

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

ДВНЗ “Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника”

---

Фізико-технічний факультет

Кафедра матеріалознавства і новітніх технологій

В.О. Коцюбинський, В.М. Бойчук

Фізика

Курс лекцій



м. Івано-Франківськ

2020

---

▶

ББК 32.86я73

*Рекомендовано до друку Вченою радою Фізико-технічного факультету  
ДВНЗ "Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника" (протокол №7 від 5 травня 2020 року)*

---

**Рецензенти:**

<sup>5\*</sup>

**Яблонь Любов Степанівна**, професор кафедри фізики і методики викладання  
фізико-технічного факультету ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»,  
доктор фізико-математичних наук, професор  
**Любомир Іванович Никируй**, професор кафедри фізики і хімії твердого тіла  
фізико-технічного факультету ДВНЗ «Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника»,  
кандидат фізико-математичних наук

**Коцюбинський В.О. Фізика:** [Електронний ресурс] /

*Володимир Олегович Коцюбинський, Володимира Михайлівна Бойчук* / Фізико-технічний факультет;  
ДВНЗ "Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника". – Івано-Франківськ, 2020. – 310 с.–  
Режим доступу : <http://lib.pu.if.ua/e-library.php>

Навчально-методичний посібник є розробкою лекційного курсу з Фізики для студентів освітньо-професійної програми «Біохімія». Увага курсу зосереджена на поясненні основних фізичних явищ та законів, що дозволяє студенту набути відповідних загальних, інструментальних та спеціальних компетентностей. Основною метою курсу є ознайомити студентів на рівні загальних уявлень з найбільш важливими законами природи, допомогти їм оволодіти сучасною науково-природничою картиною світу.

Посібник призначений для допомоги студентам денної та заочної форми навчання та викладачам під час роботи над курсом «Фізика».

ББК 32.86я73

© Коцюбинський В.О., Бойчук В.М., 2020

© Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника, 2020

---



# ЗМІСТ

---

Лекція 1. Кінематика поступального та  
обертального рухів

Лекція 2. Динаміка

Лекція 3. Робота та енергія. Коливальний рух

Лекція 4. Молекулярна фізика.  
Термодинаміка

Лекція 5. Електростатика

Лекція 6. Електродинаміка і магнетизм

Лекція 7. Оптика

Лекція 8. Квантова оптика, елементи  
квантової фізики

---

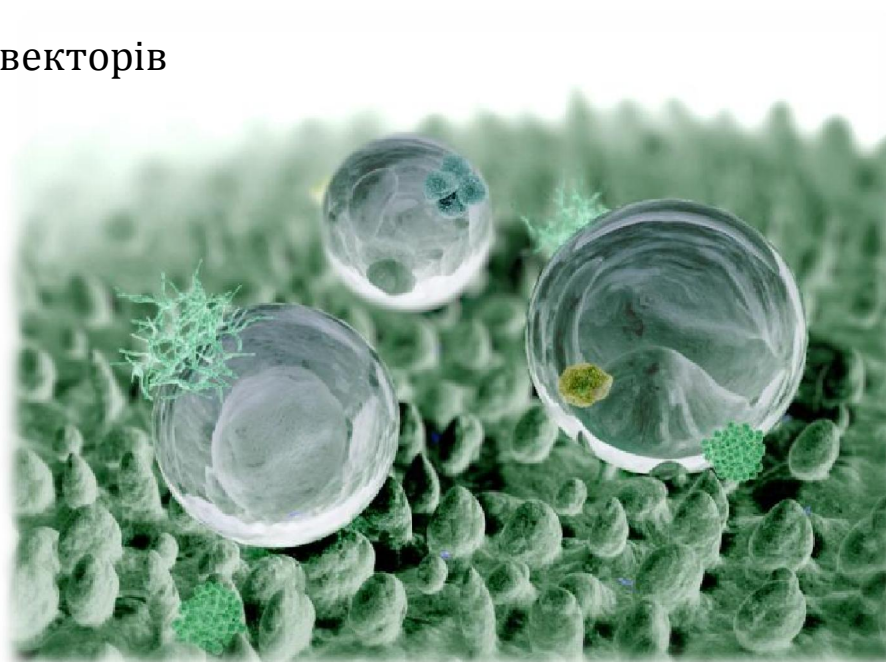


## Лекція 1

---

### Кінематика поступального та обертального рухів

1. Предмет фізики. Міжнародна система одиниць (СІ )
2. Механіка і її структура.
3. Моделі в механіці.
4. Види рухів.
5. Траєкторія , Шлях, Переміщення
6. Вектор. Додавання векторів . Віднімання векторів
7. Система відліку
8. Рівняння руху
9. Прямолінійний і рівномірний рух
10. Швидкість і шлях при рівномірному русі
11. Середня швидкість
12. Відносність руху. Додавання швидкостей
13. Прямолінійний рівноприскорений рух
14. Рух тіла кинутого під кутом до горизонту
15. Рівномірний рух по колу
16. Тангенціальне та нормальне прискорення



**Фізика** – наука, що вивчає загальні властивості руху речовини і поля.

**Фізика** – наука про **рухи матерії** і відповідні їм **закони природи**

**Прості рухи матерії**

1. механічний,
2. тепловий,
3. електричний,
4. магнітний.



**Складні рухи матерії**

1. хімічні,
2. біологічні,
3. геологічні,
4. астрономічні.



**Природничі науки  
(прикладі)**

1. фізика,
2. хімія,
3. біологія,
4. геологія.

**Матерія = речовина + поле**

**Фізика** – **експериментальна наука**: її закони базуються на фактах, встановлених дослідним шляхом.

**Фізичні закони** – стійкі, повторювані об'єктивні **закономірності**, що існують у природі і встановлюють **зв'язок між фізичними величинами**

Для знаходження кількісних співвідношень між фізичними величинами їх необхідно **вимірювати, порівнювати** їх з **еталонами**.



## Міжнародна Система одиниць (СІ)

---

### Основні одиниці вимірювання фізичних величини

1. **Метр (м)** – довжина шляху, пройденого світлом у вакуумі за  $1/299792458$  с.
2. **Кілограм (кг)** – маса, рівна масі міжнародного прототипу кілограма (платино-іридієвого циліндру, що зберігається в Міжнародному бюро мір і ваг у Севрі, біля Парижа).
3. **Секунда (с)** – час, рівний  $9\,192\,631\,770$  періодам випромінювання, що відповідає переходу між двома рівнями основного стану атома цезію - 133.
4. **Ампер (А)** – сила постійного струму, який при проходженні по двох паралельних прямолінійних провідниках нескінченної довжини і малого поперечного перерізу, розташованих у вакуумі на відстані 1 метр один від одного, створює між цими провідниками силу взаємодії, рівну  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на кожен метр довжини.
5. **Кельвін (К)** –  $1/273,16$  частина термодинамічної температури потрійної точки води.
6. **Моль (моль)** – кількість речовини системи, що містить стільки ж структурних елементів, скільки атомів міститься в 12 г ізотопу вуглецю  $^{12}\text{C}$ .
7. **Кандела (кд)** – сила світла в заданому напрямку джерела монохроматичного випромінювання частотою  $540 \cdot 10^{12}$  герців, енергетична потужність якого в цьому напрямку складає  $1/683$  Вт/ср.



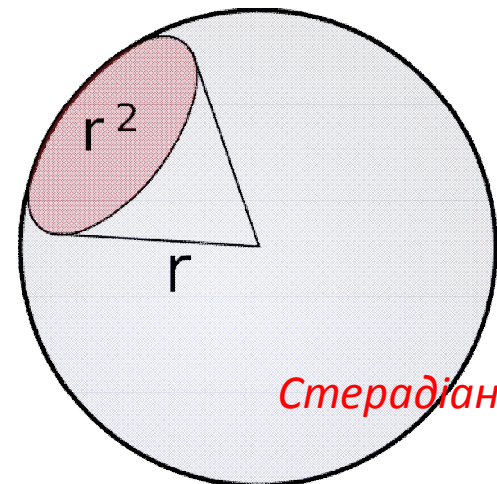
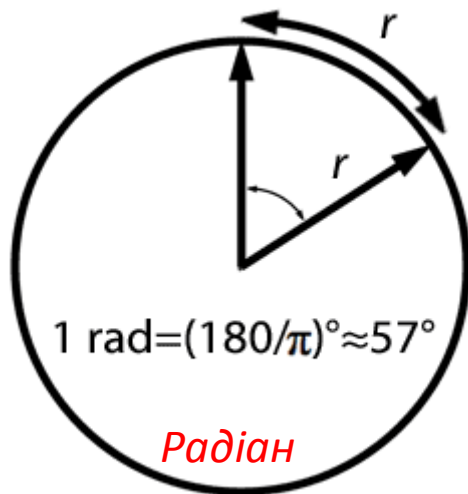
## Міжнародна Система одиниць (СІ)

---

### Додаткові одиниці вимірювання фізичних величин

**Радіан** (рад) – кут між двома радіусами кола, довжина дуги між якими дорівнює радіусу.

**Стерадіан** (срад) – тілесний кут з вершиною в центрі сфери, який вирізає на поверхні сфери площу, рівну площі квадрата зі стороною рівною радіусу сфери.



---

### Похідні одиниці вимірювання фізичних величини

встановлюються на основі фізичних законів і є комбінацією основних та додаткових одиниць

---



## Механіка і її структура

---

**Механіка** – розділ фізики, що вивчає механічний рух і причини, що викликають чи змінюють його.

---

**Механічний рух** – зміна взаємного розташування тіл чи їх частин у просторі з часом

**Класична механіка** – вивчає рухи макроскопічних тіл, що відбуваються зі швидкостями, у багато разів меншими швидкості світла у вакуумі.

**Релятивістська механіка** – вивчає рухи тіл, що відбуваються зі швидкостями, у близькими до швидкості світла у вакуумі.

**Квантова механіка** - вивчає закони руху атомів і елементарних частинок

---

### *Розділи механіки*

**Кінематика** – вивчає рух тіл, не розглядаючи причин, що його викликають.

**Динаміка** – вивчає закони руху тіл і причини, що викликають чи змінюють цей рух.

**Статика** – вивчає закони рівноваги системи тел.





## Моделі в механіці.

---

**Фізична модель** – наближене відображення реально існуючого об'єкту чи процесу  
Застосовується для **спрощення** математичного опису об'єкту чи процесу

---

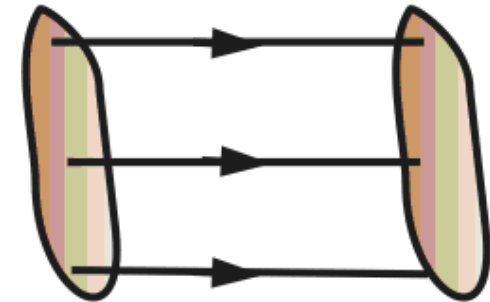
1. **Матеріальна точка** – тіло, формою і розмірами якого можна знехтувати в даній задачі (відстань від спостерігача до тіла набагато перевищує розміри цього тіла)
2. **Абсолютно тверде тіло** – тіло, деформацією якого в умовах даної задачі можна знехтувати відстань між будь-якими двома точками цього тіла залишається сталою при будь-яких рухах чи взаємодіях;
3. **Абсолютно пружне тіло** – тіло, деформація якого підкоряється закону Гука, а після припинення зовнішнього силового впливу таке тіло цілком відновлює свої первісні розміри і форму;
4. **Абсолютно непружне тіло** – тіло, що зберігає деформований стан після припинення дії зовнішніх сил.



## Види рухів

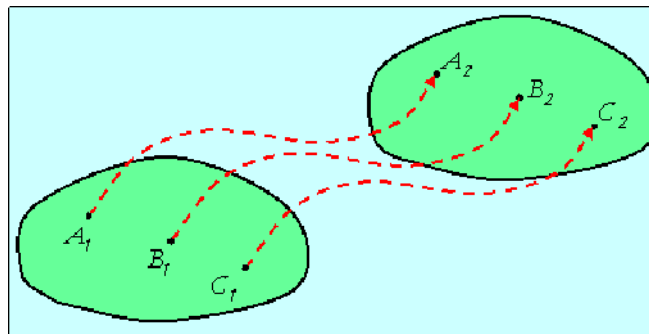
**Поступальний рух** – рух, при якому будь-яка пряма, жорстко зв'язана з тілом, залишається паралельною своєму первісному положенню.

**Обертальний рух** – рух, при якому всі точки тіла рухаються по колах, центри яких лежать на одній і тій же прямій, що називається **віссю** обертання (пряма  $OO'$ ).

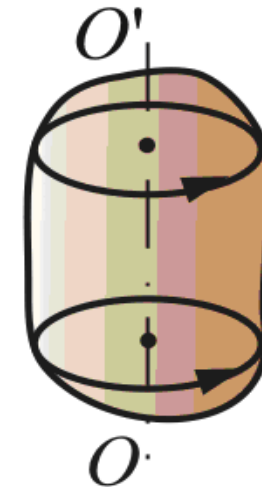


Поступальний рух

Будь-який рух твердого тіла можна представити як суму поступального та обертального рухів.



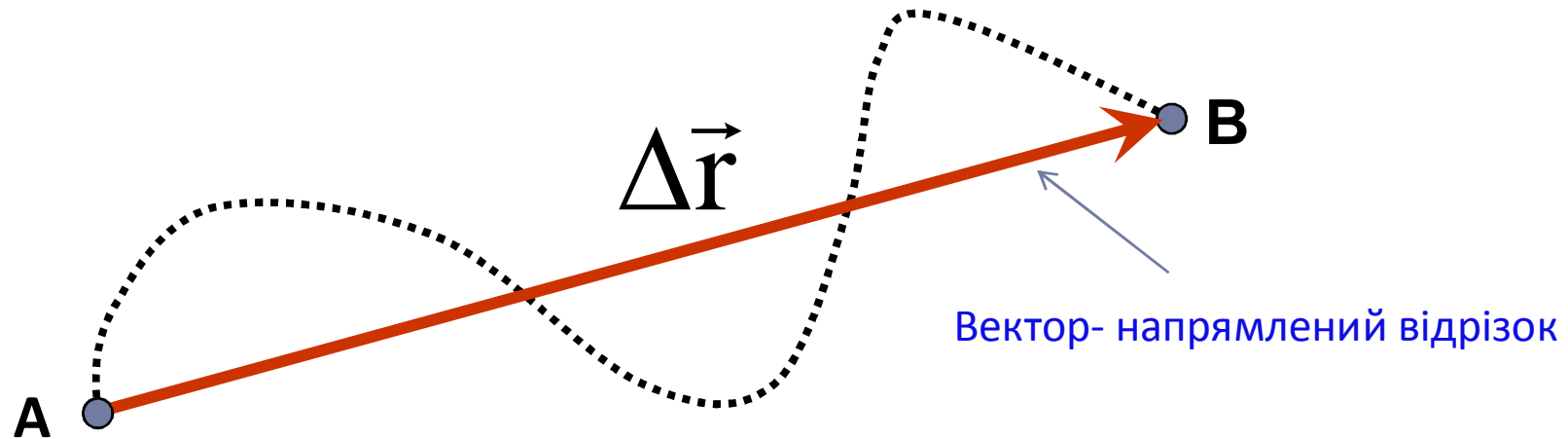
Довільний криволінійний рух



Обертальний рух

## Траєкторія , Шлях, Переміщення

---

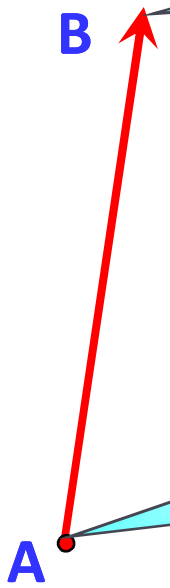


**Траєкторія** - лінія, вздовж якої рухається матеріальна точка

**Шлях**  $S$  - сума довжин усіх ділянок траєкторії, пройдених цією точкою за розглянутий проміжок часу (**довжина траєкторії**).

**Переміщення**  $\Delta \vec{r}$  - вектор, що сполучає початкове і кінцеве положення матеріальної точки

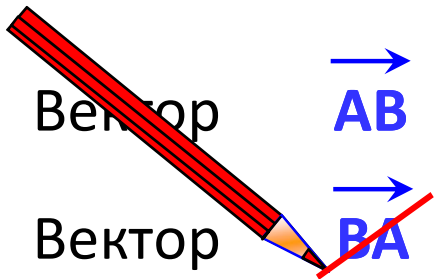




Кінець  
вектора

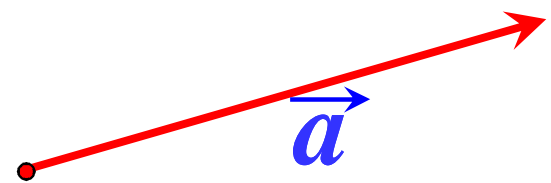
Початок  
вектора

Вектор



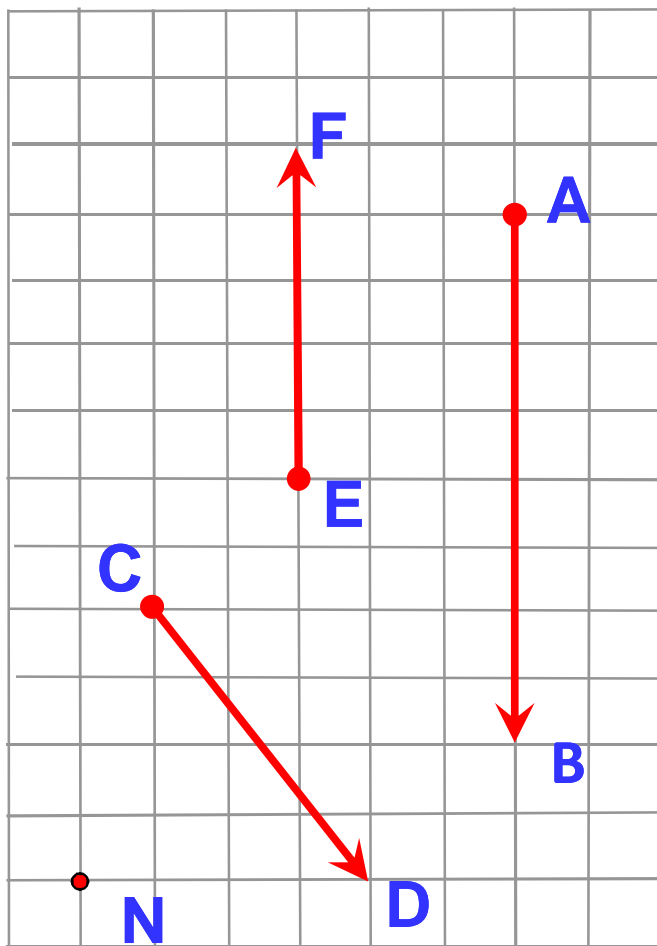
Довжиною чи модулем вектора називається довжина відрізка АВ

$$|\vec{AB}| = AB$$



Вектор  $\vec{a}$

# Вектор



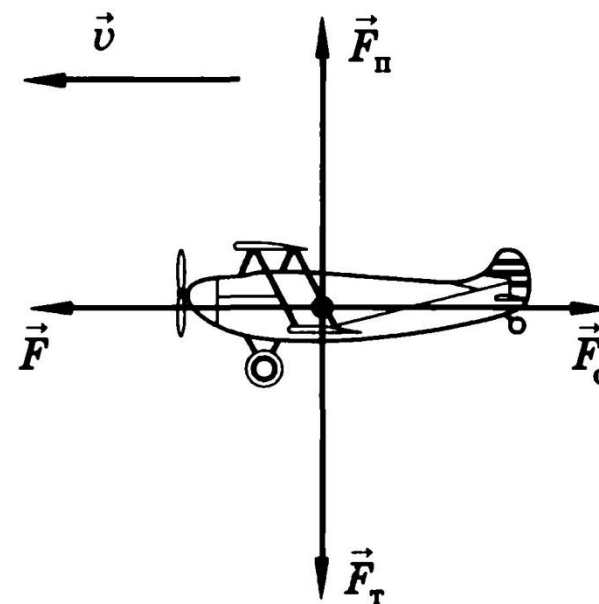
Вектор  $\vec{EF}$

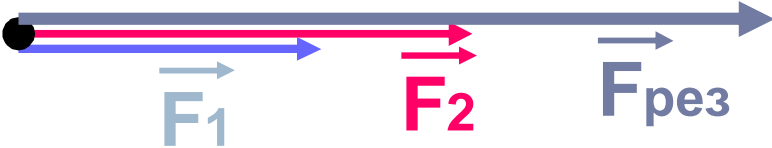
Вектор  $\vec{AB}$

Вектор  $\vec{CD}$

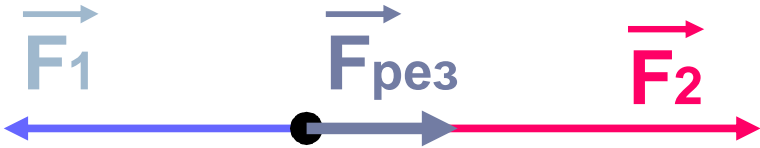
Вектор  $\vec{NN}$





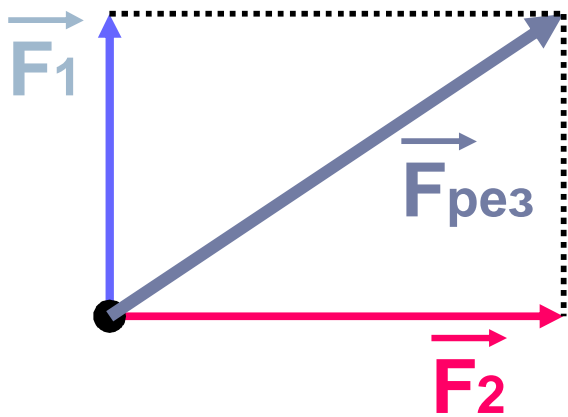


$$F_{рез} = F_1 + F_2$$



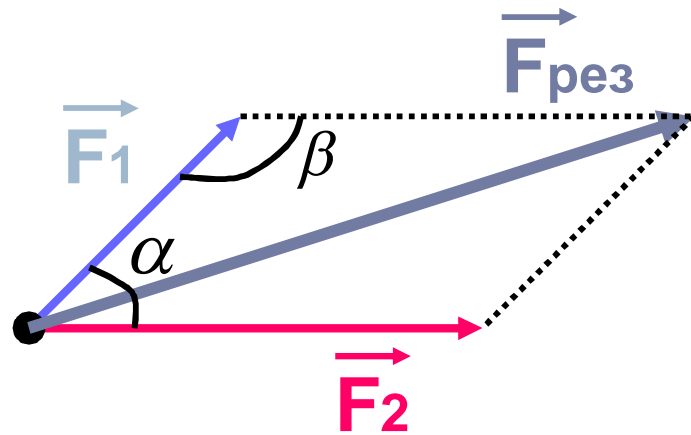
$$F_{рез} = F_2 - F_1$$





$$\vec{F}_{рез} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

$$F_{рез} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$$



$$F_{рез} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2 \cos \beta}$$

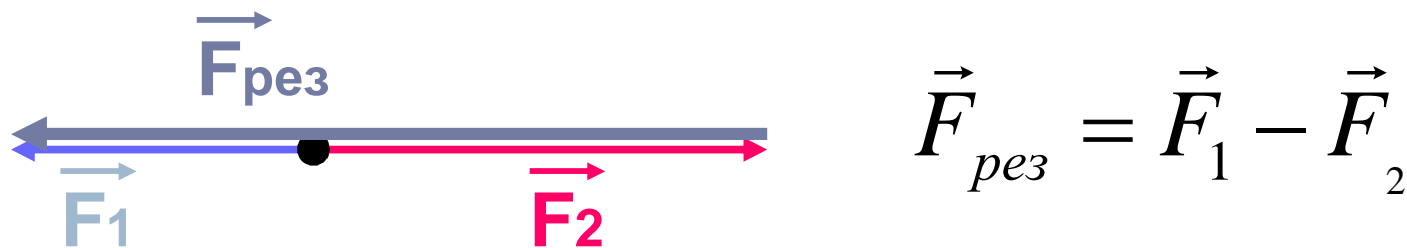
$$\alpha = 180^\circ - \beta$$

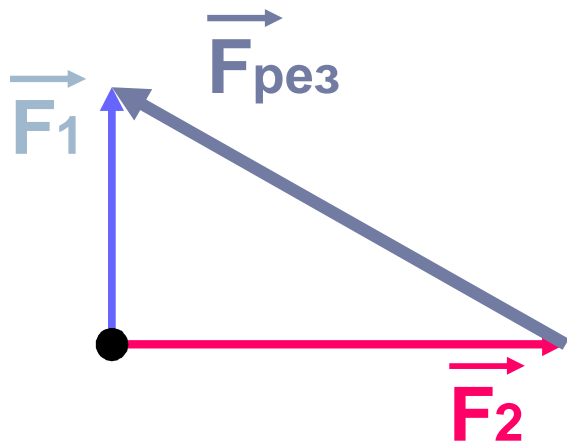
$$\cos \beta = -\cos \alpha$$

$$F_{рез} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 + 2F_1F_2 \cos \alpha}$$



## Віднімання векторів

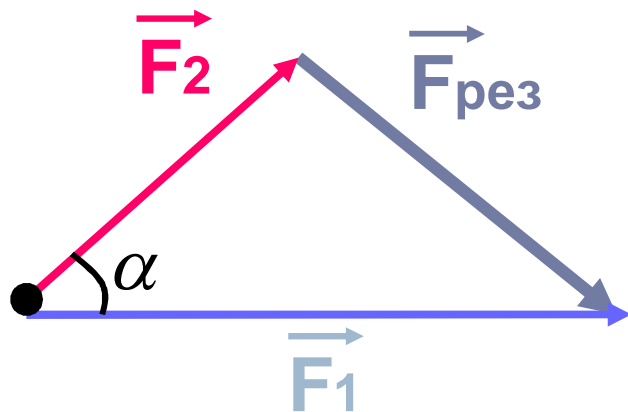




$$\vec{F}_1 = \vec{F}_2 + \vec{F}_{\text{рез}}$$

$$\vec{F}_{\text{рез}} = \vec{F}_1 - \vec{F}_2$$

$$F_{\text{рез}} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2}$$



$$\vec{F}_1 = \vec{F}_2 + \vec{F}_{\text{рез}}$$

$$\vec{F}_{\text{рез}} = \vec{F}_1 - \vec{F}_2$$

$$F_{\text{рез}} = \sqrt{F_1^2 + F_2^2 - 2F_1F_2 \cos \alpha}$$

## Множення вектора на скаляр



$$\vec{F}_1 = \vec{F}_0 \cdot a$$

$$a > 0$$

$$|F_1| = |F_0| \cdot a$$

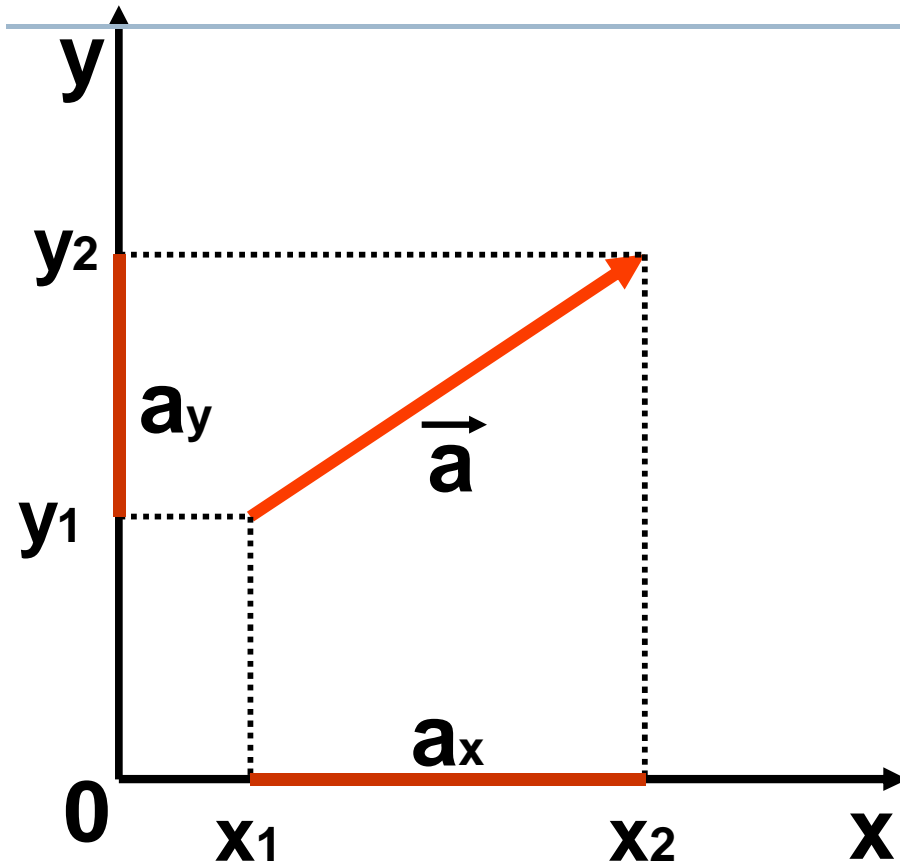


$$\vec{F}_2 = \vec{F}_0 \cdot b$$

$$b < 0$$

$$|F_2| = |F_0| \cdot |b|$$





$$a_x = x_2 - x_1$$

$$a_y = y_2 - y_1$$

$$|a| = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}$$



## Система відліку

Рух тіл відбувається в просторі і в часі.

Для опису руху матеріальної точки треба знати, у яких місцях простору ця точка знаходилася в ті чи інші моменти часу

Основна задача механіки

Система відліку – система координат + тіло відліку + годинник

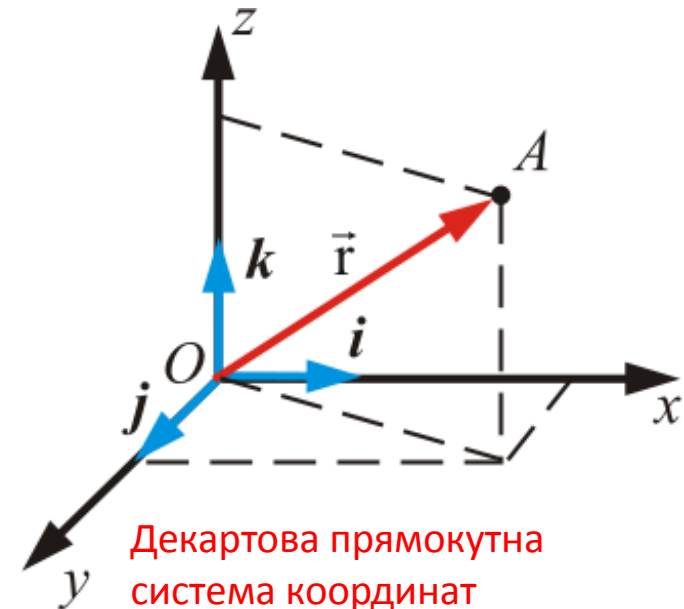
Тіло відліку – довільно обране тіло, відносно якого визначається положення інших тіл – до нього привязаний початок відліку системи координат.

В декартовій системі координат, положення точки  $A$  в даний момент часу характеризується трьома координатами  $x, y, z$  або радіус-вектором  $\vec{r}$

Радіус-вектор – сполучає початок відліку та матеріальну точку, положення якої визначається

$$\vec{r} = x \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k}$$

$$|\vec{r}| = r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$



Декартова прямокутна система координат

### Розглянемо рух матеріальної точки

Нехай в момент часу  $t_1$  вона перебувала в точці простору  $M_1$ , а через проміжок часу  $\Delta t = t_2 - t_1$  перемістилася в точку простору  $M_2$

Початкове положення матеріальної точки описує радіус-вектор  $r(t_1)$ , кінцеве - радіус-вектор  $r(t_2)$

Рівняння руху, що описують положення матеріальної точки, можна записати у векторному вигляді або в скалярній формі

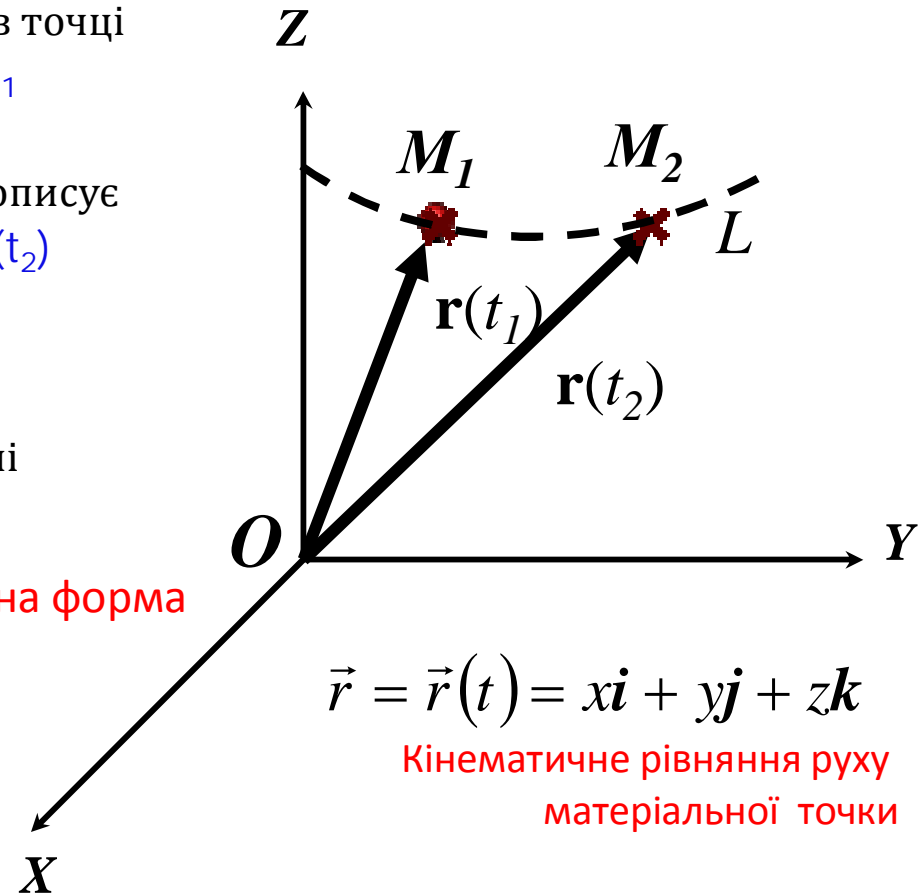
$$\vec{r} = \vec{r}(t) \quad \begin{cases} x = x(t) \\ y = y(t) \\ z = z(t) \end{cases} \quad \text{скалярна форма}$$

векторний вигляд

$$\vec{r} = \vec{r}(t) = xi + yj + zk$$

Кінематичне рівняння руху матеріальної точки

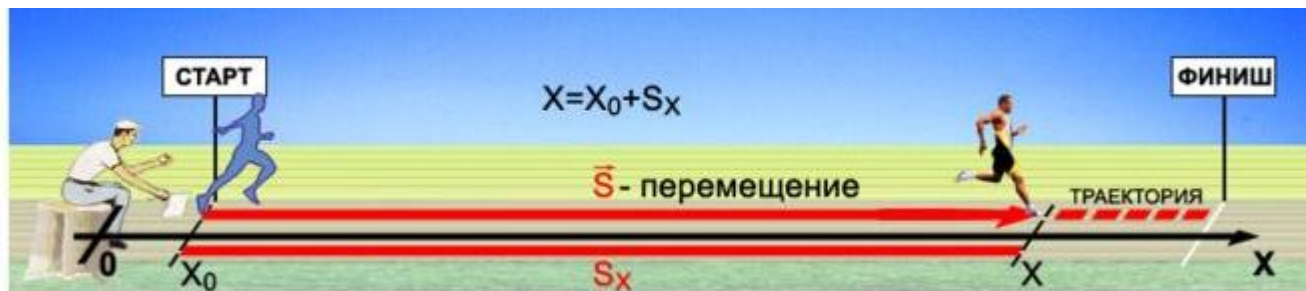
$x, y, z$  – проєкції радіус-вектора на осі координат  
 $i, j, k$  – одиничні вектори (орти),  
 що мають напрям осей  $x, y, z$

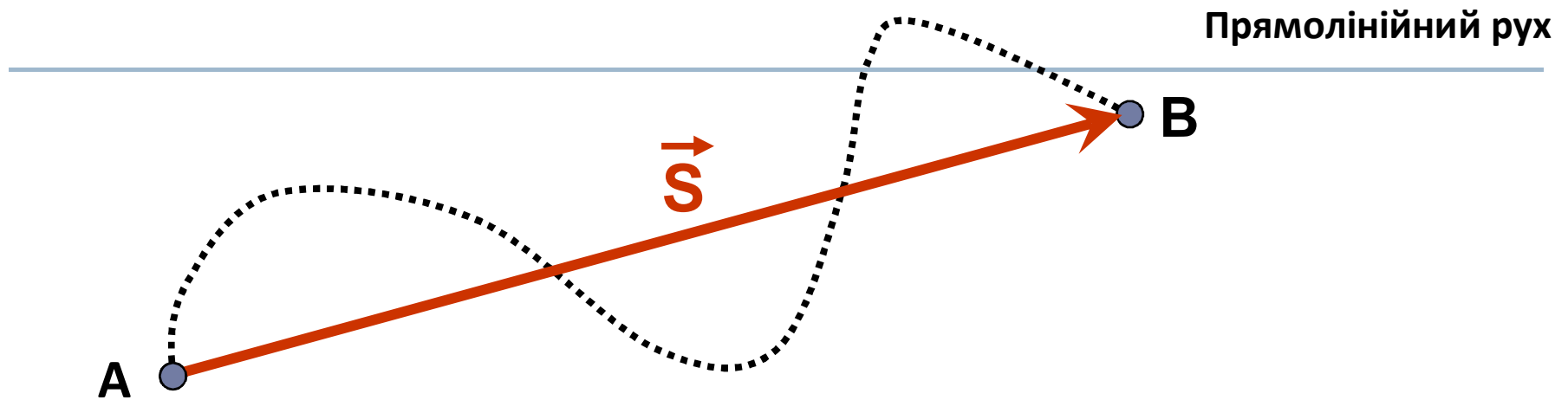


## Прямолінійний і рівномірний рух

**Рівномірний рух** - це такий рух при якому тіло за будь-які рівні проміжки часу проходить однакові шляхи.

**Прямолінійний рух** - це рух, при якому траєкторія - пряма лінія.





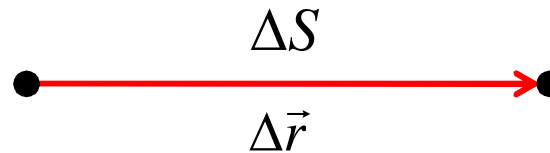
**Траєкторія** - лінія, вздовж якої рухається матеріальна точка

**Шлях  $\Delta S$**  - сума довжин усіх ділянок траєкторії, пройдених цією точкою за розглянутий проміжок часу (довжина траєкторії).

**Вектор переміщення  $\Delta \vec{r}$**  - вектор, що сполучає початкове і кінцеве положення матеріальної точки

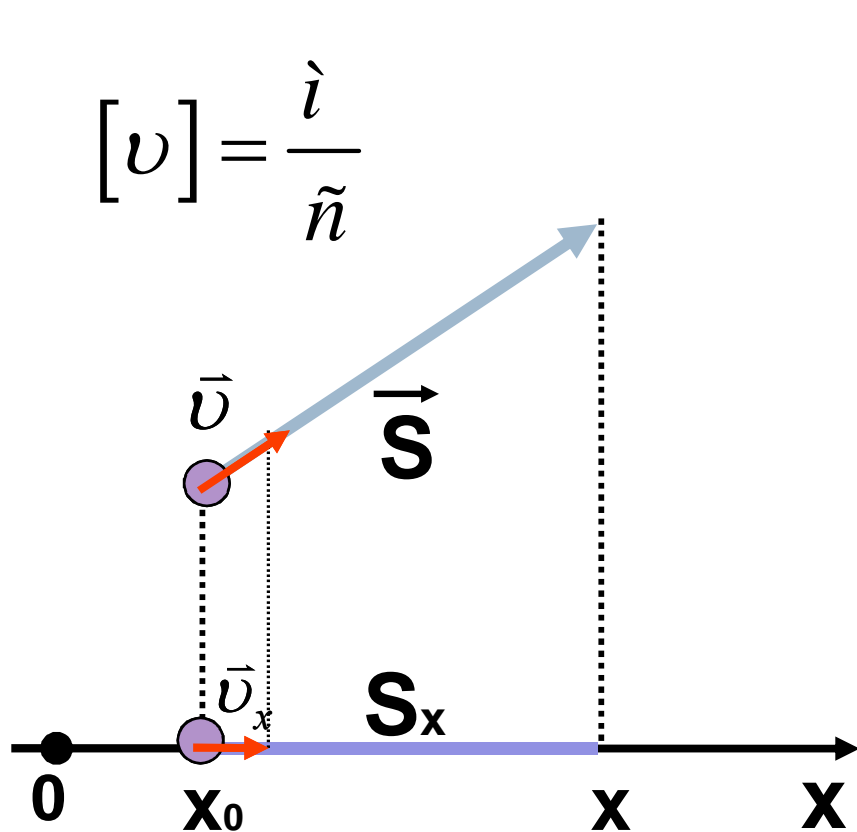
Якщо рух прямолінійний то пройдений шлях рівний модулю вектора переміщення

$$\Delta S = |\Delta \vec{r}|$$





## Прямолінійний і рівномірний рух



Швидкість

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

$$v_x = \frac{S_x}{\Delta t}$$

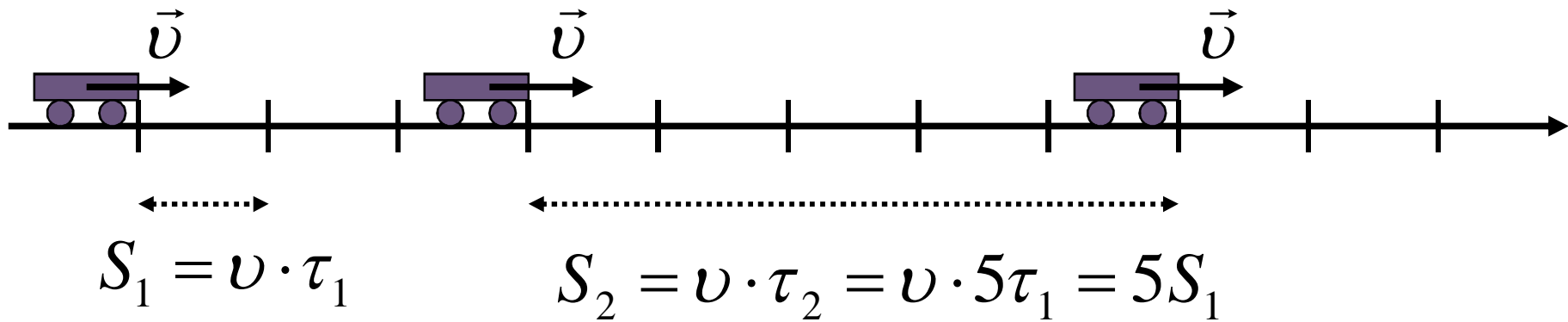
$$x = x_0 + S_x$$

$$S_x = v_x t$$

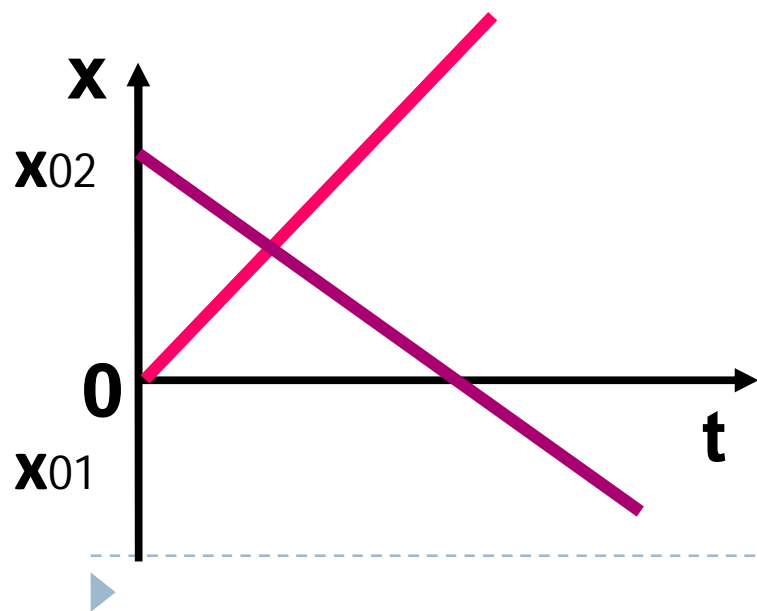
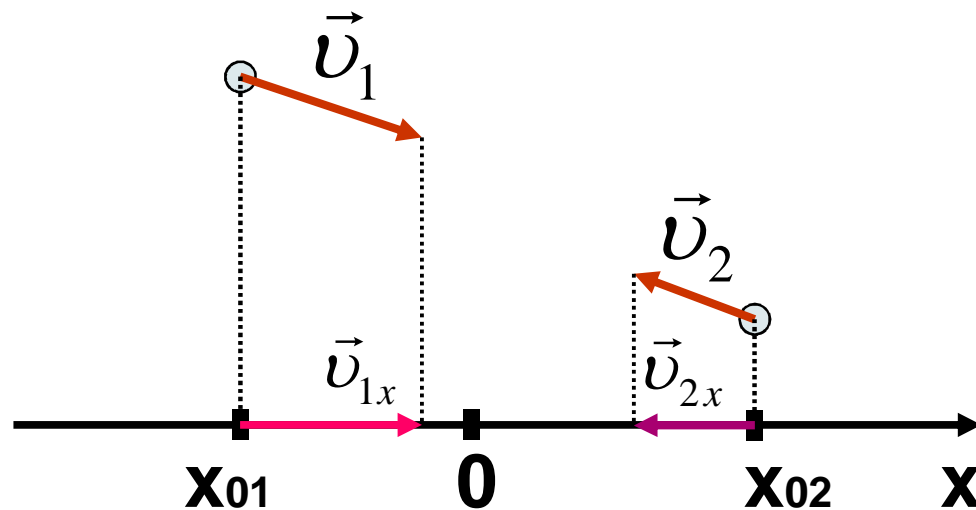
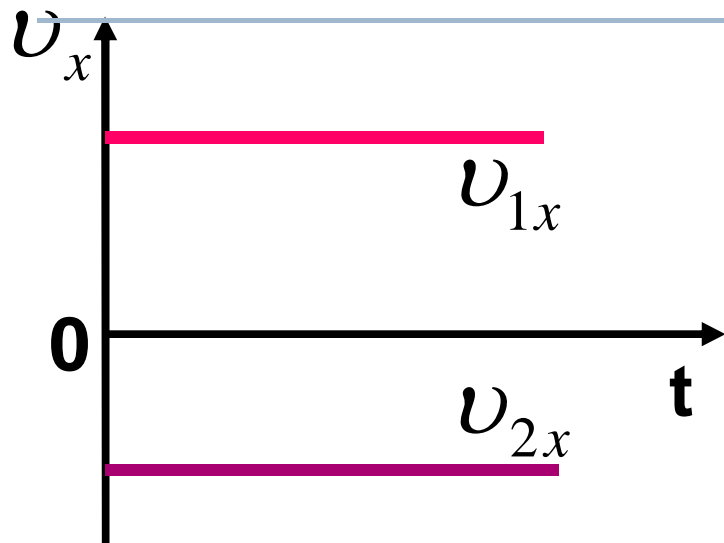
$$x = x_0 + v_x t$$

## Швидкість прямолінійного і рівномірного руху

$$\vec{v} = \text{const}$$



## Швидкість прямолінійного і рівномірного руху



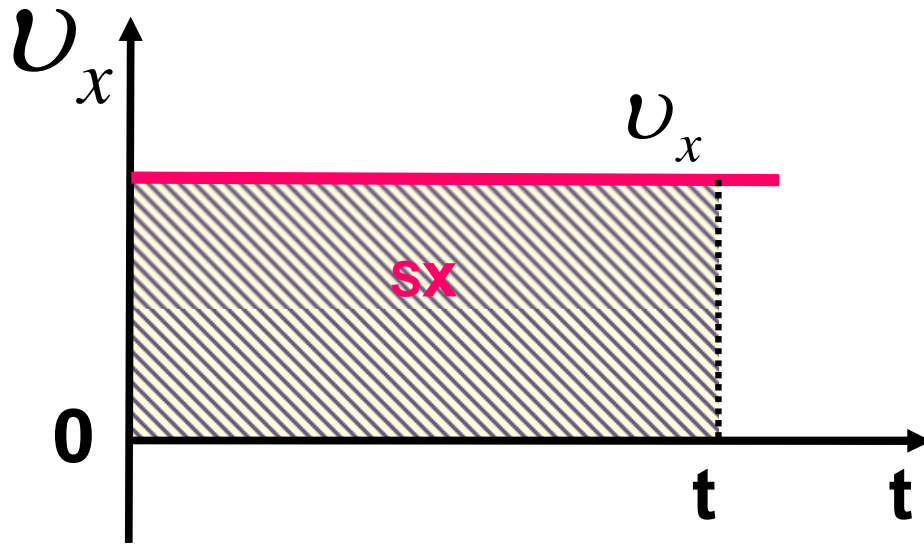
$$v_{1x} > 0$$

$$x_1 = x_{01} + v_{1x}t$$

$$v_{2x} < 0$$

$$x_2 = x_{02} - v_{2x}t$$

## Шлях при прямолінійному і рівномірному русі

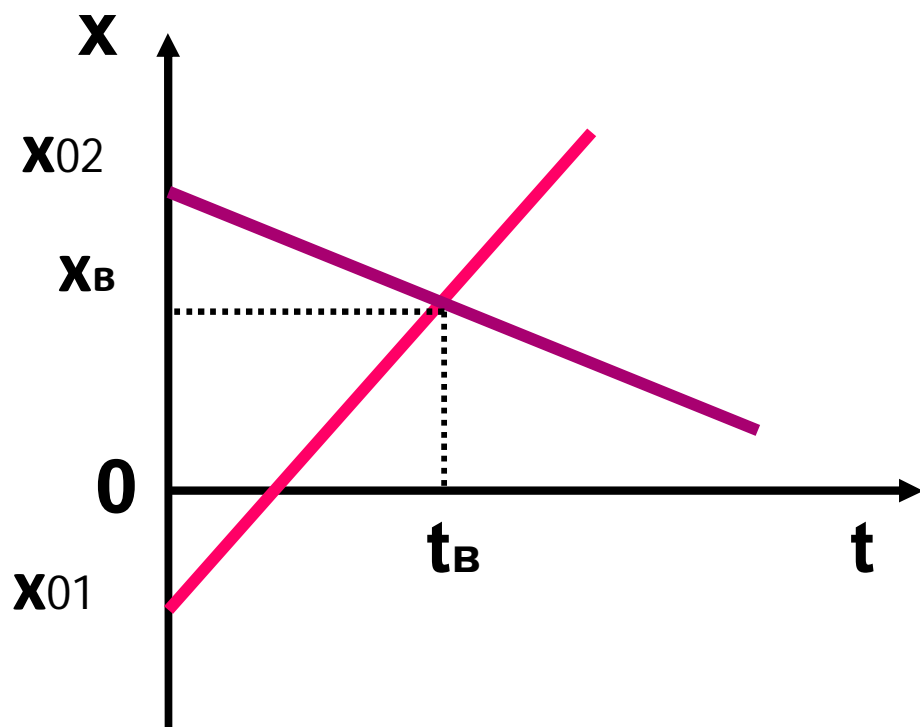


$$S_x = v_x t$$

Шлях, що проходить тіло, дорівнює площі фігури под графіком залежності швидкості від часу.



## Шлях при прямолінійному і рівномірному русі



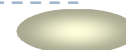
$$x_1 = x_{01} + v_{1x}t$$

$$x_2 = x_{02} - v_{2x}t$$

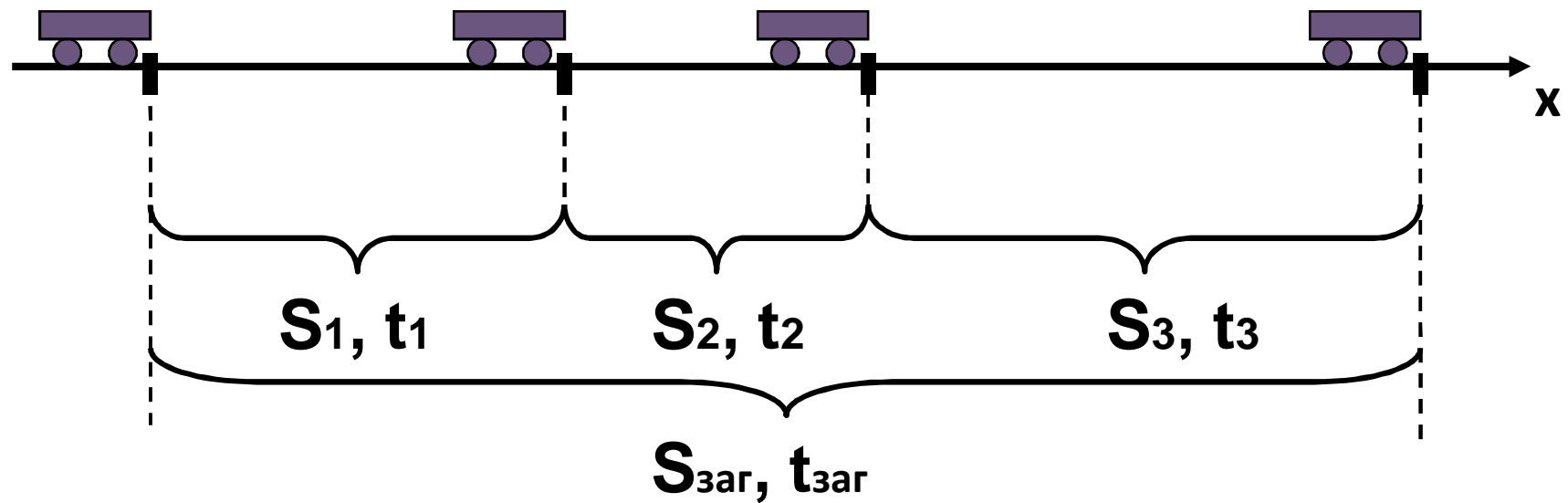
$$x_1 = x_2$$

$$x_{01} + v_{1x}t_B = x_{02} - v_{2x}t_B$$

$$t_B = \frac{x_{02} - x_{01}}{v_{1x} + v_{2x}}$$



Середня швидкість



$$\vec{v}_{\text{наб}} = \frac{\vec{S}_{\text{çàã}}}{t_{\text{çàã}}}$$

$$\vec{v}_{\text{çàп}} = \frac{\vec{S}_1 + \vec{S}_2 + \vec{S}_3}{t_1 + t_2 + t_3}$$



## Задачі

---


Із пункту А до пункту В, відстань між якими 7,5км, одночасно назустріч один одному почали рухатися два велосипедиста: перший - зі швидкістю 18км/год, другий – 9км/год. Визначити час, через який вони зустрінуться, і відстань від пункту А до місця зустрічі.

Моторний човен першу половину шляху рухався по озеру зі сталою швидкістю 36км/год, а другу – зі швидкістю 18км/год. Чому дорівнює середня швидкість моторного човна на всьому шляху?

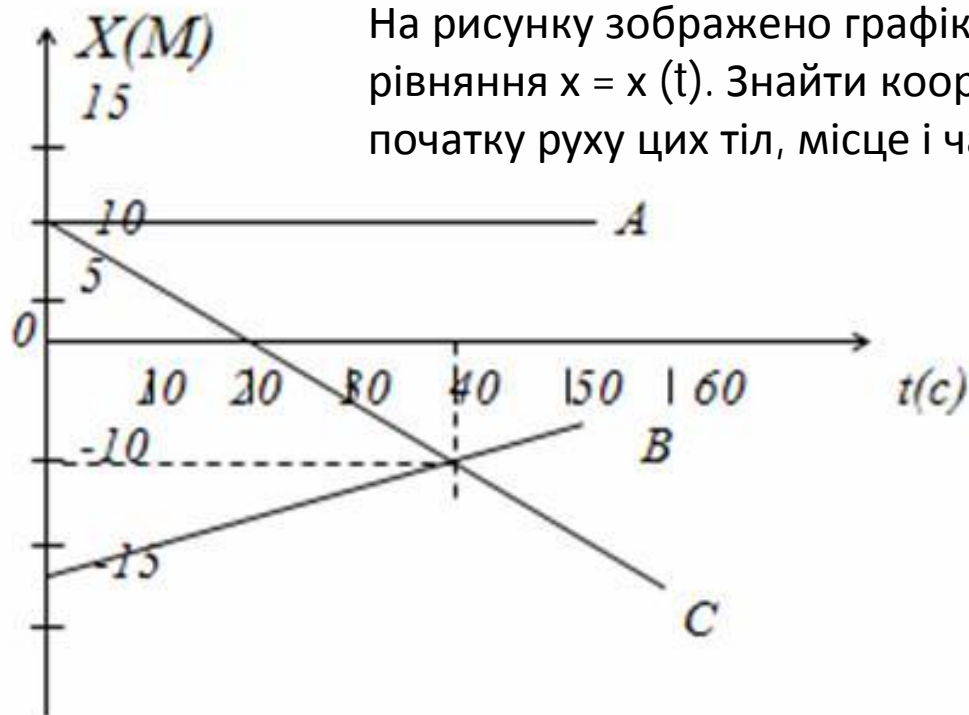
Автомобіль проїхав першу половину шляху із швидкістю 10м/с, а другу половину шляху – із швидкістю 15м/с. Визначити середню швидкість на всьому шляху.

Автомобіль проїхав першу половину часу руху із швидкістю 10м/с, а другу половину часу руху – із швидкістю 15м/с. Визначити середню швидкість на всьому шляху.

---



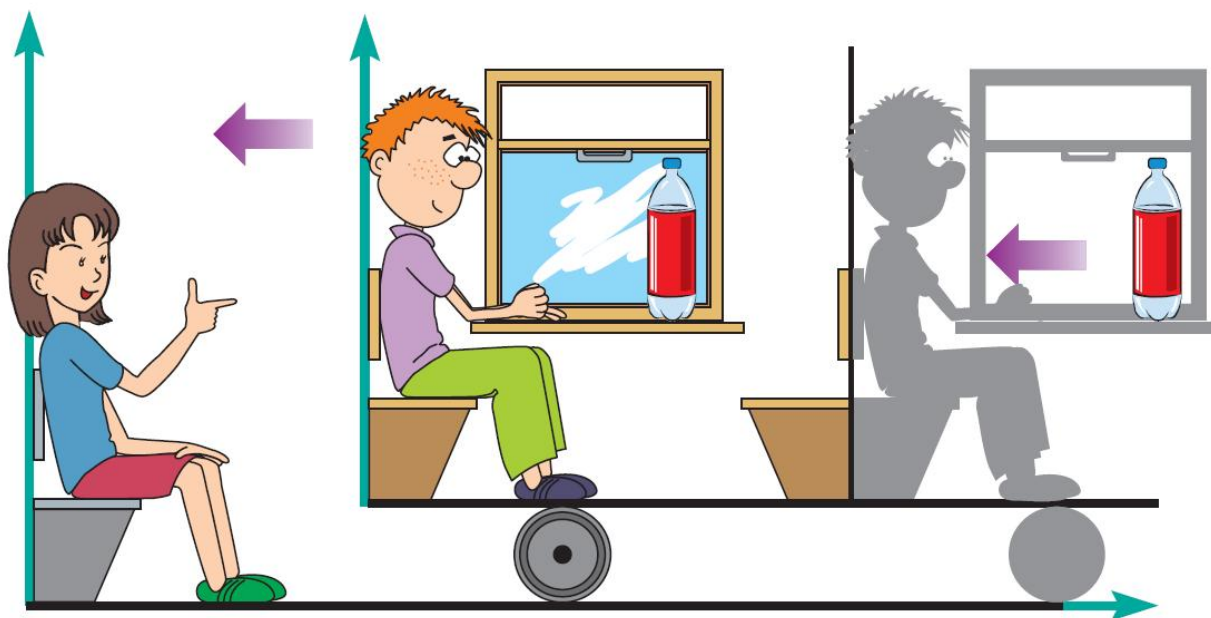
## Задачі



На рисунку зображено графіки руху тіл А, В, С. Записати рівняння  $x = x(t)$ . Знайти координати тіл через 5с після початку руху цих тіл, місце і час зустрічі тіл В і С.

Два поїзди їдуть назустріч один одному із швидкостями 36км/год і 54км/год. Пасажир, який їде в першому поїзді, помічає, що другий поїзд проходить повз нього протягом 6с. Яка довжина другого поїзда? Відповідь:  $l = 150$ м.



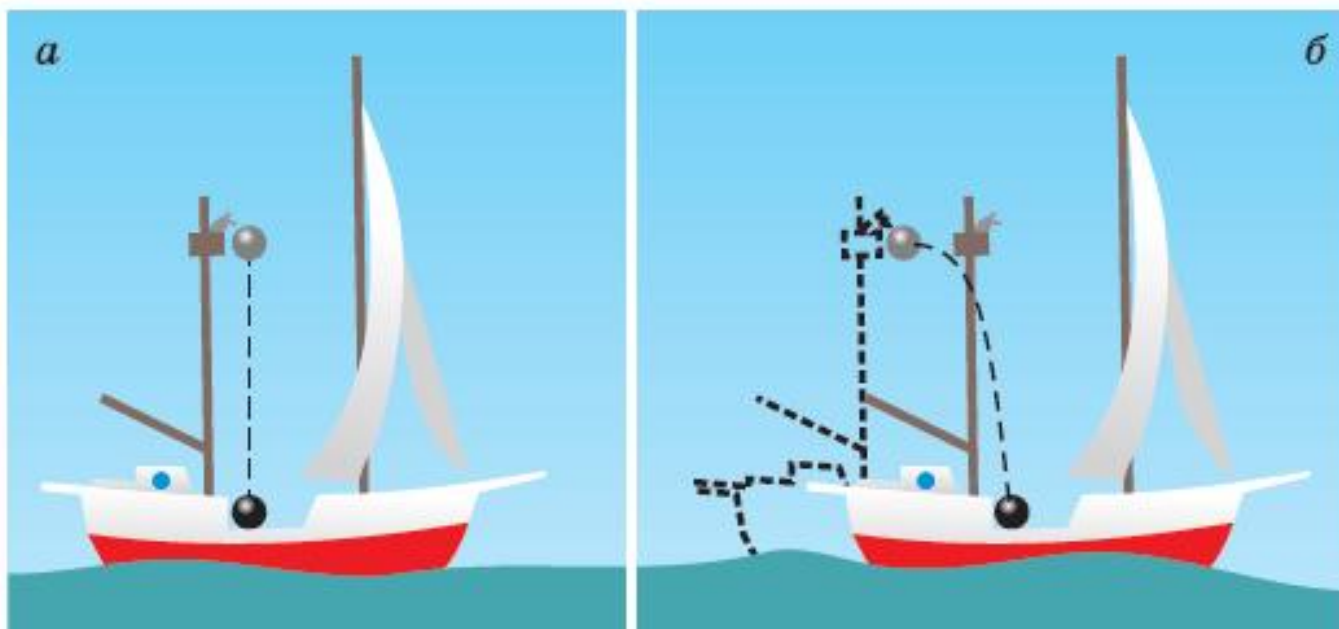


Положення тіла відносно: воно різне відносно різних тіл відліку і пов'язаних з ними систем координат.

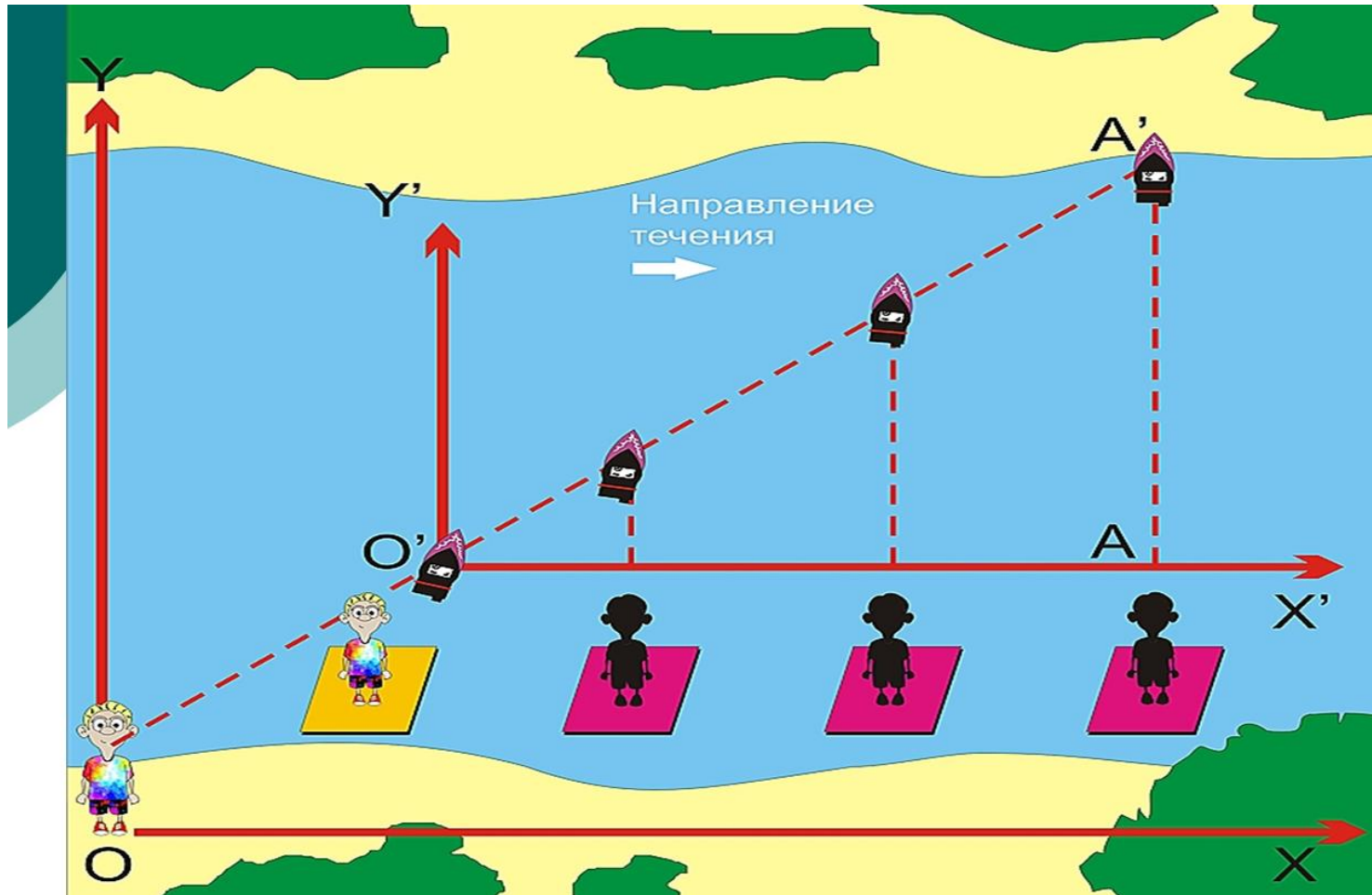
З відносності положення тіла впливає також відносність будь, якого механічного руху.

## Відносність руху

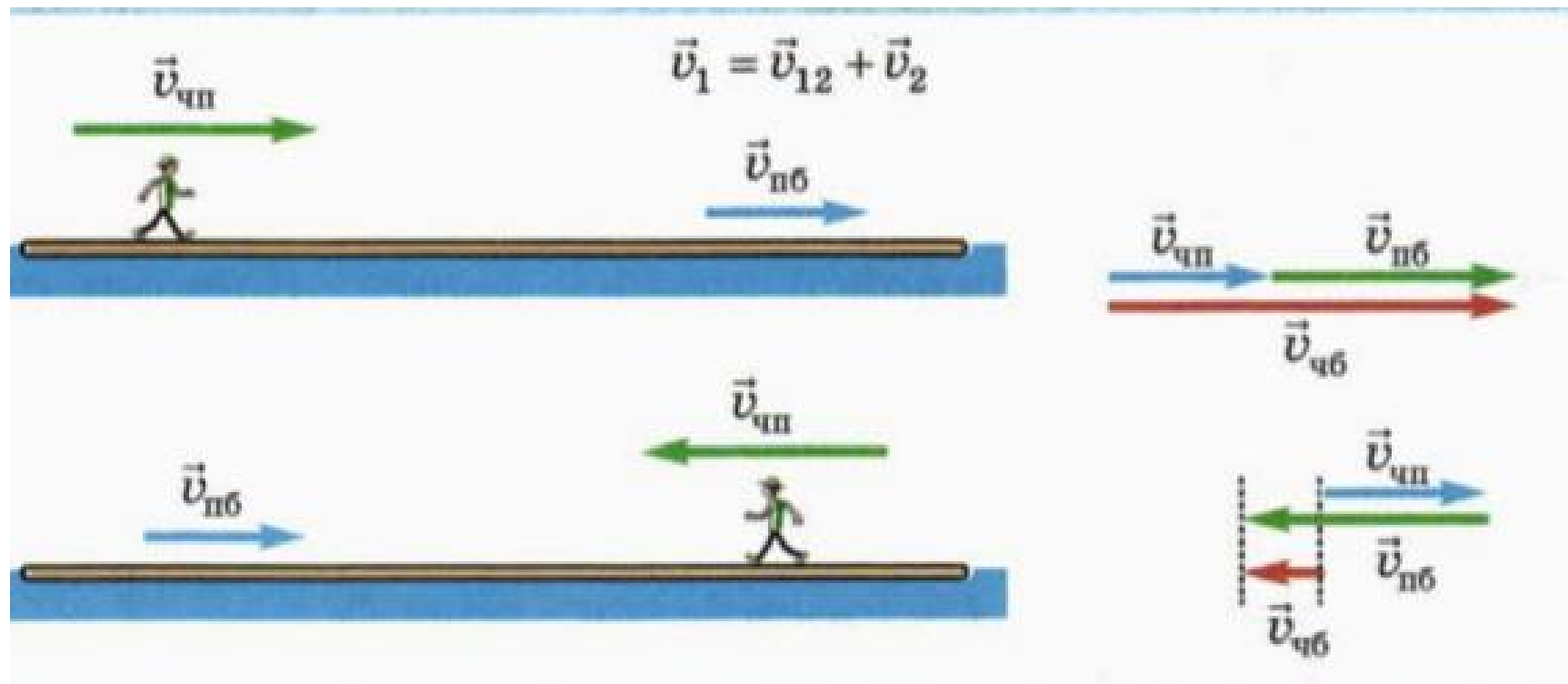
---



## Відносність руху



## Додавання швидкостей



## Задачі


---

Швидкість течії води 1 м/с, а швидкість човна в стоячій воді 2 м/с.

Яка швидкість човна відносно берега, якщо човен пливе в напрямку течії?, проти течії? Перепливає річку?

Літак летить з Києва до Каїру - Відстань 2000 км. Швидкість літака 720 км/год  
Відразу після вильоту здійсмається вітер з заходу на схід (швидкість вітру 20 м/с)  
Куди потрапить літак, якщо капітан не буде коректувати курс і пролетить 2000 км  
строго на південь? Який кут повинен бути між курсом літака і меридіаном, щоб  
літак потрапив в Каїр?

---



## Прямолінійний рівноприскорений рух

---

Рівноприскорений рух - це рух, при якому швидкість тіла за будь-які рівні проміжки часу змінюється на однакову величину

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t}$$

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

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t$$

Прискорення - величина, що дорівнює відношенню зміни швидкості до проміжку часу, за який ця зміна відбулася.

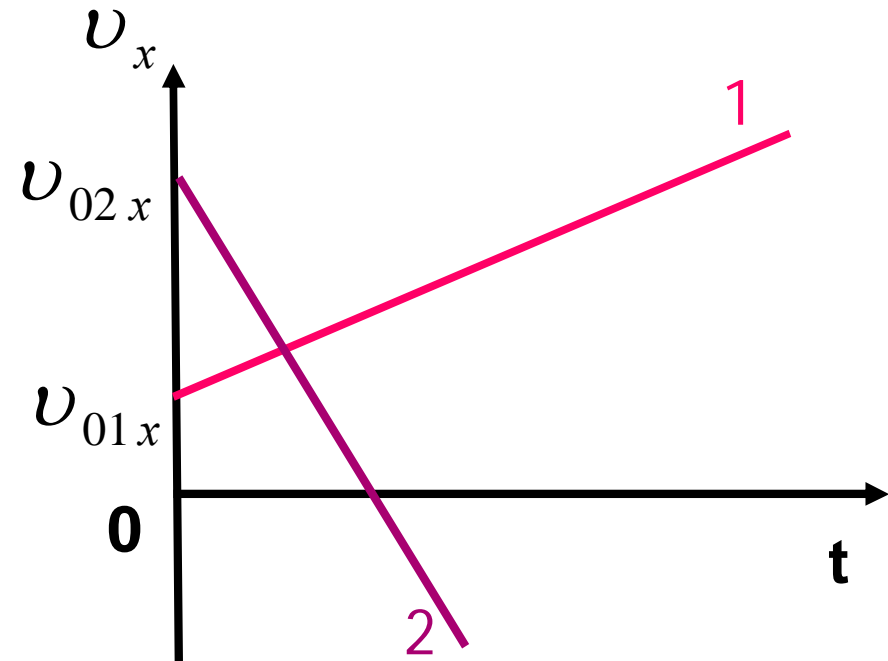
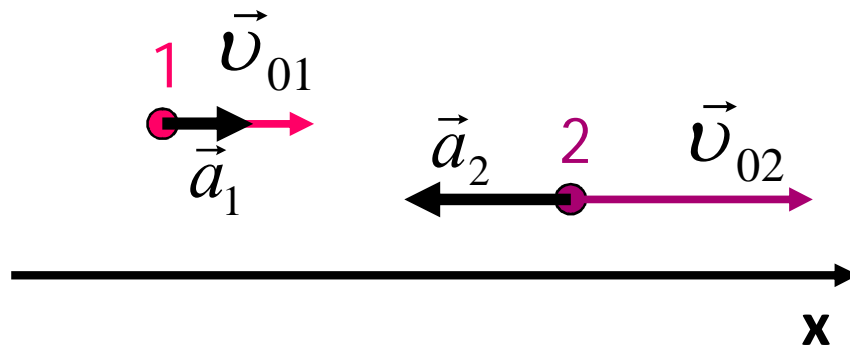
$$[a] = \frac{\frac{m}{c}}{c} = \frac{m}{c^2}$$



## Прямолінійний рівноприскорений рух

$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t}$$

$$v_x = v_{0x} + a_x t$$

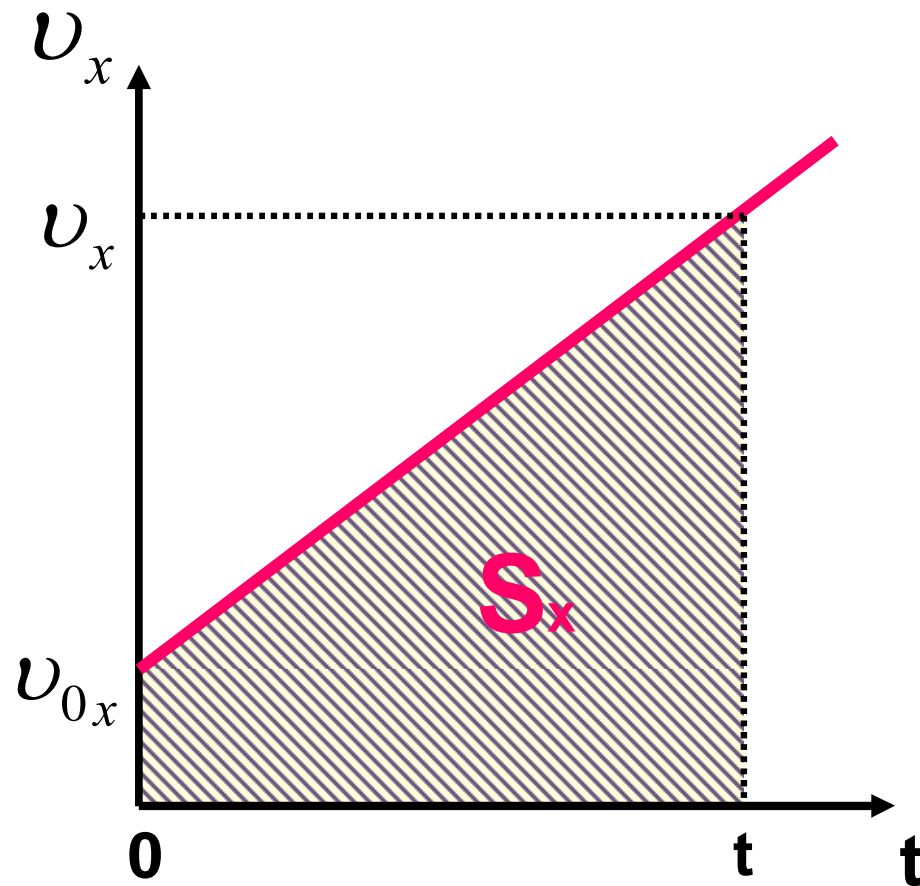


$$a_{1x} > 0$$

$$a_{2x} < 0$$

$$|a_{1x}| < |a_{2x}|$$

## Прямолінійний рівноприскорений рух



$$S_x = \frac{v_x + v_{0x}}{2} \cdot t$$

$$v_x = v_{0x} + a_x t$$

$$S_x = \frac{v_{0x} + a_x t + v_{0x}}{2} \cdot t$$

$$S_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}$$



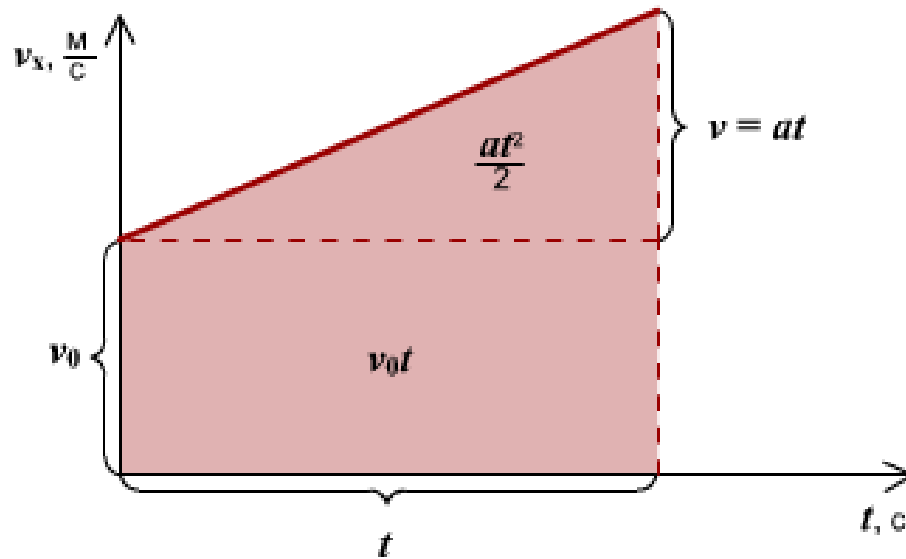
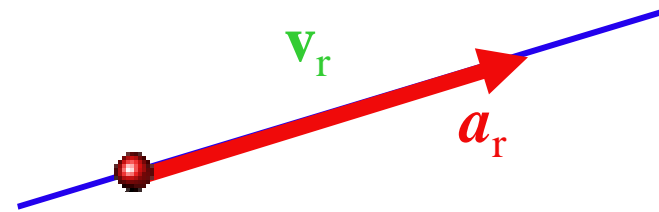


## Рівноприскорений прямолінійний рух

Матеріальна точка рухається прямолінійно

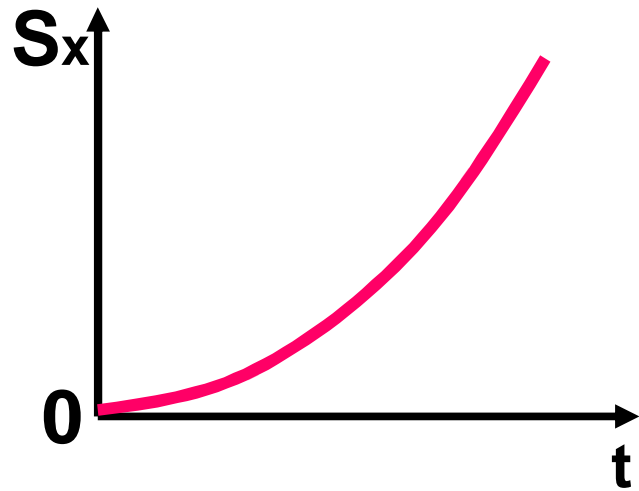
$$S = v_0 t \pm \frac{at^2}{2} \quad v = v_0 \pm at$$

$$s_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$$



## Прямолінійний рівноприскорений рух

---



$$S_x = v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$$

$$x = x_0 + S_x$$

$$x = x_0 + v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2}$$



## Прямолінійний рівноприскорений рух

---

$$\left. \begin{aligned} S_x &= v_{0x}t + \frac{a_x t^2}{2} \\ a_x &= \frac{v_x - v_{0x}}{t} \end{aligned} \right\}$$

$$S_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a}$$

$$S_x = \frac{v_x + v_{0x}}{2} \cdot t$$



## Задачі

---


Літак у момент відривання від Землі має швидкість  $240\text{км/год}$  і пробігає по злітній доріжці відстань  $790\text{м}$ . Скільки часу триває розбіг і з яким прискоренням рухався при цьому літак?

Вийшовши із стану спокою, тіло рухалося рівноприскорено протягом  $4\text{с}$ , а потім наступні  $6\text{с}$  рухатися рівномірно і пройшло  $18\text{м}$  з тією швидкістю, якої воно набуло на кінець четвертої секунди. Визначити прискорення і шлях, пройдений тілом за весь час руху.

Переміщення тіла при рівноприскореному русі за перші два рівні послідовні інтервали часу по  $2\text{с}$  кожен відповідно дорівнюють  $12\text{м}$  і  $32\text{м}$ . Знайти початкову швидкість і прискорення тіла.

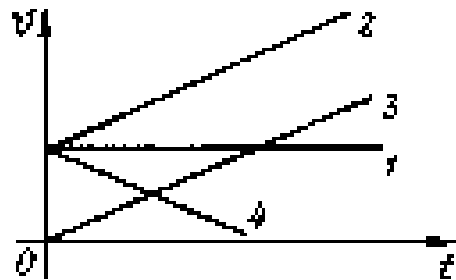
Потяг відійшов від станції і протягом  $15\text{с}$  рухався рівноприскорено. Знайти шлях, пройдений потягом за цей час, і швидкість його в кінці цього шляху, якщо відомо, що за  $15\text{-ту}$  секунду потяг пройшов шлях на  $2\text{м}$  більше, ніж за попередню.

---



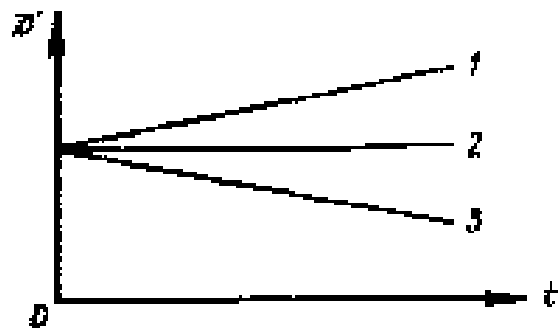
## Задачі

Автомобіль, рухаючись із стану спокою рівноприскорено, за 20 с досягає швидкості 15 м/с. З яким прискоренням рухався автомобіль?



Який із рухів, графіки яких зображені на рисунку, є рівномірним? Рівноприскореним з нульовою початковою швидкістю?

Який шлях пройде тіло за 5 с, рухаючись рівно-прискорено з прискоренням  $2 \text{ м/с}^2$ , якщо початкова швидкість руху тіла  $2 \text{ м/с}$ .

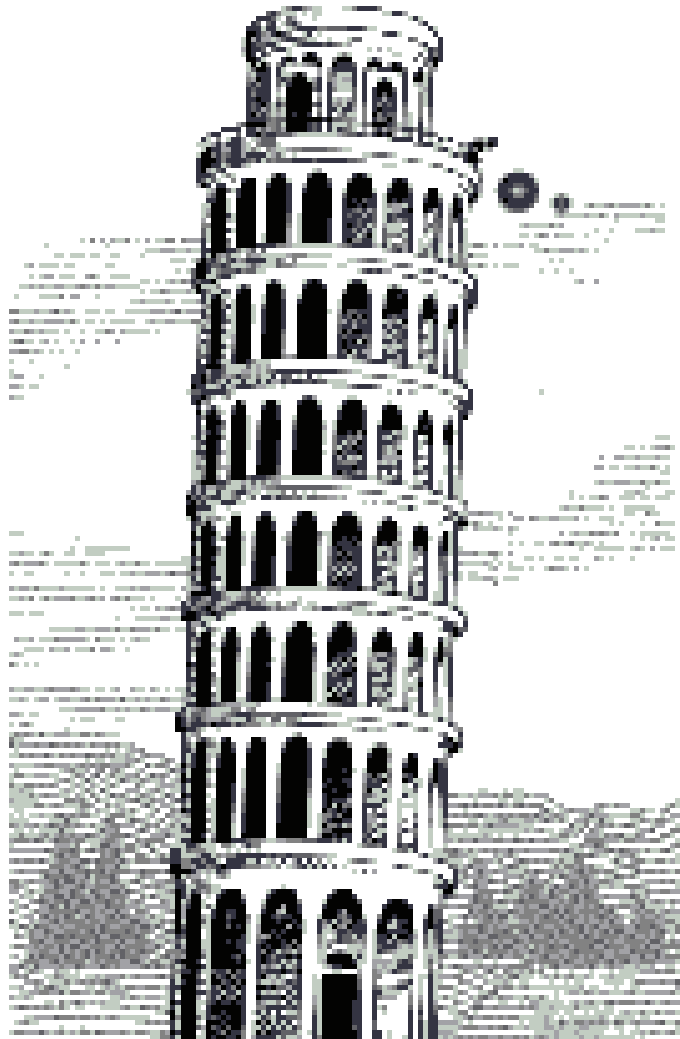


На малюнку зображені графіки залежності модулів швидкості від часу для трьох тіл, що рухаються прямолінійно. Який із графіків відповідає рівноприскореному руху, при якому напрямок вектора прискорення збігається з напрямком вектора швидкості?



## Прямолінійний рівноприскорений рух під дією сили тяжіння

---



$$g=9.81 \text{ м}^2/\text{с}$$



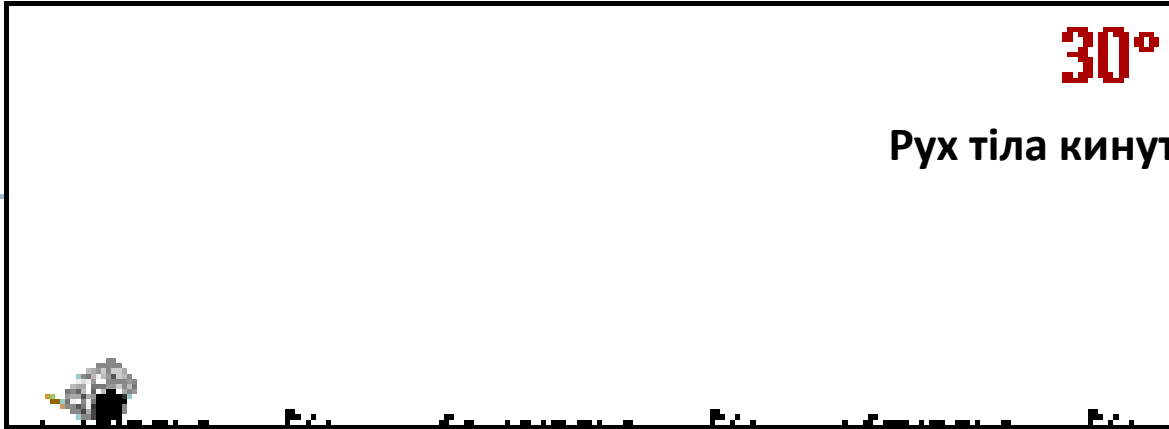
## Рух тіла кинутого під кутом до горизонту

---



**30°**

Рух тіла кинутого під кутом до горизонту



**45°**

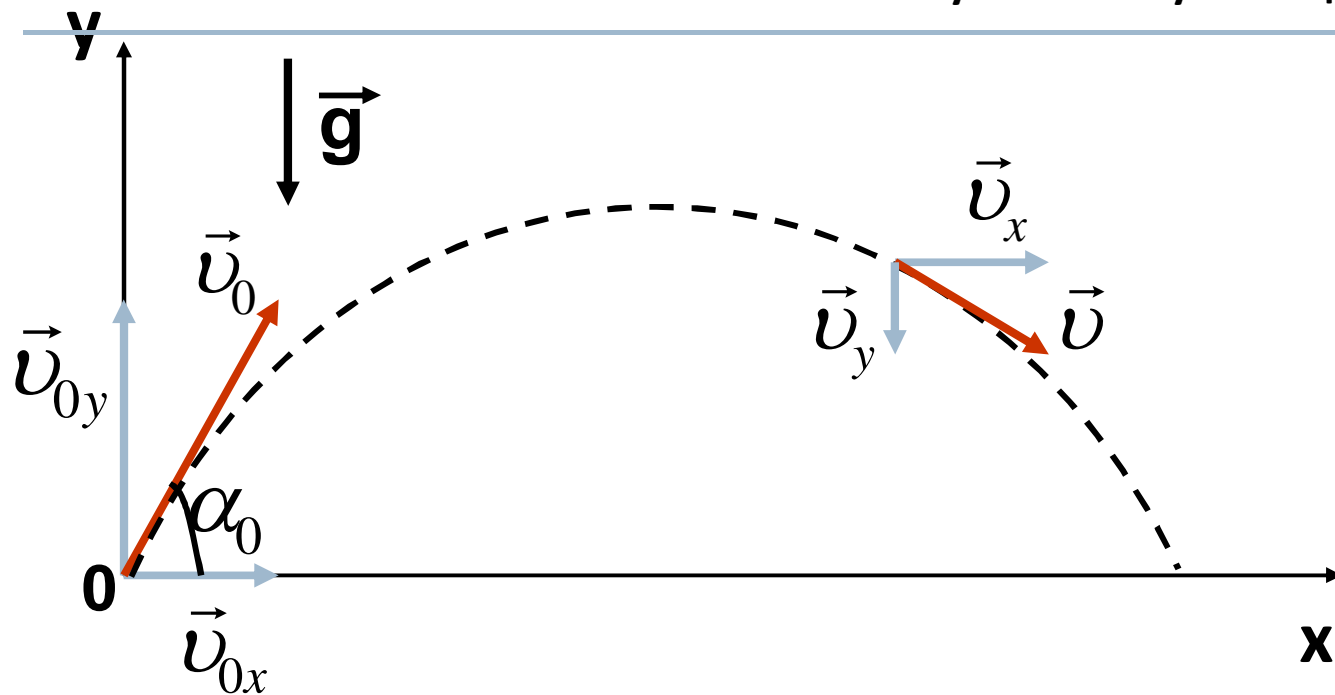


**60°**





## Рух тіла кинутого під кутом до горизонту



$$x = x_0 + v_x t$$

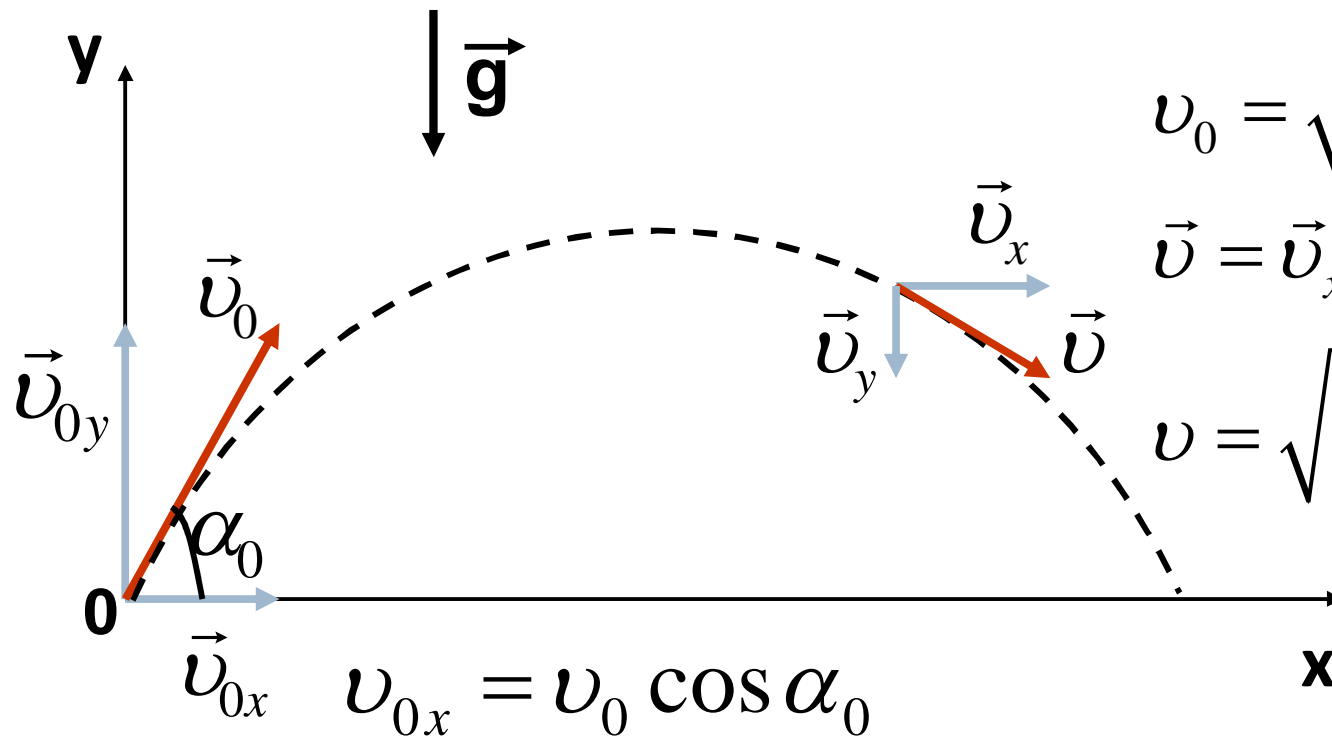
$$v_x = v_{0x} = \text{const}$$

$$y = y_0 + v_{0y} t - \frac{gt^2}{2}$$

$$v_y = v_{0y} - gt$$



## Рух тіла кинутого під кутом до горизонту



$$\vec{v}_0 = \vec{v}_{0x} + \vec{v}_{0y}$$

$$v_0 = \sqrt{(v_{0x})^2 + (v_{0y})^2}$$

$$\vec{v} = \vec{v}_x + \vec{v}_y$$

$$v = \sqrt{(v_x)^2 + (v_y)^2}$$

$$v_{0x} = v_0 \cos \alpha_0$$

$$v_{0y} = v_0 \sin \alpha_0$$

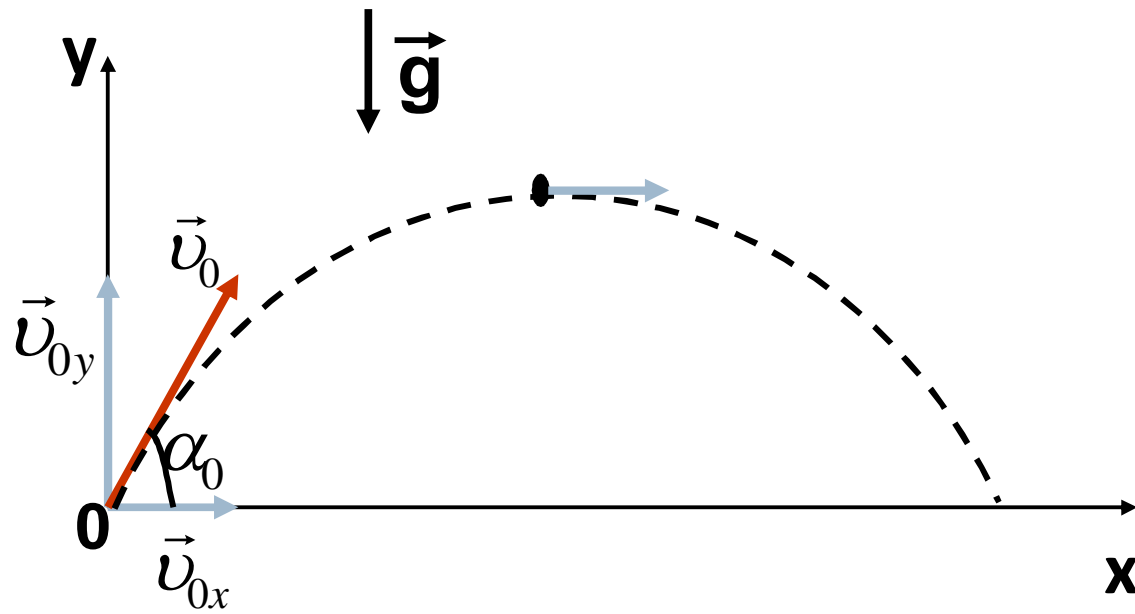




Незалежність рухів



## Рух тіла кинутого під кутом до горизонту



$$x = x_0 + v_x t$$

$$y = y_0 + v_{0y} t - \frac{gt^2}{2}$$

$$y = y_0 + v_{0y} t - \frac{gt^2}{2}$$

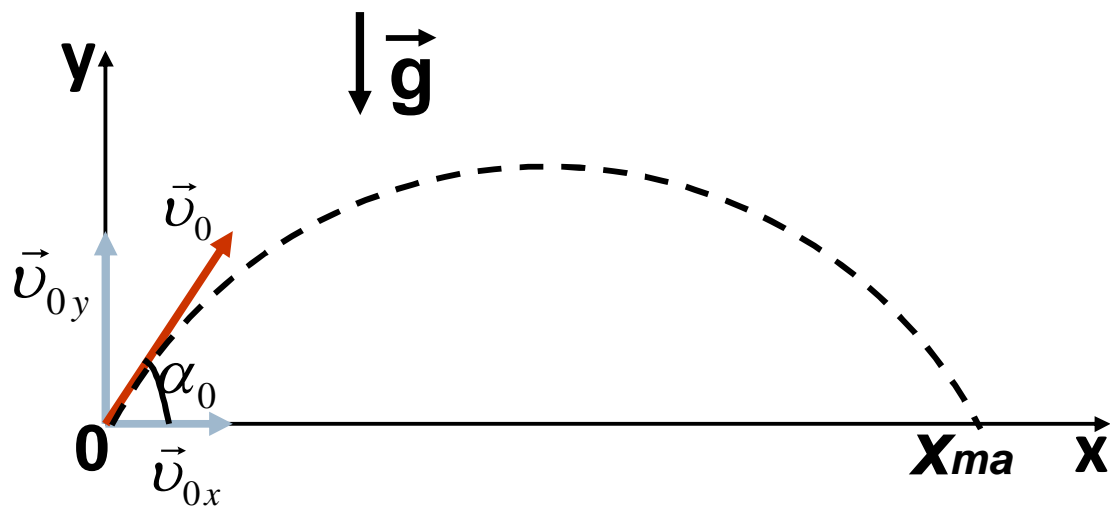
$$0 = 0 + v_{0y} t - \frac{gt^2}{2}$$

$$0 = v_{0y} - g \frac{t_m}{2}$$

$$t_m = \frac{2v_{0y}}{g}$$

$$t_m = \frac{2v_0 \sin \alpha_0}{g}$$

## Рух тіла киннутого під кутом до горизонту

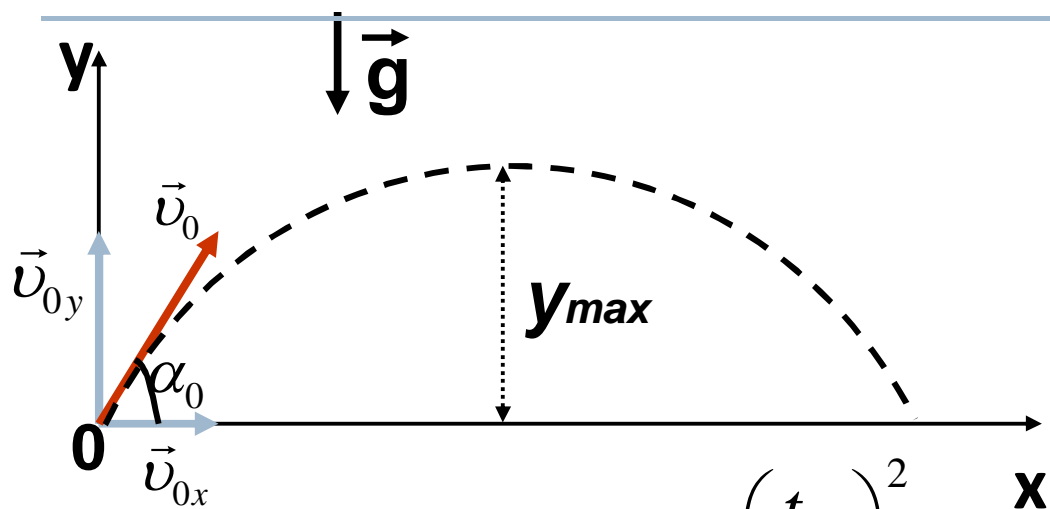


$$x_{\max} = v_{0x} t_m$$

$$x_{\max} = v_0 \cos \alpha_0 \frac{2v_0 \sin \alpha_0}{g}$$

$$x_{\max} = \frac{v_0^2 \sin(2\alpha_0)}{g}$$

## Рух тіла киннутого під кутом до горизонту

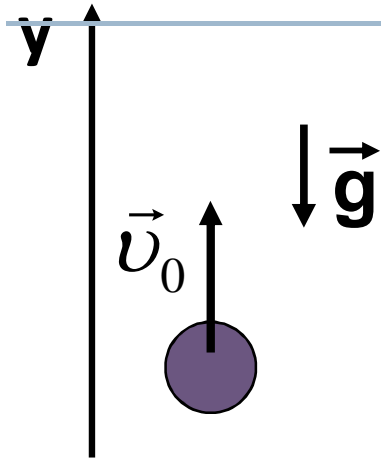


$$y_{\max} = v_{0y} \frac{t_m}{2} - \frac{g \left( \frac{t_m}{2} \right)^2}{2} = v_{0y} \frac{v_{0y}}{g} - \frac{g \left( \frac{v_{0y}}{g} \right)^2}{2}$$

$$y_{\max} = \frac{v_{0y}^2}{2g}$$

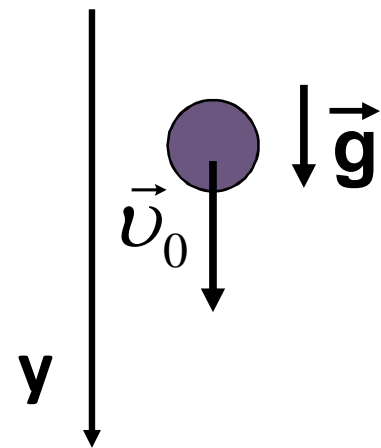
$$y_{\max} = \frac{v_0^2 \sin^2 \alpha_0}{2g}$$

## Рух тіла кинутого вертикально



$$v = v_0 - gt$$

$$y = y_0 + v_0 t - \frac{gt^2}{2}$$

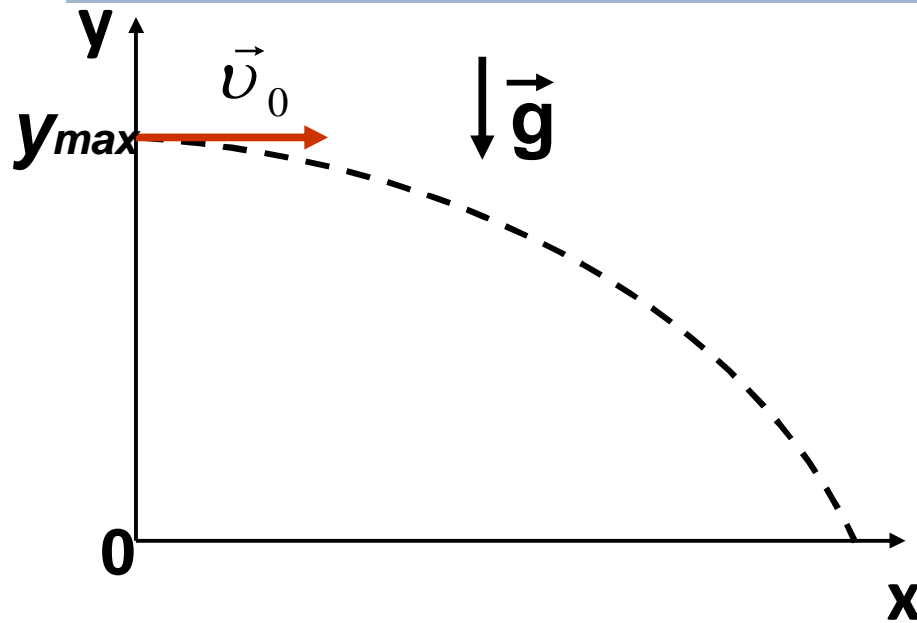


$$v = v_0 + gt$$

$$y = y_0 + v_0 t + \frac{gt^2}{2}$$



## Рух тіла кинутого горизонтально



$$v_{0x} = v_0$$

$$v_{0y} = 0$$

$$x = v_0 t$$

$$y = y_{\max} - \frac{gt^2}{2}$$

$$v_x = v_0 = \text{const}$$

$$v_y = -gt$$





## Задачі

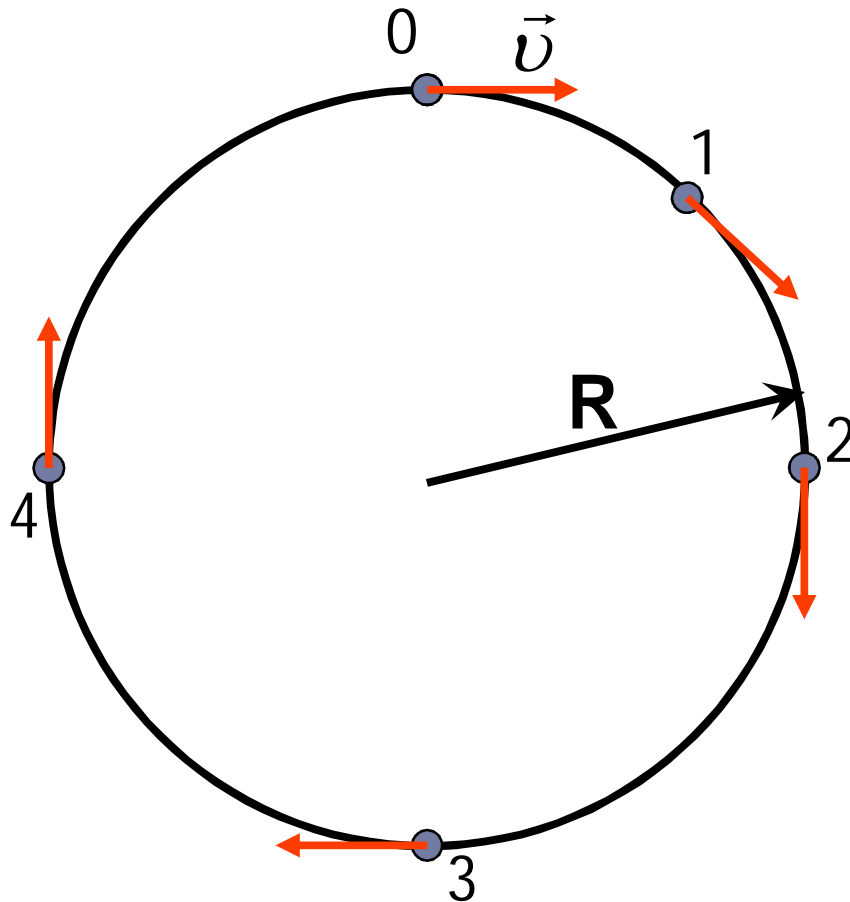
---

Тіло, що було кинуто горизонтально з висоти 19,6м, впало на землю на відстані 80м від місця кидання. Визначити швидкість кидання і кут, який утворює швидкість в момент падіння з горизонтом.

На високому березі озера знаходиться кулемет, який стріляє в горизонтальному напрямку. Початкова швидкість кулі 800м/с. Яку швидкість буде мати куля при падінні у воду, якщо висота берега 30м?



## Рівномірний рух по колу



$$v_1 = v_2 = v_3 = \dots$$

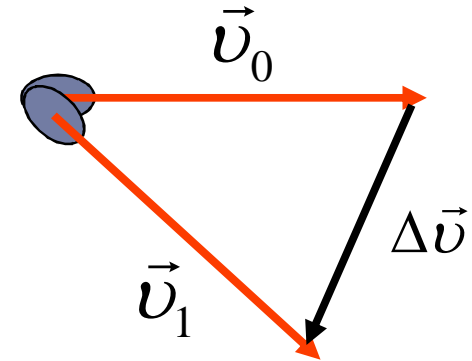
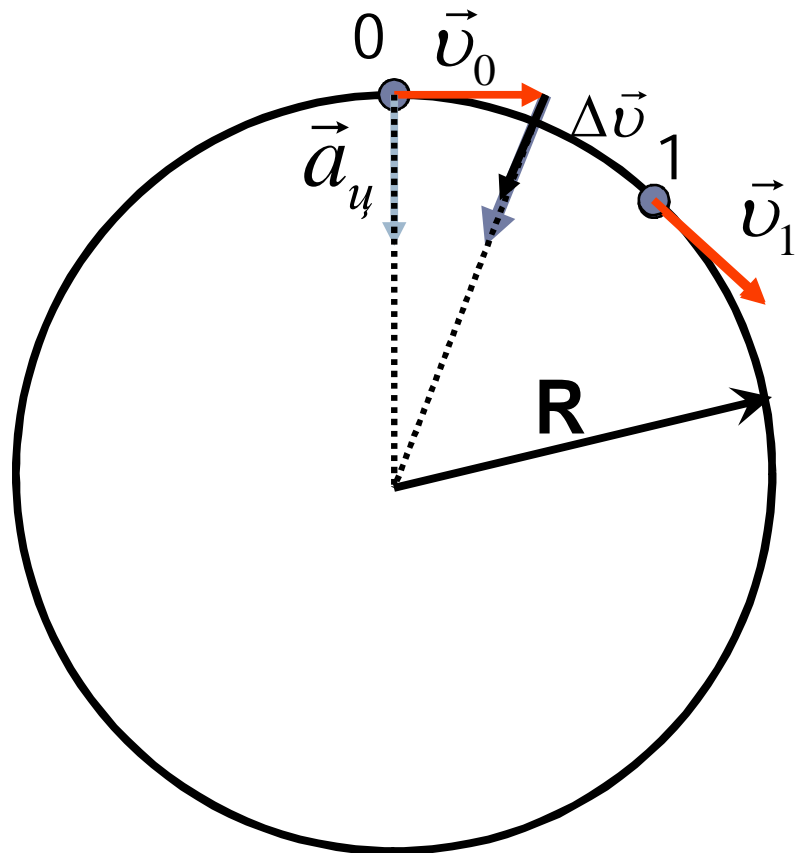
$$v = \text{const}$$

$$\vec{v}_1 \neq \vec{v}_2 \neq \vec{v}_3$$

$$\vec{v} \neq \text{const}$$



## Рівномірний рух по колу

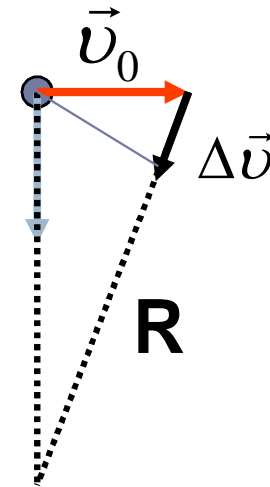
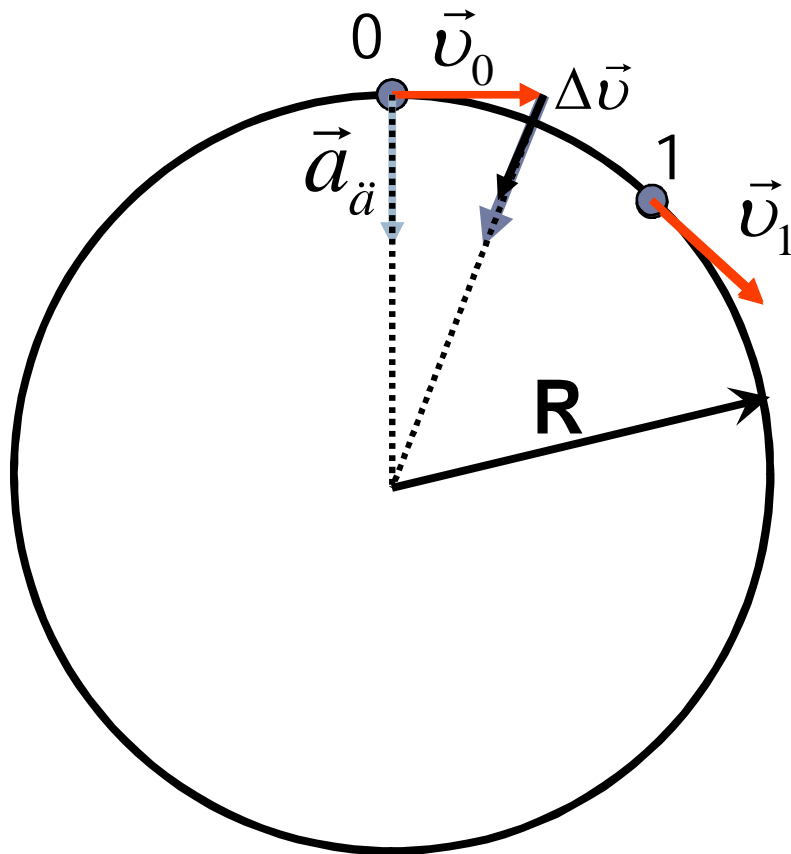


$$\vec{a} = \frac{\vec{v}_1 - \vec{v}_0}{t} = \frac{\Delta\vec{v}}{t}$$

$$\vec{a} \neq \text{const}$$



## Рівномірний рух по колу



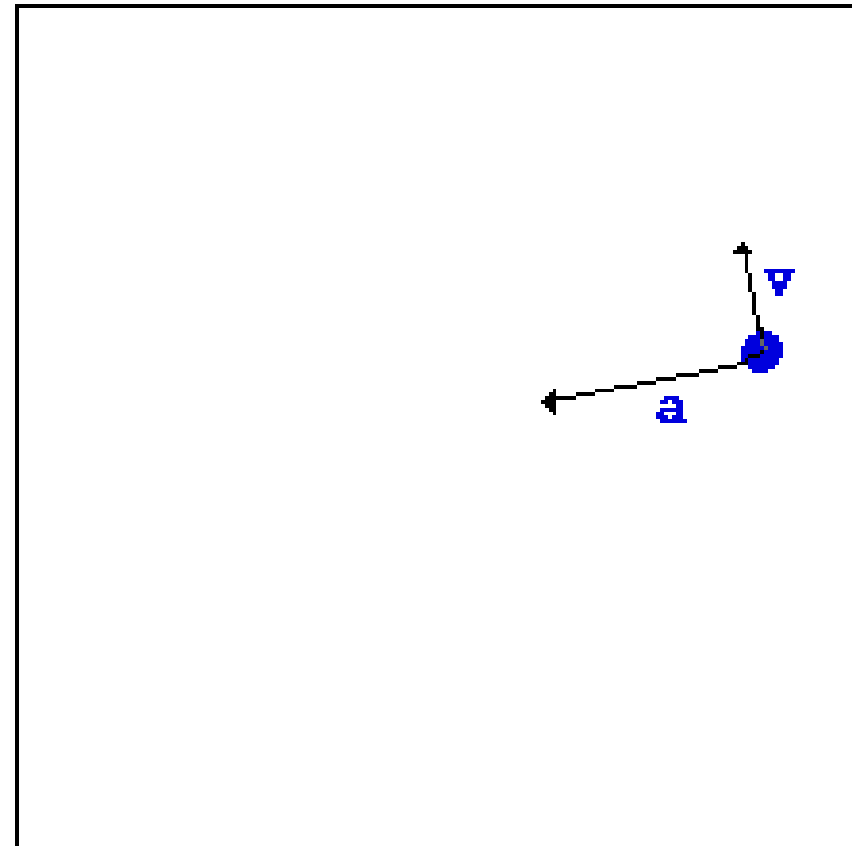
$$\frac{v_0}{R} = \frac{\Delta v}{v}$$

$$a_0 = \frac{v^2}{R}$$

**Тангенціальне прискорення**  $\vec{a}_\tau$   
визначає зміну швидкості по величині (модулю), напрямлене по дотичній до траєкторії руху

**Нормальне (доцентрове) прискорення**  $\vec{a}_n$   
визначає зміну швидкості по напрямку, напрямлене до центру кривизни траєкторії

$$\vec{a} = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$$



Рівномірний рух по колу

$$\vec{a}_\tau = 0 \quad \vec{a}_n = \text{const}$$



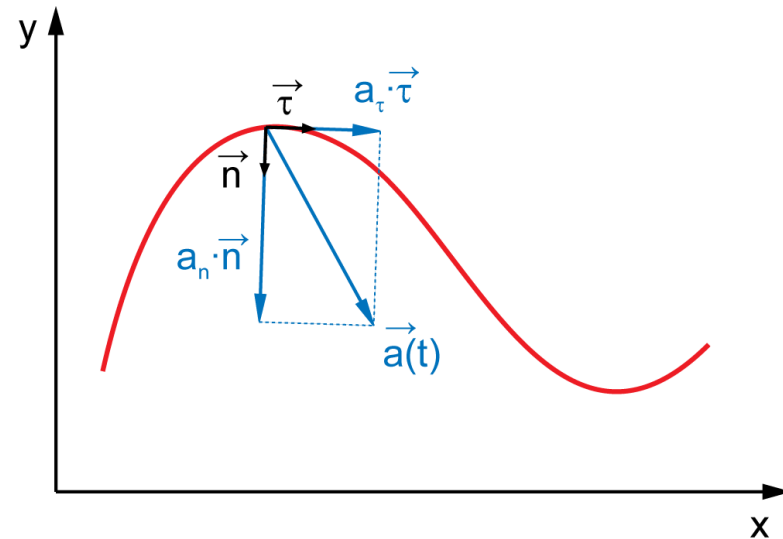
$$\vec{a}_\tau = \frac{dv}{dt} \vec{\tau}$$

## Тангенціальне прискорення

$\frac{dv}{dt} > 0$     Вектори  $\vec{a}_\tau$  і  $\vec{v}$  напрямлені **в один бік** – швидкість **зростає** з часом

$\frac{dv}{dt} < 0$     Вектори  $\vec{a}_\tau$  і  $\vec{v}$  напрямлені **в різні боки** – швидкість **зменшується** з часом

$\frac{dv}{dt} = 0$      $\vec{a}_\tau = 0$  швидкість **не змінюється** з часом  $\vec{v} = const$

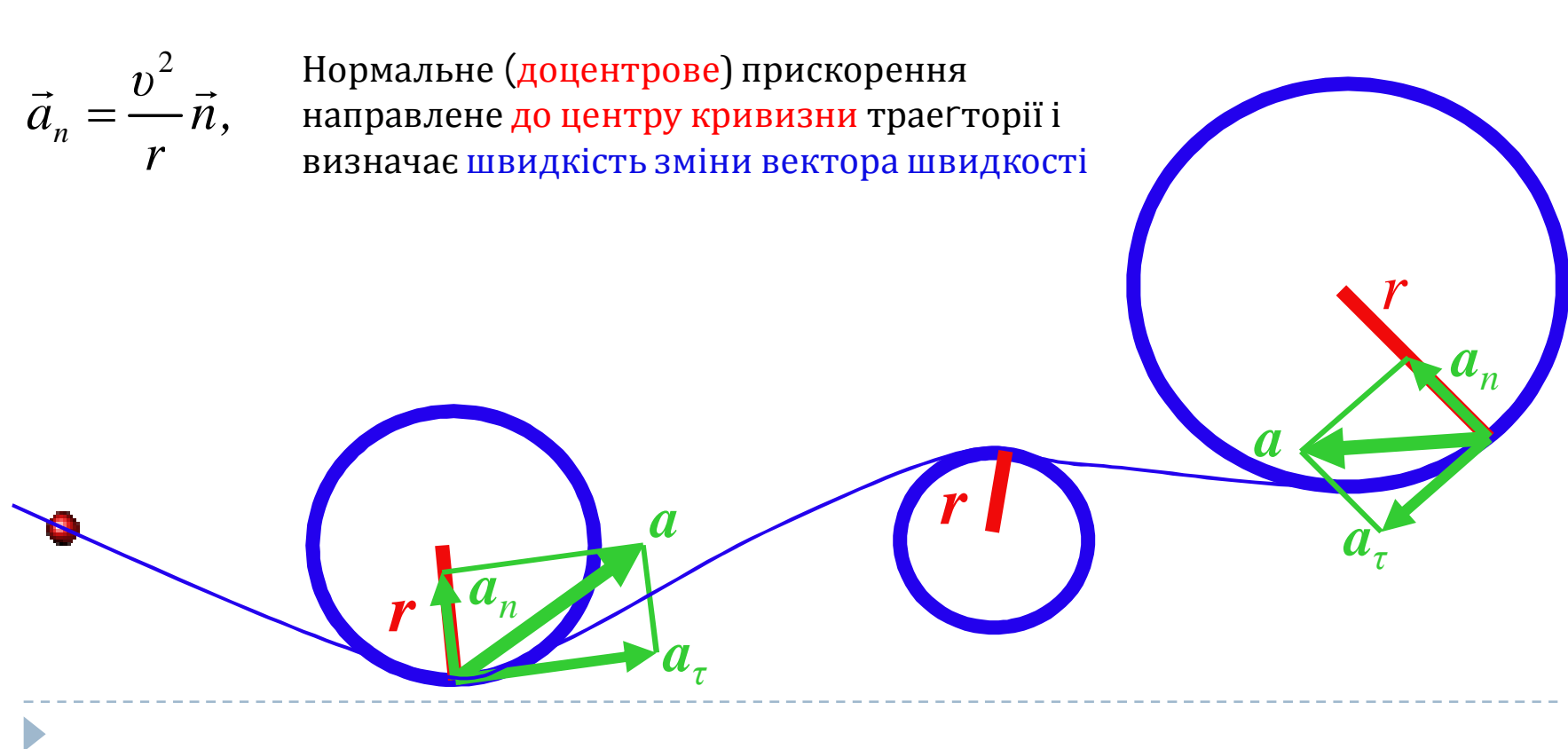


## Нормальне прискорення

При довільному русі матеріальної точки **радіус кривизни** дорівнює радіусу деякого миттєвого (тобто відповідної до даного моменту часу) кола в будь-якій точці траєкторії рух матеріальної точки можна розглядати як обертальний рух по колу (з тангенціальним і нормальним прискореннями)

$$\vec{a}_n = \frac{v^2}{r} \vec{n},$$

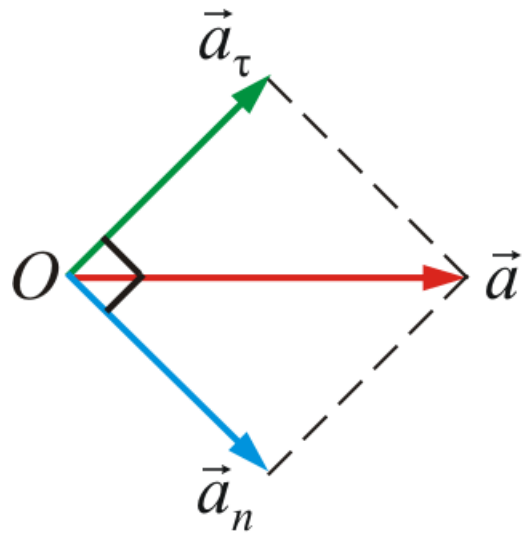
Нормальне (**доцентрове**) прискорення направлене **до центру кривизни** траєкторії і визначає **швидкість зміни вектора швидкості**



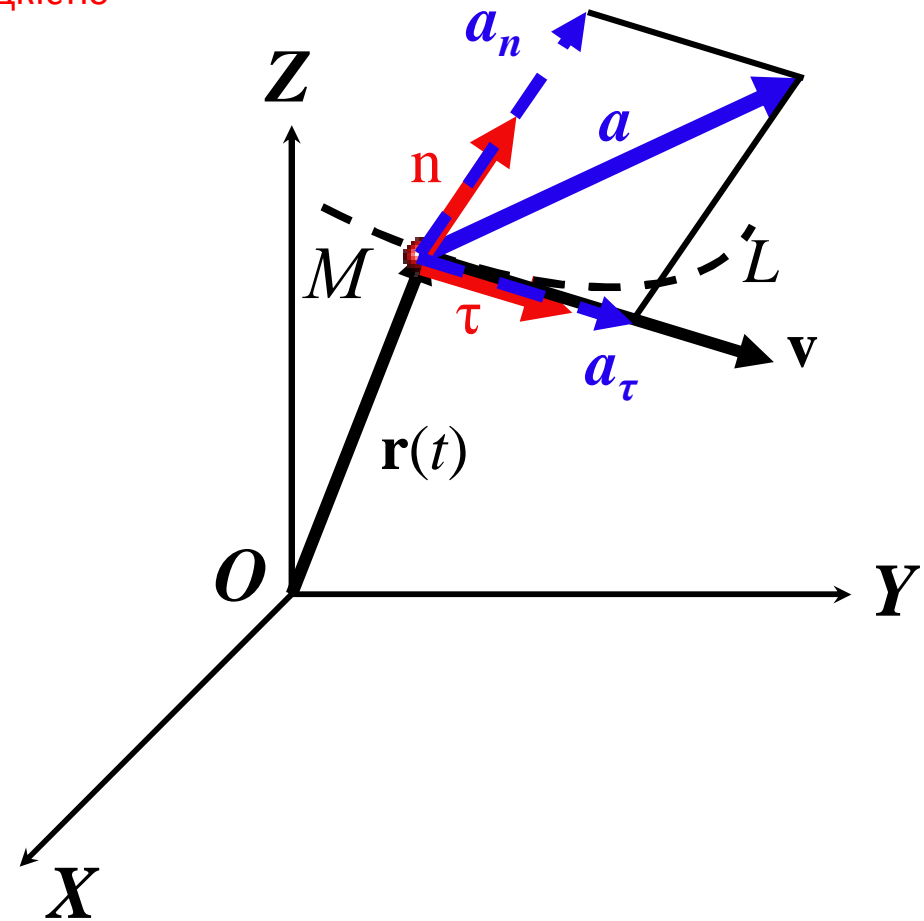
## Повне прискорення

Криволінійний рух з змінною по модулю швидкістю

$$\vec{a}(t) = \vec{a}_\tau + \vec{a}_n$$

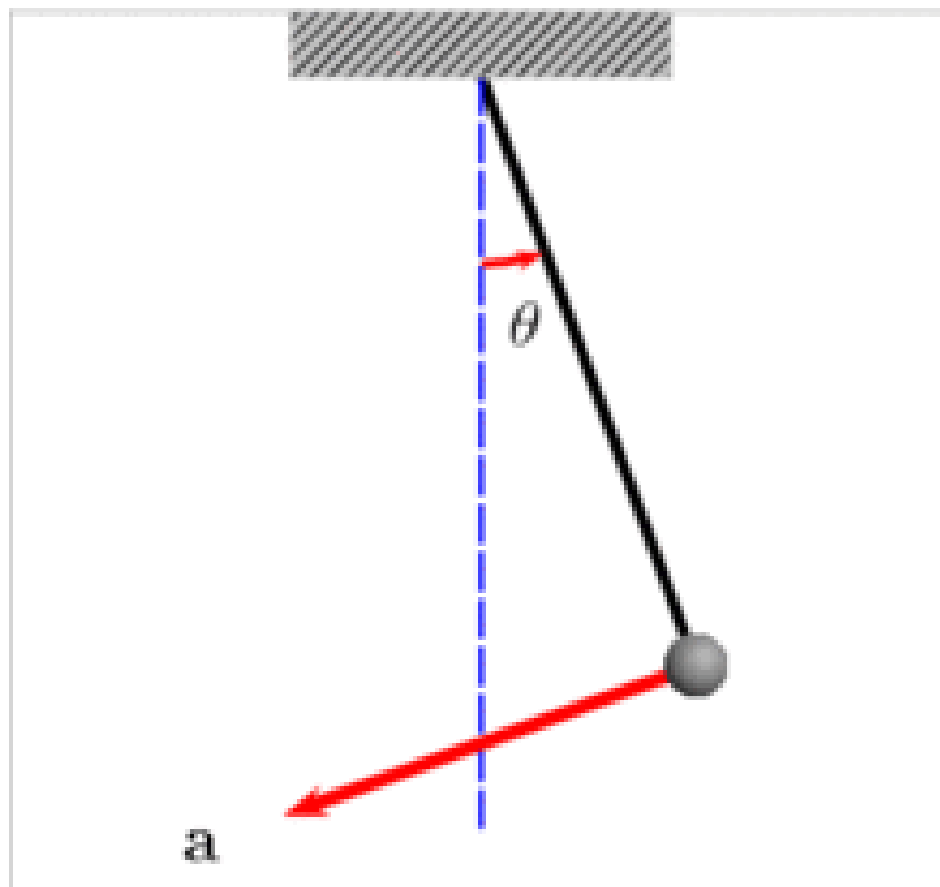


$$a = \sqrt{a_\tau^2 + a_n^2}$$



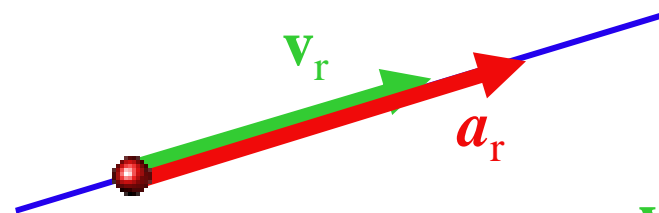


## Повне прискорення

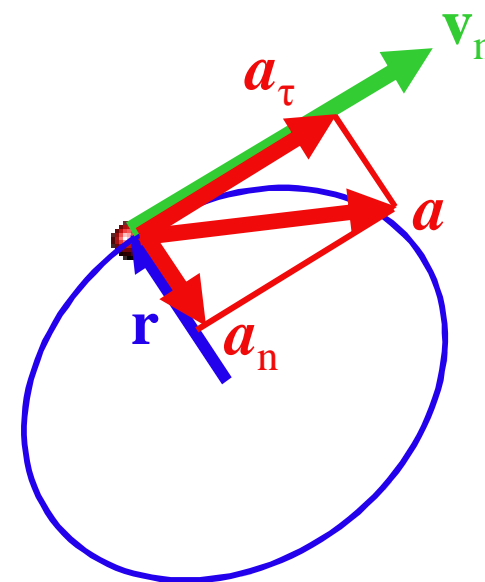


## Типи прискорень

Матеріальна точка рухається прямолінійно



Матеріальна точка рухається по колу

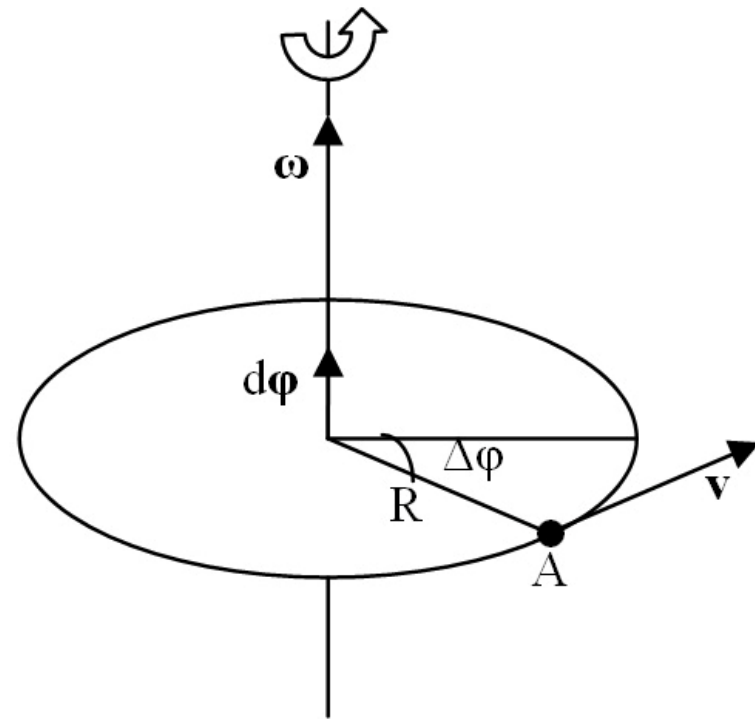


## Характеристики обертального руху

**Обертальний рух** - рух, при якому всі точки тіла рухаються по концентричним колам.

Кутове переміщення  $\Delta\varphi$

Напрямок кутового переміщення визначається за допомогою правила правого гвинта: з кінця вектора поворот тіла має відбуватися проти ходу годинникової стрілки. Одиницею вимірювання кутового переміщення є радіан:



### Кутова швидкість

- Одиниця вимірювання кутової швидкості
- Кутова швидкість також є псевдовектором і визначається за правилом правого гвинта (свердлика).

### Кутове прискорення

Одиниця вимірювання кутового прискорення

$$[\omega] = 1 \frac{\text{рад}}{\text{с}}.$$

$$\vec{V} = [\vec{\omega} \times \vec{r}]$$
$$\vec{\varepsilon} = \frac{d\vec{\omega}}{dt} = \frac{d^2\vec{\varphi}}{dt^2}$$

$$[\varepsilon] = 1 \frac{\text{рад}}{\text{с}^2}.$$



$$a_{\ddot{a}} = \omega^2 R$$

**Період обертання**  $T = \frac{t}{N}$

**Частота**  $\nu = \frac{N}{t}$

$$[T] = 1 \text{ c} \quad [\nu] = 1 \text{ c}^{-1} = 1 \text{ Гц}$$



## Обертальний рух

**Кутова швидкість** - вектор рівний першій похідній від кутового переміщення по часу і напрямлений уздовж осі обертання в напрямку кутового переміщення.

$$\vec{\omega} = \frac{\Delta \vec{\phi}}{\Delta t} \quad \omega = \frac{d\phi}{dt} \quad \text{Одиниці вимірювання - рад/с}$$

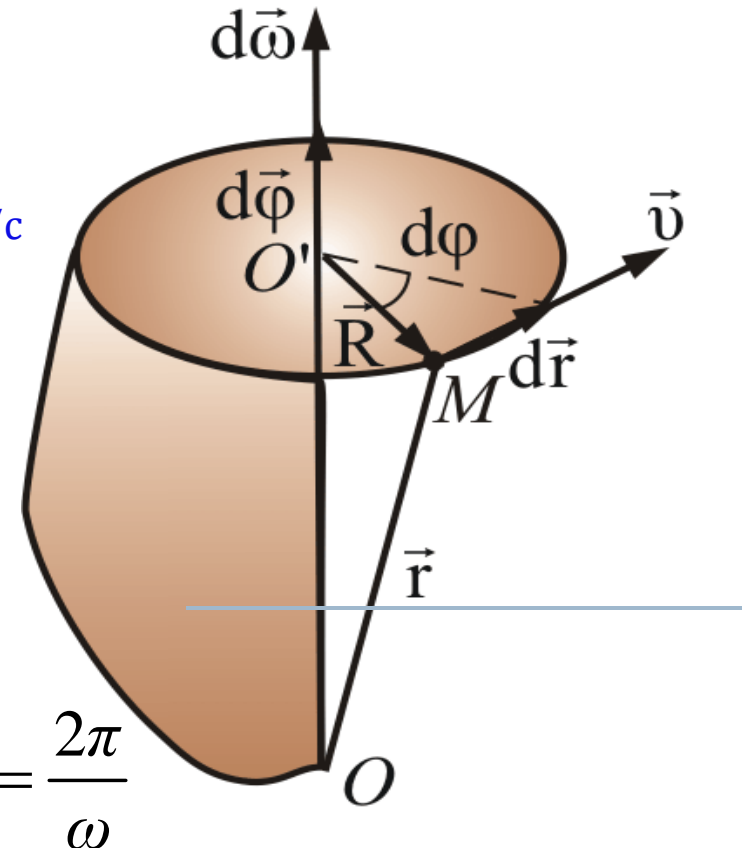
$$v = \omega R$$

Зв'язок між лінійною та кутовою швидкостями

**Частота  $\nu$**  - число обертів тіла за 1 сек  $\nu = \frac{1}{\Delta t}$ .

**Період  $T$**  - проміжок часу, протягом якого тіло робить повний оберт (тобто поворот на кут  $360^\circ$  або  $2\pi$  рад)  $T = \frac{2\pi}{\omega}$

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



Поступальний рух

$$v = \frac{dS}{dt}$$

$$a = \frac{dv}{dt}$$

$$v = v_0 \pm at$$

$$S = v_0 t \pm \frac{at^2}{2}$$

Обертальний рух

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}$$

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt}$$

$$\omega = \omega_0 \pm \varepsilon t$$

$$\varphi = \omega_0 t \pm \frac{\varepsilon t^2}{2}$$

---

---





## Лекція 2

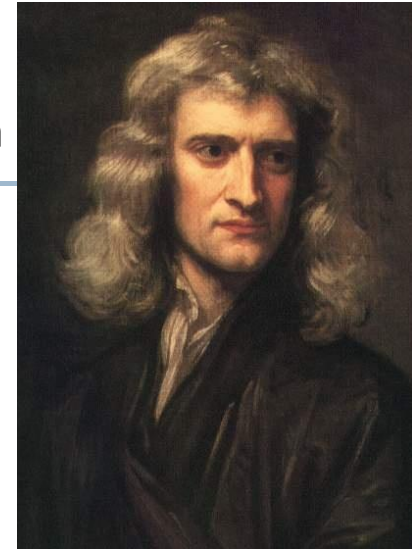
---

### Динаміка

1. Закони Ньютона
2. Перший закон Ньютона (закон інерції):
3. Другий закон Ньютона (основний закон динаміки):
4. Принцип суперпозиції або принцип незалежності дії сил
5. Третій закон Ньютона (закон взаємодій)
6. Система матеріальних точок
7. Центр мас системи матеріальних точок
8. Імпульс системи тіл
9. Рух центру мас
10. Закон збереження імпульсу
11. Закон збереження імпульсу. Удар
12. Сила.
13. Сила тяжіння і вага тіла
14. Сила пружності
15. Сила тертя
16. Сили інерції



## Закони Ньютона



В основі класичної або ньютонівської механіки лежать три закони динаміки, сформульованих Ньютоном в 1687 р. Ці закони відіграють виняткову роль в механіці і є (як і всі фізичні закони) узагальненням результатів величезного людського досвіду.

### *Перший закон Ньютона (закон інерції):*

всяка матеріальна точка зберігає стан спокою або рівномірного прямолінійного руху до тих пір, поки вплив з боку інших тіл не змусить її змінити цей стан.

Мірою інертності тіла є **маса**.  
Одиниці вимірювання – **кг**

**Інерція** – явище збереженням тілом стану спокою або рівномірного прямолінійного руху

*Існують такі інерціальні системи відліку відносно яких тіла, що рухаються поступально зберігають свою швидкість сталою, якщо на них не діють інші тіла, або дія інших тіл взаємокомпенсується*

**Інерціальною системою відліку** є така система відліку, відносно якої матеріальна точка, вільна від зовнішніх впливів покоїться або рухається **прямолінійно** і **рівномірно** (тобто з постійною швидкістю).



### Сутність першого закону Ньютона :

1. всі тіла мають інертні властивості;
2. існують інерціальні системи відліку, в яких виконується перший закон Ньютона;
3. рух відносний.  
(якщо тіло А рухається відносно тіла В зі швидкістю  $u$ , то і тіло В, в свою чергу, рухається відносно тіла А з тією ж швидкістю, але в зворотному напрямку).
4. простір і час однорідні та ізотропні



**Однорідність** простору означає, що всі точки простору еквівалентні (рівноцінні).

**Ізотропність** простору означає, що всі напрямки еквівалентні (рівноправні).

**Однорідність** часу означає, що всі моменти часу еквівалентні (рівноцінні).

---

▶

## Закони Ньютона

*Другий закон Ньютона (основний закон динаміки):*  
сила, що діє на тіло рівна добутку маси тіла  
на прискорення, якого це тіло набуває під дією сили

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

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} \Rightarrow \frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F}$$

Добуток маси тіла на його швидкість  
називається імпульсом тіла

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



*Другий закон Ньютона :*

сила, що діє на тіло рівна швидкості зміни імпульсу цього тіла під дією цієї сили

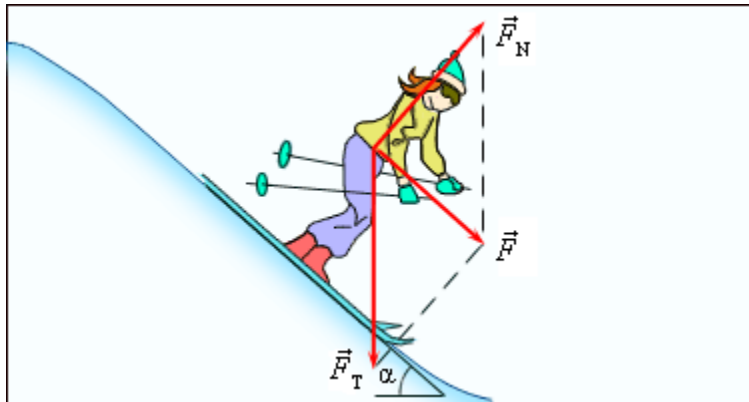
Одиниці вимірювання **сили** - 1 Ньютон = 1 кг · м/с<sup>2</sup>

## Закони Ньютона

### *Принцип суперпозиції або принцип незалежності дії сил*

Якщо на матеріальне тіло діють декілька сил, то результуюча сила рівна векторній сумі всіх сил, що діють на тіло

$$\vec{F} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i,$$



Якщо на матеріальну точку діє декілька сил, то кожна з них надає точці таке ж прискорення, як якби інших сил не було.

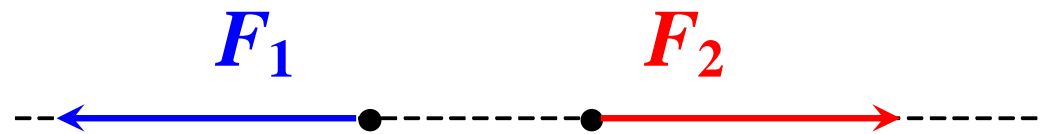
$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{F}_i}{m} = \sum_{i=1}^n \vec{a}_i$$

### Третій закон Ньютона (закон взаємодій)

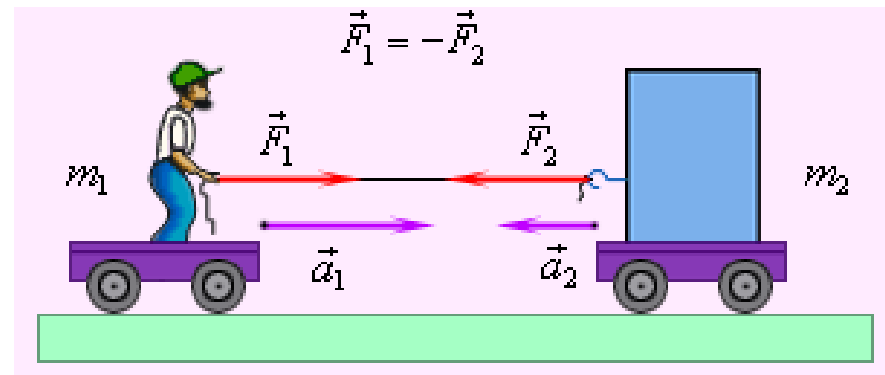
сили, з якими взаємодіють тіла, рівні за величиною (модулем), протилежні за напрямком і однієї природи.

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$

1. Ці сили мають одну і ту ж фізичну природу (гравітаційну, електричну, пружності).
2. Ці сили не зрівноважують один одного, тому що прикладені до різних тіл (тому їх не можна додавати).



$$|F_1| = |F_2|$$



*Система матеріальних точок* – сукупність макро- чи мікроскопічних тіл, які взаємодіють між собою

*Центр мас системи матеріальних точок* – точка, яка під дією сил, прикладених системи, рухається так, ніби в ній сконцентрована маса всіх тіл системи

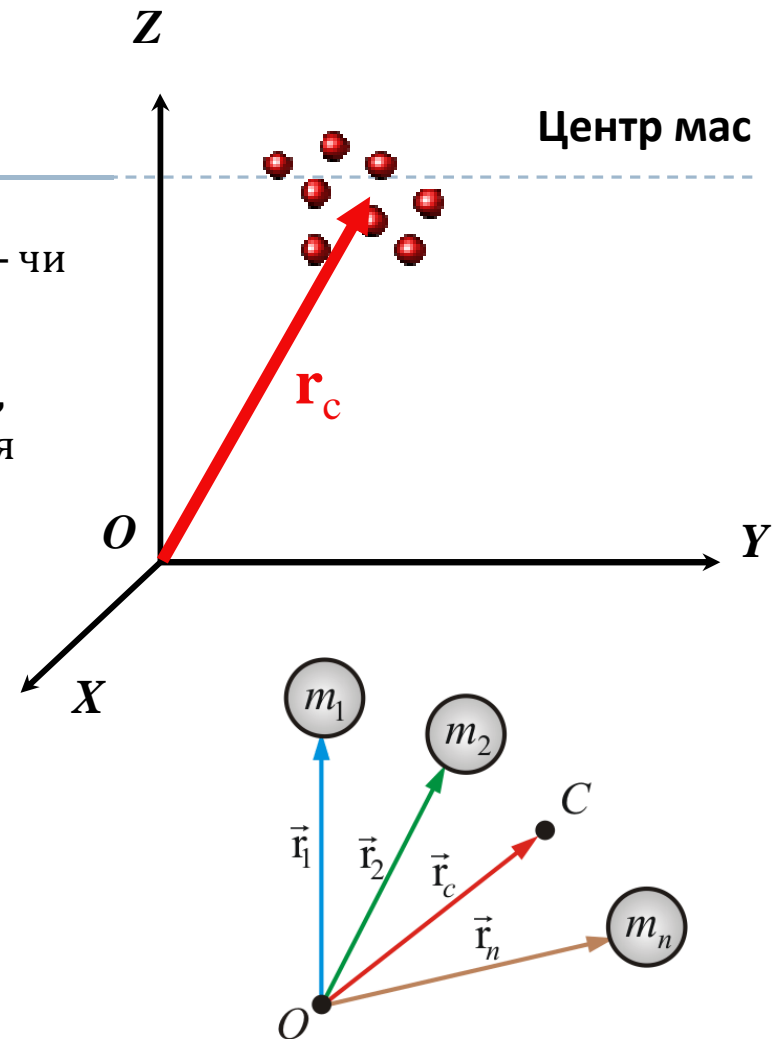
*Положення центру мас системи матеріальних точок*

$$\vec{r}_c = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i}{\sum_{i=1}^n m_i} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^n m_i \vec{r}_i,$$

$$m = \sum_{i=1}^n m_i$$

$m$  - загальна маса системи,

$n$  - число точок системи



**Імпульс системи тіл** дорівнює добутку маси системи на швидкість руху її центру мас.

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

Тіла, що не входять до складу даної системи, називають **зовнішніми** тілами,

Сили, що діють на систему з боку **зовнішніх** тіл - **зовнішніми** силами.

Сили взаємодії між тілами всередині системи, називають **внутрішніми** силами.

---


**Центр механічної системи рухається як матеріальна точка**, маса якої дорівнює масі всієї системи, і на яку діє сила, рівна рівнодійній векторів **зовнішніх сил**, прикладених до системи.

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

### **Теорема про рух центру мас**

Якщо система знаходиться у зовнішньому стаціонарному та однорідному полі (**поле тяжіння**), то ніякими діями всередині системи неможливо змінити рух центру мас системи

---





## Закон збереження імпульсу

---

*Механічна система* називається *замкнутою* (або ізольованою), якщо на неї не діють зовнішні сили, тобто вона не взаємодіє з зовнішніми тілами.

Кожна реальна система тіл завжди не замкнута, але якщо внутрішні сили набагато більші зовнішніх, то таку систему можна вважати *замкнутою* (приклад - Сонячна система).

Для замкнутої системи рівнодійна зовнішніх сил дорівнює 0  $\implies \frac{d\vec{p}}{dt} = \vec{F} \equiv 0$ ,

$$\vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_c = \text{const.}$$

*Закон збереження імпульсу*: імпульс замкнутої системи не змінюється з часом.

Імпульс системи тіл рівний добутку сумарної маси тіл на швидкість центру мас:  $\vec{p} = m \vec{v}_c$ ,

*При будь-яких процесах, що відбуваються в замкнутих системах, швидкість центру мас залишається незмінною*  $m \vec{v}_c = \text{const.}$

---

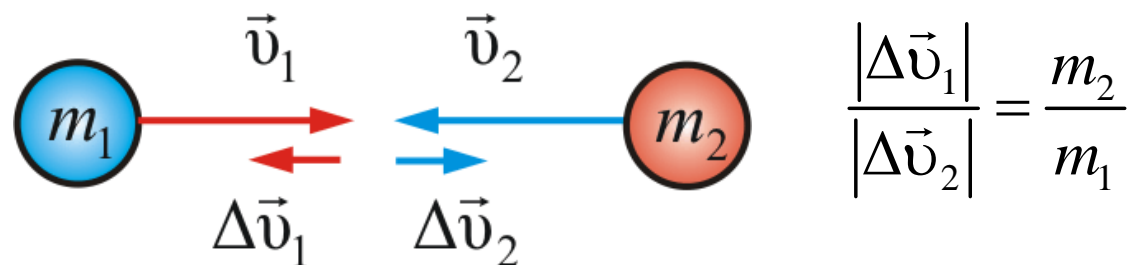
*Закон збереження імпульсу - один з основних законів природи, наслідок законів Ньютона справедливий і для мікрочастинок і для швидкостей близьких до швидкості світла*

---



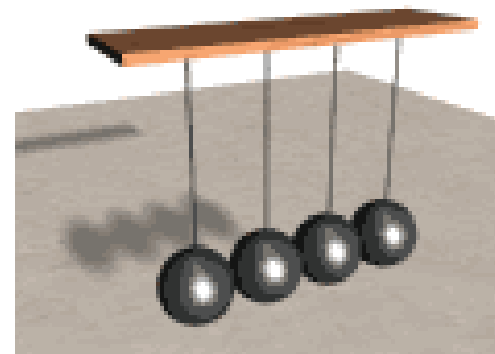
## Закон збереження імпульсу. Удар

Розглянемо замкнуту систему двох тіл масами  $m_1$  і  $m_2$  які рухаються назустріч одне одному і стикаються



*Закон збереження імпульсу:* імпульс замкнутої системи не змінюється з часом.


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



**Сила** - кількісна міра впливу (дії) одного тіла (поля) на інше тіло

Розрізняють **чотири типи сил або взаємодій**:

1. гравітаційні;
2. електромагнітні;
3. сильні (відповідальні за зв'язок частинок в ядрах)
4. слабкі (відповідальні за розпад елементарних частинок)

1. Сили тяжіння (гравітаційні сили)
  2. Сили тяжіння (вага тіла)
  3. Сили тертя
  4. Сили пружності
- 
- 

## Види фундаментальних взаємодій

---

### Гравітаційна

- Притаманна всім матеріальним об'єктам.
- Визначається наявністю у тіл маси
- Підкоряється закону всесвітнього тяжіння Ньютона
- Має необмежений радіус дії. В мікросвіті роль гравітаційної взаємодії мізерно мала.

### Електромагнітна

- Виникає між тілами, що мають електричний заряд.
- Має дві складові: електричну і магнітну.
- Необмежений радіус дії.
- Причина існування атомів, молекул, макроскопічних тіл.

### Слабка

- Приводить до нестабільності елементарних частинок.
- Має обмежений радіус дії
- Важлива тільки в мікросвіті.

### Ядерна або сильна

- Утримує разом частинки в ядрах атомів
- Має скінченний ( $10^{-15}$  м) радіус дії
- Суттєва тільки в мікросвіті.

Якщо умовно прийняти  
Інтенсивність **сильної** взаємодії за 1,  
то інтенсивність  
**електромагнітної** взаємодії буде  $10^{-2}$ ,  
**слабкої** взаємодії  $10^{-13}$ ,  
а гравітаційної -  $10^{-40}$ .



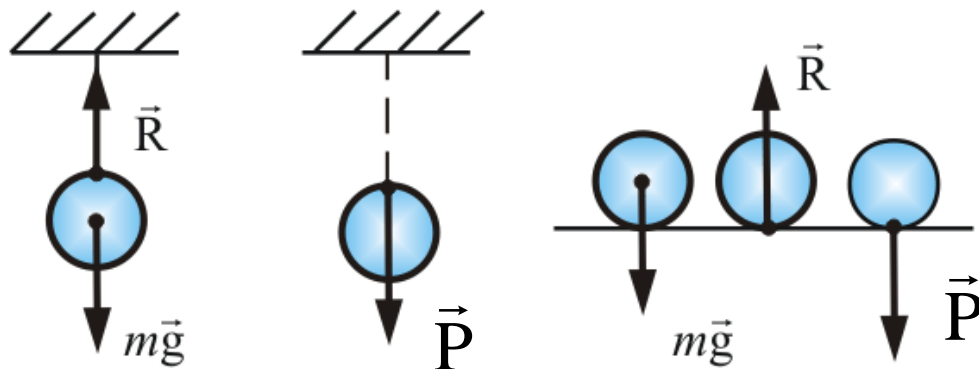
## Сила тяжіння і вага тіла

Одна з фундаментальних сил - **сила гравітації** проявляється на Землі у вигляді **сили тяжіння** - сили, з якою всі тіла притягуються до Землі.

*Поблизу поверхні Землі всі тіла падають з однаковим прискоренням - прискоренням вільного падіння  $g$ .*

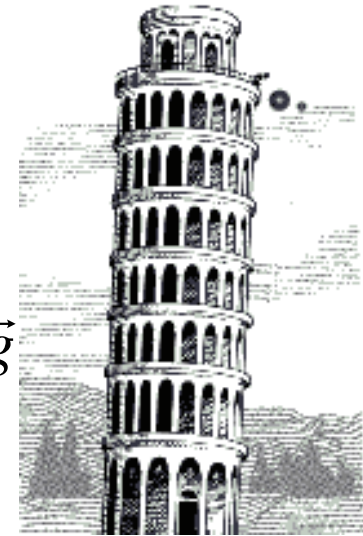
*В системі відліку, пов'язаній з Землею, на всяке тіло діє сила тяжіння  $m\vec{g}$*

Якщо підвісити тіло або покласти його на опору, то сила тяжіння зрівноважиться силою, яку називають реакцією опори або підвісу



За третім законом Ньютона тіло розтягує підвіс або тисне на опору з силою, рівною силі, з якою опора чи підвіс діють на тіло  
**Вага тіла** - сила з якою тіло тисне на опору чи розтягує підвіс.

$$\vec{P} = m\vec{g}$$



## Сила тяжіння і вага тіла

---

**Вага тіла**, що перебуває в стані спокою чи рухається рівномірно і **сила тяжіння**, що діє на це тіло **рівні між собою**, але прикладені до різних точок :

**вага** до **підвісу** або **опори**, сила тяжіння – до **тіла**.

Якщо тіло рухається з прискоренням, тоді :

$$P = mg \pm ma = m( g \pm a ).$$

*Вага тіла може бути більшою або меншою сили тяжіння:*

1. якщо  $g$  і  $a$  направлені в одну сторону (**тіло рухається вниз або падає**), то

$$P < mg \quad P = mg - ma = m( g - a ).$$


2. якщо  $g$  і  $a$  направлені в одну сторону (**тіло рухається вгору**), то

$$P > mg \quad P = mg + ma = m( g + a ).$$

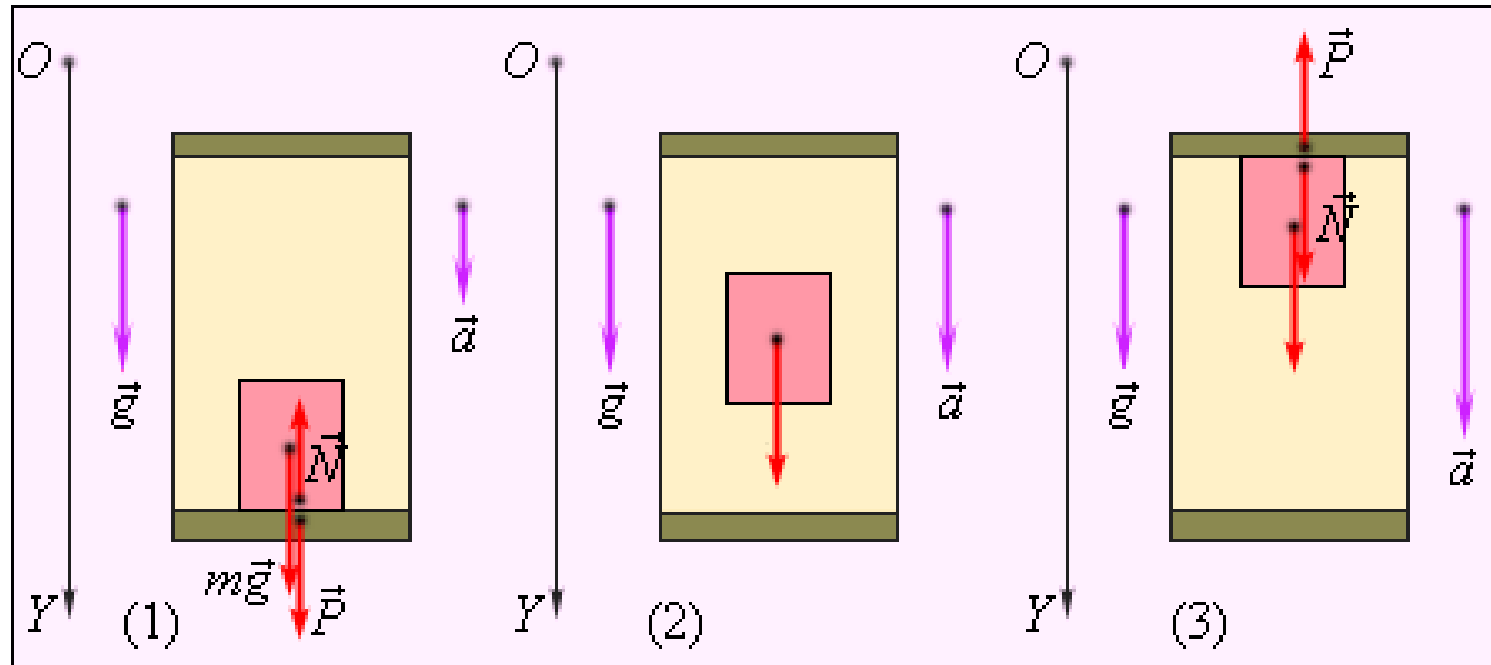
3. якщо  $g = a$  то  $P=0$  (**тіло перебуває в стані невагомості**)

$$P = mg - ma = m( g - g ) = 0.$$

---



## Сила тяжіння і вага тіла



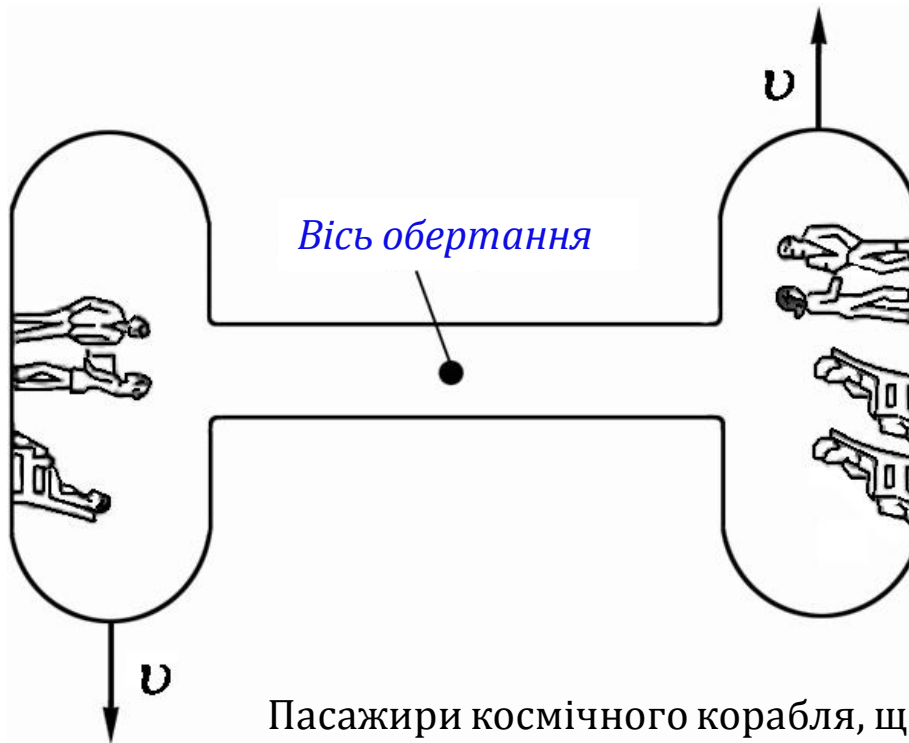
$$ma = mg - N,$$

$$N = P,$$

$$m(g - a) = P$$

*Вага тіла в ліфті, що рухається вниз*

## Штучна гравітація



Пасажири космічного корабля, що обертається з частотою всього 9,5 об / хв, перебуваючи на відстані 10 м від осі обертання, будуть відчувати себе, як на Землі



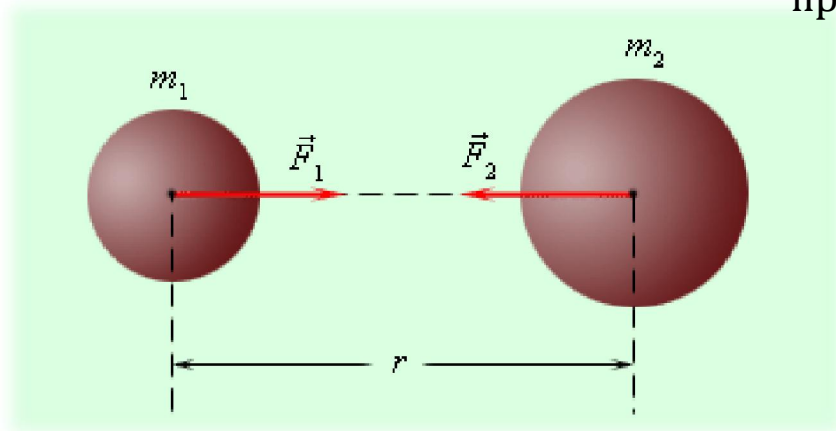
## Сила тяжіння

$$F = \gamma \frac{m}{r^2}$$

### Закон всесвітнього тяжіння

Сила, з якою два тіла притягуються одне до одного, пропорційна добутку мас цих тіл і обернено пропорційна квадрату відстані між ними

де  $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{Н} \cdot \text{м}^2/\text{кг}^2$  - гравітаційна стала



$$F = \gamma \frac{m_g M}{R_\zeta^2} = m_g g$$

$$\vec{F}_{12} = \gamma \frac{m_1 m_2}{r^2} \vec{r}_{12} \quad \text{Сила з якою куля 1 притягує кулю 2}$$

$\vec{r}_{12}$  одиничний вектор напрямлений від центру кулі 1 до центру кулі 2.

## Сила тяжіння

*Гравітаційна взаємодія* між тілами здійснюється за допомогою поля тяжіння (*гравітаційного поля*).

*Поле* це *об'єктивна реальність*, за допомогою якої *передається взаємодія*.

*Поле*, поряд з речовиною, є одним з *видів матерії*.

*Гравітаційне поле* породжується тілами що володіють *масою*

*Основна властивість гравітаційного поля*-

на будь-яку матеріальну точку масою  $m$ , внесену в це поле, діє сила тяжіння  $F$ , пропорційна  $m$

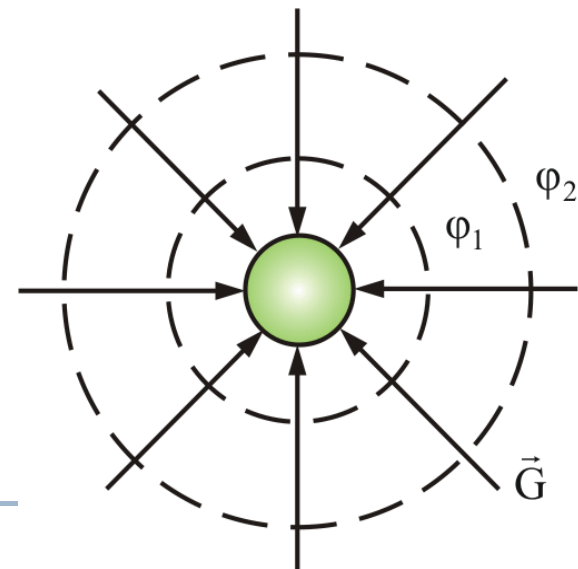
$$\vec{F} = m\vec{G} \implies \vec{G} = \frac{\vec{F}}{m},$$

$\vec{G}$  - *напруженість гравітаційного поля*

*Вектор напруженості* чисельно *дорівнює силі*, що діє з боку поля на матеріальну точку одиничної маси і збігається з цією силою за напрямком.

Вектор напруженості є *силовою* характеристикою гравітаційного поля і змінюється при переході від однієї точки поля до іншої.

*Поле тяжіння є центральним і сферично симетричним.*



## Сила пружності

Під дією зовнішніх сил тіла *деформуються* (змінюються їх розміри і форма).

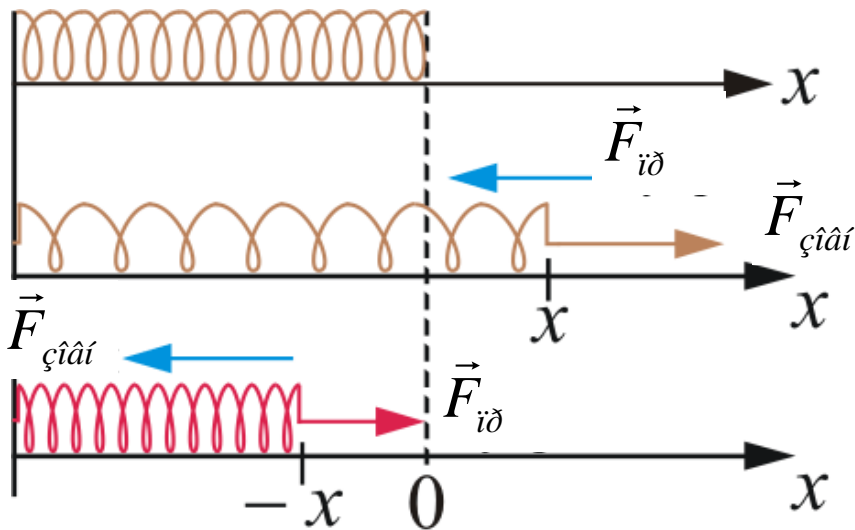
*Пружна деформація* - після припинення дії зовнішніх сил форма і розміри тіла відновлюються.

Деформація пружна, якщо зовнішня сила не перевершує певного значення, яке називається межею пружності.

При перевищенні цієї межі деформація стає *пластичною* або *непружною*, первинні розміри і форма тіла повністю не відновлюється.



Природа сил пружності - *електромагнітна*



Видовження пружини пропорційне зовнішній силі та визначається законом **Гука**:

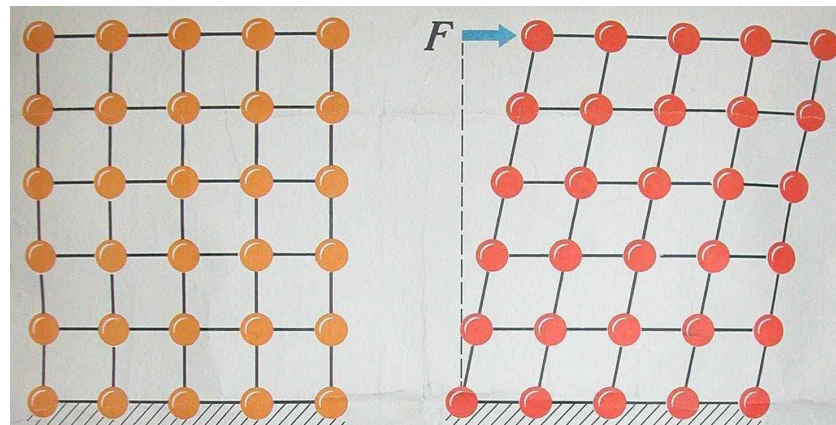
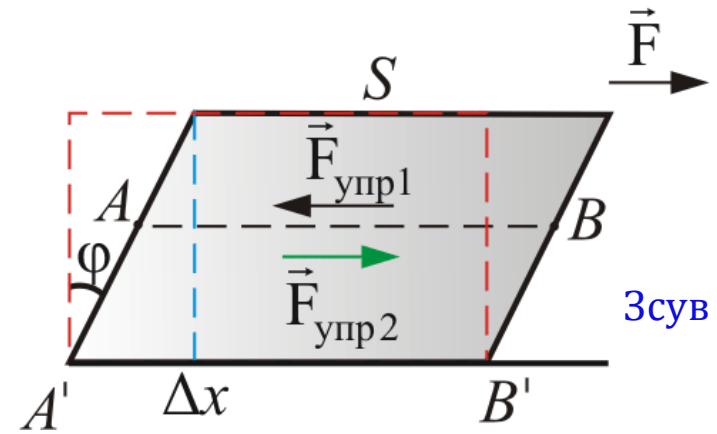
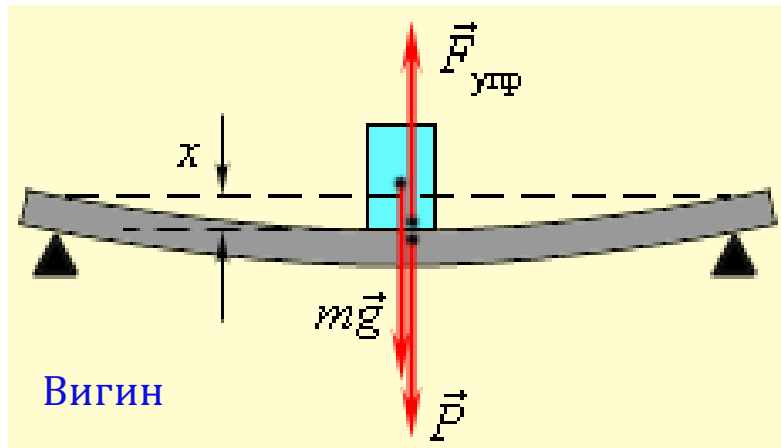
$$x = \frac{1}{k} F_{\text{çîâî}}$$

$k$  - жорсткість пружини

$$F_{\text{ïð}} = -F_{\text{çîâî}}$$

$$F_{\text{ïð}} = -kx$$

## Деформація зсуву



Деформація зсуву кристалічної ґратки твердого тіла

### Види тертя

*Зовнішнє тертя* виникає при відносному переміщенні двох твердих тіл, які безпосередньо торкаються одне одного (тертя ковзання або тертя спокою).

*Внутрішнє тертя* спостерігається при відносному переміщенні частин одного і того ж суцільного тіла (наприклад, шарів рідини або газу).

*Вязке тертя* – тертя між твердим тілом і рідиною чи газом або між шарами рідини чи газу.

*Сухе тертя* - тертя ковзання і тертя кочення.

---

Природа сил тертя - *електромагнітна*

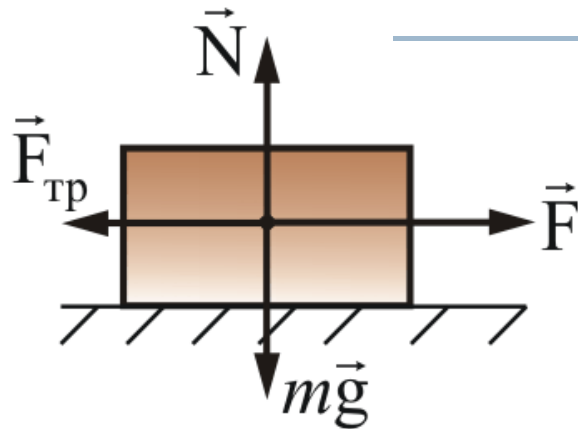
---



## Сила тертя

**Сили тертя** - тангенціальні сили, що виникають при зіткненні поверхонь тіл і перешкоджають їх відносному переміщенню.

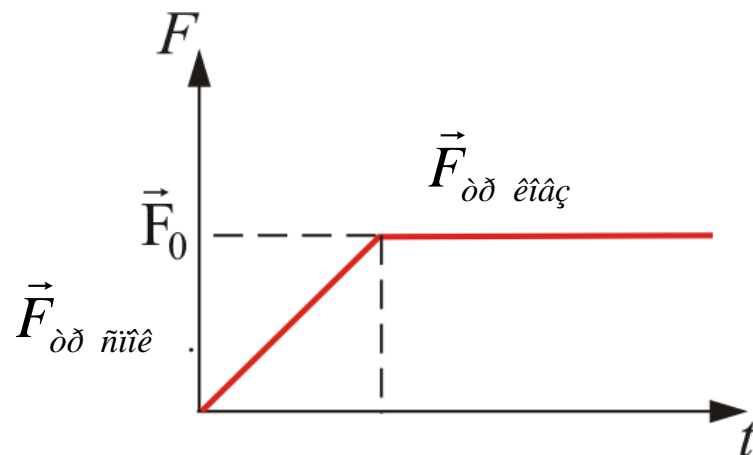
У результаті дії сил тертя механічна енергія перетворюється у внутрішню енергію взаємодіючих тіл (**дисипація енергії**)



Подіємо на тіло, зовнішньою силою  $\vec{F}$  поступово збільшуючи її модуль. Спочатку брусок буде залишатися нерухомим, значить зовнішня сила врівноважується деякою силою  $\vec{F}_{\text{дд нїїє}}$

$\vec{F}_{\text{дд нїїє}}$  **сила тертя спокою**

Коли модуль зовнішньої сили, а отже, і модуль сили тертя спокою перевищить значення  $F_0$ , тіло почне ковзати по опорі - **тертя спокою** зміниться **тертям ковзання**



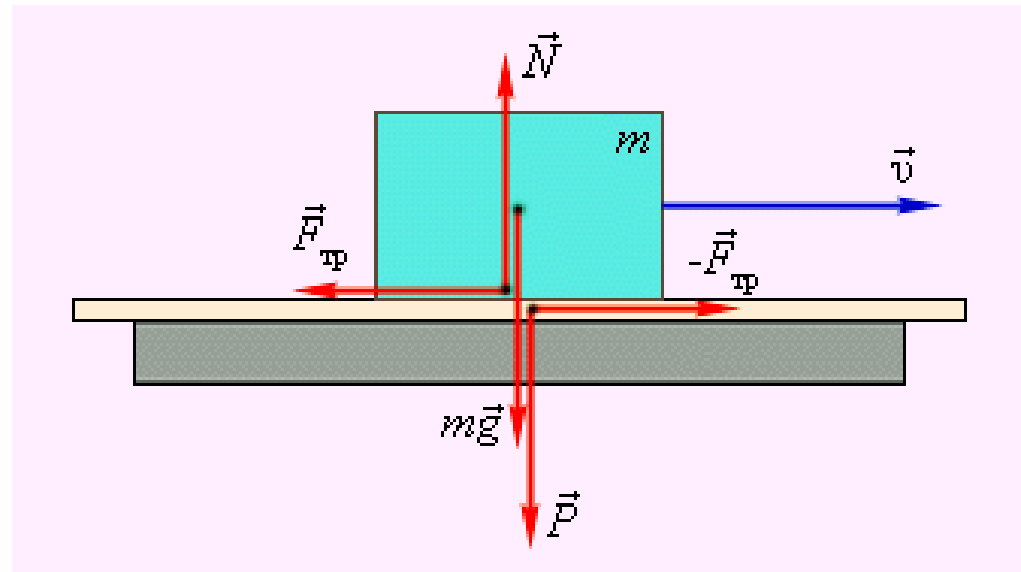
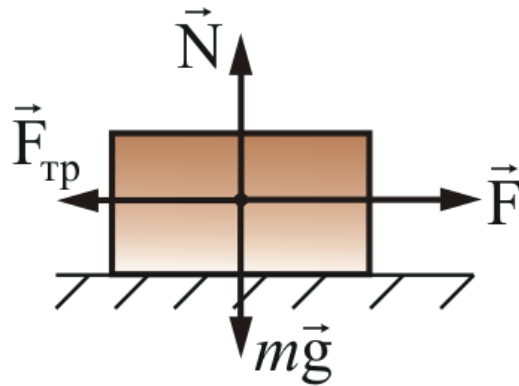
## Сила тертя

Максимальна сила тертя спокою не залежить від площі зіткнення тіл і приблизно пропорційна модулю сили нормального тиску  $N$

$$F_{\text{дд}} = \mu_0 N$$

$$F_{\text{дд}} = \mu_0 mg$$

$\mu_0$  - коефіцієнт тертя спокою - залежить від природи і стану поверхонь, що труться

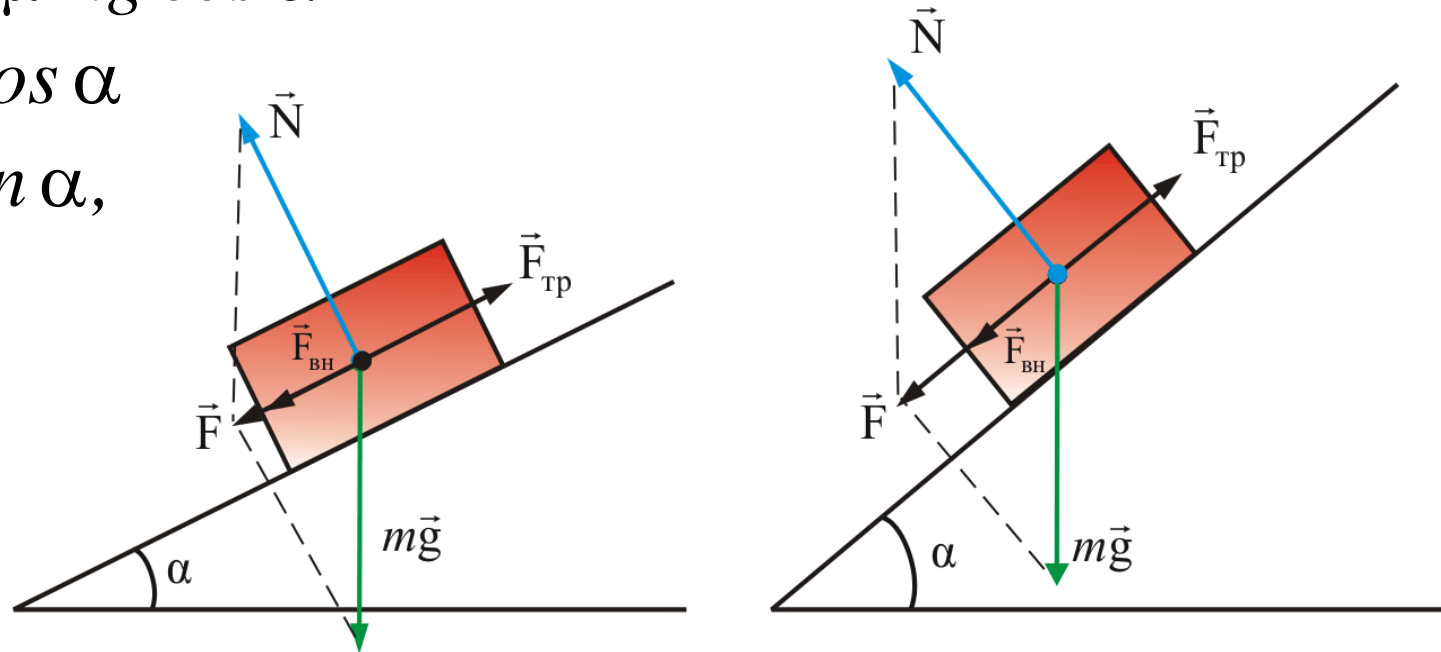


## Похила площина

$$F_{\text{д.}} = \mu N = \mu mg \cos \alpha$$

$$N = mg \cos \alpha$$

$$F = mg \sin \alpha,$$

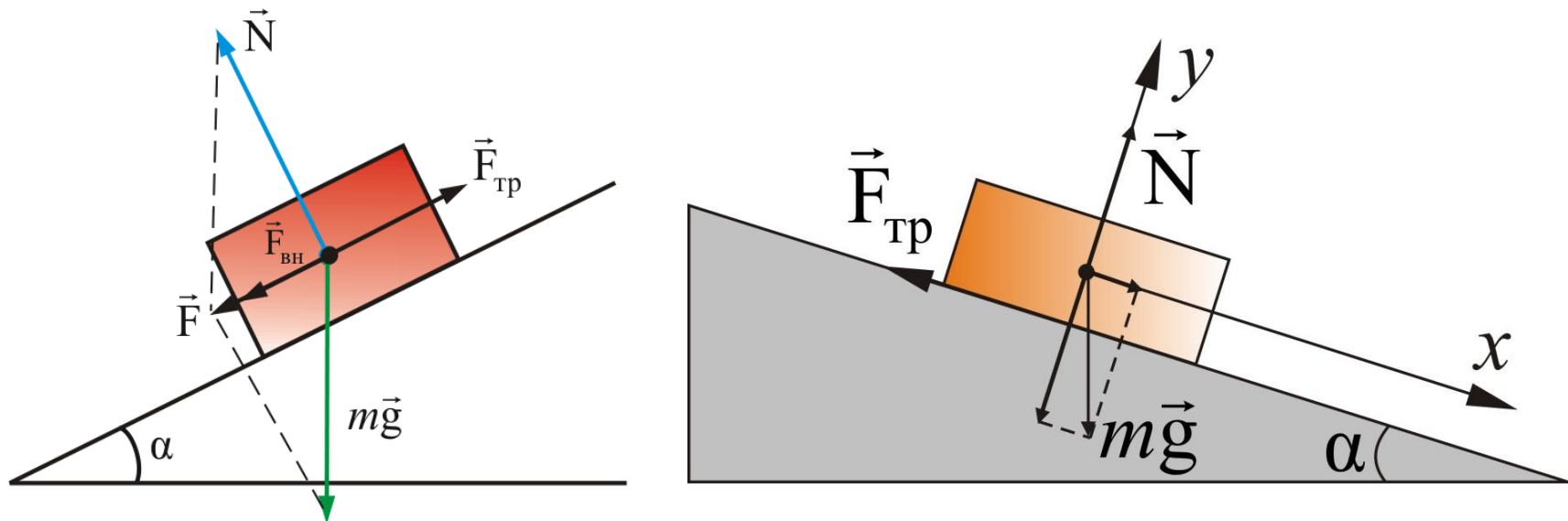


Якщо  $F < (F_{\text{д.}})_{\text{max}} = \mu N$  то тіло не рухатиметься

Кут нахилу при якому тіло починає ковзати по площині

$$(F_{\text{д.}})_{\text{max}} = F \Rightarrow \mu mg \cos \alpha = mg \sin \alpha \Rightarrow \operatorname{tg} \alpha_{\text{min}} = \mu \quad \mu - \text{коефіцієнт тертя}$$





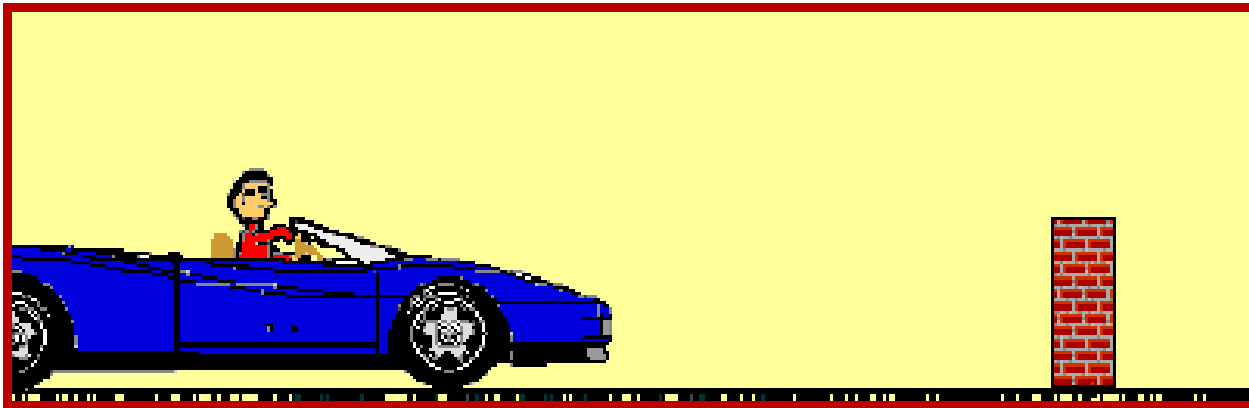
При кутах більших за  $\alpha_{min}$  тіло буде ковзати з прискоренням

$$F_{\text{доп.}} = \mu N = \mu mg \cos \alpha$$

$$F = mg \sin \alpha. \quad \Rightarrow \quad a = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha),$$

Закони Ньютона виконуються в інерціальних системах відліку.

*Неінерціальні системи відліку* – рухаються з прискоренням



*Сили інерції* обумовлені не взаємодією тіл, а властивостями неінерційної систем відліку.

На сили інерції закони Ньютона не поширюються.

Для використання в неінерціальній системі законів Ньютона вводяться *сили інерції*.

*Сили інерції* не пов'язані з іншими тіла або полями.

---

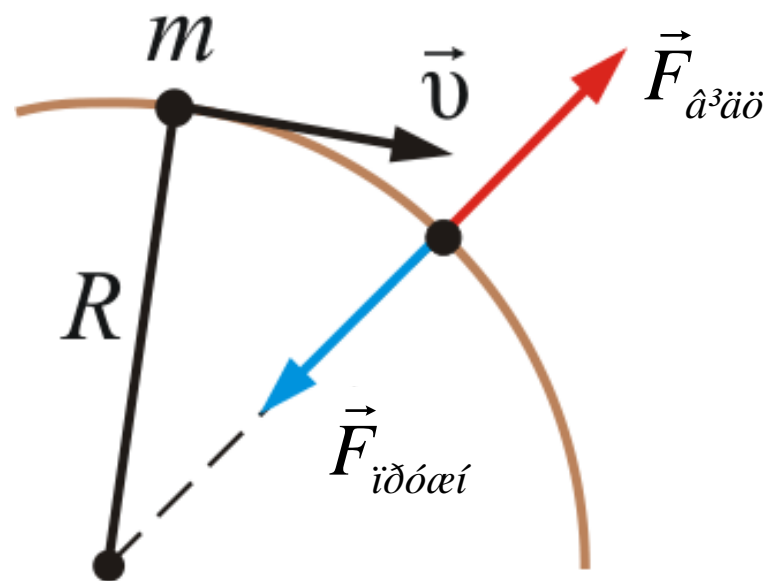


Сили інерції при обертальному русі неінерціальної системи відліку.

У кожен момент часу тягарець мав би рухатися прямолінійно по дотичній до кола.

Тягарець зв'язаний з віссю обертання мотузкою. Мотузка розтягується, з'являється пружна сила, що діє на камінь, спрямована уздовж мотузки до центру обертання.

Це і є доцентрова сила (при обертанні Землі навколо осі в якості доцентрової сили виступає сила гравітації)



$$\vec{F}_{\hat{a}^3\ddot{a}\ddot{o}} = -m\vec{a}_n,$$

$$F_{\hat{a}^3\ddot{a}\ddot{o}} = -m \frac{v^2}{R}, \quad a_n = \omega^2 R$$

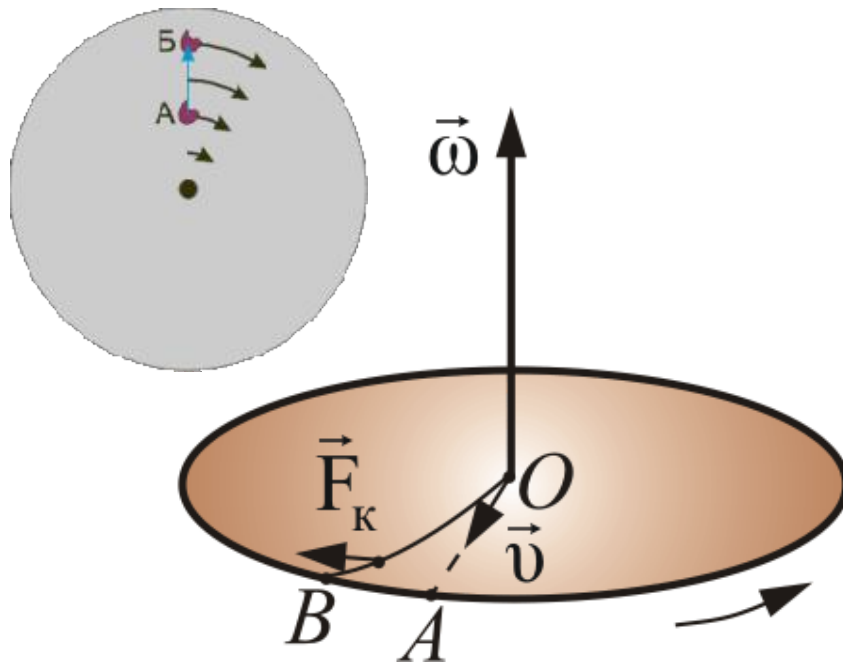
$$F_{\hat{a}^3\ddot{a}\ddot{o}} = m\omega^2 R.$$

$\omega$  - **кутова** швидкість обертання тягарця,  
 $v$  - **лінійна** швидкість обертання тягарця

## Сила Коріоліса



При русі тіла відносно системи відліку, що обертається, крім відцентрової сили з'являється *сила Коріоліса* (Г. Коріоліс (1792 - 1843) - французький фізик).



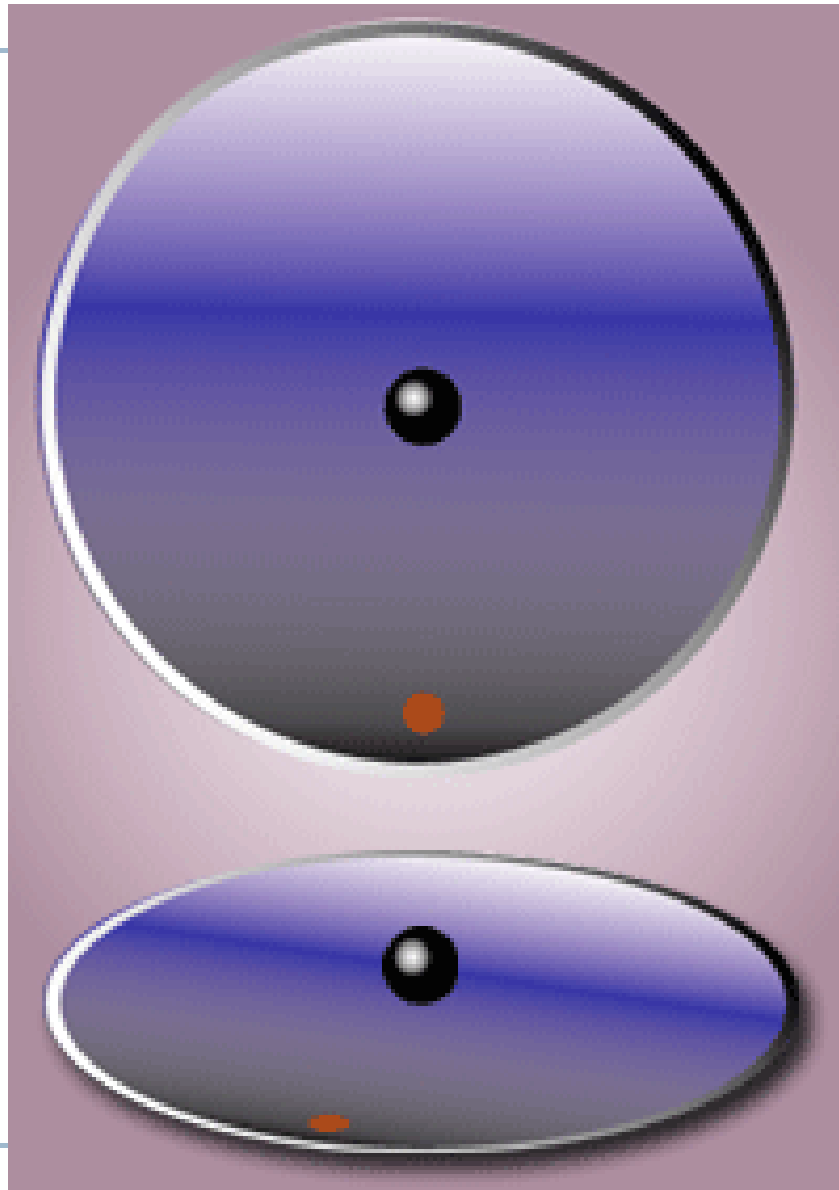
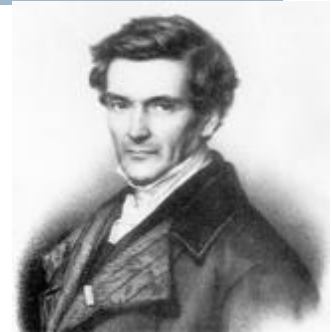
При обертанні диска, більш віддалені від центру точки рухаються з більшою лінійною швидкістю, ніж менш віддалені.

Якщо ми хочемо перемістити тіло вздовж радіуса, так, щоб воно залишалось на радіусі, то нам доведеться збільшити швидкість тіла, тобто, надати йому прискорення.

Якщо наша система відліку обертається разом з диском, то ми побасимо, що тіло зміщується вліво - це і є *наслідок дії сили Коріоліса*.

$$F_{\hat{E}} = -2m\omega v \sin \alpha \quad \alpha \text{ кут між векторами лінійної та кутової швидкостей}$$

## Сила Коріоліса



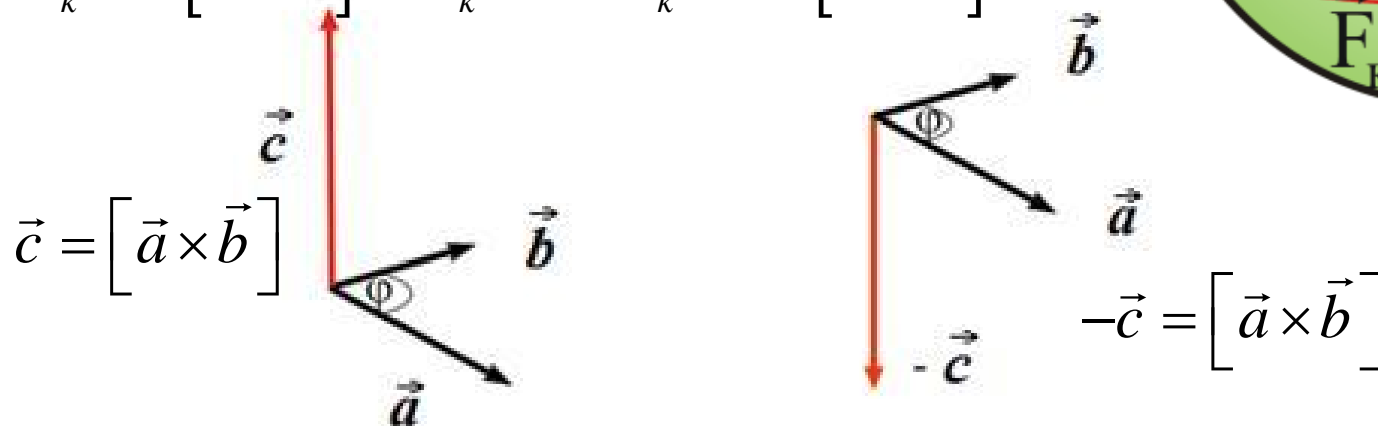
## Сила Коріоліса

Земна куля обертається **проти** годинникової стрілки, якщо дивитися на неї «зверху», на Північний полюс.

Сила Коріоліса, діє на тіло, що рухається уздовж меридіана в північній півкулі **вправо** і в південному - **вліво**.

Сила Коріоліса призводить до того, що у річок підмивається завжди **правий** берег в **північній** півкулі, і **лівий** - у **південній**.

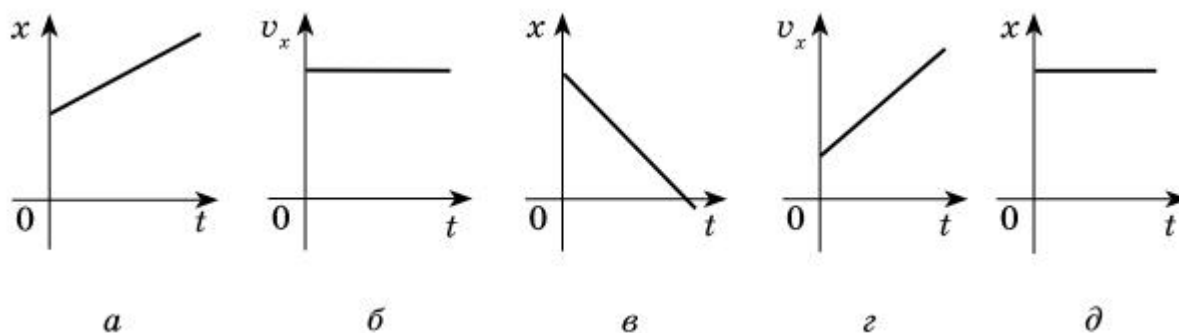
$$a_k = 2[\vec{\omega} \times \vec{v}] \quad F_k = -ma_k = -2[\vec{\omega} \times \vec{v}]$$



## Задачі

Рівняння залежності координат і швидкостей руху тіл від часу мають вигляд: а)  $x_1 = 5 - 2t$ ; б)  $x_2 = 10 + 2t - t^2$ ; в)  $v_{3x} = 25t$ ; г)  $v_{4x} = -20$ . У яких випадках рівнодійна сил, прикладених до тіла, дорівнює нулю?

На рисунку подано графіки залежності координати та швидкості руху тіл від часу. У яких випадках рівнодійна сил, прикладених до тіла, дорівнює нулю?



## Задачі

---

З яким прискоренням рухається вагонетка масою 500 кг під дією сили 125 Н?

Яку силу слід прикласти до тіла масою 200 г, щоб воно рухалось із прискоренням  $2,5 \text{ м/с}^2$ ?

Визначте масу м'яча, який під дією сили 50 мН набуває прискорення  $10 \text{ см/с}^2$ .

Певна сила надає порожньому візку масою 6 кг прискорення  $1,5 \text{ м/с}^2$ . Визначте масу вантажу, покладеного на візок, якщо відомо, що навантажений візок під дією тієї самої сили рухається з прискоренням  $0,3 \text{ м/с}^2$ .

Візок масою 15 кг гальмує, рухаючись рівноприскорено під дією сили 9 Н. Запишіть рівняння його руху, якщо відомо, що початкова координата візка  $x_0 = 16 \text{ м}$ , а початкова швидкість  $v_x = 8 \text{ м/с}$ .





## Задачі

---

Автомобіль масою 4 т, рухаючись зі швидкістю 18 км/год, починає гальмувати і зупиняється, пройшовши 50 м. Визначте силу гальмування.

Потяг масою 100 т, вирушаючи від станції, рухався рівноприскорено. Подолавши 800 м, він набув швидкості 72 км/год. Визначте силу, що надавала потягу прискорення.


Канат витримує навантаження 500 Н. Чи порветься канат, якщо: а) підвісити до цього канату вантаж масою 60 кг; б) тягнути його в протилежні боки, прикладаючи з кожного боку зусилля 260 Н?

З якою швидкістю проходить автомобіль верхню точку вигнутого мосту з радіусом кривизни 90 м, якщо пасажир автомобіля у цей момент невагомий?

Камінь кинуто вертикально вгору. У які моменти камінь перебуває у стані невагомості?

Визначте масу автомобіля, який під час проходження на швидкості 72 км/год вершини вигнутого мосту з радіусом кривизни 100 м має вагу 18 кН.

---



## Лекція 3

---

### Робота та енергія. Коливний рух

1. Робота
2. Кінетична енергія
3. Потужність
4. Консервативні сили і системи
5. Потенціальна енергія
6. Застосування законів збереження
7. Абсолютно пружний центральний удар
8. Абсолютно непружний удар
9. Вічні двигуни
10. Коливний рух
11. Гармонічні коливання
12. Параметри гармонічних коливань
13. Основне рівняння динаміки гармонічних коливань
14. Енергія гармонічних коливань
15. Математичний маятник



## Енергія і робота

---

**Енергія** — фізична величина, за допомогою якої можна кількісно охарактеризувати будь-який рух, тобто енергія - універсальна кількісна міра руху та взаємодії.

---

З різними формами руху матерії пов'язують різні форми енергії: механічну, теплову, електромагнітну, ядерну.

Зміна механічного руху тіла викликається силами, що діють на нього з боку інших тіл.

**Механічна енергія** характеризує відносний рух тіл та їх взаємодію між собою



## Механічна робота

Механічна робота характеризує зміну енергії тіл, які взаємодіють.

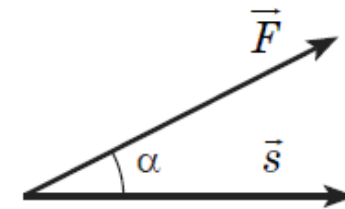
Механічна робота постійної сили — скалярна фізична величина, яка визначається добутком модуля вектора сили на модуль вектора переміщення і на косинус кута між цими векторами:

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

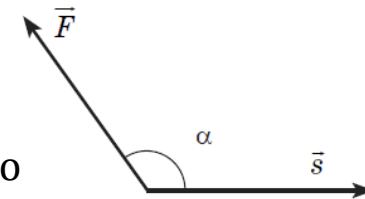
Робота, виконана силою, додатна, якщо кут  $\alpha$  між векторами сили і вектором переміщення менший за  $90^\circ$  (рис. а).

Якщо значення кута  $90^\circ < \alpha < 180^\circ$  робота сили від'ємна (рис. б), тобто робота сил, які перешкоджають рухові, від'ємна.

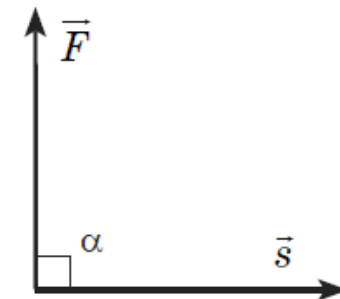
Якщо вектор сили перпендикулярний до вектора переміщення, то косинус кута  $\alpha$  дорівнює нулю і робота сили дорівнює нулю (рис. в).



а



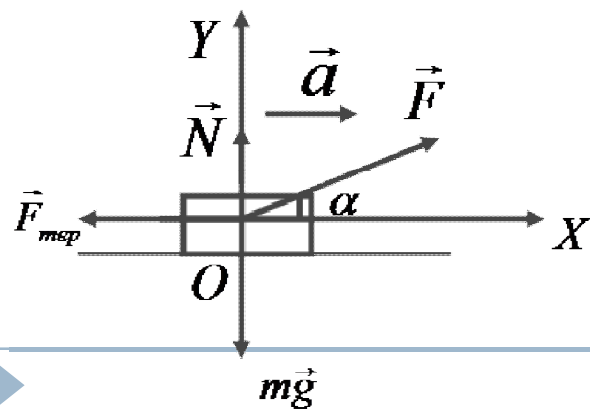
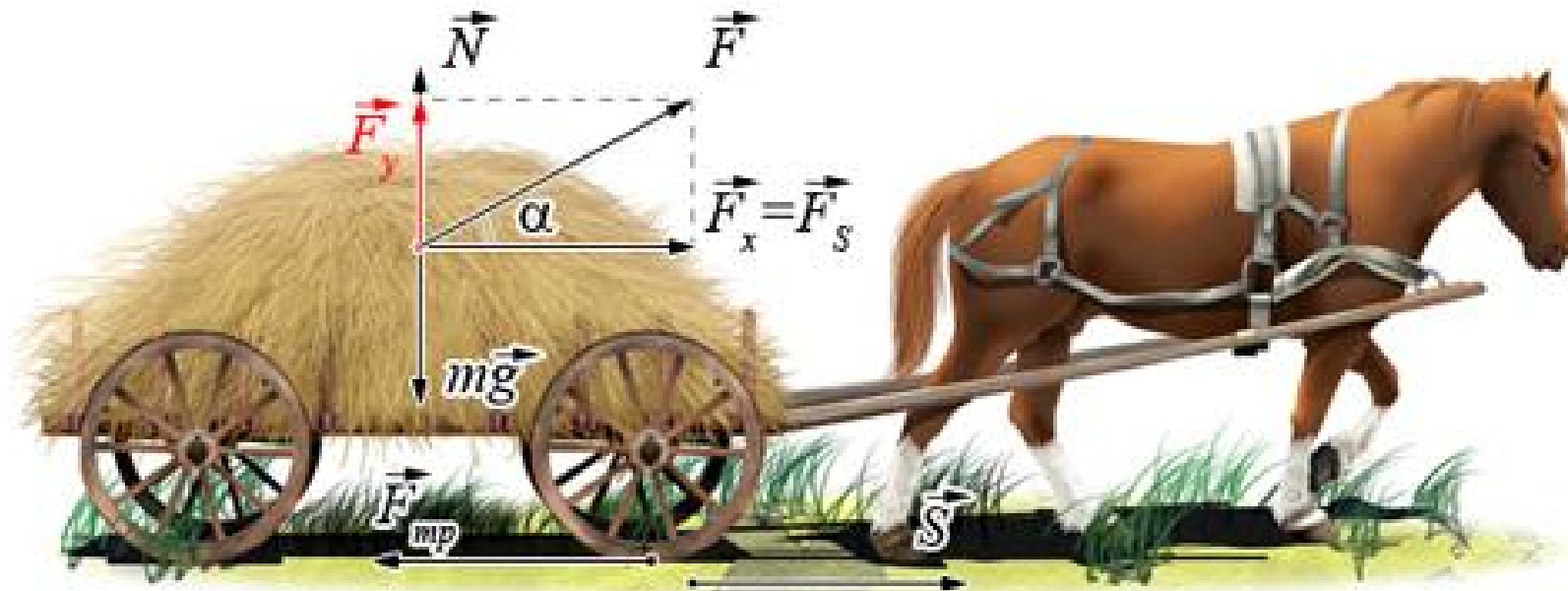
б



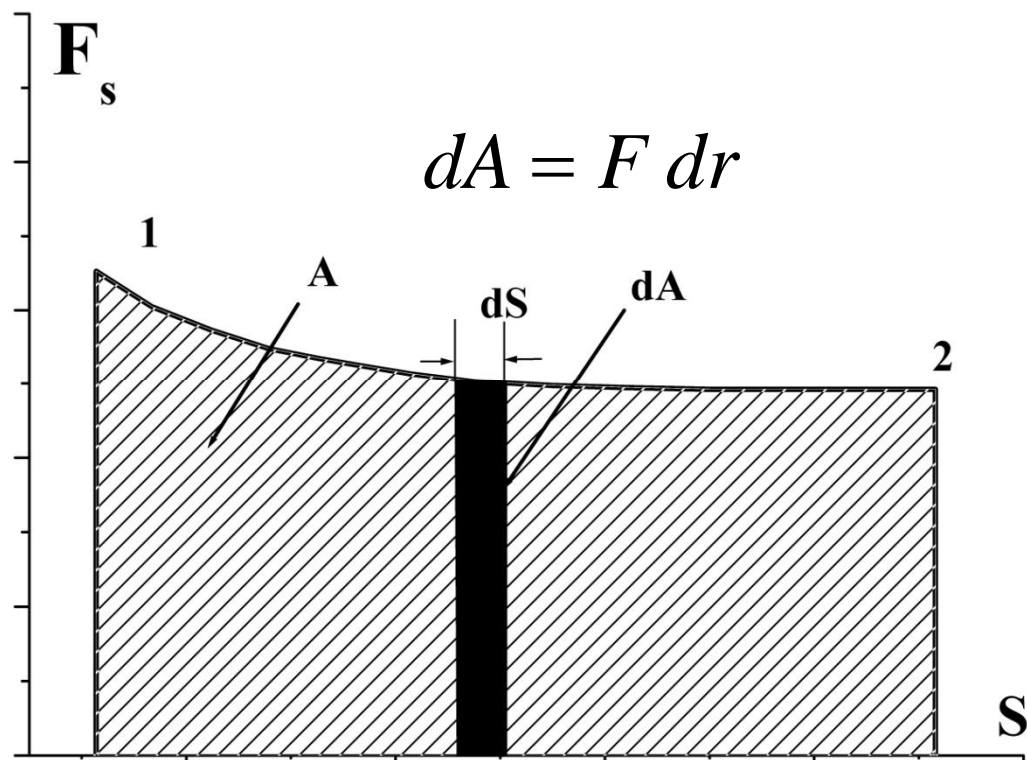
в

$$dA = F dr$$

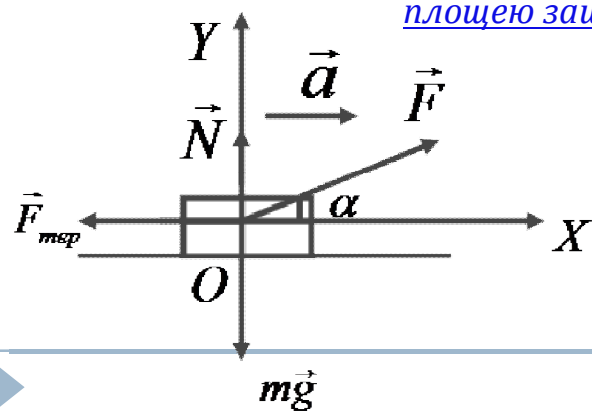
Елементарна робота (маленький шматочок)- її виконує сила на елементарному переміщенні



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



Якщо залежність  $F$  від  $S$  представлена графічно, то робота  $A$  визначається площею заштрихованої фігури (див. малюнок).



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

## Потужність

---

Швидкість виконання роботи характеризується **потужністю**.

Потужність машини або механізму дорівнює відношенню здійсненої роботи до проміжку часу, протягом якого вона виконувалася:

Одиниця потужності в СІ

ват (Вт):

1 Вт — це така потужність, за якої робота в 1 Дж здійснюється за 1 с:

$1 \text{ Вт} = 1 \text{ Дж/с}$ .

$$N = \frac{A}{t}$$

$$N = \frac{dA}{dt} \Rightarrow N = F \frac{dr}{dt} = Fv.$$



## Кінетична енергія

---

Кінетичною енергією називається частина механічної енергії, обумовлена рухом тіла.

Робота сили дорівнює зміні кінетичної енергії тіла:

$$A = \Delta E_k = E_2 - E_1$$

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

Кінетична енергія механічної системи ( $E_k$ ) – енергія механічного руху цієї системи.

Кінетична енергія залежить тільки від маси і швидкості тіла.


Кінетична енергія:

- (1) є функцією стану системи;
- (2) завжди додатня;
- (3) неоднакова в різних інерціальних системах відліку.

Сила, діючи на тіло в стані спокою і викликаючи його рух, виконує роботу, а енергія тіла, що рухається, зростає на величину витраченої роботи.

Одиниці вимірювання роботи – 1 Дж = 1 Н·1 м

---





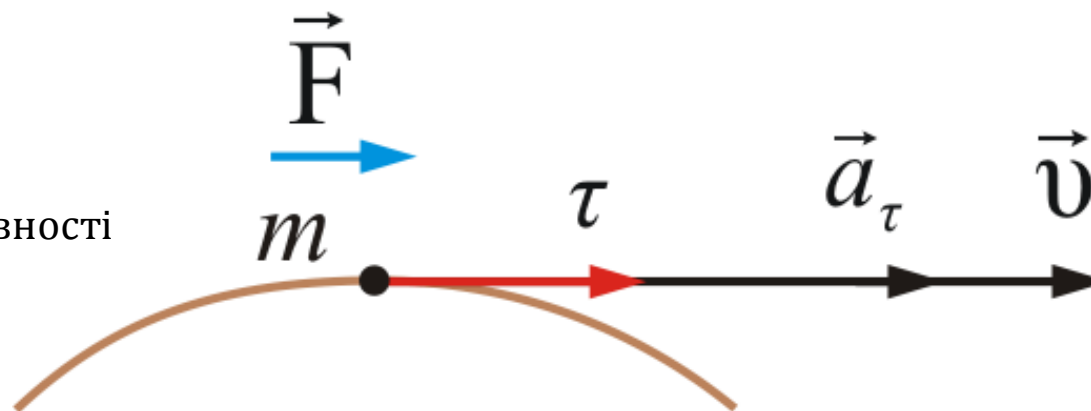
## Робота і кінетична енергія (трохи математики)

Рівняння руху тіла під дією зовнішньої сили  $\vec{F}$  має вигляд

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = \vec{F} \Rightarrow m \frac{dv}{dt} = F_\tau$$

Помножимо обидві частини цієї рівності на  $v dt = dr$ , отримаємо:

$$mv dv = F_\tau dr.$$



Ліва частина рівності, є повний диференціал деякої функції:  $mv dv = d\left(\frac{mv^2}{2}\right)$

$$d\left(\frac{mv^2}{2}\right) = F_\tau dr$$

Якщо система замкнута, то  $\vec{F}_{\text{зовніш}} = 0$ , тоді  $d\left(\frac{mv^2}{2}\right) = 0$ .

*Якщо повний диференціал деякої функції, яка описує поведінку системи дорівнює нулю, то ця функція може служити характеристикою стану даної системи.*

## Кінетична енергія

Функція стану системи, що визначається лише швидкістю її руху, називається кінетичною енергією

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

Кінетична енергія системи є функція стану руху цієї системи.

K - адитивна величина:

$$E_k = \sum_{i=1}^n \frac{m_i v_i^2}{2}$$

### *Зв'язок кінетичної енергії з роботою.*

Якщо постійна сила діє на тіло, то воно буде рухатися в напрямку сили.

Елементарна робота з переміщення тіла з точки 1 в точку 2

дорівнює добутку сили F на переміщення dr

$$dA = Fdr$$

$$A = \int_{1_1}^{2_2} Fdr = m \int_1^2 v dv = \frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2}.$$

$$A = \int_1^2 Fdr = K_2 - K_1.$$

*робота сили прикладеної до тіла чисельно дорівнює зміні кінетичної енергії цього тіла*

## Консервативні сили і системи

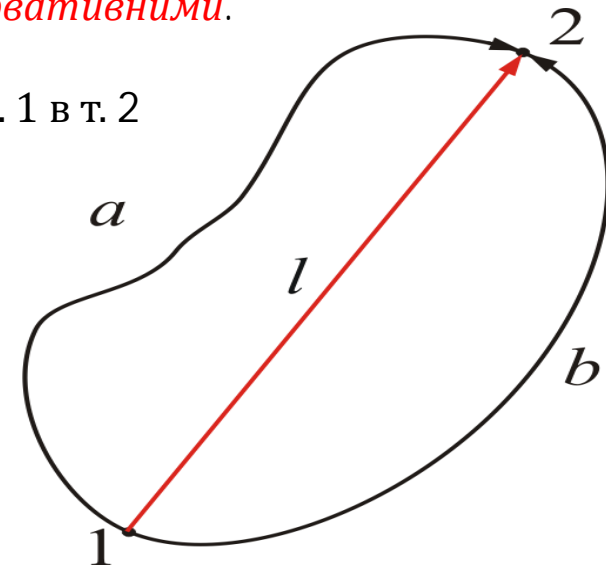
Сили, робота яких не залежить від шляху, по якому рухалося тіло, а залежить від початкового і кінцевого положення тіла називаються *консервативними*.

Нехай  $A$  - робота консервативних сил, з переміщення тіла з т. 1 в т. 2

$$A_{1a2} = A_{1b2} = A_{1l2} = A_{12}.$$

Зміна напрямку руху на протилежне - викликає зміну знака роботи консервативних сил. Звідси випливає, що *робота консервативних сил уздовж замкнутої кривої дорівнює нулю*:

$$\oint_s F dr = A_{12} + A_{21} = A_{12} - A_{12} = 0$$



## Потенціальна енергія

**Потенціальна енергія ( $E_n$ )** – механічна енергія системи тіл, яка визначається їх взаємним розташуванням і характером сил взаємодії між ними.

Потенціальна енергія:

(1) є функцією стану системи;

(2) залежить тільки від конфігурації системи і її положення по відношенню до зовнішніх тіл.

Приклади потенціальної енергії:

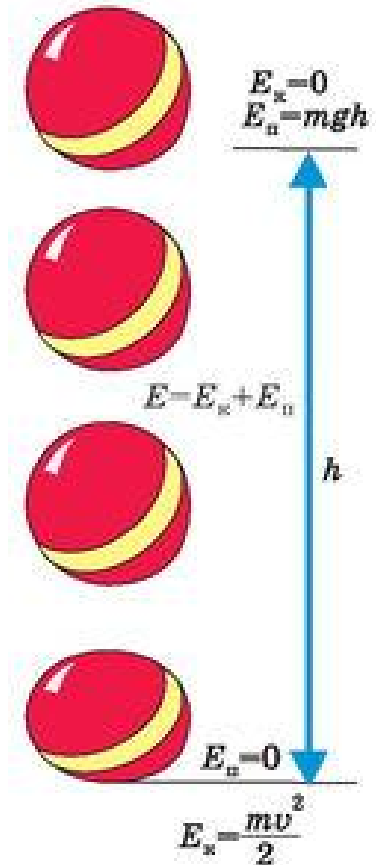
1) Потенціальна енергія тіла масою  $m$  на висоті  $H$ :

$$E_n = mgH$$

2) Потенціальна енергія пружини, розтягнутої на довжину  $x$ :

$$E_n = \frac{kx^2}{2}$$

Одиниця кінетичної і потенціальної енергії - джоуль (Дж).



## Потенціальна енергія

---

Якщо на систему матеріальних тіл діють консервативні сили, то можна ввести поняття *потенціальної енергії*.

Робота, що здійснюється консервативними силами при зміні конфігурації системи, тобто при зміні положення тіл відносно системи відліку, не залежить від того, як було здійснено цю зміну.

Робота визначається тільки початковою та кінцевою конфігураціями системи:

$$A_{12} = E_{i1} - E_{i2}$$

*Потенціальна енергія*  $U(x, y, z)$  - функція стану системи, що залежить тільки від координат всіх тіл системи в поле консервативних сил.


$E_k$  - визначається швидкістю руху тіл системи,

$E_n$  - їх взаємним розташуванням.

Робота консервативних сил дорівнює зменшенню потенціальної енергії:

$$dA = -dU.$$

---



## Потенціальна енергія (трохи математики)

---

### Зв'язок між потенціальною енергією і силою

Простір, в якому діють консервативні сили, називається *потенціальним полем*.

Кожній точці потенціального поля відповідає деяке значення сили  $\vec{F}$  діє на тіло, і деяке значення *потенціальної енергії*  $U$ .

$$\vec{F} = -\left(\frac{\partial U}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial U}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial U}{\partial z}\mathbf{k}\right)$$
$$\mathit{grad} = \frac{\partial}{\partial x}\mathbf{i} + \frac{\partial}{\partial y}\mathbf{j} + \frac{\partial}{\partial z}\mathbf{k} \quad \vec{F} = -\mathit{grad}U$$

*Гرادієнт* - вектор, що показує напрямок найшвидшого збільшення функції.

У формулі стоїть знак «мінус» -

*сила напрямлена в бік зменшення потенціальної енергії*.

---



## Закон збереження енергії

---

**Повна механічна енергія системи** –

енергія механічного руху і взаємодії, рівна сумі кінетичної і потенціальної енергій:  $E = E_K + E_{\Pi}$

**Закон збереження енергії:** в системі тіл, між якими діють тільки консервативні сили повна механічна енергія зберігається, тобто не змінюється з часом:

$$E = E_K + E_{\Pi} = const$$

Закон збереження енергії фундаментальний закон природи. Він є наслідком однорідності часу – інваріантності (незалежності) фізичних законів від вибору початку відліку часу.

**Консервативні системи** – механічні системи, на компоненти (тіла) яких діють тільки консервативні сили (внутрішні і зовнішні). В консервативних системах повна механічна енергія залишається сталою.

Можуть лише відбуватися перетворення кінетичної енергії в потенційну і навпаки в еквівалентних кількостях, так що повна енергія залишається незмінною.

**Дисипативні системи** – системи, в яких механічна енергія поступово зменшується за рахунок перетворення в інші (немеханічні) форми енергії. В системі, в якій діють також неконсервативні сили, наприклад сили тертя, повна механічна енергія системи не зберігається. Проте при «зникненні» механічної енергії завжди виникає еквівалентна кількість енергії іншого вигляду.

**Закон збереження енергії:** енергія не зникає і не з'являється, а лише перетворюється з одного вигляду в інший. В цьому полягає фізична сутність закону збереження і перетворення енергії – **матерія та її рух незнищенні.**

---



## Закон збереження імпульсу

---


**Імпульс** (кількість руху) - векторна величина  $\vec{p}$   
рівна добутку маси  $m$  матеріальної точки на її швидкість  $\vec{v}$   $\vec{p} = m\vec{v}$

імпульс має напрямок швидкості :

Імпульс замкнутої системи не змінюється з часом: 
$$\vec{p} = \sum_{i=1}^n m_i \vec{v}_i$$

Закон збереження імпульсу є наслідком однорідності простору: при паралельному переносі в просторі замкнутої системи тіл як єдиного цілого її фізичні властивості не змінюються (не залежать від вибору положення початку координат інерціальної системи відліку).

---

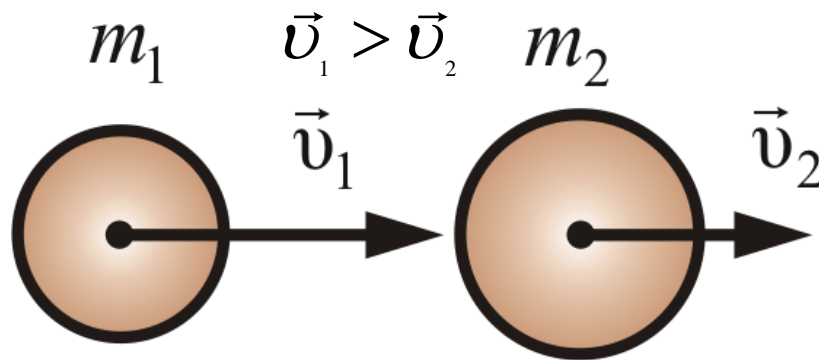




## Застосування законів збереження

### Абсолютно пружний центральний удар

Застосуємо закон збереження механічної енергії для розрахунку швидкості тіл при *абсолютно пружному ударі* - це такий удар, при якому не відбувається перетворення механічної енергії в інші види енергії.



Дві кулі з масами  $m_1$  і  $m_2$  рухаються з швидкостями  $\vec{v}_1$  та  $\vec{v}_2$ .  
Систему замкнута та консервативна.

Нехай швидкості куль після зіткнення  
 $\vec{v}'_1$  та  $\vec{v}'_2$

Використаємо закон збереження механічної енергії і закон збереження імпульсу

$$\begin{cases} \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} = \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2} \\ m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v_1' + m_2 v_2' \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v_1' = \frac{2m_2 v_2 + (m_1 - m_2)v_1}{m_1 + m_2}; \\ v_2' = \frac{2m_1 v_1 + (m_2 - m_1)v_2}{m_1 + m_2} \end{cases}$$

*швидкості куль після абсолютно пружного удару не можуть бути однаковими за величиною і за напрямком.*

## Застосування законів збереження

Абсолютно пружний удар кулі об нерухому масивну стінку.

Стінку можна розглядати як нерухому  $v_2 = 0$  кулю з масою  $m_2 \rightarrow \infty$   
Розділимо чисельник і знаменник на  $m_2$  і знехтуємо  $m_1 / m_2$ , тоді

$$v'_1 = \frac{2m_2 v_2 + (m_1 - m_2)v_1}{m_1 + m_2};$$

$\Downarrow$

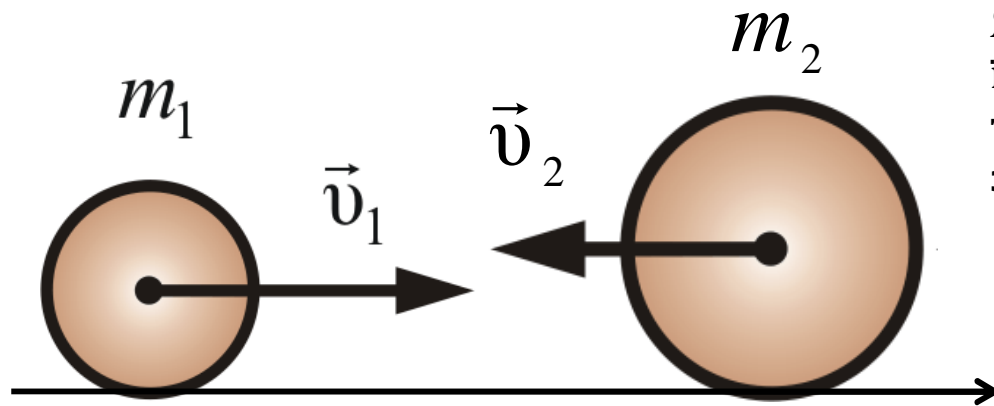
$$v'_1 = \frac{2v_2 + \left(\frac{m_1}{m_2} - 1\right)v_1}{\frac{m_1}{m_2} + 1} = \frac{2v_2 - v_1}{1},$$

$$v_2 = 0 \implies v'_1 = -v_1 \quad \text{куля після удару рухатиметься з тією ж швидкістю в протилежному напрямку}$$

## Застосування законів збереження

### Абсолютно непружний удар-

зіткнення двох тіл, в результаті якого тіла об'єднуються і рухаються далі, як єдине ціле.  
Модель : зікуль з пластиліну, що рухаються назустріч одна одній.



Якщо маси куль  $m_1$  і  $m_2$ ,  
їх швидкості до удару  $v_1$  і  $v_2$   
то використовуючи закон  
збереження імпульсу, можна записати

$$m_1 v_1 - m_2 v_2 = (m_1 + m_2) v$$
$$v = \frac{m_1 v_1 - m_2 v_2}{m_1 + m_2}.$$

$\vec{v}$  швидкість руху куль після непружного удару

*Якщо кулі рухалися назустріч один одному, то вони разом будуть продовжувати рухатися в ту сторону, в яку рухався куля, що володіє більшим імпульсом.*

*Якщо маси та швидкості куль рівні, то  $v = \frac{v_1 - v_2}{2} = 0$*

## Застосування законів збереження

---

### Абсолютно непружний удар

Внаслідок деформації відбувається «втрата» кінетичної енергії, в результаті переходу в теплову енергію (дисипація енергії).

Цю втрату можна визначити по різниці кінетичних енергій до і після удару:

$$\Delta E_k = \left( \frac{m_1 v_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2^2}{2} \right) - \frac{(m_1 + m_2) v^2}{2} \Rightarrow \Delta E_k = \frac{m_1 m_2}{2(m_1 + m_2)} (v_1 - v_2)^2.$$

---

Якщо друге тіло було спочатку нерухомим  $v_2 = 0$

$$v = \frac{m_1 v_1}{m_1 + m_2}, \quad \Delta E_k = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \frac{m_1 v_1^2}{2}.$$

1. *маса нерухомого тіла дуже велика  $m_2 \gg m_1$*

*майже вся кінетична енергія при ударі переходить в інші форми енергії.*

2. *маси взаємодіючих тіл близькі  $m_2 \approx m_1$ ,  $v \approx v_1$*

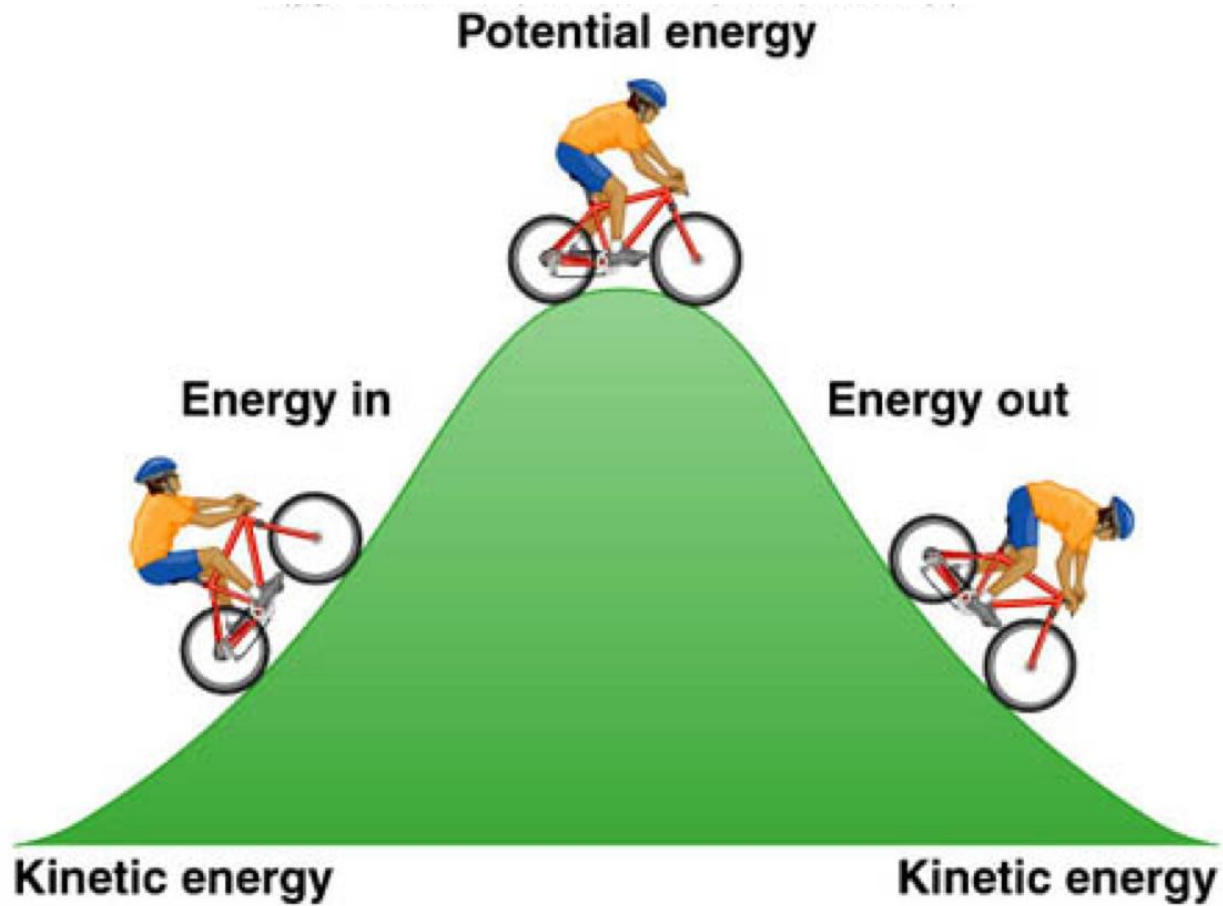
*практично вся енергія витрачається на переміщення, а не на залишкову деформацію (наприклад, молоток - цвях)*

---



## Застосування законів збереження

---

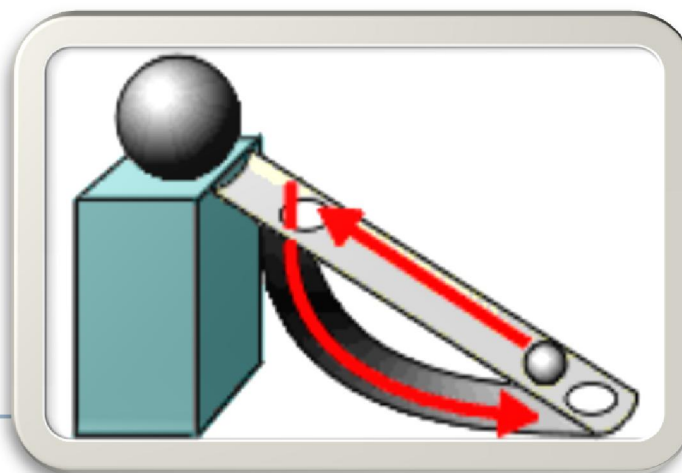
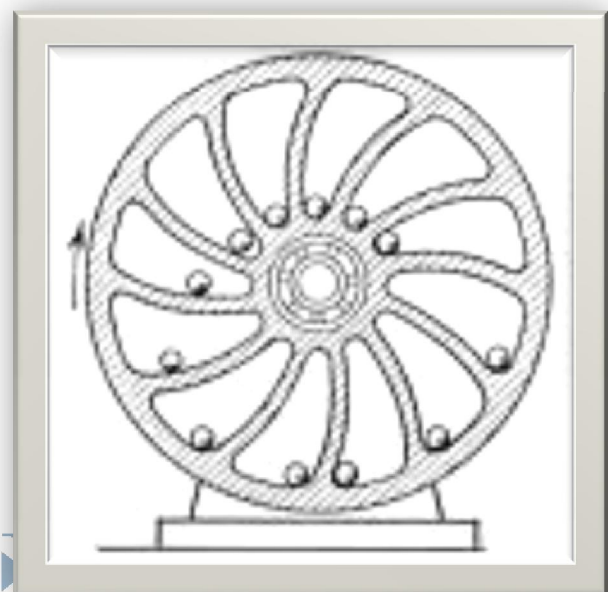
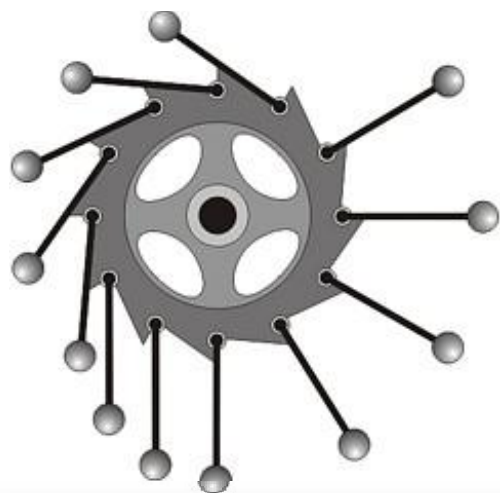


## Застосування законів збереження

---



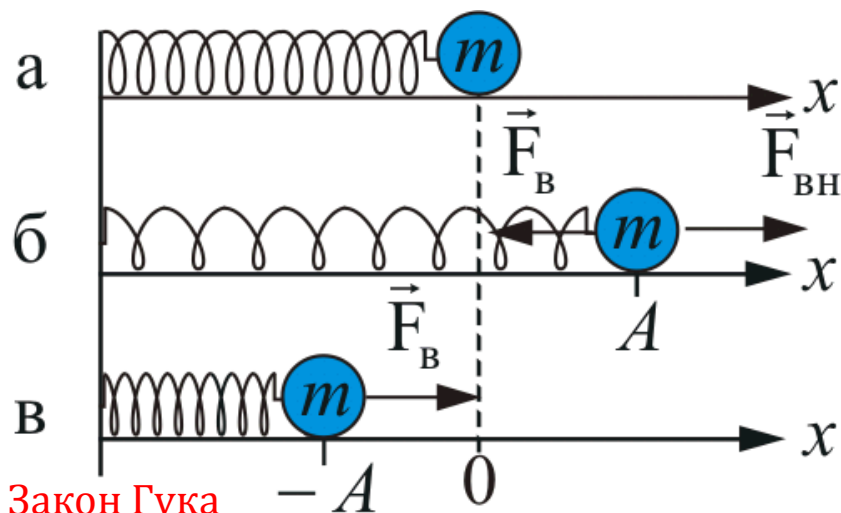
## Вічні двигуни



## Коливний рух

*Коливальним рухом* (або *коливанням*) називаються процеси, що повторюються в часі, тобто є періодичними.

Різні коливальні процеси описуються однаковими *характеристиками* і *рівняннями*.



**Закон Гука**

$$F = -kx$$

$x = 0$  - положення рівноваги;

$F_{\text{вн}}$  - зовнішня розтягуюча сила;

$F_{\text{в}}$  - сила пружності;

$A$  - амплітуда коливань.

$k$  - жорсткістю пружини.

Коливання називаються *періодичними*, якщо значення фізичних величин, що змінюються в процесі коливань, повторюються через рівні проміжки часу.

Найпростішим типом періодичних коливань є *гармонічні коливання*.

Коливальна система, в якій сила, що повертає систему в стан рівноваги, прямо пропорційна зсуву, взятому з протилежним знаком (наприклад,  $F = -kx$ ), здійснює гармонічні коливання.

Таку систему називають *гармонічним осцилятором*.



## Гармонічні коливання

Коливання, що зустрічаються в природі і техніці, часто близькі до *гармонічних*;

Різні періодичні процеси можна представити як *суму гармонічних коливань*.

Періодичний процес можна описати рівнянням:  $f(t) = f(t + nT)$

Коливання називаються **гармонічними**, якщо зміна з часом величини, що характеризує стан системи описується законом *сінуса* чи *косінуса*

$$x = A \cos \phi$$
$$x = A \sin \phi$$

### Параметри гармонічних коливань

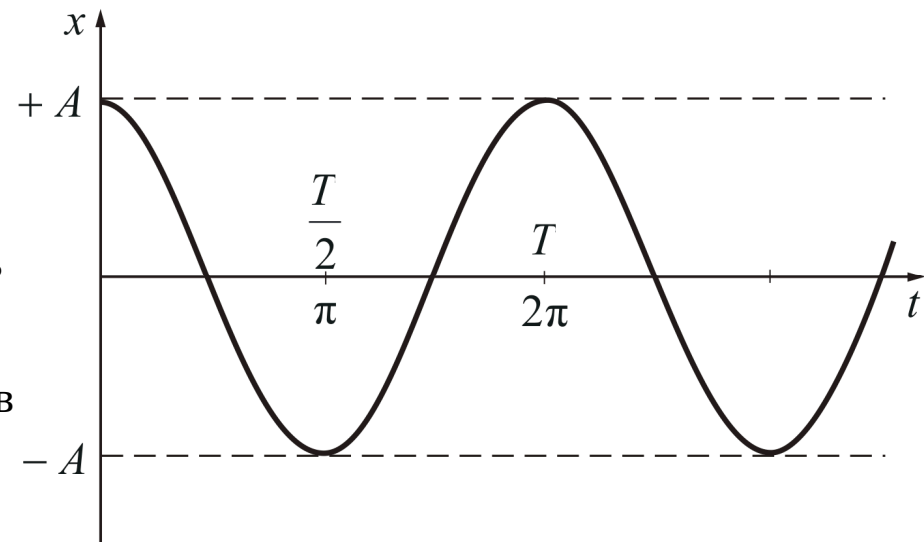
Відстань тягарця від положення рівноваги до точки, в якій він знаходиться - *зміщення  $x$* .

Максимальне зміщення - найбільша відстань від положення рівноваги - *амплітуда  $A$* .

$\phi = \omega_0 t + \phi_0$  - *фаза коливання* визначає *зсув  $x$*  в даний момент часу.

$\phi_0$  початкова фаза коливання.

*Фаза вимірюється в радіанах.*



*сінус і косінус змінюються в межах від +1 до -1, тому  $x$  може приймати значення від  $+A$  до  $-A$*

### Параметри гармонічних коливань

*Частота коливань  $\nu$*  – число коливань за 1 секунду.

Частоту вимірюють у герцах (Гц):

1 Гц = 1 колив. за секунду.

$$\nu = \frac{1}{T}$$

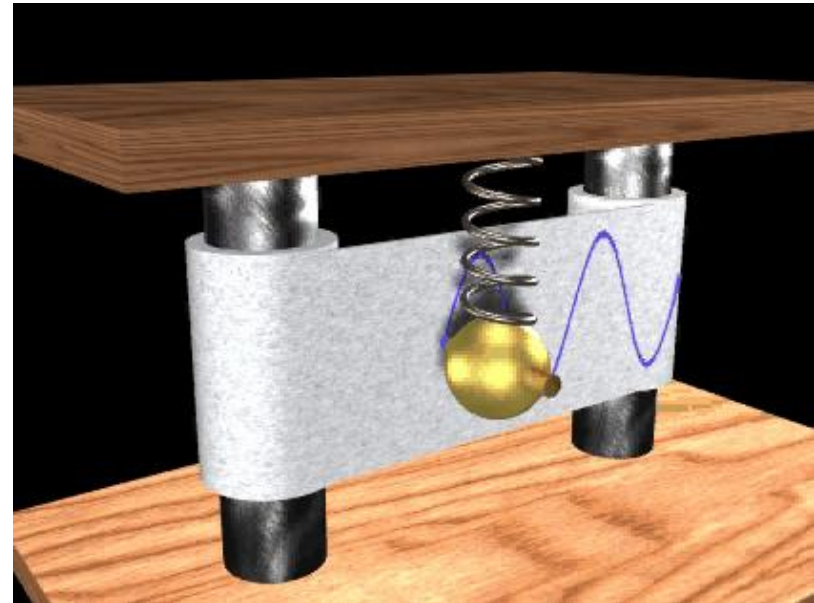
*T - період коливань* - мінімальний проміжок часу, після закінчення якого повторюються значення всіх фізичних величин, що характеризують коливання

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{1}{\nu}$$

*$\omega$  - циклічна (кругова) частота* - число повних коливань за  $2\pi$  секунд.

$$\omega_0 = 2\pi\nu$$

*Фаза  $\varphi$*  не впливає на форму кривої  $x(t)$ , а визначає її положення в деякий довільний момент часу  $t$ .

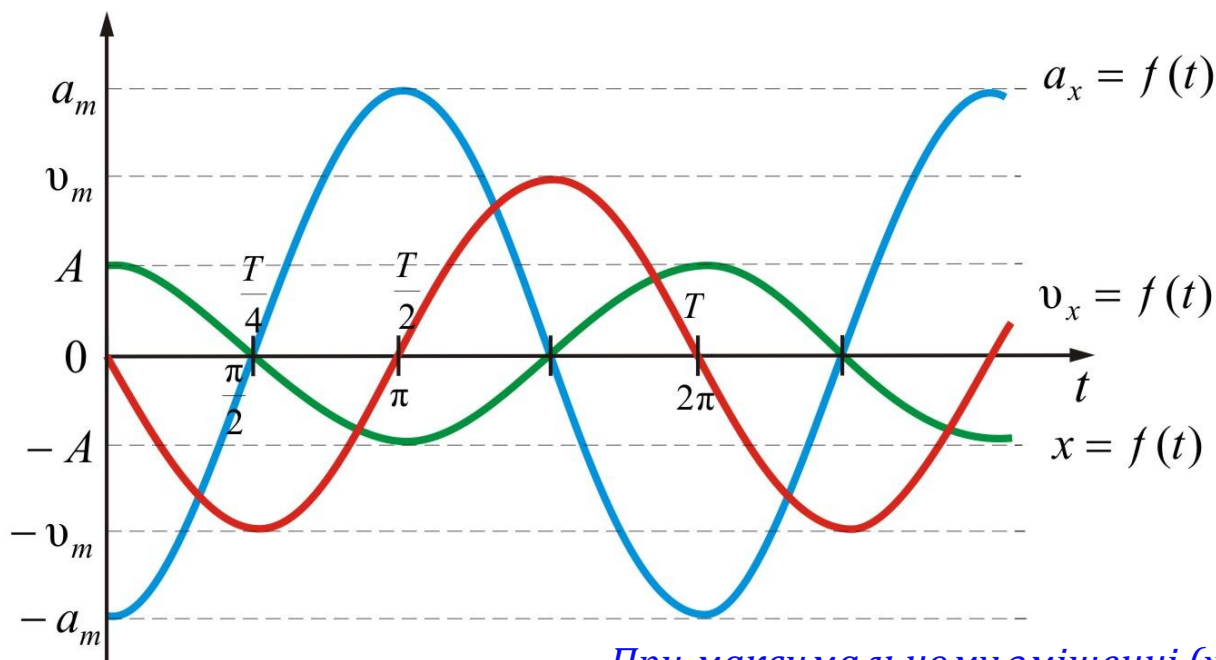


## Гармонічні коливання

Зсув описується рівнянням  $x = A \cos(\omega_0 t + \phi)$

Швидкість  $v_x = \frac{dx}{dt} = -\omega_0 A \sin(\omega_0 t + \phi_0)$        $\omega_0 A = v_m$  - амплітуда швидкості;

Прискорення  $a_x = \frac{dv_x}{dt} = -\omega_0^2 A \cos(\omega_0 t + \phi_0)$        $\omega_0^2 A = a_m$  - амплітуда прискорення;



$$\begin{cases} x = A \cos(\omega_0 t + \phi) \\ v_x = -v_m \sin(\omega_0 t + \phi) \\ a_x = -a_m \cos(\omega_0 t + \phi) \end{cases}$$

Швидкість коливань тіла  
максимальна і дорівнює  
амплітуді швидкості в  
момент проходження через  
положення рівноваги

При максимальному зміщенні ( $x=A$ ) швидкість дорівнює нулю.

Основне рівняння динаміки гармонічних коливань

$$F = ma \quad a_x = \frac{dv_x}{dt} = -\omega_0^2 A \cos(\omega_0 t + \phi_0)$$

$$F_x = -m\omega_0^2 A \cos(\omega_0 t + \phi) = -m\omega_0^2 x$$

$$F_x = -m\omega_0^2 x$$

*Сила F пропорційна x і завжди напрямлена до положення рівноваги.  
Період і фаза сили збігаються з періодом і фазою прискорення.*

$$F_x = -kx,$$

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}$$

*Період гармонічних коливань тягарця на пружині*

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} \quad \omega_0^2 = \frac{k}{m} \Rightarrow \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{k}{m}} \Rightarrow T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

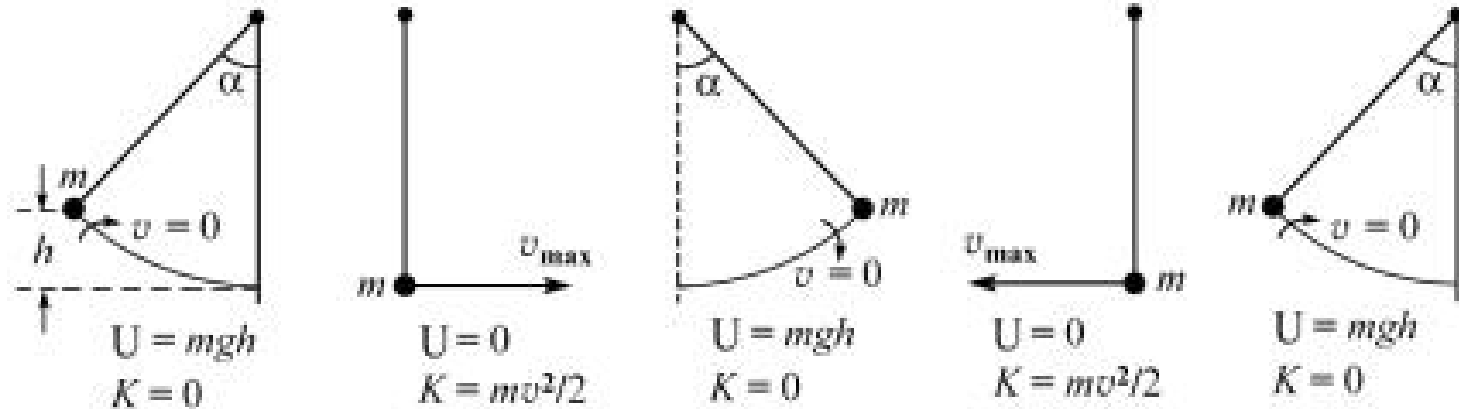
$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -kx \Rightarrow \frac{d^2 x}{dt^2} + \omega_0^2 x = 0 \Rightarrow x = A \cos(\omega_0 t + \phi)$$

*Розв'язок рівняння - вираз виду*

*Основне рівняння динаміки гармонічних коливань*

## Гармонічні коливання

### Енергія гармонічних коливань



### Кінетична енергія

$$K = \frac{mv^2}{2} = \frac{1}{2}m\omega_0^2 A^2 \sin^2(\omega_0 t + \phi)$$

### Потенціальна енергія

$$U = \frac{kx^2}{2} = \frac{1}{2}kA^2 \cos^2(\omega_0 t + \phi)$$

Повна енергія  $E = U + K = \frac{1}{2}m\omega_0^2 A^2$

Повна механічна енергія тіла, що гармонічно коливається, прямо пропорційна квадрату амплітуди коливання

При коливаннях під дією потенційних (консервативних) сил, відбувається перехід кінетичної енергії в потенціальну і навпаки, але їх сума в будь-який момент часу постійна.

---

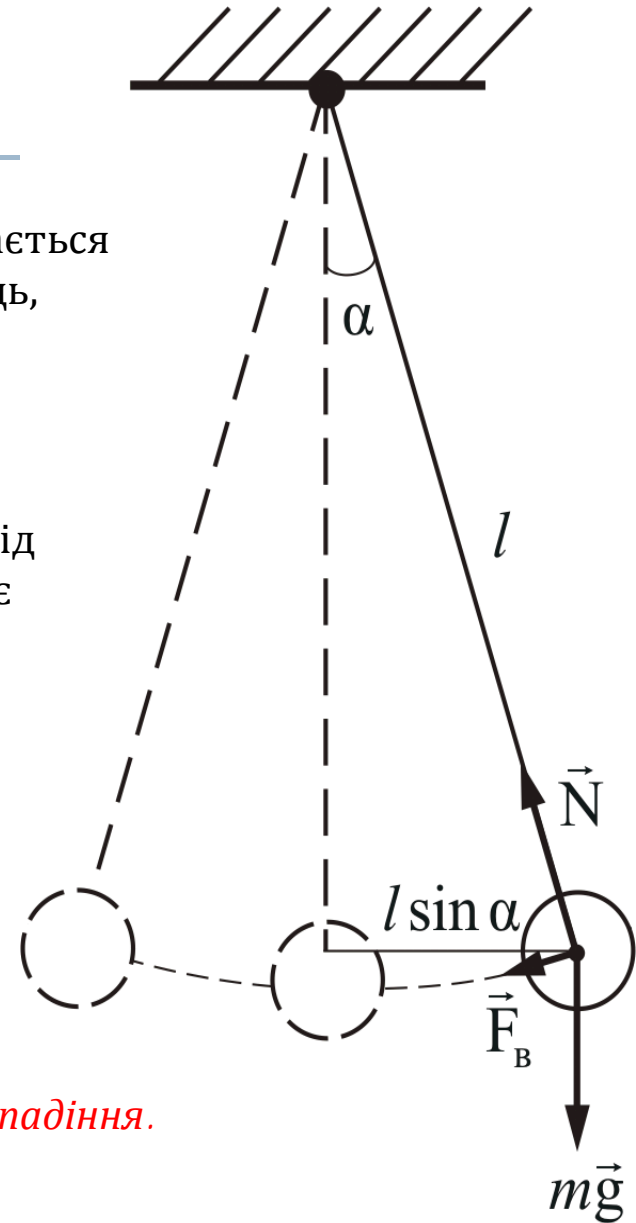
**Математичний маятник** – ідеалізована система, що складається з невагомої, нерозтяжної нитки, на яку підвішений тягарець, маса якого зосереджена в одній точці (кулька на довгій тонкій нитці).

При відхиленні маятника від вертикалі виникає відмінна від нуля рівнодійна сил тяжіння та натягу нитки, яка повертає маятник в стан рівноваги.

Проекція цієї сили  $F = -mg \sin \alpha$

Період коливань математичного маятника  $T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$

Період коливань математичного маятника залежить тільки від довжини підвісу і прискорення вільного падіння.



М'яч масою 200 г, який мав швидкість 1,5 м/с, був спійманий на льоту. На скільки змінився імпульс м'яча?


З нерухомого човна, маса якого 120 кг, стрибає хлопчик масою 60 кг зі швидкістю 2 м/с. Визначте швидкість руху човна після того, як з нього стрибнув хлопчик.

Хлопчик рівномірно тягне санчата з вантажем по горизонтальній дорозі за мотузку, прикладаючи силу 24 Н під кутом  $45^\circ$  до горизонту. Яку роботу виконав хлопчик, перемістивши санчата на 15 м?

Автомобіль масою 1,2 т рухається з прискоренням  $1,5 \text{ м/с}^2$ . Сила опору дорівнює 500 Н. Який шлях подолав автомобіль, якщо його двигуни виконали роботу 230 кДж?

Визначте прискорення, з яким падало тіло масою 4 кг з висоти 30 м, якщо сила опору виконала за час падіння роботу 42 Дж. Прискорення вільного падіння  $g \approx 9,8 \text{ м/с}^2$ .

---



## Задачі

---

На якій висоті над поверхнею землі м'яч масою 350 г має потенціальну енергію 14 Дж?

Яку кінетичну енергію має тіло масою 2 кг, що рухається зі швидкістю 3 м/с?

Візок масою 9 кг рухається під дією сили 60 Н. Визначте кінетичну енергію руху візка через 3 с від початку його руху.

Визначте потенціальну та кінетичну енергії тіла масою 100 г, кинутого вертикально вгору зі швидкістю 15 м/с, через 2 с від початку руху.





## Базові поняття

---

*Молекулярна фізика і термодинаміка* - розділи фізики, в яких вивчається залежність властивостей тіл від їхньої будови, взаємодії між частинками, з яких утворені тіла і характер руху цих частинок.

Для дослідження фізичних властивостей макроскопічних систем, пов'язаних з величезним числом атомів, що містяться в них, і молекул, застосовують *два методи: статистичний* (або молекулярно-кінетичний) і *термодинамічний*.

---

*Статистичний* - метод дослідження систем, що складаються з великого числа частинок який використовує статистичні закономірності і усереднені значення фізичних величин, що характеризують всю систему.

Статистичний метод лежить в основі *молекулярної фізики* – розділу фізики, що вивчає будову і властивості речовини виходячи з *молекулярно-кінетичних уявлень*, що ґрунтуються на тому, що всі тіла складаються з атомів, які безперервно хаотично рухаються.

---

*Термодинамічний* – метод опису системи з великого числа частинок використовуючи величини, що характеризують систему в цілому (*тиск, об'єм, температура*) при перетвореннях енергії, що відбуваються в системі, не враховуючи її внутрішньої будови.

Термодинамічний метод лежить в основі *термодинаміки* – розділу фізики, що *вивчає загальні властивості макроскопічних систем, що знаходяться в стані термодинамічної рівноваги, і процеси переходу між цими станами*

---



*Термодинамічна система* – сукупність макроскопічних тіл, що взаємодіють і обмінюються енергією як між собою, так і з іншими тілами (зовнішнім середовищем).

Термодинамічні системи, що не обмінюються із зовнішнім середовищем ні енергією, ні речовиною, називаються *замкнутими*.

*Завдання термодинамічного методу* – визначення *стану термодинамічної системи*.

*Стан системи* задається термодинамічними параметрами (*параметрами стану*) – сукупністю фізичних величин, що характеризують властивості термодинамічної системи.

*Параметри стану* - температура, тиск і об'єм.

Параметри стану системи можуть змінюватися.


Будь-яка зміна в термодинамічній системі, пов'язана із зміною хоча б одного з її термодинамічних параметрів, називається *термодинамічним процесом*.

Якщо для даної системи зовнішні умови не змінюються і стан системи з часом не змінюється, то ця система знаходиться в *термодинамічній рівновазі*.

*Функція стану системи* - параметр, що має певне значення для кожного рівноважного стану.

*Рівноважна система* - система, параметри стану якої однакові у всіх точках системи і не змінюються з часом (при незмінних зовнішніх умовах).

---



*Процес* - перехід з одного рівноважного стану в інший.

*Релаксація* - повернення системи в рівноважний стан.

*Час переходу* - час релаксації.


*Якщо рівновага встановилася, то система самовільно не зможе вийти з нього.*

*Наприклад*, якщо опустити гарячий камінь в холодну воду, то, через деякий час настане рівноважний стан: температури води і каменю вирівняються.

Зворотний процес неможливий - температура каменю самовільно не збільшиться.

---

### *Ідеальний газ*

- 1) Радіус частинок ідеального газу набагато менший середньої відстані між ними
  - 2) Зіткнення молекул між собою і зі стінками посудини - абсолютно пружні (виконуються закони збереження енергії та імпульсу)
  - 3) Частинки не притягуються і не відштовіхуються між собою, а їх зіткнення між собою чи з стінками посудини є випадковими.
- 
- 

## Вимірювання кількості речовини

**Атомна одиниця маси** (а.о.м.) - одиниця маси, що дорівнює 1/12 маси ізотопу вуглецю  $C^{12}$

$$m_{i\ddot{a}} = (1/12)m_C = 1,66 \cdot 10^{-27} \text{ ê\~{a}}$$

**Атомна маса хімічного елемента** (атомний вага)  $A$  - відношення маси атома цього елемента  $m_A$  до 1/12 маси ізотопу вуглецю  $C^{12}$

$$A = \frac{m_A(\text{à\~{a}\~{a} \text{ à}\ddot{o} \text{ à}\ddot{e}\text{à}\text{à}\text{à} )}{m_{i\ddot{a}}(1/12 \text{ à\~{a}\~{a} \text{ à}\ddot{o} \text{ à}\ddot{e}\text{à}\text{à} )}$$

(*атомна маса - безрозмірна величина*).

**Молекулярна маса**- маса одного моля  $\mu(\text{ê\~{a}/\text{î}\ddot{e}\ddot{u}})$

**Моль** - кількість будь-якої речовини, що знаходиться в газоподібному, рідкому або твердому стані і містить *число Авогадро* елементів (частинок)  $N_A = 6,022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{î}\ddot{e}\ddot{u}}$

*Кількість речовини*  $\nu(\text{î}\ddot{e}\ddot{u}) = \frac{m(\text{ê\~{a}})}{\mu(\text{ê\~{a}/\text{î}\ddot{e}\ddot{u}})} = \frac{N}{N_A(1/\text{î}\ddot{e}\ddot{u})}$

**Маса атому**- відношення молярної маси до числа атомів в 1 молі

$$m_0(\text{ê\~{a}}) = \frac{\mu(\text{ê\~{a}/\text{î}\ddot{e}\ddot{u}})}{N_A(1/\text{î}\ddot{e}\ddot{u})}$$



Газ або рідина діють з деякою силою на будь-яку поверхню, що обмежує їх.

Ця сила діє по нормалі до поверхні.

Тиск на поверхню визначається як :

$$P = \frac{\Delta F}{\Delta S}$$

де  $\Delta F$  - сила, що діє на поверхню площею  $\Delta S$ .

*Одиниці вимірювання*  
1 Па (паскаль) - 1 Ньютон/1 м<sup>2</sup>

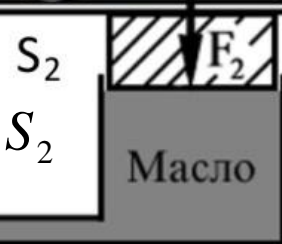
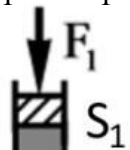
*Тиск газу* - наслідок зіткнення молекул зі стінками посудини

**Закон Паскаля:**

якщо до поверхні, що обмежує газ або рідину, прикласти силу, то тиск однаково передається будь-якій частині цієї рідини чи газу .

*Гідравлічний домкрат*

$$P_1 = F_1 / S_1$$



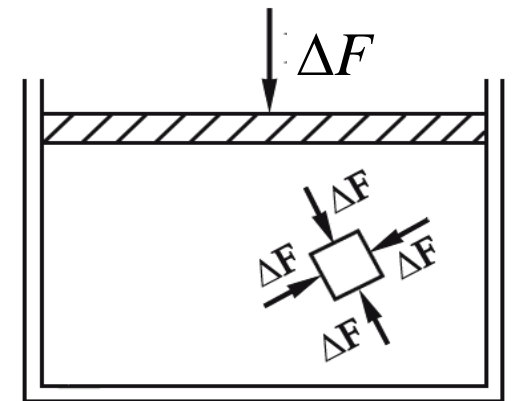
$$P_2 = F_2 / S_2$$

Масло

$$P_1 = P_2$$

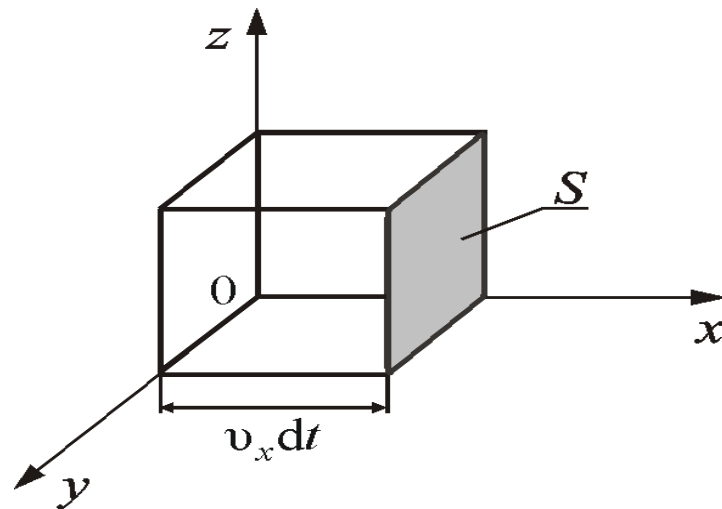
$$\frac{F_1}{S_1} = \frac{F_2}{S_2}$$

$$F_1 = F_2 (S_1 / S_2) = 0,01 F_2.$$



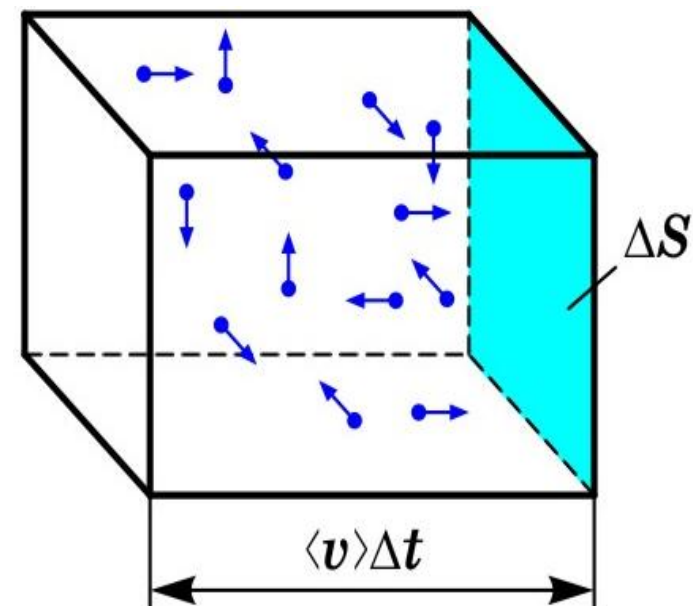
## Тиск газу

Обчислимо тиск, який чиниться газом на одну зі стінок посудини.



Концентрація - число частинок в одиниці об'єму

$$n = \frac{N}{V}$$



Позначимо:

$n$  - концентрація молекул в посудині;

$m_0$  - маса однієї молекули,  $v_x$  - проекція швидкості

Кількість молекул в посудині  $n v_x \cdot dt \cdot S$

Рух молекул в напрямку всіх осей координат є рівномірним, тому вздовж однієї осі рухається в обох напрямках  $1/3$  всіх молекул. До однієї з стінок, площею  $S=1$  підлітає за одиницю часу  $(1/6)$  молекул,

## Тиск газу

Кожна молекула має імпульсом  $m_0 v_x$ .  
 при абсолютно-пружному ударі стінка отримує  
 імпульс  $2m_0 v_x$ .  
 За час  $dt$  об стінку площею  $S$  встигне вдаритися  
 число  $N$  молекул, що міститься в об'ємі  $V$ :

$$N = nSv_x dt.$$

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F} \Rightarrow F \Delta t = \Delta p$$

$$F \Delta t = \frac{1}{6} 2m_0 v_x N = \frac{1}{3} nm_0 v_x^2 \Delta t S$$

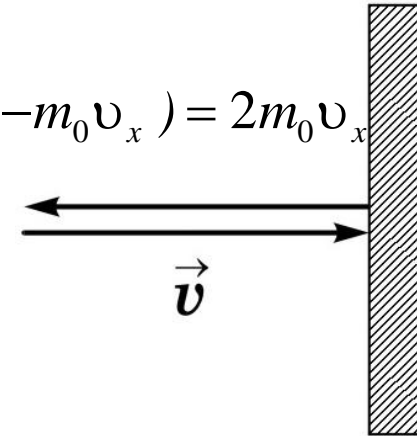
$$p = \frac{F}{S} = \frac{1}{3} nm_0 v_x^2$$

$v_x^2$  - середньоквадратична швидкість

$$p = \frac{1}{3} nm_0 v^2 \quad \text{основне рівняння}$$

молекулярно-кінетичної  
теорії газів

$$\Delta p = m_0 v_x - (-m_0 v_x) = 2m_0 v_x$$



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

$$\langle v^2 \rangle = \langle v_x^2 \rangle + \langle v_y^2 \rangle + \langle v_z^2 \rangle.$$

$$v_x^2 = v_y^2 = v_z^2$$

тиск газів визначається середньою  
кінетичною енергією поступального  
руху молекул.

## Температура



Температура – міра середньої кінетичної енергії теплового руху молекул

$$K_0 = \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2} = \frac{3}{2} kT$$

$k$  - постійна Больцмана  
 $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж·/К

Кінетична енергія теплового однієї молекули

$T$  - абсолютна температура, вимірюється в *Кельвінах* (К)

Зв'язок між температурними шкалами Кельвіна та Цельсія  $T(K) = t(^{\circ}C) + 273.15$

$$R = kN_A \quad \text{універсальна газова стала}$$
$$R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$$
$$K_{\text{моль}} = \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2} N_A = \frac{3}{2} kN_A T = \frac{3}{2} RT$$

Кінетична енергія теплового одного моля молекул

$$p = \frac{2}{3} n \frac{m_0 \langle v^2 \rangle}{2} = \frac{2}{3} n \frac{3}{2} kT = nkT, \quad p = nkT$$

основне рівняння  
молекулярно-кінетичної  
теорії газів



## Закони ідеальних газів

*Ізопроеци* –

процеси, при яких один з параметрів ( $p, V, T$ ), що характеризують газ залишається незмінним.

*1.Ізохоричний процес.*

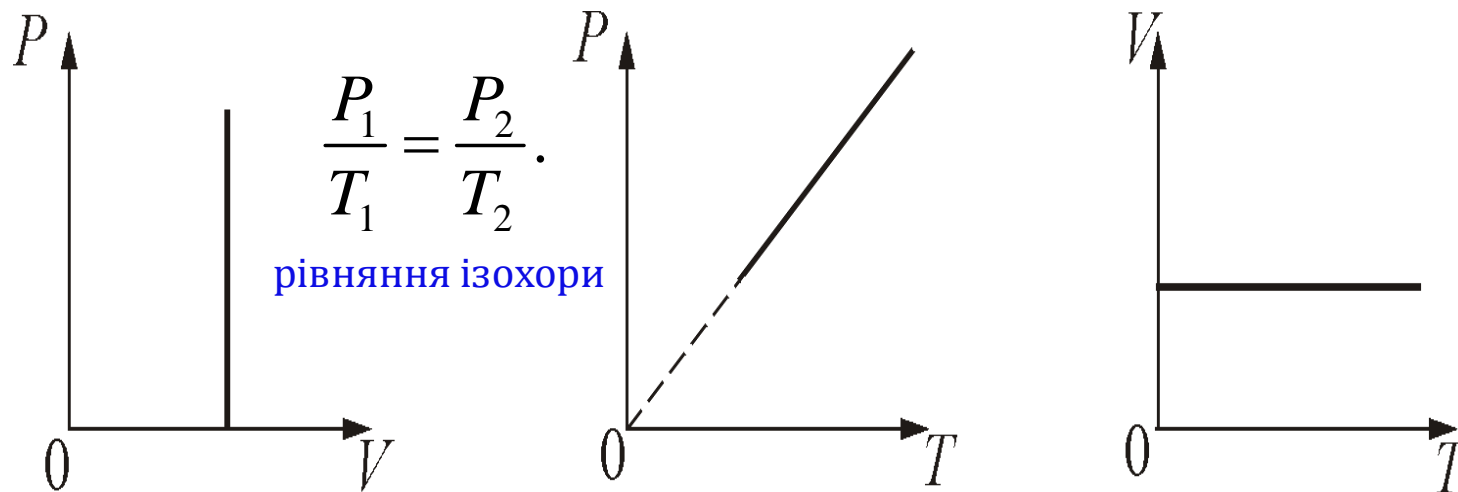
$V = \text{const.}$

Ізохоричний - процес, що протікає при незмінному об'ємі газу

Поведінка газу при ізохоричному процесі підкоряється закону Шарля:

«При постійному об'ємі і незмінних значеннях маси газу і його молярної маси, відношення тиску газу до його абсолютної температури залишається постійним».

$$\frac{p}{T} = \text{const.}$$



## Закони ідеальних газів

*Ізопроееси* –

процеси, при яких один з параметрів ( $p, V, T$ ), що характеризують газ залишається незмінним.

*Ізобаричний процес.*

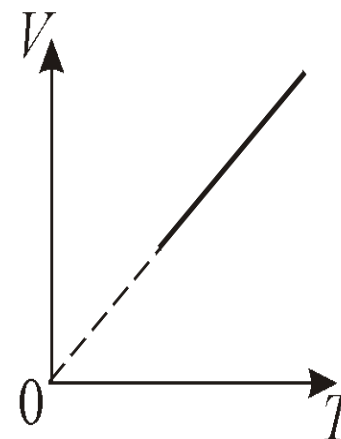
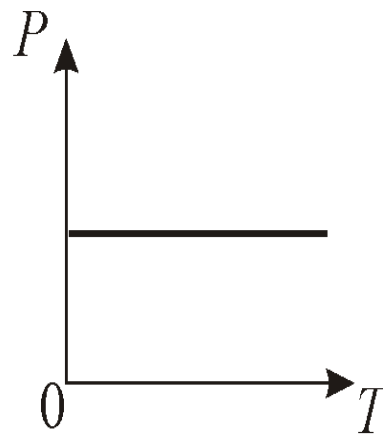
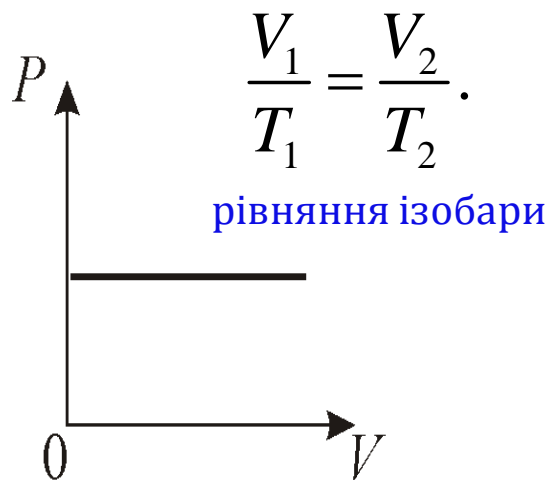
$p = \text{const.}$

Ізобаричний - процес, що протікає при незмінному тиску газу

Поведінка газу при ізобаричному процесі підкоряється закону Гей-Люсака:

«При постійному тиску і незмінних значеннях маси газу і його молярної маси, відношення об'єму газу до його абсолютної температури залишається постійним».

$$\frac{V}{T} = \text{const.}$$



---

*Ізопроееси* –

процеси, при яких один з параметрів ( $p, V, T$ ), що характеризують газ залишається незмінним.

---

*Ізотермічний процес.*

$T = \text{const.}$

$pV = \text{const.}$

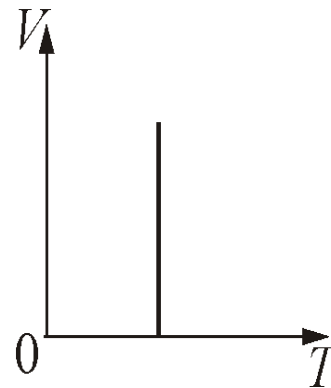
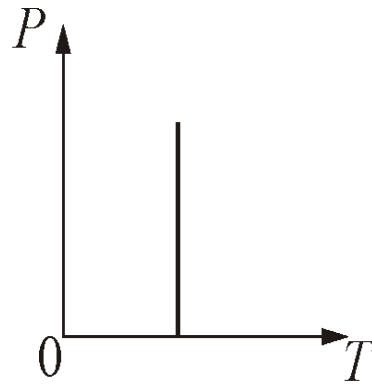
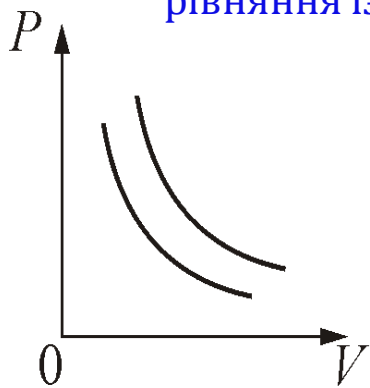
Ізотермічний - процес, що протікає при незмінній температурі газу

Поведінка газу при ізобаричному процесі підкоряється закону Бойля-Маріота:

«При постійній температурі і незмінних значеннях маси газу і його молярної маси, добуток об'єму газу на його тиск залишається постійним».

$p_1V_1 = p_2V_2.$

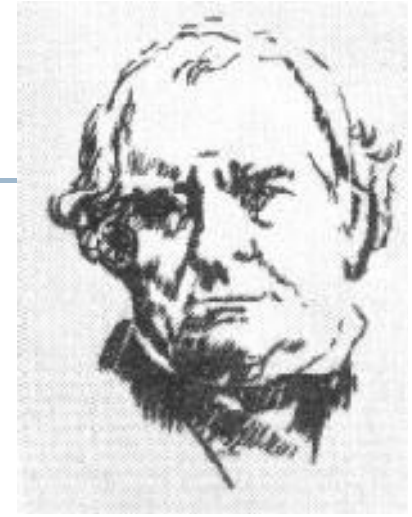
рівняння ізотерми



---

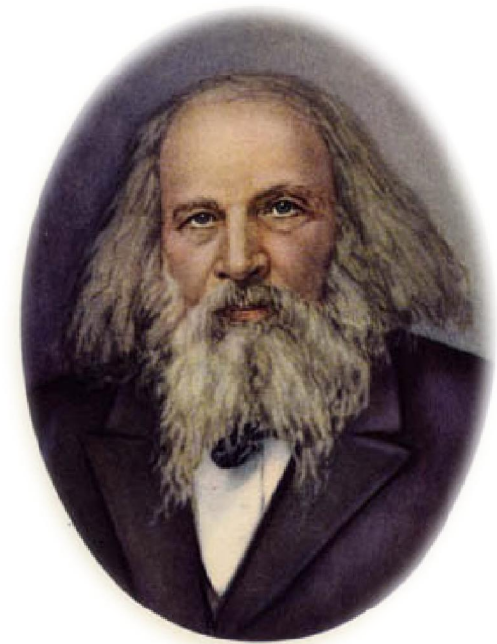
Об'єднаний газовий закон (Закон Клапейрона).

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad \div \Rightarrow \quad \frac{PV}{T} = \text{const.}$$



Рівняння Менделєєва-Клапейрона  $PV = \frac{m}{\mu} RT$

$\frac{m}{\mu}$  число молей



Всі гази, при нормальних умовах, близькі за властивостями до ідеального газу. Ближче всіх газів до ідеального газу - водень.

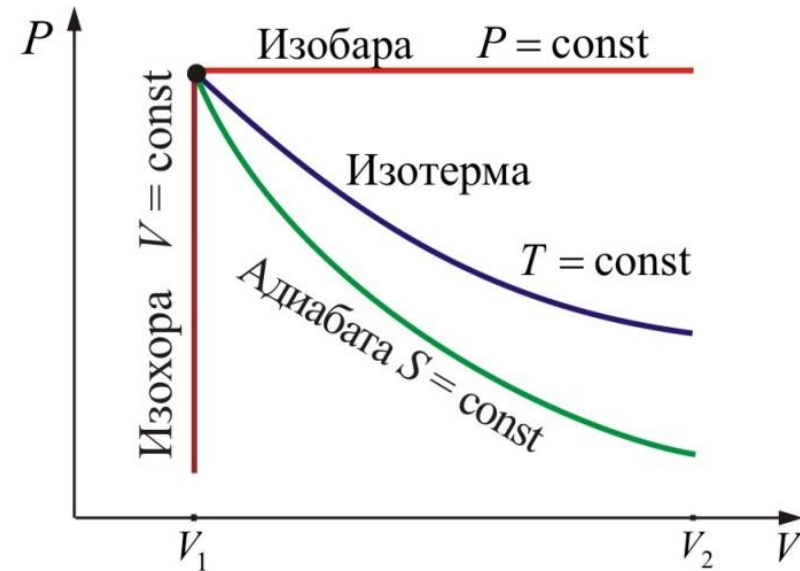
---



### Адіабатичний процес

(ізоентропійний ( $\Delta S = 0$ ,  $S = \text{const}$ )).

Адіабатичний - Процес, що відбувається без теплообміну з навколишнім середовищем.



### Закон Дальтона.

Тиск суміші ідеальних газів дорівнює сумі парціальних тисків P газів, що входять до неї газів

$$P_{\text{суміші}} = P_1 + P_2 + \dots + P_n$$

*Парціальний тиск –*

*тиск, який чинив би певний газ із суміші, якби він займав весь об'єм*

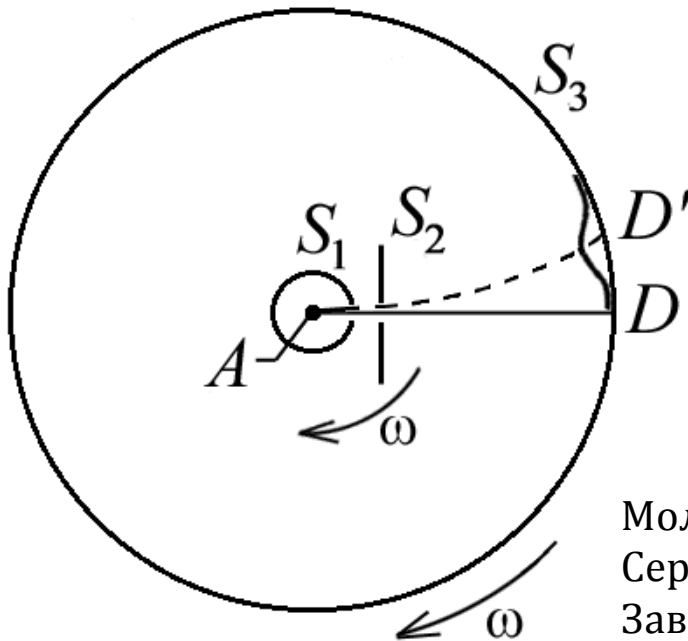
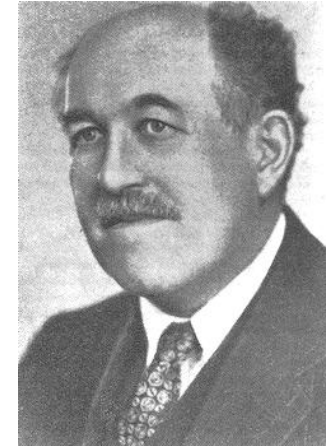
## Швидкості газових молекул. Дослід Штерна

$$\frac{mv_{\text{KB}}^2}{2} = \frac{3}{2}kT \Rightarrow v_{\text{eâ}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}.$$

*Середньоквадратична швидкість*

$$v_{\text{eâ}}(N_2) = 500 \text{ м / с.}$$

$$v_{\text{eâ}}(H_2) = 2000 \text{ м / с.}$$



**Результат:**

*Молекули рухаються з різними швидкостями, але їх найбільша кількість має швидкість близьку до середньої квадратичної*

Молекули рухаються хаотично.

Серед них є і дуже швидкі, і дуже повільні.

Завдяки безладного руху і випадковому характеру їх взаємних зіткнень, молекули певним чином розподіляються за швидкостями.

Цей розподіл однозначний, єдино можливий, і не тільки не суперечить хаотичності руху, але саме нею і обумовлений.

## Розподіл молекул за швидкостями

### Задача :

Знайти число частинок  $\Delta n$  швидкості яких лежать в інтервалі значення швидкості  $\Delta v$  (тобто мають значення швидкостей від  $v$  до  $v + \Delta v$ ).

$\Delta n$  пропорційне до концентрації молекул  $n$ .

$\Delta n$  залежить від швидкості молекул, оскільки в однакових за шириною інтервалах, але при різних значеннях швидкостей, число молекул буде різним.

$$\Delta n = f(v) n \Delta v$$

$f(v)$  - функція розподілу молекул за швидкостями,

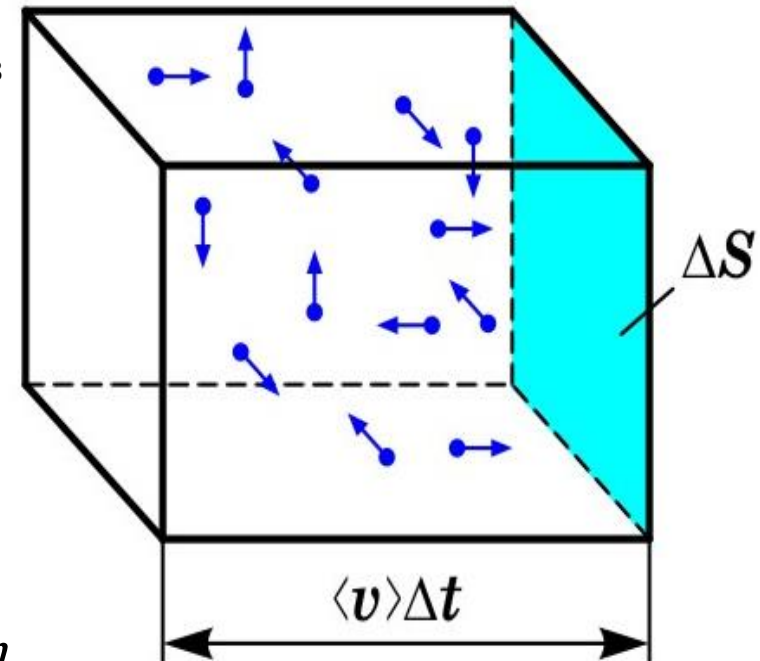
$n$  - концентрація молекул

$\Delta v$  - інтервал значень швидкостей.

$$f(v) = \frac{dn}{n}$$

**Фізичний зміст  $f(v)$**  - це відношення числа молекул, швидкості яких лежать в певному інтервалі швидкостей до загального числа молекул в одиничному інтервалі швидкостей

$f(v)$  - має зміст ймовірності для певної молекули газу в одиниці об'єму мати швидкість, що міститься в одиничному інтервалі швидкостей, який включає задану швидкість  $v$ .

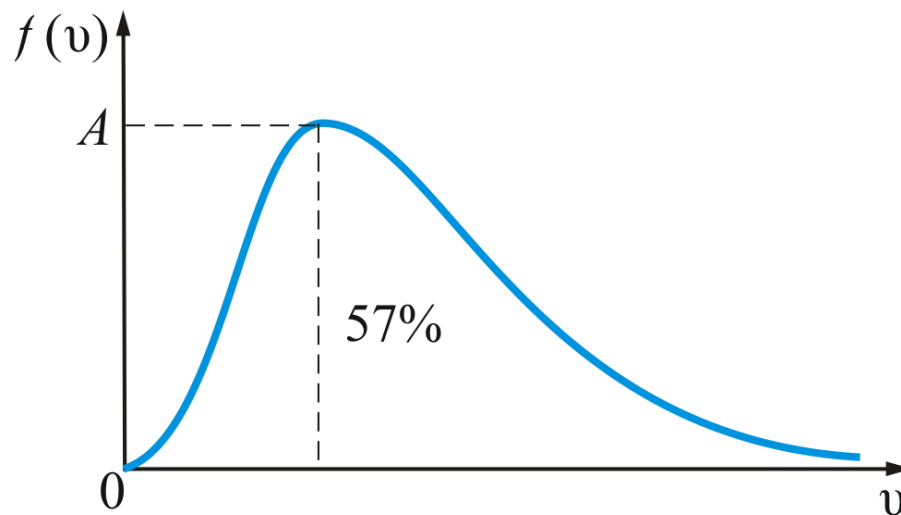


## Функція розподілу Максвелла

Розподіл молекул ідеального газу за швидкостями вперше було отримано знаменитим англійським ученим *Дж. Максвеллом* в 1860 році за допомогою методів теорії ймовірностей.



$$f(v) = \frac{dn}{n} = \frac{4}{\sqrt{\pi}} \left( \frac{m}{2kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2 \quad f(v) = A e^{-\frac{mv^2}{2kT}} v^2$$



### Висновки:

Вид розподілу молекул газу за швидкостями, для кожного газу залежить від маси частинок газу  $m$  і його температури  $T$ .

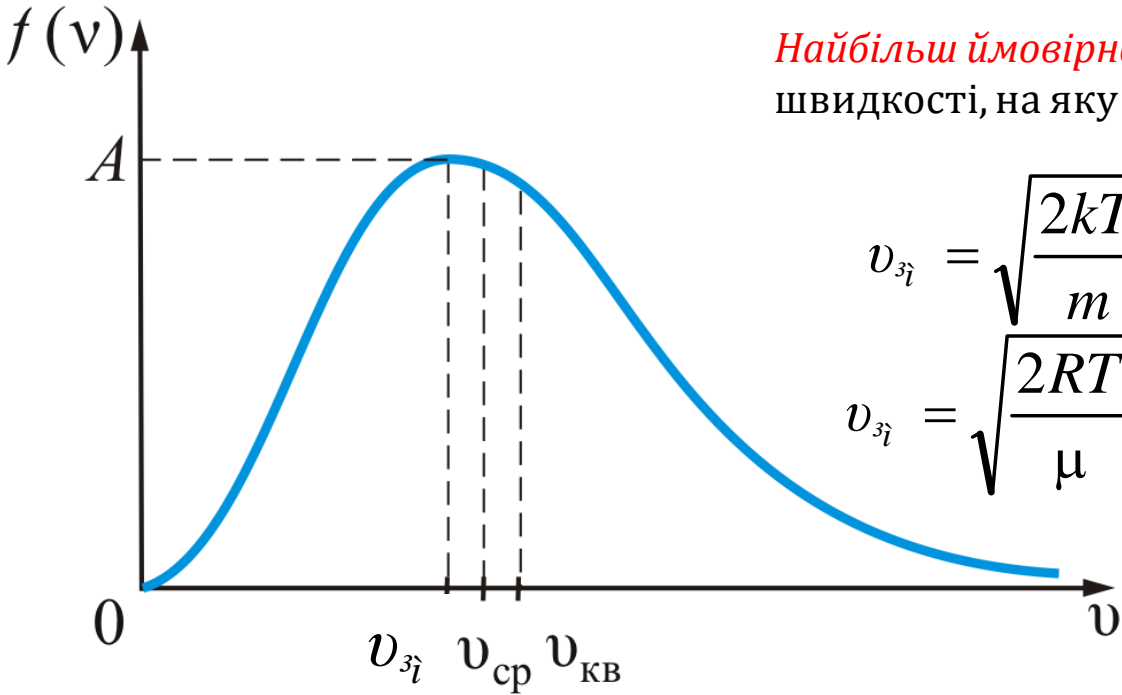
Тиск  $P$  і об'єм газу  $V$  на розподіл молекул не впливають.

У показнику степеня знаходиться відношення кінетичної енергії частинок до енергії їх теплового руху при даній температурі

розподіл Максвелла характеризує розподіл молекул за значеннями *кінетичної енергії* (тобто показує, яка ймовірність при даній температурі мати саме таке значення кінетичної енергії)



## Характеристичні швидкості



*Найбільш ймовірна швидкість* - величина швидкості, на яку припадає максимум розподілу.

$$v_{z\grave{l}} = \sqrt{\frac{2kT}{m}}$$

$$v_{z\grave{l}} = \sqrt{\frac{2RT}{\mu}}$$

*Найбільш ймовірна швидкість однієї частинки*

*Найбільш ймовірна швидкість одного моля частинок*

*Середня квадратична швидкість*  $\frac{mv_{\hat{e}\hat{a}}^2}{2} = \frac{3}{2}kT \Rightarrow v_{\hat{e}\hat{a}} = \sqrt{\frac{3kT}{m}}$   $v_{\hat{e}\hat{a}} = \sqrt{\frac{3RT}{\mu}}$

*однієї частинки* *моля частинок*

*Середня арифметична швидкість*

$$v_{cp} = \frac{1}{n} \int_0^{\infty} vn \cdot f(v)dv,$$

$$v_{\grave{n}\delta} = \sqrt{\frac{8kT}{\pi m}}$$

*однієї частинки*

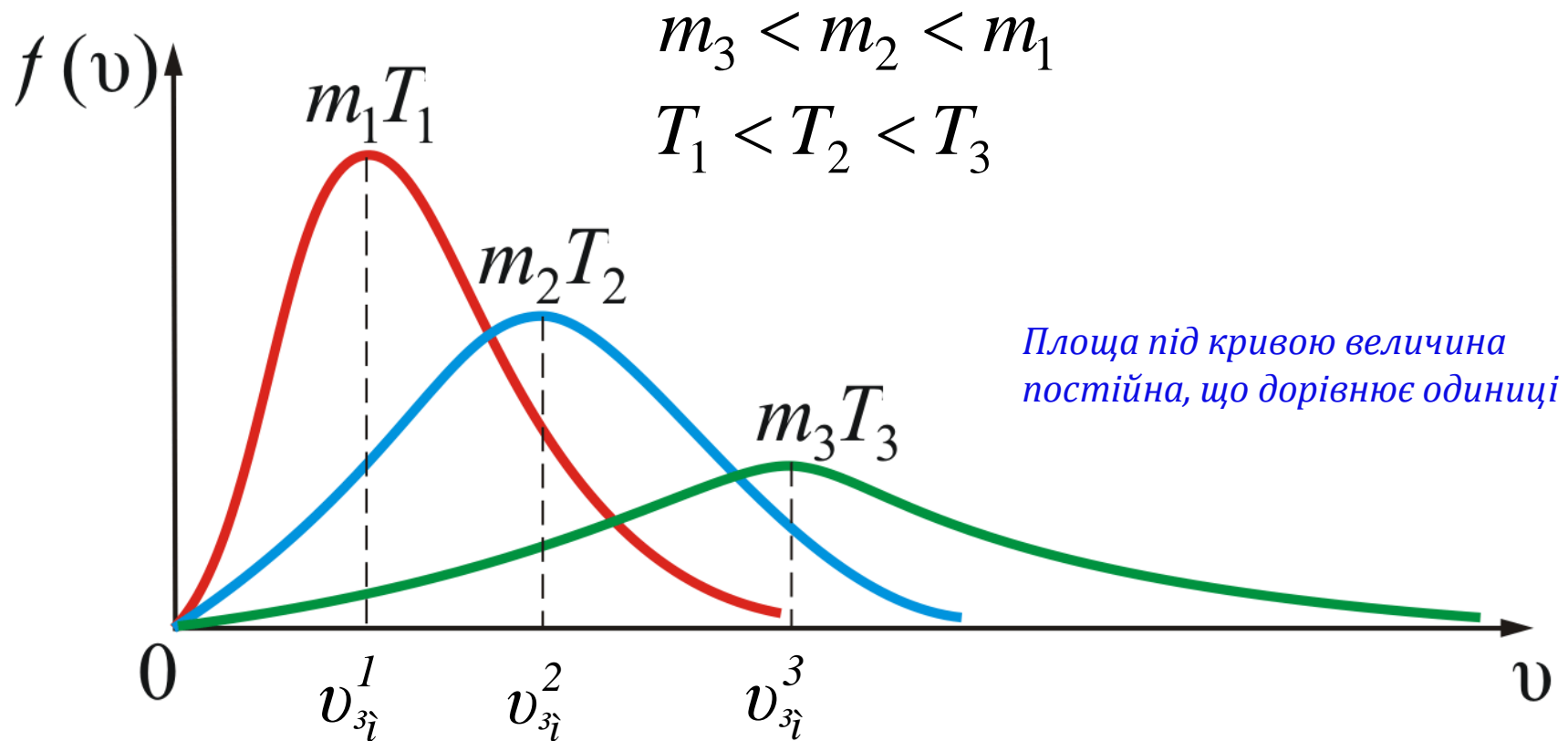
$$v_{\grave{n}\delta} = \sqrt{\frac{8R\grave{O}}{\pi \mu}}$$

*моля частинок*



## Функція розподілу Максвелла

*Залежність функції розподілу Максвелла від маси молекул та температури газу*



## Барометрична формула

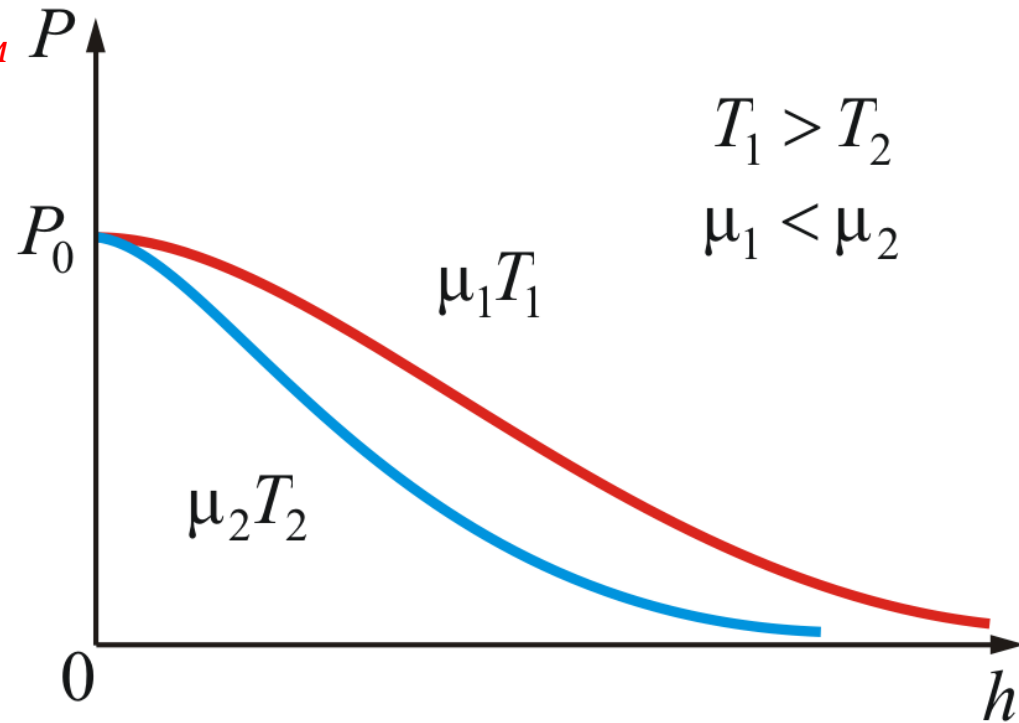
Атмосферний тиск на який-небудь висоті  $h$  обумовлений вагою шарів газу, що тиснуть один на одного .

Тиск змінюється з висотою за законом

$$p = p_0 e^{-\frac{\mu gh}{RT}}$$

барометрична формула

$p_0$  – тиск на висоті  $h=0$



Тиск зменшується з висотою тим швидше, чим важчий газ (чим більше  $\mu$ ) і чим нижчою є температура (наприклад, на великих висотах концентрація легких газів  $He$  не та  $H_2$  набагато більша ніж біля поверхні Землі)

## Розподіл Больцмана

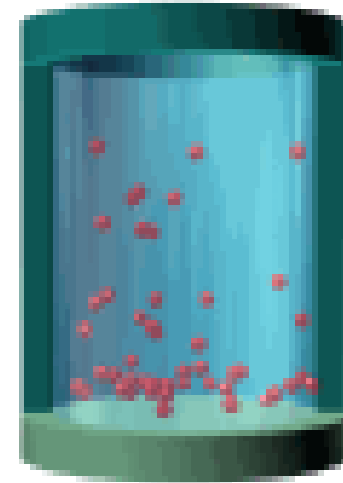


*Розподіл Больцмана* визначає розподіл часток в силовому полі в умовах теплового рівноваги.

Нехай ідеальний газ знаходиться в полі сил тяжіння в умовах теплової рівноваги.

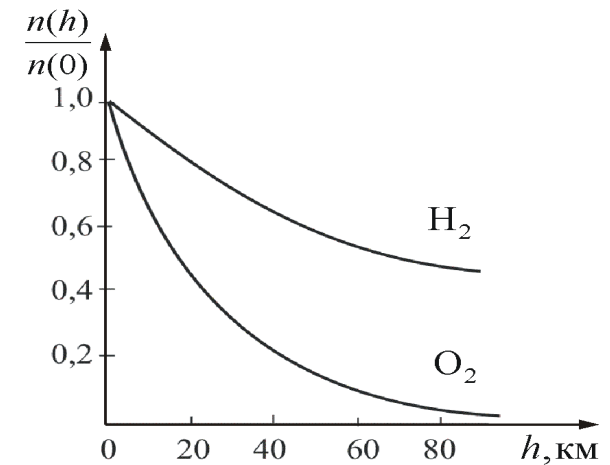
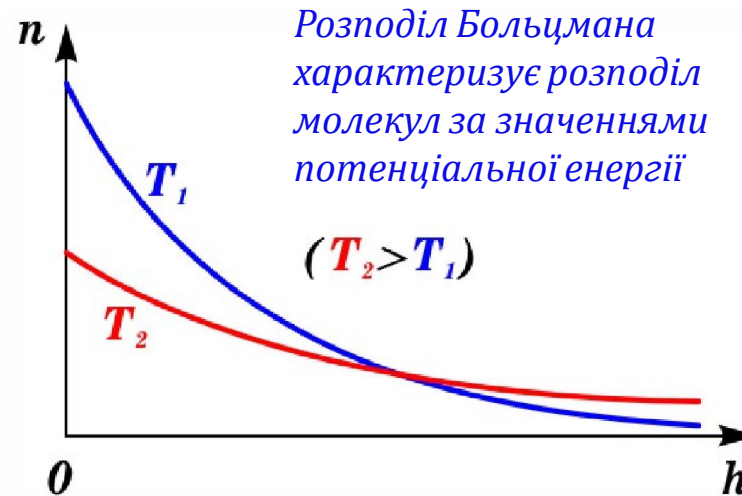
При цьому *концентрація газу буде різною в точках з різною потенціальною енергією.*

Число молекул в одиничному об'ємі (*концентрація*)  $n$  зменшується з віддаленням від поверхні Землі і *тиск теж зменшується.*



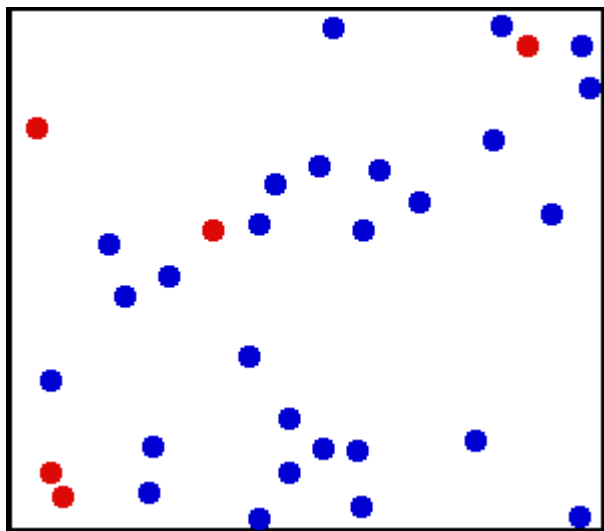
$$p = nkT$$
$$n = n_0 e^{-\frac{\mu gh}{RT}}$$
$$n = n_0 e^{-\frac{U}{kT}}$$

*Розподіл Больцмана*  
 $n_0$  – концентрація на висоті  $h=0$

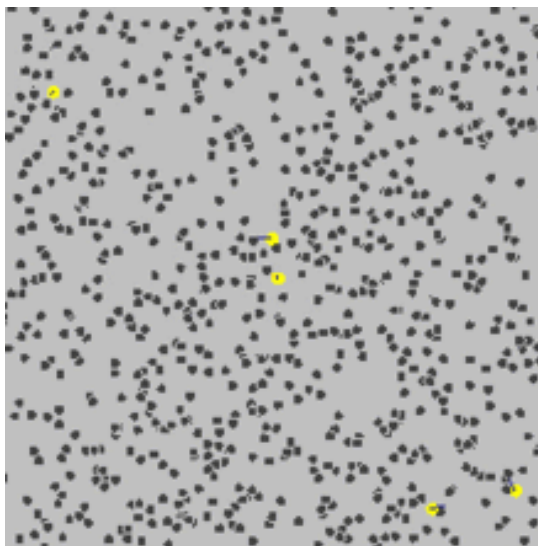


## Броунівський рух

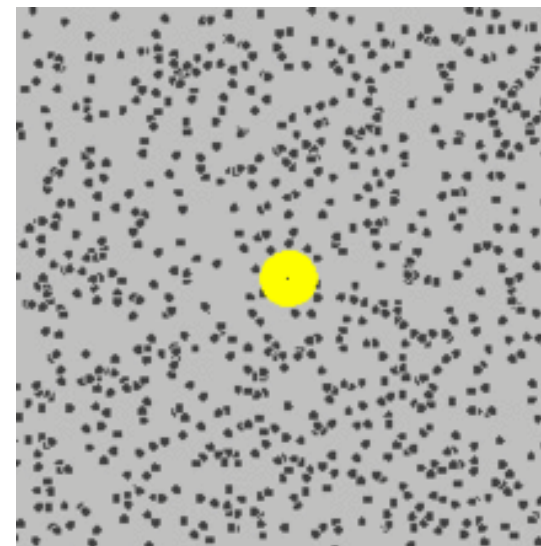
---



Рух частинок  
ідеального газу



Броунівський рух дрібних  
твердих частинок  
завислих в рідині



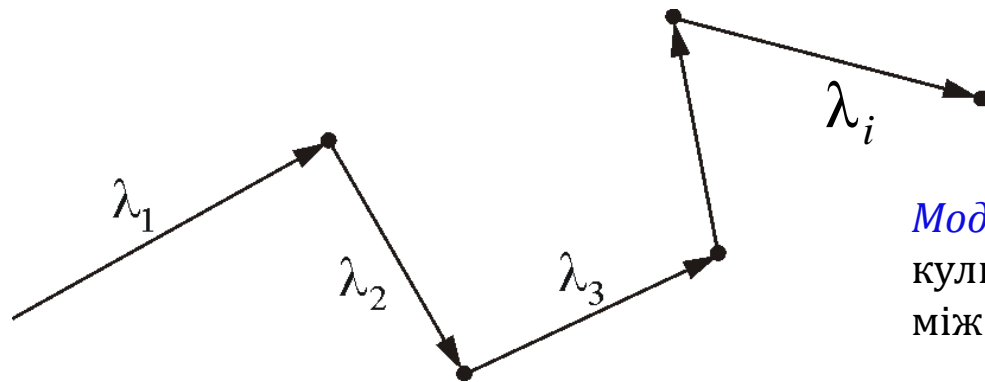
Броунівський рух «великої»  
порошинки завислої в рідині



## Середня довжина вільного пробігу

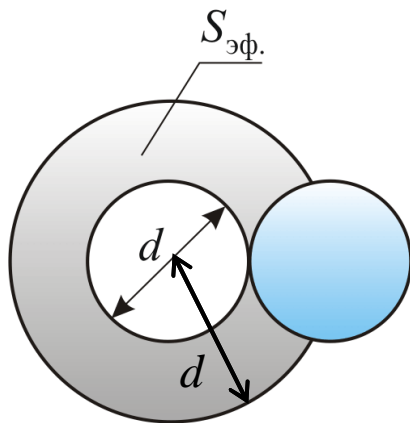
Число зіткнень і середня довжина вільного пробігу молекул в газах

**Середня довжина вільного пробігу** - середня відстань, що проходить молекула між двома послідовними зіткненнями з іншими молекулами  $\langle \lambda \rangle = v_{\text{ср}} \tau$ ,



$v_{\text{ср}}$  - середня швидкість теплового руху,  
 $\tau$  - середній час між двома зіткненнями.

**Модель ідеального газу** - молекули це тверді кульки одного діаметру, які взаємодіють між собою тільки при зіткненні



**Ефективний переріз молекули  $\sigma$**  - поперечний переріз розсіювання, що характеризує зіткнення між двома частинками

$$\sigma = \pi d^2$$

**Фізичний зміст ефективного перерізу розсіювання** - площа кола, діаметр якого рівний мінімальній відстані на яку можуть наблизитися молекули

$$\langle \lambda \rangle = \frac{kT}{\sqrt{2}\sigma P}$$

### Дифузія газів

**Дифузія** – взаємне проникнення (перемішування) речовин, що безпосередньо контактують внаслідок теплового руху частинок речовини.

Дифузія відбувається у напрямку зменшення концентрації речовини і веде до рівномірному розподілу всіх компонентів суміші по займаному об'єму.



**Потік** – кількість чогось, що проходить через поверхню одиничної площі за одиницю часу

**Дифузійний потік  $J$**  – потік речовини (однієї з компонент суміші) в напрямку **зменшення** концентрації цього компонента

$$J = -D \frac{dn}{dx}$$

$\frac{dn}{dx}$  градієнт концентрації

коефіцієнт дифузії-  $D = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle$

## Явища переносу в газах

### Внутрішнє тертя

Якщо тіло рухається в газі, то воно стикається з молекулами газу і передає їм свій імпульс.

Тіло теж буде відчувати удари з боку молекул і отримувати власний імпульс спрямований в протилежний бік.

Газ прискорюється, тіло гальмуєть - на тіло діють сили тертя.

Така ж сила тертя буде діяти між двома сусідніми шарами газу, що рухаються з різними швидкостями.

Це явище - *внутрішнє тертя або в'язкість газу*

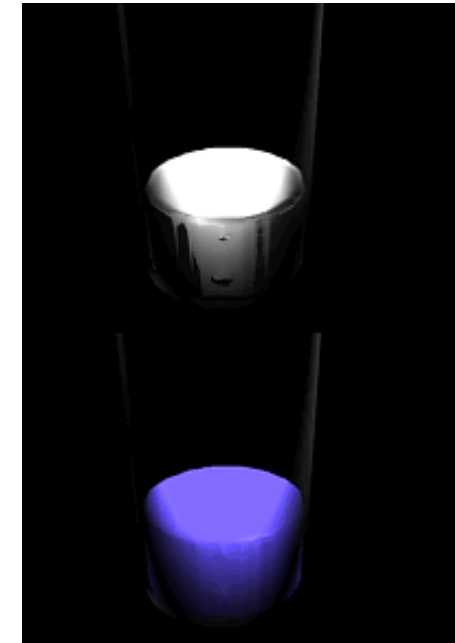
Сила вязкого тертя  $f$  пропорційна градієнту швидкості:

$$f = -\eta \frac{dv}{dx}$$

$\frac{dv}{dx}$  градієнт швидкості

коефіцієнт вязкості-  $\eta = \frac{1}{3} \lambda \langle v \rangle n m_0 = D \rho$

$D$  - коефіцієнт дифузії;  $\rho$  - густина газу



*Фізичний зміст коефіцієнта в'язкості  $\eta$*  - він чисельно дорівнює імпульсу, який переноситься за одиницю часу через одиницю площі поверхні при градієнті швидкості рівному одиниці





## Явища переносу в газах

### Теплопровідність газів

Якщо в сусідніх шарах газу створена і підтримується різниця температур, то між ними буде відбуватися обмін тепла. Завдяки хаотичності руху, молекули з сусідніх шарів перемішуватимуться і їх середні енергії будуть вирівнюватися. *Відбувається перенесення енергії від більш нагрітих шарів до більш холодних.*

*Теплопровідність* - перенесення енергії від нагрітих шарів речовини до холодних.

Потік тепла  $q$  пропорційний градієнту температури:

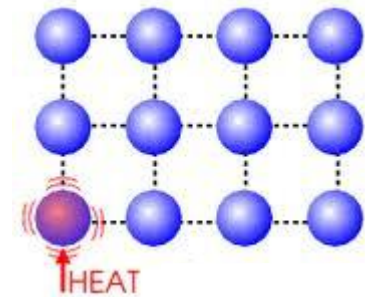
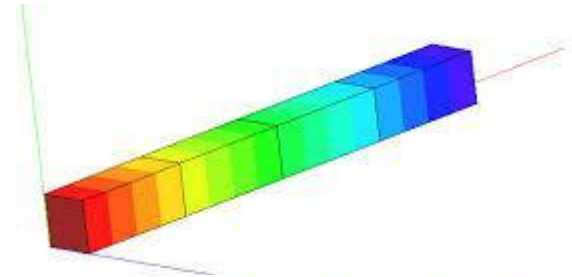
$$q = -\chi \frac{dT}{dx}$$

$\frac{dT}{dx}$  градієнт температури

$$\chi = \frac{1}{3} \lambda \langle v_T \rangle \rho C_V$$

коефіцієнт теплопровідності

$v_T$  - теплова швидкість молекул;  
 $C_V$  - питома теплоємність при постійному об'ємі.



## Внутрішня енергія

---

Будь-яке тіло (або система) має крім механічної енергії **внутрішню енергію**.

**Внутрішня енергія** – сума кінетичної енергії хаотичного руху частинок, з яких складається речовина та потенціальної енергії взаємодії цих частинок між собою

Внутрішня енергія ідеального газу – кінетична енергія хаотичного руху його частинок

*Енергія що припадає на одну частинку ідеального газу*  $U_0 = \frac{3}{2}kT$

Внутрішня енергія 1 моля ідеального газу  $U_1 = N_A U_0 = \frac{3}{2}RT$

Внутрішня енергія  $\nu$  молів ідеального газу  $U_\nu = \frac{3}{2}\nu RT$

**Внутрішня енергія залежить тільки від температури.**

*Внутрішня енергія  $U$  є функцією стану системи*

---



## Робота в термодинаміці

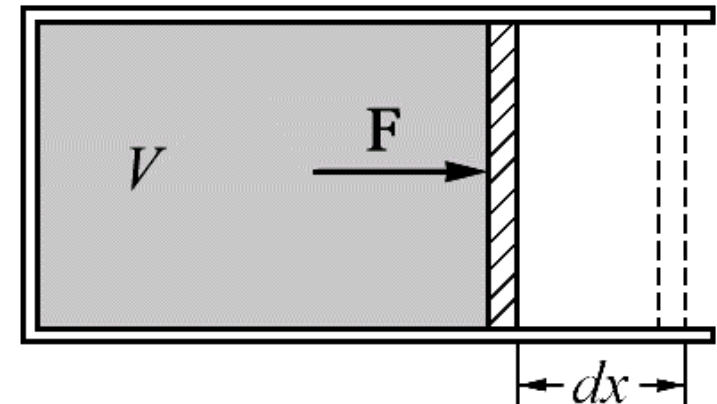
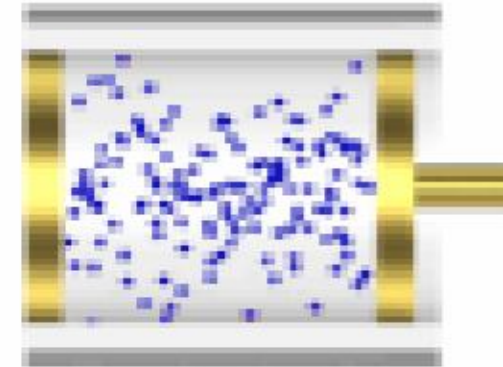
Робота, що здійснюється системою при нескінченно малій зміні об'єму системи  $dV$ , дорівнює:

$$\delta A = F dx = P dV$$

$$A = P \Delta V$$

Якщо об'єм газу **зростає**  
(газ розширюється), то зміна об'єму  
 $\Delta V > 0$  і  $A > 0$  – газ виконує  
додатну роботу проти зовнішніх сил

Якщо об'єм газу **зменшується**  
(газ стискається під дією зовнішніх сил),  
то зміна об'єму  $\Delta V < 0$  і  $A < 0$  –  
над газом виконується від'ємна робота



## Перше начало термодинаміки

Термодинамічна система може володіти як **внутрішньою** так і **механічною** енергією і різні системи можуть **обмінюватися** цими видами енергії.

*Обмін механічною енергією* характеризується виконаною **роботою  $A$** ,

*Обмін внутрішньою енергією* характеризується **кількістю переданого тепла  $Q$** .

*Механічна енергія може переходити в теплову енергію і, навпаки, внутрішня енергія може не якщо тепло передається від навколишнього середовища даній системі, при цьому ретворюватися на роботу*

### Перше начало термодинаміки

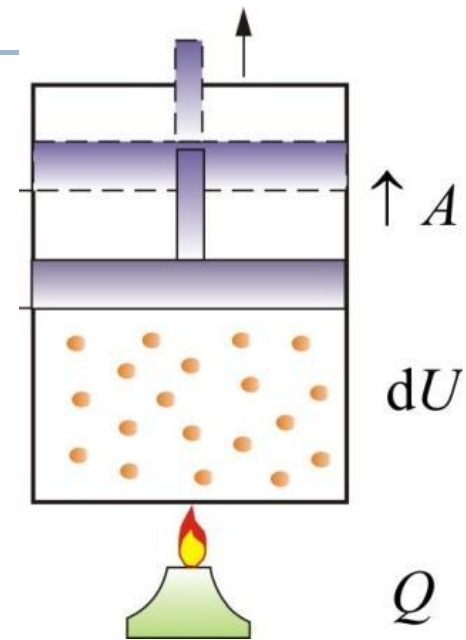
*Кількість теплоти, що передається тілу, йде на збільшення внутрішньої енергії і на здійснення тілом роботи проти зовнішніх сил*

$$Q = \Delta U + A$$

Якщо тепло передається від навколишнього середовища даній системі, при цьому  $\Delta Q > 0$   $\Delta U > 0$   $A_{\text{вн}} > 0$

Якщо система виконує роботу над зовнішніми тілами, то

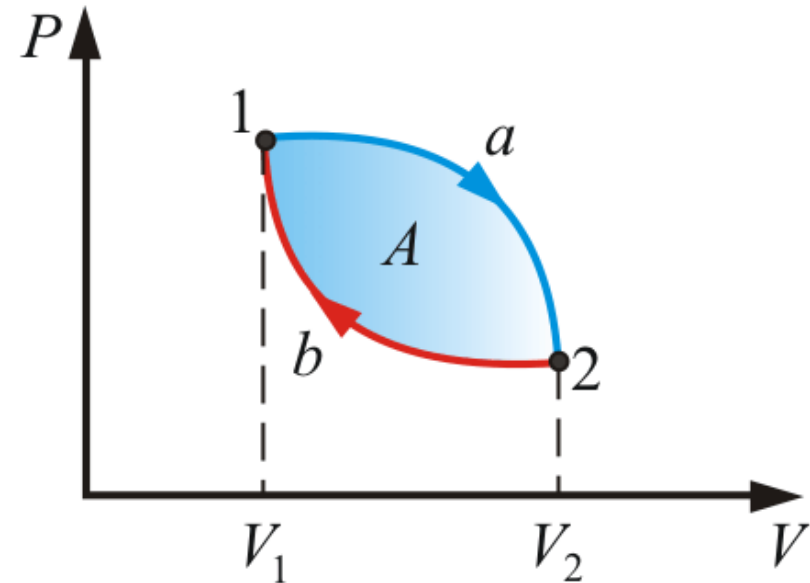
$$A_{\text{зовн}} < 0 \quad Q = \Delta U + A_{\text{зовн}}$$



## Перше начало термодинаміки

Теплота  $Q$  і робота  $A$  залежать від того, яким чином здійснений перехід зі стану 1 в стан 2 (ізохорично, адіабатично), а внутрішня енергія  $U$  не залежить.

Перше начало термодинаміки не вказує, в якому напрямку йдуть процеси зміни стану системи.



## Теплоємність

---

**Теплоємність тіла** - кількість теплоти, необхідної для нагрівання цього тіла на один градус

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

Одиниці вимірювання теплоємності Дж/К.

**Питома теплоємність** - кількість теплоти, необхідна для нагрівання 1кг речовини на 1 градус:

$$C_{\text{пит}} = c = \frac{dQ}{m dT}$$

Одиниці вимірювання питомої теплоємності Дж/кг К.

**Молярна теплоємність** - кількість теплоти, необхідна для нагрівання 1 моля речовини на 1 градус:

$$C_{\mu} = C = \frac{dQ}{\nu dT}$$

Одиниці вимірювання питомої теплоємності Дж/моль К.

---

Теплоємність термодинамічної системи залежить від того, як змінюється стан системи при нагріванні. Якщо газ нагрівати при постійному об'ємі, то все тепло йде на нагрівання газу- **теплоємність при постійному об'ємі  $C_V$**

Якщо нагрівати газ при постійному тиску  $P$  в посудині з поршнем, то поршень підніметься, тобто газ здійснить роботу. Теплоємність газу в такому випадку - **теплоємність при постійному тиску  $C_P$**

тепло витрачається і на нагрівання і на виконання роботи, тому  $C_P > C_V$

---

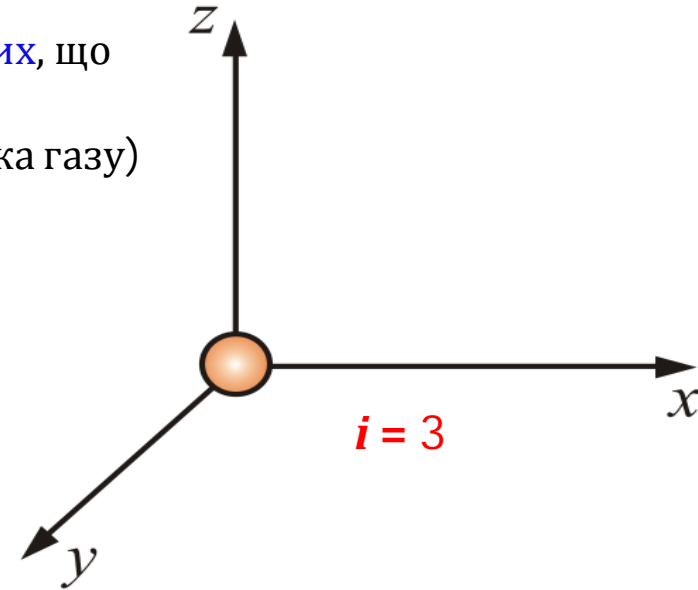
►  $C_P = C_V + R$  **Рівняння Майєра**

## Число ступеней вільності

---

Число ступенів вільності  $i$  - число незалежних змінних, що визначають положення тіла в просторі або число незалежних рухів, що може виконувати тіло (частинка газу)

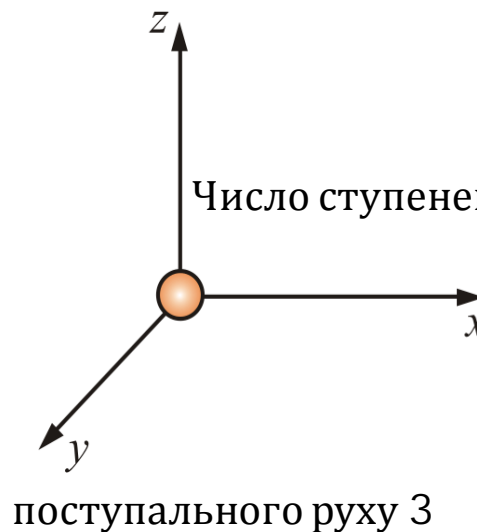
Положення матеріальної точки (одноатомної молекули) задається трьома координатами і ця молекула може здійснювати 3 незалежні рухи вздовж осей координат, тому вона має три ступені вільності :  $i = 3$



## Число ступеней вільності

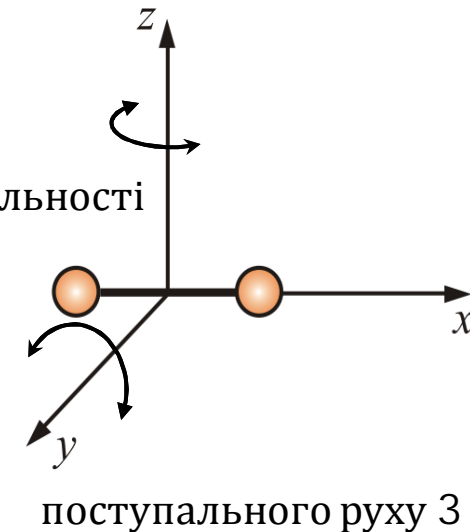
Двохатомні молекули крім трьох ступеней вільності **поступального** та **обертального** рухів можуть **обертатися**. Обертальний рух можна розкласти на три обертальних рухи навколо трьох взаємно перпендикулярних осей. Для двохатомних молекул обертання навколо осі *x* **не змінить положення** частинки в просторі

$$U_0 = \frac{i}{2} kT$$



$$i=3$$

$$U_0 = \frac{3}{2} kT$$



$$i=5$$

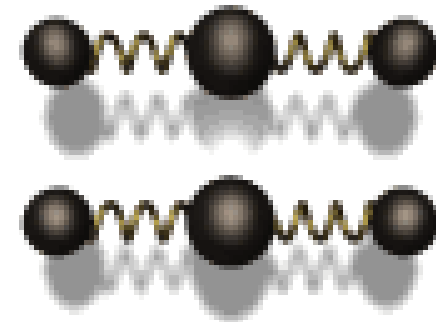
$$U_0 = \frac{5}{2} kT$$

При взаємних зіткненнях молекул можливий обмін енергіями і перетворення енергії обертального руху в енергію поступального руху і навпаки.



## Число ступеней вільності

Для багатоатомних молекул крім ступеней вільності **поступального** та **обертового** руху треба враховувати **коливні** рухи молекул – вздовж обднієї осі в **двох** напрямках



Число ступеней вільності в загальному випадку

$$i = i_{\text{пост}} + i_{\text{оберт}} + 2i_{\text{кол}}$$

*Енергія що припадає на одну частинку з певним числом ступенів вільності*

$$U_0 = \frac{1}{2} kT (i_{\text{пост}} + i_{\text{оберт}} + 2i_{\text{кол}})$$

Внутрішня енергія 1 моля газу, частинки якого мають певне число ступенів вільності

$$U_1 = \frac{1}{2} RT (i_{\text{пост}} + i_{\text{оберт}} + 2i_{\text{кол}})$$

Внутрішня енергія  $\nu$  молів газу, частинки якого мають певне число ступенів вільності

$$U_\nu = \frac{1}{2} \nu RT (i_{\text{пост}} + i_{\text{оберт}} + 2i_{\text{кол}})$$

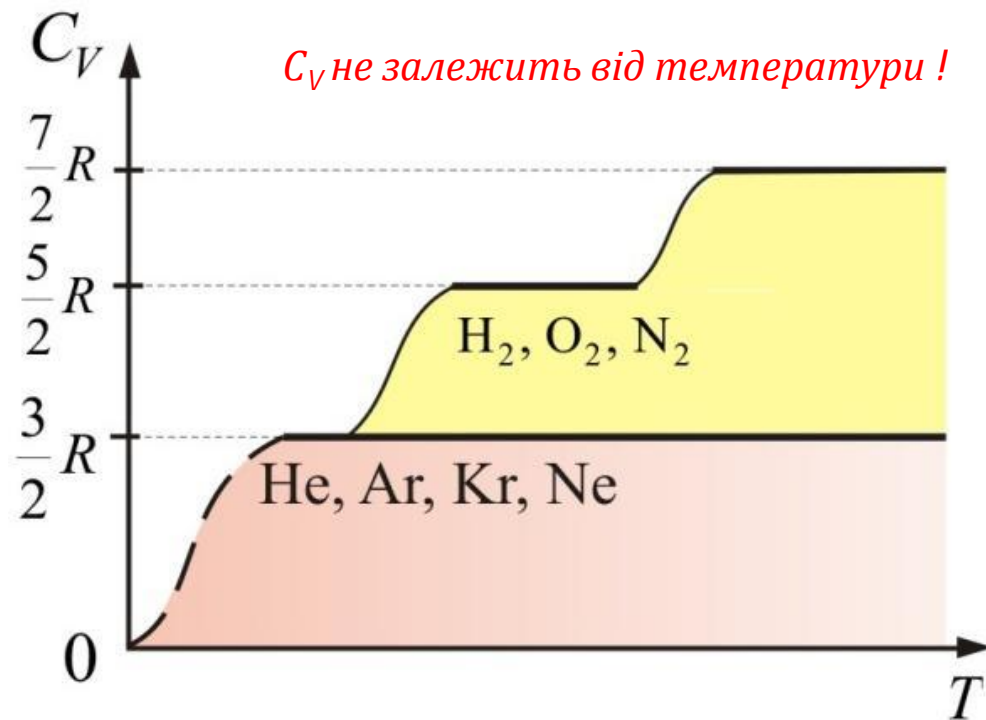


## Теплоємність газів

Молярні теплоємності газів:  $C_V = \frac{m}{\mu} \frac{i}{2} R$        $C_P = \frac{m}{\mu} \frac{i+2}{2} R.$

Число ступеней вільності в загальному випадку

$$i = i_{\text{пост}} + i_{\text{оберт}} + 2i_{\text{кол}}$$



## Застосування першого начала термодинаміки до ізопроцесів

Процес	Кількість теплоти	$\Delta U$	A
Ізотермічне розширення $T=const$	$Q=A, Q>0$	$\Delta U=0$	$A>0$
Ізотермічний стиск $T=const$	$Q=A, Q<0$	$\Delta U=0$	$A<0$
Ізохорний нагрів $V=const$	$Q=\Delta U, Q>0$	$Q=\Delta U, \Delta U>0$	$A=0$
Ізохорний стиск $V=const$	$Q=\Delta U, Q<0$	$Q=\Delta U, \Delta U<0$	$A=0$
Ізобарне розширення $p=const$	$Q=A+\Delta U, Q>0$	$\Delta U=Q-A, \Delta U>0$	$A=\Delta V, A>0$
Ізобарний стиск $p=const$	$Q=A+\Delta U, Q>0$	$\Delta U=Q-A, \Delta U<0$	$A=\Delta V, A<0$

## Кругові процеси

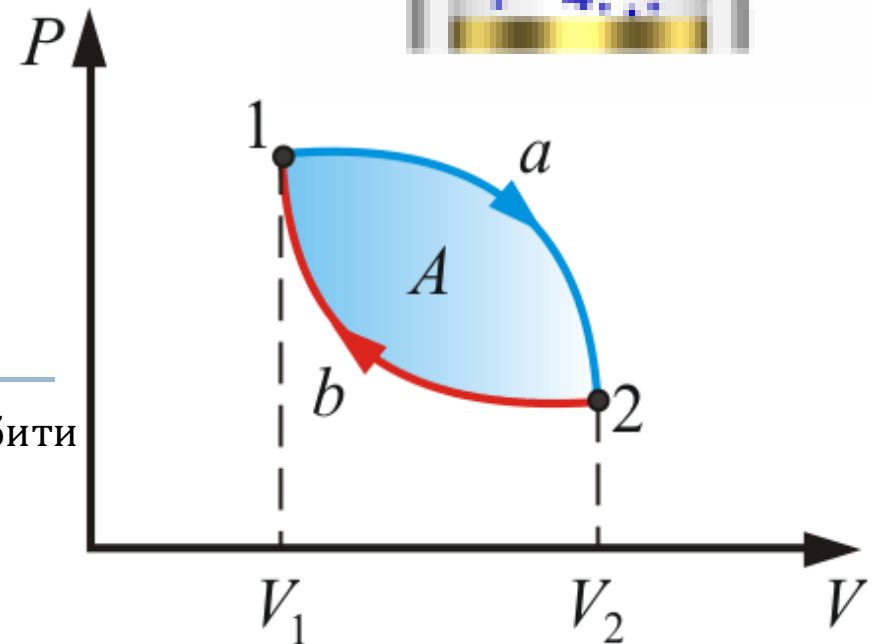
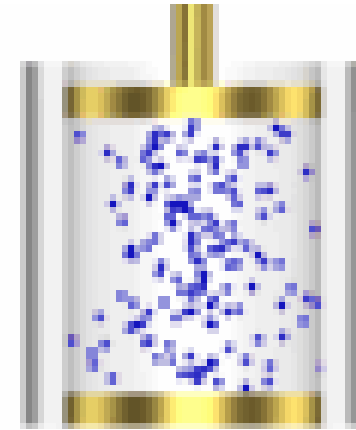
*Круговий або циклічний процес* – процес при якому система, пройшовши ряд проміжних станів, повертається у вихідний

Кругові процеси - оборотні і необоротні

На діаграмах стану ( $P$ ,  $V$ ) та кругові процеси зображується у вигляді **замкнутих кривих**. Початок і кінець кругового процесу зображуються однією точкою

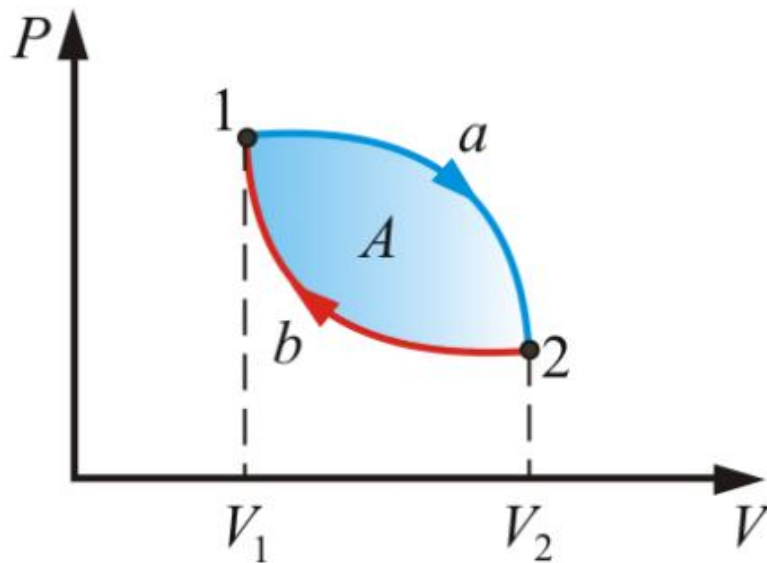
Цикл, що виконується ідеальним газом можна розбити на **розширення** (1 - 2) та **стиск** (2 - 1)

Робота розширення (1-2) - **додатня** ( $dV > 0$ )  
Робота стиску (2-1) - **від'ємна** ( $dV < 0$ ).



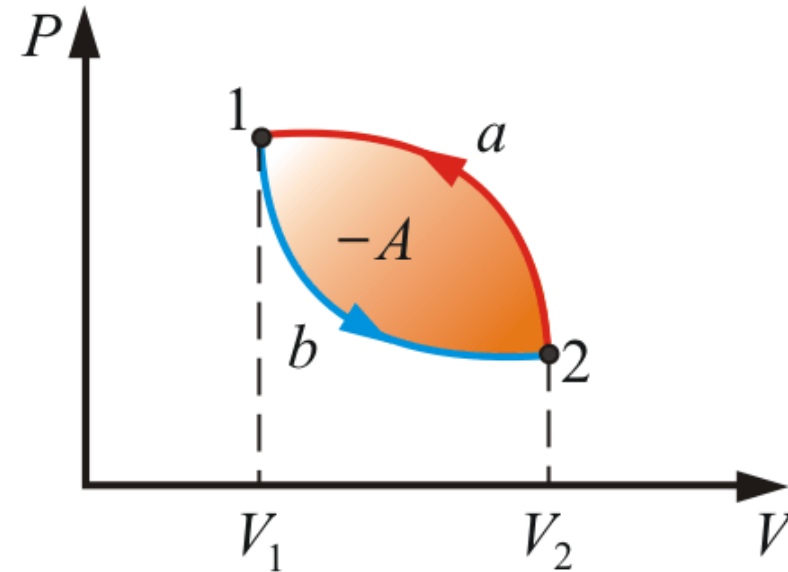
*Робота, що виконується за цикл рівна площі, яка охоплюється кривою циклічного процесу*

## Прямі і зворотні цикли



### Прямий цикл

Счатку розширення- потім стиск  
Лінія розширення вище лінії стиску  
За цикл виконується **додатна робота**



### Зворотний цикл

Счатку розширення- потім стиск  
Лінія розширення вище лінії стиску  
За цикл виконується **додатна робота**

## Кругові процеси

У результаті кругового процесу система повертається в початковий стан і повна зміна внутрішньої енергії газу дорівнює нулю

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

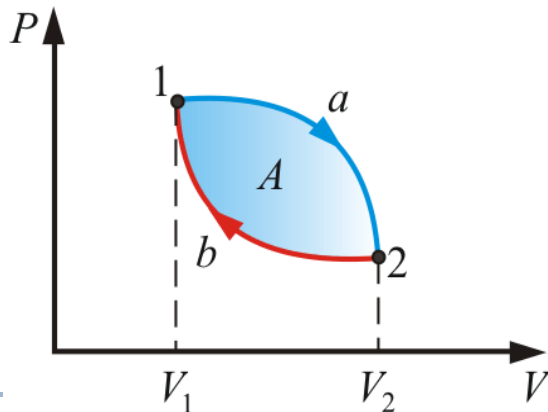
робота, що здійснюється за цикл, дорівнює кількості отриманої ззовні теплоти

в результаті кругового процесу система може теплоту як отримувати, так і віддавати, тому

$$Q = Q_1 - Q_2,$$

*коефіцієнт корисної дії для кругового процесу*

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}.$$



## Оборотні і необоротні процеси

---

Процес називають **оборотним**, якщо після закінчення процесу він може бути проведений в зворотному напрямі через всі ті ж проміжні стани, що і прямий процес.

*Після проведення кругового оборотного процесу ніяких змін в середовищі, що оточує систему, не відбудеться.*

Під середовищем розуміється сукупність всіх тіл, що не входять в систему з якими система безпосередньо взаємодіє.


Процес називається **необоротним**, якщо після його закінчення систему не можна повернути в початковий стан через колишні проміжні стани.

*Не можна здійснити незворотний круговий процес, щоб ніде в навколишньому середовищі не залишилося ніяких змін.*

Оборотністю володіють тільки рівноважні процеси.

**Рівноважний процес** – ряд станів, що є близькими до термодинамічно рівноважних

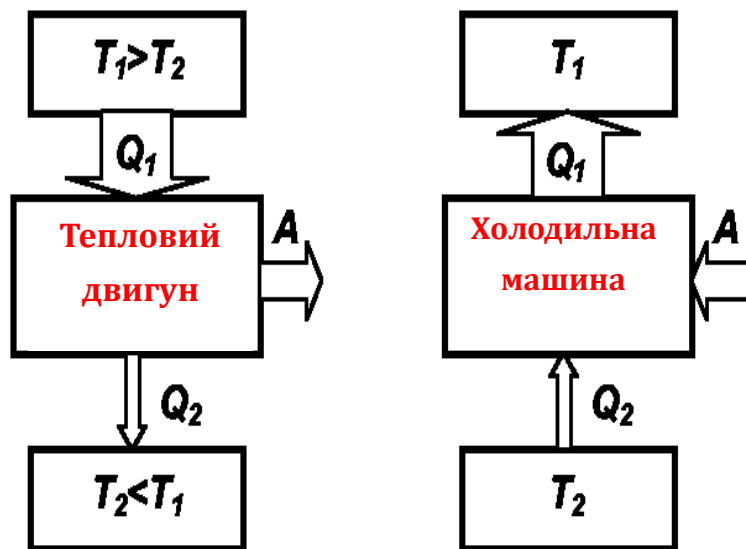
---



## Теплові машини

**Теплова машина** – пристрій, в якому теплова енергія перетворюється на механічну, складається з *нагрівника*, *робочого тіла* (газ, що розширюється та стискається), *холодильника*

Максимальним ККД володіють машини у яких відбуваються тільки оборотні процеси.  
Реальні процеси супроводжуються дисипацією енергії (через тертя, теплопровідність).



Принцип дії теплових двигунів

**Принцип роботи теплового двигуна:**

від нагрівника з більш високою температурою  $T_1$  за цикл забирається кількість теплоти  $Q_1$ , а холодильнику з нижчою температурою  $T_2$ , за цикл передається кількість теплоти  $Q_2$

Робота, що виконується за цикл

$$A = Q_1 - Q_2$$

ККД теплового двигуна

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$



## Ентропія

**Макростан** - стан речовини (системи часитинок), що характеризується набором термодинамічних параметрів.

**Мікростан** – стан речовини (системи часитинок), що характеризується характером руху та взаємодії всіх частинок тіла (системи)

молекули рухаються хаотично – тобто є багато мікростанів, що відповідають одному макростану

$W$  - число мікростанів що формують даний макростан ( $W \gg 1$ )

**Термодинамічна ймовірність або статистична вага макростану** – число перестановок елементів системи, при яких зберігається даний макростан

Термодинамічна ймовірність максимальна коли система знаходиться в рівноважному стані – в **максимально розвпорядкованому стані.**

$$S = k \ln W$$

**Ентропія  $S$**  - міра розвпорядкованості макросистеми, що складається з великого числа мікрочастинок, функція стану системи

*В ящику чорні і білі кульки.*

*Якщо вони укладені шарами за кольорами, то є порядок -  $W$  невелика, ентропія мала.*

*Після струшування кулі перемішуються,  $W$  збільшується, ентропія росте.*

## Друге та третє начала термодинаміки

---

**Друге начало термодинаміки** (закон зростання **ентропії**): будь-який необоротний процес в замкнутій системі відбувається так, що ентропія системи при цьому зростає

*Перше начало термодинаміки виражає закон збереження і перетворення енергії стосовно термодинамічних процесів.*

*Друге начало термодинаміки визначає напрям протікання термодинамічних процесів, вказуючи, які процеси в природі можливі, а які - ні.*

**Ще два формулювання другого начала:**

- 1) неможливий коловий процес, єдиним результатом якого є перетворення теплоти, отриманої від нагрівника, в еквівалентну їй роботу;
- 2) неможливий коловий процес, єдиним результатом якого є передача теплоти від менш нагрітого тіла до більш нагрітого.

---

**Третє начало термодинаміки.**

визначає поведінку термодинамічних систем при нулі Кельвіна (абсолютному нулі):  
**ентропія всіх тіл в стані рівноваги прямує до нуля при наближенні температури до нуля Кельвіна.**

---



## Ідеальна теплова машина

Найбільшим ККД при заданих температурах нагрівника  $T_1$  і холодильника  $T_2$  володіє тепловий двигун, в якому робоче тіло розширюється і стискається по циклу Карно графік якого складається з двох ізотерм і двох адіабат



### Теорема Карно

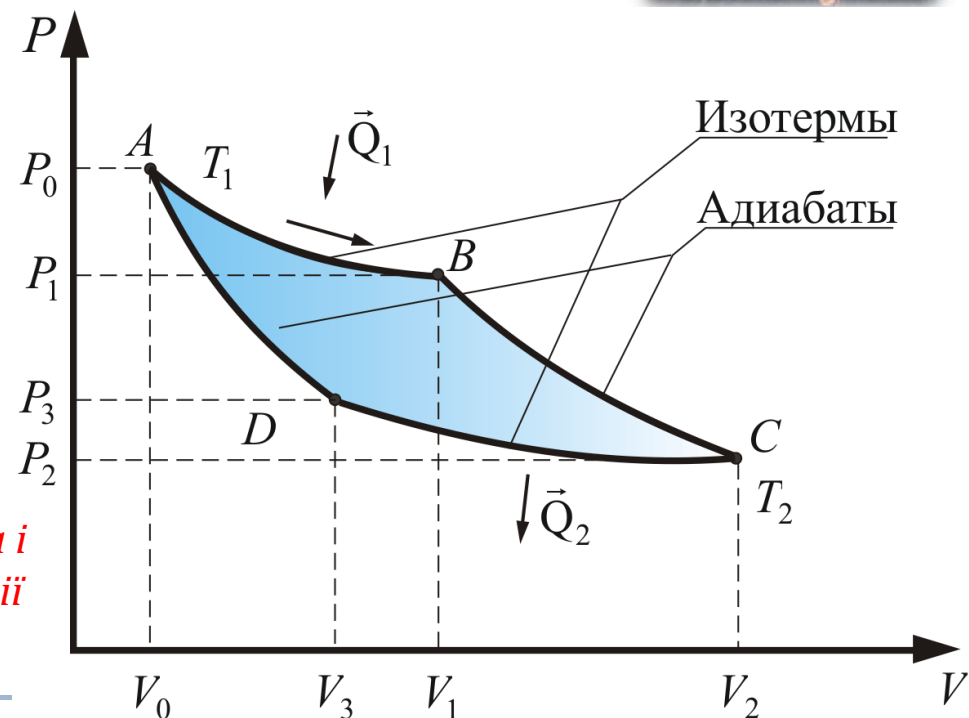
*З усіх теплових машин, що мають однакові температури нагрівників і холодильників, найбільшим ККД володіють оборотні машини.*

ККД оборотних машин рівні між собою і не залежать від конструкції машини та природи робочого тіла.

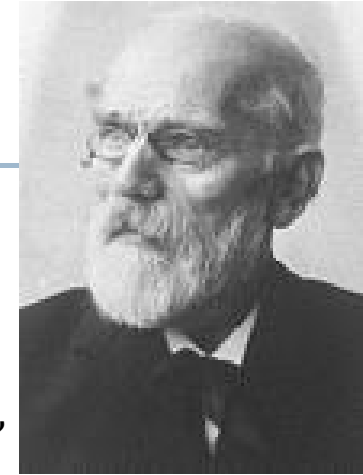
*При цьому ККД завжди менший одиниці.*

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1}.$$

*ККД залежить від температур нагрівника і холодильника і не залежить від конструкції машини та роду робочого тіла*



## Реальні гази



Рівняння стану встановлює зв'язок між тиском  $P$ , об'ємом  $V$ , температурою  $T$  і числом молей газу в стані термодинамічної рівноваги

$$PV = \nu RT$$

**Реальні гази** описуються рівнянням стану ідеального газу тільки наближено, відхилення від ідеальної поведінки стають помітними при високих тисках і низьких температурах, особливо коли газ близький до конденсації

*Для опису стану реальних газів в рівняння стану ідеального газу вводяться поправки*

**Перша** поправка  $b$  враховує наявність в молекул власний об'єму

$$(P + P^*)(V - \nu b) = \nu RT$$

*рівняння Ван-дер-Ваальса*

**Друга** поправка  $P^*$  враховує наявність сил притягання між молекулами, що рівнозначно існуванню в газі деякого внутрішнього тиску

$$\left( P + \frac{\nu^2 a}{V^2} \right) (V - \nu b) = \nu RT$$

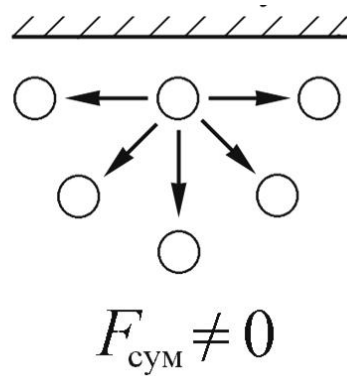
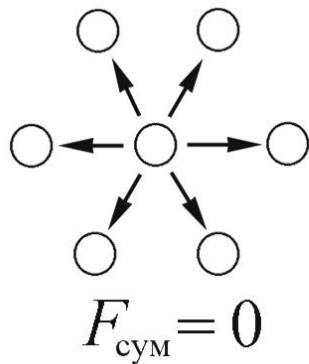
**Реальні гази** - гази, властивості яких залежать від взаємодії молекул.

У звичайних умовах, коли середня потенціальна енергія міжмолекулярної взаємодії набагато менша за їх кінетичну енергію, властивості реальних і ідеальних газів мало відрізняються.



Властивості реальних газів і рідин визначаються існуванням між молекулами на малих відстанях сил відштовхування, а на великих - сил притягання.

Сили міжмолекулярної взаємодії мають електричну природу

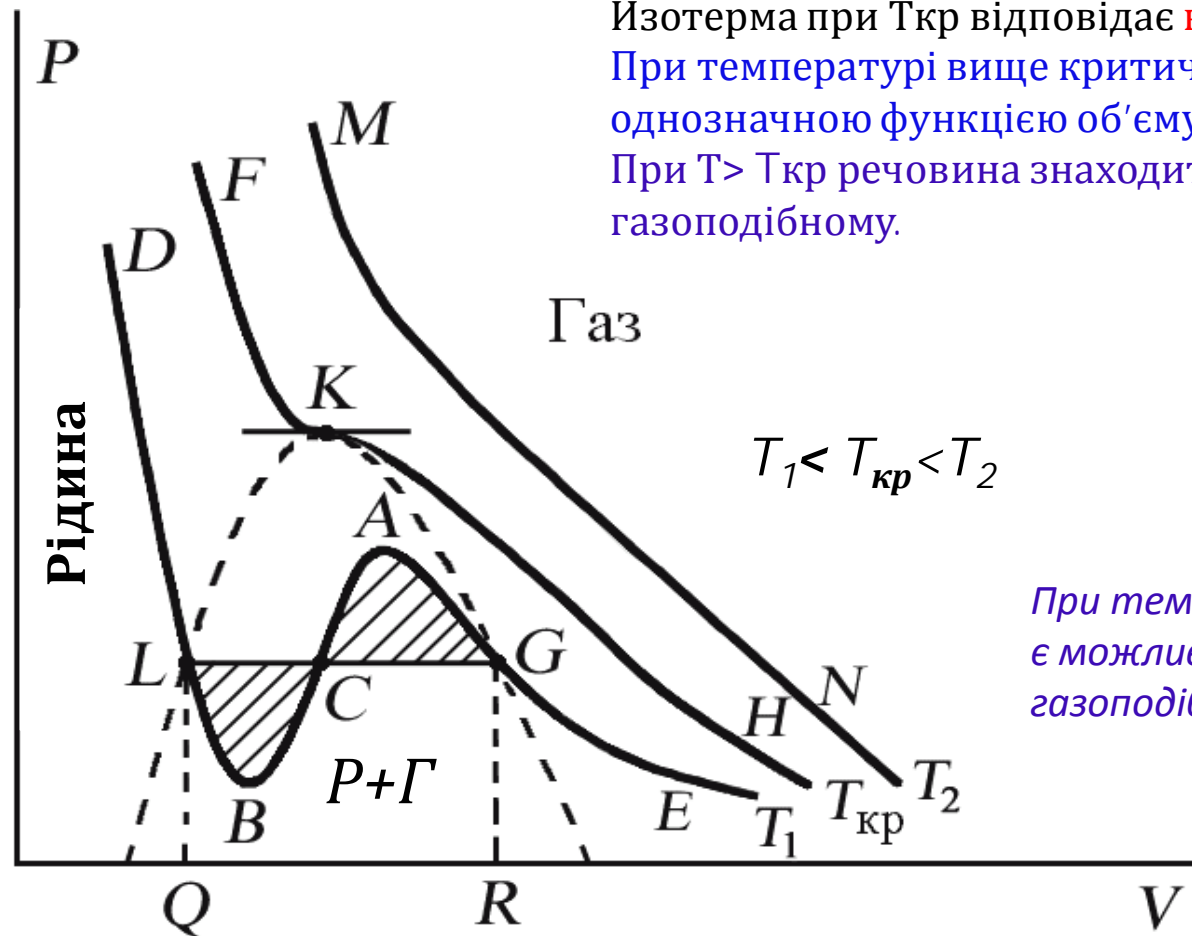


*В об'ємі газу сили притягання між молекулами врівноважують одна одну*

*Біля стінки з'являється надлишкова рівнодійна сила, напрямлена в бік газу*



## Ізотерми Ван дер Ваальса



Ізотерма при  $T_{кр}$  відповідає **критичній температурі**.

При температурі вище критичної залежність  $P = P(V)$  є однозначною функцією об'єму.

При  $T > T_{кр}$  речовина знаходиться тільки в одному стані - газоподібному.

$$T_1 < T_{кр} < T_2$$

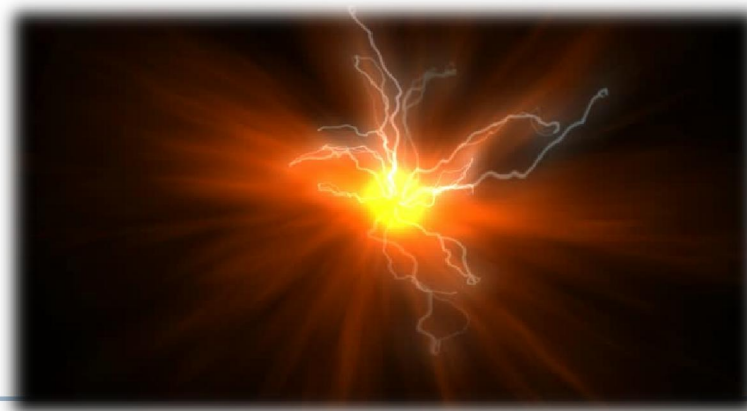
При температурі газу нижче критичної є можливість переходу речовини з газоподібного стану в рідкий і навпаки.

## Лекція 5

---

### Електростатика

1. Електростатика. Заряд
2. Закон збереження заряду
3. Закон Кулона
4. Електростатичне поле у вакуумі
5. Лінії напруженості електростатичного поля
6. Додавання електростатичних полів
7. Робота сил електростатичного поля
8. Потенціал електростатичного поля
9. Еквіпотенціальні поверхні
10. Різниця потенціалів
11. Електростатичне поле в діелектричному середовищі
12. Поляризація
13. Електричний диполь
14. Поляризованість
15. Провідники
16. Електростатична індукція
17. Електрична ємність
18. Конденсатори
19. Енергія електростатичного поля



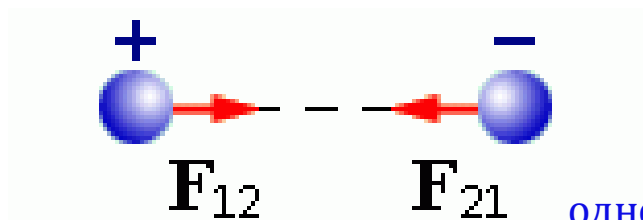
## Електростатика. Заряд

**Електростатика** - розділ, що вивчає нерухомі **заряди** та пов'язані з ними **електричні поля**.

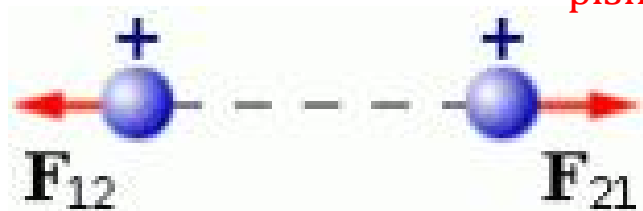
*Переміщення зарядів або відсутні або дуже повільні*

**Сила взаємодії між зарядами** визначається їх взаємним розташуванням, отже, енергія електростатичної взаємодії – **потенціальна енергія**.

в природі, існують тільки два види електричних зарядів:  
заряди, які виникають на склі, потертому об шовк - **позитивні**  
заряди, які з'являються на бурштині потертому об шерсть - **негативні**



однойменні заряди відштовхуються,  
різнойменні - притягуються.



Бенджамін Франклін



## Закон збереження заряду

Якщо піднести заряджене тіло (з будь-яким зарядом) до незарядженого, то між ними виникне сила притягання - на найближчому до зарядженого тіла краю незарядженого тіла з'являються заряди протилежного знака (індуковані) – **явище електростатичної індукції**.

*Процес зарядження це перерозподіл зарядів, причому їх сума не змінюється*



**Закон збереження заряду**  
**сумарний електричний заряд замкнутої системи не змінюється**

*Електричні заряди не існують самі по собі, а є внутрішніми властивостями елементарних частинок - електронів, протонів*

Існує елементарний (мінімальний) електричний заряд :  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл.

Носій елементарного негативного заряду **(-e) – електрон**; маса  $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}$  кг.

Носій елементарного позитивного заряду **(+e) – протон**; маса  $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  кг.

*Заряд будь-якого тіла рівний цілому кратному від елементарного електричного заряду*

$$q = \pm ne \quad e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$$

де  $n$ - ціле число

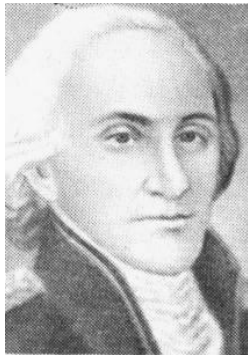
## Закон Кулона

Взаємодія електричних зарядів у вакуумі

Точковим зарядом ( $q$ ) називається заряджене тіло, розміри якого зневажливо малі в порівнянні з відстанню до інших заряджених тіл, з яким воно взаємодіє.

Сила взаємодії точкових зарядів у вакуумі пропорційна величині зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними

$$F = k_o \frac{|q_1 q_2|}{r^2}$$



Електрична постійна

$$k_o = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{Кл}^2}$$

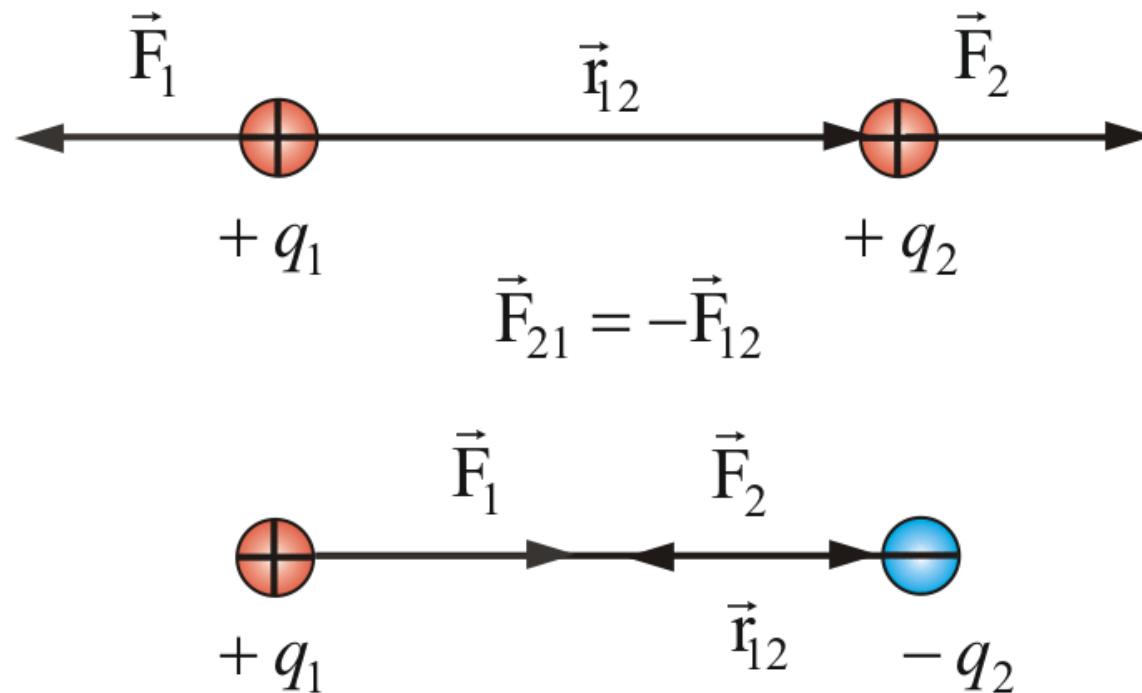
$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Кл}^2}{\text{Н} \cdot \text{м}^2} = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$$

$$1 \text{ Кл} = 6,25 \cdot 10^{18} e.$$

Оскільки елементарний заряд дуже малий, ми нехтуємо його дискретністю (заряду 1 мкКл відповідає близько  $10^{13}$  електронів).

## Закон Кулона

Взаємодія зарядів підкоряється третьому закону Ньютона:  
*сили взаємодії між зарядами рівні за величиною і спрямовані  
протилежно один одному уздовж прямої, що зв'язує ці заряди*



закон Кулона  
справедливий для  
відстаней  
від  $10^7$  до  $10^{-15}$  м

## Електростатичне поле у вакуумі

---

Навколо кожного заряду завжди є особлива форма матерії - **електричне поле**  
*Основна властивість електричного поля – на заряд, поміщений в це поле, діє сила.*  
Електричні та магнітні поля – форми електромагнітного поля (ЕМП).

---

**Електростатичне поле - створюється нерухожими електричними зарядами.**  
Електростатичне поле описується **двома величинами**:  
**потенціалом** (енергетична скалярна характеристика поля)  
**напруженістю** (силова векторна характеристика поля).

---

**Напруженість електростатичного поля** –  
фізична векторна величина, яка рівна силі, що  
діє на одиничний позитивний заряд  $q_0$ ,  
поміщений в дану точку поля:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad \vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \frac{\vec{r}_{12}}{r}$$

$r_{12}$  – вектор, що сполучає дану точку поля із зарядом  $q$

**Пробний заряд – одиничний позитивний**

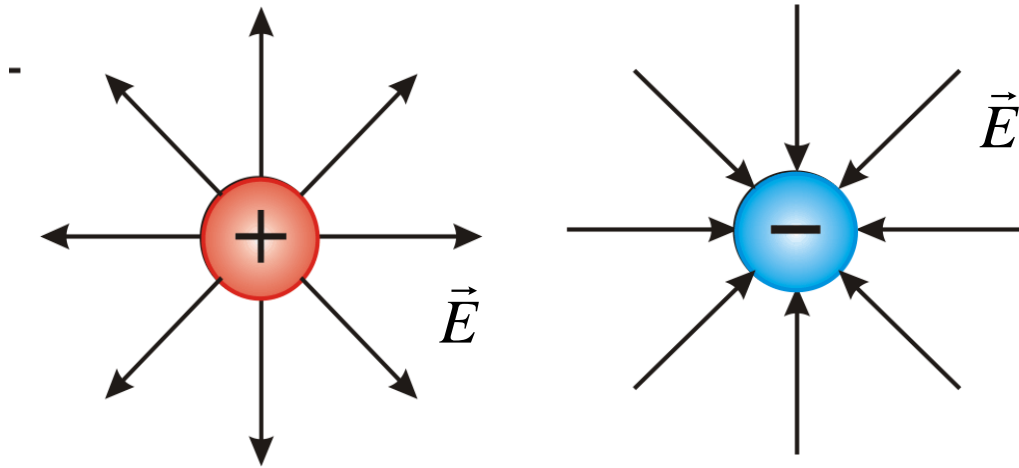
**Одиниця напруженості електростатичного поля - (Н/Кл):**

---



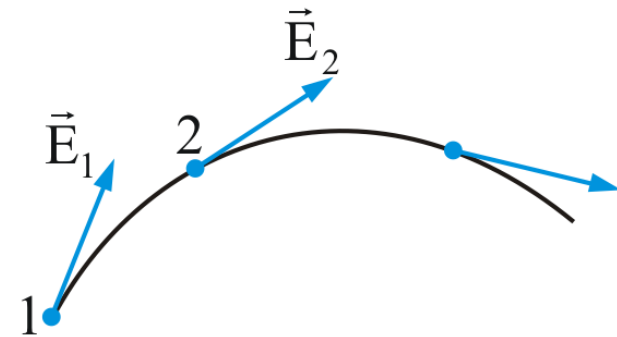
## Лінії напруженості електростатичного поля

Напрямок вектора напруженості співпадає з напрямком сили, що діє на позитивний заряд



- Якщо **поле створюється позитивним зарядом**, то вектор напруженості направлений **від заряду** (відштовхування пробного заряду).
- Якщо **поле створюється негативним зарядом**, то вектор направлений **до заряду** (притягання пробного заряду).

**Силкові лінії (лінії напруженості)** - це лінії, дотична до яких в будь-якій точці поля збігається з напрямком вектора напруженості

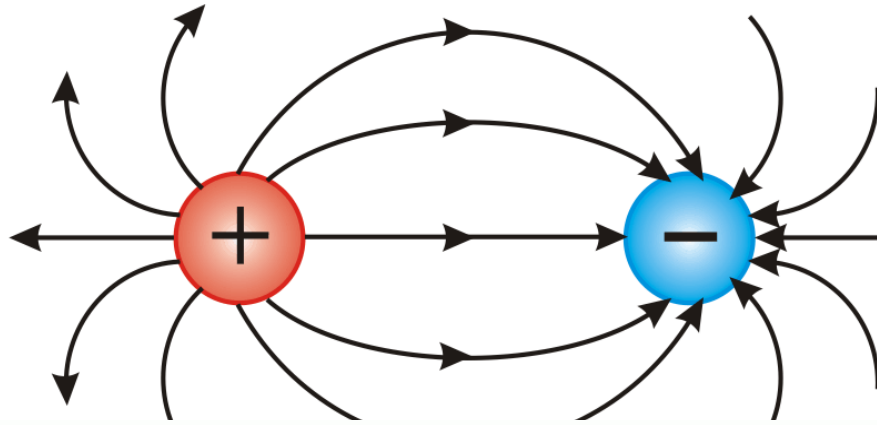


**Лінії напруженості** мають напрям, який співпадає з напрямком вектора напруженості. **Лінії напруженості ніколи не перетинаються.**

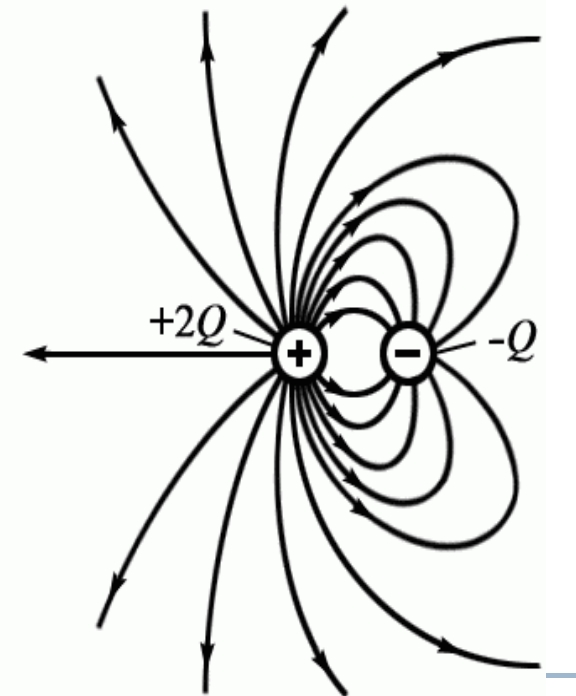
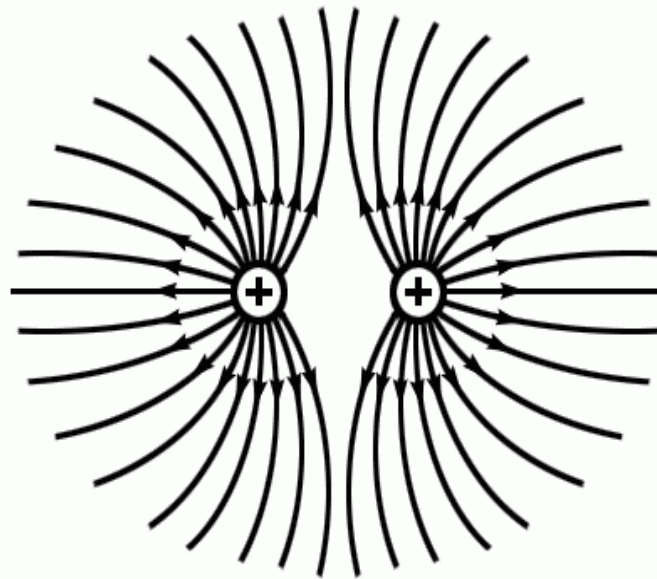
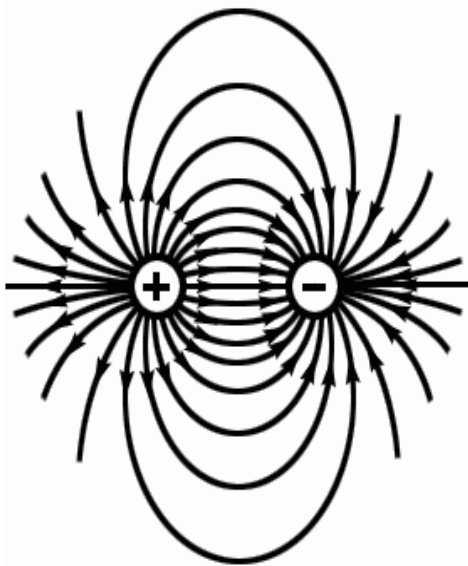
Для **однорідного поля** (коли вектор напруженості в будь-якій точці постійний по модулю і напрямку) **лінії напруженості паралельні вектору напруженості.**

Якщо поле створюється точковим зарядом, то лінії напруженості – радіальні прямі, - виходять із заряду, якщо він позитивний, і входять в нього, якщо він негативний

## Лінії напруженості електростатичного поля



*Для системи зарядів силові лінії спрямовані від позитивного заряду до негативного*



## Додавання електростатичних полів

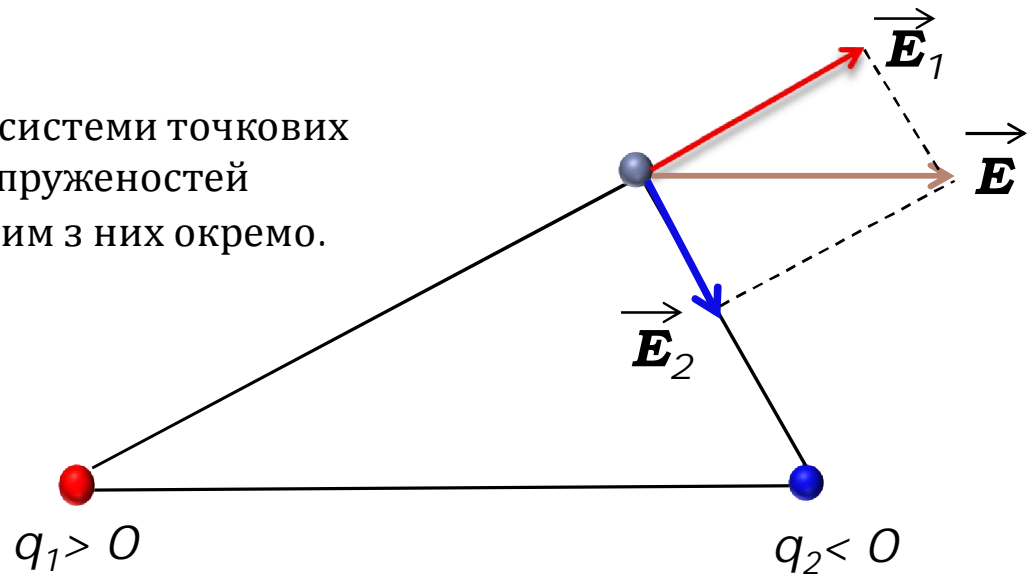
**Принцип незалежності дії сил** – результуюча сила, діюча збоку поля на пробний заряд рівна векторній сумі сил, прикладених до нього збоку кожного із зарядів, що створюють електростатичне поле

$$\vec{F} = \sum_k \vec{F}_k$$

### Принцип суперпозиції

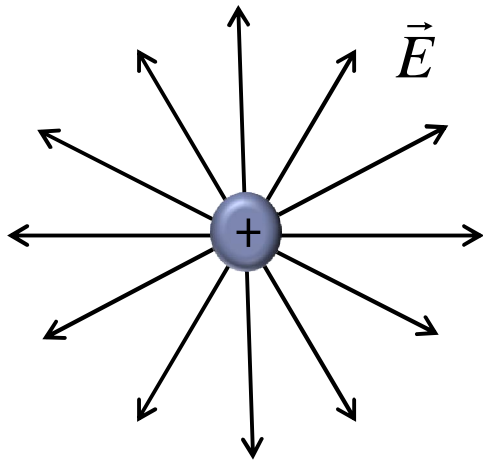
Напруженість результуючого поля, системи точкових зарядів дорівнює векторній сумі напруженостей полів, створених в даній точці кожним з них окремо.

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots = \sum_k \vec{E}_k.$$

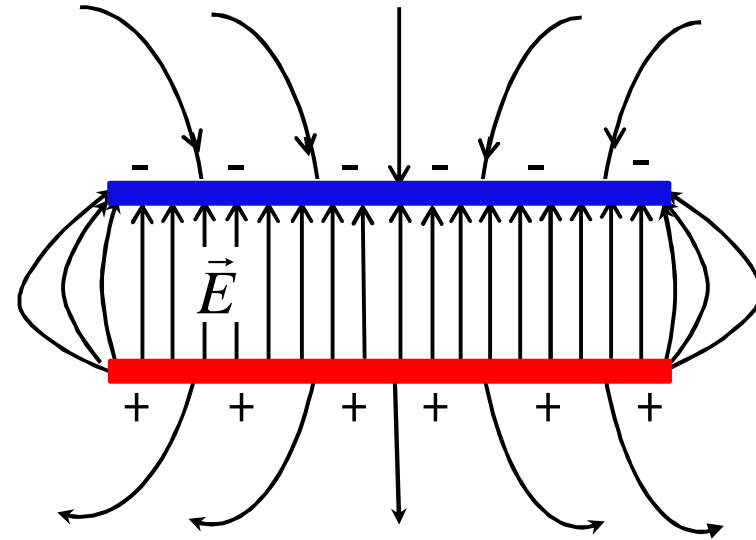


## Лінії напруженості електростатичного поля

---



Поле неоднорідне:  
густота ліній різна



Між пластинами поле однорідне –  
напрямок та густина ліній однакові





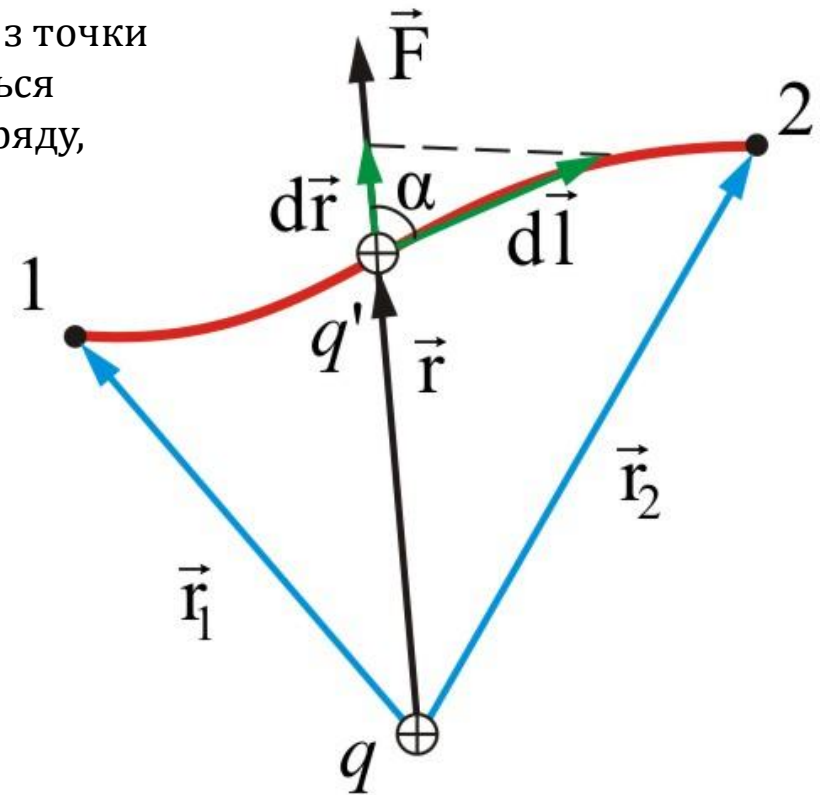
## Робота сил електростатичного поля

Якщо в електростатичному полі точкового заряду  $q$  з точки 1 в точку 2 вздовж довільної траєкторії переміщується інший точковий заряд  $q_0$ , то сила, прикладена до заряду, виконує роботу

$$dA = F dl \cos \alpha = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r^2} dl \cos \alpha,$$

$$dr = dl \cos \alpha,$$

$$dA = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r^2} dr.$$



Повна робота при переміщенні з точки 1 в точку 2 дорівнює інтегралу:

$$A_{12} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r^2} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \left( -\frac{1}{r} \right) \Big|_{r_1}^{r_2} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0} \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right).$$

## Робота сил електростатичного поля

Робота електростатичних сил не залежить від форми шляху, а тільки лише від координат початкової та кінцевої точок траєкторії.

Електростатичні сили консервативні, а саме поле - потенціальне.

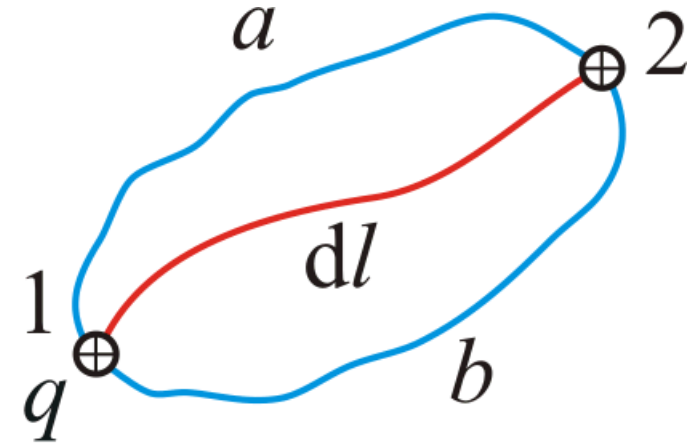
Роботу сил поля можна виразити через спад потенціальної енергії

$$A_{12} = W_1 - W_2.$$

$$A_{12} = \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r_1} - \frac{qq'}{4\pi\epsilon_0 r_2}.$$

$$\Rightarrow W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qq'}{r}$$

вираз для потенціальної енергії заряду  $q'$  в полі заряду  $q$



## Потенціал електростатичного поля

---

Різні заряди  $q'$ ,  $q''$ , ... будуть володіти в одній і тій же точці поля різними енергіями  $W'$ ,  $W''$  і так далі.

Але відношення  $W / q'$  буде для всіх зарядів однаковим

---

$$\varphi = \frac{W}{q'}$$

Можна вести **скалярну** величину, яка є енергетичною характеристикою даної точки поля - **потенціал**:

**Потенціал** чисельно дорівнює потенціальній енергії, якою володіє в даній точці поля одиничний позитивний заряд.

---

$$\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r}$$

**Потенціал** чисельно дорівнює **роботі**, яку здійснюють сили поля над одиничним позитивним зарядом при видаленні його з даної точки в нескінченність

---

$$\varphi = \frac{A_\infty}{q}$$

*Потенціал поля, що створюється системою зарядів, дорівнює алгебраїчній сумі потенціалів, створюваних кожним із зарядів окремо.*

---

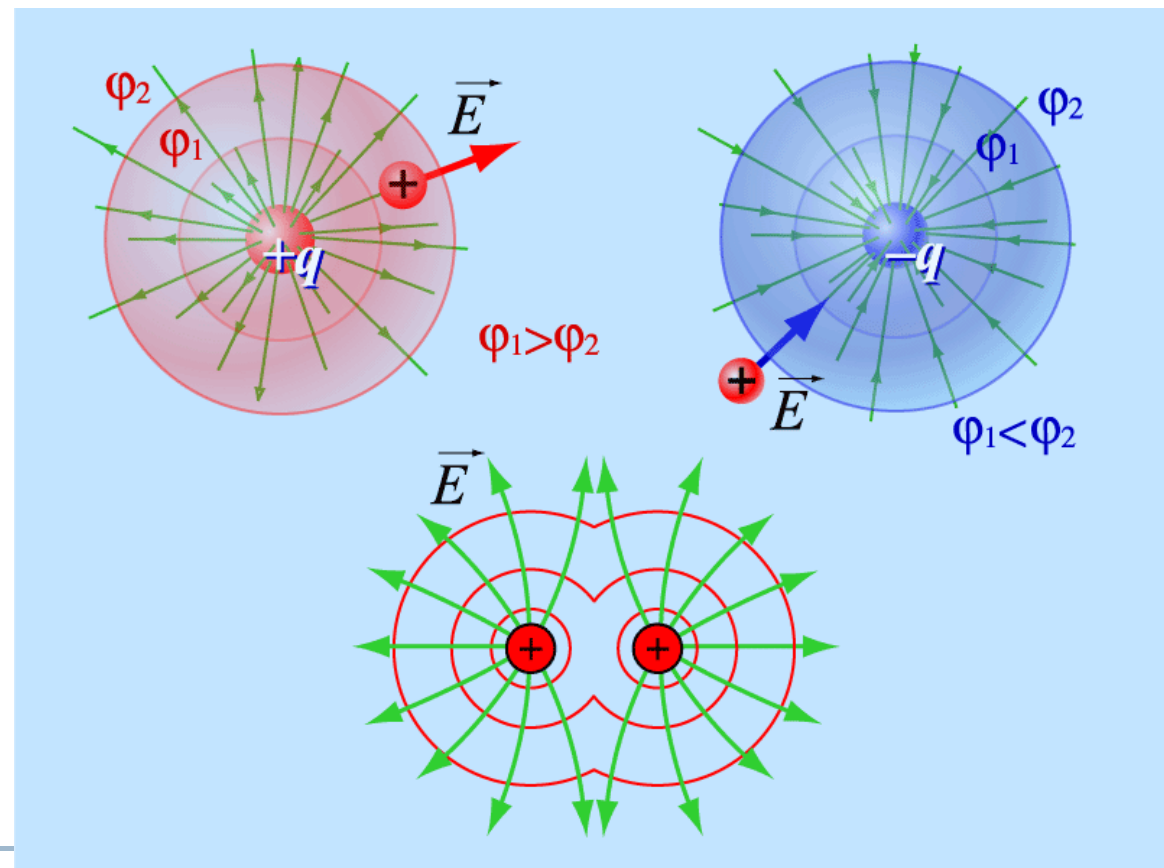
-----  
▶ *Одиниця потенціалу - вольт (В): 1В – потенціал такої точки поля, в якій заряд в 1 Кл володіє потенціальною енергією 1 Дж (1 В = 1Дж / 1Кл).*  
-----

## Еквіпотенціальні поверхні

Уявна поверхня, всі точки якої мають однаковий потенціал, називається **еквіпотенціальною поверхнею**.

**Принцип суперпозиції потенціалів електростатичних полів:**

якщо в деякій точці простору електростатичне поле створюється декількома зарядами водночас, то потенціал даної точки поля системи зарядів рівний алгебраїчній сумі потенціалів полів, що створюються в цій точці кожним зарядом окремо.



## Різниця потенціалів

---

Виразимо **роботу сил** електростатичного поля **через різницю потенціалів** між початковою і кінцевою точками траєкторії :

$$A_{12} = W_1 - W_2 = \varphi_1 q - \varphi_2 q = q(\varphi_1 - \varphi_2).$$

$$A = q(\varphi_1 - \varphi_2) = qU,$$

$$A = qU$$

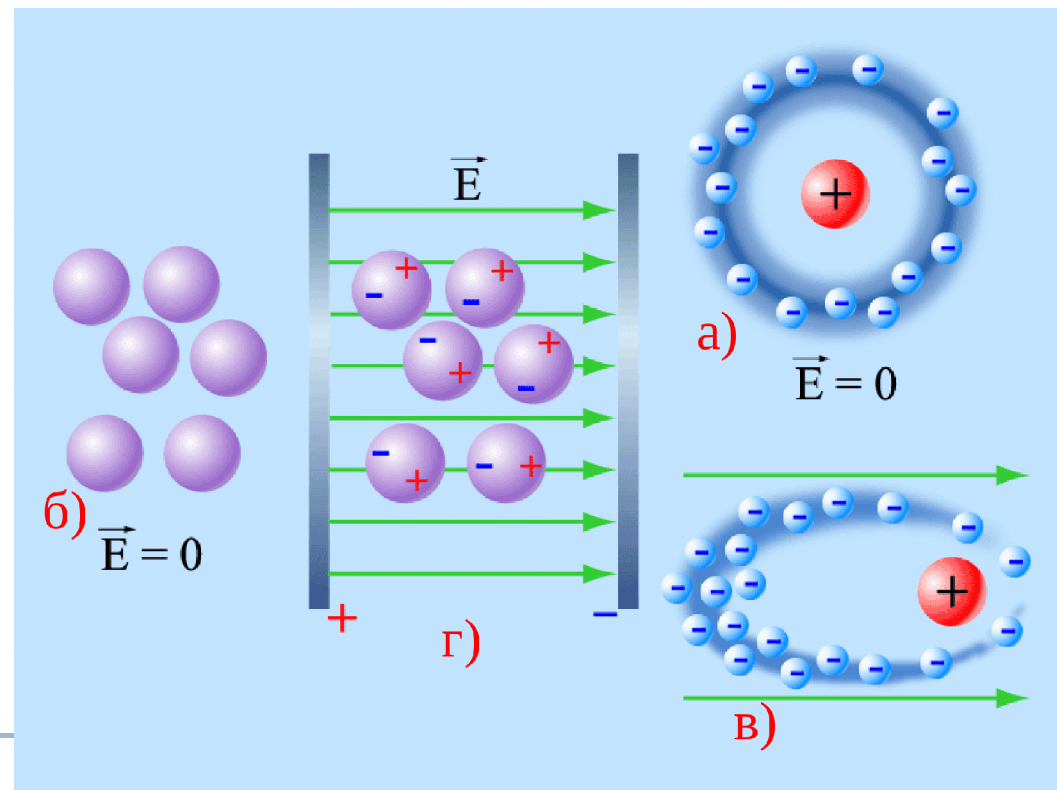
*Одиниця потенціалу - вольт (В): 1В - потенціал такої точки поля, в якій заряд в 1 Кл володіє потенціальною енергією 1 Дж (1 В = 1Дж / 1Кл).*



## Електростатичне поле в діелектричному середовищі

**Діелектрики** - речовини, які майже не проводять електричний струм.  
Діелектрики складаються з атомів, кожен з яких електрично нейтральний.

В ідеальному діелектрику вільних носіїв зарядів (здатних переміщатися на відстані переважаючі відстані між атомами), немає.



## Поляризація

Але діелектрик поміщений в електростатичне поле реагує на нього – на заряджені частинки з яких складаються атоми з боку поля діятиме сила Кулона

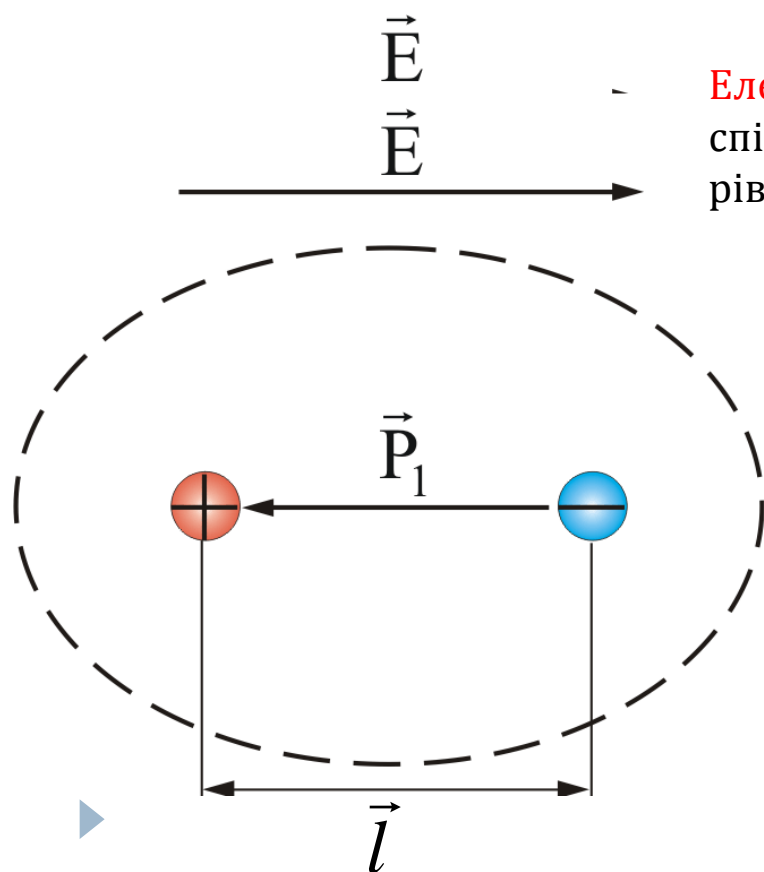
*Поляризація* - зміщення електричних зарядів речовини під дією електричного поля.  
*Здатність до поляризації є основною властивістю діелектриків.*



## Електричний диполь

**Електричний диполь** - система двох рівних по модулю різнойменних точкових зарядів (+q, -q) відстань між якими рівна  $l$

**Плече диполя** – вектор, направлений по осі диполя від негативного заряду до позитивного і рівний відстані між ними.

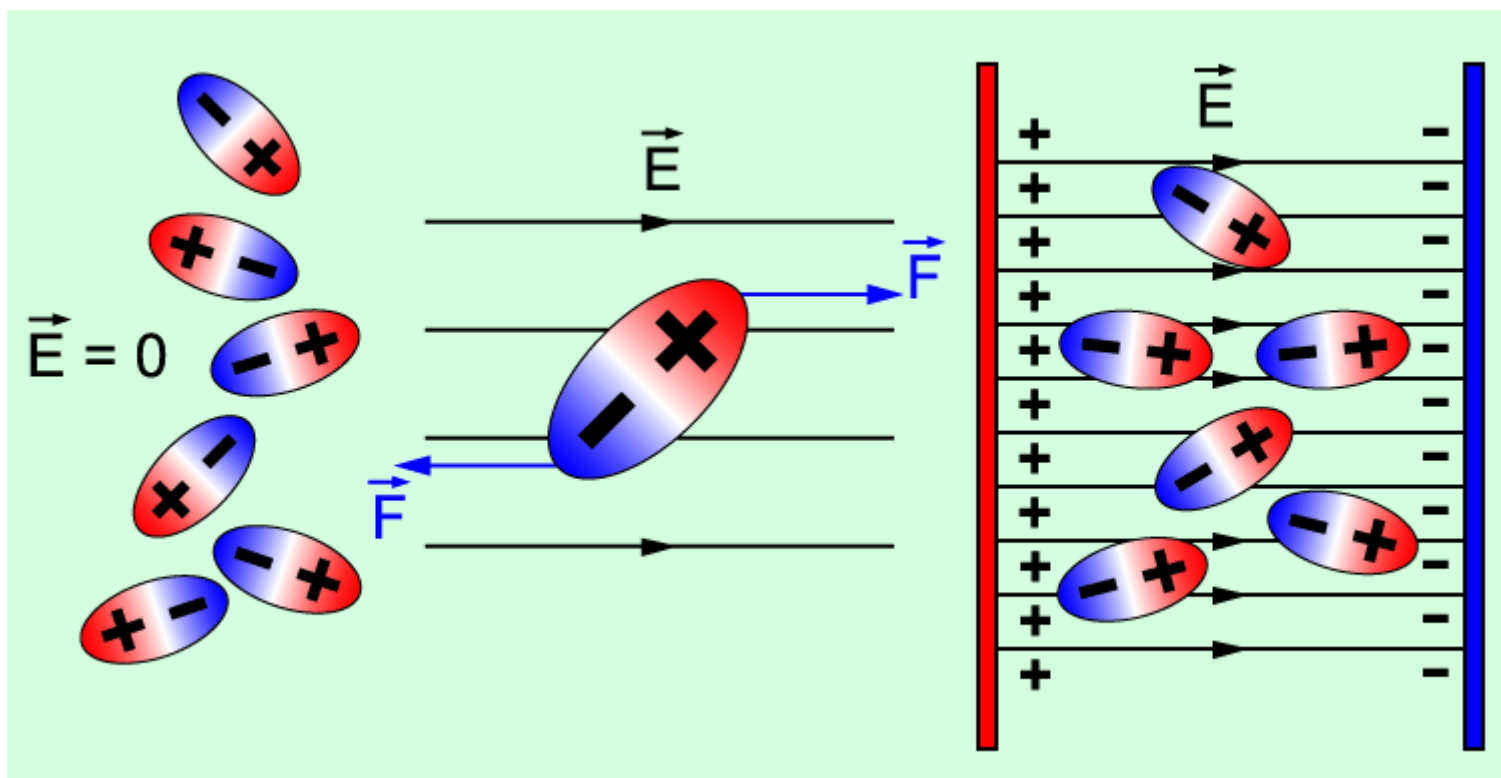


**Електричний момент диполя** – вектор, що співпадає за напрямом з плечем диполя і рівний добутку модуля заряду на плече:

$$\vec{P}_1$$

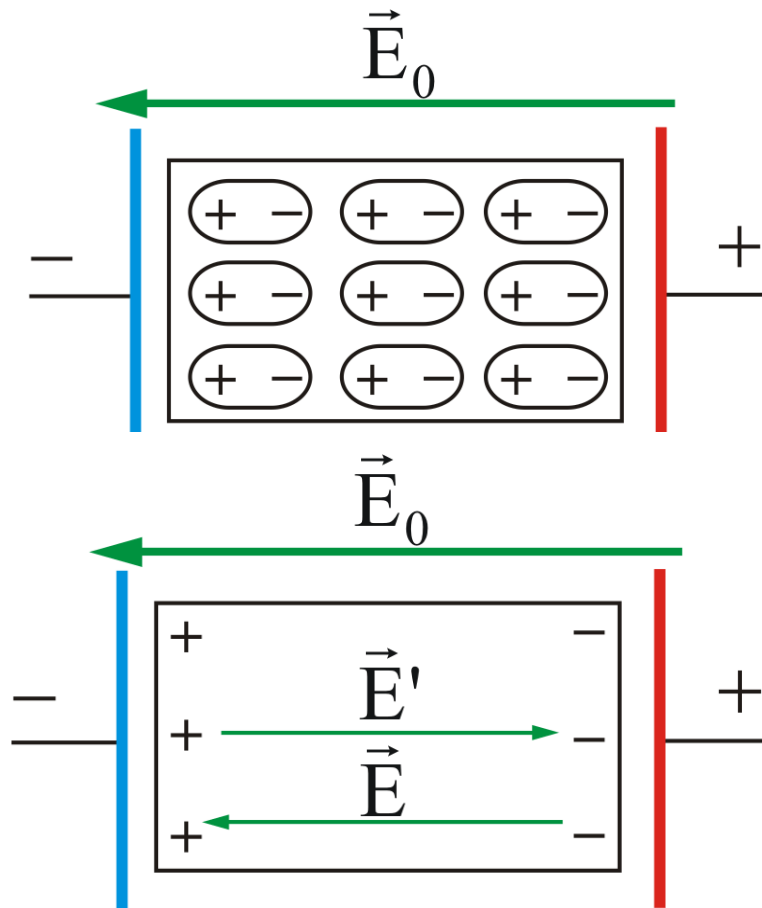
$$\vec{P}_1 = |q| \vec{l}$$





## Поляризація

Всередині діелектрика електричні заряди диполів компенсують один одного.  
Але на зовнішніх поверхнях діелектрика з'являються заряди протилежного знаку



$E_0$  зовнішнє поле

$E'$  електростатичне поле зв'язаних зарядів,  
напрявлене завжди проти зовнішнього поля

$$E = E_0 - E'$$

*результуюче електростатичне поле всередині  
діелектрика*

## Поляризованість

В зовнішньому електричному полі діелектрик об'ємом  $V$  *поляризується*, тобто *набуває дипольного моменту*

$$\vec{p}_V = \sum_i \vec{p}_i$$

**Поляризованість** – дипольний момент одиниці об'єму діелектрика

$$\vec{P} = \frac{\vec{p}_V}{V} = \frac{\sum_i \vec{p}_i}{V}$$

*Поле всередині діелектрика менше ніж зовнішнє*  $E = E_0 - E'$ .

Напруженість результуючого поля всередині діелектрика рівна  $E = \frac{E_0}{\epsilon}$

*Діелектрична проникність середовища  $\epsilon$*

Діелектрична проникність середовища характеризує здатність діелектриків поляризуватися в електричному полі та *показує в скільки разів поле послаблюється діелектриком*.

Вакуум	1
Повітря	1.0005
Папір	3
Гума	7
Вода	80

## Провідники

**Провідники** – речовини в яких є вільні (не звязані в складі атомів чи молекул) заряджені частинки (електрони в металах, іони в електролітах), які здатні переміщатися по всьому об'єму провідника під дією зовнішнього електростатичного поля.

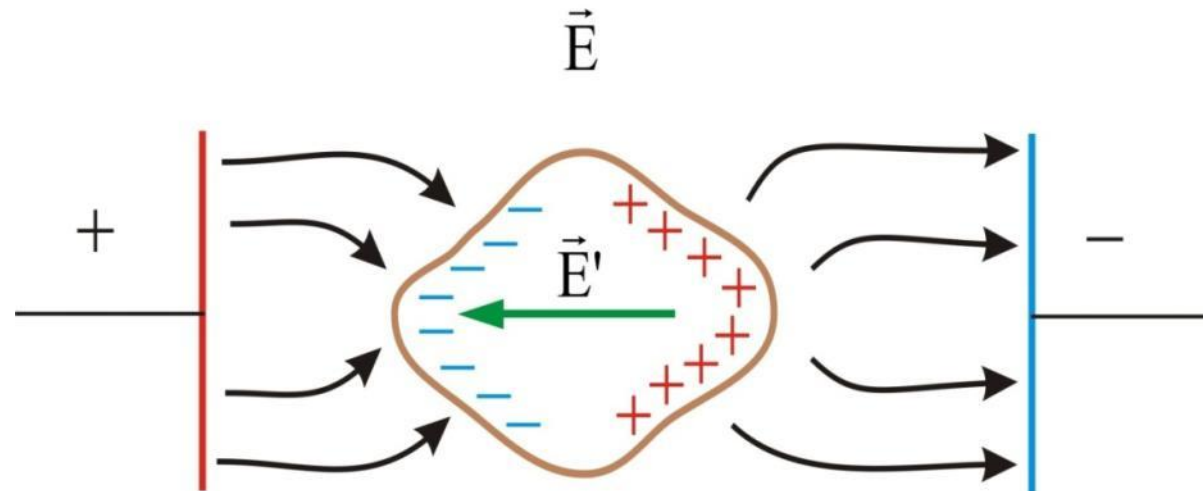
*Носіями заряду в металах є електрони.*

*При відсутності електричного поля метал є нейтральним - електростатичне поле створюване позитивними і негативними зарядами всередині нього компенсується.*



## Електростатична індукція

При внесенні металевого провідника в зовнішнє електростатичне поле, електрони провідності переміщуються до тих пір, поки усюди всередині провідника поле електронів провідності і позитивних іонів НЕ скомпенсує зовнішнє поле.



У будь-якій точці всередині провідника, що знаходиться в електростатичному полі :  $E = 0$ ;  $d\varphi = 0$ ; тобто  $\varphi = \text{const}$ .

*Електростатична індукція - явище перерозподілу зарядів в провіднику в зовнішньому електростатичному полі.*

## Електрична ємність

Якщо провідник зарядити, на його поверхні з'являється потенціал  $\varphi$ .

**Але** якщо цей же заряд передати іншому провіднику, то потенціал буде іншим, він залежить від геометричних параметрів провідника.

**В будь-якому разі, потенціал  $\varphi$  пропорційний заряду  $q$ .**

Фізична величина  $C$  рівна відношенню заряду провідника  $q$  до його потенціалу  $\varphi$ , називається **електричною ємністю цього провідника:**

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

*Електроємність ізольованого провідника чисельно рівна заряду, який потрібно надати цьому провіднику, щоб змінити його потенціал на одиницю (на 1 В).*

**Електроємність залежить від форми і розмірів провідника та від діелектричних властивостей середовища в якому цей провідник знаходиться.**

*Одиниця електроємності – фарад (Ф):*

*1 Ф – ємність провідника, потенціал якого змінюється на 1 В при наданні йому заряду 1 Кл.*

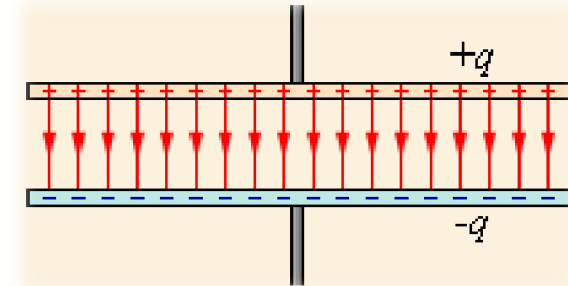
**Ємністю 1 Ф володіє куля з радіусом  $R = 9 \cdot 10^6$  км.**

**Ємність Землі – 0,7 мФ.**



## Конденсатори

**Конденсатор** – система з двох провідників (пластинок) з однаковими по модулю, але протилежними по знаку зарядами, форма і розташування яких така, що поле зосереджено у вузькому проміжку між пластинками.

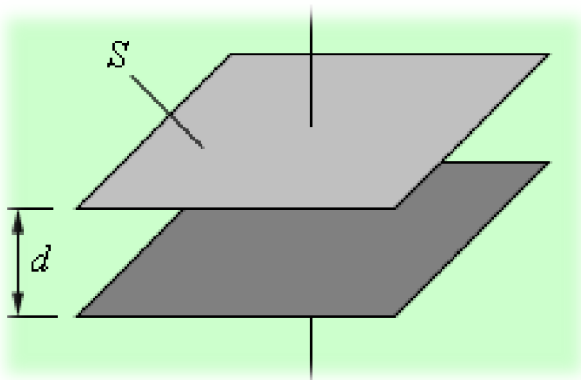


**Ємність конденсатора** – величина, рівна відношенню заряду  $q$  на пластині конденсатора до різниці потенціалів між пластинами:

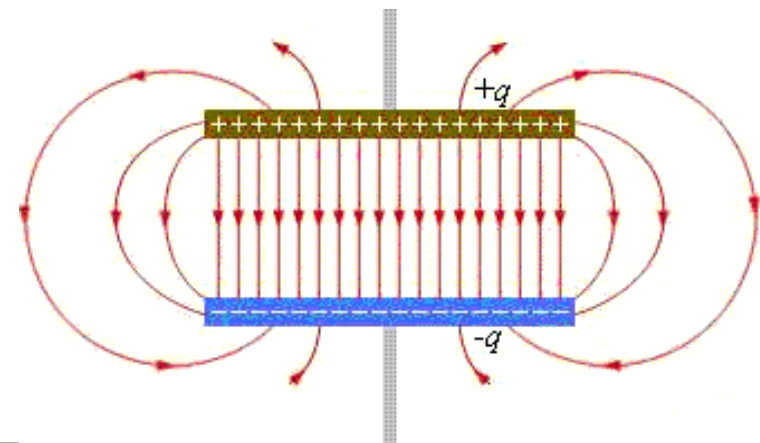
$$C = \frac{q}{\Delta\varphi}$$

**Ємність плоского конденсатора**

(дві паралельні пластини площею  $S$  кожна, розташовані на відстані  $d$  одна від одної)



$$C = \frac{q}{U} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d}$$



### Енергія системи нерухомих точкових зарядів

Для системи двох зарядів  $q_1$  і  $q_2$ , що знаходяться на відстані  $r$ , кожний з них в полі іншого володіє потенціальною енергією:

$$W_1 = q_1\varphi_{12} = q_1 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_2}{r} = q_2 \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1}{r} = q_2\varphi_{21} = W_2$$

$$W = q_1\varphi_{12} = q_2\varphi_{21} = \frac{1}{2}(q_1\varphi_{12} + q_2\varphi_{21})$$

---

### Енергія зарядженого конденсатора

$$W = \frac{q^2}{2C} = \frac{C(\varphi_1 - \varphi_2)^2}{2} = \frac{q\Delta\varphi}{2}$$





## Лекція 6

### Електродинаміка і магнетизм

1. Постійний електричний струм
2. Сила струму. Густина струму.
3. Електричний опір . Закон Ома.
4. Залежність опору від температури
5. Опір з'єднання провідників
6. Сторонні сили
7. Електрорушійна сила та напруга
8. Амперметр і вольтметр
9. Робота і потужність струму
10. Закон Джоуля-Ленца
11. Струм в газах
12. Магнітне поле
13. Дослід Ампера
14. Напрямок магнітного поля
15. Вектор магнітної індукції
16. Лінії магнітної індукції
17. Макроструми і мікроструми
18. Закон Ампера
19. Сила Ампера
20. Сила Лоренца
21. Потік вектора магнітної індукції
22. Робота по переміщенню провідника із струмом в магнітному полі
23. Явище електромагнітної індукції. Досліди Фарадея
24. Закон електромагнітної індукції Фарадея
25. Індуктивність контуру
26. Самоіндукція
27. Енергія магнітного поля



## Постійний електричний струм

**Електродинаміка** – розділ електрики, в якому розглядаються явища і процеси, обумовлені рухом електричних зарядів.

*За напрям струму приймають напрям руху позитивних зарядів.*

Кількісною мірою електричного струму служить **сила струму  $I$**  – скалярна величина, рівна відношенню заряду  $dq$ , що переноситься крізь дану поверхню за малий проміжок часу, до величини  $dt$  цього проміжку:

$$I = \frac{dq}{dt}$$

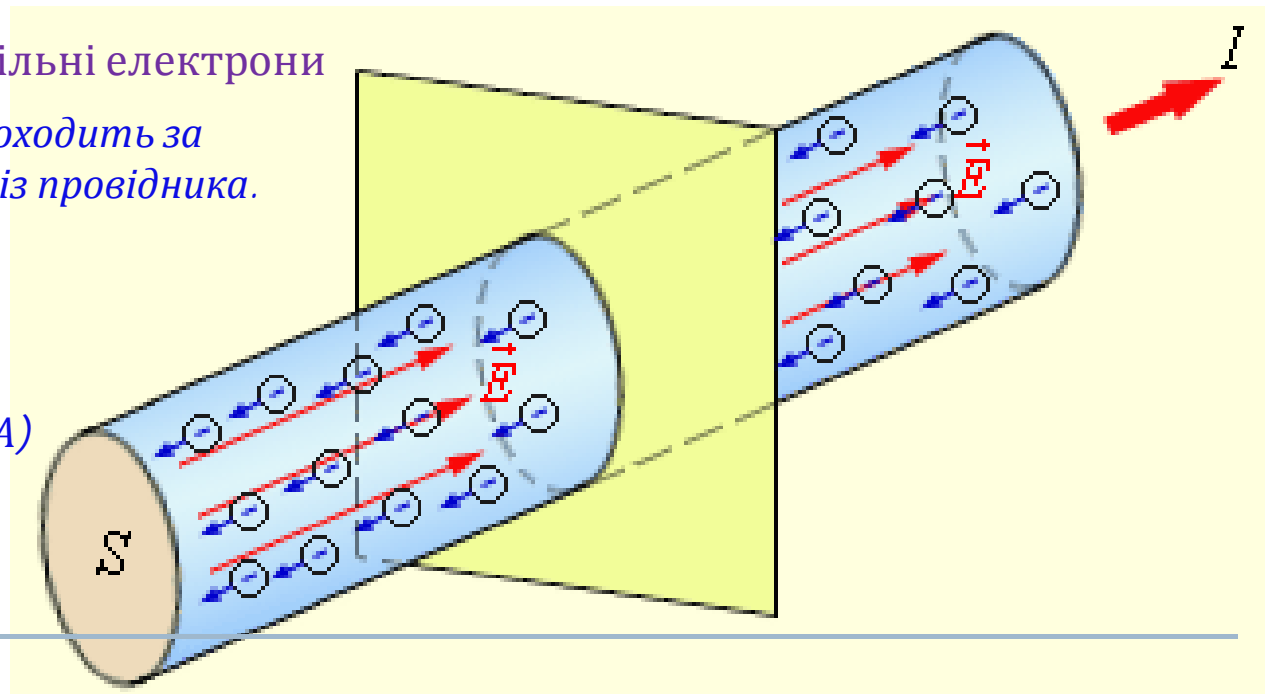
**Постійний електричний струм - сила струму і його напрям не змінюються з часом.**

Носіями струму в металах є вільні електрони

*$q$  – електричний заряд, що проходить за час  $t$  через поперечний переріз провідника.*

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

*Одиниця сили струму – ампер (А)*



## Постійний електричний струм

---

Для характеристики напрямку електричного струму в різних точках даної поверхні і розподілу сили струму по цій поверхні служить **вектор густини струму**  $\vec{j}$

Для постійного струму  $I$ , в провіднику перерізом  $S$

$$j = \frac{I}{S} \quad \text{Одиниця густини струму - А/м}^2$$

---


Для виникнення та існування електричного струму необхідно:

- 1) наявність вільних носіїв струму (електронів, іонів) здатних переміщатися впорядковано;
- 2) наявність електричного поля, енергія якого повинна якимсь чином поповнюватися.

*Якщо в колі діють тільки сили електростатичного поля, то переміщення носіїв відбувається таким чином, що потенціали всіх точок кола вирівнюються і електростатичне поле зникає.*

Для існування постійного струму необхідна наявність пристрою, здатного **створювати і підтримувати різницю потенціалів** за рахунок **дії сил не електростатичного походження**. Такі пристрої називаються **джерелами струму**.

---



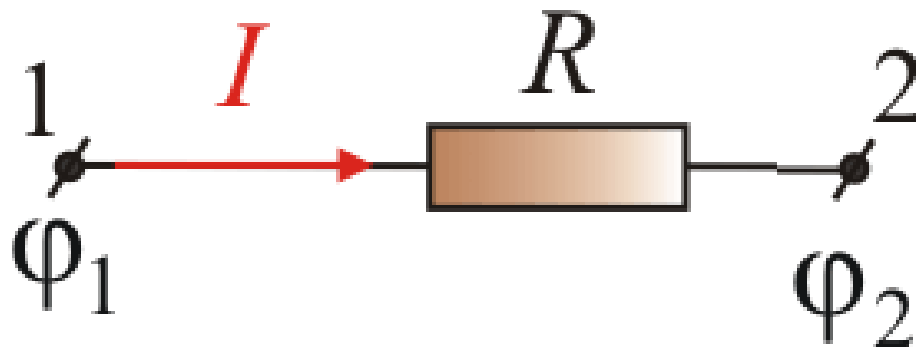
**Закон Ома для однорідної ділянки кола**  
(ділянки, що не містить джерела струму):

сила струму, що протікає по однорідному металевому провіднику, пропорційна напрузі на кінцях провідника (інтегральна форма закону Ома).

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



Коефіцієнт пропорційності  $R$  - *електричний опір провідника*.



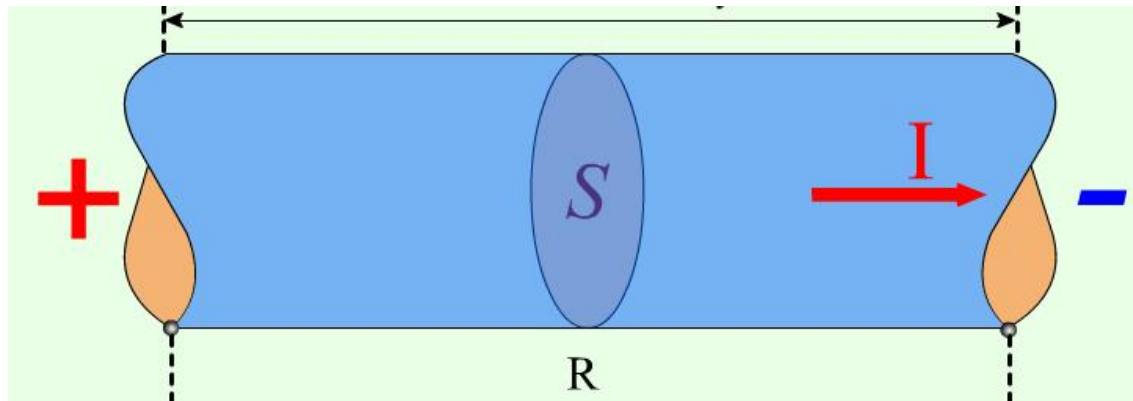
Одиниця електричного опору – Ом (Ом).

1 Ом - опір провідника, в якому при напрузі 1В тече постійний струм 1А.

## Електричний опір

---

Опір провідника залежить від його розмірів і форми та матеріалу з якого його виготовлено.  
Для провідника довжиною  $l$  площею поперечного перерізу  $S$  опір розраховується :



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

$\rho$  - питомий електричний опір - характеризує матеріал провідника

Одиниця питомого електричного опору – Ом · метр (Ом·м).

Величина обернена до питомому опору - питома електрична провідність речовини

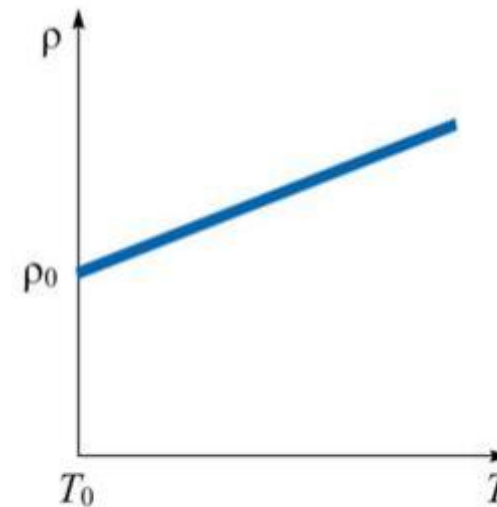
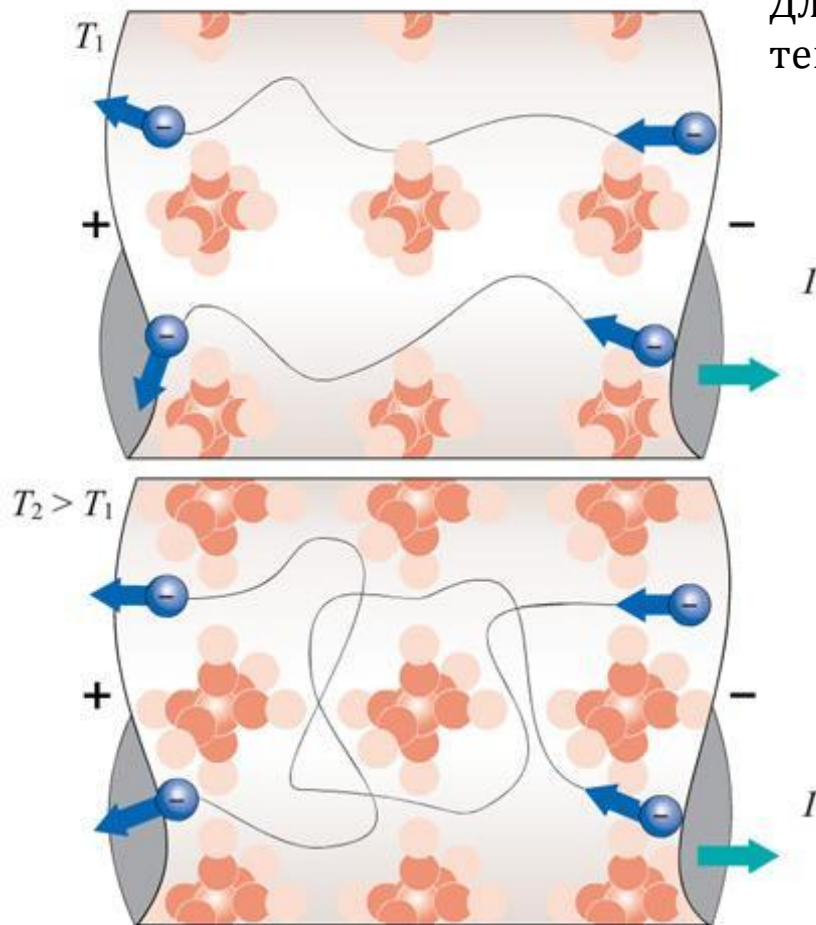
---



## Залежність опору від температури

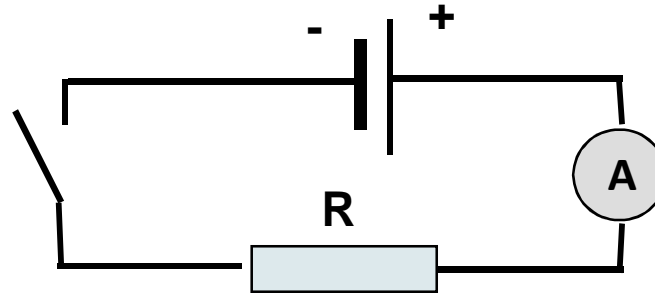
Для металів зміна питомого опору (а значить і опору) з температурою описується лінійним законом:

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

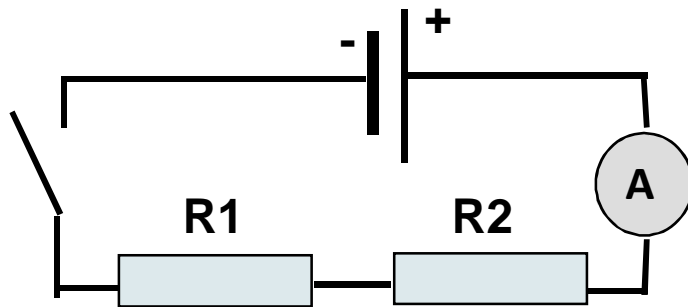


$\rho$  і  $\rho_0$  – питомі опори провідника при температурах  $t$  і  $0^\circ\text{C}$  (шкала Цельсія),  
 $\alpha$  – температурний коефіцієнт опору.

## Опір з'єднання провідників

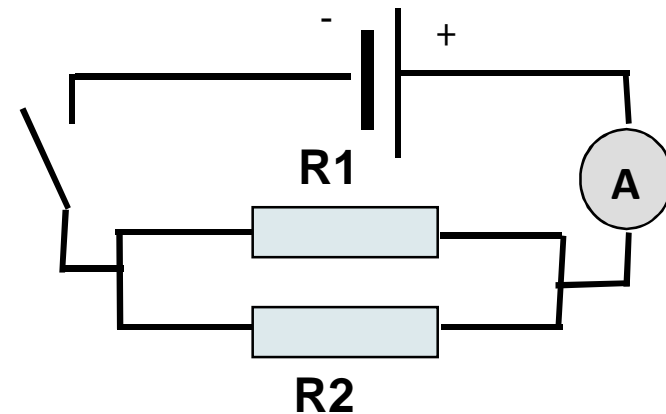


### Послідовне з'єднання провідників



$$I_1 = I_2 = I.$$
$$R = R_1 + R_2.$$

### Паралельне з'єднання провідників



$$U_1 = U_2 = U.$$
$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

## Сторонні сили

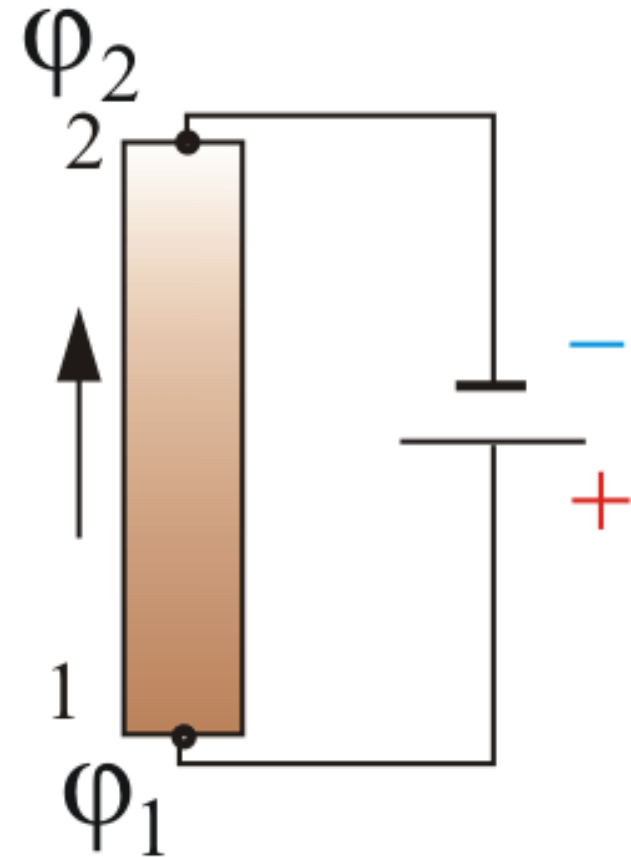
Сили неелектростатичного походження, що діють в джерелах струму- **сторонні сили**.

### Природа сторонніх сил.

В гальванічних елементах - енергія хімічних реакцій;  
в генераторі – механічна енергія обертання ротора,  
в сонячних батареях – енергія фотонів.

Роль джерела струму в електричному колі - насос,  
який підтримує постійний тиск рідини в системі.

*Під дією поля сторонніх сил електричні заряди рухаються всередині джерела струму проти сил електростатичного поля, завдяки чому на кінцях кола підтримується різниця потенціалів і в колі існує постійний електричний струм.*





## Електрорушійна сила та напруга

Фізична величина, що визначається роботою, яку виконують сторонні сили при переміщенні одиничного позитивного заряду, називається *електрорушійною силою* (ЕРС), що діє в електричному колі:

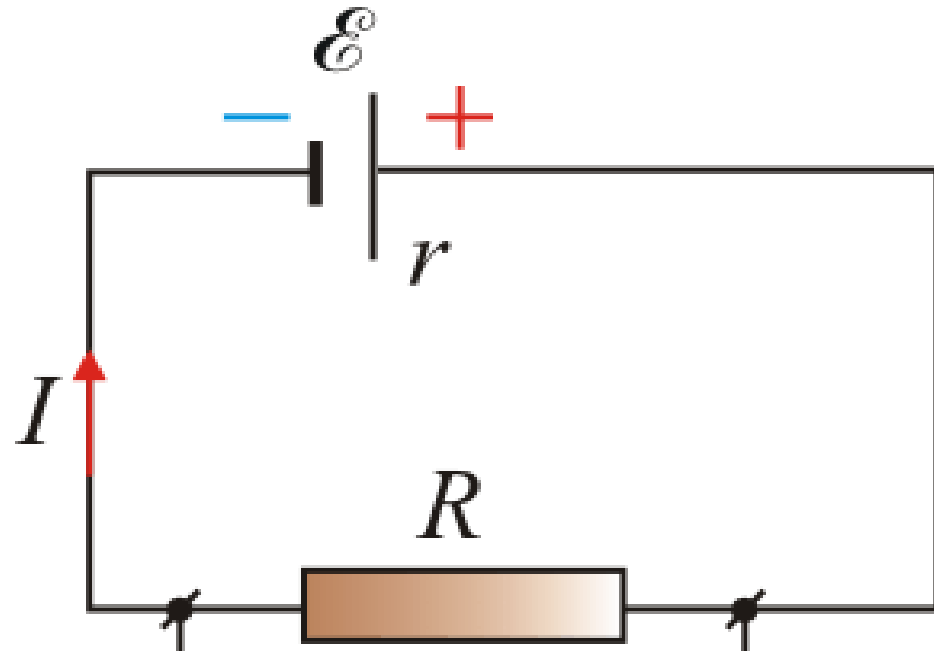
$$\mathcal{E} = \frac{A_{ст}}{q}$$

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

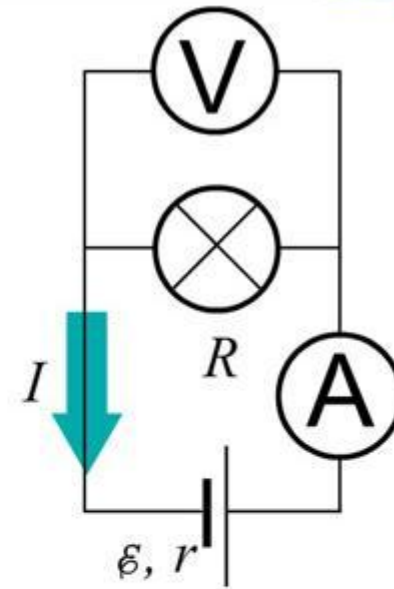
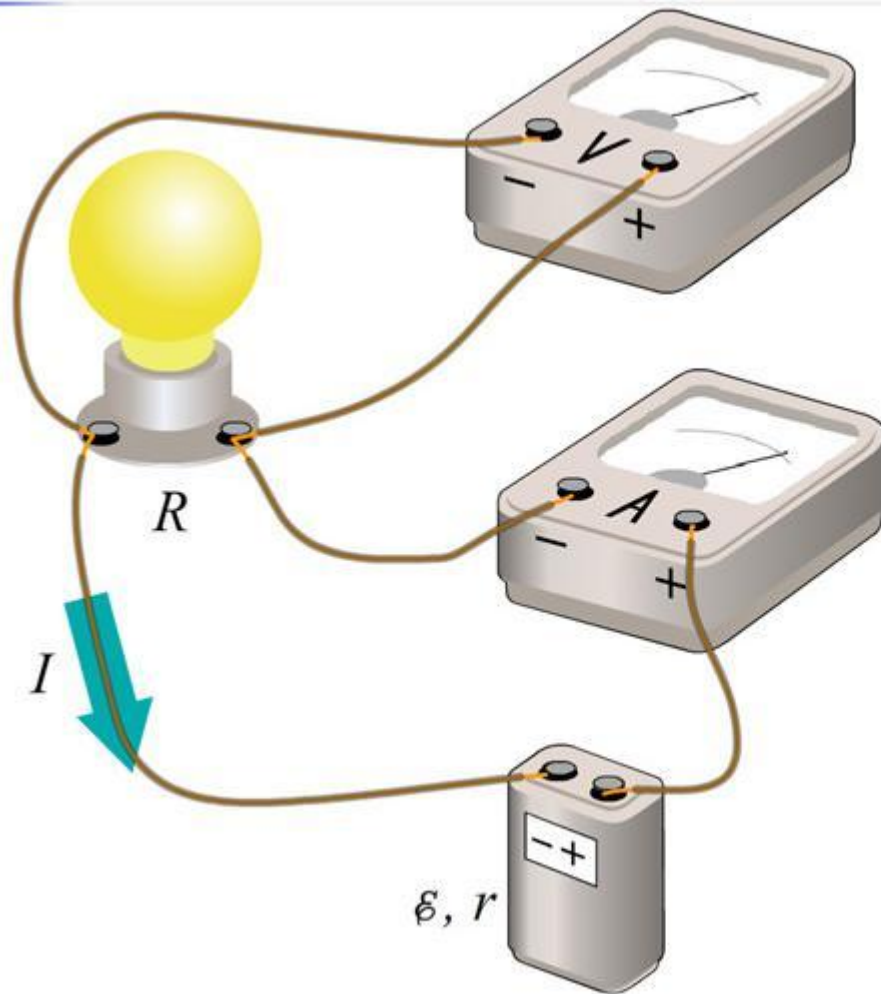
*r* – внутрішній опір джерела струму

Фізичний зміст внутрішнього опору джерела струму – визначає його *ККД*, тобто ефективність перетворення енергії механічного, магнітного чи хімічного походження в енергію електричного поля

$$\eta = \frac{R}{R + r}$$



## Амперметр і вольтметр



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

## Робота і потужність струму

### Робота струму

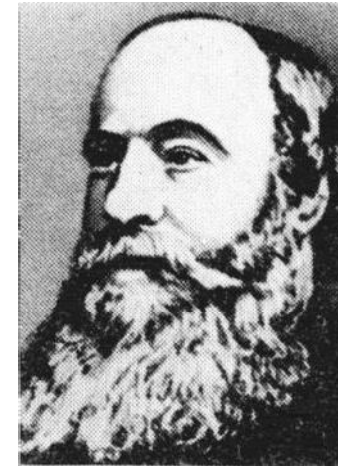
Кулонівські і сторонні сили при переміщенні заряду  $q$  уздовж електричного кола виконують роботу  $A$ .

Розглянемо однорідний провідник з опором  $R$  до кінців якого прикладено напругу  $U$ .

За час  $t$  через переріз провідника переноситься заряд  $q = \frac{I}{S}$

Робота по переміщенню заряду  $q_0$  між двома точками поля рівна:  $A_{12} = q_0 \Delta \varphi$

$$A = qU = IUt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t$$
$$[A] = [Кл \cdot В] = [Дж]$$



Джеймс Джоуль

**Потужність струму** - робота виконана за одиницю часу

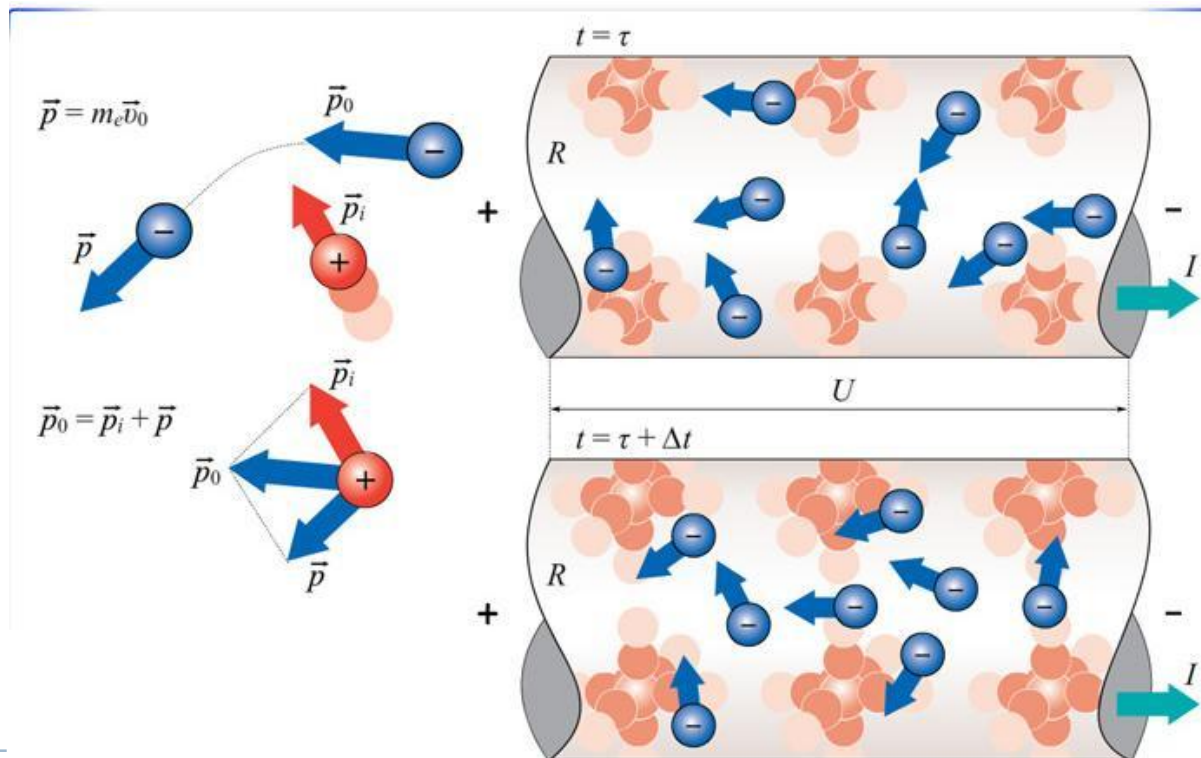
$$P = \frac{A}{t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$
$$[P] = [A \cdot В] = [Вт]$$

## Закон Джоуля-Ленца

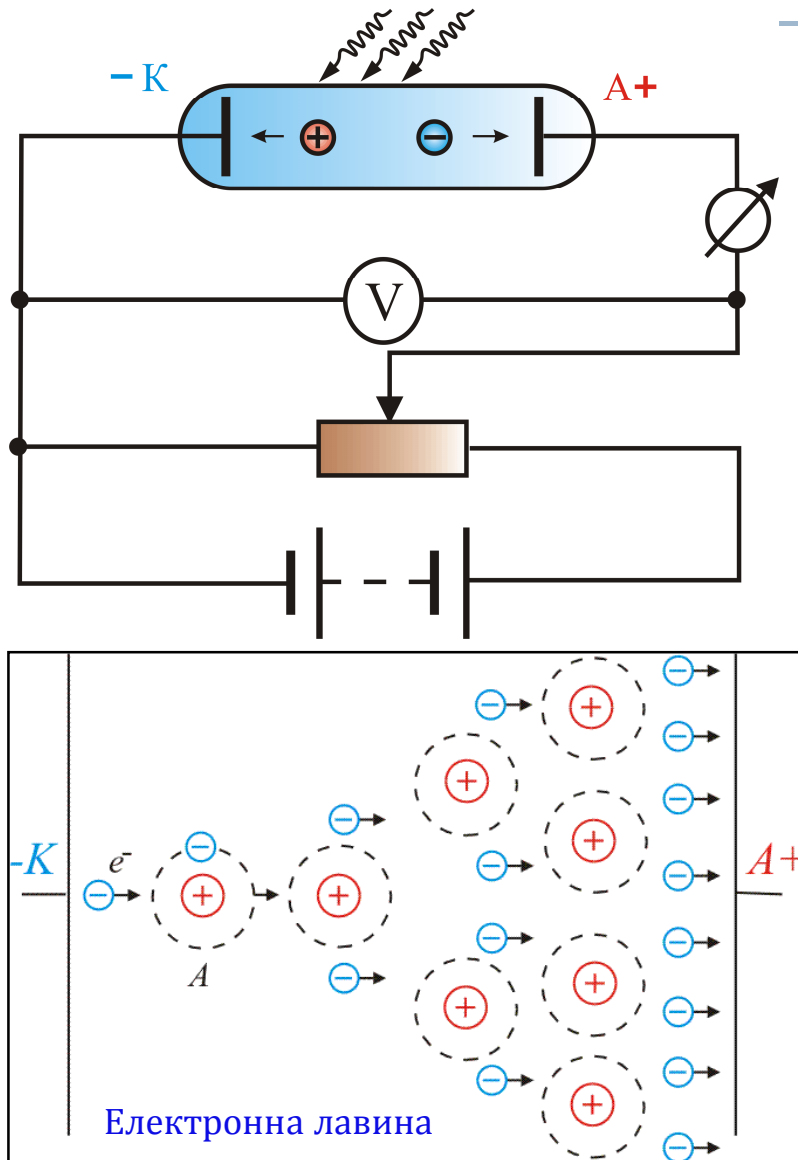
При проходженні струму по провіднику відбувається розсіювання енергії внаслідок зіткнень носіїв струму між собою та іонами у вузлах кристалічної ґратки провідника. Якщо струм проходить по нерухомому провіднику, то вся робота струму  $A$  йде на нагрівання провідника (виділяється теплота  $Q$ ).



Емілій Ленц



## Струм в газах



Під дією іонізатора (нагрів, опромінення частинками великих енергій) нейтральні молекули (атоми) газу розщеплюються на іони і вільні електрони - **іонізація газу**.

**Енергія іонізації** - енергія, яку треба затратити, щоб з молекули (атома) вибити один електрон.

**Рекомбінація** - процес, зворотний до іонізації: позитивні і негатив-ні іони, позитивні іони і електрони, зустрічаючись об'єднуються, утворюючи нейтральні атоми і молекули.

**Газовий розряд** - проходження електричного струму через іонізований газ.

**Несамостійний газовий розряд** - розряд, який існує тільки під дією зовнішніх іонізаторів.

**Самостійний газовий розряд** - розряд, що триває після припинення дії зовнішнього іонізатора.

## Струм в газах

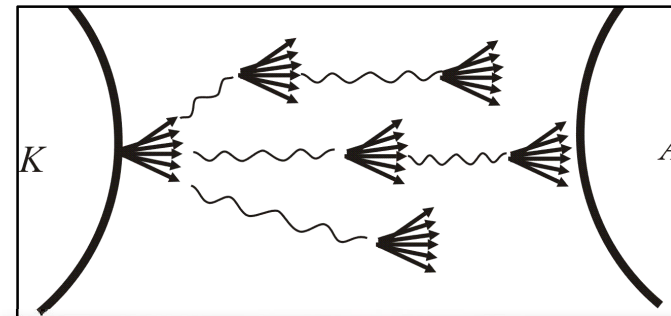
### Типи самостійного розряду

1. Тліючий розряд – виникає при низькому тиску.



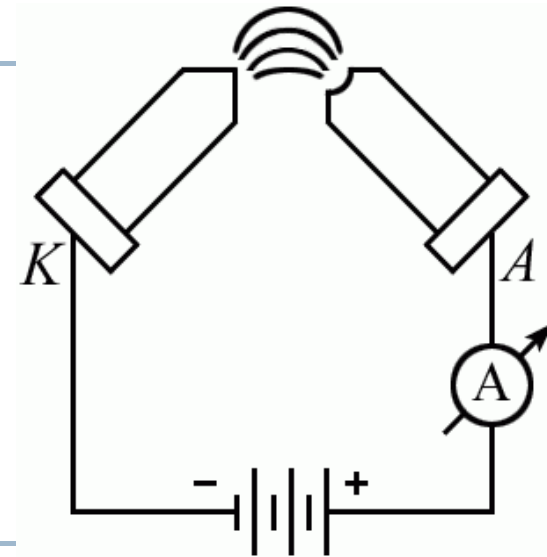
2. Іскровий розряд – виникає при великій напруженості електричного поля в газі, знаходиться під тиском порядку атмосферного

- Діаметр каналу блискавки 1 см,
- Температура в каналі 25 000°C,
- Тривалість розряду 0,01 с
- Струм -1 млн ампер

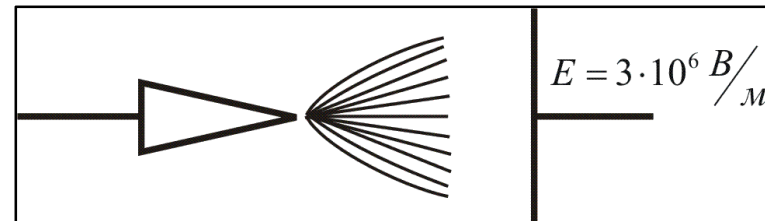


## Струм в газах

3. **Дуговий розряд** – виникає якщо після запалювання іскрового розряду від потужного джерела поступово зменшувати відстань між електродами;



4. **Коронний розряд** – виникає при високому тиску в різко неоднорідному полі поблизу електродів з великою кривизною поверхні.



## Магнітне поле

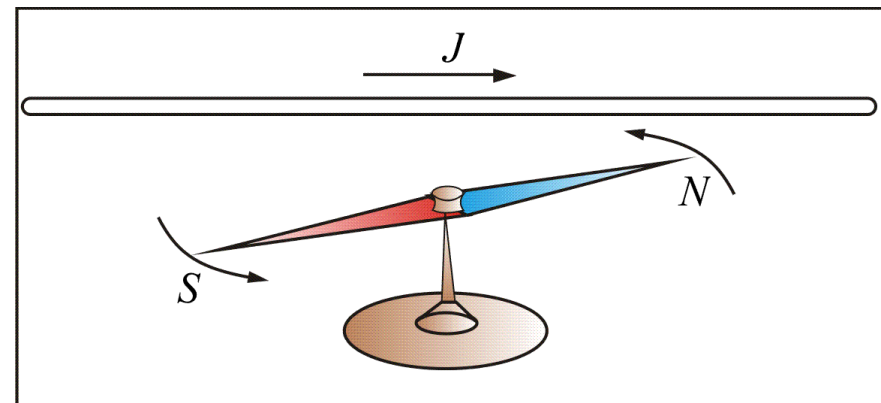
Подібно тому, як в просторі навколо електричних зарядів, виникає **електростатичне поле**, в просторі, що оточує струми і постійні магніти, виникає **магнітне поле**.

### *Основні властивості*

- 1) магнітне поле діє тільки на рухомі заряди;
- 2) рухомі заряди створюють магнітне поле.

*Дія магнітного поля на провідник з струмом залежить від*

- 1) форми провідника, по якому тече струм;
- 2) розташування провідника
- 3) напрямку струму.



*Матеріальним носієм магнітного поля є електричний струм*



## Магнітне поле

---



*1600 р. Англійський вчений-фізик Вільям Гільберт  
«Про магніт, магнітні тіла та великий магніт - Землю»*



*А. Ампер встановив закони магнітної взаємодії  
струмів та пояснив магнетизм речовин  
існуванням молекулярних струмів.*



*У 1820 р. Х. Ерстед відкрив  
магнітне поле електричного  
струму.*



## Дослід Ампера

При приміщенні магнітної стрілки в біля провідника зі струмом, стрілка відхиляється; після виключення струму стрілка повертається у вихідне положення.

### Висновок

*навколо прямолінійного провідника зі струмом існує магнітне поле.*

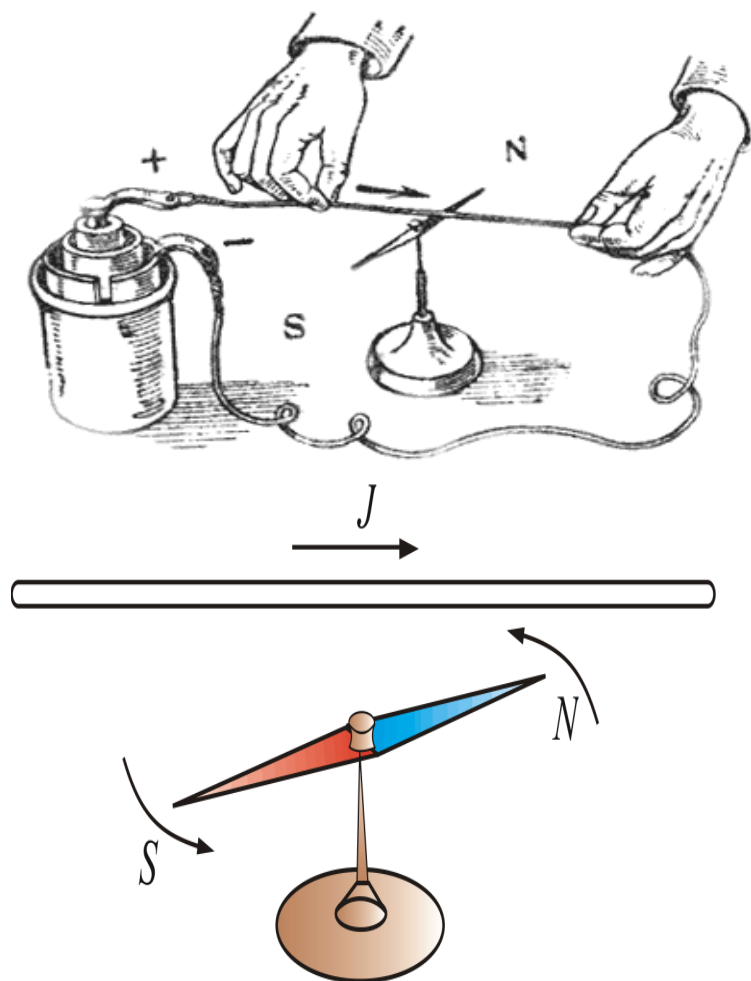
### Були встановлено

- 1) магнітне поле діє на рухомі заряди;
- 2) рухомі заряди створюють магнітне поле.

Магнітне поле не діє на нерухомі заряди.

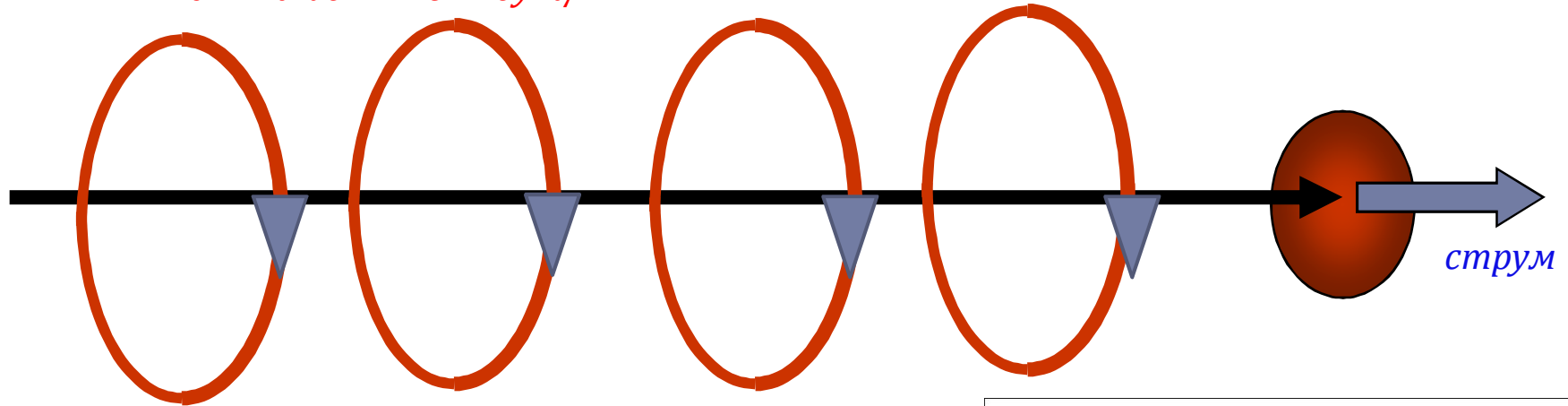
Характер дії магнітного поля на струм залежить від

- (1) форми провідника, по якому тече струм;
- (2) розташування провідника
- (3) напрямку струму.



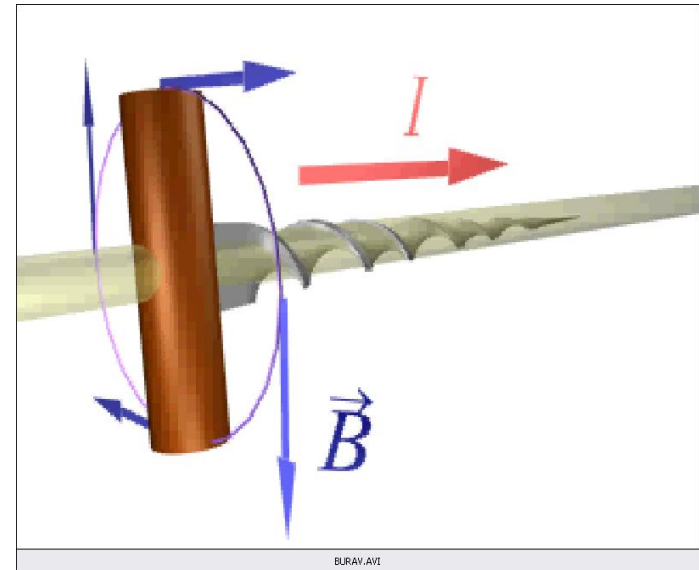
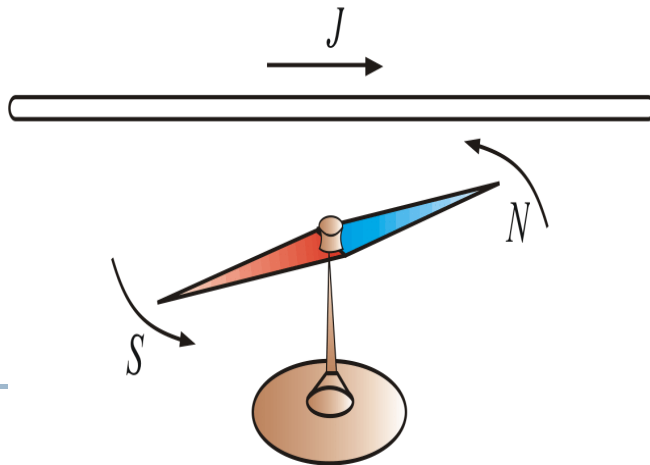
## Напря́м магнітного поля

*Лінії магнітної індукції*



*Напрямок орієнтації магнітної стрілки*

За напрям магнітного поля напрям, який співпадає з напрямом сили, діючої на північний полюс (N) магнітної стрілки, поміщений в дану точку поля.



## Вектор магнітної індукції

Силова характеристика електростатичного поля – напруженість сила, що діє на пробний заряд

Силова характеристика магнітного поля – магнітна індукція

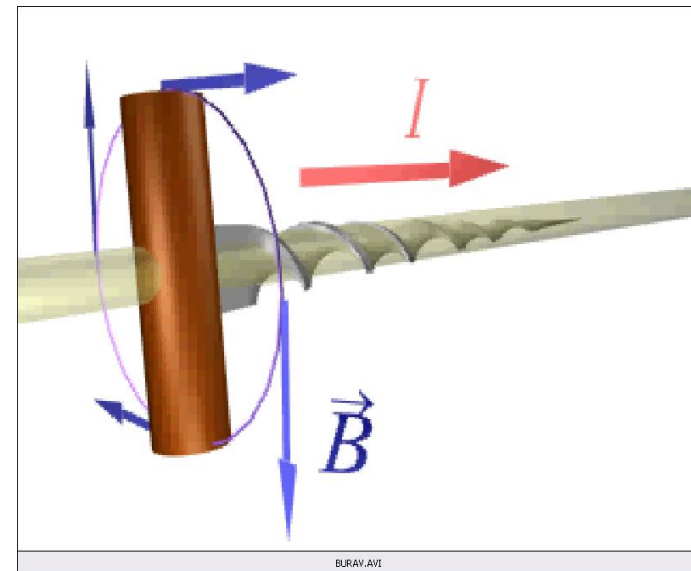
Магнітна індукція визначається силою, що діє на провідник зі струмом в магнітному полі .

Графічно магнітне поле, так само як електричне, зображають за допомогою **ліній магнітної індукції** – ліній, дотичні до яких в кожній точці співпадають з напрямом вектора  $\vec{B}$

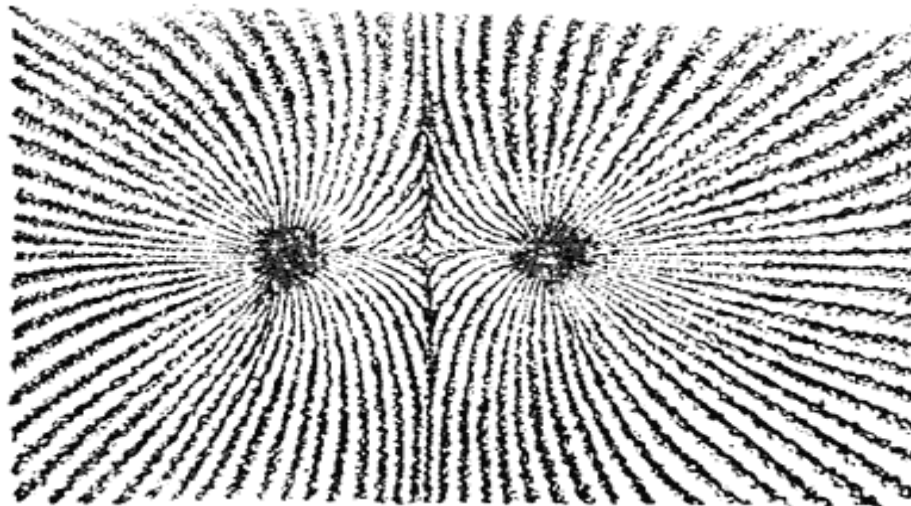
$\vec{B}$

**Лінії магнітної індукції замкнуті** і охоплюють провідники із струмом,

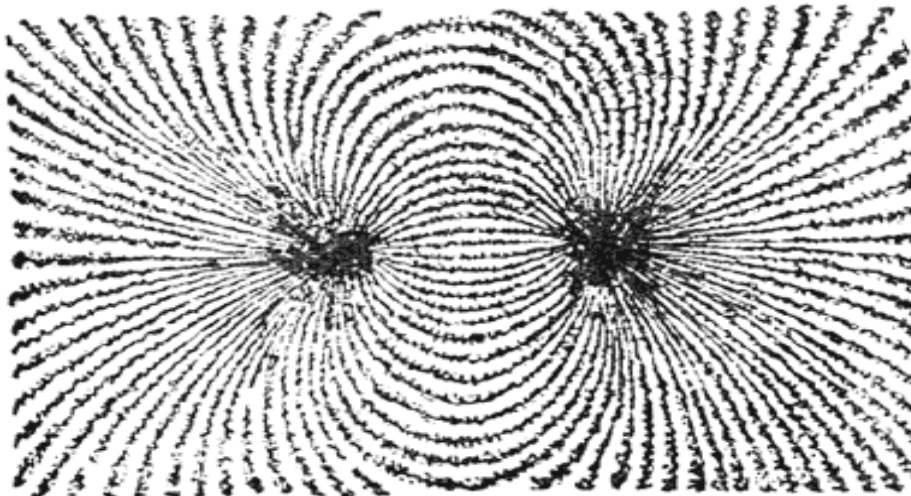
**Лінії напруженості електростатичного поля розімкнуті** (вони починаються на позитивних і закінчуються на негативних зарядах).



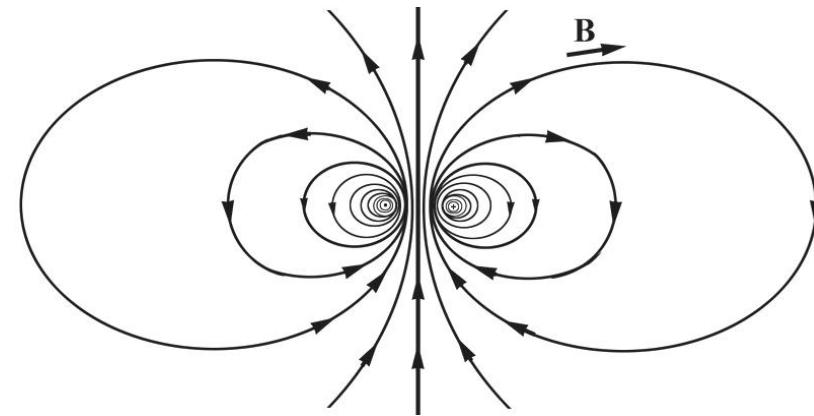
## Лінії магнітної індукції



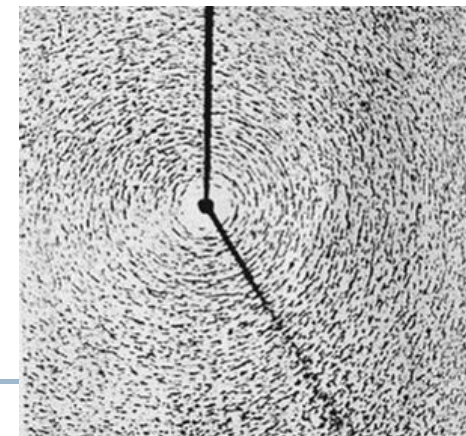
*Два однойменні полюси*



► *Два різнойменні полюси*

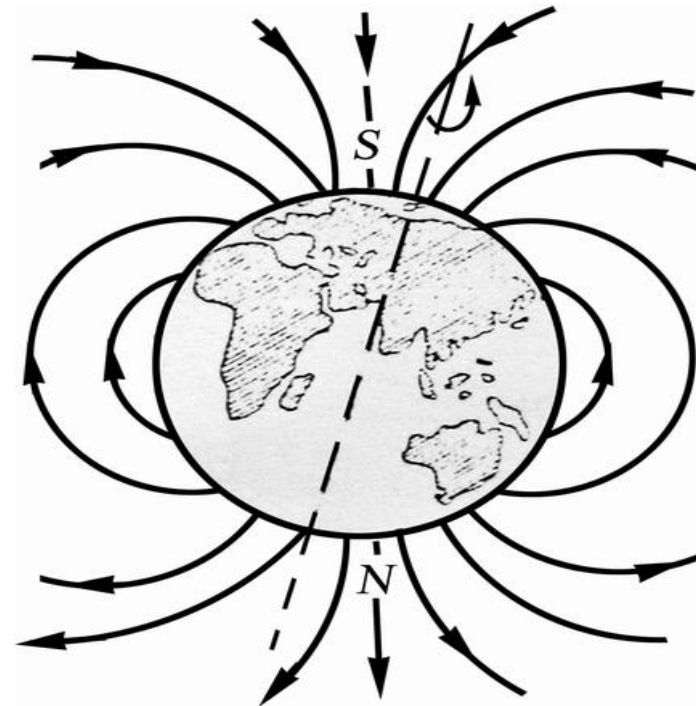
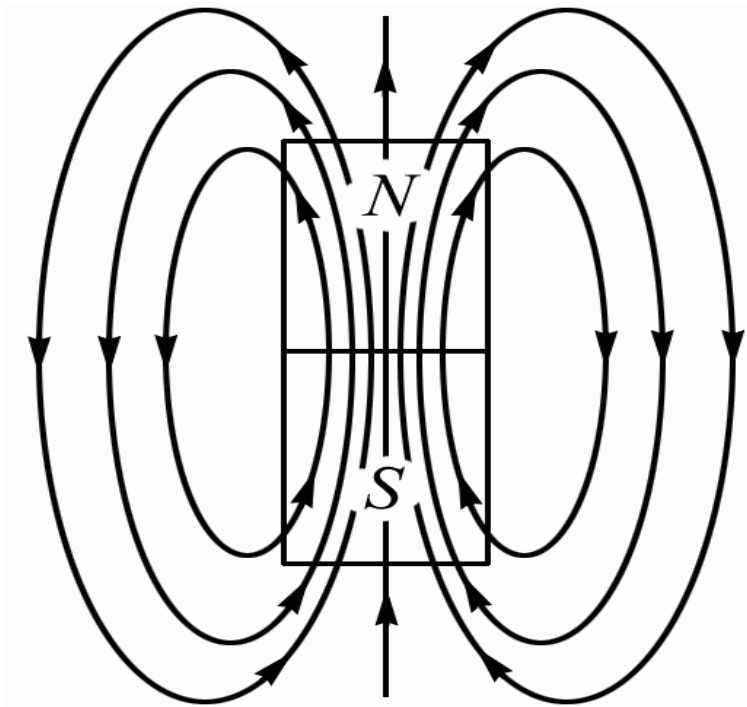


Домовилися, за напрям вектора  $\vec{B}$  вважати напрям північного полюсу магнітної стрілки



## Вектор магнітної індукції

Силі лінії (лінії магнітної індукції) виходять з північного полюса, а входять в південний полюс магніту.



## Макроструми і мікроструми

---

**Макроскопічні струми** - електричні струми, що протікають по провідниках.

**Мікроскопічні струми** - електричні струми, обумовлених рухом електронів в атомах і молекулах.

*Намагніченість постійних магнітів є наслідком існування в них мікрострумів.*

Зовнішнє магнітне поле здійснює орієнтуючу дію на ці мікроструми.

*Якщо поблизу якогось тіла помістити провідник із струмом (макрострум), то під дією його магнітного поля мікроструми у атомах орієнтуються, створюючи в тілі магнітне поле*

*Вектор магнітної індукції характеризує результуюче магнітне поле, створюване всіма макро- і мікрострумами.*



## Закон Ампера

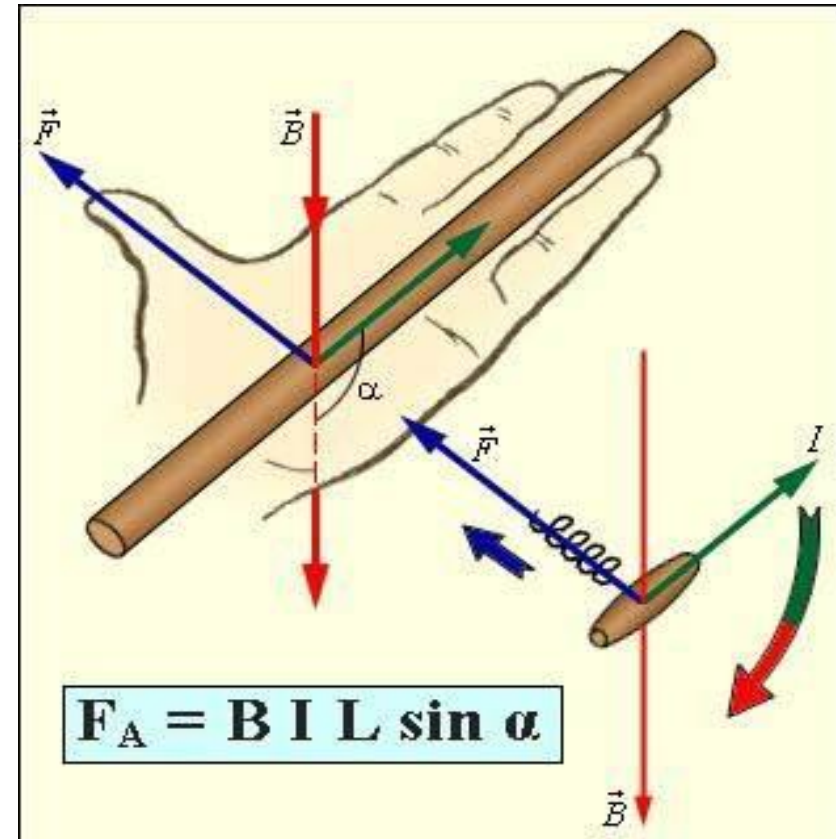
*Сила, з якою магнітне поле діє на помещений в нього провідник зі струмом*

дорівнює добутку сили струму, модуля вектора магнітної індукції, довжини відрізка провідника і синуса кута між напрямками струму і магнітної індукції

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

**Напрямок сили Ампера** прийнято визначати за правилом лівої руки:

*якщо долоню лівої руки розташувати так, щоб в неї входив вектор магнітної індукції, а чотири витягнуті пальці розташувати по напрямку струму в провіднику, то відігнутий великий палець вкаже напрям сили Ампера*



Одиниця магнітної індукції – тесла (Тл) – магнітна індукція такого магнітного поля, яке діє з силою 1 Н на кожен метр довжини провідника, розташованого перпендикулярно напрямку поля, якщо по цьому провіднику проходить струм 1 А:

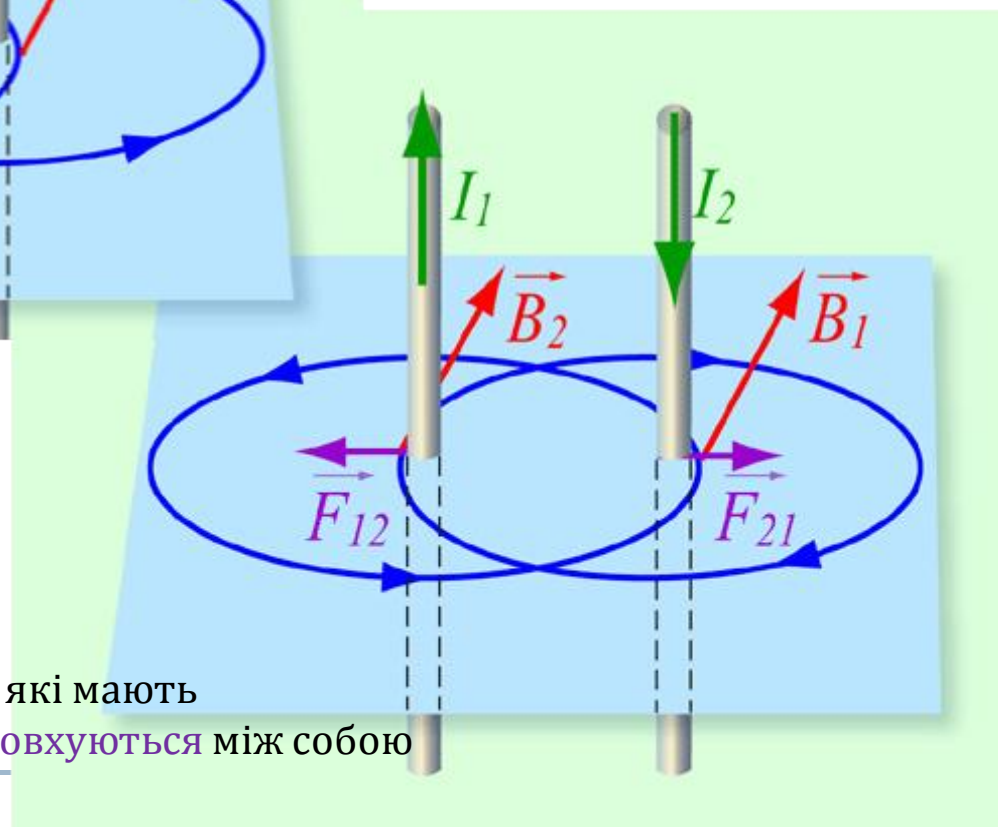
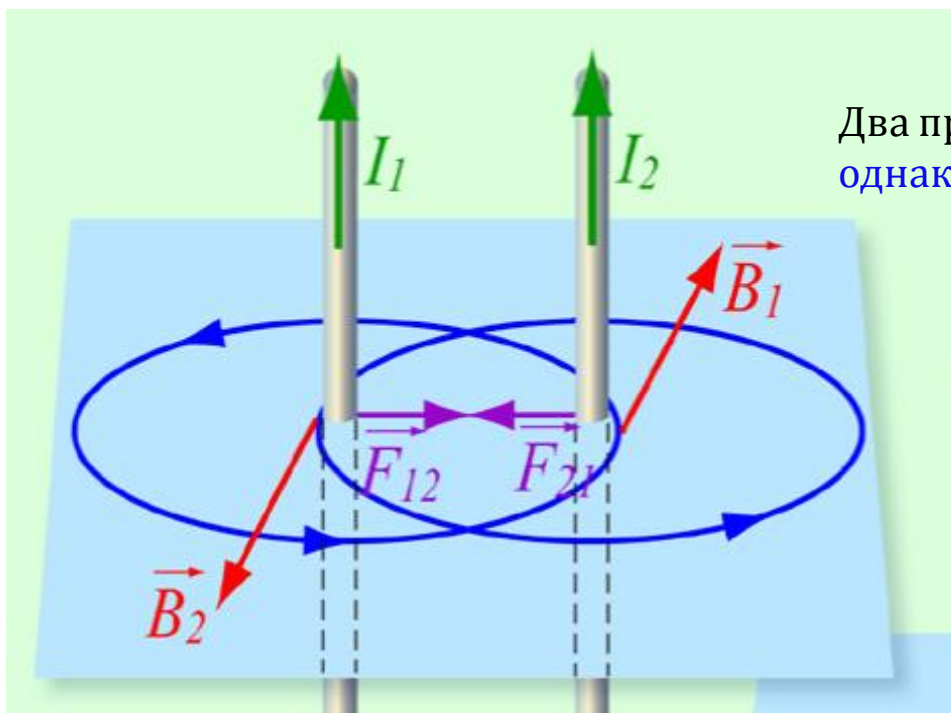
$$1 \text{ Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \times \text{м}}$$





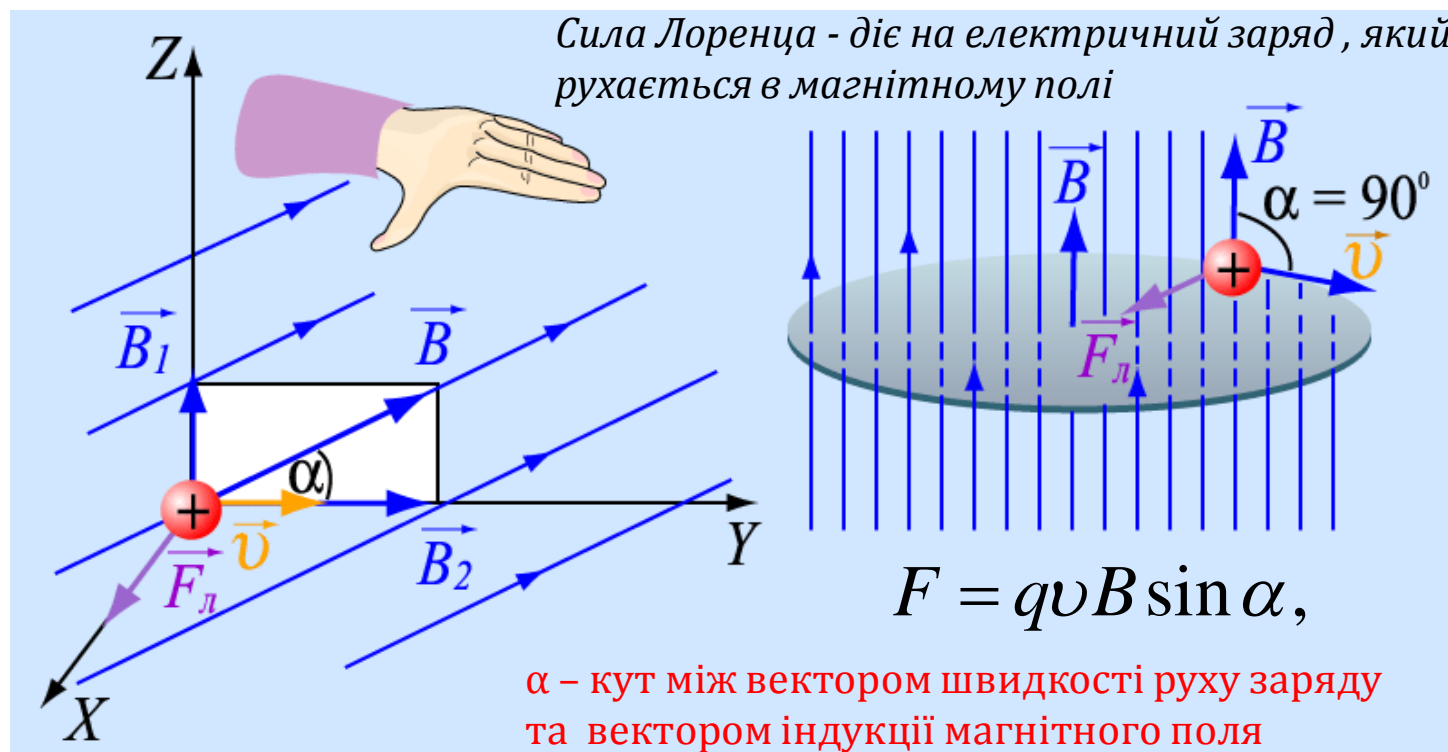
## Сила Ампера

Два провідники з струмами , які мають однакові напрямки притягуються між собою



Два провідники з струмами , які мають протилежні напрямки відштовхуються між собою

## Сила Лоренца



Напрямок сили Лоренца, що діє на позитивно заряджену частинку визначається за правилом лівої руки.

Сила Лоренца завжди перпендикулярна до швидкості руху зарядженої частинки, тому вона змінює тільки напрям цієї швидкості, не змінюючи її модуля.

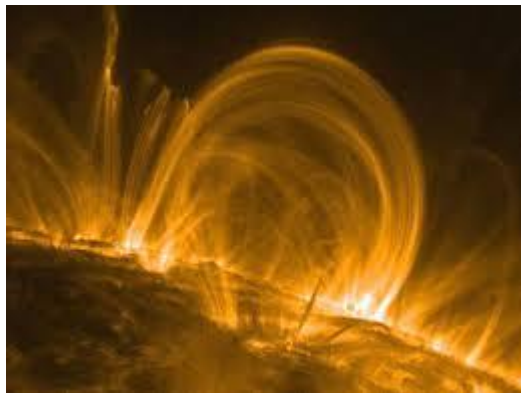
Постійне магнітне поле не виконує роботи над зарядженою частинкою, яка рухається в ньому; кінетична енергія частинки при русі в магнітному полі не змінюється.

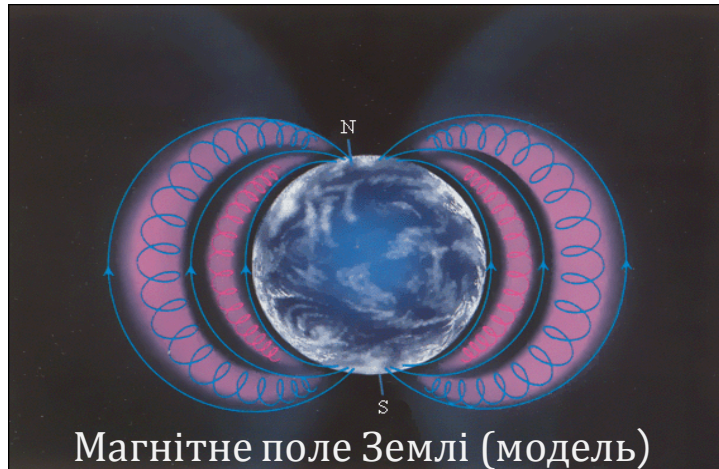


## Сила Лоренца. Північне сяйво.



**Сонячний вітер** - потік іонізованих частинок (протонів та електронів), що виривається з сонячної корони зі швидкістю 300-1200 км/с в навколишній космічний простір.

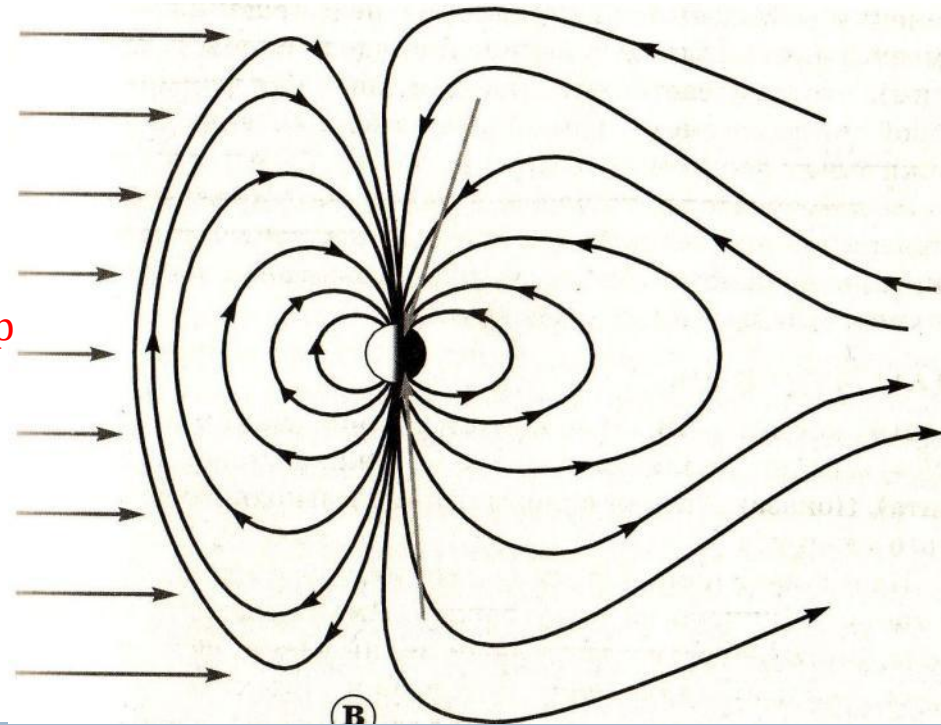




### Природа і походження полярних сійв

Дійсна картина силових ліній геомагнітного поля показана на малюнку. Сонячний вітер як би підтискає поле з денного боку, при цьому на нічній стороні лінії поля виявляються відкинутими далеко від Землі, утворюючи довгий «хвіст».

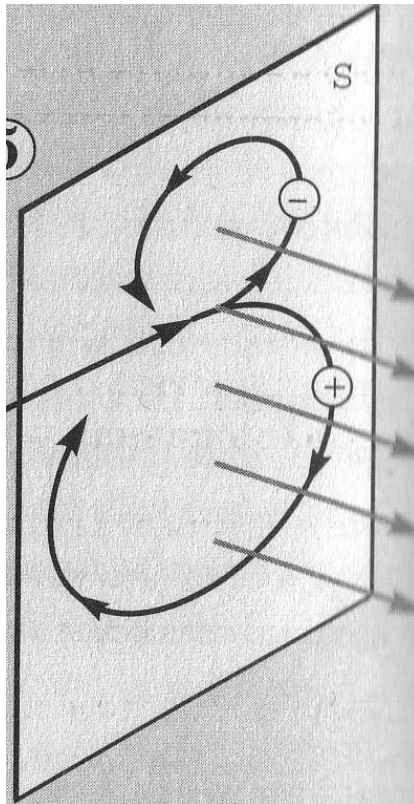
Сонячний вітер



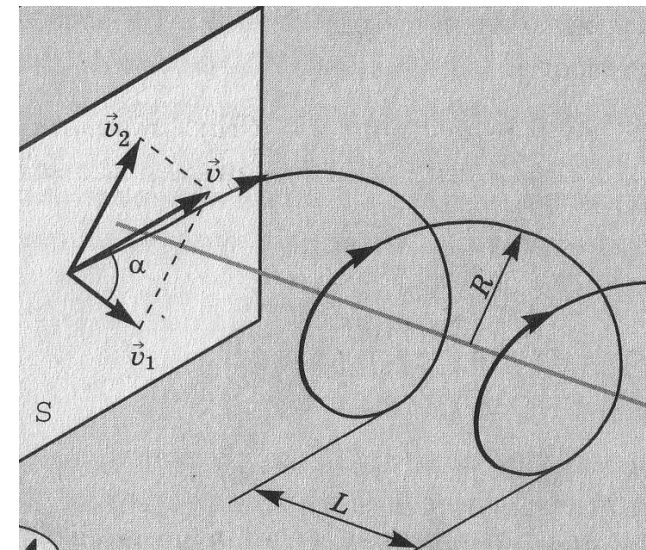
## Сила Лоренца. Північне сьйво.

На рухому заряджену частинку з боку магнітного поля Землі діє сила Лоренца.

*Залежно від кута, під яким влітає частинка в магнітне поле та її заряду траєкторії руху різні.*



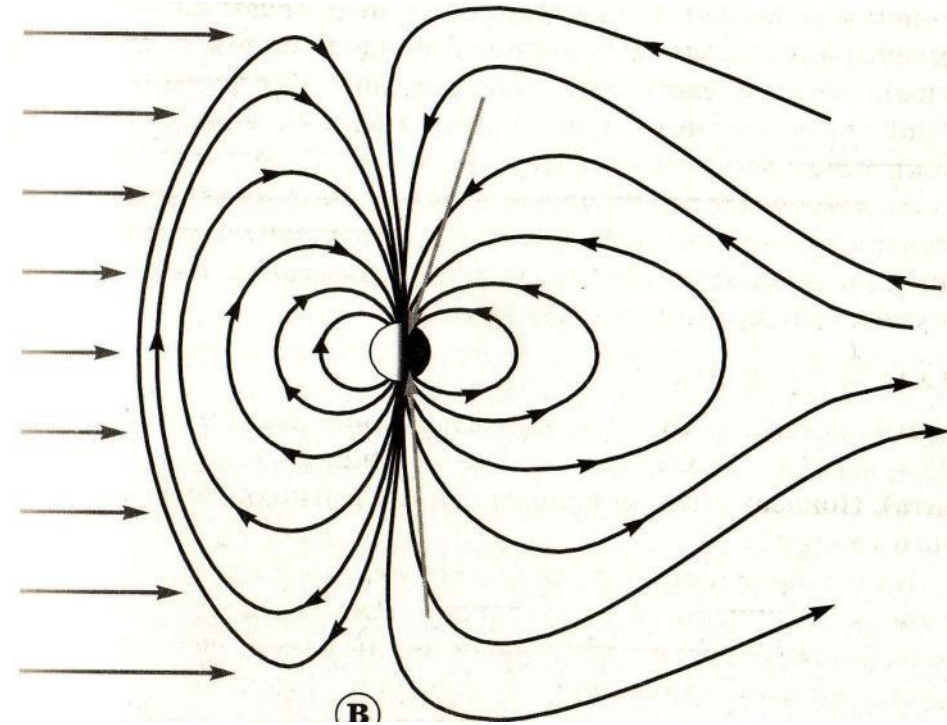
Якщо магнітне поле однорідне і частинка влітає перпендикулярно силовим лініям поля, то вона робить рух по колу навколо силових ліній поля.



Якщо частинка влітає в магнітне поле під кутом 90 градусів, то вона буде рухатися по спіральній траєкторії.

## Сила Лоренца. Північне сяйво.

Оскільки магнітне поле Землі неоднорідне, то заряджена частка буде описувати спіральну траєкторію навколо силових ліній, потрапляючи в атмосферу поблизу полюсів .




## Сила Лоренца. Північне сяйво.

---



Світло полярних сяйв - це люмінесценція.  
Вона викликається потоками електронів, які потрапляють земну атмосферу.  
Світяться атоми, молекули газів атмосфери.

---



## Потік вектора магнітної індукції

Потоком вектора магнітної індукції (магнітним потоком) через площадку  $dS$  називається скалярна фізична величина, рівна  $d\Phi_B = \vec{B}d\vec{S} = B_n dS$

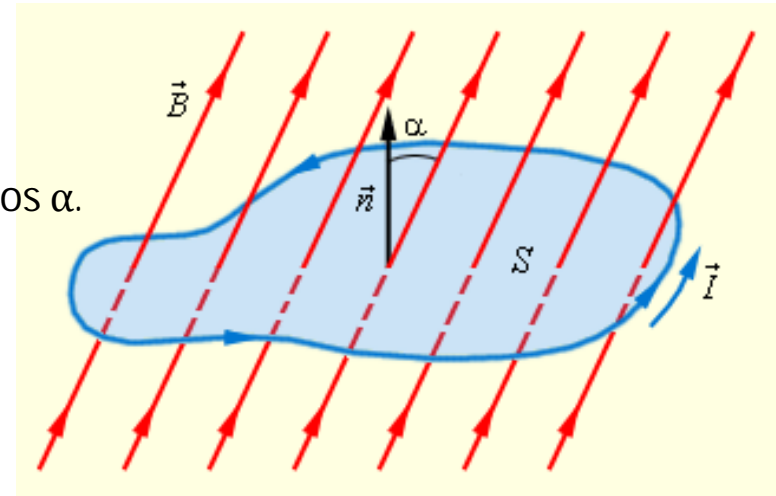
$B_n = B \cos \alpha$  – проекція вектора  $\vec{B}$  на напрям нормалі  $\vec{n}$  до площадки  $dS$ ,

$\alpha$  - кут між векторами  $\vec{B}$  і  $\vec{n}$

Потік вектора магнітної індукції може бути як позитивним, так і негативним, залежно від знаку  $\cos \alpha$ .

Якщо поле однорідне і перпендикулярно йому розташована плоска поверхня з площею  $S$ , то

$$\Phi_B = BS$$



Одиниця магнітного потоку – вебер (Вб):

1 Вб – магнітний потік, що проходить крізь плоску поверхню площею  $1 \text{ м}^2$ , розташовану перпендикулярно до однорідного магнітного поля, індукція якого рівна 1 Тл ( $1 \text{ Вб} = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2$ ).



## Робота по переміщенню провідника із струмом в магнітному полі

Провідник довжиною  $l$  із струмом  $I$  може вільно переміщуватися в однорідному магнітному полі.

Поле направлене перпендикулярно до площини малюнка.

Сила Ампера, що діє з боку магнітного поля на провідник зі струмом  $F = IBl$

Під дією сили Ампера провідник перемістився з положення 1 в положення 2.

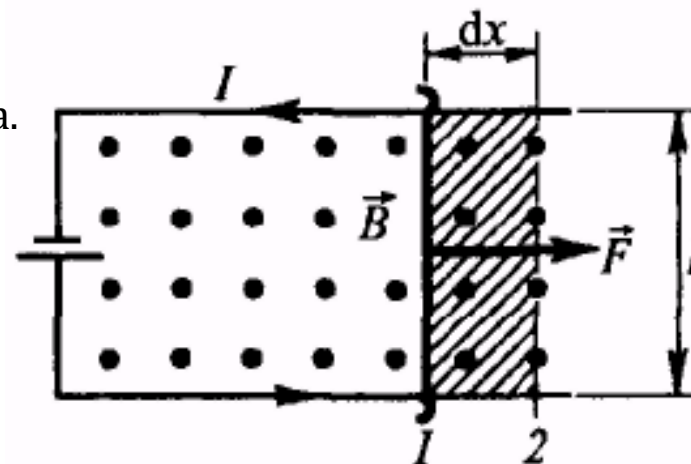
Робота, виконана магнітним полем:

$$dA = \vec{F} d\vec{x} = IBldx = IBdS = Id\Phi$$

$dS = ldx$  - площа, що перетинається провідником при його переміщенні в магнітному полі

$BdS = d\Phi$  - потік вектора магнітної індукції, пронизуючий цю площу

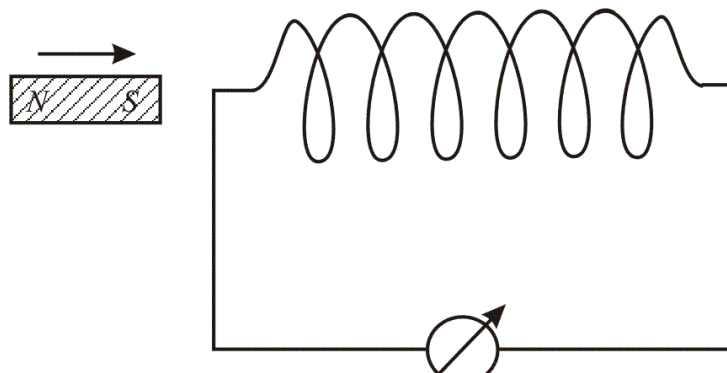
*Робота по переміщенню провідника із струмом в магнітному полі рівна добутку сили струму на магнітний потік, що перетинається рухомих провідником.*



## Явище електромагнітної індукції. Досліди Фарадея

### Дослід 1.

Котушка підключена до гальванометра.



Фарадей Майкл

*Якщо в котушку вводити (або виводити з неї) постійний магніт, то в моменти введення (виведення) спостерігається відхилення стрілки гальванометра, тобто в котушці індукується ЕРС.*

Напрямок відхилення стрілки при введенні та виведенні протилежні.

Якщо постійний магніт розвернути так, щоб полюси помінялися місцями, то і напрям відхилення стрілки зміниться на проти-лежний.

Відхилення стрілки гальванометра тим більше, чим більша швидкість руху магніту відносно котушки.

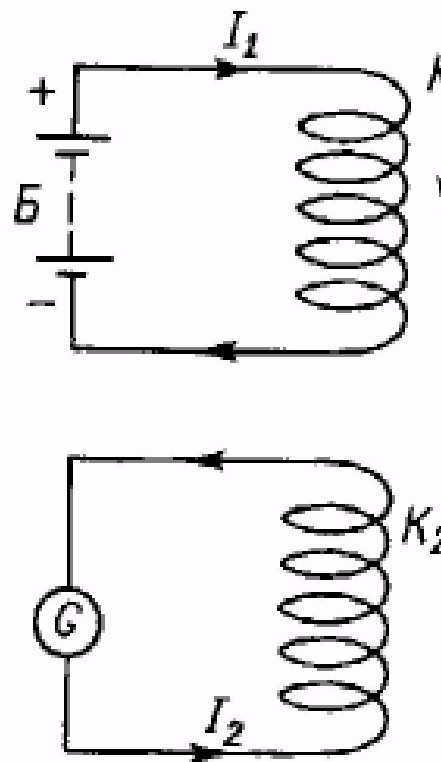
Такий же ефект буде, якщо постійний магніт залишити нерухомим, а відносно нього переміщувати котушку.

## Явище електромагнітної індукції. Досліди Фарадея

### Дослід 2.

Дві котушки впливають одна на одну

Котушка К підключена до джерела струму.  
Котушка К2 підключена до гальванометра.  
Відхилення стрілки гальванометра спостерігається в моменти появи чи зникнення струму, в моменти його збільшення або зменшення або при переміщенні котушок одна відносно іншої.  
При цьому стрілка відхиляється в різні боки, тобто знак індукованої ЕРС в цих випадках різний.  
Наведення в котушці К2 ЕРС різного знаку спостерігається при збільшенні або зменшенні струму в котушці К та при зближенні або віддаленні котушок.



## Явище електромагнітної індукції. Досліди Фарадея

У дослідах Фарадея відкрито *явище електромагнітної індукції*: в замкнутому провідному контурі при зміні потоку магнітної індукції, що охоплюється цим контуром, виникає індукційний електричний струм

### Основні властивості індукційного струму:

1. індукційний струм виникає завжди, коли відбувається *зміна* потоку магнітної індукції через площу поверхні, охоплену контуром.
2. сила індукційного струму не залежить від способу зміни потоку магнітної індукції, а визначається лише *швидкістю його зміни*.

### Відкриття явища електромагнітної індукції:

1. показало взаємозв'язок між електричним і магнітним полем;
2. виявило спосіб отримання електричного струму за допомогою магнітного поля.



## Закон електромагнітної індукції Фарадея

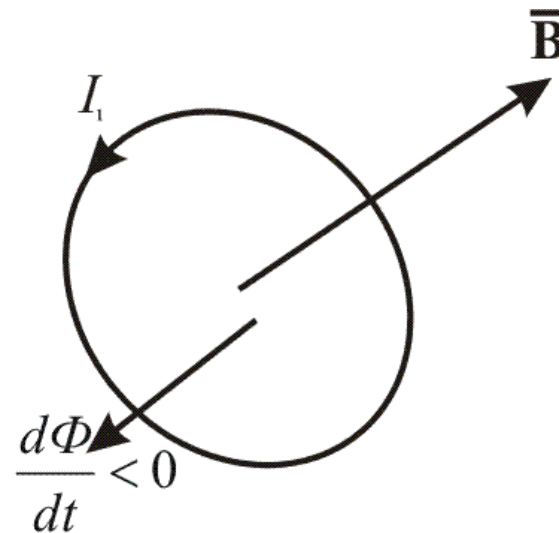
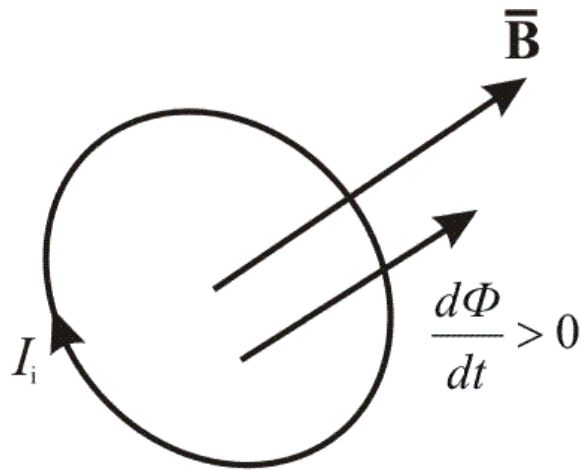
**Закон Фарадея:** електрорушійна сила електромагнітної індукції в контурі чисельно рівна і протилежна по знаку швидкості зміни магнітного потоку крізь поверхню, обмежену цим контуром:

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Напрямок індукційного струму визначається за **правилом Ленца**:

*при всякій зміні магнітного потоку крізь поверхню, обмежену на замкнутий провідний контур, в останньому виникає індукційний струм такого напрямку, що його магнітне поле протидіє зміні магнітного потоку.*

$$\left[ \frac{d\Phi}{dt} \right] = \frac{\text{Вб}}{\text{с}} = \frac{\text{Тл} \times \text{м}^2}{\text{с}} = \frac{\text{Н} \times \text{м}^2}{\text{А} \times \text{м} \times \text{с}} = \frac{\text{Дж}}{\text{А} \times \text{с}} = \frac{\text{А} \times \text{В} \times \text{с}}{\text{А} \times \text{с}} = \text{В}$$



*Х. Ленц*

## Індуктивність контуру

---

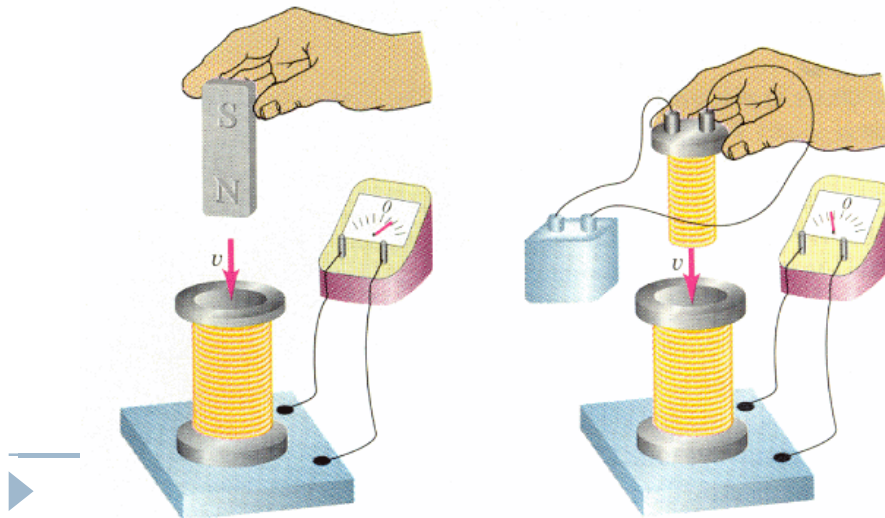
Електричний струм, який тече в замкнутому контурі, створює навколо себе магнітне поле, індукція якого пропорційна величині струму.

Магнітний потік через площину контуру пропорційний струму в контурі:  $\Phi = LI$

$L$  - індуктивність контуру.

Індуктивність контуру в залежить тільки від геометричної форми контуру, його розмірів і магнітної проникності того середовища, в якому він знаходиться.

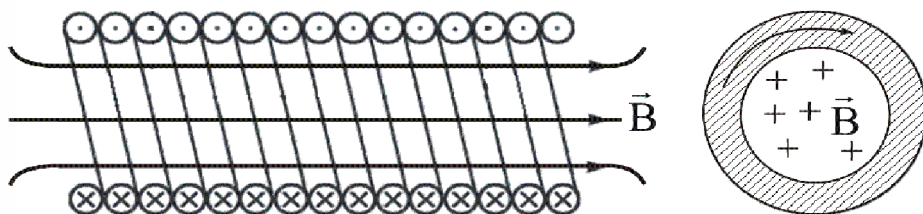
Індуктивність контуру – аналогія електричної ємності провідника, яка також залежить тільки від форми провідника, його розмірів і діелектричної проникності середовища.



## Самоіндукція

**Ідея** : при зміні сили струму в контурі змінюватиметься і породжуваний ним магнітний потік, а це, в свою чергу індукуватиме ЕРС в цьому контурі.

**Самоіндукція** - виникнення ЕРС індукції в провідному контурі при зміні в сили струму, який тече в цьому самому контурі.



ЕРС самоіндукції  $\varepsilon_{si} = -\frac{d\Phi}{dt} = -L\frac{dI}{dt}$

знак мінус показує, що наявність індуктивності в контурі приводить до уповільнення зміни струму в ньому

- Якщо **сила струму** з часом **збільшується**, то **струм самоіндукції** направлений **назустріч** струму, обумовленому зовнішнім джерелом і уповільнює його ріст.
- Якщо **сила струму** з часом **зменшується**, то **струм самоіндукції** має такий же **напрямок**, як і спадаючий струм в контурі і уповільнює його зменшення.

**Одиниця індуктивності – генрі (Гн):** 1Гн – індуктивність такого контуру, магнітний потік самоіндукції якого при струмі в 1 А рівний 1 Вб (1Гн = 1Вб/А = 1В·с/А).



## Енергія магнітного поля

---

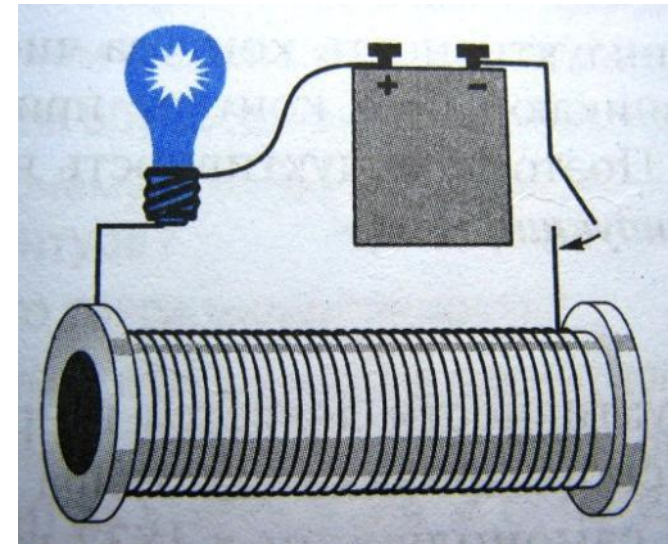
Провідник, по якому протікає електричний струм, завжди оточений магнітним полем.

Магнітне поле з'являється і зникає разом з появою і зникненням струму.

Магнітне поле, подібно електричному, є носієм енергії.

Енергія магнітного поля рівна роботі, яку витрачає струм для створення цього поля.

Енергія магнітного поля, пов'язаного з контуром:  $W = \frac{LI^2}{2}$





## Макроструми і мікроструми

---

**Макроскопічні струми** - струми, що протікають по провідниках і в електричних колах.

**Мікроскопічні струми** - струми, обумовлених рухом електронів в атомах і молекулах.

Намагніченість постійних магнітів є наслідком існування в них мікрострумів.

Зовнішнє магнітне поле здійснює орієнтуючу дію на ці мікроструми.

Якщо поблизу якогось тіла помістити провідник із струмом (макрострум), то під дією його магнітного поля мікроструми у всіх атомах орієнтуються, створюючи в тілі додаткове магнітне поле.

---

**Вектор магнітної індукції**  $\vec{B}$  характеризує результуюче магнітне поле, створюване всіма макро- і мікрострумами

При одному і тому ж макрострумі вектор  $\vec{B}$  в різних середовищах матиме різні значення.

Магнітне поле макроструму описується **вектором напруженості магнітного поля**  $\vec{H}$ .

В речовині магнітне поле макрострумів посилюється за рахунок поля мікрострумів.

$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H},$$

$\mu_0$  – магнітна стала,  
 $\mu$  – *магнітна проникність середовища, безрозмірна величина, яка показує, в скільки разів магнітне поле макрострумів посилюється за рахунок поля мікрострумів середовища.*

---



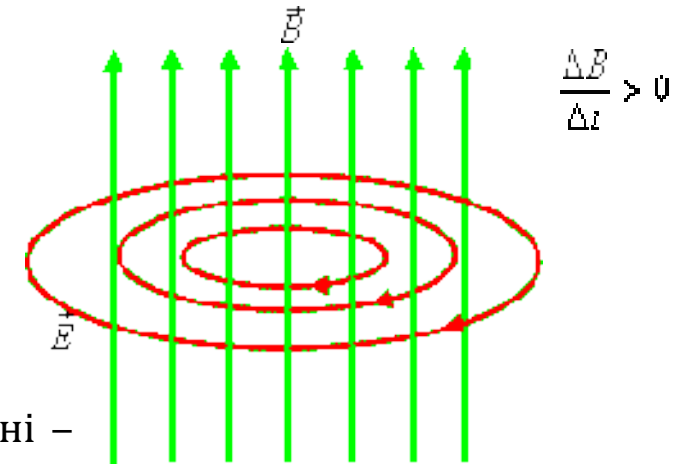
## Електромагнітна індукція.

*ЕРС електромагнітної індукції виникає в нерухомому контурі, що знаходиться в змінному магнітному полі.*

Змінне магнітне поле породжує в навколишньому просторі вихрове електричне поле, яке і є причиною виникнення індукційного струму в провіднику.

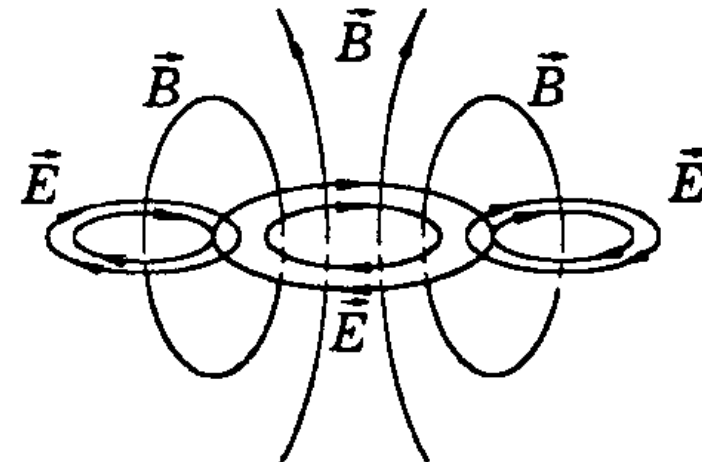
### Властивості Вихрового ЕСП

1. Вихрове електричне поле не є електростатичним.
2. Силкові лінії електростатичного поля завжди розімкнені – вони починаються і закінчуються на електричних зарядах.



### Основний наслідок:

Змінне в часі магнітне поле породжує змінне в часі електричне поле і навпаки – змінне в часі електричне поле породжує змінне в часі магнітне поле



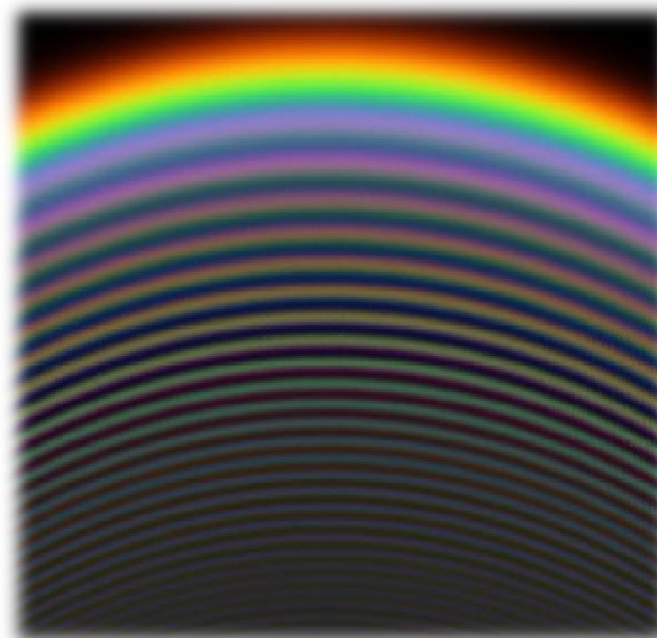
Результат – електромагнітне поле

## Лекція 7

---

### Оптика

1. Електромагнітна хвиля
2. Спектр електромагнітних хвиль
3. Оптика
4. Показник заломлення середовища
5. Геометрична оптика
6. Основні закони геометричної оптики
7. Сонячне затемнення
8. Принцип Ферма
9. Основні закони геометричної оптики
10. Принцип Гюйгенса
11. Повне внутрішнє відбивання
12. Лінза. Хід променів в лінзі .Оптична сила лінзи
13. Побудова зображення в лінзі .Формула тонкої лінзи
14. Фотометрія. Потік випромінювання. Сила світла. Освітленість.

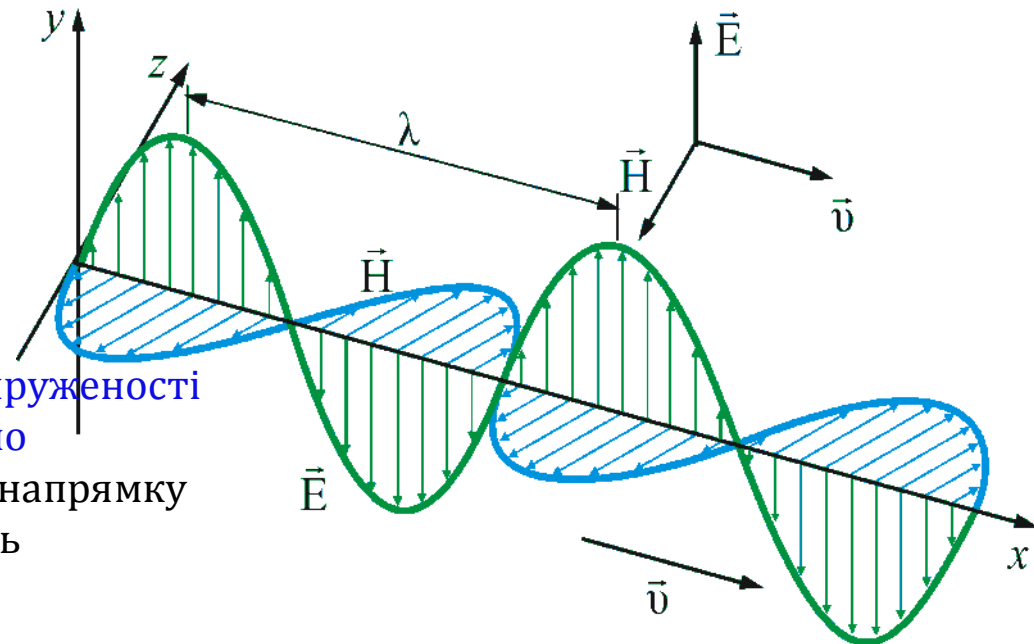


## Електромагнітна хвиля

**Електромагнітні хвилі** - поперечні хвилі в яких відбуваються коливання (зміна з часом в просторі) взаємопороджуваних електричного та магнітного полів

### Властивості

У будь-якій точці простору **вектори напруженості електричного і магнітного полів взаємно перпендикулярні** і перпендикулярні до напрямку розповсюдження і одночасно набувають масимальних та мінімальних значень



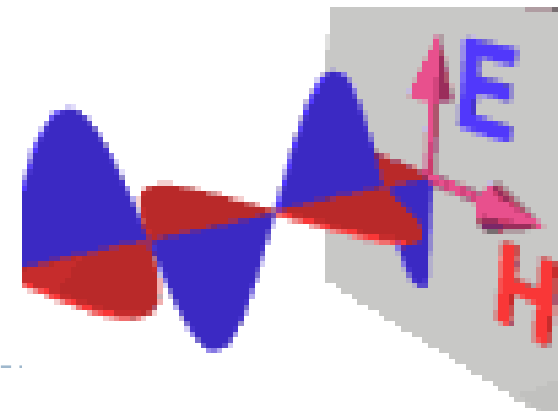
**Будь-які ЕМХ у вакуумі поширюються з однаковою швидкістю**

$$\tilde{n} = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ м} \cdot \tilde{n}^{-1}$$

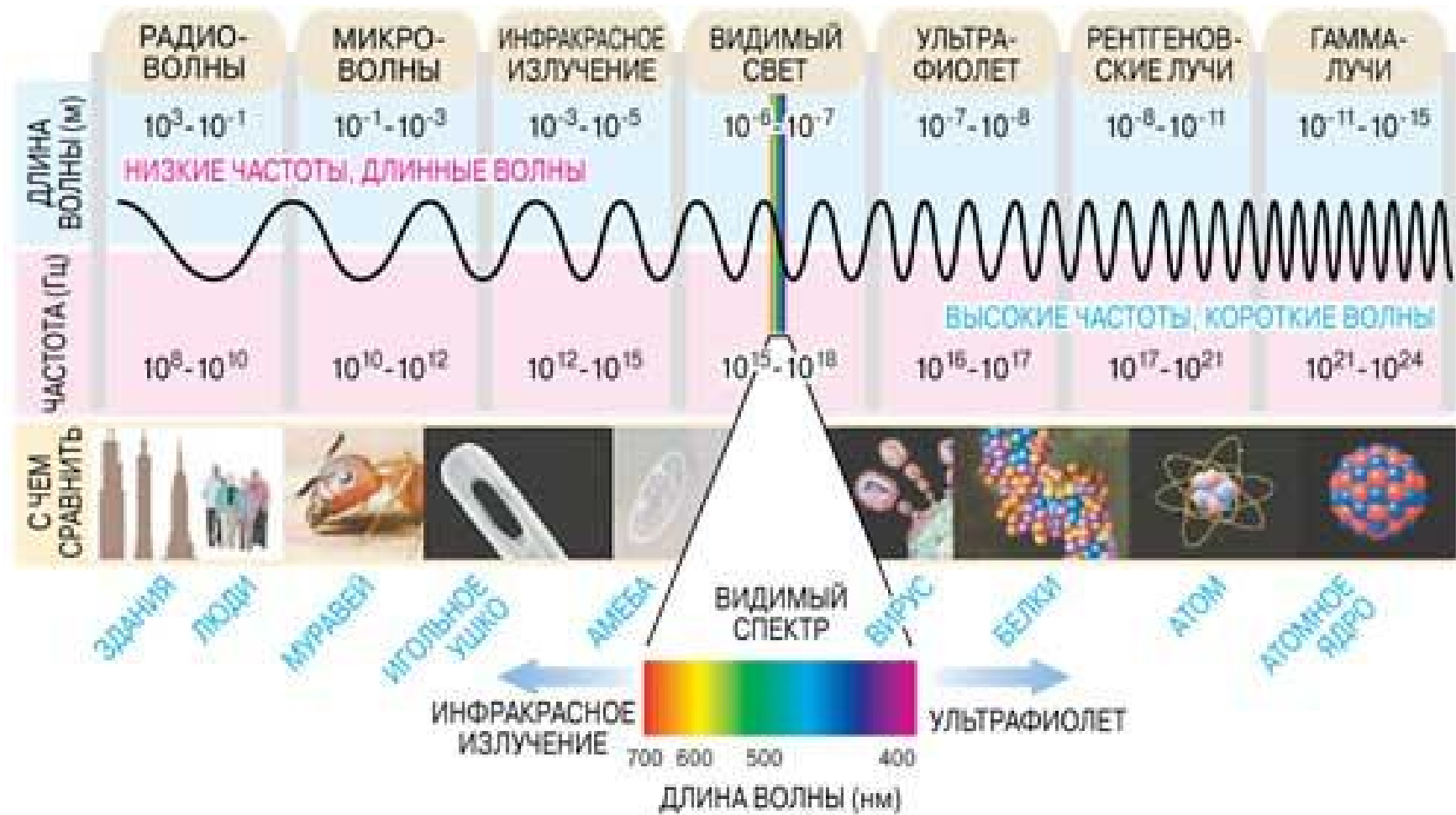
$$\epsilon_0 = 8,85418782 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2 \cdot \text{м}^{-1} \cdot \text{В}^{-1}$$

$$\mu_0 = 1,256637061 \cdot 10^{-6} \text{ Вб} \cdot \text{А}^{-1} \cdot \text{м}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$



# Електромагнітна хвиля

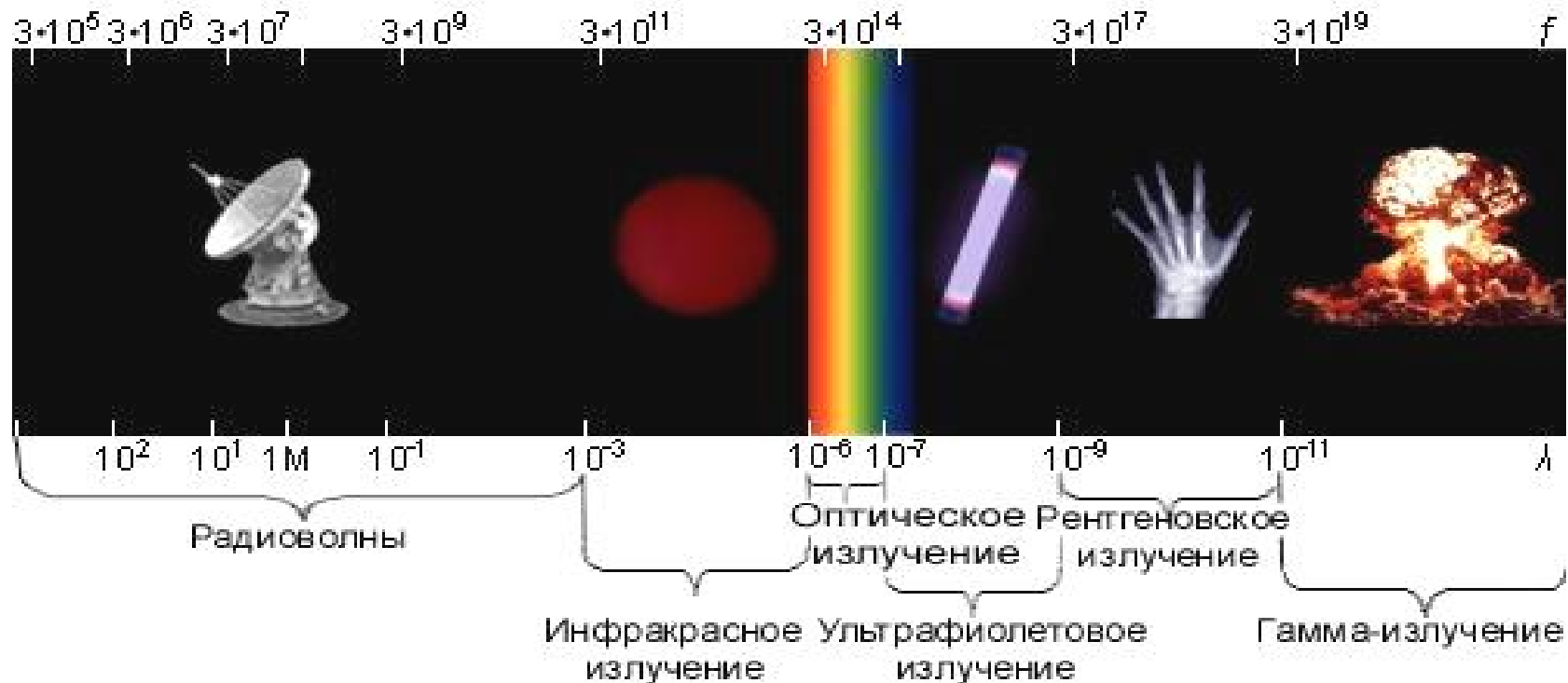


## Спектр ЕМХ

Довжина	Назва	Частота
більше 100 км	Низькочастотні коливання	0 – 3 кГц
100 км – 1 мм	Радіохвилі	3 кГц – 3 ТГц
100 – 10 км	Кілометрові (дуже низькі частоти)	3 – 3-кГц
10 – 1 км	Кілометрові (низькі частоти)	30 – 300 кГц
1 км – 100 м	Гектометрові (середні частоти)	300 кГц – 3 МГц
100 – 10 м	декаметрові (високі частоти)	3 – 30 МГц
10 – 1 м	метрові (дуже високі частоти)	30 – 300 МГц
1 м – 10 см	дециметрові (ультрависокі)	300 МГц – 3 ГГц
10 – 1 см	сантиметрові (надвисокі)	3 – 30 ГГц
1 см – 1 мм	міліметрові (супервисокі)	30 – 300 ГГц
1 – 0.1 мм	дециміліметрові (гіпервисокі)	300 ГГц – 3 ТГц
2 мм – 760 нм	Інфрачервоне випромінювання	150 ГГц – 400 ТГц
760 – 380 нм	Видиме випромінювання (оптичний спектр)	400 - 800 ТГц
380 – 3 нм	Ультрафіолетове випромінювання	800 ТГц – 100 ПГц
10 нм – 1 пм	Рентгенівське випромінювання	30 ПГц – 300 ЭГц
<10 пм	Гамма-випромінювання	>30 ЭГц

Оптика – вивчає природу світла, світлові явища і взаємодію світла з речовиною.

Оптичне випромінювання являє собою електромагнітні хвилі з довжинами 380-730 нм



Залежно від явищ, що розглядаються

оптику поділять на **геометричну**, **хвильову**, **квантову**

## Показник заломлення середовища

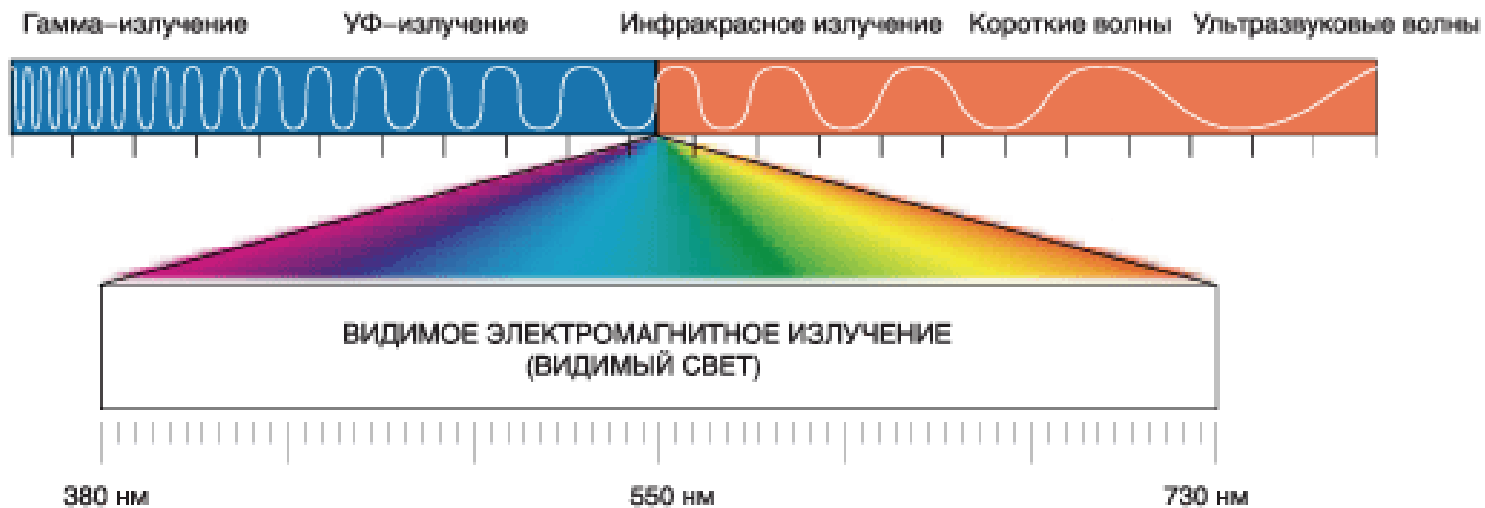
У речовині швидкість розповсюдження електромагнітних хвиль зменшується в  $n$  разів.

Показник заломлення  $n$  - фізична величина, рівна відношенню швидкості електромагнітних хвиль у вакуумі до їх швидкості в середовищі.

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

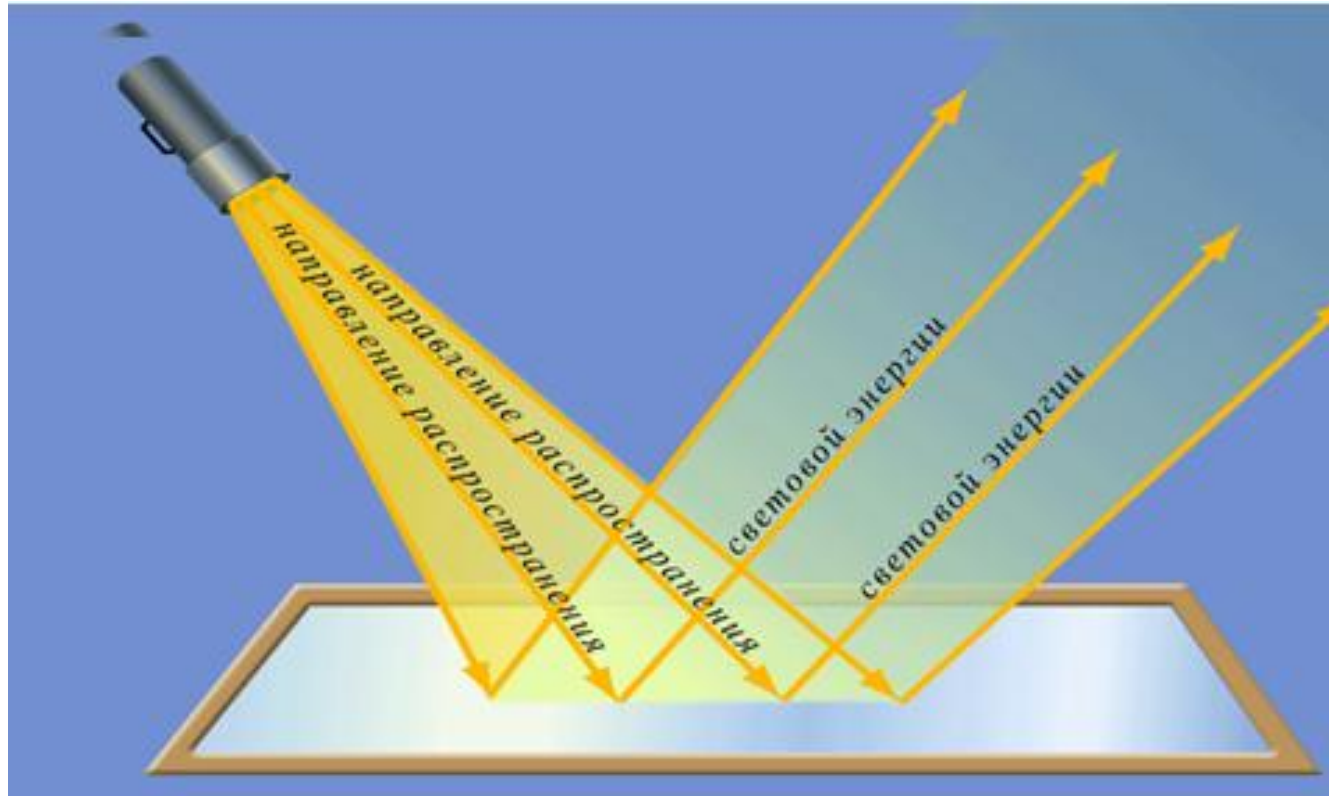
Швидкість поширення електромагнітних хвиль у речовині залежить від електричної та магнітної проникності цієї речовини.

$$n = \sqrt{\epsilon\mu}$$





**Світловий промінь** – лінія, уздовж якої переноситься світлова енергія.



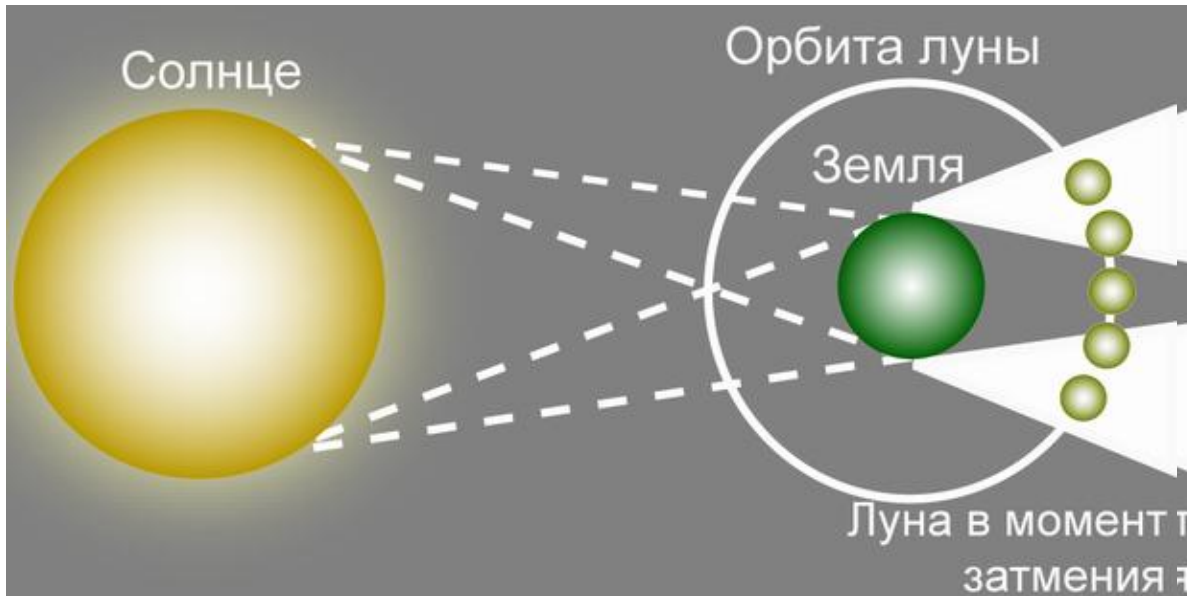
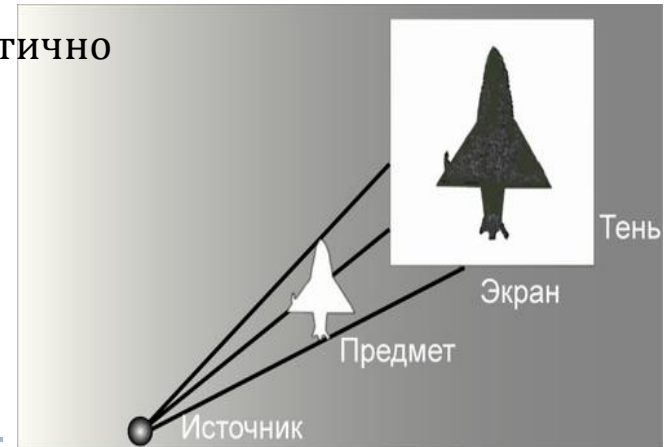
Лекція 6  
Оптика

Основні закони геометричної оптики

1. Закон прямолінійного поширення світла – світло в оптично однорідному середовищі поширюється прямолінійно.

Тінь, що відкидається предметом, обумовлена прямолінійністю поширення світлових променів в оптично однорідних середовищах

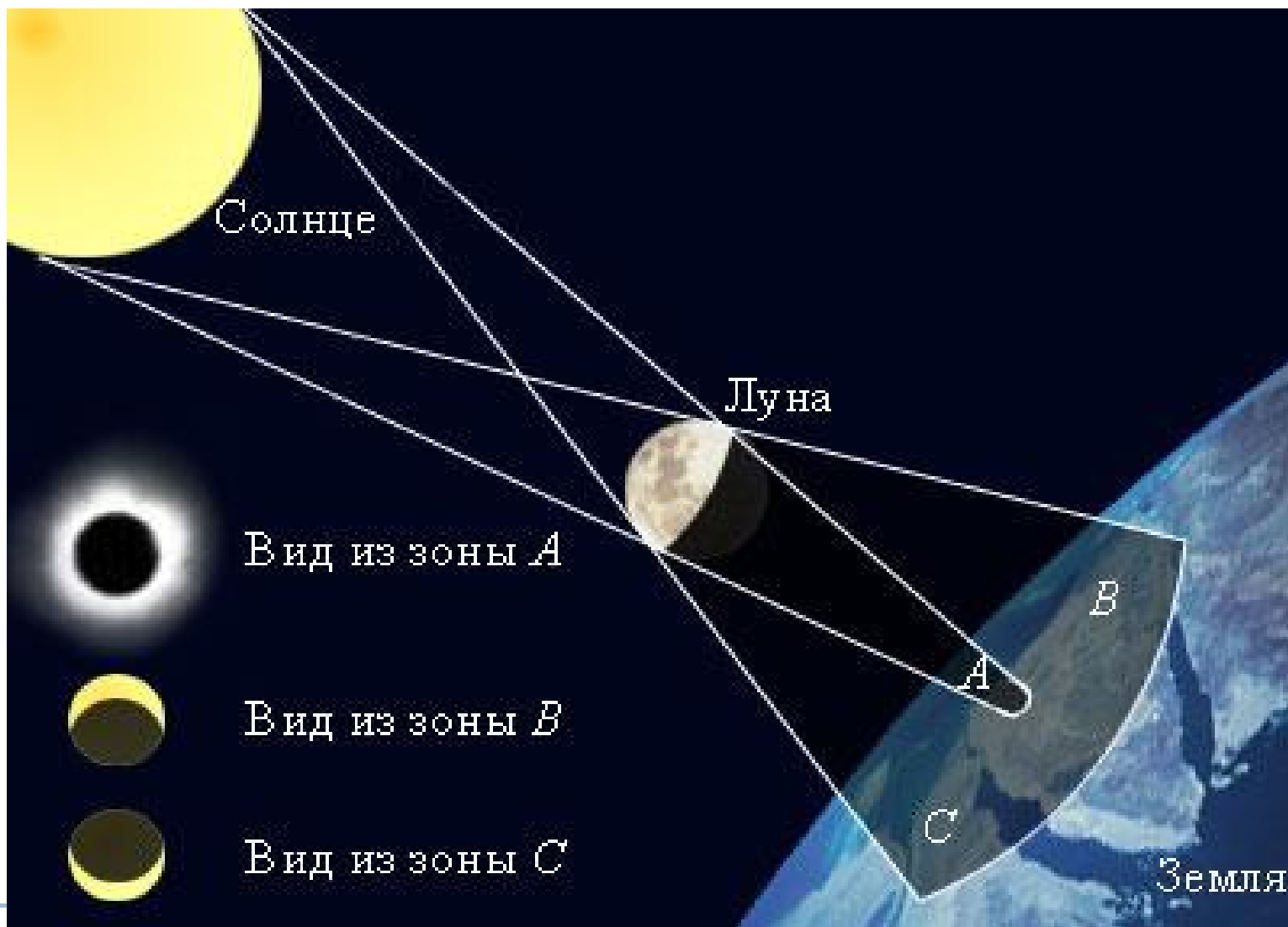
Оптично однорідне середовище – показник заломлення не залежить від координати



Ілюстрація - затемнення Місяця, який потрапляє в тінь Землі.



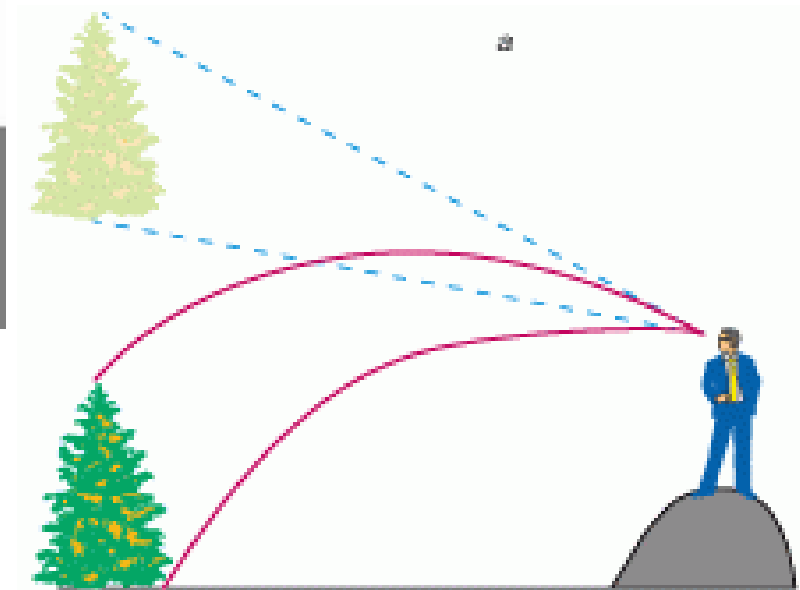
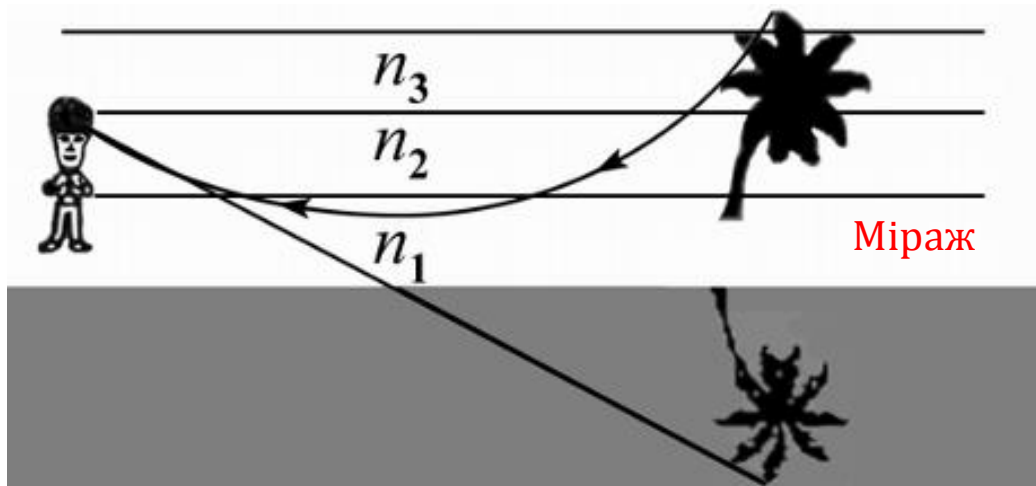
## Сонячне затемнення



## Принцип Ферма

**Принцип Ферма** - світло поширюється між двома точками по шляху, для проходження якого необхідно найменший час.

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



**Ідея**- світло в оптично неоднорідному середовищі поширюється криволінійно

## Основні закони геометричної оптики

---

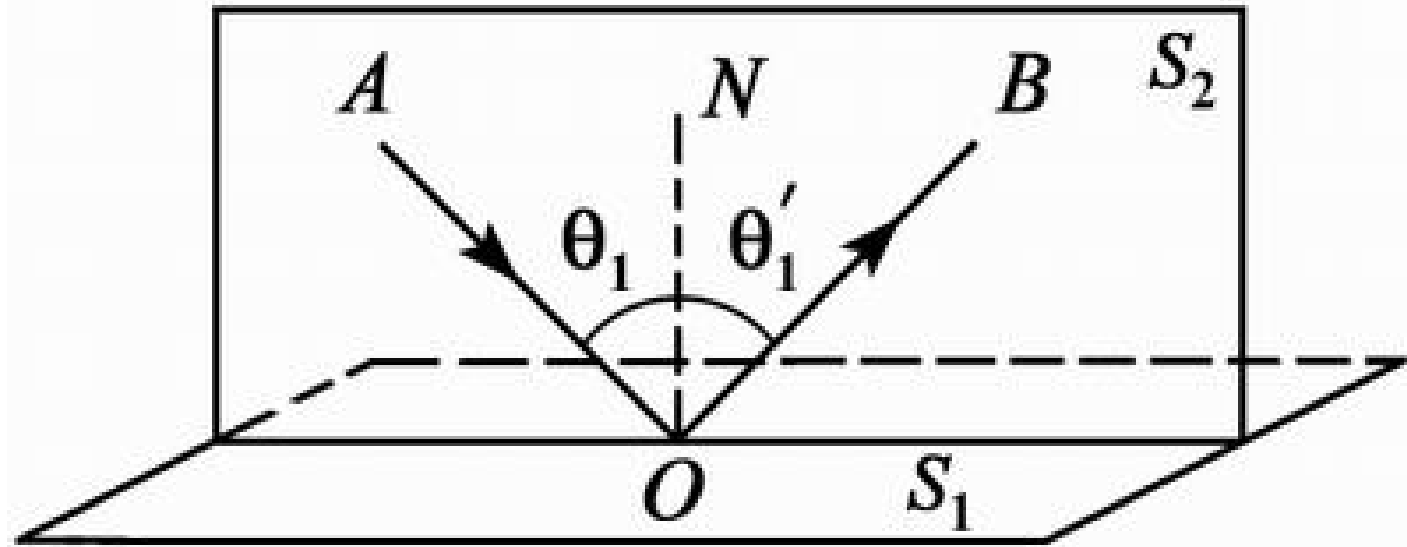
### 2. Закон незалежності світлових пучків –

ефект, що виникає внаслідок дії окремого пучка, не залежить від того, чи діє одночасно решта пучків чи вони усунені (світлові пучки не взаємодіють між собою).



## Основні закони геометричної оптики

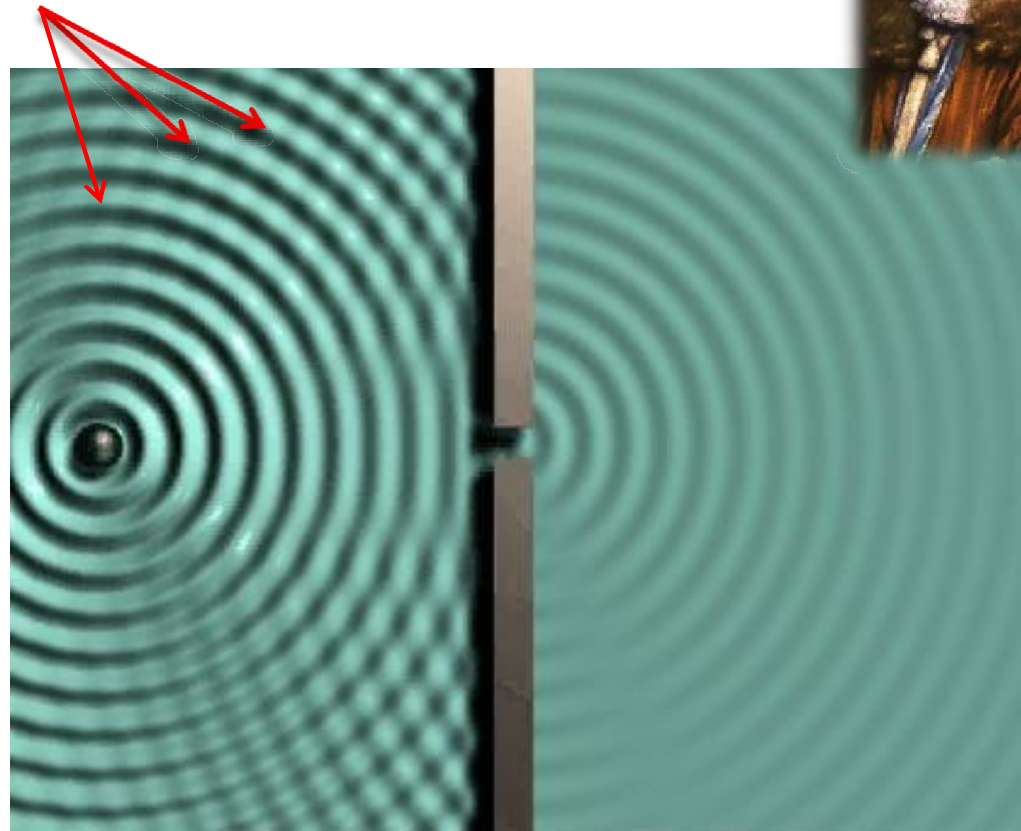
**3. Закон відбивання** – відбитий промінь лежить в одній площині з падаючим променем і перпендикуляром, проведеним до межі розділу двох середовищ в точці падіння; кут відбивання дорівнює куту падіння



Доведення цього закону випливає з **принципу Гюйгенса**.

### Принцип Гюйгенса

Кожна точка, до якої доходить світлове збудження, є в свою чергу центром вторинних хвиль; поверхня, яка огинає в деякий момент часу вторинні хвилі формує **фронт хвилі**

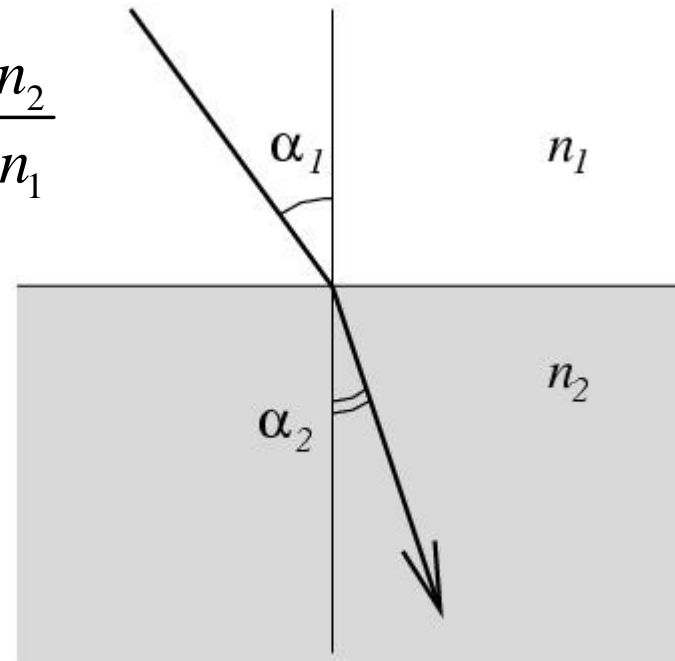


## Основні закони геометричної оптики

**4. Закон заломлення** – падаючий промінь, заломлений промінь і перпендикуляр, проведений до межі розділу двох середовищ в точці падіння, лежать в одній площині; відношення синуса кута падіння до синуса кута заломлення є величина стала для даних середовищ:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

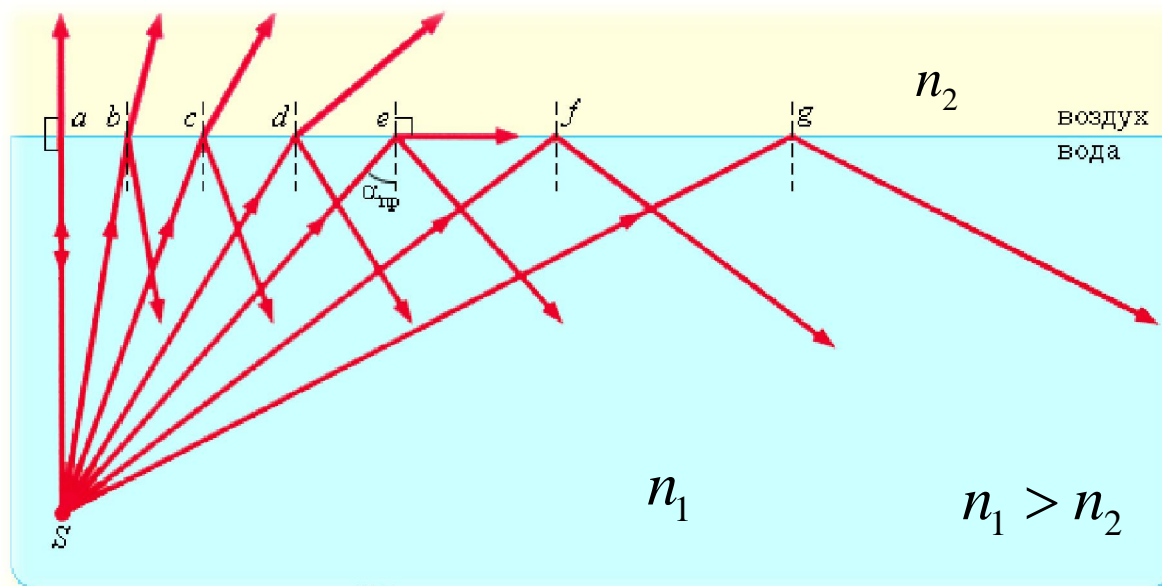
$$n_1 < n_2$$





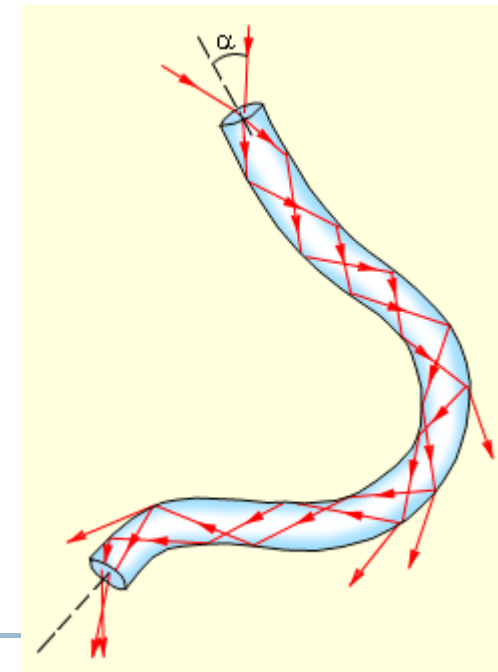
## Повне внутрішнє відбивання

Якщо світло переходить з середовища з більшим показником заломлення  $n_1$  (оптично густіше) в середовище з меншим показником заломлення  $n_2$  (оптично рідше) ( $n_1 > n_2$ ) (зі скла в повітря або з води в повітря), то згідно закону заломлення, заломлений промінь віддаляється від нормалі і кут заломлення стає більшим, ніж кут падіння.



$$\sin \alpha_{\text{гр}} = \frac{1}{n_1}$$

При всіх кутах падіння, більших за  $\alpha_{\text{гр}}$  промінь не заломлюється, а повністю відбивається в перше середовище, причому інтенсивності відбитого і падаючого променів однакові.

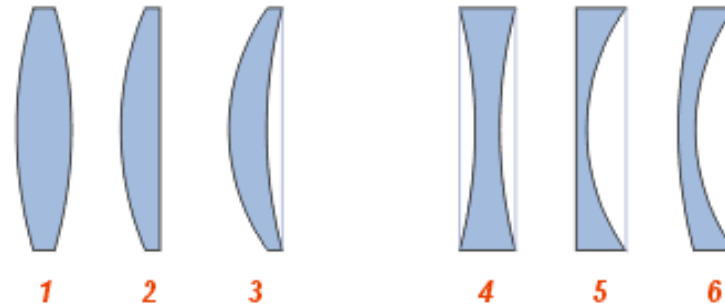


## Основні закони геометричної оптики

**Лінза** - прозоре тіло, обмежене з обох боків криволінійною поверхнею.

По зовнішній формі лінзи поділяються на:

- 1) двоопуклі; 2) плоско-опуклі;
- 3) двовгнуті; 4) двовгнуті;
- 5) плоско-вгнуті; 6) опукло-вгнуті.



Лінза називається **тонкою**, якщо її товщина значно менша, ніж радіуси кривизни  $R_1$  і  $R_2$  поверхонь, що обмежують лінзу.

**Головна оптична вісь** - пряма, що проходить через центри кривизни поверхонь.

**Оптичним центром лінзи** називається точка перетину лінзи та головної оптичної осі; промені що проходять через неї не заломлюються.

**Побічними оптичними осями** називаються прямі, які проходять через оптичний центр лінзи і не співпадають з головною оптичною віссю.

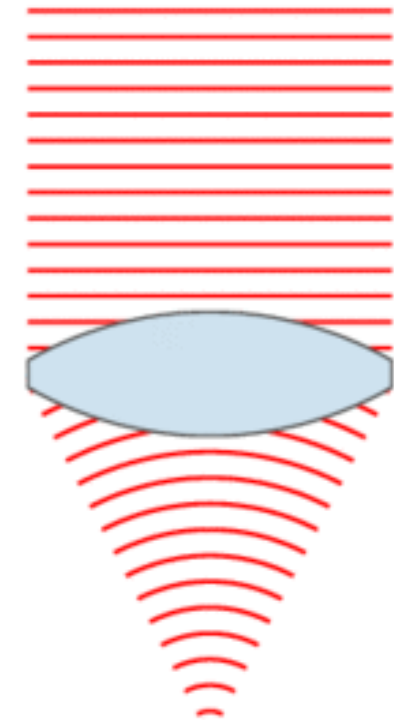
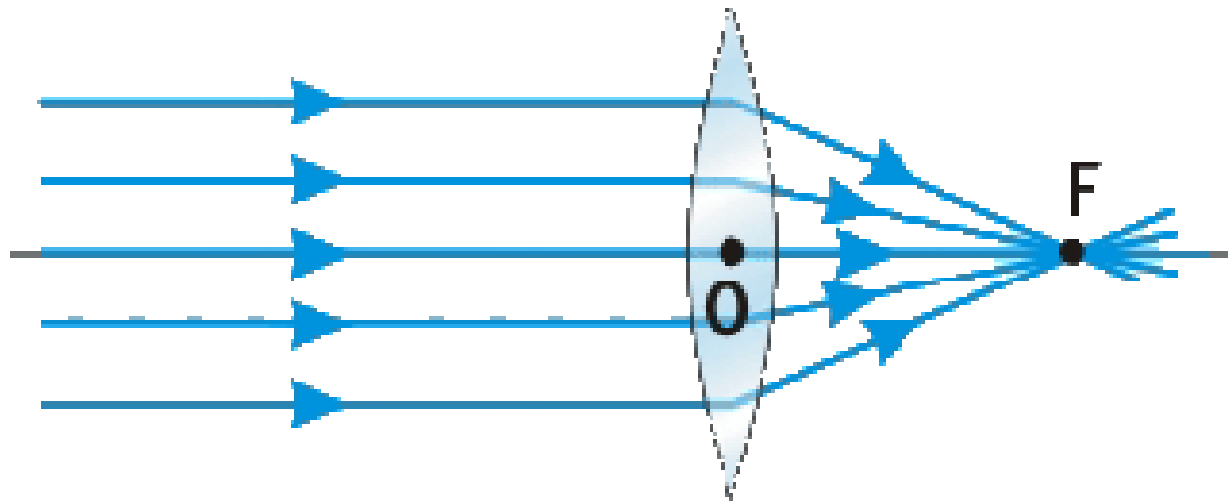


## Лінза

**Фокусом** лінзи  $F$  називається точка, що лежить на головній оптичній осі, в якій перетинаються промені світлового пучка, направленого паралельно до головної оптичної осі.

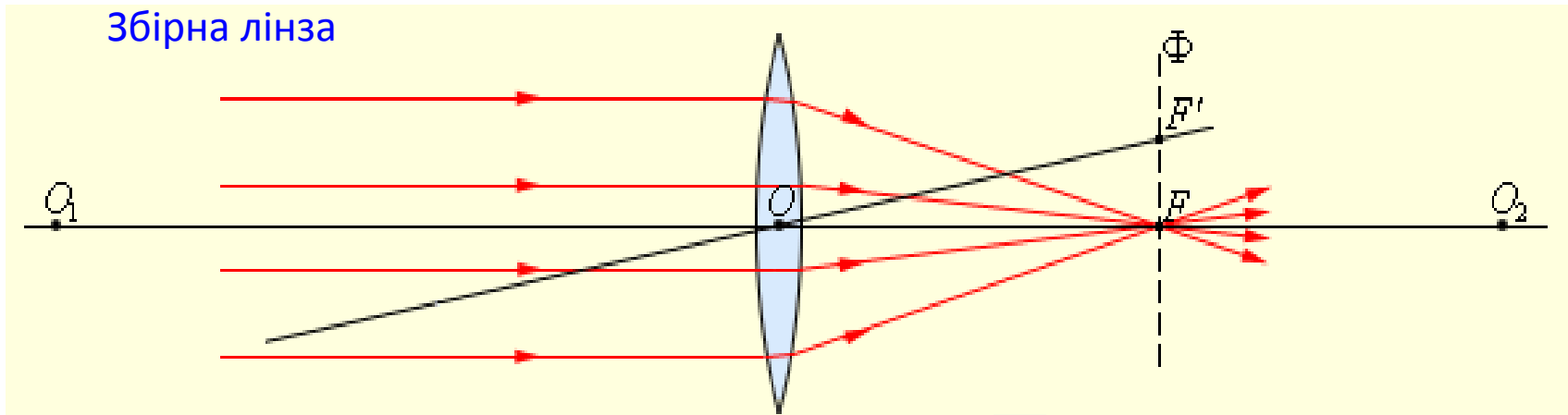
**Фокальною площиною** називається площина, яка проходить через фокус лінзи перпендикулярно до її головної оптичної осі.

**Фокусною відстанню**  $f$  називається відстань між оптичним центром лінзи  $O$  і її фокусом  $F$

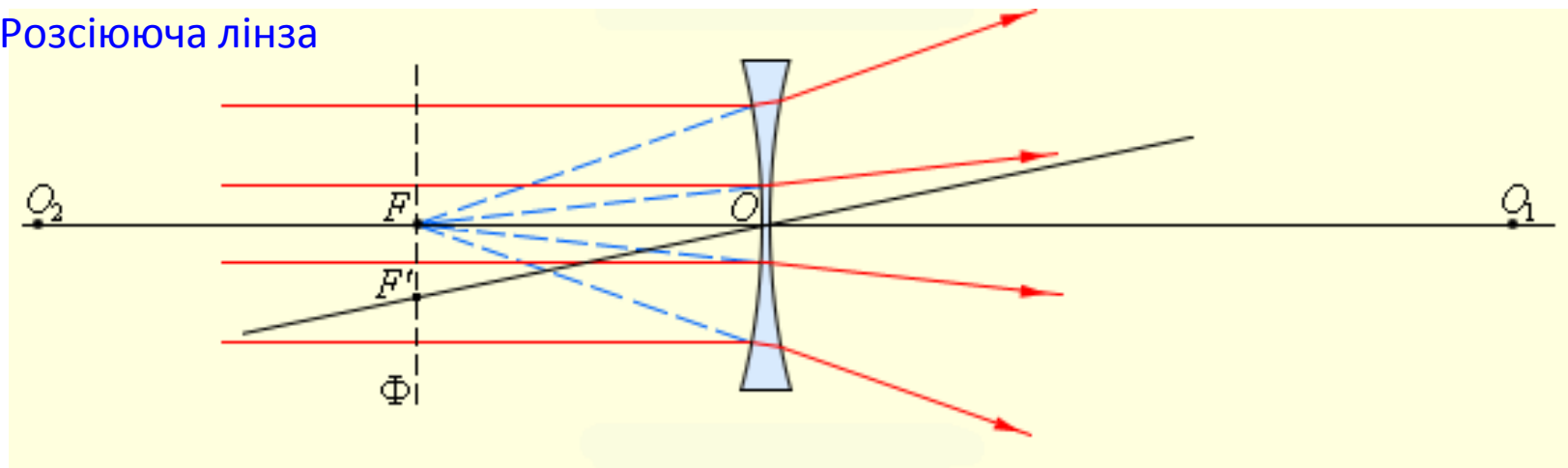


## Хід променів в лінзі

Збірна лінза



Розсіююча лінза



The image contains two diagrams illustrating lens properties. The top diagram shows a convex lens with its optical axis (главная оптическая ось линзы) passing through the optical center (O). The principal foci are labeled O<sub>1</sub> and O<sub>2</sub>. The radii of curvature for the two surfaces are R<sub>1</sub> and R<sub>2</sub>, both pointing towards the center of curvature. A box next to it contains the conditions R<sub>1</sub> > 0 and R<sub>2</sub> > 0. The bottom diagram shows a concave lens with its optical axis (главная оптическая ось линзы) passing through the optical center (O). The principal foci are labeled O<sub>1</sub> and O<sub>2</sub>. The radii of curvature for the two surfaces are R<sub>1</sub> and R<sub>2</sub>, both pointing away from the center of curvature. A box next to it contains the conditions R<sub>1</sub> < 0 and R<sub>2</sub> < 0.

$R_1 > 0$   
 $R_2 > 0$

$$D = \frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

главная оптическая ось линзы

главная оптическая ось линзы

$R_1 < 0$   
 $R_2 < 0$

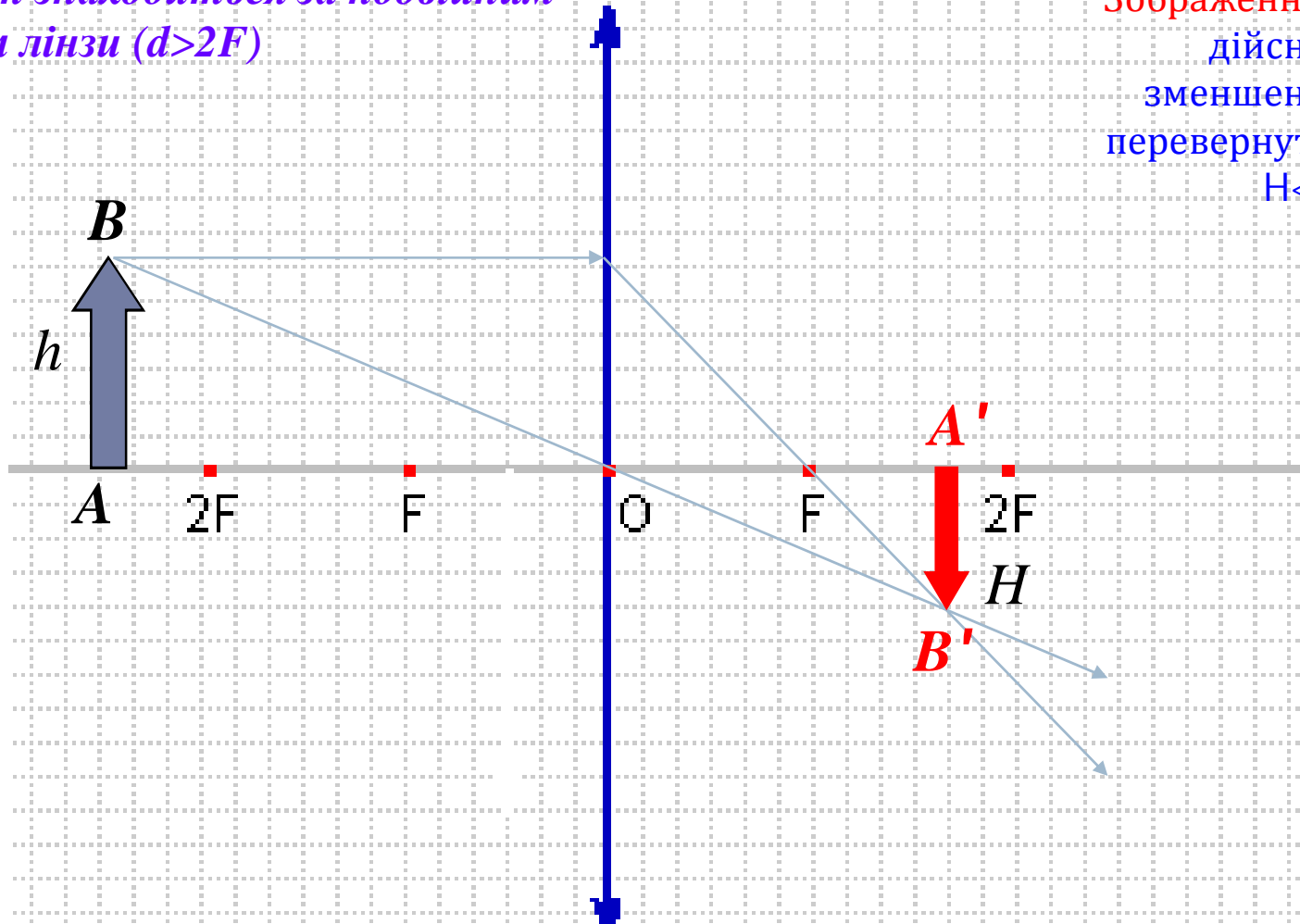
Оптичная сила – величина, обернена до фокусної відстані [D]=1/f=дптр (діоптрія)



## Побудова зображення в лінзі

Предмет знаходиться за подвійним фокусом лінзи ( $d > 2F$ )

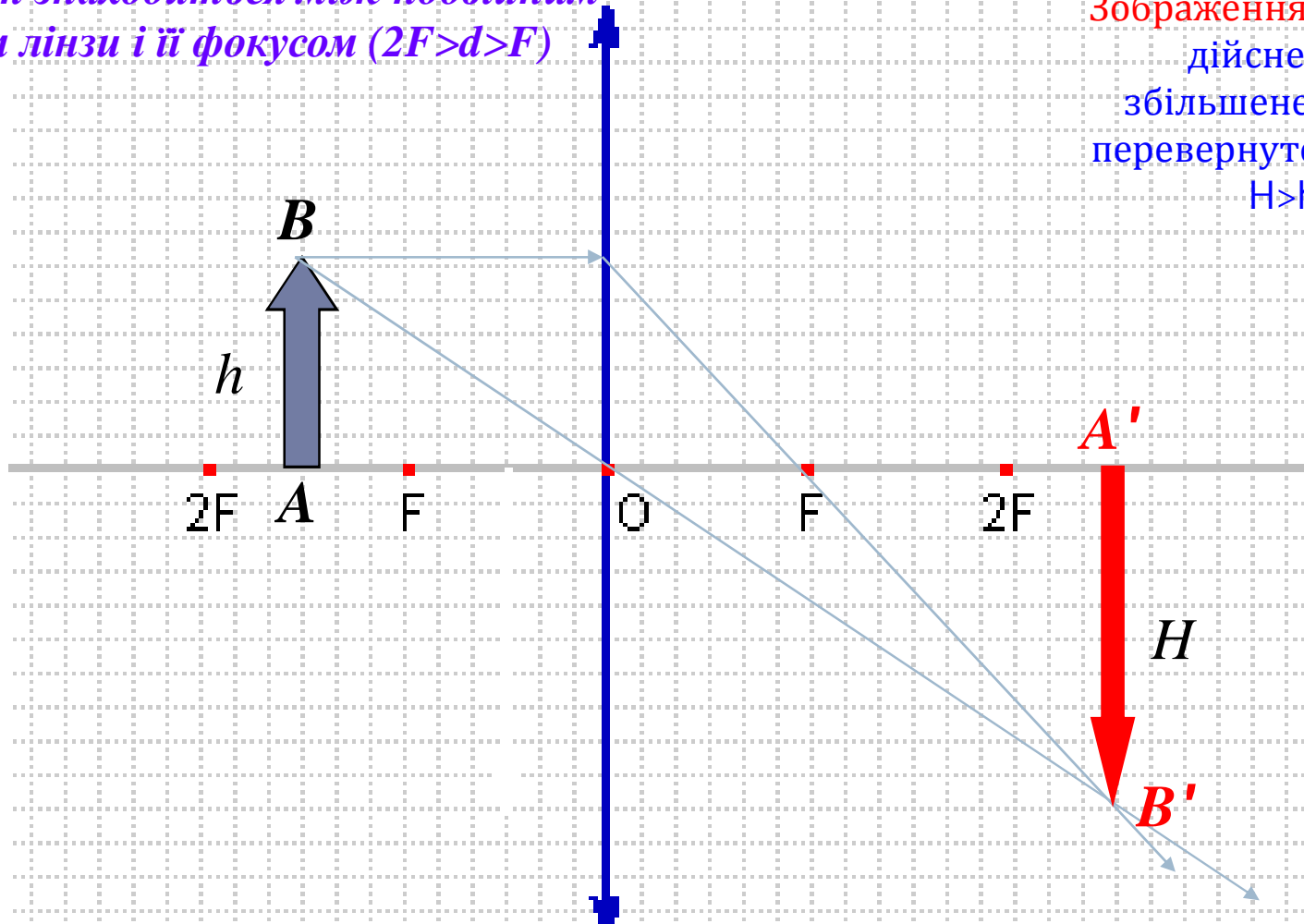
Зображення:  
дійсне,  
зменшене,  
перевернуте  
 $H < h$



## Побудова зображення в лінзі

*Предмет знаходиться між подвійним фокусом лінзи і її фокусом ( $2F > d > F$ )*

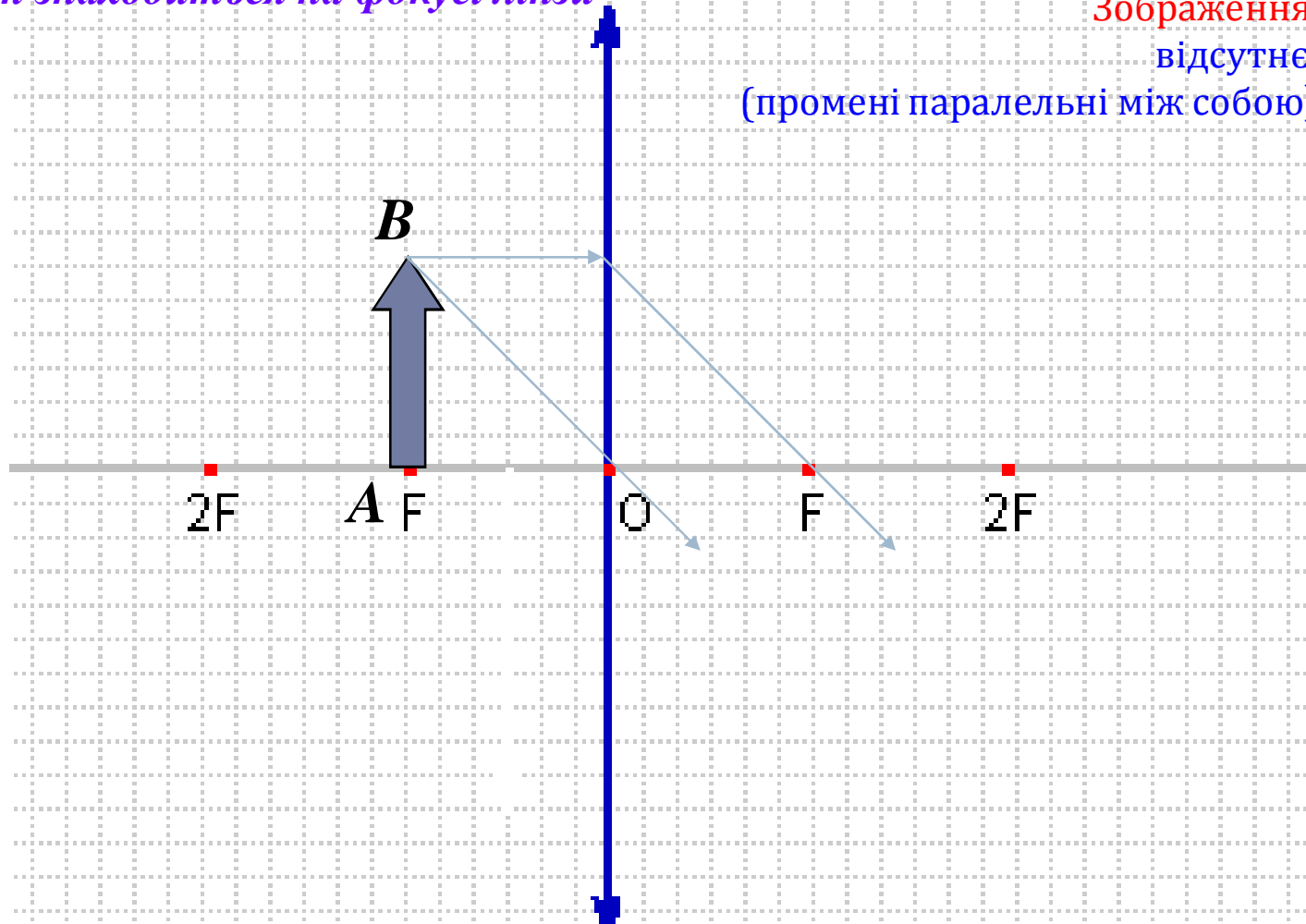
**Зображення:**  
дійсне,  
збільшене,  
перевернуте  
 $H > h$



## Побудова зображення в лінзі

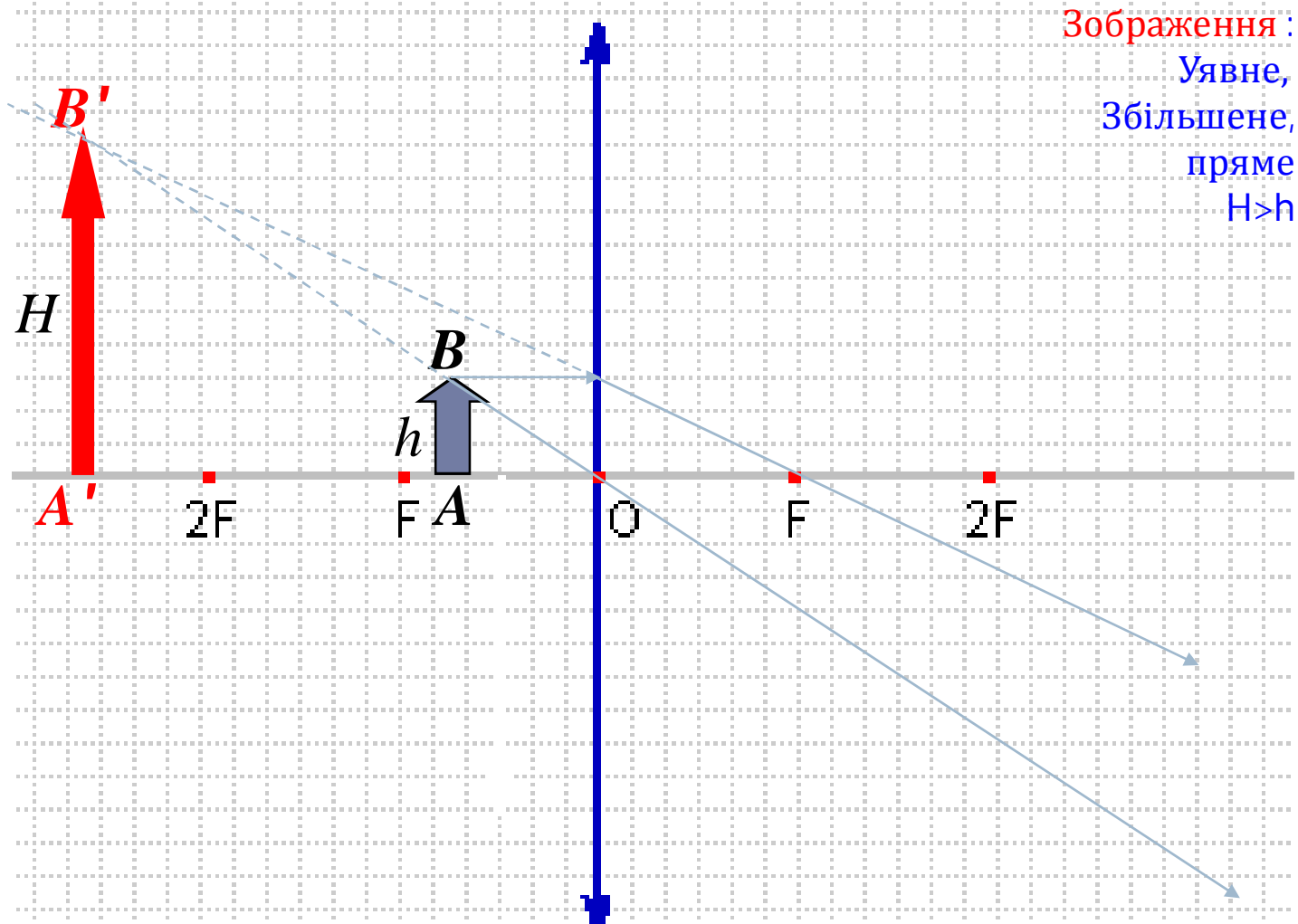
Предмет знаходиться на фокусі лінзи  
( $d=F$ )

Зображення  
відсутнє:  
(промені паралельні між собою)





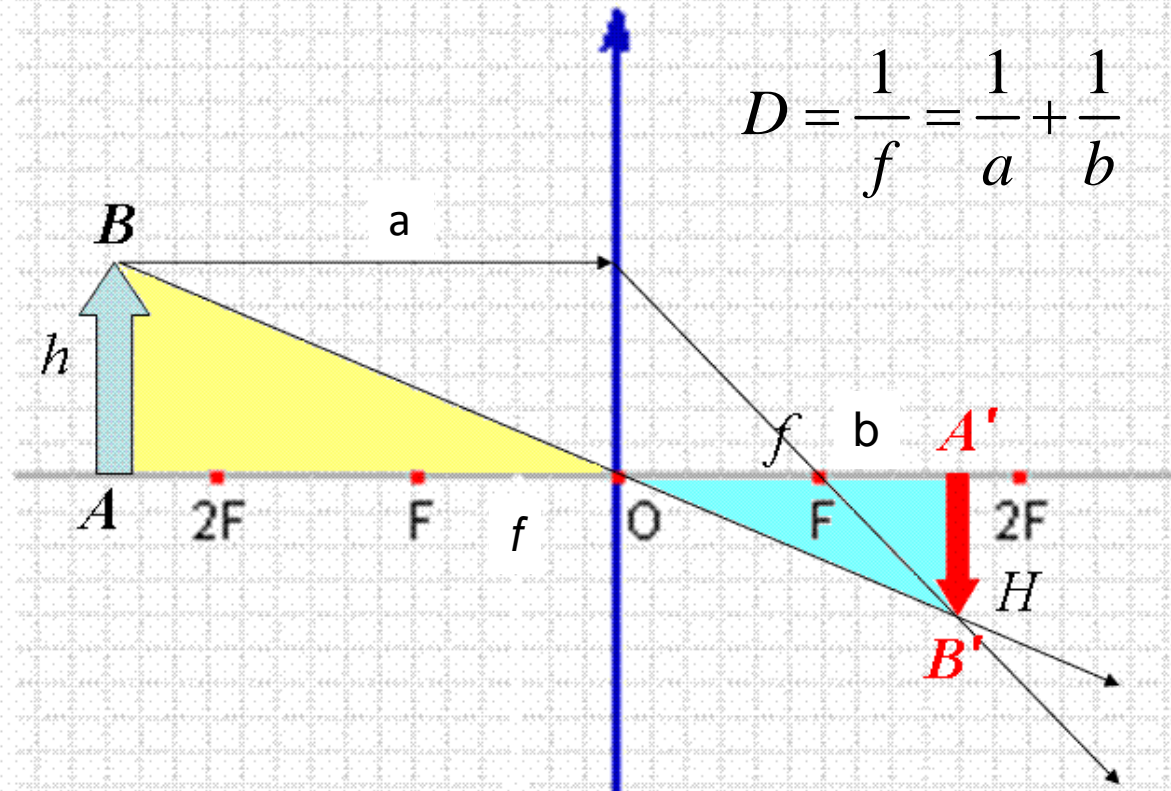
# Побудова зображення в лінзі



Зображення:  
Уявне,  
Збільшене,  
пряме  
 $H > h$

## Формула тонкої лінзи

$a$ - відстань від предмета до лінзи  
 $b$ - відстань від лінзи до зображення  
 $f$ -фокусна відстань



## Фотометрія. Потік випромінювання.

**Фотометрія** – розділ оптики, в якому розглядаються енергетичні характеристики оптичного випромінювання в процесах його генерації, поширення і взаємодії з речовиною.

**Енергетичні величини у фотометрії** – фізичні величини, що характеризують енергетичні параметри оптичного випромінювання без врахування особливостей його дії на приймач.



Енергія, що переноситься світловими променями за одиницю часу, називається **потокем енергії**, що проходить через поверхню площею  $dS$  в тілесному куті  $d\Omega$ .

Якщо нормаль до поверхні  $dS$  утворює з напрямком випромінювання кут  $\alpha$ , то необхідно розглядати її проекцію

$$dS_{\perp} = dS \cos \alpha$$

**Потік випромінювання  $\Phi_e$**  – величина, рівна відношенню енергії  $W$  випромінювання до часу  $t$ , за який випромінювання відбулося:

$$\Phi_e = \frac{W}{t}$$

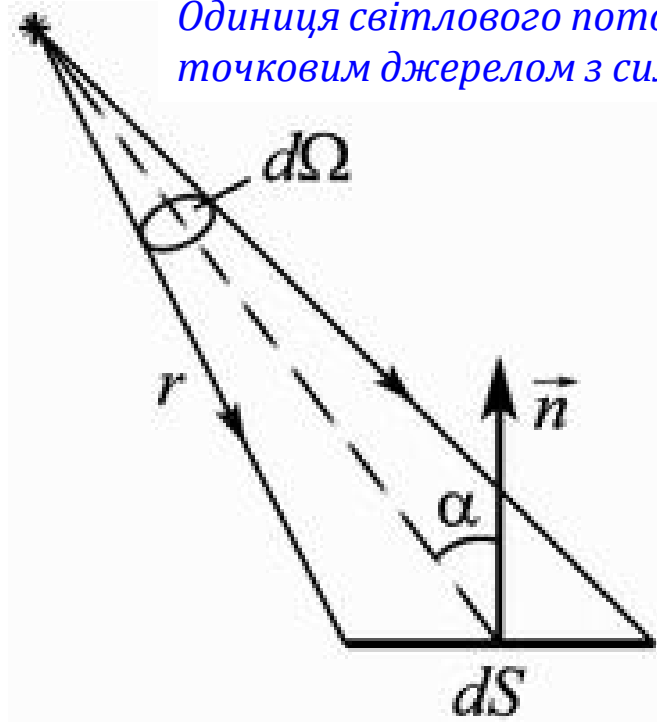
*Одиниця потоку випромінювання – ват (Вт).*

**Силою світла джерела  $I$**  в заданому напрямку називається світловий потік, що випромінюється джерелом у цьому напрямку в одиничному тілесному куті.

Одиниця сили світла  $[I] = \text{кд}$  (кандела)  
Світловий потік для точкового джерела

$$\Phi = \int I \cdot d\Omega$$

*Одиниця світлового потоку  $\Phi$  – люмен (лм) – світловий потік, що випромінюється точковим джерелом з силою світла 1 кд в тілесному куті 1 ср (1 лм = 1 кд · ср).*



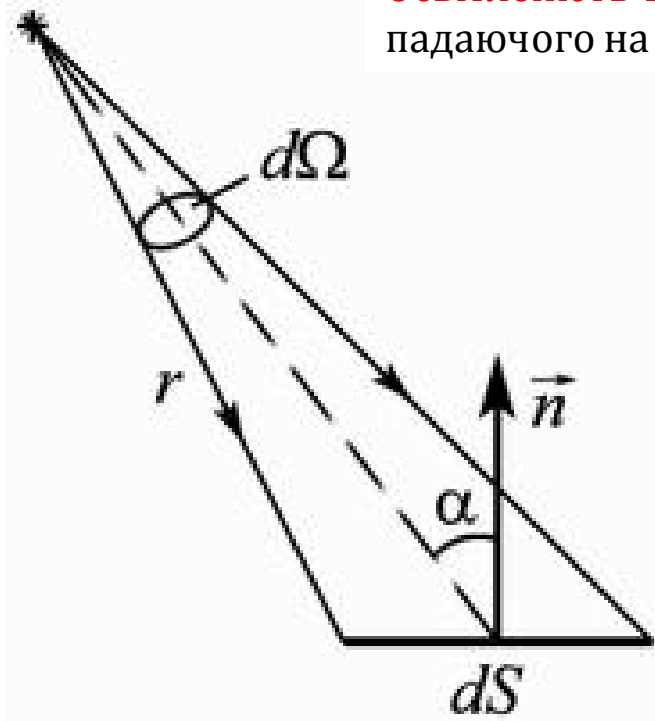
**Світність  $R$**  – сумарний потік, що випромінюється площиною площею  $S$ .

*Одиниця світності – лм/м<sup>2</sup>.*

**Яскравість поверхні, що світиться, в деякому напрямку** – величина, рівна відношенню сили світла у цьому напрямку до площі  $S$  проекції поверхні, що світиться, на площину, перпендикулярну даному напрямку.

*Одиниця яскравості – кд/м<sup>2</sup>.*

**Освітленість  $E$**  – величина, рівна відношенню світлового потоку  $\Phi$ , падаючого на поверхню, до площі  $S$  цієї поверхні.

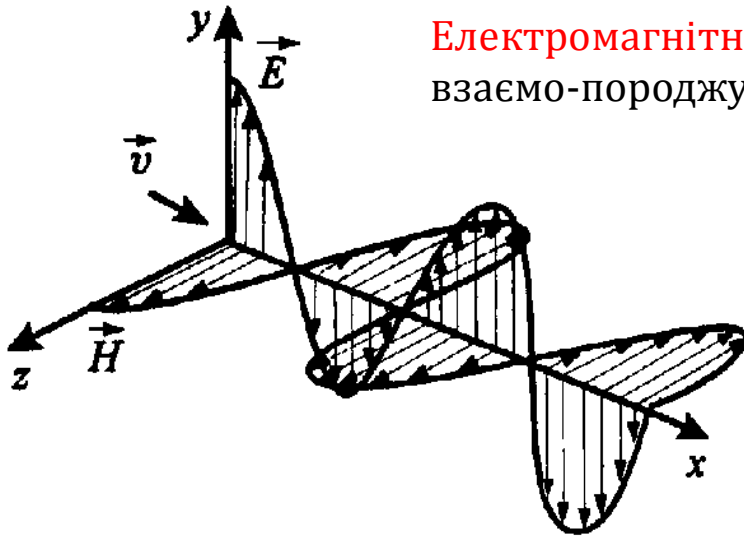


Освітленість, створювана точковим джерелом, обернено пропорційна квадрату відстані до нього і прямо пропорційна косинусу кута між напрямком падаючих променів і нормаллю до освітлюваної поверхні.

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha$$

Одиниця освітленості – люкс (лк) - освітленість такої поверхні, на один квадратний метр якої падає світловий потік в 1 лм ( $1 \text{ лк} = 1 \text{ лм/м}^2$ ).

## Когерентність



**Електромагнітна хвиля** – це процес поширення в просторі з часом взаємо-породжуючих змінних електричного та магнітного полів

**Когерентність** - узгоджене протікання в часі і просторі декількох коливальних або хвильових процесів.

**Монохроматичні хвилі** – хвилі однієї частоти;

*Монохроматичні хвилі є когерентними між собою.*

Реальні джерела не дають монохроматичного світла- хвилі випромінювані незалежними джерелами світла **завжди** некогерентні.

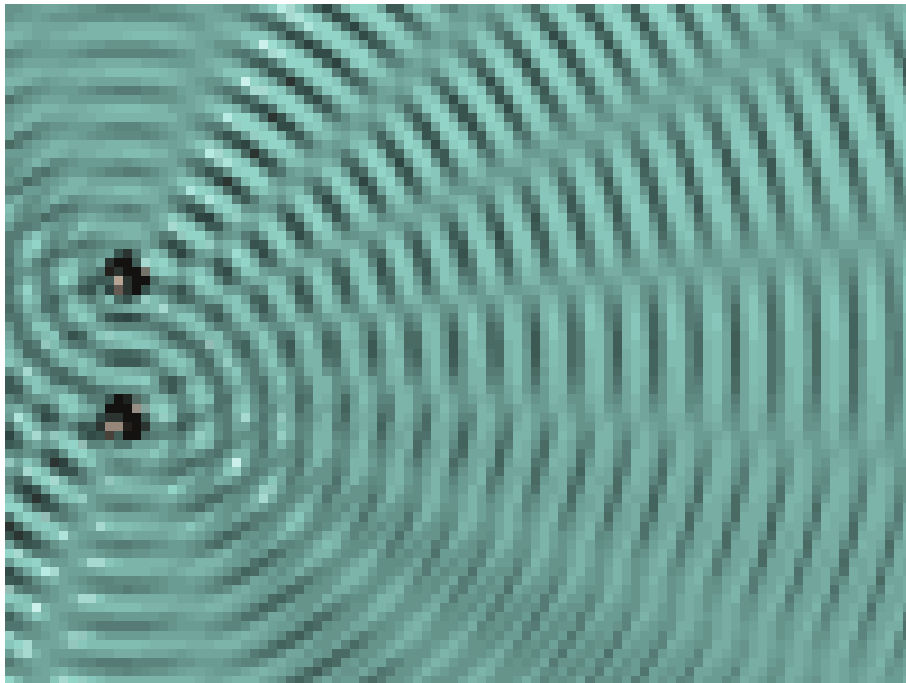
*У джерелі світло випромінюється атомами, кожний з яких генерує світло протягом  $10^{-8}$  с.*

*Протягом цього часу хвилі, що випромінюються мають постійні амплітуду і фазу коливань.*

## Інтерференція

---

**Інтерференція коливань** – просторове додавання (накладання) двох або декількох когерентних коливань, при якому відбувається просторовий перерозподіл енергії (в одних точках простору відбувається підсилення інтенсивності результуючої хвилі, в інших – зменшення інтенсивності).



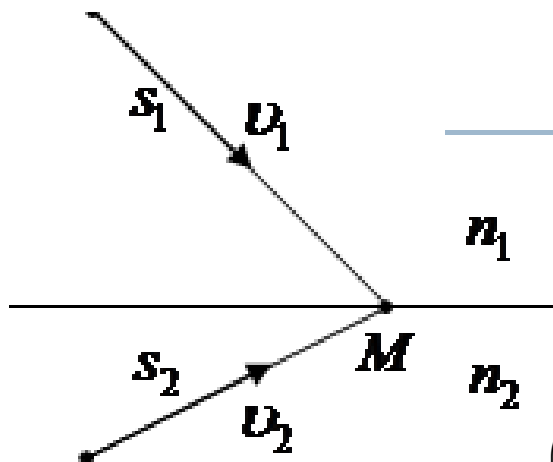
## Інтерференція світла

**Інтерференція світла** – просторове додавання (накладання) двох або декількох когерентних світлових хвиль, при якому відбувається просторовий перерозподіл енергії (в одних точках простору відбувається підсилення інтенсивності результуючої хвилі, в інших – зменшення інтенсивності).

$$x = A \cos(\omega t)$$

Нехай в даній точці М дві монохроматичні хвилі з циклічною частотою  $\omega$  збуджують два коливання, причому до точки М одна хвиля пройшла в середовищі з показником заломлення  $n_1$  шлях  $s_1$  з швидкістю  $v_1$ , а друга – в середовищі з  $n_2$  шлях  $s_2$  з швидкістю  $v_2$ :

$$x_1 = A_1 \cos \omega \left( t - \frac{s_1}{v_1} \right), \quad x_2 = A_2 \cos \omega \left( t - \frac{s_2}{v_2} \right)$$



**Амплітуда результуючого коливання:**

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1 A_2 \cos \delta$$

**Різниця фаз  $\delta$  коливань, збуджених в точці М:**

$$\delta = \omega \left( \frac{s_2}{v_2} - \frac{s_1}{v_1} \right) = \omega \left( \frac{s_2}{c/n_2} - \frac{s_1}{c/n_1} \right) = \frac{\omega}{c} (s_2 n_2 - s_1 n_1) = \frac{2\pi\nu}{c} (L_2 - L_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta$$

( $v=c/n$ ;  $\omega=2\pi\nu$ ,  $\lambda_0$  – довжина хвилі у вакуумі)



## Інтерференція світла

---

$$\delta = \omega \left( \frac{s_2}{v_2} - \frac{s_1}{v_1} \right) = \omega \left( \frac{s_2}{c/n_2} - \frac{s_1}{c/n_1} \right) = \frac{\omega}{c} (s_2 n_2 - s_1 n_1) = \frac{2\pi\nu}{c} (L_2 - L_1) = \frac{2\pi}{\lambda_0} \Delta$$

**Оптична довжина шляху  $L$**  - добуток геометричної довжини шляху  $S$  світлової хвилі в даному середовищі на показник заломлення  $n$  цього середовища:  $L = s \cdot n$ .

**Оптична різниця ходу  $\Delta$**  - різниця оптичних довжин шляхів, що проходяться хвилями.

$$\Delta = L_2 - L_1 = s_2 n_2 - s_1 n_1$$

---

**Умова виникнення інтерференційного максимуму:**

Якщо оптична різниця ходу  $\Delta$  рівна цілому числу довжин хвиль у вакуумі (парному числу півхвиль), то в цій точці спостерігатиметься підсилення інтенсивності світла

$$\Delta = \pm m \lambda_0 = \pm 2m \frac{\lambda_0}{2}$$

$$\delta = \pm 2m\pi \quad (m=0, 1, 2, \dots)$$

---

**Умова виникнення інтерференційного мінімуму:**

Якщо оптична різниця ходу  $\Delta$  рівна непарному числу половин довжин виль у вакуумі, то в цій точці спостерігатиметься послаблення інтенсивності світла

$$\Delta = \pm (2m + 1) \frac{\lambda_0}{2}$$

$$\delta = \pm (2m + 1)\pi$$

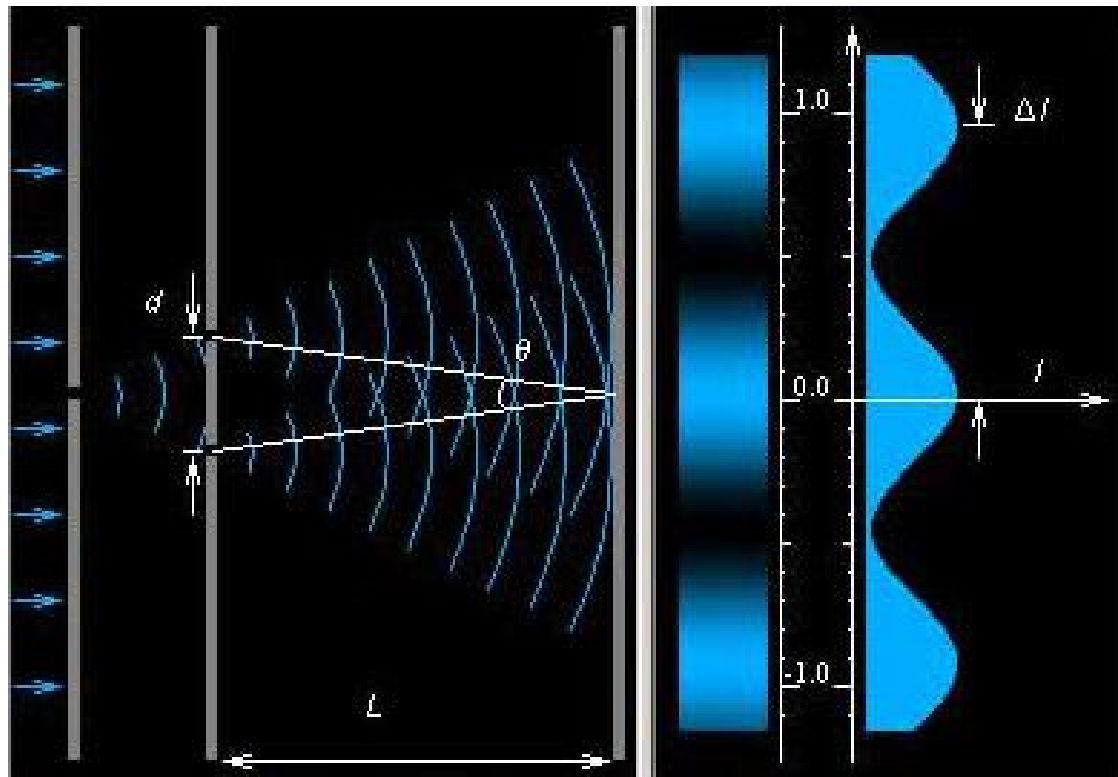
$$(m=0, 1, 2, \dots)$$

---



## Методи спостереження інтерференції.

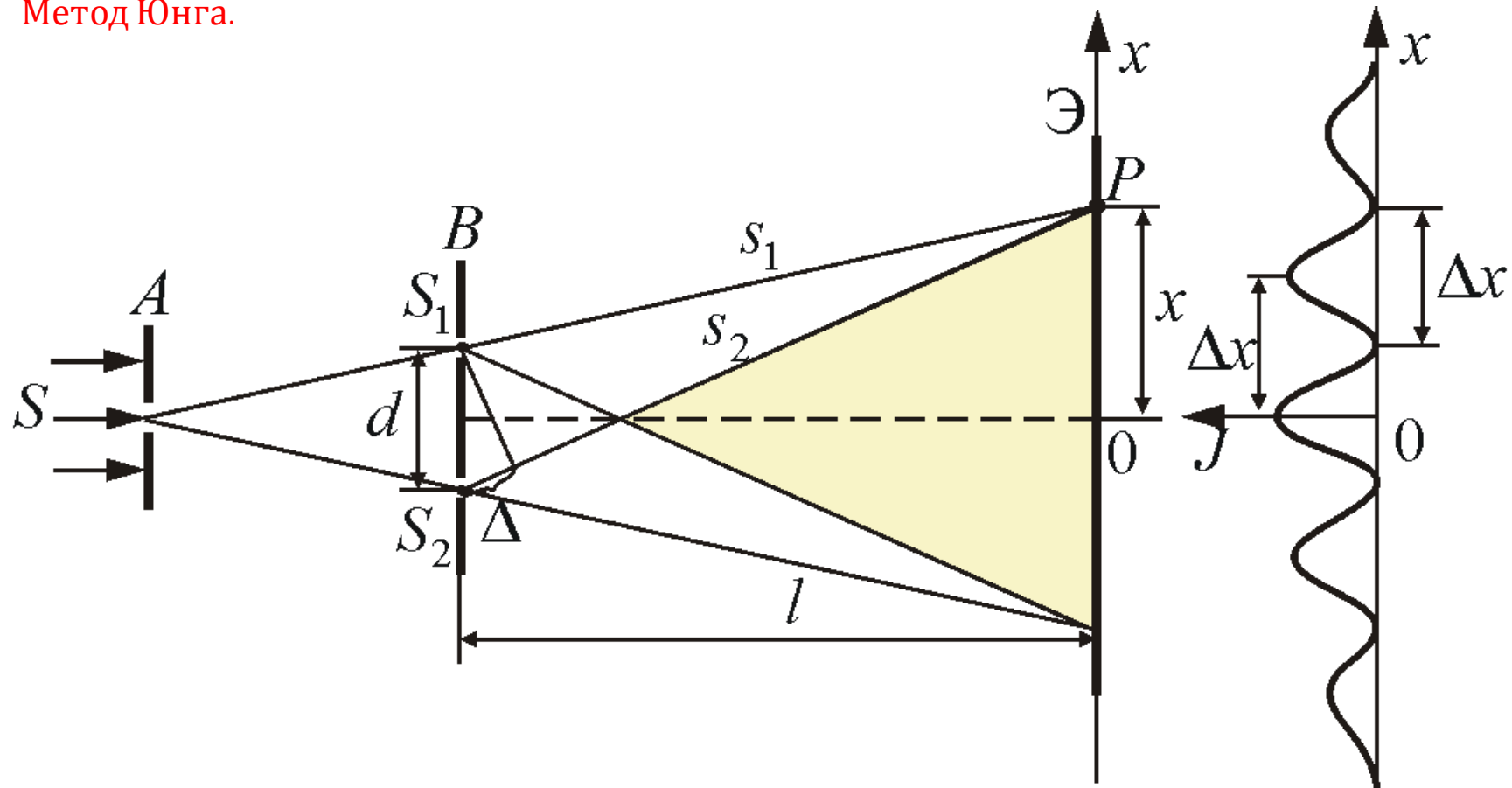
**Метод Юнга.** Світло від освітленої щілини  $S$  падає на дві щілини  $S_1$  і  $S_2$ , які виконують роль когерентних джерел. Інтерференційна картина спостерігається на екрані.



$$\Delta = \pm m\lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

## Методи спостереження інтерференції.

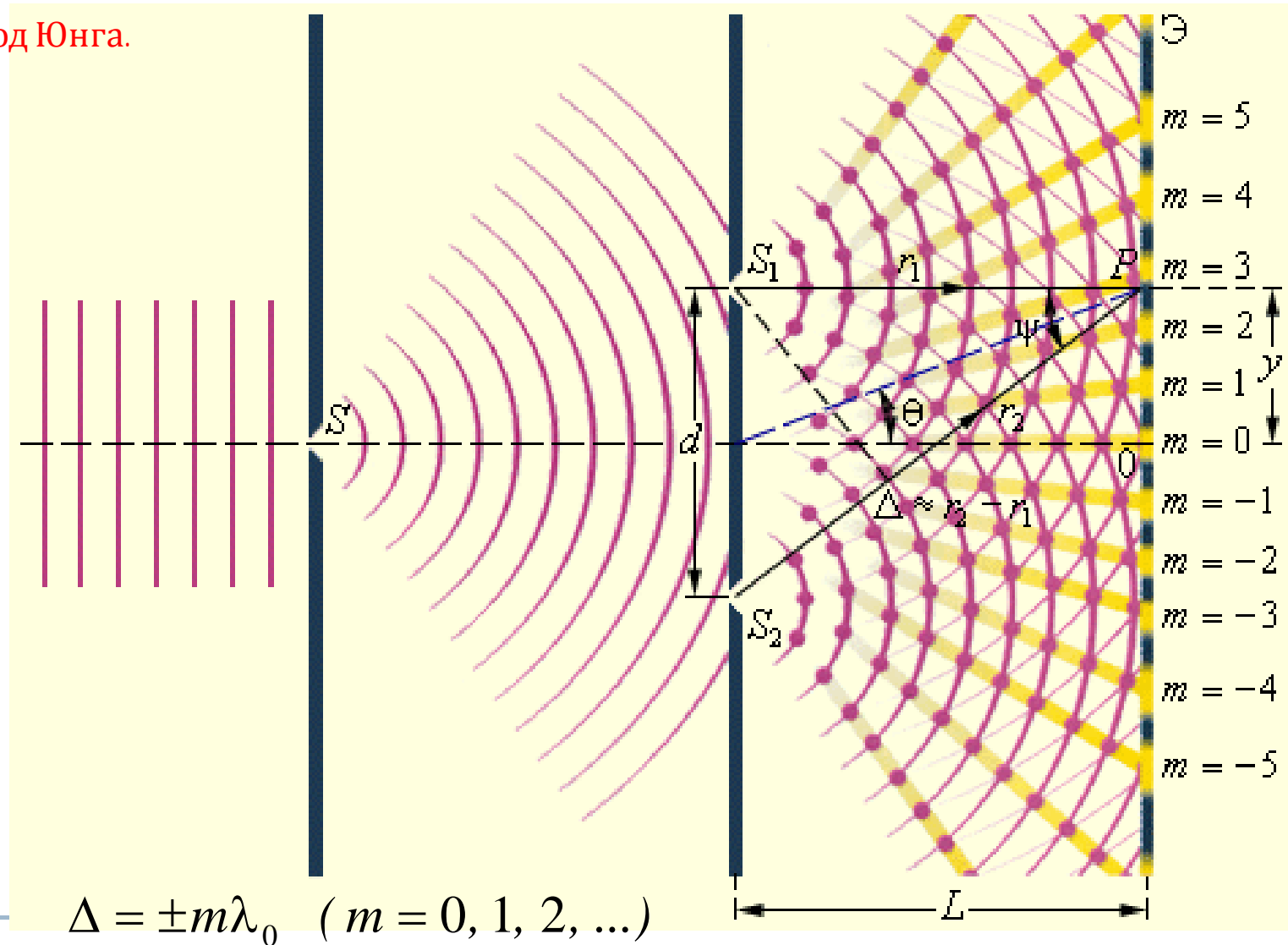
Метод Юнга.



$$\Delta = \pm m\lambda_0 \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

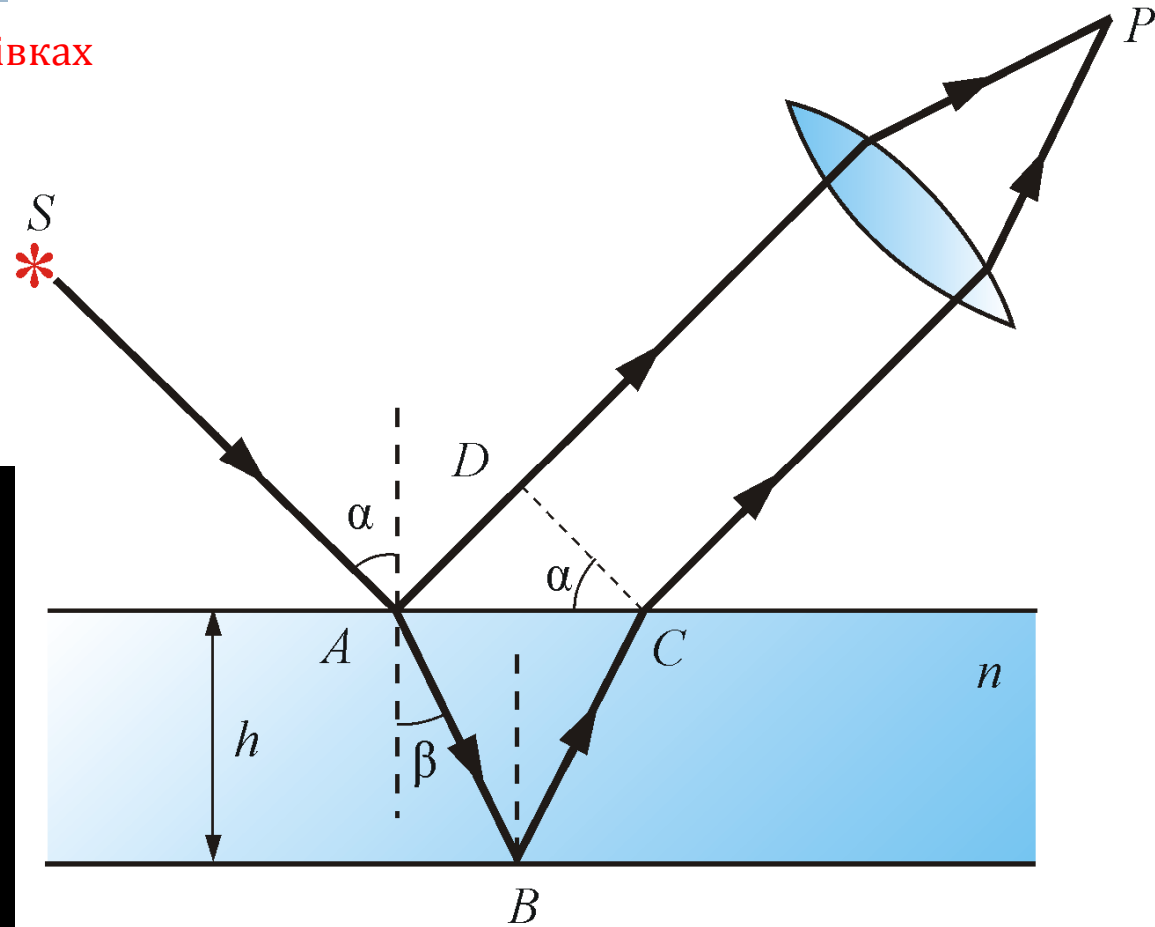
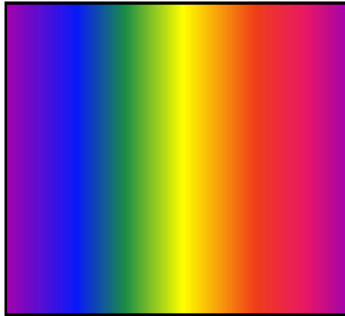
## Методи спостереження інтерференції.

Метод Юнга.



## Методи спостереження інтерференції.

### Інтерференція в тонких плівках



$$\Delta = 2nh \cos \beta \pm \frac{\lambda_0}{2} = 2h \sqrt{n^2 - \sin^2 \alpha} \pm \frac{\lambda_0}{2}$$

## Дифракція світла

---



*Ж. Френель*

**Дифракція** - огинання хвилями перешкод, що зустрічаються на їх шляху, Дифракція пояснюється за допомогою **принципу Гюйгенса** – *вторинні хвилі огинають перешкоди на шляху поширення первинних хвиль.*

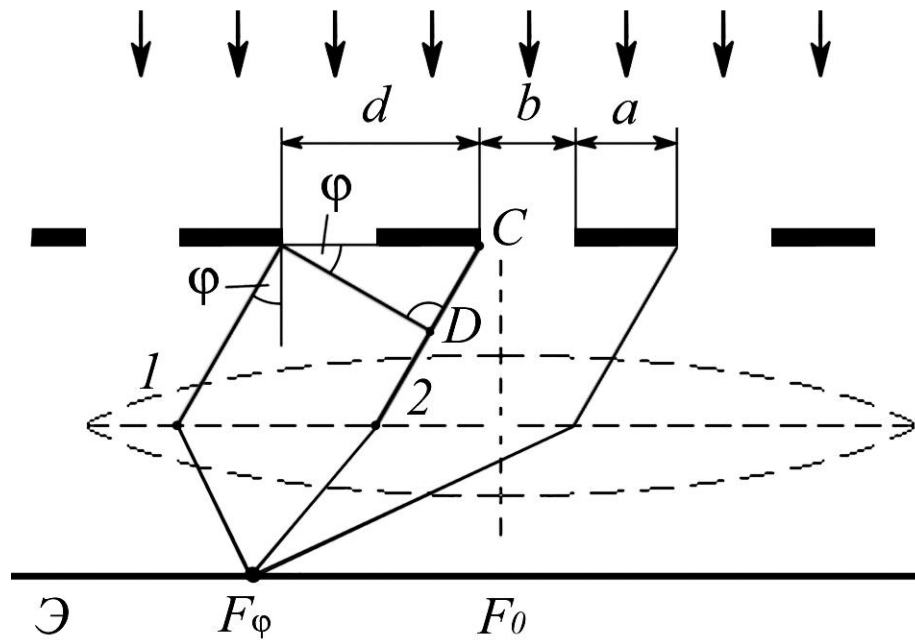
**Доповнення Френеля** – вторинні хвилі когерентні і інтерферують між собою.

Згідно принципу Гюйгенса-Френеля, світлова хвиля, створена джерелом  $S$  може бути представлена як результат суперпозиції (додавання) когерентних вторинних хвиль, що випромінюються **вторинними (уявними) джерелами** – *нескінченно малими елементами будь-якої замкнутої поверхні, що охоплює джерело  $S$ .*



## Дифракційна решітка

**Дифракційна решітка** – система паралельних щілин рівної ширини, що лежать в одній площині і розділені рівними по ширині непрозорими проміжками.



$$\sin \varphi = \frac{m\lambda}{b}$$

світло з більшою довжиною хвилі  
(**червоний**) відхиляється на більший кут



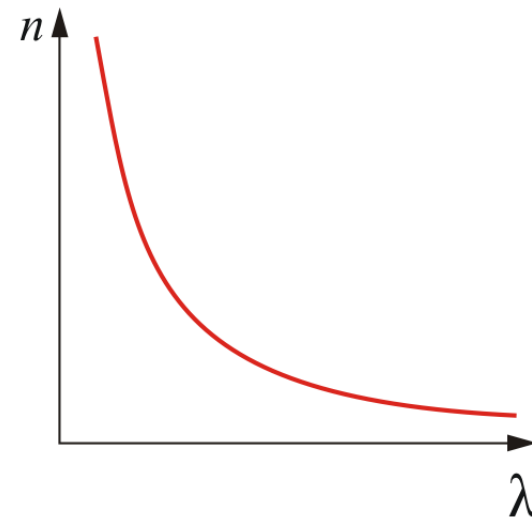
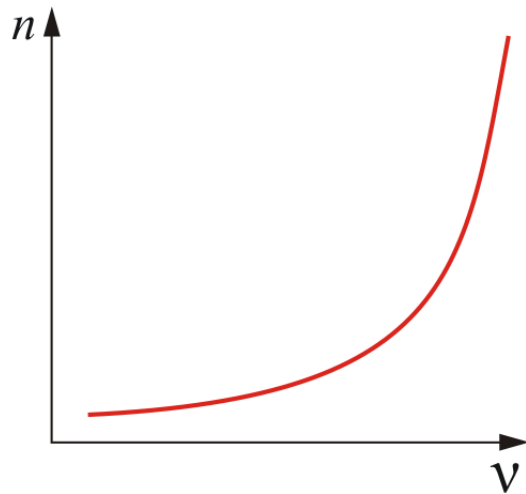
780 нм

380 нм

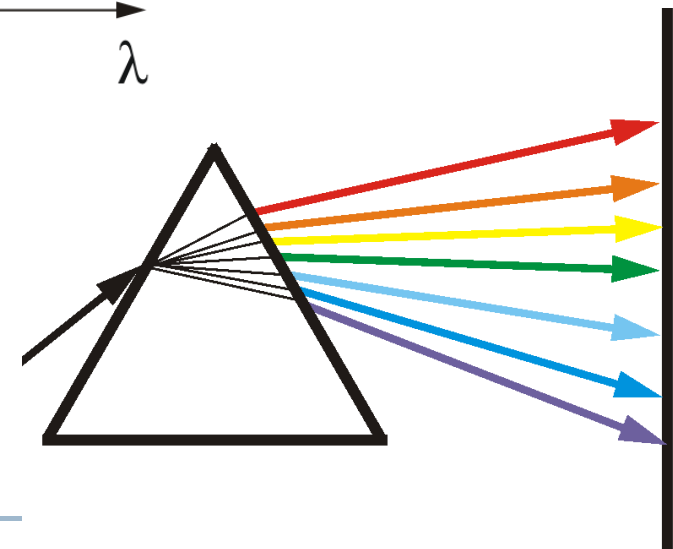


## Дисперсія світла

**Дисперсією світла** називається залежність показника заломлення  $n$  від частоти  $\nu$  (довжини хвилі  $\lambda$ ) світла (або залежність швидкості світлової хвилі від її частоти).

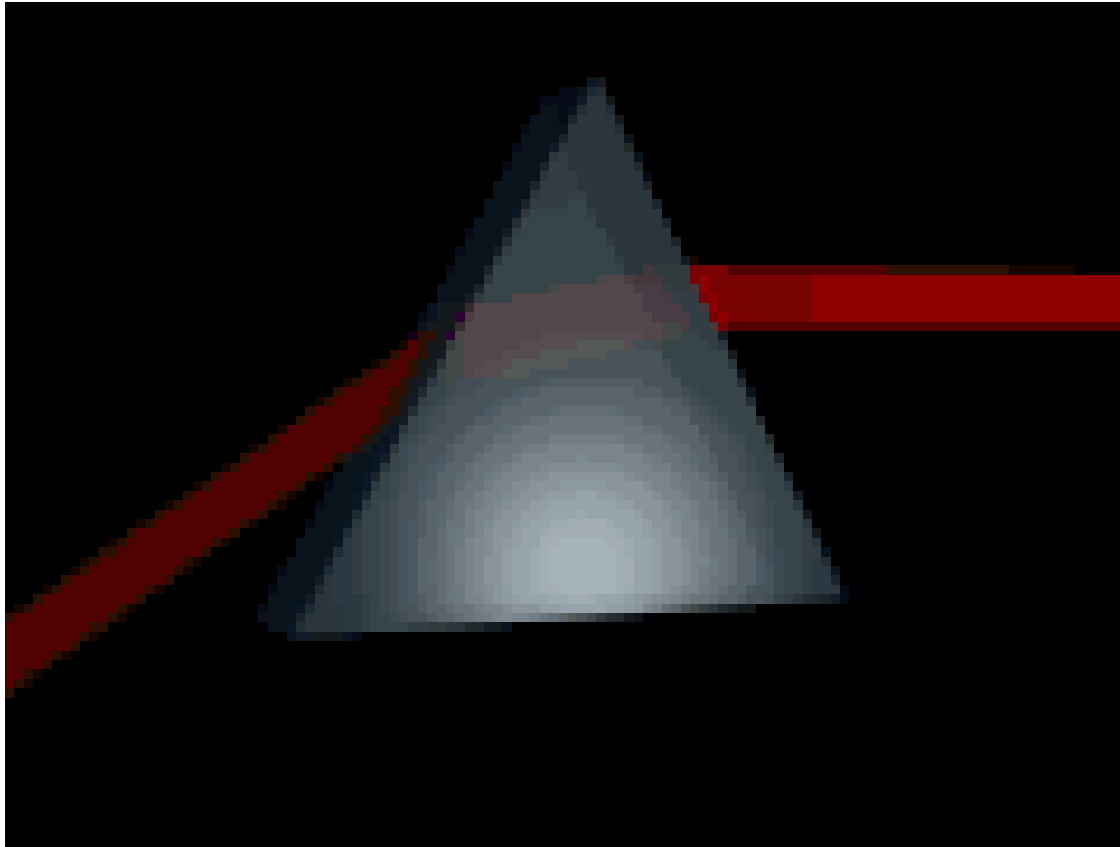


Наслідок дисперсії – розклад в **спектр** білого світла при проходженні його через призму.  
*Дисперсія виявляється лише при розповсюдженні немонохроматичних хвиль*

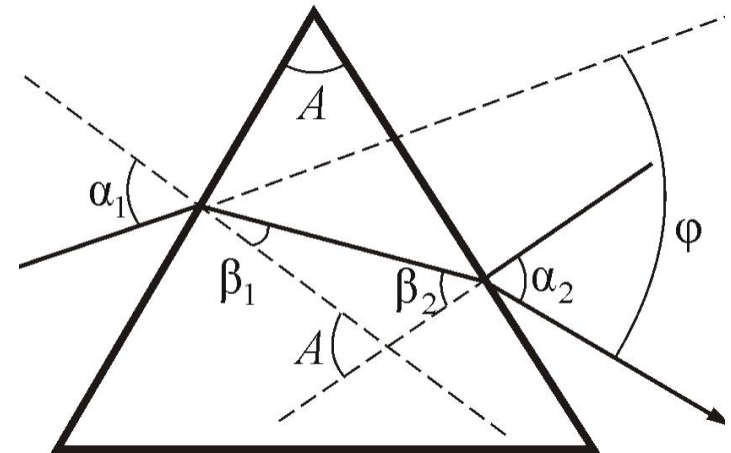




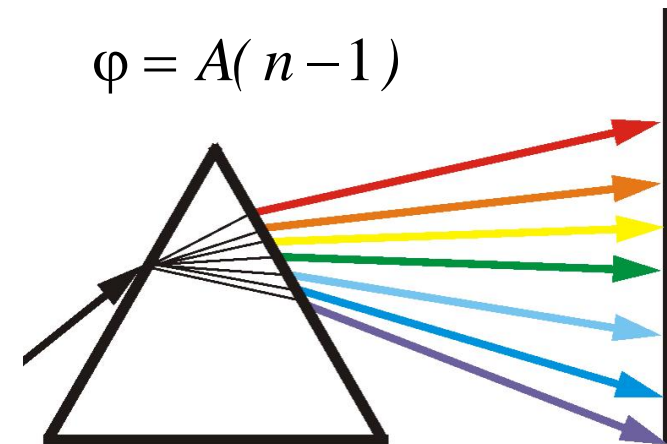
## Дисперсія світла. Призма



$A$  - заломлюючий кут призми



$$\varphi = A(n - 1)$$



кут відхилення променів призмою тим більший, чим більший заломлюючий кут призми

## Поглинання світла

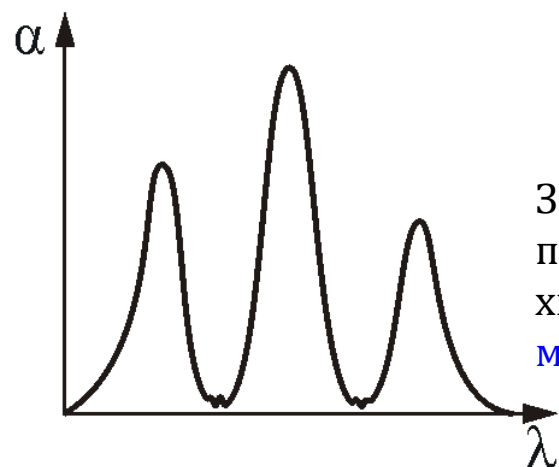
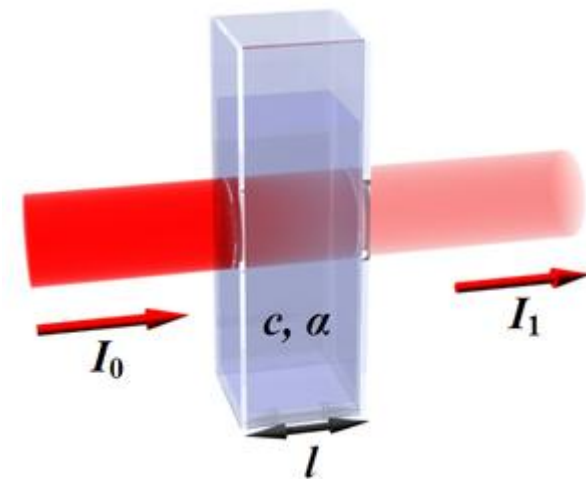
**Поглинання (абсорбція) світла** - явище зменшення енергії світлової хвилі при її поширенні в речовині внаслідок перетворення енергії хвилі в інші види енергії (внутрішню енергію речовини, енергію вторинного випромінювання в інших напрямках).

**Закон Бугера:** в результаті поглинання інтенсивність світла при проходженні через речовину зменшується:

$$I_1(x) = I_0 e^{-\alpha l}$$

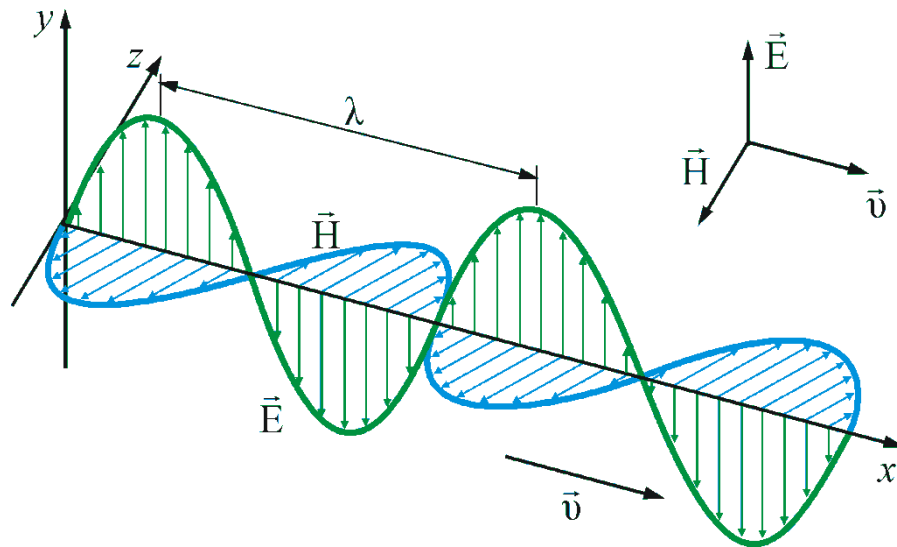
$I_0$  і  $I$  – інтенсивності хвилі на вході і виході шару поглинаючої речовини товщиною  $l$ .

$\alpha$  – коефіцієнт поглинання, який залежить від довжини хвилі світла, хімічної природи і стану речовини і не залежний від інтенсивності світла.



Залежність коефіцієнта поглинання від довжини хвилі - **спектр поглинання матеріалу.**

## Поляризація світла

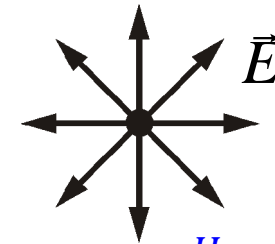


**Світлова хвиля – поперечна:**

вектори напруженості електричного та магнітного полів коливаються перпендикулярно до напрямку поширення

**Світловий вектор** – вектор напруженості електричного поля.

**Поляризована світлова хвиля** – хвиля в якій напрями коливання світлового вектора впорядковані (мають переважну орієнтацію)



*Неполяризоване світло*



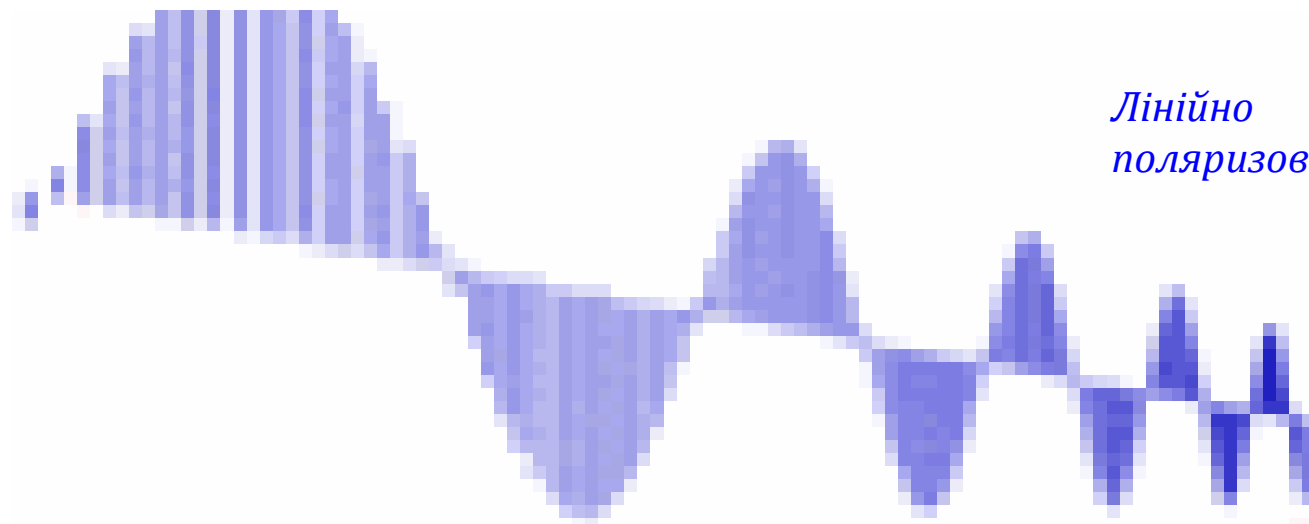
*Частково  
поляризоване світло*



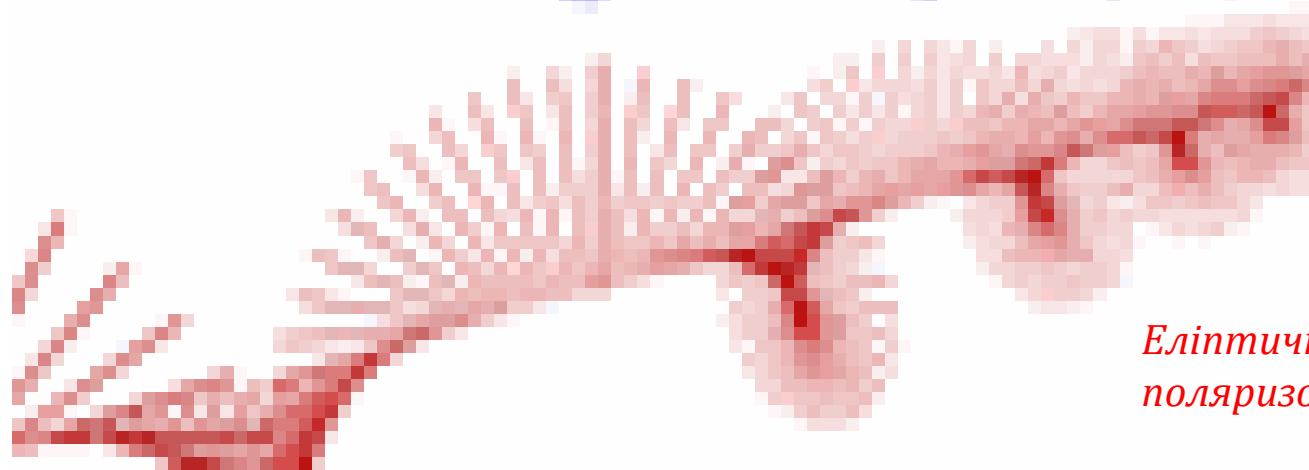
*Лінійно  
поляризоване світло*

## Поляризація світла

---



*Лінійно  
поляризоване світло*



*Еліптично  
поляризоване світло*

---

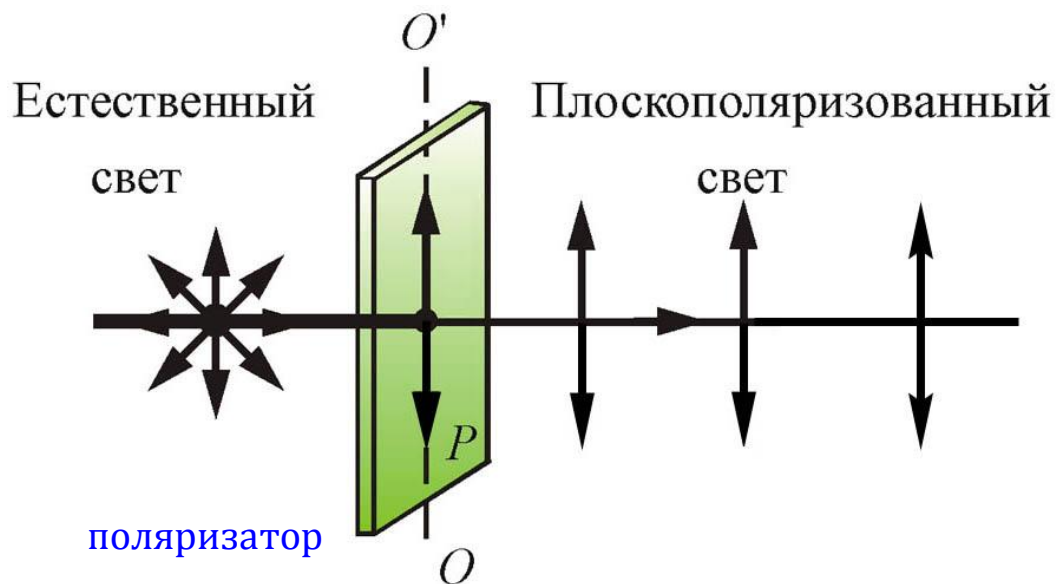


## Лінійно поляризоване світло

**Лінійно поляризоване світло** – світло в якому світловий вектор коливається тільки в одній, площині

Пристрій, що дозволяє отримати лінійно поляризоване світло з природного - **лінійний поляризатор**:

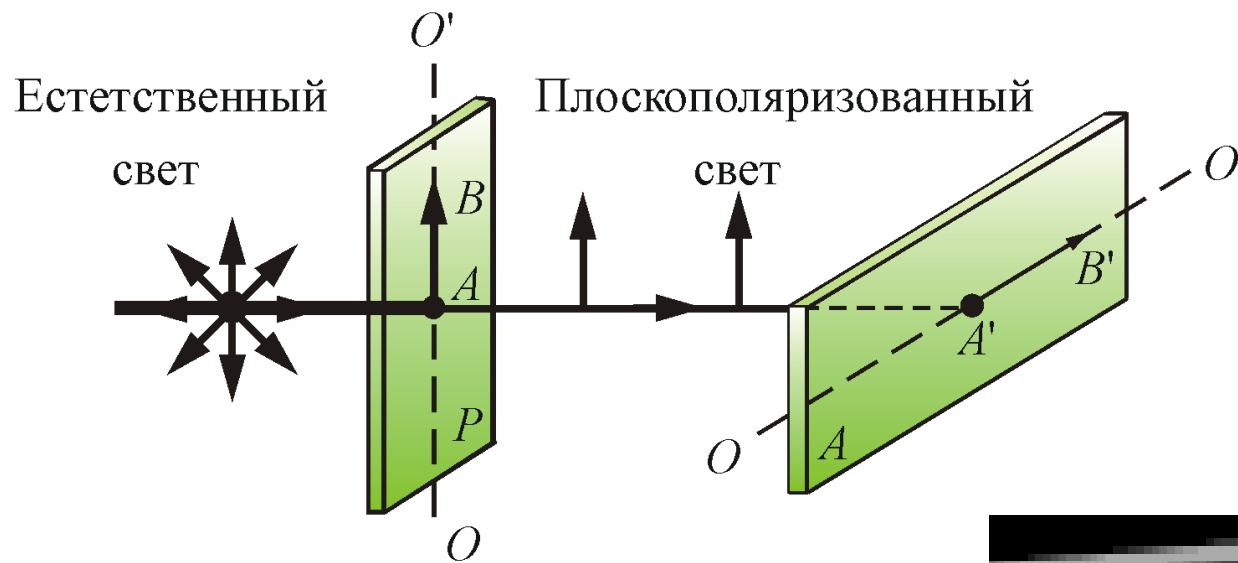
- вільно пропускає коливання, паралельні площині поляризатора,
- повністю або частково затримує коливання перпендикулярні до його площини.



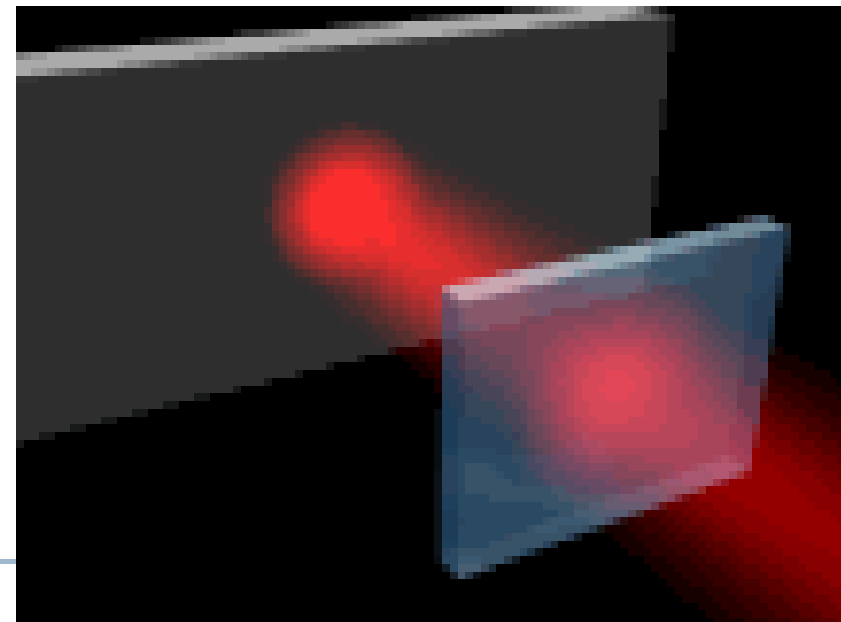
Кристал турмаліну

Після проходження поляризатора світло буде лінійно поляризоване в напрямку  $OO'$ .

## Лінійно поляризоване світло

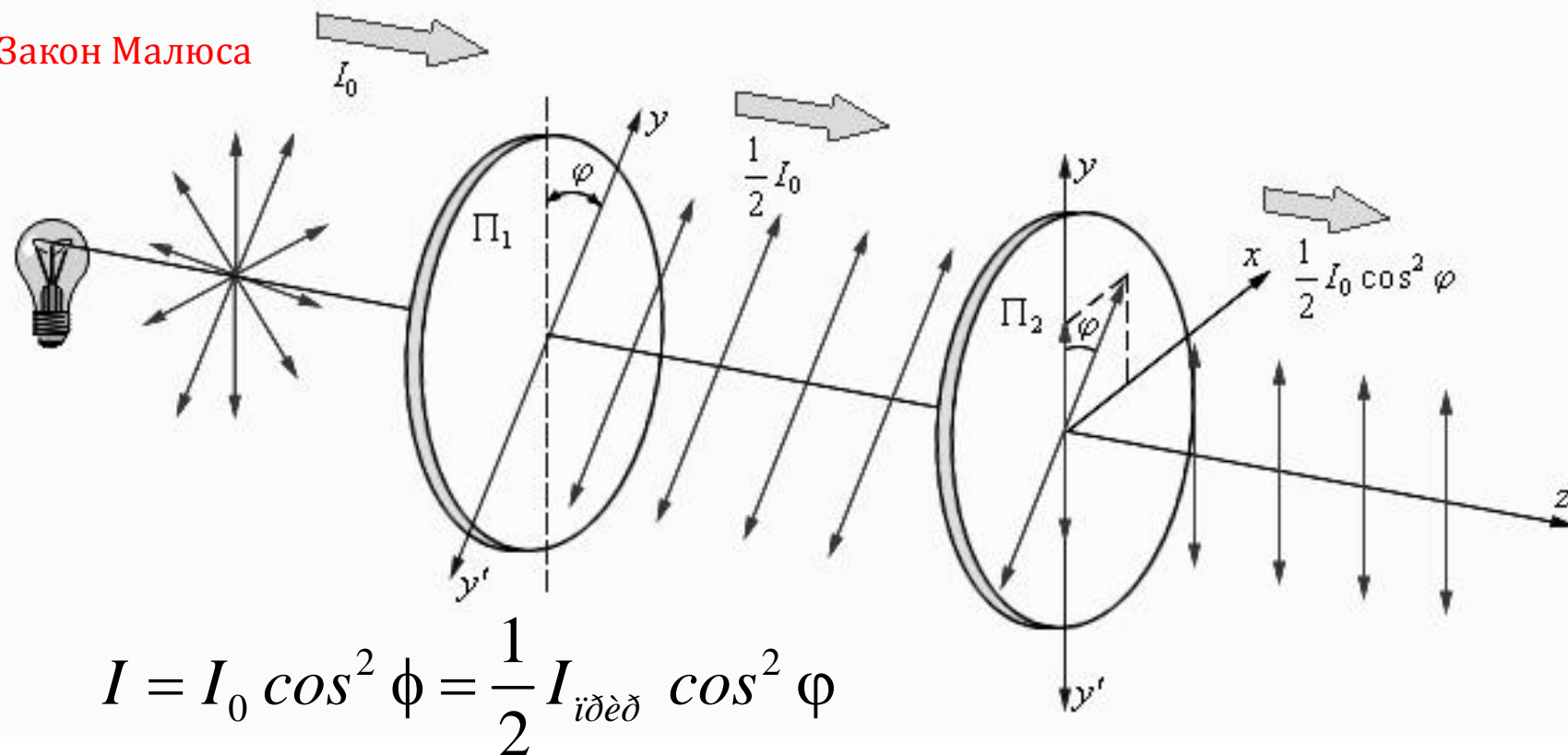


Якщо на шляху променя поставити другий кристал - **аналізатор**, то інтенсивність світла буде змінюватися в залежності від того, як орієнтовані одна відносно одного обидві пластини.

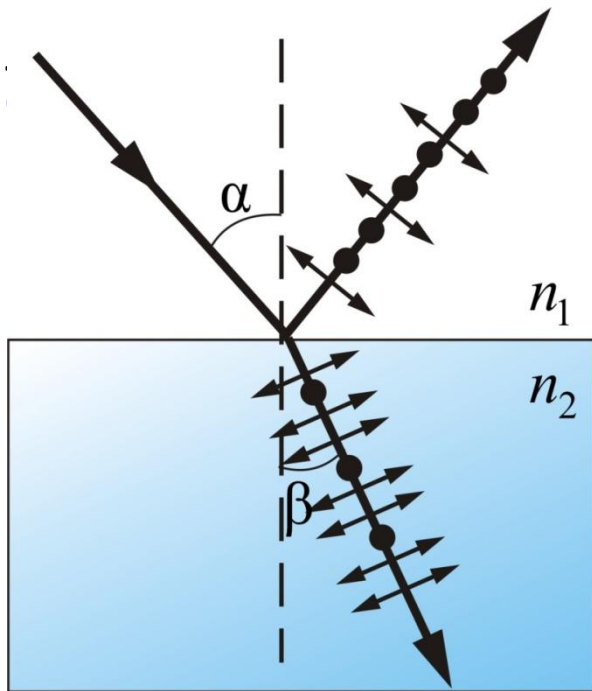


## Лінійно поляризоване світло. Закон Малюса

Закон Малюса

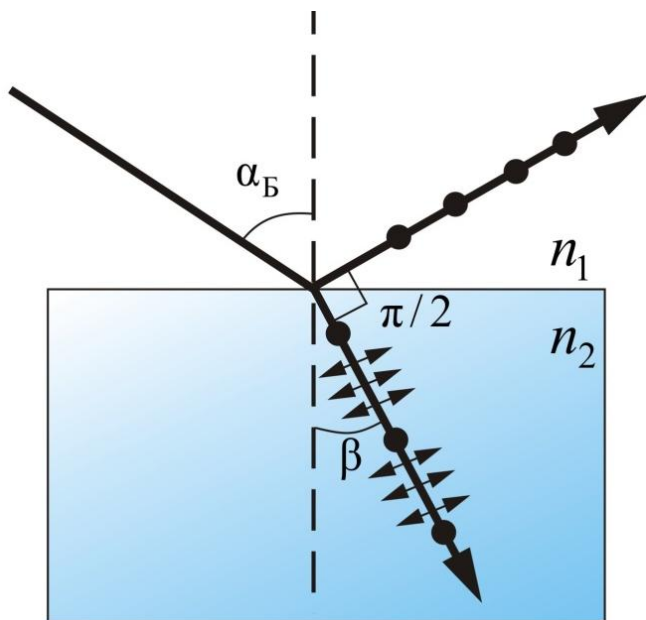


*Інтенсивність світла, що пройшло через аналізатор, міняється залежно від кута між площинами поляризатора та аналізатора*



## Поляризація при відбиванні і заломленні

У **відбитому** промені переважають коливання, світлового вектора **перпендикулярні** площині падіння, а в **заломленому** промені - коливання світлового вектора **паралельні** до площини падіння.



Якщо кут падіння рівний куту Брюстера, то відбитий промінь є плоскополяризованим.

$$\operatorname{tg} \alpha_{\text{Брюстера}} = \frac{n_2}{n_1}$$

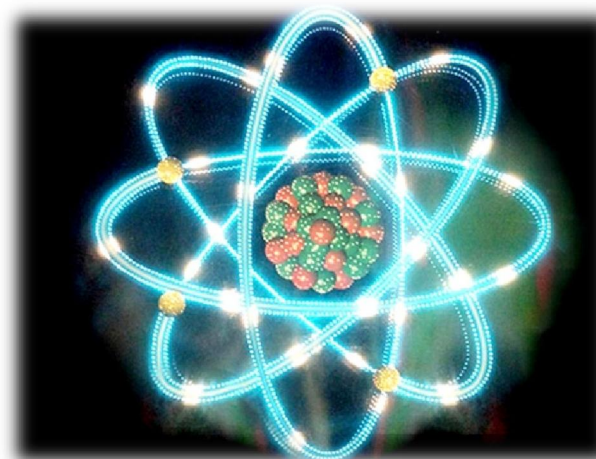


## Лекція 8

---

### Квантова оптика, елементи квантової фізики

1. Квантова оптика
2. Теплове випромінювання
3. Закони теплового випромінювання
4. Формула Релея - Джинса
5. Формула Планка
6. Фотоефект
7. Формула Енштейна для фотоефекту
8. Подвійна природа світла
9. Атомні спектри випромінювання
10. Дослід Резерфорда
11. Ядерна модель атома
12. Теорія атома Бора
13. Ядерна фізика



## Квантова оптика

---

**Квантова оптика** – вивчає явища, в яких проявляються квантові властивості світла, тобто світло розглядається як потік дискретних частинок - **фотонів**

---

*Коливання електричних зарядів, що входять до складу речовини, обумовлюють електромагнітне випромінювання, яке супроводжується втратою енергії речовиною.*

При розсіюванні і відбиванні світла формування вторинних світлових хвиль і тривалість випромінювання речовиною відбувається за час співмірний з періодом світлових коливань ( $10^{-13}$ с).

*Якщо випромінювання продовжується протягом часу, який значно перевищує період світлових коливань, то можливі два типи випромінювання:*

- 1) теплове випромінювання
- 2) люмінесценція.

**Рівноважний стан системи тіло-випромінювання** - розподіл енергії між тілом і випромінюванням залишається незмінним для кожної довжини хвилі (*енергія що поглинається рівна енергії, що випромінюється за одиницю часу одиницею площі поверхні*).

**Люмінесценція** - нерівноважне випромінювання, надлишкове при даній температурі над тепловим випромінюванням тіла і має тривалість, більшу за період світлових коливань.

---

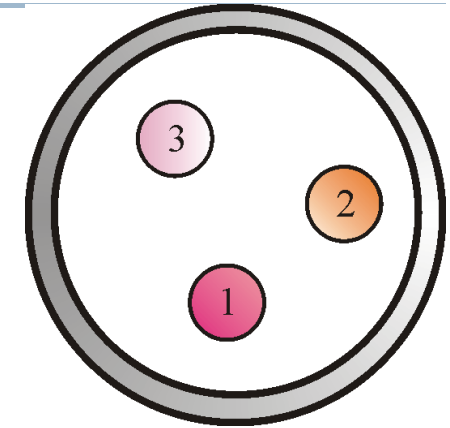


## Теплове випромінювання

**Теплове випромінювання** – світіння тіл, обумовлене нагріванням.

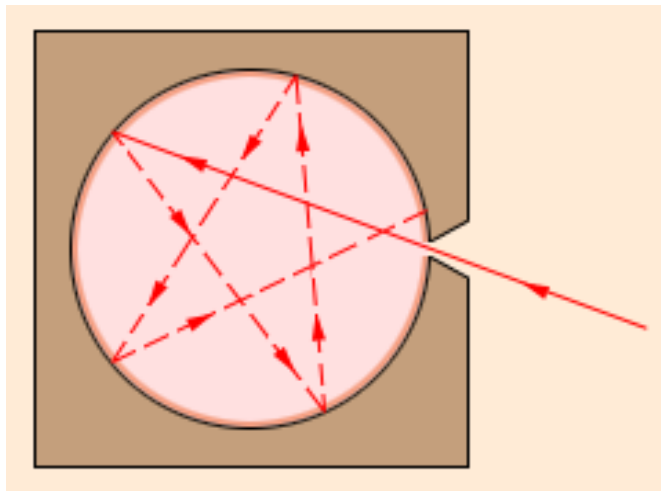
Характеристика теплового випромінювання - **випромінююча здатність тіла**  $R_T$  – енергія, що випромінюється за одиницю часу випромінювання з одиниці площі поверхні тіла в інтервалі частот одиничної ширини

$$R_T = \int_0^{\infty} r_{\lambda} d\lambda$$



*Ізольована система з декількох тіл різної температури через деякий час прийде в стан теплової рівноваги*

**Поглинальна здатність тіла** - відношення енергії, що поглинається тілом до загальної кількості енергії, що потрапляє на поверхню тіла з випромінюванням



**Абсолютно чорне тіло (АЧТ)** - тіло, здатне поглинати при будь-якій температурі все падаюче на нього випромінювання будь-якої частоти.

**Поглинальна здатність АЧТ** рівна одиниці

## Закони теплового випромінювання

**Закон Кірхгофа** визначає співвідношення між випромінюючою і поглинальною здатностями тіл: відношення випромінюючої  $r_{\lambda,T}$  і поглинальної  $\alpha_{\lambda,T}$  здатностей тіла не залежить від природи тіла і є універсальною функцією частоти і температури.

$$\frac{r_{\lambda,T}}{\alpha_{\lambda,T}} = f(\lambda, T)$$

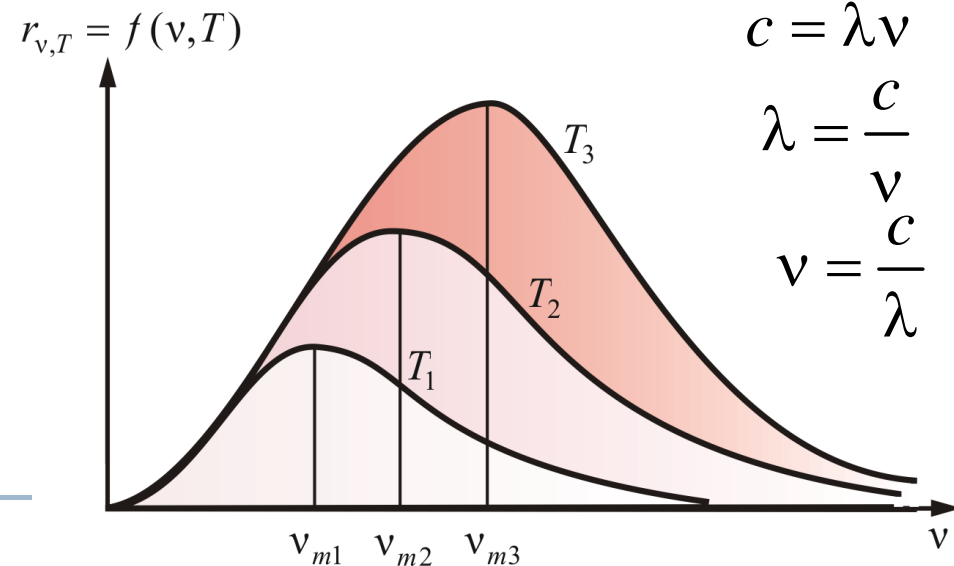
**Закон Стефана-Больцмана**  
Випромінююча здатність АЧТ пропорційна четвертому степеню термодинамічної температури

$$R = \sigma T^4$$

$\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ А} \cdot \text{д} \cdot \text{м}^{-2} \cdot \text{К}^{-4}$   
стала Стефана-Больцмана

**Закон зміщення Віна**

Довжина хвилі  $\lambda_{\max}$  при якій випромінювальна здатність АЧТ максимальна обернено пропорційна температурі тіла



$$\lambda_{\max} = b/T \quad b = 2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \cdot \text{К}$$

стала Віна

Формула Релея - Джинса



$$r_{\nu, T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

## Формула Планка



Енергія коливної системи (осцилятора) повинна бути цілим кратним деякої одиниці енергії пропорційній частоті коливань:

$$E_n = nh\nu$$

*Енергія одного фотона:*  $E = h\nu = \hbar\omega$

**Світло випромінюється окремими порціями - фотонами**

$$\left. \begin{array}{l} \omega = 2\pi\nu \\ \hbar = h/2\pi \end{array} \right\} \begin{array}{l} h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \\ \hbar = 1,054 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} \end{array}$$

Стала Планка

$$r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} \frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1},$$

Формула Планка

$$h\nu \ll kT \Rightarrow r_{\nu,T} = \frac{2\pi\nu^2}{c^2} kT$$

Формула Релея - Джинса

$$h\nu \gg kT \Rightarrow r_{\nu,T} = \frac{2\pi h\nu^3}{c^2} e^{-\frac{h\nu}{kT}}$$

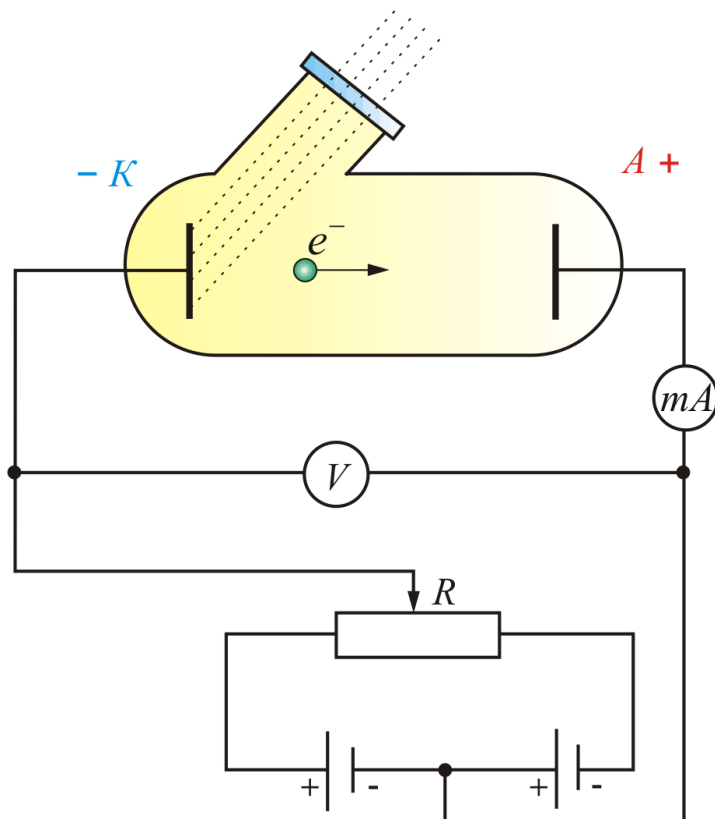
Закон Віна

## Фотоефект

**Фотоефект** - вивільнення електронів під дією електромагнітного випромінювання.

**Внутрішній фотоефект** – це викликані електромагнітним випромінюванням переходи електронів всередині речовини із зв'язаних станів у вільні без вильоту назовні.

**Зовнішній фотоефект** (фотоелектронна емісія) - випускання електронів речовиною під дією електромагнітного випромінювання.



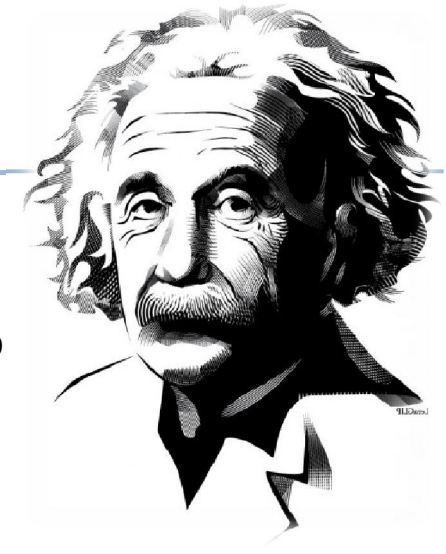
### Закони фотоефекту

- **Закон Столетова:** *при фіксованій частоті падаючого світла число фотоелектронів, що вилітають за одиницю часу пропорційне інтенсивності світла.*
- **Максимальна початкова швидкість (максимальна початкова кінетична енергія) фотоелектронів не залежить від інтенсивності падаючого світла, а визначається тільки його частотою.**
- **Для кожної речовини існує червона межа фотоефекту – мінімальна частота світла при якій, фотоефект ще можливий.**

## Формула Ейнштейна для фотоефекту

Пояснення спостережуваних закономірностей дано Ейнштейном: **Світло не тільки випромінюється (Планк), але й поширюється і поглинається речовиною окремими порціями (квантами), з енергією**

$$E = h\nu$$



Рівняння Ейнштейна для фотоефекту:

$$h\nu = \frac{mV_{\max}^2}{2} + A.$$

$A$  – робота виходу електронів

1. Збільшення інтенсивності світла означає збільшення числа падаючих фотонів, які вибивають з поверхні металу більше електронів. Оскільки енергія всіх фотонів однакова, максимальна кінетична енергія електрона не зміниться (підтвердження I закону фотоефекту).
2. При збільшенні частоти падаючого світла максимальна кінетична енергія електронів зростає лінійно за формулою Ейнштейна (підтвердження II закону фотоефекту).
$$\frac{mV_{\max}^2}{2} = h\nu - A$$
3. Якщо частота  $\nu$  менша частоти  $\nu_0$ , при якій  $h\nu_0 = A$ , то вибивання електронів з поверхні не відбувається. (підтвердження III закону фотоефекту).



## Подвійна природа світла

Основний постулат нової теорії електромагнітного випромінювання:

Електромагнітне випромінювання (світло) - це потік частинок ( фотонів).

Фотони поширюються у вакуумі зі швидкістю  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с.

Маса і енергія спокою фотона дорівнюють нулю.

Енергія фотона  $E$  пов'язана з частотою електромагнітного випромінювання  $\nu$  і довжиною хвилі  $\lambda$  формулою:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

**Світло – одночасно потік частинок (фотонів)  
та електромагнітна хвиля –  
корпускулярно-хвильовий дуалізм властивостей**

формула пов'язує корпускулярну характеристику електромагнітного випромінювання - енергію фотона з хвильовими характеристиками - частотою і довжиною хвилі.

При **зменшенні довжини хвилі** виразніше проявляються **корпускулярні** властивості. Хвильові властивості короткохвильового випромінювання проявляються слабо (рентгенівське випромінювання).

При **збільшенні довжини хвилі** виразніше проявляються **хвильові властивості** (для інфрачервоного випромінювання)



## Атомні спектри випромінювання

### Елементарне джерело випромінювання - атом

Ізольовані атоми у вигляді розрідженого газу або парів металів випромінюють спектр, що складається з окремих ліній (лінійчатий спектр).

Лінії в спектрах розташовані не безладно, а серіями.

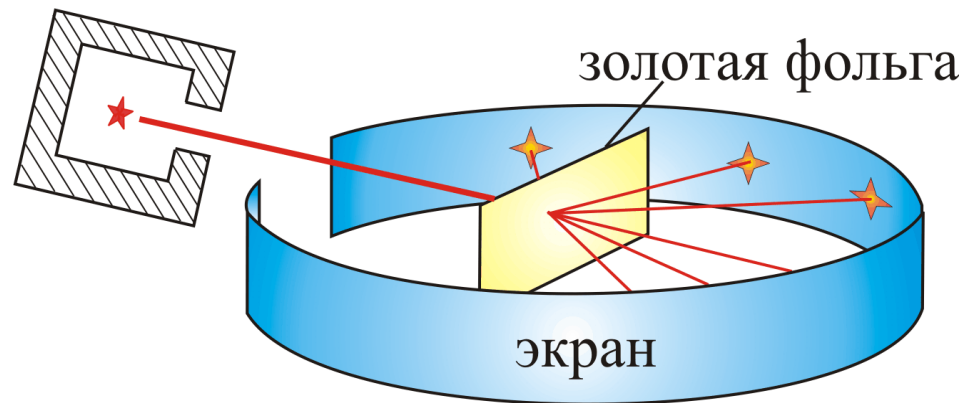
Відстань між лініями в серії зменшується при переході від довгих хвиль до коротких.



H

## Дослід Резерфорда

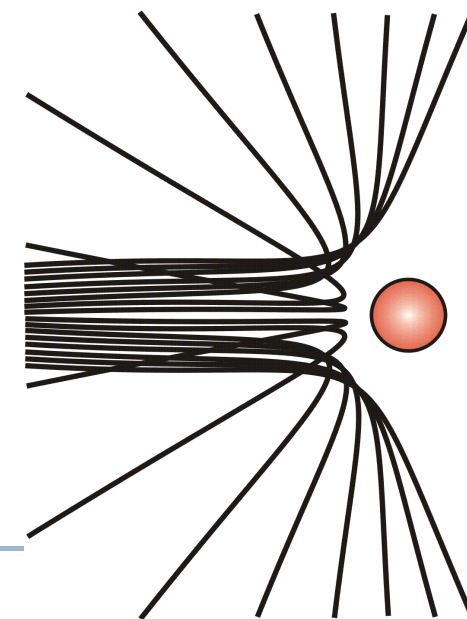
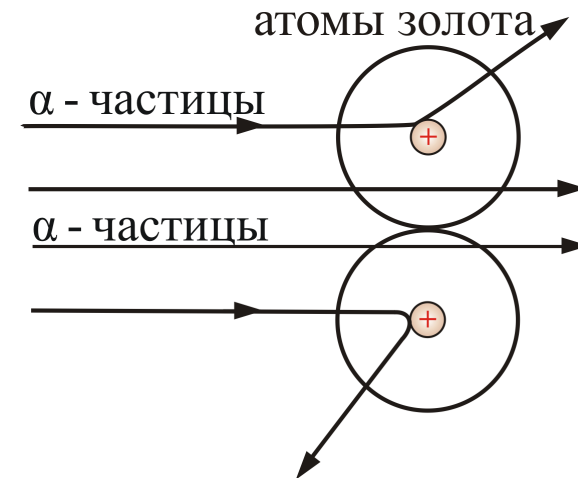
Швидкість  $\alpha$  - частинок  $10^7$  м/с =  $10^4$  км/с, їх заряд  $+2e$



Розсіяні частинки вдарялися об екран із сірчистого цинку, викликаючи сцинтиляції - спалахи світла. Кількість спалахів фіксувалася через мікроскоп

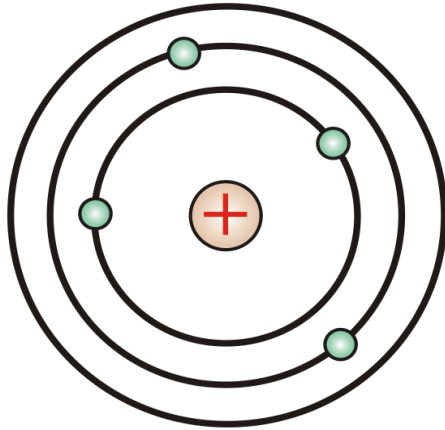
Більшість  $\alpha$ -частинок розсіювалося на кути близько  $3^\circ$   
Одна з декількох тисяч  $\alpha$ -частинок відхилилася на кути до  $150^\circ$

Таке відхилення можливе лише при взаємодії точкового позитивного заряду - ядра атома - з близько пролітаючою  $\alpha$ -частинкою.



## Ядерна модель атома

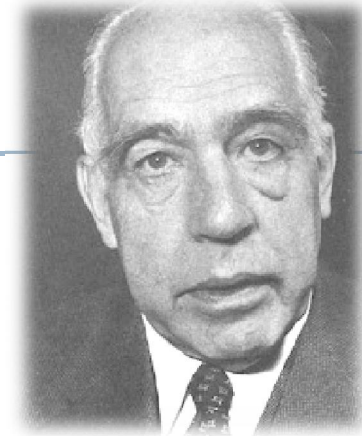
---



Планетарна модель була в протиріччі з класичною електродинамікою: електрон, рухаючись по колу з доцентровим прискоренням, повинен випромінювати енергію, отже, сповільнюватися і впасти на ядро.  
Модель Резерфорда не могла пояснити, чому атом стійкий



## Теорія атома Бора

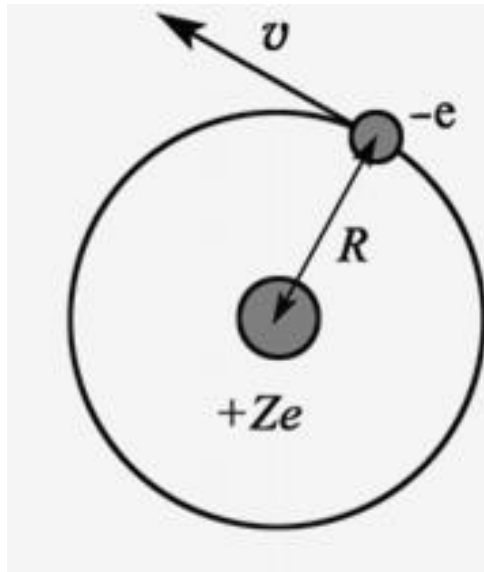


1. Електрони перебувають тільки на певних (стаціонарним) орбітах. При цьому не відбувається випромінювання енергії.

**Умова для стаціонарних орбіт:**

з усіх орбіт електрона можливі тільки ті, для яких момент імпульсу електрона, дорівнює цілому кратному постійної Планка:

$$m_e v r = n \hbar \quad n = 1, 2, 3, \dots \text{ головне квантове число.}$$



2. Випромінювання або поглинання енергії у вигляді кванта енергії  $h\nu$  відбувається лише при переході електрона з одного стаціонарного стану в інший.

**Енергія кванта світла дорівнює різниці енергій тих стаціонарних станів, між якими відбувається квантовий стрибок електрона:**

$$h\nu = E_m - E_n \quad \text{Правило частот Бора}$$

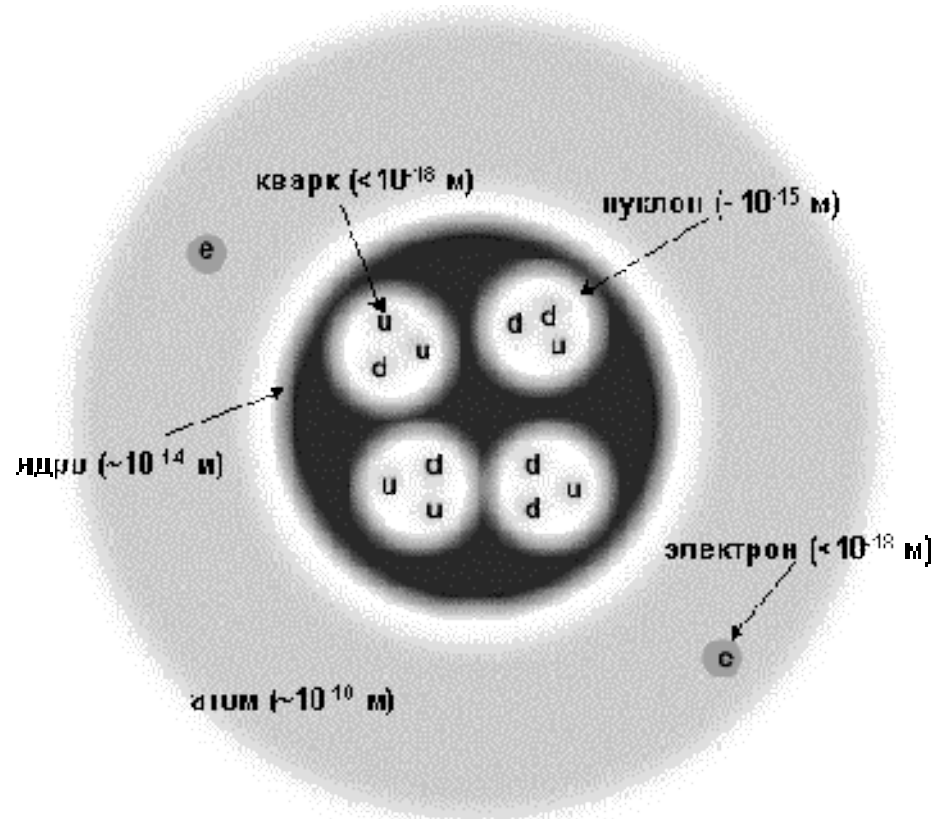
$m, n$  – номери станів

$$r_n = \frac{h^2 n^2 4\pi\epsilon_0}{m_e Z e^2} \quad \text{радіус стаціонарних орбіт}$$



До складу атомного ядра входять елементарні частинки: протони і нейтрони (нуклони)

Протон має додатній заряд  $e^+ = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл і масу спокою  $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$  кг =  $1836m_e$



Заряд ядра дорівнює  $Ze$ , де  $e$  - заряд протона,  $Z$  - зарядове число, рівне порядковому номеру хімічного елемента в періодичній системі елементів Менделєєва, тобто числу протонів в ядрі. В даний час відомі ядра з  $Z = 1$  до  $Z = 107 - 118$ .  $A = Z + N$  називається масовим числом.

Ядра з однаковим  $Z$ , але різними  $A$  називаються **ізотопами**.

Ядра, які при однаковому  $A$  мають різні  $Z$  називаються **ізобарами**.