

Лекція №8

Магнітне поле у вакуумі та речовині

Викл Коваль В.В.

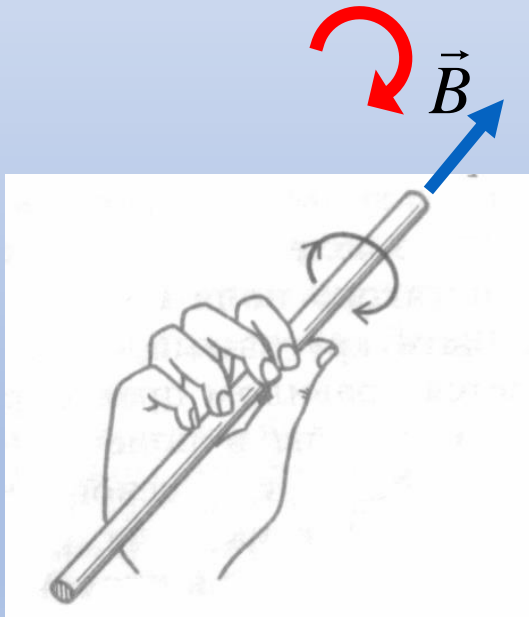
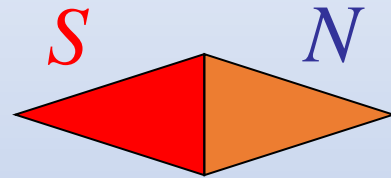
ФОК

2021р.

Питання

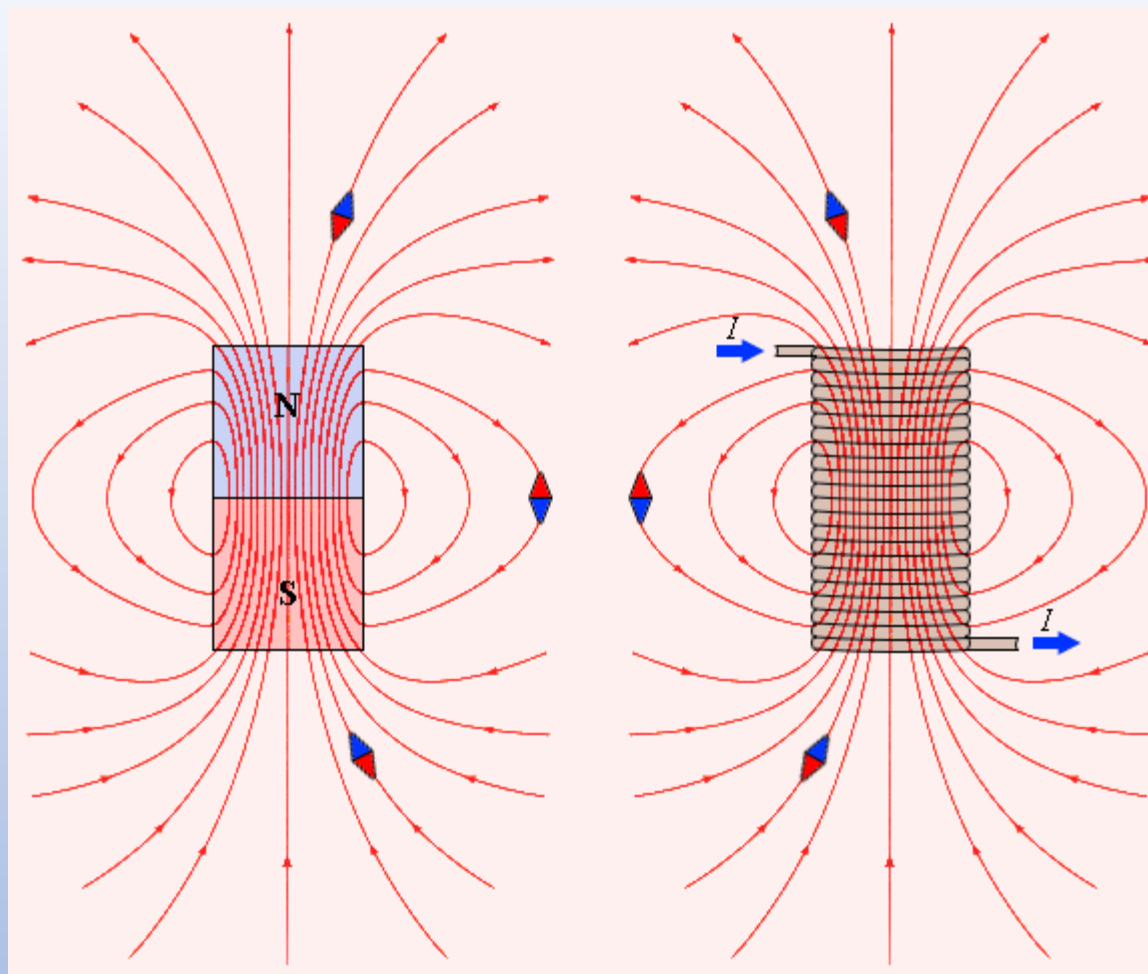
Магнітне поле. Дослід Ерстеда. Закон Ампера. Напрямок і модуль вектора індукції магнітного поля. Принцип суперпозиції. Сила Лоренца. Рух зарядженої частинки в однорідному магнітному полі. Закон Біо-Савара-Лапласа. Індукція магнітного поля. Взаємодія двох нескінченно довгих паралельних провідників. Вимірювання індукції магнітного поля за допомогою контуру зі струмом. Робота при переміщенні контуру зі струмом у магнітному полі. Теорема Гаусса для магнітного поля у вакуумі. Теорема про циркуляцію вектора магнітної індукції. Магнітне поле тороїда. Намагніченість. Теорема Гаусса для індукції магнітного поля в речовині. Напруженість магнітного поля. Теорема про циркуляцію напруженості магнітного поля. Магнітна проникність, магнітна сприйнятливість. Умови для векторів індукції та напруженості магнітного поля на межі двох магнетиків. Типи магнетиків. Закон Фарадея. Правило Ленца. Електрорушійна сила індукції (механізм виникнення) у рухомих і нерухомих контурах. Явище самоіндукції. Індуктивність. ЕРС самоіндукції. Явище взаємної індукції. Взаємна індуктивність. ЕРС взаємної індукції. Енергія магнітного поля. Енергія соленоїда. Струм після замикання та розмикання електричного кола.

Магнітне поле у вакуумі та речовині

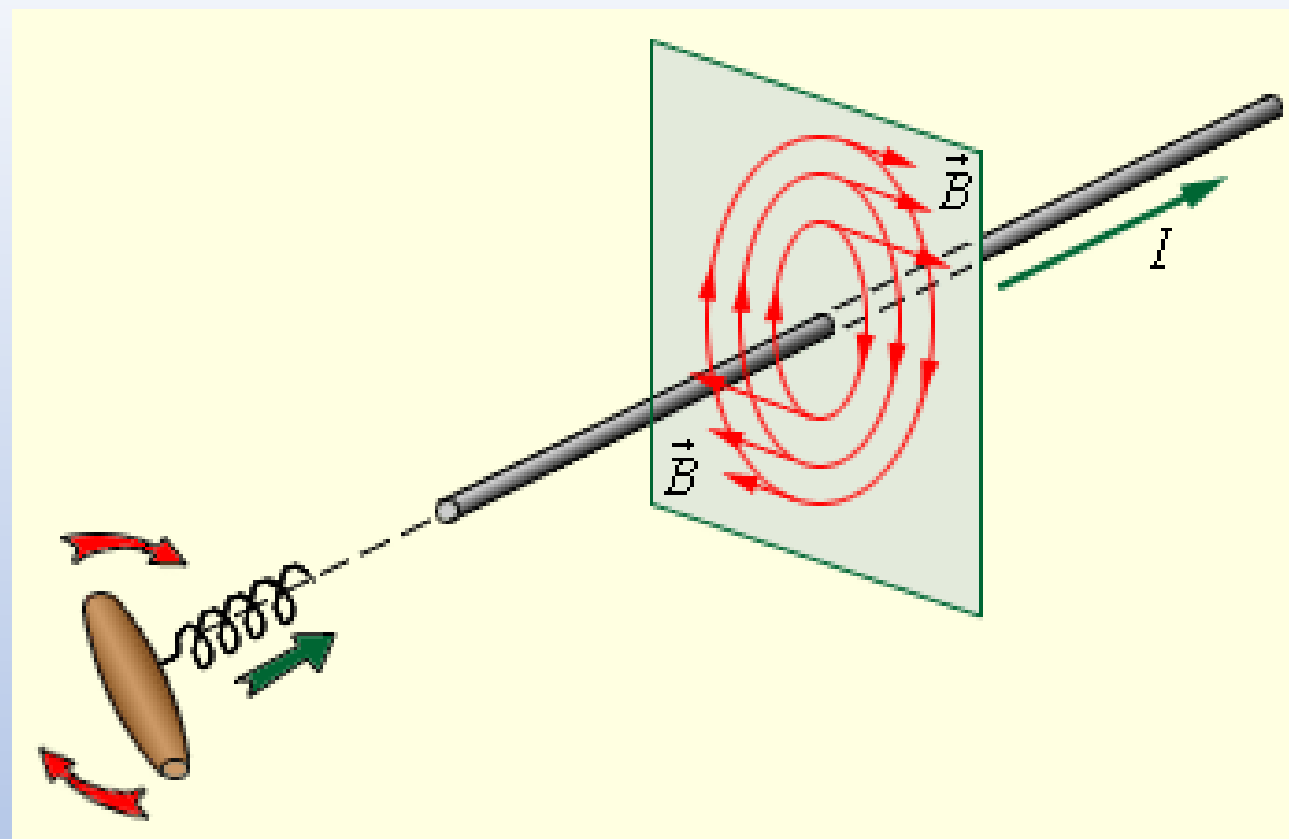


$$B = \frac{F_{\max}}{I \Delta l}$$

$$[B] = \frac{1H}{1A \cdot 1m} = 1T_{\text{л}}$$



Лінії магнітної індукції полів постійного магніта та котушки зі струмом. Індикаторні магнітні стрілки орієнтуються за напрямком дотичних до ліній індукції



**Магнітне поле прямолінійного провідника із
струмом**



$$\vec{B} = const$$

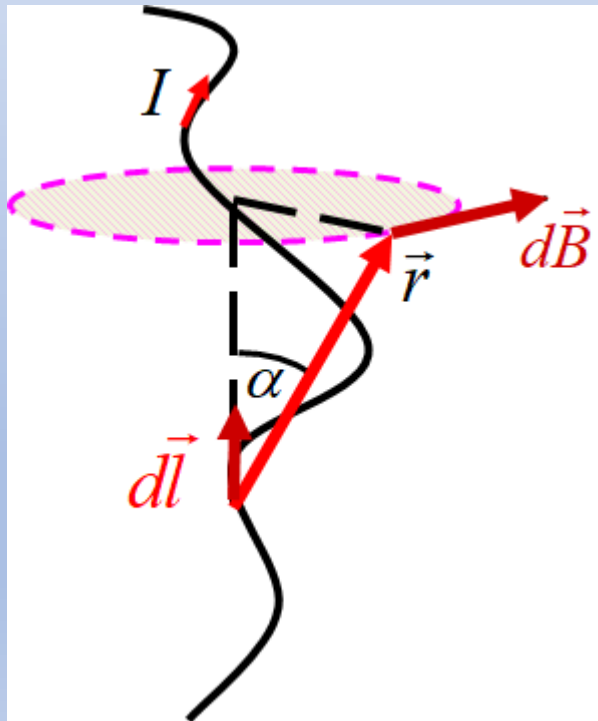
$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\Gamma_H}{\mathcal{M}}$$

$$[H] = \frac{A}{\mathcal{M}} = \text{Ersted}$$

$$\vec{B} = \sum \vec{B}$$

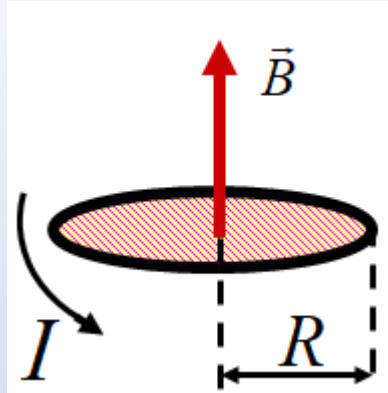
ЗАКОН БИО – САВАРА – ЛАПЛАСА



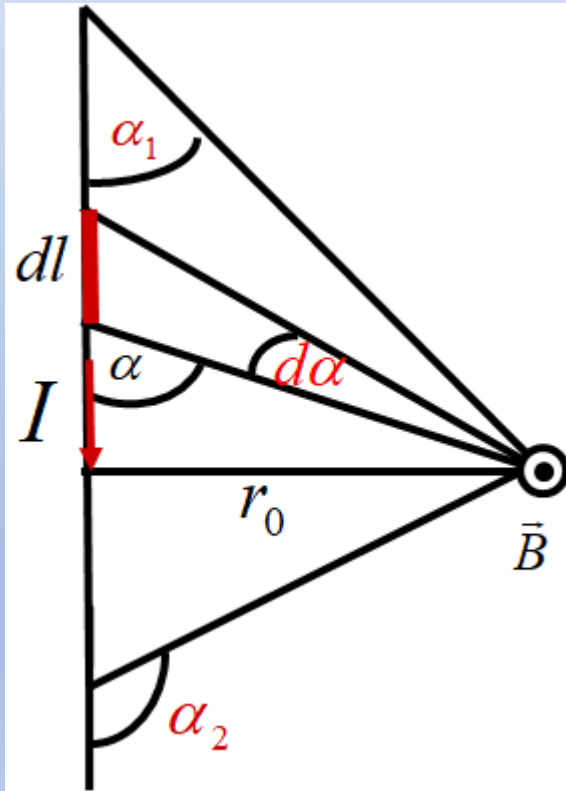
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin \alpha}{r^2}$$



$$B = \frac{\mu_0}{2} \frac{I}{R}$$



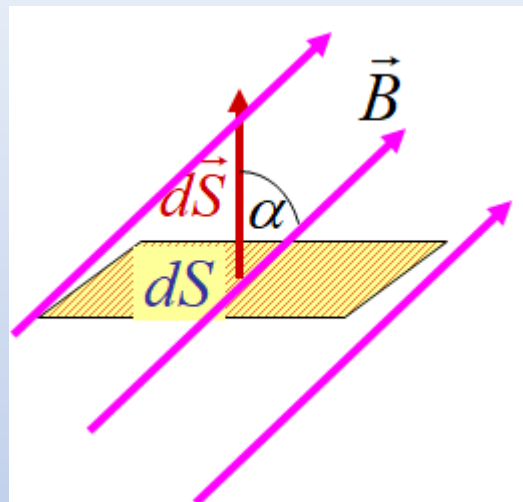
$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r_0} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

$$\alpha_1 = 0, \alpha_2 = \pi$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{r_0} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r_0}$$



ТЕОРЕМА ГАУСА ДЛЯ ПОТОКУ ВЕКТОРА ИНДУКЦІЇ МАГНІТНОГО ПОЛЯ У ВАКУУМІ



$$\Phi_B = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B dS \cos \alpha$$

$$\alpha \quad \vec{B} \quad d\vec{S}$$

$$[\Phi_B] = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2 = 1 \text{ Вб}$$



Теорема Гауса для потоку вектора магнітної індукції у вакуумі в інтегральній формі

$$\Phi_B = \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

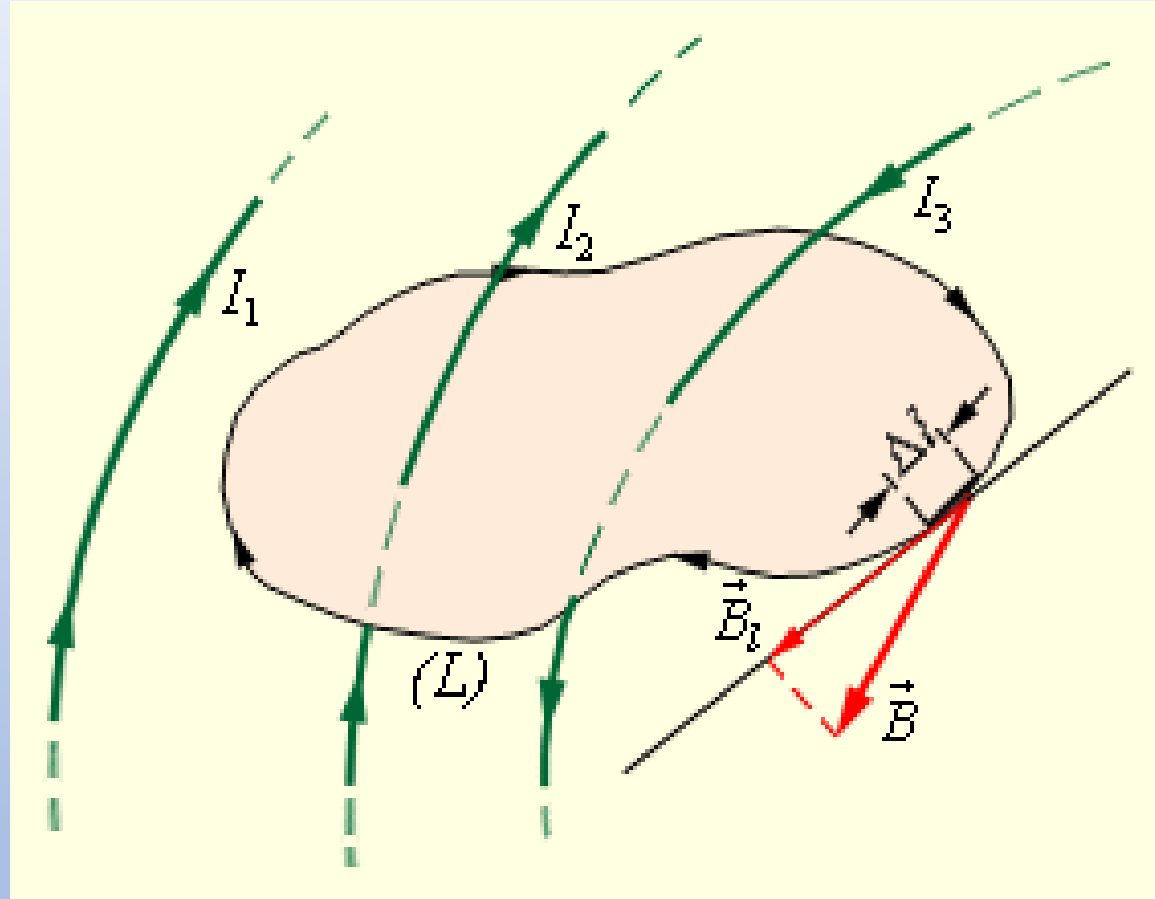
$$\Phi_B = \oint_S \vec{B} d\vec{S} = \int_V \operatorname{div} \vec{B} dV = 0$$

Теорема Гауса в диференціальній формі

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$



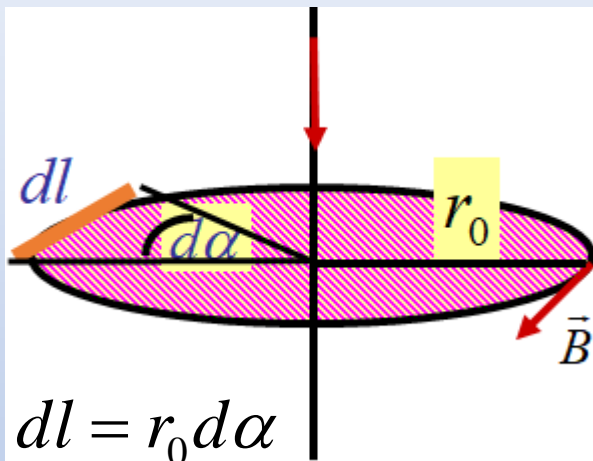
Циркуляція магнітного поля. Закон повного струму



Замкнутий контур (L) із заданим напрямком обходу.
Вказані струми I_1 , I_2 и I_3 , що створюють магнітне поле



Теорема про циркуляцію (закон повного струму) в інтегральній формі



$$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I$$

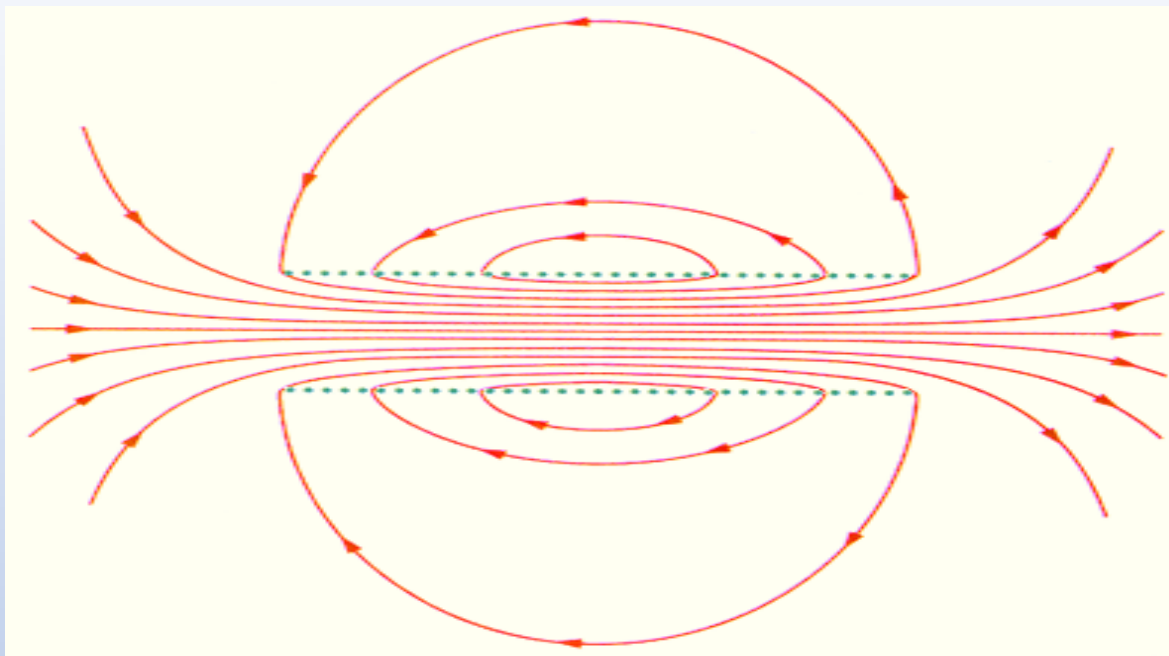
$$\oint \vec{B} d\vec{l}$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{r_0} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I}{r_0}$$

$$B dl = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I}{r_0} r_0 d\alpha = \frac{\mu_0 I}{2\pi} d\alpha$$

$$\oint d\alpha = 2\pi$$

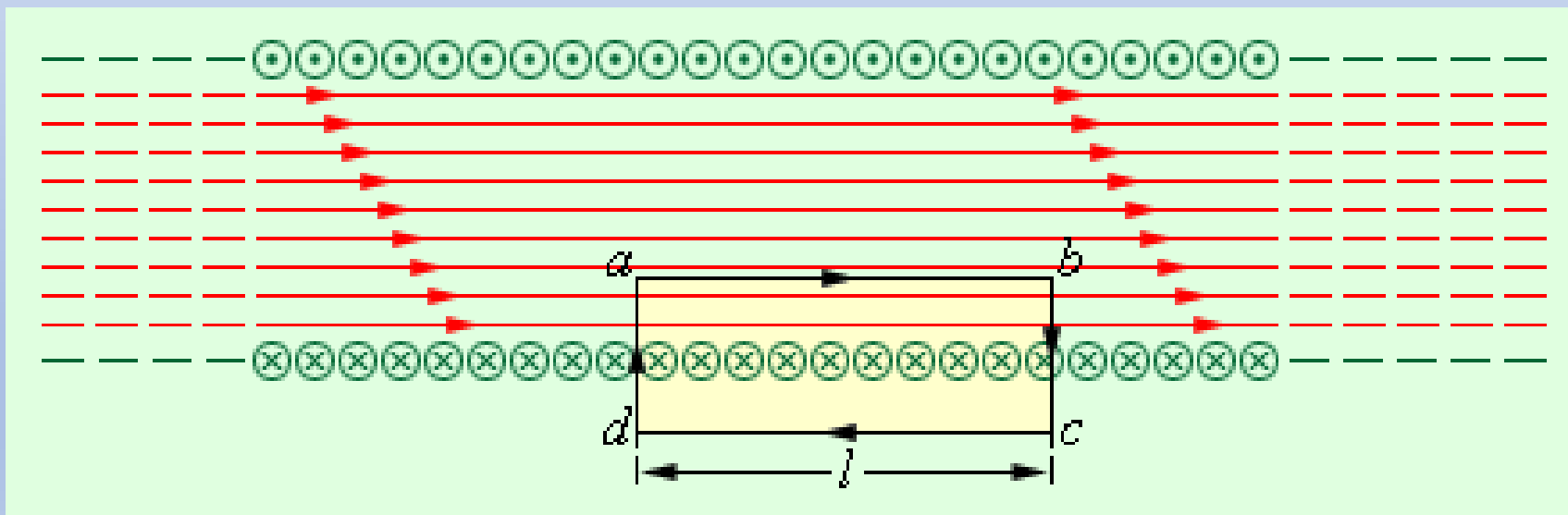
$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \oint d\alpha = \mu_0 I$$



Магнітне поле соленоїда

$$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 I$$

$$Bl = \mu_0 Inl$$



$$B = \mu_0 In$$



Ротор магнітного поля

$$\oint_{\Gamma} \vec{B} d\vec{l} = \int_S \text{rot} \vec{B} d\vec{S}$$

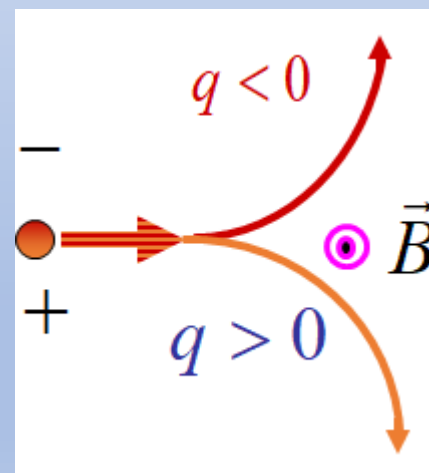
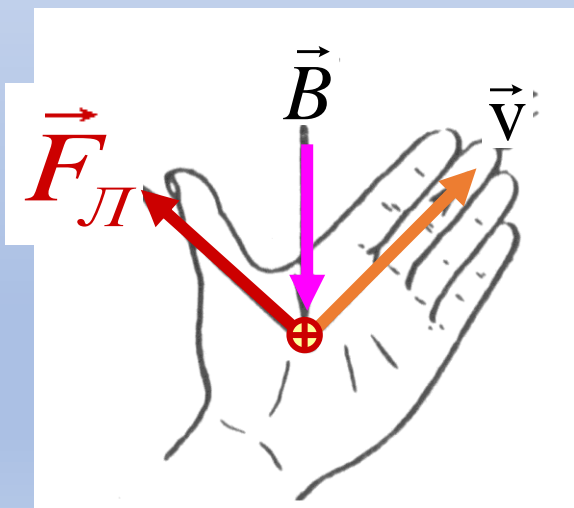
$$\text{rot} \vec{B} = \mu_0 \vec{J}$$

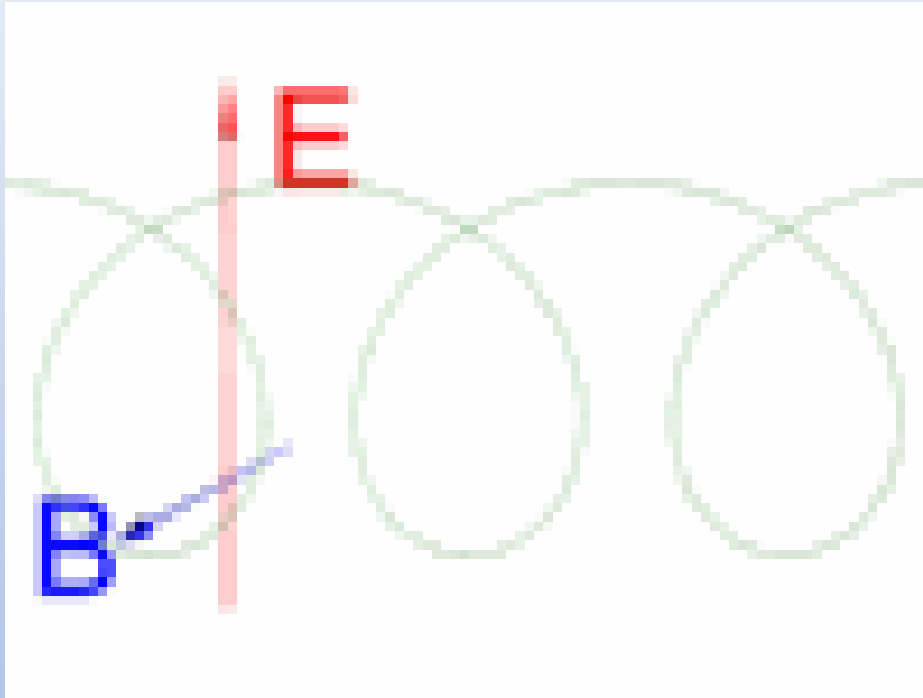


СИЛА ЛОРЕНЦА

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}\vec{B}]$$

$$F_L = qvB \sin \alpha$$

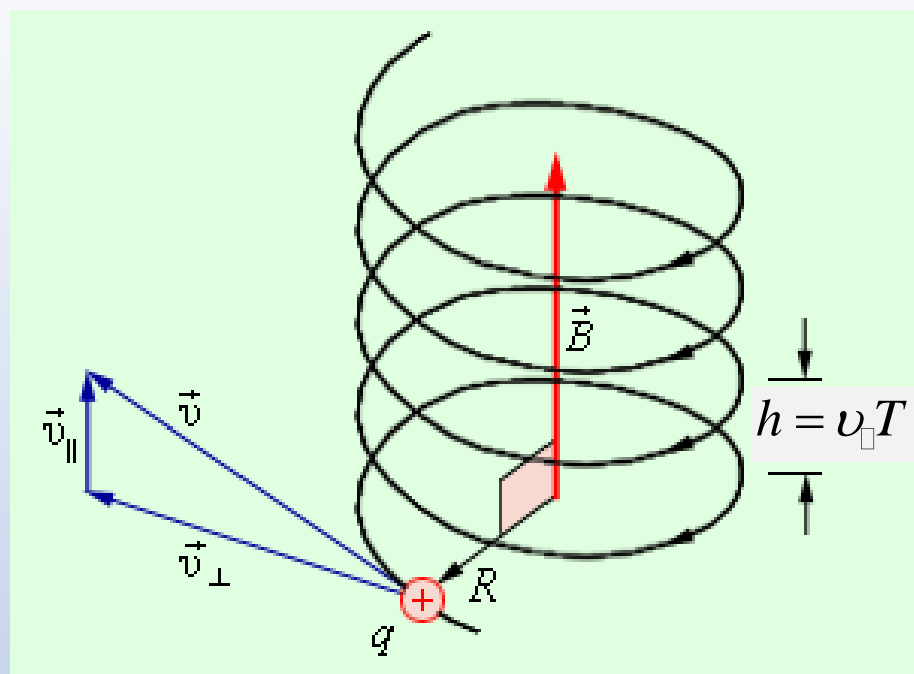




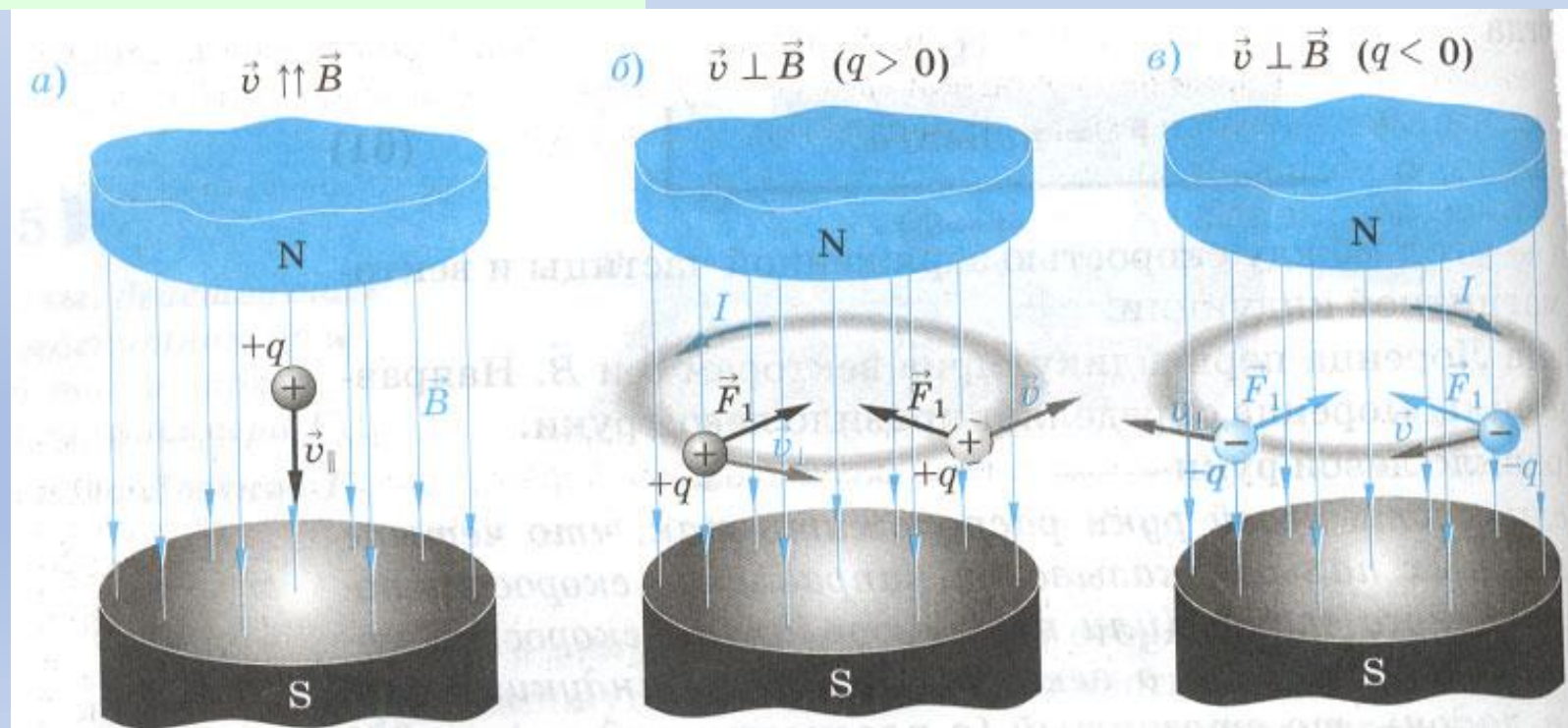
$$\frac{mv^2}{R} = |q|vB$$

$$R = \frac{mv}{|q|B}$$

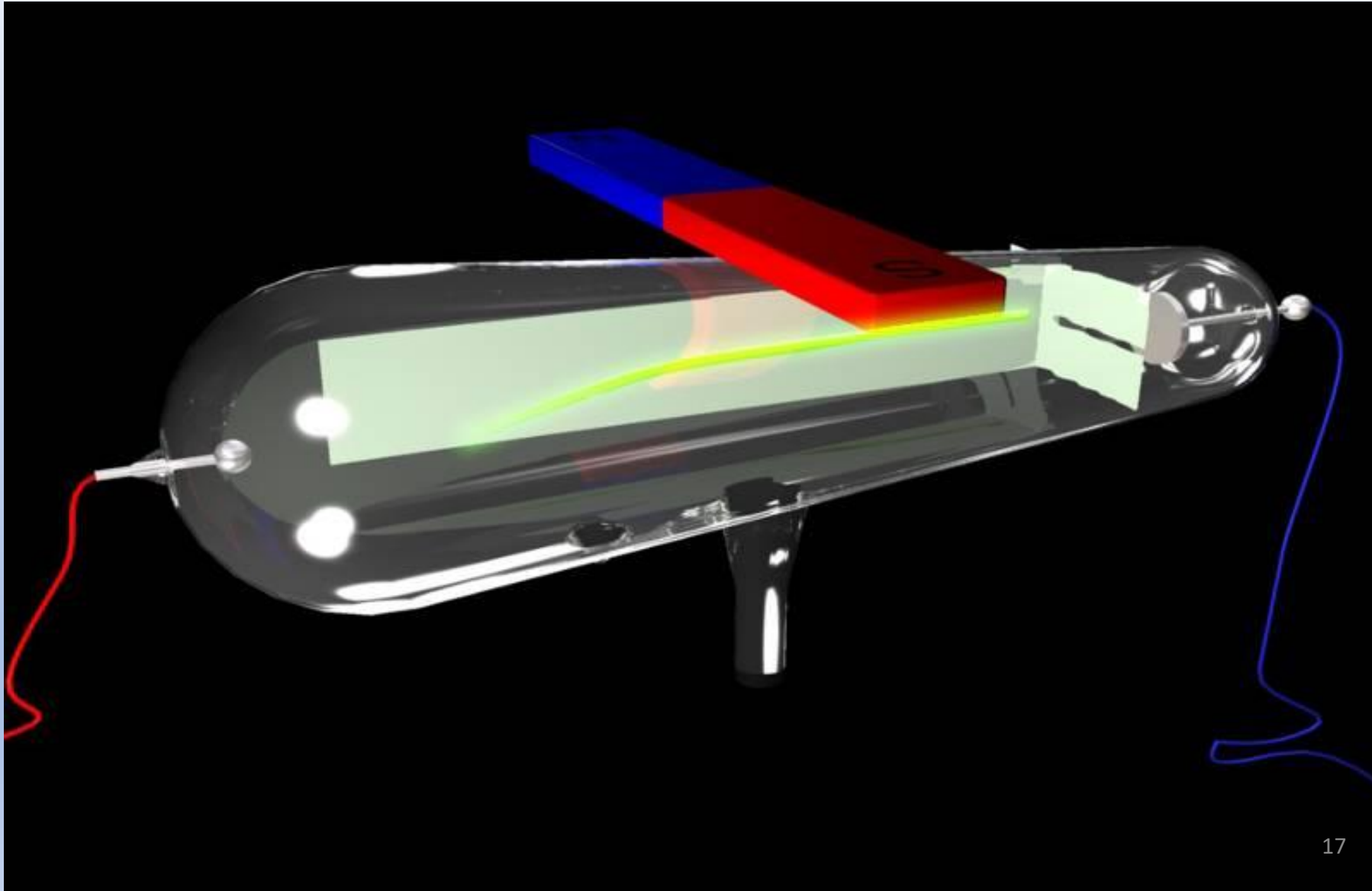
$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$$



$$R = \frac{mv_{\perp}}{|q|B}$$

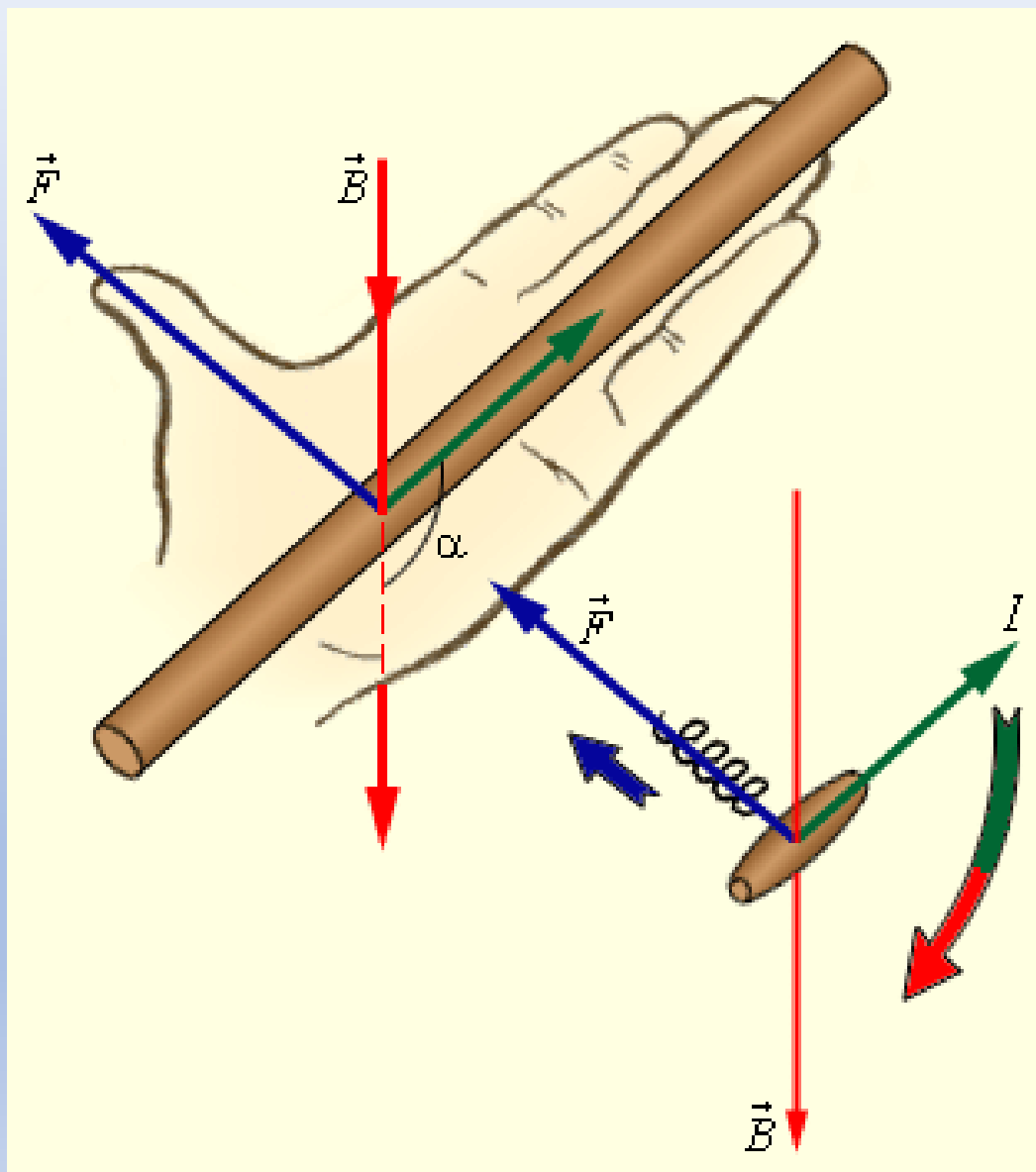


Відхилення катодних променів у магнітному полі



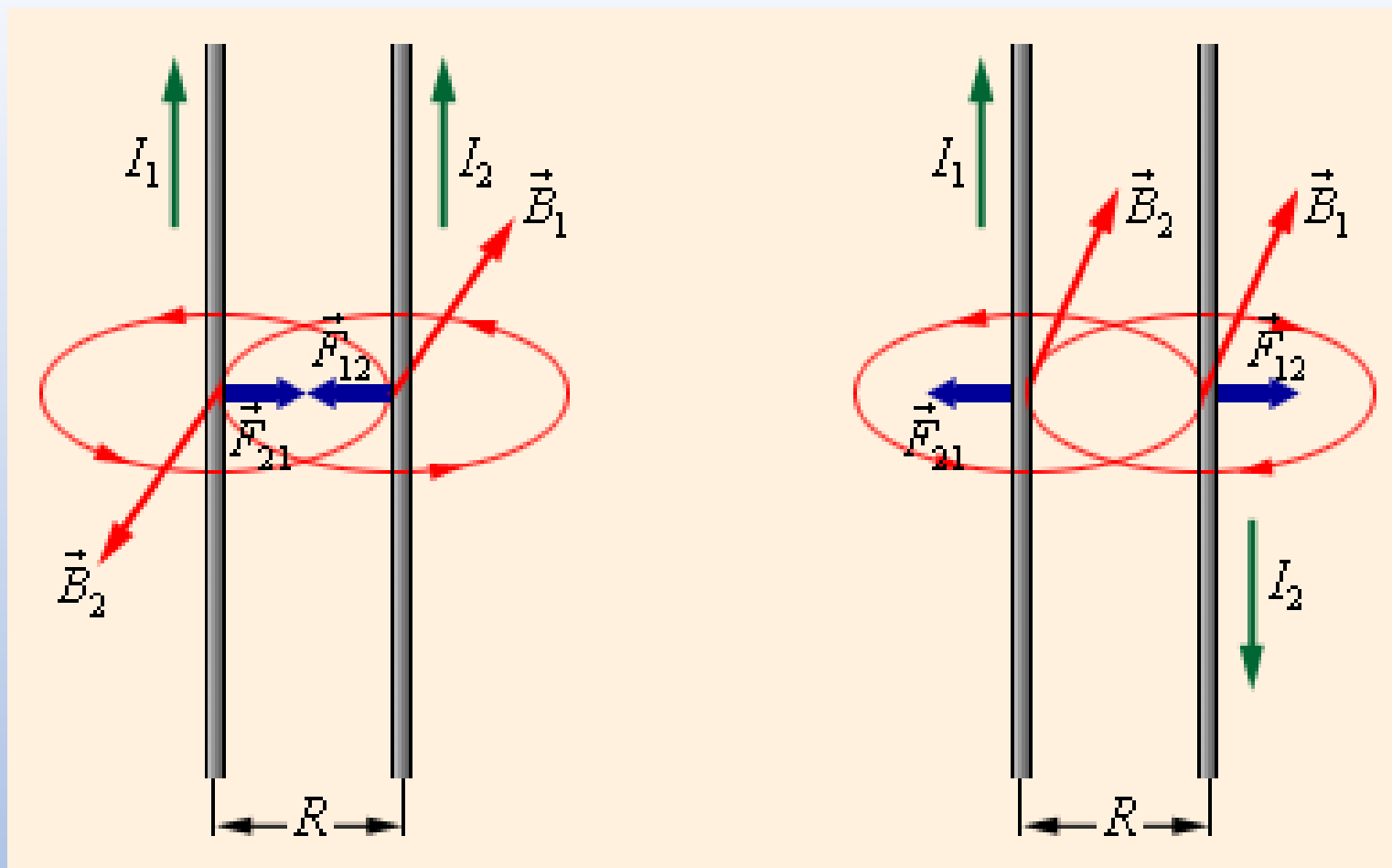


СИЛА АМПЕРА

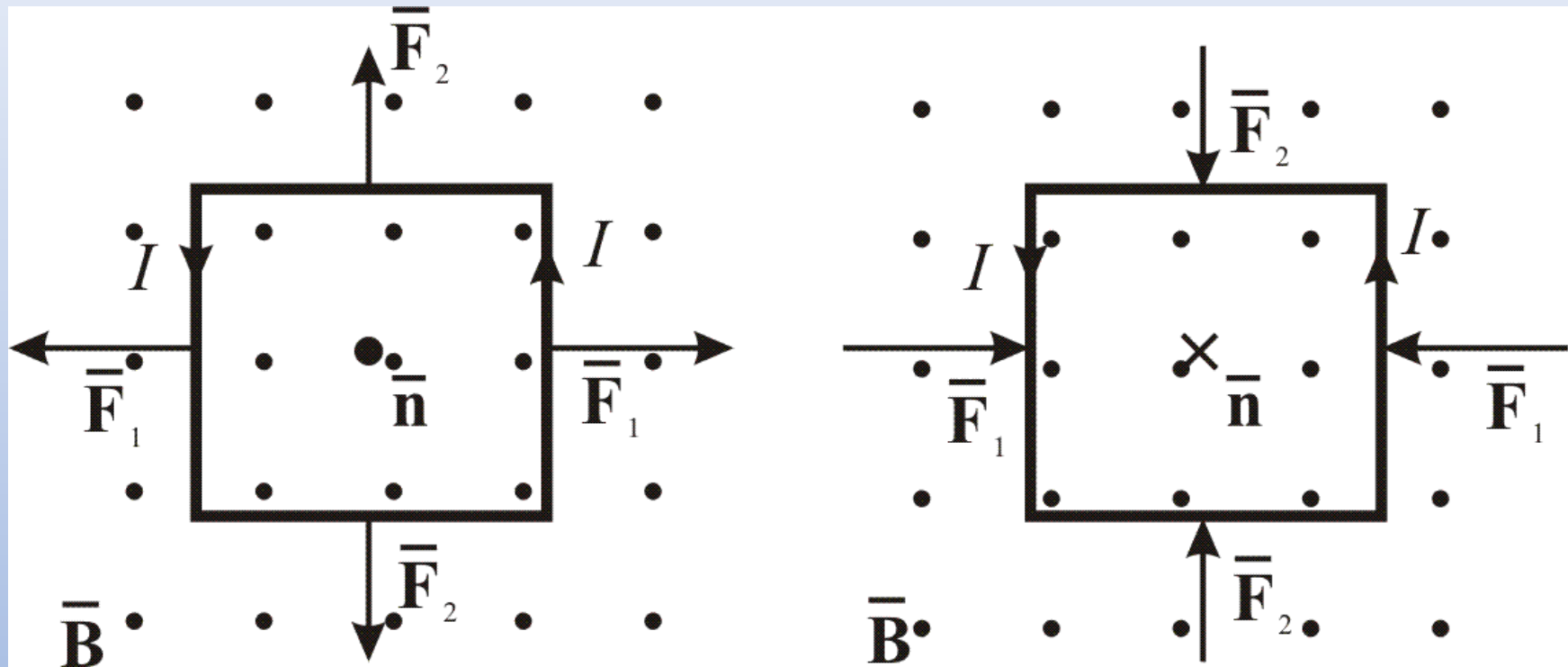


$$d\vec{F}_A = I [d\vec{\ell} \vec{B}]$$

$$dF_A = IBd\ell \sin \alpha$$



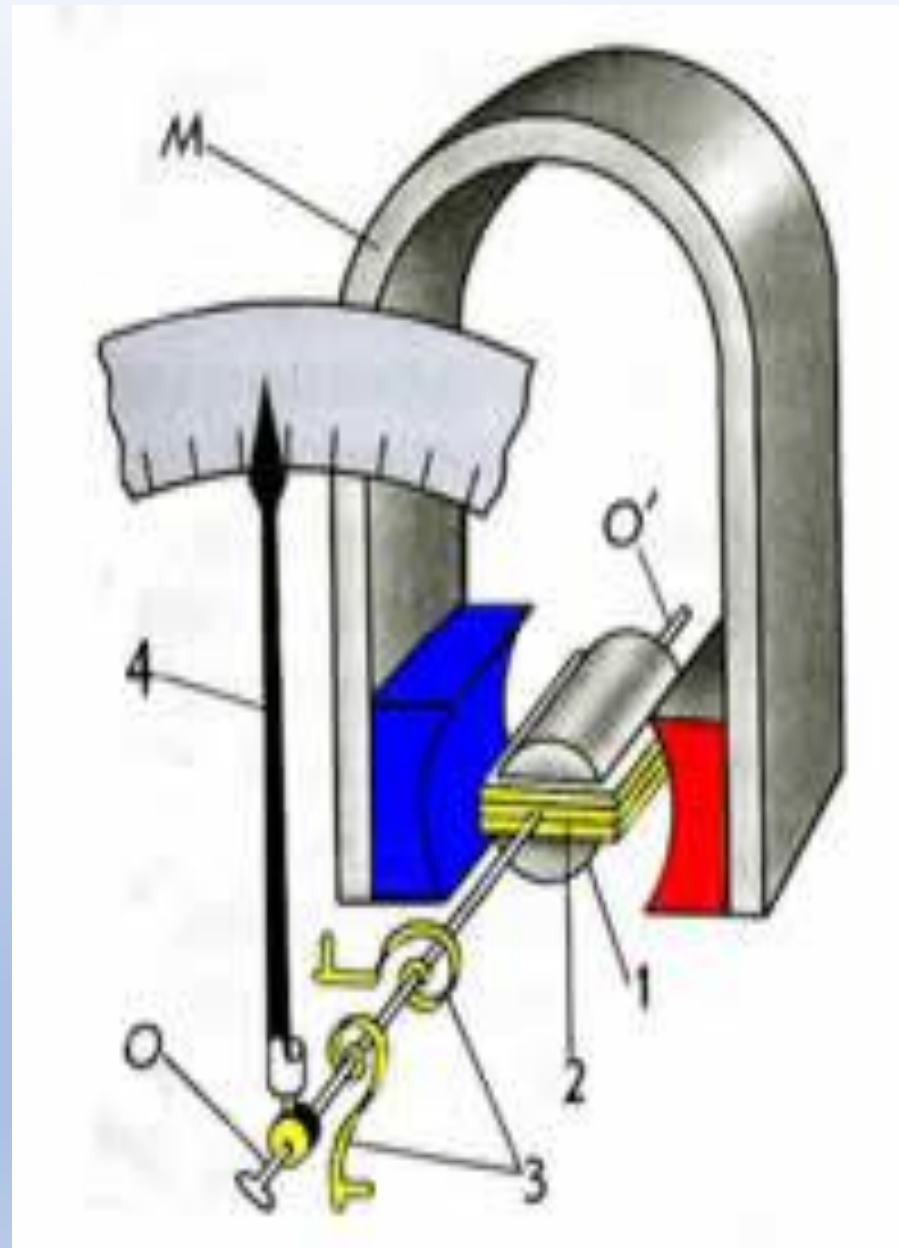
**Магнітна взаємодія паралельних та
антипаралельних струмів**





Електровимірювальні прилади
магнітно-електричної системи
(амперметри та вольтметри)

$$M = IBS \sin \alpha$$





МАГНІТНА ПРОНИКНІСТЬ РЕЧОВИНИ. ДІА-, ПАРА- ТА ФЕРОМАГНЕТИКИ

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}'$$

$$\vec{J} = \frac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V}$$

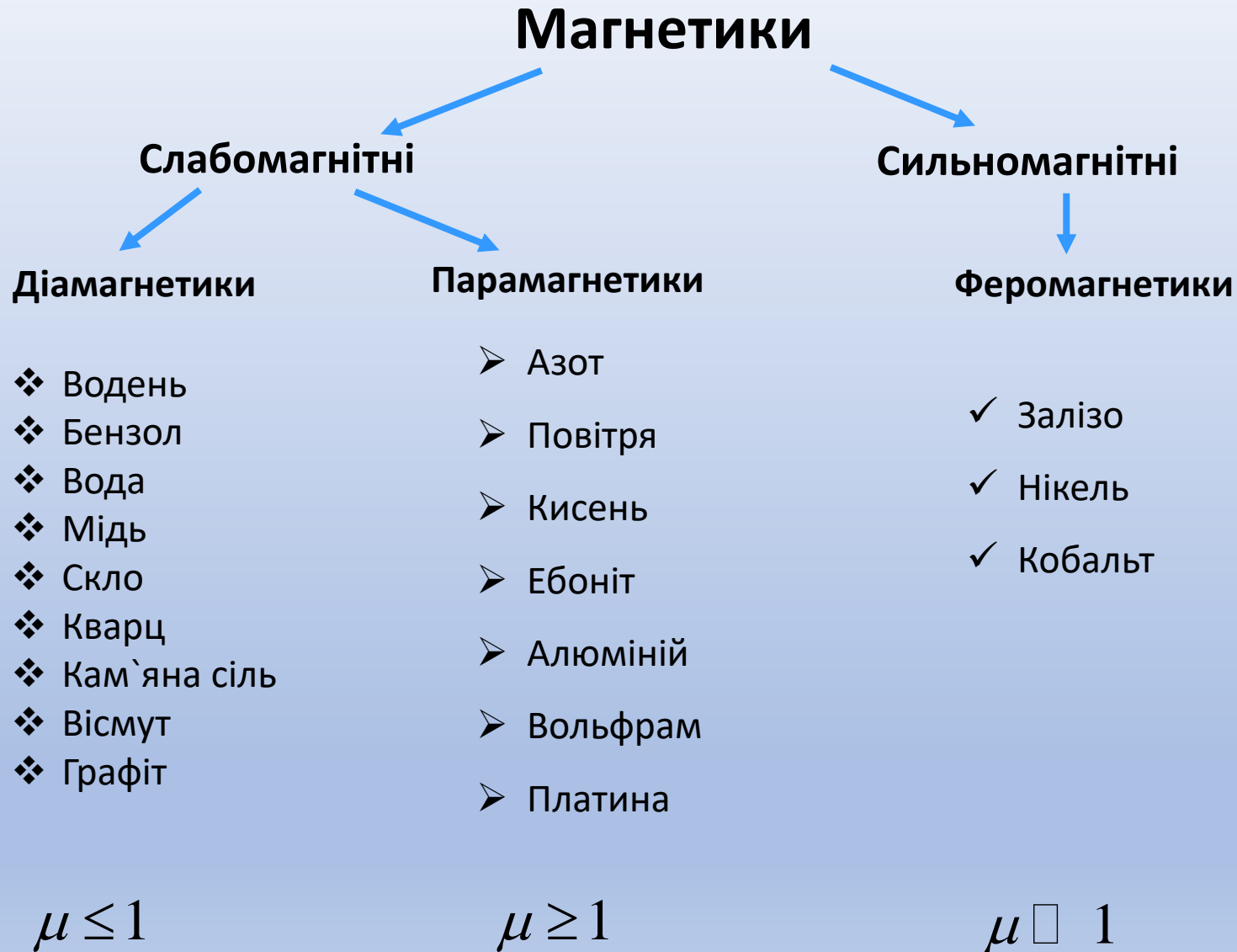
$$[J] = \frac{A}{m}$$

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}$$

$$\mu$$

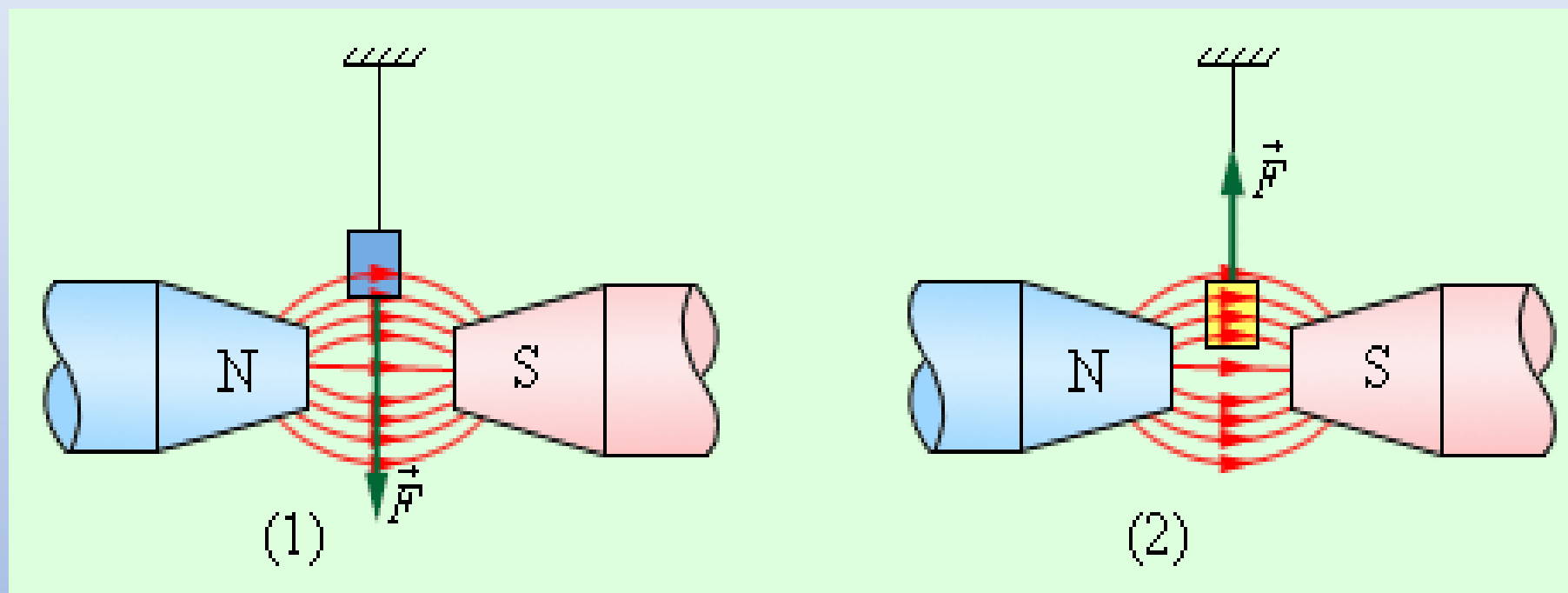
$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

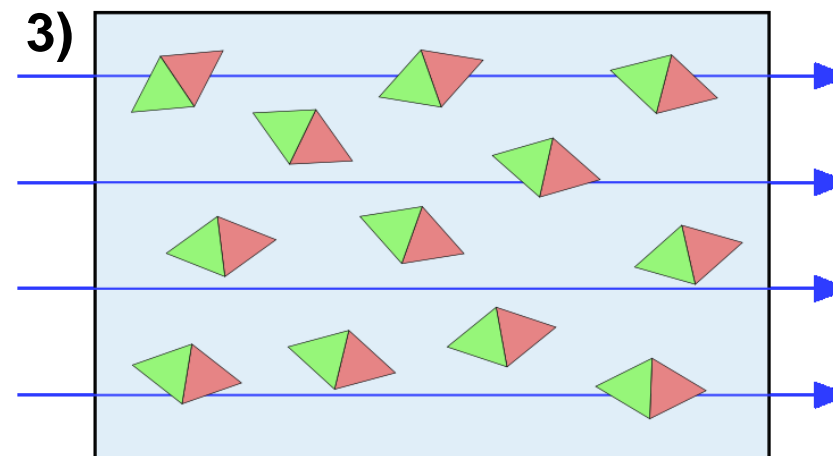
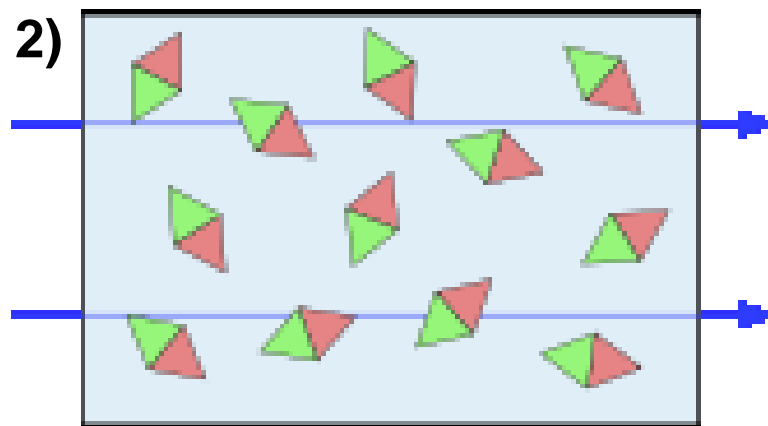
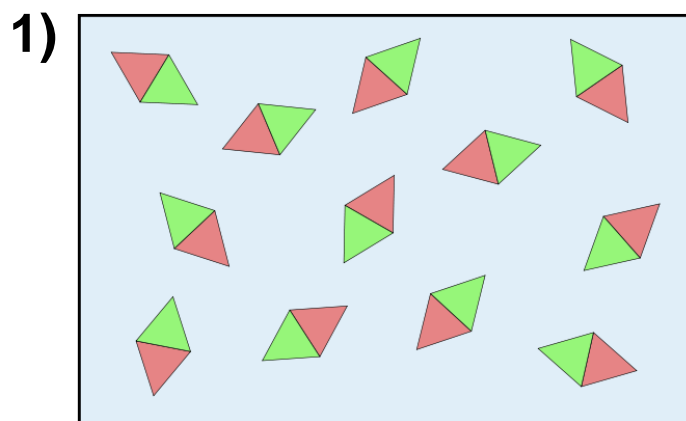
Три класи магнітних речовин





Парамагнетик (1) та діамагнетик (2) у неоднорідному магнітному полі.



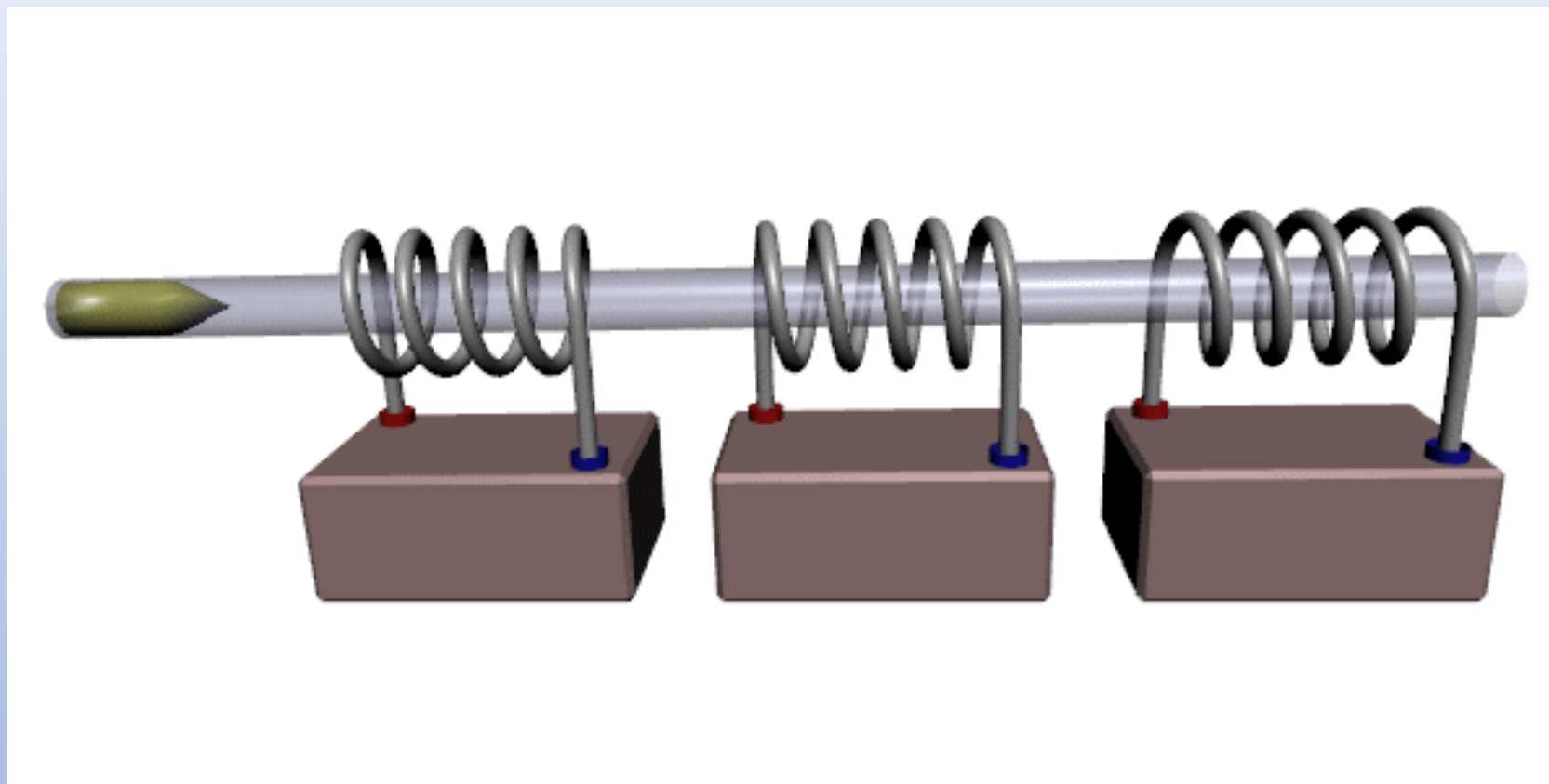


Атоми парамагнетика

- 1) у відсутності магнітного поля;***
- 2) у слабкому магнітному полі;***
- 3) у потужному магнітному полі.***

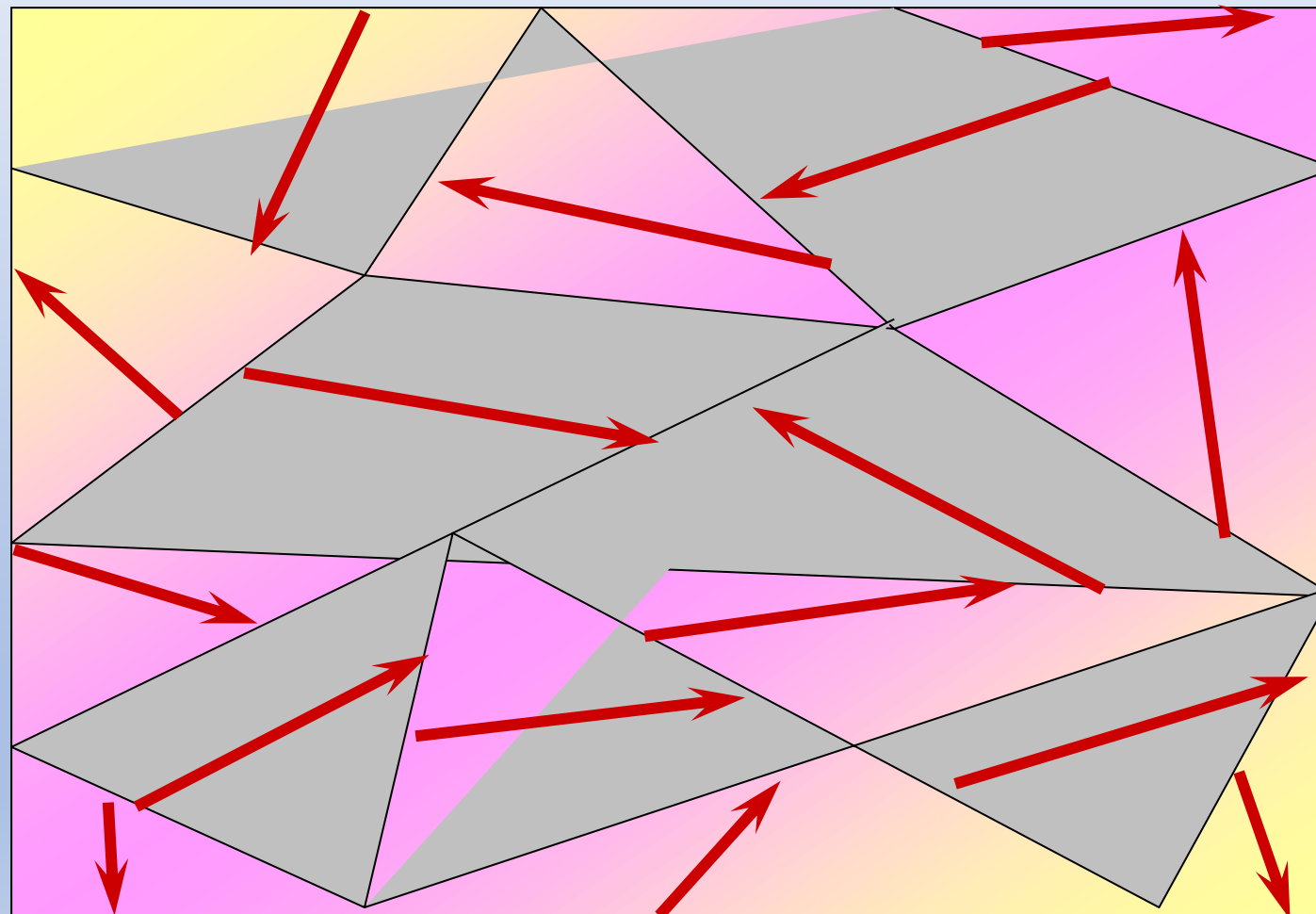


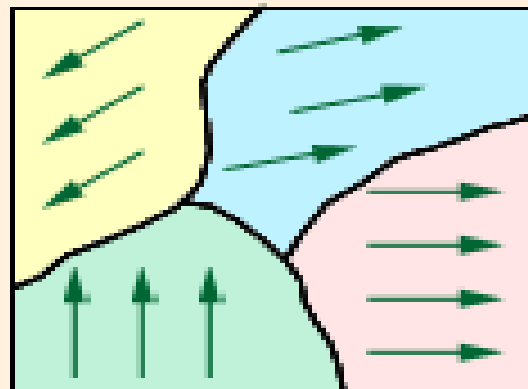
Пушка Гауса





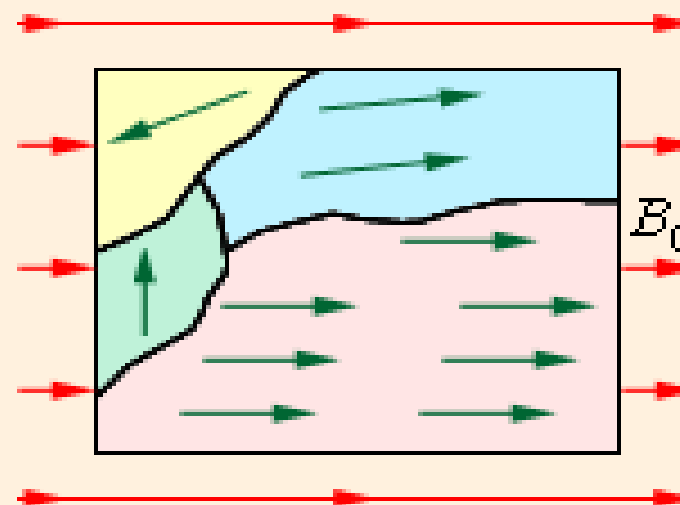
Домени в ферромагнетиках





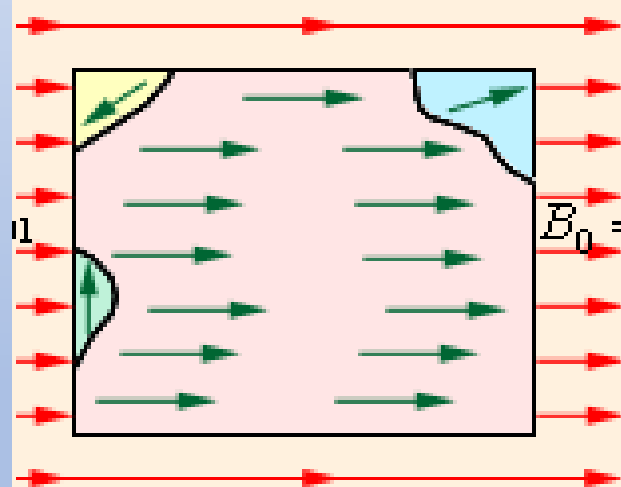
$$B_0 = 0$$

(1)



$$B_0 = B_{01}$$

(2)



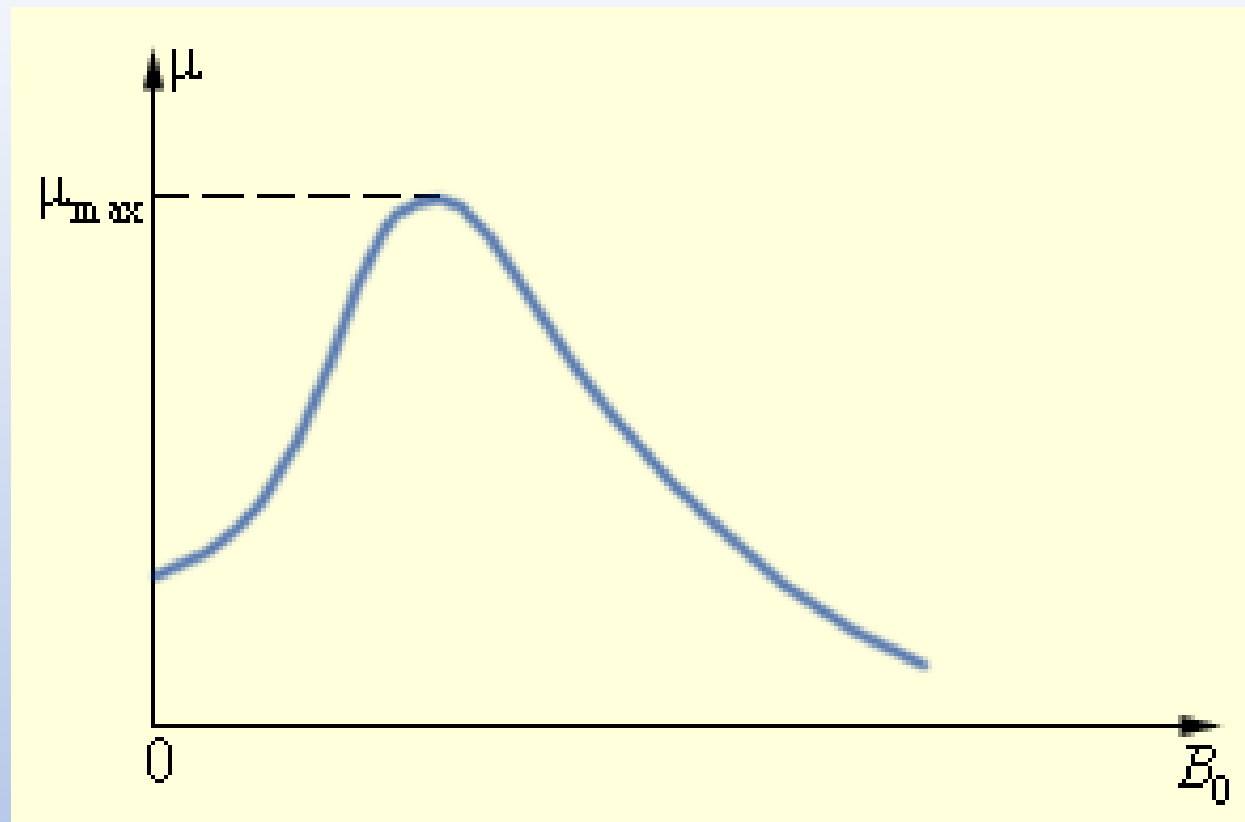
$$B_0 = B_{02} > B_{01}$$

(3)

Намагнічування феромагнітного зразка

(1) $B_0 = 0$; (2) $B_0 = B_{01}$;

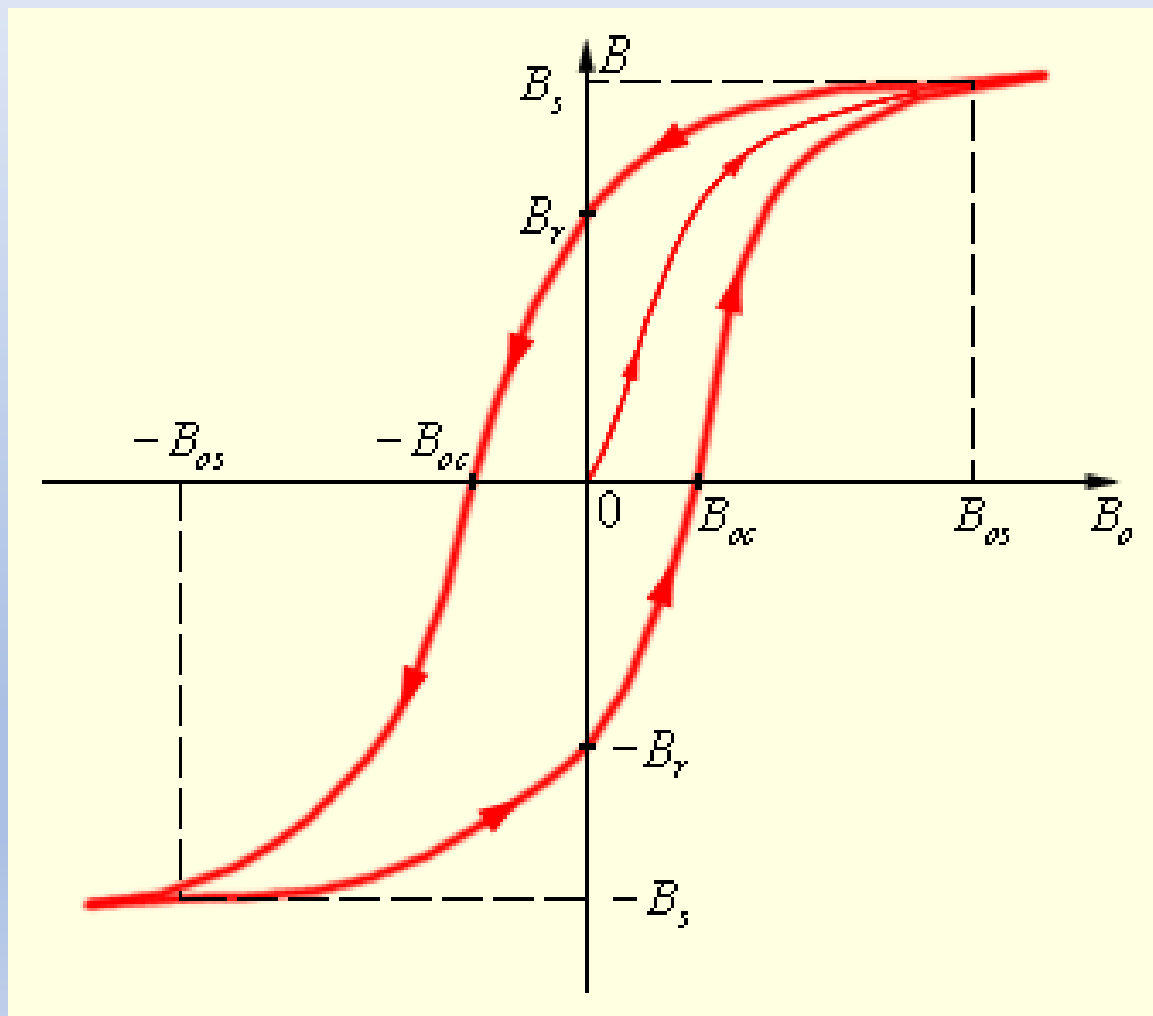
(3) $B_0 = B_{02} > B_{01}$.



**Типова залежність $\mu (B_0)$ магнітної проникності
ферромагнетика від індукції зовнішнього
магнітного поля**

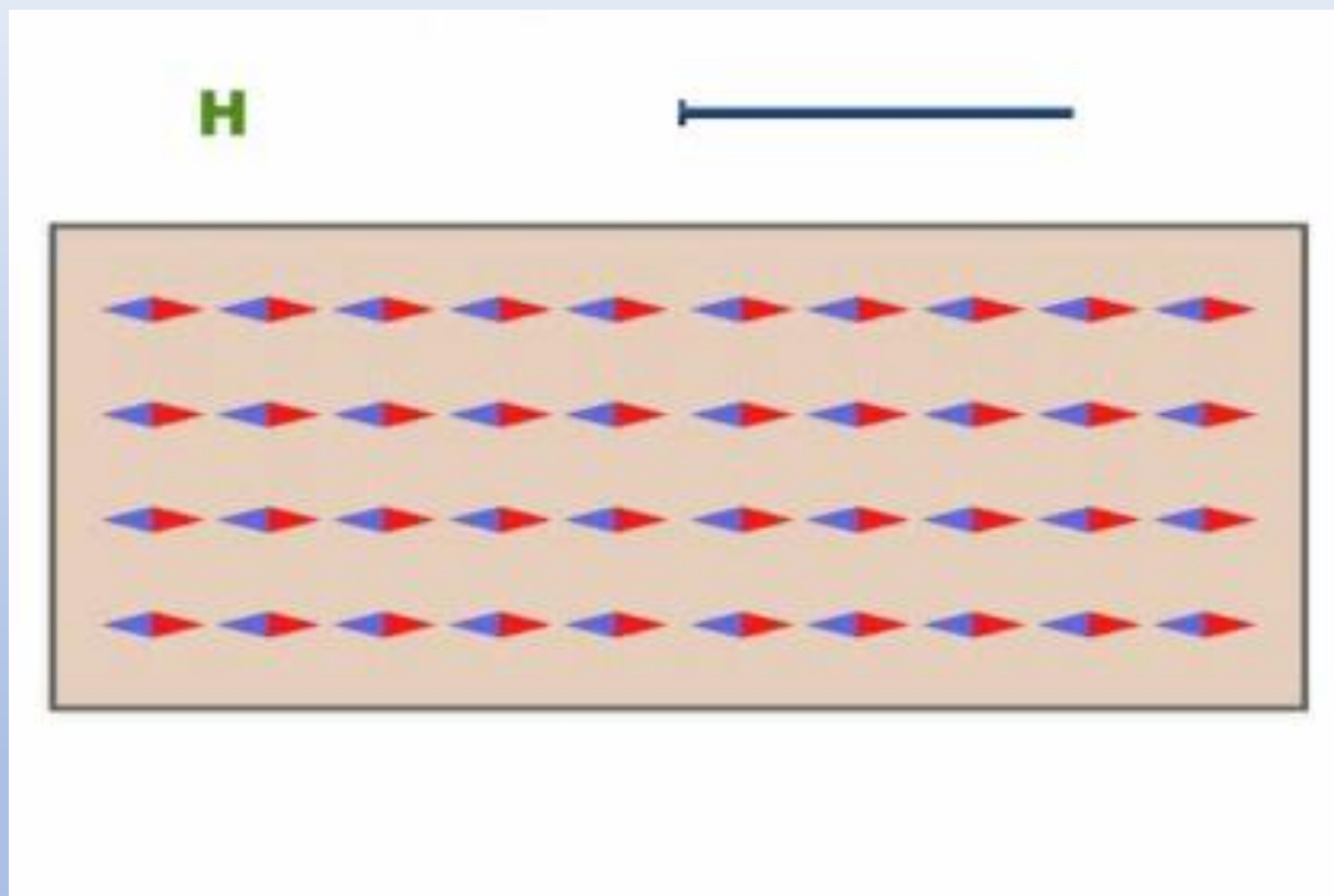


Характерною рисою процесу намагнічування феромагнетиків є **гістерезис** - залежність намагнічування від передісторії зразка. Крива намагнічування $B(B_0)$ феромагнітного зразка являє собою петлю складної форми, яка називається **петлею гістерезису**

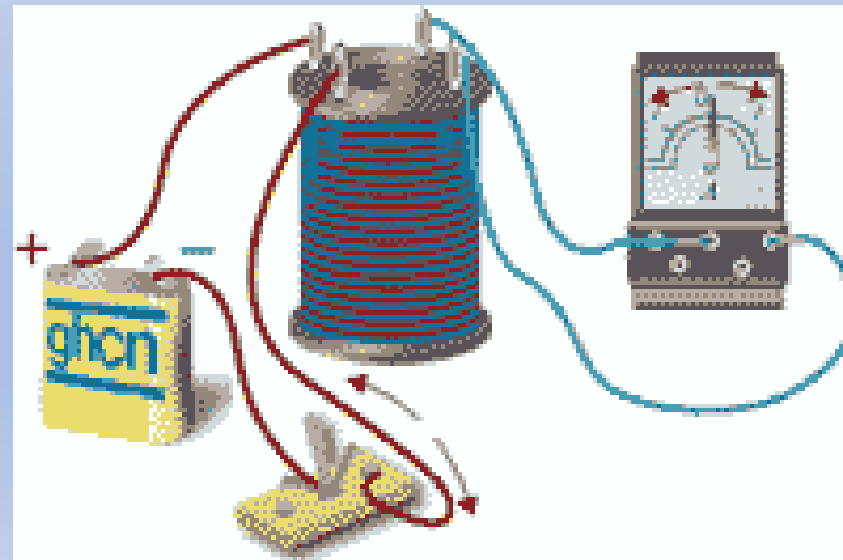
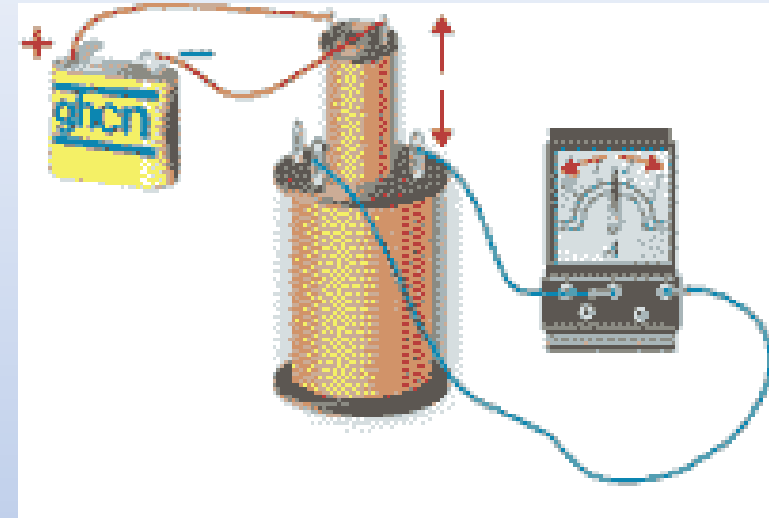




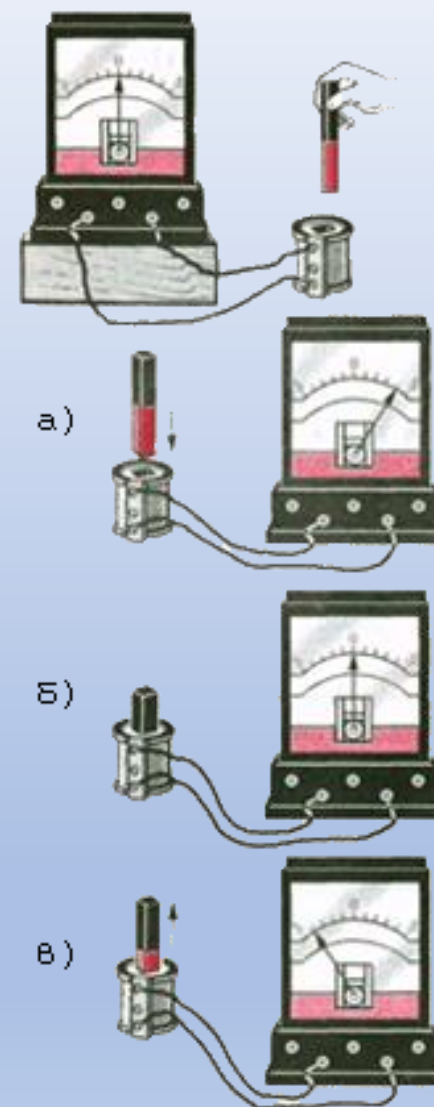
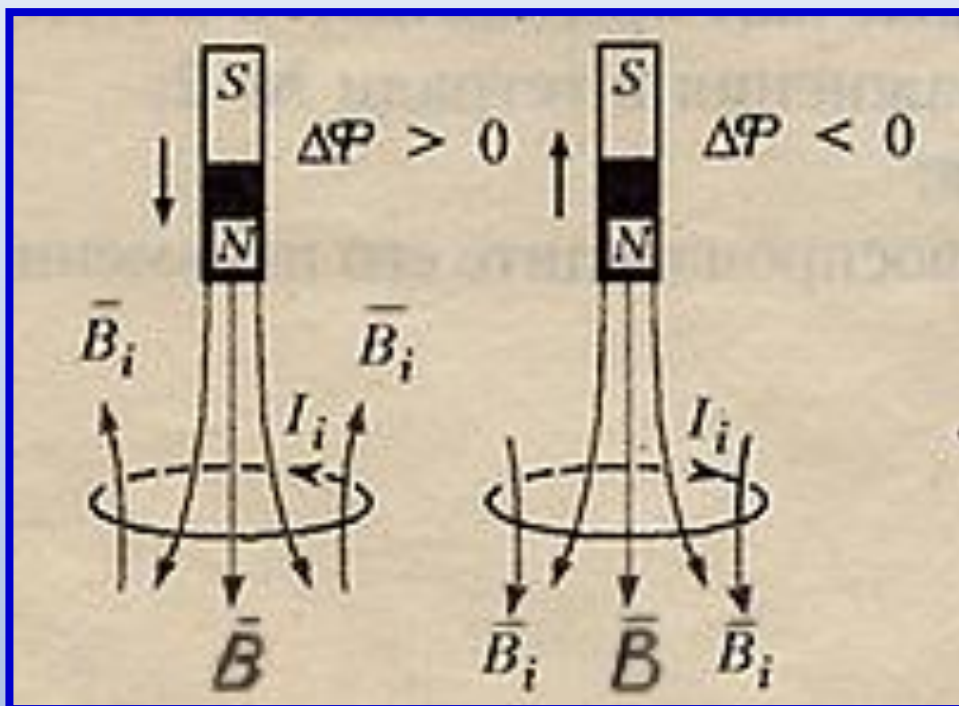
Намагнічування феромагнетика



ЯВИЩЕ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ ІНДУКЦІЇ



ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ



ЯВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ



$$\Phi_B = \int_S \vec{B} d\vec{S} = \int_S B dS_{\perp} \cos \alpha$$

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

$$\Phi_B = B dS_{\perp} \cos \alpha$$

$$[\Phi_B] = 1 \text{ Тл} \cdot \text{м}^2 = 1 \text{ Вб}$$

$$\mathcal{E} = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Правило Ленца

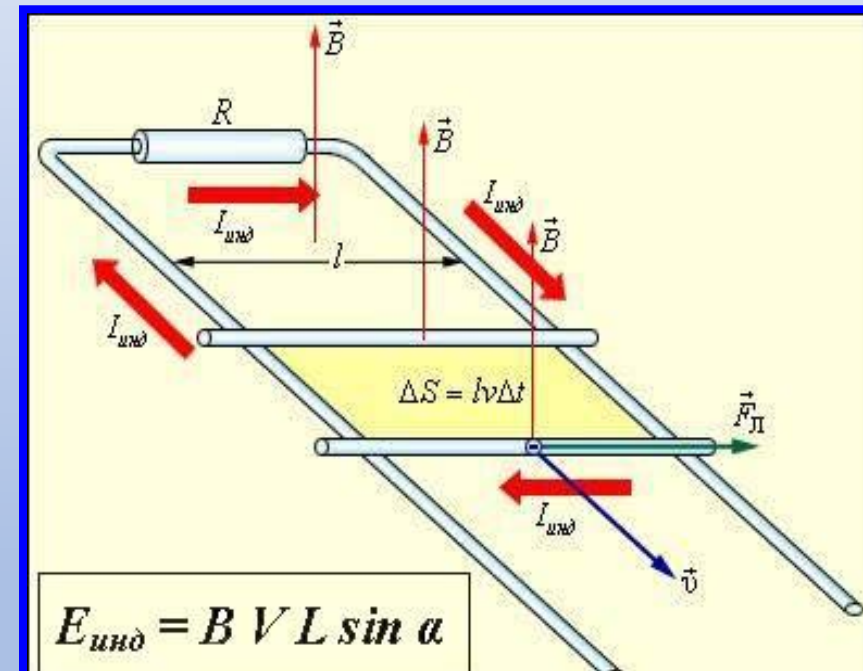
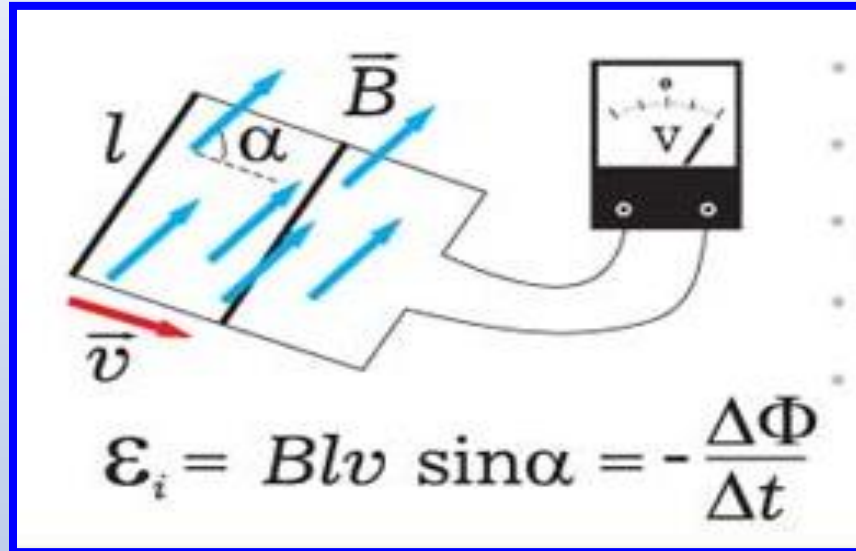


- Магніт
наближається
($\Delta\Phi > 0$) – кільце
відштовхується

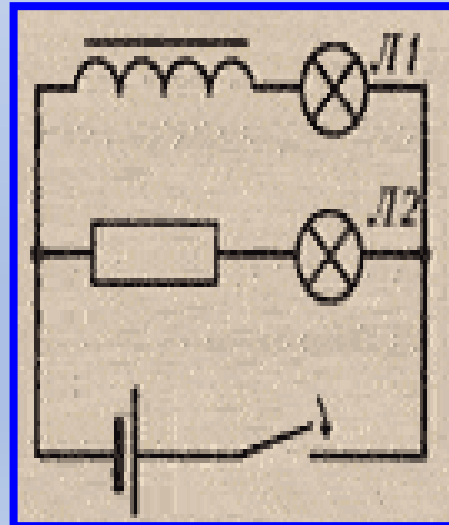
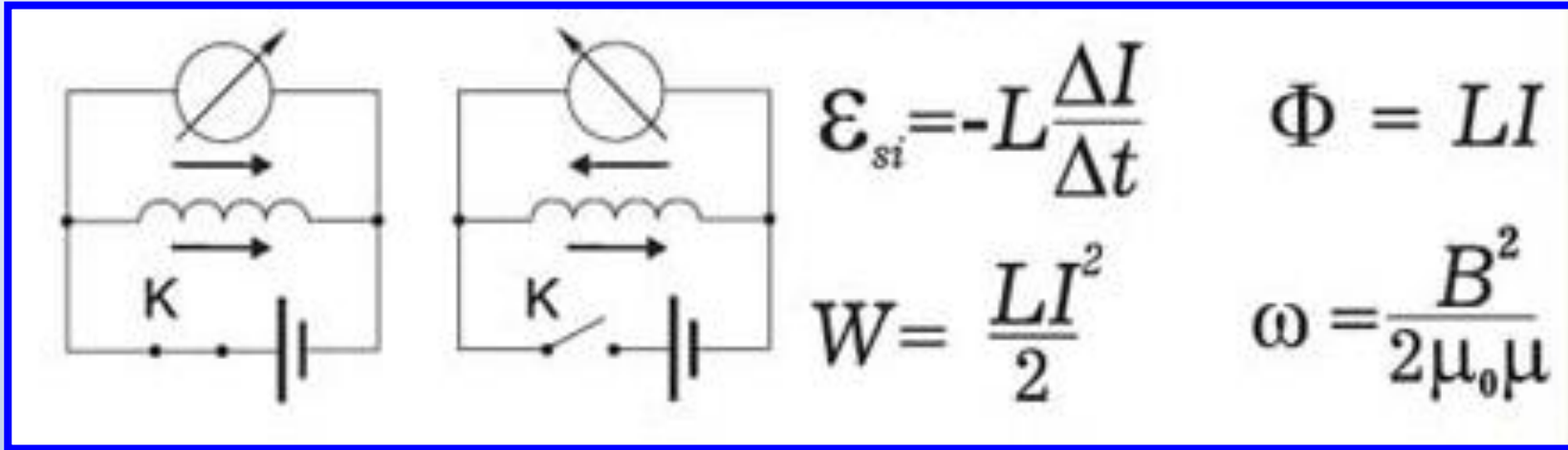
- Магніт
віддаляється
($\Delta\Phi < 0$) – кільце
притягується



ЕРС індукції в рухомих провідниках



Самоіндукція



$$[L] = 1 \frac{B\delta}{A} = 1 \Gamma H$$



Застосування електромагнітної індукції

Генератор струму

Електромагніт

Електромагнітне реле

Індикатор магнітного поля

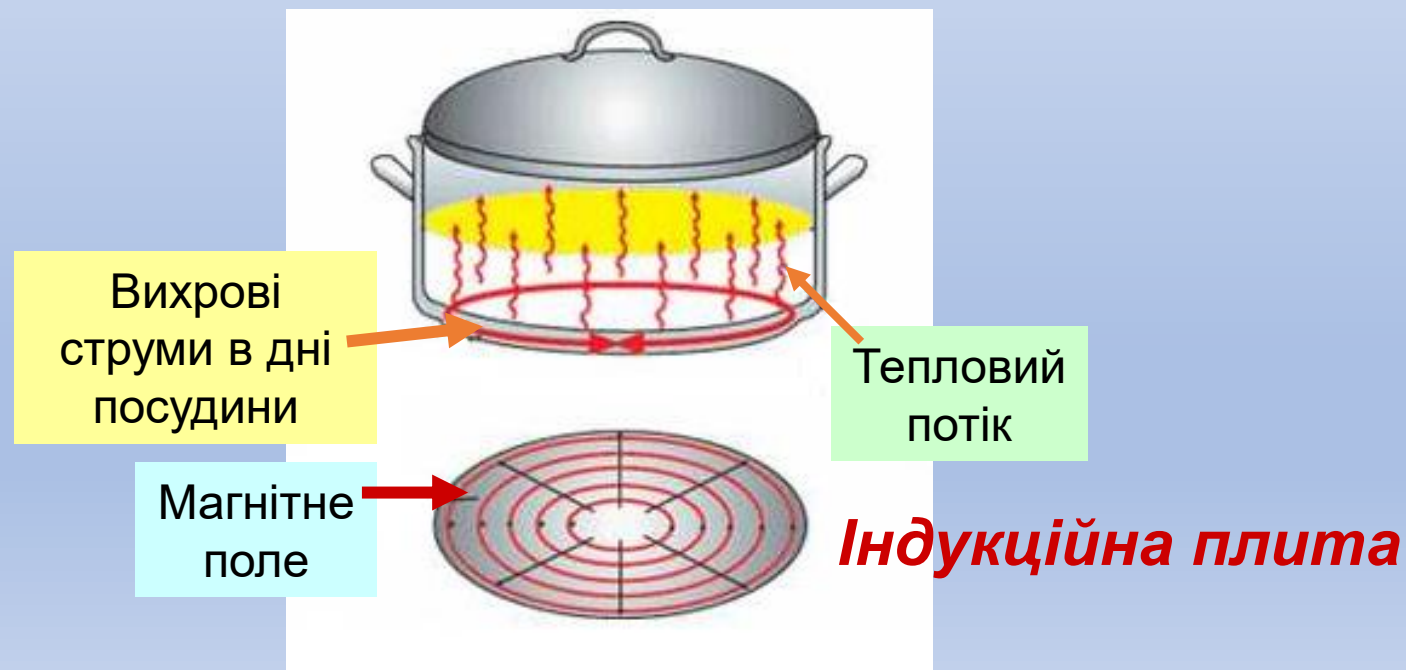
Індукційні плавильні печі

Електродинамічні мікрофони

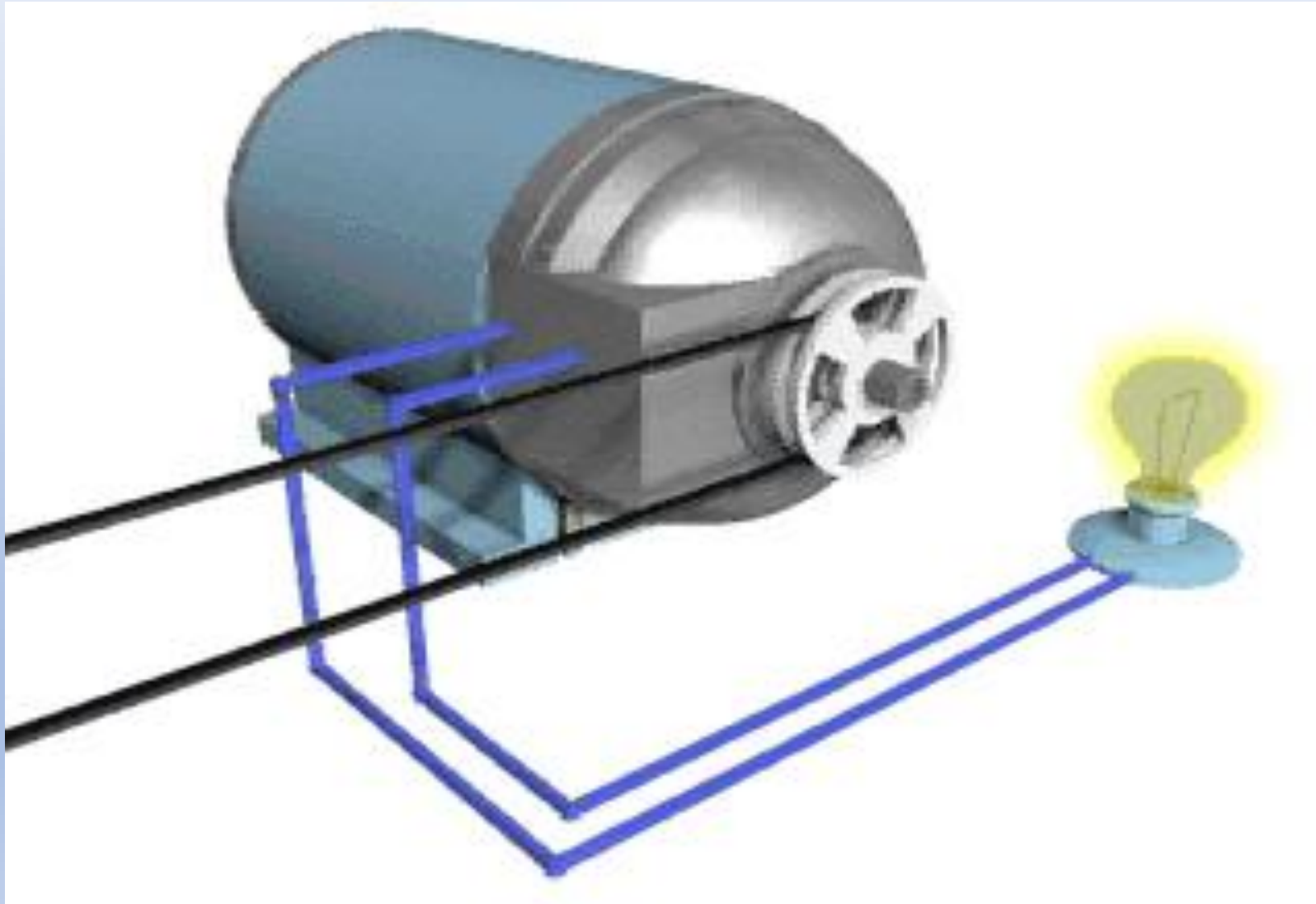
Металошукач

Магнітний запис

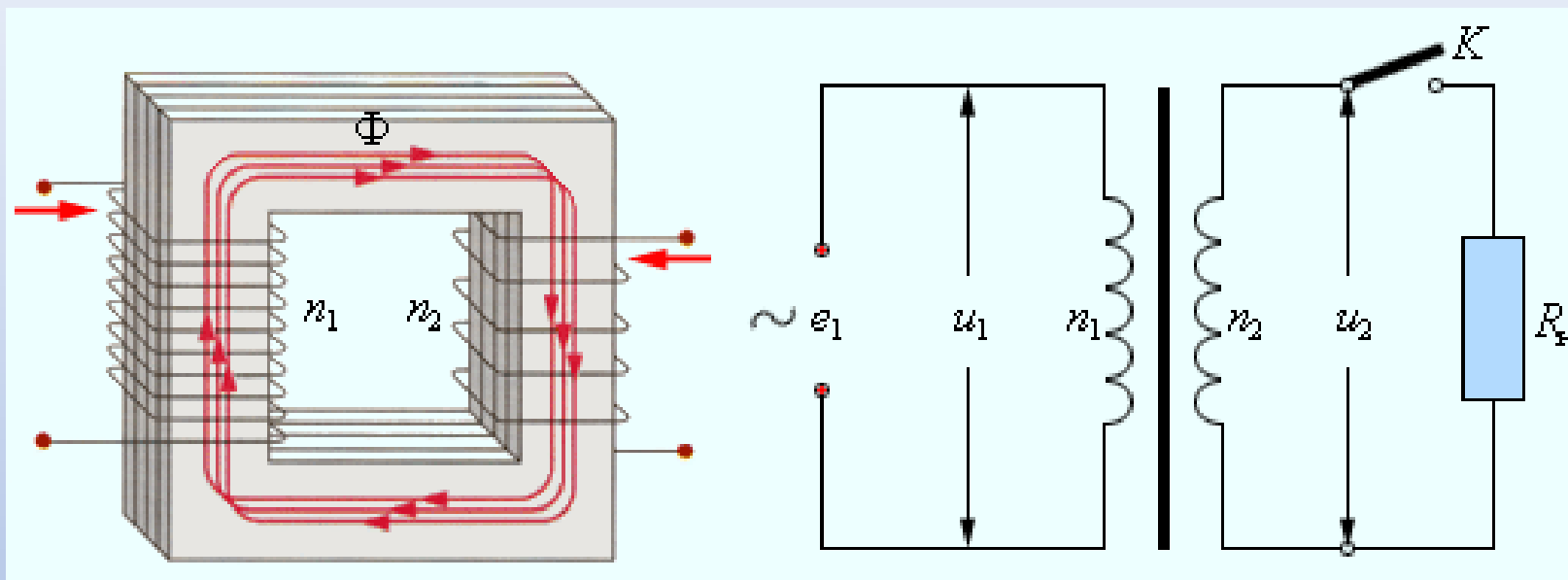
Магнітні фарби



Генератор змінного струму



Трансформатори



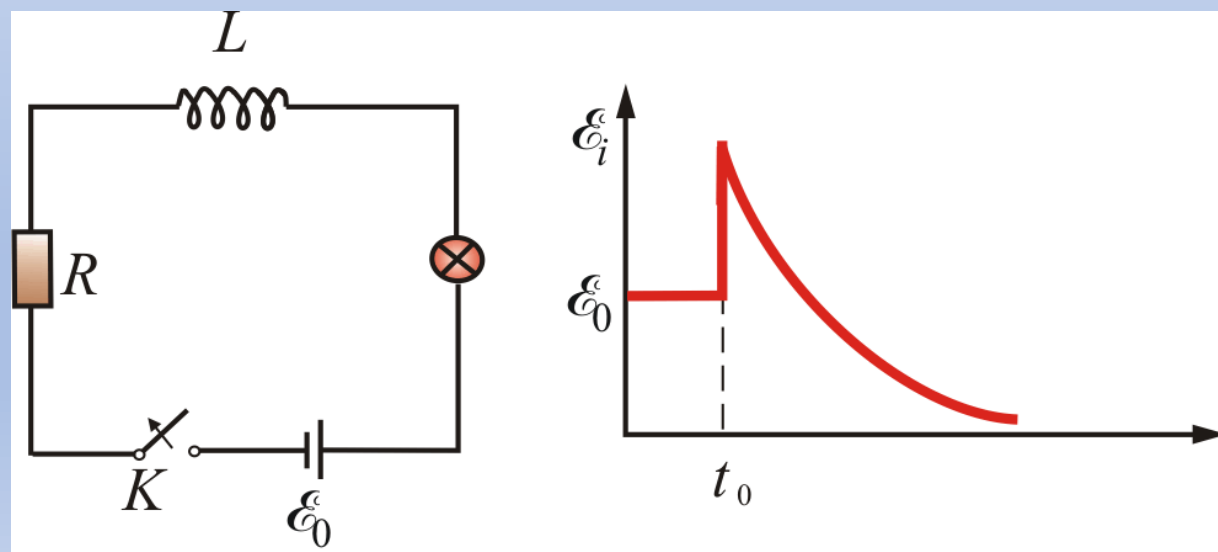
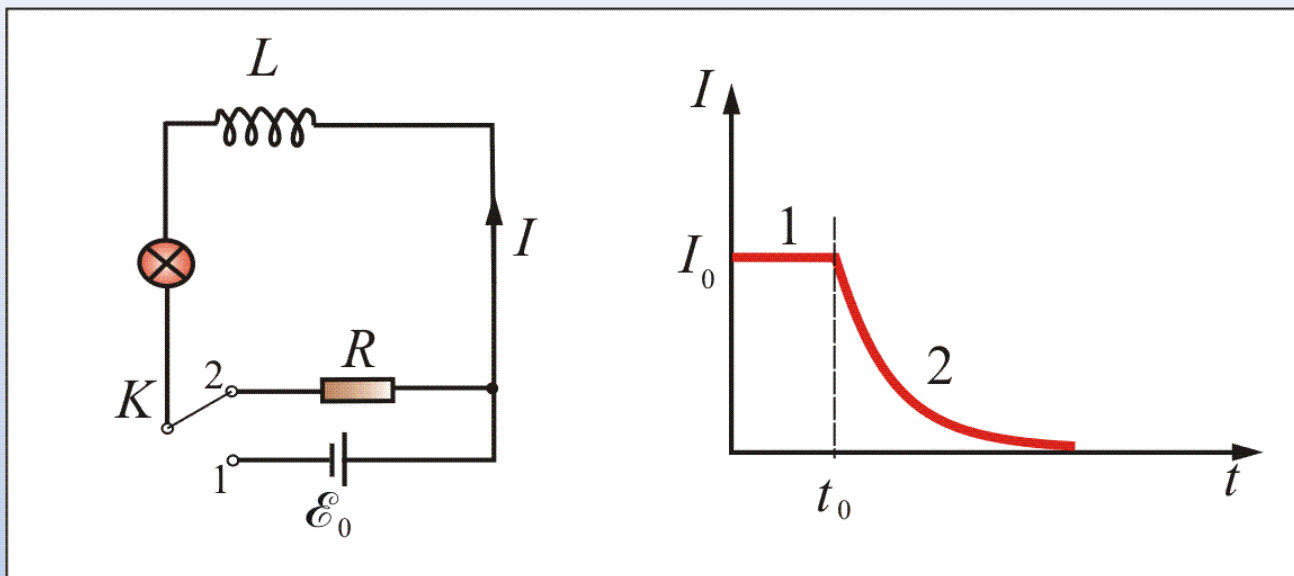
Трансформатор і його умовне зображення в схемах

n_1 и n_2 – кількість витків в обмотках.

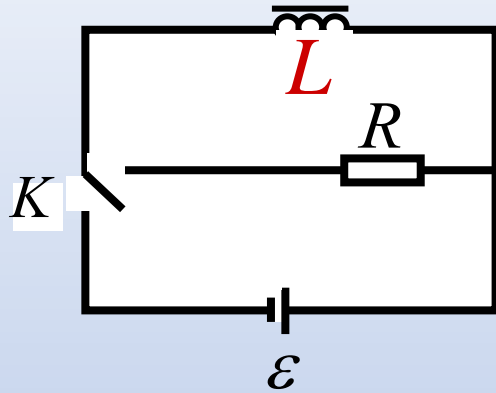
$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{n_2}{n_1} = K$$

-коефіцієнт трансформації
ідеального трансформатора

СТРУМИ ПРИ ЗАМИКАННІ І РОЗМИКАННІ КОЛА



СТРУМИ ПРИ ЗАМИКАННІ І РОЗМИКАННІ КОЛА



$t = 0$

$$I_0 = \frac{\varepsilon}{R}$$

$$IR = \varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}$$

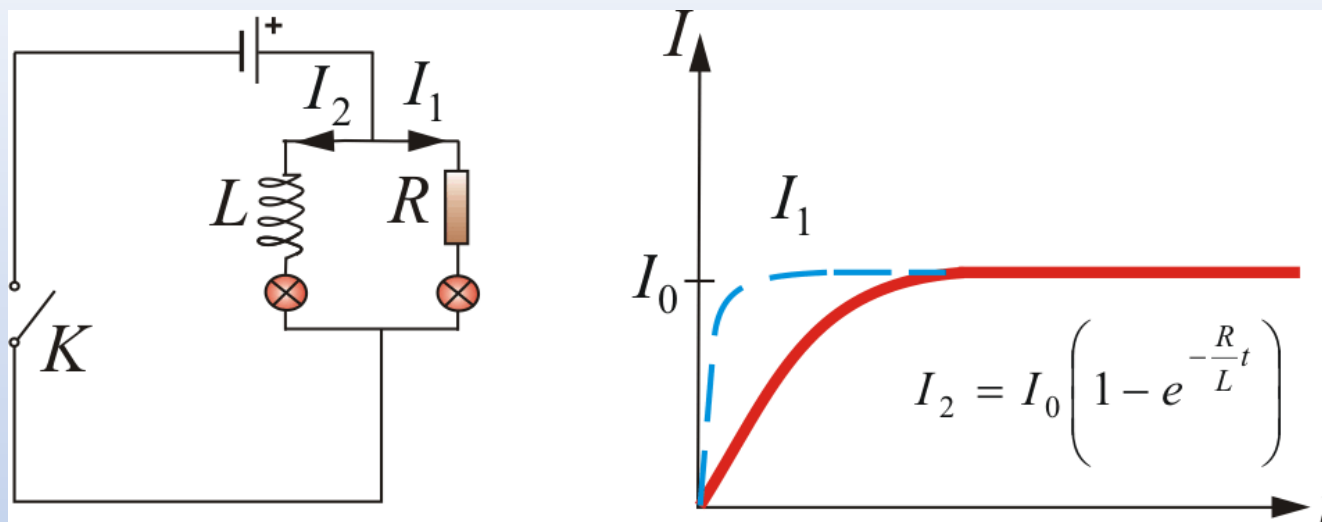
$$\frac{R}{L} I + \frac{dI}{dt} = 0$$

$$\frac{dI}{I} = -\frac{R}{L} dt \quad \ln I = -\frac{R}{L} t + \ln \text{const} \Rightarrow \quad I = \text{const} \cdot e^{-\frac{R}{L} t}$$

$$I = I_0 \cdot e^{-\frac{R}{L} t}$$



Замикання кола



$$IR = \varepsilon + \varepsilon_s = \varepsilon - L \frac{dI}{dt}$$

$$\frac{R}{L} I + \frac{dI}{dt} = \frac{\varepsilon}{L}$$

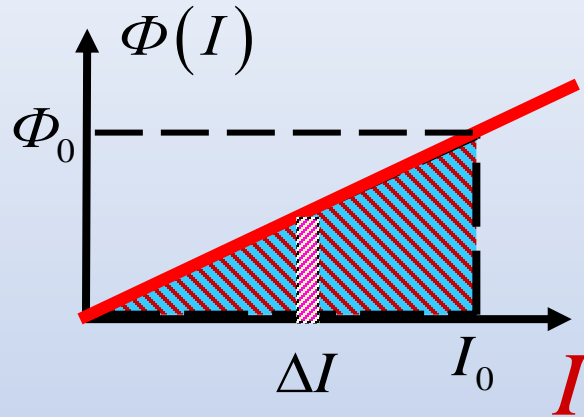
$$\varepsilon/L$$

$$I = I_0 + \text{const} \cdot e^{-\frac{R}{L}t}$$

$$t = 0 \quad I = 0$$

$$I = I_0 \left(1 - e^{-\frac{R}{L}t} \right)$$

ЕНЕРГІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ



$$dQ = I^2 R dt$$

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{L}{R} \frac{dI}{dt}$$

$$dQ = I \left(-\frac{L}{R} \frac{dI}{dt} \right) R dt = -L I dI$$

$$\Delta Q = -\int_I^0 L I dI = \frac{L I^2}{2}$$

ЕНЕРГІЯ МАГНІТНОГО ПОЛЯ



$$W_M = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \Phi I = \frac{\Phi^2}{2L}$$

$$L = \mu\mu_0 n^2 V$$

$$B = \mu\mu_0 nI$$

$$W = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} V$$

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

$$W = \int_V w_M dV = \int_V \frac{BH}{2} dV$$

Ваші питання?!