

# Лекція № 12.

## Магнітостатика

1. Магнітне поле. Вектор магнітної індукції
2. Закон Ампера
3. Контур зі струмом в магнітному полі  
Магнітний момент
4. Принцип роботи електродвигунів
5. Сила Лоренца. Прискорювачі заряджених частинок. Магнітні пастки

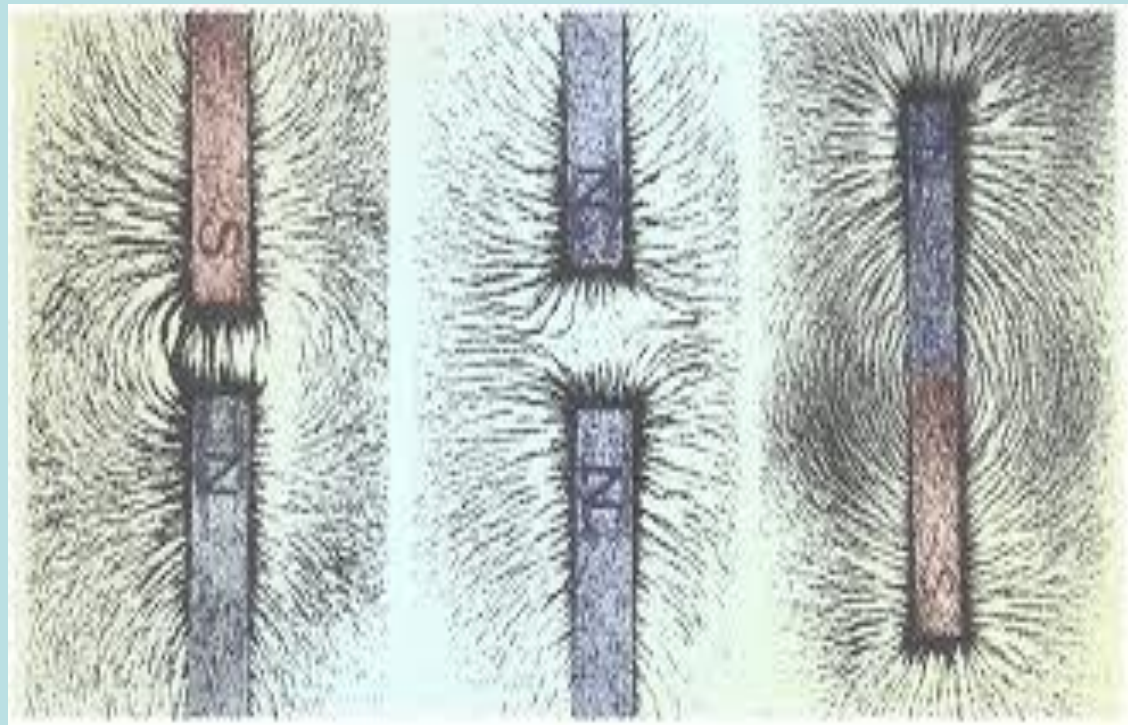
# 1. Магнітне поле. Вектор магнітної індукції

Магніти були відомі людству давно, ще понад 2000 років до нашої ери. Стародавні китайці використовували магніти як компас. Глибоке фізичне дослідження магнітів та їх властивостей відбулося лише в ХІХ столітті.



Дослід показує, що магніти мають два неподільні полюси  $N$  і  $S$ , однойменні полюси відштовхуються, а різнойменні притягуються.

Взаємодія магнітів відбувається через магнітне поле.



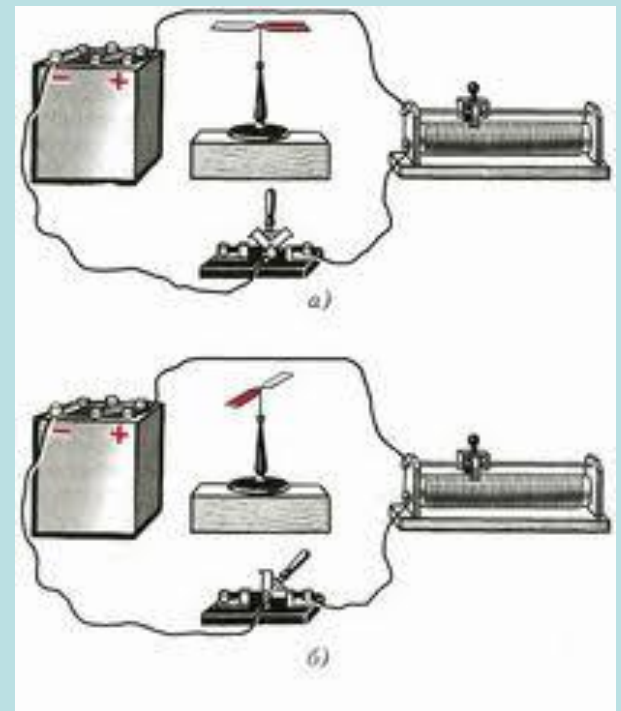
У 1820 році датський фізик Х. Ерстед показав, що магнітне поле виникає також навколо провідника, по якому протікає електричний струм. Магнітна стрілка, розташована поряд з провідником, при пропусканні по ньому електричного струму повертається і намагається встановитися перпендикулярно до провідника.

Зі зміною напрямку струму у провіднику на протилежний змінюється і напрям дії сили на стрілку. З віддаленням від провідника орієнтуюча дія зменшується.

**Ханц Христіан  
Ерстед**

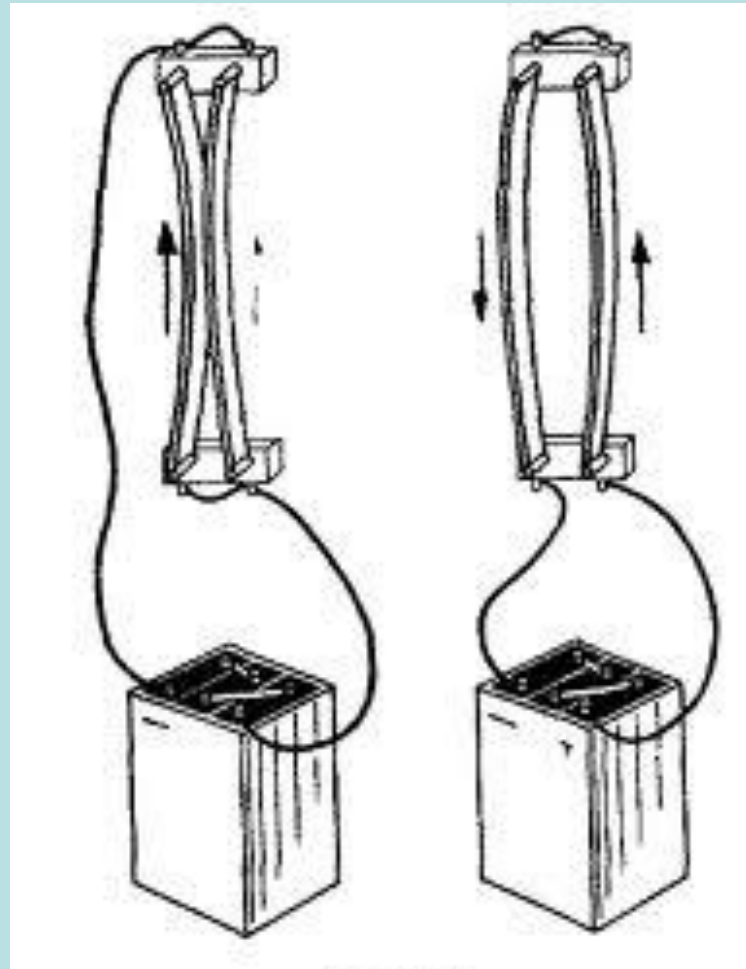


Øрстед (слева) демонстрирует своим ученикам окружающее магнитной стрелкой поле действия электрического тока.



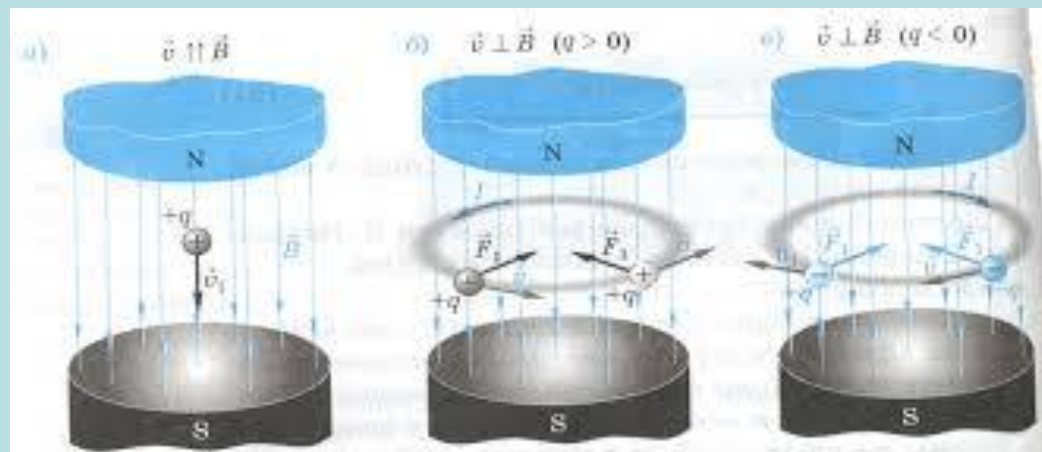
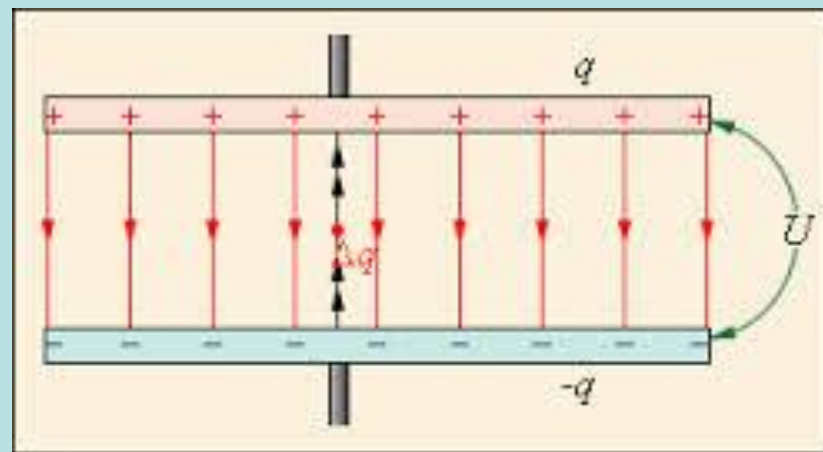
У цьому ж році А. Ампер встановив, що два паралельні провідники, по яких течуть струми одного напрямку, притягуються один до одного, різного напрямку – відштовхуються.

## Андре Марі Ампер

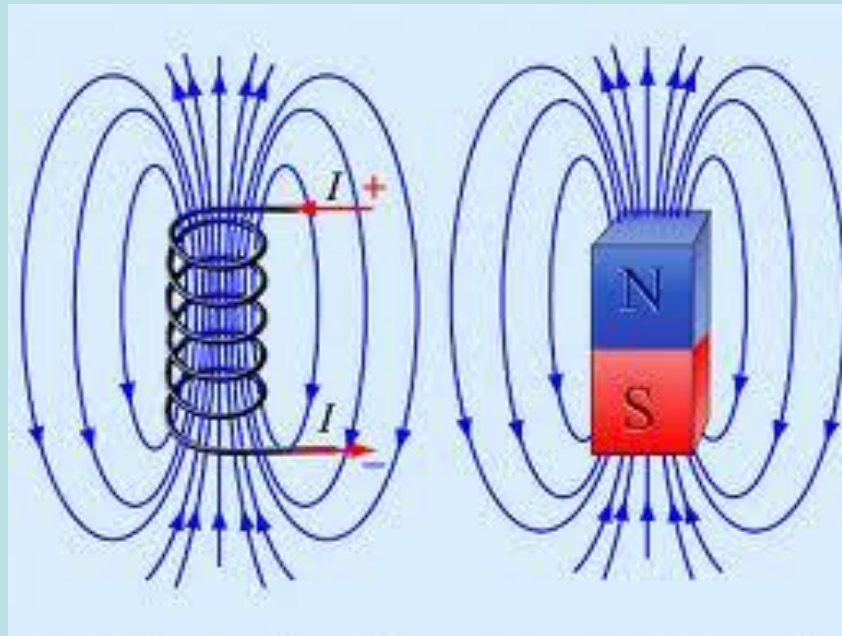


**Відеоролик:  
«Взаємодія струмів»**

Слід відмітити, що, на відміну від електричного поля, яке діє як на нерухомі, так і на рухомі електрично заряджені частинки і тіла розташовані в ньому, магнітне поле діє лише на рухомі електрично заряджені частинки і тіла.



*Магнітне поле* – це складова електромагнітного поля, що є особливою формою матерії через яку відбувається магнітна взаємодія, виникає навколо магнітів або тіл, що мають магнітні властивості, рухомих заряджених частинок, провідників зі струмом, а також спричиняється змінним у часі електричним полем.

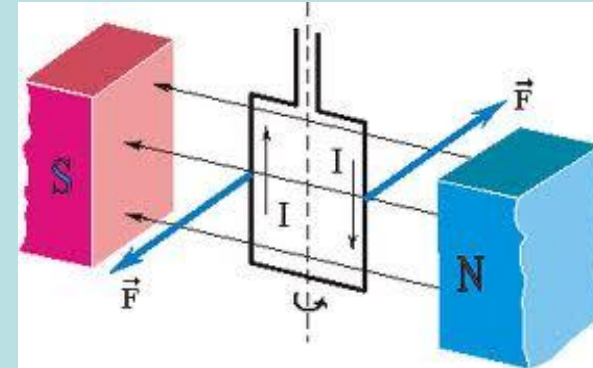
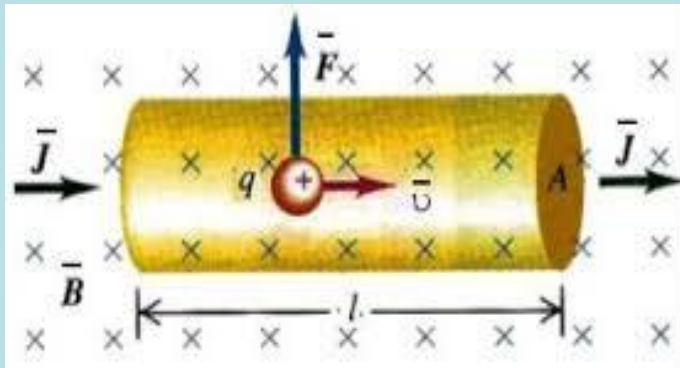
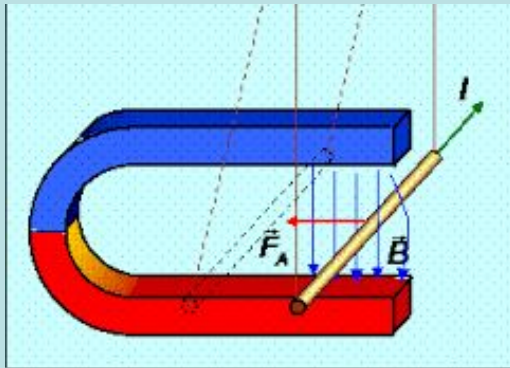




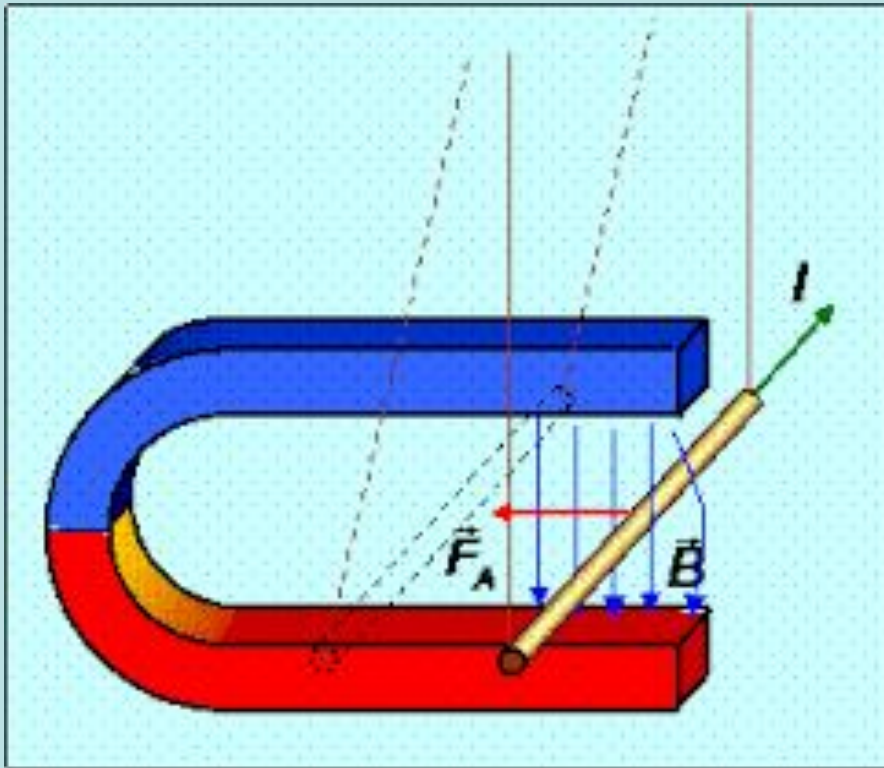
Силовою характеристикою магнітного поля є вектор індукції магнітного поля  $\vec{B}$ .

Означення вектора індукції магнітного поля може бути дане трьома рівноправними способами:

- 1) за дією магнітного поля на елемент струму;
- 2) за дією магнітного поля на рухоми заряджену частинку;
- 3) за обертальною дією магнітного поля на рамку зі струмом.

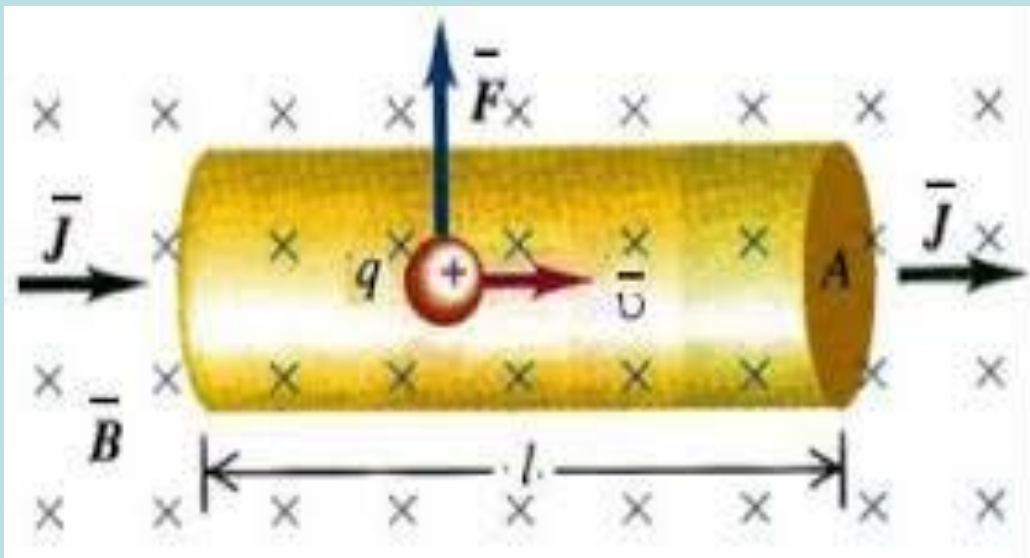


Отже, індукція магнітного поля  $\vec{B}$  – це векторна фізична величина, що є силовою характеристикою магнітного поля, чисельно рівна силі з якою магнітне поле діє на провідник одиничної довжини, по якому тече струм силою в 1 А, коли він розташований перпендикулярно до ліній індукції магнітного поля:



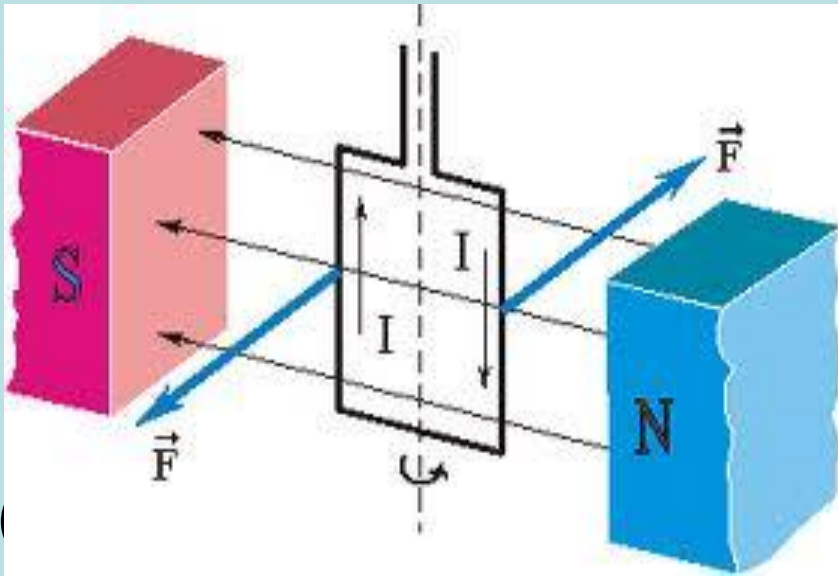
$$|\vec{B}| = \frac{F}{l \cdot \sin \alpha}$$

Або індукція магнітного поля  $\vec{B}$  – це векторна фізична величина, що є силовою характеристикою магнітного поля, чисельно рівна силі з якою магнітне поле діє на одиничний позитивний заряд, що рухається з одиничною швидкістю перпендикулярно до ліній індукції магнітного поля:



$$|\vec{B}| = \frac{F}{qv \cdot \sin \alpha}$$

Або ж індукція магнітного поля  $\vec{B}$  – це векторна фізична величина, що є силовою характеристикою магнітного поля, чисельно рівна максимальному обертальному моменту, що діє на рамку одиничної площі по якій тече струм одиничної силою:



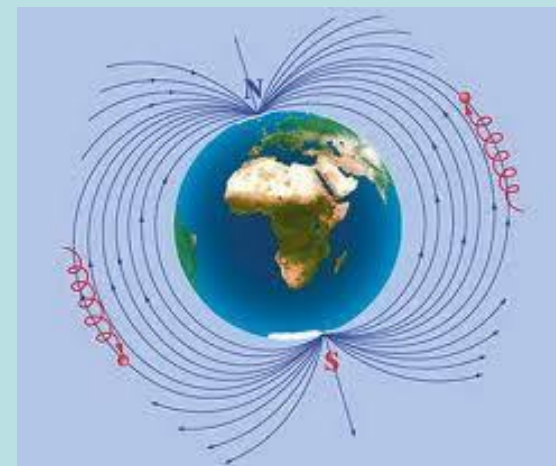
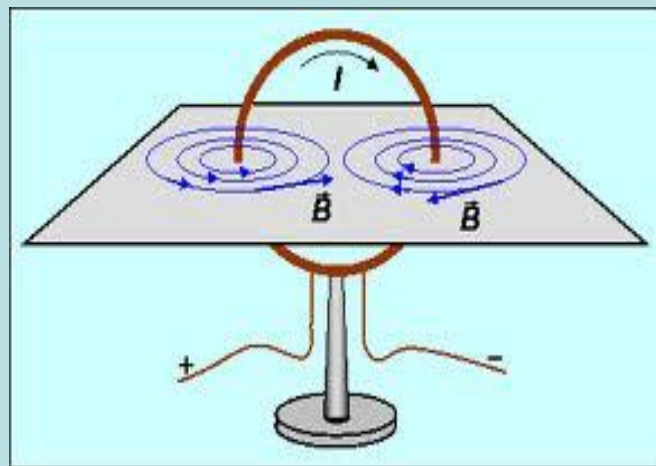
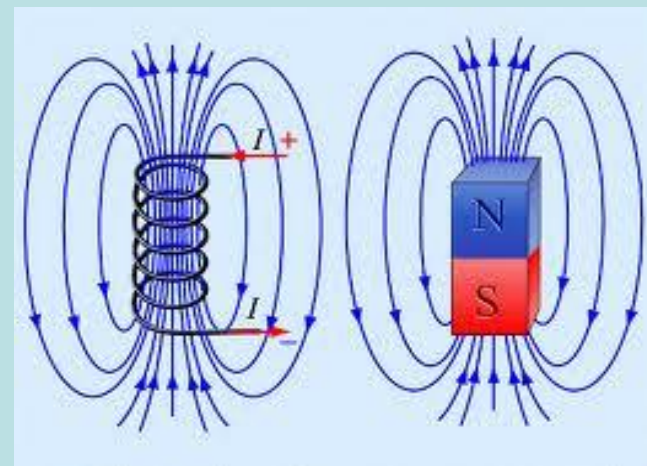
$$|\vec{B}| = \frac{M_{\max}}{IS}$$

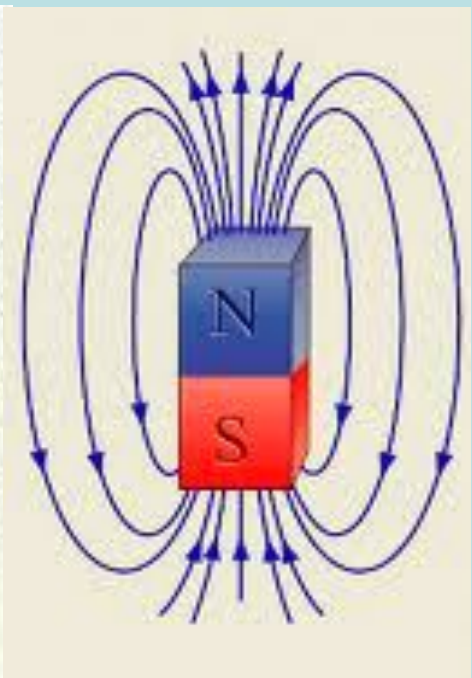
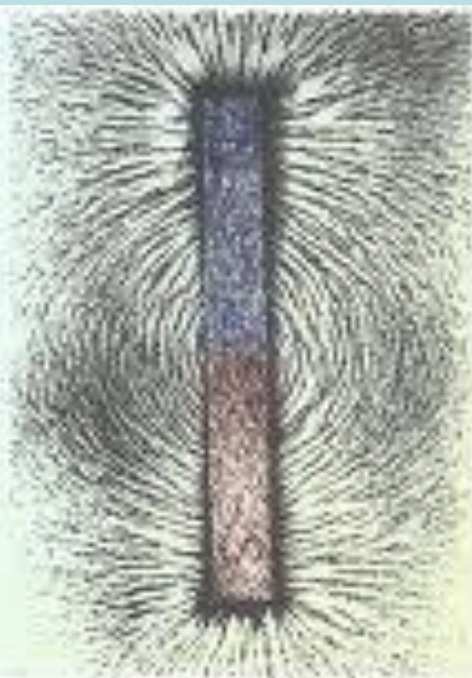
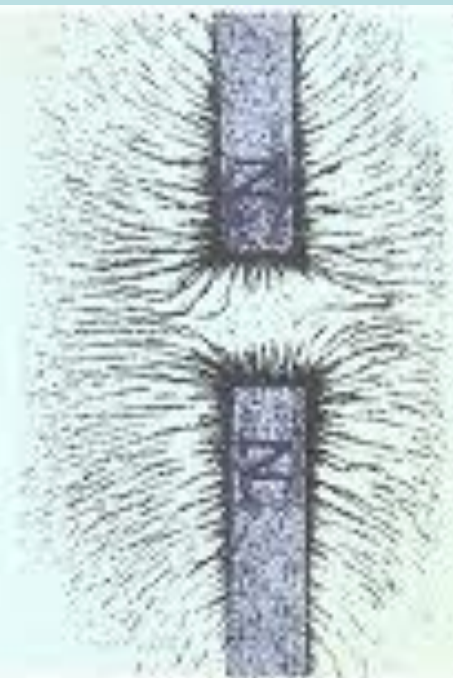
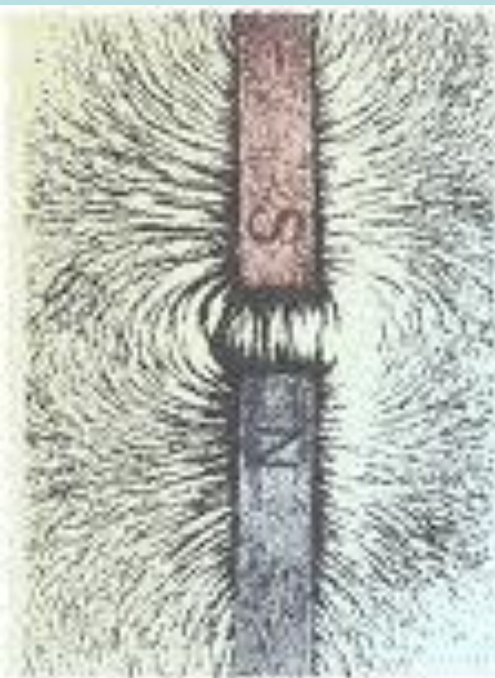
маг-нітного поля є 1 Тл  
1 м).

Для графічного зображення магнітного поля користуються лініями магнітної індукції.

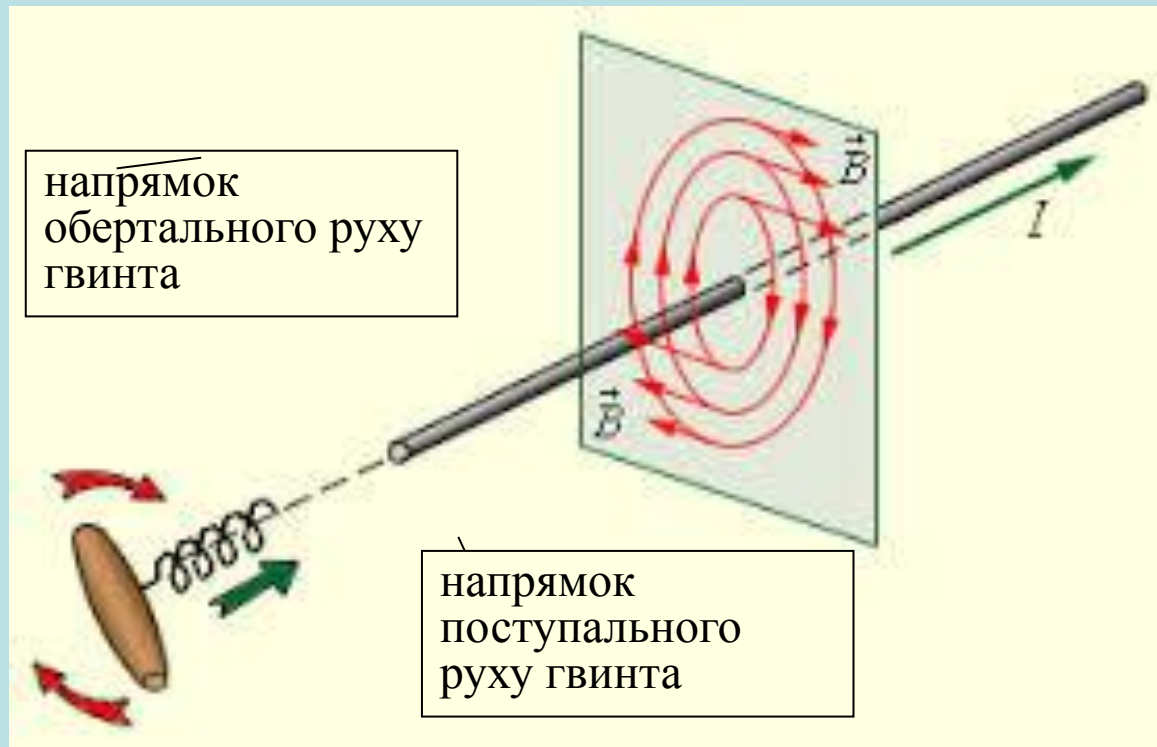
Лініями магнітної індукції (силовими лініями магнітного поля) називають криві, дотичні до яких у кожній точці збігаються з напрямом вектора у цих точках.

Числове значення вектора  $B$  визначає щільність ліній магнітної індукції на одиницю площі. Силкові лінії постійного магніту беруть початок на північному полюсі і закінчуються на південному полюсі. Силкові лінії провідника зі струмом мають вигляд концентричних кіл.





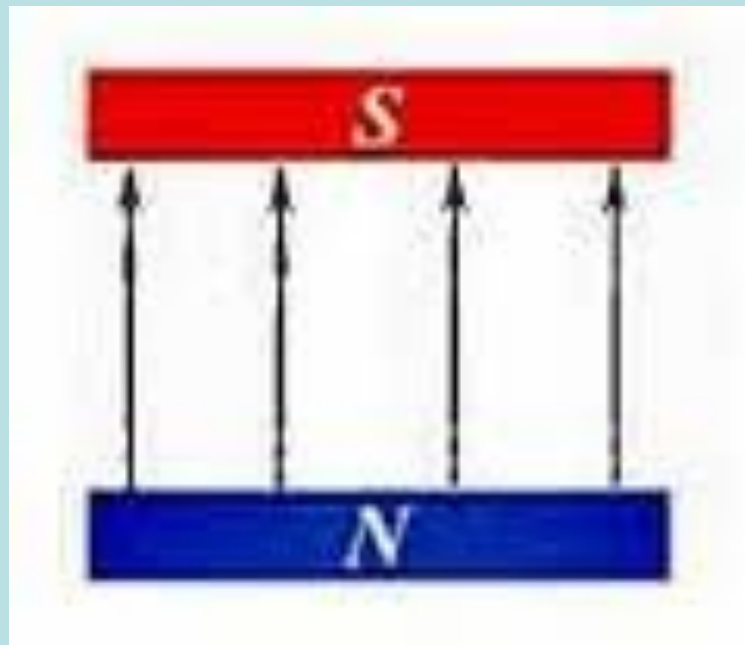
Напрям ліній магнітної індукції (вектора індукції магнітного поля  $\vec{B}$ ) визначають за правилом “правого” гвинта (свердлика): якщо поступальний рух гвинта з правою нарізкою збігається за напрямом струму, то напрям обертального руху ручки гвинта вкаже напрям ліній магнітної індукції.



Найчастіше розглядають однорідні поля.

*Однорідним магнітним полем* називають таке поле, індукція якого постійна за значенням і напрямом у кожній точці простору ( $\vec{B} = \text{const}$ ). Силкові лінії такого поля мають вигляд паралельних прямих з однаковою щільністю.

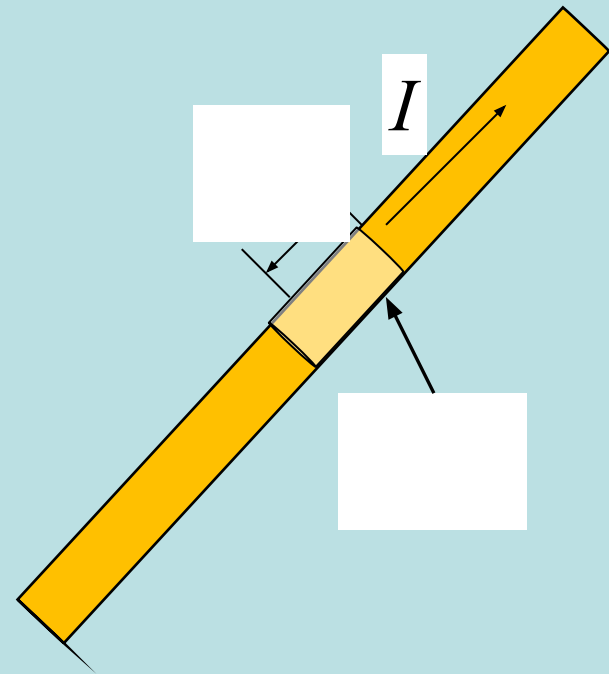
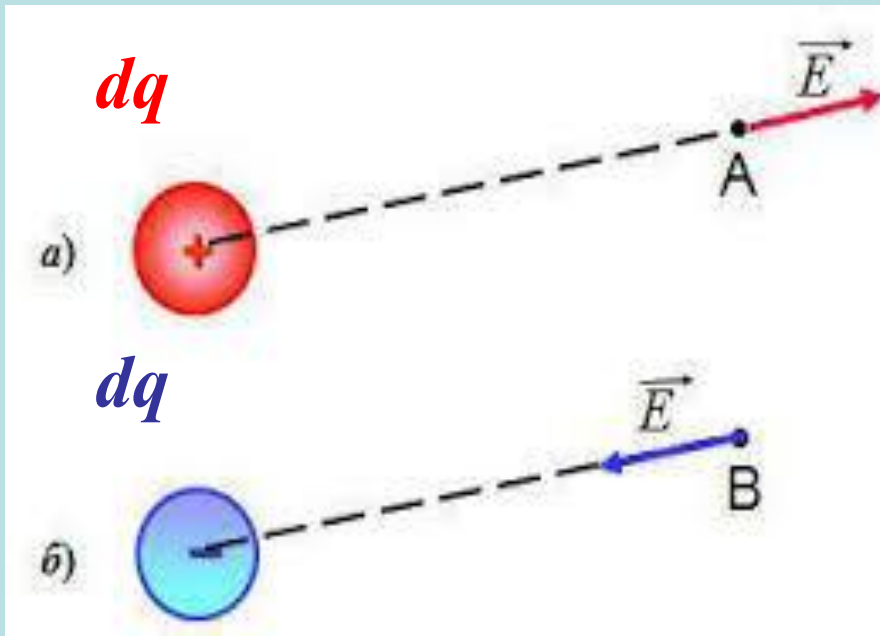
Розділ магнетизму, що вивчає стаціонарні (незмінні з часом) магнітні поля, називають *магнітостатикою*.



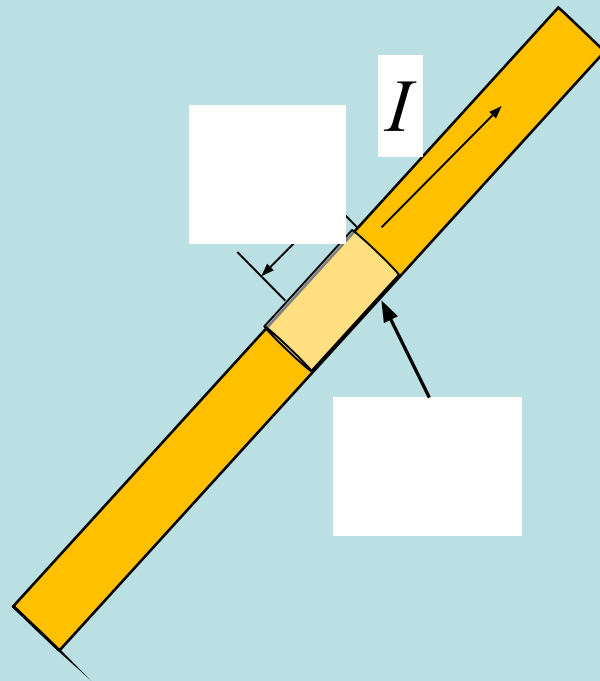


## 2. Закон Ампера

Основні принципи побудови теорії стаціонарних магнітних полів подібні до принципів побудови електростатики. За аналогією з пробним зарядом  $dq$  в електростатиці, під час вивчення магнетизму вводять абстрактне поняття – пробний елемент струму.



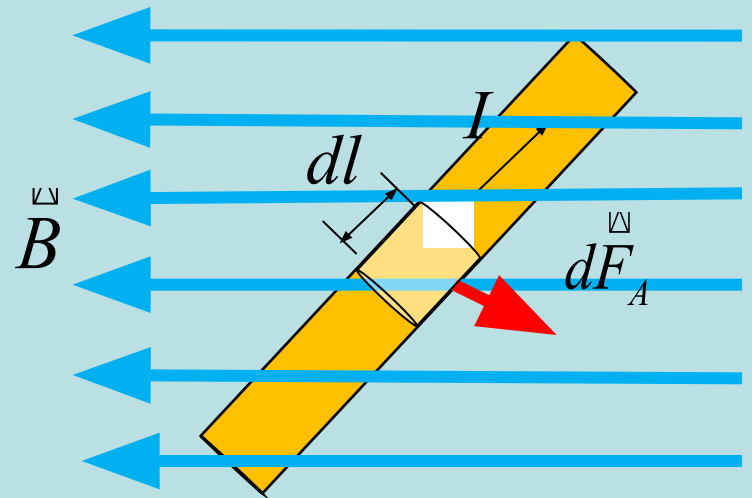
**Елементом струму** називають векторну величину  $I dl$ , що чисельно дорівнює добутковій силі струму  $I$  в провіднику на вектор елементу провідника  $dl$ , направлений уздовж напрямку струму. Елемент струму не лише сам створює у просторі навколо себе магнітне поле, а й відчуває силову дію з боку зовнішніх магнітних полів.



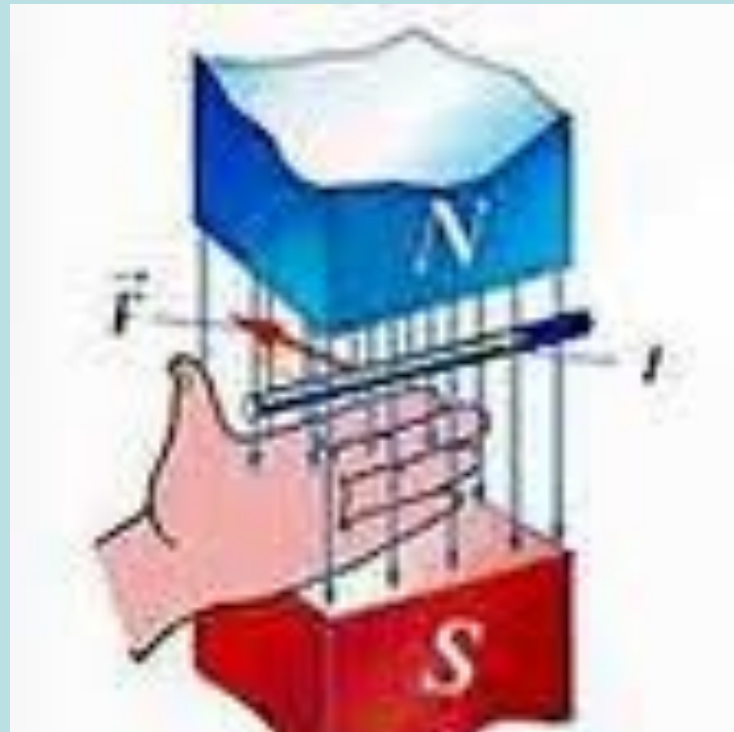
Основним експериментальним законом магнетизму є закон Ампера: сила  $d\vec{F}_A$ , з якою зовнішнє магнітне поле діє на розміщений у ньому елемент провідника зі струмом, дорівнює векторному добутку елемента струму  $I d\vec{l}$  на вектор індукції магнітного поля  $\vec{B}$ :

$$d\vec{F}_A = \left[ I d\vec{l} \cdot \vec{B} \right]$$

Андре Марі  
Ампер

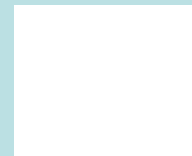
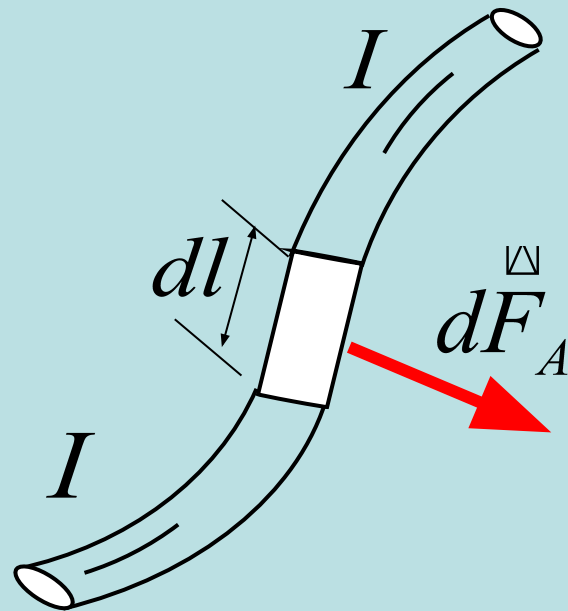


Напря́м сили визначають за правилом векторного добутку. Але для зручності часто використовують **правило лівої руки**: якщо ліву руку розмістити так, щоб лінії індукції магнітного поля входили в долоню, а чотири випрямлених пальці збігалися з технічним напрямом струму в провіднику, то відхилений під прямим кутом великий палець вкаже напрям сили Ампера.



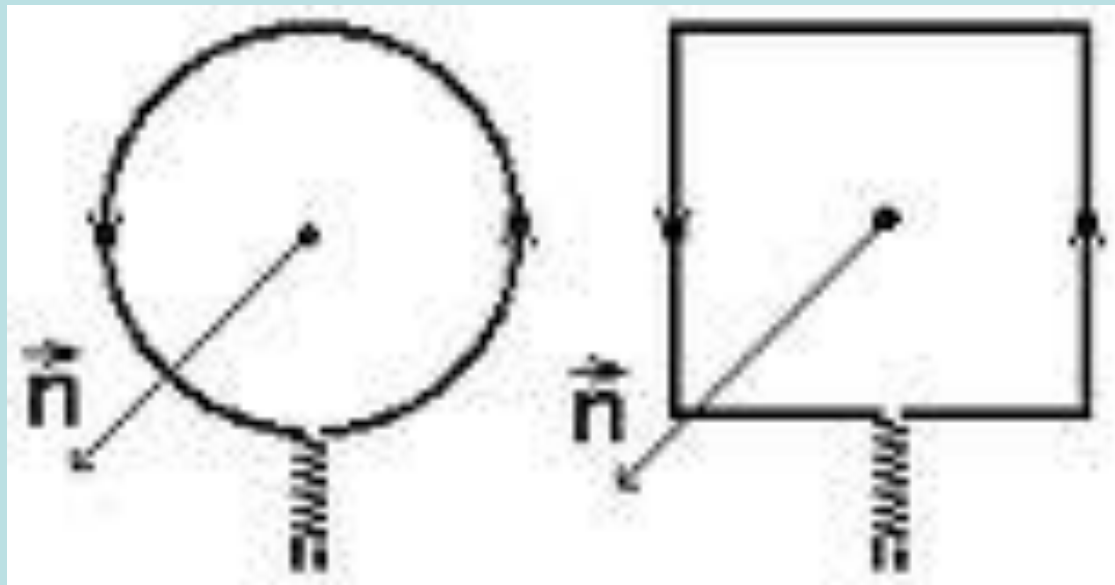
Сила, з якою магнітне поле діятиме на весь провідник, розміщений у ньому, буде визначатись інтегруванням виразу значення сили Ампера по всій довжині провідника:

$$\vec{F}_A = \int_0^l \vec{dF}_A$$



### 3. Контур зі струмом в магнітному полі. Магнітний момент

*Контуром зі струмом* називають замкнений провідник по якому тече електричний струм.



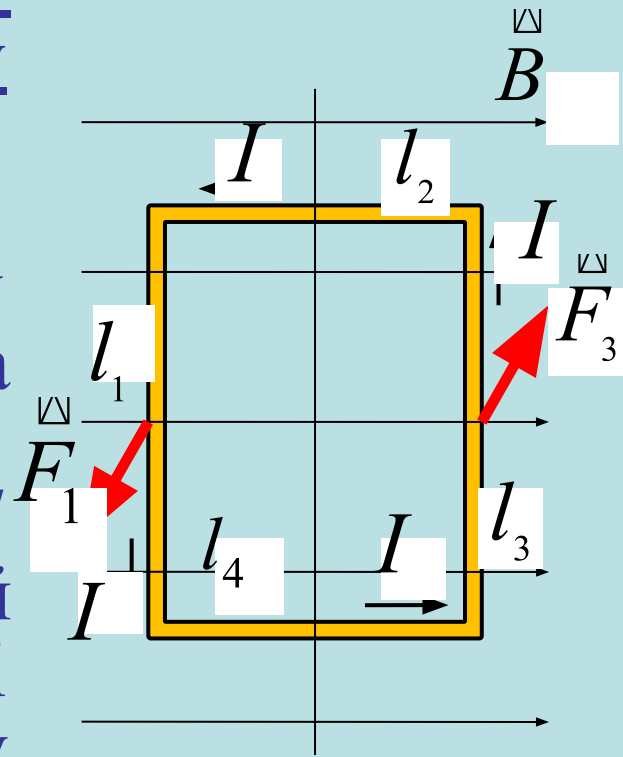
Розглянемо прямокутний контур з постійним струмом  $I = \text{const}$ , розміщений в однорідному магнітному полі:

1) паралельно лініям індукції.  
 Магнітне поле діє на кожну сторону рамки, напрями сил Ампера показано на рисунку.

Оскільки сторони 2 і 4 розташовані паралельно до ліній індукції магнітного поля, то  $F_2 = 0$  і  $F_4 = 0$ , а сили  $F_1$  і  $F_3$  утворюють пару сил, які створюють обертальний момент навколо вертикальної осі, що проходить через центр рамки:

$$F_1 = F_3 = I l_1 B \sin 90^\circ,$$

де  $l_1 = l_2$  — довжина бічних сторін рамки.



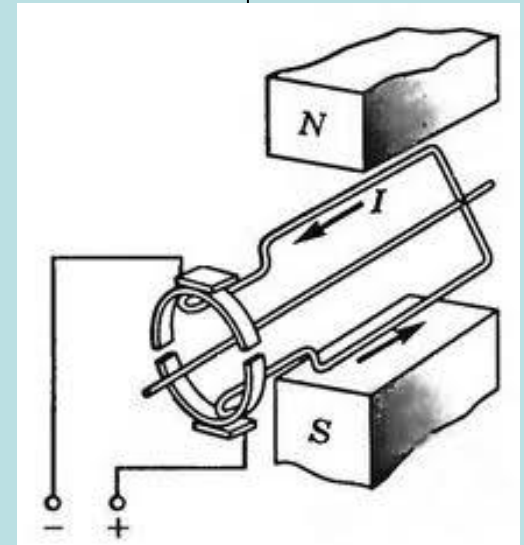
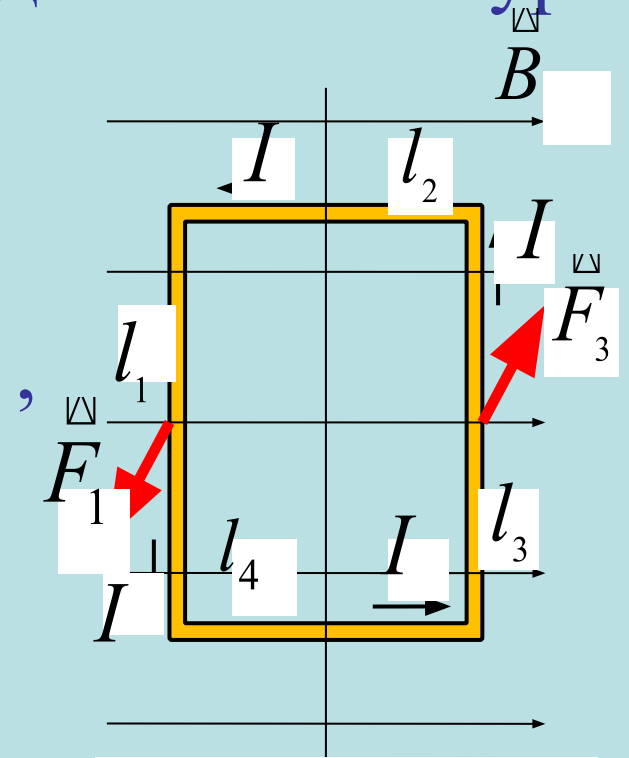
Обертальний момент сил, що діють на контур зі струмом:

$$M = 2F_1 \frac{l_2}{2} \sin \varphi = IB l_1 l_2 \sin \varphi$$

$$M = IBS \sin \varphi$$

$S = l_1 l_2$  — площа рамки,

$\varphi$  — кут між напрямком сили і елементом струму.



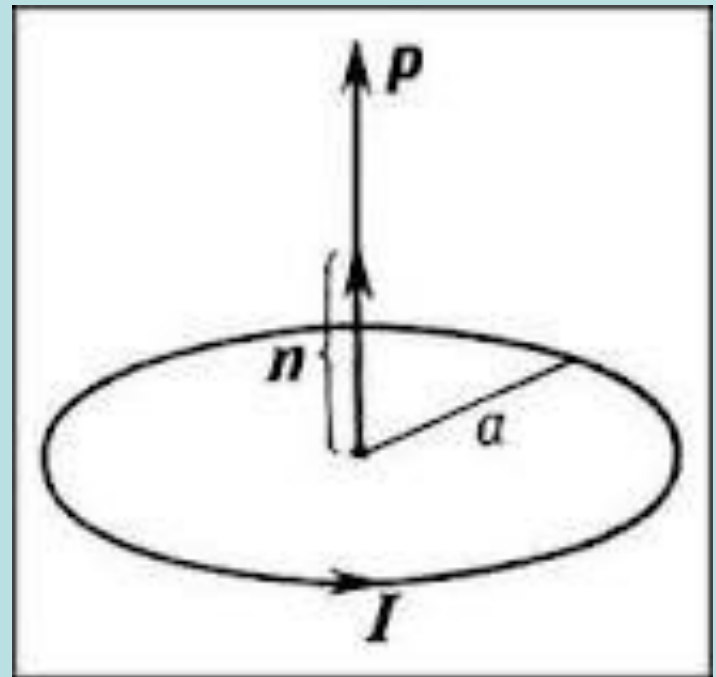


Оскільки *магнітним моментом контуру зі струмом* називають векторну фізичну величину, чисельно рівну добутку сили струму в контурі на площу рамки і на одиничний вектор нормалі проведений до площини рамки (напряму вектору  $\vec{n}$  визначають за правилом правого гвинта відносно напрямку струму у контурі):

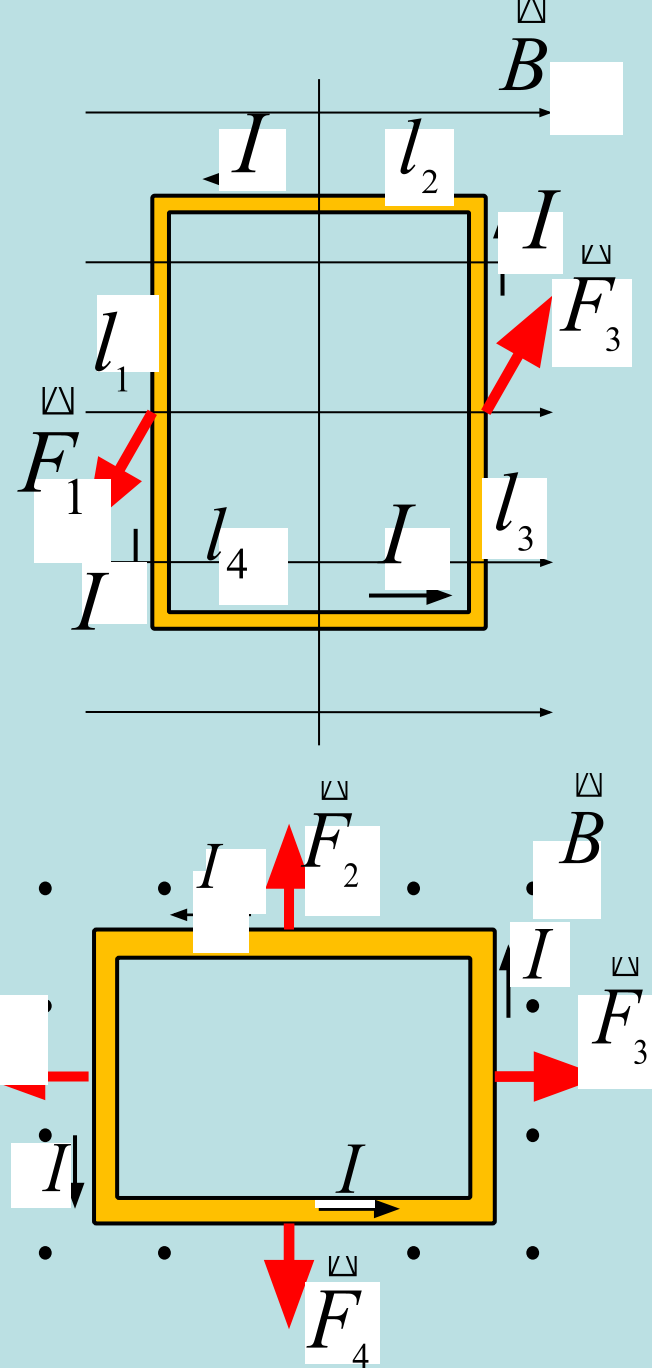
$$\vec{p}_m = IS\vec{n}$$

Тоді в загальному вигляді обертальний момент сил, що діють на контур зі струмом:

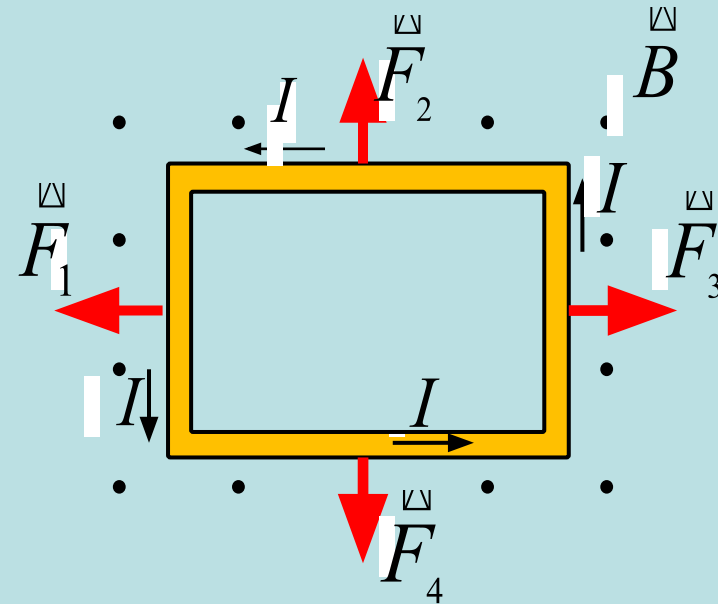
$$\vec{M} = [\vec{p}_m \cdot \vec{B}]$$



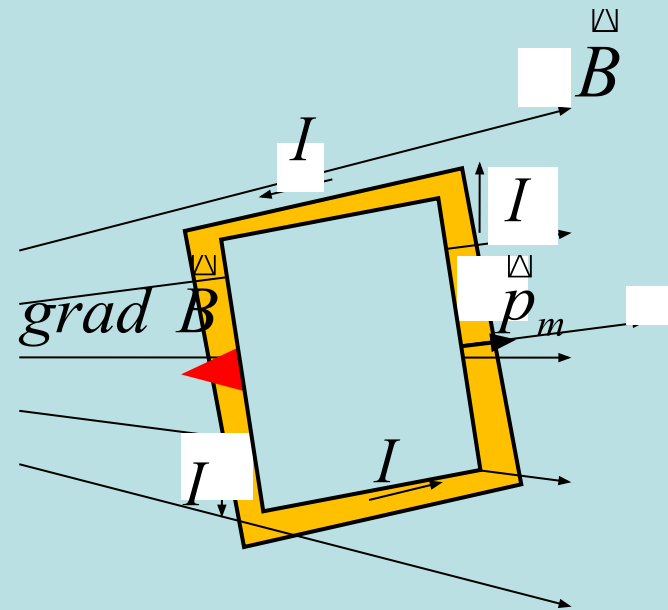
Обертальний момент сил максимальний, якщо  $\vec{p}_m \perp \vec{B}$  (площина рамки розташована вздовж ліній індукції магнітного поля) і дорівнює нулю, коли  $\vec{p}_m \uparrow\uparrow \vec{B}$  вміщений у магнітне поле контур зі струмом під дією обертального моменту буде намагатися прийняти таке положення, щоб вектори  $\vec{p}_m$  і  $\vec{B}$  стали паралельними і однаково направленними. Таке положення відповідає стійкій рівновазі.



2) Якщо площина контуру зі струмом: перпендикулярна лініям індукції магнітного поля, то  $\vec{p}_m \uparrow \uparrow \vec{B}$ . Сила Ампера, яка у цьому разі діє на кожну сторону контуру зі струмом, лежить у площині контуру і, залежно від взаємного напрямлення  $\vec{B}$  та  $I$ , буде спрямована назовні або всередину контуру. Тобто контур зі струмом під дією цих сил або розтягуватиметься, або стискуватиметься, але обертальний момент дорівнюватиме нулю.



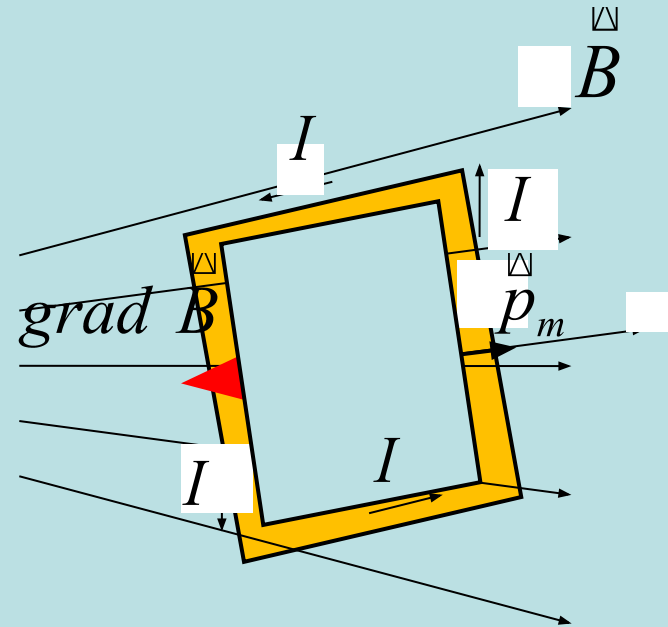
3) Плоский контур зі струмом у неоднорідному магнітному полі, окрім обертальної дії та деформації зазнає ще й додаткових дій, що зумовлюють переміщення контуру в бік збільшення або зменшення магнітної індукції залежно від напрямку струму  $I$ . У випадку зображеному на рис., контур буде втягуватиметься в область збільшення індукції  $B$  магнітного поля (переміщуватиметься ліворуч).



Результуюча сила з якою магнітне поле втягує або виштовхує контур зі струмом:

$$\vec{F} = \text{grad} (\vec{p}_m \cdot \vec{B}) = -\text{grad} W_n$$

де  $W_n = -(\vec{p}_m \cdot \vec{B})$  – потенціальна енергія контуру зі струмом у магнітному полі.



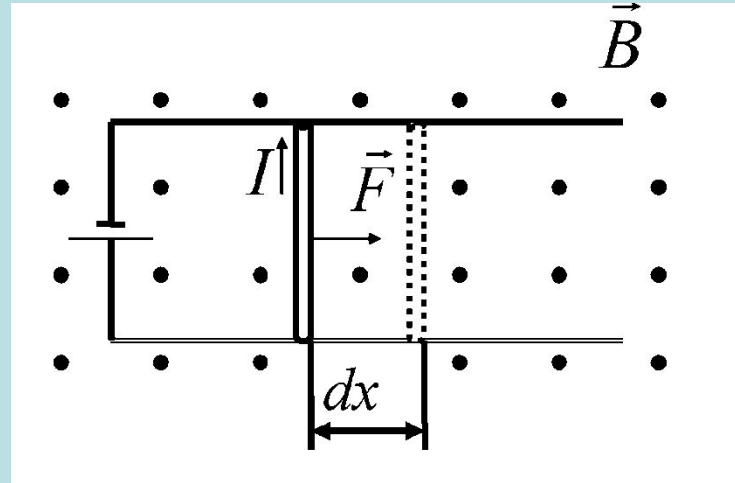
Контури зі струмом використовують у приладах для вимірювання індукції  $\vec{B}$  магнітного поля за відомим значенням обертального моменту сил користуючись формулою

$$\vec{M} = [p_m \cdot \vec{B}]$$



# 4. Принцип роботи електродвигунів

На незакріплений провідник довжиною  $l$  по якому тече струм силою  $I$  (наприклад, одна із сторін контуру може ковзати по двом сусіднім, див. рис.) однорідне  $\vec{B}$  магнітне поле індукцією діє із силою Ампера:



$$F_A = I [l \cdot B]$$

Магнітне поле, переміщуючи провідник під дією сили  $F$ , на відстань  $dx$ , виконає елементарну роботу

$$dA = F dx \cos \left( \overset{\boxtimes}{F}, \overset{\boxtimes}{dx} \right) = Il B_n dx = IB_n dS = Id\Phi$$

=1

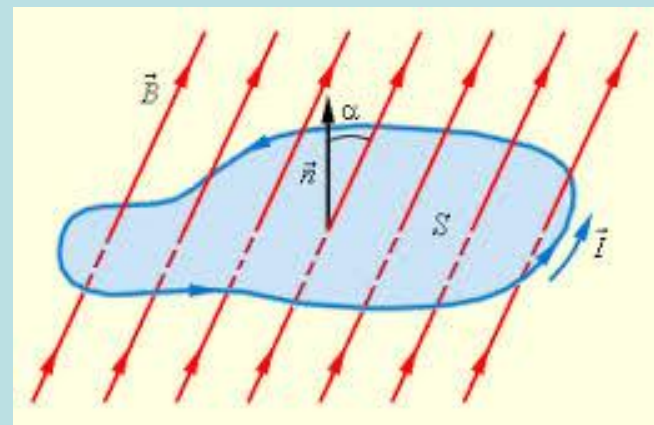
де  $d\Phi$  – зміна магнітного потоку, що перетинає контур.

Магнітним потоком або потоком вектора індукції магнітного поля називають скалярну фізичну величину, чисельно рівну скалярному добутку вектора індукції магнітного поля на площу контуру, яку пронизують лінії індукції:

$$\Phi = \left( \vec{B} \vec{S} \right) = BS \cos \alpha$$

де  $\alpha$  – кут між вектором нормалі до поверхні  $\vec{n}$  і вектором  $\vec{B}$ .

Одиницею вимірювання магнітного поля є  $1\text{Вб}$  (вебер):  $1\text{Вб} = 1\text{Тл} \cdot 1\text{м}^2$





У разі довільного переміщення провідника зі струмом у магнітному полі повна робота

$$A = \int_{\Phi_1}^{\Phi_2} I d\Phi = I(\Phi_2 - \Phi_1) = I\Delta\Phi$$

Робота при переміщенні провідника або контуру зі струмом у магнітному полі завжди може бути обчислена як

$$A = I\Delta\Phi.$$

Якщо магнітний потік, що пронизує замкнутий провідник зі струмом, зростає,  $\Delta\Phi > 0$ ,  $A > 0$ , тобто робота виконується за рахунок джерела струму контуру – ***принцип дії електродвигунів***. Якщо  $\Delta\Phi < 0$ ,  $A < 0$ , це означає, що робота виконується за рахунок зовнішніх сил і джерело може накопичувати енергію – ***принцип дії генераторів струму***.

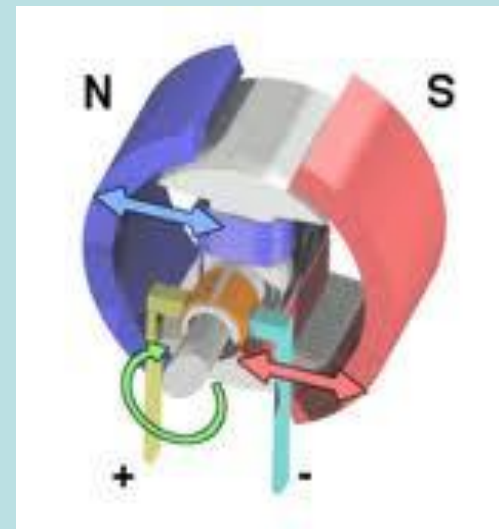
**Електродвигуни** – пристрої, що перетворюють електричну енергію у механічну.

Складаються з обертової частини (ротора) та нерухомої (статора).

Причиною обертання ротора електродвигуна є обертальний момент, що виникає при взаємодії магнітного поля статора з обмоткою ротора, по якій тече струм.

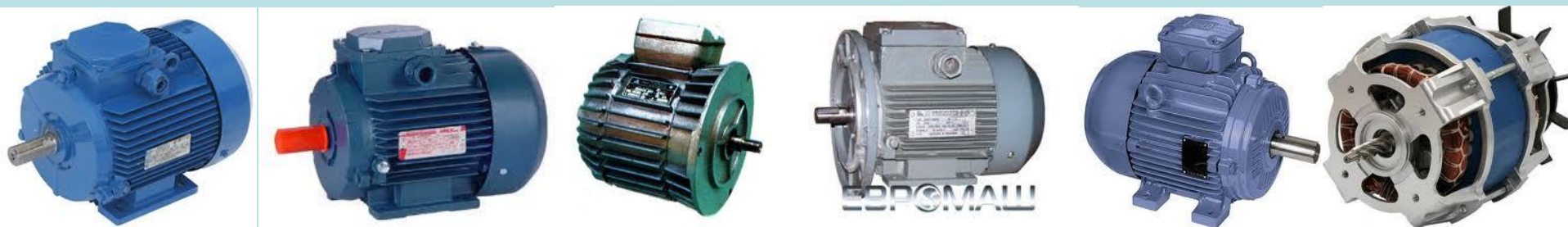
Розрізняють електродвигуни постійного та змінного струму.

**Електродвигуни постійного струму** застосовують в електротягових і підіймальних пристроях, в електроприводі з широким діапазоном регулювання швидкості (електрозварювальні установки, електропривод баштових кранів тощо).



**Електродвигуни змінного струму** поділяють на синхронні та асинхронні. **Синхронні електродвигуни** застосовують у нерегульованому електроприводі промислових установок (насосів, компресорів, повітродувок, млинів різного призначення, прокатних станів, дизель-генераторних установок та ін.). На **асинхронні двигуни** припадає близько 90-95% від загальної кількості електродвигунів через їх простоту, високу надійність в експлуатації, малі габаритні розміри і низьку вартість. За функціональним призначенням асинхронних електродвигунів розрізняють загальнопромислові, кранові, вибухобезпечні, ліфтові, екскаваторні. Вони є частиною електроприводу побутових приладів, електроінструменту, металорізальних верстатів, ковальсько-пресованих машин, насосів, вентиляторів, компресорів, транспортних та підйомально-транспортних засобів (конвеєрів, ескалаторів, будівельних розвантажувальних і навантажувальних машин, кранів, підйомників і люльок, шахтних та ліфтових підйомальних установок тощо).

Потужність електродвигунів складає від десятих часток до десятків мегават. На рисунку наведені електродвигуни різної потужності у порівнянні з батарейкою «Крона». Електродвигуни мають великі переваги у порівнянні з іншими видами двигунів (паровими, внутрішнього згорання): вони екологічно чисті – при роботі не виділяють шкідливих газів, диму або пари; економічні – не потребують запасу палива і води, легко встановлюються у будь-якому доступному місці (на стіні, під підлогою електротранспорту, у корпусі електроінструментів тощо).



**Електричні генератори** – пристрої, призначені для перетворення енергії механічного руху в енергію електричного струму.

Джерелом механічної енергії електрогенератора можуть бути парова турбіна, потік води, вітер, двигун внутрішнього згорання або навіть сила людини.

Електрогенератори поділяють на генератори постійного і змінного струму.

Генератори постійного струму використовуються у різноманітних зарядних пристроях, в автомобілях.



**Бензинові та дизельні генератори змінного струму** застосовують для електрифікації будівель, забезпечення електроживленням будівельних майданчиків (при будь-яких дорожніх роботах, зварювальних роботах, алмазному різанні, бурінні свердловин, освітлюванні та обігріванні приміщень, ремонті приміщень) у районах, де немає магістрального енергопостачання; окремих виробничих систем, у промисловості, у сільському господарстві, на повітряних і водних суднах воєнного та цивільного флоту; на об'єктах, де обов'язковим є наявність безперебійного електроживлення (на аеродромах, медичних закладах, фінансових установах тощо).

**Вітро- та гідрогенератори** використовуються як альтернативні джерела енергії на гірській місцевості.

## 5. Сила Лоренца. Прискорювачі заряджених частинок. Магнітні пастки

Елемент струму – це провідник довжиною  $dl$  всередині якого за час  $dt$  через поперечний переріз переноситься  $dN$  електронів. За законом Ампера на даний елемент струму з боку магнітного поля індукцією  $B$  діє сила:

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

у скалярному вигляді:

$$dF_A = \frac{dq}{dt} dl \cdot B \cdot \sin \alpha = \frac{dN \cdot e \cdot dl \cdot B \cdot \sin \alpha}{dt} = dN \cdot e \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

де  $v$  – швидкість направленої руху електронів уздовж провідника.

Поділивши ліву і праву частини останнього рівняння на кількість носіїв струму  $dN$ , отримаємо числове значення сили, з якою магнітне поле індукцією  $B$  діє на окремий електрон:

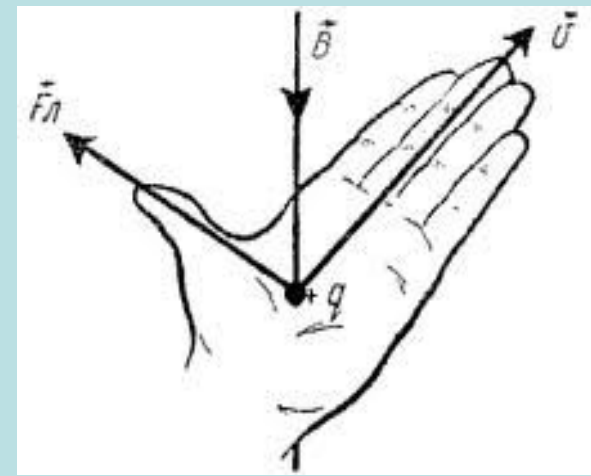
$$F = \frac{dF_A}{dN} = e \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Силу, з якою магнітне поле індукцією  $B$  діє на окрему частинку зарядом  $dq$ , що рухається зі швидкістю  $v$  називають **силою Лоренца**:

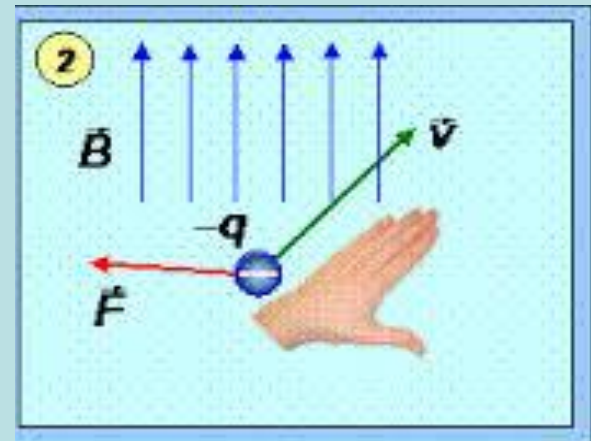
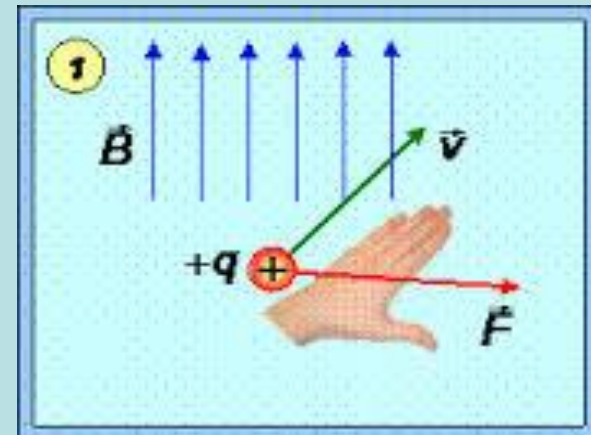
$$\vec{F}_L = q[\vec{v} \cdot \vec{B}]$$



напрямок сили Лоренца, визначається правилом **правило лівої руки**: якщо ліву руку розмістити так, щоб лінії індукції магнітного поля входили в долоню, а чотири випрямлені пальці збігалися з напрямком руху позитивно зарядженої частинки, то відхилений під прямим кутом великий палець вкаже напрям сили Лоренца.

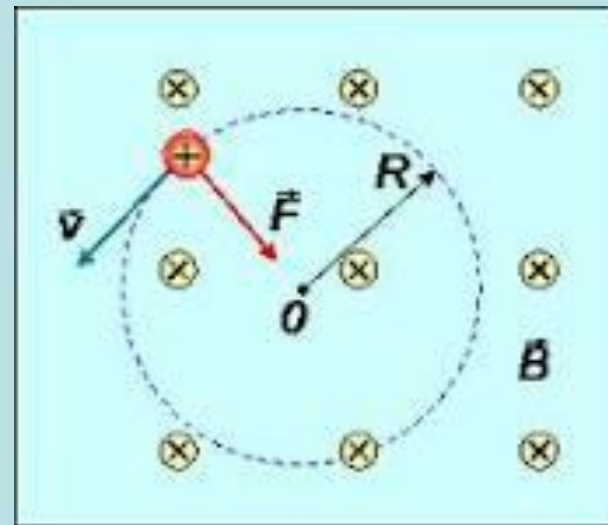
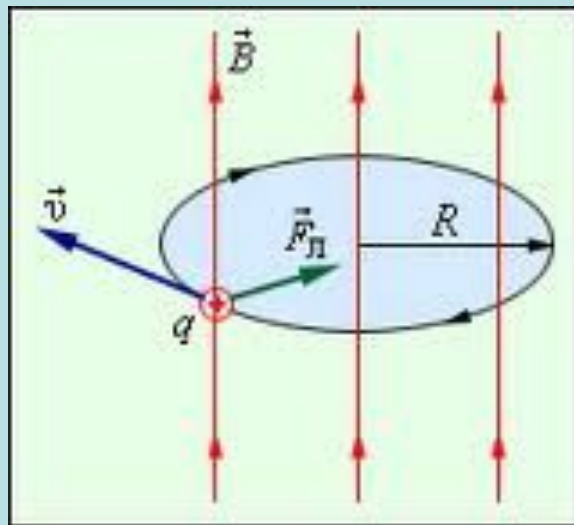


Для визначення напрямку дії сили Лоренца на негативно заряджену частинку, напрям сили, отриманий за правилом лівої руки змінюють на протилежний або використовують праву руку.



Оскільки сила Лоренца завжди направлена перпендикулярно до напрямку швидкості руху зарядженої частинки, то магнітне поле не виконує роботу по її переміщенню, а лише змінює напрям швидкості частинки.

Абсолютне значення швидкості зарядженої частинки і, відповідно, кінетична енергія при цьому не змінюється.



Якщо на рухому заряджену частинку окрім магнітного поля з індукцією  $\vec{B}$  діє і електричне поле з напруженістю  $\vec{E}$ , то результуюча сила, прикладена до частинки, дорівнює векторній сумі сил – сили, що діє з боку електричного поля, і сили Лоренца:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v} \cdot \vec{B}].$$

Цей вираз називають *формулою Лоренца*.

Поведінка зарядженої частинки в однорідному постійному магнітному полі залежить від орієнтації швидкості її руху відносно ліній вектора індукції:

1. Якщо  $\vec{v} \uparrow\uparrow \vec{B}$ , то частинка буде продовжувати рухатись прямолінійно й рівномірно, оскільки ніщо не буде впливати на її рух ( $\vec{F}_l = 0$ ).

2. Якщо  $\vec{v} \perp \vec{B}$ , то сила Лоренца направлена перпендикулярно до траєкторії руху частинки ( $\vec{F}_L \perp \vec{v}$ ) і виконуватиме роль доцентрової сили.

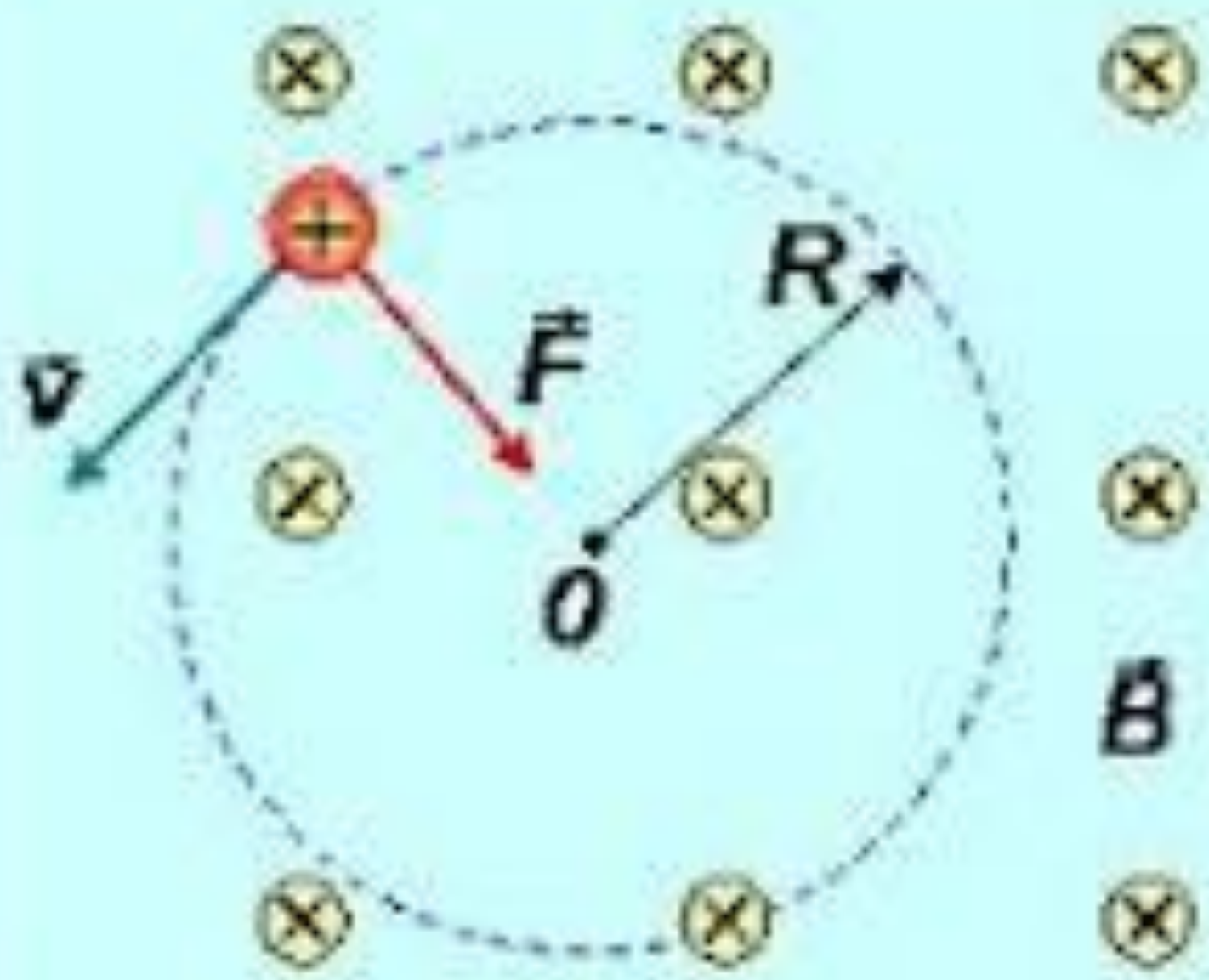
Тобто частинка буде рухатися по колу радіусом:

$$r = \frac{m v}{q B},$$

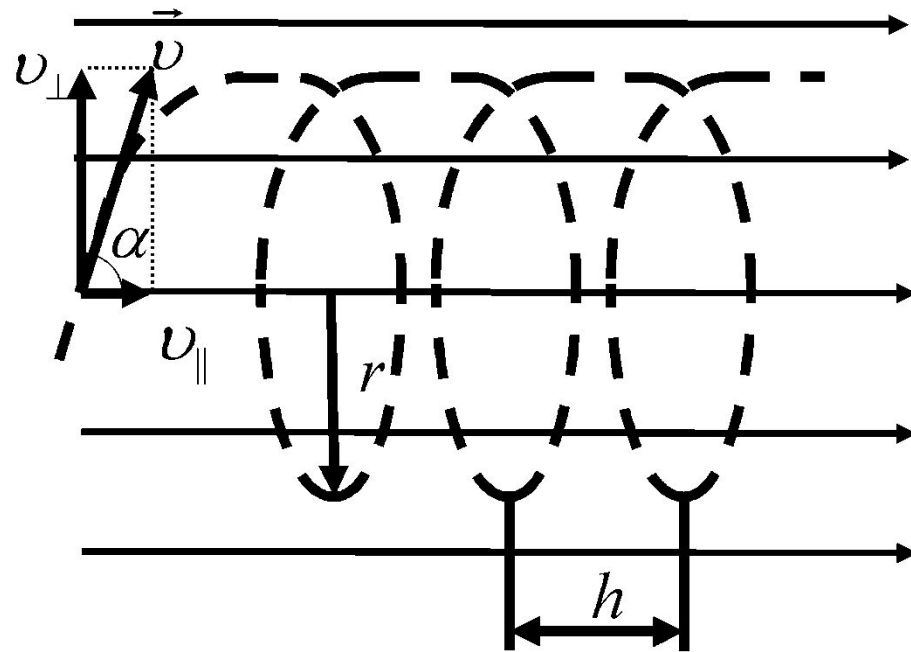
а період її обертання

$$T = \frac{2\pi m}{q B}$$

не залежить від швидкості руху частинки.



3. Якщо заряджена частинка влітає у магнітне поле під кутом  $\alpha$  до силових ліній, то вектор її швидкості  $\vec{v}$  можна розкласти на дві складові: паралельну до вектора  $\vec{B}$  ( $v_{\parallel}$ ) і перпендикулярну до нього ( $v_{\perp}$ ).



Частинка одночасно буде здійснювати поступальний рух вздовж ліній індукції магнітного поля зі сталою швидкістю  $v_{\parallel}$  і рух по колу зі швидкістю  $v_{\perp}$  описуючи гвинтову траєкторію:

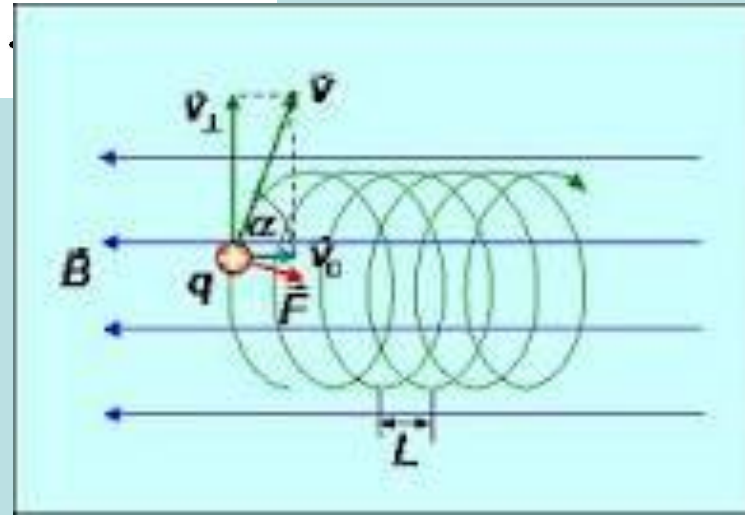
$$v_{\parallel} = v \cdot \cos \alpha, \quad v_{\perp} = v \cdot \sin \alpha.$$

Радіус витків гвинтової лінії

$$r = \frac{mv_{\perp}}{qB} = \frac{mv \cdot \sin \alpha}{qB},$$

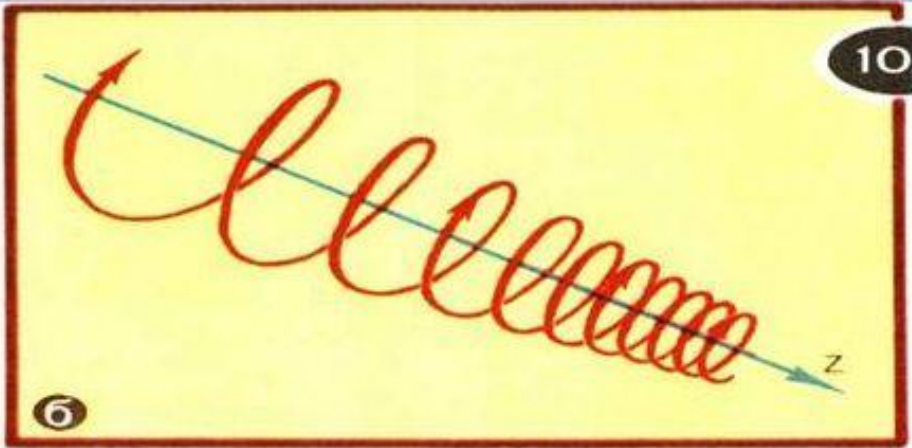
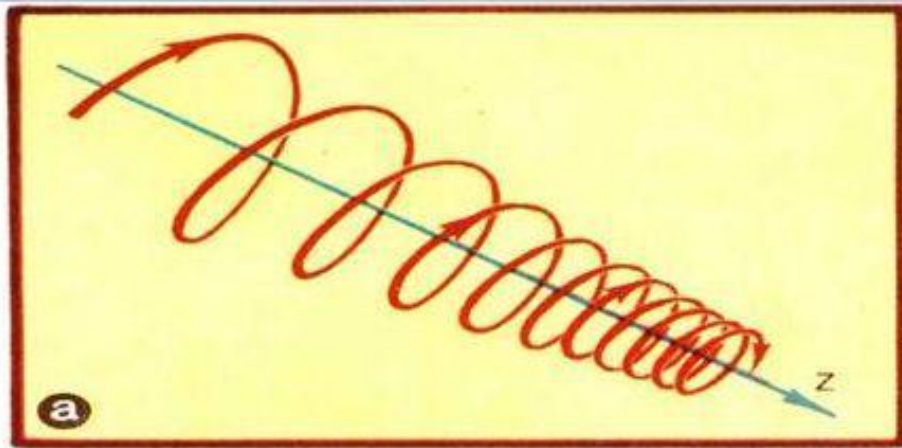
а крок гвинтової лінії руху зарядженої частинки

$$h = v_{\parallel} T = v \cdot \cos \alpha \frac{2\pi m}{qB} = \frac{2\pi m v \cdot \cos \alpha}{qB}.$$

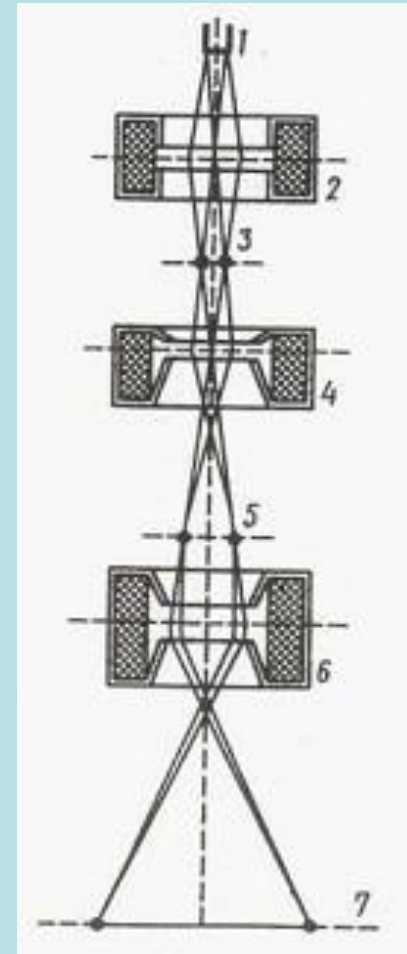
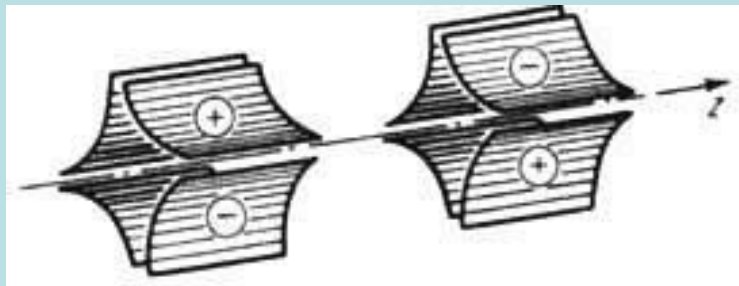




4. Складнішою є траєкторія руху зарядженої частинки у неоднорідному магнітному полі. Якщо, наприклад, заряджена частинка рухається вздовж напрямку зростання індукції магнітного поля, то з останніх формул видно, що  $r$  і  $h$  будуть пропорційно зменшуватись, тобто частинка рухатиметься по спіралі, що скручується. На цьому явищі побудований принцип магнітного фокусування пучків заряджених частинок.



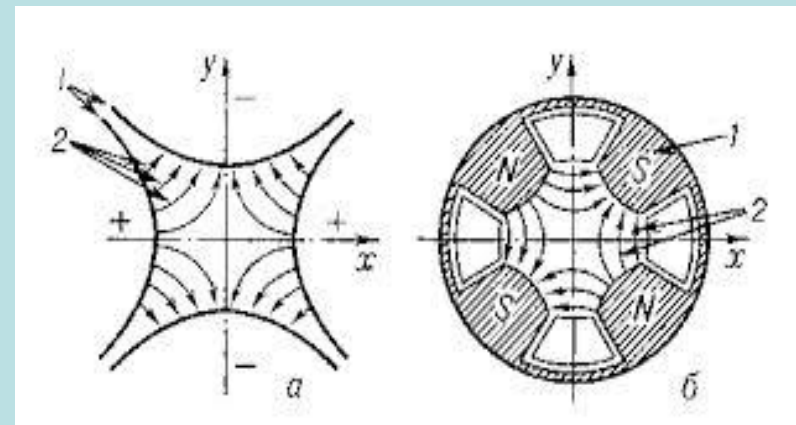
Область фізики і техніки, в якій вивчаються питання формування, фокусування і відхилення пучків заряджених частинок, отримання з їх допомогою зображень під дією електричних і магнітних полів у вакуумі, називають *електронною оптикою*.



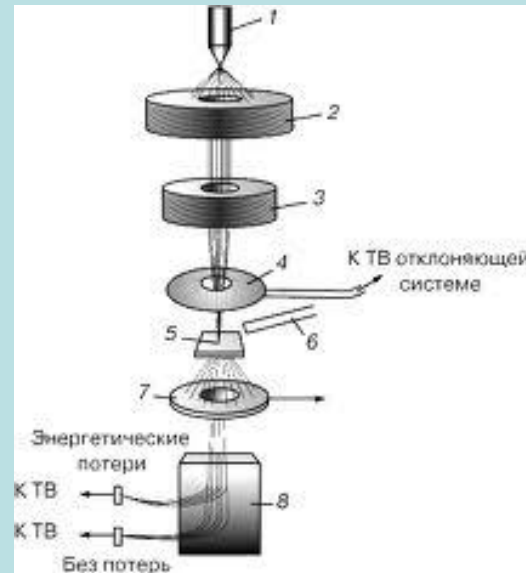
До електронно-оптичних елементів і приладів відносять:

- *магнітні і електронні лінзи*, які призначені для створення магнітних та електричних полів з певною симетрією і керування через них потоками заряджених частинок. Магнітні та електронні лінзи застосовуються для одержання зображень за допомогою електронних та іонних пучків, формування, фокусування і відхилення яких відбувається за допомогою електронних і магнітних полів.

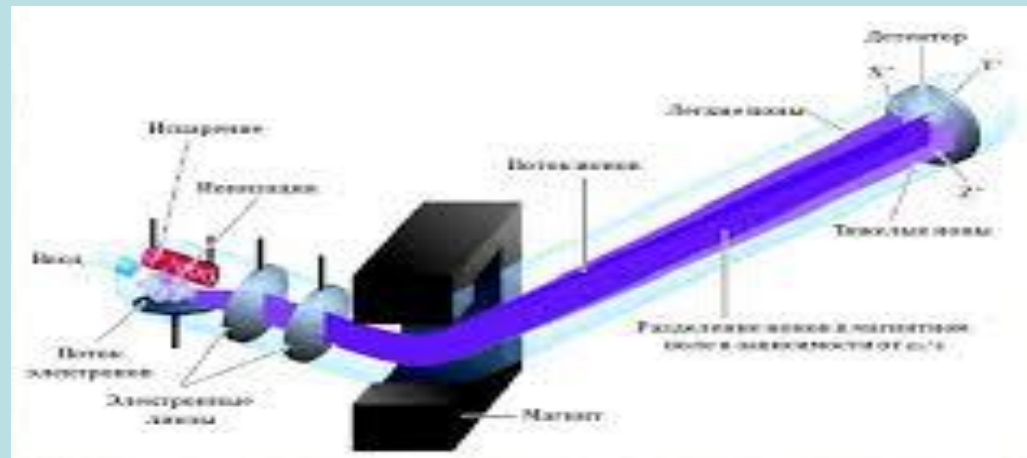
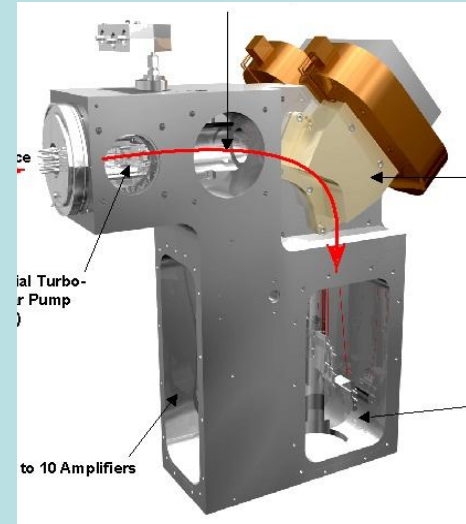
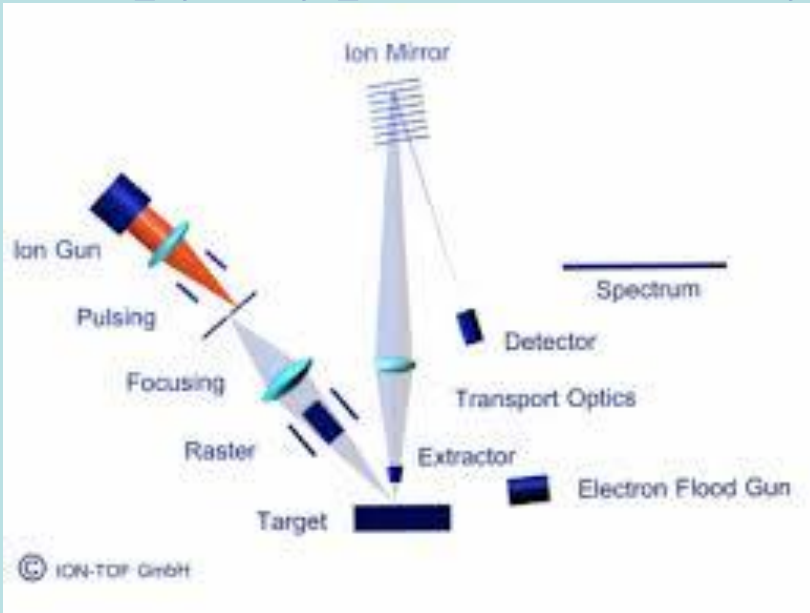
Застосовуються в електронно-променевих трубках, електронних мікроскопах, електронних прискорювачах, аналоговому телебаченні та радіолокації;



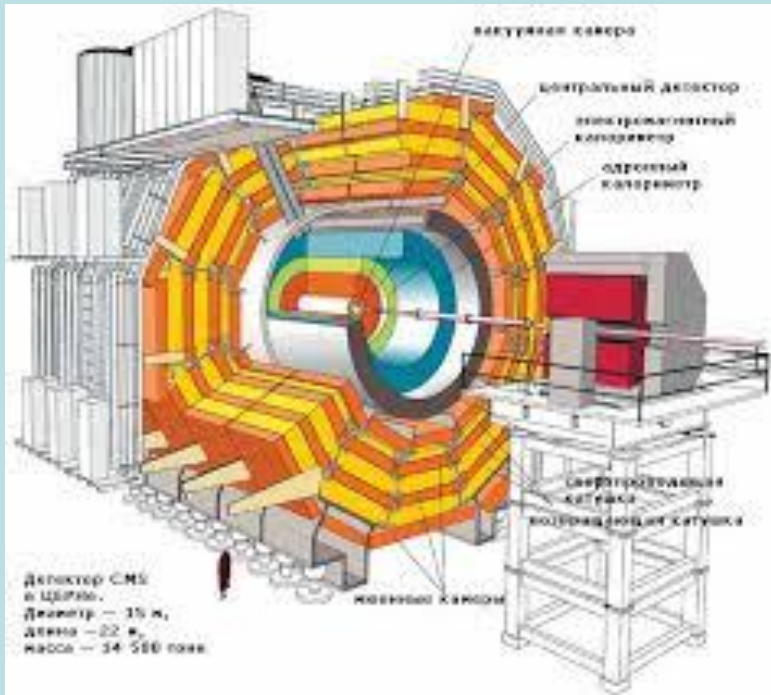
- *електронний мікроскоп*, призначений для спостереження та фотографування збільшених до  $10^6$  разів зображень об'єктів, в яких замість світлових променів використовують електронні пучки, прискоренні в умовах глибокого вакууму до енергії 30 – 100 кеВ. Дає можливість отримувати зображення окремих молекул і важких атомів, досліджувати мікрорельєф поверхонь, розподіл хімічного складу речовини на поверхні об'єкта, здійснювати структурний аналіз;



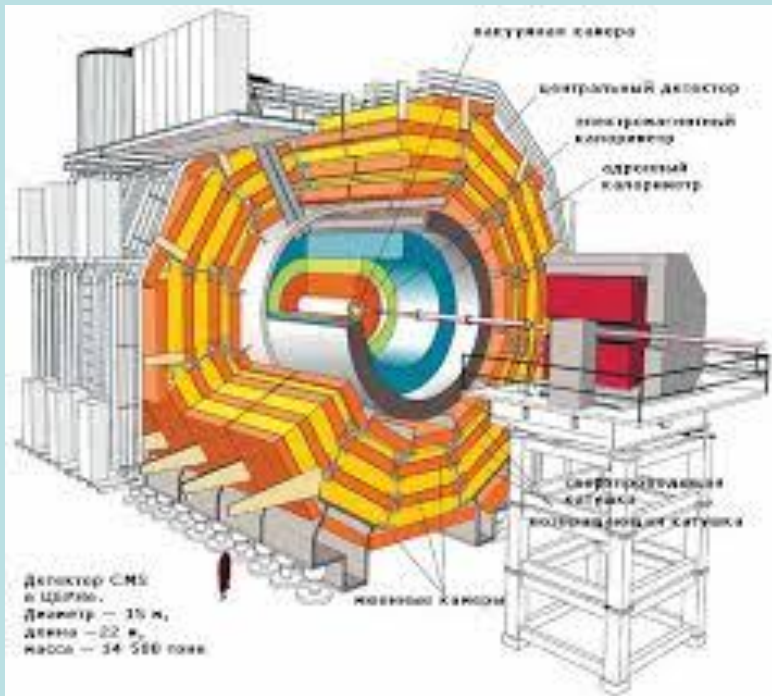
- *мас-спектрометри* – прилади, призначені для розділення іонізованих молекул і атомів за їх масами. Використовуються в ядерній енергетиці, геології, геохімії для елементарного і структурного молекулярного аналізу тощо;



- *прискорювачі заряджених частинок* – установки, призначені для одержання заряджених частинок (електронів, протонів, атомних ядер, іонів тощо) великих енергій за допомогою прискорень їх електричними і магнітними полями. За типом заряджених частинок, які підлягають прискоренню, розрізняють протонні, електронні та іонні прискорювачі.



За формою траєкторій, уздовж яких розганяють частинки, розрізняють лінійні і циклічні прискорювачі (синхрофазотрон, синхротрон, фазотрон, циклотрон, мікротрон, бетатрон). Використовуються у наукових дослідженнях з атомної та ядерної фізики елементарних частинок, у хімії, біофізиці, геофізиці, а також у ряді прикладних галузей (дефектоскопії, променевої терапії...).





# Лекція № 12.

## Магнітне поле. Рух заряджених частинок в магнітному полі

1. Магнітне поле. Вектор магнітної індукції
2. Закон Ампера
3. Контур зі струмом в магнітному полі  
Магнітний момент
4. Принцип роботи електродвигунів
5. Сила Лоренца. Прискорювачі заряджених частинок. Магнітні пастки