

# Магнітне поле у вакуумі

Лекції з електрики та магнетизму

Пономаренко С. М.

# Зміст лекції

1. Означення
2. Характеристика магнітного поля
3. Дія магнітного поля на заряджені частинки та струми
4. Закон Біо-Савара-Лапласа
5. Вектор-потенціал магнітного поля
6. Теореми магнітостатики
7. Магнітний момент
8. Потенціальна енергія диполя та сила, що діє на диполь в магнітному полі

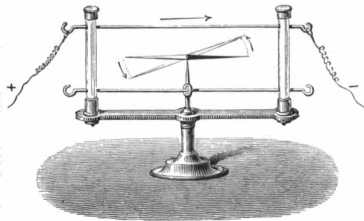
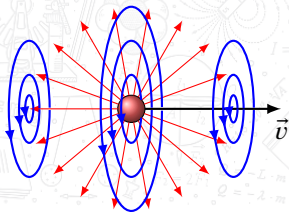
# Означення



**Дослід Ерстеда**, проведений 1820 року Ерстедом — є першим експериментальним доказом впливу електричного струму на магніт (магнітну стрілку).

**Магнітним полем** називається силове поле, що **діє на рухомі заряди** і як наслідок — на електричні струми і на тіла, які мають магнітний момент.

Магнітне поле створюється рухомими зарядами (електричним струмом). Незмінні в часі струми створюють постійні магнітні поля.



## Характеристика магнітного поля

Магнітних зарядів (магнітних монополів) у в природі немає (експериментальний факт). Характеристику магнітного поля, аналогічно до  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$  ввести не можна. Однак в природі є магнітні диполі (магнітна стрілка, коловий виток зі струмом тощо), тому використовуючи аналогію з моментом сил, що діє на електричний диполь в електричному полі  $\vec{M} = [\vec{p}_e \times \vec{E}]$ , можна ввести характеристику магнітного поля:

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}], \quad M_{\max} = p_m B$$

Характеристику магнітного поля, вектор  $\vec{B}$ , по історичним причинам називають не **напруженістю**, а **індукцією** магнітного поля.

Величина вектора індукції чисельно дорівнює максимальному обертовому моменту, що діє на одиничний магнітний момент вміщений у магнітне поле:

$$B = \frac{M_{\max}}{p_m}.$$

# Характеристика магнітного поля

Магнітних зарядів (магнітних монополів) у в природі немає (експериментальний факт). Характеристику магнітного поля, аналогічно до  $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$  ввести не можна. Однак в природі є магнітні диполі (магнітна стрілка, коловий виток зі струмом тощо), тому використовуючи аналогію з моментом сил, що діє на електричний диполь в електричному полі  $\vec{M} = [\vec{p}_e \times \vec{E}]$ , можна ввести характеристику магнітного поля:

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}], \quad M_{\max} = p_m B$$

Характеристику магнітного поля, вектор  $\vec{B}$ , по історичним причинам називають не **напруженістю**, а **індукцією** магнітного поля.

В гауссовій системі одиниць величину магнітного поля називають Гауссом (Гс). С системі СІ Теслою (Тл):

$$1 \text{ Тл} = 10^4 \text{ Гс.}$$

# Сила Лоренца та сила Ампера

Магнітною складовою сили Лоренца називається сила, що діє на рухомий заряд  $q$  з боку магнітного поля:

$$\vec{F} = q \left[ \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{B} \right].$$

Повна сила (власне і є сила Лоренца), що діє на заряд, включає також силу з боку електричного поля:

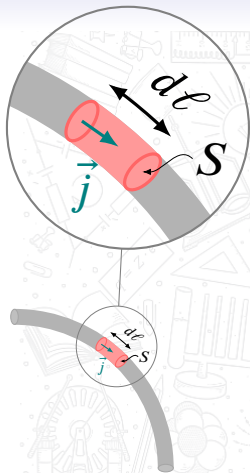
$$\vec{F} = q \left( \vec{E} + \left[ \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{B} \right] \right).$$

**Силою Ампера** називають силу, що діє на струми з боку магнітного поля:

$$d\vec{F} = \frac{1}{c} \left[ \vec{j} dV \times \vec{B} \right],$$

де  $\vec{j} dV$  — називається об'ємним **елементом струму**.

## Елемент струму



Якщо в задачі не цікавляться внутрішньою будовою провідника, та розподілом струму в його товщі, то можна ввести **лінійний елемент струму**.

Нехай струм тече провідником із площею поперечного перерізу  $S$ . Уведемо вектор ділянки провідника завдовжки  $d\vec{\ell}$  за формулою  $d\vec{\ell} = \vec{n}\ell$ , де  $\vec{n}$  — одиничний вектор уздовж осі провідника. Тоді  $\vec{j} = j\vec{n}$ , а  $I = jS$  і вираз для об'ємного елемента струму можна переписати у вигляді:

$$\vec{j}dV = j\vec{n}Sd\ell = Id\vec{\ell}.$$

Для лінійного елемента струму сила Ампера:

$$d\vec{F} = \frac{1}{c} \left[ Id\vec{\ell} \times \vec{B} \right].$$

# Зв'язок сили Лоренца та сили Ампера

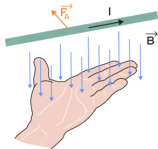
Сила Лоренца, що діє на заряд  $dq$ , дорівнює

$$d\vec{F} = \left[ \frac{dq\vec{v}}{c} \times \vec{B} \right].$$

Оскільки  $dq\vec{v} = \rho\vec{v}dV = \vec{j}dV$ , то одразу отримуємо силу Ампера, що діє на об'ємний елемент струму:

$$d\vec{F} = \frac{1}{c} \left[ \vec{j}dV \times \vec{B} \right].$$

Для рухомого заряду  $q$ , що рухається з швидкістю  $\vec{v}$  — елементом струму струму є  $q\vec{v}$ .





# Робота магнітного поля

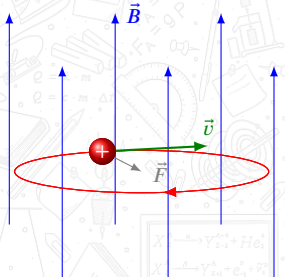
Робота сили Лоренца:

$$\delta A = \vec{F} \cdot d\vec{r} = \vec{F} \cdot \vec{v} dt = \left[ \frac{q\vec{v}}{c} \times \vec{B} \right] \cdot \vec{v} dt.$$

$$\vec{A} \cdot [\vec{B} \times \vec{C}] = \vec{C} \cdot [\vec{A} \times \vec{B}].$$

$$\vec{v} \cdot [\vec{v} \times \vec{B}] = \vec{B} \cdot [\vec{v} \times \vec{v}] = 0.$$

$$\delta A = 0.$$

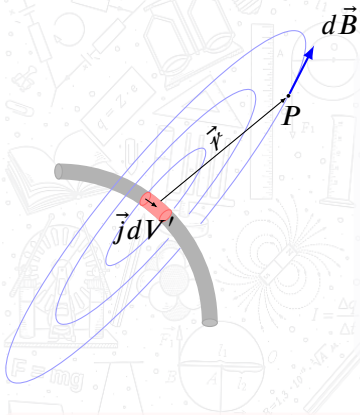


За теоремою про зміну кінетичної енергії  $A = \Delta \left( \frac{mv^2}{2} \right) = 0$ ,  
кінетична енергія частинки не змінюється.

**Магнітне поле не виконує роботи над частинкою!**

# Закон Біо-Савара-Лапласа

Закон Біо-Савара встановлено експериментально (1820 р.) шляхом аналізу експериментальних даних і **визначає магнітне поле, що створюється елементом струму.**

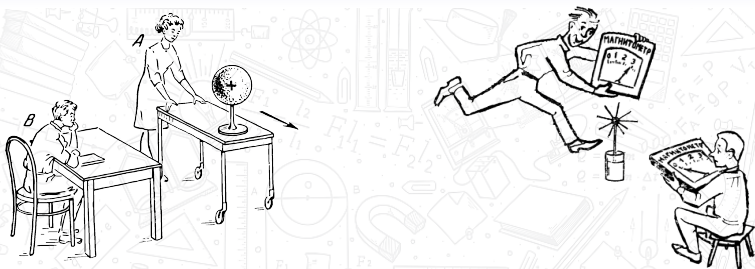


Якщо радіус-вектор точки спостереження відносно розглянутого елемента струму є  $\vec{r}$ , то поле, створюване елементом струму  $\vec{j}dV'$ , дорівнює

$$d\vec{B} = \frac{1}{c} \frac{[\vec{j}dV' \times \vec{r}]}{r^3}.$$

Магнітне поле підкоряється принципу суперпозиції:  $\vec{B} = \int d\vec{B}$ .

# Відносність величини магнітного поля



Магнітного поля навколо заряду відносно спостерігача *A* немає. Відносно спостерігача *B* буде магнітне поле:

$$\vec{B} = \frac{1}{c} \frac{q\vec{v} \times \vec{r}}{r^3} = \frac{\vec{v}}{c} \times \frac{q\vec{r}}{r^3} = \frac{\vec{v}}{c} \times \vec{E}.$$

Електричне і магнітне поле — є прояв єдиного цілого, яке можна назвати електромагнітним полем.

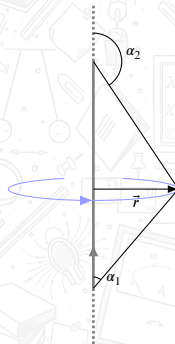
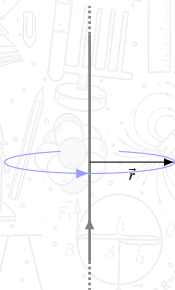
# Приклади застосування закону Біо-Савара-Лапласа

## Задача 1

Визначити магнітне поле на відстані  $r$  від нескінченно довгого провідника зі струмом  $I$ .

## Задача 2

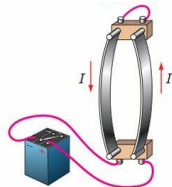
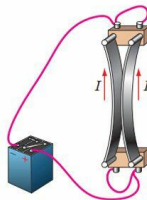
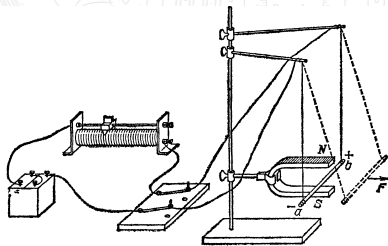
Визначте магнітне поле в точці  $P$  на відстані  $r$  від короткого провідника зі струмом. Положення точки  $P$  визначається кутами  $\alpha_1$  та  $\alpha_2$ .



# Взаємодія струмі

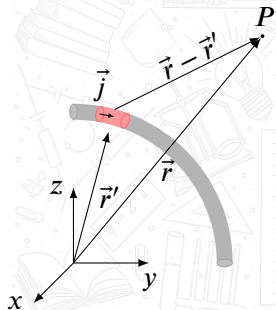
## Досліди Ампера

У 1820 р. А. Ампером було встановлено закон, що визначає силу, яка діє на елемент струму в магнітному полі. Оскільки створити відокремлений елемент не можна, то Ампер вивчав вплив паралельних дротів один на одного та поведінку дротяних замкнутих контурів різної форми в магнітному полі.



# Вектор-потенціал магнітного поля

## Введення поняття



Закон Біо-Савара-Лапласа

$$\vec{B}(\vec{r}) = \iiint_{V'} \frac{1}{c} \frac{\vec{j}(\vec{r}') dV' \times (\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3}$$

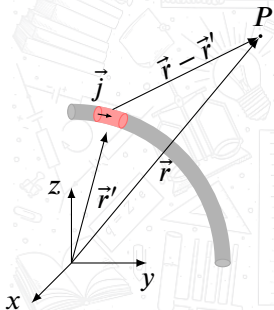
Використаємо тотожність:  $\frac{(\vec{r} - \vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} = -\vec{\nabla}_{\vec{r}} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$ , у якому операція  $\vec{\nabla}$  діє на координати  $\vec{r}$ , а також рівність  $\text{rot}(\varphi \vec{C}) = \varphi \text{rot } \vec{C} + [\vec{\nabla} \varphi \times \vec{C}]$ .

$$\vec{B}(\vec{r}) = \int_{V'} \frac{1}{c} \vec{\nabla} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}'|} \times \vec{j}(\vec{r}') dV' = \text{rot} \frac{1}{c} \int_{V'} \frac{\vec{j} dV'}{|\vec{r} - \vec{r}'|} = \text{rot } \vec{A}(\vec{r}),$$

$$\vec{B}(\vec{r}) = \text{rot } \vec{A}(\vec{r}).$$

# Вектор-потенціал магнітного поля

## Калібруванні вектор-потенціалу



$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A},$$

Введений тут вектор  $\vec{A}$  називається  
**вектор-потенціалом**:

$$\vec{A}(\vec{r}) = \frac{1}{c} \int_{V'} \frac{\vec{j}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|} dV', \quad \vec{A}(\vec{r}) = \frac{1}{c} \sum_i \frac{q_i \vec{v}_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|}$$

**Вектор-потенціал вводиться при цьому неоднозначно.** Векторні потенціали  $\vec{A}$  і  $\vec{A}' = \vec{A} + \vec{\nabla} f(\vec{r})$  призводять до одного й того ж магнітного поля  $\vec{B}$ . Цією обставиною можна скористатися для того, щоб накласти на  $\vec{A}$  яке-небудь обмеження, Зручно накласти на  $\vec{A}$  умову

$$\text{div } \vec{A} = 0,$$

**кулонівське калібрування.**

# Теорема Гауса для магнітного поля

Маючи на увазі тотожність  $\operatorname{div} \operatorname{rot} \vec{A} = 0$ , з формули  $\vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A}$  отримуємо теорему Гауса в диференціальній формі:

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

Застосовуючи теорему Остроградського-Гауса отримуємо теорему Гауса в інтегральній формі:

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0.$$

Теорема Гауса стверджує, що немає вільних (незв'язаних) магнітних зарядів, на яких могли б починатися або закінчуватися силові лінії індукції магнітного поля.



# Теорема про циркуляцію магнітного поля у вакуумі

Знайдемо ротор вектора  $\vec{B}$ :

$$\text{rot } \vec{B} = \text{rot rot } \vec{A} = \vec{\nabla} \times [\vec{\nabla} \times \vec{A}] = \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A} \stackrel{\vec{\nabla} \cdot \vec{A}=0}{=} -\nabla^2 \vec{A}.$$

Аналогія з рівнянням Пуассона з електростатики

Рівняння Пуассона та його розв'язок:

$$\nabla^2 \varphi = -4\pi\rho, \quad \varphi = \iiint_{V'} \frac{\rho dV'}{|\vec{r} - \vec{r}'|}, \quad \nabla^2 \vec{A} = -\frac{4\pi}{c} \vec{j}, \quad \vec{A} = \frac{1}{c} \iiint_{V'} \frac{\vec{j} dV'}{|\vec{r} - \vec{r}'|}$$

Однакові рівняння мають однакові розв'язки!

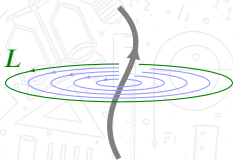
Теорема про циркуляцію для вектора  $\vec{B}$ :

$$\text{rot } \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}.$$

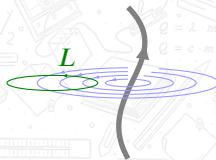
$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{r} = \frac{4\pi}{c} \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}.$$

# Приклади на теорему про циркуляцію №1

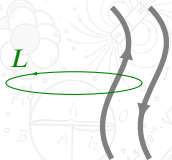
$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{r} = \frac{4\pi}{c} \sum_i I_i$$



$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{r} = \frac{4\pi}{c} I$$



$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{r} = 0$$



$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{r} = \frac{4\pi}{c} I$$

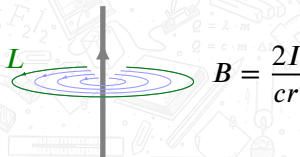


$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{r} = \frac{4\pi}{c} (I + (-I)) = 0$$

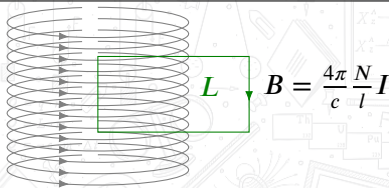
# Приклади на теорему про циркуляцію №1

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{r} = \frac{4\pi}{c} \sum_i I_i$$

Поле  
нескінченного  
провідника



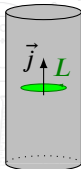
Поле  
нескінченного  
соленоїда



# Приклади на теорему про циркуляцію №2

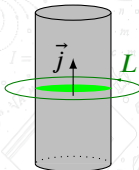
$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{r} = \frac{4\pi}{c} \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

Поле всередині  
нескінченного  
циліндричного  
провідника



$$B = \frac{2\pi}{c} jr$$

Поле зовні  
нескінченного  
циліндричного  
провідника



$$B = \frac{2}{cr} j\pi R^2 = \frac{2I}{cr}$$

# Порівняння законів електро- та магнітостатики у вакуумі

## Диференціальні теореми

Теорема	Електростатика	Зміст	Магнітостатика	Зміст
Зв'язок потенціалу та поля	$\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi$	Скалярний потенціал, поле потенціальне	$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$	Вектор-потенціал. Поле вихрове.
Теорема Гаусса	$\operatorname{div} \vec{E} = 4\pi\rho$	Джерелами поля є електричні заряди	$\operatorname{div} \vec{B} = 0$	Джерел у магнітного поля немає
Теорема про циркуляцію	$\operatorname{rot} \vec{E} = 0$	Електростатичне поле є потенціальним	$\operatorname{rot} \vec{B} = \frac{4\pi}{c} \vec{j}$	Магнітне поле є вихровим. Вихором є струм.

## Інтегральні теореми

Теорема	Електростатика	Магнітостатика
Теорема Гаусса	$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = 4\pi \iiint_V \rho dV$	$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$
Теорема про циркуляцію	$\oint_L \vec{E} \cdot d\vec{r} = 0$	$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{r} = \frac{4\pi}{c} \iint_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$

# Магнітний момент

Моменту імпульсу  $\vec{L} = \vec{r} \times (m\vec{v})$  для руху мас є аналогом магнітного моменту для руху зарядів!

**Момент імпульсу**

$$\vec{L} = \iiint_V \vec{r} \times \rho \vec{v} dV$$

**Магнітний момент**

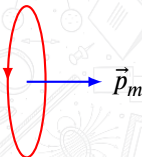
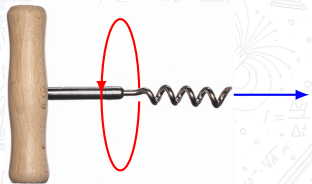
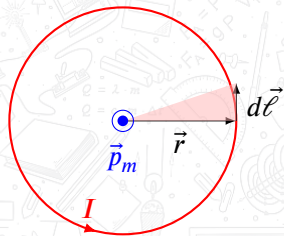
$$\vec{p}_m = \frac{1}{2c} \iiint_V \vec{r} \times \rho \vec{v} dV$$

Оскільки густина струму  $\vec{j} = \rho \vec{v}$ , а  $\vec{j}dV$  — є елементом струму, то можна для різних випадків записати різні варіації формули магнітного моменту:

Випадок	Магнітний момент
Об'ємні струми	$\vec{p}_m = \frac{1}{2c} \iiint_V \vec{r} \times \vec{j} dV$
Лінійні замкнені постійні струми	$\vec{p}_m = \frac{I}{2c} \oint_L \vec{r} \times d\vec{\ell}$

# Магнітний момент колового витка

$$\vec{p}_m = \frac{I}{2c} \oint_L \vec{r} \times d\vec{\ell} = \frac{1}{c} I \pi R^2 \vec{n} = \frac{1}{c} I S \vec{n}$$

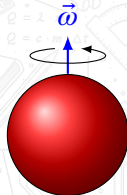


# Магнітні та механічні моменти різних тіл

Відношення магнітного моменту зарядженого тіла, до його механічного моменту називається гіромагнітним відношенням:

$$\vec{p}_m = \gamma \vec{L}.$$

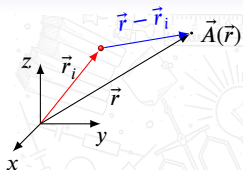
Для любых **класичних** тіл  $\gamma = \frac{Q}{2Mc}$



Тіло	Момент імпульсу	Магнітний момент	Гіромагнітне відношення $\gamma$
Куля	$\vec{L} = \frac{2}{5}mR^2\vec{\omega}$	$\vec{p}_m = \frac{1}{5c}QR^2\vec{\omega}$	$\frac{Q}{2Mc}$
Електрон	$L = \frac{1}{2}\hbar$	$p_m = \frac{e}{2mc}\hbar$	$-\frac{e}{m_e c}$



# Вектор-потенціал на далеких відстанях



Магнітний момент системи тіл:

$$\vec{A} = \frac{1}{c} \sum_i \frac{q_i \vec{v}_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|}$$

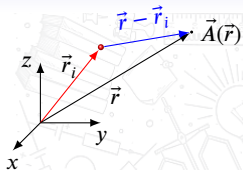
На далеких відстанях  $r_i \ll r$  наближено  $\frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_i|} \approx \frac{1}{r} \left( 1 + \frac{\vec{r} \cdot \vec{r}_i}{r^2} \right)$ .

Для стаціонарних рухів, які відбуваються в малих областях, можна зробити усереднення вектор-потенціалу, при цьому  $\frac{d}{dt} \dots = 0$ .

$$\vec{A} = \frac{1}{cr^3} \sum_i q_i v_i (\vec{r} \cdot \vec{r}_i)$$

$$v_i (\vec{r} \cdot \vec{r}_i) = \frac{1}{2} [v_i (\vec{r} \cdot \vec{r}_i) - \vec{r}_i (\vec{r} \cdot \vec{v}_i)] + \frac{1}{2} [v_i (\vec{r} \cdot \vec{r}_i) + \vec{r}_i (\vec{r} \cdot \vec{v}_i)] = \frac{1}{2} \vec{r} \times \vec{v}_i \times \vec{r}_i + \frac{1}{2} \frac{d}{dt} (\vec{r}_i (\vec{r} \cdot \vec{r}_i)) .$$

# Вектор-потенціал на далеких відстанях



Магнітний момент системи тіл:

$$\vec{A} = \frac{1}{c} \sum_i \frac{q_i \vec{v}_i}{|\vec{r} - \vec{r}_i|}$$

$$\vec{A} = \frac{1}{r^3} \left( \frac{1}{2c} \sum_i \vec{r}_i \times (q_i \vec{v}_i) \right) \times \vec{r} = \frac{\vec{p}_m \times \vec{r}}{r^3}.$$

Магнітне поле знаходиться за формулою  $\vec{B} = \text{rot } \vec{A}$ :

$$\text{rot} [\vec{A} \times \vec{B}] = (\vec{B} \cdot \vec{\nabla}) \vec{A} - (\vec{A} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B} + \vec{A} \text{div } \vec{B} - \vec{B} \text{div } \vec{A}$$

$$\vec{B} = \text{rot} \left( \vec{p}_m \times \frac{\vec{r}}{r^3} \right) = -(\vec{p}_m \cdot \vec{\nabla}) \frac{\vec{r}}{r^3} = \frac{3(\vec{p}_m \cdot \vec{r}) \vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{p}_m}{r^3}.$$

$$\vec{B} = \frac{3(\vec{p}_m \cdot \vec{r}) \vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{p}_m}{r^3}.$$

# Детальные выводы

$$\operatorname{rot} [\vec{A} \times \vec{B}] = (\vec{B} \cdot \vec{\nabla}) \vec{A} - (\vec{A} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B} + \vec{A} \operatorname{div} \vec{B} - \vec{B} \operatorname{div} \vec{A}$$

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \left( \vec{p}_m \times \frac{\vec{r}}{r^3} \right) = -(\vec{p}_m \cdot \vec{\nabla}) \frac{\vec{r}}{r^3} = \frac{3(\vec{p}_m \cdot \vec{r}) \vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{p}_m}{r^3}$$

$$\vec{A} = \vec{p}_m$$

$$\vec{B} = \frac{\vec{r}}{r^3}$$

$\vec{p}_m = \text{const}$

$$\operatorname{div} \vec{B} = \operatorname{div} \frac{q \vec{r}}{r^3} = 0 \quad (\vec{r} \neq 0)$$

$$\vec{B} = \operatorname{rot} \left( \vec{p}_m \times \frac{\vec{r}}{r^3} \right) = \cancel{\left( \frac{\vec{r}}{r^3} \cdot \vec{\nabla} \right)} \vec{p}_m - (\vec{p}_m \cdot \vec{\nabla}) \frac{\vec{r}}{r^3} + \vec{p}_m \cancel{\operatorname{div} \frac{\vec{r}}{r^3}} - \frac{\vec{r}}{r^3} \cancel{\operatorname{div} \vec{p}_m}$$

$$\vec{B} = -(\vec{p}_m \cdot \vec{\nabla}) \frac{\vec{r}}{r^3} = -\frac{(\vec{p}_m \cdot \vec{\nabla}) \vec{r}}{r^3} - \vec{r} \frac{(\vec{p}_m \cdot \vec{\nabla})}{r^3}$$

$$\left( p_x \frac{\partial}{\partial x} + p_y \frac{\partial}{\partial y} + p_z \frac{\partial}{\partial z} \right) (x\vec{e}_1 + y\vec{e}_2 + z\vec{e}_3) = p_x \vec{e}_1 + p_y \vec{e}_2 + p_z \vec{e}_3 = \vec{p}_m$$

$$\left( p_x \frac{\partial}{\partial x} + p_y \frac{\partial}{\partial y} + p_z \frac{\partial}{\partial z} \right) \frac{1}{(x^2 + y^2 + z^2)^{3/2}} = -\frac{3}{r^5} (p_x x + p_y y + p_z z) = -\frac{3(\vec{p}_m \cdot \vec{r})}{r^5}$$

$$\vec{B} = \frac{3(\vec{p}_m \cdot \vec{r}) \vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{p}_m}{r^3}$$

# Магнітний диполь

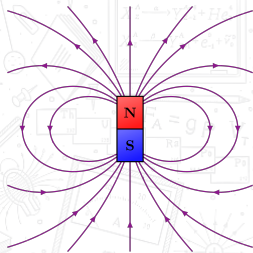
## Полюса магніту

Отримана формула збігається за виглядом із формулою для електричного поля точкового електричного диполя.

$$\vec{B} = \frac{3(\vec{p}_m \cdot \vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{p}_m}{r^3}.$$

Це означає, що точковий магнітний момент можна розглядати формально як точковий диполь, складений з *ефективних магнітних зарядів*:

*N* (північного) та *S* (південного).



# Магнітний диполь

## Порівняння електричного та магнітного диполів

	Електричний диполь	Магнітний диполь
Потенціал	$\varphi = \frac{\vec{p}_e \cdot \vec{r}}{r^3}$	$\vec{A} = \frac{\vec{p}_m \times \vec{r}}{r^3}$
Поле	$\vec{E} = \frac{3(\vec{p}_e \cdot \vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{p}_e}{r^3}$	$\vec{B} = \frac{3(\vec{p}_m \cdot \vec{r})\vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{p}_m}{r^3}$

Позначаючи величину ефективного магнітного заряду  $q_m$  і плече магнітного диполя  $\vec{\ell}$ , дипольний момент ефективного магнітного диполя можна записати як  $\vec{p}_m = q_m \vec{\ell}$ . Якщо не розглядати поле усередині такого магнітного диполя, то воно усюди буде таким самим, як і поле системи струмів із магнітним моментом  $\vec{p}_m$ .



# Потенціальна енергія диполя в магнітному полі

Розглянемо виток площею  $S$ , у якому циркулює **постійний** струм  $I$ . Магнітний момент цього витка  $\vec{p}_m = \frac{1}{c} I S \vec{n}$ .

Якщо виток перебуває в магнітному полі, то виникає момент сил, які прагнуть орієнтувати його магнітний момент за напрямком поля:

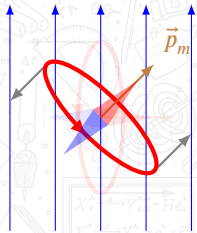
$$\vec{M} = [\vec{p}_m \times \vec{B}]$$

З визначення потенціальної енергії знаходимо

$$U = -\vec{p}_m \cdot \vec{B}$$

Той факт, що потенціальна енергія досягає мінімуму  $\vec{p}_m \uparrow \vec{B}$ , означає, що момент прагне орієнтуватися за напрямком поля.

Якщо магнітний диполь представляє собою виток, через який тече постійний струм, і магнітне поле орієнтує його, то потенційна енергія витка змінюється. Однак, оскільки магнітне поле не є потенційним і не може виконувати роботу, постає питання: за рахунок чого відбувається зміна енергії витка? **Відповідь**



## Принцип роботи електричного двигуна

# Сила, що діє на диполь в магнітному полі

У зовнішньому магнітному полі потенціальна енергія магнітного моменту дорівнює  $U = -\vec{p}_m \cdot \vec{B}$ , а сила, що діє на момент:

$$\vec{F} = -\vec{\nabla}U = \vec{\nabla}(\vec{p}_m \cdot \vec{B}).$$

У зовнішньому магнітному полі потенціальна енергія магнітного моменту дорівнює  $U = -\vec{p}_m \cdot \vec{B}$ , а сила, що діє на момент:

$$\vec{F} = -\vec{\nabla}U = \vec{\nabla}(\vec{p}_m \cdot \vec{B}).$$

$$\vec{\nabla}(\vec{A} \cdot \vec{B}) = [\vec{B} \times \text{rot } \vec{A}] + [\vec{A} \times \text{rot } \vec{B}] + (\vec{B} \cdot \vec{\nabla}) \vec{A} + (\vec{A} \cdot \vec{\nabla}) \vec{B}.$$

Якщо в середовищі, в якому перебуває момент, відсутні струми провідності, то  $\text{rot } \vec{B} = 0$ . Тоді має місце тотожність:

$$\vec{F} = (\vec{p}_m \cdot \vec{\nabla}) \vec{B}.$$

