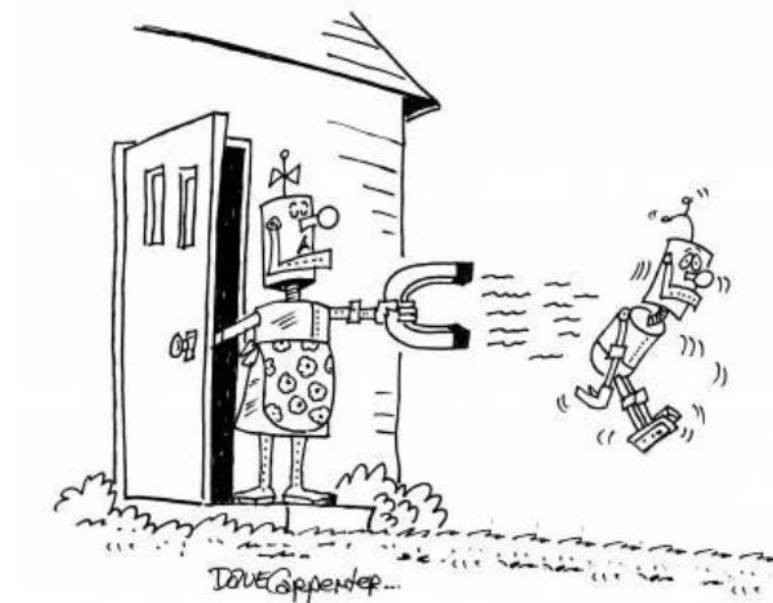


Лекція 11

# Магнітне поле



" GET BACK IN HERE AND FINISH YOUR LUNCH ."

Магніти були відомі з давніх часів, наприклад, їх згадував ще Фалес, проте вперше дослідження магнітного поля були проведені в 1269 році французьким вченим Петром Перегріном (справжнє ім'я П'єр Пелерен де Марікур). Він зробив першу мапу магнітного поля, під час чого відкрив, що силові лінії сходяться до двох точок на магніті, які він назвав полюсами, і дав їм сучасні назви – північний і південний. Також він відмітив принцип, згідно якому, при розламуванні магніту на дві частини, його полюси не відокремлюються, а утворюються нові. Свої спостереження він описав в праці «Послання про магніт» (*Epistola de magnete*).

Близько трьох століть потому, Вільям Гілберт повторив досліди Перегріна, а також показав, що Земля також є великим магнітом. Для цього він створив «терелу» – сферичну магнітну модель Землі, а потім, зробивши карту магнітного поля біля неї, зіставив результати з отриманими у 1576 році англійським виробником компасів Робертом Норманом даними щодо магнітного нахилу, і довів, що ці дві картини ідентичні. Таким чином була спростована існуюча в ті часи гіпотеза про існування велетенських магнітних гір на полюсах Землі, що притягують стрілку компасу. Книга Гілберта «Про магніт, магнітні тіла та про великий магніт – Землю» фактично започаткувала наукове вивчення магнетизму.

У 1750 році, Джон Мічел припустив, що сила притягання і відштовхування, що її створює магнітне поле зменшується за квадратичним законом. У 1750 р. Шарль Кулон експериментально довів цю гіпотезу, а також неможливість відокремлення полюсів магніту один від одного. Базуючись на цих результатах, Сімеон-Дені Пуассон вперше побудував успішну модель магнетизму, у якій магнітне поле продукувалося великою кількістю пар північних і південних магнітних полюсів всередині магніту.

На початку XIX століття три важливих відкриття змінили погляд на магнетизм: у 1819 році Ганс Крістіан Ерстед відкрив, що електричний струм генерує навколо себе магнітне поле, у 1820 р. Андре-Марі Ампер показав, що паралельні провідники притягуються або відштовхуються, коли по них йде струм (закон Ампера), і, нарешті, також у 1820 році Жан-Батіст Біо і Фелікс Савар відкрили закон, названий їх іменем (пізніше узагальнений Лапласом), що дозволяв знайти напруженість магнітного поля в будь-якій точці навколо провідника зі струмом.

На основі цих експериментів, Ампер опублікував власну теорію магнетизму у 1825 році. У ній він продемонстрував еквівалентність електричних контурів і магнітів, і припустив, що магнетизм спричинений великою кількістю замкнених потоків зі струмом у магніті, замість магнітних диполів, що фігурували в теорії Пуассона. Додатковою перевагою цієї теорії було те, що вона пояснювала, чому полюси магніту не можуть бути ізольованими.

У 1831 році Майкл Фарадей відкрив явище електромагнітної індукції, тобто факт, що зміна магнітного поля призводить до виникнення електричного поля. Цей закон зараз відомий як закон електромагнітної індукції Фарадея. Пізніше, Франц Ернст Нейман довів, що для провідника, що рухається в магнітному полі, індукція витікає з закону Ампера. Під час цього він ввів поняття векторного потенціалу магнітного поля.

У 1850-му, лорд Кельвін, відомий тоді як Вільям Томпсон, почав розрізняти два типи магнітного поля, відомі зараз як  $H$  (напруженість магнітного поля) і  $B$  (індукція магнітного поля). Ці поняття він спочатку застосував до моделі Пуассона, а потім і до моделі Ампера. Також, він показав взаємозв'язок між цими типами.

Між 1861 і 1865 роками, Джеймс Клерк Максвелл вивів і опублікував рівняння Максвела, що пояснювали і пов'язували усі параметри класичних електричного і магнітного полів. Перші варіанти цих рівнянь були опубліковані у журналі *Philosophical Magazine and Journal of Science*, під заголовком «Фізичні лінії сили». Ці рівняння були вірними, але неповними. Максвелл доповнив їх у своїй статті 1865 року «Динамічна теорія електромагнітного поля» і показав, що світло є електромагнітною хвилею. Генріх Герц експериментально довів це в 1887 році.

У ХХ столітті, у зв'язку з появою квантової теорії та теорії відносності, електродинаміка включила їх в себе. Альберт Ейнштейн у своїй роботі 1905 року показав, що розділення електромагнітного поля на електричне і магнітне природним чином витікає з теорії відносності, і при цьому, не є абсолютним, а залежить від системи відліку. Пізніше, електродинаміка була переформульована у термінах квантової механіки, утворивши таким чином квантову електродинаміку (КЕД).

**Магнітне поле** — це особливий вид матерії, складова *електромагнітного* поля, яка створюється змінним у часі електричним полем, рухомими електричними зарядами або спінами заряджених частинок. Магнітне поле спричиняє силову дію на рухомі електричні заряди. Нерухомі електричні заряди з магнітним полем не взаємодіють, але елементарні частинки з ненульовим спіном, які мають власний магнітний момент, є джерелом магнітного поля і магнітне поле спричиняє на них силову дію, навіть якщо вони перебувають у стані спокою.

Магнітне поле утворюється, наприклад, у просторі довкола провідника, по якому тече електричний струм або довкола постійного магніту.

Магнітне поле є векторним полем, тобто з кожною точкою простору пов'язаний вектор магнітної індукції  $\vec{B}$ , який характеризує величину і напрям магнітного поля у цій точці і може мінятися з плином часу. Поряд з вектором магнітної індукції  $\vec{B}$ , магнітне поле також описується вектором напруженості  $\vec{H}$ .

У вакуумі ці вектори пропорційні між собою:

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

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

Величина  $\mu_0$  називається магнітною проникністю вільного простору (permeability of free space) або пустого простору (empty space), або магнітною сталою. Її величина визначається у вакуумі (а не вимірюється) і дорівнює

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м} \quad \text{або} \quad \text{Н/А}^2$$

Ця величина є наслідком визначення ампера в одиницях сили на одиницю довжини між нескінченно довгими паралельними провідниками з нульовою площею перерізу у вакуумі.

Магнітну проникність вакууму  $\mu_0$  можна вважати однією з фундаментальних фізичних констант, але вона залежить від діелектричної сталої  $\epsilon_0$  та швидкості світла у вакуумі  $c$ , наступною формулою:

$$c^2 \epsilon_0 \mu_0 = 1$$

На відміну від електричних зарядів, магнітних зарядів, що створювали б магнітне поле аналогічним чином, не спостерігається. Теоретично такі заряди, які отримали назву магнітних монополів, могли б існувати. В такому випадку електричне і магнітне поле були б повністю симетричними.

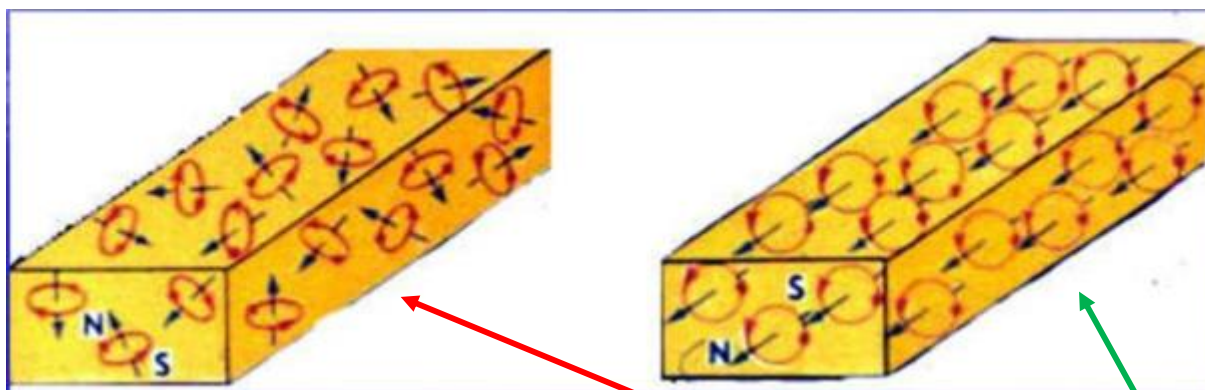
Таким чином, найменшою одиницею, яка може створювати магнітне поле, є магнітний диполь. Магнітний диполь відрізняється тим, що в нього завжди є два полюси, в яких починаються і кінчаються силові лінії поля. Мікроскопічні магнітні диполі зв'язані зі спінами елементарних частинок. Частинки з ненульовим спіном\* – такі як протони, нейтрони і електрони, є елементарними магнітами. Величину магнетизму диполю можна виразити за допомогою магнітного дипольного моменту, що зазвичай називається просто магнітним моментом і позначається літерою  $m$ . Магнітний момент макроскопічного шматка речовини може бути обрахований як векторна сума магнітних моментів його атомів

\* Спін (англ. spin – веретено) – фундаментальна характеристика частинки (наприклад атомного ядра чи елементарної частинки), яка в деякому відношенні аналогічна «власному моменту імпульсу частинки». Спін є квантовою властивістю частинок і не має аналогів у класичній фізиці. Дуже спрощено спін можна уявити собі як обертання частинки навколо власної осі, але насправді це не так, тому що на рівні елементарних частинок некоректно говорити про їх «форму» і ніякої «власної осі», навколо якої частинка може обертатися, не існує. Детальніше про спін буде розказуватися у 4-му модулі.



# Утворення магнітного поля

## Постійні магніти



Зазвичай, моменти окремих атомів напрямлені хаотично, і тому компенсують один одного, а загальний магнітний момент речовини є нульовим. Проте, деякі речовини, в першу чергу феромагнетики, тяжіють до впорядкованих станів, при яких магнітні моменти усіх атомів в речовині починають бути напрямленими в одну сторону. Існують дві моделі, що описують магнітне поле елементарних магнітних диполів – модель Гілберта і модель Ампера. Для описів полів у цих моделях використовуються дві різні величини,  $H$  і  $B$ . За межами магніту вони є однаковими, з точністю до постійного множника, проте всередині магніту їх значення перестають збігатися.

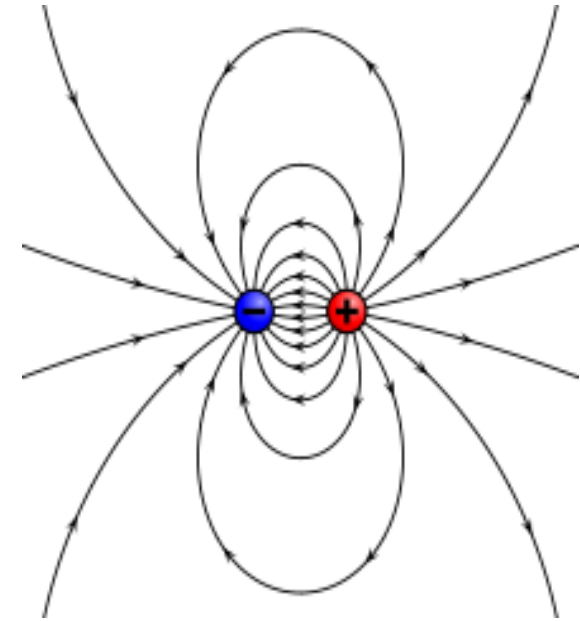
Коротше кажучи, постійний магніт - це така речовина, у якої кристалічна ґратка влаштована так, що магнітні моменти окремих атомів направлені майже однаково. Сумарний магнітний момент атомів створює постійне магнітне поле магніту.

У цій моделі диполь розглядається як два магнітних заряди, а поле, що вони створюють є аналогічним до поля електричного диполю – його лінії починаються в північному заряді, і закінчуються в південному, не виходячи на нескінченність, так само як лінії електричного поля починаються в позитивному заряді і закінчуються в негативному. Також за аналогією розраховується і магнітний момент такого диполю, що дорівнює

$$\mathbf{m} = q_m d$$

де  $q_m$  – магнітні заряди а  $d$  – відстань між ними.

Модель Гілберта передбачає правильні значення напруженості магнітного поля як всередині так і ззовні магніту, в тому числі той факт, що його напрямок є протилежним до напрямку вектора намагніченості. Проте, полюсна модель має обмеження, пов'язані з тим, що вона спирається на неіснуюче в реальності поняття щільності магнітних зарядів. Через це вона не може пояснити той факт, що полюси магніту неможливо відділити один від одного, а також магнітні властивості рухомих електричних зарядів.



У цій моделі диполь розглядається як маленький замкнений контур, по якому беззупинно тече струм. В такій моделі, поле що він створює буде соленоїдним, тобто його силові лінії не будуть мати ні початку, ні кінця, а будуть закручені навколо контуру, проходячи через його серцевину. Магнітний момент такого диполю буде дорівнювати

$$\mathbf{m} = IS$$

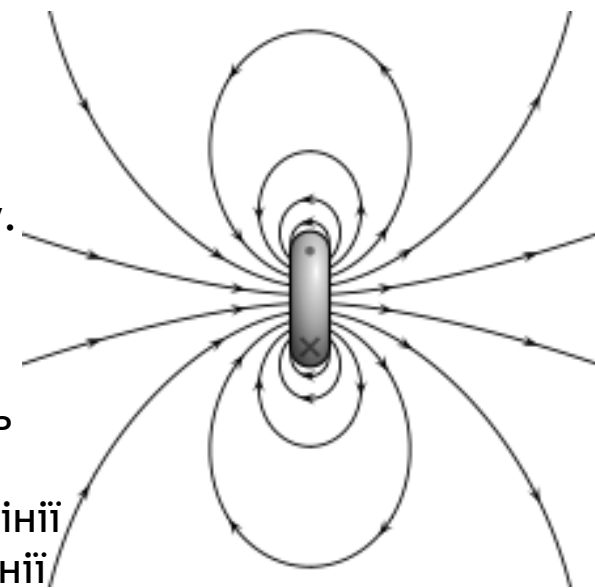
де  $I$  – сила струму в контурі, а  $S$  – площа його перерізу. Вісь такого магніту буде перпендикулярною контуру.

Важливою відмінністю  $\mathbf{B}$ -поля є те, що на відміну від  $\mathbf{H}$ -поля, лінії якого завжди напрямлені від одного полюсу до іншого, його лінії всередині магніту мають зворотній напрямок.

Узагальнюючи і формалізуючи, можна сказати, що якщо силова лінія  $\mathbf{B}$ -поля входить у деяку область простору, то вона завжди пізніше виходить з неї, тобто

$$\oint_S \mathbf{B} dS = 0$$

де інтеграл береться по деякій замкненій поверхні  $S$ , а добуток  $\mathbf{B} dS$  – позитивний, якщо лінія входить всередину поверхні, і негативний, якщо вона виходить з неї.



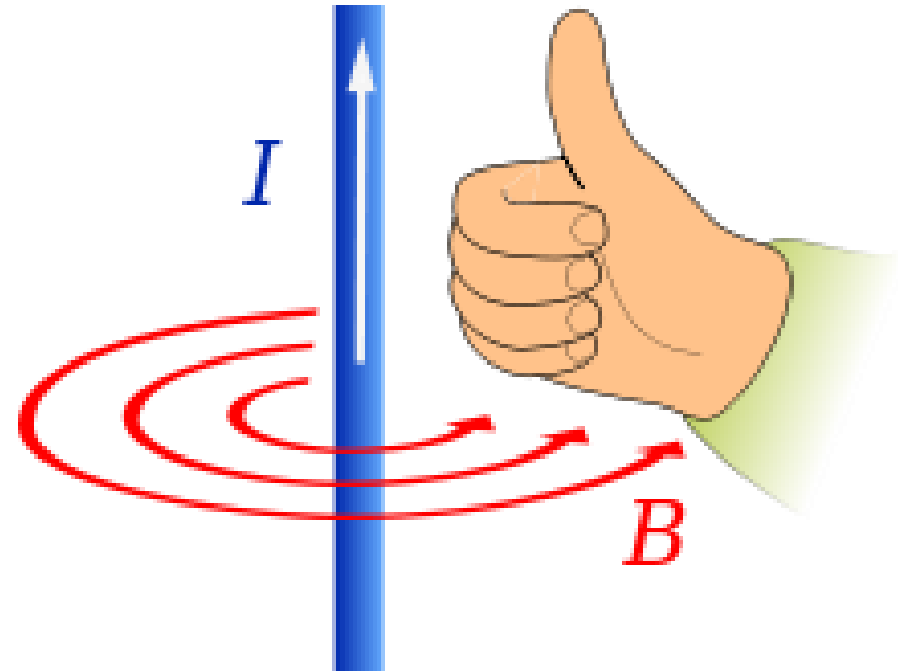
Кружочок на інтегралі означає, що такий інтеграл береться по чомусь замкненому: по замкненому контуру, або по замкненій поверхні - тобто по чомусь такому, що не має явно визначеного початку і кінця.

# Магнітне поле, породжене електричним струмом

## Правило правої руки

Правило правої руки – мнемонічне правило, яке дозволяє визначити напрям силових ліній магнітного поля навколо провідника зі струмом.

Якщо обхопити правою рукою провідник таким чином, щоб великий палець вказував напрям струму в ньому, то решта пальців вказуватиме напрям вектора магнітної індукції. Таким чином, можна застосовувати це правило на практиці, виконуючи певні завдання на знаходження вектора магнітної індукції та силових ліній у магнітній індукції вектора магнітної індукції.

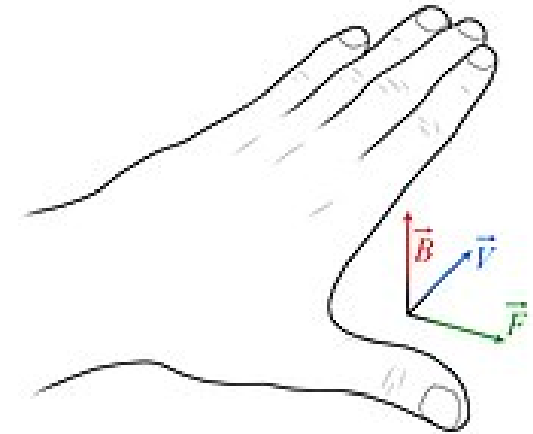


# Магнітне поле, породжене електричним струмом

## Правило лівої руки

Правило лівої руки – мнемонічне правило, що допомагає визначити напрям сили Ампера, яка діє на рухомий заряд або провідник зі струмом у магнітному полі.

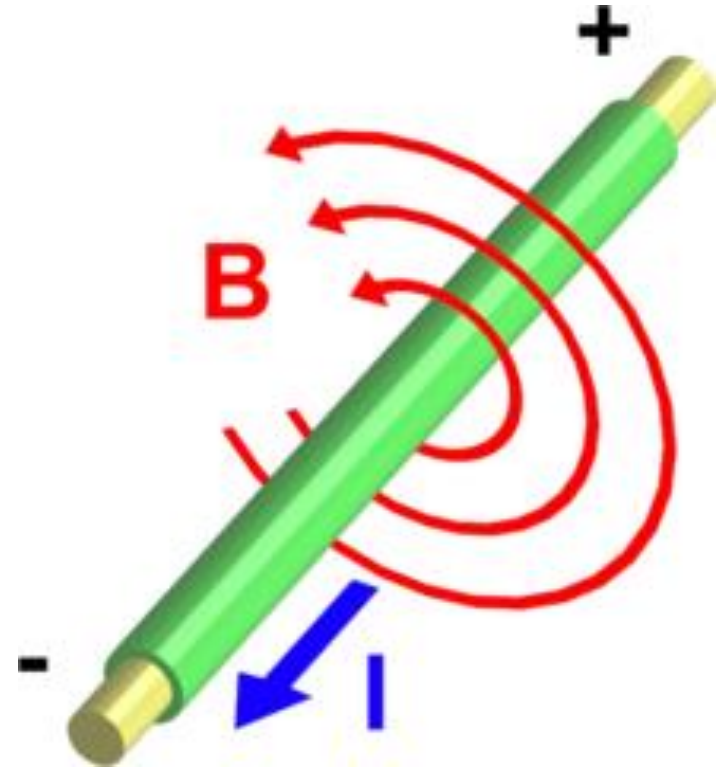
Якщо розташувати ліву долоню так, щоб витягнуті пальці збігалися з напрямом струму, а силові лінії магнітного поля входили в долоню, то відставлений перпендикулярно великий палець вкаже напрям сили, що діє на провідник.



# Магнітне поле, породжене електричним струмом

## Правило свердлика

Правило гвинта (свердлика, буравчика) формулюється так: якщо напрям струму збігається з напрямом руху гвинта (з правою різьбою), то напрям ліній магнітної індукції збігається з напрямом його обертального руху.



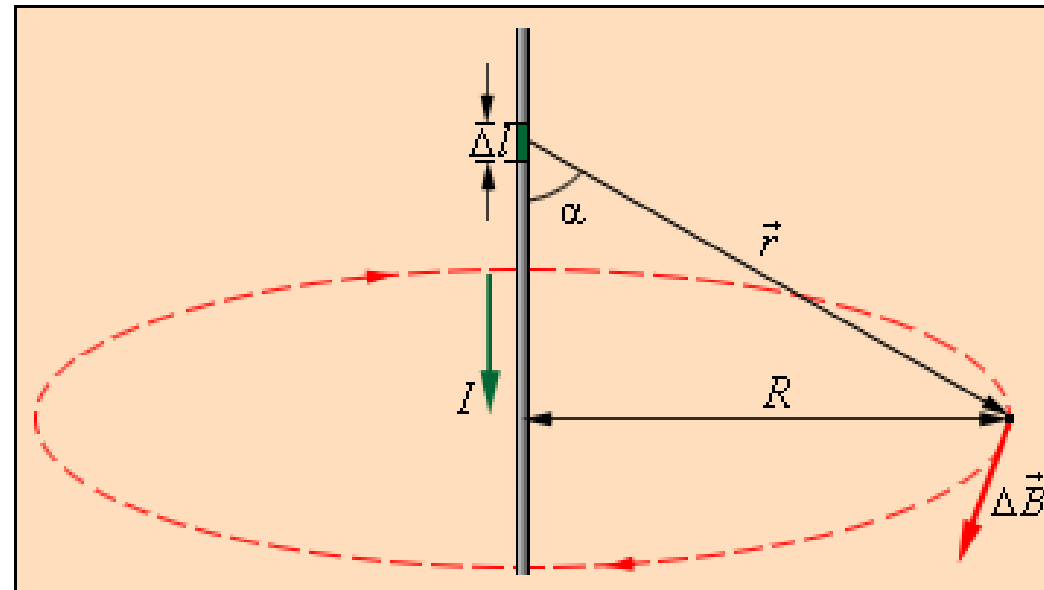
Всі попередні мнемонічні правила «не-кількісні»: вони говорять лише про напрямки струмів, сил, полів - але нічого не говорять про величину поля у певній точці простору.

На це питання відповідає закон Біо-Савара-Лапласа, який формулюється так:

*Індукція магнітного поля елемента струму  $I d\vec{l}$  дорівнює:*

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

Зверніть увагу:  $r$  - це саме відстань від елемента струму до потрібної точки, а не найменша відстань до дроту ( $R$ )!



Два магніти діють один на одного, проте оскільки ця взаємодія є диполь-дипольною, то її закон є доволі складним і залежить від орієнтації магнітів. Втім, якщо магніти розташовані достатньо далеко один від одного, а їх осі напрямлені в одну сторону, то силу, з якою один діє на інший можна описати як

$$F = \frac{3\mu_0}{2\pi} \frac{m_1 m_2}{r^4}$$

де  $m_1$  і  $m_2$  - магнітні моменти (не маси магнітів!).

З рівняння видно, що сила взаємодії між магнітами падає досить швидко — обернено пропорційно четвертому ступеню відстані між ними.



Магніти взаємодіють і зі звичайними речовинами. За характером цієї взаємодії, всі речовини поділяються на:

**Діамагнетики** – завжди намагнічуються проти магнітного поля, тобто мають від'ємну магнітну сприйнятливість і відштовхуються будь-яким полюсом магніту. Не мають магнітних властивостей за відсутності зовнішнього поля.

**Парамагнетики** – слабо намагнічуються вздовж зовнішнього магнітного поля, тобто мають додатну магнітну сприйнятливість. Магнітна проникність близька до одиниці. Не мають магнітних властивостей за відсутності зовнішнього поля.

**Феромагнетики** – для таких речовин характерний далекий порядок магнітних моментів атомів. Через це, такі речовини можуть мати власний вектор намагніченості навіть за відсутності зовнішнього магнітного поля, хоча ця намагніченість і змінюється під дією зовнішнього поля. Магнітна сприйнятливість феромагнетиків додатна і значно більша за одиницю.

**Антиферомагнетики** – як і для попередньої групи, магнітні моменти атомів таких речовин мають дальній порядок, проте на відміну від феромагнетиків, моменти сусідніх атомів направлені антипаралельно, і тому компенсують один одного, а загальна намагніченість речовини лишається близькою до нуля.

**Феримагнетики** – як і в антиферомагнетиках, ці речовини мають антипаралельно направлені магнітні моменти атомів, але при цьому атоми, що направлені в одну сторону мають більший момент, ніж ті, що направлені в іншу, а тому вони не компенсують один одного, і речовина має ненульову намагніченість.

# Дія магнітного поля на провідники із струмом - сила Ампера

Оскільки електричний струм є просто великою кількістю рухомих зарядів, на провідник в магнітному полі також діє сила. Ця сила називається силою Ампера. Вона дорівнює

$$F = BIl \sin \alpha$$

де  $l$  – довжина відрізка провідника,  $\alpha$  – кут між напрямком магнітної індукції та провідником.

Оскільки, за законом Біо-Савара-Лапласа, провідник зі струмом сам створює навколо себе магнітне поле, з цього витікає, що на два провідники, по яким тече струм, також діє сила Ампера – якщо струми течуть в одному напрямку, то провідники притягуються, а якщо в протилежних – відштовхуються.

# Дія магнітного поля на електричні заряди - сила Лоренца

Магнітне поле діє лише на рухомі заряди і визначається силою Лоренца:

$$\mathbf{F} = q[\mathbf{v} \times \mathbf{B}]$$

де квадратні дужки і  $\times$  - знак векторного добутку.

Тобто, ця сила напрямлена перпендикулярно швидкості заряду і напрямку магнітного поля. Через це робота, що її виконує магнітне поле над частинкою, дорівнює нулю. У разі відсутності інших сил, частинка в магнітному полі рухається по колу. У випадку наявності іншого поля, що діє на неї, наприклад, електричного, траєкторія перетворюється на гвинтову лінію.

Енергія магнітного поля в просторі задається формулою

$$E = \frac{1}{8\pi} \int_V \mathbf{B} \cdot \mathbf{H} dV$$

де крапка означає скалярний добуток, а інтеграл береться по об'єму тієї частини простору, де знаходиться магнітне поле.

Для створення магнітного поля широко використовуються **катушки індуктивності** - електрорадіоелементи, що являють собою намотку дроту на феромагнітне осердя (але можуть бути і без осердя - в цьому випадку магнітне поле буде створене як зовні, так і всередині простору катушки, але воно буде слабшим). Тоді енергія магнітного поля може бути визначена як

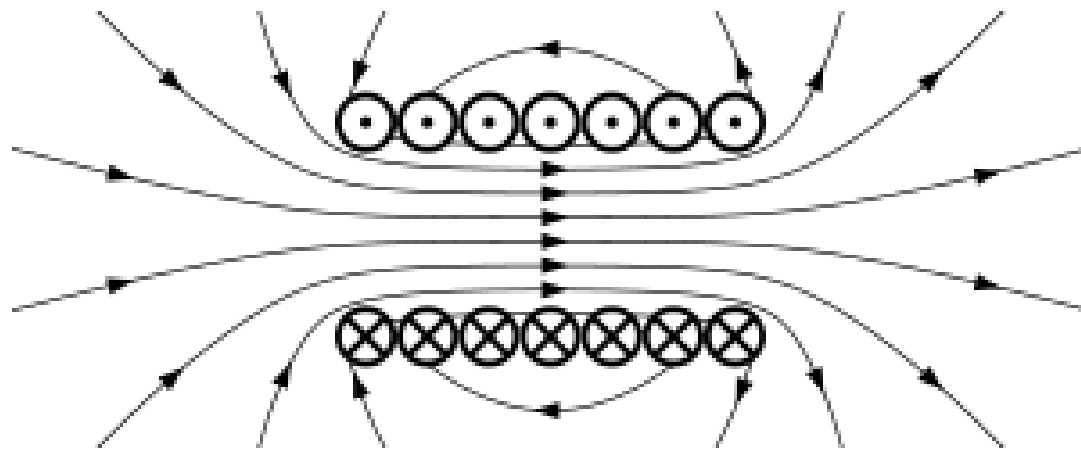
$$E = \frac{LI^2}{2}$$

де  $L$  - індуктивність,  $I$  - сила струму в катушці.

Індуктивність – фізична величина, що характеризує здатність провідника накопичувати енергію магнітного поля, коли в ньому протікає електричний струм. Позначається здебільшого латинською літерою  $L$ , у системі SI вимірюється в Генрі (Гн).



Котушки індуктивності



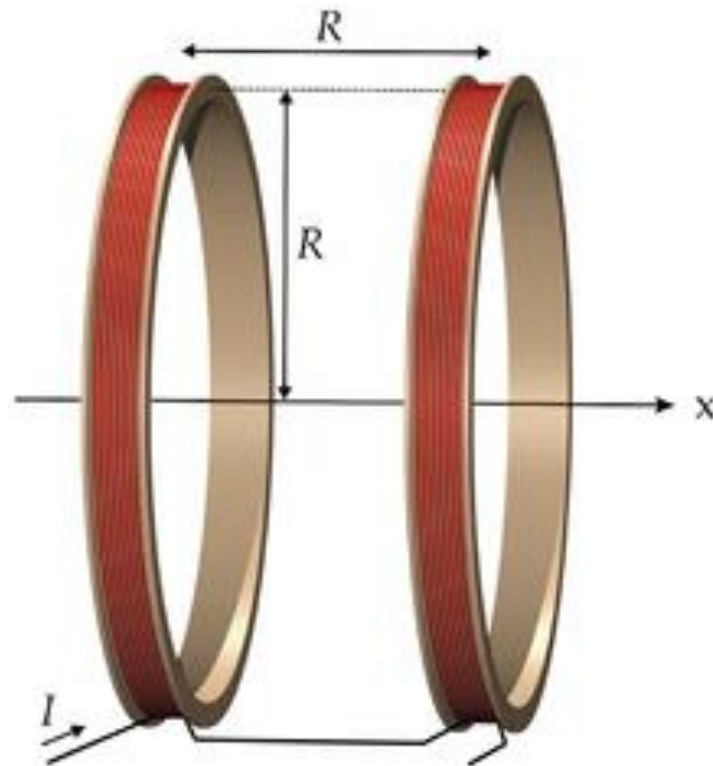
Розподіл силових ліній магнітного поля в прямій котушці з одношаровою намоткою (солєноїді)

# Котушка Гельмгольца - простий і ефективний спосіб створення однорідного магнітного поля

Котушка Гельмгольца - пристрій для отримання просторово однорідного магнітного поля. Котушка складається з двох однакових тонких соленоїдів, розташованих на одній осі на відстані один від одного, яка дорівнює їх радіусам. Котушка названа на честь Германа фон Гельмгольца. Запропонована Гельмгольцем конструкція використовується у фізичних експериментах, що потребують точного визначення величини поля.

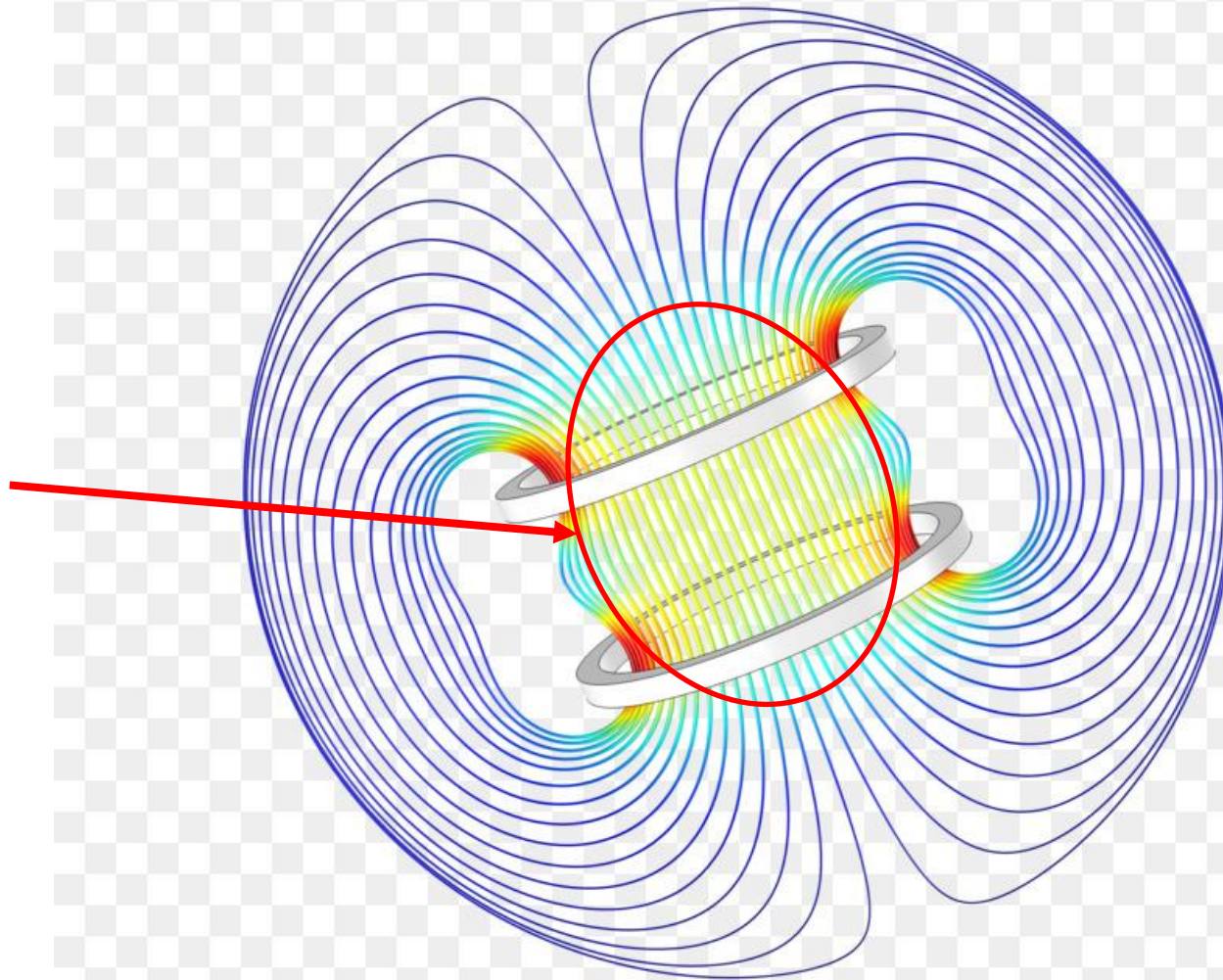
Розташування двох соленоїдів на віддалі радіуса один від одного забезпечує таку однорідність поля вздовж осі, при якій відмінною від нуля є тільки четверта похідна від поля.

Додаткова третя, дещо більша, котушка рівно посередині дозволяє підвищити однорідність поля до шостої похідної. Таку конструкцію називають котушкою Максвелла.

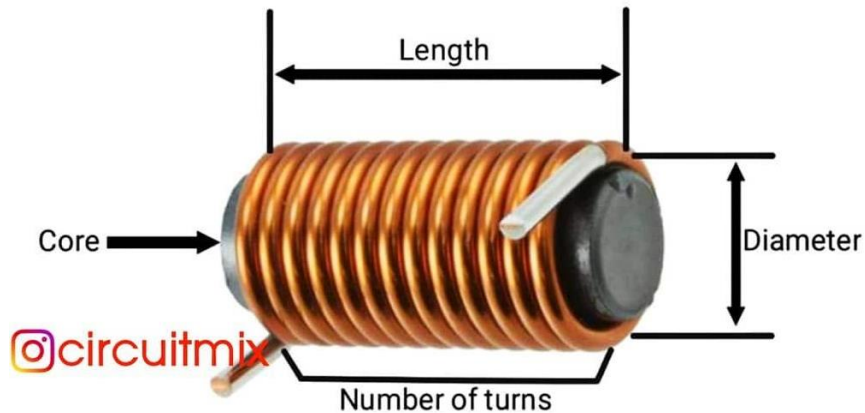


# Розподіл силових ліній магнітного поля в котушці Гельмгольца

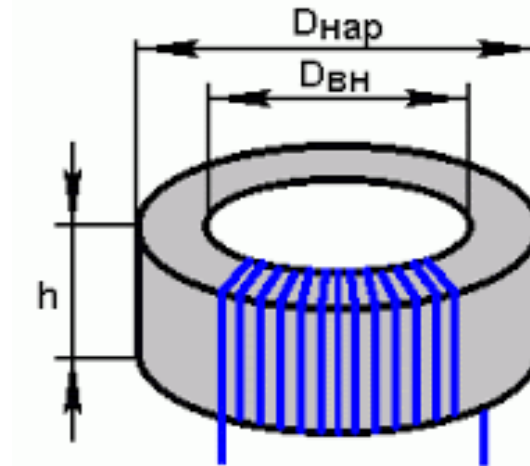
Область  
однорідного  
поля



Точний розрахунок індуктивності може бути достатньо складним, оскільки вона дуже сильно залежить від геометрії котушки, конфігурації витків та матеріалу осердя. Найчастіше використовують прямі та кільцеві котушки.



$$L = \mu_0 \mu \frac{w^2 S}{l} = \mu_0 \mu \frac{w^2 \pi D^2}{4l}$$



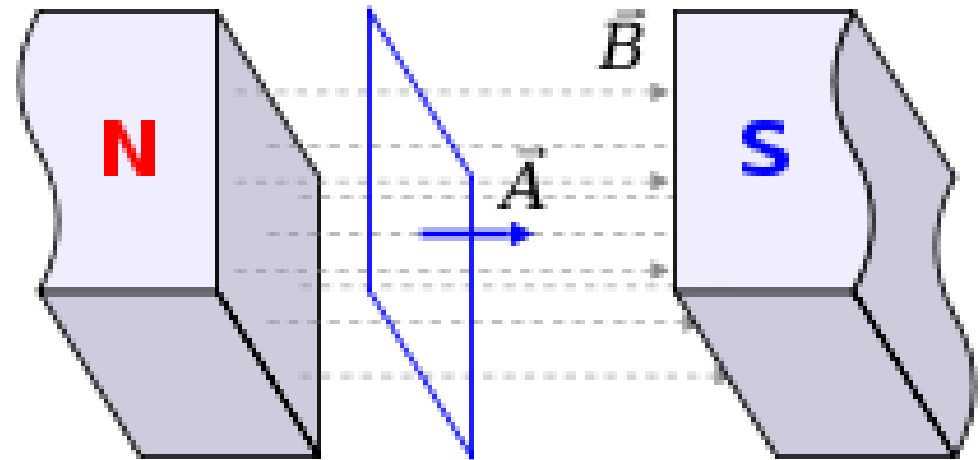
$$L = w^2 \frac{\mu}{2500} h \frac{D_{\text{нар}} + D_{\text{вн}}}{D_{\text{нар}} - D_{\text{вн}}}$$

де  $w$  - кількість витків,  $S$  - площа поперечного перерізу котушки,  $D$  - різні діаметри (див. рис.),  $l$  - довжина намотки,  $\mu$  - магнітна проникність матеріалу осердя (довідникова величина, залежить від матеріалу осердя).



Котушка створює *магнітний потік* – скалярну величину, яку уявляють як потік вектора магнітної індукції через задану поверхню. Магнітний потік позначається грецькою літерою  $\Phi$  (фі). Вимірюється у Веберах.

Потік вектора можна уявляти як кількість силових ліній, що проходять через деяку площу поперечного перерізу або поверхню.



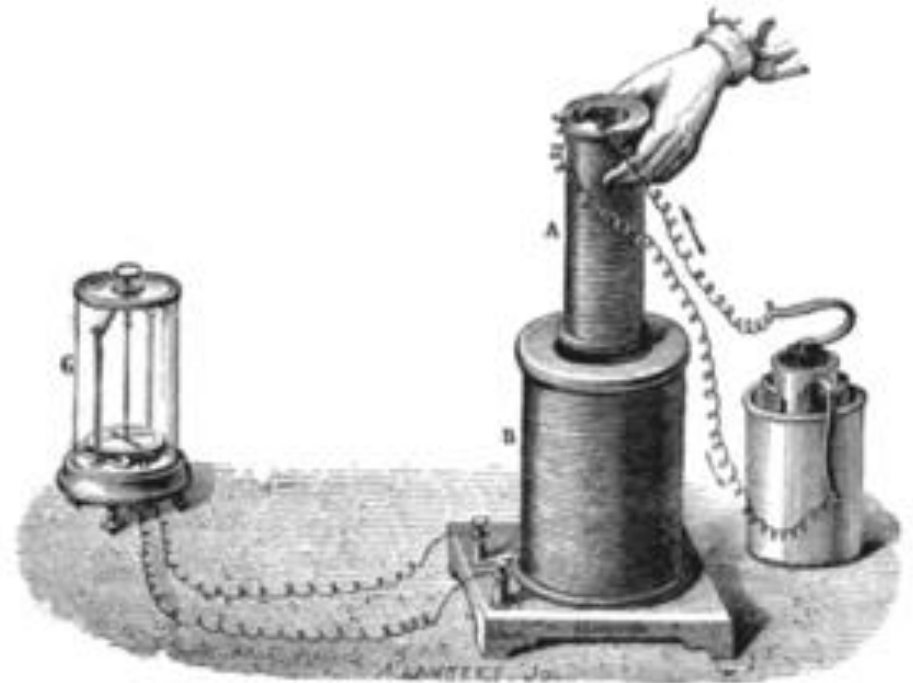
Магнітний потік через внутрішній переріз котушки прямо пропорційний силі струму:

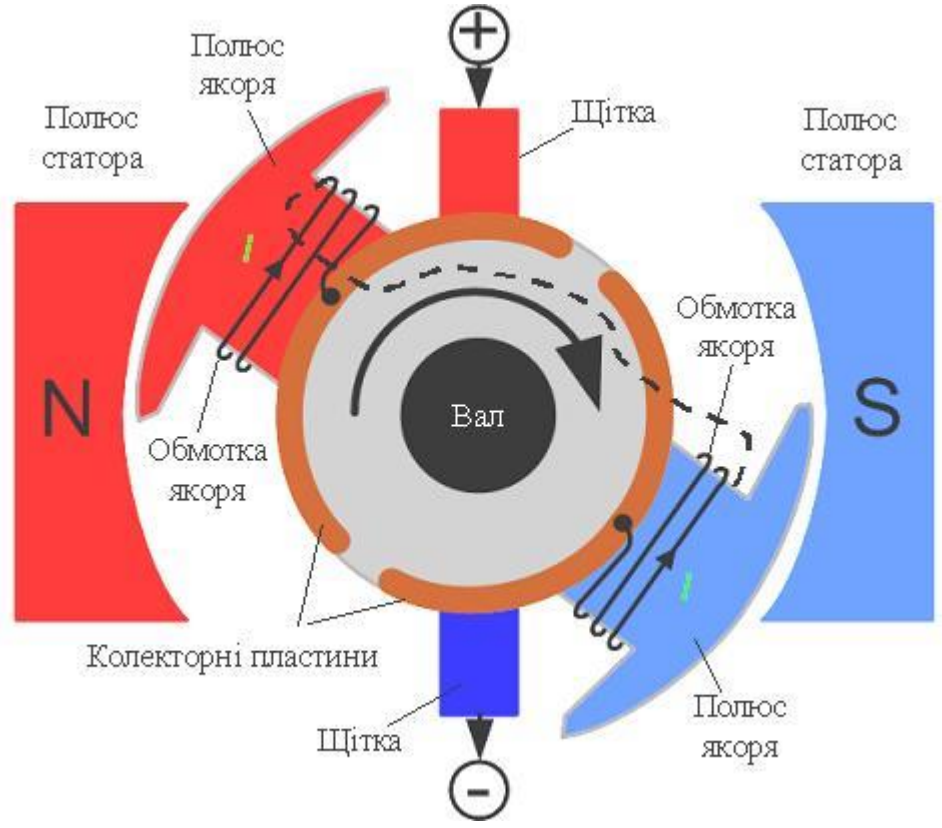
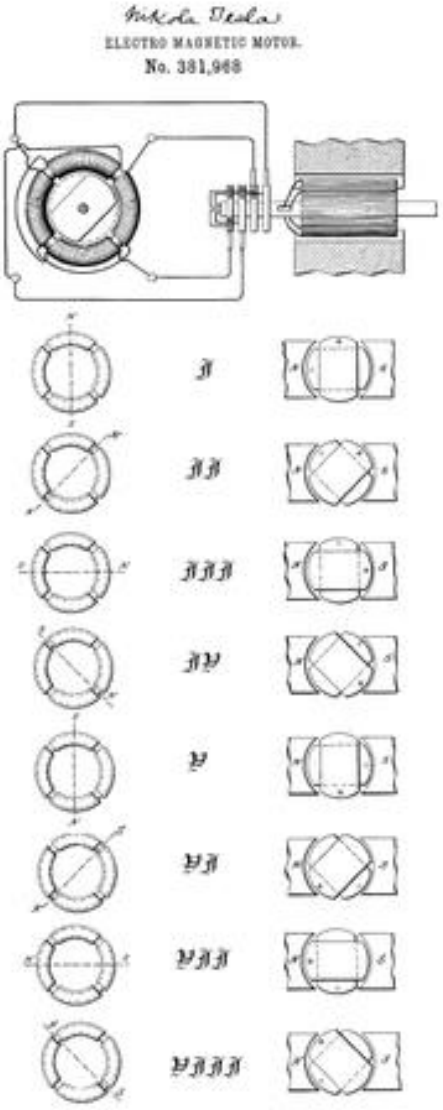
$$\Phi = LI$$

Електромагнітна індукція – явище створення в просторі вихрового електричного поля змінним магнітним потоком. Одним із наслідків електромагнітної індукції є зв'язок між змінними електричним та магнітними полями в електромагнітній хвилі, інший наслідок, практично важливий для генерації електричного струму, – виникнення електрорушійної сили в провідному контурі, магнітний потік через який змінюється. Одиниці вимірювання електромагнітної індукції – тесла (в системі СІ).

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

$\mathcal{E}$  - е.р.с.,  $N$  - кількість витків у котушці,  
 $\frac{d\Phi}{dt}$  - швидкість зміни магнітного потоку з часом.

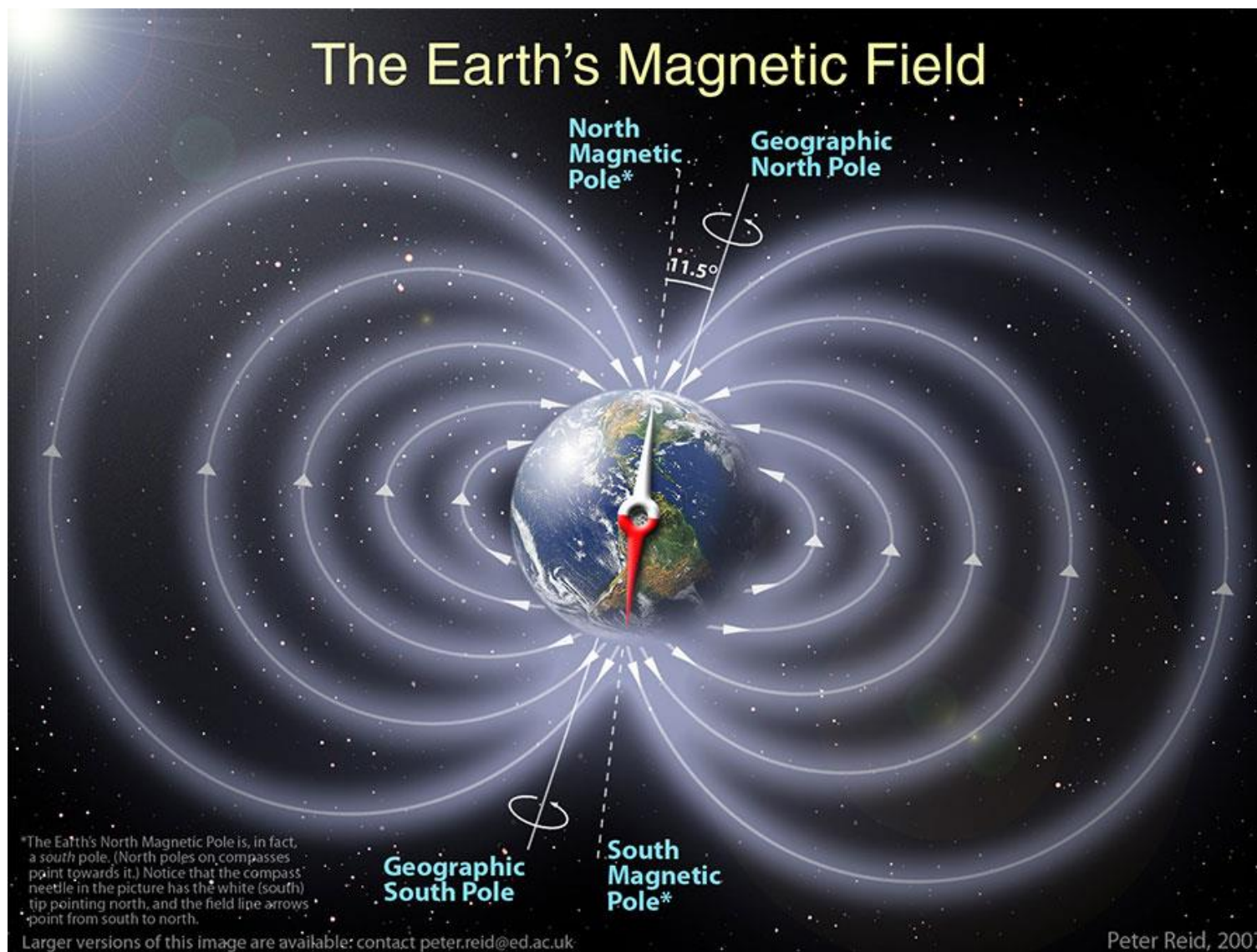




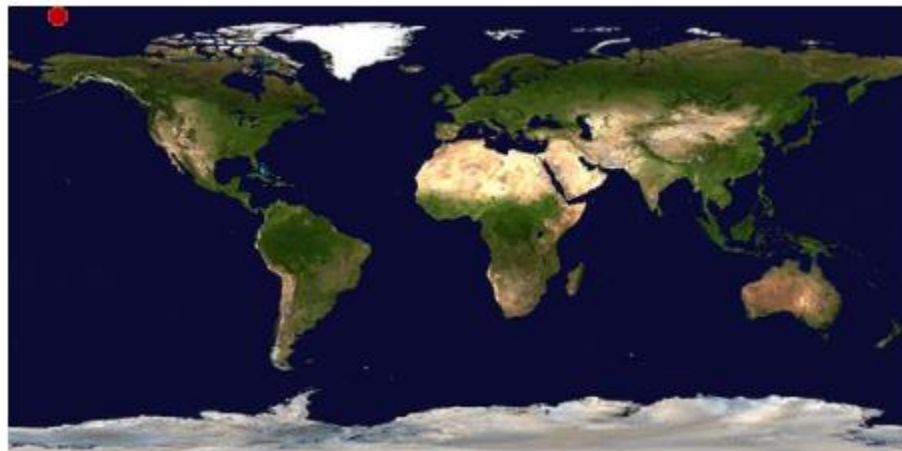
Магнітне поле Землі, або *геомагнітне поле* – силове поле, виникнення якого зумовлене джерелами, що знаходяться в земній кулі та навколоземному просторі (магнітосфері та іоносфері). У навколоземному космічному просторі магнітне поле Землі утворює магнітосферу.

Спрощено магнітне поле Землі можна уявити собі як поле магнітного диполя, нахиленого приблизно під кутом  $11,5^\circ$  відносно осі обертання Землі і віддаленого на 300 км від геомагнітного центра Землі.

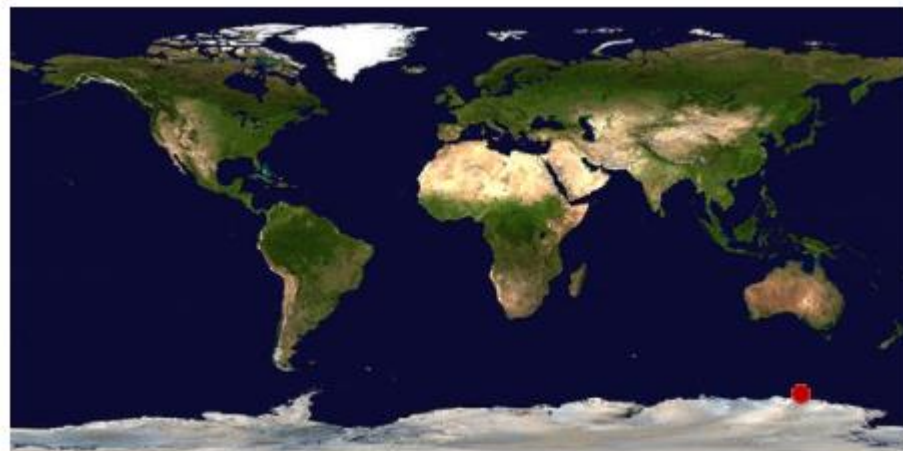
Місця, де уявний земний диполь перетинає поверхню Землі, називають геомагнітними полюсами (північним й південним). Їхнє розташування близьке до розташування магнітних північного та південного полюсів Землі, які визначаються як місця на поверхні Землі, в яких стрілка компаса показує прямовисно вниз, до центра Землі. Лінію ж, вздовж якої магнітна стрілка, що обертається навколо горизонтальної осі, займає горизонтальне положення, називають магнітним екватором. Магнітні полюси не збігаються ані з геомагнітними, ані з географічними, їхнє положення не є сталим, воно помітно змінюється в часі. Заради зручності назви магнітних полюсів звичайно прив'язують до географічних, тобто південний (фізично) магнітний полюс, розташований у Північній півкулі, називають Північним магнітним полюсом. Північний магнітний полюс нещодавно покинув територію Канади й рухається в напрямку Росії. Південний магнітний полюс знаходиться в океані біля берега Антарктиди, на південь від Австралії.



Північний:



Південний:



Магнітне поле Землі не є стабільним. Час від часу відбувається **геомагнітна інверсія** – південний геомагнітний полюс стає північним і навпаки. Коли відбувається таке явище, цілісність іоносфери порушується, а потік іонізаційного випромінювання (радіації), який сягає Землі, збільшується.

Періоди збереження сталої направленості магнітного поля Землі називають хронами. Вони тривають від 100 тисяч до 1 млн років. Інверсія, як свідчать дослідження з палеомагнетизму відбувається нерегулярно, через випадкові проміжки часу. Середня тривалість хрона становить 450 тисяч років.

Остання геомагнітна інверсія відбулася 780 тисяч років тому.

Ця тема деякою мірою є проміжною між електростатикою та електродинамікою. З одного боку, магнетизм і магнітне поле можна розглядати як самостійні фізичні явища (що ми сьогодні й робили), але насправді магнітне поле існує невіддільно від електричного. Електричне та магнітне поля - дві сторони одного і того ж фізичного явища - **електромагнітної взаємодії**. Цим видом взаємодії займається розділ фізики під назвою **електродинаміка**, якій буде присвячено наступну лекцію.

Зверніть увагу, що ми майже не розглядали практичне застосування магнітного поля. Воно є, і його багато 😊 Просто його застосування краще розглянути в рамках теми про електродинаміку, оскільки по суті магнітне поле строго теоретично описується саме в рамках електродинаміки, і законів Максвелла зокрема.

Далі буде...

## ...Електродинаміка та електромагнітні хвилі