

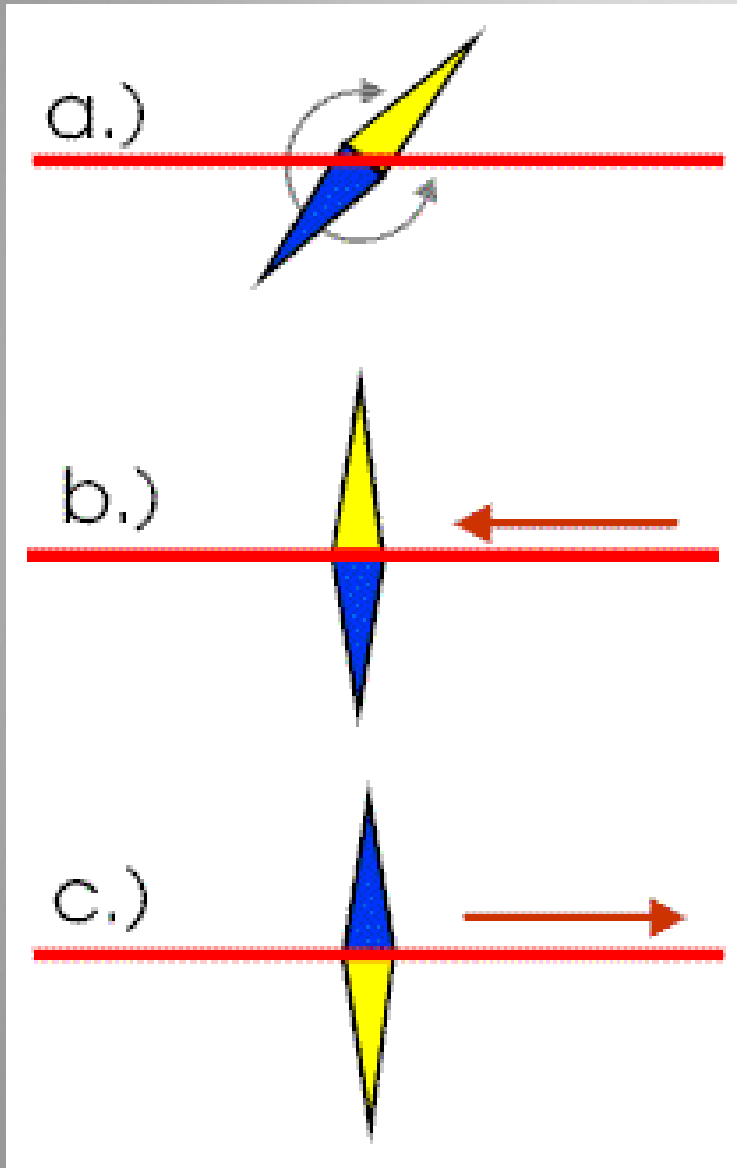
FIZYKA

Pole magnetyczne

Magnetyzm demonstracja



Pole magnetyczne

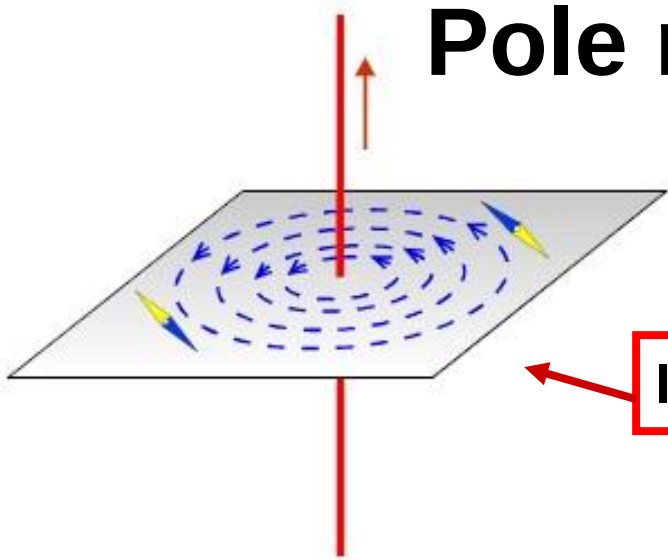


Za przełom w badaniu zjawisk magnetycznych można uznać doświadczenia Oersteda wykonane w 1820 roku. Duński fizyk Hans Christian Oersted zaobserwował, że igła magnetyczna umieszczona pod przewodnikiem przez który płynie prąd ustawia się do tego przewodnika prostopadle. Po zmianie kierunku prądu igła obraca się o 180 stopni.

Źródłem pola magnetycznego jest Przepływ prądu

1. Uporządkowany ruch ładunków elektrycznych wywołuje w otaczającej przestrzeni powstawanie pola magnetycznego.
2. Pole to ma charakter pola wektorowego (posiada własności kierunkowe).
3. Linie sił tego pola są prostopadłe do kierunku ruchu ładunków elektrycznych.

Pole magnetyczne

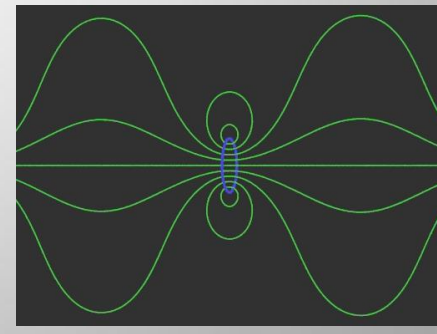
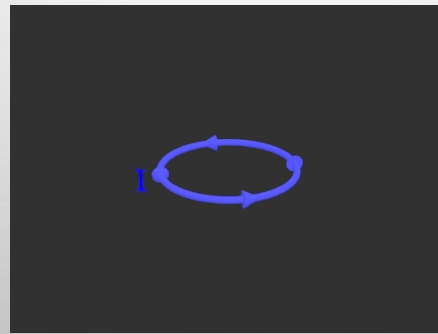
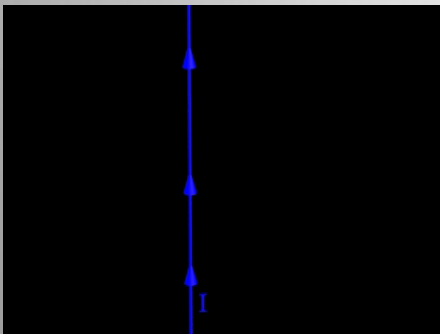


linie indukcji pola magnetycznego

indukcja pola magnetycznego $\vec{B}$

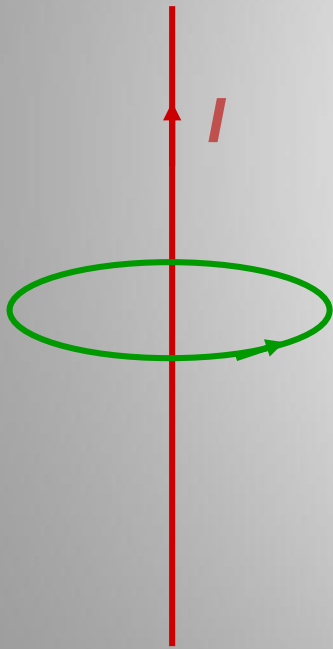
Zasada superpozycji pól magnetycznych:

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



Prawo Ampère'a

Całka wektora indukcji magnetycznej po konturze zamkniętym jest proporcjonalna do natężenia prądu płynącego wewnątrz konturu.

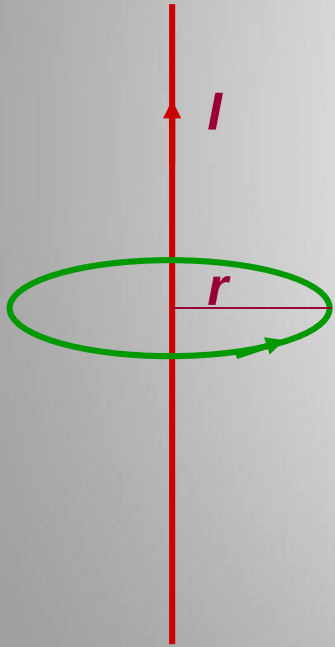


$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I$$

przenikalność magnetyczna próżni

Prawo Ampère'a

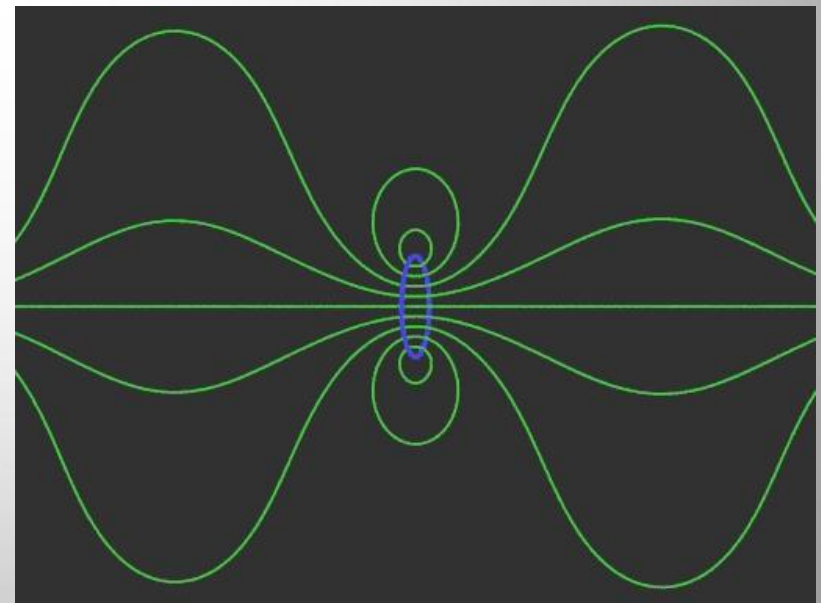
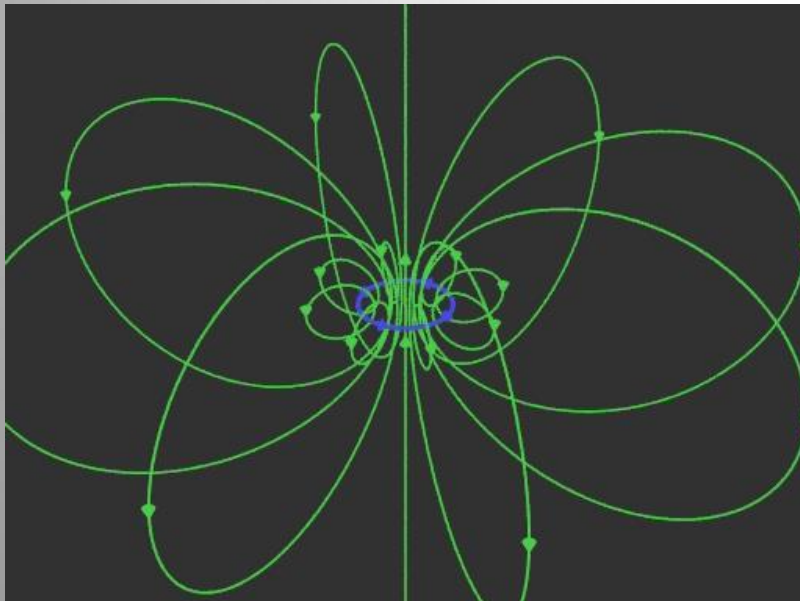
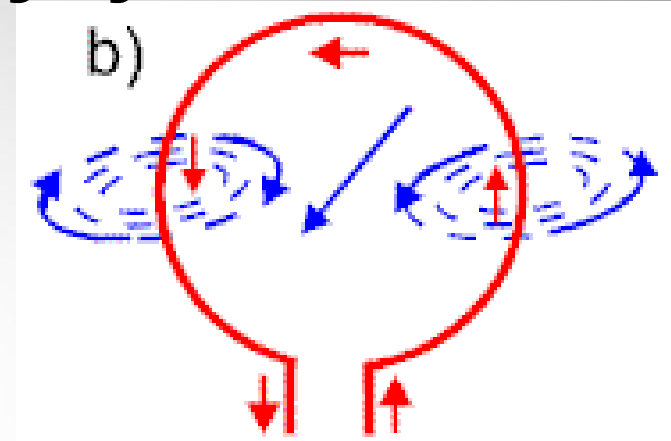
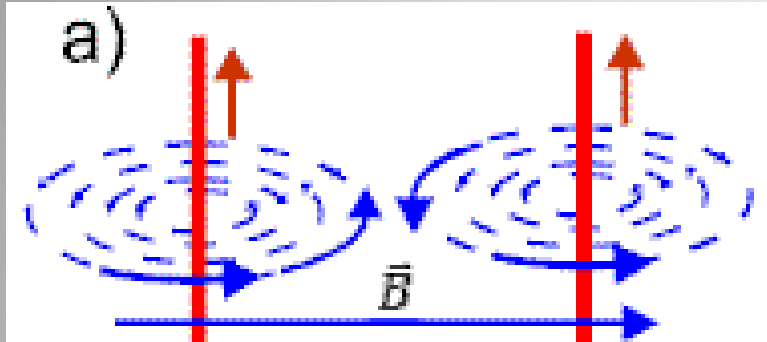
Wartość wektora indukcji w odległości r od nieskończenie długiego przewodnika, w którym płynie prąd o natężeniu I .



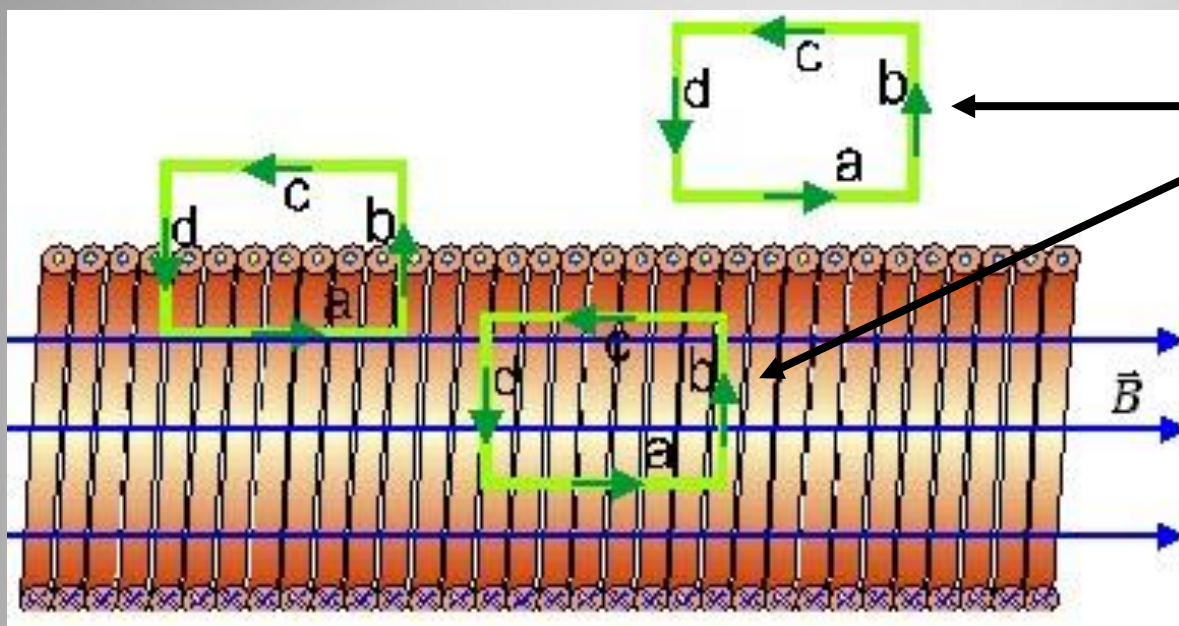
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = B \cdot \oint dl = B \cdot 2 \cdot \pi \cdot r = \mu_0 \cdot I$$

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I}{2 \cdot \pi \cdot r}$$

Pole magnetyczne i zasada superpozycji



Pole magnetyczne solenoidu



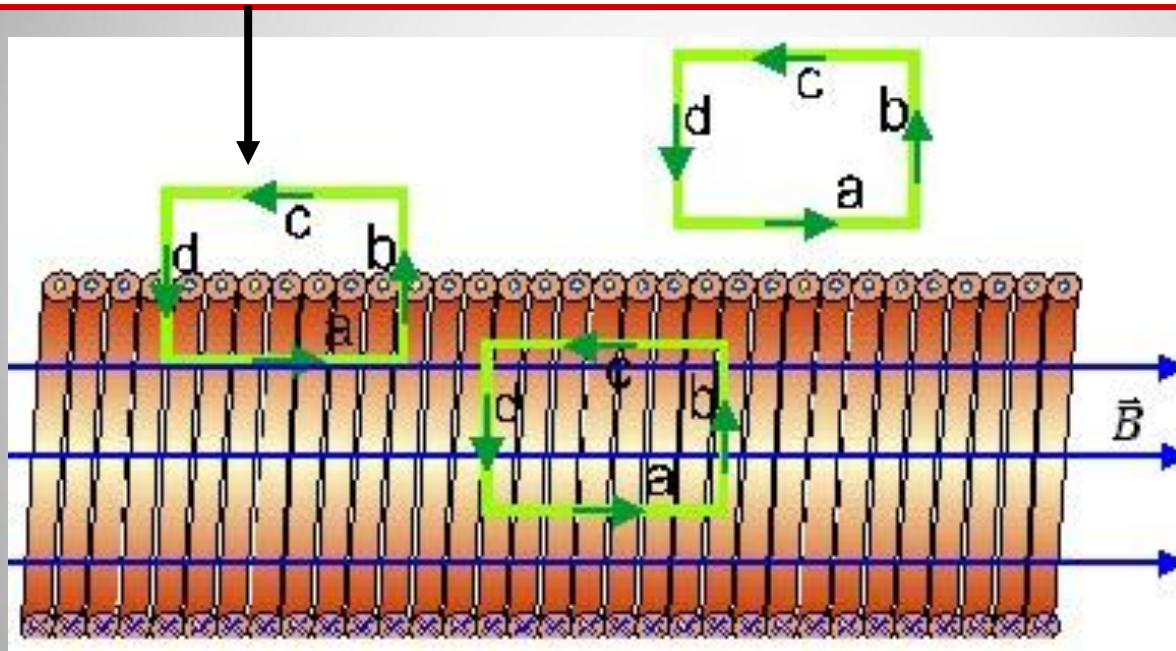
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = 0$$

Pole magnetyczne w całej przestrzeni wewnątrz solenoidu jest jednorodne, czyli takie samo co do wartości i kierunku.

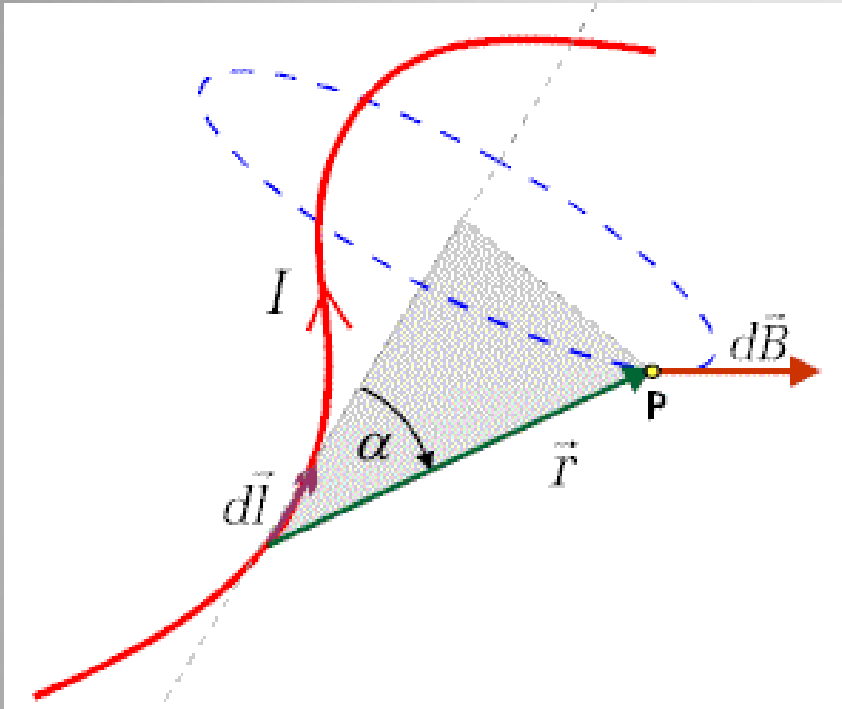
Pole magnetyczne na zewnątrz solenoidu równe jest zeru.

Pole magnetyczne solenoidu

$$B \cdot a = \mu_0 \cdot I \cdot n \cdot a \quad \text{czyli} \quad B = \mu_0 \cdot I \cdot n$$

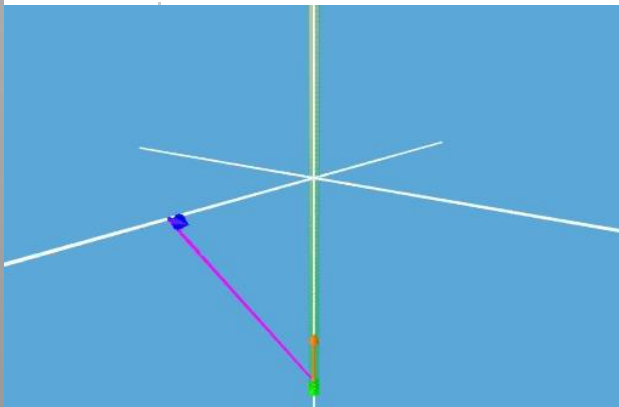


Prawo Biota-Savarta

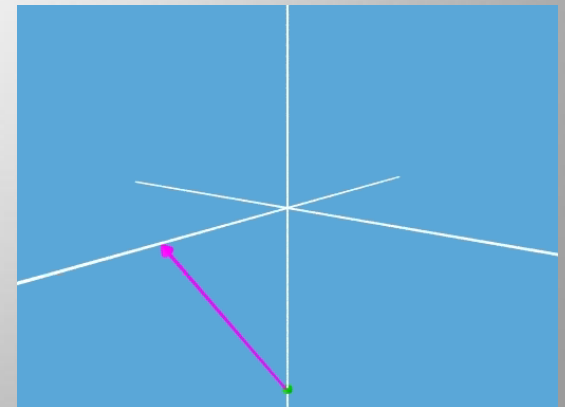


$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

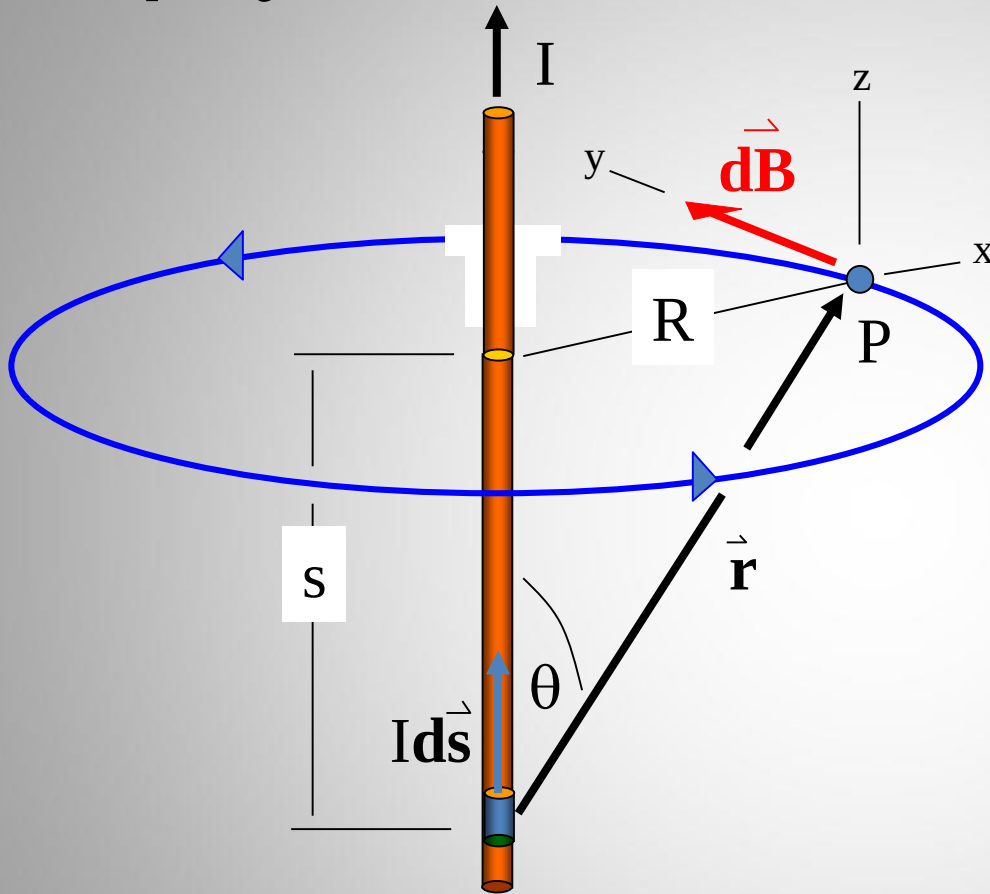
$$dB = \frac{\mu_0 \cdot I}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{dl \cdot \sin \alpha}{r^2}$$



$$\vec{B} = \int d\vec{B}$$



przykład: nieskończenie długi przewód z prądem



$$\begin{aligned}
 dB_y &= \left| \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I d\vec{s} \times \hat{r}}{r^2} \right| = \\
 &= \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \sin \theta \cdot ds}{r^2} = \\
 &= \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{1}{R^2 + s^2} \cdot \frac{R}{\sqrt{R^2 + s^2}} \cdot ds = \\
 &= \frac{\mu_0 I R}{4\pi} \cdot \frac{ds}{(R^2 + s^2)^{3/2}}
 \end{aligned}$$

$$B = B_y = \frac{\mu_0}{4\pi} I R \cdot \int_{-\infty}^{\infty} \frac{ds}{(R^2 + s^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0}{4\pi} I R \cdot \left. \frac{s}{R^2 \sqrt{R^2 + s^2}} \right|_{-\infty}^{\infty} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

Prawo Gaussa dla magnetyzmu

Strumień wektora indukcji przez powierzchnię S :

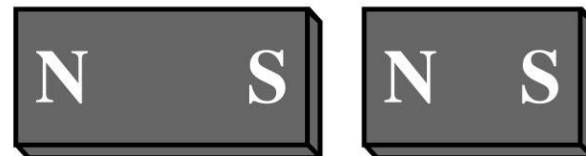
$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

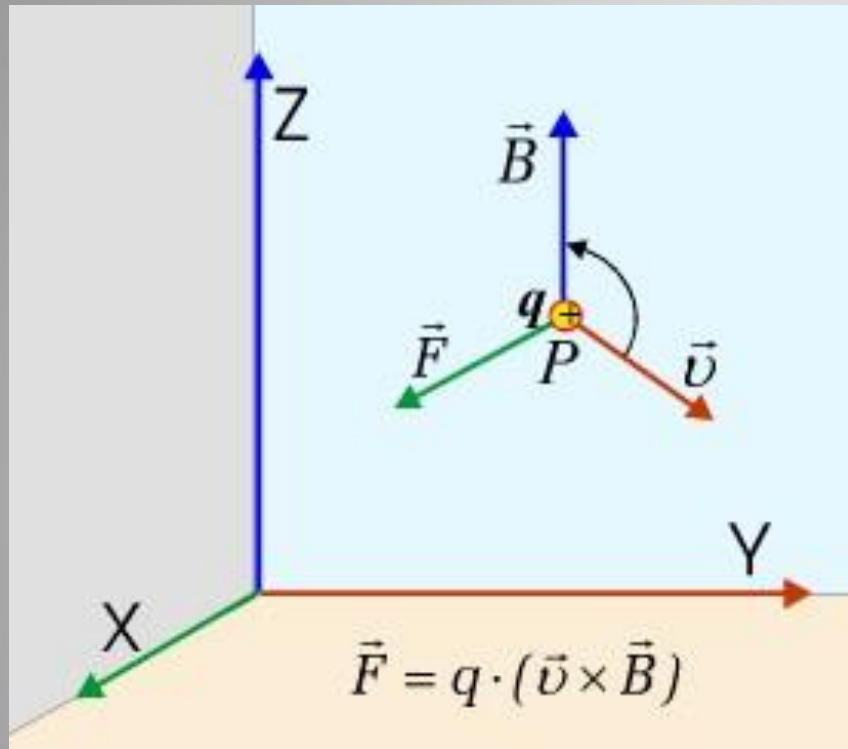
Nie ma ładunków magnetycznych mogących stanowić początek lub koniec linii sił wektora $\vec{B}$



↓ Break apart



Siła Lorentza



$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

Jeżeli na ładunek q poruszający się z prędkością $\vec{v}$ działa w punkcie P siła określona wzorem, to w punkcie tym istnieje pole magnetyczne o indukcji $\vec{B}$, określonej tym wzorem przez siłę, ładunek i prędkość.

Siła Lorentza

$$F = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Jeśli prędkość prostopadła do wektora indukcji:

$$F_{max} = q \cdot v \cdot B$$

$$B = \frac{F_{max}}{q \cdot v}$$

Wartość indukcji magnetycznej jest równa sile jaka działa na jednostkowy ładunek dodatni (próbný) poruszający się w polu magnetycznym z jednostkową prędkością w kierunku, w którym siła magnetyczna ma maksymalną wartość

Ładunek w polu magnetycznym

Ruch w płaszczyźnie **XY**:

Wartość siły Lorentza:

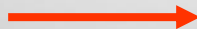
$$F = q \cdot v_{\perp} \cdot B$$

Siła skierowana jest prostopadle do wektora prędkości



Siła Lorentza to siła dośrodkowa

$$q \cdot v_{\perp} \cdot B = \frac{mv_{\perp}^2}{r}$$



$$r = \frac{m \cdot v_{\perp}}{q \cdot B}$$

Ładunek w polu magnetycznym

Okres ruchu:

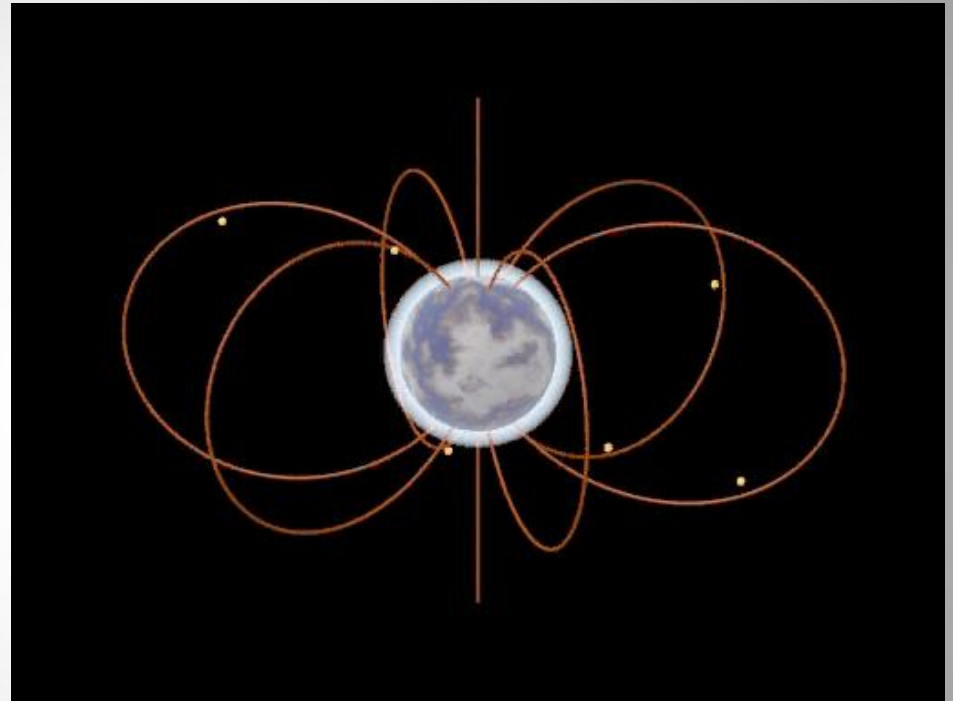
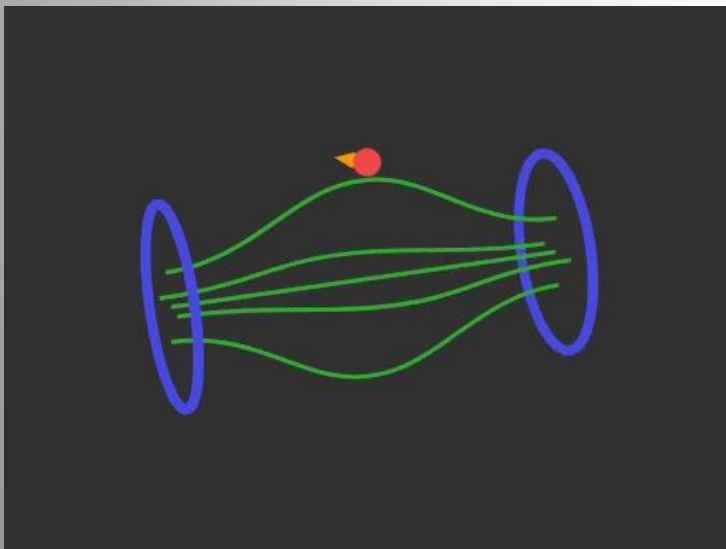
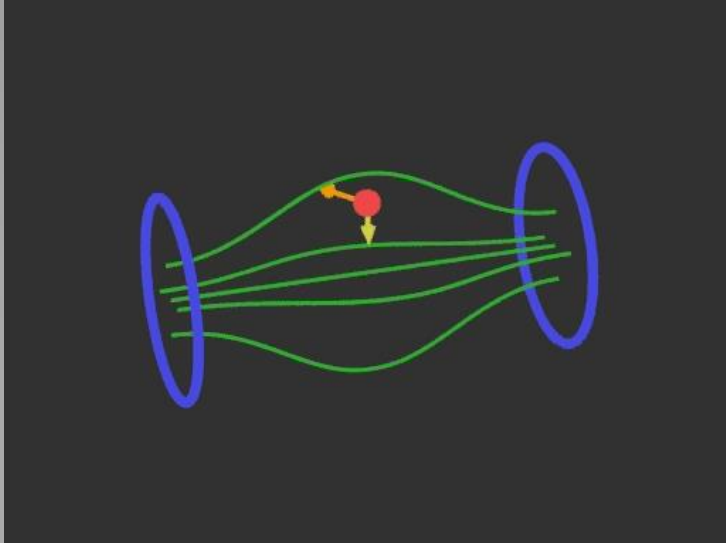
$$T = \frac{2 \cdot \pi \cdot r}{v_{\perp}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m \cdot v_{\perp}}{q \cdot B \cdot v_{\perp}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{q \cdot B}$$

Częstość kołowa:

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

**Częstość cyklotronowa
niezależna od prędkości**

Pułapki magnetyczne



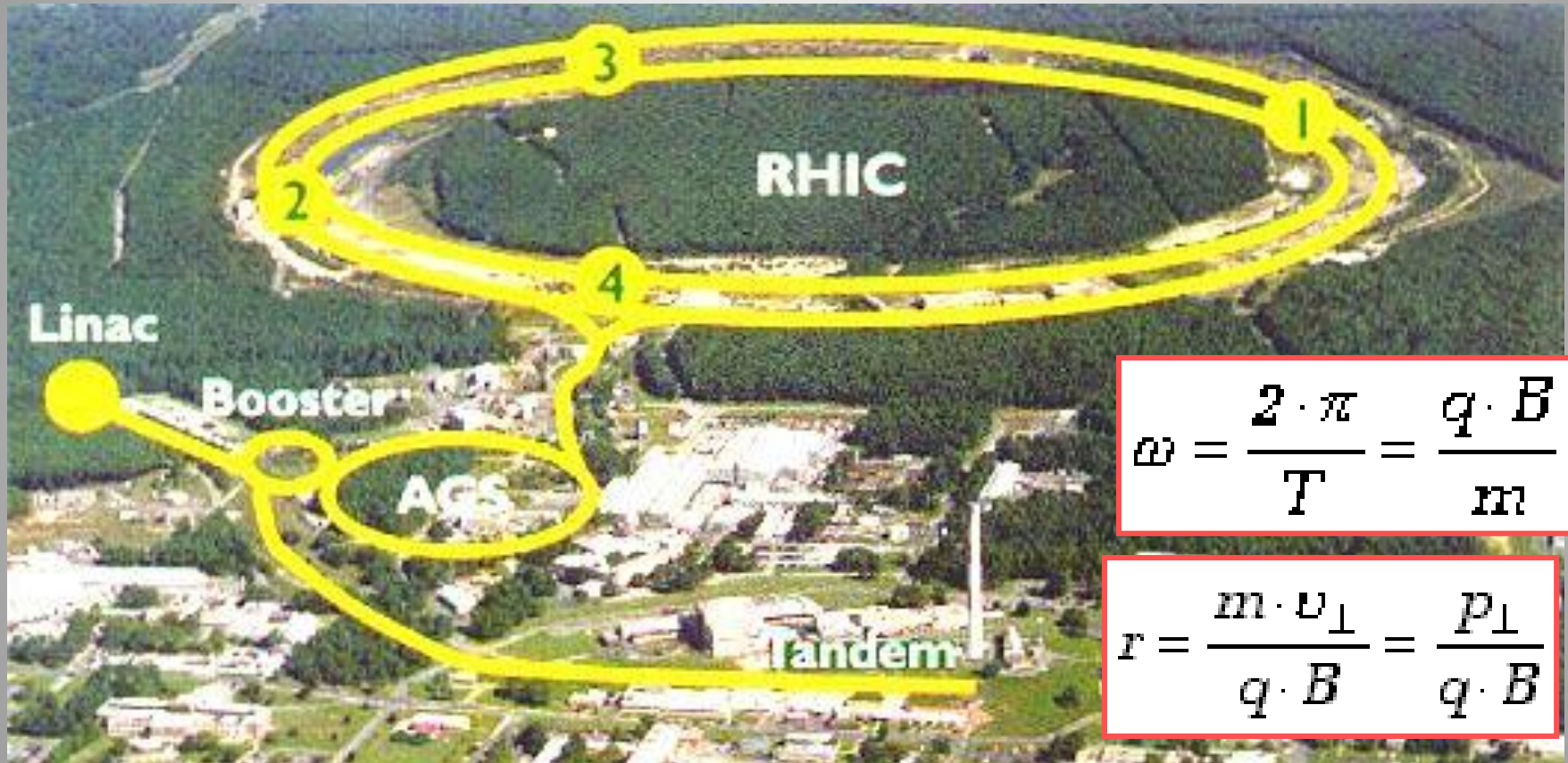
Pole magnetyczne Ziemi stanowi pułapkę dla cząstek promieniowania kosmicznego

Zorza polarna



Synchrotron

Relativistic Heavy Ion Collider

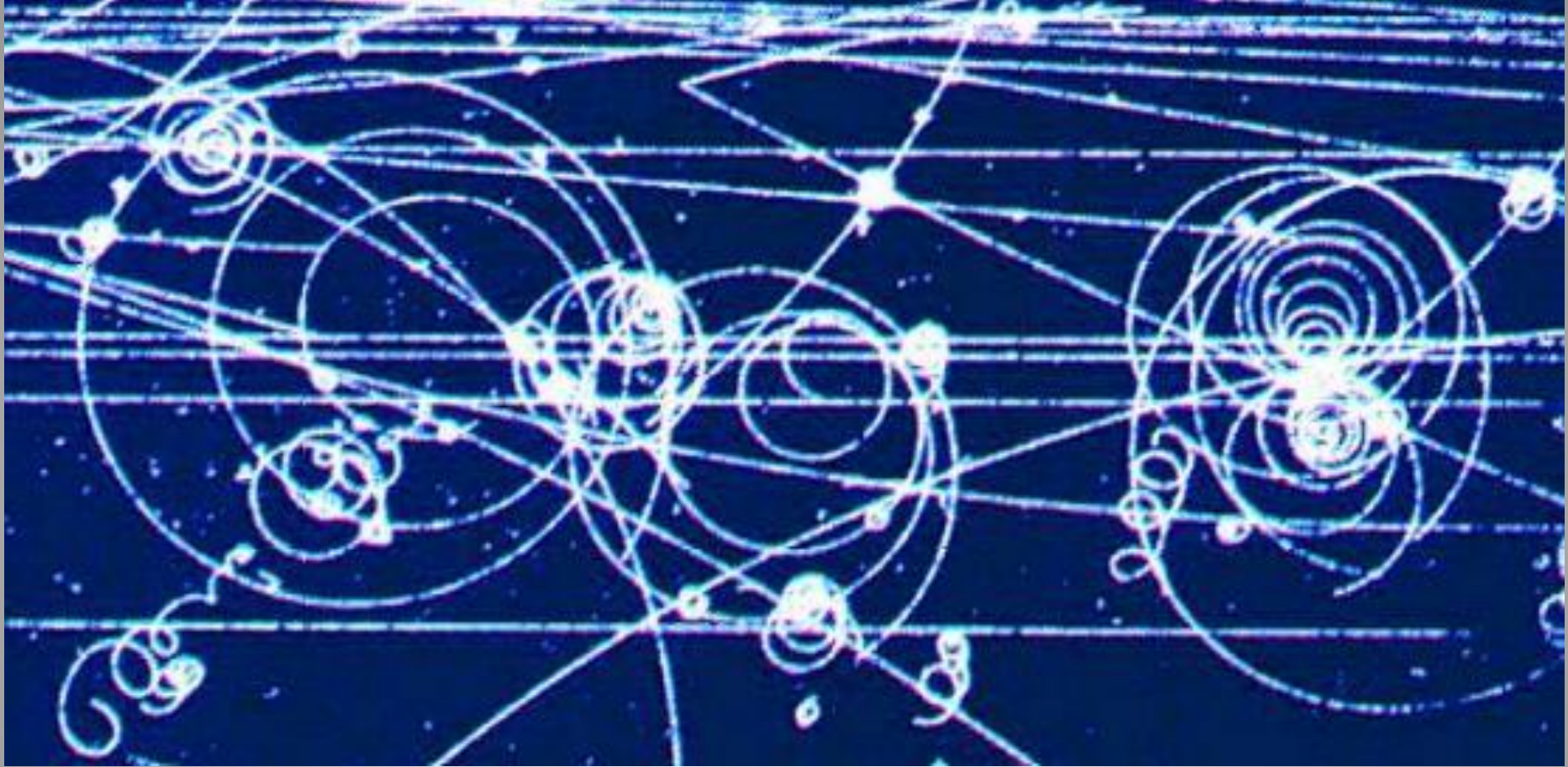


$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} = \frac{q \cdot B}{m}$$

$$r = \frac{m \cdot v_{\perp}}{q \cdot B} = \frac{p_{\perp}}{q \cdot B}$$

Jeśli zsynchronizowana zostanie częstość obiegu cząstek w pierścieniu akceleryjnym z częstością zmiany pól: elektrycznego i magnetycznego, to proces akceleracji może odbywać się bez zmiany promienia okręgu po którym krążą cząstki.

Detektory śladowe w polu magnetycznym



Ślady cząstek zarejestrowane w eksperymencie NA35 w CERN

Siła elektrodynamiczna



Jednostka indukcji magnetycznej – 1 tesla (T)

$$1T = 1 \frac{N}{C \cdot (m/s)} = 1 \frac{N}{A \cdot m}$$

Jeśli ładunek znajduje się równocześnie w polu magnetycznym i elektrycznym:

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

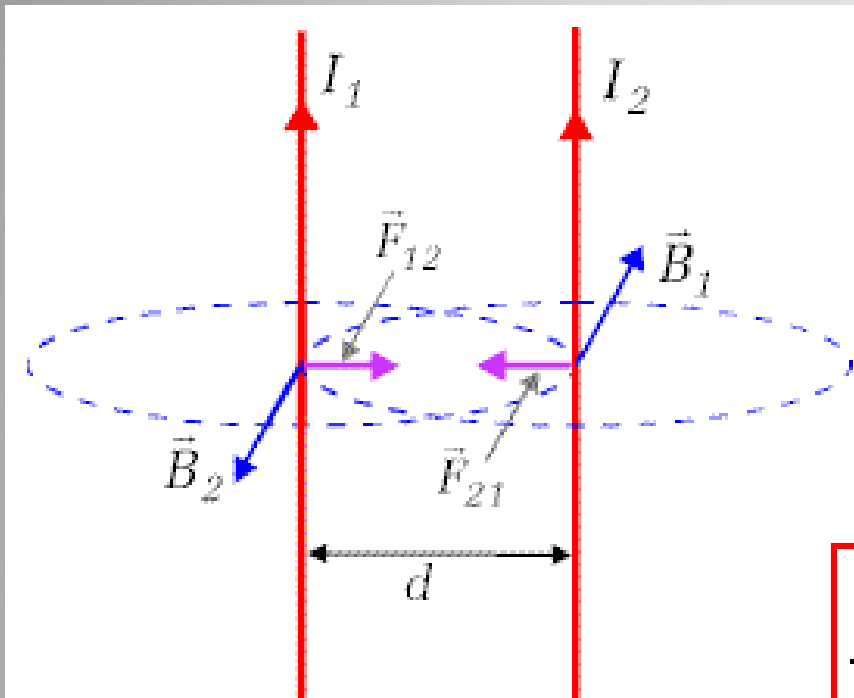
Siła elektrodynamiczna

Jaka siła działa w polu magnetycznym na przewodnik z prądem?

$$d\vec{F} = \underbrace{I \cdot dt}_{dq} \cdot \left(\underbrace{d\vec{l} / dt}_{\vec{v}} \times \vec{B} \right) = I \cdot (d\vec{l} \times \vec{B})$$

Otrzymaliśmy w ten sposób wyrażenie określające siłę działającą na element przewodnika przez który płynie prąd o natężeniu I . Siłę tę nazywamy **siłą elektrodynamiczną** (lub siłą Ampera). Pamiętając o własnościach iloczynu wektorowego widzimy, że **kiedy przewodnik ustawiony jest wzdłuż kierunku pola to nie działa na niego żadna siła, kiedy ustawiony jest prostopadle do kierunku pola - siła jest największa**. Wartość tej siły jest proporcjonalna do natężenia prądu w przewodniku.

Oddziaływanie wzajemne przewodników z prądem

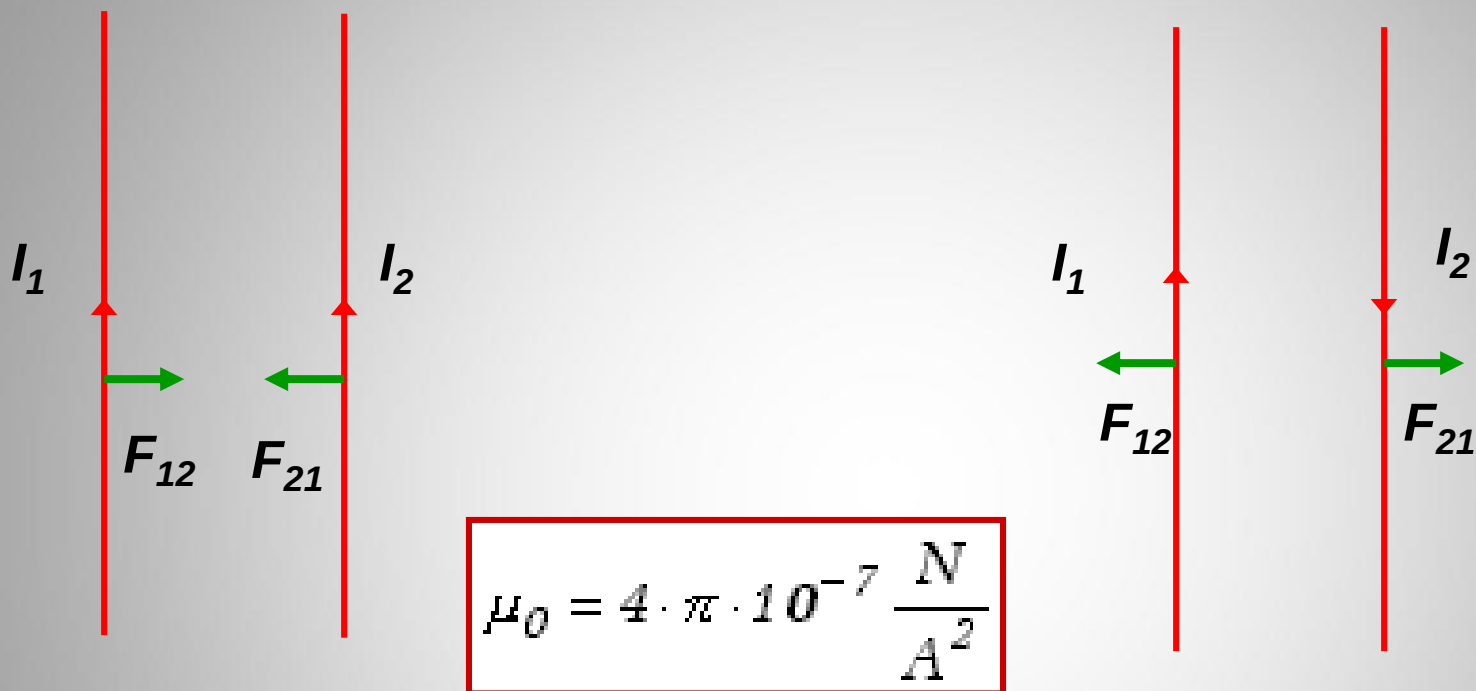


$$F_{12} = B_2 \cdot I_1 \cdot l_1 = \frac{\mu_0 \cdot I_2}{2 \cdot \pi \cdot d} \cdot I_1 \cdot l_1$$

Siła działająca na jednostkę
długości przewodnika:

$$F = \frac{\mu_0 \cdot I_1 \cdot I_2}{2 \cdot \pi \cdot d}$$

Definicja jednostki natężenia prądu

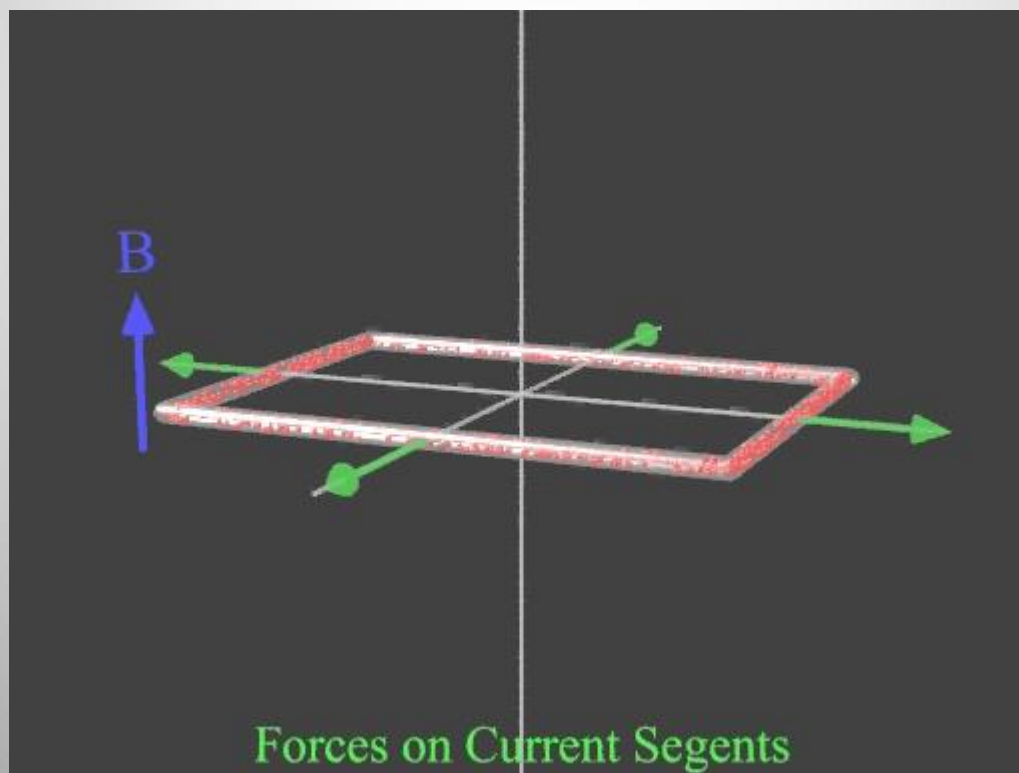


Jeden amper (**1A**) to natężenie takiego stałego prądu elektrycznego, który płynąc w dwóch równoległych, nieskończenie długich przewodach o znikomo małym okrągłym przekroju, znajdujących się w próżni w odległości wzajemnej **1m** powoduje powstawanie między nimi siły równej **$2 \cdot 10^{-7} \text{ N}$** na każdy metr ich długości.

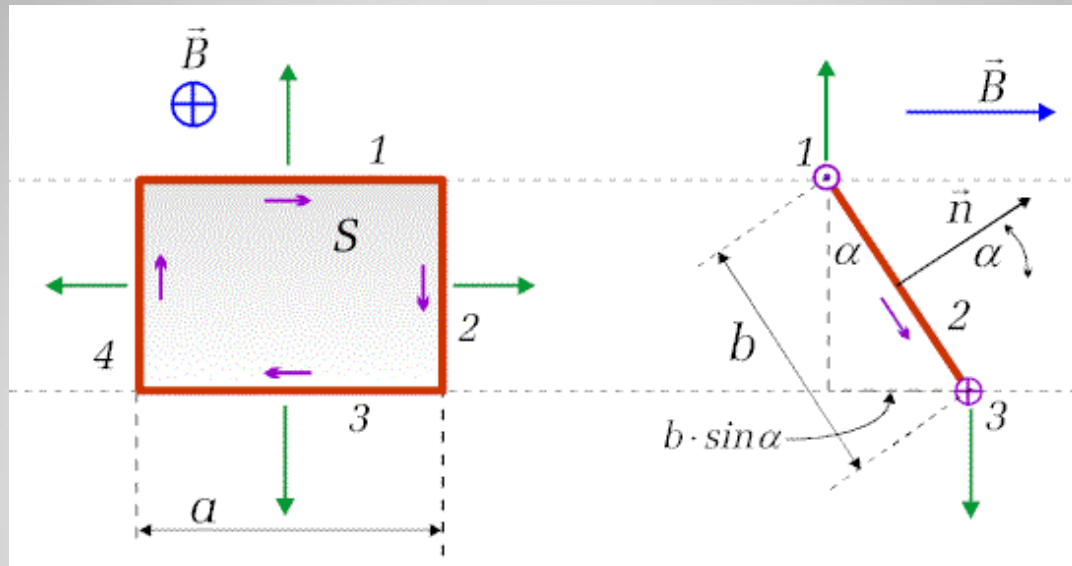
Dipol magnetyczny

Odpowiednikiem dipola w przypadku pola magnetycznego jest ramka z prądem

Jaka siła działa na ramkę z prądem w polu magnetycznym?



Dipol magnetyczny



Siły działające na odcinki 2 i 4 skierowane są w przeciwne strony i znoszą się wzajemnie. Siły działające na odcinki 1 i 3 też skierowane są w przeciwne strony, ale kiedy płaszczyzna ramki jest nachylona względem poziomu to powstaje moment obrotowy

$$M = 2 \cdot I \cdot a \cdot B \cdot \frac{b}{2} \cdot \sin \alpha = I \cdot \overbrace{a \cdot b}^S \cdot B \cdot \sin \alpha = I \cdot S \cdot B \cdot \sin \alpha$$

$$\vec{\mu} = I \cdot S \cdot \vec{n}$$

$$\vec{M} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

Praca przy obracaniu dipola magnetycznego

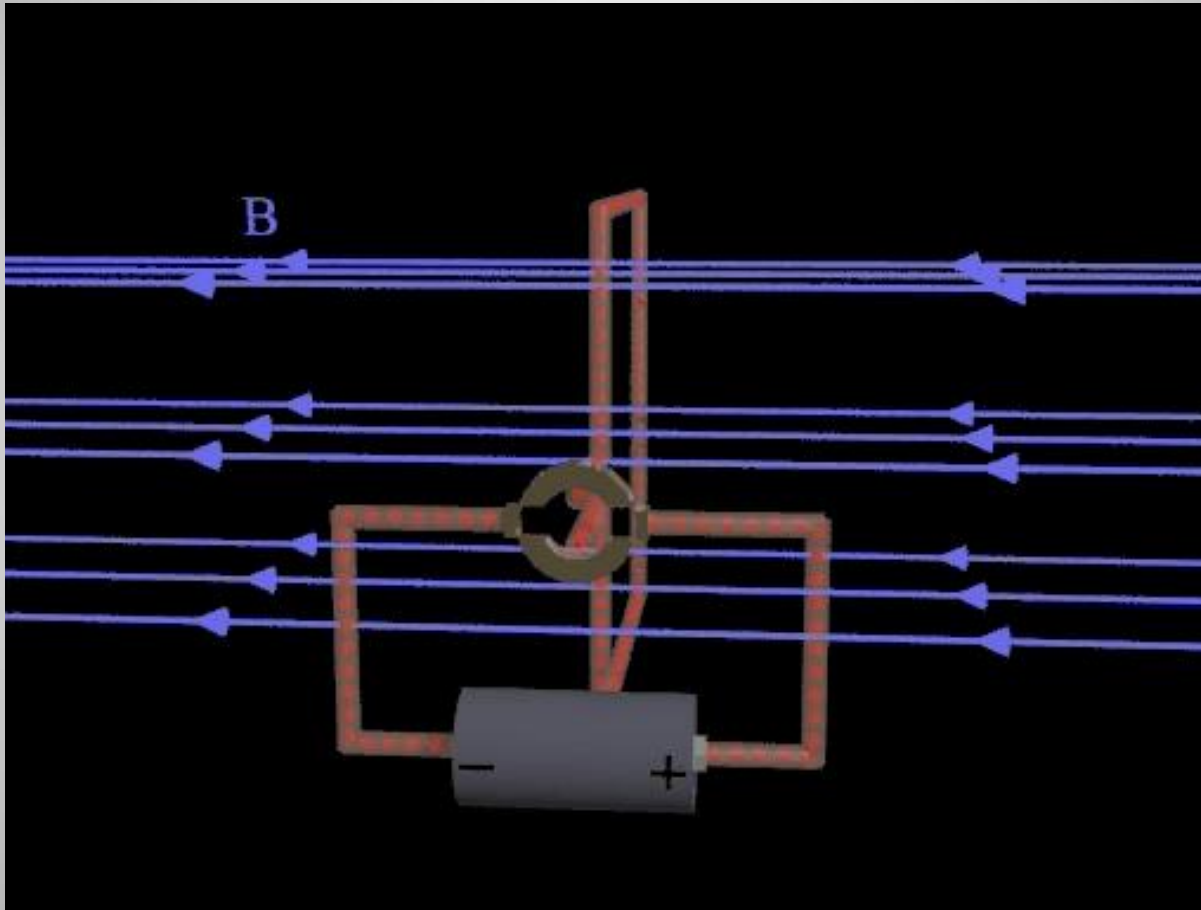
$$W = \int_{\pi/2}^{\alpha} \mu \cdot B \cdot \sin \alpha' \cdot d\alpha' = -\mu \cdot B \cdot \cos \alpha = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

Praca ta jest miarą energii potencjalnej zamkniętego obwodu z prądem w polu magnetycznym. Tak jak układ dwóch jednakowych ładunków o przeciwnym znaku nazwaliśmy dipolem elektrycznym, tak teraz przez analogię każdy zamknięty obwód z prądem elektrycznym będziemy nazywali dipolem magnetycznym.

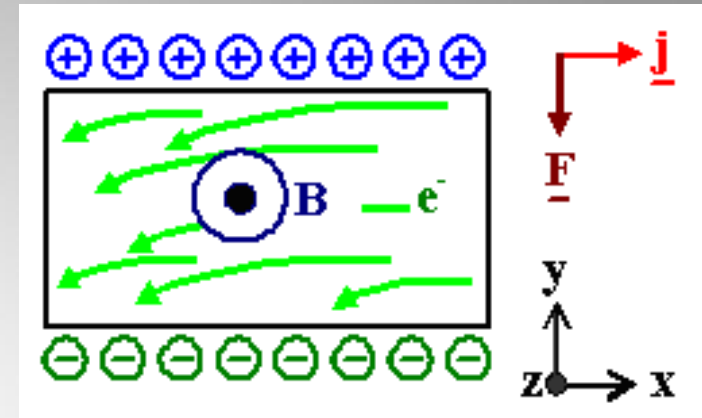
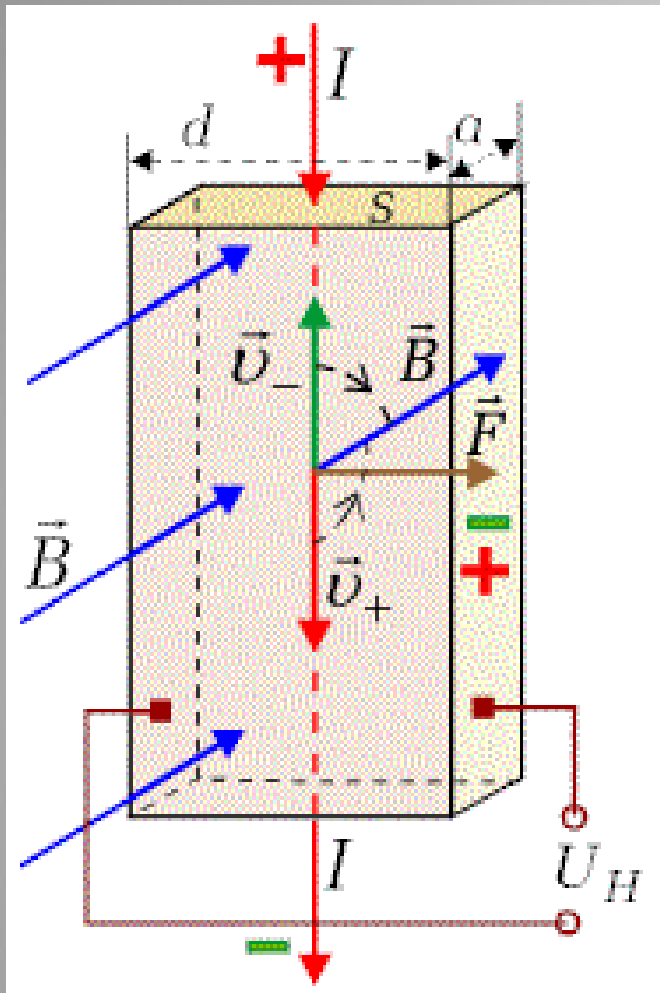
Silnik elektryczny



Silnik elektryczny



Efekt Halla



$$q \cdot E = q \cdot v \cdot B$$

$$E_H = U_H / d$$

$$U_H = v \cdot B \cdot d$$

$$dq = \overbrace{v \cdot dt}^{dV} \cdot \sum_{\vec{r}} \cdot n \cdot e, \quad \text{czyli} \quad v = \frac{dq}{dt} \cdot \frac{1}{a \cdot d \cdot n \cdot e} = \frac{I}{a \cdot d \cdot n \cdot e}$$

Efekt Halla

$$U_H = \frac{I \cdot B \cdot d}{a \cdot d \cdot n \cdot e} = \left(\frac{1}{n \cdot e} \right) \cdot \frac{I \cdot B}{a} = R_H \cdot \frac{I \cdot B}{a}$$

$$R_H = 1 / (n \cdot e)$$

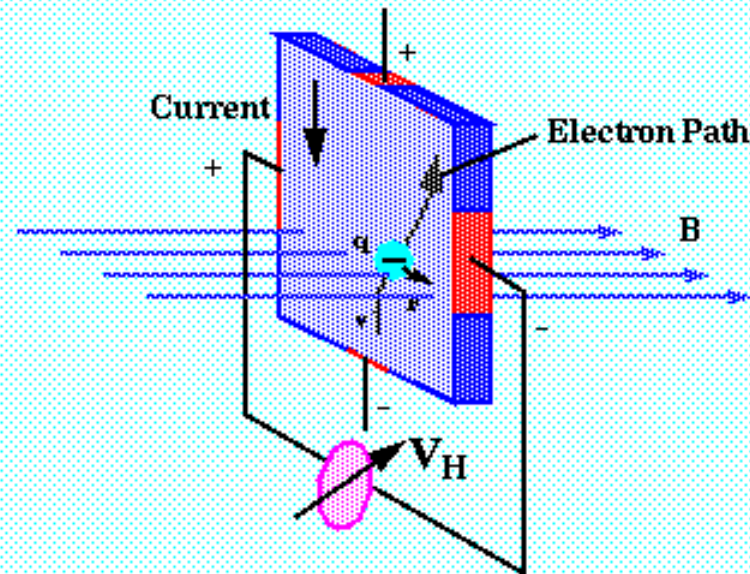
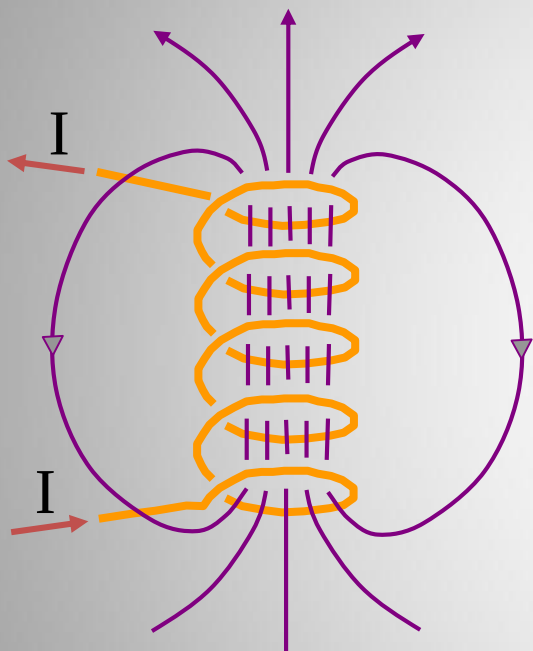


Figure M1 Hall Effect Sensor

Energia pola magnetycznego



Energia zgromadzona w cewce:

$$U_m = \frac{1}{2} LI^2$$

Gęstość energii pola magnetycznego:

$$u_m = \frac{1}{2\mu_0} \cdot B^2$$

Pole magnetyczne w materiałach

Magnetyczne własności materiałów określają głównie magnetyczne właściwości ich elektronów – spinowe i orbitalne momenty magnetyczne

paramagnetyki

Namagnesowanie własne ma taki sam kierunek jak zewnętrzne pole magnetyczne

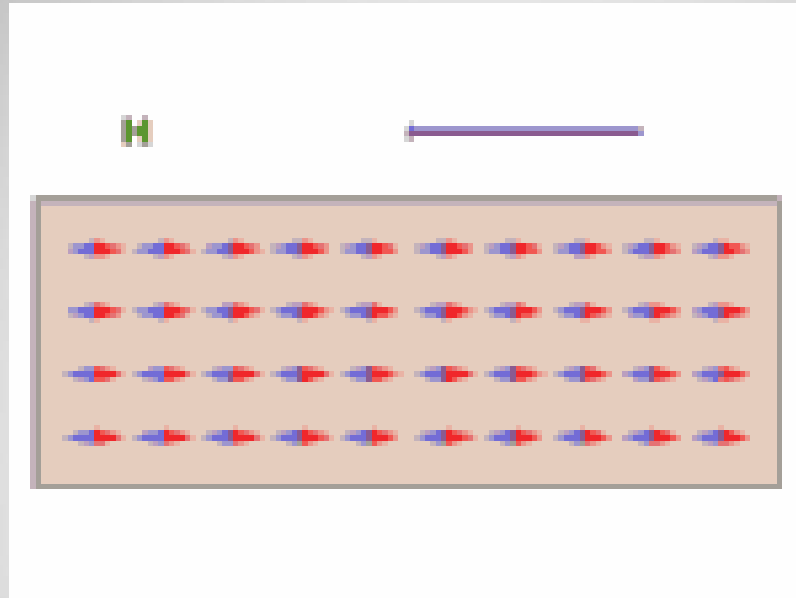
diamagnetyki

Namagnesowanie własne ma przeciwny kierunek do zewnętrznego pola magnetycznego

ferromagnetyki

Występują domeny, których rozmiary są rzędu części milimetra i które zachowują się jak małe magnesy

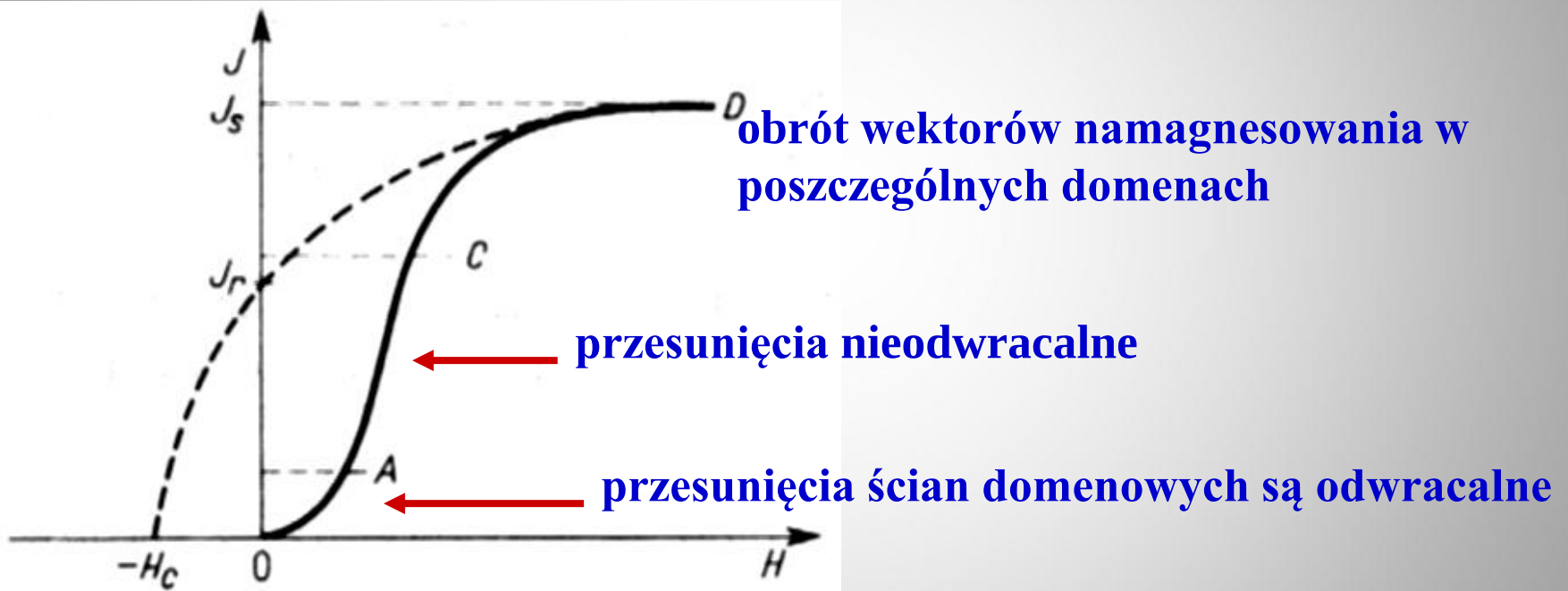
Pole magnetyczne w ferromagnetykach



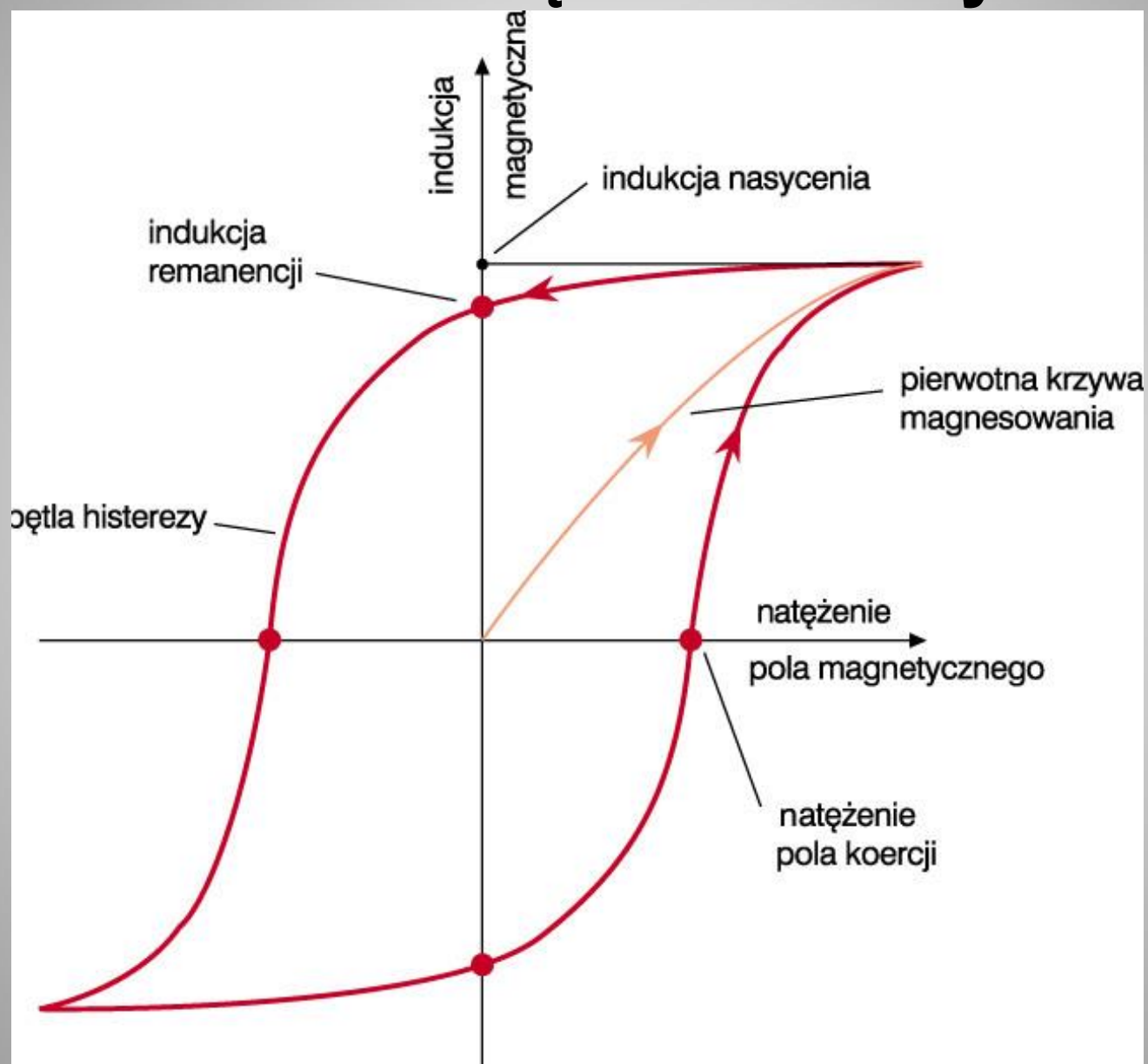
W materiałach ferromagnetycznych można wyróżnić małe obszary zwane domenami, których rozmiary są rzędu części milimetra i które zachowują się jak małe magnesy. Ustawienia ich biegunów magnetycznych w materiale są jednak chaotyczne i materiał jako całość nie wykazuje własności magnetycznych. Kiedy jednak w zewnętrznym polu magnetycznym ustawienia te zostają zorientowane w jednym kierunku, materiał staje się magnesem. Silne wstrząsy oraz termiczne ruchy cząsteczek związane z ogrzewaniem materiału mogą zniszczyć ustawienie domen i materiał traci własności magnetyczne.

Pole magnetyczne w ferromagnetykach

Domeny, w których kierunek polaryzacji tworzy mały kąt z kierunkiem pola, będą się rozrastać kosztem innych



Pętla histerezy



Pole magnetyczne w materiałach

Wektor namagnesowania – moment magnetyczny jednostki objętości

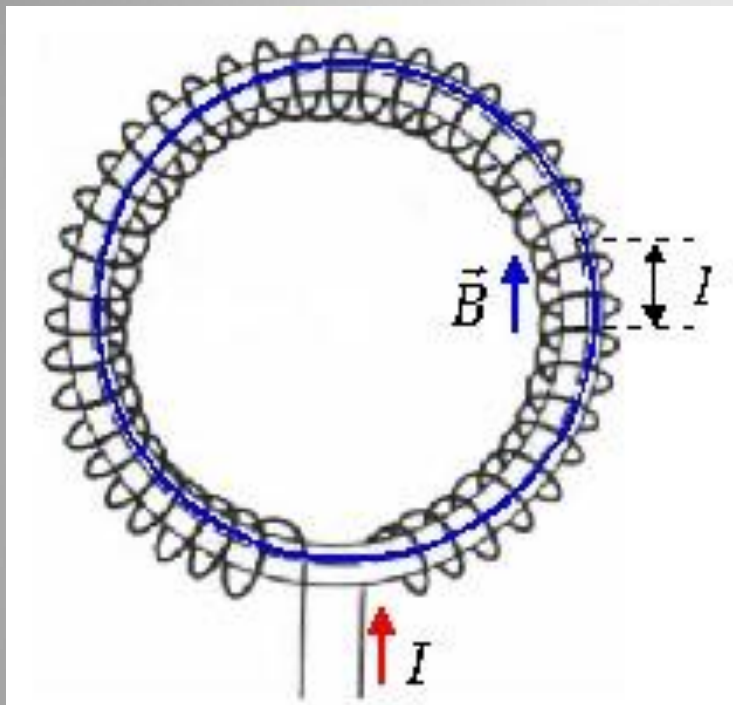
$$\vec{M} = \vec{\mu}/V$$

Prawo Curie:

$$M = C \cdot \frac{B}{T}$$

Prawo to nie obowiązuje dla bardzo silnych pól i bardzo niskich temperatur. Magnetyzacja posiada pewną określoną wartość, której nie można przekroczyć przez zwiększanie pola lub zmniejszanie temperatury

Pole magnetyczne w materiałach



$$B_0 = \mu_0 \cdot n \cdot I = \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot I$$

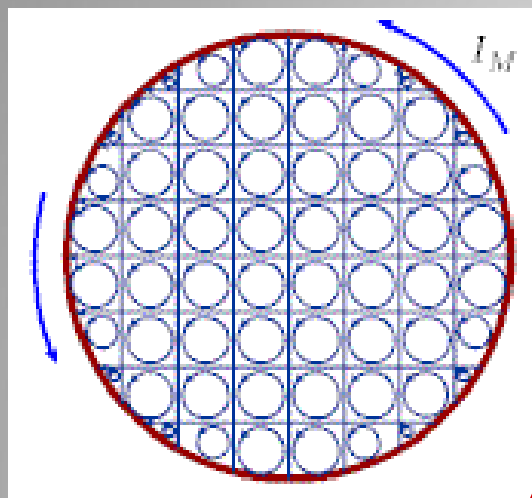
$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_M$$

Pole zewnętrzne

Pole powstałe
w materiale

B_M pojawia się wskutek ustawienia się dipoli magnetycznych cząsteczek materiału równoległe do osi toroidu w rezultacie przepływu prądu elektrycznego w uzwojeniu nawiniętym na jego korpusie. W materiałach para- i dia-magnetycznych B_M jest stosunkowo niewielkie, ale jest znacznie większe w materiałach ferromagnetycznych.

Pole magnetyczne w materiałach



$$B_0 = \mu_0 \cdot n \cdot I = \mu_0 \cdot \frac{N}{l} \cdot I$$

$$B_M = \mu_0 \cdot \frac{N_M \cdot I_M}{l}$$

Całkowity prąd
magnetyzacji

$$M = \frac{N_M \cdot I_M \cdot S}{V} = \frac{N_M \cdot I_M \cdot S}{S \cdot l} = \frac{N_M \cdot I_M}{l}$$

$$\vec{B}_M = \mu_0 \cdot \vec{M}$$

B_M możemy formalnie zapisać jako rezultat przepływu prądu magnetyzacji I_M

Pole magnetyczne w materiałach

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \cdot \vec{M}$$

Prawo Ampera w materiałach:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \oint (\vec{B}_0 + \mu_0 \cdot \vec{M}) \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot (I + I_M)$$

$$\oint \vec{B}_0 \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I, \quad \oint \vec{M} \cdot d\vec{l} = I_M$$

$$\oint \left[\frac{\vec{B} - \mu_0 \cdot \vec{M}}{\mu_0} \right] \cdot d\vec{l} = I$$

Pole magnetyczne w materiałach

Natężenie pola magnetycznego:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B} - \mu_0 \cdot \vec{M}}{\mu_0}$$

$$\vec{B} = \mu_0 \cdot \vec{H} + \mu_0 \cdot \vec{M}$$

$$\vec{B}_0 = \mu_0 \cdot \vec{H}$$

Prawo Ampera:

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$$

Pole magnetyczne w materiałach

$$\vec{M} = \chi \cdot \vec{H}$$



Podatność magnetyczna

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0(1 + \chi)}$$

$$\mu = 1 + \chi$$

Względna podatność magnetyczna

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

Związek pomiędzy wektorem natężenia pola magnetycznego i wektorem magnetyzacji zapisuje się wprowadzając pojęcie tzw. *podatności magnetycznej* ośrodka oznaczonej symbolem χ

Pole magnetyczne i elektryczne

Pole magnetyczne

$\vec{H}$

$\vec{M}$

$\vec{B}$

Pole elektryczne

$\vec{D}$

$\vec{P}$

$\vec{E}$

Prądy wirowe

