

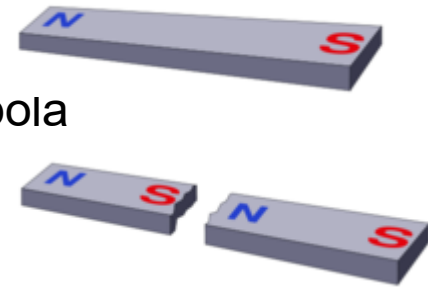
Podstawy fizyki – sezon 2

4. Pole magnetyczne 1

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

Pola magnetycznego

- ❓ Magnetostatyka – nauka o stałych niezależnych od czasu polach magnetycznych (część magnetyzmu, który z kolei jest gałęzią elektromagnetyzmu)
- ❓ Źródłem pola magnetycznego jest magnes trwały lub obwód z prądem.
- ❓ Każdy magnes ma dwa bieguny – umownie nazwane północnym i południowym. Magnes jest odpowiednikiem dipola elektrycznego.
- ❓ Nie ma monopoli magnetycznych!!!! Magnes po podzieleniu dalej ma DWA bieguny!
- ❓ Nie można zatem mówić o pełnej analogii pomiędzy polami: elektrycznym i magnetycznym.
- ❓ Ale podobieństwa są – w szczególności będziemy omawiać linie pola (magnetycznego), oddziaływanie magnesów i oddziaływanie pola magnetycznego na ładunek (elektryczny).



Źródła pola magnetycznego

- ❑ Magnes wytwarza wokół siebie **wektorowe pole magnetyczne**.
- ❑ Źródłami pola magnetycznego są również elektromagnesy – cewki z drutu nawinięte na rdzeń żelazny, prąd elektryczny wytwarza pole.
- ❑ **Cząstki** budujące materię (elektrony, protony, neutrony) są **źródłami pola magnetycznego**. Wewnętrzne pole charakteryzuje cząstkę (jak masa lub ładunek elektryczny).
- ❑ Wypadkowe pole niektórych materiałów może być różne od zera – są to magnesy trwałe, np. Fe_3O_4 .
- ❑ 1820 – H.Oersted wykazał, że poruszające się ładunki elektryczne są źródłami pola magnetycznego.
- ❑ Pole magnetyczne opisywane jest: wektorem natężenia pola $\vec{H}$ oraz wektorem indukcji pola magnetycznego $\vec{B}$.



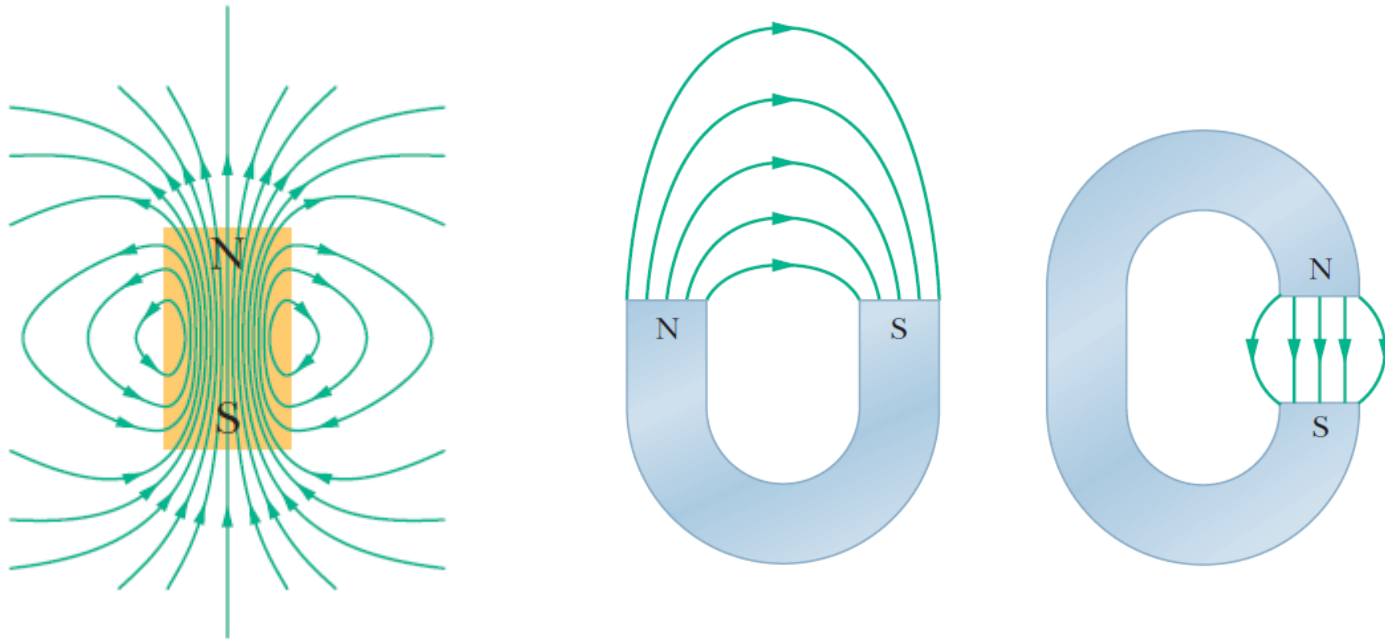
In bulk material the domains usually cancel, leaving the material unmagnetized.



Externally applied magnetic field.

Linie pola magnetycznego

❓ Pole magnetyczne ilustrowane jest za pomocą linii pola:



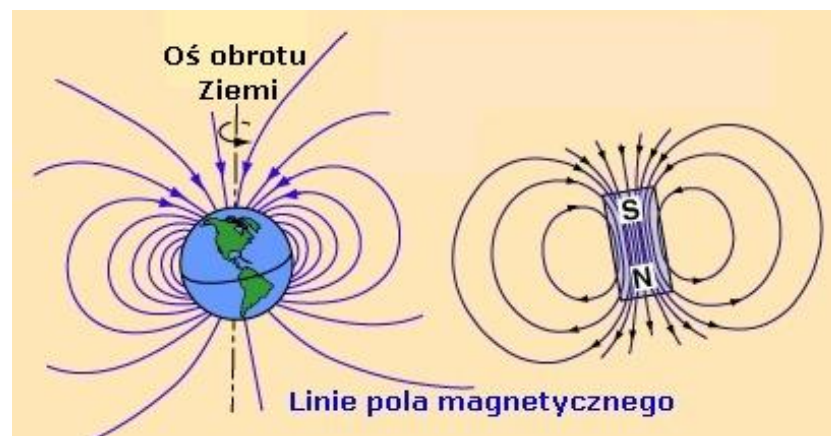
❓ Z obserwacji wynika, że bieguny jednoimienne się odpychają, różnoimienne się przyciągają.

Indukcja magnetyczna

❓ Wartość wektora indukcji magnetycznej $\vec{B}$ charakteryzuje siłę pola magnetycznego:

$$[B] = T = \frac{N}{c} \frac{m}{s} = \frac{N}{A \cdot m}$$

źródło	indukcja $B[T]$
kosmos	10^{-10}
Ziemia	10^{-4}
magnes sztabkowy	0.01
elektromagnes	1.5
magnes nadprzewodzący	8
gwiazda neutronowa	10^8

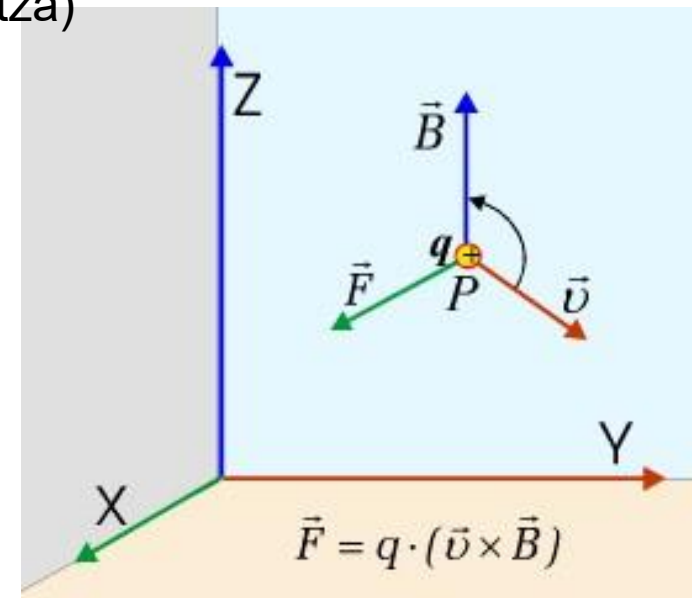


Indukcja pola magnetycznego

- ❑ Pole elektryczne można było zbadać umieszczając w nim ładunek i znajdując siłę działającą na niego ze strony pola.
- ❑ Podobnie wyznaczymy pole magnetyczne – umieścimy w nim naładowaną cząstkę próbną i znajdziemy siłę.
- ❑ Okazuje się, że na poruszający się dodatni ładunek próbny w polu magnetycznym działa siła (Lorentza) określona jako:

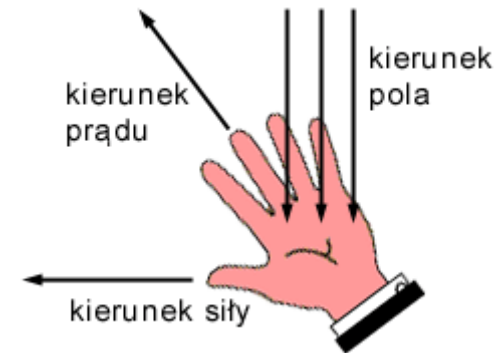
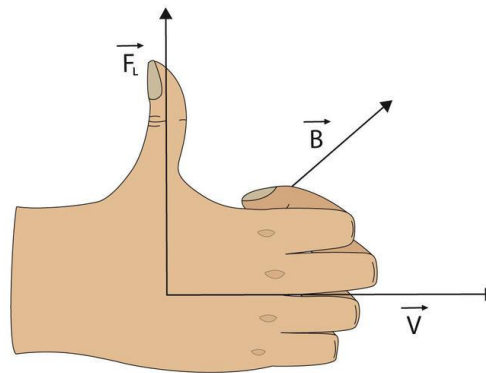
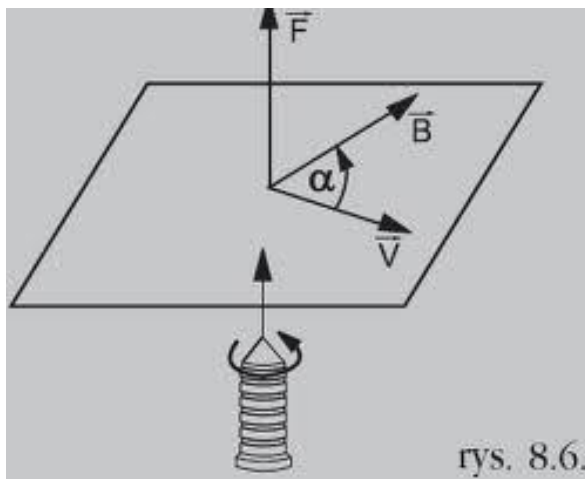
$$\vec{F}_L = q \vec{v} \times \vec{B}$$

- ❑ Siła Lorentza jest prostopadła do wektorów $\vec{v}$ oraz $\vec{B}$.



Wyznaczanie siły Lorentza

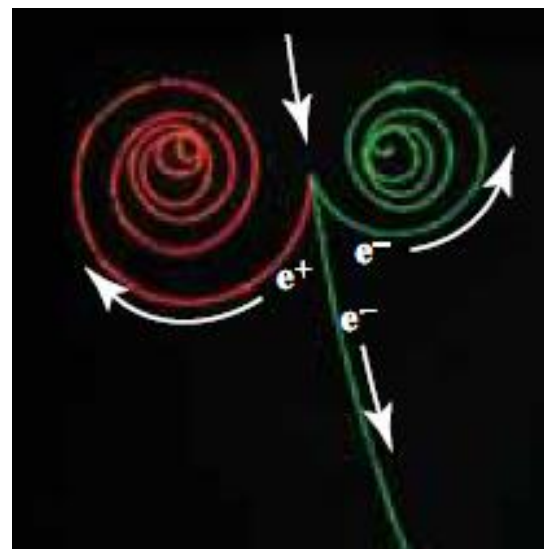
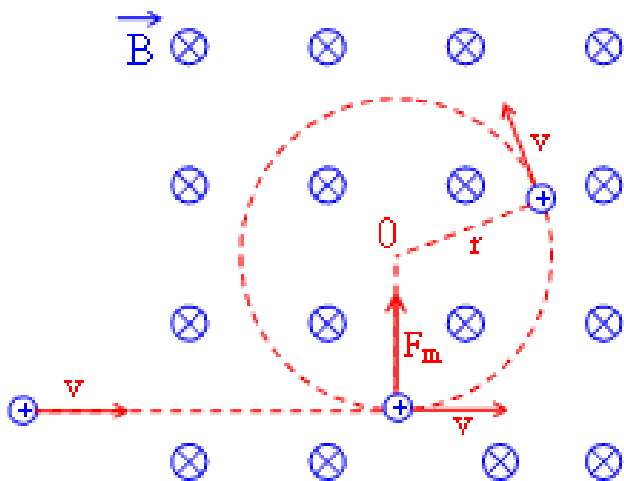
- Trzy wektory $\vec{F}_L$, $\vec{v}$, $\vec{B}$ tworzą trójkę wektorów prawoskrętnych.
- Zwrot wektora znajdziemy za pomocą reguły prawej dłoni (śruby prawoskrętnej):



- Siła Lorentza nie ma składowej równoległej do prędkości $\vec{v}$ – nie zmienia energii kinetycznej, może jedynie zmieniać kierunek prędkości.

Ruch ładunku w polu magnetycznym

- ❓ Jeśli naładowana cząstka wpada w obszar pola magnetycznego prostopadle do wektora indukcji $\vec{B}$, to pod wpływem siły Lorentza porusza się po okręgu.



Siła Lorentza jest tutaj siłą dośrodkową:

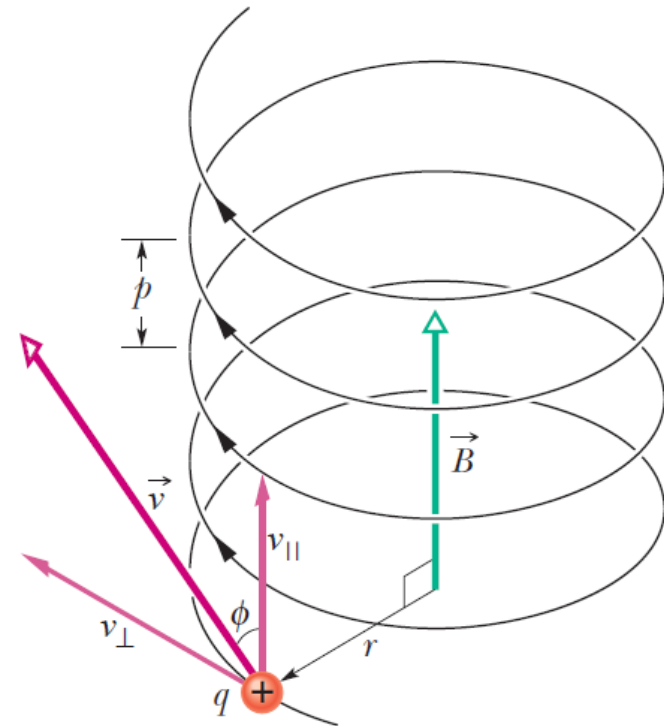
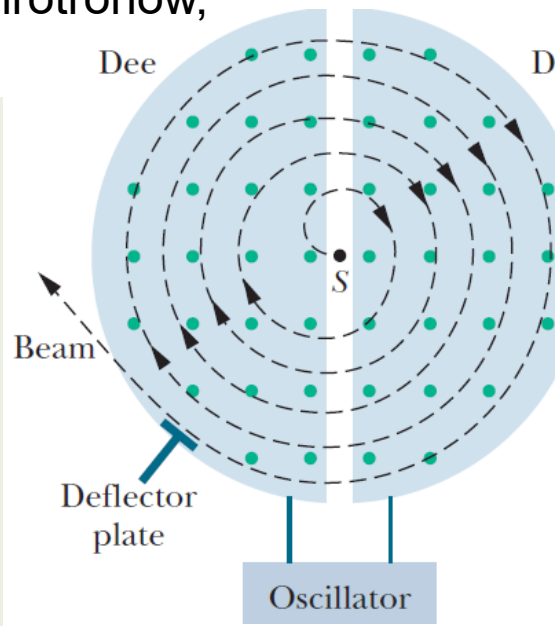
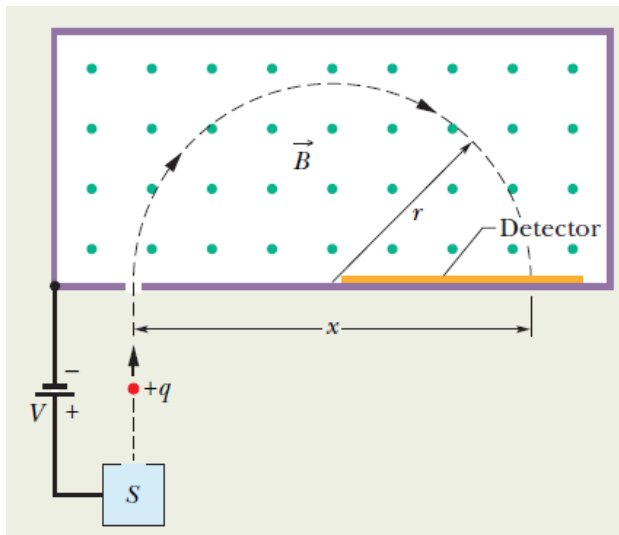
$$F_L = F_d$$

$$qvB = \frac{mv^2}{R}$$

odkrycie pozytonu

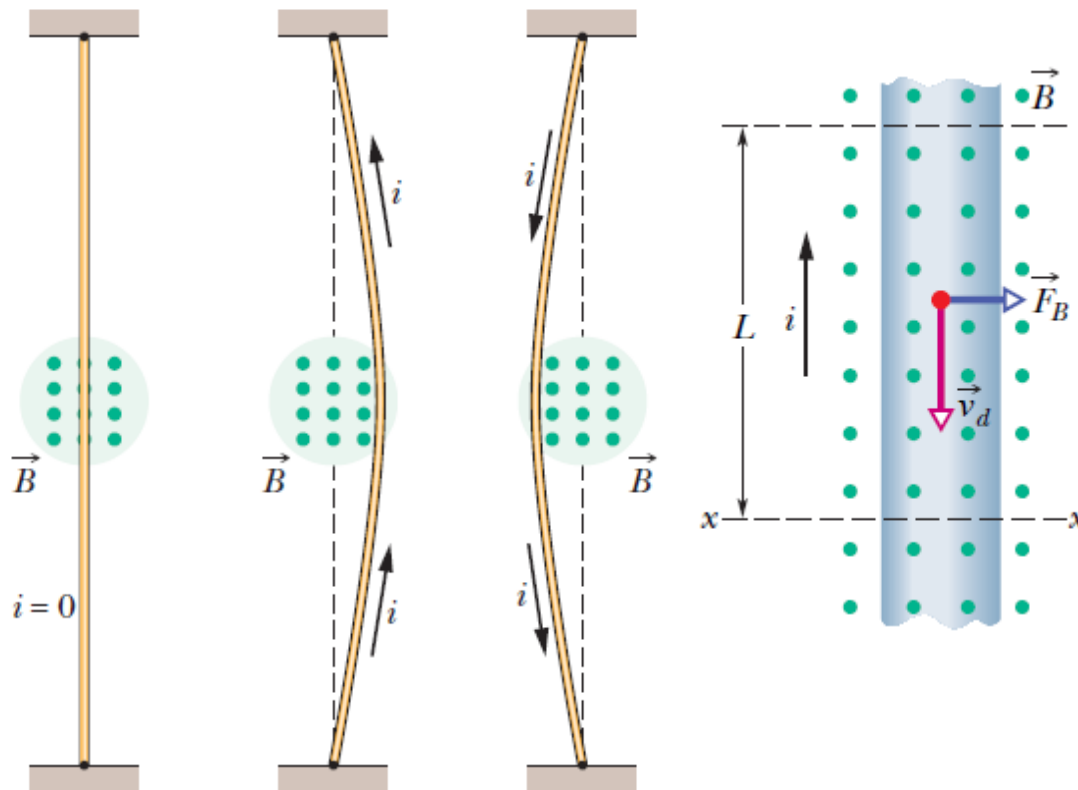
Ładunek w polu magnetycznym

- ❓ Jeśli ładunek wpada pod dowolnym kątem –porusza się po linii śrubowej
- ❓ Ruch ładunku w polu magnetycznym po okręgu lub torze śrubowym jest podstawą urządzeń służących np. do:
 - spektrometrów,
 - cyklotronów i synchrotronów,



Przewód z prądem w polu magnetycznym

- ❓ Pole magnetyczne wytwarza poprzeczną siłę, która działa na elektrony – działa ona również na przewodnik z prądem.



w czasie t przez przekrój $x-x$ przepływa ładunek q

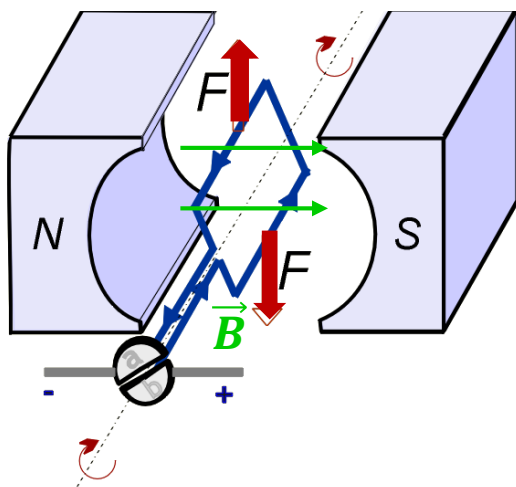
$$q = It = I \frac{L}{v_d}$$

stąd siła Lorentza działająca na przewodnik z prądem I o długości L w polu o indukcji B :

$$\vec{F}_L = I \vec{L} \times \vec{B}$$

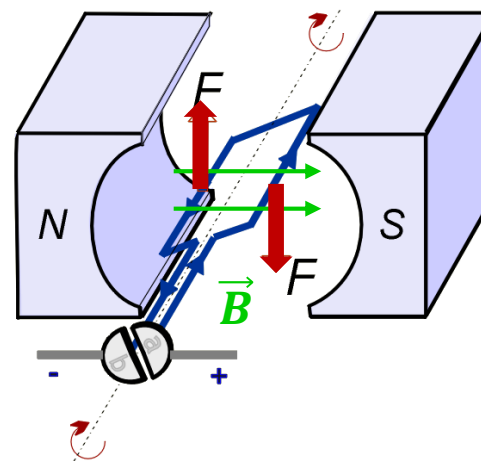
Ramka z prądem w polu magnetycznym

- ❓ Modelem **silnika elektrycznego** jest ramka z prądem w polu magnetycznym.
- ❓ Pracę wykonują siły magnetyczne (Lorentza) – uwaga! błąd w kierunku sił na rysunku



Siła Lorentza działa na boki ramki z prądem i powoduje jej obrót

po wykonaniu połowy obrotu....



komutator zmienia kierunek prądu i siły dalej obracają ramkę

Moment działający na ramkę

- ❓ Na boki ramki działają siły Lorentza – momenty sił 2 i 4 się znoszą, a moment sił 1 i 3 powoduje obrót ramki

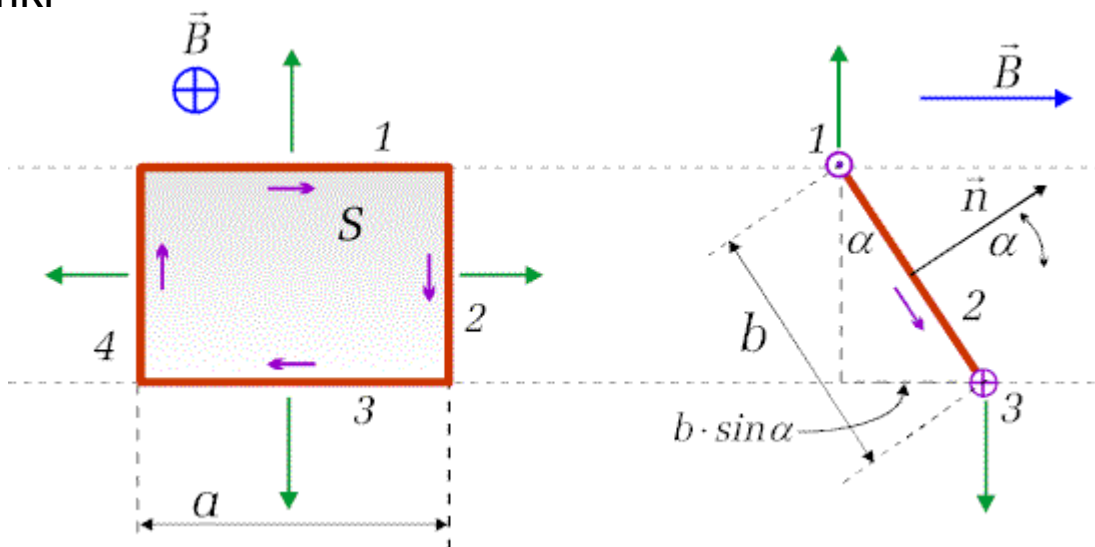
$$\vec{M} = \vec{M}_1 + \vec{M}_3 + \underbrace{\vec{M}_2 + \vec{M}_4}_{=0}$$

$$M = 2 I a B \frac{b}{2} \sin \alpha$$

$$S = a b$$

jeśli zamiast ramki mamy cewkę o N zwojach:

$$M = N I S B \sin \alpha$$

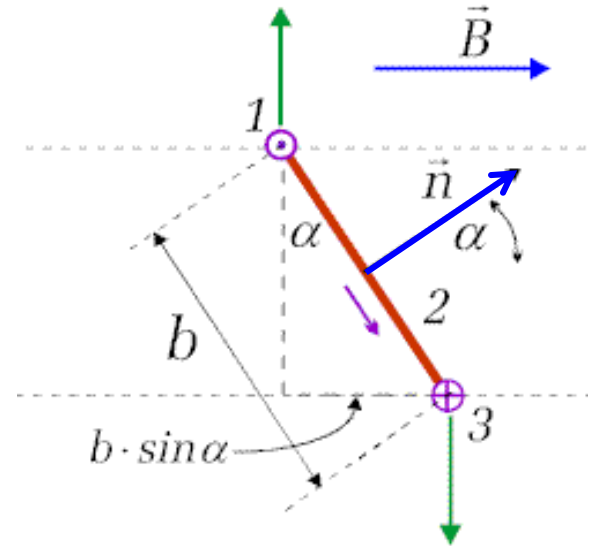


Moment działający na ramkę

- ❓ Jeśli ruch zwoju opiszemy ruchem wektora normalnego $\vec{n}$, to określimy dipolowy moment magnetyczny zwoju: $\vec{\mu} = IS \vec{n}$.
- ❓ Moment obrotowy, jaki uzyskuje ramka od pola magnetycznego $\vec{B}$:

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

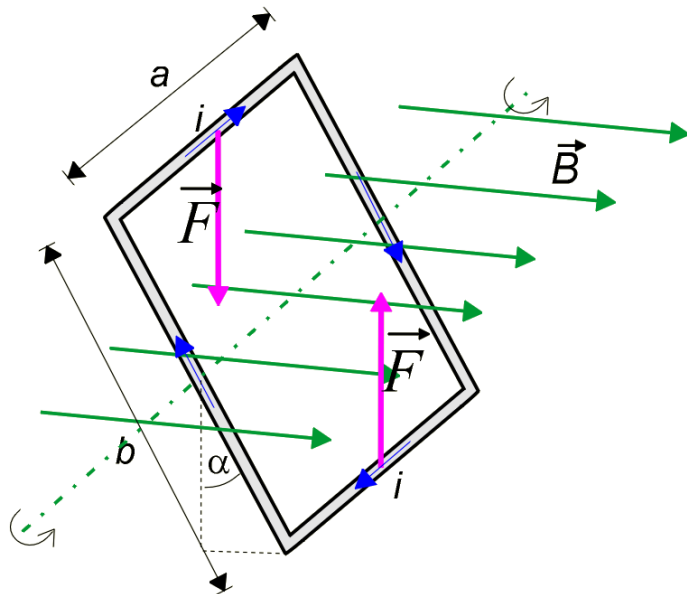
Pole obraca zwój tak, aby wektory $\vec{\mu}$ i $\vec{B}$ były zgodne



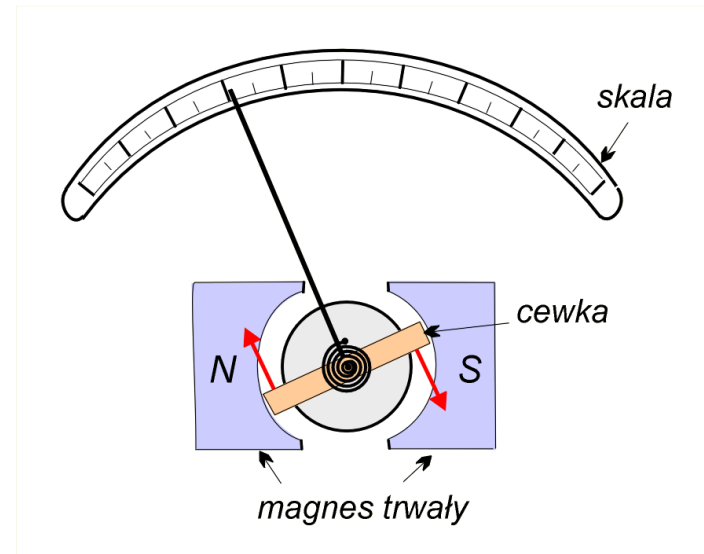
- ❓ W silniku elektrycznym kierunek prądu w cewce zmienia się w chwili, gdy kierunek wektora $\vec{n}$ pokrywa się z kierunkiem indukcji magnetycznej $\vec{B}$.

Pole magnetyczne - zastosowanie

- Przewodząca ramka w polu magnetycznym – moment skręcający

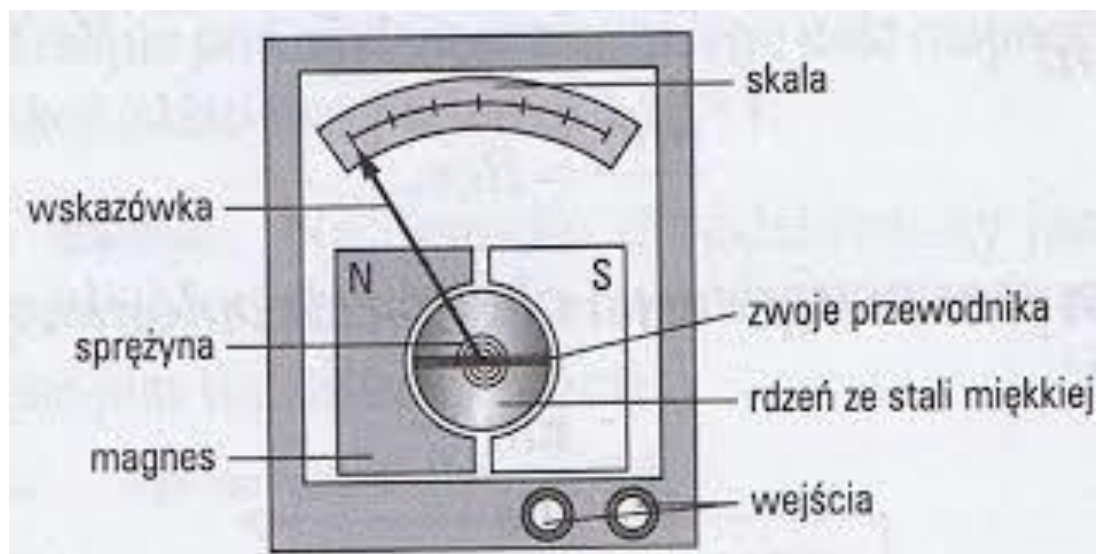


- Galwanometr, amperomierz, woltomierz



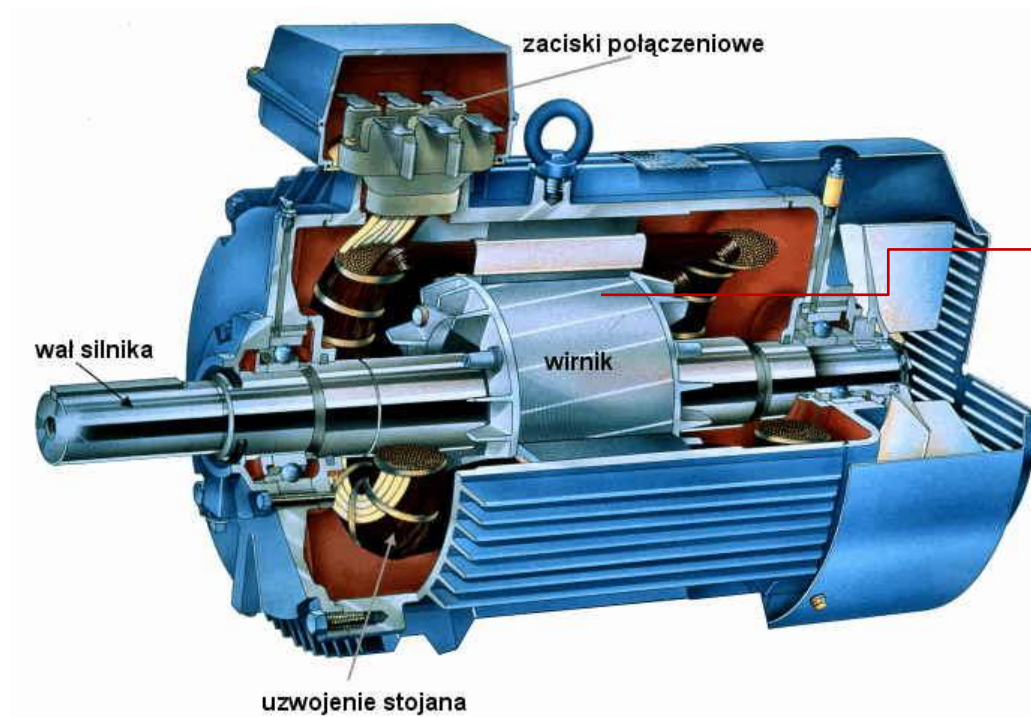
Mierniki elektryczne

- ❑ Analogowe mierniki prądu i napięcia wykorzystują pomiar momentu siły magnetycznej działającej na sprężynę (cewkę) pochodzącej od pola magnetycznego



Silniki elektryczne

- ❓ Pierwszy pracujący silnik elektryczny - 1837 w USA (Thomas Davenport) do napędu wiertarki i tokarki do drewna – 450 obr/min



- zamiast ramki - wiele zwojów
- rdzeń żelazny większe pole $\vec{B}$

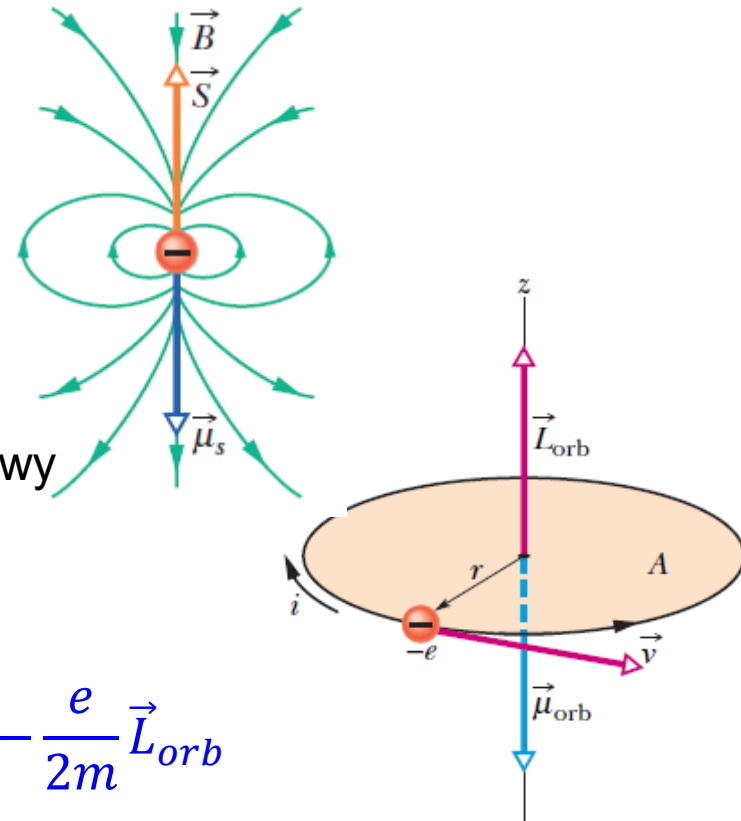
Elektron – momenty magnetyczne (*)

- ❓ Jeśli wyobrazimy sobie elektron jako wirującą kulkę o momencie pędu $\vec{S}$ (co jest niestety sprzeczne ze zrozumieniem elektronu jako cząstki punktowej, bez wymiarów), to można mu przypisać **spinowy moment magnetyczny** $\vec{\mu}_s$:

$$\vec{\mu}_s = -\frac{e}{m} \vec{S}$$

- ❓ W zewnętrznym polu magnetycznym elektron ustawia się zgodnie z kierunkiem $\vec{B}$, ale jego spin $\vec{S}$ ma przeciwny zwrot.
- ❓ Pamiętajmy, że elektrony wykonują ruch obrotowy w atomie. Zatem również ten ruch opisany jest **orbitalnym momentem magnetycznym**

$$\vec{\mu}_{orb} = -\frac{e}{2m} \vec{L}_{orb}$$



Własności magnetyczne materii

- ❓ Każdy elektron w atomie ma spinowy i orbitalny moment magnetyczny.

Wypadkowy moment magnetyczny materiału jest sumą momentów magnetycznych (orbitalnych i spinowych) elektronów oraz momentów magnetycznych poszczególnych atomów.

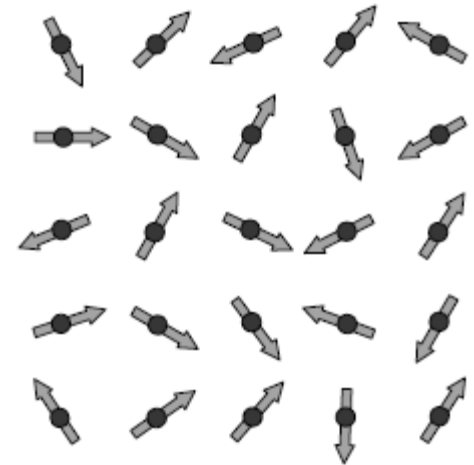
- ❓ Jeśli ta wypadkowa jest różna od zera, to taki materiał ma **własności magnetyczne**:

- **diamagnetyzm** – słabe momenty magnetyczne są indukowane (w przeciwnym kierunku) w atomach, gdy zostaną one umieszczone w zewnętrznym polu magnetycznym, po usunięciu pola zewnętrznego – momenty magnetyczne znikają - bizmut, krzem, cynk, magnez, złoto, miedź
- **paramagnetyzm** (pierwiastki ziem rzadkich – lantanowce, aktynowce, tlen, tlenek azotu, glin, platyna, potas, sód, magnez, wapń),
- **ferromagnetyzm** (żelazo, kobalt, nikiel)

Materiały magnetyczne

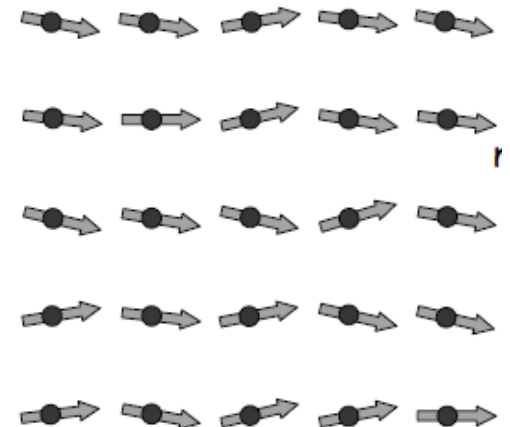
PARAMAGNETYZM

- ❓ Atomy mają momenty magnetyczne zorientowane chaotycznie, materiał nie wytwarza własnego pola.
- ❓ Przyłożone zewnętrzne pole magnetyczne częściowo porządkuje momenty (w kierunku pola), ale wewnętrzne pole znika po usunięciu pola zewnętrznego



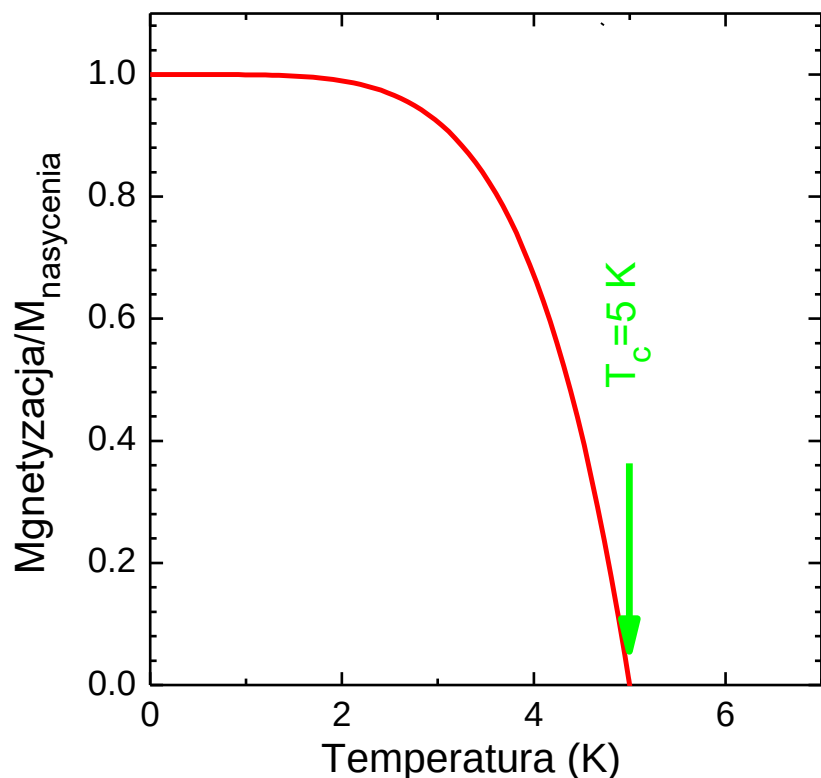
FERROMAGNETYZM

- ❓ Momenty magnetyczne są trwale uporządkowane, powstają obszary (domeny) o dużym momencie magnetycznym.
- ❓ Zewnętrzne pole magnetyczne ustawia pola domen – powstaje wypadkowe bardzo duże pole, które częściowo się utrzymuje po usunięciu pola zewnętrznego



Ferromagnetyzm

- ❑ Namagnesowanie ferromagnetów- powyżej temperatury krytycznej (Curie) T_C namagnesowanie znika:

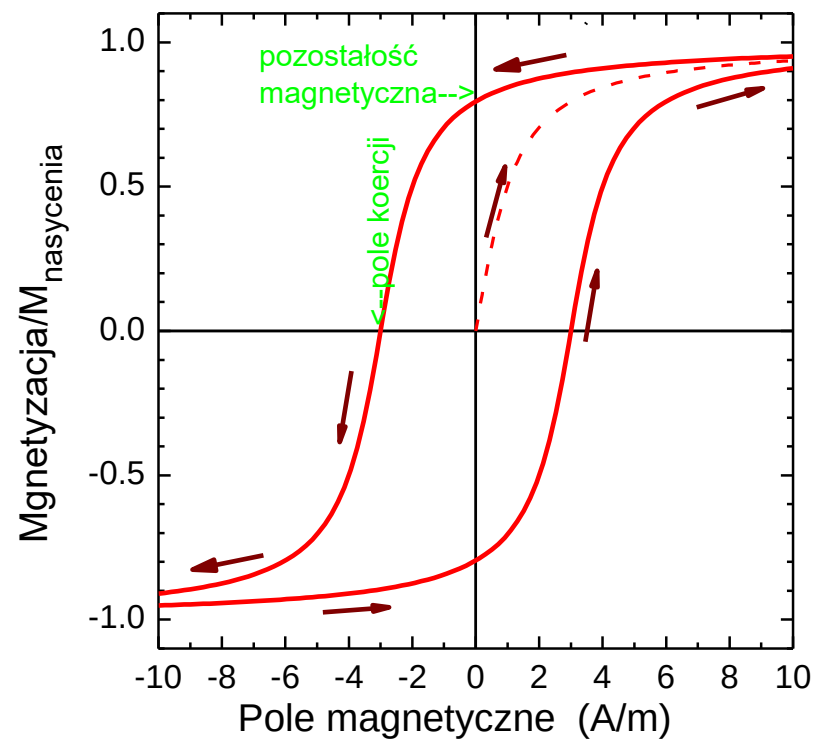
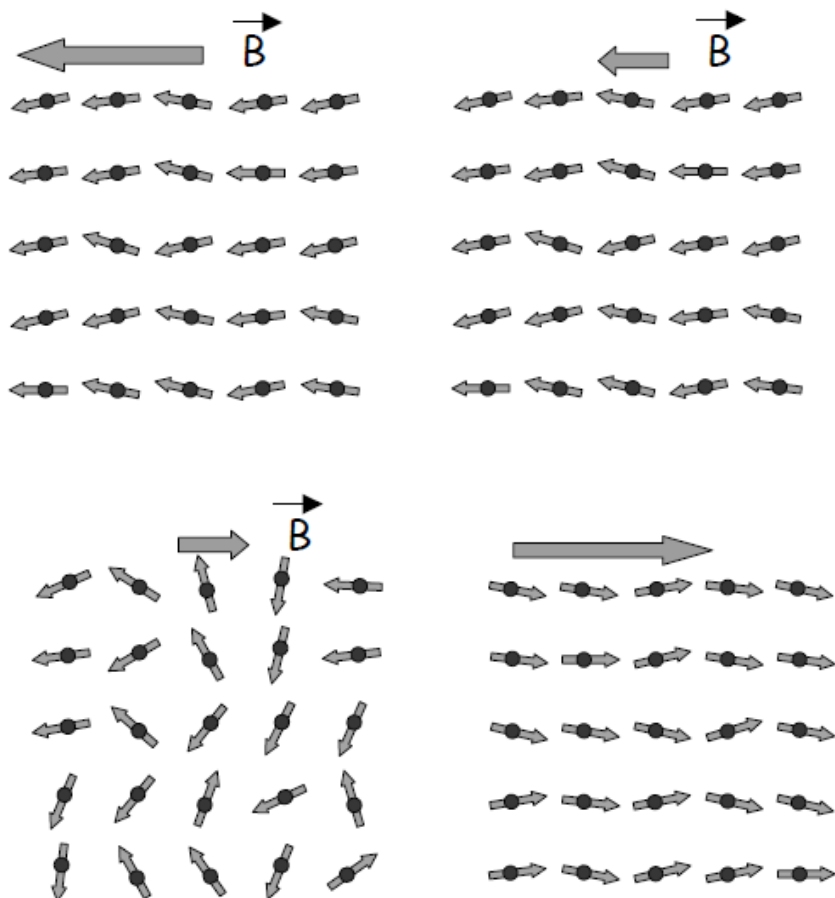


Temperatura Curie:

Fe	770°C
Co	1331°C
Ni	358°C
Fe_3O_4	585°C
stopy	900°C

Magnesowanie ferromagnetyków – pętla histerezy

☐ Zewnętrzne pole magnetyczne powoduje ustawienie momentów magnetycznych



Podsumowanie I (źródła pola magnetycznego)

- ❑ Pole magnetyczne – źródła.
- ❑ Siła Lorentza.
- ❑ Oddziaływanie ramki z prądem z polem magnetycznym.
- ❑ Model silnika elektrycznego.
- ❑ Własności magnetyczne materii.
- ❑ Magnesowanie, pętla histerezy

Indukcja magnetyczna

- ❓ Poruszający się ładunek elektryczny jest źródłem pola magnetycznego.
- ❓ Jak wyznaczyć indukcję tego pola?

element $d\mathbf{l}$ przewodnika z prądem o natężeniu i wytwarza w punkcie P , oddległym od tego elementu o $\vec{r}$, pole o indukcji $d\vec{B}$:

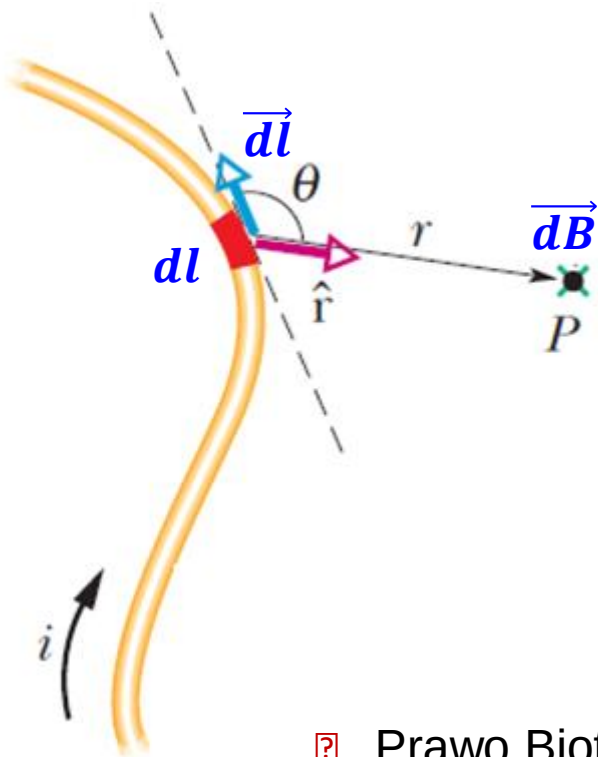
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

prawo Biota-Savarta (1820)

Całkowite pole wytworzone przez przewodnik:

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

- ❓ Prawo Biota-Savarta do opisu pola magnetycznego jest odpowiednikiem prawa Coulomba dla pola elektrycznego

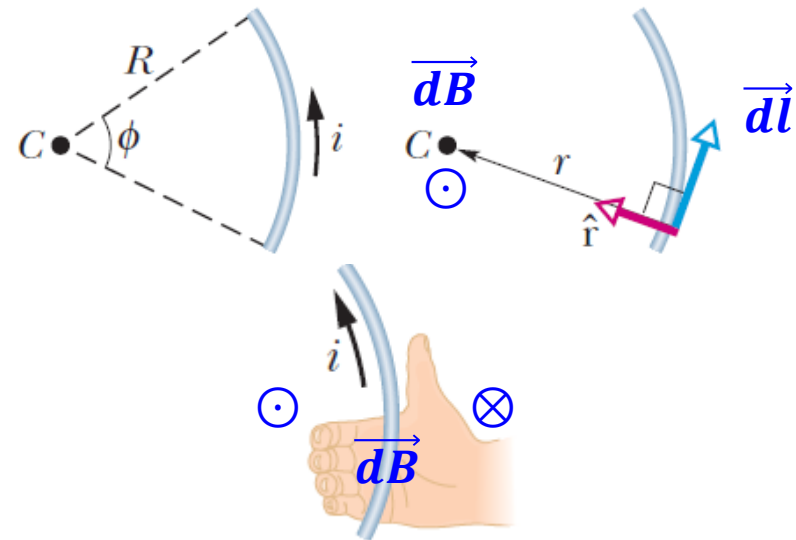


Pole od przewodnika o kształcie łuku

❓ Przykł. wykorzystania prawa Biota-Savarta – obliczenie pola od przewodnika wygiętego w łuk o promieniu R , w środku krzywizny C :

procedura:

- dzielimy przewodnik na małe elementy ,
- z reguły prawej ręki wyznaczamy zwrot wektora indukcji w środku C ,
- obliczamy $d\vec{B}$ i potem $\vec{B}$ całkowite.



$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

$$\left. \begin{aligned} dB &= \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{dl r \sin \pi/2}{r^3} \\ dl &= R d\phi \\ r &= R \end{aligned} \right\} \begin{aligned} dB &= \int_0^\phi \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{R d\phi}{R^2} \\ &= \frac{\mu_0 i}{4\pi R} \int_0^\phi d\phi \end{aligned}$$

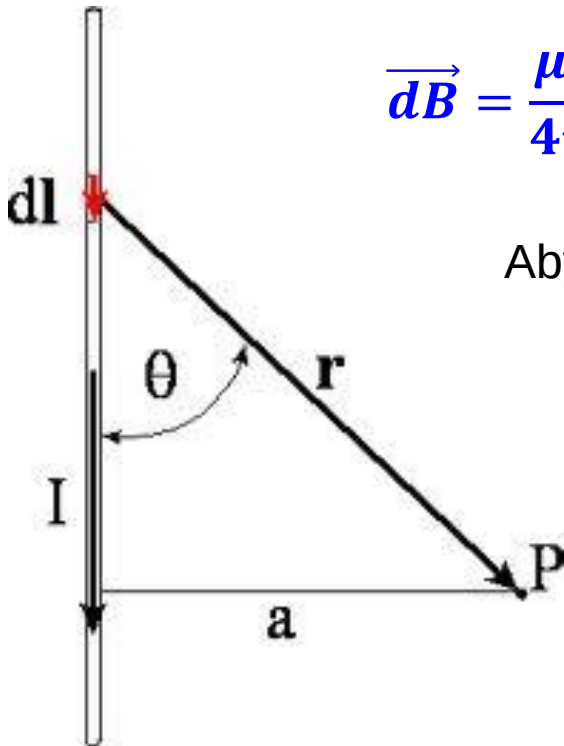
dla $\phi = 2\pi$:

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

wartość indukcji pola magnetycznego w środku kołowego przewodu z prądem

Pole wokół przewodnika

❓ Obliczenie pola od przewodnika o długości l z prądem o natężeniu I :



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

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

Aby uzależnić dB tylko od kąta θ zastosujemy podstawienia:

$$l = a \operatorname{ctg} \theta$$

Po scałkowaniu po całej (nieskończonej) długości przewodnika otrzymujemy

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

ćwiczenia!

Prawo Ampera

- Wyznaczenie indukcji magnetycznej wokół przewodnika z prądem może być skomplikowane...
- W niektórych przypadkach można wykorzystać prawo Ampera:

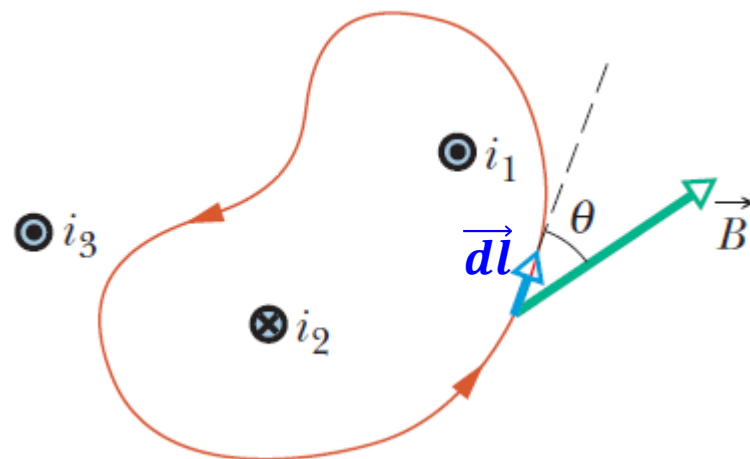
Nieskończone przewodniki z prądem o natężeniu i wytwarzają wokół siebie pole magnetyczne o indukcji B :

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

krążenie wektora indukcji magnetycznej po dowolnej pętli zamkniętej

całkowity prąd wewnątrz tej pętli

prawo Ampera



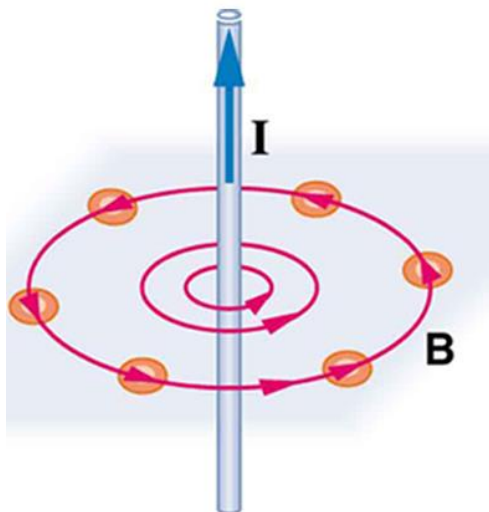
$$I_P = I_1 - I_2$$

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

Prawo Ampere'a - zastosowania

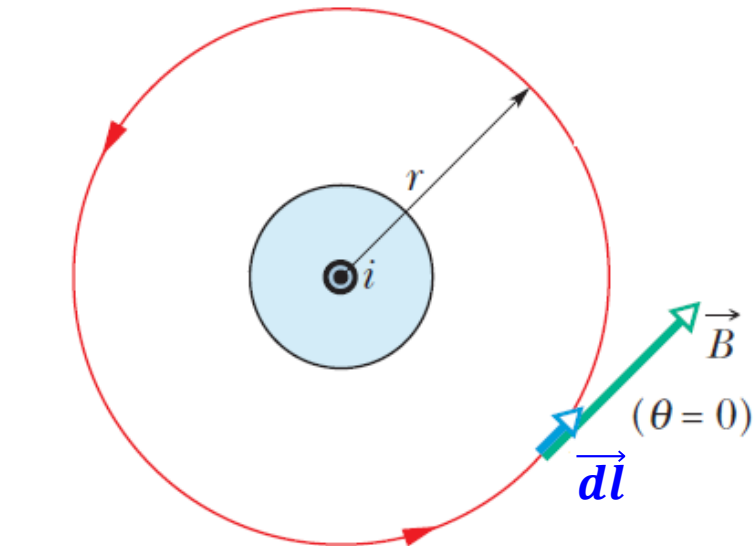
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_P$$

❓ Prawo Ampere'a dla nieskończonego prostoliniowego przewodnika:



$$I_P = I$$

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



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

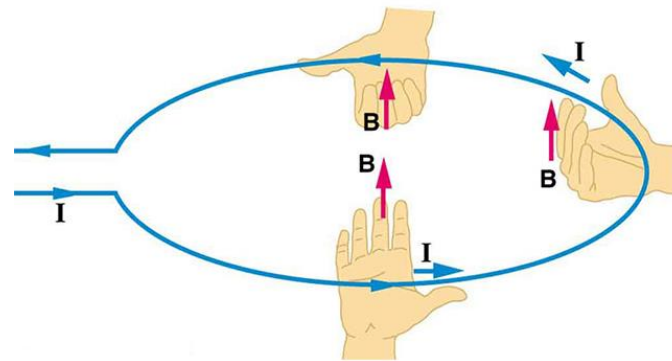
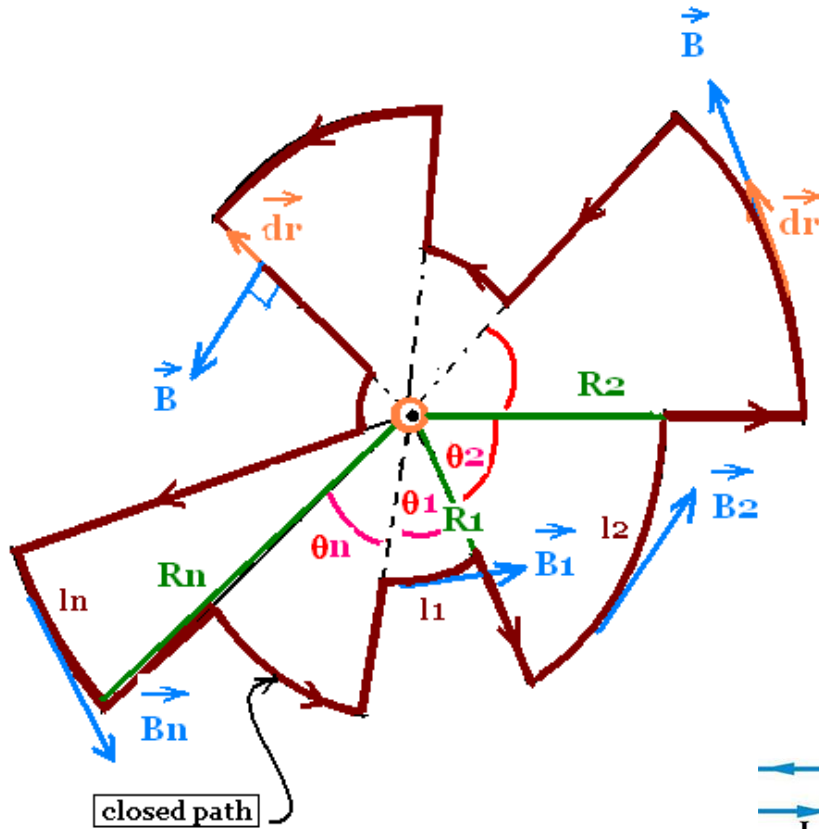
wartość indukcji pola magnetycznego w odległości r od prostoliniowego nieskończonego przewodu z prądem

Déjà vu?

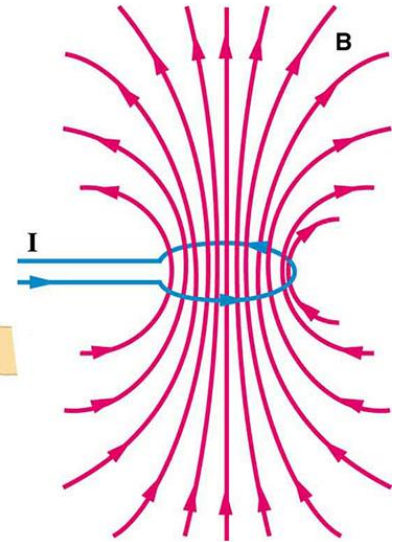
prawo B-S..

Trochę praktyki...

❓ Sprawdź, czy potrafisz?



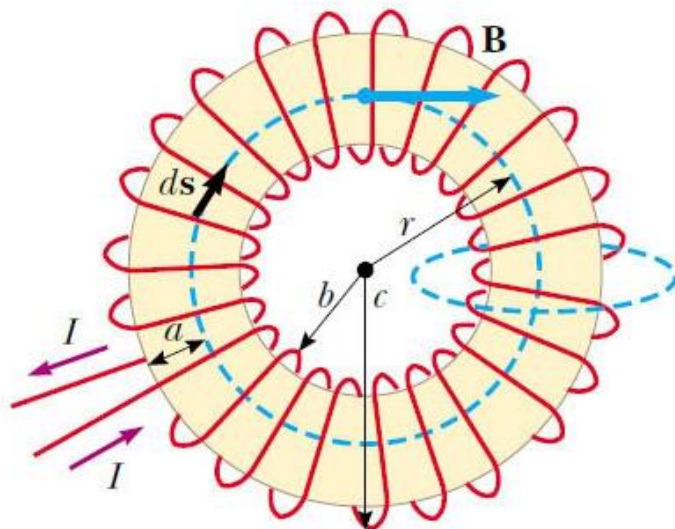
(a)



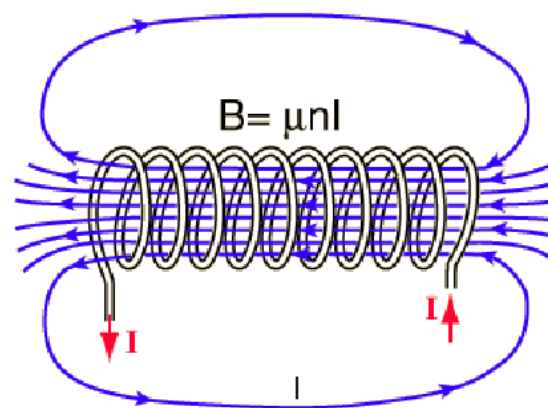
(b)

Inne (ciekawe) przykłady

Torus



Solenoid



ćwiczenia!

Dwa przewody z prądem

- ❑ Dwa przewody z prądem oddziałują na siebie siłami elektrycznymi – jeden przewodnik wytwarza pole magnetyczne na drugi przewodnik z prądem działa siła Lorentza (symetrycznie na odwrót również).
- ❑ W przypadku dwóch równoległych przewodów o długości L :

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$$

$$F_2 = B_1 I_2 L$$

również:

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r}$$

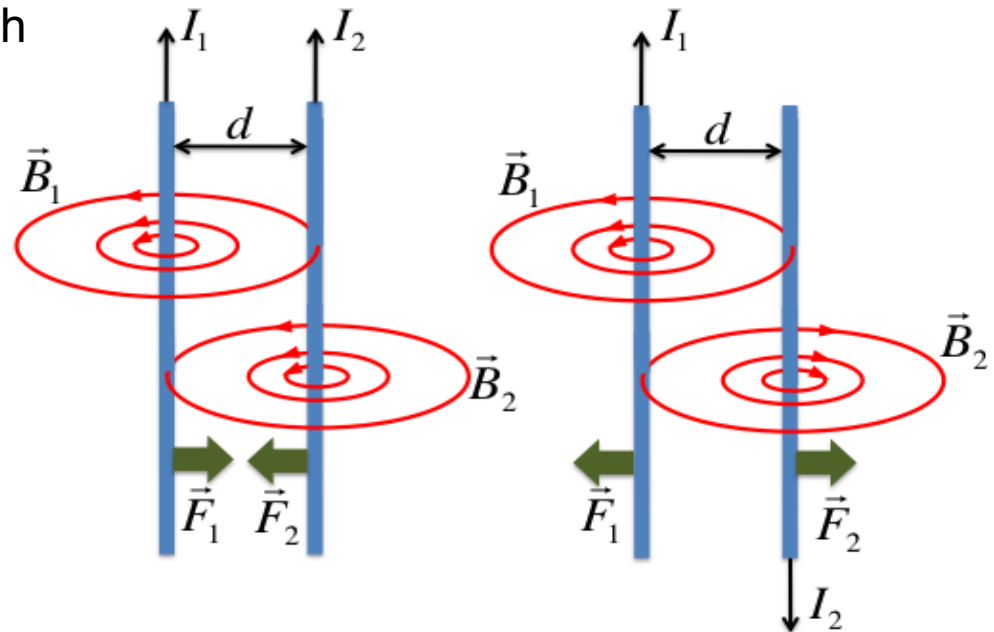
$$F_1 = B_2 I_1 L$$

co daje:

$$r = d$$

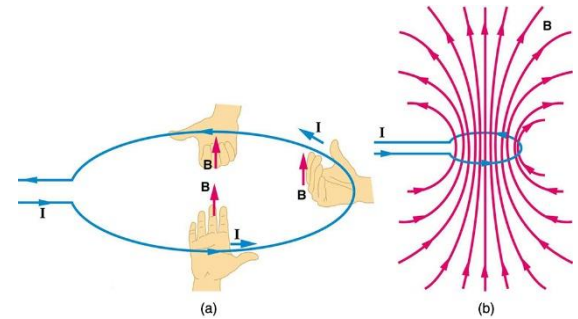
$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 L}{2\pi d}$$

siła oddziaływania dwóch przewodników z prądem.
Zwroty – reguła „prawej ręki”



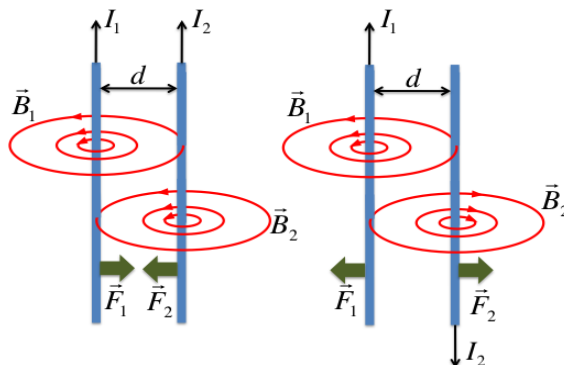
Podsumowanie II

- ❑ Przewodnik z prądem jako źródło pole magnetycznego.
- ❑ Prawo Biota Savarte'a – do obliczania indukcji magnetycznej wokół dowolnego przewodnika z prądem.
- ❑ Prawo Ampera – wygodne obliczenia indukcji pola od pewnych, modelowych przewodników (nieskończony prostoliniowy, cewka, solenoid, torus).
- ❑ Oddziaływanie dwóch przewodników z prądem.



$$\vec{dB} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{i \vec{dl} \times \vec{r}}{r^3}$$

$$\oint \vec{B} \cdot \vec{dl} = \mu_0 I_P$$



Za tydzień: łączymy pole magnetyczne i elektryczne!!!

