

Podstawy fizyki – sezon 2

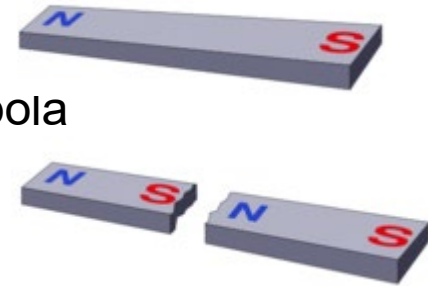
4. Pole magnetyczne

Agnieszka Obłąkowska-Mucha

AGH, WFiIS, Katedra Oddziaływań i Detekcji Cząstek,
D11, pok. 106
amucha@agh.edu.pl
<http://home.agh.edu.pl/~amucha>

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).

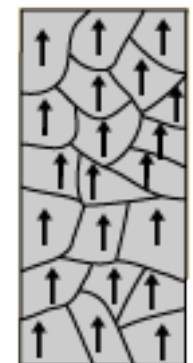


Źródła pola magnetycznego

- ▶ 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} .



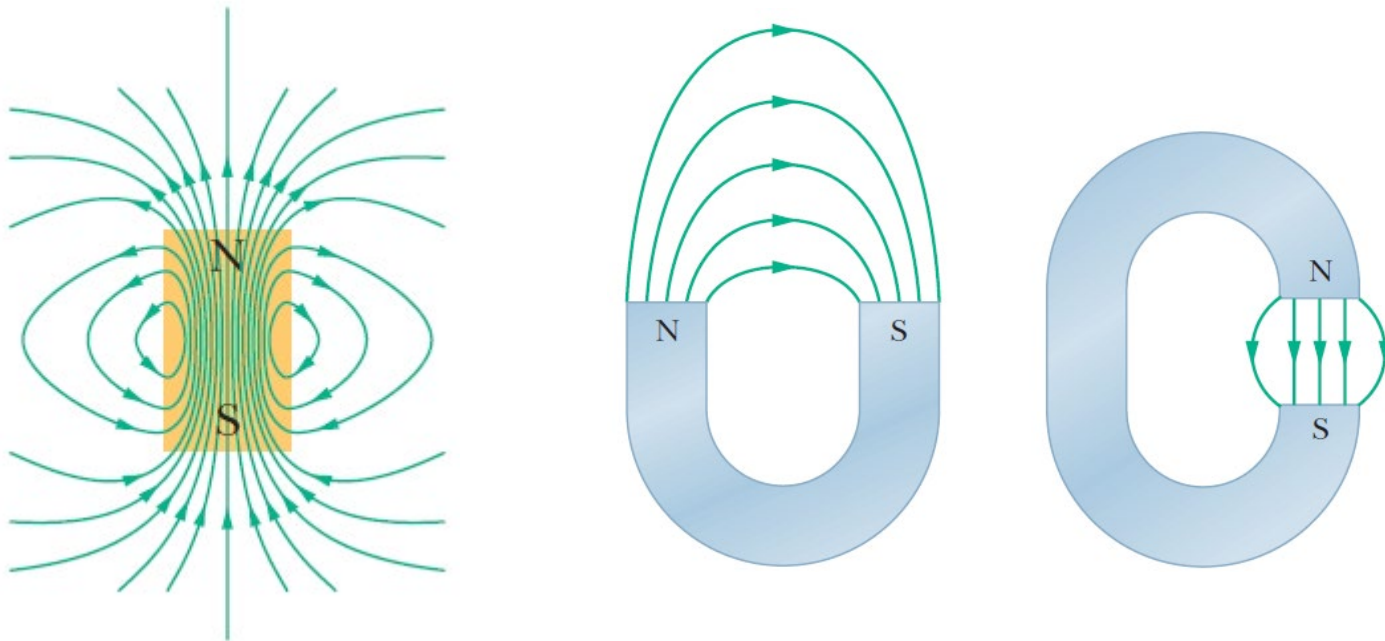
In bulk material the domains usually cancel, leaving the material unmagnetized.



Externally applied magnetic field.

Linie pola magnetycznego

- ▶ Pole magnetyczne ilustrowane jest za pomocą linii pola:



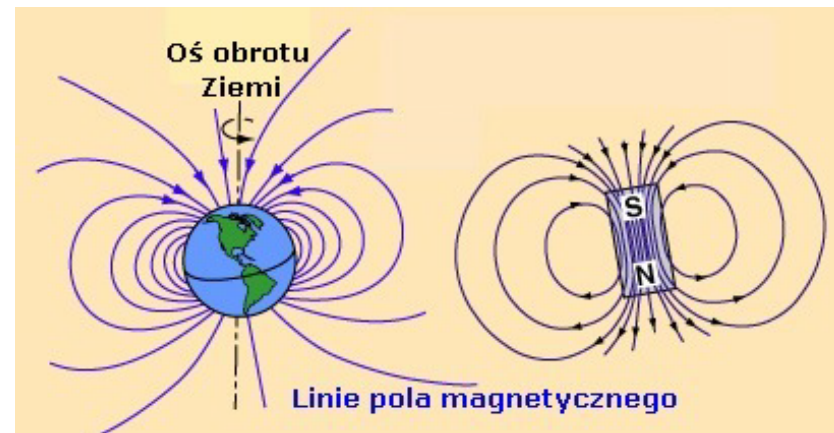
- ▶ Z obserwacji wynika, że bieguny jednoimienne się odpychają, różnoimienne się przyciągają.

Indukcja magnetyczna

- ▶ Wartość wektora indukcji magnetycznej \vec{B} charakteryzuje siłę pola magnetycznego:

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

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

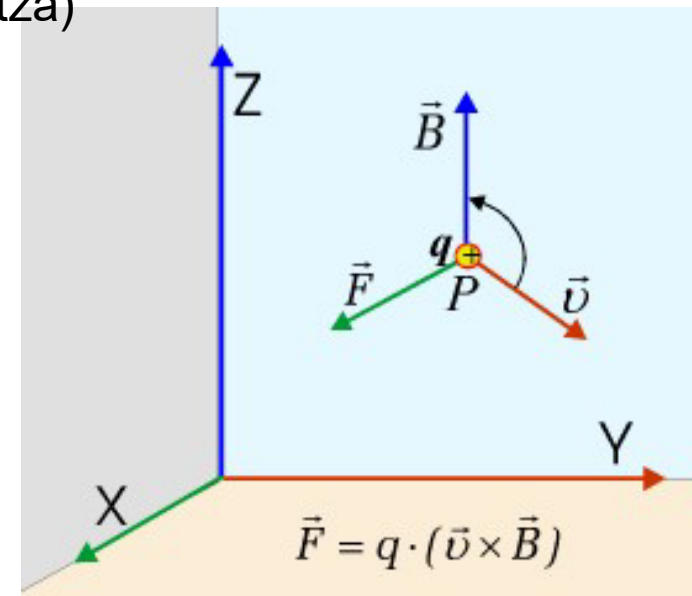


Indukcja pola magnetycznego

- ▶ 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:

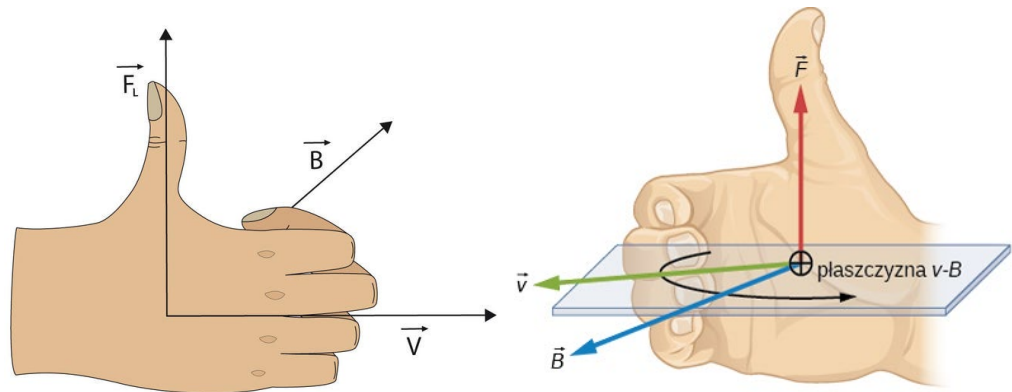
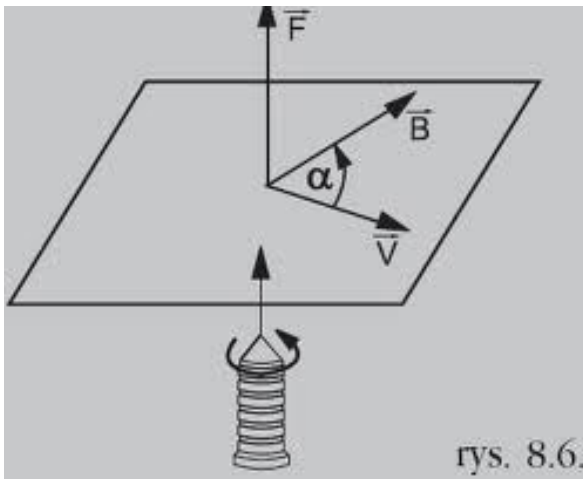
$$\vec{F}_L = q \vec{v} \times \vec{B}$$

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



Wyznaczanie siły Lorentza

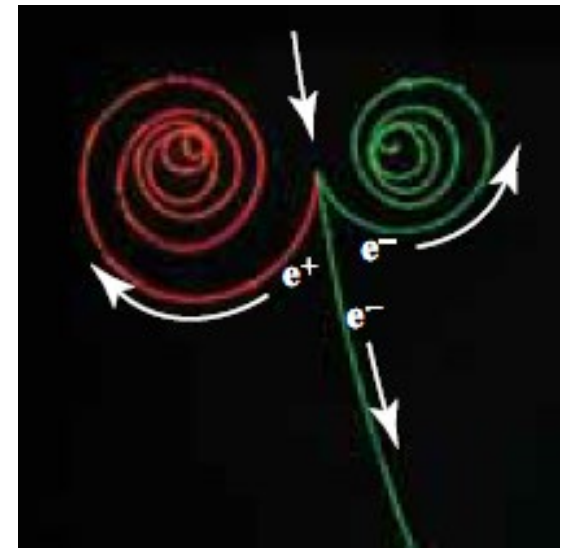
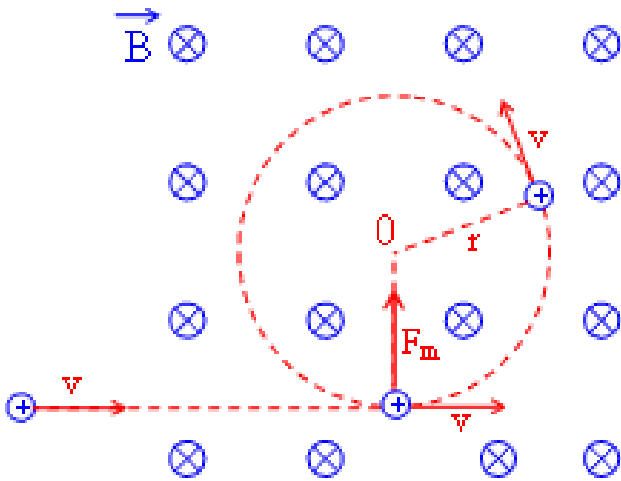
- ▶ Trzy wektory $\vec{F}_L, \vec{v}, \vec{B}$ tworzą trójkę wektorów prawoskrętnych.
- ▶ Zwrot wektora znajdziemy za pomocą reguły prawej dłoni (śruby prawoskrętnej):



- ▶ 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:

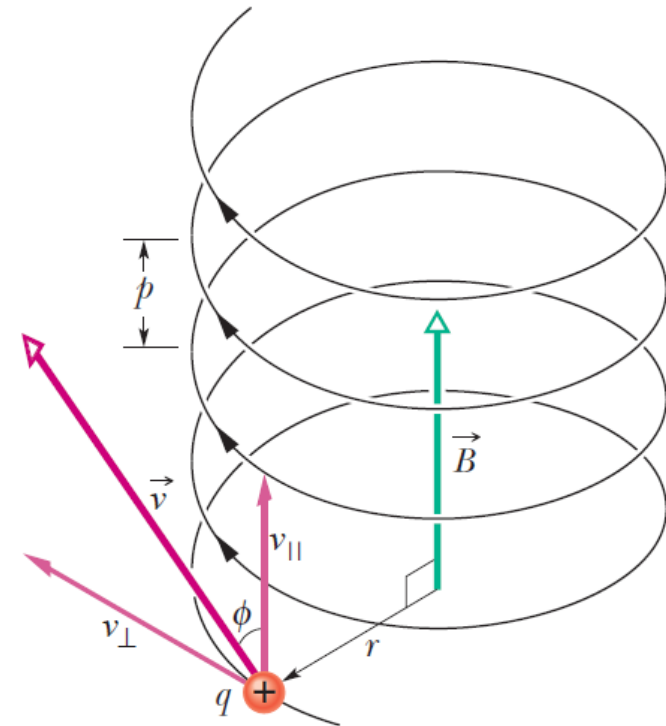
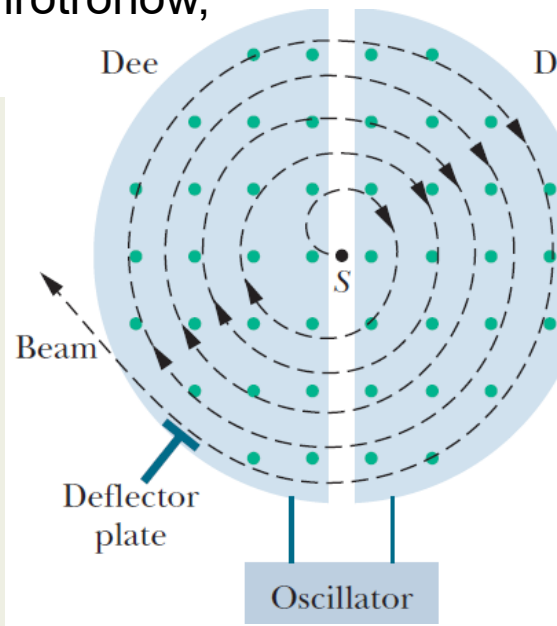
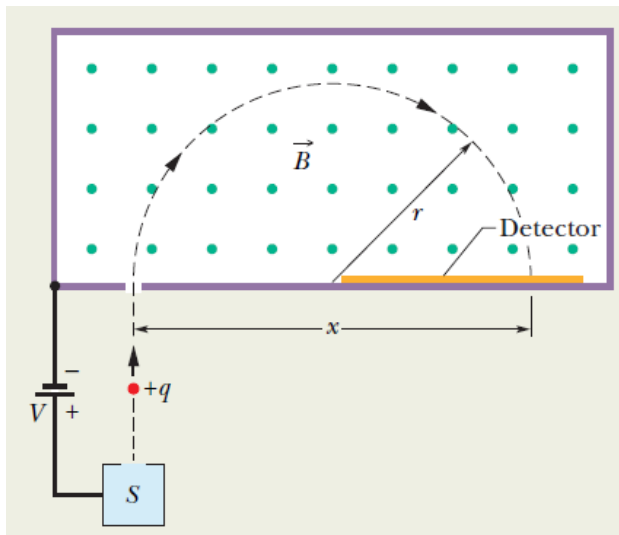
$$F_L = F_d$$

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

odkrycie pozytonu

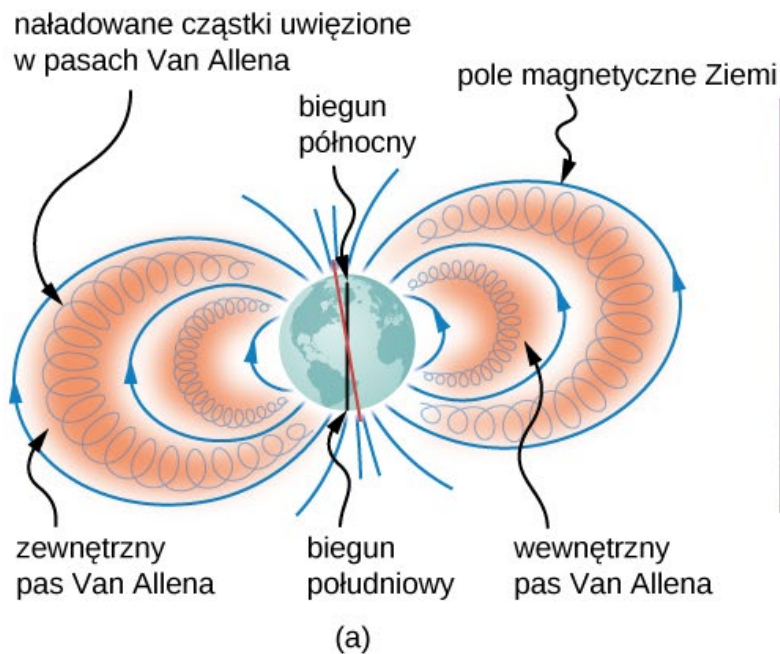
Ładunek w polu magnetycznym

- ▶ 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,



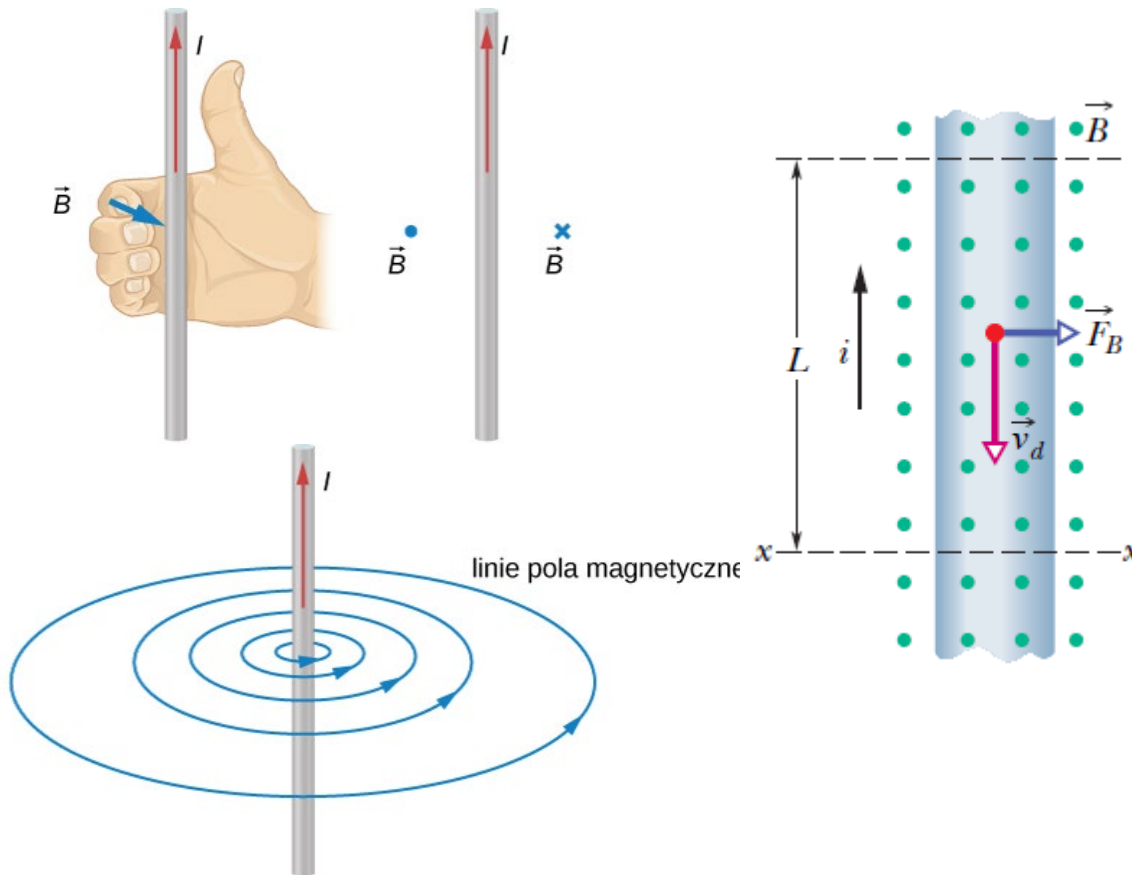
Ładunek w polu magnetycznym

- ▶ Jeśli ładunek wpada pod dowolnym kątem –porusza się po linii śrubowej
- ▶ Ruch ładunku w polu magnetycznym – promieniowanie kosmiczne i zorza polarna



Przewód z prądem jest źródłem pola magnetycznego

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



w czasie t przez przekrój
przeżywa ładunek q

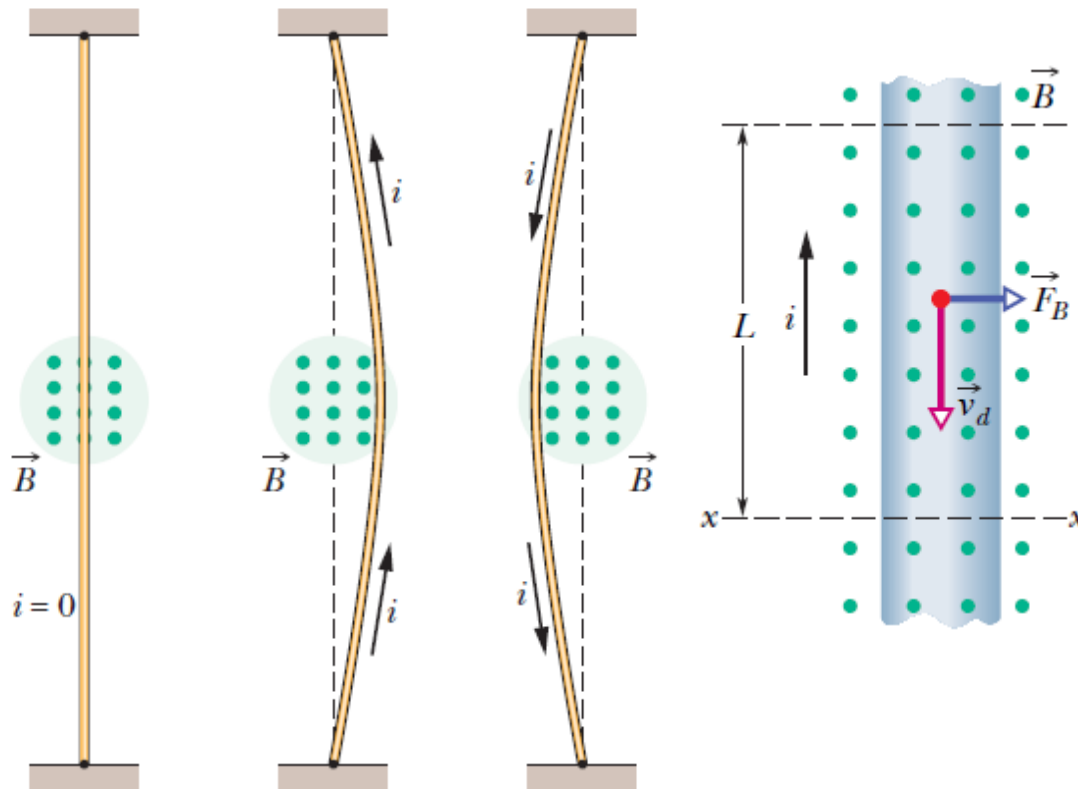
$$q = It = I \frac{L}{v_d}$$

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

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

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
przeływa ładunek q

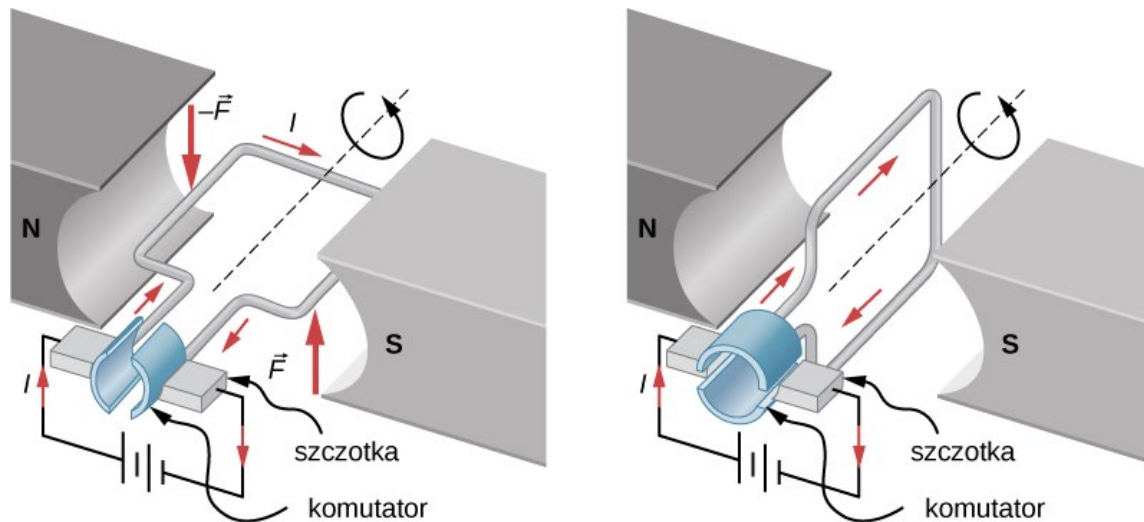
$$q = It = I \frac{L}{v_d}$$

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)



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

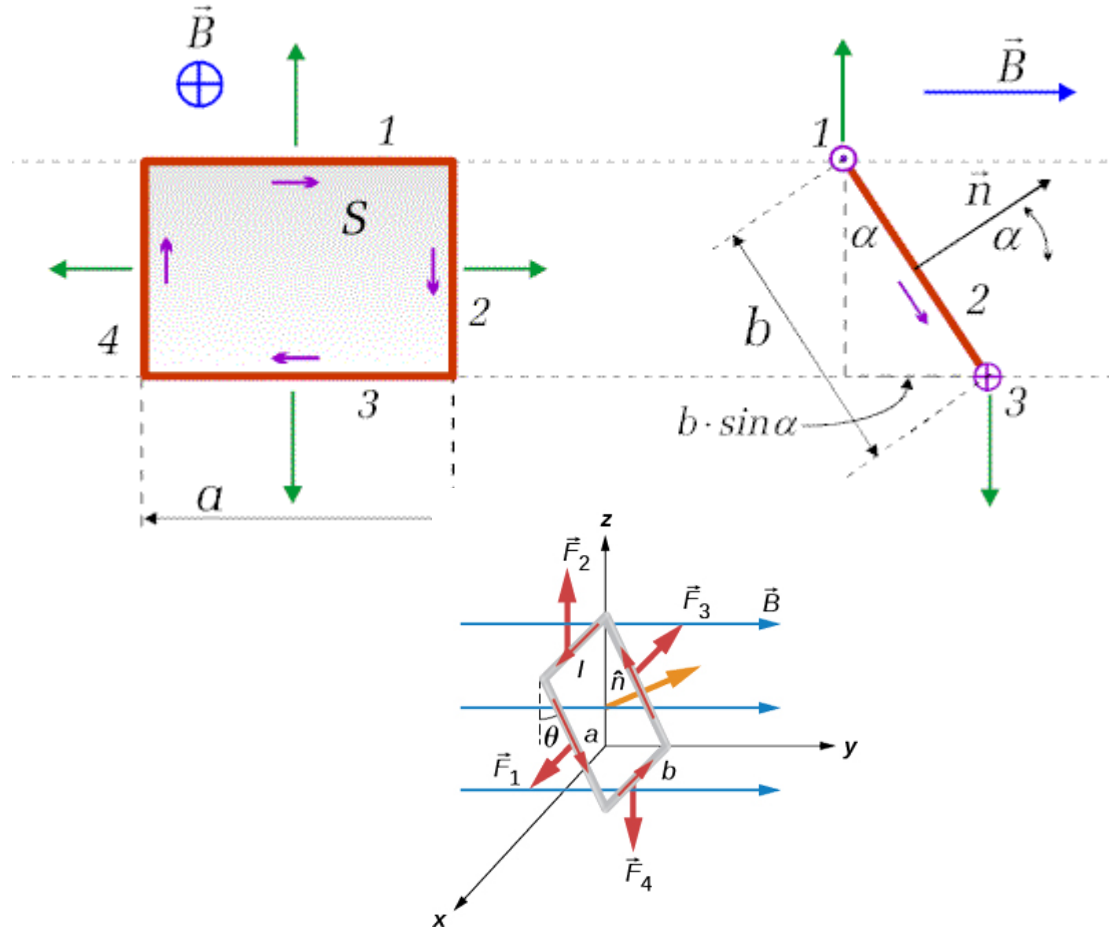
$$\vec{M} = \vec{M}_1 + \vec{M}_3 + \underbrace{\vec{M}_2 + \vec{M}_4}_{= 0}$$

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

$$S = a b$$

jeśli zamiast ramki mamy cewkę o N zwojach:

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

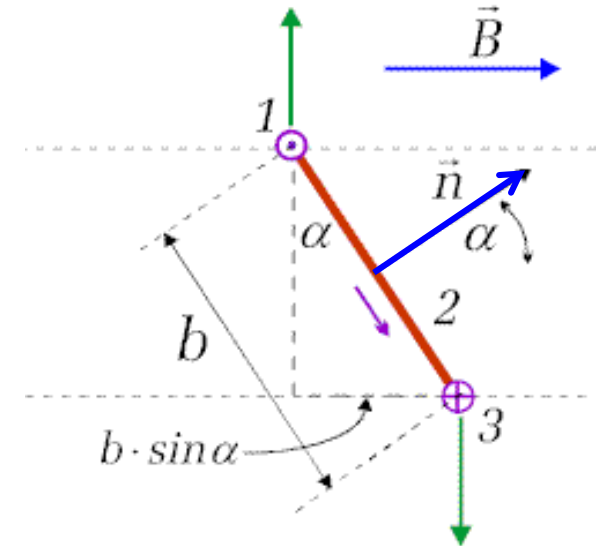


Moment działający na ramkę

- ▶ 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} :

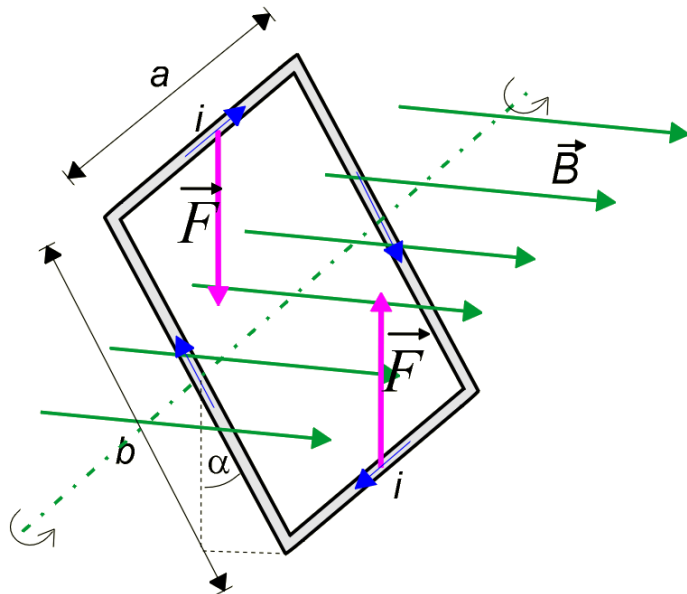
$$\vec{M} = \vec{\mu} \times \vec{B}$$

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

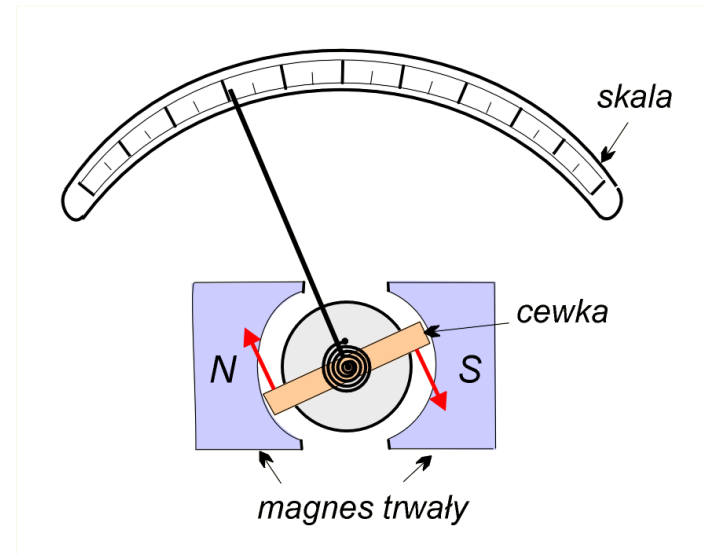


Pole magnetyczne - zastosowanie

- ▶ Przewodząca ramka w polu magnetycznym – moment skręcający

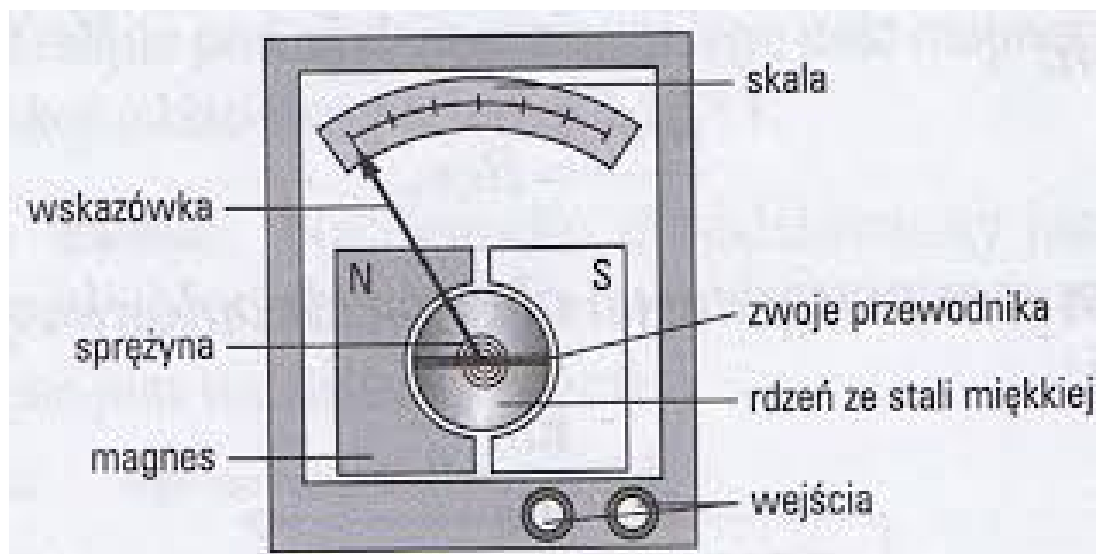


- ▶ Galwanometr, amperomierz, woltomierz



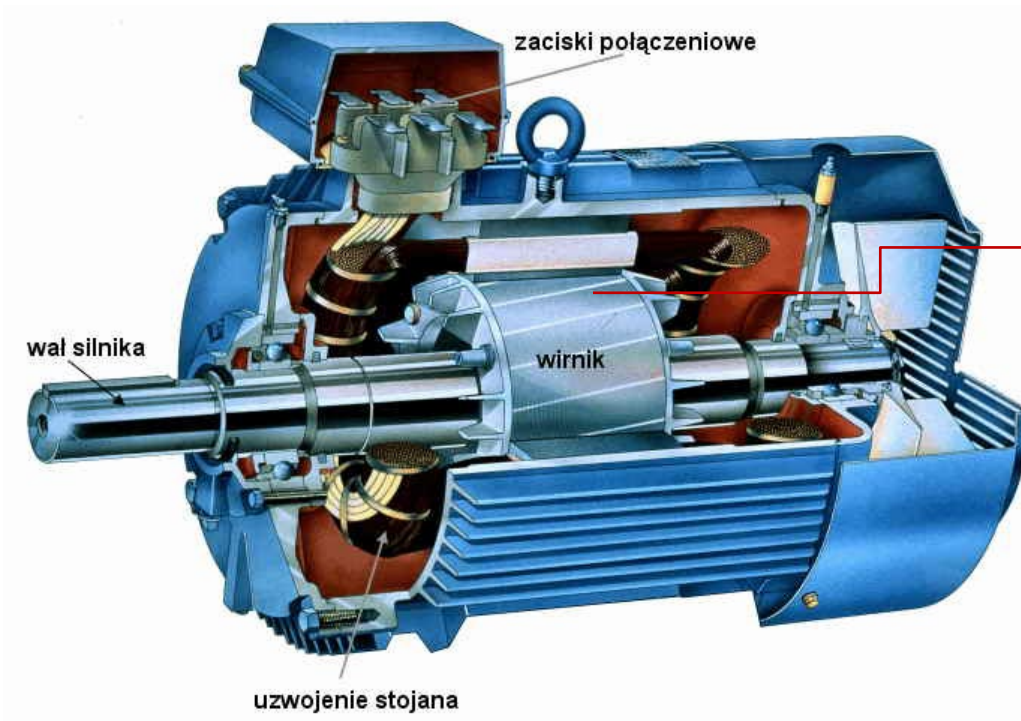
Mierniki elektryczne

- ▶ 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 (*)

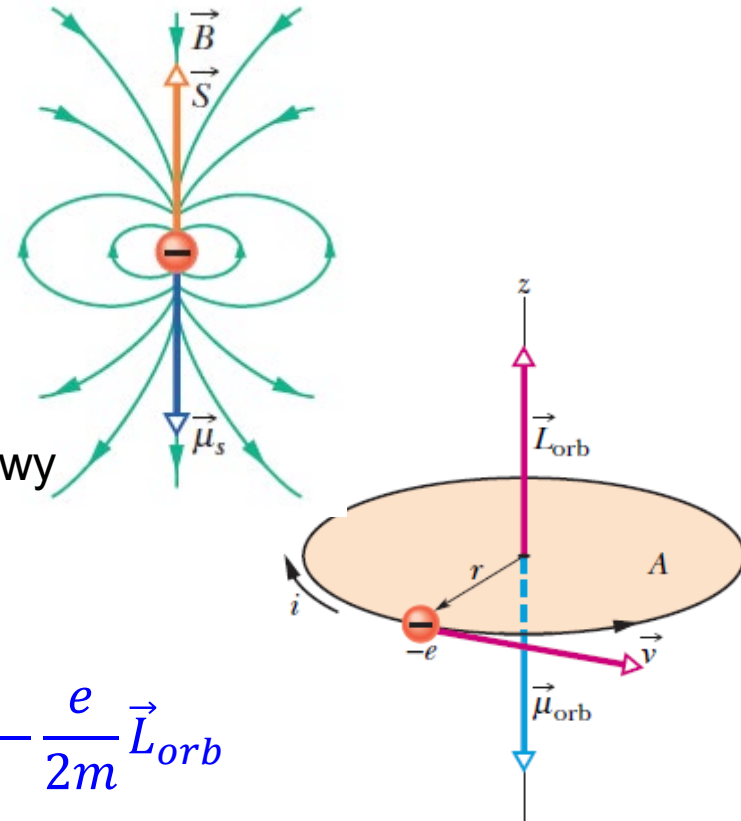
- ▶ Jeśli wyobrazimy sobie elektron jako wirującą kulkę o momencie pędu \vec{S} (co jest niestety sprzeczne ze zrozumieniem elektronu jako cząstki punktowej, bez wymiarów), to można mu przypisać **spinowy moment magnetyczny** $\vec{\mu}_S$:

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

- ▶ 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.

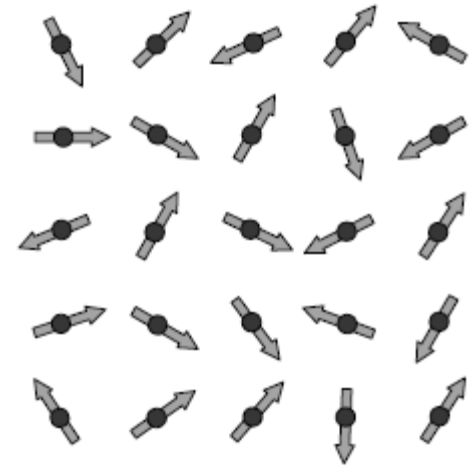
Wypadkowy moment magnetyczny materiału jest sumą momentów magnetycznych (orbitalnych i spinowych) elektronów oraz momentów magnetycznych poszczególnych atomów.

- ▶ 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)

Materia magnetyczne

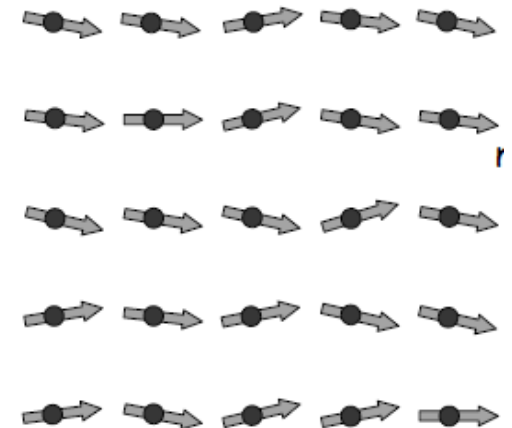
PARAMAGNETYZM

- ▶ 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



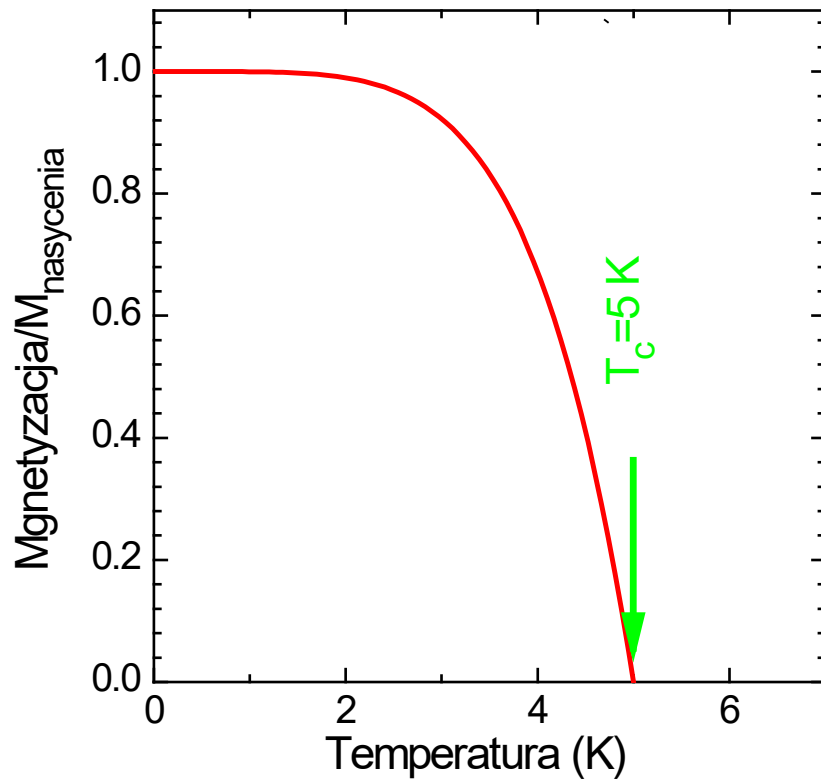
FERROMAGNETYZM

- ▶ 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- poniżej temperatury krytycznej (Curie) T_C :

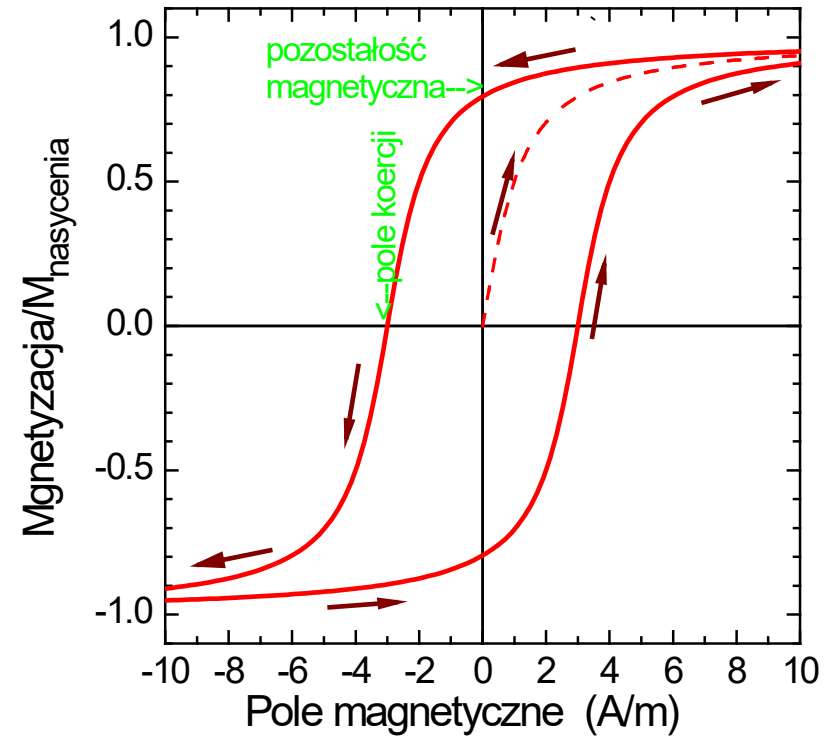
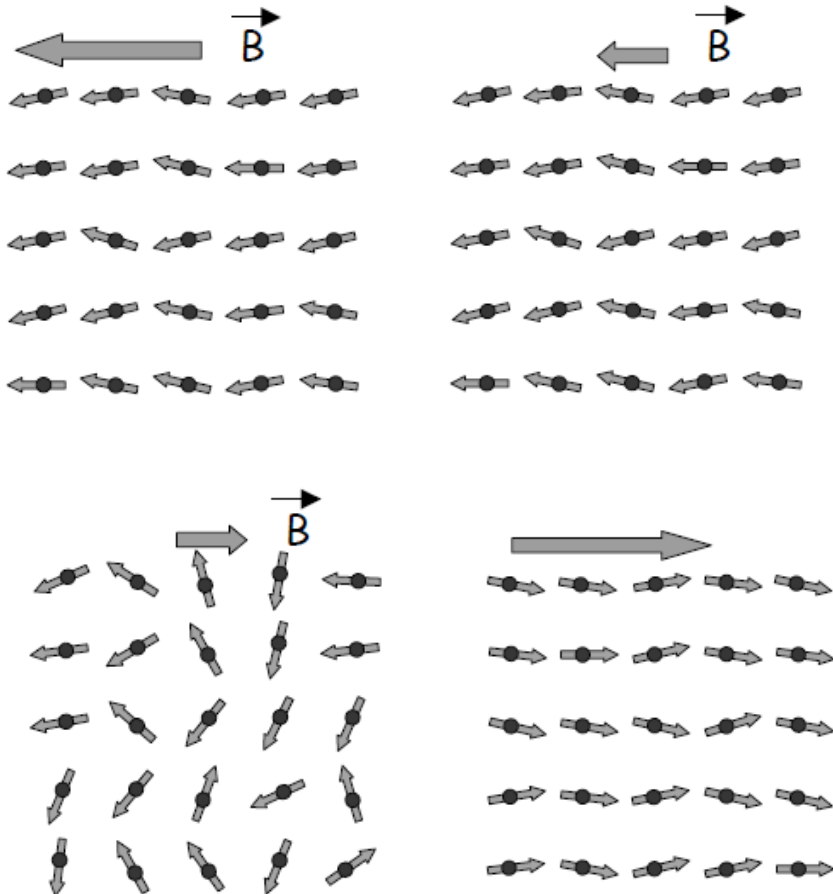


Temperatura Curie:

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

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

Pokazy doświadczeń

- ▶ Linie pola magnetycznego- magnes, elektromagnes, cewka.
- ▶ Siła Lorentza – zależność od kierunku prądu.
- ▶ Ramka w polu magnetycznym.
- ▶ Własności magnetyczne materiałów

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 , odległym od tego elementu o \vec{r} , pole o indukcji $d\vec{B}$:

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

przenikalność magnetyczna próżni
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm/A}$

prawo Biota-Savarta (1820)

Całkowite pole wytworzone przez przewodnik:

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

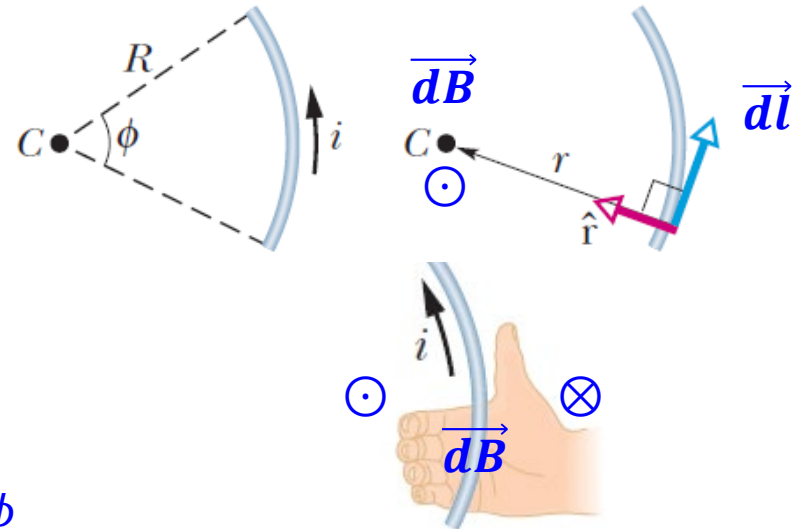
- ▶ Prawo Biota-Savarta jest odpowiednikiem prawa Coulomba dla pola elektrycznego

Pole od przewodnika o kształcie łuku

- ▶ Przykł. wykorzystania prawa Biota-Savarta – obliczenie pola od przewodnika wygiętego w łuk:

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.



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

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

$$= \frac{\mu_0 i}{4\pi R} \int_0^\phi d\phi$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I \theta}{4\pi R}$$

dla $\phi = 2\pi$:

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

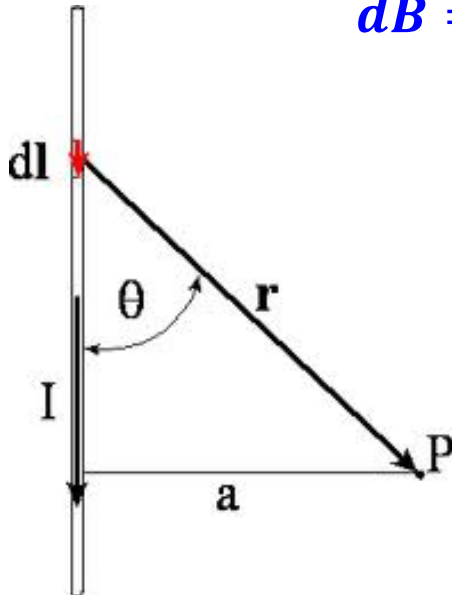
wartość indukcji pola magnetycznego w środku kołowego przewodu z prądem

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:

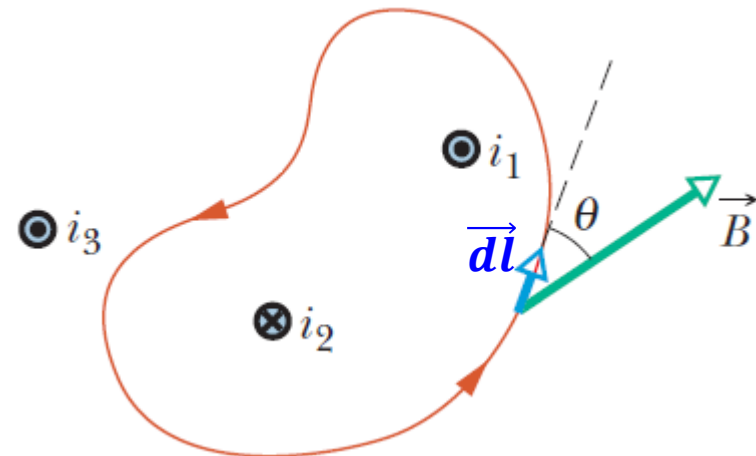
Nieskończone przewodniki z prądem o natężeniu i wytwarzają wokół siebie pole magnetyczne o indukcji B:

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

krążenie wektora indukcji magnetycznej po dowolnej pętli zamkniętej

całkowity prąd wewnątrz tej pętli

prawo Ampera



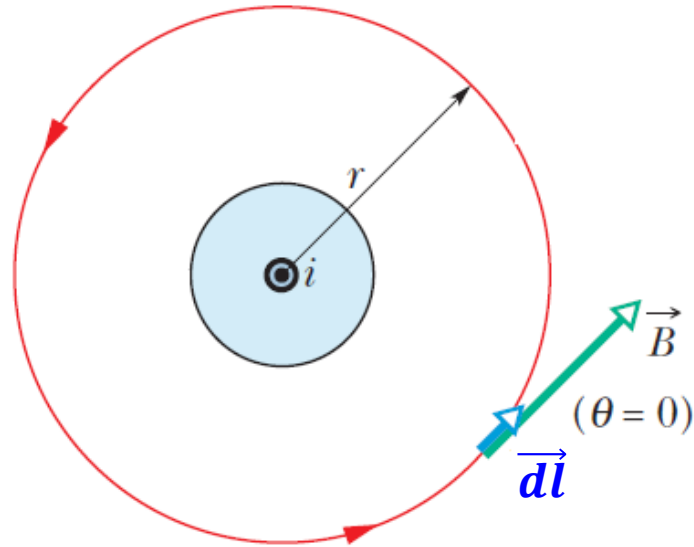
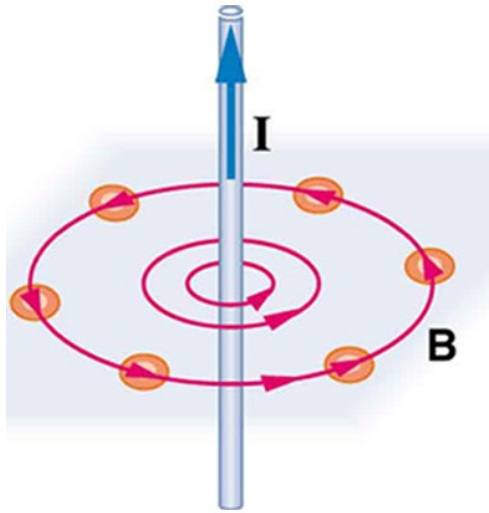
$$I_P = I_1 - I_2$$

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

Prawo Amprera - zastosowania

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

- ▶ Prawo Ampera dla nieskończonego prostoliniowego przewodnika:



$$I_P = I$$

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

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

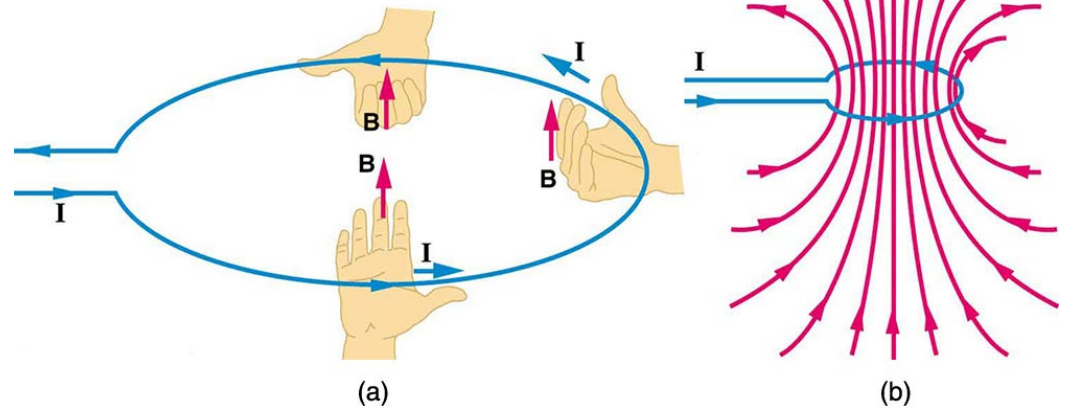
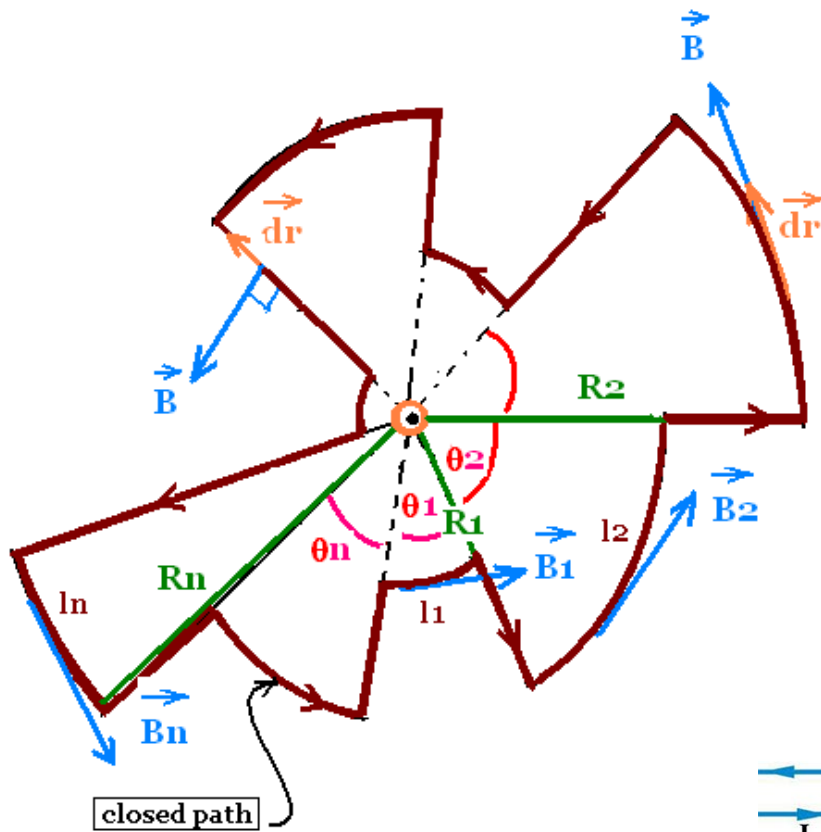
wartość indukcji pola magnetycznego w odległości r od prostoliniowego nieskończonego przewodu z prądem

Déjà vu?

prawo B-S..

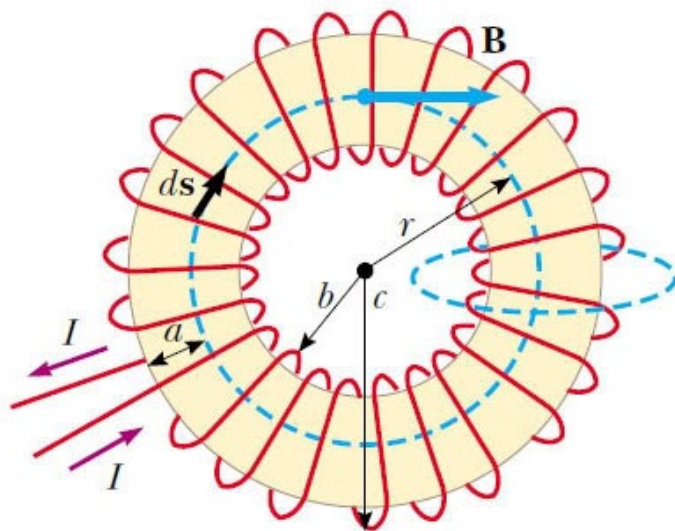
Trochę praktyki...

- Sprawdź, czy potrafisz?

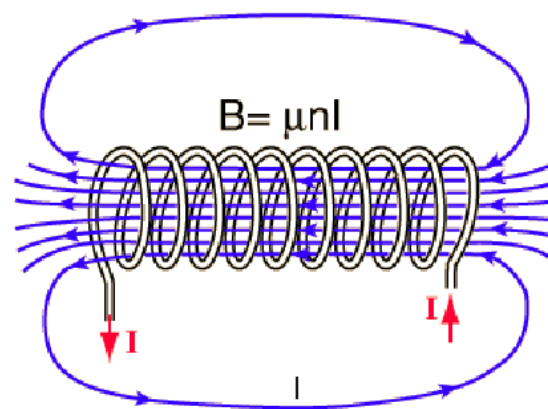


Inne (ciekawe) przykłady

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 :

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r} \quad F_2 = B_1 I_2 L$$

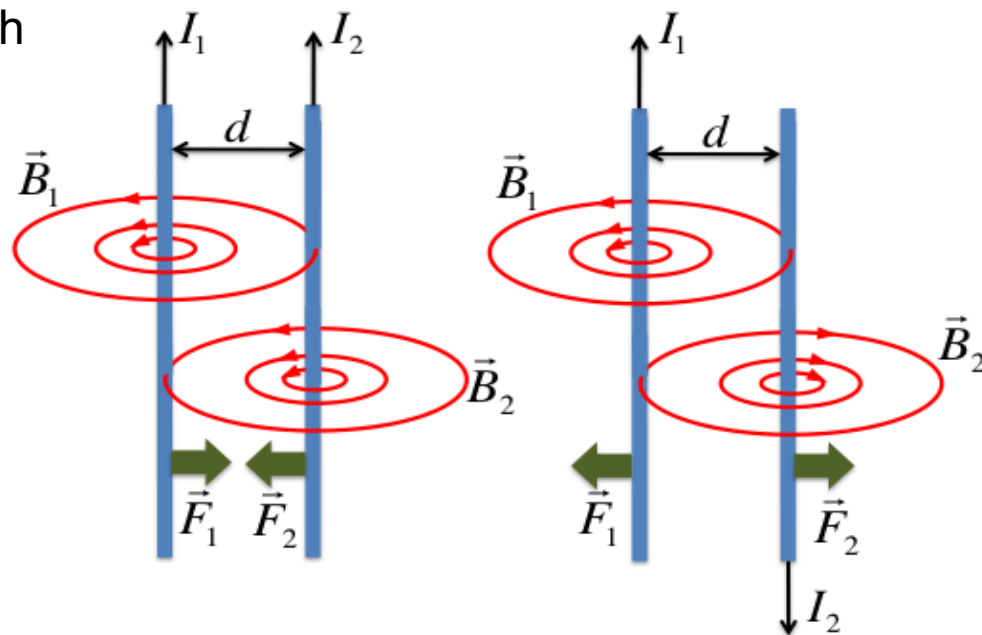
również:

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r} \quad F_1 = B_2 I_1 L$$

co daje:

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

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

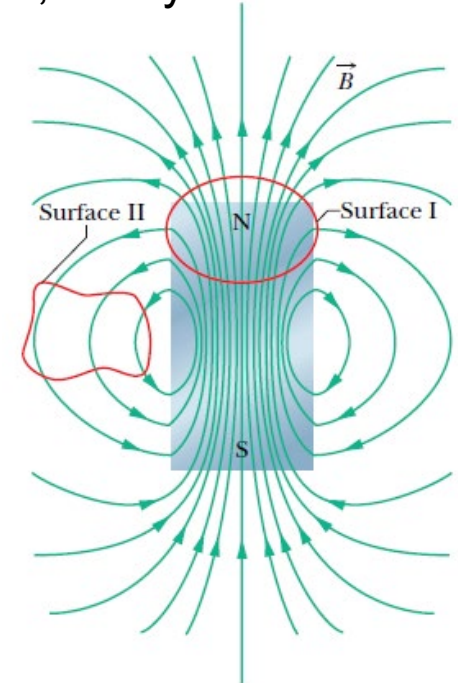


Prawo Gaussa dla pola magnetycznego

- ▶ Nie ma monopoli magnetycznych – magnes po podzieleniu nadal ma DWA bieguny (bo magnetyzm jest związany z ustawieniem spinów, mikrostrukturą)
- ▶ Jeśli zatem otoczmy magnes powierzchnią Gaussa (czyli dowolną powierzchnią zamkniętą) – całkowity „ładunek magnetyczny” wewnątrz niej wyniesie zero! Tyle samo linii pola wchodzi do powierzchni, co wychodzi.

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

prawo Gaussa dla pola magnetycznego:
wypadkowy strumień magnetyczny przechodzący
przez dowolną powierzchnię zamkniętą wynosi
zero



Dotychczas pokazaliśmy:

- Poznaliśmy dotychczas trzy równania opisujące pola elektryczne i magnetyczne:

$$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_i$$

????

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



źródłowość pola:

pole elektryczne - pojedyncze ładunki elektryczne,

pole magnetyczne jest bezźródłowe, brak monopoli magnetycznych

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



Źródłem pola magnetycznego może również być prąd elektryczny.

Czy źródłem pola elektrycznego może być pole magnetyczne ???

Zamiast podsumowania

- ▶ Zamiast podsumowania ... przejrzymy ponownie slajdy.
- ▶ Proszę o pytania!



A może jednak trzeba
było studiować
filozofię?

nieee...