

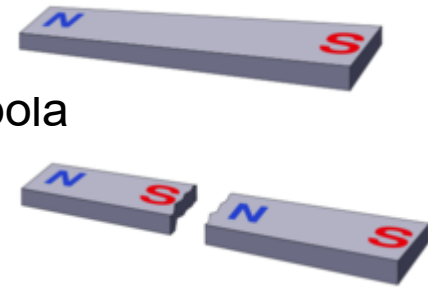
# Podstawy fizyki – sezon 2

## 4. Pole magnetyczne

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  $\vec{B}$ .



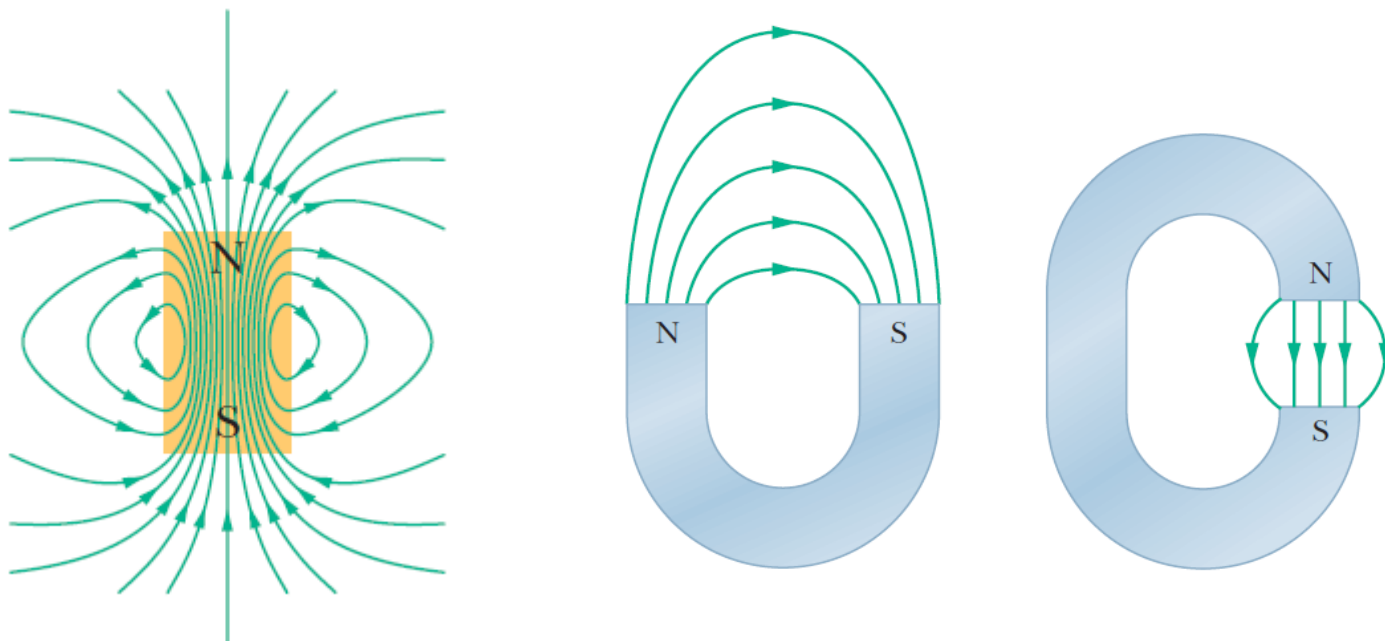
In bulk material  
the domains  
usually cancel,  
leaving the  
material  
unmagnetized.



Externally  
applied  
magnetic field.

# Linie pola magnetycznego

- Pole magnetyczne ilustrowane jest za pomocą linii pola:



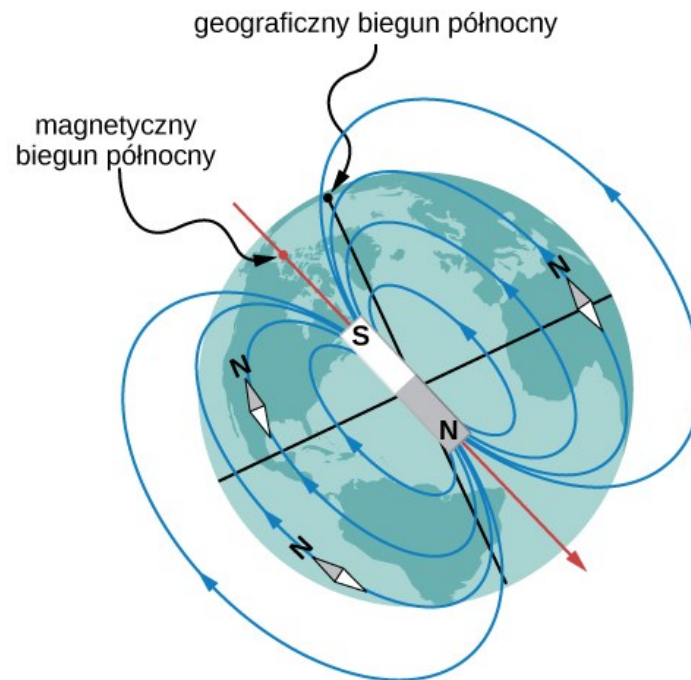
- Z obserwacji wynika, że bieguny jednoimienne się odpychają, różnoimienne się przyciągają.

# Indukcja magnetyczna

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

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

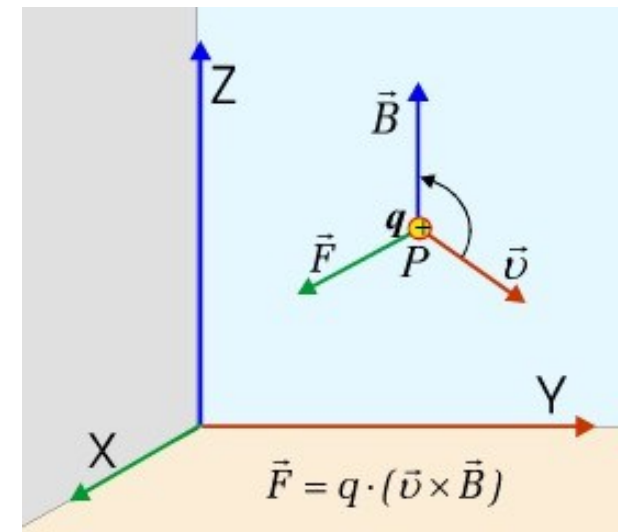
źródło	indukcja $B[T]$
kosmos	$10^{-10}$
Ziemia	$10^{-4}$
magnes sztabkowy	0.01
elektromagnes	1.5
magnes nadprzewodzący	8
gwiazda neutronowa	$10^8$



# Indukcja pola magnetycznego

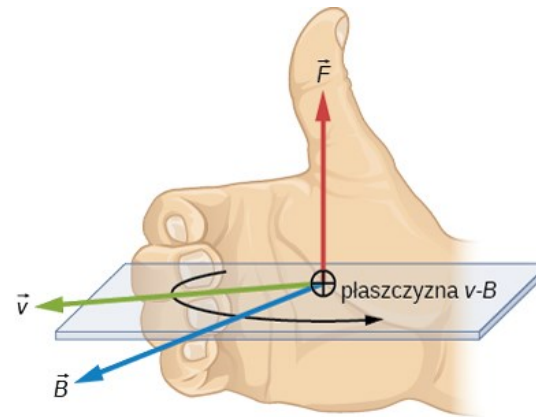
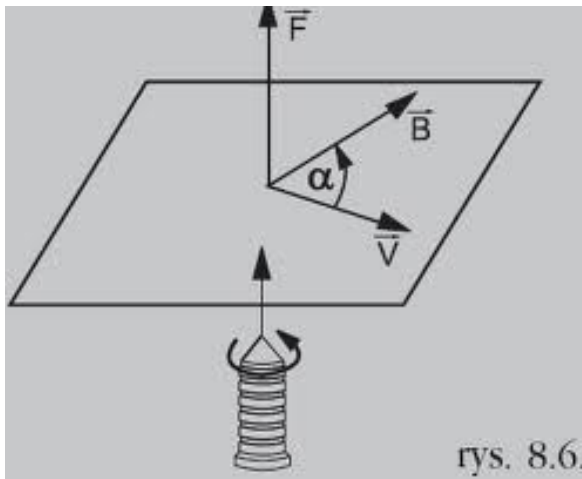
- ▶ Pole elektryczne można było zbadać umieszczając w nim ładunek i znajdując siłę działającą na niego ze strony pola.
- ▶ Podobnie wyznaczymy pole magnetyczne – umieścimy w nim naładowaną cząstkę próbną i znajdziemy siłę.
- ▶ Okazuje się, że na poruszający się dodatni ładunek próbny w polu magnetycznym działa siła (Lorentza) określona jako:
- ▶ Siła Lorentza jest prostopadła do wektorów  $\vec{v}$  oraz  $\vec{B}$ .

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



# Wyznaczanie siły Lorentza

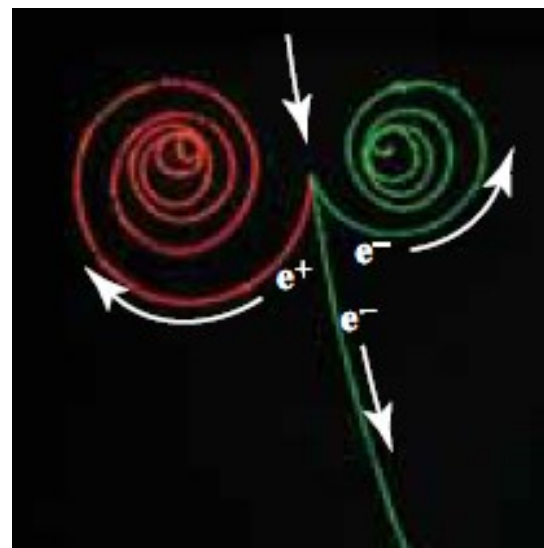
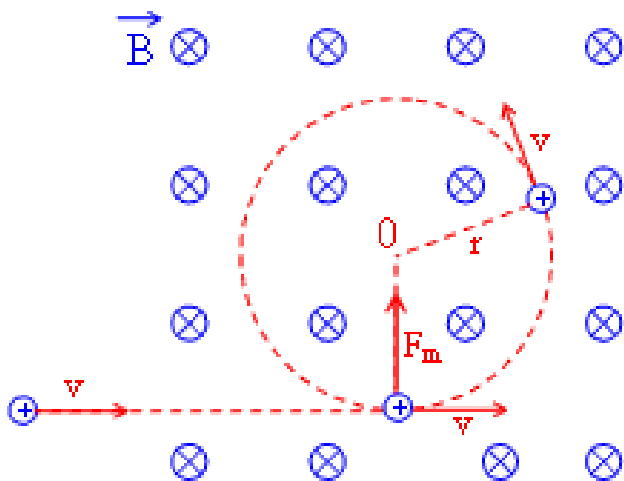
- ▶ Trzy wektory  $\vec{F}_L, \vec{v}, \vec{B}$  tworzą trójkę wektorów prawoskrętnych.
- ▶ Zwrot wektora znajdziemy za pomocą reguły prawej dłoni (śruby prawoskrętnej):



- ▶ 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:

$$F_L = F_d$$

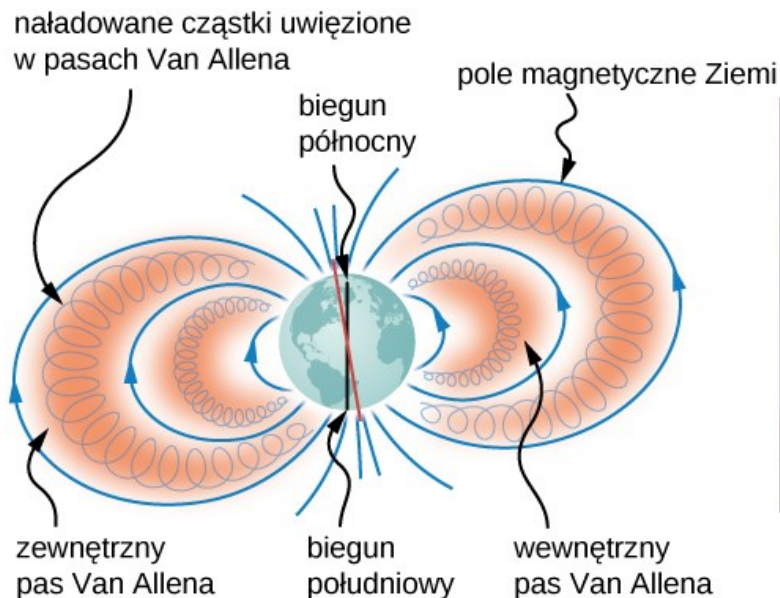
$$qvB = \frac{mv^2}{R}$$

odkrycie pozytonu



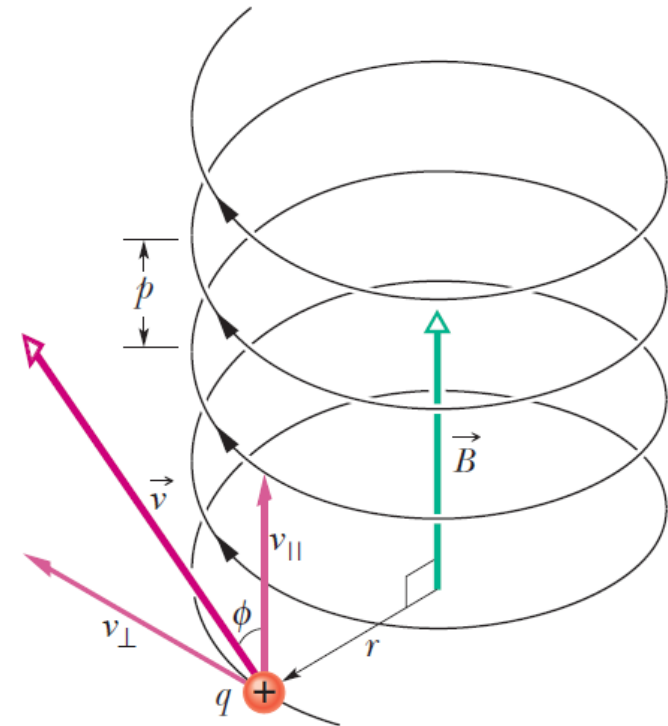
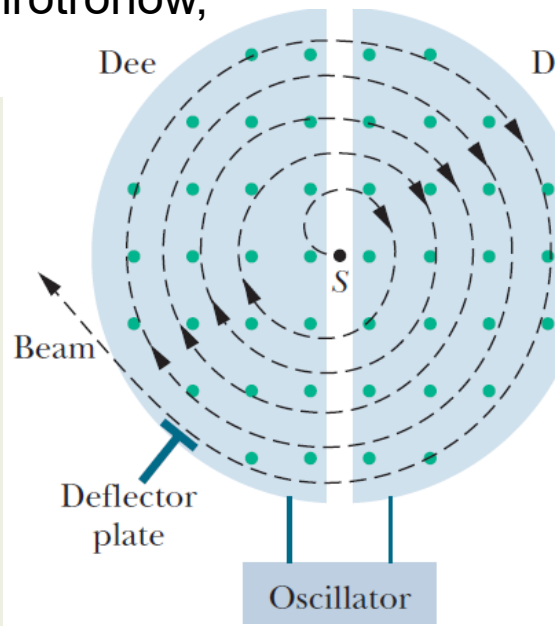
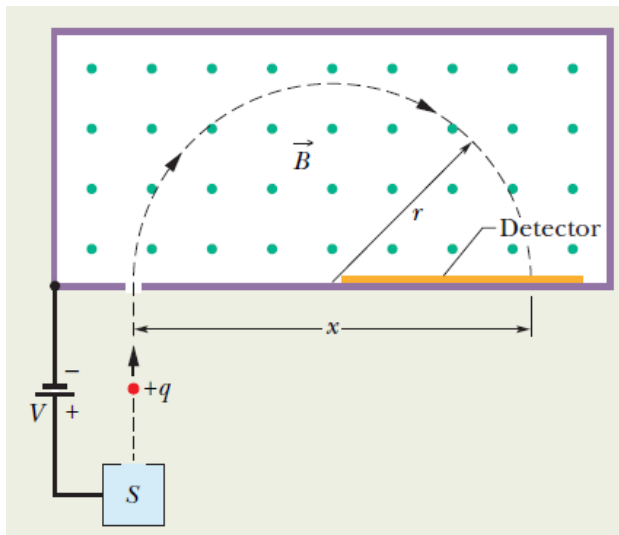
# Promieniowanie kosmiczne

- Pole magnetyczne Ziemi chroni ją przed naładowanymi cząstkami z promieniowania kosmicznego



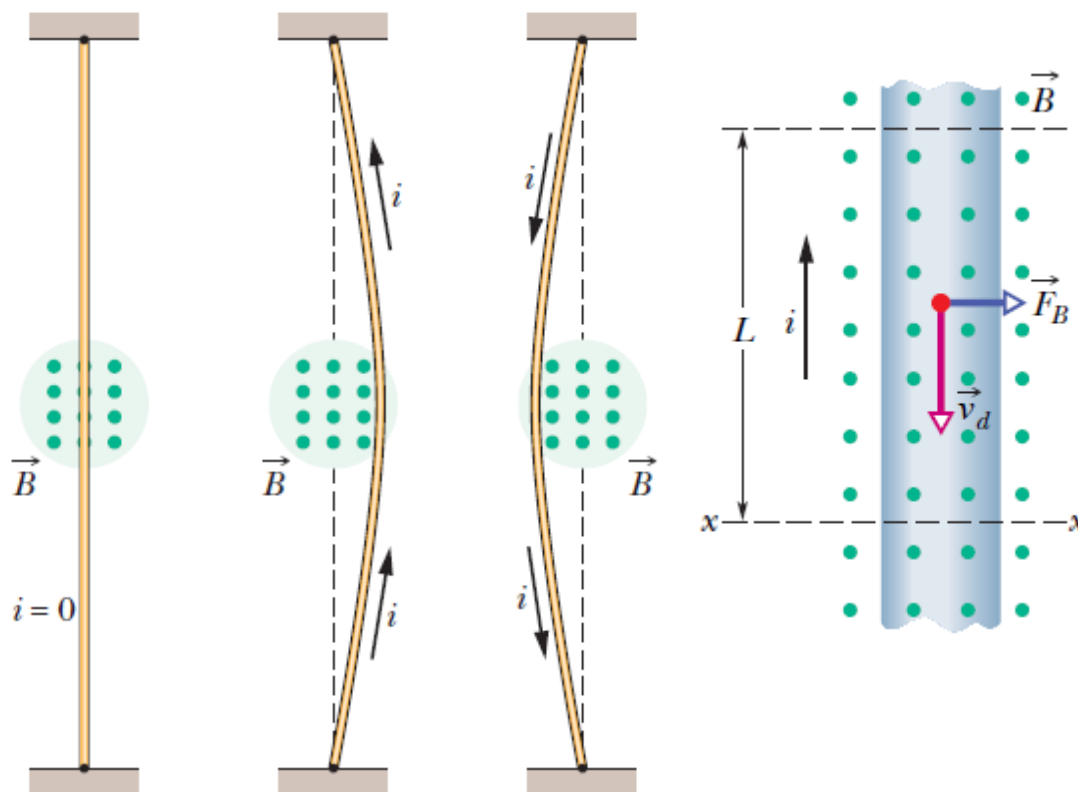
# Ładunek w polu magnetycznym

- ▶ 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  $q$

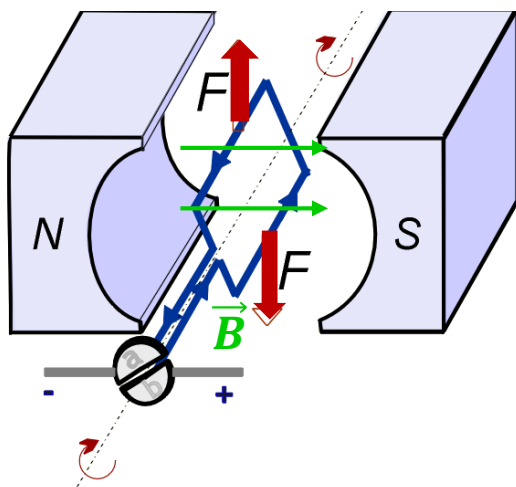
$$q = It = I \frac{L}{v_d}$$

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

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

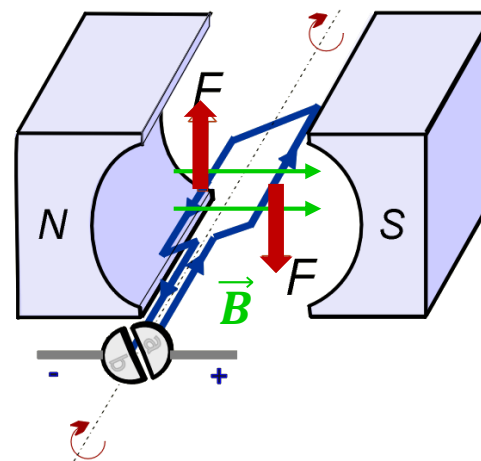
# Ramka z prądem w polu magnetycznym

- ▶ 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

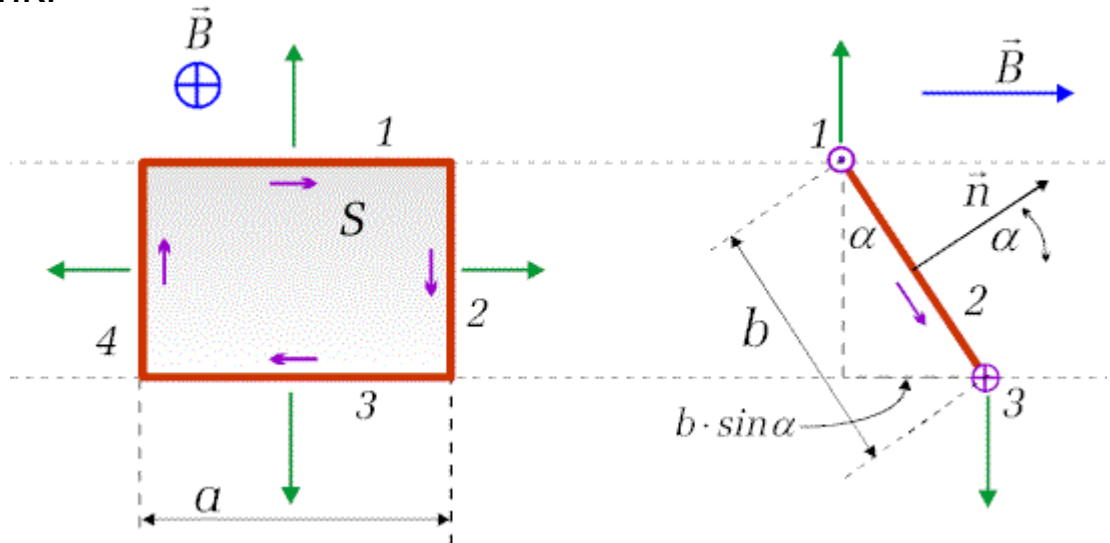
$$\vec{M} = \vec{M}_1 + \vec{M}_3 + \underbrace{\vec{M}_2 + \vec{M}_4}_{= 0}$$

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

$$S = a b$$

jeśli zamiast ramki mamy cewkę o N zwojach:

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

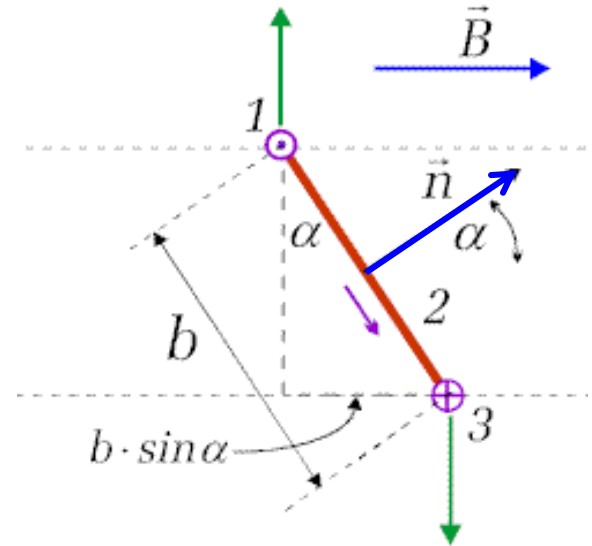


# Moment działający na ramkę

- ▶ 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  $\vec{B}$ :

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

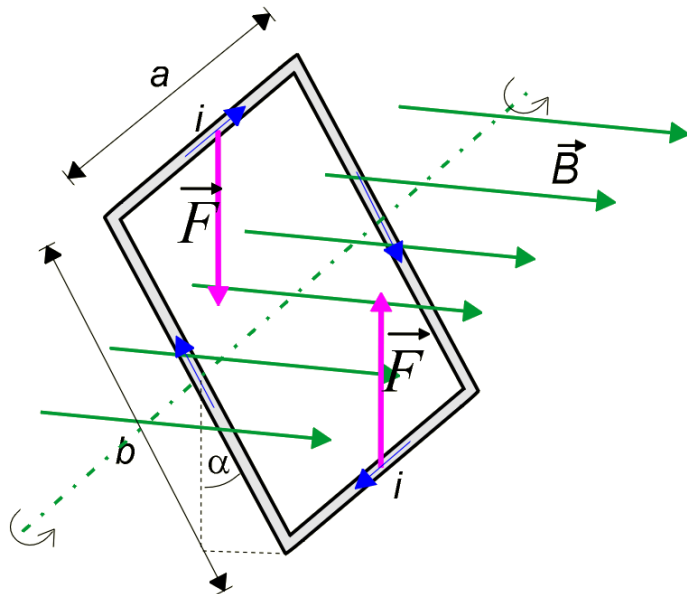
Pole obraca zwój tak, aby wektory  $\vec{\mu}$  i  $\vec{B}$  były zgodne



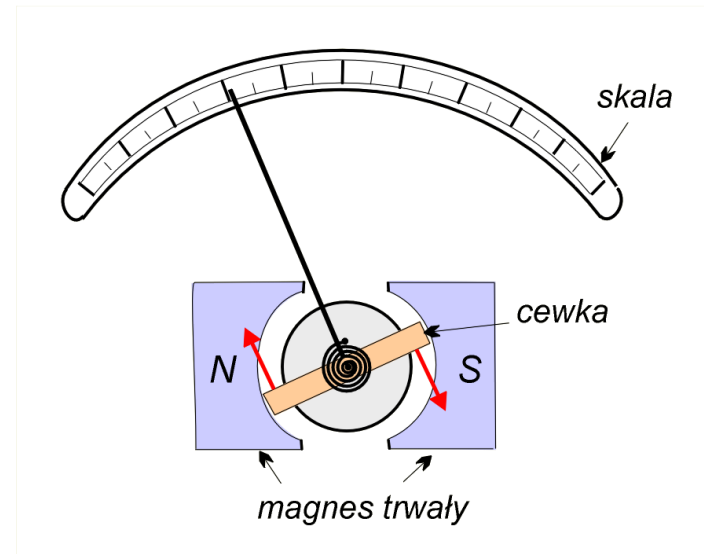
- ▶ W silniku elektrycznym kierunek prądu w cewce zmienia się w chwili, gdy kierunek wektora  $\vec{n}$  pokrywa się z kierunkiem indukcji magnetycznej  $\vec{B}$ .

# Pole magnetyczne - zastosowanie

- ▶ Przewodząca ramka w polu magnetycznym – moment skręcający

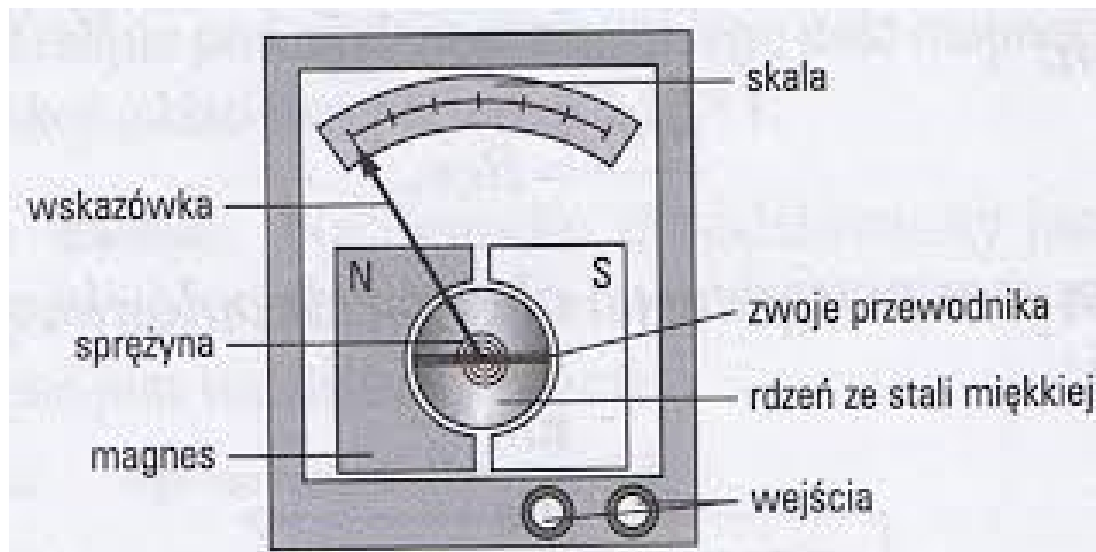


- ▶ Galwanometr, amperomierz, woltomierz



# Mierniki elektryczne

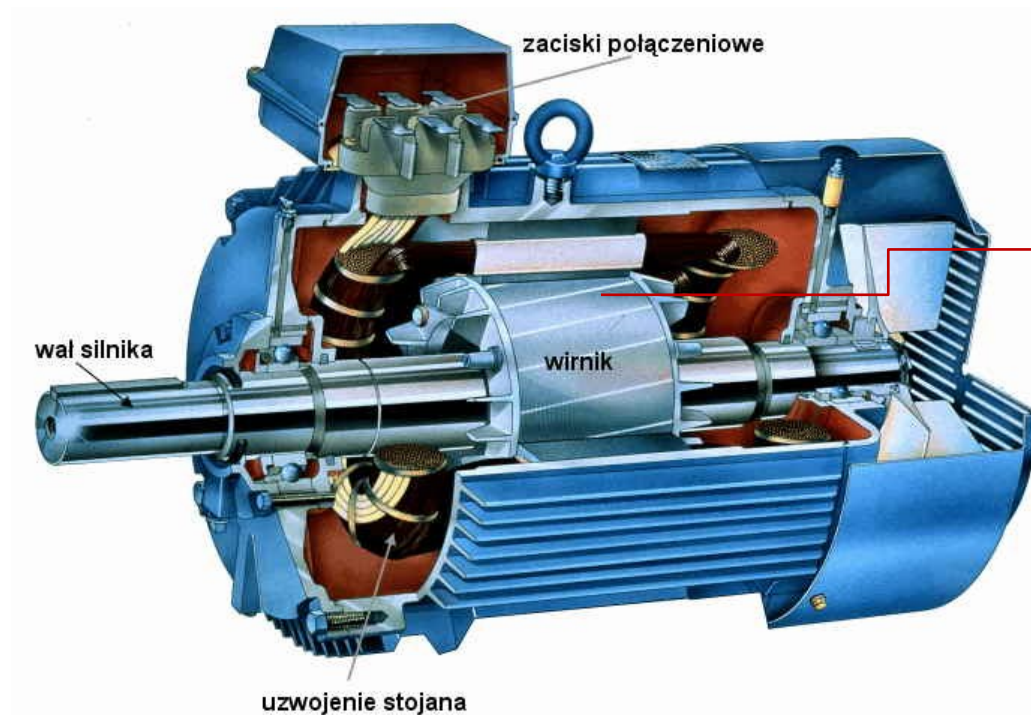
- ▶ Analogowe mierniki prądu i napięcia wykorzystują pomiar momentu siły magnetycznej działającej na sprężynę (cewkę) pochodzącej od pola magnetycznego





# 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 (\*)

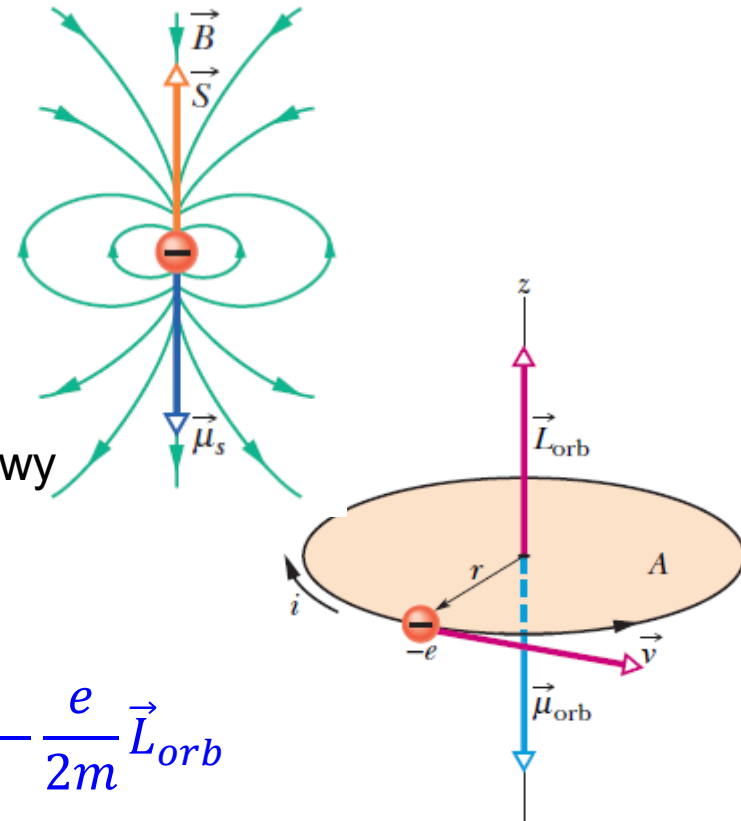
- ▶ Jeśli wyobrazimy sobie elektron jako wirującą kulkę o momencie pędu  $\vec{S}$  (co jest niestety sprzeczne ze zrozumieniem elektronu jako cząstki punktowej, bez wymiarów), to można mu przypisać **spinowy moment magnetyczny**  $\vec{\mu}_S$  :

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

- ▶ 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.

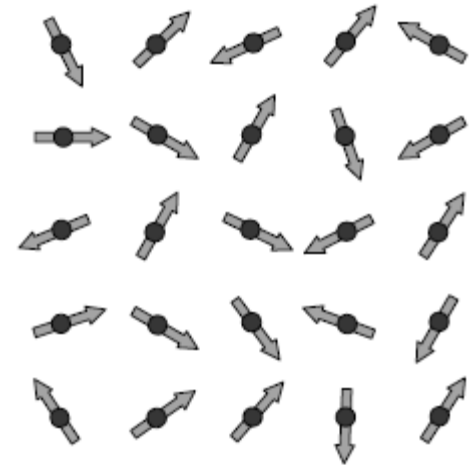
Wypadkowy moment magnetyczny materiału jest sumą momentów magnetycznych (orbitalnych i spinowych) elektronów oraz momentów magnetycznych poszczególnych atomów.

- ▶ 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)

# Materia magnetyczne

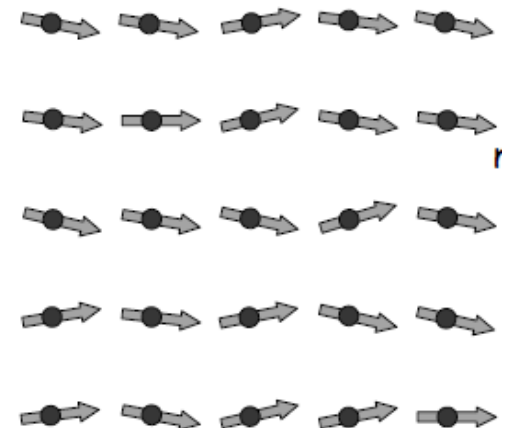
## PARAMAGNETYZM

- ▶ 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



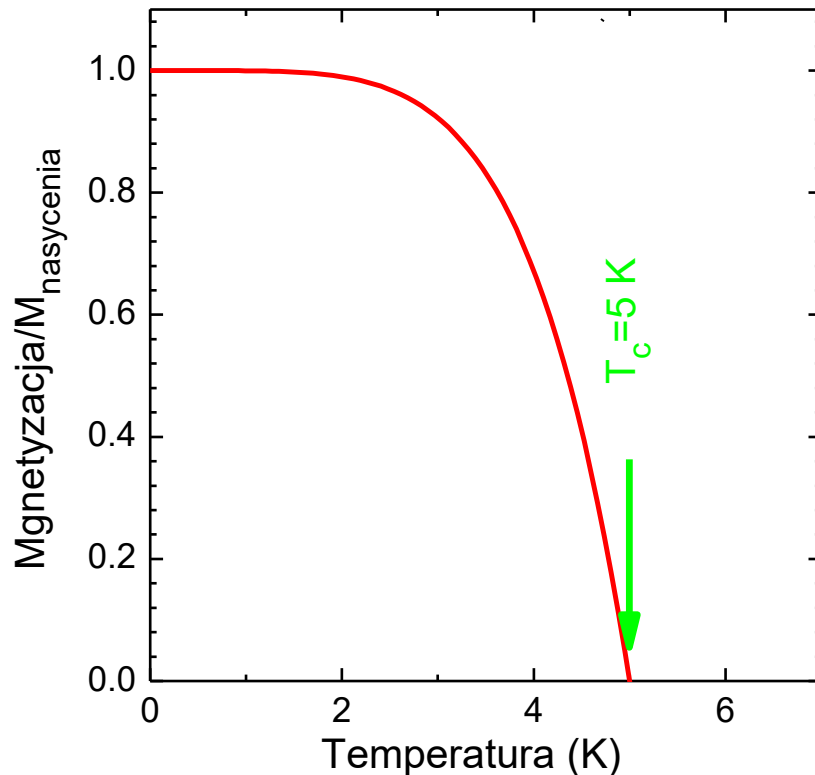
## FERROMAGNETYZM

- ▶ 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)  $T_C$ :

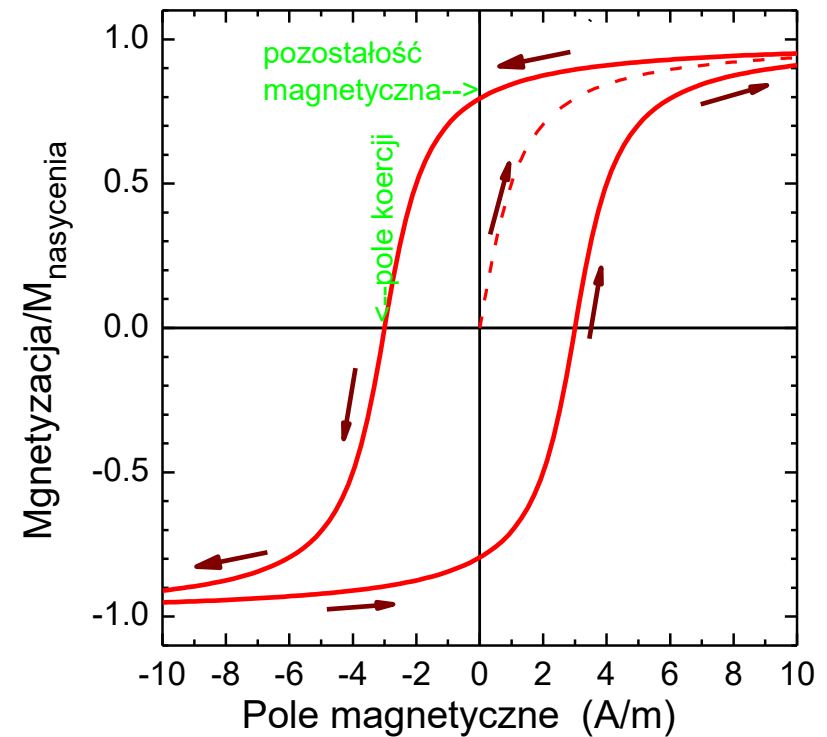
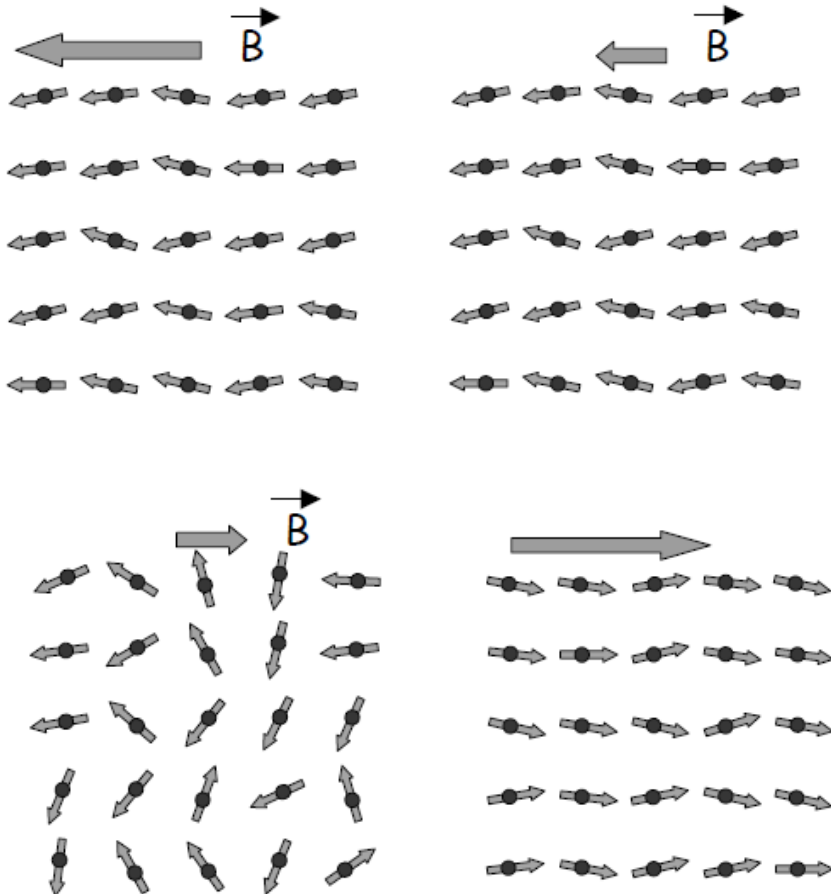


Temperatura Curie:

Fe	770 C
Co	1331 C
Ni	358 C
$\text{Fe}_3\text{O}_4$	585 C
stopy	900 C

# Magnesowanie ferromagnetyków – pętla histerezy

- ▶ Zewnętrzne pole magnetyczne powoduje ustawienie momentów magnetycznych



## Podsumowanie

---

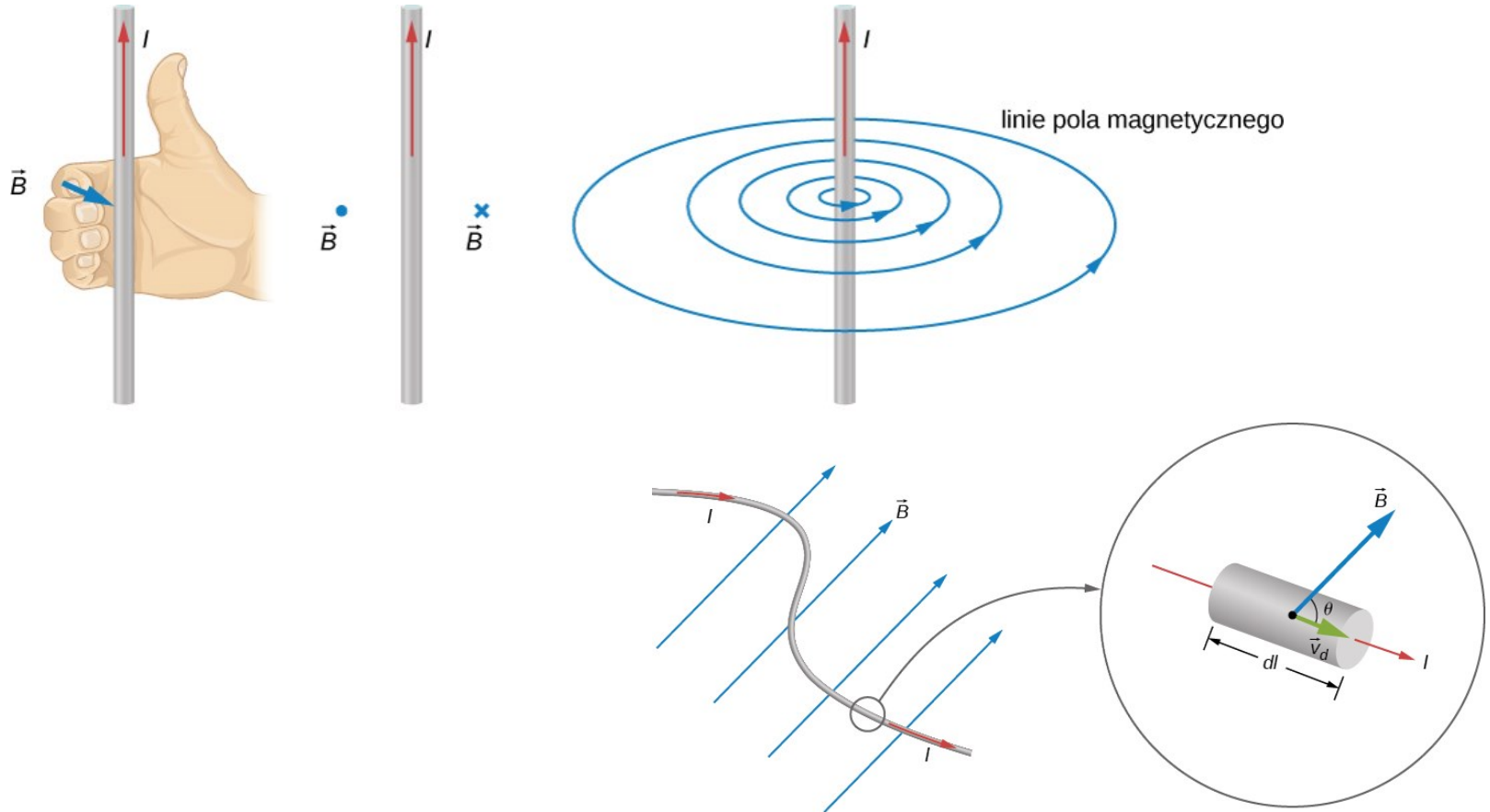
- ▶ Pole magnetyczne – źródła.
- ▶ Siła Lorentza.
- ▶ Oddziaływanie ramki z prądem z polem magnetycznym.
- ▶ Model silnika elektrycznego.
- ▶ Własności magnetyczne materii.
- ▶ Magnesowanie, pętla histerezy

## Pokazy doświadczeń

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

# Pole magnetyczne wokół przewodnika z prądem

- Poruszający się ładunek elektryczny jest źródłem pola magnetycznego:





# Indukcja magnetyczna

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

element  $d\vec{l}$  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:

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

- ▶ 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:

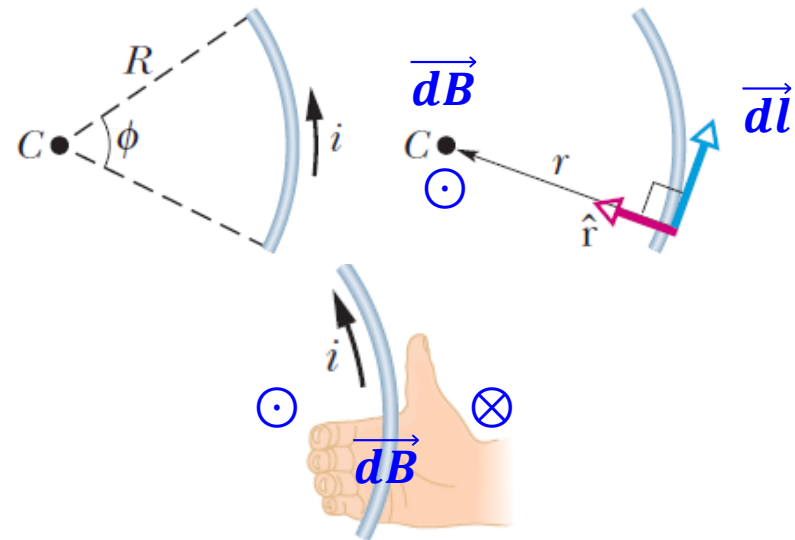
- dzielimy przewodnik na małe elementy ,
- z reguły prawej ręki wyznaczamy zwrot wektora indukcji w środku  $C$ ,
- obliczamy  $d\vec{B}$  i potem  $\vec{B}$  całkowite.

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

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

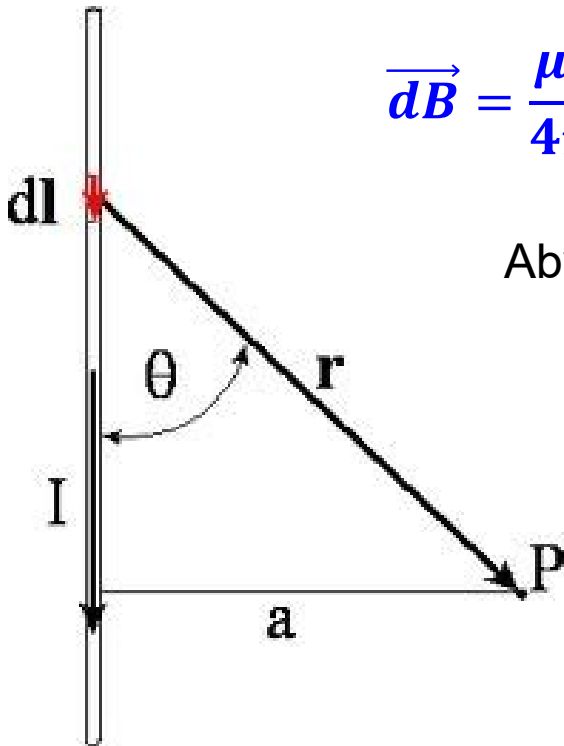
$$B = \frac{\mu_0 i}{2 R}$$

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  $\theta$  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:

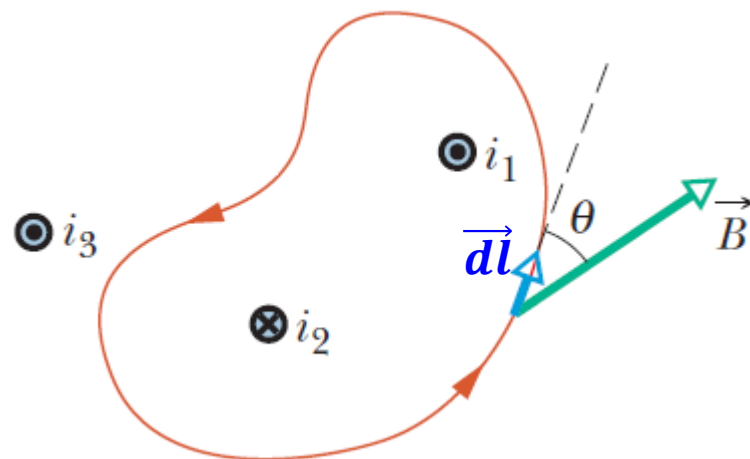
Nieskończone przewodniki z prądem o natężeniu i wytwarzają wokół siebie pole magnetyczne o indukcji  $B$ :

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

krążenie wektora indukcji magnetycznej po dowolnej pętli zamkniętej

całkowity prąd wewnątrz tej pętli

**prawo Ampera**



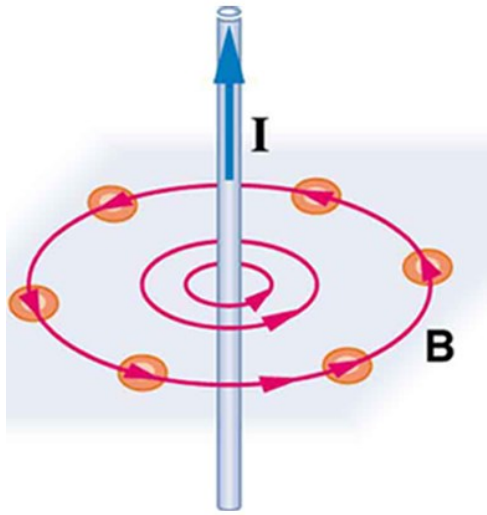
$$I_P = I_1 - I_2$$

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

# Prawo Amprera - zastosowania

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

- Prawo Ampera dla nieskończonego prostoliniowego przewodnika:

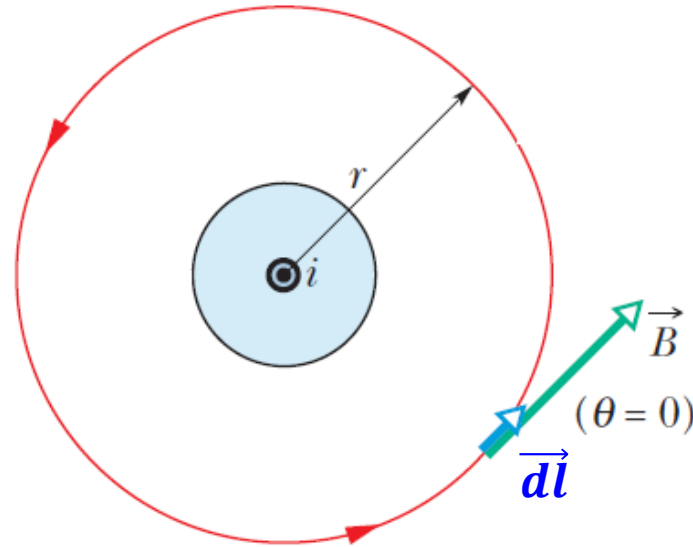


$$I_P = I$$

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

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

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

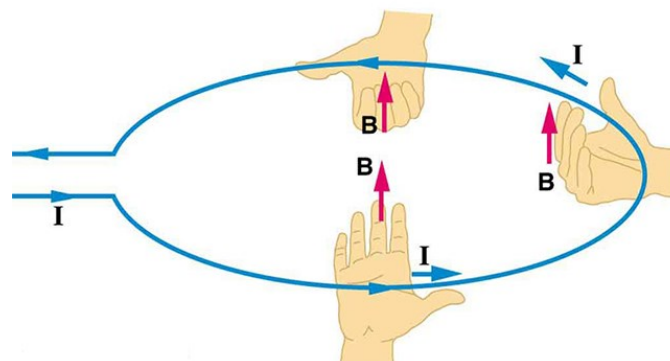
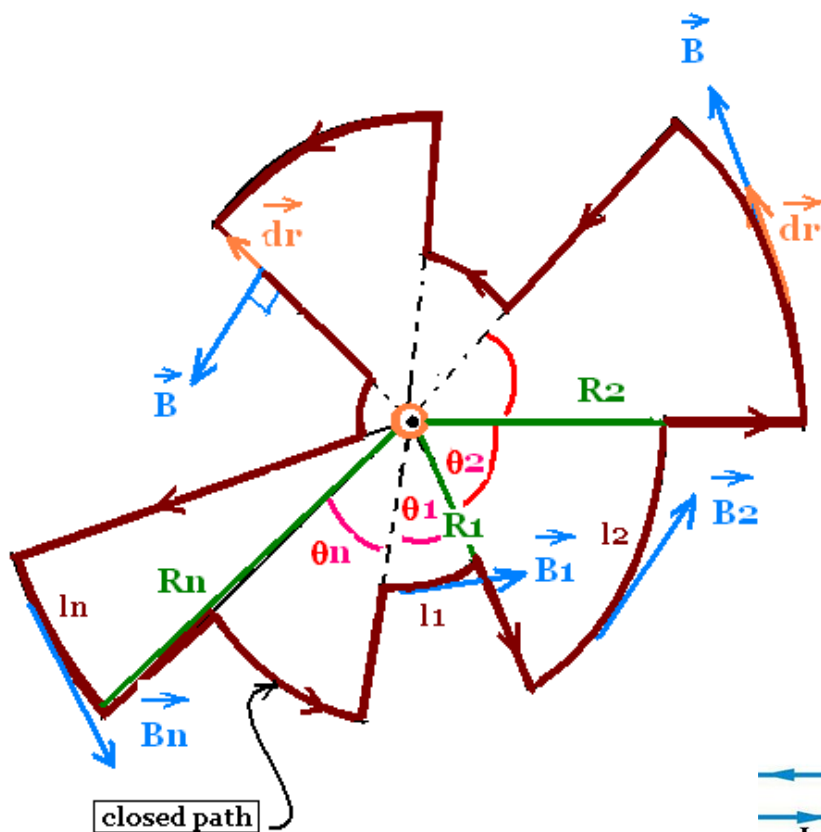


Déjà vu?

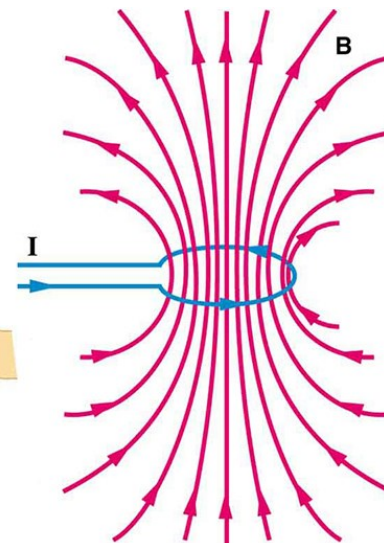
prawo B-S..

## Trochę praktyki...

► Sprawdź, czy potrafisz?



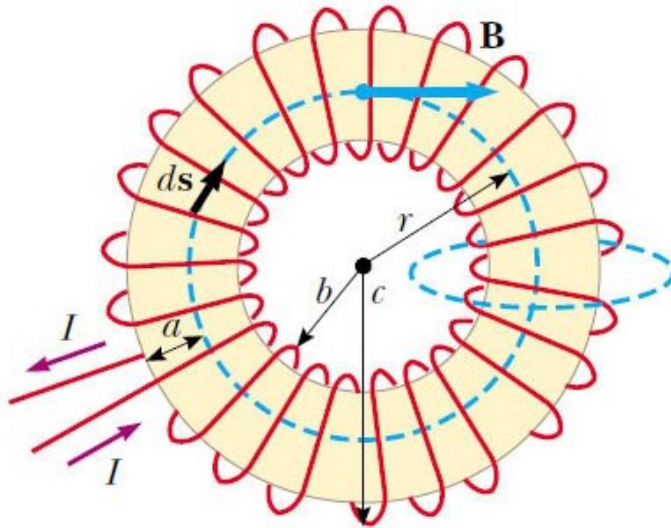
(a)



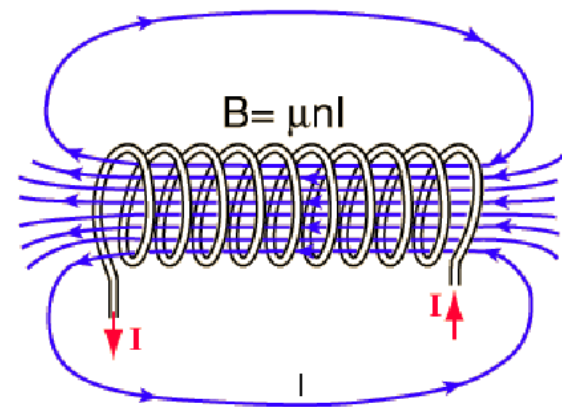
(b)

## 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:

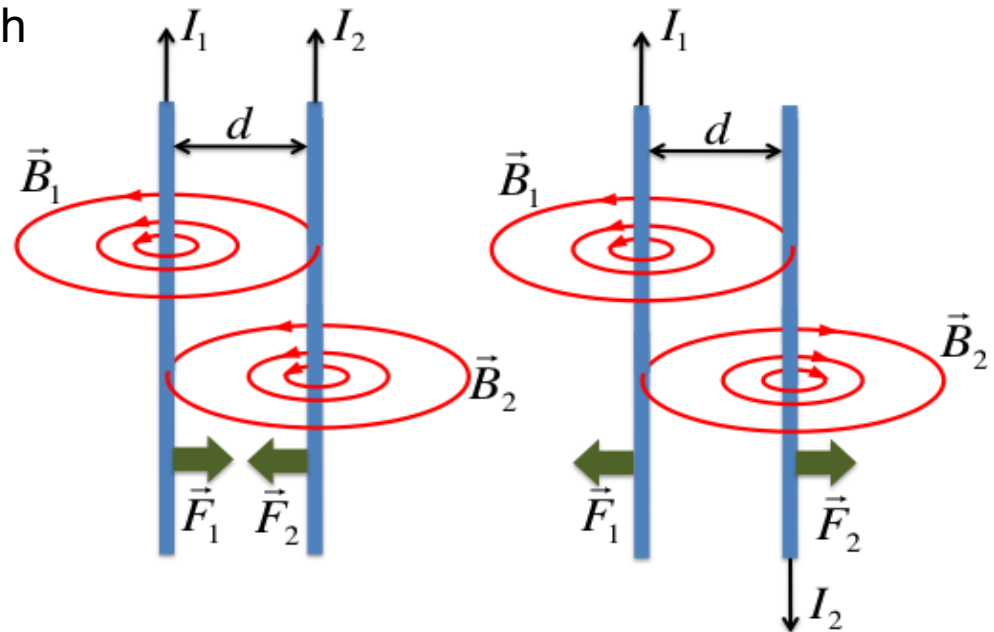
$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi r}$$

$$F_1 = B_2 I_1 L$$

co daje:

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

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



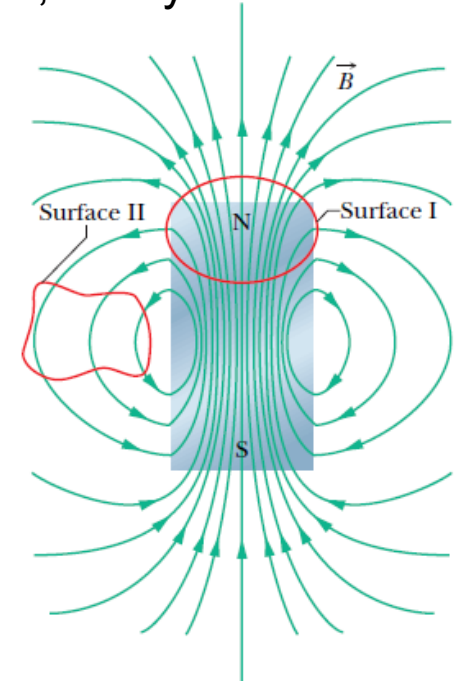


# Prawo Gaussa dla pola magnetycznego

- ▶ 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?

nieeeeee....