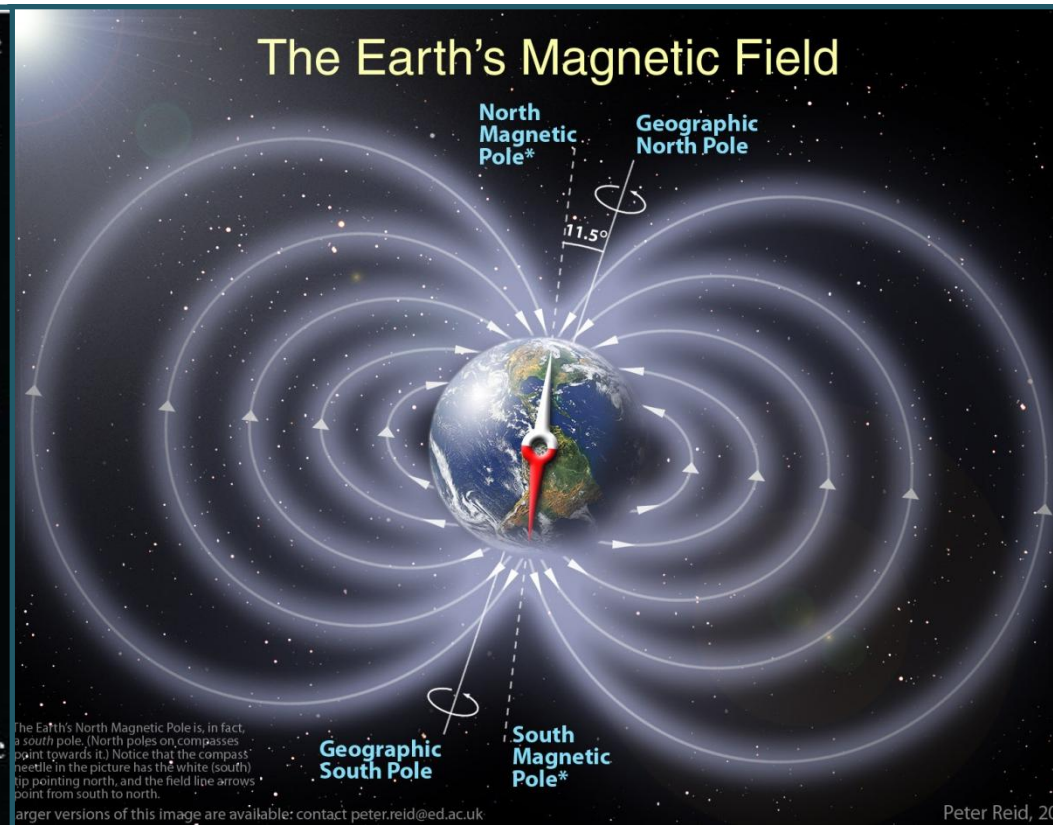
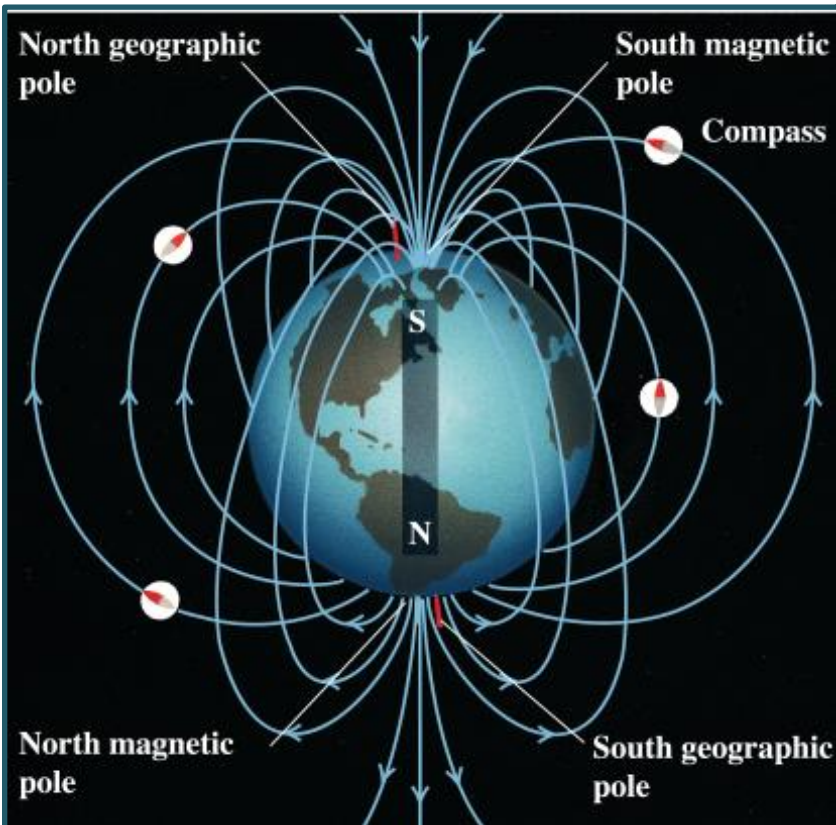


# POLE MAGNETYCZNE

- ✓ Magnetyzm . Pole magnetyczne .
  - ✓ Indukcja magnetyczna . Siła Lorentza .
  - ✓ Prawo Biota-Savarta .
  - ✓ Prawo Ampère'a .
  - ✓ Prawo Gaussa dla pola magnetycznego .
  - ✓ Prawo indukcji Faradaya .
  - ✓ Reguła Lenza .
  - ✓ Równania Maxwella .
  - ✓ Pole elektromagnetyczne .
-

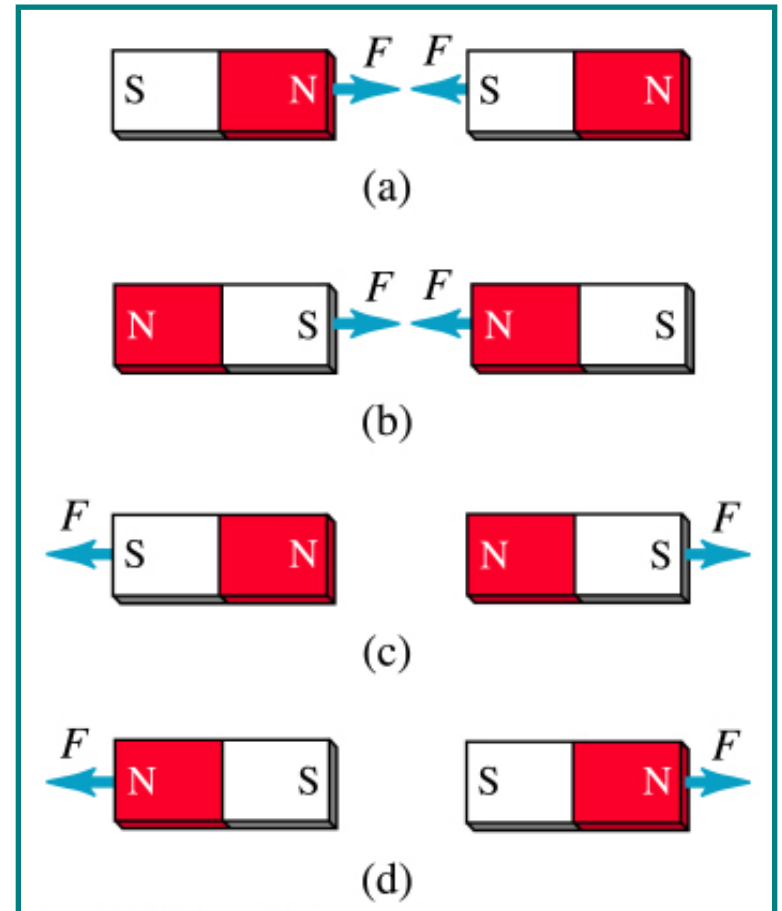
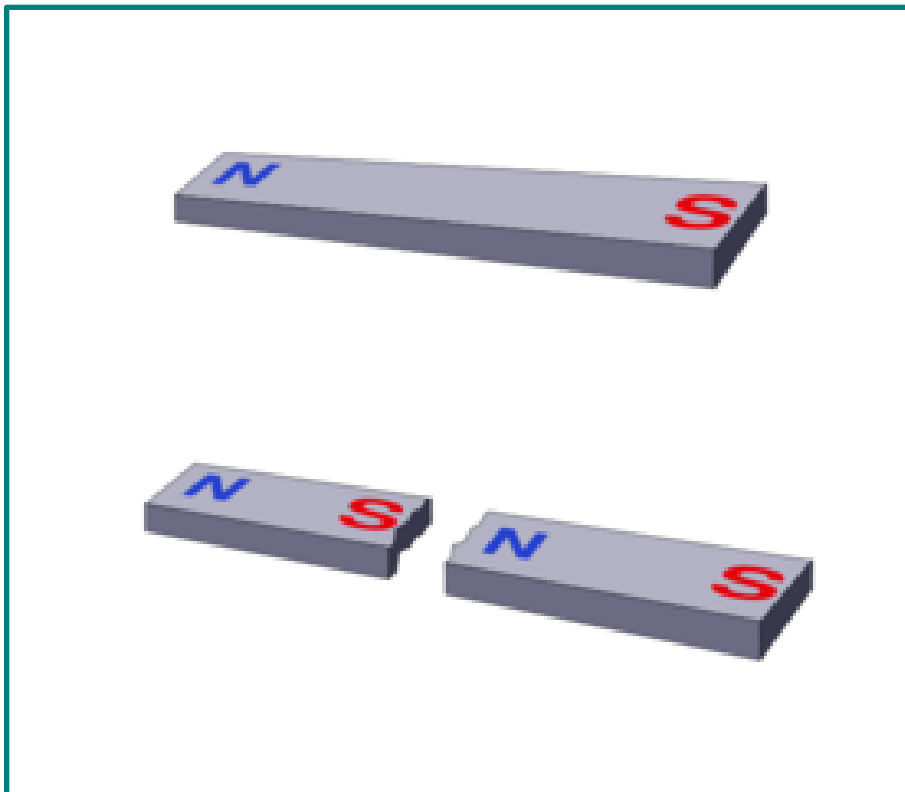
# MAGNETYZM

- ✓ Magnetyzm - pojęcie wywodzące się od nazwy okręgu Magnesia w Azji Mniejszej, gdzie już w starożytności odkryto „kamienie” (magnetyki - magnetyt, piryt, itp...) przyciągające kawałki żelaza.
- ✓ Innym naturalnym magnesem jest sama Ziemia, której działanie orientujące igłę magnetyczną kompasu znane jest już od starożytności.



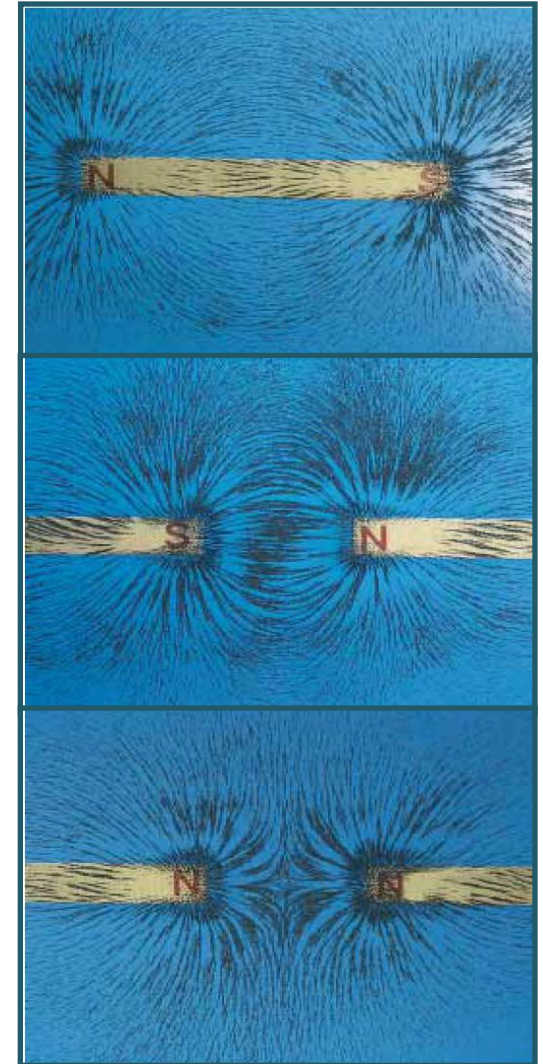
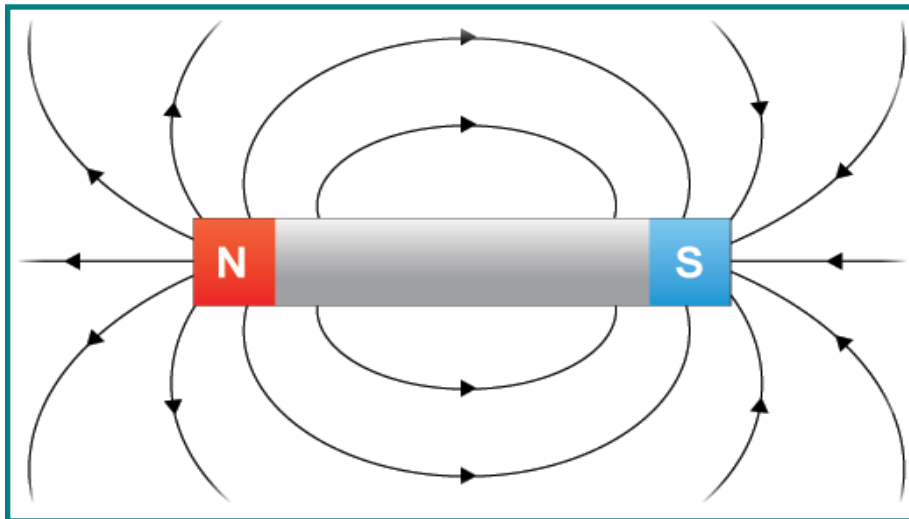
# MAGNETYZM

- ✓ W przyrodzie nie występują pojedyncze bieguny magnetyczne (nie istnieje monopol magnetyczny), każdy (nawet najmniejszy) magnes posiada zawsze dwa bieguny magnetyczne (północny **N** i południowy **S**).
- ✓ Jednoimienne bieguny magnetyczne odpychają się, różnoimienne bieguny magnetyczne - przyciągają się.



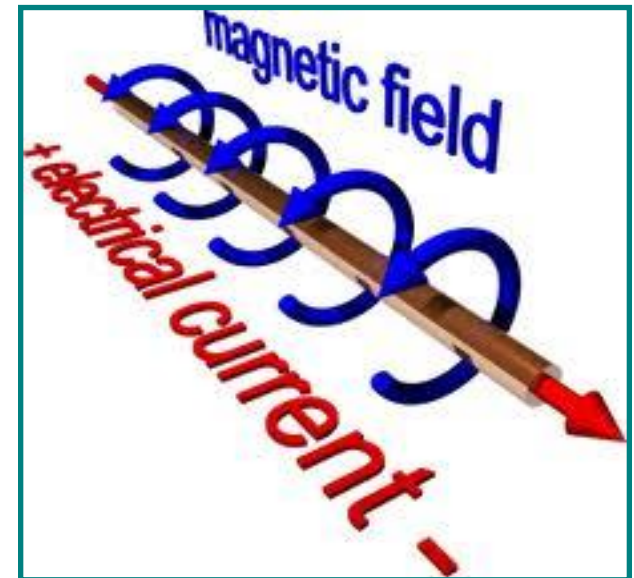
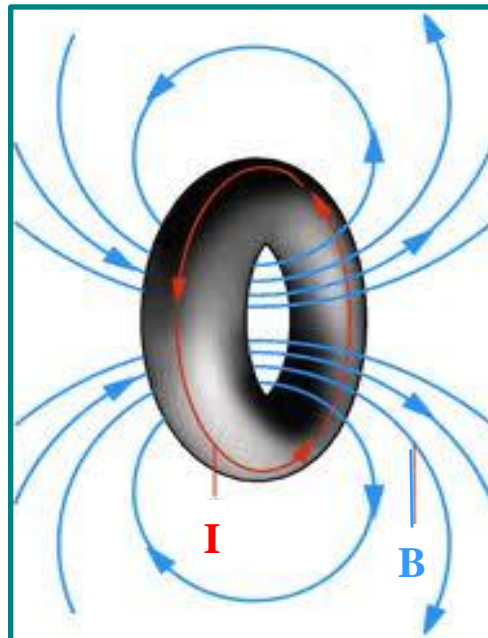
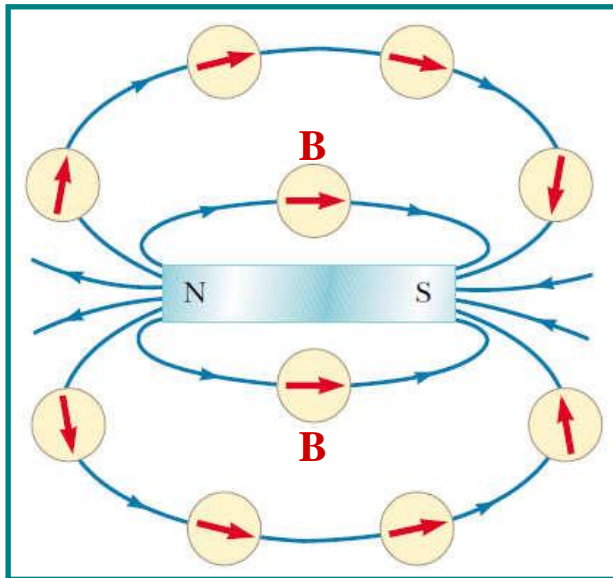
# POLE MAGNETYCZNE

- ✓ Każdy ruch ładunków elektrycznych wywołuje pole magnetyczne, a zatem istnieje związek pomiędzy zjawiskami magnetycznymi i elektrycznymi (Oersted, 1820 r.).
- ✓ Polem magnetycznym nazywamy przestrzeń otaczającą magnes albo przewodnik z prądem.
- ✓ Pole magnetyczne jest reprezentowane przez linie indukcji (linie pola magnetycznego).
- ✓ Linie indukcji magnetycznej zaczynają się na biegunie północnym (N), a kończą na biegunie południowym (S) i są krzywymi zamkniętymi.



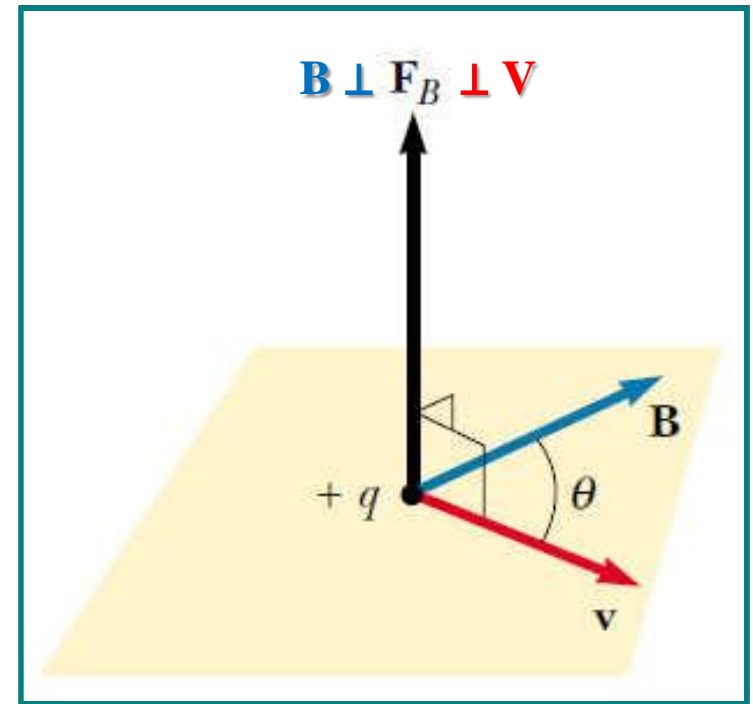
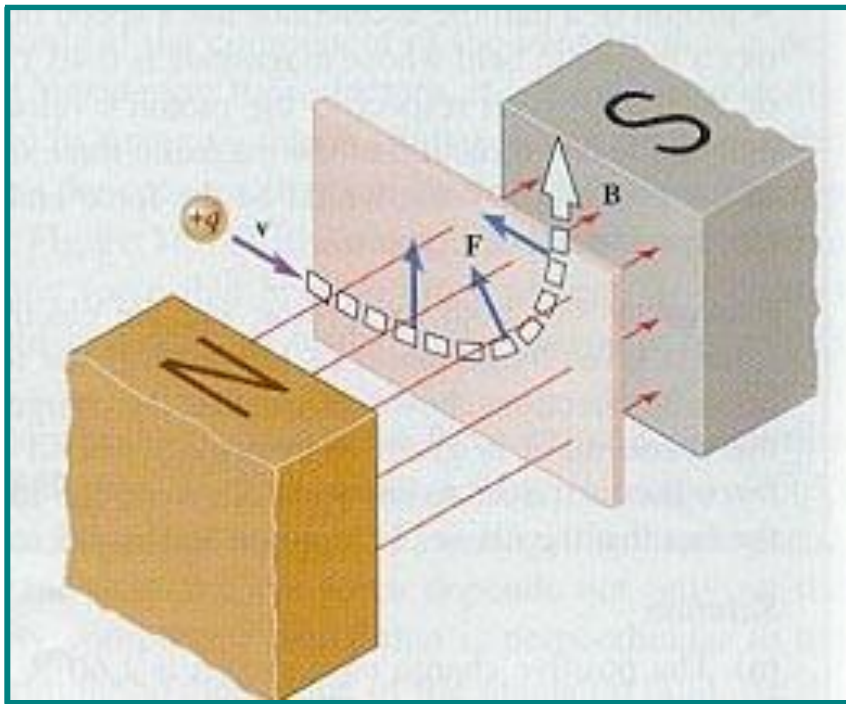
# INDUKCJA MAGNETYCZNA

- ✓ Pole magnetyczne charakteryzuje wielkość wektorowa nazywana indukcją magnetyczną  $B$ .
- ✓ Wektor pola magnetycznego  $B$  jest związany z liniami indukcji w następujący sposób:
  - styczna do linii indukcji w dowolnym punkcie wyznacza kierunek wektora  $B$  w danym obszarze przestrzeni;
  - liczba linii indukcji przechodzących przez jednostkową powierzchnię przekroju poprzecznego jest proporcjonalna do wartości  $B$ .



# SIŁA LORENTZA

- ✓ Pole magnetyczne (w odróżnieniu od pola elektrycznego) powstaje tylko wokół poruszających się ładunków elektrycznych.
- ✓ Na poruszające się w polu magnetycznym ładunki działa odchylająca siła magnetyczna  $F_B$  (nazywana siłą Lorentza).



- ✓ Siła Lorentza nie zwiększa prędkości ładunku, a jedynie zmienia jej kierunek; nie zwiększa też jego energii kinetycznej i nie wykonuje pracy.

# SIŁA LORENTZA

- ✓ Skierowana prostopadle do płaszczyzny, w której leżą wektory  $v$  i  $B$  siła Lorentza ( $F_B$ ) jest proporcjonalna do wielkości ładunku  $q_0$ , prędkości  $v$  oraz indukcji magnetycznej  $B$ .

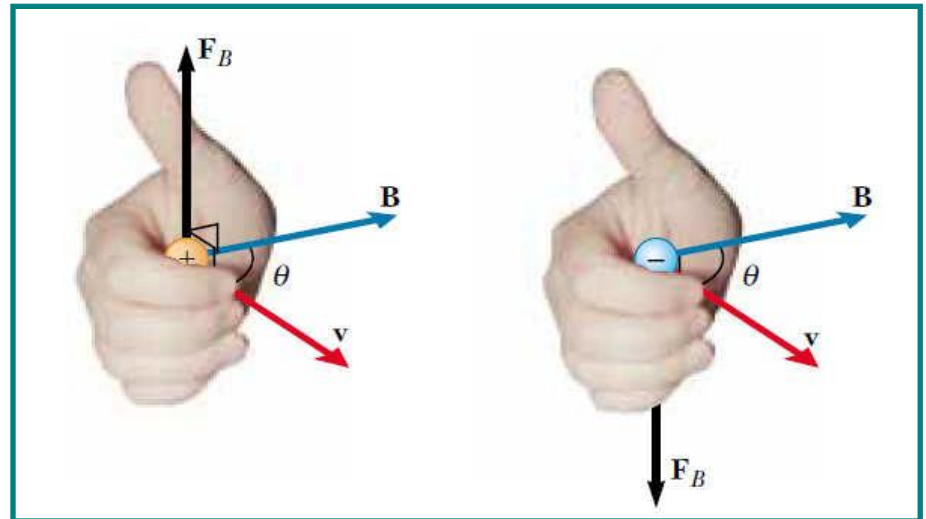
$$F_B = q_0 \underbrace{(v \times B)}_{\text{iloczyn wektorowy}}$$

- ✓ Kierunek i zwrot siły Lorentza określa „reguła prawej dłoni” lub „śruby prawoskrętnej”.

$$F_B = q_0 v B \sin\theta$$

\* $\theta$  - kąt pomiędzy wektorami  $v$  i  $B$

- $F_B$  znika, jeśli  $v \rightarrow 0$ ;
- $F_B = q_0 v B$  dla  $\theta = 90^\circ$  ( $F_{B \max}$ );
- $F_B = 0$  dla  $\theta = 0$  lub  $180^\circ$ .



$$[B] = \left[ 1T = 1 \frac{Wb}{m^2} = \frac{1N}{C(m/s)} = \frac{1N}{A \cdot m} = * 10^4 Gs \right]$$

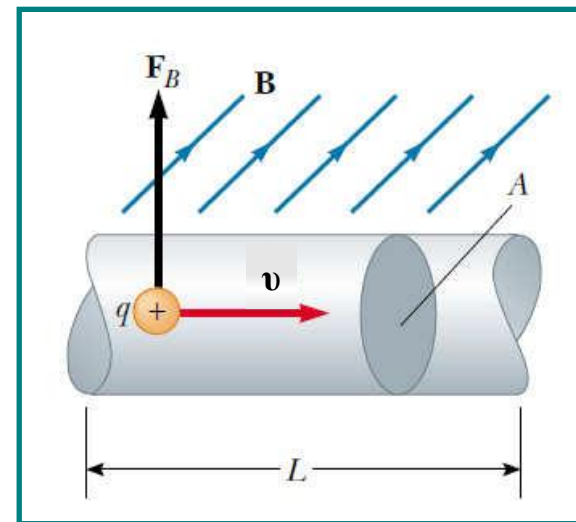
# SIŁA LORENTZA

- ✓ Wzór określający siłę Lorentza jest również słuszny w przypadku, gdy wzdłuż prostoliniowego przewodnika o długości  $l$  płynie prąd o natężeniu  $I$  (porusza się  $n$  ładunków).

*prąd (ruch ładunków)  $\leftrightarrow$  pole  $\mathcal{B}$   $\leftrightarrow$  prąd (ładunki w ruchu)*

$$\begin{cases} d\mathbf{F}_B = dq(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \\ \mathbf{v} = \frac{d\mathbf{l}}{dt} \end{cases}$$

$$d\mathbf{F}_B = dq \left( \frac{d\mathbf{l}}{dt} \times \mathbf{B} \right) = \frac{dq}{dt} (d\mathbf{l} \times \mathbf{B}) = I (d\mathbf{l} \times \mathbf{B})$$



co po scałkowaniu ostatecznie daje:

$$\mathbf{F}_B = I \underbrace{(\mathbf{l} \times \mathbf{B})}$$

*iloczyn wektorowy*



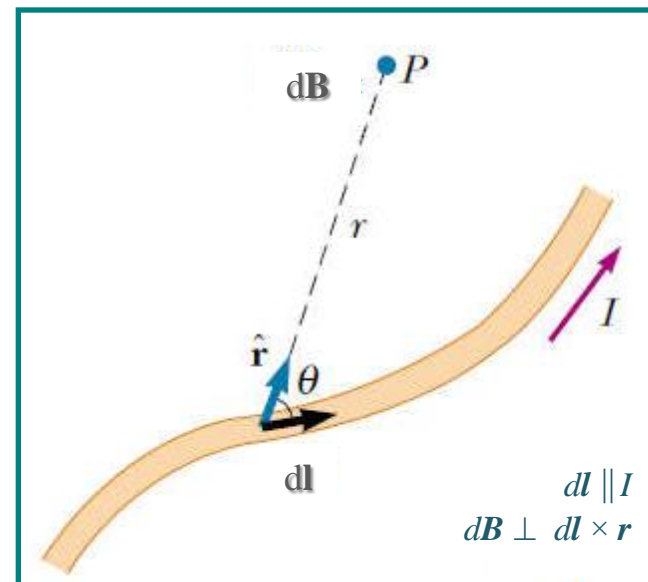
# PRAWO BIOTA-SAVARTA

- ✓ W przypadku pola magnetycznego, wytworzonego przez dowolny rozkład prądów (przewodnik dowolnego kształtu) indukcję magnetyczną  $\mathbf{B}$  w dowolnym punkcie pola  $\mathbf{P}$  obliczamy z prawa Biota-Savarta.
- ✓ Działanie magnetyczne prądu rozpatrujemy wtedy jako sumę działań pochodzących od poszczególnych elementów przewodnika i obliczamy wkłady  $d\mathbf{B}$ , dawane w rozważanym punkcie przez każdy z tych elementów:

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

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}}{r^3} \quad \left( B \sim \frac{1}{r} \right)$$

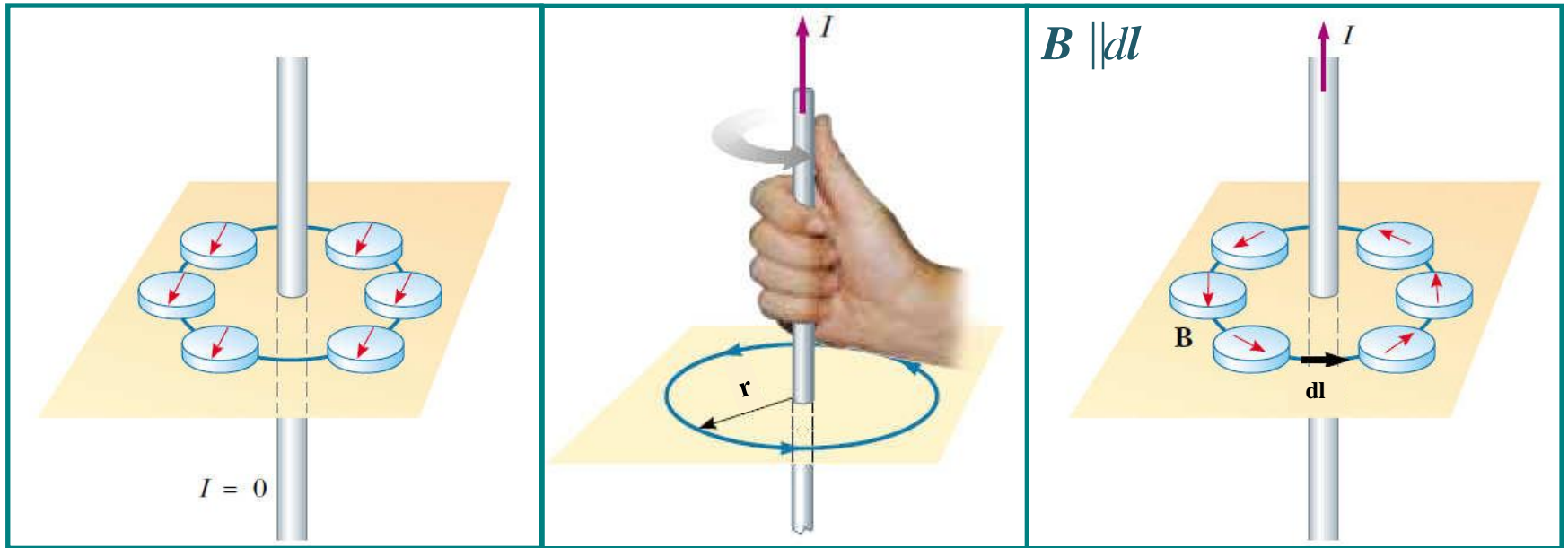
*c. po długości przewodnika*



$\theta$  - kąt pomiędzy promieniem wodzącym  $\mathbf{r}$  i elementem przewodu  $d\mathbf{l}$ ,  
 $\hat{\mathbf{r}}$  - wektor jednostkowy wektora  $\mathbf{r}$  (wersor).

*przenikalność magnetyczna próżni*  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  [T·m / A] lub [H/m]

# PRAWO AMPÈRE'A



- ✓ Wartość indukcji magnetycznej  $B$  wokół nieskończenie długiego, prostoliniowego przewodnika z prądem (z prawa Biota-Savarta):

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

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = B \oint dl = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} (2\pi r) = \mu_0 I$$

*c. po krzywej zamkniętej (okręgu)*

# PRAWO AMPÈRE'A

- ✓ Związek pomiędzy natężeniem prądu elektrycznego  $I$  płynącego w przewodniku a wektorem indukcji  $B$  dla dowolnego przypadku w polu magnetycznym wyraża prawo Ampère'a.

## PRAWO AMPÈRE'A

*Całka liniowa po dowolnej krzywej zamkniętej z wyrażenia  $B \cdot dl$  jest równa iloczynowi  $\mu_0 I$ , gdzie  $I$  jest całkowitym prądem przepływającym dowolną powierzchnię ograniczoną konturem całkowania.*

- ✓ Wynik w prawie Ampère'a nie zależy od kształtu zamkniętego konturu.

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

- ✓ Liczba linii indukcji przechodzących przez powierzchnię  $S$  określa strumień indukcji  $\Phi_B$ .

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

*c. po powierzchni otwartej lub zamkniętej*

- ✓ Jednostką strumienia indukcji  $\Phi_B$  jest *weber* [ $1\mathcal{Wb} = 1\mathcal{T} \cdot 1\mathcal{m}^2$ ].

# UOGÓLNIONE PRAWO AMPÈRE'A

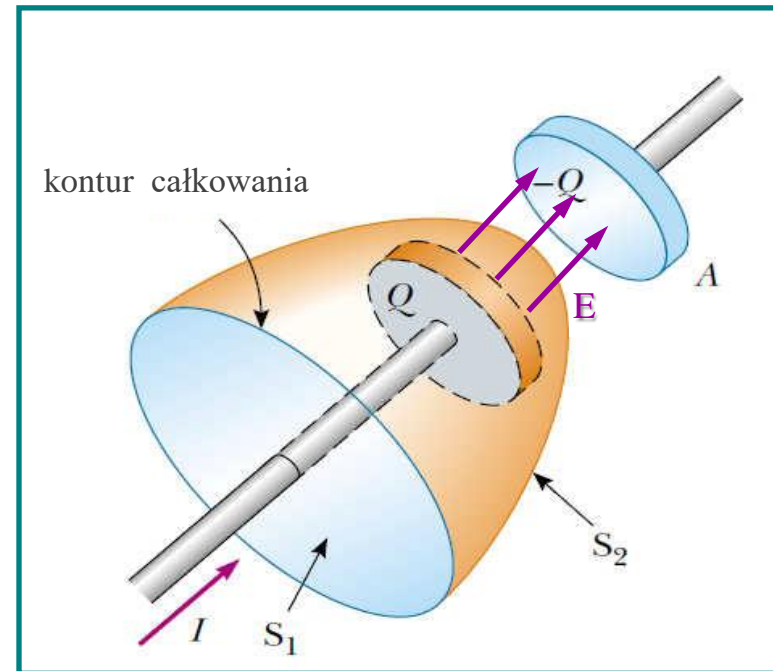
- ✓ Uogólnione prawo Ampère'a (prawo Maxwella - Ampère'a) to prawo Ampère'a uzupełnione o prąd przesunięcia.

$$\oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = \mu_0 (I + I_p) = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$$

*prąd przewodzenia  
(płynący przez przewodnik)*

*prąd przesunięcia*

- ✓ Prąd przesunięcia można traktować jako kontynuację prądu przewodzenia płynącego przez przewodnik ( $I_p = I$ ).
- ✓ Prawo Ampère'a obowiązuje tylko dla stałego w czasie pola elektrycznego.
- ✓ Prawo Ampère'a w postaci uogólnionej obowiązuje zarówno dla stałego jak i zmiennego w czasie pola elektrycznego.



# PRAWO GAUSSA dla pola magnetycznego

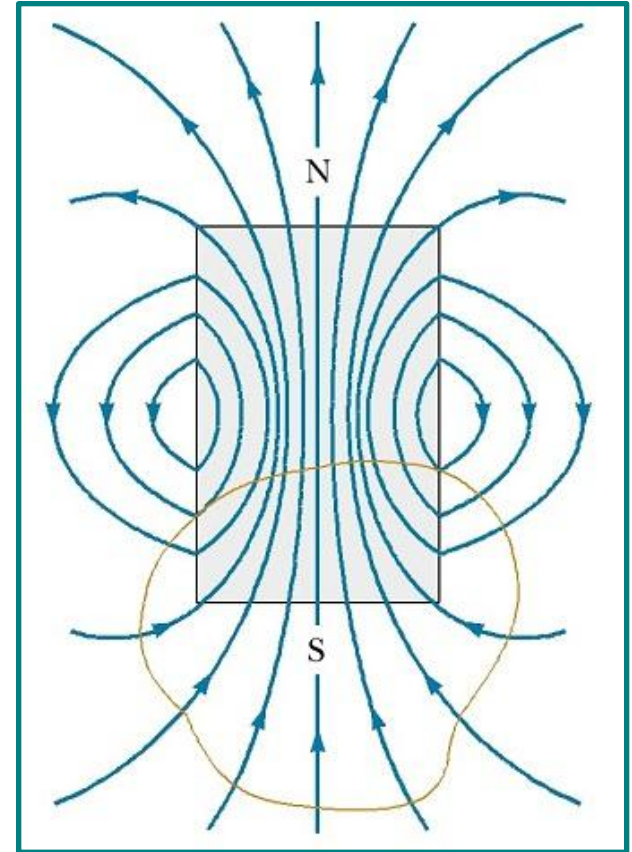
- ✓ Prawo Gaussa dla pola magnetycznego jest jednym z podstawowych równań teorii elektromagnetyzmu (II równanie Maxwella).

$$\Phi_B = \oint \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0$$

- ✓ Prawo Gaussa dla magnetyzmu jest formalnym stwierdzeniem wniosku o nieistnieniu izolowanych biegunów magnetycznych, ponieważ linie pola magnetycznego są zawsze krzywymi zamkniętymi.

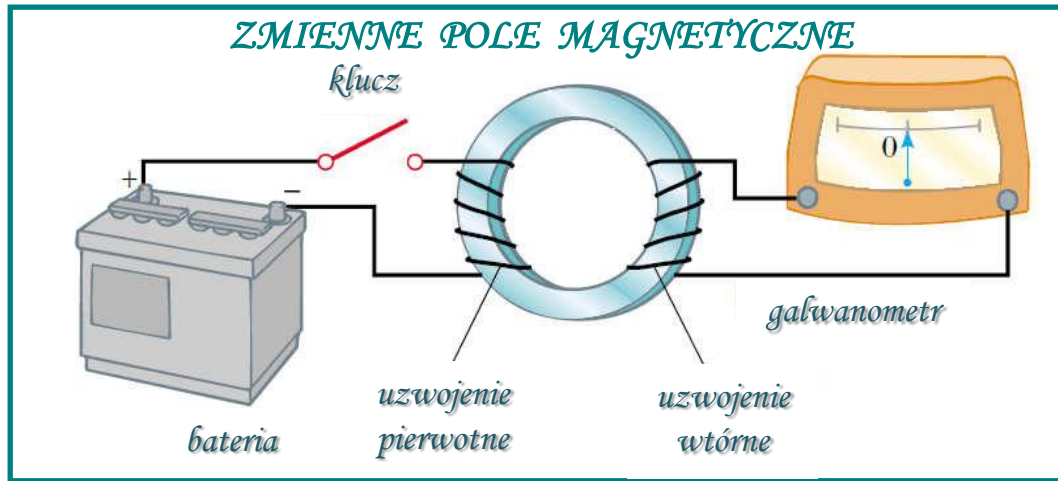
## PRAWO GAUSSA

*Strumień indukcji magnetycznej  $\Phi_B$  przez dowolną zamkniętą powierzchnię gaussowską jest równy zeru.*



# PRAWO INDUKCJI FARADAYA

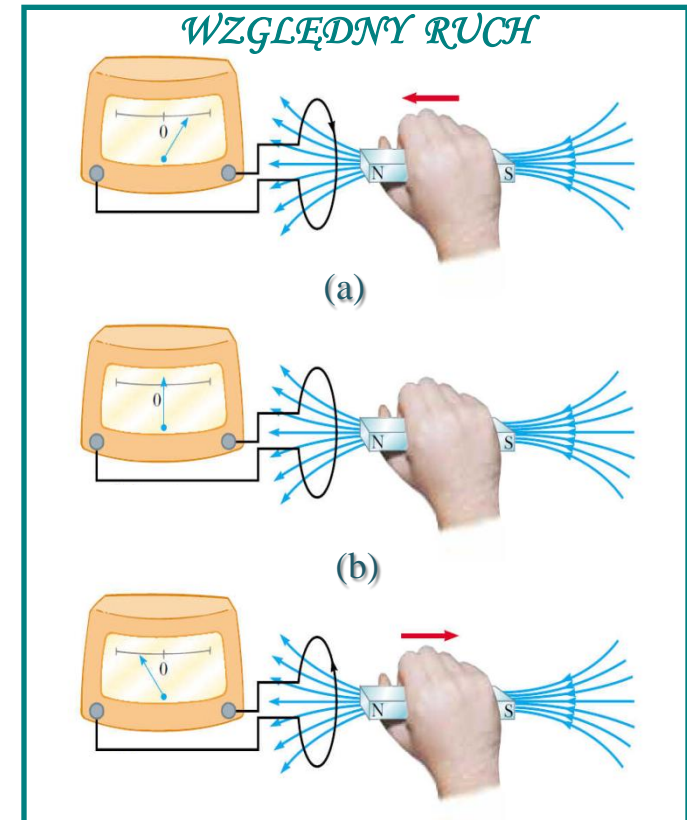
- ✓ Indukowana w obwodzie (konturze) siła elektromotoryczna ( $\mathcal{E}$ ) jest proporcjonalna do szybkości zmian strumienia pola magnetycznego  $\Phi_B$ .



$$\xi = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

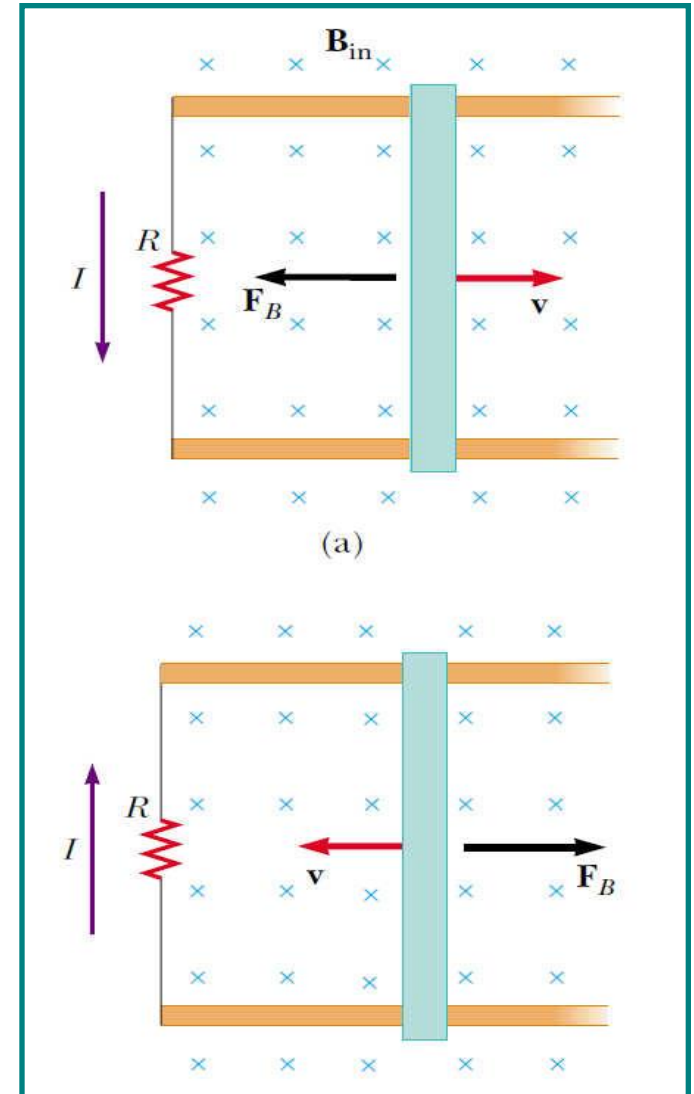
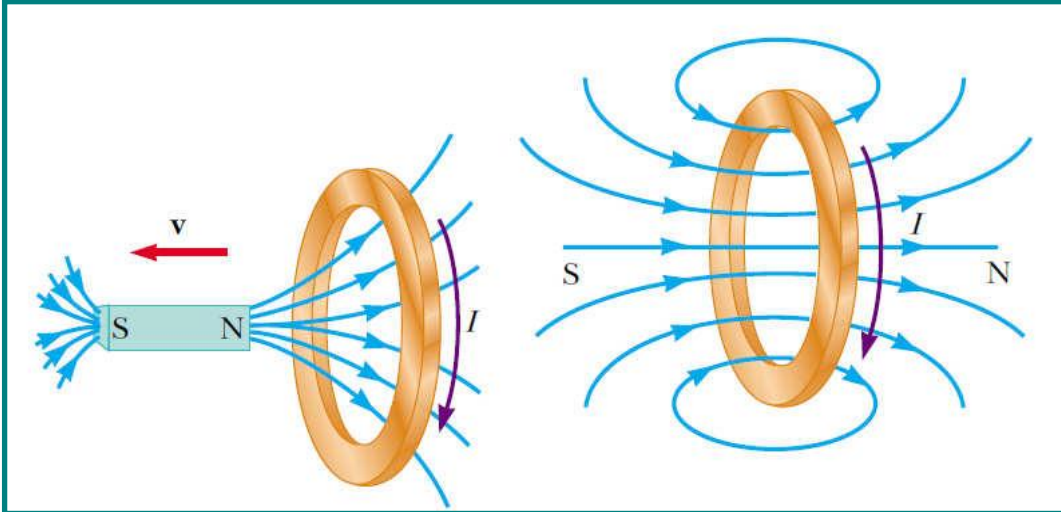
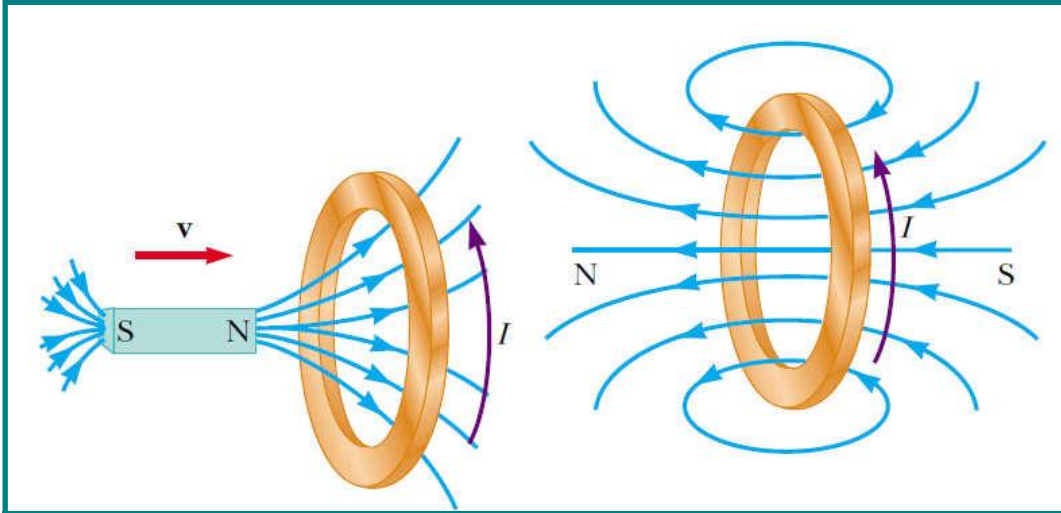
- ✓ Prąd powstający pod wpływem indukowanej  $\mathcal{E}$  nazywamy prądem indukowanym.
- ✓ Zmienne w czasie pole magnetyczne wytwarza (indukuje) pole elektryczne.

$$\oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = \xi = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$



# REGUŁA LENZA

- ✓ Prąd indukowany ma taki kierunek, że wytwarzane przez ten prąd pole magnetyczne przeciwdziała zmianie strumienia magnetycznego, która go wywołuje (znak minus w prawie Faradaya).



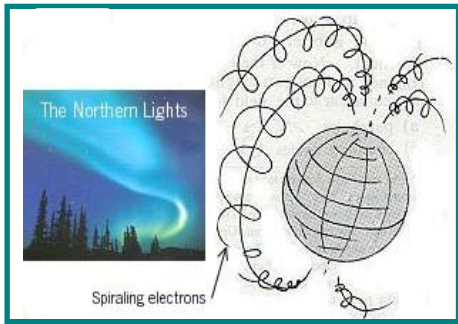
# RÓWNANIA MAXWELLA

NUMER	NAZWA	RÓWNANIE	SENS RÓWNANIA
I	Prawo Gaussa dla elektryczności	$\oint \mathbf{E} d\mathbf{S} = \frac{q}{\epsilon_0}$	Źródłem pola elektrycznego są ładunki elektryczne.
II	Prawo Gaussa dla magnetyzmu	$\oint \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0$	Pole magnetyczne jest bezźródłowe. Linie pola magnetycznego są zamknięte.
III	Prawo indukcji Faradaya (uogólnione)	$\oint \mathbf{E} d\mathbf{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$	Zmienne w czasie pole magnetyczne wytwarza pole elektryczne
IV	Prawo Ampère'a (rozszerzone przez Maxwella)	$\oint \mathbf{B} d\mathbf{l} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$	Prąd elektryczny i zmienne w czasie pole elektryczne wytwarza pole magnetyczne.

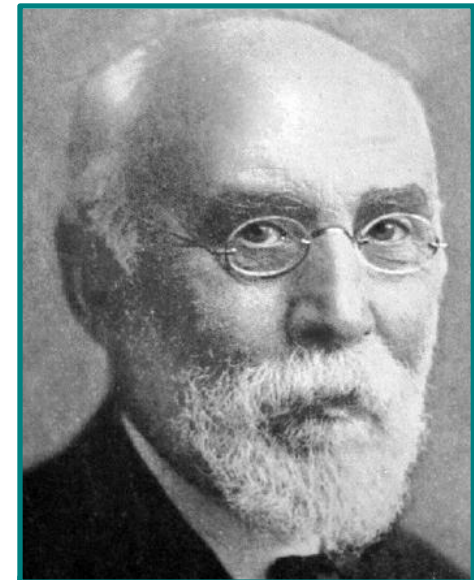


# POLE ELEKTROMAGNETYCZNE

- ✓ Jeśli naładowana cząstka porusza się w obszarze, w którym występuje zarówno pole elektryczne  $E$  jak i magnetyczne  $B$ , to działającą na tę cząstkę wypadkową siłę opisuje równanie Lorentza.



$$\mathbf{F} = q_0 \mathbf{E} + q_0 \underbrace{(\mathbf{v} \times \mathbf{B})}_{\text{iloczyn wektorowy}}$$



*H. A. Lorentz*  
(1853 – 1928)

- ✓ Wykorzystuje się to w wielu urządzeniach, takich jak telewizor, mikroskop elektronowy, czujniki położenia i przemieszczenia, napęd okrętów podwodnych (MHD), spektrometry masowe czy akceleratory cząstek.
- ✓ Równanie Lorentza wraz z podstawowymi równaniami elektromagnetyzmu (cztery równania Maxwella) opisują wszystkie zjawiska w elektrodynamice (właściwości i oddziaływania cząstek obdarzonych ładunkiem oraz pól elektrycznego i magnetycznego wraz zależnościami między tymi polami).