

Wykład 15.

Magnetyzm

1. Pole magnetyczne

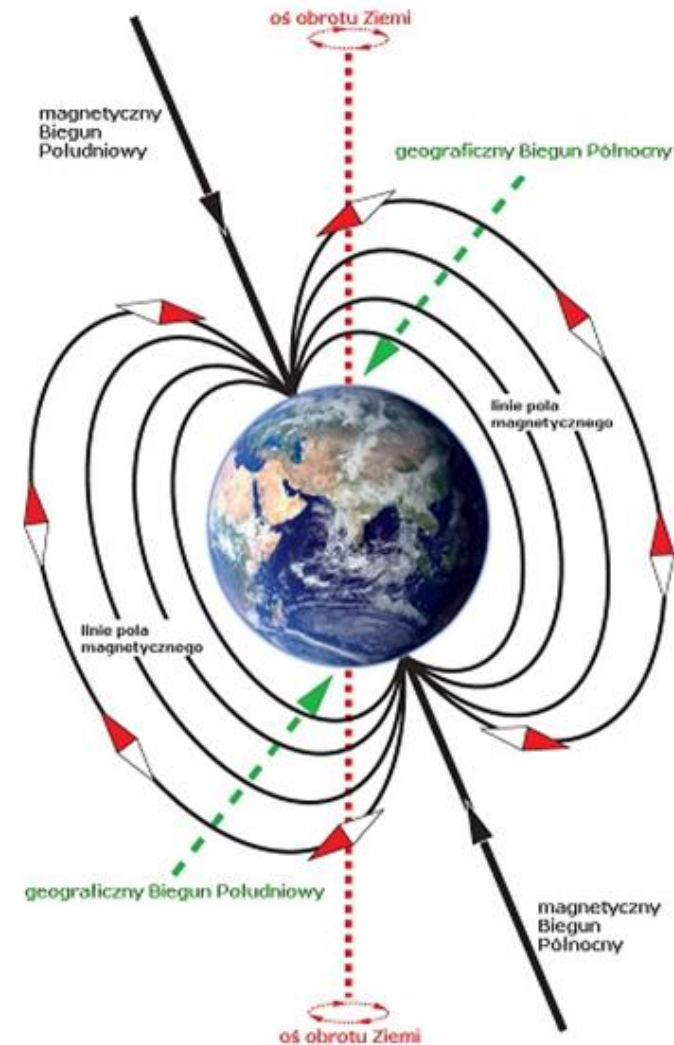
- Siła Lorentza
- Efekt Halla
- Siła magnetyczna

2. Prawo Biota-Savarta

3. Prawo Ampere'a

4. Prawo Gaussa dla pól magnetycznych

5. Własności magnetyczne materii

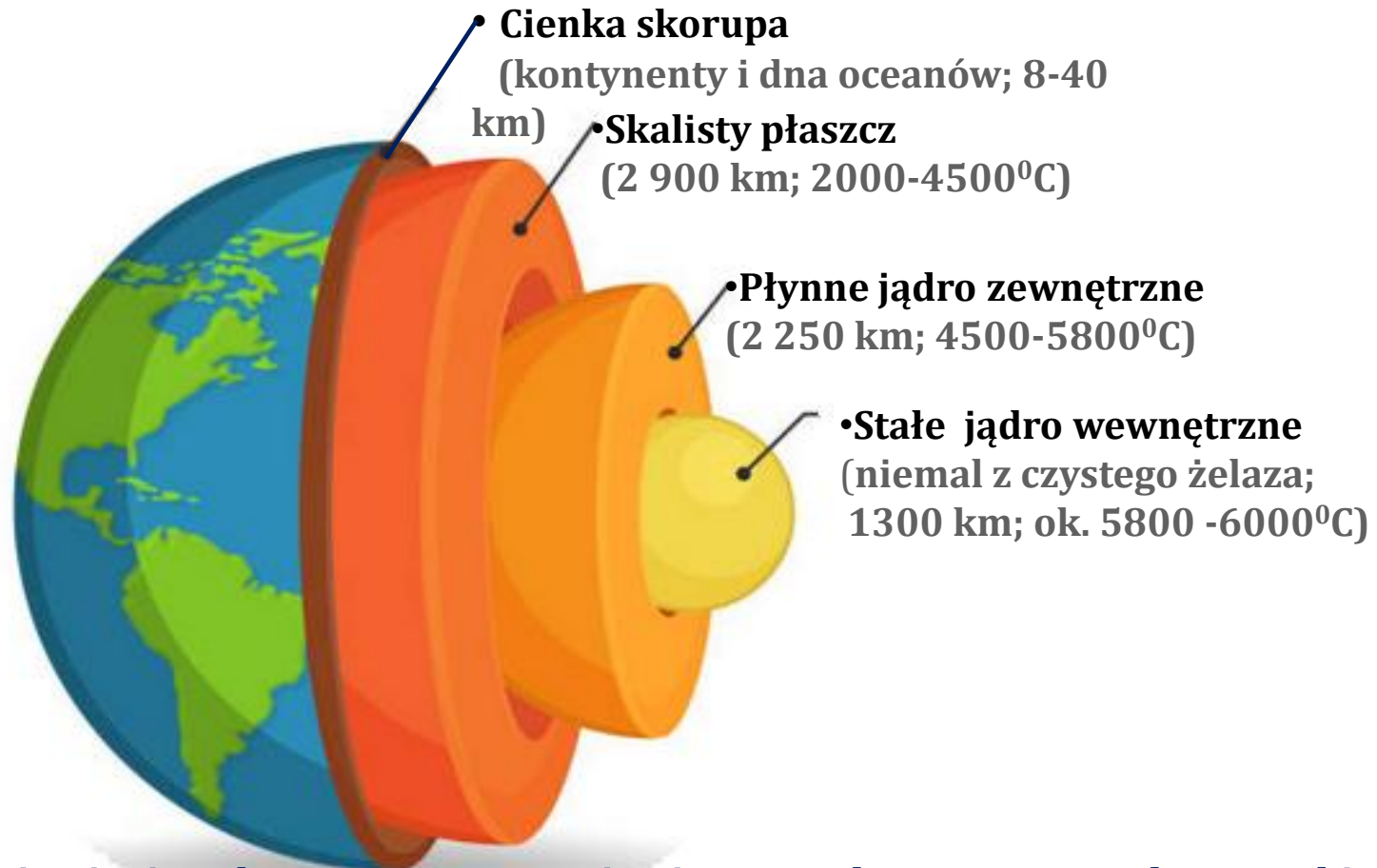


Pole magnetyczne Ziemi: 0.3 – 0.6 Gaussa, 1 Tesla [T] = 10^4 Gaussów [Gs].

Pole magnetyczne

Własności magnetyczne rudy żelaza - magnetytu, znane były w dalekiej starożytności i wykorzystywano je np. do budowy kompasu magnetycznego w Azji ok. I w. pn.e.

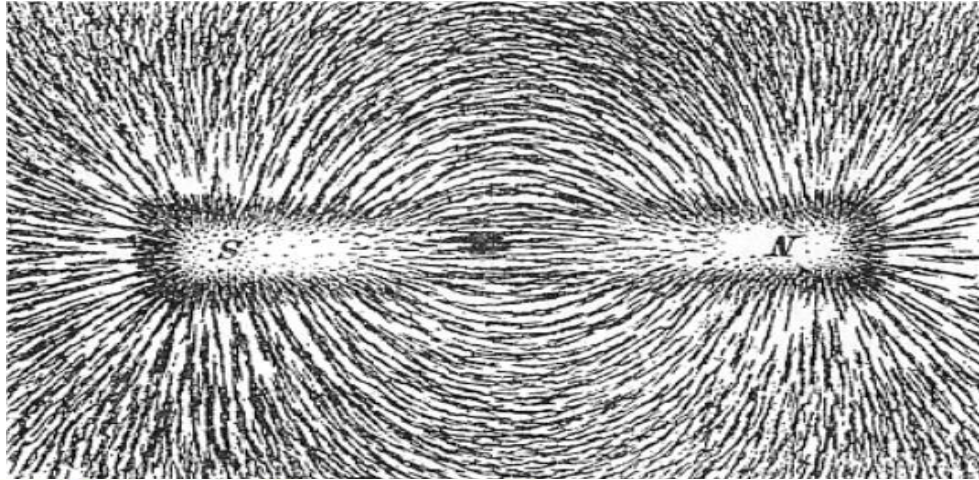
Własności magnetyczne Ziemi wynikają z jej wewnętrznej budowy



Nieustanne istnienie pola magnetycznego Ziemi tzw. geodynamo, to przede wszystkim zasługa istnienia płynnego, metalicznego żelaza, zasobów energii wystarczających do podtrzymania konwekcji oraz siły Coriolisa. Rys. Źródło: <https://www.istockphoto.com>

Pole magnetyczne

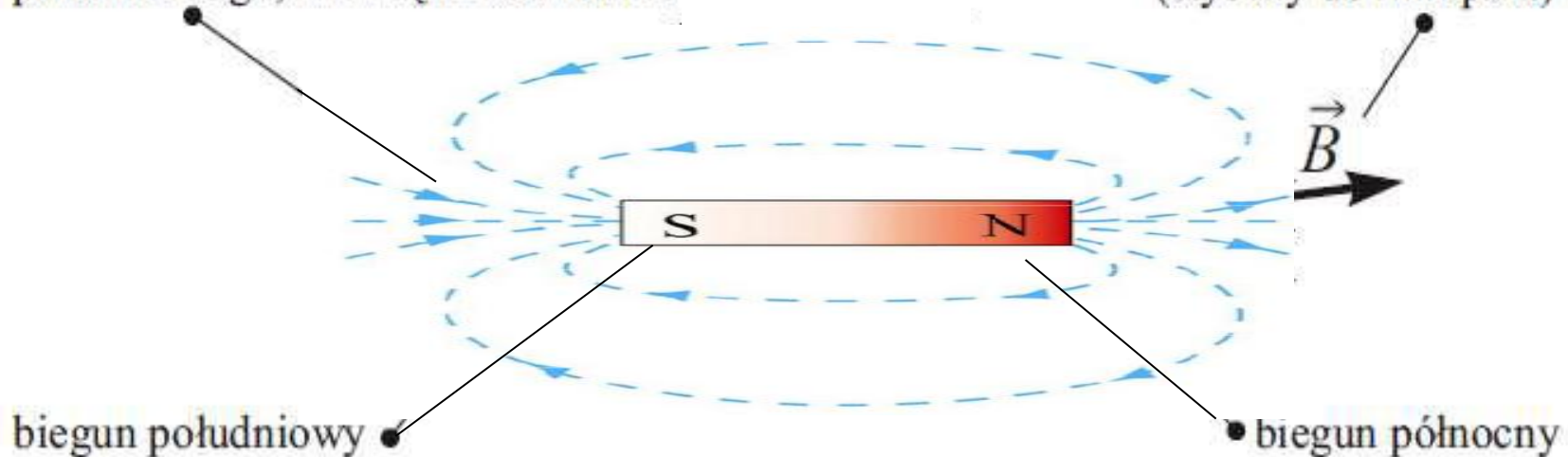
Powszechnym źródłem pola magnetycznego jest magnes stały. Najlepszym tego przykładem jest magnes sztabkowy,



Rys. źródło:
[http://pl.wikipedia.org/wiki/Grafika:](http://pl.wikipedia.org/wiki/Grafika)

na zewnątrz magnesu linie pola magnetycznego mają kierunek od bieguna północnego do bieguna południowego, wewnątrz odwrotnie

wektor indukcji magnetycznej (styczny do linii pola)

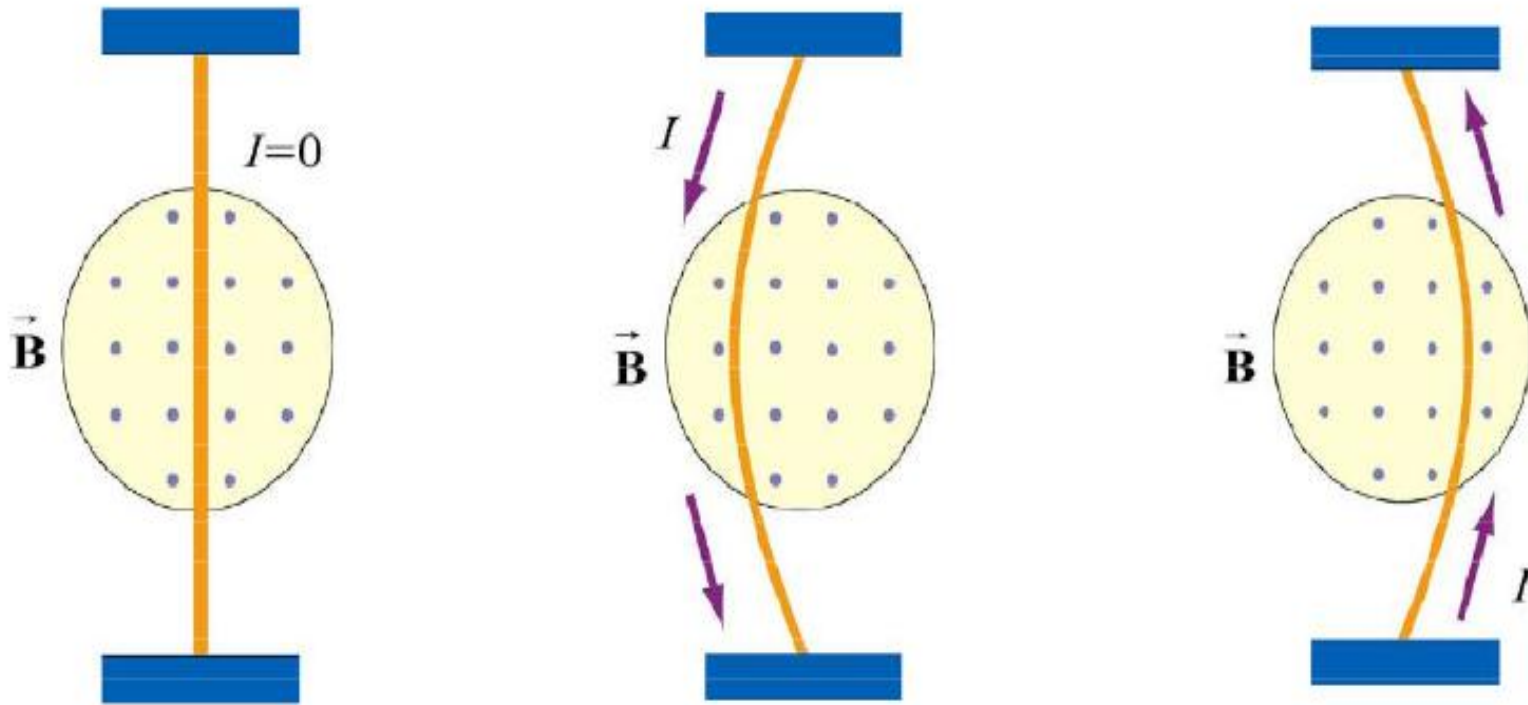


biegun południowy

biegun północny

Siła Lorentza

Pole magnetyczne wytwarza *siłę magnetyczną, zwaną siłą Lorentza*, która oddziałuje na poruszające się elektrony lub prądy elektryczne. Działa ona również na przewodnik z prądem.

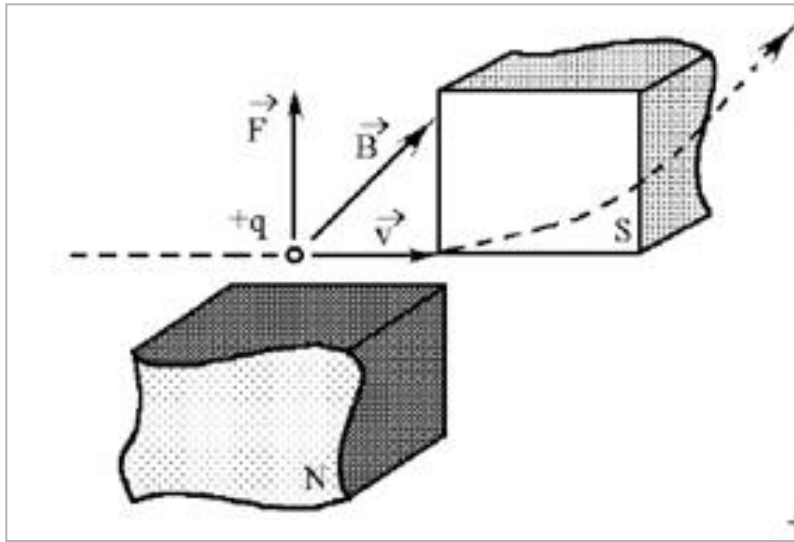


Rys. Oddziaływanie pola magnetycznego na prostoliniowy przewodnik z prądem. Źródło: <http://www.old.if.pwr.wroc.pl>

Oddziaływanie pomiędzy prądem i magnesem opisujemy za pomocą parametru *B - indukcja pola magnetycznego.*

Pole magnetyczne i siła Lorentza

Na ładunek q poruszający się w polu magnetycznym z prędkością v działa siła magnetyczna F_L (F_B). Doświadczalnie ustalono następującą zależność:

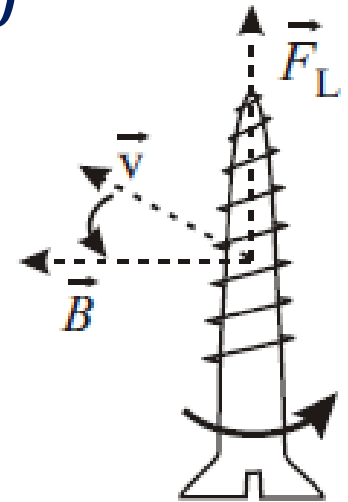


Rys. Siła F_B działająca na cząstkę w polu magnetycznym trwałego magnesu. źródło: <http://home.agh.edu.pl>

Zapis wektorowy

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

Kierunek i zwrot siły magnetycznej zwanej **siłą Lorentza** (F_L) określa **reguła śruby prawoskrętnej** lub **reguła prawej ręki**.



Skalarnie :

$$F_L = qvB \sin \alpha$$

α - kąt zawarty między wektorami v i B .

Powyższe równanie definiuje indukcję pola magnetycznego B .

Indukcja magnetyczna- definicja

Indukcja magnetyczna \vec{B} :

$$B = \frac{F_B}{q \cdot v \cdot \sin \alpha} \quad (*)$$

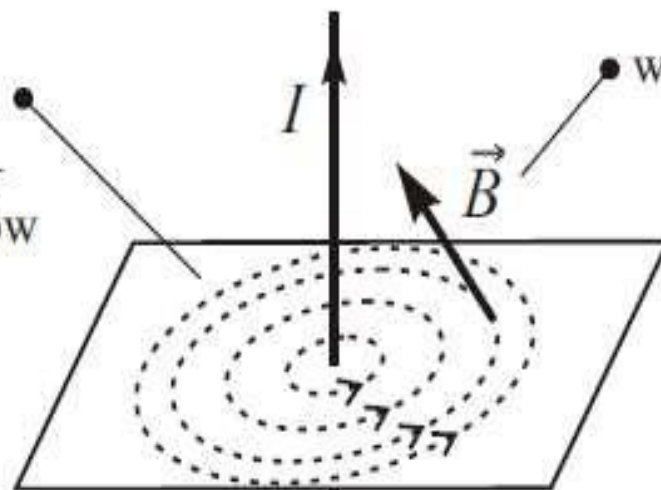
Jednostką indukcji magnetycznej B jest **tesla (1T)**: $[B] = \text{T} = \frac{\text{N}}{\text{C} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}}} = \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} = \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$.

Równanie (*) pozwala określić **zwrot wektora B** , który zgodnie z doświadczeniem, **jest on skierowany od bieguna N do bieguna S magnesu**.

■ **Indukcja magnetyczna.** Pole magnetyczne ma charakter wektorowy i jest charakteryzowane wielkością wektorową \vec{B} nazwaną indukcją magnetyczną. Wektor indukcji magnetycznej jest styczny do linii pola magnetycznego. Jego wartość jest proporcjonalna do gęstości linii pola magnetycznego. Jednostką indukcji magnetycznej jest *tesla* (T). Logiczniej byłoby przez analogię do pola elektrycznego, nazwać \vec{B} natężeniem pola magnetycznego. Jednak zgodnie z tradycją historyczną podstawową wielkość charakteryzującą pole magnetyczne nazywa się indukcją magnetyczną. Nazwę *natężenie pola magnetycznego* przypisuje się wielkości \vec{H} analogicznej do wielkości \vec{D} charakteryzującej pole elektryczne.

Pole magnetyczne przewodu z prądem

linie pola magnetycznego
(linie indukcji magnetycznej)
przewodu prostego z prądem –
układ koncentrycznych okręgów



wektor indukcji magnetycznej

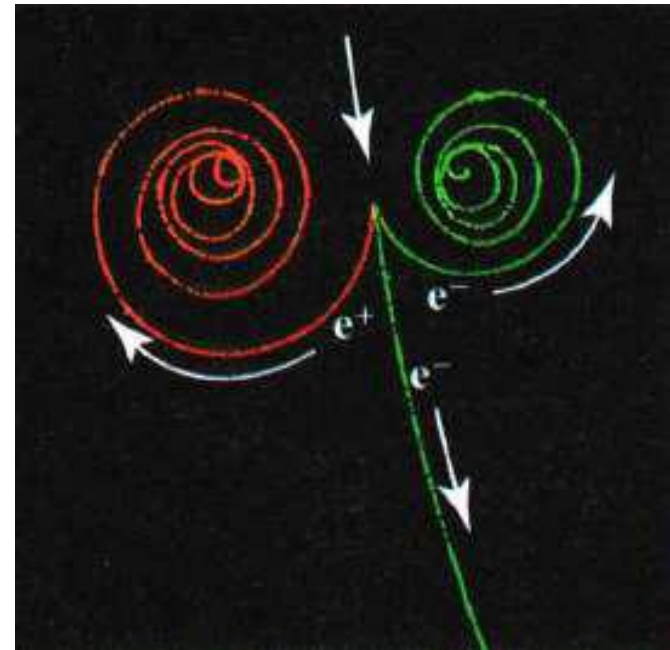
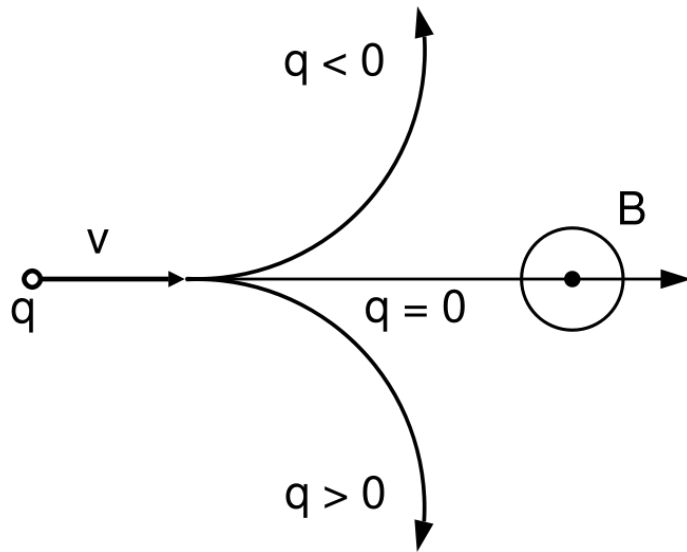
kierunek linii pola
magnetycznego określa reguła
śruby prawoskrętnej (wkręcamy
śrubę w kierunku zgodnym
z prądem w przewodniku)



kierunek ruchu obrotowego śruby
odpowiada kierunkowi linii pola

Przykład - Siła Lorentza w polach elektrycznym i magnetycznym

Siła Lorentza działająca na poruszający się dodatni i ujemny ładunek elektryczny .



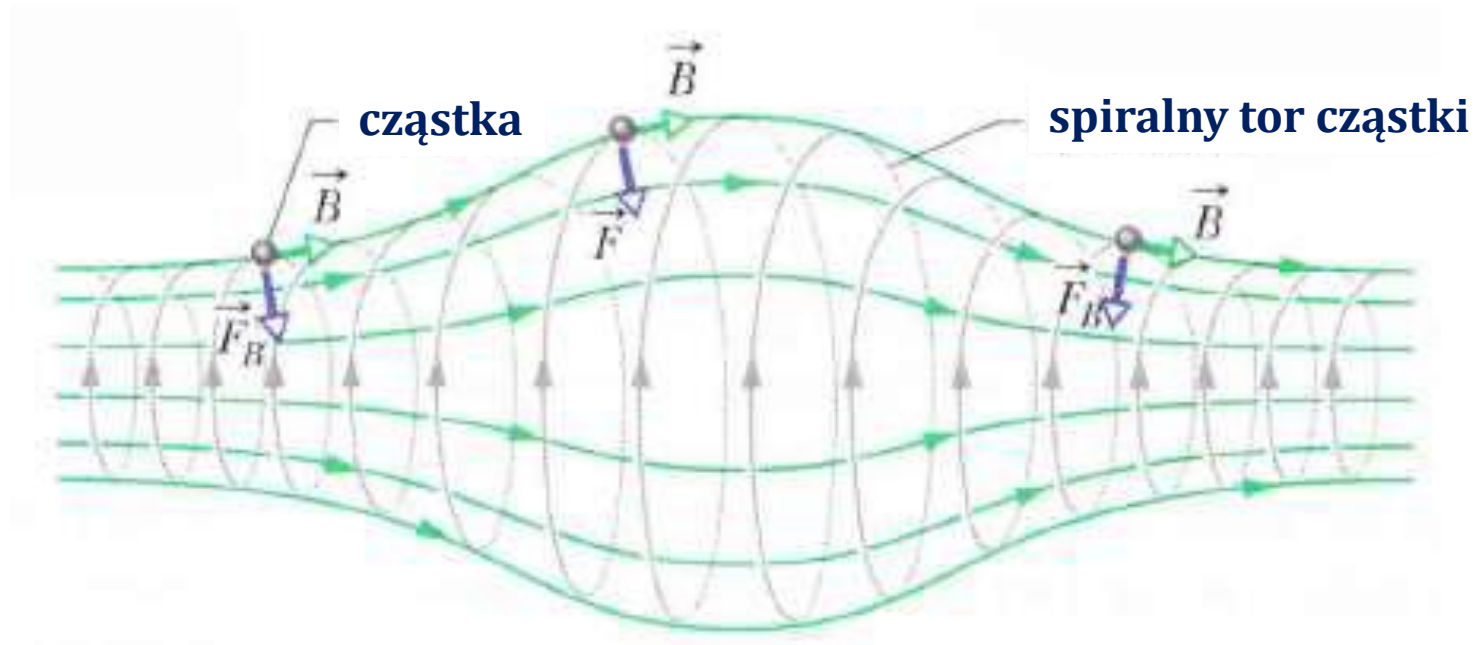
Jeżeli naładowana cząstka porusza się w obszarze, gdzie istnieje zarówno pole elektryczne jak i magnetyczne, to działa na nią wypadkowa siła:

zwana siłą Lorentza.

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

Gdzie \mathbf{v} – prędkość cząstki, ładunków, \mathbf{E} , \mathbf{B} wielkości charakteryzujące pole elektryczne [V/m] i magnetyczne [T], odpowiednio.

Niejednorodne pole magnetyczne

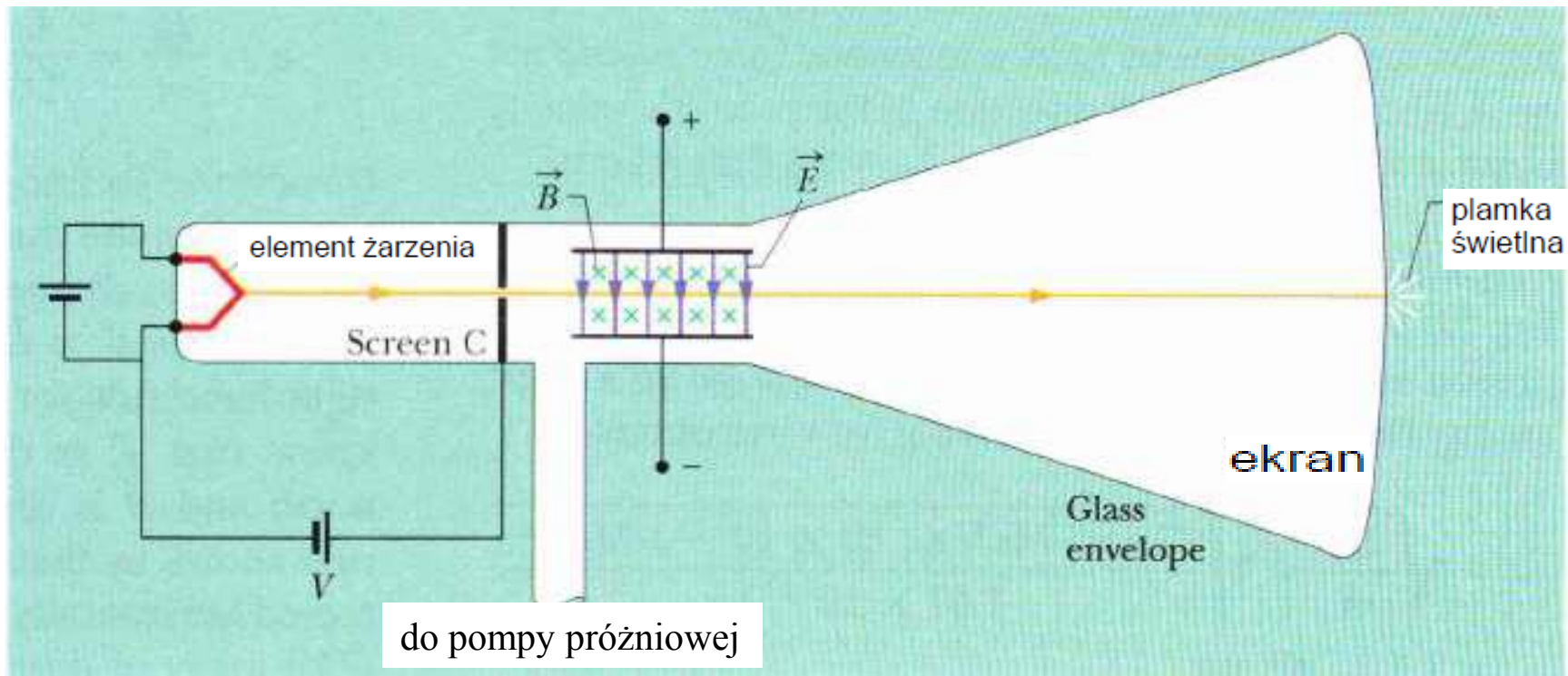


Rys. Naładowana cząstka, poruszająca się po linii śrubowej w niejednorodnym polu magnetycznym. Źródło: Halliday, Resnick, Walker „Fundamentals of Physics”.

Pola skrzyżowane

Zarówno **pole elektryczne E** , jak i **pole magnetyczne B** mogą działać siłą na naładowaną cząstkę. Pola skrzyżowane- jeżeli wektory dwóch pól E i B są wzajemnie prostopadłe (rys.).

Doświadczenie doprowadziło w **1897 r.** do **wyznaczenia q/m i odkrycia elektronu** przez J. J. Thomsona z Uniwersytetu w Cambridge.



$$\frac{q}{m} = 17,56 \cdot 10^{10} \frac{C}{kg}$$

Efekt Halla- wyjaśnienie

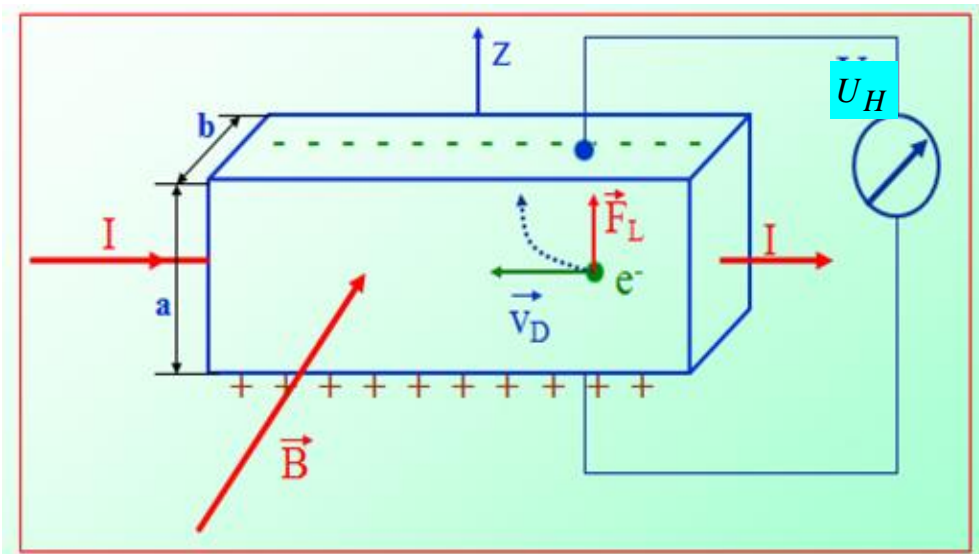
Edwin Hall – 1879 r. (wówczas student)

Pole magnetyczne może zmienić kierunek wektora prędkości poruszającej się cząstki (elektron przewodnictwa), ale nie może zmienić wartości jej prędkości.

Efekt Halla pozwala sprawdzić:

- czy nośniki w przewodniku są naładowane dodatnio, czy ujemnie
- zmierzyć liczbę nośników, przypadającą na jednostkę objętości przewodnika, czyli koncentrację nośników.

Zał. Mamy cienką płytkę przewodzącą o wymiarach a, b i c (rys.), przez którą przepływa prąd o natężeniu I , z prędkością dryfu V_D w polu indukcji magnetycznej B .



Przepływ prądu polega na uporządkowanym ruchu ładunków q .

Jeżeli $I = \text{const.}$, to gęstość płynącego prądu (j):

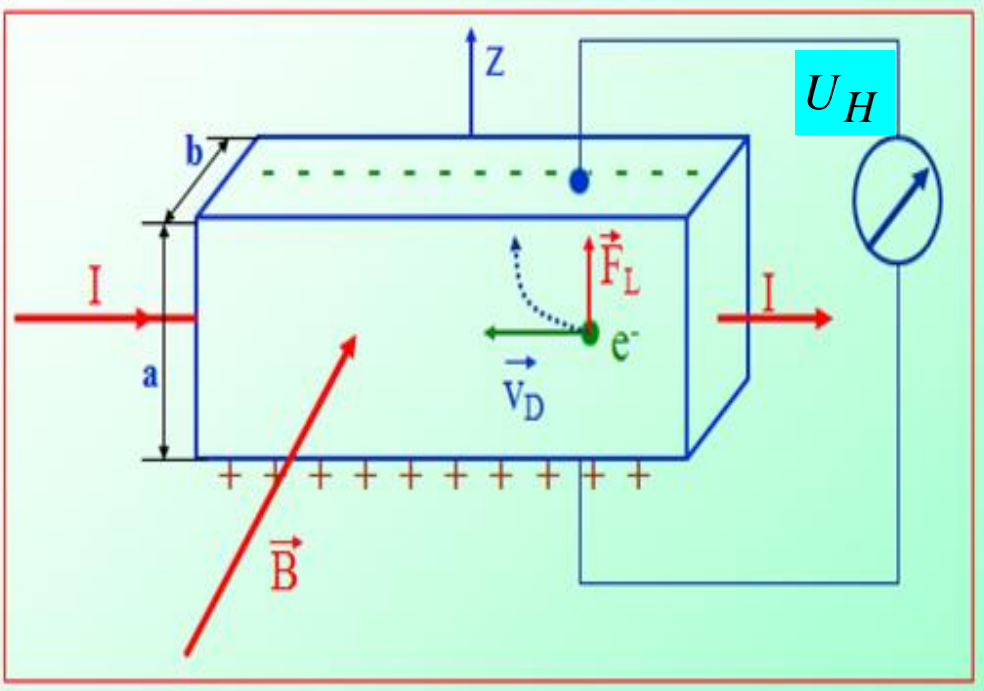
$$j = \frac{I}{S} \quad (*)$$

Rys. Efekt Halla- odchylenie strumienia elektronów w polu magnetycznym. Pola skrzyżowane

Rys. źródło: : Reinhard Kulessa

S - powierzchnia prostopadła do kierunku prądu ($S = ab$)

Efekt Halla- wyjaśnienie



Teraz potrzebujemy zależności między Gęstością prądu a prędkością dryfu (unoszenia ładunków).

Niech n - oznacza liczbę nośników w jednostce objętości; tzw. Gęstość nośników ładunków;

Q - wartość ładunku elementarnego

V - przyjmujemy, że przewodnik ma kształt walca o polu podstawy S (i zarazem przekroju S) i długości l ;

Wówczas , w elemencie przewodnika ładunek :

$$q = l \cdot S \cdot n \cdot e \quad (**)$$

Uwzględniając:

$$I = \frac{dq}{dt} = S n e \frac{dl}{dt} = S n e v_d$$

Skąd:

$$j = \frac{I}{S} = n e v_d$$

lub

$$\vec{j} = n e \vec{v}_d \quad (***)$$

Ruch ładunków jest możliwy tylko w polu elektrycznym.

Wraz z upływającym czasem wzrasta różnica potencjałów pomiędzy „górną” a „dolną” częścią przewodnika (rys.). Pojawia się zatem **siła** wynikająca z tej różnicy potencjałów.

$$F_E = -\frac{U_H}{a}$$

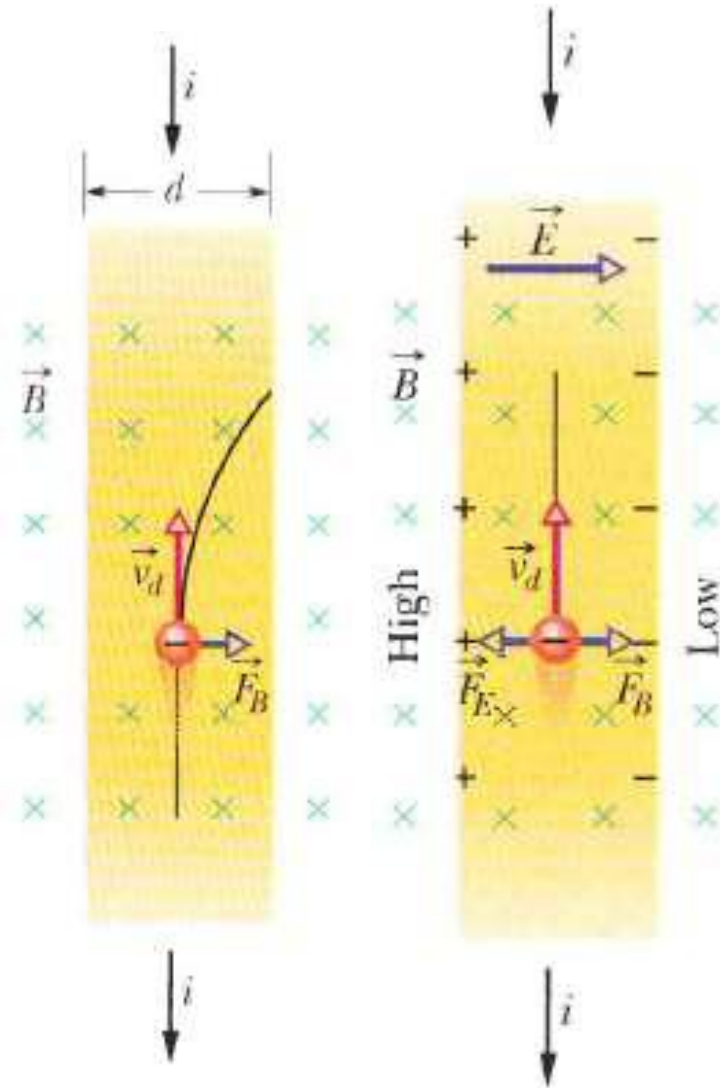
I jest ona skierowana przeciwnie do **siły Lorentza**.

$$F_L = -ev_d B$$

Wyrównanie się tych dwóch sił prowadzi do stanu równowagi:

$$eE = ev_d B$$

$$-\frac{U_H}{a} = -ev_d B$$



źródło: Halliday, Resnick, Walker
„Fundamentals of Physics”.

Efekt Halla

Korzystając z teorii przewodnictwa elektronowego (***)

$$v_d = \frac{j}{ne} = \frac{I}{ne \cdot S}$$

Otrzymujemy wyrażenie na różnicę potencjałów generowaną w efekcie Halla:

$$U_H = \frac{1}{nq} \frac{b}{S} I \cdot B = R_H j b \cdot B$$

gdzie: $R_H = \frac{1}{nq}$ - jest stałą Halla

- Typy przewodnictwa:
- $R_H < 0 \Rightarrow$ przewodnictwo elektronowe
 - $R_H > 0 \Rightarrow$ przewodnictwo dziurowe

13.1.5. Pola skrzyżowane: zorza polarna

Powstawanie zjawiska związane jest z przepływem prądu w jonosferze na wysokości około 100 km ponad powierzchnią Ziemi, w obszarze przenikania pasów radiacyjnych i górnej atmosfery ziemskiej.

Słońce stale emituje strumień naładowanych cząstek, czyli wiatr słoneczny. Podczas rozbłysków Słońce wyrzuca większe ilości takich cząstek; należą do nich protony o energiach do 1 GeV oraz elektrony o kilka rzędów wielkości mniejszej energii. W pobliżu Ziemi tory lotu tych cząstek są w większości odchylane przez ziemskie pole magnetyczne. Elektrony i protony schwytane przez ziemską magnetosferę, poruszają się po torze o

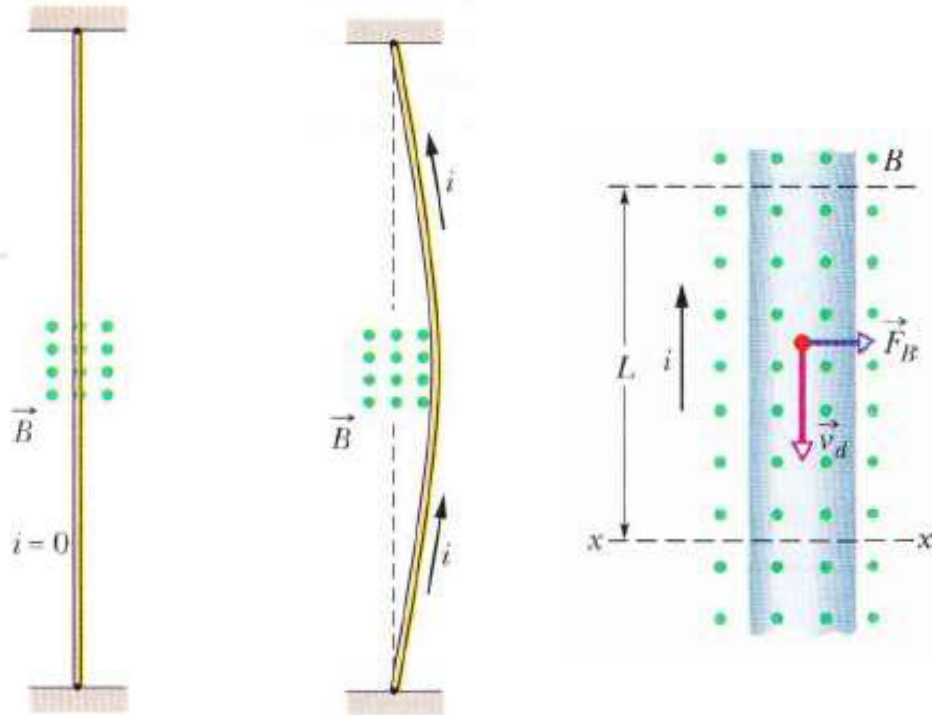
kształcie helisy wzdłuż linii pola magnetycznego łączących obydwie ziemskie bieguny magnetyczne, powodując wzbudzenia atomów w obszarze polarnym, a skutkiem tego świecenie zorzowe. Atmosfera na dużych wysokościach jest zjonizowana i rozrzedzona, co jest przyczyną także emisji linii wzbronionych. Światło zielone jest emitowane przez atomy tlenu, a światło różowe przez cząsteczki azotu. Często świecenie jest na tyle słabe, że widzimy je jako światło białe.



„Pole magnetyczne – relatywistyczna część pola elektrycznego” (Einstein).

Siła magnetyczna działająca na przewodnik z prądem

Siła działająca na przewodnik z prądem (*i*- natężenie prądu), umieszczony w polu magnetycznym o indukcji *B*.



Ładunek q , przepływający odcinek L :

$$q = it = i \frac{L}{v_d}$$

Na ładunek działa też siła magnetyczna :

$$F_B = qv_d B \sin \phi = \frac{iL}{v_d} v_d B \sin 90^\circ$$

$$F_B = iLB$$

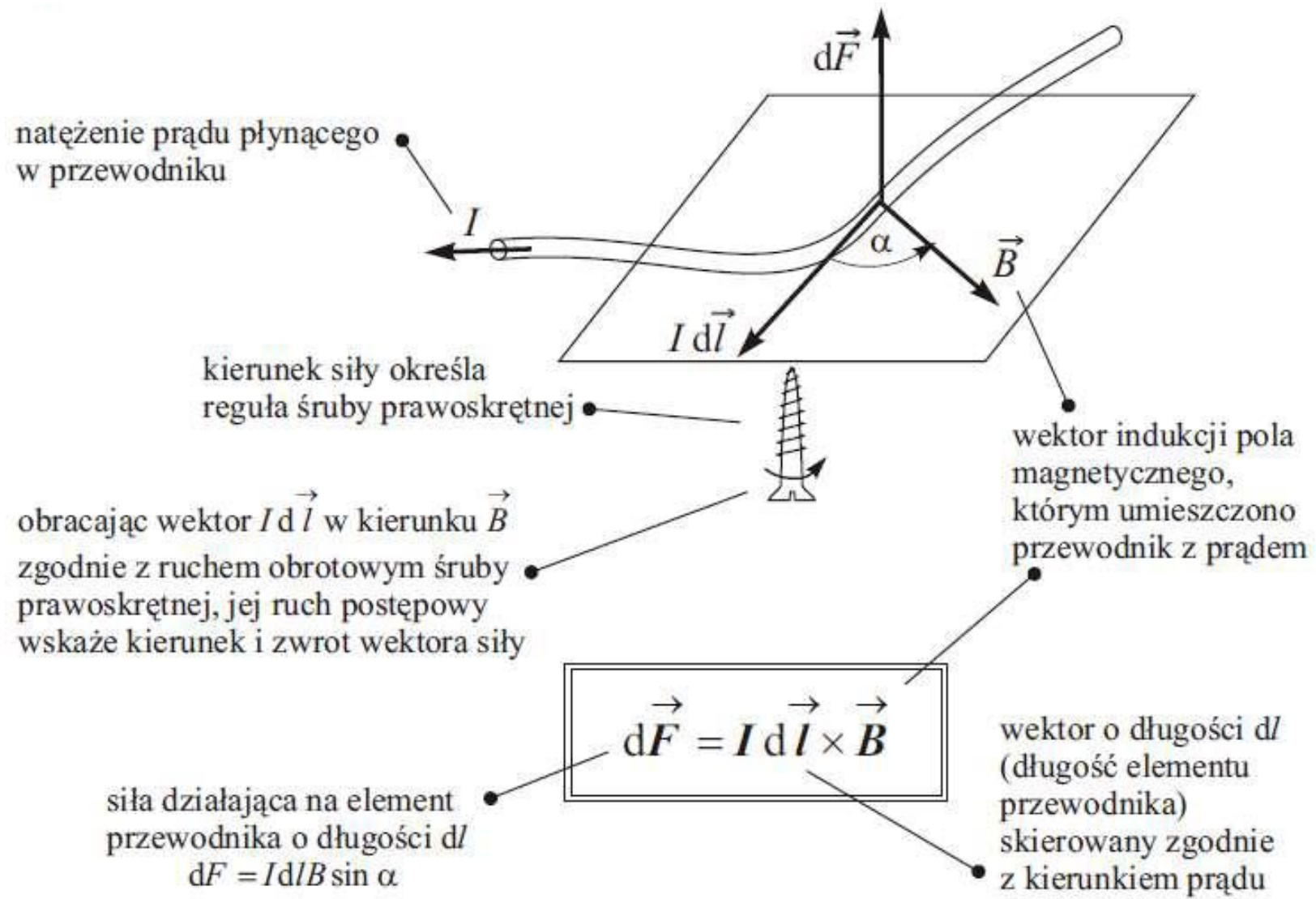
Zatem siła elektrodynamiczna:

$$\vec{F}_B = i(\vec{L} \times \vec{B})$$

źródło: Halliday,Resnick,Walker „Fundamentals of Physics”.

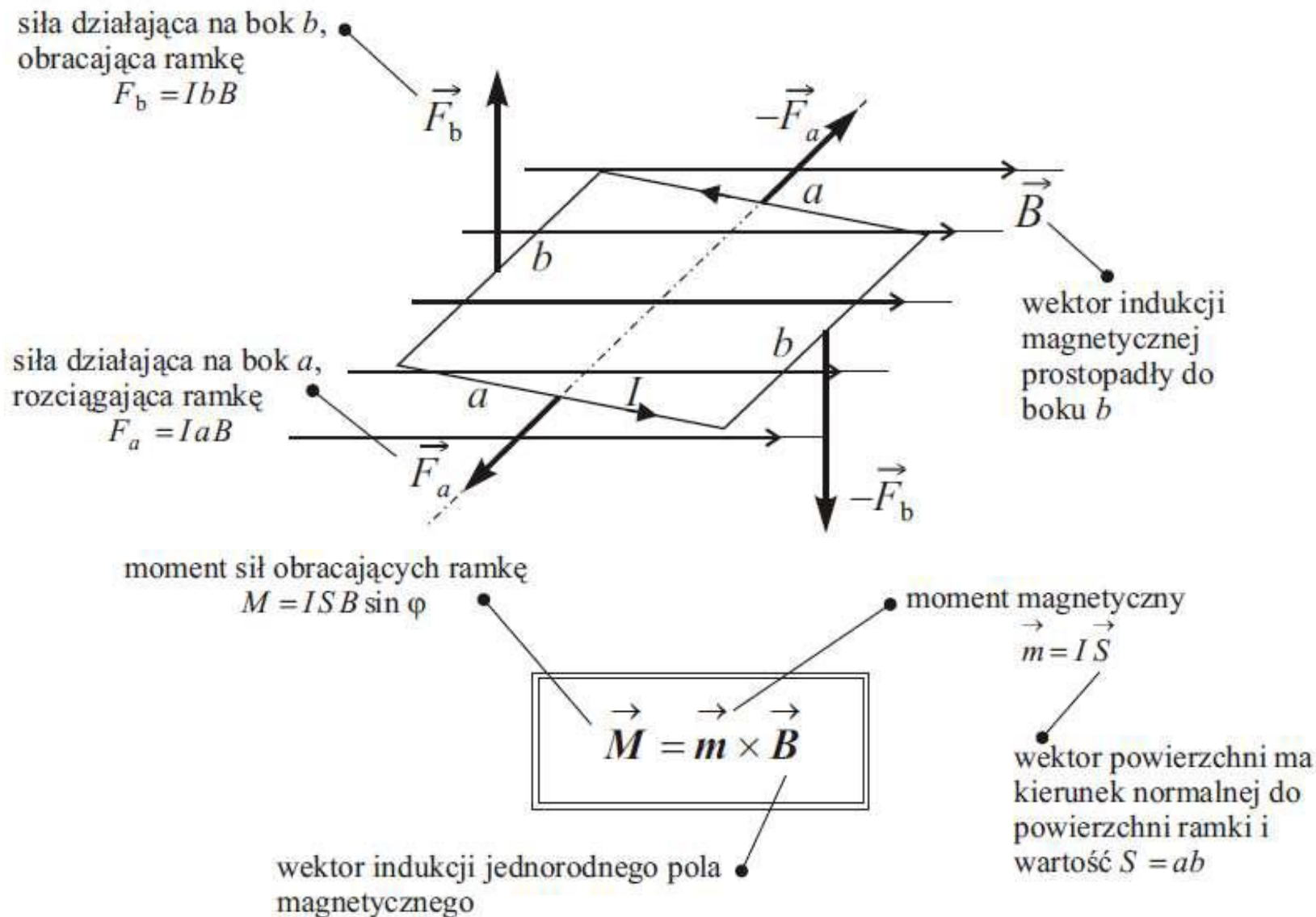
Równanie $\vec{F}_B = i(\vec{L} \times \vec{B})$ jest równoważne równaniu $F = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ w tym sensie, że każde z nich definiuje indukcję pola magnetycznego B . Jednak w praktyce łatwiej jest zmierzyć siłę działającą na przewodnik niż na pojedynczy ładunek.

Siła magnetyczna działająca na przewodnik z prądem – siła Ampere'a



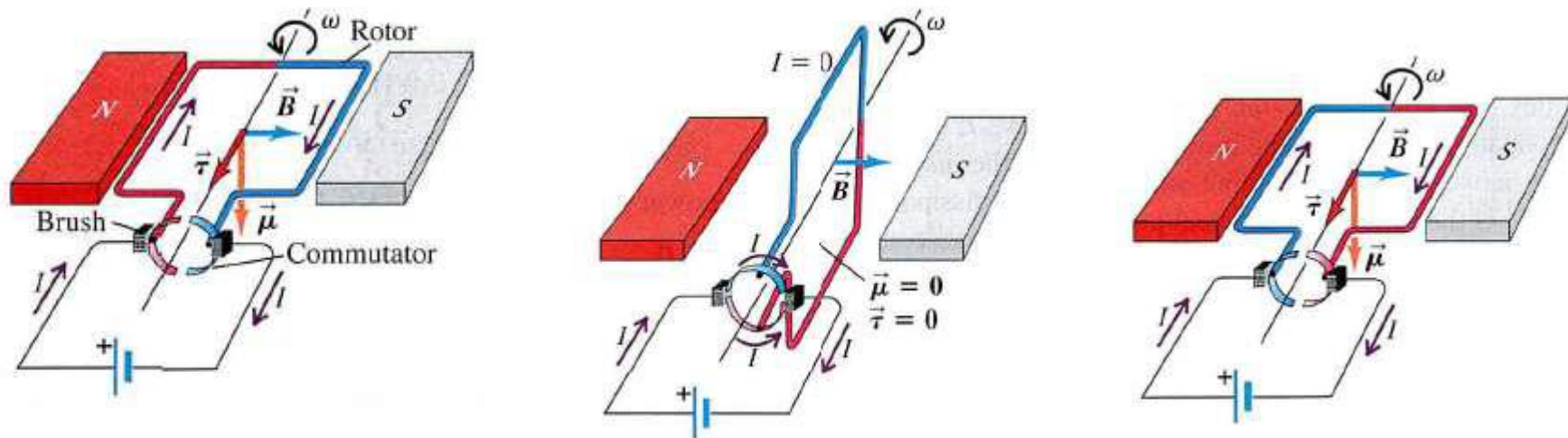
Silnik elektryczny – ramka z prądem w polu magnetycznym

Obwód z prądem w jednorodnym polu magnetycznym



Zastosowanie siły elektrodynamicznej

Silnik elektryczny - ramka z prądem w polu magnetycznym



Rys. źródło: <http://www.if.pwr.edu.pl>

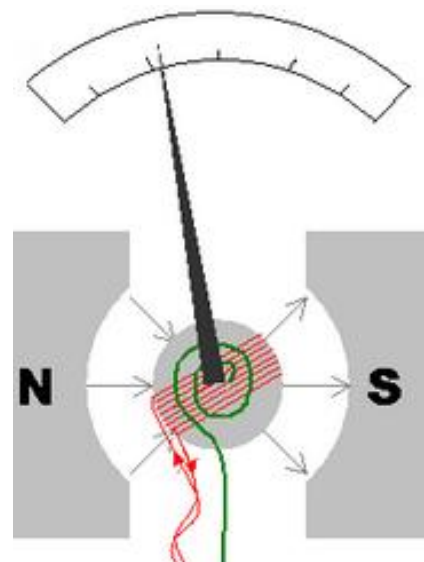
- Analogowe mierniki – woltomierz, amperomierz, galwanometr

Na ramkę z prądem w zewnętrznym polu magnetycznym działa moment siły

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

$\vec{\mu}$ - moment magnetyczny

(13.19)



Przewody doprowadzające prąd poddany pomiarowi
Sprężyna napinająca wskazówkę

Jak policzyć pole magnetyczne?

Istnieją dwie metody wyznaczenia indukcji pola magnetycznego w odległości r od nieskończenie długiego prostoliniowego przewodnika z prądem:
prawo Biota – Savarta i **prawo Ampera**.

Prawo Biota – Savarta

Przewodnik z prądem o natężeniu I dzielimy na bardzo małe elementy .

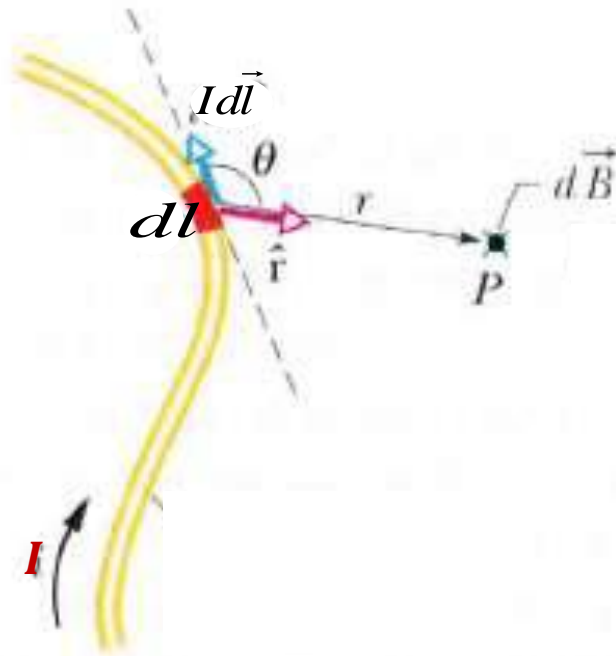
Stosując prawo Biota-Savarta:

Indukcja pola magnetycznego wytwarzanego w odległości r od elementu dl wynosi:

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

Wartość skalarna dB jest więc dana równaniem:

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



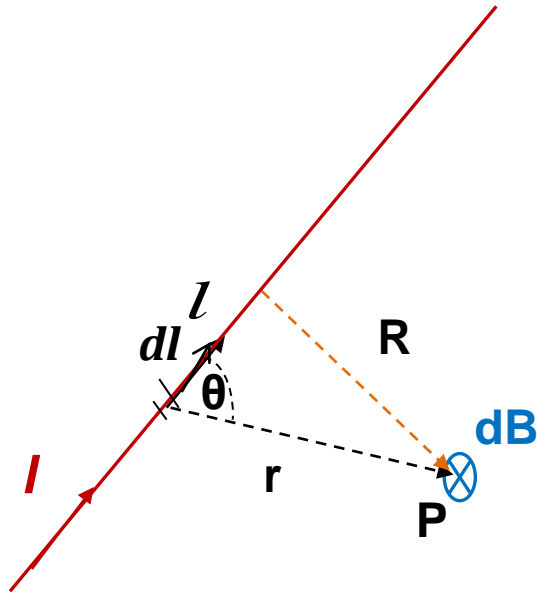
Rys. Pole dB utworzone przez element dl przewodnika, θ - kąt między elementem dl , a wektorem r

Na rys. zaznaczony jest element dl przewodnika i pole dB jakie wytwarza w punkcie P .

Następnie sumujemy (całkujemy) pola od tych elementarnych prądów żeby uzyskać wypadkowy wektor B .

Wszystkie przyczynki dB w punkcie P mają taki sam kierunek i zwrot, zatem sumują się algebraicznie:

$$B = \int dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\sin \theta dl}{r^2}$$



Pomiędzy wielkościami L , θ , i r występują następujące zależności:

$$r = \sqrt{l^2 + R^2}$$

$$\sin \theta = \frac{R}{\sqrt{l^2 + R^2}}$$

Po podstawieniu wyrażen na r i $\sin\theta$:

$$B = \int dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{R}{(l^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} dl = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \lim_{\substack{a \rightarrow -\infty \\ b \rightarrow +\infty}} \int_a^b \frac{R}{(l^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} dl = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{1}{R} \lim_{\substack{a \rightarrow -\infty \\ b \rightarrow +\infty}} \left[\frac{l}{\sqrt{l^2 + R^2}} \right]_a^b = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{2}{R} = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$$

Natężenie i indukcja pola magnetycznego

Całkując powyższe wyrażenie po całej długości przewodnika, otrzymaliśmy całkowitą indukcję pola magnetycznego w danym punkcie przestrzeni :

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

Stosując, tzw. równanie materiałowe :

(dla pola magnetycznego)

$$\vec{B} = \mu_0 \mu_r \vec{H}$$

Związek między: H – wektorem natężenia pola magnetycznego , a B – wektorem indukcji pola magnetycznego.

Otrzymujemy wyrażenie na natężenie pola magnetycznego wytworzonego w odległości r od elementu dl przewodnika :

$$H = \frac{I}{2\pi R \mu_r}$$

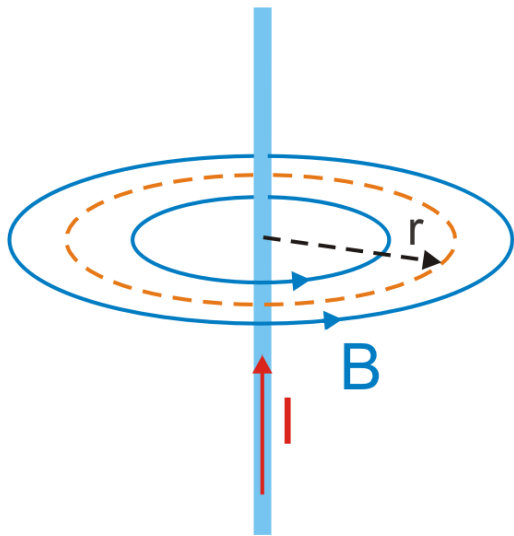
Natężenie pola magnetycznego ma wymiar $[H]=[1A/m]$

Prawo Ampere'a

Obliczenie indukcji pola magnetycznego przewodnika z prądem na podstawie prawa Biota-Savarta wymaga całkowania po elementach długości przewodnika.

W przypadku, gdy pole magnetyczne przewodnika cechuje wysoki stopień symetrii, indukcje pola można niekiedy obliczyć w inny sposób, korzystając z tzw. **prawa Ampere'a**. (Odpowiednikiem prawa Ampere'a jest w elektrostatyce prawo Gaussa.)

Prawo Ampere'a wiąże **cyrkulację (krążenie) pola magnetycznego po konturze zamkniętej l** z **natężeniem prądu (I)** przechodzącego przez powierzchnię wyznaczoną przez ten kontur l :



$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I_c$$

lub
$$\oint_l H dl = \sum_i I_i$$

Prawo Ampere'a brzmi:

Cyrkulacja wektora indukcji magnetycznej jest równa sumie algebraicznej natężeń prądów płynących wewnątrz konturu całkowania pomnożonych przez przenikalność magnetyczną ośrodka.

Rys. Kontur kołowy o promieniu r wokół przewodnika z prądem.

Elektryczność i Magnetyzm

Obliczając lewą stronę r-nia (13.23) mamy :

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

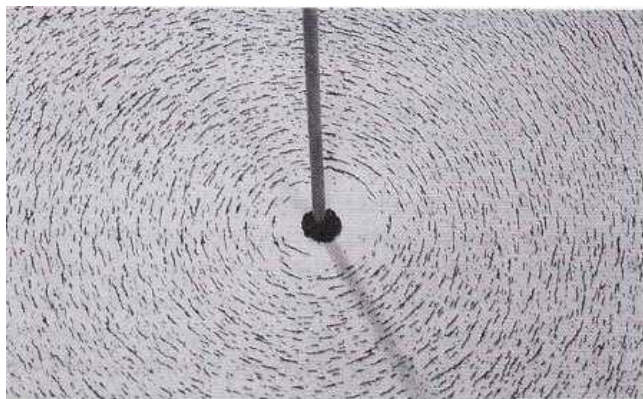
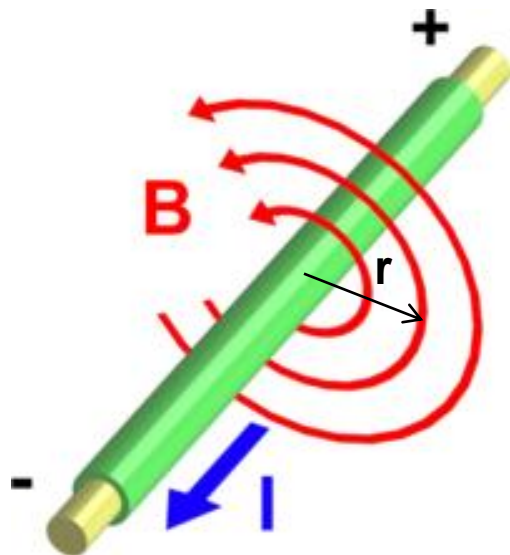
Po porównaniu z prawą stroną r-nia. (13.23) otrzymujemy:

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

Szukane wyrażenie na indukcję pola magnetycznego w odległości r od przewodnika.

gdzie: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left[\frac{N}{A^2} \right]$ przenikalność magnetyczna w próżni.

$$[\mu_0] = \frac{N}{A^2} = \frac{T \cdot m}{A} = \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$$



Elektryczność i Magnetyzm

W układzie SI:

- **Jednostką indukcji pola magnetycznego B jest Tesla [1 T]= [1 N/Am],**
1 Tesla [T] = 10000 Gaussów [Gs].
- **Jednostką natężenia pola magnetycznego H jest [1 A/m].**

Oznaczenie wartości względnej przenikalności magnetycznej:

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

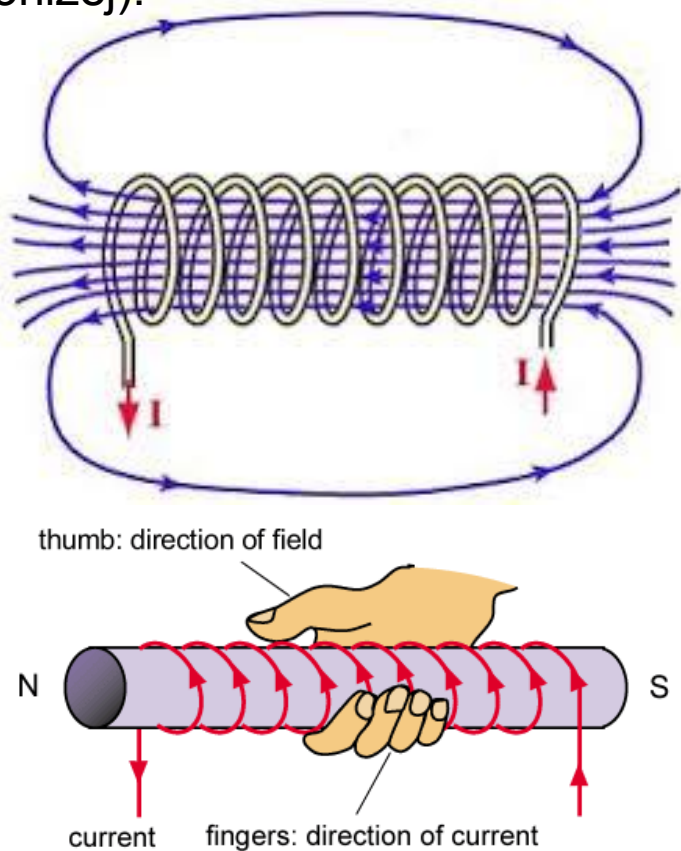
Tabela . Wartości względnej przenikalności magnetycznej dla kilku wybranych materiałów.

ośrodek	μ_r przenikalność magnetyczna
próżnia	1
powietrze	1.0000004
Aluminium (Al)	1.000020
Miedź (Cu)	0.999999
stale	300 - 2000
Supermalloy($\text{Ni}_{79}\text{Fe}_{15}\text{Mo}_5$)	1000000

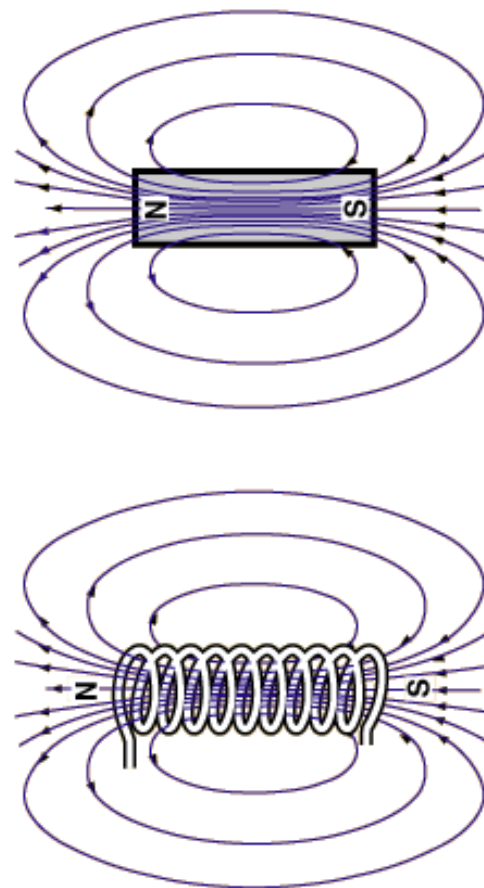
Elektryczność i Magnetyzm

Przykład:

Obliczyć pole magnetyczne wytwarzane przez solenoid o n zwojach (na jedn. długości) (rys.1 , poniżej).



Rys.1. Solenoid, schemat i reguła prawej dłoni.

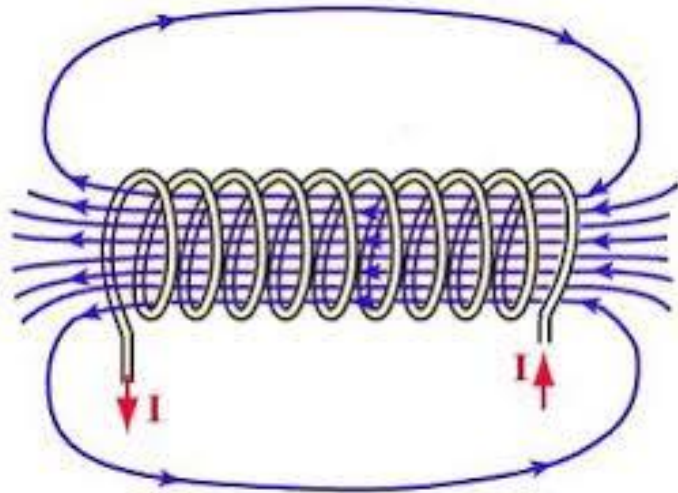


Rys. 2. Pole magnetyczne solenoidu i trwałego magnesu.

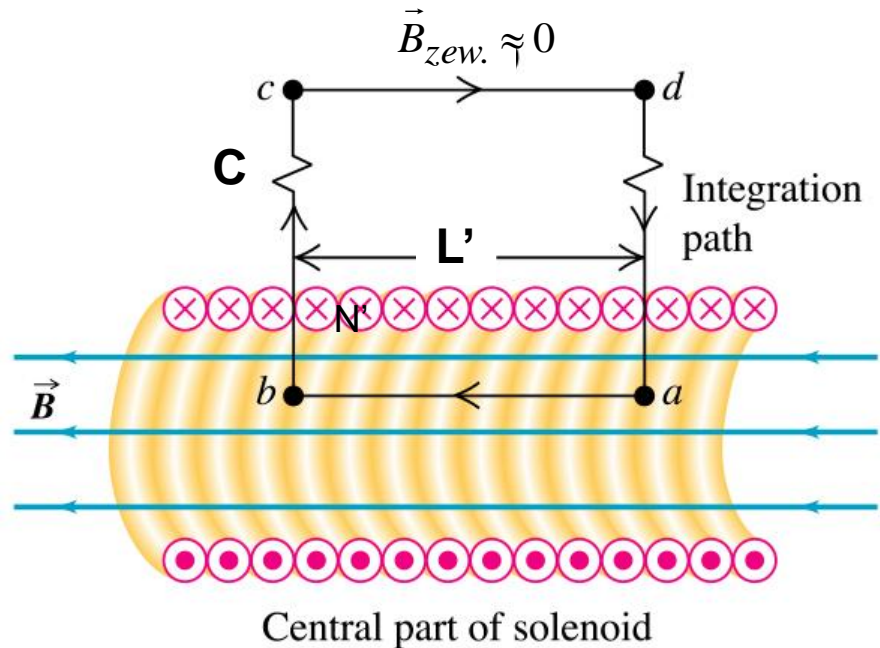
Pole magnetyczne wytwarzane przez solenoid podobne jest do pola magnetycznego trwałego magnesu.

Rysunki. źródło: www.google.pl

Elektryczność i Magnetyzm



Rys. Solenoid, schemat,
źródło: www. google.pl



Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

Rys. Środkowa część solenoidu, schemat.

Linie pola magnetycznego prawie w całości biegają wewnątrz zwojnicy. Zewnętrzne pole magnetyczne zwojnicy jest bardzo słabe, stąd możemy założyć, że $\vec{B}_{zew.} \approx 0$.

Z doświadczenia wiadomo, że wewnątrz solenoidu, z dala od jego końców, pole magnetyczne jest jednorodne i ma kierunek równoległy do osi solenoidu.

Prawo Ampere'a przyjmuje wówczas postać:

gdzie: n' jest liczbą zwojów solenoidu obejmowanych przez krzywą konturu **C** (rys.).

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 n' I$$

Cyrkulacja pola magnetycznego po krzywej C jest równa:

$$\oint_C \mathbf{B} \cdot d\mathbf{l} = B l'$$

gdzie l' jest szerokością konturu C.

Porównując dwa ostatnie wzory otrzymujemy:

$$B = \frac{\mu_0 I n'}{l'}$$

Jeżeli solenoid jest nawinięty ze stałą gęstością, to:

$$\frac{n'}{l'} = \frac{n}{l}$$

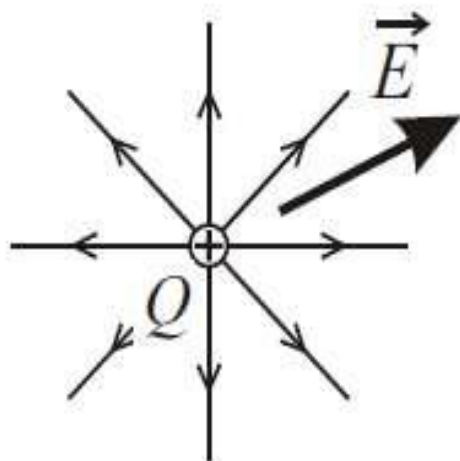
Ostatecznie otrzymujemy wyrażenie na wartość indukcji jednorodnego pola wewnątrz zwojnicy :

$$B = \frac{\mu_0 I n}{l}$$

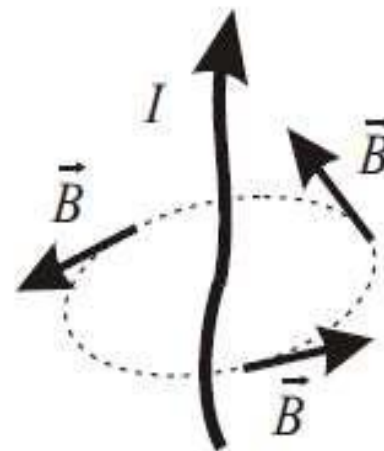
gdzie: n – ilość zwojów, l – długość zwojnicy.

Porównanie pola elektrycznego i magnetycznego

Pole elektryczne

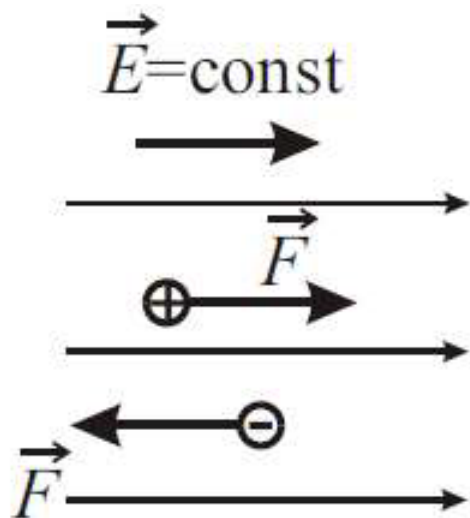


Pole magnetyczne

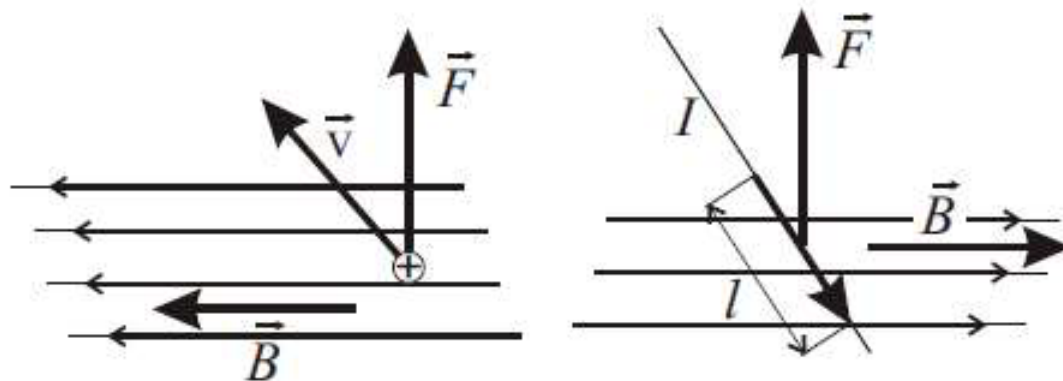


- źródłem pola są ładunki elektryczne
- linie pola wychodzą z ładunków dodatnich a wchodzą do ładunków ujemnych

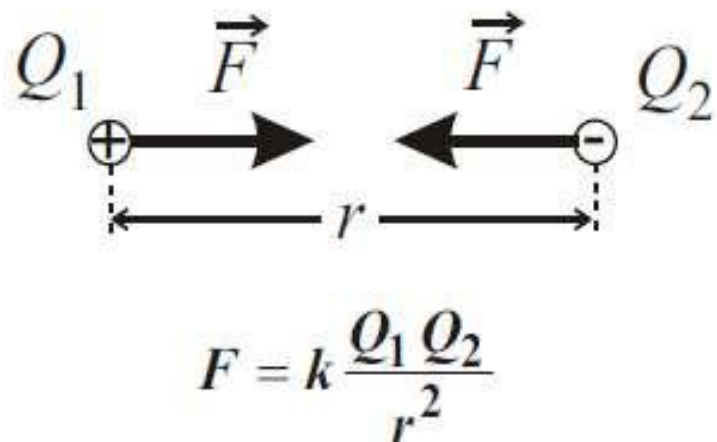
- źródłem pola są prądy elektryczne (czyli poruszające się ładunki)
- linie pola są zamknięte i otaczają płynące prądy



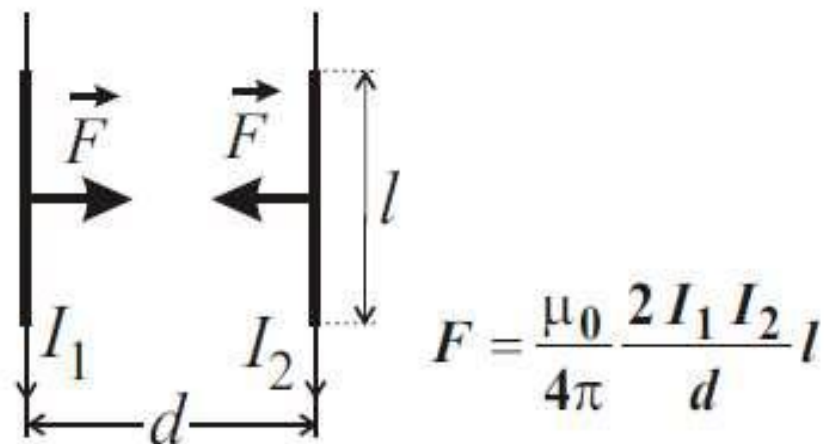
- siły elektryczne działają na ładunki elektryczne
- siły elektryczne działają wzdłuż linii pola



- siły magnetyczne działają tylko na poruszające się ładunki elektryczne (prądy elektryczne)
- siły działają prostopadle do linii pola

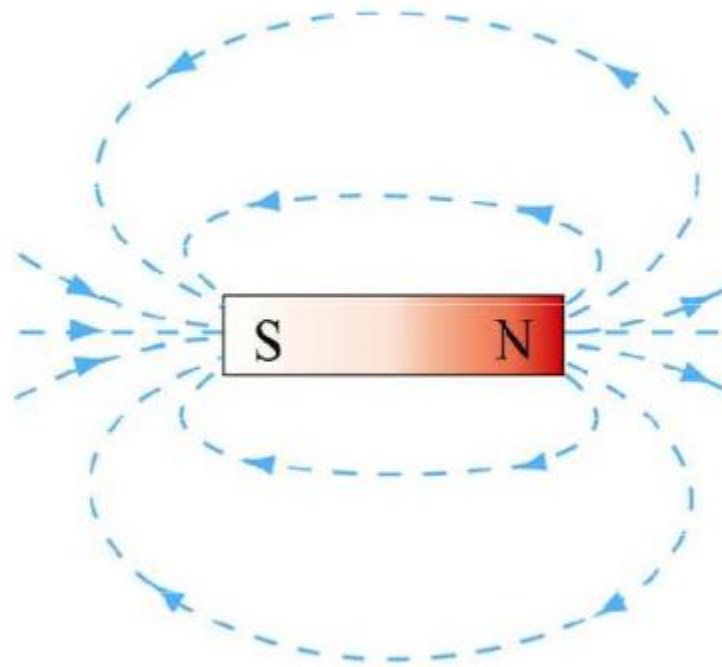


- siła między ładunkami jest proporcjonalna do iloczynu ładunków
- siła jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości



- siła między odcinkami przewodników o długości l jest proporcjonalna do iloczynu natężeń prądów
- siła jest odwrotnie proporcjonalna do odległości

Magnesy



Najprostszą strukturą magnetyczną, która może istnieć, jest dipol magnetyczny. Nie stwierdzono istnienia monopoli magnetycznych.

Prawo Gaussa dla pola magnetycznego

Strumień pola magnetycznego wyraża wzór :

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

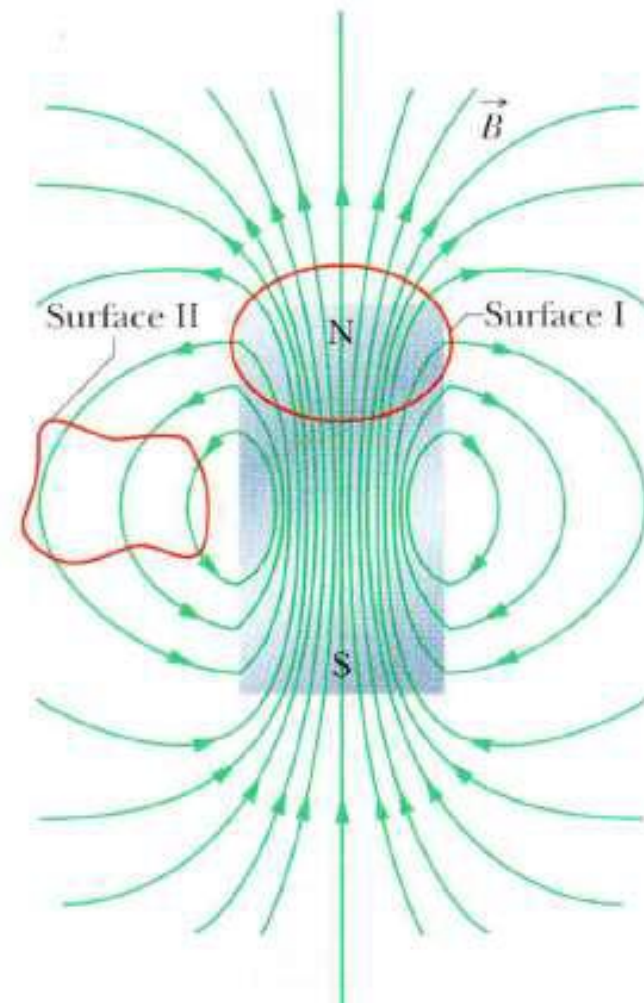
$$1 \text{ weber} = 1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot \text{m}^2$$

Prawo Gaussa dla pól magnetycznych

$$\Phi_B = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

lub

$$\text{div } \vec{B} = 0$$



Rys. źródło: Halliday, Resnick, Walker „Fundamentals of Physics”.

$$\Phi_E = \oint \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{q_{\text{wewn}}}{\epsilon_0}$$

Magnetyzm - własności magnetyczne materii

Moment magnetyczny μ zamkniętej pętli przewodnika o powierzchni A , w której płynie stały prąd o natężeniu I jest dany wzorem:



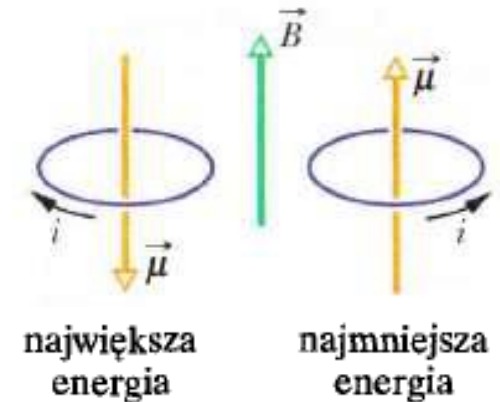
$$\vec{\mu} = I \cdot \vec{A}$$

w jednostkach [1 Am^2]. Na dipol magnetyczny znajdujący się w polu magnetycznym działa moment siły równy

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

Energia potencjalna dipola magnetycznego jest równa:

$$E_p(\theta) = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$



Magnetyzm materii

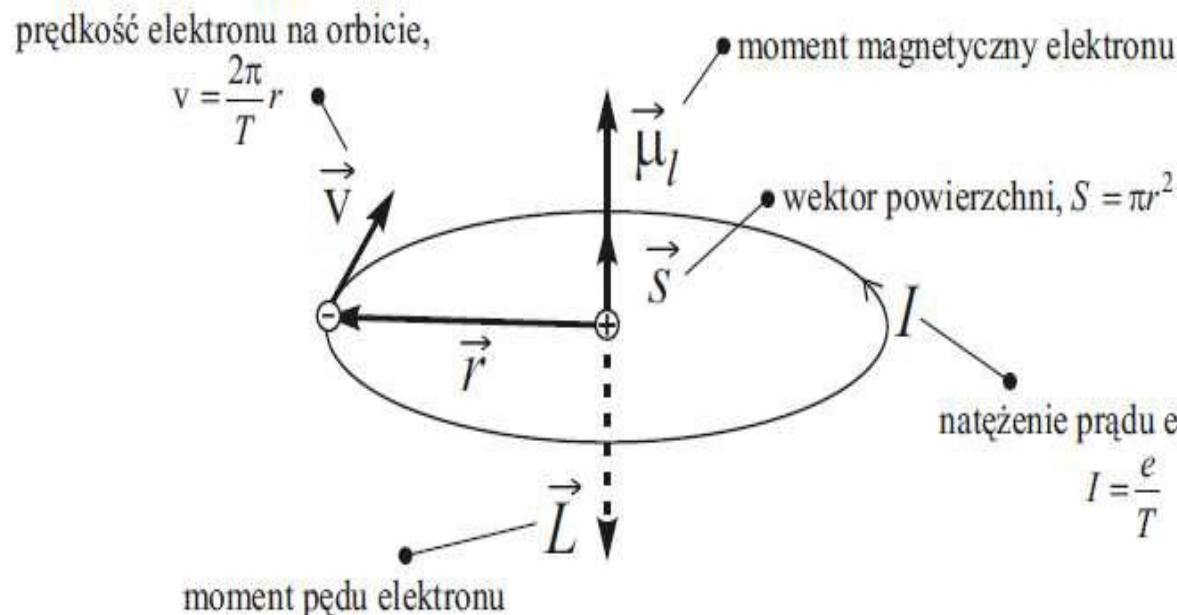
Ciała składają się z atomów (cząsteczek), w których każdy elektron ma orbitalny i spinowy moment magnetyczny. Wypadkowa tych dwóch wielkości dla wszystkich elektronów a atomie czy cząsteczce daje całkowity moment magnetyczny atomu lub cząsteczki.

Orbitalny moment magnetyczny elektronu

Elektron w atomie ma **moment pędu**, zwany *orbitalnym momentem pędu* L_{orb} , oraz towarzyszący mu orbitalny moment magnetyczny μ_{orb} .

Te dwie wielkości są związane równaniem:

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



gdzie:

$$L_{orb,z} = m_e \frac{h}{2\pi}$$

$m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm(\text{wartość maksymalna})$

m_l — magnetyczna orbitalna liczba kwantowa

$$I = \frac{e}{T} \quad (13.45) \quad \mu_{orb,z} = -m_e \frac{eh}{4\pi m}$$

$$(13.46) \quad \mu_{orb,z} = -m_l \mu_B$$

Magnetyzm materii

Elektron ma też swój własny moment pędu, nazywany *spinowym momentem pędu* (albo po prostu *spinem*) S .

Z tym spinem związany jest własny *spinowy moment magnetyczny* μ_s .

Własny, czyli S i μ_s są podstawowymi cechami charakterystycznymi dla elektronu (jak np. jego masa i ładunek elektryczny). A S i μ_s są związane równaniem

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

(1.60×10^{-19} C)
(9.11×10^{-31} kg)

Nie możemy zmierzyć wektora S . Możemy jednak zmierzyć jego składową wzdłuż dowolnej osi.

Mierzona składowa wektora \vec{S} jest skwantowana (może ona przyjmować tylko pewne określone wartości).

Założmy, że składowa spinu \vec{S} jest mierzona wzdłuż osi z układu współrzędnych. Składowa S_z może przyjmować tylko dwie wartości:

$$S_z = m_s \frac{h}{2\pi}$$

gdzie $m_s = \pm \frac{1}{2}$ -magnetyczna spinowa liczba kwantowa, zaś $h (= 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s})$

Magnetyzm materii

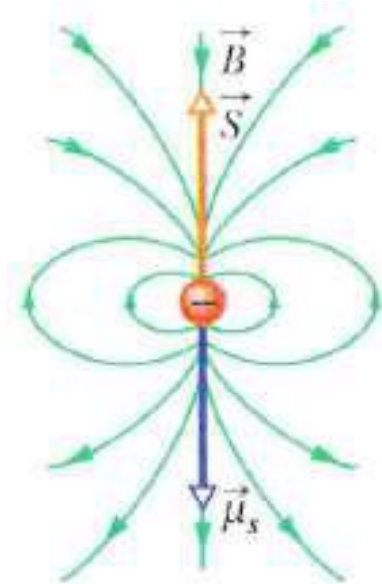
Nie możemy również zmierzyć spinowego momentu magnetycznego μ_s . Możemy tylko zmierzyć jego składową wzdłuż dowolnej osi i ta składowa także jest skwantowana.

$$\mu_{s,z} = -\frac{e}{m} S_z$$

$$\mu_{s,z} = \pm \frac{eh}{4\pi m}$$

$$|\mu_{s,z}| = 1\mu_B$$

$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m} = 9.27 \times 10^{-24} \text{ J/T} \quad (\text{magneton Bohra})$$



Ze względu na swoje własności magnetyczne materię dzielimy na trzy grupy:

- diamagnetyki, $\mu \leq 1$;
- paramagnetyki, $\mu \geq 1$;
- ferromagnetyki, $\mu \gg 1$.

Dziękuję za uwagę !

