

Pole magnetyczne

10/15

Andrzej Kapanowski
<https://ufkapano.github.io/>

WFAIS, Uniwersytet Jagielloński w Krakowie

2021

Prąd elektryczny

- **Prąd elektryczny** jest to uporządkowany ruch ładunków elektrycznych.
- Ruch ładunków może mieć miejsce w przewodnikach, a w pewnych warunkach również w półprzewodnikach.
- W metalach ładunek przenoszą głównie **elektrony przewodnictwa**, czyli elektrony pochodzące z powłoki zewnętrznej, najslabiej związane z jądrem.
- W cieczach nośnikami prądu elektrycznego są jony dodatnie (kationy) i jony ujemne (aniony).
- W rozrzedzonych gazach nośnikami prądu elektrycznego są elektrony i jony.
- Przykłady: błyskawice, prądy w nerwach organizmów żywych, prądy w instalacjach elektrycznych, wiatr słoneczny.

Natężenie prądu elektrycznego

- Natężenie prądu elektrycznego jest to stosunek ładunku Δq , jaki przejdzie przez dowolny pomyślany przekrój przewodnika w ciągu czasu Δt ,

$$I = \frac{\Delta q}{\Delta t}. \quad (1)$$

- Jednostką natężenia prądu elektrycznego w układzie SI jest **amper**, $1A = 1C/s$.
- Ładunek przepływający przez dany przekrój przewodnika w przedziale czasu od t_1 do t_2 możemy znaleźć przez całkowanie natężenia prądu ($\Delta q = I\Delta t$),

$$q = \int_{t_1}^{t_2} I(t)dt, \quad q = (t_2 - t_1)I \text{ dla } I = \text{const.} \quad (2)$$

Gęstość prądu elektrycznego

- Natężenie prądu jest wielkością makroskopową charakteryzującą przepływ prądu w całości. Niekiedy niezbędne są dokładniejsze informacje o przepływie.
- **Gęstość prądu elektrycznego** określamy jako stosunek natężenia prądu elektrycznego ΔI do pola powierzchni ΔS przekroju poprzecznego prostopadłego do kierunku uporządkowanego ruchu ładunku,

$$j = \frac{\Delta I}{\Delta S}. \quad (3)$$

- Jednostką gęstości prądu elektrycznego w układzie SI jest amper na metr kwadratowy, $1\text{A}/\text{m}^2$.

Gęstość prądu elektrycznego

- Dokładniej biorąc **gęstość prądu jest wektorem**, którego kierunek wyznacza styczna do toru poruszającego się ładunku dodatniego. Zwrot wektora \vec{j} określa się umownie jako kierunek ruchu ładunku dodatniego.
- Mając gęstość prądu możemy obliczyć natężenie prądu, które jest skalarem,

$$I = \int \vec{j} \cdot d\vec{S}. \quad (4)$$

Natężenie prądu jest strumieniem gęstości prądu przenikającego daną powierzchnię.

- Za kierunek prądu w przewodnikach przyjmuje się kierunek ruchu ładunków dodatnich.

Prędkość unoszenia

- Prąd płynie w przewodniku o długości d wtedy, gdy między jego końcami podtrzymywana jest różnica potencjałów U . Wtedy w przewodniku istnieje pole elektryczne $E = U/d$.
- Elektrony w przewodniku poruszają się chaotycznie zderzając się z jonami znajdującymi się w węzłach sieci krystalicznej, ale mają pewną prędkość unoszenia (dryfu) v_d w kierunku przeciwnym do pola elektrycznego.
- Liczba ładunków w walcu o przekroju S i długości d wynosi $q = n_0 S d e$, gdzie n_0 to koncentracja ładunków, czyli liczba ładunków w jednostce objętości.

Prędkość unoszenia

- Ładunek q przepłynie przez przekrój S w czasie $t = d/v_d$.
- Natężenie prądu $I = q/t = n_0 S e v_d$.
- Gęstość prądu $j = I/S = n_0 e v_d$.
- Po przejściu do postaci wektorowej mamy

$$\vec{j} = (n_0 e) \vec{v}_d, \quad (5)$$

gdzie $n_0 e$ jest **gęstością ładunku nośników**.

- Znając gęstość prądu j oraz koncentrację nośników n_0 można wyznaczyć prędkość unoszenia v_d .

Prędkość unoszenia

- Przykład: Przyjmijmy, że w miedzi każdy atom dostarcza jeden elektron przewodnictwa.
- Koncentracja nośników wynosi

$$n_0 = \frac{Nm}{Vm} = \frac{\rho}{m} = \frac{N_A \rho}{M} = 8.49 \cdot 10^{28} / m^3, \quad (6)$$

gdzie m to masa atomu miedzi, $\rho = 8.96 \cdot 10^3 \text{ kg}/m^3$ gęstość miedzi, $M = 63.54 \text{ g}/mol$ masa molowa miedzi.

- Jeżeli drut miedziany ma przekrój $S = 1 \text{ mm}^2$, płynący prąd natężenie $I = 2 \text{ A}$, to

$$v_d = \frac{j}{n_0 e} = \frac{I}{Sn_0 e} = 0.15 \text{ mm}/s. \quad (7)$$

Opór elektryczny i prawo Ohma

- Doświadczenie pokazuje, że w przewodnikach metalicznych natężenie prądu płynącego w przewodniku jest wprost proporcjonalne do przyłożonego napięcia,

$$I = \frac{U}{R}, \quad (8)$$

gdzie R nazywamy **oporem elektrycznym (rezystancją)**. Jest to **prawo Ohma**.

- Jednostką oporu elektrycznego w układzie SI jest **om**,
 $1\text{om} = 1\Omega = 1\text{V}/\text{A}$.
- Istnieją przewodniki, dla których prawo Ohma nie jest spełnione, np. rozrzedzone gazy. Takie przewodniki nazywa się **nieliniowymi**, ponieważ wykres I od U nie jest wtedy linią prostą.

Opór właściwy i przewodność właściwa

- Wartość R zależy od rozmiarów geometrycznych przewodnika, dlatego określamy **opór właściwy** ρ , który charakteryzuje dany materiał.

$$R = \rho \frac{d}{S}, \quad (9)$$

gdzie d jest długością przewodnika, a S jego przekrojem poprzecznym.

- Jednostką oporu właściwego w układzie SI jest om razy metr, $1\Omega \cdot m$.
- Przewodność właściwa** (przewodnictwo elektryczne) σ jest odwrotnością oporu właściwego, $\sigma = 1/\rho$.

Mikroskopowe prawo Ohma

- Prawo Ohma $I = U/R$ możemy zapisać w innej postaci, nazywanej mikroskopowym prawem Ohma,

$$jS = \frac{(Ed)S}{\rho d} = \sigma ES, \quad (10)$$

$$\vec{j} = \sigma \vec{E}. \quad (11)$$

- Wybrane wartości oporu właściwego w temperaturze pokojowej (20°C): miedź (przewodnik) $1.7 \cdot 10^{-8} \Omega\text{m}$, czysty krzem (półprzewodnik) $2.5 \cdot 10^3 \Omega\text{m}$, szkło (izolator) $10^{10} - 10^{14} \Omega\text{m}$.
- Mikroskopowo w metalach: $v_d = a\tau = eE\tau/m_e$, $j = n_0 e v_d = n_0 e^2 \tau E / m_e$, $\sigma = n_0 e^2 \tau / m_e$, gdzie τ to średni czas pomiędzy zderzeniami (dla miedzi $\tau = 2.5 \cdot 10^{-14} \text{s}$).

Zależność oporu od temperatury

- Opór elektryczny właściwy, jak wiele innych wielkości fizycznych, zależy od temperatury.
- Dla metali zależność oporu właściwego od temperatury jest w przybliżeniu liniowa w szerokim zakresie temperatur,

$$\rho - \rho_0 = \rho_0 \alpha (T - T_0), \quad (12)$$

gdzie T_0 jest wybraną temperaturą odniesienia (zwykle $T_0 = 293K$), a ρ_0 oporem właściwym w tej temperaturze.

- Wielkość α jest nazywana **współczynnikiem temperaturowym oporu właściwego**.
- Ze związku między ρ a R wynika

$$R - R_0 = R_0 \alpha (T - T_0). \quad (13)$$

Moc w obwodach elektrycznych

- Rozważmy obwód elektryczny składający się ze źródła połączonego przewodnikami o zaniedbywalnym oporze z pewnym elementem obwodu, np. opornikiem. Źródło utrzymuje różnicę potencjałów U między biegunami, a w obwodzie płynie stały prąd elektryczny o natężeniu I .
- Źródło wykonuje pracę przenosząc ładunek pomiędzy zaciskami

$$\Delta W = U\Delta q = UI\Delta t. \quad (14)$$

- Moc P przekazywana ze źródła do elementu obwodu wynosi

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} = UI. \quad (15)$$

- Jednostki: $1V \cdot A = (1J/C)(1C/s) = 1J/s = 1W$.

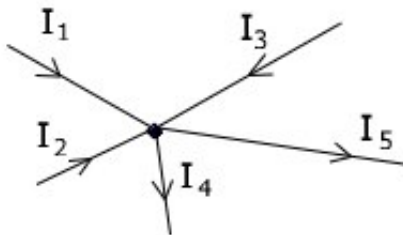
Siła elektromotoryczna

- Źródło charakteryzuje różnica potencjałów na jego zaciskach zwana **siłą elektromotoryczną (SEM)** i jego oporność wewnętrzna R_w .
- **Idealne źródło** napięciowe ma $R_w = 0$.
- Źródła SEM: ogniwo elektryczne (bateria elektryczna), prądnica elektryczna, ogniwa słoneczne, ogniwa paliwowe, termoogniwa.
- Połączenie szeregowe kilku źródeł lub oporników nazywa się **gałęzią**. Gałęzie łączą się ze sobą w punktach zwanych **węzłami**. Gałęzie tworzą zamknięte ścieżki zwane **oczkami**. Te same gałęzie mogą wchodzić w skład wielu oczek.

Pierwsze prawo Kirchhoffa

- Rozważmy węzeł obwodu elektrycznego z gałęziami z prądami dopływającymi do węzła i gałęziami z prądami odpływającymi z węzła.
- **Pierwsze prawo Kirchhoffa** mówi, że suma natężeń prądów dopływających do węzła musi być równa sumie natężeń prądów prądów odpływających z tego węzła.
- Pierwsze prawo Kirchhoffa jest konsekwencją zasady zachowania ładunku elektrycznego.
- Zwykle równanie na prądy zapisujemy w postaci $\sum_k I_k = 0$, gdzie prądy dopływające bierzemy ze znakiem plus ($+I_k$), a prądy odpływające ze znakiem minus ($-I_k$).

Pierwsze prawo Kirchhoffa

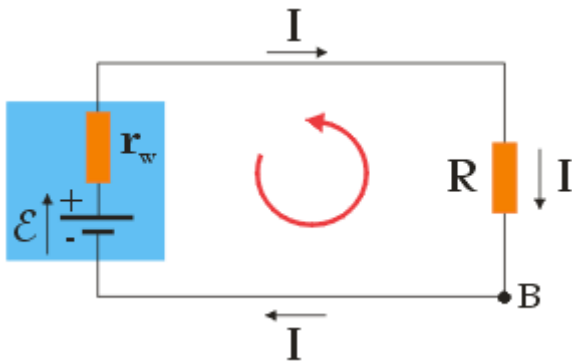


$$I_1 + I_2 + I_3 - I_4 - I_5 = 0.$$

Drugie prawo Kirchhoffa

- Rozważmy oczko obwodu elektrycznego. Przyjmijmy następujące zasady oznaczania spadków potencjału.
- Prąd I płynący przez opornik R ma kierunek od wyższego potencjału do niższego, a spadek potencjału wynosi IR .
- Dla źródła SEM przejście od bieguna ujemnego do dodatniego daje wzrost potencjału o \mathcal{E} .
- **Drugie prawo Kirchhofa** mówi, że algebraiczna suma zmian potencjału napotykanym przy pełnym obejściu oczka musi być równa zeru.
- Drugie prawo Kirchhofa jest konsekwencją zasady zachowania energii.

Obwód o jednym oczku



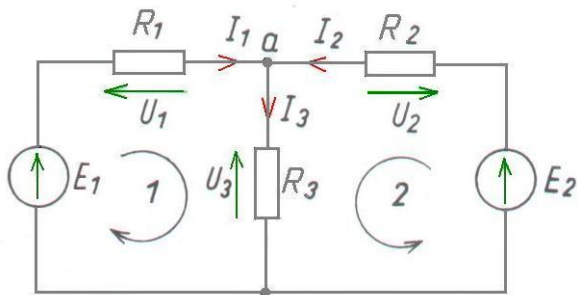
Obwód o jednym oczku

- Rozważmy obwód o jednym oczku składający się z rzeczywistego źródła SEM \mathcal{E} o oporze wewnętrznym r_w , oraz opornika R .
- Z drugiego prawa Kirchhoffa

$$-\mathcal{E} + IR + Ir_w = 0, \quad I = \frac{\mathcal{E}}{R + r_w}. \quad (16)$$

- Jeżeli $R = 0$, to takie warunki pracy źródła nazywamy **zwarcie**m. Płynie wtedy duży prąd $I_z = \mathcal{E}/r_w$, źródło nagrzewa się, a to prowadzi zwykle do jego uszkodzenia.

Obwody o wielu oczkach



Obwody o wielu oczkach

- Rozważmy przykładowy obwód o wielu oczkach z idealnymi źródłami SEM. Na początku należy ustalić kierunek obchodzenia każdego oczka, np. kierunek przeciwny do ruchu wskazówek zegara.

- Z pierwszego prawa Kirchhoffa

$$I_1 + I_2 - I_3 = 0. \quad (17)$$

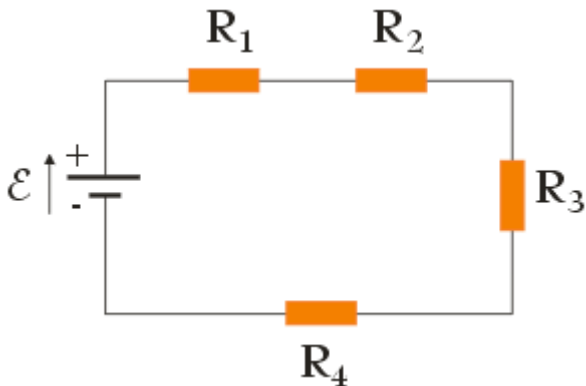
- Z drugiego prawa Kirchhoffa

$$\mathcal{E}_1 - I_1 R_1 - I_3 R_3 = 0, \quad (18)$$

$$\mathcal{E}_2 - I_2 R_2 - I_3 R_3 = 0. \quad (19)$$

- Równania dla dużego oczka i drugiego węzła nie wnoszą nowych informacji.

Oporniki połączone szeregowo



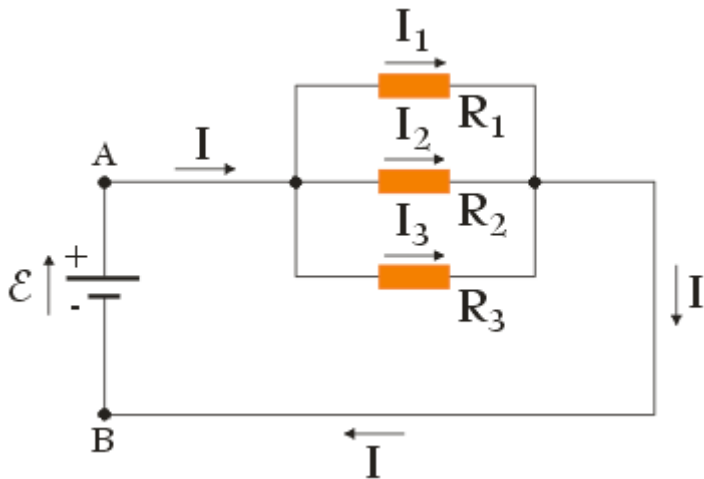
Oporniki połączone szeregowo

- Jeżeli w obwodzie elektrycznym występuje układ oporników, to nieraz możemy zastąpić ten układ **opornikiem równoważnym**, czyli pojedynczym opornikiem o takim samym oporze, jak cały układ.
- Rozważmy dwa oporniki o oporach R_1 i R_2 **połączone szeregowo**. Natężenie prądu I płynącego przez oporniki jest takie samo, $U_1 = IR_1$, $U_2 = IR_2$,
- Całkowity spadek napięcia w układzie wynosi $U = U_1 + U_2 = I(R_1 + R_2) = IR_s$.
- Opór R_s opornika równoważnego wynosi

$$R_s = R_1 + R_2. \quad (20)$$

Wzór można łatwo rozszerzyć na dowolną liczbę oporników połączonych szeregowo.

Oporniki połączone równolegle



Oporniki połączone równolegle

- Rozważmy dwa oporniki o oporach R_1 i R_2 **połączone równolegle**. Spadek napięcia na obu opornikach jest taki sam, $U = I_1 R_1 = I_2 R_2 = I R_r$.
- Z pierwszego prawa Kirchhoffa $I = I_1 + I_2$,

$$\frac{U}{R_r} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}, \quad (21)$$

$$\frac{1}{R_r} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (22)$$

Wzór można łatwo rozszerzyć na dowolną liczbę oporników połączonych szeregowo.

Prawo Joule'a-Lenza

- Prąd płynący przez opornik wykonuje pracę

$$W = qU = Ult = \frac{U^2}{R}t = I^2Rt. \quad (23)$$

- Praca ta zamienia się na ciepło, więc identyczne wzory określają ilość ciepła wydzielającego się w oporniku

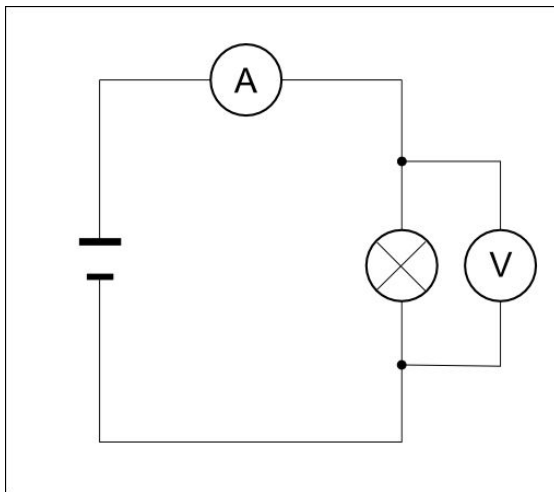
$$Q = Ult = \frac{U^2}{R}t = I^2Rt. \quad (24)$$

Podane zależności stanowią treść **prawa Joule'a-Lenza**.

Amperomierz i woltomierz

- Przyrząd używany do pomiaru natężenia prądu nazywamy **amperomierzem**. Amperomierz włącza się do obwodu **szeregowo** z opornikiem, w którym chcemy zmierzyć natężenie prądu. Istotne jest, aby opór R_A amperomierza był bardzo mały w porównaniu z innymi oporami w obwodzie.
- Miernik używany do pomiaru różnicy potencjałów nazywamy **woltomierzem**. Woltomierz dołącza się **równolegle** do opornika, na którym chcemy zmierzyć napięcie. Opór R_V woltomierza powinien być bardzo duży w porównaniu z innymi oporami w obwodzie.

Amperomierz i woltomierz



Pole magnetyczne

- Z doświadczeń wiadomo, że gdy ładunki są w ruchu względem jakiegoś układu odniesienia, wtedy występują między nimi siły oddziaływania różne od elektrostatycznych. Są to siły magnetyczne, a oddziaływanie realizuje się za pośrednictwem pola.
- **Polem magnetycznym** nazywamy taki stan przestrzeni, w którym na **poruszające się** ładunki działają siły.
- Pole magnetyczne wytwarzają prądy płynące w przewodnikach (elektromagnes) lub pewne ciała (magnesy trwałe).

Wektor indukcji magnetycznej

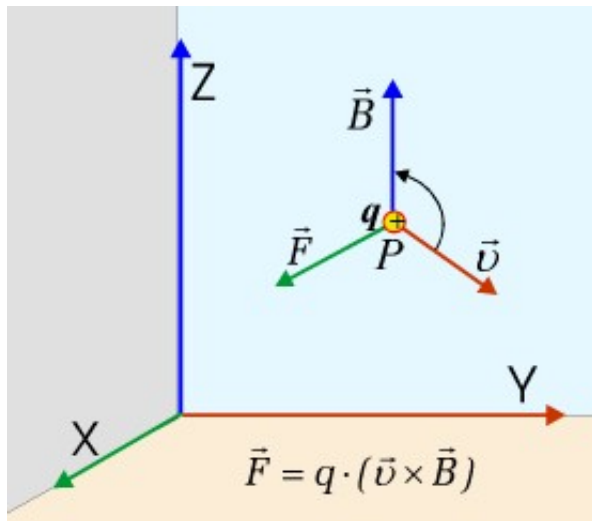
- Badania ruchów ładunków w polu magnetycznym sugerują, że pole magnetyczne trzeba scharakteryzować za pomocą wielkości wektorowej, nazywanej **indukcją magnetyczną** \vec{B} .
- Siła \vec{F}_L działająca na cząstkę o ładunku q , poruszającą się z prędkością \vec{v} , nosi nazwę **siły Lorentza**,

$$\vec{F}_L = q\vec{v} \times \vec{B}, \quad (25)$$

$$F_L = |q|vB \sin \alpha. \quad (26)$$

- Jednostką indukcji magnetycznej w układzie SI jest **tesla**,
 $1T = 1N \cdot s / (C \cdot m) = 1kg / (C \cdot s).$

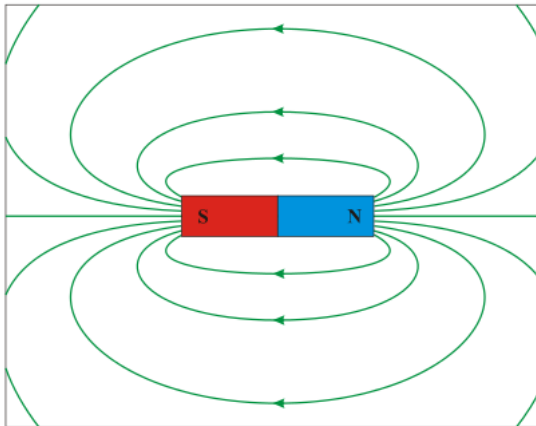
Siła Lorentza



Linie pola magnetycznego

- Pole magnetyczne przedstawia się graficznie za pomocą linii pola magnetycznego, o kierunku zgodnym z wektorem indukcji magnetycznej.
- W przypadku magnesu sztabkowego wszystkie linie przechodzą przez magnes i tworzą zamknięte pętle. Koniec magnesu, z którego linie wychodzą, nazywamy biegunem północnym. Przeciwny koniec magnesu to biegun południowy.
- Różnoimienne bieguny magnetyczne przyciągają się, a jednoimienne bieguny magnetyczne się odpychają.

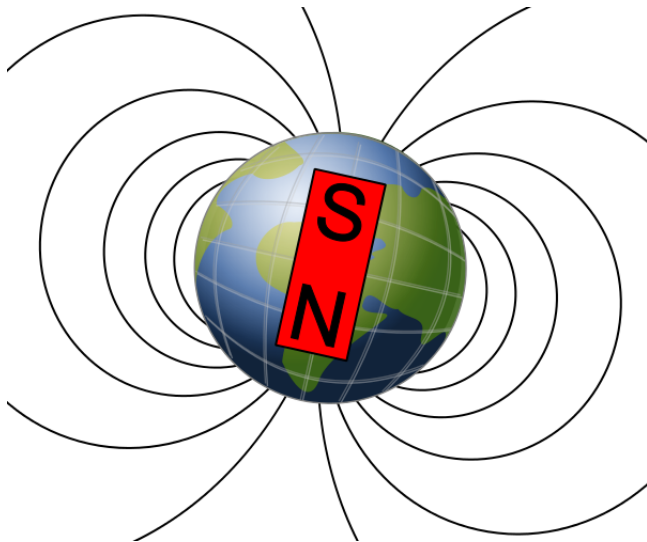
Linie pola magnetycznego magnesu sztabkowego



Pole magnetyczne Ziemi

- Wokół ziemi istnieje pole magnetyczne, którego źródłem jest jej jądro, lecz mechanizm jego powstawania nie jest znany.
- **Biegun geomagnetyczny** jest to punkt przecięcia się osi geomagnetycznej (osi dipola ziemskiego pola magnetycznego) z powierzchnią Ziemi. W geografii północny biegun geomagnetyczny oznacza biegun leżący na półkuli północnej, choć z fizycznego punktu widzenia jest to biegun południowy ziemskiego pola magnetycznego (który przyciąga północny biegun igły kompasu).
- W dziejach Ziemi dochodziło wielokrotnie do odwrócenia biegunów, co zostało utrwalone w skałach magmowych i niektórych osadowych, w postaci magnetyzacji szczątkowej.

Pole magnetyczne Ziemi



Ładunek w polu magnetycznym

- Rozważmy cząstkę o masie m i ładunku elektrycznym q , która porusza się z prędkością \vec{v} prostopadle do kierunku wektora indukcji magnetycznej \vec{B} w jednorodnym polu magnetycznym.
- Wartość siły Lorentza $F_L = qvB$.
- Siła Lorentza jest prostopadła do prędkości cząstki, czyli jest siłą dośrodkową w ruchu cząstki po okręgu $F = mv^2/r$.
- Z porównania otrzymujemy promień toru cząstki $r = mv/(qB)$.
- Czas jednego obiegu (okres) wynosi

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi}{v} \frac{mv}{qB} = \frac{2\pi m}{qB}. \quad (27)$$

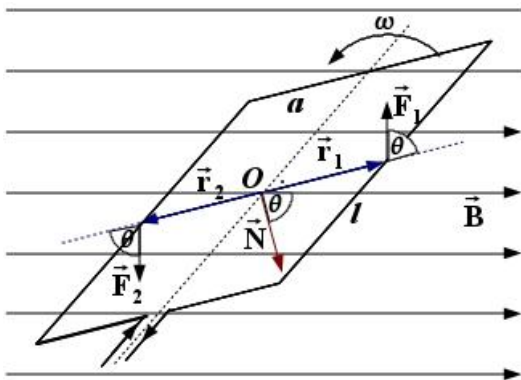
Przewodnik z prądem w polu magnetycznym

- Rozważmy przewodnik o długości L umieszczony prostopadle do kierunku wektora indukcji magnetycznej \vec{B} w jednorodnym polu magnetycznym. Przez przewodnik przepływa prąd o natężeniu I .
- W przewodniku elektrony poruszają się z prędkością unoszenia \vec{v}_d , a więc działa na nie siła Lorentza. Elektron przepłynie przez cały przewodnik w czasie $t = L/v_d$.
- Całkowity ładunek, który przepłynie przez prostopadły przekrój przewodnika w czasie t wynosi $q = It = IL/v_d$.
- Siła działająca na przewodnik z prądem wynosi

$$F = qv_d B = \frac{IL}{v_d} v_d B = ILB, \quad (28)$$

$$\vec{F} = I\vec{L} \times \vec{B}. \quad (29)$$

Ramka z prądem w polu magnetycznym



Ramka z prądem w polu magnetycznym

- Rozważmy prostokątną ramkę o bokach a i b umieszczoną w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji \vec{B} . Przez ramkę płynie prąd o natężeniu I . Pole powierzchni ramki wynosi $S = ab$.
- Na boki ramki działają siły pochodzące od pola magnetycznego. Wypadkowa siła równa się zero, ale powstaje niezerowy moment siły względem osi ramki

$$M = labB \sin \theta = ISB \sin \theta, \quad (30)$$

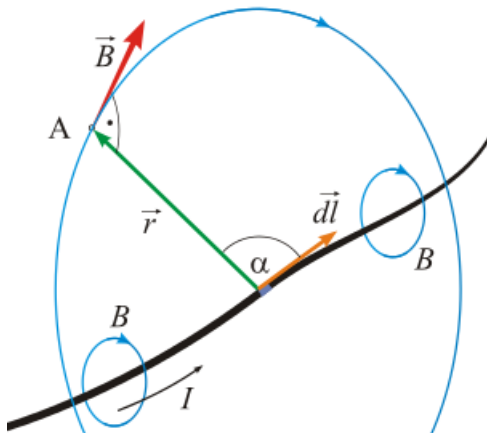
$$\vec{M} = \vec{\mu} \times \vec{B}, \quad (31)$$

gdzie $\mu = IS$ jest **dipolowym momentem magnetycznym**.

- Energia potencjalna momentu magnetycznego w polu magnetycznym

$$E_p(\theta) = -\vec{\mu} \cdot \vec{B} = -\mu B \cos \theta. \quad (32)$$

Prawo Biota-Savarta



Prawo Biota-Savarta

- Prawo Biota-Savarta podaje wartość wektora indukcji $\Delta \vec{B}$ pola wytworzonego przez odcinek $\Delta \vec{s}$ z prądem I

$$\Delta \vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \Delta \vec{s} \times \vec{r}}{r^3}, \quad (33)$$

gdzie $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T} \cdot \text{m/A}$ jest stałą, zwaną **przenikalnością magnetyczną próżni**.

- Wniosek: Pole od przewodnika prostoliniowego z prądem w odległości R wynosi $B = \mu_0 I / (2\pi R)$.
- Wniosek: Pole od przewodnika kołowego w jego środku wynosi $B = \mu_0 I / (2R)$.

Siła oddziaływania przewodów

- Rozważmy dwa długie równoległe przewody, w których płyną prądy I_1 i I_2 . Odległość między przewodami wynosi d .
- Pole wytworzone przez przewód 1 w miejscu, w którym znajduje się przewód 2 wynosi $B_1 = \mu_0 I_1 / (2\pi d)$.
- Siła jaka działa na przewód 2 wynosi

$$F_{12} = I_2 L B_1 = \frac{\mu_0 L I_1 I_2}{2\pi d}. \quad (34)$$

- Analogicznie można pokazać, że

$$F_{21} = I_1 L B_2 = \frac{\mu_0 L I_1 I_2}{2\pi d}. \quad (35)$$

- Przewody, w których płyną prądy równoległe, przyciągają się, a te, w których płyną prądy antyrównoległe, odpychają się.

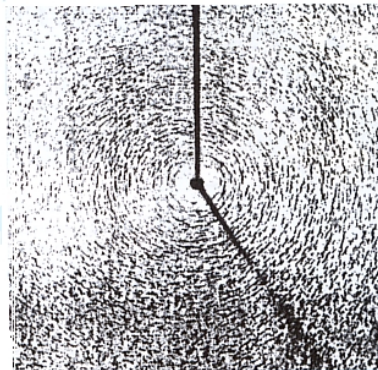
Prawo Ampere'a

- Prawo Ampere'a pozwala powiązać całkę wzdłuż zamkniętego konturu z wektora indukcji \vec{B} , z całkowitym natężeniem prądu I_p przebijającego powierzchnię rozpiętą na tym konturze

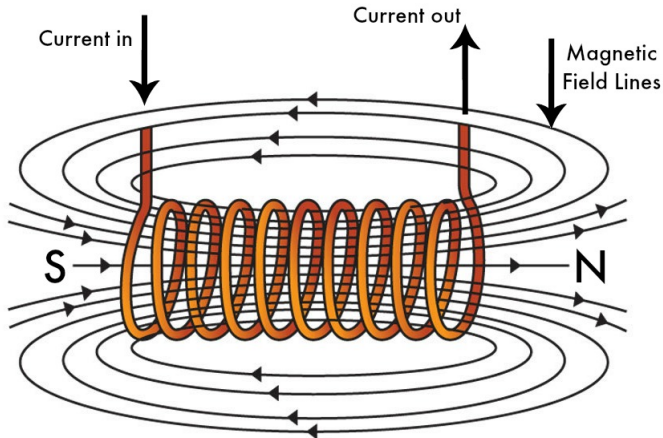
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I_p. \quad (36)$$

- Prawo Ampere'a jest szczególnie wygodne, jeżeli potrafimy uwzględnić szczególną symetrię zagadnienia.
- Przykład: Pole od przewodnika prostoliniowego z prądem, $B 2\pi R = \mu_0 I_p$.
- Przykład: Pole wewnątrz długiego solenoidu $Bd = \mu_0 n I d$, n liczba zwojów na jednostkę długości.

Pole od przewodnika prostoliniowego



Pole solenoidu



Strumień magnetyczny

- Rozważmy mały płaski element powierzchni ΔS w polu magnetycznym o indukcji \vec{B} . Elementowi powierzchni przyporządkowujemy wektor $\Delta\vec{S}$ prostopadły do powierzchni, o wartości równej polu powierzchni elementu (rozdzielamy górną i dolną stronę elementu powierzchni).
- **Strumień magnetyczny** przenikający przez element powierzchni określamy jako

$$\Delta\Phi_B = \vec{B} \cdot \Delta\vec{S}. \quad (37)$$

- Dla dużej powierzchni strumień magnetyczny obliczamy jako całkę po elementach powierzchni

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}. \quad (38)$$

- Jednostką strumienia magnetycznego w układzie SI jest **weber**,
 $1\text{Wb} = 1\text{T} \cdot \text{m}^2$.

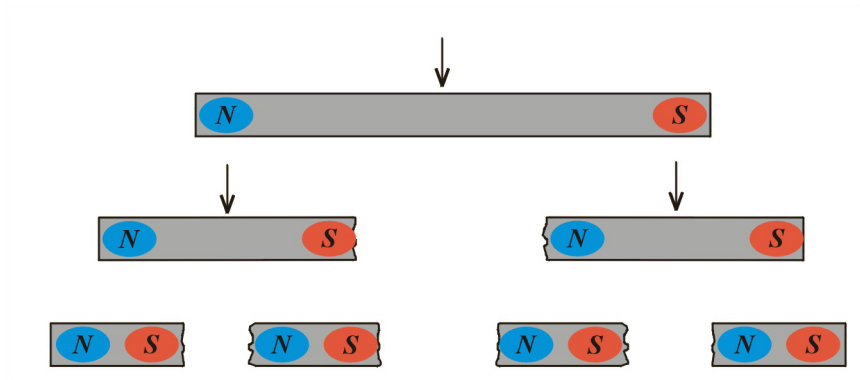
Prawo Gaussa dla pól magnetycznych

- Prawo Gaussa dla pól magnetycznych mówi, że wypadkowy strumień magnetyczny Φ_B przez dowolną powierzchnię zamkniętą jest równy zero,

$$\Phi_B = 0. \quad (39)$$

- Wniosek: Nie ma pojedynczych biegunów magnetycznych (monopoli magnetycznych). Najprostszą strukturą magnetyczną, która może istnieć, jest dipol magnetyczny. Inne sformułowanie: pole magnetyczne jest bezźródłowe.

Prawo Gaussa dla pól magnetycznych



Właściwości magnetyczne materii

- Ze względu na właściwości magnetyczne substancje można podzielić na trzy grupy: diamagnetyki, paramagnetyki i ferromagnetyki.
- W **diamagnetykach** atomy wykazują tylko słabe indukowane momenty magnetyczne.
- W **paramagnetykach** atomy mają trwałe wypadkowe momenty magnetyczne, ale są one zorientowane przypadkowo.
- W **ferromagnetykach** atomy mają trwałe wypadkowe momenty magnetyczne, które są uporządkowane w domenach magnetycznych.