

Wykłady z Fizyki 07



Zbigniew Osiak

Magnetyzm

ORCID

Linki do moich publikacji naukowych i popularnonaukowych, e-booków oraz audycji telewizyjnych i radiowych są dostępne w bazie ORCID pod adresem internetowym:

<http://orcid.org/0000-0002-5007-306X>

OZNACZENIA

B – notka biograficzna

C – ciekawostka

D – propozycja wykonania doświadczenia

H – informacja dotycząca historii fizyki

I – adres strony internetowej

K – komentarz

P – przykład

U – uwaga

Zbigniew Osiak (Tekst)

WYKŁADY Z FIZYKI
Magnetyzm

Małgorzata Osiak (Ilustracje)

© Copyright 2013 by
Zbigniew Osiak (text) and Małgorzata Osiak (illustrations)

Wszelkie prawa zastrzeżone.
Rozpowszechnianie i kopiowanie całości lub części publikacji
zabronione bez pisemnej zgody autora tekstu i autorki ilustracji.

Portret autora zamieszczony na okładkach przedniej i tylnej
Rafał Pudło

Wydawnictwo: Self Publishing

ISBN: 978-83-272-3909-9

e-mail: zbigniew.osiak@gmail.com

“*Wykłady z Fizyki – Magnetyzm*” są siódmym z piętnastu tomów pomocniczych materiałów do jednorocznego kursu fizyki prowadzonego przeze mnie na różnych kierunkach inżynierskich. Zainteresowani studiowaniem fizyki znajdą tu podstawowe pojęcia, prawa, jednostki, wzory, wykresy i przykłady.

Uzupełnieniem siódmego tomu są eBooki:

Z. Osiak: *Encyklopedia Fizyki*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Zadania Problemowe z Fizyki*. Self Publishing (2011).

Z. Osiak: *Angielsko-polski i polsko-angielski słownik terminów fizycznych*. Self Publishing (2011).

Zapis wszystkich trzydziestu wykładów zgrupowanych w piętnastu tomach zostanie zamieszczony w internecie w postaci eBooków.

-
- Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Mechanika.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Akustyka.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Hydromechanika.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Grawitacja.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Termodynamika.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Elektryczność.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Magnetyzm.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Elektromagnetyzm.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Optyka.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Kwanty.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Ciało Stałe.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Jądra.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Cząstki Elementarne.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Teoria Względności.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Stałe Uniwersalne i Jednostki.*

Stałe pole magnetyczne

dr Zbigniew Osiak

Rysunki wykonała

Małgorzata Osiak

-
- Pole magnetyczne i jego źródła 09
 - Indukcja magnetyczna i natężenie pola magnetycznego 15
 - Pola magnetyczne prądów i poruszających się ładunków 26
 - Siła Lorentza 39
 - Ruch ładunku w polu magnetycznym 50
 - Siła elektrodynamiczna 55

- Magnetyzm 10
- Pole magnetyczne 11
- Stałe pole magnetyczne 12
- Jednorodne pole magnetyczne 13
- Źródła pola magnetycznego 14

-
- Magnetyzm \Leftrightarrow dział fizyki zajmujący się badaniem
 - stałego pola magnetycznego,
 - oddziaływania stałych prądów i poruszających się ładunków elektrycznych ze stałym polem magnetycznym,
 - właściwości magnetyków znajdujących się w stałym polu magnetycznym.

-
- Pole magnetyczne \Leftrightarrow przestrzeń, w której na przewodniki z prądami i poruszające się swobodne ładunki elektryczne działają siły inne niż elektryczne, grawitacyjne i mechaniczne.

-
- Stałe pole magnetyczne \Leftrightarrow pole magnetyczne, którego wektory indukcji są stałe w czasie.

- Jednorodne pole magnetyczne \Leftrightarrow pole magnetyczne, którego wektory indukcji magnetycznej są stałe co do wartości, kierunku i zwrotu w każdym punkcie pola.

-
- Źródła pola magnetycznego \Leftrightarrow pole magnetyczne wytwarzane jest przez:
 - poruszające się ładunki elektryczne,
 - przewodniki z prądem elektrycznym,
 - zmieniające się w czasie pole elektryczne,
 - magnesy trwałe.

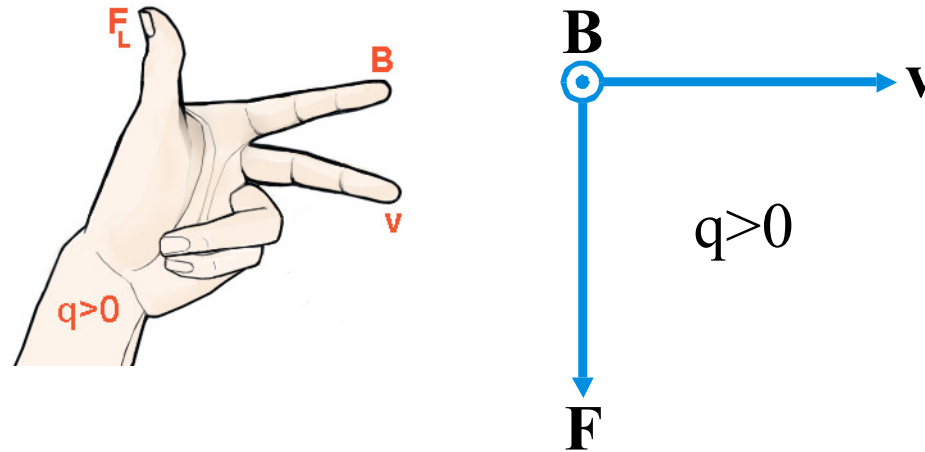
- Indukcja magnetyczna 16
- Natężenie pola magnetycznego 18
- Linie sił pola magnetycznego 19
- Pole magnetyczne Ziemi 20
- Przenikalność magnetyczna próżni 21
- Względna przenikalność magnetyczna 22
- Przenikalność magnetyczna ośrodka 23
- Gęstość energii pola magnetycznego 24

• Indukcja magnetyczna (\mathbf{B}) \Leftrightarrow wektor, charakteryzujący pole magnetyczne, prostopadły do płaszczyzny wyznaczonej przez prędkość (\mathbf{v}) dodatniego ładunku elektrycznego (q) i działającej na niego, ze strony pola magnetycznego, siły Lorentza (\mathbf{F}_L). Przy czym prędkość powinna być tak skierowana, by siła działająca na dodatni ładunek miała maksymalną wartość. Kierunki i zwroty wektorów \mathbf{F}_L , \mathbf{B} i \mathbf{v} znajdujemy z reguły lewej dłoni:

- kciuk – siła Lorentza (\mathbf{F}_L),
- wskazujący – indukcja magnetyczna (\mathbf{B}),
- środkowy – prędkość chwilowa (\mathbf{v}) ładunku.

Wartość indukcji magnetycznej w teslach jest liczbowo równa sile działającej na ładunek 1C poruszający się w polu magnetycznym prostopadle do jego linii sił z prędkością 1m/s.

$$B = \frac{F}{qv}, \quad [B] = T$$



- Reguła trzech palców lewej dłoni dotycząca wyznaczania wektora indukcji magnetycznej (\mathbf{B}): kciuk wskazuje siłę Lorentza (\mathbf{F}_L), palec wskazujący – indukcję magnetyczną (\mathbf{B}), palec środkowy – prędkość chwilową (\mathbf{v}) dodatniego ładunku elektrycznego.

- Wzajemne położenie wektorów \mathbf{B} , \mathbf{F} i \mathbf{v} w przypadku dodatniego ładunku q

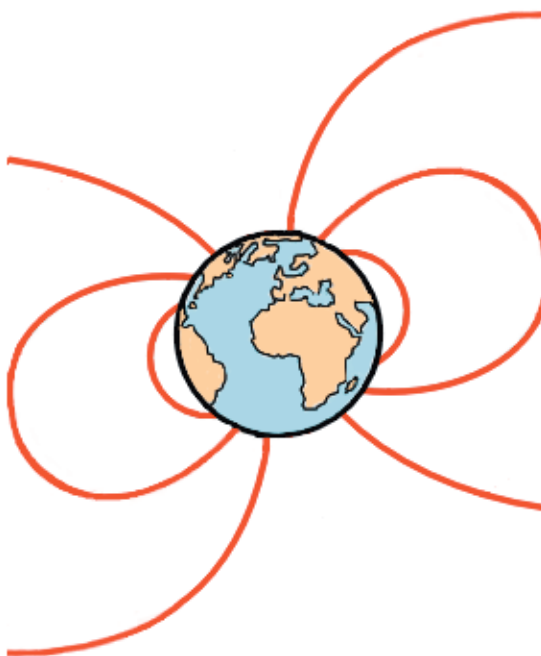
- Natężenie pola magnetycznego (\mathbf{H}) \Leftrightarrow wektor charakteryzujący pole magnetyczne, jakie wytworzyłyby przewodniki z prądami lub poruszające się ładunki, gdyby znajdowały się w próżni.

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu_r \mu_0} \cdot \mathbf{B}, \quad [\mathbf{H}] = \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

- μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni
- μ_r – względna przenikalność magnetyczna ośrodka

- Linie sił pola magnetycznego \Leftrightarrow linie, do których styczne w każdym punkcie linii pokrywają się z kierunkiem wektora indukcji pola magnetycznego w tym punkcie. Linie sił pola magnetycznego są zamknięte, a ich gęstość jest wprost proporcjonalna do wartości indukcji magnetycznej.

- Pole magnetyczne Ziemi \Leftrightarrow pole magnetyczne, którego źródłem są prądy elektryczne w zewnętrznym jądrze Ziemi. Indukcja pola magnetycznego Ziemi ma wartość rzędu kilkudziesięciu mikrotesli.



- Linie sił pola magnetycznego Ziemi

- Przenikalność magnetyczna próżni (μ_0) \Leftrightarrow stała uniwersalna pojawiająca się w równaniach elektrodynamiki, zwana też stałą magnetyczną.

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$$

- Względna przenikalność magnetyczna (μ_r) \Leftrightarrow bezwymiarowa liczba będąca stosunkiem wartości indukcji pola magnetycznego w ośrodku do indukcji pola zewnętrznego wytworzonego w próżni.

- Przenikalność magnetyczna ośrodka (μ) \Leftrightarrow wielkość skalarna mierzona w niutonach na amper kwadratowy [N/A^2], będąca iloczynem przenikalności magnetycznej próżni (μ_0) i względnej przenikalności magnetycznej ośrodka (μ_r).

$$\mu = \mu_0 \mu_r, \quad [\mu] = \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$$

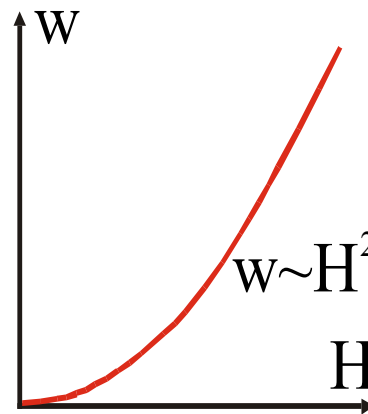
- Gęstość energii pola magnetycznego (w) \Leftrightarrow wielkość skalarna będąca stosunkiem energii (ΔW) zawartej w objętości (ΔV) jednorodnego pola magnetycznego o natężeniu (\mathbf{H}) do tej objętości.

$$w = \frac{dW}{dV} = \frac{1}{2} \mu_0 H^2, \quad [w] = \frac{J}{m^3}$$

- μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni

U Gęstość energii niejednorodnego pola magnetycznego jest pochodną zawartej w nim energii (W) względem objętości (V).

$$w = \frac{dW}{dV}$$



- Wykres zależności gęstości energii pola magnetycznego (w) od wartości natężenia pola magnetycznego (H)

- Prawo Biota-Savarta 27
- Pole magnetyczne wytworzone przez ładunek poruszający się w próżni 28
- Prawo Ampere'a 29
- Pole magnetyczne zwoju kołowego z prądem 31
- Cewka 33
- Uzwojenie bifilarne 34
- Pole magnetyczne solenoidu z prądem 35
- Elektromagnes 37
- Dzwonek elektryczny 38

- Prawo Biota-Savarta \Leftrightarrow prawo stanowiące, że natężenie pola magnetycznego ($d\mathbf{H}$), wytworzonego w próżni przez mały element przewodnika o długości ($d\mathbf{l}$), przez który płynie stały prąd elektryczny o natężeniu (I), wynosi

$$d\mathbf{H} = \frac{I}{4\pi r^3} \cdot (d\mathbf{l} \times \mathbf{r})$$

- \mathbf{r} – promień wodzący poprowadzony od elementu przewodnika do punktu obserwacji
 - $d\mathbf{l}$ – wektor o długości ($d\mathbf{l}$), którego kierunek pokrywa się z kierunkiem przepływu prądu elektrycznego
- H** Omawiane prawo podali Biot i Savart około 1820.
- B** Jean-Baptiste Biot (1774-1862), francuski fizyk, astronom i matematyk.
- B** Félix Savart (1791-1841), francuski fizyk.

- Pole magnetyczne wytworzone przez ładunek poruszający się w próżni \Leftrightarrow natężenie pola magnetycznego (\mathbf{H}), wytworzonego przez ładunek (q) poruszający się z prędkością (\mathbf{v}) w próżni, dane jest poniższym wzorem.

$$\mathbf{H} = \frac{q}{4\pi r^3} \cdot (\mathbf{v} \times \mathbf{r})$$

- \mathbf{r} – promień wodzący poprowadzony od poruszającego się ładunku do punktu obserwacji

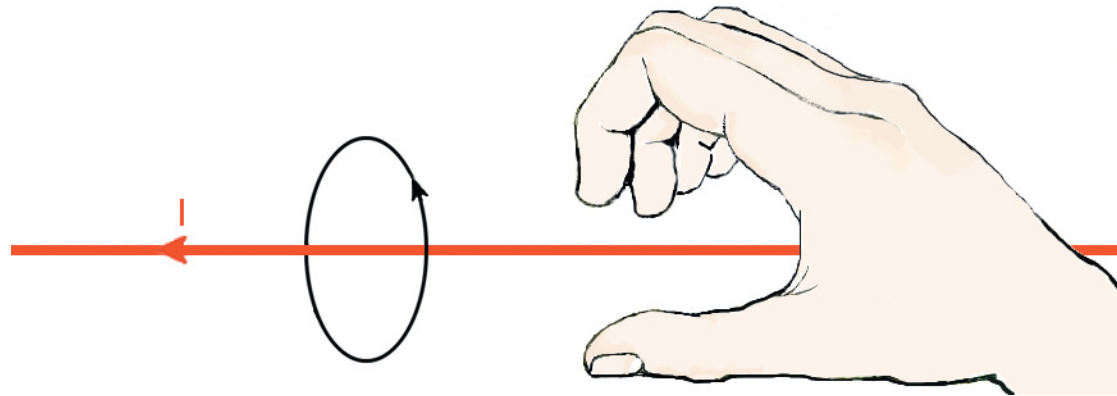
U Powyższa postać prawa Biota-Savarta jest poprawna, gdy $v^2 \ll c^2$.

- Prawo Ampère'a \Leftrightarrow prawo głoszące, że wokół prostoliniowego przewodnika, w którym płynie prąd stały o natężeniu (I), powstaje pole magnetyczne o liniach sił w postaci koncentrycznych okręgów prostopadłych do przewodnika. W odległości (r) od przewodnika wartość natężenia pola magnetycznego (H) wynosi

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

- Zwrot linii sił jest zgodny ze zwrotem obrotu śruby prawoskrętnej wkręcanej w kierunku przepływu prądu. Wektory natężenia pola magnetycznego (\mathbf{H}) są styczne do linii sił.

B André Marie Ampère (1775-1836), francuski fizyk i matematyk.



- Reguła prawej dłoni dotycząca prawa Ampère'a: Cztery palce wskazują zwrot linii sił pola magnetycznego, kciuk – kierunek przepływu prądu elektrycznego; czerwonym kolorem zaznaczono przewodnik, czarnym – linie sił.

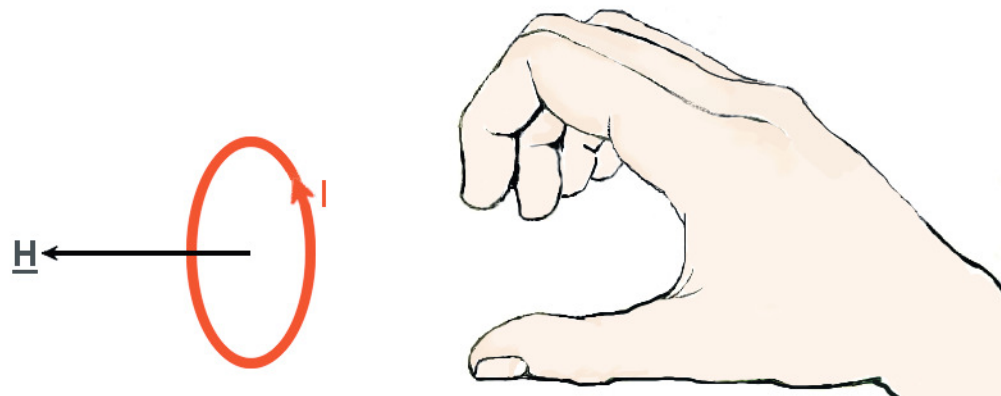
- W ogólnym sformułowaniu prawo Ampère'a stwierdza, że rotacja natężenia pola magnetycznego (\mathbf{H}) jest równa gęstości prądu (\mathbf{j}).

$$\text{rot } \mathbf{H} = \mathbf{j}$$

- Pole magnetyczne zwoju kołowego z prądem \Leftrightarrow pole magnetyczne, którego źródłem jest zwój kołowy z prądem. Wartość natężenia pola magnetycznego (H) w środku zwoju kołowego o promieniu (r), w którym płynie prąd o natężeniu (I), dana jest poniższym wzorem.

$$H = \frac{I}{2r}$$

- Natężenie pola magnetycznego (H) jest prostopadłe do zwoju, a jego zwrot jest zgodny ze zwrotem śruby prawoskrętnej obracanej w kierunku przepływu prądu.



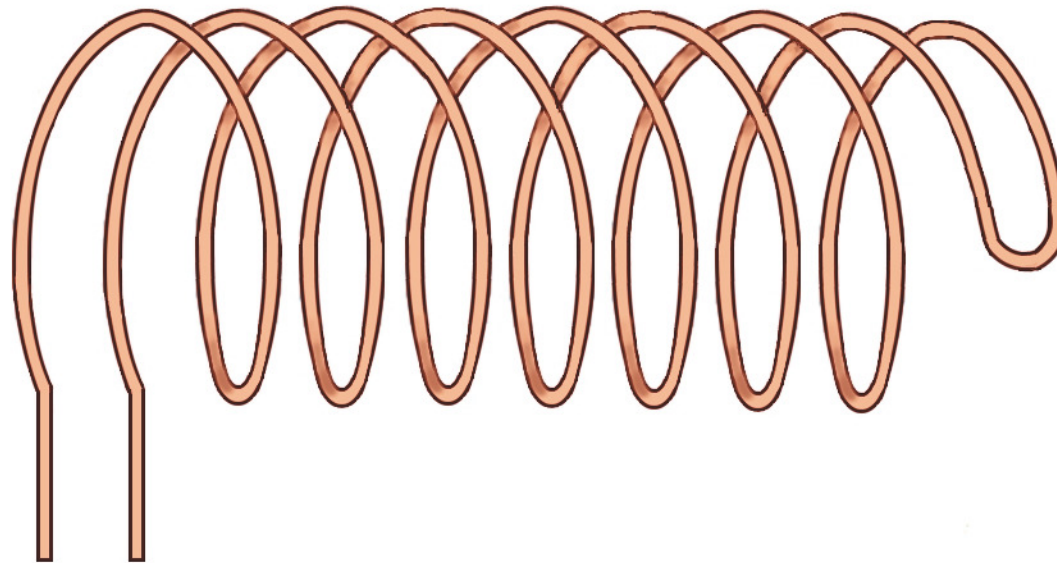
- Reguła prawej dłoni dotycząca pola magnetycznego zwoju kołowego z prądem: Cztery palce wskazują kierunek prądu elektrycznego o natężeniu (I), kciuk – kierunek i zwrot wektora natężenia pola magnetycznego (H); kolorem czerwonym zaznaczono przewodnik, czarnym – wektor natężenie pola magnetycznego.

- Cewka \Leftrightarrow drut metalowy w osłonie izolacyjnej, nawinięty “zwoj przy zwoju” najczęściej na powierzchni walca, prostopadłościanu lub pierścienia.



- Symbol cewki

- Uzwojenie bifilarne \Leftrightarrow uzwojenie nawinięte tak, aby w sąsiednich zwojach prąd płynął w przeciwnych kierunkach.



• Uzwojenie bifilarne

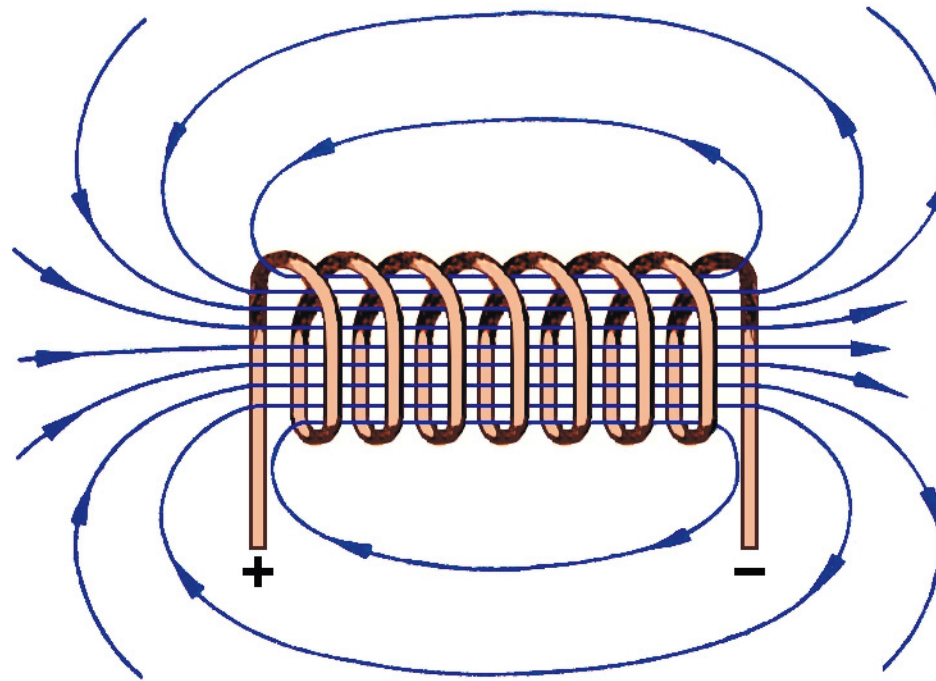
- Solenoid \Leftrightarrow cylindryczna cewka o długości (l), zawierająca (n) zwojów, bez rdzenia w środku. Solenoid, przez który przepływa prąd elektryczny o natężeniu (I), staje się źródłem pola magnetycznego. W punkcie położonym wewnątrz na osi solenoidu daleko od jego końców wartość indukcji magnetycznej (B) wynosi:

$$B = \frac{\mu_0 n I}{1}$$

- μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni
- Na końcach solenoidu, którego długość jest znacznie większa niż jego średnica, indukcja wynosi:

$$B = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mu_0 n I}{1}$$

- Solenoid nazywany jest też zwojnicą.



- Linie sił pola magnetycznego solenoidu, przez który przepływa prąd elektryczny

- Elektromagnes \Leftrightarrow cewka z rdzeniem ferromagnetycznym. Przepływ prądu elektrycznego przez cewkę powoduje, że staje się ona źródłem pola magnetycznego o indukcji wprost proporcjonalnej do liczby zwojów, natężenia prądu i względnej przenikalności magnetycznej rdzenia oraz odwrotnie proporcjonalnej do długości cewki.

H Pierwszy elektromagnes został skonstruowany przez Sturgeona około 1821.

B William Sturgeon (1783-1850), brytyjski (angielski) fizyk i wynalazca.

- Dzwonek elektryczny \Leftrightarrow urządzenie składające się z elektromagnesu zasilanego ze źródła prądu stałego poprzez mechaniczny przerywacz. Ruchoma część przerywacza, w postaci metalowej dźwigni, zakończona jest młoteczką. Kiedy elektromagnes przyciągnie dźwignię, obwód zostanie przerwany. Gdy dźwignia powróci do położenia początkowego, obwód zostanie zamknięty. Drgający wraz z dźwignią młoteczek uderza w metalową kopułkę, która staje się źródłem dźwięku.

- Siła Lorentza 40
- Ładunek właściwy 44
- Spektrometr masowy 45
- Pasy radiacyjne Van Allena 46
- Zjawisko Halla 47
- Hallotron 49

- Siła Lorentza (\mathbf{F}_L) \Leftrightarrow siła działająca na ładunek elektryczny (q) poruszający się z prędkością (\mathbf{v}) w polu magnetycznym o indukcji magnetycznej (\mathbf{B}).

$$\mathbf{F}_L = q(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$$
$$F_L = |q|vB\sin\alpha$$

- α – kąt zawarty między wektorami (\mathbf{v}) oraz (\mathbf{B})
- Siła Lorentza jest prostopadła do płaszczyzny wyznaczonej przez prędkość i indukcję magnetyczną, a jej zwrot (w przypadku ładunków dodatnich) jest zgodny ze zwrotem ruchu postępowego śruby prawoskrętnej obracanej w kierunku od (\mathbf{v}) do (\mathbf{B}).

H Siła Lorentza została opisana przez niego w 1892.

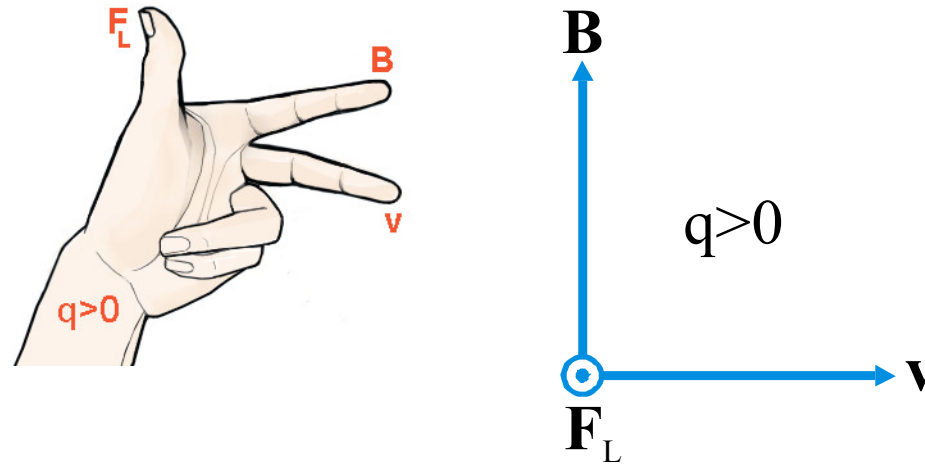
B Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), holenderski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1902.

- Zwrot siły Lorentza działającej na ładunek dodatni można także wyznaczyć, posługując się regułą lewej dłoni:
- kciuk – siła Lorentza (\mathbf{F}_L),
- wskazujący – wektor indukcji magnetycznej (\mathbf{B}),
- środkowy – prędkość chwilowa (\mathbf{v}) ładunku.

U Siła Lorentza, jako siła dośrodkowa, nie wykonuje pracy, nie zmienia wartości prędkości oraz energii kinetycznej ładunku.

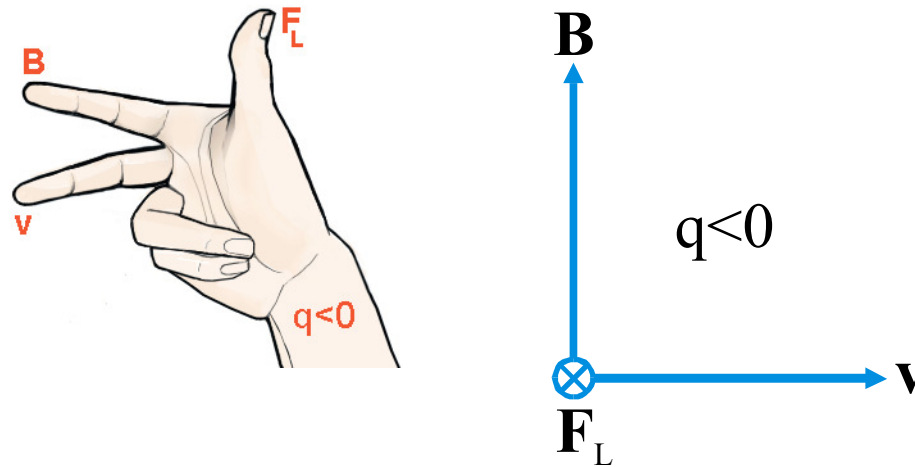
P Ładunek elektryczny (q), który wpadł prostopadle w pole magnetyczne, obiega w nim w czasie (T) okrąg o promieniu (r).

$$r = \frac{mv}{|q|B}$$
$$T = 2\pi \cdot \frac{m}{|q|B}$$



- Reguła trzech palców lewej dłoni dotycząca siły Lorentza działającej w polu magnetycznym na poruszający się dodatni ładunek elektryczny: Kciuk wskazuje siłę Lorentza (F_L), palec wskazujący – indukcję magnetyczną (B), palec środkowy – prędkość chwilową (v) dodatniego ładunku elektrycznego.

- Wzajemne położenie wektorów B , F_L i v w przypadku dodatniego ładunku q



- Reguła trzech palców prawej dłoni dotycząca siły Lorentza działającej w polu magnetycznym na poruszający się ujemny ładunek elektryczny: Kciuk wskazuje siłę Lorentza (F_L), palec wskazujący – indukcję magnetyczną (B), palec środkowy – prędkość chwilową (v) ujemnego ładunku elektrycznego.

- Wzajemne położenie wektorów B , F_L i v w przypadku ujemnego ładunku q

- Ładunek właściwy \Leftrightarrow stosunek ładunku (q) cząstki do jej masy (m).

H Pierwszy pomiar ładunku właściwego elektronu wykonał Thomson w 1897.

B Sir Joseph John Thomson (1856-1940), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1906.

• Spektrometr masowy \Leftrightarrow przyrząd służący do rozdzielania jonów o różnych wartościach stosunku ładunku do masy, poruszających się w skrzyżowanych polach elektrycznym i magnetycznym.

H Pierwszy spektrometr masowy zbudował Thomson w 1911.

H Spektrometr masowy został udoskonalony przez Astona w 1919.

B Sir Joseph John Thomson (1856-1940), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1906.

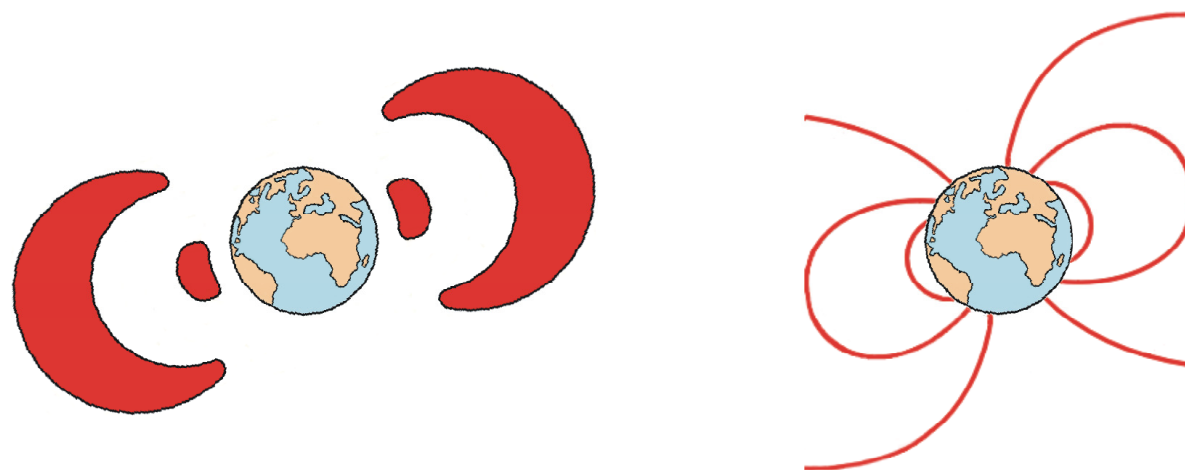
B Francis William Aston (1877-1945), brytyjski chemik i fizyk, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1922.

- Pasy radiacyjne Van Allena \Leftrightarrow dwa rozłączne obszary otaczające Ziemię, w których poruszają się po spiralnych torach naładowane cząstki promieniowania kosmicznego “przechwycone” przez pole magnetyczne naszej planety.

Wewnętrzny pas nad równikiem rozciąga się od wysokości 1000 km do wysokości 5000 km, a zewnętrzny – od 15 000 km do 25 000 km.

H Pasy radiacyjne odkrył Van Allen w 1958.

B James Alfred Van Allen (1914-2006), amerykański fizyk.



• Pasy radiacyjne Van Allena i linie sił pola magnetycznego Ziemi

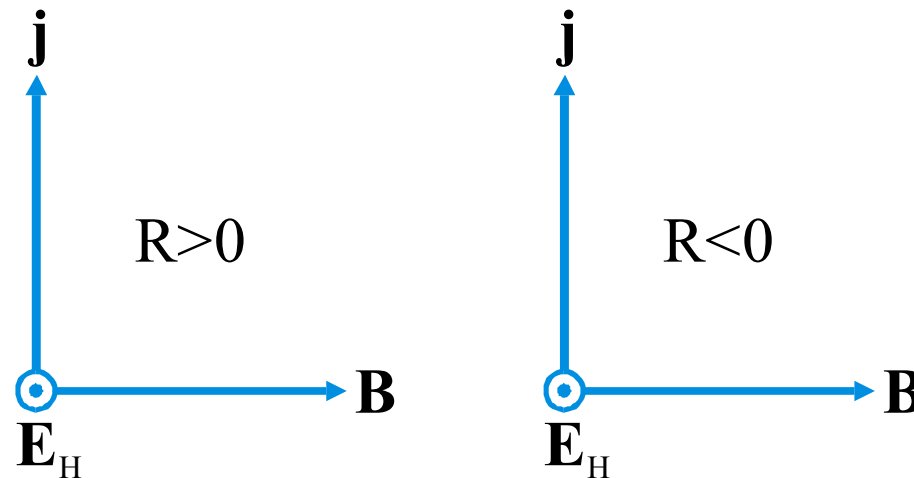
- Zjawisko Halla \Leftrightarrow zjawisko polegające na powstawaniu pola elektrycznego o natężeniu (\mathbf{E}_H) w umieszczonym w polu magnetycznym o indukcji (\mathbf{B}) przewodniku lub półprzewodniku z prądem o gęstości (\mathbf{j}).

$$\mathbf{E}_H = R(\mathbf{B} \times \mathbf{j})$$
$$E_H = RBj \sin \alpha$$

- R – stała Halla
- α – kąt zawarty między wektorami (\mathbf{B}) i (\mathbf{j})

H Zjawisko to odkrył Hall w 1879.

B Edwin Herbert Hall (1855-1938), amerykański fizyk.



- Wzajemne położenie wektorów \mathbf{j} , \mathbf{B} i \mathbf{E}_H w przypadku $R > 0$; stała Halla jest dodatnia, gdy nośnikami prądu elektrycznego są ładunki dodatnie.

- Wzajemne położenie wektorów \mathbf{j} , \mathbf{B} i \mathbf{E}_H w przypadku $R < 0$; stała Halla jest ujemna, gdy nośnikami prądu elektrycznego są ładunki ujemne.

- Hallotron \Leftrightarrow przyrząd służący głównie do pomiaru indukcji magnetycznej. Zasada działania hallotronu oparta jest na wykorzystaniu zjawiska Halla.

C Nazwa hallotron pochodzi od nazwiska Hall.

B Edwin Herbert Hall (1855-1938), amerykański fizyk.

- Równoległe wejście ładunku w pole magnetyczne 51
- Prostopadłe wejście ładunku w pole magnetyczne 52
- Skośne wejście ładunku w pole magnetyczne 53

- Cząstka o masie (m) i ładunku (q) poruszająca się z prędkością (\mathbf{v}) po wejściu równoległym w jednorodne stałe pole magnetyczne o indukcji (\mathbf{B})

$$\mathbf{v} \uparrow \uparrow \mathbf{B} \quad \text{lub} \quad \mathbf{v} \uparrow \downarrow \mathbf{B}$$

nie doznaje ze strony pola działania na nią żadnej siły.

- Pozostając w obszarze pola magnetycznego, cząstka ta kontynuuje ruch jednostajny prostoliniowy z prędkością (\mathbf{v}).

- Cząstka o masie (m) i ładunku (q) poruszająca się z prędkością (\mathbf{v}) po wejściu prostopadłym w jednorodne stałe pole magnetyczne o indukcji (\mathbf{B})

$$\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$$

doznaje ze strony pola działania na nią siły Lorentza

$$F_L = |q|vB, \quad \mathbf{F}_L \perp \mathbf{v}, \quad \mathbf{F}_L \perp \mathbf{B}$$

- Pod wpływem siły Lorentza, jako siły dośrodkowej, cząstka porusza się ruchem jednostajnym po okręgu.
- Promień (R) tego okręgu oraz okres (T) jego obiegu wynoszą:

$$R = mv / |q|B, \quad T = 2\pi m / |q|B$$

- Cząstka o masie (m) i ładunku (q) poruszająca się z prędkością (\mathbf{v}) po wejściu skośnym w jednorodne stałe pole magnetyczne o indukcji (\mathbf{B})

$$\alpha \neq 0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$$

doznaje ze strony pola działania na nią siły Lorentza

$$F_L = |q|vB \sin \alpha, \quad \mathbf{F}_L \perp \mathbf{v}, \quad \mathbf{F}_L \perp \mathbf{B}$$

- Pod wpływem siły Lorentza cząstka porusza się po linii śrubowej, której osią jest wektor indukcji magnetycznej (\mathbf{B}).
- Ruch ten jest złożeniem prostoliniowego ruchu jednostajnego z prędkością o wartości $v \cos \alpha$ oraz ruchu jednostajnego po okręgu z prędkością o wartości $v \sin \alpha$.

- Promień (R) oraz skok (h) linii śrubowej wynoszą:

$$R = \frac{mv \sin \alpha}{|q|B}$$

$$h = \frac{2\pi m v \cos \alpha}{|q|B}$$

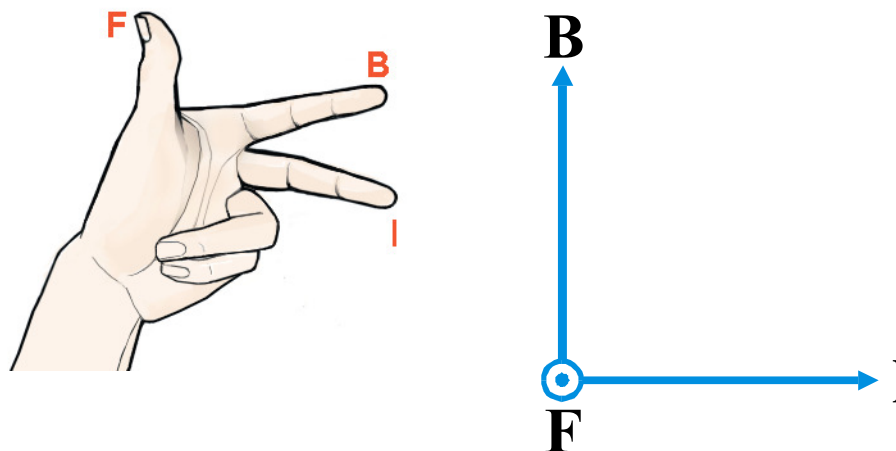
- Siła elektrodynamiczna 56
- Oddziaływanie między dwoma równoległymi przewodnikami z prądem 58
- Moment magnetyczny 60
- Moment pary sił działających na ramkę z prądem w polu magnetycznym 61
- Silnik elektryczny 63
- Komutator 64

- Siła elektrodynamiczna (\mathbf{F}) \Leftrightarrow siła działająca w jednorodnym polu magnetycznym o indukcji (\mathbf{B}) na prostoliniowy przewodnik o długości (l), w którym płynie prąd elektryczny o natężeniu (I).

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

$$F = I l B \sin \angle(\mathbf{l}, \mathbf{B})$$

- \mathbf{l} – wektor o wartości (l), skierowany zgodnie z kierunkiem prądu
- Siła elektrodynamiczna jest prostopadła do płaszczyzny wyznaczonej przez wektory (\mathbf{l}) i (\mathbf{B}), a jej zwrot jest zgodny ze zwrotem ruchu postępowego śruby prawoskrętnej obracanej od (\mathbf{l}) do (\mathbf{B}).
Zwrot siły elektrodynamicznej można też wyznaczyć, posługując się regułą lewej dłoni:
- kciuk – siła elektrodynamiczna (\mathbf{F}),
- wskazujący – wektor indukcji magnetycznej (\mathbf{B}),
- środkowy – kierunek prądu.



- Reguła trzech palców lewej dłoni dotycząca siły elektrodynamicznej: Kciuk wskazuje siłę elektrodynamiczną (\mathbf{F}), palec wskazujący – indukcję magnetyczną (\mathbf{B}), palec środkowy – kierunek przepływu prądu.

- Wzajemne położenie wektorów \mathbf{B} , \mathbf{I} i \mathbf{F}

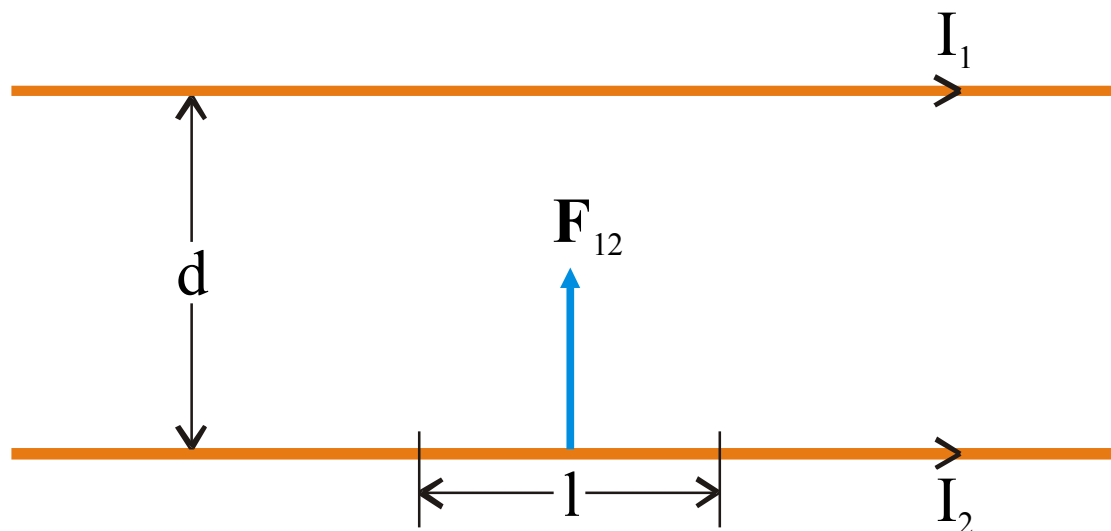
Oddziaływanie między równoległymi przewodnikami z prądem 58

- Oddziaływanie między dwoma równoległymi przewodnikami z prądem \Leftrightarrow oddziaływanie wzajemne dwóch równoległych nieskończenie długich prostoliniowych przewodników, w których płyną prądy o natężeniach (I_1) oraz (I_2). Jeżeli kierunki prądów są zgodne, to przewodniki się przyciągają. Jeżeli kierunki prądów są przeciwne, to przewodniki się odpychają.

$$F_{12} = F_{21} = \frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2 l}{d}$$

- F_{12} – wartość siły, z jaką przewodnik pierwszy działa na element o długości (l) drugiego przewodnika
- F_{21} – wartość siły, z jaką przewodnik drugi działa na element o długości (l) pierwszego przewodnika
- μ_0 – przenikalność magnetyczna próżni

Oddziaływanie między równoległymi przewodnikami z prądem 59

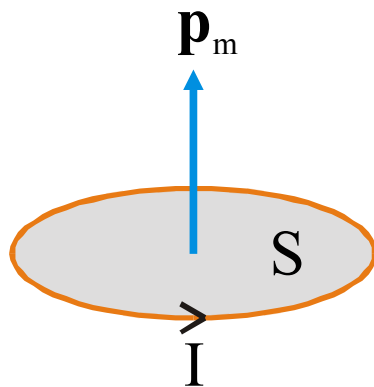


- Siła (F_{12}) z jaką przewodnik pierwszy działa na element o długości (l) drugiego przewodnika.

- Moment magnetyczny \Leftrightarrow wielkość wektorowa charakteryzująca płaską ramkę z prądem, której wartość jest iloczynem natężenia prądu (I) płynącego w ramce i pola jej powierzchni (S).

$$\mathbf{p}_m = IS, \quad [\mathbf{p}_m] = \text{A} \cdot \text{m}^2$$

- Moment magnetyczny jest prostopadły do powierzchni ramki, a jego zwrot jest zgodny ze zwrotem ruchu postępowego śruby prawoskrętnej obracanej w kierunku płynięcia prądu.



- Moment magnetyczny (\mathbf{p}_m) kołowego obwodu o polu powierzchni (S) z prądem elektrycznym o natężeniu (I)

Moment pary sił działających na ramkę z prądem w polu magnetycznym

61

- Moment pary sił działających na ramkę z prądem w polu magnetycznym \Leftrightarrow wypadkowy moment sił elektrodynamicznych powodujących obrót płaskiej ramki o momencie magnetycznym (\mathbf{p}_m).

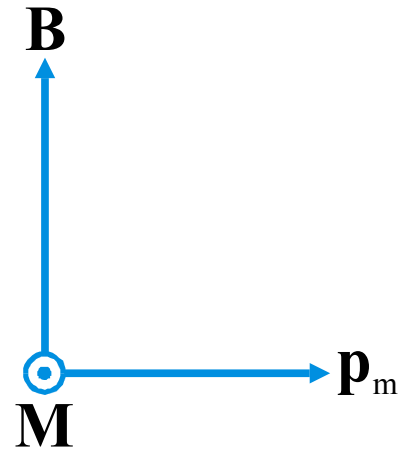
$$\mathbf{M} = \mathbf{p}_m \times \mathbf{B}$$

$$M = ISB \sin \alpha$$

- I – natężenie prądu elektrycznego płynącego w ramce
- S – pole powierzchni ramki
- α – kąt zawarty między normalną do powierzchni ramki a wektorem indukcji magnetycznej (B)

Moment pary sił działających na ramkę z prądem w polu magnetycznym

62



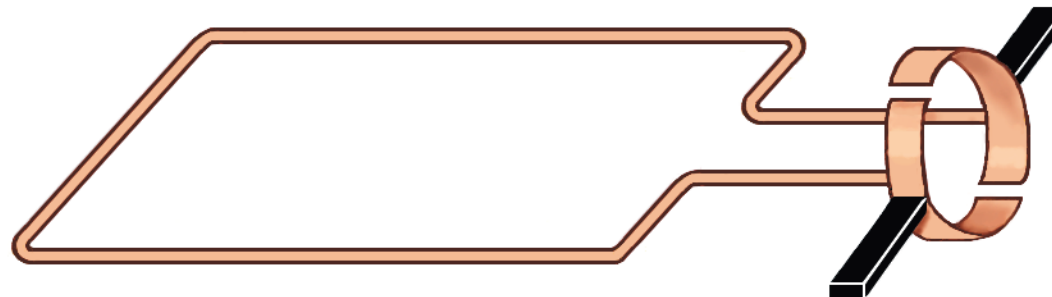
- Wzajemne położenie wektorów \mathbf{B} , \mathbf{M} i \mathbf{p}_m

- Silnik elektryczny \Leftrightarrow silnik, którego modelem jest prostokątna ramka metalowa znajdująca się między biegunami trwałego magnesu. Ramka zasilana jest ze źródła stałego napięcia za pośrednictwem komutatora. Moment pary sił działających na ramkę z prądem powoduje jej obrót.

- Komutator \Leftrightarrow urządzenie w silniku elektrycznym służące do zmiany kierunku prądu płynącego w ramce. Stanowią go dwie prostopadłościennie kostki węglowe.

H Komutator w silniku elektrycznym po raz pierwszy zastosował Sturgeon w 1836.

B William Sturgeon (1783-1850), brytyjski (angielski) fizyk i wynalazca.



• Komutator

Magnetyki

dr Zbigniew Osiak

Rysunki wykonała

Małgorzata Osiak

-
- Magnetyki (materiały magnetyczne) 67
 - Histereza magnetyczna 84

- Namagnesowanie 68
- Podatność magnetyczna 69
- Magnetyki (materiały magnetyczne) 70
- Diamagnetyki 71
- Paramagnetyki 72
- Ferromagnetyki 73
- Domeny ferromagnetyczne 74
- Ferrimagnetyki 75
- Ferryty 76
- Antyferromagnetyki 77
- Temperatura (punkt) Curie 78
- Temperatura Néela 79
- Magnesy trwałe 80
- Magnesy neodymowe 81
- Igła magnetyczna 82
- Kompas 83

- Namagnesowanie (\mathbf{J}) \Leftrightarrow wielkość wektorowa mierzona w amperach na metr [A/m], będąca stosunkiem sumy momentów magnetycznych cząsteczek znajdujących się w danej próbce do objętości tej próbki.

$$[\mathbf{J}] = \frac{\text{A}}{\text{m}}$$

- Namagnesowanie, nazywane też wektorem namagnesowania, zależy od natężenia (\mathbf{H}) zewnętrznego pola magnetycznego.

$$\mathbf{J} = \chi \mathbf{H}$$

- χ – podatność magnetyczna

- Podatność magnetyczna (χ) \Leftrightarrow wielkość skalarna charakteryzująca magnetyczne własności ośrodka.

$$\chi = \mu_r - 1$$

- μ_r – względna przenikalność magnetyczna

- Magnetyki (materiały magnetyczne) \Leftrightarrow materiały, których namagnesowanie zmienia się pod wpływem zewnętrznego pola magnetycznego. Magnetyki dzielą się na diamagnetyki, paramagnetyki, ferromagnetyki, ferrimagnetyki oraz antyferromagnetyki. Magnetyki nazywane są także materiałami magnetycznymi.

- Diamagnetyki \Leftrightarrow magnetyki o względnej przenikalności magnetycznej mniejszej od 1.

$$\mu_r < 1$$

- W diamagnetykach moment magnetyczny każdego atomu jest równy zeru. Zewnętrzne pole powoduje powstanie dipoli magnetycznych, które ustawiają się przeciwnie do kierunku natężenia przyłożonego pola magnetycznego. Diamagnetyk jest odpychany od bieguna silnego magnesu. Pręciki diamagnetyczne ustawiają się prostopadle do linii sił pola magnetycznego.

P Typowym diamagnetykiem jest miedź.

- Paramagnetyki \Leftrightarrow magnetyki o względnej przenikalności magnetycznej (μ_r) większej od 1.

$$\mu_r > 1$$

- W paramagnetykach wartość momentu magnetycznego każdego atomu jest różna od zera. Wypadkowy moment magnetyczny wszystkich atomów jest jednak równy zero. Zewnętrzne pole powoduje, że istniejące już dipole magnetyczne ustawiają się w kierunku natężenia przyłożonego pola magnetycznego. Paramagnetyk jest przyciągany do bieguna silnego magnesu. Pręciki paramagnetyczne ustawiają się równoległe do linii sił pola magnetycznego.

P Typowym paramagnetykiem jest aluminium.

C Powyżej temperatury Curie ferromagnetyki stają się paramagnetykami.

• Ferromagnetyki \Leftrightarrow magnetyki, które poniżej temperatury Curie mają strukturę domenową. W pojedynczej domenie momenty magnetyczne wszystkich atomów są względem siebie równoległe. Wypadkowy moment magnetyczny wszystkich domen może być jednak równy zero. W zewnętrznym polu magnetycznym domeny ustawiają się tak, aby ich wektory namagnesowania ustawiły się w kierunku pola. Względna przenikalność magnetyczna ferromagnetyków zależy nieliniowo od natężenia zewnętrznego pola magnetycznego i przyjmuje maksymalne wartości z przedziału $10^3 \div 10^6$.

$$\mu_r \gg 1$$

• Powyżej temperatury Curie ferromagnetyki stają się paramagnetykami.

P Typowym ferromagnetykiem jest żelazo.

- Domeny ferromagnetyczne \Leftrightarrow obszary ferromagnetyka o maksymalnej wartości namagnesowania. Kierunki namagnesowania poszczególnych domen mogą być różne. W odpowiednio silnym zewnętrznym polu magnetycznym domeny ustawiają się tak, aby ich namagnesowania były równoległe do natężenia pola magnetycznego.

• Ferrimagnetyki \Leftrightarrow magnetyki, które poniżej temperatury Néela mają strukturę domenową. W pojedynczej domenie momenty magnetyczne sąsiednich atomów ustawiają się antyrównolegle. Przy czym wartości tych momentów są różne. Wypadkowy moment magnetyczny pochodzący od wszystkich atomów jest różny od zera. Ferrimagnetyki mają duży opór właściwy rzędu $10 \div 10^4 \Omega\text{m}$, nadają się świetnie na rdzenie cewek i transformatorów. Powyżej temperatury Néela ferrimagnetyki stają się paramagnetykami.

P Ferrimagnetykami są między innymi związki chemiczne tlenku żelazowego Fe_2O_3 z tlenkami innych metali.

H Istnienie ferrimagnetyków wykazał Néel w 1947.

B Louis Eugène Félix Néel (1904-2000), francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1970.

-
- Ferryty \Leftrightarrow związki chemiczne tlenku żelazowego Fe_2O_3 z tlenkami innych metali. Ferryty ze względu na własności elektryczne są półprzewodnikami, a ze względu na własności magnetyczne są ferrimagnetykami.

• Antyferromagnetyki \Leftrightarrow magnetyki, które poniżej temperatury Néela mają strukturę domenową. W pojedynczej domenie momenty magnetyczne sąsiadnych atomów ustawiają się antyrównolegle. Przy czym wartości tych momentów są jednakowe. Wypadkowy moment magnetyczny pochodzący od wszystkich atomów jest równy zeru. Wartość namagnesowania antyferromagnetyków jest różna od zera jedynie w zewnętrznym polu magnetycznym. Powyżej temperatury Néela antyferromagnetyki stają się paramagnetykami.

P Antyferromagnetykami są między innymi chrom, mangan i tlenek manganu.

H Hipotezę o istnieniu antyferromagnetyzmu sformułował Néel około 1930.

B Louis Eugène Félix Néel (1904-2000), francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1970.

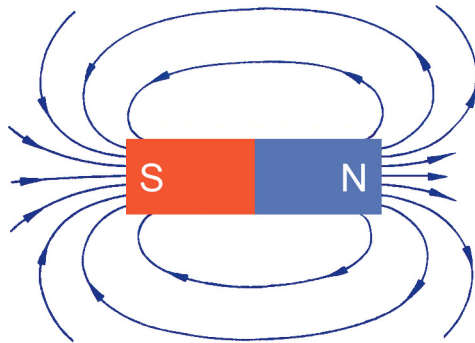
- Temperatura (punkt) Curie \Leftrightarrow temperatura, powyżej której ferromagnetyk staje się paramagnetykiem.

B Pierre Curie (1859-1906), francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1903.

- Temperatura Néela \Leftrightarrow temperatura, powyżej której antyferromagnetyki i ferrimagnetyki stają się paramagnetykami.

B Louis Eugène Félix Néel (1904-2000), francuski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1970.

- Magnesy trwałe \Leftrightarrow namagnesowany ferromagnetyk twardy będący źródłem stałego pola magnetycznego.

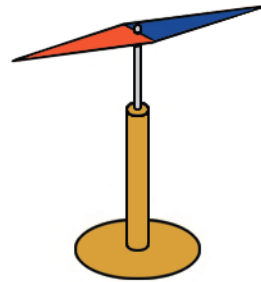


- Linie sił pola magnetycznego sztabkowego magnesu trwałego; bieguny południowy i północny oznaczono odpowiednio literami S i N.

-
- Magnesy neodymowe \Leftrightarrow bardzo silne magnesy trwałe wytwarzane z $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$.

•Igła magnetyczna \Leftrightarrow lekki magnes trwały podparty na pionowej osi tak, by mógł się swobodnie obracać w płaszczyźnie poziomej. Igła magnetyczna ustawia się wzdłuż linii sił ziemskiego pola magnetycznego.

P Jeżeli pod prostoliniowym przewodnikiem, przez który płynie prąd o odpowiednio dużym natężeniu, umieścić igłę magnetyczną, to przyjmie ona pozycję prostopadłą do tego przewodnika.



•Igła magnetyczna

-
- Kompas \Leftrightarrow urządzenie służące do wyznaczenia lokalnego kierunku południka magnetycznego. Podstawowym elementem kompasu jest igła magnetyczna, która ustawia się wzdłuż linii sił ziemskiego pola magnetycznego.

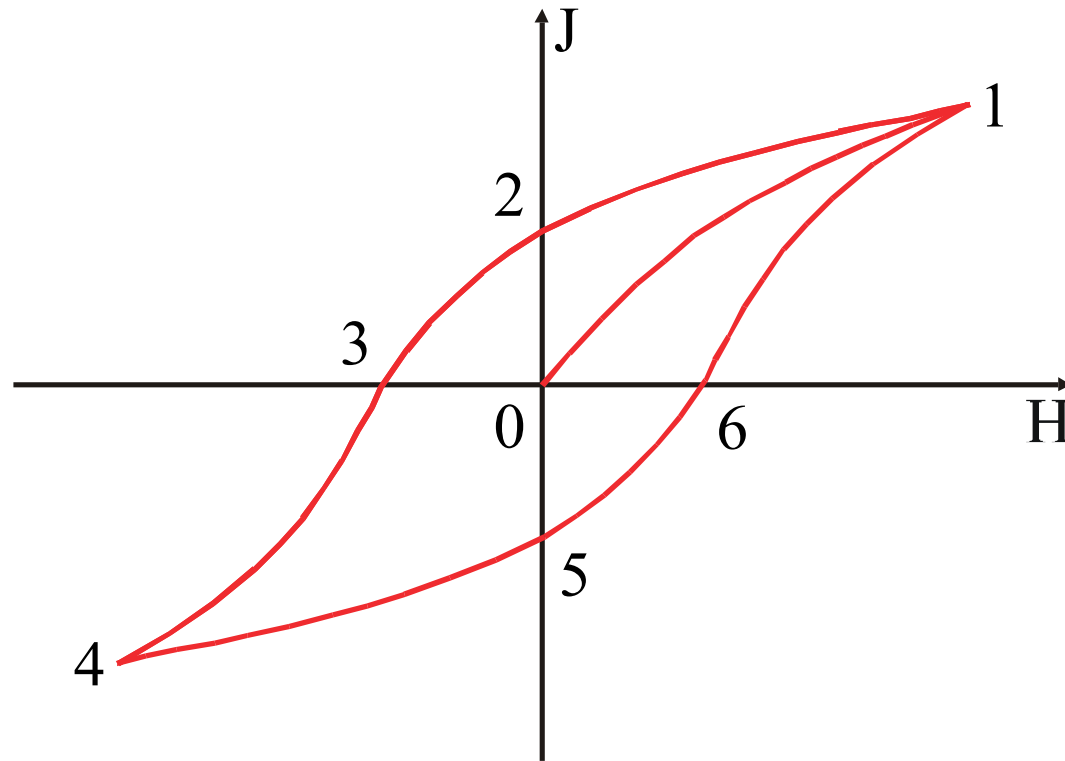
- Histereza magnetyczna 85
- Pętla histerezy magnetycznej 86
- Nasycenie magnetyczne 88
- Pozostałość magnetyczna 89
- Koercja 90
- Ferromagnetyki twarde 91
- Ferromagnetyki miękkie 92

• Histeresa magnetyczna \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że danej wartości natężenia (H) pola magnesującego mogą odpowiadać różne wartości namagnesowania (J) ferromagnetyka zależnie od wcześniejszej wartości namagnesowania. Ferromagnetyki mają “pamięć”.

H Histerezę odkrył Ewing w 1890.

B Sir James Alfred Ewing (1855-1935), szkocki fizyk i inżynier.

- Pętla histerezy magnetycznej \Leftrightarrow wykres zależności wartości namagnesowania (J) od wartości natężenia (H) pola magnesującego. Pole powierzchni pętli histerezy jest proporcjonalne do ciepła wydzielonego w ferromagnetyku podczas jednego obiegu (1 – 2 – 3 – 4 – 5 – 6 – 1).
- Ze względu na kształt pętli histerezy ferromagnetyki dzielą się na miękkie i twarde.



- Pętla histerezy magnetycznej: wykres zależności wartości namagnesowania (J) od wartości natężenia (H) zewnętrznego pola magnetycznego

-
- Nasycenie magnetyczne \Leftrightarrow maksymalna wartość namagnesowania osiągnięta przez dany ferromagnetyk w zewnętrznym polu magnetycznym.

- Pozostałość magnetyczna \Leftrightarrow wartość namagnesowania uzyskiwana przez ferromagnetyk (znajdujący się pierwotnie w stanie nasycenia magnetycznego) po zredukowaniu do zera natężenia zewnętrznego pola magnetycznego.

-
- Koercja \Leftrightarrow wartość natężenia zewnętrznego pola magnetycznego powodującego zmniejszenie do zera pozostałości magnetycznej w danym ferromagnetyku. Ferromagnetyki o dużej koercji nazywane są ferromagnetykami twardymi, a o małej koercji – miękkimi.

-
- Ferromagnetyki twarde \Leftrightarrow ferromagnetyki, które mają:
 - szeroką pętlę histerezy magnetycznej,
 - duże pole pętli histerezy magnetycznej,
 - dużą koercję (są trwałymi magnesami),
 - małą pozostałość magnetyczną (są słabymi magnesami).

-
- Ferromagnetyki miękkie \Leftrightarrow ferromagnetyki, które mają:
 - wysoką pętlę histerezy magnetycznej,
 - małe pole pętli histerezy magnetycznej,
 - małą koercję (są nietrwałymi magnesami),
 - dużą pozostałość magnetyczną (są silnymi magnesami).

Wykłady z Fizyki 07



Zbigniew Osiak

Magnetyzm