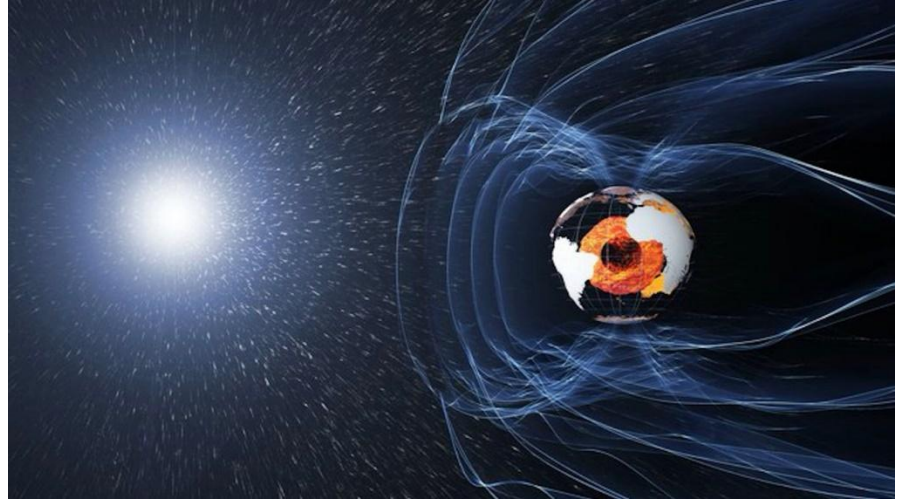
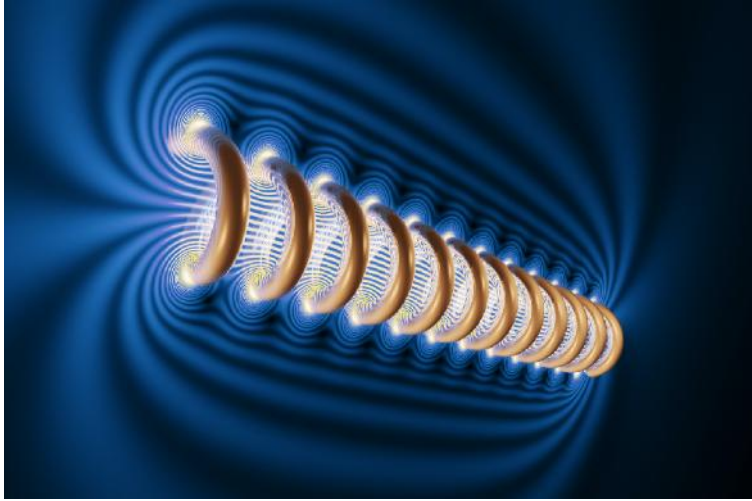
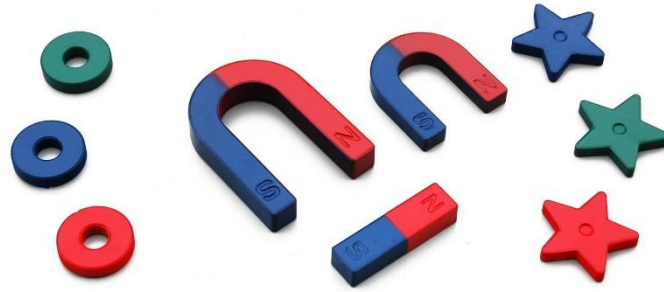




Temat: Pole magnetyczne.

dr Krzysztof Rochowicz, UMK Toruń 2025

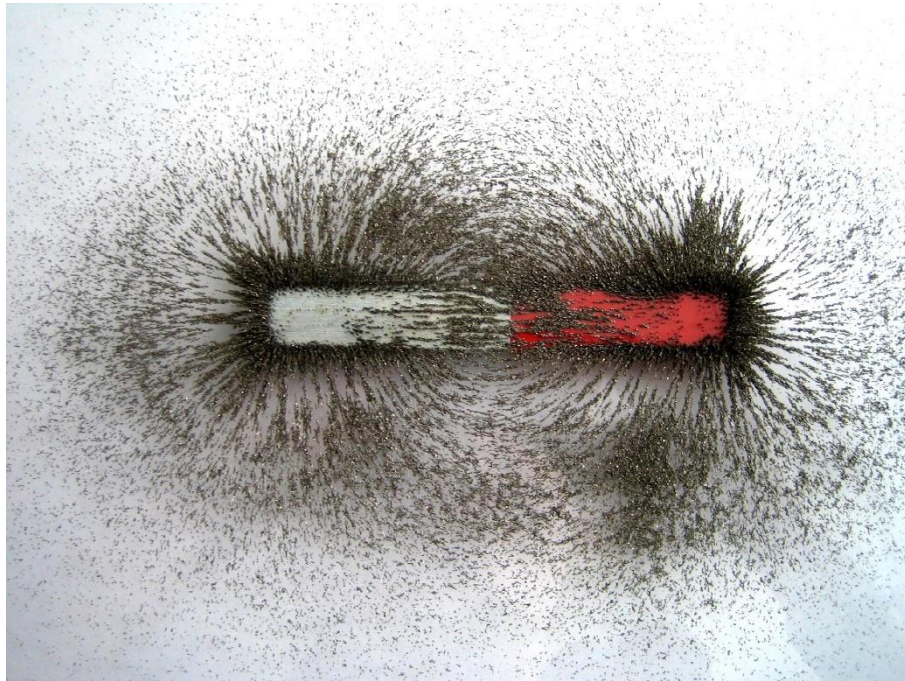
Magnesy - oddziaływanie



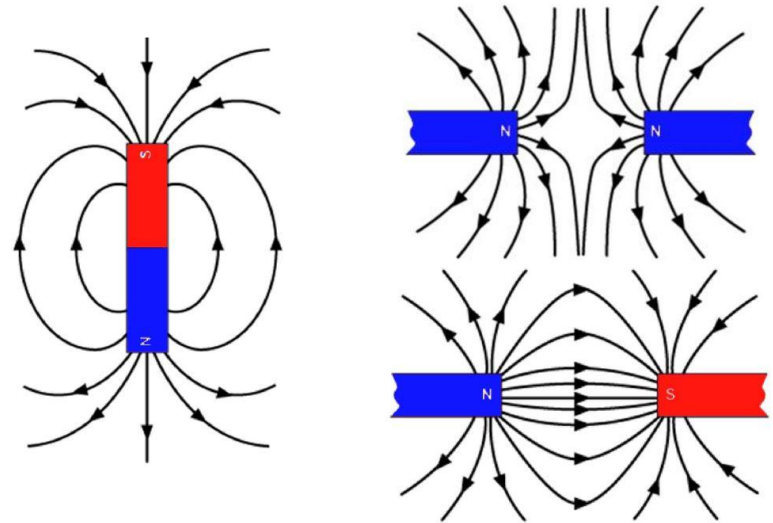
- magnetyt



Pole magnetyczne



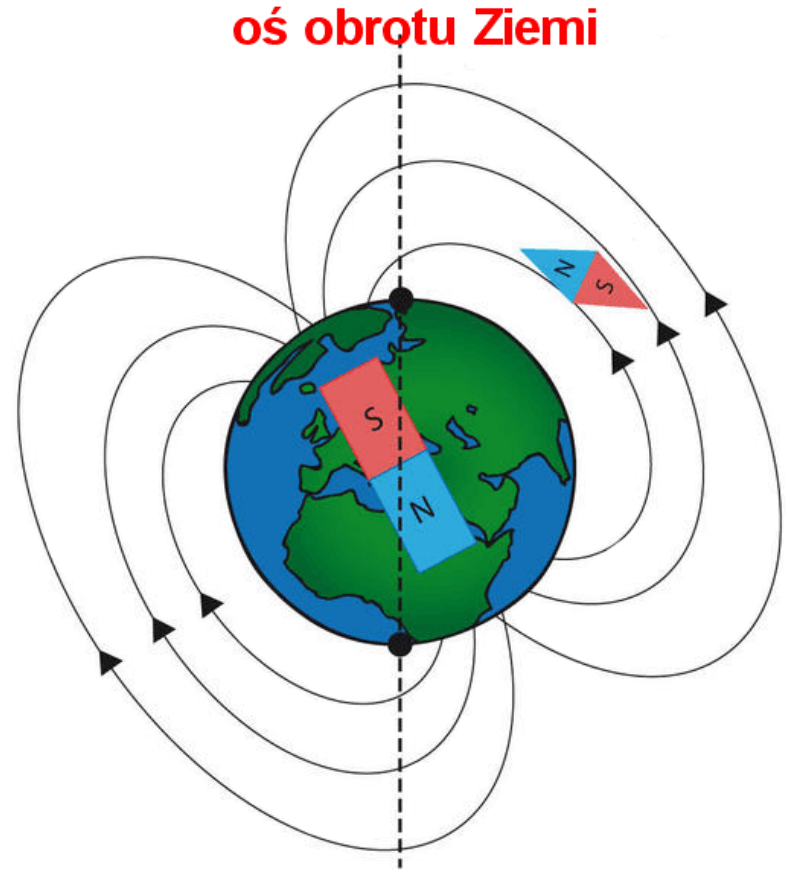
linie pola magnetycznego



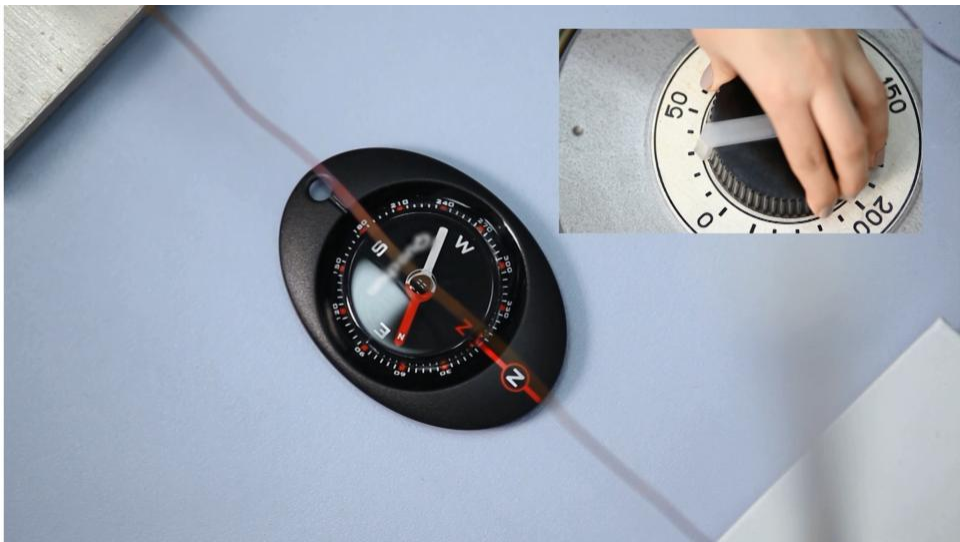
- różnoimienne bieguny magnetyczne przyciągają się
- jednoimienne bieguny magnetyczne się odpychają

Doświadczenie i animacja

Kompas i pole magnetyczne Ziemi

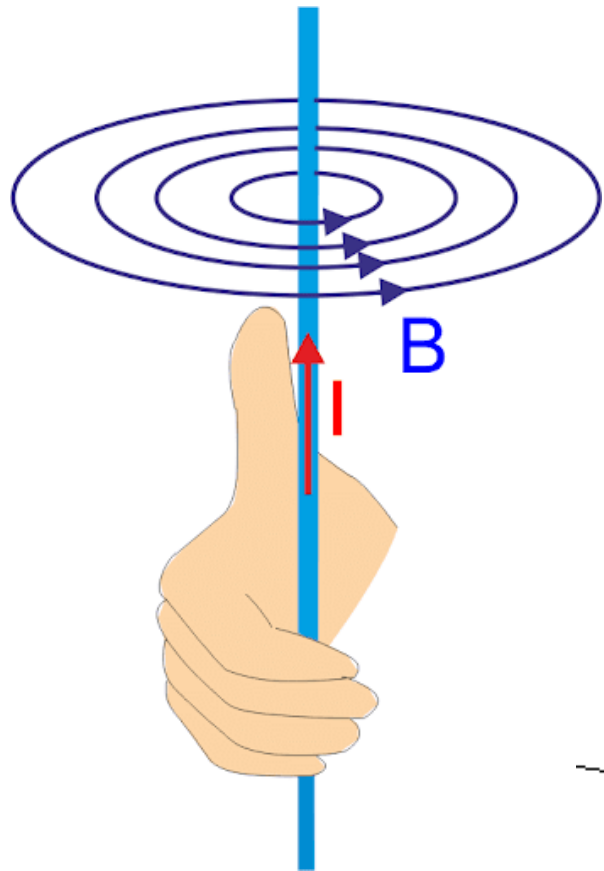


Doświadczenie Oersted'a (1820)

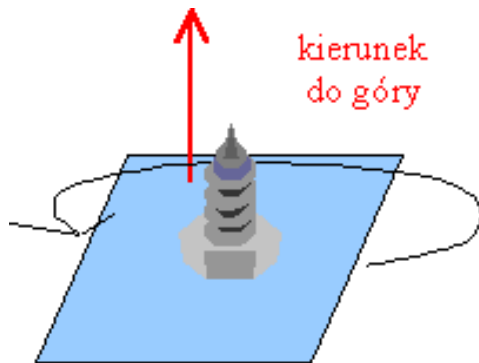


Prąd w przewodniku oddziałuje na igłę magnetyczną

Reguła prawej dłoni (śruby prawoskrętnej)

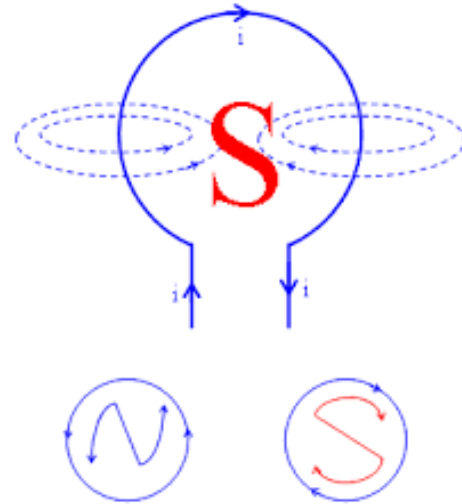
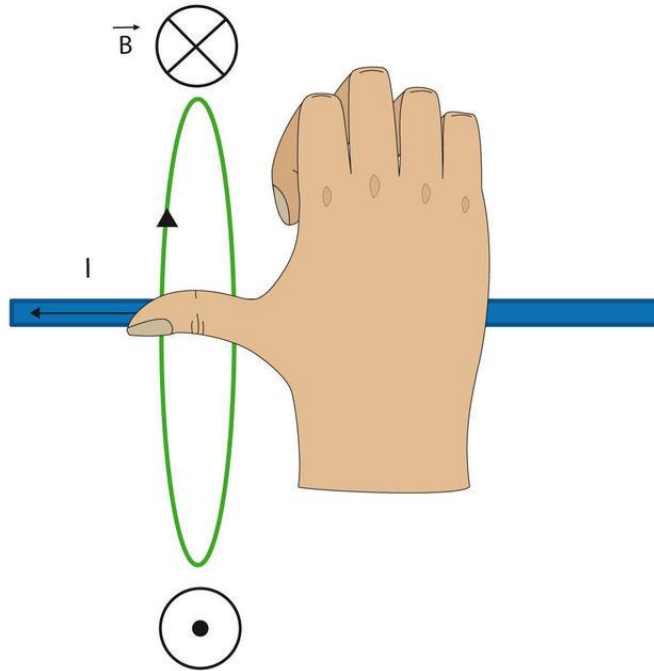


- I – natężenie prądu
- B – indukcja magnetyczna

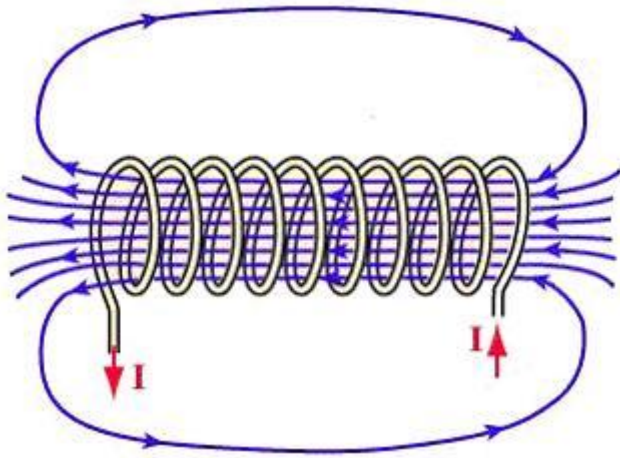


[animacja](#)

Jeszcze o kierunkach prądu i pola...

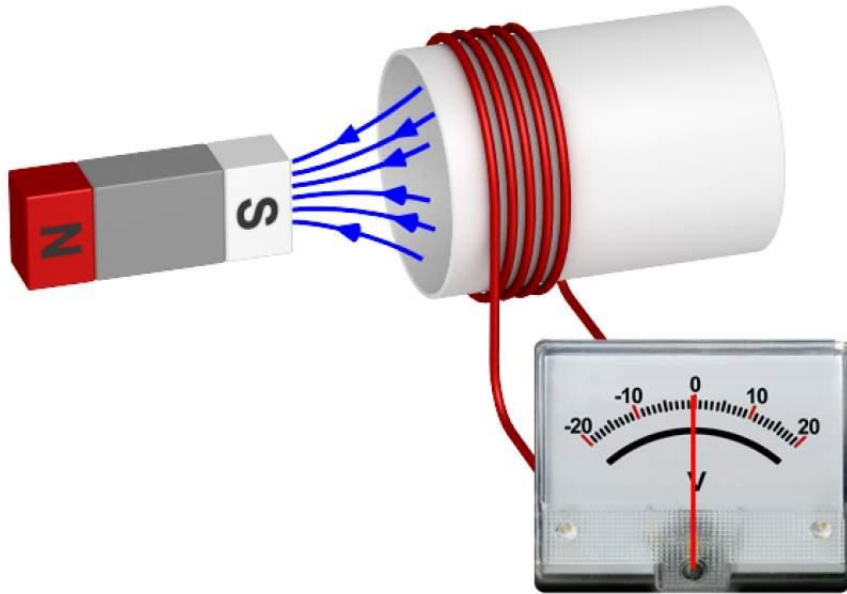


Zwojnica (cewka, solenoid)



Do tej pory omawialiśmy
różne przykłady pola
magnetycznego
powstającego wokół
przewodnika z prądem.
Ale czy magnes może
wytworzyć prąd?

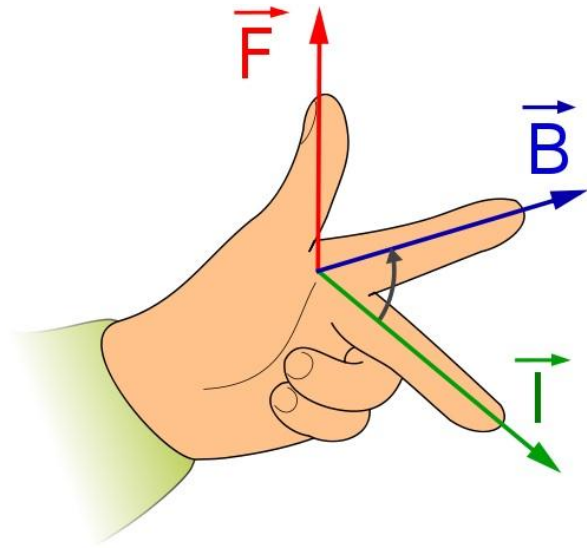
Zjawisko indukcji magnetycznej



Faraday (1831): stałe pole magnetyczne to za mało, potrzebna jest zmiana strumienia magnetycznego.

Doświadczenie i [symulacja](#)

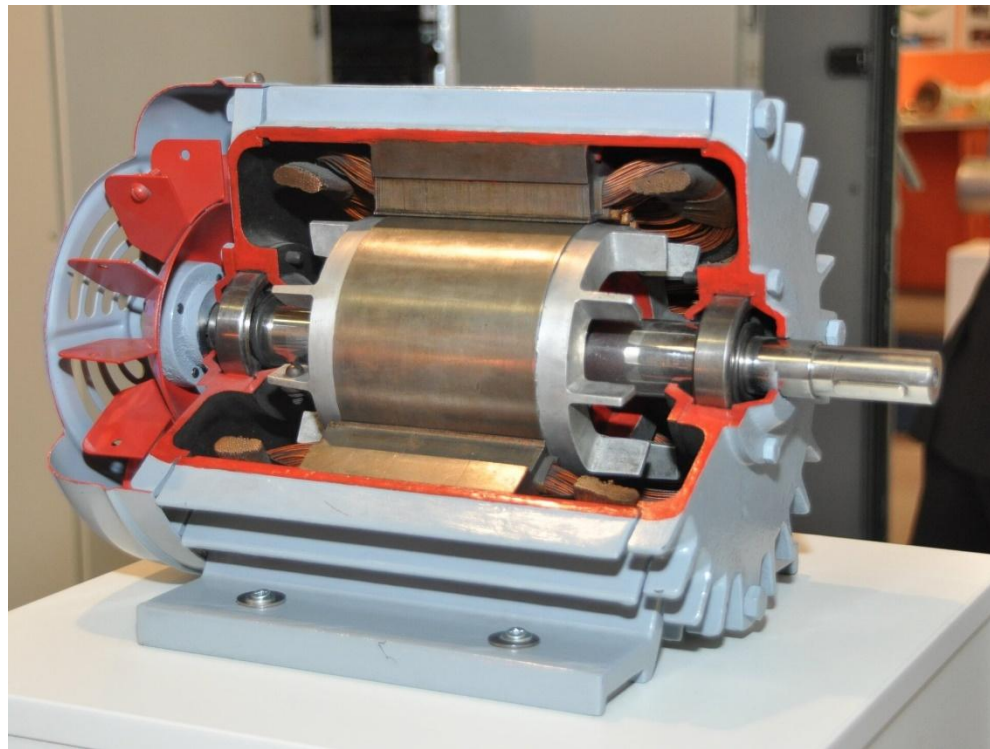
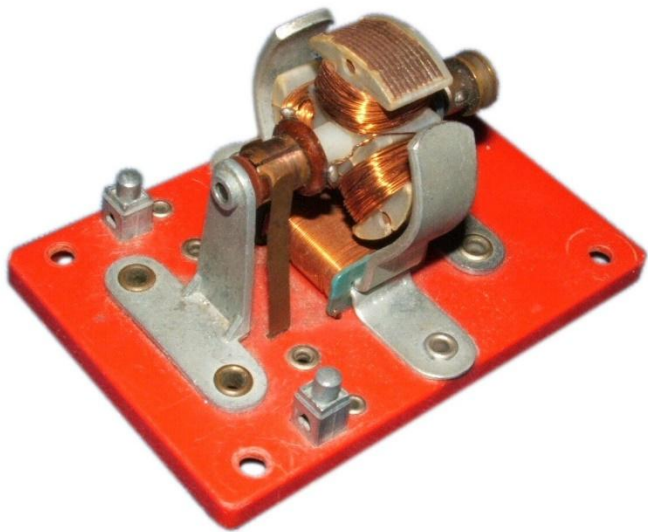
Siła elektrodynamiczna



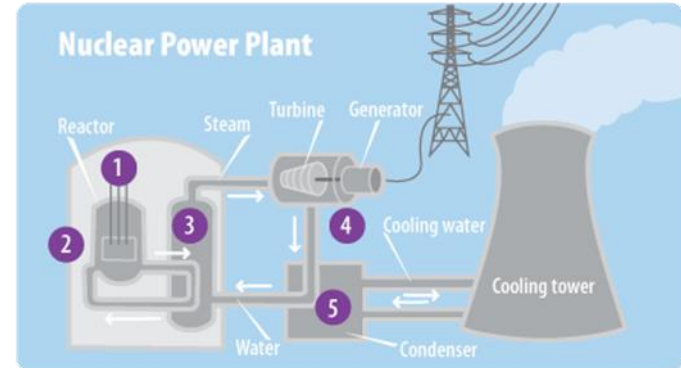
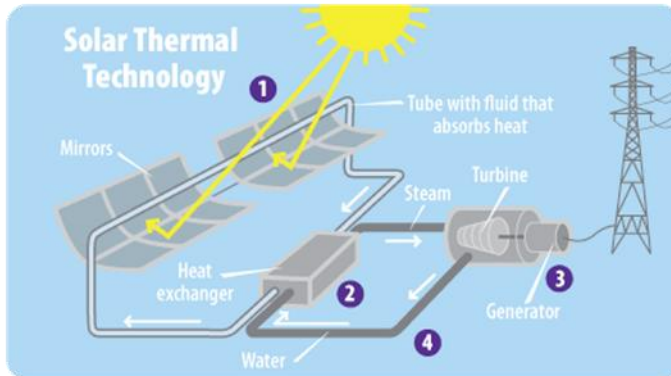
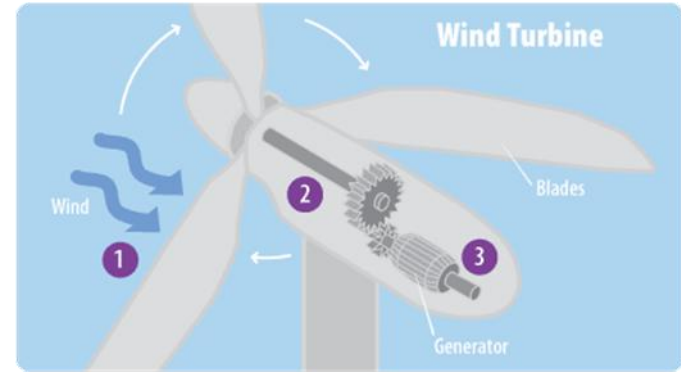
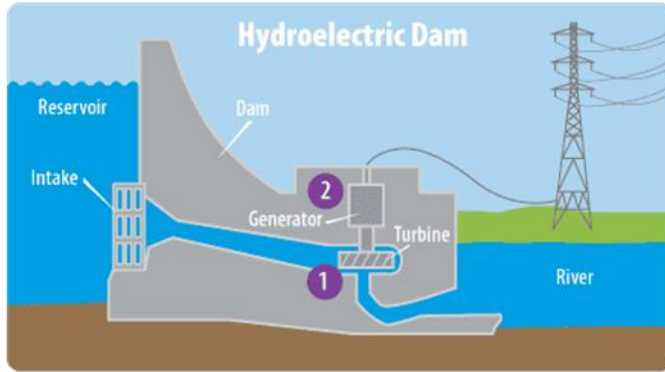
- Działa na przewodnik z prądem umieszczony w polu magnetycznym

symulacja

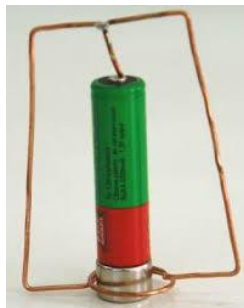
Silnik prądu stałego



Prądnica (turbina)



Inne ciekawe zjawiska magnetyczne



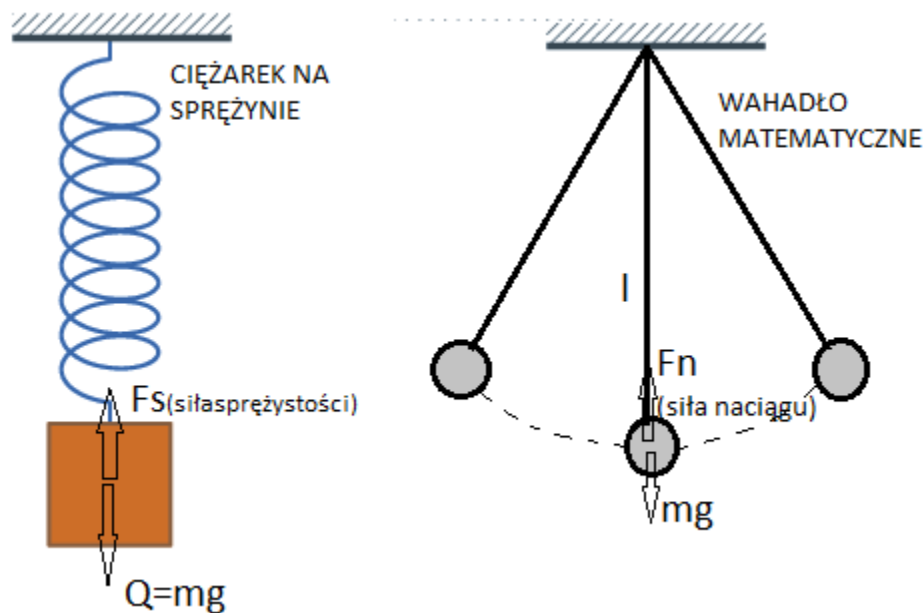
- lewitacja
- [spadanie magnesu](#)
- magnes na równi
- prosty silniczek
- prosty (i większy) elektromagnes
- działo - wyrzutnia



Temat: Drgania i fale.

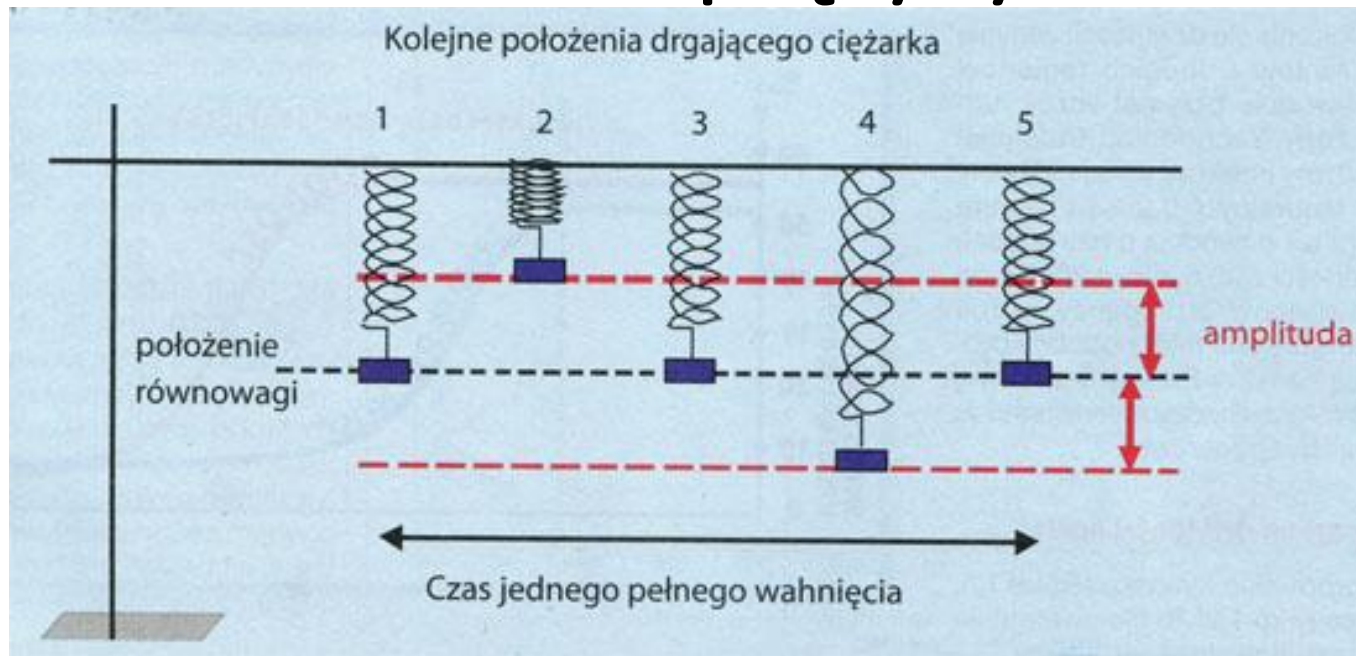
UMK Toruń 2025

Ruch drgający (harmoniczny)



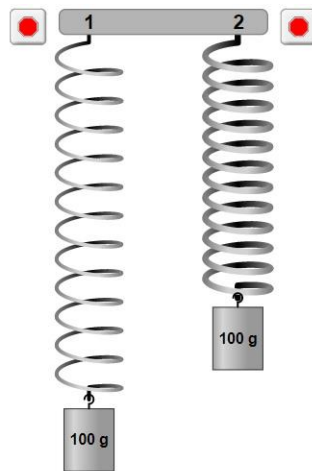
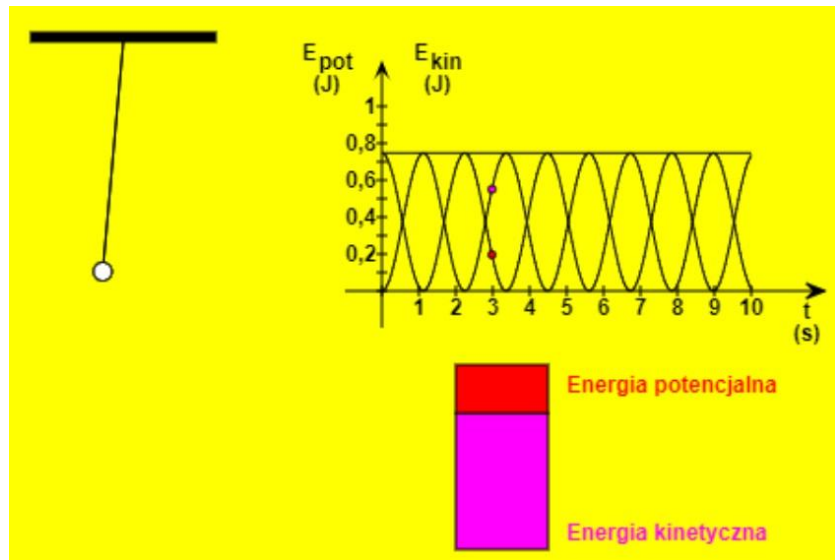
Wahadło – na lekcji
„Jak zważyć Ziemię?”

Od czego zależy okres drgań sprężyny?



różne sprężyny,
różne masy

Przemiany energii w ruchu drgającym



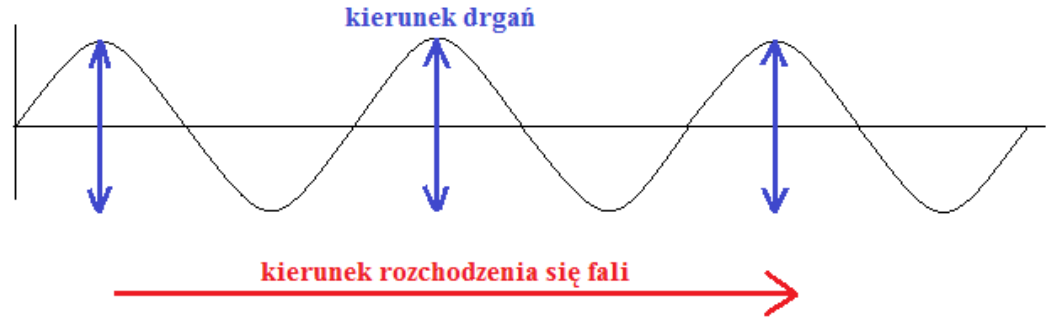
Symulacje:

- [Wahadło \(wersja PhET\)](#)
- [Ciężarek na sprężynie \(wersja PhET\)](#)

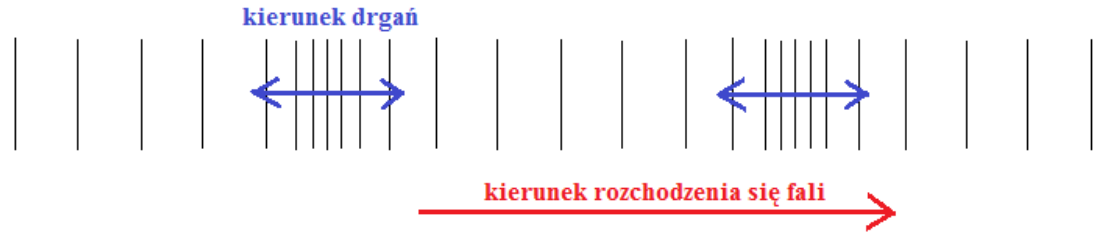
młotek i kulka

Fale mechaniczne - podział

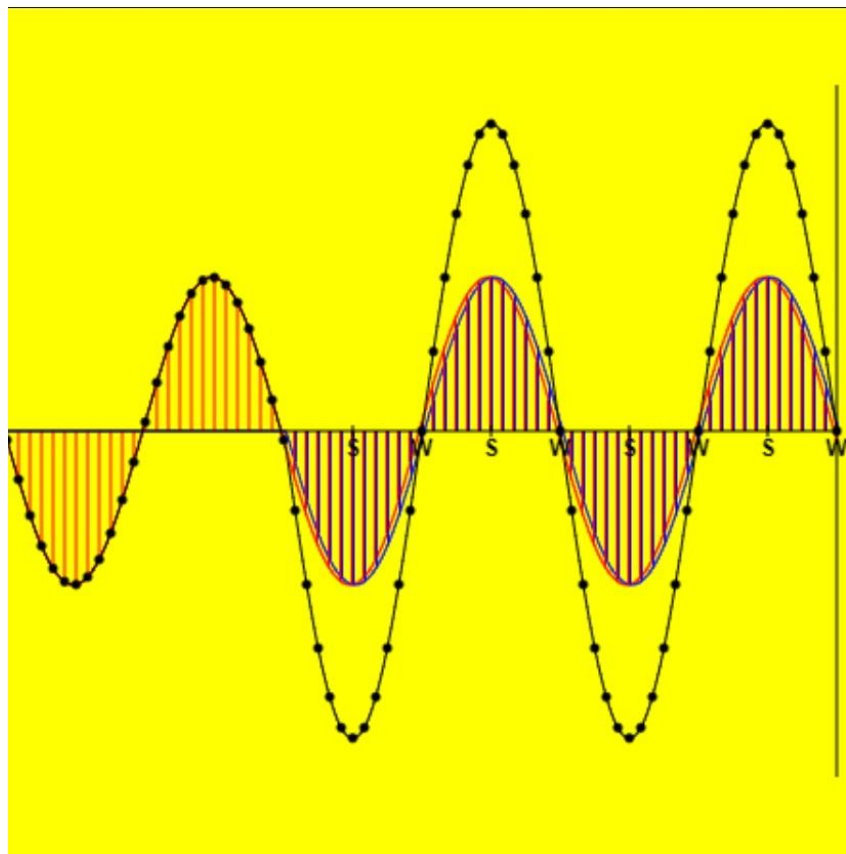
- poprzeczne



- podłużne



model fali i slinky



Odbicie

☐ koniec zamocowany

☐ koniec swobodny

Przywróć

Wznów

☐ Spowolnij

☒ Animacja

☐ Pojedyncze kroki

T/4

☒ Fala padająca

☒ Fala odbita

☒ Wypadkowa fala stojąca

W. Fendt 2003

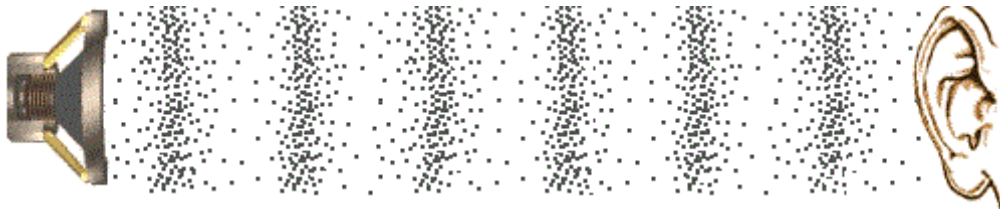
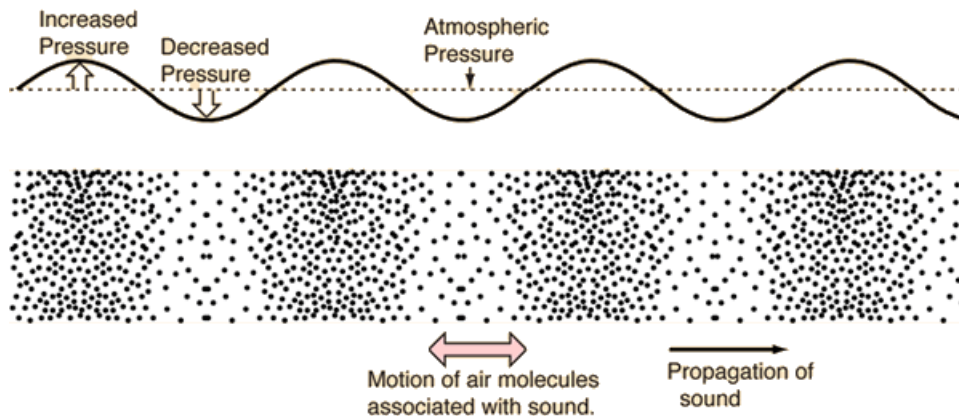
ZamKor 2006

Fala stojąca

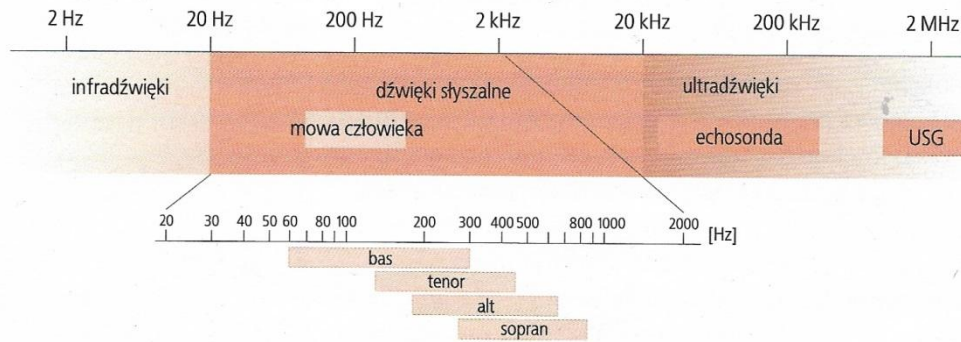
(poprzednia lekcja)

- [symulacja](#)

Dźwięk jako fala podłużna



- Długość fali: λ
- Okres: T
- Częstotliwość
 $f = 1/T$ [Hz – herc]
- Prędkość:
 $v = \lambda/T = \lambda \cdot f$



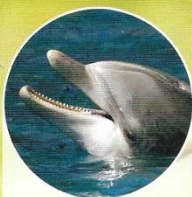
Od infradźwięków do ultradźwięków

Słyszalność dźwięków

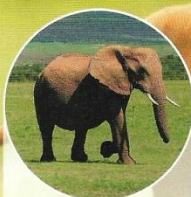
Wiele zwierząt słyszy dźwięk w zakresach częstotliwości innych niż dźwięki słyszalne dla człowieka.



Większość nietoperzy do echolokacji używa dźwięków w zakresie 20 kHz – 80 kHz, ale zdarzają się gatunki wykorzystujące częstotliwości powyżej 200 kHz.



Delfiny wydają dźwięki o częstotliwości od 500 Hz do około 200 kHz. Są one bardzo zróżnicowane i złożone. Podejrzewa się, że tworzą język.



Slonie porozumiewają się za pomocą infradźwięków (czyli drgań o częstotliwości niższej niż 16 Hz).



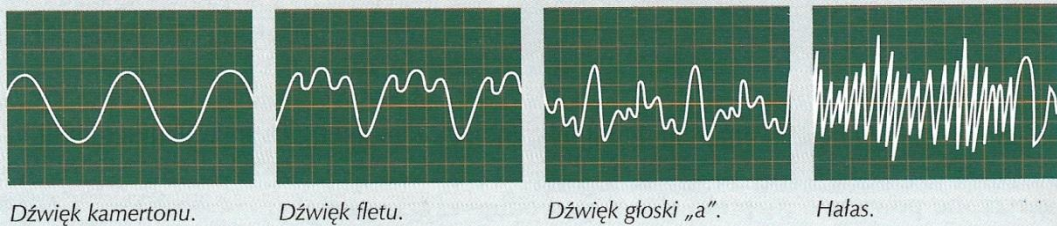
Psy – słyszą dźwięk przeciętnie do około 50 kHz.



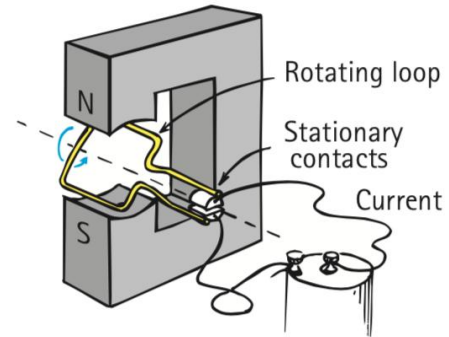
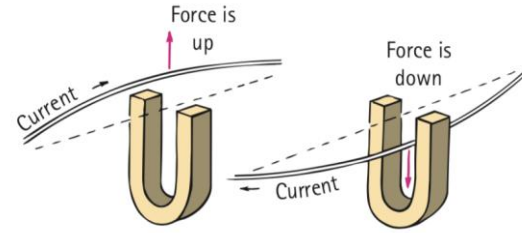
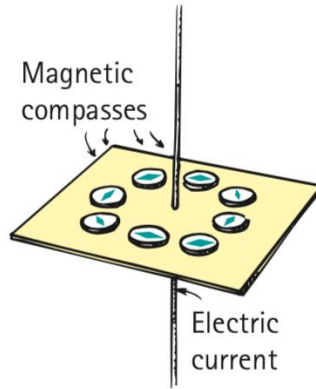
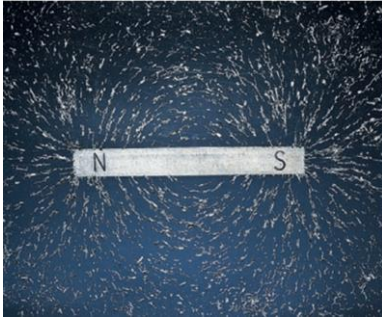
Kamertony



- pudło rezonansowe
- „czysty” dźwięk (aplikacje, np. phyphox)
- dudnienie ([symulacja](#))



Magnetyzm



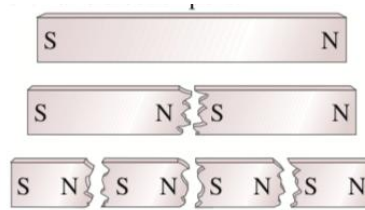
Krótką historia magnetyzmu

- Określenie magnetyzm pochodzi od nazwy *Magnezja* — jednostki regionalnej w Tesalii, w Grecji, gdzie kamienie (skały) magnetyczne (magnetyty, Fe_3O_4) występują bardzo powszechnie. Zjawisko przyciągania kawałków żelaza, przez te kamienie znane było już od starożytności.

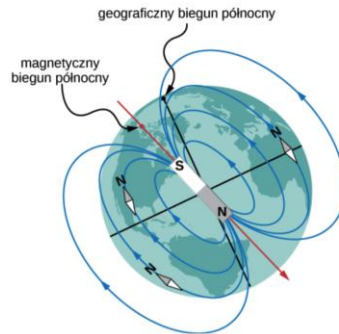


Krótką historia magnetyzmu

- Kolejne eksperymenty (XVII i XVIII w.) potwierdziły, że, **bieguny magnesu zawsze występują w parach (tworzą dipole)** - **monopole magnetyczne nie istnieją**. Co prawda prawa fizyki, nie zabraniają istnienia monopoli magnetycznych, ale do tej pory nikomu nie udało się ich znaleźć.



- W 1600 roku Anglik Wiliam Gilbert przeprowadził serię eksperymentów, które pokazały, że Ziemia jest wielkim magnesem, który zmusza kompasy do ustawiania się w kierunku północ – południe. Wyniki swoich prac opublikował w dziele *De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure* („O Magnesach i ciałach magnetycznych, oraz o wielkim magnecie Ziemi”)

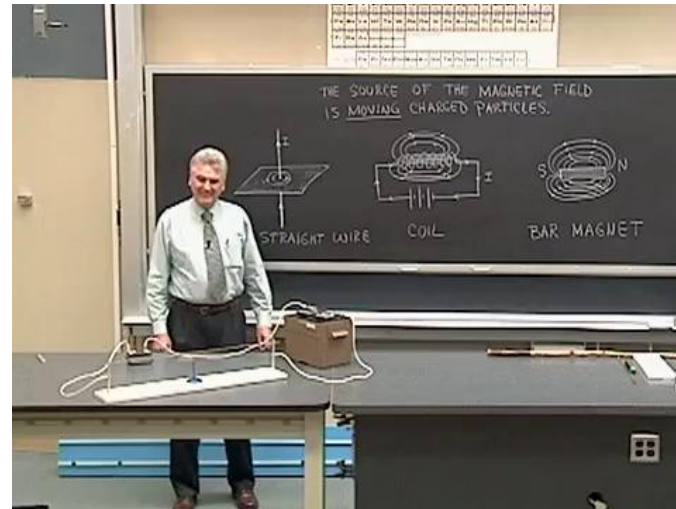
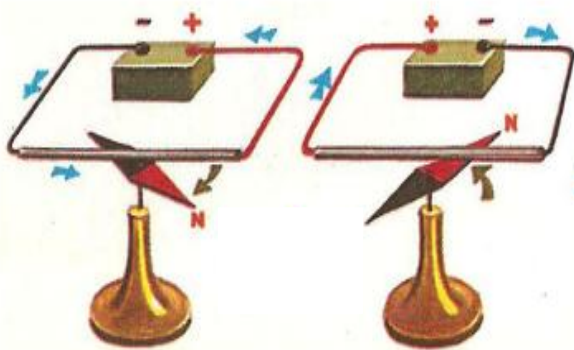


Symulacja pola
magnetycznego Ziemi:

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/magnet-and-compass>

Krótką historia magnetyzmu

- W 1819 roku Duńczyk Hans Christian Oersted odkrył, że prąd elektryczny w przewodzie odchyła igłę magnetyczną ustawioną w pobliżu. Był to pierwszy eksperyment wykazujący związek pomiędzy elektrycznością i magnetyzmem.



Płynący w drucie prąd elektryczny wytwarza pole magnetyczne, które oddziałuje z igłą kompasu.

Krótką historia magnetyzmu

- Kolejne przełomowe odkrycia przyniosły badania Michaela Farady'a oraz Josepha Henry'ego, którzy niezależnie odkryli, że zmienne pole magnetyczne może wywołać przepływ prądu (zjawisko indukcji elektromagnetycznej).
- Wymienione eksperymenty, pokazujące związek pola magnetycznego i elektrycznego, zostały matematycznie podsumowane przez szkockiego fizyka James'a Maxwella, który sformułował cztery równania leżące u podstaw całej „klasycznej” teorii pola elektromagnetycznego.

$$\oint_{\text{zamknięta powierzchnia}} \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\text{wew}}}{\epsilon_0 \epsilon_r}$$

$$\oint_{\text{zamknięta powierzchnia}} \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$$

$$\oint_{\text{po konturze zamkniętej}} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \int_{\text{powierzchnia otwarta}} \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

$$\oint_{\text{po konturze zamkniętej}} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \mu_r \left(I + \epsilon_0 \epsilon_r \frac{d}{dt} \int_{\text{powierzchnia otwarta}} \vec{E} \cdot d\vec{A} \right)$$

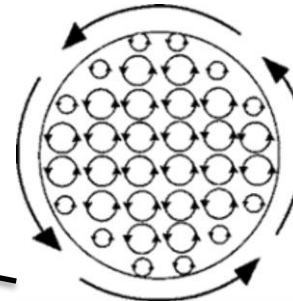
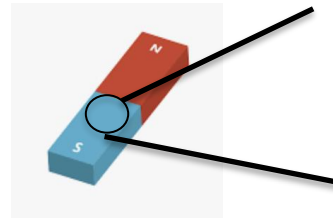


Źródła pola magnetycznego

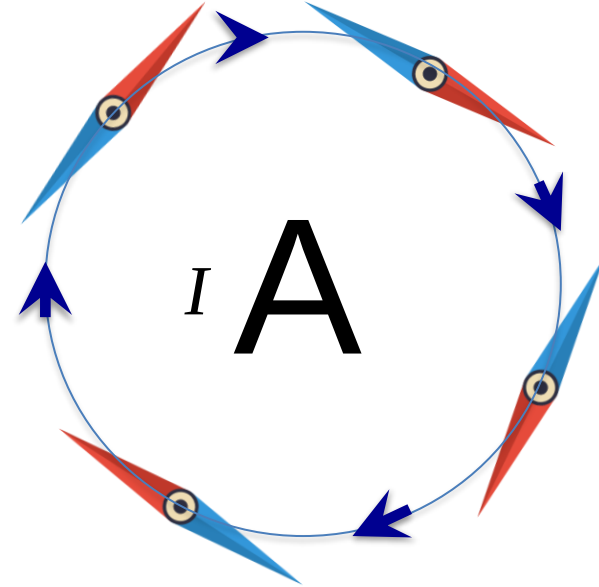
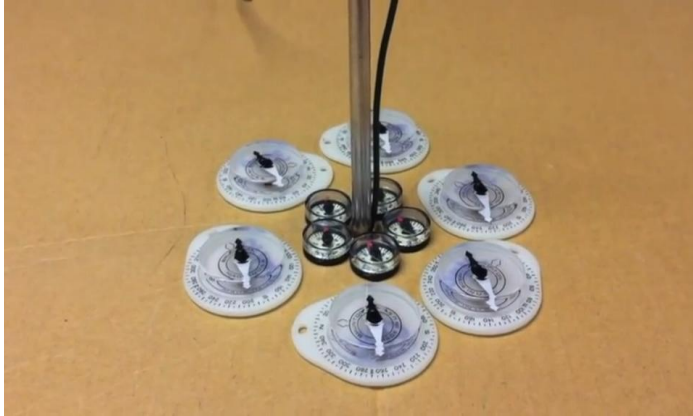
Źródłem pola magnetycznego są poruszające się ładunki elektryczne!



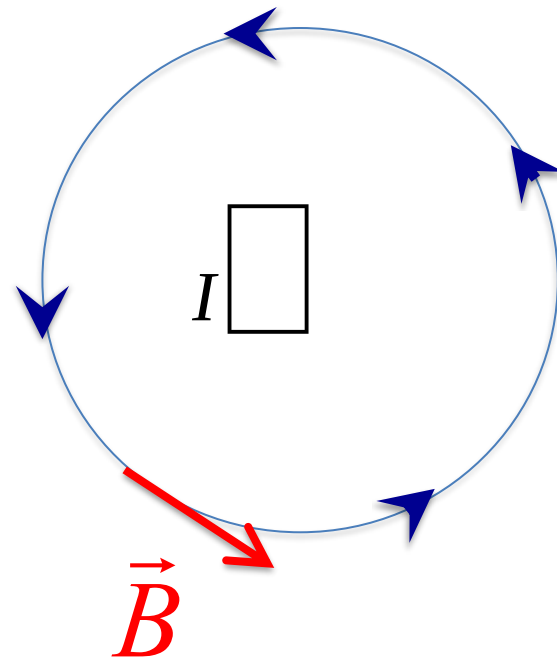
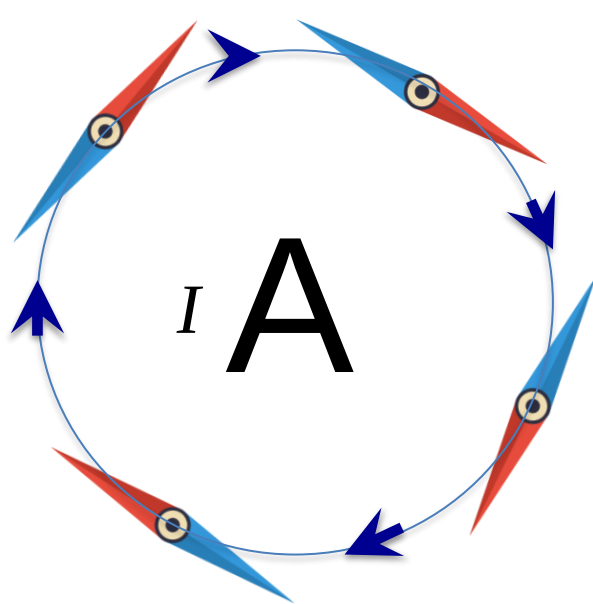
W skrócie: w magnesach trwałych źródłem pola magnetycznego są zsynchronizowane prądy elektronowe w strukturze materiału.



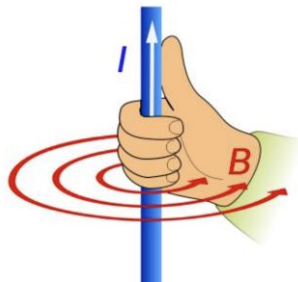
Pole magnetyczne wokół prostoliniowego przewodnika z prądem



Pole magnetyczne wokół prostoliniowego przewodnika z prądem



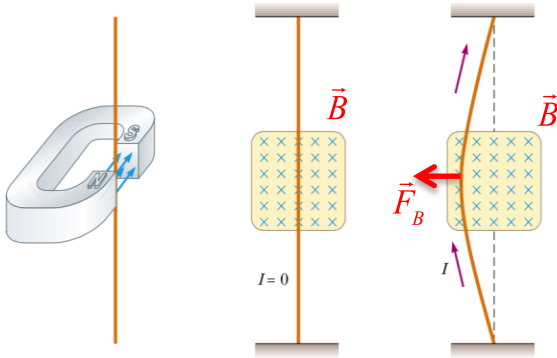
wektor indukcji magnetycznej



Siła magnetyczna działająca na przewodnik z prądem

Akcja = reakcji. Jeżeli przewodnik z prądem oddziałuje siłą na magnes stały, to magnes stały oddziałuje siłą na przewodnik z prądem.

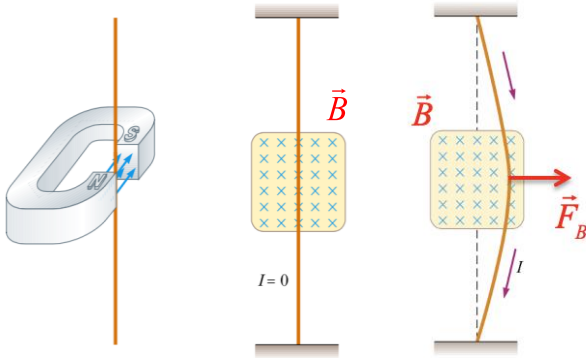
Eksperymentalnym faktem jest to, że siła jest prostopadła do kierunku prądu i pola magnetycznego: $\hat{F}_B = \hat{I} \times \hat{B}$ (wersory)



Siła magnetyczna działająca na przewodnik z prądem

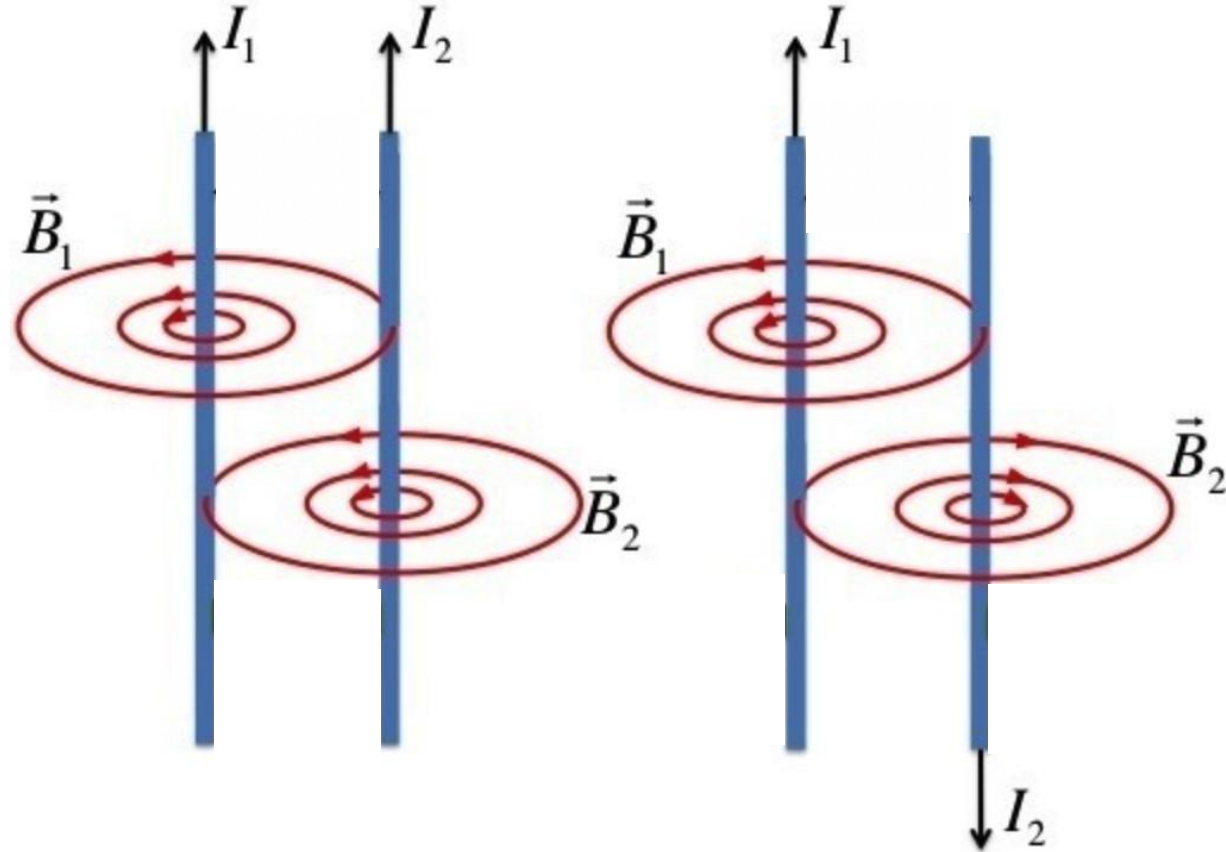
Akcja = reakcji. Jeżeli przewodnik z prądem oddziałuje siłą na magnes naturalny, to magnes naturalny oddziałuje siłą na przewodnik z prądem.

Eksperymentalnym faktem jest to, że siła jest prostopadła do kierunku prądu i pola magnetycznego: $\vec{F}_B = \hat{I} \times \hat{B}$ (wersory)

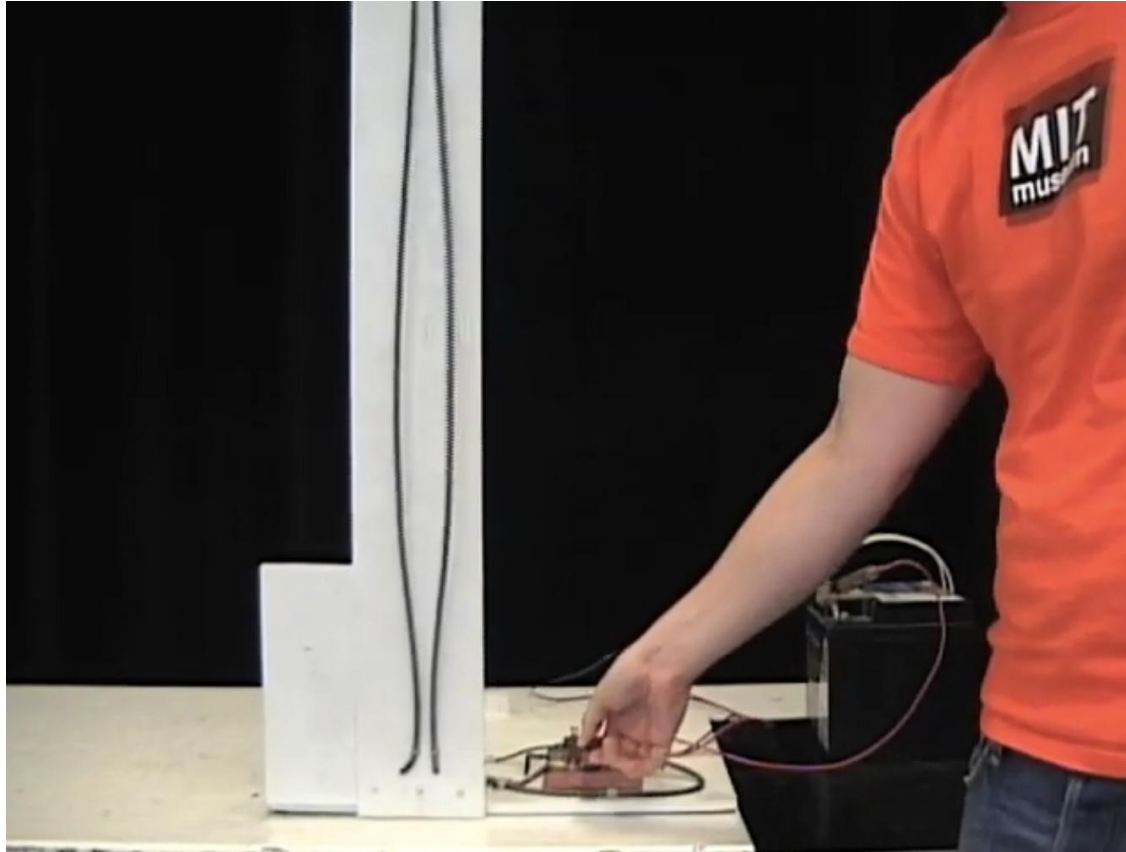


Magnetyczne oddziaływanie dwóch przewodników z prądem

$$\frac{\Delta}{\Delta} \vec{B} = \vec{I} \times \vec{B}$$



Magnetyczne oddziaływanie dwóch przewodników z prądem

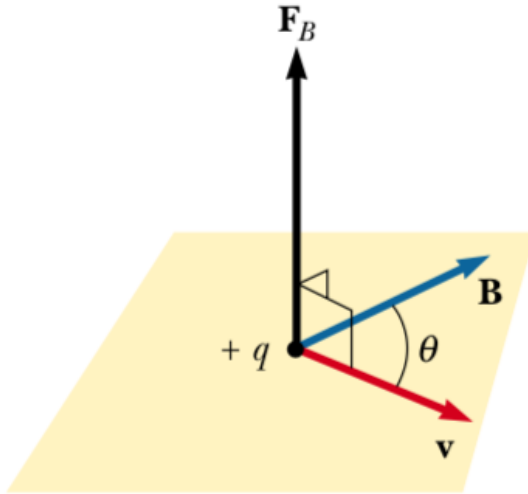


<https://www.youtube.com/watch?v=43AeuDvWc0k>

Siła magnetyczna działająca na ładunek punktowy

Siła Lorentza:

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



Jednostka indukcji magnetycznej:

$$\left[\frac{N \cdot s}{C \cdot m} \right] = [T] \quad \text{Tesla}$$

$$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T} \quad \text{Gauss}$$

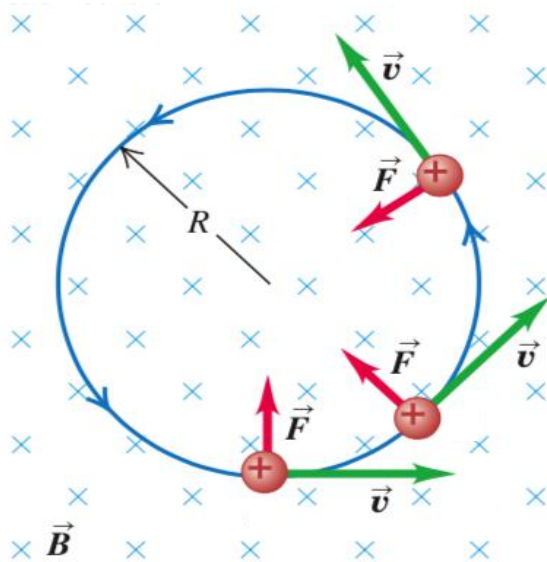
Pole magnetyczne Ziemi $\sim 0.5 \text{ G}$

Ruch ładunku punkowego w jednorodnym polu magnetycznym

Na ładunek punktowy q poruszający się w zewnętrznym polu magnetycznym działa siła (Lorentza):

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

Gdy prędkość jest prostopadła do pola $\vec{B}$, to ładunek porusza się po okręgu. $\ominus \leftarrow q_0^0$
 $\hat{x} \sim \theta \approx 1$



Siła Lorentza pełni rolę siły dośrodkowej:

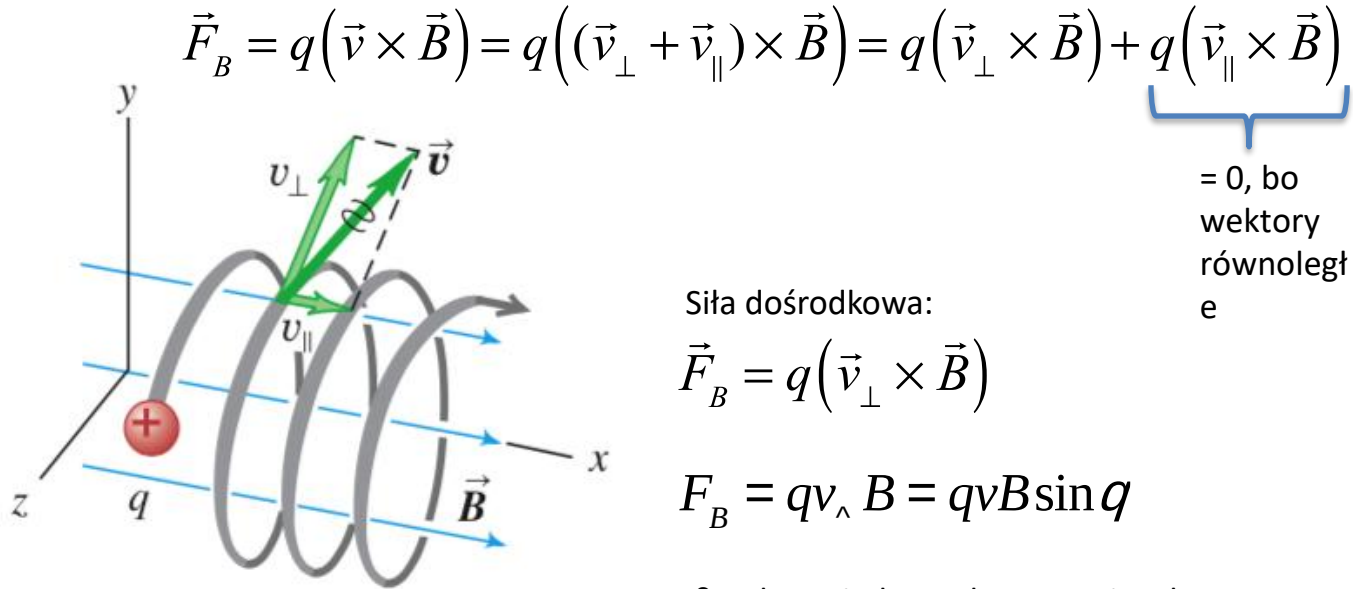
$$F_B = qvB = \frac{mv^2}{R}$$

Promień orbity:

$$R = \frac{mv}{qB}$$

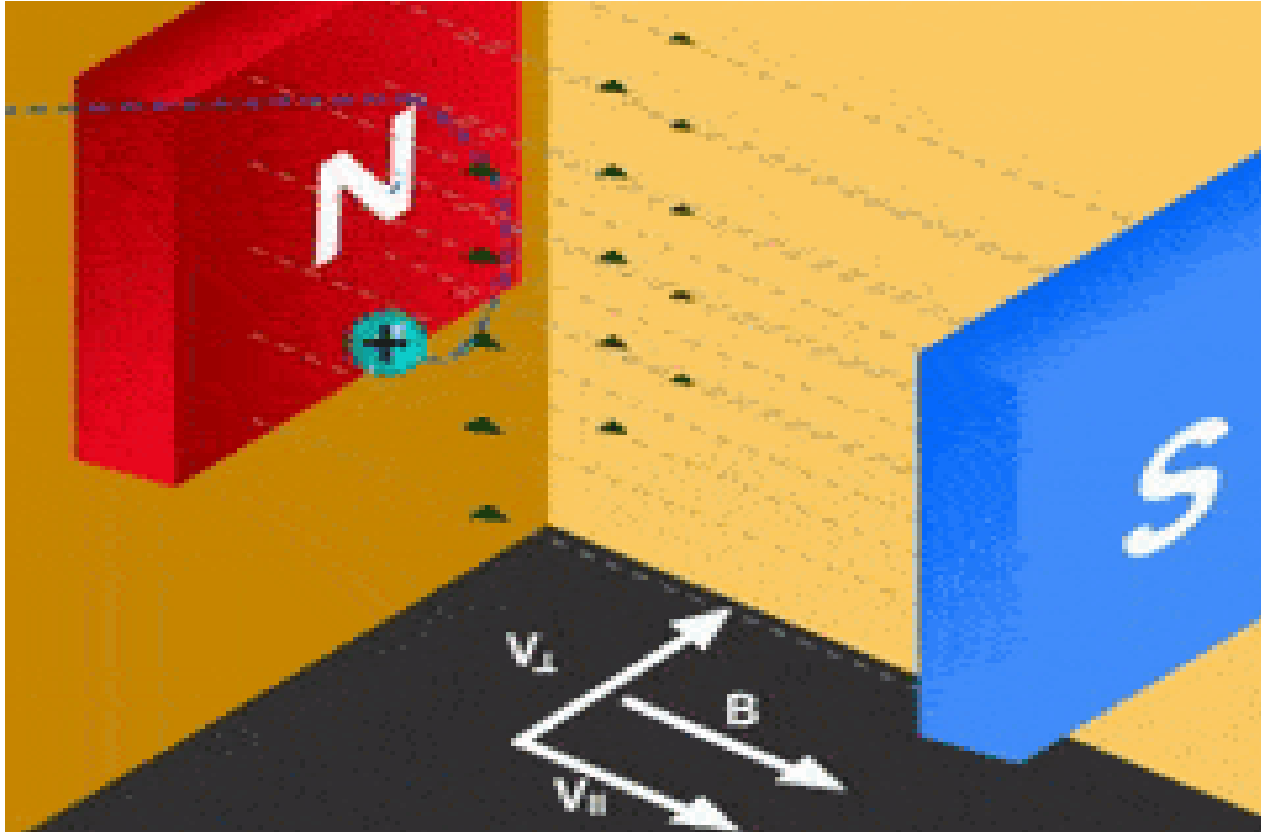
Ruch ładunku punkowego w jednorodnym polu magnetycznym

Gdy prędkość nie jest prostopadła do pola $\vec{B}$, to ładunek porusza się po linii śrubowej (helisa) wzdłuż kierunku pola magnetycznego:



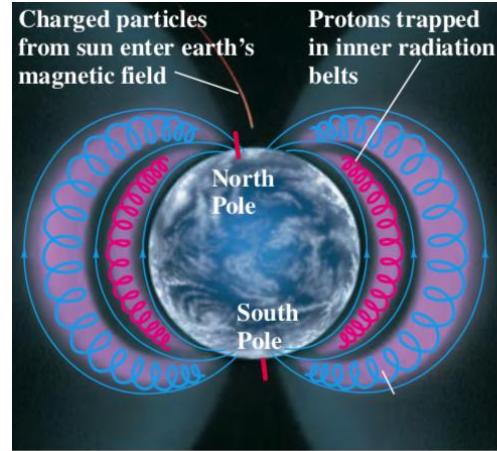
θ to kąt między wektorem $\vec{v}$ i wektorem $\vec{B}$

Ruch ładunku punkowego w jednorodnym polu magnetycznym

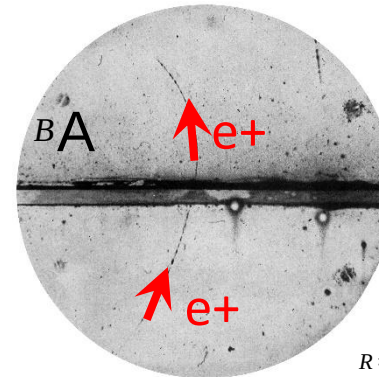
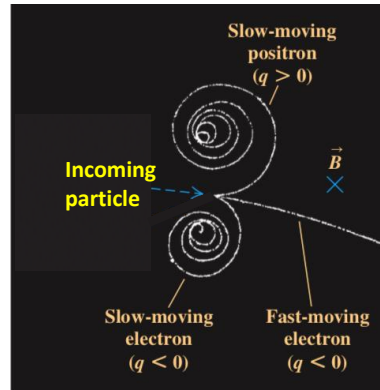


Ruch ładunku punktowego w polu magnetycznym - przykłady

Ruch cząstek
naładowanych w
wyższych partiach
atmosfery ziemskiej



Ruch cząstek
naładowanych w
komorze mgłowej
(Wilsona)



Oryginalne zdjęcie z komory mgłowej demonstrujące odkrycie pozytonu - antyelektronu (Anderson, 1932).

$$R = \frac{mv}{qB}$$

Wielki zderzacz cząstek naładowanych w Genewie

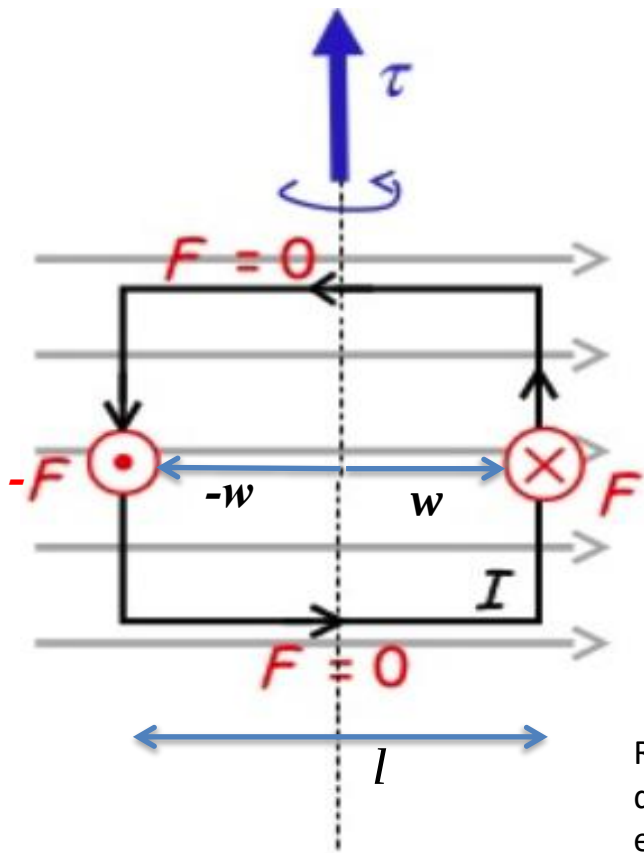


Długość obwodu 27 km, promień $R = 4.3$ km, cząstki rozpędzane do energii $\sim \text{TeV}$ (prędkości bliskie prędkości światła).

Aby zmusić cząstki o tak dużych energiach do ruchu w kolistym tunelu, trzeba zakrzywiać ich tory za pomocą pola magnetycznego wytwarzanego przez ponad 1200 potężnych elektromagnesów. Prąd płynący przez uzwojenia magnesów ma natężenie kilkunastu tysięcy amperów – jak w niewielkim wyładowaniu atmosferycznym.

Elektromagnesy w tunelu zbudowano z nadprzewodników, czyli materiałów, które w bardzo niskich temperaturach nie stawiają oporu elektrycznego. Wszystkie nadprzewodniki są schłodzone do temperatury zaledwie 1,9 stopnia powyżej zera bezwzględnego.

Ramka z prądem w jednorodnym polu magnetycznym



Siła wypadkowa = 0

Wypadkowy moment siły:

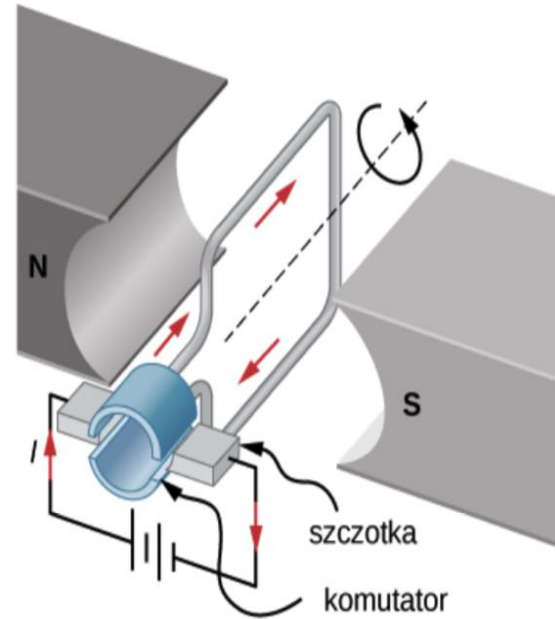
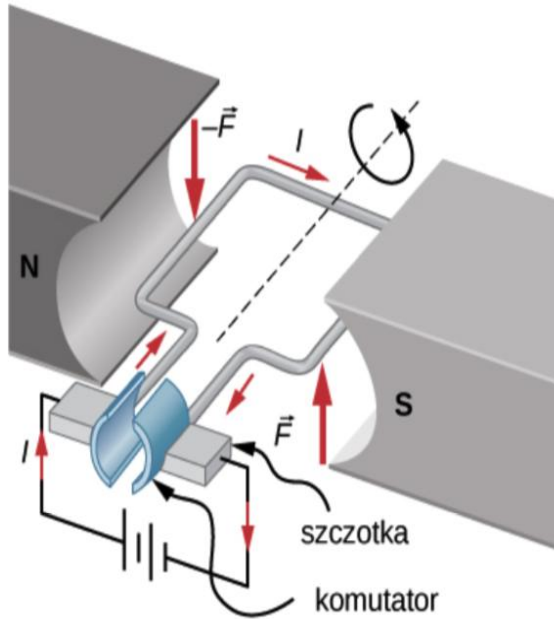
$$\vec{\tau} = \vec{w} \times \vec{F} + (-\vec{w}) \times (-\vec{F}) = 2\vec{w} \times \vec{F}$$

$$t = 2wF \sin \varphi = IBl^2 \sin \varphi \underset{\varphi=90^\circ}{=} IBl^2$$

θ to kąt między wektorem $\vec{w}$ i wektorem $\vec{F}$

Ramka obraca się – zjawisko to leży u podstaw działania mierników analogowych oraz silników elektrycznych.

Silnik elektryczny prądu stałego



Gdzie występuje? :

- suszarki dom włosów
- wentylatory (wiatraczki)
- wiertarki
- zabawki elektryczne
- telefony komórkowe (wibracje)
- zegary tarczowe

Silnik elektryczny prądu stałego



Silnik elektryczny prądu stałego

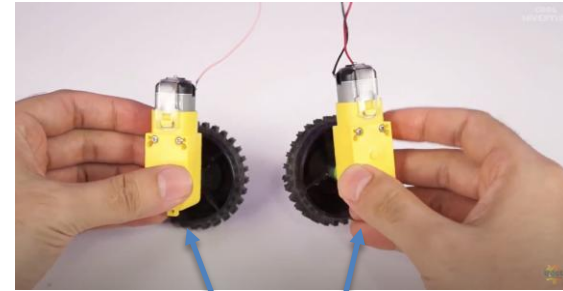
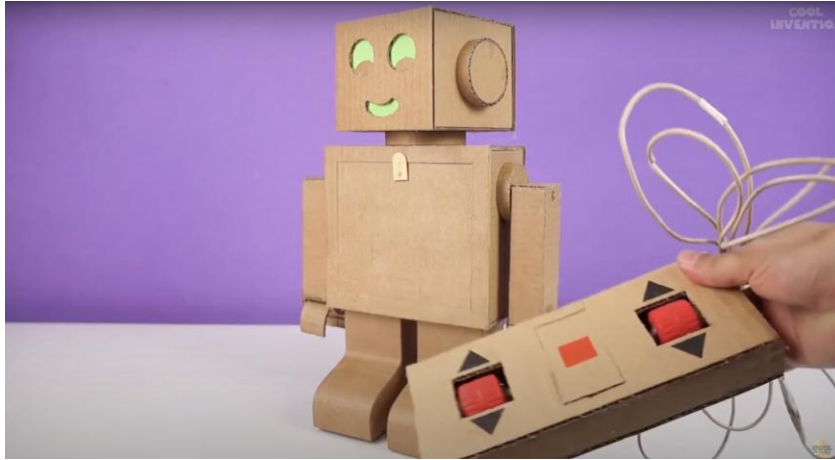


www.LearnEngineering.org

<https://www.youtube.com/watch?v=LAatPHANefQo>

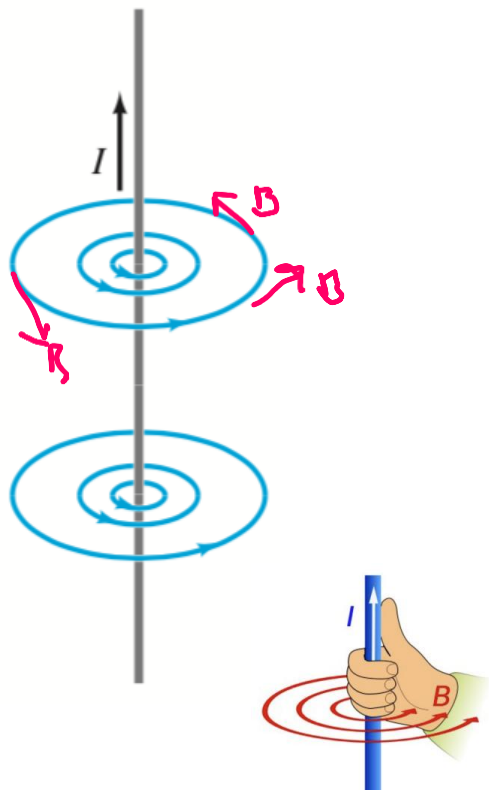
Jak zrobić robota z tektury sterowanego zdalnie

Centralnym elementem przedstawionego urządzenia jest silnik prądu stałego:



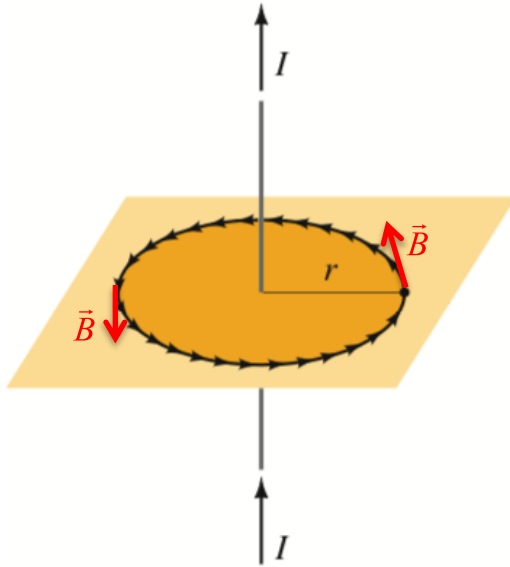
silniki DC

Pole magnetyczne prostoliniowego przewodnika



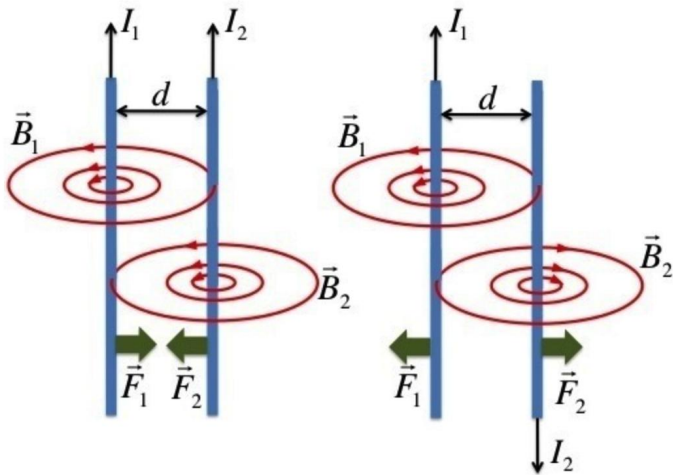
Źródła pola magnetycznego:

pole magnetyczne wytwarzane przez prostoliniowy przewodnik z prądem



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

Siła oddziaływania dwóch prostoliniowych przewodników z prądem o długości l



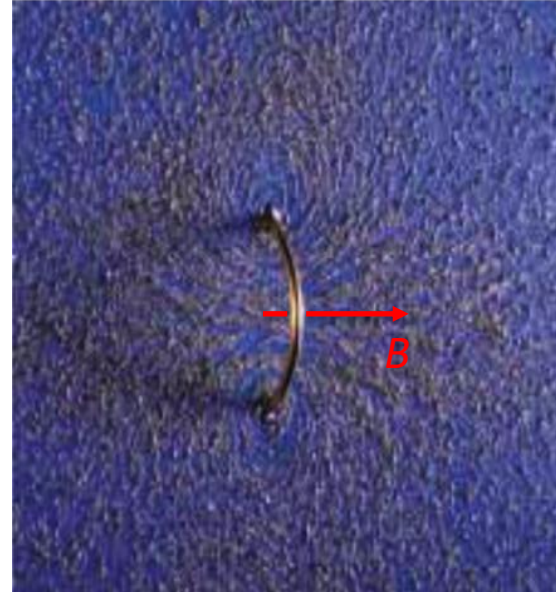
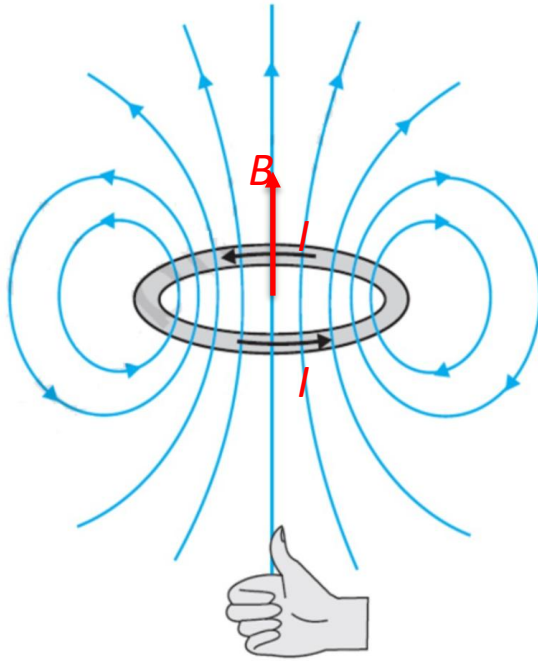
$$F_1 = I_1 B_2 l = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} l = F_2$$

Siła na jednostkę
długości:

$$\frac{F_1}{l} = \frac{F_2}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$

Źródła pola magnetycznego:

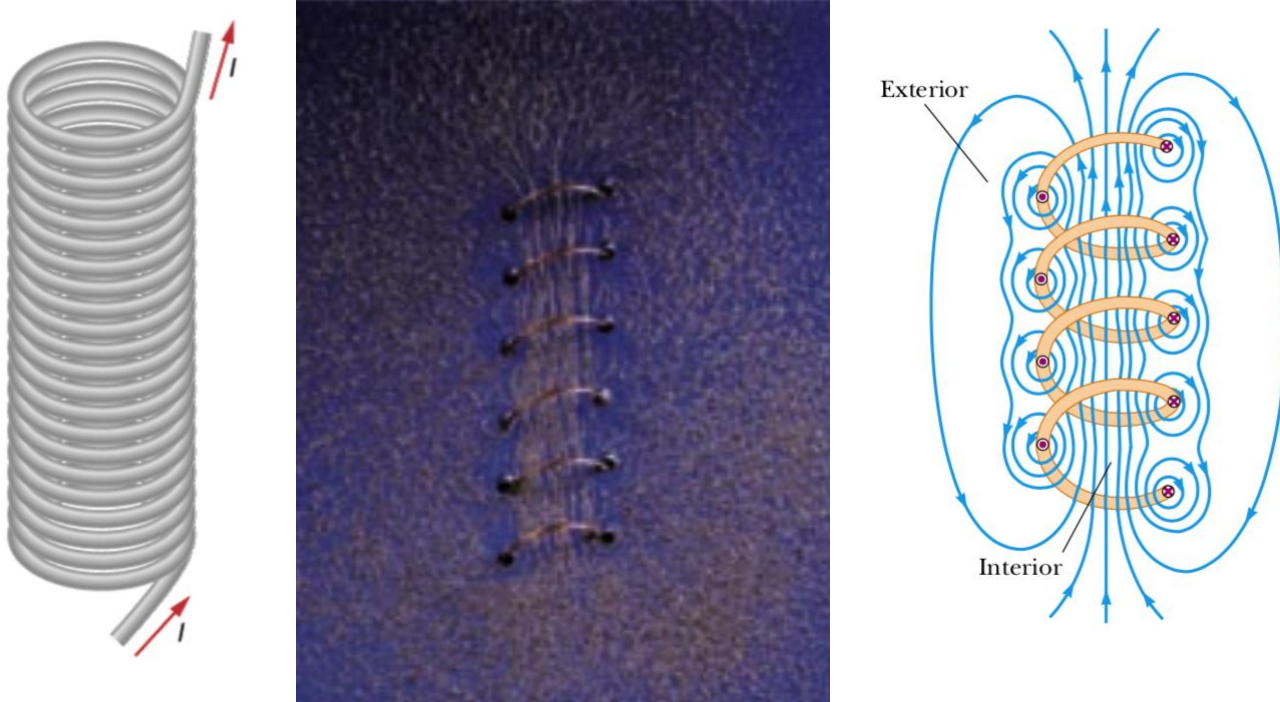
pole magnetyczne wytwarzane w środku pętli kołowej z prądem



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

Źródła pola magnetycznego:

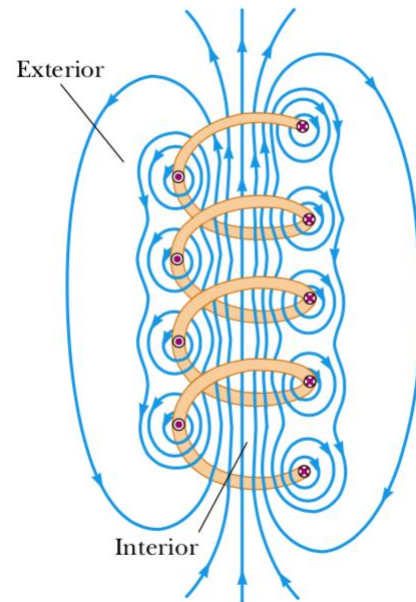
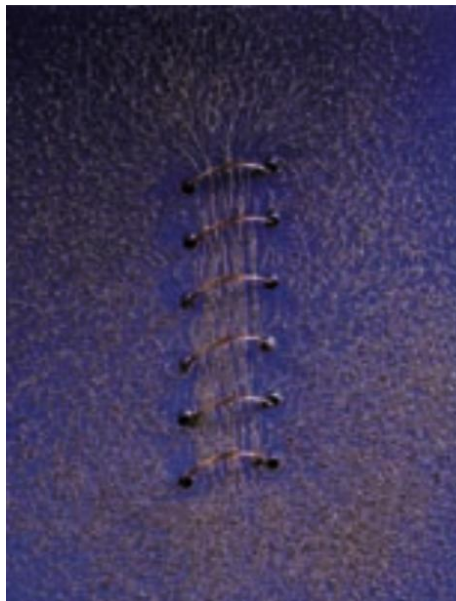
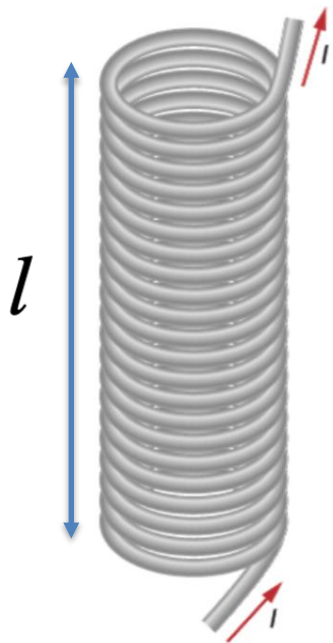
pole magnetyczne wytwarzane przez solenoid



Pole magnetyczne jest bardzo silne w środku i bardzo słabe na zewnątrz solenoidu.

Źródła pola magnetycznego:

pole magnetyczne wytwarzane przez solenoid

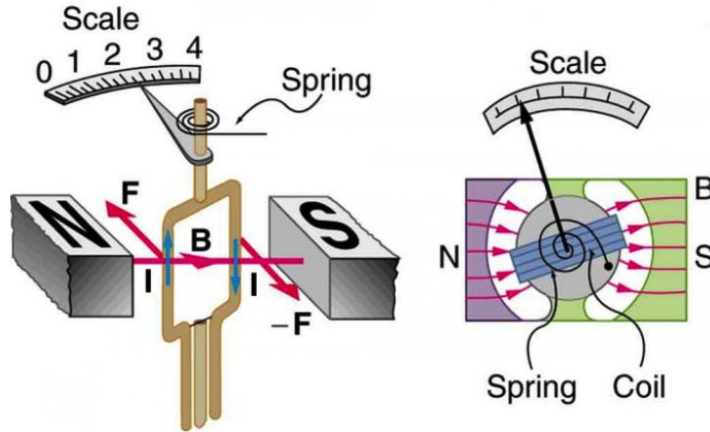


Pole magnetyczne w środku jest jednorodne i ma wartość:

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

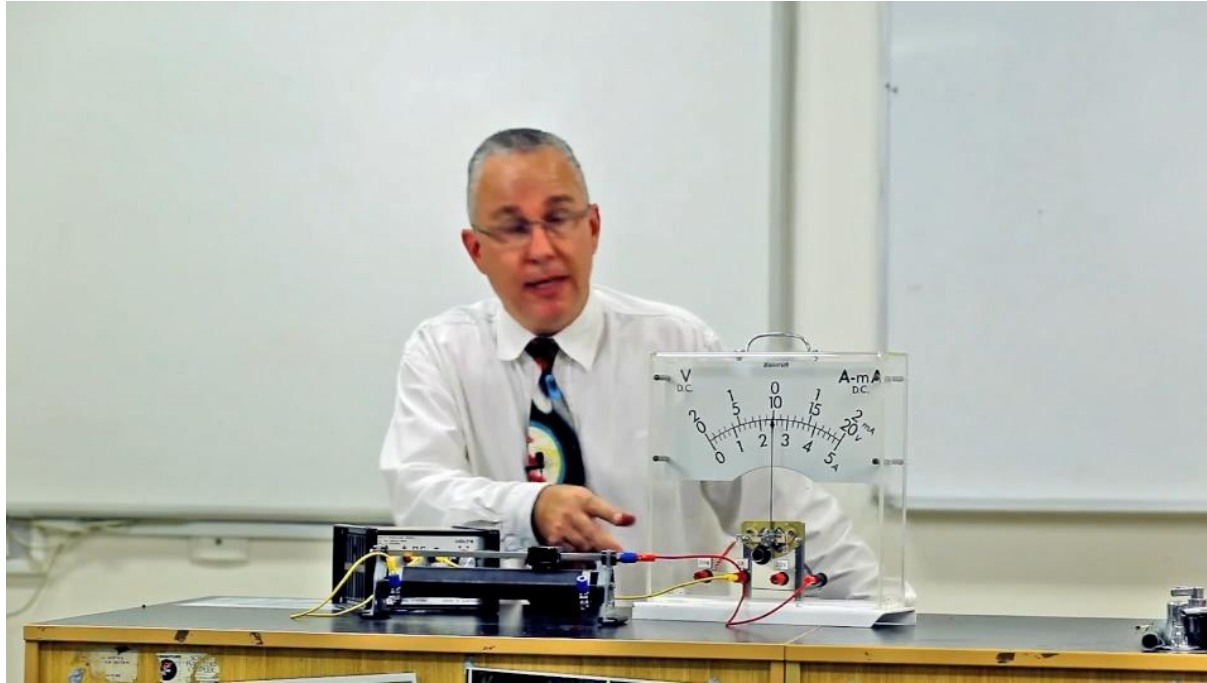
N - liczba zwojów

Analogowy amperomierz



Magnesy ukształtowane są w taki sposób, aby ograniczyć wpływ kąta θ poprzez ustawienie B zawsze równoległe do powierzchni ramki. Zatem moment obrotowy jest proporcjonalny do I , a nie θ . Sprężyna wywiera przeciwny moment siły, który równoważy moment siły wytwarzany przez przepływ prądu.

Analogowy amperomierz

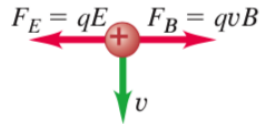


https://www.youtube.com/watch?v=_kLvQpKuyWs

Ruch ładunku punktowego w polu magnetycznym - przykłady

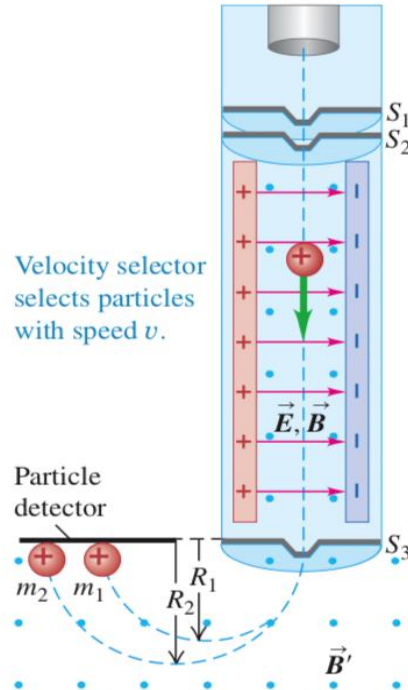
Spektrometry masowe cząstek naładowanych

spektrometr Brainbridge'a:


$$F_E = qE \quad F_B = qvB$$

$$v = \frac{E}{B}$$

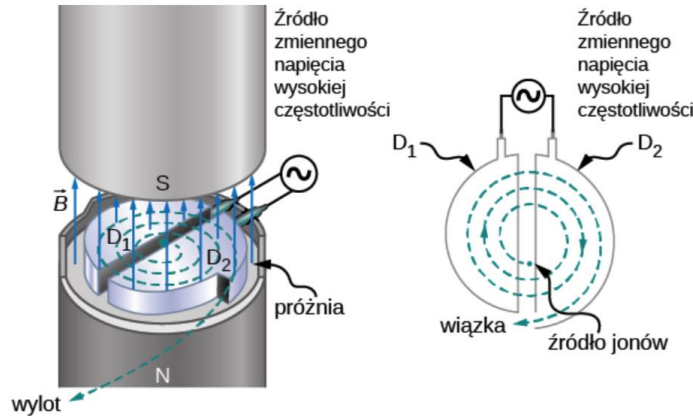
Velocity selector
selects particles
with speed v .



$$R = \frac{mv}{qB}$$

Ruch ładunku punktowego w polu magnetycznym - przykłady

Cyklotrony i synchrotrony – urządzenia służące do przyspieszania cząstek do bardzo wielkich energii kinetycznych rzędu kilkudziesięciu MeV.



Wewnątrz komór D (duanty) na cząstkę działa tylko pole magnetyczne – cząstka porusza się po okręgu o promieniu:

$$R = \frac{mv}{qB}$$

Gdy cząstka znajdzie się w szczelinie pomiędzy komorami jest przyspieszana przez pole elektryczne i zwiększa swoją prędkość, z którą wpada do drugiej komory. Tam porusza się po większym okręgu. Gdy ponownie znajdzie się w obszarze szczeliny, polaryzacja pola elektrycznego zmienia się i cząstka ponownie jest przyspieszana, poruszając się po coraz większych okręgach. Okres zmian pola elektrycznego

wynosi:

$$T = \frac{2\pi m}{qB}$$

- nie zależy on od promienia orbity i energii

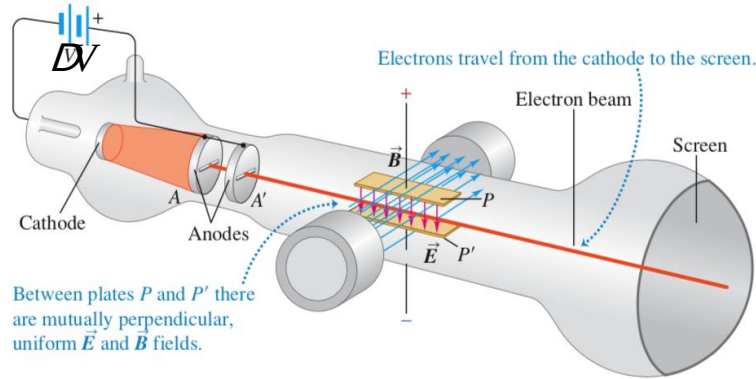
kinetycznej cząstki.

Prędkość maksymalną jaką osiąga cząstka na wyjściu:

$$v_{\max} = \frac{qBR_{\max}}{m}$$

Ruch ładunku punktowego w polu magnetycznym - przykłady

Eksperyment J. J. Thomsona (odkrycie elektronu, 1897):



Elektrony są przyspieszane od katody do anody. Wzrost ich energii kinetycznej odbywa się kosztem elektrostatycznej energii potencjalnej:

$$\frac{1}{2}mv^2 = eDV \quad \text{or} \quad v = \sqrt{\frac{2eDV}{m}}$$

Elektrony, które przejdą przez płytki P i P' uderzają w ekran fluorescencyjny. Po drodze przechodzą, że skrzyżowane prostopadle pola elektryczne i magnetyczne. Gdy siły od tych pól równoważą się, wiązka nie ulega odchyleniu:

$$\frac{E}{B} = v$$

Stąd mamy:

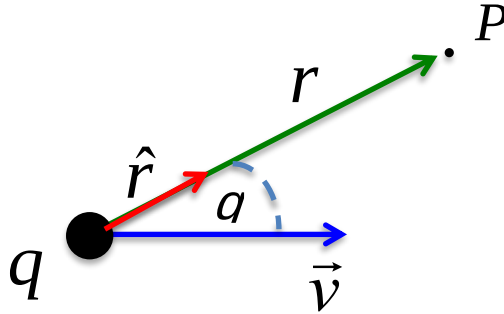
$$\frac{e}{m} = \frac{E^2}{2DV B^2}$$

wszystkie wielkości po prawej stronie równania są mierzalne

Thomson odkrył, że stosunek $e/m = 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$ jest niezmienny, niezależnie od materiału katody, gazów reszkowych w ruchu oraz innych warunków eksperymentu. Było to odkrycie elektronu!

Źródła pola magnetycznego:

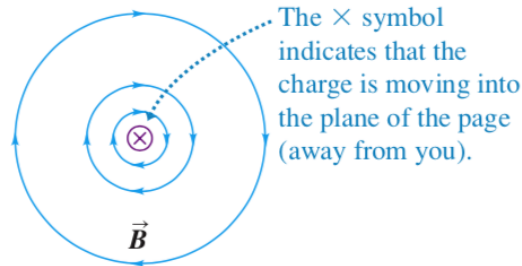
pole magnetyczne wytwarzane przez poruszający się ładunek punktowy



Wektor indukcji magnetycznej w punkcie P wytworzony przez poruszający się punktowy ładunek elektryczny jest prostopadły do prędkości ładunku oraz do wersora w kierunku łączącym ładunek z punktem P .

$$\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{q\vec{v} \times \hat{r}}{r^2}$$

Linie indukcji magnetycznej tworzą okręgi wokół kierunku prędkości:



Wartość indukcji magnetycznej w punkcie P :

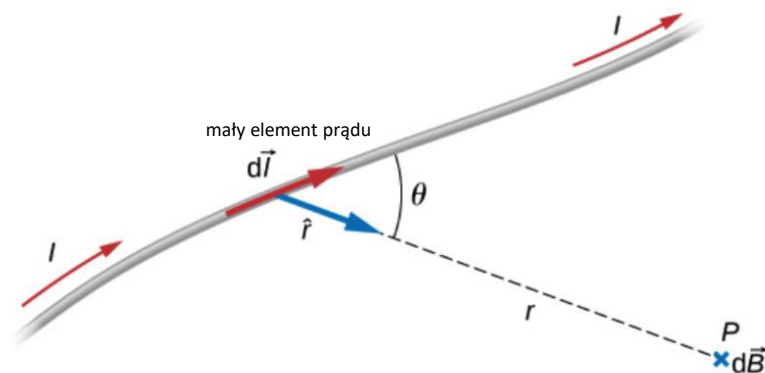
$$B = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{qv \sin q}{r^2}$$

przenikalność magnetyczna próżni: $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Vs}}{\text{Am}}$

Źródła pola magnetycznego:

pole magnetyczne wytwarzane przez przewodnik liniowy z prądem

Pole wytworzone przez mały element prądu:



$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{dq(\vec{v} \times \hat{r})}{r^2}$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{I(\vec{v}dt \times \hat{r})}{r^2}$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{I(d\vec{l} \times \hat{r})}{r^2}$$

Pole wytworzone przez cały przewodnik:

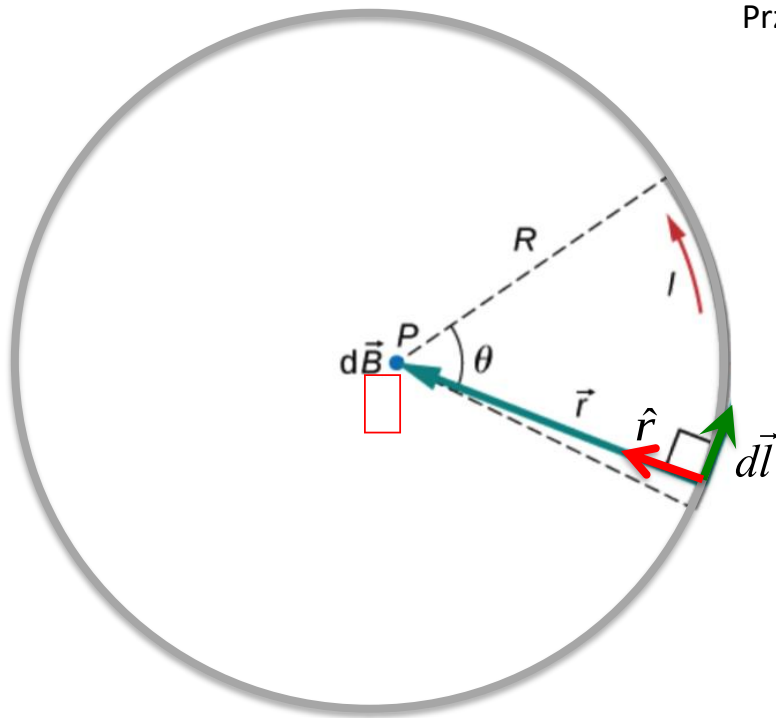
$$\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \int_{\text{cały przewodnik}} \frac{I(d\vec{l} \times \hat{r})}{r^2}$$

(Prawo Biota – Savarta)

Źródła pola magnetycznego:

pole magnetyczne wytwarzane w środku pętli kołowej z prądem

Przykład zastosowania prawa Biota - Savarta:



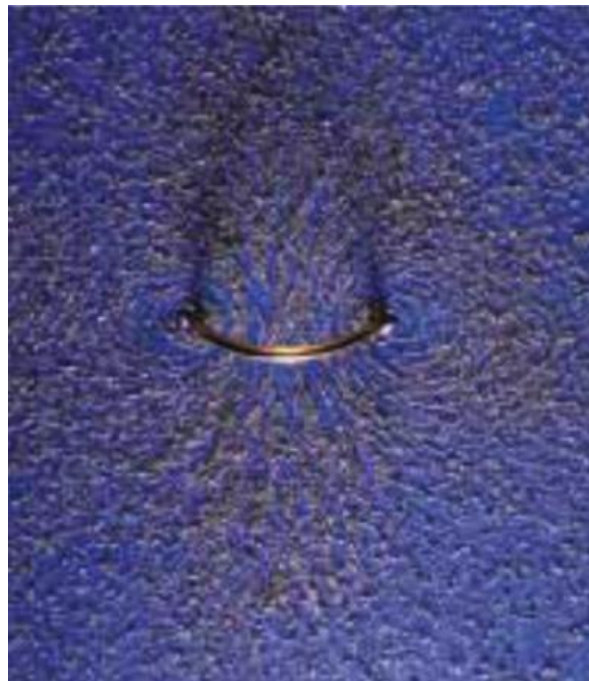
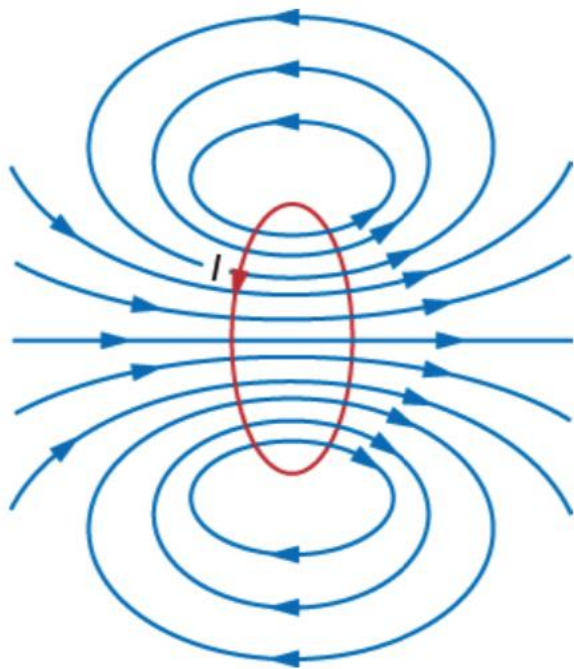
$$d\vec{B} = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{I(d\vec{l} \times \hat{r})}{r^2}$$

$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi} \frac{Idl}{R^2}, \quad r = R$$

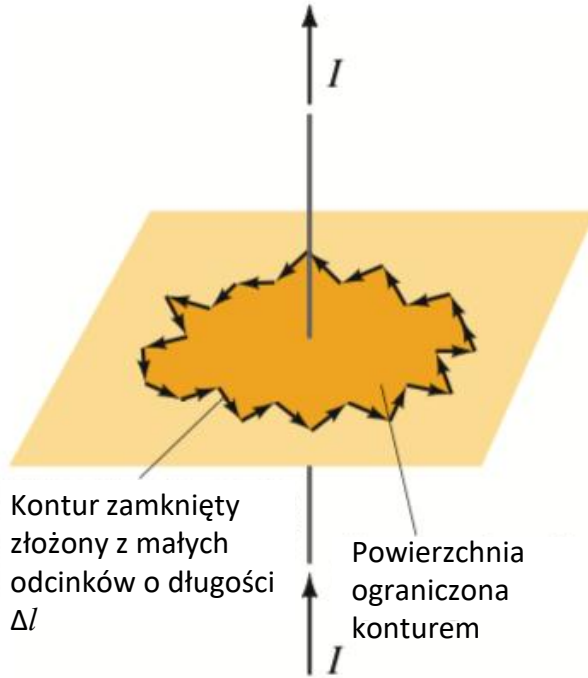
$$B = \frac{\mu_o I}{4\pi R^2} \oint dl = \frac{\mu_o I}{4\pi R^2} 2\pi R$$

$$B = \frac{\mu_o I}{2R}$$

Prawo Biota – Savarta możemy wykorzystać do policzenia pola magnetycznego w dowolnym punkcie przestrzeni – co pozwala skonstruować szkic linii pola wokół przewodnika:



Prawo Ampère'a



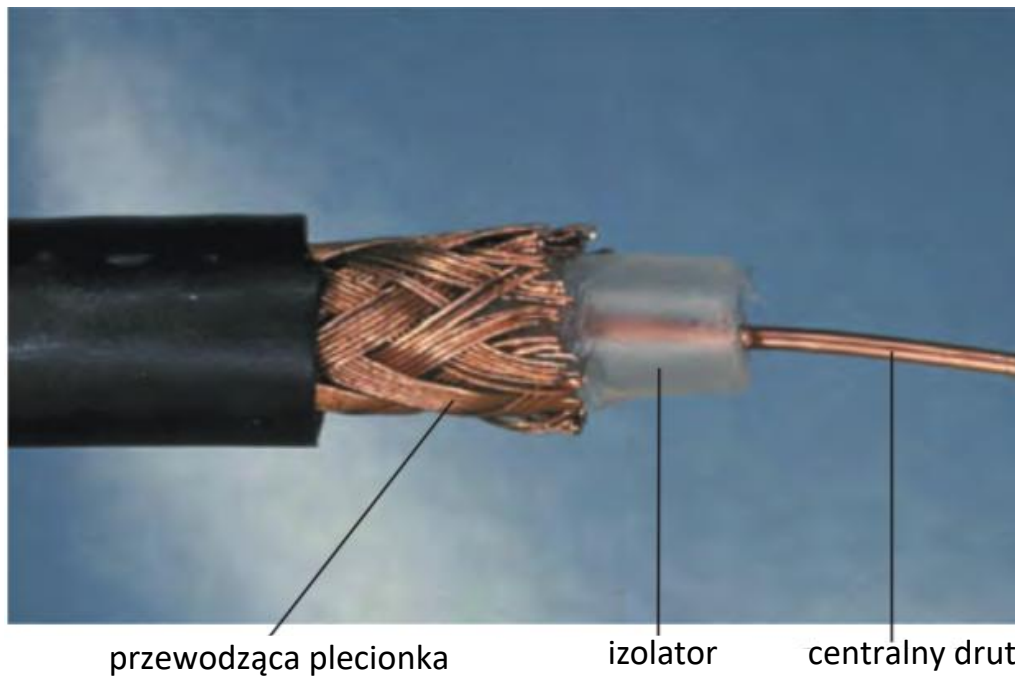
$$\sum \vec{B} \cdot \Delta \vec{l} \approx \mu_0 I$$

$$\Delta l \rightarrow 0 \Rightarrow \oint \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 I$$

Słuszne dla dowolnego konturu
zamkniętego wokół przewodnika z
prądem.

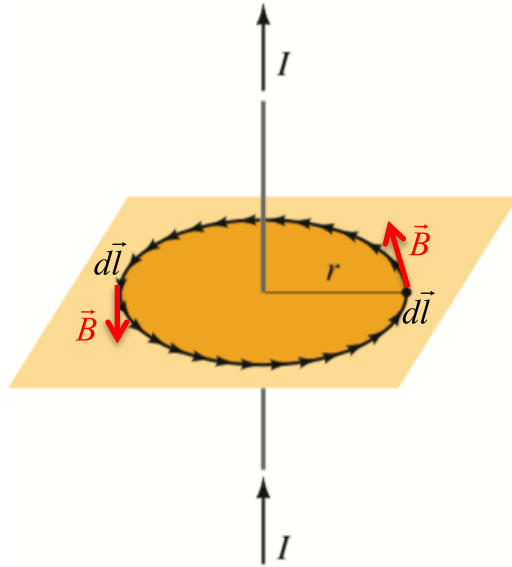
W kablu koncentrycznym prąd / płynie w drucie centralnym. Jednocześnie taki sam prąd / płynie w przewodzącej plecionce, ale w przeciwną stronę.

Ile wynosi pole magnetyczne na zewnątrz kabla?



Źródła pola magnetycznego:

pole magnetyczne wytwarzane przez prostoliniowy przewód z prądem



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

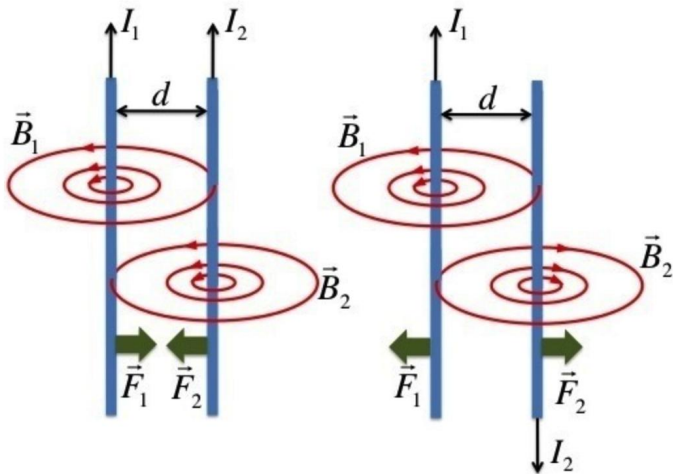
$$\vec{B} \cdot d\vec{l} = B dl$$

$$B \oint dl = \mu_0 I$$

$$B(2\pi r) = \mu_0 I$$

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

Siła oddziaływania dwóch prostoliniowych przewodników z prądem



$$F_1 = I_1 B_2 l = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} l = F_2$$

Siła na jednostkę
długości:

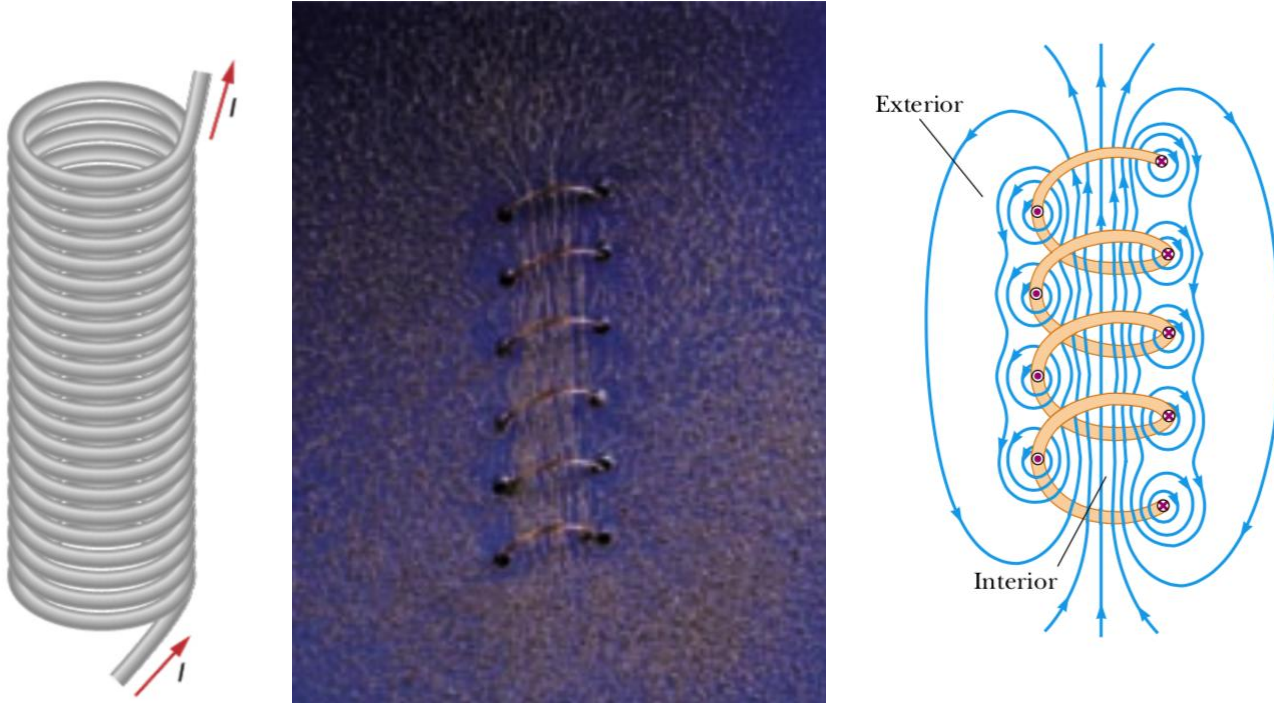
$$\frac{F_1}{l} = \frac{F_2}{l} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d}$$

Oficjalna definicja jednostki natężenia prądu (Ampera):

„1 amper to niezmienny się prąd elektryczny, który płynąc w dwóch równoległych, prostoliniowych, nieskończenie długich przewodach o znikomo małym przekroju kołowym, umieszczonych w próżni w odległości 1 m od siebie, spowodowałby wzajemne oddziaływanie przewodów na siebie z siłą równą 2×10^{-7} N na każdy metr długości przewodu”

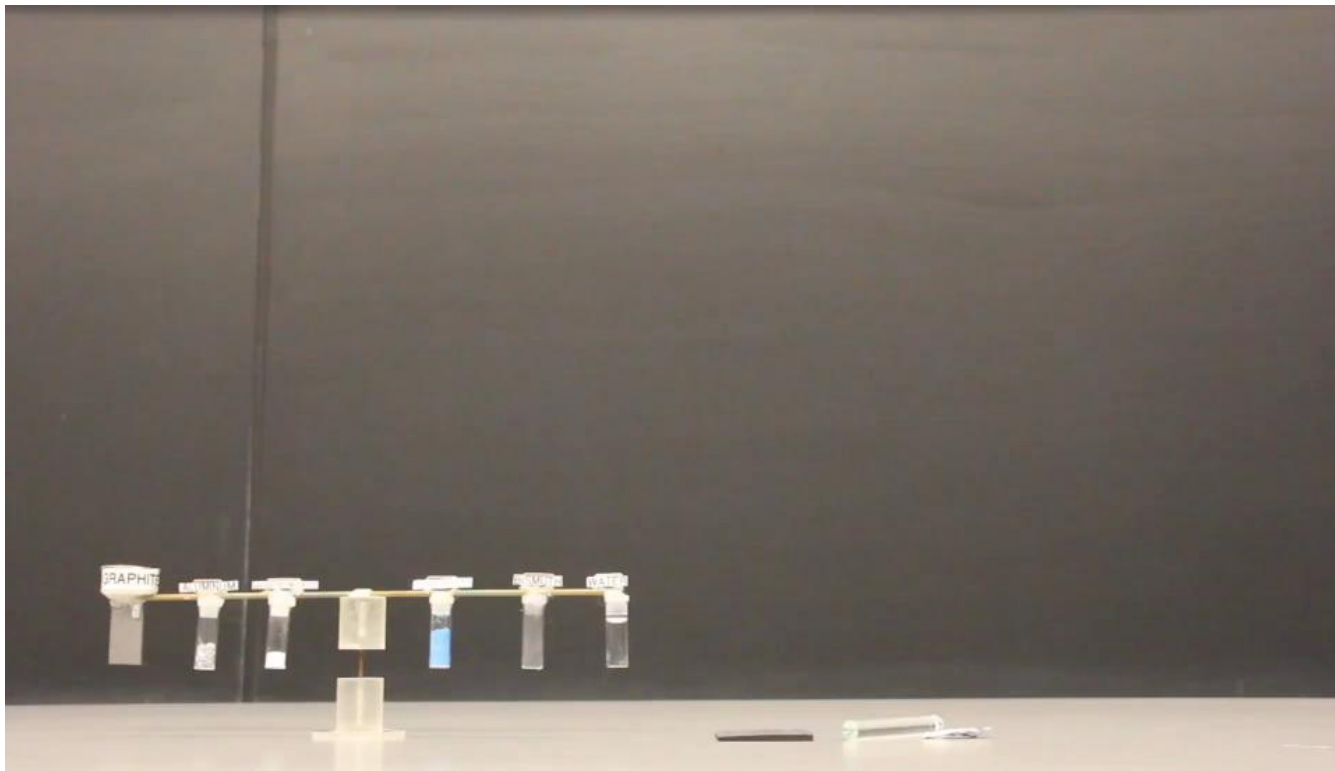
Źródła pola magnetycznego:

pole magnetyczne wytwarzane przez solenoid



Pole magnetyczne jest bardzo silne w środku i bardzo słabe na zewnątrz solenoidu.

Ferromagnetyki, paramagnetyki, diamagnetyki



Materiały magnetyczne

Do tej pory rozważaliśmy przewody z prądem umieszczone w powietrzu lub w próżni. Jednak w praktycznych zastosowaniach przewody przewodzące prąd są często umieszczane wokół rdzenia z litego żelaza. Obecność żelaza lub innych materiałów ferromagnetycznych zwiększa pole magnetyczne i często sprawia, że jest ono kilka tysięcy razy silniejsze niż bez rdzenia.



elektromagnes

Podatność
magnetyczna:

$$c = \frac{B_{\text{rdzen}}}{B_{\text{przewód}}}$$

Przenikalność magnetyczna:

$$\mu = \mu_0(1 + c)$$

Całkowite pole wewnątrz solenoidu:

$$\vec{B}_{\text{tot}} = \vec{B}_{\text{przewód}} + \vec{B}_{\text{rdzen}} = \vec{B}_{\text{przewód}} + \chi \vec{B}_{\text{przewód}} = (1 + \chi) \vec{B}_{\text{przewód}}$$

Paramagnetyki i diamagnetyki

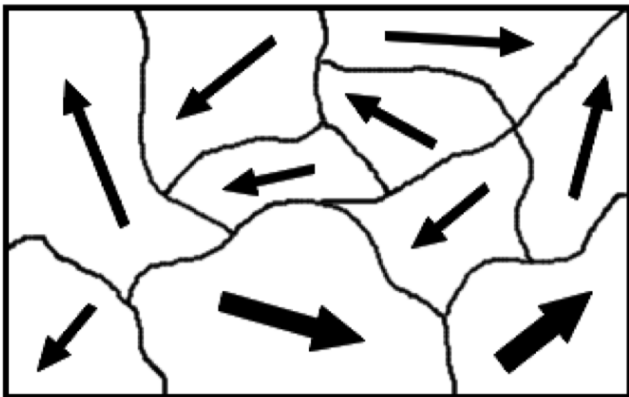
Paramagnetyki magnetyzują się zgodnie ze zwrotem pola zewnętrznego, diamagnetyki magnetyzują się przeciwnie do zwrotu pola zewnętrznego. W obydwu typach substancji efekt magnetyzacji jest bardzo mały ($|\chi| \ll 1$): $m = m_0(1 + \chi) \approx m_0$

Paramagnetic Substance	χ	Diamagnetic Substance	χ
Aluminum	2.3×10^{-5}	Bismuth	-1.66×10^{-5}
Calcium	1.9×10^{-5}	Copper	-9.8×10^{-6}
Chromium	2.7×10^{-4}	Diamond	-2.2×10^{-5}
Lithium	2.1×10^{-5}	Gold	-3.6×10^{-5}
Magnesium	1.2×10^{-5}	Lead	-1.7×10^{-5}
Niobium	2.6×10^{-4}	Mercury	-2.9×10^{-5}
Oxygen	2.1×10^{-6}	Nitrogen	-5.0×10^{-9}
Platinum	2.9×10^{-4}	Silver	-2.6×10^{-5}
Tungsten	6.8×10^{-5}	Silicon	-4.2×10^{-6}

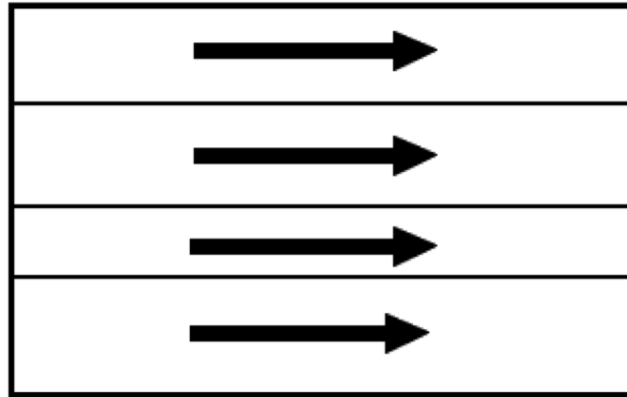
Ferromagnetyki

Ferromagnetyki wykazują ogromną podatność magnetyczną $\chi \gg 1$. Magnetyzują się zgodnie ze zwrotem zewnętrznego pola.

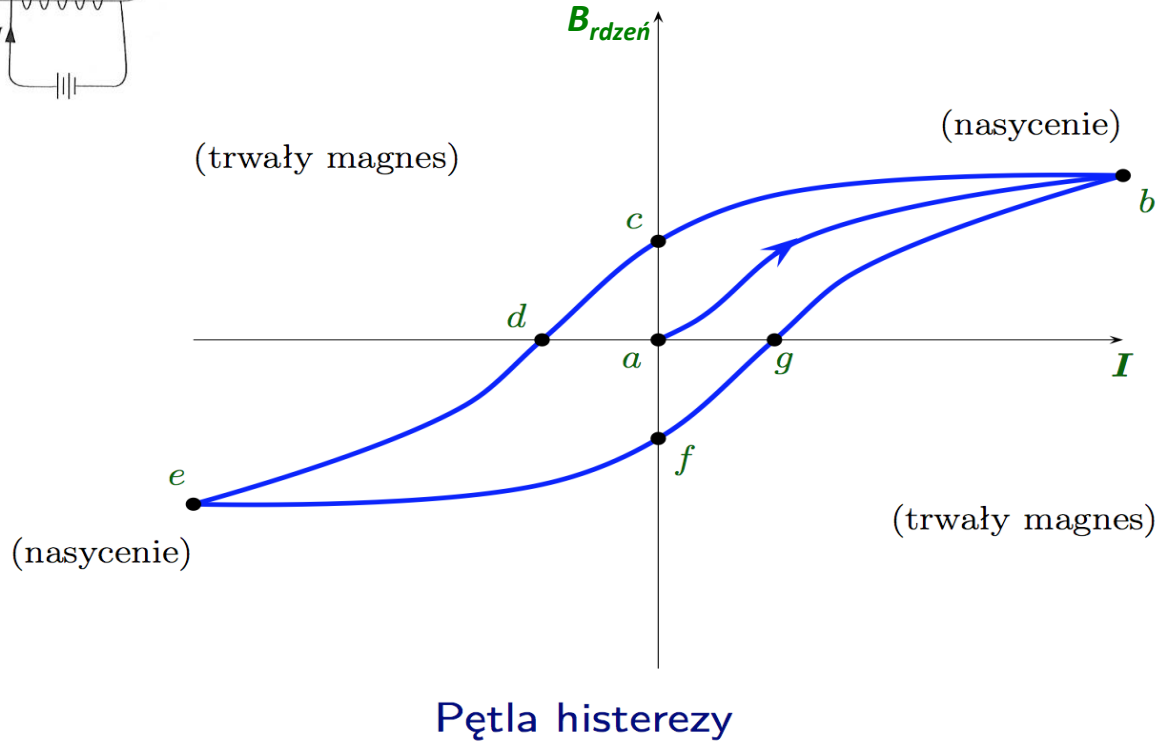
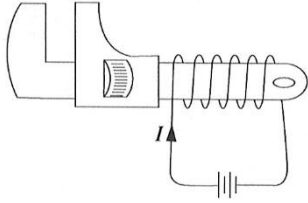
Nieuporządkowane domeny magnetyczne



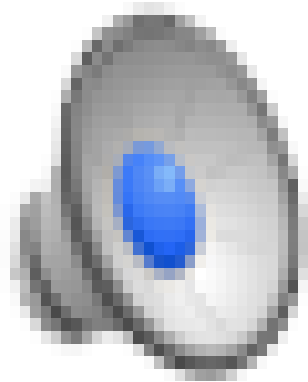
Uporządkowane domeny po przyłożeniu zewnętrznego pola



Ferromagnetyzm



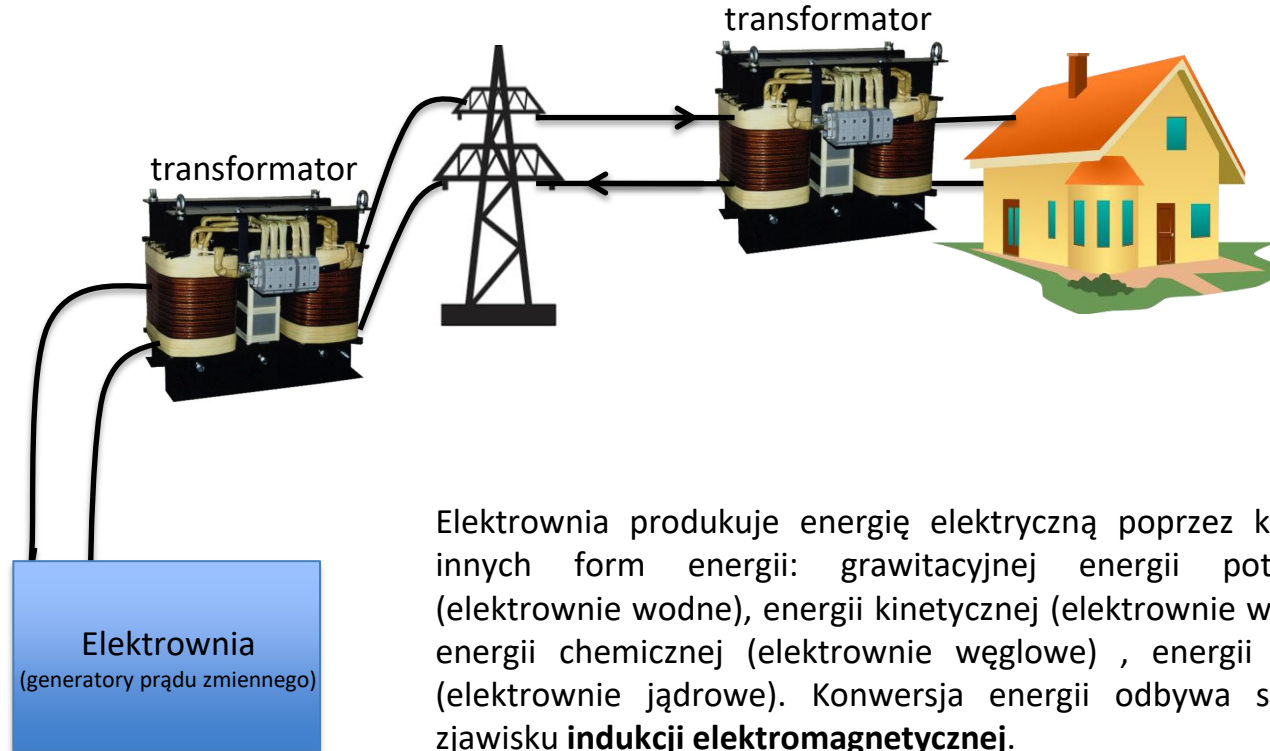
Ferromagnetyzm zależy od temperatury



Powyżej pewnej temperatury (tzw. temperatury Curie) domeny magnetyczne przestają istnieć.

<https://www.youtube.com/watch?v=haVX24hOwQI>

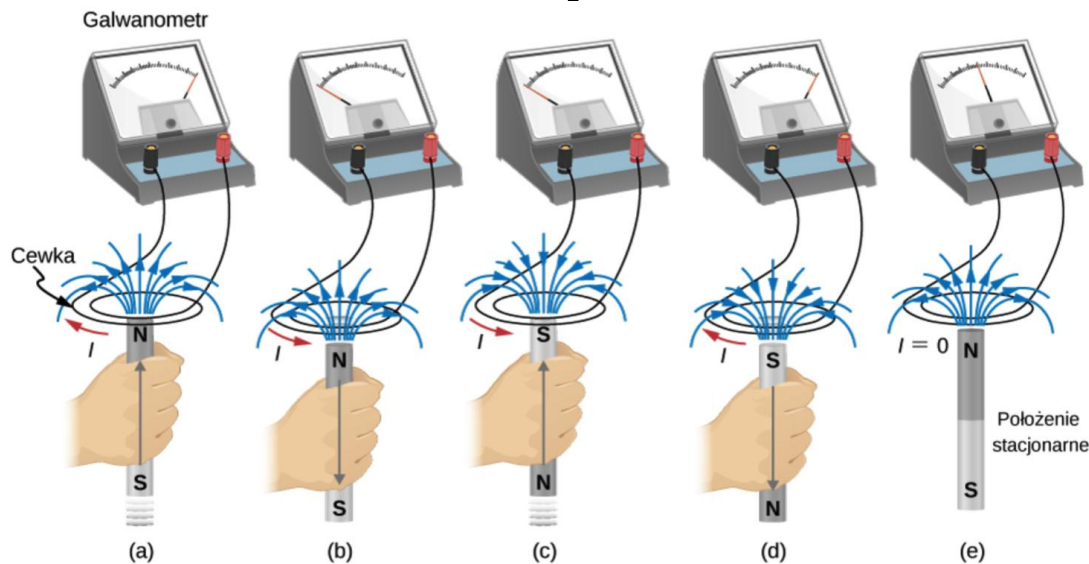
W jaki sposób elektrownia wytwarza energię elektryczną (siłę elektromotoryczną)?



Elektrownia produkuje energię elektryczną poprzez konwersję innych form energii: grawitacyjnej energii potencjalnej (elektrownie wodne), energii kinetycznej (elektrownie wiatrowe), energii chemicznej (elektrownie węglowe) , energii jądrowej (elektrownie jądrowe). Konwersja energii odbywa się dzięki zjawisku indukcji elektromagnetycznej.

Indukcja elektromagnetyczna

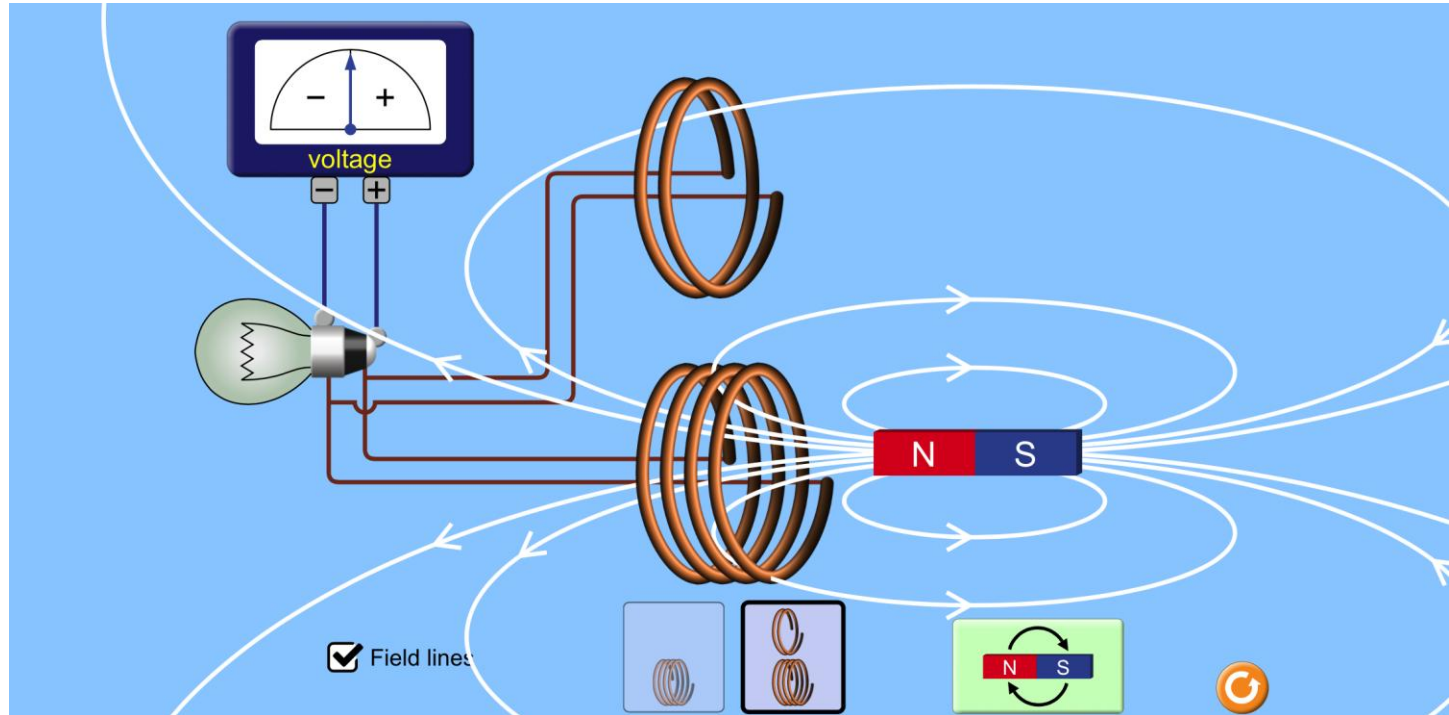
= zmiana pola magnetycznego wytwarza pole elektryczne



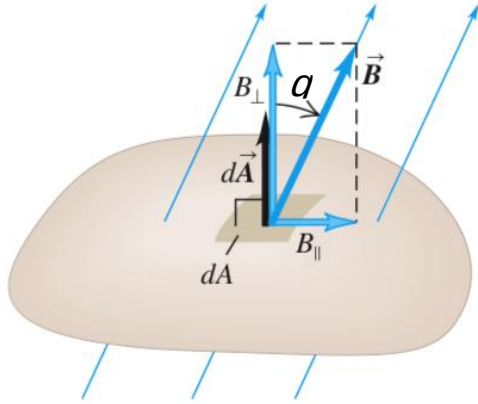
- Zmiana pola magnetycznego w cewce wywołana wsuwaniem bądź wysuwaniem magnesu sztabkowego powoduje indukcję siły elektromotorycznej (SEM).
- Znak siły elektromotorycznej zmienia się na przeciwny przy zmianie kierunku ruchu magnesu oraz przy odwróceniu jego biegunów.
- Analogiczne efekty zaobserwujemy, poruszając cewkę względem magnesu – w powstawaniu SEM istotny jest bowiem względny ruch obu obiektów.
- Siła elektromotoryczna będzie tym większa, im ów względny ruch będzie szybszy.
- SEM nie powstanie, gdy położenie magnesu względem cewki będzie stacjonarne.

Indukcja elektromagnetyczna symulacja

https://phet.colorado.edu/sims/html/faradays-law/latest/faradays-law_en.html



Prawo Faraday'a



Strumień pola magnetycznego przez mały element powierzchni dA :

$$d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{A} = B(dA)\cos\theta$$

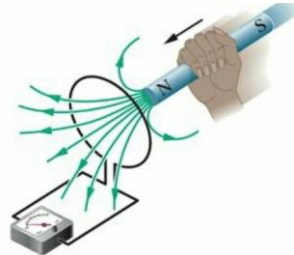
Strumień pola magnetycznego przez całą powierzchnię:

$$\Phi_B = \int_{\text{powierzchnia}} d\Phi_B = \int_{\text{powierzchnia}} \vec{B} \cdot d\vec{A}$$

Prawo Faraday'a:

indukowana siła elektromotoryczna (ϵ) w zamkniętym przewodzie liniowym jest równa tempu zmian (ze znakiem minus) strumienia magnetycznego przez powierzchnię ograniczoną tym obwodem.

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

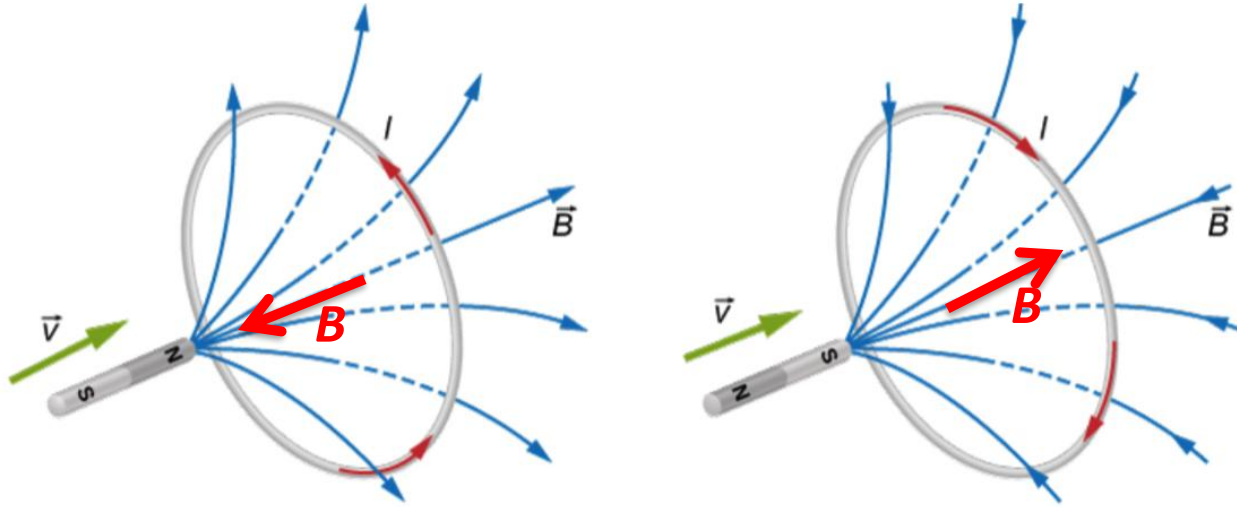


Reguła Lenza

Reguła Lenza: Natura nie znosi zmiany strumienia

Indukowany prąd będzie płynął w takim kierunku, że dodatkowy strumień powstały w wyniku jego przepływu sprzeciwia się zmianie pierwotnego strumienia.

Strumień pola magnesu sztabkowego przez powierzchnię ograniczoną pętlą rośnie.



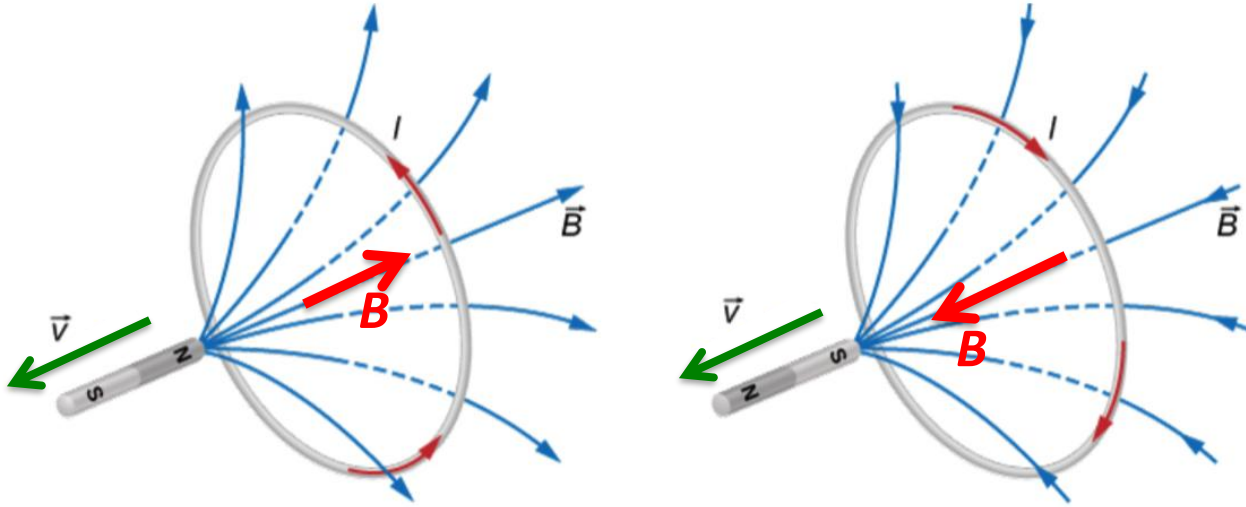
Prąd indukowany w pętli wytwarza pole magnetyczne skierowane przeciwnie do pola magnesu, tak by wytworzyć strumień kompensujący zmiany pierwotnego strumienia.

Reguła Lenza

Reguła Lenza: Natura nie znosi zmiany strumienia

Indukowany prąd będzie płynął w takim kierunku, że dodatkowy strumień powstały w wyniku jego przepływu sprzeciwia się zmianie pierwotnego strumienia.

Strumień pola magnesu sztabkowego przez powierzchnię ograniczoną pętlą maleje.



Prąd indukowany w pętli wytwarza pole magnetyczne skierowane zgodnie do pola magnesu, tak by wytworzyć strumień kompensujący zmiany pierwotnego strumienia.

Prostokątna cewka obracająca się w jednorodnym polu magnetycznym

cewka zawiera N zwojów

Strumień przez jeden zwoj:

$$\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} = BA \cos \theta(t)$$

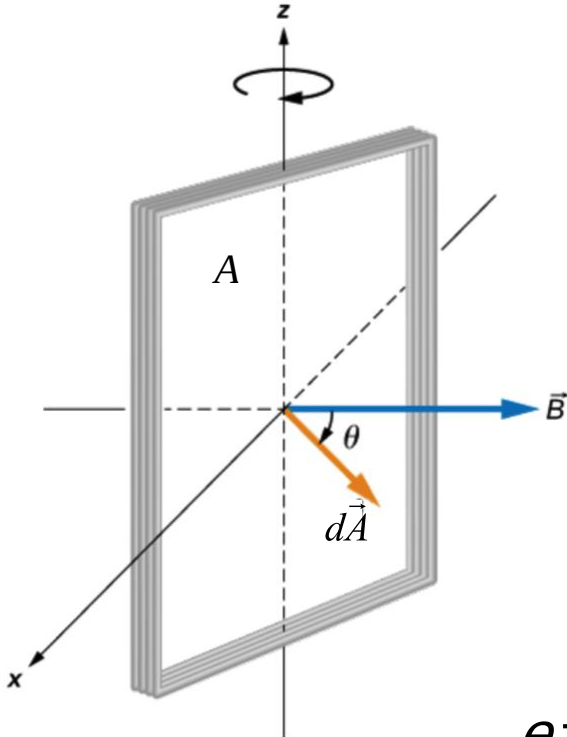
$$\theta(t) = \omega t$$

$$F_B = BA \cos \omega t$$

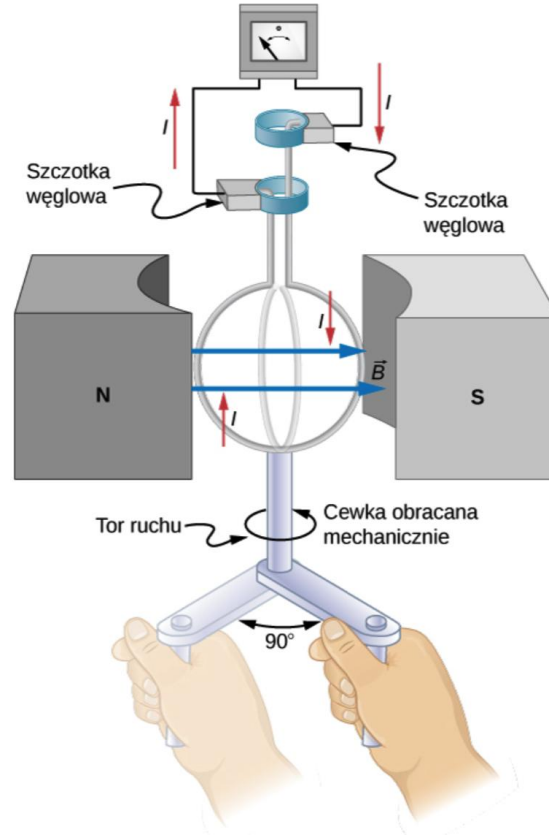
Siła elektromotoryczna we wszystkich
zwojach:

$$e = - N \frac{dF_B}{dt}$$

$$e = NBA\omega \sin \omega t \quad I = \frac{e(t)}{R} = \frac{NBA\omega}{R} \sin \omega t$$



Zastosowanie prawa indukcji: generator prądu zmiennego



Generator prądu zmiennego



<https://www.youtube.com/watch?v=MW1YUy3Yqpc>

Inne przykłady praktycznego wykorzystania indukcji elektromagnetycznej

Dynamo rowerowe

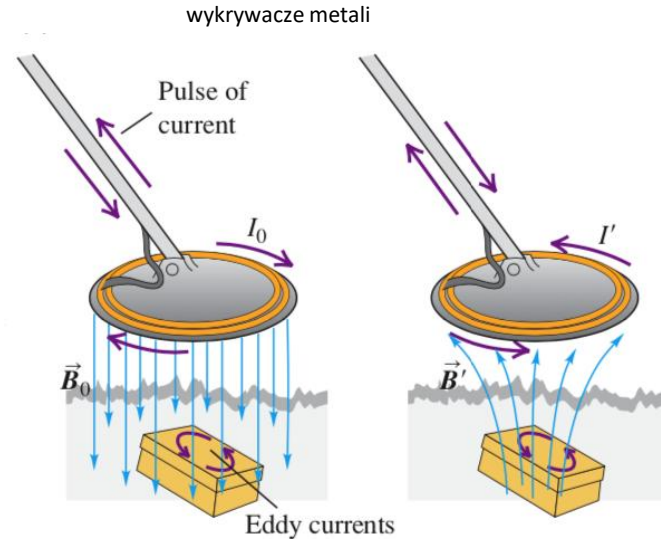
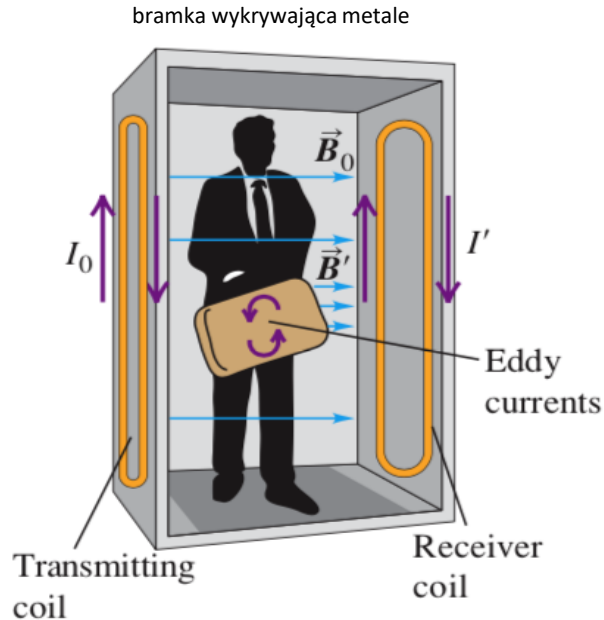


Latarka zasilana siłą mięśni



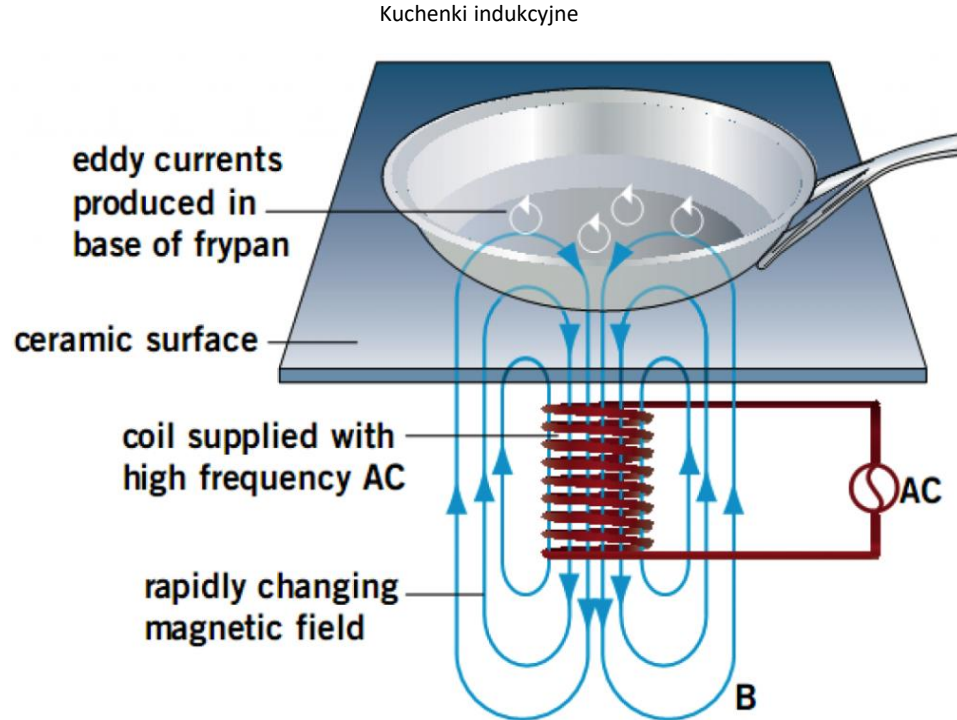
Prądy wirowe (ang. *eddy currents*)

Prądy można indukować elektromagnetycznie nie tylko w przewodnikach liniowych, ale również w materiałach przewodzących o dowolnym kształcie i powierzchni, jeżeli tylko zmienia się strumień pola magnetycznego. Indukowane prądy cyrkulują w objętości materiału, dlatego nazywamy je prądami wirowymi.



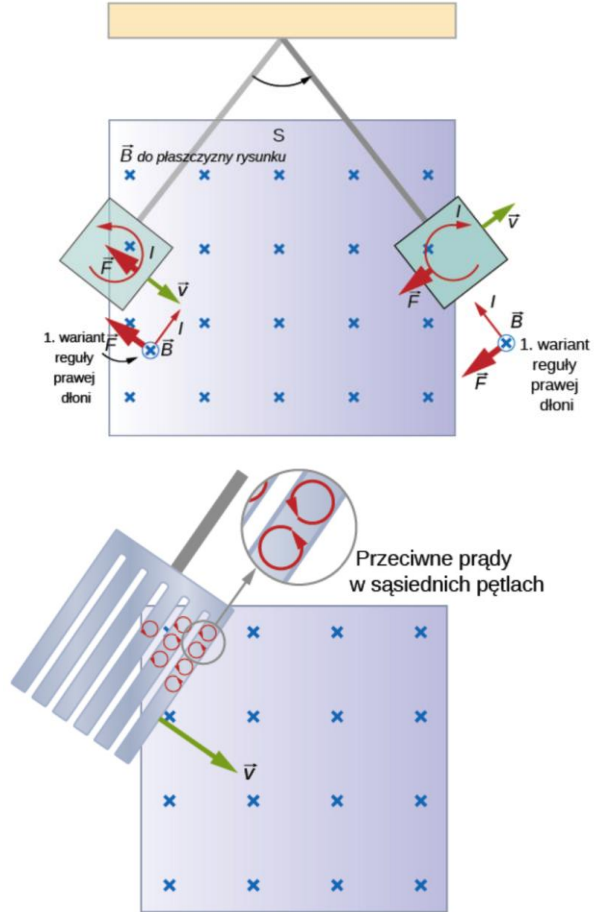
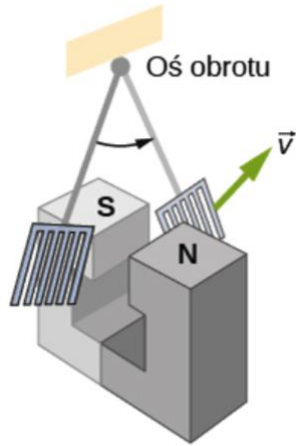
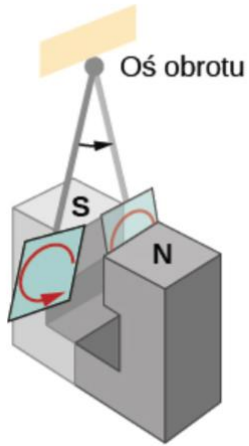
Prądy wirowe (ang. *eddy currents*)

Prądy można indukować elektromagnetycznie nie tylko w przewodnikach liniowych, ale również w materiałach przewodzących o dowolnym kształcie i powierzchni, jeżeli tylko zmienia się strumień pola magnetycznego. Indukowane prądy cyrkulują w objętości materiału, dlatego nazywamy je prądami wirowymi.

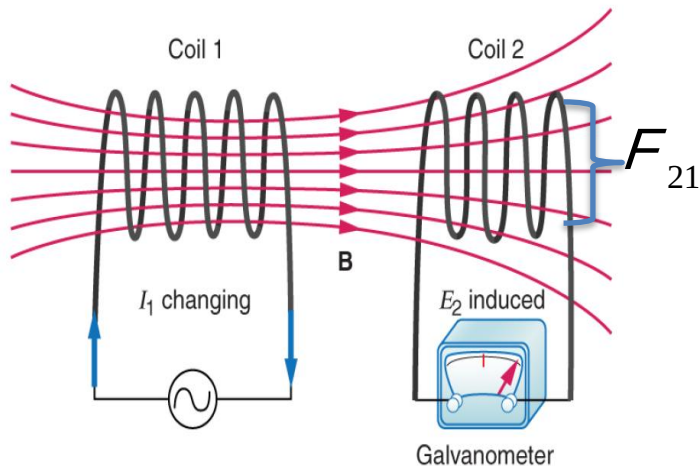


Prądy wirowe (ang. *eddy currents*)

tłumienie magnetyczne



Indukcyjność wzajemna



Strumień magnetyczny przechodzący przez cewkę 2:

$$N_2 F_{21} = M_{21} I_1$$

Siła elektromotoryczna indukowana w cewce 2:

$$e_2 = - N_2 \frac{dF_{21}}{dt} = - M_{21} \frac{dI_1}{dt}$$

Siła elektromotoryczna indukowana w cewce 1:

$$e_1 = - N_1 \frac{dF_{12}}{dt} = - M_{12} \frac{dI_2}{dt}$$

Indukcyjność wzajemna cewek:

$$M_{12} = M_{21} = \frac{N_2 F_{21}}{I_1} = \frac{N_1 F_{12}}{I_2}$$

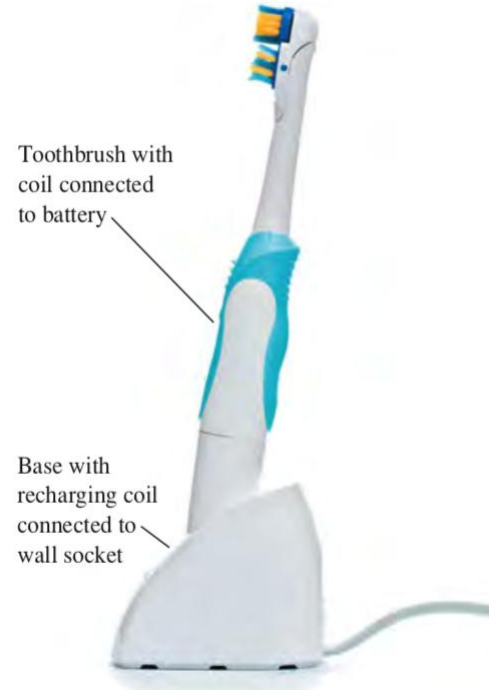
Jednostką indukcyjności jest **Henr**

$$1 \text{ H} = 1 \text{ V} \cdot \text{s} / \text{A} = 1 \Omega \cdot \text{s}$$

Indukcyjność wzajemna - zastosowanie

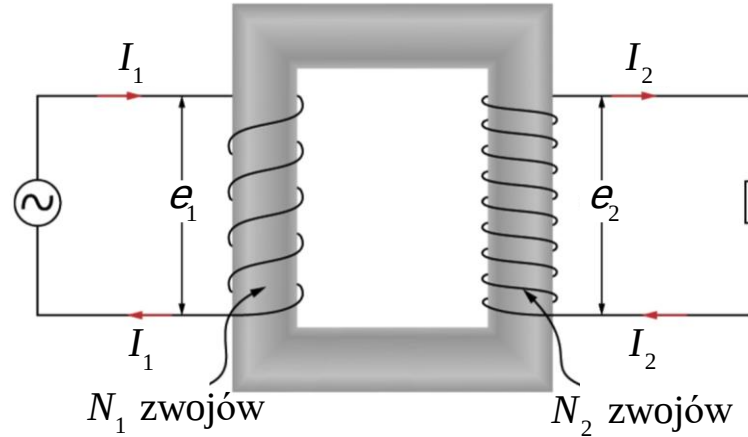
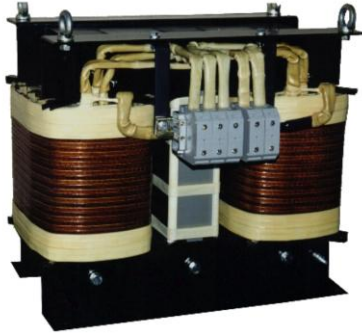


Mata ładująca smartfon zawiera cewkę, która podłączona jest do źródła prądu zmiennego (czyli prądu, którego natężenie rośnie i maleje naprzemiennie). Zmienny prąd indukuje w smartfonie SEM, która powoduje ładowanie jego akumulatora.



Baza ładująca zawiera cewkę, przez którą przepuszczany jest prąd zmienny. Prąd zmienny indukuje siłę elektromotoryczną w cewce wewnątrz szczoteczki, która jest wykorzystana do ładowania jej baterii.

Transformatory



Prąd zmienny w uzwojeniu pierwotnym indukuje siłę elektromotoryczną w uzwojeniu wtórnym. Z zasady zachowania energii wynika, że moc tracona w uzwojeniu pierwotnym musi być równa mocy wytwarzanej w uzwojeniu wtórnym (zaniedbując straty na ciepło oraz prądy wirowe w rdzeniu magnetycznym):

$$P_1 = P_2 \quad \text{p} \quad e_1 I_1 = e_2 I_2$$

Cewki, skonstruowane są w taki sposób, że strumienie przez pojedynczy zwój są identyczne w obydwu cewkach (idealne sprzężenie magnetyczne).

$$e_1 = - N_1 \frac{dF_B}{dt}, \quad e_2 = - N_2 \frac{dF_B}{dt} \quad \text{p}$$

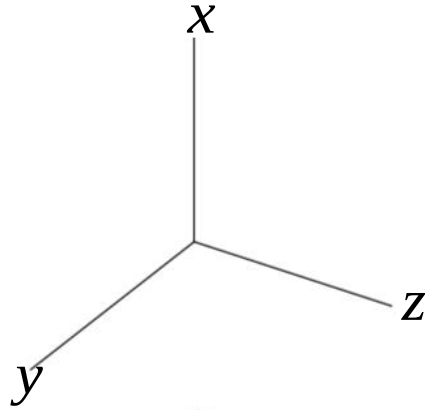
$$\frac{e_2}{e_1} = \frac{N_2}{N_1} \quad \begin{array}{l} \text{przekładnia} \\ \text{transformatora} \end{array}$$

Równania Maxwella



<https://www.youtube.com/watch?v=O8OUH0pPyoI>

Fale elektromagnetyczne



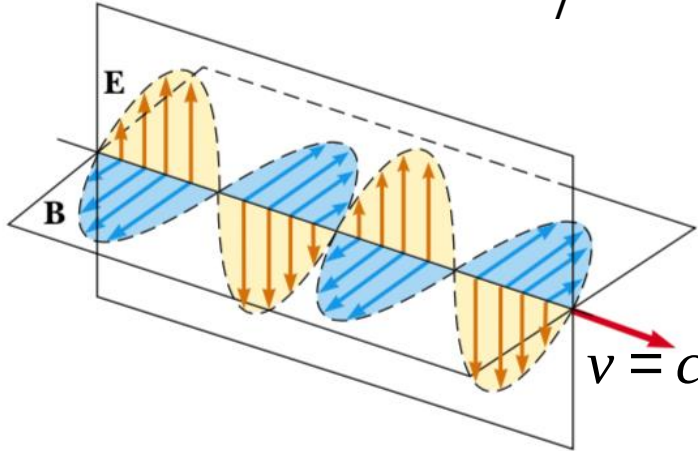
Fale płaskie w próżni:

$$\vec{E} = E_0 \hat{x} \cos(kz - \omega t)$$

$$\vec{B} = B_0 \hat{y} \cos(kz - \omega t)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{c}{\lambda} = kc$$

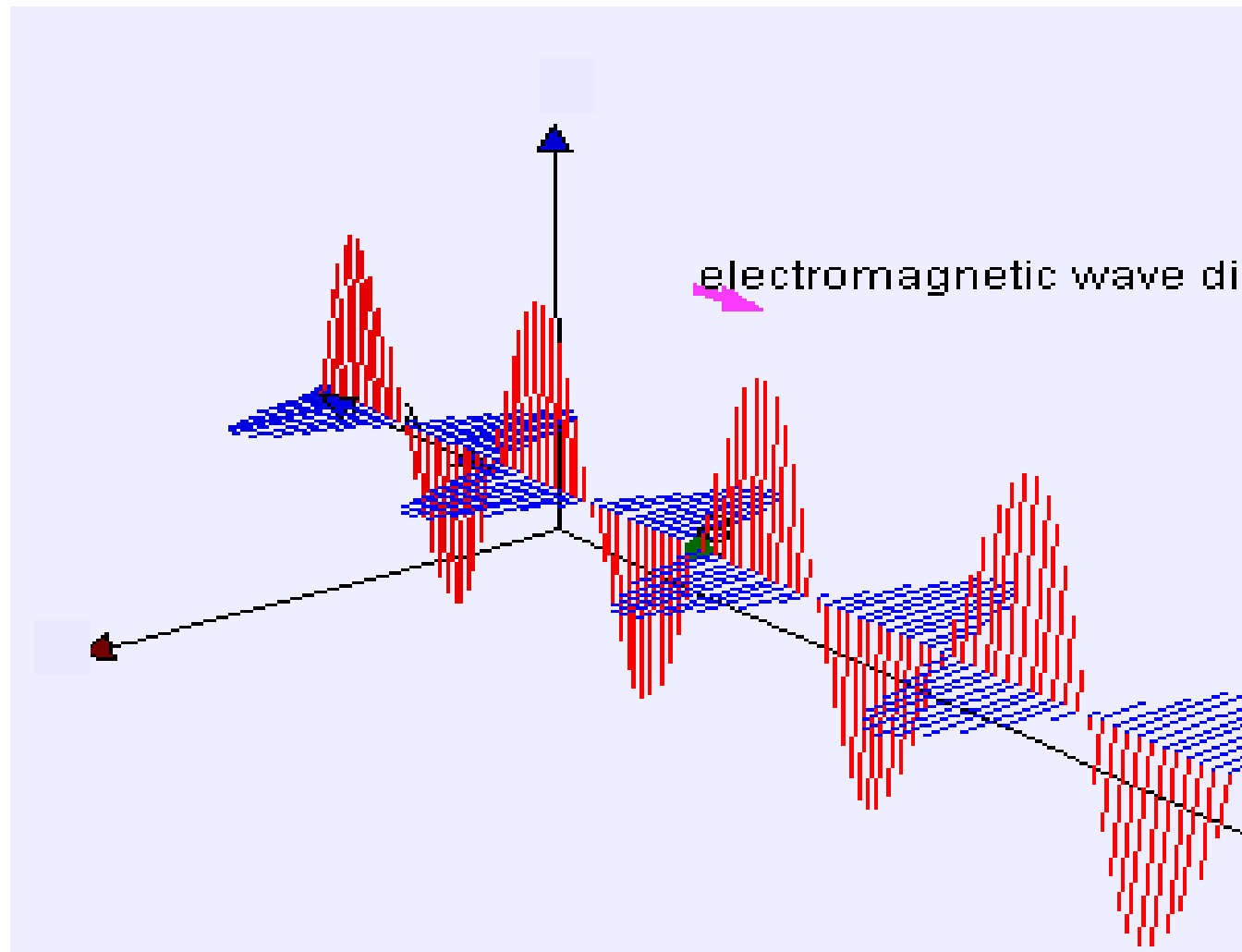


zdjęcie fali w konkretnej chwili

równania fal płaskich
spełniają równania
Maxwella gdy zachodzą dwa
warunki:

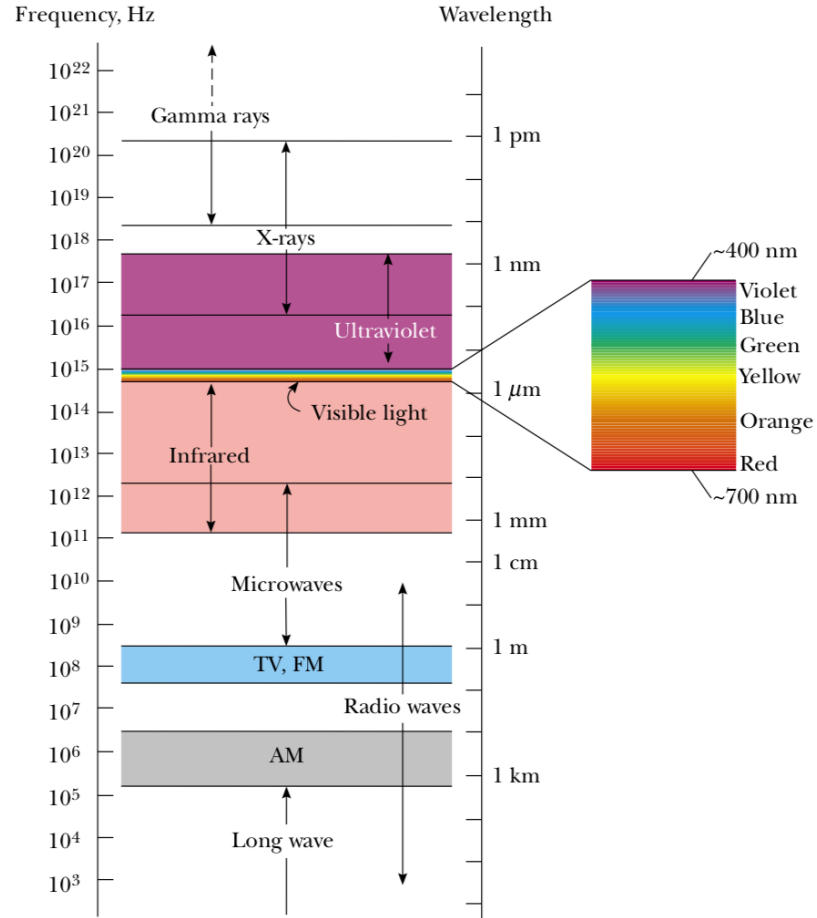
$$B_0 = \frac{E_0}{c}$$

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$



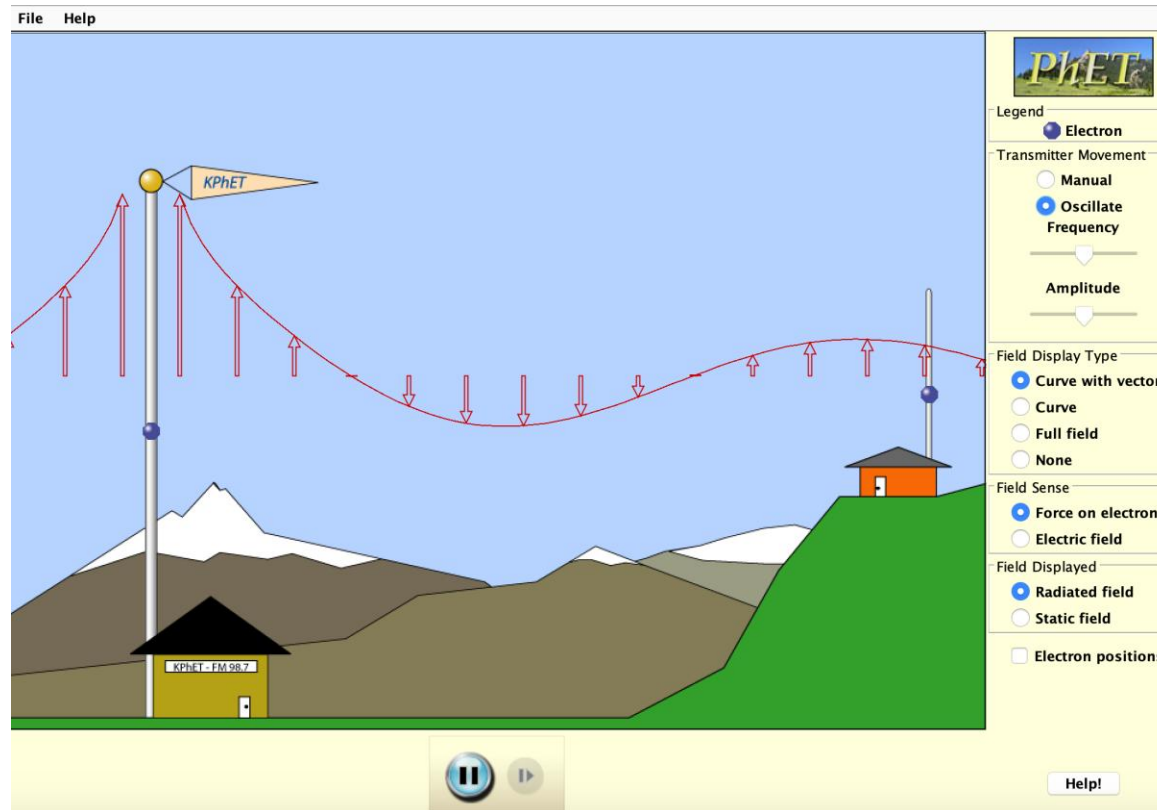
Spektrum fal elektromagnetycznych

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

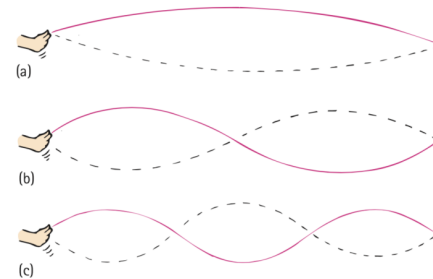
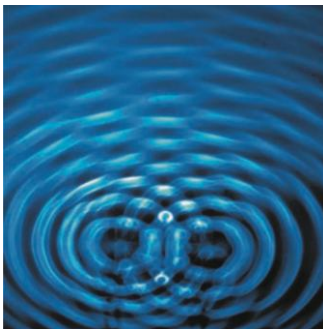


Źródła fal radiowych

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/radio-waves>



Ruch falowy, fale mechaniczne, dźwięk



Fale

(Definicja uproszczona)

Fala to

zaburzenie (energia) rozprzestrzeniające się w ośrodku materialnym (fale mechaniczne) lub w polu fizycznym (fale elektromagnetyczne) ze stałą prędkością (zależną od ośrodka).

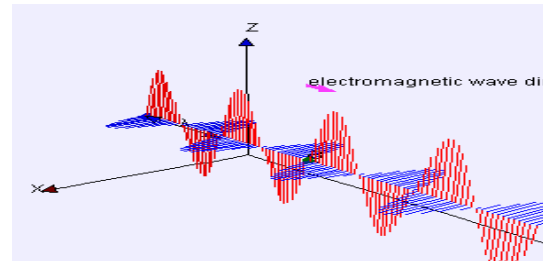
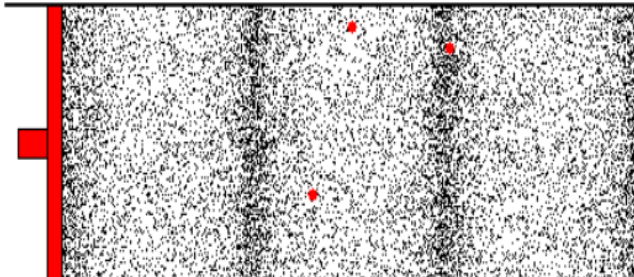
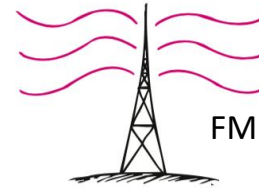
https://phet.colorado.edu/sims/html/waves-intro/latest/waves-intro_all.html

fale mechaniczne:



http://www.gimpuj.info/gallery/16278_15_07_09_4_24_56.gif

fale elektromagnetyczne:



Gdzie autorzy filmu popełnili błąd?



<https://www.youtube.com/watch?v=tquaim7OMaQ>

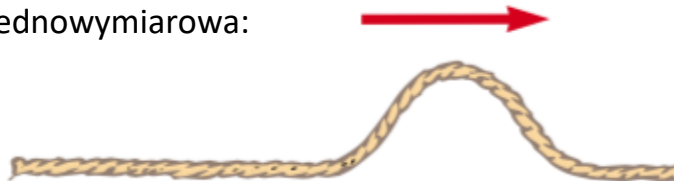
Fala mechaniczna, np. dźwięk potrzebuje ośrodka materialnego do rozchodzenia się (np. powietrze).



https://phet.colorado.edu/sims/html/sound-waves/latest/sound-waves_all.html (air pressure)

Fale jedno-, dwu-, trójwymiarowe

Fala jednowymiarowa:



spolaryzowane światło lasera



Fala dwuwymiarowa:

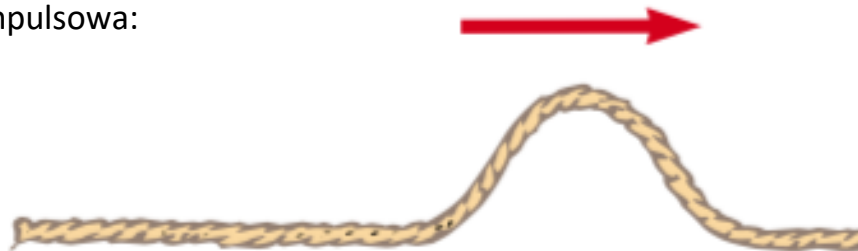


Fala trójwymiarowa:



Fale impulsowe i periodyczne

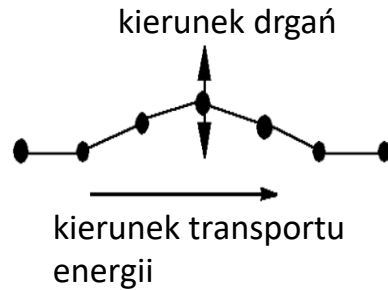
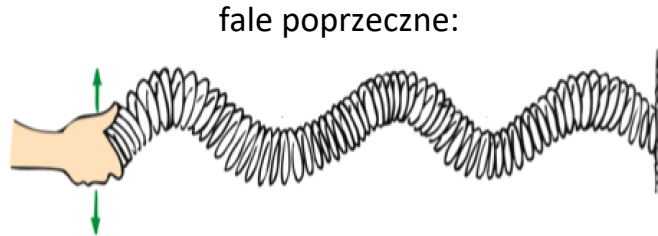
Fala impulsowa:



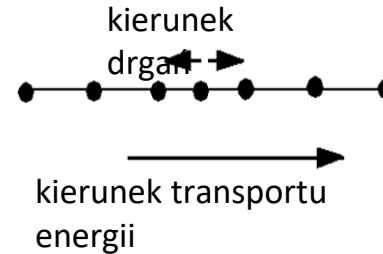
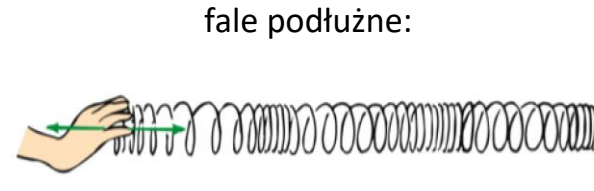
Fala periodyczna:



Fale poprzeczne i podłużne



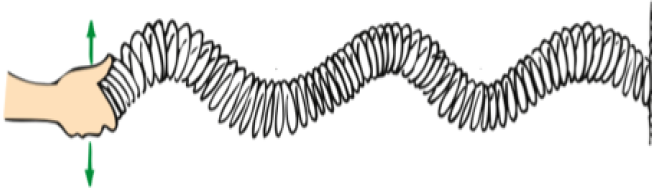
np. fale elektromagnetyczne
w nieograniczonej przestrzeni



np. dźwięk

Fale poprzeczne i podłużne

fale poprzeczne:



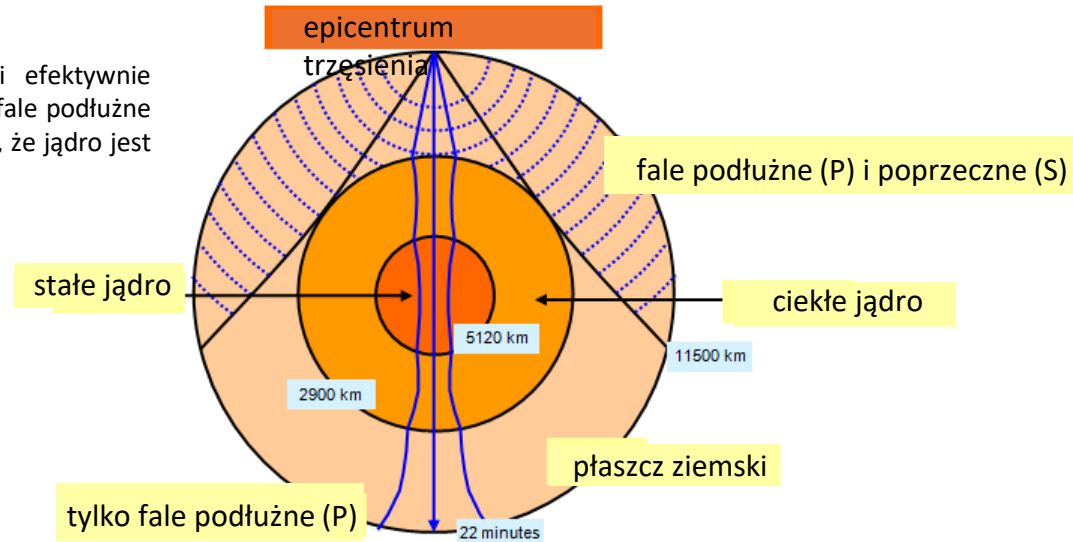
fale podłużne:



Fale poprzeczne i podłużne

- Mechaniczne fale podłużne mogą rozchodzić się w ciałach stałych, cieczach i gazach.
- Mechaniczne fale poprzeczne mogą rozchodzić się tylko w ciałach stałych, w których siły oddziaływania między ich elementami w kierunku prostopadłym do ruchu fali są wystarczająco duże, aby wymusić ruch w tym kierunku.

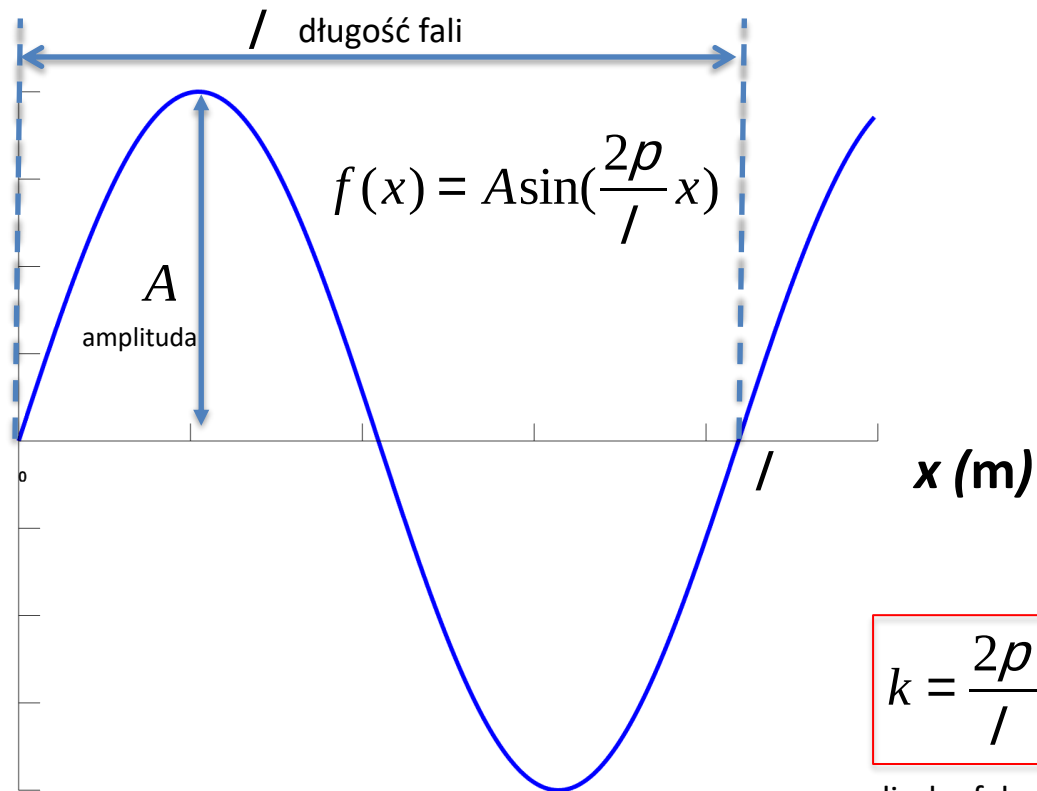
Przez środek Ziemi efektywnie propagują się tylko fale podłużne – świadczy to o tym, że jądro jest częściowo płynne.



Fale sinusoidalne



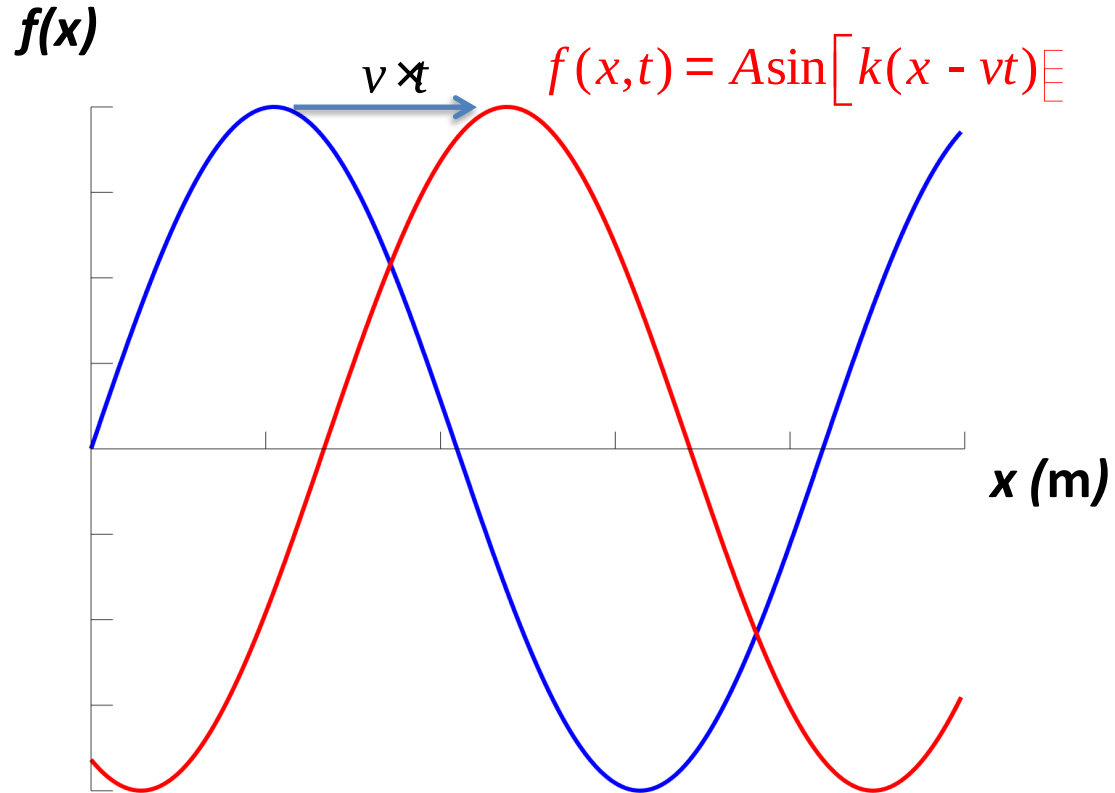
$f(x)$



$$k = \frac{2p}{l}$$

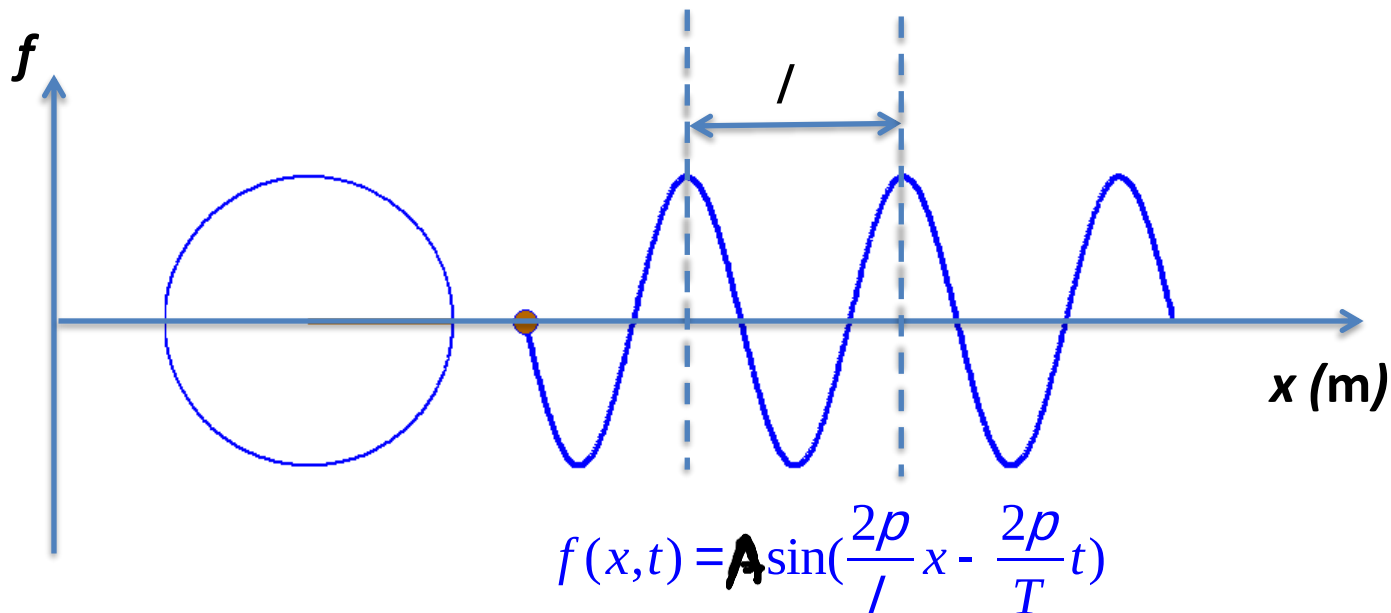
liczba falowa

Fale sinusoidalne



Fale sinusoidalne

https://phet.colorado.edu/sims/html/wave-on-a-string/latest/wave-on-a-string_en.html



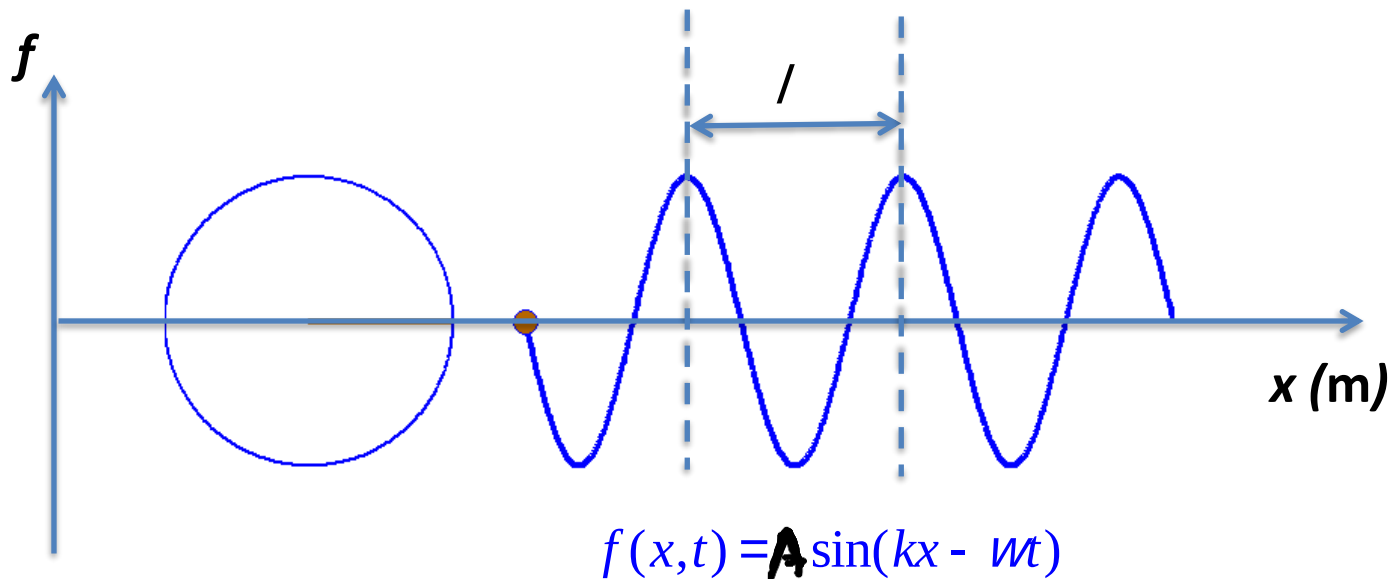
W czasie, gdy drgająca cząstka wykona jedną pełną oscylację (okres), fala przemieści się na odległość równą długości fali

$$\lambda = vT$$

odwrotność
okresu to
częstotliwość

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Fale sinusoidalne



Częstotliwość f (okres) możemy również wyrazić za pomocą częstotliwości kątovej ω :

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi}$$

Fale sinusoidalne

Ogólny zapis funkcji opisującej falę sinusoidalną rozchodzącą się w jednym kierunku (wzrastających wartości x):

$$f(x,t) = A \sin(kx - \omega t + j)$$

faza = argument funkcji falowej

amplituda

liczba falowa

częstość kątowna

faza początkowa

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$$\lambda = vT$$

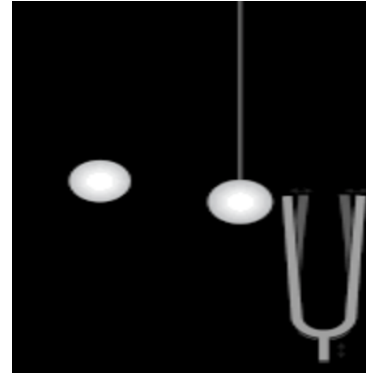
$$\lambda = \frac{v}{f}$$

$$\omega = kv$$

Źródła sinusoidalnych fal dźwiękowych (tonów)



<https://www.acs.psu.edu/drussel/Demos/forkanim/forkanim.html>



Jak wytworzyć falę sinusoidalną w powietrzu? – kamerton, kieliszek do wina



Podstawowe własności fal mechanicznych

1. Prędkość fali mechanicznej zależy tylko od własności sprężystych ośrodka, w którym się ona propaguje. Jeżeli ośrodek jest jednorodny to prędkość fali jest stała, np. prędkość dźwięku w powietrzu to około $v = 340 \text{ m/s}$ w warunkach normalnych.
2. Częstotliwość fali zależy jedynie od źródła, które wytwarza falę i jest niezależna od ośrodka, w którym fala się spropaguje.

.... innymi słowy fala przechodząc z jednego ośrodka do drugiego zmienia swoją prędkość, ale nie zmienia częstotliwości!

Ile razy zmieni się długość fali dźwiękowej przy przejściu fali z powietrza do wody?
Prędkość rozchodzenia się dźwięku w powietrzu $v_p = 340 \text{ m/s}$, a w wodzie $v_w = 1450 \text{ m/s}$.

$$\lambda_p = \frac{v_p}{f}$$



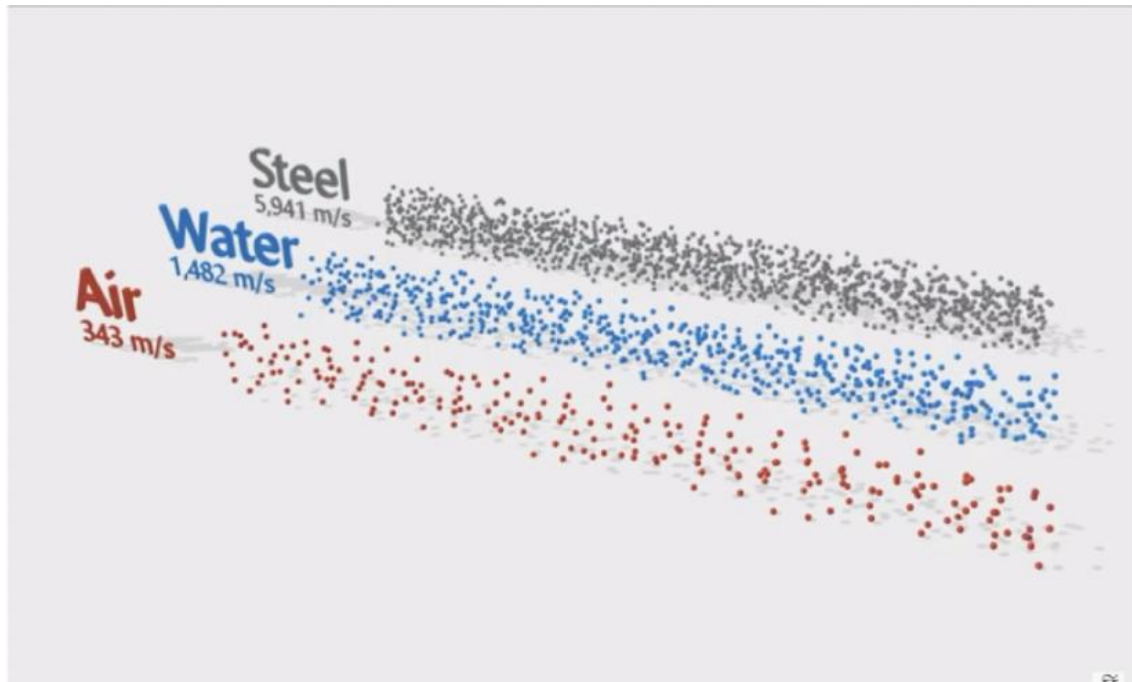
$$\frac{\lambda_w}{\lambda_p} = \frac{v_w}{v_p} = \frac{1450 \text{ m/s}}{340 \text{ m/s}} \gg 4.27$$

$$\lambda_w = \frac{v_w}{f}$$

Podstawowe własności fal mechanicznych

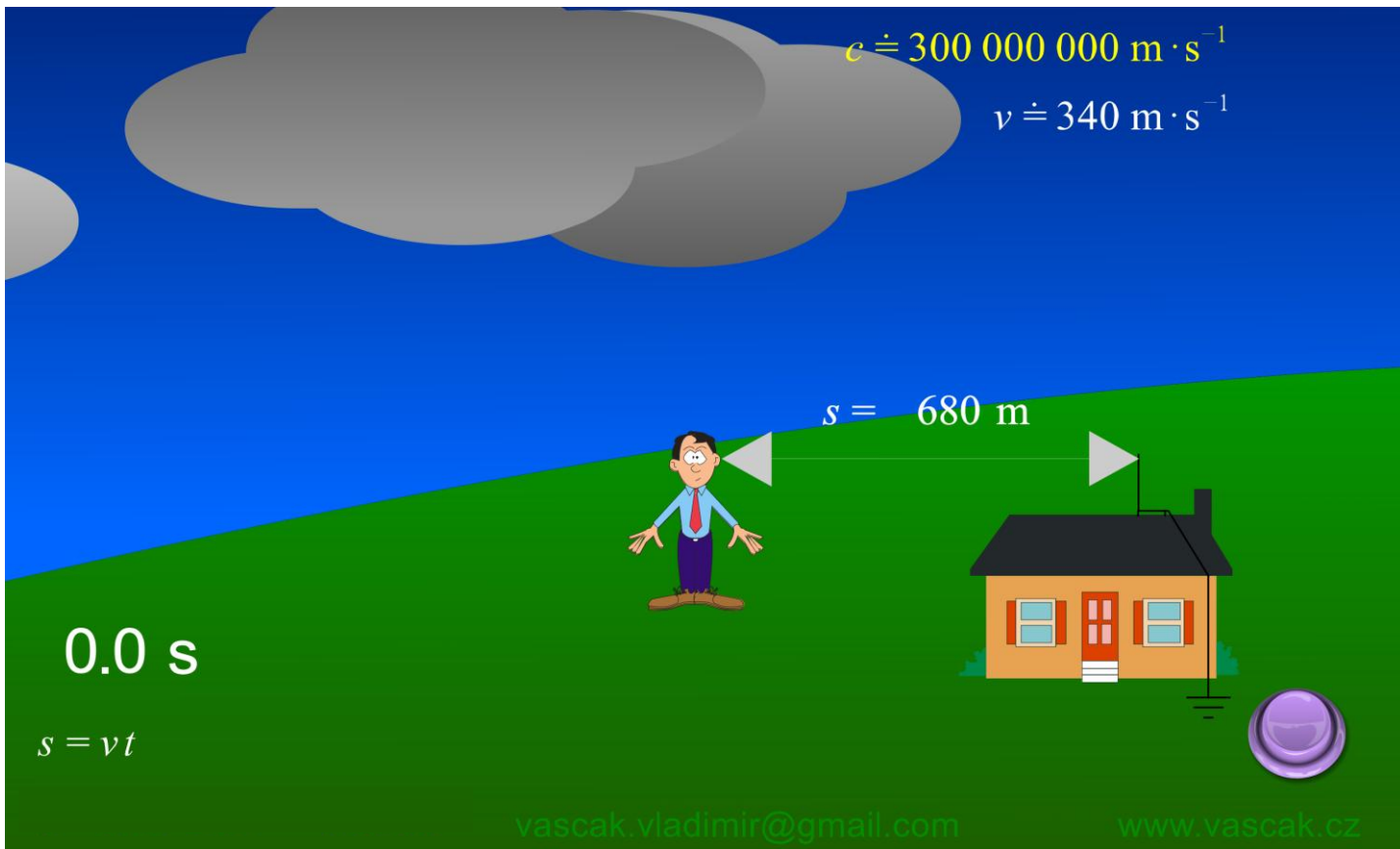
Prędkość dźwięku w różnych ośrodkach

W danym ośrodku fale propagują się ruchem jednostajnym, tj. ze stałą prędkością.



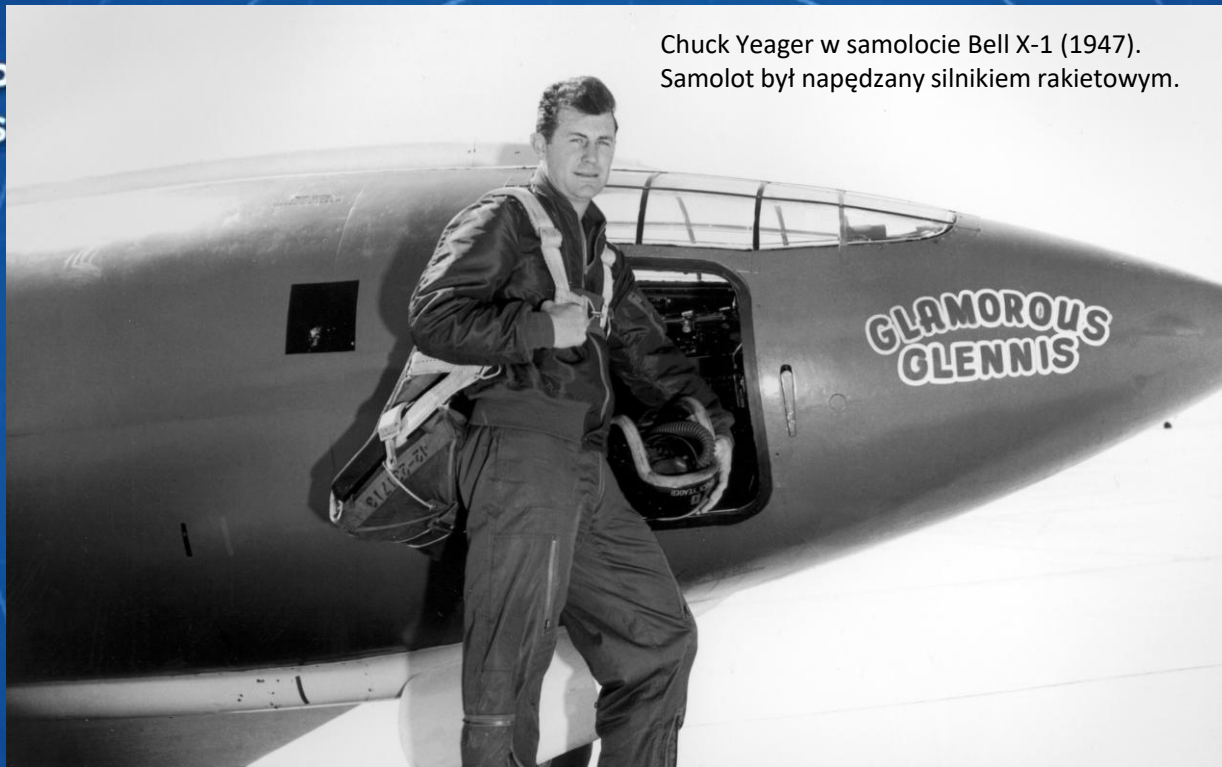
W ciałach stałych dźwięk propaguje się szybciej niż w cieczach i gazach bo ciała stałe są znacznie „sztywniejsze” (atomy są silniej związane).

Prędkość dźwięku w powietrzu



Szybciej niż dźwięk?

Chuck Yeager w samolocie Bell X-1 (1947).
Samolot był napędzany silnikiem raketowym.

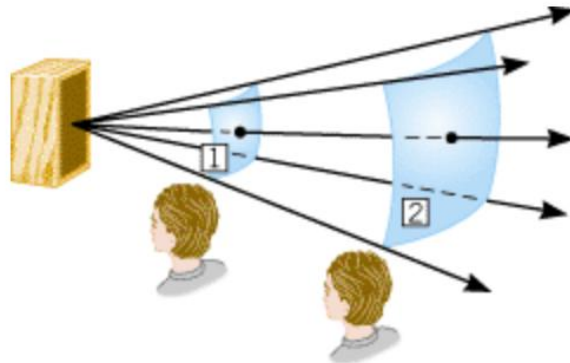


Podstawowe własności fal mechanicznych

Transport energii (natężenie)

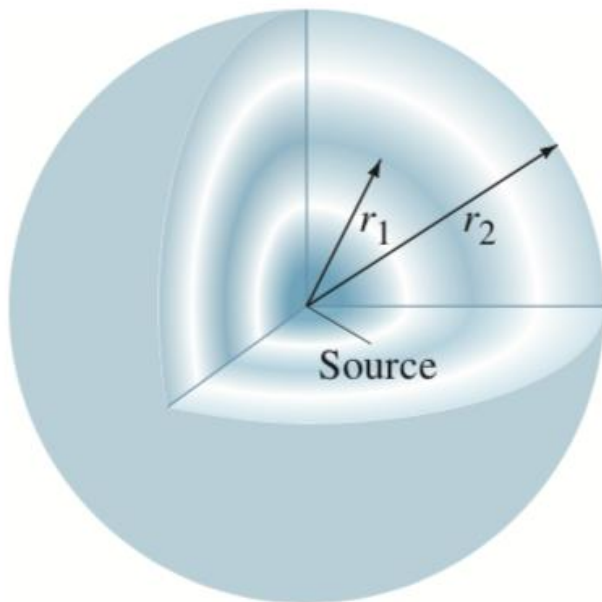
Natężenie [W/m²]: miara średniej energii przenoszonej przez falę w jednostce czasu (moc P) przez jednostkową powierzchnię prostopadłą do kierunku rozchodzenia się fali.

$$I = \frac{\text{Energy}}{\text{Area} \times \text{time}}$$



Podstawowe własności fal mechanicznych

Natężenie fali 3D emitowanej przez źródło punktowe w jednorodnym ośrodku

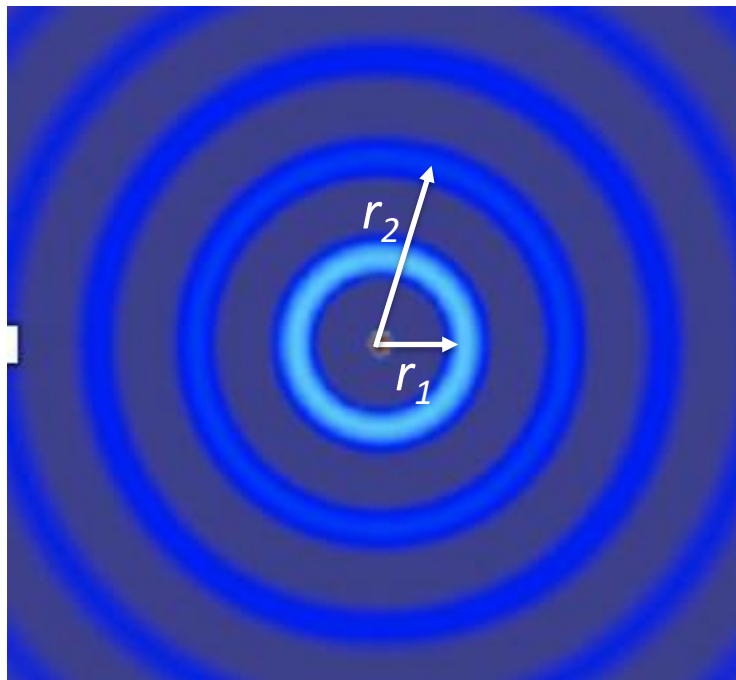


$$I_1 = \frac{\bar{P}}{4\pi r_1^2} > I_2 = \frac{\bar{P}}{4\pi r_2^2}$$

natężenie jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratu odległości od źródła

Podstawowe własności fal mechanicznych

Natężenie fali 2D (W/m) emitowanej przez źródło punktowe w jednorodnym ośrodku



$$I_1 = \frac{\bar{P}}{2\pi r_1} > I_2 = \frac{\bar{P}}{2\pi r_2}$$

natężenie jest odwrotnie proporcjonalne do odległości od źródła

Co powinni zrobić bohaterowie tego filmu,
aby uniknąć kłopotów?



Natężenie dźwięku (intensity of sound)

<https://www.animations.physics.unsw.edu.au/jw/dB.htm>

Ucho ludzkie reaguje na niezwykle duży zakres natężeń. Próg słyszalności wynosi $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$. Próg bólu jest rzędu 1 W/m^2 .

Jeśli rośnie natężenie fali, dźwięk jest głośniejszy, choć zależność między natężeniem a głośnością nie jest liniowa. Ponieważ ucho ludzkie rejestruje natężenie w bardzo szerokim zakresie, wygodnie jest podawać poziom natężenia dźwięku w **decybelach**:

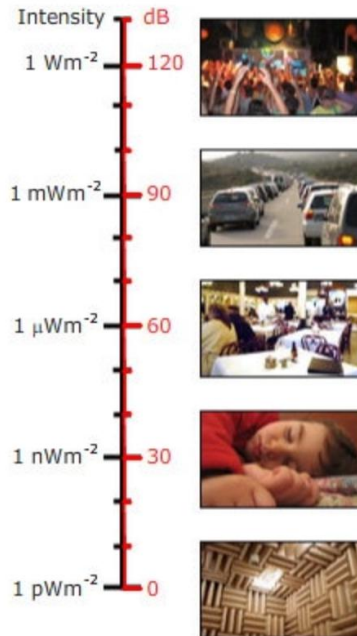
$$b = 10 \log_{10} \left| \frac{I}{I_0} \right| [\text{dB}]$$

dla dźwięku $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$

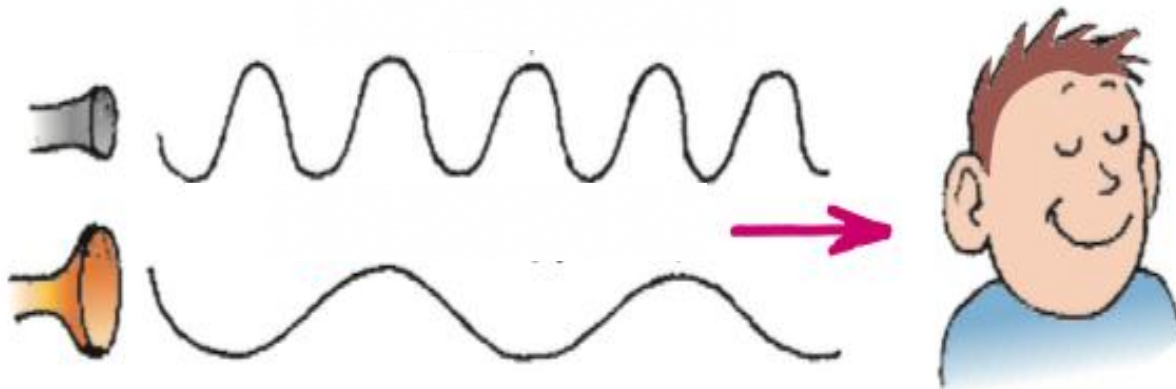
Logarytm jest funkcją rosnącą, ale rosnącą powoli.

I_2/I_1	$\beta_2 - \beta_1$
2,0	3,0 dB
5,0	7,0 dB
10,0	10,0 dB
100,0	20,0 dB
1000,0	30,0 dB

Decybele stosowane są również powszechnie w elektronice i automatyce do charakterystyki różnych wzmacniaczy i filtrów amplitudowych napięcia elektrycznego.



Częstotliwość fali dźwiękowej odpowiada za.... wysokość dźwięku



P. G. Hewitt, *Fizyka wokół nas*

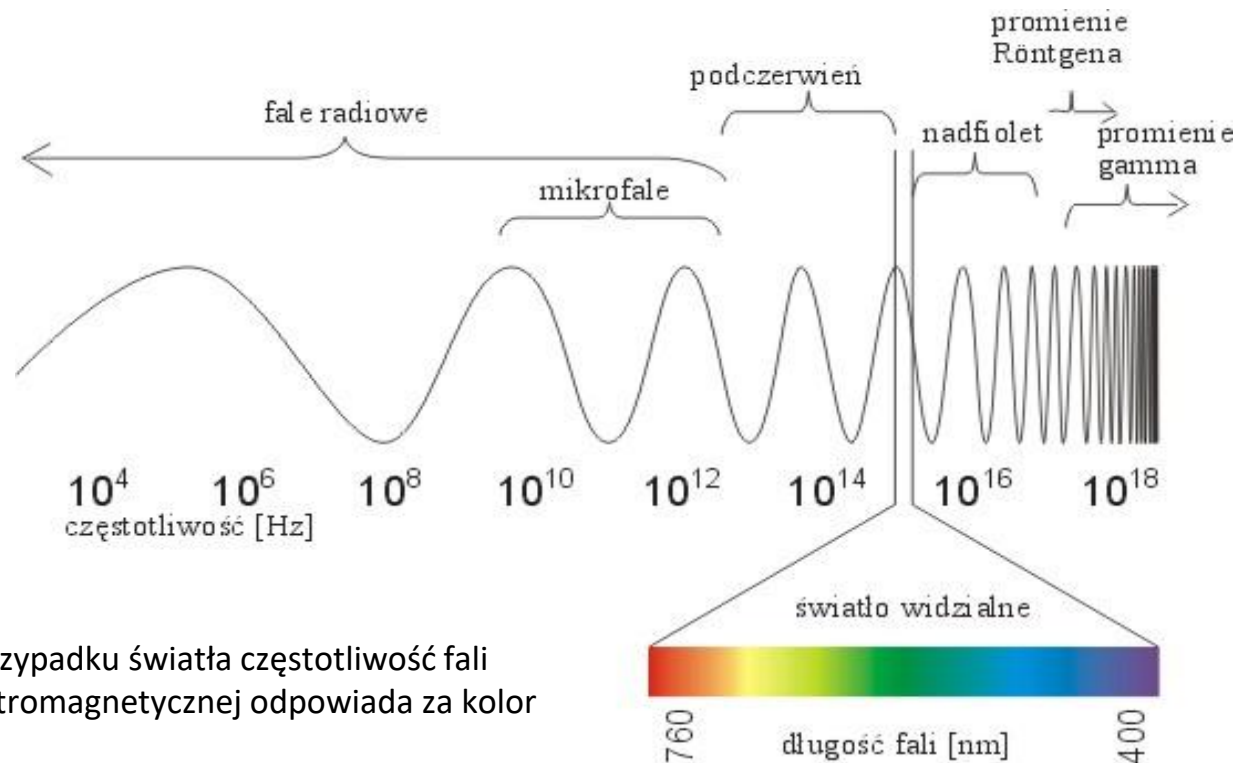
Młody, zdrowy człowiek słyszy dźwięki w zakresie od 20 Hz do 20 000 Hz.

- basy czyli tony niskie o częstotliwościach od ok. 20 do ok. 500 Hz,
- tony średnie od ok. 500 do ok. 2000 Hz,
- soprany, czyli tony wysokie o częstotliwościach od ok. 2000 do 20 000 Hz.

Dźwięki o częstotliwościach poniżej 20 Hz to **infradźwięki**.

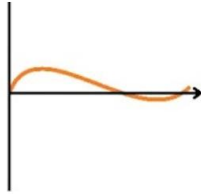
Dźwięki o częstotliwościach powyżej 20 000 Hz to **ultradźwięki**.

Widmo częstotliwościowe fal elektromagnetycznych

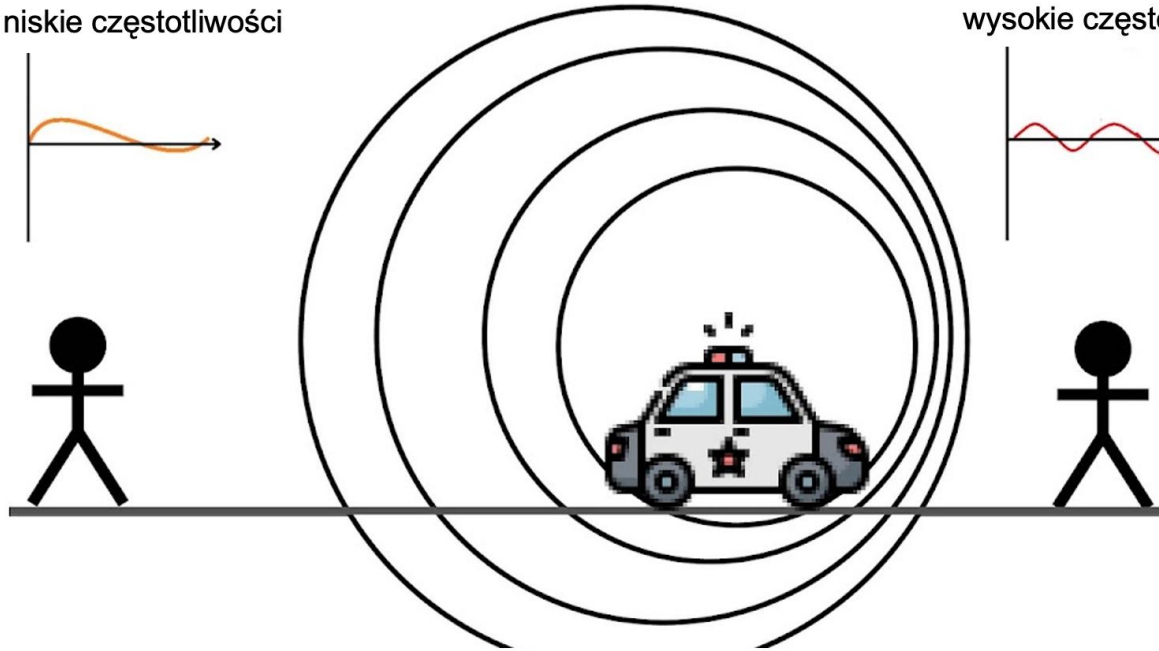
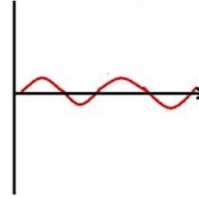


Efekt Dopplera

niskie częstotliwości



wysokie częstotliwości

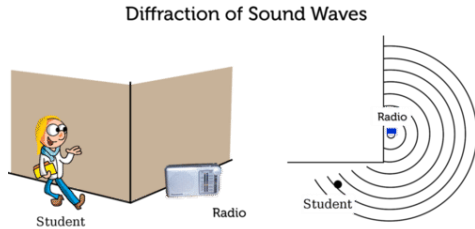


Efekt Dopplera

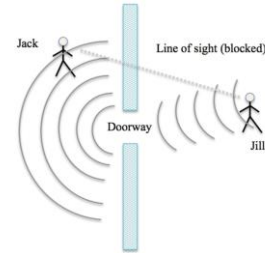


<https://www.youtube.com/watch?v=BGKOJs-iJiM>

Dyfrakcja fal



<https://flexbooks.ck12.org/cbook/ck-12-middle-school-physical-science-flexbook-2.0/section/16.9/primary/lesson/wave-interactions-ms-ps/>



Dyfrakcja (ugięcie fali) to zespół zjawisk związanych ze zmianą kierunku rozchodzenia się fali. Dyfrakcję w węższym znaczeniu określa się jako ugięcie fali wokół krawędzi przeszkody lub otworu.

https://www.youtube.com/watch?v=-5fn_xTkU-Q



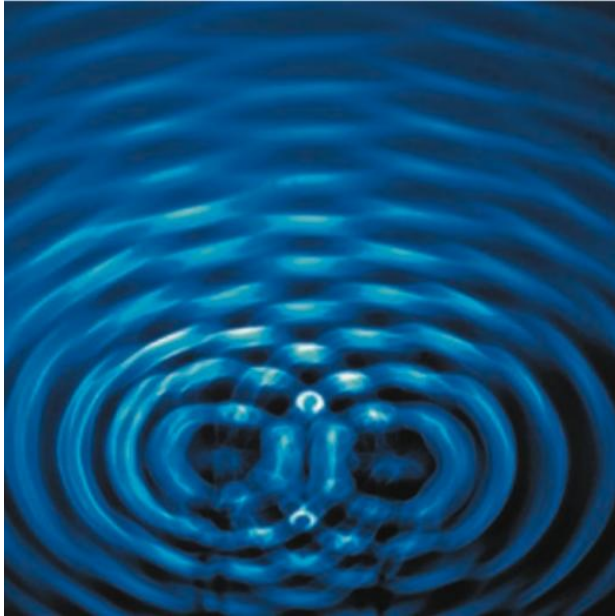
Fale ulegają dyfrakcji jeżeli wielkość przeszkody jest mała w porównaniu do długości fali (na rysunku muzykę koncertową graną na scenie można usłyszeć nawet za kolumną)



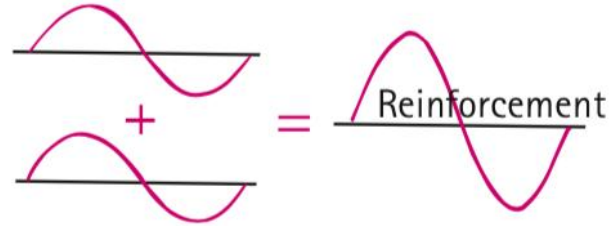
Jeżeli wielkość przeszkody jest większa niż długość fali, dźwięk zostaje odbity.

Interferencja fal

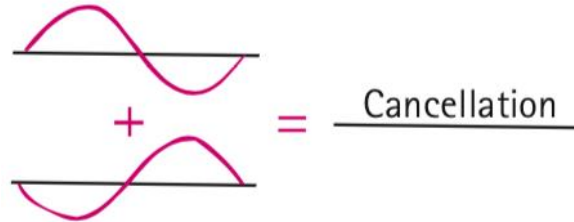
W odróżnieniu od cząstek w jednym miejscu może istnieć kilka fal, które dodają się do siebie. Takie zjawisko nazywamy interferencją.



interferencja konstruktywna

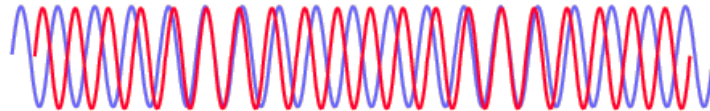


interferencja destruktywna

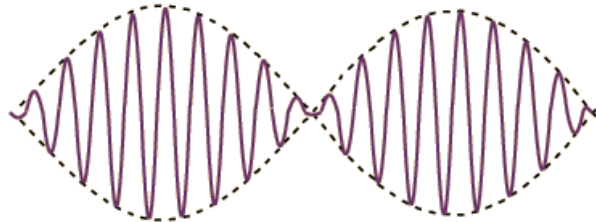


dźwięk + dźwięk = cisza ?

czyli - interferencja (dodawanie) fal dźwiękowych,



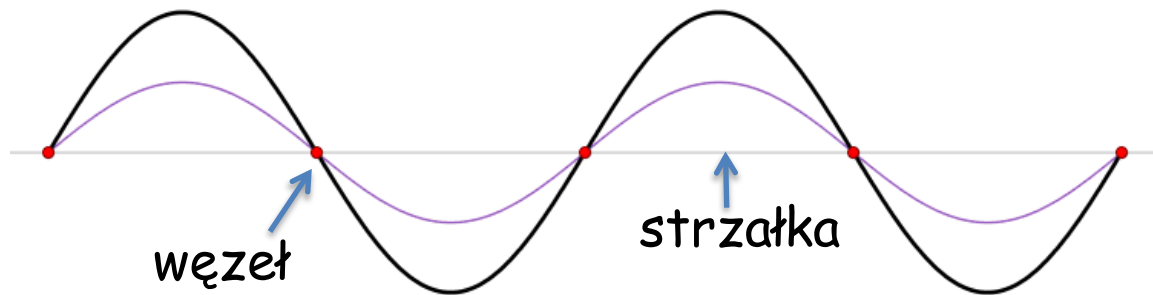
DUDNIENIA



DUDNIENIA

Fale stojące

Dwie jednakowe fale sinusoidalne biegnące w przeciwnych kierunkach interferują dając falę stojącą:

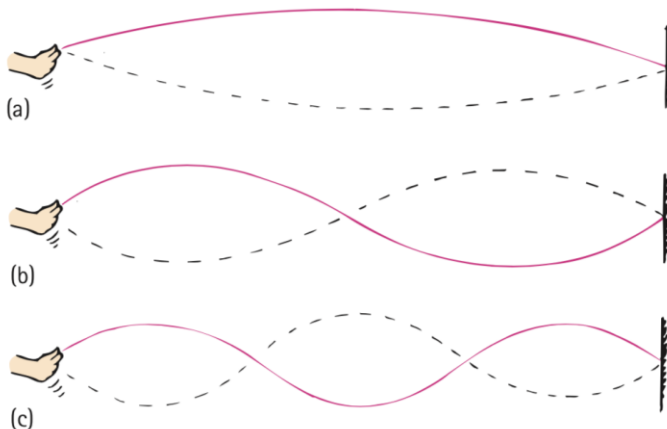


$$A\sin(kx + \omega t) + A\sin(kx - \omega t) = (2A\sin kx)\cos \omega t$$

- istnieją punkty w przestrzeni, w których wychylenie zawsze jest zerowe
węzły fali, gdy $\sin kx = 0$
- istnieją punkty w przestrzeni, w których wychylenie zawsze jest maks.
strzałki fali, gdy $\sin kx = 1$

Jak wytworzyć fale stojące?

Np. potrząsając sznurkiem przyczepionym do ściany.



<https://www.acs.psu.edu/drussell/Demos/SWR/SWR.html>

Częstotliwości rezonansowe

W ośrodkach ograniczonych fale stojące powstają przy ściśle określonych częstotliwościach, tzw. częstotliwościach rezonansowych. Pobudzanie ośrodka na częstotliwościach rezonansowych pozwala efektywnie przekazywać energię i generować falę stojącą.

ośrodek ograniczony z dwóch stron

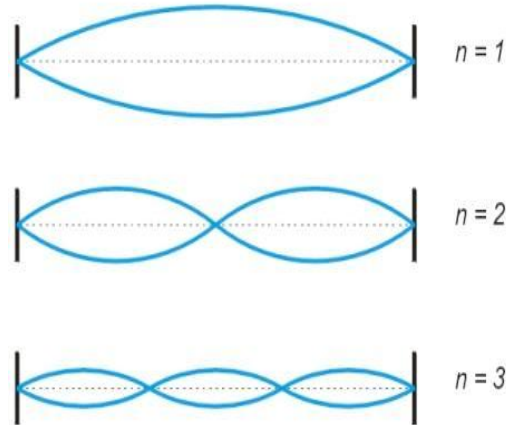
L

$$f_n = \frac{v}{2l} n$$

równanie kluczowe
dla instrumentów
strunowych

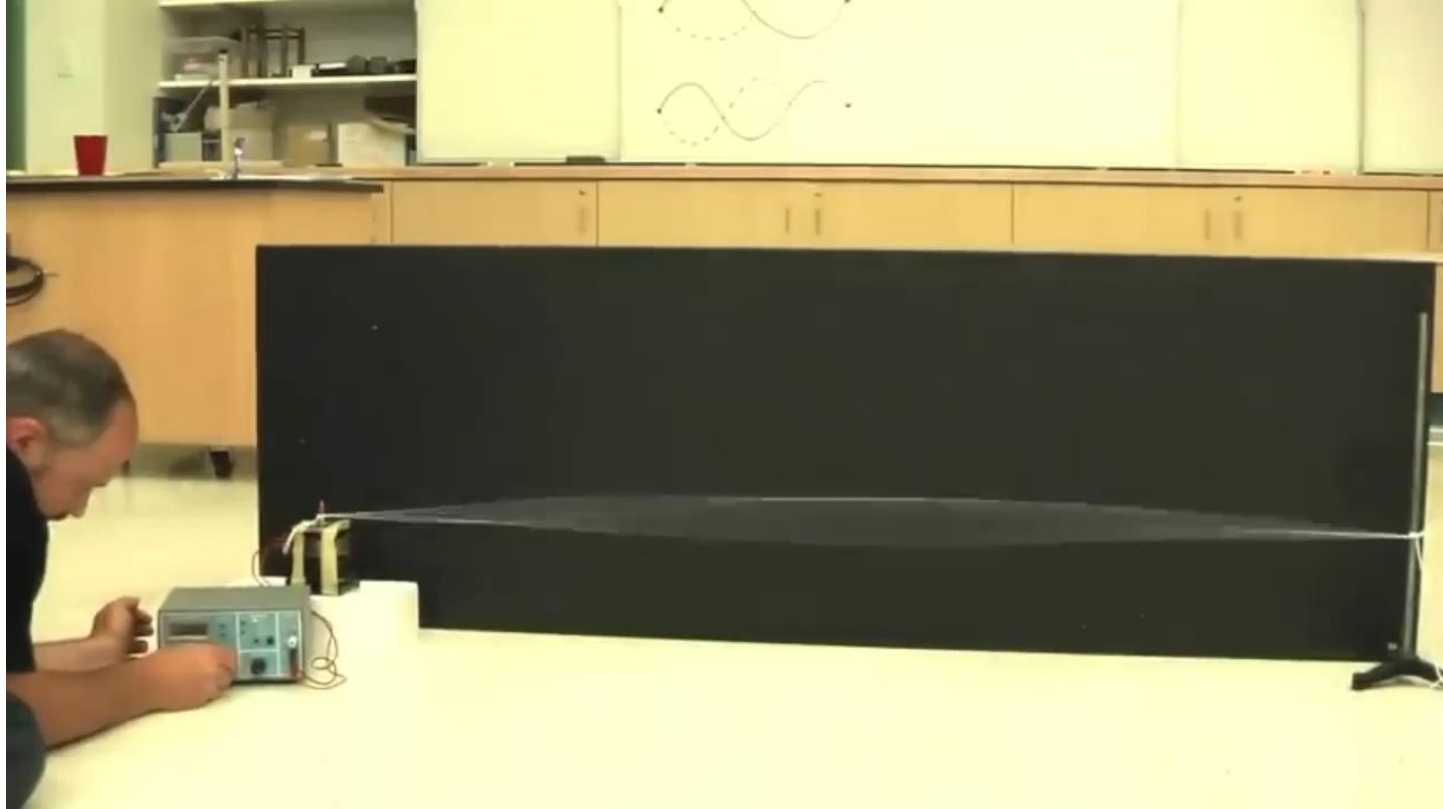
(częstotliwości rezonansowe,
harmoniczne)

$n = 1, 2, 3, \dots$



dozwolona jest tylko całkowita
liczba półfal

Fale stojące = podstawa działania instrumentów muzycznych



Fale stojące

= podstawa działania instrumentów muzycznych



Częstotliwość fali stojącej zależy od:

- długości struny
- naprężenia struny
- grubości struny

$$f_n = \frac{v}{2l} n$$

Prędkość fali w strunie:

$$v = \sqrt{\frac{\text{naprezenie struny}}{\text{masa/dlugosc}}}$$

Barwa dźwięku

(*tembr*)

pierwsza harmoniczna



druga harmoniczna

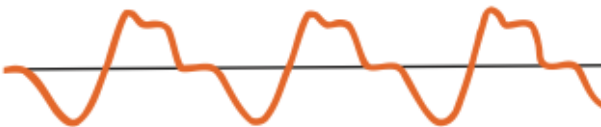


trzecia harmoniczna



barwy
dźwięku

fala powstała z
dodania poprzednich fal



Podstawy działania instrumentów dętych



$$f_n = \frac{v}{4l}(2n+1)$$



Ponieważ prędkość dźwięku jest ustalona. Częstotliwości rezonansowe fali stojącej w powietrzu zależą tylko od długości tuby powietrza.

**W helu dźwięk rozchodzi się znacznie szybciej niż w powietrzu.
W heksafluorku siarki dźwięk rozchodzi się znacznie wolniej niż w powietrzu.**



<https://www.youtube.com/watch?v=d-XbjFn3aqE>

Zadania na platformie ZPE

- Jak oddziałuje pole magnetyczne na przewodnik z prądem? [1-4](#)
- Jak oddziałuje p.m. na poruszającą się cząstkę naładowaną? [1-4](#)
- Analizujemy siłę oddziaływania dwóch długich przewodników prostoliniowych [1-3](#)
- Jak definiujemy natężenie fali? [1-3](#)
- Podstawowe pojęcia służące do opisu fal [1-3](#)
- Jak rozchodzi się dźwięk w powietrzu? [1-3](#)
- Klasyfikacja fal [1-5](#)