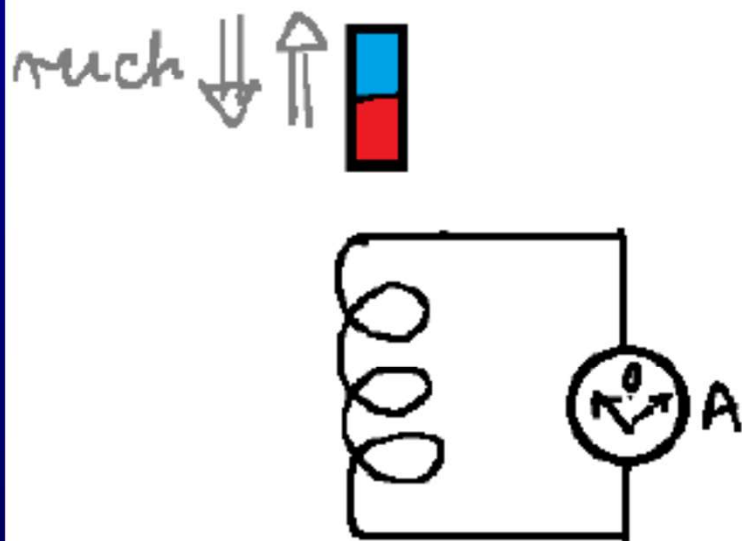


Indukcja elektromagnetyczna
Samoi indukcja i indukcja wzajemna
Wirowe zmienne w czasie pola
elektryczne i magnetyczne
Równania Maxwella
Fale elektromagnetyczne

Zjawisko indukcji elektromagnetycznej (M. Faraday 1830r.)

Doświadczenie: Zwojnica połączona jest z miernikiem prądu; w obwodzie nie ma żadnej baterii (źródła siły elektromotorycznej SEM). Gdy magnes jest nieruchomy, miernik pokazuje zerowy prąd. Jednak jeśli magnes przemieszczamy w kierunku do lub od zwojnicy, to w obwodzie pojawi się prąd (wskazówka miernika wychyla się w przeciwne strony przy zbliżaniu i oddalaniu magnesu).



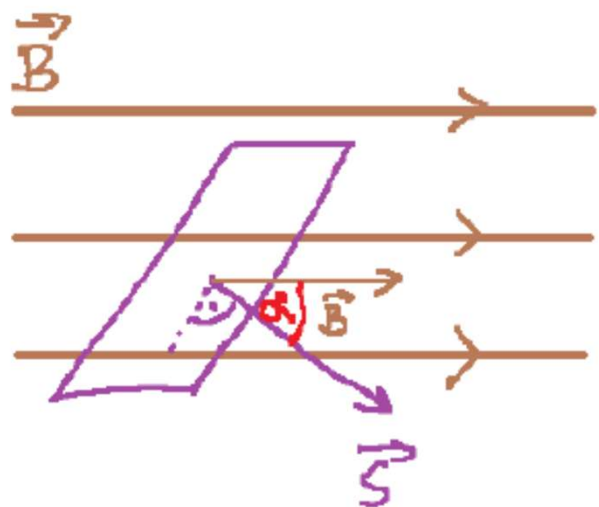
Zwojnica zachowuje się więc tak, jakby dołączono do niej źródło siły elektromotorycznej SEM. Prąd wytwarzany w zwojnicy nazywamy indukcyjnym i mówimy, że został wytworzony przez indukowaną siłę elektromotoryczną.

Samo istnienie pola B nie wystarcza do tego, aby popłynął prąd.

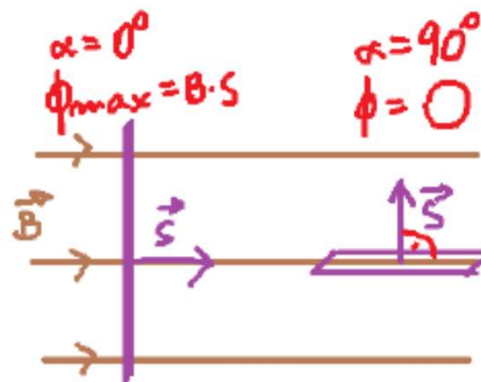
Na podstawie wszystkich swoich eksperymentów Faraday stwierdził, że prąd elektryczny w obwodzie pojawia się tylko wtedy, gdy zmienia się liczba linii pola B przechodzących przez obwód, czyli **gdy zmienia się strumień pola magnetycznego przechodzący przez obwód (w jakimś przedziale czasu).**

Strumień pola magnetycznego (strumień wektora B przechodzącego przez powierzchnię)

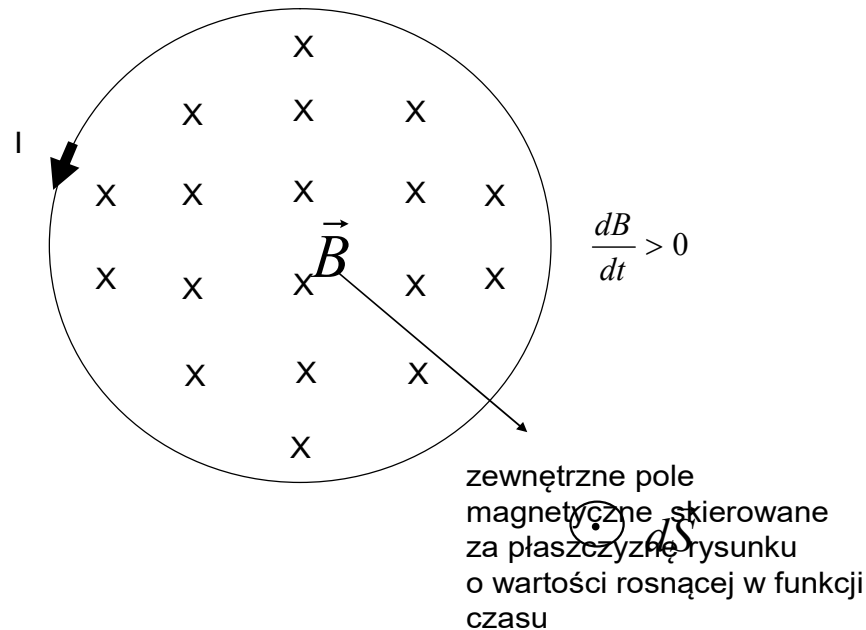
Dla pola **jednorodnego** i powierzchni **płaskiej ograniczonej obwodem/pętlą z przewodnika** o polu S ustawionym pod pewnym kątem do linii pola B nazywamy **iloczyn skalarny**:



$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = B \cdot S \cdot \cos \alpha$$



Prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya(1830)



$$\mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

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

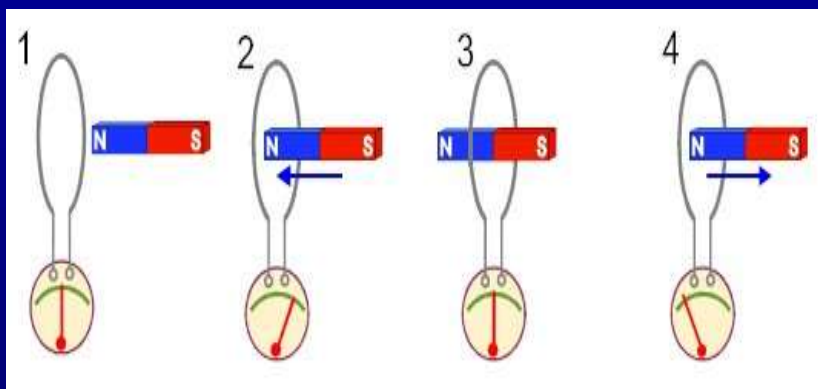
$$I = \frac{|\mathcal{E}_i|}{R}$$

W zamkniętym obwodzie elektrycznym indukuje się siła elektromotoryczna o wartości proporcjonalnej do szybkości zmian strumienia pola magnetycznego ϕ_B przenikającego przez powierzchnię rozpiętą na tym obwodzie, która powoduje przepływ prądu elektrycznego indukcji.

Kierunek przepływu prądu jest taki iż zgodnie z **regułą przekory Lenza** pole magnetyczne wytworzone przez ten prąd przeciwdziała zmianie strumienia pola magnetycznego, która go wywołuje (w przykładzie pokazanym na rysunku ma kierunek przeciwny do kierunku indukcji pola B i dąży do spowolnienia szybkości przyrostu wektora indukcji pola)

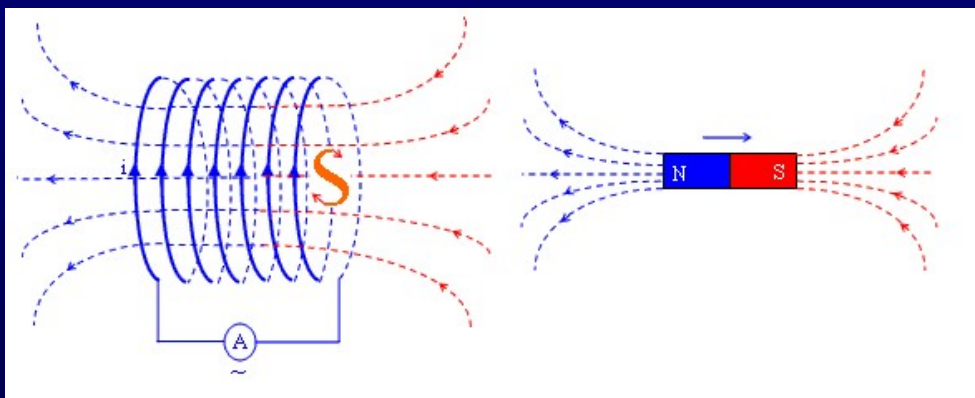
Zmiana strumienia pola magnetycznego może być wywołana poprzez

- 1) zmiany wartości indukcji pola
- 2) zmianę kąta jaki tworzą linie indukcji pola z powierzchnią obwodu.
- 3) zmiany powierzchni obwodu obejmującego strumień

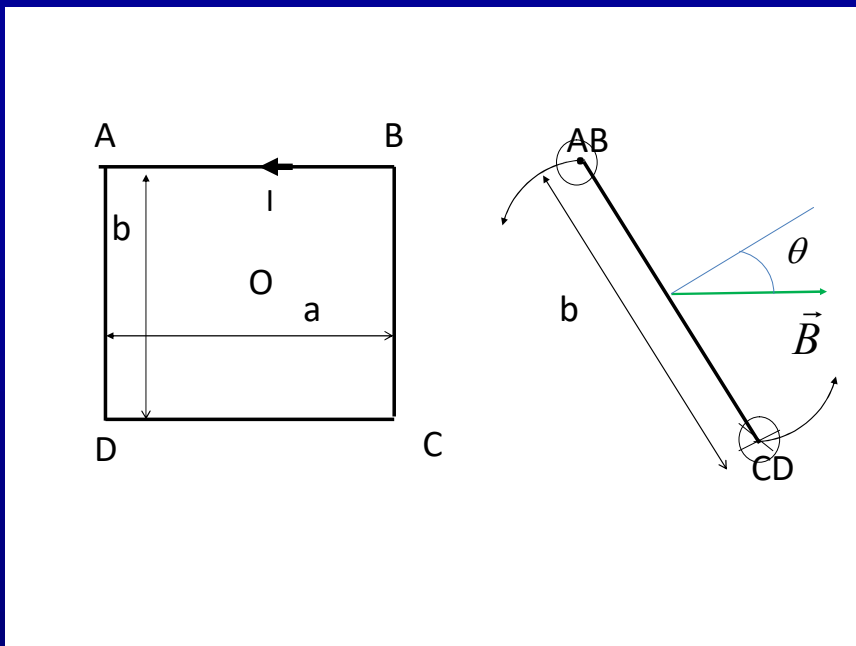


Zbliżanie magnesu do pętli z przewodnika powoduje wzrost indukcji pola co prowadzi do wzrostu strumienia pola przenikającego przez zwoje solenoidu i wywołanie przepływu prądu generującego pole o zwrocie wektora indukcji takim, iż wnosi ono wkład o przeciwnym znaku do strumienia. Prowadzi to do obniżenia szybkości wzrostu strumienia pola przenikającego przez zwoje solenoidu

Zmiana kierunku ruchu magnesu wywołuje zmianę kierunku prądu indukowanego, którego pole ma wówczas zwrot przeciwny do powstałego przy zbliżaniu magnesu



Jednocześnie na magnes działa siła przeciwdziałająca jego ruchowi.



Zmiana strumienia pola magnetycznego a zatem i siła elektromotoryczna indukcji ε_i oraz prąd płynący przez obwód I mogą być wywołane także przez zmianę kąta jaki tworzą linie indukcji pola z prostą prostopadłą do powierzchni obwodu.

$$\Phi_B = \oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = Bab \cos(\theta)$$

Ramka obraca się ze stałą prędkością kątową o wartości ω

$$\theta = \omega t$$

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

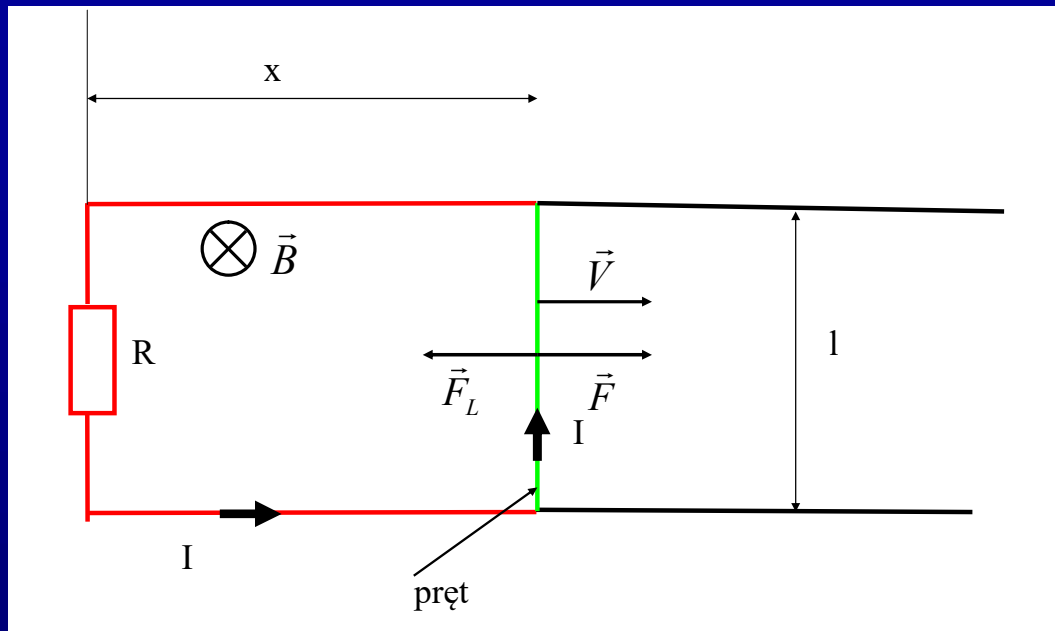
Na omawianym zjawisku może być

oparte działanie generatorów prądu zmiennego

$$\varepsilon_i = -Bab \frac{d \cos(\omega t)}{dt} = Bab \omega \sin(\omega t)$$

$$I = \frac{\varepsilon_i}{R} = \frac{Bab \omega \sin(\omega t)}{R}$$

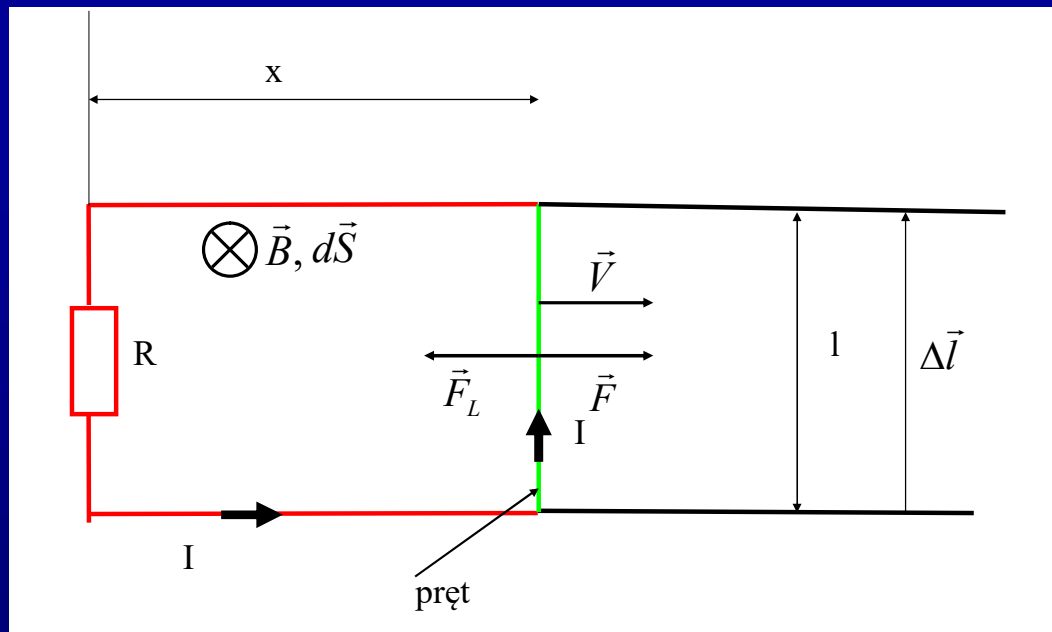
Przykład dodatkowy



W sytuacji pokazanej na rysunku następuje przesuwanie zielonego pręta w prawo, co powoduje wzrost powierzchni obwodu elektrycznego (oznaczonego na czerwono i zielono) i wzrost strumienia pola magnetycznego przenikającego przez obwód. To wywołuje powstanie siły elektromotorycznej i przepływ prądu w obwodzie.

Jednocześnie na pręt przez który płynie prąd w polu magnetycznym działa siła Lorentza $\vec{F}_L$, które przeciwdziała ruchowi pręta w prawo, co jest przejawem reguły przekory Lenza. W celu przesuwu pręta w prawo niezbędne jest przyłożenie siły $\vec{F}$, która wykonuje pracę, która jest zamieniana na energię cieplną wydzielaną na oporniku wchodzącym w skład obwodu elektrycznego.

Analiza ilościowa przykładu (dla zainteresowanych)



Strumień pola magnetycznego

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

Siła elektromotoryczna indukcji

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -Bl \frac{dx}{dt} = -Bl|\vec{V}|$$

Natężenie prądu

$$I = \frac{|\varepsilon_i|}{R} = \frac{Bl|\vec{V}|}{R}$$

Wartość siły Lorentza

$$|\vec{F}_L| = BIl \sin(90^\circ) = BIl = \frac{B^2 l^2 |\vec{V}|}{R}$$

Wartość siły zewnętrznej równoważącej siłę Lorentza
dzięki której możliwy jest ruch jednostajny pręta

$$\vec{F} = -\vec{F}_L$$

$$|\vec{F}| = \frac{B^2 l^2 |\vec{V}|}{R}$$

$$\vec{F}_L = I\vec{l} \times \vec{B}$$

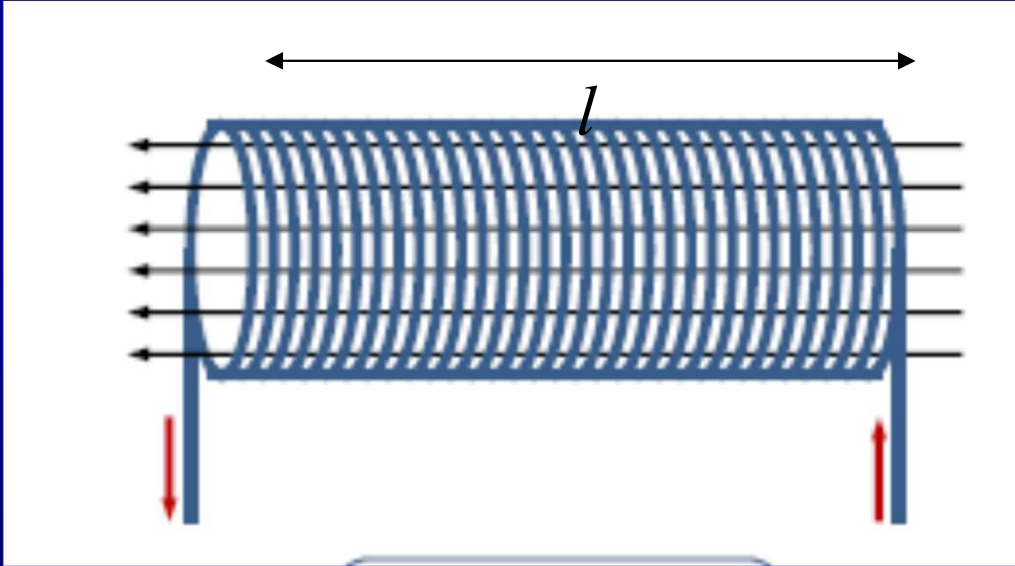
Energia wydzielona w czasie Δt na oporniku

$$W = I^2 R \Delta t = \frac{B^2 l^2 V^2}{R} \Delta t$$

równa pracy siły zewnętrznej

$$W = |\vec{F}| \Delta x = \frac{B^2 l^2 |\vec{V}|}{R} |\vec{V}| \Delta t = \frac{B^2 l^2 V^2}{R} \Delta t$$

Obliczanie indukcyjności cewki, samoindukcja



Samoindukcja –pojawienie się siły elektromotorycznej indukcji w cewce na skutek zmiany natężenia prądu płynącego przez cewkę

Wartość indukcji pola w cewce wywołanego przez płynący prąd o natężeniu I

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

Strumień indukcji pola przenikający przez N zwojów

$$\Phi_B = N\phi_B = NBS = \frac{\mu_0 N^2 S}{l} I$$

Siła elektromotoryczna indukcji (samoindukcji) SEM wywołana przez zmianę natężenia prądu płynącego przez solenoid

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi_B}{dt} = -N \frac{d\phi_B}{dt} = -\frac{N^2 \mu_0 S}{l} \frac{dI}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

Indukcyjność cewki

$$L = -\frac{\varepsilon_i}{\frac{dI}{dt}} = \frac{\Phi_B}{I} = \frac{N^2 \mu_0 S}{l}$$

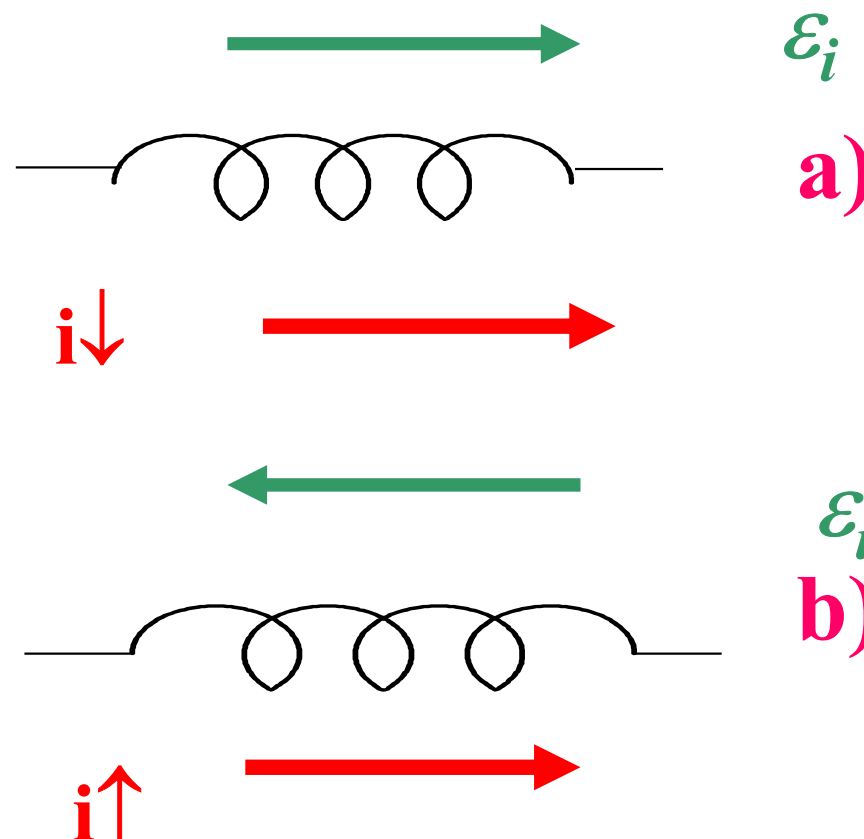
Jednostką indukcyjności jest henr

$$H = T \cdot m^2 / A = V \cdot s / A = \Omega \cdot s$$

Zwrot siły elektromotorycznej indukcji jest taki, iż przeciwdziała ona zmianie która ją wywołuje (gdy natężenie prądu rośnie spowalnia jego wzrost, gdy natężenie prądu maleje, opóźnia szybkość spadku natężenia prądu)

Kierunek SEM można otrzymać z reguły Lenza.

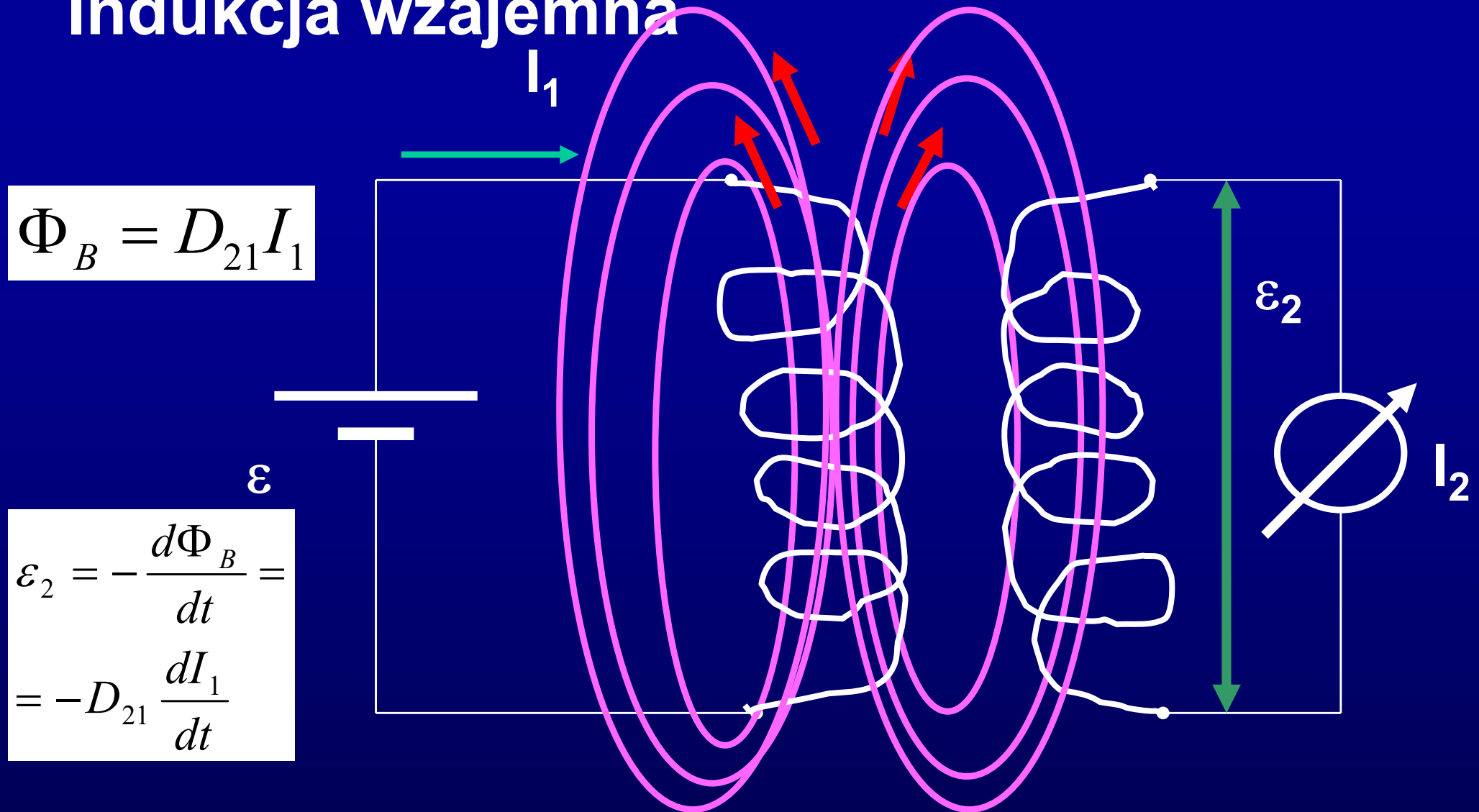
**Wyobraźmy sobie, że
nawinęliśmy cewkę.
Zauważamy różne
kierunki siły
elektromotorycznej ε_i .**



W przewodzie a) prąd maleje, a w przewodzie b) rośnie.

ε_i - siła elektromotoryczna w obu przypadkach przeciwdziała zmianie prądu.

Indukcja wzajemna



$$\Phi_B = D_{21} I_1$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E}_2 &= - \frac{d\Phi_B}{dt} = \\ &= -D_{21} \frac{dI_1}{dt} \end{aligned}$$

D_{21} - współczynnik indukcji wzajemnej

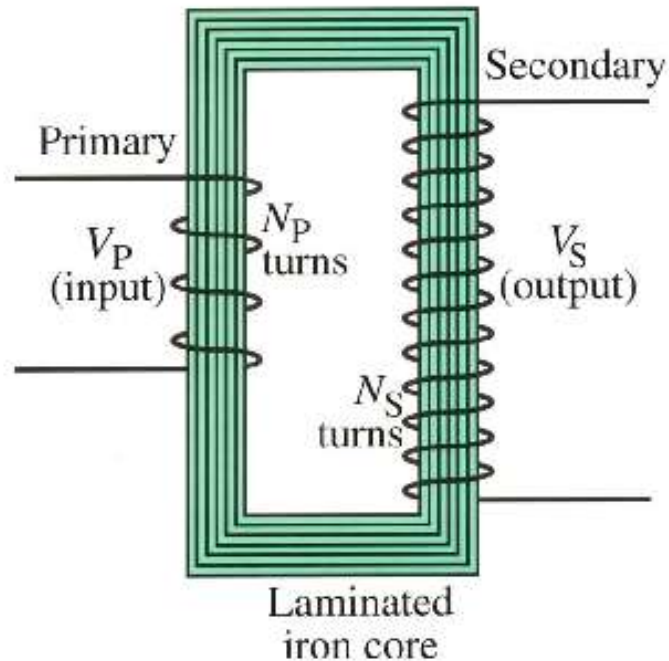
Indukcja wzajemna-powstanie siły indukcji w 2 cewce na skutek zmiany strumienia pola magnetycznego przenikającego przez zwoje 2 cewki wytworzonego przez zmienny w czasie prąd płynący przez 1 cewkę. Na omawianym zjawisku jest oparte działanie transformatora

Wartość współczynnika indukcji wzajemnej D_{21} silnie wzrasta po umieszczeniu pomiędzy zwojami 2 cewki materiału magnetycznego o dużej względnej wartości przenikalności magnetycznej μ_r (*ferromagnetyka*). Umieszczenie materiału ferromagnetycznego w obszarze cewki powoduje wzrost wartości pola w obszarze 2 cewki i siły elektromagnetycznej indukcji μ_r -krotnie.

TRANSFORMATOR

$N_S > N_P$

transformator podwyższający
napięcie



$N_S > N_P$ transformator
podwyższający napięcie
 $N_S < N_P$ transformator
obniżający napięcie

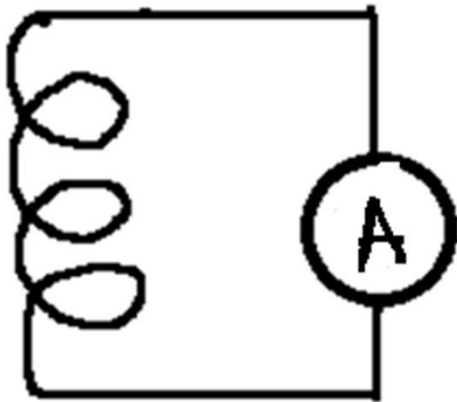
$$\mathcal{E}_p = N_p \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\mathcal{E}_s = N_s \frac{d\Phi_B}{dt}$$

$$\frac{\mathcal{E}_s}{\mathcal{E}_p} = \frac{N_s}{N_p}$$

Stosunek spadków napięć na transformacie w obwodzie wyjściowym i wejściowym zależy od stosunku ilości zwojów w cewkach wchodzących w skład tych obwodów

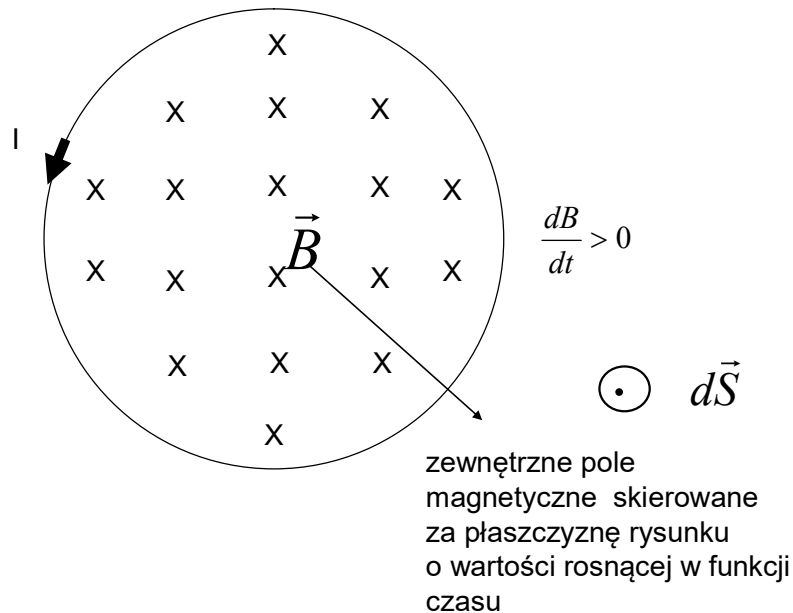
Pyt. Na rysunku przedstawiono zwojnicę połączoną z amperomierzem oraz znajdujący się obok niej magnes sztabkowy. Które z poniżej zapisanych stwierdzeń jest prawdziwe?



- a) W zwojnicy nie będzie płynął prąd dopóki magnes nie zacznie się przemieszczać względem niej.
- b) Kierunek płynącego w zwojnicy prądu nie zależy od tego, czy magnes jest przemieszczany z zewnątrz do środka zwojnicy, czy z powrotem ze środka zwojnicy na zewnątrz.
- c) W trakcie zbliżania się magnesu do zwojnicy na magnes działa ze strony pola magnetycznego siła prowadząca do samoczynnego wciągania magnesu do wnętrza zwojnicy
- d) W trakcie oddalania się magnesu od zwojnicy na magnes działa ze strony pola magnetycznego siła prowadząca do samoczynnego odpychania magnesu od zwojnicy

Wirowe zmienne w czasie pola
elektryczne i magnetyczne
Równania Maxwella
Fale elektromagnetyczne

Prawo indukcji elektromagnetycznej Faradaya



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

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

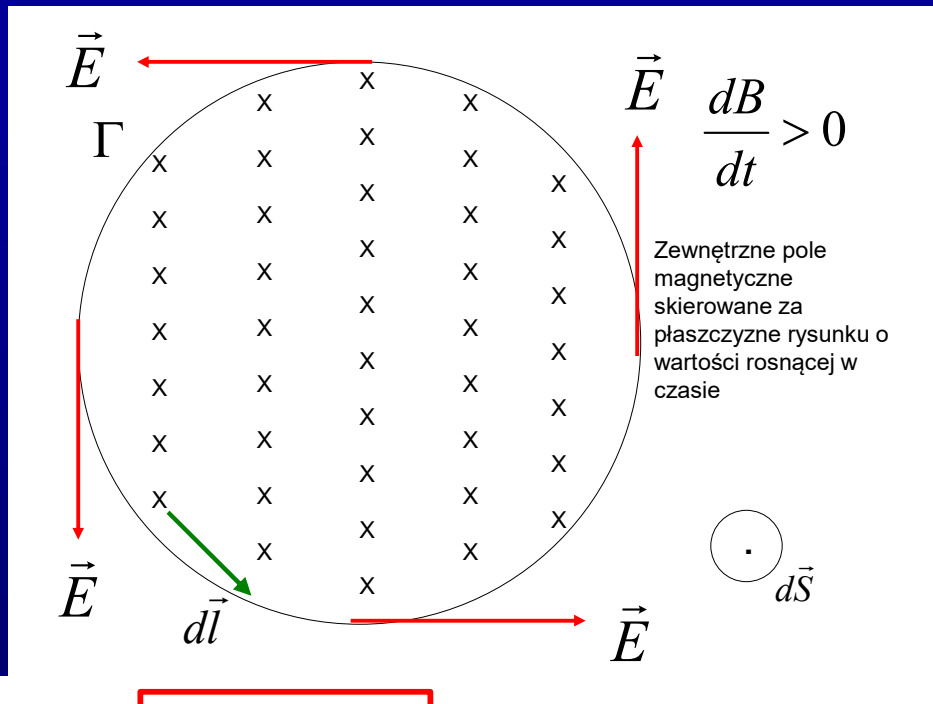
W zamkniętym obwodzie elektrycznym utworzonym z przewodnika prądu umieszczonym w obszarze zmiennego w czasie pola magnetycznego, którego linie indukcji przenikają przez powierzchnię rozpiętą na tym obwodzie, indukuje się siła elektromotoryczna indukcji ε_i o wartości proporcjonalnej do szybkości zmian strumienia pola magnetycznego Φ_B przenikającego przez analizowaną powierzchnię. Prowadzi ona do pojawienia się prądu elektrycznego płynącego w tym obwodzie związanego z ruchem nośników prądu wzdłuż obwodu elektrycznego. Ruch ten odbywa się pod wpływem siły $\vec{F} = q\vec{E}$, działającej na każdy z nośników prądu o ładunku q w obwodzie ze strony powstającego w przestrzeni wirowego pola elektrycznego o natężeniu $\vec{E}$. Gdy obwód ma kształt okręgu prostopadłego do linii indukcji jednorodnego pola magnetycznego $\vec{B}$ to wektor natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$ jest w każdym punkcie styczny do tego obwodu.

Zmienne w czasie pole magnetyczne wytworza pole elektryczne

Jeżeli wzdłuż rozpatrywanego zamkniętego kołowego obwodu nie umieścimy przewodnika to wzdłuż tego obwodu nie popłynie prąd elektryczny natomiast nadal obwód ten będzie styczny do linii sił (natężenia) powstającego wirowego pola elektrycznego.

Ogólnie w obszarze zmiennego w czasie pola magnetycznego zawsze pojawia się wirowe pole elektryczne. Cyrkulacja natężenia tego pola elektrycznego po dowolnym konturze Γ jest równa szybkości zmian strumienia pola magnetycznego przez powierzchnię rozpiętą na tym konturze.

Dla pola wirowego nie można wprowadzić pojęcia potencjału, jak to robiliśmy dla pola wytworzonego przez nieruchome ładunki, gdyż siła działająca ze strony tego pola jest siłą niezachowawczą i wykonuje niezerową pracę po torze zamkniętym



$$\varepsilon_i = \oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

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

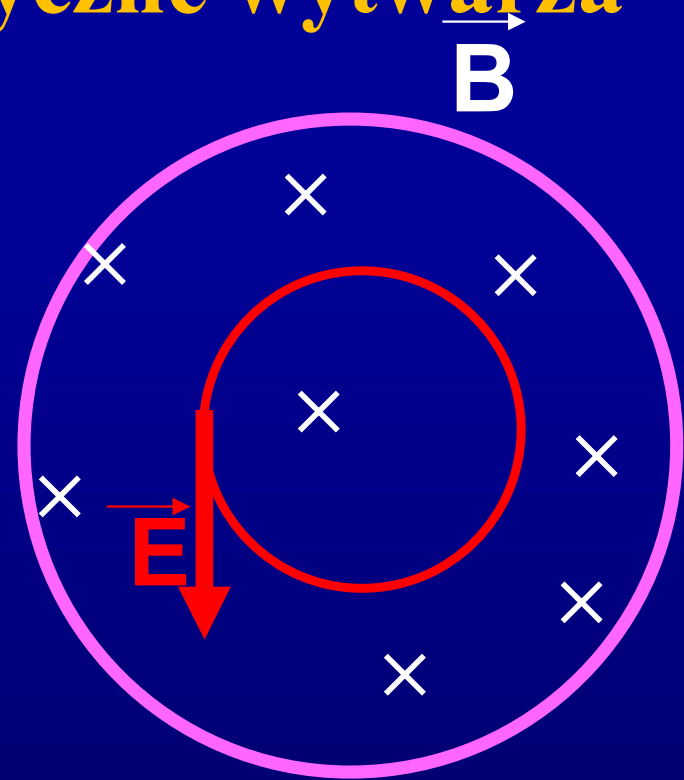
Cyrkulacja wirowego pola elektrycznego
Praca wykonana przez to pole wirowe przy obiegu przez ładunek q całego zamkniętego konturu jest równa iloczynowi ładunku nośnika przez siłę elektromotoryczną indukcji równą cyrkulacji wirowego pola elektrycznego

$$W = \oint_{\Gamma} \vec{F} \cdot d\vec{l} = q \oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = \varepsilon_i q \neq 0$$

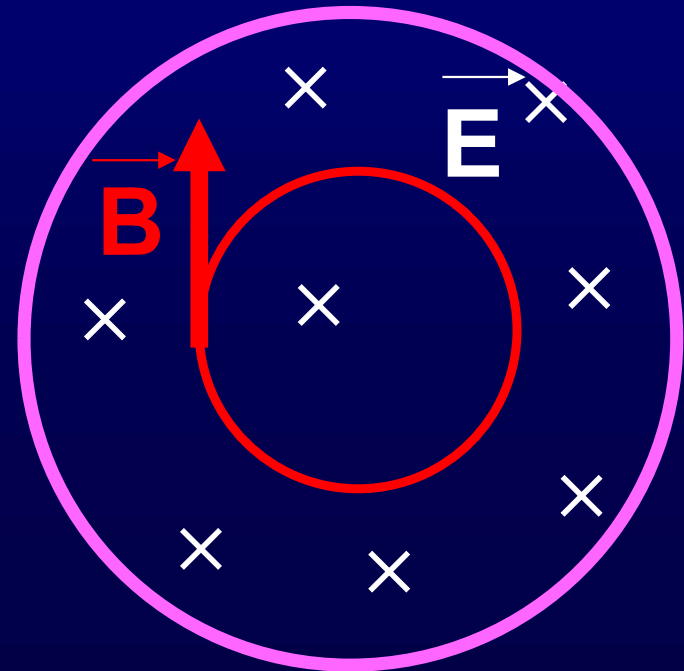
Zmienne w czasie pole elektryczne wytwarza pole magnetyczne

Nie tylko zmienne w czasie pola magnetyczne wytwarza wirowe pole elektryczne ale także zmienne pola elektryczne powoduje powstanie wirowego pola magnetycznego

$$\frac{dB}{dt} > 0$$



$$\frac{dE}{dt} > 0$$



Uogólnione prawo Ampera.

$$\oint_{\Gamma} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 I$$

Pole magnetyczne
jest wytwarzane
przez

zmienny
strumień pola
elektrycznego

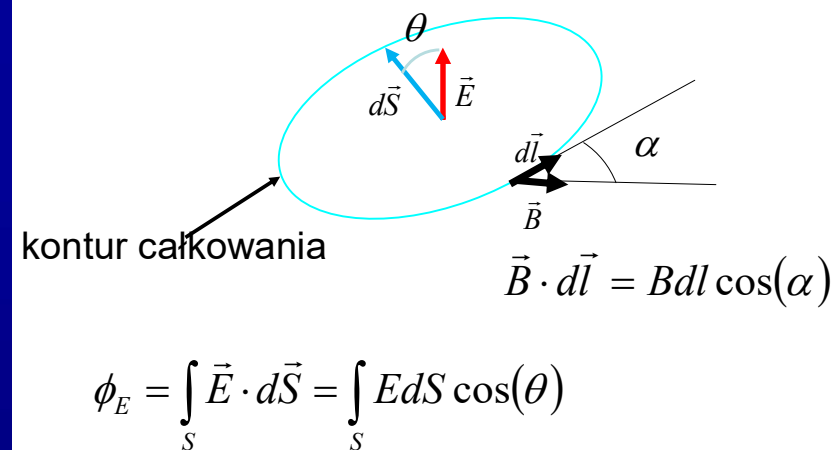
natężenie
prądu

$$\varepsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt}$$

Opisuje szybkość zmian w czasie strumienia pola elektrycznego przez powierzchnie objętą konturem Γ .

W ośrodku o względnej przenikalności elektrycznej ε_r i magnetycznej μ_r uogólnione Prawo Ampera przyjmuje postać

$$\oint_{\Gamma} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mu_0 \mu_r \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 \mu_r \sum_k I_k$$



Równania Maxwella

(postać całkowa)

w ośrodku o względnej przenikalności elektrycznej ϵ_r i magnetycznej μ_r

- Prawo Gaussa dla elektryczności

$$\epsilon_0 \oint_S \epsilon_r \vec{E} \cdot d\vec{S} = q$$

- Prawo Gaussa dla magnetyzmu

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

Wyraża fakt iż linie indukcji pola są krzywymi zamkniętymi

- Prawo indukcji Faradaya

$$\oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

- Prawo Ampere'a

$$\oint_{\Gamma} \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_r \mu_0 \left(\epsilon_r \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + I \right)$$

W próżni $\epsilon_r = \mu_r = 1, q = 0, I = 0$

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

$$\Phi_E = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

Fale elektromagnetyczne

Równania Maxwella przewidują istnienie fal elektromagnetycznych. W szczególności światło jest falą elektromagnetyczną

Mechanizm rozchodzenia się fal elektromagnetycznych:

Zmienne w czasie pole magnetyczne indukuje wirowe zmienne w czasie pole elektryczne i na odwrót, zmienne w czasie pole elektryczne indukuje wirowe zmienne w czasie pole magnetyczne.

Ciąg wzajemnie sprzężonych pól elektrycznych i magnetycznych stanowi falę elektromagnetyczną, w której zależność natężenia od czasu pola elektrycznego i magnetycznego w danym punkcie może mieć postać taką jak w przypadku drgań harmoniczných .

Fala ta może rozchodzić się w próżni i nie wymaga istnienia drgań cząsteczek ośrodka w którym się rozchodzi . Wartość prędkości fali w próżni wynosi

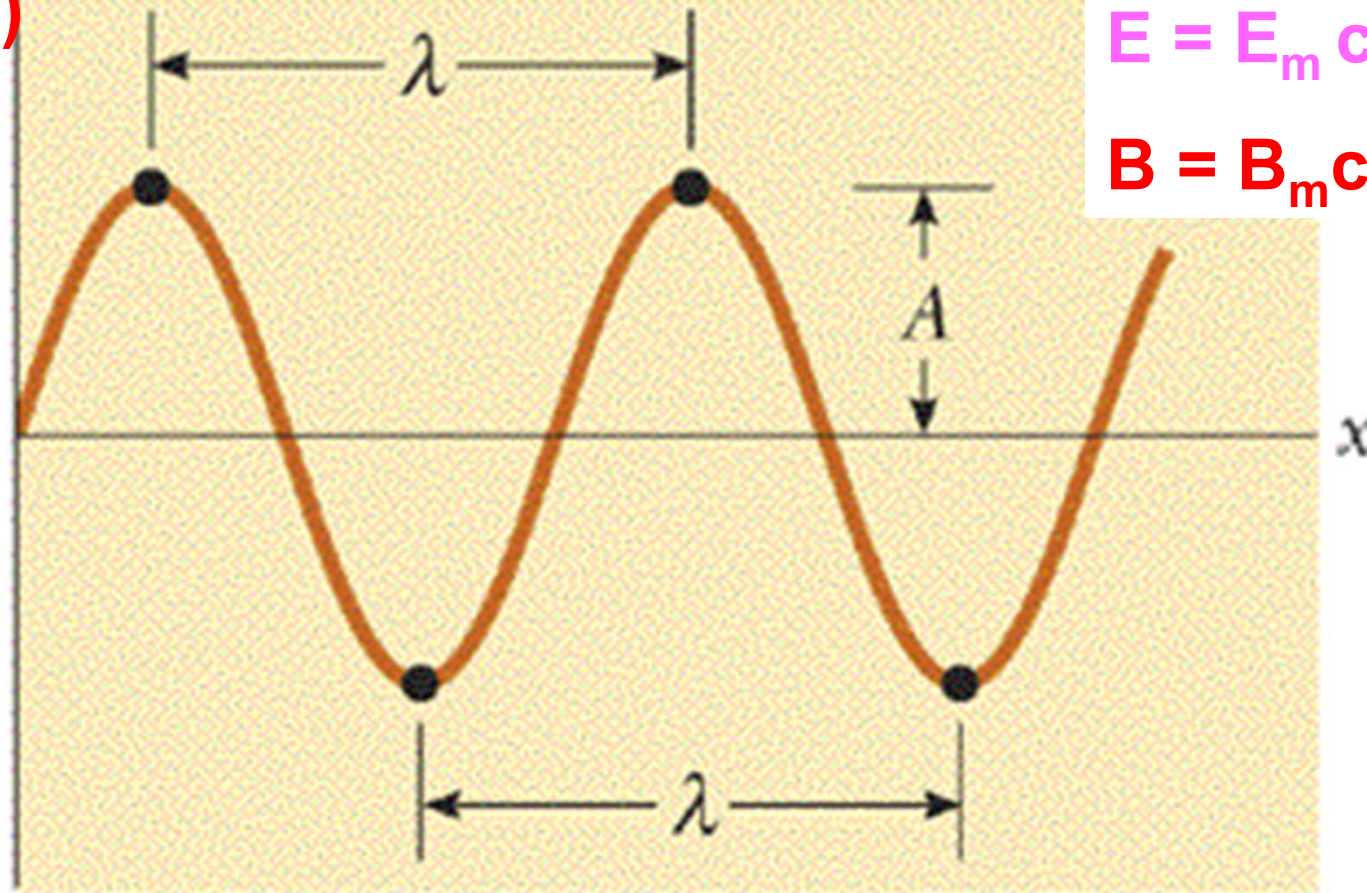
$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = 299\,792 \text{ km/s}$$

W przypadku ośrodka materialnego prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych zależy od częstości ω drgań pola elektrycznego i magnetycznego i jest mniejsza niż w próżni $V=c/n$ (n - bezwzględny współczynnik załamania światła).

Długość fali i amplituda fali

Zależność natężenia pola elektrycznego (indukcji pola magnetycznego) płaskiej fali elektromagnetycznej rozchodzącej się wzdłuż osi OX od położenia w ustalonej chwili czasu

E(B)



$$E = E_m \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$

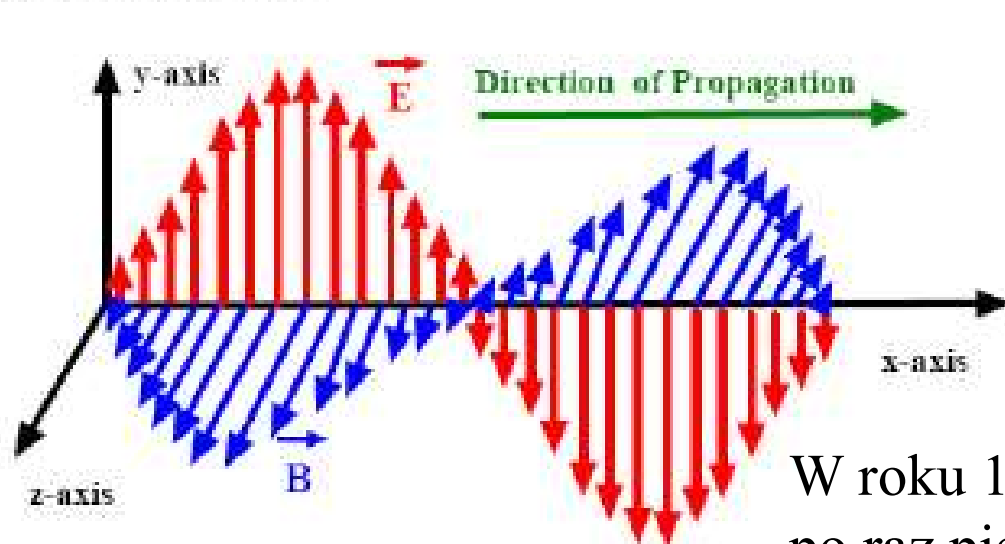
$$B = B_m \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$

$A = E_m (B_m)$ -
amplituda
komponentu
elektrycznego
(magnetycznego)
fali
elektromagnetycznej

$k = 2\pi/\lambda$
-liczba falowa

Długość fali λ jest równa odległości między punktami w których drgania zachodzą w tej samej fazie, którą określamy z dokładnością do 2π .

Fala elektromagnetyczna



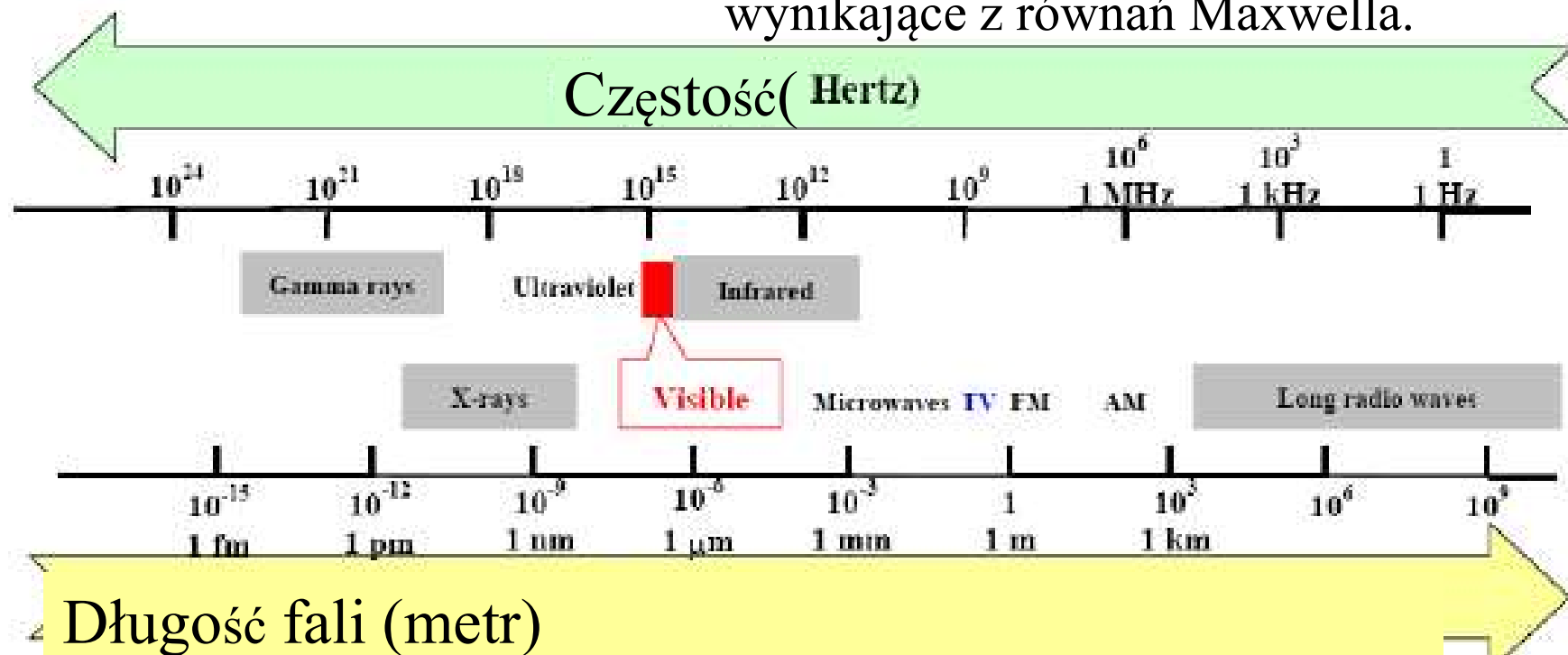
$$c = 1 / \sqrt{\mu_0 \epsilon_0}$$

$$\vec{E} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{E} \times \vec{B} \quad \text{Kierunek propagacji fali}$$

W roku 1888 Heinrich Hertz przeprowadził po raz pierwszy eksperyment, w którym były wytwarzane i odbierane radiowe fale elektromagnetyczne, potwierdzając wnioski wynikające z równań Maxwella.

Widmo fal elektromagnetycznych



Informacje dla zainteresowanych

Równanie falowe dla fal elektromagnetycznych

W oparciu o równania Maxwella zapisane dla ośrodka dla którego $\rho=0$ oraz $q=0$ można pokazać iż natężenia pola elektrycznego $\vec{E}$ i indukcja pola magnetycznego $\vec{B}$ spełniają równania falowe, które w przypadku próżni można zapisać w postaci

$$\Delta \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\Delta \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

gdzie $\Delta A = \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial z^2}$ -laplasjan

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

Dla fali płaskiej rozchodzącej się wzdłuż osi Ox

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

$$\frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial x^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = 0$$

W fali elektromagnetycznej wektory $\vec{E}$ i $\vec{B}$ są prostopadłe do siebie i do kierunku rozchodzenia się fali. Dla fali płaskiej o ustalonych kierunkach drgań wektorów $\vec{E}$ i $\vec{B}$ rozchodzącej się wzdłuż osi x zależność wartości natężenia pola $\vec{B}$ i $\vec{E}$ od czasu i położenia można np. przyjąć w postaci :

$$B = B_m \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$

$$E = E_m \cos(\omega t - kx + \varphi_0)$$

ω - częstość kołowa drgań

$$\omega = 2\pi\nu = 2\pi / T$$

k - liczba falowa $k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{\omega}{V}$, V - prędkość fali (w próżni $V=c$)

λ - długość fali, T - okres drgań, ν - częstotliwość (częstość),
 $\omega t - kx + \varphi_0$ - faza drgań , φ_0 - faza początkowa drgań w $x=0$

Pola elektryczne i magnetyczne drgają w tej samej fazie.

W przypadku fali płaskiej powierzchnie falowe grupujące punkty w których drgania zachodzą w tej samej fazie są płaszczyznami prostopadłymi do kierunku rozchodzenia się fali

W próżni zachodzi przy tym relacja $\frac{E}{B} = c$

Zjawiskami bezpośrednio potwierdzającymi falową naturę promieniowania elektromagnetycznego (w tym światła) są zjawiska interferencji i dyfrakcji.

Interferencja fal świetlnych polega na nakładaniu się na siebie fal o tej samej częstotliwości drgań. Zjawisko to może być obserwowane tylko dla fal spójnych tzn. fal o stałej w czasie różnicy faz. Warunek ten można łatwiej spełnić dla światła wytworzonego przez laser.

Amplituda drgań powstałych w wyniku interferencji dwóch fal wywołujących drgania zachodzące w tym samym kierunku z częstotliwością ω zależy od amplitudy drgań wywołanych przez obie fale osobno A_1 i A_2 odpowiednio oraz różnicy faz początkowych tych drgań

$$A_w = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}$$

W przypadku interferencji dwóch fal o jednakowej długości λ (rozchodzących się z tą samą wartością prędkości $V=\omega/k$) mamy:

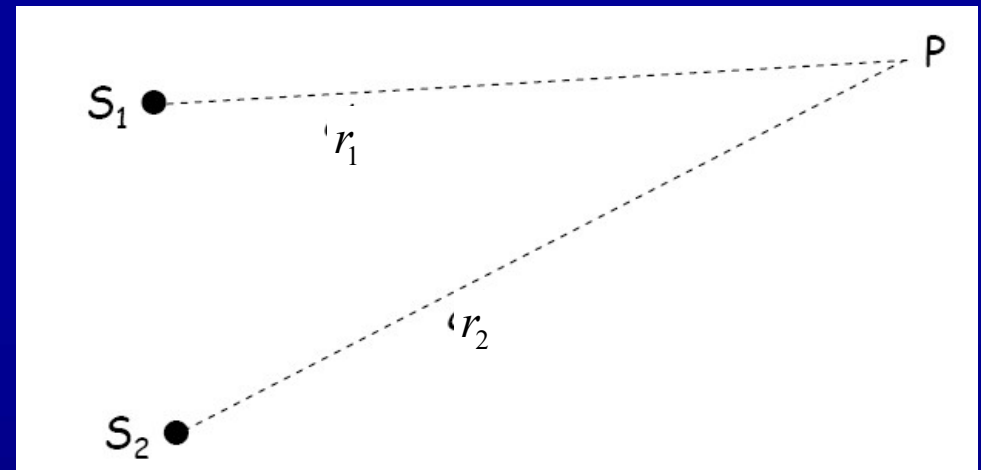
$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 = -k(r_1 - r_2) + (\delta_{01} - \delta_{02}) = \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) + (\delta_{01} - \delta_{02})$$

$r_2 - r_1$ – różnica dróg pokonanych przez obie fale od ich źródeł do punktu, w którym zachodzi interferencja fali

$\delta_{01} - \delta_{02}$ – różnica początkowych faz drgań w punktach, będących źródłami fali.

$$A_w = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\Delta\varphi)}$$

$$\Delta\varphi = k(r_2 - r_1) + (\delta_{01} - \delta_{02}) = \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1) + (\delta_{01} - \delta_{02})$$



Gdy $\delta_{02} = \delta_{01}$ to największa amplituda drgań wypadkowych występująca wtedy gdy $\Delta\varphi = 2n\pi$ występuje w punktach, dla których $|r_2 - r_1| = n\lambda = 0, \lambda, 2\lambda, \dots$ (n -liczba całkowita)

i jest ona równa $A_w = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2} = A_1 + A_2$

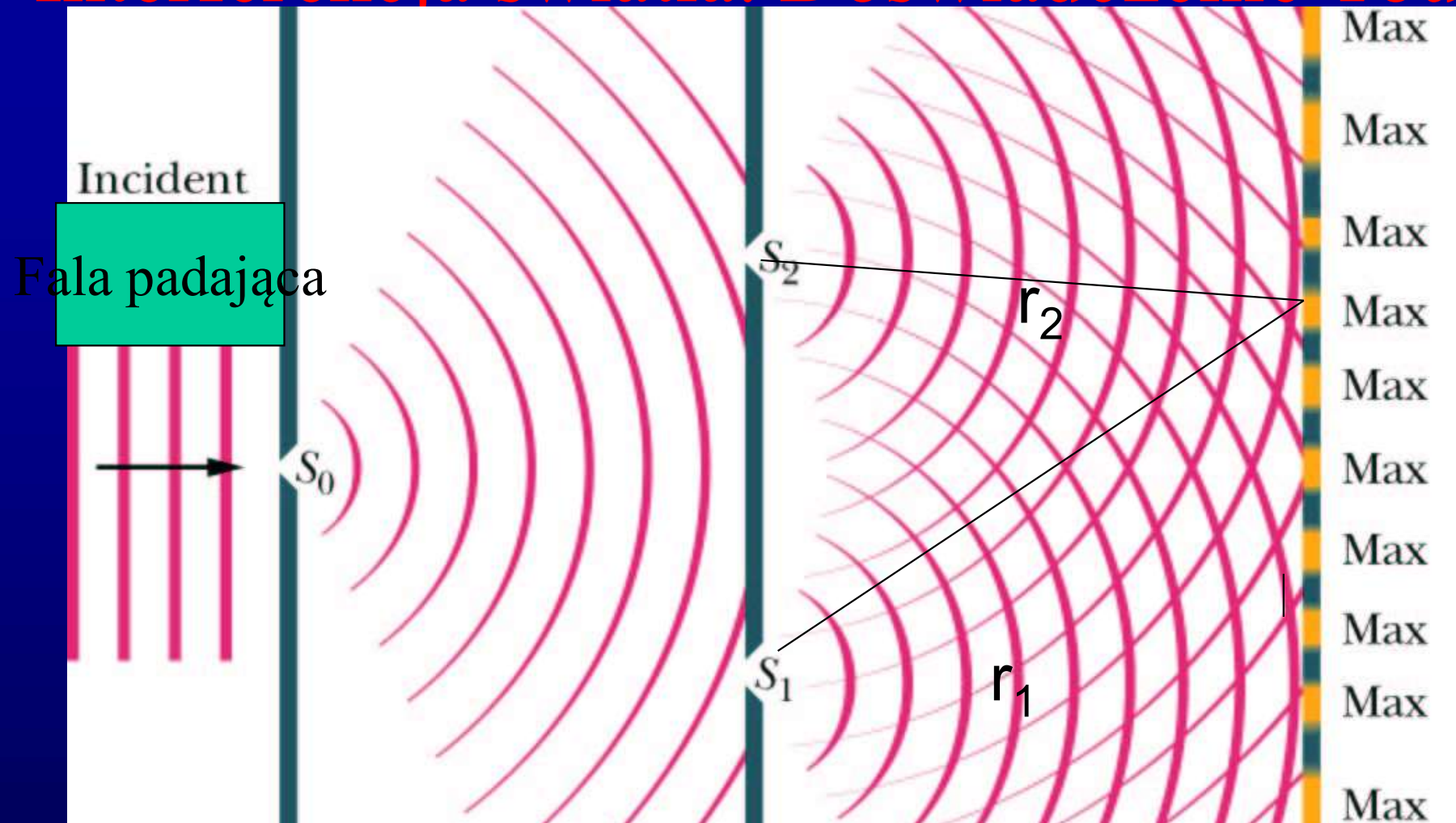
zaś amplituda drgań przyjmująca wartość najmniejszą wtedy gdy $\Delta\varphi = (2n+1)\pi$ osiąga minimalną wartość w punktach dla

których $|r_2 - r_1| = (2n+1)\frac{\lambda}{2} = \frac{1}{2}\lambda, \frac{3}{2}\lambda, \dots$

i jest ona równa

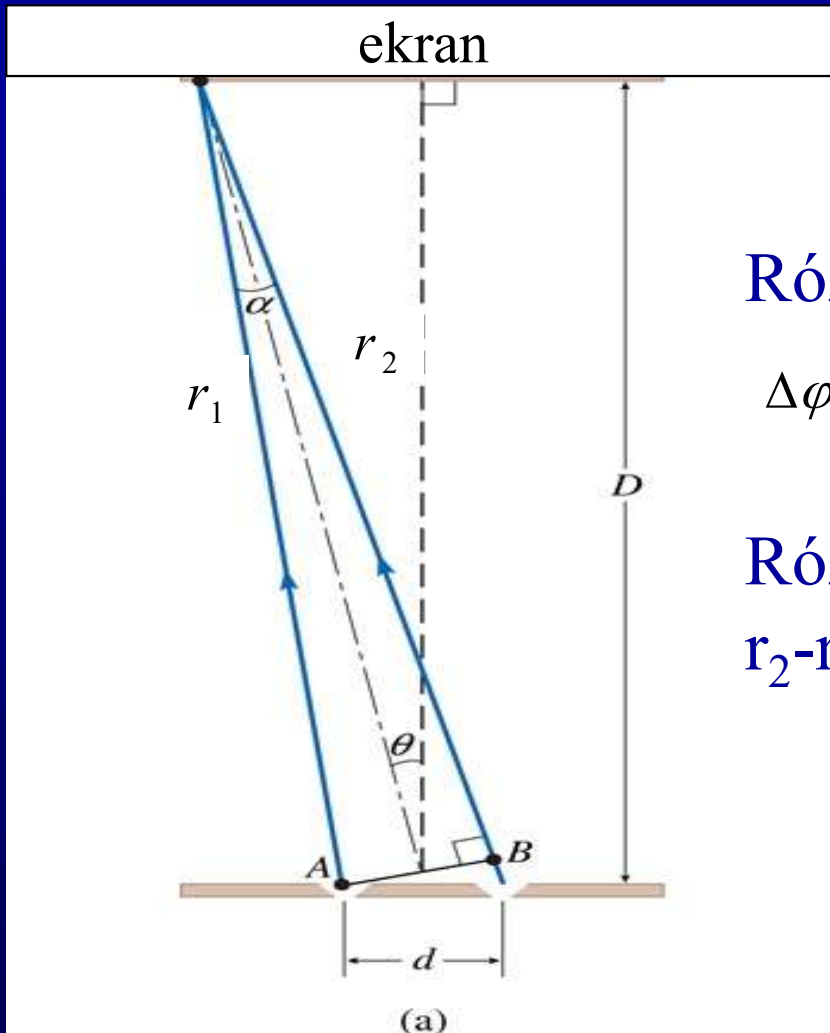
$$A_w = \sqrt{A_1^2 + A_2^2 - 2A_1A_2} = |A_1 - A_2|$$

Interferencja światła. Doświadczenie Younga



Można przyjąć iż punkty położone w szczelinach S_1 i S_2 stanowią źródła fal kulistych(w których powierzchnie falowe są sferami) . Fale te interferują. Wyniku ich interferencji obserwujemy obszary jasno i ciemno określone. Jasność danego punktu zależy od natężenia fali wypadkowej w danym punkcie, które zależy od amplitudy drgań pola elektrycznego zależnej od amplitudy drgań interferujących fal i różnicy faz drgań obu fal.

Doświadczenia Younga- Interferencja światła przechodzącego przez 2 szczeliny ($D \gg d$)

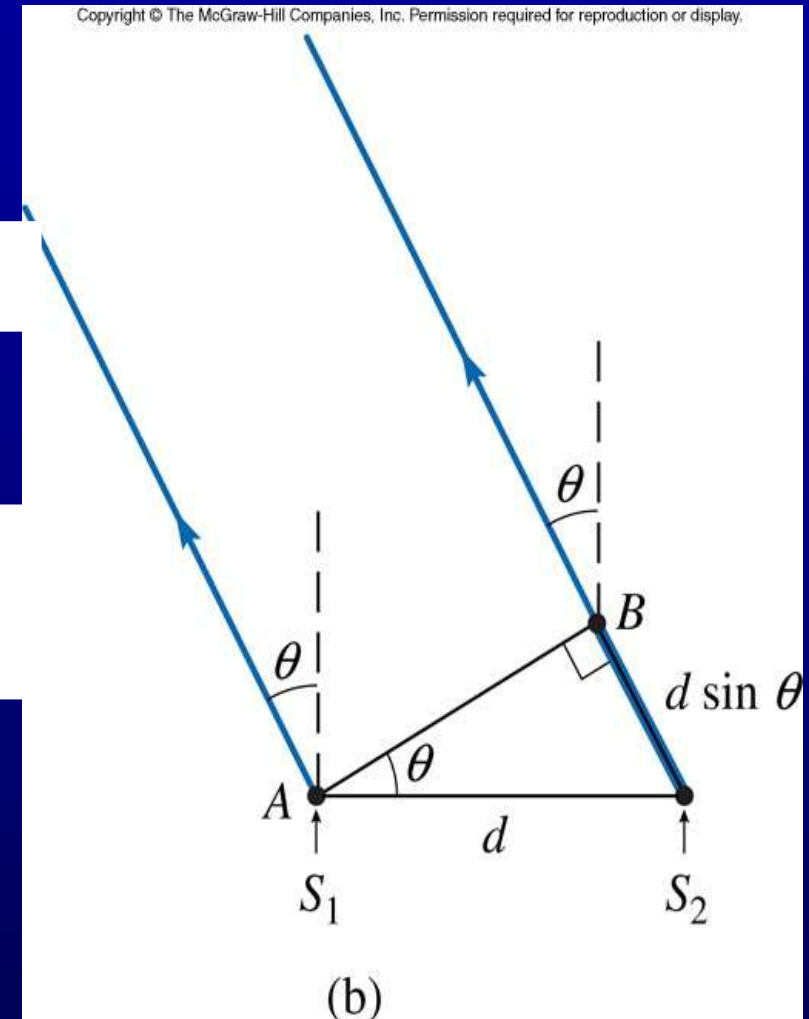


Różnica faz

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(r_2 - r_1)$$

Różnica dróg

$$r_2 - r_1 \cong d \sin \theta$$



Maksimum natężenia gdy

$$\Delta\varphi = n2\pi \Rightarrow r_2 - r_1 = n\lambda \Rightarrow d \sin \theta = n\lambda$$

n-liczba całkowita

Minimum natężenia gdy

$$\Delta\varphi = \left(n + \frac{1}{2}\right)2\pi \Rightarrow r_2 - r_1 = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda \Rightarrow d \sin \theta = \left(n + \frac{1}{2}\right)\lambda$$

Gdy fala nie napotyka na swojej drodze w ośrodku izotropowym przeszkód to jej kształt powierzchni falowych (grupujących punkty dla których drgania pola elektrycznego zachodzą w tej samej fazie) nie ulega zmianie (dla fali płaskiej ma postać płaszczyzn).

W przypadku przechodzenia fali (także płaskiej) przez otwory w przegrodach czy w pobliżu krawędzi przegród można obserwować zmiany kształtu powierzchni falowych co jest efektem **dyfrakcji fali**.

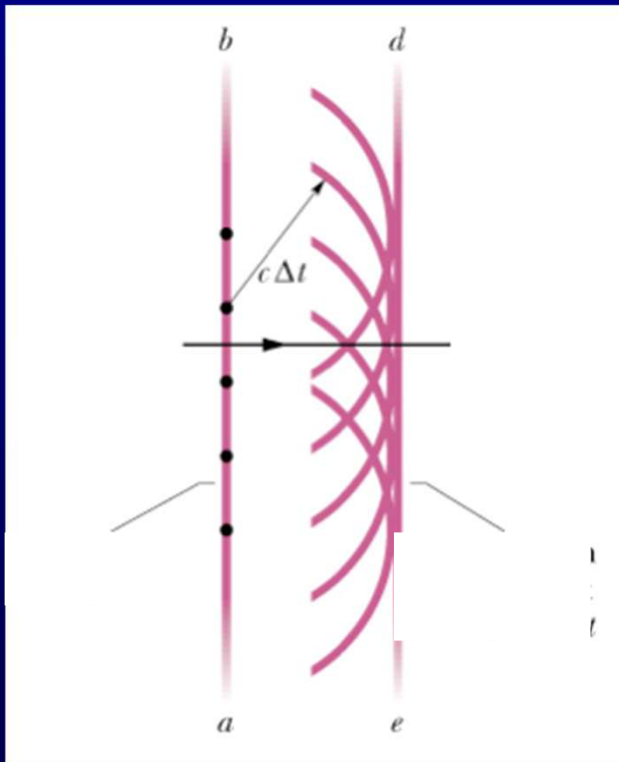
Można w uproszczeniu opisać to zjawisko wykorzystując poznane wiadomości dotyczące interferencji fal oraz zasadę Huygensa

Zasada Huygensa

Każdy punkt ośrodka do którego dociera fala staje się źródłem nowej fali kulistej. Obwiednie powierzchni falowych wszystkich tych fal wyznaczają powierzchnie falową fali wypadkowej .

Fale te można traktować jako wynik interferencji fal pochodzących od wszystkich tych punktów.

W przypadku fali kulistej punkty tworzące powierzchnie falowej leżą na powierzchni kuli. Złożenie fal kulistych wychodzących ze wszystkich punktów leżących na prostej daje nam nową falę płaską, dla której powierzchnia falowa jest płaszczyzną. Ograniczenie prostej do półprostej lub krótkiego odcinka może spowodować zmianę kształtu powierzchni falowych w pewnych obszarach



Dyfrakcja światła na szczelinie ($D \gg a$)

Natężenie światła na ekranie można zapisać w postaci

$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin(\Delta\varphi/2)}{\Delta\varphi/2} \right)^2$$

gdzie

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} a \sin(\theta)$$

$$I_0 = I(\theta = 0)$$

Minimum

$$\Delta\varphi = m2\pi \rightarrow a \sin \theta = m\lambda$$

$$m \neq 0$$

Maksimum

$$\Delta\varphi = 0 \Leftrightarrow \theta = 0$$

lub

$$\Delta\varphi = \left(m + \frac{1}{2} \right) \pi$$

$$a \sin \theta = \left(m + \frac{1}{2} \right) \lambda$$

