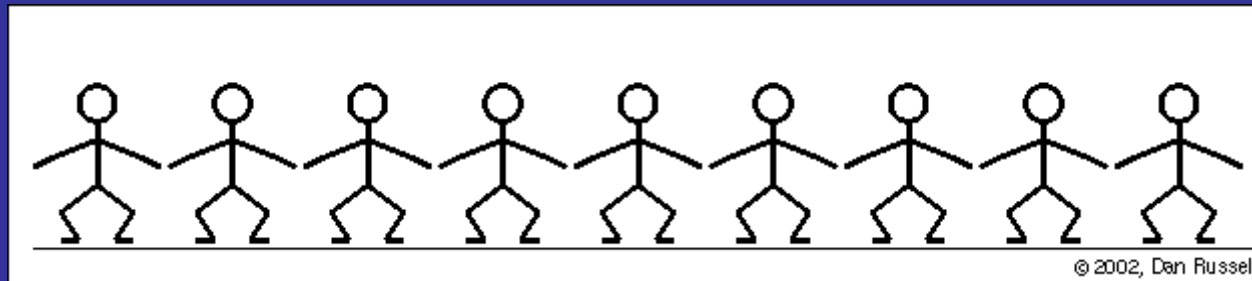
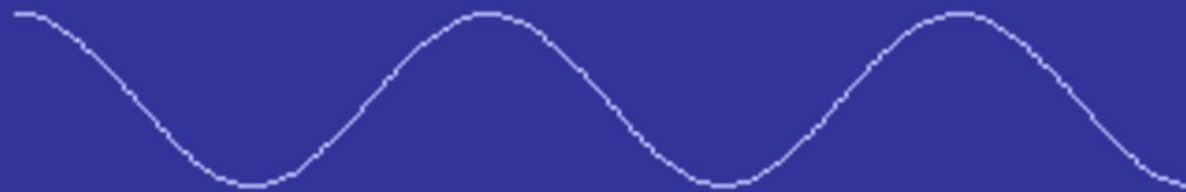


RUCH FALOWY



Fala – oscylacje w przestrzeni i w czasie.
Zaburzenie, które rozchodzi się w ośrodku.

Rodzaje fal:

- mechaniczne (na wodzie, fale akustyczne)
- elektromagnetyczne (radiowe, mikrofale, światło),
- fale materii (czy elektron jest falą?)

Fala przenosi energię i informację

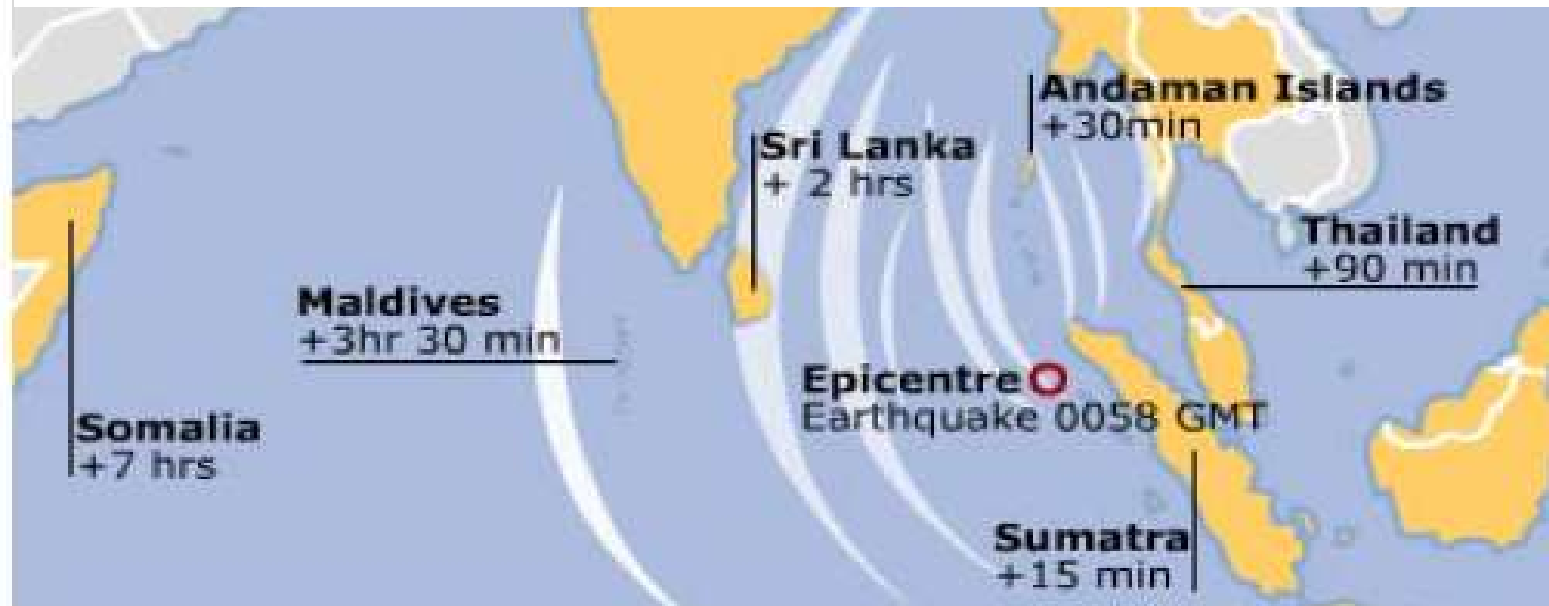
Czy fala przenosi energię?

26 grudnia 2004, największe od 40 lat trzęsienie ziemi wystąpiło na Oceanie Indyjskim pomiędzy płytami australijską i euroazjatycką



http://news.bbc.co.uk/1/hi/in_depth/4136289.stm

Trzęsienie ziemi spowodowało przerwanie dna morskiego wzdłuż linii uskoku i powstanie fali tsunami niosącej zniszczenie na odległość 4500 km w ciągu 7 godzin



Fale tsunami (jap. tsoo-NAH-mee) wielkie fale portowe

2018 lato

www.geophys.washinton.edu/tsunami/general/physics

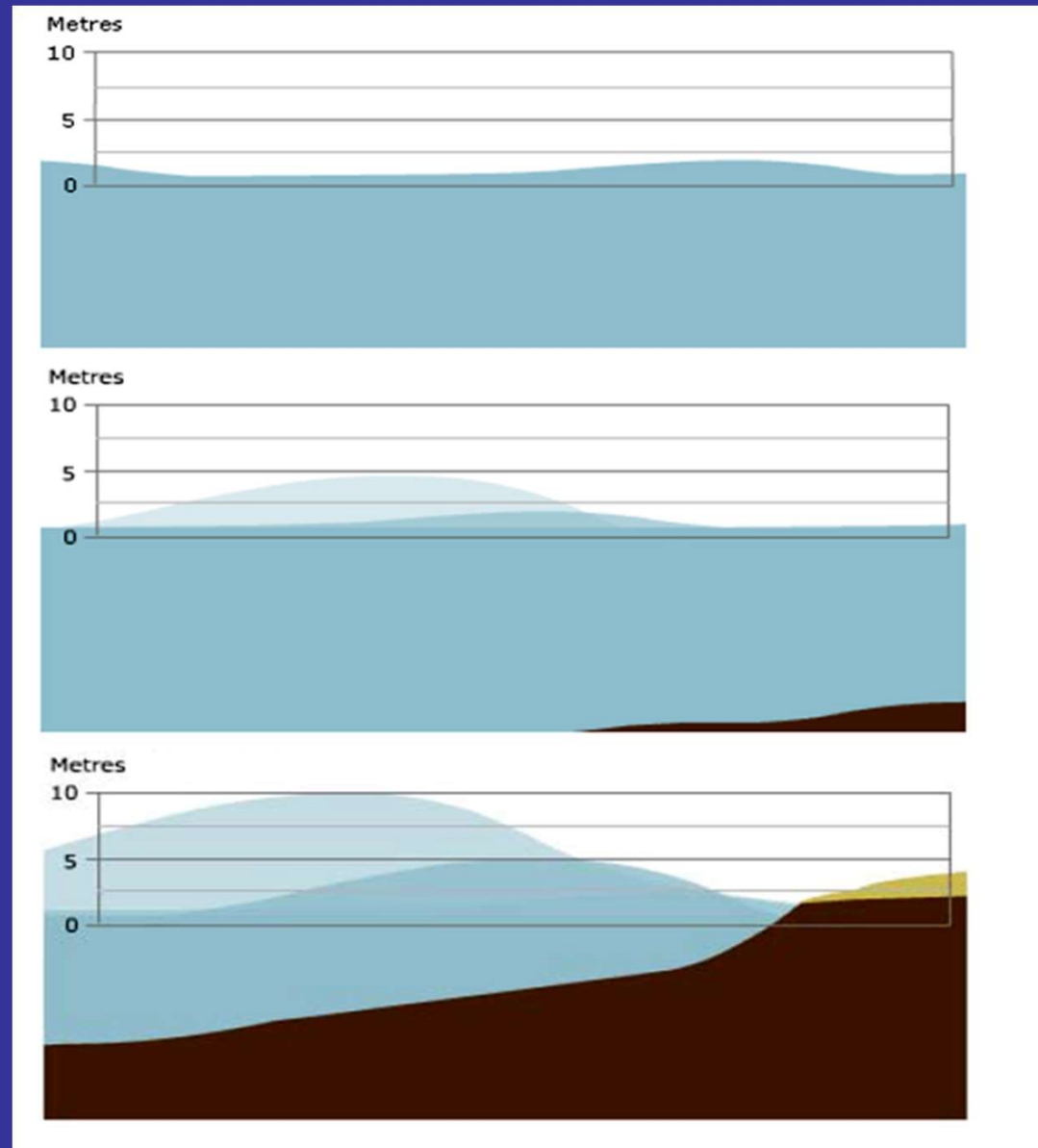
Fala tsunami na
głębokiej wodzie:

mała amplituda, duża
szybkość rozchodzenia się
800 km/h

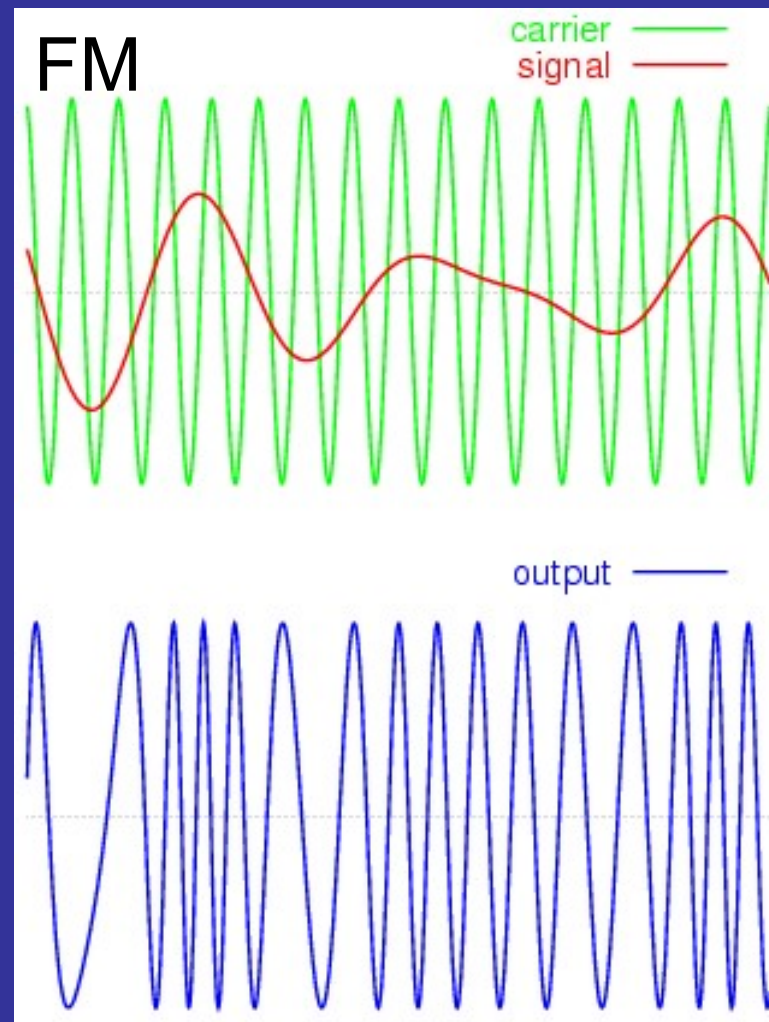
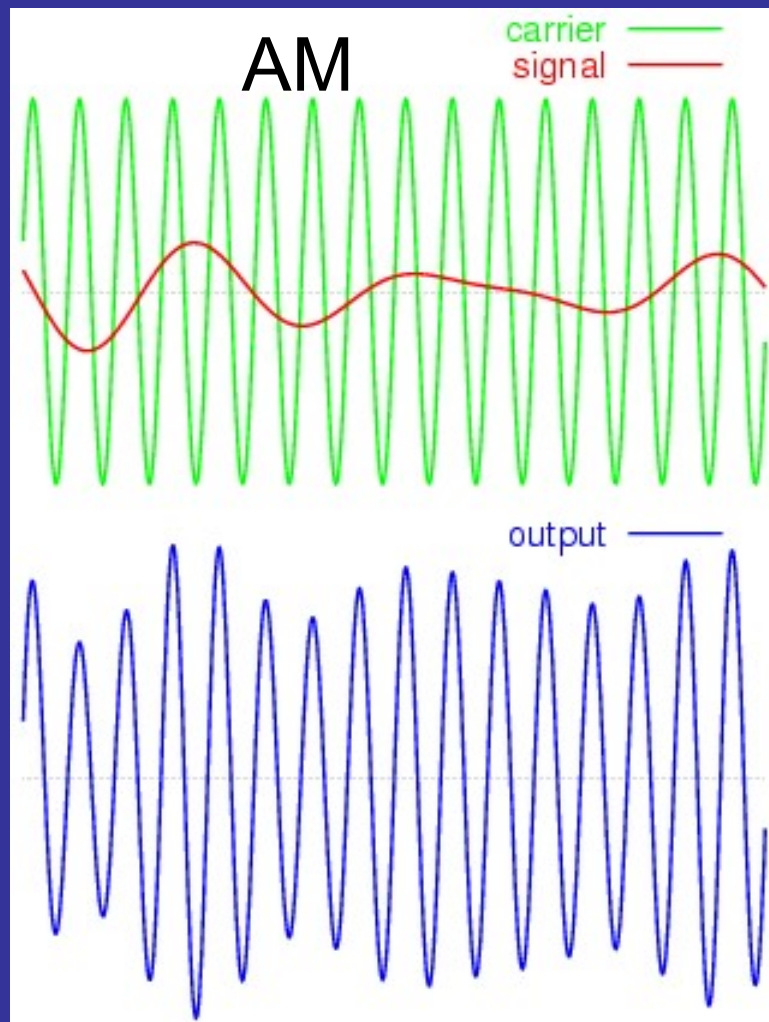
Fala tsunami na
płytkiej wodzie:

mniejsza szybkość
rozchodzenia się ale duża
amplituda (nawet do 30 m)

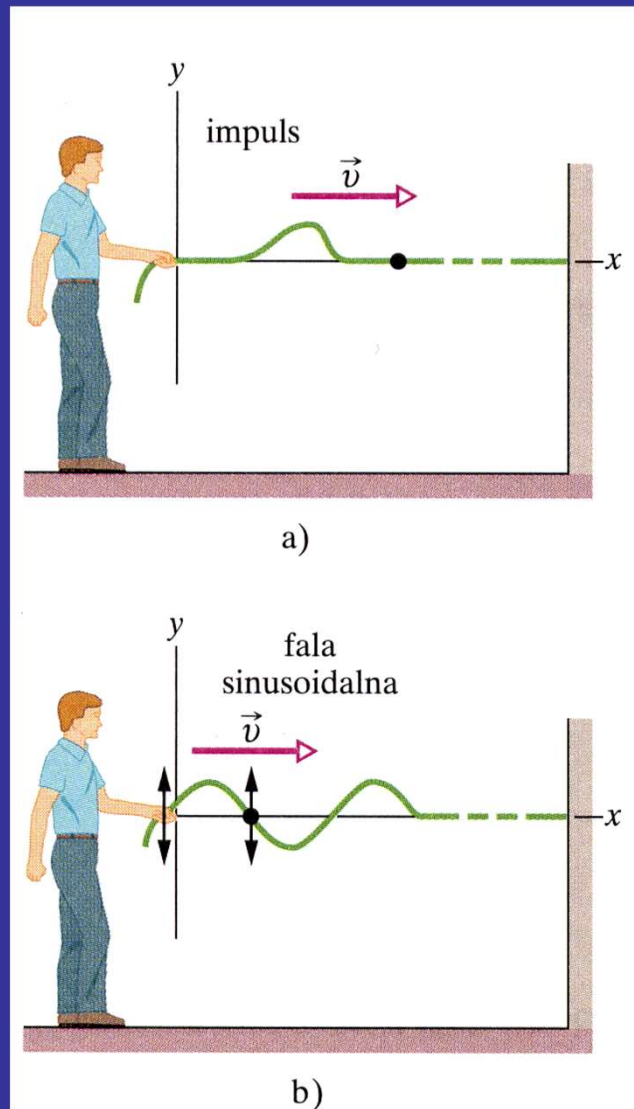
2018 lato



Informacja? Modulacja AM lub FM



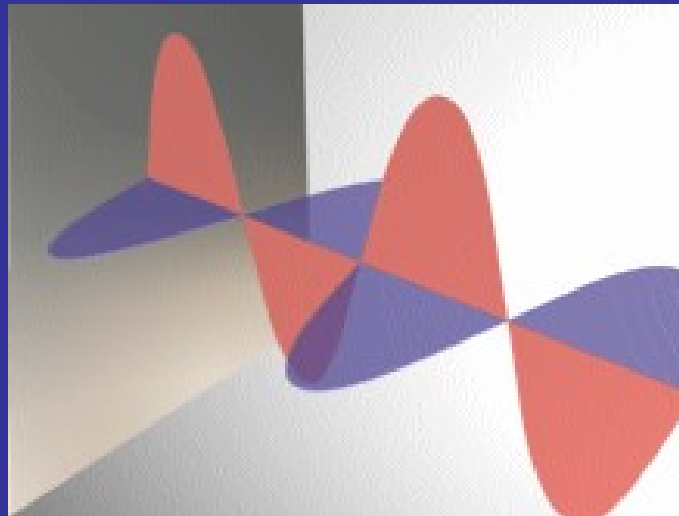
Jak powstaje fala?



2018 lato

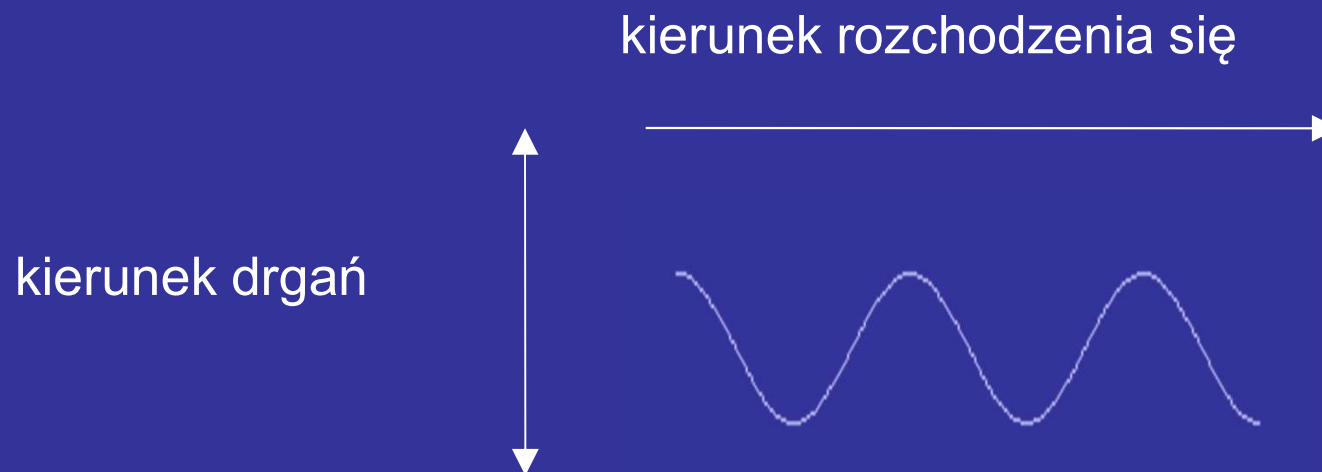
Dla fal mechanicznych rozchodzących się w sznurze, pręcie, słupie powietrza (ośrodku sprężystym), zaburzeniem jest wychylenie z położenia równowagi, gęstość, ciśnienie. Fala powstaje gdy element ośrodka sprężystego jest wytrącony z położenia równowagi. Do przenoszenia zaburzenia tj. rozchodzenia się fali konieczny jest ośrodek materialny. Przenoszona jest energia na odległość a nie materia.

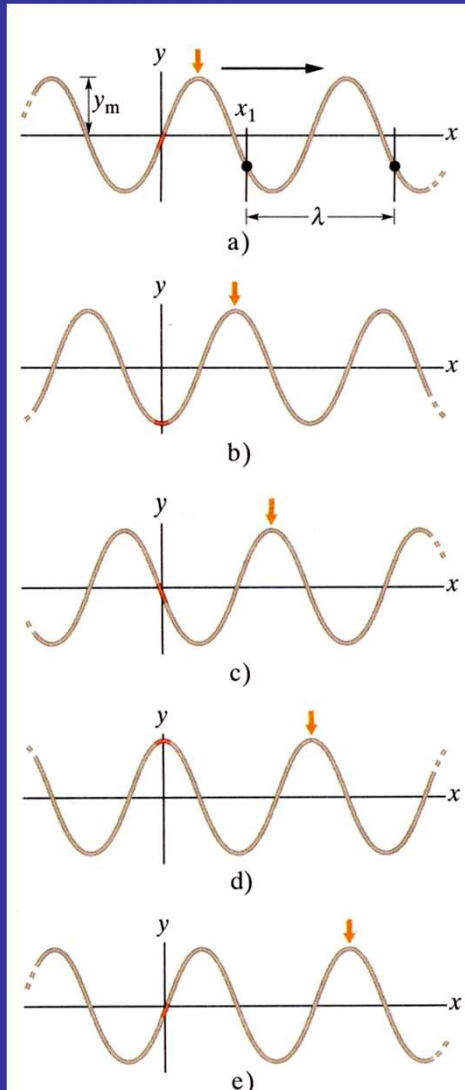
Fala elektromagnetyczna (zaburzenie pola E i B)
rozchodzi się w próżni – nie jest potrzebny ośrodek
materialny



Doświadczenie Michelsona-Morleya, 1887 – „eter świetlny” nie istnieje

Ze względu na zależność pomiędzy kierunkiem drgań i kierunkiem rozchodzenia się fale dzielimy na **podłużne** (gdy kierunki są zgodne) oraz **poprzeczne** (gdy kierunki są prostopadłe). Fale EB są poprzeczne.





Zaburzenie może być opisane przez:

$$y(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t)$$

amplituda

faza

Częstość

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

liczba falowa - k

Długość fali λ - jest to odległość (mierzona równoległe do kierunku rozchodzenia się fali) między kolejnymi powtórzeniami kształtu fali

Dla $t=0$, kształt fali opisuje: $y(x,0) = y_m \sin(kx)$

z definicji długości fali: $y(x_1, t) = y(x_1 + \lambda, t)$

zatem: $y_m \sin(kx_1) = y_m \sin k(x_1 + \lambda)$



$$k\lambda = 2\pi$$

Związek pomiędzy liczbą falową k i długością fali

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

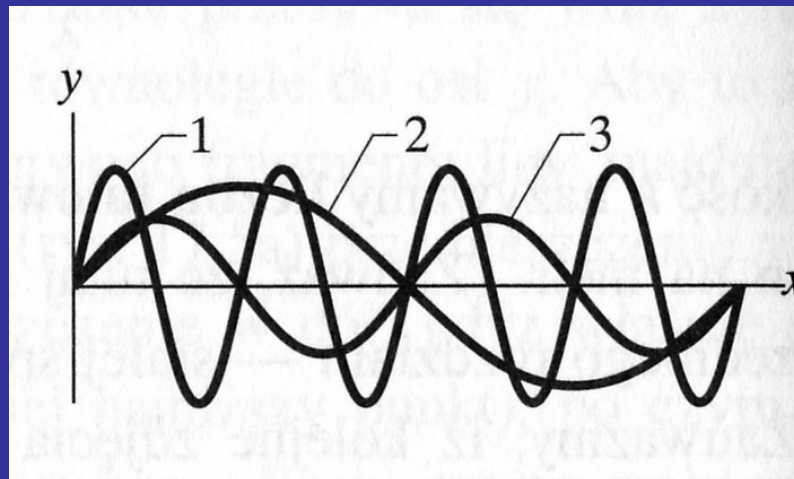
W przestrzeni trójwymiarowej:

$$y(\vec{\mathbf{r}}, t) = y_m \sin(\vec{\mathbf{k}} \circ \vec{\mathbf{r}} - \omega t)$$

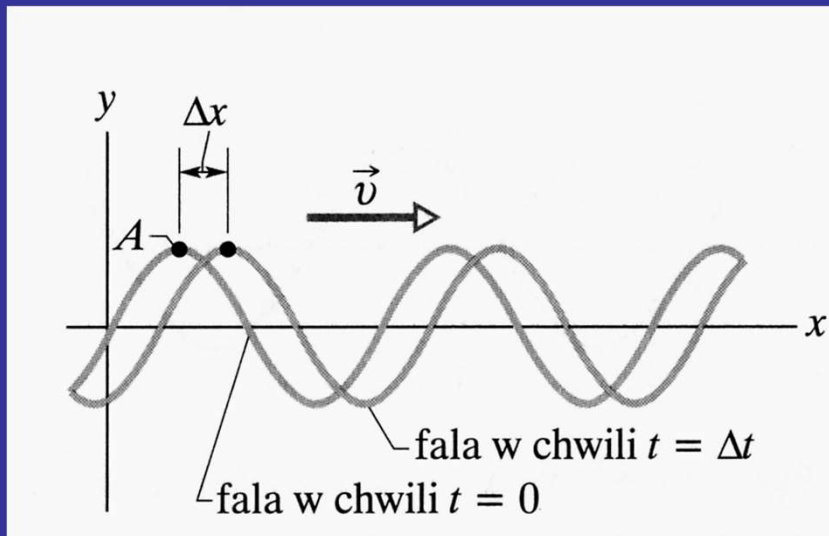
$\vec{\mathbf{k}}$ jest to wektor falowy

Zadanie domowe 3.1: Pokazać, że z powyższej postaci $y(\vec{\mathbf{r}}, t)$ wynika $y(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t)$ w przestrzeni jednowymiarowej

Zadanie domowe 3.2: Na rysunku nałożono trzy zdjęcia migawkowe, przedstawiające fale biegnące wzdłuż pewnej linii. Fazy fal są opisane zależnościami: (a) $2x-4t$, (b) $4x-8t$, (c) $8x-16t$. Dopasuj wykresy do tych wyrażień.



Prędkość fali bieżącej



Rozważmy punkty o takiej samej fazie:

$$kx - \omega t = \text{const}$$

gdy t rośnie, x również rośnie

czyli $y(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t)$

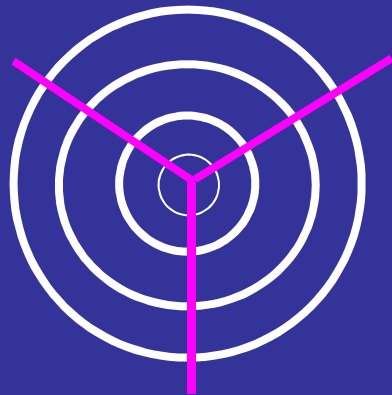
reprezentuje falę rozchodzącą się w kierunku dodatnich wartości x (w prawo)

Analogicznie

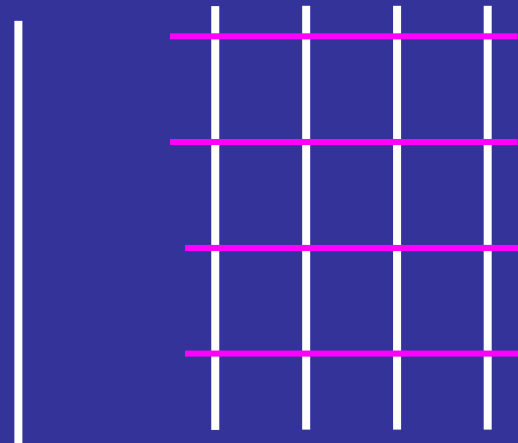
$$y(x, t) = y_m \sin(kx + \omega t)$$

reprezentuje falę rozchodzącą się w lewo

INNY PODZIAŁ FAL

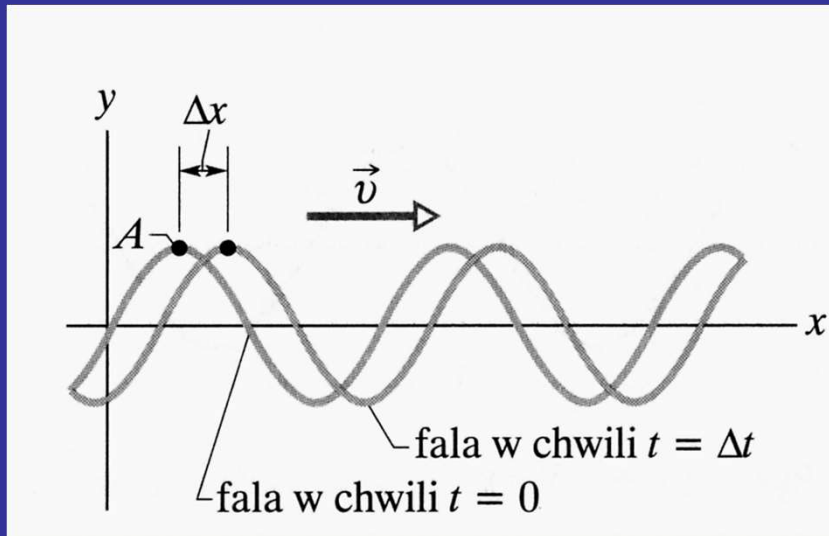


czoło fali promień fali



Ze względu na kształt czoła fali, wyróżniamy m.in. **fale kuliste** i **płaskie**. Czoło fali jest to powierzchnia łącząca punkty w tej samej fazie zaburzenia

Prędkość fali bieżącej



Prędkość fazowa v fali

$$v = \frac{dx}{dt}$$

$$kx - \omega t = \text{const}$$

$$\frac{d}{dt}(kx - \omega t) = 0$$

$$k \frac{dx}{dt} - \omega = 0$$

$$kv - \omega = 0$$

$$v = \frac{\omega}{k}$$

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

Od czego zależy prędkość fali?

Prędkość fali mechanicznej określa bezwładność i sprężystość ośrodka

Przykład 3.1 Prędkość fali w strunie.

Bezwładność: masa na jednostkę długości $\mu = M/L$ [kg/m]

Sprężystość: siła naprężająca strunę T [kg m/s²]

Analiza wymiarowa daje jako jedyną kombinację:

$$v = \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Prędkość fali mechanicznej w ciele stałym:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

moduł Younga

gęstość

Prędkość fali akustycznej w gazie:

$$B = - \frac{\Delta p}{\Delta V / V}$$

$$v = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

moduł ścisłości

gęstość

$$v = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}}$$

ciśnienie

$$\kappa = \frac{c_p}{c_v}$$

Prędkość fali elektromagnetycznej w próżni:

$$c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m / s}$$

Wynika z teorii (równań Maxwella)

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

stałe uniwersalne

$$\mu_0 = 1,26 \cdot 10^{-6} \text{ H / m}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F / m}$$

w ośrodku

$$v = \frac{c}{n}$$

n - współczynnik
załamania ośrodka

OGÓLNE RÓŻNICZKOWE RÓWNANIE FALI

Wzór $y(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t)$

przypomina rozwiązanie równania oscylatora harmonicznego

A jakie równanie naprawdę rozwiązuje?

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\omega^2 y_m \sin(kx - \omega t) = -\omega^2 y$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -k^2 y_m \sin(kx - \omega t) = -k^2 y$$

$$\omega = vk$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

OGÓLNE RÓŻNICZKOWE RÓWNANIE FALI

3D

Zaburzenie jest opisywane funkcją $\Psi(x,y,z,t)$

$$\frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Psi}{\partial z^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}$$

czyli

$$\Delta \Psi(\vec{r}, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial t^2}$$

Operator różniczkowy Laplace'a (laplasjan)

$$\Delta = \nabla \circ \nabla = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Rozwiązaniem równania falowego

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

jest każda funkcja postaci $y = f(x \pm vt)$

znak „-” dotyczy fali rozchodzącej się w kierunku dodatnim osi x,

znak „+” w kierunku ujemnym

Zadanie domowe 3.3. Zaproponuj inne niż

$$y(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t)$$

rozwiązania równania falowego (zad.5, str.149 HRW)

Gęstość energii i natężenie fali

Średnia gęstość energii

$$\langle \rho_E \rangle = b(\lambda) y_m^2$$

$b(\lambda)$ różne dla każdego typu fali i
zależne od długości fali

amplituda fali

Natężenie fali

$$I = v \langle \rho_E \rangle = b(\lambda) v y_m^2$$

przepływ energii w jednostce czasu przez
jednostkową „powierzchnię”, $[I] = 1 \text{ W/m}^2$

prędkość fali

Średnia moc, czyli średnia szybkość z jaką energia jest przenoszona przez falę (dla fali poprzecznej strunie)

$$\langle P \rangle = 2 \left\langle \frac{dE_k}{dt} \right\rangle = \frac{1}{2} \mu v \omega^2 y_m^2$$

Czynniki μ oraz v zależą od materiału i naprężenia struny natomiast ω i y_m - od sposobu powstawania fali

Zależność średniej mocy fali od kwadratu amplitudy oraz od kwadratu częstości ma charakter ogólny i obowiązuje dla wszystkich rodzajów fal

ZADANIE DOMOWE 3.4

Rozciągnięta lina o gęstości liniowej $\mu=525$ g/m została naprężona siłą $T=45$ N. Wytwarzamy falę sinusoidalną o częstotliwości $f=120$ Hz i amplitudzie $y_m=8,5$ mm, biegnącą wzdłuż liny od jednego z jej końców. Wyznacz średnią szybkość przenoszenia energii przez falę.

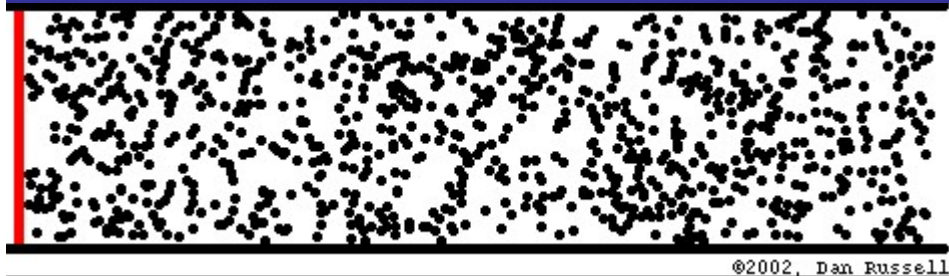
Fala dźwiękowa (podłużna)

przesunięcie warstwy płynu

$$s(x, t) = s_m \cos(kx - \omega t)$$

zmiana ciśnienia powietrza w rurze

$$\Delta p(x, t) = \Delta p_m \sin(kx - \omega t)$$



$$\Delta p_m = (v\rho\omega)s_m$$

amplituda zmian ciśnienia

prędkość
fazowa

gęstość płynu

częstość

amplituda przesunięcia

Przykład 3.2: Maksymalna amplituda zmian ciśnienia Δp_m , jaką ludzkie ucho może wytrzymać w postaci głośnego dźwięku, jest równa około 28 Pa (jest ona znacznie mniejsza od normalnego ciśnienia powietrza równego 10^5 Pa). Znajdź amplitudę przemieszczenia s_m dla takiego dźwięku w powietrzu o gęstości $\rho = 1,21 \text{ kg/m}^3$, przy częstotliwości 1000 Hz i prędkości 343 m/s

Dane:

$$\Delta p_m = 28 \text{ Pa}$$

$$\rho = 1,21 \text{ kg/m}^3$$

$$f = 1000 \text{ Hz}$$

$$v = 343 \text{ m/s}$$

Rozwiązanie:

$$s_m = \frac{\Delta p_m}{v \rho \omega} = \frac{\Delta p_m}{v \rho (2 \pi f)}$$

Szukane:

$$s_m$$

$$\text{Odpowiedź: } s_m = 11 \text{ } \mu\text{m}$$

Wniosek:

Amplituda przemieszczenia dla najgłośniejszego dźwięku, jaki może znieść ludzkie ucho, jest bardzo mała.

ZADANIE DOMOWE 3.5

Przeprowadzając podobne obliczenia wykazać, że dla najśłabszego słyszalnego dźwięku o częstotliwości 1000 Hz, amplituda przemieszczenia wynosi 11 pm podczas gdy amplituda zmian ciśnienia wynosi $2,8 \cdot 10^{-5}$ Pa.

Ucho jest bardzo czułym detektorem fali dźwiękowej

Natężenie dźwięku

Natężenie I fali dźwiękowej na pewnej powierzchni jest to średnia szybkość w przeliczeniu na jednostkę powierzchni, z jaką fala dostarcza energię do tej powierzchni (lub przenosi przez nią energię).

$$I = \frac{P}{S}$$

← moc

← pole powierzchni

dla fali emitowanej izotropowo



$$I = \frac{P_{\text{źr}}}{4\pi r^2}$$

← moc źródła

Podobnie jak dla fali w strunie

$$I = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 s_m^2$$

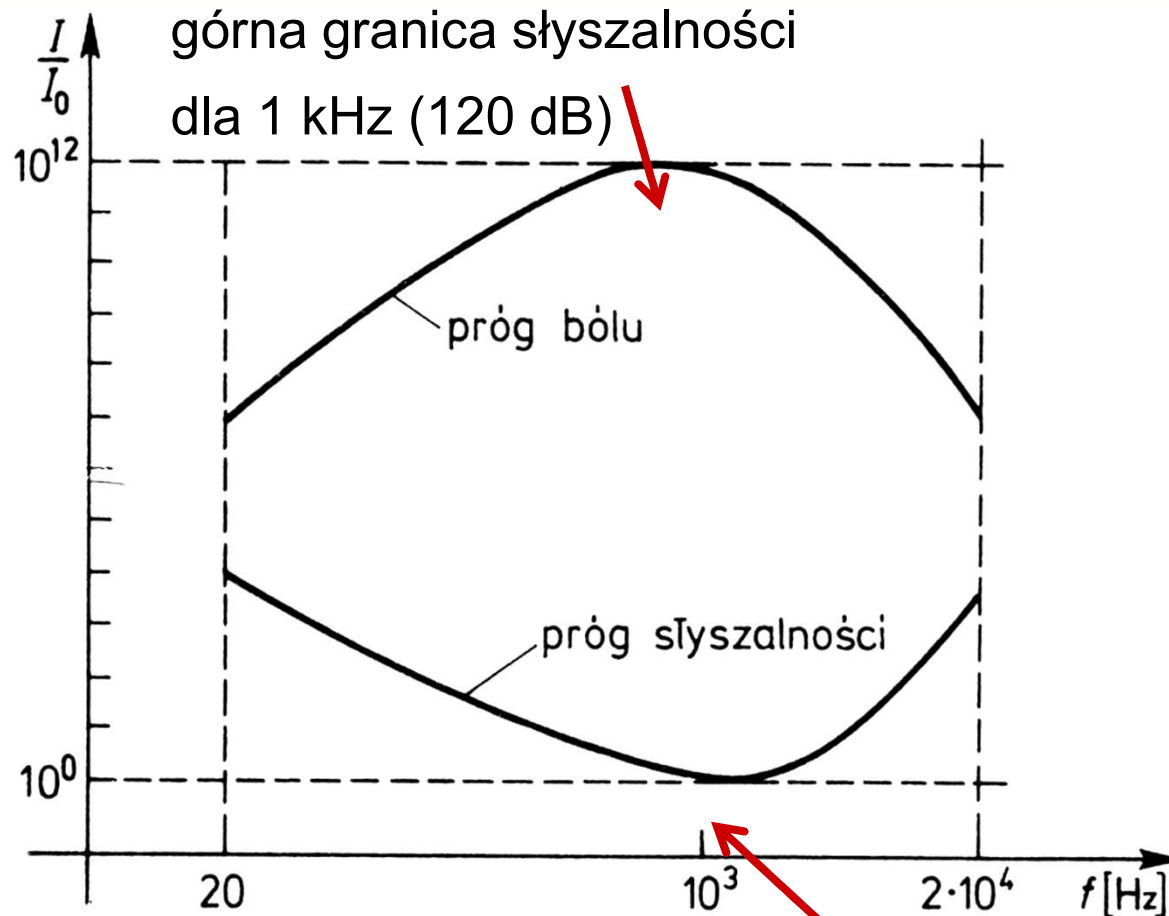
Ucho ludzkie: amplituda przemieszczenia zmienia się od 10^{-5} m dla najgłośniejszego tolerowanego dźwięku do 10^{-11} m dla najśłabszego słyszalnego dźwięku; stosunek tych amplitud wynosi 10^6 .

Natężenie dźwięku jest proporcjonalne do kwadratu amplitudy przemieszczenia, zatem zakres natężeń dźwięku rejestrowany przez ucho jest bardzo duży, około 10^{12}

Subiektywnie odczuwalne natężenie dźwięku, tak zwany poziom natężenia określamy na podstawie prawa Webera i Fechnera. Zmiana intensywności subiektywnego wrażenia dźwiękowego wywoływanego przez dwa dźwięki jest proporcjonalna do logarytmu natężeń porównywanych dźwięków

Krzywa czułości ucha

Przedmiot: Fizyka



Poziom natężenia

$$\Lambda = \eta \log \frac{I}{I_0}$$

$\eta=1$, jednostką jest 1B (bel)
 $\eta=10$, 1dB (decybel)

Natężenie $I_0=10^{-12}$ W/m² o
częstotliwości 1 kHz
nazywamy natężeniem
poziomu zerowego (0 dB)

Ucho ludzkie charakteryzuje się różną czułością dla różnych częstotliwości dźwięku

Skala subiektywnego natężenia dźwięku

$$\Lambda = (10\text{dB}) \log \frac{I}{I_0}$$

Gdy natężenie dźwięku I zwiększa się o rząd wielkości (czynnik 10), subiektywny poziom natężenia Λ zwiększa się o 10 dB

próg słyszalności	0 dB
szum liści	10 dB
rozmowa	60 dB
koncert rockowy	110 dB
granica bólu	120 dB
silnik odrzutowy	130 dB

Głośność dźwięku

Dwa dźwięki o tym samym natężeniu lecz o różnych częstotliwościach nie wydają się nam tak samo głośne, np. dźwięk o częstotliwości 1 kHz odczujemy jako głośniejszy od dźwięku o częstotliwości 0.5 kHz mimo, że w skali decybelowej będą miały jednakowy poziom natężenia.

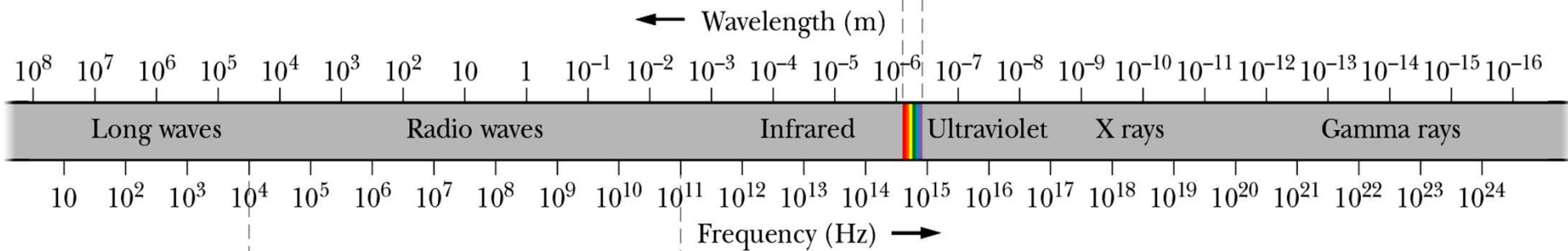
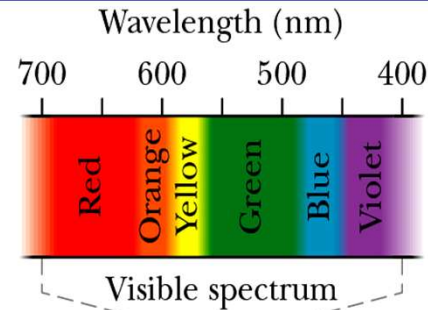
Głośność dźwięku wyrażamy w fonach. Dany dźwięk ma głośność n fonów, jeżeli słyszymy go tak samo głośno, jak dźwięk o natężeniu subiektywnym n decybeli i częstotliwości 1 kHz.

20 fonów odpowiada

200 Hz	40 dB
1000 Hz	20 dB
3000 Hz	15 dB
10 000 Hz	32 dB

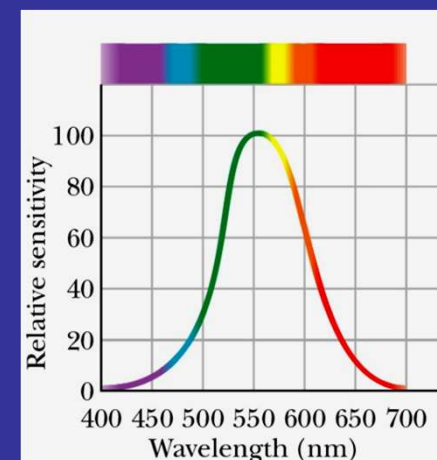
Fala elektromagnetyczna – widmo promieniowania

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

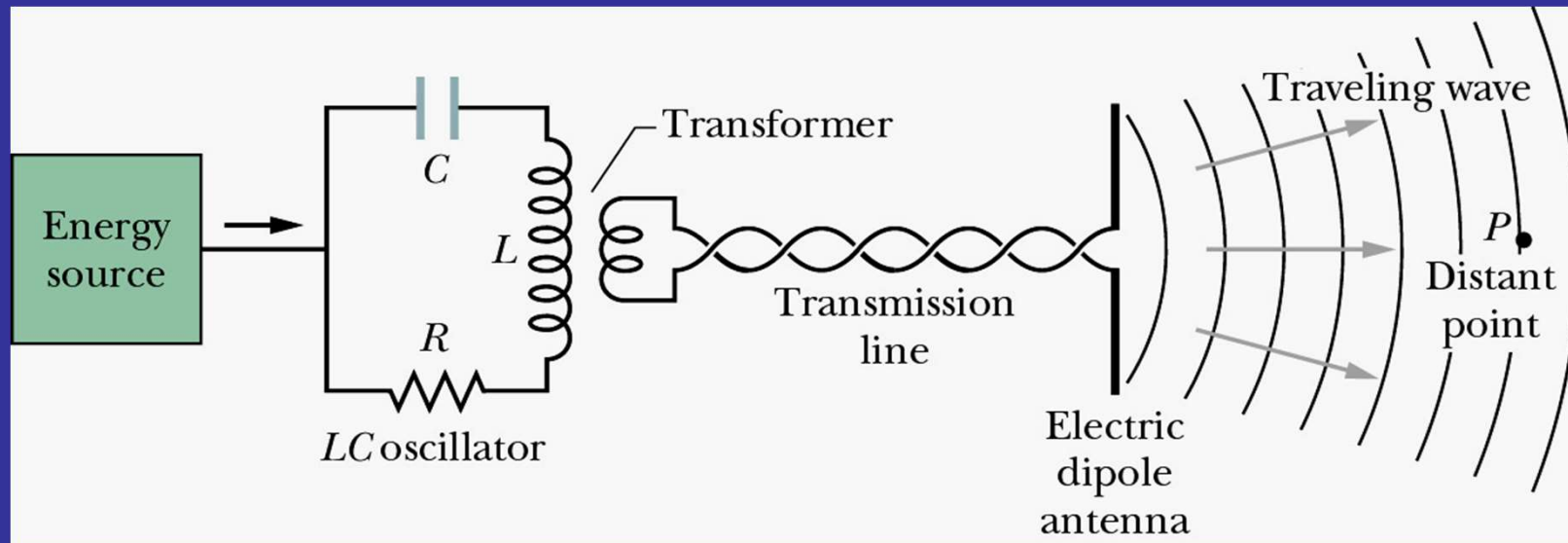


Czułość oka ludzkiego w zakresie widzialnym

2018 lato



Wytwarzanie fali elektromagnetycznej o częstotliwościach radiowych



$$E(x, t) = E_m \sin(kx - \omega t)$$

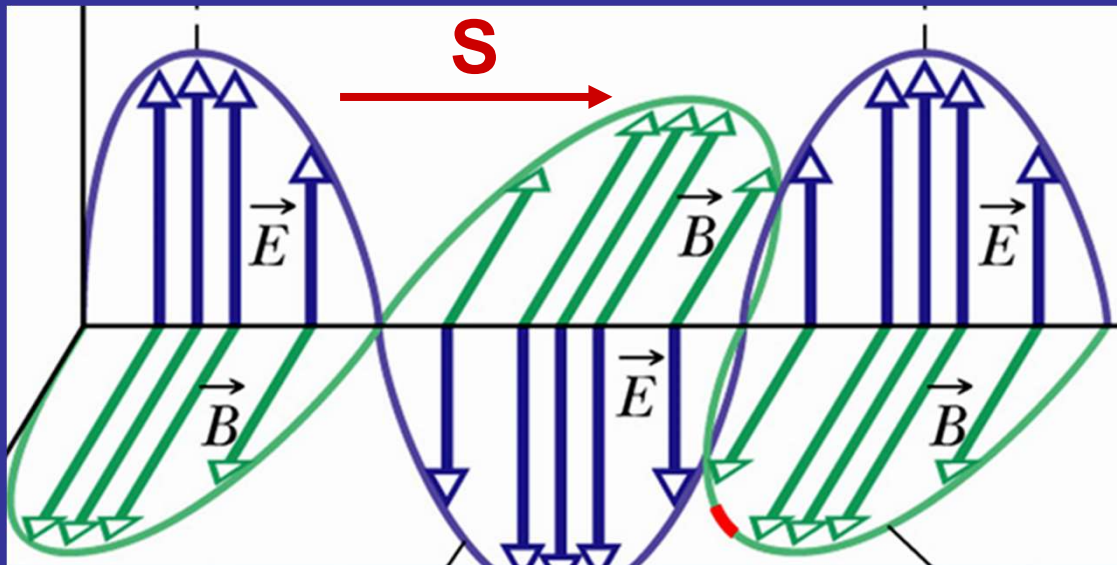
$$B(x, t) = B_m \sin(kx - \omega t)$$

$$\frac{E_m}{B_m} = c$$

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

H. Hertz (1888)
doświadczalne
potwierdzenie
istnienia fal EB

Fala elektromagnetyczna – przepływ energii i wektor Poyntinga



Definicja wektora Poyntinga

$$\vec{\mathbf{S}} = \frac{1}{\mu_0} \vec{\mathbf{E}} \times \vec{\mathbf{B}}$$

Kierunek wektora Poyntinga jest kierunkiem rozchodzenia się fali i kierunkiem przepływu energii

Natężenie fali elektromagnetycznej

Wartość wektora Poyntinga wiąże się z szybkością, z jaką energia fali przepływa przez jednostkową powierzchnię w danej chwili. Średnia wartość wektora Poyntinga jest natężeniem fali elektromagnetycznej.

chwilowa szybkość
przepływu energii

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \mathbf{B} = \frac{1}{c \mu_0} \mathbf{E}^2$$

natężenie fali
elektromagnetycznej

$$I = S_{\text{śr}} = \frac{1}{2c \mu_0} E_m^2$$

PODSTAWOWE ZJAWISKA FALOWE:

- interferencja
- dyfrakcja
- polaryzacja

ale także: załamanie, rozszczepienie (dyspersja), odbicie, transmisja, absorpcja

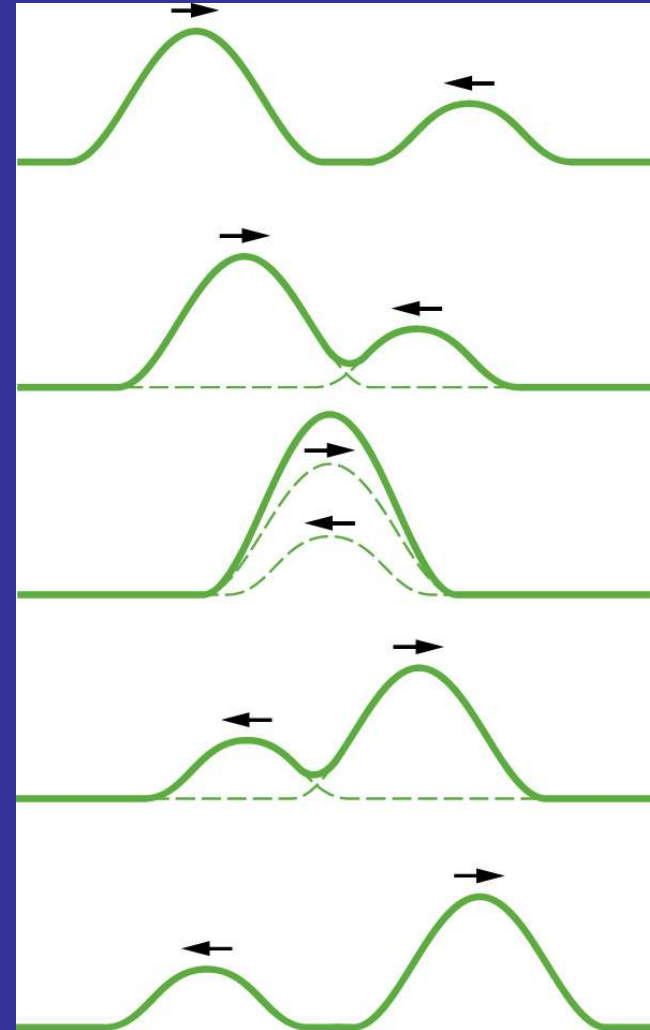
Zjawiska są wspólne dla wszystkich rodzajów fal

ZASADA SUPERPOZYCJI FAL

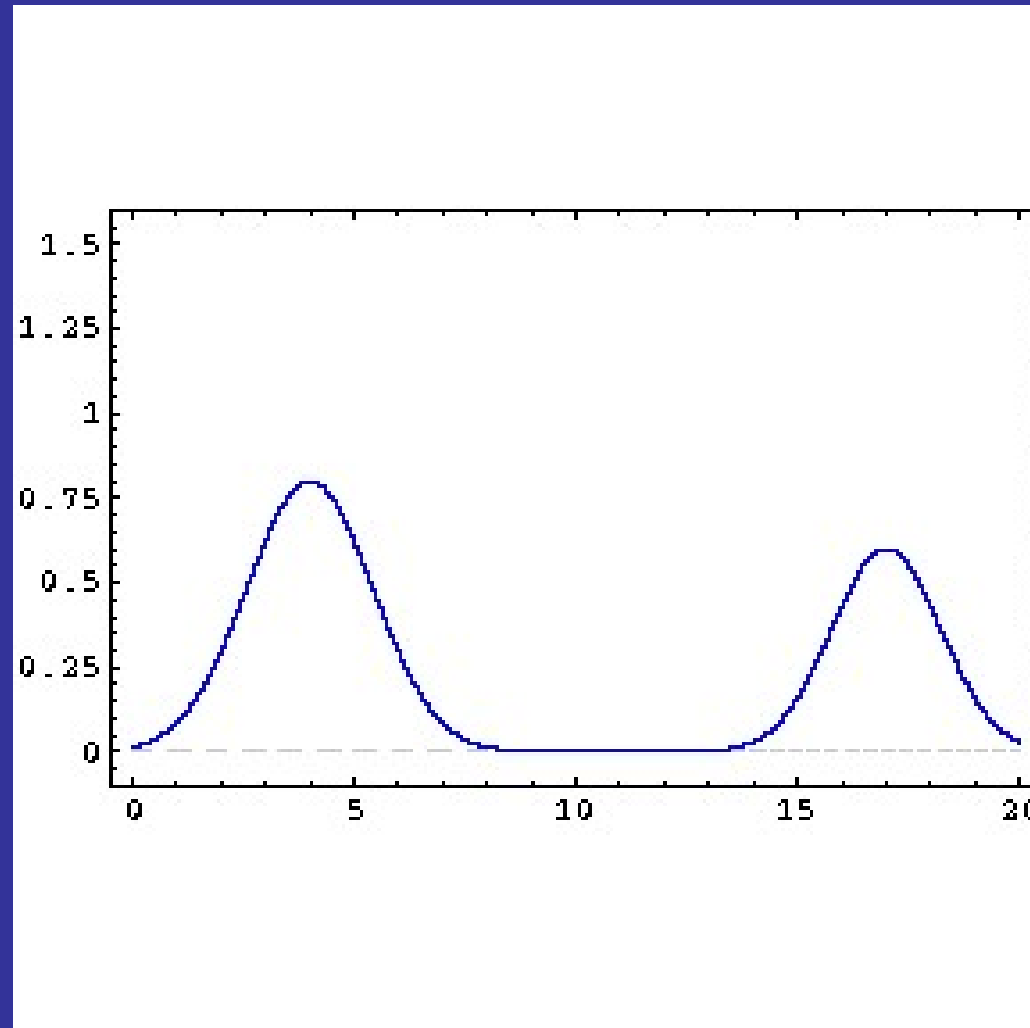
Często się zdarza, że dwie lub więcej fal przechodzi równocześnie przez ten sam obszar. Fale te nakładają się, w żaden sposób nie wpływają na siebie wzajemnie a zaburzenia dodają się algebraicznie tworząc **falę wypadkową**.

$$y_w(x,t) = y_1(x,t) + y_2(x,t)$$

2018 lato

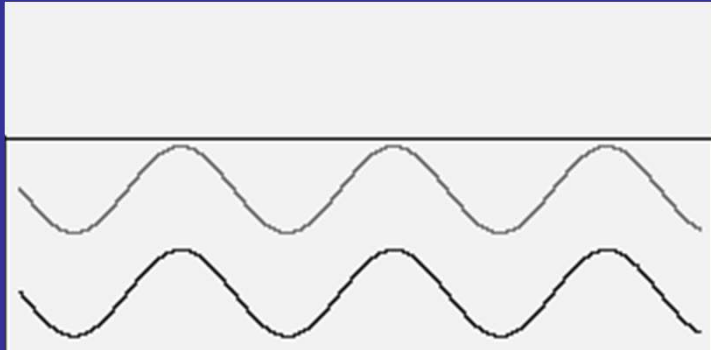


Demonstracja

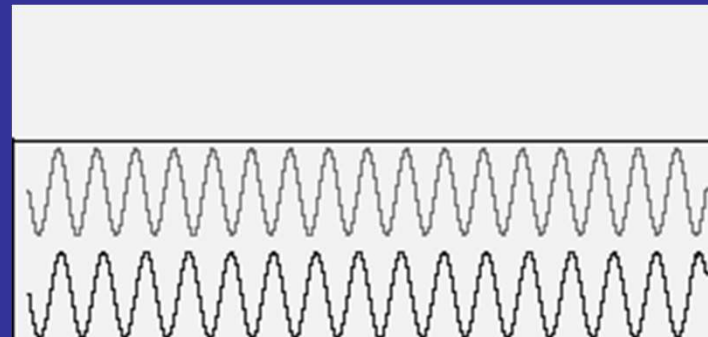


Skutki superpozycji fal

Wzmocnienie (interferencja konstruktywna) lub osłabienie (interferencja destruktywna)



Dudnienia (nakładanie się fal o bardzo zbliżonych częstościach)



Interferencja

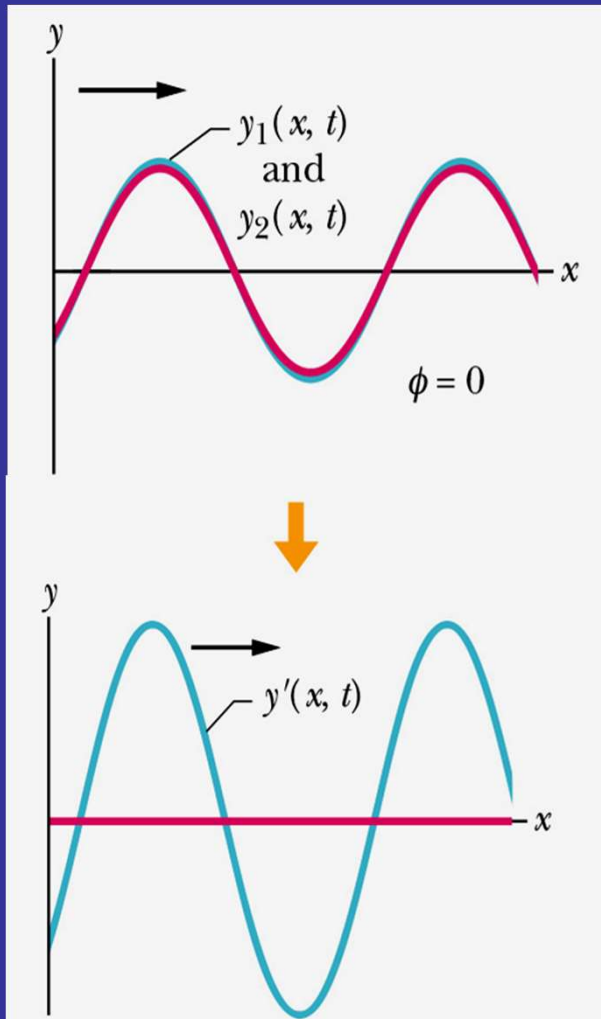
Zakładamy, że dwie sinusoidalne fale o tej samej długości i amplitudzie biegną wzdłuż napiętej liny w tym samym kierunku. Fale te interferują ze sobą dają wypadkową falę sinusoidalną biegnącą w tym samym kierunku. Amplituda fali wypadkowej zależy od względnej różnicy faz fal interferujących.

$$y_1(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t)$$

$$y_2(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t + \varphi)$$

$$y = y_1(x, t) + y_2(x, t) = \left[2y_m \cos \frac{1}{2} \varphi \right] \sin\left(kx - \omega t + \frac{1}{2} \varphi\right)$$

amplituda

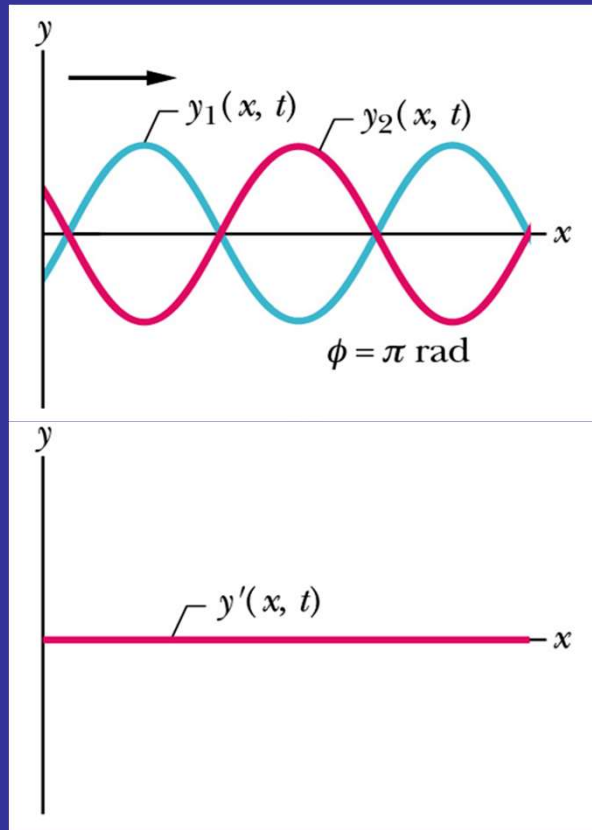


Interferencja konstruktywna (wzmocnienie) występuje, gdy fazy są zgodne, tj. gdy $\phi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$

Amplituda wypadkowa jest dwukrotnie większa niż amplituda każdej z fal interferujących

$$y'_m = 2y_m \cos \frac{1}{2} \phi = 2y_m$$

Natężenie fali wypadkowej jest czterokrotnie większe niż natężenie każdej z fal interferujących



Interferencja destruktywna – całkowite wygaszenie, gdy fazy są przeciwne, tj. gdy $\phi = \pi, 3\pi, 5\pi, \dots$

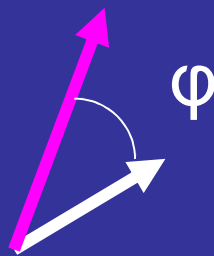
Amplituda i natężenie fali wypadkowej wynoszą zero

$$y'_m = 2y_m \cos \frac{1}{2} \phi = 0$$

Przypomnienie: Podobny efekt obserwowaliśmy przy nakładaniu drgań zachodzących wzdłuż jednej prostej

Metoda wektora wirującegogo - wskazzy

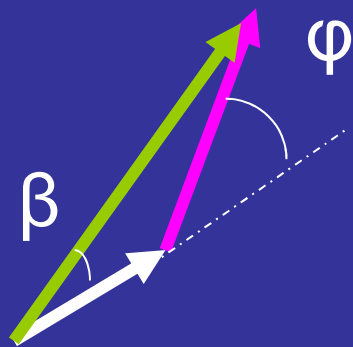
Wskaz jest wektorem, którego długość jest równa amplitudzie fali. Wektor ten obraca się wokół początku układu współrzędnych z prędkością kątową równą częstości fali ω .



$$y_1(x, t) = y_{m1} \sin(kx - \omega t)$$

$$y_2(x, t) = y_{m2} \sin(kx - \omega t + \varphi)$$

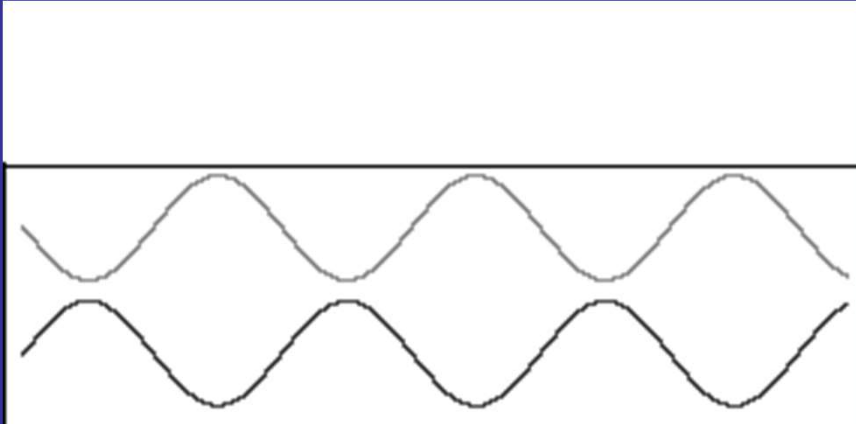
Wynik interferencji – wynik dodawania wskazów



$$y'(x, t) = y'_m \sin(kx - \omega t + \beta)$$

Metodą wskazów można się posługiwać nawet gdy amplitudy fal interferujących są różne

Fala stojąca



Fala stojąca powstaje gdy dwie sinusoidalne fale o tej samej długości i amplitudzie biegną wzdłuż napiętej liny w przeciwnym kierunku.

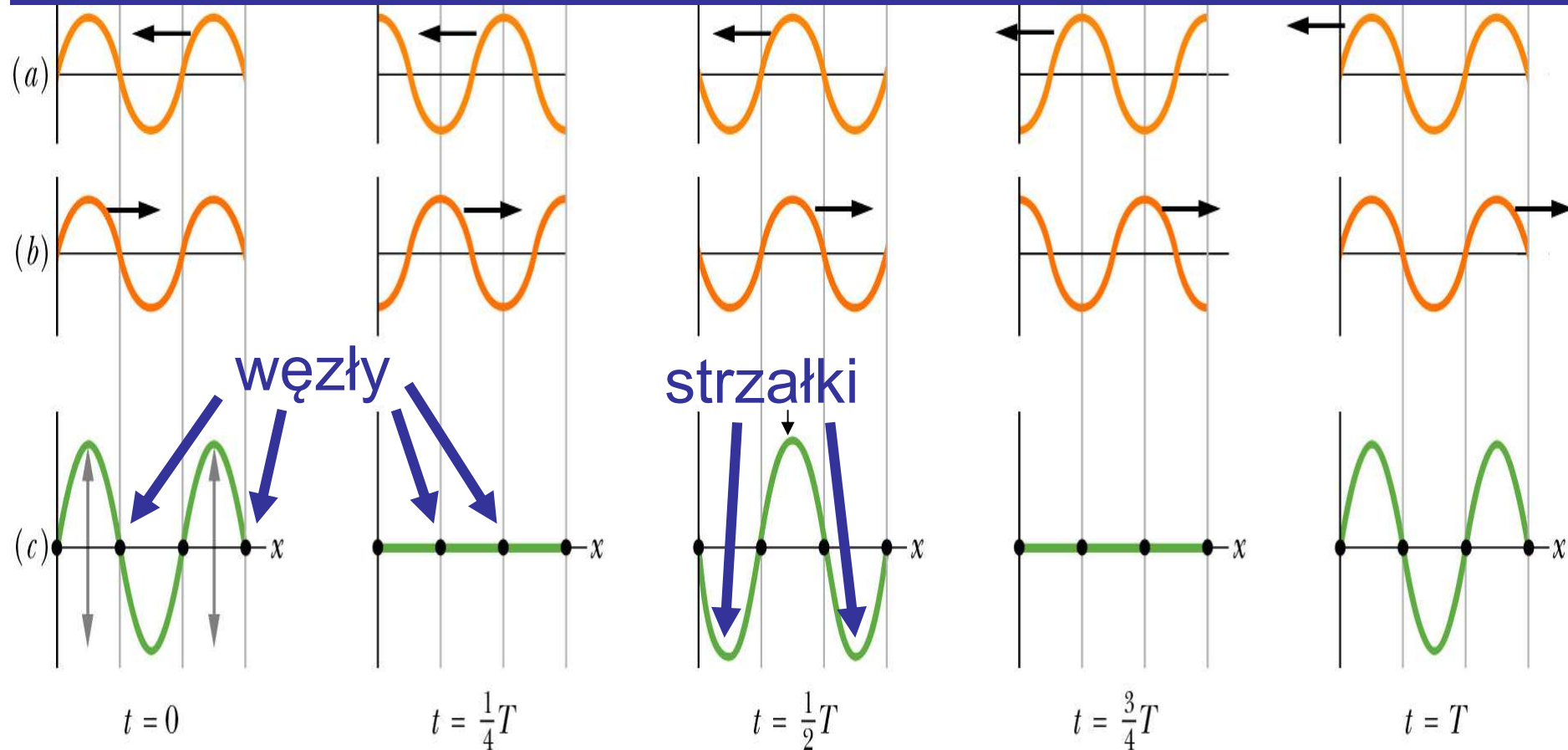
$$y_1(x, t) = y_m \sin(kx - \omega t)$$

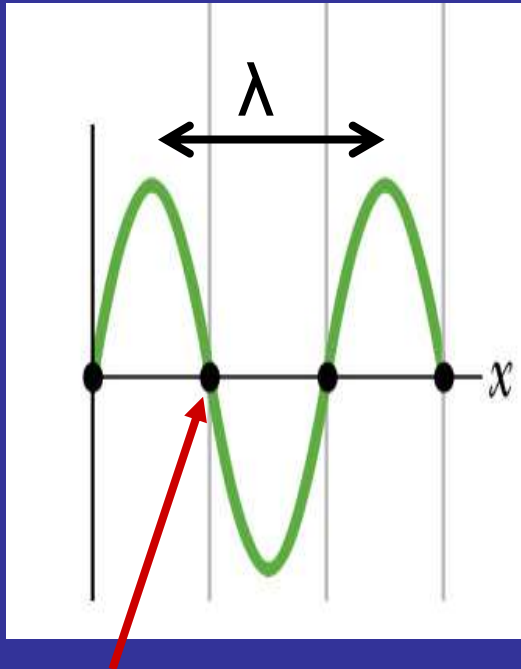
$$y_2(x, t) = y_m \sin(kx + \omega t)$$

Można pokazać, że

$$y = y_1 + y_2 = \underbrace{[2y_m \sin kx]}_{\text{amplituda fali}} \cos(\omega t)$$

Fala stojąca





położenie węzła dla $n'=1$

Położenia węzłów są opisane relacją:

$$x = n' \frac{\lambda}{2}$$

gdzie $n'=0,1,2,\dots$

Rezonans występuje, gdy przy pewnych częstościach w wyniku interferencji powstaje fala stojąca o dużej amplitudzie

Struna wykazuje rezonans przy pewnych częstościach zwanych częstościami rezonansowymi

Rezonans

Narzucając warunki brzegowe kwantujemy długość fali i częstotliwość

warunki brzegowe:

dla $x=0$ $y=0$ i dla $x=L$ $y=0$ (węzły na końcach struny)

warunek kwantyzacji długości fali:

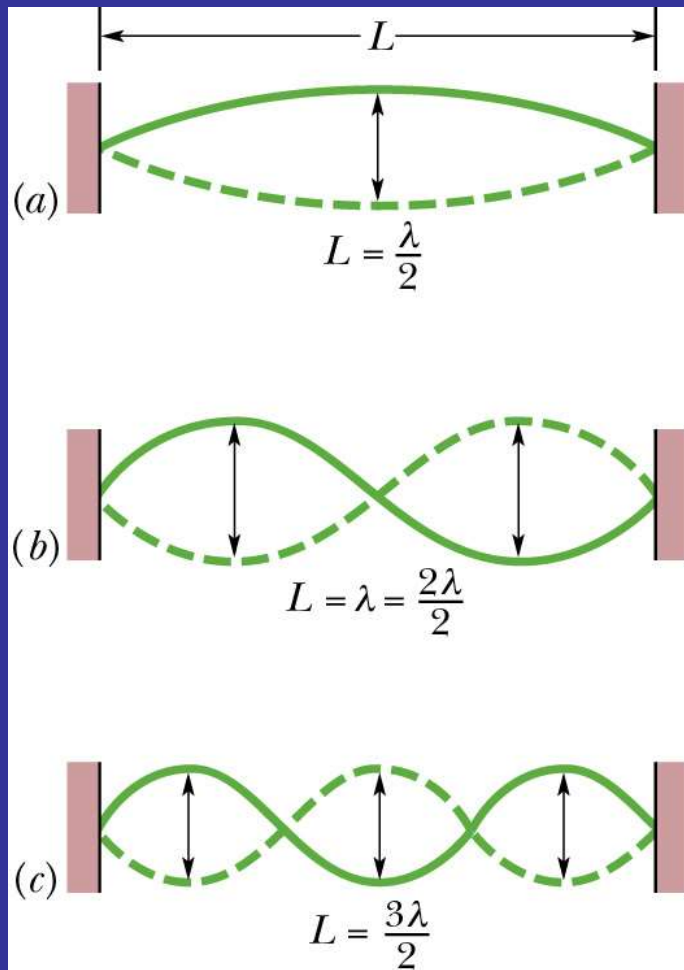
$$\lambda_{n'} = \frac{2L}{n'}$$

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

warunek kwantyzacji częstotliwości:

$$\gamma_{n'} = n' \frac{v}{2L}$$

prędkość fali



Częstości rezonansowe są całkowitymi wielokrotnościami najniższej częstotliwości – częstotliwości podstawowej γ_1

$$\gamma_1 = \frac{v}{2L}$$

Drganie własne o częstotliwości podstawowej nazywamy modem podstawowym lub pierwszą harmoniczną

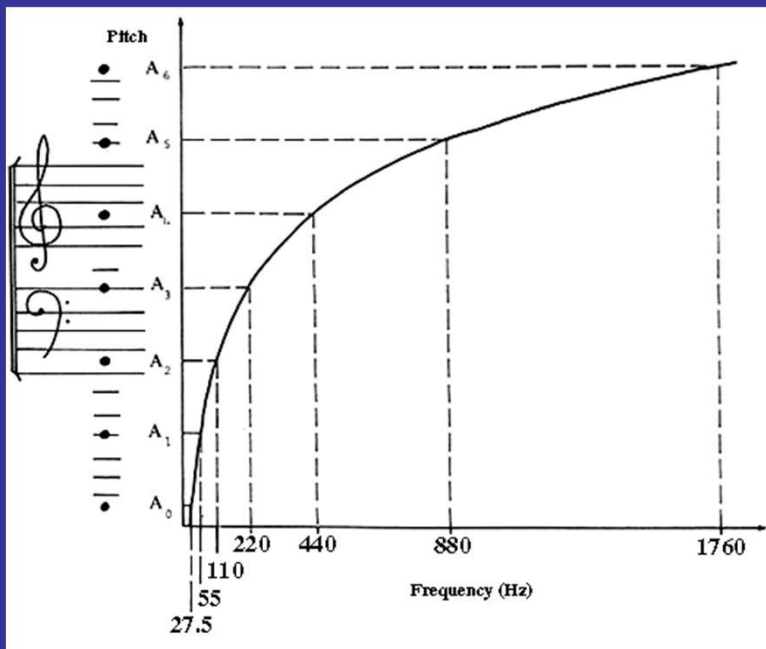
Szereg harmoniczny czyli zbiór wszystkich możliwych drgań własnych opisany jest przez

$$\gamma_{n'} = n' \gamma_1$$



Cechy dźwięku

- wysokość – częstotliwość tonu podstawowego
- głośność – kwadrat amplitudy
- barwa – zawartość tonów harmoniczných

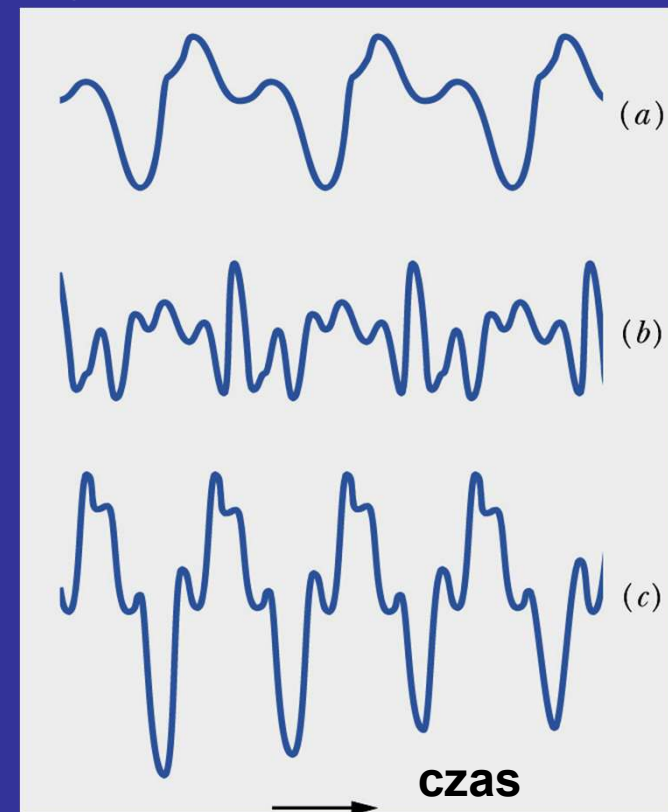


2018 lato

a) flet

b) obój

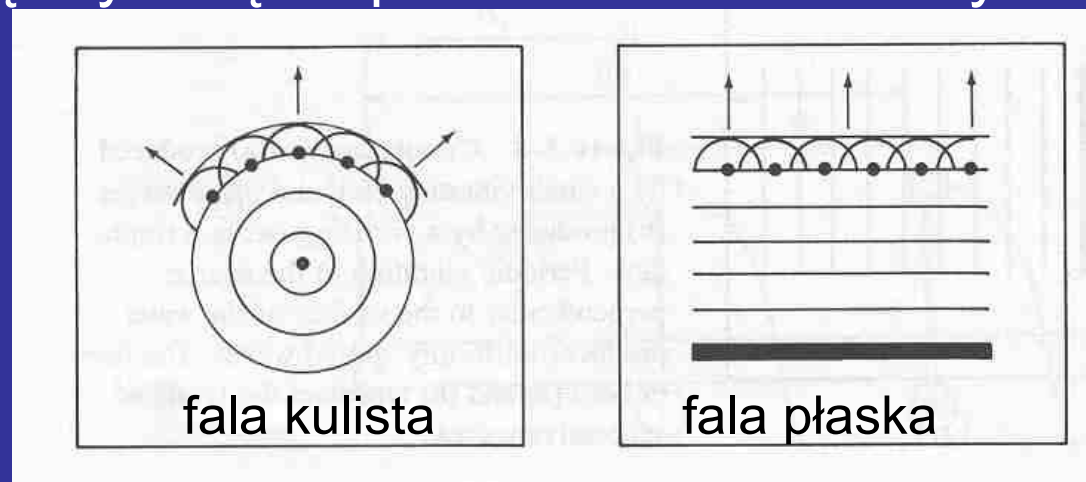
c) saksofon



Światło – jako fala

Christian Huygens – 1678 r. pierwsza falowa teoria światła

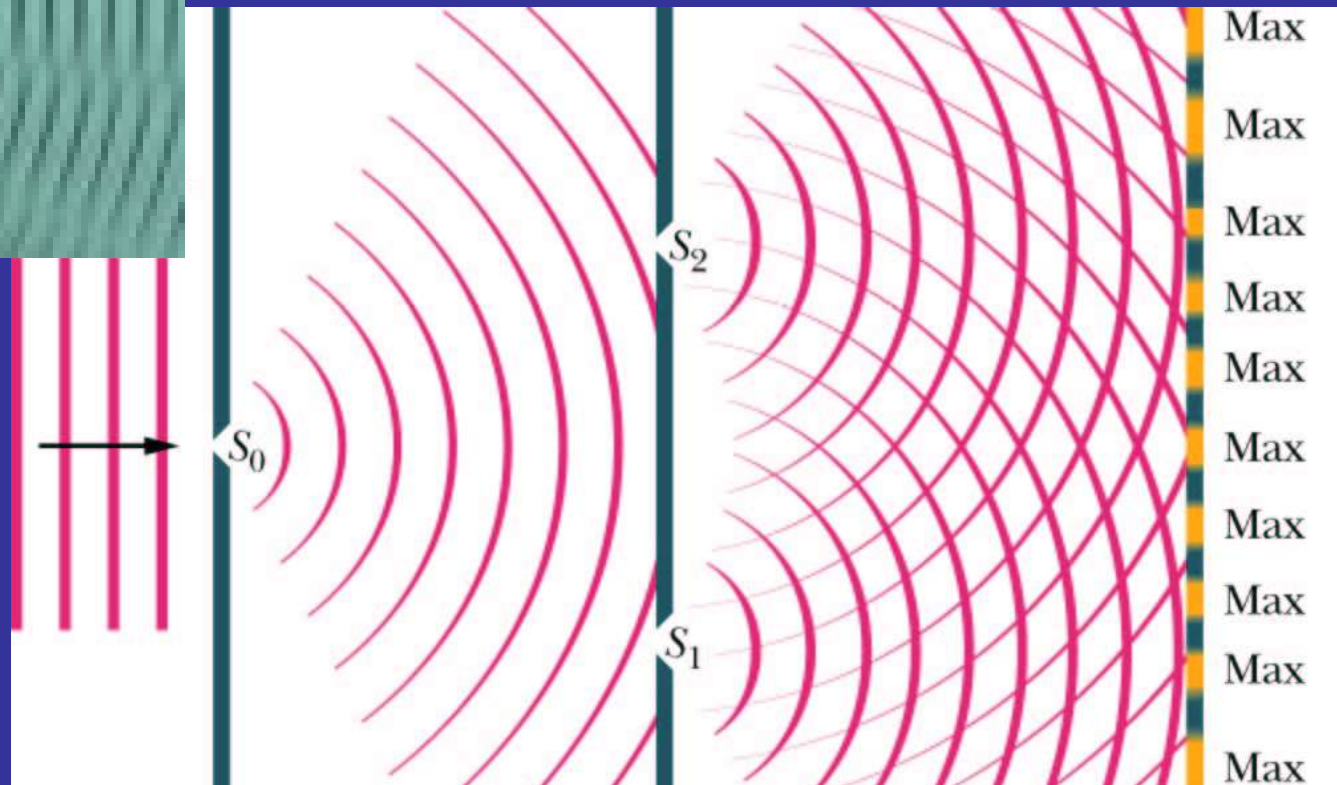
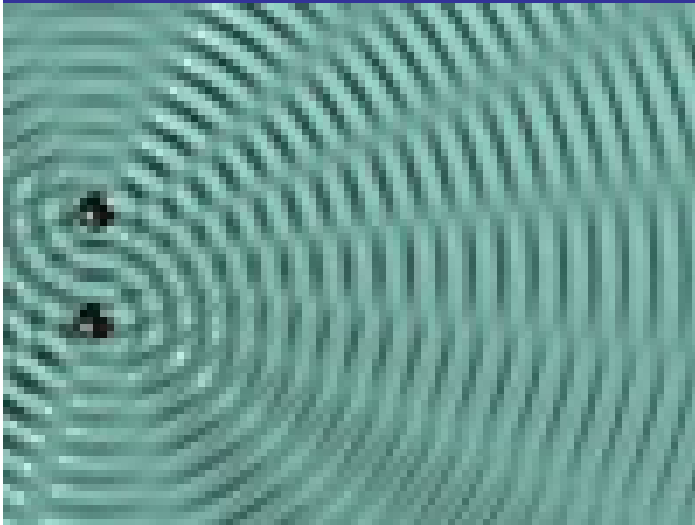
Zasada Huygensa: Wszystkie punkty czoła fali zachowują się jak punktowe źródła elementarnych kulistych fal wtórnych. Po czasie t nowe położenie czoła fali jest wyznaczone przez powierzchnię styczną do powierzchni fal wtórnych



Zasada ta pozwala wyprowadzić m.in. prawo załamania, prawo odbicia (HRW, t.4, 36.2). Wykorzystuje się ją również w interferencji i dyfrakcji

Doświadczenie Younga

1801 r. – światło jest falą
bo ulega interferencji



O wyniku interferencji fal decyduje różnica faz $\Delta\varphi$

Jakie mogą być przyczyny powstawania różnicy faz?

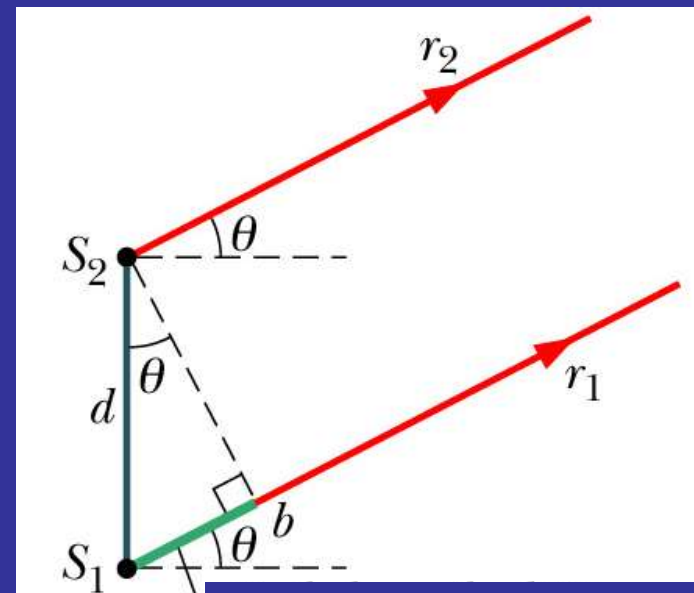
Dla światła rozchodzącego się w przestrzeni 3D (w próżni lub ośrodku materialnym) główną przyczyną powstawania różnicy faz $\Delta\varphi$ jest różnica dróg optycznych ΔL

$$\Delta\varphi = 2\pi$$

$$\Delta L = \lambda$$

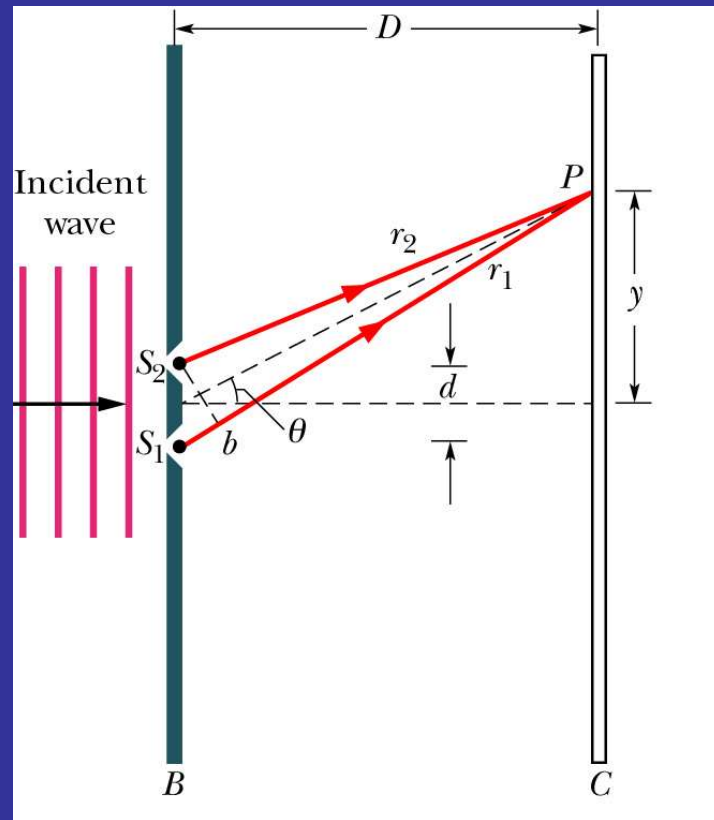
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L$$

gdy $\Delta L = \lambda$ to $\Delta\varphi = 2\pi$ i
zachodzi interferencja
konstruktywna



$$S_1b = \Delta L$$

$$\Delta L = S_1b = 2d \sin\theta$$



Warunki interferencji:

różnica faz musi być stała w czasie – spójność czasowa i w przestrzeni – spójność przestrzenna

Źródła światła muszą być spójne (koherentne)

warunek interferencji konstruktywnej (maximum)

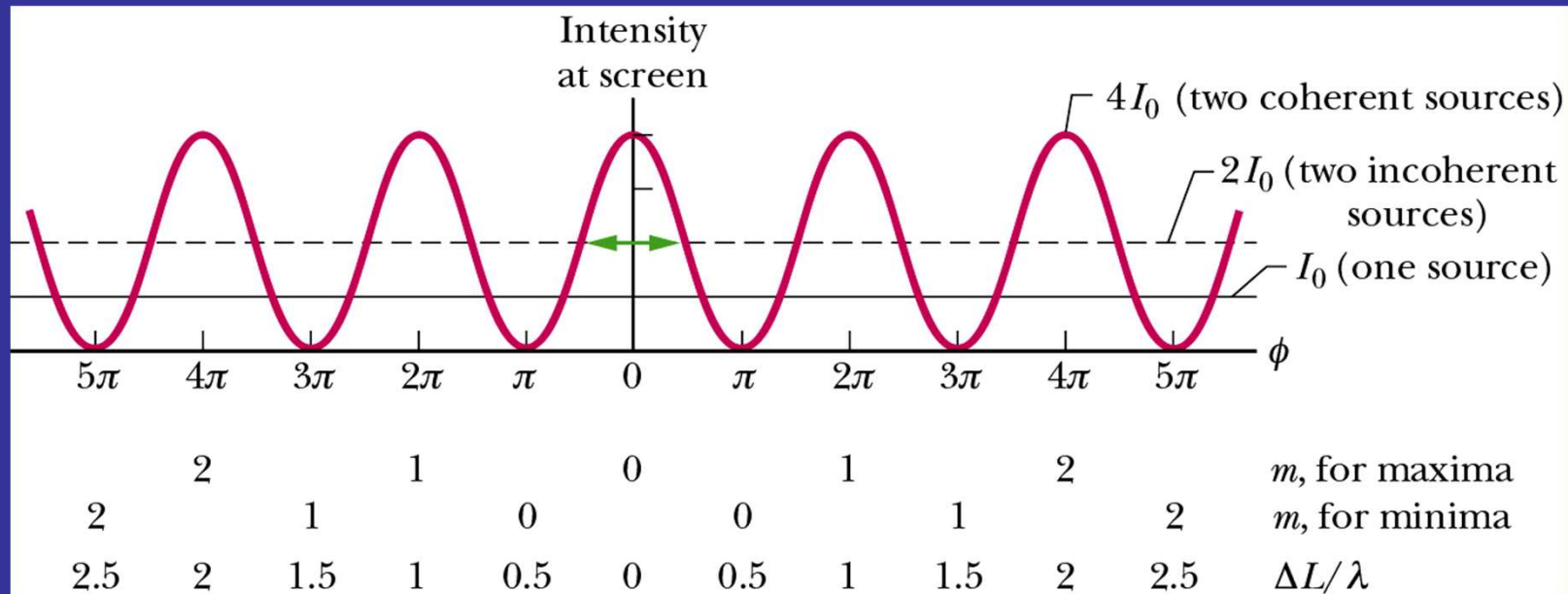
$$d \sin \theta = m \lambda$$

warunek interferencji destruktywnej (minimum)

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

$$m=0,1,2,\dots$$

Obraz interferencyjny – rozkład natężenia światła na ekranie



$$I = 4I_0 \cos^2(\phi/2)$$

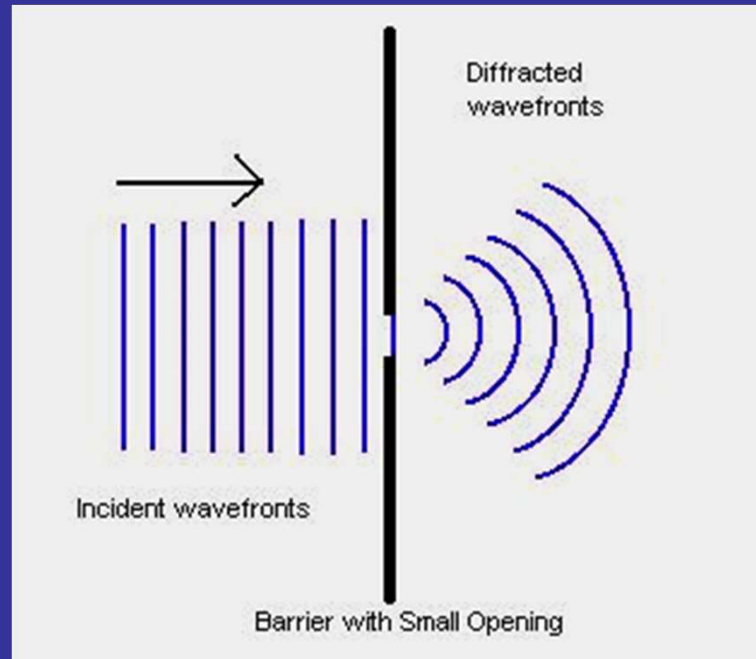
różnica faz

$$\phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin \theta$$

odległość między szczelinami

kąt obserwacji

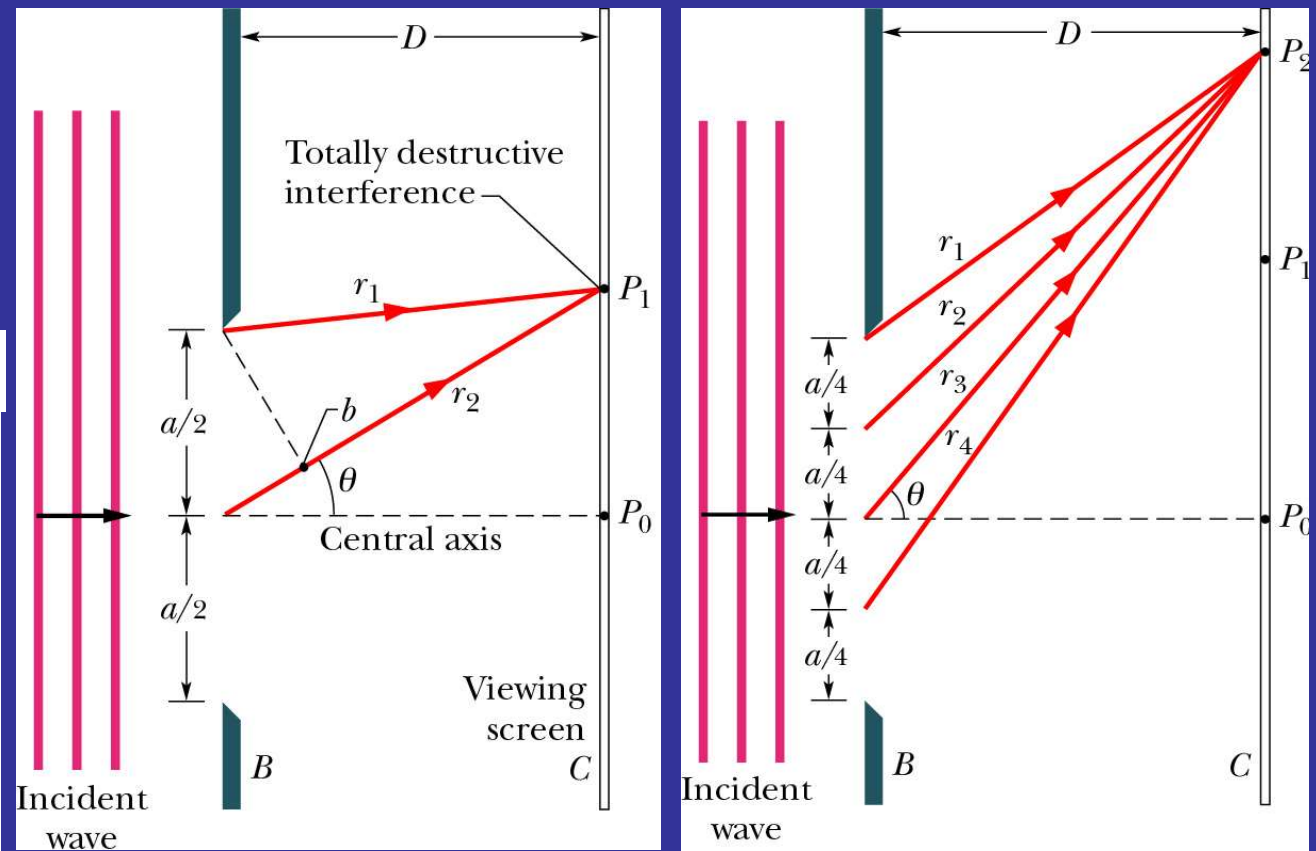
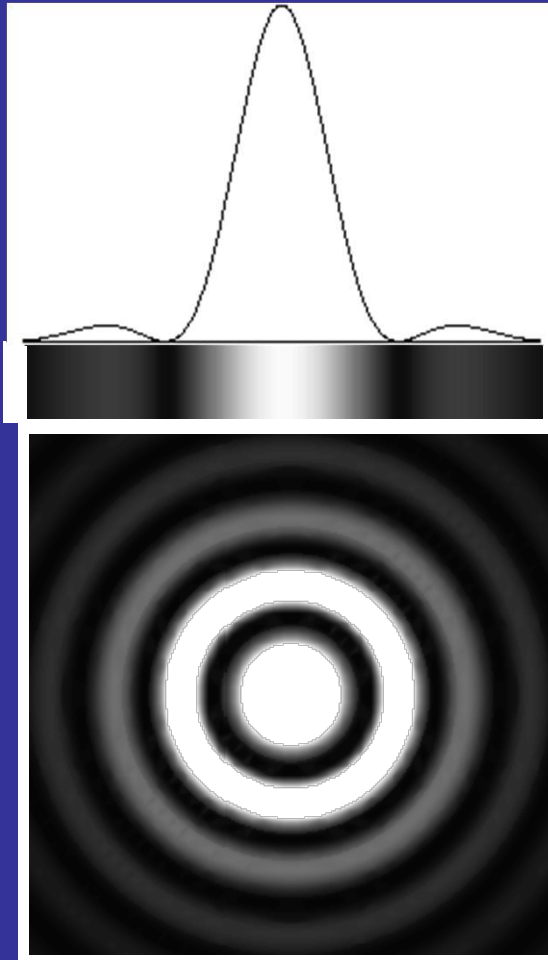
Dyfrakcja



Jeżeli fala napotyka na swojej drodze przeszkodę, otwór lub szpilkę o rozmiarach porównywalnych z długością fali, to po przejściu przez nią będzie się inaczej rozprzestrzeniać (fala będzie ulegać ugięciu – dyfrakcji).

W wyniku dyfrakcji powstaje złożony z prążków obraz interferencyjny zwany obrazem dyfrakcyjnym

Obraz dyfrakcyjny pojedynczej szczeliny



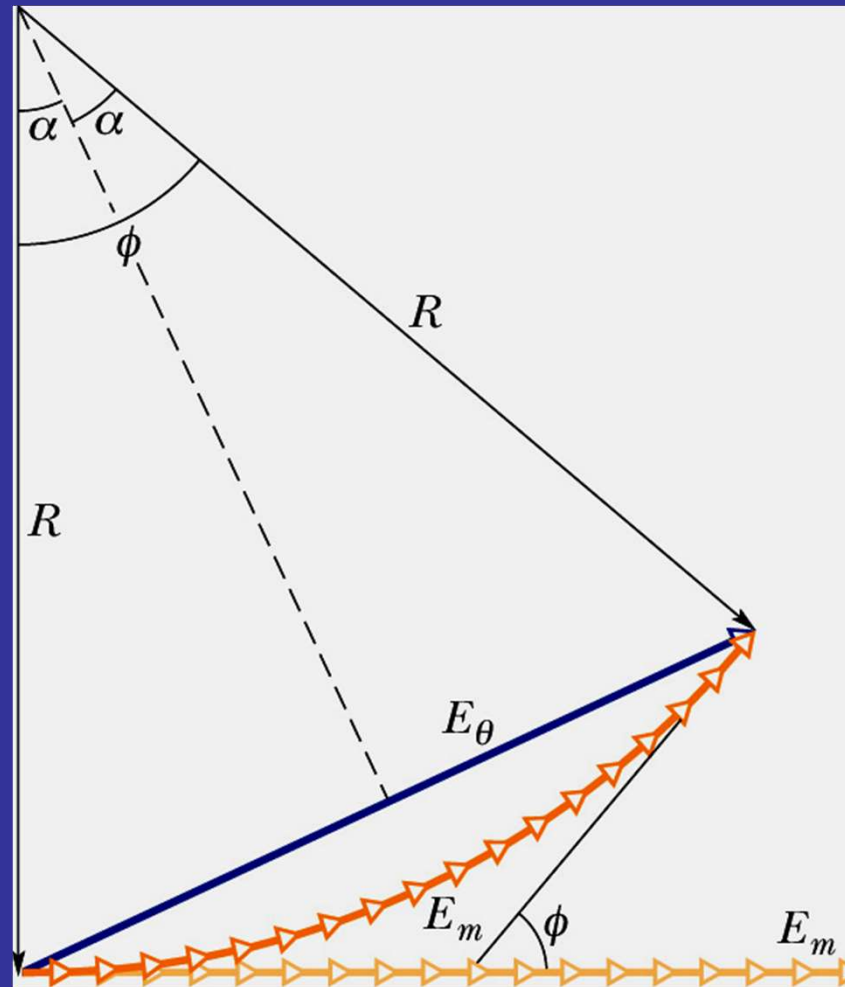
Ciemne prążki – minima powstają gdy

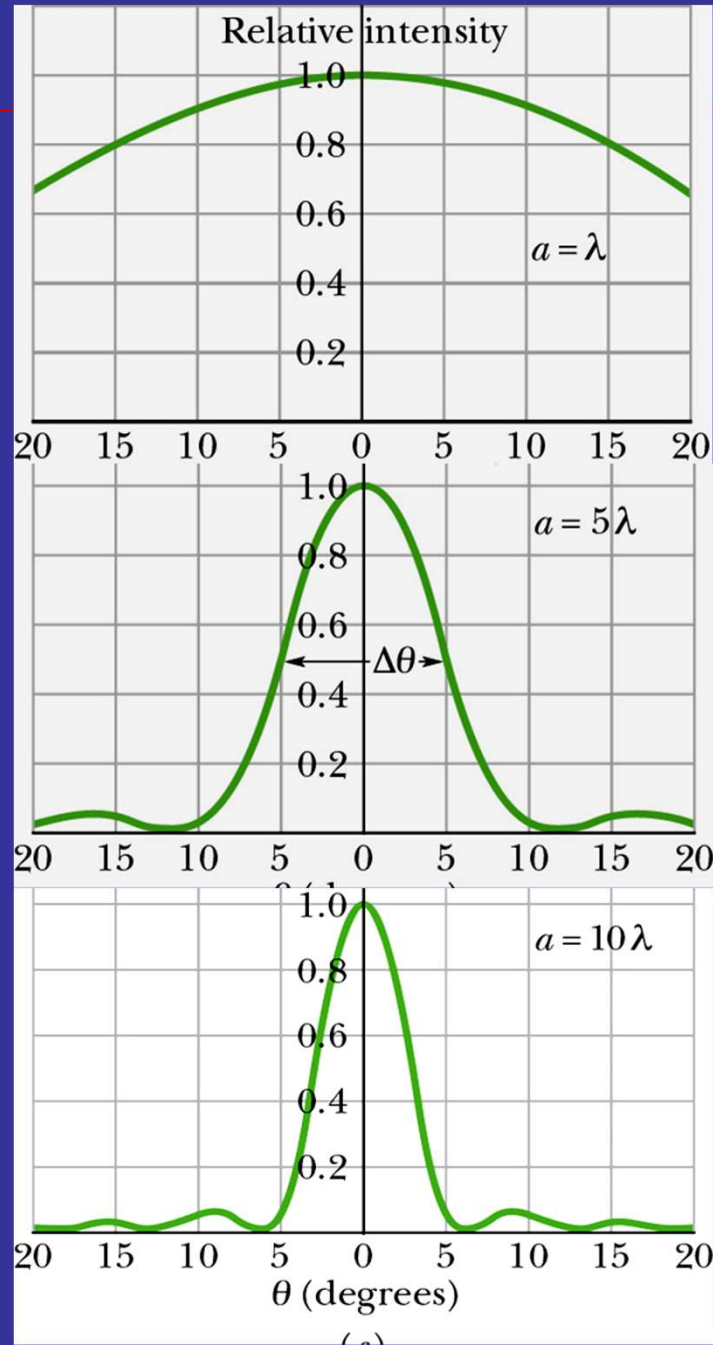
szerokość
szczeliny

$$a \sin \theta = m \lambda \quad m=0,1,2,..$$

kąt ugięcia

Metoda wskazów-
wyprowadzenie
wzoru na natężenie
światła w obrazie
dyfrakcyjnym
pojedynczej
szczeliny (HWR, t.4,
37.4)



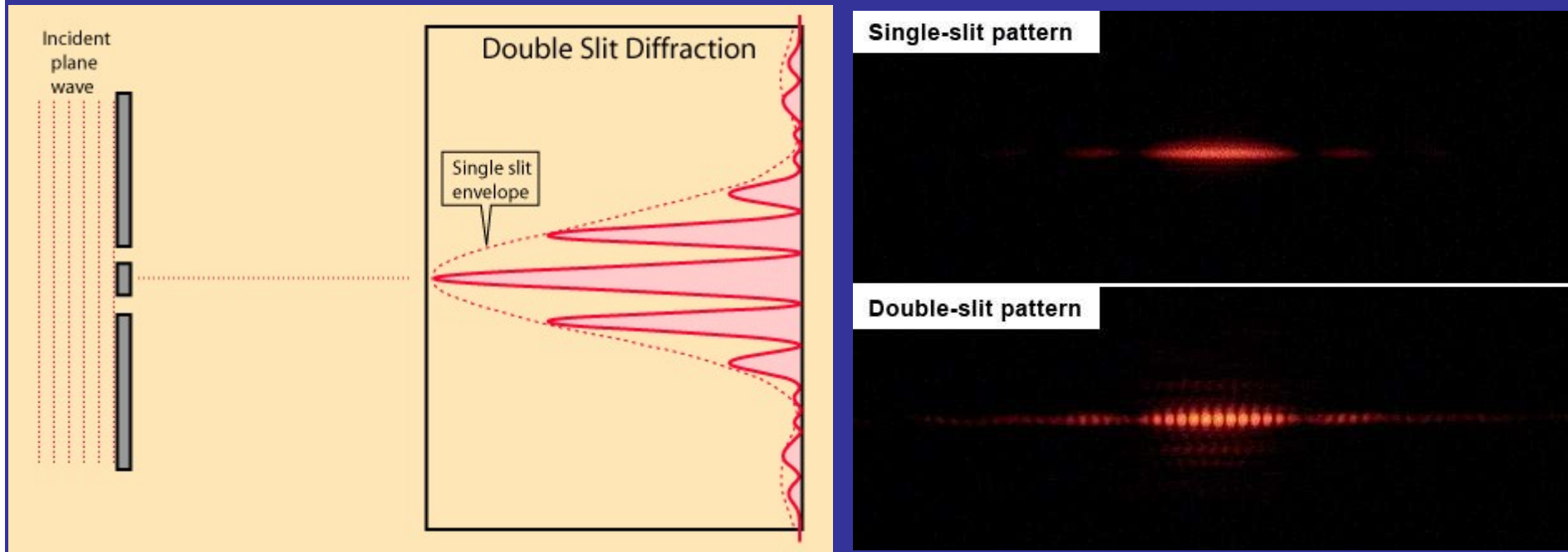


$$I(\theta) = I_0 \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2$$

$$\alpha = \frac{\varphi}{2} = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta$$

Im większy stosunek a/λ tym węższy jest obraz dyfrakcyjny (szerokość centralnego maksimum).

Obraz interferencyjno-dyfrakcyjny od dwóch szczelin



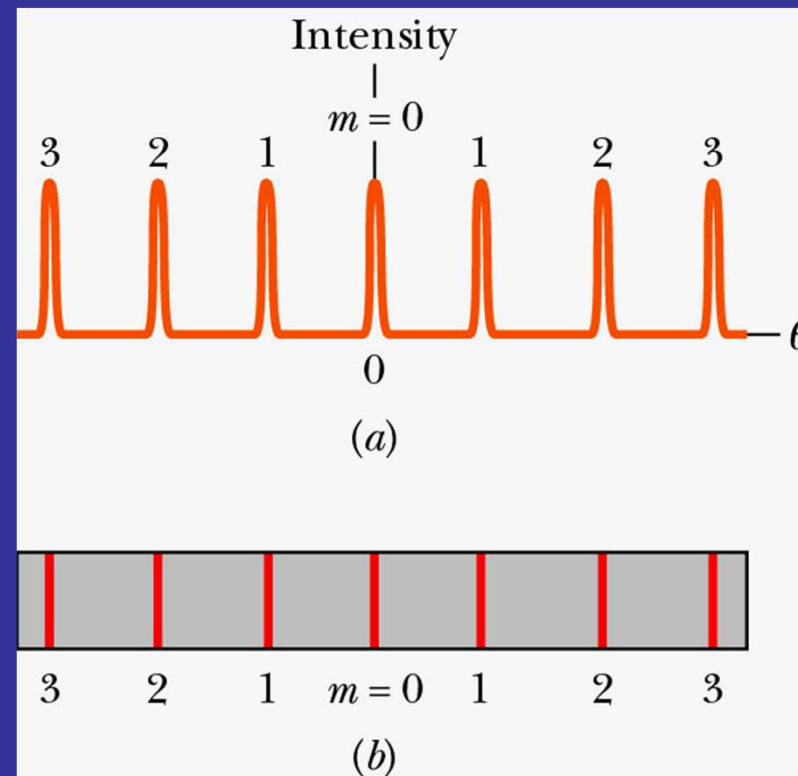
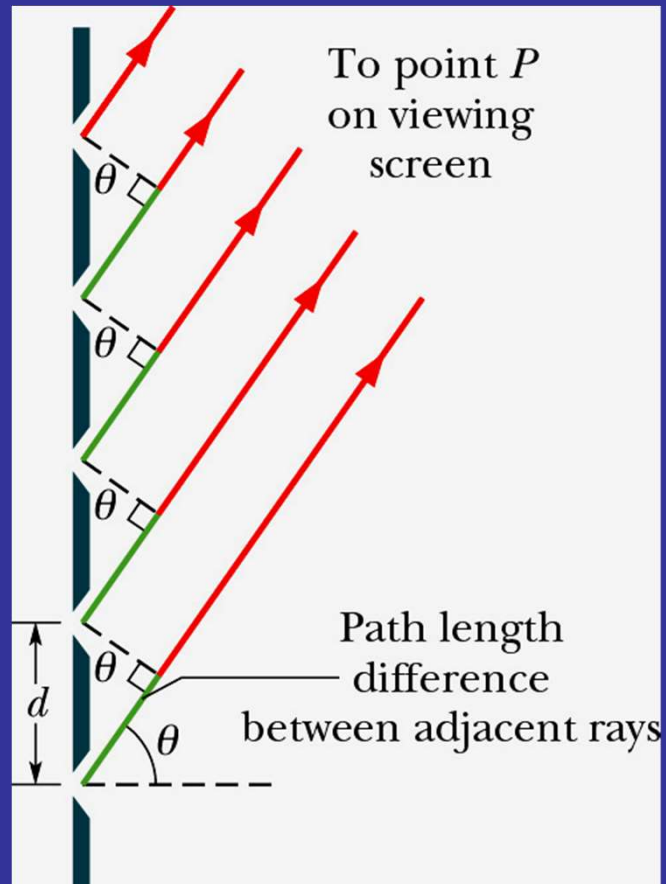
$$I(\theta) = 4I_o \left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2 \cos^2 \beta$$

$$\beta = \frac{\pi d}{\lambda} \sin \theta$$

$$\alpha = \frac{\pi a}{\lambda} \sin \theta$$

Siatka dyfrakcyjna

układ wielu szczelin

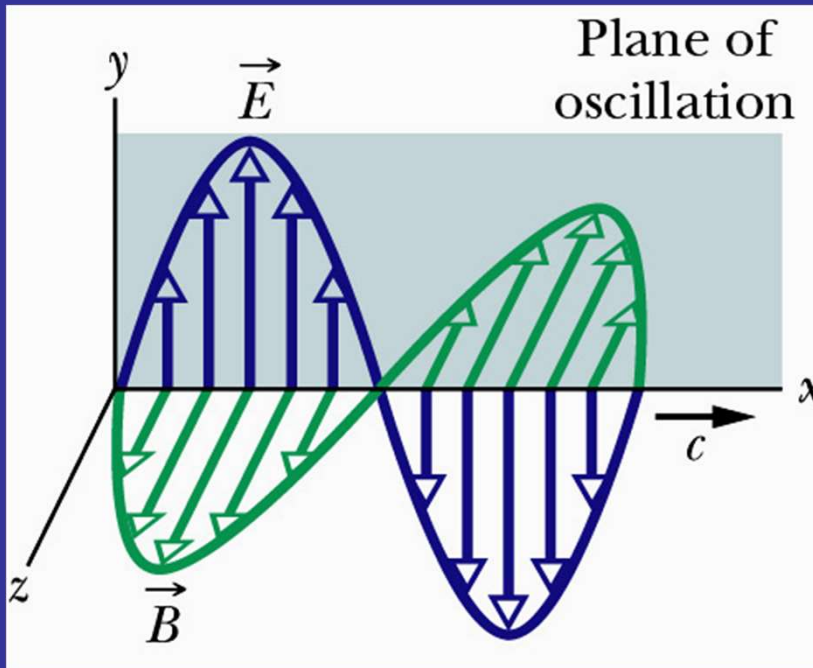


warunek powstawania
maksimum

$$d \sin \theta = m \lambda$$

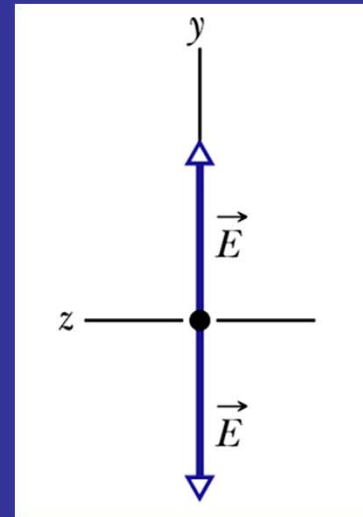
$$m = 0, 1, 2, \dots$$

Polaryzacja fali elektromagnetycznej



światło niespolaryzowane

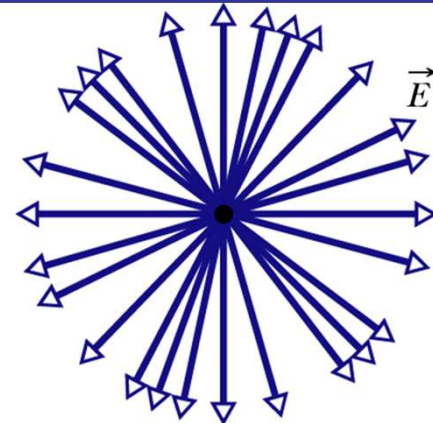
2018 lato



światło całkowicie
spolaryzowane
liniowo

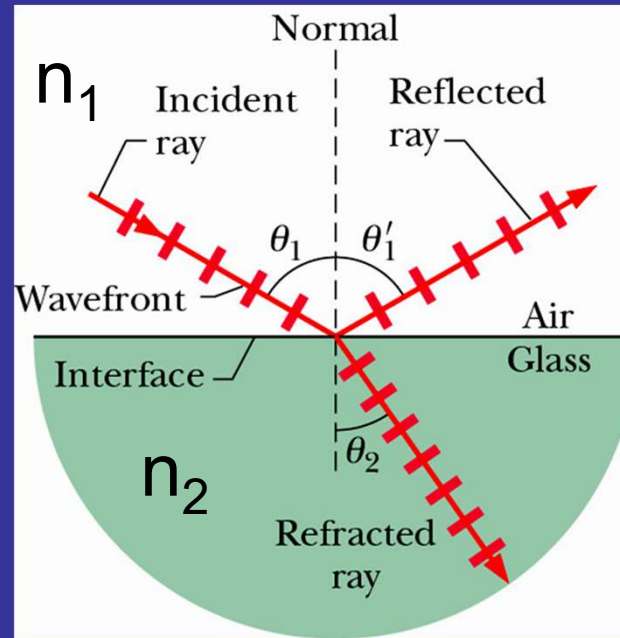
Prawo Malusa

$$I(\theta) = I_0 \cos^2 \theta$$



Odbicie i załamanie

Czemu ołówek wydaje się być złamany?



Prawo odbicia:

$$\theta_1 = \theta_1'$$

Prawo załamania- prawo Snella

$$n_2 \sin \theta_2 = n_1 \sin \theta_1$$

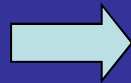
różna jest prędkość rozchodzenia się fali w ośrodkach różniących się współczynnikiem załamania $n=c/v$

Zasada Fermata

1679 r

Światło przebiegające między dwoma punktami wybiera drogę, na przebycie której trzeba zużyć minimum lub maksimum czasu (zazwyczaj minimum) w porównaniu z sąsiednimi drogami

$$t = \int \frac{ds}{v}$$



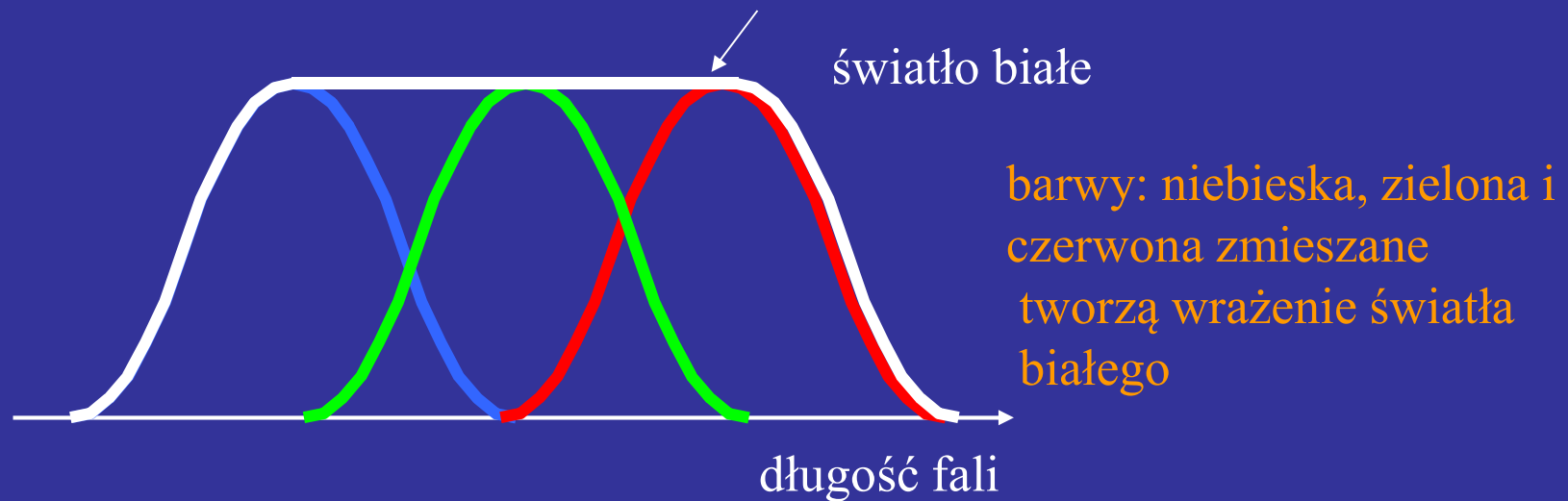
$$t = \frac{1}{c} \int n ds = \frac{\text{droga optyczna}}{c}$$

Minimalizacja czasu to minimalizacja drogi optycznej

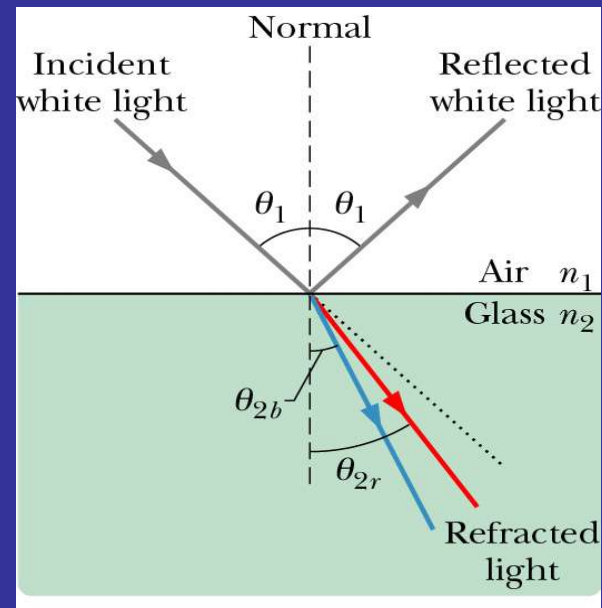
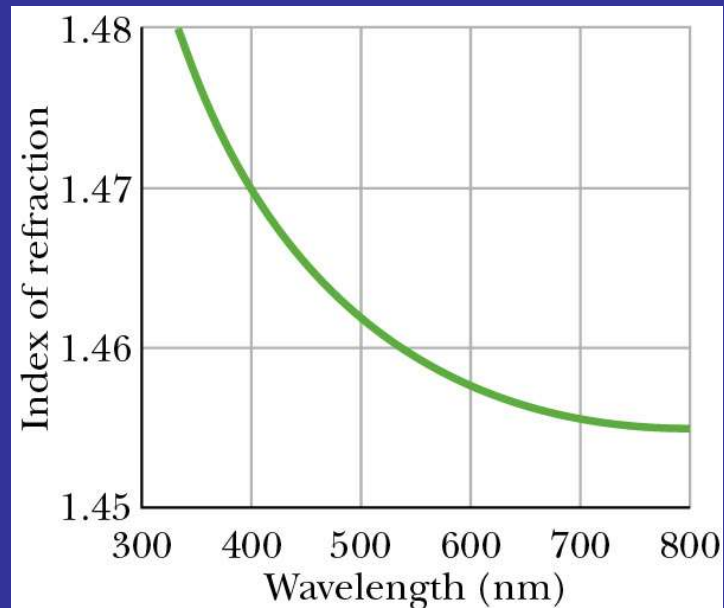
Zasada Fermata tłumaczy prostoliniowy bieg światła w ośrodku jednorodnym, można z niej wyprowadzić prawo odbicia i prawo załamania

Światło białe

Światło białe stanowi idealną mieszalinę barw



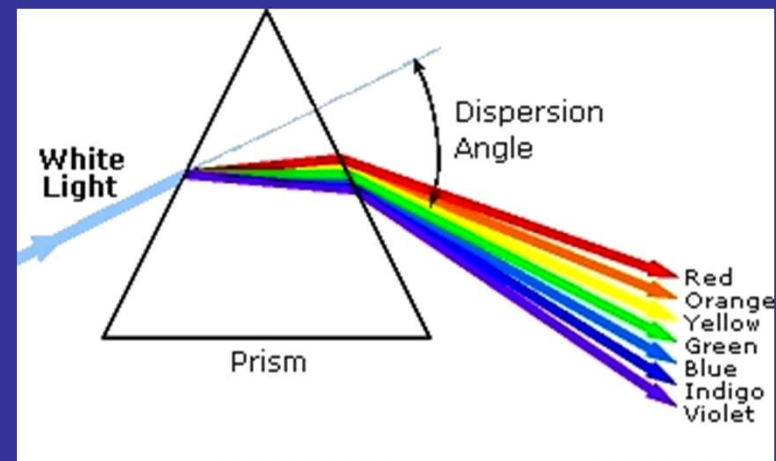
Dyspersja



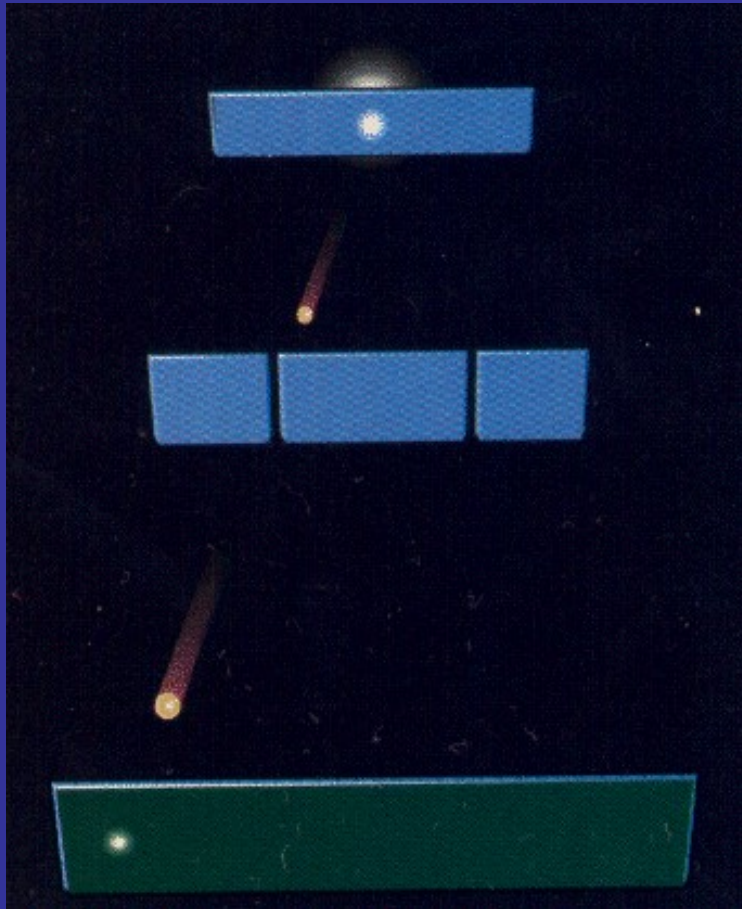
Światło monochromatyczne o określonej długości fali można utworzyć wykorzystując:

dyspersję $n(\lambda)$ – pryzmat

ugięcie $\theta(\lambda)$ – siatka dyfrakcyjna

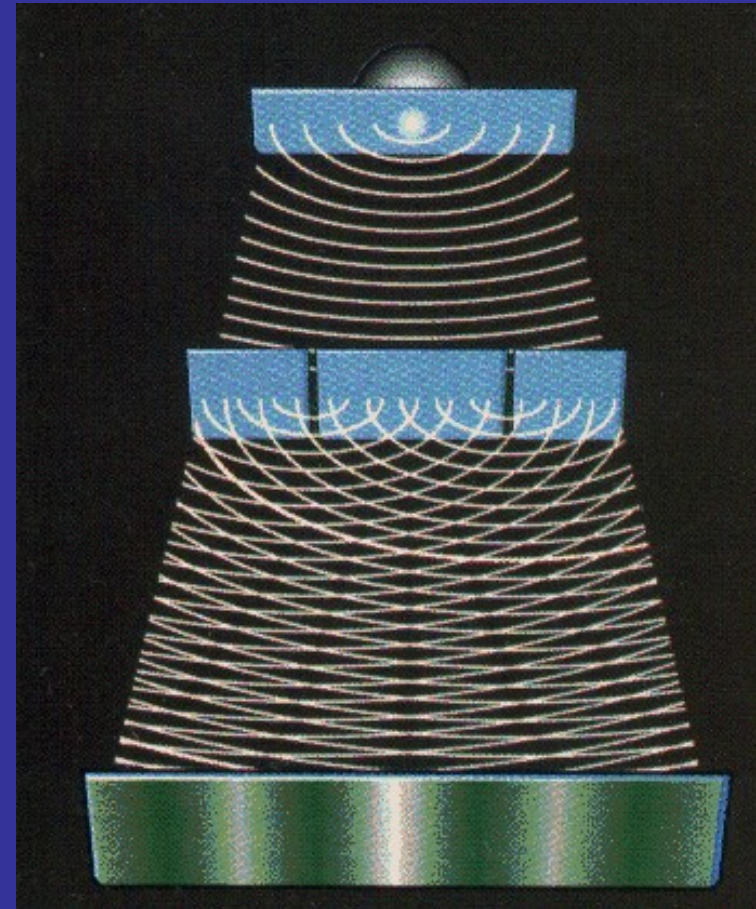


Podsumowanie – refleksja na temat natury falowej



2018 lato

Czy światło jest cząstką?



Czy światło jest falą?

Dualizm korpuskularno-falowy:

W pewnych eksperymentach ujawnia się charakter falowy światła (dyfrakcja, interferencja, polaryzacja) a pewne zjawiska (efekt fotoelektryczny, efekt Comptona) można wytłumaczyć w modelu zakładającym istnienie kwantu promieniowania elektromagnetycznego – fotonu o energii $E=h\nu$ (h -stała Plancka)

Foton jest cząstką o zerowej masie spoczynkowej

Czy elektron jest falą czy cząstką? Czy istnieją fale materii?

Hipoteza de Broglie'a odpowiada twierdząco:

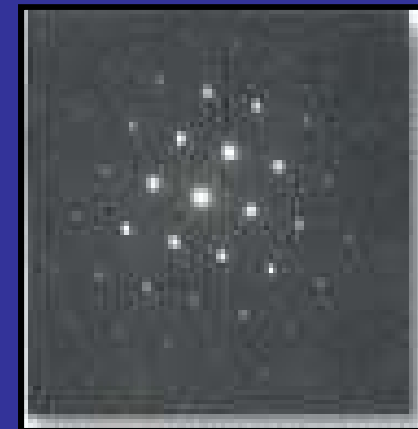
długość fali
stowarzyszonej
z cząstką

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

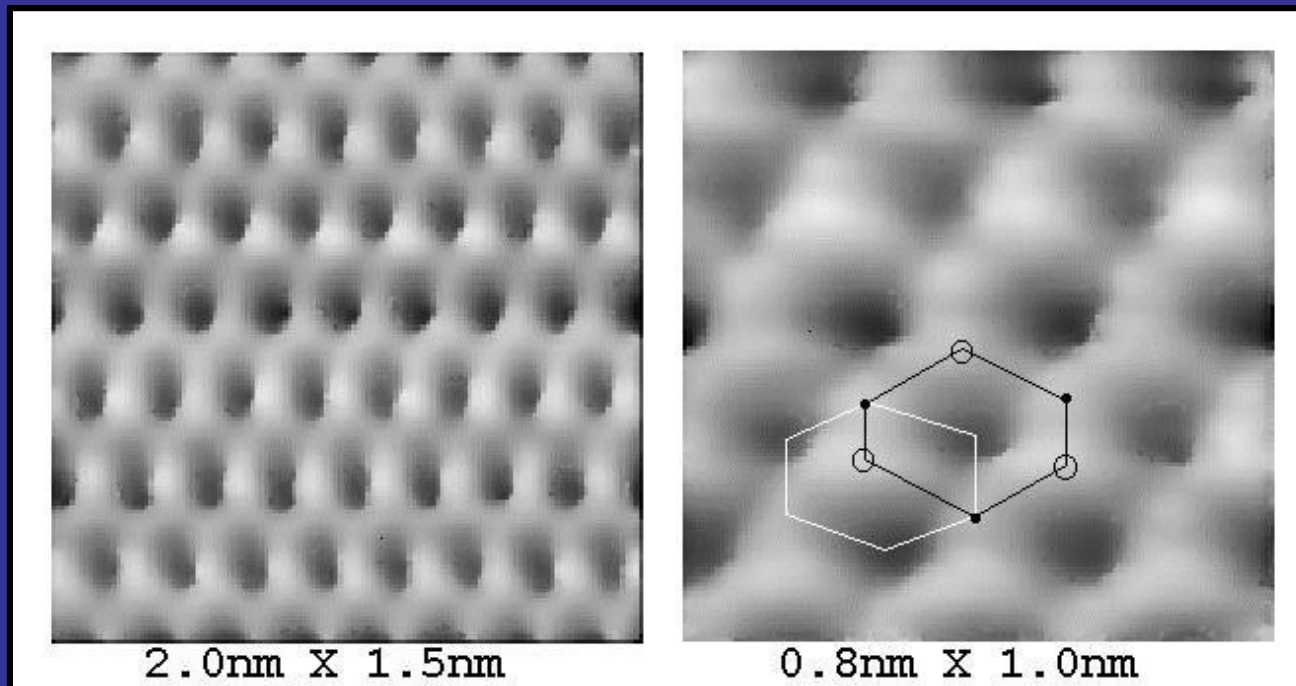
stała Plancka

pęd cząstki

Dyfrakcja fal elektronowych rzeczywiście zachodzi –
transmisyjna mikroskopia elektronowa TEM



STM (Scanning Tunneling Microscope)



rozdzielczość na poziomie atomowym