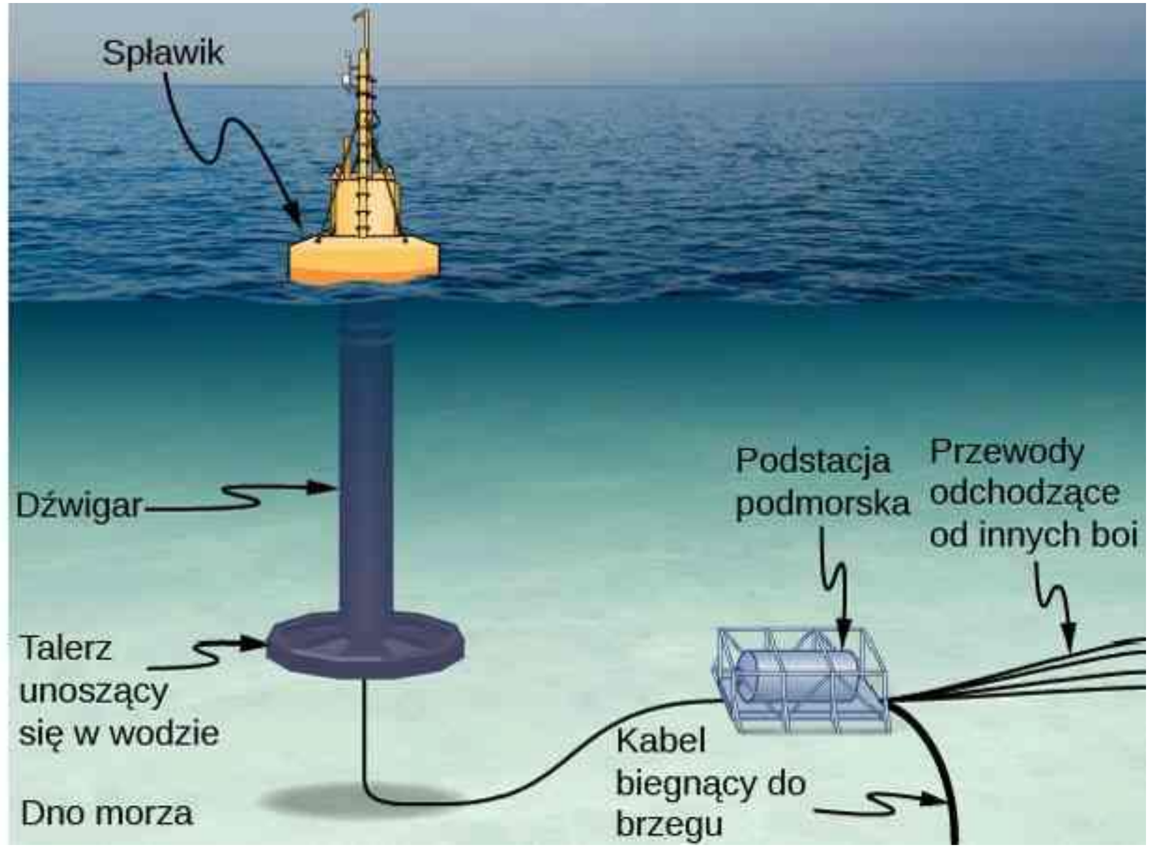
RUCH FALOWY



Z badań nad odnawialnymi źródłami energii wywodzi się koncepcja boi wytwarzającej prąd elektryczny. Model pokazany na rysunku przekształca energię ruchu boi w płaszczyźnie pionowej i poziomej w energię ruchu obrotowego. W ten sposób uruchomiony zostaje generator prądu elektrycznego.

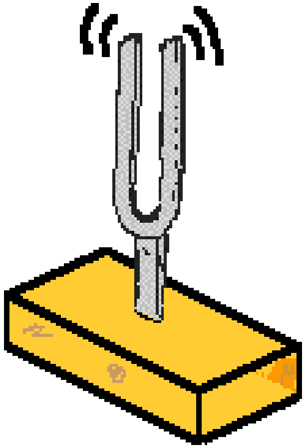
Energia elektryczna magazynowana jest w baterii.

źr.: „Fizyka dla szkół wyższych" Samuel J. Ling, Jeff Sanny, William Moebs

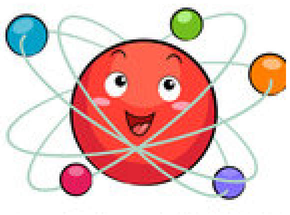
"Często zdarza się, że fala ucieka z miejsca powstania, podczas gdy woda pozostaje, podobnie jest z falami, jakie wiatr wywołuje na polu zboża-widzimy fale biegnące przez pole, podczas gdy zboże pozostaje w miejscu. "

Leonardo da Vinci

WYKŁAD 8 i 9



CZĄSTKA I FALA



Mamy dwa sposoby kontaktowania się z przyjacielem w innym mieście:

→ możemy napisać list (sposób polega na wykorzystaniu **cząstek**- obiektów materialnych);

→ skorzystać z telefonu (drugi sposób polega na wykorzystaniu **fal**).

Cząstka oznacza malutkie skupienie materii zdolne do przenoszenia energii.

Fala oznacza coś wręcz przeciwnego, tj. rozchodzące się w ośrodku **zaburzenie**.

RODZAJE FAL (trzy główne rodzaje)

1.Fale mechaniczne, podlegają zasadom Newtona **i mogą istnieć wyłącznie w ośrodku materialnym** (sprężystym).

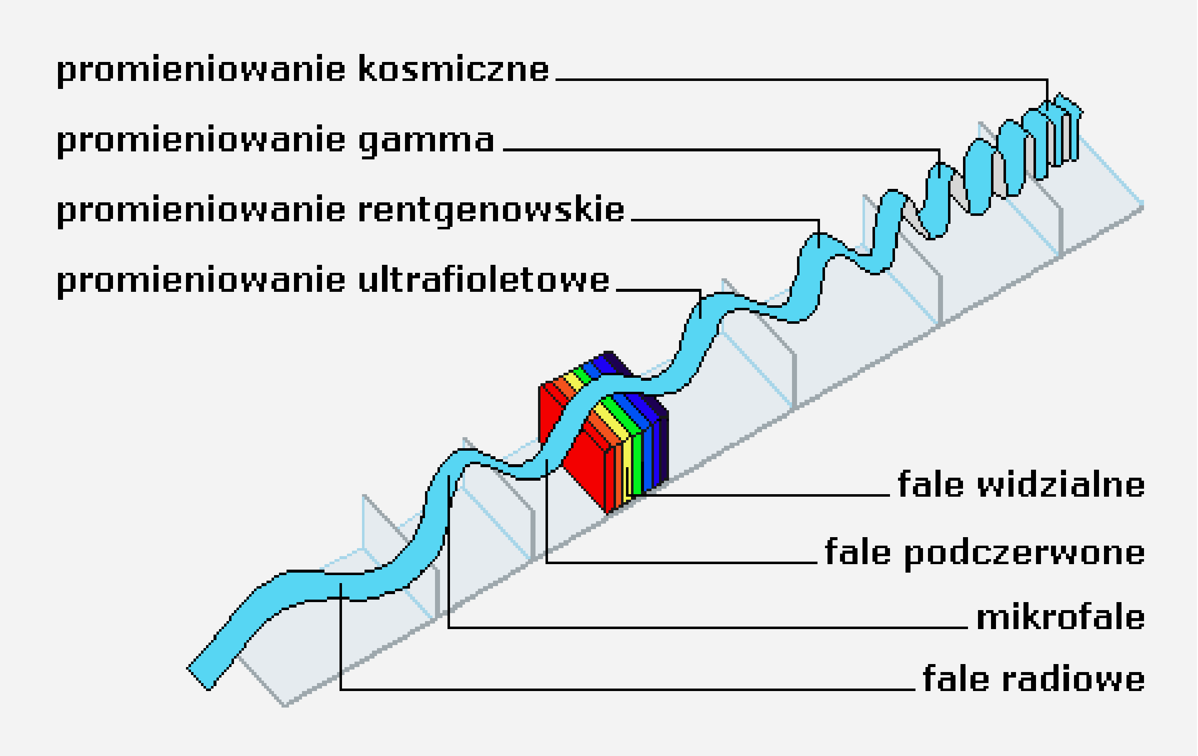
Fale mechaniczne przenoszą energię i pęd, nie przenoszą masy.

Przykładami fal mechanicznych są fale na wodzie , fale dźwiękowe lub fale sejsmiczne.

2. Fale elektromagnetyczne

są związane z drganiami pól elektrycznych i magnetycznych i nie wymagają obecności ośrodka.

Zaliczymy do nich promieniowanie:



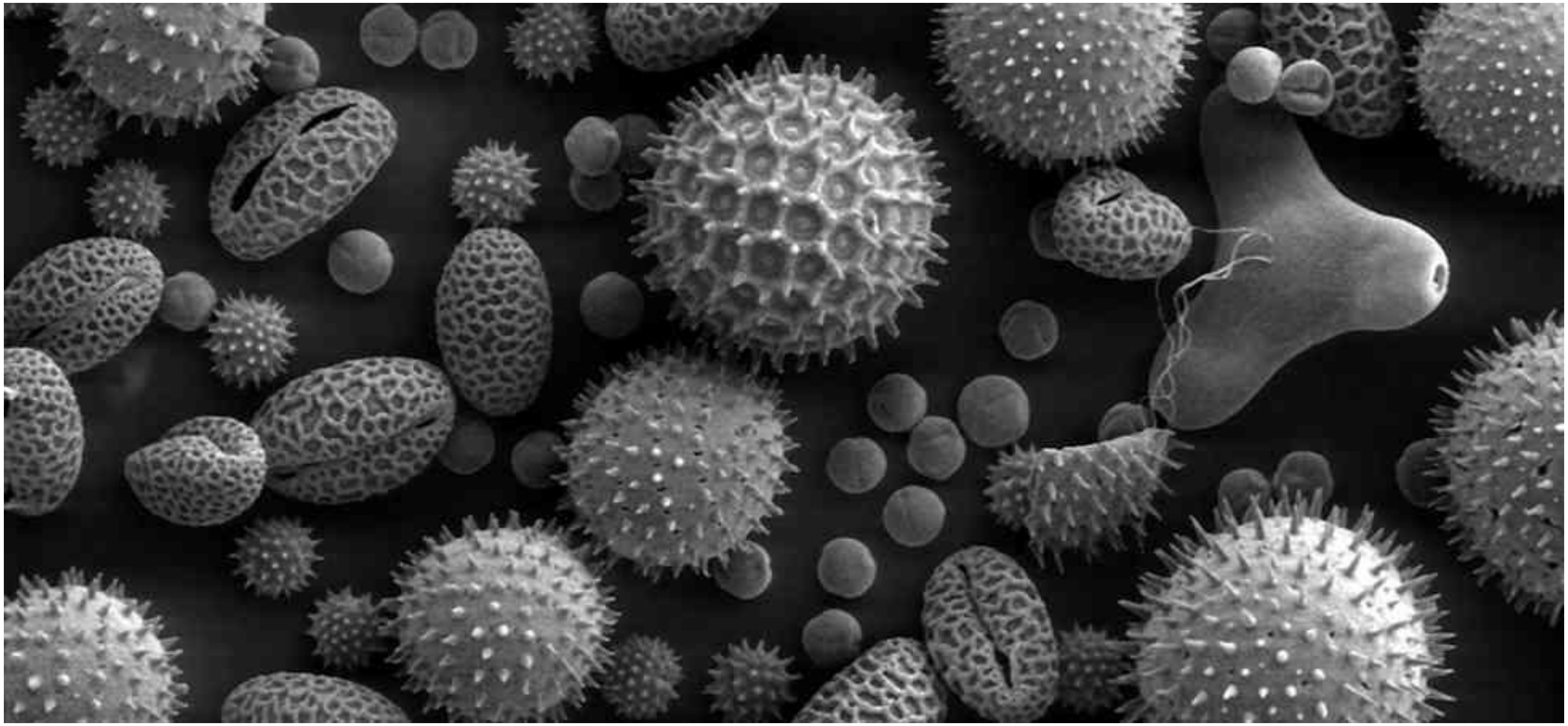
Fale elektromagnetyczne rozchodzą się w próżni z prędkością światła :

c = 299 792 458 m/s.

RODZAJE FAL (trzy główne rodzaje)

3. Fale materii są kluczowym zagadnieniem mechaniki kwantowej.

Są wykorzystywane we współczesnej technice i są one związane z takimi cząstkami jak elektrony, protony oraz inne cząstki elementarne. Cząstki te uważamy za składniki materii, nazywamy je falami materii. Teoria, wg której każda cząstka materialna ma właściwości falowe, została sformułowana przez Louisa de Broglie'a w 1924 roku.



Rys. Zdjęcie wykonane mikroskopem elektronowym, przedstawia ziarnka pyłku, drobiny w kształcie fasoli mają około 50 μm długości. Mikroskop elektronowy ma dużo większą zdolność rozdzielczą niż konwencjonalne mikroskopy optyczne. Długość fali elektronu, to około 100 000 razy mniejsza niż długość fali odpowiadająca światłu widzialnemu. Zdjęcie, źródło: „*Fizyka dla szkół wyższych* S. Ling, , J.Sanny, W. Moebs

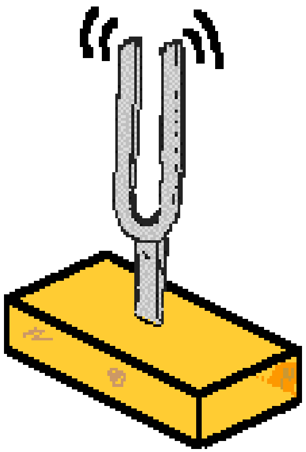
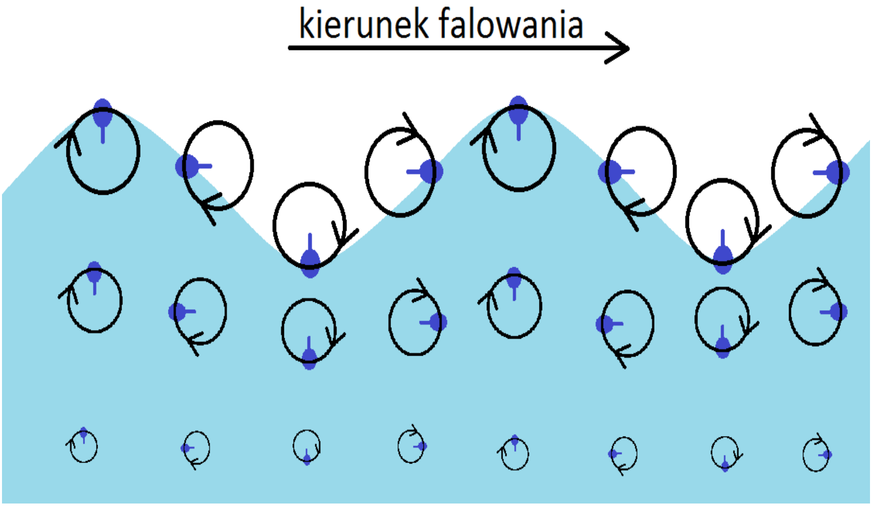


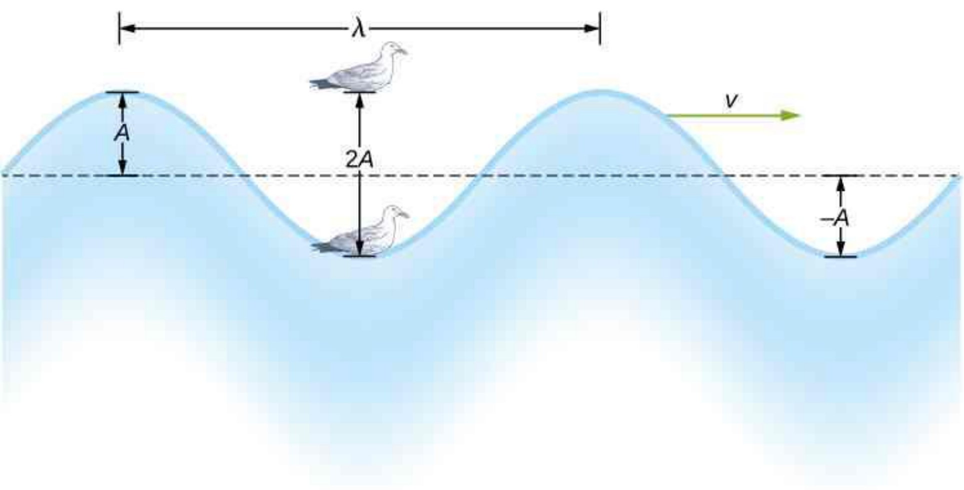
Foto. Źródło: https://www.slideshare.net

Fale powstające w ośrodkach materialnych (sprężystych) nazywane są falami mechanicznymi (np. dźwiękowe, na wodzie, sejsmiczne**).**

Ruch falowy polega na przenoszeniu zaburzeń w ośrodku sprężystym, w czasie i przestrzeni. W przypadku fal mechanicznych drgają cząsteczki ośrodka, natomiast w przypadku fal elektromagnetycznych, w danym punkcie drgają wektory natężenia pola elektrycznego i indukcji magnetycznej.

Ruch falowy jest związany z transportem energii przez ośrodek





Podczas rozchodzenia się fali, cząsteczki ośrodka nie przesuwają się wraz z falą, a jedynie drgają wokół swoich położeń równowagi. Energia fal, to energia kinetyczna i potencjalna cząstek ośrodka.

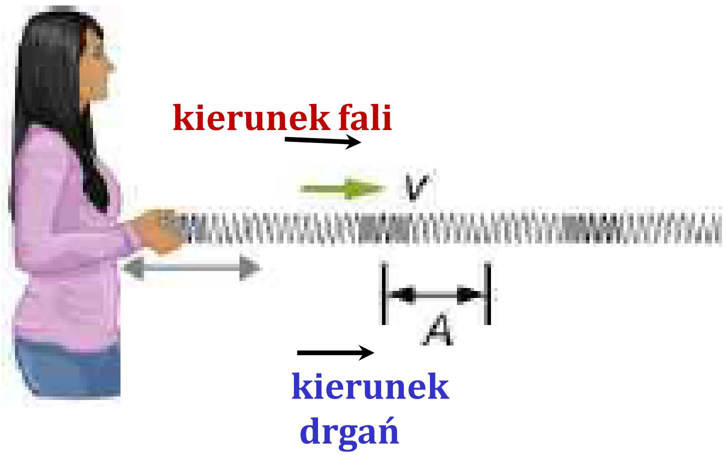
Podstawową własnością wszystkich fal, niezależnie od ich natury, jest transport energii bez przenoszenia materii.

Rys. Falowanie pojedynczych cząstek wody w głębokim zbiorniku.
Falowanie- oscylacyjny ruch cząsteczek wody w pionie po orbitach kołowych lub eliptycznych.

źródło: http://geographicforall.pl/ & Fizyka dla szkół wyższych,I, Samuel J. Ling, Jeff Sanny, William Moebs)

RODZAJE FAL MECHANICZNYCH

Falą mechaniczną nazywamy zaburzenie w postaci ruchu drgającego cząsteczek ośrodka rozchodzące się ze skończoną prędkością v.



▪**Podział fal ze względu na kierunek drgań**

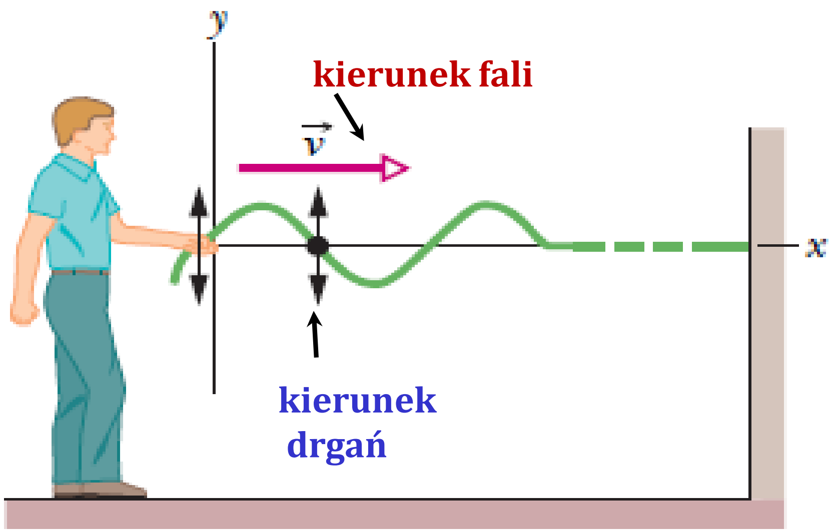
A. Fala podłużna

Fala jest podłużna **gdy kierunek drgań cząstek ośrodka jest równoległy do kierunku rozchodzenia się fali** i zarazem kierunku transportu energii . Przykład. Fale dźwiękowe w powietrzu, drgania naprzemiennie ściskanej i rozciąganej sprężyny.

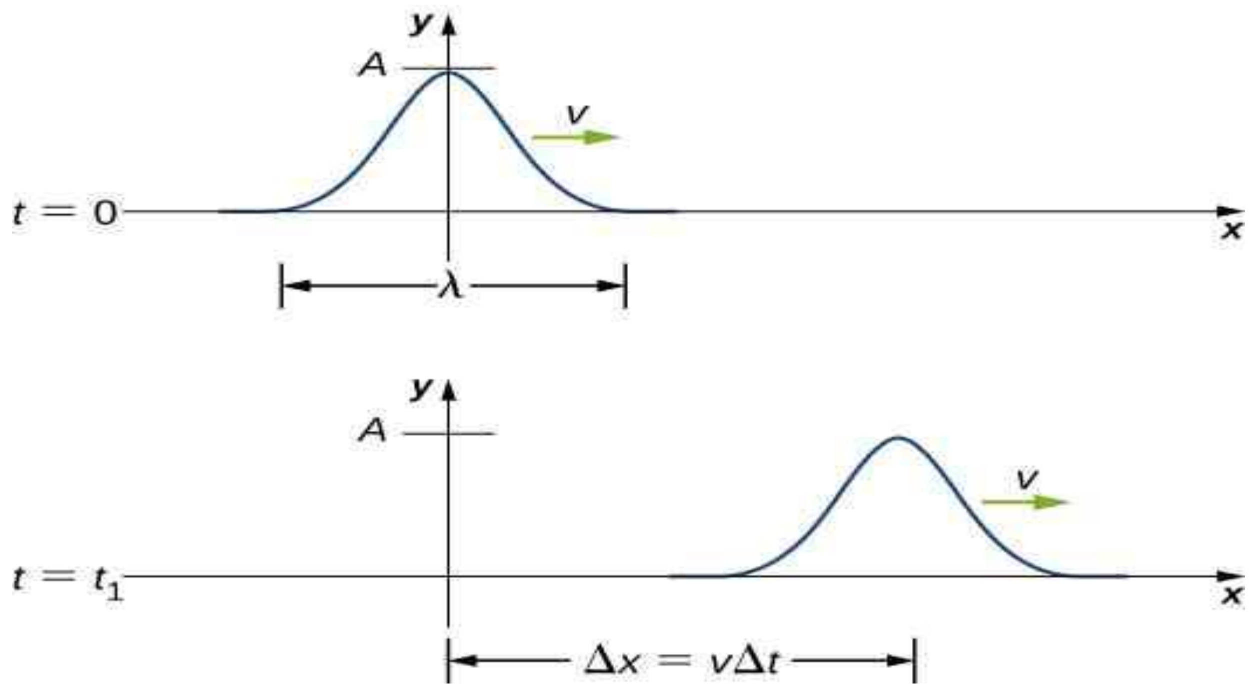
B. Fala poprzeczna

Kierunek drgań cząstek ośrodka jest prostopadły do kierunku rozchodzenia się fali i zarazem kierunku transportu energii.

Przykład.
Drgania naprężonego sznura, którego końcem poruszamy cyklicznie w górę i w dół.



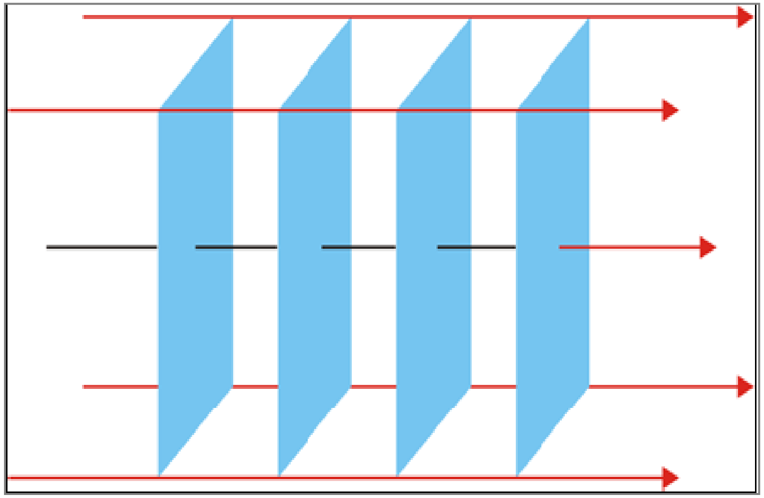
Impuls falowy powstaje gdy źródłem jest jednorazowe zaburzenie w ośrodku (rys.1).



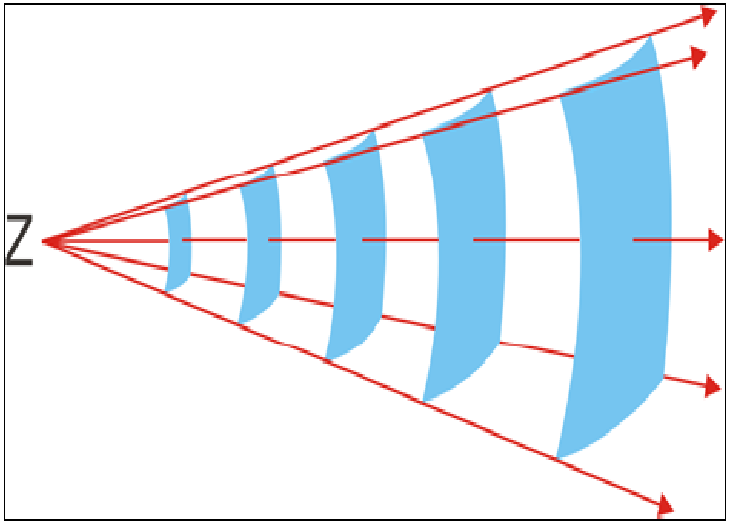
Rys.1. Impuls falowy ma stałą amplitudę i rozchodzi się ze stałą prędkością.

▪ Podział fal ze względu na kształt powierzchni falowej :

a) ***fale płaskie***



b) ***fale kuliste***



Przykład – Cechy charakterystyczne fal

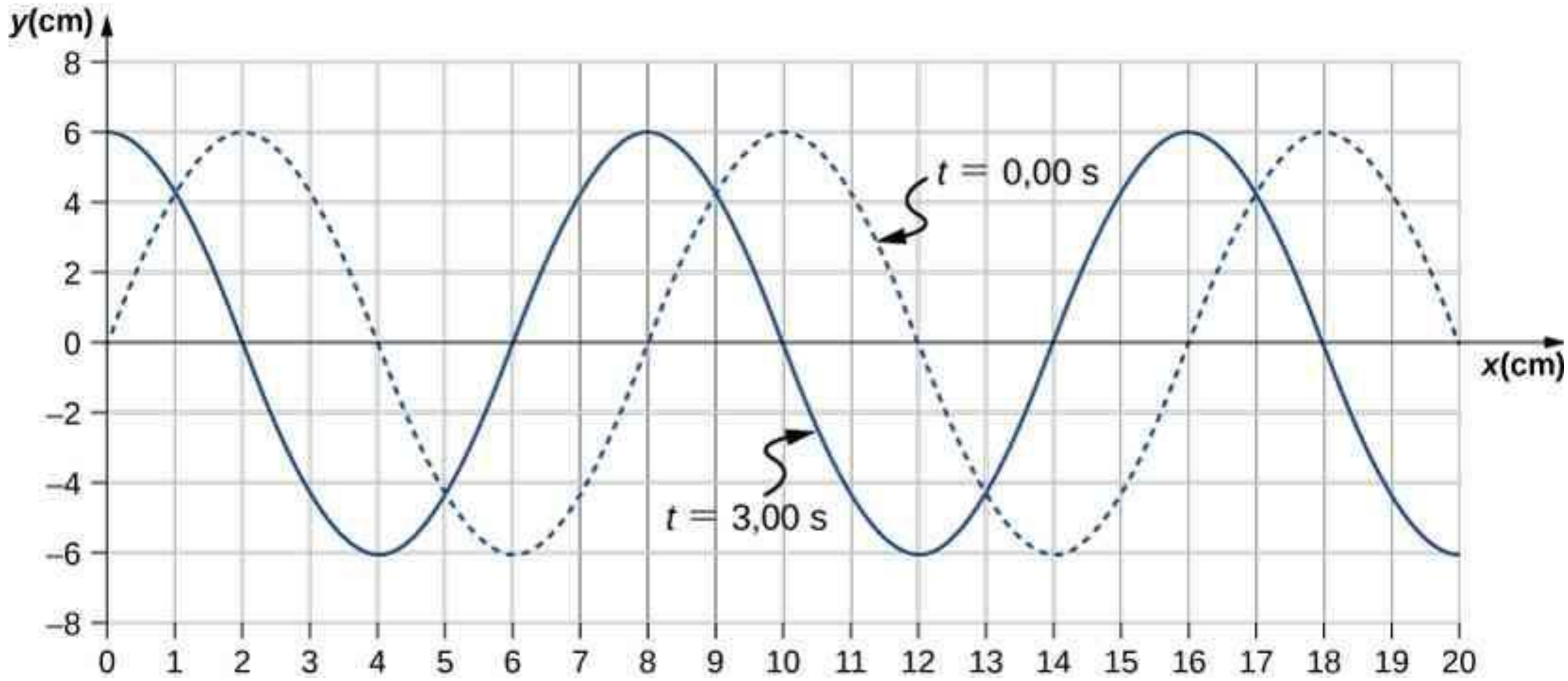
Na wykresie przedstawiono zależność wychylenia sprężyny w funkcji położenia: y =f (x).

Zwrot osi x jest zgodny z kierunkiem rozchodzenia się fali. Linią przerywaną pokazano y=f(x) w chwili t = 0,00 s . Linia ciągła pokazuje zależność y =f(x) dla t = 3 s .

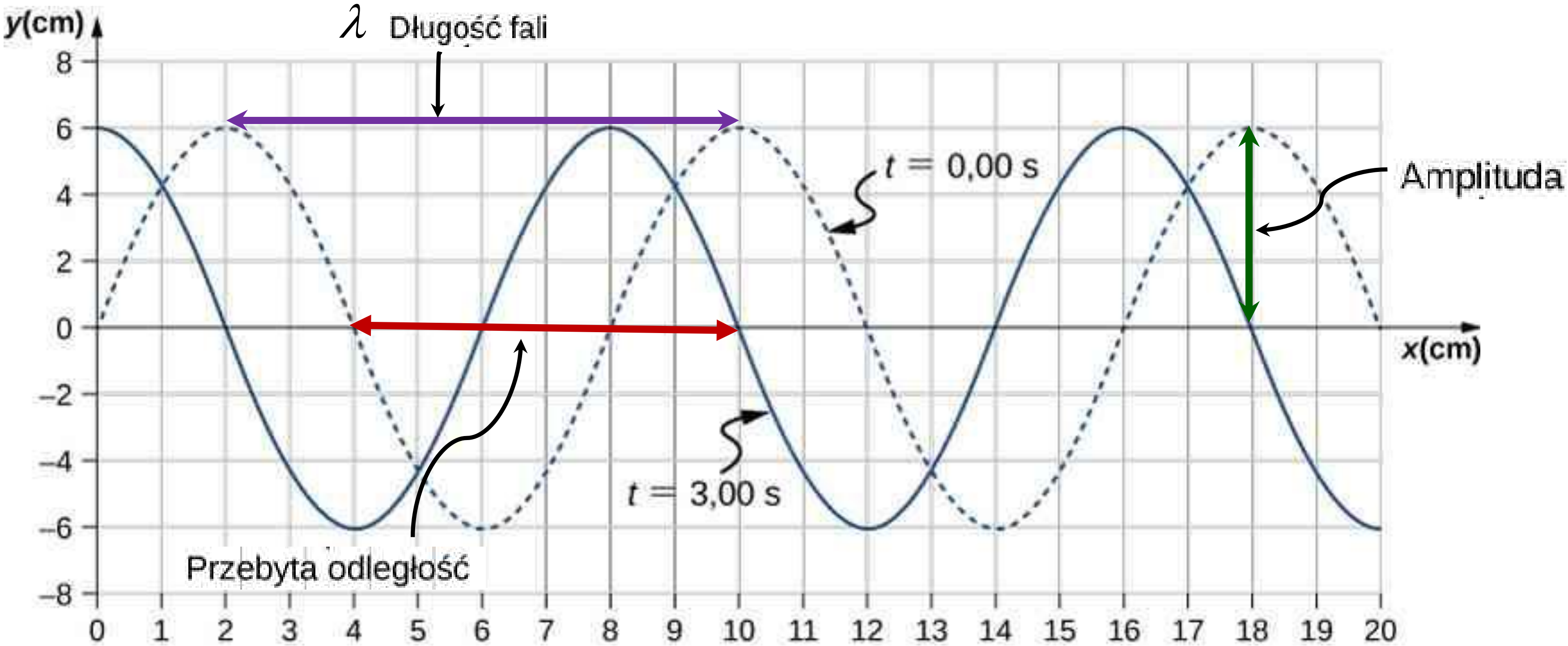
(a) Oblicz długość i amplitudę fali.

(b) Znajdź prędkość rozchodzenia się fali.

(c) Oblicz okres i częstotliwość fali.



Rozwiązanie



Ad a) $\lambda = 8{,}0cm = 0{,}08m; \;\; A = 6{,}0cm = 0{,}06m$

Ad b) $\Delta x = 10{,}0cm - 4{,}0cm = 6{,}0cm = 0{,}06m$

$$\Delta t = 3{,}0s$$

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow v = 0{,}02\frac{m}{s}$$

Ad c) $T = \dfrac{\lambda}{v} \Rightarrow T = 4{,}0 \;\; s$

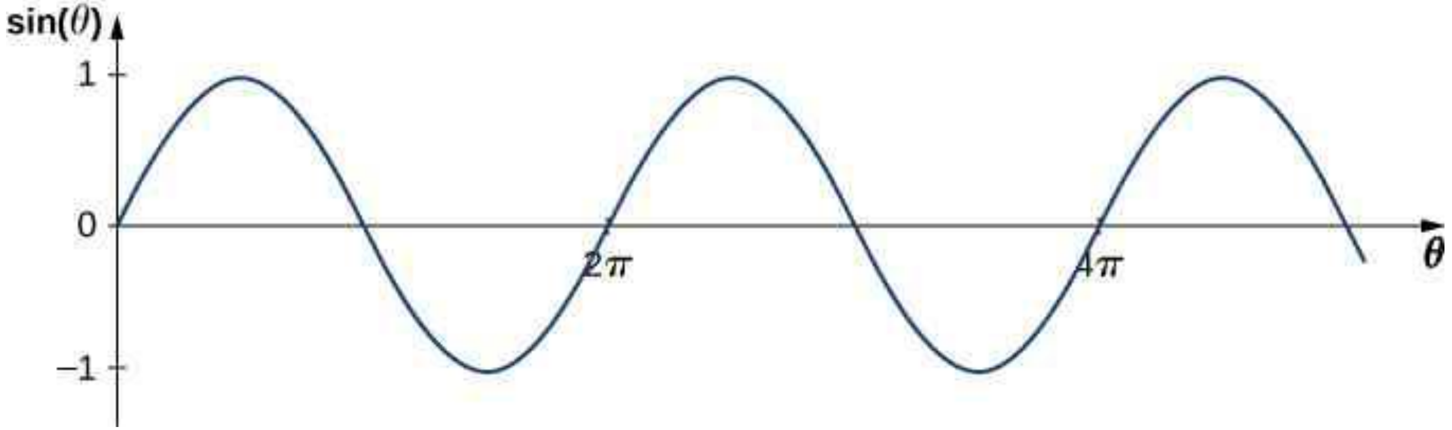
$$f = \frac{1}{T} \Rightarrow f = 0{,}25 \;\; Hz$$

Matematyczny opis fali

Jak opisać falę przy użyciu funkcji okresowej y =f (x)?

Rozważmy stosunek kąta do położenia (rys.).

Współrzędne $y = \sin\theta$ cząstek ośrodka, a zarazem funkcji falowej, posiadają wartości (-1,+1) .



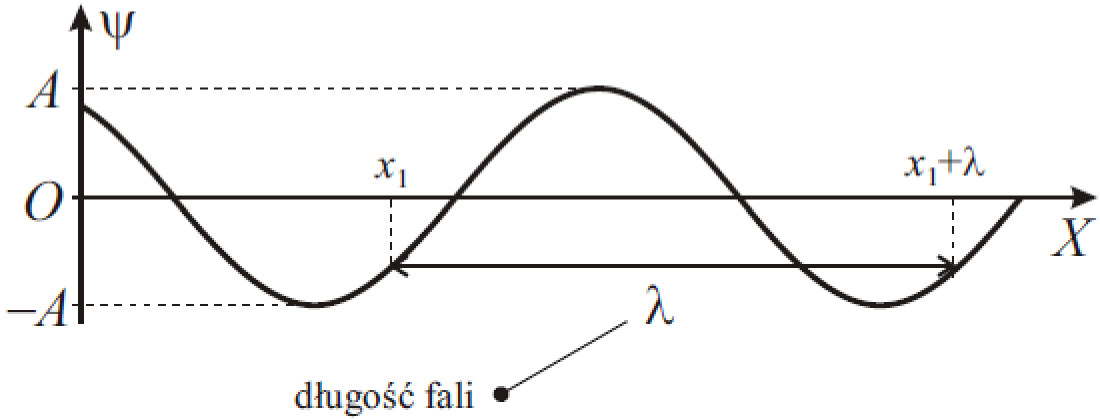
$$\frac{\theta}{x} = \frac{2\pi}{\lambda},$$
$$\theta = \frac{2\pi}{\lambda}x. \qquad (7.2)$$

Postać funkcji opisującej położenie y ośrodka w zależności od położenia x :

$$y(x) = A\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right).$$

FALA – matematyczny opis

Fala przemieszcza się wzdłuż struny w kierunku osi *x ze stałą prędkością v i pokonuje odcinek vt w czasie t .*



Funkcję falową definiuje się jako: $$y\,(x,t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right).$$

$$\boxed{y\,(x,t) = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{\lambda}vt\right).}$$

Wielkość $\boxed{k = \frac{2\pi}{\lambda}}$ - liczba falowa, jednostka (m^{-1})

Równanie poprzecznej fali harmonicznej

$$\boxed{y(x,t) = A\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x - \frac{2\pi}{\lambda}vt\right).}$$

Drugi wyraz przyjmuje też postać:

$$\frac{2\pi}{\lambda}vt = \frac{2\pi}{\lambda}\left(\frac{\lambda}{T}\right)t = \frac{2\pi}{T}t = \omega t.$$

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

Funkcja falowa:

$$\boxed{\underset{\text{wychylenie z położenia równowagi drgającego punktu ośrodka}}{y(x,t)} = \overset{\text{amplituda fali}}{A}\, sin\big(\overbrace{\underset{\text{liczba falowa}}{k}x \mp \omega t + \underset{\text{faza początkowa drgań źródła}}{\varphi}}^{\text{faza}}\big)}$$

Znak minus (–)oznacza falę biegnącą w kierunku zgodnym ze zwrotem osi x
znak plus (+) falę biegnącą przeciwnie do zwrotu osi x

v-PRĘDKOŚĆ ROZCHODZENIA SIĘ FALI

częstotliwość drgań
punktów ośrodka

prędkość fazowa fali

częstość kołowa

$$\boxed{v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f = \frac{\lambda\omega}{2\pi} = \frac{\omega}{k}} \qquad (7.2) \qquad \boxed{\omega = \frac{2\pi}{T}}$$

liczba
falowa

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

okres drgań punktów ośrodka

Prędkość *v* nazywa się **prędkością fazową, gdyż jest to prędkość z jaką** porusza się stała faza fali.

❖***λ* -długość fali,** *to* najmniejsza odległość między dwoma cząstkami, mającymi tę samą fazę drgań. Zależność: $\boxed{\lambda = v \cdot T}$ $[m]$

Przykład- parametry fali

Student jeden koniec sznura **o długości 30,00 m**, przymocował do ściany w laboratorium fizycznym. Następnie, uchwycił wolny koniec sznura, i zaczął nim poruszać w gorę i w dół z **częstotliwością 2,00 Hz**, generując fale mechaniczne. Maksymalne **wychylenie** końca sznura wynosiło **20,00 cm**. Pierwsza fala uderzyła w ścianę po upływie **6,00 s** od chwili jej powstania.(a) Ile wynosi prędkość fali? (b) Ile wynosi okres fali? (c) Jaka jest długość fali?

Rozwiązanie:

a) Prędkość :

$$v = \frac{30{,}00\ \mathrm{m}}{6{,}00\ \mathrm{s}} = 5{,}00\,\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}.$$

b) Okres fali:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{2{,}00\ \mathrm{s}^{-1}} = 0{,}50\ \mathrm{s}.$$

c) Długość fali:

$$\lambda = vT = 5{,}00\ \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \cdot 0{,}50\ \mathrm{s} = 2{,}50\ \mathrm{m}.$$

Częstotliwość fali równa jest częstotliwości siły wymuszającej wytwarzającej tę falę.

Prędkość fali na naprężonej strunie

1. Gęstość liniowa:

masa struny

$$\mu = \frac{m}{l} \quad \left(\frac{kg}{m}\right)$$

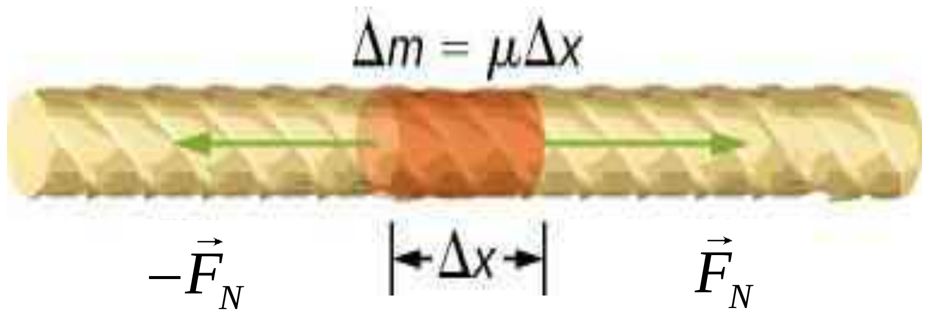
długość struny

W dalszej części wykładu będziemy rozpatrywać struny, które mają stałą gęstość liniową.

Jakie czynniki wpływają na prędkość fali na strunie?

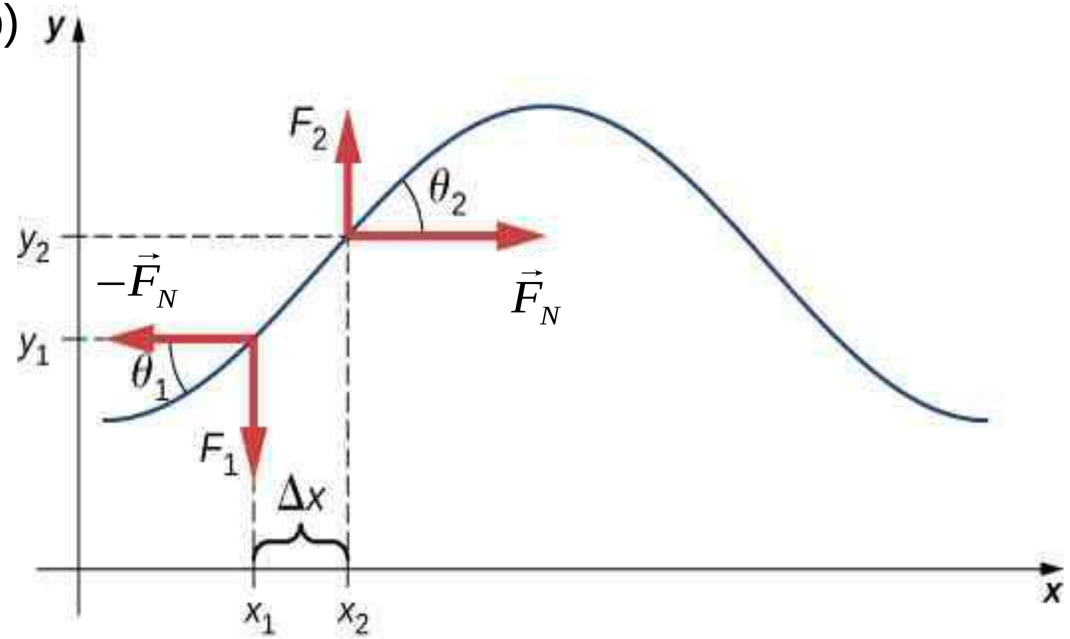
Rozważmy krótki odcinek struny o masie równej Δm = μΔx (rys.).

a)



W położeniu równowagi (rys. a) $\vec{F}_N$ - naprężenie (jest stałe) i działa na każdy z końców struny i nie zależy od położenia oraz czasu.

b)



Strunę szarpnięto i impuls (rys. b), rozchodzi się wzdłuż struny, w kierunku OX.

Siła wypadkowa:

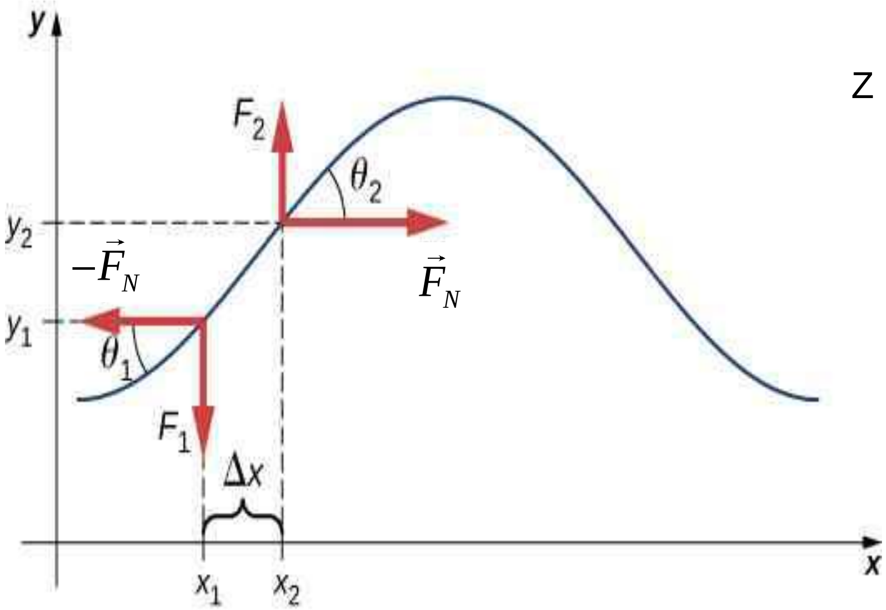
$$\vec{F}_w = \vec{F}_{wN} + \vec{F}_{ws}$$

Składowe naprężenia (OX) : $\sum \vec{F}_{wN} = 0$

Siły sprężystości (kier. OY) :

$$\vec{F}_{ws} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

Wyznaczenie siły naciągu:



Z rys.: $$tg\theta_1 = \frac{F_1}{F_N} \Rightarrow F_1 = F_N tg\theta_1$$

$$tg\theta_2 = \frac{F_2}{F_N} \Rightarrow F_2 = F_N tg\theta_2$$

Przypomnijmy, że $tg\theta = \dfrac{dy}{dx}$,

Zatem: $tg\theta_1 = \dfrac{\partial y}{\partial x_1}$ oraz $tg\theta_2 = \dfrac{\partial y}{\partial x_2}$

Siłę wypadkową możemy zapisać:

$$F_{ws} = F_2 - F_1 = F_N\left[tg\theta_2 - tg\theta_1\right] = F_N\left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_2}\right) - \left(\frac{\partial y}{\partial x_1}\right)\right]$$

Prędkość fali na naprężonej strunie

$$F_{ws} = F_N \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right) - \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right) \right]$$

Z II zasady dynamiki Newtona: $F_{ws} = \Delta m \cdot a$,

w naszym przypadku $m = \Delta m, \; a = \dfrac{\partial^2 y}{\partial t^2}$

Po uwzględnieniu gęstości liniowej: $\Delta m = \mu \cdot \Delta x$

Otrzymujemy: $$\mu \Delta x \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = F_N \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right) - \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right) \right]$$

Prędkość fali na naprężonej strunie

$$\mu\Delta x \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = F_N \left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right) - \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right) \right]$$

Dzielimy przez F_N i Δx oraz przyjmujemy, że $\Delta x \rightarrow 0$, otrzymujemy:

$$\frac{\mu}{F_N} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\left[\left(\frac{\partial y}{\partial x_2} \right) - \left(\frac{\partial y}{\partial x_1} \right) \right]}{\Delta x}$$

Wiedząc, że liniowe równanie falowe ma postać: $\boxed{\frac{\partial^2 y(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}}$

Otrzymujemy: $\frac{1}{v^2} = \frac{\mu}{F_N}$, ostatecznie $\boxed{v = \sqrt{\frac{F_N}{\mu}}}$

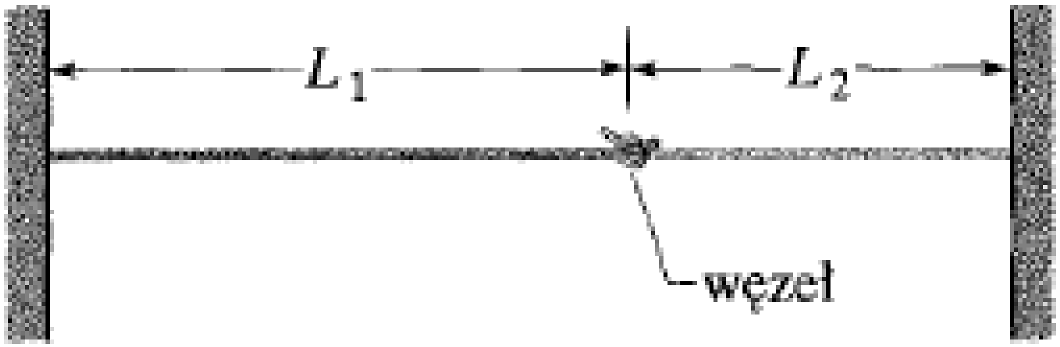
Prędkość fali na naprężonej strunie.

Zależy od naprężenia i gęstości struny.

Nie zależy od częstości fali.

Przykład 1 (samodzielnie)

Dwie liny połączone razem za pomocą węzła (rys.) i naciągnięte między dwoma sztywnymi wspornikami . Długości lin wynoszą odpowiednio L_1=3m oraz L_2 =2m (rys.), a ich liniowe gęstości $\mu_1 = 1,4 \cdot 10^{-4}\ {}^{kg}\!/\!_{m}$ oraz $\mu_2 = 2,8 \cdot 10^{-4}\ {}^{kg}\!/\!_{m}$. Naprężenie liny 1 wynosi 400N. W obu linach równocześnie wytworzono impulsy biegnące od sztywnych wsporników w kierunku węzła. Który impuls najpierw dotrze do węzła (t=?)



Odp.:

$$t_1 = 1,775 \cdot 10^{-3}\, s$$

$$t_2 = 1,673 \cdot 10^{-3}\, s.$$

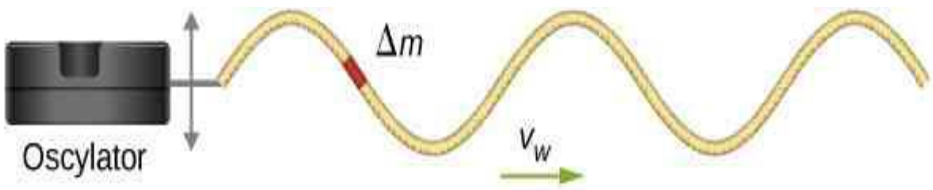
ENERGIA I MOC FALI

Zniszczenia spowodowane trzęsieniem Ziemi to namacalny dowód na to, że fale przenoszą energię *(Zdj. źr.: „Fizyka dla szkół wyższych" Samuel J. Ling, Jeff Sanny, William Moebs).*

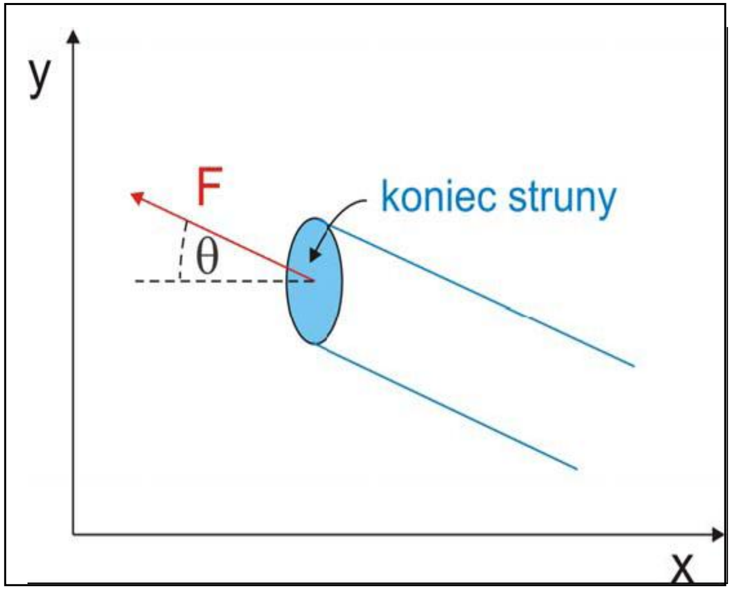
ENERGIA I MOC FALI (na strunie)

Wprawiając koniec struny w drgania poprzeczne (rys.) źródło wykonuje pracę, która objawia się w postaci energii kinetycznej i potencjalnej punktów struny (ośrodka).

Załóżmy, że w strunie naciągniętej wzdłuż osi x wytworzyliśmy falę opisaną wzorem:



$$y(x,t) = A\sin(kx - \omega t). \qquad (1)$$



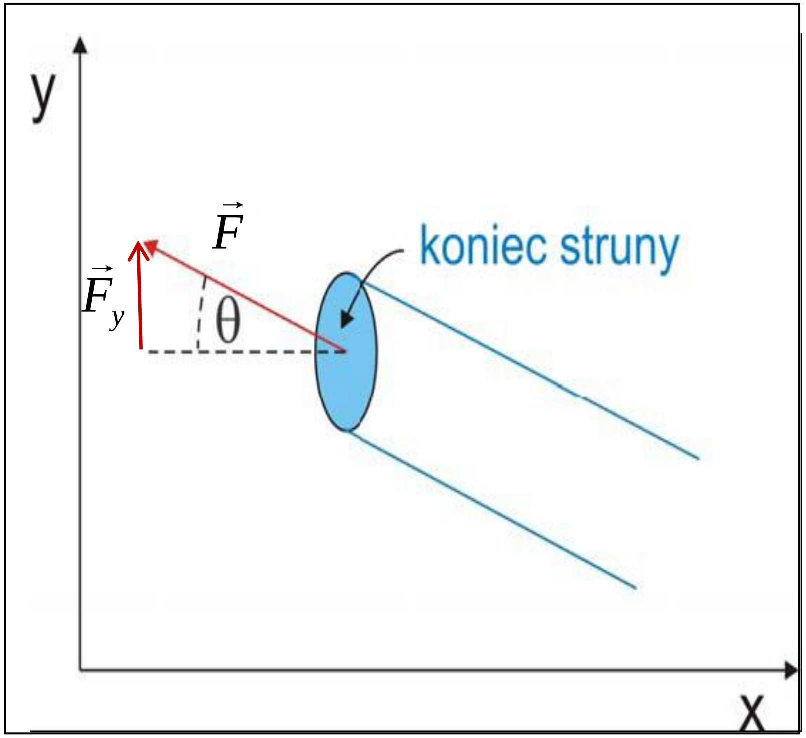
Rys. *E_k elementu struny zależy od jego prędkości poprzecznej. E_p- zal. od stopnia naprężenia struny w danej chwili.*

Szybkość przenoszenia energii

- Do wyznaczenia szybkości przenoszenia energii przez falę posłużymy się wyrażeniem na moc:

$$P = F_y v_y \qquad (2)$$

Gdzie v_y- jest prędkością poprzeczną struny.



▪Rys. Siła ***F*** jaka działa na koniec struny porusza struną w górę i w dół wprawiając jej koniec w drgania w kierunku *y*.

$$P = F_y v_y \qquad (2)$$

Prędkość poprzeczna jest równa:

$$v_y = \partial y / \partial t \qquad (3)$$

Z rys. składowa F_y siły wynosi:

$$F_y = F\sin\theta. \qquad (4)$$

Podstawiając wyrażenia (3) i (4) do wzoru (2),

możemy zapisać:

$$P = F\frac{\partial y}{\partial t}\sin\theta \qquad (5)$$

MOC FALI

Dla małych kątów θ możemy przyjąć $\sin\theta = -\partial y / \partial x$ (znak minus wynika z nachylenia struny), stąd:

$$P = -F\frac{\partial y}{\partial t}\frac{\partial y}{\partial x} \tag{6}$$

Różniczkując wzór (1): $y(x,t) = A\sin(kx - \omega t)$

(7)

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -A\omega\cos(kx - \omega t) \quad \text{oraz} \quad v_y = \frac{\partial y}{\partial x} = Ak\cos(kx - \omega t) \tag{8}$$

Skąd po podstawieniu do wyrażenia (6) otrzymujemy:

$$P = FA^2 k\omega\cos^2(kx - \omega t) \tag{9}$$

MOC FALI

$$P = FA^2 k\omega \cos^2(kx - \omega t) \tag{9}$$

Zastępując: $F = v^2\mu \left(z\ v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \right)$ $, k = \frac{\omega}{v}$ *oraz pamiętając* $\omega = 2\pi f$

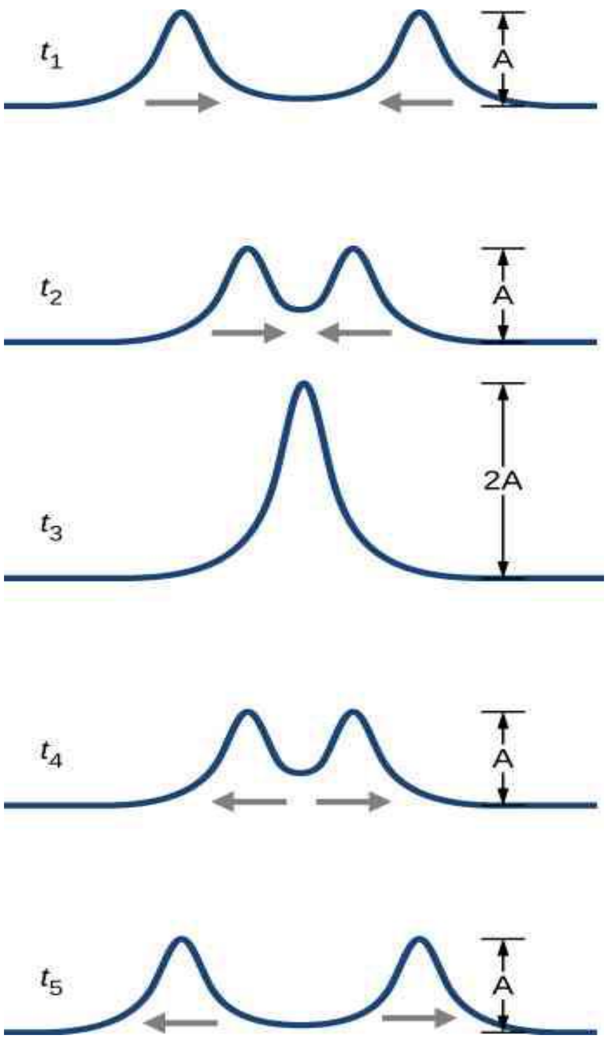
Możemy napisać wzór na moc fali mechanicznej:

$$\boxed{P = 4\pi^2 A^2 f^2 \mu v \cos^2(kx - \omega t)}$$

Podsumowanie

- Moc czyli szybkość przepływu energii fali oscyluje w czasie.
- Ponadto, szybkość przepływu energii jest proporcjonalna do kwadratu amplitudy oraz kwadratu częstotliwości fali: $P \sim A^2 f^2$
- Przypadek szczególny, to moc średnia: $P_{sr} = \frac{1}{2}\mu A^2\omega^2 v$
- Zależność ta jest prawdziwa dla wszystkich typów fal.

SUPERPOZYCJA I INTERFERENCJA FAL



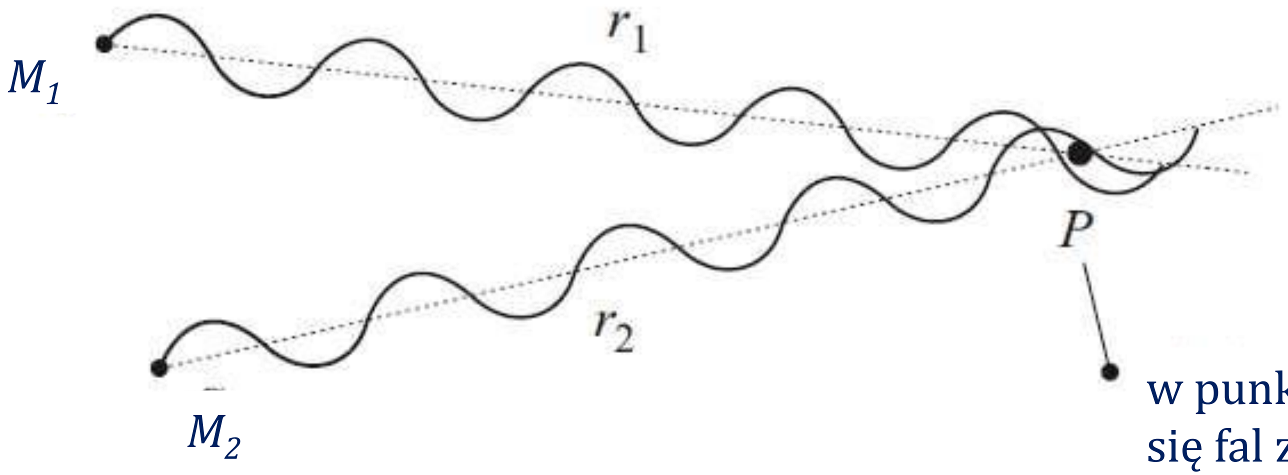
Rys. Pojęcie interferencji odnosi się do sytuacji, kiedy fale nałożą się na siebie.

Zasada superpozycji:

Jeżeli co najmniej dwie fale biegnące nałożą się na siebie w tym samym punkcie, to wypadkowe położenie cząstki ośrodka w tym punkcie jest algebraiczną sumą położeń tego punktu dla każdej fali z osobna.

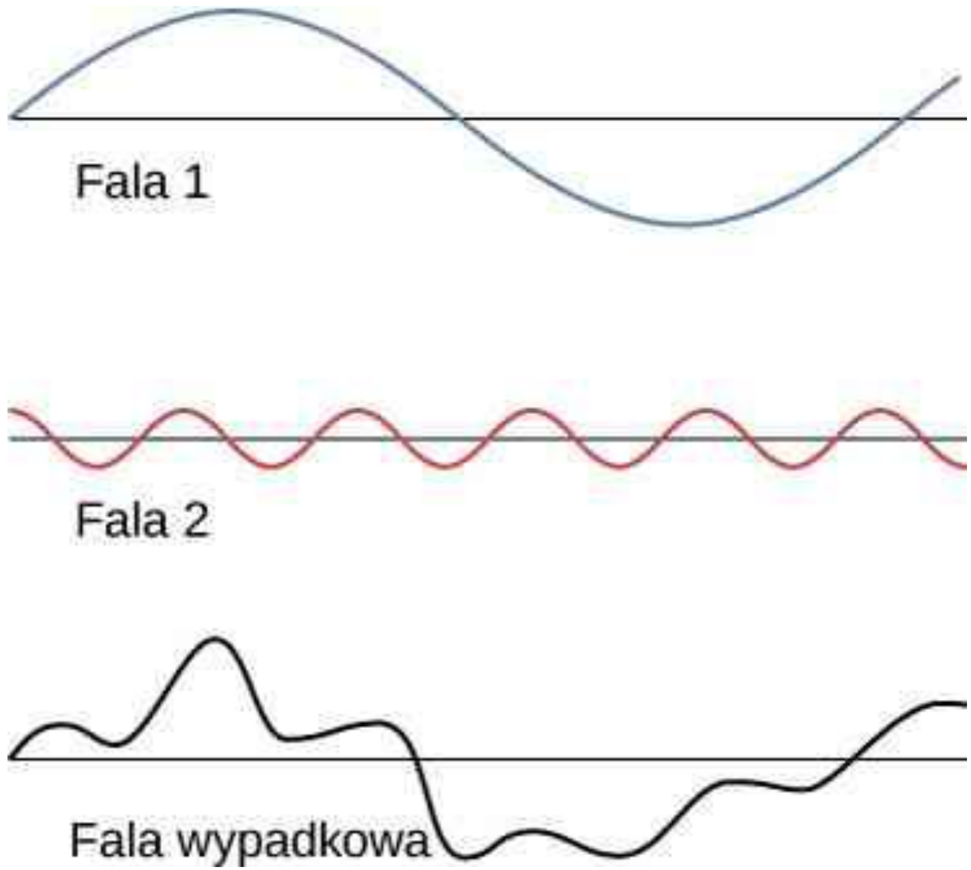
Fale elektromagnetyczne także podlegają tej zasadzie , ale w ich przypadku nie dodaje się położeń punktu ośrodka, lecz natężenia pola elektrycznego i magnetycznego.

Fale, które nie podlegają zasadzie superpozycji, to fale nieliniowe.



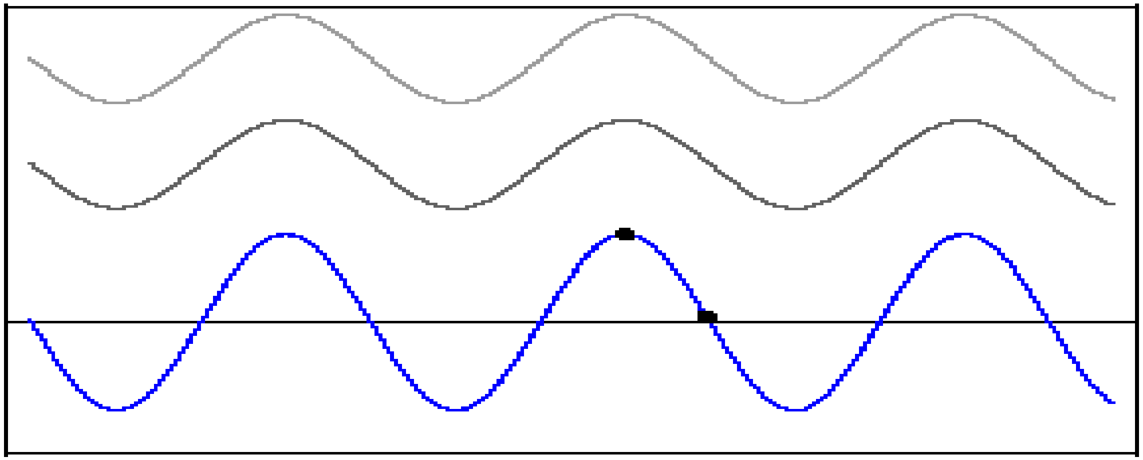
w punkcie P mamy nakładanie się fal ze źródeł M_1 i M_2 odległych o r_1 i r_2.

Rys. Gdy fale liniowe ulegają interferencji, fala wypadkowa jest algebraiczną sumą fal składowych.



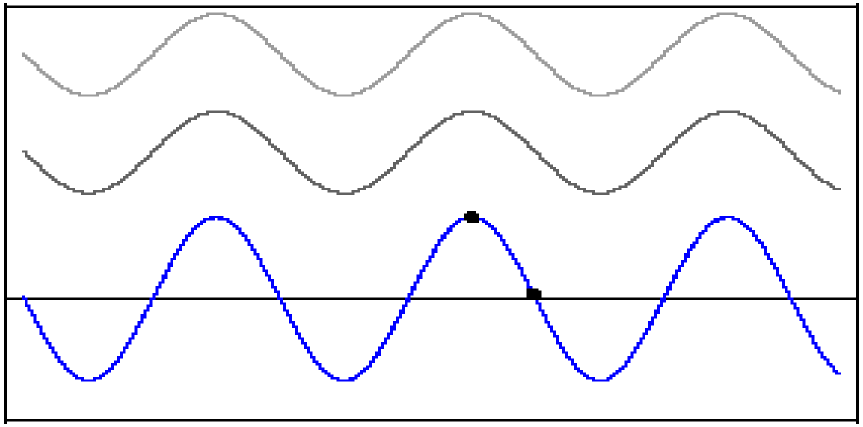
Rys. Superpozycja fal nieidentycznych prowadzi zarówno do wzmacniania, jak i do osłabiania interferencyjnego.

INTERFERENCJA FAL



Rys. Animation Dr. Dan Russell, Kettering University;
http://sdsu-physics.org/

INTERFERENCJĄ FAL nazywamy zjawisko fizyczne polegające na nakładaniu się dwóch lub więcej fal, prowadzące do zwiększenia lub zmniejszenia amplitudy fali wypadkowej.

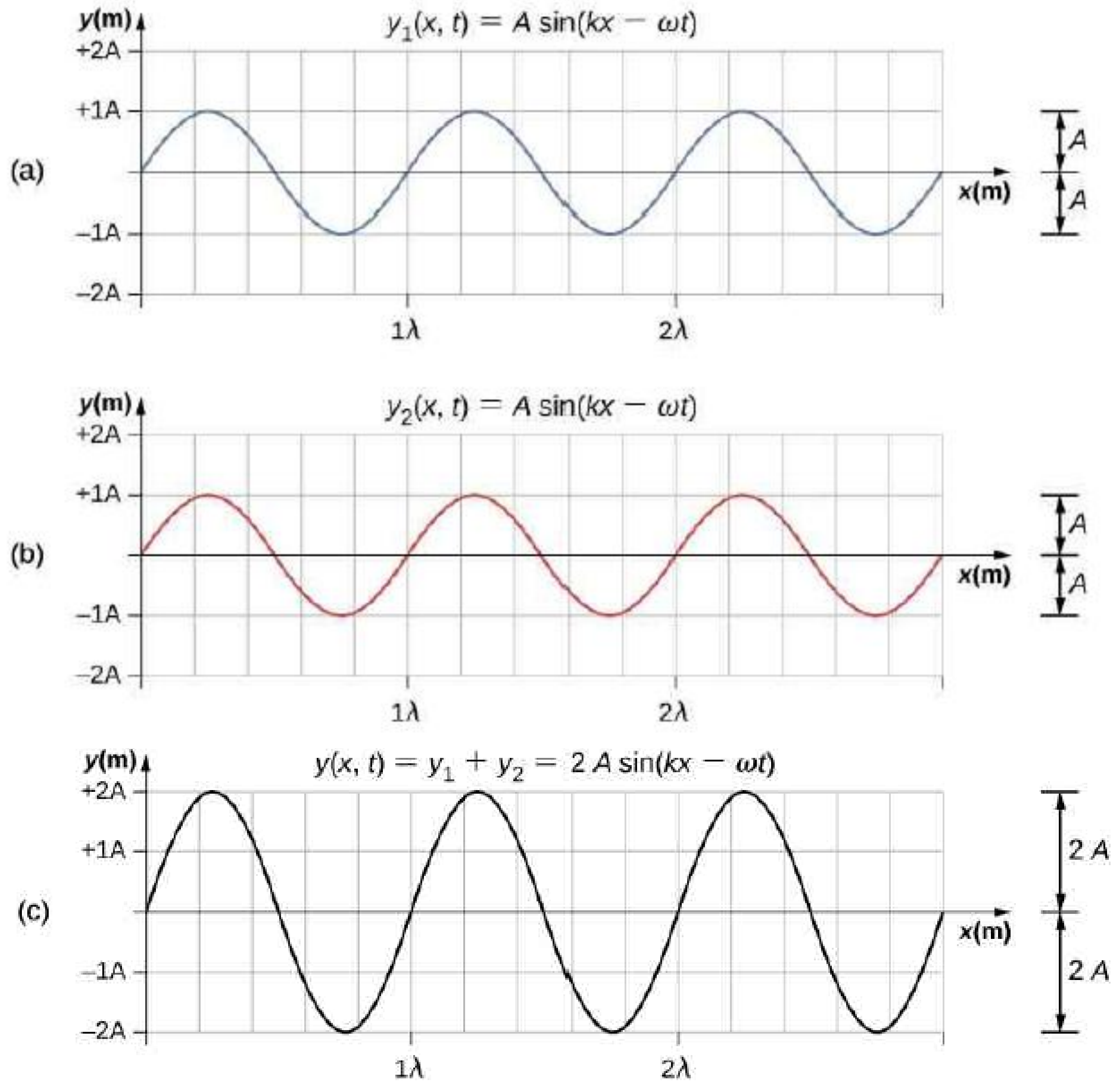


Rys. Animation Dr. Dan Russell, Kettering University;
http://sdsu-physics.org/

- **Warunkiem interferencji fal** jest ich spójność (koherencja), czyli korelacja faz, amplitudy i częstotliwości.

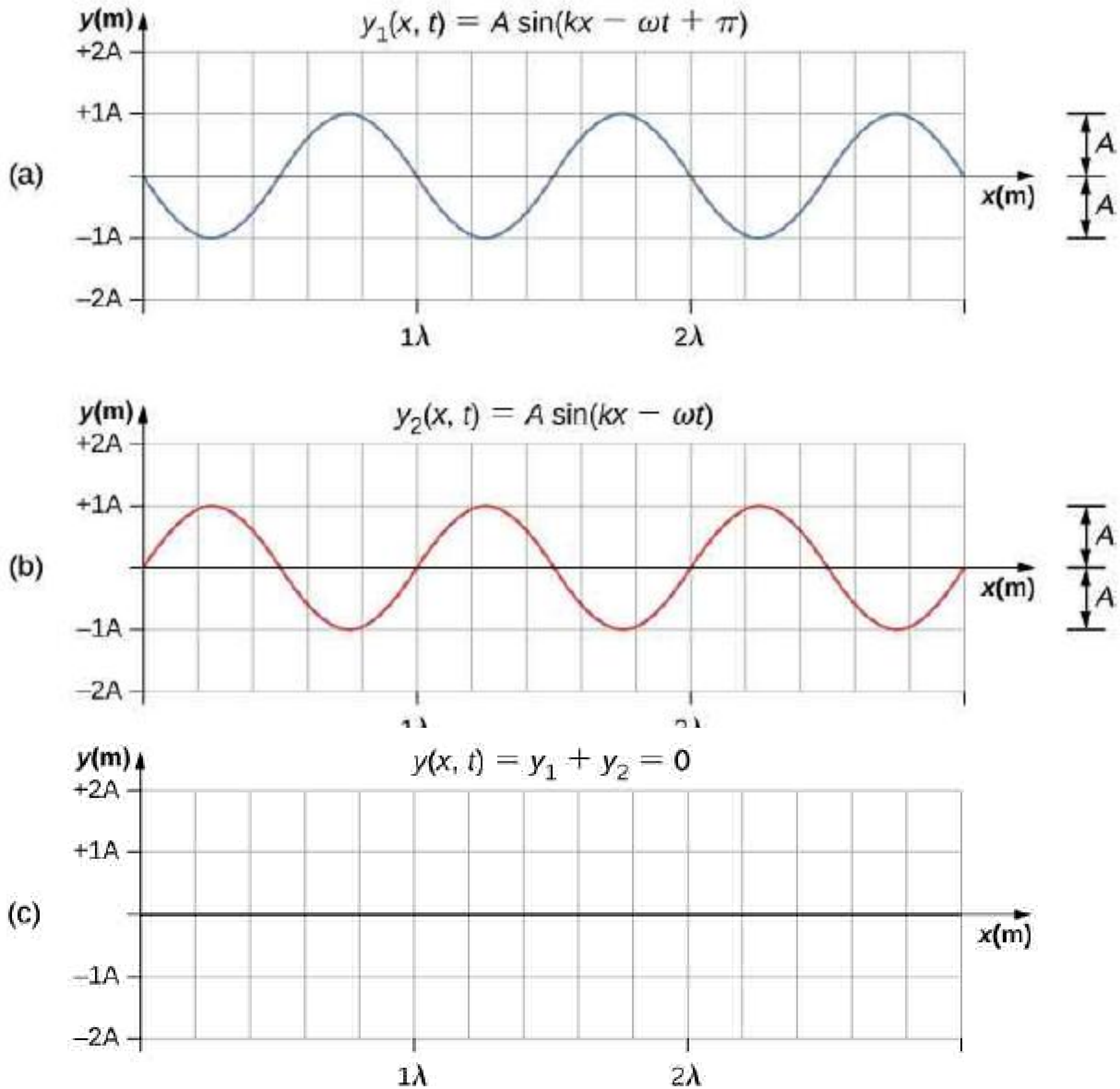
Fale nazywamy **spójnymi**, jeżeli **mają taką samą długość (i częstotliwość) oraz stałą w czasie różnicę faz.**

❖ INTERFERENCJA KONSTRUKTYWNA



Rys. Wzmocnienie interferencyjne dwóch fal prowadzi do powstania fali o dwukrotnie większej amplitudzie, lecz o tej samej długości. Rys. źródło: *„Fizyka dla szkół wyższych" Samuel J. Ling, Jeff Sanny, William Moebs*

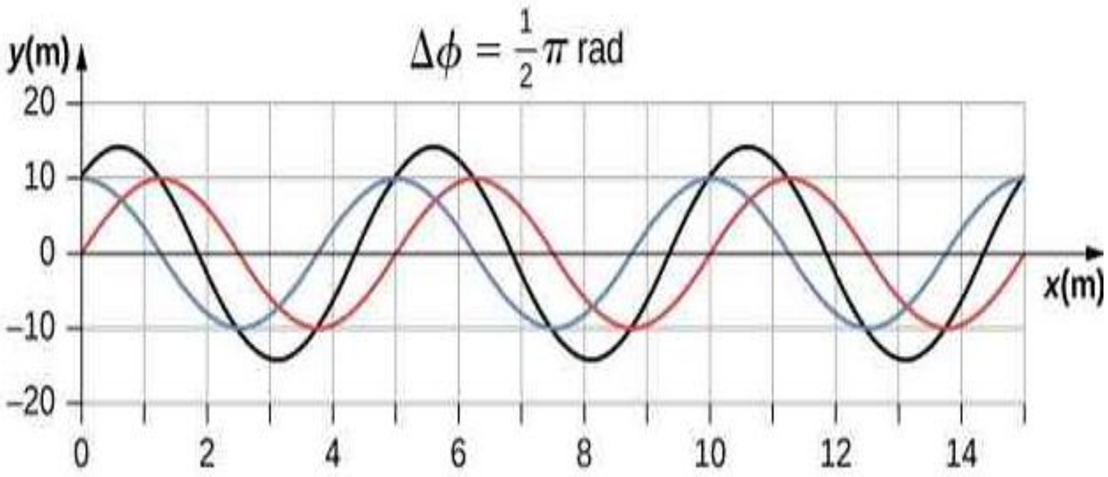
❖ INTERFERENCJA DESTRUKTYWNA



Rys. Wygaszanie dwóch fal, których fazy różnią się o 180^0 , prowadzi do powstania fali o zerowej amplitudzie.

FALA WYPADKOWA- opis matematyczny

Rozważmy w przestrzeni przemieszczające się **dwie fale o równych częstotliwościach i amplitudach, ale o fazach różniących się o φ.** Jeżeli te fale rozchodzą się w kierunku *x*, z jednakowymi prędkościami, to możemy je opisać równaniami:



Interferencja konstruktywna

$$\begin{cases} y_1 = A\sin(kx - \omega t + \varphi) \\ y_2 = A\sin(kx - \omega t) \end{cases}$$

W wyniku nałożenia się fal (zasada superpozycji) powstaje **fala wypadkowa**:

$$y = y_1 + y_2$$

$$y = A\sin(kx - \omega t + \varphi) + A\sin(kx - \omega t) \qquad (*)$$

Interferencja konstruktywna –opis matematyczny

$$y = A\sin\left(kx - \omega t + \varphi\right) + A\sin\left(kx - \omega t\right)$$

Uwzględniając tożsamość trygonometryczną: $\boxed{\sin\alpha + \sin\beta = 2\sin\frac{\alpha+\beta}{2}\cos\frac{\alpha-\beta}{2}}$

gdzie: $\alpha = \left(kx - \omega t + \varphi\right), a\ \ \beta = \left(kx - \omega t\right)$

$$y = 2A\sin\left(\frac{\left(kx - \omega t + \varphi\right) + \left(kx - \omega t\right)}{2}\right)\cos\left(\frac{\left(kx - \omega t + \varphi\right) - \left(kx - \omega t\right)}{2}\right) =$$

$$= 2A\sin\left(kx - \omega t + \frac{\varphi}{2}\right)\cos\left(\frac{\varphi}{2}\right)$$

Powyższe równanie można też zapisać jako:

$$\boxed{y = 2A\cos(\varphi/2)\sin(kx - \omega t + \varphi/2)}$$

FALA WYPADKOWA

Równanie powstałej fali :
$$y = A'\sin(kx - \omega t + \frac{\varphi}{2})$$

czynnik $A' = 2A\cos(\varphi/2)$ jest **amplitudą fali wypadkowej**.

Amplituda ta zależy tylko od przesunięcia fazowego ***φ*.**

WNIOSKI:

➢Wynik nakładania się fal (interferencji) zależy wyłącznie od przesunięcia fazowego φ (różnicy faz).

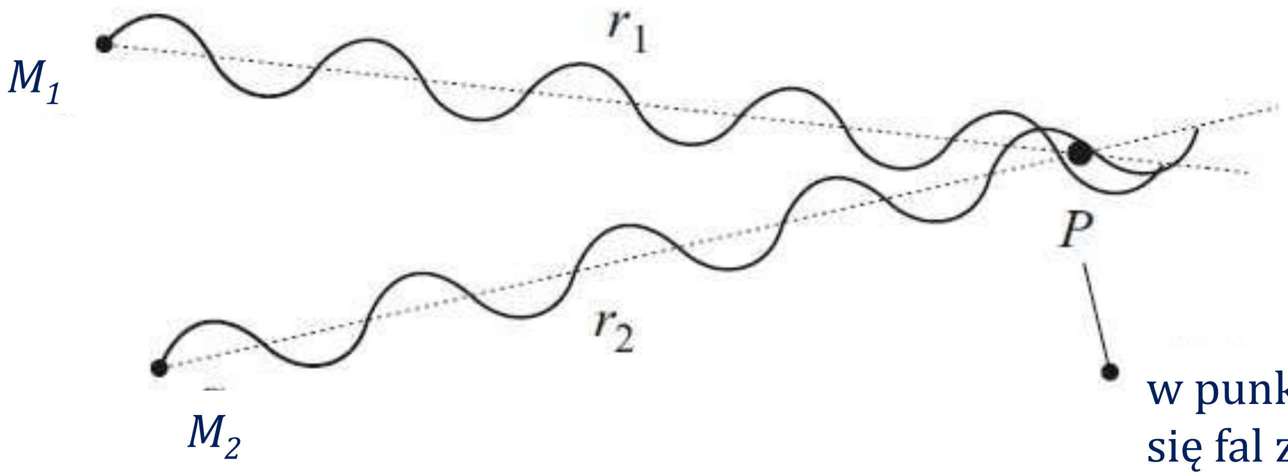
➢ Jeżeli nie ma przesunięcia fazowego $\varphi = 0$, to A'=2A . Następuje maksymalne wzmocnienie (amplituda *A*' osiąga maksimum)- ***interferencja konstruktywna.***

➢ Jeżeli przesunięcie fazowe wynosi $\varphi = 180°$ (fale są przeciwne w fazie), to amplituda

A' = 0 i następuje wygaszenie fali – ***interferencja destruktywna.***

➢ Dla pozostałych wartości φ otrzymujemy pośrednie wyniki nakładania się fal.

ODLEGŁOŚĆ OD ŹRÓDEŁ FAL SKŁADOWYCH

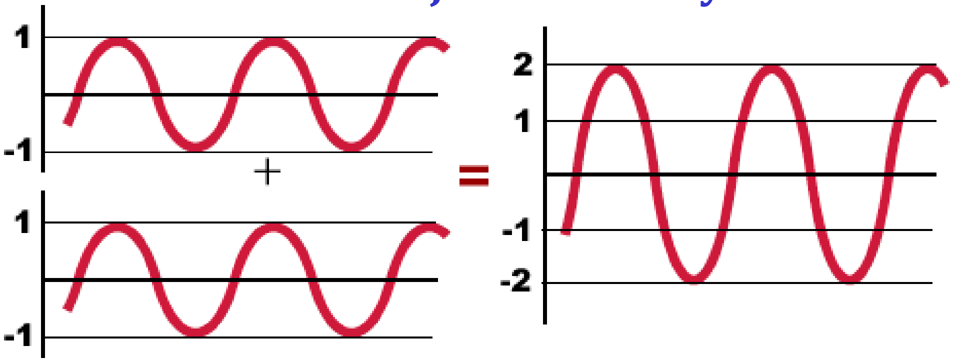


w punkcie P mamy nakładanie się fal ze źródeł M_1 i M_2 odległych o r_1 i r_2.

Rys. Gdy fale liniowe ulegają interferencji, fala wypadkowa jest algebraiczną sumą fal składowych.

Interferencja fali wypadkowej a odległość od źródeł fal składowych

Interferencja konstruktywna

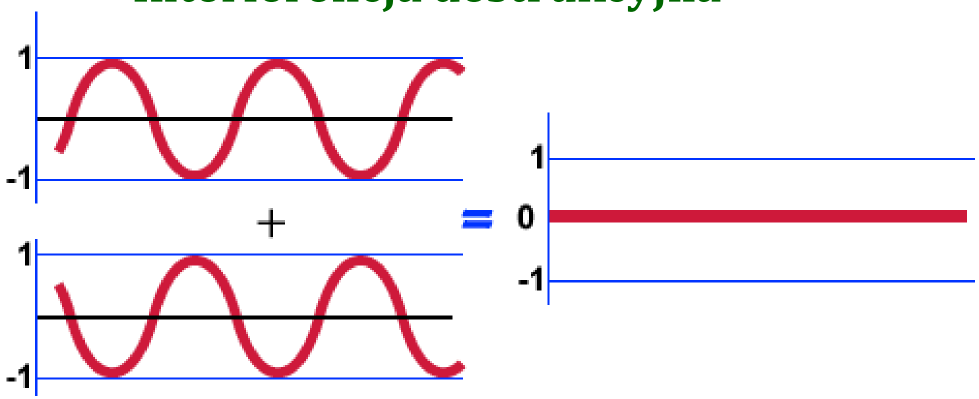


różnica odległości od źródeł

$$\left|r_2 - r_1\right| = n\lambda = 2n\frac{\lambda}{2}$$

całkowita wielokrotność długości fali, $n = 1, 2, \ldots$ (parzysta wielokrotność połowy długości fali)

Interferencja destrukcyjna



$$\left|r_2 - r_1\right| = (2n+1)\frac{\lambda}{2}$$

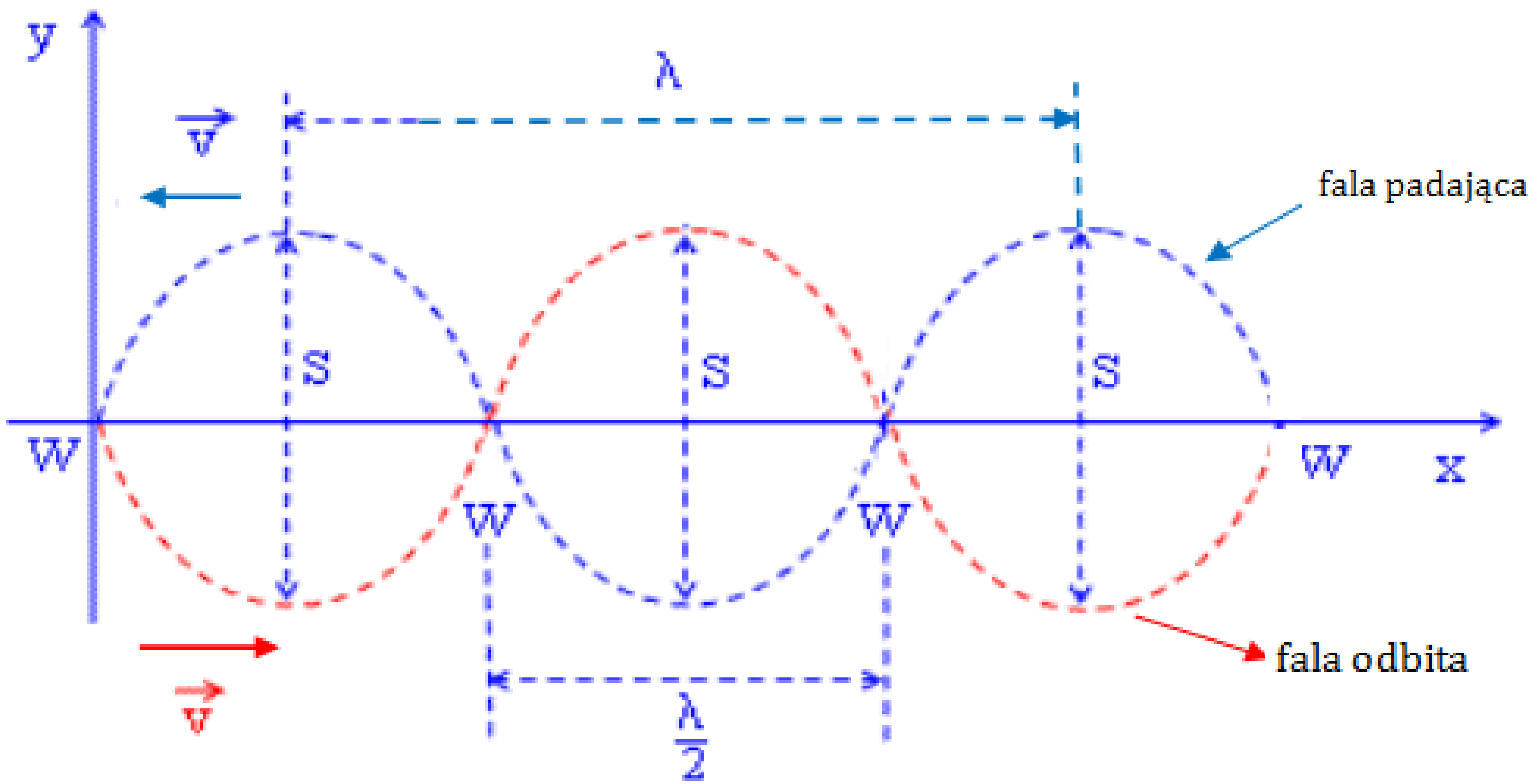
nieparzysta wielokrotność połowy długości fali

Rys. źr. Animation Dr. Dan Russell, Kettering University;
http://sdsu-physics.org/

Fale stojące zostały utworzone na powierzchni wody w misce, umieszczonej na obudowie wiatraka (pralki).

FALE STOJĄCE

Gdy **interferują ze sobą dwie fale spójne** przemieszczające się w jednym kierunku, ale w przeciwne strony, **fala wypadkowa jest falą stojącą.**



w-** tzw. **węzły fali stojącej; s-** tzw. **strzałki fali stojącej

RÓWNANIE FALI STOJĄCEJ- opis matematyczny

Rozważmy dwie identyczne fale, rozchodzących się wzdłuż osi OX w przeciwnych kierunkach

$$\begin{cases} y_1(x,t) = A\sin(kx - \omega t) \\ y_2(x,t) = A\sin(kx + \omega t) \end{cases}$$

Fale interferują ze sobą, tworząc falę wypadkową :

$$y(x,t) = y_1 + y_2 = A\sin\left(kx - \omega t\right) + A\sin\left(kx + \omega t\right)$$

Uwzględniając tożsamość: $\boxed{\sin\left(\alpha \pm \beta\right) = \sin\alpha\cos\beta \pm \cos\alpha\sin\beta}$

gdzie: $\alpha = kx,$

$\beta = \omega t$

wówczas :

$$y(x,t) = A\left[\sin\left(kx\right)\cos\left(\omega t\right) - \cos\left(kx\right)\sin\left(\omega t\right) + \sin\left(kx\right)\cos\left(\omega t\right) + \cos\left(kx\right)\sin\left(\omega t\right)\right]$$

RÓWNANIE FALI STOJĄCEJ

I po przekształceniach, otrzymujemy wyrażenie **:**

$$\boxed{y(x,t) = 2A\sin(kx)\cos(\omega t)}$$

gdzie: $k = \dfrac{2\pi}{\lambda}$

Wobec tego, równanie fali stojącej:

$$y(x,t) = \underbrace{2A\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)}_{\text{amplituda}}\underbrace{\cos(\omega t)}_{\text{czynnik oscylacyjny}}$$

RÓWNANIE FALI STOJĄCEJ

$$y(x,t)=2A\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)\cos(\omega t)$$

- Amplituda wypadkowej fali stojącej nie zależy od czasu, ale od położenia.

Cechy charakterystyczne:

- **strzałki 2A :** $$\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}x\right)=\pm 1;$$

$$\frac{2\pi}{\lambda}x=\frac{\pi}{2},\ \frac{3}{2}\pi,\frac{5}{2}\pi\ldots$$

$$x=\frac{\lambda}{4},\ \frac{3}{4}\lambda,\ldots.=\frac{(2n+1)\lambda}{4},\ \ gdzie\ \ n\in N+\{0\}$$

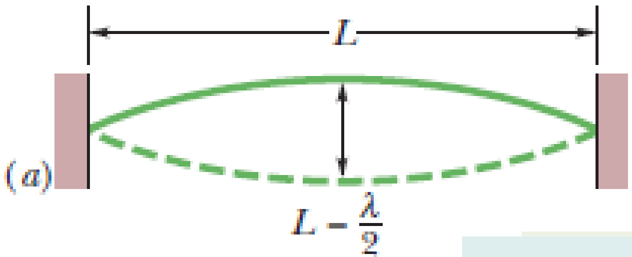
- **węzły :** $$\frac{2\pi}{\lambda}x=0,\ \pi,2\pi,\ldots$$

$$x=0,\ \frac{1}{2}\lambda,\ \lambda,\ldots.=\frac{n\lambda}{2},\ \ gdzie\ \ n\in N+\{0\}$$

- położenia węzłów i strzałek fali stojącej nie ulegają zmianie

Przykład 1 . FALE STOJĄCE NA STRUNIE

Struna o długości L, napięta jest między dwoma zaciskami i wprawiona w drgania w postaci fali stojącej (rys.). Znajdź ogólny **wzór na częstotliwości rezonansowe struny** (tablica) **.**

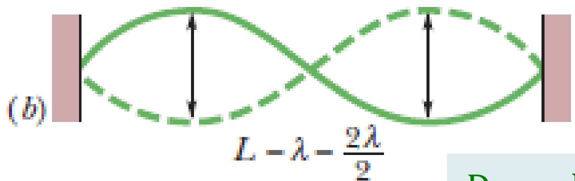


Pierwsza harmoniczna
n= 1

Dla n=1, otrzymujemy::

$$\frac{1}{2}\lambda_1 = L \;, uwzględniając \;\; \lambda = \frac{v}{f}$$

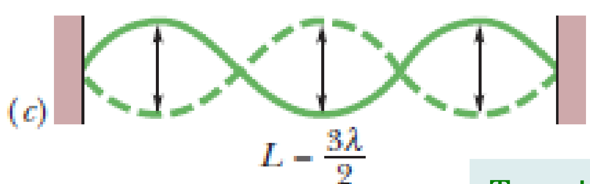
$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L}$$



Druga harmoniczna
n=2

n=2

$$\frac{2}{2}\lambda_2 = L \;, zatem: \; f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{2v}{2L}$$



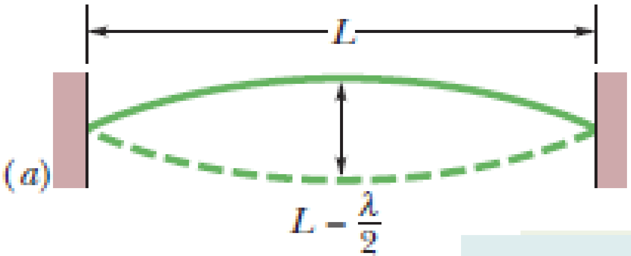
Trzecia harmoniczna
n=3

n=3 $$\frac{3}{2}\lambda_3 = L_3 \Rightarrow \lambda_3 = \frac{2}{3}L,$$

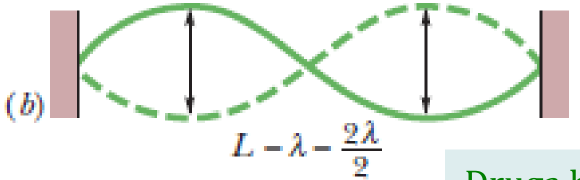
$$zatem: \; f_3 = \frac{v}{\lambda_3} = \frac{3v}{2L}$$

$$\boxed{\lambda_n = \frac{2}{n}L}$$

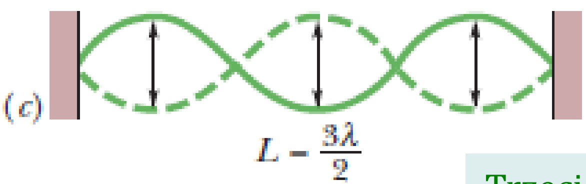
Przykład 1 . FALE STOJĄCE W STRUNIE



Pierwsza harmoniczna
n= 1



Druga harmoniczna
n=2



Trzecia harmoniczna
n=3

Ogólnie, wyrażenie na długość fali:

$$\boxed{\lambda_n = \frac{2}{n} L}$$

gdzie n=1,2.3,...

Wyrażenie na **częstotliwość:**

$$\boxed{f_n = n\frac{v}{2L} = nf_1} \qquad (*)$$

gdzie n=1,2.3,..., a $f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L}$,

❖Rys. Drganie własne struny o najniższej częstości rezonansowej nazywamy ***modem podstawowym lub pierwszą harmoniczną*** .

❖Z wyrażenia (*) wynika, że częstości rezonansowe są całkowitymi wielokrotnościami najniższej częstości rezonansowej , nazywany też modem podstawowym lub pierwszą harmoniczną) :

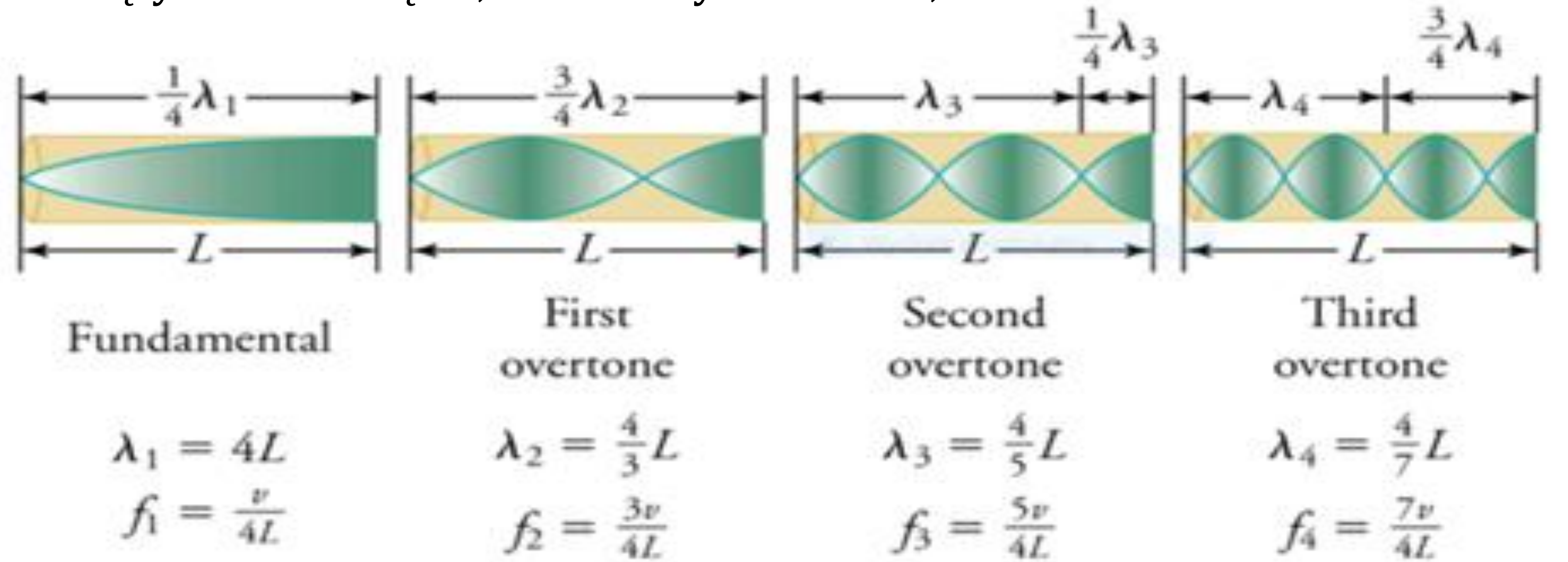
$$f_1 = \frac{v}{\lambda_1} = \frac{v}{2L},$$

❖Częstotliwości wyższe od f_1 nazywa się **nadtonami lub alikwotami**

❖Zbiór wszystkich możliwych drgań własnych nazywamy **szeregiem harmonicznym,** a liczbę **n –liczbą harmoniczną** dla n -tej harmonicznej.

Przykład 2. Częstotliwości rezonansowe rury otwartej z jednej strony

Na zamkniętym końcu węzeł, na otwartym strzałka,



Częstości drgań tonów

Częstości drgań tonów gamy razkreślnej

Nazwa tonu	Względna częstość drgań: stroju czystego	Względna częstość drgań: stroju temperowanego	Bezwzględna częstość drgań Hz
c^1	1,000 00	1,000 00	261,63
cis^1	1,041 66	1,059 46	277,18
des^1	1,080 00		
d^1	1,125 00	1,122 46	293,67
dis^1	1,171 87	1,189 21	311,13
es^1	1,200 00		
e^1	1,250 00	1,259 92	329,63
f^1	1,333 33	1,334 84	349,23
fis^1	1,388 89	1,414 21	369,99
ges^1	1,440 00		
g^1	1,500 00	1,498 31	392,00
gis^1	1,562 50	1,587 40	415,30
as^1	1,600 00		
a^1	1,666 67	1,681 79	440,00
ais^1	1,736 11	1,781 80	466,16
b^1	1,800 00		
h^1	1,875 00	1,887 75	493,88
c^2	2,000 00	2,000 00	523,25

Przykład 3 (samodzielnie)

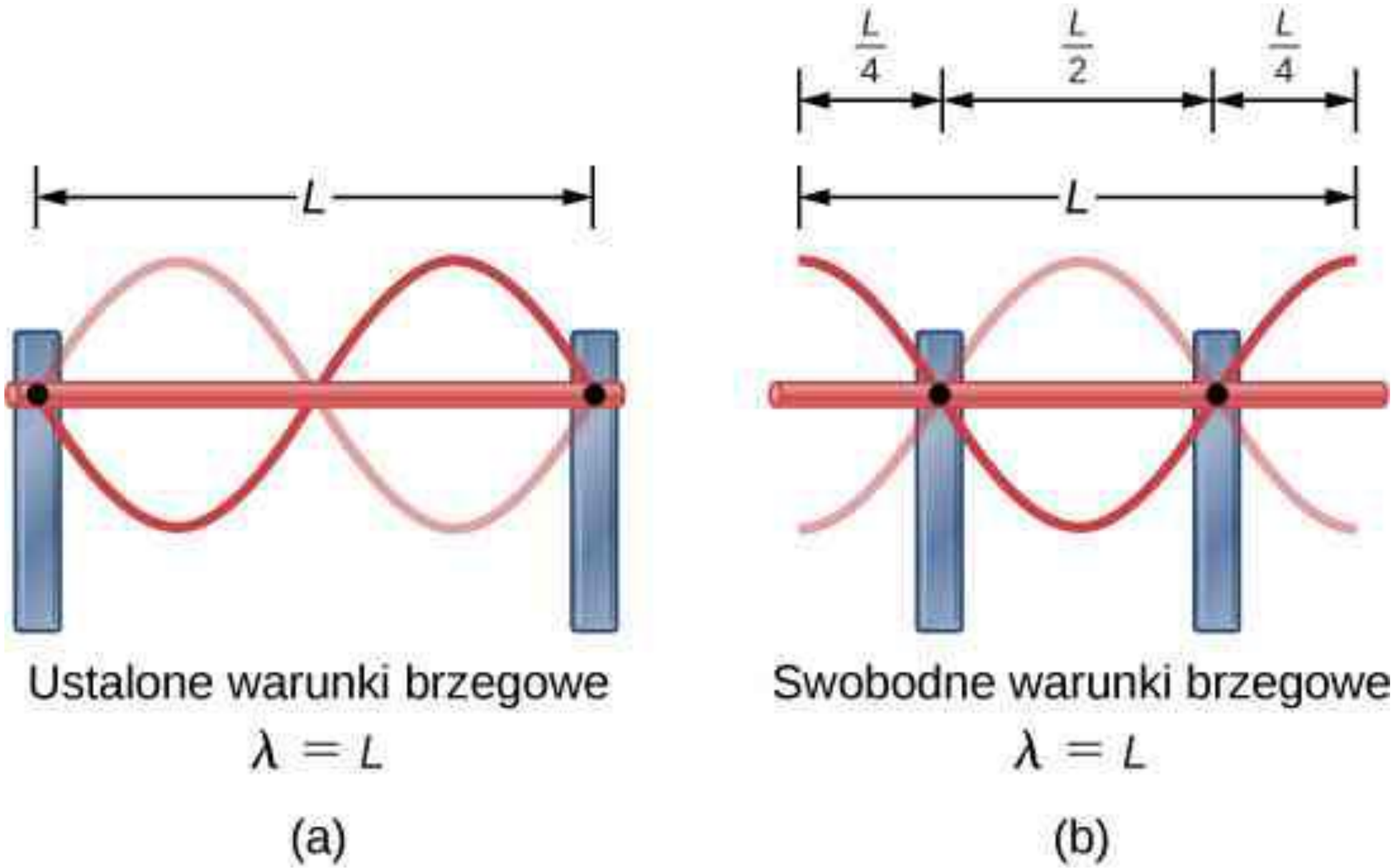
Piszczałka organowa zamknięta, w której źródłem dźwięku jest drgające powietrze. Jeżeli na krawędź otwartego końca piszczałki skierujemy strumień powietrza to można w niej wytworzyć falę stojącą. Na otwartym końcu piszczałki powstaje strzałka, a na jej końcu zamkniętym węzeł. Spróbuj wykreślić, drganie podstawowe i trzy pierwsze drgania harmoniczne jakie powstają w piszczałce zamkniętej. Przyjmując, że długość piszczałki wynosi L, oblicz długości tych fal. Jaki ogólny związek opisuje długości fal stojących w piszczałce ?

Odp. Ogólny związek na długość fali powstającej w piszczałce organowej:

$$\lambda_n = \frac{4L}{2n-1}$$

, gdzie n = 1, 2, 3, ...

Dygresja - Ustalone i swobodne warunki brzegowe



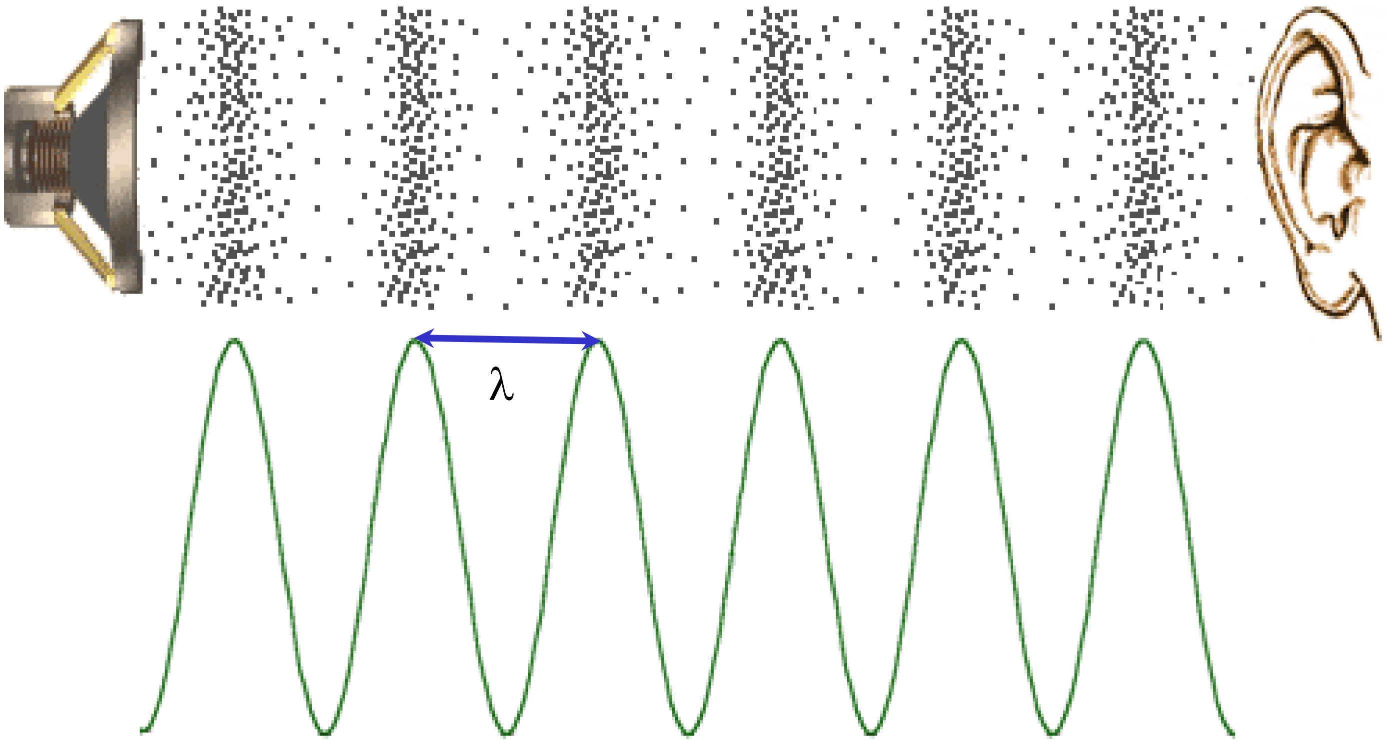
Rys. (a) Pręt metalowy o długości L zamocowany na obu końcach. Gdy pręt zostanie wprawiony w rezonans, na obu jego końcach utworzone zostaną węzły; (b) Pręt podparty w punktach oddalonych od każdego końca o 1/4 jego długości. Na obu końcach pręta występują swobodne warunki brzegowe. Gdy zajdzie rezonans, to na obu jego końcach powstają strzałki. Rys. źródło: *„Fizyka dla szkół wyższych" Samuel J. Ling, Jeff Sanny, William Moebs*

Dźwięki

W jaki sposób nietoperz może zlokalizować ćmę oraz określić jej prędkość , aby skierować się na owada?

Zdjęcie- źródło: Halliday,Resnick,Walker „Fundamentals of Physics”.

Fala dźwiękowa



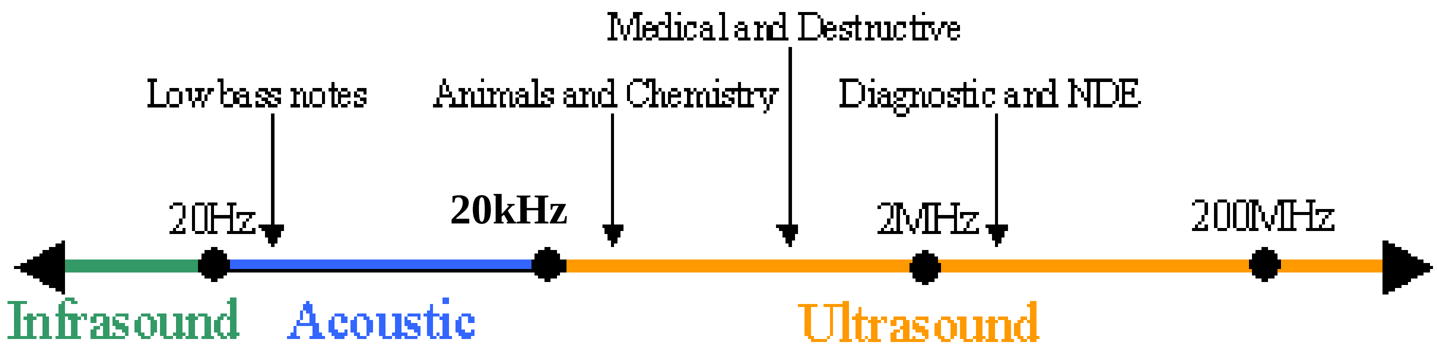
Rys. Głośnik wytwarza falę dźwiękową poprzez drgania membrany, powodując drgania cząsteczek powietrza.

Zagęszczenia- obszary wysokiego ciśnienia, i rozrzedzenia- obszary niskiego ciśnienia, w powietrzu rozchodzą się jako podłużne fale ciśnienia mające taką samą częstotliwość jak źródło (drgająca membrana). Zmiany te są falą dźwiękową.

Dźwięk , to propagujące zaburzenia ośrodka, które mogą być okresowe i mogą być modelowane jako zmiany ciśnienia powietrza lub drgania cząsteczek.

Fale dźwiękowe w powietrzu i w większości płynów są falami podłużnymi. W ciałach stałych fale dźwiękowe mogą być poprzeczne i podłużne

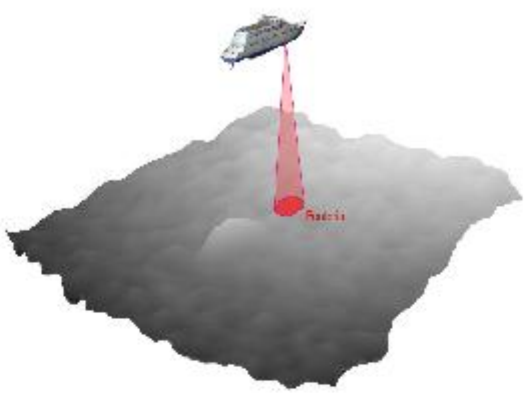
Zakresy częstotliwości fal dźwiękowych



(Infradźwięki, słyszalne przez niektóre zwierzęta: słonie, żyrafy, wieloryby; które porozumiewają się za ich pośrednictwem)

zakres słyszalny dla człowieka.

(Ultradźwięki- niektóre zwierzęta mogą emitować i **słyszeć ultradźwięki**, np. pies, szczur, delfin, wieloryb, chomik czy nietoperz.)

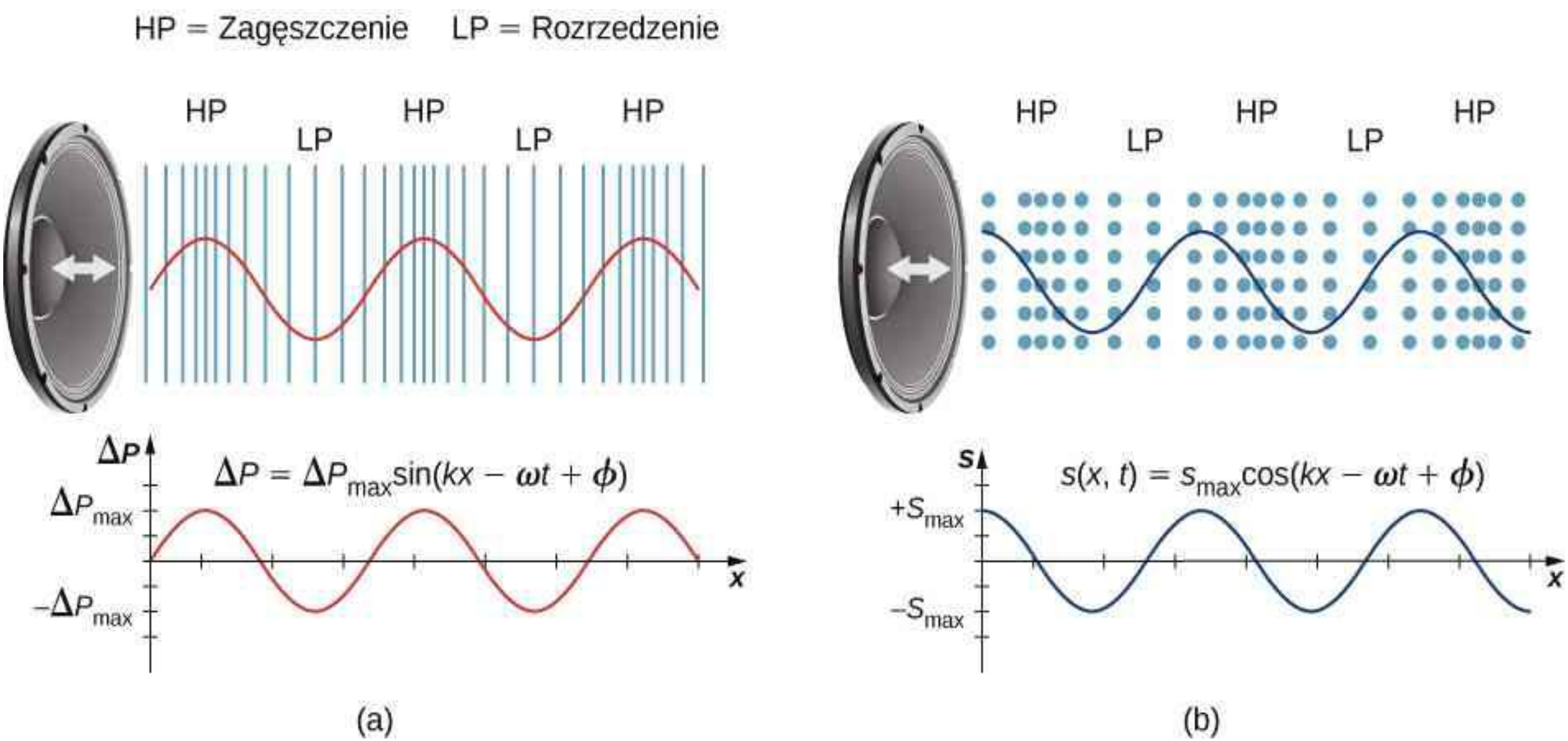


Rys.1 Wiązka akustyczna i jej ślad na dnie

Rys. https://escort-technology.com/przeglad-technik-sonarowych;
(np. sonary od 192 kHz d0 1.0 MHz)

Fale dźwiękowe modele matematyczne

Zał. Fala biegnąca w kierunku dodatnim osi x



a) Dźwięk - zmiany ciśnienia powietrza wokół wartości średniej

b) Dźwięk modelowany za pomocą drgających cząsteczek powietrza

Prędkość dźwięku

Rys. Różnicę między prędkościami światła i dźwięku można zauważyć np. podczas wyładowań atmosferycznych. Zdjęcie, źródło: http://naukawpolsce.pap.pl

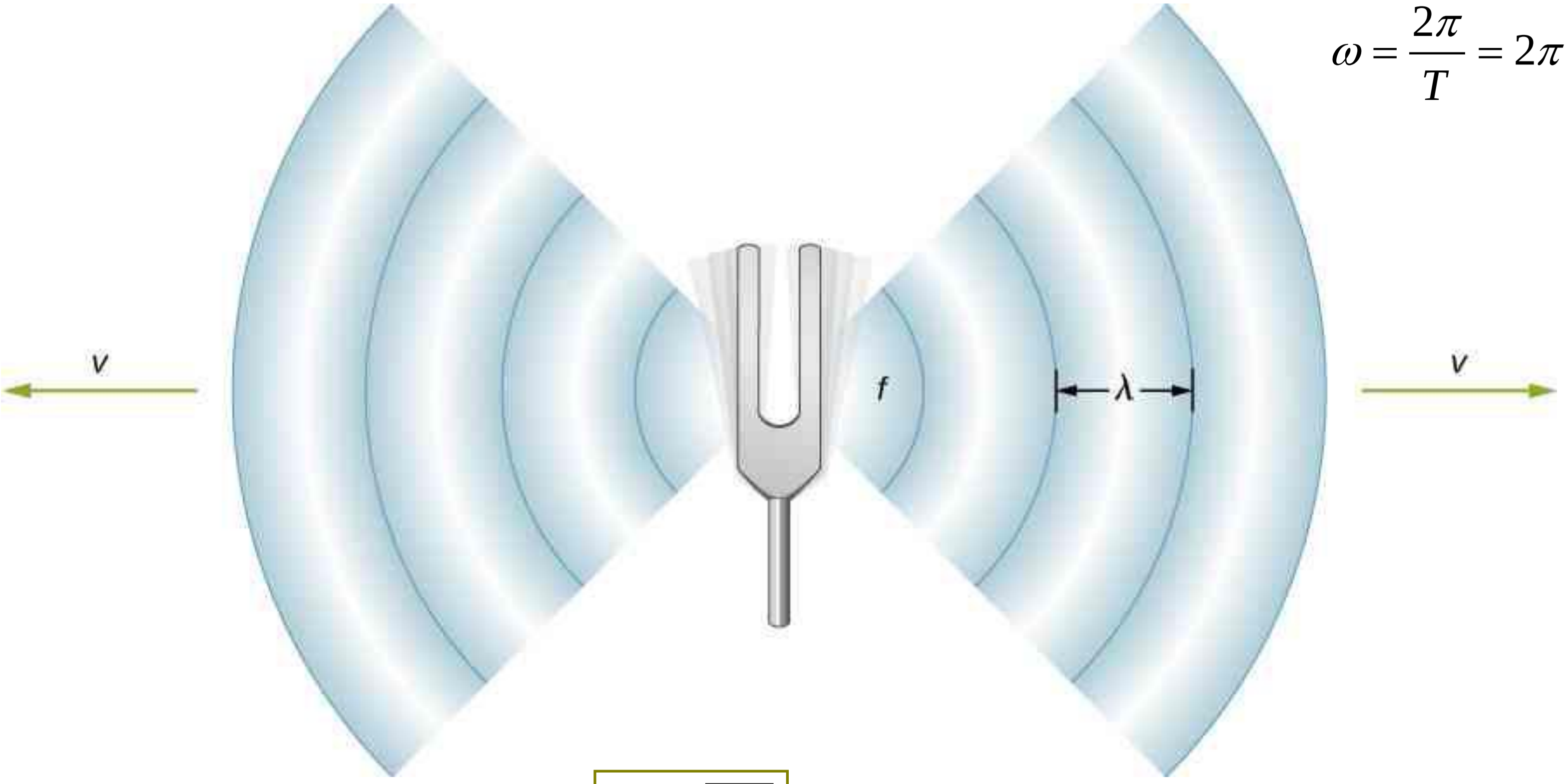
Prędkość dźwięku

Fala dźwiękowa o długości λ propaguje się z prędkością v:

$$\boxed{v = \frac{\omega}{k} = \lambda f}$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} - liczba \ \ falowa$$

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



Prędkość fali na naprężonej strunie: $\boxed{v = \sqrt{\frac{F_N}{\mu}}}$; $v = \sqrt{\frac{\text{sprężystość}}{\text{bezwładność}}}$.

Prędkość dźwięku w gazie doskonałym

wykładnik adiabaty $\kappa = c_p / c_v$

$$\boxed{v = \sqrt{\frac{\kappa R T_K}{M}},}$$

masa molowa gazu

c_p- ciepło właściwego w przemianie izobarycznej
c_v-ciepło właściwe w p. izochorycznej,
R= 8,31 J / (mol · K) – uniwersalna stała gazowa

Ośrodek	Prędkość [m/s]
Gazy	
powietrze (0°C)	331
powietrze (20°C)	343
hel	965
wodór	1284
Ciecze	
woda (0°C)	1402
woda (20°C)	1482
woda morska[b]	1522
Ciała stałe	
aluminium	6420
stal	5941
granit	6000

[a] W temperaturze 0°C i pod ciśnieniem 1 atm, o ile nie podano inaczej.
[b] W temperaturze 20°C i przy zasoleniu 3,5%.

Prędkość dźwięku w różnych ośrodkach

Prędkość dźwięku zależy od gęstości materiału, a gęstość zależy od temperatury, dlatego istnieje zależność pomiędzy temperaturą ośrodka i prędkością rozchodzącego się w nim dźwięku.

Prędkość dźwięku w powietrzu:

$$\boxed{v = v_0\sqrt{\frac{T_K}{273K}} \left[\frac{m}{s}\right]}$$

$$v_0 = 331\left[\frac{m}{s}\right]$$ -prędkość dźwięku w powietrzu w T_o = 273,15 K

Prędkość dźwięku w gazach:

Stała Boltzmanna k_B= 1,38 · 10^{-23} J /K

Zależy od średniej prędkości cząsteczek gazu (v_{rms})

$$\boxed{v_{rms} = \sqrt{\frac{3k_B T_K}{m}} \left[\frac{m}{s}\right]}$$

masa pojedynczej cząsteczki

Uwaga: Zauważ, ze że ***v*** jest prędkością propagacji koherentnego zaburzenia (fala), natomiast $\boldsymbol{v_{rms}}$ opisuje prędkość cząsteczek poruszających się w rożnych kierunkach.

Prędkość dźwięku w różnych ośrodkach

Ogólna formuła dla płynów i gazów:

(ośrodek jednorodny)

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

moduł ściśliwości (współczynnik sprężystości objętościowej)

$$B = -V\frac{dp}{dV}$$

gęstość ośrodka

Ośrodek	Prędkość [m/s]
Gazy	
powietrze (0°C)	331
powietrze (20°C)	343
hel	965
wodór	1284
Ciecze	
woda (0°C)	1402
woda (20°C)	1482
woda morska[b]	1522
Ciała stałe	
aluminium	6420
stal	5941
granit	6000

[a] W temperaturze 0°C i pod ciśnieniem 1 atm, o ile nie podano inaczej.
[b] W temperaturze 20°C i przy zasoleniu 3,5%.

A) **Fale podłużne**

$$v_{||} = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

moduł Younga

gęstość

$$E = \frac{\text{naprężenie rozciągające}}{\text{odkształcenie rozciągające}} = \frac{F_{\perp}/A}{\Delta L/L_0} = \frac{F_{\perp}}{A}\frac{L_0}{\Delta L}.$$ [N/m^2]

Solids	
Material	v (m/s)
Diamond	12000
Pyrex glass	5640
Iron	5130
Aluminum	5100
Brass	4700
Copper	3560
Gold	3240
Lucite	2680
Lead	1322
Rubber	1600

B) **Fale poprzeczne**

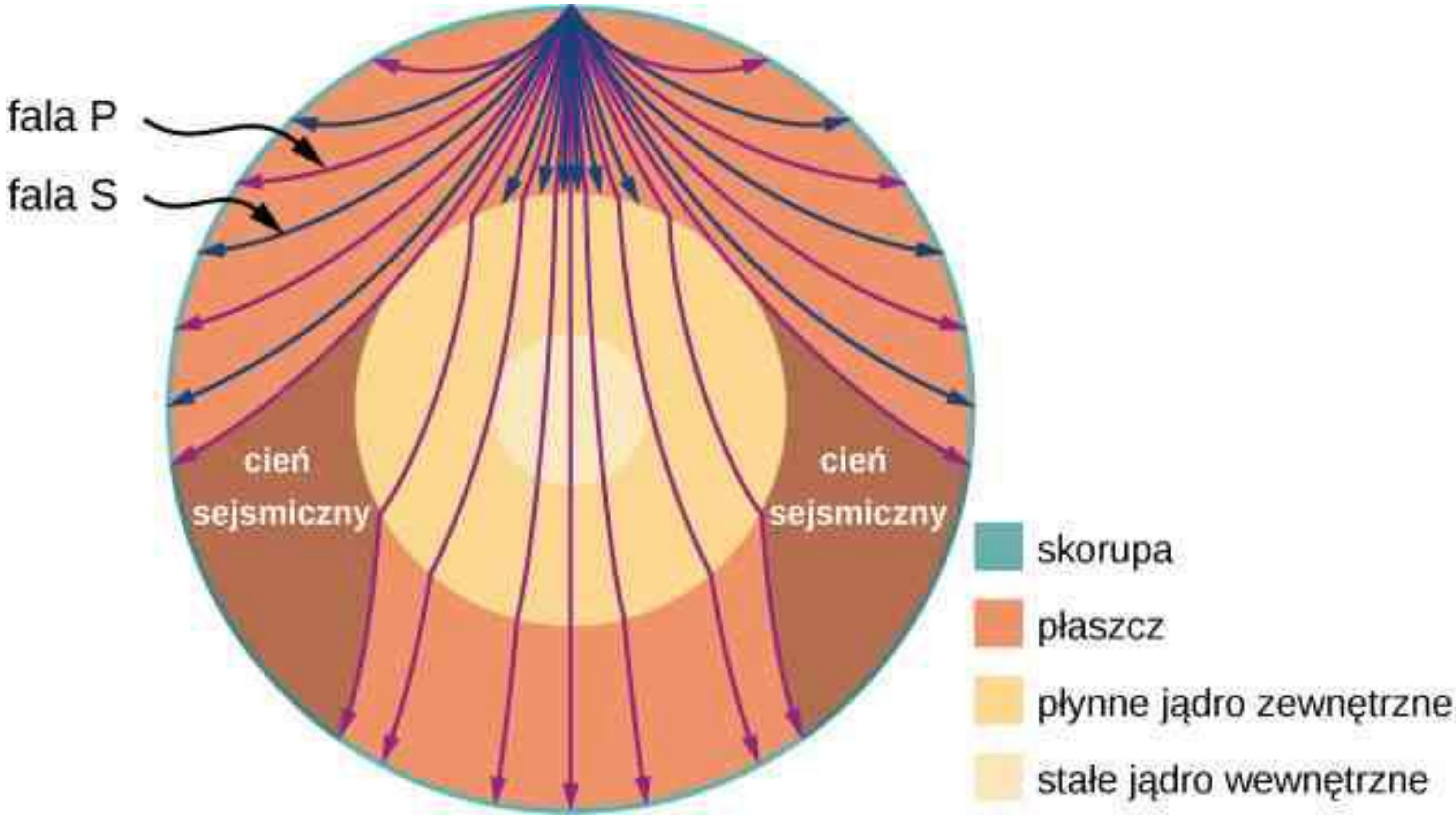
$$v_{\perp} = \sqrt{\frac{G}{\rho}}.$$

G- moduł sztywności (moduł sprężystości poprzecznej/moduł ścinania).

Ponieważ E > G, to fale podłużne rozchodzą się w ciele stałym szybciej niż poprzeczne.

Fale sejsmiczne- fale dźwiękowe w skorupie ziemskiej

Fale sejsmiczne są ciekawym przykładem tego, jak prędkość dźwięku zależy od sztywności ośrodka.



Rys. źródło: *„Fizyka dla szkół wyższych" Samuel J. Ling, Jeff Sanny, William Moebs*

Trzęsienia ziemi wytwarzają zarówno fale podłużne (P), jak i fale poprzeczne (S), poruszają się z rożnymi prędkościami w rożnych obszarach Ziemi. Jednak fale podłużne (P) propagują się szybciej (4-7 km/s) ,niż fale poprzeczne (S)(2 - 5 km/s) .

Fale poprzeczne (S) nie przechodzą przez płynny rdzeń (brak modułu sztywności), a (P) przechodzą i załamują się na granicy ośrodków, tworzą się dwa obszary cienia (rys.).

POMIAR DŹWIĘKU

Źródło dźwięku wysyła energię, która rozchodzi się w postaci fali akustycznej. Energię tę można obliczyć oraz zmierzyć.

Prędkość akustyczna (*u*)- nazywamy tak prędkość, jaką mają cząsteczki drgającego ośrodka przy przechodzeniu przez położenie równowagi .

amplituda drgań cząsteczek ośrodka

$$\boxed{u = 2\pi f y_0}$$

częstość fali akustycznej

Uwaga:

Na ogół nie mierzymy prędkości akustycznej (*u*), lecz obliczamy ją na podstawie pomiaru ciśnienia akustycznego.

POMIAR DŹWIĘKU

Ciśnienie akustyczne (*p*) w powietrzu jest to różnica między chwilową wartością ciśnienia powstałego w danym punkcie pola pod działaniem fal akustycznych a wartością ciśnienia statycznego (atmosferycznego); (pojawia się tu nadciśnienie, bądź podciśnienie).
Ciśnienie akustyczne wyraża się w paskalach [Pa].

prędkość dźwięku

$$\boxed{p = \rho v u}$$

gęstość ośrodka

prędkość akustyczna

p	ϱ	v	u
$\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}^2}$	$\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}$	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}}$
μbar	$\frac{\mathrm{g}}{\mathrm{cm}^3}$	$\frac{\mathrm{cm}}{\mathrm{s}}$	$\frac{\mathrm{cm}}{\mathrm{s}}$

Ciśnienie akustyczne mierzymy najczęściej w mikrobarach (μbar), tabela.

$$\boxed{1Pa = 1\frac{N}{m^2} = 10\,\mu bar}$$

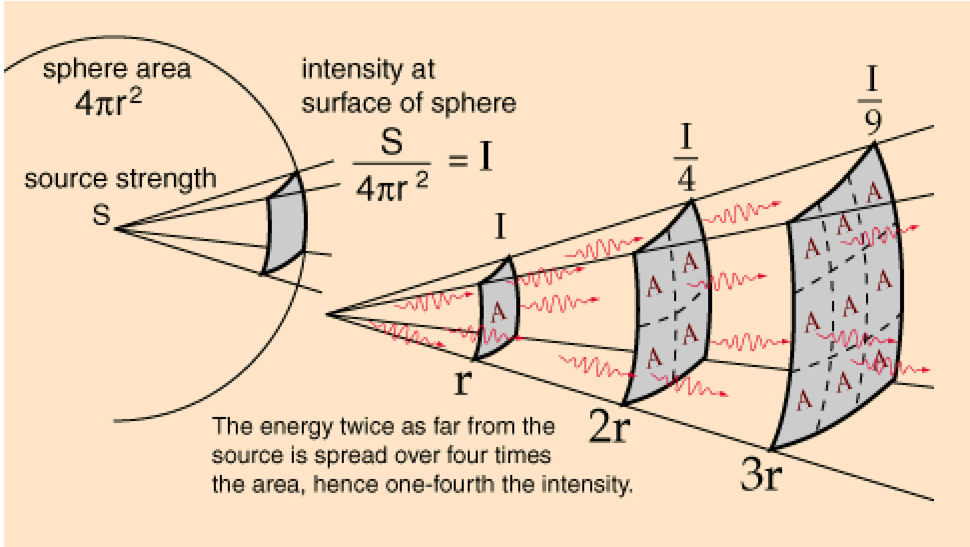
Natężenie dźwięku (głośność)

Natężenie fali :

moc źródła
(szybkość
przenoszenia energii)

$$\boxed{I = \frac{P}{S} = \frac{Fv}{S}} \quad \left[1\frac{W}{m^2}\right]$$

pole powierzchni
odbierającej dźwięk



Emisja izotropowa $\quad I = \frac{P_{źr}}{4\pi r^2},$

zmiana ciśnienia
(lub amplituda ciśnienia (Pa)

Natężenie fali dźwiękowej

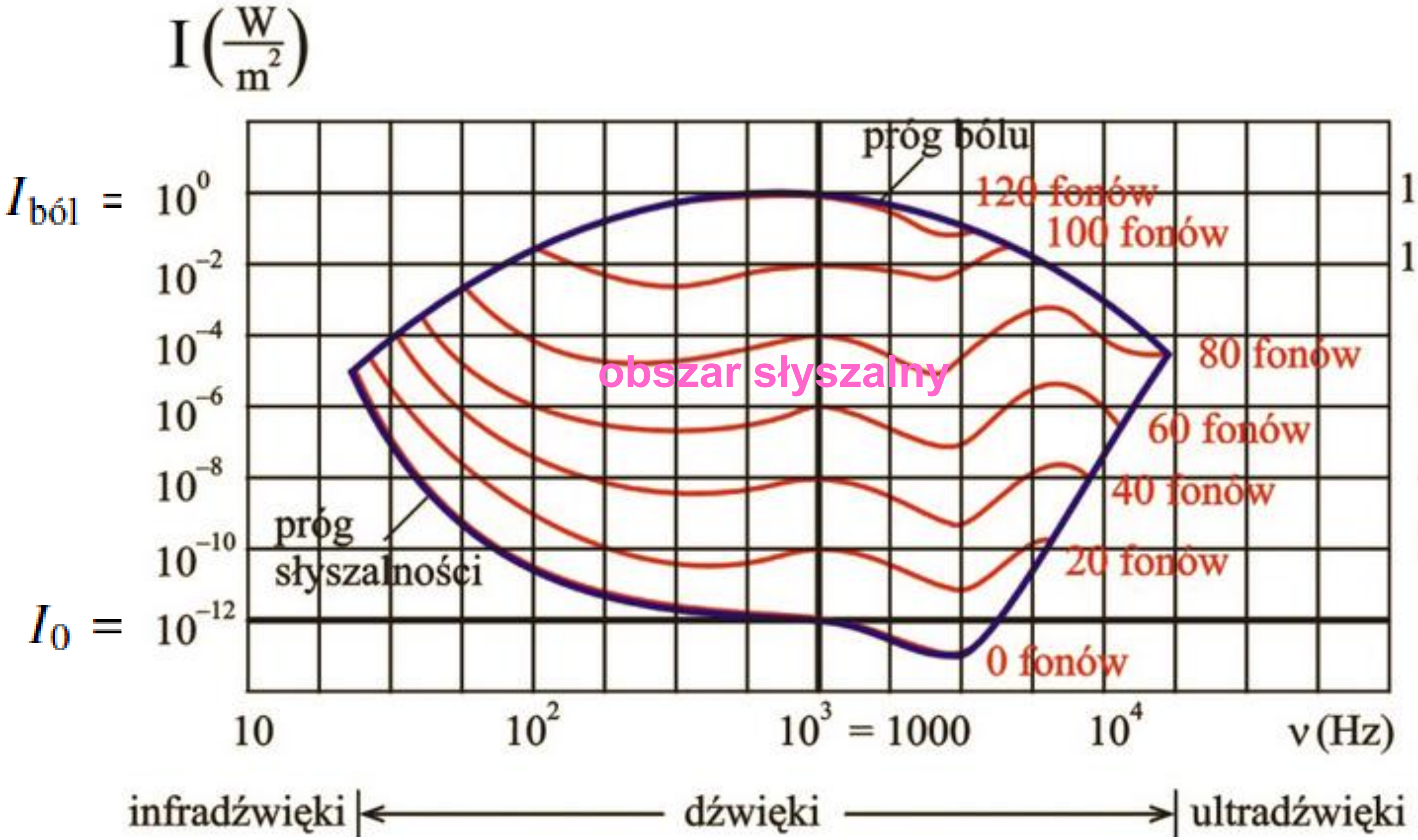
$$\boxed{I = \frac{(\Delta p_{max})^2}{2\rho v} = \frac{\rho u^2 v}{2}} \quad \left[1\frac{W}{m^2}\right]$$

gęstością ośrodka

prędkość dźwięku w ośrodku

Obszar słyszalności ludzkiego ucha

Aby wywołać wrażenie dźwięku fala musi posiadać pewne minimalne natężenie. Jeżeli natężenie przekracza pewną wartość, to fala przestaje być odbierana jako dźwięk, wywołuje natomiast uczucie bólu.



Rys. **Zależność progów słyszalności i bólu w funkcji częstości.**

Dla każdej częstości drgań istnieje najmniejsze (**próg słyszalności) i największe (próg bólu) natężenie fali, która wywołuje wrażenie dźwięku.**

Poziom natężenia dźwięku- głośność

Głośność (poziom natężenia) jest wielkością, która charakteryzuje **subiektywną intensywność odbierania dźwięku przez człowieka .**

Zgodnie z prawem **Webera i Fechnera: zmiana intensywności subiektywnego wrażenia dźwiękowego wywołanego przez dwa dźwięki jest proporcjonalna do logarytmu stosunku natężeń porównywanych dźwięków.**

Poziom natężenia dźwięku (L_I):

natężenie danego dźwięku

$$L_I = log\frac{I}{I_o}$$

[1 bel]

natężenie odniesienia: $I_0 = 10^{-12}\ \mathrm{W/m^2}$

(wzorcowa głośność dla f=100Hz, aby otrzymać L=0)

Jednostką głośności jest **bel (B). Zwykle jednak używa się jednostek dziesięć razy mniejszych – decybeli (dB).**

Poziom natężenia dźwięku mierzony w decybelach:

$$L_I = 10\log_{10}\frac{|I|}{I_o}$$

$[dB]$

W technice budowlanej w dB podawana jest również zdolność izolacyjna materiałów budowlanych.

Poziom głośności dźwięku

Poziom głośności , który odczuwa człowiek subiektywnie jako natężenie dźwięku, zależy od naszego organu słuchu i jest wielkością fizjologiczną.

Głośność dźwięku (L):

$$\boxed{L = 20\,log\,\frac{p}{p_0}} \qquad [\,fon\,]$$

p- ciśnienie akustyczne tonu o częstości 1000 Hz, (odbieranego jako impuls tak samo głośny, jak dźwięk , który słyszymy);

p₀- ciśnienie akustyczne równe $2 \cdot 10^{-5}\,\frac{N}{m^2}$; odpowiada ono wartości progowej I_0-najsłabszego natężenia dźwięku, (odbieranego jeszcze przez ucho ludzkie)

1 fon odpowiada 1 dB przy częstotliwości dźwięku 1 kHz

Przykłady różnych dźwięków

Źródło dźwięku (odległość od źródła)	**Natężenie *I*** (W/m^2)	**Poziom natężenia *L*** (decybele)
Szept (1 m)	10^{-12}	0
Niegłośna rozmowa (1 m)	10^{-8}	40
Krzyk (1 m)	10^{-5}	70
Orkiestra symfoniczna (5 m)	10^{-4}	80
Młot pneumatyczny (1 m)	10^{-2}	100
Ryk odrzutowca (20 m)	1	120

, silny ból, utrata słuchu

Ile dB wynosi natężenie dźwięku na progu słyszalności?

Przykład- poziom natężenia dźwięku

Oblicz poziom natężenia dźwięku w W/m^2 oraz w decybelach dla fali dźwiękowej rozchodzącej się w powietrzu w temperaturze 0°C gdy amplituda ciśnienia wynosi 0,656 Pa.

Dane:
T=273 K
V=331 m/s
Δp_{max} =0,656 Pa
ρ=1,29 kg/m^3
(gęstość powietrza w t=0 C oraz normalnego ciśnienia).

$$I = \frac{(\Delta p_{max})^2}{2\rho v}$$

Szukane:
I=?

$$I = \frac{(\Delta p)^2}{2\rho v} = \frac{(0{,}656\,\mathrm{Pa})^2}{2 \cdot 1{,}29\,\mathrm{kg/m^3} \cdot 331\,\mathrm{m/s}} = 5{,}04 \cdot 10^{-4}\ \mathrm{W/m^2}.$$

Poziom natężenia w dB, z definicji:

$$L_I = 10 \log_{10} \frac{|I|}{I_o}$$

, stąd $L_I = 10 \, log_{10} \dfrac{5{,}04 \cdot 10^{-4}}{10^{-12}} = 87 dB$

Fale i dźwięki

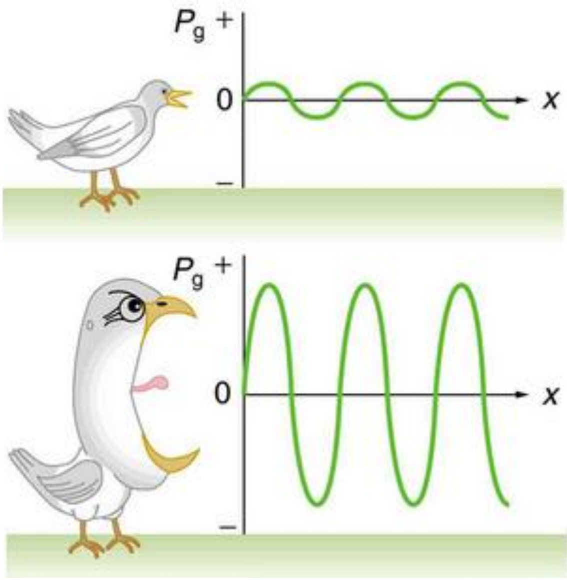
Odbicie na granicy ośrodków fala akustyczna ulega odbiciu załamaniu i absorpcji

Echo fala padająca i odbita ulegają interferencji na dużych odległościach

Pogłos fala padająca i odbita ulegają interferencji na małych odległościach

Dudnienie dwa źródła o zbliżonych częstotliwościach

Cechy dźwięku



Wysokość określa częstotliwość dźwięku.

Barwa subiektywne wrażenie słuchowe związane z ilością harmonicznych w dźwięku.

Głośność lub natężenie dźwięku określa ilość energii niesioną przez falę dźwiękową.

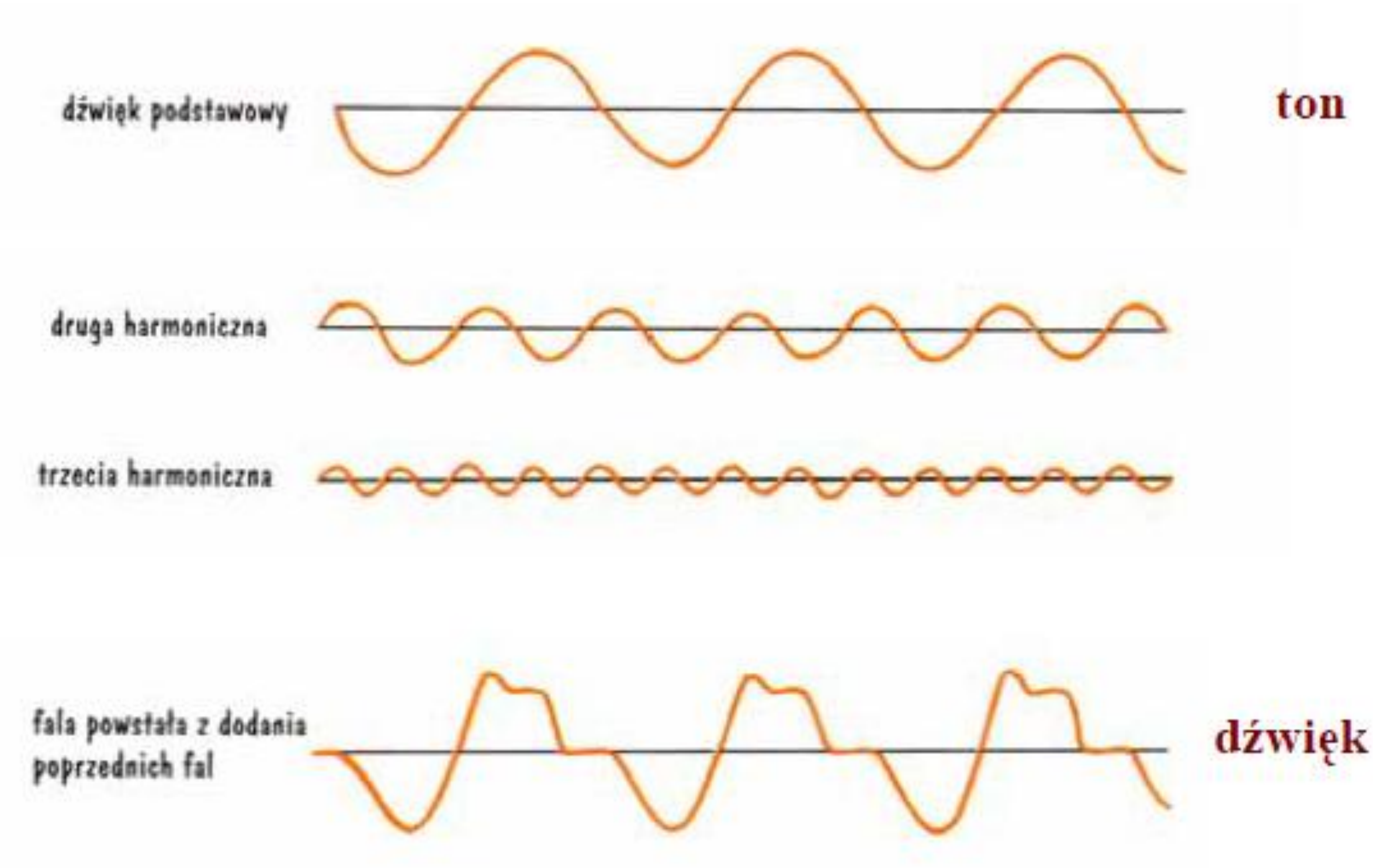
Fala zawierająca tylko jedną częstotliwość to w akustyce ton a w optyce fala monochromatyczna.

Ton to zaburzenie sinusoidalne. Charakteryzuje go wysokość, zależna od częstotliwości i natężenie, wprost proporcjonalne do kwadratu amplitudy drgań źródła tonu.

Dźwięk to zaburzenie niesinusoidalne. Jest ono wypadkową tonu podstawowego i jego harmonicznych.
Natężenie i wysokość dźwięku są takie same jak dla tonu podstawowego.

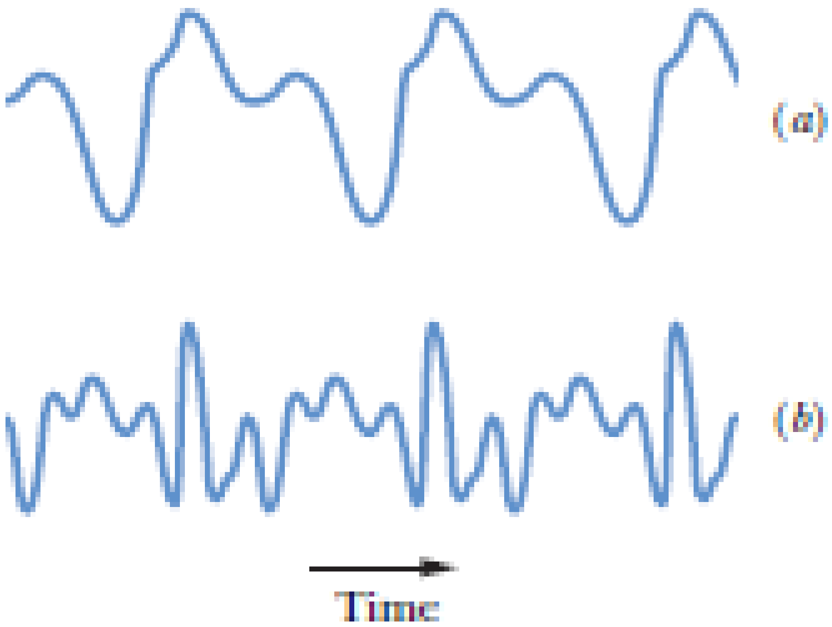
Oprócz wysokości i natężenia dźwięk posiada jeszcze barwę.
Barwa zależy od częstotliwości i natężenia wyższych harmonicznych.

Barwa dźwięku



Dźwięki instrumentów muzycznych

Gdy gramy tę samą nutę, tzn. pierwsze harmoniczne maja taka sama częstość **.**

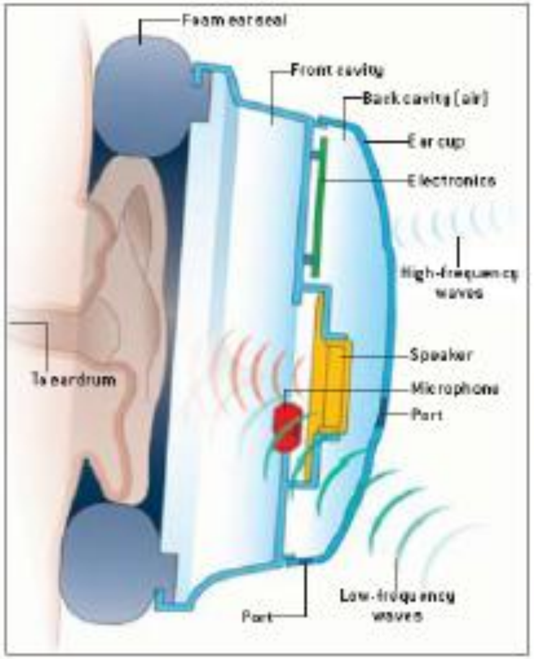


Rys. Fale generowane przez (a) flet i (b) obój

Słup powietrza drga z częstotliwością podstawową(pierwszą harmoniczną) i jednocześnie z częstotliwościami wyższymi (wyższymi harmonicznymi).

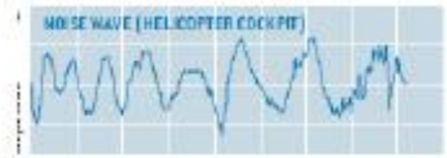
Metoda matematyczna rozkładu złożonej zależności ciśnienia fali dźwiękowej od czasu na sinusoidalne fale o częstościach będących wielokrotnością częstości podstawowej (pierwszej harmonicznej) nazywa się **analizą Fouriera**.

Słuchawki redukujące hałas i szum



Docierający hałas jest wykryty przez mikrofon, który połączony z układem elektronicznym generuje falę o przeciwnej amplitudzie

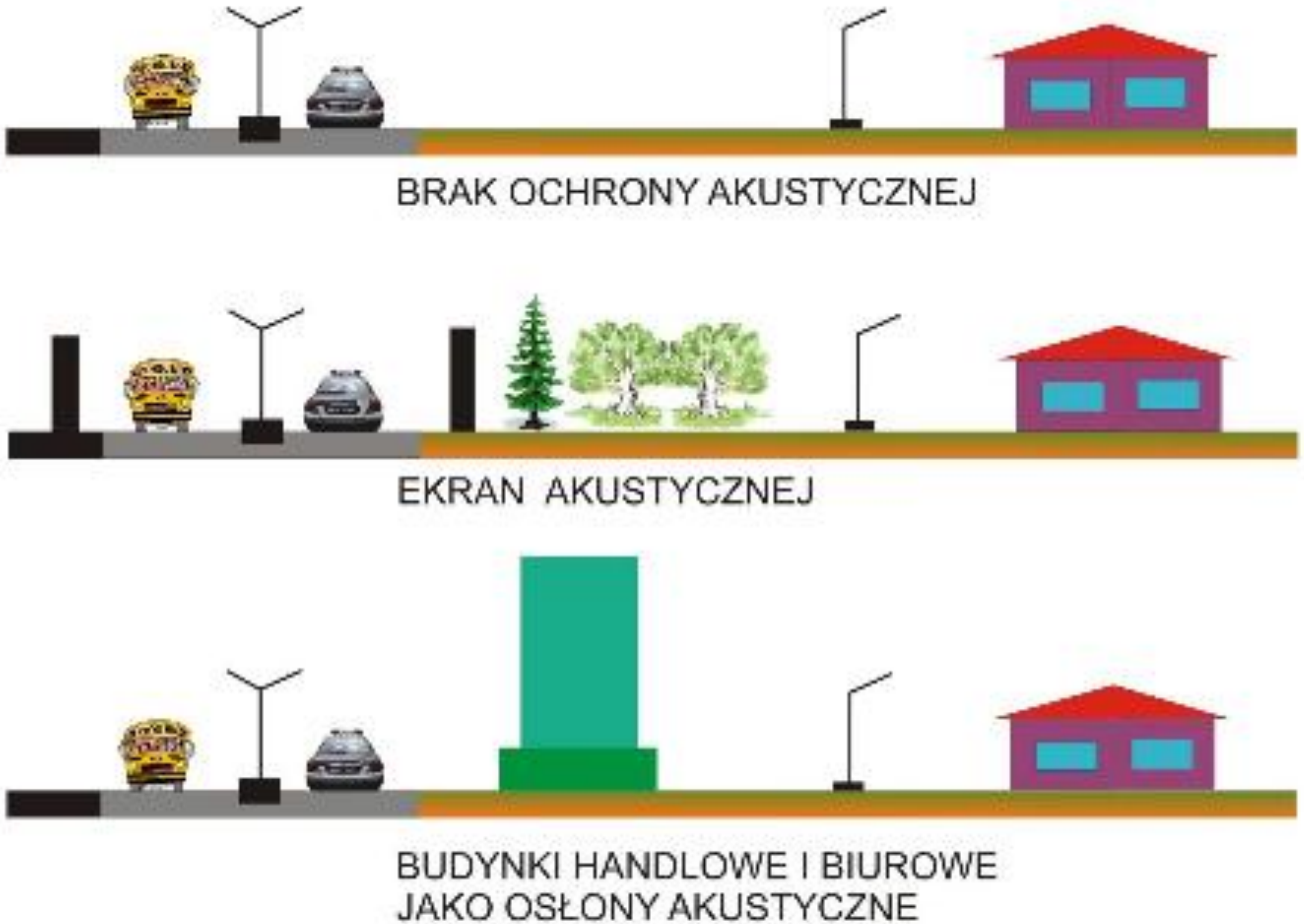
Sygnał hałasu



Sygnał generowany przez głośnik

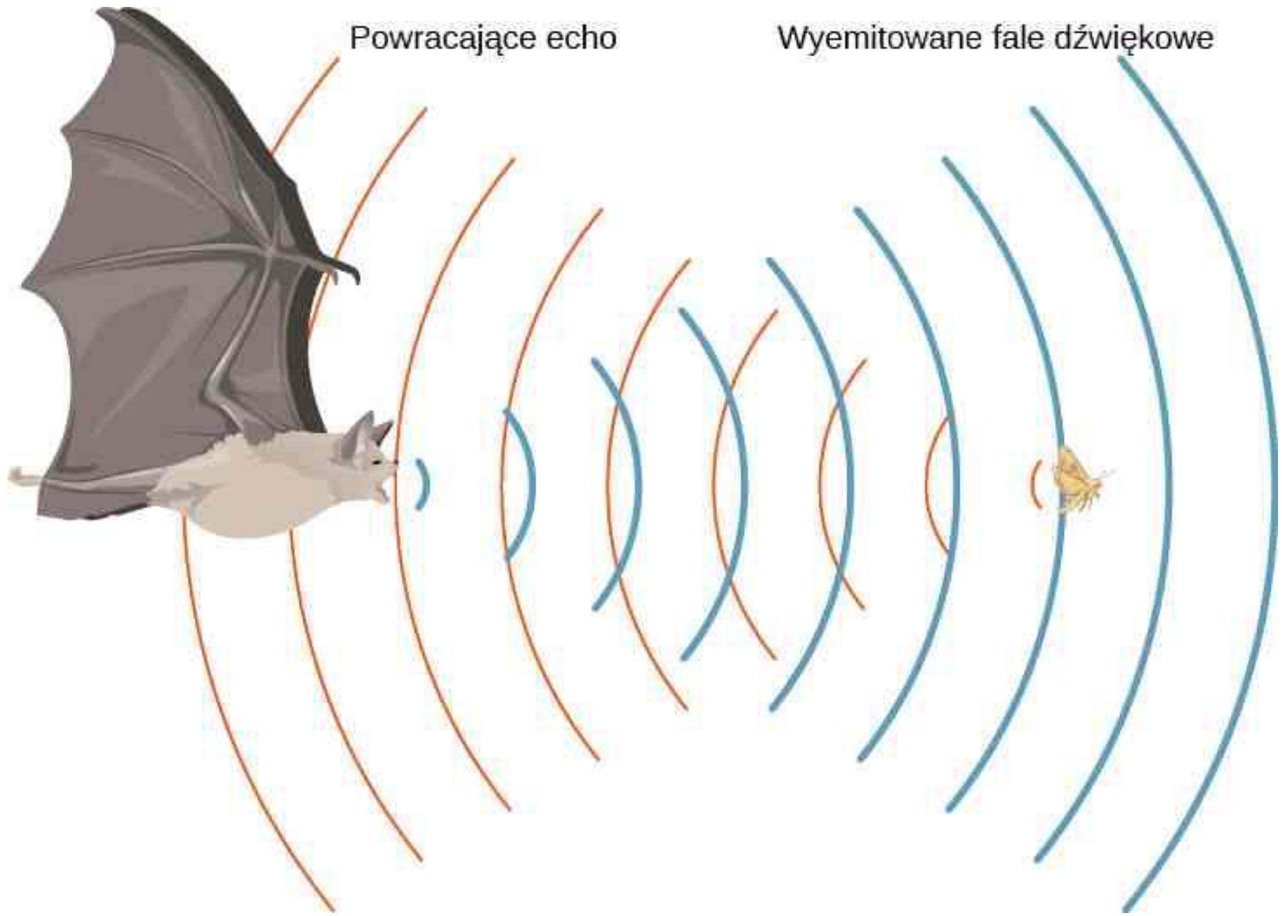
Sygnał docierający do słuchacza

Sposoby zabezpieczenia obiektów mieszkaniowych przed hałasem drogowym



Rys. źródło: http://kurtz.zut.edu.pl

Nawigacja nietoperza



Nietoperz wykorzystuje zjawisko echa do określenia odległości od zdobyczy. Czas dotarcia echa jest wprost proporcjonalny do odległości.

Dziękuję za uwagę !