Fale

- **Falą** nazywamy każde **rozprzestrzeniające się** (rozchodzące się w czasie i przestrzeni) **zaburzenie** (odkształcenie, drganie)

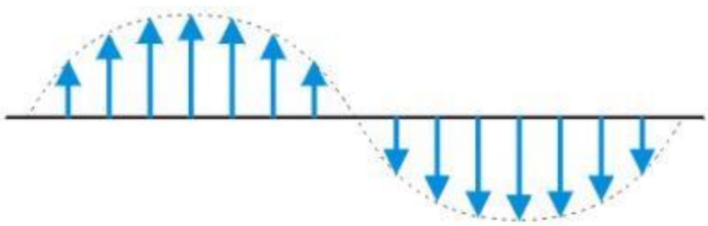
  Drgania: x(t) Fale: u(x,y,z,t)

- Fale przenoszą **energię**, ale nie transportują materii.
- Fale mogą rozchodzić się w **ośrodkach materialnych** (i związane są wtedy ze zmianą parametrów takiego ośrodka, jak np. ciśnienie i gęstość w gazach w przypadku fali akustycznej w powietrzu) ale mogą też **nie potrzebować ośrodka materialnego** do propagacji (fale elektromagnetyczne).
- **Rodzaje fal:**

  - fale mechaniczne

  - fale elektromagnetyczne

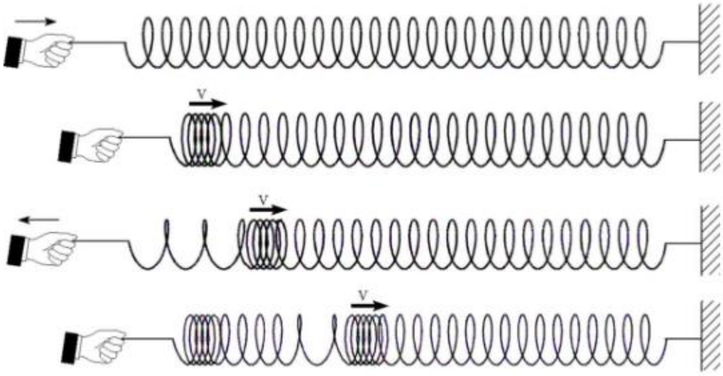
  - fale materii (cząstki)
- **Fala poprzeczna** – gdy drgania rozchodzą się w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się fali.
- **Fala podłużna** – gdy drgania rozchodzą się w kierunku równoległym do kierunku rozchodzenia się fali.



Fala poprzeczna

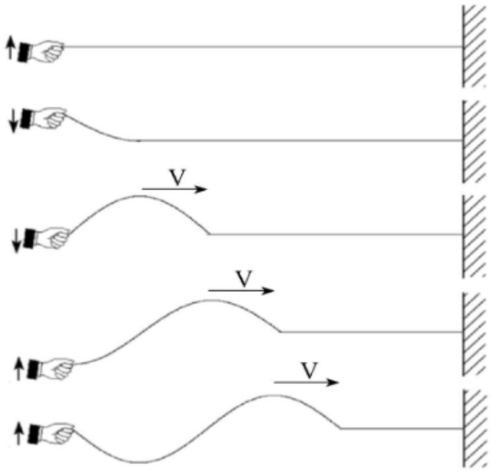
Fala podłużna

https://www.edukator.pl/resources/page/fale/7633



https://docplayer.pl/23954066-Fale-w-osrodkach-sprezystych.html

Jeżeli koniec sprężyny wykonuje regularny ruch harmoniczny, to wzdłuż sprężyny będzie się rozchodzić (podłużna) fala zagęszczeń i rozrzedzeń.



https://docplayer.pl/23954066-Fale-w-osrodkach-sprezystych.html

Swobodny koniec sznura wykonuje ruch harmoniczny, wskutek czego na sznurze rozchodzi się fala. Robiąc szybkie zdjęcie rozchodzącego się zaburzenia, stwierdzimy, że fala ma kształt sinusoidalny.

Przykłady fal

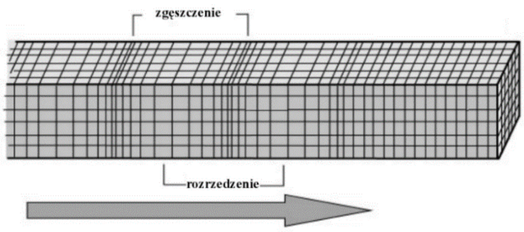
- Fale morskie: zaburzenia propagujące w wodzie
- Fale elektromagnetyczne: mogą rozchodzić się w próżni
- Fale dźwiękowe – fale mechaniczne propagujące w gazach, cieczach i ciałach stałych
- Fale sejsmiczne
- Fale grawitacyjne – nieliniowe fluktuacje w krzywiźnie czasoprzestrzeni, przewidziane w Ogólnej Teorii Względności
- Fale Tkaczenki – fale w cieczach w stanie nadciekłym i, ogólniej, w kondensatach Bosego-Einsteina, polegające na poprzecznych drganiach linii wirów w ośrodku. Wirowanie obszaru nadciekłego może się odbywać jedynie przez tworzenie się w cieczy wirów kwantowych, w których cyrkulacja pola prędkości cząstek okrążających wir jest skwantowana.

Doświadczalnie istnienie fal Tkaczenki w ciekłym helu potwierdzono w roku 1980. Materia w fazie nadciekłej może podlegać szybkiej rotacji we wnętrzu gwiazd neuronowych.

Fale sejsmiczne

Fale podłużne

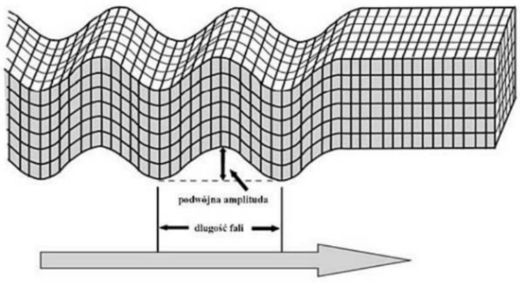
Fala P



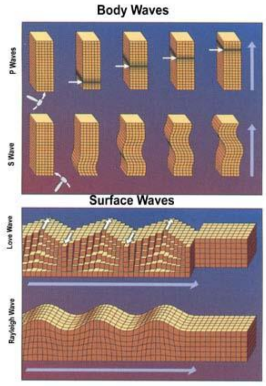
Strzałka pokazuje kierunek przemieszczania się fali

Fale poprzeczne

Fala S



Strzałka pokazuje kierunek przemieszczania się fali

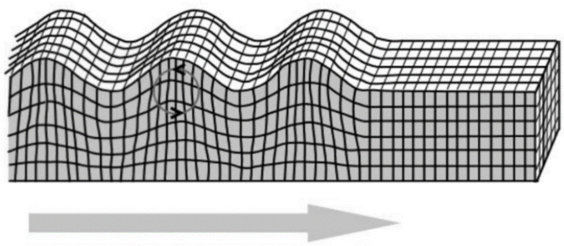


https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/38/Pswaves.jpg

https://www.pgi.gov.pl/mogepl-home/monitoring-geodynamiczny/sejsmologia/9724-co-to-sa-fale-sejsmiczne.html

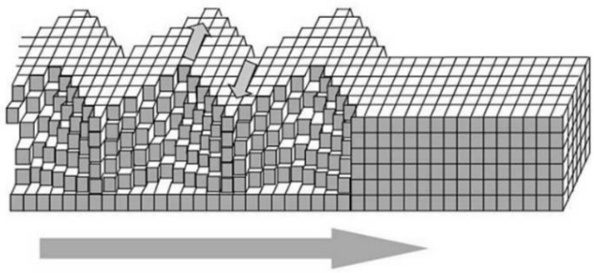
Fale powierzchniowe (ang. Surface waves) w przeciwieństwie do fal przestrzennych rozchodzą się na granicy dwóch ośrodków, a szczególnie na powierzchni ziemi. Składają się z dwóch rodzajów drgań – fal Rayleigha i Love'a.

Fala Rayleigha



Strzałka pokazuje kierunek przemieszczania się fali

Fala Love'a

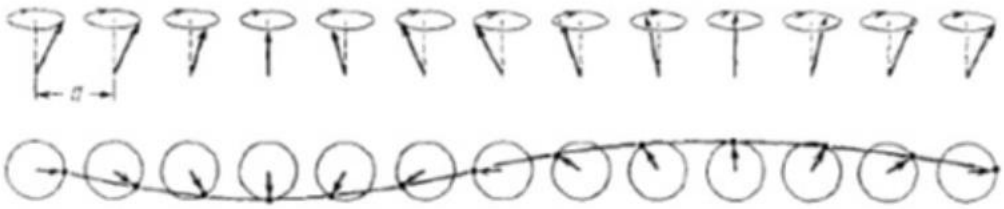


Strzałka pokazuje kierunek przemieszczania się fali

https://www.pgi.gov.pl/mogepl-home/monitoring-geodynamiczny/sejsmologia/9724-co-to-sa-fale-sejsmiczne.html

Fala spinowa Magnonika

Oddziaływujące spiny w sieci krystalicznej mogą tworzyć propagujące się jak fale wzbudzenia.



https://slideplayer.pl/slide/2674297/

Fale spinowe są falami krótkimi (z długością fali od kilkudziesięciu do kilkuset nanometrów) i o częstotliwości w zakresie giga- oraz teraherców.

Fale radiowe

Twórcą teorii, która w pełni poprawny sposób opisywała zjawiska elektromagnetyczne był James Clerk Maxwell (1831-1879). Poprawność jego teorii sprawdził Hertz w latach 80 XIX wieku.

Fale – równanie falowe

Równanie różniczkowe cząstkowe II stopnia

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

Gdzie: v^2 to prędkość fazowa

<u>Rozwiązanie ogólne</u>: dowolna funkcja $\Psi(u)$

Argumentu: $u = x \pm vt$

Jednowymiarowe skalarne równanie falowe posiada proste rozwiązanie

$$f(x,t) = f(x \pm vt)$$

Gdzie: f może być dowolną funkcją podwójnie różniczkowalną.

Fala

- Przykłady **rozwiązań równania falowego**:
    - Fala harmoniczna:

$$\Psi = Acos\omega\left(t \pm \frac{x}{v}\right) = Acos2\pi\left(\frac{t}{T} \pm \frac{x}{\lambda}\right) = Acos(\omega t \pm kx)$$

    - Fala płaska:

$$\Psi = (\vec{r},t) = Aexp(\mp\omega t)\exp\left(\pm i\vec{k}\cdot\vec{r}\right)$$

    - Fala kulista:

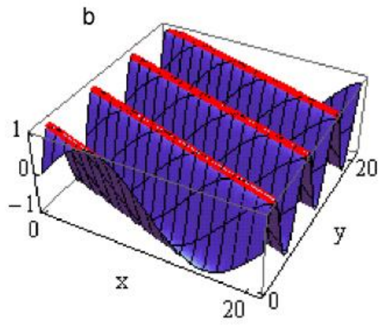
$$\Psi = (\vec{r},t) = \frac{A}{r}exp(i\omega t)\exp\left(\pm i\vec{k}\cdot\vec{r}\right)$$

Fala klasyczna to zaburzenie rozchodzące się w ośrodku materialnym lub próżni, któremu towarzyszy transport energii, bez ekwiwalentnego transportu masy.

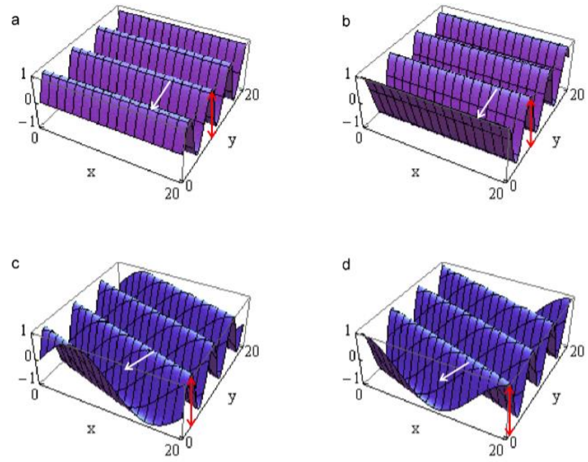
Fala płaska

Fala harmoniczna trójwymiarowa nazywana jest falą płaską.

Oprócz linii równej fazy związanych z grzbietem fali (czerwone linie) możemy wyróżnić inne linie równej fazy.



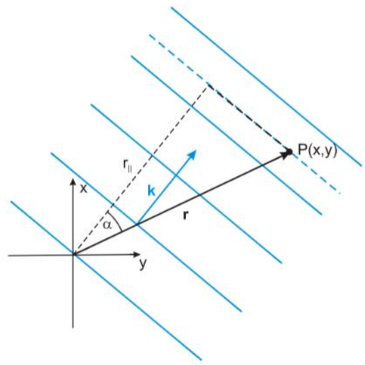
https://docplayer.pl/132734273-Jan-masajada-45-tematow-z-fizyki-temat-ix-fale.html



$$\Psi = (\vec{r}, t) = Aexp(\mp\omega t)\exp\left(\pm i\vec{k}\cdot\vec{r}\right)$$

Wektor falowy

Wektor falowy wskazuje, w danym punkcie, kierunek biegu energii fali.



$$\Psi = (\vec{r}, t) = Aexp(\mp\omega t)\exp\left(\pm i\vec{\boldsymbol{k}}\cdot\vec{r}\right)$$

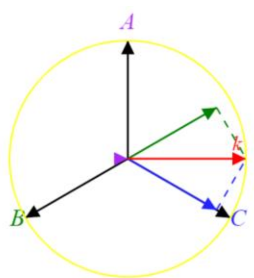
https://docplayer.pl/132734273-Jan-masajada-45-tematow-z-fizyki-temat-ix-fale.html

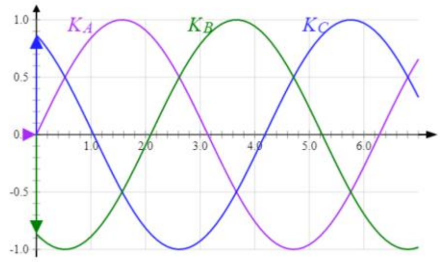
Fazor

Fazorem (inaczej wektor wirujący) nazywamy obracający się wektor reprezentujący ruch harmoniczny. Fazorowi nadajemy następującą interpretację: częstość obrotu fazora odpowiada częstości drgań, kąt fazora odpowiada fazie drgań; kąt ten będziemy również nazywać fazą fazora, długość fazora odpowiada amplitudzie drgań.

Ruch po kole o promieniu A można reprezentować przez obrót końca wektora o długości A

$$Ae^{i\omega t}e^{i\delta} = Ae^{i(\omega t+\delta)} = Acos(\omega t+\delta) + iAsin(\omega t+\delta)$$

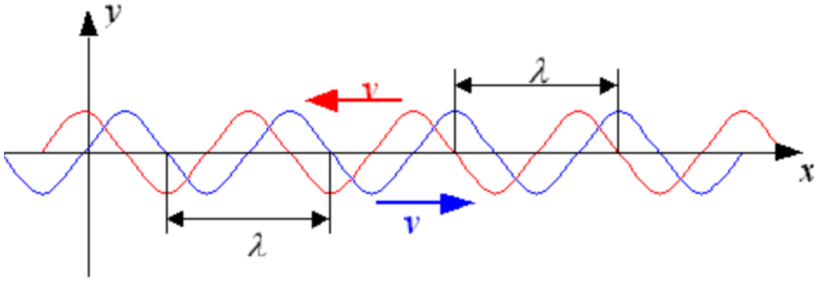




https://kener.elektr.polsl.pl/epedlab/lect.php?no=a1&l=pl

Fala

- Przykład: **fala biegnąca**



http://www.demofiz.umcs.lublin.pl/ukat3.htm

$$y(x,t) = y_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right)$$

Dla dowolnej, ustalonej wartości t: $y(x, t = const) = y_0 \cos\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x + \phi)\right)$

λ – to **długość** fali (odległość między powtarzającymi się fragmentami fali, np. ”grzbietami”)

v – to prędkość przesuwania się „grzbietu” fali, czyli **prędkość fazowa** fali

- Wielkości opisujące falę:

  - Związki między prędkością, okresem i długością fali:

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

  Gdzie: T to okres fali, ω to częstość kołowa, f to częstotliwość

  - Liczba falowa (wektor falowy): $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

  - Prędkość fazowa: $v = \frac{\omega}{k}$

Fala stojąca

Fale stojące powstają, gdy nakładają się na siebie (interferują) dwie fale o jednakowej amplitudzie ale rozchodzące się w przeciwnych kierunkach (fale stojące powstają np. w strunie).

Równanie fali stojącej: zapiszmy równania dwóch fal rozchodzących się wzdłuż osi OX w przeciwnych kierunkach (niech różnica faz δ = 0):

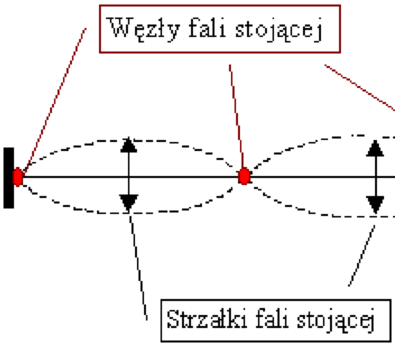
$u_1(x,t) = A sin(\omega t - kx)$ i $u_2(x,t) = A sin(\omega t + kx)$.

W wyniku dodawania się tych fal i po zastąpieniu liczby falowej k przez jej wartość definicyjną $\frac{2\pi}{\lambda}$, dostajemy wzór na falę wypadkową (stojącą):

$$u(x,t) = u_1(x,t) + \text{i } u_2(x,t) = A sin\left(\omega t - 2\pi\frac{x}{\lambda}\right) + A sin\left(\omega t + 2\pi\frac{x}{\lambda}\right)$$

Co po zastosowaniu wzoru na sumę sinusów daje

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



http://www.fizykon.org/akustyka/akustyka_wezly_i_strzalki.htm

Strzałki, 2A $\quad 2\pi\frac{x}{\lambda} = \pm n x$ (n=0,1,2,..) $\quad x_s = \pm n\frac{\lambda}{2}$ (n=0,1,2,..)

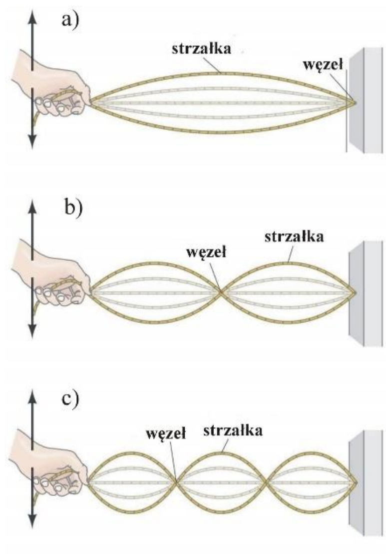
Węzły, 0 $\quad 2\pi\frac{x}{\lambda} = \pm\left(n+\frac{1}{2}\right)\pi$ (n=0,1,2,..) $\quad x_w = \pm\left(n+\frac{1}{2}\right)\frac{\lambda}{2}$ (n=0,1,2,..)

Zakładamy odbicie fali harmonicznej od granicy ośrodków ze skokiem fazy równej π radianów:

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

Równanie to przedstawia tzw. Falę stojącą – taki rodzaj drgań ośrodka, który charakteryzuje się regularnym występowaniem na przemian miejsc, gdzie amplituda drgań jest równa zeru (węzły) i gdzie się maksymalna – równa 2A (strzałki.)

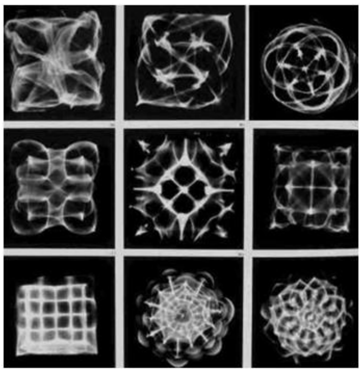
https://livesound.pl/tutoriale/5327-bas-w-pomieszczeniach-fale-stojace-i-mody-drgan/5327/9232?returnId=image-9232



Generowanie fal stojących:

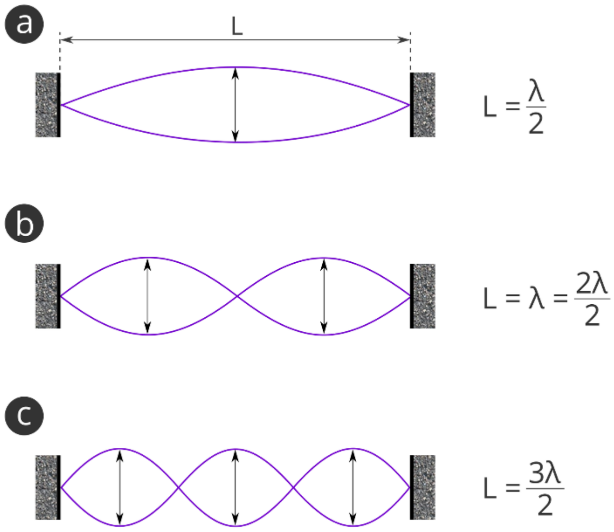
- Przykład: płaska, prostokątna membrana o bokach a i b – można na niej wzbudzić falę stojącą tylko taką, która odpowiada włożeniu się na każdej krawędzi całkowitej wielokrotności połowy odpowiadającej jej długości fali

  - **figury Chladniego**



https://platformytransformacji.com/blog/9-Nasz-Blog/84-Cymatyka-wplyw-fal-dzwiekowych-na-materie

Fala stojąca – pręt lub struna zamocowana na obu końcach



$\lambda = 2L$

$\lambda = L = \frac{2}{2}L$

$\lambda = \frac{2}{3}L$

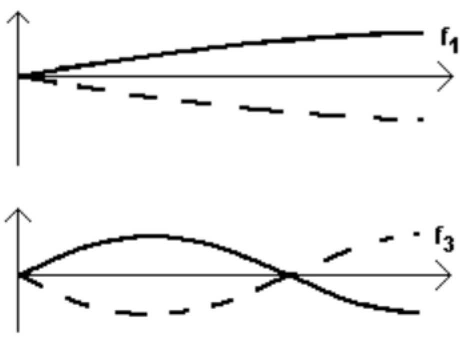
https://zpe.gov.pl/a/fale-stojace-mechanizm-wytwarzania-dzwieku-w-instrumentach-muzycznych/D1GguyB65

$$\lambda_n = \frac{2L}{n}, n = 1,2,3, \ldots$$

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{2L}n = nf_1, n = 1,2,3 \ldots$$

Gdzie: λ to długość fali wygenerowanej na pręcie, λ_n to długość fal stojących, L to długość struny, f_n to częstotliwości własne struny, v to prędkość rozchodzenia się fal w strunie, f_1 to częstotliwość podstawowa $f_1 = \frac{v}{2L}$

Fala stojąca – pręt lub struna zamocowana na jednym końcu



$\lambda = 4L = \frac{4}{1}L$

$\lambda = \frac{4}{3}L$

https://edu.pjwstk.edu.pl/wyklady/wspmu/scb/main08.html

$$\lambda_n = \frac{4L}{2n-1}, n = 1,2,3, \ldots$$

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{4L}(2n-1), n = 1,2,3 \ldots$$

Energia fal mechanicznych

Niech fala mechaniczna rozchodzi się w kierunku osi OX. Obliczmy sumaryczną energię cząsteczek ośrodka w małym elemencie objętości ΔV w kształcie walca o polu powierzchni S i wysokości Δx. Energia ta jest sumą energii kinetycznej i potencjalnej. $\Delta E = \Delta E_k + \Delta E_p$

Energia kinetyczna wynosi $\Delta E_k = \frac{1}{2}\Delta m u^2 = \frac{1}{2}\rho\Delta \mathrm{V} u^2$

Gdzie: $\Delta m = \rho\Delta\mathrm{V}$ – masa elementu o objętości ΔV, a u – prędkość cząstek w objętości ΔV (zakładamy, że Δx jest tak małe, że prędkość cząstek w całej objętości jest w przybliżeniu jednakowa). Ponieważ $u = \frac{\partial\psi}{\partial t} = -\omega A sin(\omega t - kx + \delta)$

To

$$\Delta E_k = \frac{1}{2}\rho\Delta\mathrm{V}\omega^2 A^2 sin^2(\omega t - kx + \delta)$$

Energia potencjalna zawarta w elemencie objętości ΔV jest równa pracy potrzebnej do rozciągnięcia elementu o długości Δx o wartości Δψ, $\Delta E_p = \frac{\mathrm{k}\Delta\psi^2}{2}$, gdzie zgodnie z prawem Hooke'a, $\mathrm{k} = \frac{ES}{\Delta\mathrm{x}}$. Przekształcając to wyrażenie otrzymujemy

$$\Delta E_p = \frac{1}{2}ES\Delta\mathrm{x}\left(\frac{\Delta\psi}{\Delta\mathrm{x}}\right)^2 = \frac{1}{2}E\ \Delta\mathrm{V}(\mathrm{kAsin}(\omega t - kx + \delta^2))$$

Gdzie: $\frac{\Delta\psi}{\Delta\mathrm{x}}$ zastąpiliśmy pochodną $\frac{\partial\psi}{\partial x}$. Stąd energia całkowita wynosi

$$\Delta E = \frac{1}{2}(\rho\omega^2 + Ek^2)A^2 sin^2(\omega t - kx + \delta)\Delta\mathrm{V}$$

$$\Delta E = \frac{1}{2}\rho\ \Delta\mathrm{V}u^2 + \frac{1}{2}\left(\frac{ES}{\Delta\mathrm{x}}\right)(\Delta\psi)^2$$

Gdzie: ΔE to energia fali w elemencie ciała o objętości ΔV, ρ to gęstość ośrodka, $\frac{1}{2}\rho\ \Delta\mathrm{V}u^2$ to energia kinetyczna cząstek w objętości ΔV, $\frac{1}{2}\left(\frac{ES}{\Delta\mathrm{x}}\right)(\Delta\psi)^2$ to energia potencjalna cząstek w objętości ΔV

Nakładanie się fal

Nakładamy na siebie dwie fale harmoniczne o jednakowej amplitudzie i zbliżonych częstotliwościach ω_1 i ω_2:

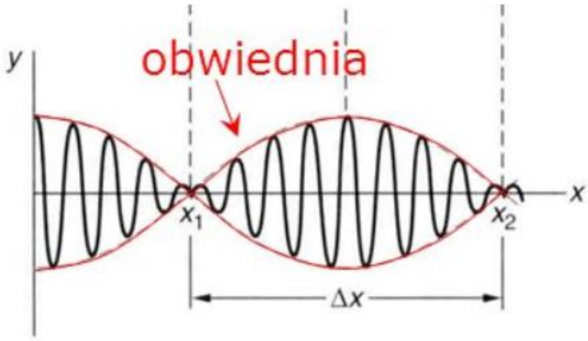
$$y(t) = \mathrm{A}\cos(\omega_1 t) + \mathrm{A}\cos(\omega_2 t)$$

Jako falę wypadkową otrzymujemy:

$$y(t) = 2\mathrm{A}\cos[(\Delta\omega)t]\cos(\omega t)$$

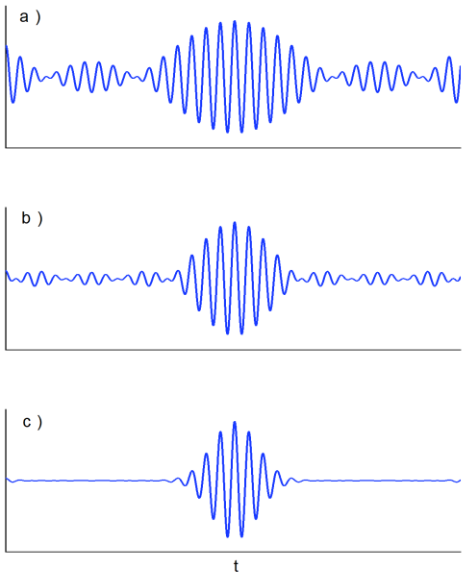
Gdzie: $\omega \equiv \frac{\omega_1+\omega_2}{2}$ $\Delta\omega = \frac{\omega_1-\omega_2}{2}$

$2\mathrm{a}\cos[(\Delta\omega)t]$ to **funkcja modelująca** (obwiednia) [zakładamy, że częstości różnią się nieznacznie]



https://slideplayer.pl/slide/423327/1/images/52/Z%C5%82o%C5%BCenie+dw%C3%B3ch+fal+optoelectronics.+Suma+dw%C3%B3ch+fal+o+r%C3%B3wnych+amplitudach+i+nieznacznie+r%C3%B3%C5%BCnych+w.+obwiednia+fali+pakiet+falowy..jpg

Nakładanie się fal – paczka falowa



Paczki falowe powstałe w wyniku złożenia odpowiednio a) 3, b) 5, c) 11 fal o niewiele różniących się częstotliwościach.

https://home.agh.edu.pl/~kakol/efizyka/w35/extra35a.html

- **Nieskończona** liczba fal o względnych amplitudach danych **funkcją Gaussa**:

$$G(x) = \exp\left[-\frac{(\omega - \varpi)^2}{2(\Delta\omega)^2}\right]$$

  Gdzie: $\Delta\omega$ jest odchyleniem standardowym – tu: **rozrzut częstości**

- **Suma** nieskończonej ilości fal sinusoidalnych będzie wtedy dana funkcją:

$$\int G(\omega)\cos(\omega t)\,d\omega = \exp\left[-\frac{t^2}{2\left(\frac{1}{\Delta\omega}\right)^2}\right]\cos(\varpi t)$$

- Odchylenie standardowe tego rozkładu: $\Delta t = \frac{1}{\Delta\omega}$ nazwane jest **szerokością paczki fal.**

  Funkcja $G(\omega)$ to **transformata Fouriera** paczki fal.

- Nakładamy na siebie dwie rozchodzące się w przestrzeni fale harmoniczne o jednakowej amplitudzie i zbliżonych częstotliwościach ω_1 i ω_2 oraz zbliżonych liczbach falowych k_1 i k_2:

$$y(x,t) = \mathrm{A}\cos(\omega_1 t - k_1 x) + \mathrm{A}\cos(\omega_2 t - k_2 x)$$

- Jako falę wypadkową otrzymujemy:

$$y(t) = 2\mathrm{A}\cos[(\Delta\omega)t - \Delta\mathrm{kx}]\cos(\omega t - kx)$$

Gdzie: $\omega \equiv \frac{\omega_1+\omega_2}{2}$ $\Delta\omega = \frac{\omega_1-\omega_2}{2}$ $k \equiv \frac{k_1+k_2}{2}$ $\Delta k = \frac{k_1-k_2}{2}$

Nakładanie się fal – prędkość paczki falowej

- **Fala modelująca** jest teraz równa: $2\mathrm{A}\cos[(\Delta\omega)t - \Delta\mathrm{kx}]$

  I ma ona maksimum dla: $[(\Delta\omega)t - \Delta\mathrm{kx}] = 0$

  Stąd otrzymujemy: $\frac{x}{t} = \frac{\Delta\omega}{\Delta k}$

Nakładanie się fal – paczka falowa

- **Prędkość grupowa $\boldsymbol{v_g}$** – prędkość rozchodzenia się paczki fal sinusoidalnych o zbliżonych częstościach (prędkość „grzbietu" obwiedni"):

$$v_g = \frac{d\omega}{dk}$$

- **Prędkość fazowa $\boldsymbol{v_f}$** – prędkość rozchodzenia się stałej fazy (każdej fali składowej osobno):

$$v_f = \frac{\omega_i}{k_i}$$

Nowy mechanizm działania tranzystora

Prędkość grupowania fal spinowych, czyli prędkość propagacji wzbudzeń magnetycznych zależy od siły oddziaływania spin – orbita w namagnesowanym, dwuwymiarowym gazie elektronowym.

Prędkość w ruchu falowym

Z każdą falą sprężystą stowarzyszone się trzy rodzaje prędkości.

1. **Prędkość cząstek** – jest to prędkość chwilowa (np. drgań harmonicznych) ruchu cząsteczek (punktów) ośrodka sprężystego wokół ustalonych położeń równowagi; źródłem tego ruchu jest rozchodząca się fala.
2. **Prędkość fazowa (falowa)** – jest to prędkość, z jaką przemieszcza się w ośrodku powierzchnia stałej fazy (np. garby lub doliny fali biegnącej w sznurku) drgań cząsteczek ośrodka.
3. **Prędkość grupowa** – jest to prędkość pakietu (grupy, paczki) fal.

Fale akustyczne

- Jest to rodzaj **fal sprężystych** – rozchodzących się w ciągłym ośrodku materialnym odkształceń objętościowych lub odkształceń postaci (w ciałach stałych).
- **Fale akustyczne** w powietrzy są przykładem **fal podłużnych**, polegających na rozchodzeniu się zagęszczeń i rozrzedzeń powietrza.
- **Założenia:**

  - lokalny ruch cząsteczek powoduje zmianę gęstości gazu

  - zmiana gęstości jest równoważna zmianie ciśnienia gazu

  - nierównomierny rozkład ciśnienia powoduje lokalny ruch cząstek gazu

Elementy akustyki

- **Fale dźwiękowe** są to fale mechaniczne o częstotliwości od 16Hz do 20kHz, gdyż fale w tym zakresie odbiera ucho ludzkie. W powietrzu fale dźwiękowe (podłużne) rozchodzą się z prędkością v=330/340 m/s. Fale mechaniczne o częstotliwościach mniejszych od 16Hz nazywa się infradźwiękami, a fale o częstotliwościach powyżej 20kHz – ultradźwiękami. Dźwięk odbierany jest przez człowieka według wysokości, barwy i głośności.
- **Wysokość dźwięku** jest to wyrażenie słuchowe (akustyczne) określone przez częstotliwość drgań źródła dźwięku. Jeżeli źródło np. struna drga z różnymi częstotliwościami, to mówimy, że dźwięk jest złożony z tonów harmonicznych odpowiadających poszczególnym częstotliwościom. Wtedy wysokość dźwięku określa częstotliwość tonu podstawowego – tonu o najniższej częstotliwości
- **Barwa dźwięku** jest określona poprzez wzajemny stosunek natężeń tonu podstawowego i wyższych tonów harmonicznych. Barwa dźwięku określa różne brzmienie instrumentów muzycznych o tym samym tonie podstawowym.

Fale akustyczne

Natężenie fali dźwiękowej: $I = \frac{P}{S} = \frac{1}{2}\rho v \omega^2 s_m^2$

Gdzie: P to szybkość przenoszenia energii (moc), s_m to amplituda fali

$I_0 = 10^{-12}\,\frac{W}{m^2}$ – jest to standardowe natężenie odniesienia

Energia i natężenie fali

Dla małego elementu ośrodka o objętości V i masie m, średnia energia jego ruchu drgającego wynosi:

$$\overline{W} = \frac{1}{2} m \omega^2 A^2$$

Średnia gęstość energii: $\overline{w} = \frac{\overline{W}}{V} = \frac{1}{2}\frac{m}{V}\omega^2 A^2 = \frac{1}{2}\rho\omega^2 A^2$

Natężeniem fali nazywamy średnią wielkość energii przenoszonej przez jednostkowy wycinek powierzchni falowej w jednostce czasu:

$$I = \frac{\overline{W}}{S\Delta t}\left[\frac{W}{m^2}\right]$$

Natężenie fali w odległości r od źródła jest równe:

$$I = \frac{P}{4\pi r^2}\left[\frac{W}{m^2}\right]$$

Moc akustyczna głośnika jest znacznie mniejsza od mocy **elektrycznej** dostarczanej do głośnika, np. ze wzmacniacza. Wynika to z faktu, że typowa sprawność głośnika, czyli stosunek mocy akustycznej do mocy elektrycznej, nie przekracza 5%.

Fale akustyczne

Dla scharakteryzowania głośności dźwięku przyjmuje się nie skalę liniową, lecz logarytmiczną. W tym celu definiuje się tzw. *poziom natężenia,* który mierzymy za pomocą wzoru:

$$K = log\frac{I}{I_0}$$

Jednostką na tej skali jest *bel*. Wzrost natężenia o rząd wielkości, czyli dziesięciokrotny, odpowiada jednemu belowi. Zero na tej skali **umownie** odpowiada natężeniu fali,

$I_0 = 10^{-12}\,\frac{W}{m^2}$ – jest to standardowe natężenie odniesienia

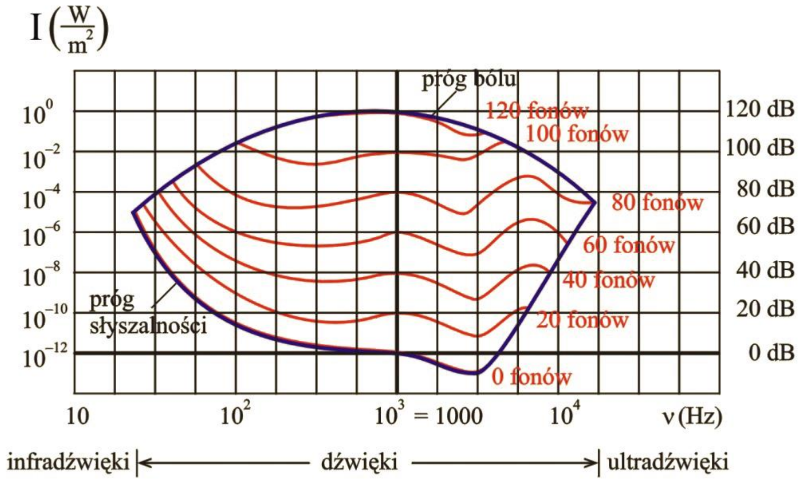
Przyjęto dla tego punktu skali tę właśnie wartość natężenia, ponieważ „średnie ucho” nie reaguje na dźwięki o mniejszym natężeniu. Jest to tzw. *próg słyszalności* lub próg czułości ucha ludzkiego. Ta wartość progowa dotyczy dźwięku o częstotliwości 1000Hz.

Ze względu na to, że jednostka 1 bel jest za duża, stosuje się jednostkę dziesięć razy mniejszą – 1 decybel, w skrócie 1dB. Poziom natężenia mierzony w decybelach wyraża się za pomocą wzoru:

$$L = 10log\frac{I}{I_0}$$

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

Głośność dźwięku. Krzywe izofoniczne



http://ilf.fizyka.pw.edu.pl/podrecznik/3/5/13?type=accessible

Skala decybelowa – przykład

L_{ArqD} – równoważny poziom hałasu wyznaczony dla pory dnia (6:00 – 20:00), wyrażony w decybelach

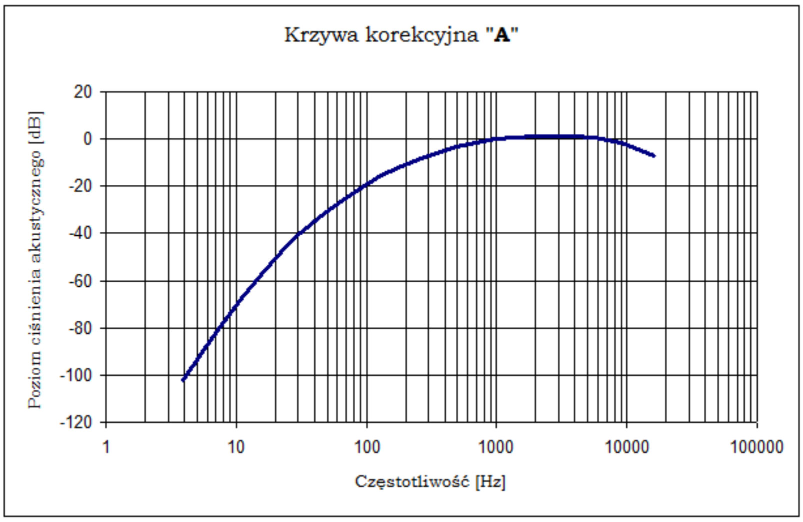
L_{ArqN} – równoważny poziom hałasu wyznaczony dla pory nocy (22:00 – 6:00), wyrażony w decybelach

L_{Arq} < 52dB – mała uciążliwość,

52dB < L_{Arq} < 62dB –średnia uciążliwość

62dB < L_{Arq} < 70dB – duża uciążliwość

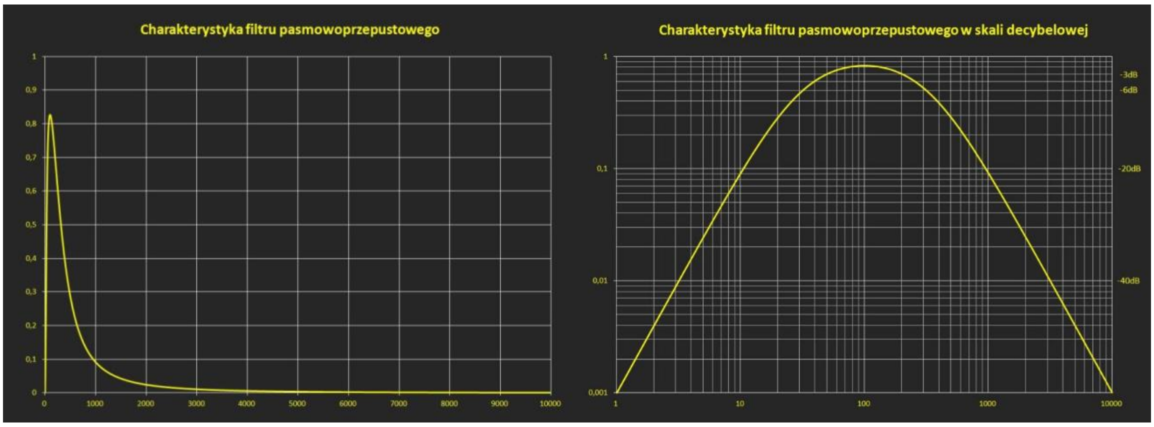
L_{Arq} > 70dB – bardzo duża uciążliwość



https://pma.gliwice.eu/layout/MainDictionary.aspx?src=1

Krzywa słyszenia „A” – korekcja według krzywej słyszenia „A” polega na dodaniu odpowiednich wartości do poziomu ciśnienia w zależności od częstotliwości. Korekcję stosuje się, aby tony o różnej częstotliwości były słyszane z jednakowa głośnością.

Bardzo często decybele stosuje się przy rysowaniu wykresów. Ma to zastosowanie w szczególności wtedy, gdy charakterystyka zmienia się w bardzo szerokim zakresie.



http://extronic.pl/content/6-decybele-w-elektronice

Na osi poziomej jest częstotliwość w zakresie od 0 do 10000Hz, a na osi pionowej zaznaczono tłumienie filtru.

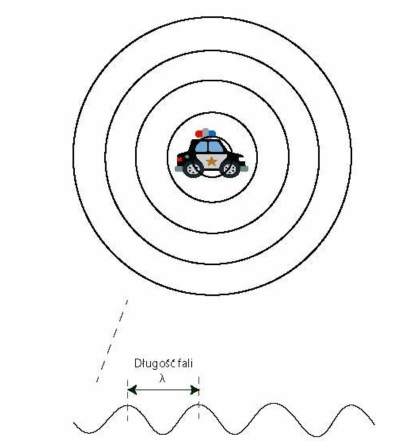
Fale dźwiękowe

Najgłośniejszy dźwięk, jaki wydobył się z naszej planety, wywołał wybuch wulkanu Krakatura w Indonezji pod koniec XIX wieku. Jednak nawet wtedy poziom dźwięku nie przekroczył 350 decybeli – co wystarcztło, by huk słyszalny był z odlełości 3200 kilometrów.

Infradźwięki, czyli dźwięki o częstotliwościach zbyt niskich, by było w stanie wychwycić je ludzkie ucho, wykorzystywane są współcześnie – między innymi przez twórców horrorów.

Efekt Dopplera

- Ruch odbiornika



https://www.medianauka.pl/efekt-Dopplera

Odbiornik zbliża się:

$$f' = f\frac{c+v_0}{c}$$

Odbiornik oddala się:

$$f' = f\frac{c-v_0}{c}$$

Gdzie: f' to częstotliwość odbierana przez odbiornik, f to częstotliwość drgań źródła, c to prędkość fali, v_0 to prędkość odbiornika

- Jednoczesny ruch obserwatora i źródła

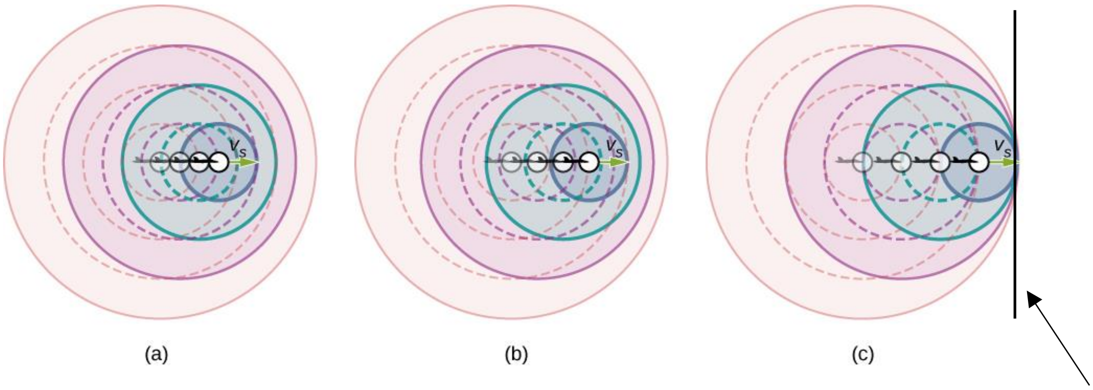
$$f' = f\frac{c \pm v_0}{c \mp v_z}$$

Gdzie: f' to częstotliwość odbierana przez obserwatora, f to częstotliwość drgań źródła, v_0 to prędkość obserwatora, v_z to prędkość źródła

Ograniczenia:

Ani obserwator ni może oddalać się od źródła z prędkością $V_0 > c$ (dźwięk nie dogoni obserwatora), ani źródło przybliżać się z prędkością $Vz > c$ (dźwięk pozostaje za źródłem).

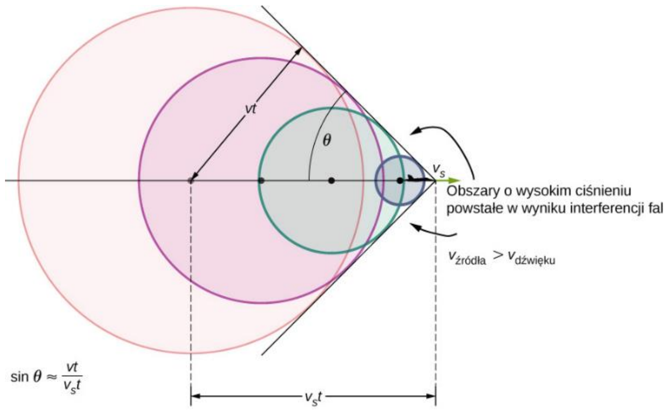
- Liczba Macha. Fala uderzeniowa



https://cnx.org/contents/BFNEpWiL@2/Tom-I-Cz%C4%99%C5%9B%C4%87-2-Fale-i-akustyka-17-D%C5%BAwi%C4%99k-Modu%C5%82-08-Efekt-Dopplera-i-du%C5%BCe-pr%C4%99dko%C5%9Bci

Czoło fali uderzeniowej (obszar kumulacji

Prędkość źródła równa się prędkości fali: Vs = c



https://cnx.org/contents/BFNEpWiL@2/Tom-I-Cz%C4%99%C5%9B%C4%87-2-Fale-i-akustyka-17-D%C5%BAwi%C4%99k-Modu%C5%82-08-Efekt-Dopplera-i-du%C5%BCe-pr%C4%99dko%C5%9Bci

Czoło fali uderzeniowej ma postać stożka.

Połowa kąta rozwarcia stożka czoła fali uderzeniowej – θ

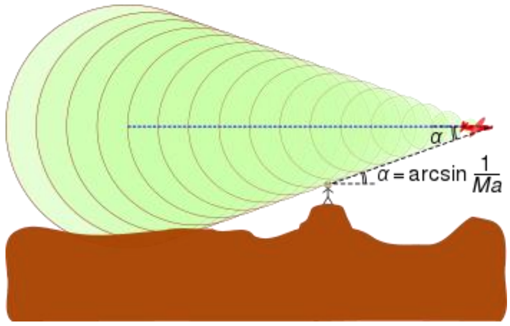
Vs > c

$$sin\theta = \frac{V_S}{c} \qquad\qquad M = \frac{c}{V_S}$$

Przykłady lokalnych fal uderzeniowych wskazują na lokalne przepływy naddźwiękowe na samolotach lecących z dużymi kątami natarcia, ale z prędkościami poddźwiękowymi.

Przykład

Obserwator usłyszał dźwięk samolotu lecącego na wysokości 5000 metrów z prędkością naddźwiękową w momencie gdy samolot oddalił się o 9000 metrów. Z jaką liczbą Macha leci samolot?



Kąt Macha wynosi: $tg\mu = \frac{5000}{9000} = 0{,}5556 \rightarrow \mu = 29{,}05°$

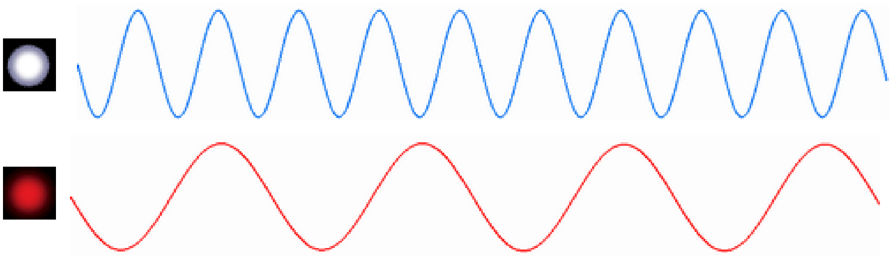
Liczba Macha wynosi: $Ma = \frac{1}{sin\mu} = \frac{1}{sin29{,}05} = 2{,}06$

Uwaga! Powyższe obliczenie jest przybliżone. W rzeczywistości fala zbliżając się do powierzchni Ziemi będzie się zakrzywiać w kierunku ruchu samolotu.

https://pl.wikipedia.org/wiki/Grom_d%C5%BAwi%C4%99kowy

Efekt Dopplera w astronomii

Planety, gwiazdy i galaktyki wysyłają elektromagnetyczne fale świetlne. Czasem same emitują światło (jak w przypadku gwiazd), a czasem tylko odbija się ono od nich (planety). Przypatrzmy się spektrum światła widzialnego.



http://www.if.pw.edu.pl/~mrow/doppler/

Na górze przedstawiona jest fala, wysyłana przez niebiesko-białą gwiazdę (na przykład taką, jak Sirus), natomiast poniżej - przez czerwoną gwiazdę (jak Arcturus).

Jan Worożański