

Mehansko potujoče valovanje

longitudinalno (vzdolžno)

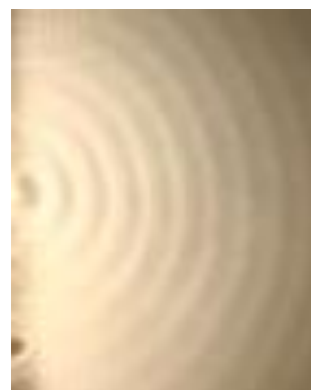
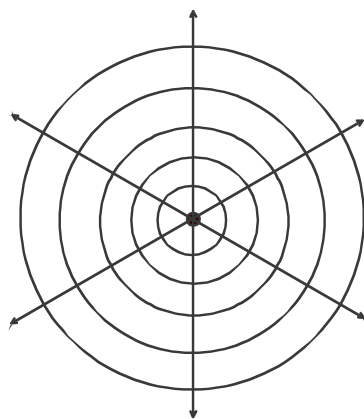


transverzalno (prečno) valovanje



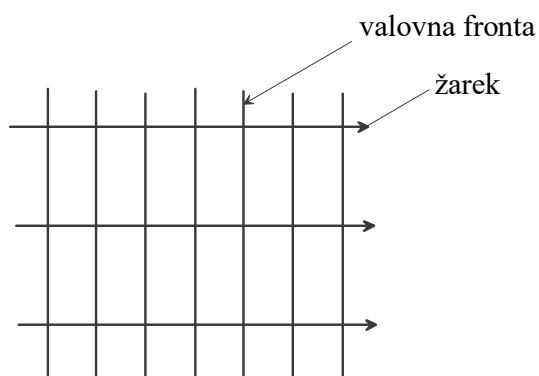
krožno (kroglasto) valovanje

krožno
valovanje



ravno valovanje

ravno
valovanje



Potujoče valovanje po napeti gumijasti vrvi/ struni



transverzalno potujoče valovanje se širi v smeri x-osi po napeti vrvici/struni

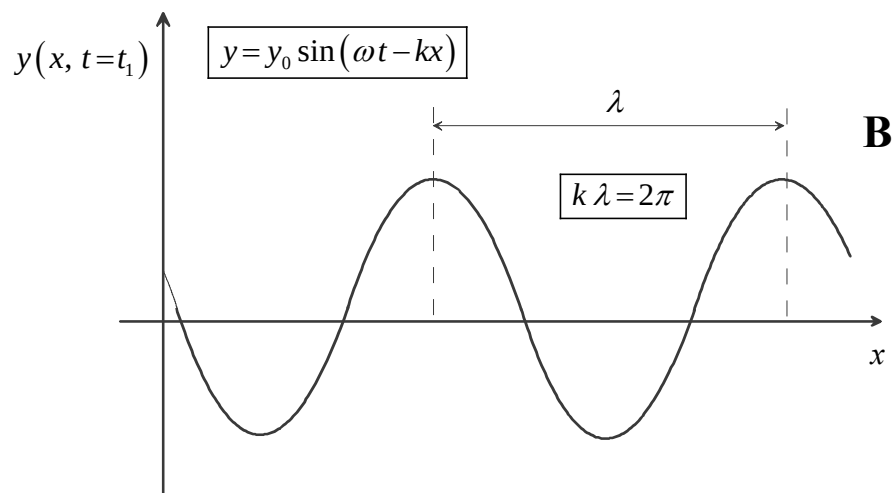
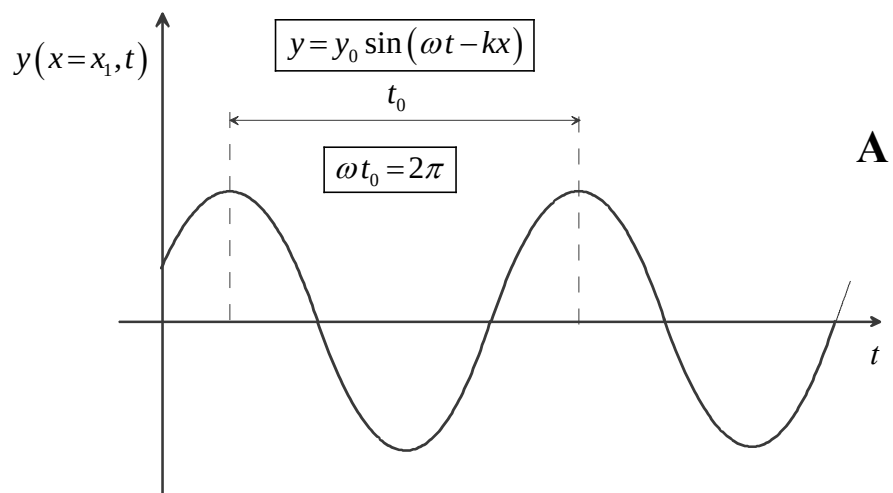
izvor valovanja v prečni smeri (v smer y-osi) s krožno **frekvenco** ω v točki $x = 0$:

$$y(x=0, t) = y_0 \sin(\omega t)$$

časovna zakasnitev motnje na razdalji x : $\Delta t = \frac{x}{c}$

$$y(x, t) = y(0, t - \Delta t) = y_0 \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{c}\right)\right] = y_0 \sin(\omega t - kx)$$

valovno število (vektor v 3-D): $k = \frac{\omega}{c}$



$$\omega t_0 = 2\pi \quad \omega = \frac{2\pi}{t_0} = 2\pi \nu$$

$$k \lambda = 2\pi$$

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

$$c = \nu \lambda$$

Stoječe valovanje napete strune

struna je vpeta na obeh koncih (krajščih)

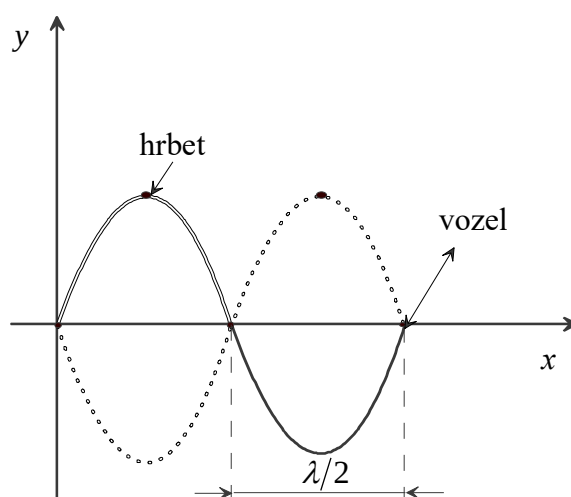
smer proti desni: $y_D(x, t) = y_0 \sin(\omega t - kx)$

odbito valovanje potuje proti levi: $y_L(x, t) = -y_0 \sin(\omega t + kx)$

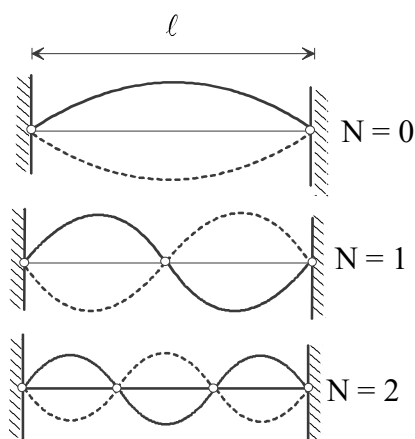
superpozicija (seštevanje) obeh valovanj : **stoječe valovanje**

$$y(x, t) = y_D(x, t) + y_L(x, t) = y_0 \sin(\omega t - kx) - y_0 \sin(\omega t + kx) = 2y_0 \sin kx \cos \omega t$$

amplituda odmika : $A = 2y_0 \sin kx$



različno število vozlov ustreza različnim **lastnim nihanjem** na krajiščih vpete strune



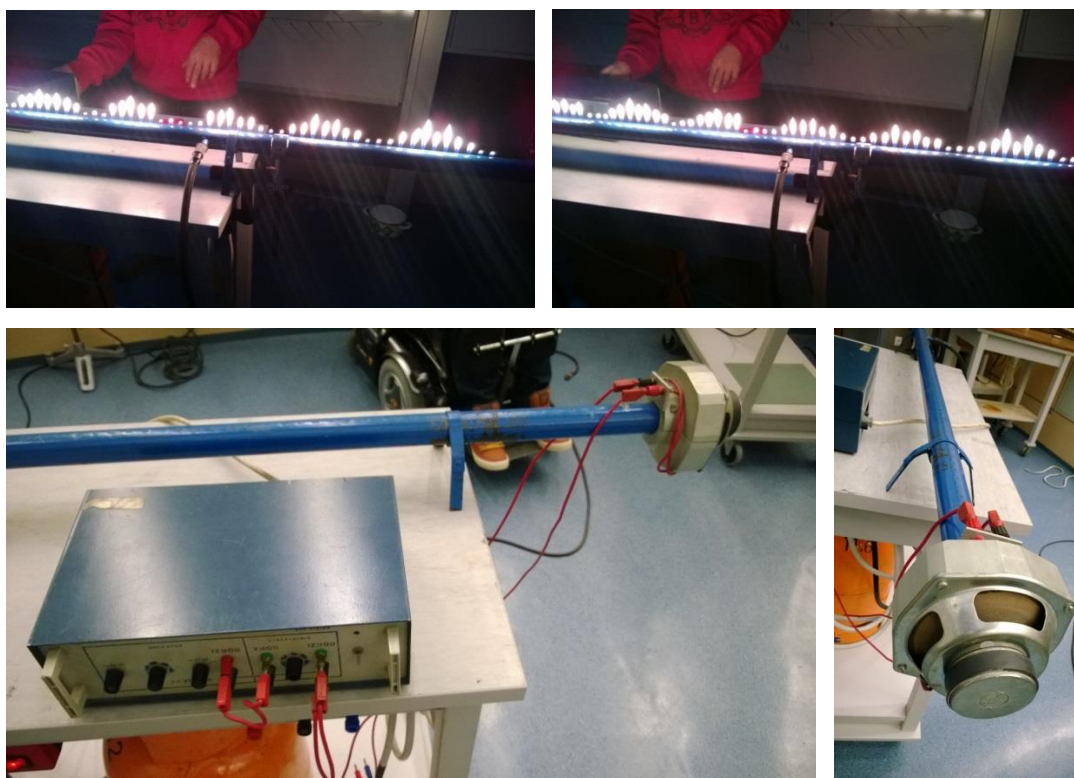
$$\ell = (N+1) \frac{\lambda_N}{2}, \quad N=0,1,2$$

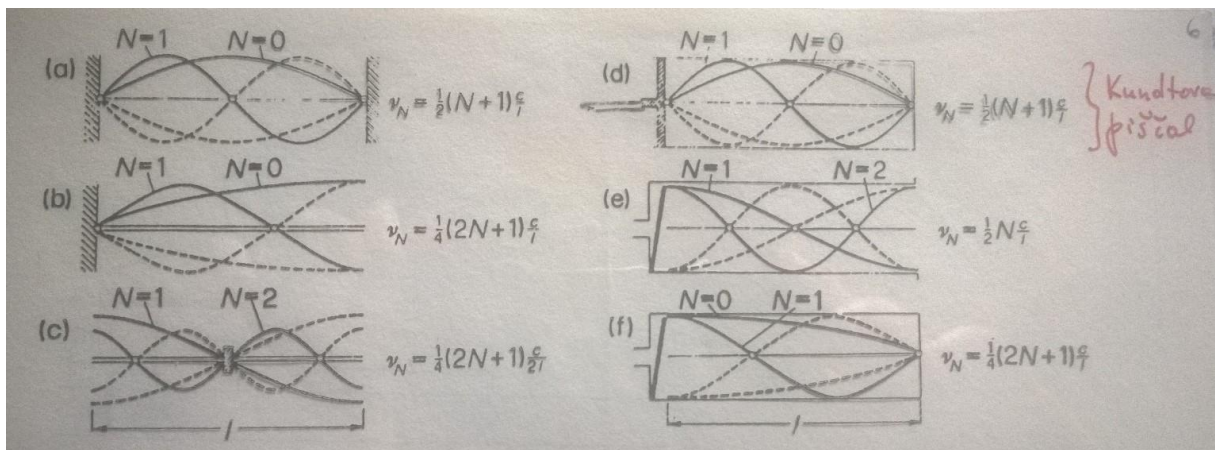
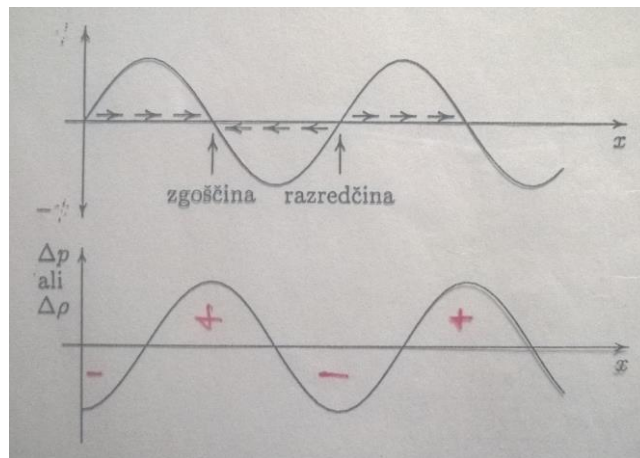
$$\lambda_N = \frac{2\ell}{N+1}$$

$$\nu_N = \frac{c}{\lambda_N} = \frac{c(N+1)}{2\ell}$$

najnižja lastna frekvenca za $N=0$ $\left(\nu_0 = \frac{c}{2\ell} \right)$ = **osnovna lastna frekvenca**

STOJEČE VALOVANJE PRI **ZVOKU** : Kundtova cev s plinskimi plamenčki



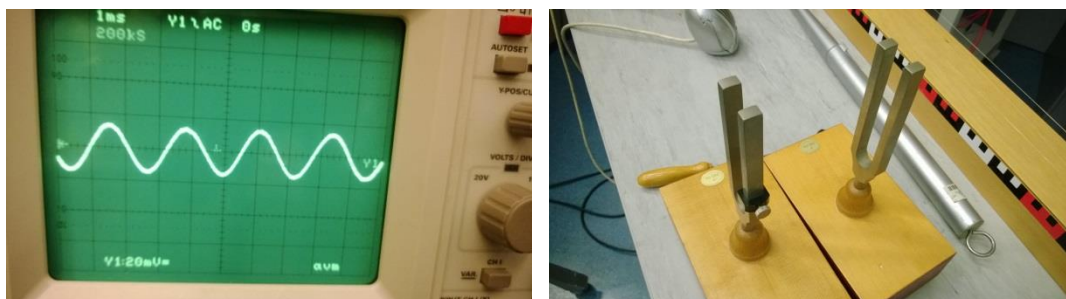


Poskusi:

V VAKUMU NI ZVOKA - zvočilo pod evakuiranim poveznikom



ZVOČILA IN LASTNA NIHANJA - glasbene vilice



OPNA KOT ODDAJNIK IN SPREJEMNIK ZVOKA - dva okrogla okvirja z opnama

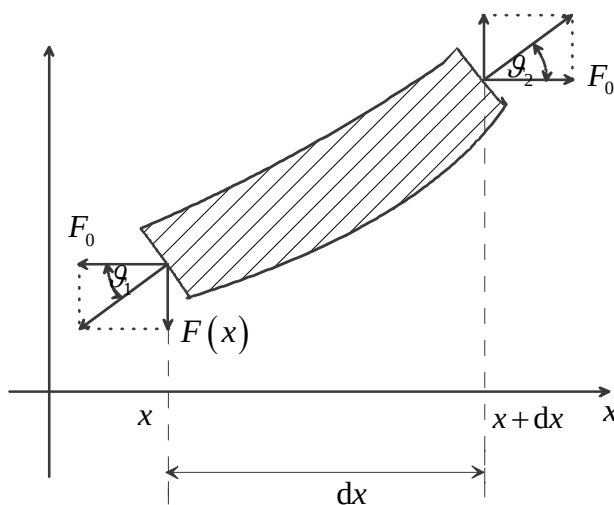


Hitrost širjenja transverzalne motnje po napeti struni (**valovna enačba**)

hitrost širjenja **transverzalne** motnje vzdolž strune, ki je napeta s F_0



transverzalna motnja, ki potuje vzdolž strune, struno deformira: pojavijo se sile in napetosti v transverzalni smeri :



rezultantna sila v smeri y-osi :

$$\begin{aligned} dF &= F(x+dx) - F(x) = F_0 \operatorname{tg} \vartheta_2 - F_0 \operatorname{tg} \vartheta_1 = F_0 (\operatorname{tg} \vartheta_2 - \operatorname{tg} \vartheta_1) = F_0 \frac{\partial (\operatorname{tg} \vartheta)}{\partial x} dx = \\ &= F_0 \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial y}{\partial x} \right) dx = F_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx \end{aligned} \quad \text{upoštevati: } \operatorname{tg} \vartheta = \frac{\partial y}{\partial x}$$

II. Newtonov zakon za gibanje v smeri y-osi :

$$dF = F_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx = dm a \quad dm = \rho S dx \quad a = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

$$F_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} dx = \rho S dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

VALOVNA ENAČBA

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \left(\frac{F_0}{\rho S} \right) = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \left(\frac{F_0}{\rho S} \right) = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

rešitev (**potujoče valovanje**) : $y(x, t) = y_0 \sin(\omega t - kx)$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -y_0 k^2 \sin(\omega t - kx)$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -y_0 \omega^2 \sin(\omega t - kx)$$

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

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \frac{\omega^2}{k^2} = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

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

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \left(\frac{F_0}{\rho S} \right) = \frac{\partial^2 y}{\partial t^2}$$

$$c = \left(\frac{F_0}{\rho S} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Hitrost širjenja motnje v plinu (hitrost zvoka) :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\chi_Q \rho}}$$

χ_Q = stisljivost toplotno izoliranega plina (adiabatna stisljivost)

Izotermna stisljivost idealnega plina:

$$pV = \text{konst.} \Rightarrow p dV + V dp = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{stisljivost } \chi_T = -\frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dp} \right)_T = \frac{1}{p}$$

Adiabatna stisljivost idealnega plina:

$$pV^\kappa = \text{konst.} \Rightarrow p \kappa V^{\kappa-1} dV + V^\kappa dp = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \text{stisljivost } \chi_Q = -\frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dp} \right)_Q = \frac{1}{\kappa p}$$

$$\chi_Q < \chi_T$$

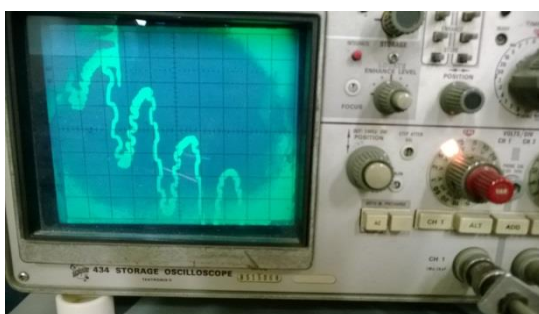
Hitrost širjenja motnje v trdni snovi/kovini (hitrost zvoka v trdni snovi) :

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

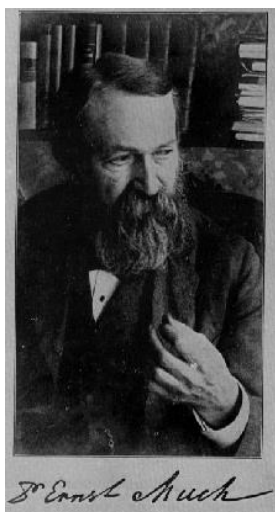
E = prožnostni modul trdne snovi (Youngov modul)

$$\frac{F}{S} = E \frac{\Delta x}{x}$$

Poskus : ŠIRJENJE ZVOKA PO MEDENINASTI PALICI - hitrost potovanja motnje

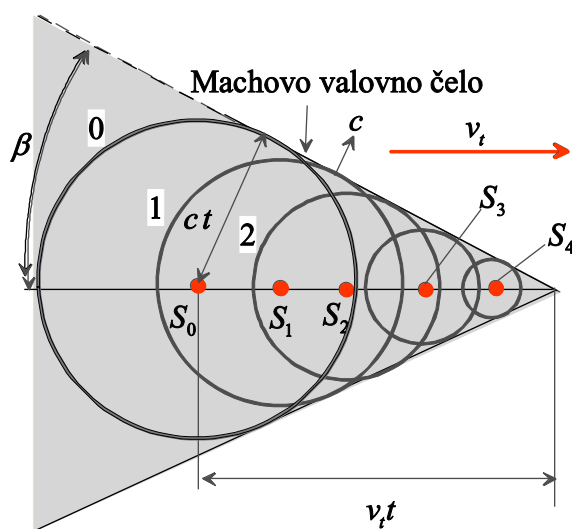


Machovo valovno čelo



Ernst Mach (1838 – 1916). Na Moravskem rojeni fizik in filozof Ernst Mach je preživel svojo mladost v gradiču Slatnik (po domače »Mahovi graščini«) v vasi Veliki Slatnik blizu Novega mesta na Dolenjskem.

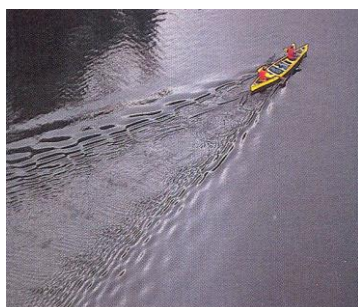
pogoj za pojav : hitrost telesa večja od hitrosti valovanja



$v_t \equiv$ hitrost telesa
 $c \equiv$ hitrost valovanja
 $S_i \equiv$ lega telesa

$$\sin \beta = \frac{ct}{v_t t} = \frac{c}{v_t}$$

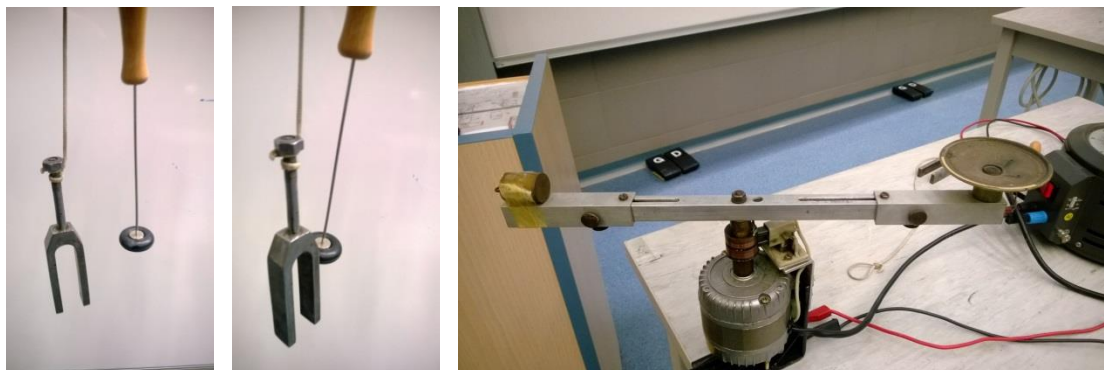
valovna črta potuje po snovi s hitrostjo c pod kotom $(90^\circ - \beta)$ proti hitrosti izvira



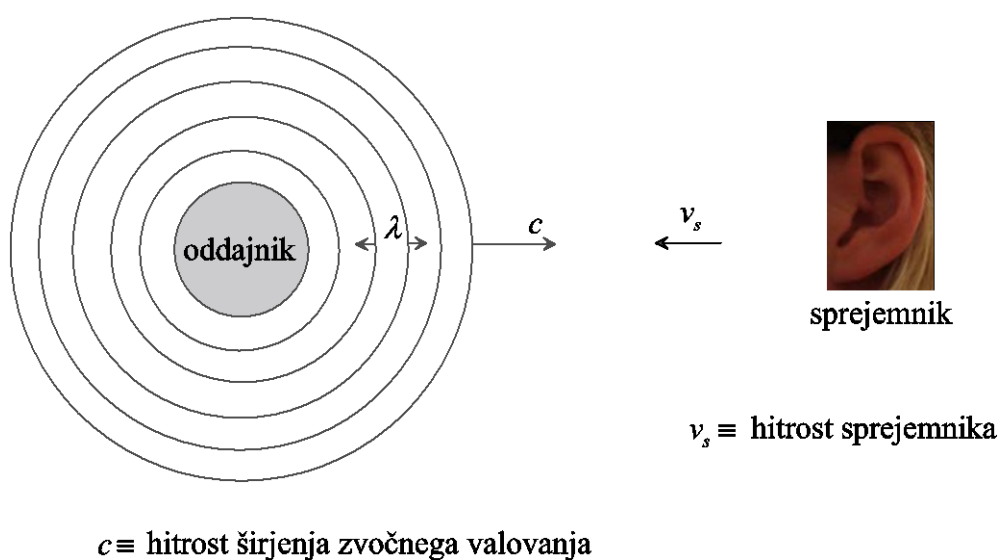
iz knjige Serway

Dopplerjev pojav

Poskus : DOPPLERJEV POJAV – vrteče se glabene vilice, sirena



1. primer: sprejemnik se giblje, oddajnik zvočnega valovanja miruje



hitrost zvočnega valovanja za sprejemnik : $c + v_s$ (**približevanje sprejemnika**)

hitrost zvočnega valovanja za sprejemnik : $c - v_s$ (**oddaljevanje sprejemnika**)

$$c' = c \pm v_s$$

val. dolžina zvočnega valovanja **enaka** za sprejemnik (λ') in oddajnik (λ):

$$\lambda' = \lambda$$

$$\lambda' = \lambda$$

$$c = v \lambda$$

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

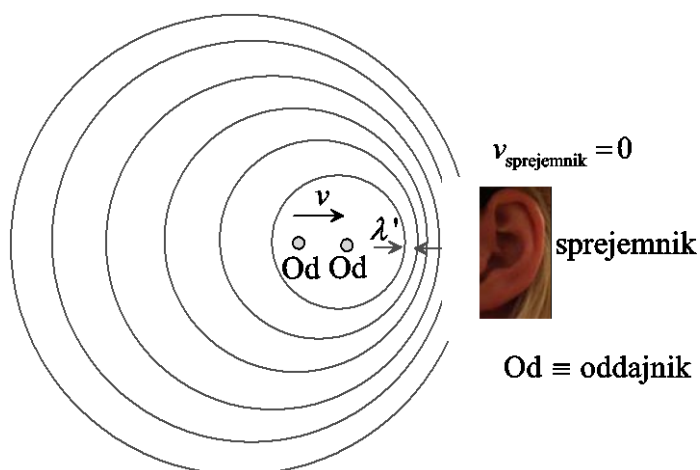
$$\frac{c \pm v_s}{v'} = \frac{c}{v}$$

$$v' = v \left(1 \pm \frac{v_s}{c} \right)$$

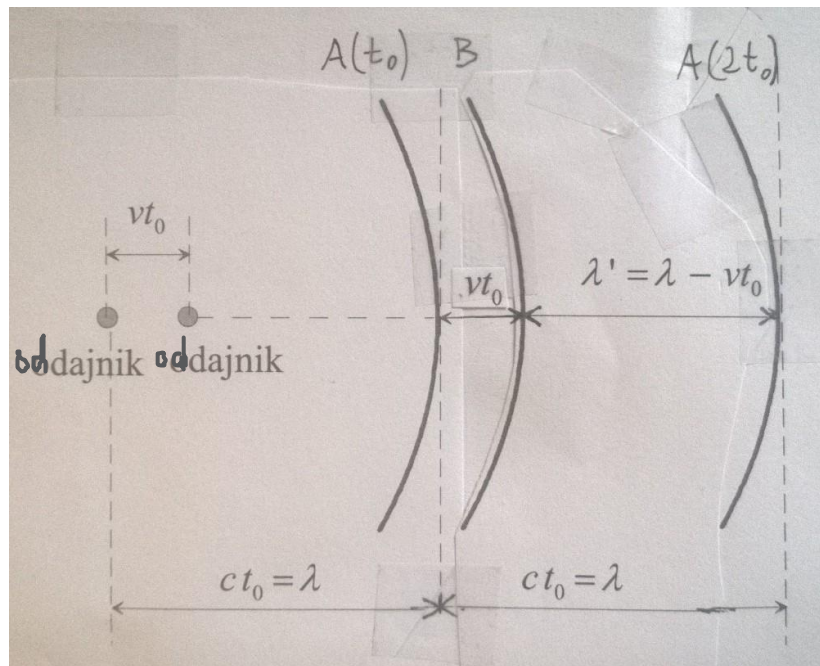
predznak $+$: velja za približevanje sprejemnika
predznak $-$: velja za oddaljevanje sprejemnika

2. primer: sprejemnik miruje, oddajnik zvočnega valovanja se giblje

valovne dolžine **krajše** ali **daljše**.



oddajnik giblje proti mirujočemu sprejemniku : valovne dolžine so **krajše**



$$\lambda' = \lambda - vt_0$$

$$c = \lambda v = \lambda \frac{1}{t_0} \Rightarrow \lambda = ct_0$$

$v = \frac{1}{t_0}$: frekvenca zvoka, ki jo zaznava oddajnik

frekvenco zvoka, ki jo zazna mirujoč sprejemnik proti kateremu se giblje oddajnik s hitrostjo v :

$$v' = \frac{c}{\lambda'} = \frac{c}{\lambda - vt_0} = \frac{c}{\lambda - \frac{v}{v}}$$

$v \equiv$ hitrost oddajnika

$$v' = \frac{v}{\left(1 - \frac{v}{c}\right)}$$

oddajnik giblje stran od mirujočega sprejemnika (transformacija : $v \rightarrow -v$):

$$v' = \frac{v}{\left(1 + \frac{v}{c}\right)}$$

GOSTOTA ENERGIJSKEGA TOKA VALOVANJA

energijski tok

$$P = \frac{dW}{dt} \quad [W]$$

(energija, ki gre skozi dano
ploskev S na enoto časa)

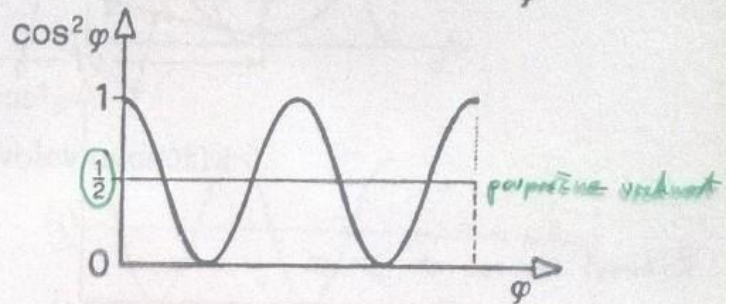
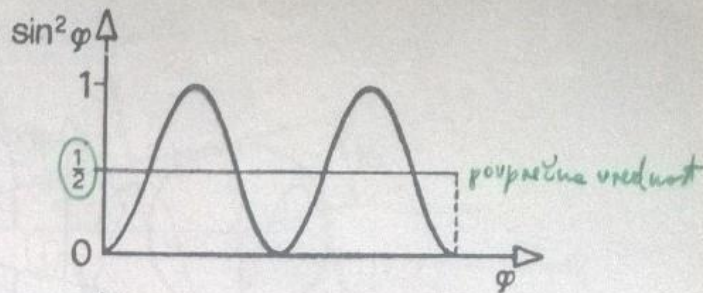
gostota energijskega toka

$$j = \frac{dP}{dS} \quad \left[\frac{W}{m^2}\right]$$

gostota energije

$$w = \frac{dW}{dV} \quad [J/m^3]$$

$$w = \frac{dW}{dV} = \frac{P dt}{S c dt} = \frac{j}{c} \Rightarrow j = w \cdot c$$



Funkciji $\sin^2 \varphi$ in $\cos^2 \varphi$ in njuni
povprečni vrednosti ($1/2$)

$$y = y_0 \sin(\omega t - kx) \Rightarrow v = \frac{dy}{dt} = y_0 \omega \cos(\omega t - kx)$$

$$\bar{w} = \rho \overline{v^2} = \rho y_0^2 \omega^2 \overline{\cos^2(\omega t - kx)} = \frac{1}{2} \rho y_0^2 \omega^2$$

$$\bar{j} = \bar{w} c = \frac{1}{2} \rho c y_0^2 \omega^2$$

Absorpcija zvoka

zvočna energija se pri razširjanju zaradi viskoznosti delno pretvarja v notranjo energijo (se segreje)

Absorbirana gostota zvočnega toka je sorazmerna z upadno gostoto toka ter debelino snovi

$$dj' = -\mu j' dx$$

$$\int_{j_0}^j \frac{dj'}{j'} = -\mu \int_0^x dx$$

$$j = j_0 e^{-\mu x}$$

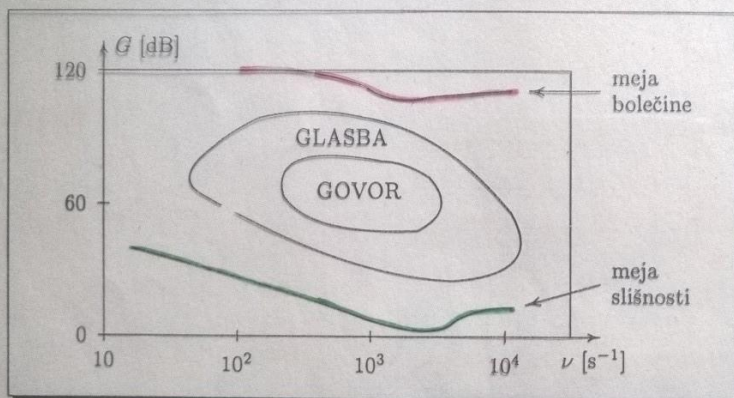
$\mu \equiv$ atenuacijski koeficient

$x_{1/2} \equiv$ razpolovna debelina $\frac{1}{2} = e^{-\mu x_{1/2}} \Rightarrow$

$$x_{1/2} = \frac{\ln 2}{\mu}$$

gostota zvočnega toka pada tudi zaradi razdalje

$$j = \frac{P}{4\pi r^2} e^{-\mu r}$$



Frekvenčna odvisnost glasnosti G , ki je na meji slišnosti in na meji bolečine. Označeni sta tudi področji normalnega govora in glasbe.

$\text{jakost zvoka} \equiv j$ (gostota energijskega toka)

$$\text{glasnost} \equiv G = 10 \log \left(\frac{j}{j^*} \right)$$

$$j^* = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

(najmanjša jakost zvoka, ki jo človek še sliši)