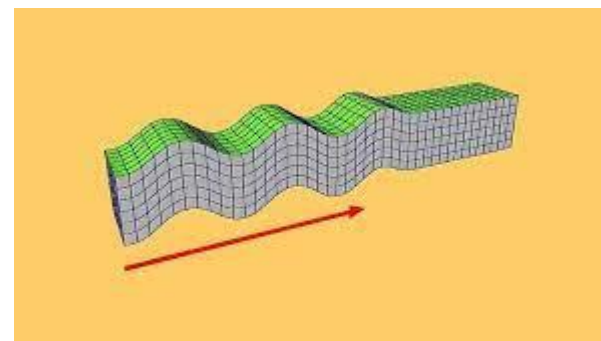
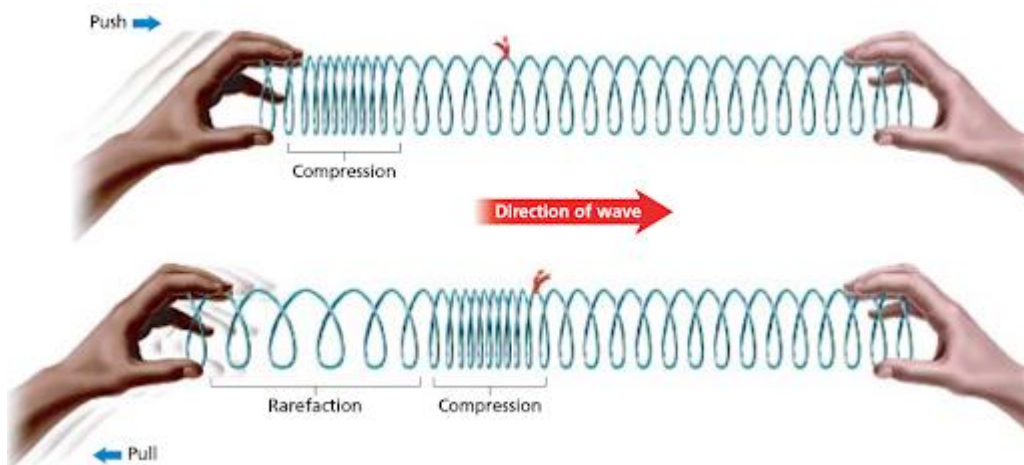
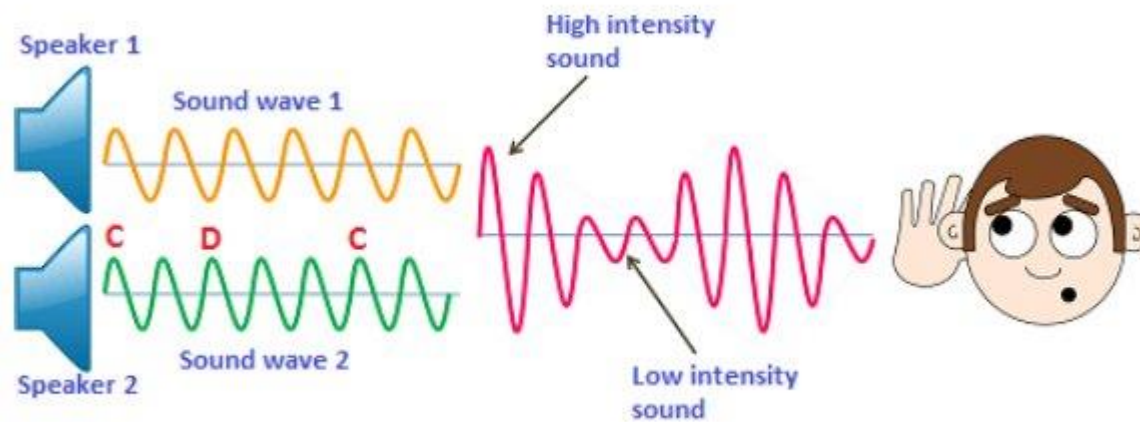


Fizika I

VALNO GIBANJE

Doc. dr. sc. Iva Movre Šapić

VALNO GIBANJE



Valovi

```
graph TD; Valovi --> Mehanički_valovi[Mehanički valovi<br/>(trebaju sredstvo)]; Valovi --> Elektromagnetski_valovi[Elektromagnetski valovi:<br/>(ne trebaju sredstvo)]; Mehanički_valovi --> Transverzalni[Transverzalni:<br/>Valovi na vodi]; Mehanički_valovi --> Longitudinalni[Longitudinalni:<br/>Zvučni valovi]; Elektromagnetski_valovi --> Radio_valovi[Radio valovi]; Elektromagnetski_valovi --> Mikrovalovi[Mikrovalovi]; Elektromagnetski_valovi --> Vidljiva_svetlost[Vidljiva svjetlost]; Elektromagnetski_valovi --> X_zrake[X - zrake];
```

Mehanički valovi
(trebaju sredstvo)

Elektromagnetski valovi:
(ne trebaju sredstvo)

Transverzalni:
Valovi na vodi

Longitudinalni:
Zvučni valovi

Radio valovi
Mikrovalovi
Vidljiva svjetlost
X - zrake

Nastanak vala

- **Elastično sredstvo** – napeta žica, elastična opruga, bilo koja tvar u čvrstom, tekućem ili plinovitom stanju.
- Čvrsta tvar – niz oscilatora uzajamno povezanih elastičnim vezama.
- Fluidi – elastična sila rezultat je razlike tlakova među pojedinim točkama u fluidu.
- **Mehanički val** – jedna čestica elastičnog sredstva se pobudi na titranje te se ta pojava širi duž sredstva. (Energija prelazi s jednog oscilatora na drugi, čestice sredstva ne putuju s valom).
- **Izvor vala** – mjesto na kojem nastaje titranje.
- Svi oscilatori titraju istom frekvencijom i istom amplitudom, ali s različitim fazama.

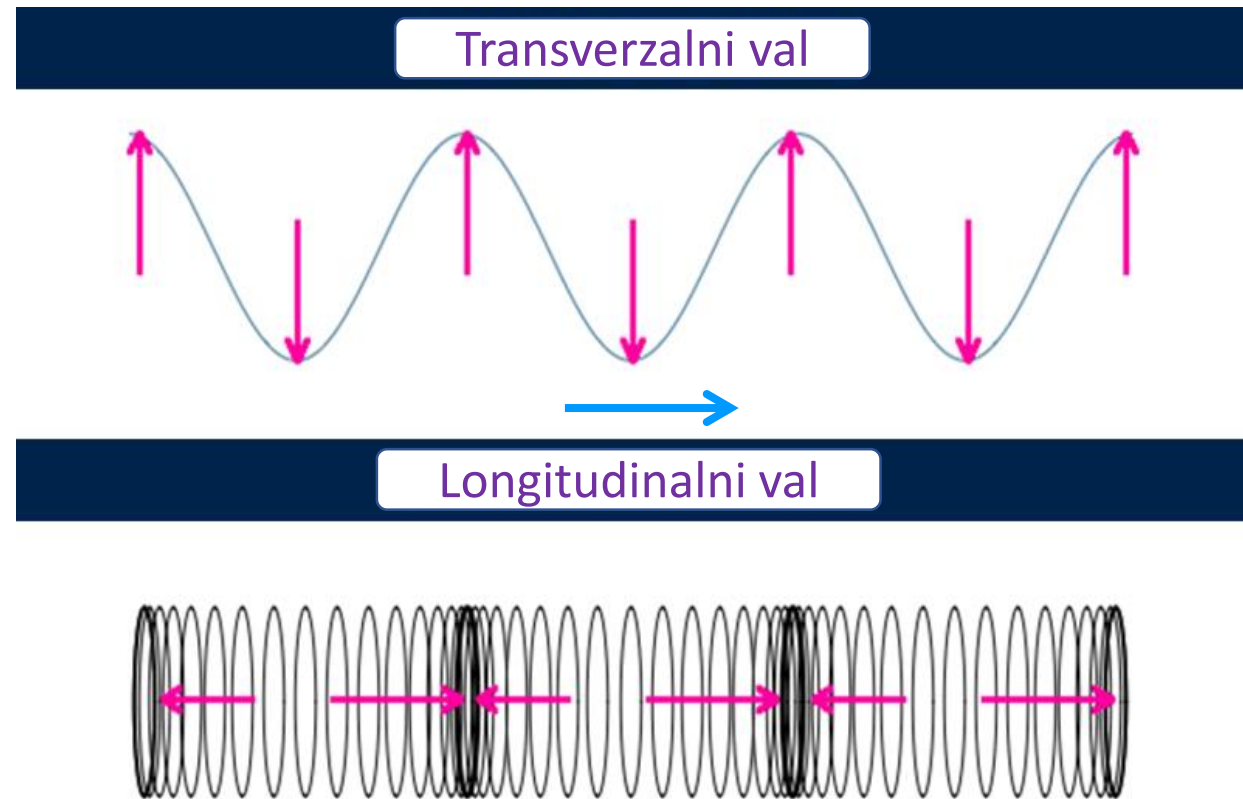
Nastanak vala

Val karakteriziraju dvije brzine:

- Brzina širenja vala, v
- Brzina titranja čestice

Smjerovi im ne moraju biti jednaki.

- Transverzalni val – titranje se odvija na pravcu okomitom na smjer širenja vala (poprečni val)
- Longitudinalni val – titranje se odvija duž pravca širenja vala (uzdužni val)



Periodički valovi

- Izvor vala harmonički titra
- I ostale točke harmonički titraju, kasne u fazi za izvorom

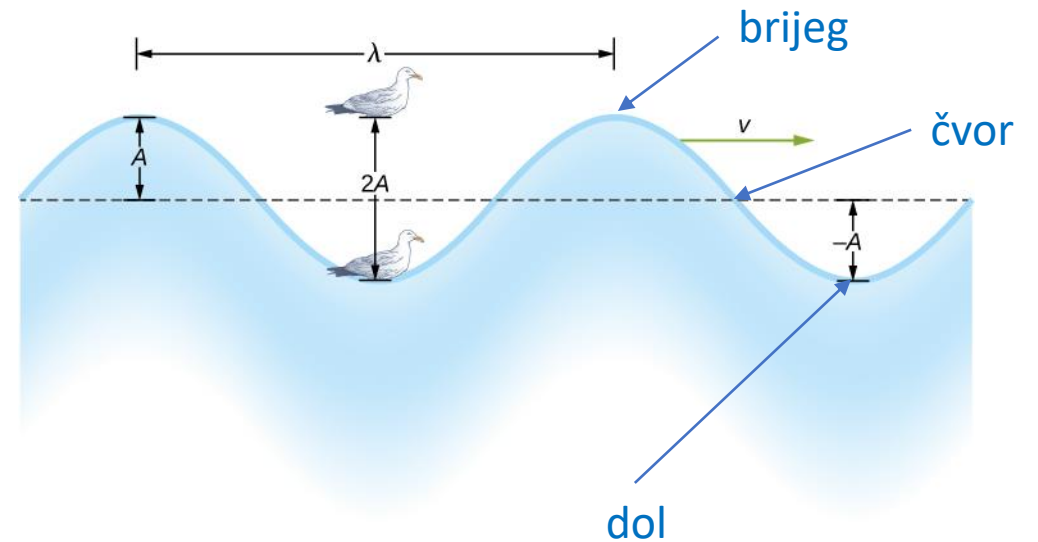
Valna duljina λ = udaljenost dvaju susjednih mjesta u sredstvu koja imaju istu elongaciju i fazu.

Period vala T = vrijeme potrebno za jedan cijeli titraj

Brzina širenja vala v :

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

$$v = \lambda f$$



A – amplituda čestice sredstva

Jednadžba vala u jednoj dimenziji

- Kružna frekvencija: $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$
- Ravnotežni položaj žice je duž x -osi
- Izvor vala je u ishodištu; val putuje u + smjeru x -osi
- Transverzalni val → čestica s ravnotežnim položajem na x -osi otkloni se za neku udaljenost $y(s)$ po y -osi:

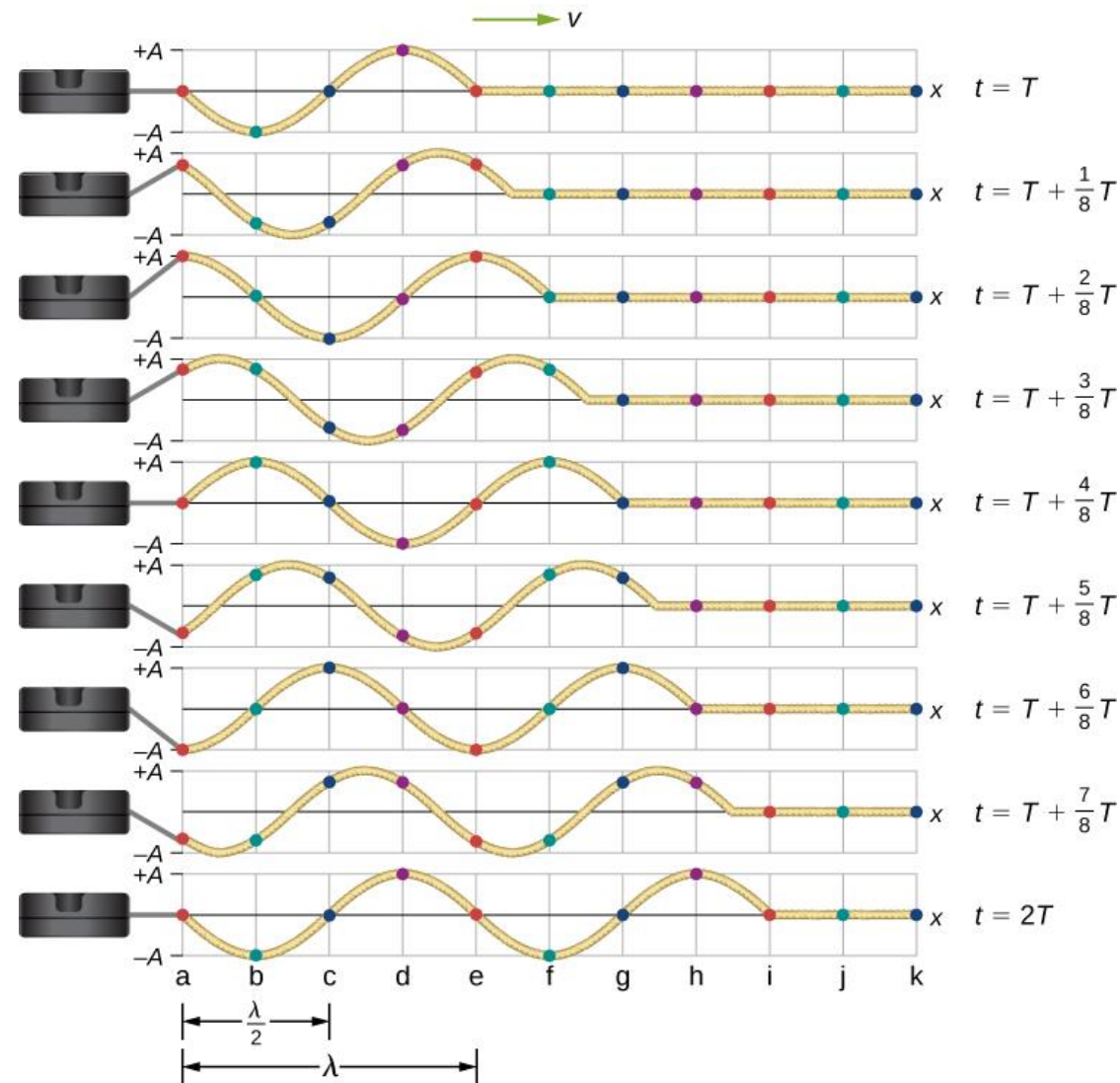
$$y(x, t) = s(x, t) = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right)$$

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

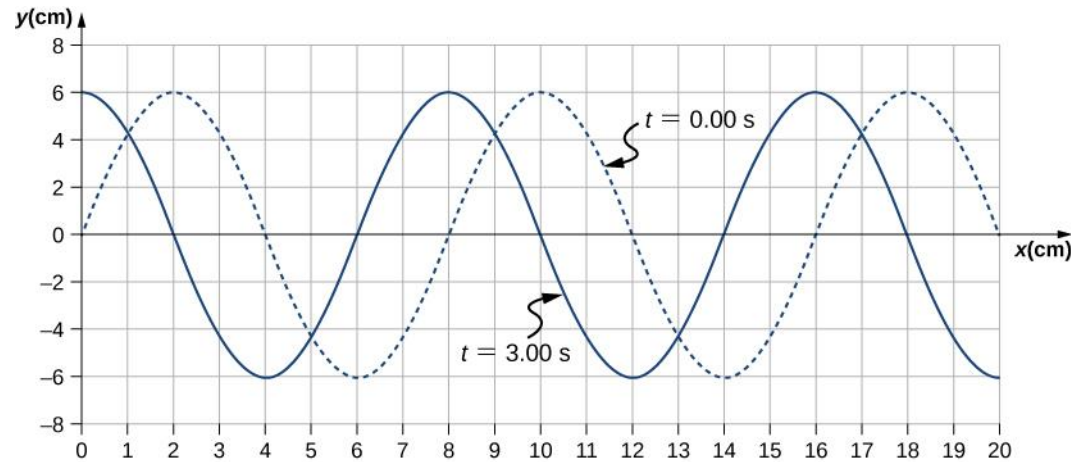
Valni broj:

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

faza

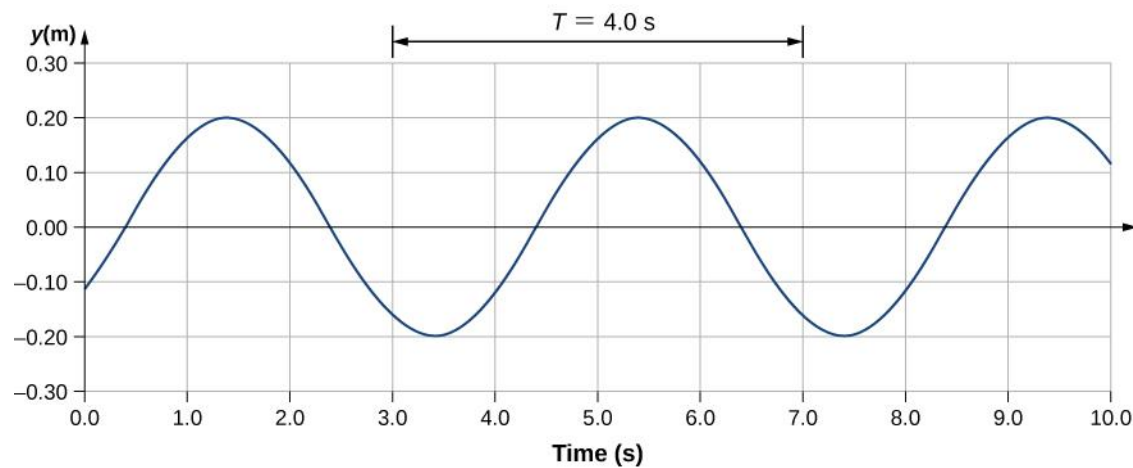


Jednadžba vala u jednoj dimenziji



- Ovisnost elongacije y ($= s$) o **položaju** u određenom trenutku
- Npr. , u trenutku $t = 0$ i $t = 3$ s :

$$s(x, t = 0)$$
$$s(x, t = 3 \text{ s})$$



- Ovisnost elongacije y ($= s$) o **vremenu** za određeni položaj
- Npr. , $x = 0,6$ m:

$$s(x = 0,6 \text{ m}, t)$$

Brzina širenja vala

- Brzina širenja vala ovisi o vrsti i svojstvima elastičnog sredstva:

- Transverzalni val na žici

- $$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{F}{\rho S}}$$

F – sila kojom je napeta žica

μ – masa žice m podijeljena s njenom duljinom L

- Longitudinalni val u čvrstom elastičnom sredstvu

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

E – Youngov modul elastičnosti

ρ – gustoća sredstva

- Longitudinalni val u plinu (npr. valovi zvuka)

- $$v = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}} = \sqrt{\frac{\kappa \rho T}{M}}$$

p – tlak plina

M – molarna masa

κ – adijabatski koeficijent plina

Energija i intenzitet vala

- Primjer: Transverzalni val na žici

$$dm = \rho S dx$$

- Energija takvog djelića mase:

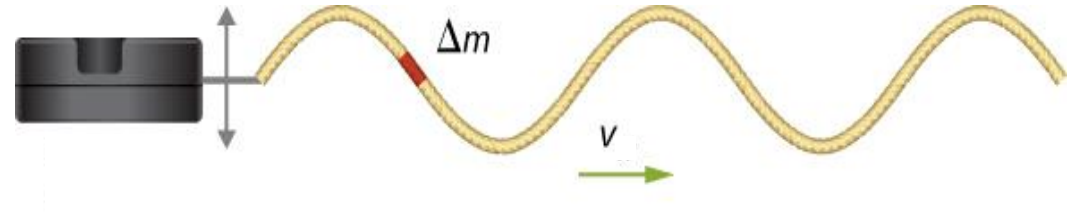
$$dE = \frac{1}{2} dm \omega^2 A^2$$

- Snaga = energija koja se u jedinici vremena prenese kroz presjek žice:

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 S v$$

- Intenzitet – omjer snage i površine presjeka:

$$I = \frac{dP}{dS} = \frac{1}{2} \rho \omega^2 A^2 v$$

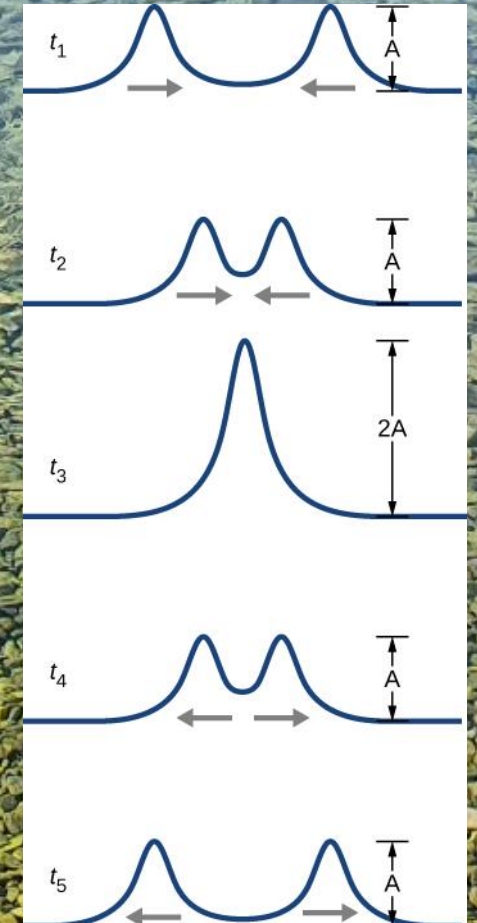


Interferencija valova

- Interferencija se javlja kad na isto mjesto na elastičnom sredstvu stižu dva (ili više) vala iz različitih izvora.
- Mehanički valovi su linearni valovi pa se primjenjuje princip superpozicije:

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

- Ukupni otklon čestice sredstva (u svakom trenutku) je zbroj otklona koje bi čestica imala zbog svakog pojedinog vala.

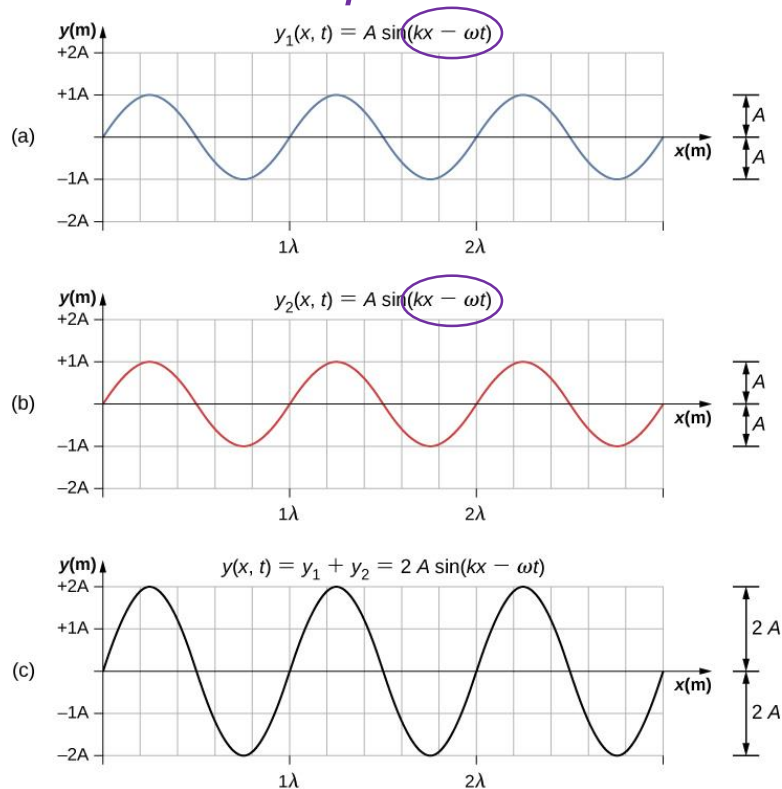


Interferencija valova

Dva vala, jednakih frekvencija, amplituda i valnog broja

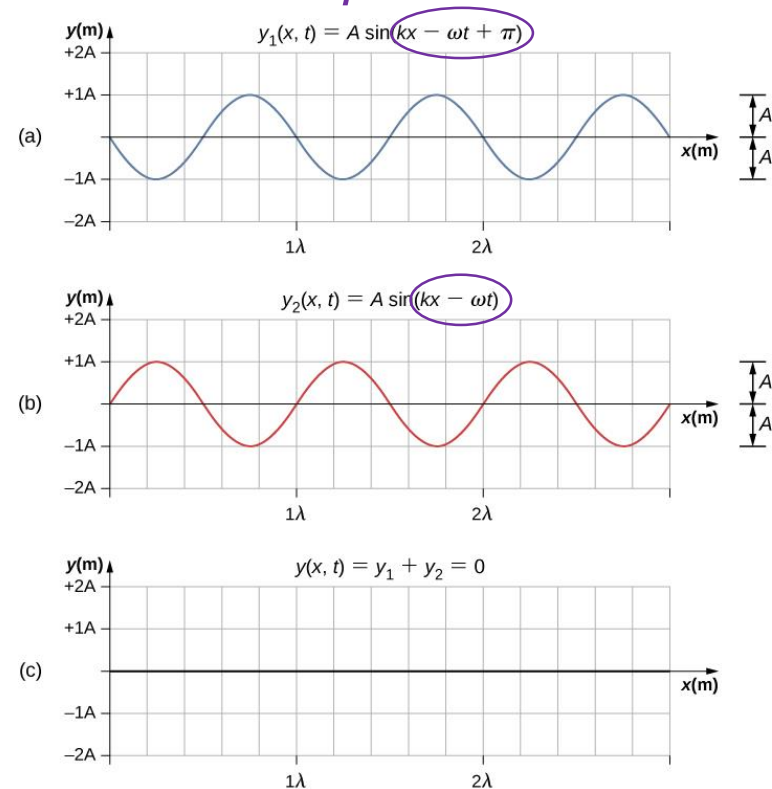
Konstruktivna interferencija

$$\Delta\varphi = 0$$



Destruktivna interferencija

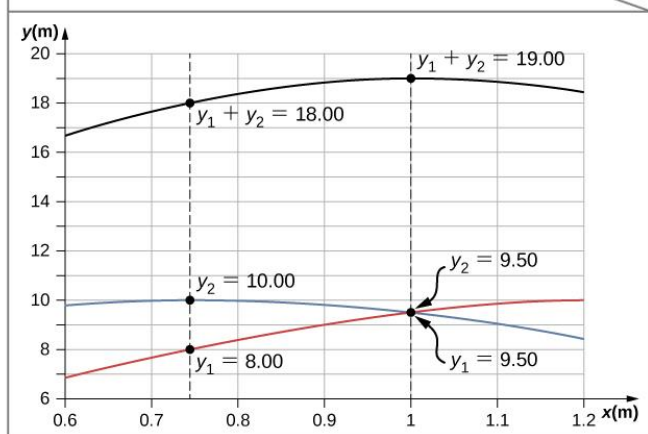
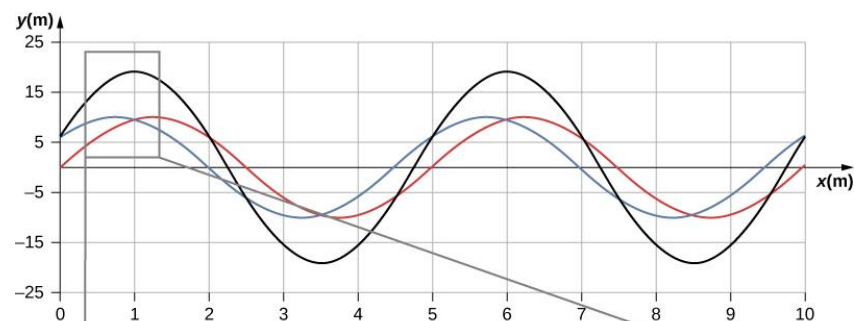
$$\Delta\varphi = \pi$$



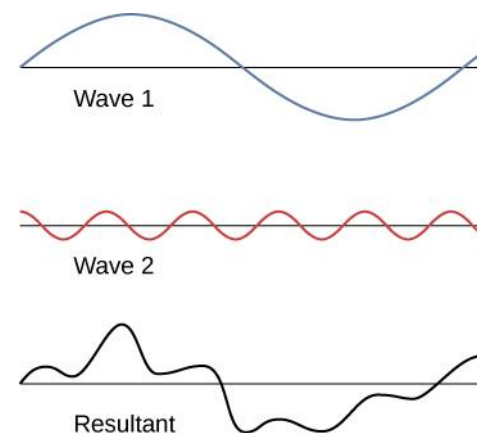
Interferencija valova

Dva vala, jednakih frekvencija, amplituda i
valnog broja

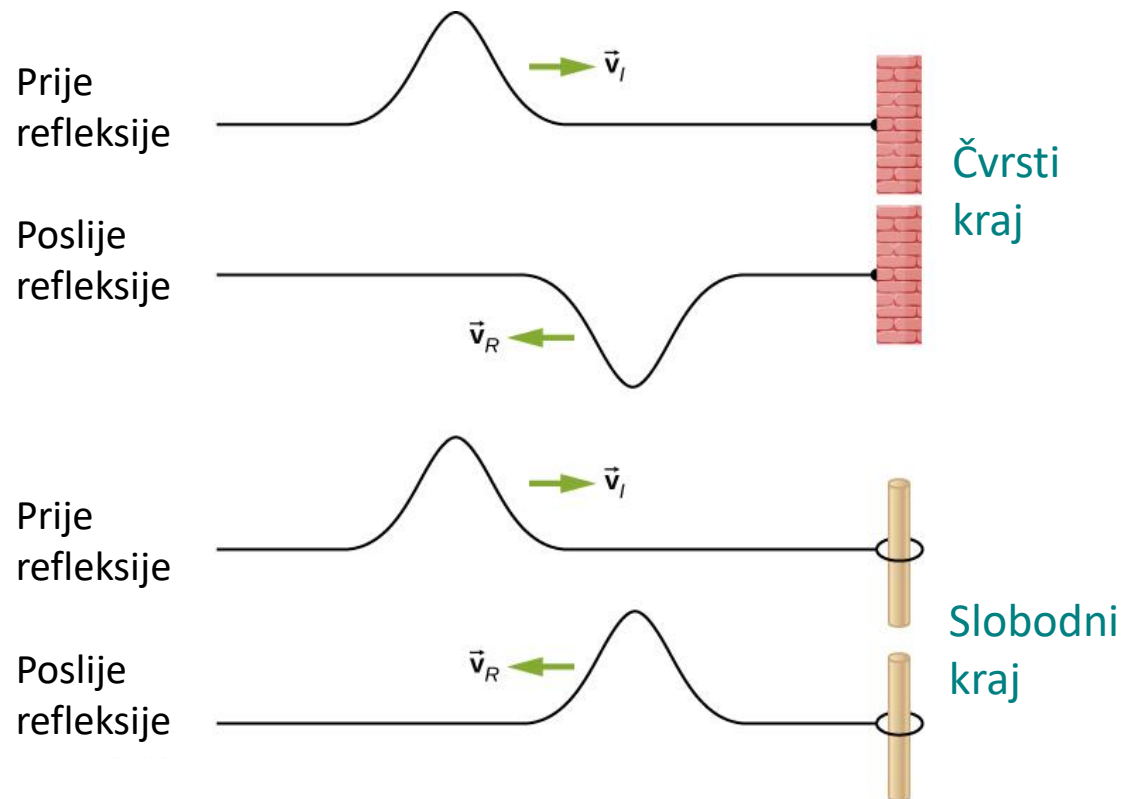
$$\Delta\varphi \neq 0, \pi$$



Dva vala, različitih frekvencija i
amplituda



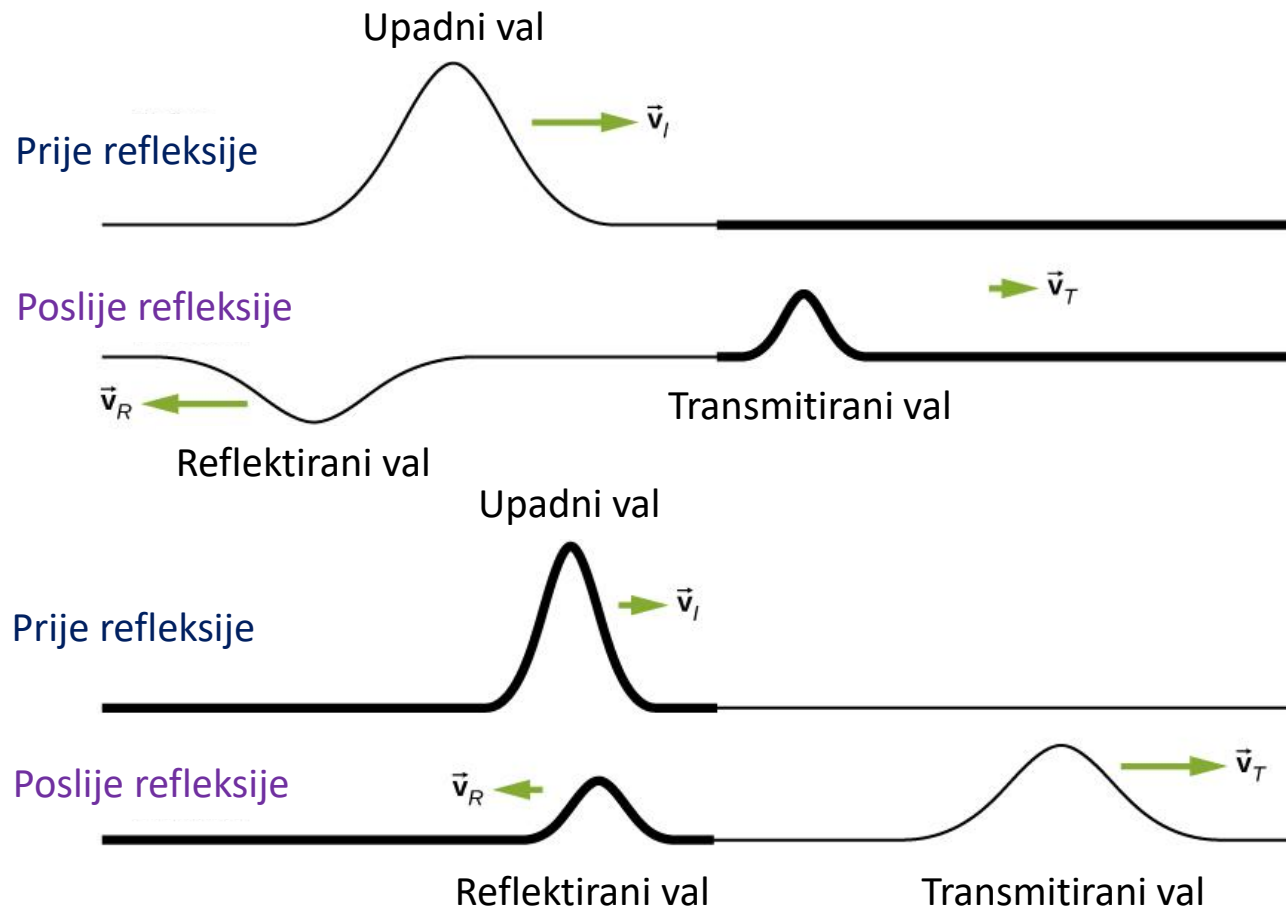
Refleksija i transmisija valova na granici sredstava



- Refleksija na čvrstom kraju:
Dolazi do skoka u fazi za π –
brijeg se vraća kao dol
- Refleksija na slobodnom kraju:
nema skoka u fazi

Refleksija i transmisija valova na granici sredstava

Val prelazi na žicu od drugog materijala, tj. žice su različitih linearnih gustoća μ



Val dolazi sa žice male linearne gustoće na žicu velike linearne gustoće:
reflektirani val ima skok u fazi za π ;
transmitirani val je u fazi s upadnim valom

Val dolazi sa žice velike linearne gustoće na žicu male linearne gustoće:
reflektirani i transmitirani val su u fazi s upadnim valom

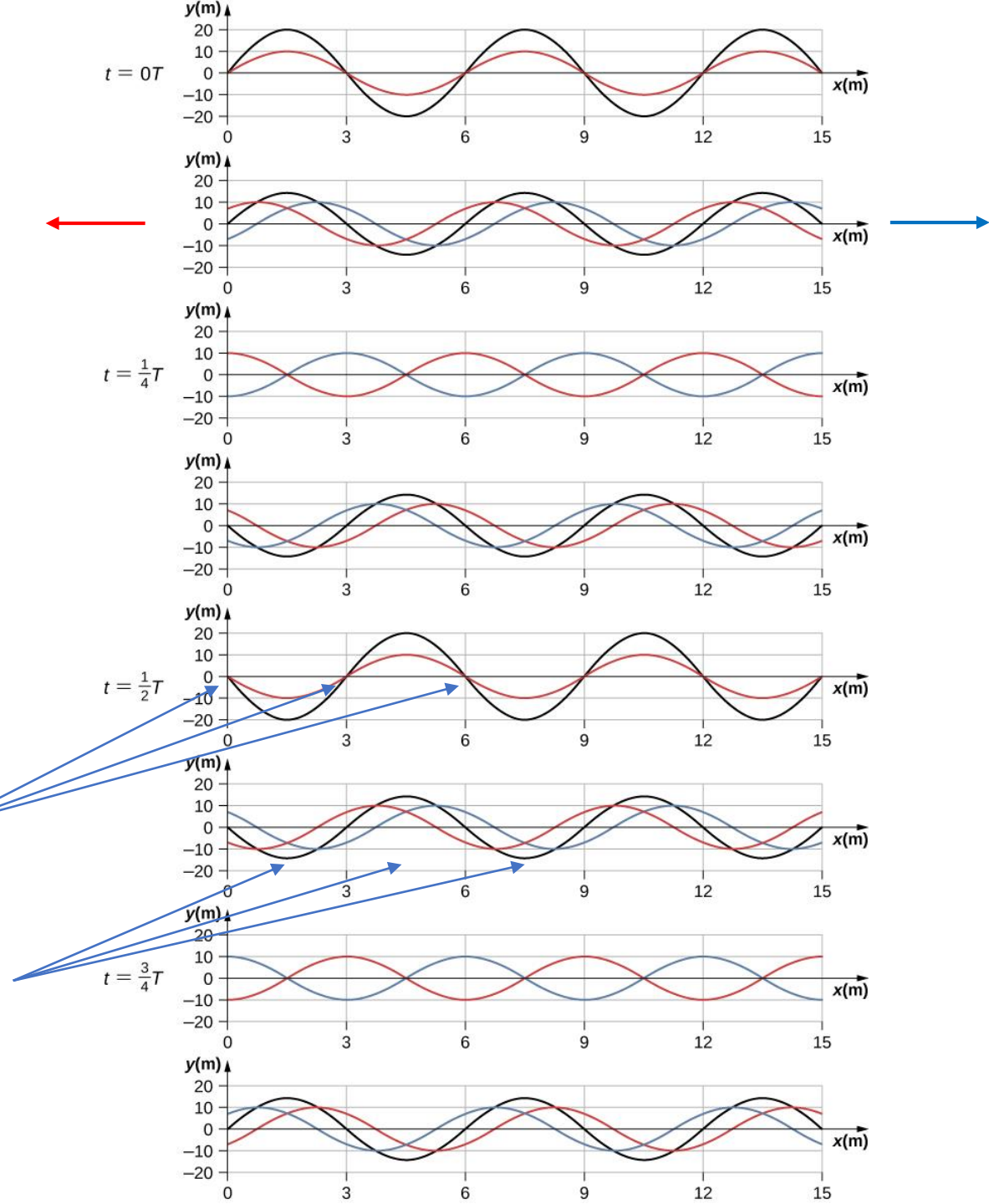
Kad žice imaju istu napetost, brzina je veća na žici manje linearne gustoće.

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

Stojni val

- Nastaje kad na omeđenom sredstvu interferiraju dva vala: upadni i reflektirani (imaju iste amplitude i valne duljine)
 - Crveni ide u $-x$ smjeru; plavi u $+x$
 - Crno je prikazan zbroj
- Suprotnost putujućem valu.
- Svaka točka titra sa svojom vlastitom amplitudom:
- *Čvorovi stojnog vala* – točke kojima je amplituda jednaka nuli, nikada ne titraju!
- *Trbusi stojnog vala* – točke koje imaju najveću amplitudu

<https://www.youtube.com/watch?v=DUPLRe5PHvE>



Stojni val

Stojni val možemo opisati zbrajanjem upadnog vala koji putuje udesno i

$$\vec{s} = A \sin(\omega t - kx)$$

reflektiranog vala na čvrstom kraju u točki $x = 0$ (putuje ulijevo)

$$\vec{\tilde{s}} = -A \sin(\omega t + kx)$$

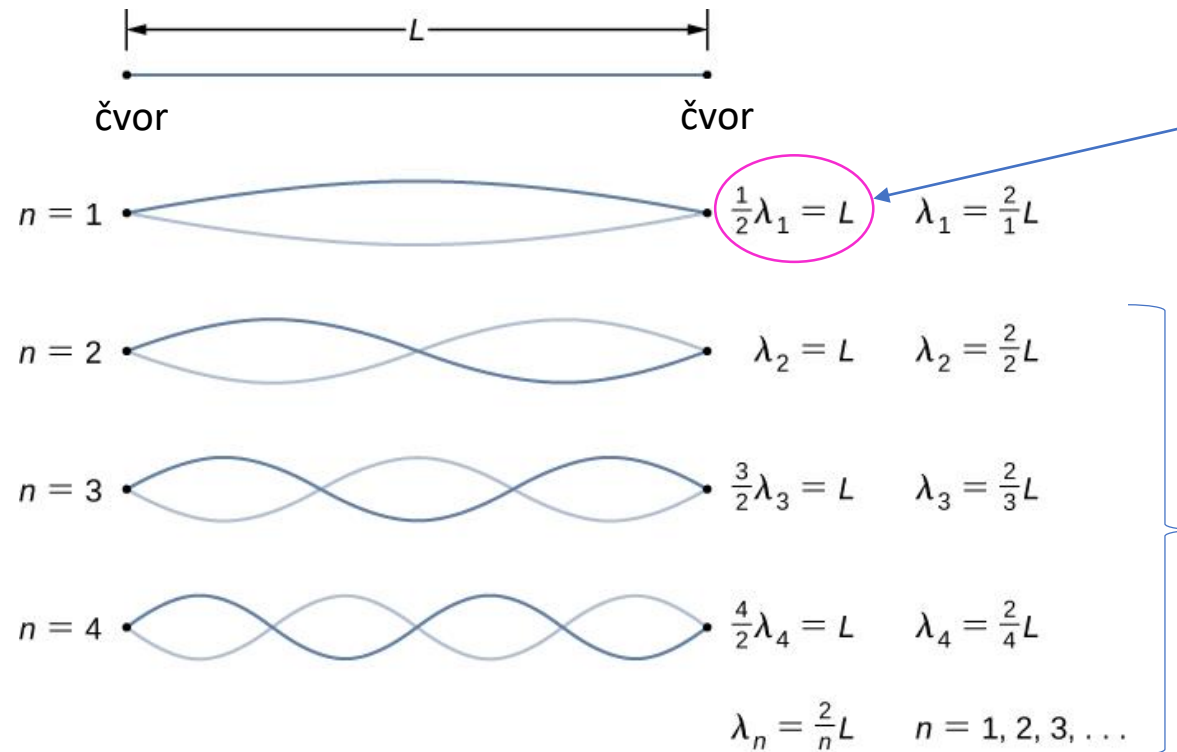
$$s_{ST.VAL} = \vec{s} + \vec{\tilde{s}} = -2A \sin kx \cos \omega t$$

- Amplituda je maksimalna za $\sin kx = 1$;
- Čvorovi: $kx = n\pi$; n – cijeli broj

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

Stojni val za žicu duljine L učvršćenu na oba kraja

- Moguća su sva ona titranja pri kojima su na oba kraja čvorovi



Za najveću moguću valnu duljinu duljina žice odgovara polovici valne duljine

Ima i drugih titranja, onih s manjim valnim duljinama – viši harmonici

Za njih vrijedi:

$$L = n \frac{\lambda}{2} \text{ ili } \lambda = \frac{2L}{n}$$

- Iz $v = \lambda f$ možemo naći i odgovarajuće frekvencije:

$$f = n \frac{v}{2L} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Valovi zvuka

- Longitudinalni valovi u zraku (najčešće sredstvo)

<https://www.youtube.com/watch?v=17tqXgvCN0E>

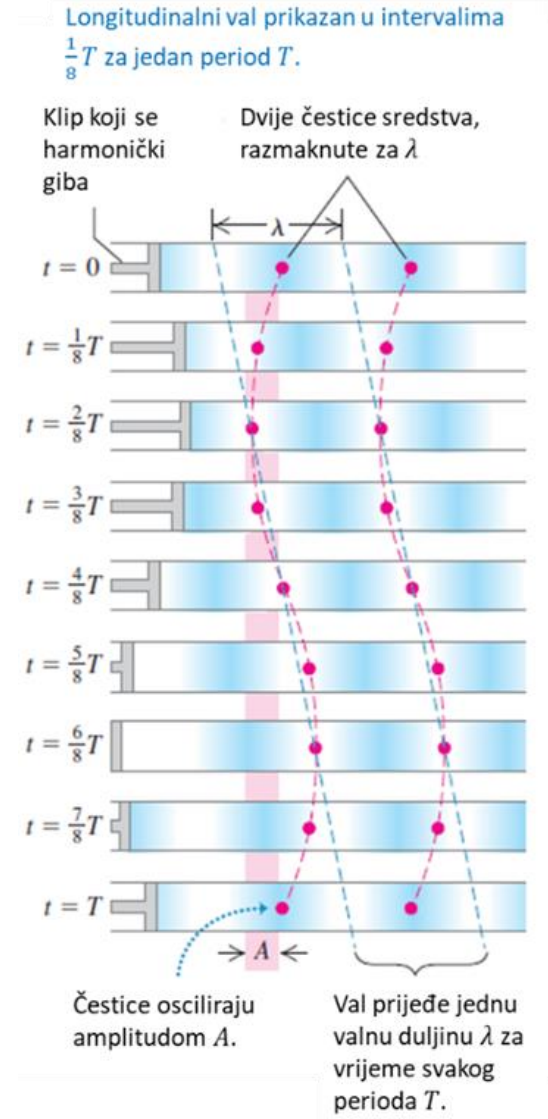
- Frekvencije koje čujemo: 16 – 20000 Hz
- Brzina zvuka: čvrsto elastično sredstvo, plin

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

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

Sredstvo (0°C)	v / ms^{-1}
zrak	331
kisik	316
vodik	1290

Sredstvo (20°C)	v / ms^{-1}
voda	1480
etanol	1160
željezo	5950



Valovi zvuka

Intenzitet zvuka – mjera jakosti zvuka

$$I = \frac{P}{S} \left(\propto \frac{1}{r^2} \right) \text{ [W/m}^2\text{]}$$

- Raspon intenziteta zvuka koje ljudsko uho čuje je jako velik:
 - $I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ najmanji intenzitet koji ljudsko uho može raspoznati
 - $I \approx 1 \text{ W/m}^2$ granica boli
- Praktičnija je skala ako se uzme logaritam omjera stvarnog i minimalnog intenziteta (jedinica bel, B; još praktičnije dB)

$$\frac{I}{\text{dB}} = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0}$$

Vrsta zvuka	Intenzitet zvuka / dB
šapat	20
Tihi radio u kući	40
razgovor	60
Prometna ulica	70
Glasni radio	80
Sirena policijskog automobila	100
Koncert; pneumatska bušilica	120
Polijetanje aviona	140
Pucanje bubnjića	160

Dopplerov efekt

Promjena frekvencije zvuka zbog gibanja izvora zvuka (v_i) ili opažača (v_o) (detektora)

$$f_o = f_i \frac{v \pm v_o}{v \mp v_i}$$

približavanje

