



Fakultet elektrotehnike, strojarstva i brodogradnje

Razlikovni studiji (910/920/930/940/950)

Fizika 2

Predavanje 4

Stojni valovi. Valovi zvuka

Dr. sc. Damir Lelas

(Damir.Lelas@fesb.hr,

damir.lelas@cern.ch)

Priča

- ◆ Jeste li se ikad zapitali zašto klavir ima ovakav čudan oblik? Ne radi se samo o tradiciji, već zato postoji i fizikalni razlog, povezan sa stojnim valovima.



- ◆ Kako to gitarist Carlos Santana koristeći pojavu stojnih valova proizvodi tonove različitih frekvencija. Zašto Santana da bi proizveo viši ton mora pritisnuti žicu gitare tako da joj skрати dužinu.

Kakva je to veza između muzike i stojih valova?



Danas ćemo raditi:

(V. Henč-Bartolić i P. Kulišić: "Valovi i optika", poglavlje 2)

- ◆ Valni paket, grupna brzina
- ◆ Refleksija i transmisija valova
- ◆ Stojni valovi
 - stojni val na žici
- ◆ Valovi zvuka
- ◆ Jakost i glasnoća zvuka
- ◆ Longitudinalni stojni valovi

Valni paket. Grupna i fazna brzina (1)

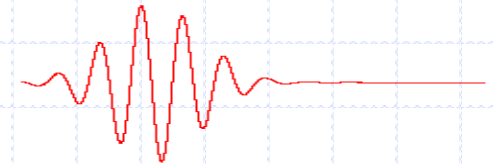
- ◆ Harmonički val je neograničen u prostoru, nije lokaliziran.
- ◆ Valni paket (puls) je valno gibanje lokalizirano u prostoru.
- ◆ Valni paket se može dobiti superpozicijom jednostavnih harmoničkih valova različitih amplituda i valnih duljina odnosno frekvencija.
- ◆ Fazna brzina jednostavnih harmoničkih valova ne ovisi o valnoj duljini $v_f \neq f(\lambda)$ – nedisperzivni valovi koji se šire u nedisperzivnim sredinama.
- ◆ U disperzivnim sredinama šire se disperzivni valovi kod kojih fazna brzina ovisi o valnoj duljini $v_f = f(\lambda)$
- ◆ Grupna brzina je brzina kojom putuje valni paket, koji je u načelu dan superpozicijom velikog broja jednostavnih harmoničkih valova.
- ◆ Energija valnog paketa se giba grupnom brzinom.

Valni paket. Grupna i fazna brzina (2)

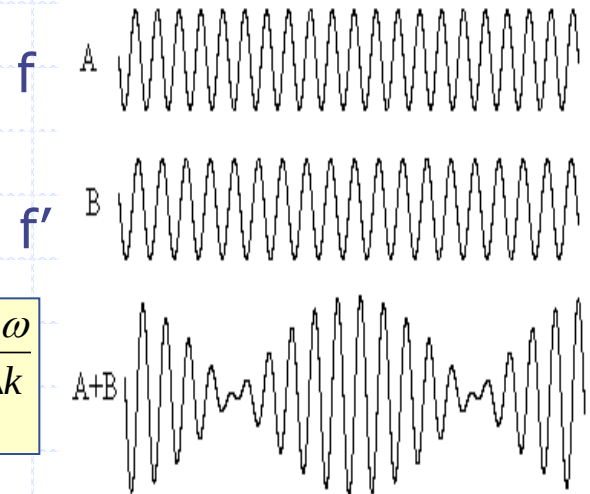
◆ Valni paket – ograničeno valno gibanje u prostoru

$$u(x, t) = \int_{\omega_1}^{\omega_2} A(\omega) \sin \omega(t - \frac{x}{v}) d\omega$$

- Superpozicija dva vala vrlo bliskih frekvencija, daje resultantni val čija se amplituda mijenja s frekvencijom $(\omega' - \omega'')/2$.
- Brzina kojom se širi amplituda dobivena superpozicijom ova dva vala je **grupna brzina**



$$\begin{aligned} u_1(x, t) &= A \sin(\omega' t - \frac{\omega'}{v'} x) + A \sin(\omega'' t - \frac{\omega''}{v''} x) = \\ &= 2A \cos \left[\frac{\omega' - \omega''}{2} t - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega'}{v'} - \frac{\omega''}{v''} \right) x \right] \sin \left[\frac{\omega' + \omega''}{2} t - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega'}{v'} + \frac{\omega''}{v''} \right) x \right] \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \frac{\omega' - \omega''}{2} t - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega'}{v'} - \frac{\omega''}{v''} \right) x &= n \cdot 2\pi \\ \frac{\omega' - \omega''}{2} dt - \frac{1}{2} \left(\frac{\omega'}{v'} - \frac{\omega''}{v''} \right) dx &= 0 \end{aligned}$$

$$v_g = \frac{dx}{dt} = \frac{\omega'' - \omega'}{\frac{\omega''}{v''} - \frac{\omega'}{v'}} = \frac{\omega'' - \omega'}{k'' - k'} = \frac{\Delta \omega}{\Delta k}$$

$$v_f = \frac{\omega}{k} - \text{FAZNA BRZINA}$$

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} - \text{GRUPNA BRZINA}$$

$V_g \rightarrow$
valni paket

Grupna brzina i fazna brzina (3)

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d}{dk} (v_f k) = \frac{dv_f}{dk} k + v_f$$

$$v_g = \frac{dv_f}{d\lambda} \frac{d\lambda}{dk} k + v_f = \frac{dv_f}{d\lambda} \frac{d \frac{2\pi}{k}}{dk} k + v_f$$

$$v_g = \frac{dv_f}{d\lambda} \cdot k \cdot 2\pi \cdot \left(-\frac{1}{k^2}\right) + v_f = v_f - \lambda \frac{dv_f}{d\lambda}$$

- ◆ Ako nema disperzije $\frac{dv_f}{d\lambda} = 0$, te je $\mathbf{v_g = v_f}$ u nedisperzivnim sredinama, tijekom vremena valni paket ne mijenja svoj oblik, ne raspršuje se, tj. nema disperzije.
- ◆ U disperzivnim sredinama ($\mathbf{v_f = f(\lambda)}$) valni paket mijenja svoj oblik, širi se i biva sve manje prostorno omeđen:

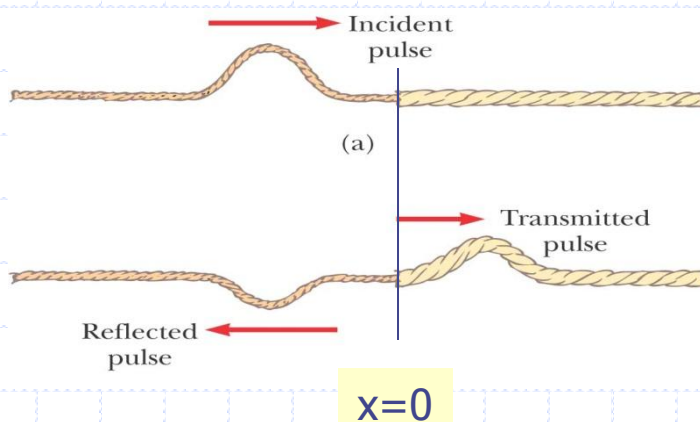
$$\frac{dv_f}{d\lambda} < 0 \rightarrow v_g > v_f \quad \frac{dv_f}{d\lambda} > 0 \rightarrow v_g < v_f$$

Refleksija i transmisija vala (1)

- ◆ Kad val naiđe na granicu dvaju medija u kojima se brzine širenja vala razlikuju ($v_1 \neq v_2$) tada se val djelomično reflektira a djelomično prenosi u drugo sredstvo, javlja se refleksija i transmisija vala.
- ◆ Frekvencija vala se ne mijenja jer je određena frekvencijom titranja izvora vala.

$$u_u = A_u \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{v_1} x\right)$$

$$u_r = A_r \sin\left(\omega t + \frac{\omega}{v_1} x\right)$$



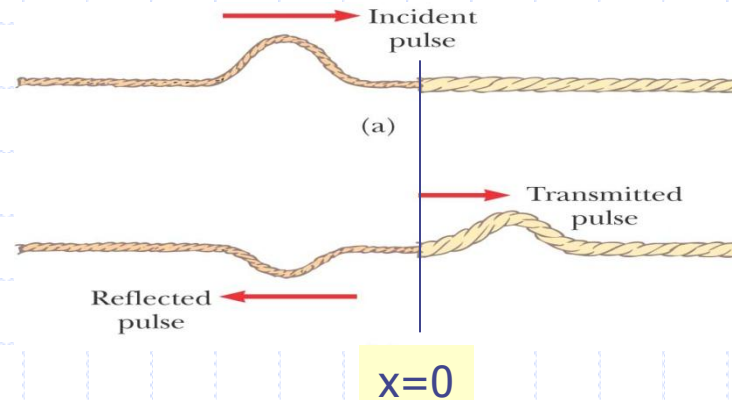
$$u_t = A_t \sin\left(\omega t - \frac{\omega}{v_2} x\right)$$

- ◆ Kolika je amplituda reflektiranog i transmitiranog vala uz pretpostavku da je amplituda upadnog vala A_u poznata?

Refleksija i transmisija vala (2)

$$u_u = A_u \sin(\omega t - \frac{\omega}{v_1} x)$$

$$u_r = A_r \sin(\omega t + \frac{\omega}{v_1} x)$$



$$u_t = A_t \sin(\omega t - \frac{\omega}{v_2} x)$$

- ◆ Na granicu dvaju medija koja se nalazi na mjestu $x=0$ moraju biti ispunjeni slijedeći **rubni uvjeti**:

$$u_u + u_r = u_t$$

Na granici dvaju medija ($x=0$), elongacija mora biti ista i s lijeve i s desne strane

$$\frac{\partial}{\partial x}(u_u + u_r) = \frac{\partial u_t}{\partial x}$$

Na granici dvaju medija ($x=0$), nagibi obiju žica moraju biti isti i s lijeve i s desne strane

$$A_u + A_r = A_t$$

$$\frac{A_u}{v_1} - \frac{A_r}{v_1} = \frac{A_t}{v_2}$$

Refleksija i transmisija vala (3)

Amplitude reflektiranog i transmitiranog vala:

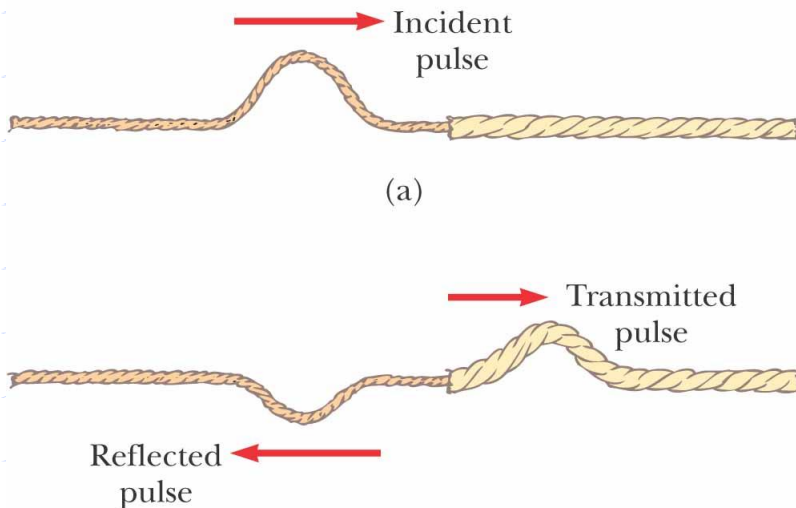
$$A_r = \frac{v_2 - v_1}{v_1 + v_2} A_u$$

$$A_t = \frac{2v_2}{v_1 + v_2} A_u$$

Pri refleksiji na gušćem sredstvu

$\mu_2 > \mu_1 \rightarrow v_2 < v_1$, $(v = \sqrt{F/\mu})$
reflektirani val ima skok u fazi za $\phi_r = \pi$:

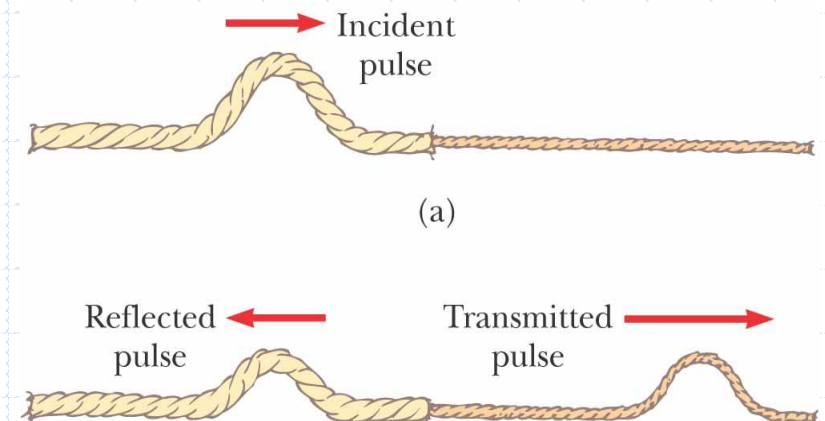
$$u_r = A_r \sin\left(\omega t + \frac{\omega}{v_1} x + \pi\right)$$



Pri refleksiji na rjeđem sredstvu:

$\mu_2 < \mu_1 \rightarrow v_2 > v_1$, $(v = \sqrt{F/\mu})$
reflektirani val nema skok u fazi $\phi_r = 0$:

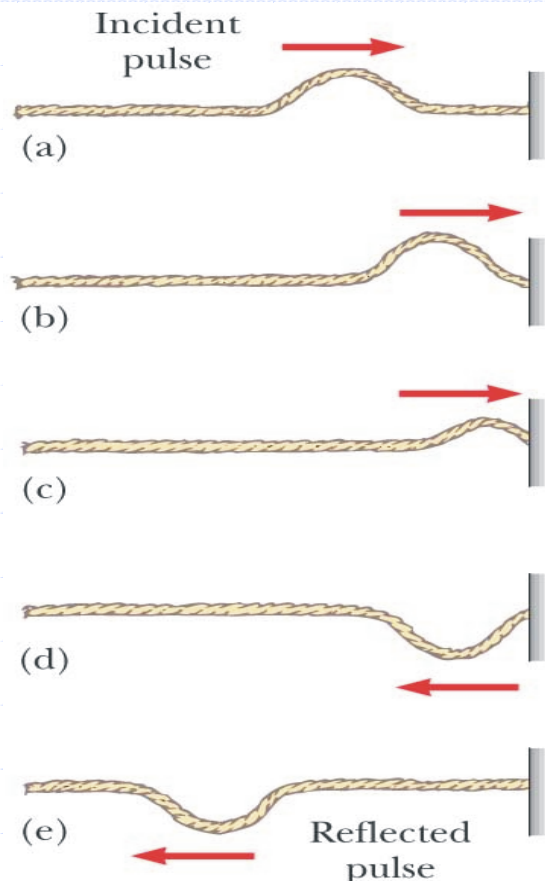
$$u_r = A_r \sin\left(\omega t + \frac{\omega}{v_1} x\right)$$



Refleksija i transmisija vala (4)

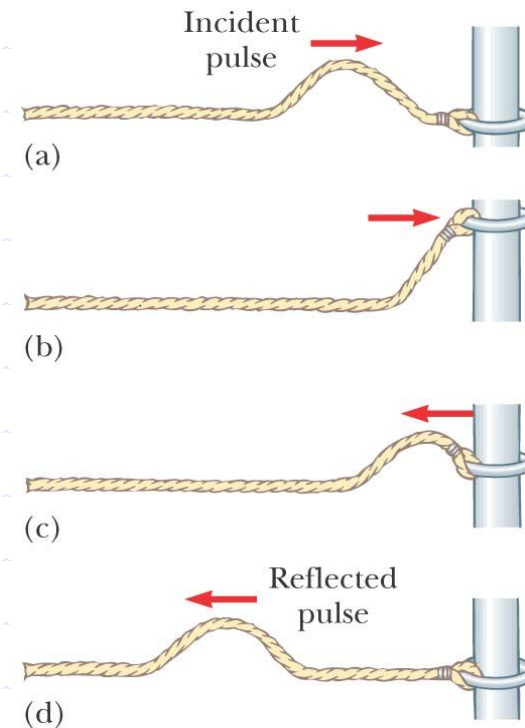
Refleksija na čvrstom kraju, $\phi_r = \pi$:

$$\mu_2 = \infty, \quad v_2 = 0 \rightarrow A_r = -A_u, \quad A_t = 0$$



Refleksija na slobodnom kraju $\phi_r = 0$:

$$\mu_2 = 0, \quad v_2 = \infty \rightarrow A_r = A_u, \quad A_t = 2A_u$$

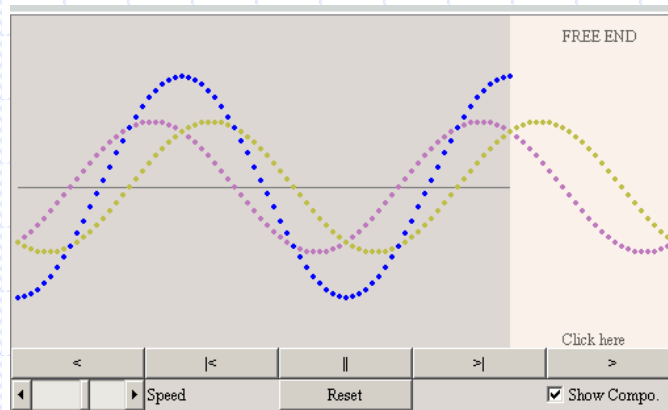
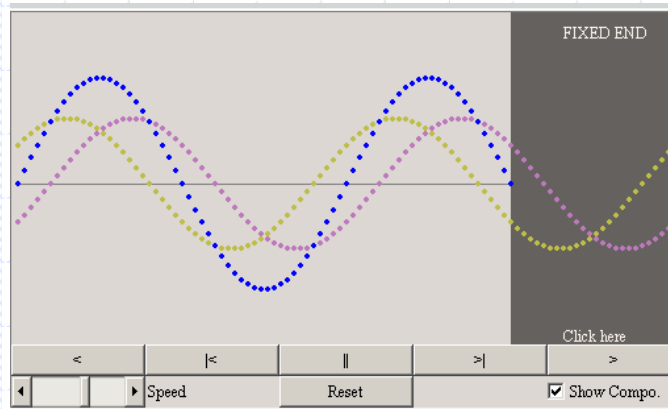


Refleksija valova (interaktivni primjer).



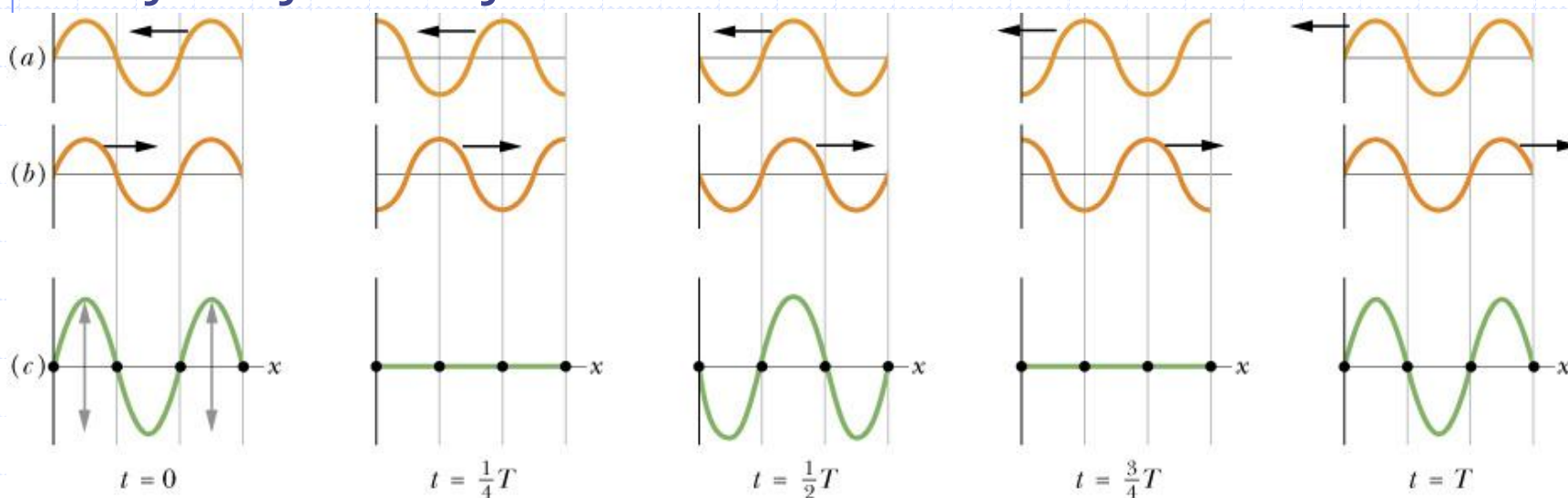
Primjer:

<http://www2.biglobe.ne.jp/~norimari/science/JavaEd/e-wave5.html>



Stojni val

- ◆ Donja slika prikazuje, dva koherentna harmonička vala na žici koji se šire u suprotnim smjerovima.
- ◆ Rezultat interferencije (zeleno) pokazuje da u pojedinim trenucima sve točke točke žice miruju, te da postoje točke koje uvijek miruju – čvorovi.



- ◆ Interaktivni primjer stojnog vala:

<http://www2.biglobe.ne.jp/~norimari/science/JavaEd/e-wave4.html>

Stojni valovi pri refleksiji na čvrstom kraju

- ◆ Stojni val nastaje interferencijom dvaju valova jednakih amplituda i frekvencija koji se gibaju duž istog pravca suprotnim smjerovima.
- ◆ Pri refleksiji na **čvrstom kraju žice** nastaje reflektirani val s amplitudom A_r jednakom amplitudi upadnog vala A_u i sa skokom u fazi jednakim π :

$$u_u = A \cos(\omega t - kx)$$

$$u_r = A \cos(\omega t + kx + \pi)$$

$$u = u_u + u_r = 2A \sin kx \sin \omega t$$

- ◆ Svaka čestica žice titra uvijek istom amplitudom ($2A \sin kx$) čiji iznos ovisi o koordinati čestice, a ne ovisi o vremenu kao što je slučaj koja putujućeg vala.
- ◆ Amplituda stojnog vala mijenja se u ovisnosti o položaju ($2A \sin kx$).
- ◆ $u(x_{\check{c}}, t) = 0$, u točkama $x_{\check{c}} = n(\lambda/2)$; ($n=0,1,2,3$) – čvorovi
- ◆ $u(x_t, t) = 2A \sin \omega t$, u točkama $x_t = (2n+1)(\lambda/4)$; ($n=0,1,2,3$) – trbusi, čestica sredstva harmonički titra maksimalnom amplitudom.

Stojni val pri refleksiji na slobodnom kraju

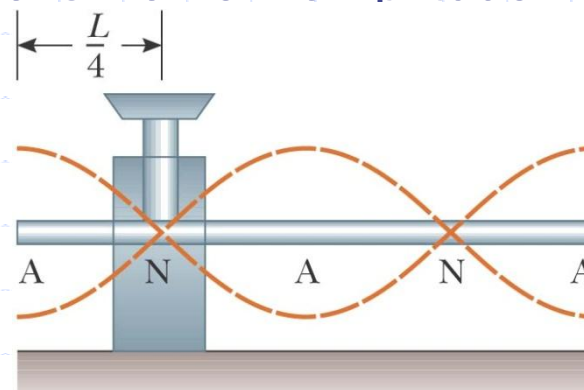
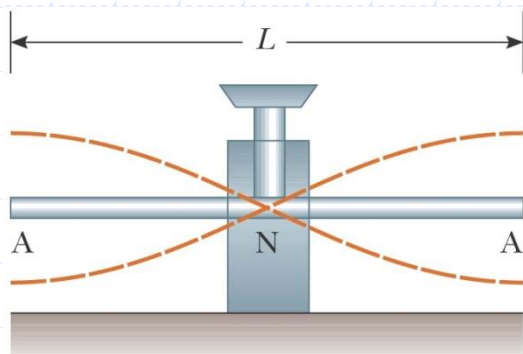
- ◆ Pri refleksiji **na slobodnom kraju** nema skoka u fazi za π kod reflektiranog vala:

$$u_u = A \cos(\omega t - kx)$$

$$u_r = A \cos(\omega t + kx)$$

$$u = u_u + u_r = 2A \cos kx \cos \omega t$$

- ◆ $u(x_{\check{c}}, t) = 0$, u točkama $x_{\check{c}} = (2n+1)(\lambda/4)$ ($n=0,1,2,3$) – čvorovi
- ◆ $u(x_t, t) = 2A \cos \omega t$ u točkama $x_t = n(\lambda/2)$ ($n=0,1,2,3$) – trbusi, čestica sredstva harmonički titra maksimalnom amplitudom



Stojni valovi na žici učvršćenoj na oba kraja

◆ Stojni valovi na žici učvršćenoj na oba kraja ($x=0$, $x=L$):

Rubni uvjeti:

$$u(0, t) = u(L, t) = 0$$

$$\sin k \cdot 0 = 0$$

$$\sin k \cdot L = 0$$

$$u = u_u + u_r = 2A \sin kx \sin \omega t$$

$$\sin kL = 0 \Rightarrow kL = n\pi \Rightarrow L = n \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \lambda = \frac{2L}{n}, \quad n=1,2,3,\dots$$

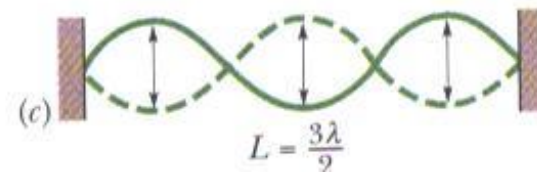
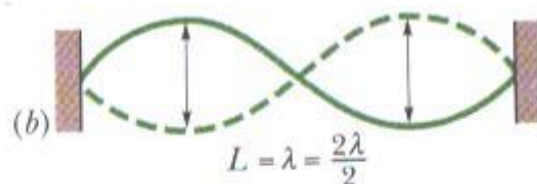
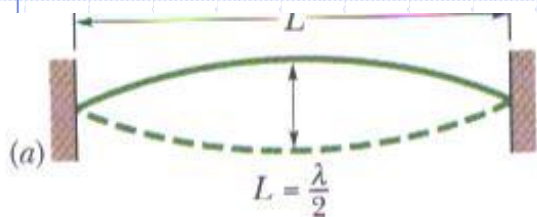
$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

Vlastite frekvencije

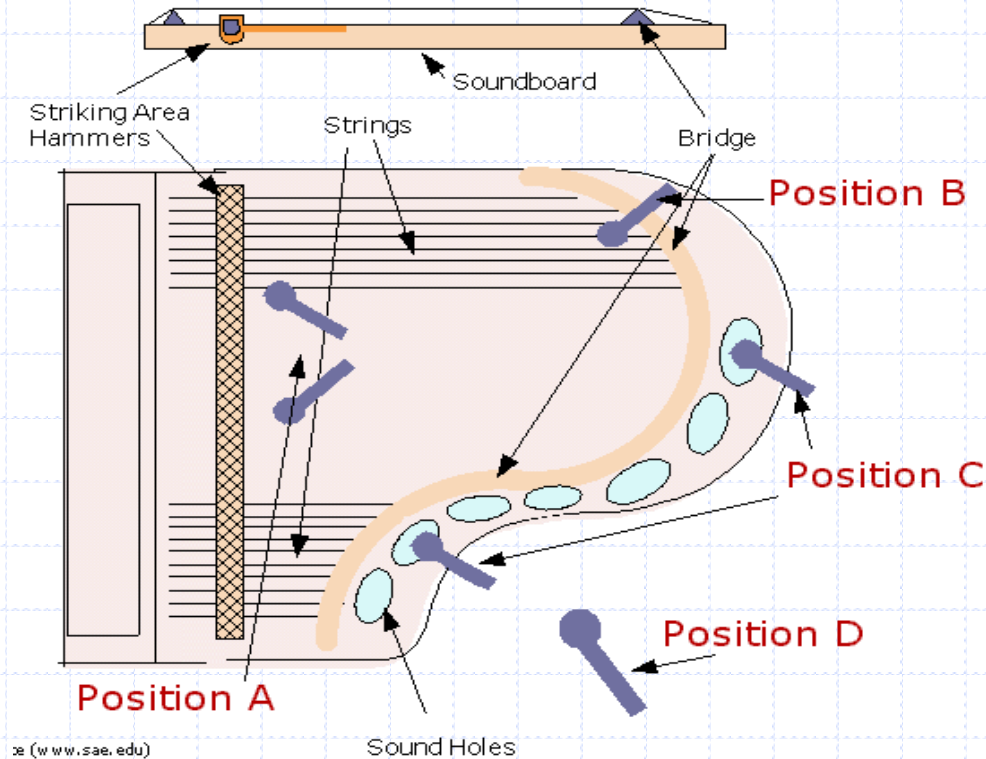
Na žici duljine L koja je učvršćena na oba kraja mogu se pojaviti samo stojni valovi za koje je duljina žice jednaka cijelom broju valnih poluduljina.

Općenito zategnuta žica učvršćena na oba kraja titra istovremeno svim vlastitim frekvencijama, pa je valna funkcija koja opisuje elongaciju nekog djelića žice superpozicija svih vlastitih titranja:

$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin \omega_n t + B_n \cos \omega_n t) \sin k_n x$$



Oblik klavira



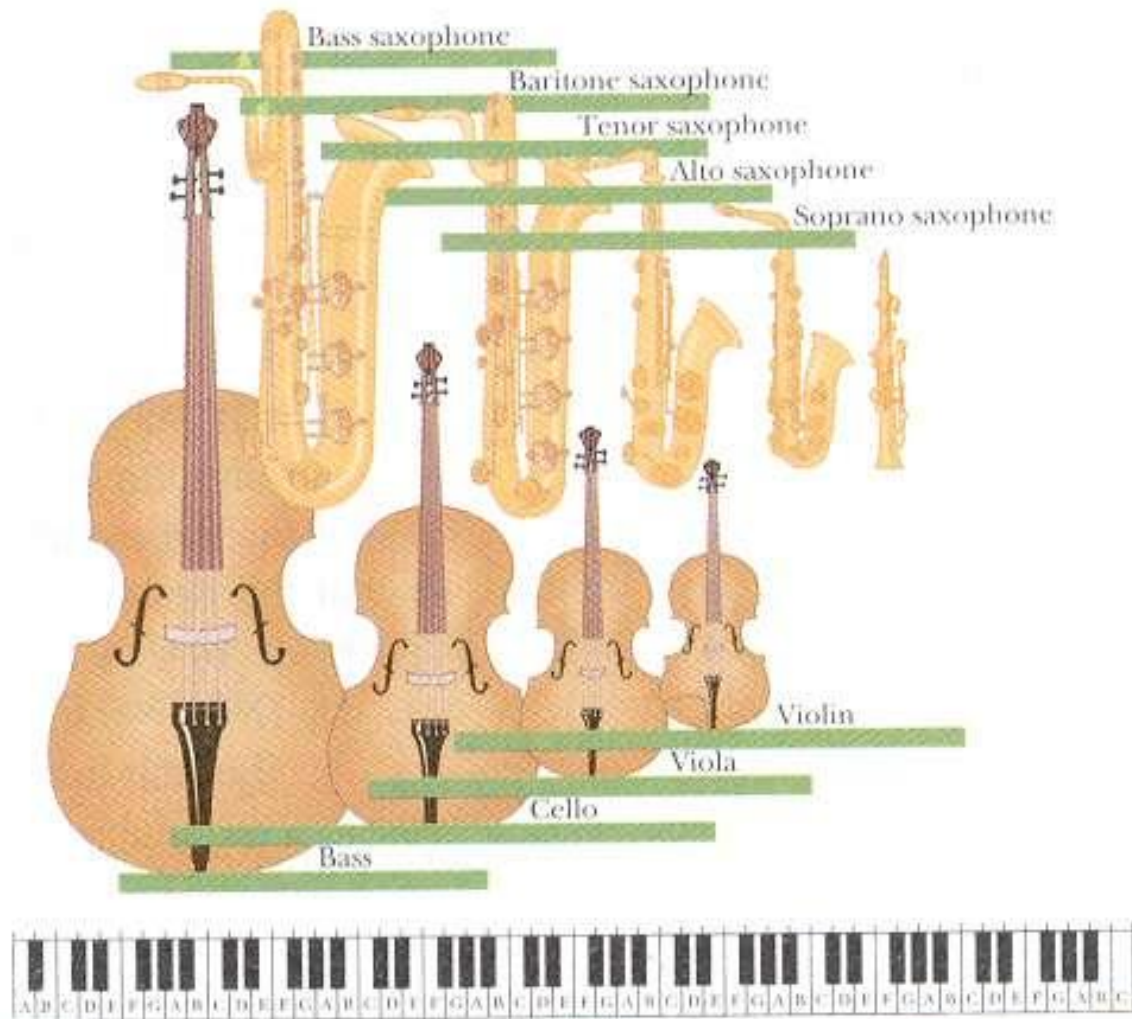
Općenito, zategnuta žica učvršćena na oba kraja titra istovremeno svim vlastitim frekvencijama.

Visina tona određena je osnovnom frekvencijom, boja tona ovisi o veličini koeficijenata A_n i B_n , tj. o primjesama viših harmonika.

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

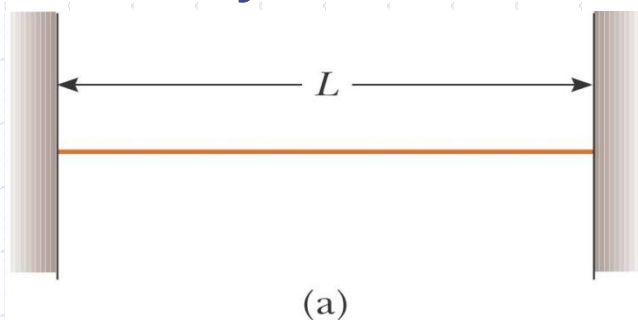
$$u(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin \omega_n t + B_n \cos \omega_n t) \sin k_n x$$

Zvukovi muzičkih instrumenata

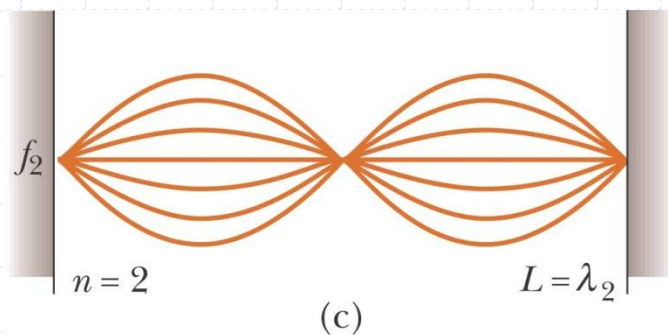
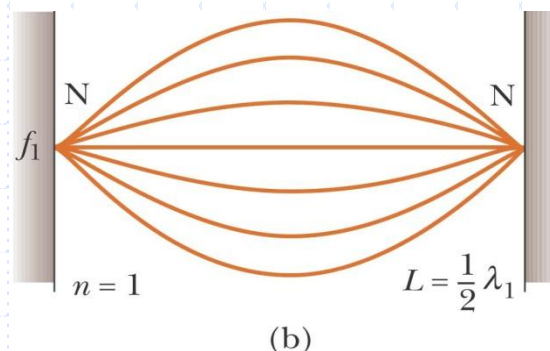


Kvantizacija

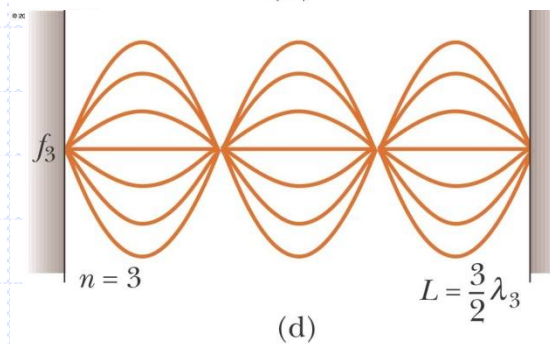
- ◆ Pojava pri kojoj su samo neke frekvencije moguće, odnosno u općem slučaju kad fizikalna veličina može poprimiti samo neke fizikalno dopuštene vrijednosti zovemo KVANTIZACIJA.
- ◆ Kvantizacija je uobičajena pojava kad val treba zadovoljiti određene rubne uvjete.



© 2004 Thomson/Brooks Cole



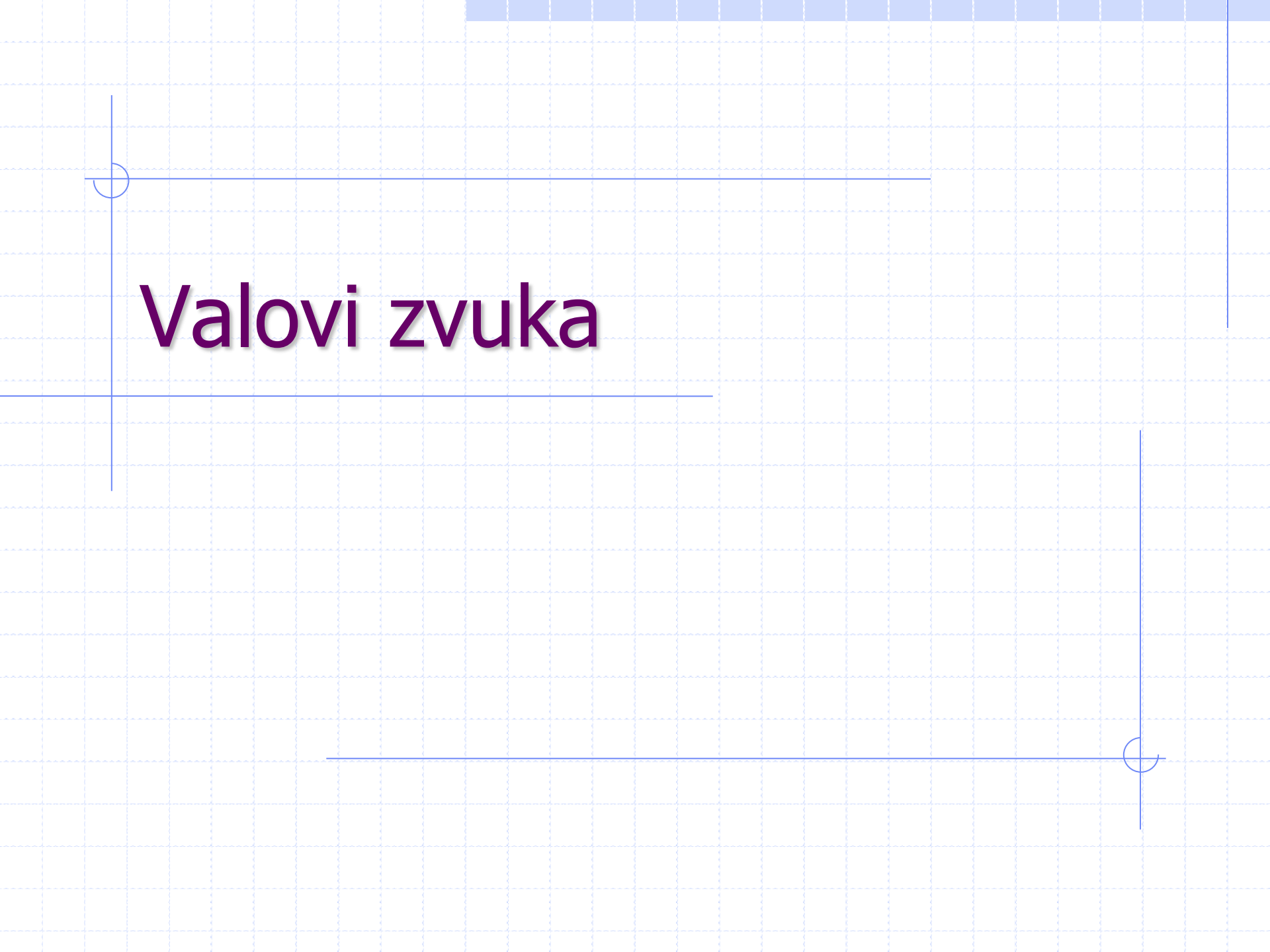
© 2004 Thomson/Brooks Cole



© 2004 Thomson/Brooks Cole

Pitanja za provjeru znanja

1. **Ukratko objasnite sljedeće pojmove: superpozicija valova, konstruktivna i destruktivna interferencija, refleksija valova, transmisija valova, stojni val. (obavezno)**
2. Objasnite superpoziciju valova.
3. Izvedite uvjete za pojavu konstruktivne/destruktivne interferencije valova iz dva koherentna izvora ako je izvor 1 udaljen za r_1 , a izvor 2 za r_2 od točke preklapanja u kojoj se promatra interferencija.
4. Razmotrite pojavu pri upadu vala na granicu između dvaju sredstava. Izvedite izraz za amplitudu reflektiranog i transmitiranog vala. Diskutirajte posebne slučajeve.
5. Kako nastaje stojni val? Objasnite primjer transverznog stojnog vala na žici učvršćenoj na oba kraja. Objasnite pojam vlastitih frekvencija.



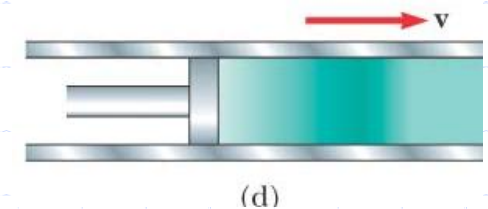
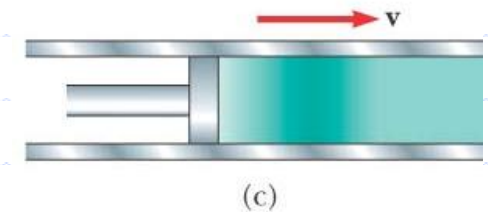
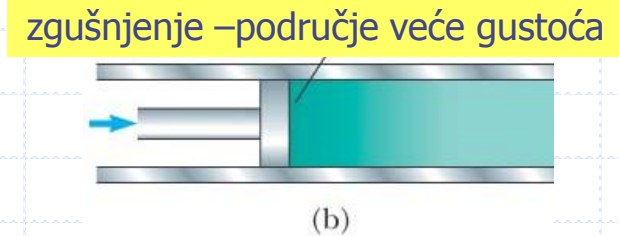
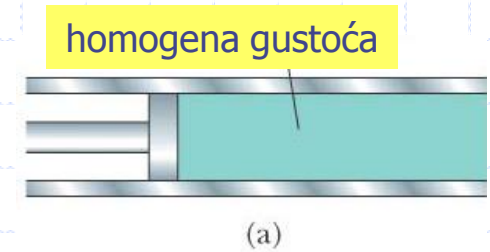
Valovi zvuka

Valovi zvuka

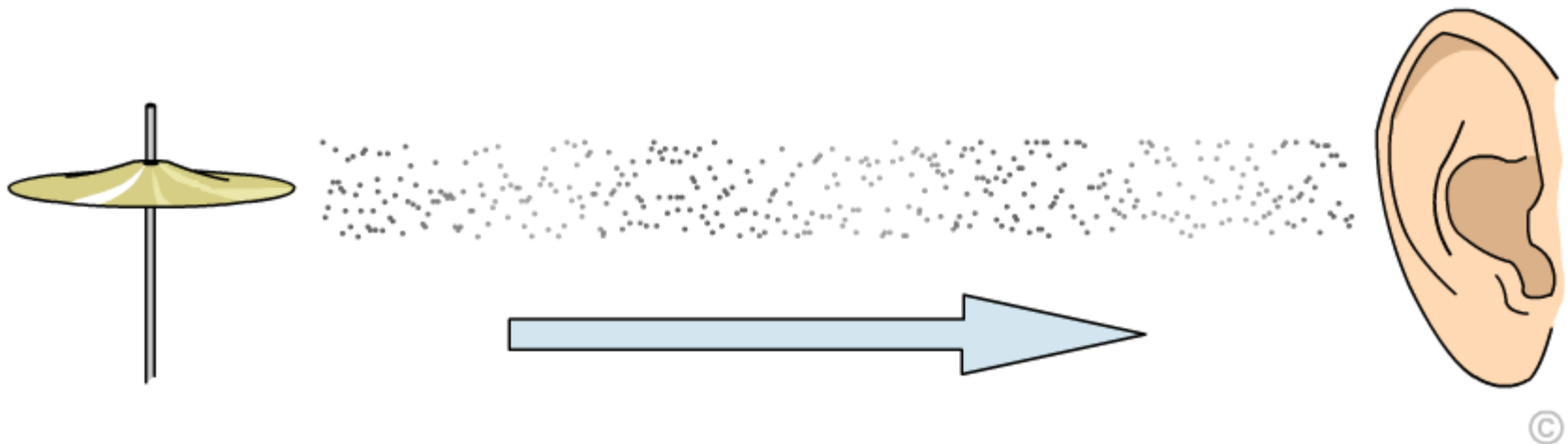
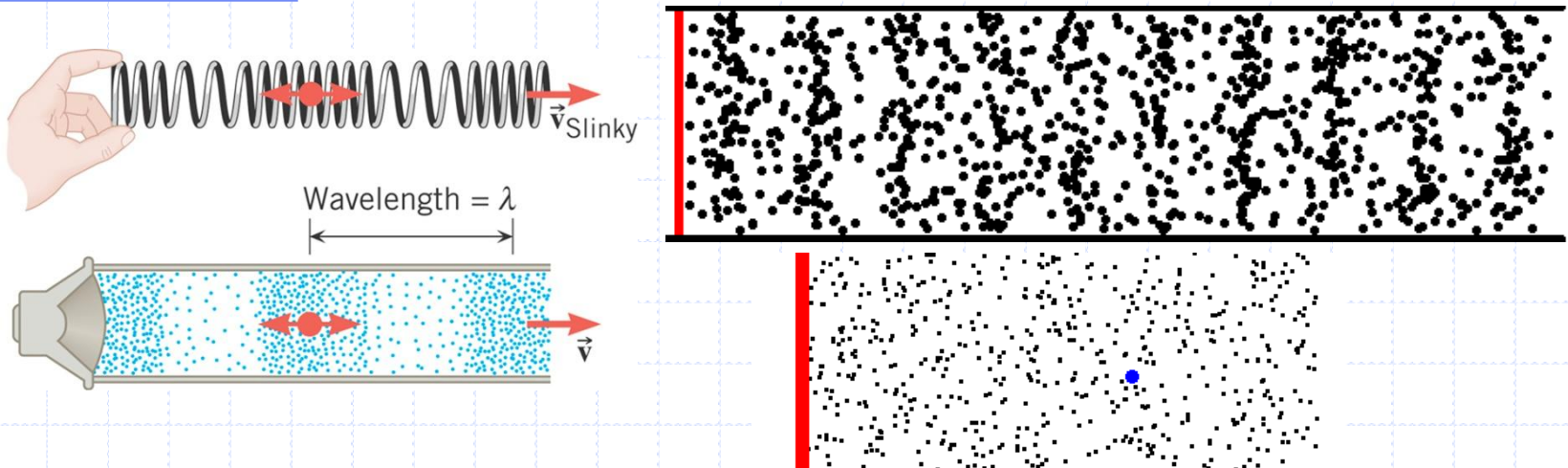
- ◆ Valovi zvuka su longitudinalni valovi u čvrstim tijelima, tekućinama i plinovima.
- ◆ Brzina širenja ovisi o svojstvima tromosti i svojstvima elastičnosti sredine kroz koju se šire.
- ◆ Kako se zvučni val širi, čestice sredstva titraju i tako nastaju promjene u gustoći i tlaku i to duž smjera širenja.
- ◆ Ako izvor zvučnog vala harmonički titra, promjene tlaka i gustoće također se mijenjaju po zakonu sinusa/kosinusa.
- ◆ Matematički opis harmoničkih zvučnih valova identičan je opisu harmoničkim valovima na žici.

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} - \frac{\rho_o}{B} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = 0$$

valna jednadžba za pomak



Zvučni val – longitudinalni val



Podjela zvučnih valova

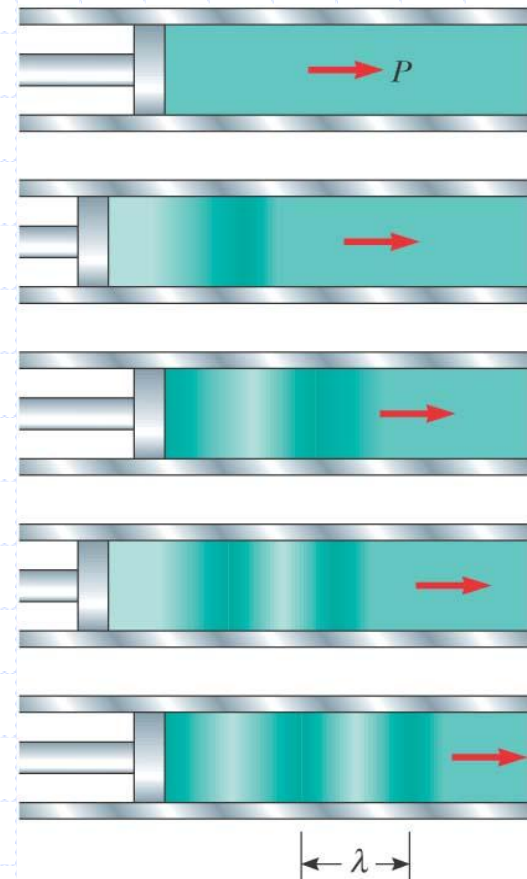
- ◆ U užem smislu **valovi zvuka su mehanički valovi koje čuje ljudsko uho**. Titranje žica i membrana prenosi se na zrak. Titranje zraka zbiva se u ritmu titranja izvora zvuka.
- ◆ Zrak se razrjeđuje i zgušnjava u smjeru širenja zvuka te se na svakom mjestu periodički mijenjaju gustoća i tlak zraka.
- ◆ Valovi dopiru i do uha, odnosno bubnjića u uhu, gdje nastaje osjet zvuka.
- ◆ Sustav bubnjić-košćice-limfna tekućina (slušne niti)-živci proizvodi osjet zvuka.
- ◆ Najniža frekvencija koja može zatitrati bubnjić i proizvesti osjet tona iznosi (16 Hz) 20 Hz, a najviša oko 20 000 Hz.
- ◆ **Infrazvuk** - zvučni valovi frekvencije niže od 20 Hz
- ◆ **Ultrazvuk** - zvučni valovi frekvencije više od 20 kHz

Jednodimenzionalni harmonički zvučni val

- ◆ Longitudinalni val se širi kroz valjkastu cijev ispunjenu plinom.
- ◆ Izvor vala je klip koji harmonički titra.
- ◆ Udaljenost između dva sukcesivna zgušnjjenja (razrjeđenja) je jedna valna duljina.
- ◆ Kako se zgušnjjenja i razrjeđenja šire tako dolazi do pomaka djelića sredstva od ravnotežnog položaja i to u smjeru širenja vala:

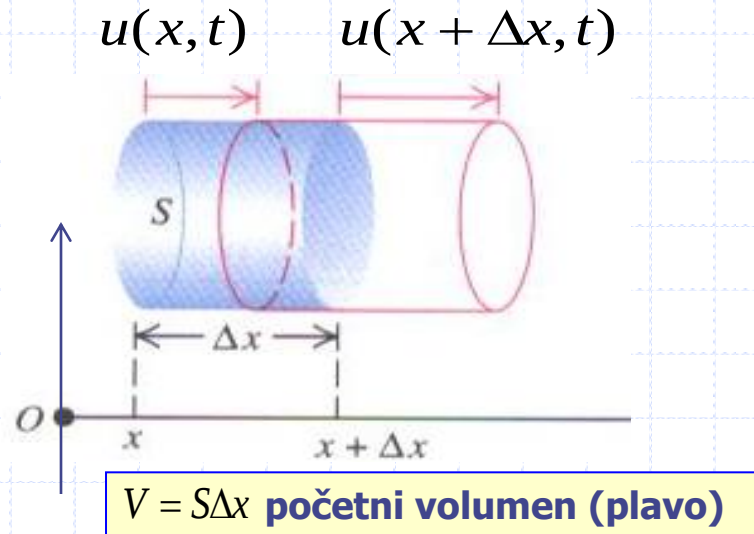
$$u(x, t) = A \sin(\omega t - kx)$$

- ◆ Što je s tlakom, kakva je veza između tlaka i pomaka ?

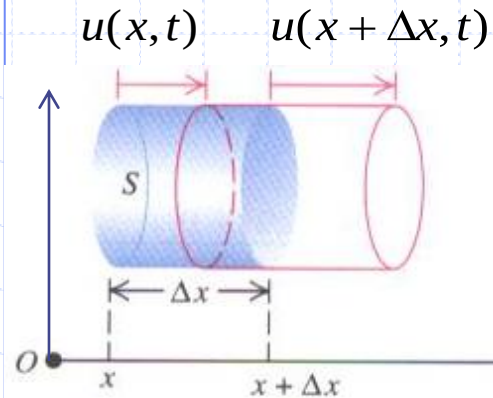


Jednodimenzionalni harmonički zvučni val: Pomak i akustički tlak (1)

- ◆ Kad se kroz stupac zraka ne širi val, gustoća ρ_0 i tlak p_0 su svugdje isti, konstantni i u prostoru i u vremenu, pa govorimo o ravnotežnom tlaku i gustoći (ρ_0 , p_0).
- ◆ Razlika tlaka na danom mjestu i u nekom trenutku $p(x,t)$ od ravnotežnog tlaka naziva se akustički tlak: $\Delta p = p_{ak} = p(x,t) - p_0$.
- ◆ Dok val prolazi kroz plin, relacija $u(x,t) = A \sin(\omega t - kx)$ opisuje pomak djelića plina u određenoj točki u vremenu.
- ◆ Pomak dva susjedna sloja može biti pozitivan i negativan, ako se dva sloja udalje nastaje razrjeđenje, popraćeno smanjenjem tlaka u tom dijelu plina i obrnuto, ako se dva susjedna sloja približe nastaje zgušnjavanje popraćeno s povećanjem tlaka plina.



Jednodimenzionalni harmonički zvučni val: Pomak i akustički tlak (2)



$V = S\Delta x$ početni volumen (plavo)

Zbog vala $u(x, t) = A\sin(\omega t - kx)$ koji se širi kroz plin, volumen se promijeni za iznos:

$$\Delta V = V_2 - V_1 = S[x + \Delta x + u(x + \Delta x, t) - x - u(x, t)] - S[x + \Delta x - x] = S[u(x + \Delta x, t) - u(x, t)]$$

Promjena volumena uzrokuje promjenu tlaka prema relaciji:

$$dp = -B \frac{dV}{V} \quad \text{B-volumni modul}$$

Iz gornjih relacija kad $\Delta x \rightarrow 0$, slijedi:

$$p_{ak} = dp = -B \frac{dV}{V} = -B \frac{S[u(x + \Delta x, t) - u(x, t)]}{S\Delta x} = -B \frac{\partial u}{\partial x} = ABk \cos(\omega t - kx)$$

Promjena tlaka izazvana zvučnim valom je **akustički tlak**

Maksimalni akustički tlak:

$$(v = \sqrt{B / \rho_0})$$

$$(p_{ak})_{\max} = AkB = A \frac{\omega}{v} \rho_0 v^2 = A\omega \rho_0 v$$

Val pomaka i val akustičkog tlaka

- ◆ Akustički tlak je razlika između tlaka izazvanog širenjem zvučnog vala $p(x,t)$ i ravnotežnog tlaka p_0 kad nema zvučnog vala:

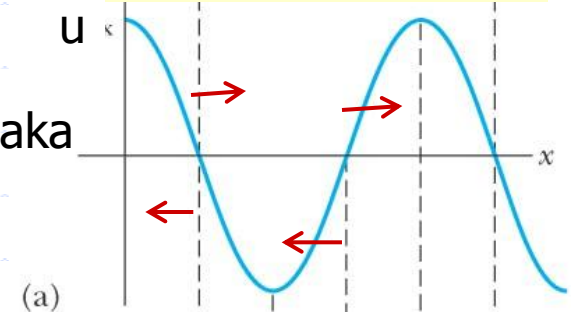
$$p_{ak} = p(x,t) - p_0.$$

- ◆ Iz slike lijevo se vidi da postoji pomak u fazi za $\pi/2$ između vala pomaka i vala akustičkog tlaka.
- ◆ Kad je $u(x,t)$ pozitivan pomak djelića sredstva je u smjeru širenja vala, a kad je $u(x,t) < 0$ pomak djelića sredstva je u smjeru suprotnom od smjera širenja vala.
- ◆ Za $u(x,t)=0$, na tom mjestu nastaje zgušnj enje što izaziva maksimalno povećanje tlaka u odnosu na ravnotežni tlak (akustički tlak maksimalan).

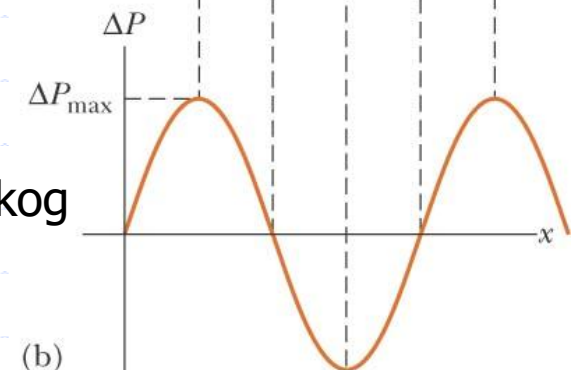


$$u(x, t) = u_0 \cos 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$$

val pomaka



val akustičkog tlaka



$$p_{ak}(x, t) = \Delta p_{max} \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$$

Brzina zvuka u nekim sredstvima

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

Sredstvo	Brzina (m/s)
Plinovi	
Zrak (0 °C)	331
Zrak (20 °C)	343
Helij	965
Vodik	1248

$$v = 331 \left(\frac{m}{s} \right) \cdot \sqrt{1 + \frac{T(^{\circ}C)}{273(^{\circ}C)}}$$

Sredstvo	Brzina (m/s)
Tekućine	
Voda (0 °C)	1402
Voda (20 °C)	1482
Morska voda	1522

Sredstvo	Brzina (m/s)
Čvrsta tijela	
Aluminij	6420
Čelik	5941
Granit	6000

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

Intenzitet zvučnog vala

- ◆ Snaga koja se prenese zvučnim valom koji se širi u plinu zatvorenom u cijevi poprečnog presjeka S , na nekom mjestu, je jednaka produktu brzine djelića sredstva i sile na taj djelić sredstva.

$$P = \vec{F} \cdot \vec{v} = F \frac{\partial u}{\partial t} = p_{ak} S \frac{\partial u}{\partial t}$$

$$P = -BS \frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial u}{\partial t}$$

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

$$p_{ak} = dp = -B \frac{\partial u}{\partial x} = ABk \cos(\omega t - kx)$$

$$v(x, t) = \frac{\partial u}{\partial t} = \omega A \cos(\omega t - kx)$$

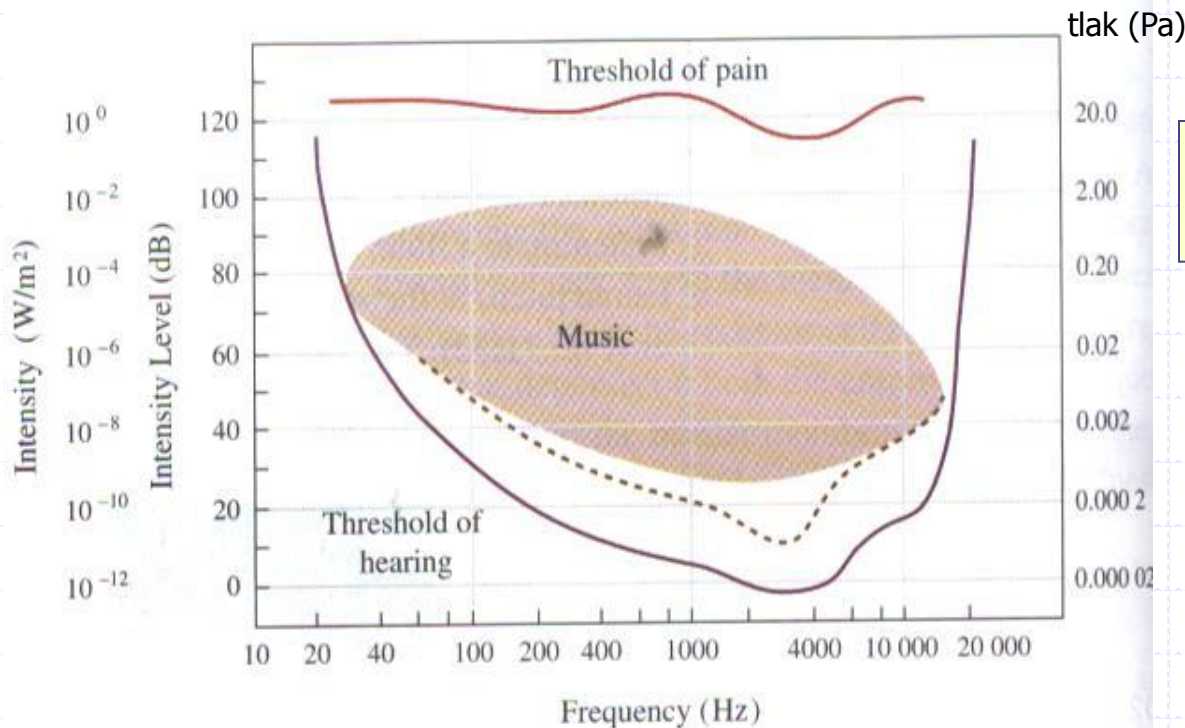
- ◆ Srednji intenzitet zvučnog vala: snaga prenesena kroz jedinicu površine za vrijeme jednog perioda:

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P}{S} dt = \frac{1}{T} \int_0^T ABk \cos(\omega t - kx) \omega A \cos(\omega t - kx) dt = \frac{1}{2} B \omega k A^2 = \frac{p_{ak_max}^2}{2\rho_0 v} = \frac{p_{ak_max}^2}{2\sqrt{\rho_0 B}}$$

- ◆ Intenzitet zvučnog vala razmjeran je kvadratu amplitude akustičkog tlaka.
- ◆ Ista relacija vrijedi i za srednji intenzitet sfernog zvučnog vala (Predavanje 3).

Razine jakosti zvuka

- **Jakost zvuka** (W/m^2) je **intenzitet zvučnog vala**, tj. energija koja se prenese u jedinici vremena kroz jedinicu površine okomitu na smjer širenja vala.



Razina jakosti zvuka izražena u decibelima (dB):

$$L = 10 \log \frac{I}{I_0}, \quad I_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

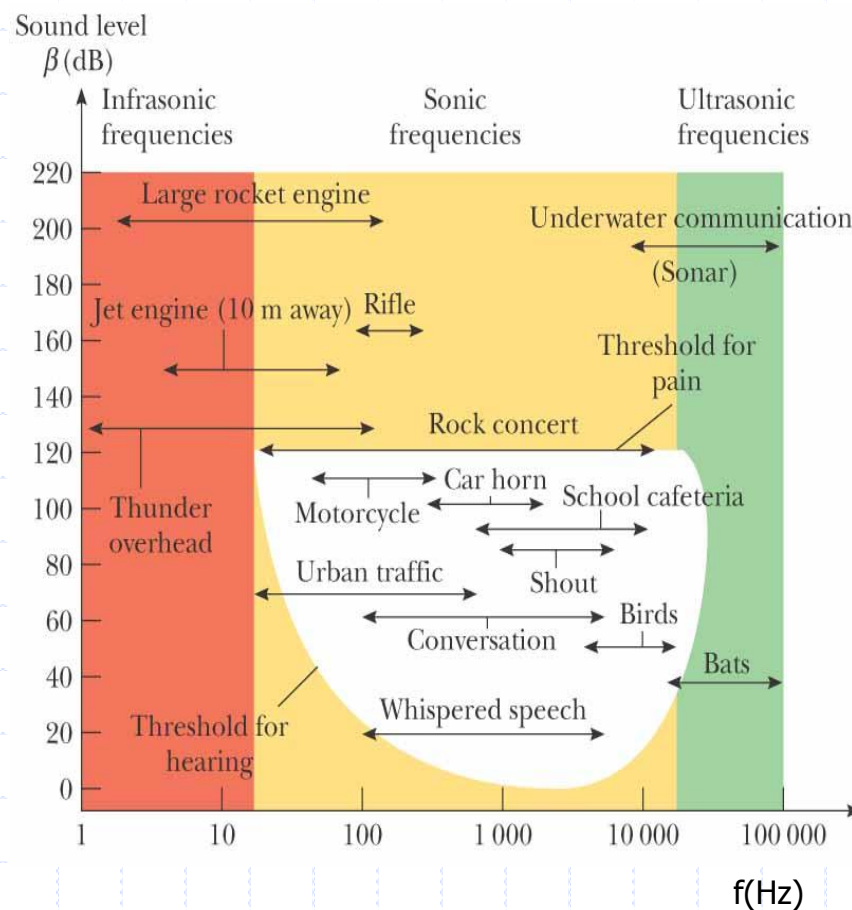
$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ prag čujnosti za $f = 1000 \text{ Hz}$.

Osjet jakosti zvuka raste logaritamski.

- **Glasnoća zvuka** – je osjet jakosti zvuka u našem uhu i fiziološka je veličina koja ovisi o intenzitetu, frekvenciju i trajanju zvuka, a jedinica je **fon**.

Glasnoća i frekvencija

- ◆ Razina jakosti zvuka (L) je fizikalna veličina, a **glasnoća** zvuka je osjet jakosti zvuka u našem uhu, te je fiziološka veličina.
- ◆ Zvukovi iste jakosti, a različite frekvencije, čine se uhu različito glasnima.
- ◆ Za određivanje razine glasnoće treba zvuk nepoznate glasnoće usporediti s glasnoćom referentnog zvuka frekvencije 1000 Hz. Za zvuk frekvencije 1000 Hz, **fon** je isto što i **dB**.
- ◆ Zvuk frekvencije 100 Hz se čuje tek kad mu je intenzitet 30 dB, tj. fiziološki je ekvivalentan kao i zvuk frekvencije 1000 Hz jakosti 0 dB.



Razine jakosti zvuka

◆ Prag čujnosti	0 dB
◆ Šapat	20 dB
◆ Govor	50 dB
◆ Stan u prometnoj ulici	60 dB
◆ Prometna ulica	70 dB
◆ Automobil	70 dB
◆ Kamion	90 dB
◆ Rock koncert	110 dB
◆ Avionski motor	120 dB
◆ Prag bola	130 dB

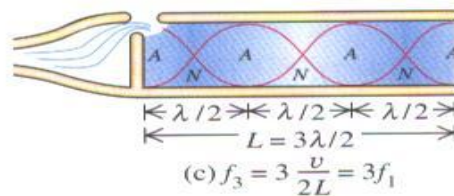
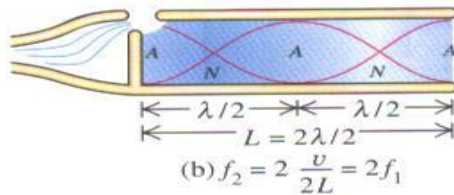
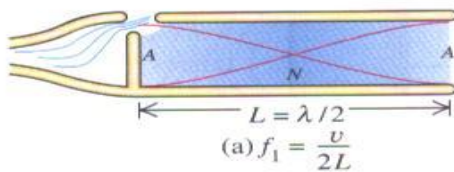
Longitudinalni stojni valovi u stupcu zraka

- ◆ Stojni valovi u stupcu zraka nastaju interferencijom dva ista longitudinalna zvučna vala koji se šire u suprotnim smjerovima kroz cijev kružnog presjeka S i dužine L (svirala).
- ◆ Frekvencija tona ovisi o dužini svirale ali i o tome je li svirala otvorena ili zatvorena.
- ◆ Cijev sa zračnim stupcem može biti zatvorena ili otvorena, na oba kraja ili samo na jednom kraju.
- ◆ Val koji nastaje refleksijom u stupcu zraka koji je zatvoren ili otvoren jednak je upadnom valu, uz razliku u fazi koja je jednaka nuli za refleksiju na otvorenom kraju (slobodnom kraju) odnosno π za refleksiju na zatvorenom kraju (čvrsti kraj).

Longitudinalni stojni valovi u stupcu zraka

◆ Svirala-cijev kružnog oblika ispunjena plinom

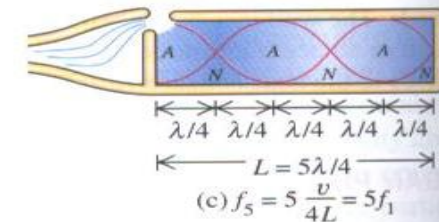
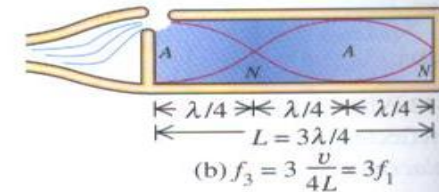
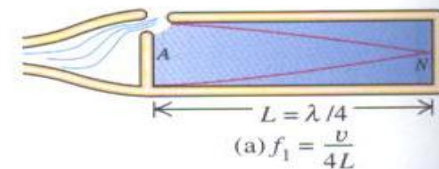
Otvorena na oba kraja



$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = n \frac{v}{2L} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Viši harmonici su svi višekratnici osnovne frekvencije

Zatvorena na jednom kraju

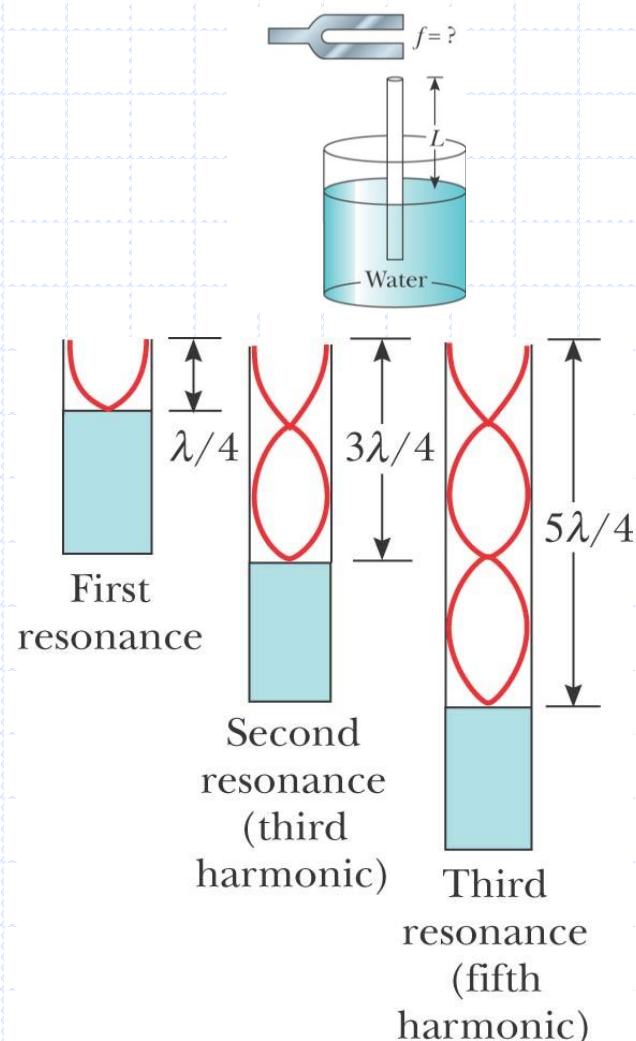
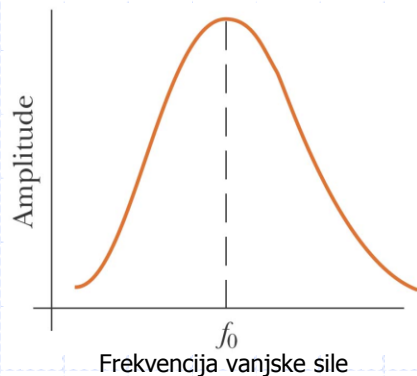


$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = (2n - 1) \frac{v}{4L} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

Viši harmonici su samo neparni višekratnici osnovne frekvencije

Rezonancija zvuka

- ◆ Stojni val na žici ili u svirali nakon nekog vremena utrne zbog trenja ili otpora zraka.
- ◆ Ako je frekvencija vanjske sile jednaka jednoj od vlastitih frekvencija stojnog vala nastupa rezonancija i stojni val ne utrne.
- ◆ Pri rezonanciji žica dobiva maksimalnu energiju od vanjske sile.
- ◆ Kad je frekvencija vanjske sile različita od njoj najbliže vlastite frekvencije na žicu se prenosi razmjerno malo energije vanjskom silom.



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