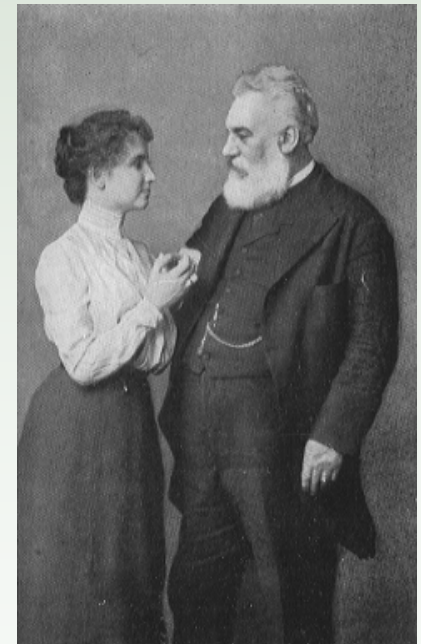


FIZIČKI KONCEPT BUKE



Milonska, ovoplanetarna ljudska populacija pod bremenom decibelskih okova, zavisno podređena konzumiranju užitaka tehnoloških revolucija, hita po umirujuću terapiju inženjerske prakse.

**“Zvuk glasa je najvažniji
podsticaj, jer on donosi govor,
izaziva misli i odražava nas u
intelektualnom društvu čoveka”,
Helen Keler.**



Helen Keller (1880 – 1968)



Anny Sullivan,
učiteljica

Bografija

1880	Rodjena u Alabami, SAD
1882	Obolela od groznice sa 19 meseci, koja uzrokuje slepilo i gluvoću
1887	Anne Sullivan dolazi da uči Helen kako da komunicira
1890	Uči da govori
1896	Polazi na Cambridge School for Young Ladies
1899	Polaže završni ispit za Radcliffe College
1900	Prvi dan na koledžu

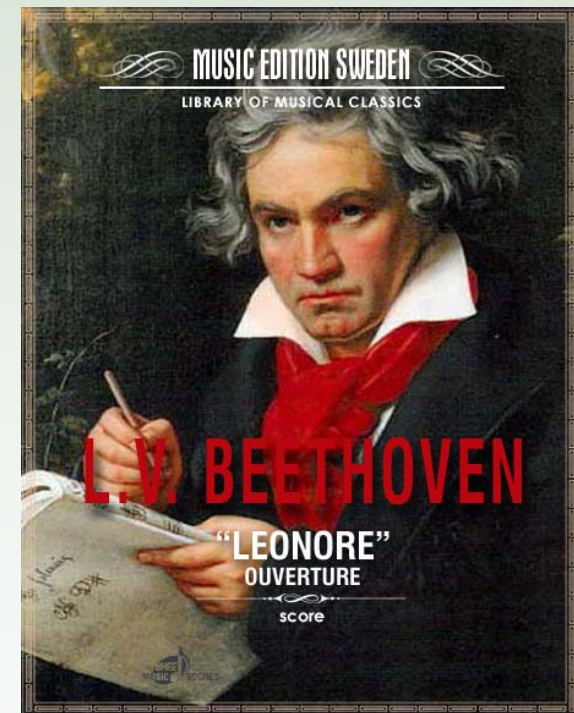


Ludvig van Beethoven

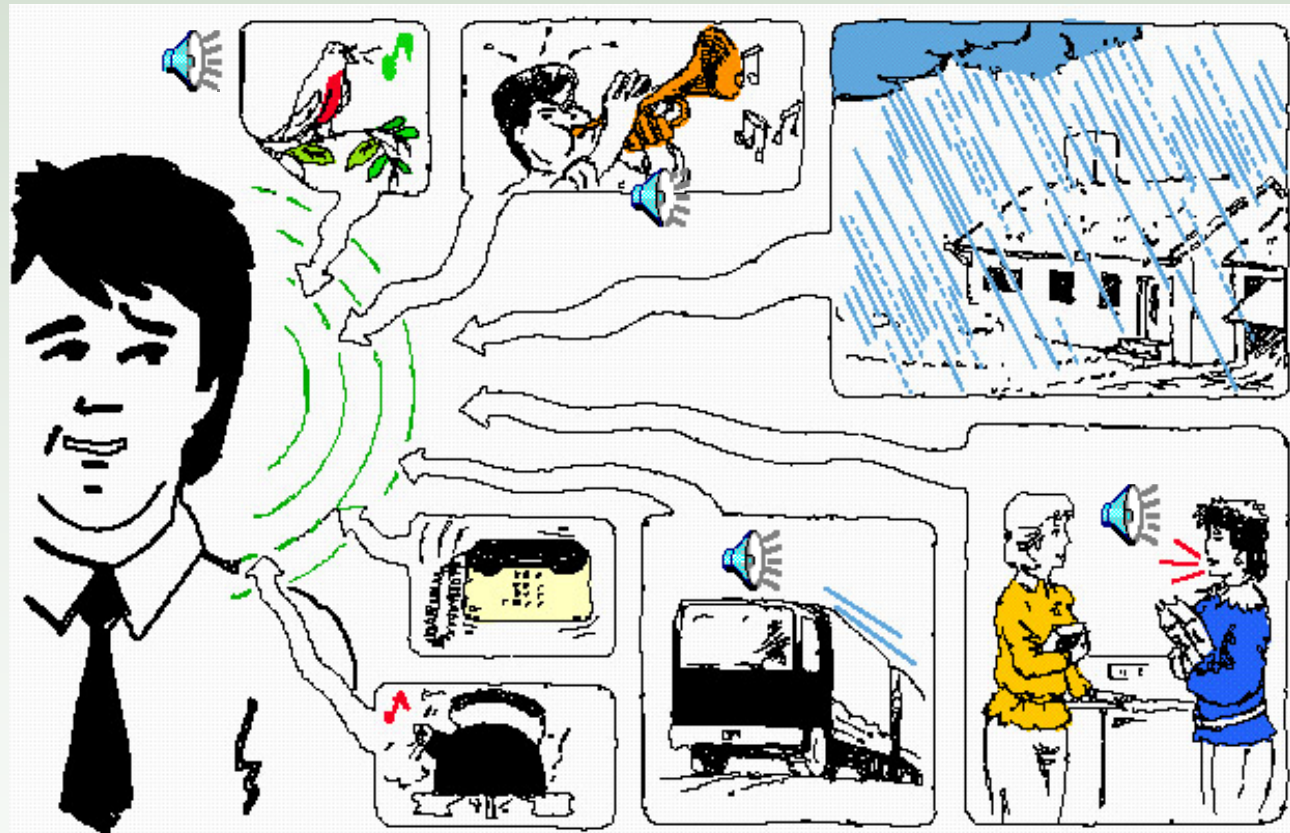
**Rođen je 1770. god u Bon-u,
Nemačka**

**Sa 28 god, na vrhuncu stvaralačkog
života, počinje da gluvi (oblik otoskleroze,
koji može da se javi u ranom životnom
dobu). Vrlo teško podnosi svoj hendikep.
Bio je poznat po prekoj naravi, koja se
mogla meriti sa veličinom njegovog
genija.**

Umire 1827. god od bolesti jetre.



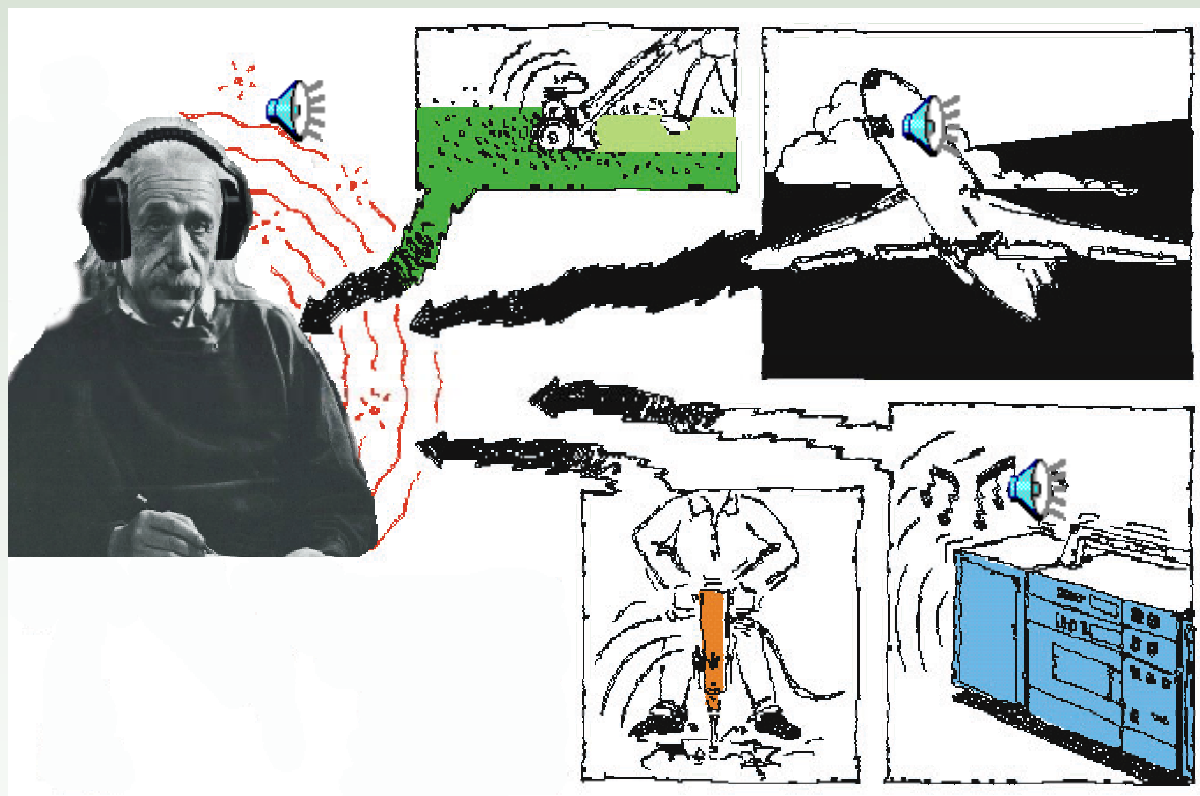
- Zvuk je po prirodi sastavni deo svakodnevnog života i deo čovekovog okruženja tako da se ponekad i ne primećuju sve njegove funkcije.



● Zvuk kao buka

➤ Veoma često zvuk uznemirava i ugrožava čoveka.

➤ Mnogi događaji praćeni generisanjem zvuka su neželjeni i neprijatni i kao takvi predstavljaju **BUKU**.



- ▶ Nivo smetnji zavisi od zvučnog sadržaja ali i od stava prema njemu.

Muzika i govor su nosioci informacija - korisni zvuci, ali samo za one koji ih žele primati. Međutim ali za one koji ih ne žele mogu izgledati kao buka, posebno ako se javljaju u vreme spavanja ili vođenja razgovora.



- ▶ Zvuk ne treba da bude glasan da bi predstavljao smetnju.



Škripa poda, izgrebane ploče ili isprekidani zvuk kapanja vode iz slavine može biti isto tako ometajući kao i glasna grmljavina.

- ▶ Ocena glasnosti buke zavisi i od perioda dana.

Veći nivoi buke su tolerantniji u toku dnevnog nego noćnog perioda.

- ▶ Buka može da ima i razorno dejstvo koje se ogleda u uništavanju materijalnih dobara i povređivanju osetljivih organa sluha.

Buka koja nastaje pri probijanju zvučnog zida može slomiti prozore i obiti malter sa zidova.

- ▶ Ali najteži slučaj je kada buka ošteti mehanizam koji je namenjen za percepciju zvuka

Avion.wav

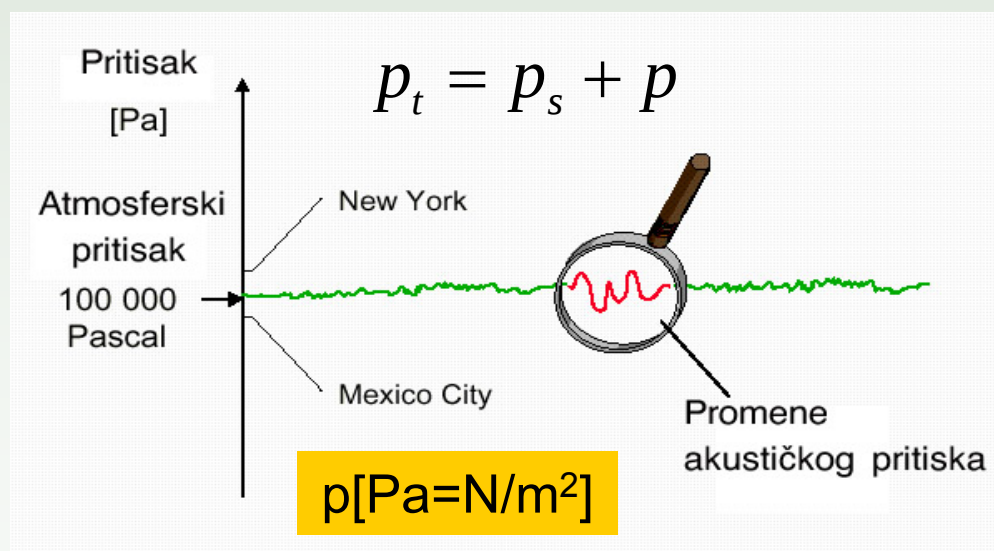




Milonska, ovoplanetarna ljudska populacija pod bremenom decibelskih okova, zavisno podređena konzumiranju užitaka tehnoloških revolucija, hita po umirujuću terapiju inženjerske prakse.

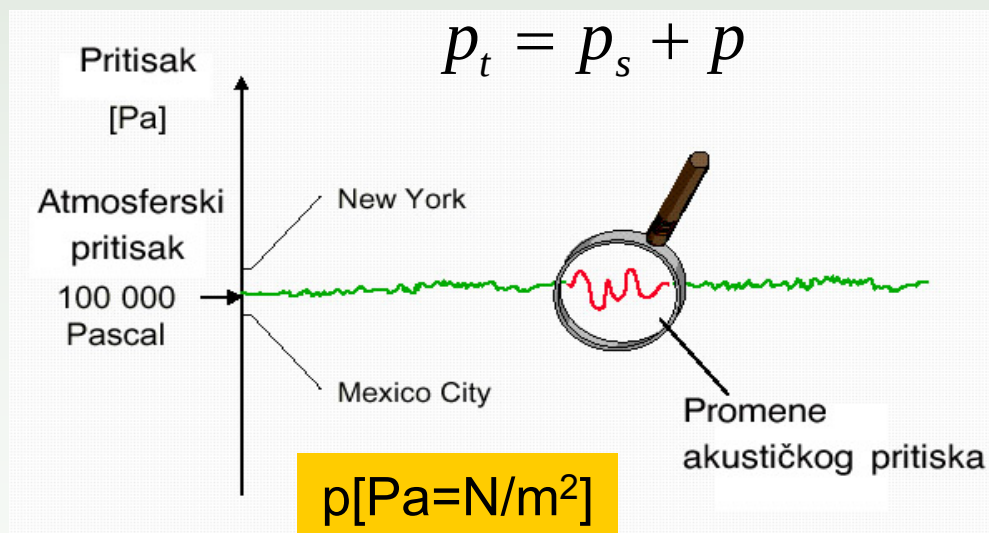
Zvuk je fizička pojava koja nastaje usled **vremenski promenljivih** poremećaja stacionarnog stanja elastične sredine.

- Promene položaja čestica, tzv. akustičke ili zvučne oscilacije, praćene su promenama akustičkog ili zvučnog pritiska u elastičnoj sredini oko ravnotežne vrednosti.



Zvučni pritisak predstavlja promenljivu komponentu ukupnog pritiska u nekoj tački elastične sredine koja se superponira atmosferskom, odnosno statičkom pritisku.

- ▶ Zvučni pritisak je rezultat generisanja zvuka i prostiranja zvučnih talasa.
- ▶ Promene zvučnog pritiska su u većini slučajeva male u poređenju sa ravnotežnim vrednostima – statičkim pritiskom.



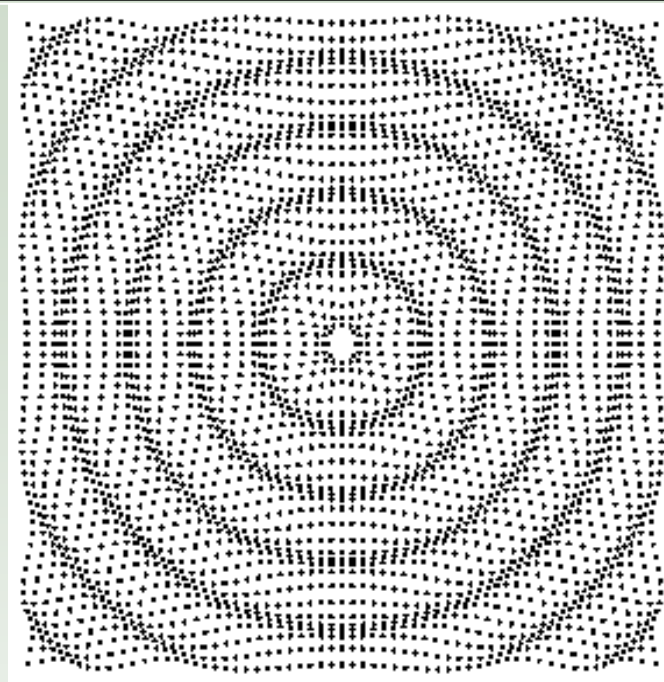
Buka je svaki neželjeni zvuk koji pored fizičkih karakteristika izaziva i psihofiziološke senzacije (smeta, uznemirava, ugrožava).

► **BUKA** je subjektivna kategorija. **ZVUK** je fizička kategorija.

? Osnovna pretpostavka da se zvuk tretira kao buka je da postoji subjekt (čovjek ili životinja) koji opaža zvuk i kome taj zvuk smeta.

Saobraćaj ne generiše buku ako u okolini saobraćajnice ne postoje stambeni objekti ili stanište životinja?

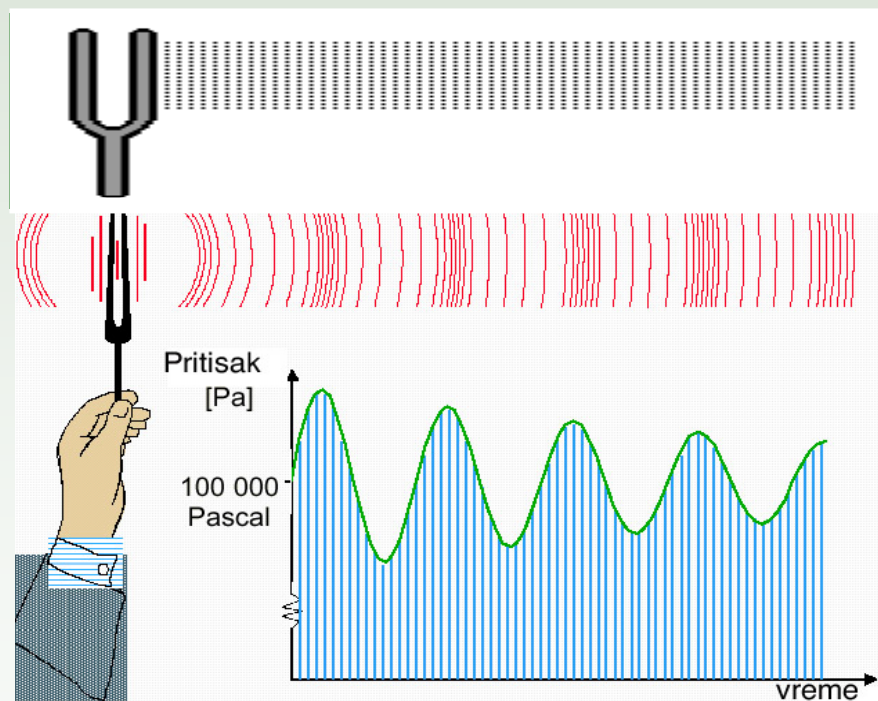
- ▶ Zvučne oscilacije (zvuk) nastaju oscilovanjem izvora pod dejstvom spoljašnje sile koja izvodi iz ravnotežnog položaja čestice elastične sredine i podstiče ih na oscilatorno kretanje oko ravnotežnog položaja.
- ▶ Telo koje izaziva poremećaj sredine naziva se **izvor zvuka**.
- ▶ Izvor zvuka može biti svako telo koje u elastičnoj sredini izvodi mehaničke oscilacije i taj način izaziva poremećaj sredine saopštavajući pri tom energiju česticama elastične sredine.



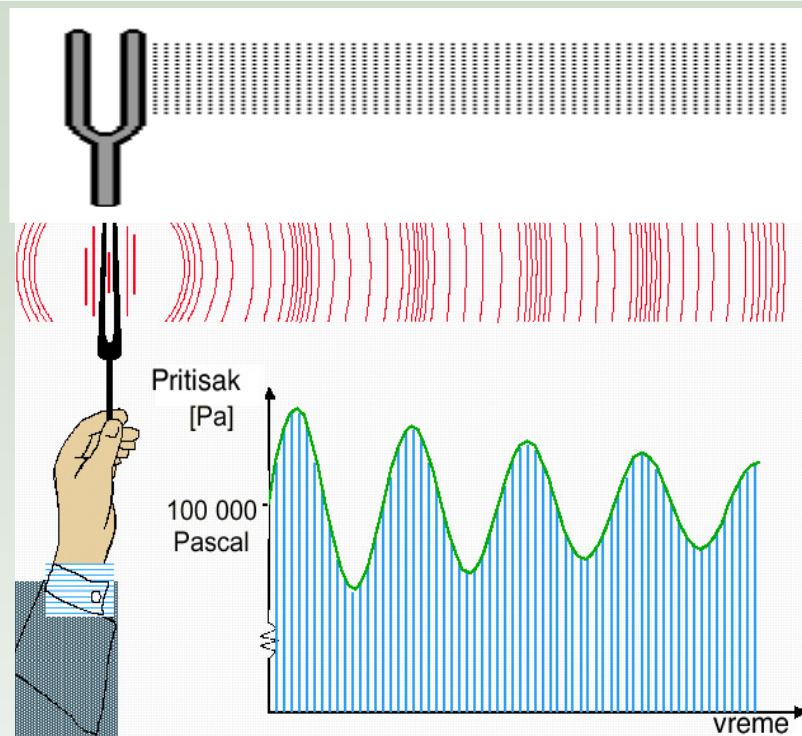
- ▶ Kada izvor osciluje, čestice sredine koje se nalaze neposredno uz izvor, potisnute su što za posledicu ima povećanje gustine sredine.

U tom sloju dolazi do zgušnjavanja čestica koje prodiru u naredni sloj, potiskujući čestice ka sledećem sloju čime se oscilacije izvora prenose na daljinu, sa sloja na sloj.

- ▶ Kada zvučni izvor osciluje, nastaju promene gustine u okruženju čime se generišu zvučni talasi.



- ▶ Kada izvor promeni smer oscilovanja, u sloju sredine uz izvor stvara se praznina koju odmah popunjavaju čestice najbližeg sloja. Na njihovo mesto, zbog razređenja, dolaze čestice iz susednog sloja. Na taj način se čestice pomeraju u suprotnom smeru a talas razređenog vazduha širi se koncentrično odmah iza talasa zgusnutog vazduha.

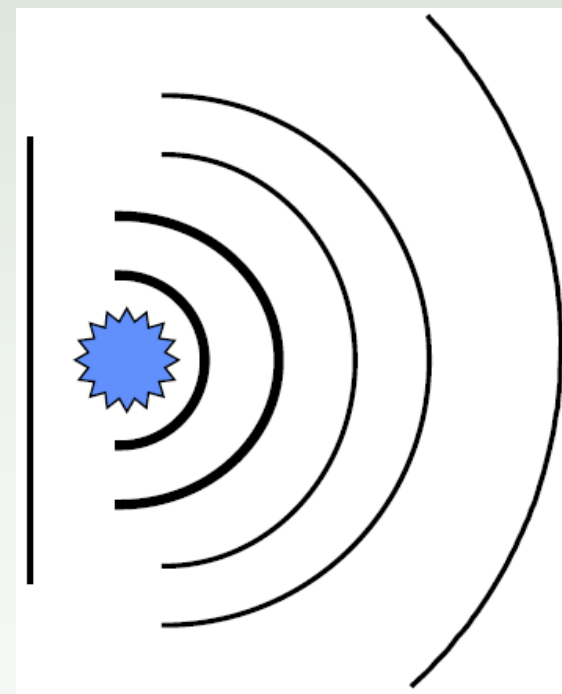


Cela pojava se ponavlja čime nastaju zvučni talasi koji se prostoru kroz sredinu konačnom brzinom.

Zvučni talas se može definisati kao poremećaj koji se prostire kroz elastičnu sredinu, prenoseći energiju s jedne lokacije na drugu.

Talasni front označava površinu na kojoj sve čestice sredine imaju istu fazu kretanja.

- ▶ Talasni front u blizini izvora ima geometrijski oblik samog izvora dok na većim udaljenostima uglavnom prerasta u ravan.



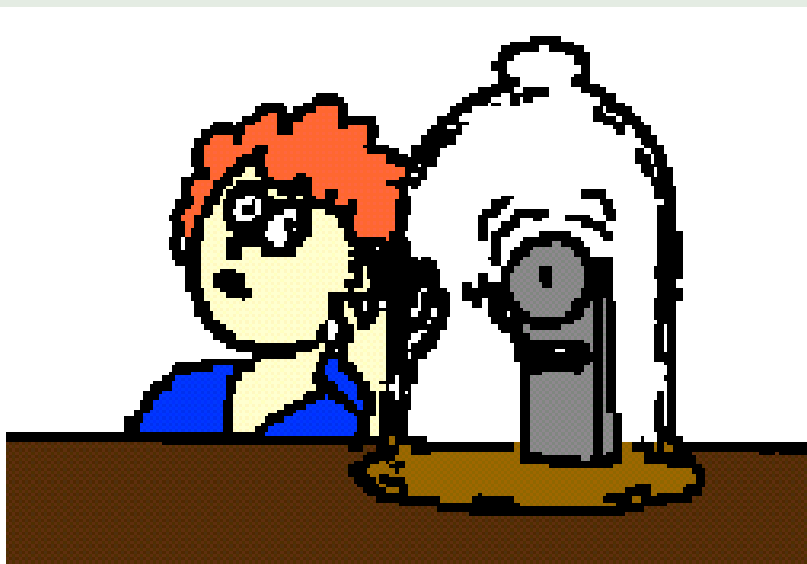
1. Zvuk i buka – definicije, sličnosti i razlike.
2. Zvučni pritisak.
3. Nastajanje i prostiranje talasa.
4. Zvučni talas.
5. Talasni front.



- ▶ Zvučni talasi se mogu prostirati kroz gasovite, tečne ili čvrste sredine. **Zvučni talasi se ne prostiru se kroz vakuum.**

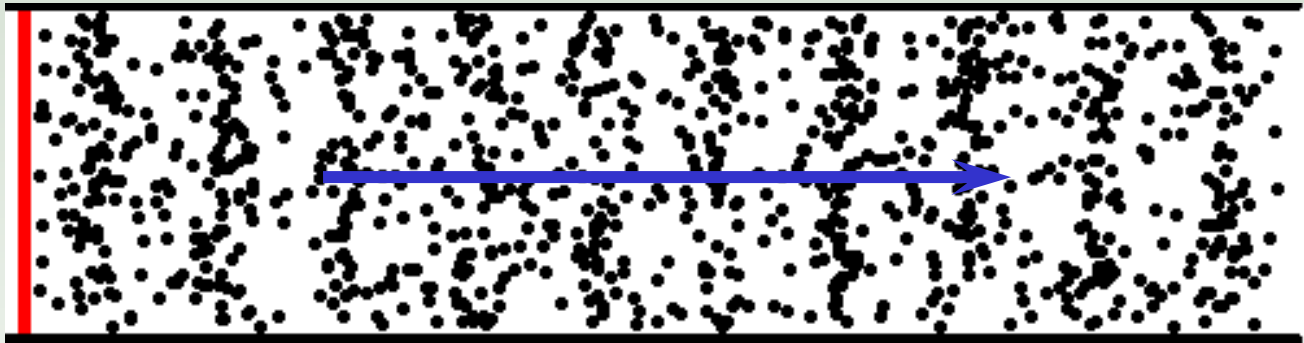
VRSTE TALASA:

- **longitudinalni** (fluid, čvrsta sredina)
 - **transverzalni** (čvrsta sredina)
- **kombinovani** (čvrsta sredina)



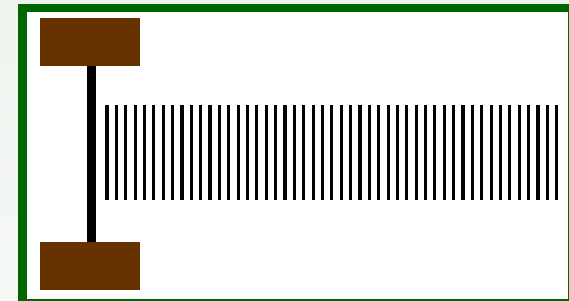
● LONGITUDINALNI TALAS

- Pomeranje čestica u pravcu prostiranja zvučnog talasa.
- **Primer:** prostiranje zvučnih talasa kroz cev

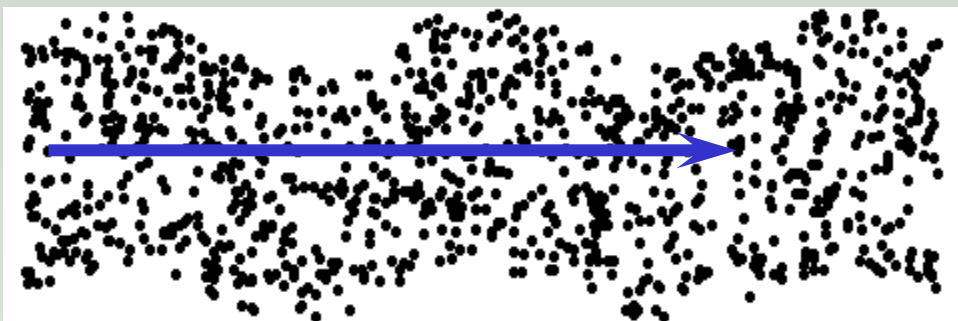
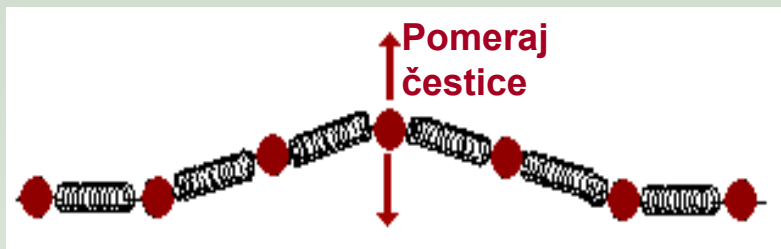


Čestice se kreću napred – nazad oko ravnotežnog položaja.

Kretanje talasa: kretanje komprimovane oblasti levo - desno.

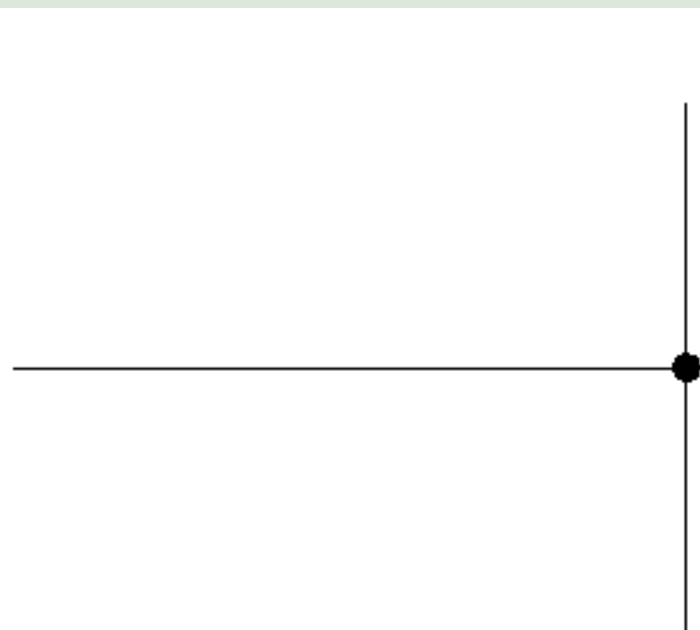


● TRANSVERZALNI TALAS



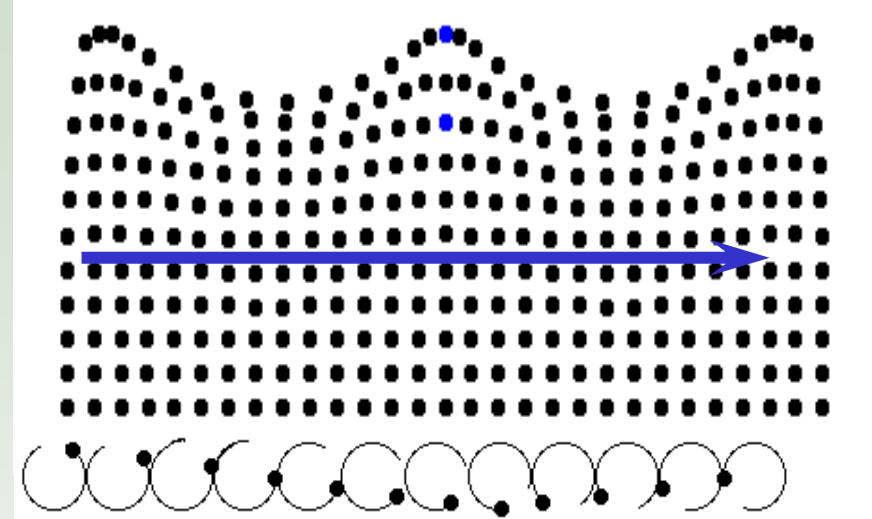
- Pomeranje čestica u pravcu koji je normalan na pravac prostiranja zvučnog talasa.
- Čestice se pomeraju gore-dole bez kretanja u pravcu talasa.

Animacija: Kada se kraj rastegnutog kanapa pomeri gore-dole energija se prenosi s leva na desno izazivajući da se delovi kanapa pomeraju gore-dole.



POVŠINSKI TALAS U TEČNOSTIMA

(kombinacija longitudinalnog i transverzalnog)

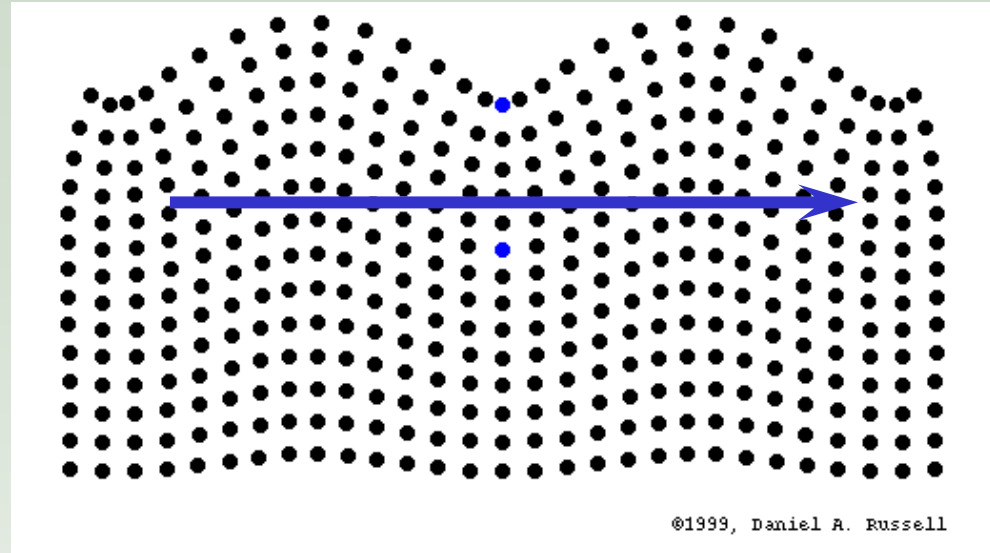


- Talasi koji nastaju na površini neke tečnosti.
- Pod dejstvom talasa čestice izvode kružno kretanje u pravcu kazaljke na satu.

Animacija: Kretanje talasa po površini vode čija je dubina veća od talasne dužine

POVRŠINSKI TALAS U ČVRSTIM TELIMA

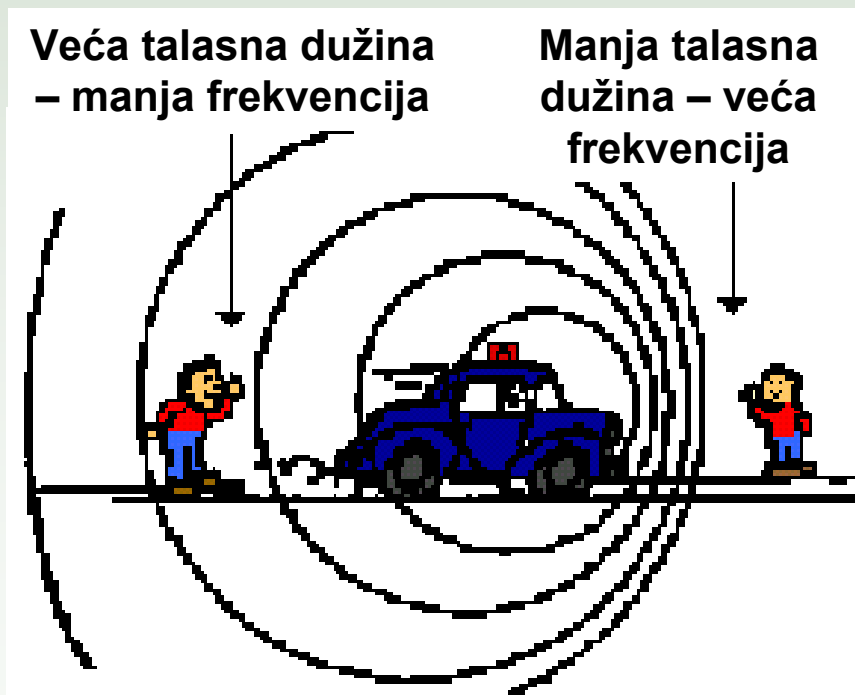
(kombinacija
longitudinalnog i
transverznog)

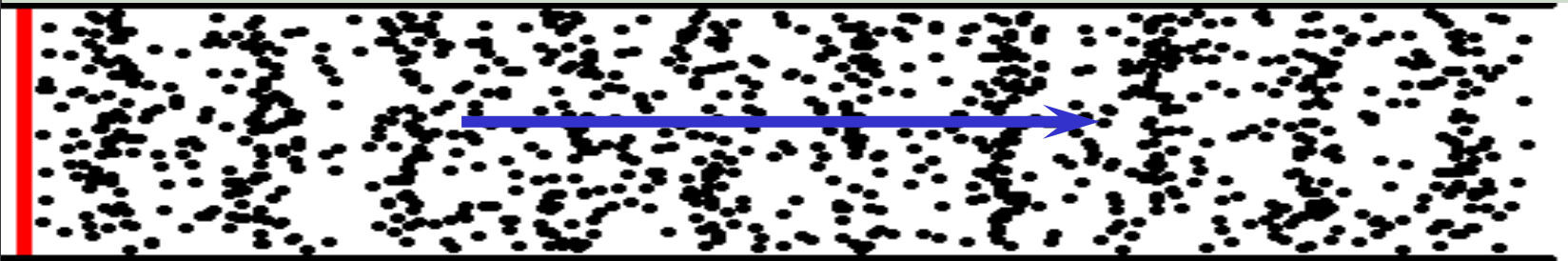


- Talasi koji nastaju na površini čvrstih tela.
- Pod dejstvom talasa čestice izvode eliptično kretanje sa glavnom osom elipse normalnom na površinu tela.
- Širina elipse se smanjuje sa povećanjem rastojanja od površine.
- Čestice na površini izvode kretanje u pravcu suprotnom kazaljka na satu, dok čestica na dubinama većim od $\lambda/5$ izvode kretanje u pravcu kazaljki na satu.

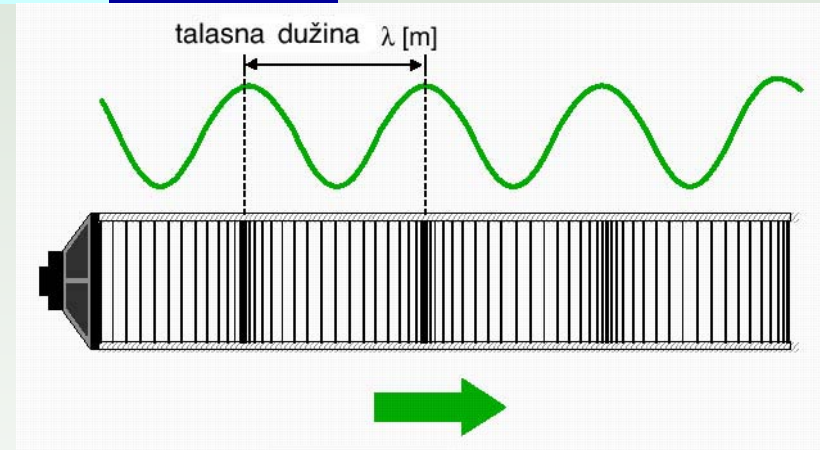
Osnovne veličine koje karakterišu zvučne talase i njihovo prostiranje su:

- talasna dužina, λ [m]
- frekvencija, f [Hz]
- period oscilovanja, T [s]
- brzina prostiranja zvuka – brzina zvuka, c [m/s]

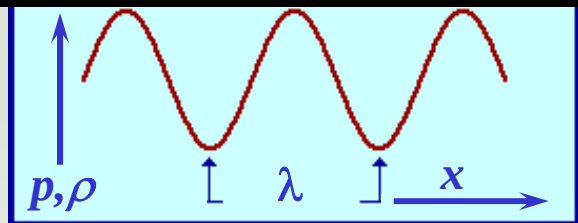
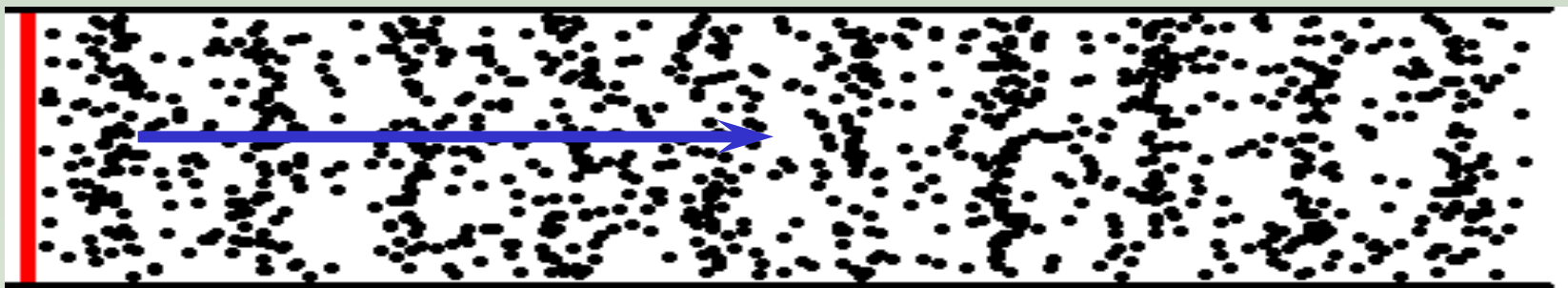




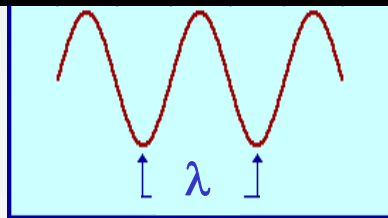
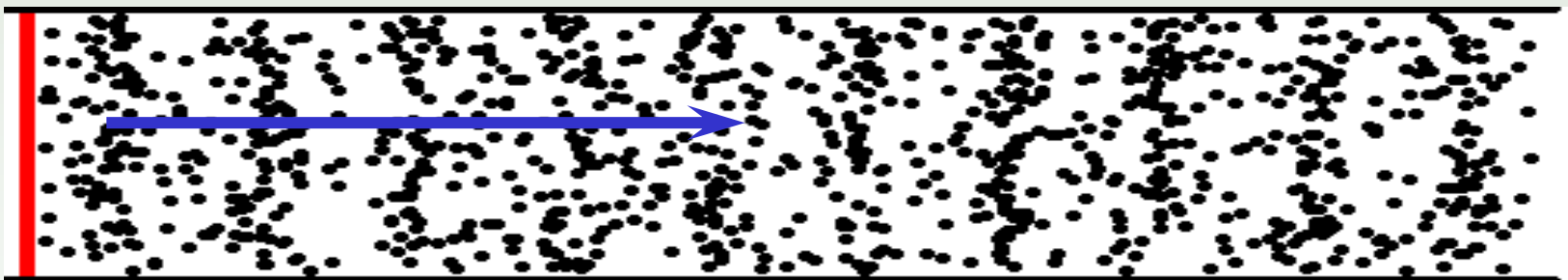
- Ako je signal sinusni, zvučni talas će se sastojati od određenog broja maksimuma i minimuma.



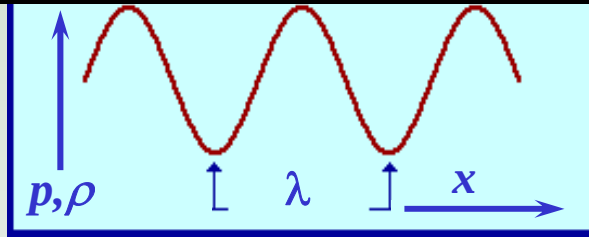
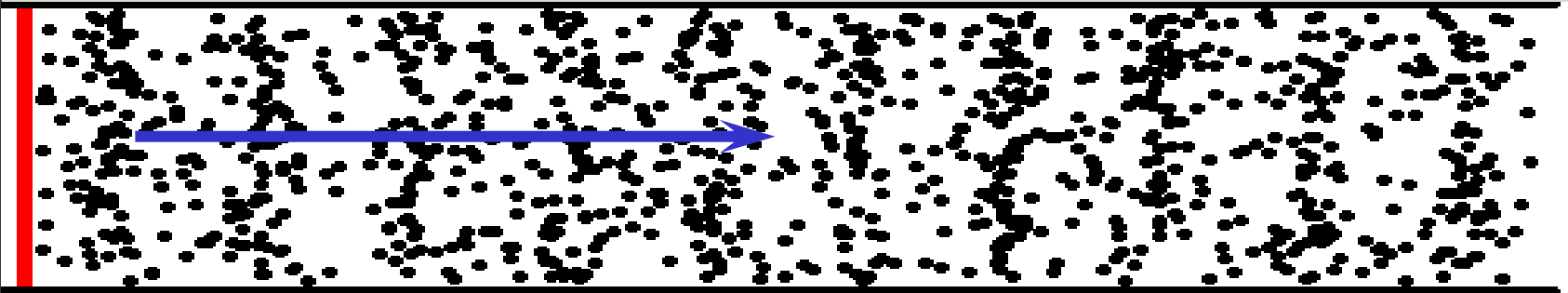
Talasna dužina zvuka predstavlja rastojanje između dva maksimuma ili dva minimuma.



► U zavisnosti od toga kako pobudna sila (klip) kreira zvučni talas, čestice osciluju napred-nazad sa određenom frekvencijom.



► Frekvencija zavisi od pobude.
► Svaka čestica kontinijuma osciluje istom frekvencijom.



$f[\text{Hz}]$

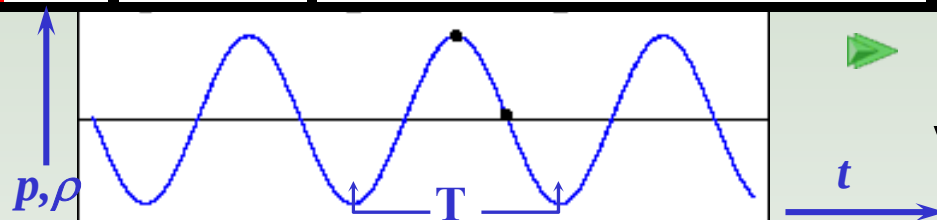
$1\text{ Hz} = 1\text{ oscilacija/sekunda}$

- Frekvencija talasa definiše koliko često čestica osciluje oko ravnotežnog položaja.

Frekvencija predstavlja broj periodičnih promena položaja čestica oko ravnotežnog položaja u jedinici vremena.

Manja frekvencija - veći period oscilovanja.

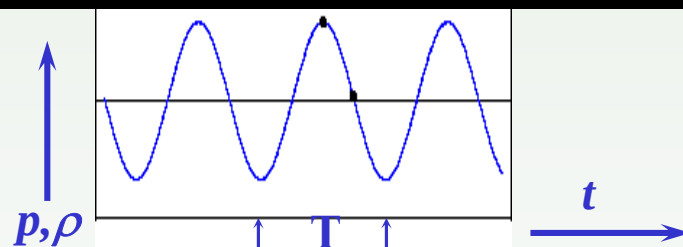
$$f = \frac{1}{T}$$



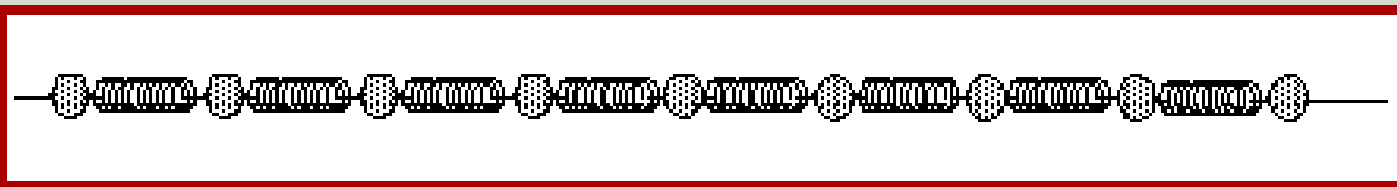
► Period oscilovanja je recipročna vrednost frekvencije oscilovanja

Veća frekvencija - manji period oscilovanja.

T[s]



Period oscilovanja predstavlja vreme potrebno za jedan ciklus oscilovanja čestica oko ravnotežnog položaja.



Frekvencija – **KOLIKO**
ČESTO?

Broj oscilacija koje
čestica izvrši u jedinici
vremena.

$$f = \frac{n}{t}$$

Brzina zvuka – **KOLIKO**
BRZO?

Rastojanje koje
poremećaj pređe u
jedinici vremena.

$$c = \frac{d}{t}$$

Brzina zvučnih talasa (zvuka) definiše se kao brzina kojom se poremećaj prenosi sa čestice na česticu.

c[m/s]

Brzina zvuka zavisi od:

- ▶ Inercionih osobina sredine (masa, gustina)

$$\rho_1 > \rho_2 \Rightarrow c_1 < c_2 \quad \text{Tri puta brže u helijumu nego u vazduhu.}$$

- ▶ Elastičnih osobina sredine (deformabilnost, elastičnost,

$$c_{\text{čvrsta tela}} > c_{\text{tečnost}} > c_{\text{gas}}$$

Jača veza između čestica čvrstih tela, iako čvrsta tela imaju veću gustinu, utiče da brzina kroz čvrsta tela bude najveća.

$$c = \sqrt{\gamma \frac{p_s}{\rho_s}}, \quad \gamma = \frac{c_p}{c_v}$$

- ▶ p_s – pritisak sredine u stacionarnom stanju

- ▶ ρ_s – gustina sredine u stacionarnom stanju

- ▶ c_v – specifična toplota pri stalnom pritisku

- ▶ c_v – specifična toplota pri stalnoj zapremini

Brzina zvuka u funkciji temperature:

$$c = c_0 \sqrt{\frac{T}{273}}$$

➤ c_0 – brzina zvuka pri $T=273^\circ\text{K}$

➤ T – apsolutna temperatura u $^\circ\text{K}$

$$c = c_0 + 0.6t$$

➤ c_0 – brzina zvuka pri $t = 0^\circ\text{C}$

➤ t – temperatura u $^\circ\text{C}$

● **Vazduh**

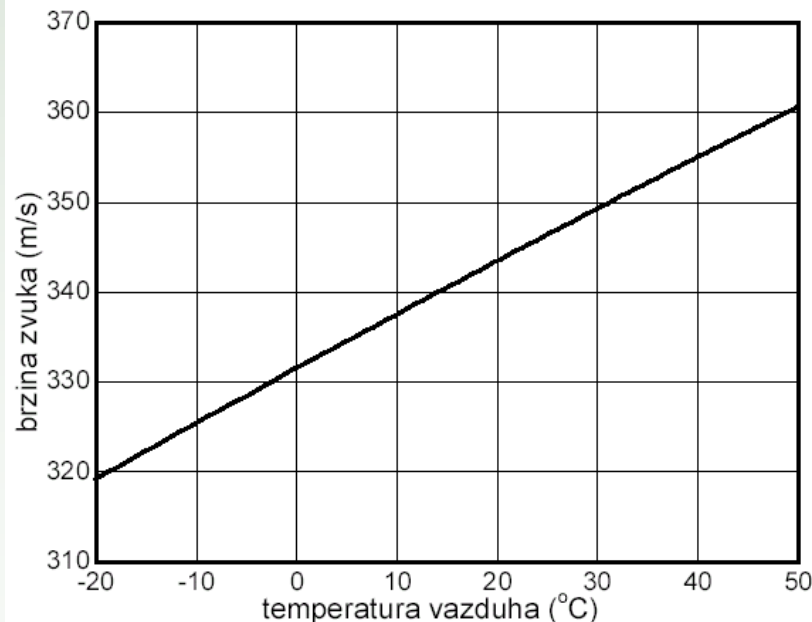
$$c = 331 + 0.6t$$

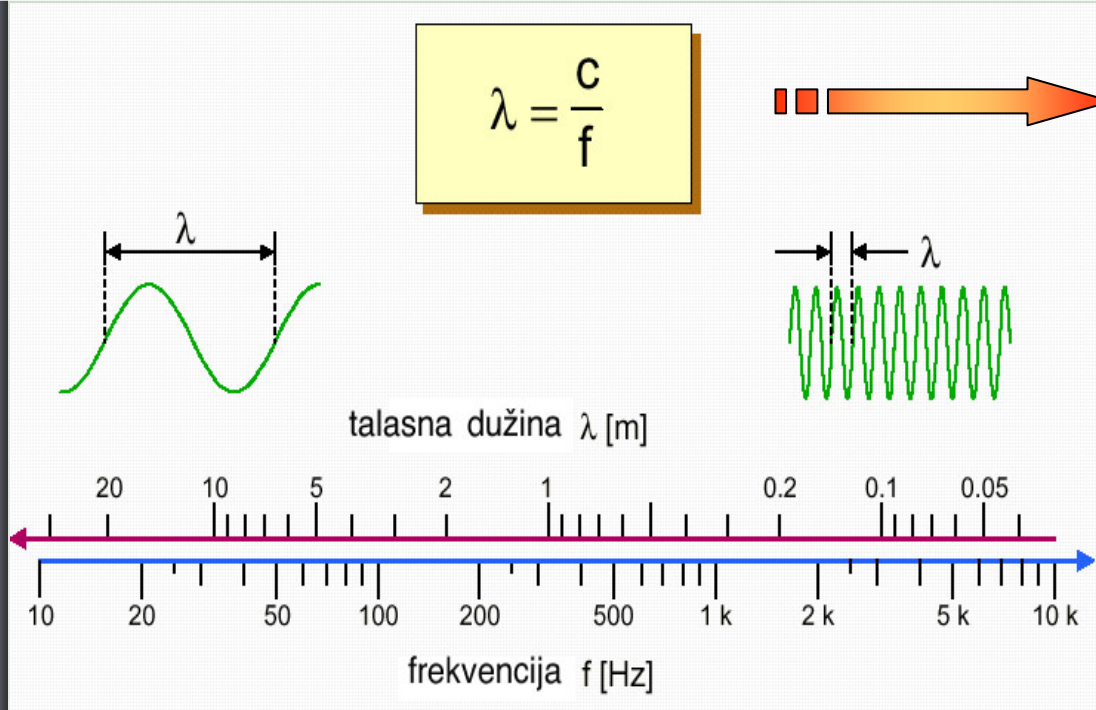


331.4m/s

331.6m/s

c=340m/s





Iako se iz prikazane jednačine može izračunati brzina zvuka na osnovu frekvencije i talasne dužine, **brzina zvuka ne zavisi od talasne dužine i frekvencije.**

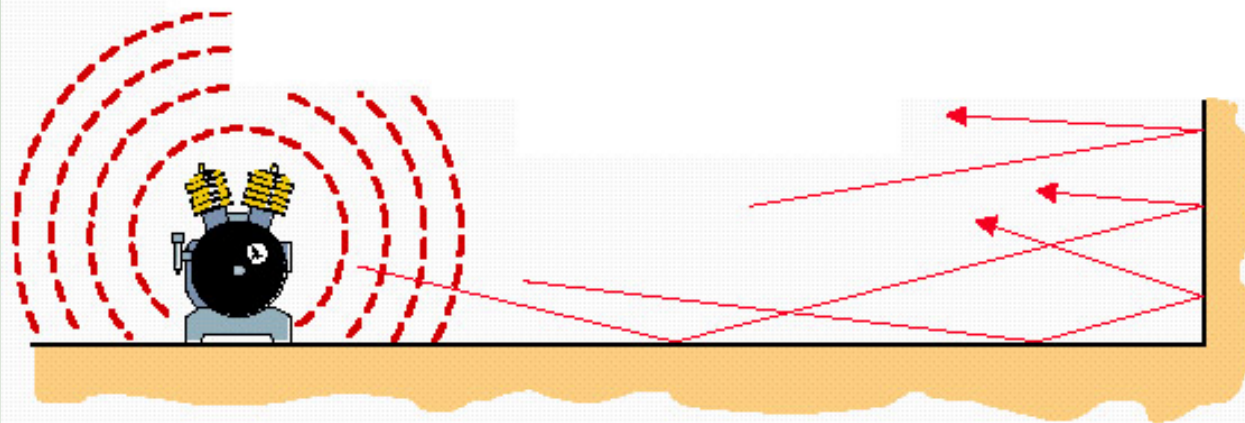


Frekvencija i talasna dužina su međusobno zavisne veličine.

frekvencija	20 Hz	100 Hz	1 kHz	10 kHz	20 kHz
talasna dužina	17 m	3,4 m	34 cm	3,4 cm	1,7 cm

1. Vrste talasa.
2. Frekvencija.
3. Talasna dužina.
4. Period oscilovanja.
5. Brzina prostiranja talasa.



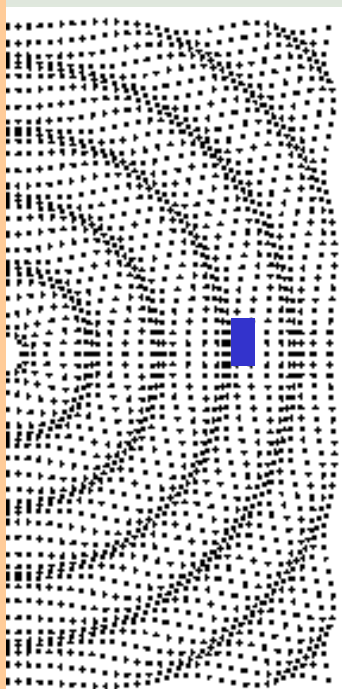


Prostiranje zvučnih talasa je praćeno fenomenima koji su posledica:

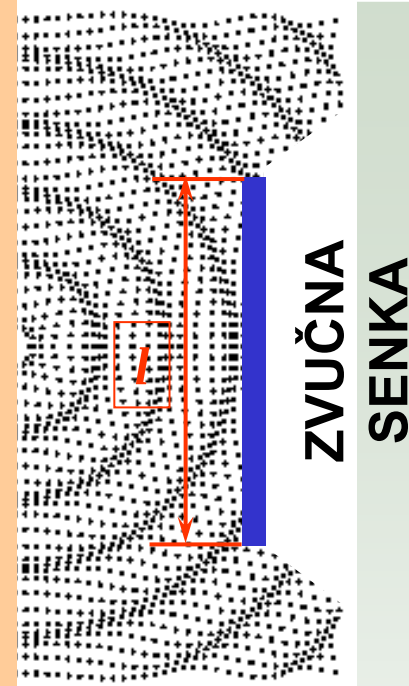
- susreta talasa sa preprekom
 - refleksije
 - difrakcije
 - difuzije
- pojava u samoj sredini
 - refrakcije
 - disipacije
- kretanja izvora
 - Doplerov efekat

Refleksija talasa je pojava nagle promene pravca prostiranja talasa pri nailasku na diskontinuitet sredine – prepreku.

Talasna dužina zvučnog talasa mnogo **VEĆA** od širine prepreke.



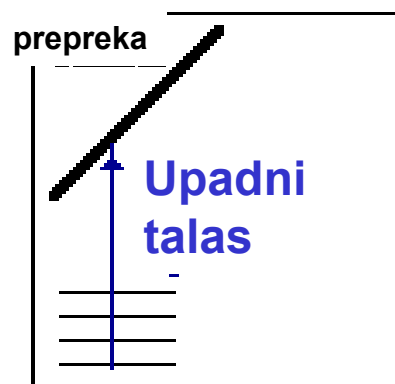
Talasna dužina zvučnog talasa mnogo **MANJA** od širine prepreke.



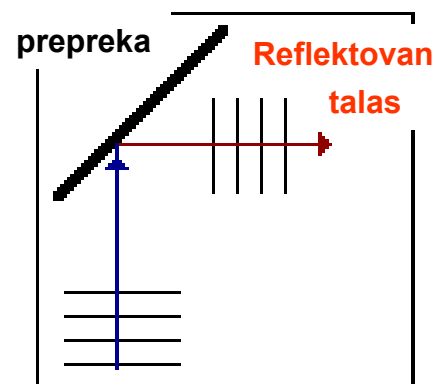
Uslov: Talasna dužina zvučnog talasa mnogo manja od veličine prepreke.

$$\lambda < \frac{l}{4}$$

► l – poprečna dimenzija prepreke u m

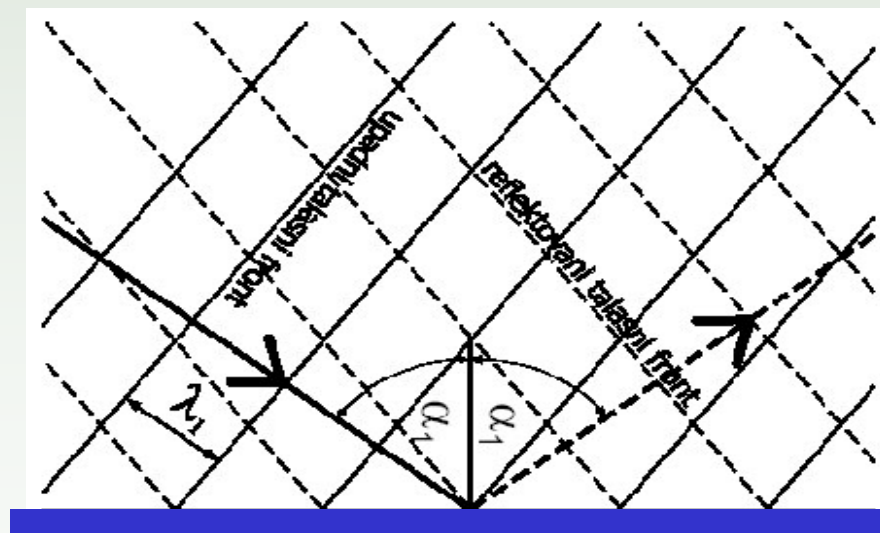


Pre refleksije



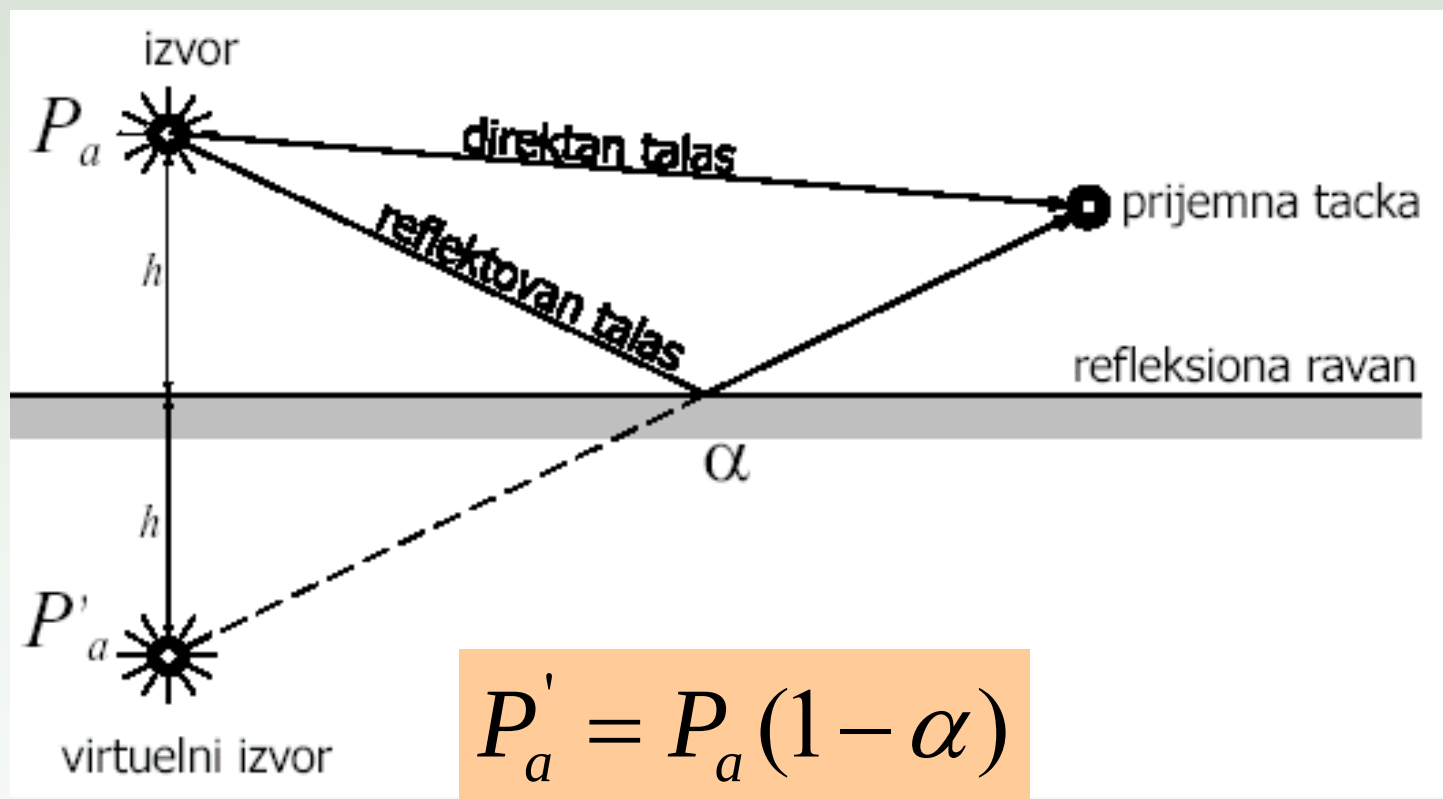
Nakon refleksije

Pravilo1: Kod kose incidencije zvučnih talasa upadni ugao jednak je reflektovanom uglu. Upadni i reflektovani talas nalaze se u istoj ravni.



Pravilo2: Dejstvo reflektovanih talasa se može zameniti virtuelnim izvorom (lik u ogledalu).

MODELOVANJE REFLEKSIJE

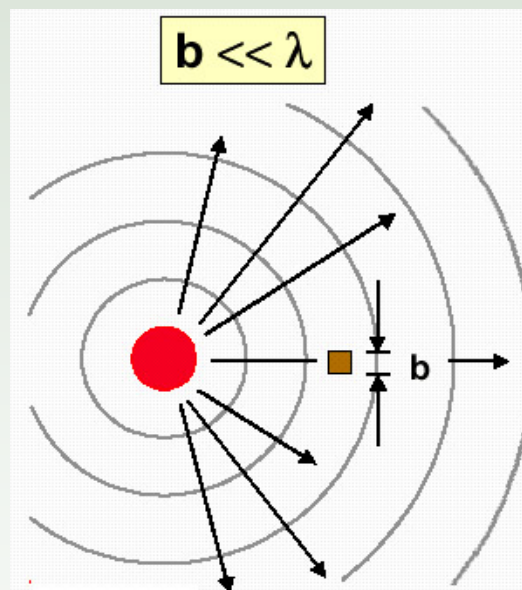


Difrakcija talasa je pojava savijanja zvučnih talasa oko ivica prepreke na koju nailazi.

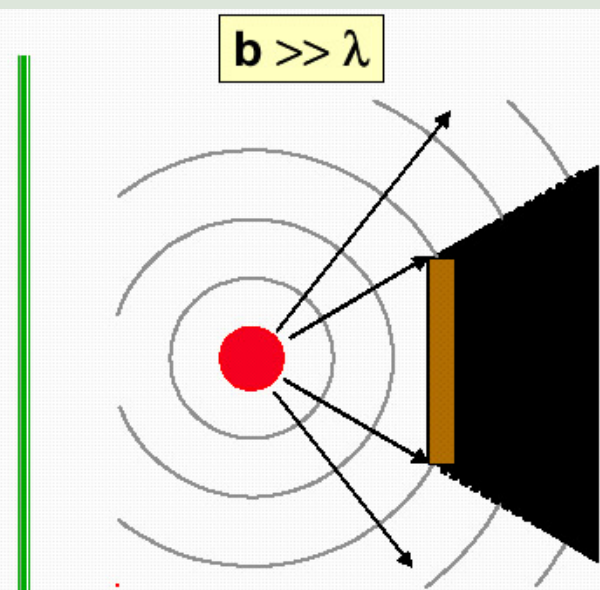
Objašnjenje: *Haygens*-ov princip – Svaka tačka pogođena talasnim frontom postaje tačkasti izvor.

Uslov:

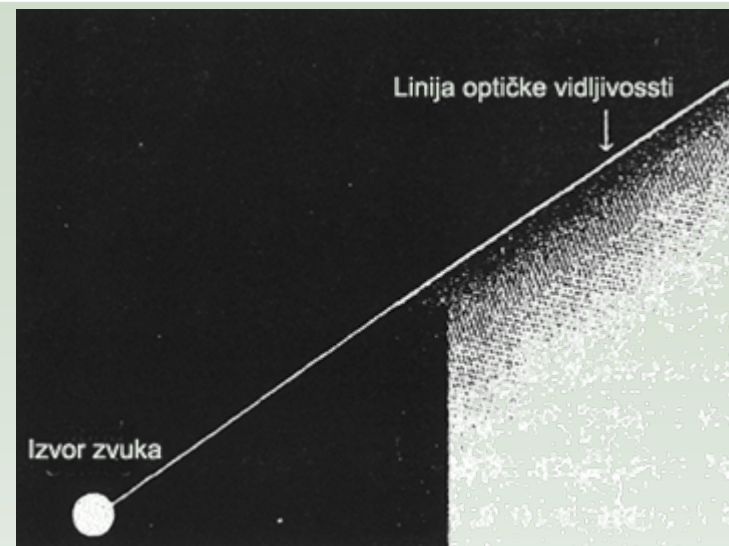
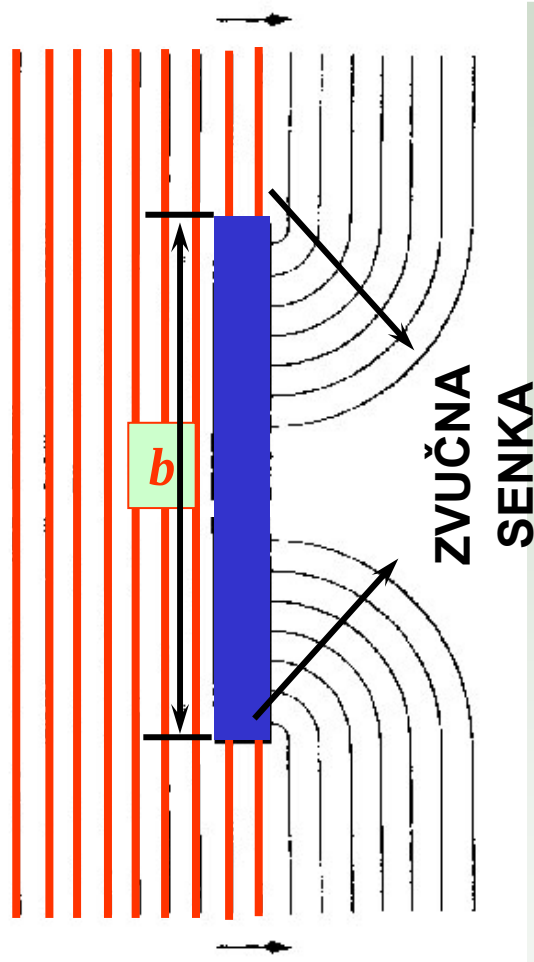
$$\frac{\lambda}{10} \leq b \leq 4\lambda$$



$b = 0.1 \text{ m}$
 $\lambda = 0.344 \text{ m} (\approx f = 1 \text{ kHz})$



$b = 1 \text{ m}$
 $\lambda = 0.344 \text{ m} (\approx f = 1 \text{ kHz})$



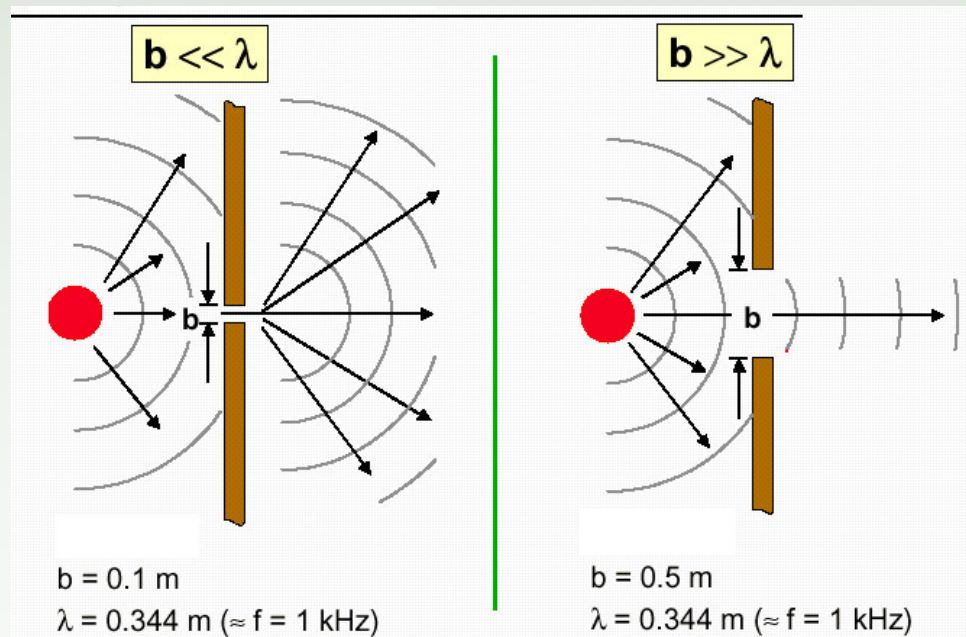
- Zvučni talasi zaobilaze prepreku i menjaju smer širenja.
- Stepen difrakcije zavisi od odnosa talasne dužine i dimenzija prepreke. Što je odnos manji difrakcija je veća i uočljivije je formiranje zvučne senke.
- Ako je prepreka znatno manja od talasne dužine, prepeka neće imati nikakav uticaj.

Difuzija je specijalni slučaj difrakcije kada zvučni talas prolazi kroz otvore čije su dimenzije male u poređenju sa talasnom dužinom.

Objašnjenje: *Haygens*-ov princip – Svaka tačka pogođena talasnim frontom postaje tačkasti izvor.

Uslov: Talasna dužina zvučnog talasa mnogo veća od dimenzija otvora.

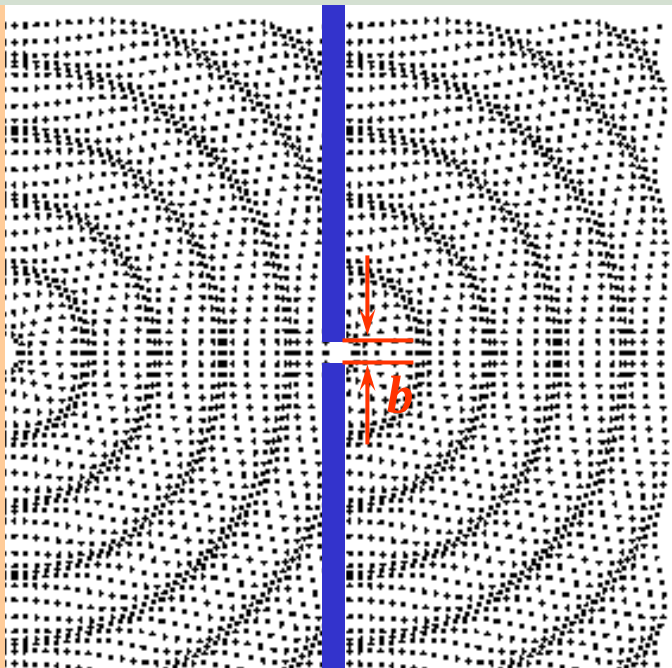
$$\lambda \gg b$$



ANIMACIJA

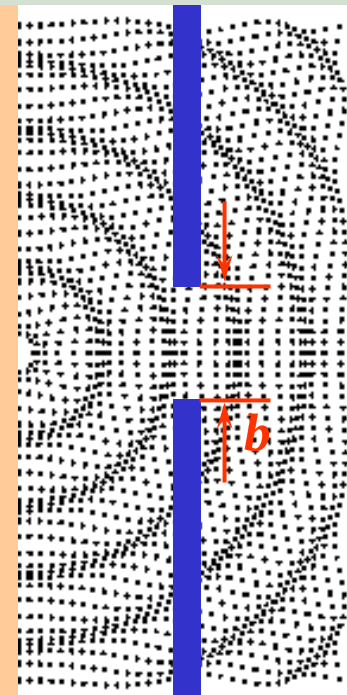
Talasna dužina zvučnog talasa mnogo VEĆA od dimenzija otvora.

$$\lambda \gg b$$



Talasna dužina zvučnog talasa mnogo MANJA od dimenzija otvora.

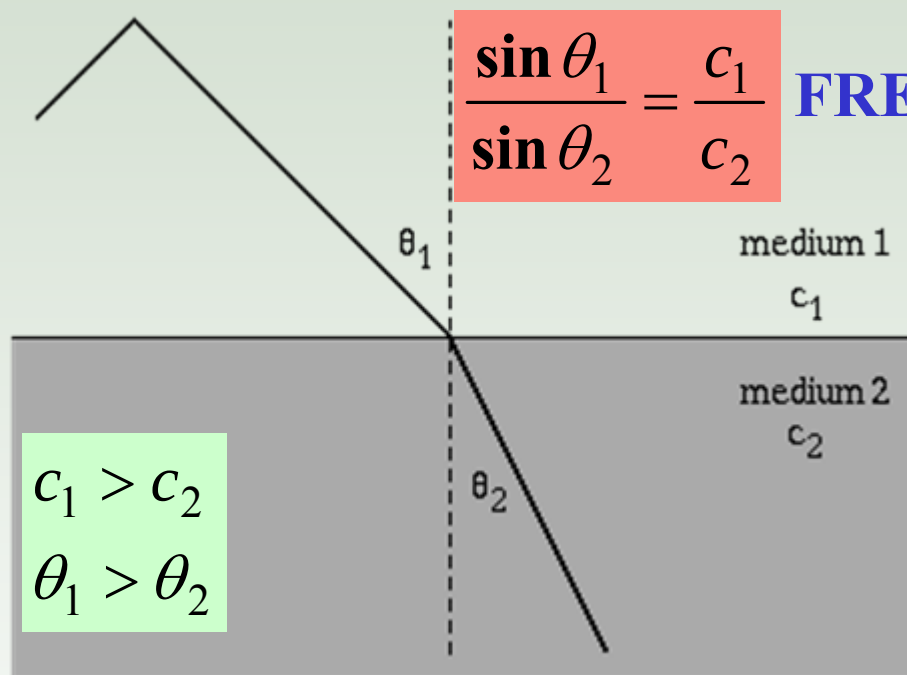
$$\lambda \ll b$$



b – poprečna dimenzija otvora

Zračenje iza otvora je skoro identično zračenju originalnog izvora.

Refrakcija talasa je pojava savijanja ili prelamanja zvučnih talasa, odnosno odstupanje od pravolinijskog kretanja.

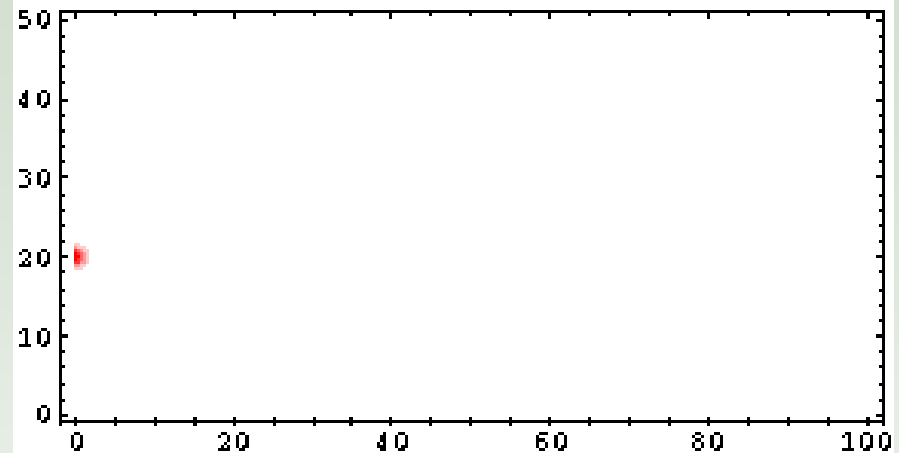


Veličina promene smera zavisi od ODNOSA brzina prostiranja zvučnih talasa kroz različite sredine.

Uslov: Refrakcija nastaje pri prostiranju talasa kroz nehomogenu sredinu ili pri prelasku iz jedne u drugu sredinu sa različitim brzinama prostiranja talasa.

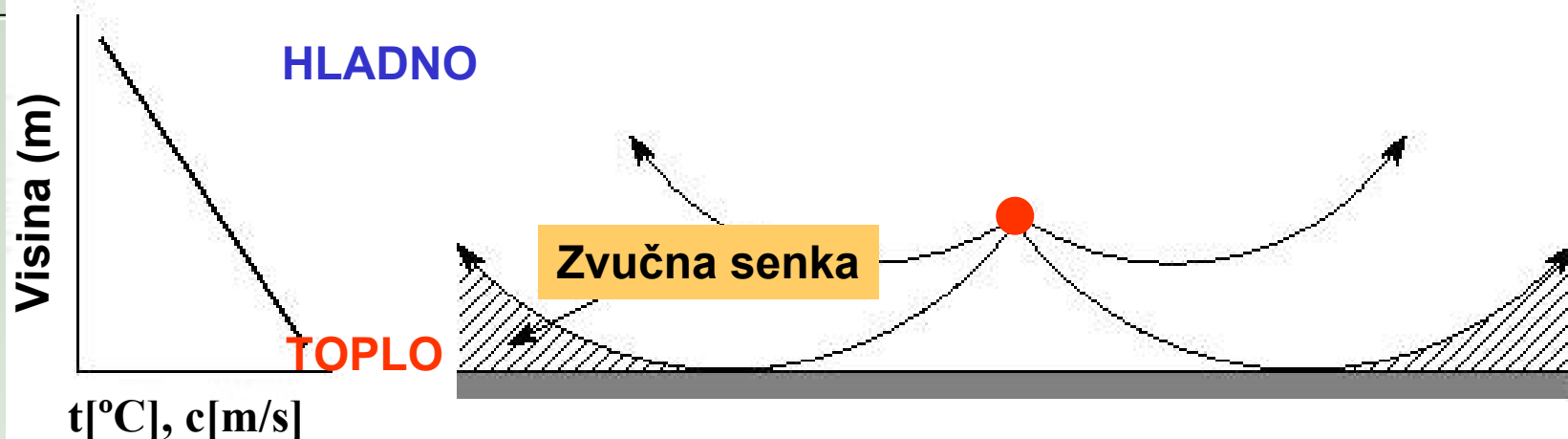
Prostiranje talasa kroz
sredinu sa konstantnom
brzinom.

Nema refrakcije!

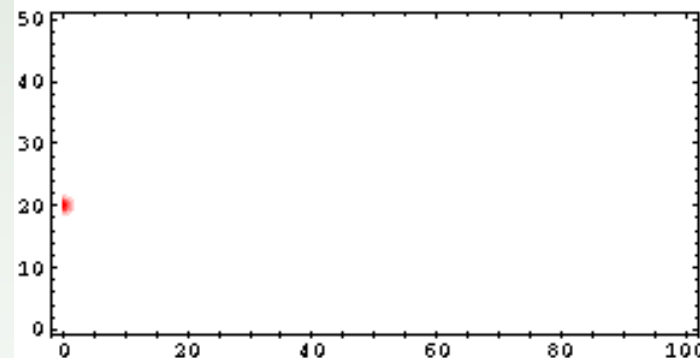


► Promena brzine zvuka u vazduhu može nastati zbog:

- gradijenta (promene) temperature
- pojave vetra



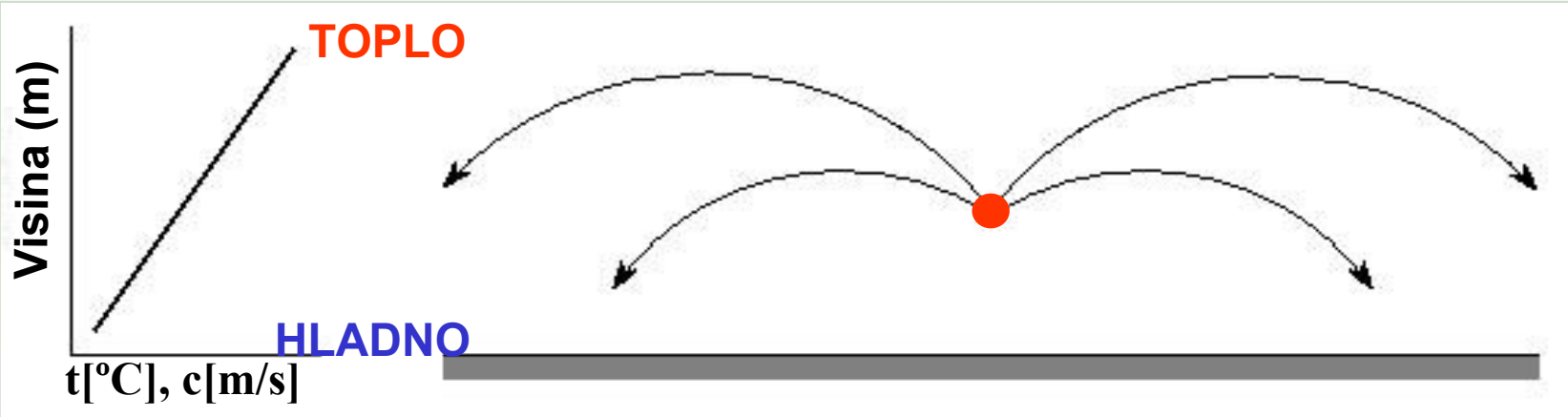
- Opadanje temperature sa visinom, opada i brzina zvuka, tako da dolazi do savijanja talasa naviše.
- Javlja se zvučna senka tako da se zvuk ne može čuti na rastojanjima na kojima bi se čuo kada ne bi bilo promene temperature.
- **Primer kampera pored jezera:** U toku dana se mogu videti ali se ne mogu čuti kamperi sa suprotne strane jezera.



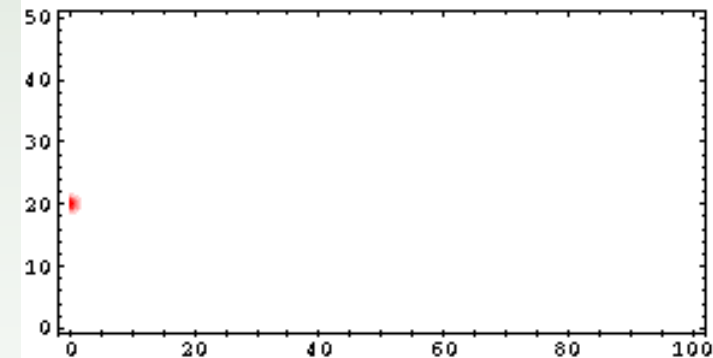
Fenomeni pri prostiranju talasa (+)

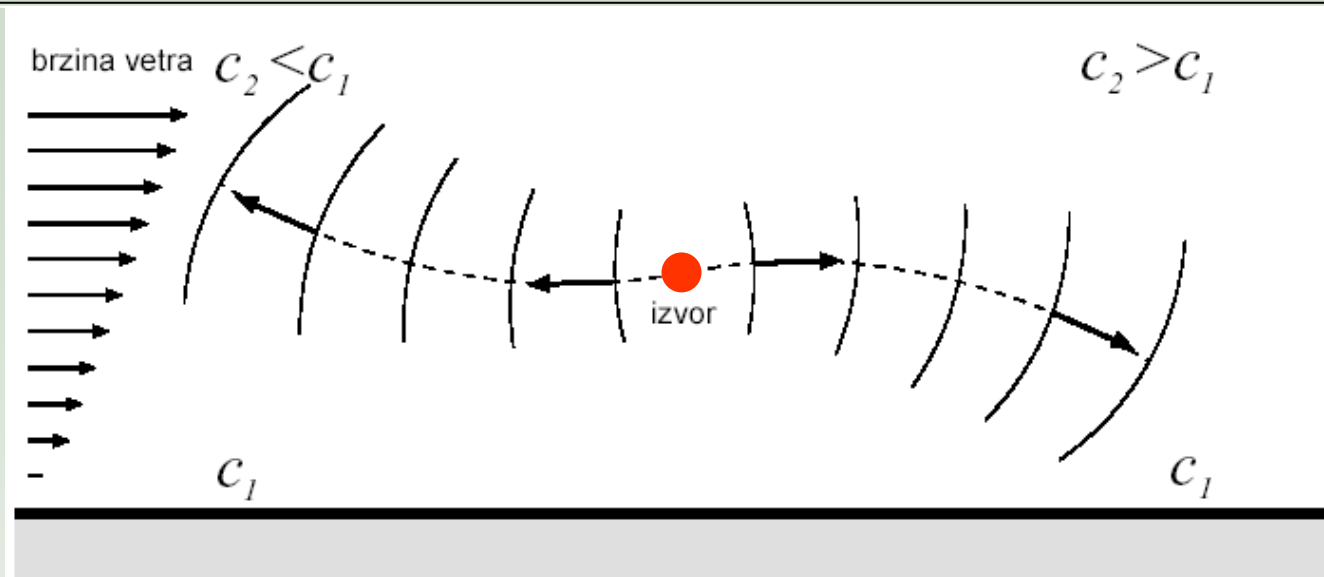
Fizički parametri radne i životne sredine

Prof. dr Dragan Cvetković



- Pri pojavi porasta temperature sa visinom raste i brzina zvuka, tako da dolazi do savijanja talasa naniže.
- Zvuk se može čuti na većim rastojanjima od uobičajenih, npr. uveče kada se zemlja i voda brže hlade od vazduha.
- **Primer kampera pored jezera:** Uveče se ne mogu videti ali se mogu čuti kamperi sa suprotne strane jezera.





- Smer prostiranja zvuka menja i vetar, jer se njihove brzine vektorski sabiraju. Brzina je veća ako se poklapaju smer vetra i smer prostiranja talasa i obrnuto.
- Brzina vetra uz tlo je najmanja zbog trenja i postojanja prepreka i raste sa visinom.
- Zvuk “uz vetar” se širi od tla prema gore, a “niz vetar” prema tlu.

Disipacija predstavlja proces gubljenja energije, odnosno njenog nepovratnog pretvaranja u drugi oblik, pri prostiranju zvučnih talasa.

Uzroci disipacije:

● Viskoznost fluida

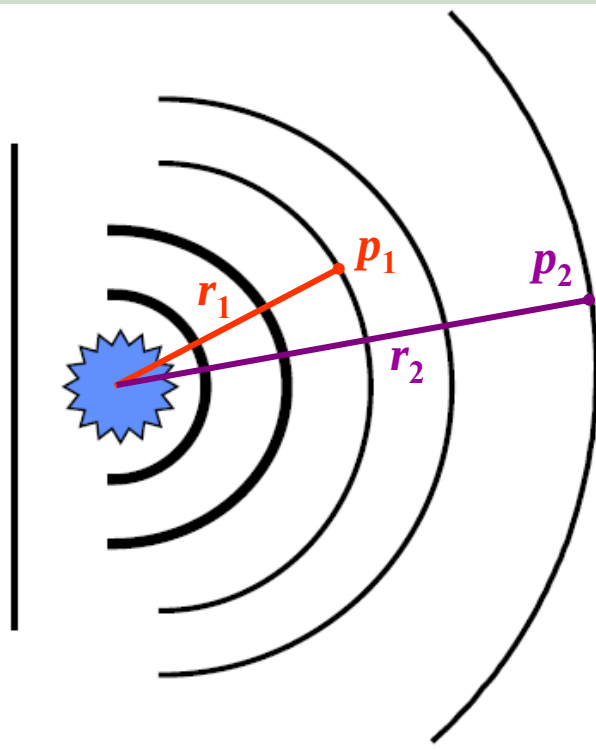
- Viskozni gubici u gasovima, osim u domenu ultrazvuka, vrlo su mali. Značajniji uticaj se javlja pri prostiranju zvuka kroz uske cevi, zbog različitih brzina oscilovanja u slojevima gasa.

● Lokalno odvođenje toplote

- Gubici su takođe mali. Značajniji uticaj se javlja pri prostiranju zvuka kroz uske cevi i porozne materijale gde zidovi i materijal preuzima deo energije iz vazduha.

● Rezonance u molekulima

- Molekularni gubici su najznačajniji na čujnim frekvencijama. Vodena para deluje katalitički pa gubici energije zavise od vlažnosti vazduha.



$$p_2 = p_1 \cdot e^{-\frac{m}{2}(r_2 - r_1)}$$

► m – koeficijent disipacije
 $m(f, \varphi, t)$

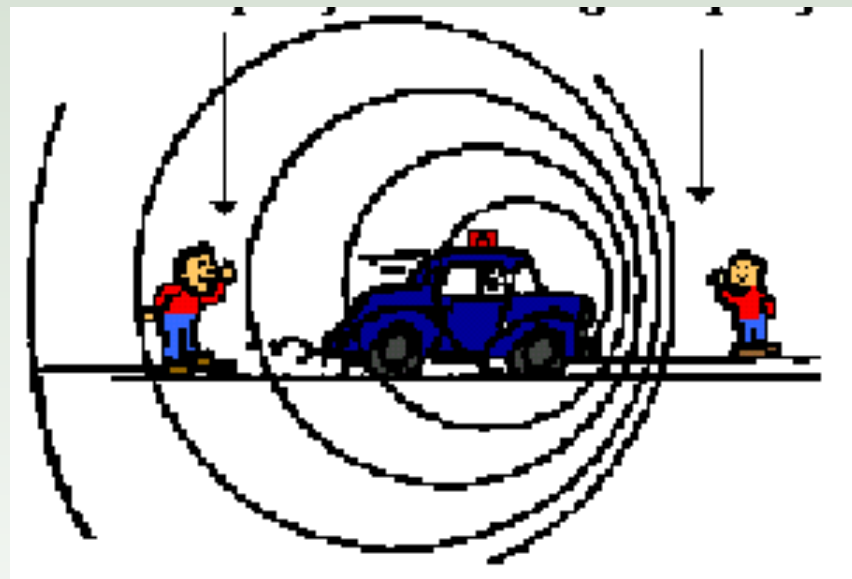
$$\Delta L = 4.34m(r_2 - r_1)$$

- Slabljenja usled disipacije su ekstremno velika na visokim frekvencijama pa je domet zvuka mali na ovim frekvencijama.

Doplerov efekat je pojava promene frekvencije i talasne dužine (visine tona) koja nastaje kao rezultat kretanja izvora ili prijemnika u odnosu na sredinu ili kretanja sredine.

► Objašnjenje:

Pri približavanju izvora prijemniku do prijemnika dolazi više zvučnih talasa u jedinici vremena tako da je frekvencija koja se opaža na mestu prijemnika veća.



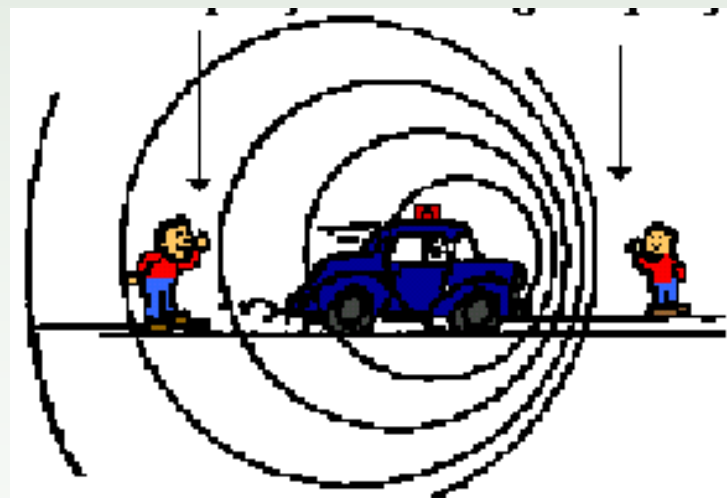
► **Primer:** Promene koje nastaju u opažanju zvuka sirene kada vozilo prolazi pored slušaoca. 

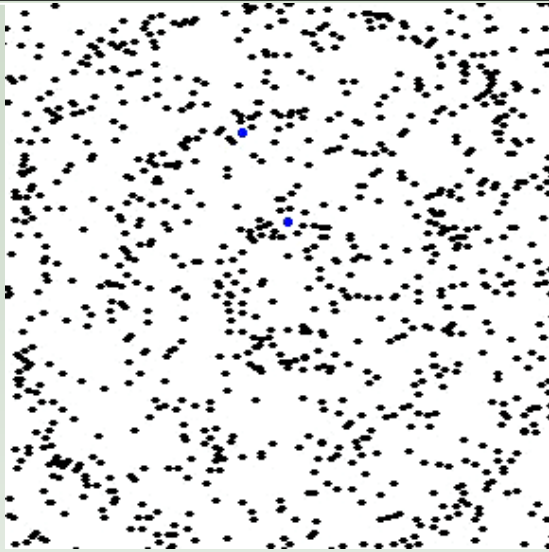
Frekvencija zvučnih talasa na mestu prijemnika:

$$f_p = f_s \frac{c \pm v_p}{c \pm v_s}$$

- f_p – frekvencija na mestu prijemnika
- f_s – frekvencija izvora
- v_p – brzina prijemnika
- v_s – brzina izvora

- Kada se izvor i prijemnik približavaju uzima se znak - (frekvencija se povećava), a kada se udaljavaju znak + (frekvencija se smanjuje).





Stacionarni zvučni izvor



- Zvučni talasi se emituju konstantnom frekvencijom f_s .
- Talasni front se prostire simetrično, konstantom brzinom koja je jednaka brzini zvuka.
- Rastojanje između talasnih frontova je jednako λ i predstavlja talasnu dužinu.
- Svi posmatrači čuju istu frekvenciju koja odgovara frekvenciji izvora f_s .

● Pokretni zvučni izvor ($v_s < c$)

- Zvučni izvor se kreće (udesno) brzinom koja je manja od brzine zvuka.
- Zvučni talasi se emituju konstantnom frekvencijom f_s .
- Centar talasnih frontova se pomera udesno.
- Rastojanje između talasnih frontova je različito - manje ispred izvora, veće iza izvora.
- Talasi se nagomilavaju ispred izvora a iza izvora se razređuju.
- Posmatrač ispred izvora čuje veću frekvenciju od frekvencije izvora, dok posmatrač iza izvora čuje nižu frekvenciju.

.

● Pokretni zvučni izvor ($v_s=c$) – Probijanje zvučne barijere



- ▶ Talasni frontovi se nagomilavaju u jednu tačku, na poziciji izvora.
- ▶ Posmatrač ispred izvora ne čuje ništa dok izvor ne stigne, dok posmatrač iza izvora čuje dvostruko nižu frekvenciju od frekvencije izvora.
- ▶ Na mestu izvora javlja se udarni talas sa veoma intenzivnim pritiskom – vizelno se opaža kao barijera (zid).
- ▶ Zvuk se ne opaža kao ton već kao tup udarac.



Pilot supersoničnih aviona registruje zvučni zid u trenutku kada dostigne zvuka i pređe na supersonične brzinu.

● Pokretni zvučni izvor ($v_s > c$)

- ▶ Izvor prethodi talasnom frontu koji ostaje iza njega u obliku kupe.
- ▶ Zvučni izvor prolazi pored stacionarnog posmatrača pre nego što on čuje zvuk koji izvor generiše.
- ▶ Iza izvora se formira kupa sa udarnim talasom visokog pritiska. Ugao kupe zavisi od odnosa brzine izvora i zvuka.

● Pokretni zvučni izvor ($v_s > c$)

➤ Nakon prolaska izvora, posmatrač čuje veoma jak zvuk (**sonic boom**) koji nastaje kao posledica istovremenog opažanja dva zvučna talasa – sa visokim (posledica kompresije) i niskim zvučnim pritiskom (posledica ekspanzije).



➤ Supersonični avioni stvaraju dva zvučna udara, jedan koji potiče od buke aviona a drugi od njegovog repa.

Nastajanje zvučnog udara nije posledica probijanja zvučnog zida (!) već kretanja aviona brzinom većom od brzine zvuka.

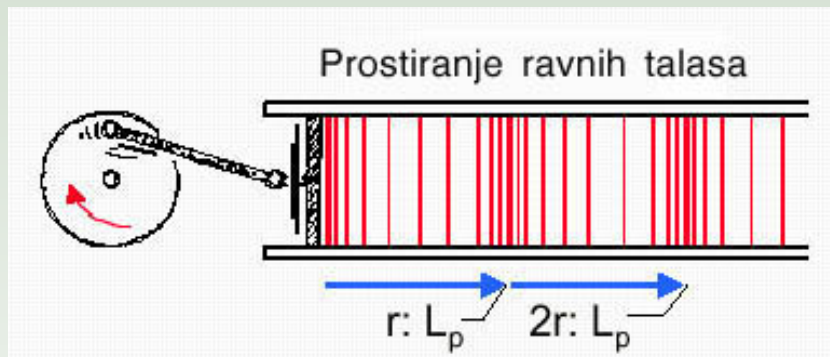


Kretanje supersoničnog aviona – probijanje zvučnog zida i kreiranje zvučnih udara

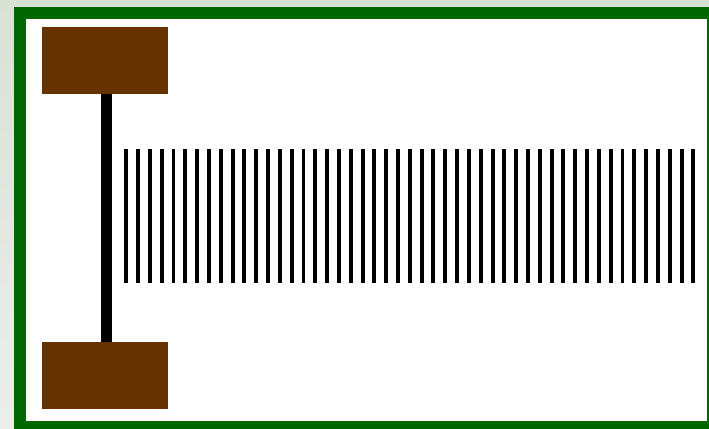
1. Refleksija talasa.
2. Difrakcija talasa.
3. Difuzija talasa.
4. Refrakcija talasa.
5. Doplerov efekat.



- Oscilovanjem beskonačne ravni ili klipne membrane u pravoj beskonačno dugoj cevi idealno glatkih i krutih zidova, nastaje najprostiji oblik talasa, **ravni talas**.

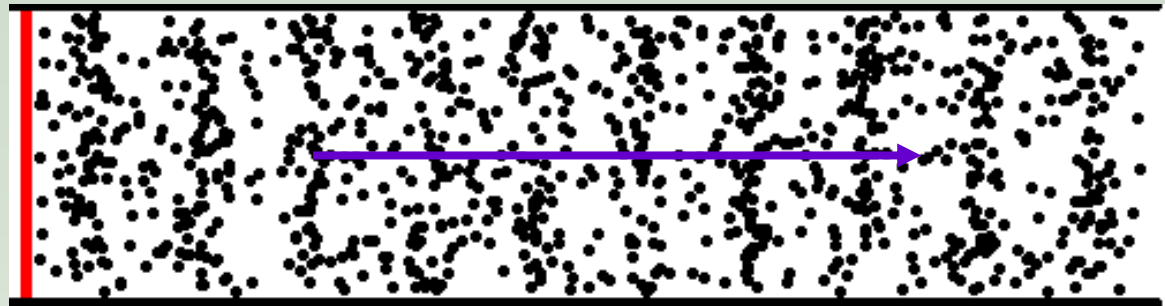


Ravanski talasi



- Talasni front, u obliku beskonačne ravni ili ravni klipne membrane, normalan je na pravac prostiranja talasa i na toj površini u svim tačkama, u bilo kojem trenutku vremena, svaka akustička promenljiva je ista bez obzira na vremensku zavisnost polja.

- ▶ Formirano zvučno polje se naziva **polje ravnih talasa.**



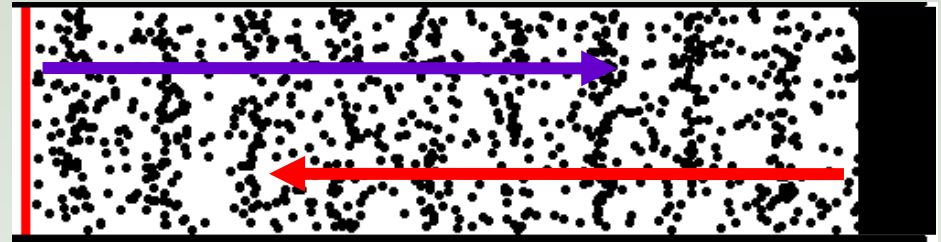
$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 p = 0$$

- ▶ Formirano zvučno polje opisuje se homogenom talasnom jednačinom koja predstavlja trodimenzionalni oblik talasne jednačine u Dekartovom koordinatnom sistemu.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c^2 \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} \right) = 0$$

- Za slučaj prostiranja ravnih talasa u pravcu **x-ose** sve akustičke veličine su funkcija samo jedne koordinate **x**, tako da talasna jednačina ima oblik dat jednačinom:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0$$



- Opšte rešenje homogene diferencijalne jednačine ima oblik:

$$\underline{p}(x, t) = \underline{A}_p^+ e^{j(\omega t - kx)} + \underline{A}_p^- e^{j(\omega t + kx)}$$

Kompleksne konstante
zavisne od graničnih i
početnih uslova

ω - kružna učestanost, $\omega = 2\pi f$

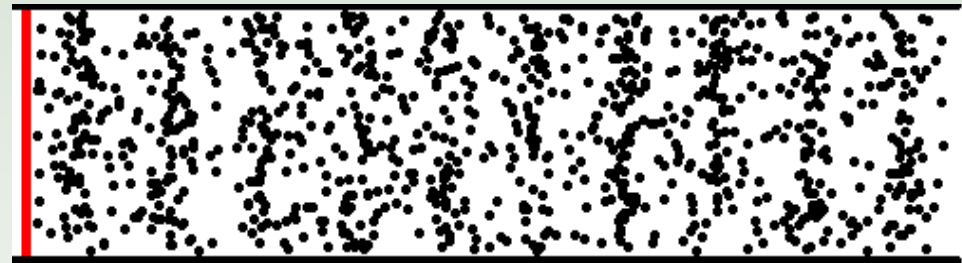
f - frekvencija, $k = \omega/c = 2\pi f/c = 2\pi/\lambda$

k - fazna konstanta,

- **Efektivna vrednost zvučnog pritiska u svim tačkama polja ravnog talasa je ista.**
- Efektivna vrednost zvučnog pritiska je veličina koja se meri mernim instrumentima i u proizvoljnoj tački zvučnog polja, u opštem slučaju, računa se kao:

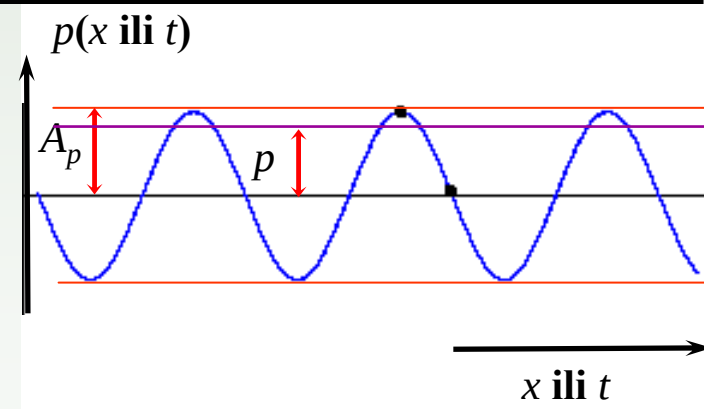
RMS

$$p = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p^2(t) dt}$$



- Za ravne talase:

$$p = \frac{A_p}{\sqrt{2}}$$



- Odnos **zvučnog pritiska** i **brzine oscilovanja** čestica elastične sredine, definiše **specifičnu akustičku impedansu** sredine kroz koju se prostire talas i određuje reakciju sredine na prostiranje talasa.

$$\underline{Z}_s = \frac{p}{v}$$

- Za ravne talase **specifična akustička impedansa** ima konstantnu vrednost što znači da su pritisak i brzina u fazi.

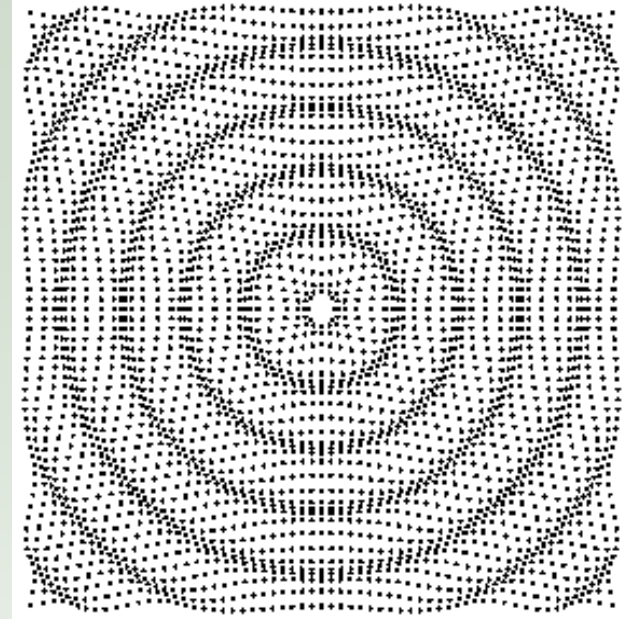
$$\underline{Z}_s = \rho c$$

- Za ravne talase specifična akustička impedansa zavisi od **karakteristika sredine** i u vazduhu pri sobnoj temperaturi i normalnom pritisku ima približno vrednost:

$$\underline{Z}_s = 414 [\text{kg/s} \cdot \text{m}^2]$$

- Sferni talasi nastaju oscilovanjem tačkastog zvučnog izvora ili pulsiranjem sfere.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c^2 \nabla^2 p = 0$$



- Talasni front, u obliku sfere, normalan je na pravac prostiranja talasa i na toj površini u svim tačkama, u bilo kojem trenutku vremena, svaka akustička promenljiva je uniformna bez obzira na vremensku zavisnost polja.
- Formirano zvučno polje se naziva **polje sfernih talasa**.

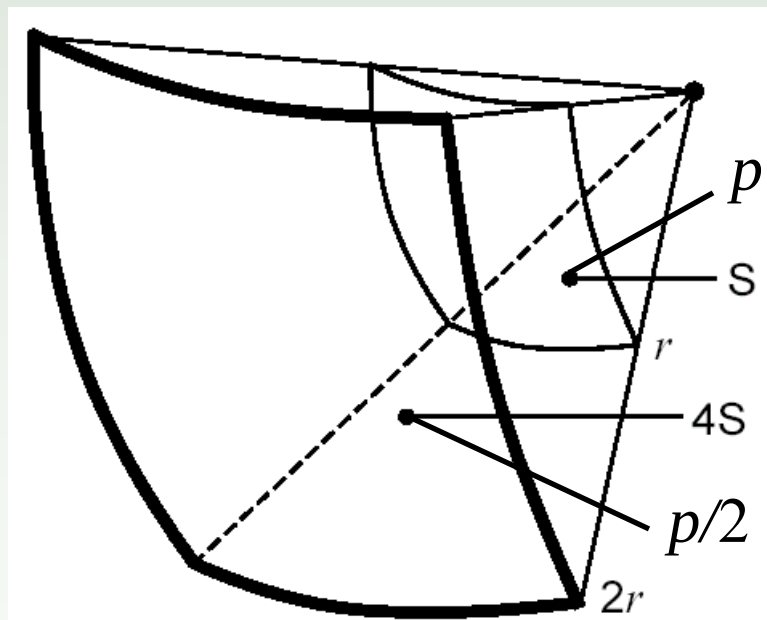
- ▶ Trenutna vrednost zvučnog pritiska $p(r,t)$ određena je realnom komponentom kompleksne veličine pritiska.

$$p(r,t) = \text{Re}\{\underline{p}(r,t)\} = \frac{A^+}{r} \cos(\omega t - kr)$$

- ▶ Zvučni pritisak opada sa povećanjem rastojanja.

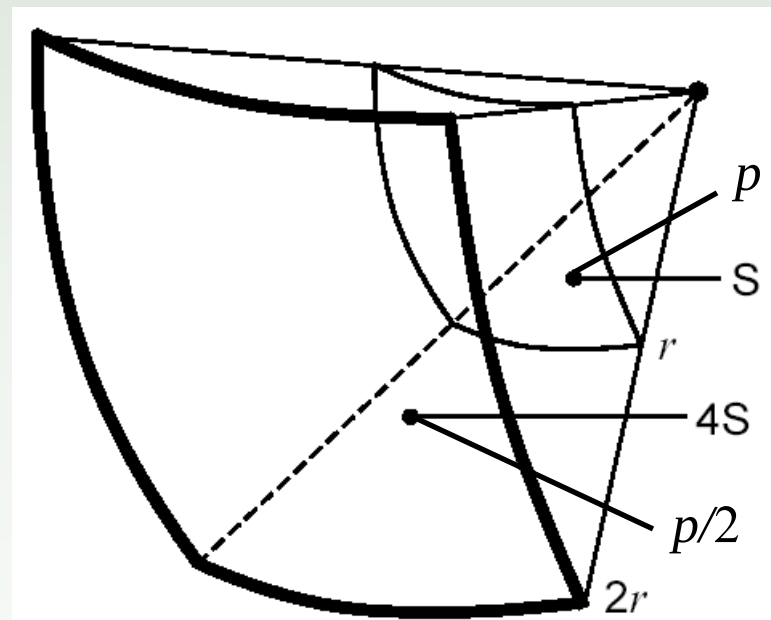
- ▶ **Razlog:** Povećanjem rastojanja od izvora zvuka povećava se površina talasnog fronta na kojoj se raspodeljuje energija koja je krenula od izvora zvuka.

- ▶ Površina talasnog fronta se povećava sa kvadratom rastojanja.

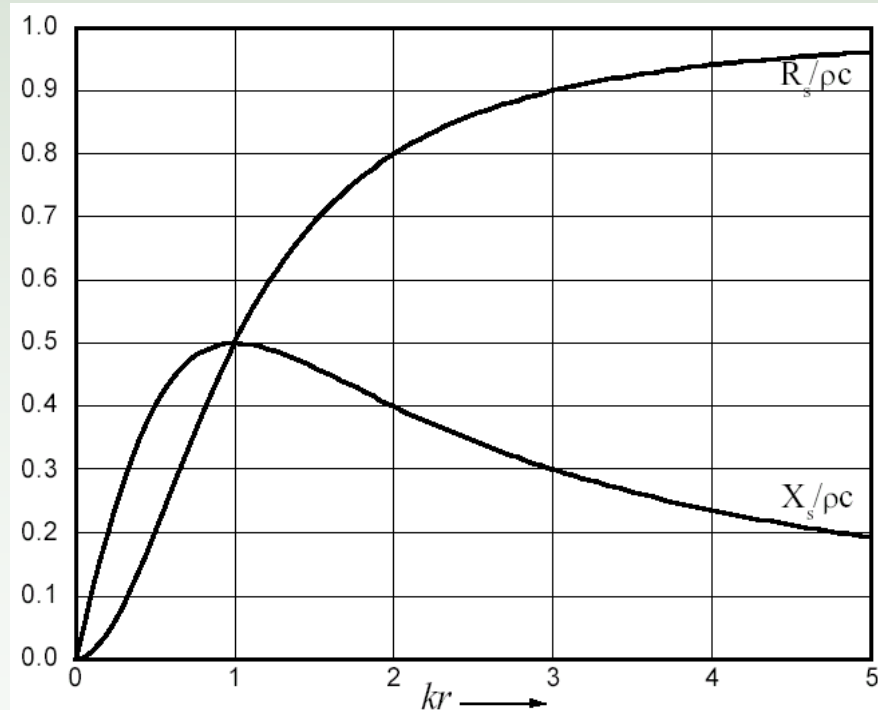


- ▶ Udvostručavanje rastojanja – četiri puta veća površina talasnog fronta, četiri puta manja gustina zvučne energije i dva puta manji zvučni pritisak.
- ▶ Zahvaljući navedenoj činjenici polje sfernog talasa je potpuno definisano jednim podatkom o veličini zvučnog pritiska.

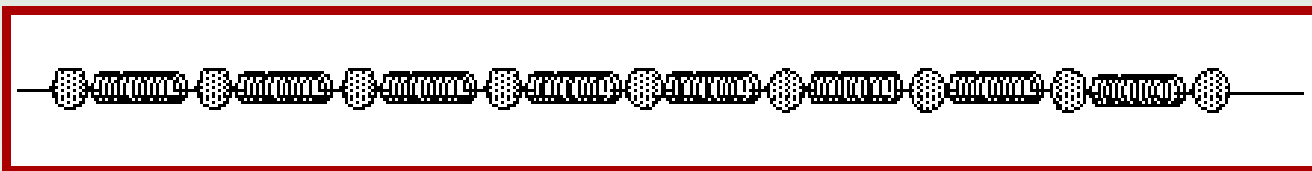
$$p_2 = \frac{r_1}{r_2} p_1$$



- Impedansa zavisi od proizvoda kr , što znači da je funkcija rastojanja i frekvencije.
- Kada je $kr \ll 1$ (u blizini izvora) impedansa je pretežno induktivna, dok na većim rastojanjima ($kr \gg 1$) impedansa postaje jednaka vrednosti za ravanski talas - ρc .
- Sferni talas pri udaljavanju od izvora zvuka se transformiše u ravni talas.

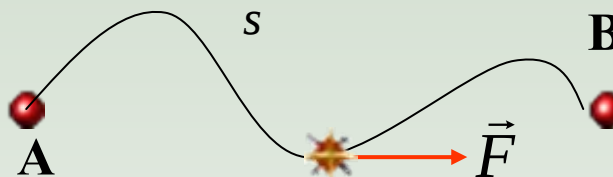


- Pre i posle nailaska zvučnog talasa, čestice sredine se nalaze u mirovanju tako da je njihova potencijalna i kinetička energija jednaka nuli.
- Pri prolasku zvučnog talasa čestice sredine izložene su uticaju statičkog i zvučnog pritiska koji je promenljiv.
- Promene zvučnog pritiska izazivaju kretanje čestica oko ravnotežnog položaja, čime se menja njihova kinetička energija.



- Kretanje čestica prouzrokuje komprimovanje ili ekspanziju sredine čime se menja potencijalna energija sredine.
- Komprimovanje i ekspanzija sredine izaziva kretanje čestica u narednom sloju, čime se nastavlja proces prenošenja energije zvuka naizmeničnim pretvaranjem kinetičke energije u potencijalnu i obrnuto.

- Energija zvuka je ekvivalentna radu koji izvrši sila **F** , kao posledica promene zvučnog pritiska, kada deluje na česticu sredine pri čemu izaziva kretanje te čestice:



$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{s}$$

- Dva oblika energije:

- **Kinetička energija** – posledica kretanja čestica oko ravnotežnog položaja.
- **Potencijalna energija** – posledica kompresije i ekspanzije sredine.

- **Gustina energije zvuka**, koristi se za opisivanje procesa kretanja zvučnih talasa i transport energije na daljinu, a definiše se kao energija zvuka po jedinici zapremine:

✚ E – gustina energije [J/m^3]

✚ W – energija [J]

$$E = \frac{dW}{dV}$$

- Gustina energije sublimiše kinetičku (posledica kretanja čestica) i potencijalnu komponentu (posledica komprimovanja i ekspanzije sredine):

$$E = E_k + E_p$$

- ▶ Kinetička energija nastaje kao posledica oscilovanja čestica oko ravnotežnog položaja:

$$E_k = \frac{\Delta W_k}{\Delta V} = \frac{\rho_s v^2}{2}$$

- ▶ Potencijalna energija nastaje kao posledica kompresije ili ekspanzije sredine i može se pokazati da je njena gustina jednaka:

$$E_p = \frac{\Delta W_p}{\Delta V} = \frac{p^2}{2\rho_s c^2}$$

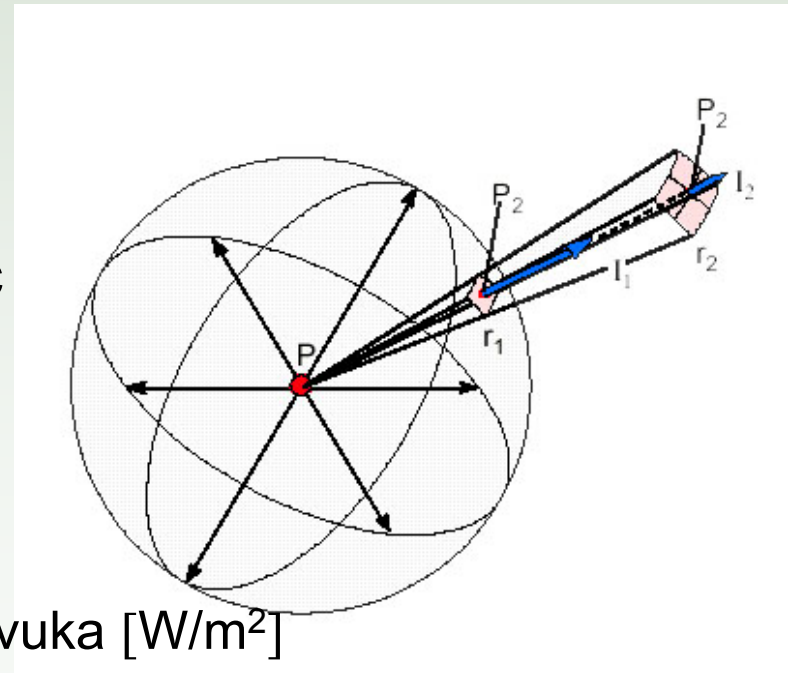
- ▶ Ukupna gustina energije zvuka – zbir gustina kinetičke i potencijalne energije:

$$E = \frac{1}{2} \left(\frac{p^2}{\rho_s c^2} + \rho_s v^2 \right)$$

- ▶ Kada zvučni izvor generiše zvučnu energiju ona se prostire radijalno i raspoređuje po talasnom frontu koji se širi sa povećanjem rastojanja od izvora.
- ▶ Intenzitet zvuka ili fluks zvučne energije definiše količinu protoka zvučne energije kroz jediničnu površinu u jedinici vremena, u pravcu prostiranja zvučnog talasa (normalno na pravac talasnog fronta):

$$I = \frac{dW}{\Delta S dt}$$

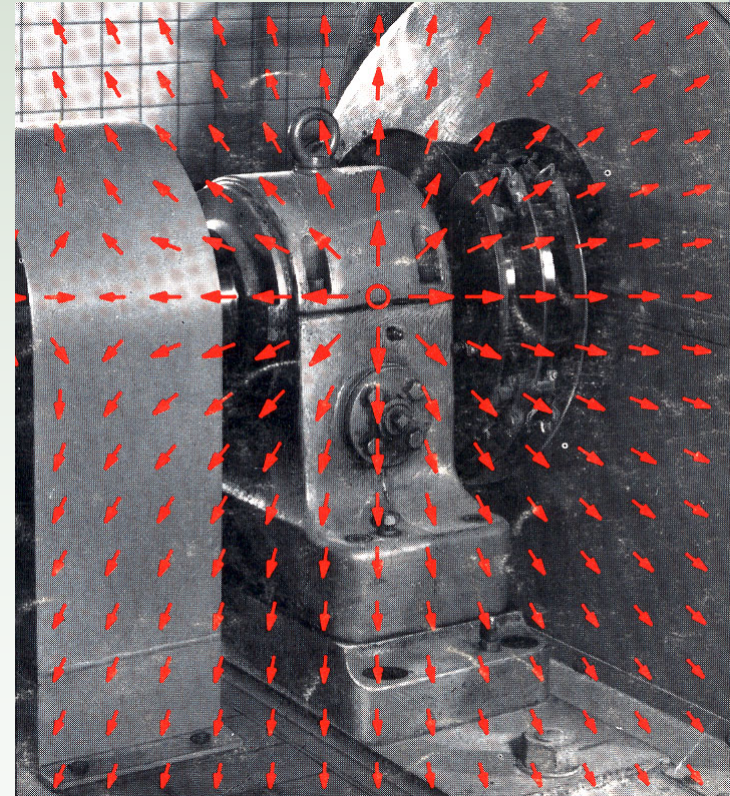
✚ I – intenzitet zvuka [W/m^2]



- ▶ Intenzitet zvuka definiše količinu zvučne energije koju zvučni talas nosi po jedinici površine talasnog fronta.
- ▶ Intenzitet zvuka je vektorska veličina koja pored količine opisuje i smer protoka zvučne energije, odnosno smer prostiranja zvučnih talasa. Intenzitet zvuka je u svakoj tački normalan na talasni front.

ZVUČNI PRITISAK – SKALAR, INTENZITET ZVUKA VEKTOR.

Prostorna raspodela vektora intenziteta zvuka ukazuje na pravce prostiranja energije (smer vektora) i količinu energije (intenzitet vektora)



- Intenzitet zvuka u bilo kojem pravcu:

$$\vec{I} = p\vec{v}$$

- Kod ravnih talasa, pravac prostiranja talasa i pravac vektora brzine se poklapaju, pritisak i brzina su u fazi pa je intenzitet zvuka:

$$\frac{p}{v} = \rho_s c \quad E = \frac{p^2}{\rho_s c^2} \quad \text{intenzitet} \quad I = pv = \frac{p^2}{\rho_s c} = v^2 \rho_s c$$

- Kod sfernih talasa pritisak i brzina su u fazno pomereni pa je intenzitet zvuka:

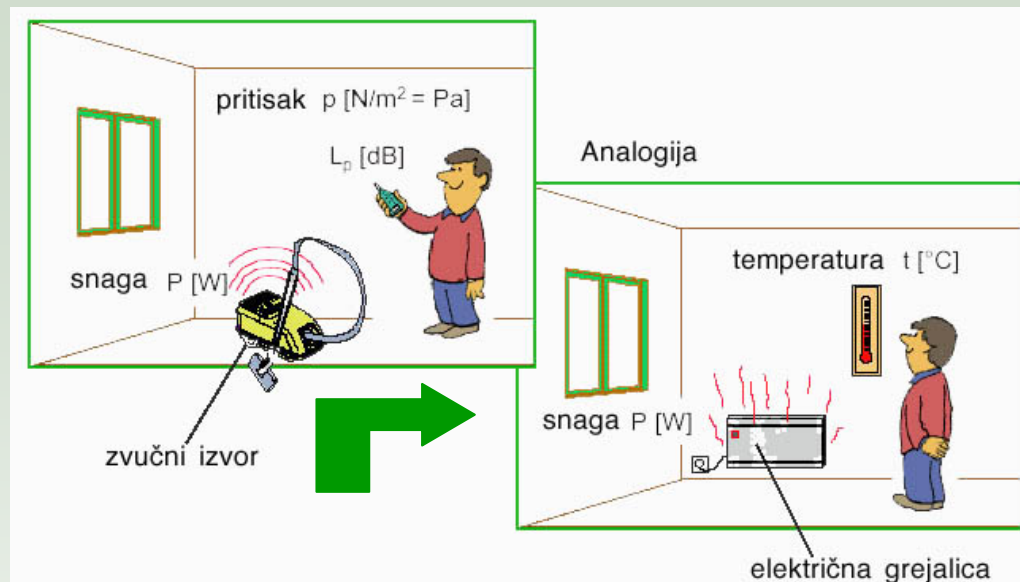
$$I = pv \cos \varphi = \frac{p^2}{\rho_s c} = v^2 \rho_s c \cos \varphi$$

$$\cos \varphi = \frac{kr}{\sqrt{1 + k^2 r^2}}$$

➤ Zvučni izvor emituje određenu količinu energije u jedinici vremena $[J/s]$, tj. ima zvučnu snagu u $[W=J/s]$.

➤ Snaga ne zavisi od okruženja u kome se izvor nalazi i predstavlja osnovnu meru energije koju može emitovati izvor.

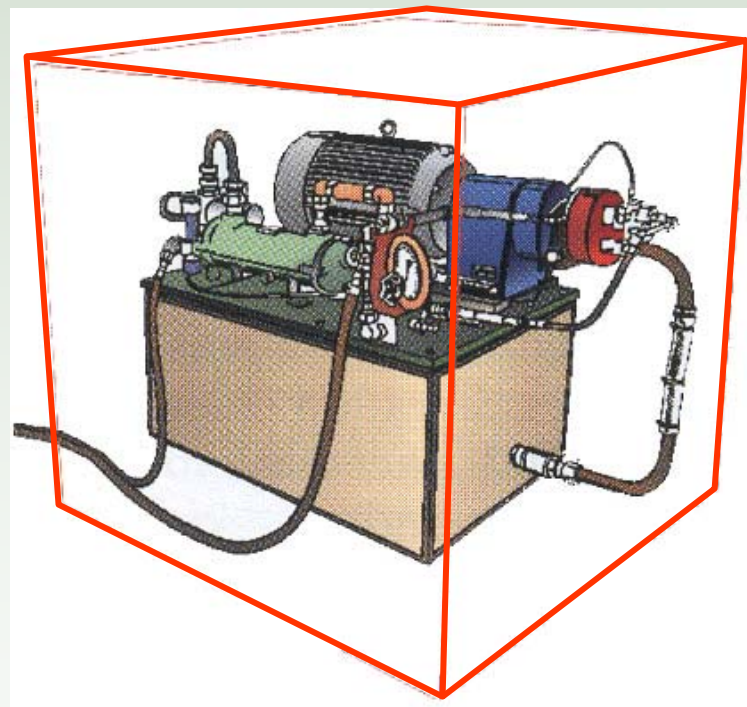
➤ Protok zvučne energije koji dolazi od izvora izaziva porast zvučnog pritiska u prostoriji. Promena pritiska se registruje mikrofonom, ne zavisi samo od zvučne snage izvora i rastojanja izvora i merne tačke, već i od količine apsorbovane energije zidova kao i količine energije koja se prenese kroz zidove, prozore i vrata.



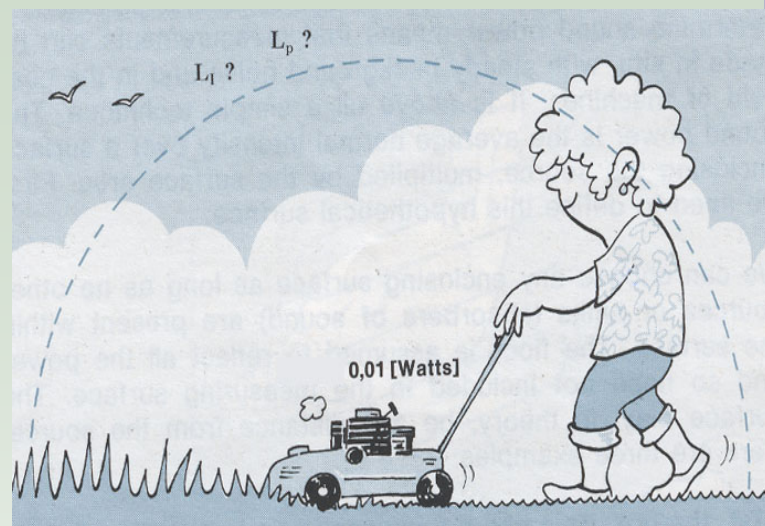
ZVUČNI PRITISAK – POSLEDICA, ZVUČNA SNAGA UZROK.

- ▶ Izvor zvuka zrači zvučnu energiju čija količina direktno zavisi od zvučne snage izvora i kao rezultat javlja se zvučni pritisak u okruženju.
- ▶ Zvučna snaga izvora definiše brzinu kojom se emituje energija, odnosno definiše energiju koja u jedinici vremena prolazi kroz bilo koju površinu koja obuhvata izvor:

$$P_a = \frac{dW}{dt}$$



- ▶ Poznavajući zvučnu snagu izvora buke može se odrediti vrednost zvučnog pritiska i intenziteta zvuka na određenom rastojanju od izvora zvuka, uzimajući u obzir karakteristike prostiranja zvučnih talasa u posmatranoj sredini.



- ▶ Kod ravnih talasa zvučna snaga se računa kao:

$$P_a = I \cdot S$$

- ▶ Kod sfernih talasa zvučna snaga se računa kao:

$$P_a = I \cdot 4\pi r^2$$

✚ r – rastojanje od izvora zvuka na kojem je izmeren intenzitet zvuka I

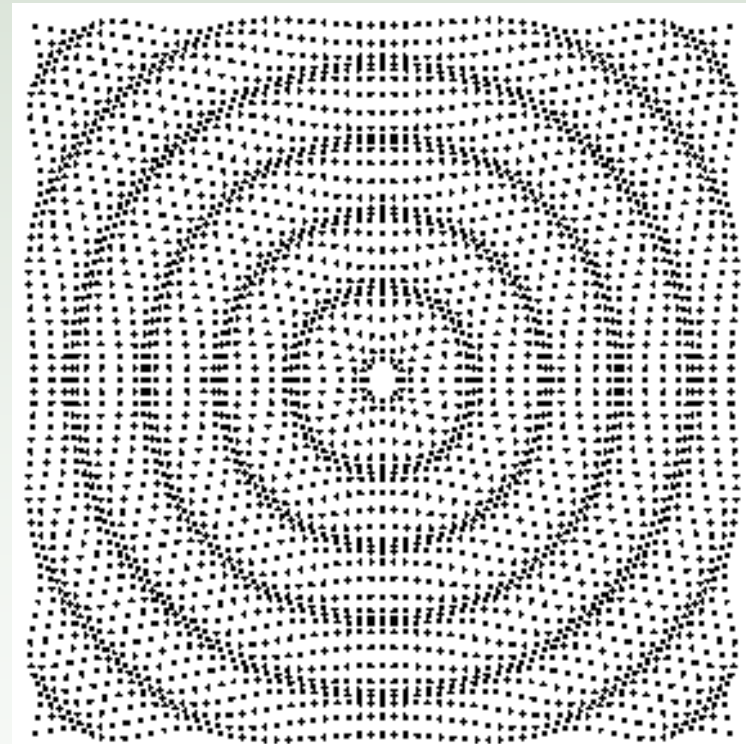
1. Ravanski talas – nastajanje, zvučni pritisak, specifična impedansa.
2. Sferni talas – nastajanje, zvučni pritisak, specifična impedansa.
3. Energija zvuka.
4. Intenzitet zvuka.
5. Zvučna snaga.



- ▶ Kada su dimenzije zvučnog izvora koji generiše sferne talase (pulsirajuća sfera poluprečnika r_0) znatno manje u odnosu na talasnu dužinu emitovanih talasa, takvi izvori nazivaju se tačkasti zvučni izvori.

USLOV: $r_0 \ll \lambda$

- ▶ U slobodnom prostoru dati izvori stvaraju sferne talase i važe iste zakonitosti kao i za izvore sfernih talasa.

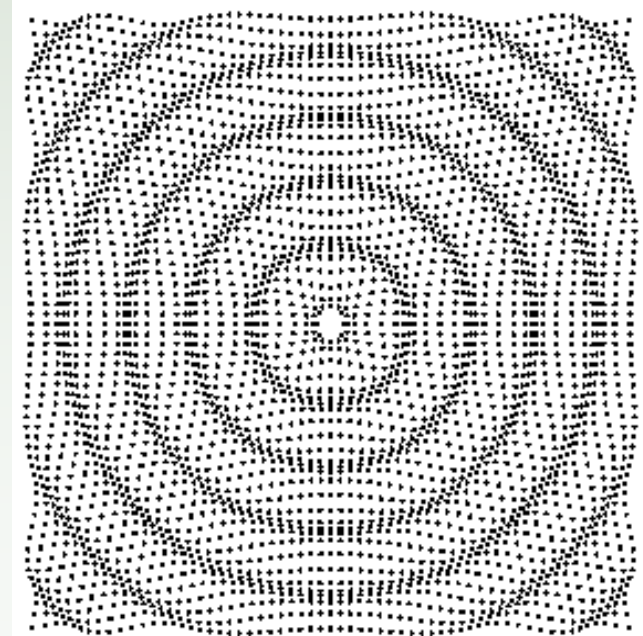


- ▶ Za slučaj kada se tačkasti izvor zvuka nalazi u slobodnom prostoru, vrednost zvučnog pritiska određena je rešenjem talasne jednačine za sferne talase:

$$\underline{p}(r, t) = \frac{\underline{A}^+}{r} e^{j(\omega t - kr)}$$

- ▶ Iz izvedenih izraza proizilazi osnovna karakteristika tačkastih izvora: **zvučni pritisak opada sa povećanjem rastojanja.**

$$pr = \text{const}$$



- Intenzitet zvuka zavisi od akustičke snage izvora zvuka i površine talasnog fronta na kojem se računa intenzitet:

$$I = \frac{P_a}{4\pi r^2}$$

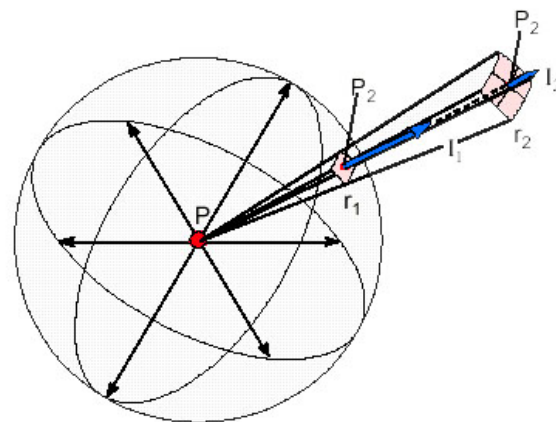
- ✚ P_a – akustička snaga tačkastog zvučnog izvora
✚ r – rastojanje od tačkastog izvora zvuka

- Korišćenjem relacije između intenziteta zvuka i zvučnog pritiska:

$$I = \frac{p^2}{\rho c}$$

može se izvesti izraz za zvučni pritisak:

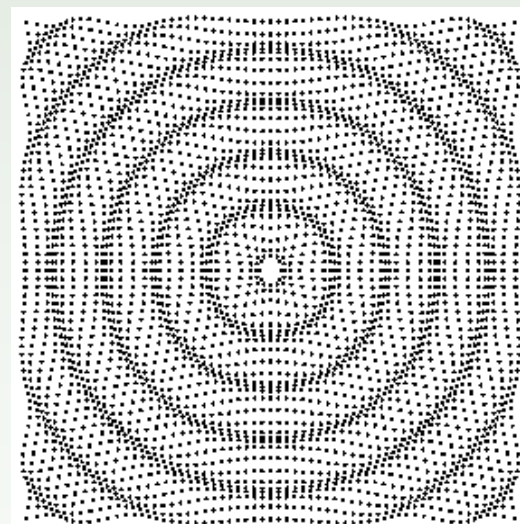
$$\frac{p^2}{\rho c} = \frac{P_a}{4\pi r^2} \Rightarrow p = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{P_a \rho c}{4\pi}}$$



- ▶ **Prostorni ugao zračenja**, Ω_z [steradian], pokazuje veličinu prostornog ugla u kome se širi zvučna energija koju emituje izvor zvuka.
- ▶ Promena prostornog ugla može nastati fizičkim ograničavanjem prostora u kome izvor može da zrači energiju.
- ▶ Kada zvučni izvori rade u slobodnom prostoru, talasni front se širi kao sfera u čitavom prostoru, odnosno prostornom uglu veličine 4π steradiana.

$$\Omega_z = 4\pi$$

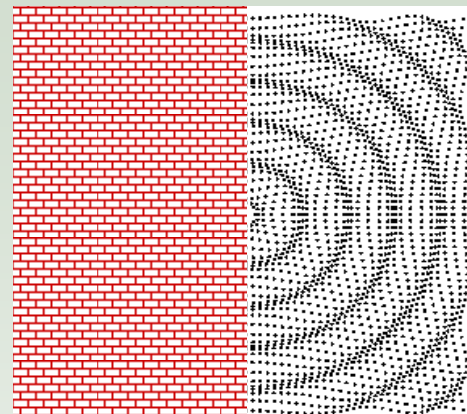
$$I = \frac{P_a}{4\pi r^2}$$



- Kada se zvučni izvor ugradi u idealno gladak i krut zid, talasni front se širi u obliku polusfere u prostoru koji definiše prostorni ugao veličine 2π steradijana.

$$\Omega_z = 2\pi$$

$$I = \frac{P_a}{2\pi r^2}$$



- Kada se zvučni izvor ugradi na spoju dva idealno glatka i kruta zida, talasni front se širi u prostoru koji definiše prostorni ugao veličine π steradijana.

$$\Omega_z = \pi$$

$$I = \frac{P_a}{\pi r^2}$$



- Kada se zvučni izvor ugradi na spoju tri idealno glatka i kruta zida, talasni front se širi u prostoru koji definiše prostorni ugao veličine $\pi/2$ steradijana.

$$\Omega_z = \pi / 2$$

$$I = \frac{P_a}{\pi/2 r^2}$$

Smanjenjem prostornog ugla povećava se intenzitet zvuka (ali samo za tačkaste izvore zvuka!).

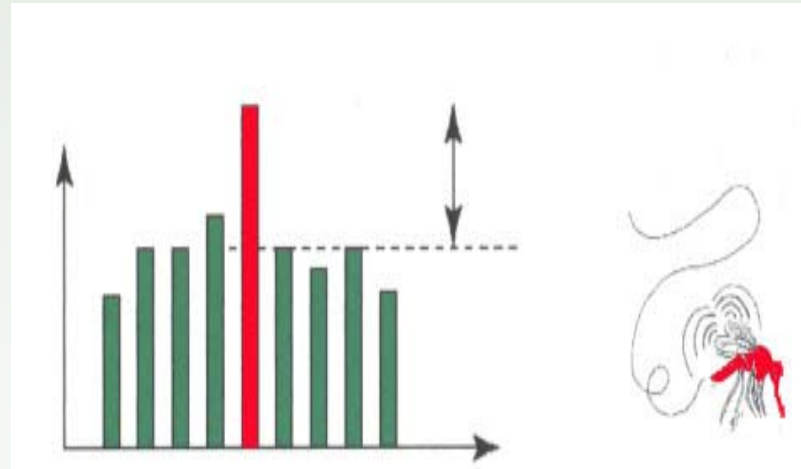
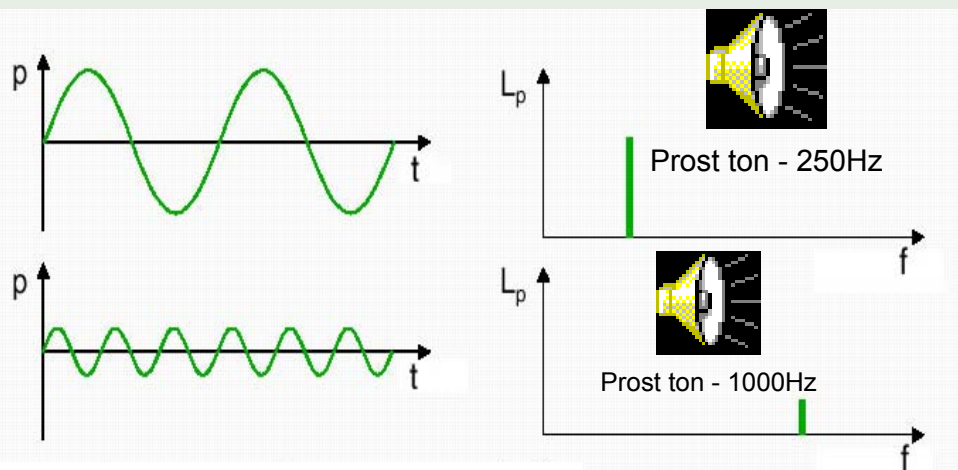
- ▶ Kada u slobodnom prostoru imamo više zvučnih izvora na relativno velikom rastojanju jedan od drugog može se govoriti o **nezavisnim izvorima**.
 - ✗ Grupa mašina raspoređena u industrijskoj hali.
 - ✗ Grupa zvučnih kutija raspoređenih oko stadiona za njegovo ozvučavanje.
- ▶ Rezultujući zvučni pritisak se određuje kao zbir svih zvučnih pritisaka vodeći računa o faznom stavu talasa na mestu prijema.

$$\underline{p} = \sum_{i=1}^n \underline{p}_i$$

Postupak za određivanje rezultujućeg pritiska zavisi od toga da li zvučni izvori emituju prost zvuk ili složeni zvuk.

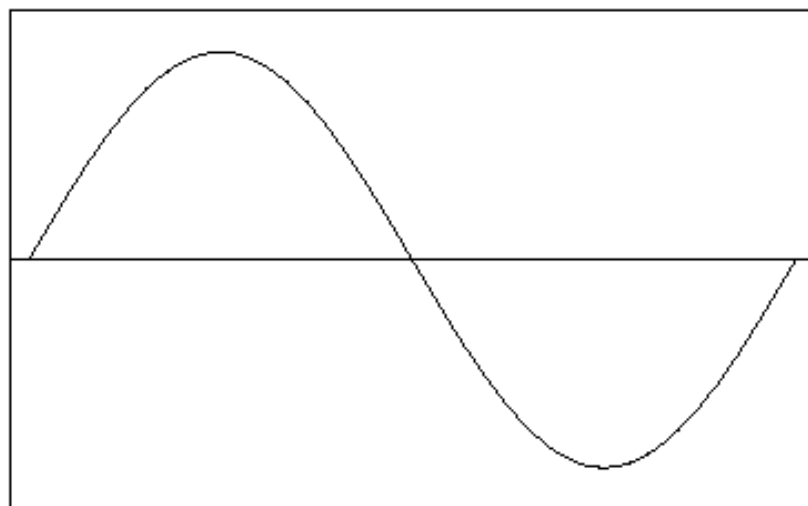
Prost zvuk

- ▶ Vremenske promene su periodične i sinusoidalne. Frekvencijski spektar je linijskog tipa, predstavljen jednom komponentom, čiji je položaj određen frekvencijom a dužina veličinom promene posmatrane fizičke veličine.



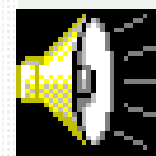
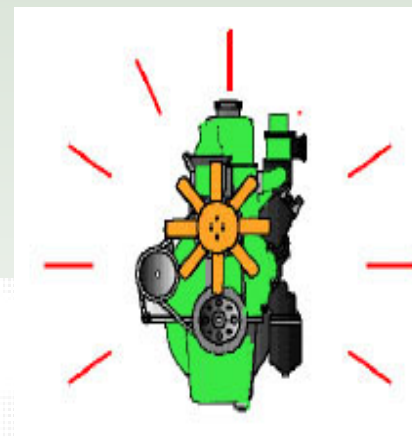
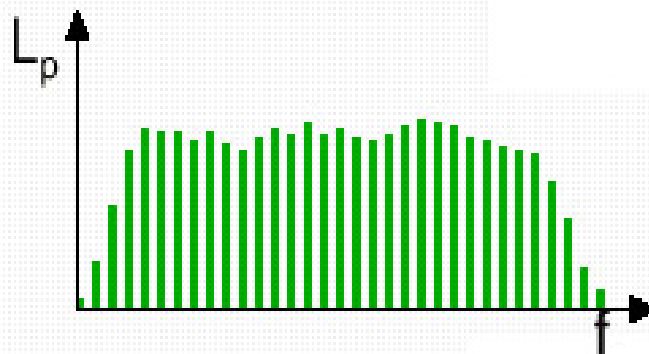
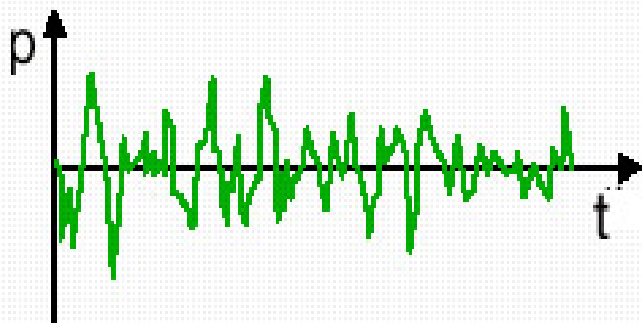
Složeni zvuk

- **Složeni periodični zvuk.** Vremenske promene su periodične i nesinusoidalnog tipa. Spektar je linijskog (diskretnog) tipa i sadrži konačni broj komponenti na frekvencijskoj skali.



Složeni zvuk

- **Složeni neperiodični zvuk.** Vremenske promene su neperiodične. Spektar je kontinualnog tipa i sadrži beskonačni broj kontinualno raspoređenih komponenti po frekvencijskoj skali.

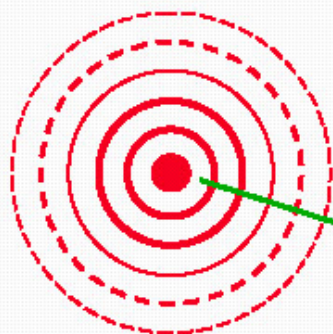


Sirokopojasna -
tonalna buka

Prost zvuk

Kada dva ili više nezavisnih izvora emituju prost zvuk potrebno je voditi računa o faznom stavu talasa na mestu prijema.

Dva tačkasta zvučna izvora



$$p_1(r, t) = A_{p1} \cos(2\pi f_1 t - kr_1), p_1 = A_{p1} / \sqrt{2}$$

$$\underline{p} = \underline{p}_1 + \underline{p}_2 \Rightarrow p = \sqrt{p_1^2 + p_2^2 + 2p_1p_2 \cos \varphi}$$
$$\varphi = \varphi_0 + k\Delta r = \varphi_0 + k(r_1 - r_2)$$

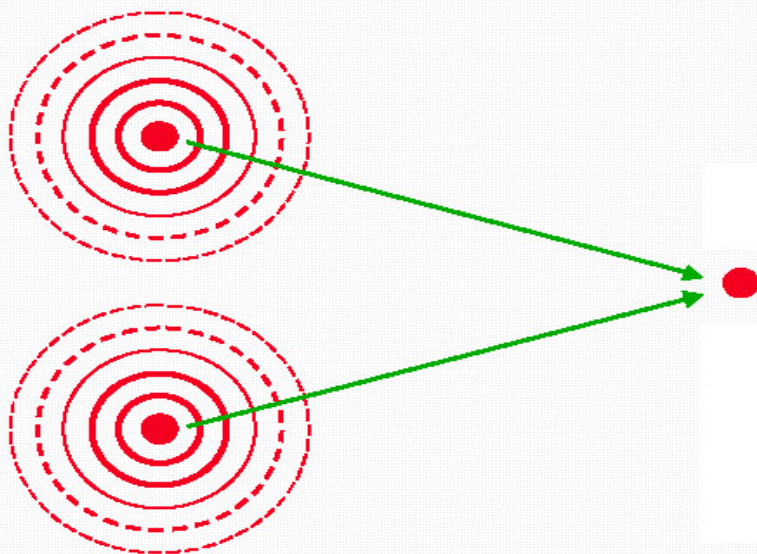
$$p_2(r, t) = A_{p2} \cos(2\pi f_1 t - kr_2), p_2 = A_{p2} / \sqrt{2}$$

Složeni zvuk

Komponente složenog zvuka imaju različite, jednako verovatne, fazne stavove na mestu prijema, pa nije potrebno voditi računa o faznim stavovima talasa na mestu prijema.

Primeri: nezavisni izvori zvuka različitog spektra, udaljeni izvori istog zvuka ali širokog spektra, izvori u zatvorenom prostoru.

Dva tačkasta zvučna izvora



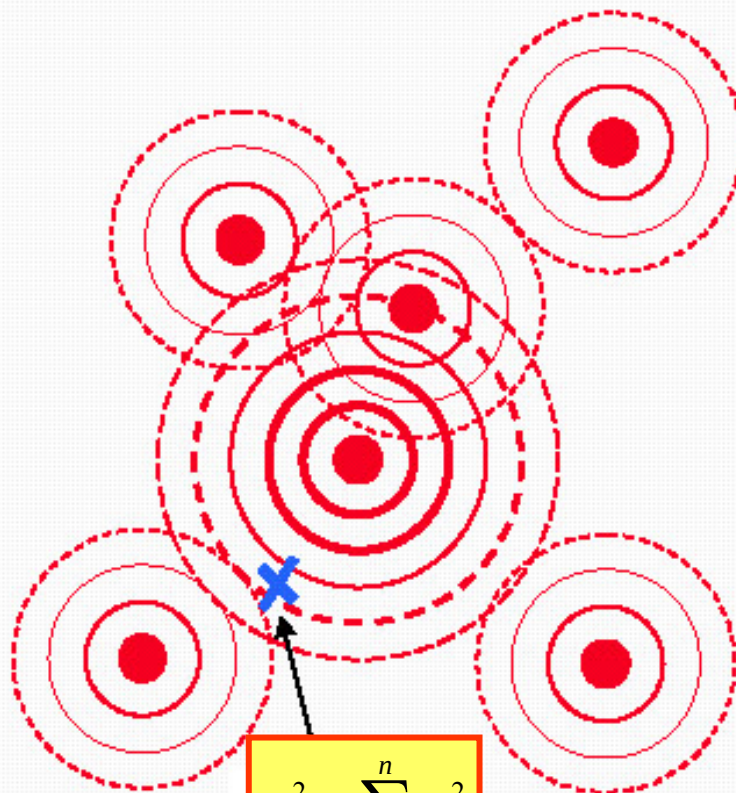
Ukupna gustina energije jednaka je zbiru gustina energije pojedinih izvora.

$$E = E_1 + E_2 = \frac{p_1^2}{\rho c} + \frac{p_2^2}{\rho c} \Rightarrow$$

$$p^2 = p_1^2 + p_2^2$$

$$I = I_1 + I_2$$

Više tačkastih zvučnih izvora



$$p^2 = \sum_{i=1}^n p_i^2$$

$$I = \sum_{i=1}^n I_i$$

1. Tačkasti izvor – uslov, odnos pritiska i rastojanja.
2. Neusmereni i usmereni izvori.
3. Prostorni ugao zračenja.
4. Dejstvo više izvora – prost zvuk.
5. Dejstvo više izvora – složeni zvuk.



HVALA