

Akustika

Akustika = Područje fizike koje se bavi načinima dobivanja i zakonima širenja zvuka.

Zvuk?

Štapovi, žice, ploče i dr. obično se nalaze u fluidu, npr. u zraku (fluid pokazuje svojstva elastičnosti)

Fluidi - Opiru se lokalnoj kompresiji odnosno dilataciji. → Poprimaju početna stanja kad uzroci poremećaja prestanu djelovati. U fluidu mogu nastati samo longitudinalni valovi.

→ Titranje čvrstih tijela u fluidu, pa i u zraku, proizvodi longitudinalne valove pomaka. → Te valove zamjećuje uho (kao *zvuk ili šum*).

U slojevima zraka kuda prolazi val izvodi se izmjenično kompresija, sabijanje i razrjeđenje zračnog sloja; pri kompresiji tlak zraka raste, a pri razrjeđenju se smanji ispod atmosferskog tlaka.

Najveća razlika od atmosferskog tlaka naziva se amplituda tlaka; ljudsko uho podnosi najviše amplitudu tlaka od oko *30 Pa*, (atmosferski tlak je oko 10^5 Pa); ljudsko uho čuje najnižu amplitudu od oko *2×10^{-5} Pa*.

Akustika 2

Akustika = Područje fizike koje se bavi načinima dobivanja i zakonima širenja zvuka.

Zvuk se širi samo u području gdje ima tvari, molekula, a ne giba se kroz vakuum.

Pokus - U zatvorenoj staklenoj posudi nalazi se obješeno zvono čiji zvuk čujemo pri potresanju posude; kad posudu evakuiramo pomoću priključene pumpe, pri ponovnom potresanju posude više ne čujemo zvuk zvona.

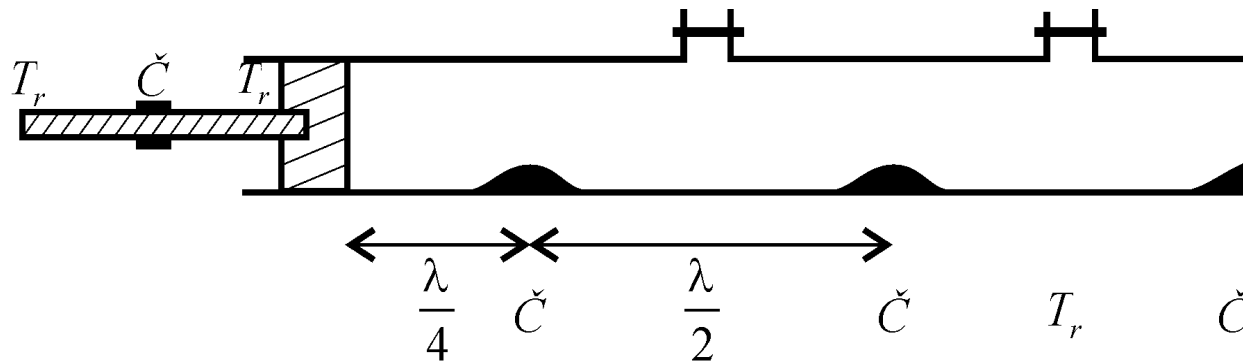
Ravni stojni valovi u cilindričnom stupu zraka

Zvuk = longitudinalni val \rightarrow Za stup plina u cilindričnoj posudi vrijedi cijela teorija longitudinalnih valova.

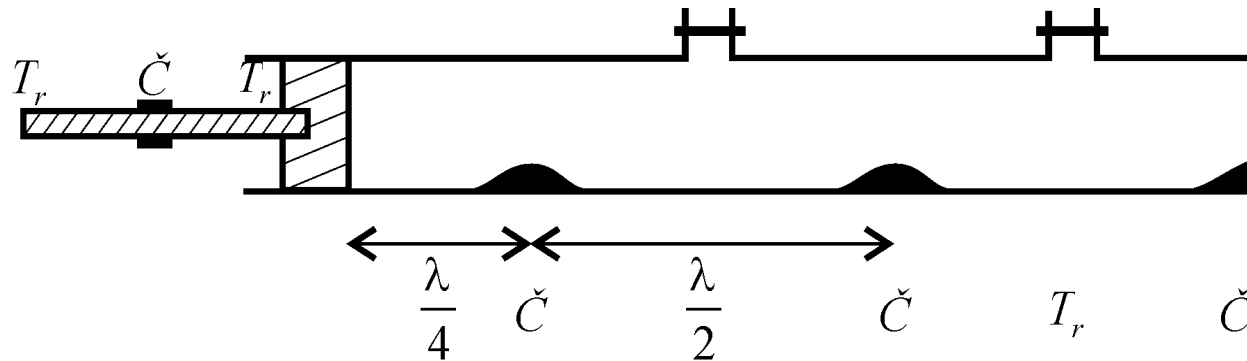
Ako je cijev zatvorena samo na jednom kraju, tamo će biti i čvor pomaka, a na otvorenom kraju trbuh pomaka.

Primjer: *Kundtova cijev* \rightarrow Stup zraka pobuđuje se longitudinalnim titranjem staklenog štapa (što se postiže npr. povlačenjem vlažne tkanine po štapu).

Na krajevima štapa (jednim krajem se nalazi u cijevi) nastaje trbuh pomaka \rightarrow pobuđuje zrak u cijevi (+ piljevina od pluta).



Ravni stojni valovi u cilindričnom stupu zraka 2



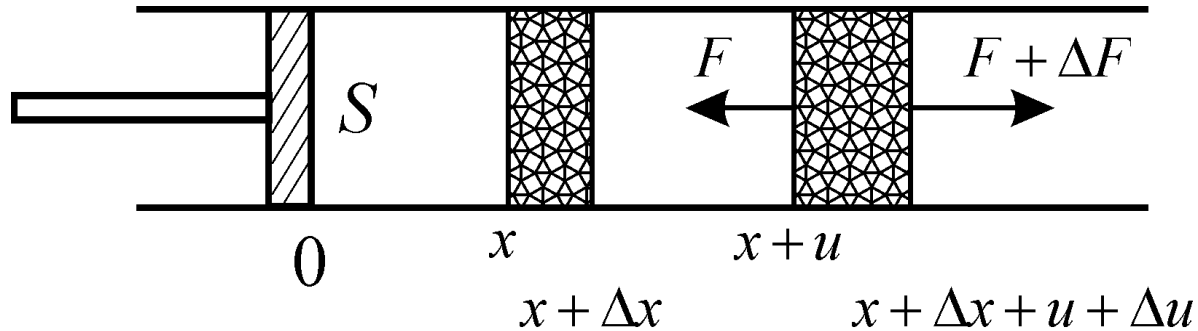
Podlašavanjem udaljenosti (L) čepa od kraja cijevi \rightarrow Da udaljenost bude jednaka neparnom broju četvrtina dužine vala, tj. da bude: $L = (2k - 1)\lambda/4$, gdje je $k = 1, 2, 3, \dots$; tada se u cijevi uspostave stojni valovi, što se vidi po figurama piljevine, koja se skuplja na čvorovima.

Mjerenjem udaljenosti između dva susjedna čvora (odgovara polovici valne duljine) \rightarrow odredi se valna duljina valova koji su nastali u zraku.

Ako je poznata brzina vala (v), možemo odrediti i pripadnu frekvenciju zvuka (ν) iz jednadžbe: $\nu = v/\lambda$.

Brzina zvuka

Neka se u cijevi nalazi fluid i pomični stap presjeka S .



pomak stapa \rightarrow kroz fluid longitudinalni poremećaj (kompresija)

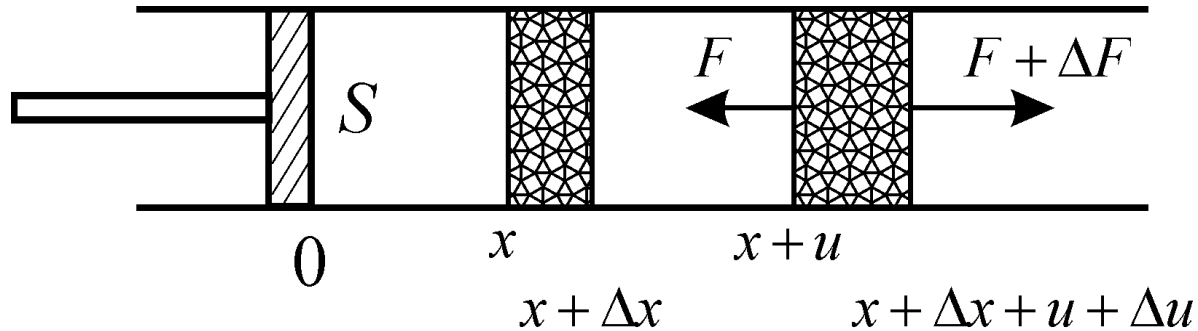
Neka je element fluida u sloju između apscisa x i $x + \Delta x$ (prije nastanka poremećaja).

Kad nastane poremećaj onda se prvi (lijevi) presjek elementa pomakne za u , a drugi za $u + \Delta u$.

Uzrok deformacije sloja fluida je razlika sila F (lijevo) i $F + \Delta F$ (desno).

Brzina zvuka 2

Neka se u cijevi nalazi fluid i pomični stap presjeka S .



Razlika sila $\Delta F \rightarrow$ razlika tlakova u fluidu: $\Delta p = \Delta F/S$

Uvodimo modul kompresije B :
$$p = B \frac{\Delta V}{V} = B \frac{S \Delta u}{S \Delta x} = B \frac{\Delta u}{\Delta x}$$

u nazivniku - volumen promatranog elementa fluida

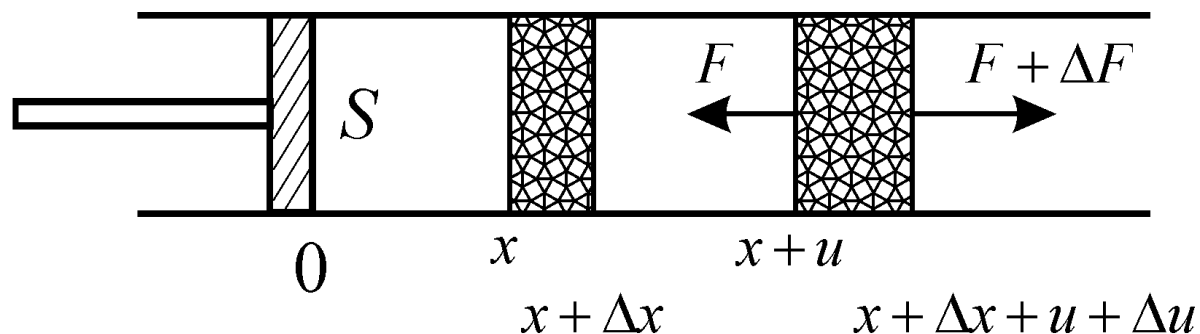
u brojniku - promjena tog volumena (zbog deformacije)

Od konačnih promjena \rightarrow infinitezimalno male veličine (diferencijale):

$$p = B \frac{du}{dx} \quad \rightarrow \quad dp = B \frac{d^2 u}{dx^2} dx$$

Brzina zvuka 3

Neka se u cijevi nalazi fluid i pomični stap presjeka S .



$$dp = B \frac{d^2 u}{dx^2} dx$$

$$dF = S dp$$

S druge strane, 2. Newtonov zakon $\rightarrow dF = dm \cdot a$

$$dm = \rho_o V = \rho_o S dx \quad a = \frac{d^2 u}{dt^2} \quad \Rightarrow \quad \cancel{S} dp = \rho_o \cancel{S} dx \frac{d^2 u}{dt^2}$$

$$\Rightarrow dp = \rho_o dx \frac{d^2 u}{dt^2} \quad \Rightarrow \quad \rho_o \cancel{dx} \frac{d^2 u}{dt^2} = B \frac{d^2 u}{dx^2} \cancel{dx} \quad \Rightarrow$$

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

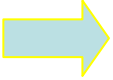
Parcijalna diferencijalna jednačba drugog reda
(kao kod ravnog longitudinalnog vala u štapu)

Brzina zvuka 4

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

Parcijalna diferencijalna jednačba drugog reda
(kao kod ravnog longitudinalnog vala u štapu) 

Uzimamo za brzinu širenja poremećaja (brzinu zvuka): $v_o = \sqrt{\frac{B}{\rho_o}}$

 $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = v_o^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$

Indeksi u izrazu se odnose na neku temperaturu; uobičajeno se uzima standardna temperatura $t_o = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, ili $T_o = 273,15 \text{ K}$.

Modul kompresije se u termodinamici iskazuje kao umnožak adijabatskog koeficijenta κ i tlaka p , tj. vrijedi: $B = \kappa p$

 $v = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}}$ brzina zvuka (općenito)

Brzina zvuka 5

$$v = \sqrt{\frac{\kappa p}{\rho}} \quad v_o = \sqrt{\frac{B}{\rho_o}}$$

Jednadžba stanja za idealne plinove:

$$\frac{pV}{T} = \frac{p_o V_o}{T_o} \quad \Rightarrow \quad \frac{V_o}{V} = \frac{p T_o}{p_o T}$$

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \rho_o = \frac{m}{V_o} \Rightarrow \frac{\rho}{\rho_o} = \frac{V_o}{V}$$

$$\Rightarrow \rho = \frac{\rho_o p T_o}{p_o T}$$

$$\frac{v}{v_o} = \sqrt{\frac{\rho_o p}{\rho p_o}} \quad \Rightarrow \quad v = v_o \sqrt{\frac{T}{T_o}}$$

brzina zvuka u plinu u zavisnosti o temperaturi (T) fluida

Brzina zvuka 6

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

$$\frac{d^2 u}{dt^2} = v_0^2 \frac{d^2 u}{dx^2}$$

Numerički brzina zvuka?

$$p_0 = 1,013 \cdot 10^5 \text{ Pa}$$

$$\rho_0 = 1,293 \text{ kg} / \text{m}^3$$

$$\kappa = 1,41 \quad (\text{dvoatomni plinovi})$$

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

$$v = \sqrt{\frac{1,41 \cdot 1,013 \cdot 10^5}{1,293}}$$

$$v = 331,4 \text{ m} / \text{s}$$

Brzina zvuka 7

Prvo uspješno mjerenje brzine zvuka u zraku –
Francuska akademija znanosti 1738. godine

Između dva brijega pored Pariza, na udaljenosti od 23 km; na jednom brijegu ispaljen je topovski hitac, a na drugom je mjereno vrijeme između pojave bljeska i dolaska zvučnog praska.

Utjecaj vjetra se nastojao izbjeći ispaljivanjem hitca naizmjenično s jednog i drugog brijega.

Dobivena srednja brzina zvuka, preračunata na 0 °C, bila je $v_0 = 332 \text{ m/s}$.

Nesigurnost (pogrješka) mjerenja uglavnom potječe od neodređenosti temperature zraka na cijelom putu zvuka.

Brzina zvuka u tvarima

Brzinu određuje izraz:

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

čelik: $v = 5050$ m/s

aluminij: $v = 5104$ m/s;

staklo: $5000 - 6000$ m/s

opeka: 3600 m/s

drvo (jelovina): 3300 m/s

vodu (kod 4 °C): 1420 m/s

Prijenos energije progresivnim valovima

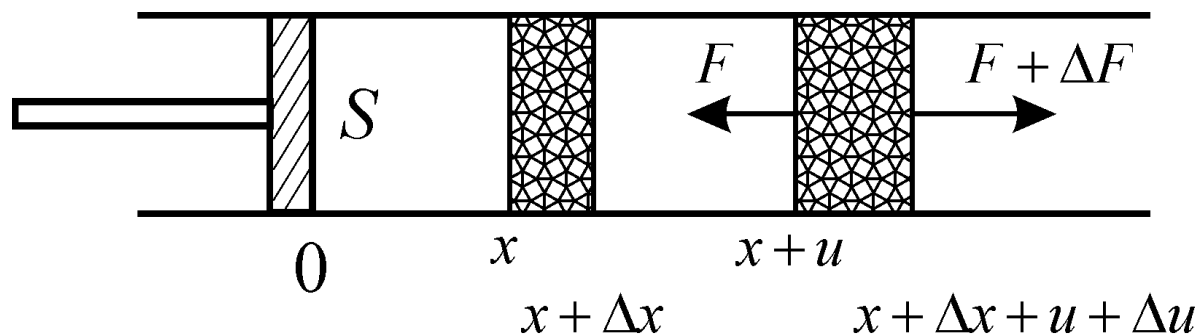
progresivni valovi = Valovi koji nisu stojni.

progresivni valovi \rightarrow povezan tok ili prijenos energije

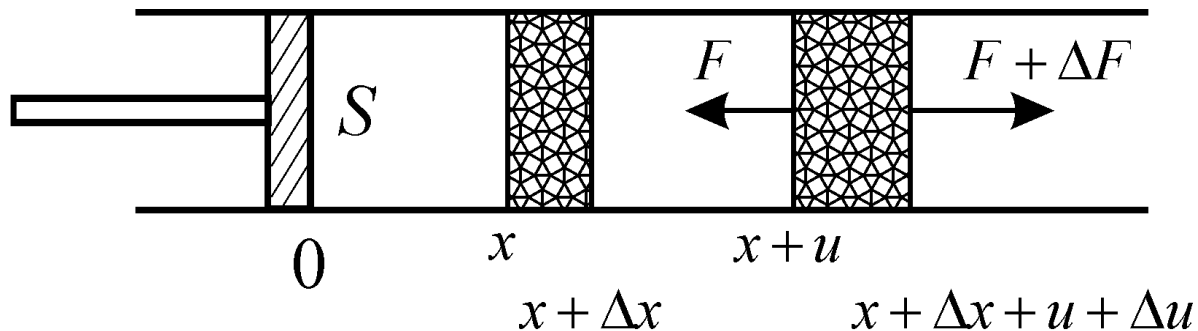
Primjer: Zemlja prima energiju od Sunca putem progresivnih transverzalnih valova; tu energiju prepoznajemo dijelom kao energiju valova mora koji udaraju u obalu.

Kako odrediti energiju valova?

Promatramo progresivni longitudinalni val u fluidu koji se nalazi u cijevi



Prijenos energije progresivnim valovima 2



Izvor vala (zvuka) \rightarrow daje energiju elementu fluida \rightarrow pomak (npr. od lijeva na desno) \rightarrow na elementu se izvodi rad \rightarrow taj element izvodi rad na drugom susjednom elementu \rightarrow itd. \rightarrow element prima energiju s lijeva i predaje ju desnom elementu, itd.

\mathbf{v}_s = brzina čestice ili diferencijalnog sloja fluida \rightarrow

pripadni pomak je $ds = \mathbf{v}_s dt$ \rightarrow

diferencijal rada (energije) $dW = F ds = dE$ \rightarrow

trenutna snaga vala (energija prenesena u diferencijalu vremena)

$P = dW/dt$ \rightarrow

$$P = \frac{dW}{dt} = F \frac{ds}{dt} = Fv_s$$

Prijenos energije progresivnim valovima 3

$$P = \frac{dW}{dt} = F \frac{ds}{dt} = Fv_s$$

Od prije: $u = A \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) \rightarrow \frac{du}{dt} = -\omega A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) = v_s$

$$p = B \frac{du}{dx}$$

$B =$ modul kompresije \rightarrow

$$p = B \frac{du}{dx} = -B \frac{2\pi}{\lambda} A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right)$$

$$P = Fv_s = pSv_s = B \frac{2\pi}{\lambda} A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) S \omega A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) \rightarrow$$

$$P = \frac{2\pi AB}{\lambda} S \omega A \sin^2 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) \rightarrow P = p_0 S \omega A \sin^2 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right)$$

Izraz za trenutnu snagu.

Prijenos energije progresivnim valovima 4

$$P = p_0 S \omega A \sin^2 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right)$$

Prosječna ili srednja snaga vala zvuka u intervalu T ?

Definicija srednje vrijednosti:

$$P_s = \frac{1}{T} \int_0^T P dt \quad \longrightarrow$$

$$P_s = \frac{p_0 S \omega A}{T} \int_0^T \sin^2 2\pi \left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda} \right) dt$$

$$\longrightarrow P_s = \frac{1}{2} S p_0 A \omega \quad \longrightarrow$$

$$\int_0^T \sin^2 x dx = \frac{T}{2}$$

Intenzitet zvučnog vala I = Srednja snaga po jedinici površine presjeka.

$$I = \frac{P_s}{S} = \frac{1}{2} p_0 A \omega \quad \text{gdje je:} \quad p_0 = \frac{2\pi AB}{\lambda} = \frac{2\pi A \rho v^2}{T \cancel{\lambda/T}} = \omega A \rho v$$

Prijenos energije progresivnim valovima 5

$$I = \frac{P_s}{S} = \frac{1}{2} p_0 A \omega \quad p_0 = \omega A \rho v \quad \longrightarrow$$

$$\text{Intenzitet sinusnog vala zvuka: } I = \frac{1}{2} \omega A \rho v A \omega \quad \longrightarrow \quad I = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 A^2$$

Jakost zvuka I (tok akustičke energije) je razmjernan kvadratu frekvencije i kvadratu amplitude, kao i brzini zvuka te gustoći fluida.

Primjer:

Odrediti jakost zvuka frekvencije $\nu = 1 \text{ kHz}$, amplitude $A = 10 \text{ }\mu\text{m}$ u zraku, kod sobne temperature ($\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$; $v = 340 \text{ m/s}^2$).

$$\nu = 1 \text{ kHz} = 10^3 \text{ Hz}$$

$$A = 10 \text{ }\mu\text{m} = 10^{-5} \text{ m}$$

$$\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$$

$$v = 340 \text{ m/s}$$

$$I = ?$$

$$I = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 A^2 = \frac{1}{2} \rho v (2\pi\nu)^2 A^2 = \frac{1}{2} 1,2 \cdot 340 (2 \cdot 3,14 \cdot 10^3)^2 (10^{-5})^2$$

$$I = 0,81 \text{ W/m}^2$$

Sferni valovi zvuka

do sada - ravni val zvuka

Poseban slučaj valova zvuka - *kuglasti ili sferni valovi zvuka*

Primjer nastanka:

Pomoću elastične gumene kugle koja pulzira periodično, npr. sinusno, mijenjajući svoj polumjer (odnosno u kugli se sinusno mijenja tlak plina). Ako se kugla nalazi u fluidu ona će postati izvor sfernih valova.

Zanimljivost: Uz pretpostavku da je akustička energija sačuvana (premda mehanička energija pri trenju prelazi manjim dijelom u toplinu) → kroz svaku cijelu sfernu površinu, kojoj je u središtu kuglasti izvor zvuka, prolazi ista snaga.

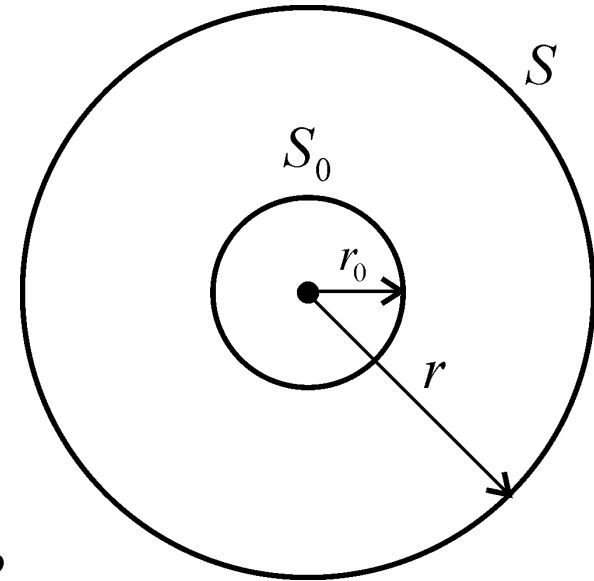
→ Površina kugle se povećava s kvadratom polumjera (r), → Jakost zvuka, tj. tok energije kroz jedinicu površine, opada s kvadratom udaljenosti od izvora zvuka.

Sferni valovi zvuka 2

Dokaz:

Promatramo dvije koncentrične sfere:

Kroz prvu manju sferu površine S_0 prolazi srednja snaga P_s , pa je pripadna jakost zvuka na udaljenosti r_0 od središta sfere (gdje je smješten točkasti izvor zvuka):



$$I_0 = \frac{P_s}{S} = \frac{P_s}{4\pi r_0^2}$$

Kroz veću sferu površine S i radijusa r prolazi ista snaga \rightarrow jakost zvuka:

$$I = \frac{P_s}{4\pi r^2} \quad \rightarrow \quad I = \frac{I_0 r_0^2}{r^2} = \frac{const}{r^2}$$

Velika udaljenost od izvora zvuka \rightarrow kuglasti val postaje skoro ravni \rightarrow vrijede iste formule:

$$I_0 = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 A_0^2 \quad \rightarrow \quad I = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 \frac{A_0^2 r_0^2}{r^2} = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 A^2 \quad A = \frac{A_0 r_0}{r} = \frac{const}{r}$$

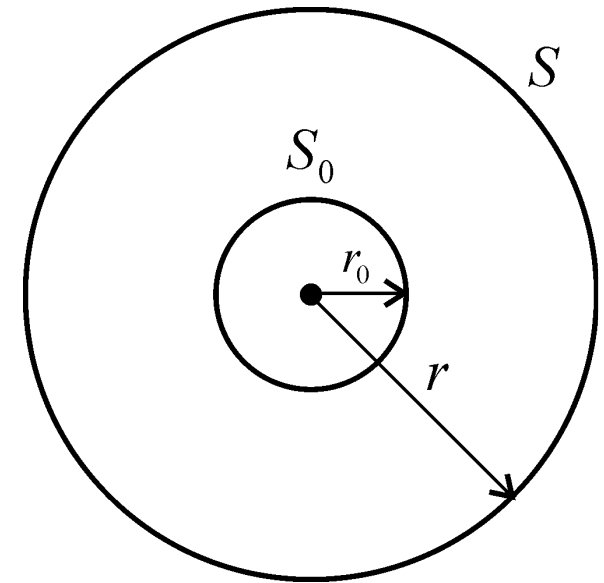
Sferni valovi zvuka 3

$$I = \frac{I_o r_o^2}{r^2} = \frac{const}{r^2}$$

$$A = \frac{A_o r_o}{r} = \frac{const}{r}$$

Zaključak:

Jakost se zvuka smanjuje s kvadratom udaljenosti od izvora, a amplituda vala je obrnuto razmjerna udaljenosti od izvora zvuka.



Valna jednađba za sferne valove?

Bez izvoda:
$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{2u}{r} \right) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

Za velike udaljenosti od točkastog izvora zvuka (pomak (u) puno manji od radijusa položaja r) \rightarrow jednađba ravnog vala

Time je opravdano razmatranje kuglastih valova na većoj udaljenosti od izvora zvuka kao ravnih valova.

Grupna brzina

Eksperiment mjerenja brzine zvuka pomoću topovskog hitca, nije mjerio faznu brzinu vala, nego *brzinu signala* odnosno brzinu segmenta vala.

Signal je rezultanta superponiranih ravnih beskonačnih valova različitih amplituda i valnih dužina (može se dokazati pomoću Fourierove harmoničke analize).

Takav segment ili signal naziva se stoga *valni paket ili valna grupa*.

Ako svi pojedini valovi imaju jednake brzine (v dakle ne zavisi o λ),
→ valna grupa na svome putu ostaje nepromijenjena (nedeformirana) i putovat će brzinom (tzv. brzina grupe valova) koja je jednaka faznoj brzini v .

Općenito: Pojedine fazne brzine v_i su različite, pa se kaže kako fazna brzina zavisi o valnoj duljini. → Valna grupa putuje nekom brzinom koja ne odgovara pojedinim faznim brzinama v_i . →

Valna grupa se u vremenu mijenja, tj. mijenja oblik (deformira se), pa se može dogoditi i da se "raziđe"; → ne možemo više govoriti o nekoj grupi ili pripadnoj brzini.

Grupna brzina 2

Općenito: Za grupu valova teško je odrediti pravilo, npr. za brzinu, za nastanak i nestanak, za početak i kraj grupe.

Tražimo **grupnu brzinu** = granična vrijednost grupe valova kada se grupa povećava.

Promatramo dva ravna sinusna vala jednakih amplituda, no malo različitih faznih brzina i valnih duljina :

$$u = A \sin 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) = A \sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

u, u' = valni pomaci

v, v' = fazne brzine

$$u' = A \sin \omega' \left(t - \frac{x}{v'} \right)$$

Rezultirajući val nastaje superpozicijom ta dva vala. → Nastaju tzv. valni udari (pojačavanje i slabljenje rezultantne amplitude), tj.

$$u_r = u + u' = A \left[\sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \sin \omega' \left(t - \frac{x}{v'} \right) \right]$$

Grupna brzina 3

$$u_r = u + u' = A \left[\sin \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \sin \omega' \left(t - \frac{x}{v'} \right) \right]$$

Koristimo trigonometrijsku transformaciju:

$$\sin \alpha + \sin \beta = 2 \sin \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right) \cos \left(\frac{\alpha - \beta}{2} \right)$$

$$u_r = 2A \sin \left[\frac{\omega + \omega'}{2} t - \frac{x}{2} \left(\frac{\omega}{v} + \frac{\omega'}{v'} \right) \right] \cos \left[\frac{\omega - \omega'}{2} t - \frac{x}{2} \left(\frac{\omega}{v} - \frac{\omega'}{v'} \right) \right]$$

ω i ω' , odnosno v i v' se malo razlikuju međusobno \rightarrow aproksimacija $\omega + \omega' \approx 2\omega$. Druga uglata zagrada postaje:

$$\cos \left[\frac{\omega - \omega'}{2} \left(t - x \frac{\frac{\omega}{v} - \frac{\omega'}{v'}}{\omega - \omega'} \right) \right] = \cos \left[\frac{\omega - \omega'}{2} \left(t - \frac{x}{\frac{\omega}{v} - \frac{\omega'}{v'}} \right) \right]$$

Grupna brzina 4

$$u_r = 2A \sin \left[\frac{\omega + \omega'}{2} t - \frac{x}{2} \left(\frac{\omega}{v} + \frac{\omega'}{v'} \right) \right] \cos \left[\frac{\omega - \omega'}{2} t - \frac{x}{2} \left(\frac{\omega}{v} - \frac{\omega'}{v'} \right) \right]$$
$$\cos \left[\frac{\omega - \omega'}{2} \left(t - x \frac{\frac{\omega}{v} - \frac{\omega'}{v'}}{\omega - \omega'} \right) \right] = \cos \left[\frac{\omega - \omega'}{2} \left(t - \frac{x}{\frac{\omega - \omega'}{\frac{\omega}{v} - \frac{\omega'}{v'}}}} \right) \right]$$

Konačno, rezultatni val možemo pisati u obliku:

$$u_r = 2A \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right] \cos \left[\frac{\omega - \omega'}{2} \left(t - \frac{x}{\frac{\omega - \omega'}{\frac{\omega}{v} - \frac{\omega'}{v'}}}} \right) \right]$$

Grupna brzina 5

Konačno, rezultatni val možemo pisati u obliku:

$$u_r = 2A \sin \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) \right] \cos \left[\frac{\omega - \omega'}{2} \left(t - \frac{x}{\frac{\omega - \omega'}{\frac{\omega}{v} - \frac{\omega'}{v'}}} \right) \right]$$

Rezultatni val s danim fazama ima u sinusnoj funkciji pulzaciju ω , dok faza kosinusa pokazuje da se u rezultatnom valu amplituda periodički mijenja s pulzacijom $(\omega - \omega')/2$ i da se ta promjena širi brzinom:

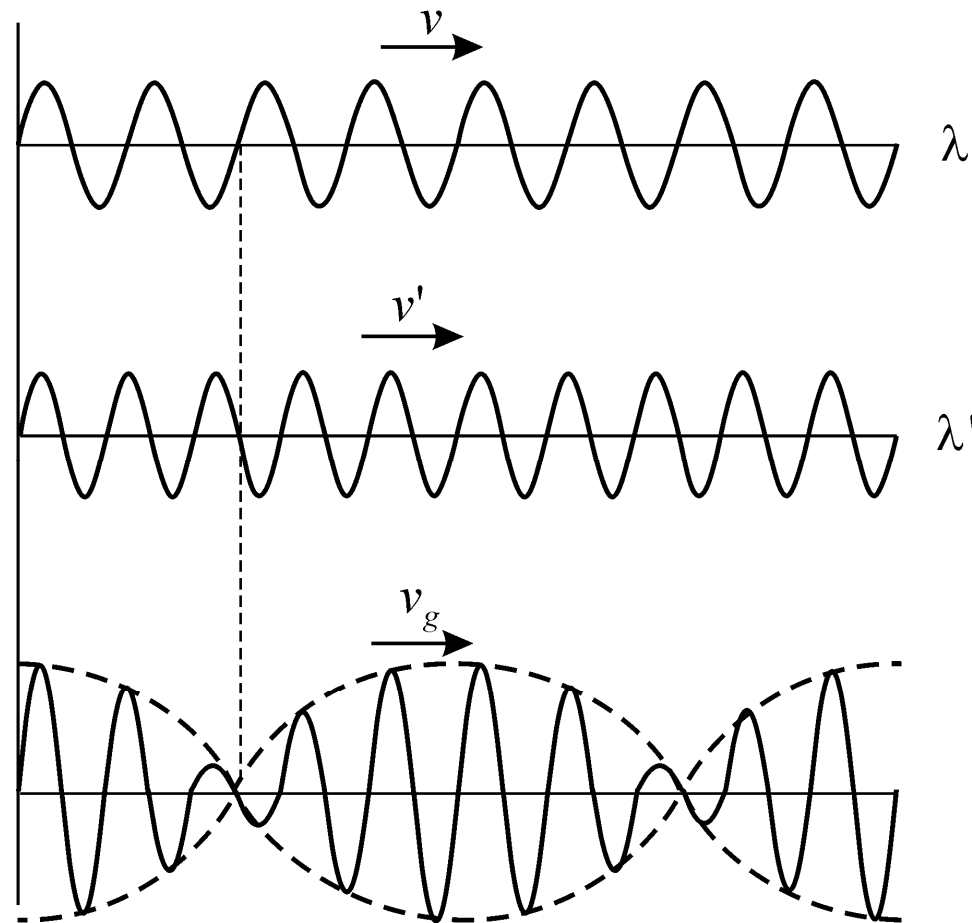
$$v_g = \frac{\omega - \omega'}{\frac{\omega}{v} - \frac{\omega'}{v'}}$$

$v_g =$ *grupna brzina vala* (brzina kojom se širi spomenuti signal)

Grupna brzina 6

Grafički:

Superpozicija dva ravna sinusna vala daje valnu grupu koja se širi brzinom v_g




Grupna brzina 7

$$v_g = \frac{\omega - \omega'}{\frac{\omega}{v} - \frac{\omega'}{v'}}$$

Za bliske kutne brzine (granični slučaj) \rightarrow

$$\omega - \omega' = \Delta\omega \approx d\omega$$

Slično: $\frac{\omega}{v} - \frac{\omega'}{v'} \approx d\left(\frac{\omega}{v}\right)$ 

$$v_g \approx \frac{d\omega}{d\left(\frac{\omega}{v}\right)}$$

Ako je **$v = \text{const}$** , gornji kvocijent diferencijala daje: $v_g \approx \frac{d\omega}{\frac{1}{v}d\omega} = v$

Isto kao na početku ovog razmatranja (ako svi valovi u grupi imaju jednake fazne brzine **v** , valna grupa ostaje nepromijenjena na svom putu i širi se grupnom brzinom **v_g** koja je jednaka toj faznoj brzini).

Grupna brzina 8

$$v_g = \frac{\omega - \omega'}{\frac{\omega}{v} - \frac{\omega'}{v'}}$$

Pokus:

Zvučni udari se čuju kad udarimo batićem u dvije glazbene viljuške koje su jednake izvedbe, a mala razlika u njihovim frekvencijama nastaje (i onda se čuje vremenski niz jačanja i slabljenja zvuka tj. udari) ako na kraj jedne viljuške pričvrstimo npr. manji gumeni prsten).

Dopplerov efekt

Do sada: izvor zvuka i motritelj miruju relativno jedan naspram

Što se događa kada ako se izvor zvuka i motritelj gibaju relativno jedan naspram?

Frekvencija koju zapaža motritelj (čuje) nije jednaka frekvenciji izvora!

Frekvencija koju zapaža motritelj kada se približava izvoru, veća je od frekvencije izvora, a kad se udaljava, zapažena frekvencija je manja od frekvencije izvora.

Ta pojava se naziva *Dopplerov efekt* (Ch. Doppler, 19. st.).

Dopplerov efekt 2

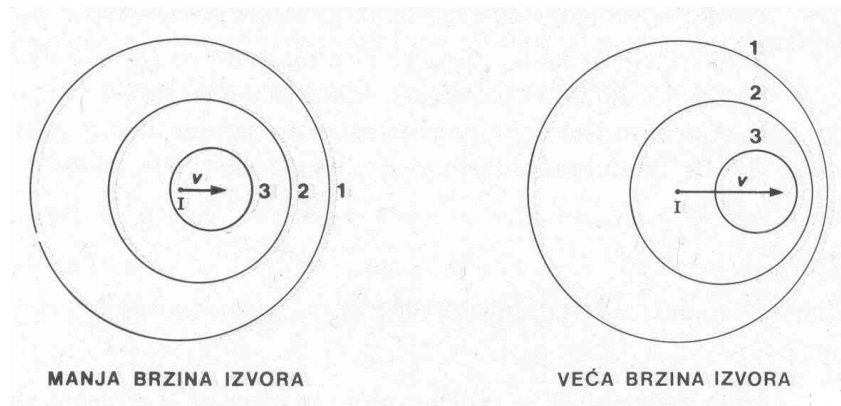
Doppler - 1845. javno demonstrirao pokus s trubačima u kočiji koja se kreće

Dopplerov efekt – opće svojstvo valova (ne samo zvučnih)

Pokus: 2 promatrača i izvor zvuka koji se giba

Pokus

A



B

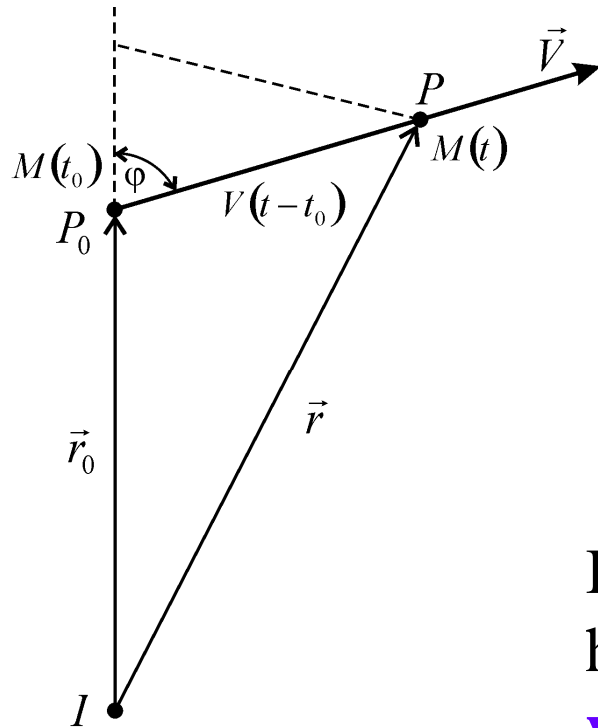


opažać u A – valne fronte rijede – manja frekvencija

opažać u B – valne fronte gušće – viša frekvencija

Dopplerov efekt 3

a) Motritelj (M) se giba brzinom V ; izvor zvuka (I) miruje.



P_0 = položaj motritelja u trenutku t_0

P = položaj motritelja u trenutku t

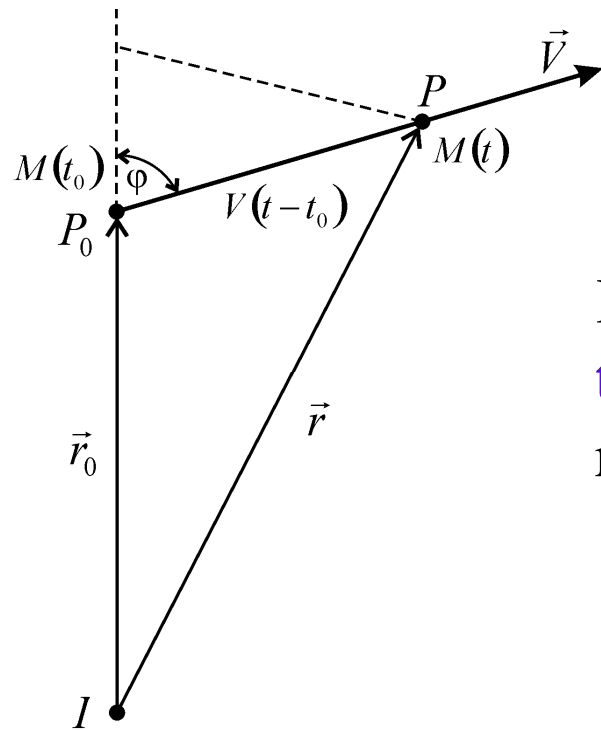
I = položaj izvora (ishodište)

φ = kut što ga zatvaraju radijusvektor r_0 i brzina V .

Izvor \rightarrow odašilje zvuk u obliku sfernih harmoničkih valova (s pulzacijom ω i brzinom v) \rightarrow akustički tlak na položaju P je opisan izrazom:

$$p = p_0 \sin \omega \left(t - \frac{r}{v} \right)$$

Dopplerov efekt 4



$$p = p_0 \sin \omega \left(t - \frac{r}{v} \right)$$

Kada je P blizu P_0 , tj. kad se t malo razlikuje od $t_0 \rightarrow$ približno pravokutan trokut (kateta = razlika radijvektora, hipotenuza = pomak točke)

$$r = r_0 + V(t - t_0) \cos \varphi \quad \longrightarrow$$

$$p = p_0 \sin \omega \left[t - \frac{r_0 + V(t - t_0) \cos \varphi}{v} \right]$$

Gledamo uglatu zagradu:

$$t - \frac{Vt \cos \varphi}{v} - \frac{r_0 - Vt_0 \cos \varphi}{v} = \left(1 - \frac{V \cos \varphi}{v} \right) \left[t - \frac{r_0 - Vt_0 \cos \varphi}{v \left(1 - \frac{V \cos \varphi}{v} \right)} \right]$$

Dopplerov efekt 5

$$p = p_0 \sin \omega \left[t - \frac{r_o + V(t - t_o) \cos \varphi}{v} \right] \left(1 - \frac{V \cos \varphi}{v} \right) \left[t - \frac{r_o - V t_o \cos \varphi}{v \left(1 - \frac{V \cos \varphi}{v} \right)} \right]$$

→ Izraz za tlak:
$$p = p_0 \sin \left\{ \omega \left(1 - \frac{V \cos \varphi}{v} \right) \left[t - \frac{r_o - V t_o \cos \varphi}{v \left(1 - \frac{V \cos \varphi}{v} \right)} \right] \right\}$$

Usporedimo li jednadžbu s osnovnom jed. za tlak:
$$p = p_0 \sin \omega \left(t - \frac{r}{v} \right)$$

→ Motritelj koji se giba brzinom V prima zvuk s novom pulzacijom:

$$\omega' = \omega \left(1 - \frac{V}{v} \cos \varphi \right)$$

ω = Pulzacija izvora

ω' = Pulzacija koju "prima" motritelj

Dopplerov efekt 6

$$\omega' = \omega \left(1 - \frac{V}{v} \cos \varphi \right)$$

ω = Pulzacija izvora

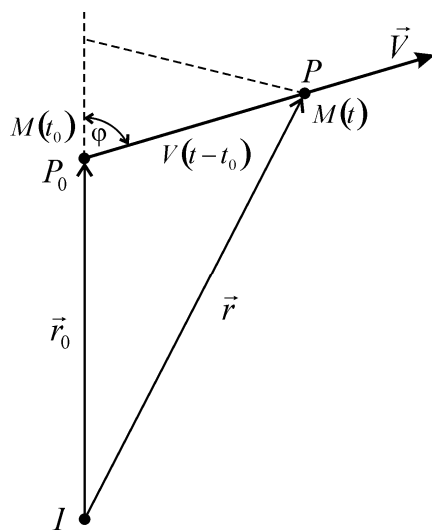
ω' = Pulzacija koju "prima" motritelj

Koristimo vezu pulzacije i frekvencije: $\omega = 2\pi\nu$

$\longrightarrow \nu' = \nu \left(1 - \frac{V}{v} \cos \varphi \right)$ *Slučaj kad se motritelj giba a izvor miruje.*

Kada će Dopplerov efekt biti najviše izražen?

Kada drugi član zagrade bude najveći! $\longrightarrow \varphi = 0$ ili $\varphi = \pi$



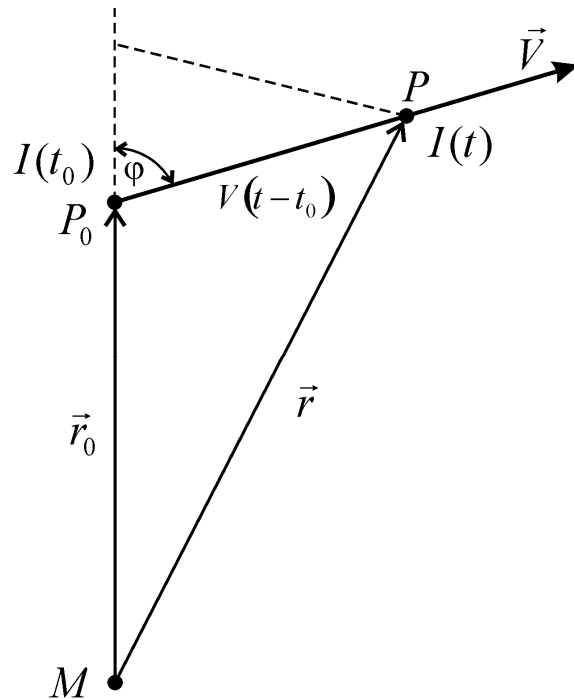
$\varphi = 0 \rightarrow$ motritelj se udaljava od izvora (pravcem)
 \rightarrow čuje nižu frekvenciju $\nu' < \nu$

$\varphi = \pi \rightarrow$ motritelj se približava izvoru (pravcem)
 \rightarrow čuje višu frekvenciju $\nu' > \nu$

$\varphi = \pi/2 \rightarrow$ ne zapaža se promjena frekvencije

Dopplerov efekt 7

Slučaj **b**) Motritelj (**M**) miruje, a izvor (**I**) se giba brzinom **V**.



P_0 = položaj izvora u trenutku t_0

P = položaj izvora u trenutku t

I = položaj motritelja (ishodište)

φ = kut što ga zatvaraju radijusvektor r_0 i brzina V .

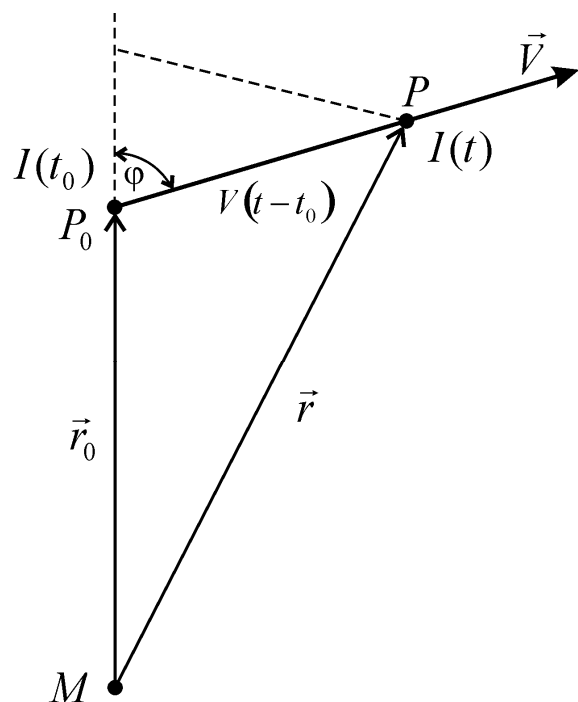
Promatramo periode akustičkog tlaka:

Neka u trenutku t_0 izvor daje maksimum akustičkog tlaka. \rightarrow Taj maksimum stiže do motritelja za vrijeme: $t'_0 = t_0 + r_0/v$

Uzmimo takvu točku P da izvor dođe do nje za vrijeme $t = t_0 + \overline{T}$ (T period titranja izvora zvuka) \rightarrow Prijedeni put izvora će biti: $\overline{P_0P} = VT$

Dopplerov efekt 8

Slučaj **b**) Motritelj (**M**) miruje, a izvor (**I**) se giba brzinom **V**.



Neka u trenutku t_0 izvor daje maksimum akustičkog tlaka. \rightarrow Taj maksimum stiže do motritelja za vrijeme: $t'_0 = t_0 + r_0/v$

Spomenuti maksimum tlaka iz točke **P** će doći do **M** za vrijeme $t' = t_0 + T + r/v$. \rightarrow

Motritelj mjeri prividni period izvora kao **T'** (razlika trenutaka koje on zapaža u **P** i **P₀**):

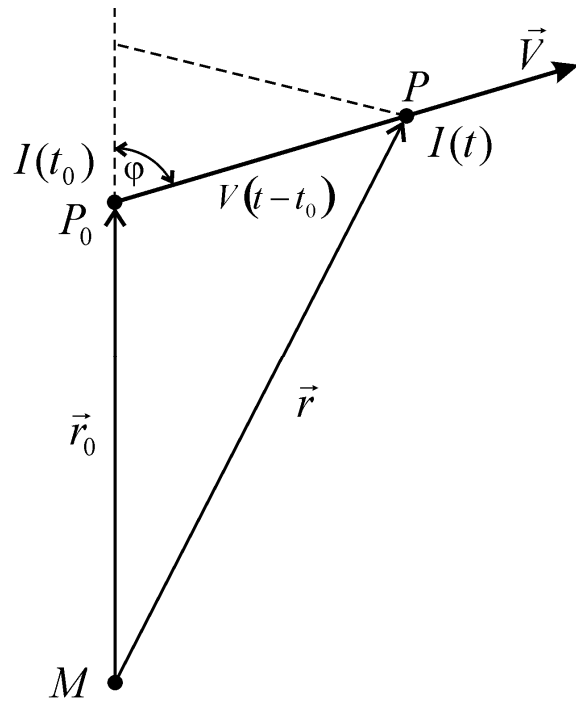
$$T' = t' - t'_0 = t_0 + T + r/v - (t_0 + r_0/v) = T + (r - r_0)/v$$

Kada je **P** blizu **P₀**, tj. kad se t malo razlikuje od $t_0 \rightarrow$ pribl. pravokutan trokut (kateta = razlika radijvektora, hipotenuza = pomak izvora) \rightarrow

$$r - r_0 = V(t - t_0) \cos \varphi \quad \longrightarrow \quad r - r_0 = VT \cos \varphi$$

Dopplerov efekt 8

Slučaj **b**) Motritelj (**M**) miruje, a izvor (**I**) se giba brzinom **V**.



$$T' = T + (r - r_0) / v$$

$$r - r_0 = VT \cos \varphi$$



$$T' = T + VT \cos \varphi / v = T \left(1 + \frac{V}{v} \cos \varphi \right)$$



Frekvencija koju zapaža motritelj u miru:

$$v' = \frac{v}{1 + \frac{V}{v} \cos \varphi}$$

Dopplerov efekt 9

$$v' = v \left(1 - \frac{V}{v} \cos \varphi \right)$$

Slučaj kad se motritelj giba a izvor miruje.

$$v' = \frac{v}{1 + \frac{V}{v} \cos \varphi}$$

Slučaj kad se izvor giba a motritelj miruje .

⇒ Relacije nisu recipročne. →

Različiti slučajevi (**a** i **b**) relativnoga gibanja motritelja i izvora zvuka.

Primjer:

Izvor zvuka se udaljava brzinom zvuka, $V = v$ ($\varphi = 0$). → $v'_b = \frac{v}{2}$

Motritelj se udaljava brzinom zvuka, $V = v$ ($\varphi = 0$). → $v'_a = 0$

Dopplerov efekt 10

$$v' = v \left(1 - \frac{V}{v} \cos \varphi \right)$$

Slučaj kad se motritelj giba a izvor miruje.

$$v' = \frac{v}{1 + \frac{V}{v} \cos \varphi}$$

Slučaj kad se izvor giba a motritelj miruje.

Pojednostavljenja (kada će vrijediti reciprocitet):

a) Motritelj se približava izvoru brzinom V približno po zajedničkom pravcu ($\varphi = 180^\circ$). \rightarrow

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

b) Slučaj manjih brzina gibanja izvora zvuka (kad je V znatno manje od brzine zvuka v) ($\varphi = 180^\circ$). \rightarrow

$$\frac{1}{1 - \frac{V}{v}} \approx 1 + \frac{V}{v} + \left(\frac{V}{v} \right)^2 - \dots \quad \rightarrow \quad v' \approx v \left(1 + \frac{V}{v} \right)$$

Dopplerov efekt 11

$$v' = v \left(1 - \frac{V}{v} \cos \varphi \right)$$

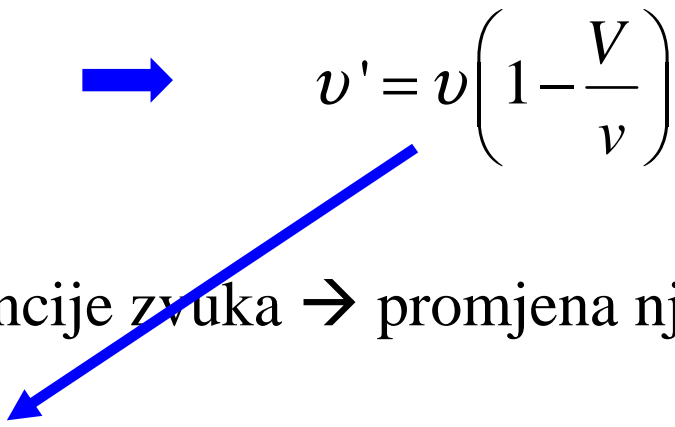
Slučaj kad se motritelj giba a izvor miruje.

$$v' = \frac{v}{1 + \frac{V}{v} \cos \varphi}$$

Slučaj kad se izvor giba a motritelj miruje .

Pojednostavljenja (kada će vrijediti reciprocitet):

Slično → Motritelj se udaljava od izvora zvuka (brzinom $-V$)


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

Promjena frekvencije zvuka → promjena njegove valne duljine →

$$\frac{v'}{v} = \frac{\lambda}{\lambda'} \Rightarrow \lambda' = \lambda / (1 - V / v)$$

Dopplerov efekt 12

Primjer: Ako je frekvencija trube automobila **400 Hz**, a motritelj kojemu se automobil **približava** zapaža frekvenciju od **440 Hz**, kolika je brzina automobila? (motritelj je u miru, a brzina zvuka je **330 m/s**)

$$v = 400\text{Hz}$$

$$v' = 440\text{Hz}$$

$$v = 330\text{m/s}$$

$$V = ?$$

$$\varphi = \pi \quad \rightarrow \quad v' = \frac{v}{1 + \frac{V}{v} \cos \varphi} \Rightarrow v' = \frac{v}{1 - \frac{V}{v}}$$

$$\rightarrow V = v \left(1 - \frac{v}{v'} \right) = 330 \left(1 - \frac{400}{440} \right) \text{m/s}$$

$$V = 30\text{m/s}$$

Dopplerov efekt 13

Primjer: Dopplerov efekt za elektromagnetske valove koji se šire i u vakuumu (bez medija). → Nestaje navedena razlika u frekvencijama za slučajeve **a** i **b**. → Isti rezultat Dopplerovog efekta za gibanje izvora elektromagnetskih valova ili gibanje motritelja.

Zašto nestaje navedena razlika u frekvencijama za slučajeve a i b?

specijalna teorija relativnosti → vrijeme nije jednako u sustavu koji miruje i u onom koji se giba → moramo uzeti u obzir dilataciju vremena

$$\Delta t_v = \Delta t(1 - v^2 / c^2)$$

Δt_v → izvoru koji se giba brzinom v relativno s obzirom na motritelja



izvor (v) i motritelj (v') se približavaju: $v'_{(p)} = v \left(\frac{\sqrt{1 - v^2 / c^2}}{1 - v / c} \right) = v \sqrt{\frac{c + v}{c - v}}$

izvor (v) i motritelj (v') se udaljavaju: $v'_{(u)} = v \sqrt{\frac{c - v}{c + v}}$

Dopplerov efekt 14

Primjena Dopplerovog efekta u astrofizici:

→ promjena frekvencije odnosno valne duljine svjetlosti koju emitira neki svemirski objekt (npr. zvijezda) ukazuje na:

- a) udaljavanje (pomak prema većim valnim duljinama, tzv. crveni pomak)
- b) približavanje (pomak prema kraćim valnim duljinama) izvora motritelju;

→ mjerenje valnih duljina → određivanje relativne brzine gibanja izvora svjetlosti

Isti princip i kod radara za mjerenje brzine vozila:

radar emitira elektromagnetske valove → EM valovi pogađaju vozilo → odbijanje elektromagnetskih valova → vraćaju se u radar → mjerenje pomaka u frekvenciji → brzina vozila

Dopplerov efekt 15

Slučaj kad izvor zvuka putuje brže od zvuka:

→ nastaju tzv. zvučni udari

Primjer: Nedaleko od nas leti zrakoplov nadzvučnom brzinom. →
Obično se kaže kako je zrakoplov «probio zvučnu barijeru».

Čuju se dva zvučna udara koji nastaju na mjestu povećanog i sniženog atmosferskog tlaka (odnosno na početku i kraju konusnog sloja zraka koji neposredno slijedi nadzvučni zrakoplov. ← *studentski seminar*

Objašnjenje (ukratko): Izvor zvuka «pretrčava» sferne valove koje proizvodi i nastaje konstruktivna interferencija velikog broja valnih ploha; tj. prekrivaju se "brjegovi" valova i onda daju jedan veliki brijeg što predstavlja udarni val ili zračni udar koji nosi ogromnu energiju (dovoljno da razbije prozore i napravi druge štete; psihološki "nervira").

Izvori zvuka

Najjednostavniji izvori longitudinalnih sinusnih valova zvuka su longitudinalna titranja štapa: uzbuda nastaje, primjerice, udarcem uzdužno po jednom kraju npr. čeličnog ili staklenog cilindričnog štapa.
→ Kraći cilindar daje višu frekvenciju (obrnuto razmjerna duljini štapa).

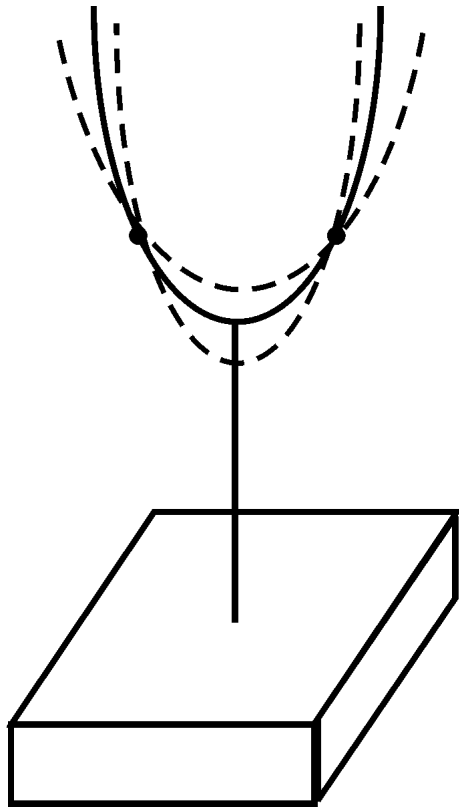
Općenito: Izvor zvuka je elastični sustav koji uzbuđen na neki način (mehanički, električki, fiziološki) titra određenom frekvencijom; takav sustav u dodiru s atmosferom daje ton.

Ton = Glazbeni zvuk, karakteriziran određenom frekvencijom, koja je stalna u nekom (duljem) intervalu vremena.

Šum = Zvuk koji ne potječe od periodičnih titraja i kojemu se period, tj. frekvencija i amplitude brzo mijenjaju.

Izvori zvuka - glazbena viljuška

Glazbena viljuška - plosnata šipka svinuta u obliku slova U



kratkotrajna deformacija krajeva šipke (približavanje i naglo otpuštanje krajeva, ili transverzalnim udarcem po kraju) → titranje s dva čvora i tri trbuha (pri osnovnoj frekvenciji)

Glazbena viljuška → na svinutom dijelu držak preko kojega se titranje može prenositi na neko drugo tijelo, npr. na rezonantni ormarić u postolju

lagani udarac batićem po viljuški → složena titranja → nakon sekundu-dvije više frekvencije se prigušuju → ostaje osnovna frekvencija (sinusni val – osciloskop)

Male viljuške daju visoke tonove (vrijedi približno).

Izvori zvuka - rezonancija u akustici

Rezonancija u akustici nastaje kad val zvuka pada na neki sustav koji može titrati frekvencijom upadnog vala. → Sustav se pobuđuje, preuzima zvučnu energiju upadnog vala. → emitira dalje

Primjer: Dvije glazbene viljuške s rezonantnim kutijama, i jednakim osnovnim frekvencijama. → Jednu viljušku pobudimo udarcem, druga viljuška u blizini započinje titrati istim tonom. → Provjera: Prvu viljušku prigušimo, a isti ton onda čujemo od druge viljuške.

Izvori zvuka - rezonancija u akustici 2

Pokus – Posuda u obliku menzure, u kojoj se nalazi nešto vode i iznad nje zračni stup.

Iznad posude držimo viljušku kojoj udarcem dajemo osnovnu frekvenciju. → U posudu dolijemo nešto vode dok ne čujemo pojačani ton viljuške koji daju stojni valovi u zračnom stupu iznad vode u posudi.

Nastali valovi u stupu zraka su u rezonanciji s viljuškom (titraju istom frekvencijom kao viljuška). → To čujemo kao pojačani zvuk.

Mjerimo visinu tj. duljinu zračnog stupca u posudi iznad vode, L .

Za osnovnu frekvenciju vrijedi odnos: $L = \lambda/2$. → Uz brzinu zvuka u laboratoriju $v = 340 \text{ m/s}$. → Frekvencija osnovnog tona viljuške:

$$v = v / \lambda = v / 2L$$

Glazbala ili glazbeni instrumenti

- izvori glazbenog zvuka (proizvode stojne valove)

- a) žičana glazbala
- b) puhačka glazbala
- c) udaraljke

Primjer: gitara (žičano glazbalo) → položajem prsta na žici (i pragu gitare) izabiremo duljinu žice → pripadna osnovna frekvencija (drugom rukom, transverzalnim pomakom ili trzajem pobuđujemo žicu na titranje).

Glazbala na vjetar ili puhački instrumenti → Proizvode stojne valove u stupu zraka u nekoj cijevi.

otvorena cijev → trbusi stojnog vala na oba kraja → harmonici se odnose kao niz cijelih brojeva

zatvorena cijev → jedan kraj cijevi zatvoren → harmonici se odnose kao neparni brojevi

Glazbala ili glazbeni instrumenti 2

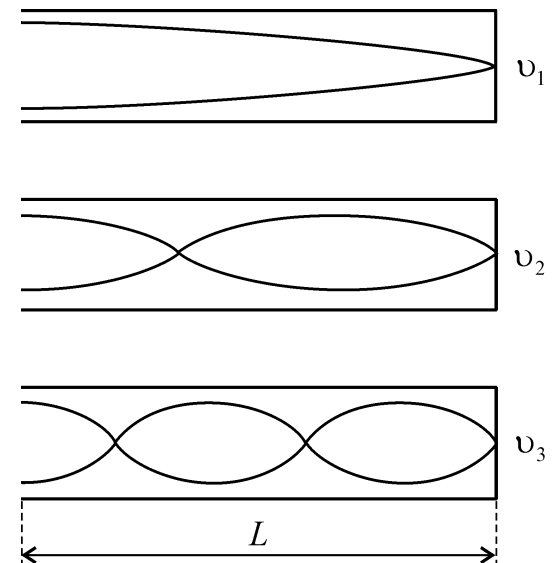
flauta → otvorena cijev kojoj se duljina mijenja (skraćuje) otvaranjem rupa na cijevi

truba → zatvaranjem rupa povećava se duljina cijevi

Po čemu se razlikuje glazbeni zvuk?

- kvaliteta zvuka
- boja tona (timbra) - karakterizira ga zastupljenost viših harmonika i njihove relativne amplitude
- visina zvuka ili frekvencija

Primjer: Tri harmonika longitudinalnih stojnih valova u stupu zraka (polu) zatvorene cijevi duljine L .



Glazbena ljesvtica

SEMINAR!!!

kromatska skala – susjedne note se razlikuju za jednak omjer frekvencija (NE ZA JEDNAK IZNOS)

OKTAVA – područje između 2 tona koji se u frekvenciji razlikuju za faktor 2

- ima 12 dijelova (međutonova)

$$2 = x^{12} \Rightarrow x = 2^{1/12}$$

$$\Rightarrow v, 2^{1/12} v, 2^{2/12} v, 2^{3/12} v, \dots, 2^{11/12} v, 2v$$

Osjetljivost ljudskog uha na zvuk

Ljudsko uho čuje zvuk s frekvencijama od približno dvadesetak do 20000 Hz (individualno).

starije osobe → gube osjetljivost na frekvencije zvuka, npr. iznad 10 kHz

infrazvuk = Zvuk frekvencije ispod 20 Hz (npr. područje frekvencija potresa zemlje → osjećaju ga, npr. psi, magarci, ribe, ...)

ultrazvuk = Zvuk frekvencije iznad 20 kHz (do približno desetak MHz)
→ prirodno ga proizvode i zamjećuju npr. šišmiši, dupini

Osjetljivost ljudskog uha na zvuk 2

Kako čovjek čuje?

Primjer: udarac batića po membrani bubnja

- membrana se periodički udubljuje (ispupčuje)*
- zrak ispred membrane se periodički zgušnjava (razrjeđuje)*
- zgušnjenja i razrjeđenja se prenose na okolni zrak*
- zgušnjenja i razrjeđenja dolaze na bubnjić i popuđuju titranje opne*
- preko sitnih koščica, titranje se prenosi na limfnu tekućinu zatvorenu u mješini u kojoj se nalaze fine slušne niti*
- zatitraju fine slušne niti, i to samo one čija je frekvencija jednaka frekvenciji izvora zvuka (rezonancija)*

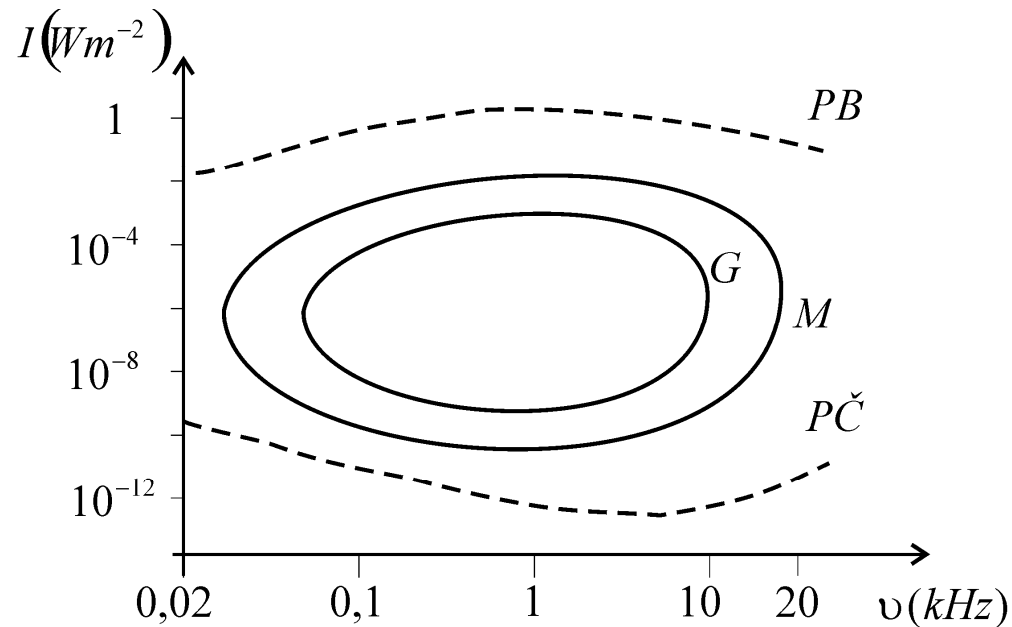
Osjetljivost ljudskog uha na zvuk 3

Ispitivanje osjetljivosti uha? → Uzima se ton određene frekvencije. → Intenzitet sinusnog tona se povećava do vrijednosti kod koje motritelj uhom zamjećuje upadni val. → Dosegnut *prag osjetljivosti ili čujnosti* motriteljevog uha.

Dalje povećavanje jakosti zvuka. → Stanje kad motritelj više ne osjeća zvuk nego *bol* u ušima. → Dostignut prag bolnog osjeta ili bola.

Ponavljajući pokus za različite frekvencije → Krivulja praga čujnosti i krivulja (praga) boli. → Veći broj ispitanika → Prosječne krivulje osjetljivosti:

Osjetljivost ljudskog uha na zvuk 4



Krivulje praga čujnosti(PČ) i boli (PB) te uobičajena područja jakosti za govor (G) i glazbu (M).

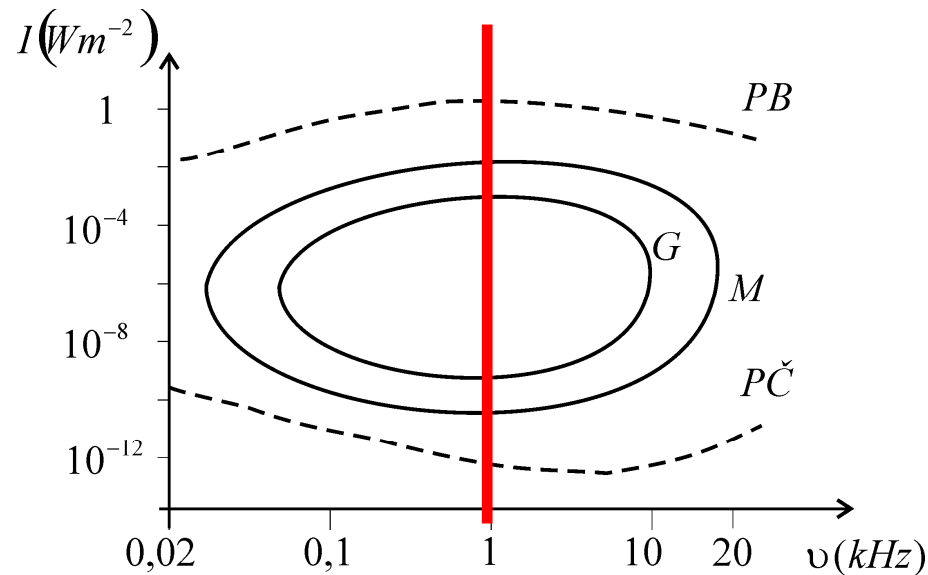
Prosječno uho → zvuk frekvencija u području (0,03 – 15) kHz

Telefon → prenose se frekvencije od (0,2 – 2) kHz

Zvučni film → koristi područje od (0,15 – 6) kHz.

Ljudski glas i glazbeni instrumenti uglavnom pokrivaju područje od (0,08 – 10) kHz.

Osjetljivost ljudskog uha na zvuk 5



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

Krivulja praga čujnosti → za zvuk frekvencije 1 kHz prag čujnosti ima jakost od oko 10^{-12} W/m^2

za frekvencije 2 – 5 kHz → još niži prag čujnosti

$I = 10^{-12} \text{ W/m}^2$ → odgovara akustički tlak od $20 \mu\text{Pa}$

→ odgovara amplituda pomaka čestica u zraku od 10^{-11} m , tj. manje od promjera molekule kisika. →

Uho je izvanredno osjetljiv detektor zvuka!

Osjetljivost ljudskog uha na zvuk 6

intenzitet vala I (def): ona energija koja s valom prođe kroz poprečni presjek po jedinici ploštine i jedinici vremena

$$[I] = \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

ljudsko uho – vrlo osjetljiv instrument, registrira intenzitet od 10^{-12} W/m^2 pa do 1 W/m^2 (raspon od 12 redova veličine!)

*ljudsko uho – registrira logaritamske promjene intenziteta
(ne linearne)*

razina jakosti zvuka J (def):

*Dva se zvučna signala razlikuju u intenzitetu za **1 bel**, ako omjer njihovih intenziteta iznosi **10**.*

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

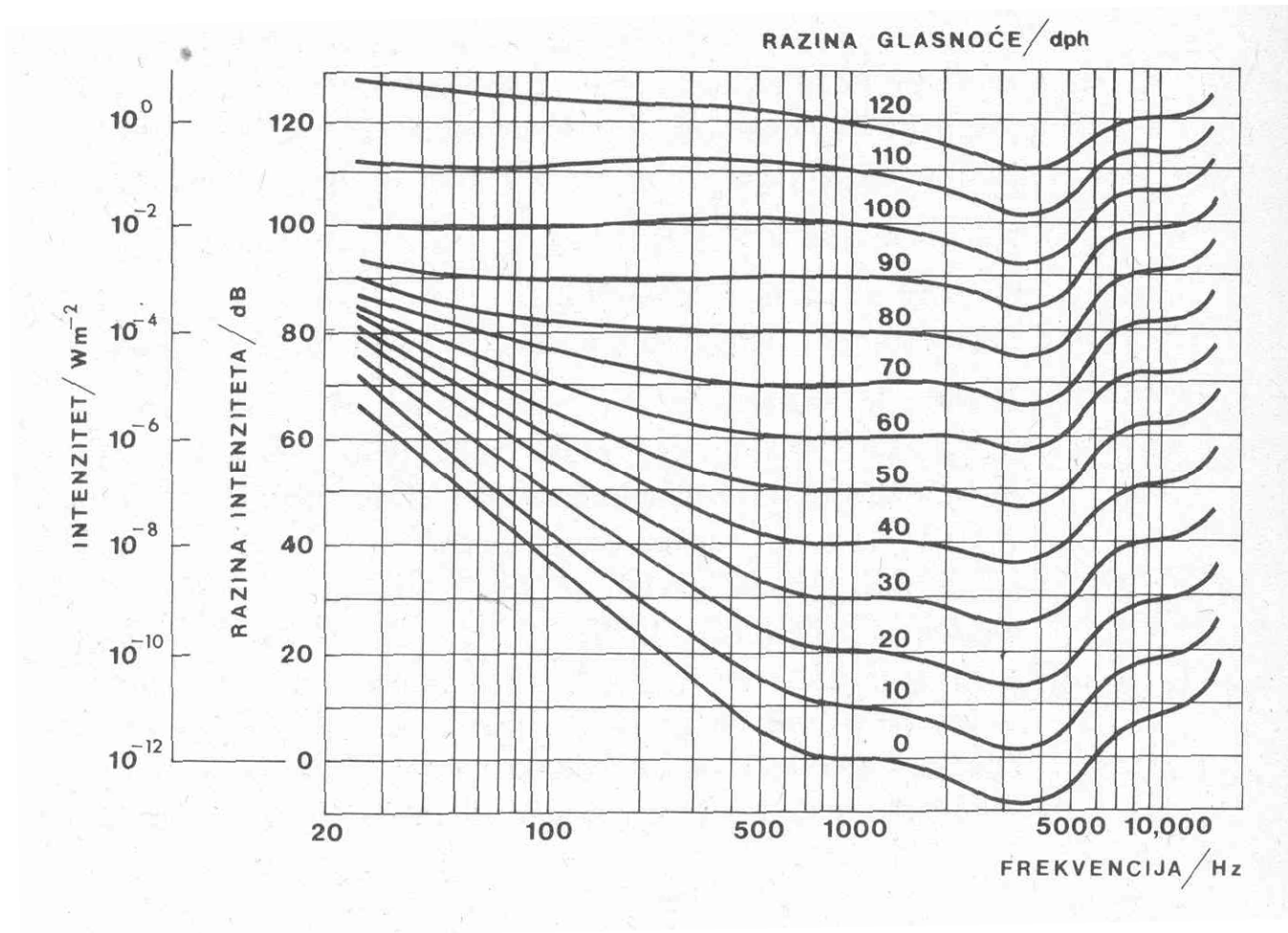
*U upotrebi je obično **decibel (dB)**.* $J = 10 \log \frac{I}{I_0}$ $I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$

$$I = I_0 \Rightarrow J = 10 \log \frac{I_0}{I_0} = 0dB$$

$$I = 1 \text{ W/m}^2 \Rightarrow J = 10 \log \frac{1}{10^{-12}} = 120dB \quad \textit{granica boli}$$

razina glasnoće zvuka (fon → decifon) (ph → dph)

Definira se isto kao i decibel, ali za svaku frekvenciju posebno.



Uho je najosjetljivije za frekvencije 600 do 6000 Hz!

detektor buke – mjeri jakost zvuka (mikrofon, filter za određene frekvencije, električno pojačalo i mjerni galvanometar)

Mjerenje akustičke razine izvodi se pomoću sinusnog tona frekvencije 1 kHz kojemu se mijenja intenzitet sve dok ne postigne približno jednaku jakost zvuka kao drugi zvuk koji uho sluša; kaže se tada da oba zvuka imaju jednaku akustičku razinu.

buka = povećani šum u ljudskom okolišu

Tipične vrijednosti nivoa zvuka:

<i>Izvor zvuka (buke)</i>	<i>Nivo šuma J (dB)</i>
granica čujnosti	0
šum lišća	10
šaputanje	20
tiho sviranje radija u kući	40
običan govor	65
Automobili 50 km/h (8 m)	70
Simfonijski orkestar (fortissimo)	80
Diskoteka (unutar prostorije)	90
Zrakoplov (uzlijetanje, 100 m)	110
granica bola	120

Oštećenje uha → I kratkotrajna buka s razinom jakosti od preko 120 dB

Procjenjuje se da je oko 20 % stanovništva Europe izloženo buci cestovnog prometa, a oko 3 % stanovništva industrijskoj buci.

Buka u ljudskom okolišu. → Obično izaziva psihološki stres.

Više razine jakosti buke → Mogu prouzročiti kardiovaskularne smetnje i mentalne poremećaje.

Uzima se da značajnu neugodu izaziva noćna buka od preko 40 dB i dnevna od preko 50 dB (primjerice, neki proizvođači klima uređaja navode da njihovi uređaji ne premašuju razinu jakosti zvuka od 40 dB).

PDF s podacima o buci!!!

Ultrazvuk

Longitudinalni valovi s frekvencijama od 20 kHz do oko 10^7 Hz.

- a) Ljudsko uho ne čuje ultrazvučne valove, ali ga osjećaju neke životinje: zaštita od komaraca pomoću ultrazvuka
- b) zaštita od glodavaca

izvori ultrazvuka → pretvaraju električne titraje u mehaničke, što se postiže na temelju piezoelektričnih svojstava tvari.

Piezoelektričnost = Pojava u nekim kristalima da električna polarizacija nastaje kao posljedica mehaničke deformacije (izravni piezoelektrični efekt P. i J. Curie, 19. st.).

Inverzni piezoelektrični efekt = Pojava kada djelovanjem električnog polja na piezoelektrični kristal nastaje deformacije kristala.

Inverzni piezoelektrični efekt → Omogućuje dobivanje titranja kristala u ultrazvučnom (i zvučnom) području.

Izravni piezoelektrični efekta → Služi za detekciju ultrazvuka.

Ultrazvuk 2

Najvažniji piezoelektrični kristali u primjeni ultrazvuka:

- a) kremen (kvarc)
- b) turmalin,
- c) monokalij-fosfat, i dr. (zajedničko svojstvo da nemaju centar simetrije.)

Primjer: Kristal kvarca → Izrezati u obliku pločice okomito na jednu od binarnih osi simetrije tj. piezolektričnih osi kristala.

→ Između velikih ploha pločice postavi se razlika potencijala npr. 10 kV

→ Nastaje promjena debljine pločice kristala od oko 20 nm.

Stavimo na pločicu kvarca metalne elektrode (npr. sloj naparenog aluminijskog oksida) i između njih se uspostavi izmjenični napon frekvencije. →

Pločica će prisilno titrati istom frekvencijom ali preslabom amplitudom da bi bila izvor ultrazvuka.

Kako dobiti ultrazvuk?

Ultrazvuk 3

Frekvenciju električnog napona podesimo tako da ima vrijednost koja odgovara vlastitoj frekvenciji pločice (longitudinalno titranje štapa s frekvencijom $\nu = v/\lambda = v/2L$). → Rezonancija pločice → Titranje znatno većom amplitudom. → Snažan izvor ultrazvuka.

visoka frekvencija → velika energija - proporcionalna s: $A^2 \cdot \nu$

Primjer za kvarc: $v = 5,5 \times 10^3 \text{ m/s}$, pločica debljine 5 mm rezonantno će titrati uz frekvenciju $\nu = 5,5 \times 10^3 / 2 \times 5 \times 10^{-3} \text{ Hz} = 5,5 \times 10^5 \text{ Hz}$.

Uređaj s piezoelektričnim kristalom, koji služi za emisiju ultrazvuka, reverzibilan je. → Može služiti kao detektor ultrazvuka, tj.

Padne li na piezoelektrični kristal val ultrazvuka, zbog tlaka vala i izravnog piezoelektričnog efekta između ploha kristala pojavljuje se izmjenični napon (s frekvencijom ultrazvuka) koji se onda elektronički pojačava.

Ultrazvuk 4

magnetostrikcija – drugi izvor ultrazvuka

Deformacija feromagnetskih materijala nastaje kad se feromagnetik postavi u zavojnicu kroz koju prolazi električna struja. Primjerice, unutar magnetskog polja od $1,6 \times 10^4 \text{ Am}^{-1}$ štap od nikla dužine 0,2 m skрати se za $6 \text{ }\mu\text{m}$.

Primjena ultrazvuka je mnogovrsna.

Navigacija - Izvor ultrazvuka emitira usmjerene snopove ultrazvuka koji se na zaprekama reflektiraju i mogu se vratiti odašiljaču, gdje se onda detektiraju; to je metoda jeke ultrazvuka ili *eho metoda*.

Ultrazvuk može biti emitiran u kratim intervalima vremena i onda emiter služi kao detektor (*eho-puls metoda*).

Npr. signal ultrazvuka se promatra na osciloskopu, kao i povratni signal, a između njih vremenska skala može biti baždarena u kilometrima, što se očitava kao tražena udaljenost.

Primjene ultrazvuka

Navigacija - Izvor ultrazvuka emitira usmjerene snopove ultrazvuka koji se na zaprekama reflektiraju i mogu se vratiti odašiljaču, gdje se onda detektiraju; to je metoda jeke ultrazvuka ili *eho metoda*.

Ultrazvuk može biti emitiran u kratim intervalima vremena i onda emiter služi kao detektor (*eho-puls metoda*).

Npr. signal ultrazvuka se promatra na osciloskopu, kao i povratni signal, a između njih vremenska skala može biti baždarena u kilometrima, što se očitava kao tražena udaljenost.

Ako je npr. podmornica na udaljenosti d od zapreke, reflektirani ultrazvučni signal će se vratiti nakon vremena $t = 2d/v$, a tražena udaljenost je $d = vt/2$ (ovdje je v brzina ultrazvuka u vodi; uobičajena frekvencija je 20 – 100 kHz).

Primjene ultrazvuka 2

Defektoskopija - Reflektirani signal može pokazati nehomogenosti materijala, pukotine, kao i materijal drugačijih svojstava.

Medicinska dijagnostika (u internoj medicini i ginekologiji) - Koristi se ultrazvuk s frekvencijama od oko 1 do 10 MHz (valna duljina treba biti manja od objekta koji se promatra), a temelji se na različitoj apsorpciji ultrazvuka u kostima, masti i mišićima.

Primjena u terapiji (npr. za razaranje neželjenog tkiva ili objekta u tijelu) → Za razbijanje kamena u bubregu koristi se ultrazvuk velikog intenziteta od oko 10 MW/m².

Eho-puls tehnika koristi ultrazvuk za *otkrivanje podvodnih objekata, mjerenje dubine dna, detekciju jata riba*, i dr.; također se koristi za *istraživanje nafte i minerala u tlu*.

Ultrazvuk se koristi također i u dijagnostici s primjenom Dopplerovog efekta, pa se eho metodom može mjeriti *brzina pomaka objekta unutar tijela*, kao što je *protok krvi i/ili rad srca fetusa*.

Primjene ultrazvuka 3

U dijagnostičkoj medicini se usmjereni puls ultrazvuka u organizmu reflektira na granici tijela ili između organa i drugih različitih struktura.

→ Mogu se razlikovati abnormalne izrasline ili džepovi fluida; može se istražiti razvoj fetusa; pratiti djelovanje srčanih zalisaka i prikupiti podatke o različitim organima tijela, kao mozak, jetra, bubrezi i dr.

Za niže intenzitete (ispod tridesetak kW/m²) nisu zapaženi štetni efekti ultrazvuka u tkivu.

Primjer: Brzina valova ultrazvuka u tkivu je oko 1540 m/s (slično kao u vodi), pripadna valna duljina za frekvenciju od 1 MHz iznosi: $\lambda = v/\nu = 1540/10^6 \text{ m} \approx 1,5 \text{ mm}$ → Granična vrijednost za male objekte koji još mogu biti detektirani (za više frekvencije se veći dio valova apsorbira u tijelu pa se teško prati refleksija; u kosti se ultrazvuk potpuno apsorbira).

Različitim intenzitetima reflektiranog ultrazvuka pridaju se različite boje i nijanse → Slika organa u boji (npr. slika fetusa u uterusu majke).

Ultrazvučna kompjutorska tomografija → Zasniva na transmisiji valova ultrazvuka.