

TALASI I deo – jezički smer

Vrste i nastanak talasa

Najvažnije dve vrste talasa su:

- mehanički i
- elektromagnetni talasi.

Međutim, postoje i neke egzotične vrste talasa kao što su magneto – hidrodinamički talasi (proizvodi ih jezgro Sunca), gravitacioni talasi (postojanje gravitacionih talasa još nije eksperimentalno potvrđeno) itd.

Mehanički talasi uvek nastaju i prostiru se kroz materijalnu sredinu. Oscilatori mehaničkih talasa su čestice (molekuli) te sredine. Zbog toga se oni ne mogu prostirati kroz vakuum.

Primeri mehaničkih talasa su: zvučni talas, talas na vodi, talas na kanapu, talas u lastišu, talas na zategnutoj žici, itd.

Mehanički talasi se kreću različitim brzinama, ali su one uvek mnogo manje od brzine svetlosti. Npr. zvučni talas se kroz vazduh na normalnom pritisku i sobnoj temperaturi kreće približno brzinom $u = 340 \text{ m/s}$.

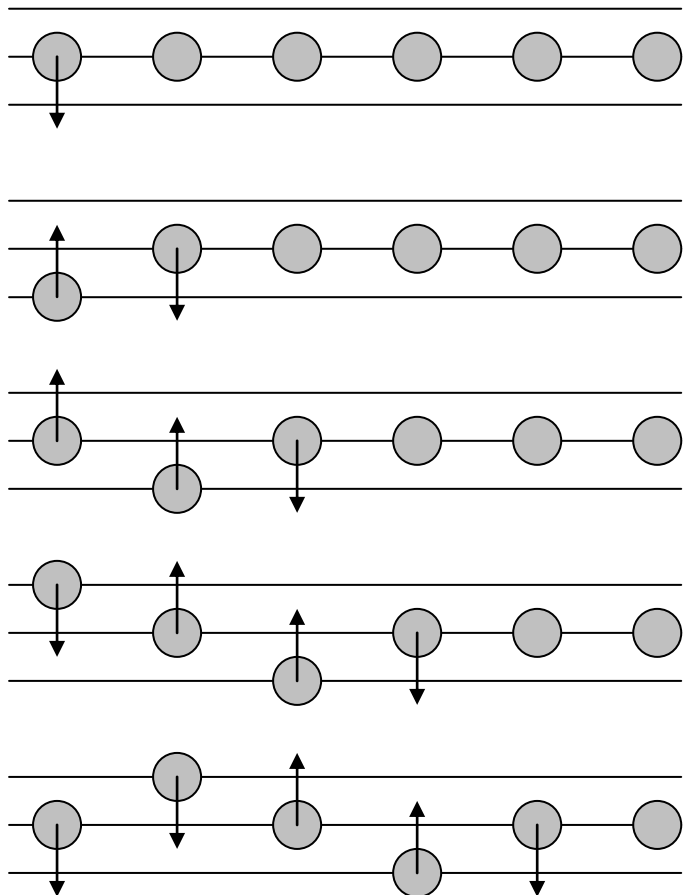
Elektromagnetni talasi se mogu prostirati i kroz materijalnu sredinu ali i kroz vakuum. Njihovi oscilatori su kvanti tj. fotoni. To su zrnca energije elektromagnetnog polja koja osciluju i istovremeno se kreću brzinom svetlosti u smeru prostiranja talasa. Zbog toga se ovi talasi i najbolje prostiru kroz vakuum, jer atomi, tj. molekuli materijalne sredine ometaju kretanje fotona.

Primeri elektromagnetnih talasa su: svetlost, radio talasi, infracrveni talasi, ultraljubičasti (ultravioletni) zraci, γ - zraci, itd.

Svi elektromagnetni talasi se kreću brzinom svetlosti:
 $c = 299792,5 \text{ km/s}$, tj. približno
 $c = 300000 \frac{\text{km}}{\text{s}} = 3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ kroz va-

kuum. U materijalnim sredinama ova brzina je manja. Npr brzina svetlosti kroz staklo je $c_s = 200000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$.

Na sl. 1. prikazan je nastanak mehaničkog – talasa na vodi. Prva slika prikazuje površinske molekule vode u recimo jednoj bari. Kamen bačen u baru povuče za sobom prvi molekul u nizu naniže. Međutim između prvog i drugog molekula deluje jako međusobno privlačenje koje zaustavlja prvi molekul u donjem položaju i izaziva njegovo kretanje naviše. Istovremeno ovo privlačenje povlači drugi molekul naniže i uključuje ga u oscilovanje, ali sa četvrtinom perioda zakašnjenja u odnosu na prvi molekul, što prikazuje druga slika. Treća slika pokazuje četvrtinu perioda kasnije, kada se prvi molekul, nastavlja svoje kretanje uvis dok drugi molekul povlači za sobom nadole treći



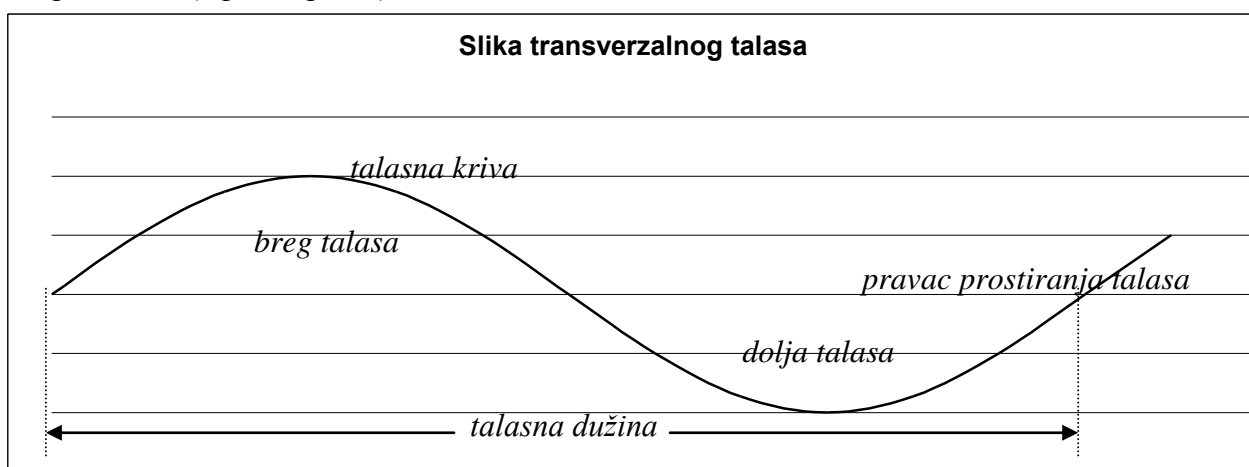
sl. 1.

molekul uključujući i njega u oscilovanje. Četvrta slika pokazuje opet četvrtinu perioda kasnije kada se prvi molekul zbog privlačenja sa drugim zaustavlja u gornjem amplitudnom položaju, drugi molekul vučen prvim molekulom uvis prolazi kroz ravnotežni položaj naviše, dok treći molekul iz donjeg amplitudnog položaja povlači četvrti molekul naniže uključivši i njega u oscilovanje. Poslednja slika prikazuje trenutak kada se, posle jednog perioda oscilovanja, prvi molekul vraća u ravnotežni položaj završivši jednu punu oscilaciju. U tom trenutku oscilovanje je zahvatilo već pet površinskih molekula u nizu, od kojih svaki osciluje sa jednom četvrtinom perioda zaostatka za prethodnim molekulom koji mu je i preneo oscilovanje.

Iz ovakve slike nastanka mehaničkog talasa jasno sledi i njegova definicija: **Mehanički talas predstavlja prenošenje oscilacija kroz datu materijalnu sredinu.**

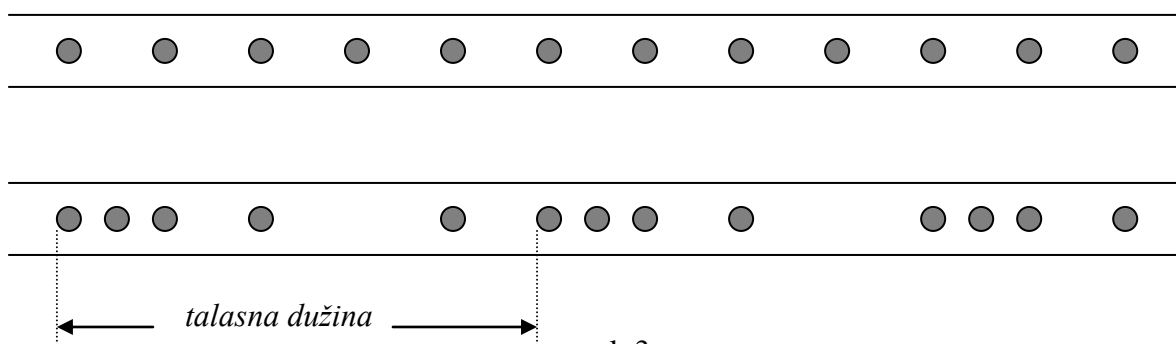
Postoji još jedna podela talasa na poprečne (transverzalne) i uzdužne (longitudinalne) talase.

Talas je poprečan ako se oscilacije dešavaju pod pravim uglom (popreko) u odnosu na pravac prostiranja talasa. Ovakav talas pravi karakteristične bregove i dolje. U poprečne talase spadaju svi prirodni elektromagnetni talasi, talas na kanapu, vodeni talas, talas koji nastaje trzanjem zategnute žice (npr. na gitari) itd.



sl. 2.

Talas je uzdužan ako se oscilacije dešavaju duž (uzduž) pravca prostiranja talasa. Uzdužan talas pravi karakteristična mesta zgušnjavanja i razređivanja sredine. U uzdužne talase spadaju: zvučni talas, talas u lastišu, laserski zrak itd. Na sl. 3. prikazan je talas u lastišu. Prva slika prikazuje blago zategnut lastiš, čiji krajevi su učvršćeni, sa tačkama koje su nacrtane na njegovoj površini na jednakim međusobnim rastojanjima. Ako se dva dela lastiša nejednako rastegnu pa se onda lastiš pusti, doći će do uzdužnih oscilacija lastiša zbog težnje materijala lastiša ka ravnotežnom stanju, tj. ka izjednačavanju istezanja. Ovo oscilovanje će se prenositi duž čitavog lastiša. Druga slika prikazuje jedan trenutak njegovog oscilovanja. Može se videti da su tačke na njegovoj površini na nekim mestima zgusnute, dok su na drugim mestima razređene. To je karakteristična slika uzdužnog talasa.



sl. 3.

Osnovne karakteristike talasa

Postoji šest osnovnih veličina koje se koriste pri opisivanju talasa i to su:

elongacija talasa x (m)

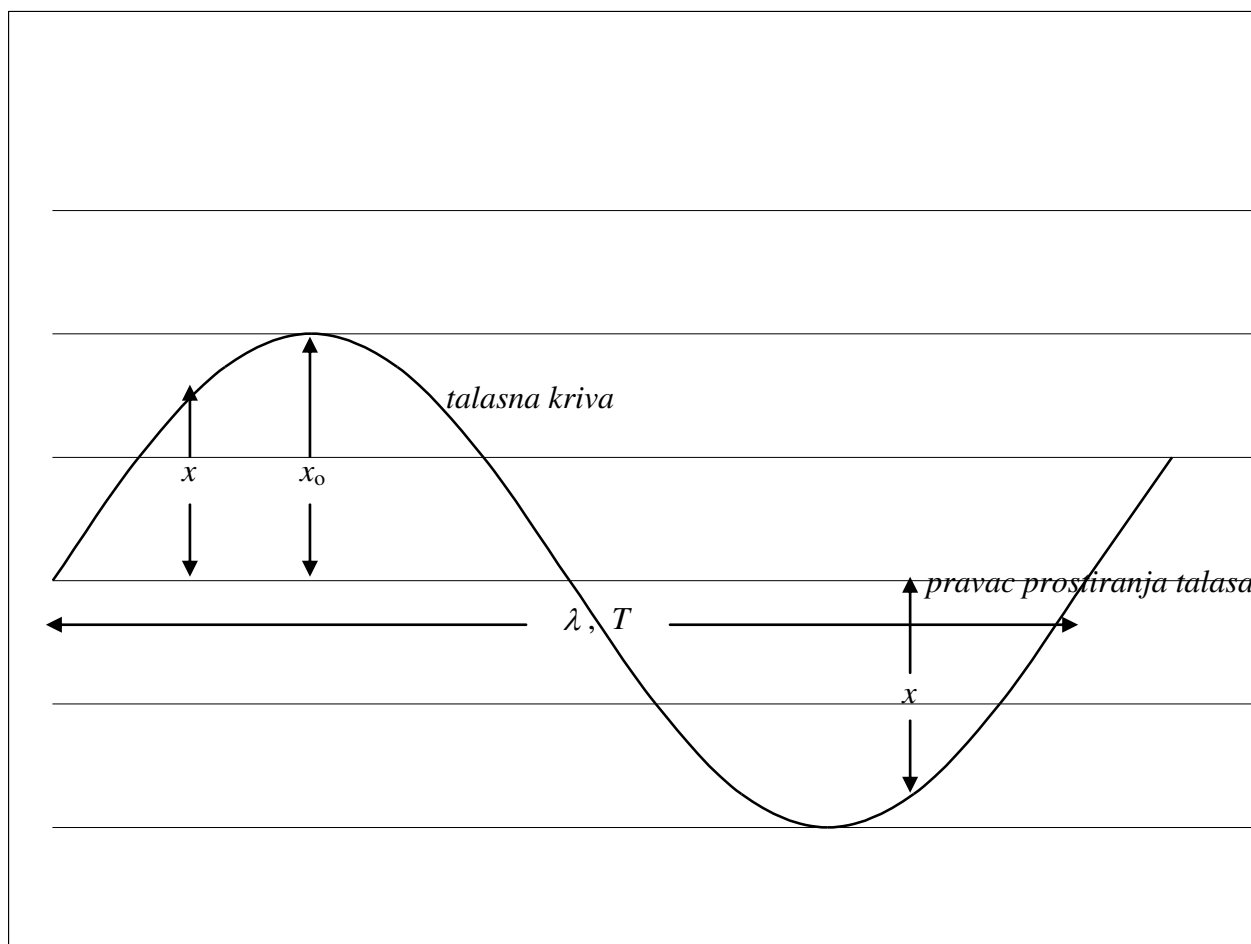
amplituda talasa x_0 ili A (m)

talasna dužina λ (m)

period talasa T (s)

frekvencija talasa ν (Hz)

brzina talasa u ili c (m/s)



sl. 4.

Elongacija i amplituda će biti definisane na primeru poprečnog talasa.

elongacija talasa x (m) je trenutno rastojanje izabrane tačke na talasnoj krivoj od pravca prostiranja talasa.

amplituda talasa x_0 ili A (m) je maksimalno rastojanje od talasne krive do pravca prostiranja talasa.

Zato važi relacija:

$$x_{\max} = x_0.$$

talasna dužina λ (m) je, kod poprečnog talasa, rastojanje duž pravca prostiranja talasa na koje se može smestiti jedan breg i jedna dolja talasa. Kod uzdužnog talasa, talasna dužina je rastojanje duž pravca prostiranja talasa na koje se može smestiti jedno mesto zgušnjavanja i jedno mesto razređivanja sredine (vidi sl. 3.).

Opšta definicija talasne dužine koja važi za sve vrste talasa glasi: talasna dužina je rastojanje između dva najbliža molekula koja osciluju u istoj fazi.

Dva molekula osciluju u istoj fazi ako se nalaze u istom položaju, a smer oscilovanja im je isti.

period talasa T (s) je vreme za koje talas pređe jednu svoju talasnu dužinu.

frekvencija talasa ν (Hz) je broj talasnih dužina koji talas pređe u jedinici vremena, tj. u jednoj sekundi.

Iz definicija perioda i frekvencije sledi:

$$T = \frac{1}{\nu} \quad \text{tj.} \quad \nu = \frac{1}{T}. \quad (1)$$

brzina mehaničkog talasa u (m/s) je brzina prenošenja oscilacija kroz datu materijalnu sredinu.

Kako znamo da je: $\text{brzina} = \frac{\text{put}}{\text{vreme}}$ i ako za put uzmemo talasnu dužinu, tada je vreme jednako periodu, pa je:

$$u = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot \frac{1}{T}. \quad (2)$$

$$u = \lambda \cdot \nu \quad (3)$$

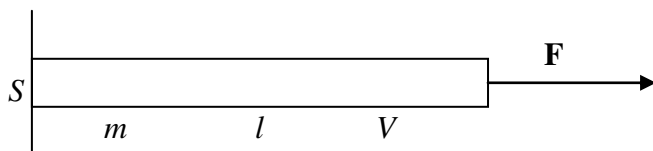
Obrasci (2) i (3) za brzinu talasa važe i za mehaničke i za elektromagnetne talase.

Brzina mehaničkih talasa

Brzina poprečnog talasa u zategnutoj žici je:

$$u = \sqrt{\frac{\sigma}{\rho}}, \quad (4)$$

gde je $\sigma = \frac{F}{S}$ napon na istežanje te žice. F je sila koja isteže žicu, dok je S površina njenog poprečnog preseka. $\rho = \frac{m}{V}$ je gustina materijala od koga je žica napravljena. m je masa žice, a V je njena zapremina. Zamenom ovih izraza u obrazac (4) dobija se:



$$u = \sqrt{\frac{\frac{F}{S}}{\frac{m}{V}}} \quad (5)$$

Kako je zapremina žice: $V = S \cdot l$, gde je l njena dužina, zamenom u (5) dobija se:

$$u = \sqrt{\frac{\frac{F}{S}}{\frac{m}{S \cdot l}}} = \sqrt{\frac{F}{\frac{m}{l}}}. \quad (6)$$

Veličina iz imenioca dvojnog razlomka: $\frac{m}{l}$ ima smisao mase po jedinici dužine žice, a u fizici se naziva linearna gustina žice i obeležava se slovom μ . Zato je:

$$u = \sqrt{\frac{F}{\mu}}. \quad (7)$$

Brzina uzdužnog talasa u čvrstim i tečnim sredinama je:

$$u = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (8)$$

ρ je gustina tog čvrstog materijala, ili te tečnosti. Kod čvrstih materijala E je Jungov moduo elastičnosti, dok je kod tečnosti E koeficijent njihove stišljivosti.

Brzina uzdužnih talasa u gasovima na primeru brzine prostiranja zvuka u atmosferi je:

$$u = \sqrt{\chi \cdot \frac{p}{\rho}} \quad (9)$$

$$\chi = \frac{c_p}{c_v} \quad (10)$$

je odnos molarnih toplotnih kapaciteta vazduha pri stalnom pritisku i pri stalnoj zapremini. Zemljinu atmosferu čine uglavnom dvoatomni gasovi: azot N_2 i kiseonik O_2 , pa je zbog toga

$c_p = \frac{7}{2}R$, a $c_v = \frac{5}{2}R$. Zamenom u (10) i posle kraćenja dobija se: $\chi = \frac{7}{5} = 1.4$

$\rho = \frac{m}{V}$ je gustina vazduha, a p je njegov pritisak. Iz Klapejronove jednačine:

$$p \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T$$

pritisak se može izraziti kao:

$$p = \frac{m \cdot R \cdot T}{V \cdot M} = \rho \cdot \frac{R \cdot T}{M} \quad (11)$$

Zamenom (11) u (9) dobija se:

$$u = \sqrt{\chi \cdot \frac{\rho \cdot \frac{R \cdot T}{M}}{\rho}} = \sqrt{\chi \cdot \frac{R \cdot T}{M}} \quad (12)$$

$R = 8.314 \frac{J}{mol \cdot K}$ je univerzalna gasna konstanta, T je temperatura vazduha u Kelvinovim stepenima, dok je M molarna masa vazduha.

Molarna masa kiseonika O_2 je: $M_{O_2} = 32 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{mol}$, a azota N_2 : $M_{N_2} = 28 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{mol}$.

Kako kiseonik čini približno $\frac{1}{4}$ vazduha, dok preostale $\frac{3}{4}$ približno čini azot, sledi da je prosečna

molarna masa vazduha: $M = 29 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{mol}$.

Zamenom vrednosti χ , R i M u (12) dobija se:

$$u = \sqrt{1.4 \cdot \frac{8.314 \frac{J}{mol \cdot K} \cdot T}{29 \cdot 10^{-3} \frac{kg}{mol}}} \quad (13)$$

$$u \approx 20 \cdot \sqrt{T} \left(\frac{m}{s} \right).$$

pa je:

Uzmimo temperaturu vazduha $t = 16^\circ C$. Tada je $T = 273 + t = 273 + 16 = 289K$. Zamenom u (13) dobija se:

$$u = 20 \cdot \sqrt{289} = 20 \cdot 17 = 340 \frac{m}{s}.$$

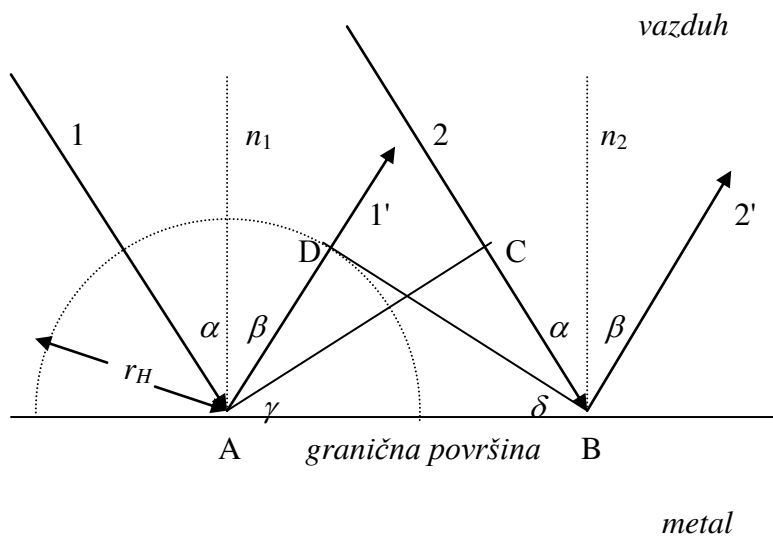
Zakon odbijanja talasa – na primeru svetlosti

Zakon odbijanja talasa ima dva stava:

I stav: Upadni zrak, normala na graničnu površinu i odbijeni zrak leže u istoj ravni.

II stav: Upadni ugao uvek je jednak odbojnom uglu $\alpha = \beta$.

Na sl. 5. snop paralelnih svetlosnih zraka – prikazan pomoću dva granična zraka tog snopa (1 i 2) – pada na graničnu površinu između dve sredine. Upadna sredina je propusna za svetlost (recimo vazduh), dok je druga sredina nepropusna za svetlost (recimo neki metal). Zrak 1 pada u tačku A, dok zrak 2 pada u tačku B. Kada zrak 1 stigne u tačku A, zrak 2 je stigao tek u tačku C – što definiše upadni talasni front AC, koji je normalan na upadne zrake 1 i 2. Dok zrak 2 prelazi rastojanje CB, zrak 1 pogodivši tačku A počinje da se širi u gornju sredinu po Hajgensovom principu. Hajgensov princip glasi: svaka tačka pogođena talasom postaje izvor novog sfernog talasa. U ovom slučaju talas se širi samo u gornjoj sredini jer je donja nepropusna za svetlost. Kako se odbijeni talas kreće istom brzinom kao i upadni talas može se zaključiti da je poluprečnik Hajgensove polusfere r_H jednak rastojanju CB u trenutku kada zrak 2 stigne u tačku B. Odbijeni talasni front BD se dobija kada se iz tačke B povuče normala na Hajgensovu polusferu. Pritom odbijeni zraci $1'$ i $2'$ moraju biti normalni na odbijeni talasni front.



sl. 5.

Dokaz II stava zakona odbijanja talasa:

Posmatraćemo pravougle trouglove: $\triangle ABC$ i $\triangle ABD$. Kako je:

$$AB = AB$$

$$BC = AD \quad \text{i}$$

$$\angle C = \angle D = 90^\circ$$

po SSU (stranica, stranica i ugao naspram veće od njih) stavu o podudarnosti trouglova ovi trouglovi su podudarni:

$$\triangle ABC \cong \triangle ABD.$$

Iz njihove podudarnosti sledi da su uglovi γ i δ jednaki kao uglovi naspram jednakih kateta.

Parovi uglova α i γ , β i δ su takođe jednaki kao uglovi sa međusobno normalnim kracima. Dakle:

$$\gamma = \delta,$$

$$\alpha = \gamma \quad \text{i}$$

$$\beta = \delta$$

pa je jasno da je:

$$\alpha = \beta$$

što je i trebalo dokazati.

Zakon prelamanja talasa – na primeru svetlosti

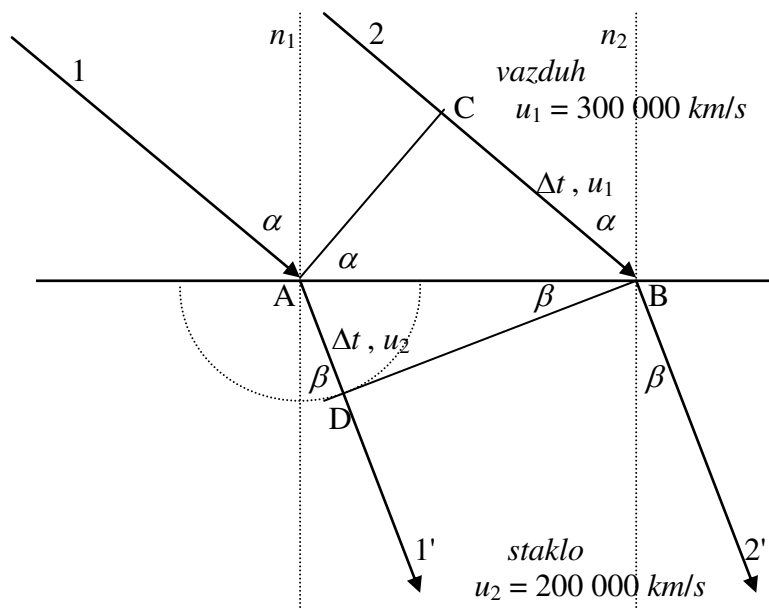
Kao i zakon odbijanja talasa tako i zakon prelamanja talasa ima dva stava:

I stav: Upadni zrak, normala na graničnu površinu i prelomljeni zrak leže u istoj ravni.

II stav: Odnos sinusa upadnog i prelomnog ugla jednak je odnosu brzina talasa u upadnoj i prelomnoj sredini, tj.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{u_1}{u_2}$$

Uzmimo da je upadna (gornja) sredina – vazduh , a prelomna (donja) sredina – staklo. Svetlost je brža u vazduhu nego u staklu.



sl. 6.

Kada zrak 1 stigne na graničnu površinu, tj u tačku A, zrak 2 je tek u tački C – što definiše upadni talasni front AC. U toku vremena Δt dok zrak 2 prelazi rastojanje CB brzinom u_1 , zrak 1 se širi u donju sredinu kao Hajgensova polusfera. Zbog toga što je $u_1 > u_2$ sledi da je rastojanje AD – koje predstavlja poluprečnik Hajgensove polusfere – manje od rastojanja CB. Prelomni talasni front BD nastaje kada se povuče tangenta iz tačke B na Hajgensov polusferu. Prelomljeni zraci 1' i 2' moraju biti normalni na prelomni talasni front. Na ovaj način prelomni ugao β je manji od upadnog ugla α .

Dokaz II stava zakona prelamanja talasa:

Posmatraćemo dva pravougla trougla na sl. 6. ΔABC i ΔABD .

U ΔABC ugao kod temena A je jednak upadnom uglu α zato što su to uglovi sa međusobno normalnim kracima.

U ΔABD ugao kod temena B je jednak prelomnom uglu β zato što su to uglovi sa međusobno normalnim kracima.

Iz ΔABC imamo: $\sin \alpha = \frac{CB}{AB}$,

a iz ΔABD : $\sin \beta = \frac{AD}{AB}$.

Znamo da je $put = brzina \cdot vreme$ pa je:

$$CB = u_1 \cdot \Delta t \quad \text{i} \quad AD = u_2 \cdot \Delta t$$

Sada je:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\frac{CB}{AB}}{\frac{AD}{AB}} = \frac{CB}{AD} = \frac{u_1 \cdot \Delta t}{u_2 \cdot \Delta t} = \frac{u_1}{u_2}.$$

Dakle ovime je dokazan drugi stav zakona prelamanja da je:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{u_1}{u_2}.$$

Značenje ovog stava zakona prelamanja je sledeće: ako talas prelazi iz sredine u kojoj je brži u sredinu u kojoj je sporiji prelomiće se ka normali (β manje od α) i ako talas prelazi iz sredine u kojoj je sporiji u sredinu u kojoj je brži prelomiće se od normale (β veće od α).

Princip superpozicije talasa – slaganje talasa

Glavno pitanje u ovoj temi je: a šta se dešava kada se sretnu dva talasa ? Da li se oni tada slože u jedan rezultujući talas, ili uopšte međusobno ne reaguju ?

Zanimljivo je da se obe ove alternative dešavaju. Da bi se dva talasa složila u rezultujući talas potrebno je da budu koherentni.

Dva talasa su koherentna kada ispunjavaju sledeća dva uslova:

- moraju da budu iste prirode (oba svetlosna, oba zvučna ...) i
- moraju da imaju istu talasnu dužinu tj. istu frekvenciju.

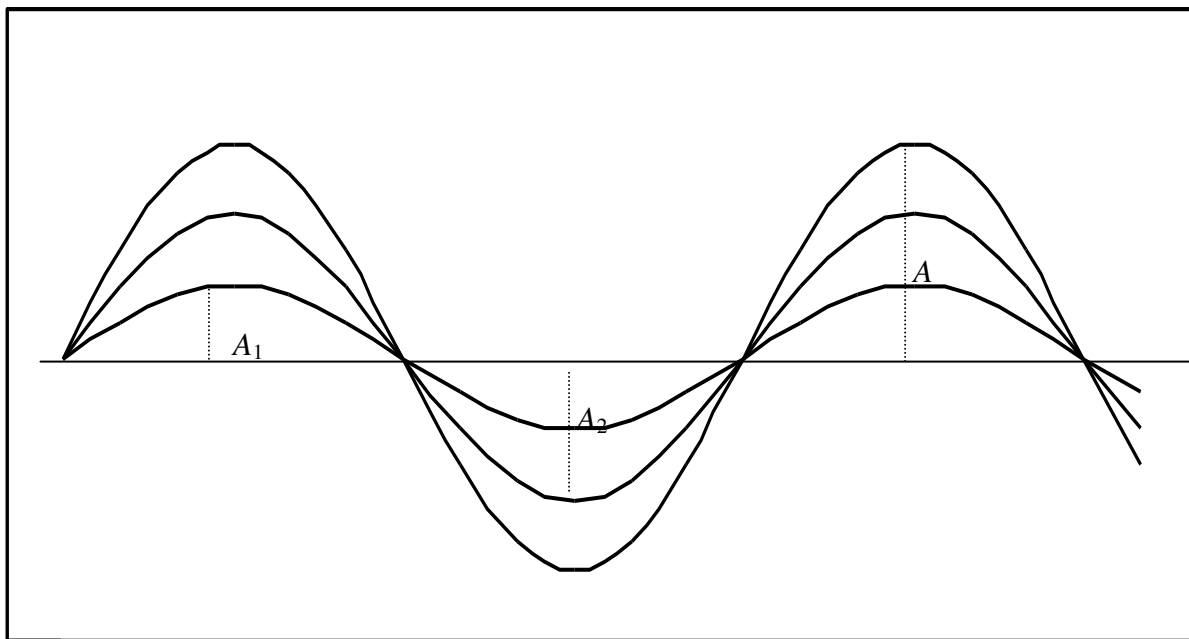
Ako nisu koherentni oni se ne slažu u rezultujući talas, tj. nastavljaju svoje kretanje kao da onaj drugi (talas) uopšte i ne postoji. Ovakva situacija se javlja kada se sretnu jedan svetlosni i jedan zvučni talas, ili svetlosni i vodeni talas...

Međutim, nema slaganja ni kada se sretnu dva talasa iste prirode, ako su im talasne dužine tj. frekvencije različite.

Kao primer možemo uzeti dva radio talasa koje emituju dve različite radio stanice. Kako se njihove frekvencije razlikuju, ova dva talasa se ne mešaju te možemo nesmetano pratiti oba programa. Kada bi ove stanice emitovale na istoj frekvenciji, tada bi se njihovi talasi složili u jedan rezultujući talas, a na toj frekvenciji bi se verovatno čulo samo krčanje...

Dva talasa koja su koherentna mogu se sresti na beskonačno mnogo različitih načina. Sada ćemo razmotriti tri najjednostavnija načina njihovog slaganja u rezultujući talas.

1. slučaj: Susret dva koherentna talasa koja se susreću krećući se u istom smeru i koji su u istoj fazi.



sl. 7.

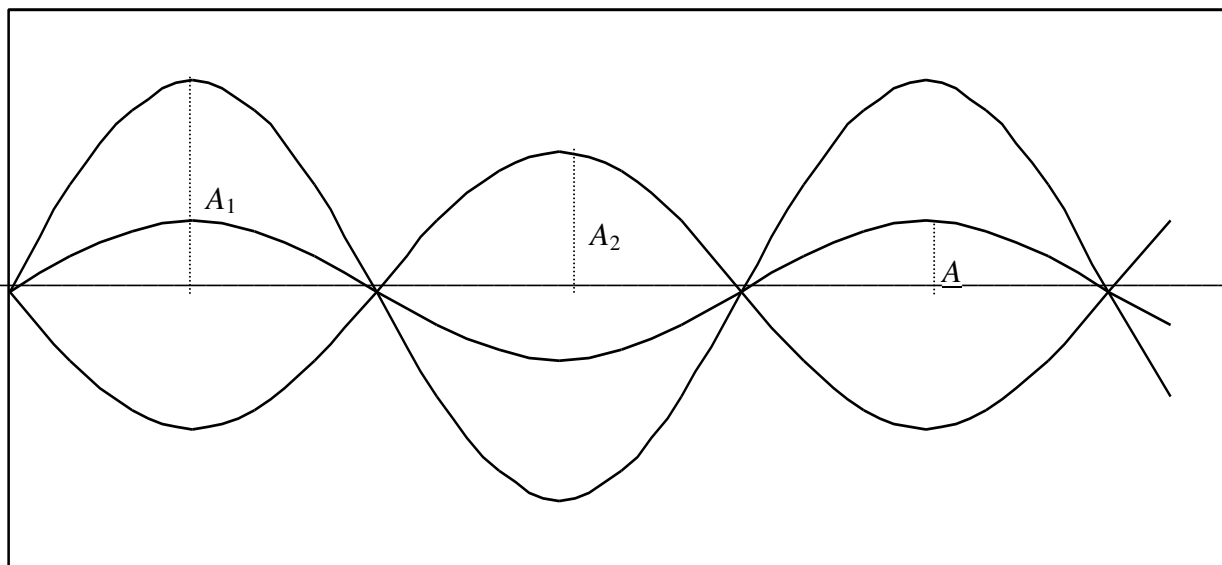
Dva koherentna talasa su u istoj fazi ako im se poklapa: breg sa bregom, a dolja sa doljom, što je i prikazano na sl. 7.

Ako su im amplitude A_1 i A_2 tada rezultujući talas ima amplitudu:

$$A = A_1 + A_2.$$

Dakle u ovom slučaju rezultujući talas nastaje »sabiranjem« dva komponentna talasa. Ovo je lako razumeti ako zamislimo da su u pitanju dva vodena talasa. Kako oba talasa na istom mestu »vuku« vodu u istom smeru – naviše ili naniže, jasno je da će se ovakva dva dejstva sabrati u jedno rezultujuće dejstvo koje je, zbog istog pravca i smera komponentnih dejstava, jednako njihovom prostom zbiru.

2. slučaj: Dva koherentna talasa koja se susreću krećući se u istom smeru, a koji su u suprotnoj fazi.



sl. 8.

Dva koherentna talasa su u suprotnoj fazi ako se breg jednog, poklapa sa doljom drugog talasa.

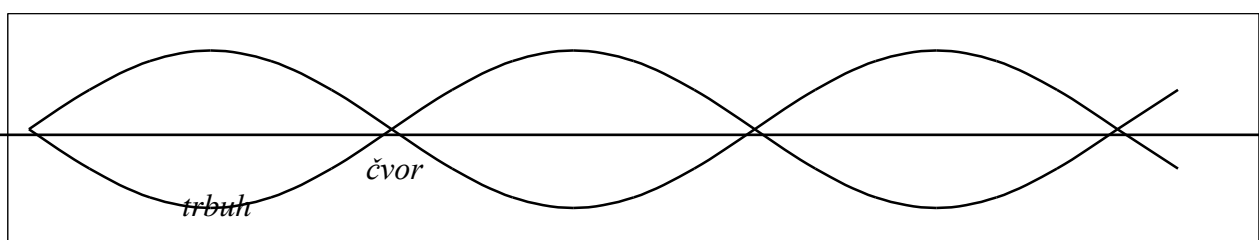
Amplitude dva komponentna talasa su na sl. 8. označene sa A_1 i A_2 , pa rezultujući talas ima amplitudu:

$$A = A_1 - A_2.$$

Dakle, u ovom slučaju rezultujući talas nastaje »oduzimanjem« dva komponentna talasa.

U ovom slučaju je moguće i potpuno poništavanje komponentnih talasa, ali pod uslovom da su im amplitude jednake. Dakle, dva koherentna talasa će se poništiti ako se susretnu u: istom smeru i u suprotnoj fazi i ako su im amplitude jednake.

3. slučaj: Dva koherentna talasa koja se susreću krećući se u suprotnom smeru, a koji su u suprotnoj fazi.



sl. 9.

U ovom slučaju nastaje rezultujući – stojeći talas.

Stojeći talas nastaje i kao poprečan talas na zategnutoj žici (recimo na gitari) kada je trznemo i ostavimo da osciluje.

Postoje dva razloga da ovaj talas nazovemo stojećim:

- slika ovog talasa se ne menja tokom vremena, tj. trbusi i čvorovi stojećeg talasa se ne pomeraju duž pravca prostiranja i
- duž pravca prostiranja talasa se ne prenosi ni energija talasa.

Zvučni talasi

Zvuk je uzdužan mehanički talas.

Izvor zvuka je svako telo koje osciluje (treperi, vibrira...)

Frekvencija izvora je jednaka frekvenciji proizvedenog zvuka.

Zvuke različitih frekvencija razlikujemo po visini tona. Mala frekvencija zvuka znači da je ton dubok, dok velika frekvencija zvuka znači da je taj ton visok. Primer: muški glas ima prosečno $\nu = 500 \text{ Hz}$, dok prosečan ženski glas ima frekvenciju od $\nu = 1000 \text{ Hz}$.

Međutim, čovek ne čuje sve frekvencije. Zato sve zvuke delimo na tri vrste:

infrazvuk – od 0 do 20 Hz,

zvuk (u opsegu čujnosti) – od 20 Hz do 20 000 Hz i

ultrazvuk – iznad 20 000 Hz.

Navedene granice su prosečne vrednosti, a to znači da se kod svakog pojedinačnog čoveka mogu javiti razlike u odnosu na njih. *Pri starenju gornja granica čujnosti se značajno smanjuje, tako da stari ljudi često ne čuju cvrčke jer njihova pesma je na oko 13 000 Hz. Ovako visoku frekvenciju cvrčak proizvodi tako što na svom stomaciću ima hitinski oklop i na njemu vrlo kratke i čvrste hitinske dlačice preko kojih prelazi svojim nožicama izazivajući tako njihovo treperenje.*

Čovek čuje baš ovaj opseg frekvencija – kao posledicu principa svrsishodnosti u evoluciji – jer su to zvuci koji su najčešći u prirodi.

U sredinama različite gustine zvuk ima različite brzine i različit domet. U principu, što je sredina gušća to je zvuk brži i ima duži domet. Međutim, brzina zvuka zavisi i od elastičnosti sredine. U sledećoj tabeli date su prosečne vrednosti brzine zvuka u različitim sredinama:

sredina	brzina zvuka u $\frac{m}{s}$
vazduh	340
voda	1 450
morska voda	1 550
bakar	3 500
aluminijum	5 000
staklo	5 500

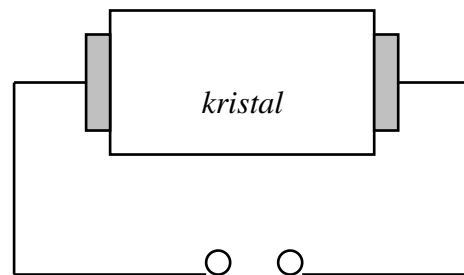
Kako je zvuk mehanički talas on se ne prostire kroz vakuum.

Brzina i domet zvuka zavise i od temperature sredine. U principu, može se reći da je u toplijoj sredini zvuk brži, ali da ima kraći domet. Da je u toplijoj sredini zvuk brži poznato je iz ranije izvedenog obrasca za brzinu zvuka u vazduhu:

$$u \approx 20 \cdot \sqrt{T} \left(\frac{m}{s} \right).$$

Povećanje brzine zvuka sa porastom temperature je logično jer su u toplijoj sredini molekuli brži, pa brže dolazi do njihovih sudara a tako oni jedan drugome brže prenose oscilovanje. Međutim, za uređivanje na oscilovanje bržih molekula potrebna je veća energija, pa to objašnjava kraći domet zvuka u toplijoj sredini, jer se energija koju je izvor uložio potroši na manjem rastojanju, nego pri uređivanju na oscilovanje sporijih molekula u hladnijoj sredini.

Pored prirodnih izvora zvuka postoji i generator zvuka koji radi na principu obrnutog piezo-električnog efekta. Kroz kristal kvarca ili turmalina propušta se naizmjenična struja. Pri kretanju elektrona u jednom smeru kristal se širi, dok se pri njihovom kretanju u suprotnom smeru kristal skuplja. Dakle, frekvencija struje je jednaka frekvenciji proizvedenog zvuka, dok se jačina zvuka reguliše jačinom struje.



sl. 10.

Kako generatori naizmjenične struje mogu proizvoditi struju frekvencije do 300 000 000 Hz, jasno je da je to i najveća proizvedena frekvencija ultrazvuka.

Zvuk kao prinudna periodična sila može izazvati pojavu rezonancije kod raznih tela.

Kamion ili autobus koji prolaze ulicom mogu izazvati, bukom koju proizvode, rezonanciju prozorskog stakla, što izaziva zvečanje stakla, normalno pod uslovom da je frekvencija buke jednaka sopstvenoj frekvenciji tog okna.

Operaska pevačica može slomiti čašu za šampanjac ako dovoljno jako otpeva ton čija je frekvencija jednaka sopstvenoj frekvenciji čaše.

Jak infrazvuk, proizveden generatorom infrazvuka može srušiti most ili zgradu, ali može izazvati i smrt čoveka ako pogodi sopstvenu frekvenciju nekog vitalnog organa u telu, npr. srca. Ove za čoveka opasne frekvencije se nalaze do 100 Hz. Uvo nam “zapišti” ako neki infrazvuk pogodi sopstvenu frekvenciju neke od kosti glave, pa njeno oscilovanje izazvano rezonancijom čujemo kao pištanje. Opasnost preti i od muzičkih uređaja sa oznakom Hi Fi. Ova oznaka je skraćenica od High fidelity što znači Visoka vernost. Oni proizvode sve frekvencije u opsegu čujnosti – dakle od 20 Hz do 20 000 Hz, pa i one zvuke koji su od 20 do 100 Hz. Stari uređaji bez ove oznake proizvode zvuke od 100 pa do 10 000 Hz. Zato kada slušamo muziku, a ton jako pojačamo potrebno je da uključimo sub-sonic filter jer on ne propušta u zvučnike ni jedan zvuk čija je frekvencija ispod 100 Hz, a time ćemo sprečiti da nas ovi opasni zvuci povrede.

Jak ultrazvuk tačno podešene frekvencije može rezonancijom razbiti kamen u bubregu – pretvorivši ga u pesak koji se ipak mnogo lakše izbacuje iz organizma prirodnim putem, što se i koristi u medicini.

Nezavisno od pojave rezonancije ultrazvuk se pokazao jako korisnim i kao zamena za X ili rentgenske zrake. Kako je ultrazvuk bezopasan (istina je da je ultrazvučni snimak manje jasan od rentgenskog) za čoveka, ultrazvučni snimak unutrašnjosti ljudskog tela sve više zamenjuje rentgenske snimke, a može se koristiti bez opasnosti čak i kod trudnica.

Za otkrivanje podmornica i drugih objekata pod vodom često se koriste ultrazvučni sonari umesto radara. Sonari rade na istom principu kao i radari, samo emituju ultrazvuk umesto elektromagnetnih – mikro talasa. Ultrazvuk se tada odbija o prepreku na koju naiđe i vraća se ka sonaru koji ga detektuje a samim tim detektuje i objekat koji ga je reflektovao. Ovde je prekopiran način na koji slepi miš “vidi” tela u svojoj okolini. Cičanje slepog miša je ultrazvuk frekvencije od oko $\nu = 75\ 000\ \text{Hz}$. Kao i sonar, on čuje odbijeni ultrazvuk o okolne objekte i na osnovu njega “stvara sliku” svoje okoline. Dakle, slepi miš ne vidi pomoću svetlosti, kao čovek ili većina životinja, već pomoću ultrazvuka. Na neki način on je u prednosti, jer njegov “vid” ne zavisi od postojanja spoljašnjih izvora svetlosti, ali sa druge strane on vidi samo kada ciči, dok kada učiti potpuno je slep.

Psi i pernata živina čuju ultrazvuke do 100 000 Hz.

Jačina zvuka se meri u vatima po kvadratnom metru $\frac{W}{m^2}$ – objektivna jačina zvuka i u decibelima dB – subjektivna jačina zvuka.

Najtiši zvuk koji čujemo ima objektivnu jačinu od svega $I_0 = 10^{-12} \frac{W}{m^2}$, a subjektivnu jačinu od $L_0 = 0 \text{ dB}$. Zvuk ove jačine naziva se: standardni prag čujnosti. Ako želimo da preračunamo objektivnu u subjektivnu jačinu zvuka (ili obrnuto) koristimo obrazac:

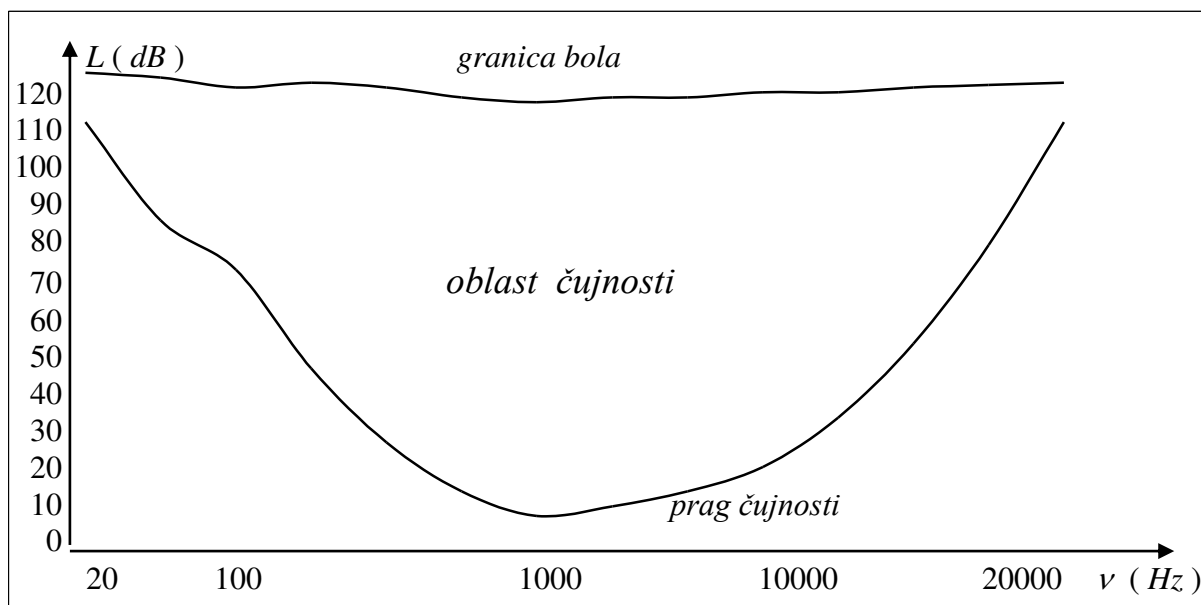
$$L = 10 \cdot \log \frac{I}{I_0},$$

pri čemu objektivne jačine I i I_0 uzimamo u jedinicama $\frac{W}{m^2}$, a subjektivnu jačinu L dobijamo u dB .

U sledećoj tabeli date su i objektivne i subjektivne jačine nekih nama poznatih zvukova:

Izvor zvuka	Rastojanje (m)	Objektivna jačina $\frac{W}{m^2}$	Subjektivna jačina dB
Šapat (prag čujnosti)	1	10^{-12}	0
Padanje kišne kapi	1	10^{-10}	20
Tihi razgovor	1	10^{-8}	40
Automobil na asfaltu	5 – 10	10^{-6}	60
Simfonijski orkestar	3 – 5	10^{-4}	80
Udar čekića	1	10^{-2}	100
Motor aviona	10	1	120

Naša osetljivost na tihe zvukove je najveća na frekvenciji od oko 1 000 Hz . Standardni prag čujnosti je $L_0 = 0 \text{ dB}$, ali na frekvenciji od 1 000 Hz . To znači da zvuke iste jačine – ali manje ili veće frekvencije od 1 000 Hz uopšte ne čujemo. Da bi i njih mogli da čujemo potrebno je da budu jači od 0 dB . Koliko jači možemo videti na sledećem grafiku:



Značenje grafika se najbolje može razumeti na sledećem primeru. Kada utišamo svoj muzički uređaj, tada najbolje čujemo srednje frekvencije, dok su male frekvencije (duboki tonovi) i velike frekvencije (visoki tonovi) tada jako prigušeni ili čak potpuno nečujni. Zato na muzičkim uređajima obično postoji dugme LOUDNESS čija funkcija je da pojačava duboke i visoke tonove, pa ga treba uključiti kada utišamo uređaj. Međutim kada ton pojačamo tada treba isključiti ovo dugme jer bi u protivnom duboki i visoki tonovi bili prejaki u odnosu na srednje tonove.

Doplerov efekat u akustici

Doplerov efekat u akustici je pojava povećanja, tj. smanjenja frekvencije zvuka koju čuje posmatrač pri međusobnom približavanju, tj. udaljavanju (respektivno) izvora zvuka i posmatrača.

Ako ste nekad gledali trku Formule 1 mogli ste čuti da je zvuk od rada motora, pri prolasku bolida pored mikrofona koji je postavljen uz stazu, prvo visok ton – kada se automobil približava mikrofona, onda pri prolaženju pored mikrofona naglu modulaciju tona, da bi ton pri udaljavanju formule bio izrazito dublji, a sve ovo je posledica Doplerovog efekta.

Prvo ćemo razmotriti slučaj kada i izvor zvuka i posmatrač miruju. Uzmimo da izvor proizvodi zvuk od $\nu_i = 680\text{Hz}$. Zbog toga je talasna dužina zvuka:

$$\lambda = \frac{u}{\nu_i} = \frac{340 \frac{m}{s}}{680 \frac{1}{s}} = 0,5m$$

Izvor šalje zvuk prema posmatraču brzinom od $u = 340 \frac{m}{s}$ u odnosu na zemlju. Kako posmatrač miruje u odnosu na zemlju zvuk prolazi pored njega istom tolikom brzinom: $u_p = 340 \frac{m}{s}$. Zbog toga je frekvencija koju čuje posmatrač:

$$\nu_p = \frac{u_p}{\lambda} = \frac{340 \frac{m}{s}}{0,5m} = 680 \frac{1}{s} = 680\text{Hz}.$$

Iz ovog slučaja se jasno vidi, ako i izvor zvuka i posmatrač miruju, da je frekvencija koju čuje posmatrač jednaka frekvenciji koju izvor zvuka šalje: $\nu_p = \nu_i = 680\text{Hz}$.

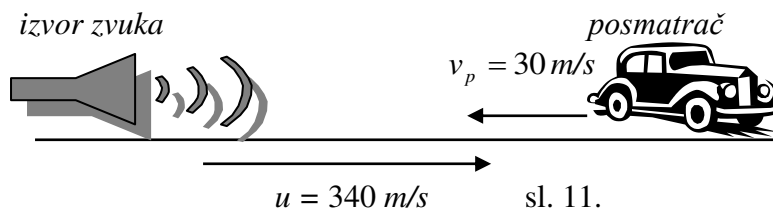
A sada ćemo razmotriti četiri najjednostavnija slučaja u kojima se kreće ili izvor zvuka ili posmatrač:

1. Izvor zvuka miruje, a posmatrač mu se približava brzinom ν_p .

U ovom slučaju izvor zvuka miruje u odnosu na podlogu i pritom emituje zvuk frekvencije $\nu_i = 680\text{Hz}$

brzinom $u = 340 \text{ m/s}$ u odnosu na podlogu. Pritom se posmatrač koji se

nalazi u automobilu kreće prema izvoru zvuka brzinom $\nu_p = 30 \text{ m/s}$ (108 km/h) u odnosu na podlogu. Međutim brzina zvuka u odnosu na posmatrača nije 340 m/s , već je povećana zbog kretanja automobila na:



$$u_p = u + v_p = 340 \frac{m}{s} + 30 \frac{m}{s} = 370 \frac{m}{s}.$$

Zbog toga je frekvencija koju čuje posmatrač:

$$v_p = \frac{u_p}{\lambda} = \frac{u + v_p}{\lambda} = \frac{370 \frac{m}{s}}{0.5m} = 740 \frac{1}{s} = 740Hz. \quad (14)$$

Kada uporedimo frekvenciju koju izvor emituje $v_i = 680Hz$ sa frekvencijom koju čuje posmatrač $v_p = 740Hz$ vidimo da on, u ovom slučaju, čuje povećanu frekvenciju tj. povišen ton.

Formula (14) se pomoću izraza $\lambda = \frac{u}{v_i}$ može prikazati i na sledeći način:

$$v_p = \frac{u + v_p}{\lambda} = \frac{u + v_p}{\frac{u}{v_i}} = v_i \cdot \frac{u + v_p}{u}.$$

Dakle:

$$v_p = v_i \cdot \frac{u + v_p}{u} \quad (15)$$

2. Izvor zvuka miruje, a posmatrač se od njega udaljava brzinom v_p .

U ovom slučaju izvor zvuka miruje u odnosu na podlogu i emituje zvuk frekvencije $v_i = 680Hz$ a brzinom $u = 340 m/s$ u odnosu na podlogu. Kako se posmatrač udaljava od njega brzinom $v_p = 30 m/s$, zvuk pretilče posmatrača smanjenom brzinom:

$$u_p = u - v_p = 340 \frac{m}{s} - 30 \frac{m}{s} = 310 \frac{m}{s}.$$

Zbog toga je frekvencija zvuka koju čuje posmatrač:

$$v_p = \frac{u_p}{\lambda} = \frac{u - v_p}{\lambda} = \frac{310 \frac{m}{s}}{0.5m} = 620 \frac{1}{s} = 620Hz. \quad (16)$$

Upoređivanjem frekvencija zaključujemo da u ovom slučaju posmatrač čuje smanjenu frekvenciju ($v_p = 620Hz$) u odnosu na onu koju izvor emituje ($v_i = 680Hz$), pa zato čuje dublji ton.

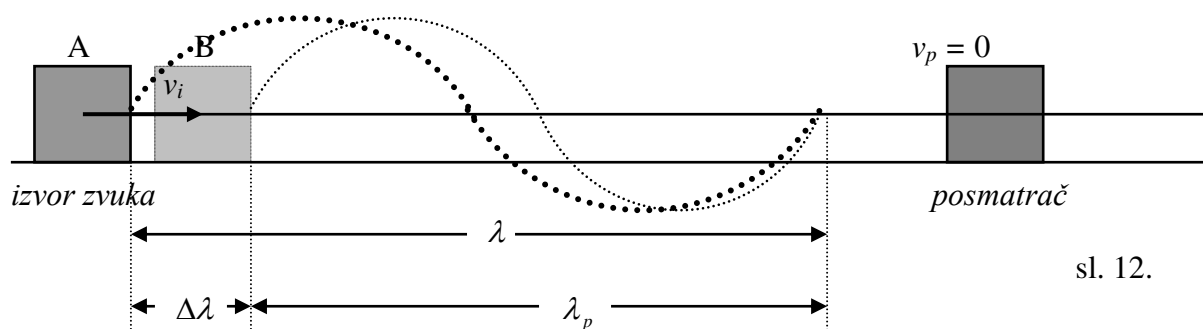
Istim postupkom kojim smo izraz (14) transformisali u izraz (15) možemo sada i izraz (16) transformisati:

$$v_p = \frac{u - v_p}{\lambda} = \frac{u - v_p}{\frac{u}{v_i}} = v_i \cdot \frac{u - v_p}{u}.$$

Dakle:

$$v_p = v_i \cdot \frac{u - v_p}{u} \quad (17)$$

3. Posmatrač miruje, a izvor zvuka mu se približava brzinom v_i .



sl. 12.

Napomena u vezi sa slikom: zvuk je uzdužan talas pa se ne bi trebalo prikazivati bregovima i doljama kao na slici. Međutim, slika koja bi prikazala mesta zgušnjavanja i mesta razređivanja sredine bi bila potpuno nejasna, pa se zato čitaoc upozorava da bregovi i dolje na slici ustvari treba da prikažu pomenuta mesta zgušnjavanja i razređivanja sredine.

Najjednostavnije objašnjenje ove pojave je sledeće: izvor zvuka svojim kretanjem sabija zvučni talas i time skraćuje talasnu dužinu koja stiže do posmatrača. Kako je frekvencija koju čuje posmatrač obrnuto srazmerna talasnoj dužini koju prima:

$$v_p = \frac{u_p}{\lambda_p} = \frac{u}{\lambda}$$

zaključak je da će skraćenje ove talasne dužine dovesti do povećanja frekvencije, pa će zato posmatrač čuti povišenu frekvenciju, tj. povišen ton.

Sada ću prikazati detaljnije objašnjenje ove pojave uz brojni primer:

U početnom trenutku vremena t_A , izvor zvuka se nalazi u tački A i emituje zvučni talas sa svoje površine. Dok zvuk pređe talasnu dužinu λ za vreme $\Delta t = t_B - t_A$, izvor pređe rastojanje $\Delta\lambda$ u smeru kretanja zvuka i premesti se u tačku B. Zbog toga je talasna dužina koja stiže do posmatrača λ_p skraćena u odnosu na talasnu dužinu koju izvor emituje (λ) za $\Delta\lambda$:

$$\lambda_p = \lambda - \Delta\lambda.$$

Pritom brzina kojom zvuk prolazi pored posmatrača nije promenjena jer posmatrač miruje u odnosu na podlogu:

$$u_p = u = 340 \text{ m/s.}$$

Uzmimo da je brzina kojom se kreće izvor zvuka $v_i = 30 \text{ m/s}$. Vreme Δt koje je zvuku frekvencije $v_i = 680 \text{ Hz}$ potrebno da pređe rastojanje $\lambda = 0.5 \text{ m}$ brzinom $u = 340 \text{ m/s}$ iznosi:

$$\Delta t = \frac{\lambda}{u} = \frac{0.5 \text{ m}}{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 0.00147 \text{ s.}$$

Za to isto vreme izvor pređe rastojanje $\Delta\lambda$ brzinom $v_i = 30 \text{ m/s}$:

$$\Delta\lambda = v_i \cdot \Delta t = 30 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 0.00147 \text{ s} = 0.044117647 \text{ m.}$$

To znači da je skraćena talasna dužina koju čuje posmatrač:

$$\lambda_p = \lambda - \Delta\lambda = 0.5 \text{ m} - 0.044117647 \text{ m} = 0.455882353 \text{ m}$$

Zato je frekvencija koju čuje posmatrač:

$$v_p = \frac{u_p}{\lambda_p} = \frac{u}{\lambda_p} = \frac{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{0.455882353 \text{ m}} = 745.8 \frac{1}{\text{s}} = 745.8 \text{ Hz} \quad (18)$$

Isti rezultat će se dobiti i iz obrasca:

$$v_p = v_i \cdot \frac{u}{u - v_i} = 680 \text{ Hz} \cdot \frac{340 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{340 \frac{\text{m}}{\text{s}} - 30 \frac{\text{m}}{\text{s}}} = 745.8 \text{ Hz}. \quad (19)$$

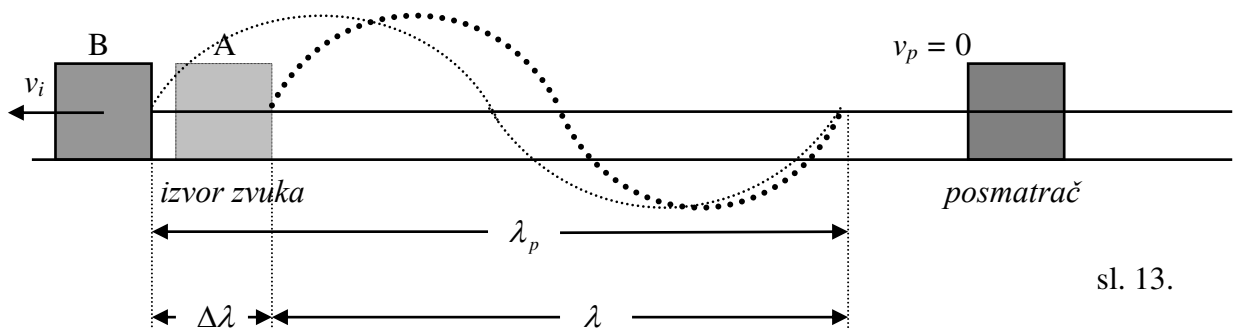
Put kojim se obrazac (19) može dobiti iz obrasca (18) je sledeći:

$$v_p = \frac{u_p}{\lambda_p} = \frac{u}{\lambda_p} = v_i \cdot \frac{u}{\lambda_p \cdot v_i} = v_i \cdot \frac{u}{(\lambda - \Delta\lambda) \cdot v_i} = v_i \cdot \frac{u}{(\lambda - \Delta\lambda) \cdot \frac{u}{\lambda}} = v_i \cdot \frac{u}{(\lambda - \Delta\lambda) \cdot \frac{1}{\frac{\lambda}{\Delta t}}} = v_i \cdot \frac{u}{\frac{\lambda - \Delta\lambda}{\Delta t}}$$

Sledi:

$$v_p = v_i \cdot \frac{u}{u - v_i} \quad (19)$$

4. Posmatrač miruje, a izvor zvuka se od njega udaljava brzinom v_i .



sl. 13.

Situacija je u odnosu na slučaj 3. izmenjena utoliko ukoliko se izvor zvuka udaljava od posmatrača brzinom v_i , dok posmatrač miruje u odnosu na podlogu.

Kao i u prethodnom slučaju postoji jednostavno objašnjenje onoga što se dešava, Naime, izvor zvuka svojim kretanjem rasteže zvučni talas i povećava mu talasnu dužinu. Kako je frekvencija zvuka koju posmatrač čuje obrnuto srazmerna talasnoj dužini koja do njega stiže:

$$v_p = \frac{u_p}{\lambda_p} = \frac{u}{\lambda_p}$$

zaključak je da posmatrač zbog povećane talasne dužine zvuka λ_p , čuje smanjenu frekvenciju tj. dublji ton.

Može se sprovesti slična analiza kao i u prethodnom slučaju, da bi se na kraju dobio obrazac za smanjenu frekvenciju koju čuje posmatrač:

$$v_p = v_i \cdot \frac{u}{u + v_i} \quad (20)$$

Zanimljivo je da se obrasci (15), (17), (19) i (20) mogu prikazati kao jedan obrazac:

$$v_p = v_i \cdot \frac{u \pm v_p}{u \mp v_i} \quad (21)$$

Ovaj obrazac se može koristiti i kada se i izvor zvuka i posmatrač istovremeno kreću u odnosu na podlogu brzinama v_i i v_p respektivno. Pravilo je da se tada koristi gornji znak za približavanje, a donji za udaljavanje.

Zanimljivo je da je Doplerov efekat primenjen u policijskim radarima za merenje brzine automobila. Pritom se ne koristi zvuk već mikro – talasi.

To znači da je Doplerov efekat primenljiv i na elektromagnetne talase. Međutim postoji razlika.

Doplerov efekat neće postojati ako se posmatrač kreće, a izvor miruje. Doplerov efekat tada treba da izazove promena brzine kojom se talas kreće pored posmatrača. Ovakva promena brzine je nemoguća kod elektromagnetnih talasa zato što je njihova brzina apsolutna – a to znači da je njihova brzina ista za sve posmatrače, nezavisno od toga da li se posmatrači kreću ili ne.

Ipak Doplerov efekat postoji kada se izvor elektromagnetnog talasa kreće, zato što se tada dešava zbog promene talasne dužine, a takva promena talasne dužine se dešava i elektromagnetnim talasima isto kao i zvučnim talasima.

Doplerov efekat je primećen u svetlosti koju emituju udaljene galaksije (one koje ne pripadaju našoj Lokalnoj grupi galaksija). Zanimljivo je da svetlosti iz svih galaksija pokazuju pomak ka većim talasnim dužinama tzv. crveni pomak (crvena svetlost ima najveću talasnu dužinu od svih svetlosti različitih boja). To znači da se sve one udaljavaju od naše galaksije, što današnji naučnici objašnjavaju širenjem svemira – u smislu rastezanja prostora. Međutim, to znači da postoji i treći uzrok Doplerovog efekta. Naime samo širenje svemira rasteže i talasnu dužinu svetlosti što izaziva pomenuti crveni pomak.