

Fizika 2

Fizikalna optika

2008/09

Što je svjetlost; što je priroda svjetlosti...?

U geometrijskoj optici:

Svjetlost je pravocrtna pojava određene brzine u nekom sredstvu (optičkom sredstvu).

U fizikalnoj optici:

Svjetlost se očituje ili kao val ili kao "čestica", foton. Ovakvo svojstvo "dvostruke" pojavnosti nazivamo dualnom prirodom svjetlosti.

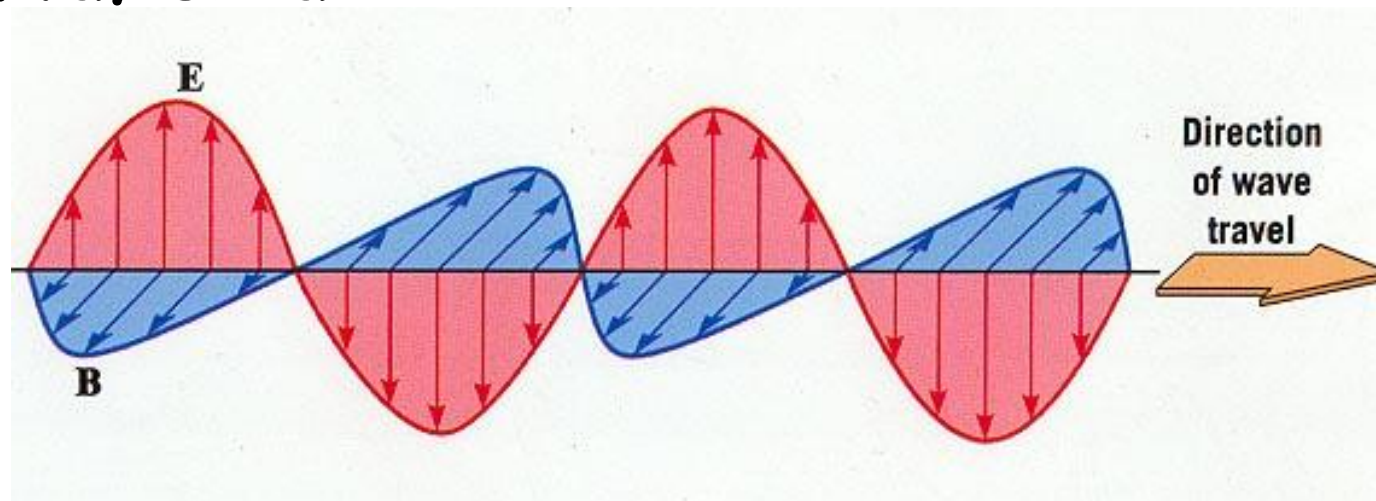
U ovom dijelu optike veliki doprinos dali su **Christiaan Huygens** (valna optika) i **Isaac Newton** (ideja o čestičnoj prirodi) u 17. i 18. stoljeću. Ideju o čestičnoj prirodi svjetlosti, fotonu, dovršio je Albert Einstein tek početkom 20. stoljeća; 1905. godine.

Pojave koje ćemo učiti u fizikalnoj optici:

- **Valna optika**
 - interferencija
 - uređaji za interferenciju
 - ogib (difrakcija)
 - uređaji za ogib
- **Čestična (korpuskularna) optika**
 - fotoelektrični efekt

....u valnoj optici

Svjetlost je elektromagnetski val, koji predstavlja istodobno širenje električnog, E , i magnetskog polja, H , u prostor. Ta dva polja su međusobno okomita; slika:



Brzina elektromagnetskog vala (svjetlosti) c_0 , u vakuumu iznosi: $c_0 = 299\,792,458 \text{ km/s} = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

http://www.walter-fendt.de/ph14cr/doubleslit_cr.htm

Valovi

- Osnovne veličine kojima opisujemo valove
- Superpozicija valova
- Ponašanje valova na granici između dva sredstva
- Svojstva koherentnih valova

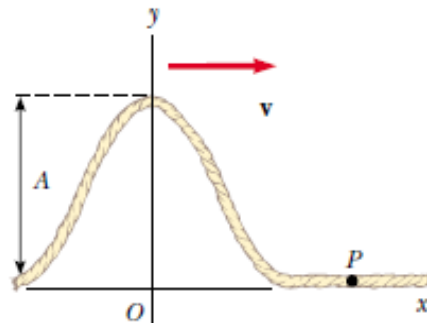


Valovi

- Val je poremećaj sredstva koji se širi u prostoru s određenom brzinom prenoseći pritom energiju.
- Val je titranje koje se širi prostorom i time prenosi energiju.
- Vrste valova:
- **Mehanički:** potrebno im je elastično sredstvo za širenje (valovi na vodi, na opruzi, zvuk). Mehanički val je poremećaj koji putuje kroz neko sredstvo.
- **Elektromagnetski:** šire se i kroz vakuum; ne trebaju nikakvo sredstvo (sav spektar elektromagnetskog zračenja od radio valova do x-zraka)

Karakteristike valnog gibanja

- **Transverzalni val:** čestice sredstva titraju okomito na smjer širenja vala (val na konopcu, elektromagnetski val koji se širi brzinom od $3 \cdot 10^8$ m/s)

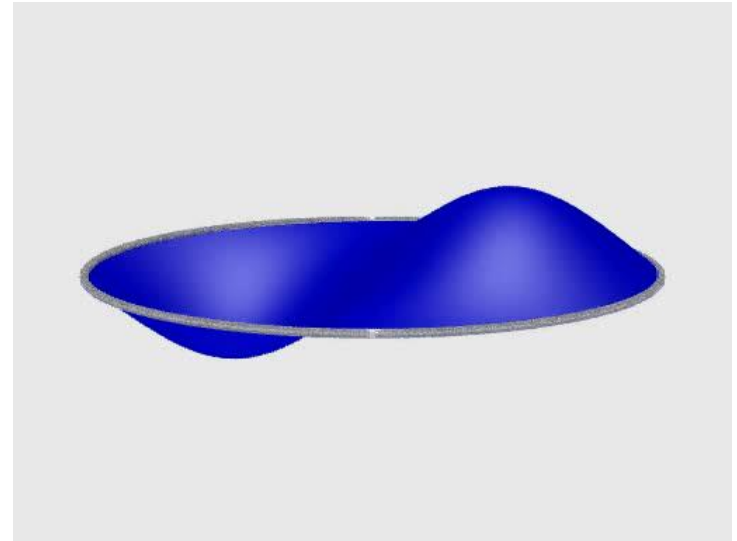
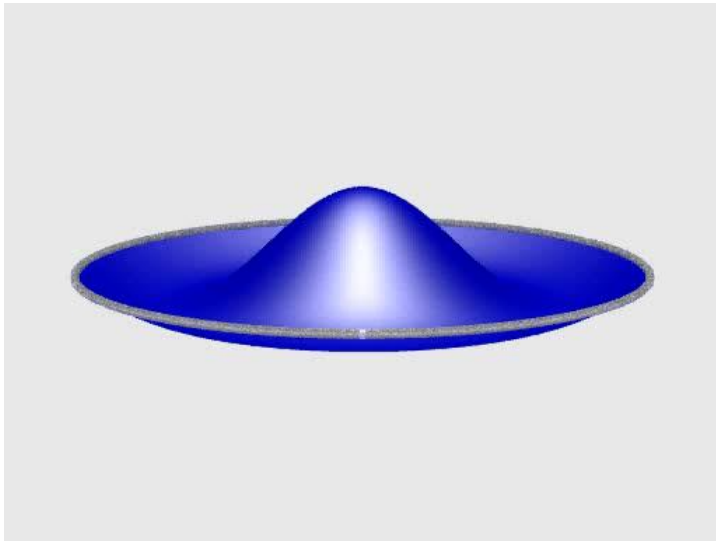


- **Longitudinalni val:** čestice sredstva titraju u smjeru širenja vala (titranje opruge, zvučni valovi koji se u zraku šire brzinom od 340 m/s)



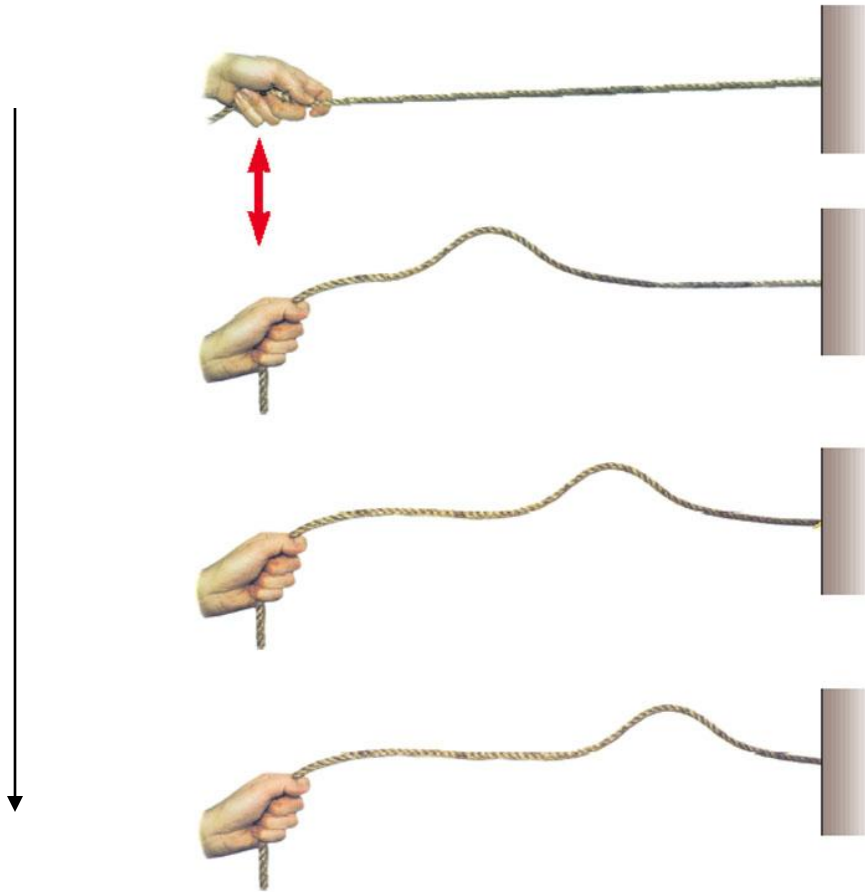
Plin u ravnoteži – nema poremećaja

- Progresivni (putujući) val giba se u određenom smjeru i pritom se energija prenosi sa čestice na česticu.
- Stojni (stacionarni) val je takav val kod kojeg neke čestice titraju, a neke stalno miruju. Suprotno progresivnom valu, pri stojnom se valu energija ne širi prostorom.
- Valni paket je valno gibanje ograničeno na određeni dio prostora Δx .
- Dok čestica napravi jedan puni titraj, val prevali određeni put koji zovemo valna duljina λ .
- **Fazna brzina** vala (njom se širi određena faza vala) povezana je s valnom duljinom i frekvencijom, $v = \lambda f$.
- Brzina vala ovisi o osobinama sredstva kroz koje prolazi. Brzina i valna duljina se mijenjaju, ali frekvencija ostaje ista.
- Brzina širenja energije zove se **grupna brzina**.



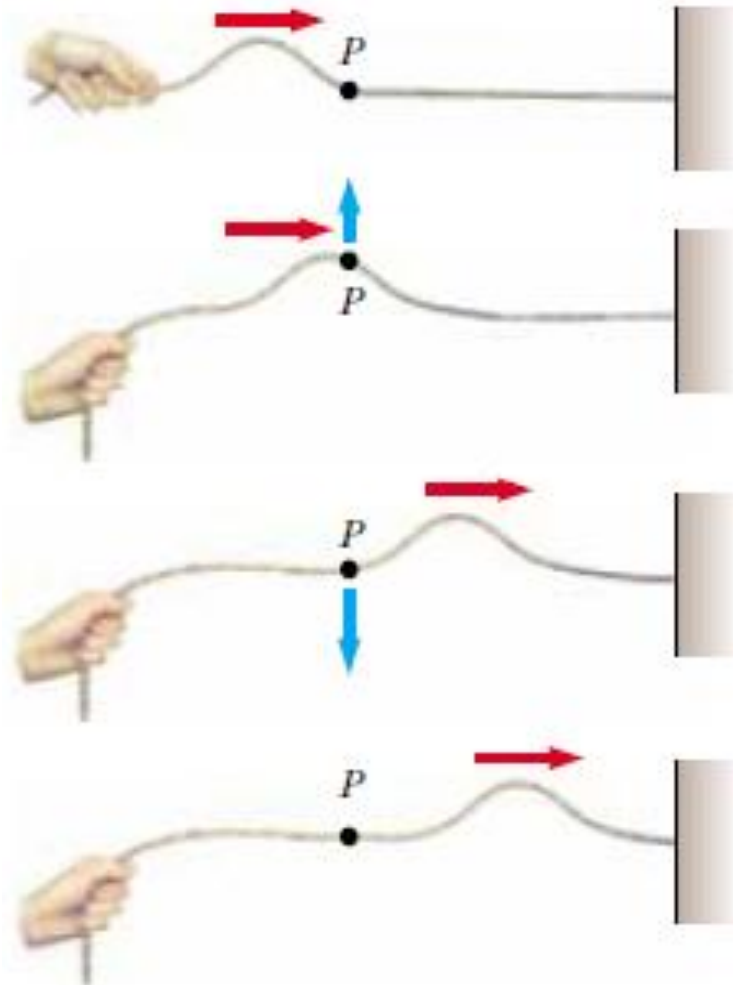
Valovi na niti (užetu)

vrijeme



© 2006 Brooks/Cole - Thomson

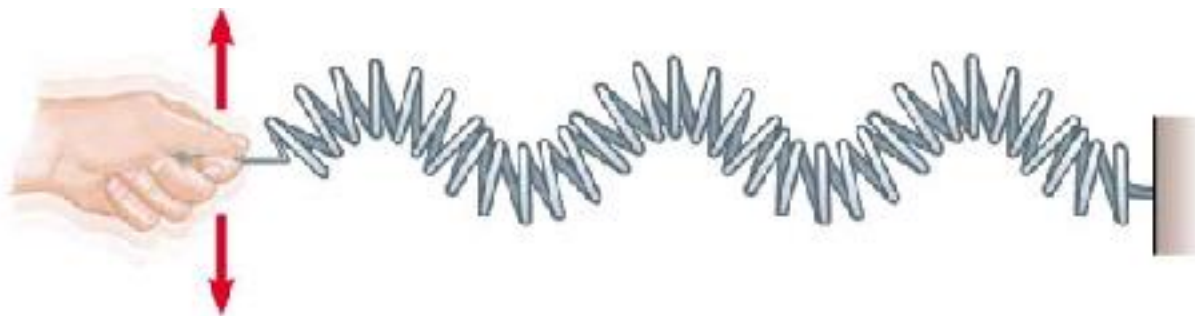
- Valni puls putuje duž napete niti.
- Oblik pulsa je približno nepromijenjen dok putuje duž niti.



- Impuls koji putuje napetom niti je ***transverzalni val***.
- Smjer gibanja bilo kojeg elementa P niti (plave strelice) je okomit na smjer kretanja vala (crvena strelica).

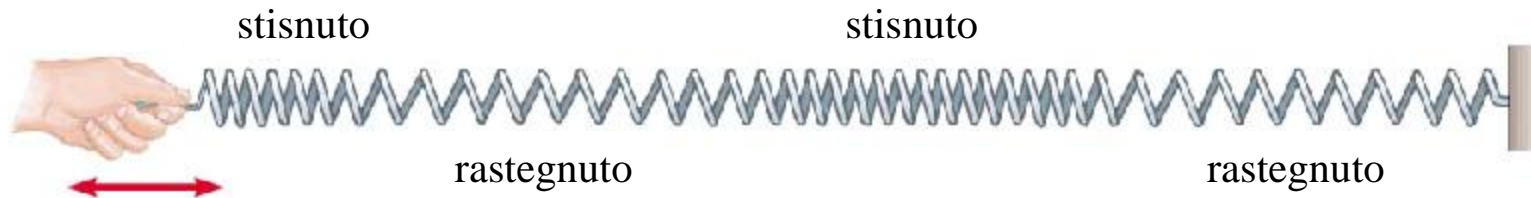
Transverzalni i longitudinalni valovi

Transverzalni val - pomak okomit na smjer širenja

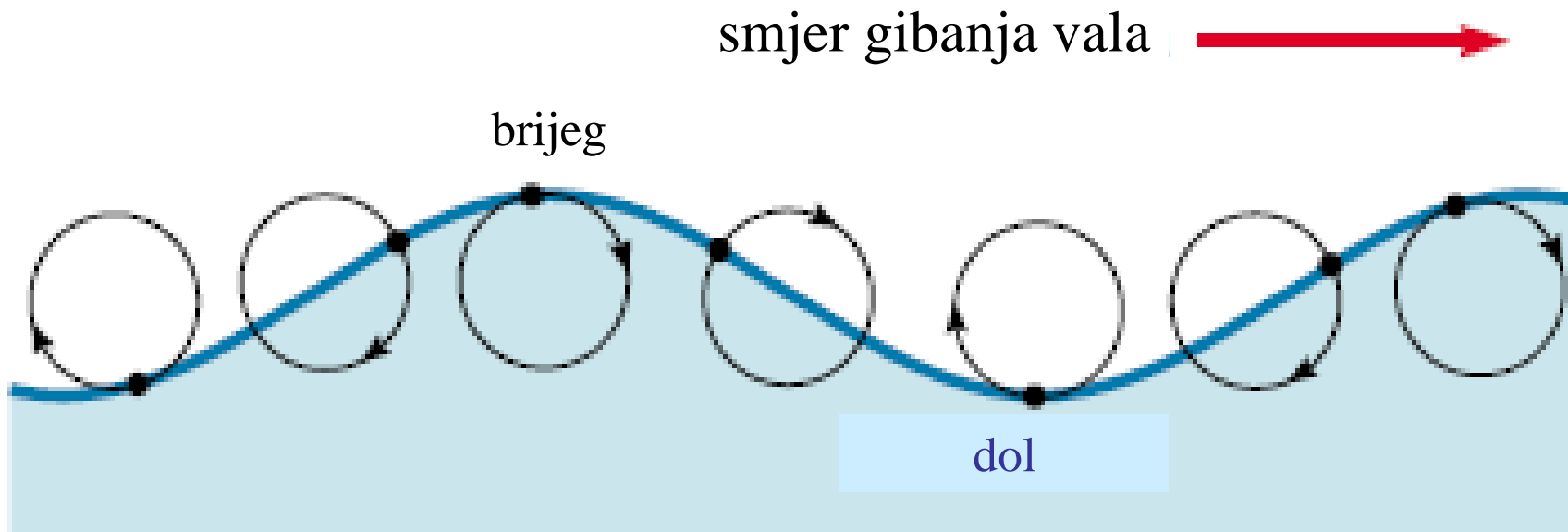


a) Transverzalni val

Longitudinalni val - pomak je paralelan smjeru širenja



b) Longitudinalni val



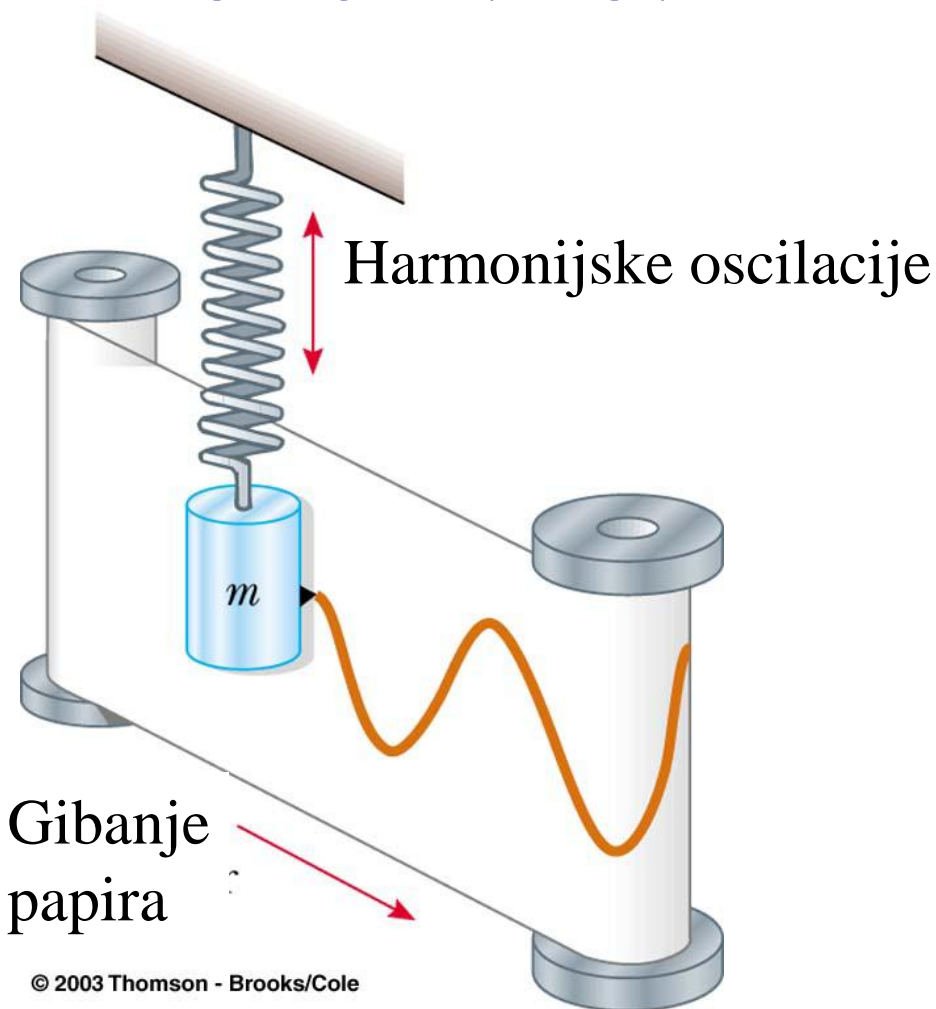
- Gibanje molekula vode na površini duboke vode u kojoj se prostire val je kombinacija poprečnih i uzdužnih pomaka, koji rezultiraju time da se molekule na površini kreću u skoro kružnim putanjama.
- Svaka molekula je pomaknuta i horizontalno i vertikalno od svojih ravnotežnih položaja.

Jednostavni harmonički valovi

Svako titranje uzrokuje sila koja nastoji vratiti sustav u položaj ravnoteže. Najjednostavnije titranje je ono koje uzrokuje sila proporcionalna s pomakom iz položaja ravnoteže:

$$\vec{F} = -k\vec{x}$$

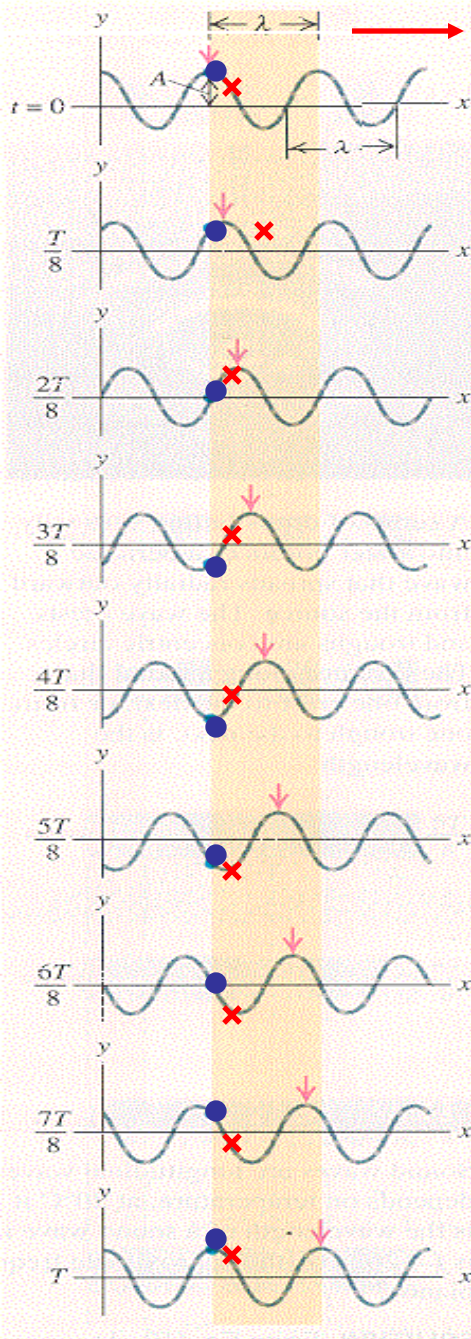
Takvo titranje je harmoničko titranje, a sustav koji titra (oscilira) zove se harmonički oscilator (atomi i molekule, u električnim krugovima el. naboji, njihala, žice glazbenih instrumenata).



Periodički pomak vs udaljenost

Valna terminologija

- Harmonijsko titranje je periodičko gibanje pri kojem se materijalna točka giba oko ravnotežnog položaja.
- **Period, T** - veličina kojom se iskazuje trajanje jednog ciklusa periodične promjene, tj. trajanje jednog potpunog titraja (za to vrijeme tijelo dvaputa prođe kroz položaj ravnoteže). To je najmanji vremenski interval nakon kojeg vremenska funkcija $f(t)$ kojom se ta promjena opisuje poprima iste vrijednosti, tj. za period T vrijedi:
 -
 - $$f(t+T) = f(t)$$
- **Period** je vremenski interval između dvije uzastopne jednake faze.
- **Faza** titranja je trenutno stanje određenog titranja, tj. položaj i brzina tijela u određenom vremenskom trenutku.



o Sinusni valovi: kontinuirani slijed sinusoidalnih poremećaja.

Točka ● se pomiče gore-dolje uz period **T**, a križić **x** pomaknut za **$t - x/v$** . To znači da križić **x** ima isti obrazac kao ● u ranije vrijeme **$t - x/v$** .

o Valna duljina (λ): udaljenost najbližih točaka koje titraju istom fazom

o Marker ↓ se pomiče uzduž osi za udaljenost **l** u vremenu **T**. Prema tome

brzina vala:
$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

Primjer: Kolika je valna duljina zvučnog vala, ako je frekvencija $f = 262 \text{ Hz}$ (srednji C na glasoviru)?

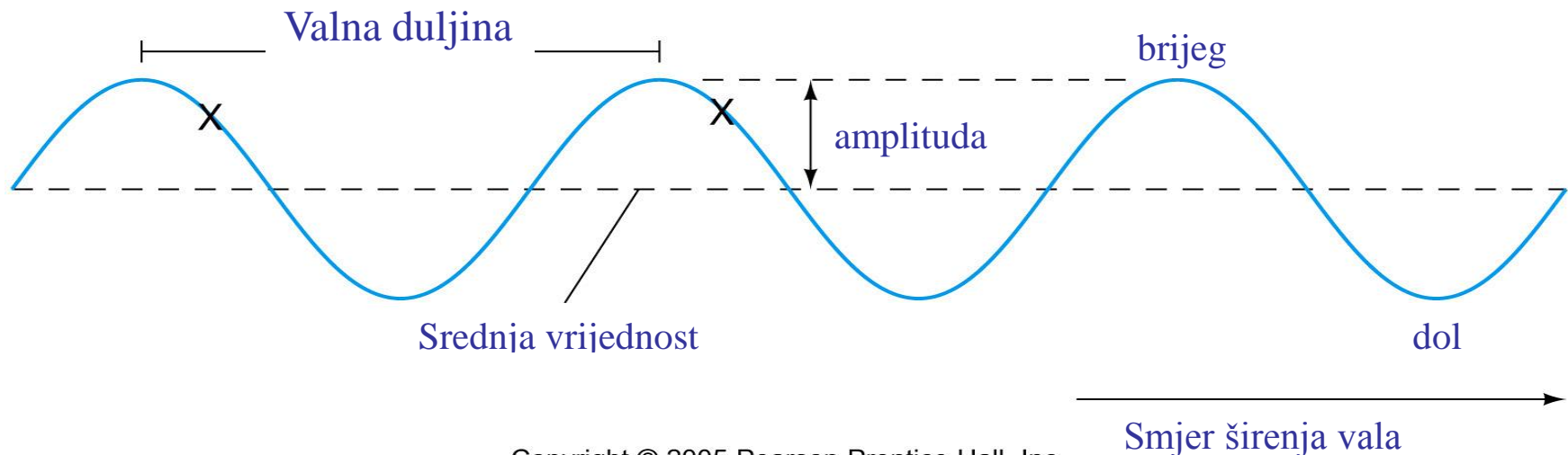
Brzina zvuka u zraku = 344 m/s

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{344 \text{ ms}^{-1}}{262 \text{ s}^{-1}} = 1.31 \text{ m}$$

Valna terminologija

- **Valna duljina, λ** – udaljenost najbližih točaka koje titraju istom fazom
- **Elongacija, s ili y** – pomak čestice od položaja ravnoteže, tj. od srednje vrijednosti fizikalne veličine kojom se opisuje val ili titranje. Vrijednost se izražava u istim mjernim jedinica kojima se izražava i vrijednost te fizikalne veličine.
- **Amplituda, A** – maksimalna elongacija.

Frekvencija - fizikalna veličina kojom se izražava broj titraja u određenom vremenskom intervalu.



Valne relacije

- Frekvencija f je broj titraja u jedinici vremena:

$$f = \frac{1}{T} [s^{-1} = Hz]$$

- Frekvencija obično se izražava u jedinici Hertz
 - Ova jedinica je dobila ime po njemačkom znanstveniku koji je proučavao radio valove
 - Na primjer, ako val ima period od 10 sekundi, frekvencija vala je 1/10 Hz, ili 0,1 Hz

Kružna frekvencija:

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

- Imajte na umu da svjetlo uvijek putuje istom brzinom ($c \sim 3 \times 10^8$ m/s)
Ne zaboravite: brzina = valna duljina x frekvencija

Ako se frekvencija povećava, smanjuje se valna duljina
Ako se frekvencija smanjuje, povećava se valna duljina

Valne relacije

- U specijalnom slučaju kada se elektromagnetski val giba kroz vakuum, tada je $v = c$, gdje je c brzina svjetlosti u vakuumu, pa izraz postaje:

$$f = \frac{c}{\lambda}$$

- **Napomena:** Kada valovi prelaze iz jednog medija u drugi, njihova se frekvencija ne mijenja — mijenja se samo njihova valna duljina i brzina.

$$brzina = \frac{\text{valna duljina}}{\text{period}} = \text{valna duljina} \times \text{frekvencija}$$

- Rješenje jednačbe koja opisuje harmoničko titranje (za ravne valove):

- $$y = A \sin(\omega t - kx)$$
 val se širi na desno

- Valovi se kroz sredstvo šire određenom brzinom koja se zove i fazna brzina, jer se njome širi određena faza vala.

- Za vrijeme jednog titraja T val prijeđe jednu valnu duljinu

- $$\Rightarrow \lambda = vT$$

- $$T = \frac{1}{f} \Rightarrow v = \lambda f$$
 brzina širenja vala

- Razlika u fazi je proporcionalna $\Delta\varphi = k\Delta x$

- s udaljenošću x ; konstanta $\Delta x = v\Delta t$

- proporcionalnosti je valni broj k $za_x = \lambda \Rightarrow \Delta\varphi = 2\pi \Rightarrow k = \frac{2\pi}{\lambda}$

- Fazna razlika se može izraziti i preko vremenskog intervala t:

$$\Delta\varphi = k\Delta x$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta x$$

$$\Delta x = v\Delta t \Rightarrow \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \lambda f\Delta t = 2\pi f\Delta t$$

$$\Rightarrow \Delta\varphi = \omega\Delta t$$

- Ako se val širi sredstvom indeksa loma n ($n \neq 1$):

-

$$\Delta\varphi = \omega\Delta t$$

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \Rightarrow \Delta t = \frac{\Delta x}{v}$$

-

-

$$\Delta\varphi = \omega \frac{\Delta x}{v}$$

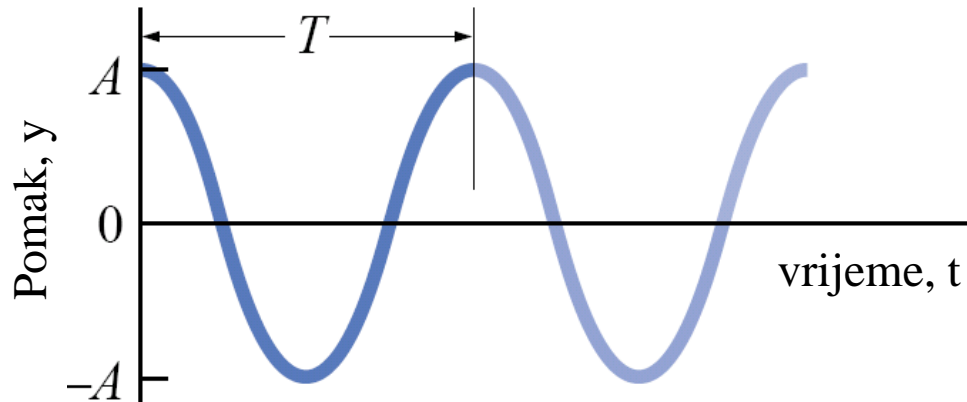
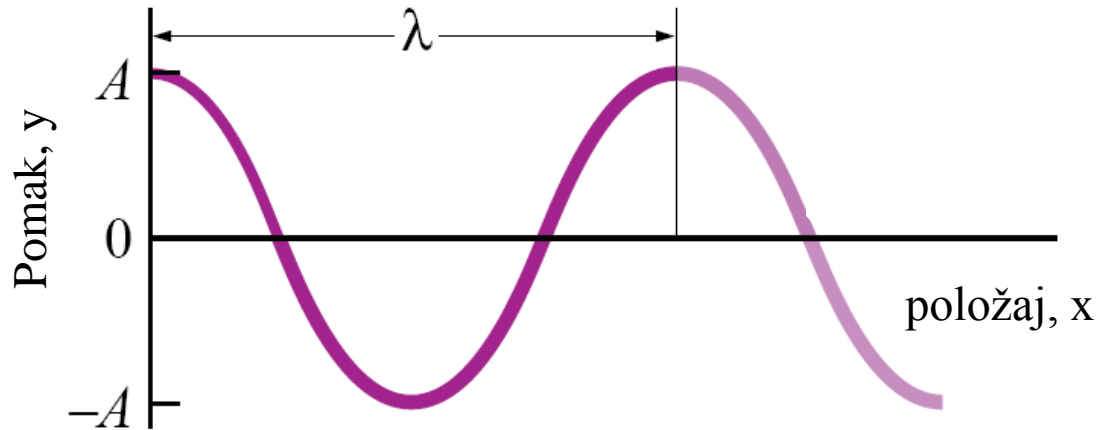
-

-

$$v = \frac{c}{n} \Rightarrow \Delta\varphi = \frac{\omega}{c} n\Delta x$$

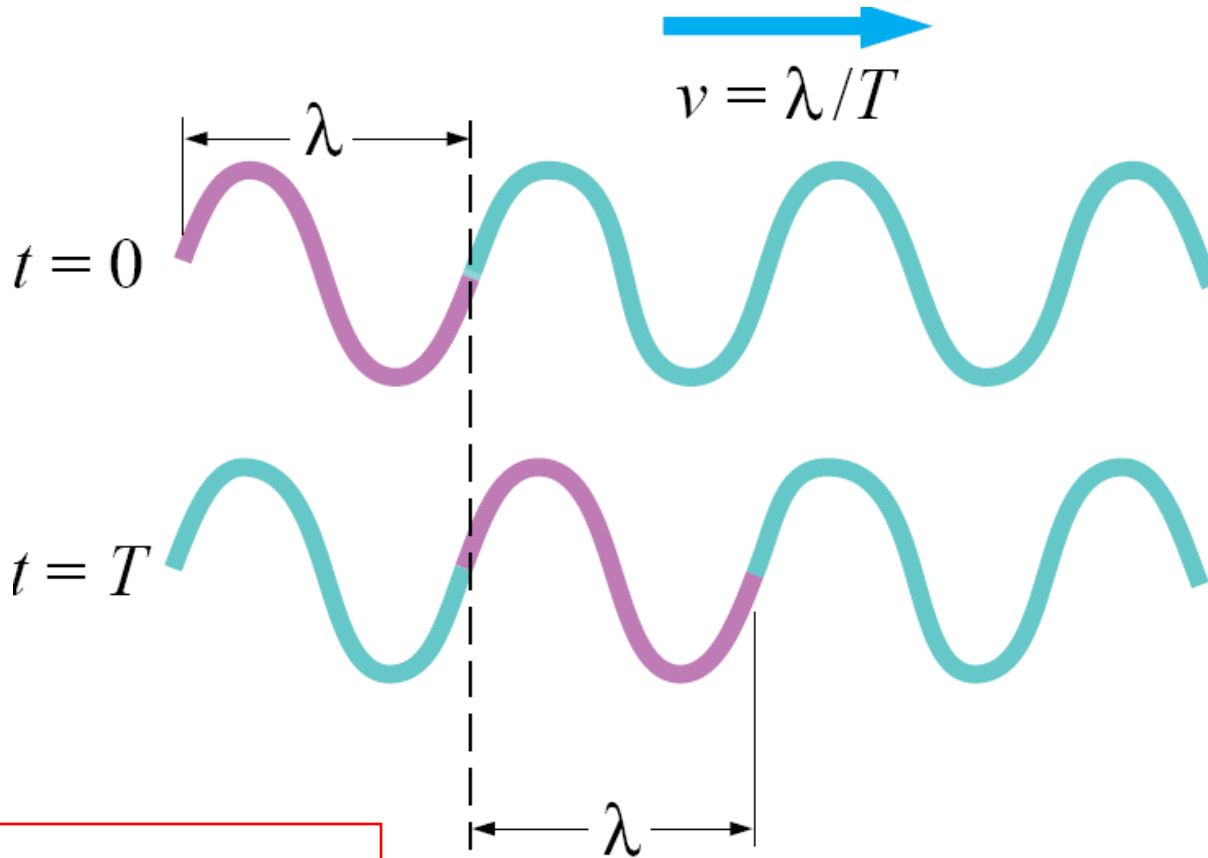
veličina $n\Delta x$ zove se razlika optičkih puteva

Valna duljina - prostorni period



Val prelazi udaljenost λ tijekom jednog perioda T

Valna brzina



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

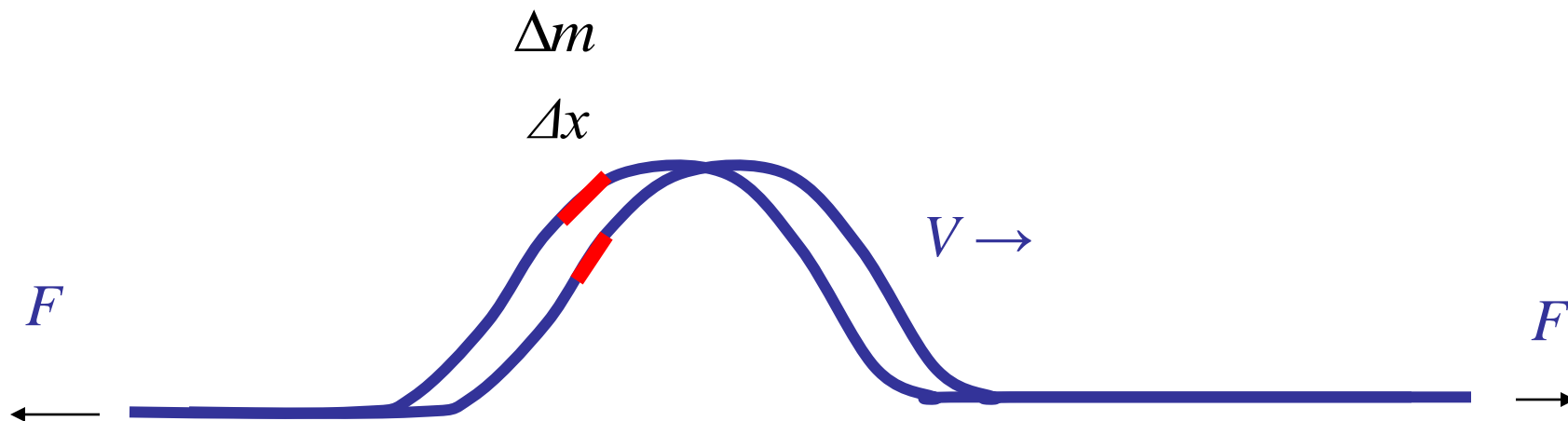
Primjer

Radio stanica emitira na frekvenciji od 100 MHz. Nađi valnu duljinu elektromagnetskih valova. (Brzina svjetlosti = 3.0×10^8 m/s)

$$v = \lambda f$$

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{3.0 \cdot 10^8}{100 \cdot 10^6} = 3.0m$$

Brzina transverzalnog vala na niti



$$\mu = \frac{\Delta m}{\Delta x}$$

Gustoća mase

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

brzina transverzalnog vala na niti ovisi o napetosti niti i gustoće

Primjer

Trebamo proizvesti transverzalni val na napetoj niti brzine 50 m/s. Ako nit ima duljinu od 5,0 metara i masu 0,060 kg, kolika je potrebna napetost niti?



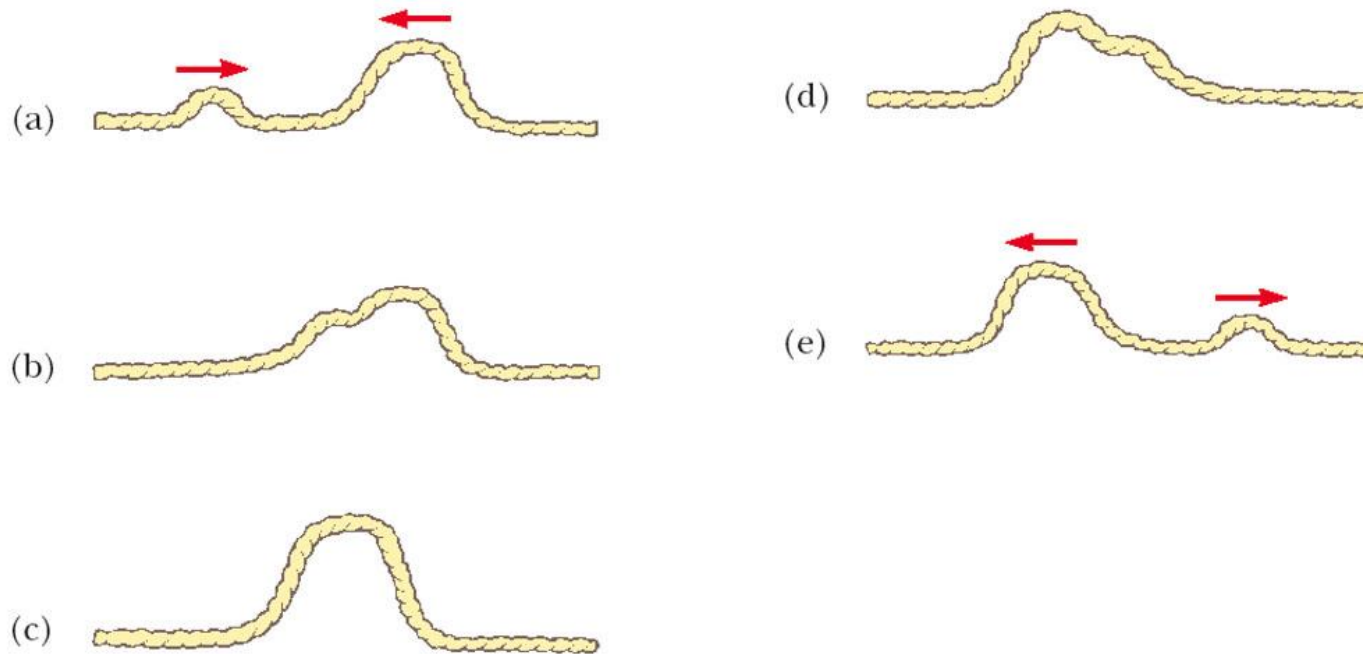
$$v = \sqrt{\frac{F}{m/L}}$$

$$F = \frac{v^2 m}{L} = \frac{(50 \text{ m/s})^2 (0.060 \text{ kg})}{5.0 \text{ m}} = 30 \text{ N}$$

Žice glasovira variraju i u napetosti i masi po jedinici duljine. Te razlike u napetosti i gustoće, u kombinaciji s različitim duljinama žice, omogućuju instrumentu proizvodnju širokog spektra zvukova.

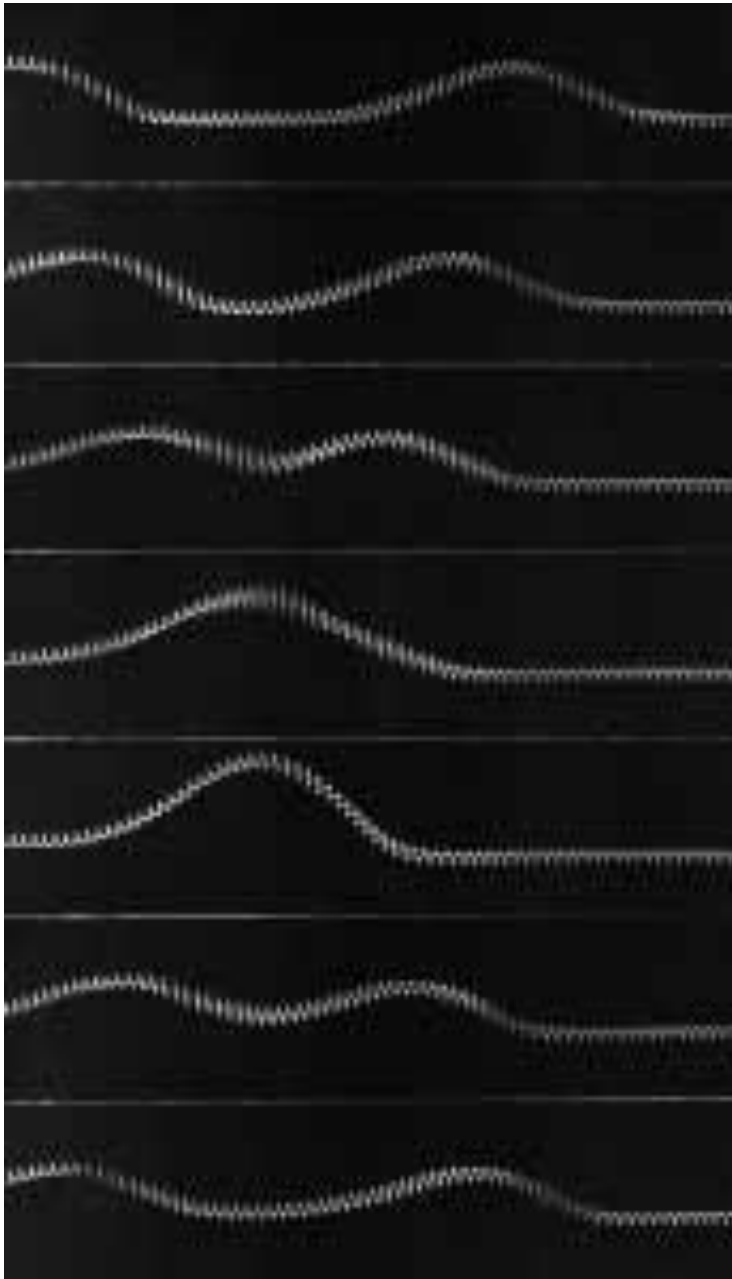
Princip superpozicije

- Kada se dva vala u prostoru preklapaju pomak vala je zbroj pojedinačnih pomaka.



© 2006 Brooks/Cole - Thomson

- Ako su dva ili više valova putuju kroz medij, rezultatna valna funkcija u bilo kojem trenutku je algebarska suma valnih funkcija pojedinih valova.



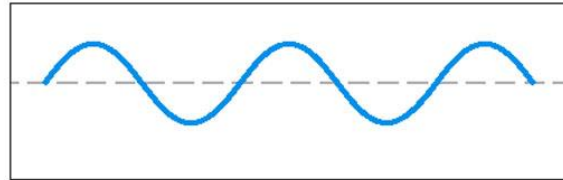
Fotografija superpozicije dva jednaka, simetrična pulsa koji putuju u suprotnim smjerovima na napetoj niti.

Interferencija

- Superpozicija (zbrajanje) harmoničkih valova ovisi o relativnoj fazi dva vala
- Može dovesti do
 - Konstruktivne interferencije
 - Destruktivne interferencije

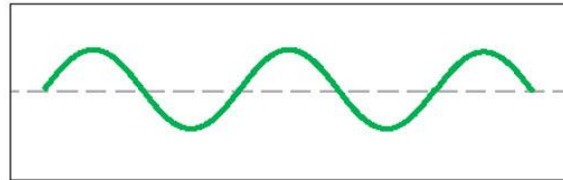
Konstruktivna interferencija

Val 1



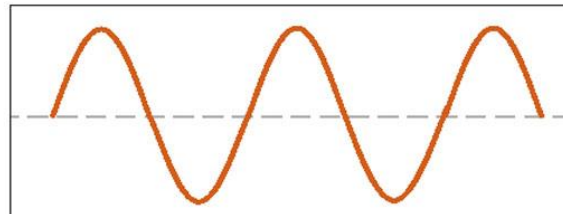
(a)

Val 2



(b)

Superposition



(c)

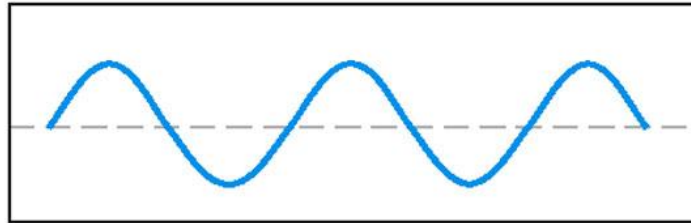
© 2006 Brooks/Cole - Thomson

pomak →

Dva vala imaju istu fazu

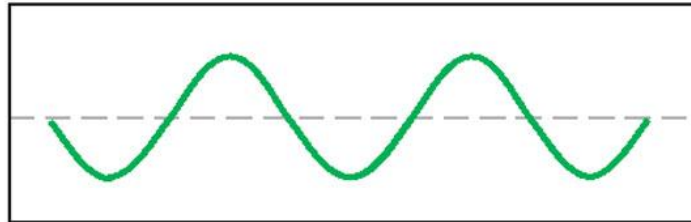
Destruktivna interferencija

Val 1



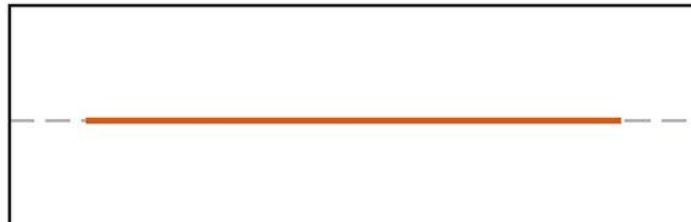
(a)

Val 2



(b)

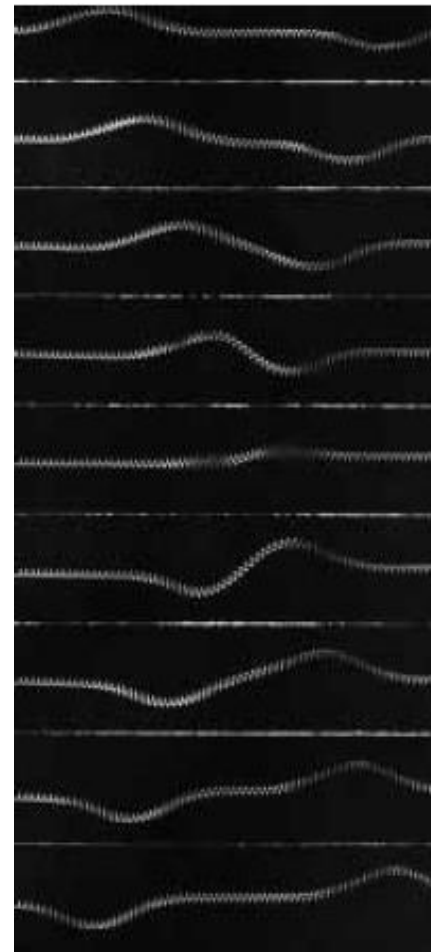
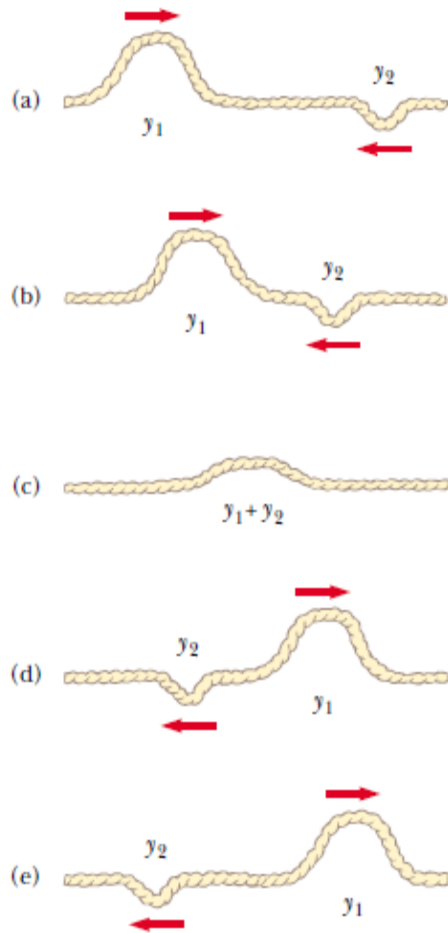
Superpozicija



(c)

© 2006 Brooks/Cole - Thomson

Razlika faza valova je 180° , tj. π



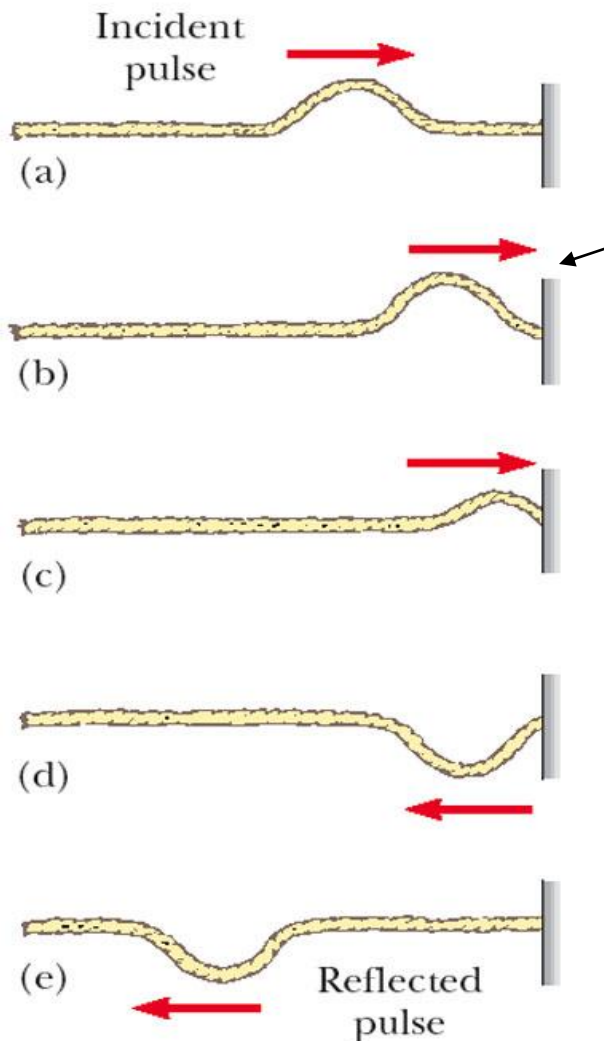
(a-e) Dva valna pulsa putuju u suprotnim smjerovima i imaju pomake koji su suprotno orijentirani. Kada se preklapaju (c), njihovi će pomaci djelomično poništiti jedan drugoga. Fotografija superpozicije dvaju simetričnih pulsova koji putuju u suprotnim smjerovima, gdje je jedan puls obrnut u odnosu na drugi.

Refleksija i transmisija

- Kada val dosegne granicu sredstva (promjena medija kroz koji se širi val), dio vala se reflektira, a dio vala se transmitira (samo kad se reflektira na rjeđem sredstvu).
- Promjena faze reflektiranog vala ovisi o tome da li val dolazi iz optički rjeđeg u gušće sredstvo ili obratno.

Refleksija

promjena faze na čvrstom kraju (gušćem optičkom sredstvu)

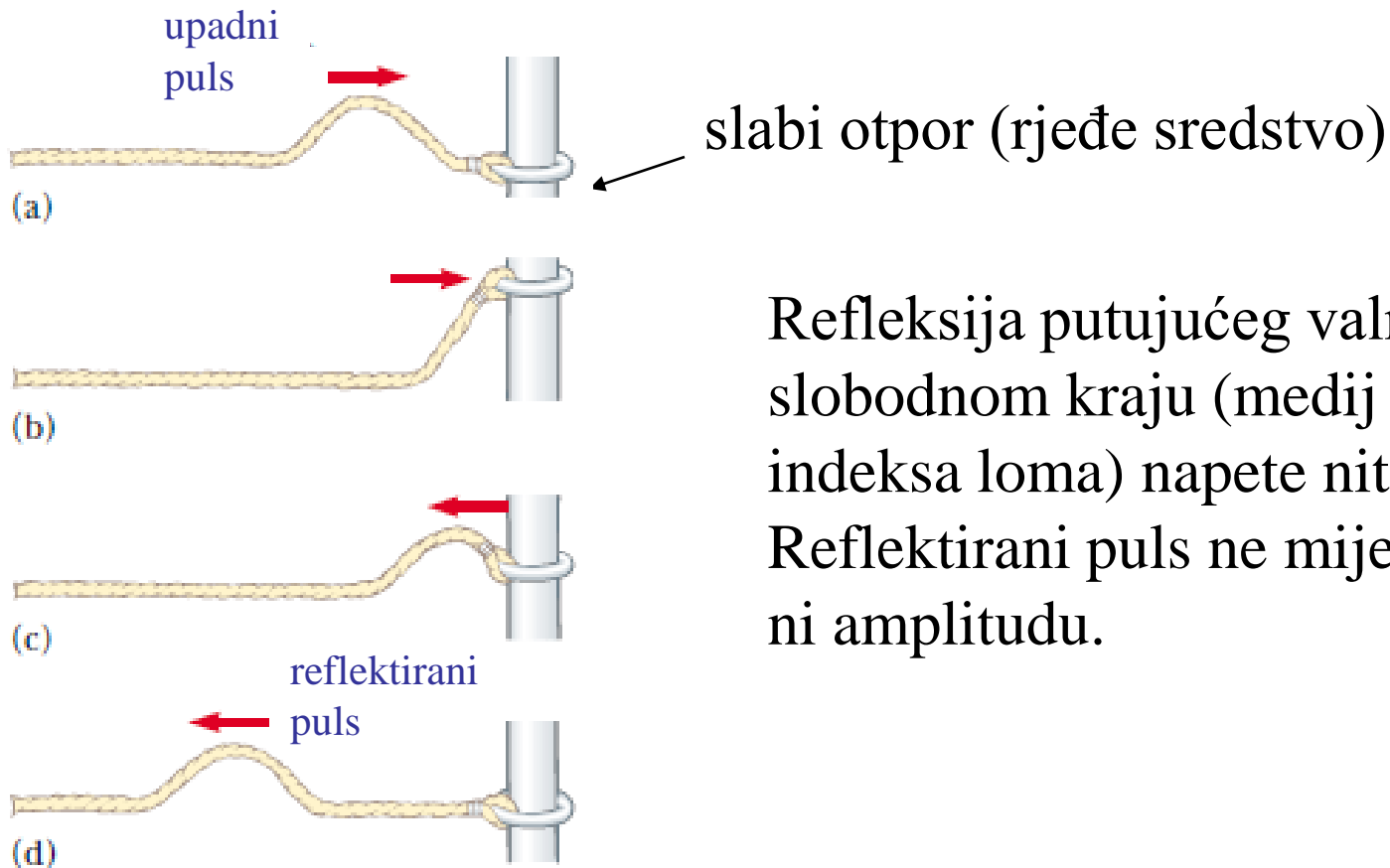


← snažan otpor (gušće sredstvo)

Refleksija putujućeg valnog pulsa na fiksnom kraju napete niti, odnosno na sredstvu većeg indeksa loma. Došlo je do skoka u fazi za 180° za reflektirani puls, dok je amplituda nepromijenjena.

Refleksija

Slobodan kraj (rjeđe sredstvo) – nema promjene faze

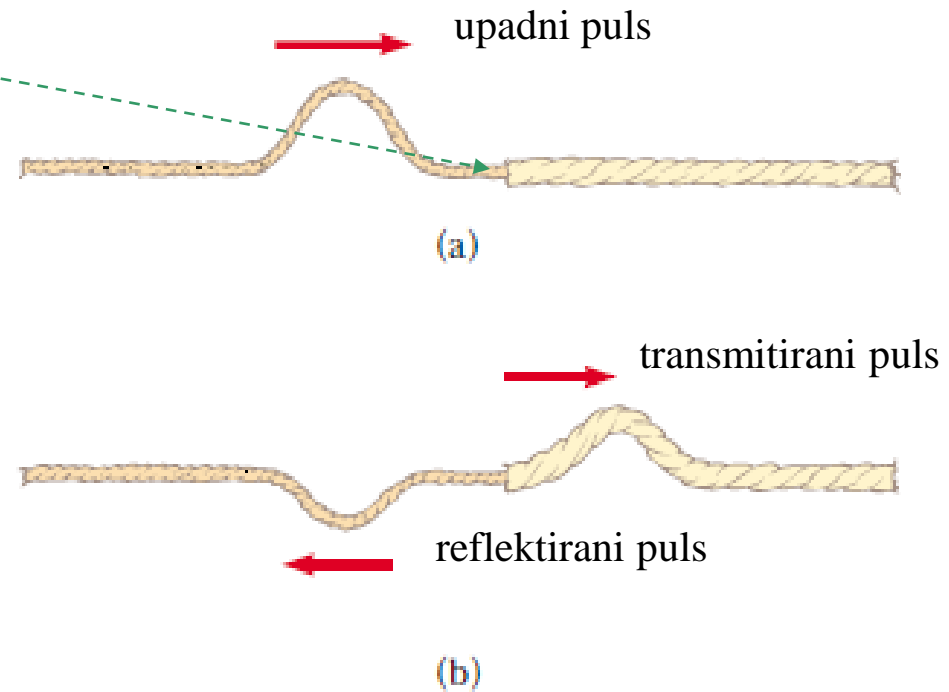


Refleksija putujućeg valnog pulsa na slobodnom kraju (medij manjeg indeksa loma) napete niti.

Reflektirani puls ne mijenja ni fazu ni amplitudu.

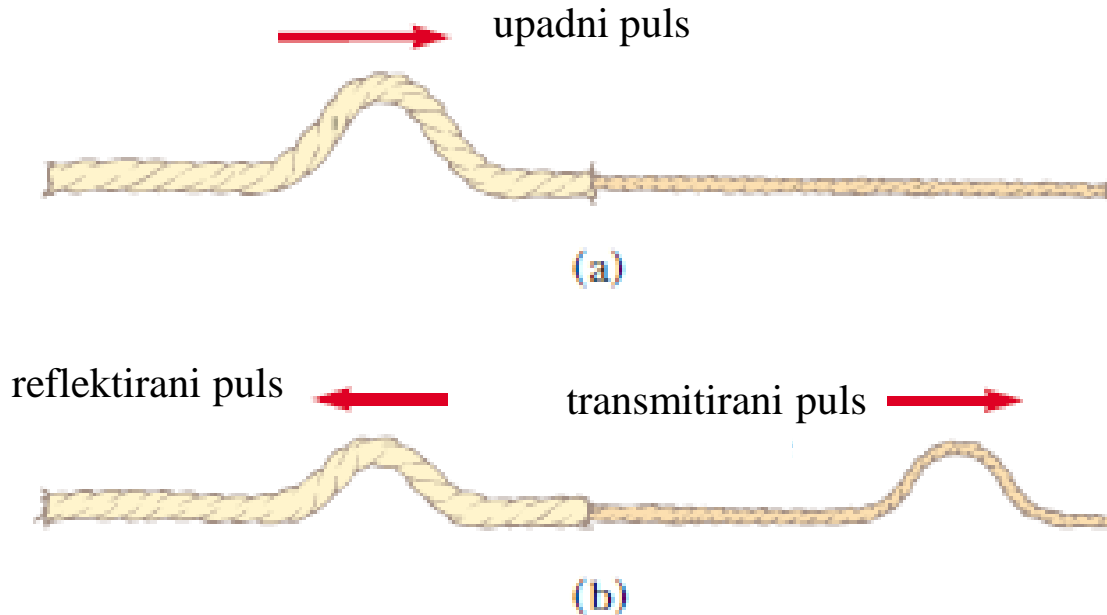
Transmisija

- **granica** između dva sredstva
- U ovom slučaju, dio se upadnog pulsa reflektira, a dio transmitira - dio pulsa prolazi kroz granicu.
- Kad puls koji putuje laganom niti dosegne granicu dviju niti, dio impulsa se reflektira i preokrene (promjena faze za pola valne duljine), a dio se prenosi na težu nit.



(a) puls koji putuje u desno laganom niti vezanom na težu nit. (b) Dio upadnog pulsa se reflektira (i obrne), a dio se transmitira na težu nit.

Transmisija



Puls putuje težom niti i udara u granicu između teške i lake niti, tj. prelazi iz optički gušćeg u rjeđe sredstvo. Dio pulsa se reflektira, a dio se transmitira. U ovom slučaju, reflektirani puls ne mijenja fazu.