

Valovi i zvuk

**FIZIKA
PSS-GRAD
16. prosinca 2025.**

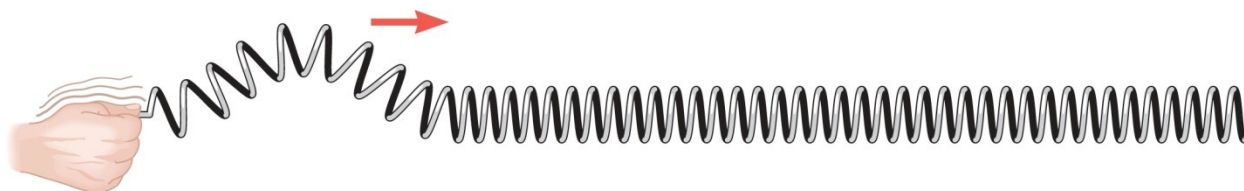


WILEY

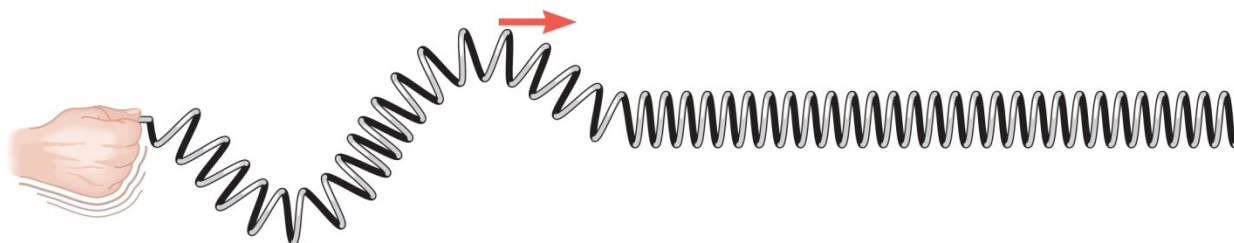
Copyright © 2015 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

16.1 *Priroda valova*

1. Val je poremećaj koji se širi kroz prostor.
2. Val prenosi energiju s jednog mjesta na drugo.



(a)

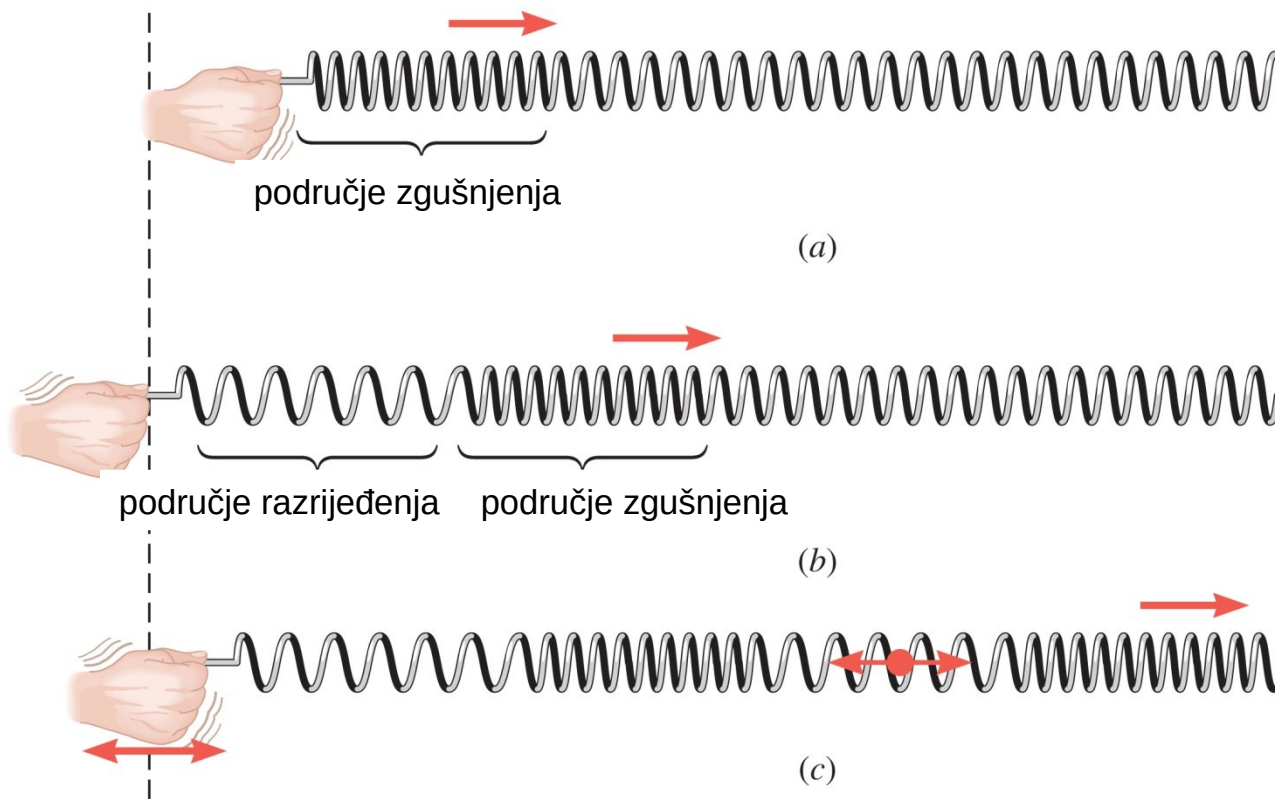


(b)

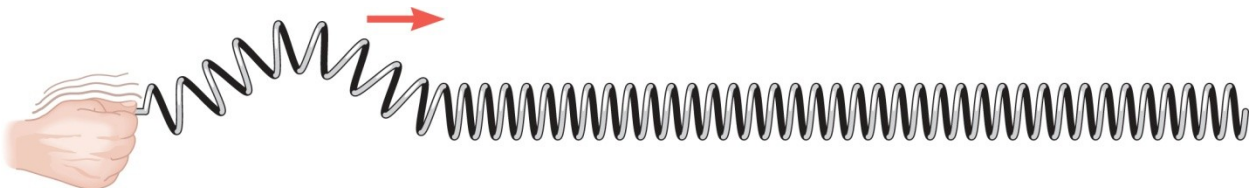


(c)

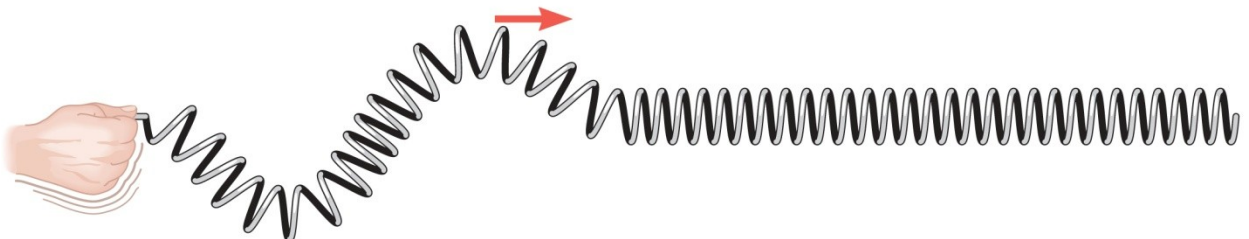
Longitudinalni val



Transverzalni val



(a)



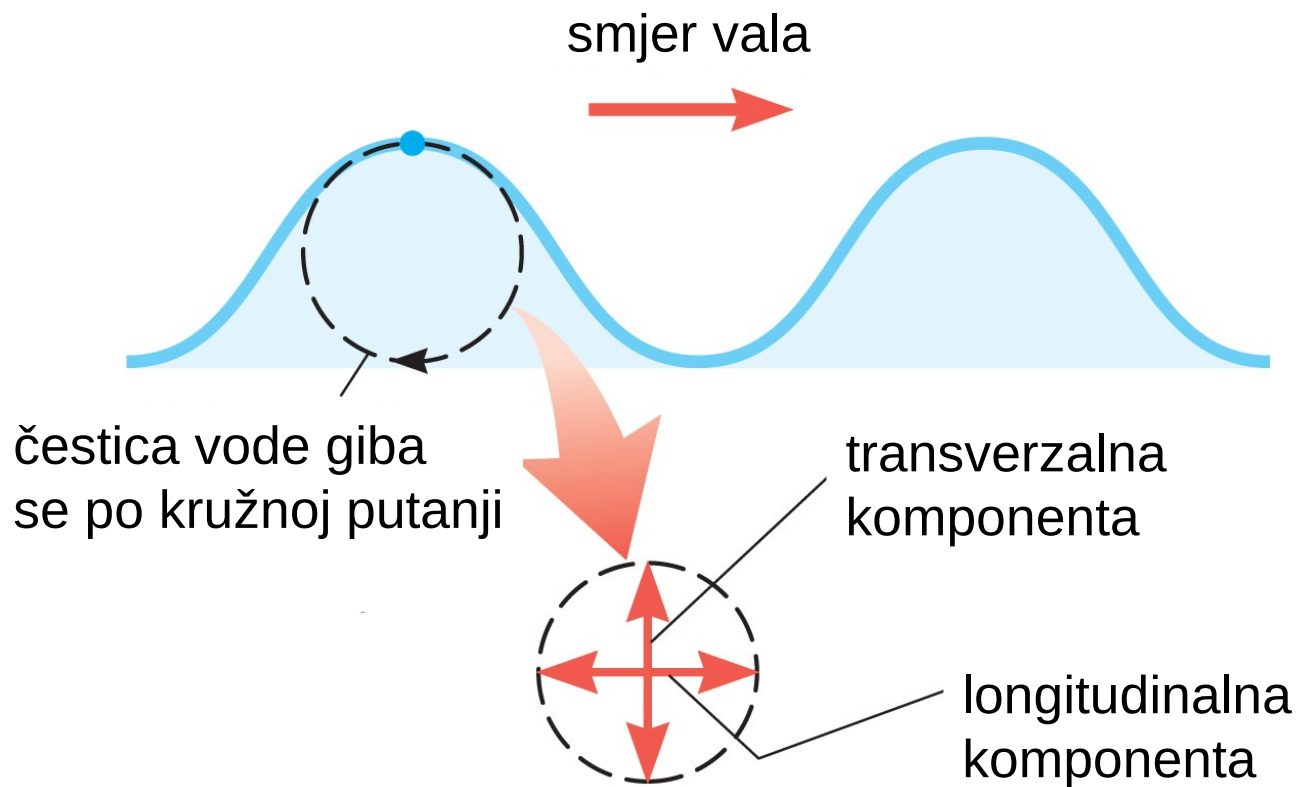
(b)



(c)

16.1 *Priroda valova*

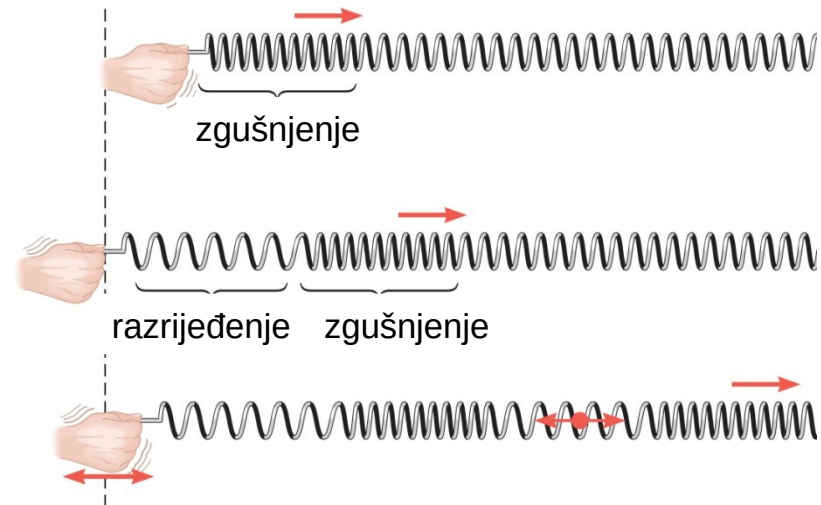
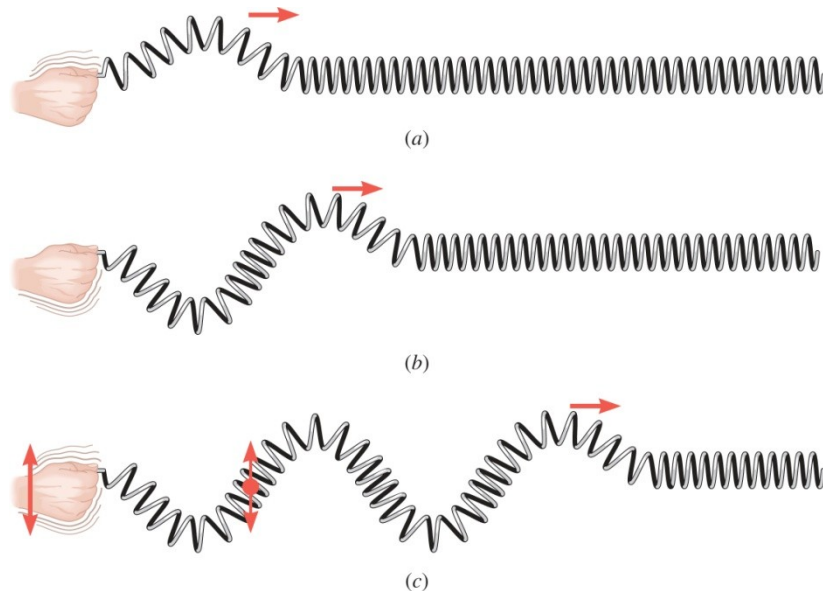
Valovi na vodi su djelomično transverzalni, a djelomično longitudinalni.



16.2 Periodični valovi

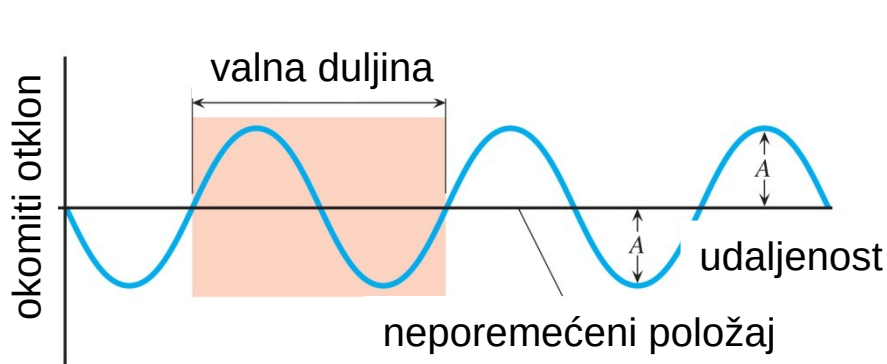
Periodični valovi sastoje se od ponavljajućih uzoraka koji se neprekidno stvaraju u izvoru.

periodičan
koji se ponavlja u određenim
vremenskim razmacima

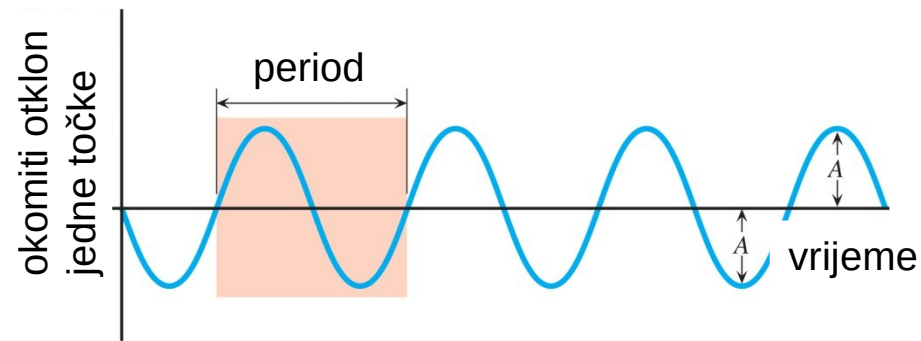


WILEY

16.2 Periodični valovi



a) u određenom trenutku



b) na određenom položaju

amplituda je najveći otklon od neporemećenog položaja

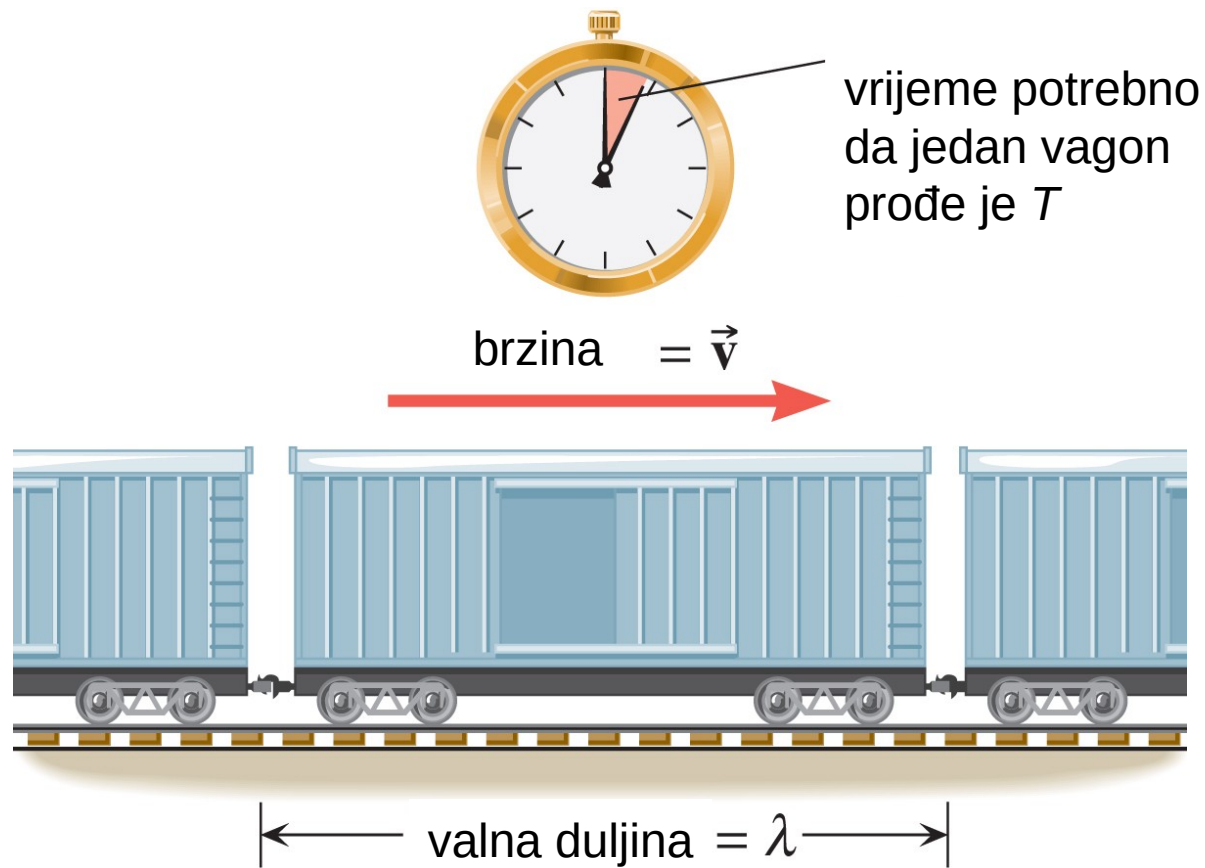
valna duljina je vodoravna duljina jednog ciklusa

period je vrijeme potrebno za jedan ciklus

frekvencija je recipročna vrijednost perioda

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

16.2 Periodični valovi

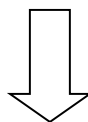


$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda f$$

Primjer 1 Valne duljine radiovalova

AM i FM radiovalovi su transverzalni valovi koje čine poremećaji električnih i magnetskih polja i koji putuju brzinom od $3,00 \cdot 10^8$ m/s. Radiostanica emitira AM valove čija je frekvencija $1230 \cdot 10^3$ Hz i FM valove čija je frekvencija $91,9 \cdot 10^6$ Hz. Odredite valne duljine tih valova.

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



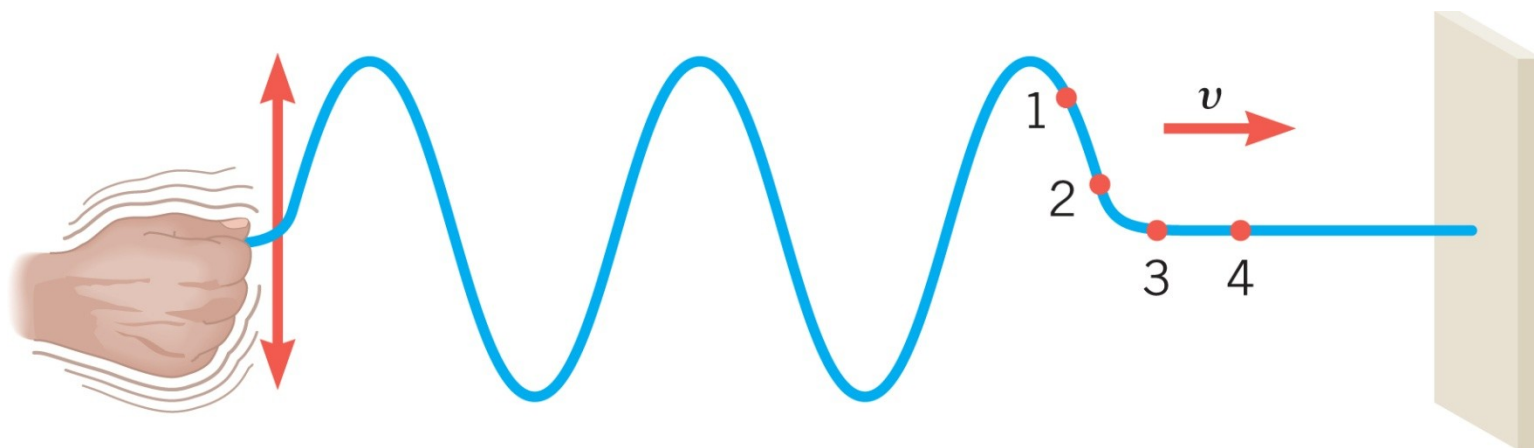
$$\lambda = \frac{v}{f}$$

$$\text{AM} \quad \lambda = \frac{v}{f} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1230 \cdot 10^3 \text{ Hz}} = 244 \text{ m}$$

$$\text{FM} \quad \lambda = \frac{v}{f} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{91,9 \cdot 10^6 \text{ Hz}} = 3,26 \text{ m}$$

16.3 Brzina valova na žici

Brzina kojom se val giba nadesno ovisi o tome kako se čestica užeta ubrzava u okomitom smjeru kao reakcija na silu u izvoru.



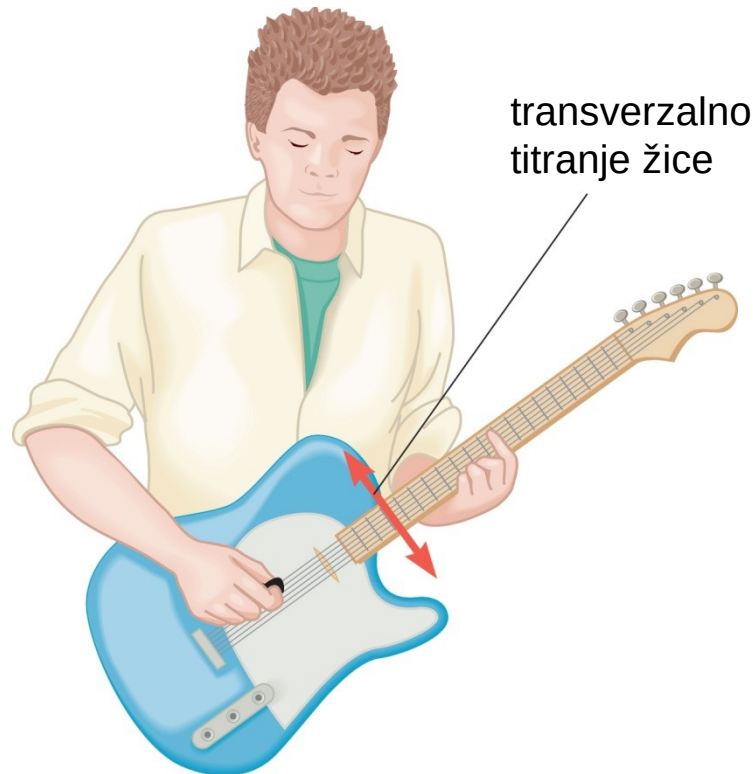
$$v = \sqrt{\frac{F}{m/L}}$$

napetost

linearna gustoća

Primjer 2 Valovi koji putuju po žicama gitare

Nakon što je žica električne gitare trznuta po njoj putuje transverzalni val. Duljina svake žice, od jednog do drugog učvršćenog kraja, je 0,628 m. Masa učvršćenog dijela žice je 0,208 g za visoki E, a 3,32 g za niski E. Napetost svake žice je 226 N. Odredite brzine valova na tim žicama.



16.3 Brzina valova na žici

visoki E

$$v = \sqrt{\frac{F}{m/L}} = \sqrt{\frac{226 \text{ N}}{(0,208 \cdot 10^{-3} \text{ kg})/(0,628 \text{ m})}} = 826 \text{ m/s}$$



niski E

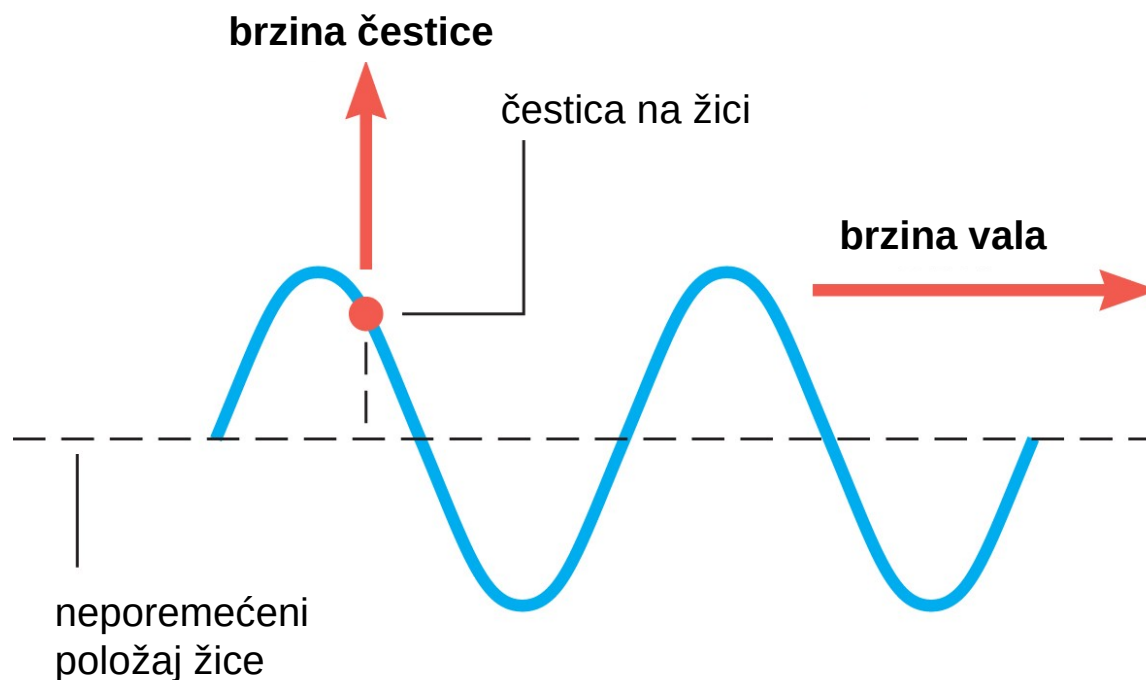
$$v = \sqrt{\frac{F}{m/L}} = \sqrt{\frac{226 \text{ N}}{(3,32 \cdot 10^{-3} \text{ kg})/(0,628 \text{ m})}} = 207 \text{ m/s}$$

WILEY

Copyright © 2015 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

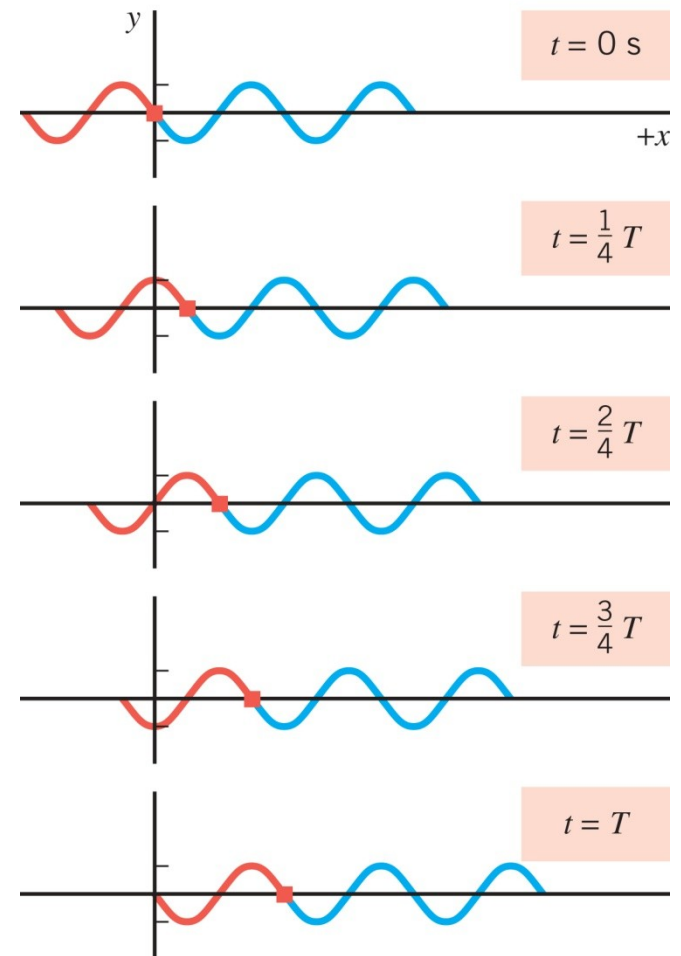
Konceptualni primjer 3 Brzina vala & brzina čestice

Je li brzina transverzalnog vala ista kao i brzina čestice na valu?



16.4 Matematički opis vala

Koji je pomak y u trenutku t čestice na položaju x ?



$$y = A \sin \left(2 \pi f t - \frac{2 \pi x}{\lambda} \right)$$

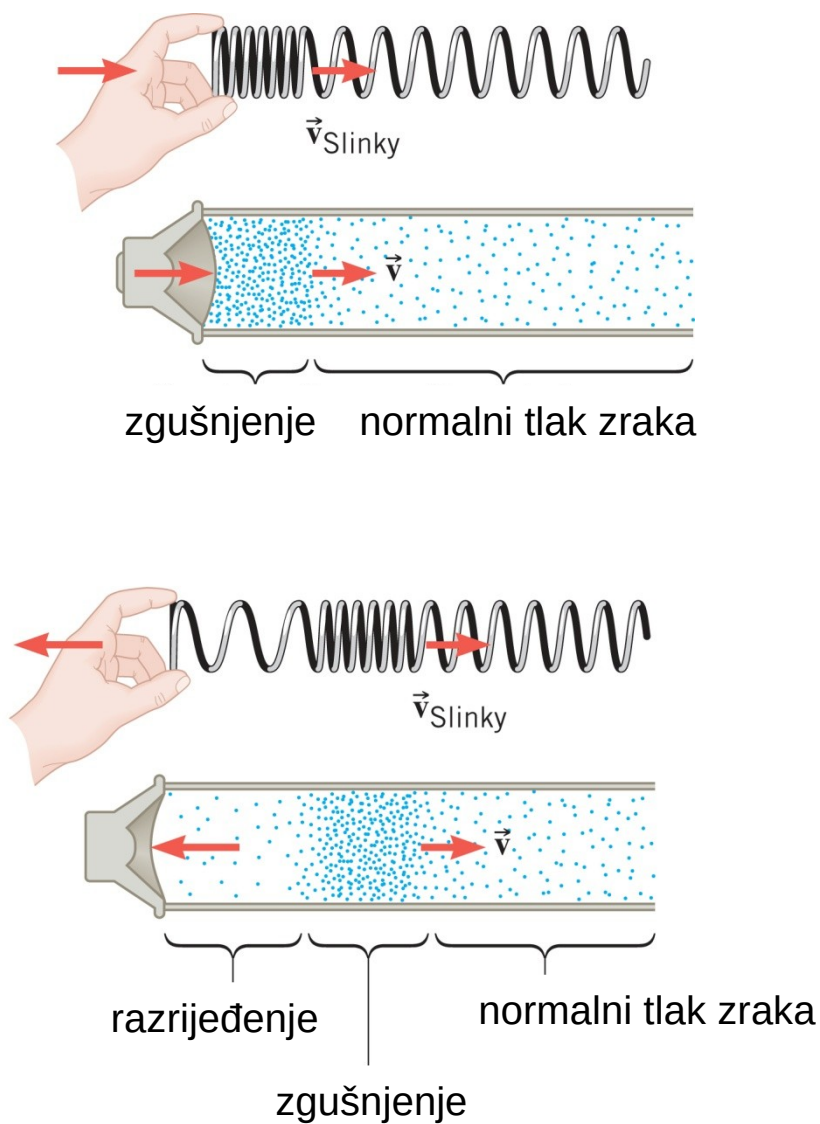
val putuje u pozitivnom smjeru osi x

$$y = A \sin \left(2 \pi f t + \frac{2 \pi x}{\lambda} \right)$$

val putuje u negativnom smjeru osi x

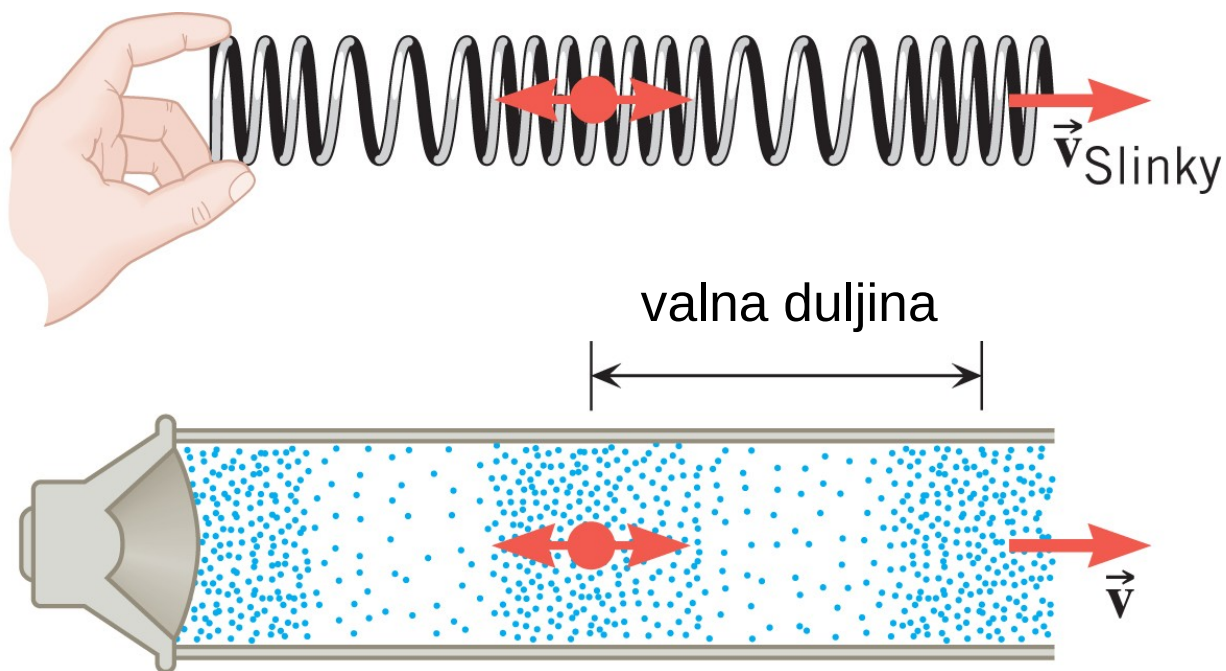
WILEY

LONGITUDINALNI ZVUČNI VALOVI



16.5 Priroda zvučnih valova

Udaljenost susjednih zgušnjenja odgovara valnoj duljini zvučnoga vala.

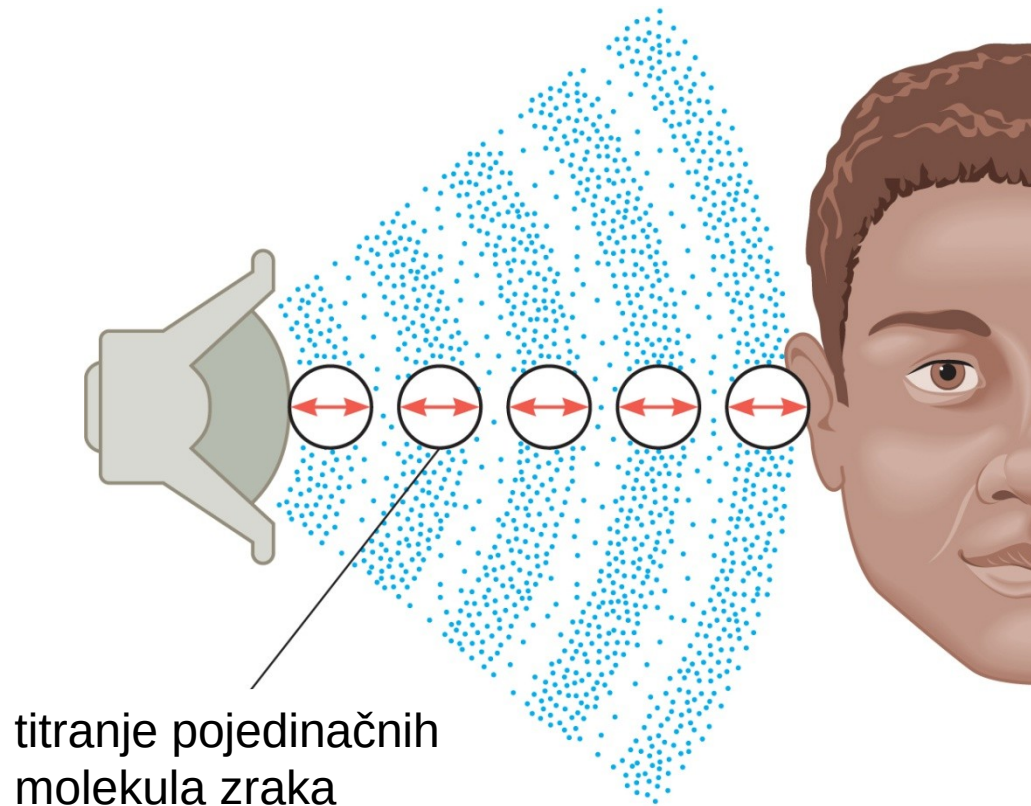


WILEY

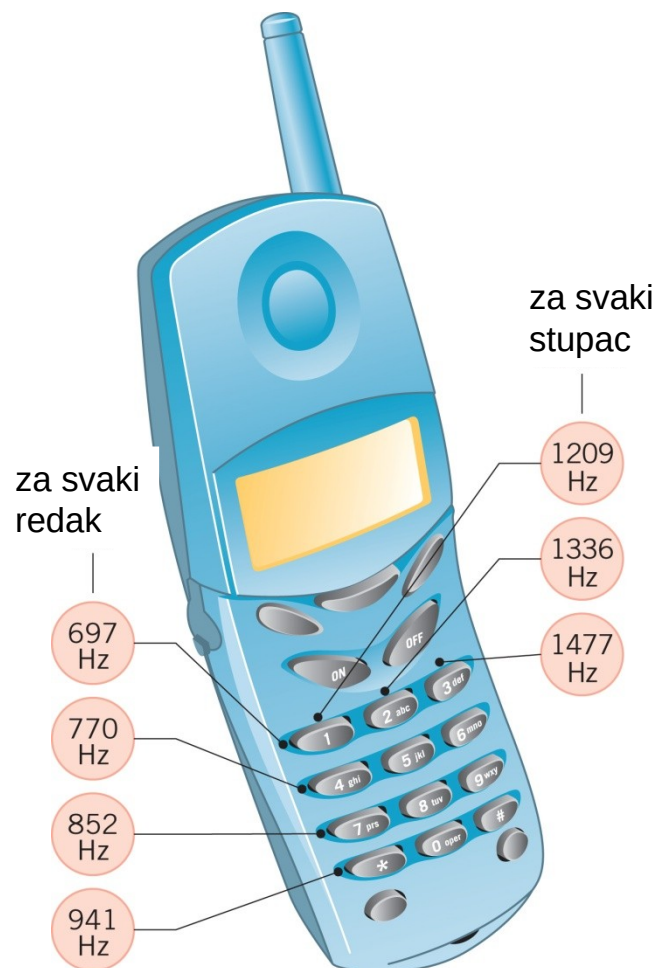
Copyright © 2015 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

16.5 *Priroda zvučnih valova*

Pojedinačne molekule zraka ne putuju uzduž vala.



FREKVENCIJA ZVUČNOG VALA

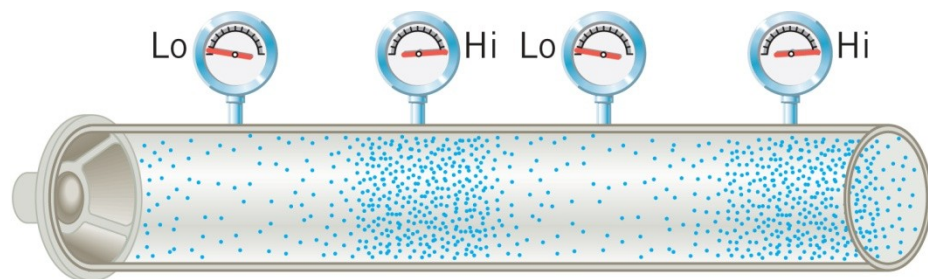


Frekvencija je broj titraja u sekundi.

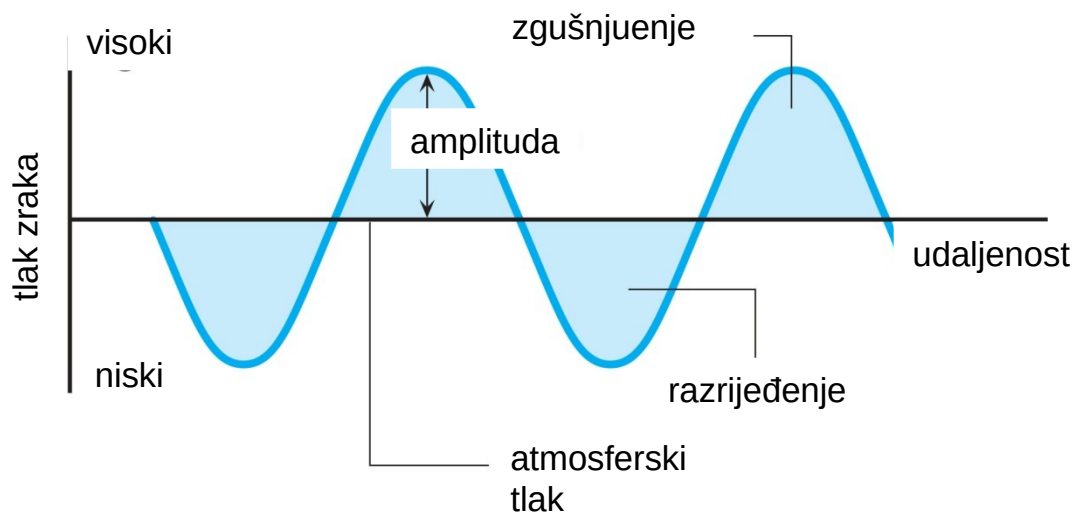
Zvuk određene frekvencije nazivamo **čistim tonom**.

Mozak frekvenciju interpretira kao subjektivnu kvalitetu koje nazivamo **visinom tona**.

AMPLITUDA TLAKA ZVUČNOGA VALA



Glasnoća je svojstvo zvuka koje prvenstveno ovisi o amplitudi vala.



Zvuk različitim brzinama putuje kroz plinovite, tekuće čvrste tvari.

Table 16.1 Speed of Sound in Gases, Liquids, and Solids

Substance	Speed (m/s)
<i>Gases</i>	
Air (0 °C)	331
Air (20 °C)	343
Carbon dioxide (0 °C)	259
Oxygen (0 °C)	316
Helium (0 °C)	965
<i>Liquids</i>	
Chloroform (20 °C)	1004
Ethyl alcohol (20 °C)	1162
Mercury (20 °C)	1450
Fresh water (20 °C)	1482
Seawater (20 °C)	1522
<i>Solids</i>	
Copper	5010
Glass (Pyrex)	5640
Lead	1960
Steel	5960

16.6 Brzina zvuka

Zgušnjena i razrijeđenja mogu prenositi zvučni val kroz plin samo ako se molekule sudaraju.

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3 k T}{m}}$$

idealni plin

$$v = \sqrt{\frac{\gamma k T}{m}}$$

$$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$$

za jednoatomni plin

$$\gamma = \frac{5}{3}$$

za dvoatomni plin

$$\gamma = \frac{7}{5}$$

16.6 Brzina zvuka

Table 11.1 Mass Densities^a of Common Substances

Substance	Mass Density ρ (kg/m ³)
Solids	
Aluminum	2700
Brass	8470
Concrete	2200
Copper	8890
Diamond	3520
Gold	19 300
Ice	917
Iron (steel)	7860
Lead	11 300
Quartz	2660
Silver	10 500
Wood (yellow pine)	550
Liquids	
Blood (whole, 37 °C)	1060
Ethyl alcohol	806
Mercury	13 600
Oil (hydraulic)	800
Water (4 °C)	1.000 × 10 ³
Gases	
Air	1.29
Carbon dioxide	1.98
Helium	0.179
Hydrogen	0.0899
Nitrogen	1.25
Oxygen	1.43

^aUnless otherwise noted, densities are given at 0 °C and 1 atm pressure.

TEKUĆINE

$$v = \sqrt{\frac{B_{ad}}{\rho}}$$

Table 10.3 Values for the Bulk Modulus of Solid and Liquid Materials

Material	Bulk Modulus B [N/m ² (=Pa)]
Solids	
Aluminum	7.1 × 10 ¹⁰
Brass	6.7 × 10 ¹⁰
Copper	1.3 × 10 ¹¹
Diamond	4.43 × 10 ¹¹
Lead	4.2 × 10 ¹⁰
Nylon	6.1 × 10 ⁹
Osmium	4.62 × 10 ¹¹
Pyrex glass	2.6 × 10 ¹⁰
Steel	1.4 × 10 ¹¹
Liquids	
Ethanol	8.9 × 10 ⁸
Oil	1.7 × 10 ⁹
Water	2.2 × 10 ⁹

ČVRSTE ŠIPKE

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

Table 10.1 Values for the Young's Modulus of Solid Materials

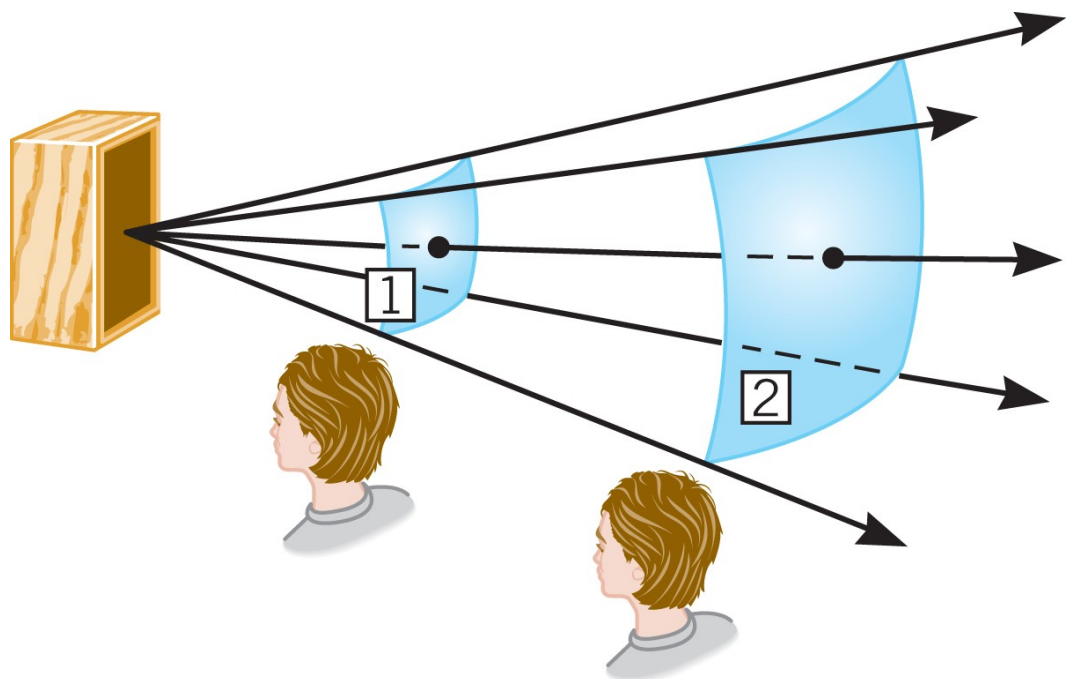
Material	Young's Modulus Y (N/m ²)
Aluminum	6.9 × 10 ¹⁰
Bone	
Compression	9.4 × 10 ⁹
Tension	1.6 × 10 ¹⁰
Brass	9.0 × 10 ¹⁰
Brick	1.4 × 10 ¹⁰
Copper	1.1 × 10 ¹¹
Mohair	2.9 × 10 ⁹
Nylon	3.7 × 10 ⁹
Pyrex glass	6.2 × 10 ¹⁰
Steel	2.0 × 10 ¹¹
Teflon	3.7 × 10 ⁸
Titanium	1.2 × 10 ¹¹
Tungsten	3.6 × 10 ¹¹

16.7 Intenzitet zvučnoga vala

Zvučni valovi nose energiju i mogu obaviti rad.

Energija prenešena u jedinici vremena je **snaga** vala.

Intenzitet zvuka je snaga vala koji prolazi okomito kroz plohu podijeljena s površinom te plohe.

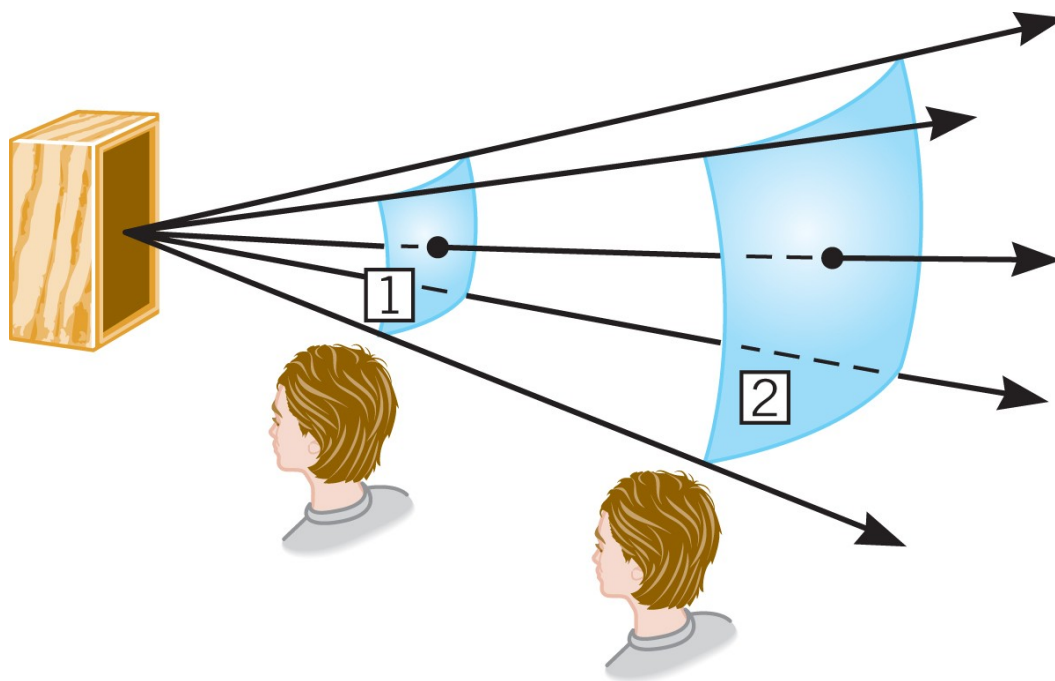


$$I = \frac{P}{A}$$

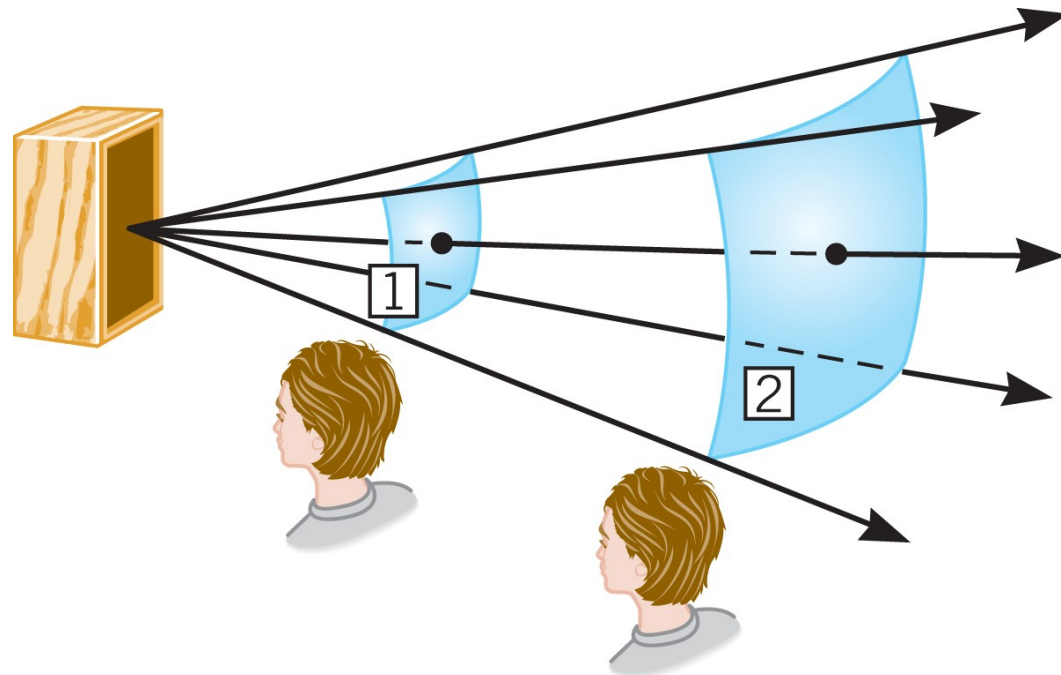
WILEY

Primjer 6 Intenziteti zvuka

Zvuk snage $12 \cdot 10^{-5} \text{ W}$ prolazi kroz plohe 1 i 2. Površine ploha su redom $4,0 \text{ m}^2$ i 12 m^2 . Odredite intenzitet zvuka na svakoj od ploha.



16.7 Intenzitet zvučnoga vala



$$I_1 = \frac{P}{A_1} = \frac{12 \cdot 10^{-5} \text{ W}}{4,0 \text{ m}^2} = 3,0 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2$$

$$I_1 = \frac{P}{A_1} = \frac{12 \cdot 10^{-5} \text{ W}}{12 \text{ m}^2} = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ W/m}^2$$

WILEY

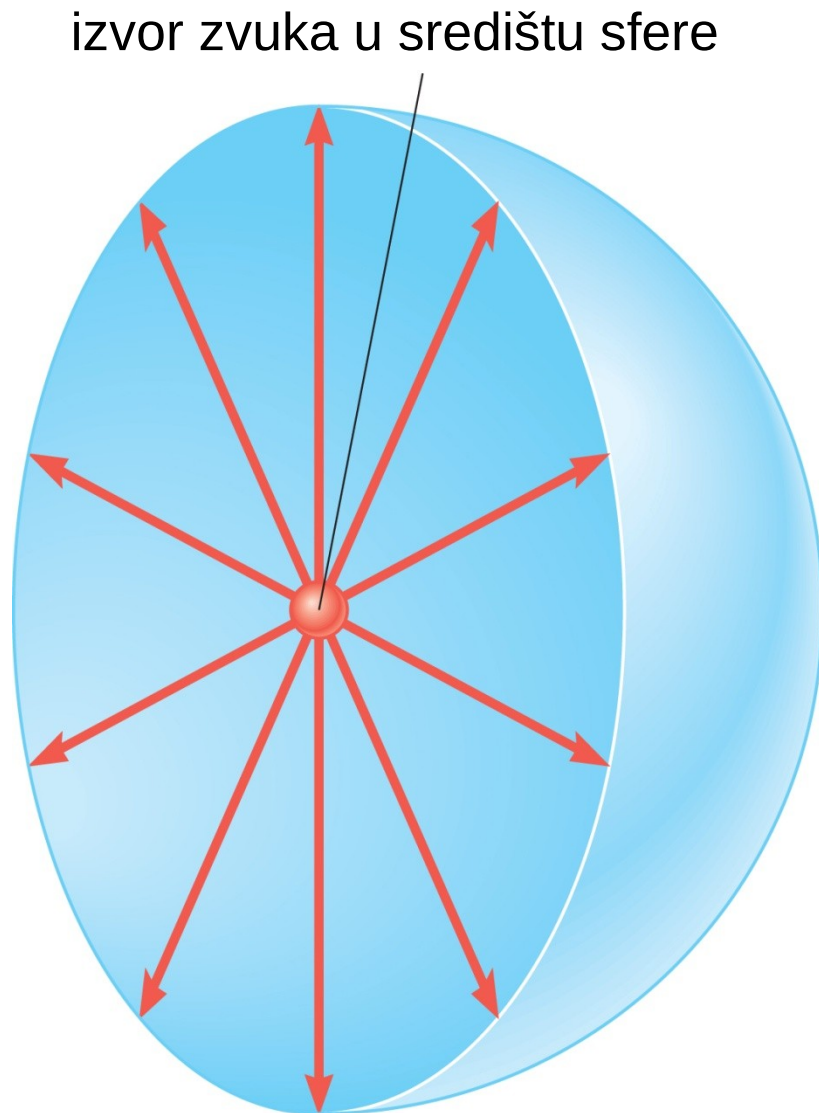
16.7 *Intenzitet zvučnoga vala*

Za zvuk frekvencije 1000 Hz, najmanji intenzitet koji se ljudskim uhom može čuti je 10^{-12} W/m^2 . Taj intenzitet nazivamo ***pragom čujnosti***.

S druge strane, stalna izloženost zvuku intenziteta većeg od 1 W/m^2 može biti bolan.

Ako izvor emitira zvuk jednoliko u svim smjerovima, ovisnost intenziteta o udaljenosti vrlo je jednostavna.

16.7 Intenzitet zvučnoga vala



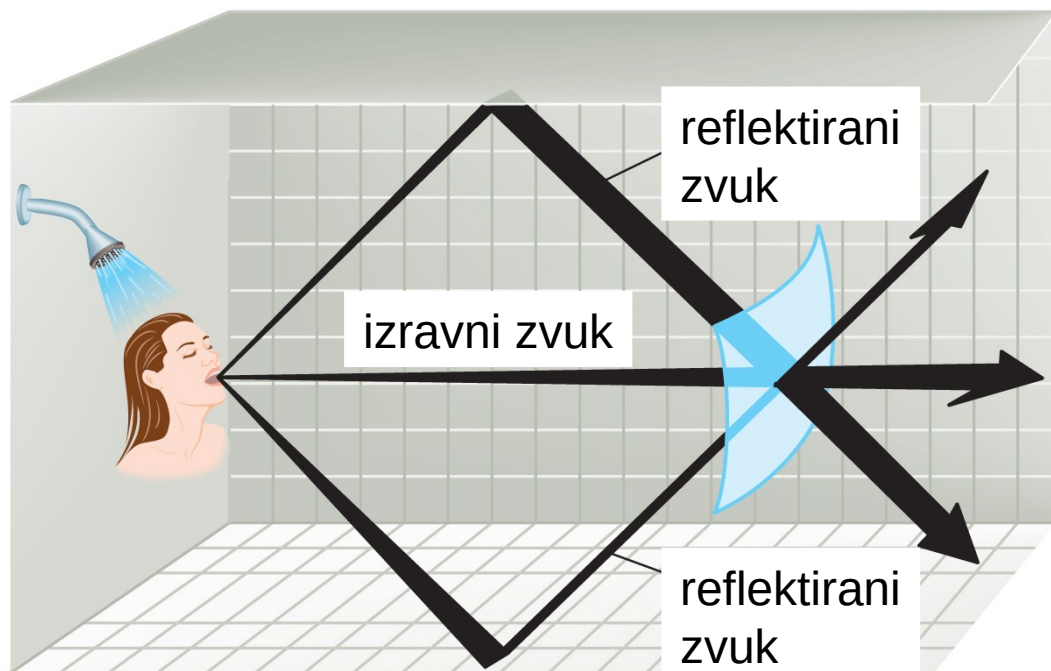
snaga izvora

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

površina sfere

Konceptualni primjer 8 Reflektirani zvuk i intenzitet zvuka

Osoba koja pjeva pod tušem stvara zvuk snage P . Zvuk se odbija od zidova kupaoonice. Daje li jednađba za intenzitet zvuka (koji se emitira jednoliko u svim smjerovima), na udaljenosti r od osobe, precijenjenu, podcijenjenu ili ispravnu vrijednost intenziteta zvuka?



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

16.8 Decibeli

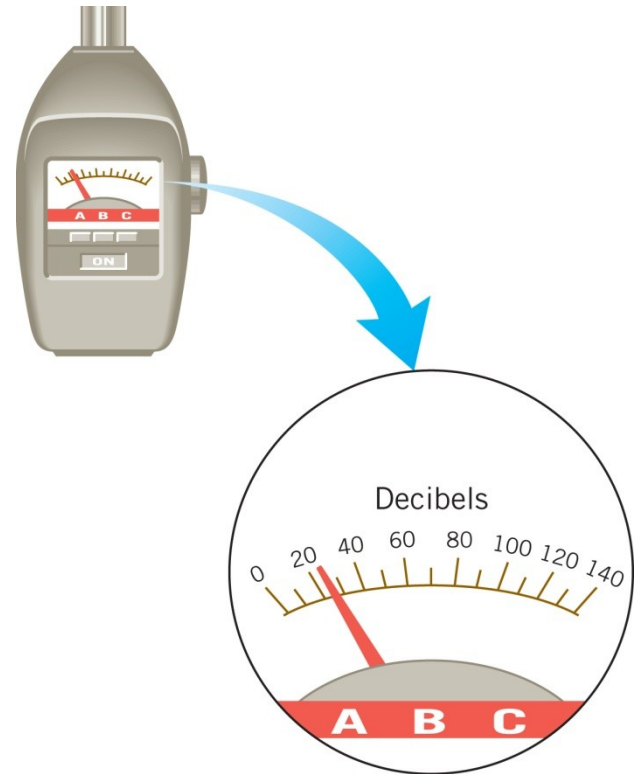
Decibel (dB) je mjerna jedinica za usporedbu dvaju intenziteta zvuka.

Zbog načina na koji slušni mehanizam kod ljudi reagira na intenzitet, za **razinu zvuka** prikladno je koristiti logaritamsku skalu:

$$\beta = 10 \text{ dB} \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

Uočite da je $\log(1)=0$. Stoga je razina zvuka za prag čujnosti jednaka nuli.



WILEY

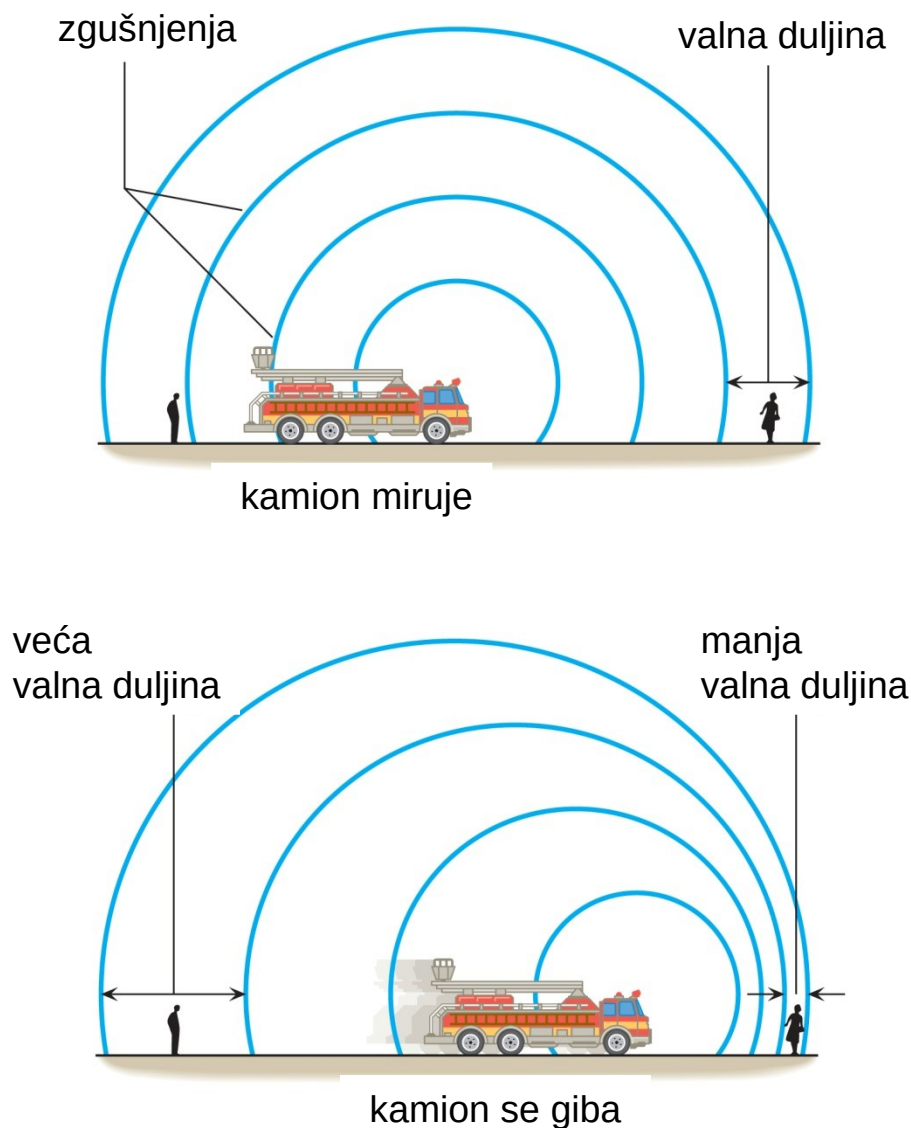
$$\beta = 10 \text{ dB} \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

Table 16.2 Typical Sound Intensities and Intensity Levels Relative to the Threshold of Hearing

	Intensity I (W/m ²)	Intensity Level β (dB)
Threshold of hearing	1.0×10^{-12}	0
Rustling leaves	1.0×10^{-11}	10
Whisper	1.0×10^{-10}	20
Normal conversation (1 meter)	3.2×10^{-6}	65
Inside car in city traffic	1.0×10^{-4}	80
Car without muffler	1.0×10^{-2}	100
Live rock concert	1.0	120
Threshold of pain	10	130

16.9 Dopplerov učinak



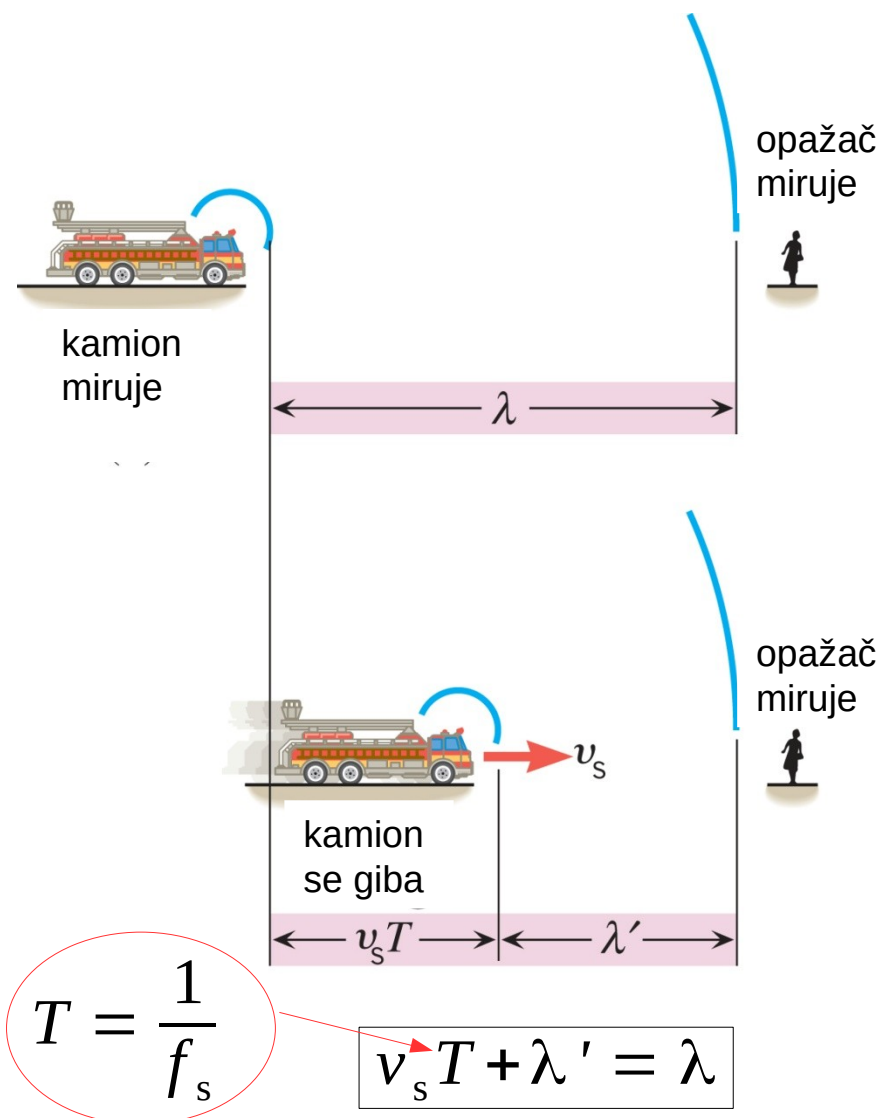
Dopplerov učinak je promjena frekvencije zvuka (visine tona) koju slušatelj čuje zato što izvor zvuka i slušatelj imaju različite brzine s obzirom na medij kojim se zvuk širi.

WILEY

Copyright © 2015 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

16.9 Dopplerov učinak

IZVOR ZVUKA SE GIBA



$$\lambda' = \lambda - v_s T$$

$$v = \lambda f_s = \lambda' f_o$$

$$f_o = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda - v_s T}$$

$$f_o = \frac{v}{\frac{v}{f_s} - \frac{v_s}{f_s}} = f_s \frac{v}{v - v_s}$$

$$f_o = f_s \frac{1}{1 - \frac{v_s}{v}}$$

WILEY

16.9 Dopplerov učinak

izvor se giba
prema mirnom
opažaču

$$f_o = f_s \frac{1}{1 - \frac{v_s}{v}}$$

$$f_o > f_s$$

izvor se giba
od mirnog
opažača

$$f_o = f_s \frac{1}{1 + \frac{v_s}{v}}$$

$$f_o < f_s$$

<http://youtu.be/8WgSQLRymwE>

WILEY

Primjer 10 Zvuk prolazećeg vlaka

Pri brzini vlaka od 44,7 m/s vlakovođa uključi sirenu čija je frekvencija 415 Hz. Brzina zvuka je 343 m/s. Koju frekvenciju čuje osoba koja stoji na križanju:

- (a) kad se vlak približava;
- (b) kad se vlak udaljava?

$$f_o = f_s \frac{1}{1 - \frac{v_s}{v}}$$

$$f_o = f_s \frac{1}{1 + \frac{v_s}{v}}$$

16.9 Dopplerov učinak

vlak se približava

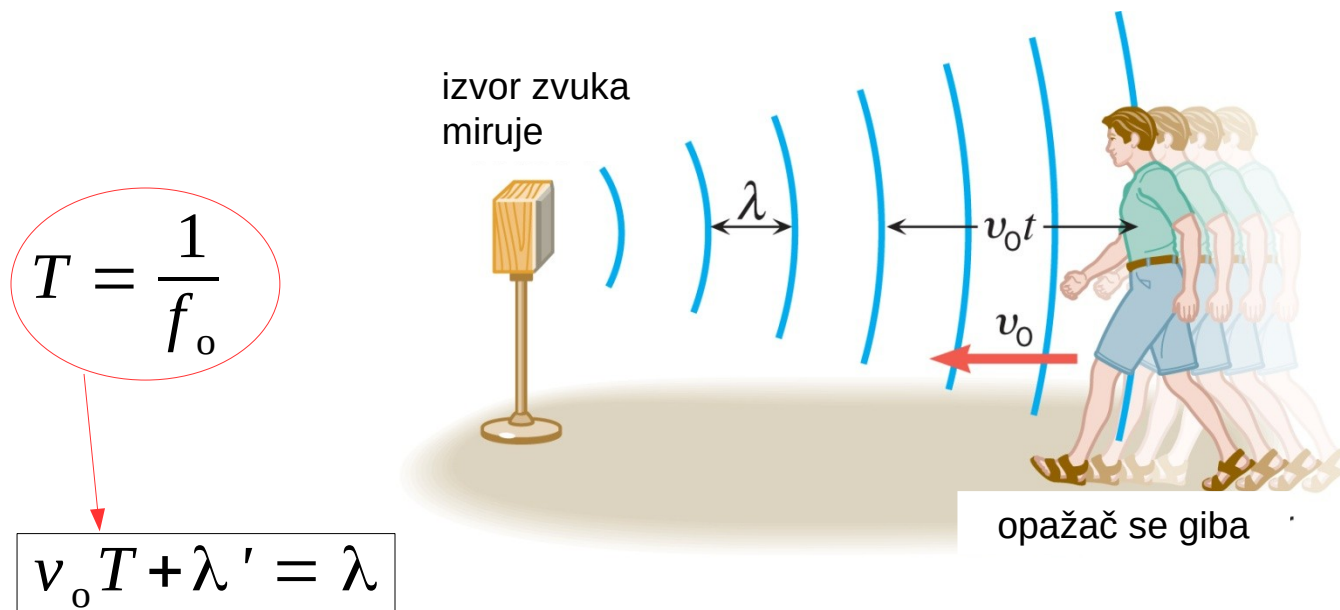
$$f_o = 415 \text{ Hz} \frac{1}{1 - \frac{44,7 \text{ m/s}}{343 \text{ m/s}}} = 477 \text{ Hz}$$

vlak se udaljava

$$f_o = 415 \text{ Hz} \frac{1}{1 + \frac{44,7 \text{ m/s}}{343 \text{ m/s}}} = 367 \text{ Hz}$$

16.9 Dopplerov učinak

OPAŽAČ SE GIBA



$$(v_o + v) f_s = f_o v$$

$$v = \lambda f_s = \lambda' f_o$$

$$\frac{v_o}{f_o} + \frac{v}{f_o} = \frac{v}{f_s}$$

$$f_o = f_s \left(1 + \frac{v_o}{v} \right)$$

WILEY

16.9 Dopplerov učinak

opažač se giba
prema mirnom
izvoru

$$f_o = f_s \left(1 + \frac{v_o}{v} \right) \quad f_o > f_s$$

opažač se giba
od mirnog
izvora

$$f_o = f_s \left(1 - \frac{v_o}{v} \right) \quad f_o < f_s$$

OPĆENITI SLUČAJ

$$f_o = f_s \left(\frac{1 \pm \frac{v_o}{v}}{1 \mp \frac{v_s}{v}} \right)$$

brojnik: plus znači da se opažač giba prema izvoru; minus znači da se opažač giba od izvora

nazivnik: minus znači da se izvor giba prema opažaču; plus znači da se izvor giba od opažača

16.10 *Primjene zvuka u medicini*

Ultrazvučni valovi se emitiraju u tijelo, odbijaju se (različito od tkiva različitih gustoća) te se ponovo detektiraju. Skeniranjem po površini tijela može se rekonstruirati slika unutrašnjosti.



Blend Images/SuperStock



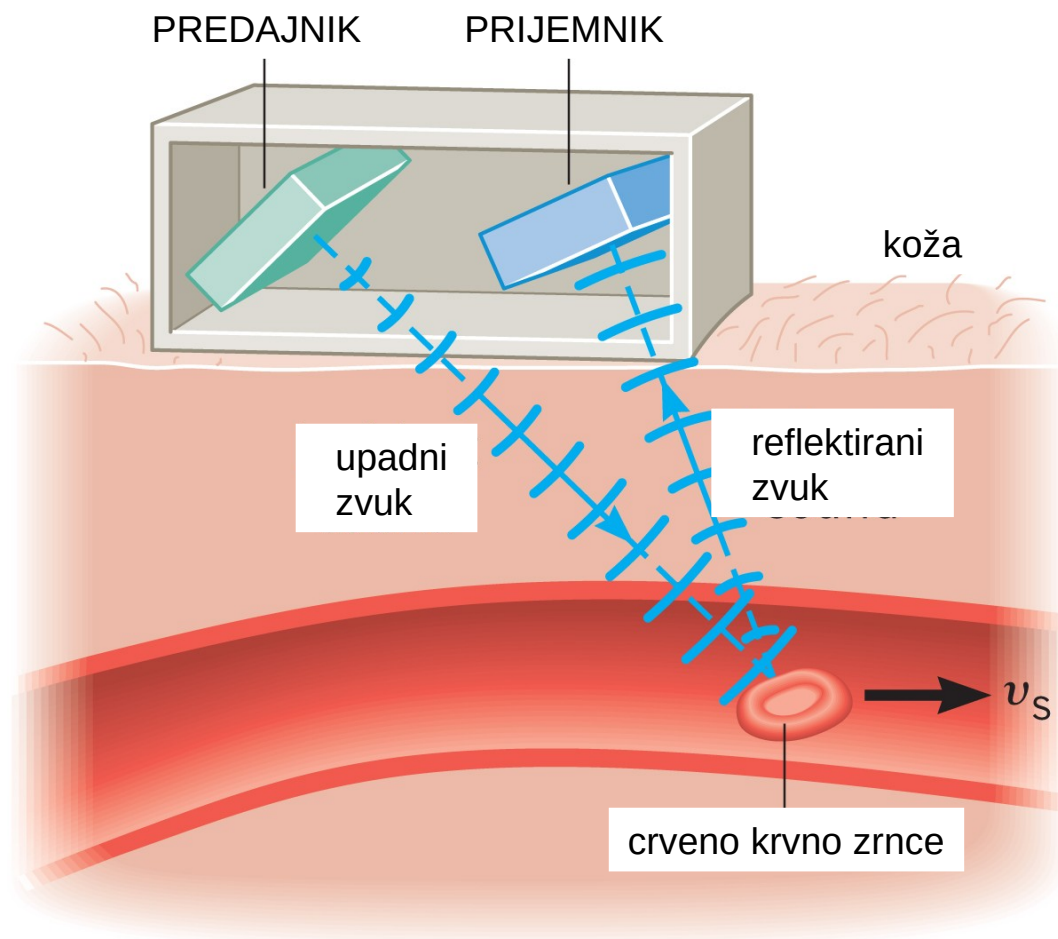
Dr. Najeeb Layyous/Science Source

WILEY

Copyright © 2015 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

16.10 *Primjene zvuka u medicini*

Kad se zvuk odbija od gibajućih crvenih krvnih zrnaca, njegova se frekvencija mijenja (zbog Dopplerovog učinka).



WILEY

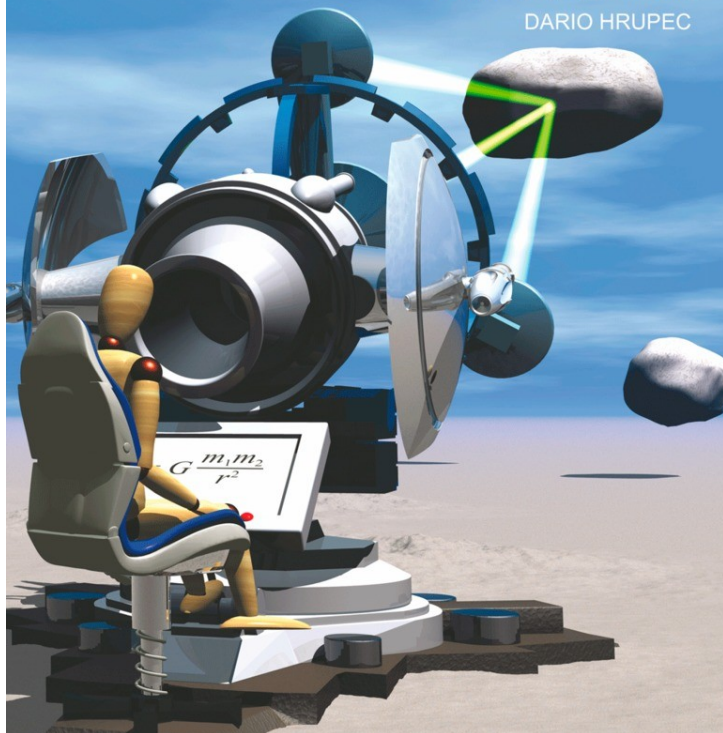
Copyright © 2015 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.



FIZIKA U MEDICINI 1

udžbenik s multimedijским sadržajem
za 1. razred medicinskih i zdravstvenih škola
s dvogodišnjim programom fizike

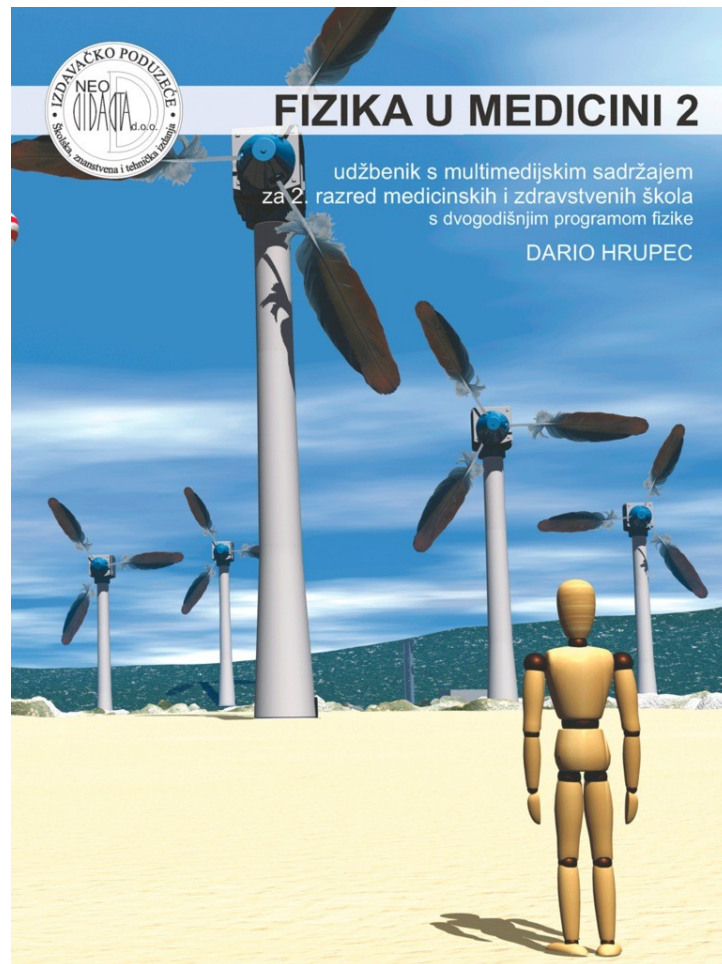
DARIO HRUPEC



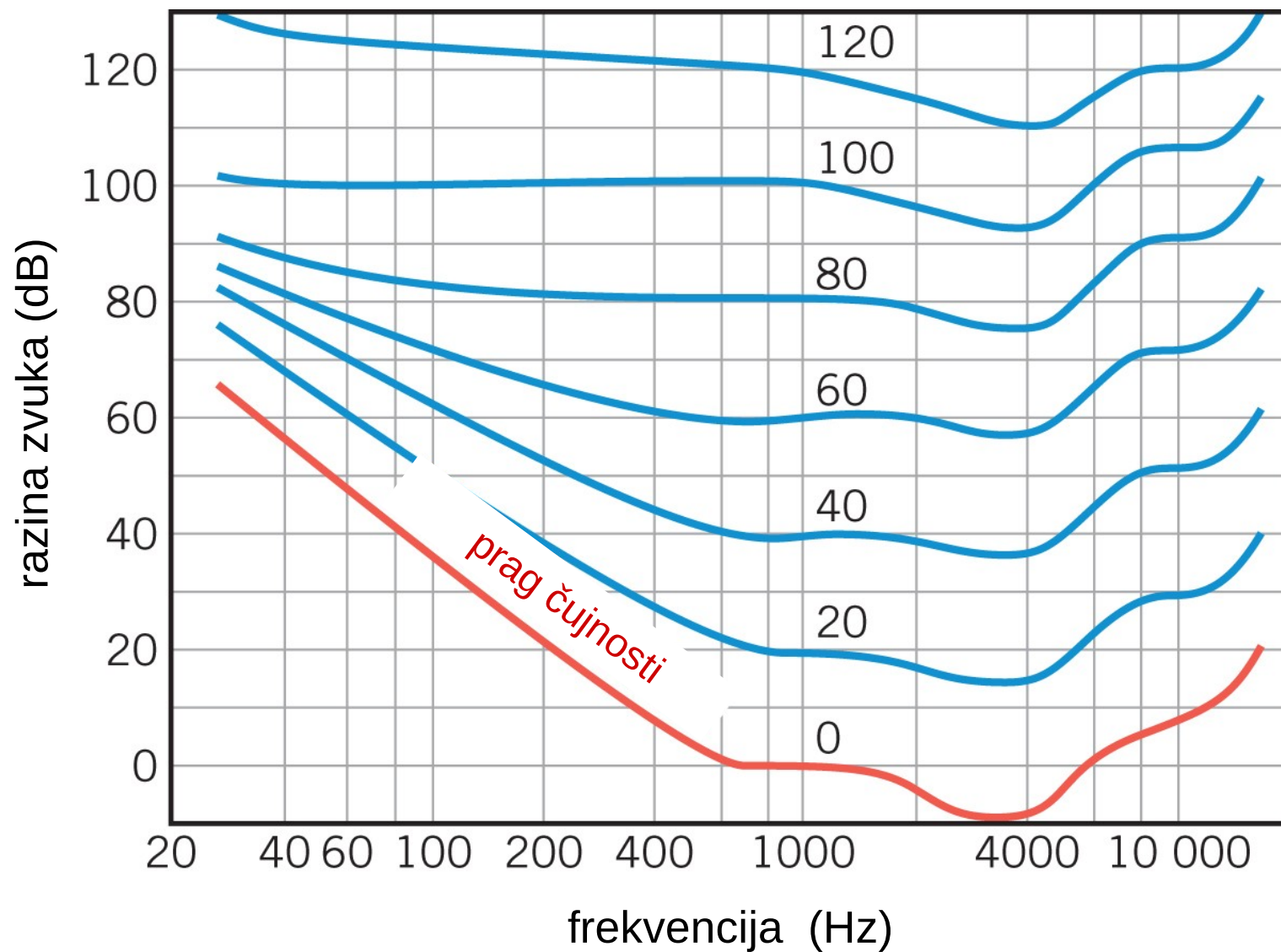
FIZIKA U MEDICINI 2

udžbenik s multimedijским sadržajem
za 2. razred medicinskih i zdravstvenih škola
s dvogodišnjim programom fizike

DARIO HRUPEC



16.11 Osjetljivost ljudskog uha



WILEY

Copyright © 2015 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

ZADACI ZA VJEŽBU

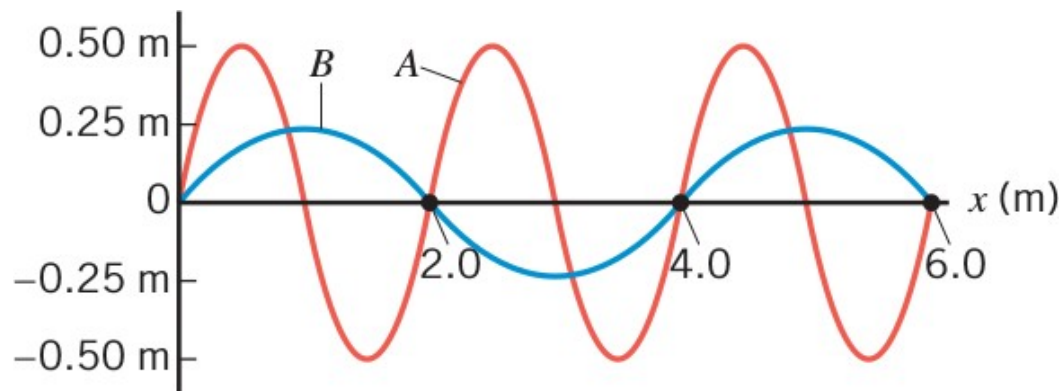
1. Svjetlost je elektromagnetski val i putuje brzinom $3,00 \cdot 10^8$ m/s. Ljudsko oko je najosjetljivije na žutozelenu svjetlost čija je valna duljina $5,45 \cdot 10^{-7}$ m.

Koju frekvenciju ima ta svjetlost?

RJEŠENJE: $5,50 \cdot 10^{14}$ Hz

2. Slika prikazuje dva vala koja istom brzinom putuju nadesno. a) Iz podataka na slici odredite valnu duljinu svakoga vala. b) Izračunajte frekvenciju svakoga vala, ako je brzina vala 12 m/s. c) Koja je najveća brzina čestice na svakom od valova?

RJEŠENJE: a) 2 m; 4 m; b) 6 Hz; 3 Hz; c) 19 m/s; 4,7 m/s

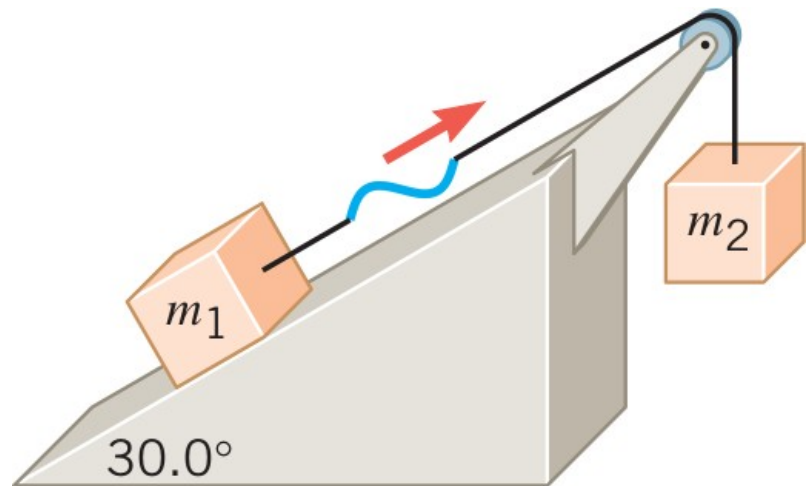


WILEY

ZADACI ZA VJEŽBU

3. Slika prikazuje kosinu zanemarivog trenja i koloturu. Dva tijela miruju, a povezana su žicom čija je masa po jedinici duljine $0,0250 \text{ kg/m}$. Žicom putuje transverzalni val, brzinom od $75,0 \text{ m/s}$. Odredite mase dvaju tijela. Težina žice zanemarljiva je u odnosu na silu napetosti žice.

RJEŠENJE: 28,7 kg; 14,3 kg



4. Val koji putuje u pozitivnom smjeru osi x ima amplitudu $0,35 \text{ m}$, brzinu $5,2 \text{ m/s}$ i frekvenciju 14 Hz . Napišite jednadžbu tog vala.

RJEŠENJE: $y = 0,35 \text{ m} \sin(88 \text{ s}^{-1} t - 17 \text{ m}^{-1} x)$

ZADACI ZA VJEŽBU

5. Jednoatomni idealni plin ($\gamma = 1,67$) nalazi se u posudi volumena $2,5 \text{ m}^3$. Tlak plina je $3,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$. Ukupna masa plina je $2,3 \text{ kg}$. Odredite brzinu zvuka u tom plinu.

RJEŠENJE: 800 m/s

6. Uho odraslog čovjeka ima površinu $2,1 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$. Tijekom normalnog razgovora intenzitet zvuka je $3,2 \cdot 10^{-6} \text{ W/m}^2$. Kolika je snaga zvučnog vala na svako uho? Pretpostavite da zvuk dolazi okomito na površinu uha.

RJEŠENJE: $6,7 \cdot 10^{-9} \text{ W}$

7. Razinu zvuka povećamo s 23 dB na 61 dB . Koji je omjer konačnog i početnog intenziteta zvuka?

RJEŠENJE: 6300

8. Alarm parkiranog automobila emitira zvuk frekvencije 960 Hz . Brzina zvuka u zraku je 343 m/s . Ako vozimo prema tom automobilu, prođemo ga te nastavimo voziti od njega, opažamo da se frekvencija promijeni 95 Hz . Koja je brzina našeg automobila?

RJEŠENJE: 17 m/s

ZADACI ZA VJEŽBU

9. Pretpostavite da je linearna gustoća violinske A-žice $7,8 \cdot 10^{-4}$ kg/m. Val na toj žici ima frekvenciju 440 Hz i valnu duljinu 65 cm. Odredite napetost te žice.

RJEŠENJE: 64 N

10. Šišmiš emitira zvuk frekvencije 91 kHz. Brzina zvuka u zraku, pri 20°C, je 343 m/s. No temperatura zraka je 35°C, pa brzina zvuka nije 343 m/s. Uz pretpostavku da se zrak ponaša kao idealni plin, odredite valnu duljinu zvuka.

RJEŠENJE: $3,9 \cdot 10^{-3}$ m



WILEY

Copyright © 2015 John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

PITANJA ZA PONAVLJANJE

1. Val
2. Transverzalni val
3. Longitudinalni val
4. Periodični val
5. Veza valne dolžine, frekvencije i brzine vala
6. Matematički opis periodičnih valova
7. Intenzitet vala
8. Prag čujnosti
9. Decibel
10. Dopplerov učinak