Vlnění

„Pověst, která vznikne v jednom městě, pronikne velmi brzo do druhého města, i když nikdo z lidí, kteří mají podíl na šíření zpráv, neodcestuje z jednoho města do druhého. Účast na tom mají dva docela různé pohyby, a to pohyb pověsti od města k městu a pohyb lidí, kteří pověst rozšiřují.“

Vítr rozvlní pole: Musíme rozlišovat mezi pohybem vlny a pohybem jednotlivých rostlin, které konají jen malé výkyvy.
Vlna na vodní hladině: Vidíme pohyb vlny, ale vodní částice se pohybují jen nahoru a dolů.

„Pozorovaný pohyb vlny je pohybem stavu hmoty, a nikoli pohybem hmoty samé.“

Myšlenkový pokus: Předpokládejme, že nějaký velký prostor je naprosto rovnoměrně vyplněn vodou, nebo vzduchem, nebo nějakým jiným „prostředím“. Někde uprostřed bude koule. Na počátku pokusu nebude existovat žádný pohyb. Najednou začne koule rytmicky „dýchat“. Částice v přímém sousedství koule jsou tlačeny ven, takže hustota kulovitého vodního nebo vzdušného či jiného obalu se zvýší nad normální hodnotu. Podobně při stahování se hustota zmenší. Tyto změny se šíří celým prostředím. <u>Částice, z nichž se prostředí skládá, vykonávají jen malá chvění, avšak celý pohyb je pohybem postupující vlny. Pohyb neprovádí sama hmota, pohyb je způsoben tím, že se hmotou šíří energie.</u>

Dva obecné fyzikální pojmy, důležité pro vystižení vln:
<u>rychlost šíření</u> - závisí na prostředí
<u>délka vlny</u> (λ) - př. vlny na vodě: vzdálenost vrcholů nejbližších vln u myšlené pulzující koule = vzdálenost mezi dvěma sousedními kulovitými obaly max. nebo min. hustoty (na vln. délku má vliv rychlost pulsace, je-li pulsace rychlejší, je λ kratší, pulsuje-li koule volněji, je λ delší).

$\lambda = v \cdot T = \dfrac{v}{f}$	T … perioda f … frekvence v … fázová rychlost

<u>Podélné vlnění</u> (longitudinální): částice kmitají ve směru šíření vlnění;
příklad: naše koule, zvukové vlny

<u>Příčné vlnění</u> (transverzální): částice kmitají kolmo ke směru šíření vlnění;
příklad: koule v rosolu otáčející se kolem osy rytmicky o malý úhel sem a tam, vlny na vodní hladině

Vlny sférické = kulové
Vlny rovinné – jde o model, kdy zdroj vlnění se nachází ve velké vzdálenosti od místa pozorovatele (poloměr kulové vlnoplochy je velmi velký, kulovou vlnu lze pak nahradit rovinnou vlnou)

Příklady:

1. Proč při bouřce vidíme dříve blesk?

- světlo se šíří ve vzduchu rychleji než zvuk

2. Proč vlny na vodní hladině neodnáší plovoucí předměty - pohybují se jen nahoru a dolu?

- plyne z vlastností mechanického vlnění popsaných výše

3. Určete rychlost vlnění, které má vlnovou délku 80 cm a je buzeno kmitáním o frekvenci 2 Hz.

Řešení:
$\lambda = 0{,}8$ m, $f = 2$ Hz, $v = ?$

$$v = f \cdot \lambda = 1{,}6\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$$

Rychlost vlnění je $1{,}6\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

4. Určete rychlost vlnění v mosazné tyči, jestliže při frekvenci 2,5 kHz vzniká vlnění o vlnové délce 1,36 m.

Řešení:
$f = 2{,}5.10^3$ Hz, $\lambda = 1{,}36$ m, $v = ?$

$$v = f \cdot \lambda = 3\,400\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$$

Rychlost vlnění v mosazné tyči je $3\,400\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

5. Časový signál v rozhlase je tvořen šesti zvukovými značkami o frekvenci 1 kHz, z nichž prvních pět má dobu trvání po 100 ms a šestá 500 ms. Určete vlnovou délku zvukového vlnění časového signálu a počet zvukových vln, které jsou při každé značce vysílány. Rychlost zvuku ve vzduchu je $v = 340\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

Řešení:
$f = 1$ kHz, $t_1 = 100$ ms, $t_2 = 500$ ms, $v = 340\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$, $\lambda = ?$, $n = ?$

$$\lambda = \frac{v}{f} = 0{,}34\,\mathrm{m} \qquad n = \frac{t_{1,2}}{T} \Rightarrow n_1 = 100,\ n_2 = 500$$

Vlnová délka zvukového vlnění je 0,34 m, počet vyslaných zvukových vln je 100 při prvních pěti značkách a 500 při poslední značce časového signálu.

6. Určete frekvenci ladičky, která je zdrojem zvukového vlnění o vlnové délce 67 cm. Rychlost zvuku ve vzduchu je $v = 340\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$.

Řešení:
$\lambda = 0{,}67$ m, $v = 340$ m$\cdot$s^{-1}, $f = ?$

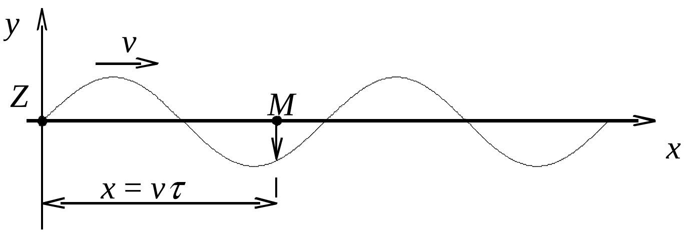
$$f = \frac{v}{\lambda} = 510 \text{ Hz}$$

Frekvence ladičky je 510 Hz.

Rovnice postupné vlny

Vlnění popíšeme vztahem, který umožňuje určit okamžitou výchylku bodu v každém místě v libovolném časovém okamžiku.

Vlnění je postupující kmitavý pohyb:
rovnice harm. kmit. pohybu: $y = y_m \sin \omega t$



Do bodu M dospěje vlnění od zdroje za čas τ,

$$\tau = \frac{x}{v}$$

$$y = y_m \sin \omega(t - \tau) = y_m \sin \omega\left(t - \frac{x}{v}\right)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}, \qquad vT = \lambda$$

$$\boxed{y = y_m \sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)}$$

$$2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \quad \ldots \quad \text{fáze vlnění}$$

V tomto případě jde o rovnici postupného vlnění, které se šíří homogenním prostředím ze zdroje, který kmitá harmonicky. Neuvažujeme ztráty mechanické energie do okolí, která se vlněním přenáší. V tomto případě je amplituda všech bodů stejná a vlnění je netlumené. Kdyby vlnění postupovalo v záporném směru osy x, bylo by ve výrazu pro fázi znaménko +.

Vlnění má dvě periodicity: v čase
v prostoru
- okamžitá výchylka bodu závisí nejen na čase, ale i na poloze bodu.

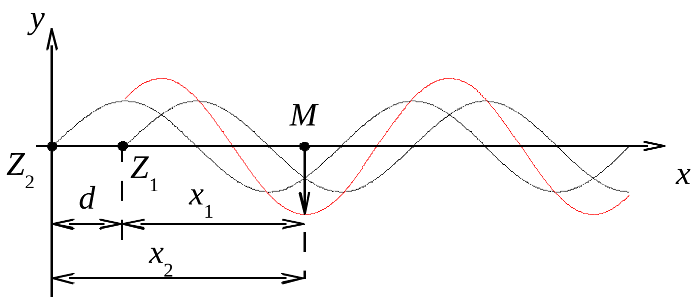
Interference vlnění

„Interference“: vzájemné pronikání, prolínání, střetání, křížení [viz slovník cizích slov]

Pružným prostředím se šíří dvě nebo více vlnění stejného druhu, šíří se navzájem nezávisle; tam, kde se překrývají dochází k zesílení nebo k zeslabení (interference vlnění) a obě vlnění pak postupují dál, jako by se vůbec nesetkaly (př. dva kameny na vodní hladinu).

Výsledný kmitavý pohyb hmotných bodů prostředí tam, kde se překrývají vlnění, je určen superpozicí kmitání vyvolaných vlněním.

Budeme zkoumat nejjednodušší případ:
Dvě vlnění postupují řadou bodů stejnou fázovou rychlostí, stejným směrem, mají stejnou vlnovou délku a amplitudu.



Ve vzdálenosti x od zdroje vlnění je v čase $t = 0$ s fáze vlnění $\varphi = 2\pi \frac{x}{\lambda}$

$$\varphi_1 = \frac{2\pi x_1}{\lambda} \qquad \varphi_2 = \frac{2\pi x_2}{\lambda}$$

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda}(x_2 - x_1) = \frac{2\pi}{\lambda} d$$

d … dráhový rozdíl … vzdálenost bodů, v nichž mají obě vlnění stejnou fázi
$\Delta\varphi$ … fázový rozdíl

$\Rightarrow \Delta\varphi \sim d$ … Je-li fázový rozdíl dvou interferujících vlnění konstantní, jsou obě vlnění koherentní.
[koherence = souvislost, spojitost; koherentní = souvislý, spojitý (viz slovník cizích slov)]

Interferenční maximum (zesílení)

$$d = 2k\frac{\lambda}{2}, \qquad k = 0, 1, 2, 3, \ldots$$

Dráhový rozdíl je roven sudému počtu půlvln (obě vlnění se stejnou fází).
(výsledná amplituda dána součtem $y_M = y_{M1} + y_{M2}$)

Interferenční minimum (zeslabení)

Dráhový rozdíl je roven lichému počtu půlvln (obě vlnění s opačnou fází) (výsledná amplituda dána rozdílem $y_M = |y_{M1} - y_{M2}|$)

Příklady:

1. Příčné vlnění s vlnovou délkou 5 cm postupuje řadou bodů. Zdroj vlnění kmitá s amplitudou výchylky 5 cm a frekvencí 2 Hz. Napište a) rovnici postupné vlny, b) rovnici kmitavého pohybu ve vzdálenosti 8 cm od zdroje vlnění.

Řešení:
$\lambda = 5$ cm, $y_M = 5$ cm, $f = 2$ Hz, $y(x,t) = ?$

a) $y = 5\sin 2\pi\left(\frac{t}{0,5} - \frac{x}{5}\right)$ cm

b) $y = 5\sin 2\pi\left(\frac{t}{0,5} - \frac{8}{5}\right)$ cm

2. Postupné mechanické vlnění je popsáno rovnicí $y = 0,1\sin 2\pi(5t - 0,3x)\,\mathrm{m}$. Určete amplitudu výchylky vlnění, vlnovou délku a fázovou rychlost vlnění.

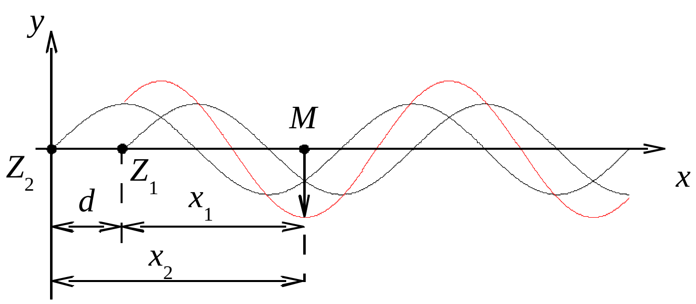
Řešení:
$y_M = 0,1\,\mathrm{m}$;

$\frac{1}{\lambda} = 0,3\ \mathrm{m}^{-1} \Rightarrow \lambda = 3,\overline{3}\,\mathrm{m}$;

$\frac{1}{T} = 5\ \mathrm{s}^{-1}, v = \frac{\lambda}{T} = 16,\overline{6}\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$

Amplituda výchylky vlnění je 0,1 m, vlnová délka je $3,\overline{3}$ m a fázová rychlost vlnění je $16,\overline{6}\,\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$.

3. Zdroje zvukového vlnění Z_1 a Z_2 jsou ve vzájemné vzdálenosti 0,5 m (viz obr). Oba zdroje kmitají se stejnou frekvencí 170 Hz a se stejnou počáteční fází. Rychlost zvukového vlnění je 340 $\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}^{-1}$. Určete fázový rozdíl vlnění v bodě M.



Řešení:
$d = 0{,}5$ m; $f = 170$ Hz; $v = 340\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

$$\triangle\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\cdot d \qquad \lambda = \frac{v}{f} \qquad \triangle\varphi = \frac{2\pi}{v}\cdot f\cdot d = \frac{\pi}{2}\,\mathrm{rad}$$

Fázový rozdíl vlnění v bodě M je $\frac{\pi}{2}$ rad.

4. Zdroj Z_2 v předchozí úloze posuneme doleva do takové vzdálenosti od zdroje Z_1, že vlnění v bodě M má amplitudu výchylky a) maximální, b) minimální. Určete vzájemnou vzdálenosti zdrojů vlnění v obou případech.

Řešení:

$$\varphi_2 - \varphi_1 = \frac{2\pi}{\lambda}(x_2 - x_1) = \frac{2\pi}{\lambda}d$$

a) maximum… $d = 2\frac{\lambda}{2}$, $\lambda = \frac{v}{f} = 2\,\mathrm{m}$

b) minimum… $d = \frac{\lambda}{2} = 1$ m

Vzdálenosti zdrojů jsou v jednotlivých případech 2 m a 1 m.

Odraz vlnění v řadě bodů

Vlnění je omezeno, dospěje na konec řady bodů
- pokus s hadicí - pevný konec: vrací se vrch
  - volný konec: vrací se důl

Na pevném konci nastává vlnění s opačnou fází (fáze se mění o π).
$(v_2 < v_1)$ (*)
Na volném konci nastává odraz vlnění se stejnou fází.
$(v_1 < v_2)$ (*)

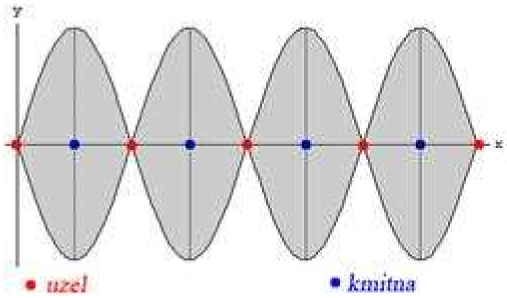
(*) Stejné efekty na rozhraní dvou prostředí
v_1 … rychlost v 1. prostředí, v_2 … rychlost v 2. prostředí

Stojaté vlnění

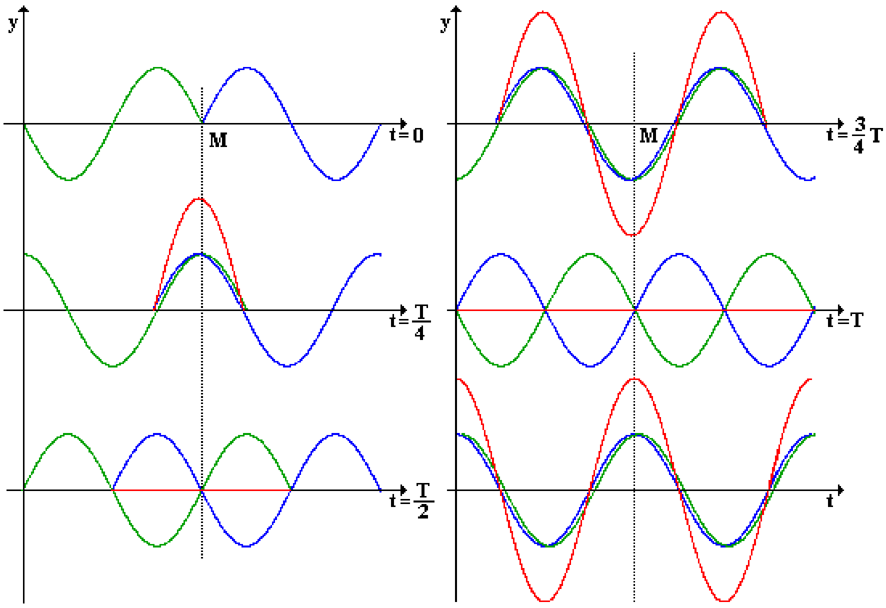
- odraz na pevném konci
- skládá se vlnění přímé a odražené

$\Rightarrow$ vzniká stojaté vlnění
kmitny $\times$ uzly

mezi kmitnami resp. uzly je vzdálenost $\frac{\lambda}{2}$ (mezi sousední kmitnou a uzlem $\frac{\lambda}{4}$):



Obrázek ukazující vznik stojatého vlnění v různém čase:
Modrá a zelená sinusovka reprezentují interferující vlnění, červená pak jejich složení.



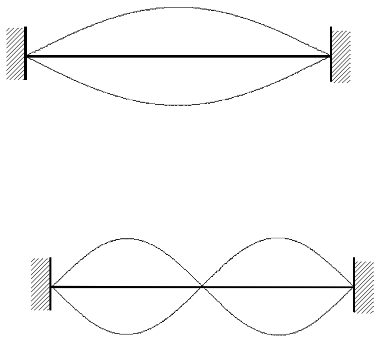
Postupné vlnění	**Stojaté vlnění**
Kmitají všechny body se stejnou y_M, ale různou fází	Nekmitají uzly, kmitají ostatní body se stejnou fází, ale různou y_M
Přenáší energii	Nepřenáší se energie

Chvění mechanických soustav

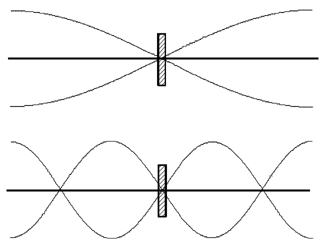
- struna, tyč, vzduchové sloupce
- prostředí ohraničeno z obou stran – stojaté vlnění = chvění
- na pevném konci UZEL
- na volném konci KMITNA

Např. na struně můžeme vybudit různé stojaté vlny při různém upevnění struny:

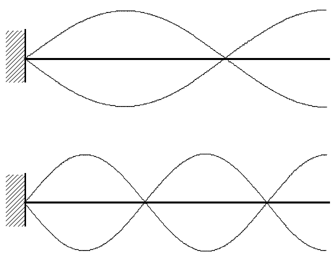
l – délka struny



$$\left.\begin{array}{l} l = \dfrac{\lambda}{2} \\[2em] l = \lambda \end{array}\right\} \quad l = k \cdot \dfrac{\lambda}{2} \qquad ①$$



$$\left.\begin{array}{l} l = 2 \cdot \dfrac{\lambda}{4} \\[2em] \dfrac{l}{2} = 3 \cdot \dfrac{\lambda}{4} \end{array}\right\} l = (2k-1)\dfrac{\lambda}{2} \qquad ②$$



$$\left.\begin{array}{l} l = 3 \cdot \dfrac{\lambda}{4} \\[2em] \lambda = 5 \cdot \dfrac{\lambda}{4} \end{array}\right\} l = (2k-1)\dfrac{\lambda}{4} \qquad ③$$

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

podmínky pro různé stojaté vlny na struně:

① $f = k \cdot \dfrac{v}{2l}$ $\quad k = 1, 2, \ldots$ $\qquad k = 1$ základní frekvence

② $f = (2k-1) \cdot \dfrac{v}{2l}$ $\quad k = 1, 2, \ldots$ $\qquad k = 2, 3, \ldots$ vyšší harmonické frekvence

③ $f = (2k-1) \cdot \dfrac{v}{4l}$ $\quad k = 1, 2, \ldots$

Na principu chvění pracují rezonátory (př. ozvučné desky).

Vlnění v izotropním prostředí

Izotropní prostředí: fázová rychlost ve všech směrech stejná (např. vodní hladina)
- prostředí má ve všech směrech stejné fyzikální vlastnosti

Vlnoplocha - je množina bodů, do nichž dospěje vlnění za čas t od zdroje
- je množina bodů, v nichž má vlnění v určitém časovém okamžiku stejnou fázi

Kulová vlnoplocha – množina bodů, kde má vlnění v určitém časovém okamžiku stejnou fázi, má tvar koule, popř. kružnice – např. vlnoplochy ve tvaru soustředných kružnic po vhození kamene do vody
Rovinná vlnoplocha – zdroj vlnění je rovinný, popř. zdroj je ve velké vzdálenosti od místa pozorovatele (kulové vlnoplochy mají velký poloměr a je možno je nahradit rovinnými vlnoplochami)

Směr šíření vlnění určuje kolmice k vlnoploše … paprsek

Huygensův princip

- při studiu vlnění je někdy potřeba určit tvar vlnoplochy v libovolném okamžiku, jestliže známe tvar vlnoplochy v okamžiku předcházejícím:

<u>Huygensův princip</u>: Každý bod vlnoplochy, do něhož dospělo vlnění v určitém časovém okamžiku, můžeme pokládat za zdroj elementárního vlnění, které se z něho šíří v elementárních vlnoplochách. Vlnoplocha v dalším časovém okamžiku je vnější obalová plocha všech elementárních vlnoploch.

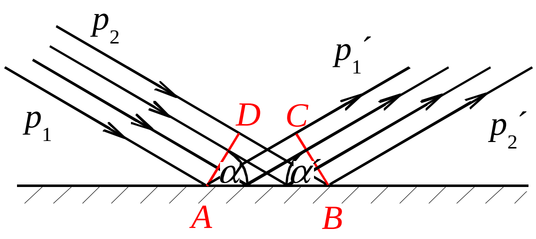
Podle H. principu můžeme sestrojit vlnoplochu, aniž známe zdroj vlnění.

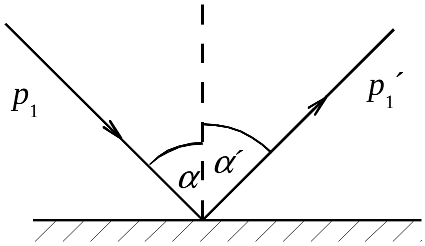
Odraz a lom vlnění

<u>Odraz vlnění</u>

Uvažujme část rovinné vlnoplochy mezi paprsky p_1 a p_2 dopadající na překážku pod úhlem α. Vlnění dospěje nejdřív do bodu A, který se stane zdrojem elementárního vlnění. Postupně se stávají zdroji vlnění také ostatní body překážky a v okamžiku, kdy vlnění dospělo do bodu B, má elementární vlnoplocha z bodu A poloměr $|AC| = v \cdot t$, to je současně vzdálenost $|DB|$, kterou vlnění prošlo po paprsku p_2.

Vlnoplocha odraženého vlnění CB je vnější obalovou plochou elementárních vlnoploch, které se šíří z bodů na úsečce AB, a je rovněž rovinná. S překážkou svírá úhel α'. Ze shodných trojúhelníků ABC a ABD plyne, že $\alpha = \alpha'$.





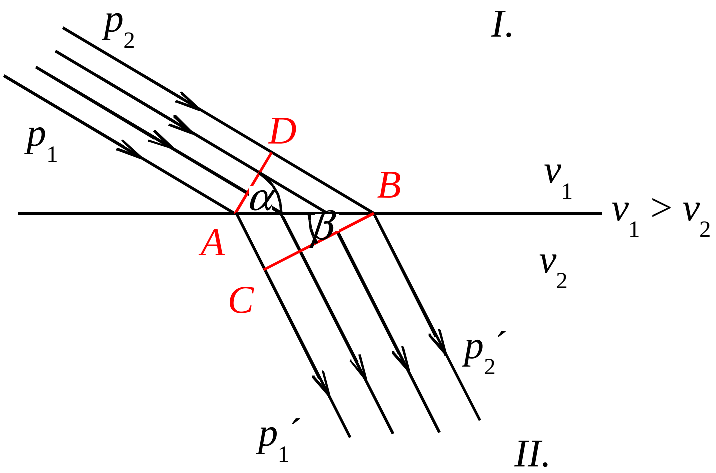
<u>Zákon odrazu</u>: úhel odrazu se rovná úhlu dopadu

<u>Rovina dopadu</u>: rovina daná dopadajícím paprskem a kolmicí na rozhraní

<u>Odražený paprsek leží v rovině dopadu.</u>

<u>Lom vlnění</u>

Vlnění dopadající na rozhraní dvou prostředí proniká do druhého prostředí.
Body úsečky *AB* se postupně stávají zdroji elementárního vlnění, které přechází z prostředí *I* do prostředí *II*, v němž má jinou fázovou rychlost. Jakmile vlnění dospěje do bodu *A* na rozhraní, stává se tento bod zdrojem elementárního vlnění v prostředí *II*. Za dobu τ, než vlnění v prostředí *I* dospěje z bodu *D* do bodu *B* ($|DB| = v_1 \cdot t$), vznikne v prostředí *II* elementární vlnoplocha o poloměru ($|AC| = v_2 \cdot t$). Z bodů na úsečce *AB* vycházejí další elementární vlnoplochy a jejich obalová plocha *CB* je rovinnou vlnoplochou lomeného vlnění v prostředí *II*. Dopadající a lomené paprsky jsou kolmé na vlnoplochy *AD* a *CB*.



Platí:

$$|DB| = |AB| \sin\alpha \qquad |DB| = v_1\tau$$

$$|AC| = |AB| \sin\beta \qquad |AC| = v_2\tau$$

$$\frac{|DB|}{|AC|} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} \qquad \boxed{\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n}$$

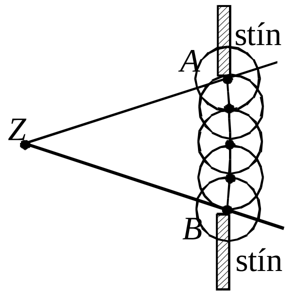
n … index lomu

<u>Zákon lomu</u>: Poměr sinů úhlů dopadu a lomu se rovná poměru fázových rychlostí. Lomený paprsek zůstává v rovině dopadu.

Ohyb vlnění, stín

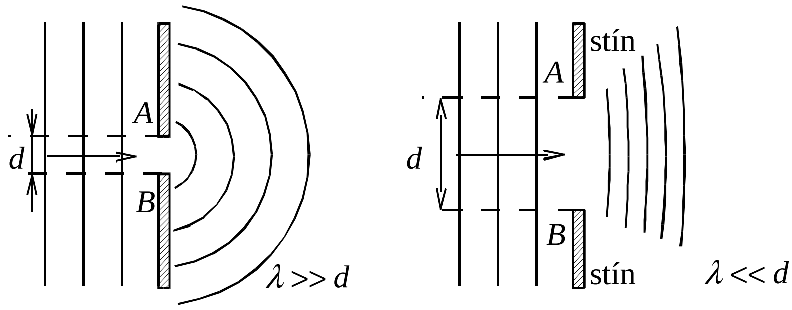
Umístíme vlnění do cesty překážku s otvorem

- velký otvor … vlnění se za překážkou šíří téměř přímočaře
- malý otvor … nastává ohyb vlnění – vlnění se šíří i za okraje přepážky podle H. principu



Elementární vlnění z krajních bodů otvoru A, B se šíří do tzv. geometrického stínu.

Ohybový jev výraznější čím d menší a λ větší.

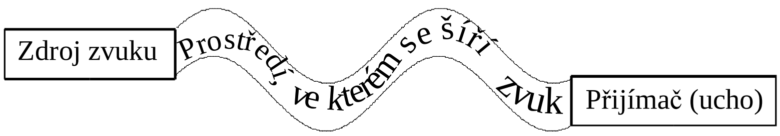


Zvuk a jeho vlastnosti

<u>Zvuk</u>: mechanické vlnění o frekvenci 16 Hz až 16 000 Hz

infrazvuk $f_i < 16$ Hz
ultrazvuk $f_u > 16\,000$ Hz

$f \rightarrow$
infrazvuk, zvuk, ultrazvuk



<u>Akustika</u> – část fyziky zkoumající zvuk
fyziologická akustika – zabývá se vznikem zvuku v hlasovém orgánu a vnímání zvuku uchem
hudební akustika – zkoumá zvuk z hlediska hudby

<u>Zdrojem zvuku je chvění pružných soustav</u>
- zvuk se šíří vzduchem, kapalinou i pevnou látkou
- prostředí zvuk zeslabuje (<u>absorpce zvuku</u>)

<u>Zvuky</u> - neperiodické: hluk (praskot, tlukot atd.)
- periodické: hudební zvuky (tóny)
samohlásky

<u>Tóny</u> - jednoduché (harmonický průběh)
složené (periodické, ale složité)

<u>Fyzikální veličiny charakterizující zvuk</u>:
- objektivní fyzikální veličiny (frekvence, intenzita zvuku)
- subjektivní (výška zvuku, barva zvuku, hlasitost)

<u>Základní tón</u>: komorní a …440 Hz

Hlasitost a intenzita zvuku

<u>Zvuková vlna</u>: - periodické stlačování a rozpínání vzduchu, vody, kovu (obecně pružného prostředí)
- změny tlaku vzduchu, oscilace kolem hodnoty atmosf. tlaku = zvuky o různé hlasitosti

<u>Práh slyšení</u>: nejnižší tlakové změny vnímatelné uchem
$\Delta p \doteq 10^{-5}$ Pa

Největší tlakové změny přípustné pro ucho :

$\Delta p \doteq 10^2$ Pa

- při překročení této hranice vzniká v uchu bolestivý pocit a mluvíme o tzv. prahu bolesti

Intenzita zvuku: $I = \frac{P}{S}$ $[I] = \mathrm{W \cdot m^{-2}}$

P - výkon zvukového vlnění
S - plocha, kterou vlnění prochází

Největší citlivost ucha je při frekvencích 700 Hz – 6 kHz

Při 1 kHz: práh slyšení $I_0 = 10^{-12}\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$
práh bolesti $I = 1\ \mathrm{W \cdot m^{-2}}$ celkový rozsah intenzit je 10^{12}

Úroveň intenzity: $\log \frac{I}{I_0}$ jednotky: bel B

decibel dB

Práh slyšení: $\log \frac{I}{I_0} = \log 1 = 0\,\mathrm{B} = 0\,\mathrm{dB}$

Práh bolesti: $\log \frac{I}{I_0} = \log 10^{12} = 12\,\mathrm{B} = 120\,\mathrm{dB}$

Příklady:
Práh slyšení 0 dB
tikot náramkových hodinek u ucha 10 dB
šepot 30 dB
hlasitý hovor na 1 m 50 dB
symfonický orchestr na 3-5m 80 dB
startující letadlo na 10 m 110 dB

Rychlost zvuku

První experimentální hodnoty:
17. století: pozorování výstřelu děla, měření času mezi zábleskem a zvukem

Dnes: při t = 0°C a hustotě vzduchu $\rho_0 = 1{,}293\ \mathrm{kg \cdot m^{-3}}$
$v = 331{,}82\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
Při běžných teplotách $v = 340\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

Čím hustší prostředí, tím větší rychlost zvuku
ve vodě 8°C … $v = 1\,435\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$
ve vodě 12°C … $v = 4\,980\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$

Ozvěna: odraz od rozměrných překážek, ucho rozliší dva zvuky s $\Delta t = 0{,}1$ s … $\Rightarrow s = 17$ m
překážka blíže … dozvuk

Ultrazvuk a infrazvuk

Ultrazvuk: $f > 16$ kHz
uchem nevnímáme
λ malá $\quad \lambda = vT = \frac{v}{f} \doteq \frac{340}{16\,000} = 21{,}25 \cdot 10^{-3}$ m
šíří se přímočaře
malá absorpce $\Rightarrow$ při odrazu platí zákon odrazu
využití: - měření hloubek moře
(doba $\vartriangle t$ mezi vysláním a přijetím signálu)

$$h = \frac{v \cdot \vartriangle t}{2}, \quad v \ \ldots \text{ rychlost zvuku ve vodě}$$

- ultrazvuková defektoskopie (vady materiálů)
- čištění součástek

Infrazvuk: $f < 16$ Hz
- dobře se šíří ve vodě
- podle infrazvuku lze zjistit „hlas moře“ (předpověď příchodu vlnobití)
- infrazvuk dobře vnímají mořští živočichové
- f infrazvuku… blízká tlukotu srdce (kdybychom ho vnímali (infrazvuk) vnímali bychom tep)

Dopplerův jev

- Dopplerův jev popisuje změnu frekvence a vlnové délky přijímaného oproti vysílanému signálu, způsobenou nenulovou vzájemnou rychlostí zdroje a pozorovatele.

Zdroj se vzdaluje:

$P \circ$ $\qquad\qquad\qquad$ $Z \quad v$
$\qquad\qquad\qquad\qquad$ $* \quad \rightarrow$

Vlnění musí urazit dráhu delší o posunutí zdroje v čase T (periody)

$$T' = T + \frac{vT}{c}$$

$$T' = T\left(1 + \frac{v}{c}\right) = T\left(\frac{c+v}{c}\right)$$

$$\frac{T'}{T} = \frac{c+v}{c} \qquad \boxed{\frac{f'}{f} = \frac{c}{c+v}}$$

Zdroj se přibližuje:

$$\boxed{\frac{f'}{f} = \frac{c}{c-v}}$$

<u>Pozorovatel se vzdaluje</u>:

ω $P \circ$ Z

$\leftarrow$ $*$

Vlnění musí urazit dráhu delší o posunutí zdroje v čase $T\,'$(prodloužení periody)

$$T' = T + \frac{T'\omega}{c}$$

$$\frac{T'}{T} = \frac{c}{c-\omega}$$

$$\boxed{\frac{f'}{f} = \frac{c-\omega}{c}}$$

<u>Pozorovatel se přibližuje</u>:

$$\boxed{\frac{f'}{f} = \frac{c+\omega}{c}}$$

obecně:

$$f' = f\,\frac{c \mp w}{c \pm v}$$

P vzdaluje $-$, přibližuje $+$

Z vzdaluje $+$, přibližuje $-$

Příklady:

1. Tón píšťaly lokomotivy, která se pohybuje rychlostí o velikosti 20 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$, má frekvenci 576 Hz. Jakou absolutní výšku má tón, který slyší pozorovatel stojící při trati?

Řešení:

<u>f = 576 Hz, c = 340 m.s^{-1}, f'=?</u>

lokomotiva se přibližuje:

$$f' = f \cdot \frac{c}{c-v} = 612\ \text{Hz}$$

lokomotiva s vzdaluje:

$$f' = f \cdot \frac{c}{c+v} = 544\ \text{Hz}$$

Při přibližování lokomotivy má tón píšťaly výšku 612 Hz, při vzdalování 544 Hz.

2. Zdroj zvuku vysílá tón o absolutní výšce 500 Hz a pohybuje se směrem k pozorovateli rychlostí o velikosti 5 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Zvuk se šíří rychlostí o velikosti 340 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$. Jak velkou rychlostí se pohybuje pozorovatel, který slyší tón o absolutní výšce 522 Hz?

Řešení:
<u>$f = 500$ Hz, $v = 5$ m.s^{-1} , $f' = 522$ Hz, $w = ?$</u>

$$f' = f\frac{c \mp w}{c \pm v}$$

$$c \mp w = \frac{f'(c - v)}{f} = 349{,}7\ \mathrm{m \cdot s^{-1}}$$

$\Rightarrow$ Pozorovatel se pohybuje rychlostí 9,7 $\mathrm{m \cdot s^{-1}}$ směrem ke zdroji.

Souhrn

<u>Základní vztahy pro vlnění</u>:

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

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

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

<u>Základní rovnice vlnění</u>:

$$y = y_m \sin \omega (t - \tau)$$

$$y = y_m \sin \omega \left(t - \frac{x}{v}\right)$$

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

<u>Fáze</u>:

$$\varphi = 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$$

v bodě x v čase $t = 0$ s

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

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

<u>Interference</u>:

Max. $d = 2k\dfrac{\lambda}{2}$

Min. $d = (2k + 1)\dfrac{\lambda}{2}$

Struna $l = k\dfrac{\lambda}{2}$ $f = k\dfrac{v}{2l}$

Tyč uprostřed $l = (2k-1)\dfrac{\lambda}{2}$ $f = (2k-1)\dfrac{v}{2l}$

Tyč na kraji $l = (2k-1)\dfrac{\lambda}{4}$ $f = (2k-1)\dfrac{v}{4l}$