

Mechanické kmitání

Harmonický pohyb

Harmonický pohyb je periodický pohyb, při kterém těleso pravidelně přechází z jedné krajní polohy přes rovnovážnou polohu do druhé krajní polohy, přičemž časový průběh výchylky $y(t)$ z rovnovážné polohy je vyjádřen vztahem

$$y(t) = A \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$$

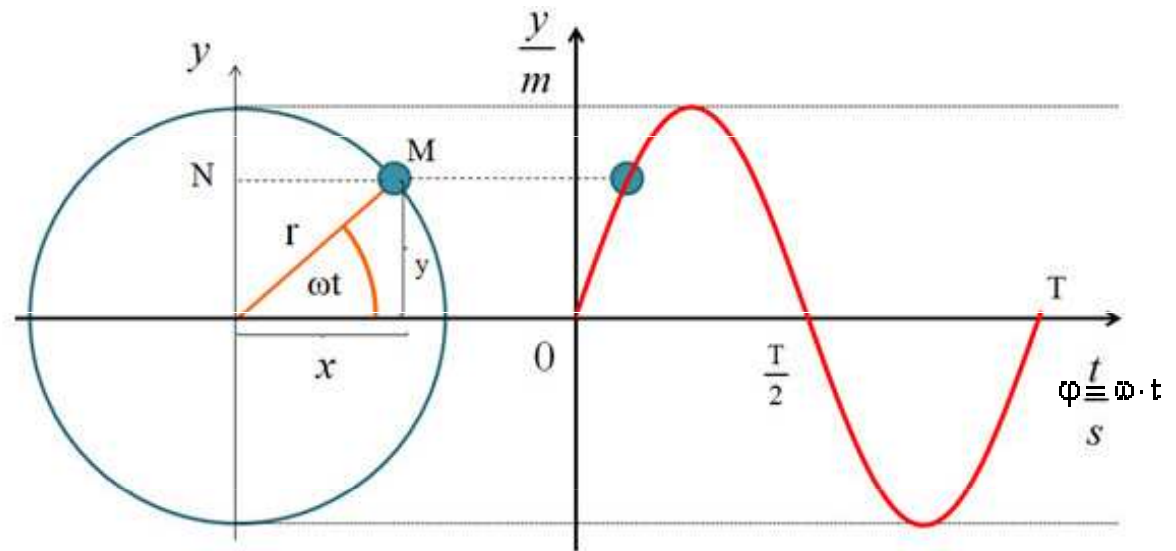
kde A je amplituda výchylky,

ω je úhlová frekvence

$\varphi(t) = \omega \cdot t + \varphi_0$ je fáze

φ_0 je počáteční fáze harmonicky proměnné veličiny.

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

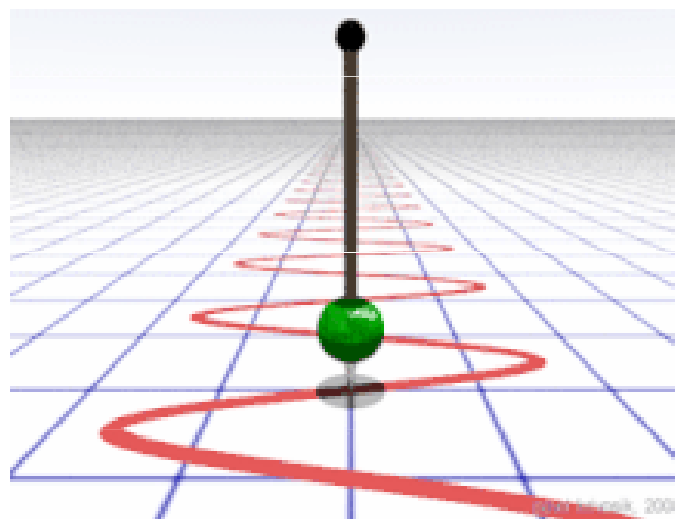
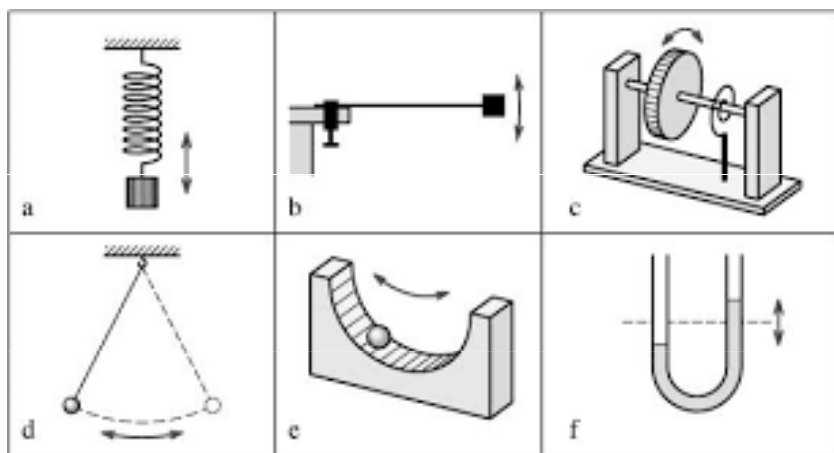


Při harmonickém pohybu je zrychlení úměrné výchylce z rovnovážné polohy ($y = 0$) a má směr proti směru výchylky. Největší výchylka je pro sinus rovno jedné, tj. $y = A$, a nazývá se **amplituda** (rozkmit). Převratná hodnota **doby kmitu** (T) se nazývá **kmitočet**.

Kmitání (oscilace) a oscilátor

Kmitání (oscilace) je změna (zpravidla v čase) nějaké veličiny, vykazující opakování nebo tendenci k němu.

Oscilátor je systém nebo zařízení, schopné **kmitavého pohybu**, při němž se hodnoty určitých parametrů (poloha, rychlost, napětí atd.) periodicky opakují. Oscilátory mohou být mechanické, elektrické aj. a dělí se na **harmonické** (kyvadlo, závaží na pružině), kde je průběh kmitu charakterizován sinusoidou, resp. **relaxační** s nesouměrným tvarem kmitů a další.



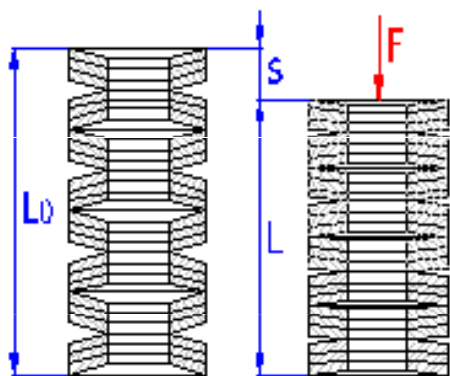
Příčinou kmitání **mechanického oscilátoru** je buď síla pružnosti, nebo tíhová síla. Ze znalosti zrychlení harmonického kmitavého pohybu ($a = -\omega^2 \cdot y$) a 2. Newtonova zákona ($F = m \cdot a$) můžeme obecně vyjádřit velikost síly, která způsobuje harmonické kmitání:

$$F = -m \omega^2 y$$

Pružina

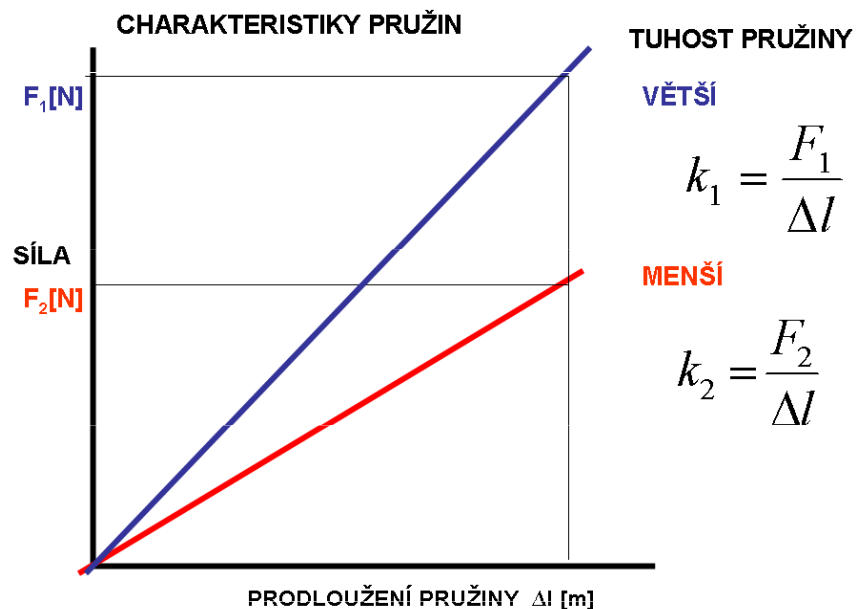
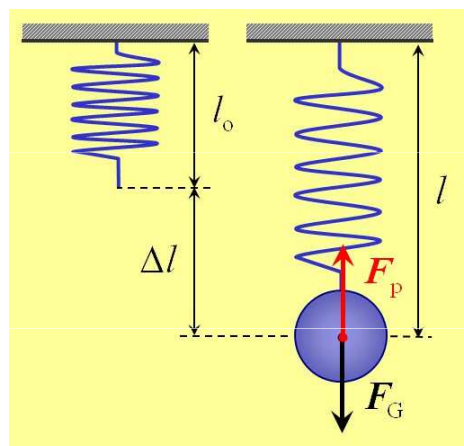
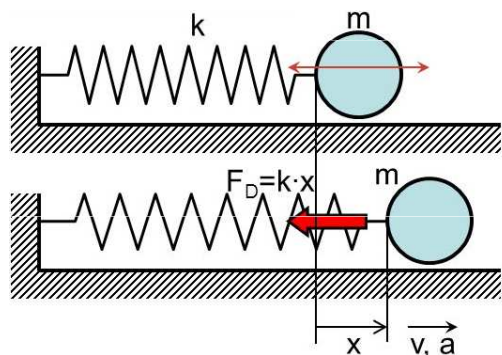
Pružina umožňuje v jednom nebo i více směrech elastickou deformaci (působením síly se deformuje, ale když síla přestane působit, vrací se do původního tvaru). Využívá se k pružnému spojení jiných součástí tak, aby se rázy a kmitání neodpružené součásti (například nápravy) nepřenášely na část odpruženou (například podvozek).

Pružina obvykle působí **silou** závislou na velikosti její výchylky z klidové polohy a ve směru proti této výchylce. Podle **Hookova zákona**



$$F = -k \cdot x$$

k je tuhost pružiny



Frekvence a doba kmitu pružiny

$$-k \cdot y = -m \omega^2 y \quad \omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$
$$\omega^2 = \frac{k}{m}$$

Energie mechanického oscilátoru

Pro **potenciální energii** stlačené nebo natažené hookovské pružiny platí

$$V(x) - V(x_0) = \int_{x_0}^x ky \, dy = \frac{1}{2}kx^2 - \frac{1}{2}kx_0^2,$$

$$E_p = W = \frac{1}{2}F \cdot x$$

$$E_p = \frac{1}{2}ky^2,$$

V libovolném okamžiku je E_p

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot y^2 = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 \cdot \sin^2(\omega \cdot t + \varphi)$$

V **rovnovážné poloze** je $y = 0$ a tudíž

$$E_p = 0$$

V **maximální výchylce** $|y| = A$

$$E_p = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2$$

kde k je tuhost pružiny a y je výchylka z rovnovážné polohy pružiny.

Kinetická energie

V libovolném okamžiku je E_k

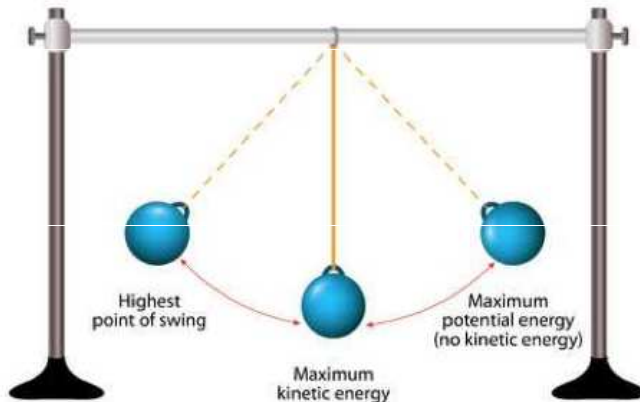
$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot (k/\omega^2) \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot k \cdot y^2 = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 \cdot \cos^2(\omega \cdot t + \varphi)$$

V rovnovážné poloze je $y = 0$ a tudíž

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2$$

V maximální výchylce $|y| = A$

$$E_k = 0$$



Celková energie

V libovolném okamžiku je E

$$E = E_p + E_k = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2 \cdot (\sin^2(\omega \cdot t + \varphi) + \cos^2(\omega \cdot t + \varphi))$$

$$E = E_p + E_k = \frac{1}{2} \cdot k \cdot A^2$$

Energy in Simple Harmonic Oscillator

A spring has Elastic Potential Energy:

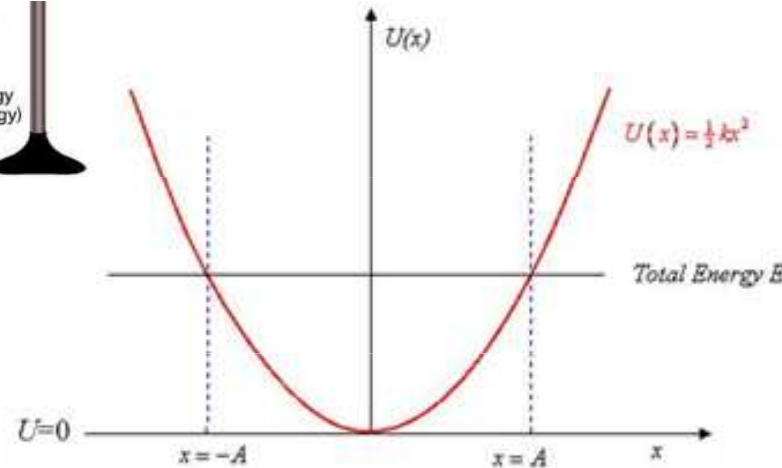
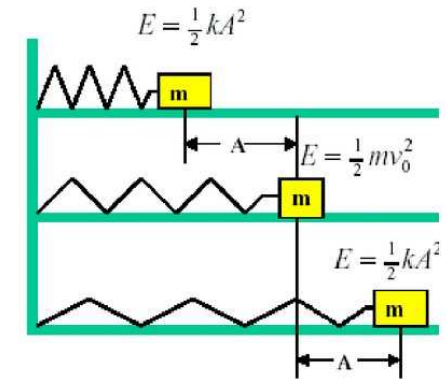
$$PE = \frac{1}{2} kx^2$$

Kinetic Energy:

$$KE = \frac{1}{2} mv^2$$

Total Energy:

$$E = \frac{1}{2} kx^2 + \frac{1}{2} mv^2$$



Potential Energy $U(x)$ for a Simple Harmonic Oscillator.

For **total** energy E , the oscillator swings back and forth between $x = -A$ and $x = +A$.

- The oscillator has total energy equal to kinetic energy + potential energy.
- when the oscillator is at A , it is momentarily at rest, so has no kinetic energy

Příklad

Jak se změní perioda harmonického kmitavého pohybu, jestliže ke pružině namísto měděného válečku ($\rho_1 = 8930 \text{ kg.m}^{-3}$) připevníme hliníkový váleček ($\rho_2 = 2700 \text{ kg.m}^{-3}$) se stejným objemem?

$$T_0 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

$$T_1 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{\rho_1 V}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{8930 \text{ kg.m}^{-3} V}{k}}$$

$$T_2 = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{\rho_2 V}{k}} = 2\pi\sqrt{\frac{2700 \text{ kg.m}^{-3} V}{k}}$$

$$\frac{T_2}{T_1} = 0,55$$

$$T_2(\text{Al}) = 0,55T_1(\text{Cu})$$

$$\frac{T_2}{T_1} = \frac{2\pi\sqrt{\frac{2700 \text{ kg.m}^{-3} V}{k}}}{2\pi\sqrt{\frac{8930 \text{ kg.m}^{-3} V}{k}}} = \sqrt{\frac{2700}{8930}} = \sqrt{0,30235} = 0,55$$

Příklad

Jakou práci vykonáme, stlačíme-li pružinu o 20 cm, je-li její tuhost 30 N.cm^{-1} ?

$$k = 30 \text{ N.cm}^{-1}$$

$$y = 20 \text{ cm} = 0,2 \text{ m}$$

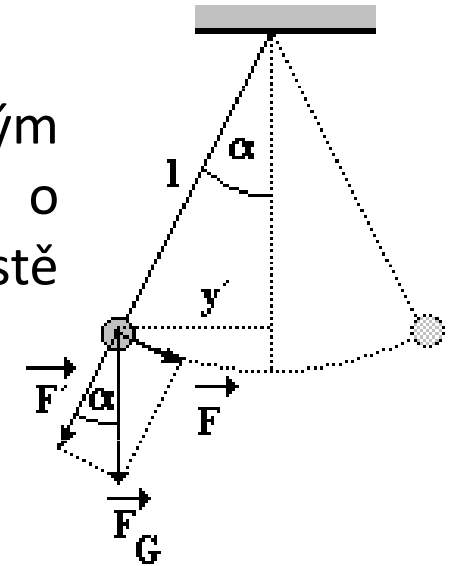
$$E_p = \frac{1}{2}ky^2,$$

$$W = \frac{1}{2}.k.y^2 = 0,5.30.20.0,2 = \underline{60 \text{ J}}$$

Kyvadlo

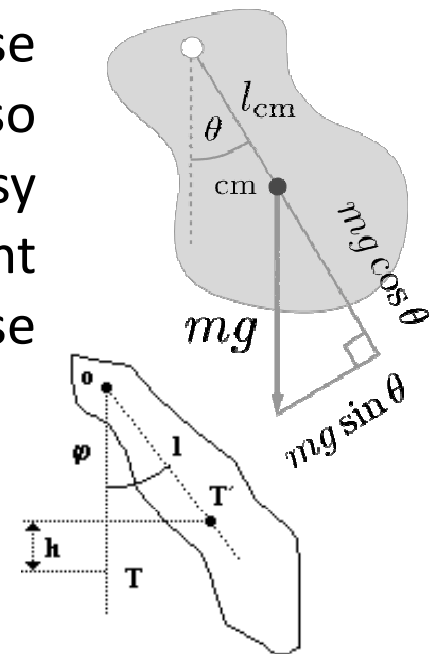
Kyvadlo = každé zařízení v tíhovém poli Země, které vykonává kývavý pohyb (opakované pohyby sem a tam).

Matematické kyvadlo. Kývající těleso se nahrazuje hmotným bodem o hmotnosti m , který se kýve na nehmotném závěsu o konstantní délce l , úhel vychýlení $\alpha < 5^\circ$. Zanedbává se tření v místě závěsu a odpor vzduchu.



$$-mg \frac{y}{l} = -m\omega^2 y \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{g}{l}} \quad T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \quad f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

Fyzikální kyvadlo. Kývající se těleso se nepovažuje za hmotný bod, nezanedbává se hmotnost závěsu (tyče). Pohybová energie se skládá z kinetické energie posuvného a rotačního pohybu: těleso se v tíhovém poli otáčí se kolem pevné vodorovné osy neprocházející jeho hmotným středem, uplatňuje se moment setrvačnosti kývajícího se tělesa. Potenciální energie kyvadla se mění v kinetickou energii rotačního pohybu.



$$\omega = \sqrt{\frac{mgl}{J + ml^2}} \quad f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{mgh}{I}}$$

Kyvadlové hodiny

Metronomy



Příklad

Jak se změní doba kmitu matematického kyvadla, když jeho délku zkrátíme o 20 % a hmotnost snížíme na polovinu?

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

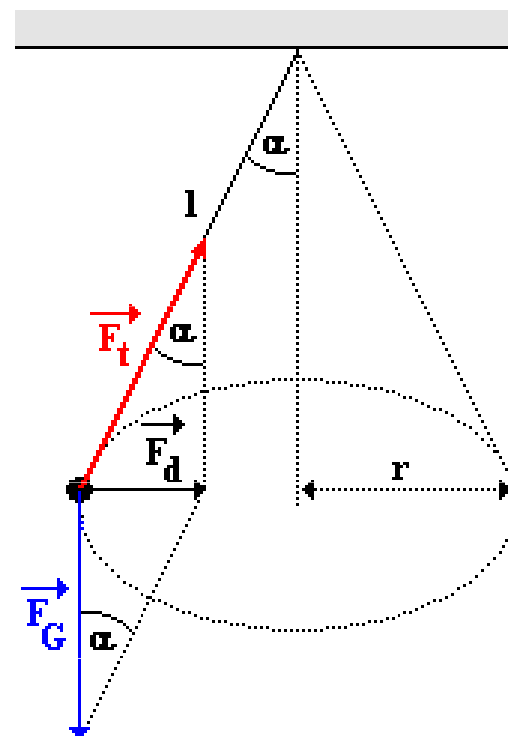
Doba kmitu matematického kyvadla na jeho hmotnosti nezávisí

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}}{2\pi \sqrt{\frac{4l}{5g}}} = \frac{\sqrt{\frac{l}{g}}}{\sqrt{\frac{4l}{5g}}} = \frac{\sqrt{\frac{l}{g}}}{\sqrt{5g}} = \sqrt{\frac{\frac{l}{g}}{5g}} = \sqrt{\frac{5gl}{4gl}} = \sqrt{\frac{5}{4}} = \underline{\underline{\frac{1}{2}\sqrt{5}}}$$

Kónické kyvadlo = kyvadlo, kterému je udělena taková rychlost, aby závěs opisoval plášť rotačního kužele (kónusu). Hmotný bod se pohybuje po kružnici, takže na něj působí dostředivá síla, kterou lze rozložit na sílu tíhovou a tahovou sílu závěsu.



$$\omega = \sqrt{\frac{g}{l \cos \alpha}}$$



Ruské kuželky



Tetherball

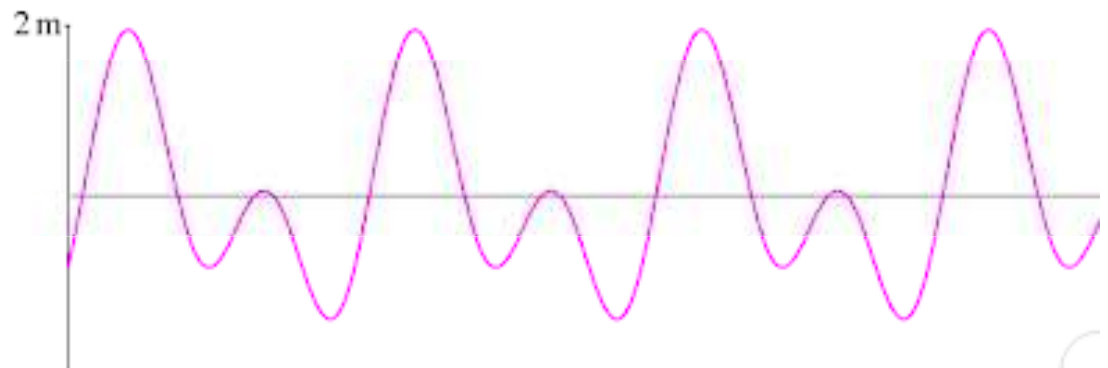
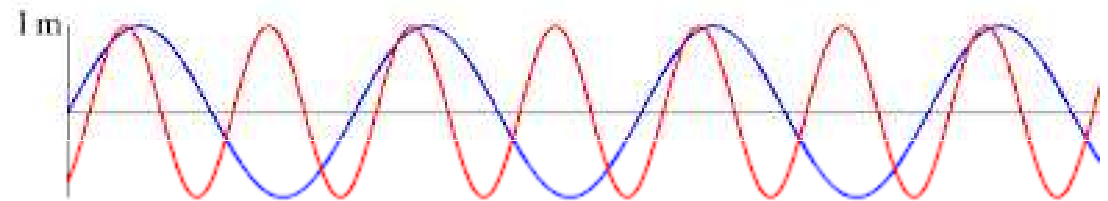
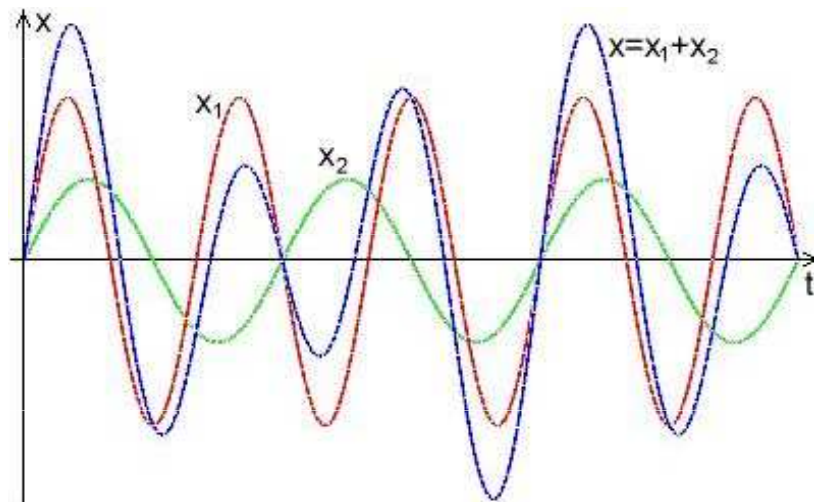
Skládání rovnoběžných (stejnoseměrných) harmonických kmitů

Pro **lineární kmitání** platí, že probíhá-li současně několik kmitavých dějů (např. pokud hmotný bod koná několik kmitavých pohybů současně), je výsledný kmitavý pohyb určen součtem (obecně vektorovým) jednotlivých kmitavých dějů. Tato skutečnost je v souladu s **principem superpozice**. Pro **nelineární kmitání** nemusí být výsledné kmitání součtem jednotlivých kmitání, z nichž je složeno.

$$x_1 = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$$

$$x_2 = A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2)$$

$$x = x_1 + x_2$$



výsledné složené kmitání není harmonické

Rovnoběžné harmonické kmity se stejnou úhlovou frekvencí

Složení dvou harmonických kmitů se stejnou úhlovou frekvencí ω , tzv. **izochronních kmitů**

$$x_1 = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1)$$

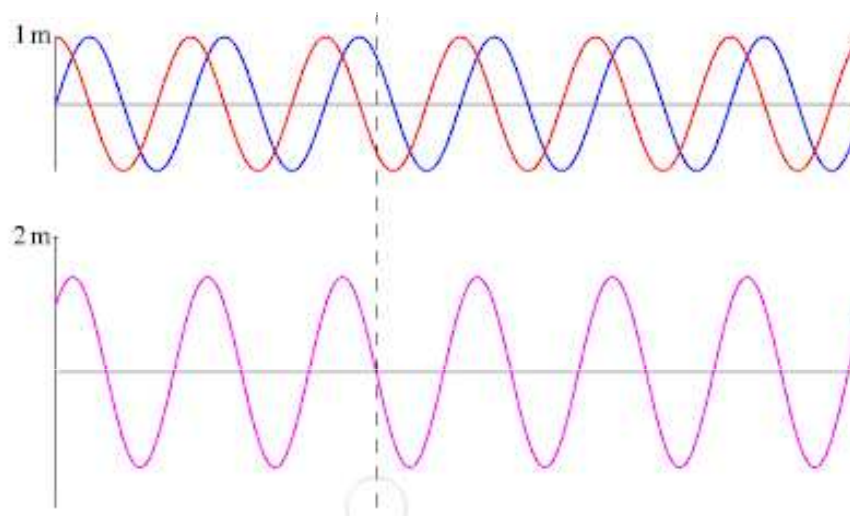
$$x_2 = A_2 \sin(\omega t + \varphi_2)$$

$$x = x_1 + x_2 = A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(\omega t + \varphi_2) = A \sin(\omega t + \varphi)$$

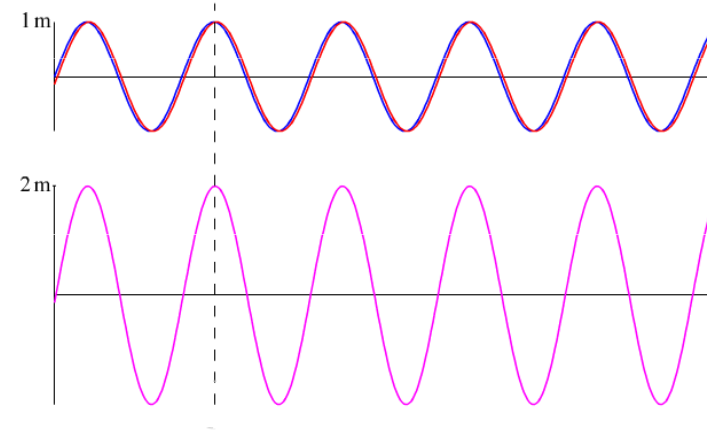
Výsledná amplituda A: $A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(\varphi_2 - \varphi_1)$

Fázový posun φ : $\operatorname{tg} \varphi = \frac{A_1 \sin \varphi_1 + A_2 \sin \varphi_2}{A_1 \cos \varphi_1 + A_2 \cos \varphi_2}$

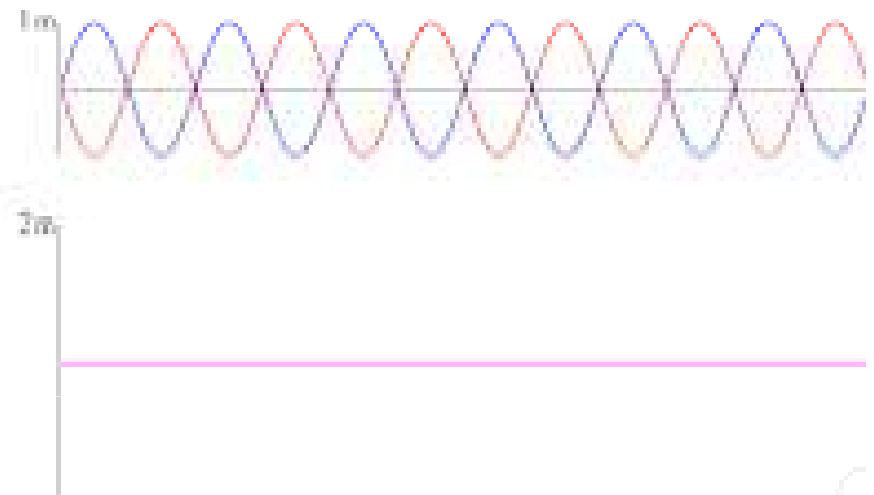
Fázový posun představuje vzájemné posunutí fází dvou kmitajících složek jediného kmitavého pohybu.



Je-li rozdíl počátečních fází dvou kmitů $\varphi_2 - \varphi_1 = 2.k.\pi$, kde k je celé číslo, mají oba skládané kmity **stejnou fází**. V takovém případě lze položit $\varphi = \varphi_1 = \varphi_2$ a amplituda je dána jako $A = A_1 + A_2$. Při vektorovém znázornění leží oba kmity na stejné přímce a mají stejný směr.



Při skládání kmitů s **opačnými fázemi** lze počáteční fáze zapsat jako $\varphi_1 = \varphi$, $\varphi_2 = \varphi + \pi$. Amplituda kmitu je rovna $A = A_2 - A_1$. Při vektorovém znázornění leží vektory A_1 a A_2 na stejné přímce, ale mají opačný směr. Je-li $A_1 = A_2$, je výsledná amplituda nulová ($A = 0$), tzn. oba kmity se navzájem vyruší.



Rovnoběžné harmonické kmity s blízkými úhlovými frekvencemi

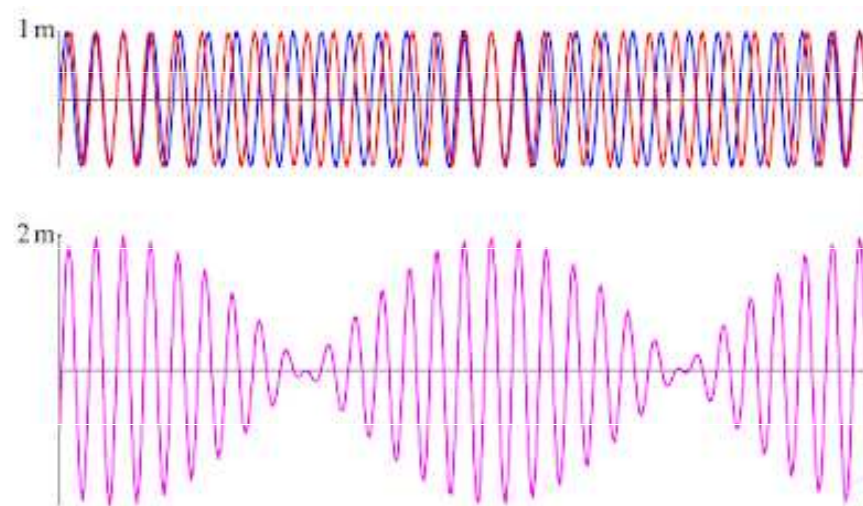
Skládání dvou rovnoběžných harmonických kmitů, které mají různé, ale blízké frekvence, amplitudy obou kmitů jsou stejné ($A_0 = A_1 = A_2$), a fázový posun je nulový ($\varphi = \varphi_1 = \varphi_2$). Výsledný kmitavý pohyb, který sestává z kmitů

$$x_1 = A_0 \sin \omega_1 t$$

$$x_2 = A_0 \sin \omega_2 t$$

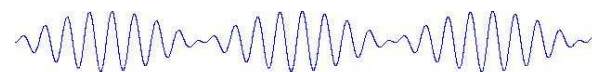
$$x = x_1 + x_2 = A_0 (\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t)$$

$$x = 2A_0 \cos\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2}t\right) \sin\left(\frac{\omega_1 + \omega_2}{2}t\right)$$



Pokud se úhlové kmitočty ω_1 a ω_2 příliš neliší, pak platí $\omega_2 - \omega_1 \ll \omega_1 + \omega_2$. To znamená, že kosinus, v němž vystupuje $\omega_2 - \omega_1$, se mění mnohem pomaleji než sinus, v němž vystupuje výraz $\omega_1 + \omega_2$. To umožňuje považovat předchozí vztah za kmitání s úhlovou frekvencí $\omega = (\omega_1 + \omega_2)/2 \approx \omega_1 \approx \omega_2$ s pomalu se měnící amplitudou

$$A(t) = 2A_0 \cos\left(\frac{\omega_2 - \omega_1}{2}t\right)$$



Periodické kolísání amplitudy se projevuje tzv. **rázy (záznějemi)**.

Spřažená kyvadla (vázané oscilátory)

dvě stejná kyvadla spojená pružinou nebo vláknem se závažím

O ... **oscilátor** (zdroj nuceného kmitání)

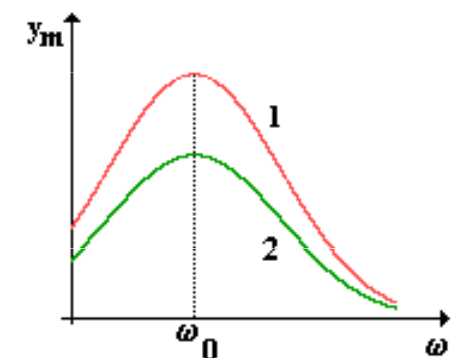
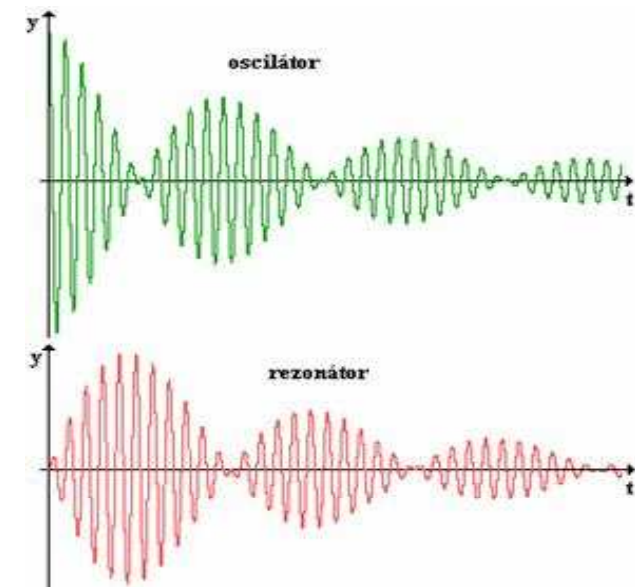
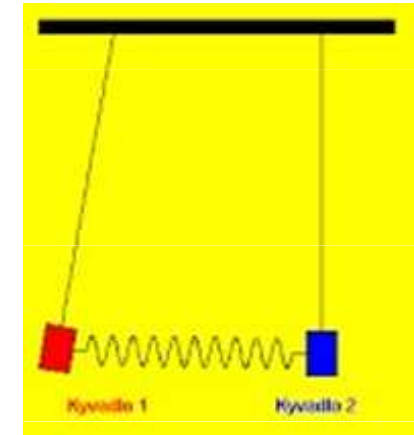
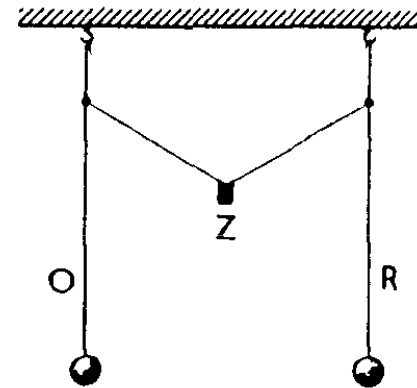
R ... **rezonátor** (působením zdroje se nucené rozkmitá)

Z ... **závaží + vlákno = VAZBA** (zprostředkovává přenos energie mezi oscilátorem a rezonátorem)

Vazba může být

volná: pomalé přenášení energie z oscilátoru na rezonátor, amplituda nucených kmitů je malá.

těsná: rychlé přenášení energie z oscilátoru na rezonátor, amplituda nucených kmitů je velká.



Skládání kolmých harmonických kmitů

Vzájemně **kolmé harmonické kmity** nelze skládat algebraickým součtem výchylek, ale je nutné je skládat vektorově.

$$x = A_1 \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$$

$$y = A_2 \sin(\omega_2 t + \varphi_2)$$

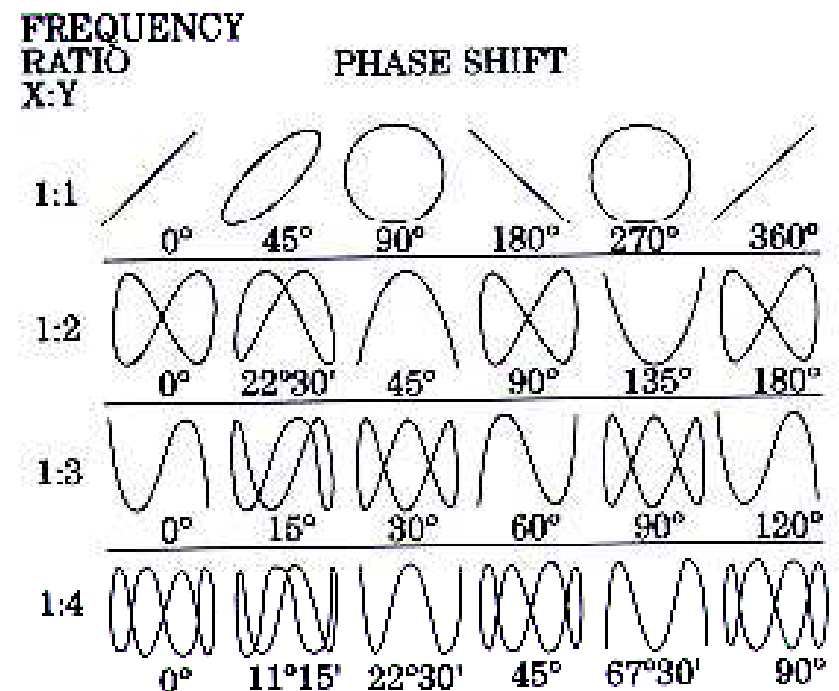
Tyto kmity leží v rovině dané osami x a y, výsledné kmity budou také ležet v této rovině.

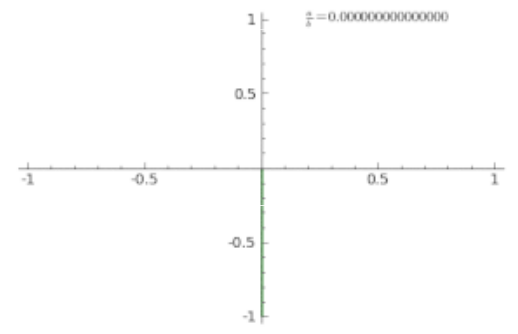
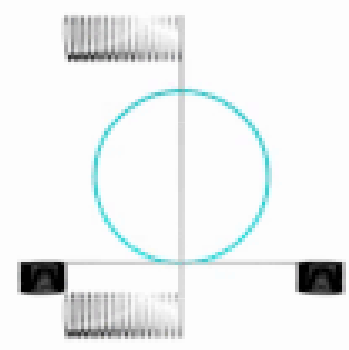
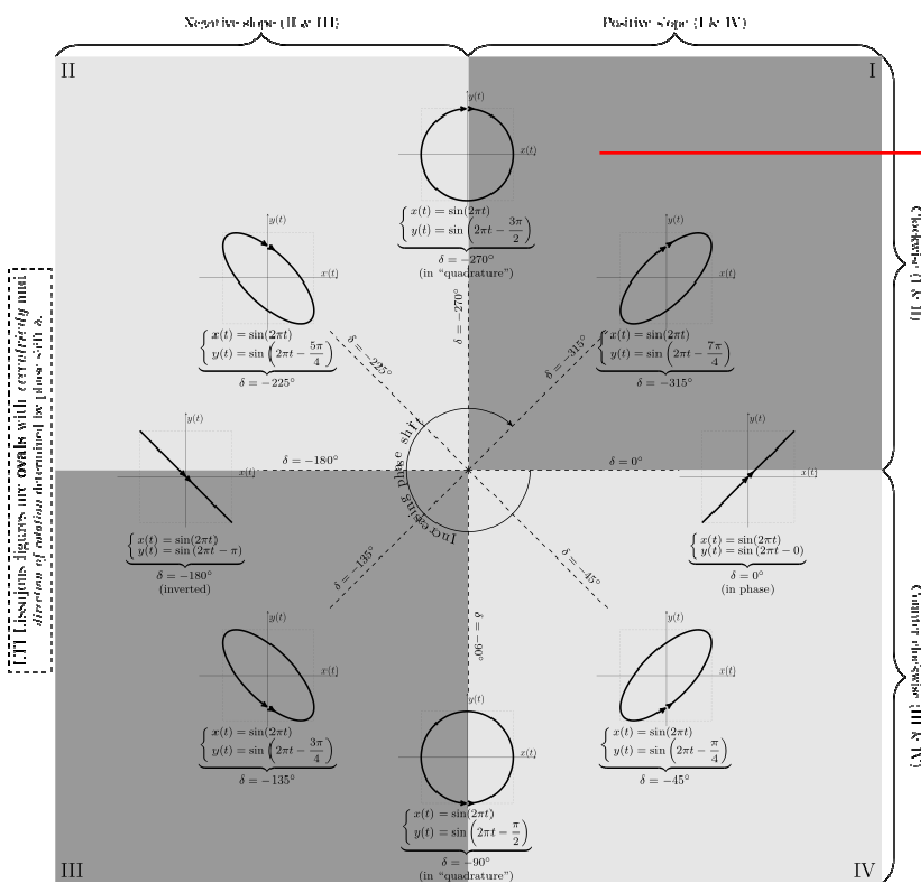
Obecně je výsledkem skládání dvou harmonických kmitů o stejné frekvenci pohyb po **elipse**, která ve zvláštních případech přechází v kružnici nebo úsečku.

Výsledný pohyb při skládání dvou kolmých harmonických kmitů různých frekvencí, amplitud a počátečních fází probíhá jako periodický pohyb po křivkách nazývaných **Lissajousovy obrazce** (křivky).

Animace:

<http://gerdbreitenbach.de/lissajous/lissajous.html>

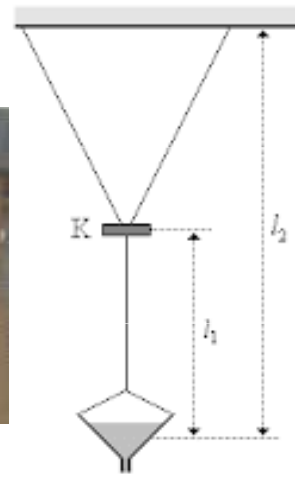




Blackburnovo (pískové) kyvadlo slouží ke skládání dvou navzájem kolmých kmitavých pohybů. Jedná se vlastně o dvě matematická kyvadla s délkami závěsů l_1 a l_2 .

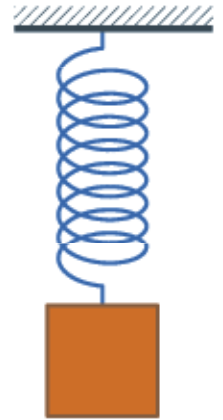
Kyvadlo (nádobka s pískem) bude opisovat *Lissajousovy obrazce*, pokud bude následující rovnice vyjádřena podílem dvou celých čísel.

$$\frac{T_1}{T_2} = \sqrt{\frac{l_1}{l_2}}$$



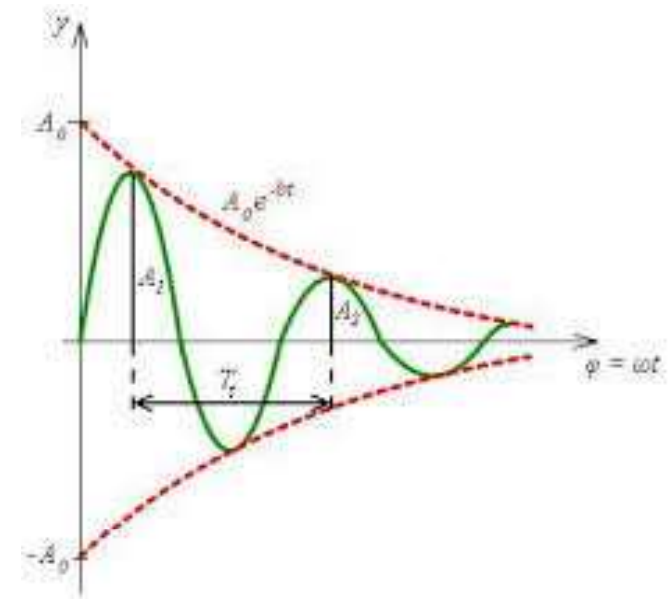
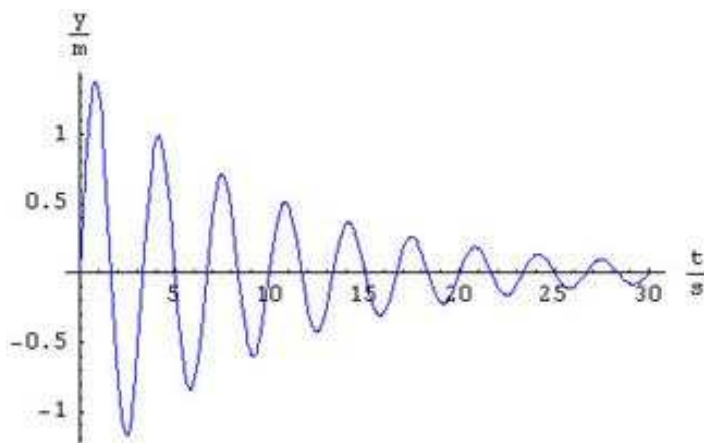
Tlumené kmity

Dochází k němu přeměnou části energie kmitavého pohybu na jiné formy energie (vnitřní energie okolí i oscilátoru, vynaložení práce na překonání třecích sil, ...). Tlumení kmitání harmonického oscilátoru je závislé na hustotě prostředí, ve kterém kmitá. Tlumení je větší ve vodě než na vzduchu. Dále je závislé na rychlosti, kterou oscilátor kmitá.



$$y = e^{-bt} y_m \sin(\omega t + \varphi_0)$$

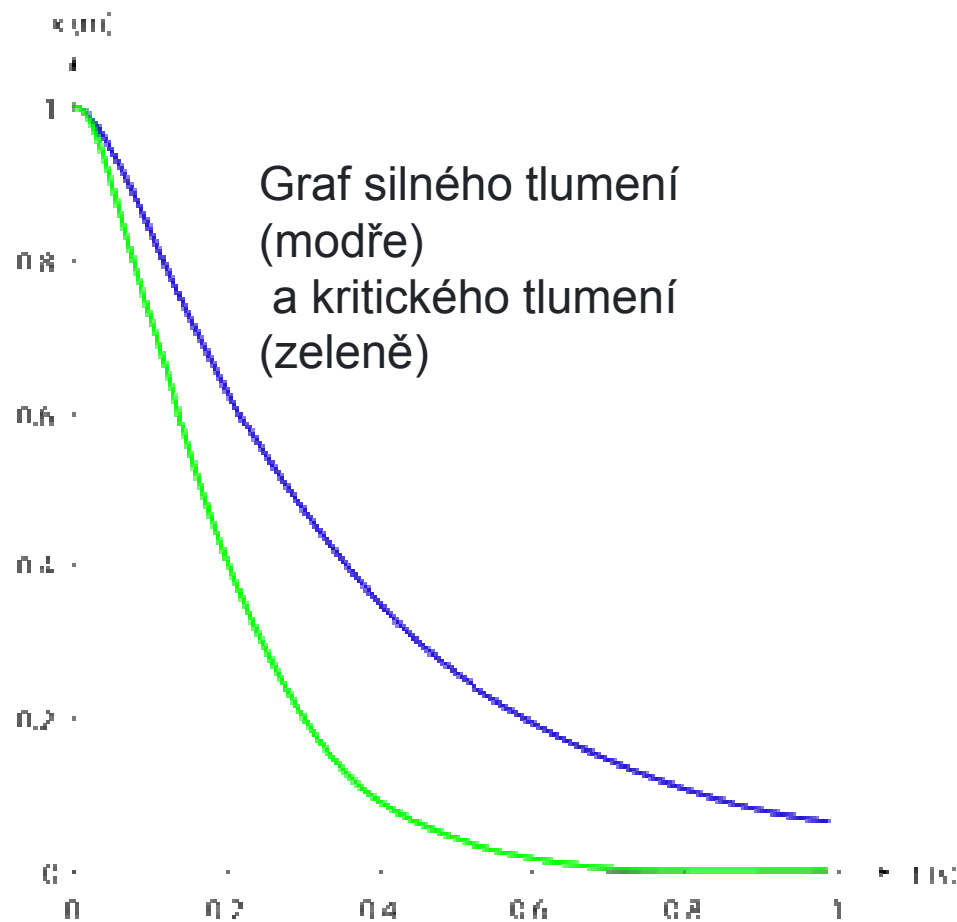
kde b je **koeficient útlumu**. Body, které mají **maximální výchylku** téhož znaménka, leží na grafu exponenciální funkce.



Vlastní kmitání oscilátoru je vždy tlumené. Tlumení má vliv také na periodu: tlumený oscilátor kmitá volně s větší periodou, než jakou by měl netlumený oscilátor se stejnými parametry.

V závislosti na velikosti tlumení harmonického oscilátoru může dojít k následujícím dvěma situacím:

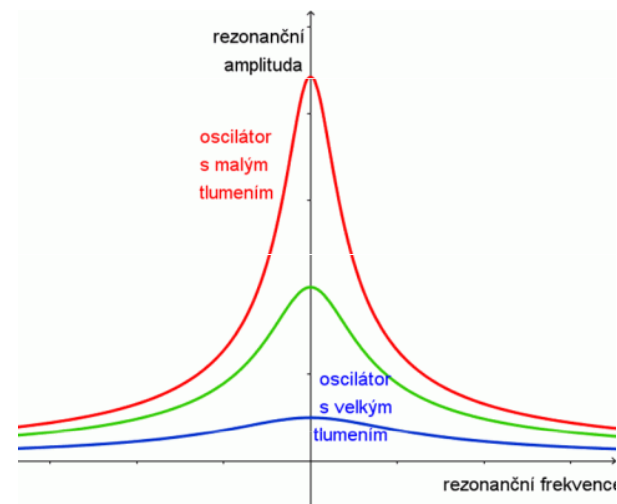
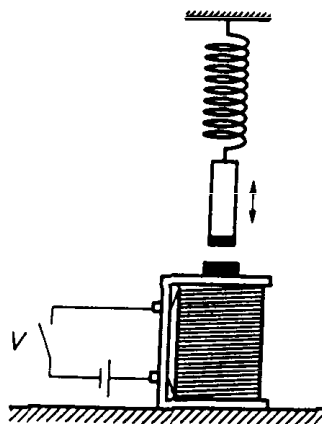
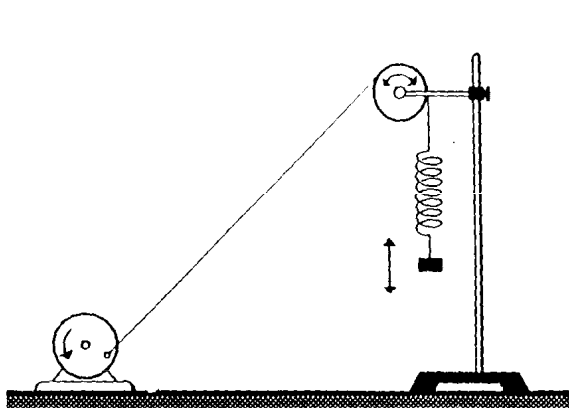
1. **tlumení je kritické** - pohyb oscilátoru je takový, že oscilátor se za nejkratší možnou dobu ustálí v rovnovážné poloze.
2. **tlumení je nadkritické** - jedná se o neperiodický (aperiodický) pohyb, kdy se oscilátor bude pomalu vracet do své rovnovážné polohy.



Nucené kmitání, rezonance

Nucené kmitání vzniká působením periodické síly na oscilátory i na objekty, které vlastnosti oscilátoru nemají. Frekvence nuceného kmitání závisí na frekvenci působící síly a nezávisí na vlastnostech kmitajícího objektu. Nucené kmitání je netlumené.

Při nuceném kmitání oscilátor kmitá vždy s frekvencí vnějšího působení. Netlumené harmonické kmitání nastane, pokud je energie dodávána v celém průběhu periody.



Pokud se frekvence zdroje energie výrazně liší od frekvence oscilátoru, je účinek jen velmi malý. Pokud se frekvence zdroje energie liší jen málo od frekvence oscilátoru, amplituda se postupně zvětšuje. Největší je při stejných frekvencích. Dochází k jevu, který se nazývá **rezonance**.

Výskyt rezonance:

zesílení zvuku hudebních nástrojů (struna, těleso kytary)

vznik nežádoucího rezonančního kmitání u strojních zařízení, která konají otáčivý pohyb

pérování sedadel automobilu na hrbolaté silnici (prevence: tlumiče, změna vlastní frekvence, zvýšení tření)

Zřícení Tacoma Narrows Bridge

Tacoma Narrows Bridge je visutý most přes Tacomskou úžinu v americkém státě Washington. Původní most byl na místě postaven v červenci 1940. Most byl postaven tak, že byl překážkou větru, kvůli vertikálním pohybům mostovky za větrného počasí byl pojmenován *Cválající Gertie*. Dne 7. listopadu za větrného dopoledne, kdy vítr dosahoval rychlosti až 68 km/h, vítr most vlastní silou rozhoupal, což nakonec způsobilo pád mostu. Při kolapsu mostu nedošlo k žádným lidským obětem, o život však přišel jeden malý pes, kterého v jednom z aut nechal jeho vlastník.



Příklad

Perioda vlastního kmitání železničního vagónu je 1,25 s. Nárazy na spoje kolejnic dostává vagón silové impulsy, které ho rozkmitají. Při jaké rychlosti vlaku se vagón nejvíce rozkmitá, pokud délka kolejnic je 25 m?

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{1,25s} = 1,6\pi s^{-1}$$

$$s = O = 2\pi r$$

$$r = \frac{s}{2\pi} = \frac{25m}{2\pi}$$

$$v = \omega_0 r = 1,6\pi s^{-1} \cdot \frac{25m}{2\pi} = \frac{1,6 \cdot 25m \cdot s^{-1}}{2} = 20m \cdot s^{-1}$$

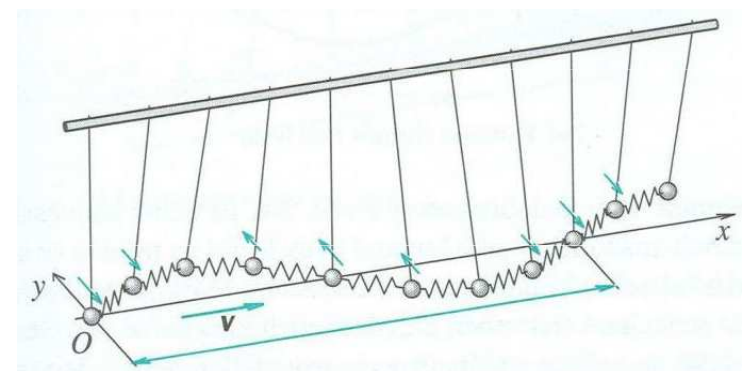
$$v = 20m \cdot s^{-1} = 72km \cdot h^{-1}$$

Mechanické vlnění a zvuk

Mechanické vlnění

Mechanické vlnění je děj, při němž se kmitání částic šíří látkovým prostředím. Mechanické vlnění se šíří látkami všech skupenství pomocí sil působících mezi částicemi. Vzniká tak, že výchylka jedné částice z rovnovážné polohy vnější silou a k tomu dodaná energie se přenese na částici sousední, pak na další a tak vlnění určitou rychlostí postupuje od svého zdroje v řadě bodů, nebo v rovině, nebo v prostoru.

Proces vzniku vlnění lze demonstrovat na příkladu *vázaných oscilátorů*. Máme-li vázané oscilátory, přenáší se energie kmitání postupně z jednoho oscilátoru na druhý a zpět. Podobně to funguje mezi částicemi v látkách, mezi kterými existují vazebné síly. Energie kmitavého pohybu jedné částice se postupně přenáší na okolní částice. Důsledkem je skutečnost, že energie kmitavého pohybu se v látce postupně šíří a přenáší se i na vzdálenější částice.



Mechanické vlnění

Vlnová délka (λ) označuje vzdálenost dvou nejbližších bodů postupného periodického vlnění, které kmitají ve fázi.

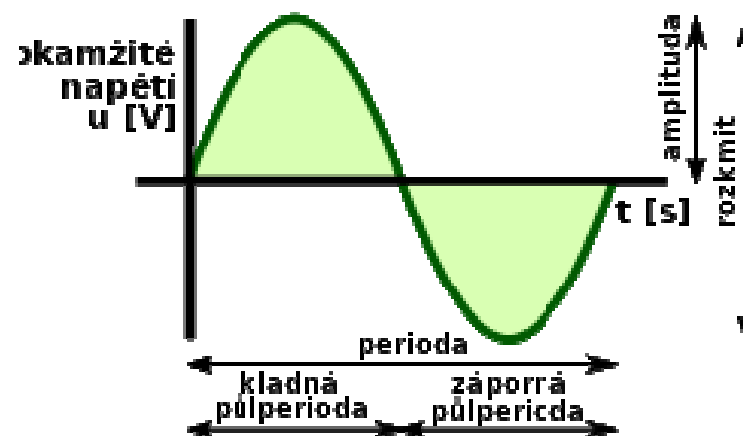
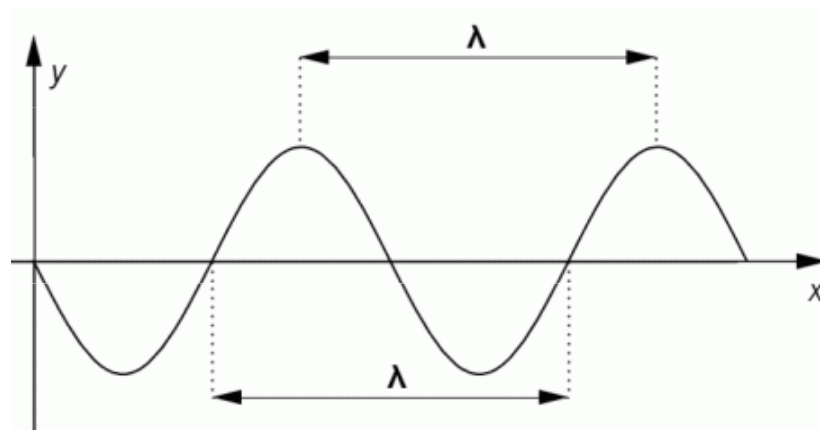
$$\lambda = vT = \frac{v}{f} = 2\pi \frac{v}{\omega}$$

Perioda označuje dobu trvání jednoho opakování periodického děje. Perioda tedy označuje dobu potřebnou k tomu, aby se systém dostal zpět do výchozího stavu.

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

Při popisu kmitání a vlnění se používá také **úhlová frekvence** ω , f frekvence vlnění, v je fázová rychlost šíření vlnění.

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



Postupné vlnění

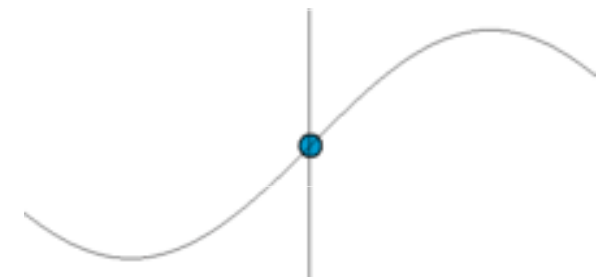
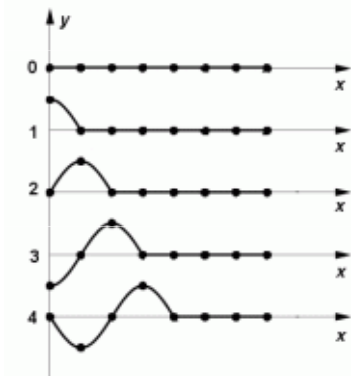
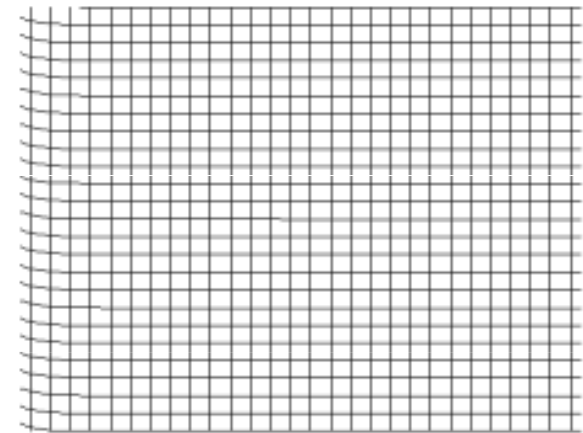
Vzniká postupným rozkmitáváním bodů v pružném prostředí (hadice, lano, vodní hladina ...). Rovnice postupné vlny:

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

(okamžitá výchylka y , maximální amplituda y_m , čas t , perioda T , poloha x , vlnová délka λ , rychlost šíření vlnění v , fázová rychlost ω)

Postupné příčné vlnění

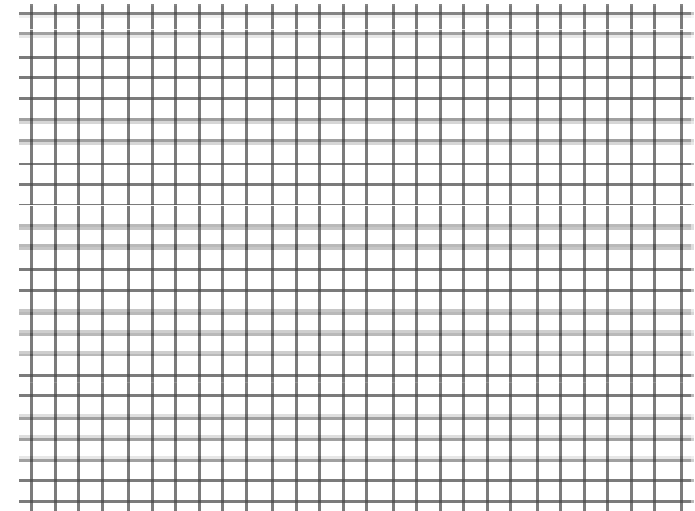
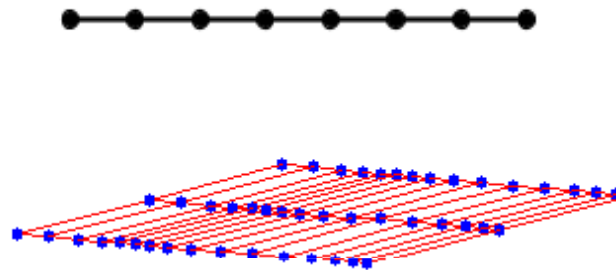
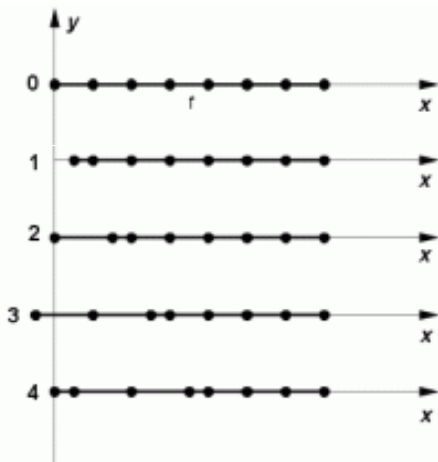
Body prostředí kmitají kolmo na směr šíření. Příkladem postupného vlnění příčného je vlnění na vodní hladině po dopadu kamene, šířící se od tohoto zdroje v kruhových rovinných vlnoplochách, nebo elektromagnetické záření (světlo).



Postupné podélné vlnění

Při **podélném (longitudálním) vlnění** je amplituda kmitů rovnoběžná se směrem šíření vlny. U mechanického vlnění se lze také setkat s označením **tlaková vlna**. Příkladem je zvuk.

Podélnou postupnou vlnu můžeme získat např. tak, že si představíme přímou řadu shodných oscilátorů, mezi nimiž jsou stejné vazby. Vychýlíme-li jeden z těchto oscilátorů podél osy, ve které oscilátory leží, bude se kmitavý pohyb postupně přenášet mezi ostatní oscilátory. Během šíření vlny dochází k postupnému *zhušťování* a *zředování* podélné vlny.

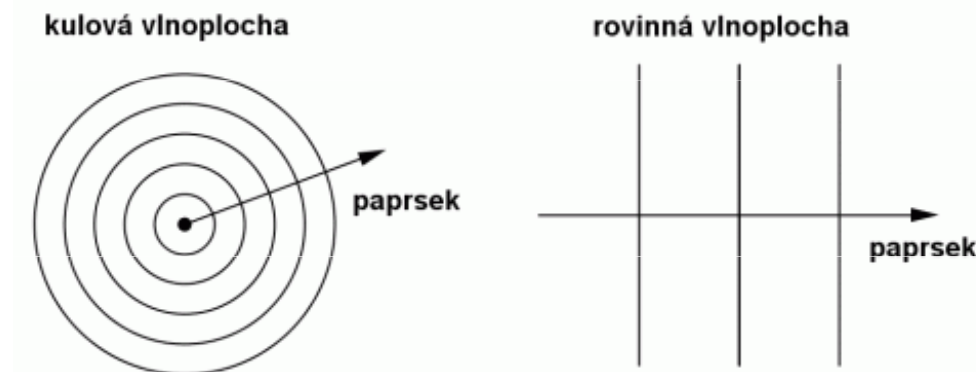


V **pevném tělese** se ve směru původní výchylky šíří podélná vlna, ve směrech kolmých k směru původní výchylky se šíří vlna příčná. Obě vlny se šíří různou rychlostí, podélná rychleji. V **kapalinách** a **plynech** se příčné vlny nešíří, mohou jimi postupovat jen vlny podélné.

Šíření vlnění v prostoru

Rychlost, kterou se vlnění šíří v prostoru, závisí na fyzikálních vlastnostech prostředí, např. na pružnosti a hustotě prostředí. Jsou-li fyzikální vlastnosti prostředí ve všech směrech stejné, je také ve všech směrech stejná velikost rychlosti vlnění. Takové prostředí nazýváme **izotropní prostředí**.

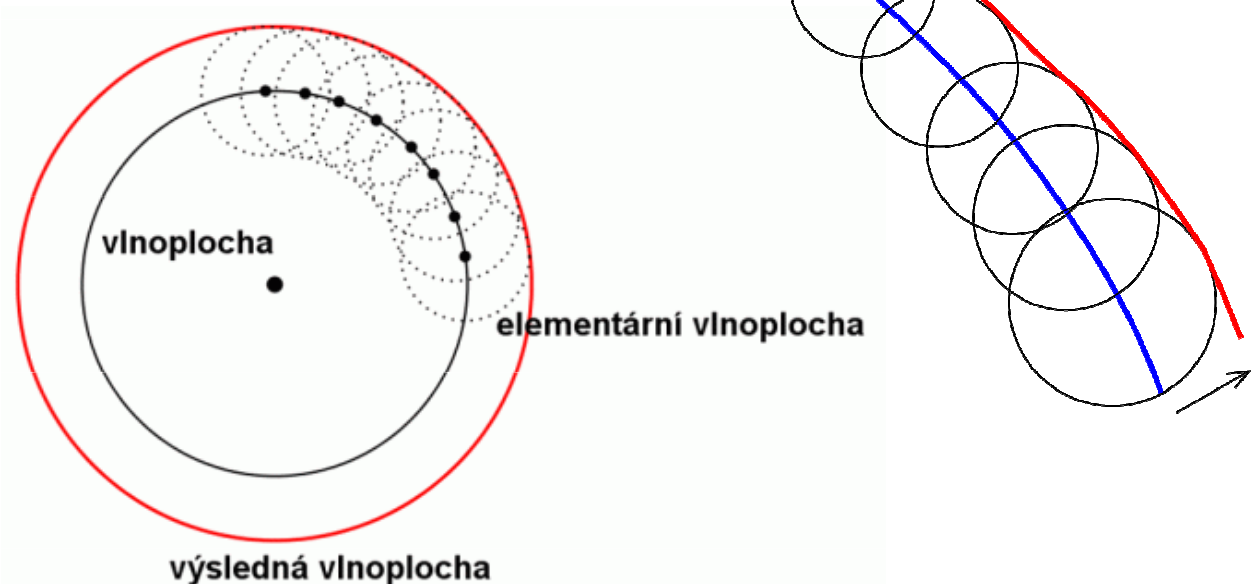
Z bodového zdroje, postupuje vlnění ze zdroje všemi směry rychlostí v a za dobu t dosáhne vzdálenosti $r = v \cdot t$. Všechny body, do nichž dospěje vlnění z bodového zdroje za stejnou dobu, leží na kulové ploše, kterou nazýváme **vlnoplocha**. Všechny body stejné vlnoplochy kmitají se stejnou fází. Směr šíření vlnění určuje přímka, která vychází ze zdroje vlnění kolmo na vlnoplochu a nazývá se **paprsek**. V blízkosti bodového zdroje vlnění se vytvářejí kulové vlnoplochy. Ve větších vzdálenostech od zdroje je však zakřivení kulových vlnoploch tak malé, že můžeme jejich části nahradit vlnoplochami rovinnými.



Huygensův princip

Každý bod vlnoplochy, do kterého dospělo v určitém okamžiku postupné vlnění v izotropním prostředí, můžeme pokládat za **bodový zdroj** elementárního vlnění. To se z něj dále šíří v elementárních vlnoplochách. **Vlnoplocha** postupného vlnění je plocha, jejíž body kmitají se **stejnou fází**, neboli plocha, na níž leží body, které dospěly ze zdroje za stejnou dobu. Vlnoplocha v dalším časovém okamžiku je „obálka“ všech elementárních vlnoploch ve směru šíření vlnění.

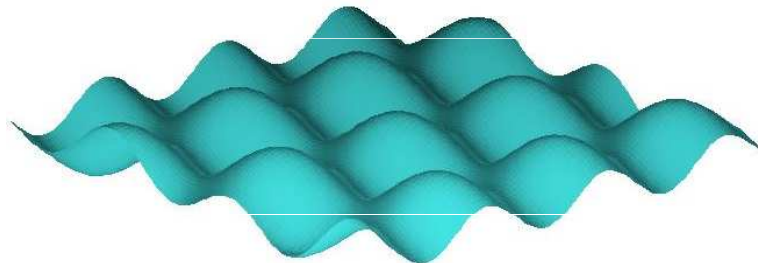
Díky Huygensovu principu lze zkonstruovat vlnoplochu v určitém okamžiku, je-li známa její poloha a tvar v některém předcházejícím okamžiku.



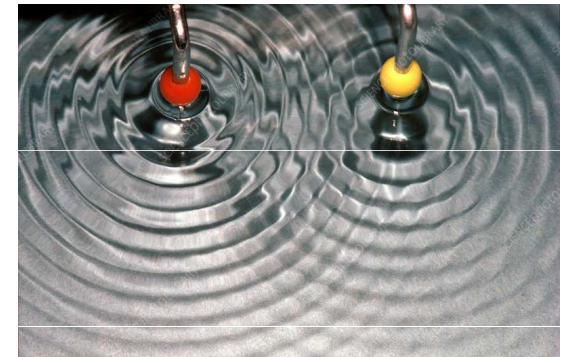
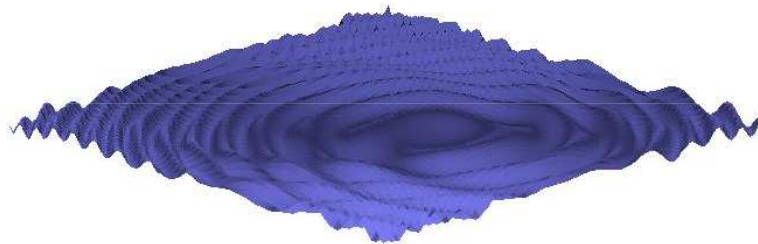
Interference vlnění

Děj, při kterém dochází ke skládání dvou nebo více vlnění, nazýváme **interference vlnění**. Kmitání jednotlivých míst pružného prostředí, v nichž vlnění interferují se řídí **principem superpozice**. Proto se mohou vlnění interferencí zesilovat nebo zeslabovat či dokonce navzájem zcela rušit. Vznikají tzv. interferenční maxima a minima, jejichž rozmístění v pružném prostředí závisí na vlastnostech skládaných vlnění a na vzdálenostech zdrojů vlnění.

Rovinné vlny

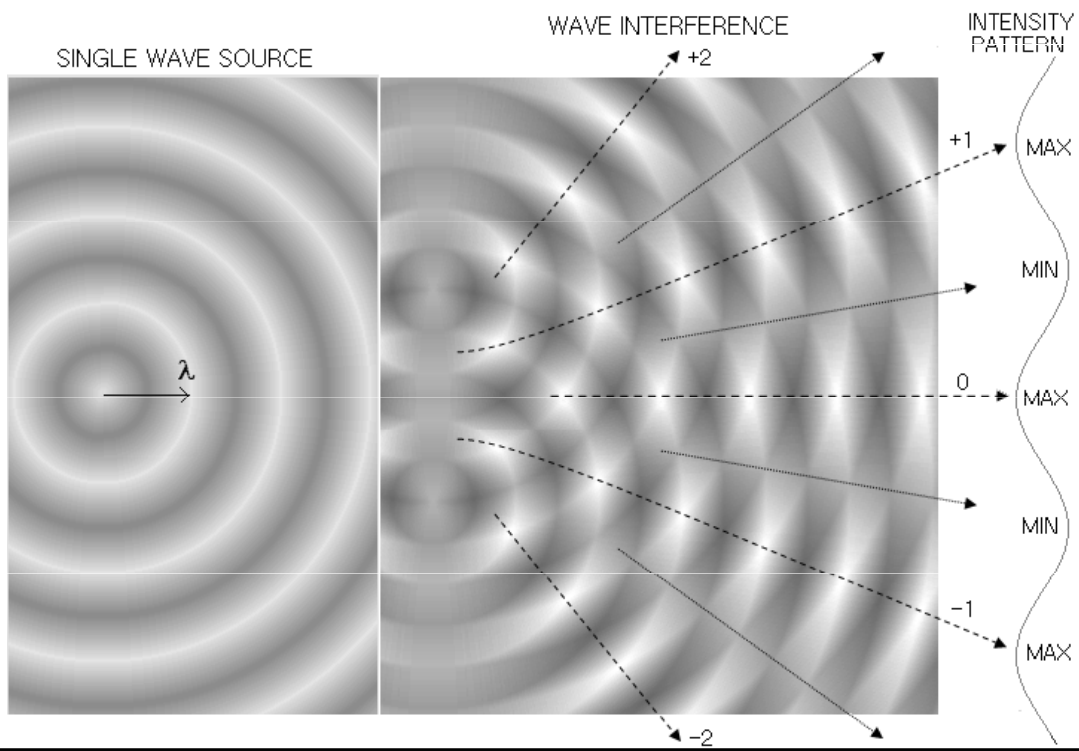
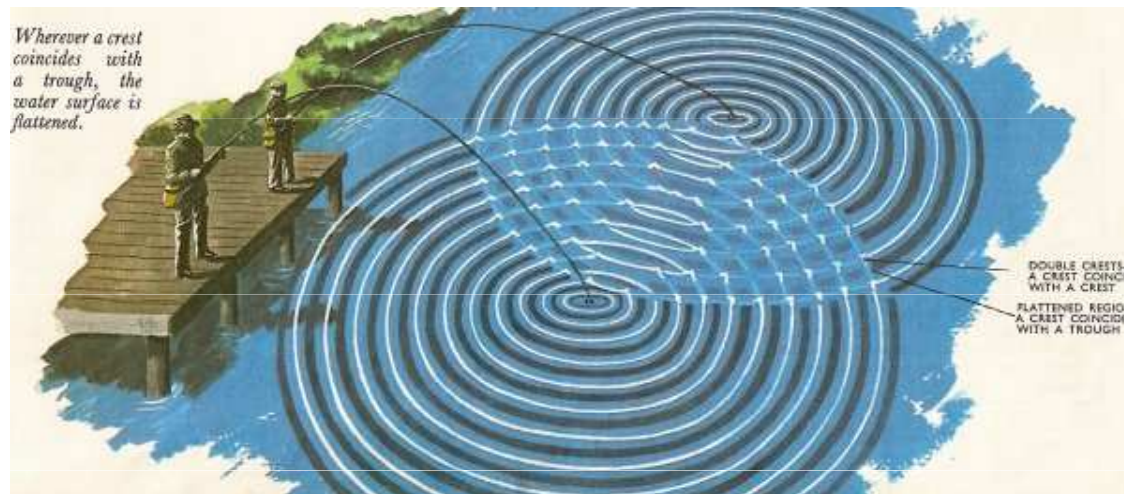


Kruhové vlny



Stálé rozmístění interferenčních maxim a minim nastává při skládání dvou vlnění stejné frekvence a s konstantním fázovým rozdílem kmitání jejich zdrojů. Taková dvě vlnění se nazývají **vlnění koherentní**.

Interference vlnění



Nejjednodušší případ interference vlnění nastává **skládáním dvou postupných příčných vlnění o stejné amplitudě výchylky a stejné frekvenci**, která se šíří stejnou rychlostí stejným směrem.

$$y_1 = y_m \sin(\omega t + \varphi_1)$$

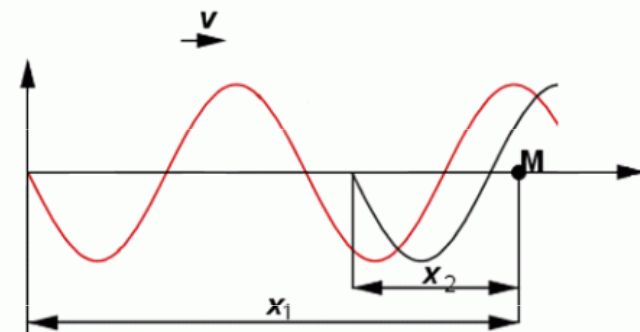
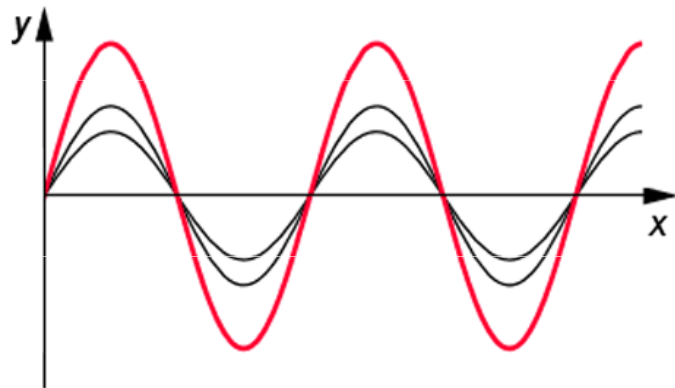
$$y_2 = y_m \sin(\omega t + \varphi_2)$$

$$y_1 = y_m \sin \omega \left(t - \frac{x_1}{v} \right)$$

$$y_2 = y_m \sin \omega \left(t - \frac{x_2}{v} \right)$$

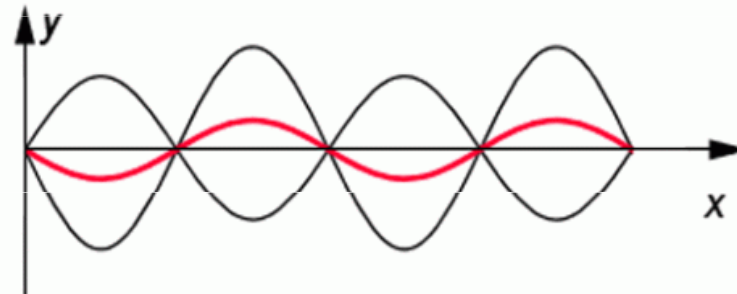
$$\Delta \varphi = \varphi_2 - \varphi_1 = \frac{\omega}{v} (x_1 - x_2) = \frac{2\pi}{\lambda} (x_1 - x_2)$$

Je-li dráhový rozdíl Δx dvou vlnění roven **sudému počtu půlvln**, je výsledná amplituda složeného vlnění maximální a rovná součtu obou amplitud.



kde výraz $x_1 - x_2 = \Delta x$ je tzv. **dráhový rozdíl** vlnění, $\Delta \varphi$ je tzv. **fázový rozdíl** vlnění.

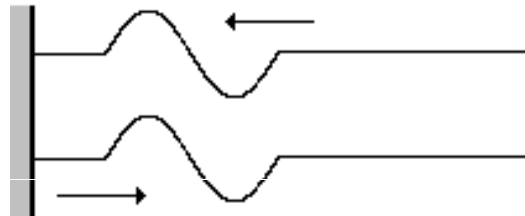
Je-li dráhový rozdíl Δx dvou vlnění roven **lichému počtu půlvln**, je výsledná amplituda nejmenší, v případě, že obě amplitudy jsou stejné, pak je nulová a obě vlnění se navzájem ruší.



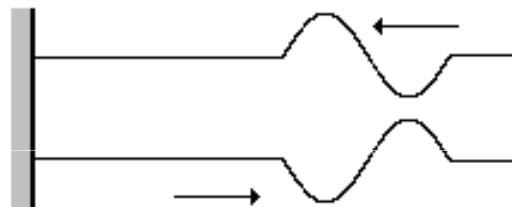
Odraz vlnění v řadě bodů

Postupuje-li **vlnění řadou bodů** a dospěje-li na konec této řady, nastává odraz vlnění a vlna se vrací zpět. Na konci může dojít ke dvěma typům „konce“ řady bodů:

Na **pevném konci** má odražené vlnění stejnou vlnovou délku jako původní vlnění, ale jeho fáze se změní o π .

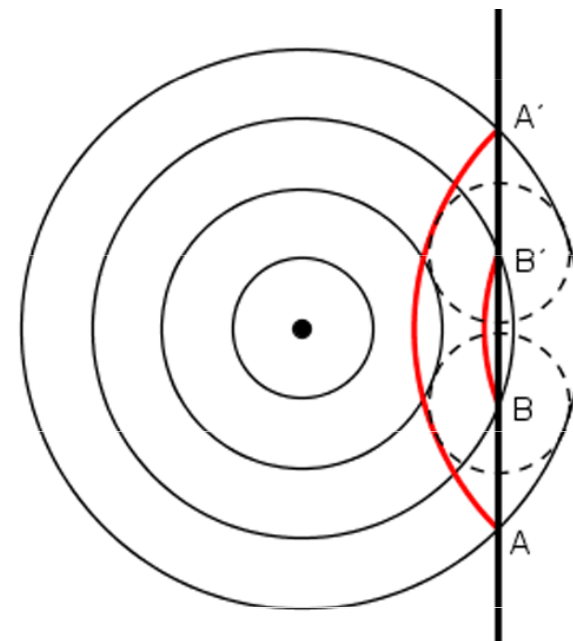


Na **volném konci** má odražené vlnění stejnou vlnovou délku i fázi jako vlnění původní.

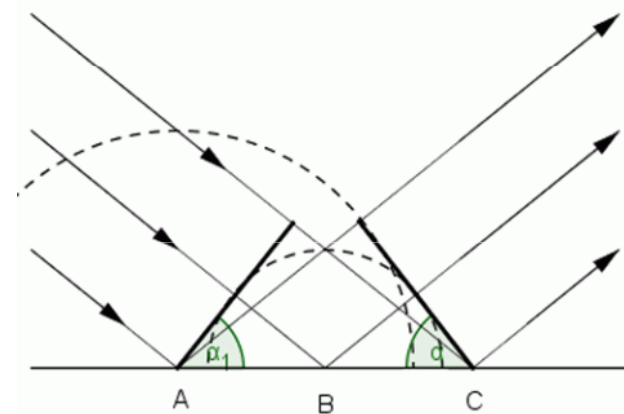


Odraz vlnění na překážce

K **odrazu vlnění** dochází, jestliže je překážka velká oproti vlnové délce. Princip odrazu vlnění lze vysvětlit pomocí *Huygensova principu*: Vlnoplocha postupuje ze zdroje k rovinné překážce. K ní vlnění dospívá postupně v bodech A, A', B, B'. V době, kdy vlnění dorazilo do bodu A a A', vznikly již kolem bodů B, B' elementární vlnoplochy. Jejich vnější obalová plocha tvoří výsledný tvar vlnoplochy odražené.



V případě **rovinné vlnoplochy**, která svírá s rovinou překážky úhel dopadu α , vlnění dospívá k překážce postupně v bodech A, B, C. V době, kdy vlnění dorazilo do bodu C, vznikla kolem bodu A a B elementární vlnoplocha. Vnější obálka obou elementárních vlnoploch dává vlnoplochu odraženou, která je rovinná a svírá s překážkou úhel odrazu α' . Úhel odrazu vlnění se rovná úhlu jeho dopadu na překážku = **zákon odrazu vlnění**.

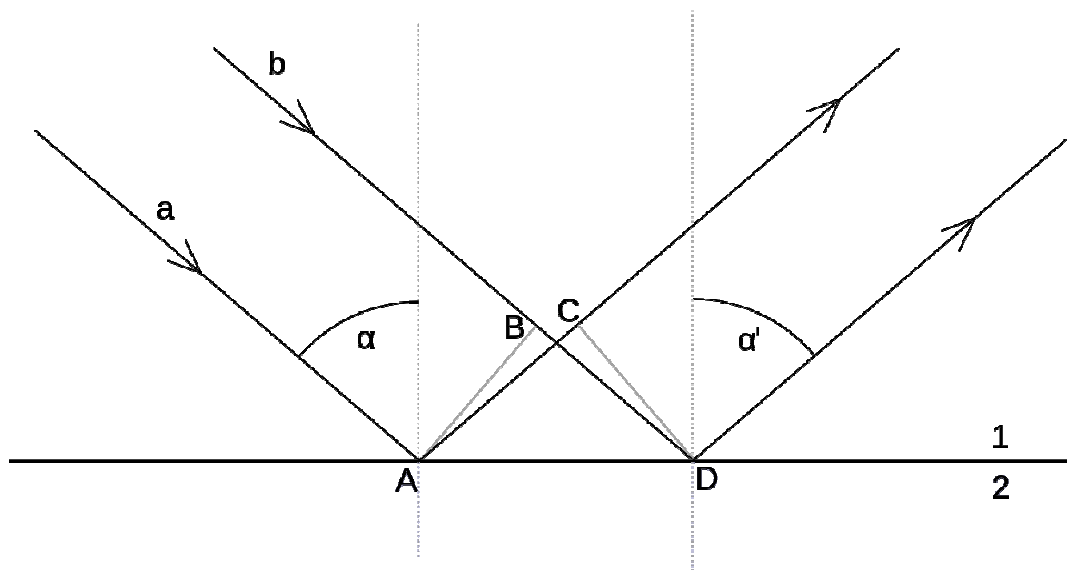


Odraz vlnění na rozhraní dvou prostředí

Odraz vlnění také vzniká pokud se přicházející vlnění dostane k rozhraní dvou prostředí. Na tomto rozhraní může dojít k jeho **odrazu** zpět do prostředí, ze kterého vlnění přichází.

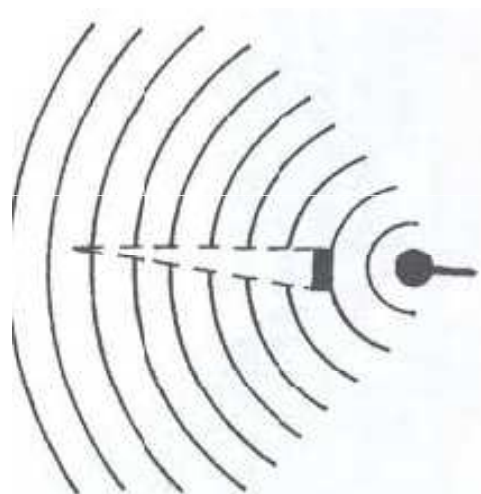
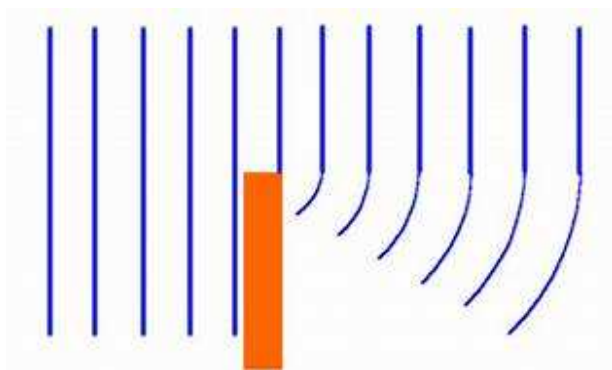
Odraz se řídí **zákonem odrazu**. Zákon odrazu je platný pro všechny druhy vlnění (mechanické vlnění, elektromagnetické vlnění).

Úhel odrazu je roven úhlu dopadu, přičemž odražené vlnění zůstává v rovině dopadu. Odražený paprsek zůstává v rovině dopadu (v rovině dané dopadajícím paprskům a kolmicí dopadu) a svírá s kolmicí dopadu úhel odrazu, který je stejně velký jako úhel dopadu.

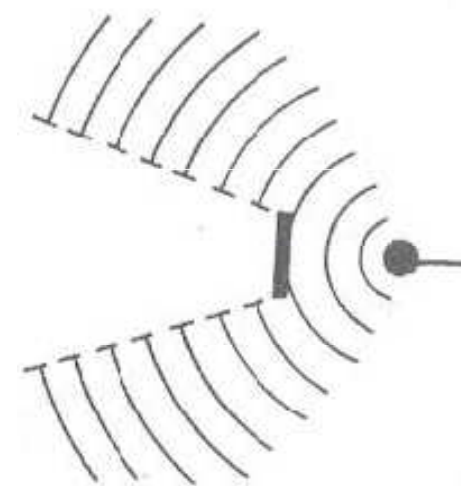


Ohyb (difrakce) vlnění na překážce

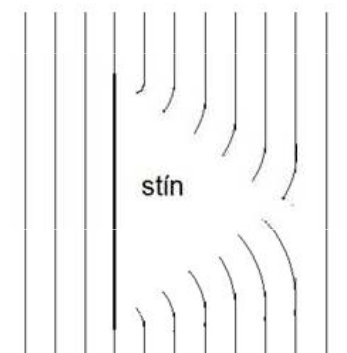
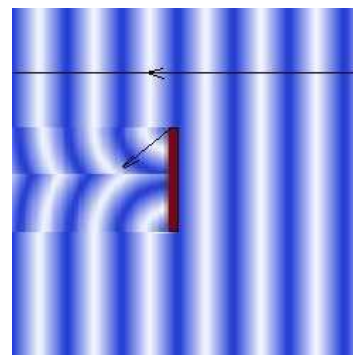
Jestliže je překážka menší oproti vlnové délce, dochází k **ohybu vlnění**. Princip ohybu vlnění můžeme také vysvětlit pomocí *Huygensova principu*. Okraje překážky, k nimž vlnění dospěje, se stávají zdrojem elementárních vlnění, která se v případě blízkých okrajů, tj. malých rozměrů překážky, za překážkou spojují, čímž vytvoří souvislou výslednou vlnoplochu.



Malá překážka

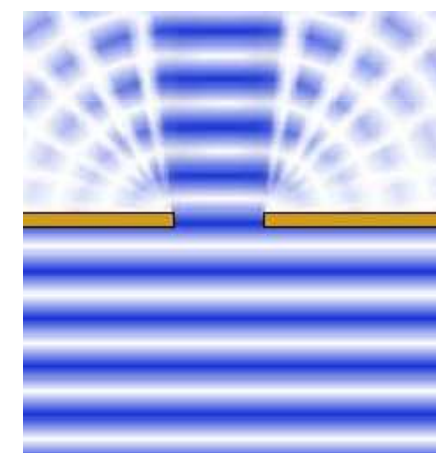
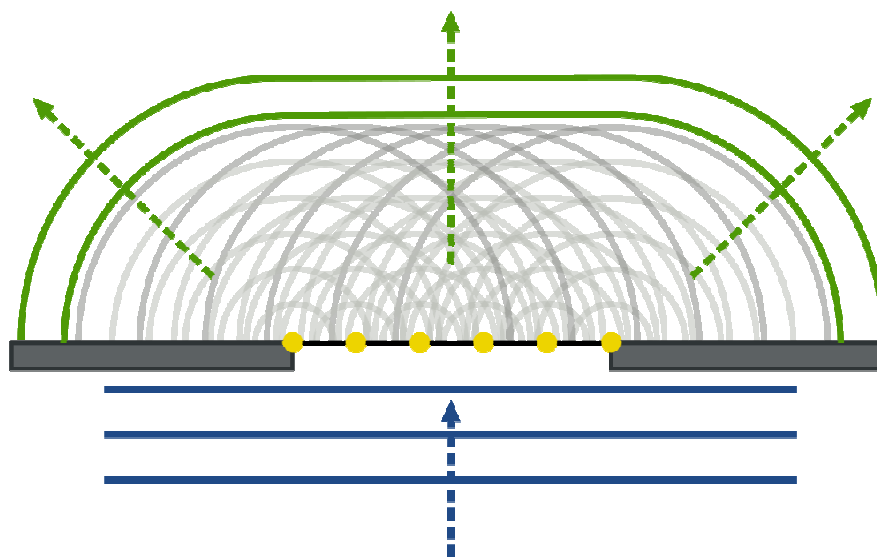
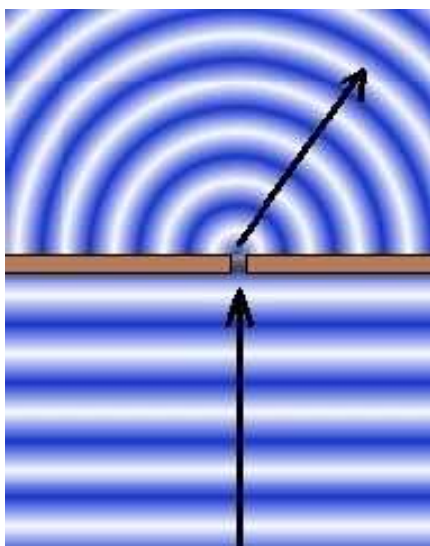
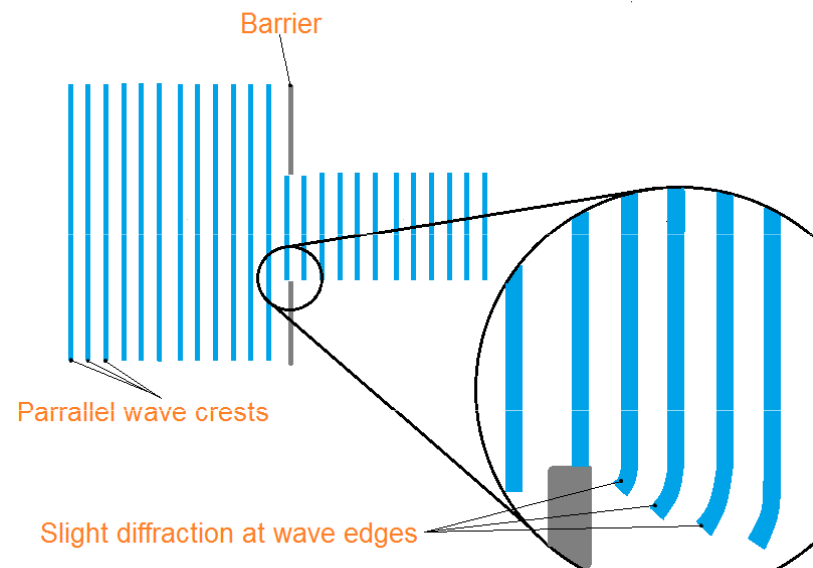


Velká překážka



Ohyb (difrakce) vlnění na štěrbině

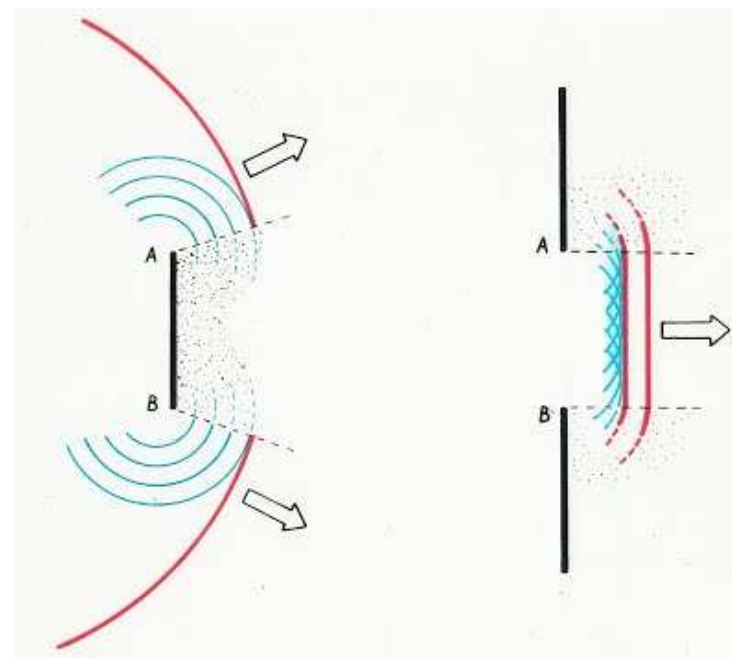
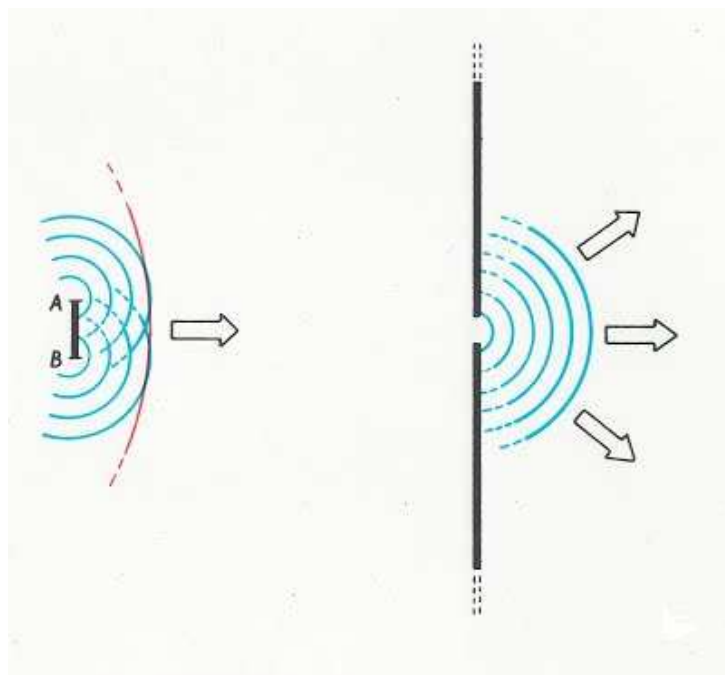
Obdoba ohybu vlnění na překážce, můžeme také vysvětlit pomocí *Huygensova principu*.



Ohyb (difrakce) vlnění
na štěrbině

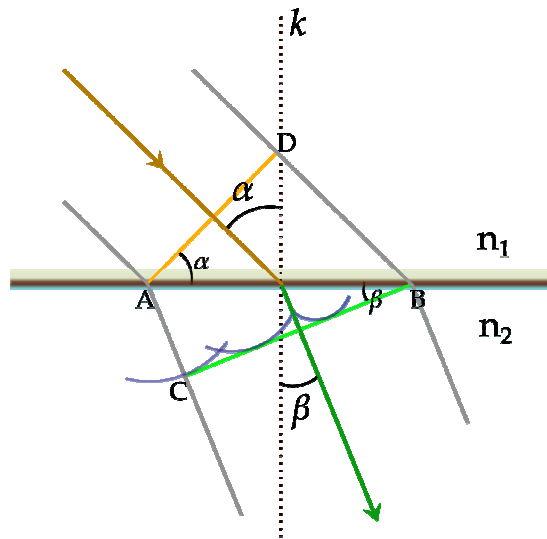


Ohyb (difrakce) vlnění na překážce a na štěrbině



Lom vlnění

Lom vlnění je fyzikální jev, který nastává jestliže přechází vlnění z jednoho prostředí do druhého. Lom mechanického vlnění většinou nepozorujeme - značně větší význam má lom světla v optice.

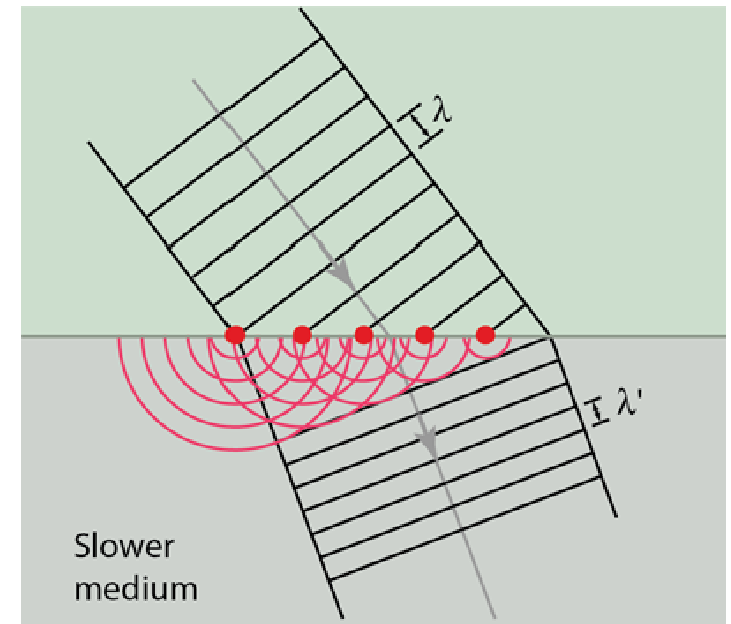


Snellův zákon

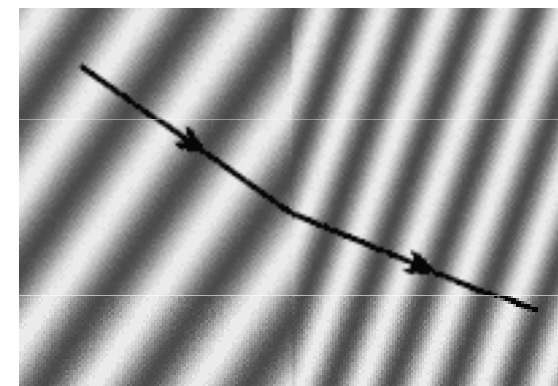
$$\frac{|DB|}{|AC|} = \frac{v_1 t}{v_2 t} = \frac{v_1}{v_2} \quad |DB| = |AB| \sin \alpha$$
$$|AC| = |AB| \sin \beta$$

$$\frac{|DB|}{|AC|} = \frac{|AB| \sin \alpha}{|AB| \sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$$



Poměr sinu úhlu dopadu a sinu úhlu lomu je pro daná dvě prostředí stálá veličina a rovná se poměru rychlostí vlnění v obou prostředích. Tento poměr se nazývá **index lomu** vlnění (n) pro daná prostředí.



Ze **Snellova zákona** plyne:

Při šíření záření z **prostředí opticky řidšího do opticky hustšího** prostředí se paprsky lámou směrem **ke kolmici** (tzv. lom ke kolmici).

Při šíření záření z **prostředí opticky hustšího do opticky řidšího** prostředí se paprsky lámou směrem **od kolmice** (tzv. lom od kolmice).

Opticky hustším, resp. řidším prostředím je míněno prostředí s vyšším, resp. nižším indexem lomu.

Totální odraz

Šíří-li se paprsky z opticky hustšího prostředí (tedy v případě lomu od kolmice) může nastat, že úhel lomu je roven pravému úhlu, tzn. $\alpha_2 = \pi/2$. V takovém případě je $\sin \alpha_2 = 1$, a zákon lomu má tvar

$$\sin \alpha_m = \sin \alpha_1 = \frac{v_1}{v_2}$$

kde α_m označuje tzv. **mezní úhel**. Mezní úhel je největší úhel dopadu, při kterém ještě nastává lom vlnění. Je-li úhel dopadu větší než mezní úhel, tzn. $\alpha_1 > \alpha_m$, dochází k tzv. **totálnímu (úplnému) odrazu**, při kterém se vlnění do druhého prostředí vůbec nedostane a odráží se zpět do prostředí původního.

$$\alpha_m = \arcsin \left(\frac{n_2}{n_1} \right)$$

Stojaté vlnění

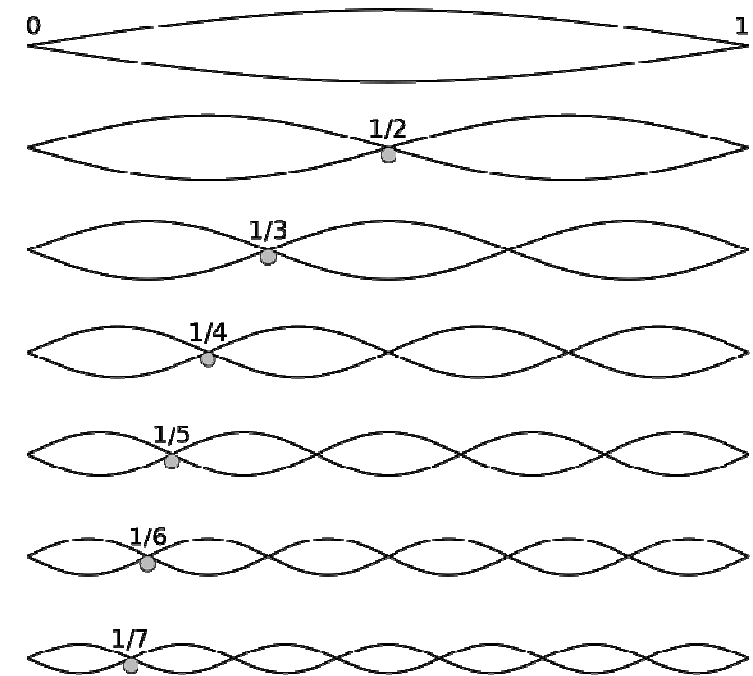
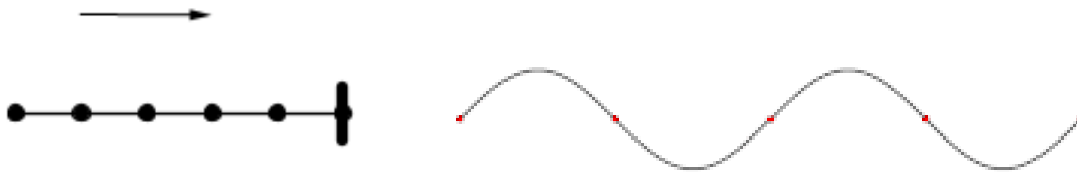
Stojaté vlnění je zvláštní případ interference dvou vlnění se stejnými frekvencemi a amplitudami, která postupují proti sobě.

Vzniká např. odrazem postupujícího vlnění od pevné překážky, nebo na struně napjaté mezi dvěma pevnými konci.

Body s trvale největší výchylkou se nazývají **kmitny**, body s trvale nulovou výchylkou se nazývají **uzly**.

Rovnice stojatého vlnění

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



Stojaté vlnění pružných těles se nazývá **chvění** a je nejčastějším zdrojem zvuku a fyzikálním základem hudebních nástrojů.

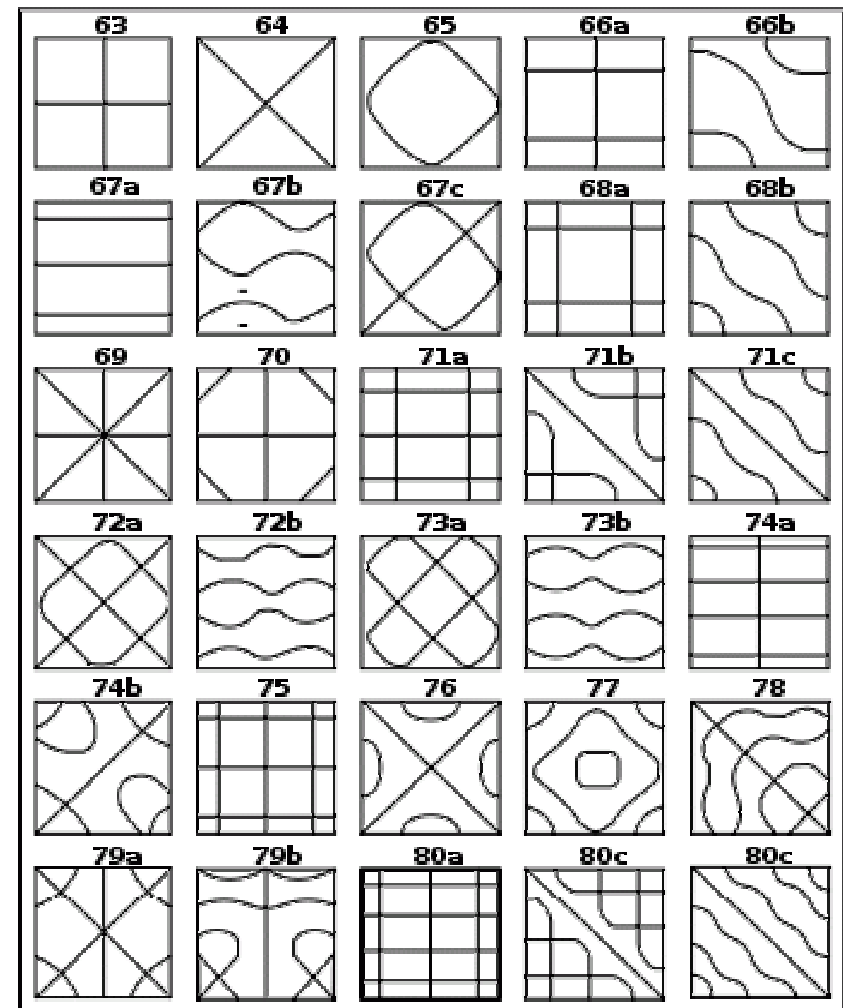
Chvění

Chvění je kmitavý pohyb povrchů těles, který má formu dvourozměrných stojatých vln. Chvění těles je zdrojem zvuku, využívá se zejména u hudebních nástrojů, ale může být naopak také vyvoláno zvukem vhodné frekvence, na níž těleso rezonuje. Rozložení kmiten a uzlů na povrchu tělesa v různých vibračních módech lze zkoumat metodou tzv. **Chladního obrazců**.

Desky se rozechvívají smyčcem nebo nárazem. Vlnění se v deskách šíří z místa vzniku různými směry, odráží se od okrajů a interferencí vzniká stojaté vlnění. V bodech s nulovou výchylkou se vytvářejí uzlové čáry. Při posypání desky jemným pískem se písek během kmitání přesune do uzlových čar a vznikne tzv. Chladního obrazec.



Chladni's Akustik

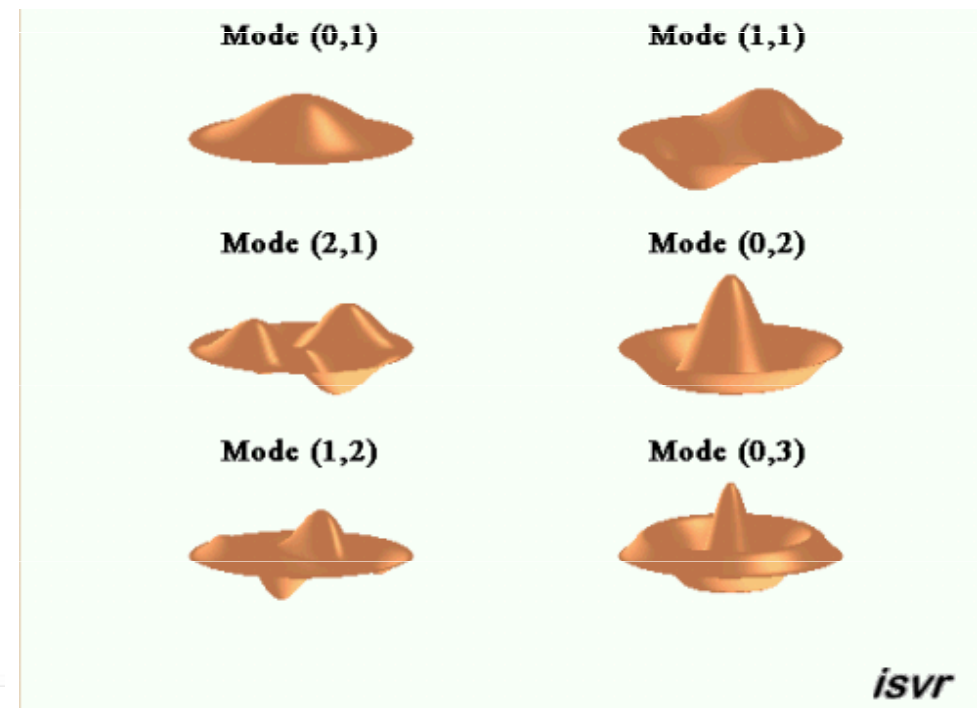
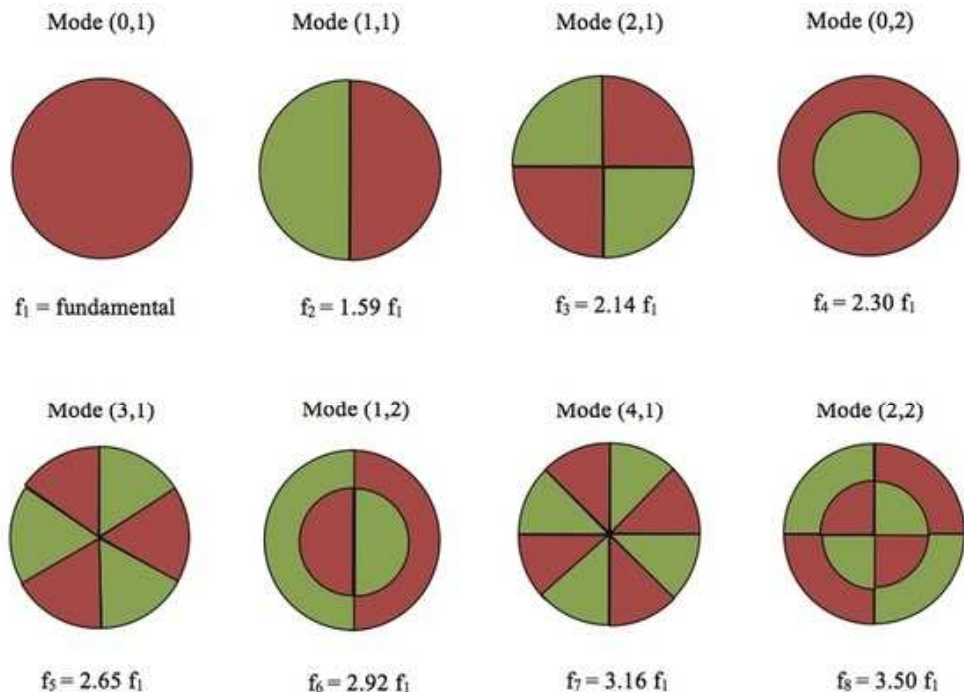


Chvění pružné membrány

Dvojměrná elastická membrána pod tlakem mohou vykazovat příčné vibrace.



$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} \right) \text{ for } 0 \leq r < a, 0 \leq \theta \leq 2\pi$$



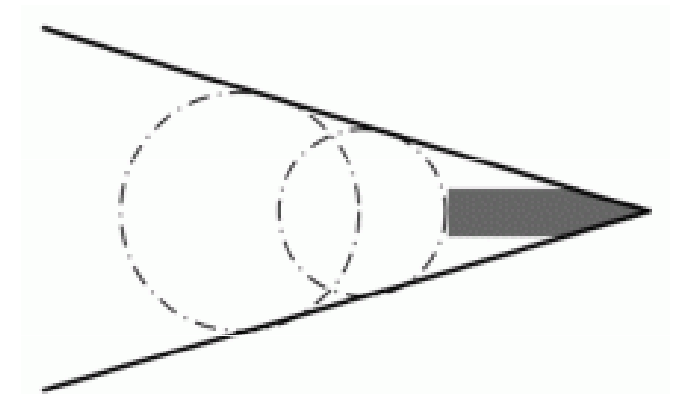
Kýlová vlna

Při pohybu lodi rychlostí větší než jakou se šíří vlny vzniká za lodí rozšiřující se brázda. Oba přímé okraje brázdy jsou obálkou kruhových vlnoploch s poloměry rostoucími úměrně s časem, a tedy i se vzdáleností od rovnoměrně plující lodi.

Úhel brázdy ϕ závisí na poměru rychlosti šíření vln v_ϕ a pohybu lodi v_z

$$\sin \frac{\alpha}{2} = \frac{v_\phi}{v_z}$$

v_z je rychlost tělesa, v_ϕ rychlost šíření vln v daném prostředí

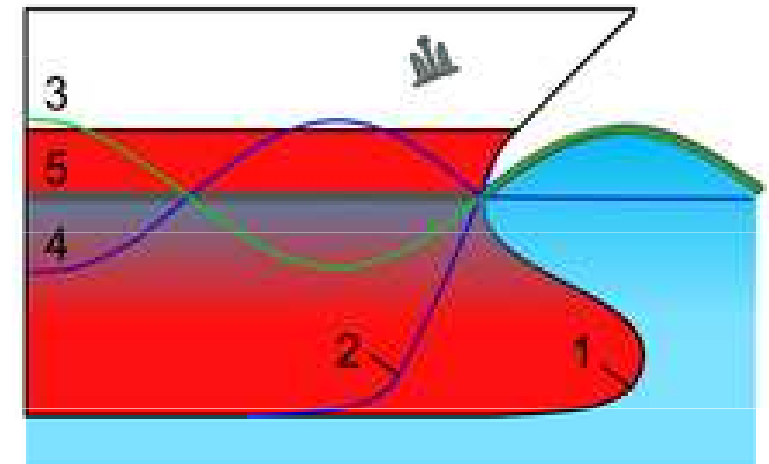
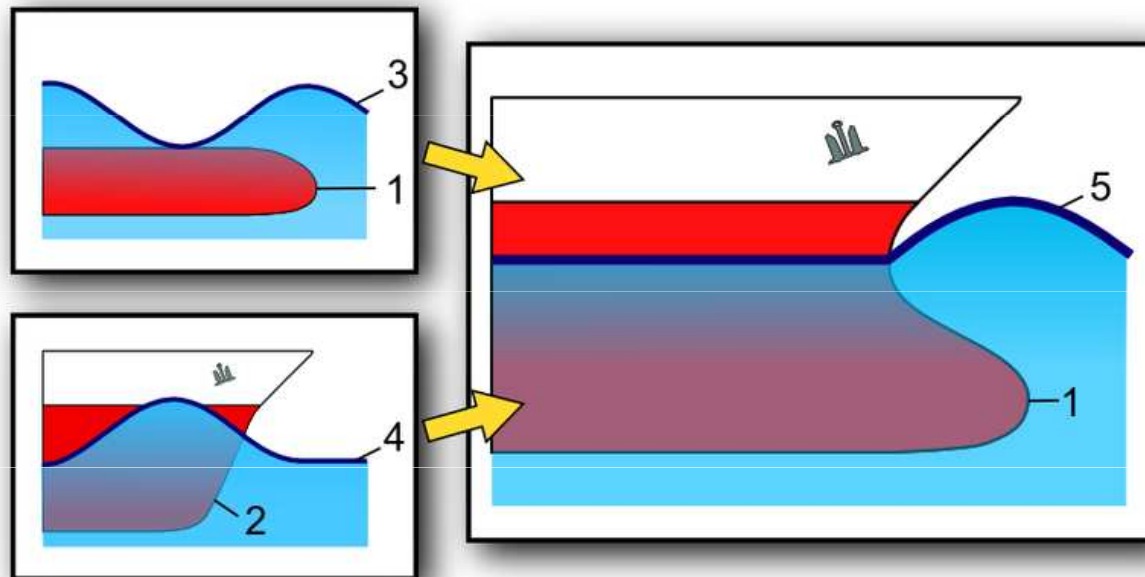


Blíží-li se rychlost tělesa rychlosti šíření vln v daném prostředí, začíná se tekutina stlačovat, hromadí se před tělesem a její hustota se značně zvětšuje. Odpor prostředí za této situace prudce roste, neboť lokální „zhuštění“ tekutiny před tělesem se nestačí přenést do okolí. Před tělesem se tak vytváří tzv. **tlaková bariéra**, tlačaná tělesem dopředu.

Při pohybu tělesa **menší rychlostí než jakou se šíří vlny** ke vzniku kýlové vlnoplochy **nedojde**, vlnoplochy předbíhají těleso.

Hruškovitá příď

Běžná příď při rozrážení vody vytváří příďovou vlnu, která obtéká trup lodi a zvyšuje odpor. Pokud je přidána „*hruška*“ v úrovni hladiny, vytvoří se na ní ještě jedna vlna, fázově posunutá. Díky tomu se obě vlny zčásti vzájemně vyruší, sníží brázdu za lodí a změní tlaky kolem trupu, a tím loď dokáže ušetřit na palivu 12-15 %.



Dopplerův jev

Dopplerův jev popisuje změnu frekvence a vlnové délky přijímaného oproti vysílanému vlnění, způsobenou nenulovou vzájemnou rychlostí vysílače a přijímače.

Zdroj vysílající signál s frekvencí f_0 pohybuje **směrem k přijímači** (pozorovateli), pak stojící pozorovatel jej přijímá s frekvencí f :

$$f = f_0 \frac{v}{v - v_{s,r}}$$

Zdroj vysílající signál s frekvencí f_0 pohybuje **směrem od přijímače** (pozorovatele), pak stojící pozorovatel jej přijímá s frekvencí f :

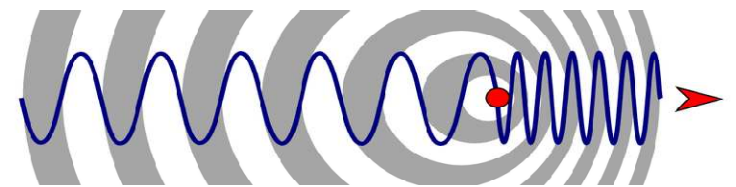
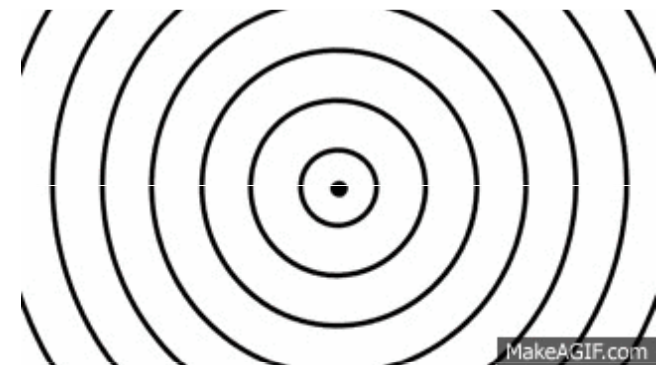
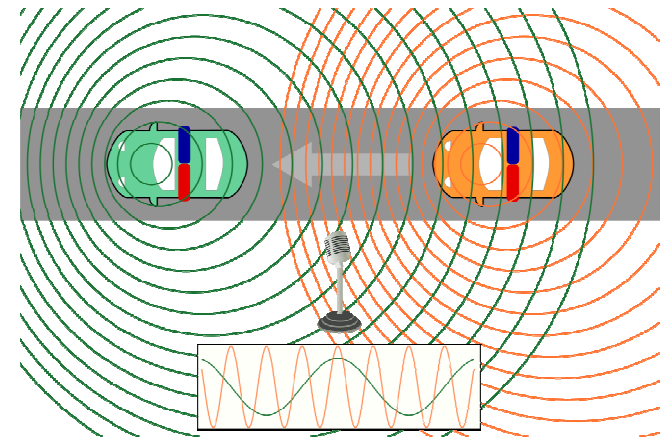
$$f = f_0 \frac{v}{v + v_{s,r}}$$

kde v je rychlost vln v dané látce a $v_{s,r}$ relativní radiální rychlost zdroje vůči pozorovateli (kladná rychlost znamená vzdalování, záporná přibližování).

Pro stacionární zdroj a pohyblivý přijímač je situace obdobná.

$$f = f_0 \left(1 + \frac{v_0}{v} \right)$$

kde v_0 je rychlost přijímače a pro přibližující se přijímač je kladná, pro vzdalující se je pak záporná.



Motor automobilu vydává tón o kmitočtu 70 Hz. Automobil jede rychlostí 108 km.h⁻¹. Cyklista jede rychlostí 18 km.h⁻¹ ve směru proti pohybu automobilu. Určete frekvenci motoru, kterou bude cyklista vnímat, a) při přibližování a b) při vzdalování automobilu. Rychlost zvuku je 340 m.s⁻¹.

$$v = 108 \text{ km.h}^{-1} = 30 \text{ m.s}^{-1}$$

$$u = 18 \text{ km.h}^{-1} = 5 \text{ m.s}^{-1}$$

$$c = 340 \text{ m.s}^{-1}$$

$$f_a = f \cdot (c + u) / (c - v) = \underline{77,9 \text{ Hz}}$$

$$f_b = f \cdot (c - u) / (c + v) = \underline{63,3 \text{ Hz}}$$

Zvuk

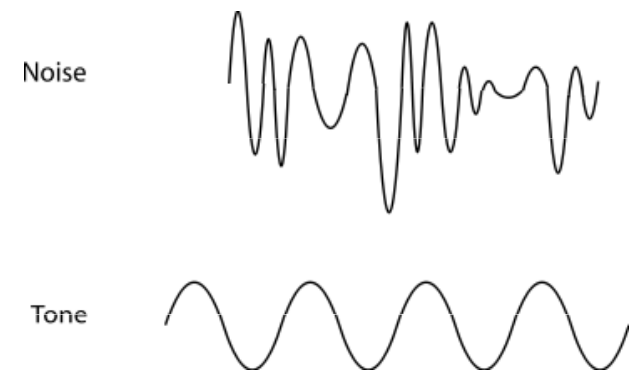
Zvuk je mechanické vlnění v látkovém prostředí, které je schopno vyvolat sluchový vjem.

Zdrojem zvuku může být každé chvějící se těleso. O vlnění v okolí zdroje zvuku však nerozhoduje jen jeho chvění, ale i okolnost, jestli je tento předmět dobrým nebo špatným **zářičem zvuku**. Tato jeho vlastnost závisí hlavně na jeho geometrickém tvaru.

Zvuky lze rozdělit na tóny a hluky.

Hluky bývají označovány jako zvuky nehudební. Jde o nepravidelné vlnění vznikající jako složité nepravidelné kmitání těles nebo krátké nepravidelné rozruchy (srážka dvou těles, výstřel, přeskočení elektrické jiskry apod.) i zvuky mnoha hudebních nástrojů, především bicích.

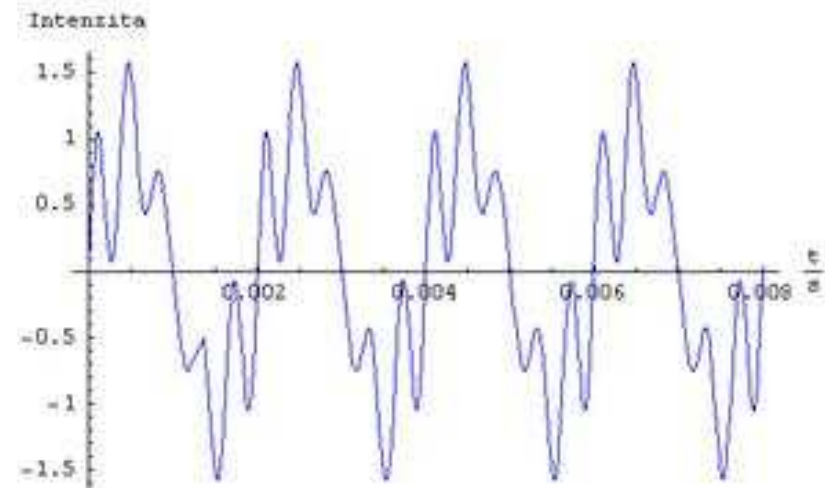
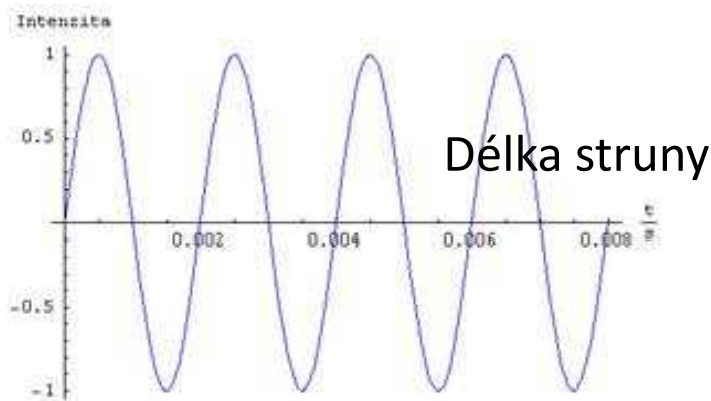
Tóny bývají označovány jako zvuky hudební, vznikají při pravidelném, v čase přibližně periodicky probíhajícím pohybu – kmitání. Při jejich poslechu vzniká v uchu vjem zvuku určité výšky, proto se tónů využívá v hudbě. Jejich zdrojem mohou být například lidské hlasivky nebo různé hudební nástroje.



Tóny se pak dále ještě dělí na:

1. **tóny jednoduché** - mají harmonický průběh, tj. grafem závislosti intenzity (hlasitosti) zvuku na čase je funkce sinus.

2. **tóny složené** - jejich průběh je periodický, ale už se nejedná o sinusoidu. Zvuky obsahují kromě **základní frekvence** ještě i tzv. **vyšší harmonické frekvence** (aliquotní tóny), které jsou tvořeny složkami jejichž frekvence jsou celistvé násobky frekvence základního tónu. Má-li harmonická frekvence dvojnásobný počet kmitů proti kmitu základnímu, jde o druhou harmonickou atd.



Délka struny

Délka struny je rovna celočíselným násobkům poloviny vlnové délky stojaté vlny.

$$l = k \frac{\lambda}{2}, \text{ kde } k = 1, 2, 3, \dots$$

Základní frekvence kmitání

$$f_z = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2l}$$

Vyšší harmonické frekvence

$$f_k = k f_z, \text{ kde } k = 1, 2, 3, \dots$$

Výška zvuku je dána jeho frekvencí, čím vyšší je frekvence, tím je vyšší výška. U jednoduchých tónů s harmonickým průběhem určuje jejich frekvence absolutní výšku tónu. **Absolutní výška tónu** se měří přístroji pro měření zvukových frekvencí, za obvyklých podmínek ji nelze určit sluchem. Pro subjektivní hodnocení zvuku je důležitější **relativní výška tónu**, což je podíl frekvence daného tónu vůči frekvenci referenčního tónu.

Zvuky se i při stejné výšce tónu mohou lišit odlišným zabarvením. **Barva zvuku** je určena jeho spektrem - frekvencemi vyšších harmonických tónů ve složeném tónu a jejich amplitudami a fázemi. Sluchem podle barvy zvuku rozeznáváme hudební nástroje a hlasy lidí.

Příklad

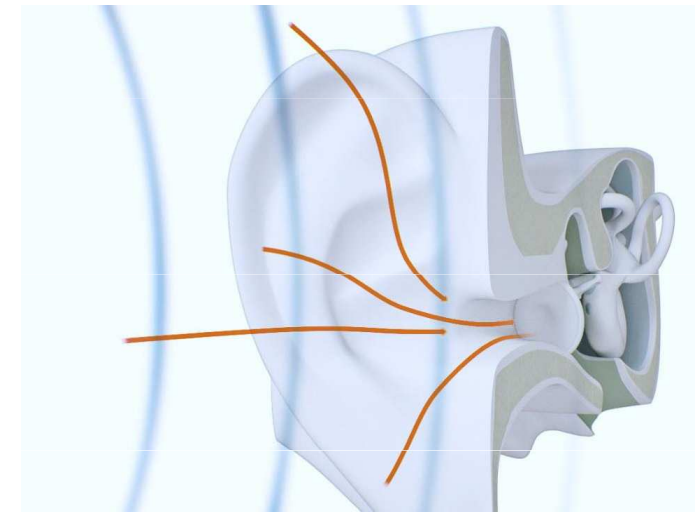
Na jednom člunu měřili hloubku moře ultrazvukem. Jaká je tam hloubka moře jestli se odražený ultrazvukový signál vrátil na člun za 0,8 s?

$$h = v \cdot \frac{t}{2}$$

$$h = 1450 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \frac{0,8 \text{ s}}{2} = 580 \text{ m}$$

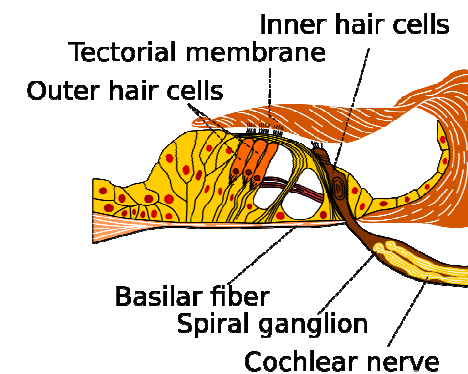
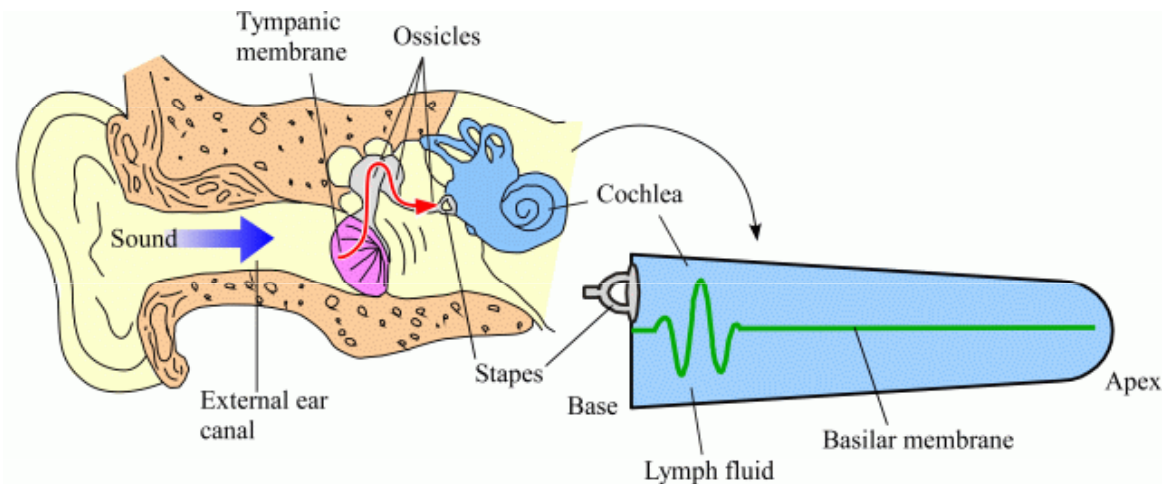
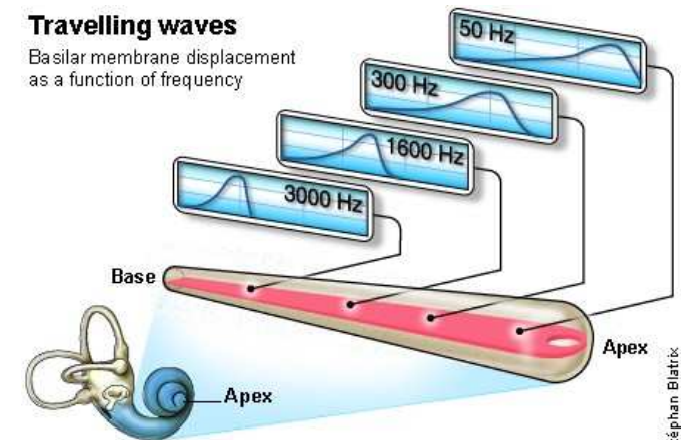
Sluch

Sluch je schopnost vnímat zvuk. Ucho je sluchový párový orgán obratlovců. Jeho základními částmi jsou vnější, střední a vnitřní ucho. Zvuk, který prochází zvukovodem naráží do bubínku, ten se rozechvěje a vibrace přenáší přes kladívko, kovadlinku a třmínek do hlemýždě. Tam na vibrace reagují smyslové buňky, které informace o zachyceném zvuku vedou pomocí sluchového nervu k dalšímu zpracování do mozku.



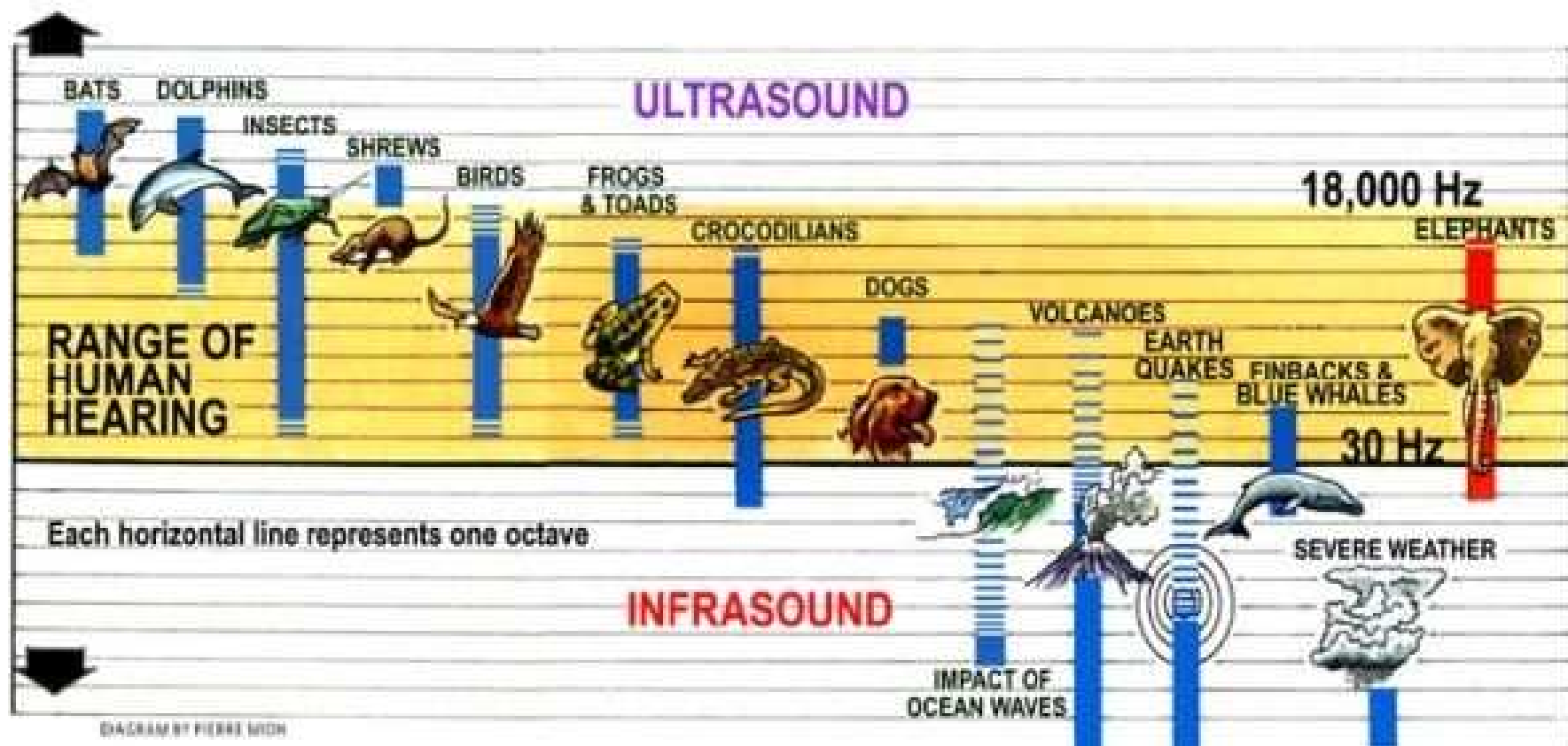
Travelling waves

Basilar membrane displacement as a function of frequency



Frekvence zvuku

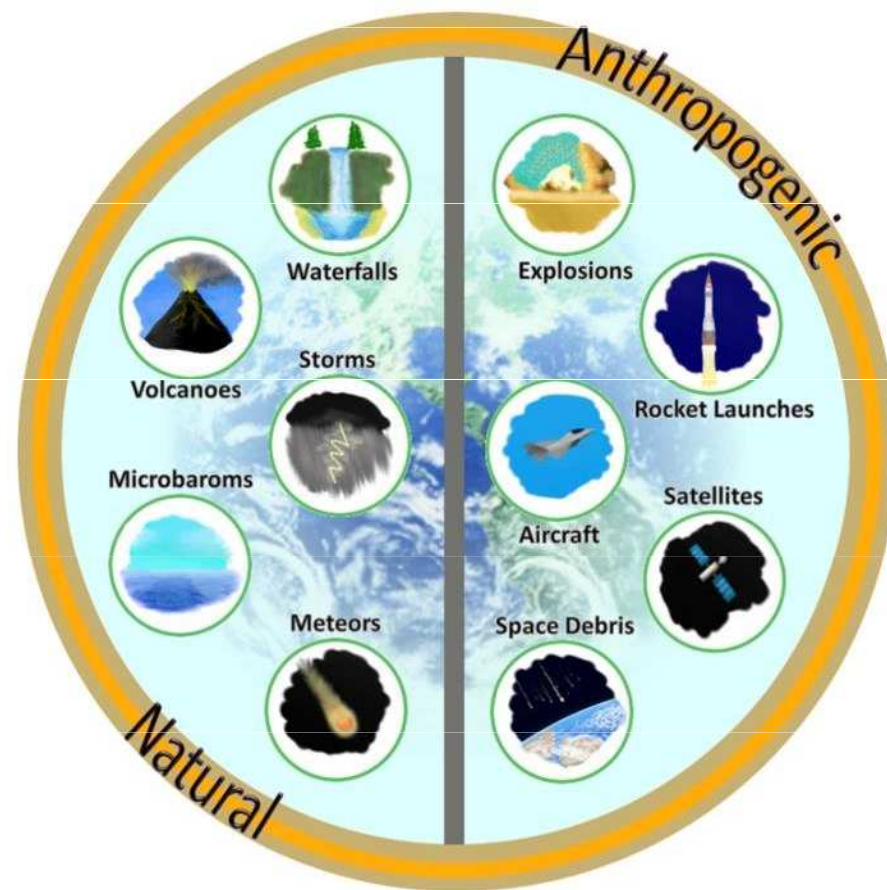
Frekvence zvukového vlnění, které je člověk schopen vnímat, jsou značně individuální a leží v intervalu přibližně 16 Hz až 20 000 Hz. Mechanické vlnění mimo tento frekvenční rozsah sluchový vjem nevyvolává, přesto se někdy také označuje jako zvuk. Frekvenci nižší než 16 Hz má **infrazvuk**, frekvenci vyšší než 20 kHz má **ultrazvuk**.



Infrazvuk

Infrazvuk je akustické vlnění, jehož frekvence je tak nízká, že ho lidské ucho není schopné zaznamenat. Přesná hranice mezi slyšitelným zvukem a infrazvukem neexistuje, ale udává se mezi 16 až 20 Hz. Spodní hranice se udává mezi 0,001 a 0,2 Hz.

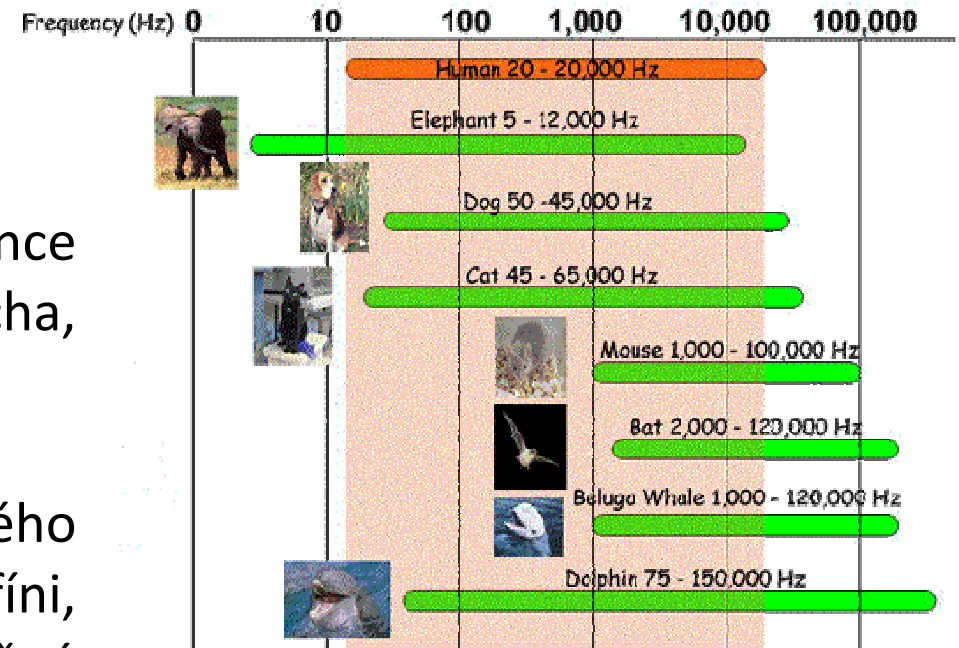
Velryby, sloni, hroši, nosorožci, okapi a aligátoři používají infrazvuk k dorozumívání.



Ultrazvuk

Ultrazvuk je akustické vlnění, jehož frekvence leží nad hranicí slyšitelnosti lidského ucha, slyšitelného zvuku, která je cca 20 kHz.

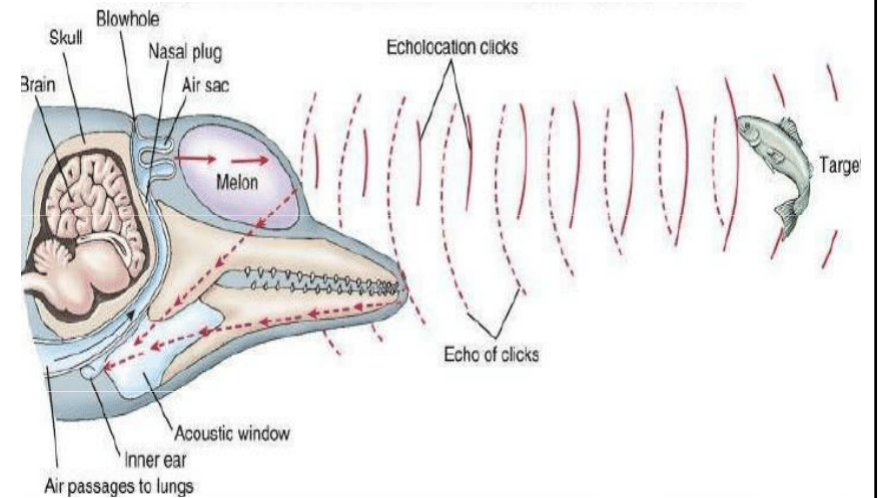
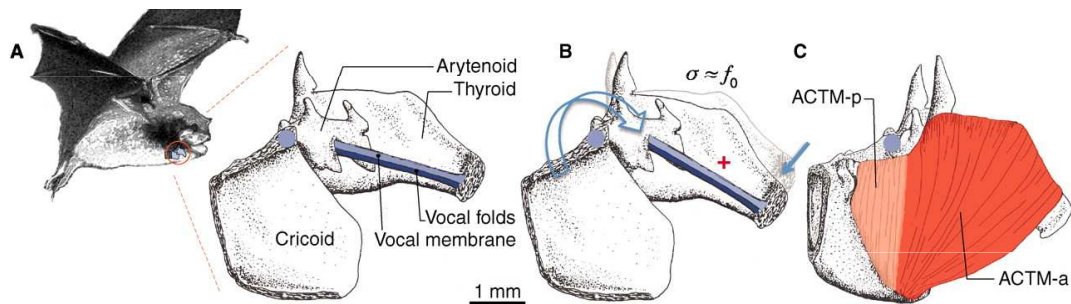
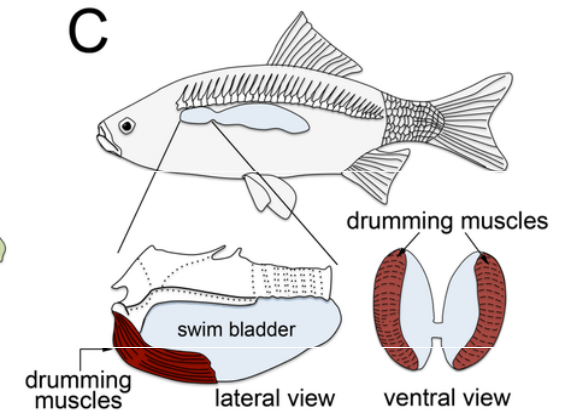
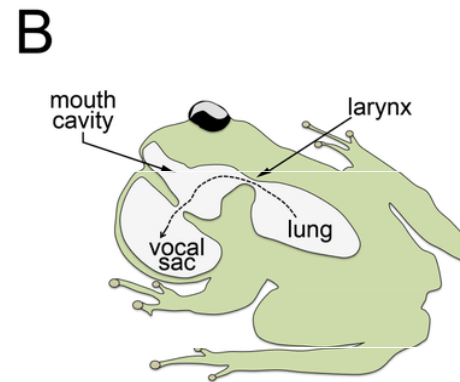
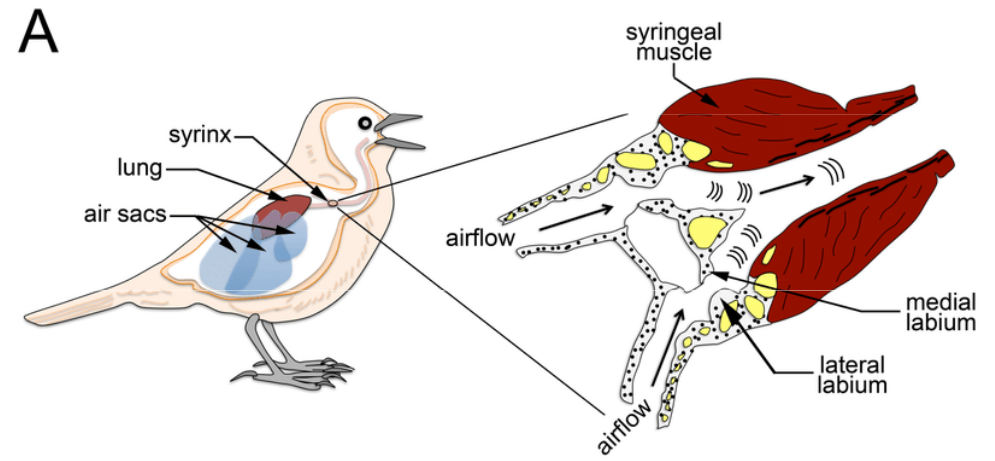
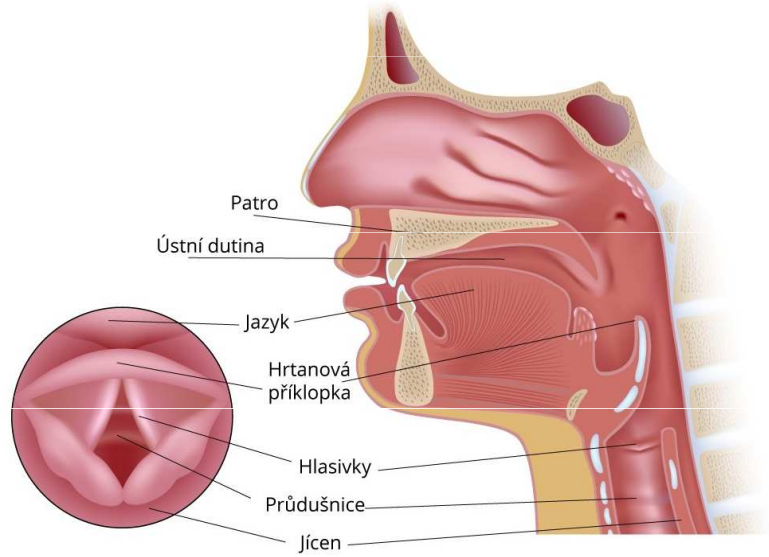
Někteří živočichové část ultrazvukového spektra vnímají, případně i vydávají (delfíni, netopýři, aj.) a využívají jej jak k běžné komunikaci, tak zejména k echolokaci.



Pes vnímá ultrazvuk až do frekvence 100 kHz, což se využívá pro cvičení a ovládání psů pomocí **ultrazvukových píšťalek**.

K plašení zvířat se používají také **ultrazvukové odpuzovače**.

Hlasové (vokální) ústrojí

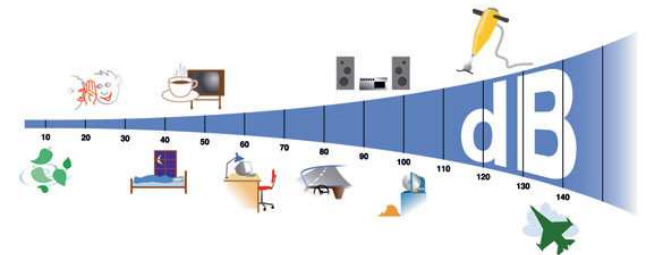


Intenzita zvuku

Zvukové vlny vycházející ze zdroje způsobují periodické zhušťování a zředování okolního pružného prostředí. Při šíření zvuku tedy dochází k tlakovým změnám, které ucho vnímá jako zvuk o různé hlasitosti. Nejnižší tlaková změna, která již vyvolá v uchu sluchový vjem, je asi 10^{-5} Pa a nazývá se **práh slyšení**. Naopak nejvyšší tlaková změna, při které ještě nevzniká v uchu pocit bolesti, je asi 10^2 Pa, a nazývá se **práh bolesti**.

K porovnávání zvuků, které vnímáme, se užívá fyzikální veličina **intenzita zvuku**. Ta je dána průměrnou energií vlnění, která projde za jednotku času (výkon zvukové vlny) jednotkovou plochou kolmou ke směru šíření.

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



Lidské ucho slyší zvuky skutečně v ohromném rozpětí intenzit, proto se namísto intenzity zvuku používá **hladina intenzity zvuku**

nebo **hladina tlaku** $B = 20 \log \frac{p}{p_0}$

$$B = 10 \log \frac{I}{I_0}$$

kde p_0 je nejnižší možný tlak, který lidské ucho zaznamená jako vjem 20 mPa, tzv. práh slyšení). Práh bolesti 130 dB odpovídá tlaku 130 Pa. Ucho je tedy schopné rozlišit akustické tlaky v rozmezí 7 řádů. Jednotkou hladiny intenzity zvuku i hladiny tlaku je decibel (dB).

Netopýr rybožravý (*Noctilio leporinus*) dokáže vyvinout ultrazvuk o intenzitě až 140 dB.

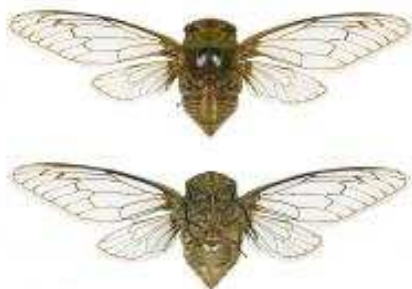


Plejtvak obrovský (*Balaenoptera musculus*), který dokáže vyvinout zvuk o intenzitě až 188 dB.



Pistolová kreveta (*Alpheus bellulus*) vystřeluje proud vody takovou rychlostí, že je doprovázen zvukem podobným výstřelu s intenzitou až 200 dB.

Samci některých druhů **cikád** vydávají zvuky o intenzitě až 120 dB a jsou slyšet na kilometr daleko.



Rychlost zvuku

Rychlost zvuku závisí na prostředí, ve kterém se zvukové vlny šíří. Nejčastěji se pod tímto pojmem míní rychlost zvuku ve vzduchu, zde záleží na atmosférických podmínkách, zejm. teplotě vzduchu.

$$v_t = 331,82 + 0,61 \cdot t \quad t \text{ je teplota v } ^\circ\text{C}$$

V suchém vzduchu o teplotě $0\text{ }^\circ\text{C}$ je rychlost zvuku $331,4\text{ m/s}$.

V suchém vzduchu o teplotě $25\text{ }^\circ\text{C}$ je však tato rychlost již $346,3\text{ m/s}$.

V pevných látkách se zvuk obecně šíří rychleji, ve vakuu se zvukové vlny nemají jak přenášet a zvuk se tedy nešíří vůbec.

Příklad

Vypočítejte rychlost zvuku ve vzduchu a) při teplotě $20\text{ }^\circ\text{C}$ a b) při teplotě $27\text{ }^\circ\text{C}$.

$$t_1 = 20\text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_1 = 331,82 + 0,61 \cdot t_1 = 331,82 + 0,61 \cdot 20 = \underline{344,02\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}}$$

$$t_2 = 27\text{ }^\circ\text{C}$$

$$v_2 = 331,82 + 0,61 \cdot t_2 = 331,82 + 0,61 \cdot 27 = \underline{348,29\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}}$$

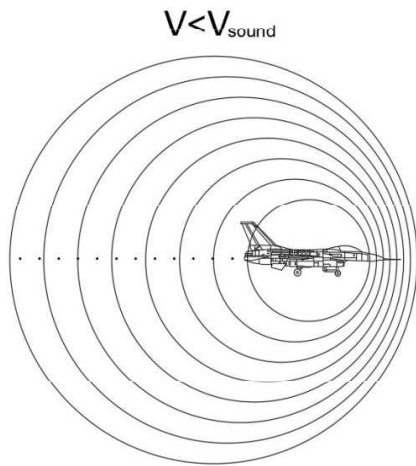
Machovo číslo

Překonání rychlosti zvuku se měří **Machovým číslem** (poměr rychlosti pohybu tělesa určitým prostředím k rychlosti šíření zvuku v témže prostředí). Protože rychlost zvuku je funkcí hustoty vzduchu, která se mění s výškou letu, je konkrétní hodnota rychlosti zvuku proměnná a platná právě pro konkrétní stav atmosféry a danou výšku letu.

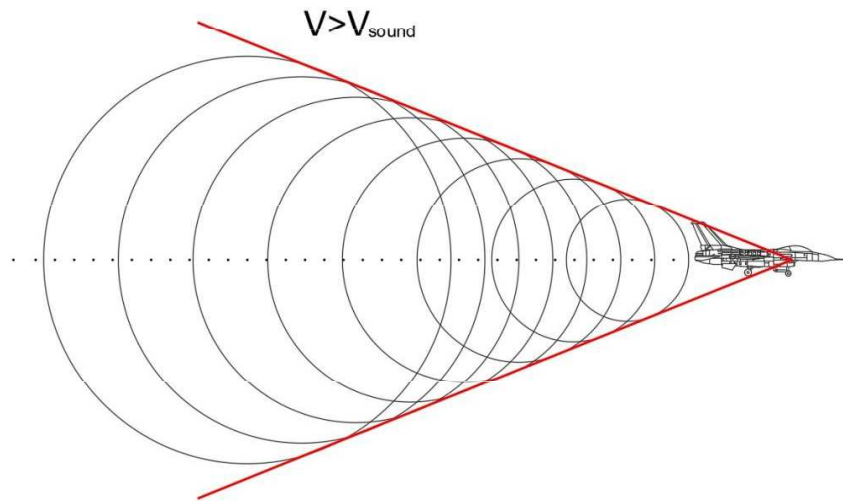
<u>Mach Number</u>	<u>Regime</u>
< 1	Subsonic
= 1	Sonic
0.8 - 1.2	Transonic
1.2 – 5	Supersonic
5 - 10	Hypersonic
> 10	High - Hypersonic



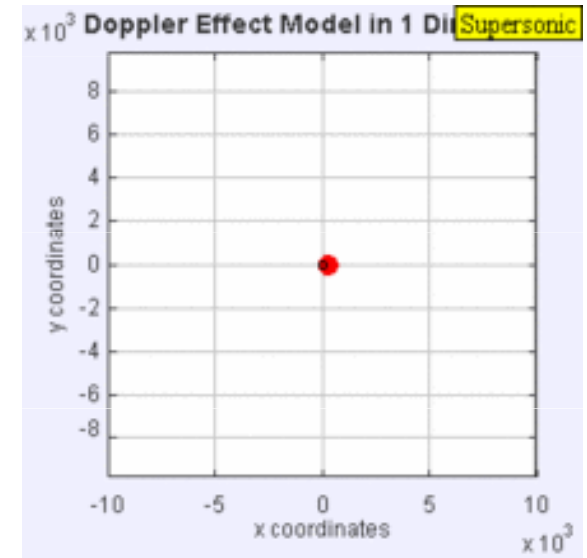
Při pohybu letadla nad hranicí rychlosti zvuku je možné pozorovat tzv. **Machův kužel**, který je možné pozorovat díky zhuštění vodních par okolo letadla.



$$V < V_{\text{sound}}$$

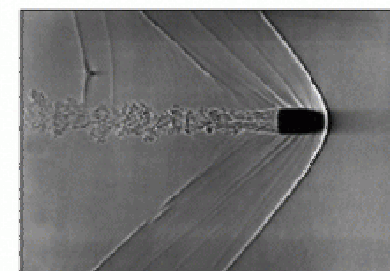
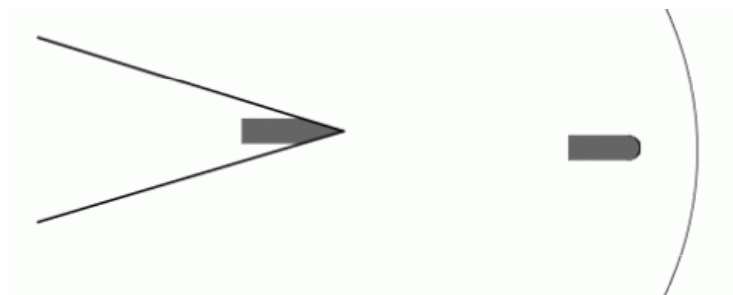
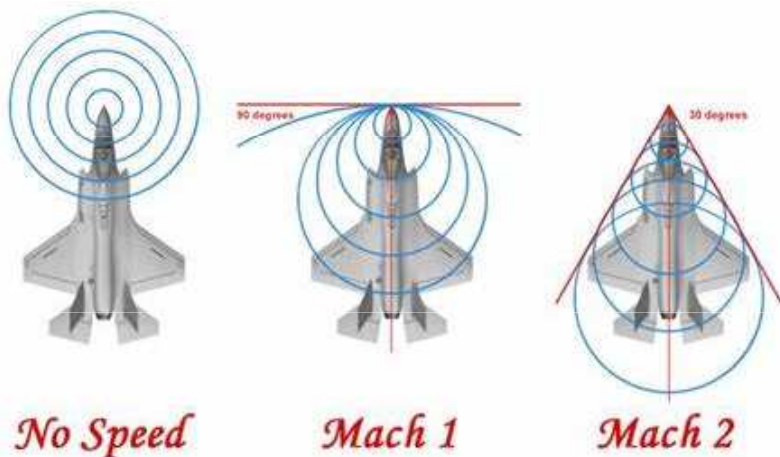


$$V > V_{\text{sound}}$$

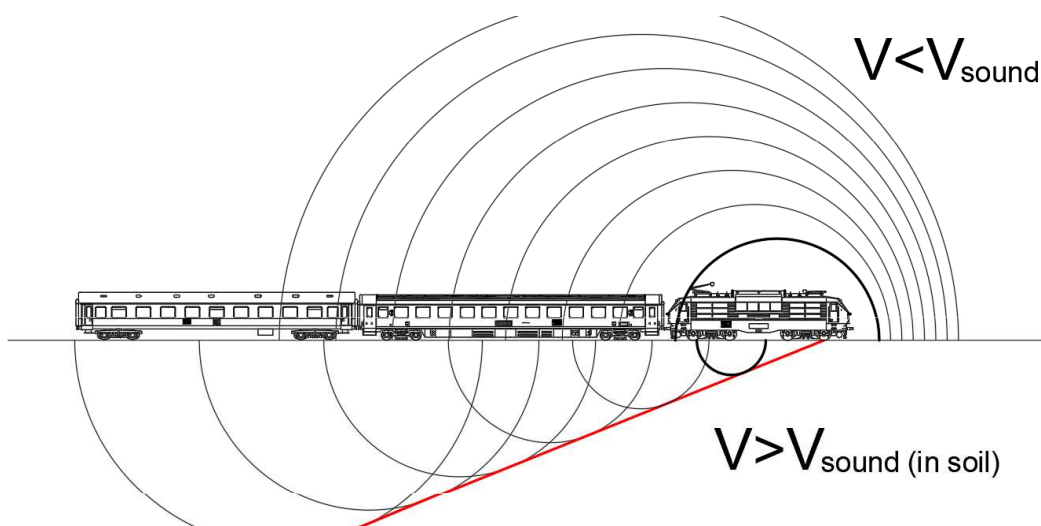


Při pohybu tělesa rychlostí větší než jakou se šíří vlny vzniká **rázová vlna**, jejíž tvar závisí na tvaru pohybujícího se tělesa. Při překonávání tlakové bariéry dochází k vyrovnání velmi rozdílných tlaků před a za tělesem, provázeném **zvukovými efekty** značné intenzity.

Značná část energie pohybu se spotřebuje na vznik zvukových a rázových vln. Když rázová vlna dosáhne k zemskému povrchu, vnímáme ji sluchem jako silnou ránu podobající se výstřelu. Tento zvuk označujeme jako **aerodynamický (sonický či akustický) třesk**. Vznik akustického třesku je jedním z důvodů, proč se letadla mohou pohybovat nadzvukovou rychlostí jen ve velkých výškách.



Letadlo pohybující se *nadzvukovou* rychlostí
a *střela* pohybující se *podzvukovou* rychlostí.

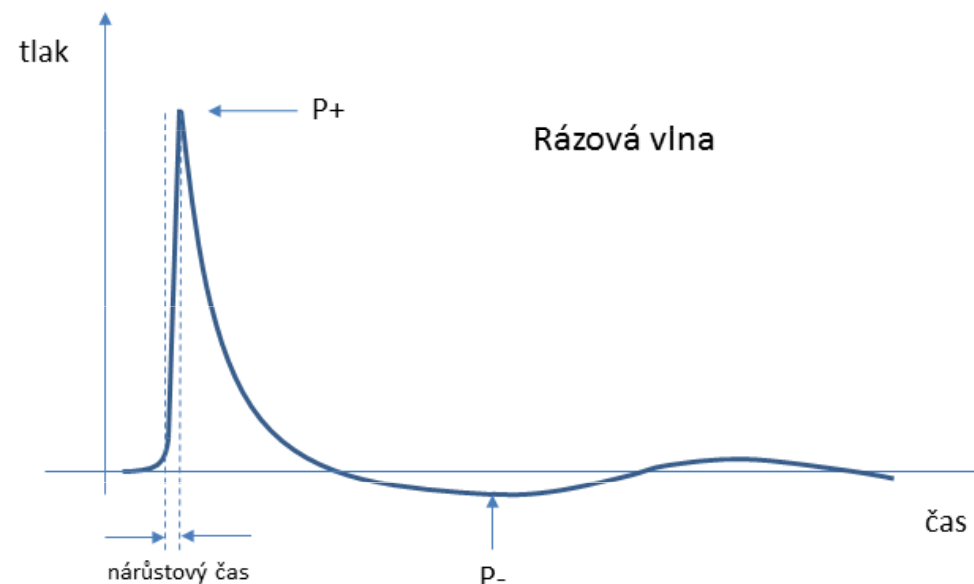
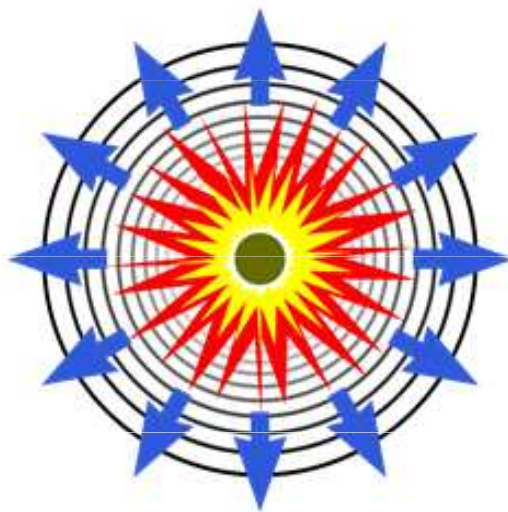


Pokud je těleso podpražcového podloží tvořeno materiálem s nízkou rychlostí šíření vln, může nastat situace, kdy se vlak bude pohybovat stejnou (nebo vyšší) rychlostí, než je šíření vln v podpražcovém podloží. To může být doprovázeno “ztekucením” zeminy a nadměrnými deformacemi kolejové jízdní dráhy (obdoba *sonického třesku* a *rázové vlny* ve vzduchu).

U rázové vlny dochází k velkému ohřevu především stykových ploch tělesa a prostředí. Špička nadzvukového letadla se při podzvukových rychlostech zahřívá na cca 60 °C, ale při nadzvukových rychlostech 240 °C, při trojnásobné rychlosti zvuku až 820 °C. Při rychlostech nad 10 km/s už se každé těleso vypaří (meteor). Teplota roste přibližně se čtvercem rychlosti.

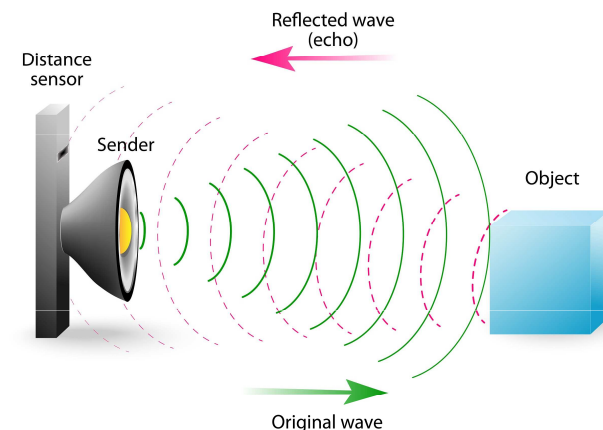
Ke vzniku rázové vlny dochází například při výbuších, jiskrových výbojích nebo při letu střely, letadla či rakety nadzvukovou rychlostí ve vzduchu, při termonukleárních reakcích v přehřáté plazmě.

Výbuch (exploze) je fyzikální jev, při kterém dochází k náhlému, velmi prudkému uvolnění energie, a prudkému lokálnímu zvýšení teploty a tlaku (obecně entropie). Tato prudká změna tlaku se může šířit do okolí jako **rázová vlna**.



Odraz zvuku, ozvěna

K **odrazu zvuku** dochází při dopadu zvuku na rozhraní dvou prostředí.

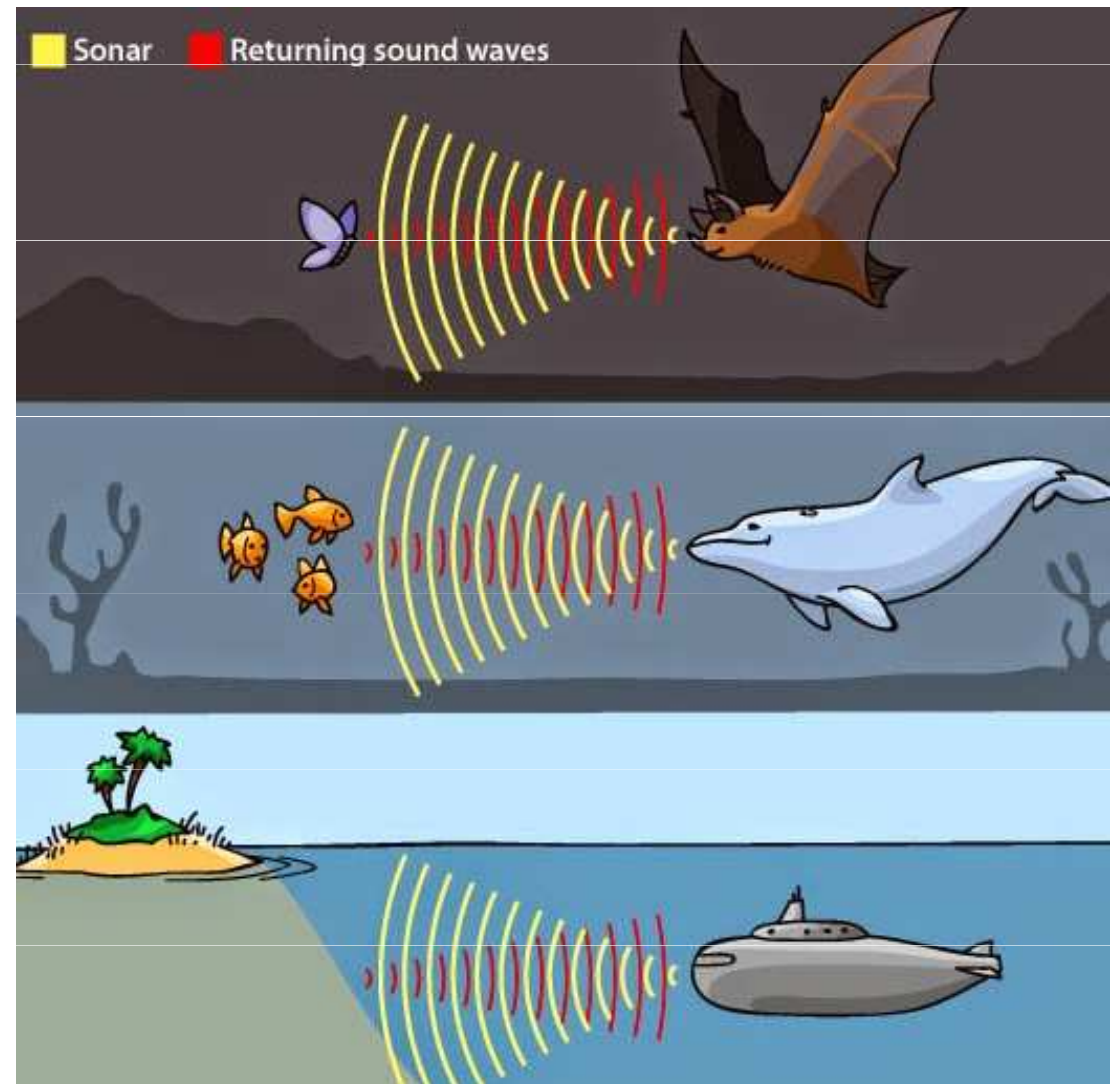
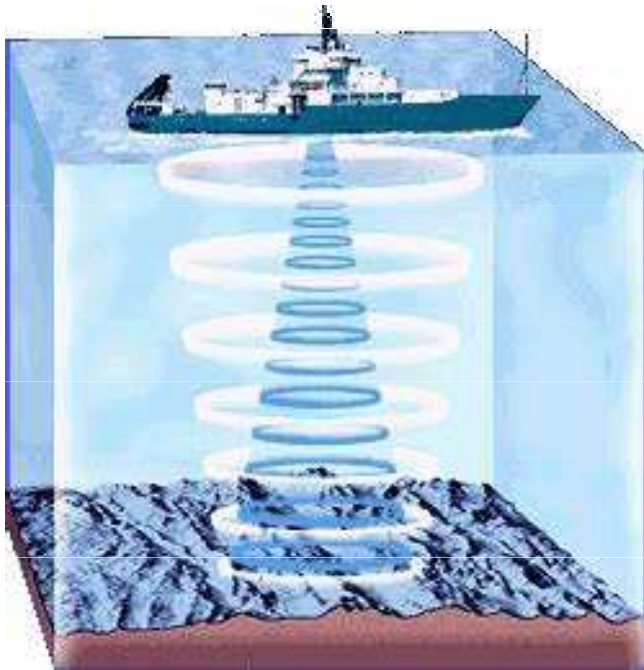


Ozvěna (echo) vzniká odrazem zvuku od rozlehlé překážky. Odražený zvuk poté posluchač vnímá zpožděně. Vhodnou překážkou pro vznik ozvěny je například skála, dno studny, jeskyně, dno propasti nebo rozlehlá budova. Člověk dokáže rozlišit zvuk vydaný zdrojem od zvuku, který se odrazil. Aby však došlo ke správnému rozlišení, musí být překážka vzdálena od zdroje nejméně 17 metrů. V tom případě zvuk urazí vzdálenost 34 metrů (tam a zpět), což mu zabere zhruba 0,1 sekundy a naše ucho tuto prodlevu zaznamená. Pokud by byla překážka blíže, zvuky by splývaly – v tomto případě nemluvíme o ozvěně, ale o **dozvuku**.



Echolokace

Při **echolokaci** zjišťuje sonar polohu a vzdálenost různých těles s pomocí zvuku anebo ultrazvuku na základě rychlosti šíření zvuku. Užívají ji kromě lidí pomocí techniky i živočichové, např. netopýři či kytovci.



Pohlcování (absorpce) zvuku

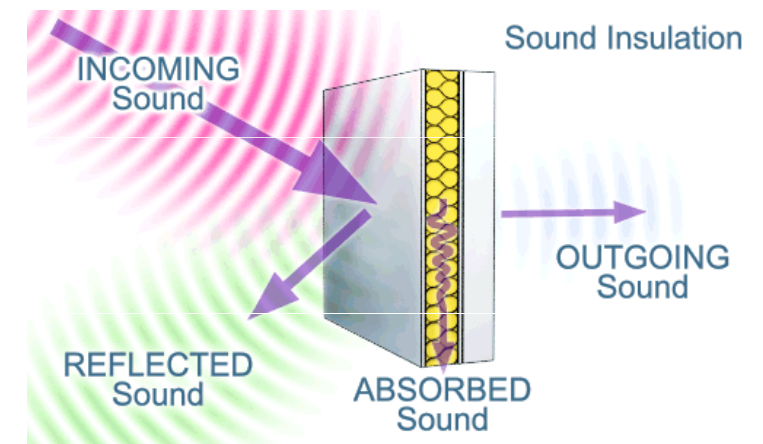
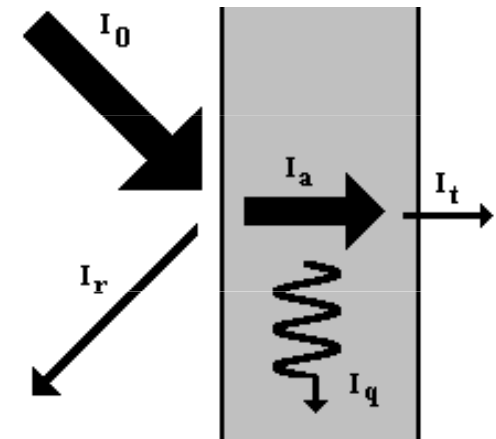
Podle zákona odrazu, je intenzita odraženého (reflektovaného) vlnění I_r vždy menší než intenzita I_0 vlnění dopadajícího na stěnu. Část zvukové energie, která pronikla do překážky je z hlediska místnosti ztracená (**pohlčená**). Platí jednoduchý vztah:

$$I_0 = I_r + I_a$$

kde I_a je intenzita pohlčeného (absorbovaného) vlnění.

$$\alpha = \frac{I_a}{I_0}$$

Při dopadu zvukového vlnění na překážku (např. stěna, dveře, ...) část zvukové energie proniká do druhého prostředí a zbytek se od překážky odráží Koeficient pohlivosti závisí především na materiálu a charakteru jeho povrchu, ale mění se i s výškou zvukového vlnění - pro nižší tóny je koeficient absorpce tónu menší a pro vyšší tóny je naopak o něco vyšší. Tento koeficient je větší u látek pórovitých (koberec, závěsy, děrované panely, ...), velmi malý je tento koeficient u materiálů kompaktních a hladkých (kovy, dlaždice, sklo, ...).



Metoda **ultrazvukové defektoskopie** využívá ultrazvuku pro kontrolu homogenity a poruch materiálu je založená na změnách prostupnosti a odrazivosti ultrazvukové vlny vlivem necelistvosti v materiálu.

Ultrazvuk se dá použít třeba při lékařském vyšetření v lékařské **ultrasonografii** nebo **echokardiografii**.

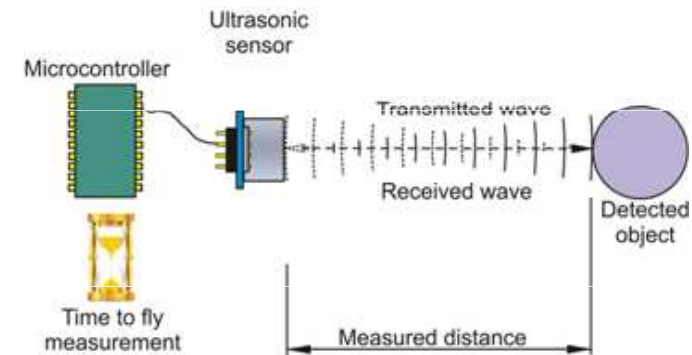
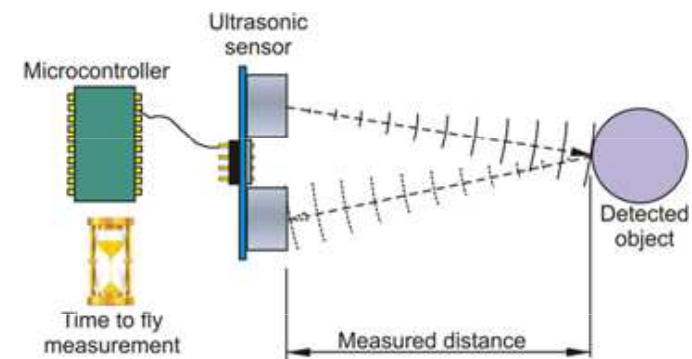
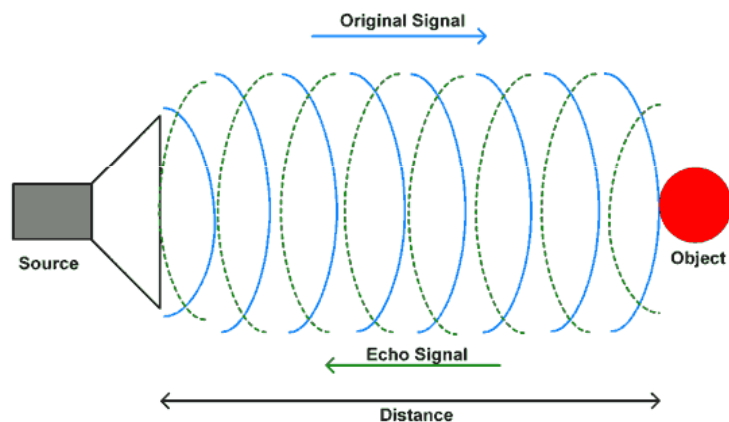
Ultrazvukový **zmlžovač** (resp. zvlhčovač vzduchu) díky rychlým vibracím destičky ponořené ve vodě generuje aerosol (mlhu). Frekvence jednotek MHz vytváří vodní kapky velikosti řádově jednotek μm .

Dále se ultrazvuk používá k **měření tloušťky materiálu**, **desinfekci vody, mléka a jiných roztoků**, **promíchávání galvanické lázně** či **vytváření suspenzí**.

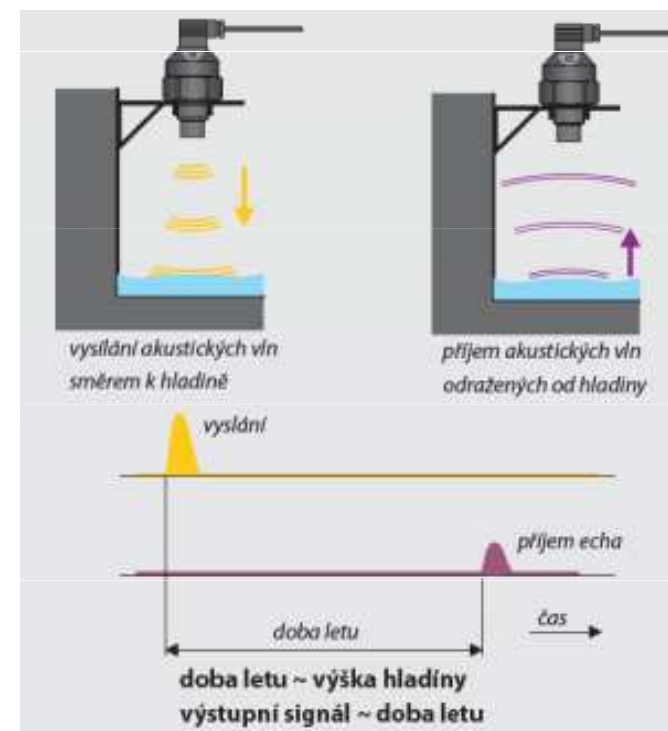
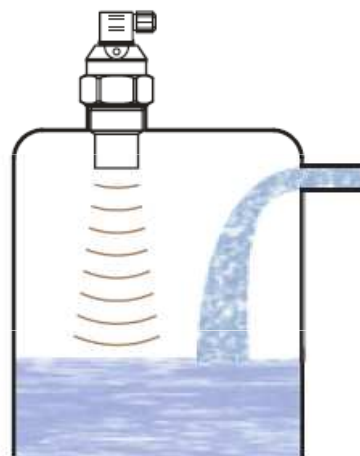
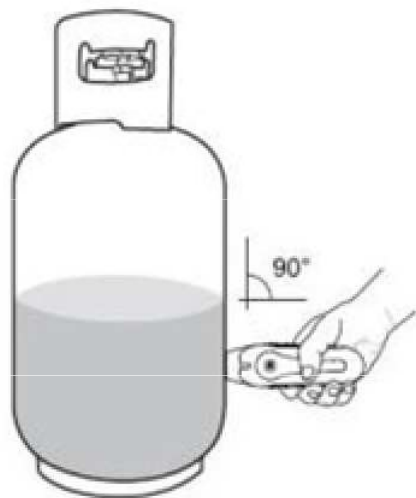


Ultrazvukové dálkoměry

Ultrazvukové vlny se odráží od měřené plochy a vrací do měřicího přístroje.

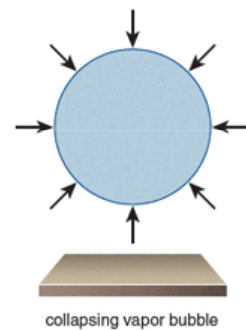
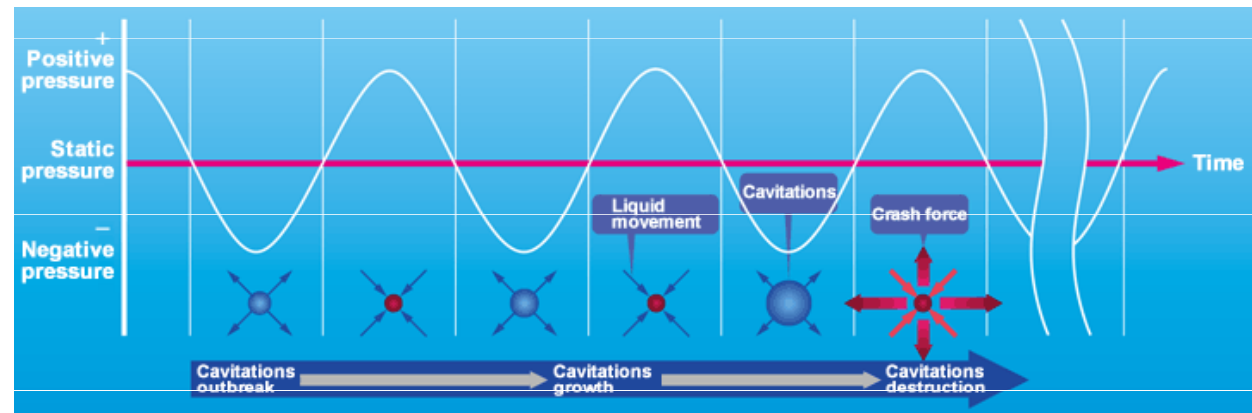
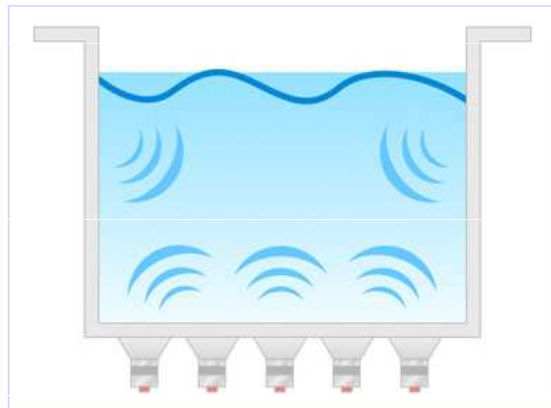


Ultrazvukové měřiče výšky hladiny

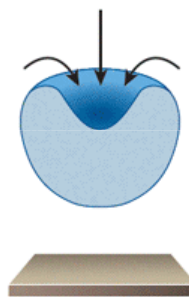


Ultrazvuková lázeň

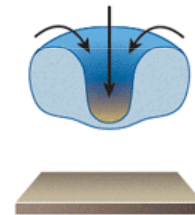
Pokles tlaku může být důsledkem průchodu intenzivní akustické vlny v periodách zředění (**akustická kavítace**). Také fokusované rázové vlny šířící se v kapalině bývají doprovázeny vznikem kavítací. Jev může být doprovázen světelným efektem (**sonoluminiscence**).



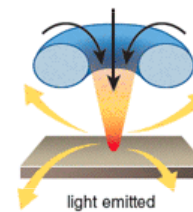
collapsing vapor bubble



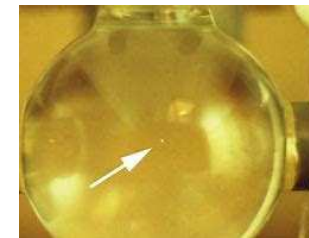
imploding shock wave



heat building

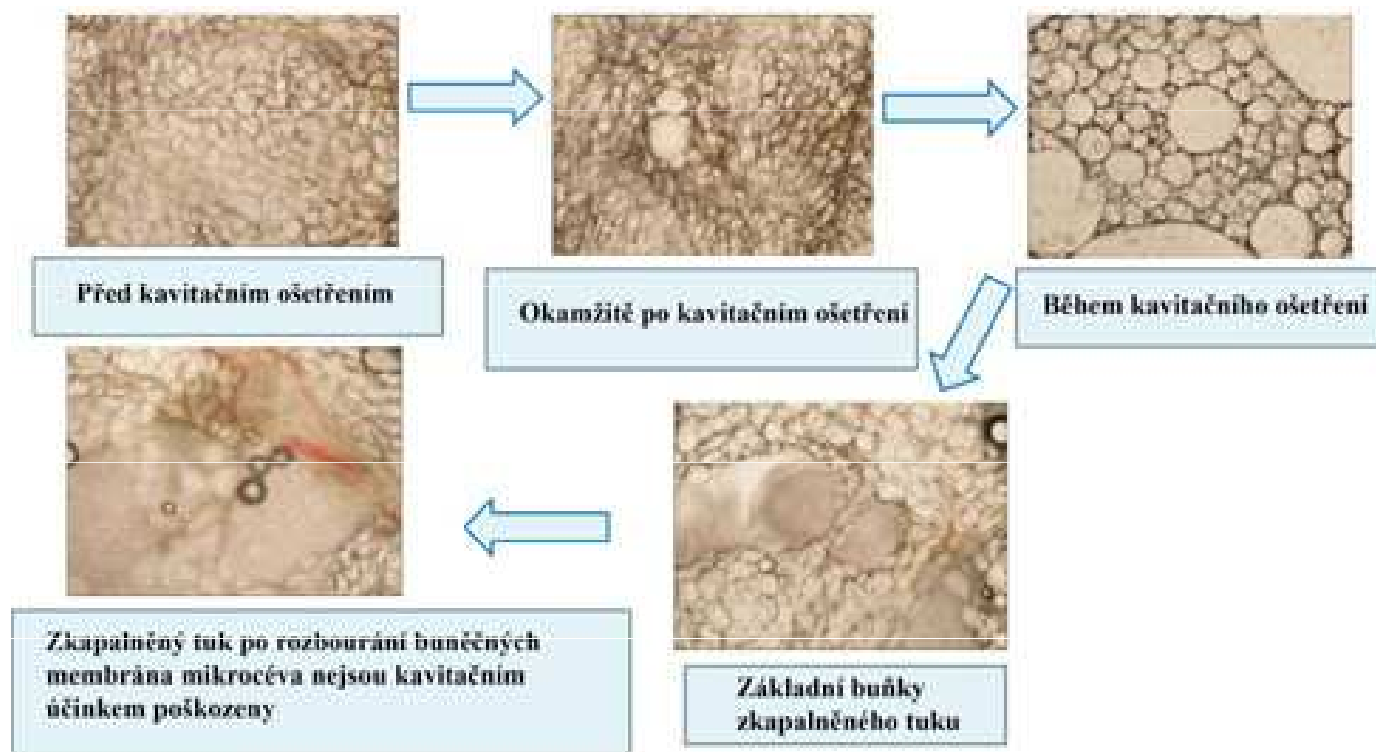


light emitted



Běžně se efektů kavítace využívá k čištění špatně dostupných míst na malých předmětech (např. u šperků). Předmět je umístěn do vodní lázně a zdroj ultrazvuku v lázni vyvolává akustickou kavítaci, která narušuje nečistoty na povrchu.

Kavitace se využívá při **ultrazvukové liposukci** sloužící k odbourávání podkožního tuku.

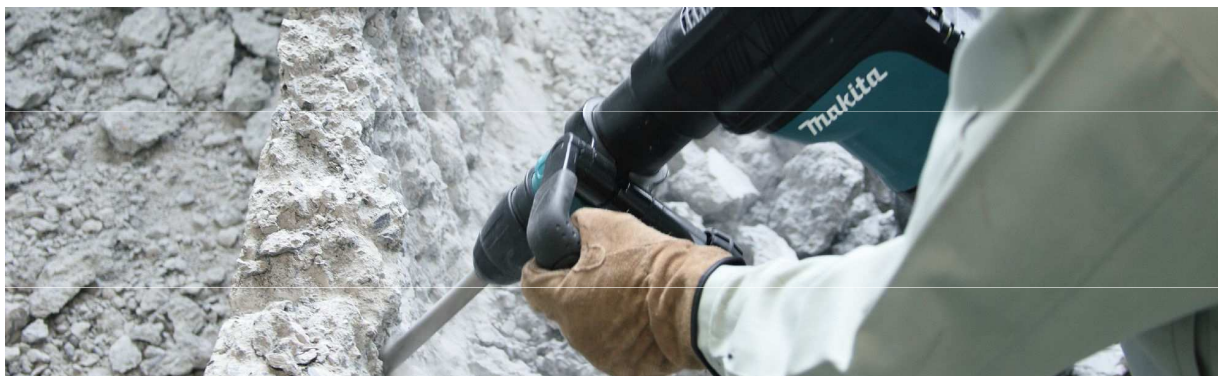


Ultrazvuková kavitace se také využívá například ve stomatologii na **odstraňování zubního kamene** a jako vedlejší efekt i při **rozrušování ledvinových kamenů** pomocí rázových vln – litotripsii.

Vibrace

Vibrace vzniká pohybem pružného tělesa nebo prostředí, jehož jednotlivé body kmitají kolem své rovnovážné polohy. Např. chodem strojů a přístrojů, motorů dopravních či jiných prostředků, vlivem mořských vln. Z těchto zdrojů se přenášejí vibrace na člověka přímo nebo prostřednictvím dalších materiálů, médií a zařízení (sedadlem traktoru, palubou lodi, plošinou vrtné soupravy, podlahou v blízkosti zdrojů vibrací, apod.).

Odezva organismu na účinek vibrací závisí na intenzitě vibrací a na délce působení vibrací na organismus, kritické jsou frekvence především od 4 do 8 Hz. I krátkodobá expozice může vyvolat nepříznivou odezvu. Systémové účinky mohou být nebezpečné, protože uvnitř organismu působí velké dynamické síly. Expozice vibracím je spojena s nepříjemnými subjektivními pocity. Obecně se jedná o únavu, snížení pozornosti, zhoršené vnímání, snížení pracovní výkonnosti.

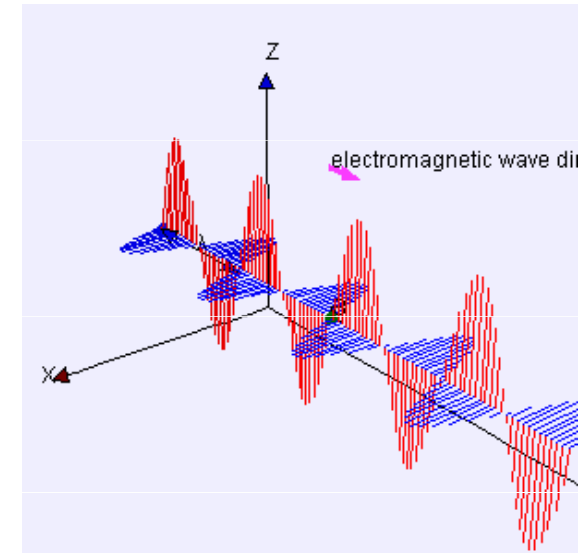


Elektromagnetické vlnění

Elektromagnetické vlnění

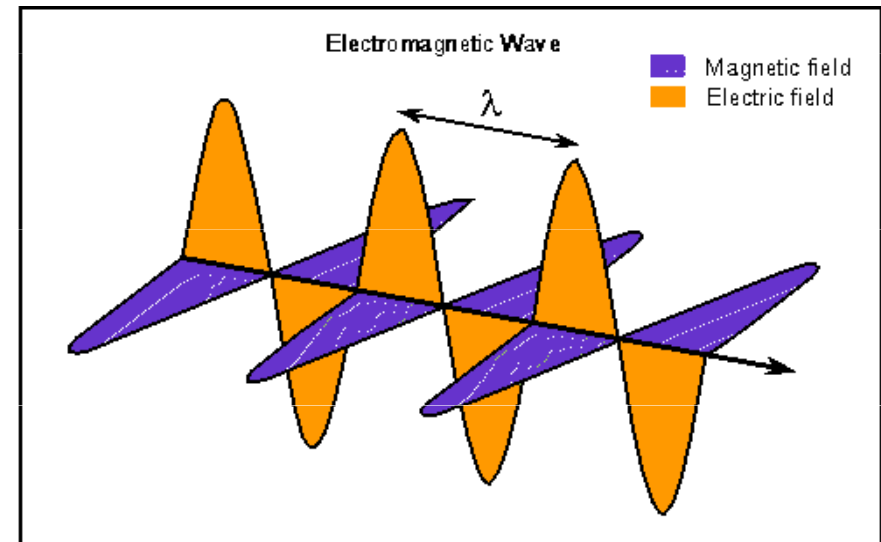
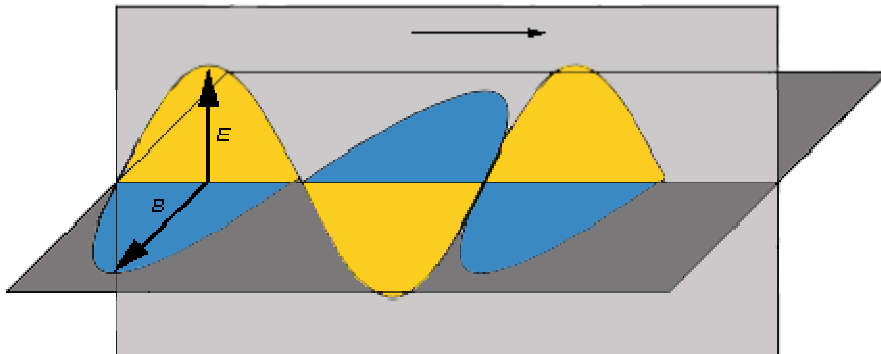
Elektromagnetické vlnění (též elektromagnetické záření) je děj, při němž se prostorem šíří příčné vlnění elektrického a magnetického pole. Popsáno je pomocí tzv. Maxwellových rovnic.

	Integrální tvar	Diferenciální tvar
1	$\oint_c H dl = I + \frac{d\psi}{dt}$	$\text{rot}H = J + \frac{\partial D}{\partial t}$
2	$\oint_c E dl = -\frac{d\phi}{dt}$	$\text{rot}E = -\frac{\partial B}{\partial t}$
3	$\oint_s D dS = Q$	$\text{div}D = \rho$
4	$\oint_s B dS = 0$	$\text{div}B = 0$



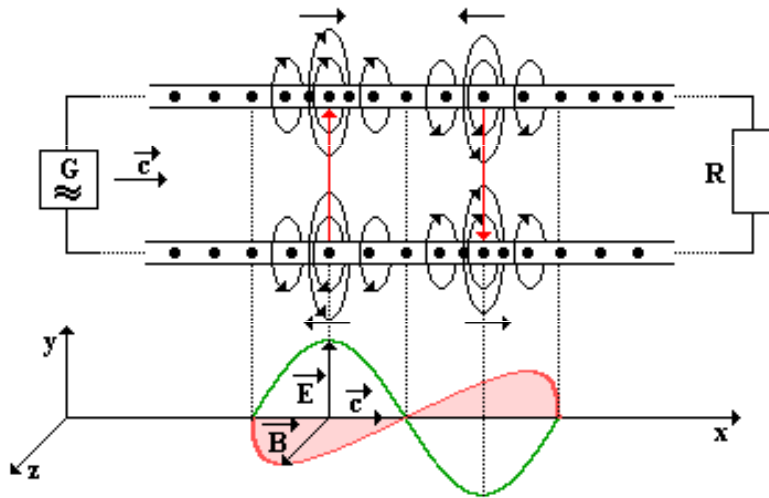
Zahrnuje dvě složky, které jsou na sebe kolmé:

- Intenzita elektrického pole **E**
- Magnetická indukce **B**



Vznik elektromagnetického záření

Při přenosu elektromagnetické energie dvou vodičovým vedením vzniká v prostoru mezi vodiči **časově proměnné silové pole**, které má složku elektrickou a magnetickou (= **elektromagnetické pole**). Energie není přenášena samotnými vodiči, ale elektromagnetickým polem mezi nimi. Tento děj má charakter vlnění.



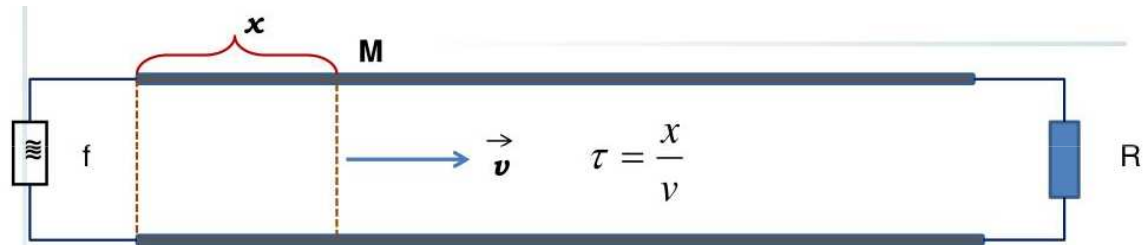
Za předpokladu, že veškerá elektromagnetická energie se na konci vedení pohltí dostáváme **postupné elektromagnetické vlnění**.

Pokud tomu tak není, nastává na konci vedení odraz vlnění a odražené vlnění se skládá s vlněním postupujícím a vzniká **vlnění stojaté**.

Elektromagnetické záření vzniká všude tam, kde se pohybuje náboj s nenulovým zrychlením, tzn. kde teče nekonstantní proud, např.

- Střídavý proud (např. anténa)
- Zpomalování nabitě částice (např. rentgenka)
- Emise záření podle Planckova vyzařovacího zákona (např. žárovka)

Rovnice postupné elektromagnetické vlny



Do bodu M dorazí elektromagnetická vlna se zpožděním τ , tedy v čase $t' = t - \tau$

$$u = U_m \sin \omega(t - \tau)$$

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

Rychlost světla ve vakuu

$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

$$c_0 = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$

$$c_0 = 1\,079\,252\,848,8 \text{ km/h}$$

c_0 je rychlost světla ve vakuu,

ϵ_0 je permitivita vakua (dielektrická konstanta)

μ_0 je permeabilita vakua (magnetická konstanta)

Rychlost šíření světla v jiných prostředích je vždy menší.

$$v_{\text{vzduch}} \approx c$$

$$v_{\text{voda}} = 2,25 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

$$v_{\text{sklo}} = 2 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1} - 1,5 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

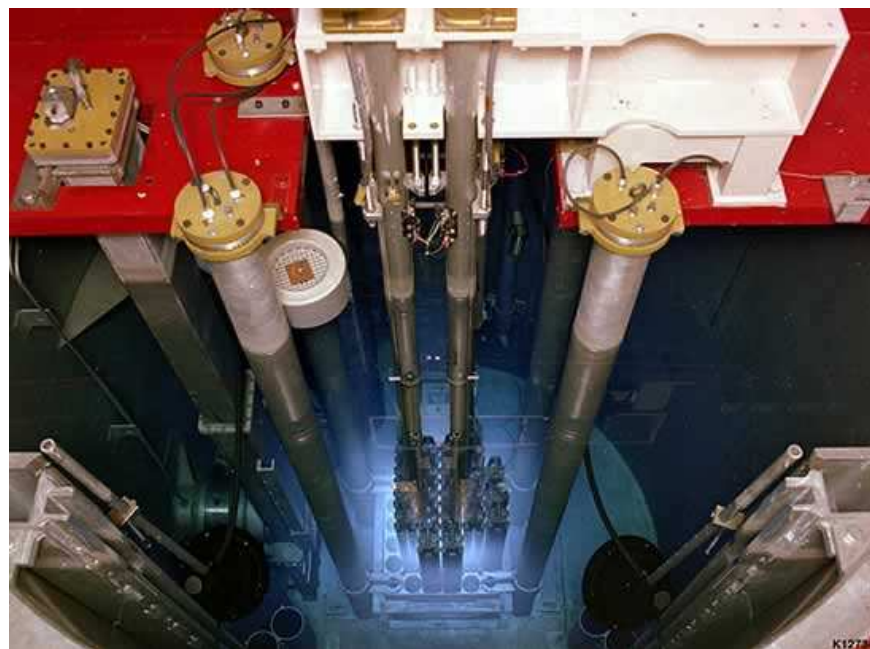
ϵ_r relativní permitivita

μ_r relativní permeabilita

Čerenkovovo záření

Čerenkovovo záření je elektromagnetická obdoba zvukové rázové vlny. Nabitá částice, která se pohybuje v optickém prostředí rychleji, než je fázová rychlost světla pro toto prostředí, vyvolává záření, které trvá po tu dobu, kdy je částice rychlejší než světlo.

Typicky lze Čerenkovův efekt pozorovat v nádržích jaderných reaktorů, kde se uranové palivo nachází v kapalině moderující neutrony, vlivem štěpení jsou produkovány částice záření beta (vysokoenergetické elektrony), které při pohybu kapalinou emitují fotony s energií několika málo eV a voda tak získává modravý nádech.



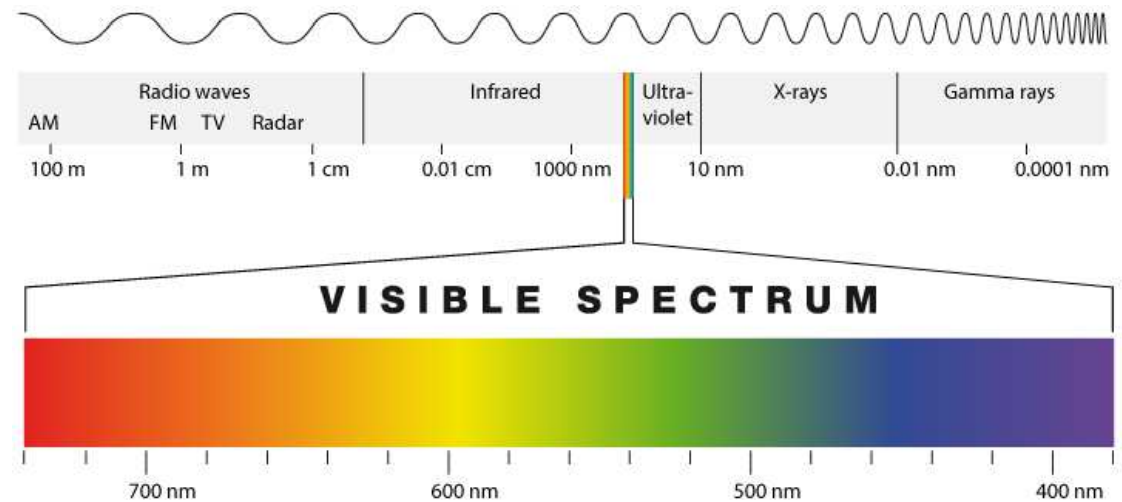
Vztah mezi vlnovou délkou a frekvencí

f – nezávisí na prostředí

λ – se mění podle rychlosti

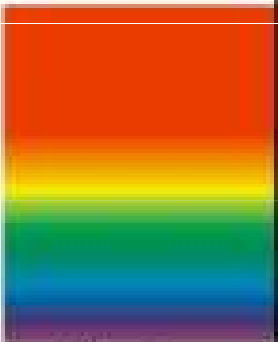
c (v) – rychlost světla ve vakuu (v daném prostředí)

Vlnová délka



Elektromagnetické vlny se **odráží** i **lámou**. Jednotlivé druhy elektromagnetického záření se liší vlnovou délkou a tvoří **spektrum** elektromagnetického záření.

Elektromagnetické záření	Vlnová délka ve vzduchu	Frekvence (Hz)
rádiové záření	30 km – 1 m	$10^4 - 3 \cdot 10^8$
mikrovlny	1 m – 0,03 mm	$3 \cdot 10^8 - 10^{13}$
infračervené záření	0,3 mm – 790 nm	$10^{12} - 3,8 \cdot 10^{14}$
světlo	790 nm – 390 nm	$3,8 \cdot 10^{14} - 7,7 \cdot 10^{14}$
ultrafialové záření	400 nm – 10 nm	$7,7 \cdot 10^{14} - 3 \cdot 10^{16}$
rentgenové záření	10 nm – 1 pm	$3 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{20}$
záření gama	< 300 pm	$> 10^{18}$

Elektromagnetické záření, vlnění	Vlnová délka λ	Použití, výskyt	Pozn.
Radiové vlny Dlouhé (DV) Střední (SV) Krátké (KV) Velmi krátké (VKV) Ultra krátké (UKV)	2 000 m – 1 000 m 600 m – 150 m 50 m – 15 m 15 m – 1 m 1 m – 0,1 m	Rozhlas, televize	Neionizující záření
Mikrovlny	0,1 m – 0,3 mm	mobilní telefony , GPS, WiMax, Wifi, mikrovlnné trouby, radar	
Infračervené záření	0,3mm – 750 nm	dálkové ovladače, noční vidění, tepelné záření	
Světlo červené oranžové žluté zelené modré fialové 	760 nm – 390 nm	Viditelné světlo	
Ultrafialové záření	390 nm – 10 nm	Opalování, solária, sterilizace	
Rentgenové záření	10 nm – 1 pm	lékařská diagnostika, průmyslová diagnostika	Ionizující záření
Záření gama	< 300 pm	ozařování nádorů, kosmické záření, jaderné reaktory	