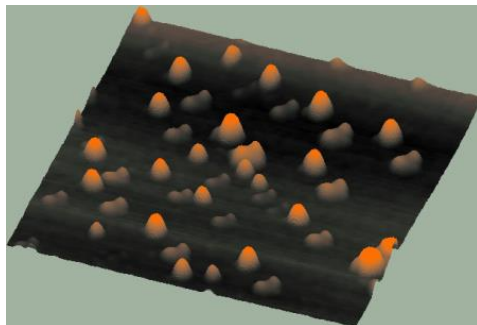
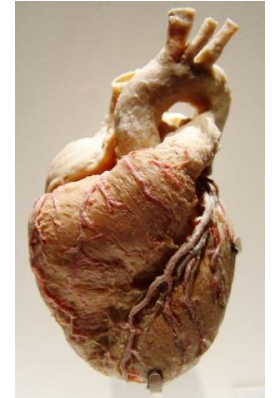
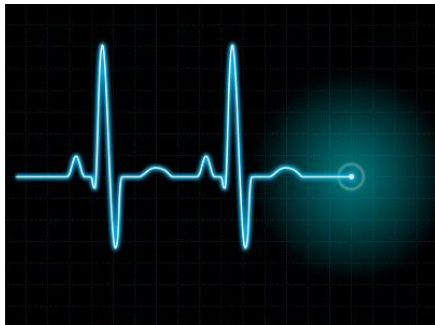


A high-speed photograph of a water droplet falling into a pool of water. The droplet is captured mid-fall, just above the surface, with a smaller droplet above it. The impact has created a series of concentric ripples that spread outwards from the point of contact. The water is a deep blue color, and the lighting is dramatic, highlighting the spherical shape of the droplets and the texture of the ripples.

# MECHANICKÉ KMITÁNÍ A VLNĚNÍ

# 1. Mechanické kmitání

## 1.1 Kmitavý pohyb

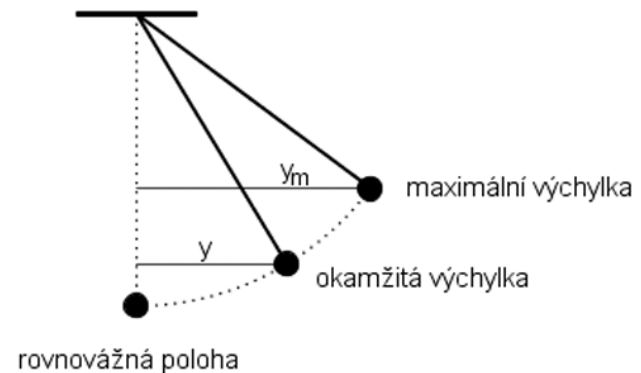
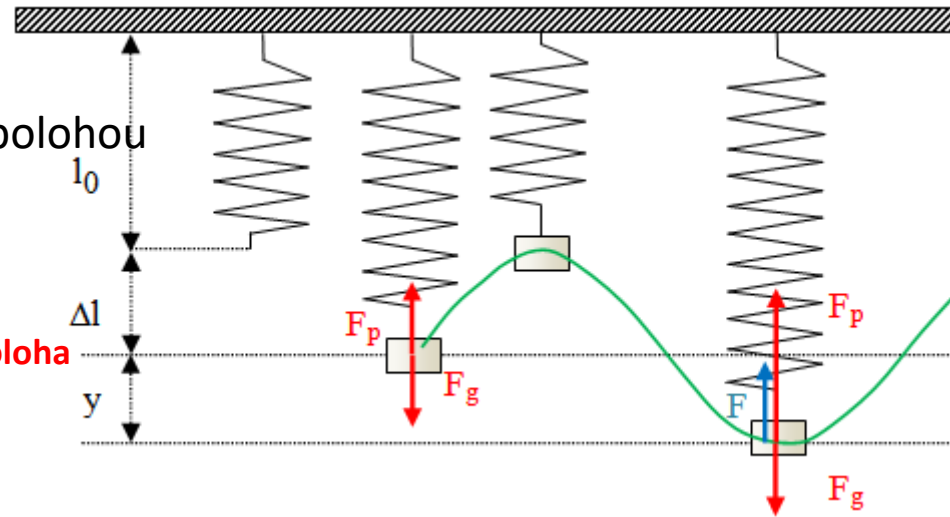
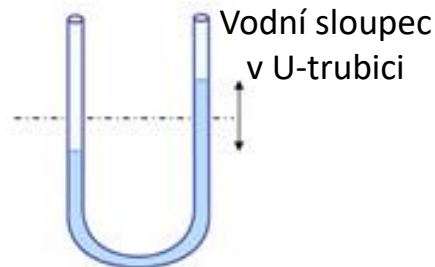
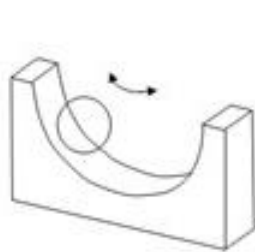
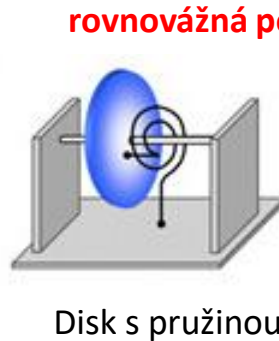
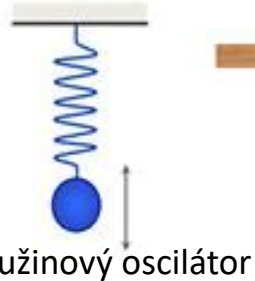


# 1. Mechanické kmitání

## 1.1 Kmitavý pohyb

### Charakteristika kmitavého pohybu

- těleso kmitá kolem tzv. **rovnovážné polohy**
- jde o **periodický pohyb**
  - pravidelné průchody tělesa rovnovážnou polohou
    - **poloha, ve které je tělo v klidu**
- Mechanický oscilátor
  - fyzické
- Kyvadlo → matematické
  - fyzické



Kyvadlo

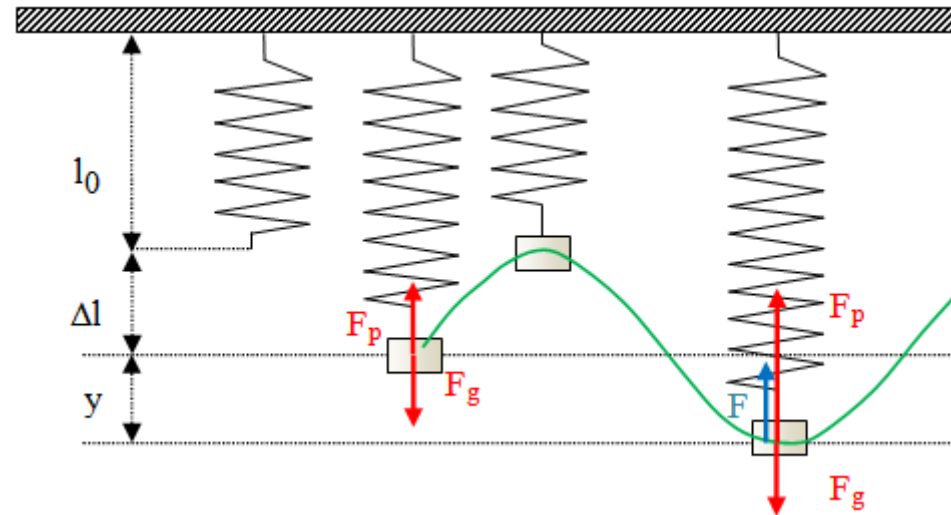
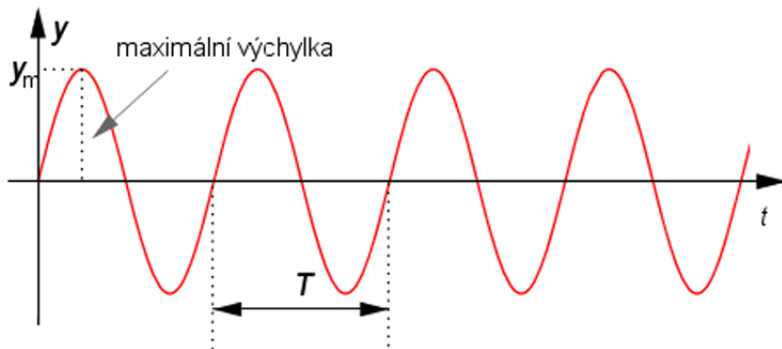
Kulička na U-rampě

# 1. Mechanické kmitání

## 1.1 Kmitavý pohyb

### Časový průběh kmitavého pohybu

- časový průběh je **sinusoida**
- Závislost okamžité výchylky  $y$  na čase  $t$
- rychlost se mění – **nerovnoměrný pohyb**



### Perioda a frekvence

- $y_m$  – **amplituda výchylky** (maximální výchylka)
- $T$  – **perioda** → doba jednoho kmitu [ $T$ ] = s (sekunda)
- $f$  – **frekvence** → počet kmitů za 1 s [ $f$ ] = Hz (hertz)

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

- Kmitání** – kvazistacionární děj → je funkcí času
- Vlnění** – nestacionární děj → je funkcí času i prostorových souřadnic

# 1. Mechanické kmitání

## 1.1 Kmitavý pohyb

### Tabulka period a frekvencí různých kmitavých dějů

Doplňte tabulku:

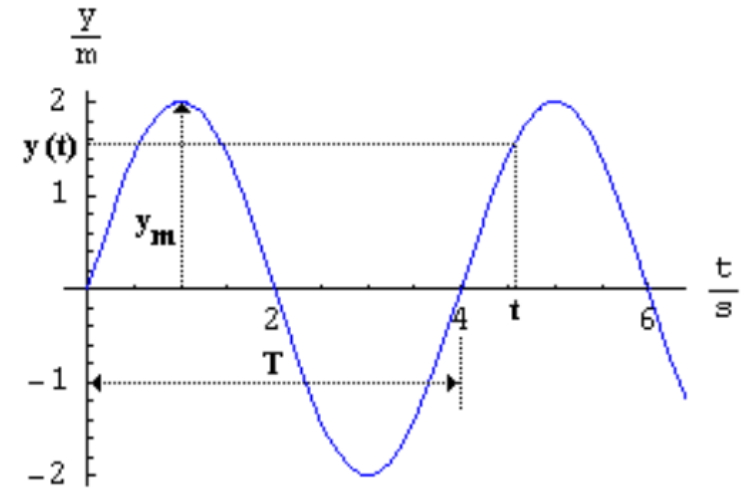
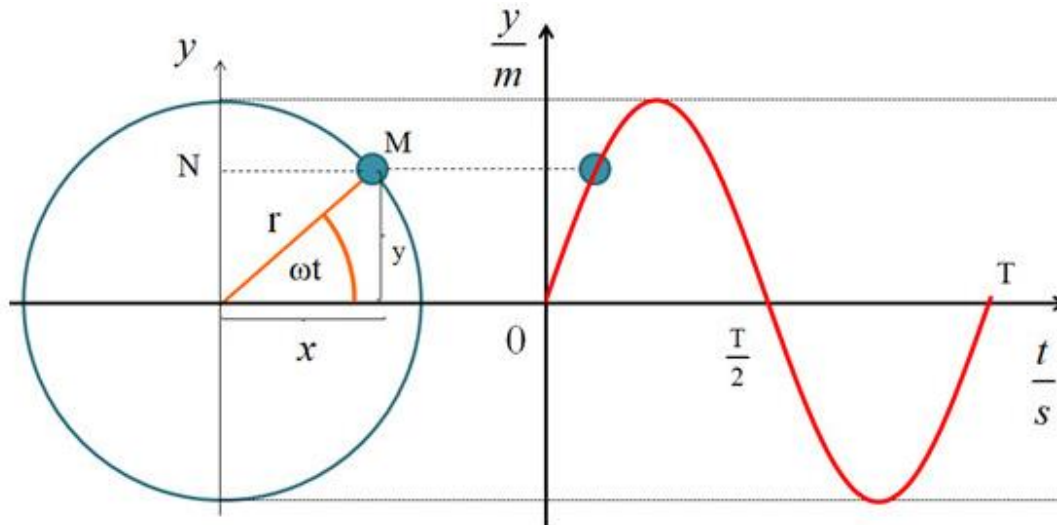
| děj             | Perioda T (s)                               | Frekvence f (Hz)      |
|-----------------|---|-----------------------|
| lidské srdce    |   | 1,25                  |
| $\approx I (A)$ |   | 50                    |
| ladička         |   | 440                   |
| čas. signál     | $10^{-3}$                                   |                       |
| CPU (uhlík)     | $10^{-11}$                                  |                       |
| mobilní síť 4G  |   | 5 GHz, 17 GHz, 60 GHz |
| satelitní TV    | $8,55 \cdot 10^{-11}$ až $8 \cdot 10^{-11}$ |                       |

# 1. Mechanické kmitání

## 1.2 Harmonické kmitání – okamžitá výchylka, rychlost, zrychlení

### Harmonické kmity

- časový průběh kmitů je **sinusový**
- $y$  - okamžitá výchylka**  $[y] = \text{m}$
- kmitavý pohyb je analogický rovnoměrnému pohybu po kružnici promítnutého do časové osy



$$\omega = \frac{\varphi}{t} \rightarrow \varphi = \omega t$$

$$\sin \varphi = \frac{y}{r} \rightarrow y = r \sin \varphi$$

$$r = y_m$$

### Rovnice kmitavého pohybu

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

- $\omega$  - úhlová frekvence**  $[\omega] = \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$
- $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$**
- Harmonické kmity** – sinusový průběh
- Periodický průběh** – obecně nesinusový průběh

# 1. Mechanické kmitání

## 1.2 Harmonické kmitání – okamžitá výchylka, rychlost, zrychlení

### Okamžitá rychlost

- časový průběh kmitů je **kosinusový**
- $v$  – **okamžitá rychlost**  $[v] = \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
- $v_m$  – **amplituda rychlosti**

$$v_m = \omega y_m$$

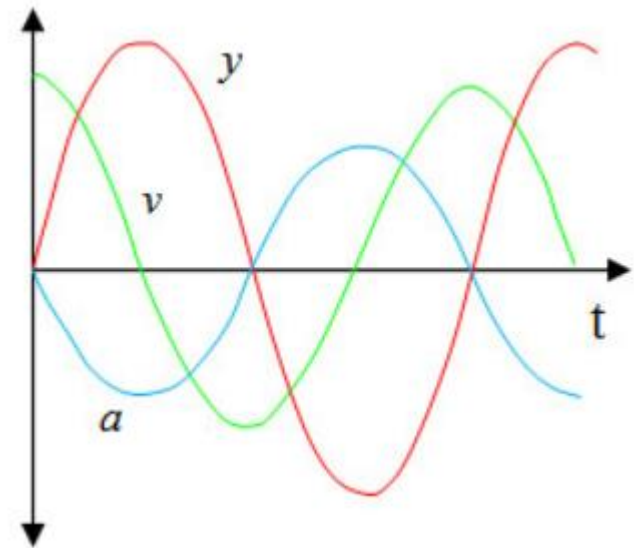
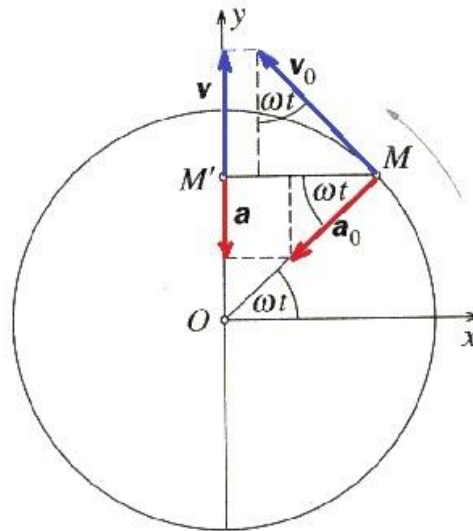
$$\cos(\omega t) = \frac{v}{v_0} \rightarrow v = v_0 \cos(\omega t)$$

$$v_0 = v_m$$

$$\sin(\omega t) = \frac{a}{a_0} \rightarrow a = a_0 \sin(\omega t)$$

$$a_0 = a_m$$

$$v = v_m \cos(\omega t) = \omega y_m \cos(\omega t)$$



### Okamžité zrychlení

- $\omega t$  – **fáze kmitavého pohybu**
- $a$  – **okamžité zrychlení**  $[a] = \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
- $a_m$  – **amplituda zrychlení**
- směr okamžitého zrychlení míří proti okamžité výchylce (znaménko minus)

$$a_m = \omega^2 y_m$$

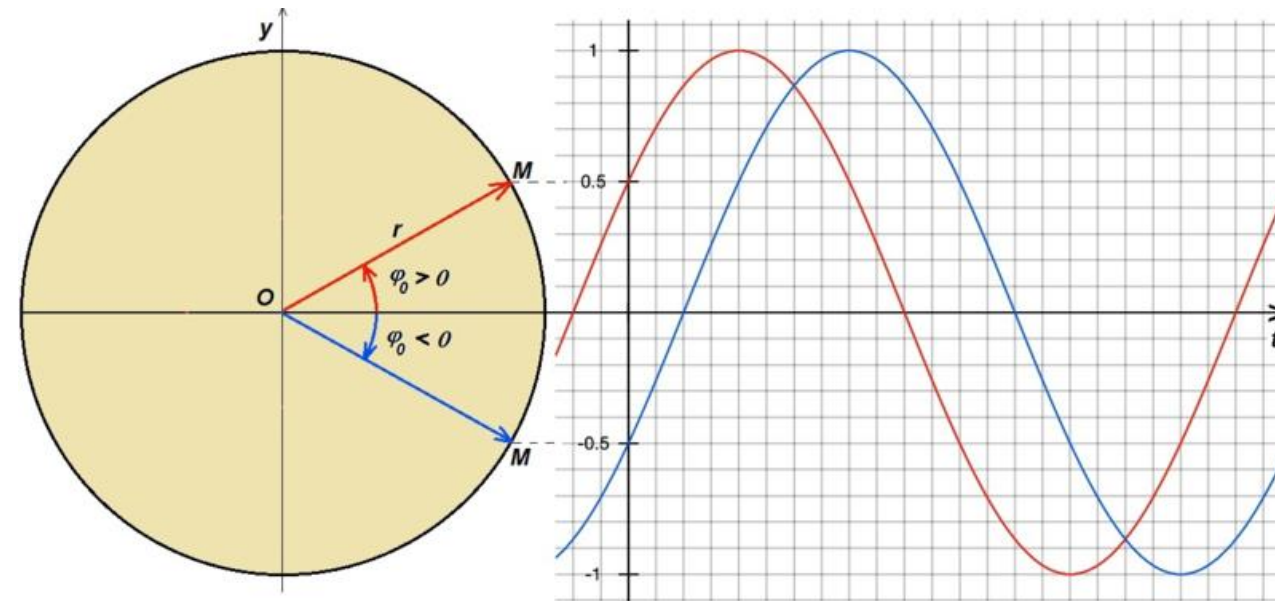
$$a = -a_m \sin(\omega t) = -\omega^2 y_m \sin(\omega t) = -\omega^2 y$$

# 1. Mechanické kmitání

## 1.2 Harmonické kmitání – počáteční fáze

Počáteční fáze kmitavého pohybu –  $\varphi_0$       $[\varphi_0] = \text{rad}$

- graf okamžité výchylky nezačíná v bodě  $[0;0]$
- čas začínáme měřit v okamžiku, kdy oscilátor neprochází rovnovážnou polohou



$$y = y_m \sin(\omega t + \varphi_0)$$

$$v = v_m \cos(\omega t + \varphi_0) = \omega y_m \cos(\omega t + \varphi_0)$$

$$a = -a_m \sin(\omega t + \varphi_0) = -\omega^2 y_m \sin(\omega t + \varphi_0)$$

# 1. Mechanické kmitání

## 1.3 Složené kmitání

- uvažujeme, koná-li těleso více harmonických pohybů současně
- výsledná výchylka je dána principem superpozice:  $\vec{y} = \vec{y}_1 + \dots + \vec{y}_n$
- **matematicky: součet dvou (a více) funkcí sinus (kosinus)**

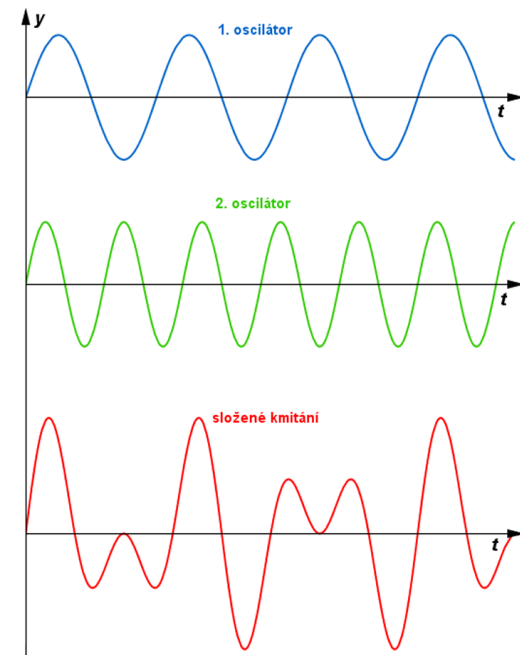
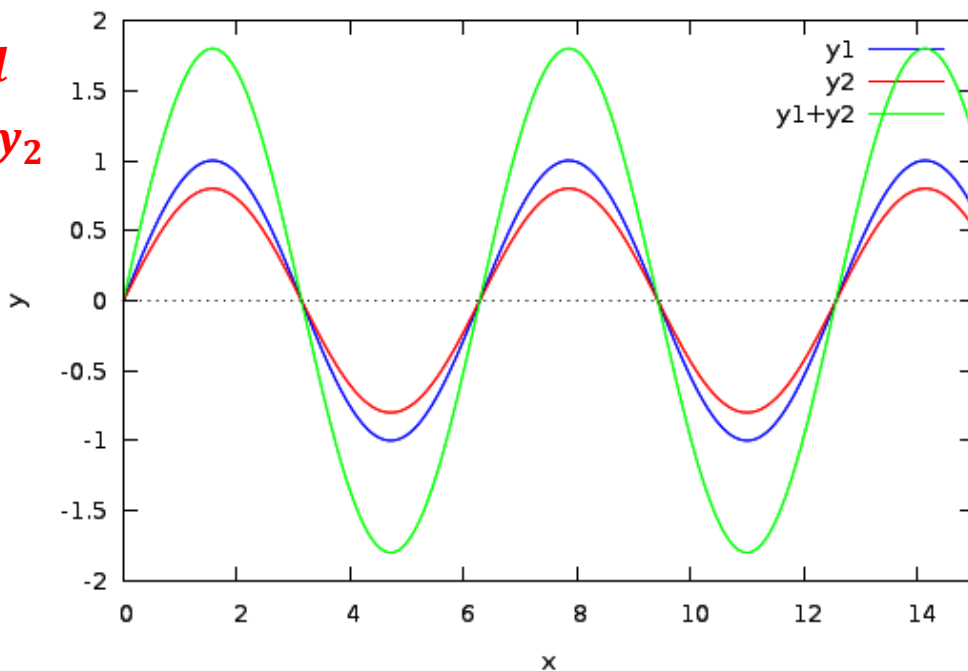
Fázový rozdíl –  $\Delta\varphi$

$$\Delta\varphi = \varphi_{02} - \varphi_{01}$$

- **Izochronní kmity** – pro dvě harmonické veličiny o stejné frekvenci
- velikost výsledné výchylky je dána **součtem okamžitých výchylek**

$$\Delta\varphi = 0 \text{ rad}$$

$$y = y_1 + y_2$$

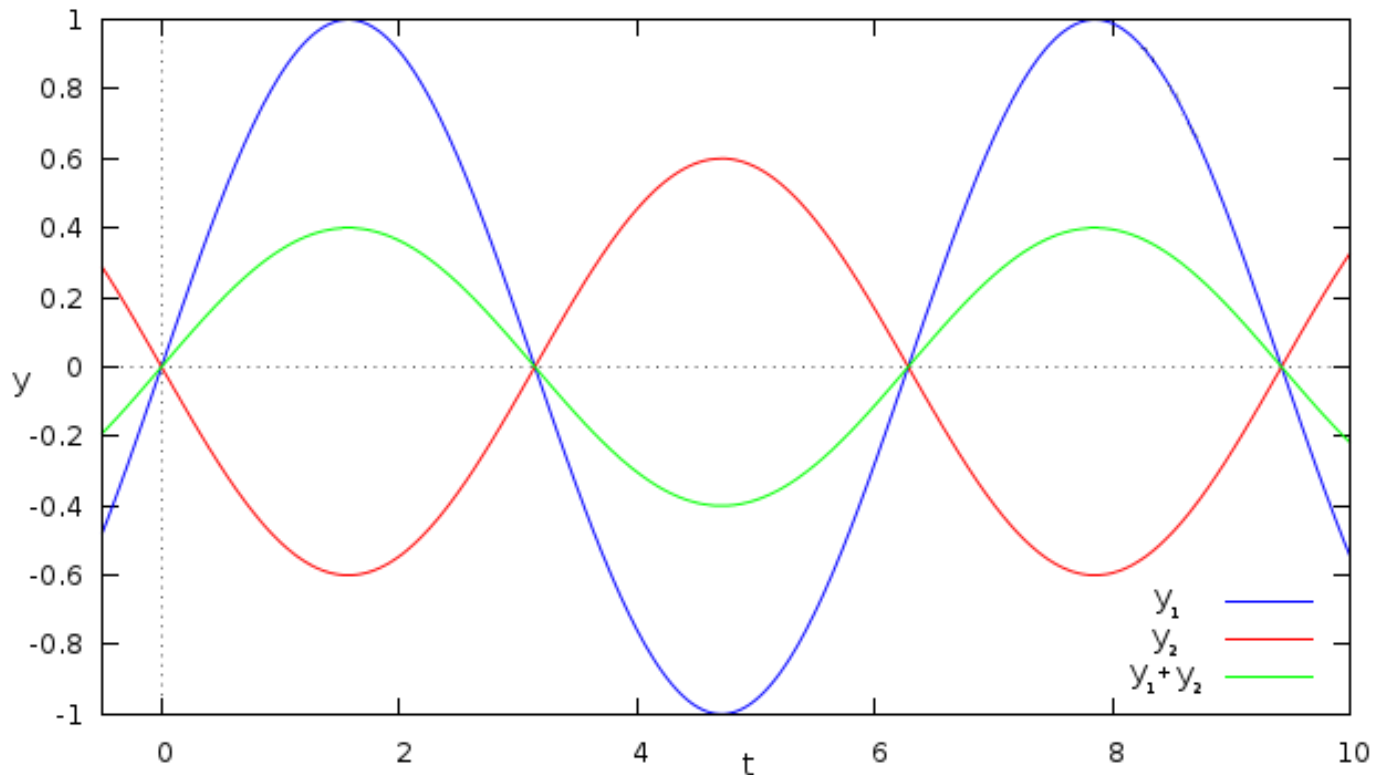


# 1. Mechanické kmitání

## 1.3 Složené kmitání

- **Izochronní kmity** – pro dvě harmonické veličiny o stejné frekvenci
- velikost výsledné výchylky je dána **rozdílem okamžitých výchylek**

$$\Delta\varphi = \pi \text{ rad} \Rightarrow y = y_1 - y_2$$



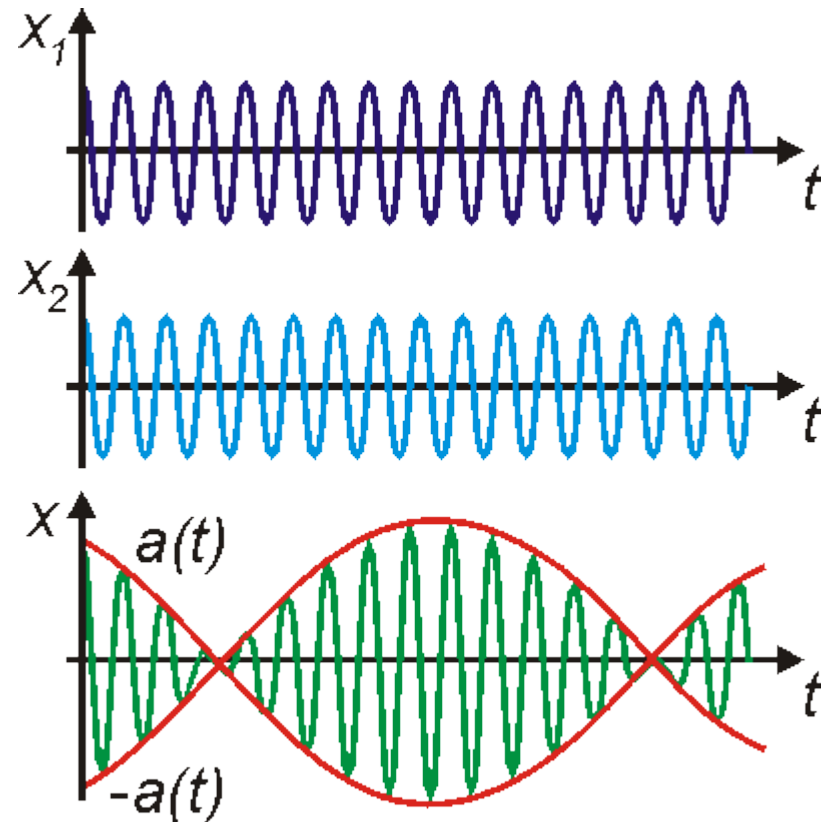
# 1. Mechanické kmitání

## 1.3 Složené kmitání

### Rázy – záněje

- **Neizochronní kmity** – pro dvě harmonické veličiny o různých, ale blízkých frekvencích
- vznikají tzv. **rázy** (v akustice zvané záněje)
- Online: [https://www.walter-fendt.de/html5/phcz/beats\\_cz.htm](https://www.walter-fendt.de/html5/phcz/beats_cz.htm)
- **frekvence výsledné amplitudy rázů:**

$$f = f_1 - f_2$$



# 1. Mechanické kmitání

## 1.4 Dynamika kmitavého pohybu

### Pohybová rovnice

- vychází z 2. Newtonova pohybového zákona:

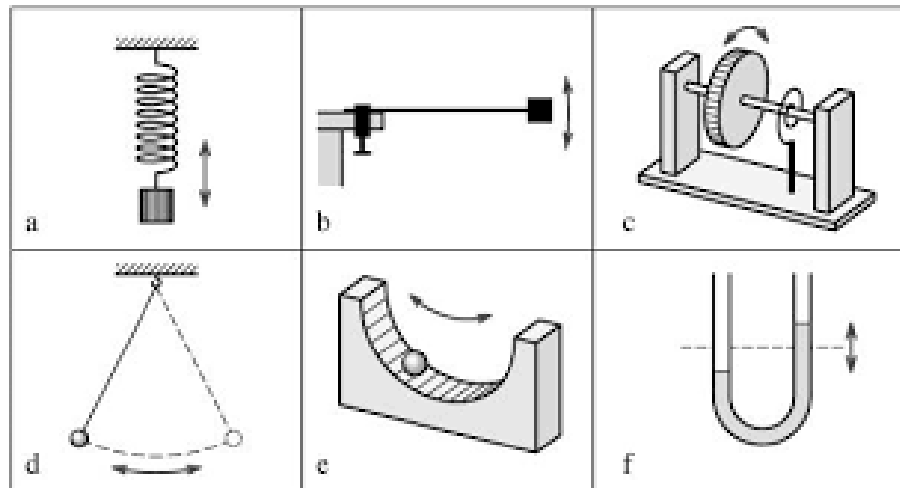
$$F = m a = m \omega^2 y$$

- vztah popisuje velikost síly, která způsobuje kmitání

$$\vec{F} = -m\omega^2\vec{y}$$

### Parametry mechanického oscilátoru

- parametry jsou takové veličiny, které **ovlivňují velikost frekvence kmitů**
- mechanický oscilátor**  
např. závaží na pružině
- Př. další mech. OSC  
→ kyvadlo,  
→ voda v U-trubici,  
→ kovová destička



# 1. Mechanické kmitání

## 1.4 Dynamika kmitavého pohybu

### Parametry mechanického oscilátoru

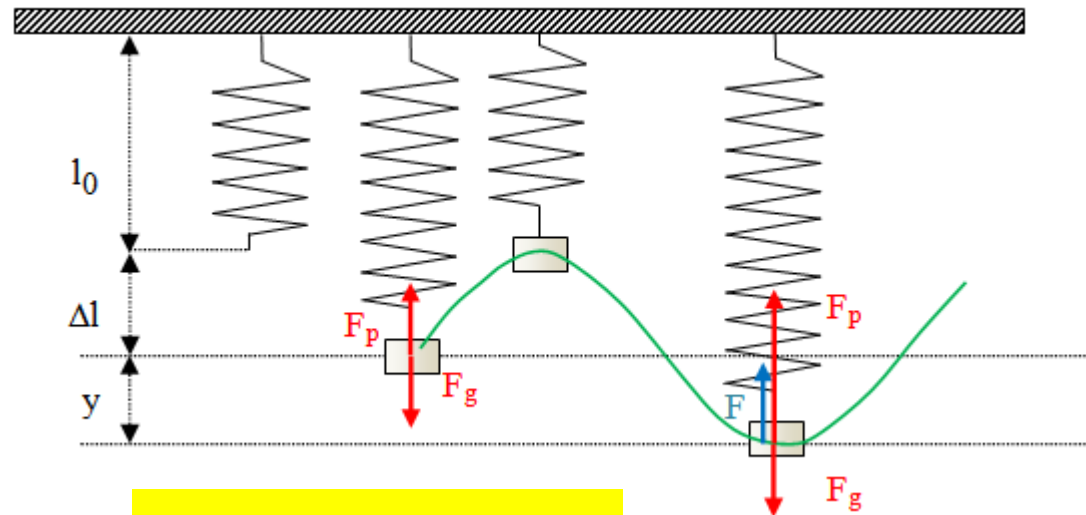
- tuhost pružiny –  $k$
- hmotnost závaží –  $m$

### Odvození vztahu pro $T$ a $f$

- rovnovážná poloha:  $F_p = F_G$   
 $k\Delta l = mg$
- bod obratu:  $F = F_p - F_G =$   
 $= k(\Delta l + y) - mg =$   
 $= k\Delta l + ky - mg =$   
 $= k\Delta l + ky - k\Delta l = ky$
- Rovnost výsledné síly a pohybové síly:  
 $ky = m\omega^2 y$

$$k = m\omega^2 \rightarrow \omega^2 = \frac{k}{m} \rightarrow \omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = \sqrt{\frac{k}{m}}$$



$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

$f_0$  – vlastní frekvence oscilátoru

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

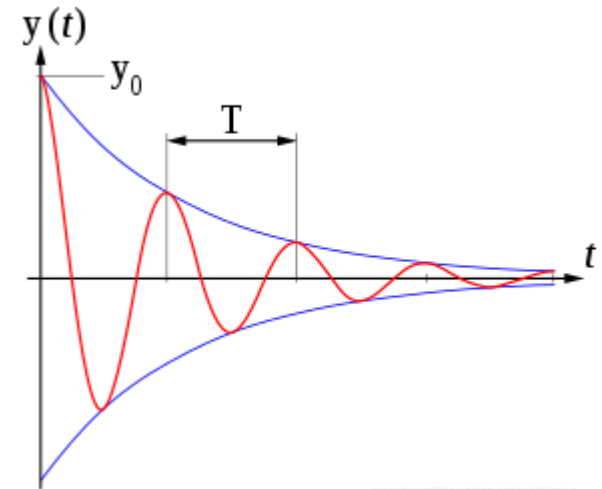
$T_0$  – vlastní perioda oscilátoru

# 1. Mechanické kmitání

## 1.5 Tlumené a netlumené kmity. Rezonance

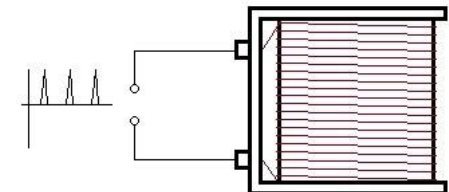
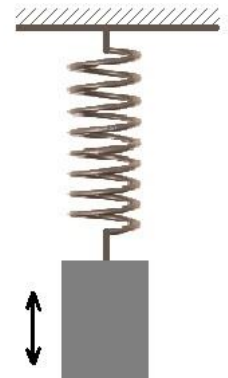
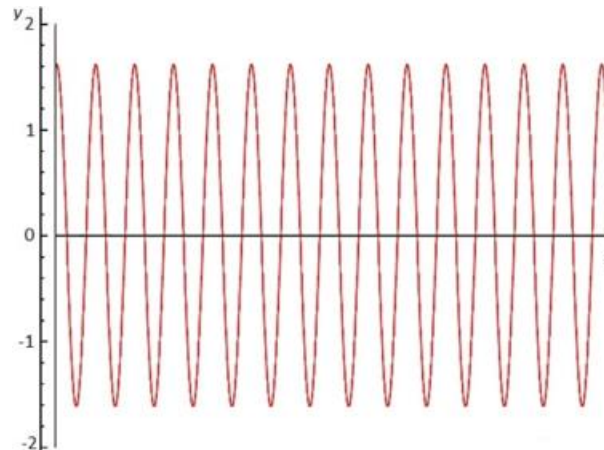
### Tlumené kmitání

- **vlastní kmity oscilátoru vždy tlumené (i ve vakuu)**
- **kmitání s vlastní frekvencí  $f_0$**
- **amplituda kmitů exponenciálně klesá**



### Netlumené kmitání

- k udržení kmitání je třeba **vnější budící síla** (např. elektromagnet)
- **OSC kmitá s frekvencí vnějšího zdroje**
- **amplituda kmitů je konstantní**
- **vazba** – mezi OSC a okolím



# 1. Mechanické kmitání

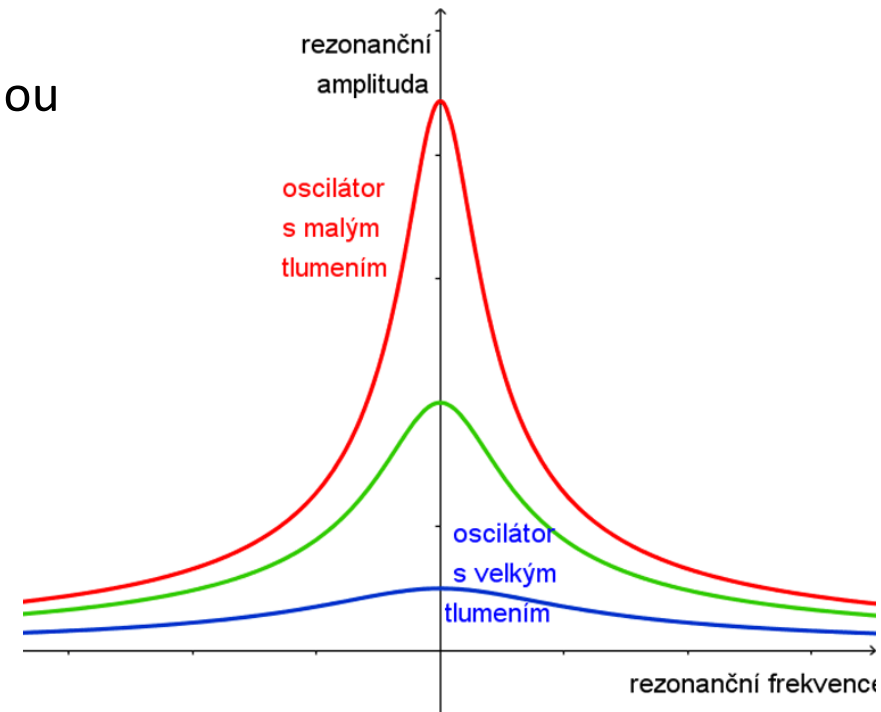
## 1.5 Tlumené a netlumené kmity. Rezonance

### Rezonance

- nastává, je-li **frekvence vnější budící síly rovna vlastní frekvenci oscilátoru**
- **$f = f_0$**
- **rezonanční zesílení kmitů** – malou budící silou lze vyvolat velkou amplitudu kmitů
- Spřažená kyvadla – oscilátor a rezonátor
  - **volná vazba** – malý přenos energie
  - **těsná vazba** – velký přenos energie

### Rezonance v praxi

- hudební nástroje
- radiotechnika – elektromagnetické kmity
- mostní konstrukce
- rotující stroje – mohutná základna
- tlumiče aut
- pračka – gumové nohy tlumí nežádoucí vibrace
- vojáci – povel „Zrušit krok“
- tančící Gertie – Tacoma Narrows Bridge 7.11.1940: <https://www.youtube.com/watch?v=j-zczJXSxnw>

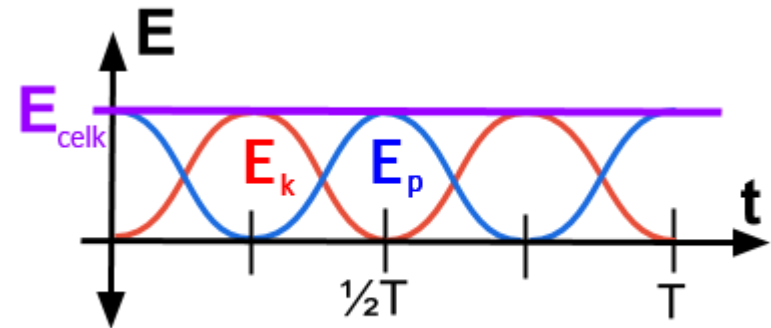
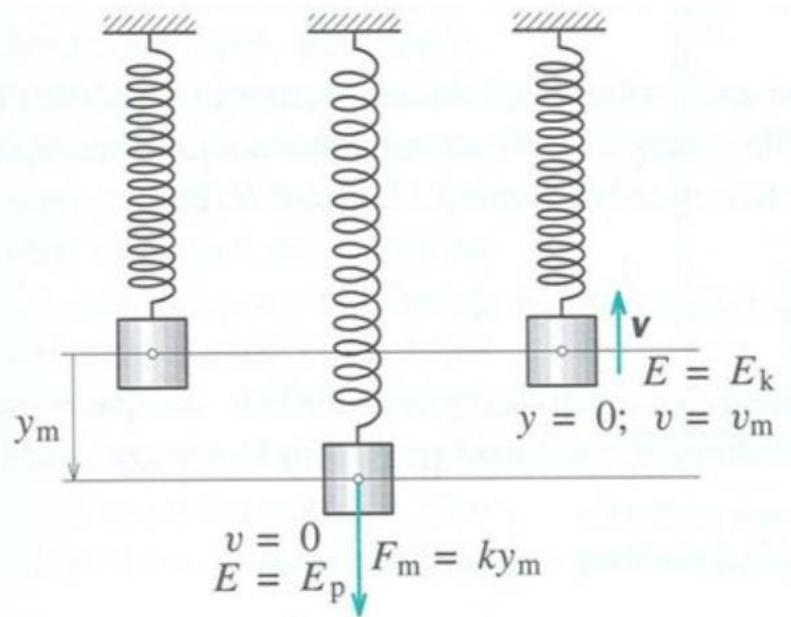


# 1. Mechanické kmitání

## 1.6 Přeměny energie v mechanickém oscilátoru

### Celková mechanická energie

- je konstantní
- přeměňuje se potenciální energie na kinetickou a naopak



$$E_p = \frac{1}{2}ky_m^2$$

$$E_k = \frac{1}{2}mv_m^2 = \frac{1}{2}m\omega^2 y_m^2$$



$$E = E_p + E_k = \frac{1}{2}ky^2 + \frac{1}{2}mv^2$$

$$E = E_p + E_k = \frac{1}{2}ky^2 + \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}ky_m^2 \sin^2(\omega t) + \frac{1}{2}mv_m^2 \cos^2(\omega t) = \frac{1}{2}ky_m^2 = \frac{1}{2}mv_m^2 = \text{konst.}$$

$$E = \frac{1}{2}ky_m^2$$

# 1. Mechanické kmitání

## 1.7 Kyvadlo

### Matematické kyvadlo

- hmotný bod na nehmotném vlákně – idealizace
- parametry oscilátoru
  - **délka kyvadla  $L$**
  - **gravitační zrychlení (na Zemi uvažujeme  $g$ )**
  - amplituda výchylky (u reálného kyvadla)

- **doba kyvu** –  $\tau$  (tau)  $\tau = \frac{T_0}{2}$
- **bod obratu:**

$$\begin{aligned}\vec{F} &= \vec{F}_t + \vec{F}_G = \\ &= -mg \sin \alpha = -mg \frac{x}{L}\end{aligned}$$

$\vec{F}_t$  – tahová síla na vlákno

znaménko  $-$ :  $\vec{F}$  míří proti okamžité výchylce  $x$

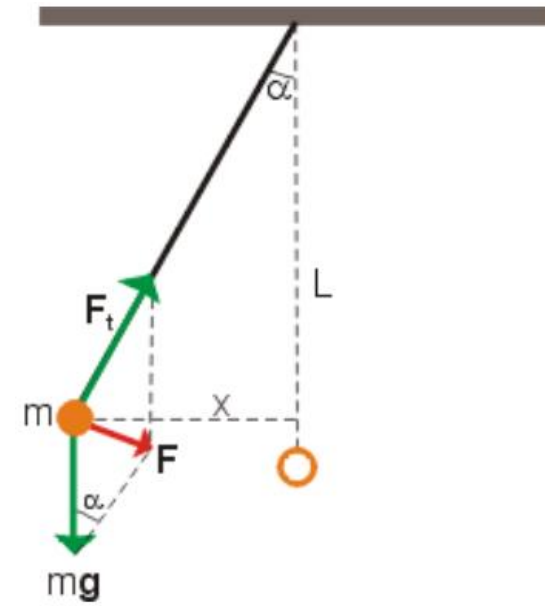
- **pohybová rovnice:**

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

$$mg \frac{x}{L} = m\omega^2 x \rightarrow \omega^2 = \frac{g}{L} \rightarrow \omega = \sqrt{\frac{g}{L}}$$

- **vztah pro úhlovou rychlost**

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f = \sqrt{\frac{g}{L}}$$



$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}}$$

$f_0$  – vlastní frekvence kyvadla

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{L}{g}}$$

$T_0$  – vlastní perioda kyvadla

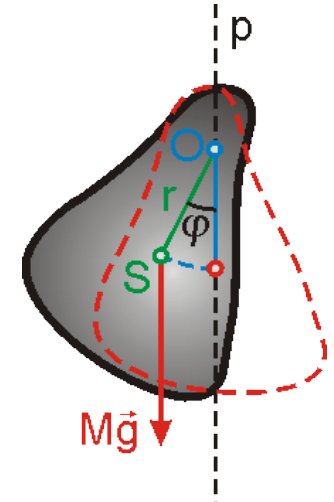
# 1. Mechanické kmitání

## 1.7 Kyvadlo

### Fyzické kyvadlo

- jakékoliv těleso kmitající kolem nehybné osy
- Příklad: zvon, deska
- $m$  – hmotnost tělesa
- $d$  – vzdálenost těžiště od osy otáčení
- $J$  – moment setrvačnosti tělesa vzhledem k ose otáčení

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{mgd}{J}}$$
$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J}{mgd}}$$



### Blackburnovo kyvadlo

- demonstrace složených kmitů
- nádoba s pískem kývá současně ve dvou kolmých směrech
- vytváří se **Lissajousovy obrazce**



# 1. Mechanické kmitání

## 1.7 Kyvadlo

### Foucaultovo kyvadlo

- **1851** Pantheón v Paříži – **Leon Foucault (1819 – 1868)**:  $m = 28 \text{ kg}$ ,  $L = 68 \text{ m}$ ,  $T = 16 \text{ s}$
- dokazuje rotaci Země kolem osy; neotáčí se kyvadlo, ale země pod kyvadlem
- na kyvadlo působí **Coriolisova síla**
- na pólech se rovina kmitů stočí o  $360^\circ$  za 24 hodin
- na rovníku se rovina kmitů nemění
- na dané rovnoběžce  $\alpha$ :  $\varphi = 360^\circ \sin \alpha$   
 $\varphi$  – úhel stočení roviny kmitů za 24 h



Pantheón v Paříži



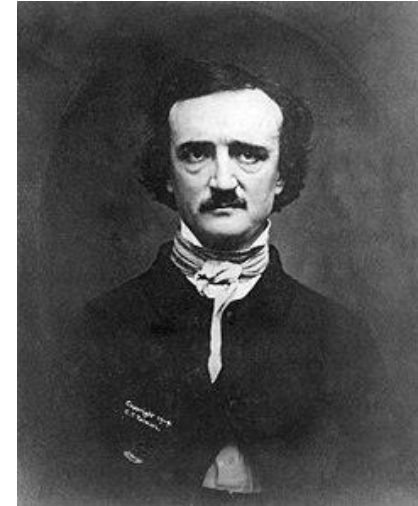
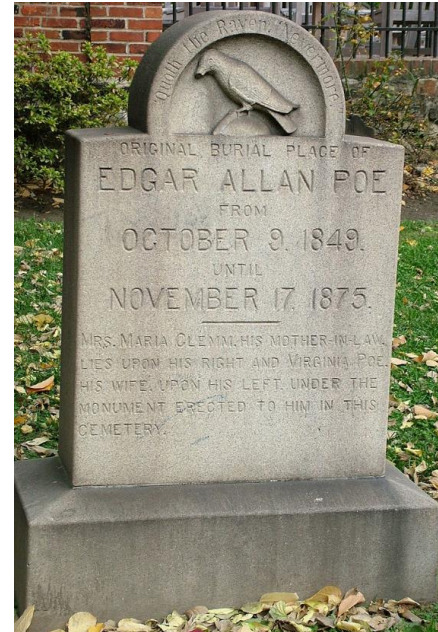
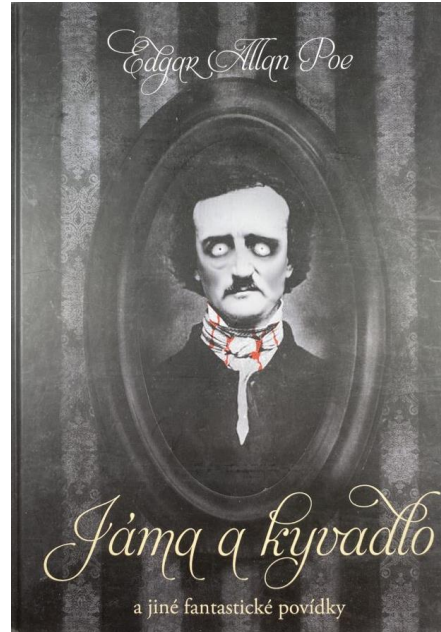
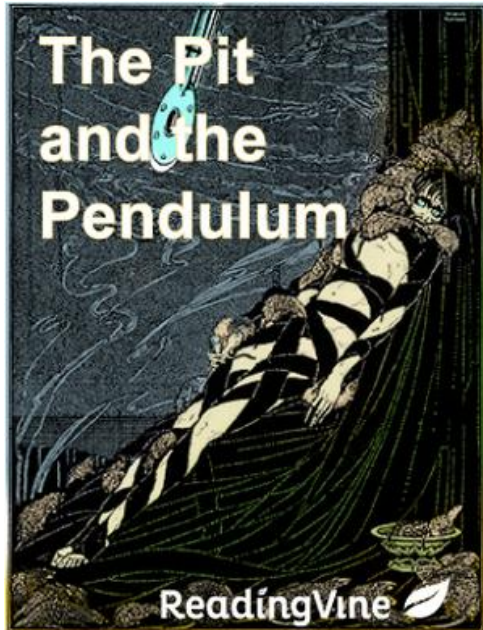
Přírodovědecká fakulta UP Olomouc

# 1. Mechanické kmitání

## 1.7 Kyvadlo

### Jáma a kyvadlo

- 1842 – Edgar Allan Poe (1809 – 1849)
- zakladatel hororů a deduktivních detektivních románů
- dílo: Vraždy v ulici Morgue (1841), Havran (1845)



## 2. Mechanické vlnění

Kmity vodní hladiny vyvolají vlnění



250 m vysoká vlna tsunami



Mořská vlna



Interference vodních vln



# 2. Mechanické vlnění

## 2.1 Vznik a druhy vlnění

### Základní vlastnosti mechanického vlnění

- **podstatou mechanického vlnění je přenos kmitů látkovým prostředím**
- **ve vakuu** se mechanické kmity nešíří
- **nedochází k přenosu látky**
- **dochází k přenosu energie**
- kmitání v tzv. **pružném prostředí**
  - dochází k přenosu kmitů a energie z částice na částici → kmity se šíří
  - vzniká tzv. **postupné vlnění**

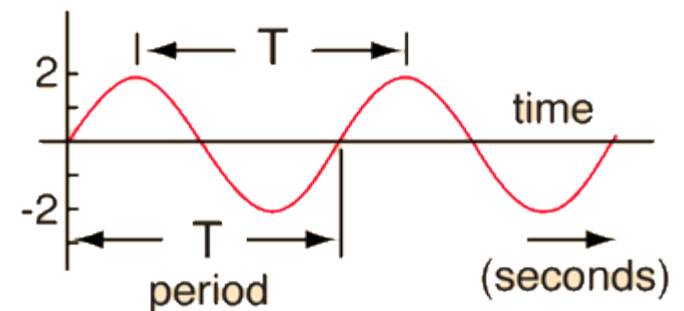
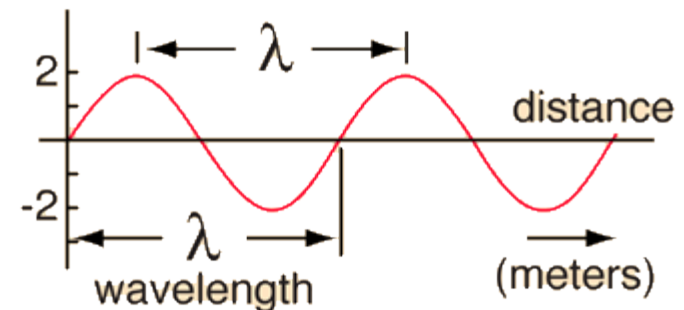


### **Vlnová délka – $\lambda$**      $[\lambda] = m$

- **udává vzdálenost 2 nejbližších bodů, které kmitají se stejnou fází** → vzdálenost, kterou vlna urazí za  $T$

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

$v$  – rychlost postupného vlnění



# 2. Mechanické vlnění

## 2.1 Vznik a druhy vlnění

### Příčné a podélné vlnění

- **příčné (transverzální) – kmity jsou kolmé na směr šíření (rychlosti)**

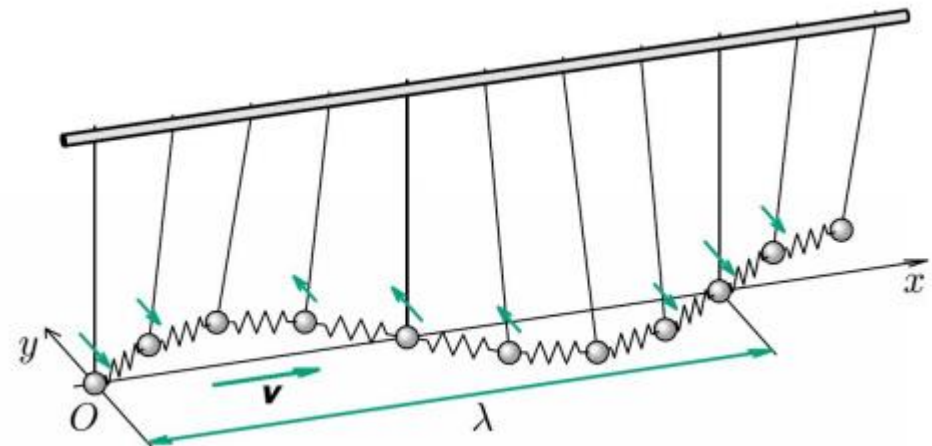
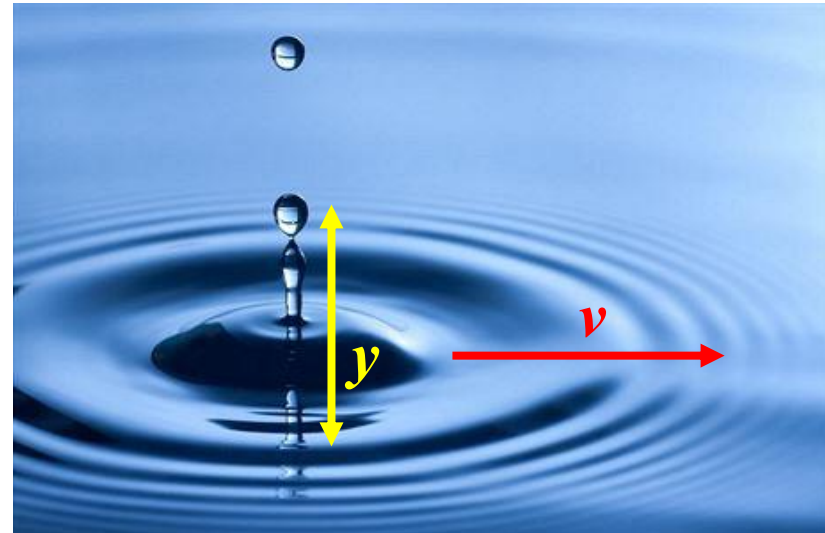
Př. vodní vlny pod opadu kamene na hladinu, kmitající tyč, struna

- online animace:

<https://www.youtube.com/watch?v=7cDAYFTXq3E>

- online experiment:

[https://www.youtube.com/watch?v=bJzxzhv\\_rgU](https://www.youtube.com/watch?v=bJzxzhv_rgU)

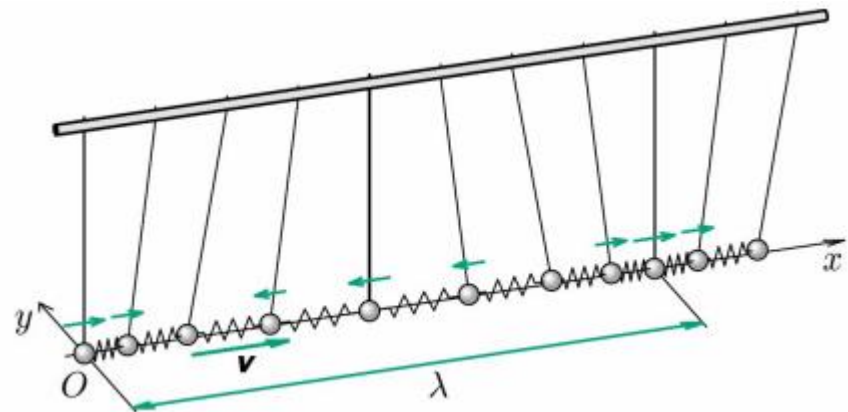
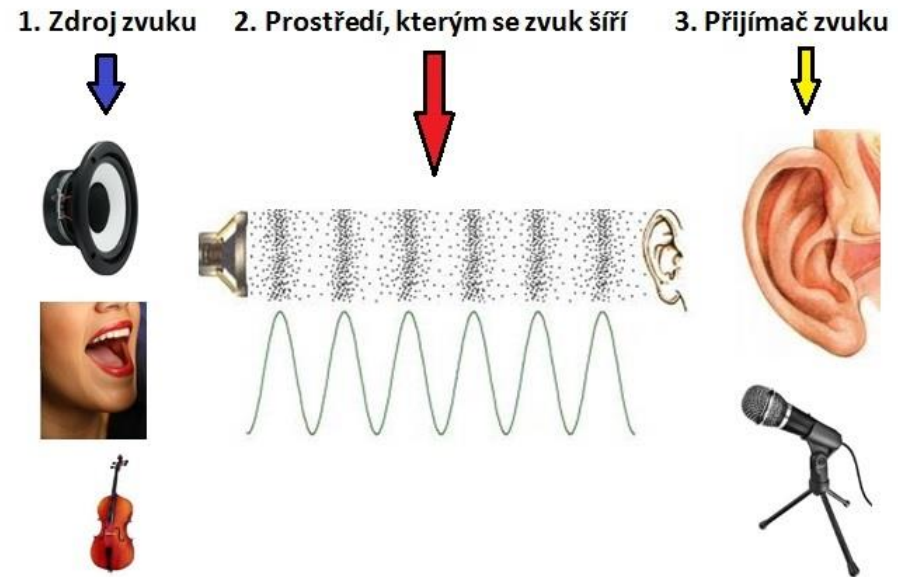


# 2. Mechanické vlnění

## 2.1 Vznik a druhy vlnění

### Příčné a podélné vlnění

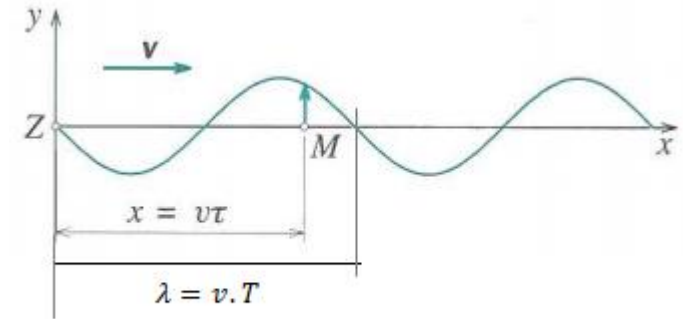
- **podélné – kmity se dějí ve směru/proti směru šíření**  
→ dochází k zhušťování a zředování bodů  
Př. šíření zvuku
- online animace:  
<https://www.youtube.com/watch?v=3J6zWv2CqEY>  
online experiment:  
<https://www.youtube.com/watch?v= DOCSUa0sbM>



# 2. Mechanické vlnění

## 2.2 Rovnice postupného vlnění

### Šíření vlny ve směru osy $x$



- kmitání zdroje:  $y = y_m \sin(\omega t)$
- do bodu M kmitání dospěje za čas  $\tau = \frac{x}{v}$
- Rovnice okamžité výchylky v bodě M:  
$$y = y_m \sin(\omega(t - \tau)) = y_m \sin\left[\omega\left(t - \frac{x}{v}\right)\right] =$$
$$= y_m \sin\left[\frac{2\pi}{T}\left(t - \frac{x}{v}\right)\right] = y_m \sin\left[2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{vT}\right)\right]$$
- **Rovnice postupného vlnění** (příčného i podélného):

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

$2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right)$  → fáze vlnění postupujícího **ve směru osy  $x$**

$2\pi\left(\frac{t}{T} + \frac{x}{\lambda}\right)$  → fáze vlnění postupujícího **proti směru osy  $x$**

- $t$  – čas,  $T$  – perioda vlnění,  $x$  –  $x$ -ová souřadnice bodu do kterého vlnění dospělo  
 $\lambda$  – vlnová délka vlnění
- **v různém prostředí má vlnění různou rychlost**
- **vlnění je děj, který je funkcí jak času, tak polohy v prostoru**

# 2. Mechanické vlnění

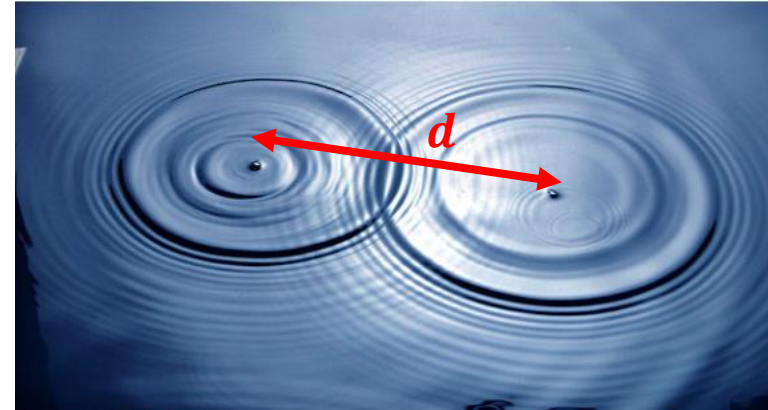
## 2.3 Interference vln

### Princip superpozice

- **Interference** = skládání vlnění
- Při kmitání více zdrojů dochází v libovolném bodě prostoru ke skládání vln z jednotlivých zdrojů
- výsledná výchylka v daném bodě je dána tzv. **superpozicí jednotlivých výchylek**
- **Interference** je dána **fázovým rozdílem**  $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$

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

- **dráhový rozdíl vlnění**  $d$  – vzdálenost kmitajících zdrojů
- $\lambda$  – vlnová délka vlnění

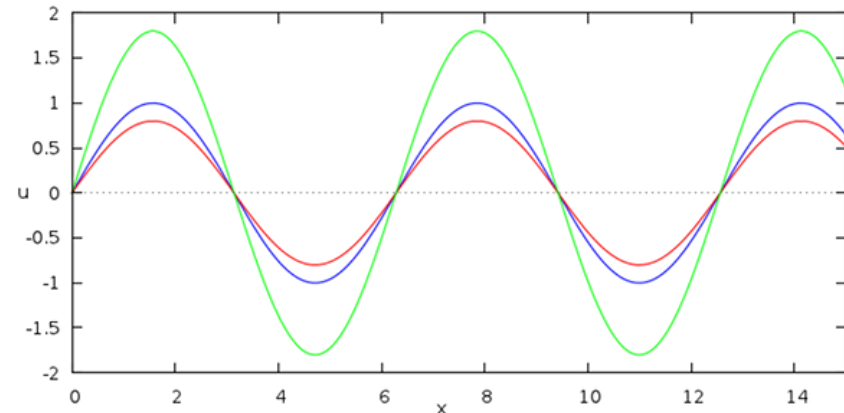


### Zvláštní případy interference

#### 1. dráhový rozdíl = sudý počet půlvln

$$d = 2k \frac{\lambda}{2} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

- vlny se setkávají v každém bodě **se stejnou fází**
- vzniká **interferenční maximum (konstruktivní IF)**
- $y_m = y_{m1} + y_{m2}$



# 2. Mechanické vlnění

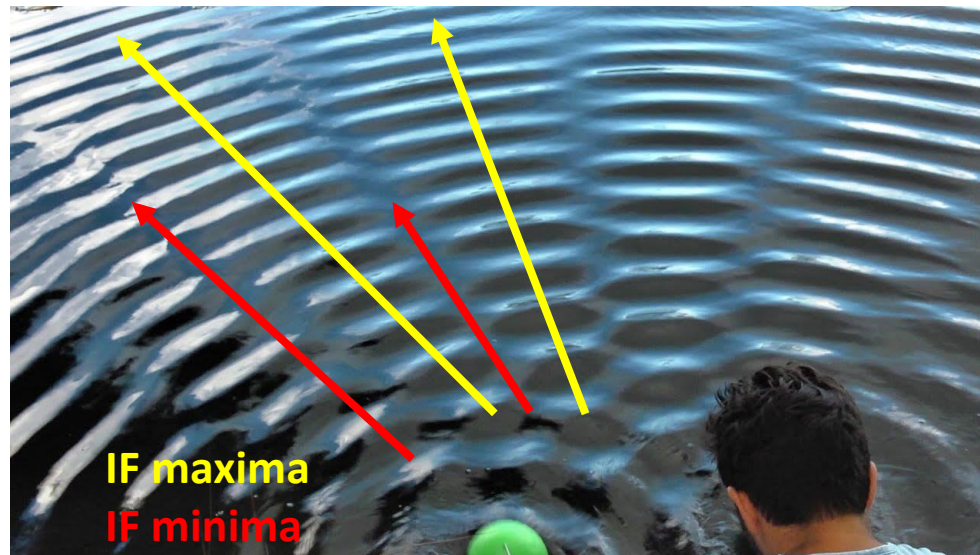
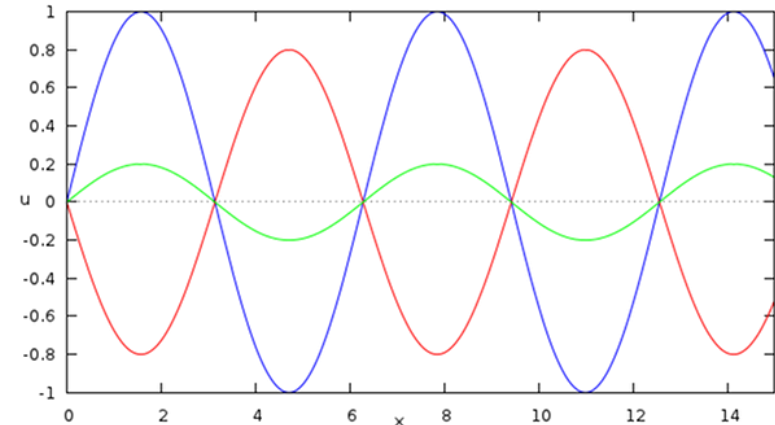
## 2.3 Interference vln

### Zvláštní případy interference

#### 2. dráhový rozdíl = lichý počet půlvln

$$d = (2k + 1) \frac{\lambda}{2} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

- vlny se setkávají v každém bodě s opačnou fází
- vzniká **interferenční minimum (destruktivní IF)**
- $y_m = y_{m1} - y_{m2}$
- při stejné amplitudě vln se vlnění vzájemně vynuší

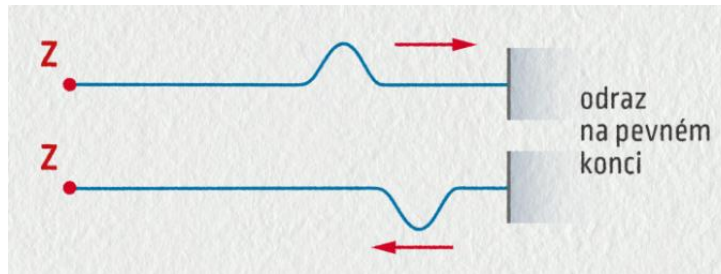


# 2. Mechanické vlnění

## 2.4 Odraz vlnění. Stojaté vlnění

### Odraz na pevném konci

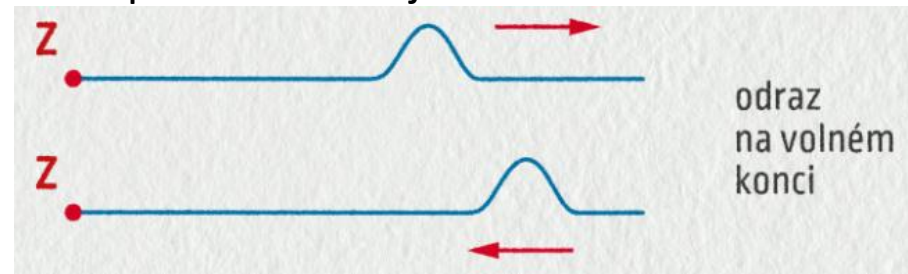
- vlna se odráží **s opačnou fází**
- na pevném konci je **uzel**



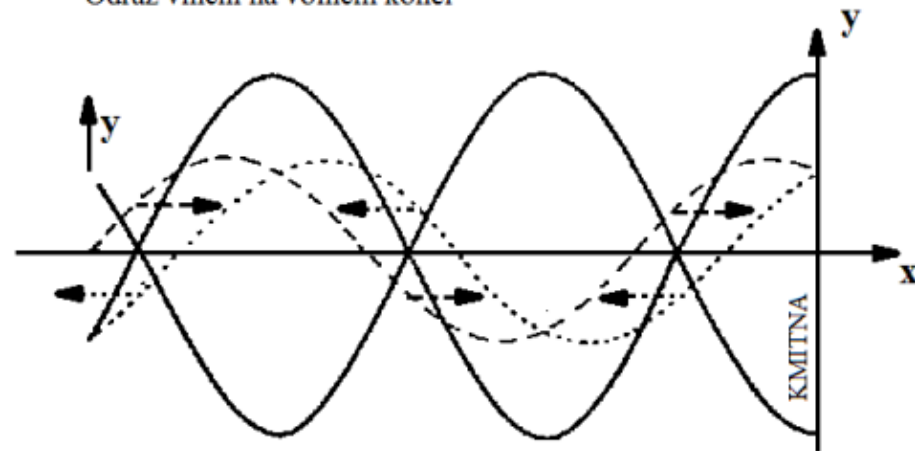
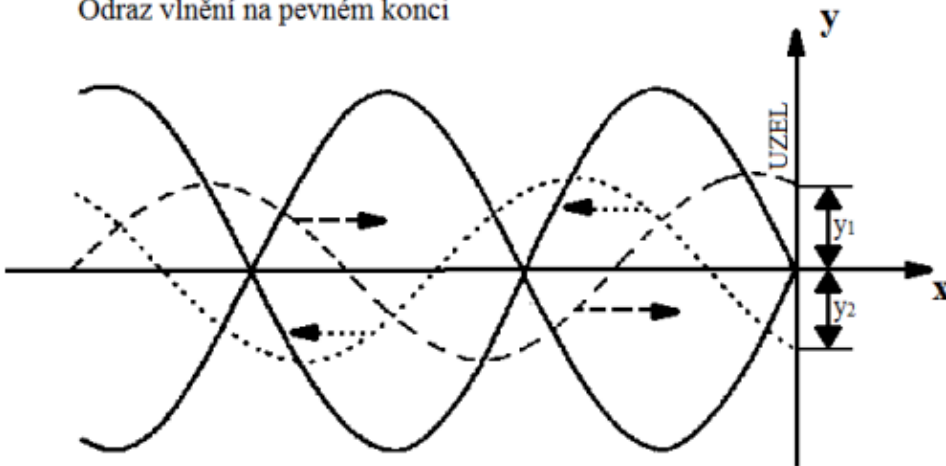
Odraz vlnění na pevném konci

### Odraz na volném konci

- vlna se odráží **se stejnou fází**
- na volném konci je **kmitna**



Odraz vlnění na volném konci



- postupná vlna
- ..... odražená vlna
- výsledná stojatá vlna

# 2. Mechanické vlnění

## 2.4 Odraz vlnění. Stojaté vlnění

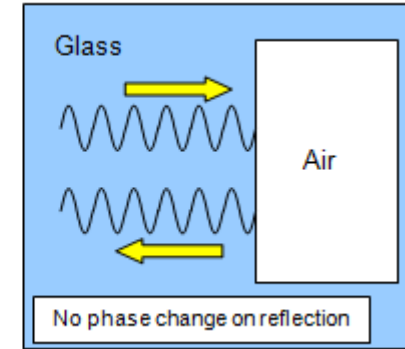
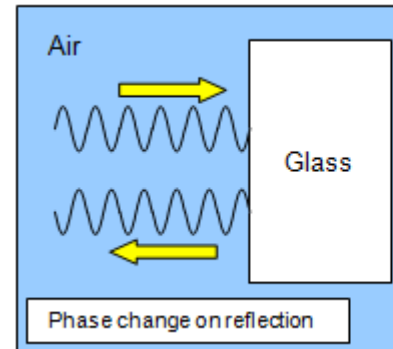
### Změna fáze přechodem do jiného prostředí

- $v_1 > v_2 \rightarrow$  vlna prochází **s opačnou fází, fáze se převrací**

Př.: zvuk šířící se z vody do vzduchu

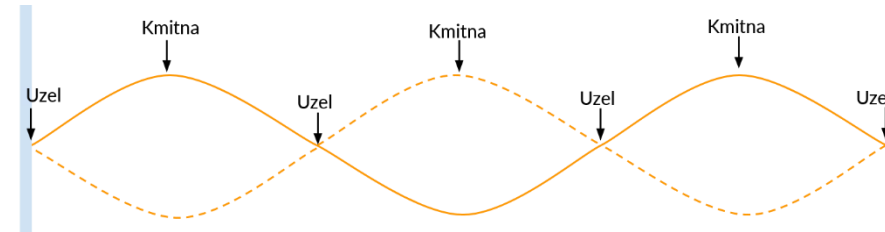
- $v_1 < v_2 \rightarrow$  vlna prochází **se stejnou fází, fáze se nemění**

Př.: zvuk šířící se ze vzduchu do vody



### Stojaté vlnění

- vzniká **interferencí přímé a odražené vlny**
- **kmitny** – maximální výchylka  $\rightarrow y_m = \max.$
- **uzly** – nulová amplituda  $\rightarrow y_m = 0$
- vzdálenost 2 kmiten nebo uzlů:  $\frac{\lambda}{2}$
- vzdálenost kmitna-uzel:  $\frac{\lambda}{4}$
- **stojatým vlněním se energie nepřenáší**
- všechny body kmitají se stejnou fází, ale různou amplitudou



# 2. Mechanické vlnění

## 2.4 Chvění mechanických soustav

- **Chvění** = stojaté vlnění vzniklé např. na struně, v píšťale, ve 2D desce, apod.

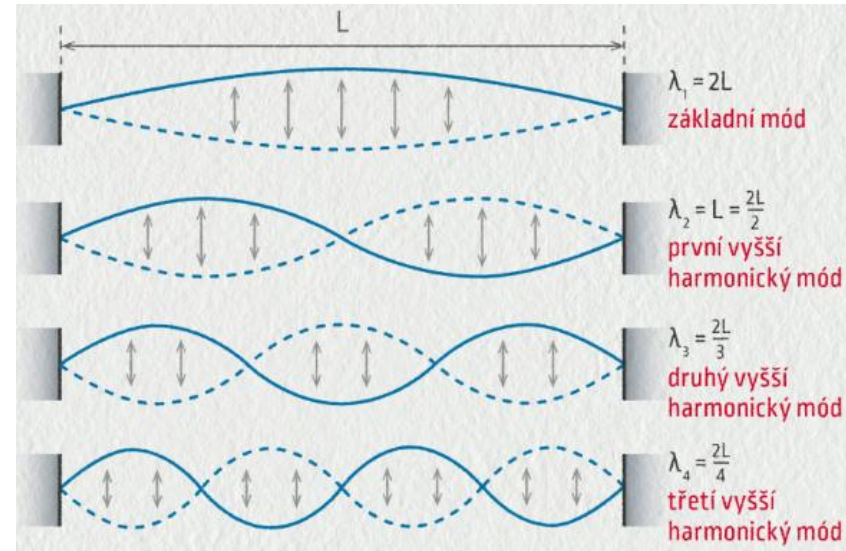
### Struna upevněná na obou koncích

- **základní frekvence**  $f_1$  je dána geometrickými a konstrukčními vlastnostmi struny
- na obou koncích jsou uzly → **délka struny**  $L$  je rovna  $\lambda/2$

$$f_1 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2L}$$

$$f_k = k \frac{v}{\lambda} = k \frac{v}{2L}$$

- vyšší harmonické frekvence:  $f_k = k f_1$ ,  $k = 2, 3, \dots$

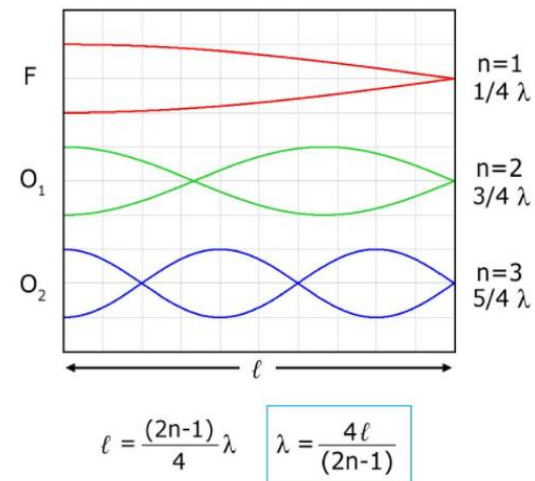


### Struna upevněná na jednom konci

- na jednom konci uzel, na druhém kmitna → **délka struny**  $L$  je rovna  $\lambda/4$
- vyšší harmonické frekvence:  $f_k = k f_1$ ,  $k = 1, 2, \dots$

$$f_1 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4L}$$

$$f_k = \frac{(2k-1)v}{\lambda} = (2k-1) \frac{v}{4L}$$



# 2. Mechanické vlnění

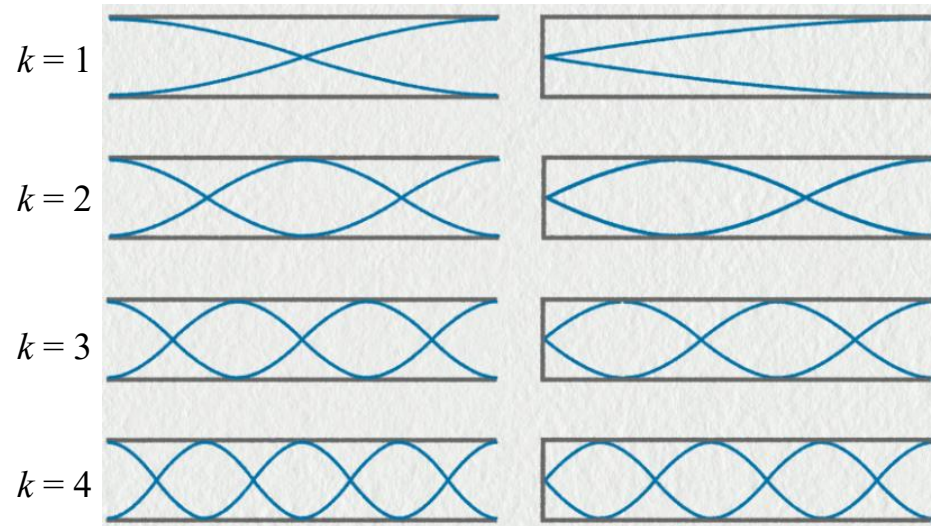
## 2.4 Chvění mechanických soustav

### Otevřená píšťala

- **základní frekvence**  $f_1$  je dána geometrickými a konstrukčními vlastnostmi píšťaly
- Př. flétna
- na obou koncích jsou kmitny  
→ **délka píšťaly  $L$  je rovna  $\lambda/2$**
- vyšší harmonické frekvence:  $f_k = k f_1, k = 2, 3, \dots$

$$f_1 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{2L}$$

$$f_k = k \frac{v}{\lambda} = k \frac{v}{2L}$$



### Píšťala uzavřená na jednom konci

- na jednom konci uzel, na druhém kmitna  
→ **délka píšťaly  $L$  je rovna  $\lambda/4$**
- Př. Klarinet, žestě
- vyšší harmonické frekvence:  $f_k = k f_1, k = 2, 3, \dots$

$$f_1 = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{4L}$$

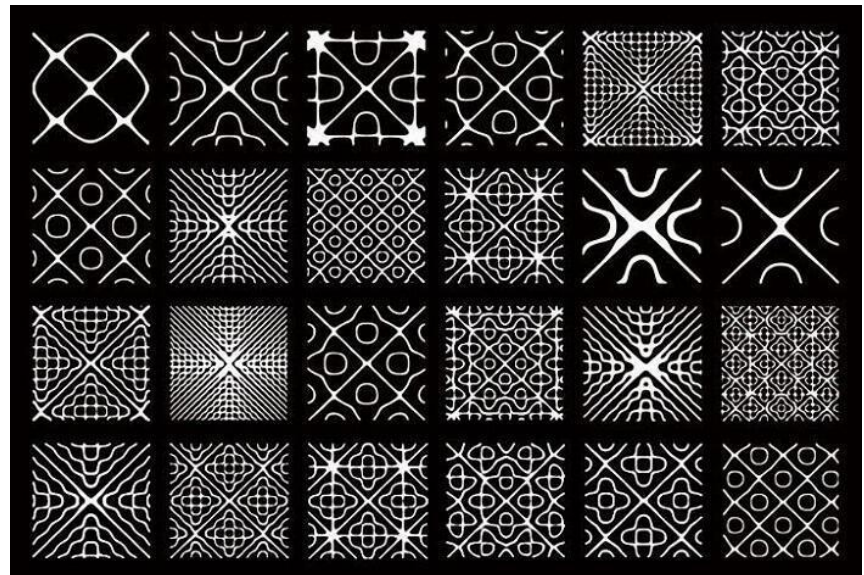
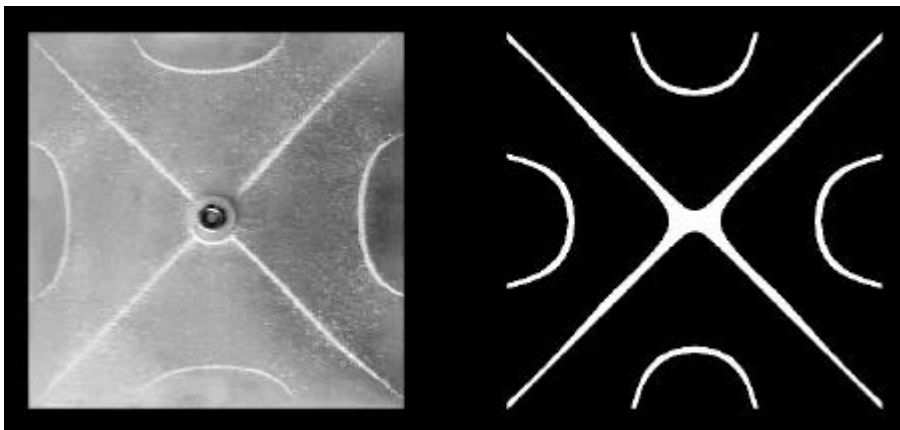
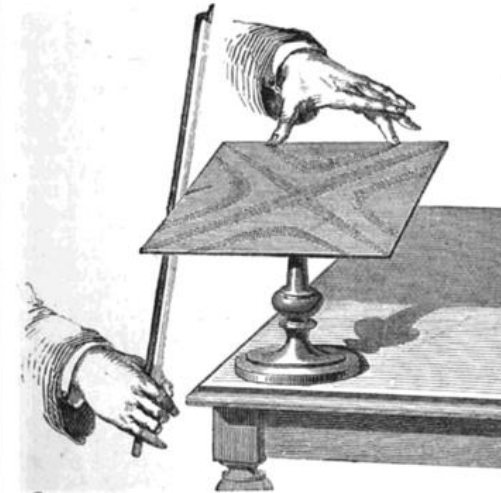
$$f_k = \frac{(2k-1)v}{\lambda} = (2k-1) \frac{v}{4L}$$

# 2. Mechanické vlnění

## 2.4 Chvění mechanických soustav

### Chladniho obrazce

- **Ernst Chladni (1756 – 1827)**
  - německý fyzik, hudebník;
  - otec akustiky
  - slovenské kořeny
- rezonanční obrazce dvourozměrných desek
- zkoumal také meteority a zastával myšlenku jejich mimozemského původu



# 2. Mechanické vlnění

## 2.5 Huygensův princip

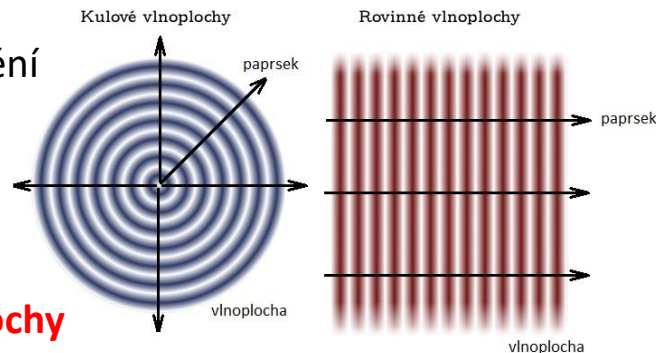
### Christian Huygens (1629 – 1695)

- holandský fyzik, matematik, astronom
- autor prvních sci-fi románů
- 1659 vysvětlil vznik Saturnových prstenců, objevil jeho největší měsíc Titan
- formuloval myšlenku o vlnové povaze světla  
→ základ duality částice-vlna
- 1657 – vynalezl kyvadlové hodiny s netlumeným pohybem kyvadla
- 1666 – zakládající člen Královské akademie věd
- 1690 – optika  
→ objasnil přímočaré šíření světla, zákon odrazu a lomu  
→ popsal dvojlom a polarizaci



## Vlnění v izotropním prostředí

- **Izotropní prostředí** → ve všech směrech se vlnění šíří stejnou rychlostí  
→ kámen hozený do vody vytváří kruhy, nikoliv např. elipsy
- v prostoru vznikají **kulové vlnoplochy**
- ve velké vzdálenosti od zdroje: **rovinné vlnoplochy**
- **vlnoplocha** – plocha PV jejíž body kmitají se stejnou fází

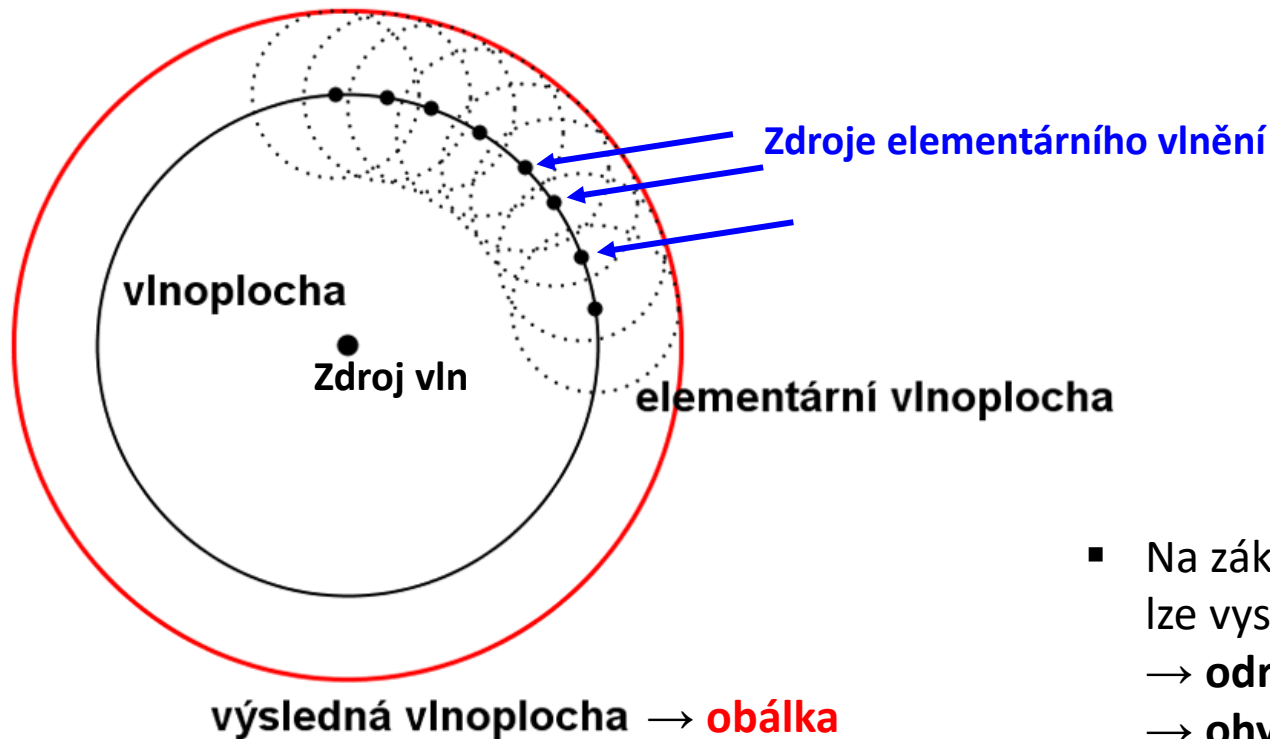


# 2. Mechanické vlnění

## 2.5 Huygensův princip

### Huygensův princip

- Každý bod vlnoplochy je zdrojem elementárního vlnění, které se z něho šíří v elementárních vlnoplochách. Vlnoplocha v dalším časovém okamžiku je obálkou všech elementárních vlnoploch.



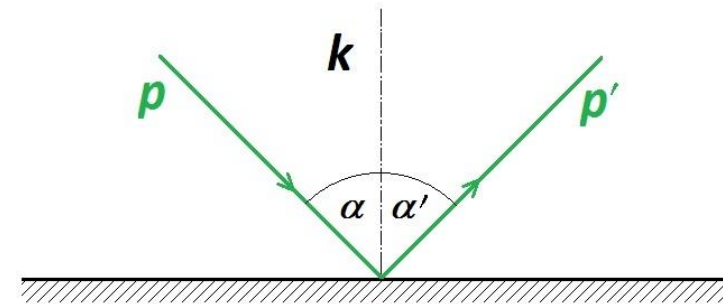
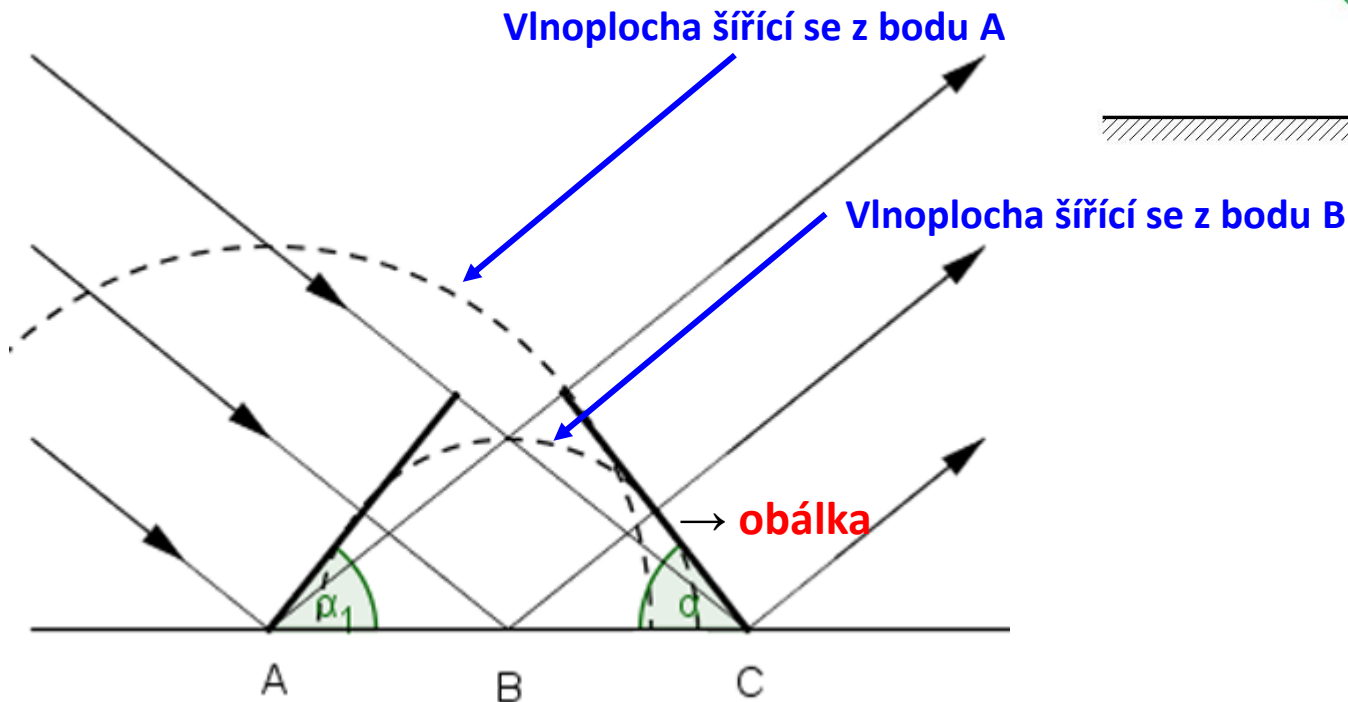
- Na základě **Huygensova principu** lze vysvětlit:
  - **odraz a lom vlnění**
  - **ohyb vlnění**

# 2. Mechanické vlnění

## 2.6 Odraz a lom. Ohyb vlnění

### Odraz a lom

- **Zákon odrazu: úhel dopadu je roven úhlu odrazu.**  
**Odražený paprsek leží v rovině dopadu (tvořená dopadajícím paprskem a kolmicí dopadu).**



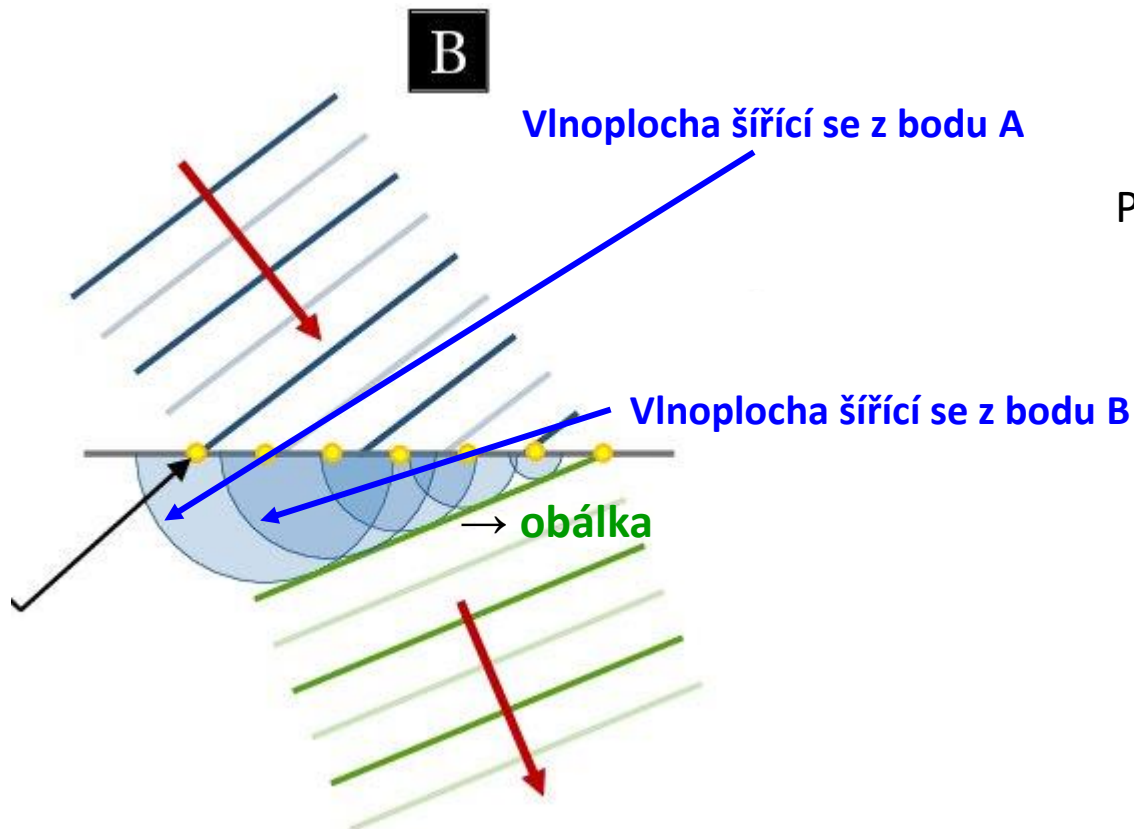
$$\alpha = \alpha'$$

# 2. Mechanické vlnění

## 2.6 Odraz a lom. Ohyb vlnění

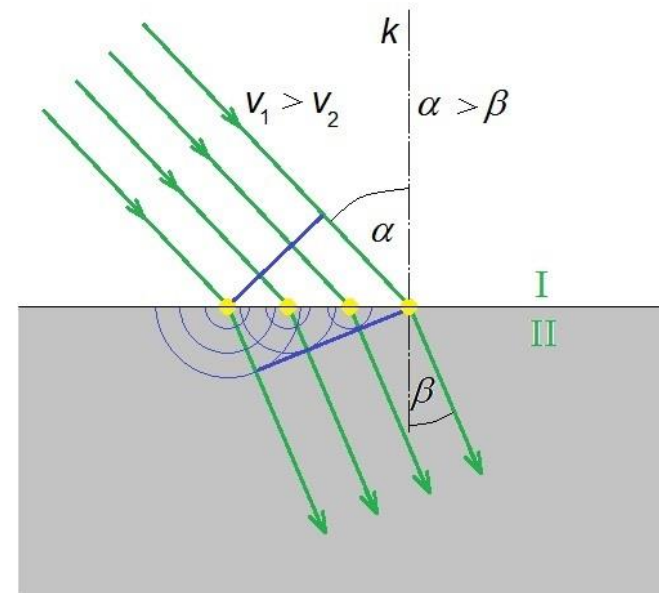
### Odraz a lom

- **Zákon lomu: poměr sinu úhlu dopadu a lomu je stejný jako poměr rychlostí v prostředích. Lomený paprsek leží v rovině dopadu (tvořená dopadajícím paprskem a kolmicí dopadu).**



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

Pro  $v_1 > v_2$ :  $\beta < \alpha$  – lom ke kolmici

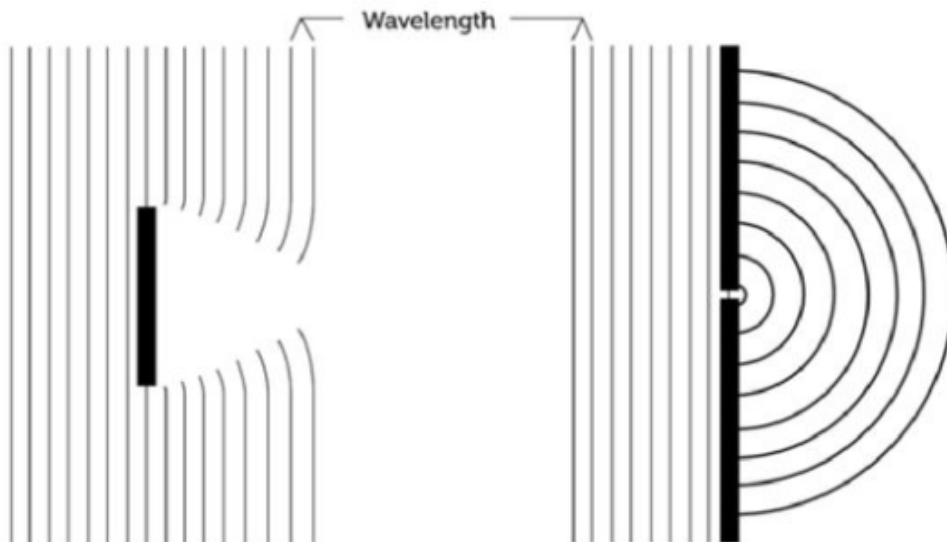


# 2. Mechanické vlnění

## 2.6 Odraz a lom. Ohyb vlnění

### Ohyb

- **ohyb vlnění nastává na překážkách, které jsou svým rozměrem srovnatelné nebo menší než je vlnová délka vlnění**
- ohyb nastává **na překážce** nebo **na otvoru v překážce**
- vlnění se díky ohybu dostane i do oblasti tzv. **geometrického stínu**, tedy tam, kam by se podle geometrických pravidel dostat nemělo
- dopadne-li na otvor plošná vlnoplocha, stane se otvor zdrojem elementárního vlnění a z otvoru se šíří kruhové vlnoplochy



- a) ohyb na překážce
- b) ohyb na štěrbině

## 2. Mechanické vlnění

### 2.6 Odraz a lom. Ohyb vlnění

Ohyb vodní vlny na otvoru



Ohyb vodní vlny na překážce

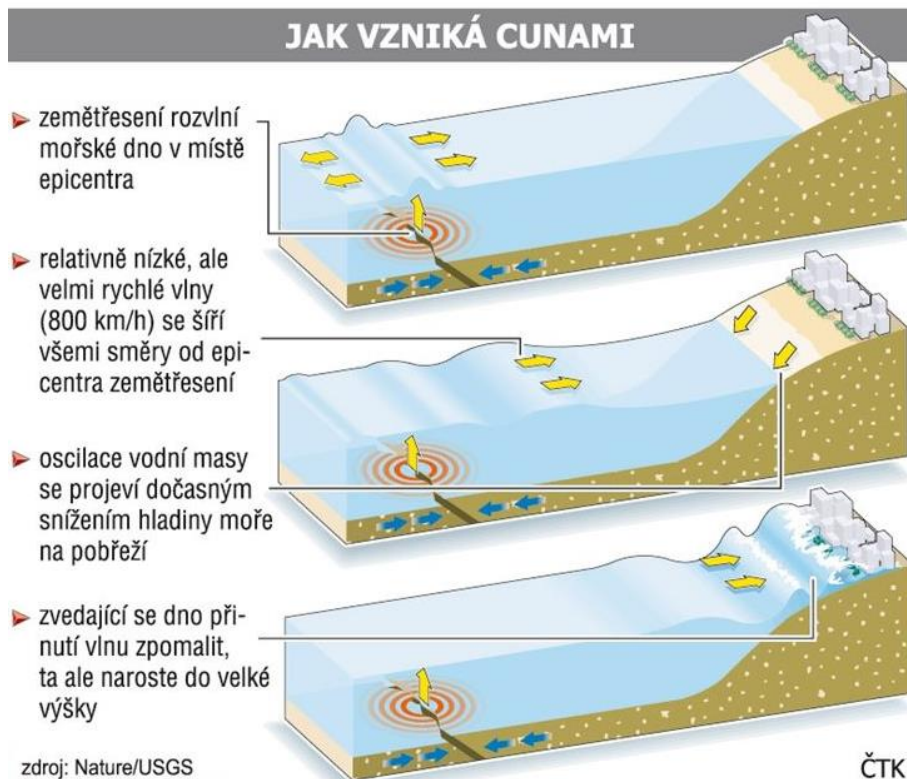


# 2. Mechanické vlnění

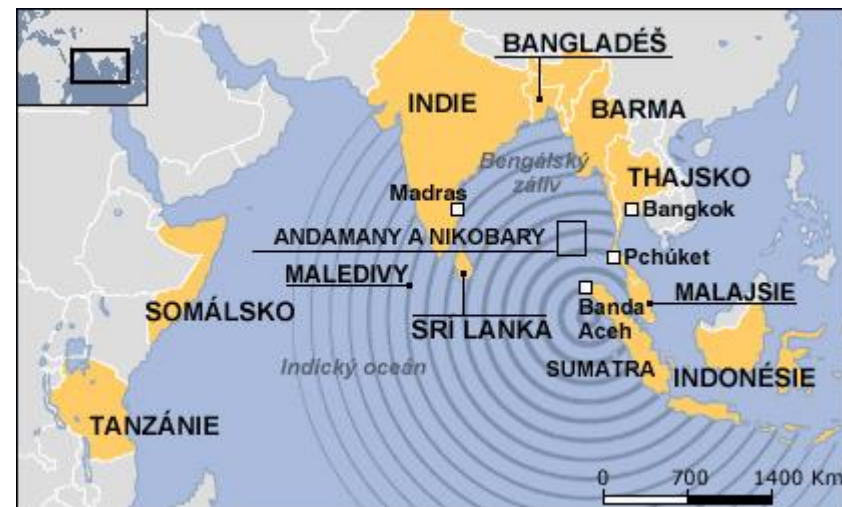
## 2.6 Odraz a lom. Ohyb vlnění

### Tsunami – osamocená vlna

- **tsunami = japonsky cunami – „dlouhá vlna v přístavu“**
- osamocená vlna vyvolaná pohybem tektonických desek, např. při zemětřesení, sesuvem ledovce, sopečnou činností, dopadem meteoritu
- nejčastější výskyt: Tichý oceán – nejvíce ohrožené je Japonsko



- **26.12.2004 – Indický oceán**
- zemětřesení o síle přesahující 9,0 R.š. v délce asi 1200 km
- účinky byly pozorovány i na pobřeží Jižní Ameriky nebo v Arktidě
- 220 000 obětí na životech

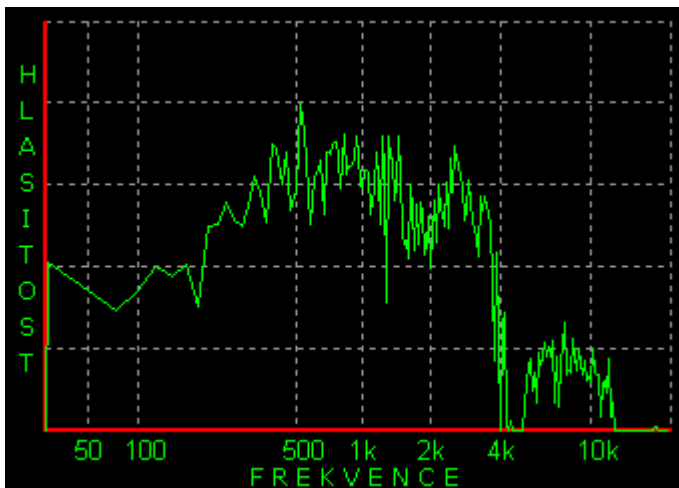


# 3. Akustika

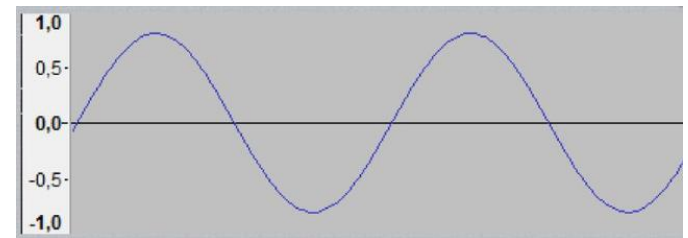
## 3.1 Zvuk a jeho vlastnosti

### Základní terminologie

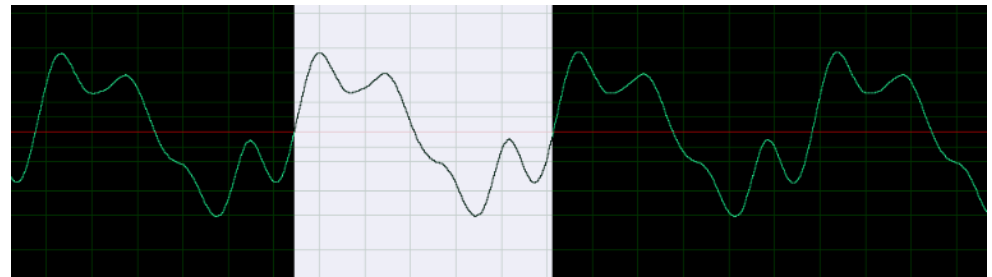
- **Zvuk je mechanické podélné vlnění, které je schopno vyvolat zvukový vjem.**
- **Akustika = nauka o zvuku**
- **Člověk** – vnímá frekvence v rozsahu cca **16 Hz – 16 kHz** (20 Hz – 20 kHz)
- **Infrazvuk** – zvukové vlnění jehož  **$f < 16$  Hz** (0-16 Hz, pohyby země, mořské vody, vrtule)
- **Ultrazvuk** – zvukové vlnění jehož  **$f > 20$  kHz** (pes, delfín, netopýr)
- Periodické zvuky – hudební zvuky, tóny (ladička, tónový generátor)
- Neperiodické zvuky – nehudební zvuky: šumy, praskoty



Záznam zvuku – praskot, šum



Záznam zvuku – jednoduchý tón



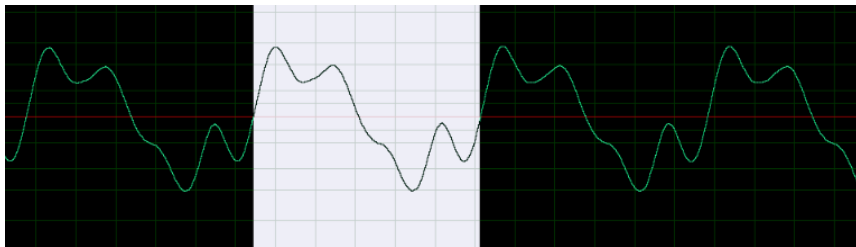
Záznam zvuku – tón klarinetu

# 3. Akustika

## 3.1 Zvuk a jeho vlastnosti

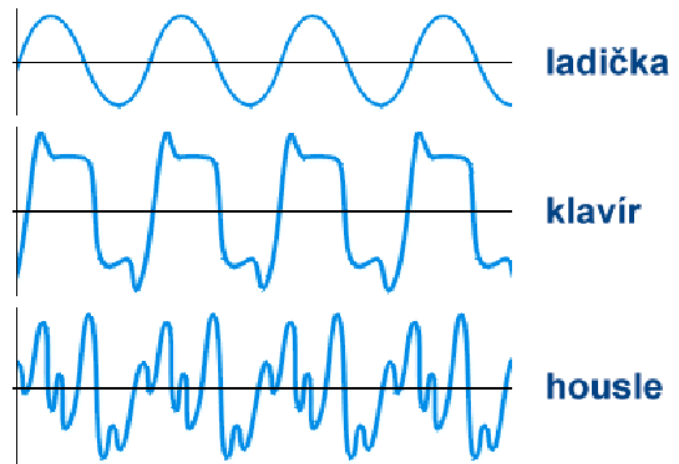
### Základní vlastnosti tónu

- **jednoduchý tón** → **harmonický (sinusový) průběh**
- **složený tón** → vzniká interferencí jednoduchých tónů (akord, různé hudební nástroje)
- **flažoletový tón** → lehký dotyk v uzlu, např. na struně uprostřed, slyšíme tón o oktávu vyšší
- **Výška tónu**
  - **absolutní** – frekvence tónu vyjádřená v Hz
  - **relativní** – podíl frekvence tónu v Hz ku frekvenci referenčního tónu **440 Hz (a<sup>1</sup>)**; **technika: 1 kHz**
- **Barva tónu** – stejné tóny znějí na různých nástrojích jinak (díky vyšším harmonickým frekvencím)
- **Intenzita tónu** – hlasitost, zmenšuje se s druhou mocninou vzdálenosti od zdroje zvuku



Záznam zvuku – tón klarinetu

### PERIODICKÉ KMITY



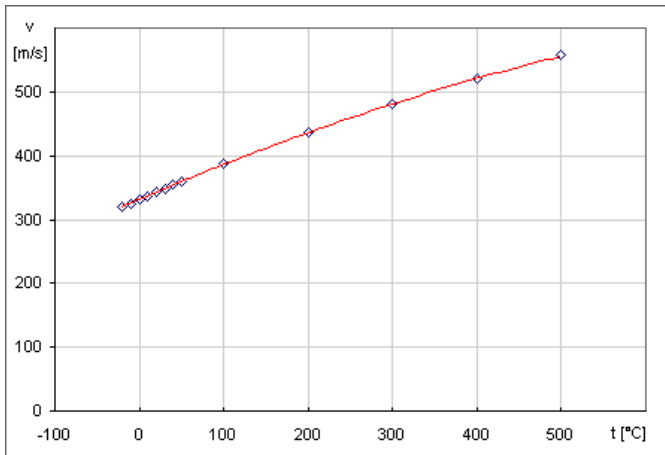
# 3. Akustika

## 3.1 Zvuk a jeho vlastnosti

### Rychlost zvuku

- **pružné prostředí** → **látkové prostředí je nutné pro šíření zvuku**
- **vakuum** → zvuk se nešíří, elektromagnetické vlnění ano
- **rychlost zvuku ve vzduchu** → **závisí na teplotě  $t$**

$$v = (331,82 + 0,61 \cdot t) \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$



| $t$ [°C] | $v$ [m·s <sup>-1</sup> ] |
|----------|--------------------------|
| 0        | 331,82                   |
| 5        | 334,87                   |
| 10       | 337,92                   |
| 15       | 340,97                   |
| 20       | 344,02                   |
| 25       | 347,07                   |
| 30       | 350,12                   |
| 35       | 353,17                   |

#### Z historie měření rychlosti zvuku:

Učenci francouzští chtějí vyzpytovat r. **1798** rychlost zvuku, změřili vzdálenost dvou stanic a dali tam postavit děla. Noční dobou střílelo se střídavě v umluvených okamžicích a změnila se pokaždé doba mezi uzřením ohně a zaslechnutím rány. Doby té má zvuk potřebí, aby proběhl vzdálenost stanic. **Zvuk se šíří ve vzduchu při teplotě 0° rychlostí 333 m/s.**

| Látka  | Rychlost zvuku [m·s <sup>-1</sup> ] |
|--------|-------------------------------------|
| vzduch | 340                                 |
| voda   | 1500                                |
| led    | 3200                                |
| ocel   | 5000                                |
| sklo   | 5200                                |

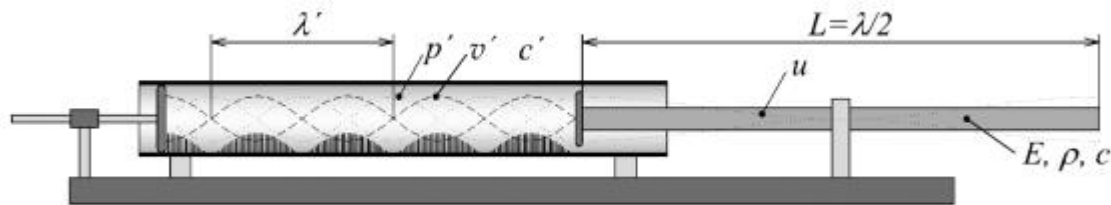


# 3. Akustika

## 3.1 Zvuk a jeho vlastnosti

### Měření rychlosti zvuku

- **Kundtova metoda** → pomocí poslechu nebo mikrofону se změří vzdálenost dvou sousedních kmiten, která je rovna polovině vlnové délky  
→ ze vztahu  $v = \lambda \cdot f$  vypočítáme rychlost zvuku



Kundtova trubice

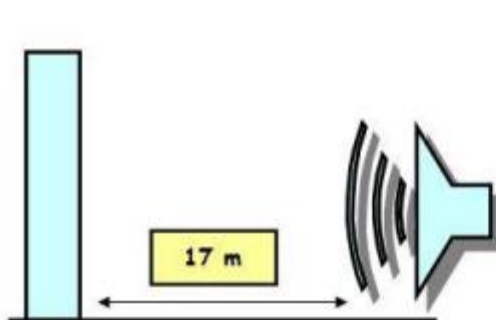
- **Odrazem od konce trubice** → pomocí zvukového SW jako je např. Audacity, Free Audio Editor, apod. určíme čas mezi zazněním zvuku (tlesknutí, lusknutí prsty) a odraženým zvukem od konce trubice  
→ ze vztahu  $v = s/t$  vypočítáme rychlost zvuku  
→ online: <https://www.youtube.com/watch?v=Lf7sePWWMyLk>
- **S využitím Dopplerova jevu**  
→ pomocí roztočeného zdroje zvuku zaznamenáme charakteristický nárůst a pokles frekvence  
→ online: <http://www.matfyz.eu/scclpx/dokumenty/scclpx-10-2R.pdf>

# 3. Akustika

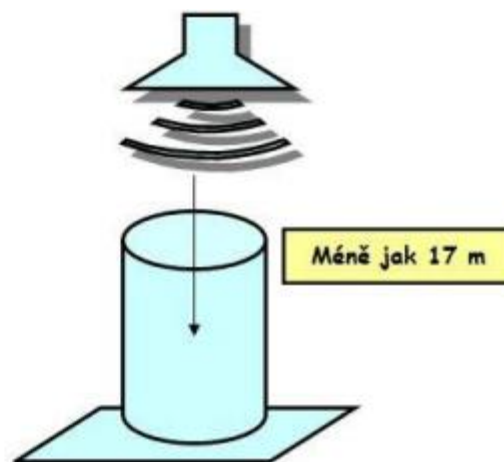
## 3.1 Zvuk a jeho vlastnosti

### Ozvěna a dozvuk

- **citlivost ucha** → **lidské ucho rozliší 2 zvuky, je-li čas. interval > 0,1 s**
- **ozvěna** → vzdálenost překážky větší než 17 m:  $s(\text{tam a zpět}) = 340 \cdot 0,1 \text{ m} = 34 \text{ m}$
- **dozvuk** → vzdálenost překážky menší než 17 m  
→ působí rušivě např. v koncertních sálech → závěsy, obaly od vajec, vata v reprobedně



Jestliže je odrazová plocha ve vzdálenosti více jak 17 metrů, jedná se o **ozvěnu**



Jestliže je odrazová plocha ve vzdálenosti méně jak 17 metrů, jedná se o **dozvuk**

# 3. Akustika

## 3.1 Zvuk a jeho vlastnosti

### Hlasitost a intenzita zvuku

- **citlivost ucha** → ucho reaguje na periodické změny tlaku vlnícího se prostředí
- **práh slyšení** →  $\Delta p = 10^{-5} \text{ Pa}$  - nejmenší hodnota změny tlaku, kterou je ucho schopné zaznamenat
- **práh bolesti** →  $\Delta p = 10^2 \text{ Pa}$  → největší hodnota, kterou ucho snese bez poškození

### Intenzita zvuku – $I$

- $P$  → výkon zvukového vlnění
- $S$  → plocha, kterou výkon prochází
- **práh slyšitelnosti** –  $I = 10^{-12} \text{ W m}^{-2}$
- **práh bolesti** –  $I = 1 \text{ W m}^{-2}$

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

$$[I] = \frac{[P]}{[S]} = \text{W} \cdot \text{m}^{-2}$$

### Hladina intenzity zvuku (hlasitost) – $L$

- intenzitě  $I_0 = 10^{-12} \text{ W m}^{-2}$  odpovídá  $B = 0 \text{ dB}$
- intenzitě  $I = 1 \text{ W m}^{-2}$  odpovídá  $B = 120 \text{ dB}$

$$L = \log \frac{I}{I_0}$$

$$[L] = \text{dB (decibel)}$$

| zdroj zvuku         | vzdálenost<br>v metrech | intenzita<br>v dB |
|---------------------|-------------------------|-------------------|
| tíkot hodinek       | 0,1                     | 20                |
| normální rozhovor   | 1                       | 65                |
| křik                | 1                       | 80                |
| symfonický orchestr | 3 až 5                  | 80                |
| motorová vozidla    | 10                      | 90                |
| startující letadlo  | 10                      | 110               |

# 3. Akustika

## 3.1 Zvuk a jeho vlastnosti

### Durová stupnice – diatonická tvrdá

- Poměr tónů:  $1 \quad \frac{9}{8} \quad \frac{5}{4} \quad \frac{4}{3} \quad \frac{3}{2} \quad \frac{5}{3} \quad \frac{15}{8} \quad 2$   
*kvarta* *oktáva*  
*velká tercie* *kvinta*

### Molová stupnice – diatonická měkká

- Poměr tónů:  $1 \quad \frac{9}{8} \quad \frac{6}{5} \quad \frac{4}{3} \quad \frac{3}{2} \quad \frac{5}{3} \quad \frac{15}{8} \quad 2$   
*kvarta* *oktáva*  
*malá tercie* *kvinta*

Hudební interval tónů s poměrem frekvencí  $f_2 : f_1 = 2 : 1$  se označuje jako *oktáva*.

Další libozvučný tón byl získán zkrácením struny o  $1/3$  a odpovídá mu vlnová délka  $\lambda_3 = \frac{4}{3}l$  (obr. R2-1f). Tón má frekvenci

$$f_3 = \frac{v}{\lambda_3} = \frac{v}{\frac{4}{3}l} = \frac{3v}{4l} = \frac{3}{4} \cdot 2f_1 = \frac{3}{2}f_1.$$

Získali jsme tak další základní hudební interval – *kvintu*:  $f_3 : f_1 = 3 : 2$ .

Při zkrácení struny o  $1/4$  vznikne tón s vlnovou délkou  $\lambda_4 = \frac{3}{2}l$ , kterému odpovídá hudební interval *kvarta* s poměrem frekvencí

$$\frac{f_4}{f_1} = \frac{\lambda_1}{\lambda_4} = \frac{2l}{\frac{3}{2}l} = 4 : 3.$$

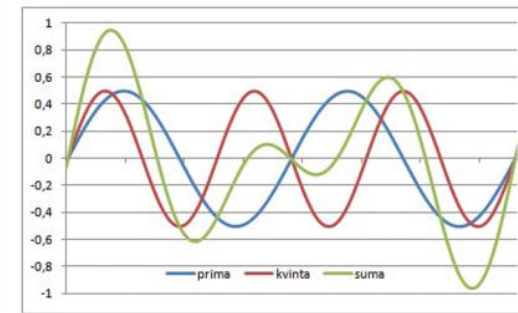
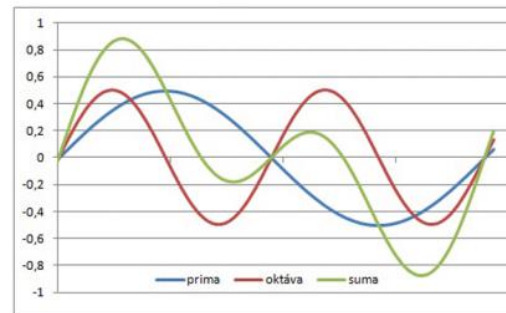
Stejným postupem určíme hudební interval mezi kvartou a kvintou:

$$\frac{f_3}{f_4} = \frac{3}{2} : \frac{4}{3} = 9 : 8.$$

Tento hudební interval určuje relativní výšku kvinty vzhledem ke kvartě a představuje *velký celý tón*.

### Konsonance a disonance

- **Konsonantní = libozvučné kombinace:**  
prima-oktáva, prima-kvinta, prima-kvarta,  
prima-sexta, prima-tercie  
→ poměr frekvencí je poměrem celých čísel  $< 7$
- **Disonantní = nelibozvučné kombinace:**  
prima-sekunda, prima-septima  
→ poměr frekvencí není poměrem celých čísel

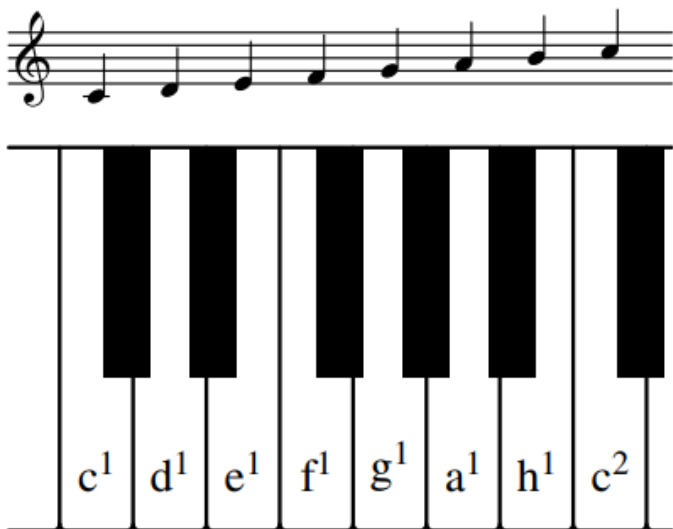


R3-3 Časové diagramy hudebních intervalů: oktáva (vlevo), kvinta (vpravo)

# 3. Akustika

## 3.1 Zvuk a jeho vlastnosti

### Tónová stupnice klavíru



**R3-5** Tónová stupnice klávesového hudebního nástroje

**Tabulka R3-1**

| Tón                | c <sup>1</sup> | d <sup>1</sup>   | e <sup>1</sup>  | f <sup>1</sup>  | g <sup>1</sup>  | a <sup>1</sup> | h <sup>1</sup>    | c <sup>2</sup>  |
|--------------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|
| Relativní výška    | prima<br>1 : 1 | sekunda<br>9 : 8 | tercie<br>5 : 4 | kvarta<br>4 : 3 | kvinta<br>3 : 2 | sexta<br>5 : 3 | septima<br>15 : 8 | oktáva<br>2 : 1 |
| Interval mezi tóny |                | 9:8              | 10:9            | 16:15           | 9:8             | 10:9           | 9:8               | 16:15           |

# 3. Akustika

## 3.1 Zvuk a jeho vlastnosti

### Tónová stupnice klavíru – MP3 intervalů

Tabulka R3-1

| Tón                | c <sup>1</sup> | d <sup>1</sup>   | e <sup>1</sup>  | f <sup>1</sup>  | g <sup>1</sup>  | a <sup>1</sup> | h <sup>1</sup>    | c <sup>2</sup>  |
|--------------------|----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|
| Relativní výška    | prima<br>1 : 1 | sekunda<br>9 : 8 | tercie<br>5 : 4 | kvarta<br>4 : 3 | kvinta<br>3 : 2 | sexta<br>5 : 3 | septima<br>15 : 8 | oktáva<br>2 : 1 |
| Interval mezi tóny | 9:8            |                  | 10:9            | 16:15           | 9:8             | 10:9           | 9:8               | 16:15           |

Prima:



Kvinta:



Tercie:



Na břehu Blanice

Sekunda:



Sexta:



Tercie:



Septima:



Kvinta:



Improvizace

Kvarta:



Oktáva:



# 3. Akustika

## 3.1 Zvuk a jeho vlastnosti

### Přirozené a temperované ladění

**Poznámka:** Ve stupnici se vyskytuje vedle velkého celého tónu s relativní výškou 9 : 8 také tzv. *malý celý tón* s relativní výškou 10 : 9. Ten vzniká posloupností velkého a malého půltónu. Jeho relativní výšku získáme vynásobením relativních výšek těchto půltónů:  $16/15 \cdot 25/24 = 10/9$ . Rozdíl intervalů obou celých tónů je však tak malý, že ho rozliší jen zkušené ucho hudebníka. Můžeme tedy konstatovat, že stupnice C dur se skládá z pěti celých tónů a dvou půltónů. Na klaviatuře klávesového hudebního nástroje jim odpovídají bílé klávesy.

Vývojem hudby došlo k rozšíření základní tónové stupnice o další půltóny a vznikla *chromatická stupnice*, která v jedné oktávě obsahuje celkem 12 tónů s různou relativní výškou. Jednotlivé tóny chromatické stupnice postupují po půltónech. Na klaviatuře s chromatickou stupnicí doplňuje bílé klávesy 5 černých kláves.

Přirozené ladění se používá u hudebních nástrojů, kde hudebník může technikou hry přímo ovlivnit frekvenci tónu. Podobně je tomu také při zpěvu. U klávesových nástrojů však je frekvence každého tónu pevně nastavena a přirozené ladění nahrazuje *temperované ladění*. Hudební interval oktávy tvoří 12 stejných půltónů s přesně definovanou relativní výškou  $\sqrt[12]{2} = 1,06$ . Rozdílné hodnoty absolutních výšek jednotlivých tónů  $c^1$  až  $c^2$  stupnice C dur jsou v tabulce R3-2. Přesně shodnou frekvenci 440 Hz má při obou způsobech ladění jen tón  $a^1$  – komorní a (tón  $e^1$  má v temperovaném ladění frekvenci 329,6 Hz).

# 3. Akustika

## 3.1 Zvuk a jeho vlastnosti

### Přirozené a temperované ladění

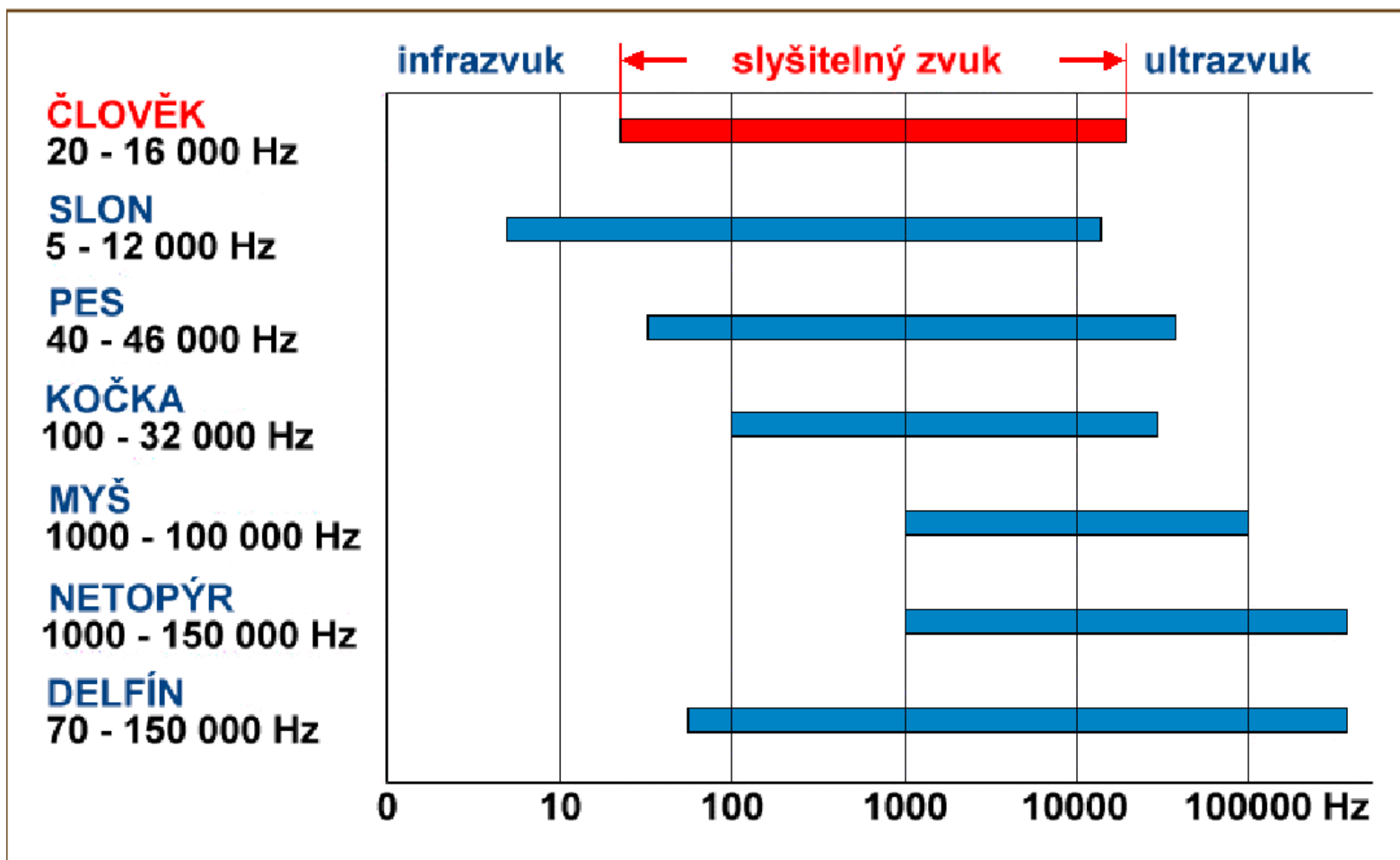
| Tón         | c <sup>1</sup>            | d <sup>1</sup> | e <sup>1</sup> | f <sup>1</sup> | g <sup>1</sup> | a <sup>1</sup> | h <sup>1</sup> | c <sup>2</sup> |
|-------------|---------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Ladění      | absolutní výška tónu (Hz) |                |                |                |                |                |                |                |
| přirozené   | 264                       | 297            | 330            | 352            | 396            | 440            | 495            | 528            |
| temperované | 262                       | 294            | 330            | 349            | 392            | 440            | 494            | 524            |

V hudbě se využívají tóny až do frekvence přibližně 4 kHz, rozdělené do osmi oktáv: *subkontra* začíná tónem s označením C<sub>2</sub>, *kontra* (C<sub>1</sub>), *velká* (C), *malá* (c), *jednočárkovaná* (c<sup>1</sup>; tabulka R3-2) až po *čtyřčárkovanou* (c<sup>4</sup>). Frekvence tónů těchto oktáv v temperovaném ladění jsou v MFChT. Např. klavíatura piana začíná tónem A<sub>2</sub> ( $f_{A_2} = 440/2^4 \text{ Hz} = 27,5 \text{ Hz}$ ) a končí tónem c<sup>5</sup> ( $f_{c_5} = 261,63 \cdot 2^4 \text{ Hz} = 4\,186 \text{ Hz}$ ).

# 3. Akustika

## 3.2 Infrazvuk a ultrazvuk

### Co slyší zvířata



Rozsah frekvencí, které slyší člověk a některá zvířata.

# 3. Akustika

## 3.2 Infrazvuk a ultrazvuk

### Infrazvuk

- **je zvuk s frekvencí nižší než je lidské ucho schopné vnímat, tedy pod 16 či 20 Hz.**
- Tuto frekvenci mají např. seizmické vlny při zemětřesení či nízko frekvenční vibrace strojů.
- Zvuk ve frekvenčním rozsahu nad 20kHz lidský sluch nevnímá a ani lidské tělo negativně neovlivňuje. Z fyziologického hlediska je neškodný.
- **dlouhotrvající působení infrazvuku na lidský organizmus je škodlivé**
- Infrazvuk představuje vážný rizikový faktor zejména pro člověka. Zvláště nebezpečné jsou infrazvuky s frekvencí 7 - 8 Hz, při kterých rezonují tkáně a mechanicky se poškozují buňky ve svalech a v nervech
- Hygienické normy omezují, případně zakazují práci mladistvých a žen v tomto prostředí. Na infrazvuk jsou zvláště citliví i revmatici.
- Další účinky infrazvuku se projevují jako pulzování v hlavě a úplně znemožňují jakoukoliv intelektuální práci. I při poměrně nízkých intenzitách vyvolává u živých organismů únavu, podráždění, závratě, zvracení. Způsobuje pocity panického strachu a při frekvenci 7 Hz dokonce smrt.
- **Infrazvuky s velmi vysokou energií mohou zabíjet lidi i živočichy na větší vzdálenosti.**
- online: <https://www.jesen.cz/clanek17.html>

# 3. Akustika

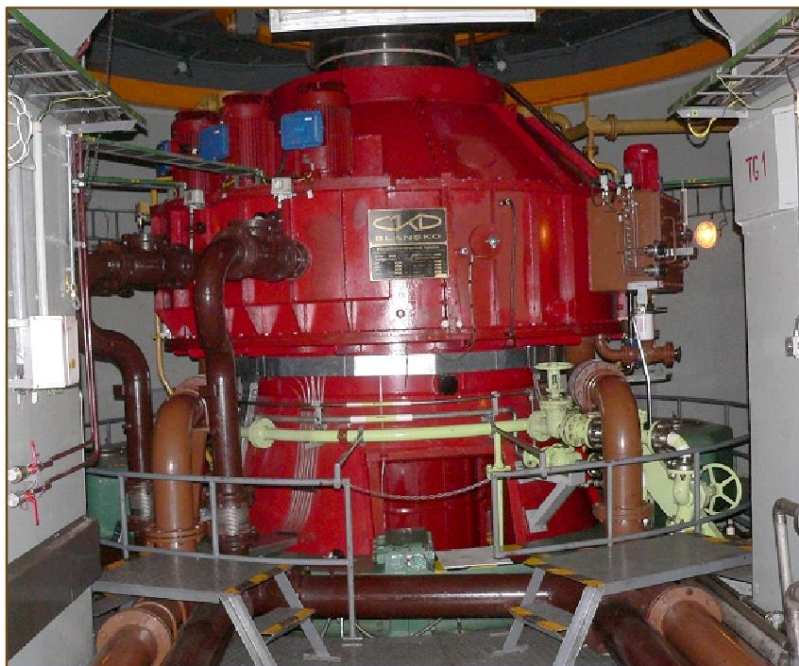
## 3.2 Infrazvuk a ultrazvuk

### Přírodní zdroje infrazvuku

- zemětřesení, erupce vulkánů
- vichřice, větry, bouřky
- vodopády, mořský příboj
- sluneční atmosféra, polární záře

### Technické zdroje infrazvuku

- motory letadel
- točivé vibrující stroje (ventilátory, kompresory)
- turbíny, generátory
- klimatizace
- zbraně



Turbína vodní elektrárny pohání generátor, ale je také zdrojem silného zvuku a infrazvuku.



# 3. Akustika

## 3.2 Infrazvuk a ultrazvuk

### Zajímavosti ze světa zvířat

- **kosatka** – při lovu a orientaci vysílá IZ
- **sloni** → vnímají IZ – neklidné chování a útoky z oblastí, kde nastane zemětřesení → dorozumívají se zvuky s  $f < 16$  Hz
- **ryby** – slyší jen IZ



# 3. Akustika

## 3.2 Infrazvuk a ultrazvuk

### Zajímavosti ze světa lidí

- **Troubení na lasturu** – lidé ve středověku věřili a někde věří, že troubení zažene bouřku
- Troubení skutečně vydává infrazvuk, který dokáže rozvibrovat jemné kapky vody v mracích a tím spustit déšť dřív než zasáhne pole a zničí úrodu

Troubení na lasturu proti covidu-19: Indie, jižní Amerika



Jeho (Durjodhanův) věhlasný praděd (Bhíšma), nejstarší z rodu Kuruů, zadul do lastury mající zvuk jakoby řval lev. Hned po jeho zatroubení se rozezvučely ostatní lastury, bubínky, bubny, rohy a kotle, jejichž zvuk byl děsivý. Potom nasedli také Mádhava<sup>[red 12]</sup> a Pándava<sup>[red 13]</sup> do svého nádherného bojového vozu taženého bělouši a zatroubili na své nebeské lastury, Hršíkéša<sup>[red 14]</sup> na Páňčadžanju, Dhanandžaja<sup>[red 15]</sup> na Dévadattu a Bhímakarma<sup>[red 16]</sup> rozseval hrůzu troubením na obrovitou lasturu Poundru, mající zvuk jakoby vyl vlk. Princ Judhištira, syn Káunt<sup>[red 17]</sup>, troubí na lasturu Anantavidžaju, Nakula a Sahadéva na lastury Sughóšu a Manipušpaku. Král Káši, obratný lučištník, mocný vozataj Šikhandi a neporazitelní vozatajové Dhrštadjumna, Viráta a Drupada, synové Draupady a silnoruký syn Subhadry (Abhimanju), všichni troubí na svoje lastury, ó zeměvládče. Tento ohlušující ryk Dhrtaráštrových vojáků proniká nebem a zemí a zasévá hrůzu do srdcí.



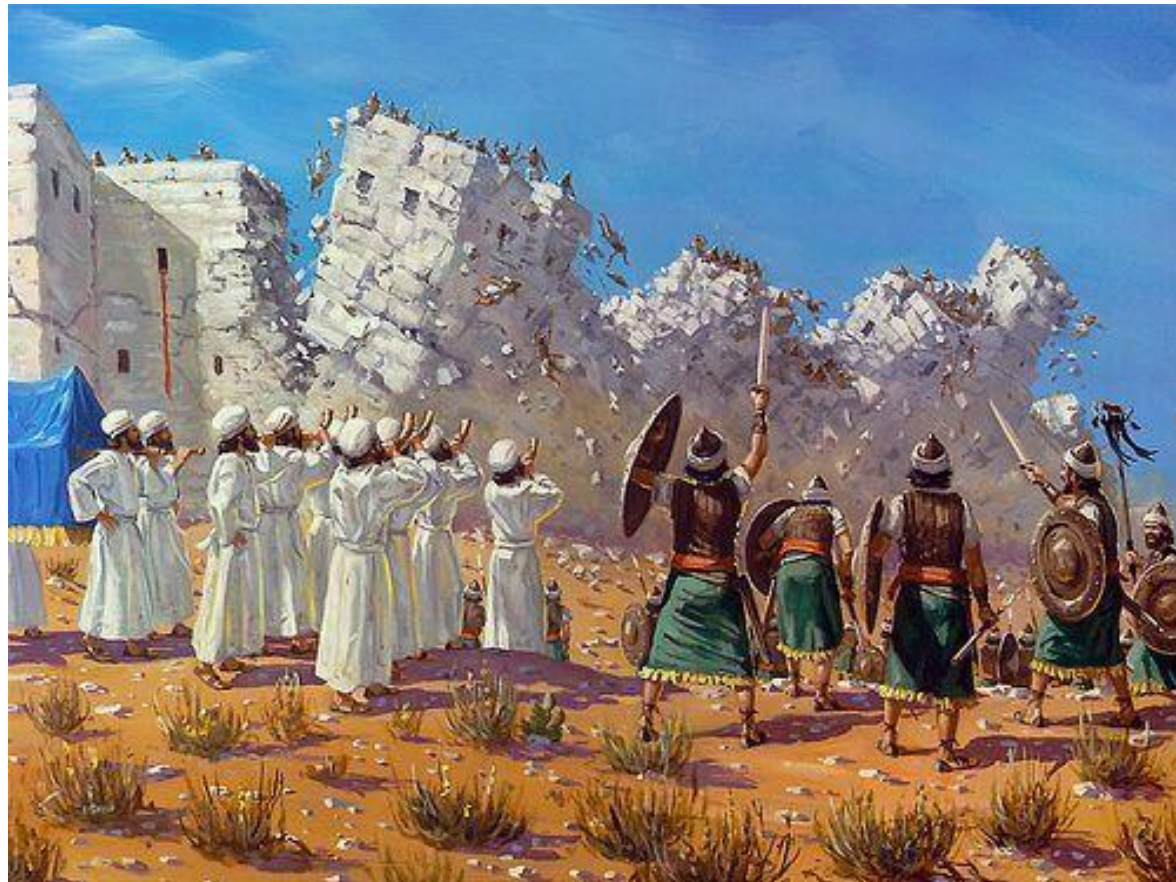
# 3. Akustika

## 3.2 Infrazvuk a ultrazvuk

### Zajímavosti ze světa lidí

- **Walls of Jericho** → biblický příběh o zboření zdí Jeruzaléma pomocí troubení

*„Kdybys poznalo v tento den i ty, co vede k pokoji!  
Avšak je to skryto tvým očím. Přejdou na tebe dny,  
kdy tvoji nepřátele postaví kolem tebe val, obklíčí  
tě a sevrou se všech stran. Srovnají tě se zemí a s  
tebou i tvé děti; nenechají v tobě kamen na  
kameni, poněvadž jsi nepoznalo čas, kdy se Bůh k  
tobě sklonil.“ (L 19,42-44)*



# 3. Akustika

## 3.2 Infrazvuk a ultrazvuk

### Jozue dobyl Jericho

Zhruba před třemi tisíci let prožíval židovský národ těžké období, o kterém se dočtete v biblických knihách Starého zákona. Když se Mojžíšovi podařilo vysvobodit Židy z egyptského otroctví, následovalo čtyřicetileté putování pouští do zaslíbené země Kanaán – dnešního území Palestiny a Izraele. Po příchodu poutníků na planinu Moab východně od řeky Jordán Mojžíš zemřel. Vůdcem se stal **Jozue**, který lid převedl přes Jordán a obsazování země Kanaán zahájil dobytím opevněného města Jericha.

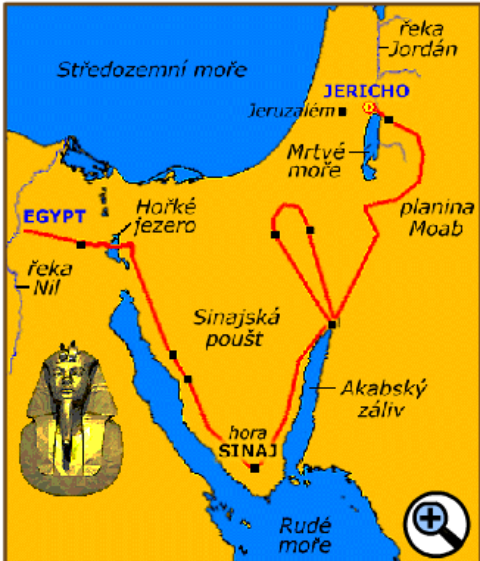
Jozue řídil **boj o Jericho** podle pokynů Hospodina. V bibli (*Kniha Jozue, kap. 6*) jsou boží pokyny podrobně popsány:

1. Jericho pak velmi pilně zavřeno bylo pro strach ze synů Izraelských, a žádný nevycházel ven, ani tam nevcházel.
2. I řekl Hospodin k Jozue: *Aj, dal jsem v ruku tvou Jericho, a krále jeho s silnými muži jeho.*
3. *Protož obcházeti budete město všickni muži bojovní, okolo města chodíce, jednou za den; tak učiníš po šest dní.*
4. *Kněží pak sedm ať nesou sedm trub z rohů beraních před truhlou; dne pak sedmého obejdete město sedmkrát, a kněží troubiti budou v trouby.*
5. *A když zdlouha troubiti budou na roh beraní, jakž nejprve uslyšíte hlas trouby, zkřikne všecken lid křikem velikým, i oboří se zeď městská na místě svém, a vejde lid do města, jeden každý proti místu, kdež stál.*

Z Hospodinových pokynů je zřejmé, že hradby Jericha měly být rozbořeny **mocnými zvukovými vlnami** hlasitě křičících bojovníků. Tato neobvyklá zbraň se plně osvědčila, jak o tom svědčí další odstavce Knihy Jozue:

20. *Tedy křičel lid, když zatroubili v trouby. Nebo když slyšel lid hlas trub, křičeli i oni křikem velikým, i obořila se zeď na místě svém. Tedy všel lid do města, jeden každý proti místu, kdež stál. I vzali je.*
21. *A pohubili ostrostí meče jako proklaté všecko, což bylo v městě, od muže až do ženy, od dítěte až do starce, a až do vola, dobytčete i osla.*

Dobyvatelé byli krutí a nelítostní – město bylo vyloupeno a vypáleno, přežila jen rodina nevěstky Raab, která ve svém domě ukrývala Jozuovy zvědy.



# 3. Akustika

## 3.2 Infrazvuk a ultrazvuk

Ultrazvuk



6.0 R15 G55 C7 A3

5:NUCHAL/DATING

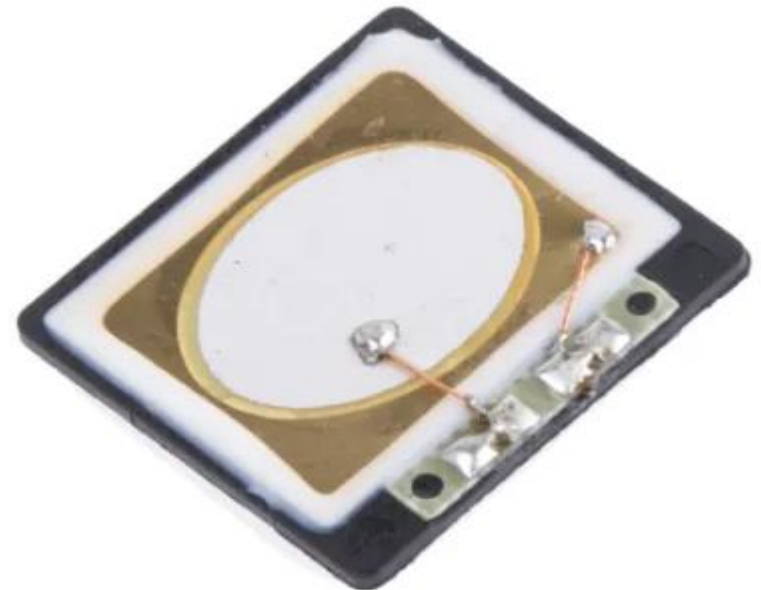
DVA: 49%

# 3. Akustika

## 3.2 Infrazvuk a ultrazvuk

### Ultrazvuk

- **je zvuk s frekvencí vyšší než je lidské ucho schopné vnímat, tedy nad 20 kHz.**
- Tuto frekvenci má např. vzduch proudící z trysek vysokou rychlostí nebo různé elektroakustické měniče využívající piezoelektrický nebo magnetostrikční jev (až  $10^2$  MHz)
- Zvuk ve frekvenčním rozsahu nad 20kHz lidský sluch nevnímá a ani lidské tělo negativně neovlivňuje. Z fyziologického hlediska je neškodný.

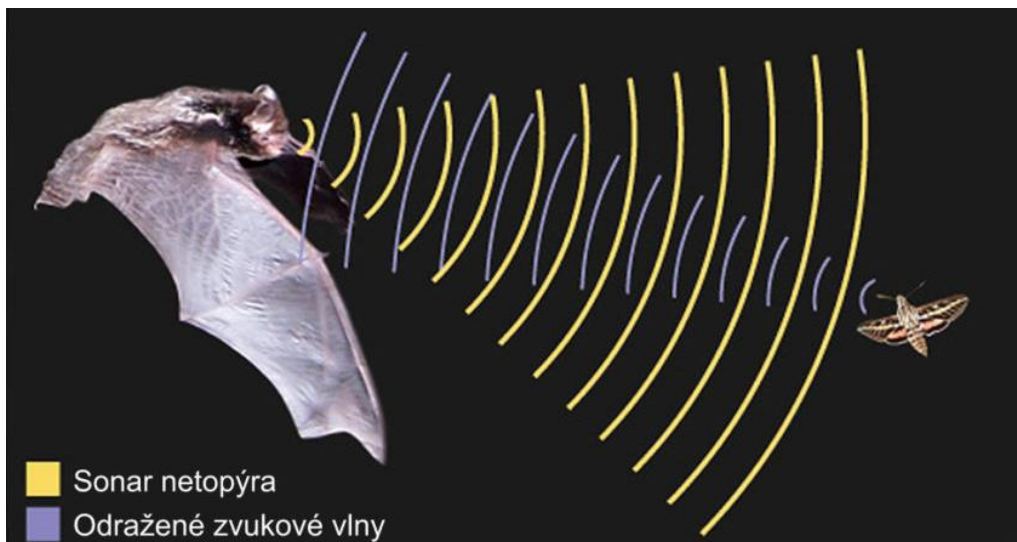


# 3. Akustika

## 3.2 Infrazvuk a ultrazvuk

### Ultrazvuk v říší živočichů

- **delfíni** → orientace a lov UZ echolokací
- **netopýr** → orientace, lov
- **pes** → UZ píšťalka, různé povely
- **kočka, myš**
- **moskyti, můry**
- **slepí lidé** → UZ slepecké hole

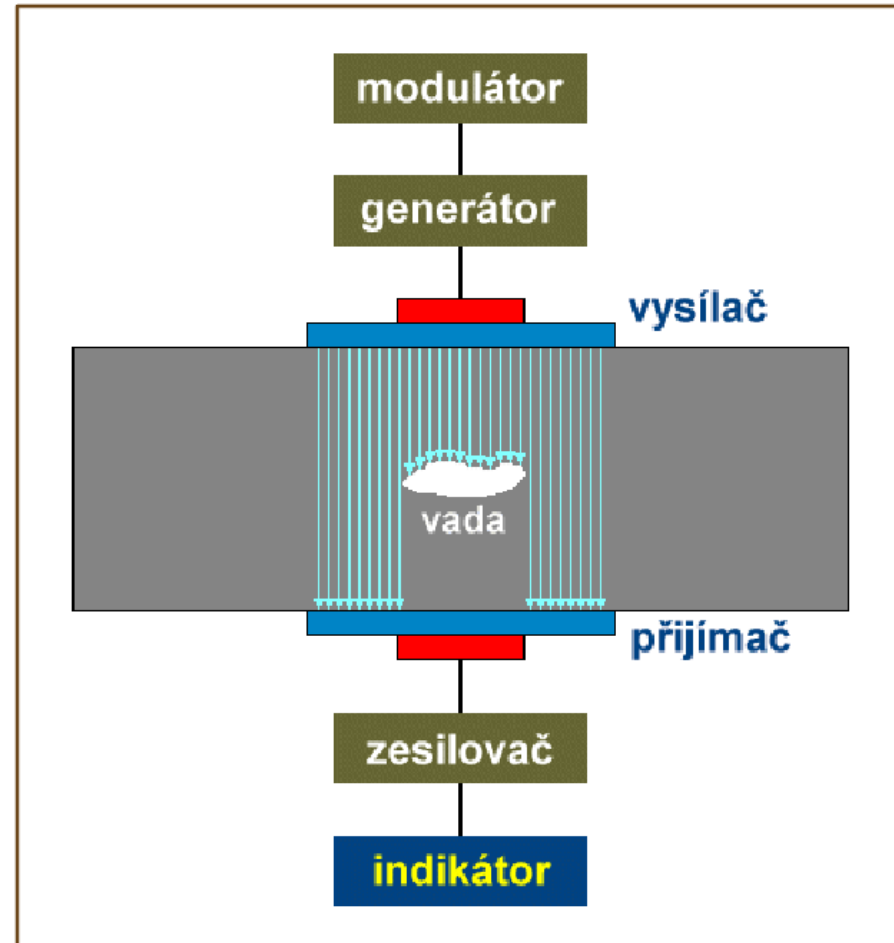


# 3. Akustika

## 3.2 Infrazvuk a ultrazvuk

### Ultrazvuková defektoskopie

- V praxi se využívá vlastnost **ohybu a odrazu UZ vln na rozhraní dvou materiálů** → dochází ke změně rychlosti šíření zvuku.
- Využití:
  - **detekce trhlin**
  - **hledání vnitřních dislokací** a poruch v materiálech a technických výrobcích nedestruktivním způsobem → **UZ defektoskopie**



Ultrazvukový defektoskop.

# 3. Akustika

## 3.2 Infrazvuk a ultrazvuk

### Ultrazvukové aplikace

- **Čištění povrchů materiálů**  
→ pomocí tzv. kavitace dochází k odstranění nečistot rychlými nárazy kapaliny rozkmitané UZ  
→ ložiska, šperky, optické sklo, chirurgické a dentální nástroje
- **UZ pračky** → prádla mechanické odstranění nečistot z prádla pomocí UZ
- **UZ liposukce** → kavitace způsobí v tukových tkáních rozpad tuků na menší části, které se lépe vstřebávají
- **Nežádoucí kavitace** – ničí lopatky lodních šroubů

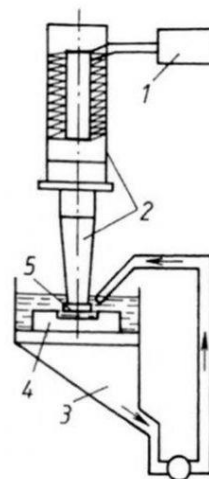
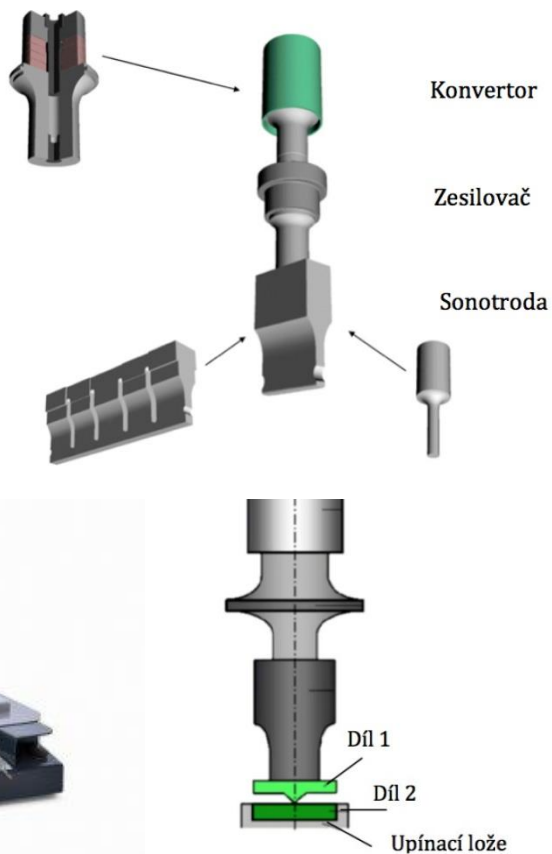
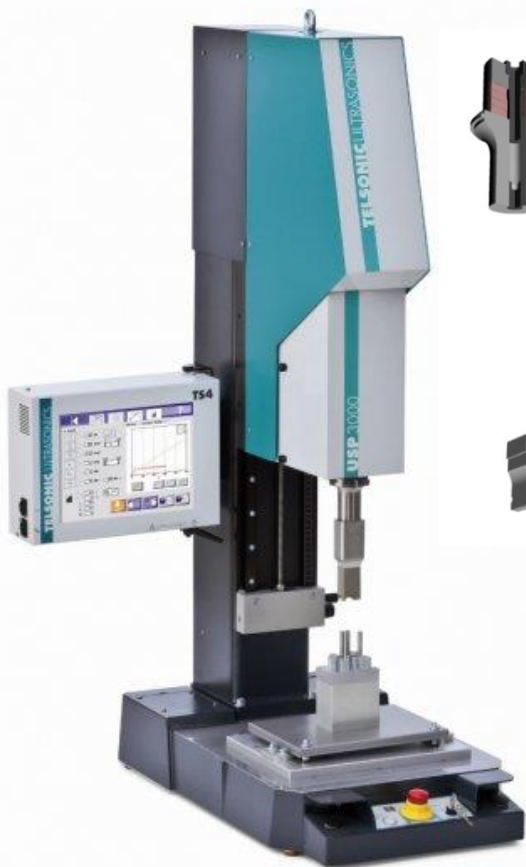


# 3. Akustika

## 3.2 Infrazvuk a ultrazvuk

### Ultrazvukové aplikace – obrábění, řezání, svařování plastů

#### Zařízení pro obrábění ultrazvukem



#### schéma zařízení

- 1 – generátor ultrazvukových kmitů
- 2 – systém pro vytvoření mechanických kmitů
- 3 – přívod brousících zrn a kapaliny
- 4 – obrobek
- 5 – nástroj

# 3. Akustika

## 3.2 Infrazvuk a ultrazvuk

### Ultrazvukové aplikace – zvlhčovače vzduchu a inhalátory

- voda se "rozpráší" ultrazvukovým generátorem na malé částičky, které jsou schopné se vznášet ve vzduchu. Protože voda nebyla zahřívána, vytváří se vodní mlha bez par.
- Tato technologie se využívá také při inhalacích, kde v inhalační přístroji se "rozprašuje" voda, resp. léčivo ve formě kapaliny bez jejího ohřevu.



# 3. Akustika

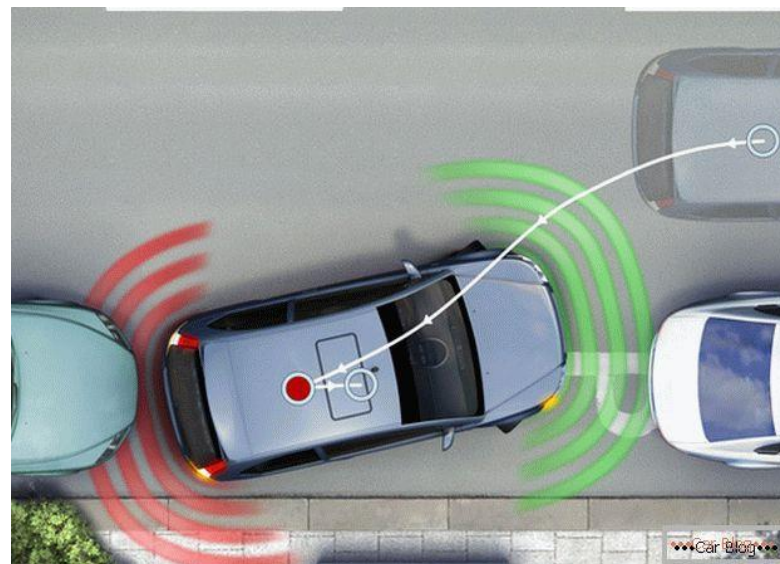
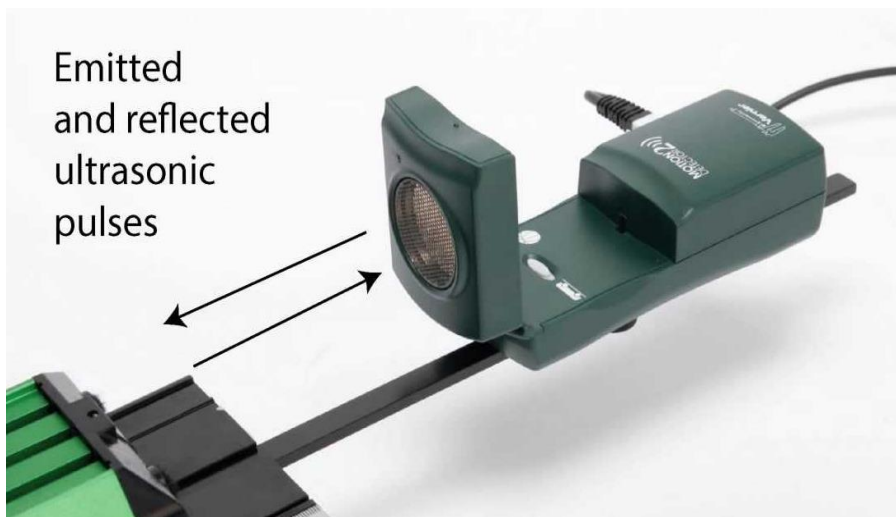
## 3.2 Infrazvuk a ultrazvuk

### Ultrazvukové aplikace – měřiče vzdálenosti

- Odrazy se využívají např. na **měření vzdáleností** (ultrazvukový dálkoměr – Motion Detector Vernier),
- zjištění polohy a vzdálenosti těles v homogenním prostředí: **sonar, echolot**
  - používaný postup se nazývá **echolokace**.
  - **ponorky, rybolov** (vyhledávání ryb)
- **parkovací senzory, adaptivní tempomat**



Emitted and reflected ultrasonic pulses

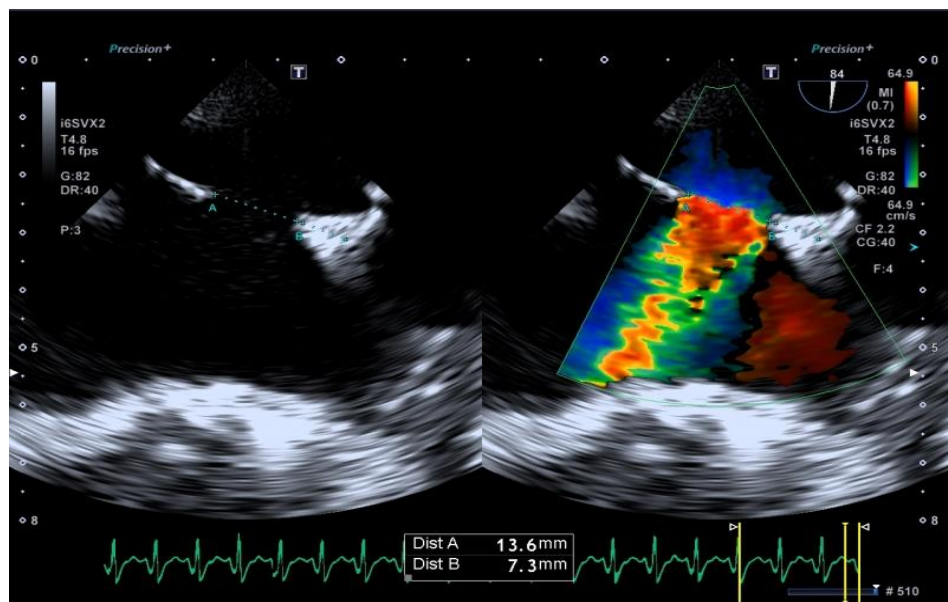


# 3. Akustika

## 3.2 Infrazvuk a ultrazvuk

### Ultrazvukové aplikace – diagnostické přístroje v lékařství

- UZ vlny procházejí tělem a odrážejí se od jednotlivých orgánů
- odražené vlny lze počítačově převést do formy obrazu – **sonografie**
- PŘ.: vyšetření plodu v těle matky, krční tepny, břicho, srdce.

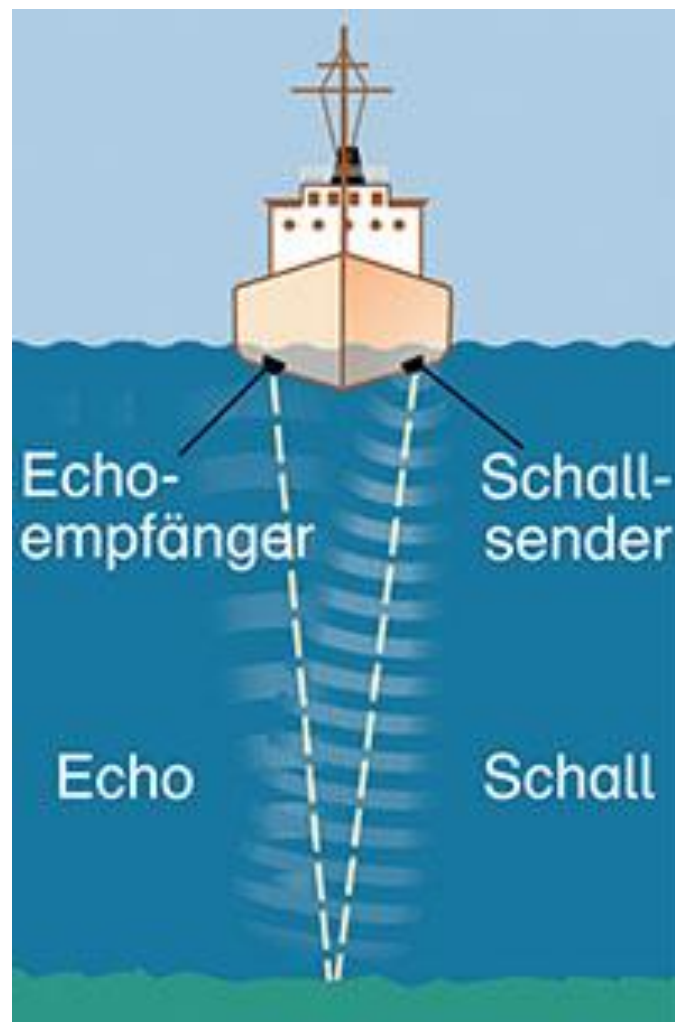
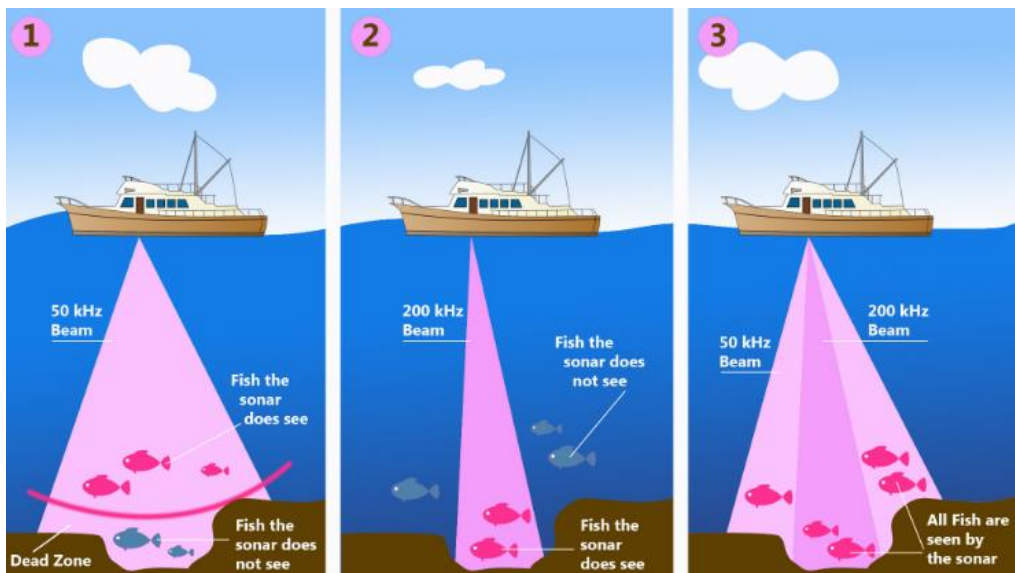


# 3. Akustika

## 3.2 Infrazvuk a ultrazvuk

### Ultrazvukové aplikace – echolokace a SONAR

- termín **echolokace** zavedl v r. 1944 Donald Griffin (1915-2003), americký profesor zoologie
- umožňuje některým živočichům orientaci a lov ve tmě (netopýr)
- na stejném principu pracuje **sonar**  
→ **SO**und **NA**avigation and **R**anging  
→ záznam odražených zvukových vln od objektu



# 3. Akustika

## 3.3 Dopplerův jev

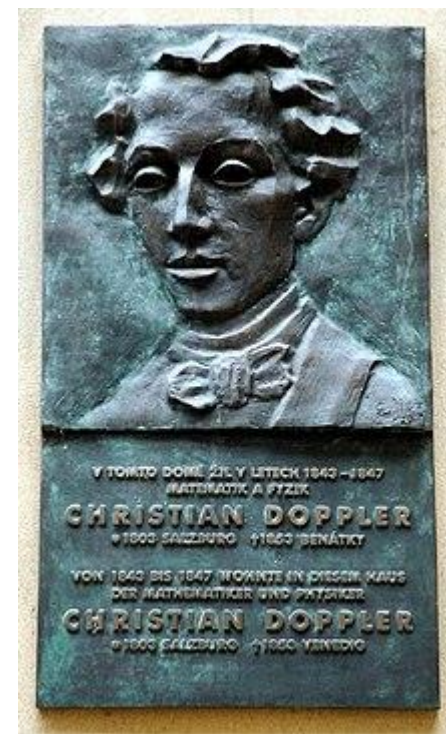
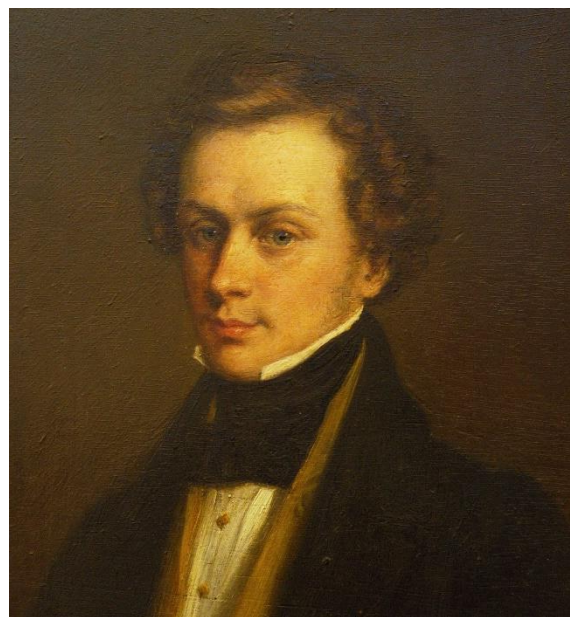
### ▪ Christian Doppler (1803 – 1853)

- rakouský fyzik, matematik, astronom
- 1835 profesor matematiky na reálném gymnáziu v Praze
- 1836, 1837 na ČVUT přednášel matematiku a geodézii
- 1836 řádný člen Královské české společnosti
- 1848 kvůli revolučním nepokojům odjezd do Vídně, kde se stal prof. geodézie

- 1842 – publikoval princip Dopplerova jevu; na jeho základě pak E. Hubble popsal tzv. **red shift** (rudý posuv) světla vzdalujících se galaxií a souvislost s rozpínáním vesmíru



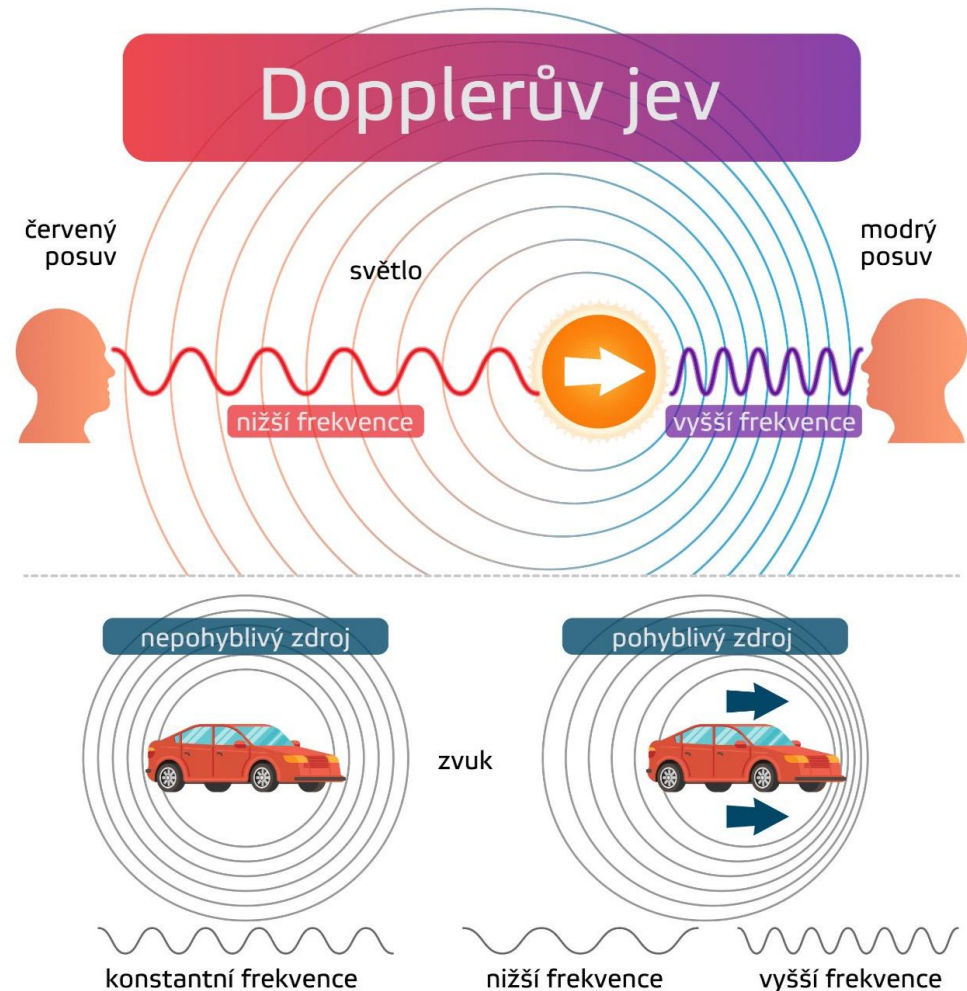
Č.p. 798 U obecního dvora 5, Praha 1 Staré město



# 3. Akustika

## 3.3 Dopplerův jev

- **Dopplerův jev:** popisuje **změnu frekvence a vlnové délky přijímaného vlnění** oproti vysílanému vlnění, **způsobenou nenulovou vzájemnou rychlostí vysílače a přijímače**
- platí pro zvukové vlnění i pro světlo
- Při **přibližování zdroje zvuku** ke stojícímu pozorovateli **vnímá pozorovatel vyšší frekvenci** zvuku než je frekvence zdroje
- Při **vzdalování zdroje zvuku** od stojícího pozorovatele **vnímá pozorovatel nižší frekvenci** zvuku než je frekvence zdroje

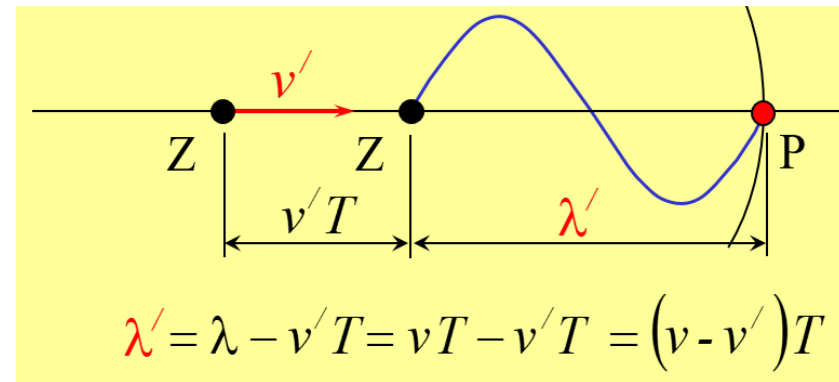
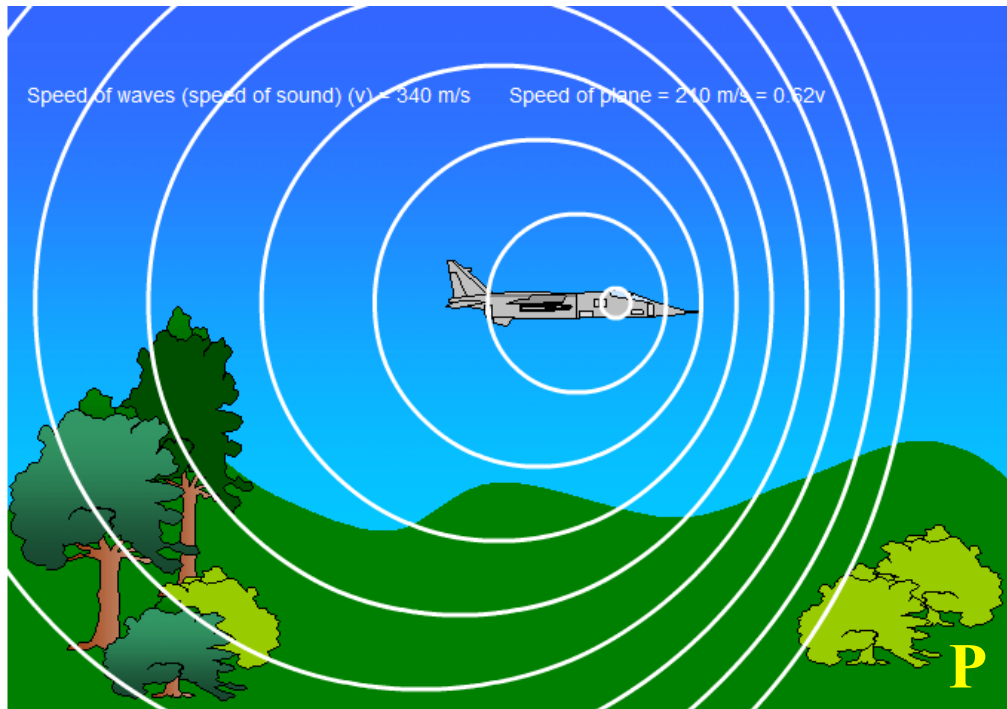


# 3. Akustika

## 3.3 Dopplerův jev

### Přibližování zdroje zvuku k pozorovateli v klidu

- **Pozorovatel v klidu:** vnímá **vyšší frekvenci** tónu, tedy **menší vlnovou délku**



$$f_P = \frac{c}{c - v} f_Z$$

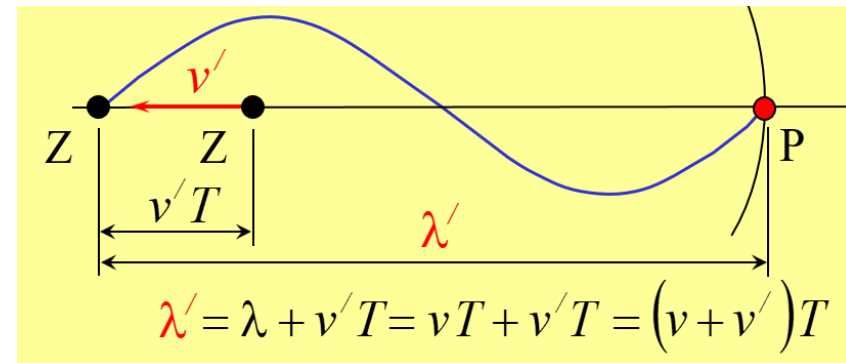
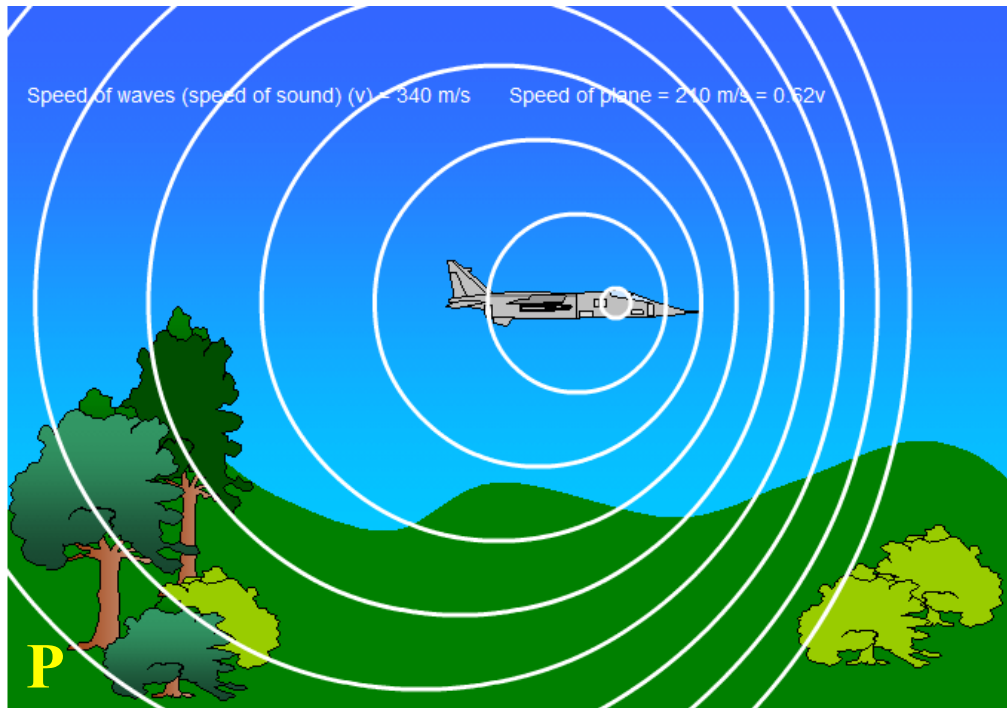
- $f_Z$  – frekvence zdroje
- $f_P$  – frekvence vnímaná (naměřená) pozorovatelem P v klidu
- $c$  – rychlost vlnění (zvuku nebo světla)
- $v$  – rychlost zdroje vůči pozorovateli

# 3. Akustika

## 3.3 Dopplerův jev

### Přibližování zdroje zvuku k pozorovateli v klidu

- **Pozorovatel v klidu:** vnímá **nižší frekvenci** tónu, tedy **větší vlnovou délku**



$$f_P = \frac{c}{c + v} f_Z$$

- $f_Z$  – frekvence zdroje
- $f_P$  – frekvence vnímaná (naměřená) pozorovatelem P v klidu
- $c$  – rychlost vlnění (zvuku nebo světla)
- $v$  – rychlost zdroje vůči pozorovateli

# 3. Akustika

## 3.3 Dopplerův jev

### Vzájemný pohyb pozorovatele i zdroje

$$f_P = \frac{c \pm u}{c \mp v} f_Z$$

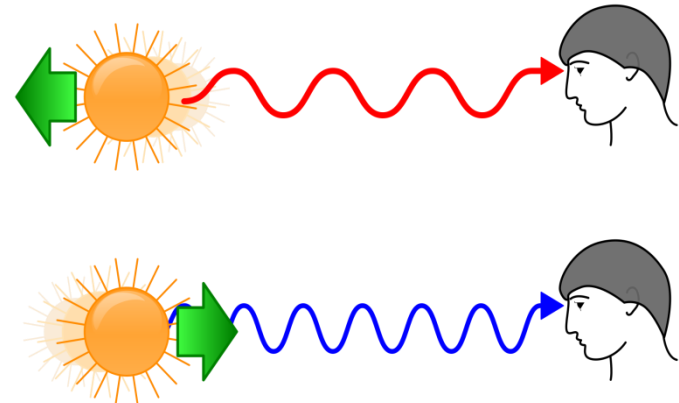
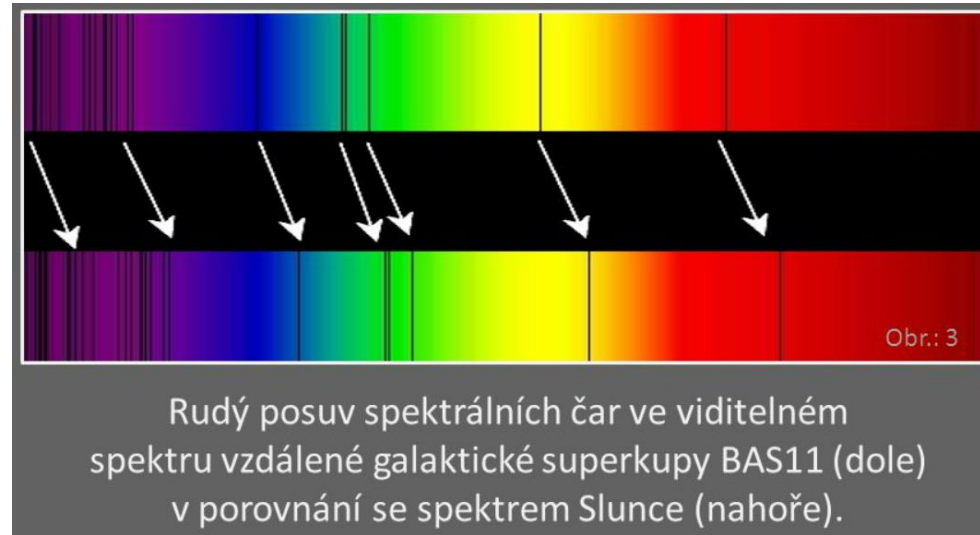
- $f_Z$  – frekvence zdroje
- $f_P$  – frekvence vnímaná (naměřená) pozorovatelem P v klidu
- $c$  – rychlost vlnění (zvuku v daném prostředí nebo světla)
- $v$  – rychlost zdroje zvuku
- $u$  – rychlost pozorovatele
- horní znaménka: vzájemné přibližování P a Z
- dolní znaménka: vzájemné vzdalování P a Z

# 3. Akustika

## 3.3 Dopplerův jev

### Rudý posuv – rozpínání vesmíru

- **prodloužení vlnové délky elektromag. záření na straně přijímače**
- ve viditelné části spektra znamená posuv barevnou změnu spektrálních čar k červené
- příčiny rudého posuvu:
  - **relativistický Dopplerův jev** – způsobený vzdalováním zdroje světla od pozorovatele
  - **gravitační rudý posuv** – podle Einsteinovy OTR gravitační pole zpomaluje čas, tedy fialové světlo vyslané směrem od Země díky slábnoucí gravitaci zvětší vlnovou délku směrem k červené
  - **kosmologický red shift** – důkaz rozpínání vesmíru a teorie Big Bangu (1924 E. Hubble)



# 3. Akustika

## 3.4 Historické zdroje zvuku

### Sirény

- **Seebeckova siréna – kruhová deska s vyvrtanými otvory po obvodu kružnic**

→ po roztočení **foukáme proudem vzduchu proti otvorům, třením vzniká tón**

→ **moderní provedení – tón vzniká přerušením laserového paprsku dopadajícího na fotočlánek**, který je spojený se zesilovačem

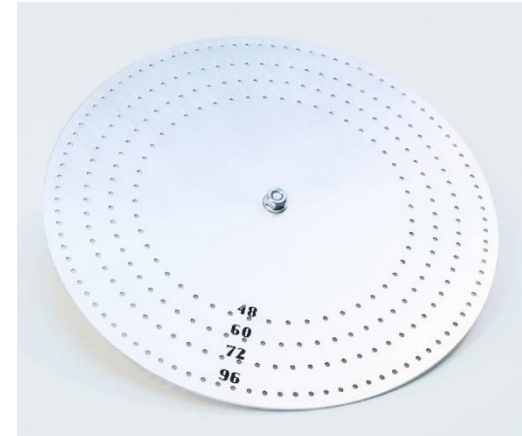
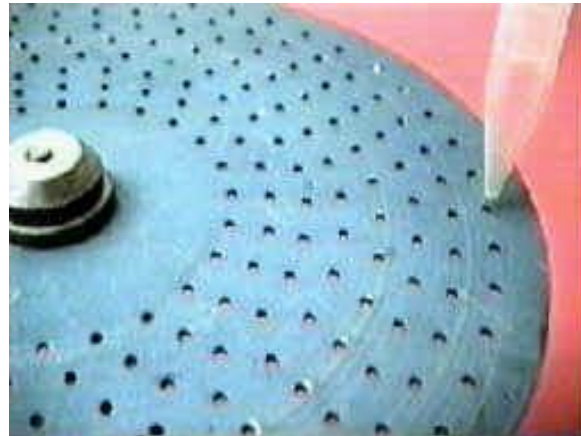
→ frekvence tónu  $f$  je daná počtem otvorů  $n$  na příslušné dráze a současně přímo úměrná frekvenci otáčení disku  $f_o$ :

$$f = n f_o$$

→ počty otvorů pro durovou stupnici jsou ve stejném poměru jako absolutní frekvence

tónů durové stupnice: např. C-dur: 48 (c<sup>2</sup>), 45 (h<sup>1</sup>), 40 (a<sup>1</sup>), 36 (g<sup>1</sup>), 32 (f<sup>1</sup>), 30 (e<sup>1</sup>), 27 (d<sup>1</sup>), 24 (c<sup>1</sup>)

→ rychlost proudění vzduchu nemá vliv na frekvenci tónu, pouze na jeho intenzitu



# 3. Akustika

## 3.4 Historické zdroje zvuku

### Sirény

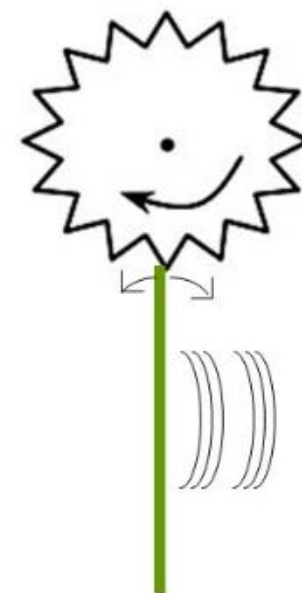
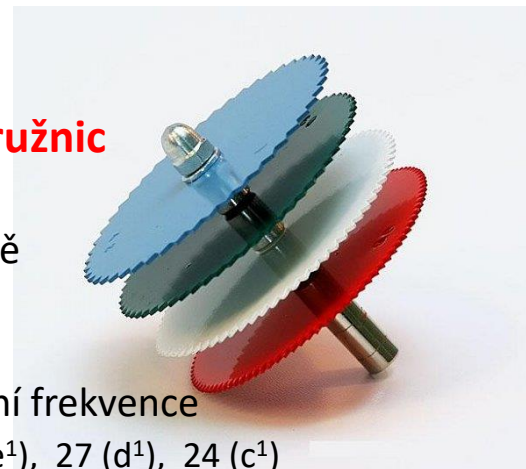
- **Savartova siréna – soustava ozubených kol se zuby po obvodu kružnic**

→ po roztočení **přiložením pružného pásku na zuby vzniká tón**

→ frekvence tónu  $f$  je daná počtem zubů  $n$  na příslušném kole a současně přímo úměrná frekvenci otáčení disku  $f_0$

$$f = n f_0$$

→ počty zubů pro durovou stupnici jsou ve stejném poměru jako absolutní frekvence tónů durové stupnice: např. C-dur: 48 (c<sup>2</sup>), 45 (h<sup>1</sup>), 40 (a<sup>1</sup>), 36 (g<sup>1</sup>), 32 (f<sup>1</sup>), 30 (e<sup>1</sup>), 27 (d<sup>1</sup>), 24 (c<sup>1</sup>)



# 3. Akustika

## 3.4 Historické zdroje zvuku

### Struny a píšťaly

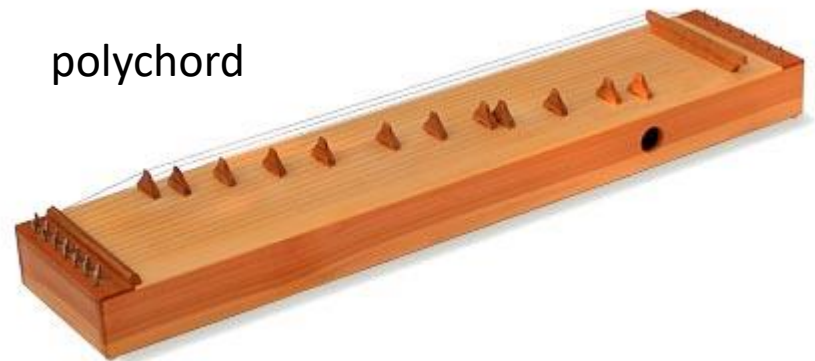
dřevěná píšťala z varhan



monochord



polychord



# 3. Akustika

## 3.4 Historické zdroje zvuku

### Struny

Můžeme tedy shrnout, že frekvence tónu struny závisí na

1. délce struny,
2. hmotnosti struny,
3. napětí struny.

Struna kmitá příčně a pro rychlost  $v$  vlnění na struně byl odvozen vztah

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

kde  $F$  je síla, kterou je struna napínána, a  $\mu$  je hmotnost jednotkové délky struny ( $[\mu] = \text{kg} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

**Poznámka:** Struna o délce  $l$  má hmotnost  $m = \rho S l$ , kde  $\rho$  je hustota materiálu struny a  $S$  je plocha příčného řezu struny. Hmotnost  $\mu$  jednotkové délky struny je tedy  $\mu = m/l = \rho S$ . Normálové napětí struny  $\sigma_n = F/S$  a pro rychlost vlnění také platí  $v = \sqrt{\sigma_n/\rho}$ .

Základní tón struny o délce  $l$ , kterému odpovídá vlnová délka zvukového vlnění  $\lambda = 2l$ , má frekvenci

$$f_z = \frac{v}{\lambda} = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{F}{\mu}}.$$

# 3. Akustika

## 3.4 Historické zdroje zvuku

### Píšťaly retné

Jestliže proud vzduchu naráží na ostrou hranu, čili na tzv. *ret*, dochází po obou stranách hrany k vírovému proudění a víry vzduchu budí tzv. *třecí tóny*. Jejich vznik je provázen periodickými změnami tlaku, kterými se sloupec vzduchu v píšťale rozkmitá. Schematicky je retná píšťala znázorněna na obr. R3-10. Vzduch vyfukovaný ústy hudebníka prochází úzkou štěrbinou, za kterou je umístěn ret píšťaly. Intenzita vznikajících třecích tónů je ovšem malá, ale zesiluje se rezonancí vzduchového sloupce píšťaly. Rezonanční frekvenci  $f$  určuje délka  $l$  vzduchové sloupce, v němž vzniká chvění s kmitnou v místě rtu a na otevřeném konci. Uprostřed píšťaly je uzel, takže frekvence základního tónu

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

kde  $v$  je rychlost zvuku ve vzduchu. Kromě základního tónu mohou vznikat vyšší harmonické tóny, avšak jen s lichými násobky základní frekvence (viz čl. R2.1). Délku rezonujícího sloupce vzduchu lze měnit soustavou otvorů v tělese píšťaly, které se otvírají pomocí klapek nebo prsty. Typickým příkladem retné píšťaly je flétna. Na stejném principu jsou konstruovány také píšťaly varhan.



R3-10 Retná píšťala

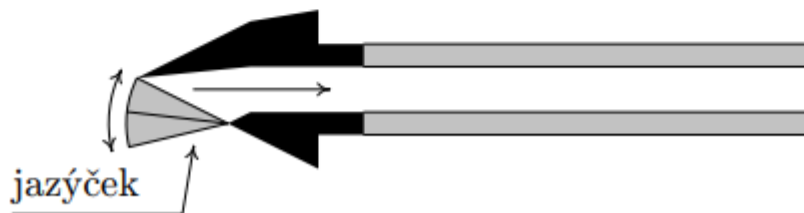
# 3. Akustika

## 3.4 Historické zdroje zvuku

### Píšťaly jazýčkové

V jazýčkové píšťale je zdrojem kmitání pružný jazýček, což je proužek vyrobený z pružného materiálu. Na jednom konci je upevněný a na druhém volný (obr. R3-11). Proudem vzduchu z hudebníkových úst se jazýček rozkmitá a střídavě zakrývá otvor do vzduchového sloupce, v němž vzniká chvění obdobně jako u retné píšťaly. Frekvence kmitání jazýčku určuje výšku tónu.

Typickým příkladem jazýčkové píšťaly je klarinet nebo saxofon, u nichž se jako jazýček používá třtinový plátek. Kovové jazýčky mají např. foukací harmoniky, akordeon a také některé druhy varhanních píšťal. U dalších jazýčkových hudebních nástrojů jsou zdrojem zvuku dvojité jazýčky (např. hoboj, fagot). Jazýčky jsou mírně vyduť a dutými stranami jsou přivráceny k sobě. Mezi nimi vzniká úzká štěrbinu a proud vzduchu jazýčky rozkmitá. U žesťových nástrojů (trubka, pozoun) tvoří dvojitý jazýček přímo rty, kterými se hudebník dotýká nátrubku.



R3-11 Jazýčková píšťala