

Nelineární vlnové procesy v akustice

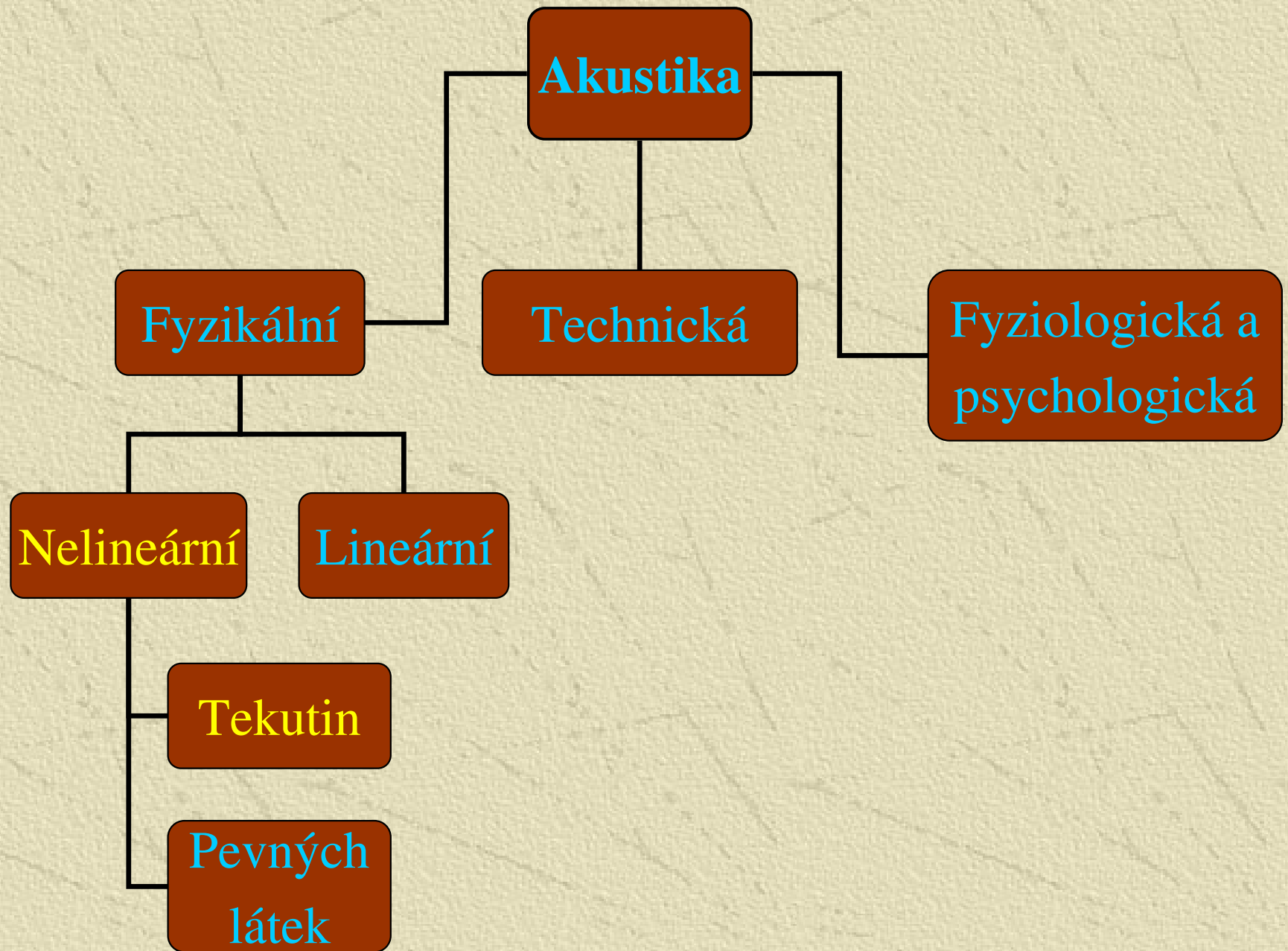
Michal Bednařík

ČVUT – FEL, katedra fyziky

Technická 2

166 27 Praha 6

e-mail: bednarik@fel.cvut.cz



Klíčová témata prezentace

- ✦ Základní modelová rovnice nelineární akustiky
- ✦ Nelineární útlum, saturační jev
- ✦ Potlačení saturačního jevu

Základní rovnice


Základní rovnice

- ◆ Navierova-Stokesova pohybová rovnice

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{1}{3} \eta \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v})$$

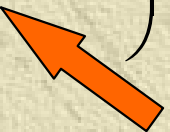
Základní rovnice

- ◆ Navierova-Stokesova pohybová rovnice


$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{1}{3} \eta \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v})$$

Základní rovnice

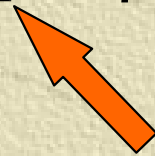
- ◆ Navierova-Stokesova pohybová rovnice

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{1}{3} \eta \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v})$$


Základní rovnice

- ◆ Navierova-Stokesova pohybová rovnice

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{1}{3} \eta \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v})$$



Základní rovnice


- ◆ Navierova-Stokesova pohybová rovnice

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{1}{3} \eta \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v})$$



Základní rovnice

- ◆ Navierova-Stokesova pohybová rovnice

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{1}{3} \eta \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v})$$


Základní rovnice

- ◆ Navierova-Stokesova pohybová rovnice

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{1}{3} \eta \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v})$$

- ◆ Rovnice kontinuity

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

Základní rovnice

- ◆ Navierova-Stokesova pohybová rovnice

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{1}{3} \eta \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v})$$

- ◆ Rovnice kontinuity

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

- ◆ Rovnice toku tepla

$$\rho \theta \left(\frac{\partial s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla s \right) = \frac{\eta}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ik} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) + \zeta (\nabla \cdot \mathbf{v})^2 + \kappa \nabla^2 \theta$$

Základní rovnice


- ◆ Navierova-Stokesova pohybová rovnice

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{1}{3} \eta \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v})$$

- ◆ Rovnice kontinuity

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

- ◆ Rovnice toku tepla

$$\rho \theta \left(\frac{\partial s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla s \right) = \frac{\eta}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ik} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) + \zeta (\nabla \cdot \mathbf{v})^2 + \kappa \nabla^2 \theta$$


Základní rovnice


- ◆ Navierova-Stokesova pohybová rovnice

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{1}{3} \eta \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v})$$

- ◆ Rovnice kontinuity

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

- ◆ Rovnice toku tepla

$$\rho \theta \left(\frac{\partial s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla s \right) = \frac{\eta}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ik} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) + \zeta (\nabla \cdot \mathbf{v})^2 + \kappa \nabla^2 \theta$$


Základní rovnice

- ◆ Navierova-Stokesova pohybová rovnice

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{1}{3} \eta \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v})$$

- ◆ Rovnice kontinuity

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

- ◆ Rovnice toku tepla

$$\rho \theta \left(\frac{\partial s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla s \right) = \frac{\eta}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ik} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) + \zeta (\nabla \cdot \mathbf{v})^2 + \kappa \nabla^2 \theta$$



Základní rovnice

- ◆ Navierova-Stokesova pohybová rovnice

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{1}{3} \eta \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v})$$

- ◆ Rovnice kontinuity

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

- ◆ Rovnice toku tepla

$$\rho \theta \left(\frac{\partial s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla s \right) = \frac{\eta}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ik} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) + \zeta (\nabla \cdot \mathbf{v})^2 + \kappa \nabla^2 \theta$$



Základní rovnice

- ◆ Navierova-Stokesova pohybová rovnice

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} \right) = -\nabla p + \eta \nabla^2 \mathbf{v} + \left(\zeta + \frac{1}{3} \eta \right) \nabla (\nabla \cdot \mathbf{v})$$

- ◆ Rovnice kontinuity

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

- ◆ Rovnice toku tepla

$$\rho \theta \left(\frac{\partial s}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla s \right) = \frac{\eta}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_k} + \frac{\partial v_k}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ik} \frac{\partial v_l}{\partial x_l} \right) + \zeta (\nabla \cdot \mathbf{v})^2 + \kappa \nabla^2 \theta$$

- ◆ Stavová rovnice

$$p = p(\rho, s)$$

Kuzněcovova rovnice

Kuzněcovova rovnice

Modelová
rovnice
v 2. přiblížení

Kuzněcovova rovnice

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \varphi = \frac{b}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial t^3} - \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\beta - 1}{c_0^2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + (\nabla \varphi \cdot \nabla \varphi) \right]$$


Kuzněcovova rovnice



$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \varphi = \frac{b}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial t^3} - \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\beta - 1}{c_0^2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + (\nabla \varphi \cdot \nabla \varphi) \right]$$

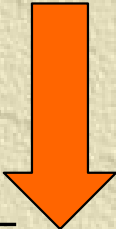
$$\mathbf{v} = \nabla \varphi$$

Kuzněcovova rovnice

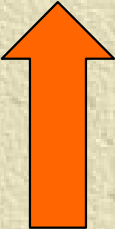
$$b = \eta + \frac{4}{3}\zeta + \kappa \left(\frac{1}{c_V} - \frac{1}{c_p} \right)$$


$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \varphi = \frac{b}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial t^3} - \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\beta - 1}{c_0^2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + (\nabla \varphi \cdot \nabla \varphi) \right]$$

Kuzněcovova rovnice


$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \varphi = \frac{b}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial t^3} - \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\beta - 1}{c_0^2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + (\nabla \varphi \cdot \nabla \varphi) \right]$$

Kuzněcovova rovnice

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \varphi = \frac{b}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial t^3} - \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\beta - 1}{c_0^2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + (\nabla \varphi \cdot \nabla \varphi) \right]$$


Kuzněcovova rovnice

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \varphi = \frac{b}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial t^3} - \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\beta - 1}{c_0^2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + (\nabla \varphi \cdot \nabla \varphi) \right]$$



Kuzněcovova rovnice

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} - c_0^2 \nabla^2 \varphi = \frac{b}{\rho_0 c_0^2} \frac{\partial^3 \varphi}{\partial t^3} - \frac{\partial}{\partial t} \left[\frac{\beta - 1}{c_0^2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial t} \right)^2 + (\nabla \varphi \cdot \nabla \varphi) \right] + L[\varphi]$$

Charakteristické vzdálenosti

✦ Nelineární délka x_N

✦ Difrakční délka x_{DF}

✦ Disperzní délka x_{DP}

✦ Disipační délka x_{DS}

**Představují vzdálenosti,
na kterých se projeví
nelineární, difrakční,
disperzní a disipační efekty**

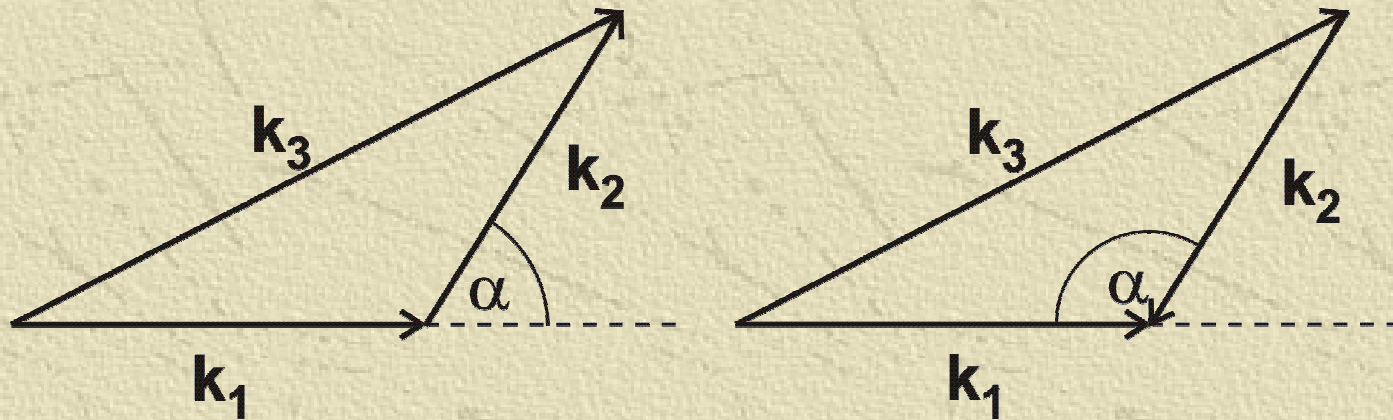
**Chování akustické vlny
určují relace mezi
charakteristickými délkami**

Předpoklad: $x_{DF} \rightarrow \infty$ a $x_{DP} \rightarrow \infty$ $x_N \ll x_{DS}$

Počet harmonických $\sim \frac{x_{DS}}{x_N}$

Synchronizační podmínky

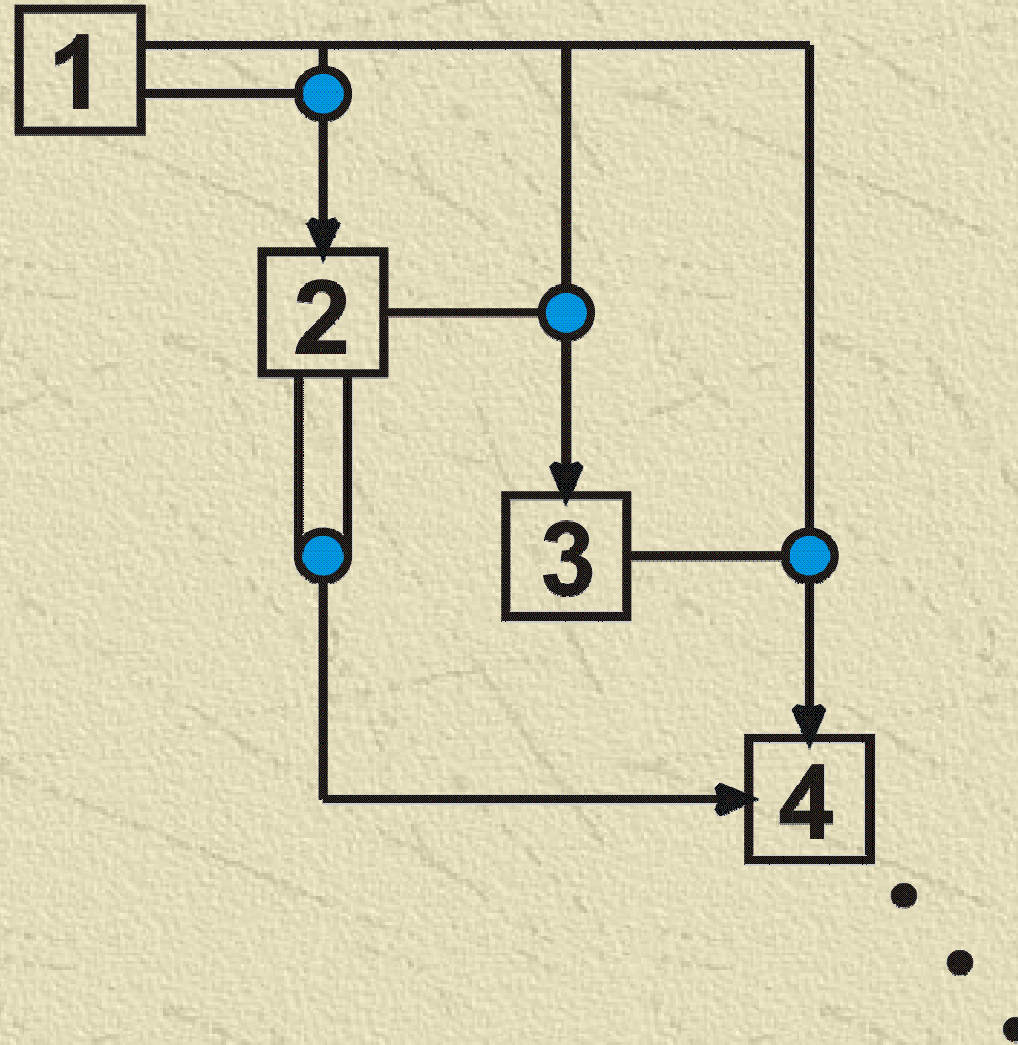
$$\omega_1 \pm \omega_2 = \omega_3 \quad k_1 \pm k_2 = k_3$$



$$\left(\frac{\omega_3}{c_3}\right)^2 = \left(\frac{\omega_1}{c_1}\right)^2 + \left(\frac{\omega_2}{c_2}\right)^2 \pm 2 \frac{\omega_1 \omega_2}{c_1 c_2} \cos \alpha$$

Splnění synchronizační podmínky: k_1 a k_2 jsou kolineární
 $c_1 = c_2$ \longrightarrow bezdisperzní prostředí

Kaskádní vlnový proces



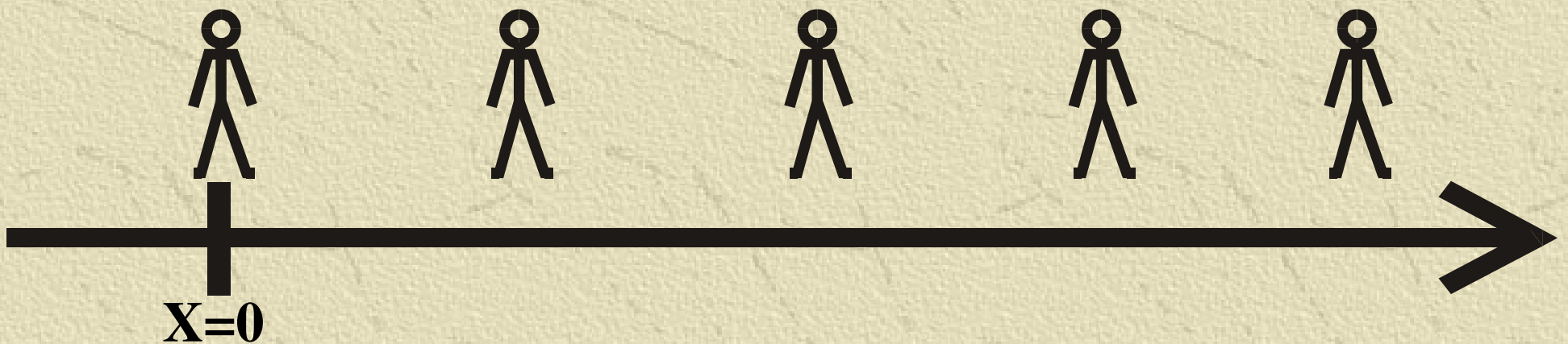


Postupná rovinná vlna

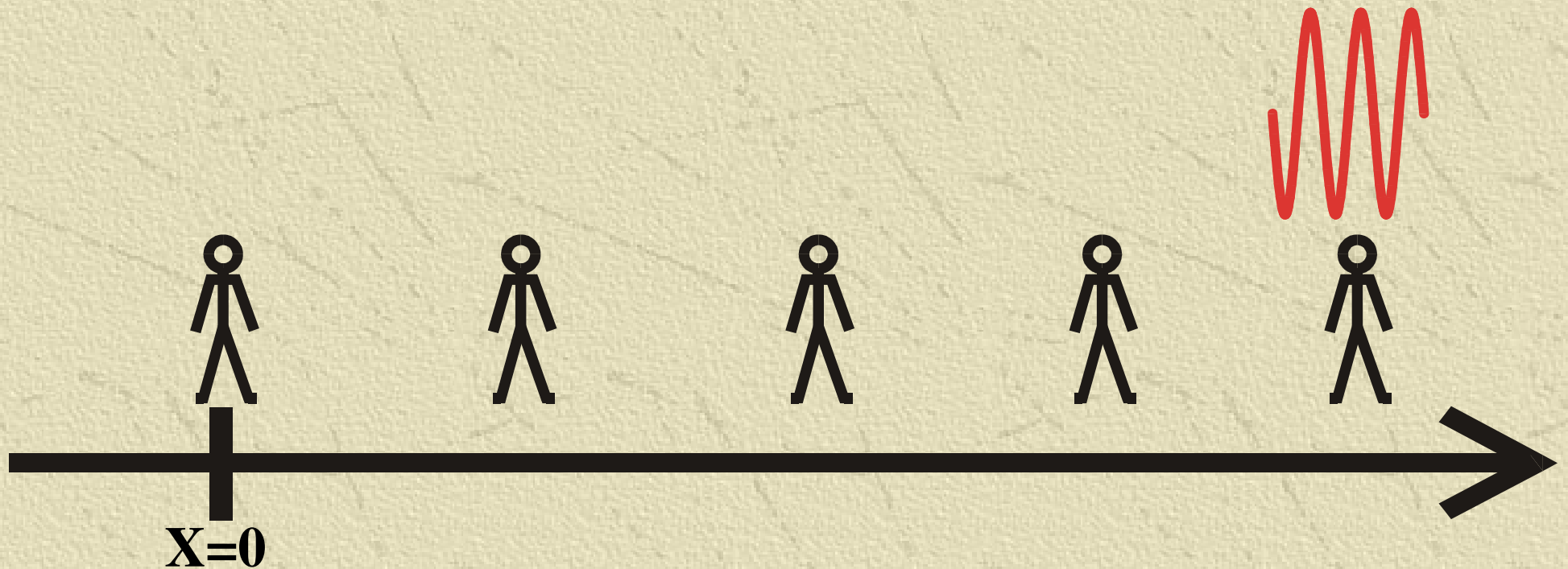
Postupná rovinná vlna



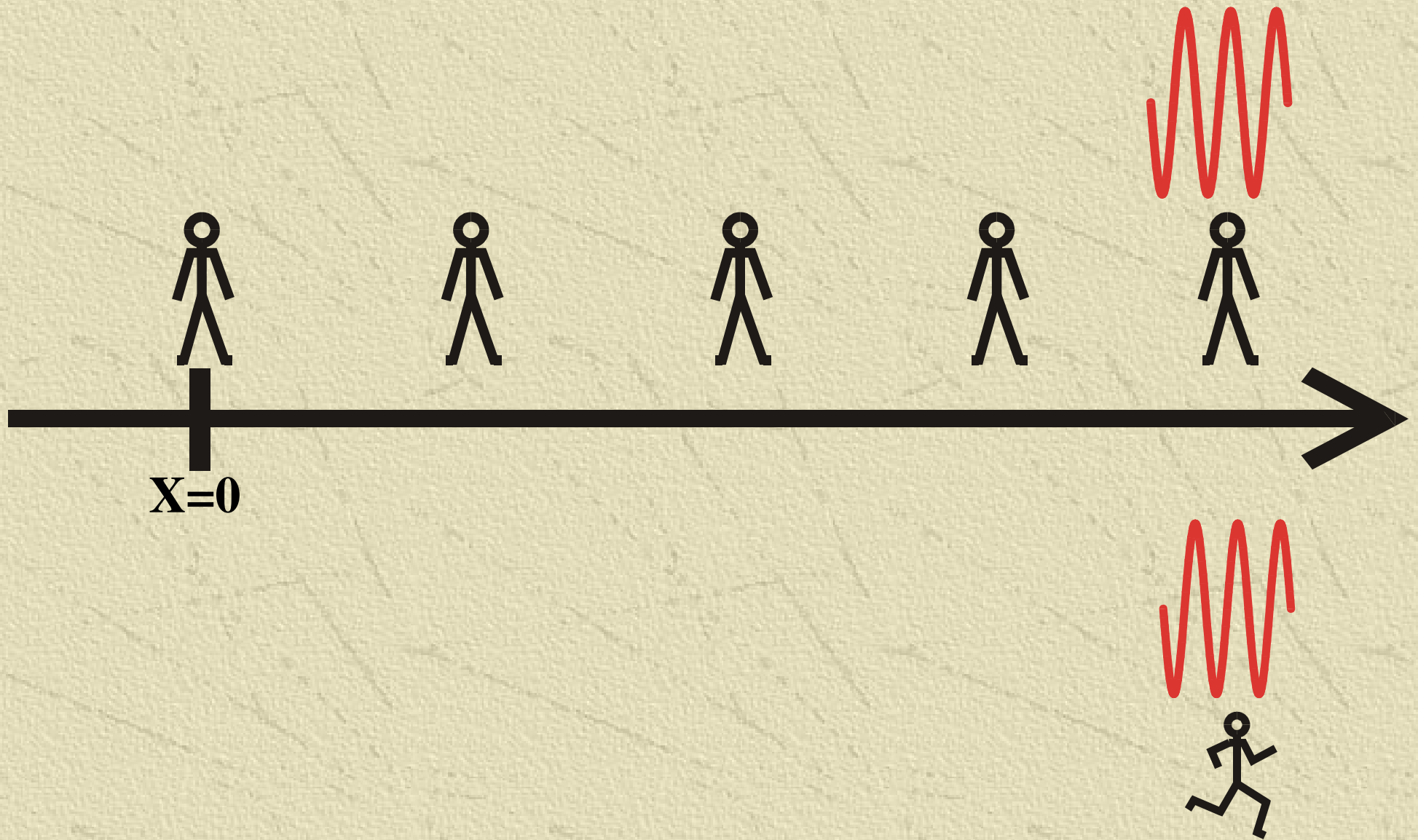
Postupná rovinná vlna



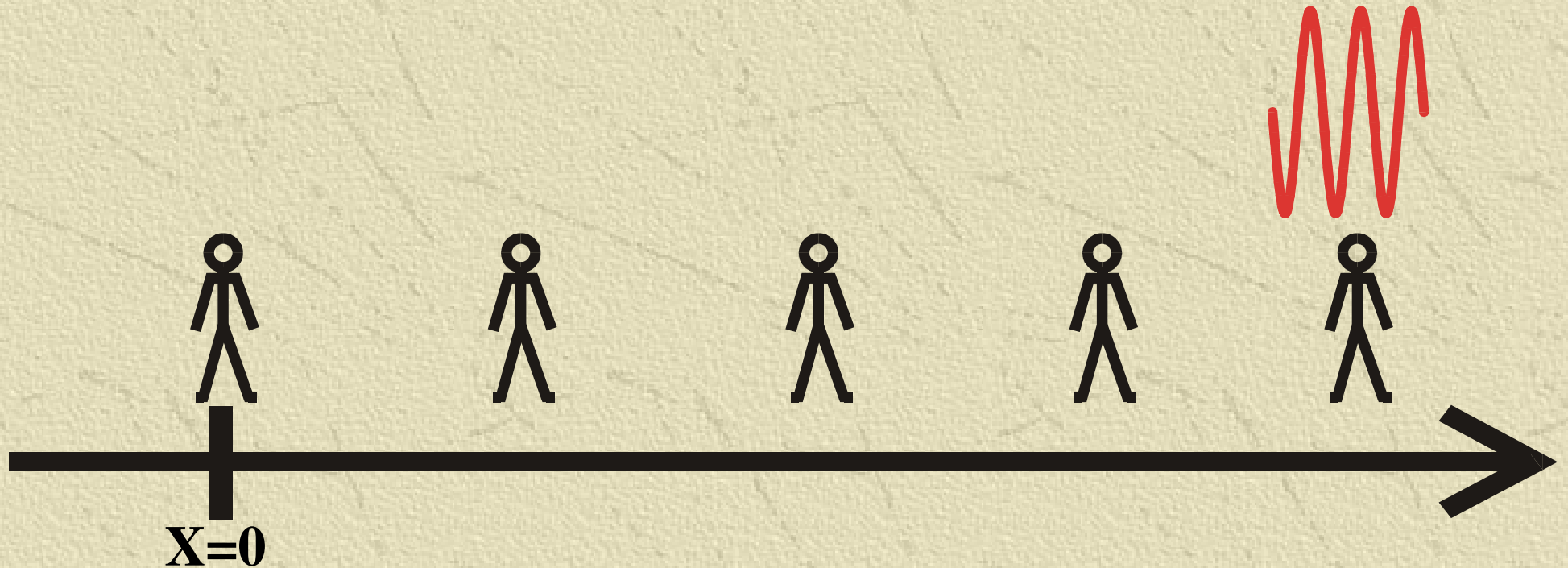
Postupná rovinná vlna



Postupná rovinná vlna



Postupná rovinná vlna



Retardovaný čas: $\tau = t - \frac{x}{c_0}$



Předpoklady

Předpoklady

1. Postupná vlna (kladný směr osy x)

Předpoklady

1. Postupná vlna (kladný směr osy x)
2. Rovinná

Předpoklady

1. Postupná vlna (kladný směr osy x)
2. Rovinná
3. Nelinearita a disipace zvukové energie způsobí jen **pomalé** změny v závislosti na prostorové souřadnici x .

Předpoklady

1. Postupná vlna (kladný směr osy x)
2. Rovinná
3. Nelinearita a disipace zvukové energie způsobí jen **pomalé** změny v závislosti na prostorové souřadnici x .

$$p' = p' \left(\tau = t - \frac{x}{c_0}, X = \mu x \right)$$

Předpoklady

1. Postupná vlna (kladný směr osy x)
2. Rovinná
3. Nelinearita a disipace zvukové energie způsobí jen **pomalé** změny v závislosti na prostorové souřadnici x .

Akustický
tlak

$$p' = p' \left(\tau = t - \frac{x}{c_0}, X = \mu x \right)$$

$$p' = p - p_0$$

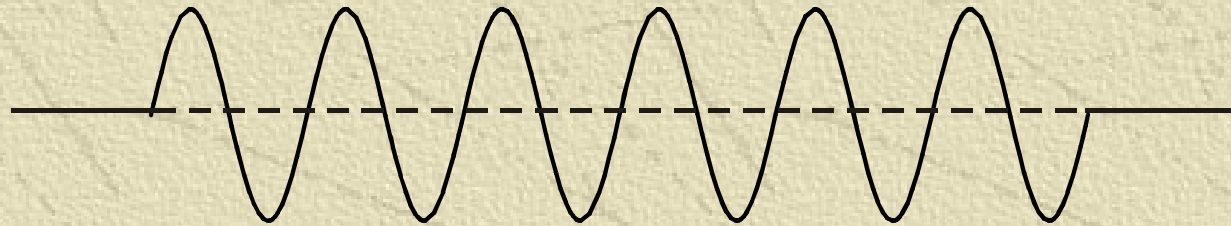
Předpoklady

1. Postupná vlna (kladný směr osy x)
2. Rovinná
3. Nelinearita a disipace zvukové energie způsobí jen **pomalé** změny v závislosti na prostorové souřadnici x .

Akustický
tlak

$$p' = p' \left(\tau = t - \frac{x}{c_0}, X = \mu x \right)$$

$$p' = p - p_0$$



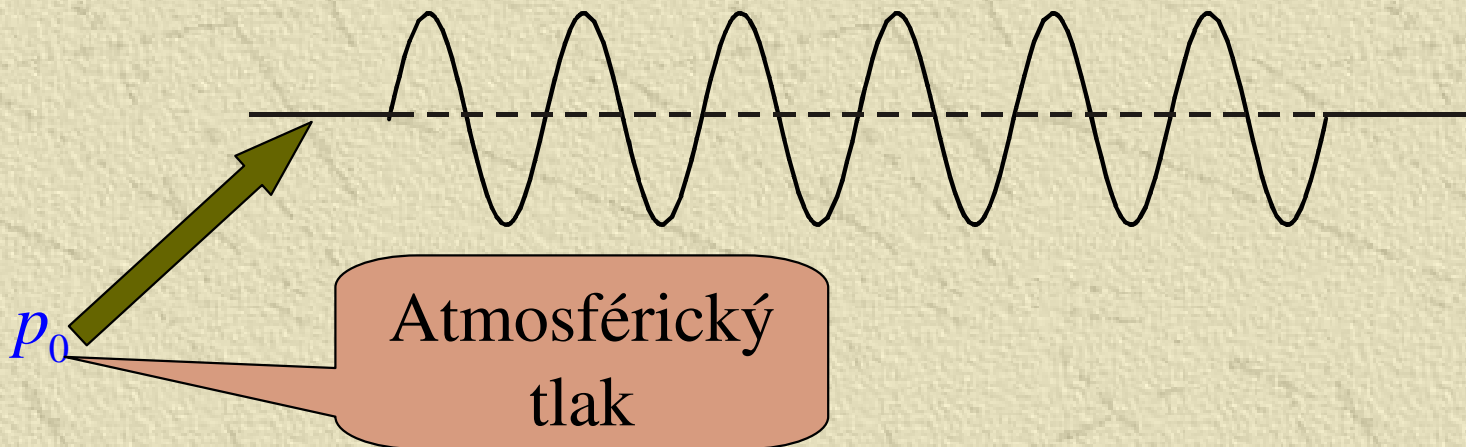
Předpoklady

1. Postupná vlna (kladný směr osy x)
2. Rovinná
3. Nelinearita a disipace zvukové energie způsobí jen **pomalé** změny v závislosti na prostorové souřadnici x .

Akustický
tlak

$$p' = p' \left(\tau = t - \frac{x}{c_0}, X = \mu x \right)$$

$$p' = p - p_0$$



Předpoklady

1. Postupná vlna (kladný směr osy x)
2. Rovinná
3. Nelinearita a disipace zvukové energie způsobí jen **pomalé** změny v závislosti na prostorové souřadnici x .

Akustický
tlak

$$p' = p' \left(\tau = t - \frac{x}{c_0}, X = \mu x \right)$$

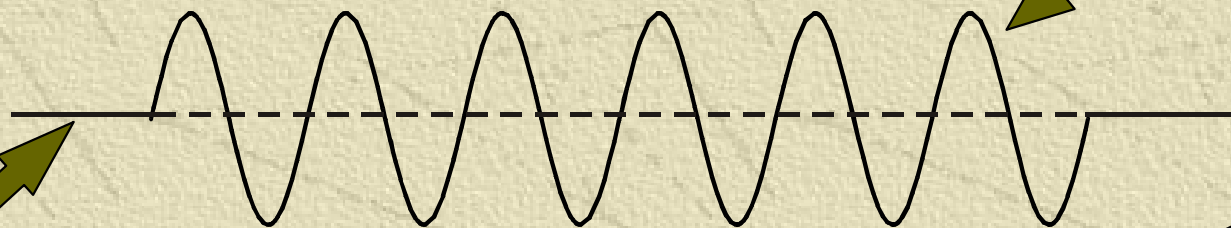
$$p' = p - p_0$$

$$p = p_0 + p'$$

p_0

Atmosférický
tlak

Celkový
tlak



Předpoklady

1. Postupná vlna (kladný směr osy x)
2. Rovinná
3. Nelinearita a disipace zvukové energie způsobí jen **pomalé** změny v závislosti na prostorové souřadnici x .

Akustický
tlak

$$p' = p' \left(\tau = t - \frac{x}{c_0}, X = \mu x \right) \quad \mu \sim \frac{|p_m'|}{p_0}$$

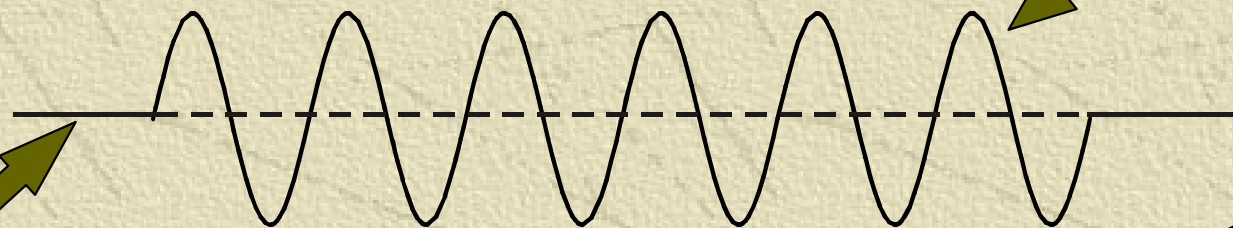
$$p' = p - p_0$$

$$p = p_0 + p'$$

p_0

Atmosférický
tlak

Celkový
tlak



Kuzněcovova rovnice pro akustický tlak

$$\nabla^2 p' - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p'}{\partial t^2} = \frac{b}{\rho_0 c_0^4} \frac{\partial^3 p'}{\partial t^3} - \frac{\beta}{\rho_0 c_0^4} \frac{\partial^2 p'^2}{\partial t^2} - \left(\nabla^2 + \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) L$$

**Lagrangian hustoty
akustické energie**

$$L = \frac{\rho_0}{2} v^2 - \frac{p'^2}{2\rho_0 c_0^2}$$

Uvedené předpoklady spolu
se základními vztahy mezi
akustickými veličinami a
zanedbání členů řádu vyššího
než druhého

Kuzněcovova rovnice



Burgersova rovnice



Johannes Martinus Burgers

1895-1981

$$\frac{\partial v}{\partial t} - v \frac{\partial v}{\partial x} = \delta \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$$



Burgersova rovnice v nelineární akustice

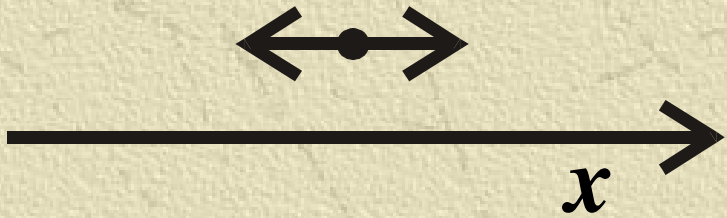
$$\frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\beta}{\rho_0 c_0^3} p' \frac{\partial p'}{\partial \tau} = \frac{b}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p'}{\partial \tau^2}$$



Burgersova rovnice v nelineární akustice

V tekutinách
uvažujeme
vlnění podélné

$$\frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\beta}{\rho_0 c_0^3} p' \frac{\partial p'}{\partial \tau} = \frac{b}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p'}{\partial \tau^2}$$

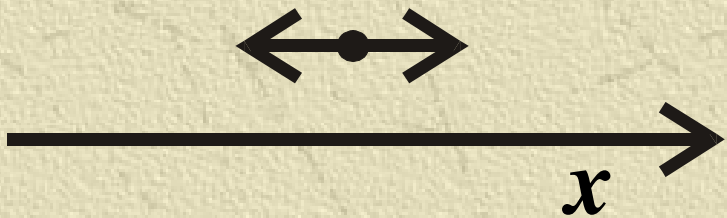




Burgersova rovnice v nelineární akustice

V tekutinách
uvažujeme
vlnění podélné

$$\frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\beta}{\rho_0 c_0^3} p' \frac{\partial p'}{\partial \tau} = \frac{b}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p'}{\partial \tau^2}$$



$$p' = \rho_0 c_0 v + O(\mu^2)$$

Platí pro
rovinnou vlnu

$$v_x \equiv v$$

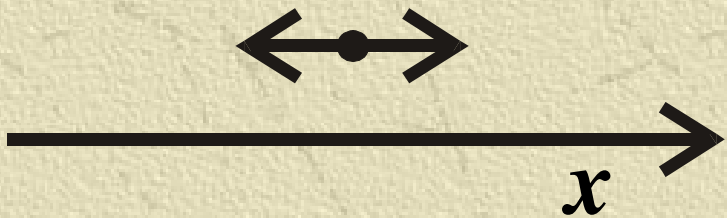
$$v \ll c_0 \Rightarrow \mu \sim \frac{|v_m|}{c_0}$$



Burgersova rovnice v nelineární akustice

V tekutinách uvažujeme vlnění podélné

$$\frac{\partial p'}{\partial x} - \frac{\beta}{\rho_0 c_0^3} p' \frac{\partial p'}{\partial \tau} = \frac{b}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 p'}{\partial \tau^2}$$



$$p' = \rho_0 c_0 v + O(\mu^2)$$

Platí pro rovinnou vlnu

$$\frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\beta}{c_0^2} v \frac{\partial v}{\partial \tau} = \frac{b}{2\rho_0 c_0^3} \frac{\partial^2 v}{\partial \tau^2}$$

$$v_x \equiv v$$

$$v \ll c_0 \Rightarrow \mu \sim \frac{|v_m|}{c_0}$$

Řešení Burgersovy rovnice

Bezrozměrný tvar Burgersovy rovnice: $\frac{\partial P}{\partial \sigma} - P \frac{\partial P}{\partial y} - \frac{1}{G_0} \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0$

$$y = \frac{\tau}{\chi} ; \quad \sigma = \frac{x}{x_s} ; \quad P = \frac{p'}{p_m} ; \quad G_0 = \frac{1}{x_s \alpha}$$

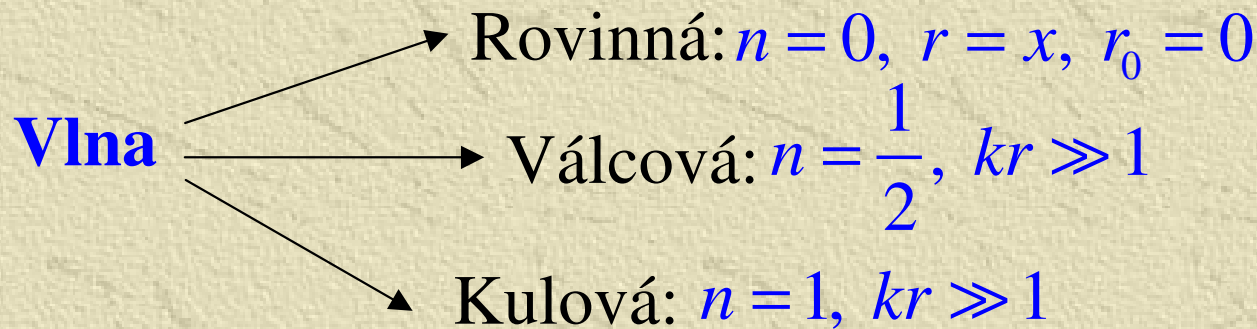
Coleova-Hopfova transformace: $P = \frac{2}{G_0 U} \frac{\partial U}{\partial y} \longrightarrow \frac{\partial U}{\partial \sigma} = \frac{1}{G_0} \frac{\partial^2 U}{\partial y^2}$

Obecné
řešení

$$P(y, \sigma) = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \frac{y-z}{\sigma} \exp \left[\frac{-G_0 (y-z)^2}{4\sigma} + \frac{G_0}{2} \int_0^z V(0, y) dy \right] dz}{\int_{-\infty}^{\infty} \exp \left[\frac{-G_0 (y-z)^2}{4\sigma} + \frac{G_0}{2} \int_0^z V(0, y) dy \right] dz}$$

Zobecněná Burgersova rovnice

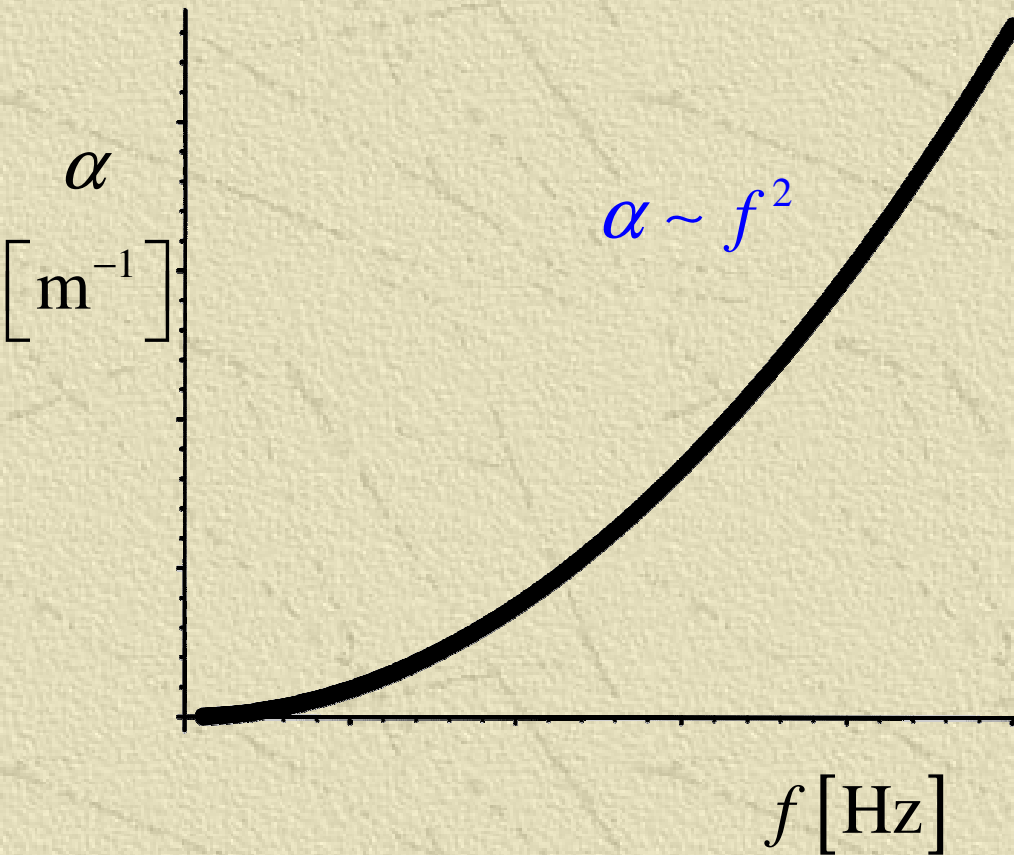
$$\frac{\partial p'}{\partial r} + \frac{n}{r} p' - \frac{\beta}{\rho_0 c_0^3} p' \frac{\partial p'}{\partial \tau} = L[u] \quad \tau = t - \frac{r - r_0}{c_0}$$



- Lineární časový operátor: $L[u]$**
- ✦ Útlum vlivem viskozity a tepelné vodivosti
 - ✦ Relaxační jevy
 - ✦ Mezní vrstva
 -
 -
 -

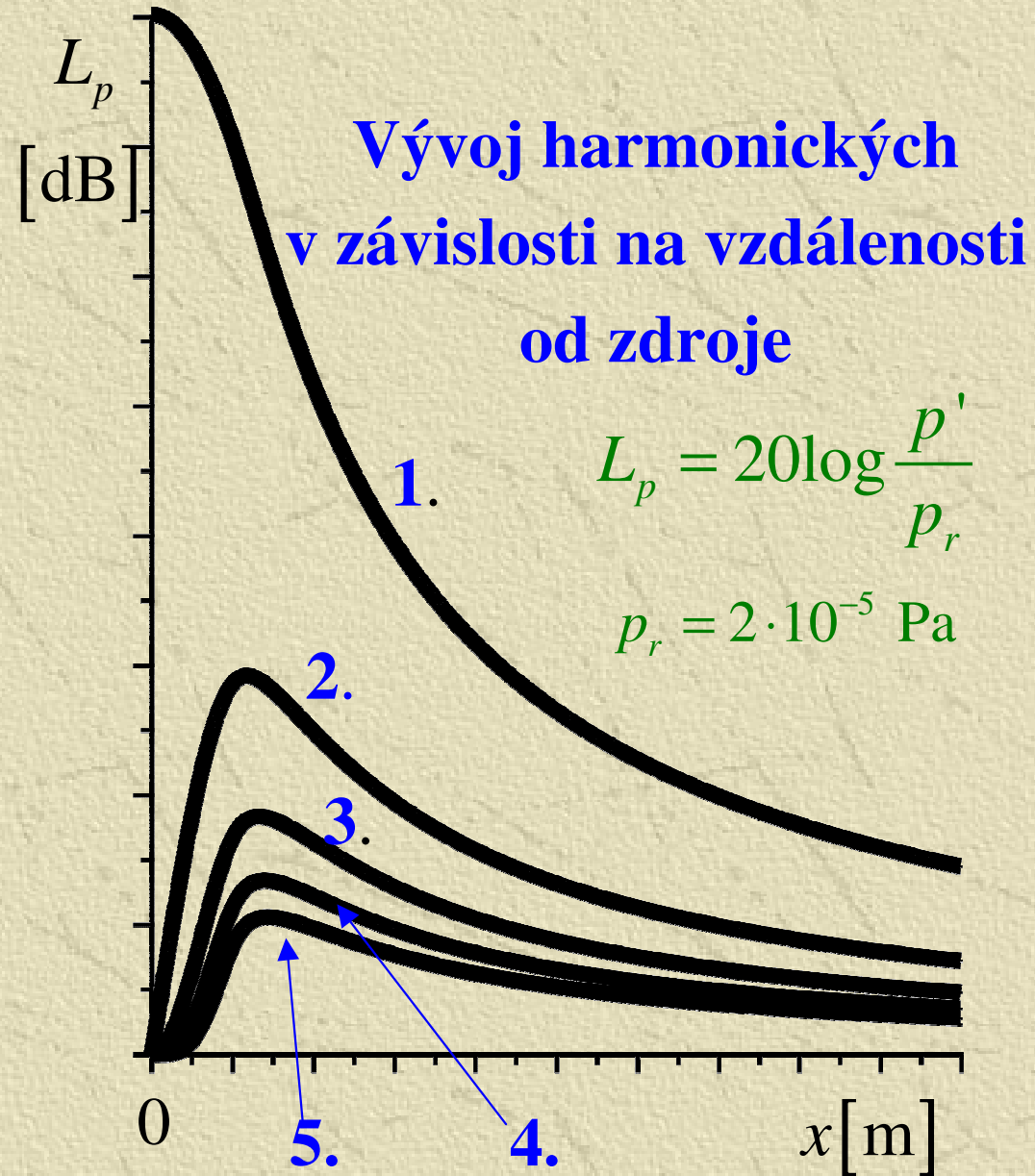
Teplotně-viskózní útlum

$$\alpha = \frac{b\omega^2}{2\rho_0 c_0^3}$$

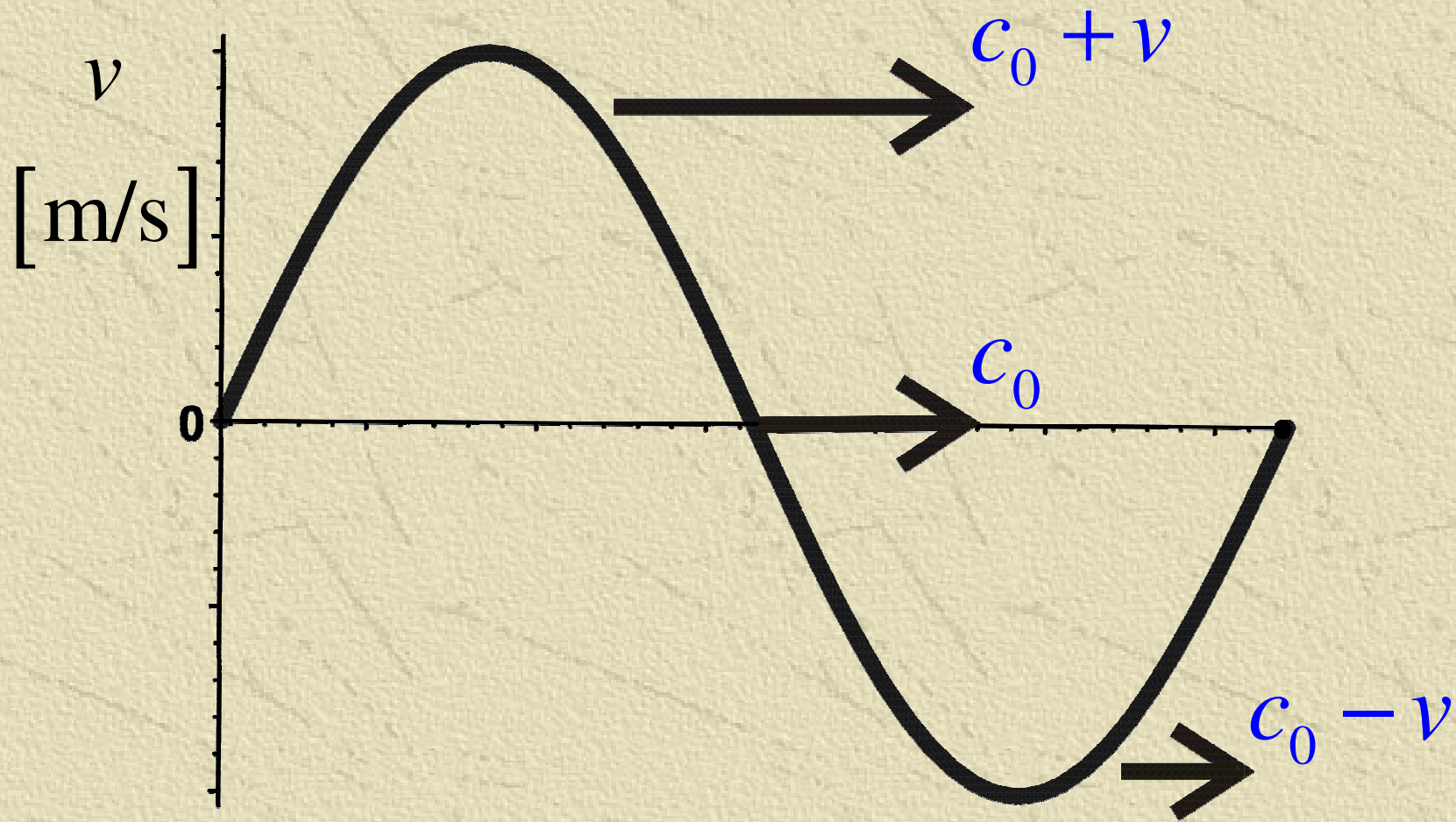


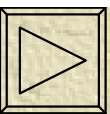
Okrajová podmínka

$$v(0, t) = v_m \sin(\omega t)$$

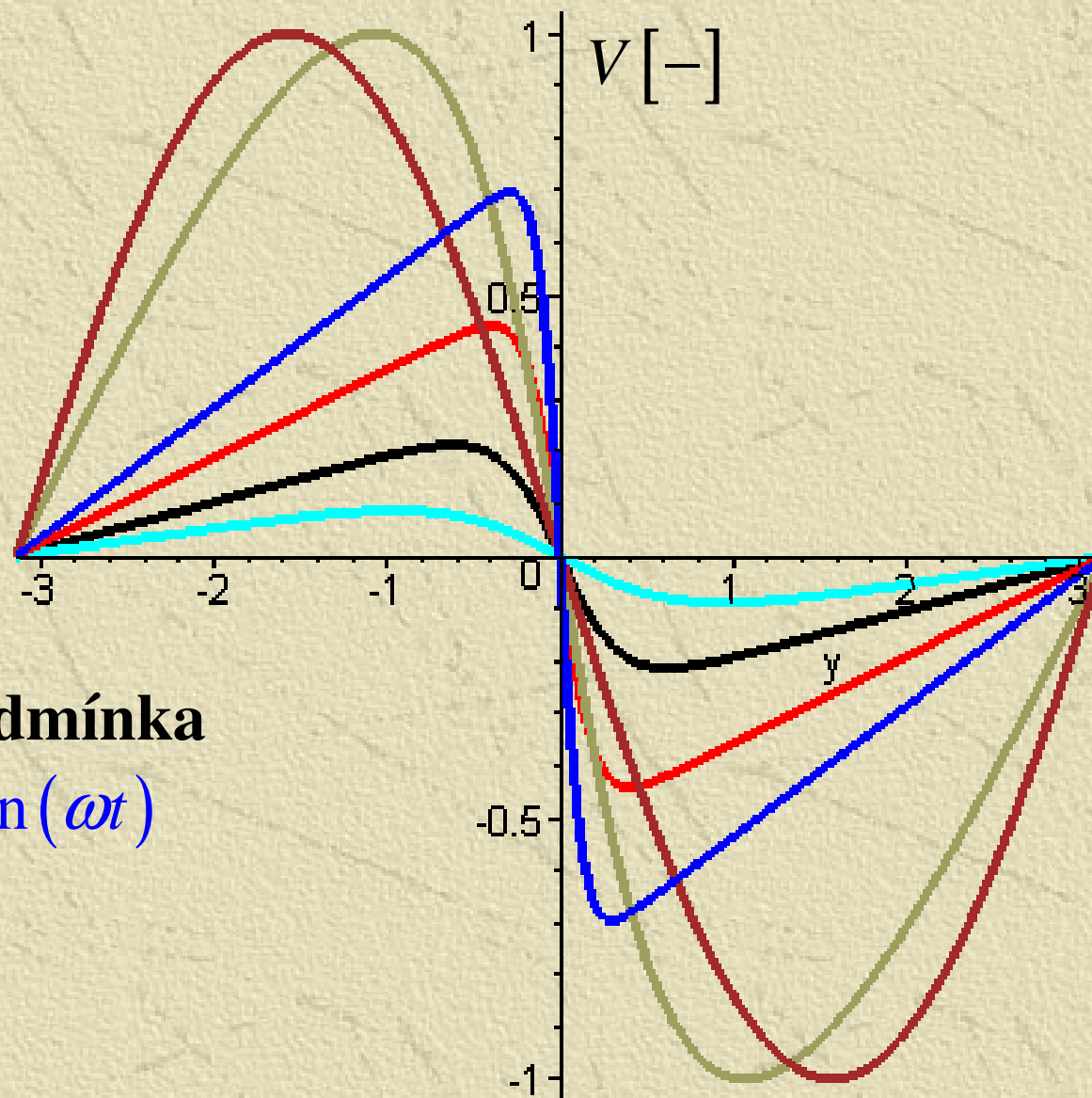


Zkreslení tvaru vlny





Vývoj tvaru vlny v závislosti na vzdálenosti od zdroje

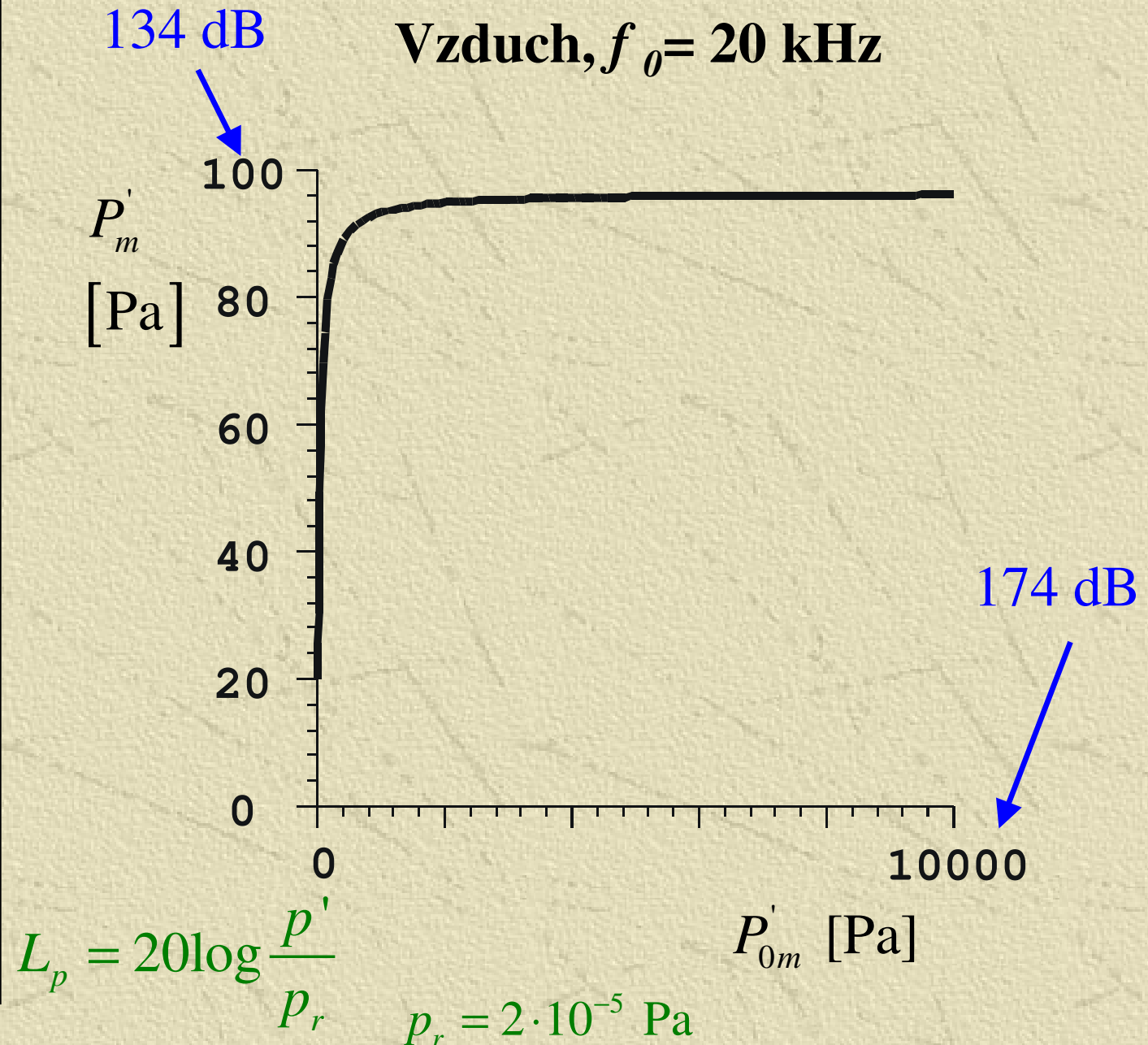


Okrajová podmínka

$$v(0, t) = v_m \sin(\omega t)$$

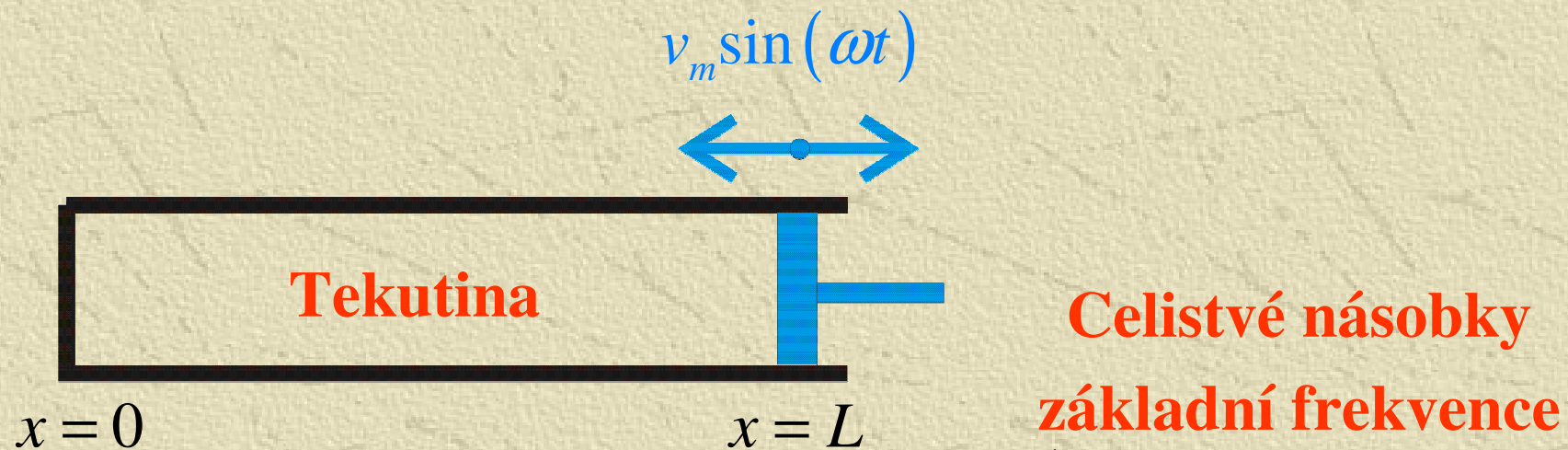
Saturační jev u rovinné vlny

β	1,21
ρ_0	1,193 kg m ⁻³
c_0	345,22 m s ⁻¹
Θ	296,15 K
η	1,096 · 10 ⁻⁵ kg m ⁻¹ s ⁻¹
ζ	1,827 · 10 ⁻⁵ kg m ⁻¹ s ⁻¹
γ	1,402
c_p	1004 J kg ⁻¹ K ⁻¹
K	25,87 J kg ⁻¹ m ⁻¹ s ⁻¹



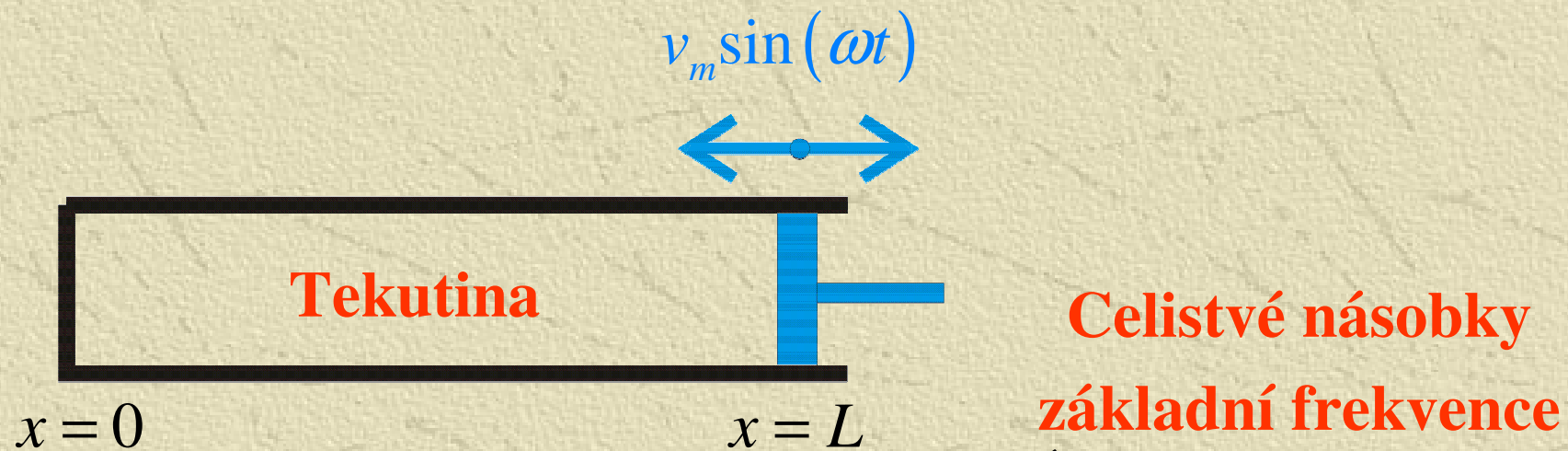
Nelineární stojaté vlny

Válcový rezonátor

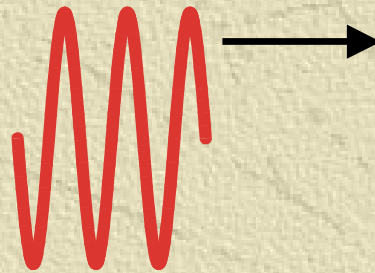


Vlastní kruhové frekvence: $\omega_n = \frac{n\pi c_0}{L}; \quad n = 1, 2, 3, \dots$

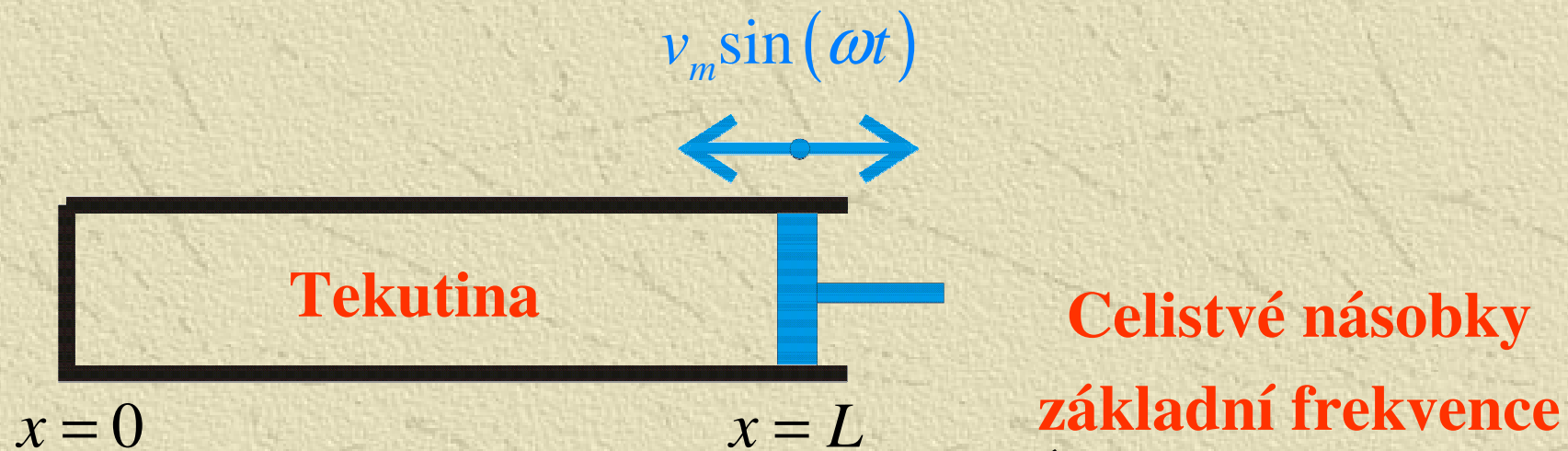
Válcový rezonátor



Vlastní kruhové frekvence: $\omega_n = \frac{n\pi c_0}{L}; \quad n = 1, 2, 3, \dots$



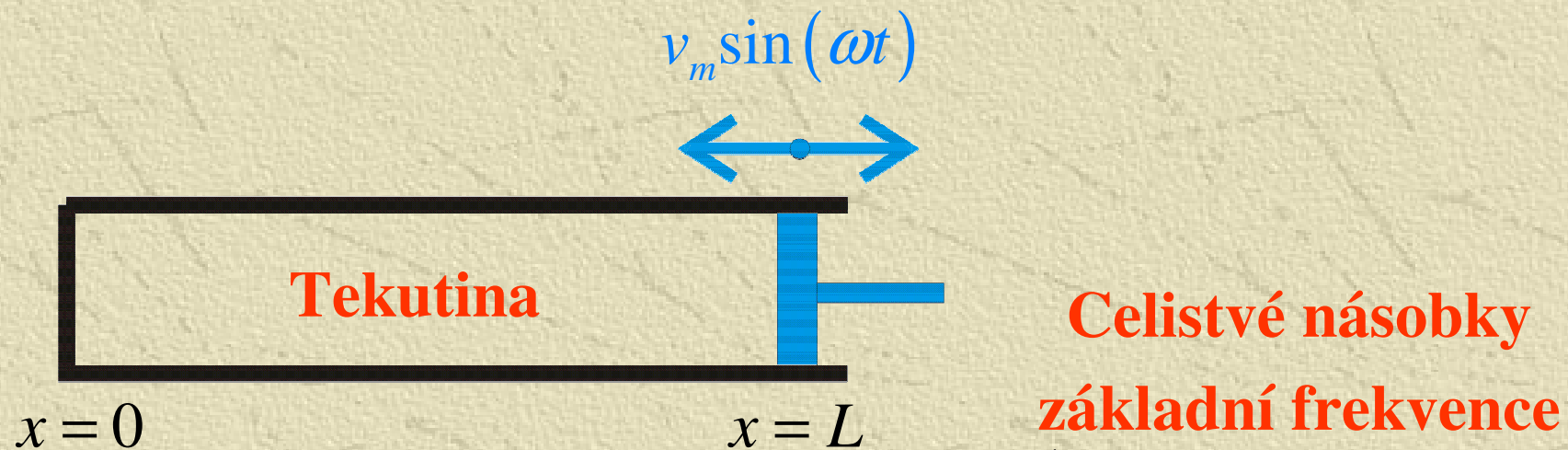
Válcový rezonátor



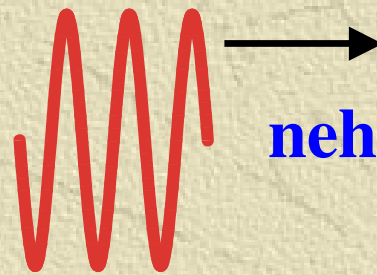
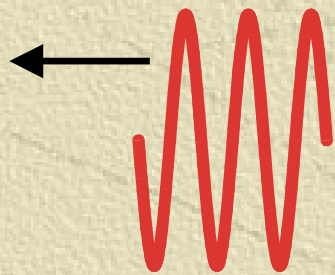
Vlastní kruhové frekvence: $\omega_n = \frac{n\pi c_0}{L}; \quad n = 1, 2, 3, \dots$



Válcový rezonátor

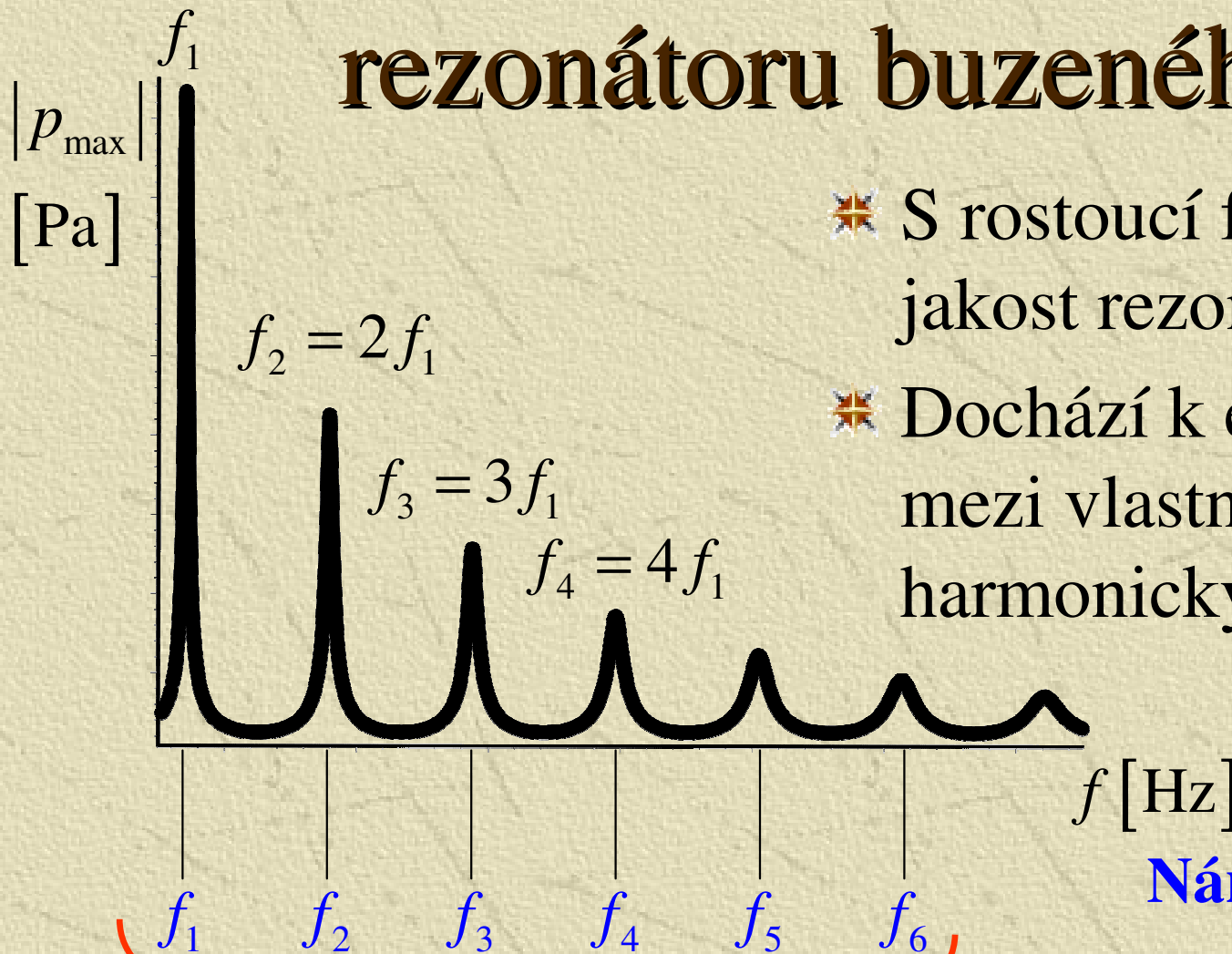


Vlastní kruhové frekvence: $\omega_n = \frac{n\pi c_0}{L}; \quad n = 1, 2, 3, \dots$



nehomogenní Burgersova rovnice

Vlastní frekvence válcového rezonátoru buzeného pístem



✦ S rostoucí frekvencí klesá jakost rezonátoru

✦ Dochází k efektivní interakci mezi vlastními a harmonickými frekvencemi

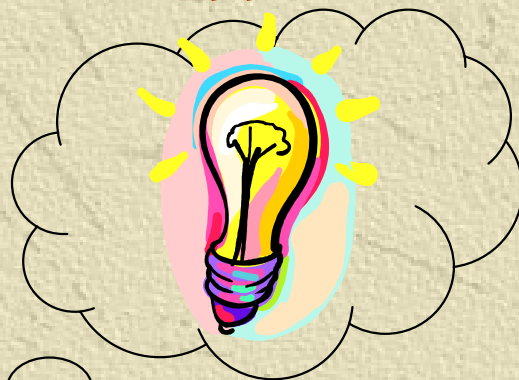
Harmonické jsou v koincidenci s vlastními kmitočty

Nárůst disipace akustické energie => nelineární útlum

Saturační efekt

Potlačení saturačního jevu

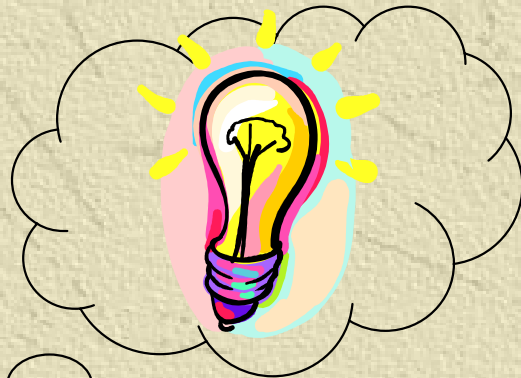
1997



Timothy Lukas

Potlačení saturačního jevu

1997

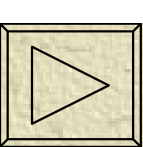


Rezonanční makrosonická syntéza

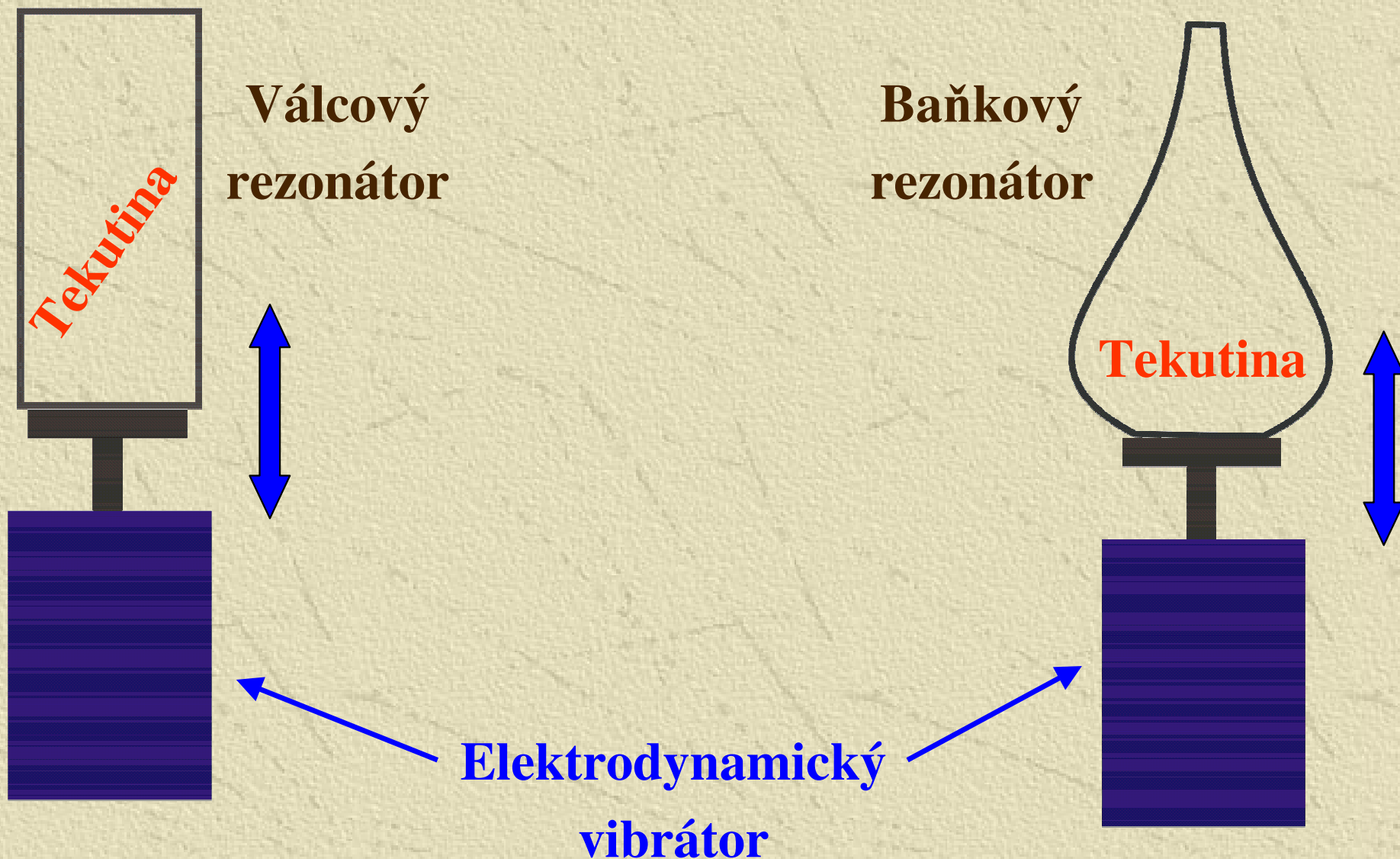
(metoda RMS)

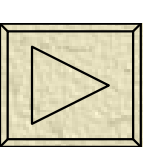


Timothy Lukas

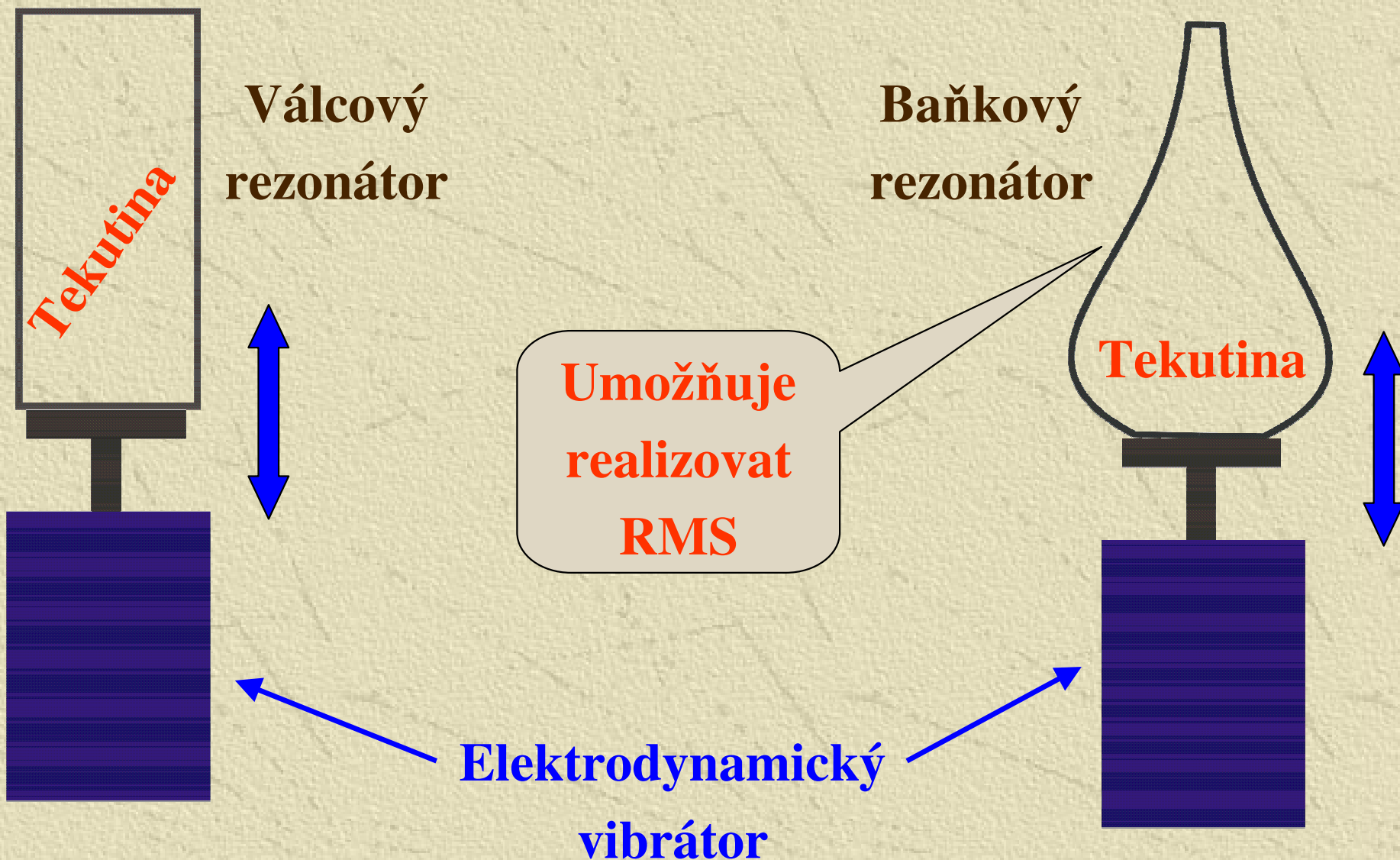


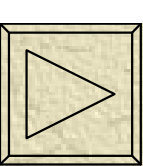
Buzení objemovou silou



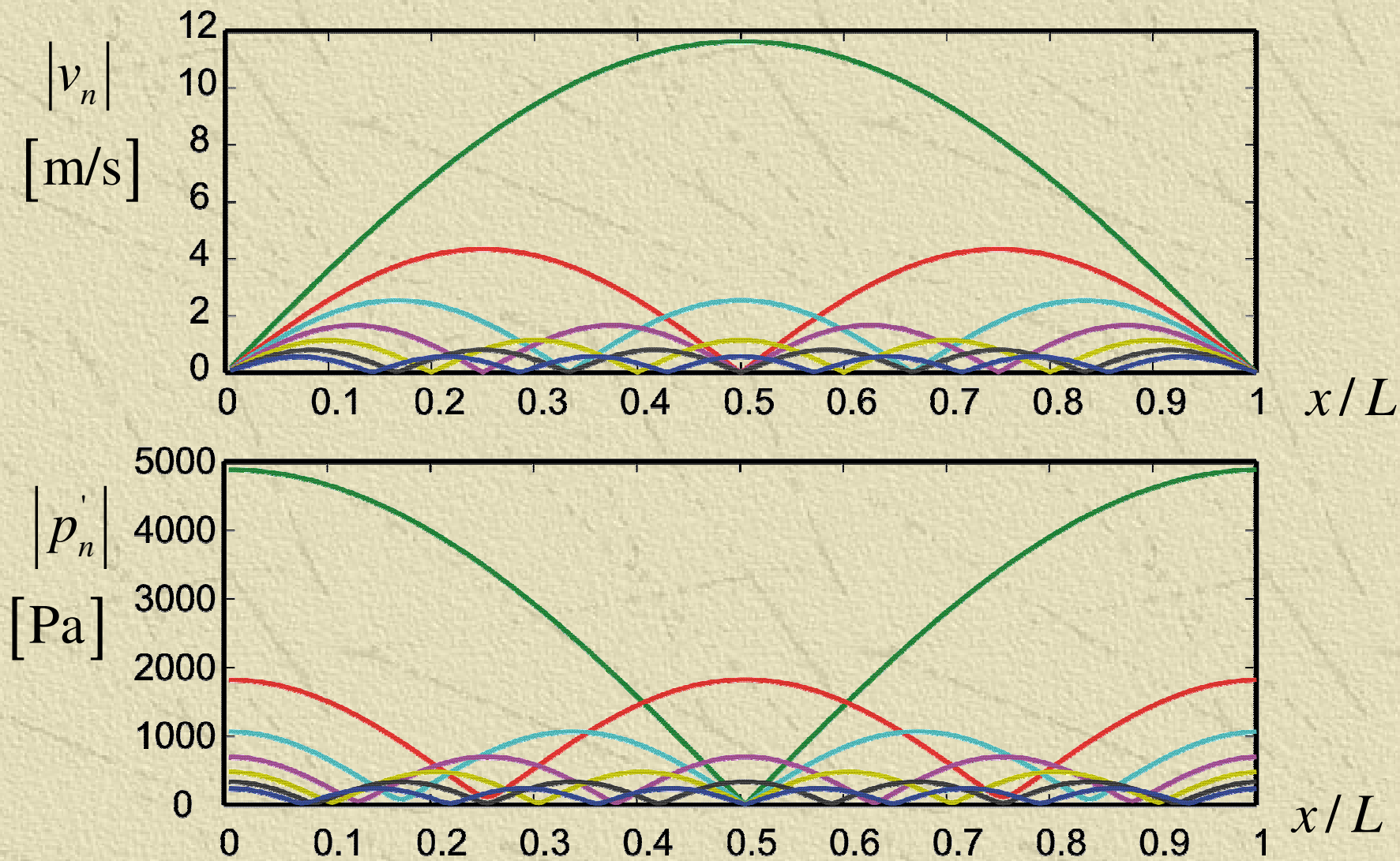


Buzení objemovou silou

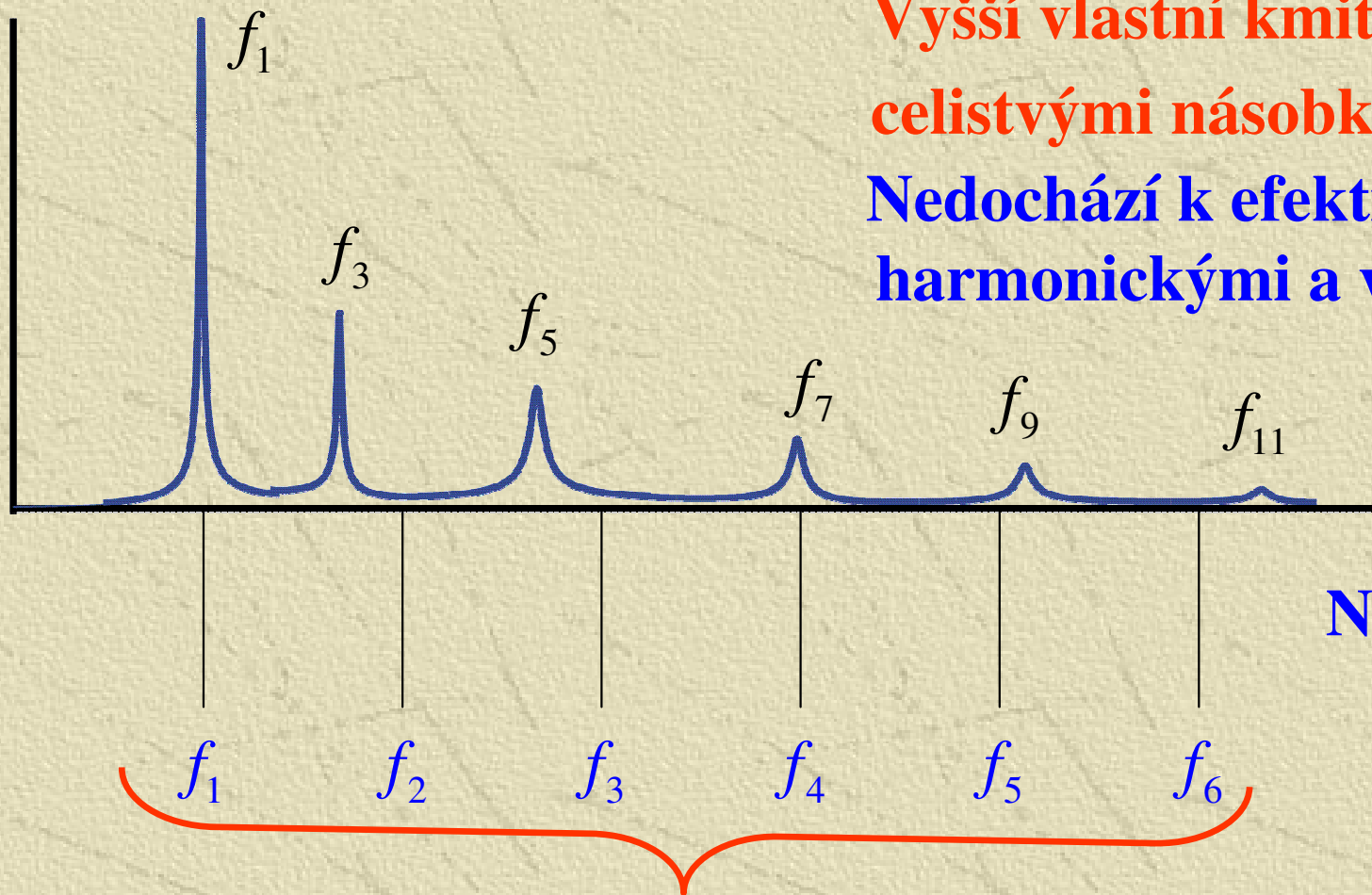




Distribuce akustické rychlosti a tlaku u válcového rezonátoru



Vybuzené vlastní frekvence baňkového rezonátoru

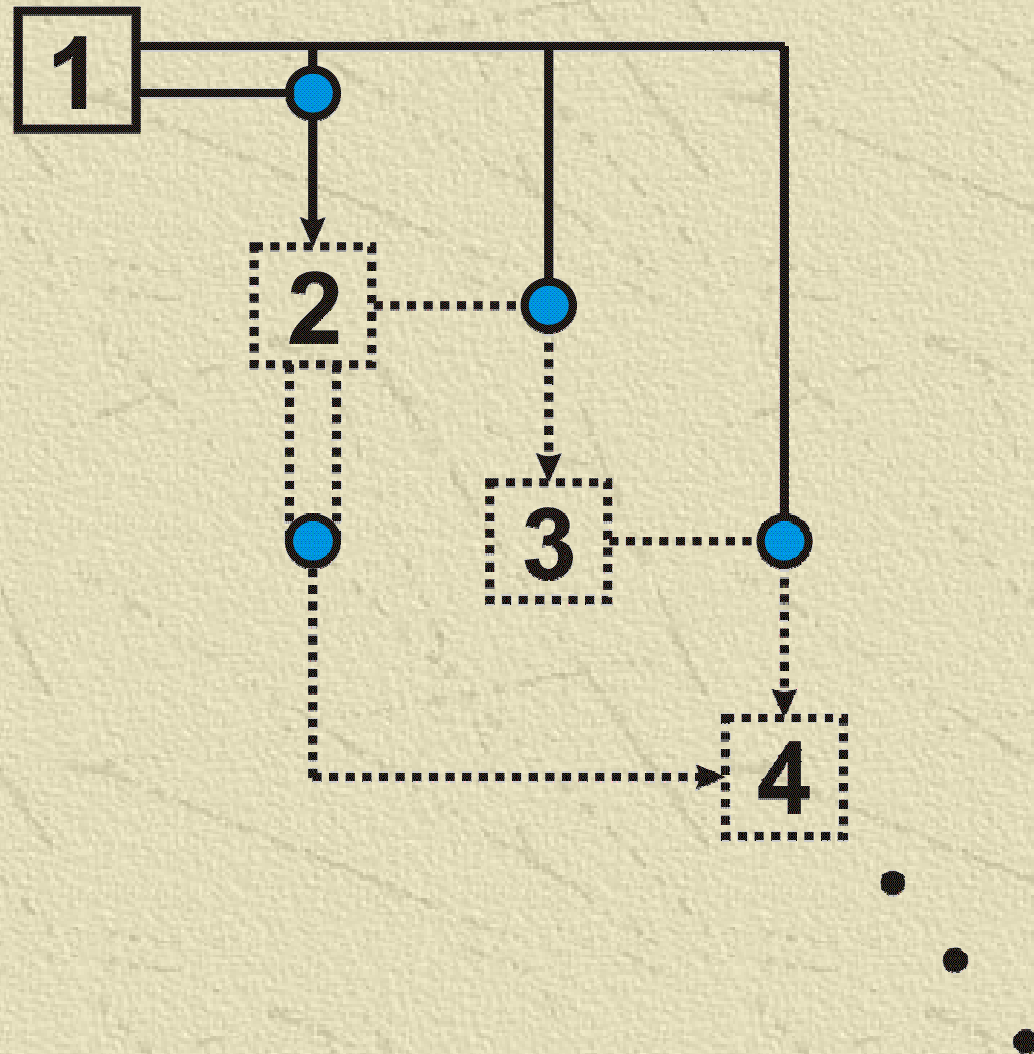


Vyšší vlastní kmitočty nejsou
celistvými násobky základního
Nedochází k efektivní interakci mezi
harmonickými a vlastními kmitočty

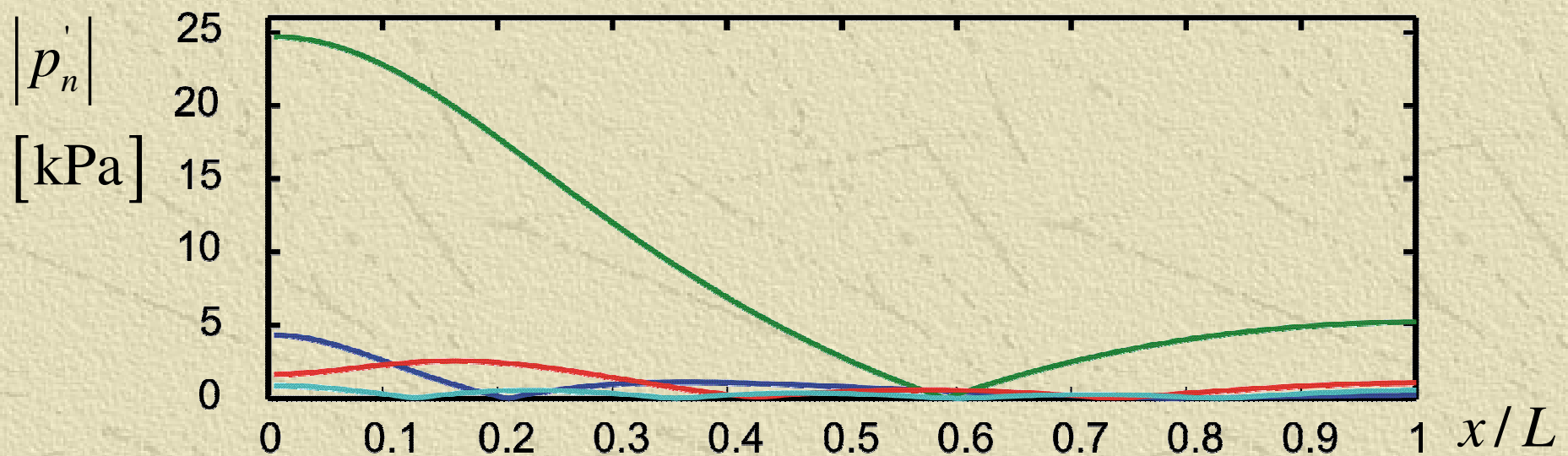
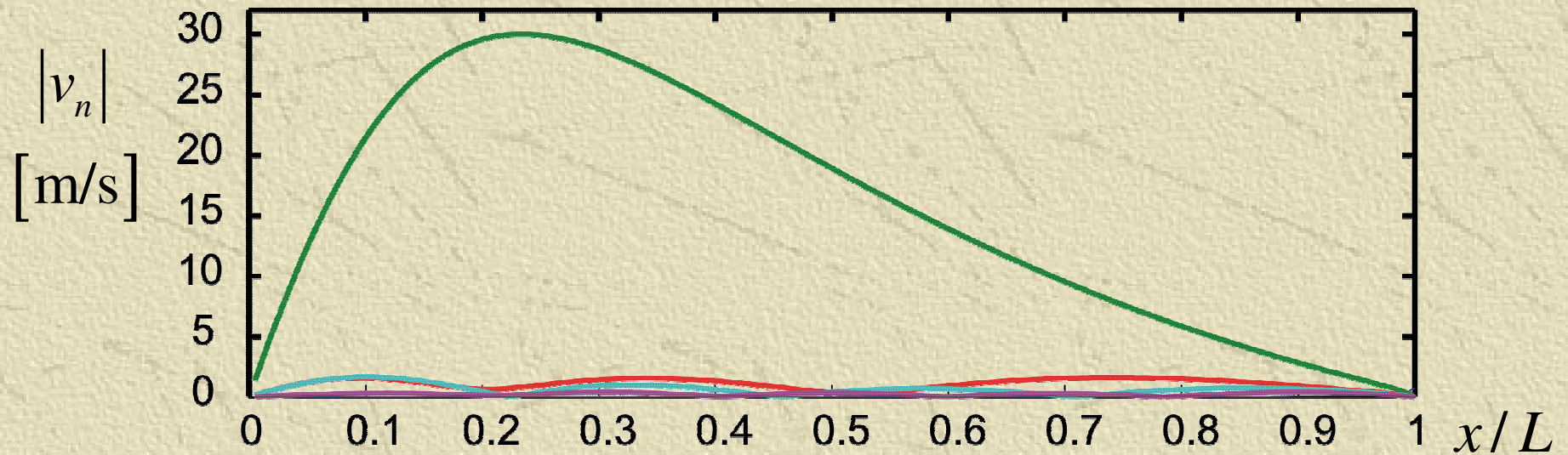
Narušení kaskádních
procesů

Harmonické nejsou v koincidenci
s vlastními frekvencemi

Narušení kaskádních procesů



Distribuce rychlosti a tlaku u baňkového rezonátoru



Využití metody RMS


✦ Akustické kompresory 

✦ Termoakustická zařízení

✦ Vakuové pumpy

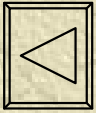
✦ Akustická levitace

Další metody potlačující saturační jev

- ✦ Selektivní absorpce druhé harmonické
- ✦ Zavedení umělé disperze 
- ✦ Multifrekvenční buzení
- ✦ Kombinace jednotlivých metod

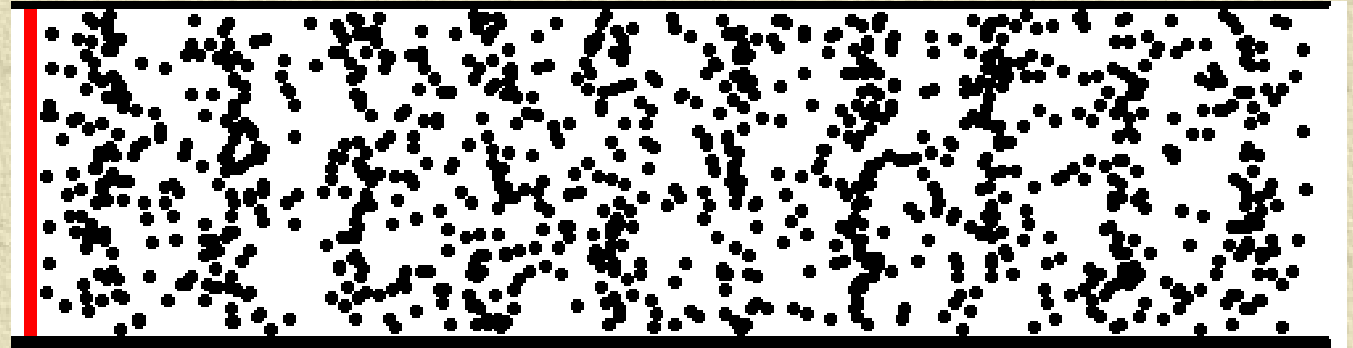
Základní témata nelineární akustiky

- ✦ Nelineární akustické svazky
- ✦ Nelineární stojaté vlny
- ✦ Nelineární akustické vlny v nehomogenních prostředích
- ✦ Akustická proudění
- ✦ Levitační procesy
- ✦ Kavitační procesy
- ✦ Nelineární akustické vlny v pevných látkách s hysterezní nelinearitou
- ✦ Nelineární časově-reverzibilní akustika

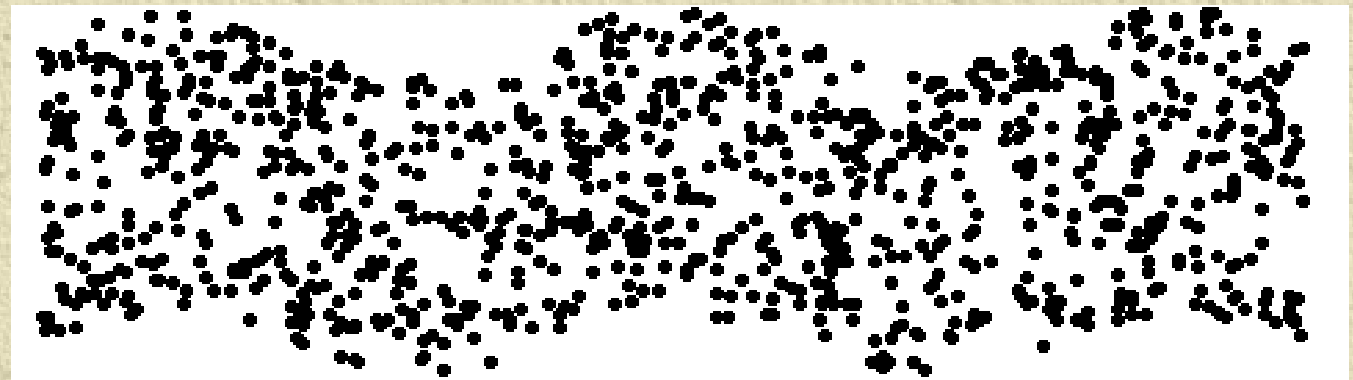


Druhy vlnění

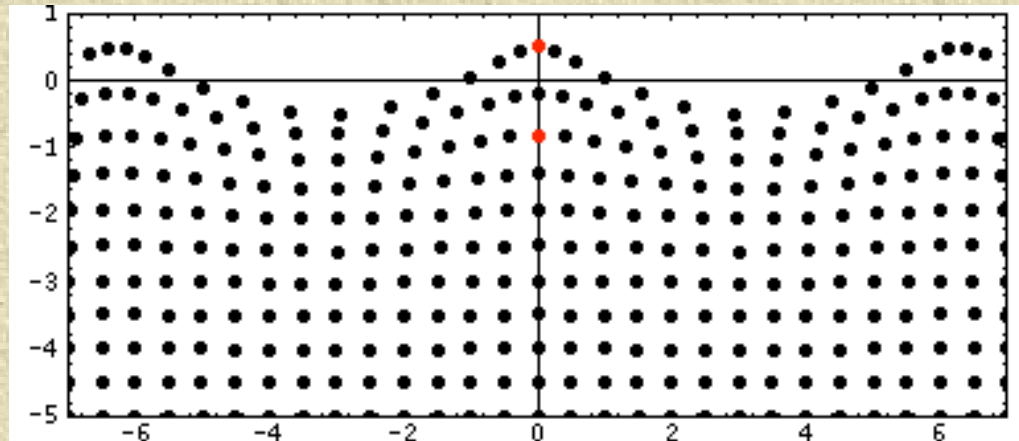
Podélné vlnění

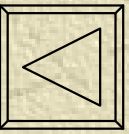


Příčné vlnění



Povrchové vlnění



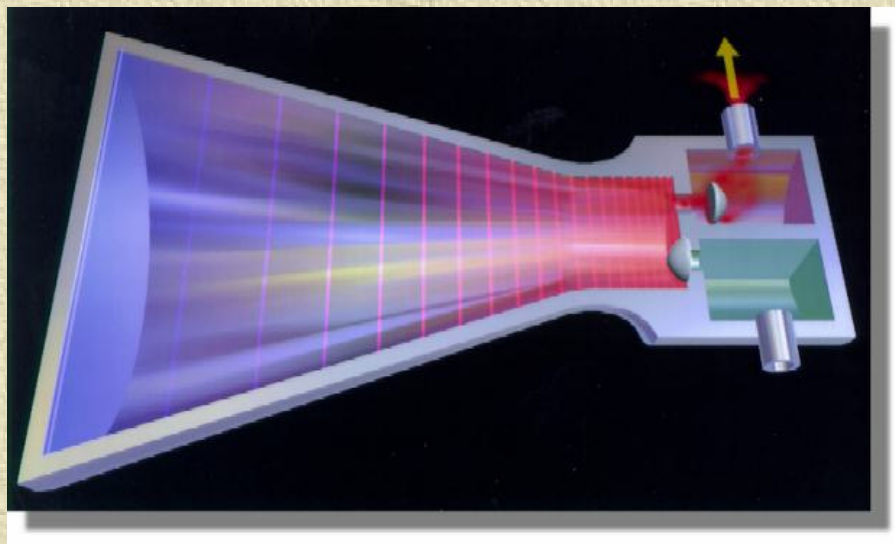
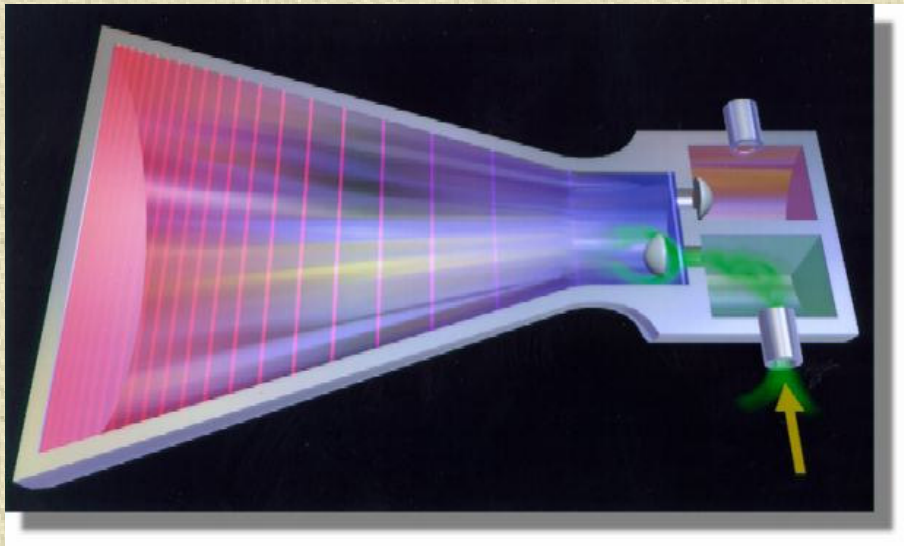


Konkrétní realizace rezonátoru s proměnným průřezem

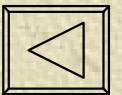
Vibrátor
(lineární motor)

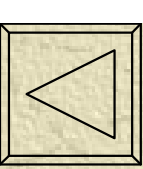


Akustický kompresor

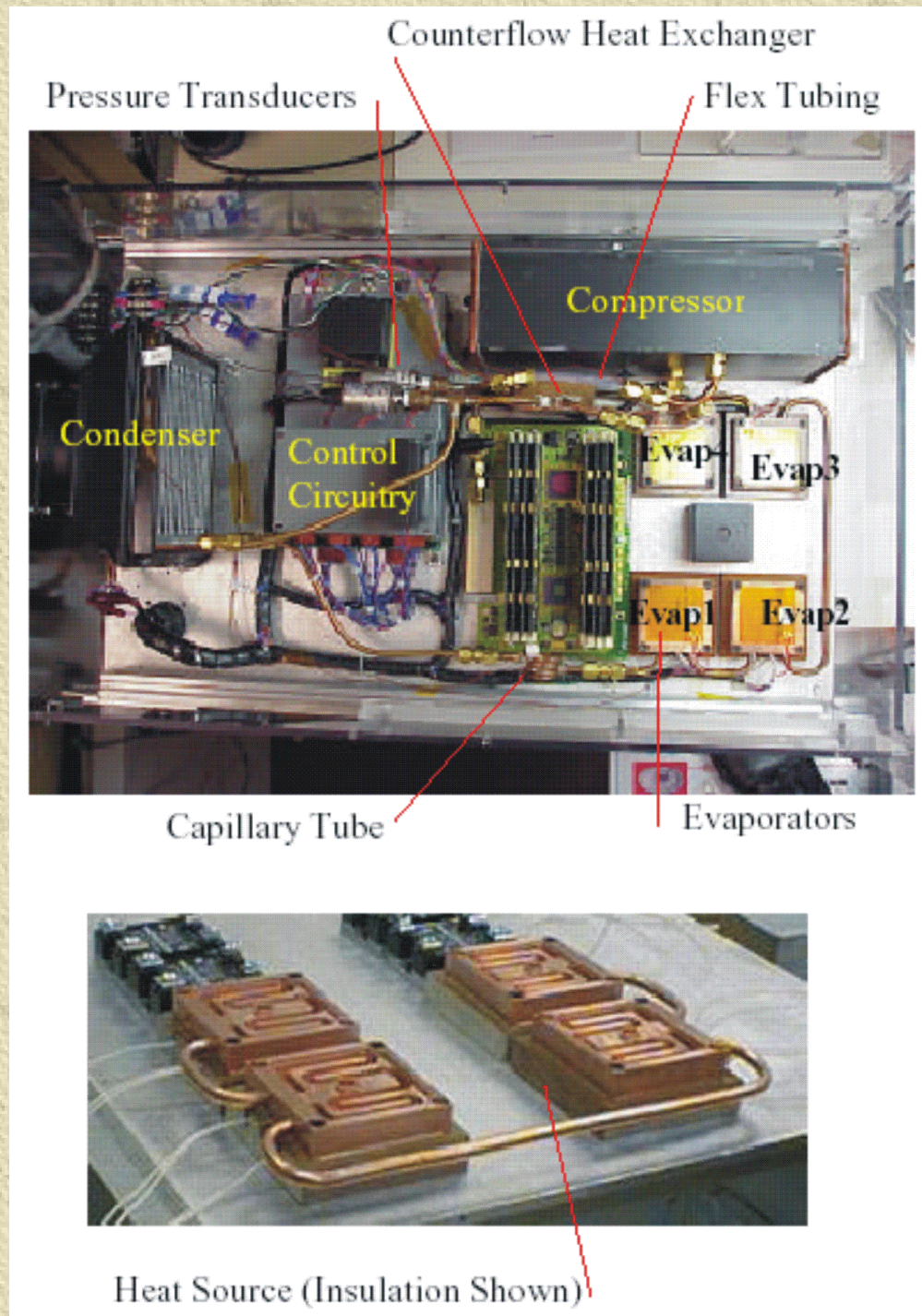
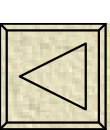


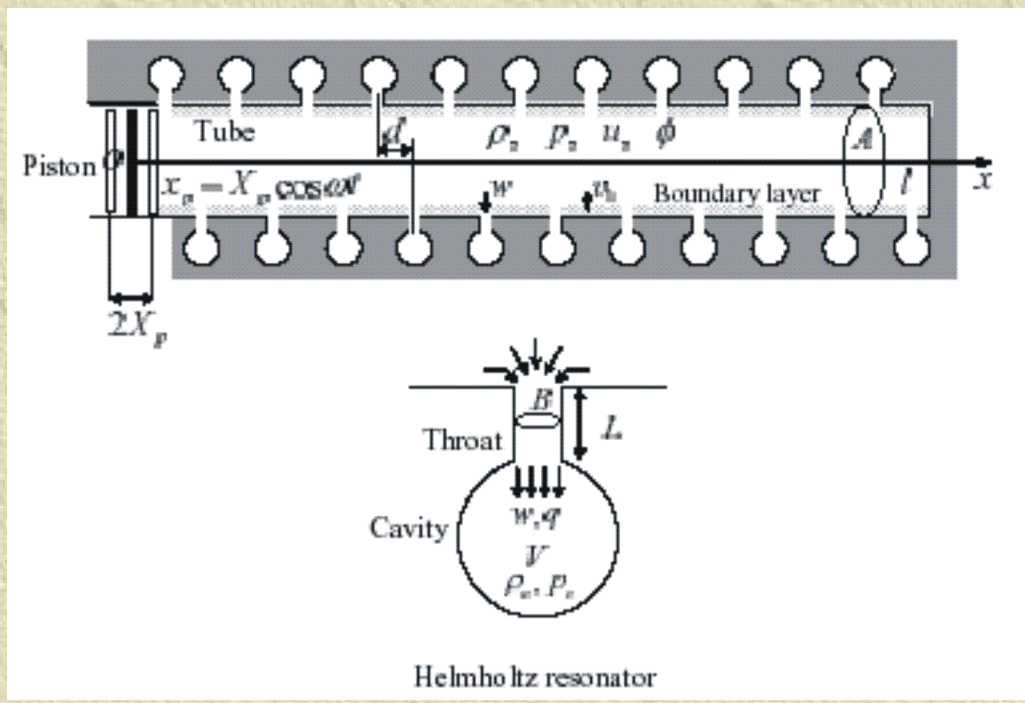
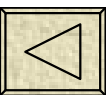
- ✦ Není potřeba pístu
- ✦ Není potřeba mazacích olejů
- ✦ Vyšší účinnost
- ✦ Větší spolehlivost
- ✦ Nižší hladina hluku (35 dB)
- ✦ Čistý provoz
- ✦ Snadná regulovatelnost

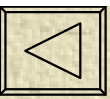




Tlaková vlna uvnitř válcového rezonátoru







Vývoj tvaru vlny se vzdáleností od zdroje

Ideální tekutina

Reálná tekutina