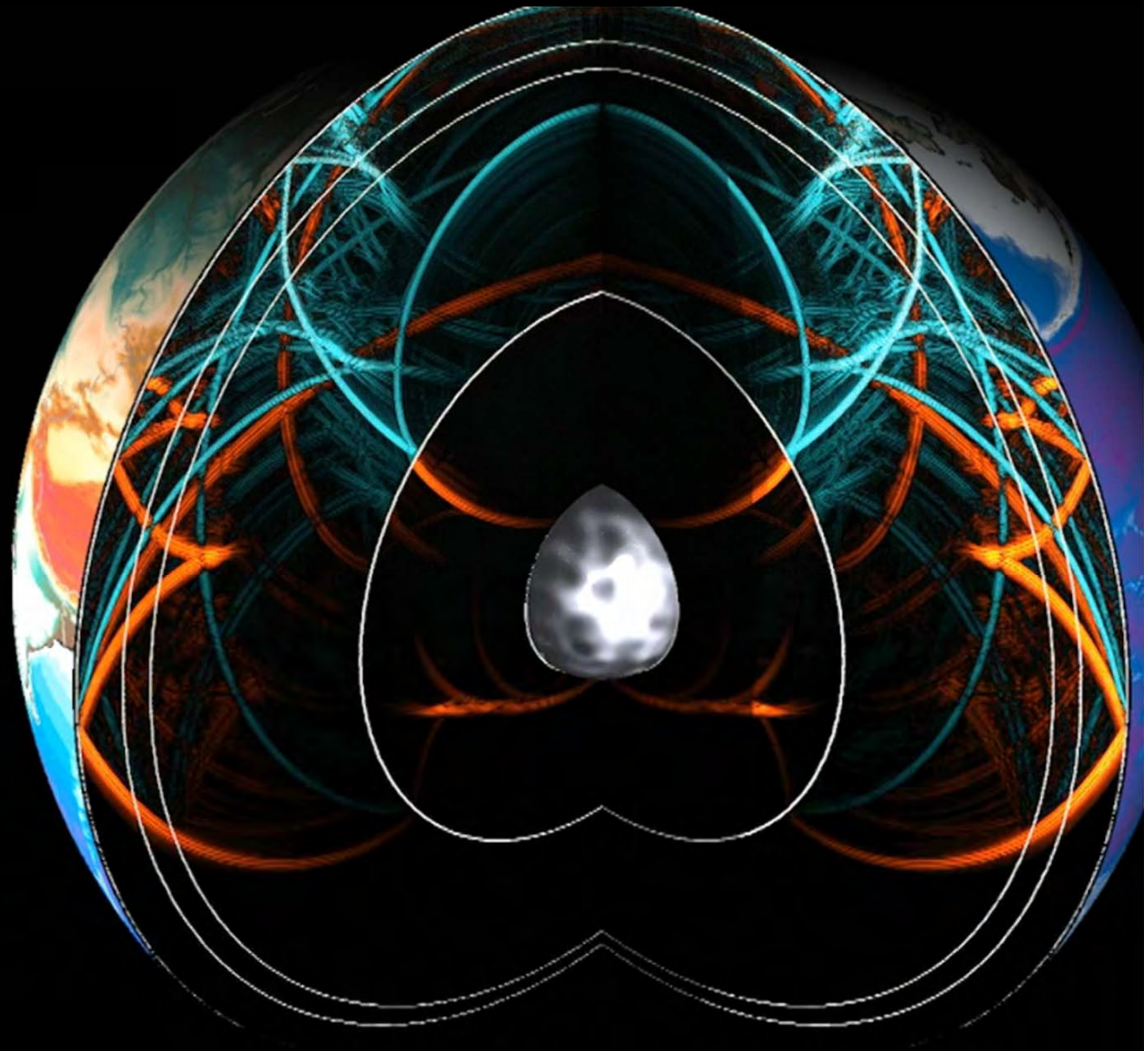
Vlny uvnitř Země



Ondřej Čadek
Katedra geofyziky MFF

Obrázek: http://web.utah.edu/thorne

Chvála vlnám?

Vlna – wave – Welle – vague – волна – val – våg – onda

Vlnová rovnice: $$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

Vlnová rovnice: $\dfrac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \dfrac{1}{c^2}\dfrac{\partial^2 u}{\partial t^2}$

$$u(x,t) = \sin(x+ct)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \cos(x+ct), \quad \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{\partial}{\partial x}\cos(x+ct) = -\sin(x+ct)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c\cos(x+ct), \quad \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c\frac{\partial}{\partial x}\cos(x+ct) = -c^2\sin(x+ct)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = -\sin(x+ct)$$

$$\frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{1}{c^2}\left[-c^2\sin(x+ct)\right] = -\sin(x+ct)$$

Vlnová rovnice: $$\nabla^2\vec{u} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{u}}{\partial t^2}$$

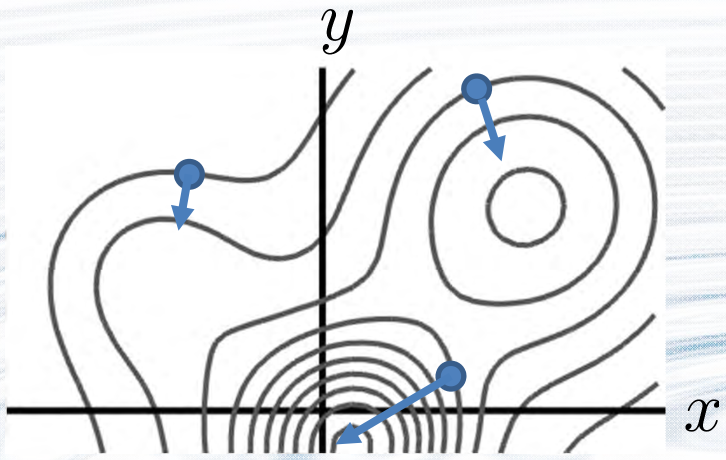
$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}$$

Vlnová rovnice: $$\nabla^2\vec{u} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2\vec{u}}{\partial t^2}$$

gradient: $\nabla f(x,y)$



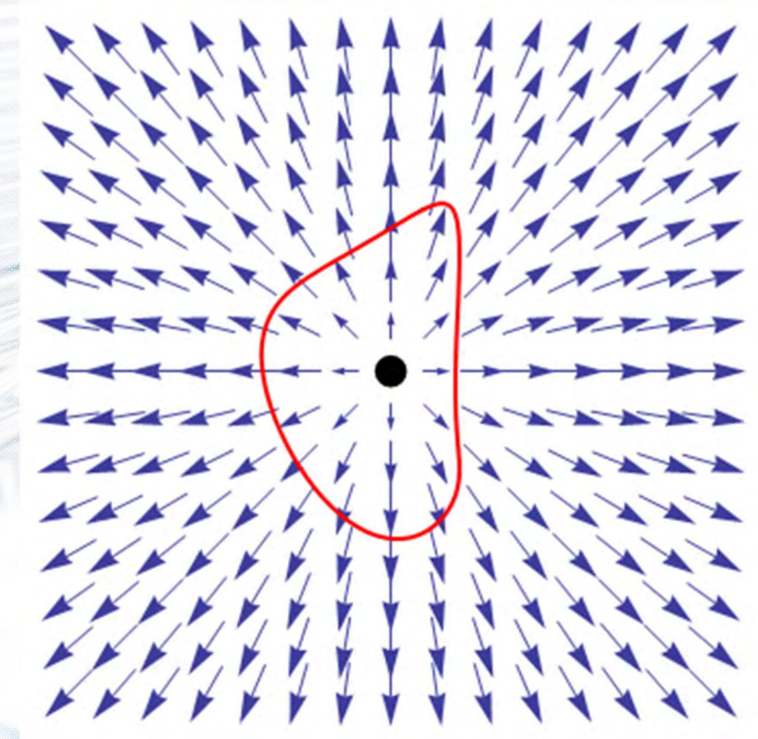
$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}$$

Vlnová rovnice: $\nabla^2 \vec{u} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}$

divergence: $\nabla \cdot \vec{u}(x,y)$



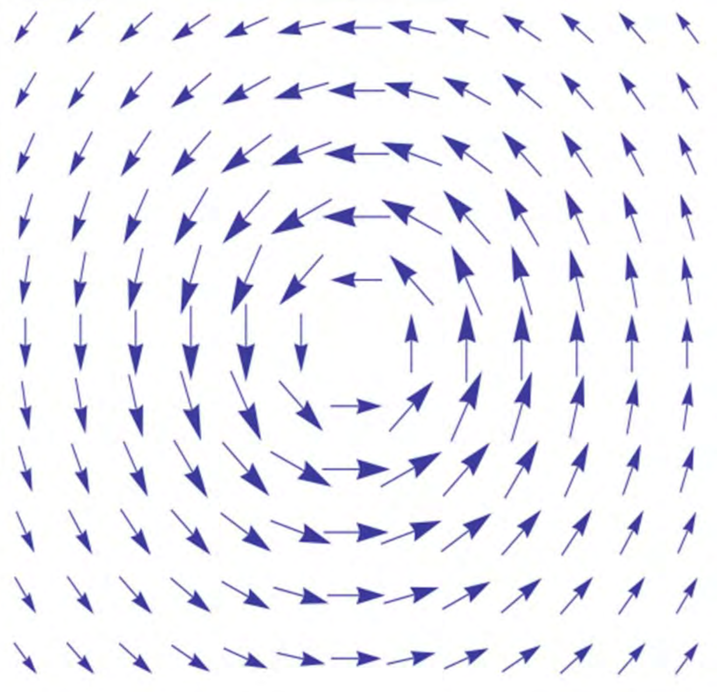
$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}$$

Vlnová rovnice: $\nabla^2 \vec{u} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 \vec{u}}{\partial t^2}$

rotace: $\nabla \times \vec{u}(x,y)$

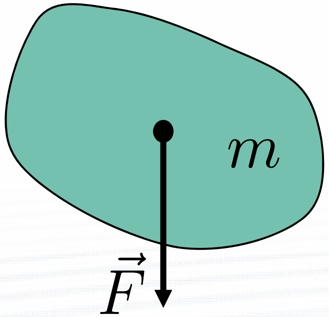


$$\frac{\partial^2 u_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_x}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}$$

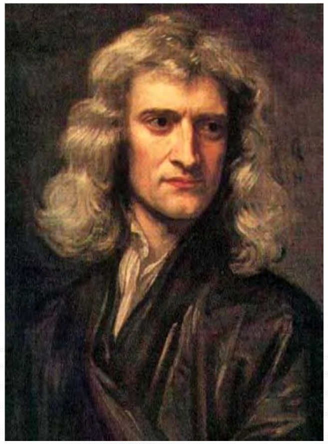
$$\frac{\partial^2 u_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_y}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_z}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}$$

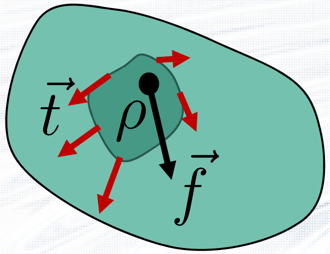
Newton (1687)



$$\vec{F} = m\vec{a} = m\frac{d\vec{v}}{dt} = m\frac{d^2\vec{u}}{dt^2}$$



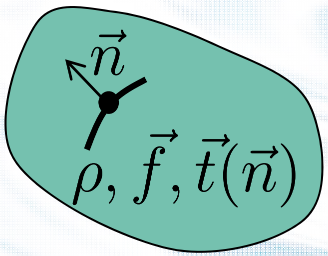
Euler (kolem 1740)



$$\vec{f} = \frac{\vec{F}}{V}, \quad \rho = \frac{m}{V}$$

$$\int_V \vec{f} dV + \int_S \vec{t} dS = \frac{d}{dt}\int_V \rho\vec{v} dV$$

Cauchy (po 1815)



$$\boxed{\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \vec{f} = \rho\frac{d\vec{v}}{dt}}$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} + \vec{f} = \rho \frac{d^2 \vec{u}}{dt^2}$$

$$\boldsymbol{\sigma} = \lambda(\nabla \cdot \vec{u})\mathbf{I} + \mu \left[\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T\right]$$

$$F = k\frac{\Delta l}{l}$$

$$\nabla \cdot \left\{\lambda(\nabla \cdot \vec{u})\mathbf{I} + \mu \left[\nabla \vec{u} + (\nabla \vec{u})^T\right]\right\} = \rho \frac{d^2 \vec{u}}{dt^2}$$

$$\vec{u} : \quad \phi = \nabla \cdot \vec{u}, \ \vec{\psi} = \nabla \times \vec{u}$$

$$\boxed{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho} \nabla^2 \phi = \frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2}}$$

$$\boxed{\frac{\mu}{\rho} \nabla^2 \vec{\psi} = \frac{\partial^2 \vec{\psi}}{\partial t^2}}$$

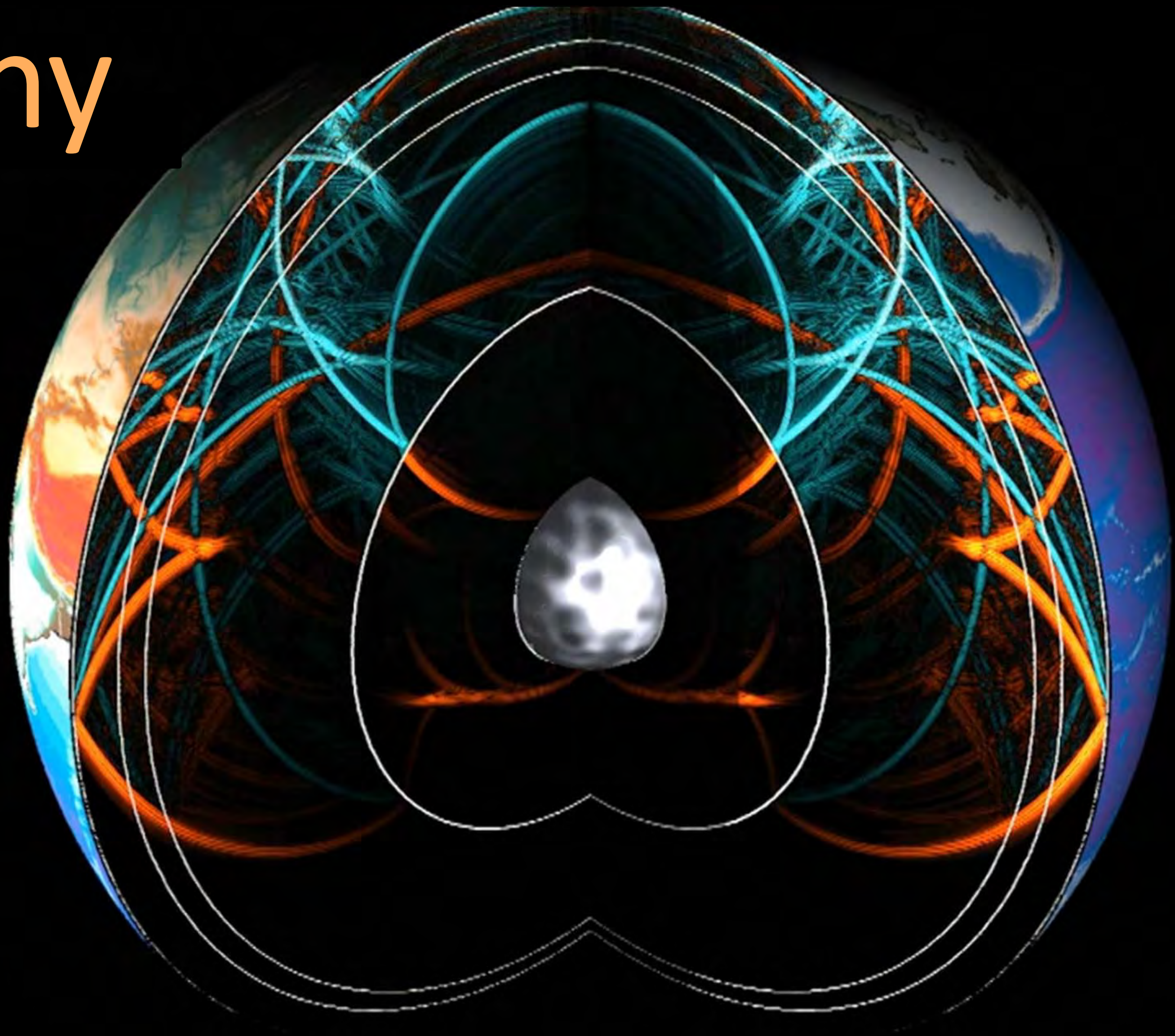
Objemová (P) vlna

$$c_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$$

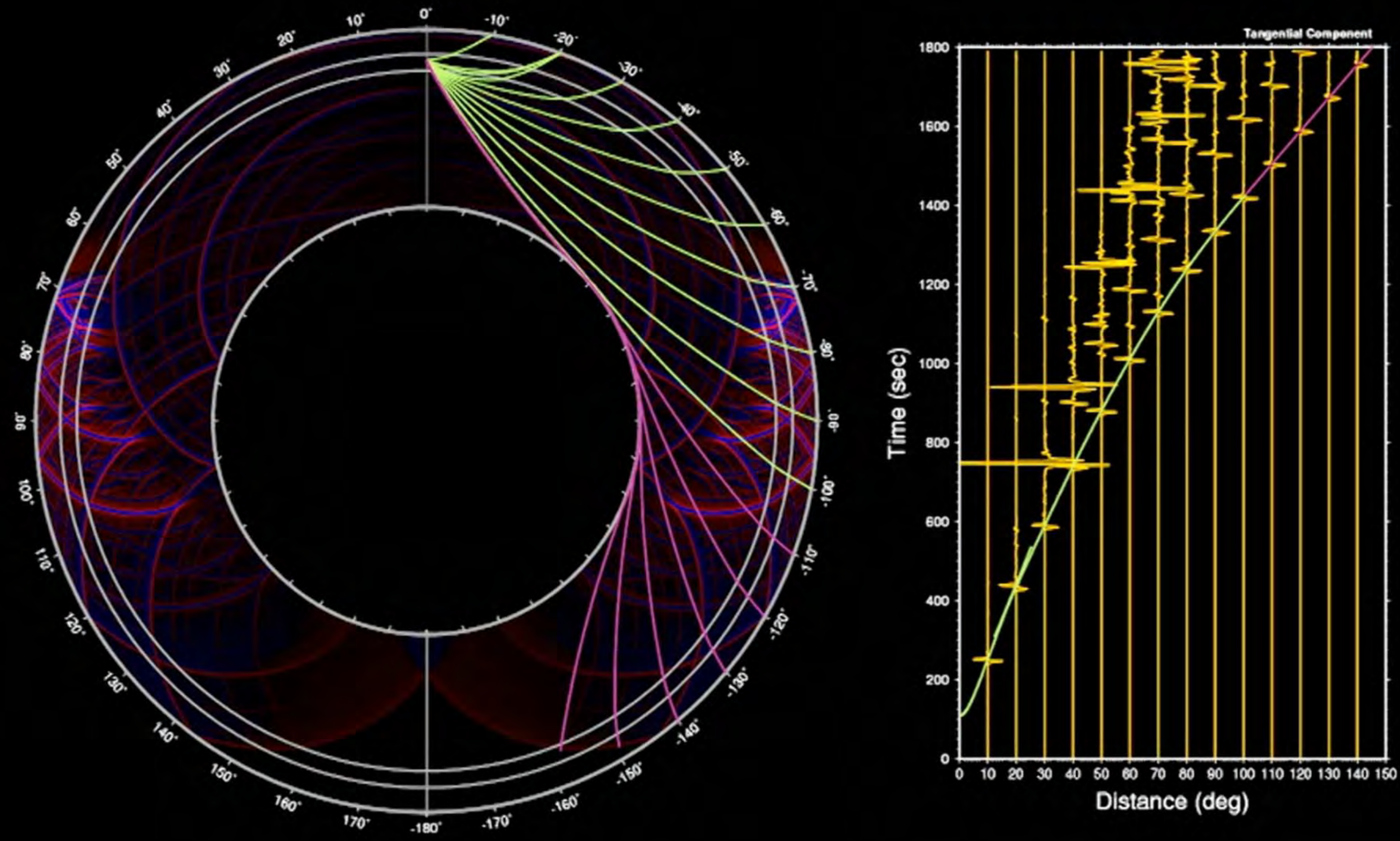
Střižná (S) vlna

$$c_s = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

P a S vlny

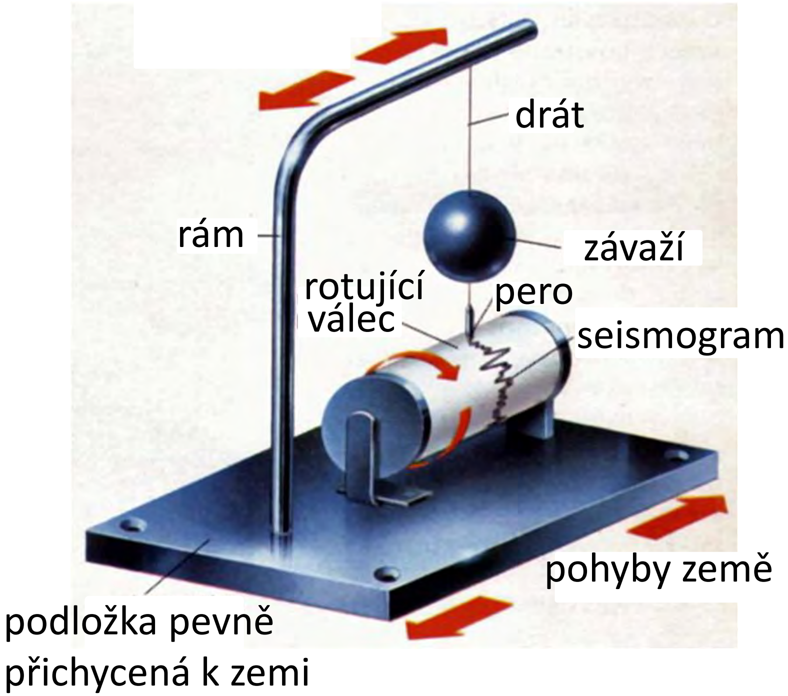


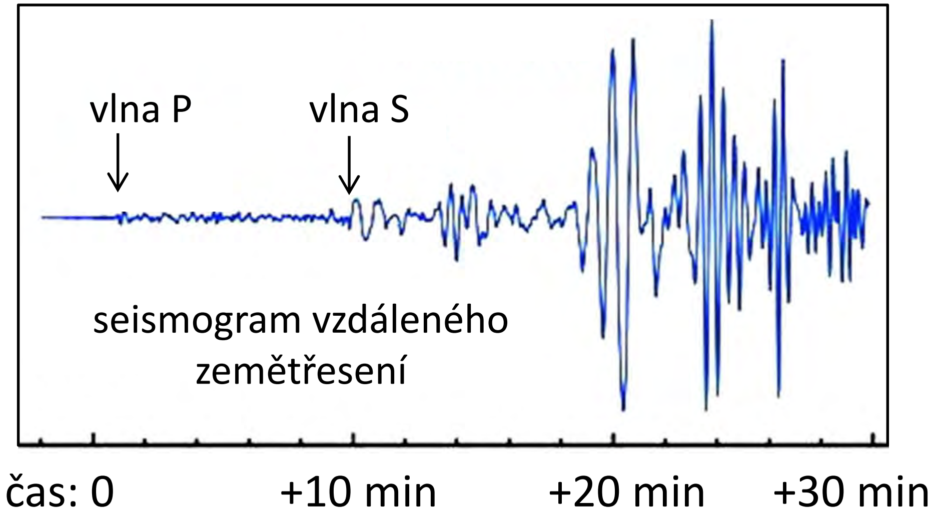
Obrázek: http://web.utah.edu/thorne

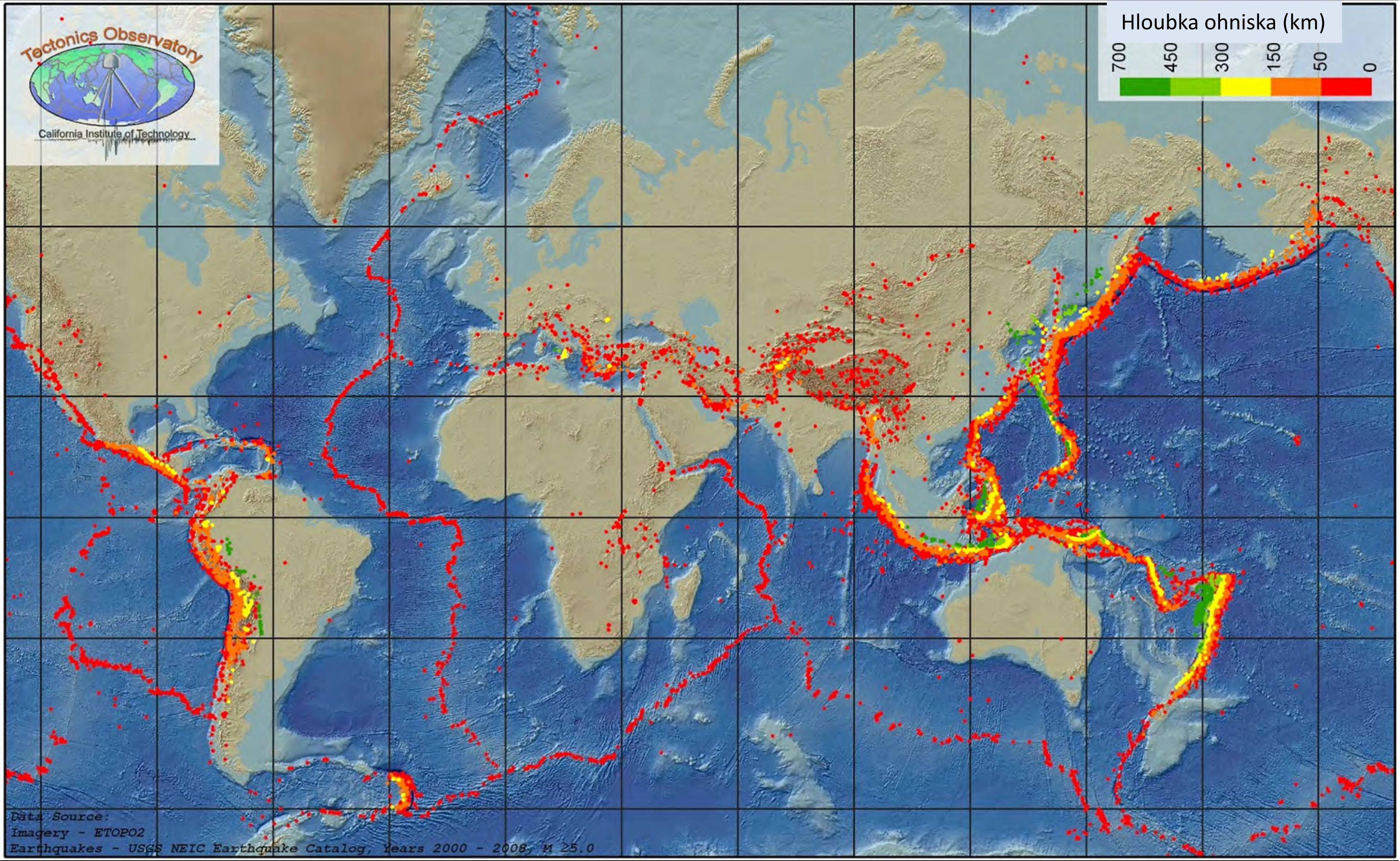


Obrázek: http://web.utah.edu/thorne

Seismograf … a seismogram

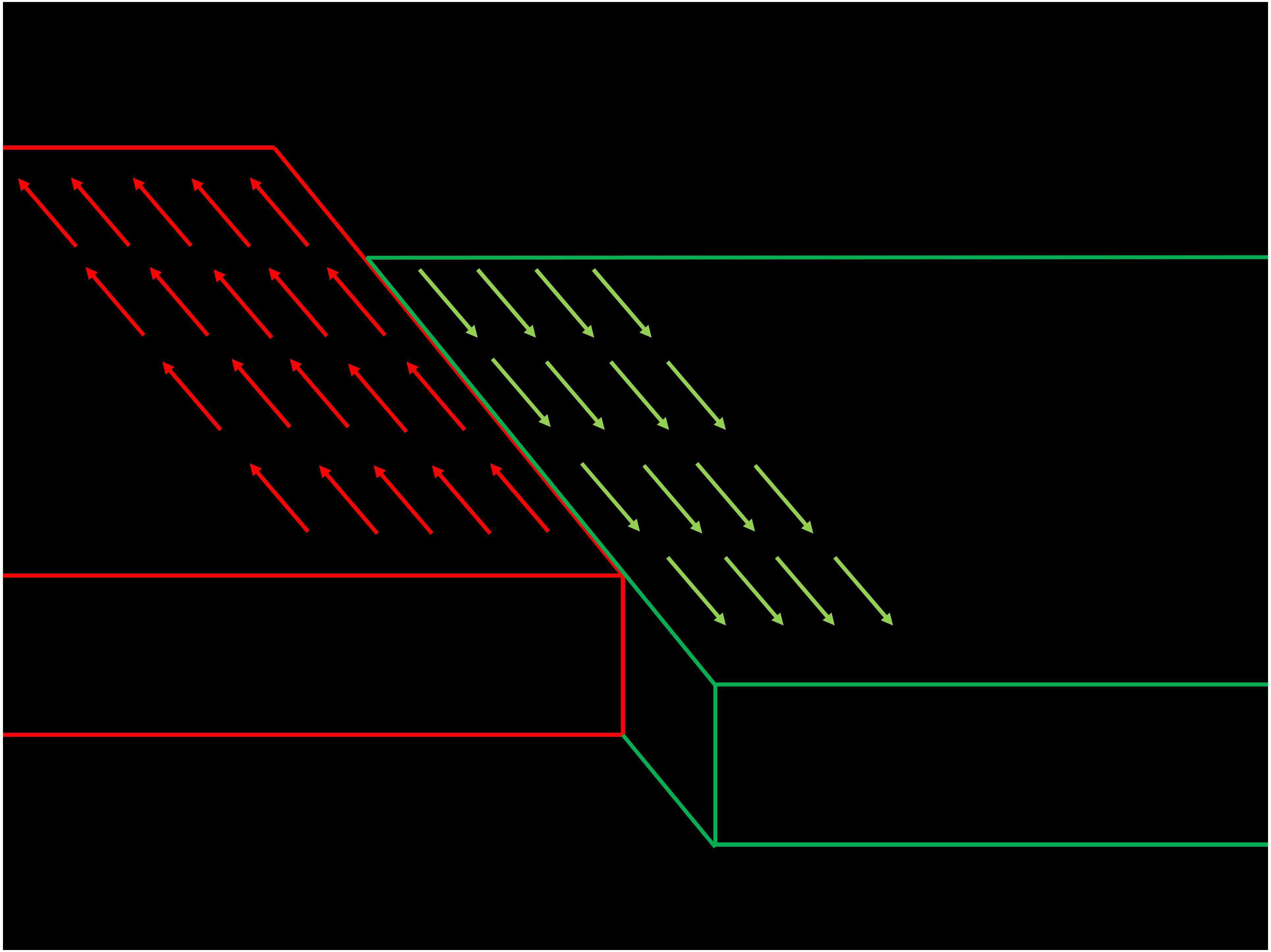


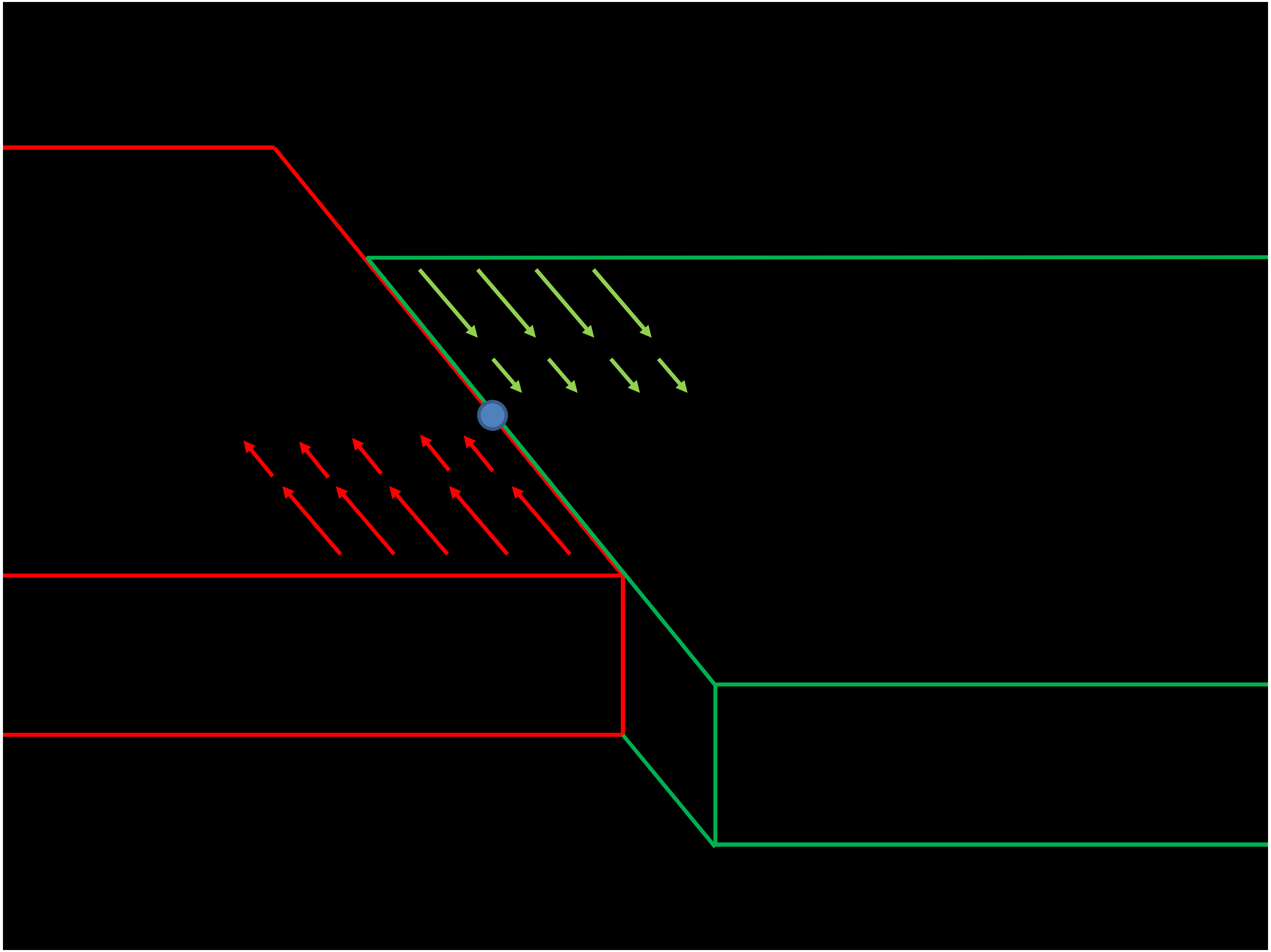


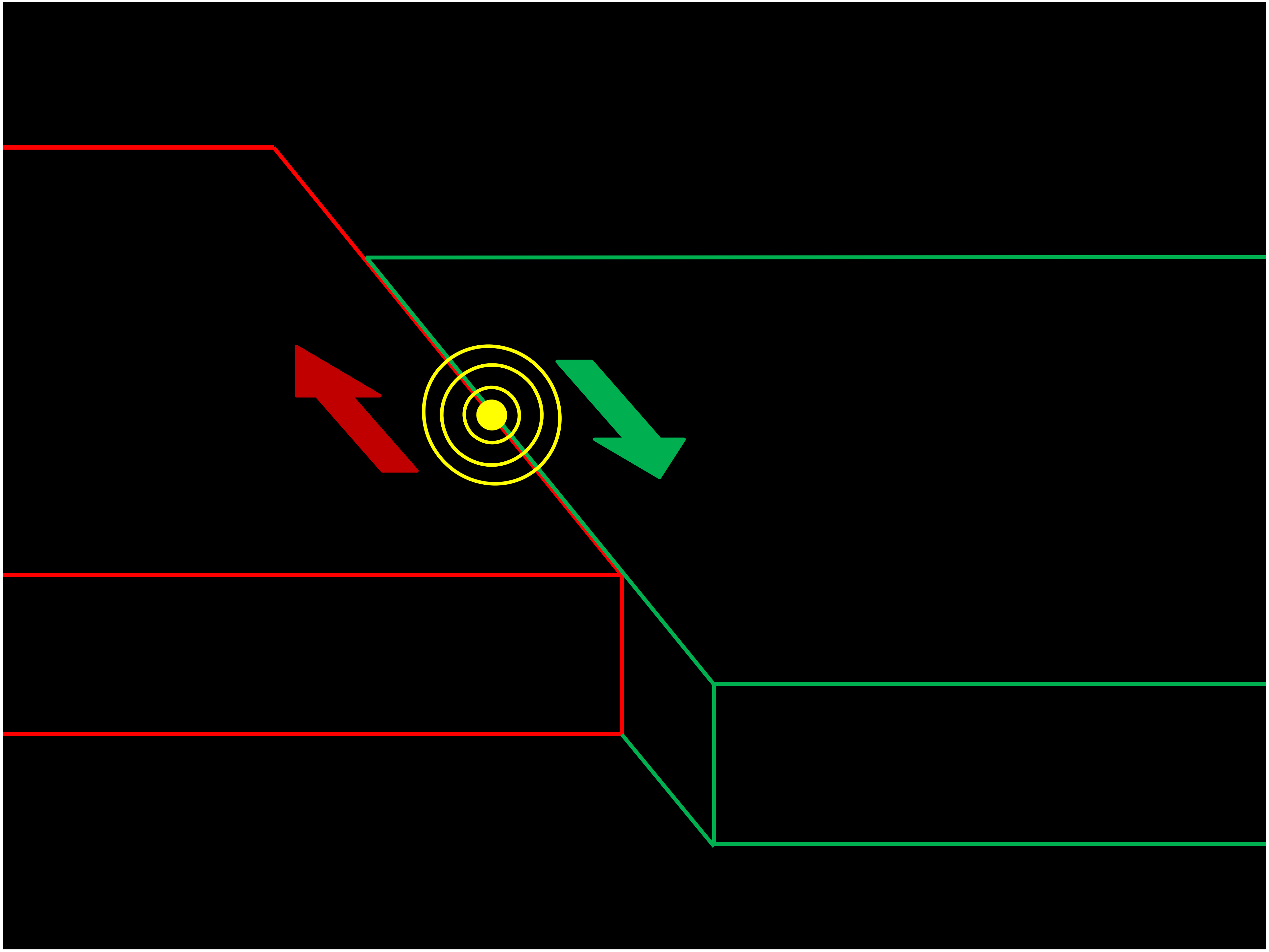


Zdroj: Tectonics Observatory, Caltech


Alamy



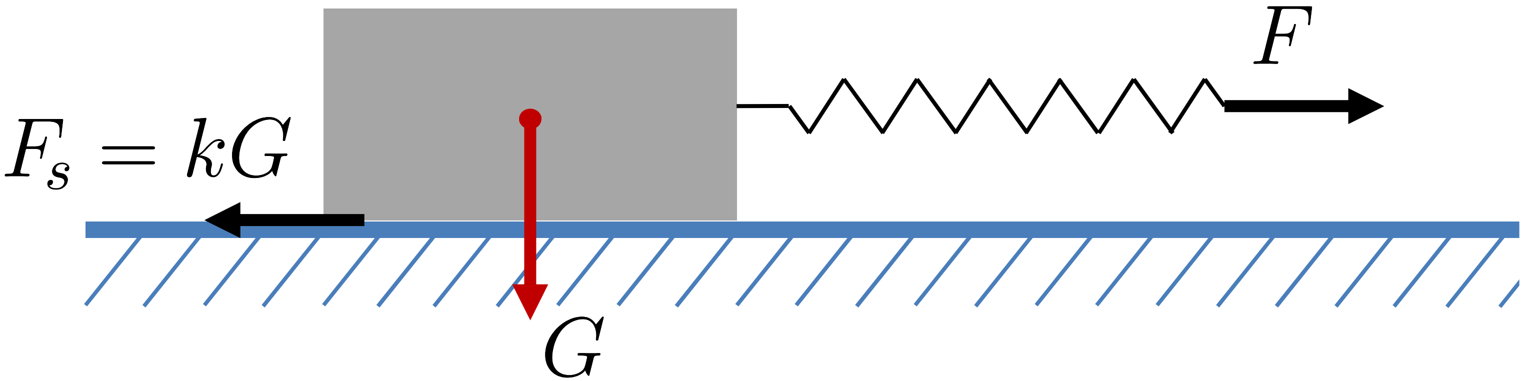




$F < F_s$ ... objekt zůstává v klidu

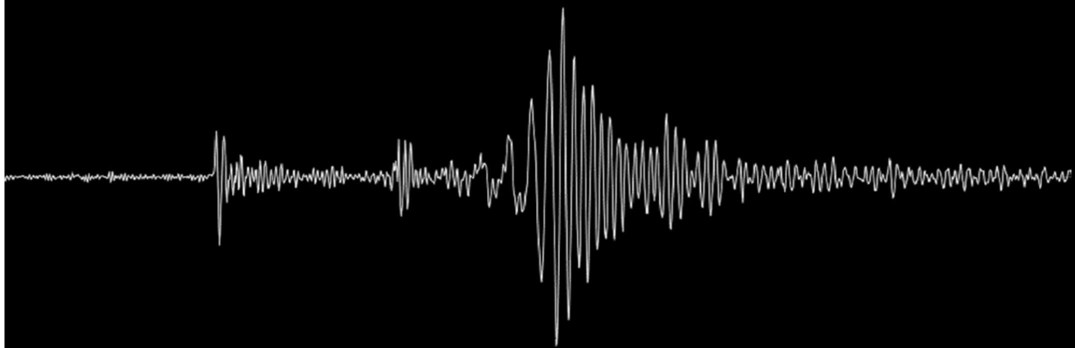
$F > F_s$ ... objekt se pohybuje

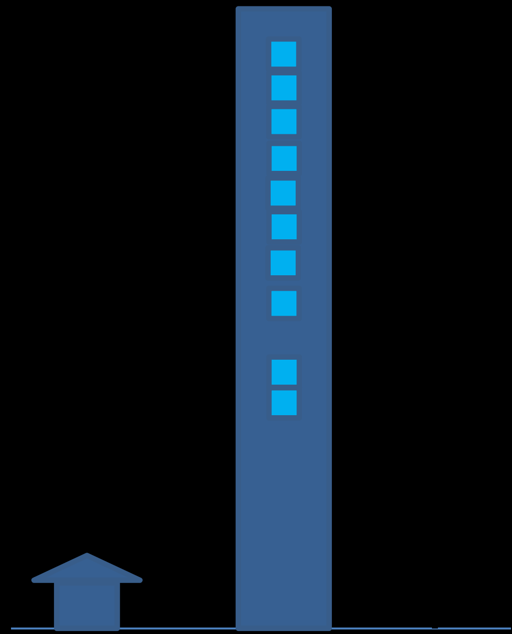
$\boxed{F \approx F_s}$



Ochrana před zemětřesením

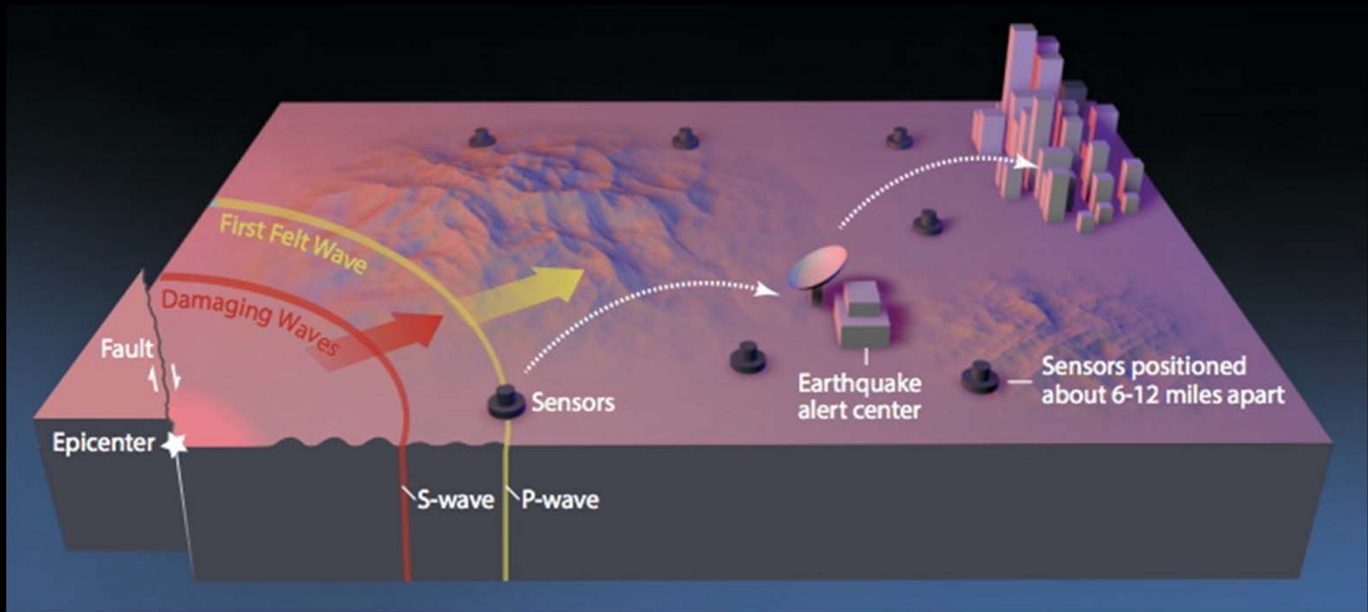
- Monitorování zlomů
- Stavební opatření



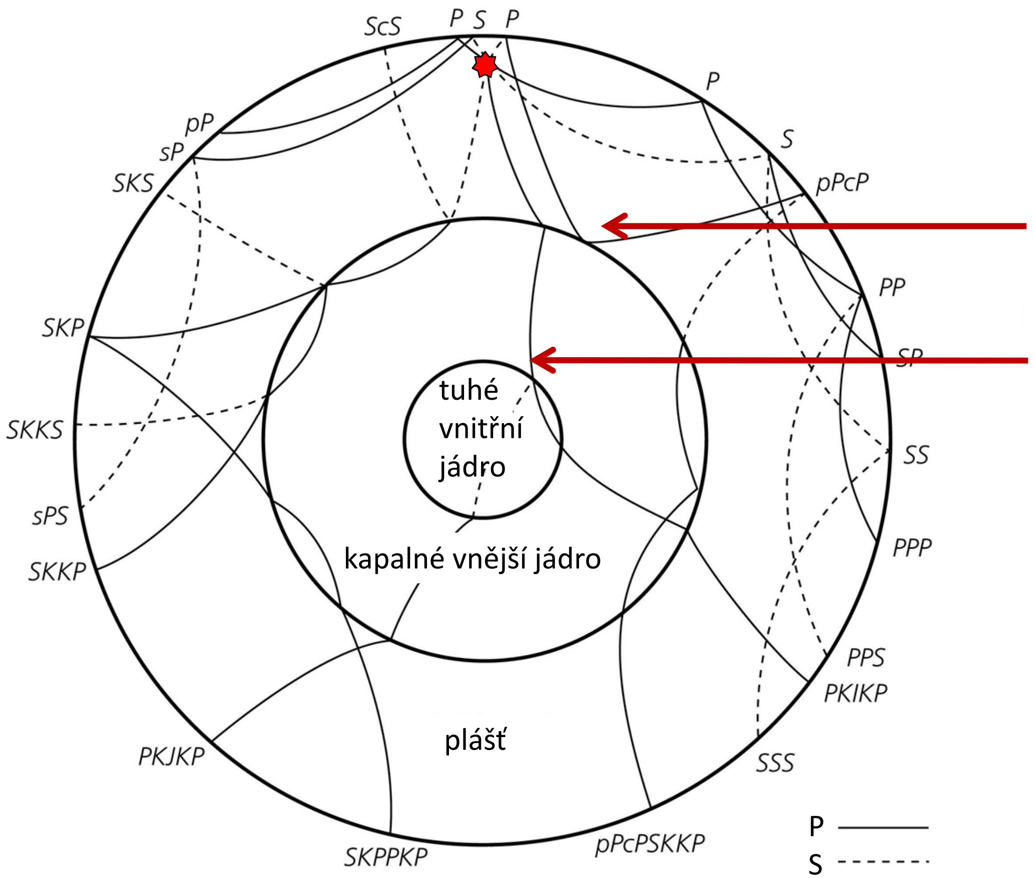


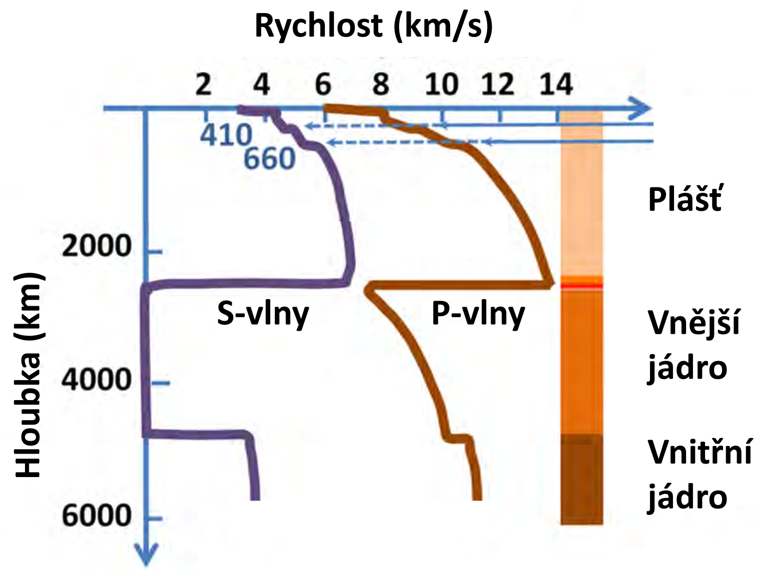
Ochrana před zemětřesením

- Monitorování zlomů
- Stavební opatření
- Systémy rychlého varování



Zdroj: USGS



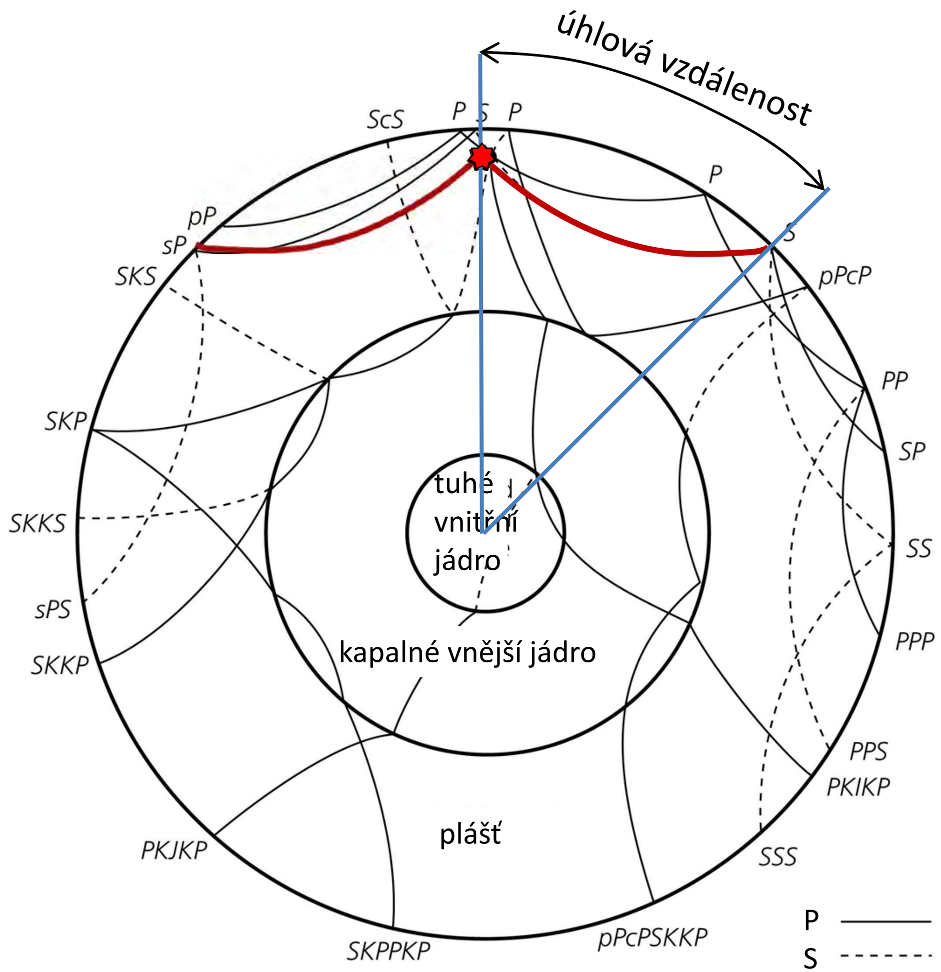


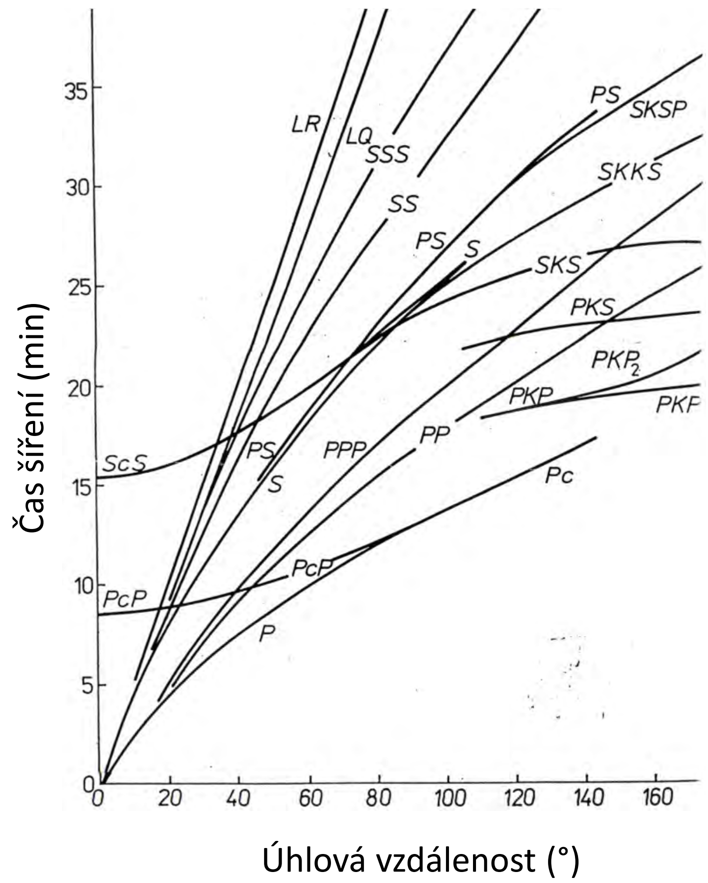
seismické rychlosti

+

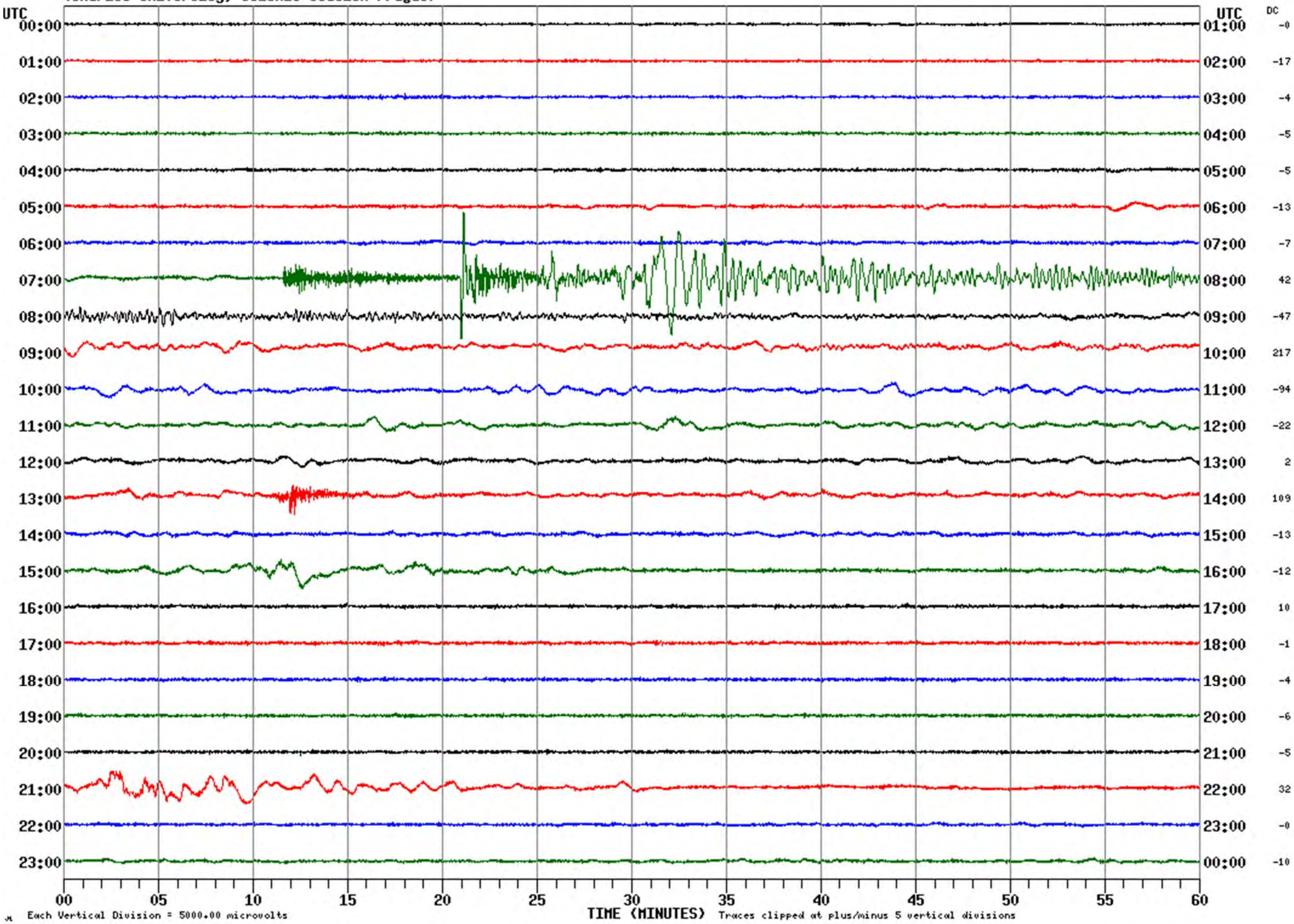
minerálová fyzika

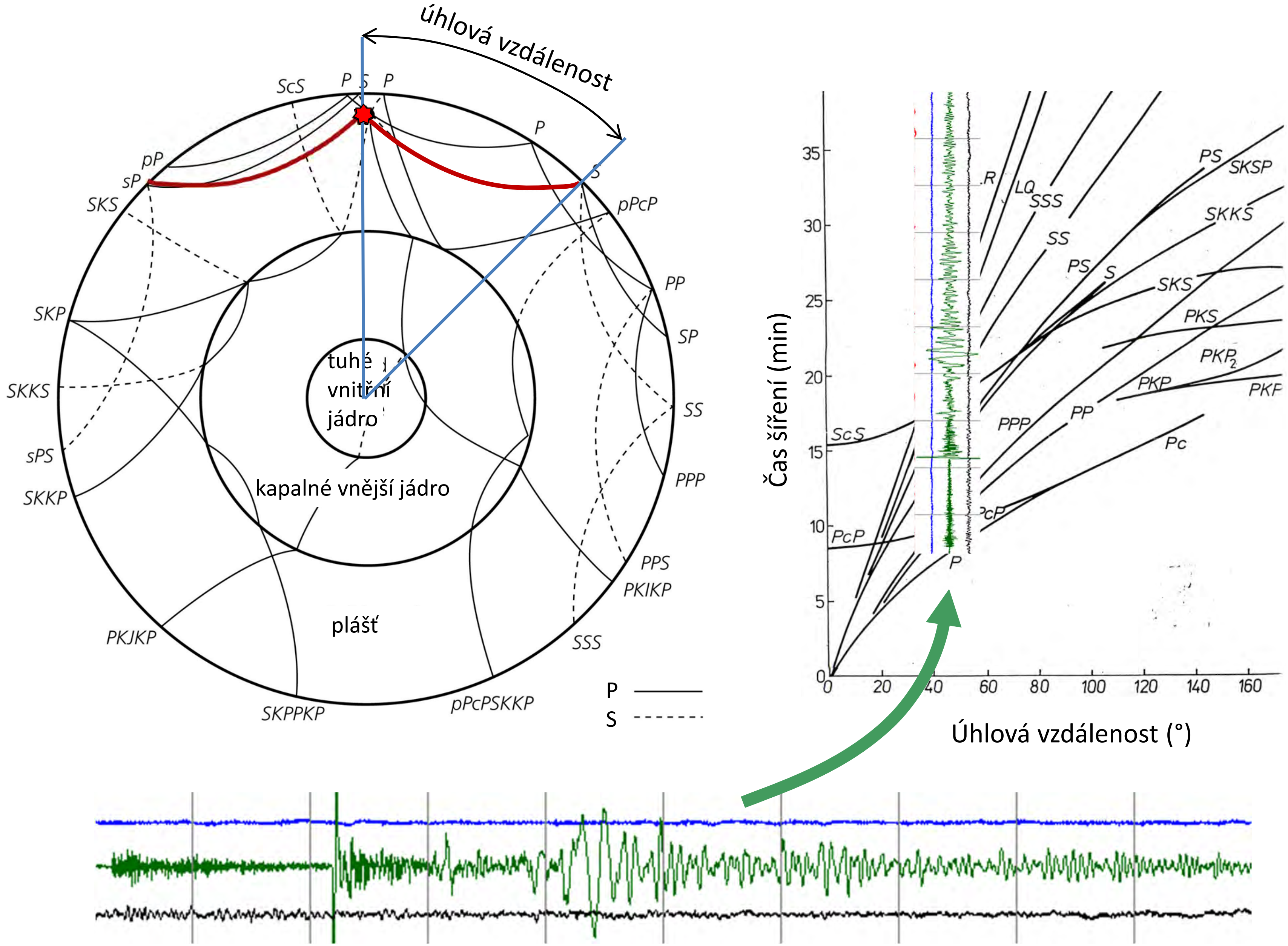
materiálové složení Země


úhlová vzdálenost
ScS
P
S
P
pP
sP
SKS
SKP
SKKS
sPS
SKKP
PKJKP
SKPPKP
pPcPSKKP
SSS
PKIKP
PPS
PPP
SS
SP
PP
pPcP
S
P
tuhé vnitřní jádro
kapalné vnější jádro
plášť
P
S


Čas šíření (min)
Úhlová vzdálenost (°)
0
5
10
15
20
25
30
35
0
20
40
60
80
100
120
140
160
LR
LQ
SSS
SS
PS
S
SKS
PS
SKSP
SKKS
PKS
PKP2
PKP
PKP
PP
PPP
PS
S
ScS
PcP
PcP
P
Pc

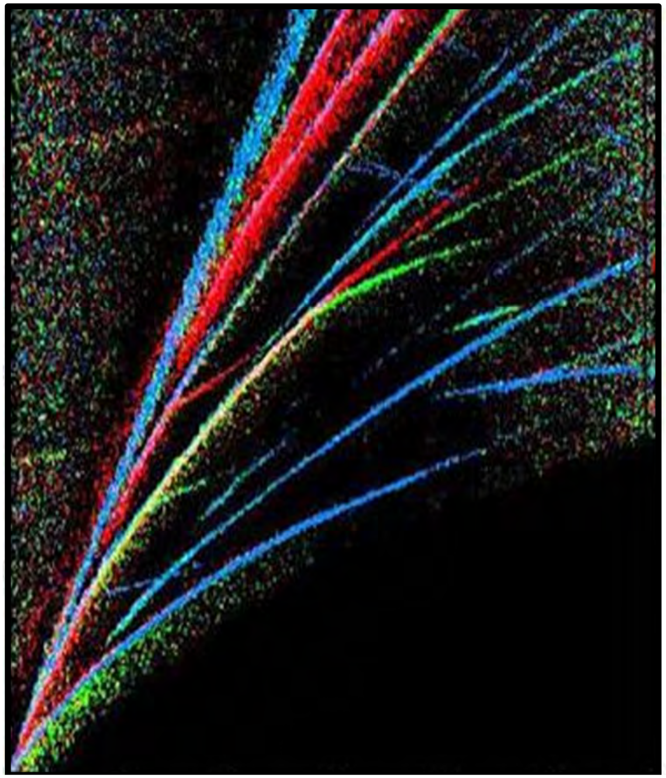
May29,2015
PRA BHE CZ --
(Charles University, Seismic Station Prague)





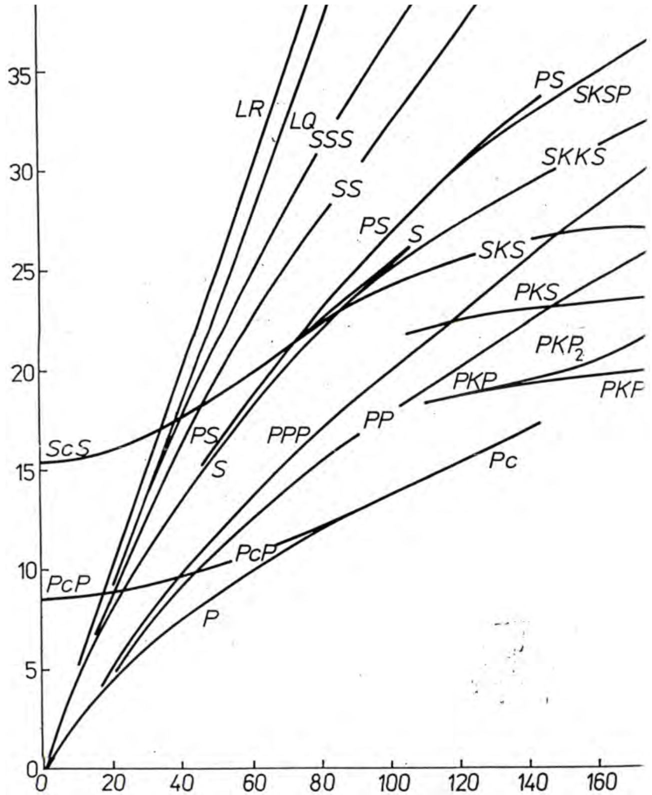
úhlová vzdálenost
tuhé vnitřní jádro
kapalné vnější jádro
plášť
P
S
Čas šíření (min)
Úhlová vzdálenost (°)

Čas šíření

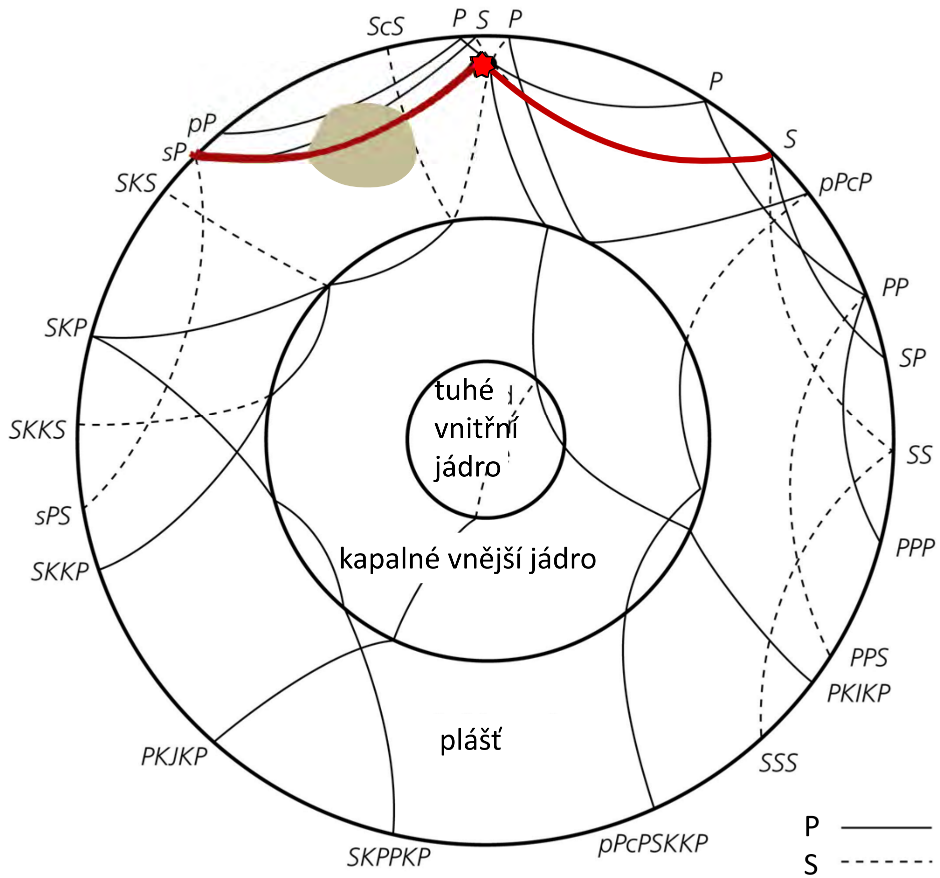


Úhlová vzdálenost

Čas šíření (min)



Úhlová vzdálenost (°)

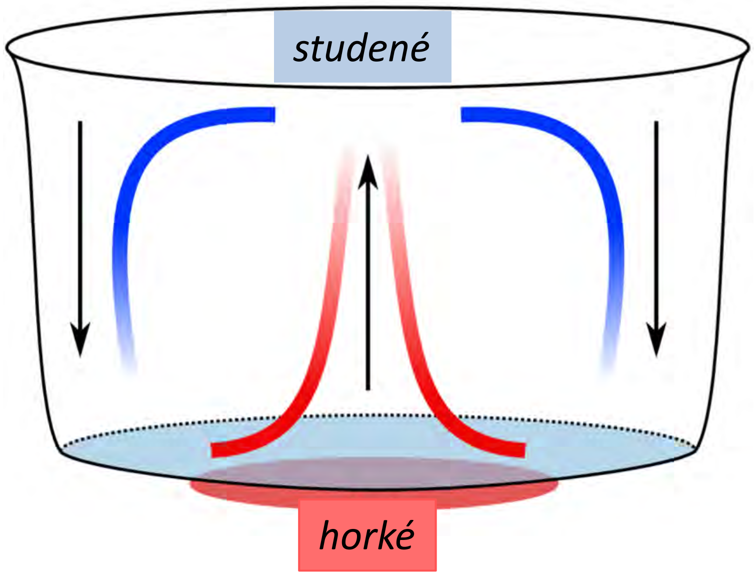


Seismická tomografie

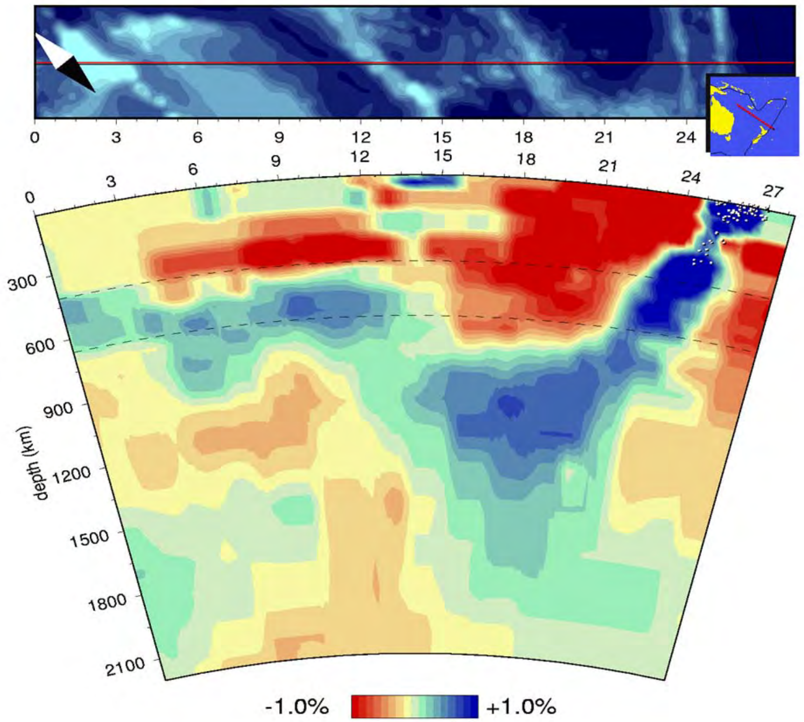
využívá vln vznikajících
při zemětřesení k určení
třírozměrné struktury
zemského tělesa

Umožňuje určit
teplotní a mineralogické
anomálie v Zemi
a tedy také to, jak se Země
deformuje a chladne.

Termální konvekce

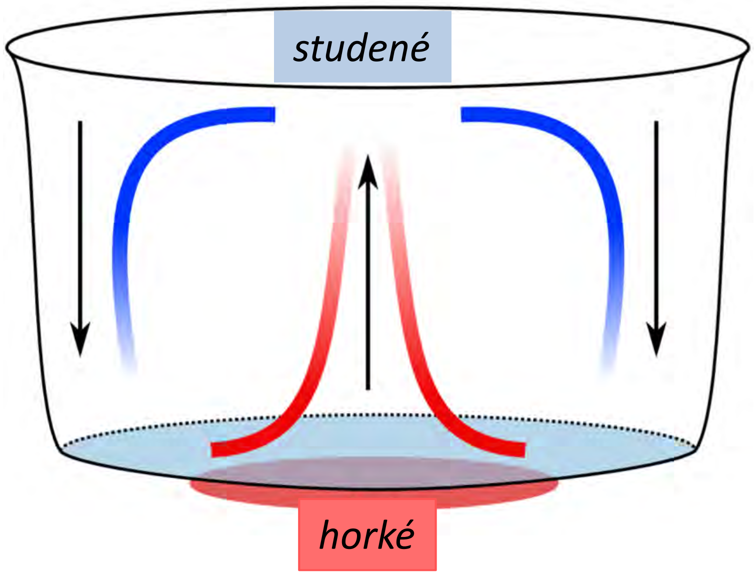


Anomálie seismických rychlostí

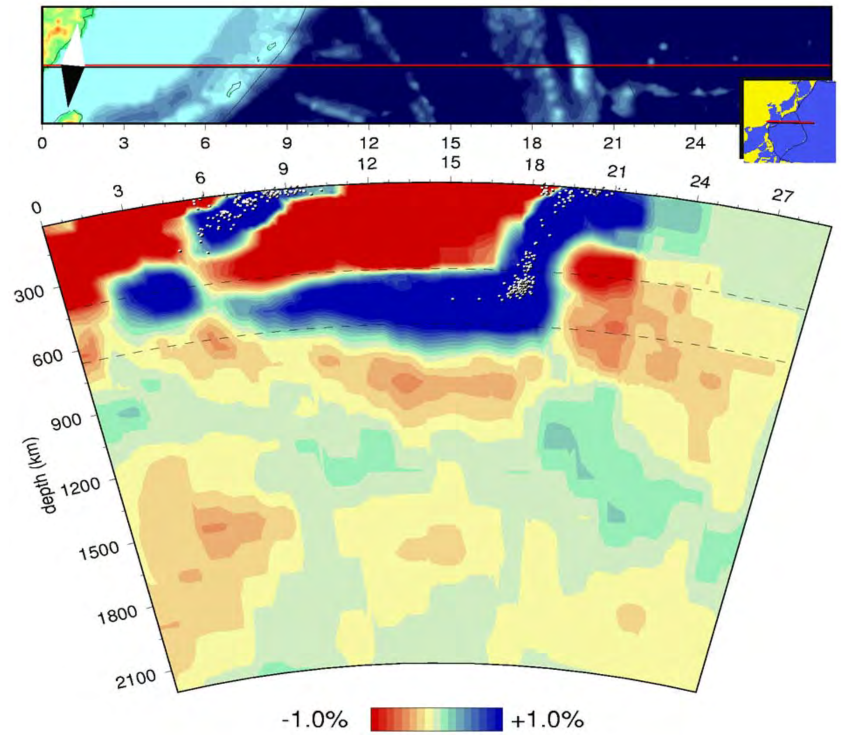


Bijwaard et al., 1998

Termální konvekce

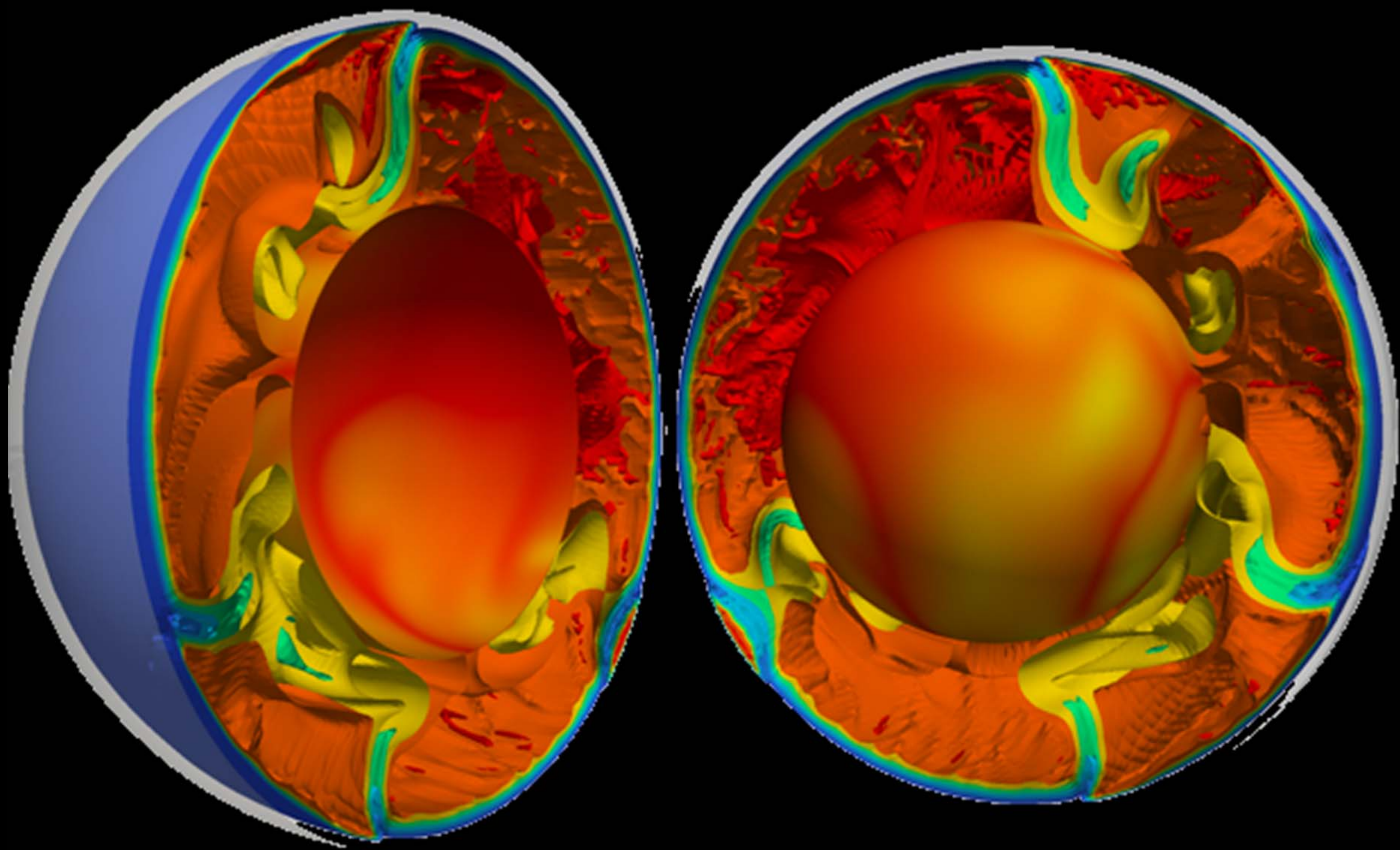


Anomálie seismických rychlostí

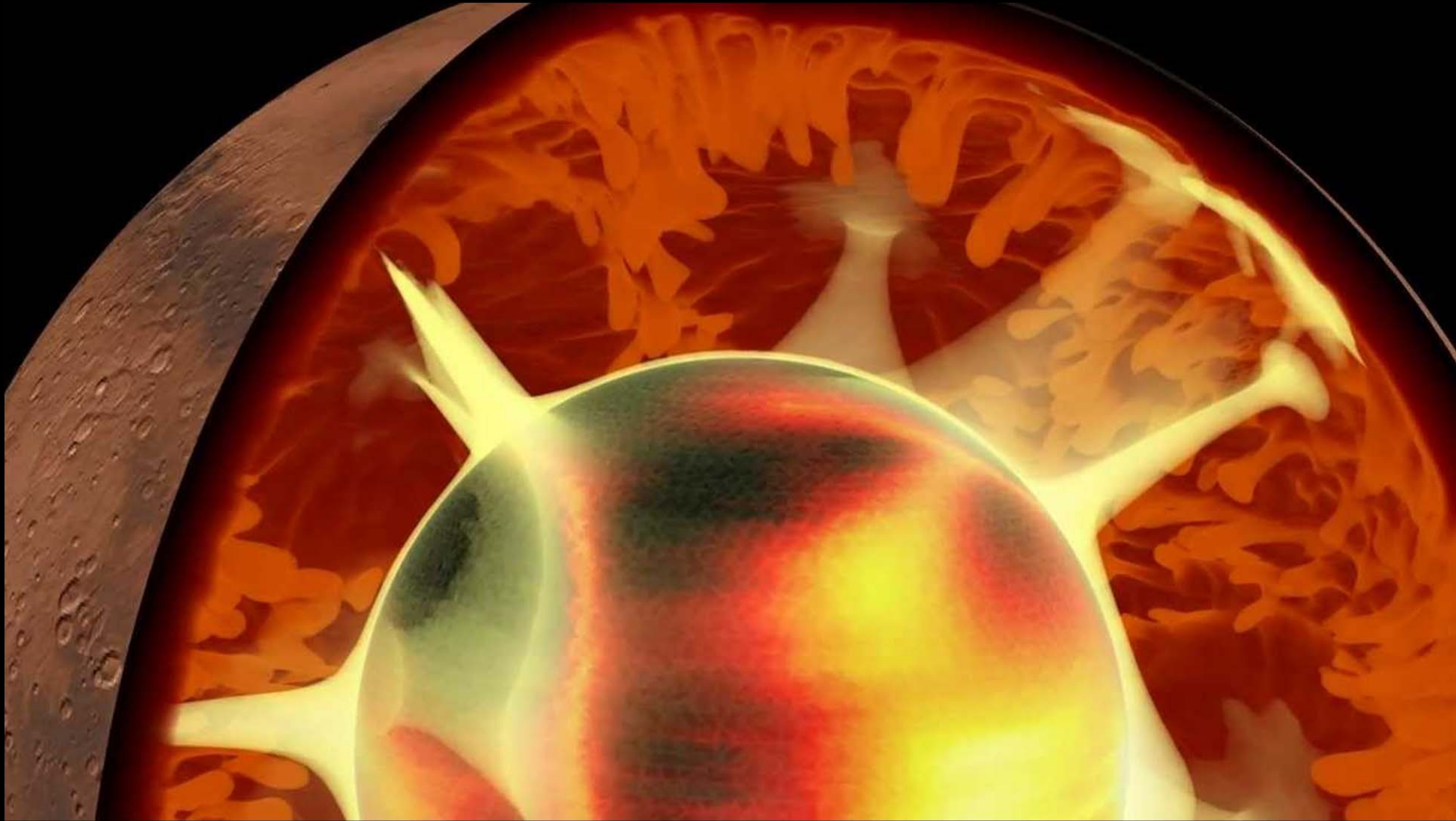


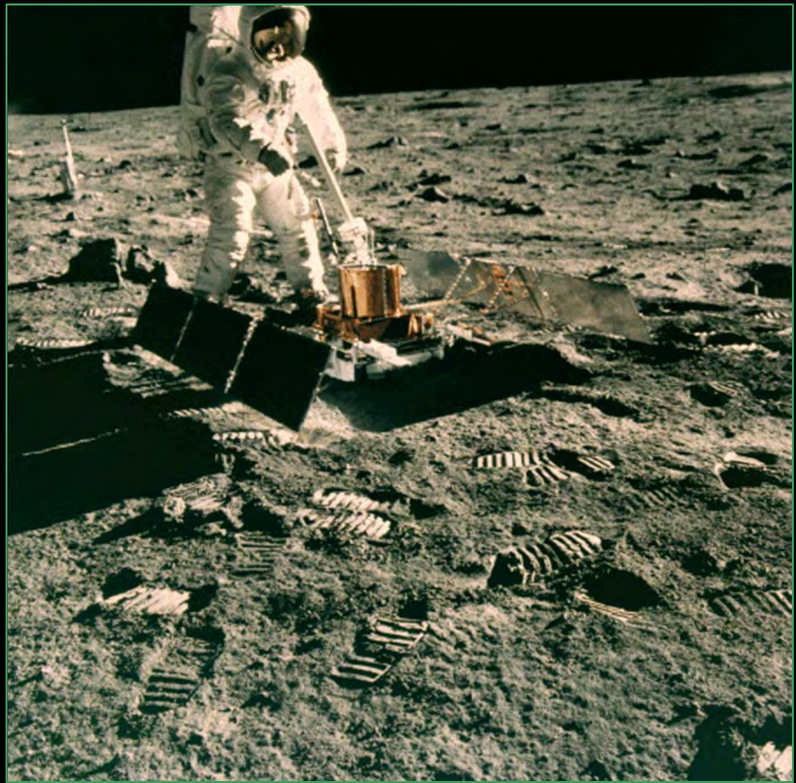
Bijwaard et al., 1998

Země

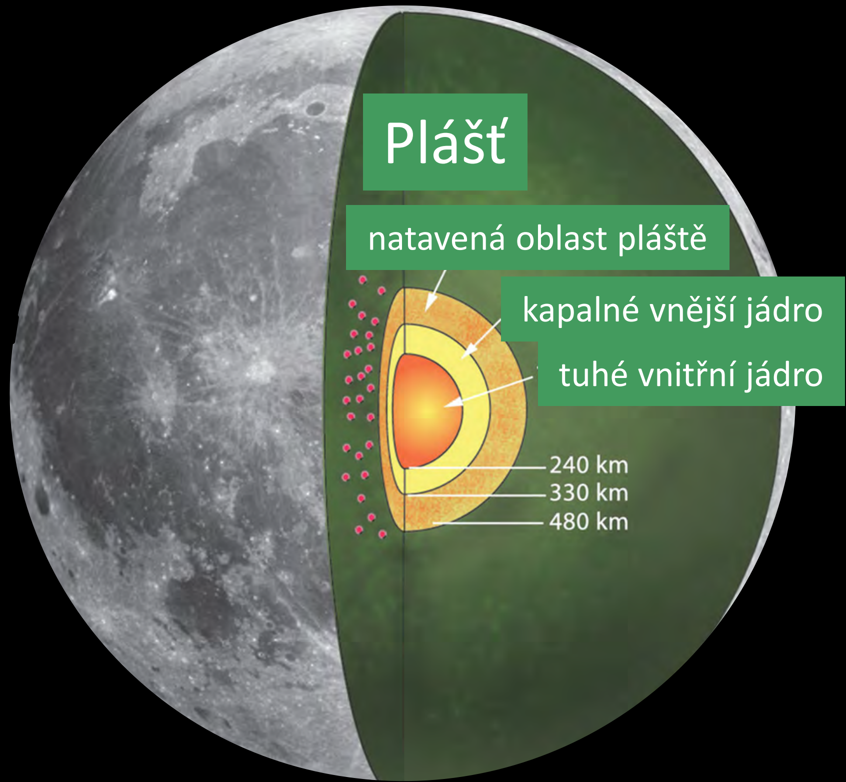


Merkur, Venuše, Mars



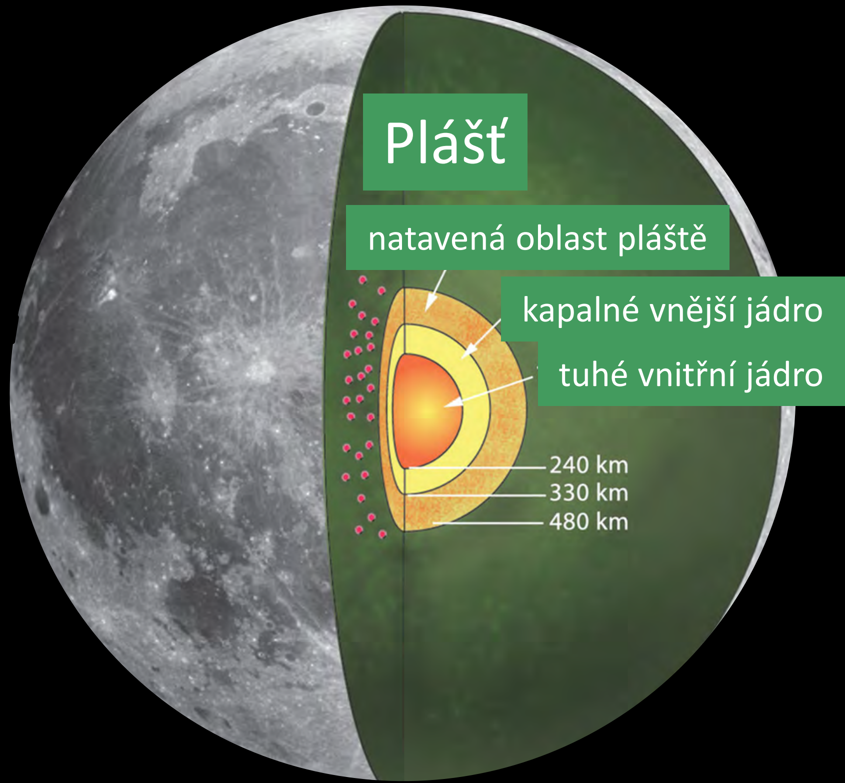


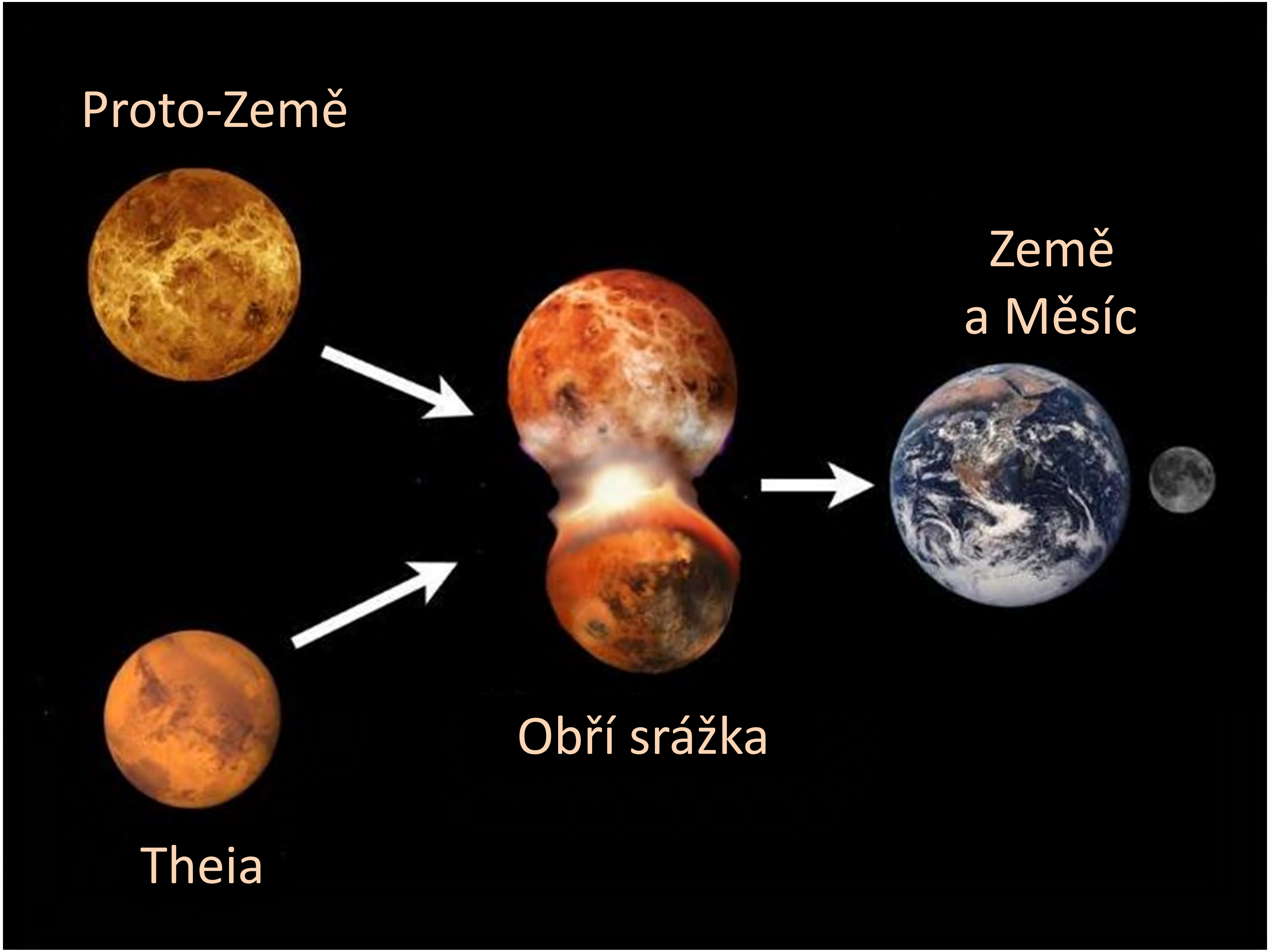
Apollo 11, 12, 14, 15 a 16
měření do září 1977



Měsíc

- shodné izotopové složení jako Země
- liší se obsahem některých majoritních elementu (více Fe)
- stejný podíl vody vázané v minerálech jako na Zemi




Proto-Země
Země
a Měsíc
Obří srážka
Theia

Chvála seismických vln

Díky nim:

- známe složení a strukturu Země
  a můžeme studovat její termální vývoj
- máme nástroj, který lze použít při výzkumu
  dalších terestrických těles

Znalosti fyzikálních zákonitostí, které řídí vznik zemětřesení a šíření seismických vln, nám pomáhají eliminovat škody, které při zemětřeseních vznikají.