

Helioseismologie

Sluneční fyzika
LS 2013/2014

Michal Švanda

Astronomický ústav MFF UK
Astronomický ústav AV ČR

Disperzní relace

• Obecná

$$k_r^2 = \frac{\omega^2 - \omega_c^2}{c^2} + \frac{S_l^2}{c^2 \omega^2} (N^2 - \omega^2)$$

• p -mody

$$- k_r^2 > 0, N^2 < 0$$

$$\omega^2 = \omega_c^2 + k^2 c^2$$

• g -mody

$$- k_r^2 > 0, N^2 > 0$$

$$\omega^2 = N^2 \cos^2 \Phi$$

• f -mod

$$- \Delta P = 0$$

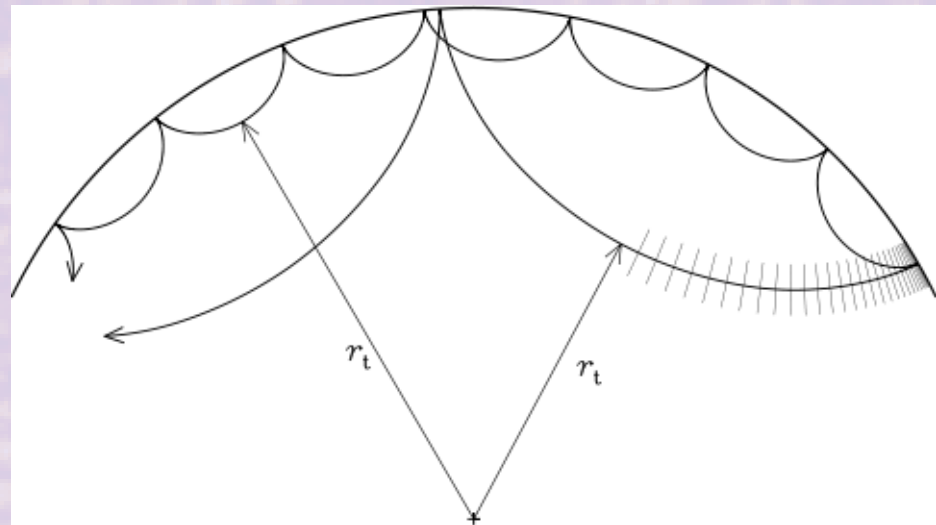
$$\omega^2 = k_h g$$

• Bod obratu

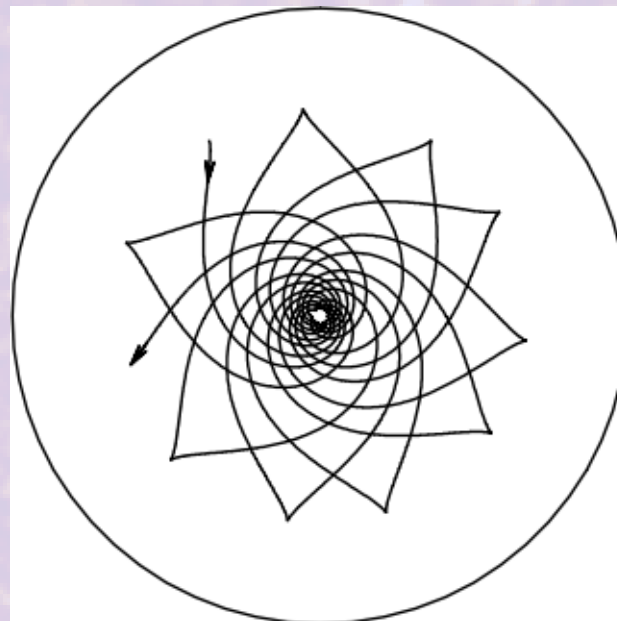
$$k_r^2 = 0 \rightarrow \frac{c(r_t)}{r_t} = \frac{\omega}{l(l+1)}$$

Trajektorie pro p/g mody

- P-mody $l = 30$ a
 $l = 100$, $\nu = 3$ mHz



- G-mod $l = 5$,
 $\nu = 192.6$ μ Hz



Helioseismická inverze

Vlastní problém $\omega^2 \vec{\xi} = L(\vec{\xi})$ středujeme:
$$\omega^2 = \frac{\int_V \vec{\xi}^* \cdot L(\vec{\xi}) \rho_0 dV}{\int_V \rho_0 \vec{\xi}^* \cdot \vec{\xi} dV}$$

Rozvoj $L(\vec{\xi}) = L_0(\vec{\xi}) + L_1(\vec{\xi})$ vede na
$$\frac{\delta \omega}{\omega} = \frac{1}{2I\omega} \int_V \vec{\xi}^* \cdot L_1(\vec{\xi}) \rho_0 dV$$

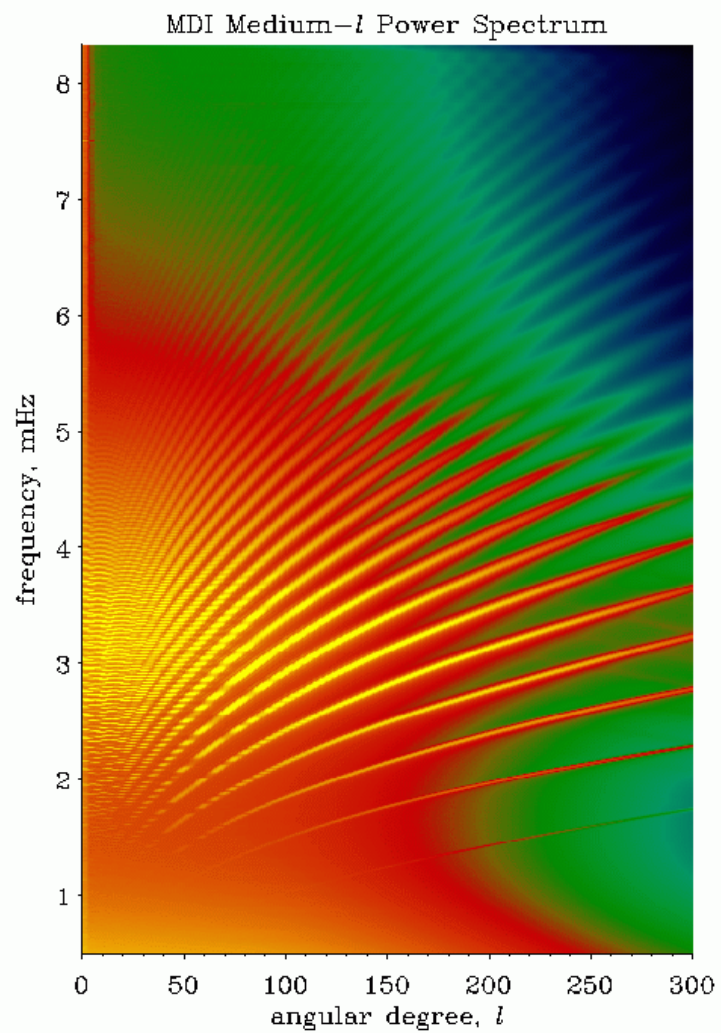
Explicitní formulace L_1 vede k rozštěpení výrazu na

$$\frac{\delta \omega^{(n,l)}}{\omega^{(n,l)}} = \int_0^R K_{\rho,\gamma}^{(n,l)} \frac{\delta \rho}{\rho} dr + \int_0^R K_{\gamma,\rho}^{(n,l)} \frac{\delta \gamma}{\gamma} dr$$

Seismická jádra K lze vypočítat ze slunečního modelu a vlastních ξ pro tento model.

Globální \times lokální

k- ω diagram



P-mody oscilací



P-mody oscilací



Ring-diagram lokální helioseismologie

k- ω diagram do (k_x, k_y, ω)

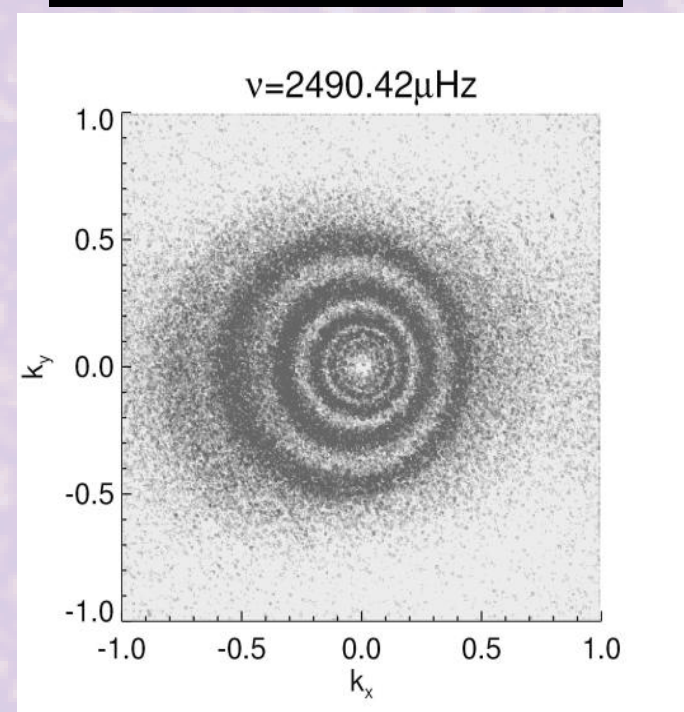
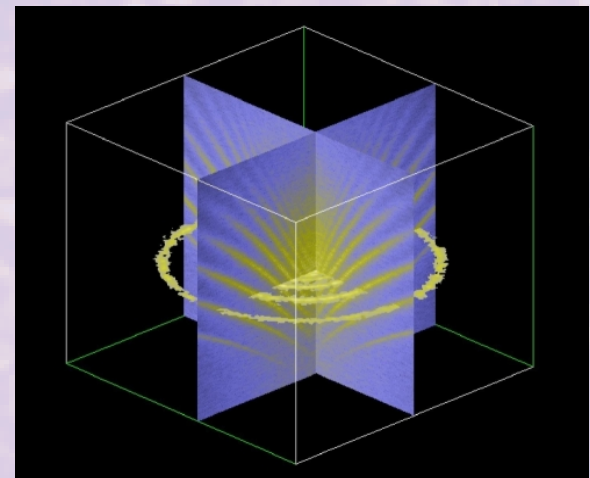
- Fit ringů s aproximací rovinné vlny

- Pro fixní k a nízká m :

$k=|\mathbf{k}|$, ψ =úhel(\mathbf{k}, \mathbf{x}):

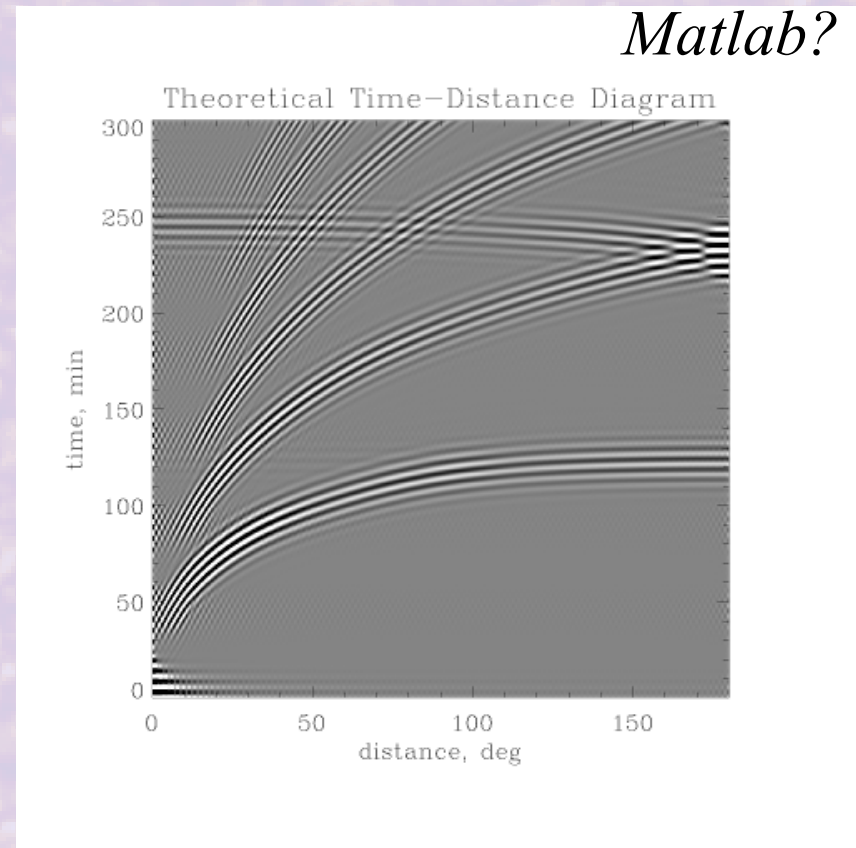
$$P_k(\Psi, \omega) = \sum a_m(\omega) \cos(m\Psi) + b_m(\omega) \sin(m\Psi)$$

$$P_{\text{fit}}(\Psi, \omega) = \frac{A}{1 + \frac{(\omega - \omega_0 - k u_x \cos \Psi - k u_y \sin \Psi)^2}{\gamma^2}}$$



- Měření cestovního času vlnového paketu mezi dvěma body
- Z k - ω diagramu pakety se stejnou fázovou rychlostí $v_f = \omega/k$
- Měří se kovariance oscilací v různých bodech pro různá zpoždění
- Travel-time ovlivněn poruchami nitra

Matlab?

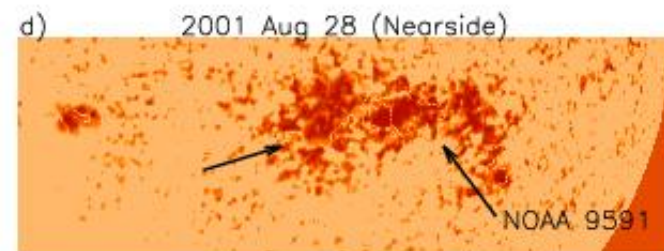
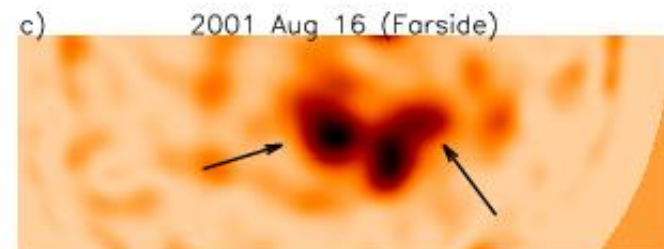
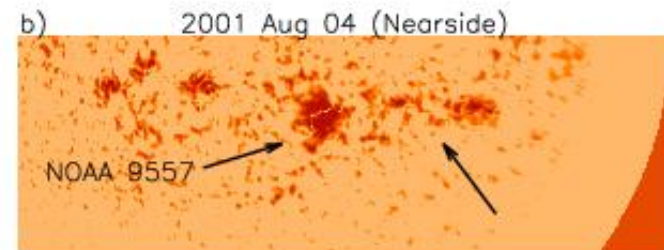
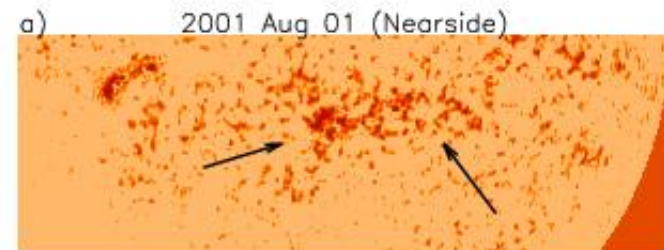
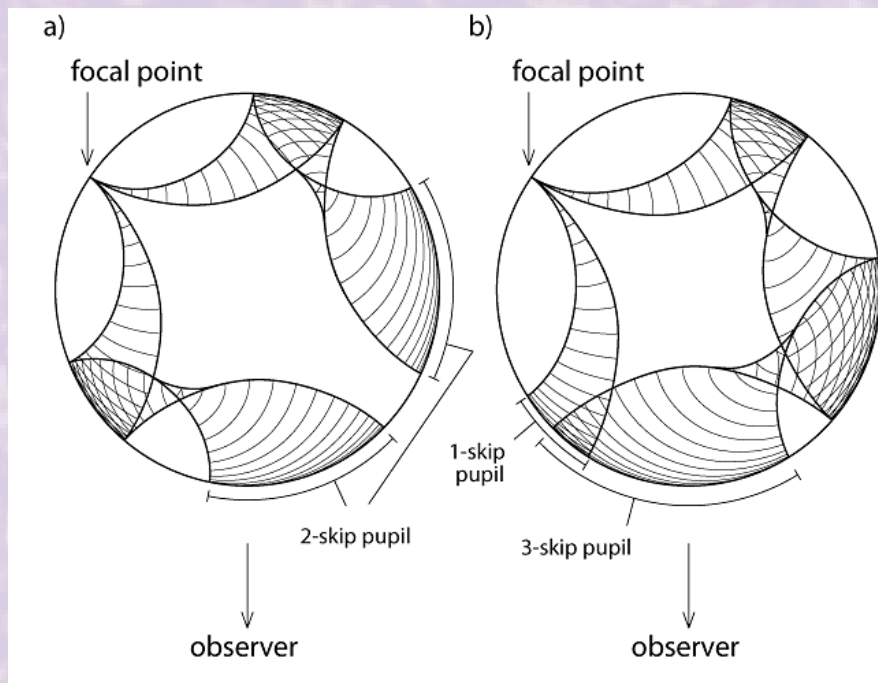


$$\delta \tau(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = - \int_{\Gamma} ds \left[\frac{\mathbf{n} \cdot \mathbf{u}}{c^2} + \frac{1}{v_p} \frac{\delta c}{c} + \frac{\delta \omega_c}{\omega_c} \frac{\omega_c^2 v_p}{\omega^2 c^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{c_A^2}{c^2} - \frac{(\mathbf{k} \cdot \mathbf{c}_A)^2}{k^2 c^2} \right) \right]$$

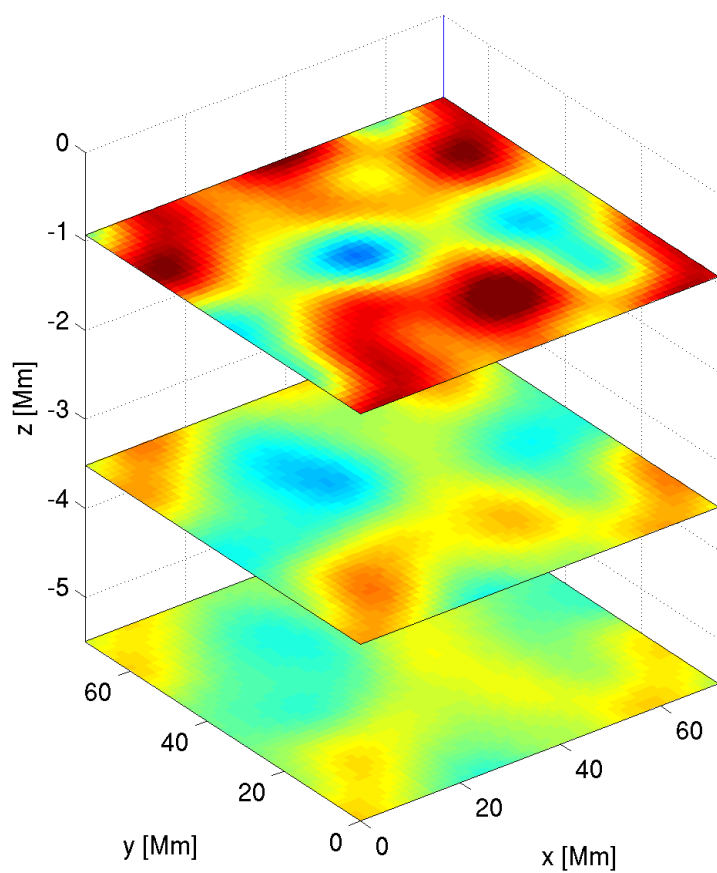
- Dnes rozšířená time-distance
- Nejen filtry fázové rychlosti, ale i jiné, v zásadě libovolné (např. filtrování hřbetů)
- Koncept geometrické optiky opouštěn, zahrnovány vlnové efekty
- Důraz na konzistenci mezi přímou a inverzní metodou
 - Zpracování dat se promítá do přímé úlohy
- Zahrnuje se plná informace o vlastnostech náhodného šumu (kovarianční matice, z modelu nebo z měření) → přesnost měření
- Požadavek na kontrolu nad biasem a splnění předpokladů (je lokální skutečně lokální?) → znalost zhlazování a přeslechů
- Zvýšený důraz na validaci metody a měření helioseismických veličin

Helioseismická holografie

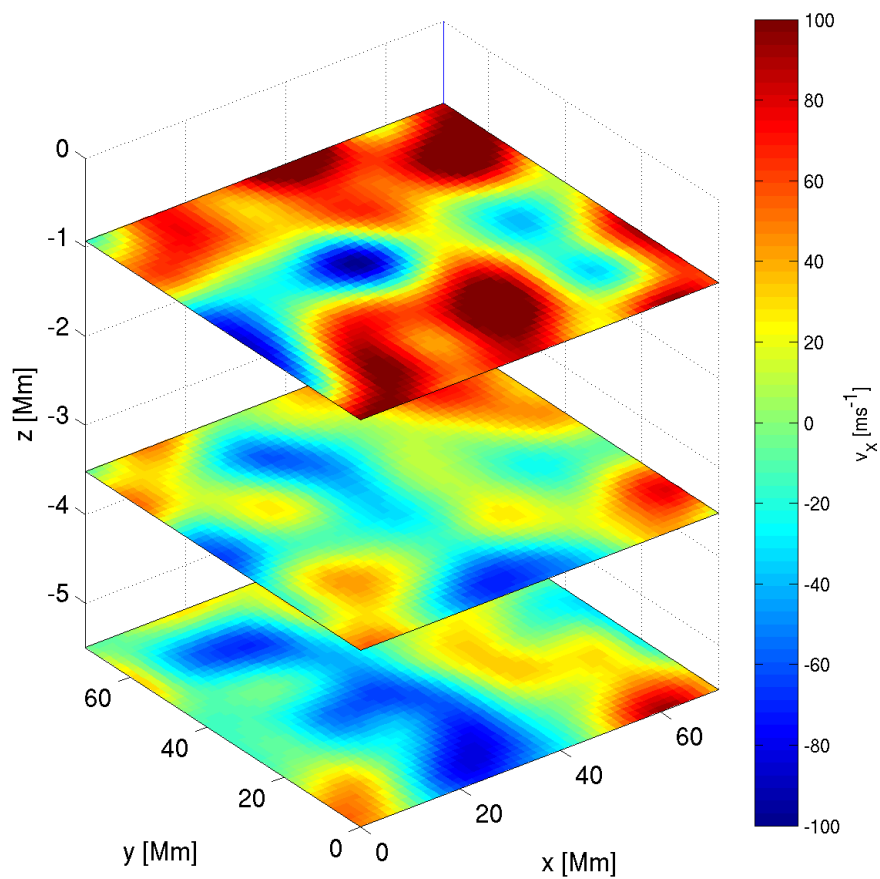
- Ekvivalent time-distance metody
- Mapování poruch na odvrácené straně Slunce
- 2-2 nebo 1-3?



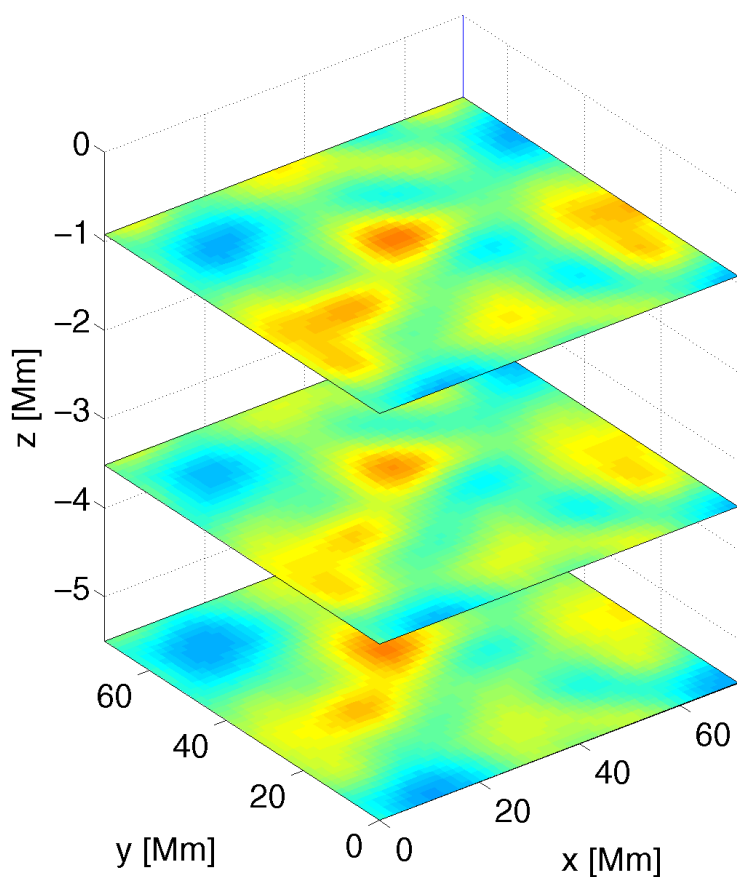
400 Mm



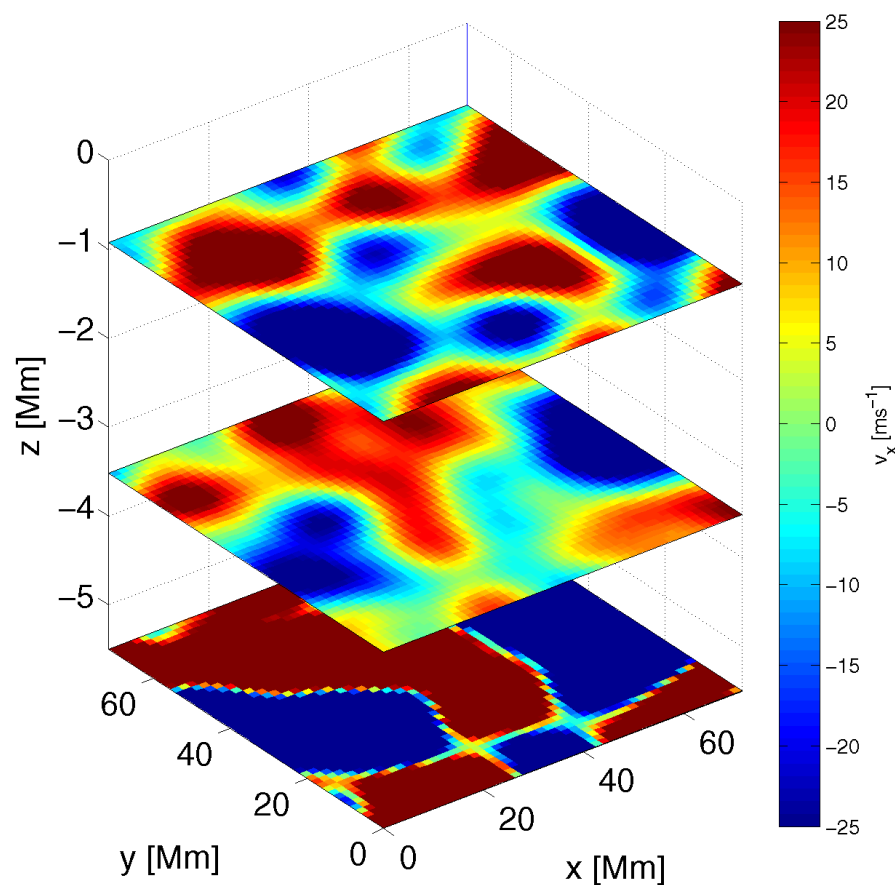
targeted



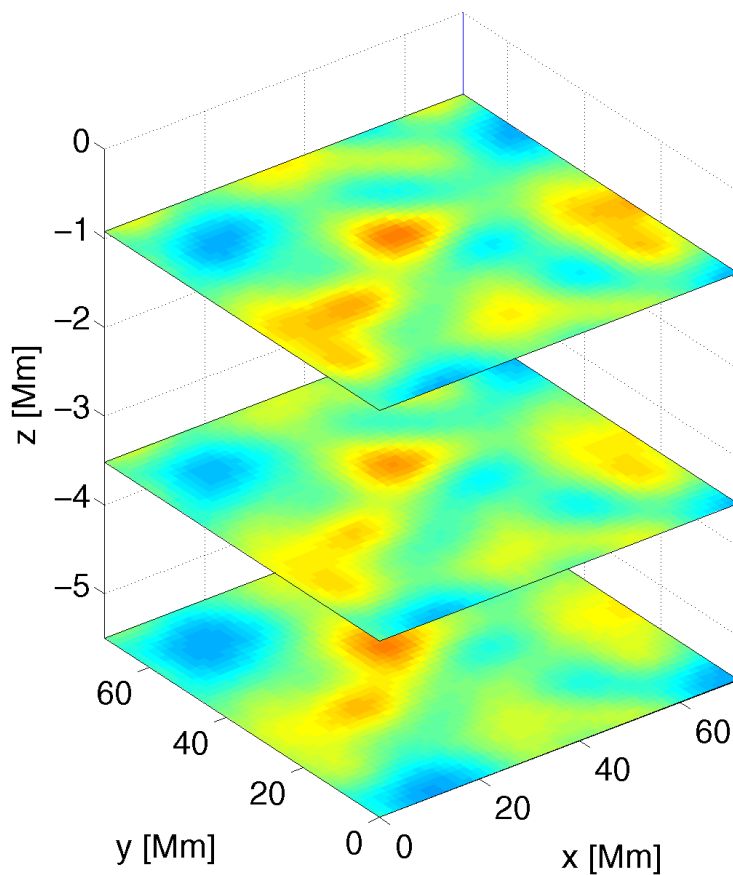
inversion



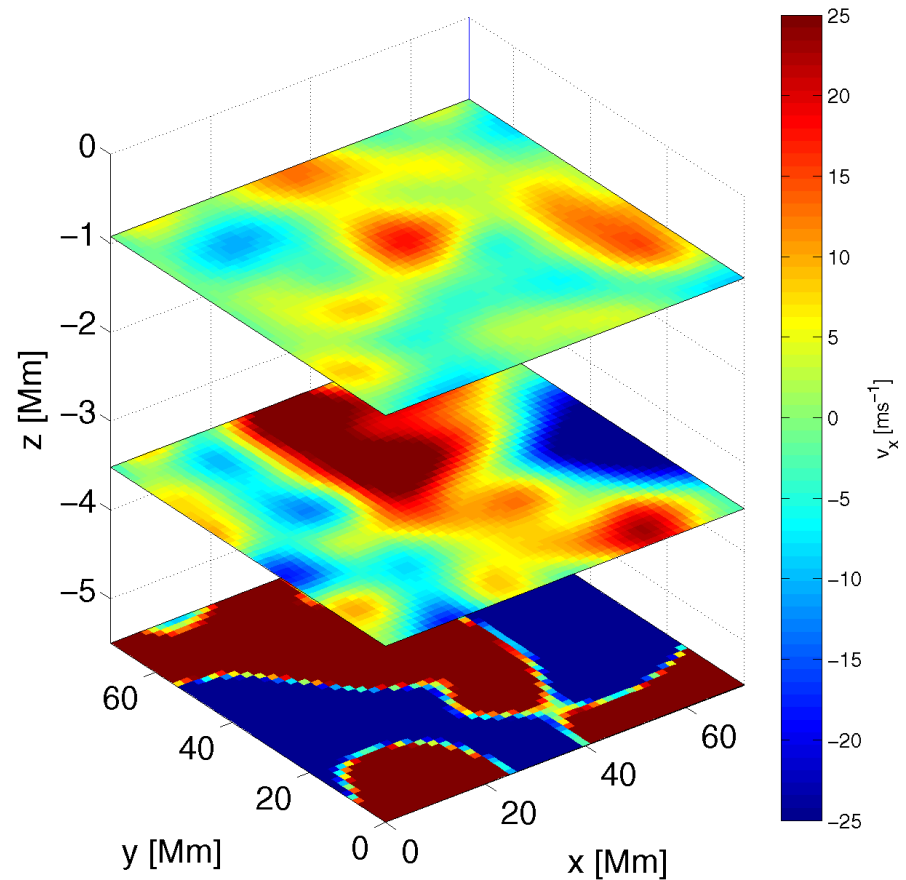
targeted



inversion

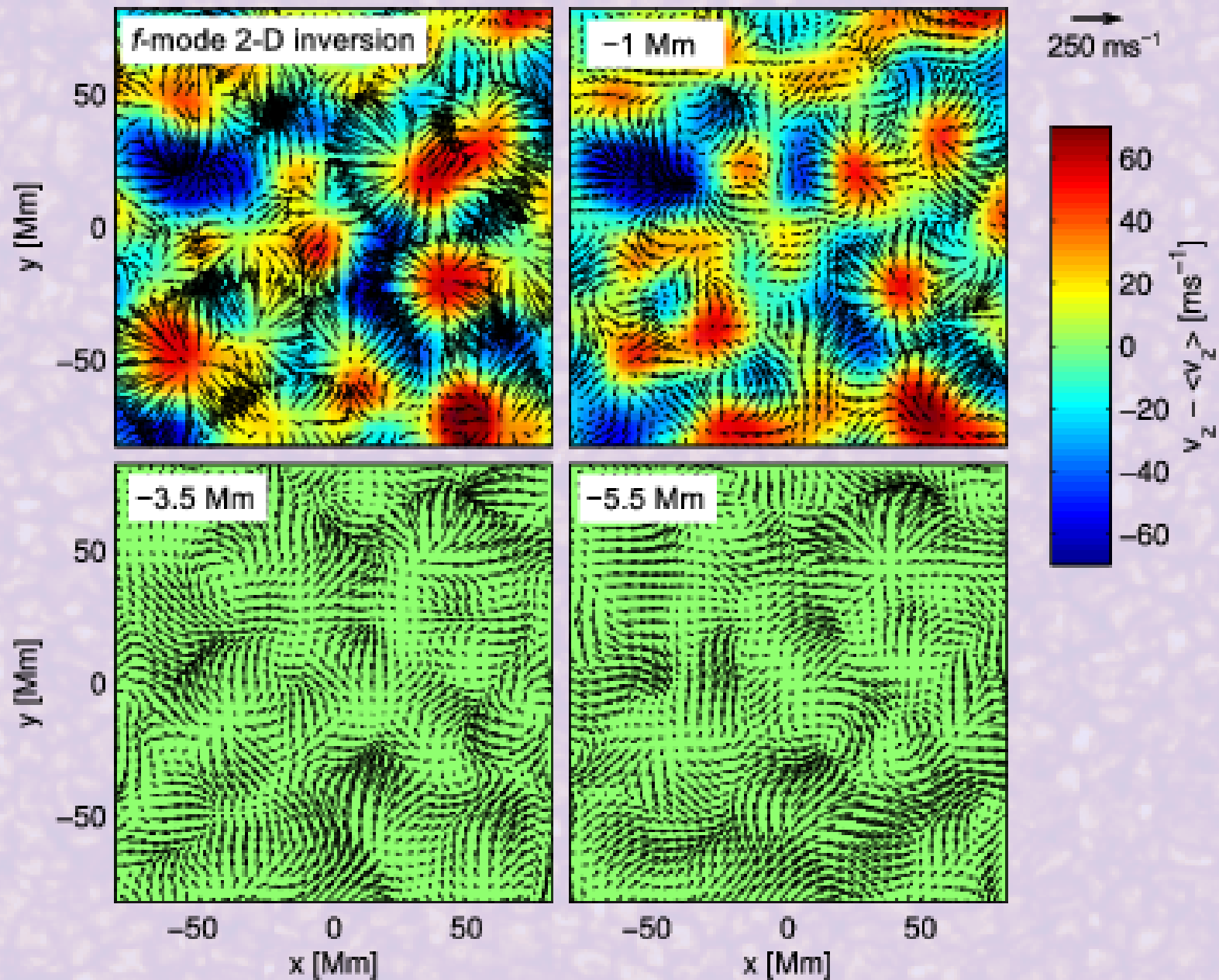


targeted



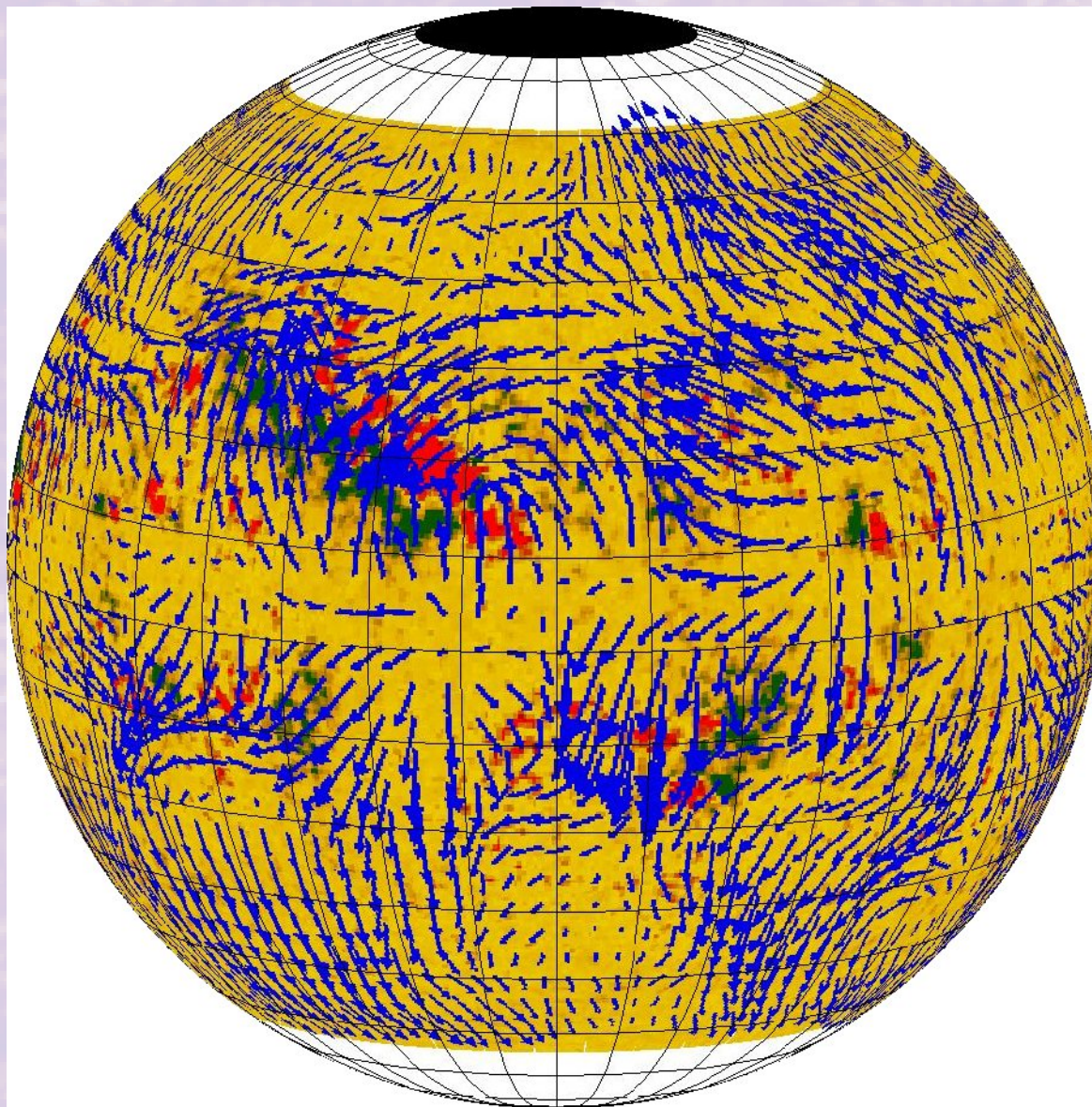
*inversion with minimized
cross-talk*

Supergranulace jinou metodou

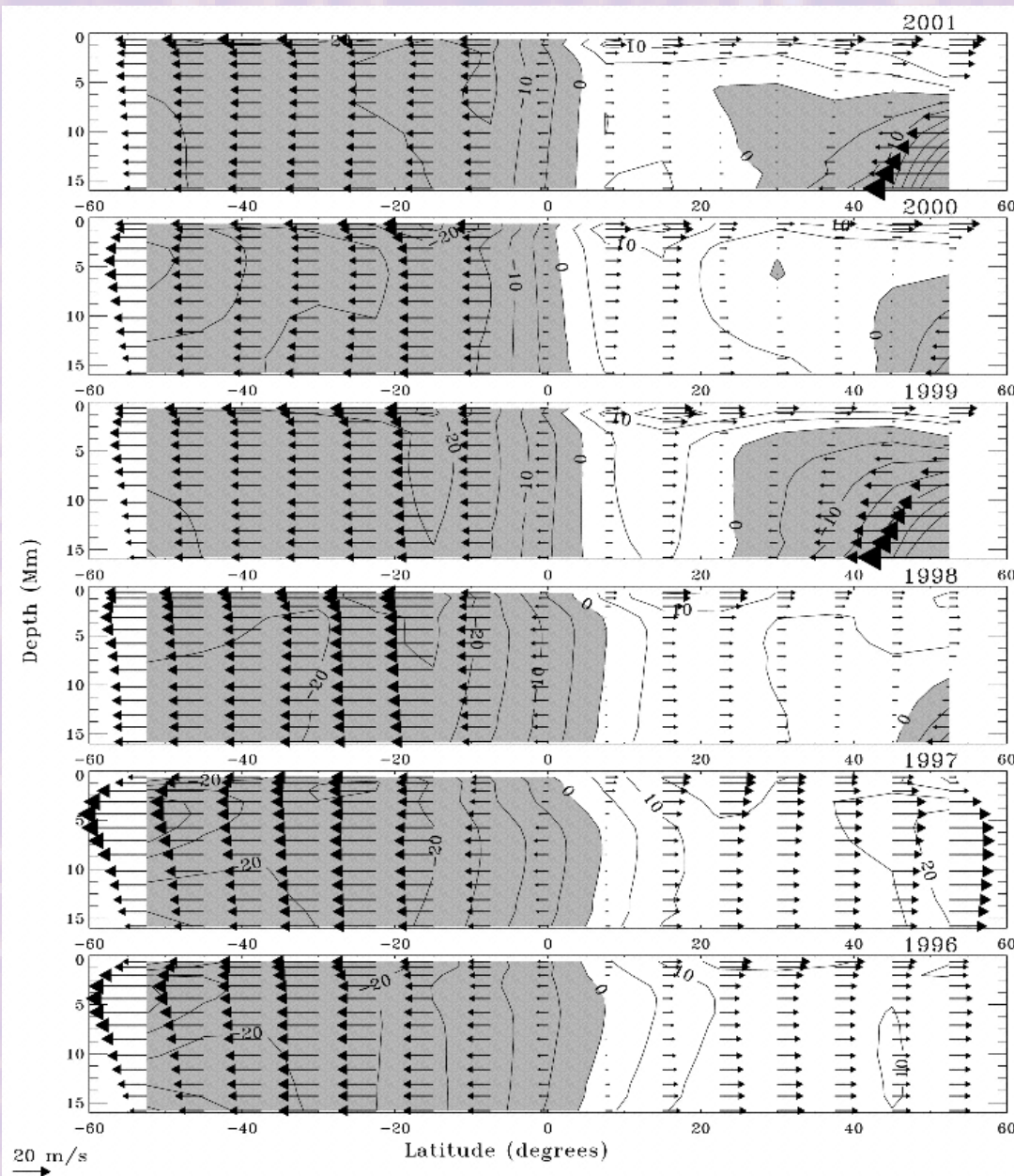


Podpovrchové počasí (sub-surface weather, SSW)

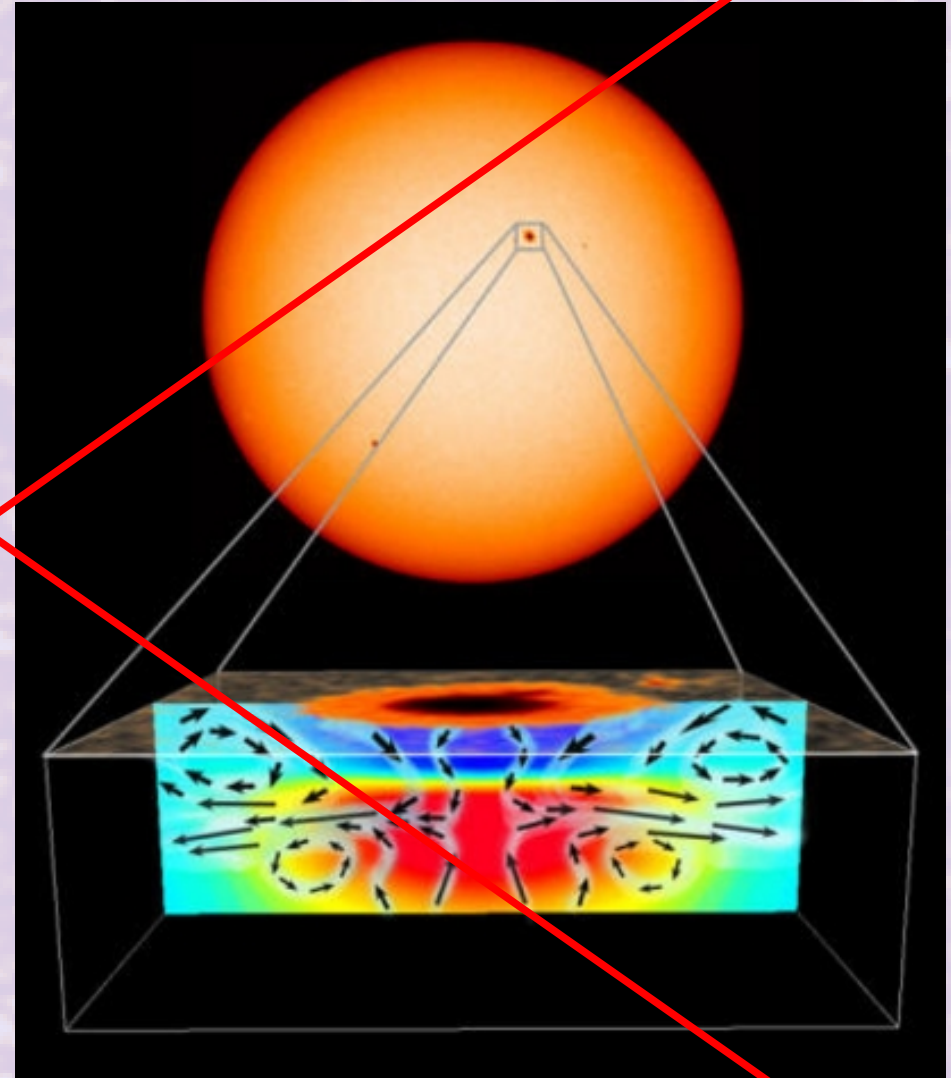
- Reziduální velkorozměrové toky



Meridionální proudění



- Inverze pro skvrnu z 20. června 1998
- Konvergentní toky udržující skvrnu stabilní
- Skvrna = mělký útvar
- Jediné pozorování lehce preferující svazkový model sluneční skvrny



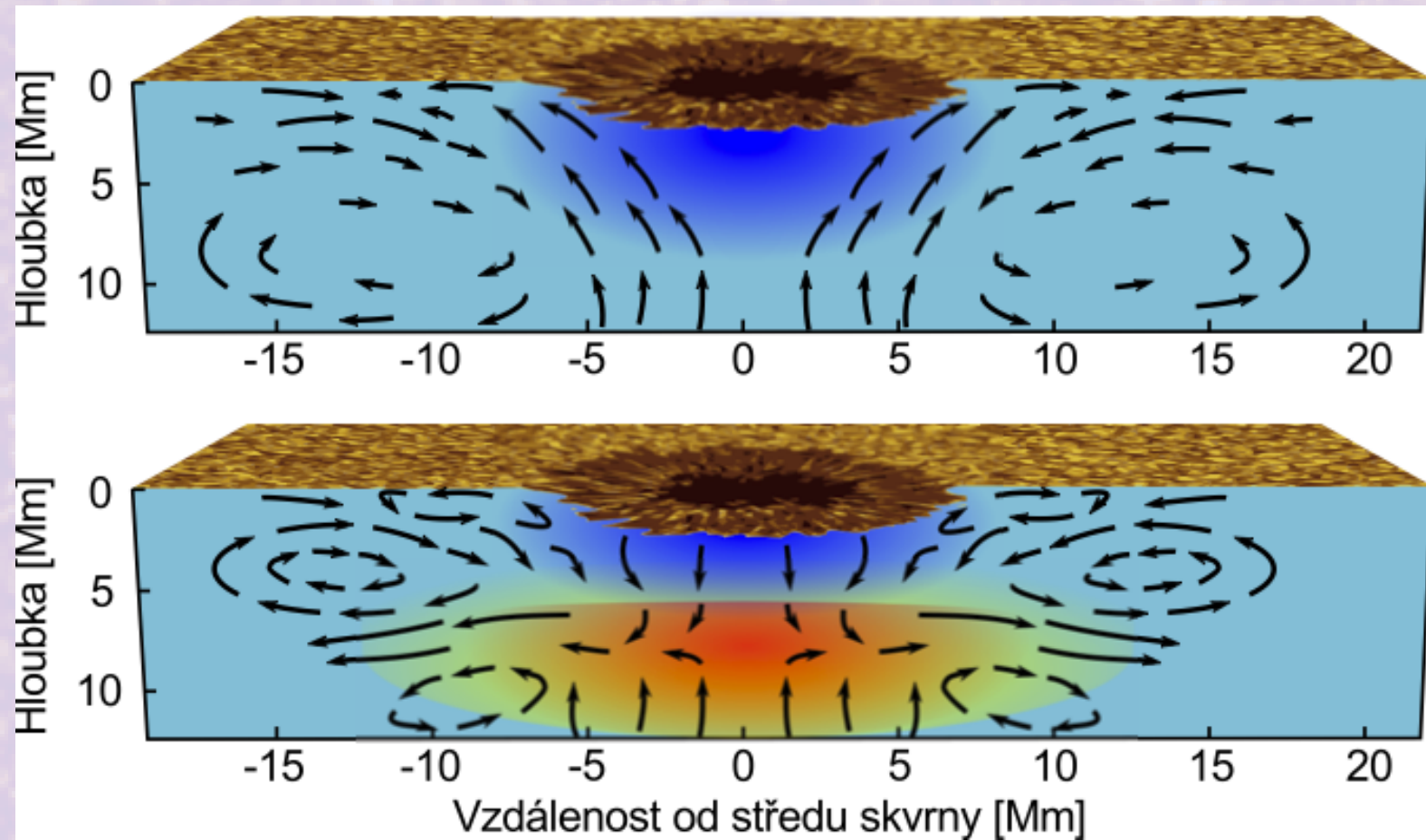
Pod skvrnou (II)



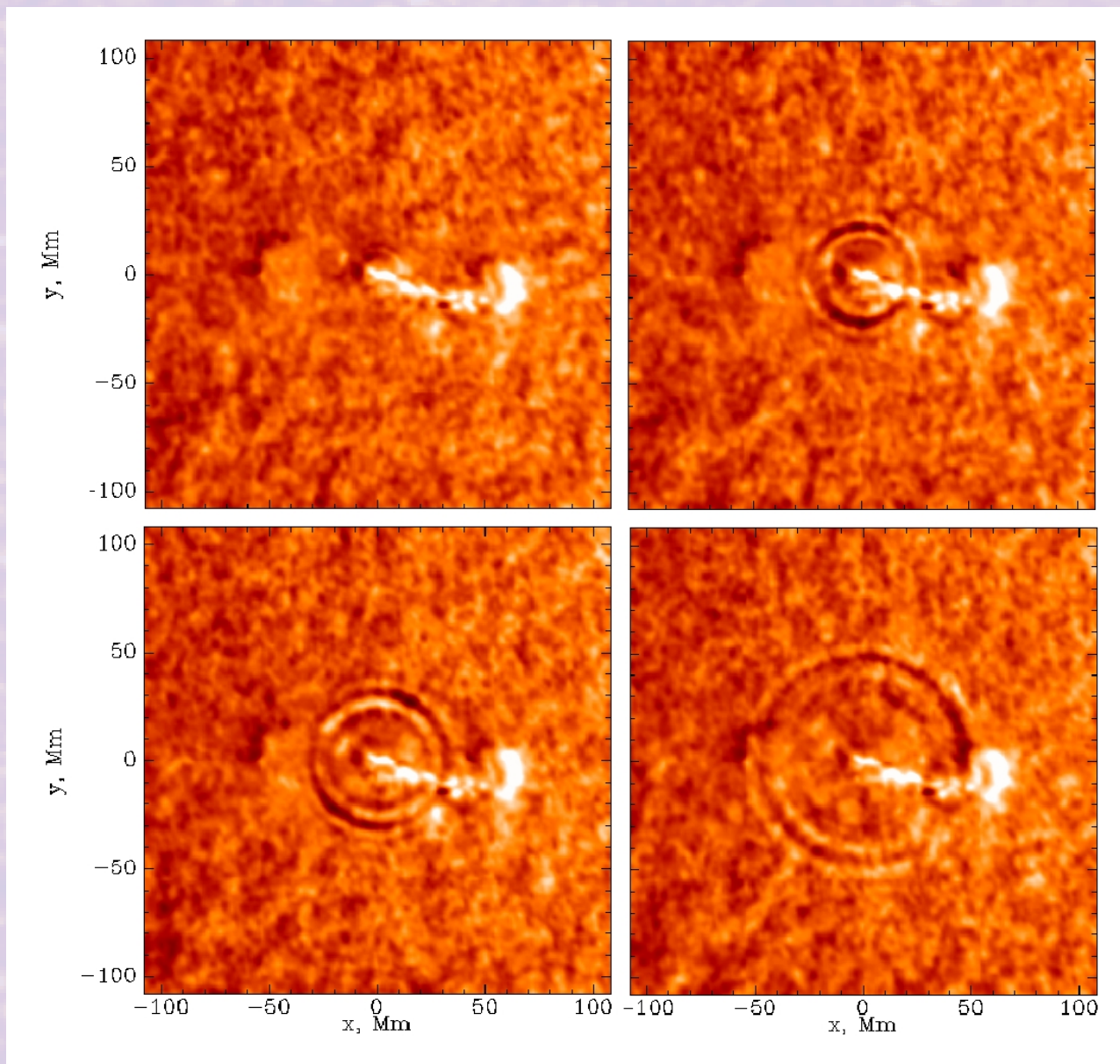
Pod skvrnou (III)



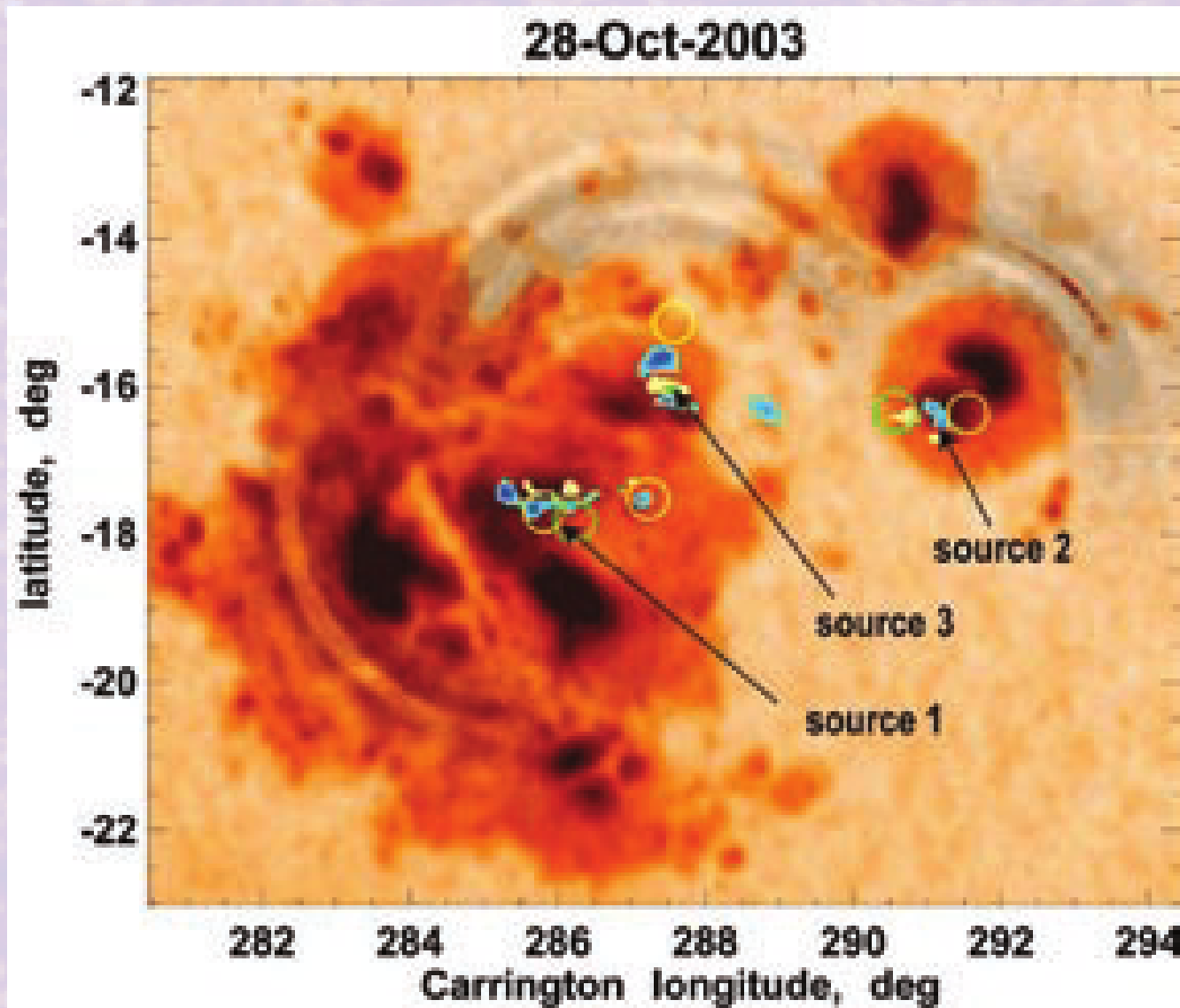
Pod skvrnou?



Sluncetřesení



Indukované oscilace



Oscilace indukované erupcí

