

Helioseismologie

Michal Švanda
Sluneční fyzika LS 2014/2015

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

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

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

- f -mod

- $\Delta P = 0$

$$\omega^2 = k_h g$$

- Bod obratu

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

P-mody oscilací

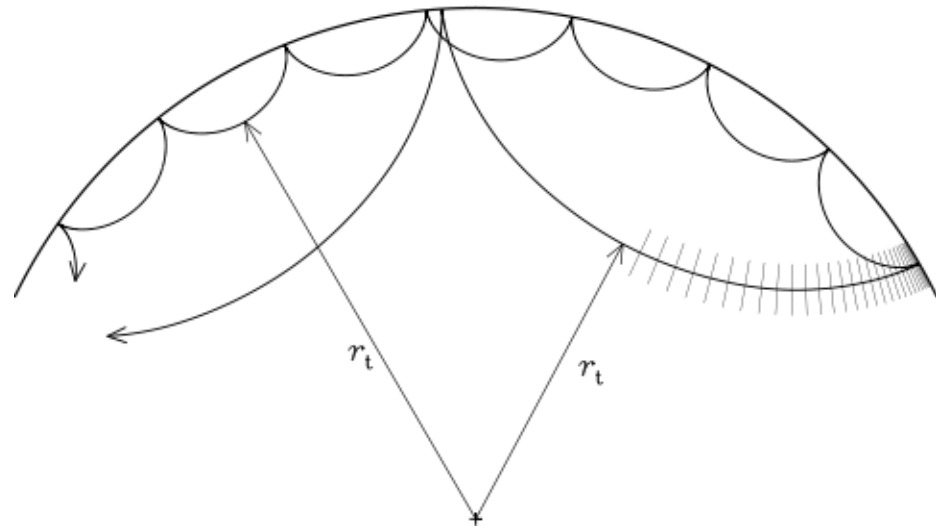


P-mody oscilací

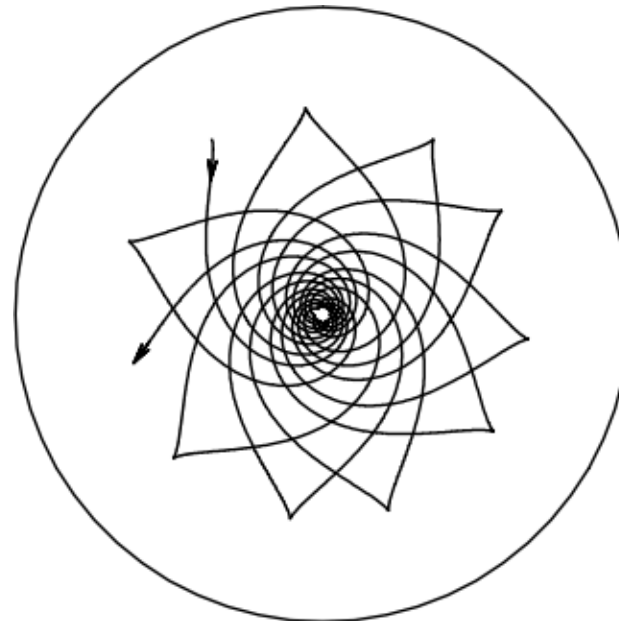


Trajektorie pro p/g mody

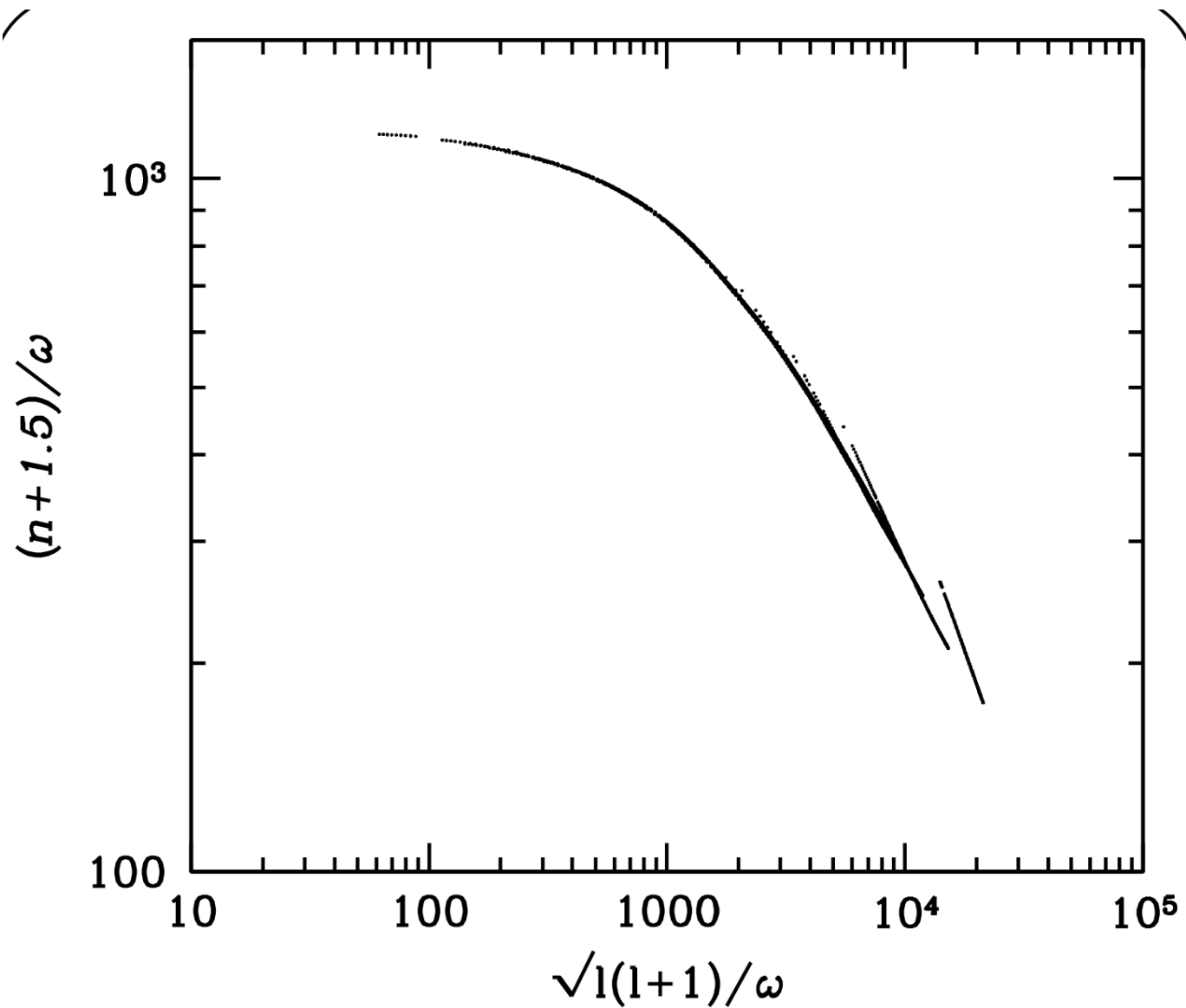
● P-mody $l = 30$ a $l = 100$,



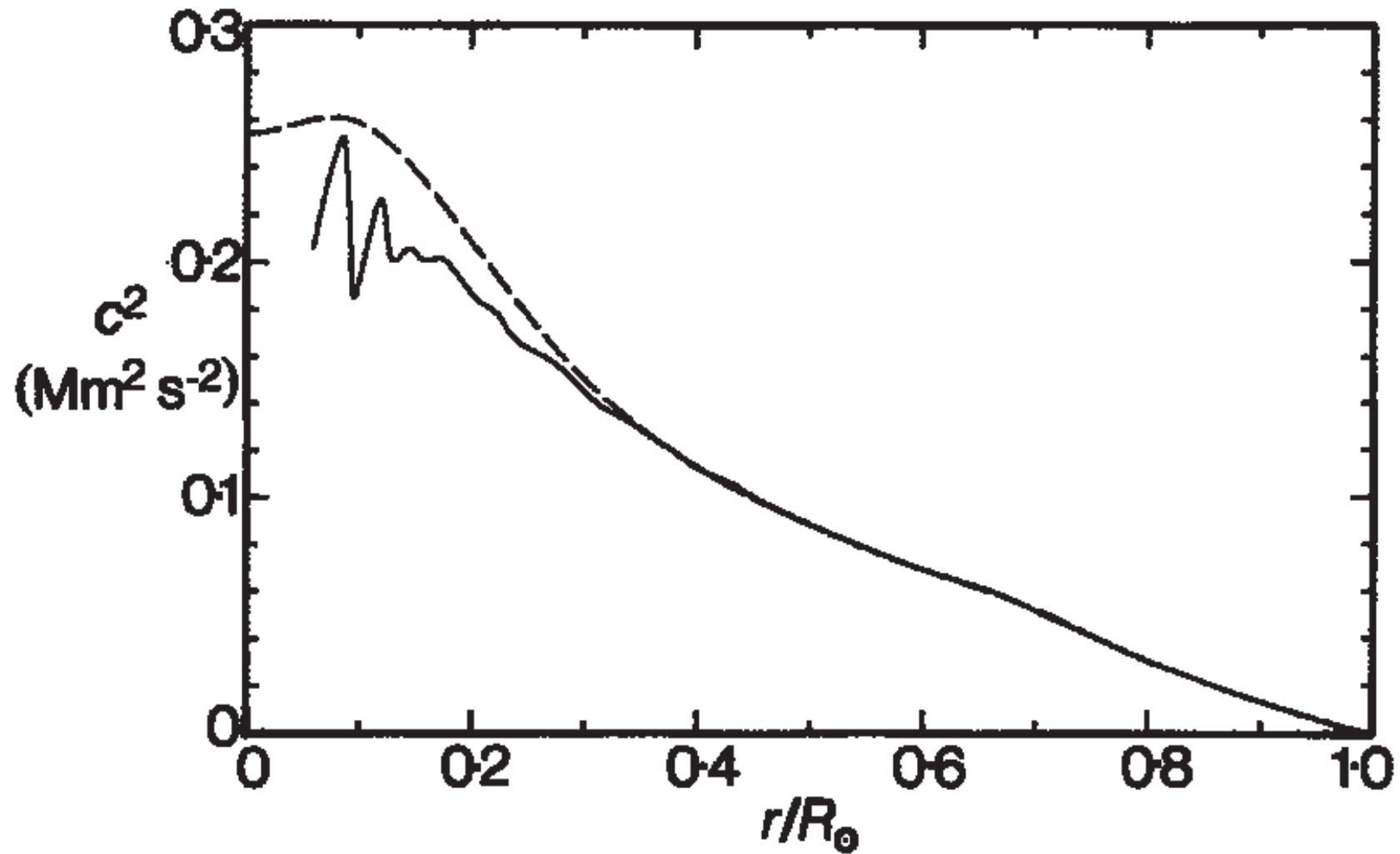
G-mod $l = 5$,
 $\nu = 192.6 \mu\text{Hz}$



Duvallův zákon



Asymptotická inverze c



Ring-diagram lokální helioseismologie

▣ k- ω diagram do (k_x, k_y, ω)

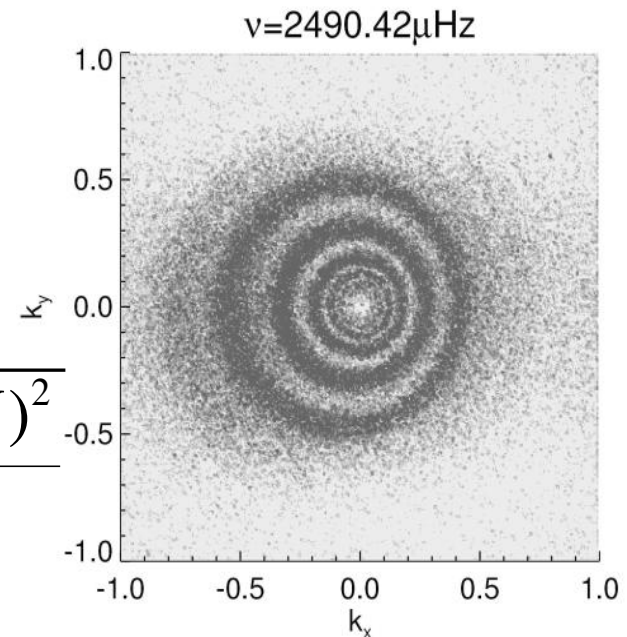
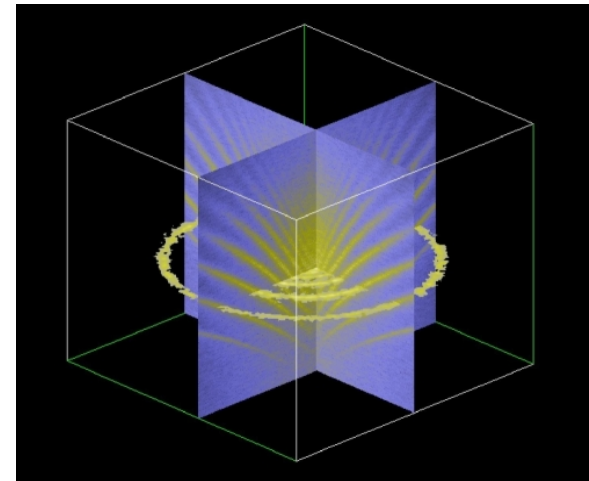
● Fit ringů s aproximací rovinné vlny

● Pro fixní k a nízká m :

▣ $k=|\mathbf{k}|$, $\psi=\text{úhel}(\mathbf{k}, \mathbf{x})$:

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

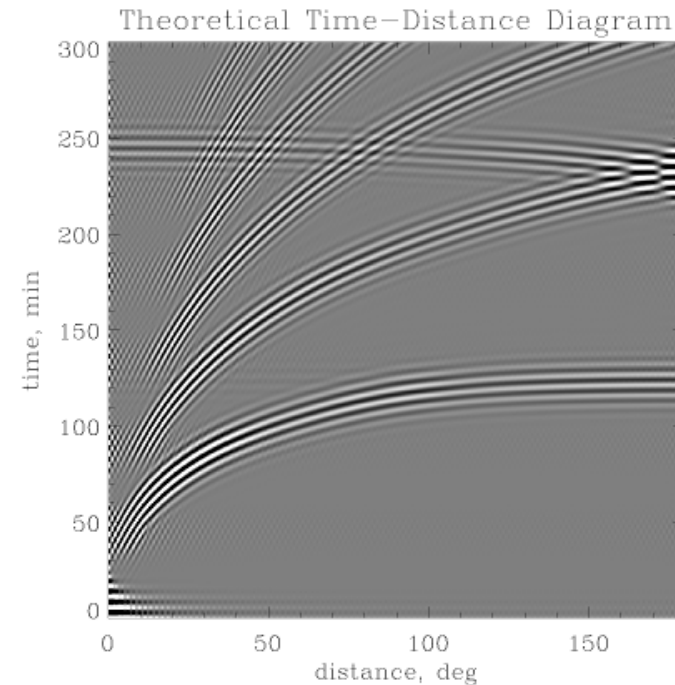
$$P_{fit}(\Psi, \omega) = \frac{A}{1 + \frac{(\omega - \omega_0 - k u_x \cos \Psi - k u_y \sin \Psi)^2}{\gamma^2}}$$



Time-distance

- 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, fituje se travel-time

Matlab?



$$\tau(x_1, x_2) = - \int ds \left[\frac{n \cdot u}{c^2} + \frac{1}{v_p} \frac{\delta c}{c} + \frac{\delta \omega_c}{\omega_c} \frac{\omega_c^2 v_p}{\omega^2 c^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{c_A^2}{c^2} - \frac{(k \cdot c_A)^2}{k^2 c^2} \right) \right]$$

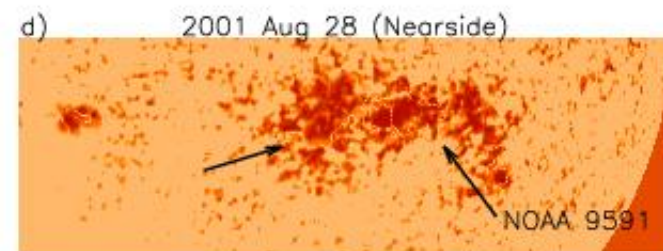
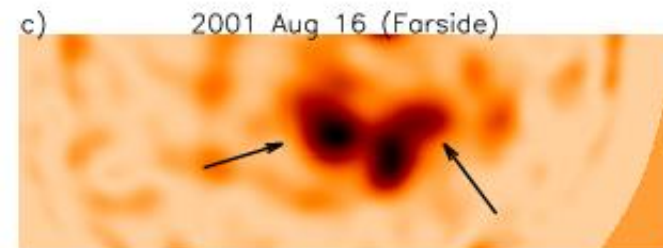
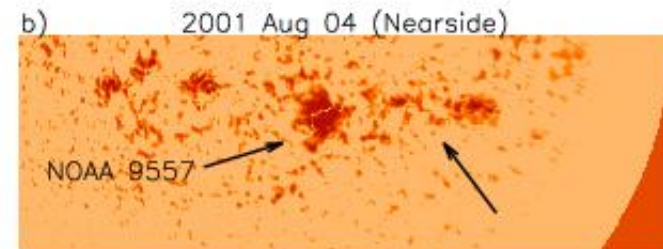
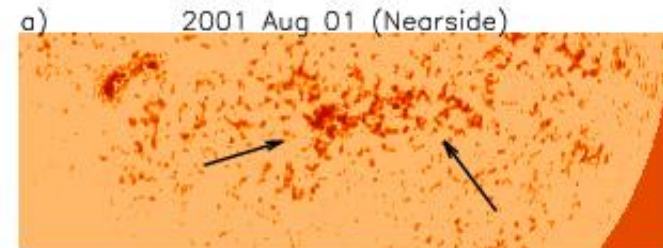
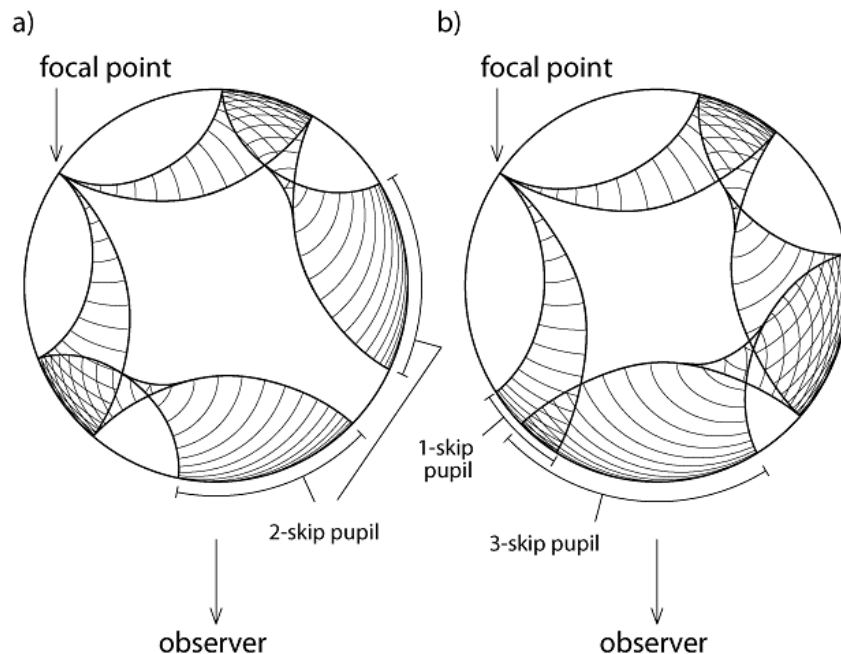
$$\delta \tau^a(\mathbf{r}) = \sum_{\alpha} \int_{-\infty}^{\infty} d^2 \mathbf{r}' dz K_{\alpha}^a(\mathbf{r}' - \mathbf{r}; z) \delta q_{\alpha}(\mathbf{r}'; z) + n^a(\mathbf{r})$$

Time-distance II

- 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

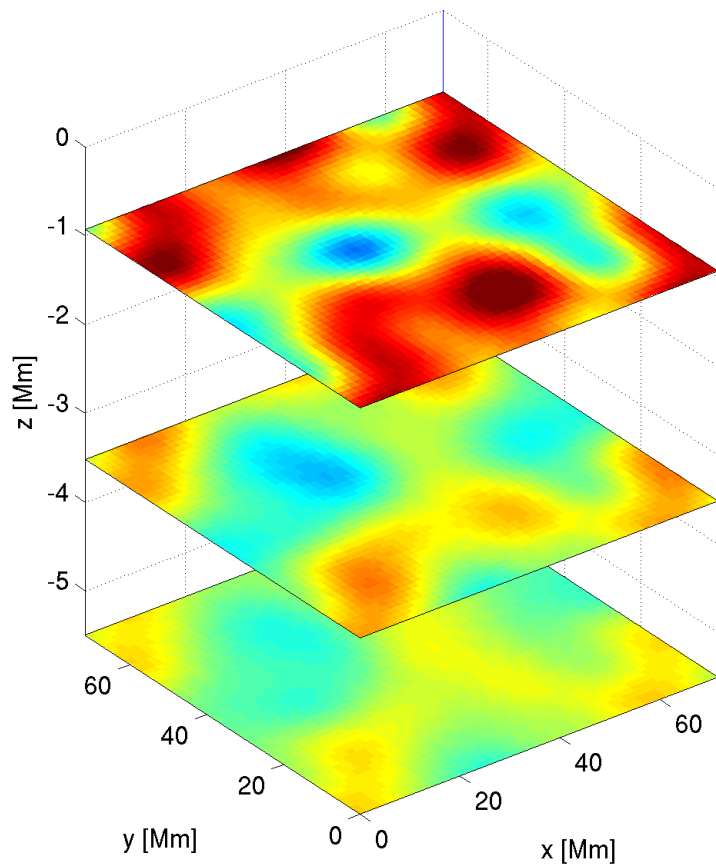
Helioseismická holografie

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

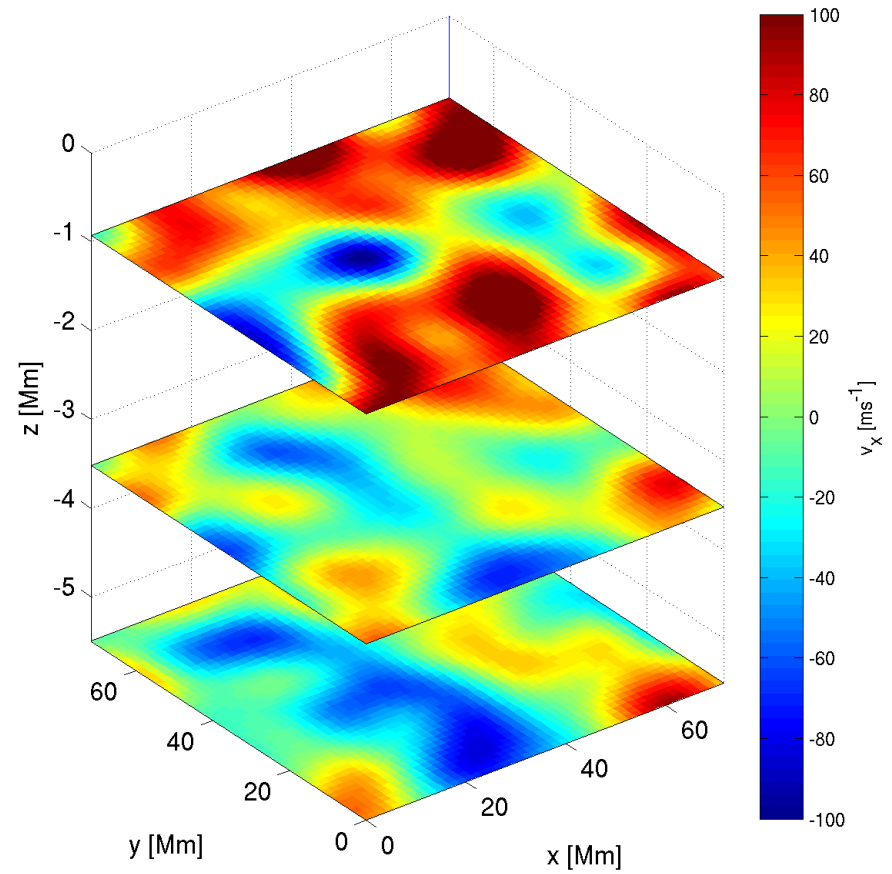


400 Mm

Validace (I)

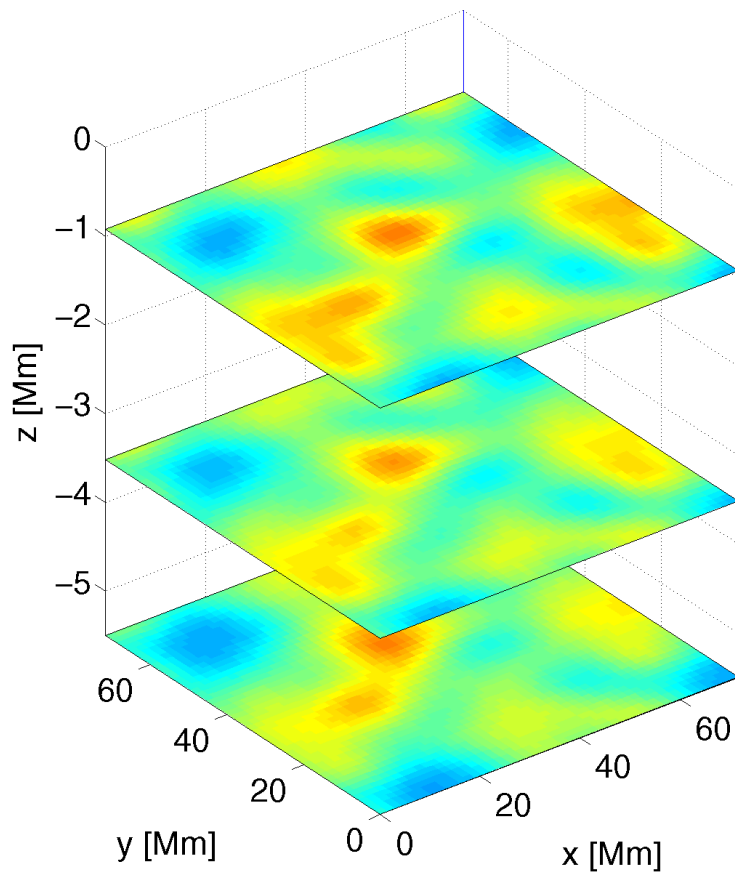


targeted

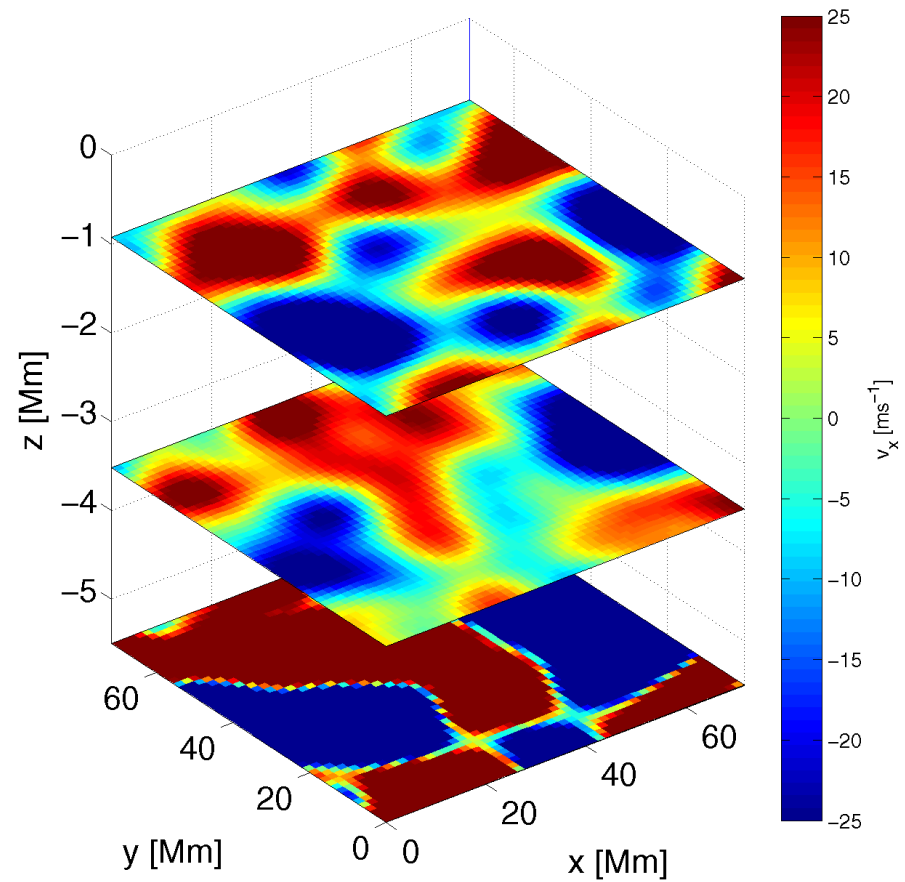


inversion

Validace (II)

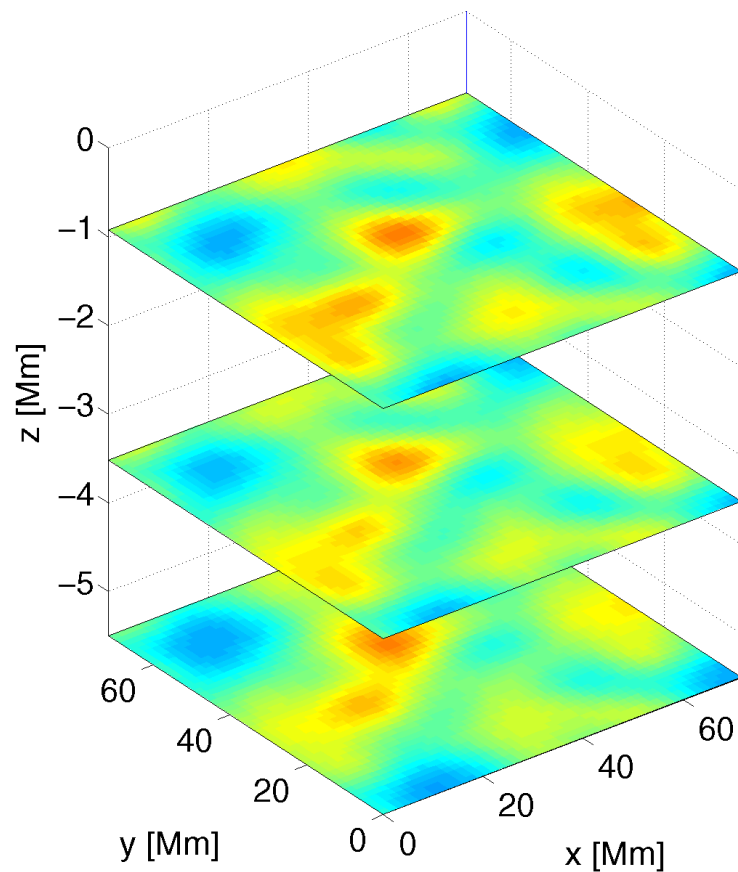


targeted

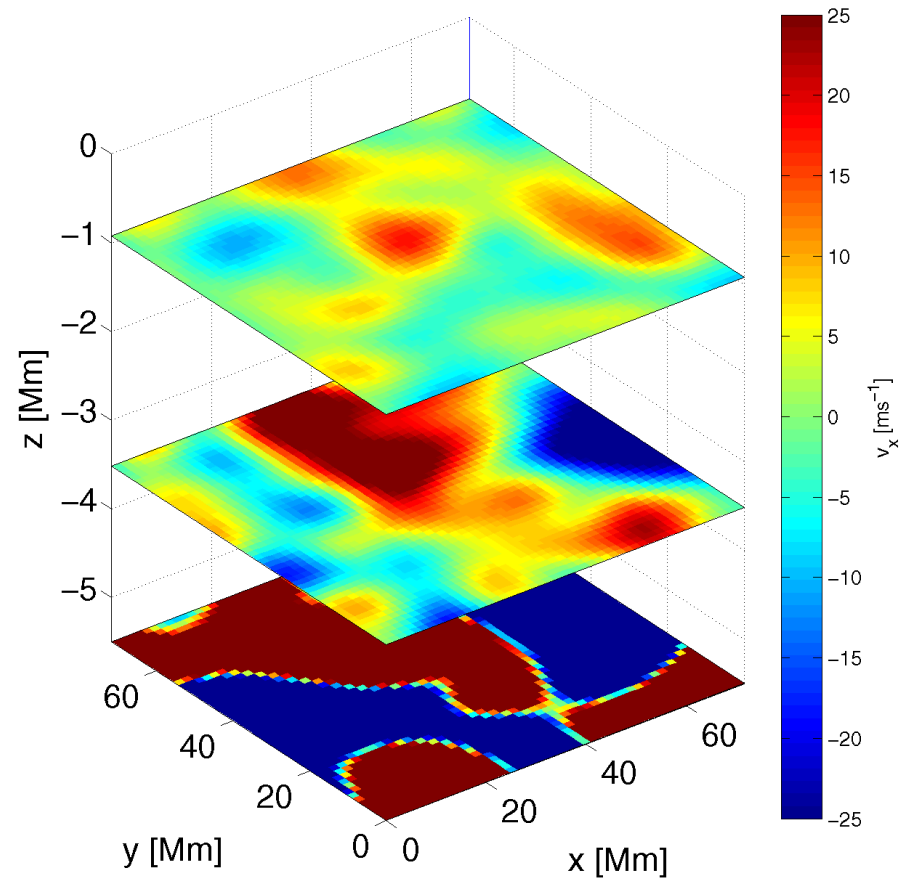


inversion

Validace (III)

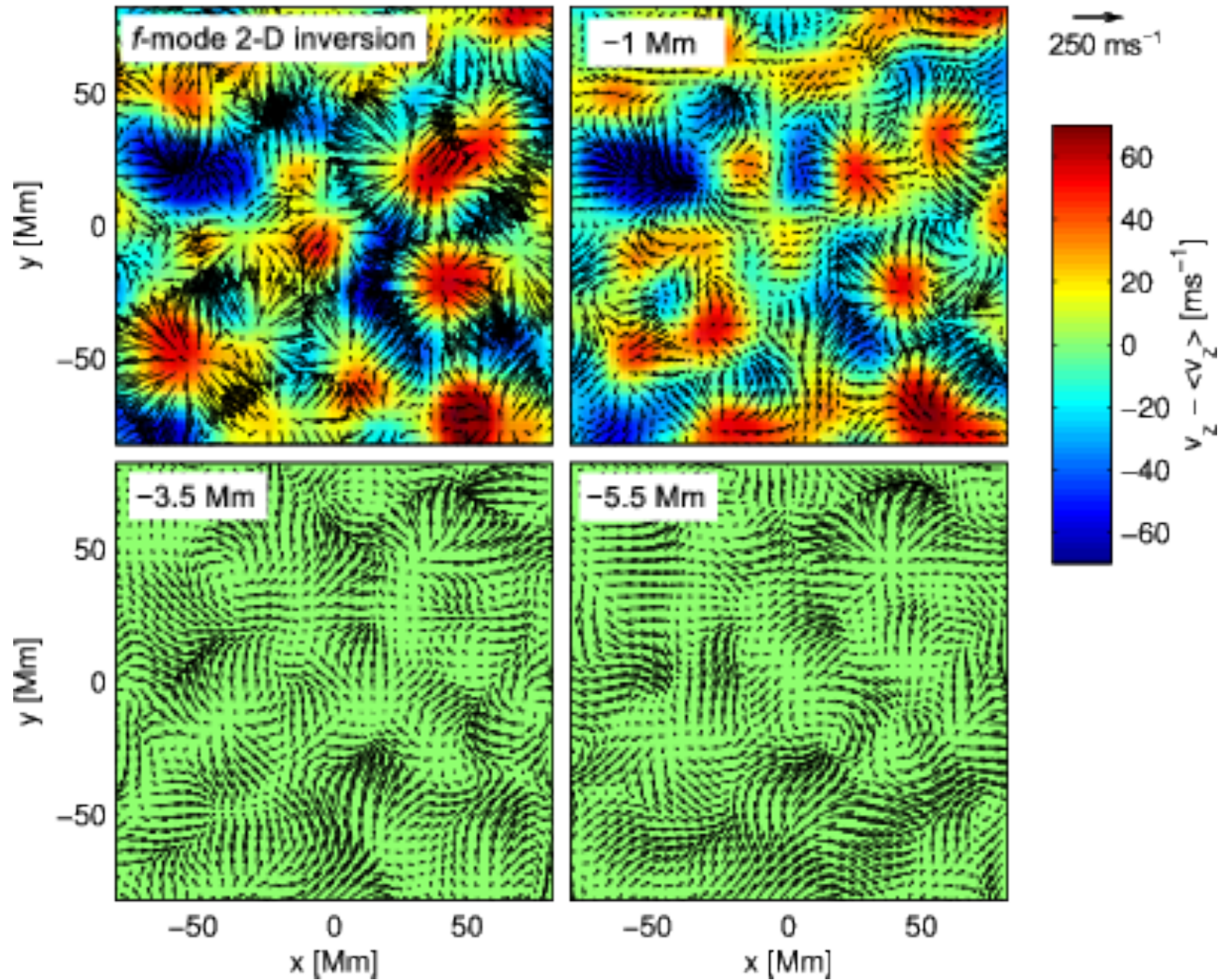


targeted



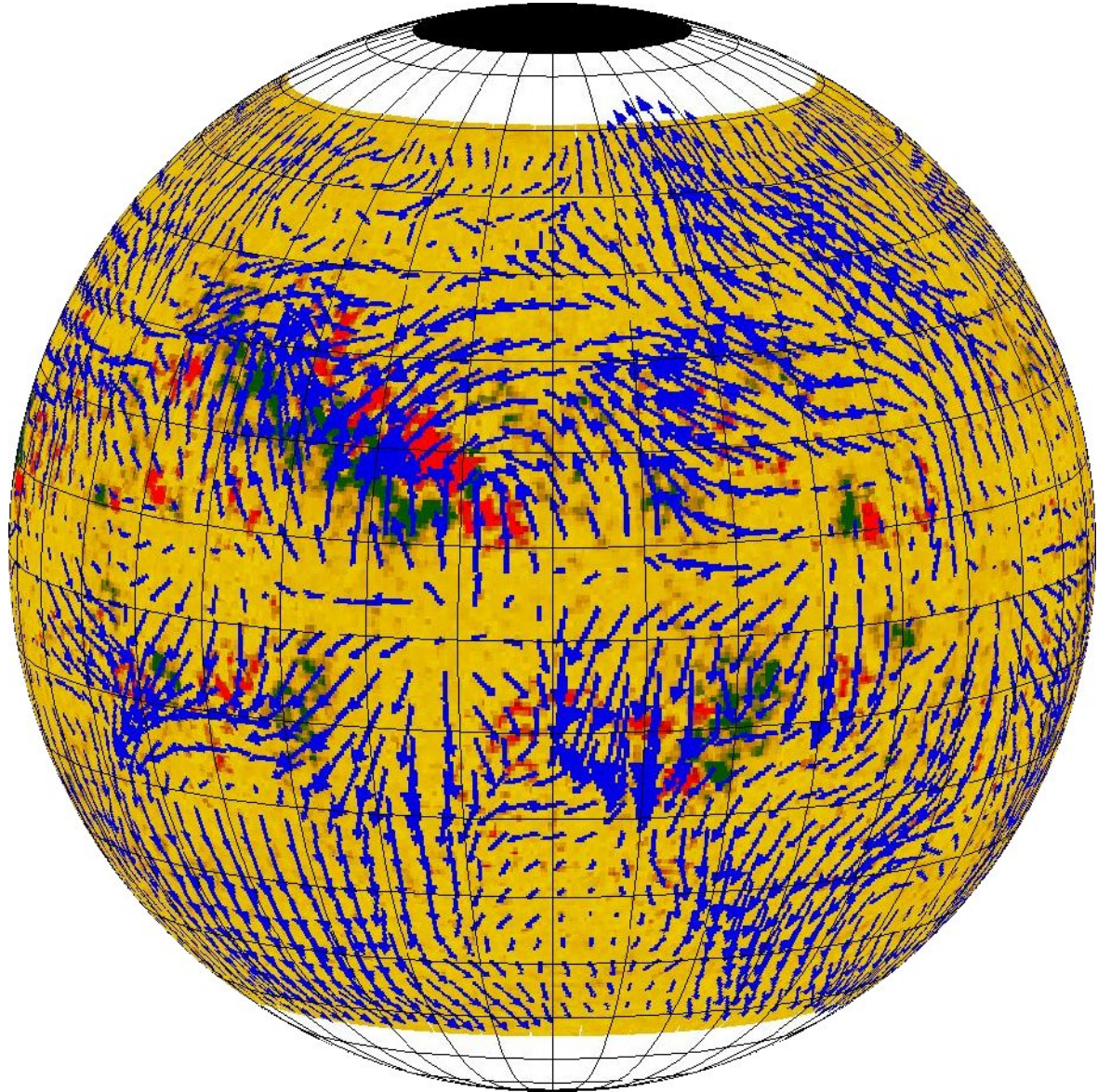
*inversion with minimized
cross-talk*

Supergranulace jinou metodu



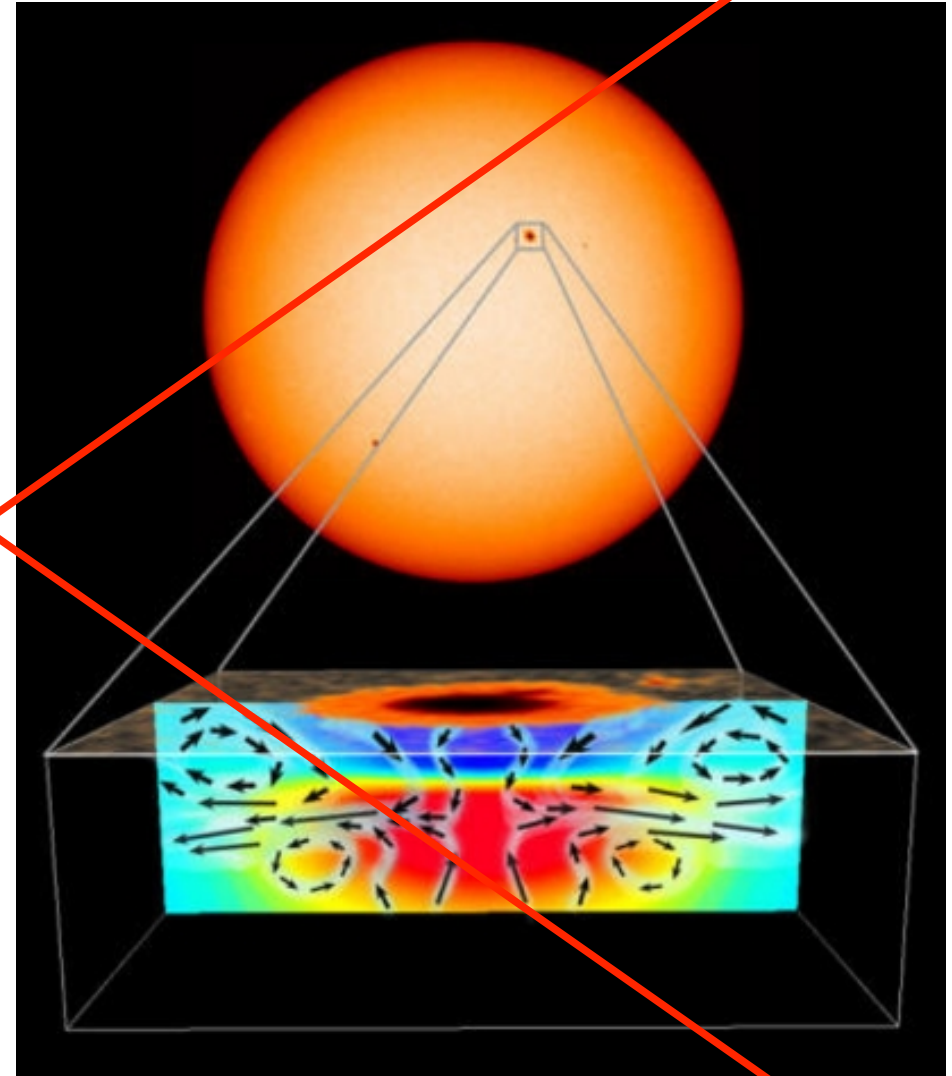
Podpovrchové počasí (sub-surface weather, SSW)

- Reziduální velkorozměrové toky

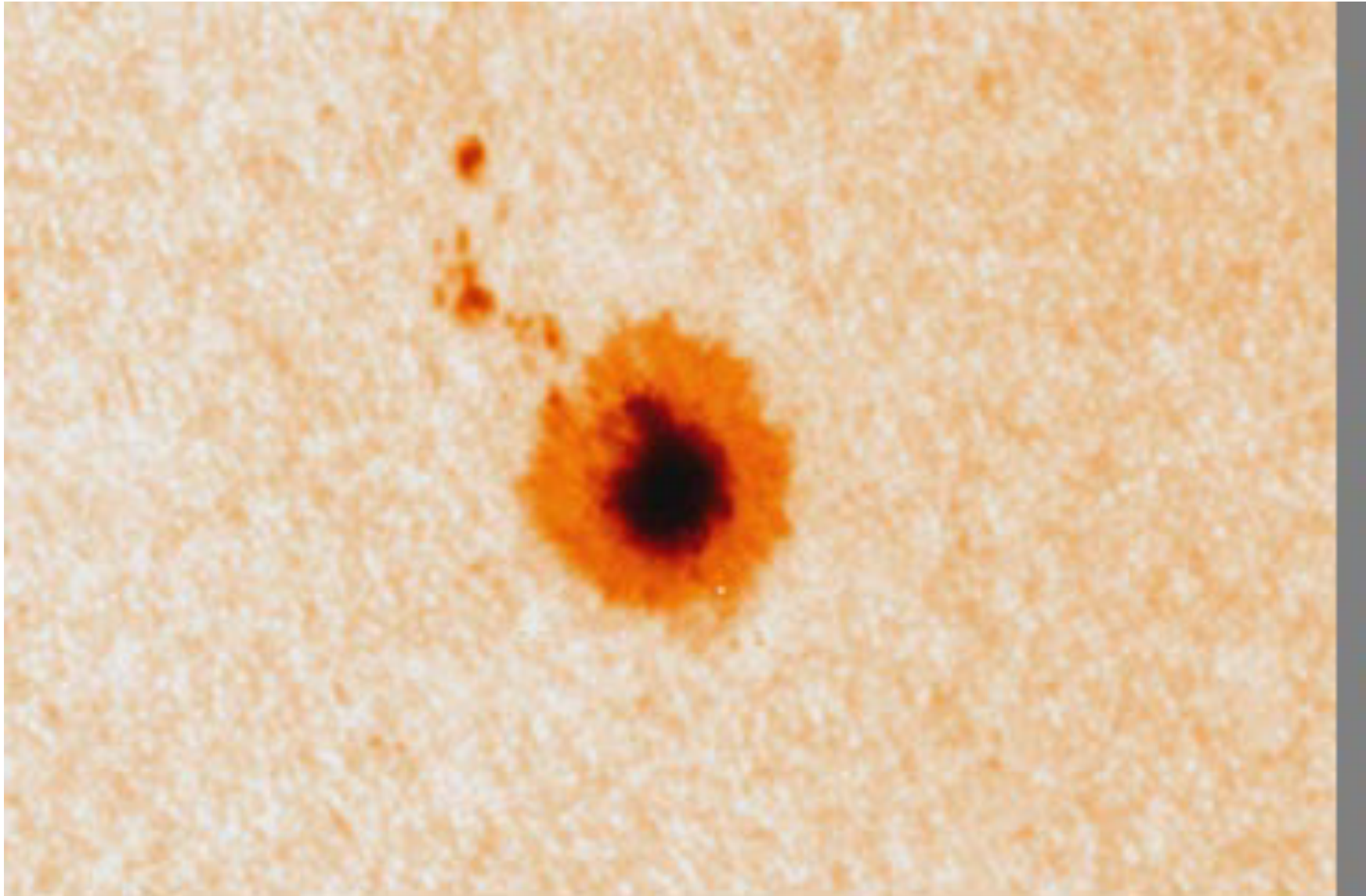


Pod skvrnou

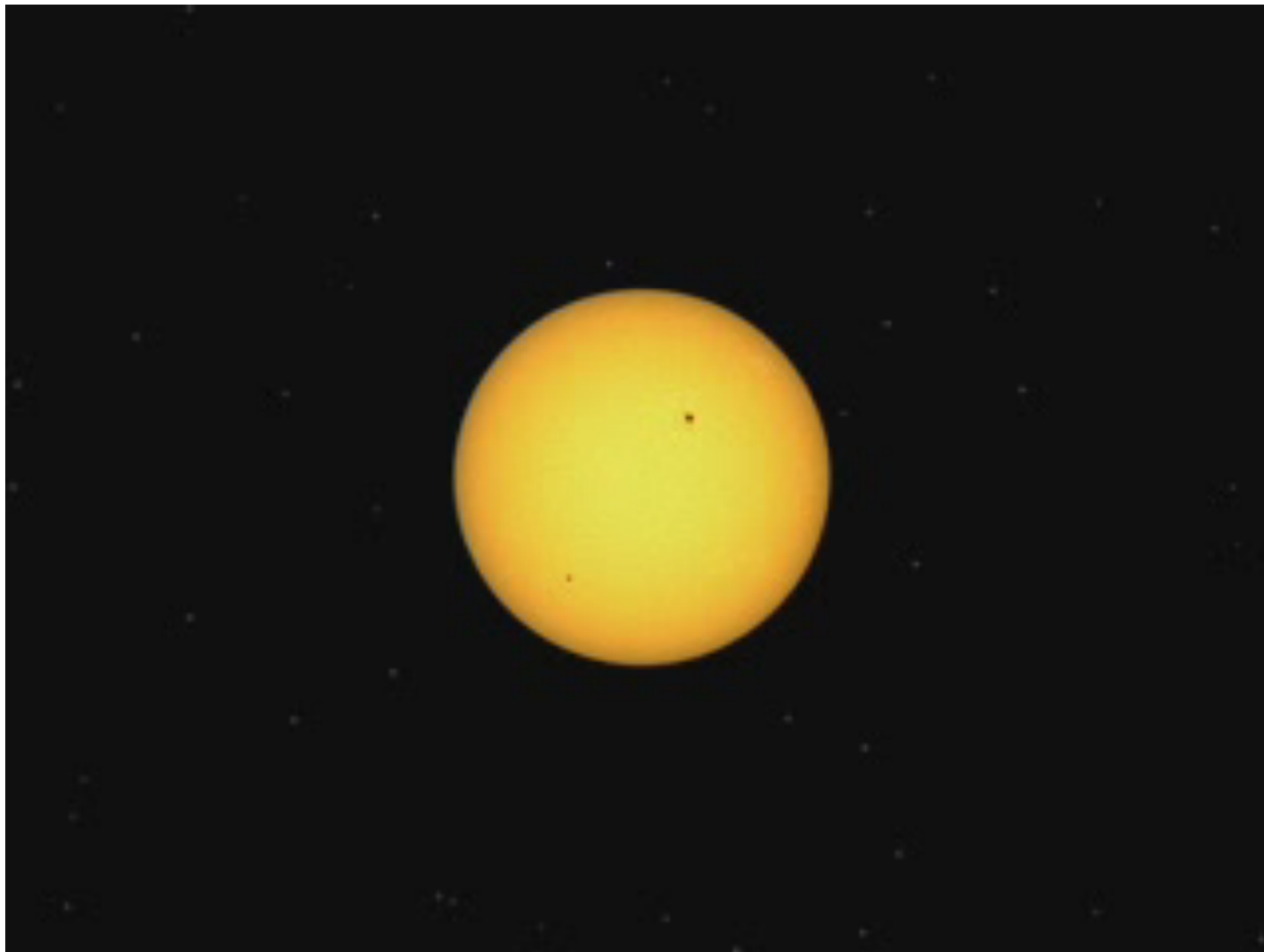
- Inverze pro skvrnu z 20. června 1998
- Konvergentní toky udržující skvrnu stabilní
- Skvrna = mělký útvar
- Jediné pozorování lehce preferující svazkový model sluneční skvrny



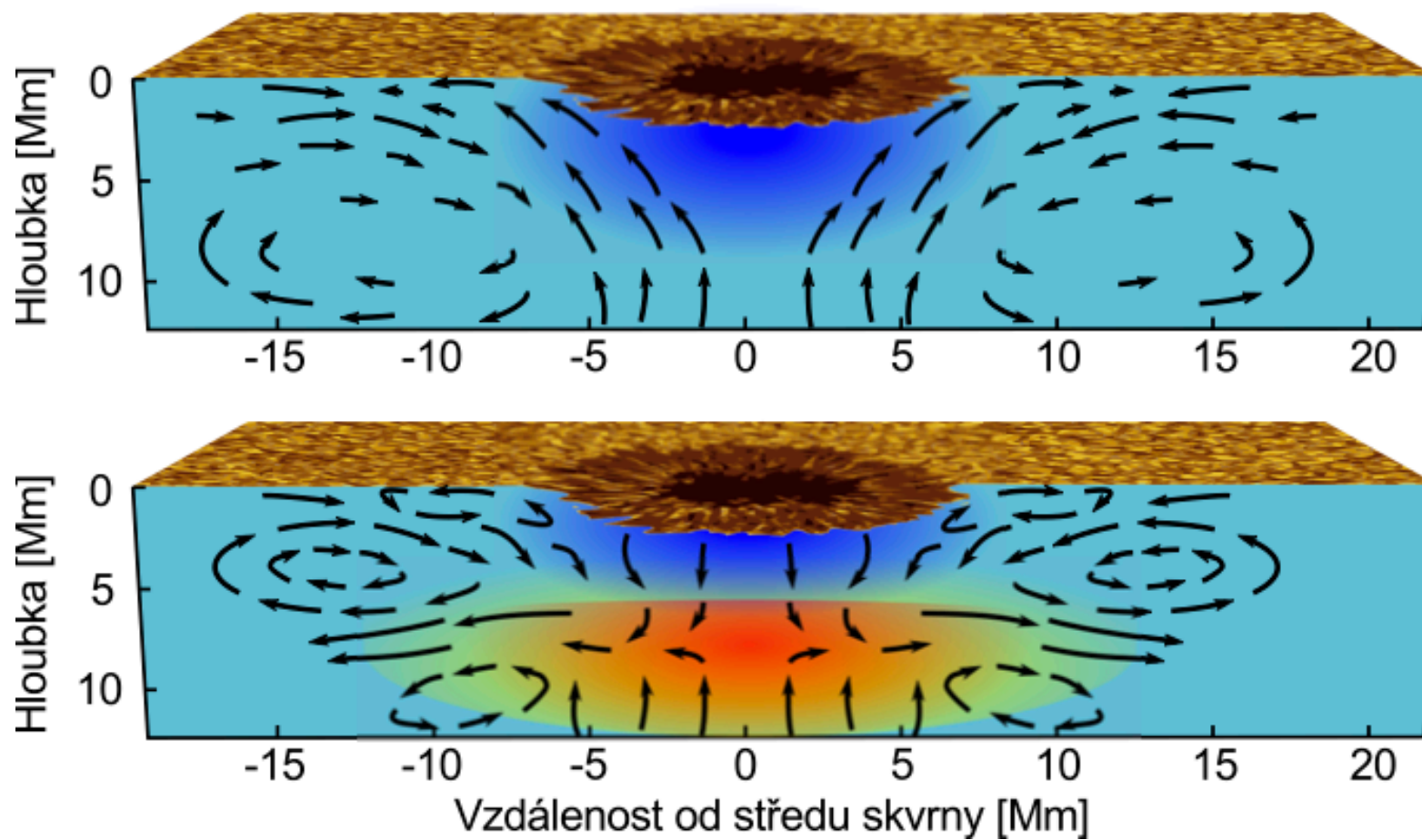
Pod skvrnou (II)



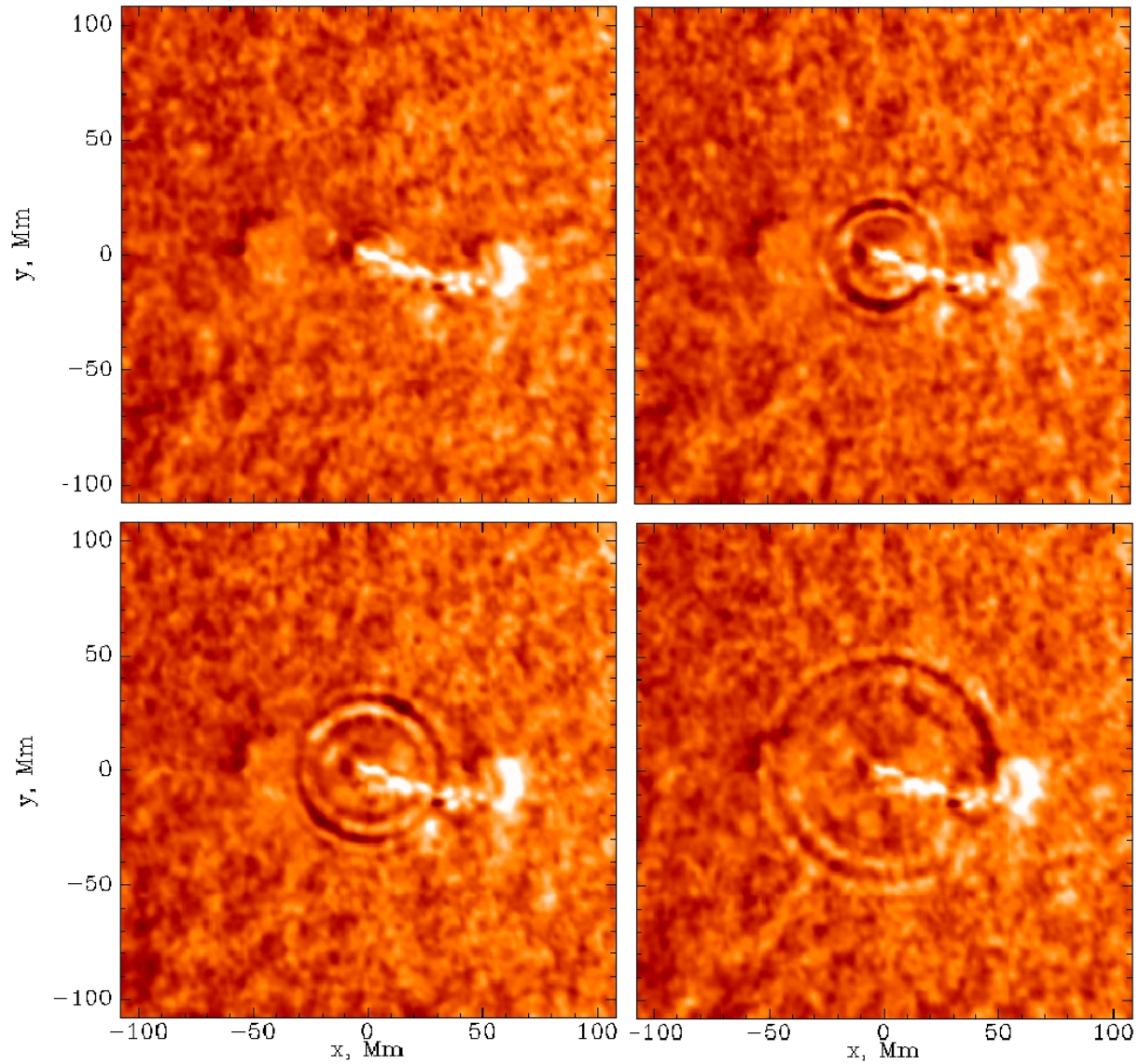
Pod skvrnou (III)



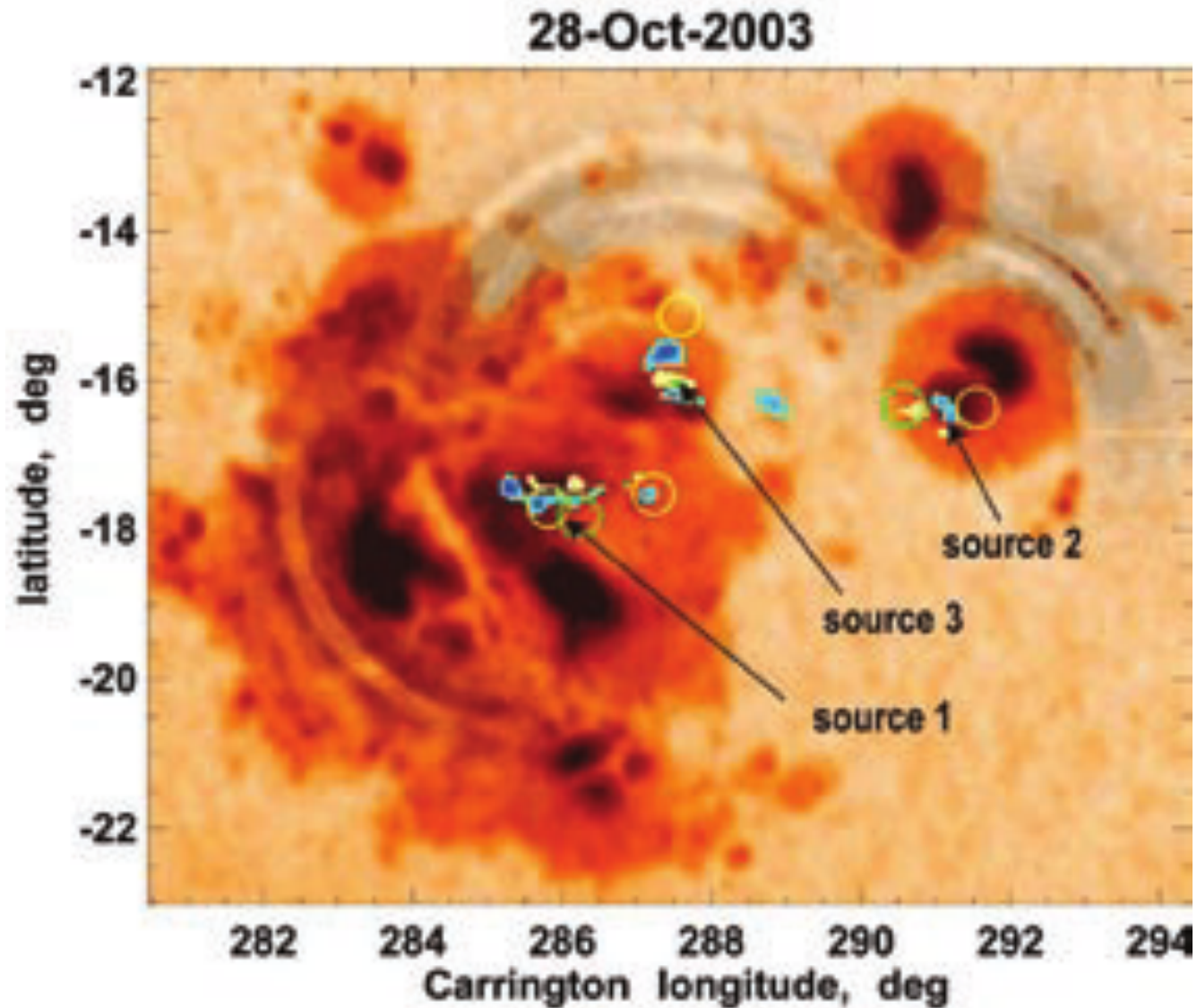
Pod skvrnou?



Sluncetřesení



Indukované oscilace



Oscilace indukované erupcí

