

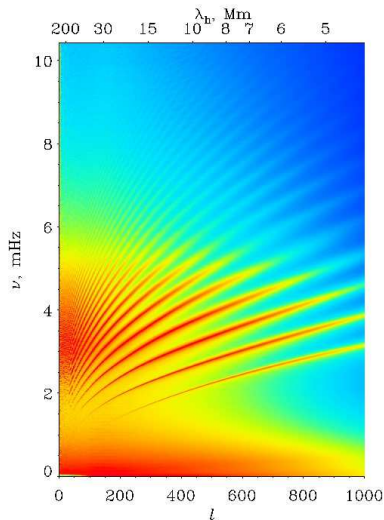
Oscilace a helioseismologie

Základní charakteristiky

- Objeveny 1962 R. Leightonem v Dopplergramech
- Ulrich (1970) - stojaté vlnění
- Tři základní typy vln
- Nejvýraznější zvukové mody s periodou 5 minut (interference až 10^7 modů)
- Různé vlny pronikají do různé hloubky: sondáž nitra
- Helioseismologie

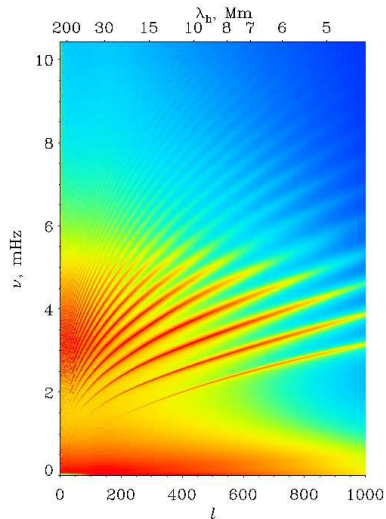
Výkonové spektrum

- Kvadrát amplitudy Fourierova spektra (FT autokorelace)
- Interference mnoha modů
→ přežijí jen stojaté vlny splňující rezonanční podmínku → hřebeny
- Převážně zvukové módy
- Signál na nízkých frekvencích - konvekce a gravitační módy
- Pětiminutové oscilace



Výkonové spektrum

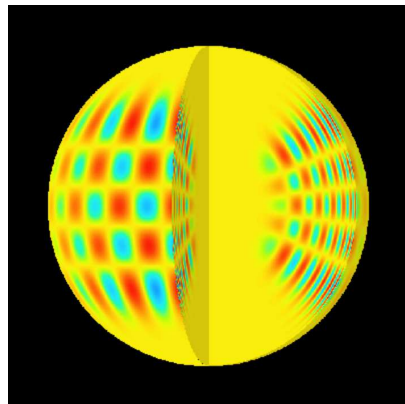
- Úbytek výkonu nad frekvenci 5.3 mHz - vlny se neodráží zpět pod povrch, ale unikají do atmosféry
- Rozlišení ve frekvenční oblasti $\leftrightarrow$ rozlišení v časové oblasti $\leftrightarrow$ vzorkovací teorém
- Ukázka



Definice

$$Y_l^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{(2l+1)(l-m)!}{4\pi(l+m)!}} \exp(im\phi) P_l^m(\cos\theta)$$

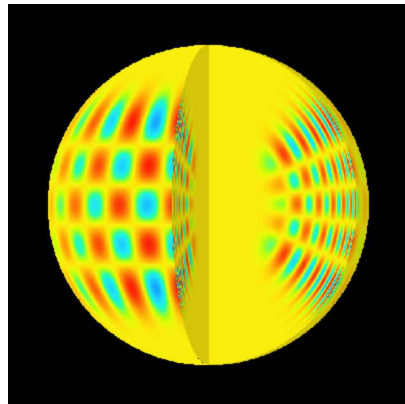
- n - počet uzlových křivek v radiálním směru
- l - počet uzlových křivek v úhlovém směru
- m - počet uzlových křivek v úhlovém směru, které prochází póly



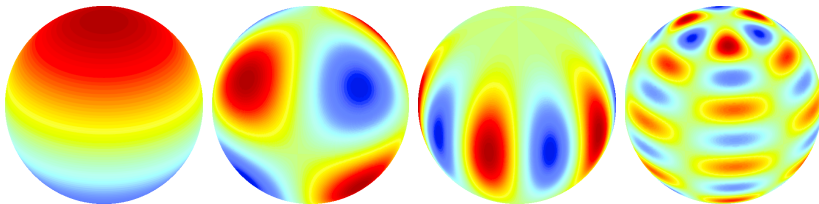
Definice

$$Y_l^m(\theta, \phi) = \sqrt{\frac{(2l+1)(l-m)!}{4\pi(l+m)!}} \exp(im\phi) P_l^m(\cos\theta)$$

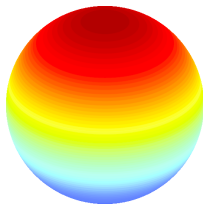
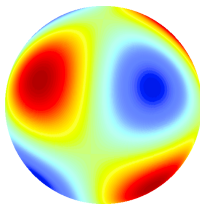
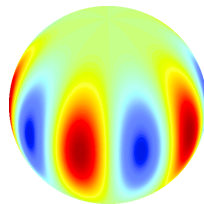
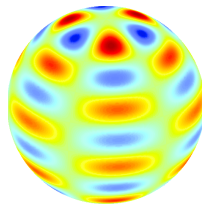
- n - počet uzlových křivek v radiálním směru
- l - počet uzlových křivek v úhlovém směru
- m - počet uzlových křivek v úhlovém směru, které prochází póly
- $(n, l, m) = (14, 20, 16)$



Příklady



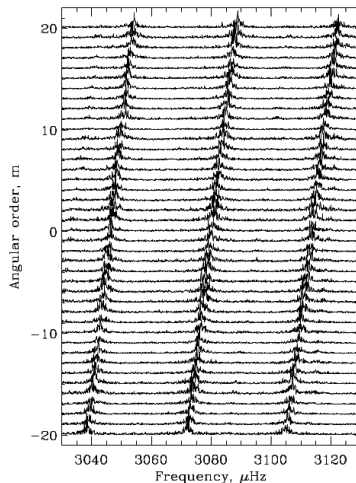
Příklady

 $(?, 1, 0)$  $(?, 3, 2)$  $(?, 5, 5)$  $(?, 10, 3)$

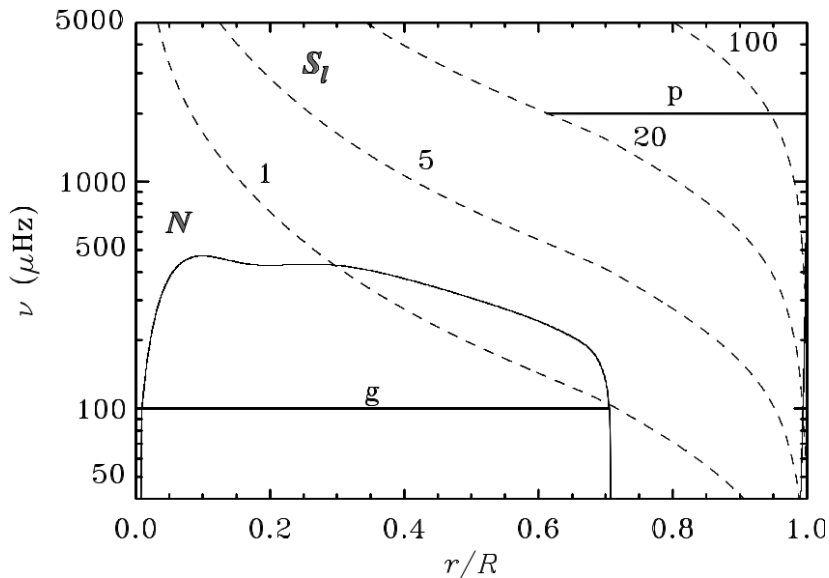
Rotační rozštěpení

$$\Delta\omega_{nlm} = \int_0^{R_\odot} \int_0^\pi d\theta dr K_{nlm}^\Omega(r, \theta) \Omega(r, \theta)$$

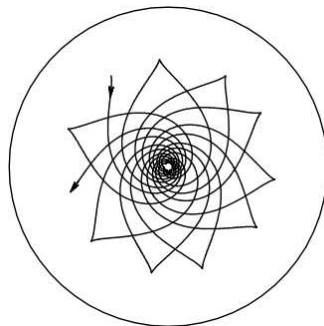
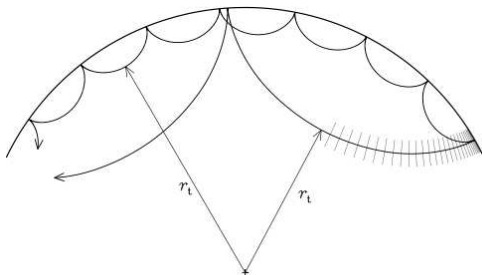
- Rotace rozdělí frekvence ω_{nl} na ω_{nlm}
- Rozdíl $\omega_{nlm} - \omega_{nl0} = \Delta\omega_{nlm}$
- Úhlová rychlost Ω je úměrná $\Delta\omega_{nlm}/m$



Hranice šíření vln



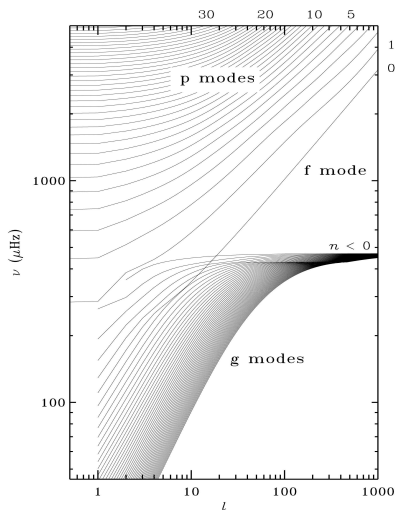
Trajektorie vln



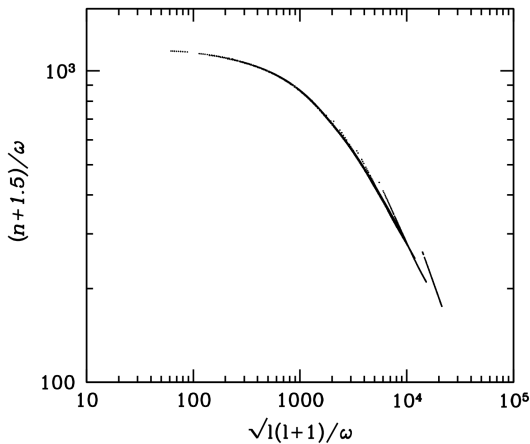
- Vlny s nižším l pronikají hlouběji, ale obtížněji se pozorují
- f mody jen povrchové
- g mody jen v konvektivně stabilní oblasti

Teoretické spektrum oscilací

- Vypočteno ze standardního modelu
- Můžeme pozorovat frekvence vyšší, než 1 mHz

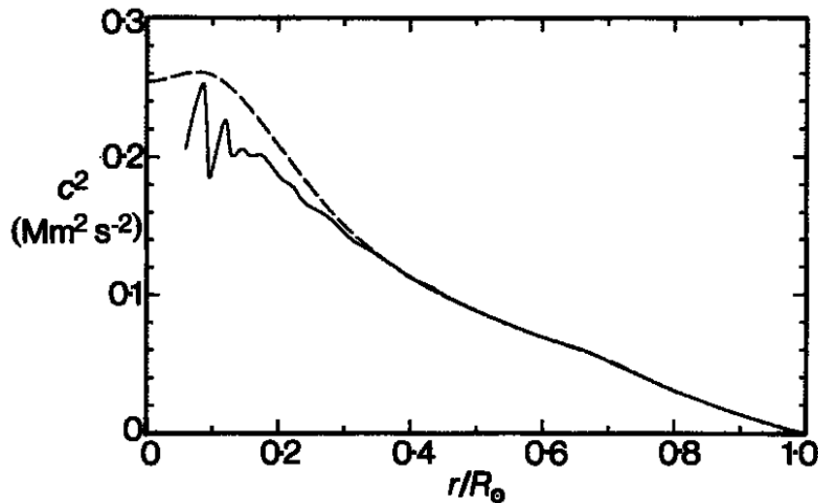


Duvallův zákon

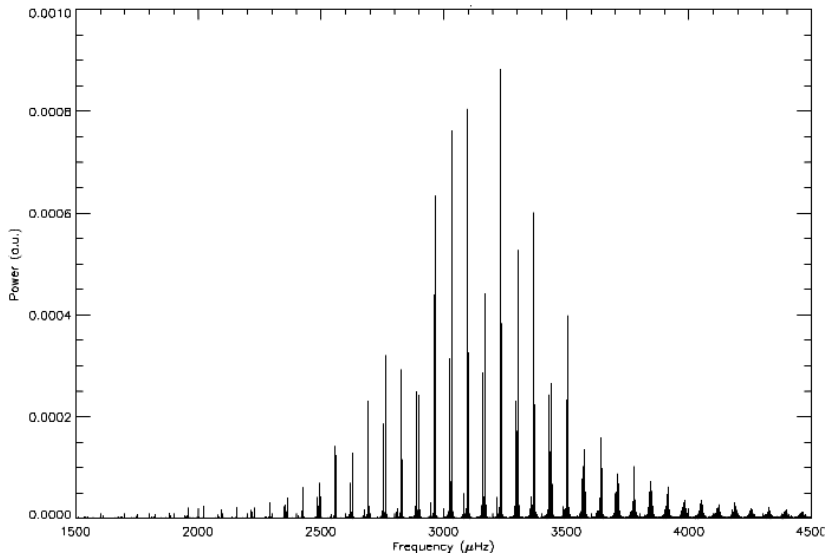


- Platí pro $l < 250$

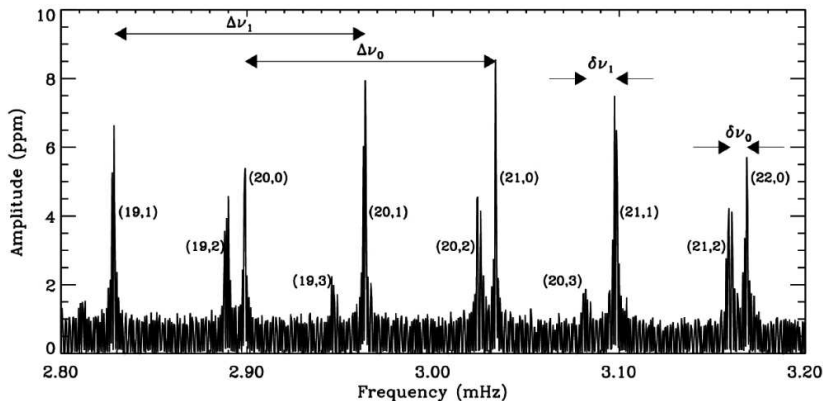
Inverze c_s



Low-l mody



Velká a malá separace

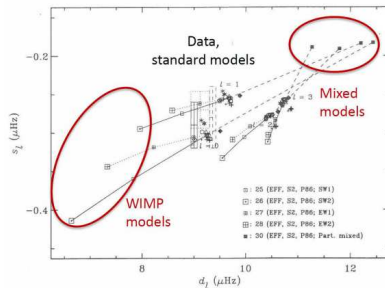


- Velká separace (n, l) a $(n + 1, l) \rightarrow$ střední hustota
- Malá separace (n, l) a $(n - 1, l + 2) \rightarrow$ rychlost zvuku v centru $\rightarrow$ zastoupení vodíku $\rightarrow$ věk

Neutrinový problém

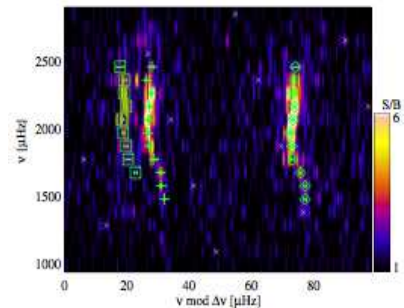
- Rozpor mezi modelem Slunce a částicovou fyzikou
- Helioseismologie → chyba není v modelech Slunce
- Malá separace

$$\delta\nu_{nl} = d_l + s_l(n - n_0)$$



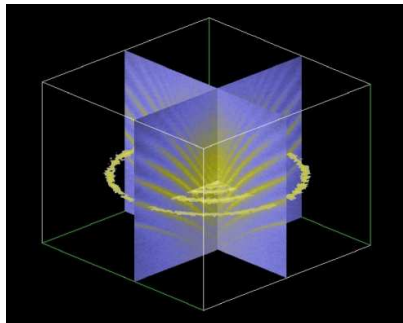
Asteroseismologie

- Identifikovány mody
 $l = 0, 1, 2$
- Střední hustota + odhad
hmotnosti $\rightarrow$ odhad
poloměru
- Rychlost zvuku v okolí jádra
 $\rightarrow$ odhadnut vek
- Změřena osa a rychlost
rotace
- Složitě měření velké a malé
separace



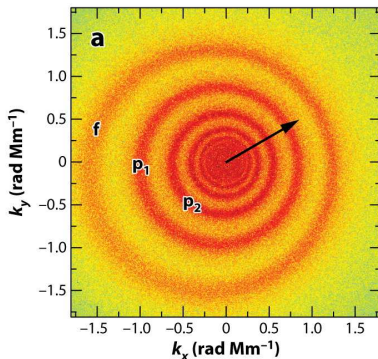
Ring-diagram

- Povrch Slunce rozdělíme na jednotlivé úseky
- Na každém úseku spočítáme výkonové spektrum
- Dvě možnosti analýzy



Ring-diagram

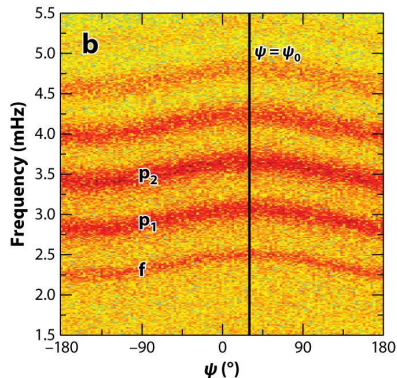
- Fit elips v $(k_x, k_y, \omega = \text{konst})$ diagramu
- Aproximace rovinné vlny
- Elipsy nejsou soustředné $\rightarrow$ velikost a směr rychlosti plazmatu



$$(\omega - \omega_0 - v_x k_x - v_y k_y)^2 = m^2 k_x^2 + m^2 k_y^2$$

Ring-diagram

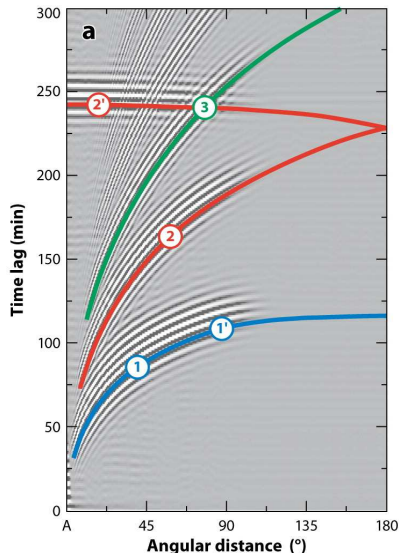
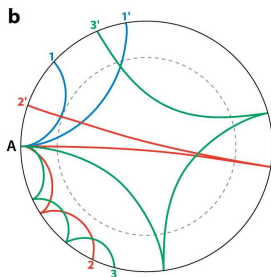
- Hledání vrcholů v ($|\mathbf{k}| = \text{konst}, \omega, \Psi$) diagramu
- Ψ je úhel mezi $\mathbf{k}$ a $\hat{\mathbf{x}}$
- Dopplerův posuv a „vlnka“ ve spektru $\rightarrow$ velikost a směr rychlosti plazmatu



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

Time-distance

- Měří čas vlnového balíku mezi dvěma body
- Cestovní čas = maximum časové kroskorelace filtrovaných oscilací mezi dvěma body
- Prostorové zkreslení - pozorovatelné asi do 110°



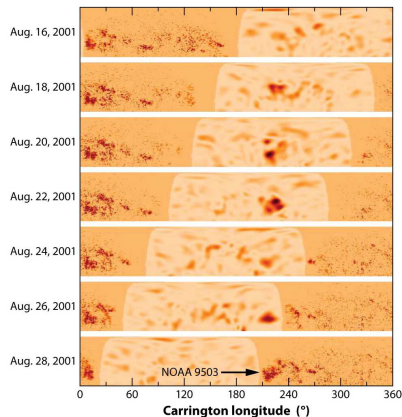
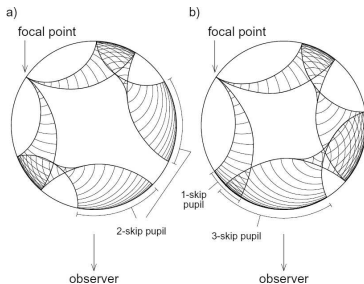
Time-distance

- Velmi citlivé na rychlost zvuku a podpovrchové proudění
- Fázově-rychlostní filtry, hřebenové filtry, ...
- Zahrnuty základní efekty nenulové vlnové délky (Fresnelovy zóny)
- Zahrnuta informace o statistických vlastnostech náhodného šumu
- Invertujeme opravdu tam a to, co chceme? - průměrovací jádra
- Důraz na validaci metody a měření veličin

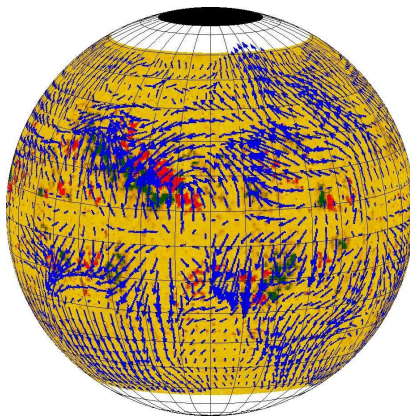
$$\delta\tau^a(\mathbf{r}) = \int_{\odot} d^2\mathbf{r}' dz \sum_{\beta=1}^P K_{\beta}^a(\mathbf{r}' - \mathbf{r}, z) \delta q^{\beta}(\mathbf{r}', z) + n^a(\mathbf{r})$$

Helioseismická holografie

- Ekvivalentní time-distance
- Mapuje poruchy na odvrácené straně
- Geometrie 2-2 → střed disku
- Geometrie 1-3 → okraj disku



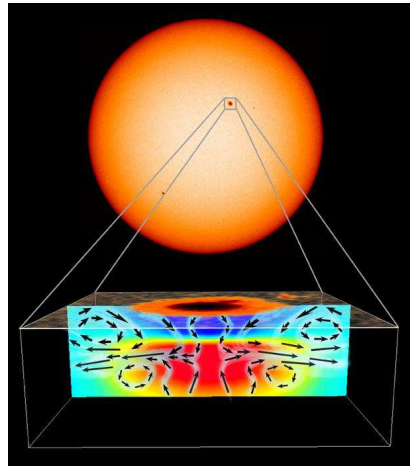
Reziduální toky



- Reziduální velkorozměrové toky

Pod skvrnou

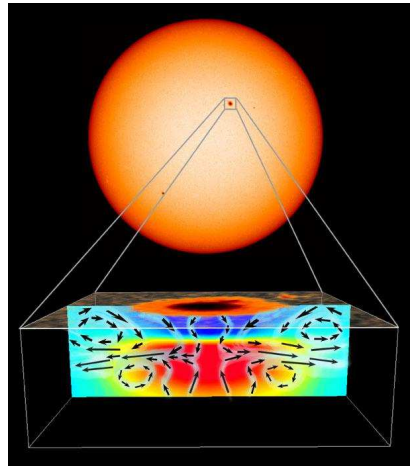
- Inverze pro skvrnu z 20. června 1998
- Použita time-distance v paprskové aproximaci, metoda RLS
- Konvergentní toky udržují skvrnu stabilní
- Skvrna je mělký útvar
- Preferuje svazkový model



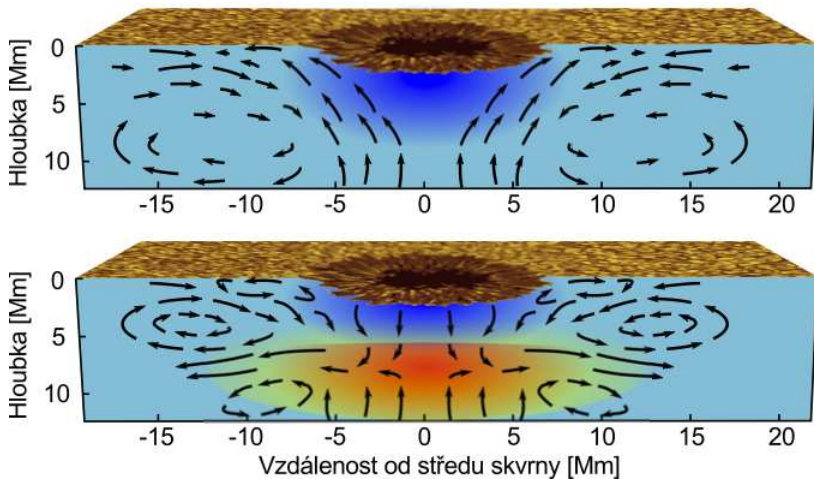
Pod skvrnou

Pod skvrnou

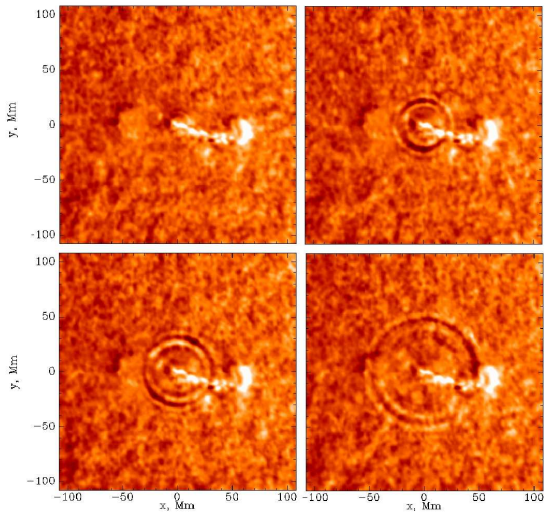
- Inverze pro skvrnu z 20. června 1998
- Použita time-distance v paprskové aproximaci, metoda RLS
- Konvergentní toky udržují skvrnu stabilní
- Skvrna je mělký útvar
- Preferuje svazkový model
- Inverze ignorovala 90 % fyziky



Srovnání s modelem



Sluncetřesení



Sluncetřesení