

Rotace Slunce, souřadnice

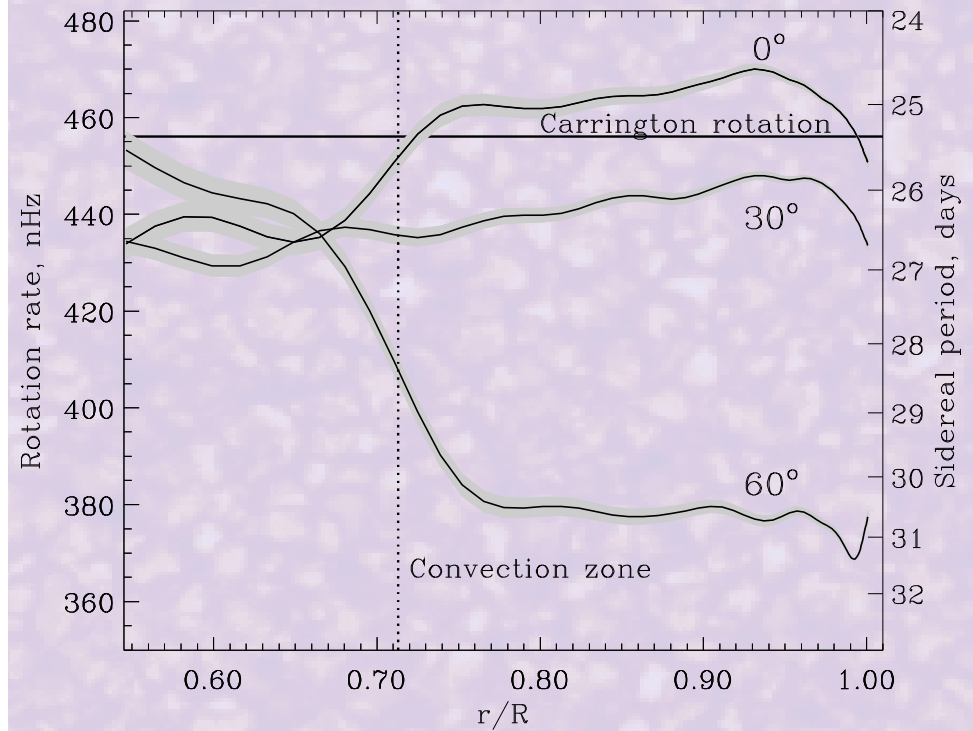
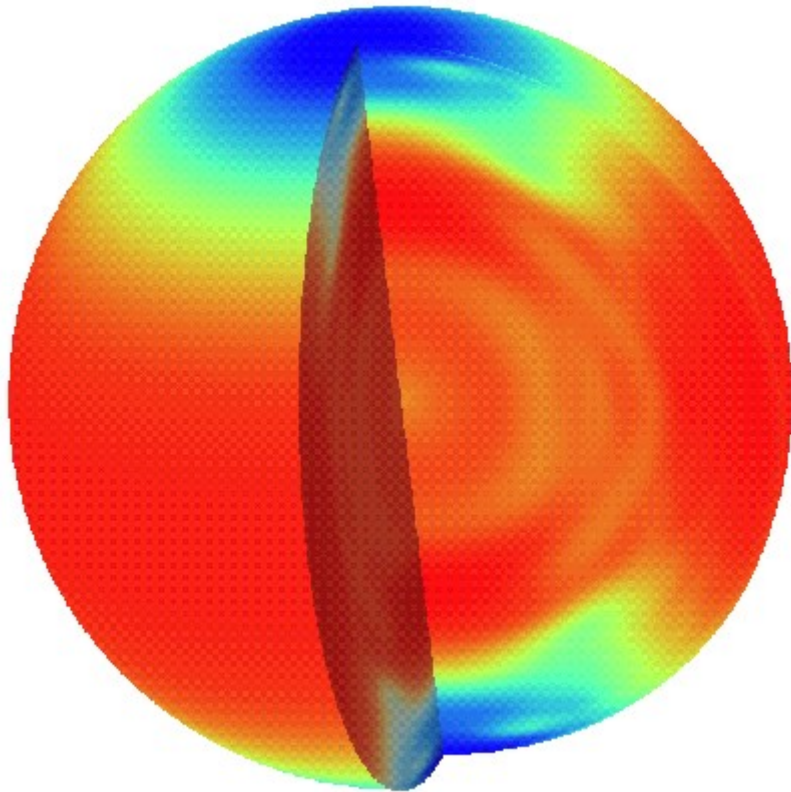
Sluneční fyzika
ZS 2011/2012

Michal Švanda

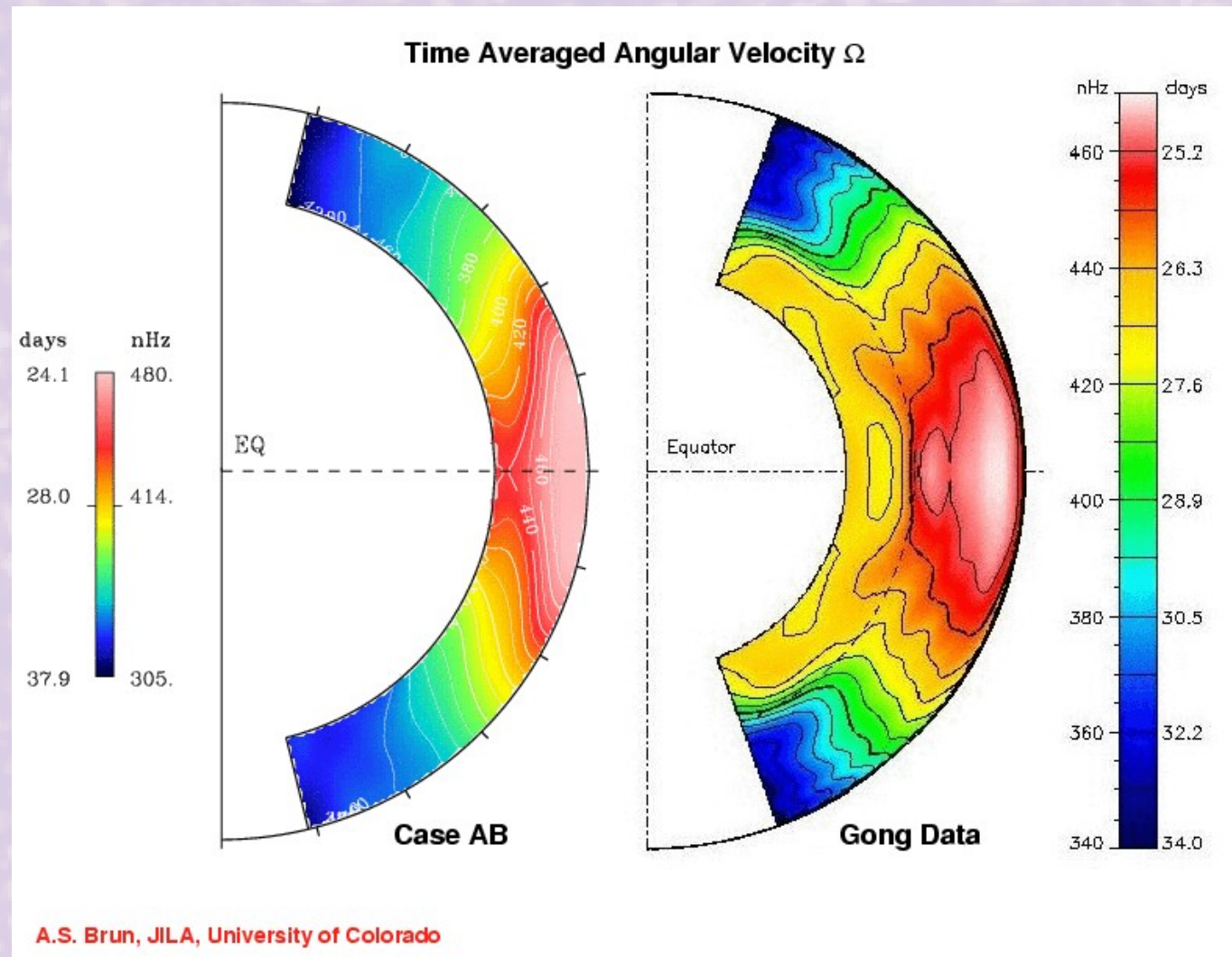
Astronomický ústav MFF UK
Astronomický ústav AV ČR

- Pomalá ~měsíc, ~1610 podle pohybů skvrn, Galileo
 - 1858, Carrington, střední rotační perioda skvrn je $13^{\circ}12'$ za den, čili $T=27,2753$ dne
- Diferenciální
 - 1863, Carrington, $\omega = A + B \sin^{7/4} b$
 - Dnes se používá $\omega = A + B \sin^2 b + C \sin^4 b$
 - Lepší popis expanzí na Legendreovy nebo Gegenbauerovy polynomy, či jiné ortogonální báze
- Nesymetrická vůči rovníku
- Ovlivněná magnetickými poli
- Způsoby měření
 - Spektroskopicky
 - Trasování objektů
 - Helioseismicky

Helioseismický profil rotace

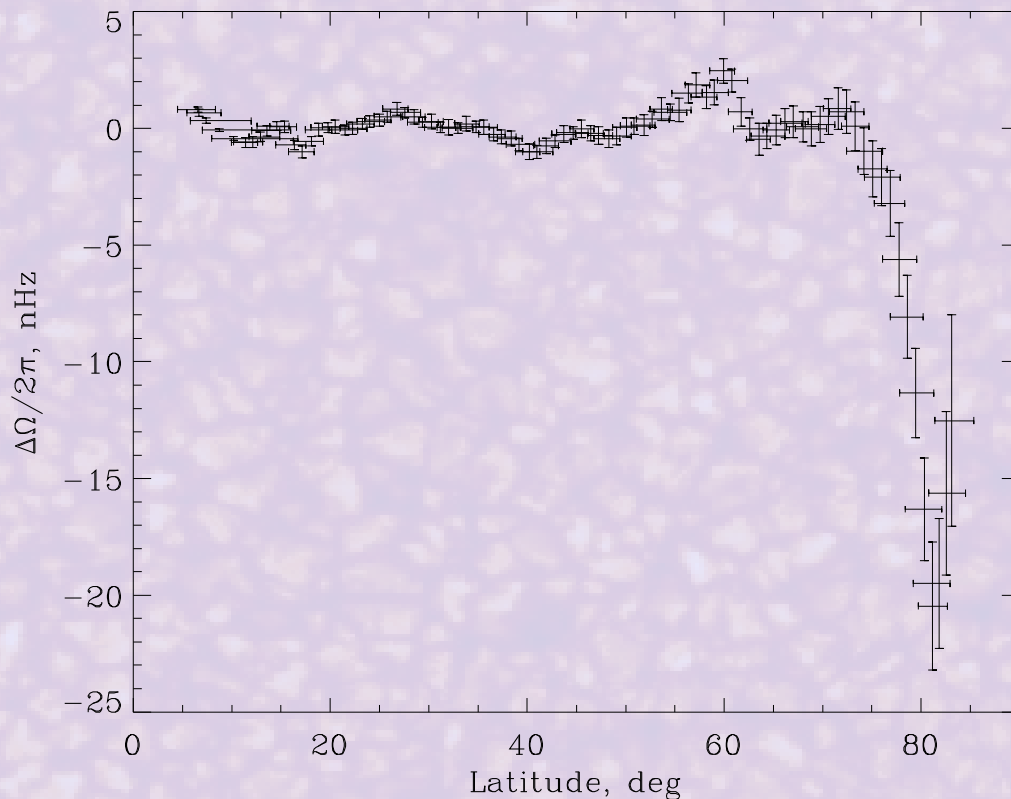


Pozorování vs. simulace



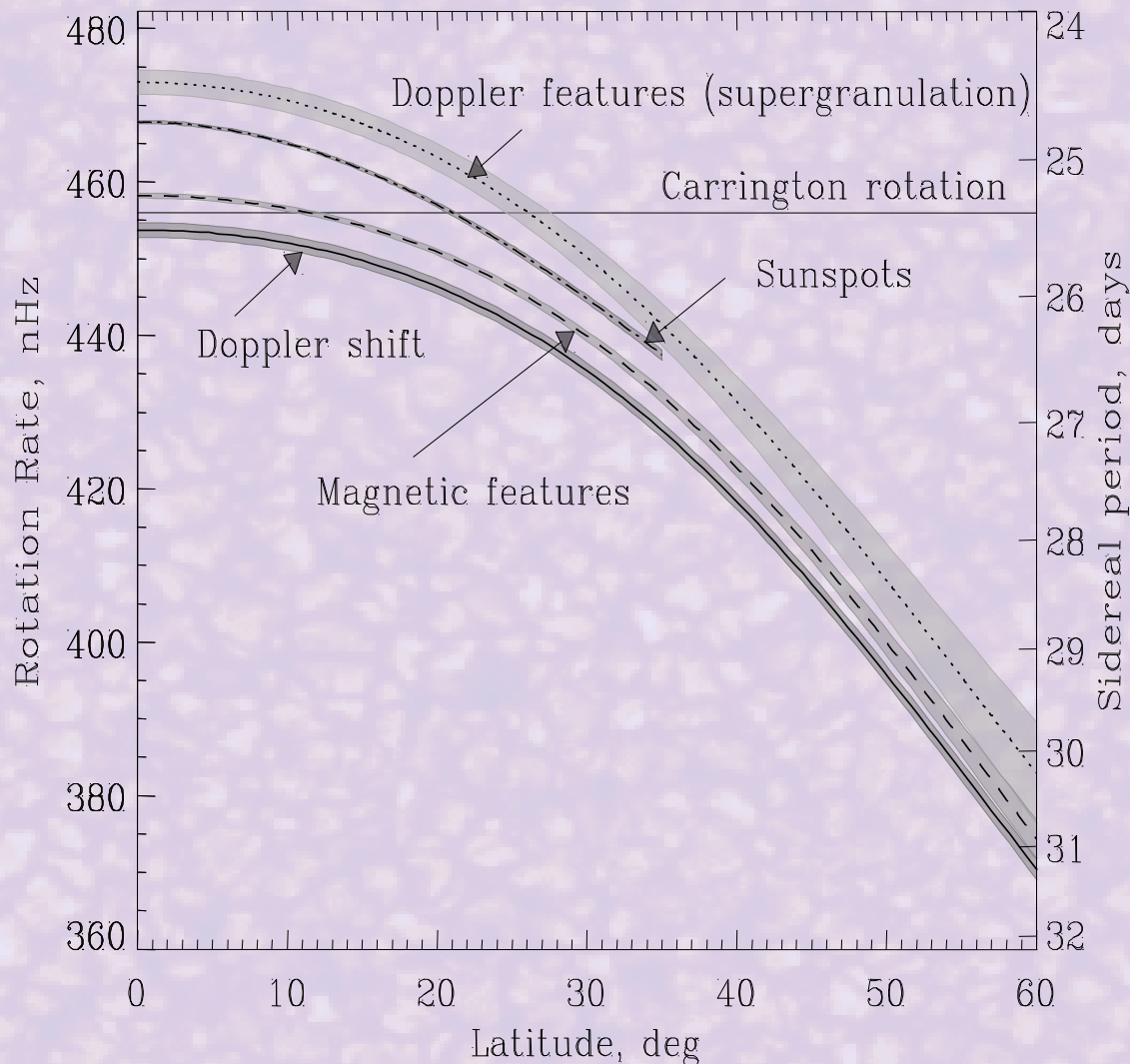
- Simulace cylindrická tendence rotace, pozorování spíše konický profil ($\sim 25^\circ$) – Taylor-Proudmannův stav

Odchyly od parabolického fitu



- Jak dobrý je parabolický tříčlenný fit na helioseismická data?
- Polární oblasti – co se tam děje je velkou záhadou
 - MDI: Sektorová struktura (?), přetoky přes pól ~100 m/s
 - Kampaně HINODE

Různé metody = různé výsledky



- Větší rozměr
-> rigidnější
rotace
- Magnetické
elementy ->
rychlejší
rotace

Helioseismická inverze

Rozštěpení frekvencí s různým řádem m . Rotace je popsána pomocí

$$\Delta \nu_{lnm} = \nu_{nlm} - \nu_{nl0}$$

Směrnice $\Delta \nu_{lnm} / \Delta m$ je přibližně totéž co rotace (430 nHz)

Použijí-li se seismická jádra:

$$\Delta \nu_{lnm} = m \int_0^R \int_0^\pi K_{nlm}(r, \theta) \Omega(r, \theta) d\theta dr$$

Lze úlohu invertovat:

$$\bar{\Omega}(r_0, \theta_0) = \sum_{nlm} c_{nlm}(r_0, \theta_0) \Delta \nu_{lnm}$$

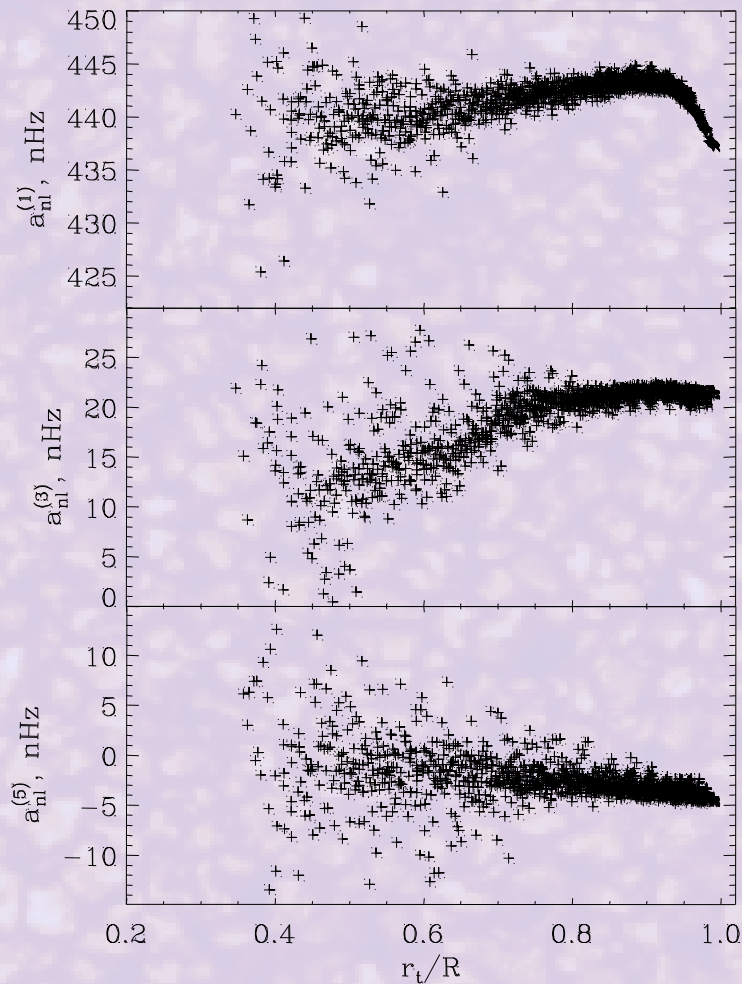
koeficienty c_{nlm} lokalizují zvolené jádro na pozici (r_0, θ_0)

Koeficienty rozkladu do tříčlenné řady lze dopočítat:

$$a_{nl}^{(1)} = \int_0^R K_{nl}^{(1)} \bar{A}(r) dr, \quad a_{nl}^{(3)} = - \int_0^R K_{nl}^{(3)} \bar{B}(r) dr, \quad a_{nl}^{(5)} = \int_0^R K_{nl}^{(5)} \bar{C}(r) dr$$

Jádra jsou důležitá jen v oblasti propagace – informace i bez inverze

Vnitřní rotace bez inverze



- $a^{(1)}$ – pokles rotační rychlosti pod povrchem
- $a^{(3)}$ – první člen šířkové difrotace, pokles pod $0,7R$ – konvektivní zóna – pokles diferenciality v radiativní zóně

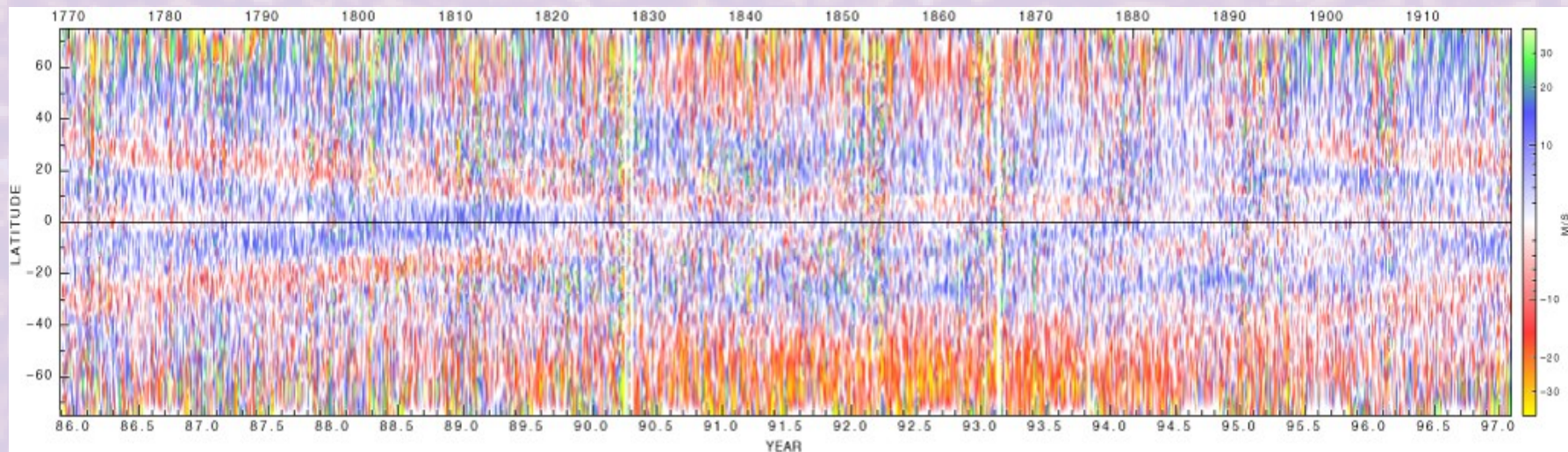
• Sekulární změny

- Hvězdy na MS obvykle rotují rychleji – Slunce v minulosti zřejmě podobné
- Magnetické brždění („magnetic arms“) -- efektivní poloměr Slunce magnetizovaným větrem větší – efektivnější ztráty momentu hybnosti
 - Rotace jádra by se zpomalovat tímto mechanismem neměla

• S cyklem aktivity

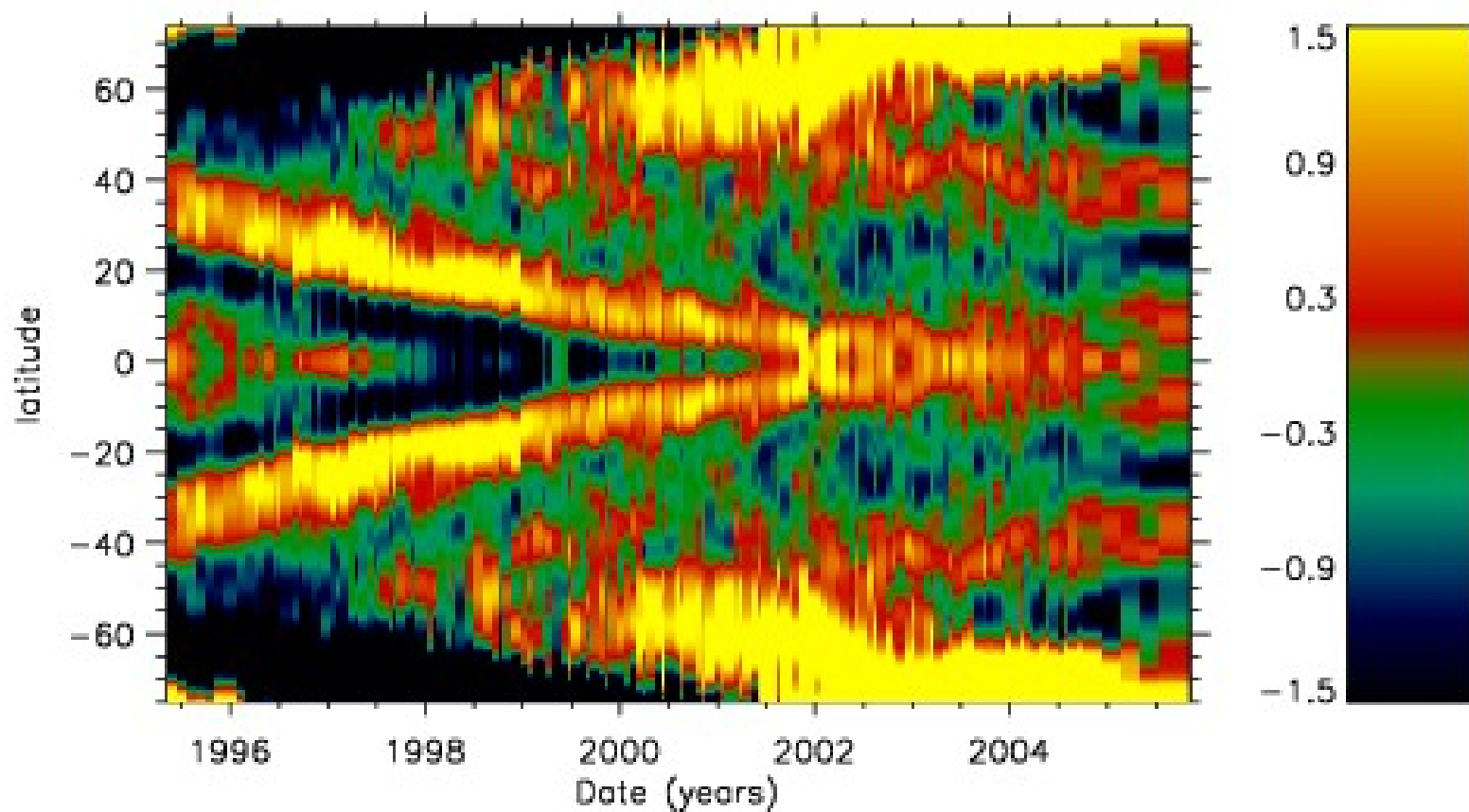
- Severo-jížní asymetrie – polokoule s míň aktivitou rotuje rychleji (Maxwellův tensor)
- Změna profilu na více rigidní v době maxima
- Lokální urychlování lokálními povrchovými magnetickými oblastmi
- Torzní oscilace

- Jak rotuje jádro?

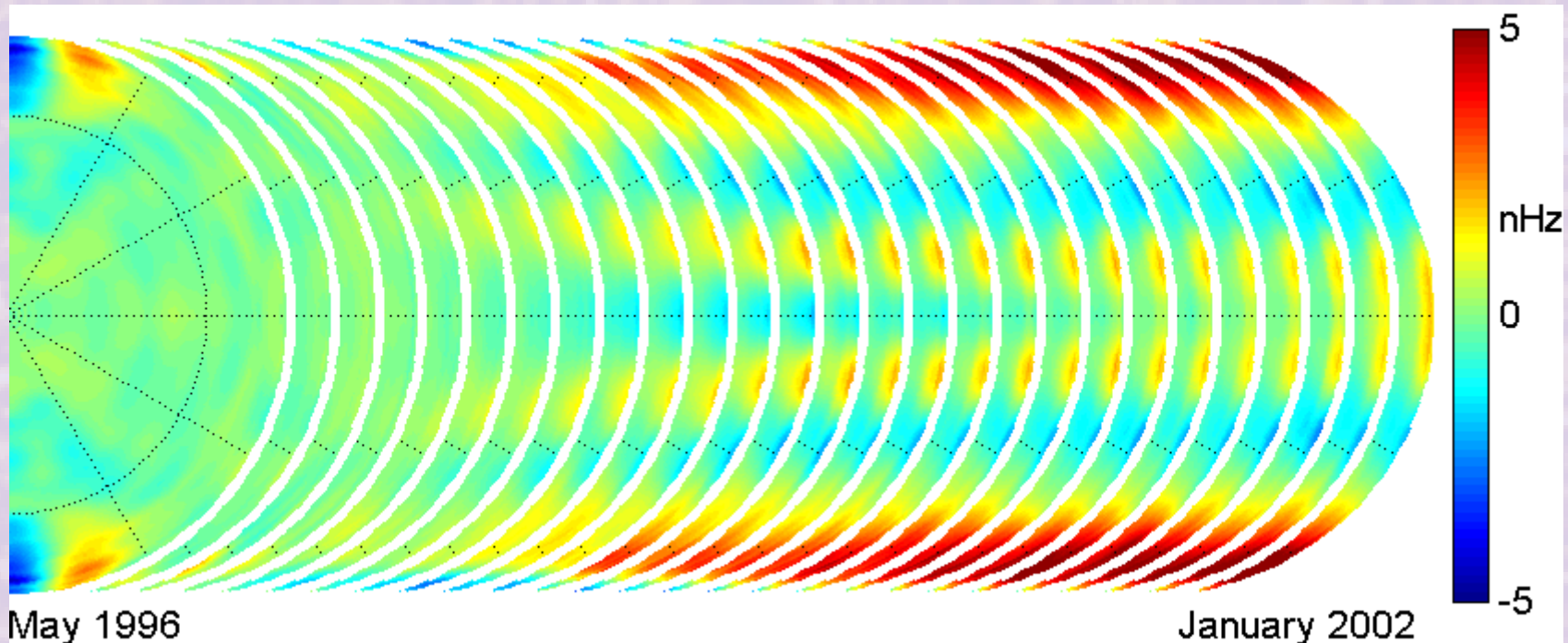


- Pásky rychlejší (pomalejší) rotace (o cca 10 m/s), migrující k rovníku s cyklem aktivity
- Aktivní oblasti na rozhraní pomalého a rychlého pásu
- Druhá větev – migrace k pólu s cyklem aktivity
- Původ
 - Nejasný
 - (Spruit 2003, Rempel 2006) Pás aktivity je o cca 5 K chladnější – vtok hmoty do pásu – vznik torzních

Torzní oscilace na povrchu – lokální helioseismologie

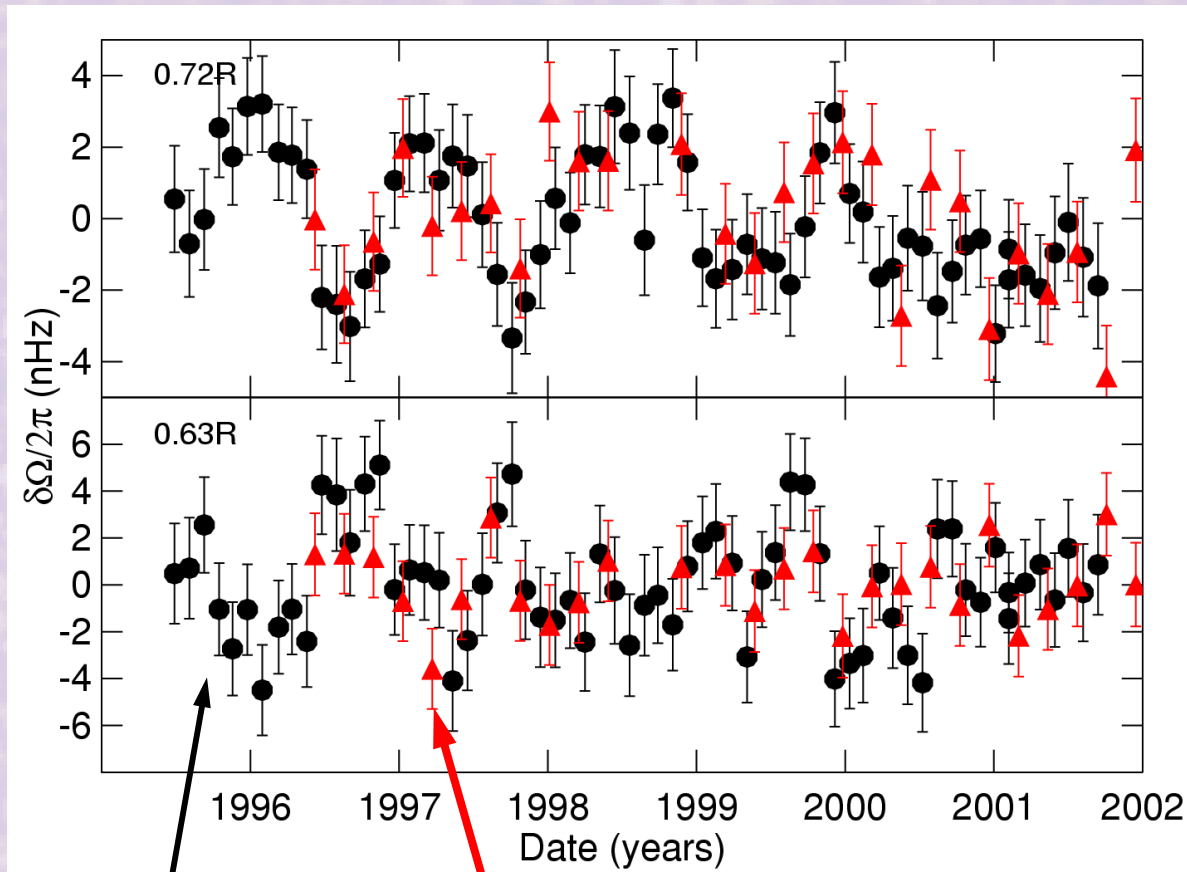


Torzní oscilace helioseismicky



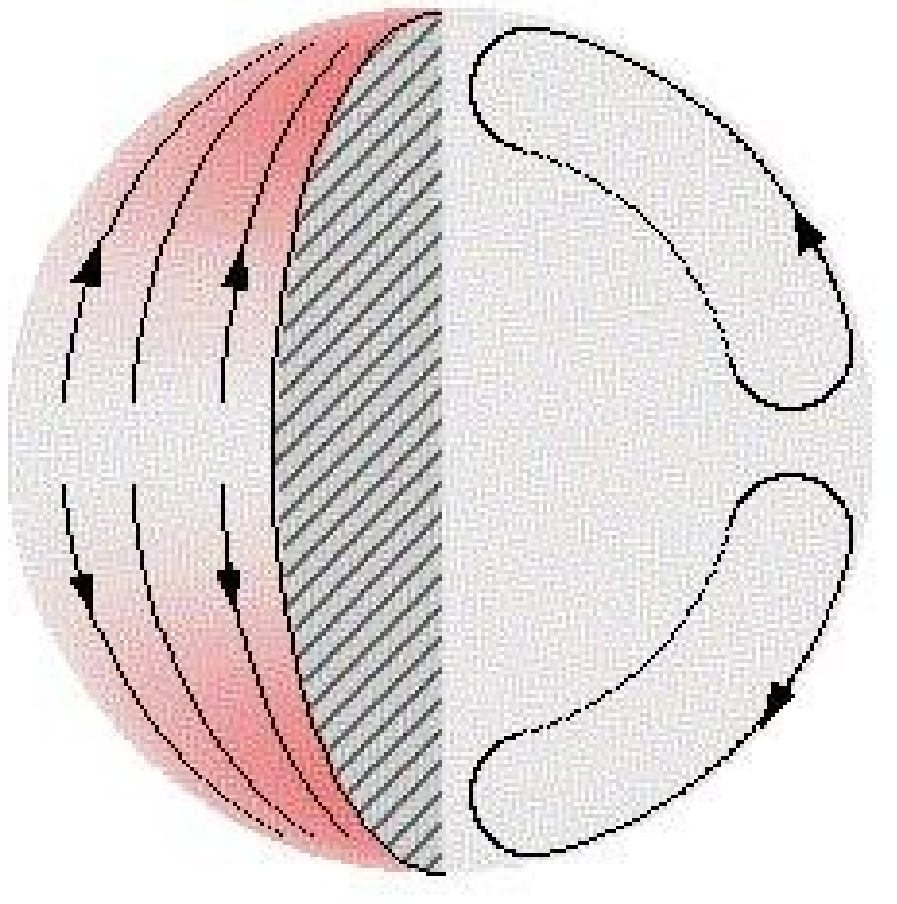
- Low-latitude větev – spíše povrchová, nejspíš efekt termální (Taylor-Proudman state) spojený s povrchovou magnetickou aktivitou – geostrofické proudění
- High-latitude větev – hluboká, nejspíše efekt Reynoldsova tensoru (mechanical forcing)

Oscilace v tachoklině



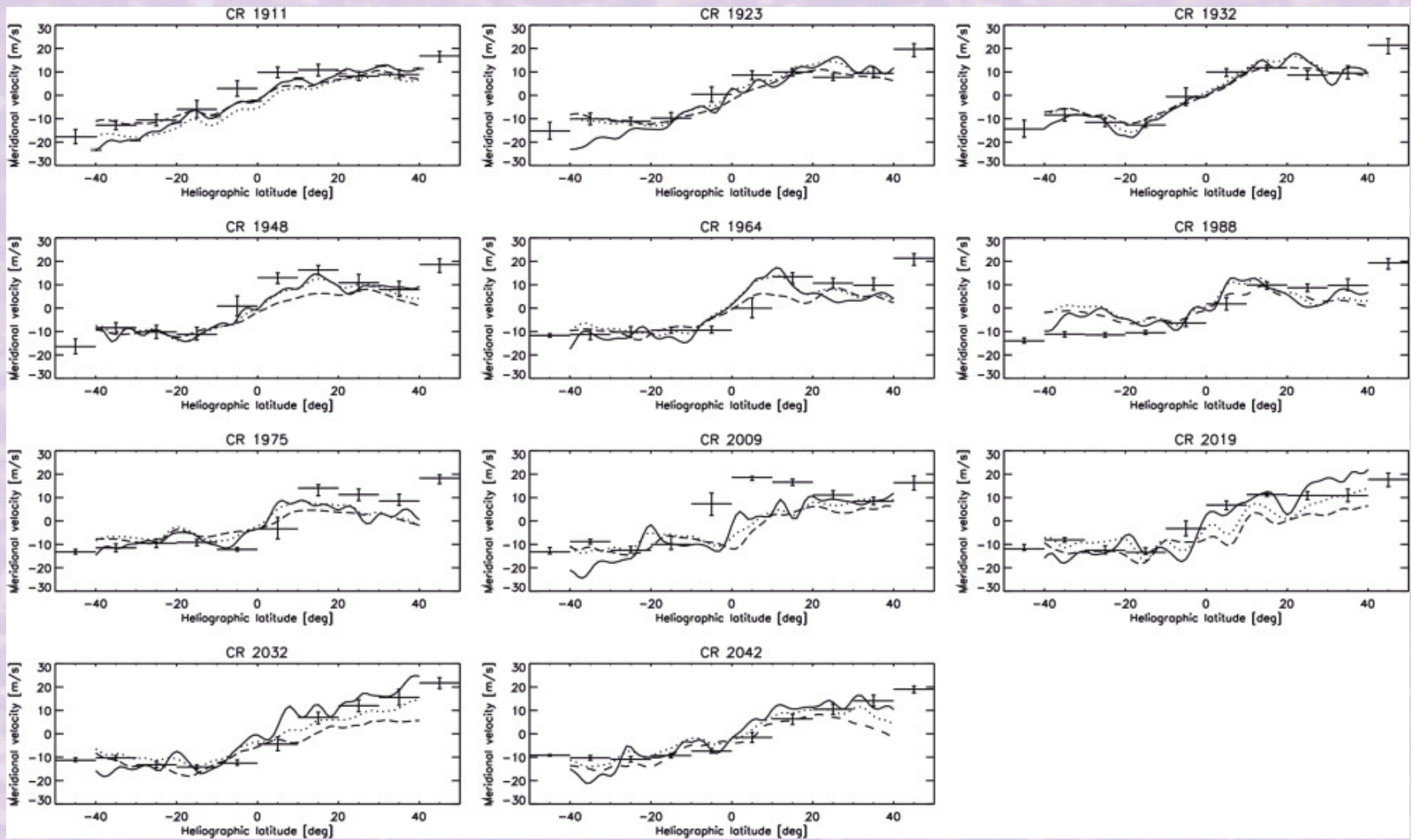
- 1,3 roku perioda
- V minimu klidnější
- ?mechanismus
- ?od roku 2002 již zřejmě neosciluje

Meridionální cirkulace

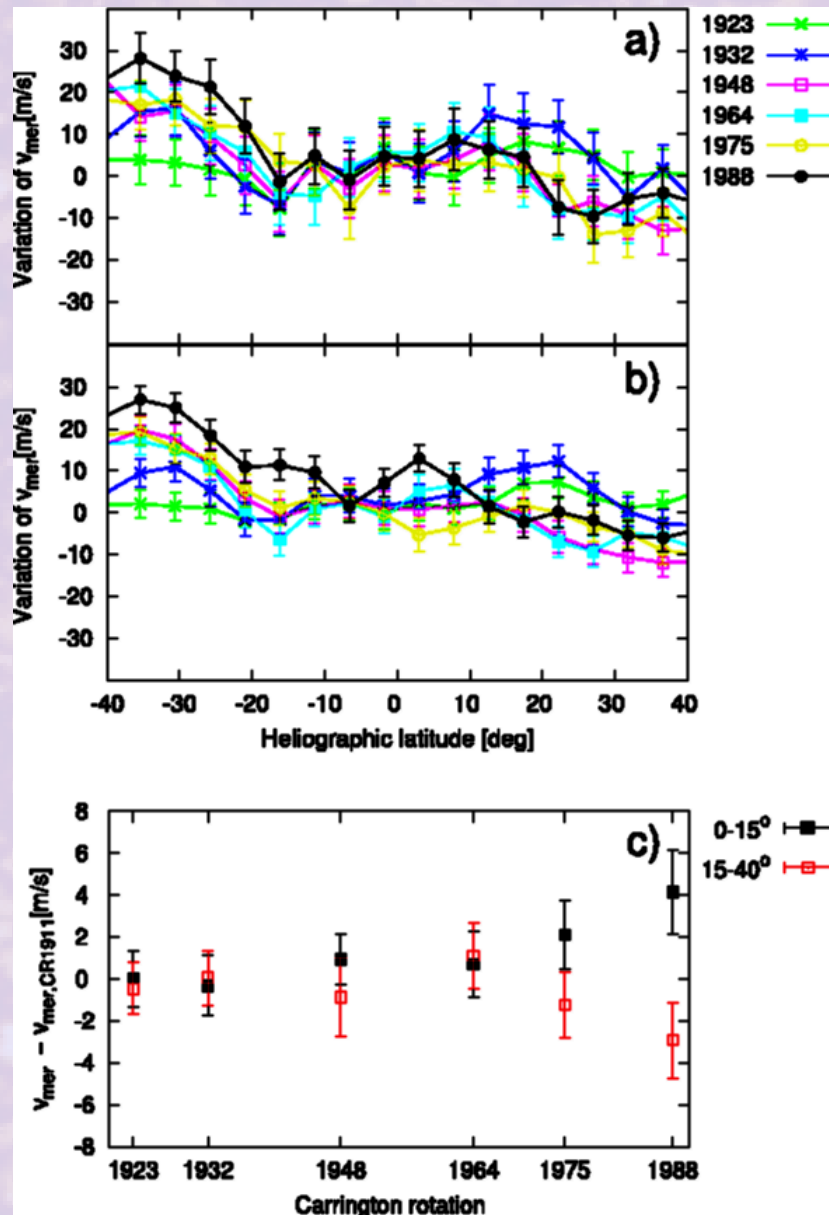


- Pomalý (~ 10 m/s) tok od rovníku k pólům
- (Zřejmě) odpovídá za odnos magnetického pole k pólu, přepólování globálního pole a jeho recyklaci
- Projeví se pouze statisticky – lokální rychlosti jsou až o dva řády větší
- Jeden z faktorů způsobující diferenciální rotaci

Meridionální tok v průběhu cyklu

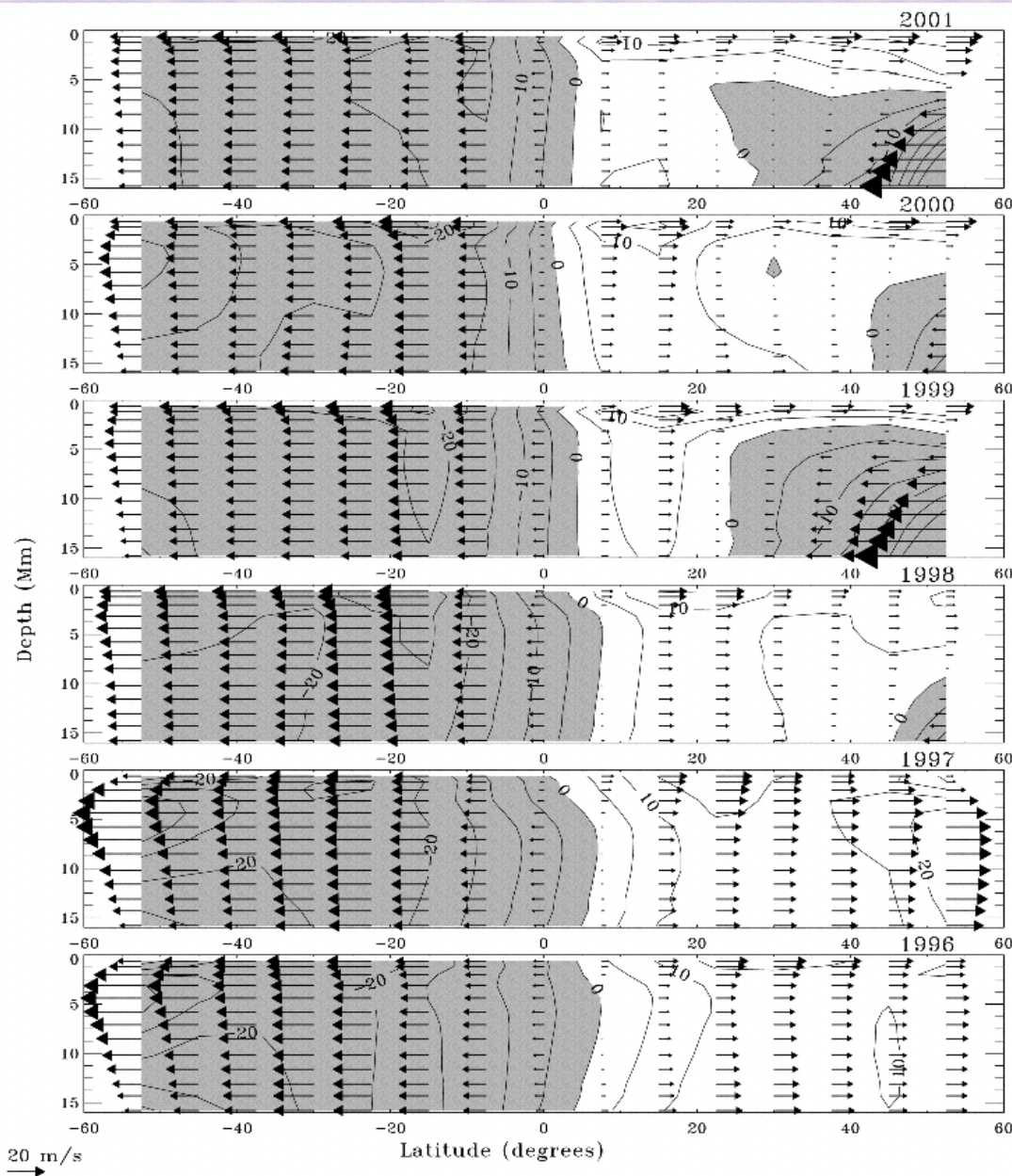


Meridionální tok – cyklické změny



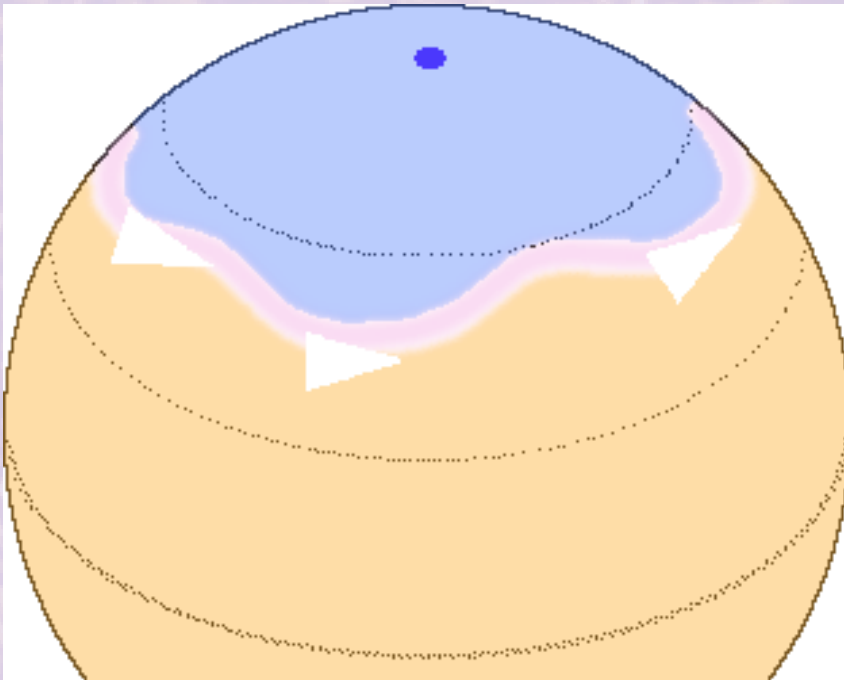
- Variace značící vtok hmoty do pásu aktivity
 - Část z nich lze vysvětlit prouděním kolem aktivních oblastí, ale ne vše
 - Odpovídá Spruitovu (Rempelovu) modelu torzních oscilací, kde jsou vtoky jako vedlejší produkt

Meridionální tok v prostoru a čase



- Formace protibuněk?
- Numerické simulace – meridionální tok pouze statisticky, protibuňky žijící ~8 hodin se vytvářejí zcela běžně

Rossbyho vlny



- Velkorozměrové vlny
- Mají vždy komponentu, která se šíří proti směru rotace
- Na Zemi odpovídá za střídání počasí

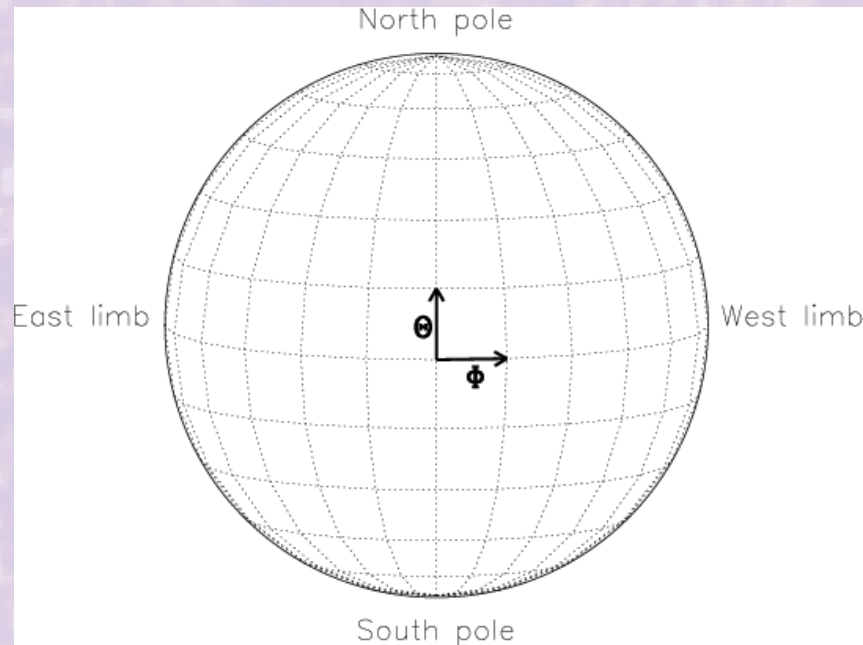
$$c = u - \frac{2\omega \cos \phi}{Rk^2}$$

$$\omega_{\text{west}} = -\frac{2\omega m}{l(l+1)}$$

- Objeví se vždy s diferenciální rotací
- Těžko detekovatelné ve sluneční atmosféře
- Označovány jako *r*-mody „oscilací“

Numerická simulace





● Carringtonův systém

- $\omega_{\text{syn}} = 13,2 \text{ } ^\circ/\text{den}$
- $T_0 = 9. 11. 1853$
- Pozice osy
 - $\alpha_0 = 286,13^\circ$
 - $\delta_0 = 63,87^\circ$

● Heliocentrický systém

● Lokální kartézský

- Hlavně pro pozorování s vysokým rozlišením

● Různé projektivní systémy

- V helioseismologii Postelova projekce (zachovává kružnice)

● Přehled: Thompson, W. T.: 2006, A&A 449, p. 791