

# 7. Rotace Slunce, souřadnice

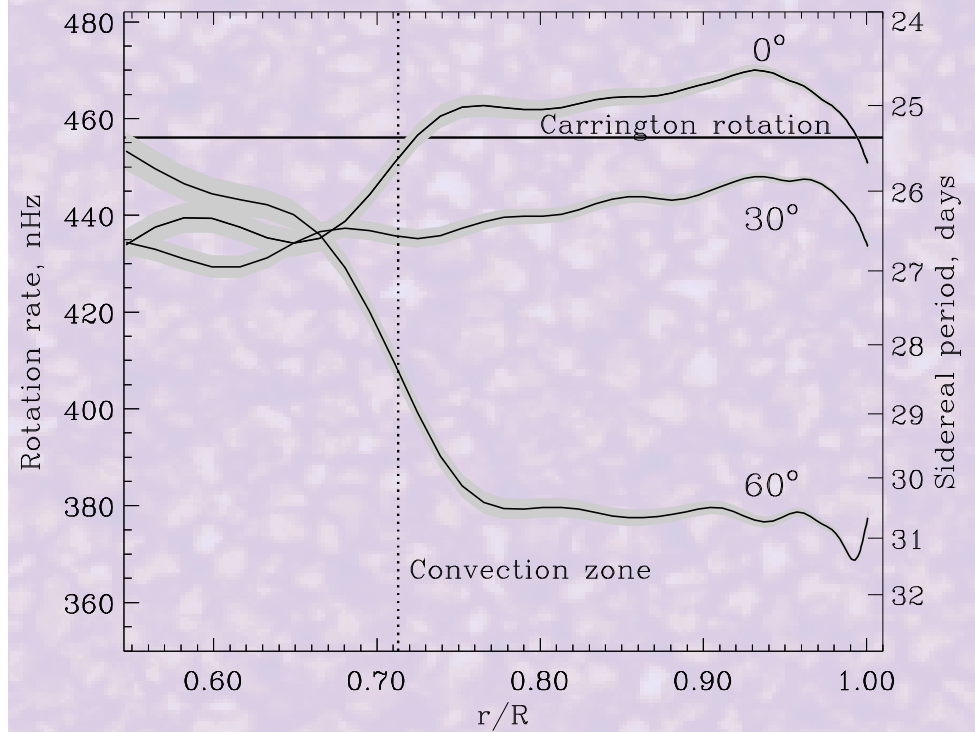
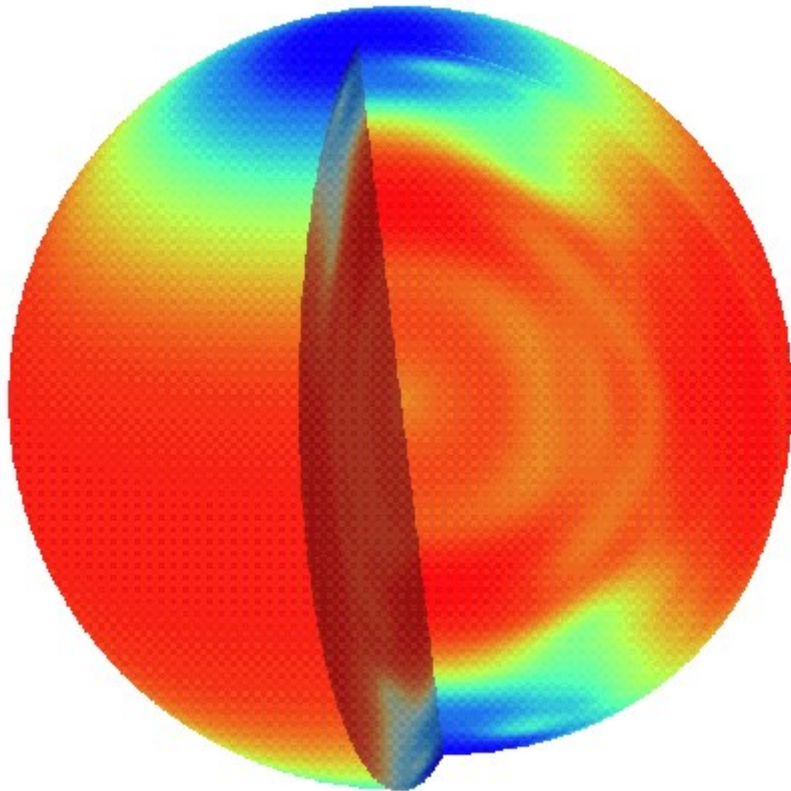
Sluneční fyzika  
LS 2007/2008

**Michal Švanda**

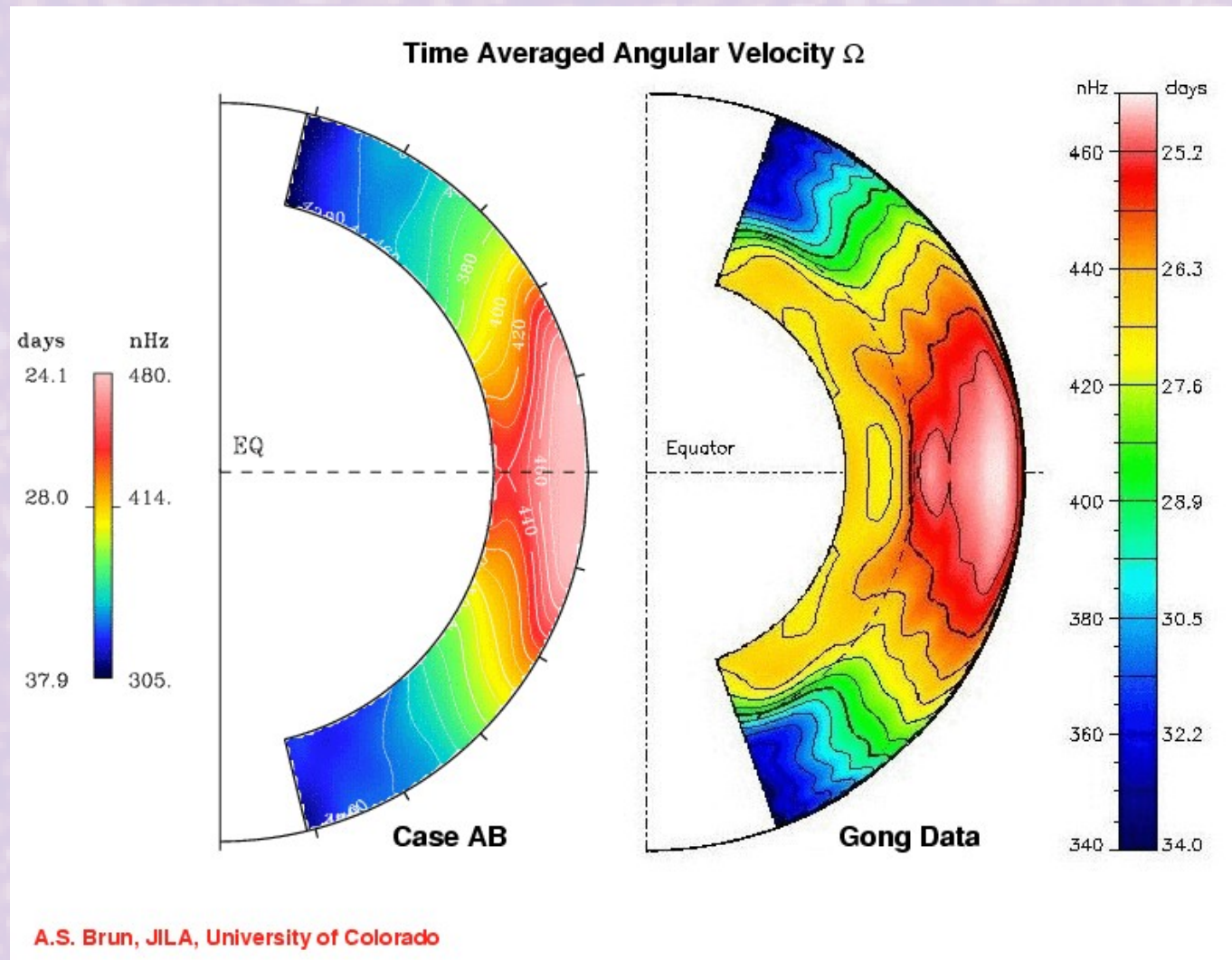
Astronomický ústav MFF UK  
Astronomický ústav AV ČR

- 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

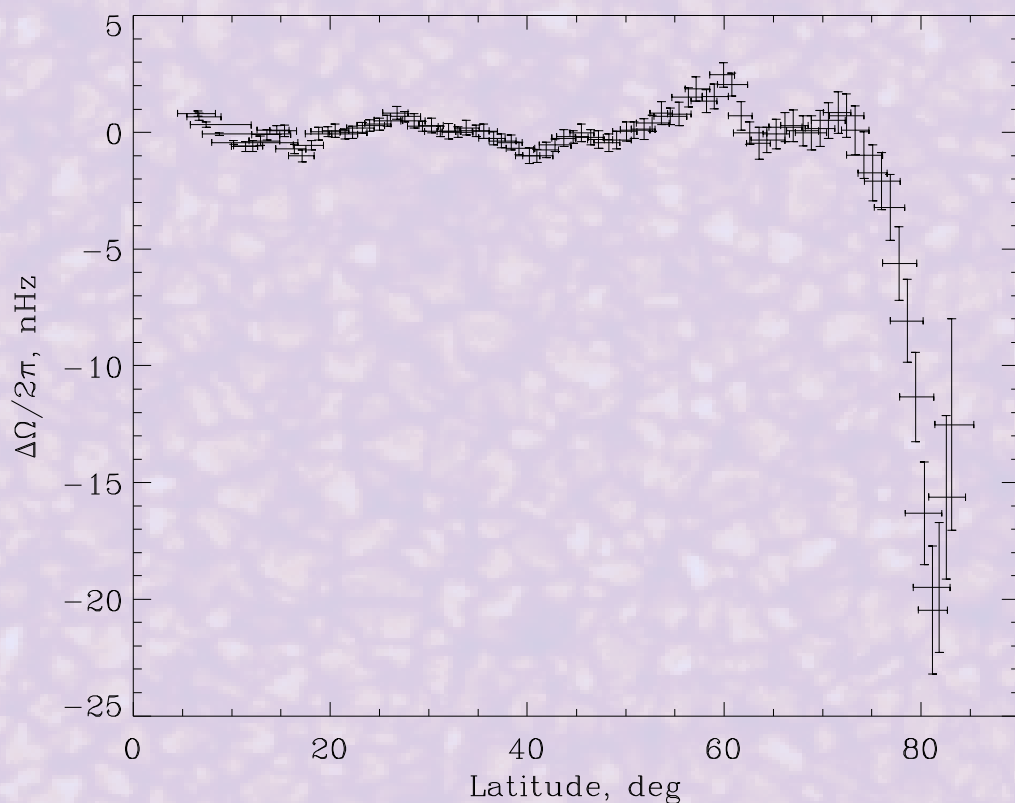


# Pozorování vs. simulace



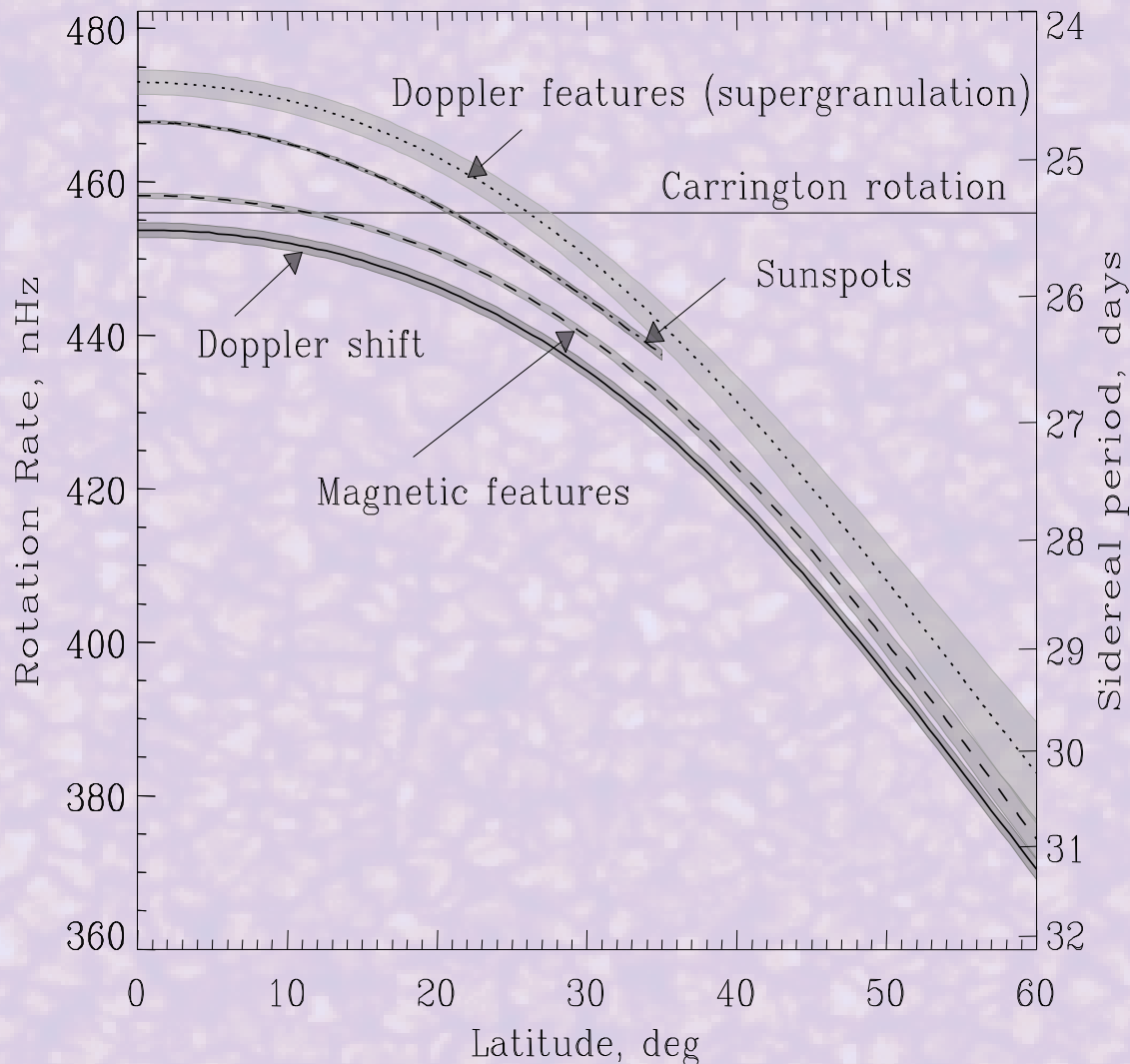
- Simulace cylindrická tendence rotace, pozorování spíše konický profil ( $\sim 25^\circ$ ) – Taylor-Proudmannův stav

# 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:

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

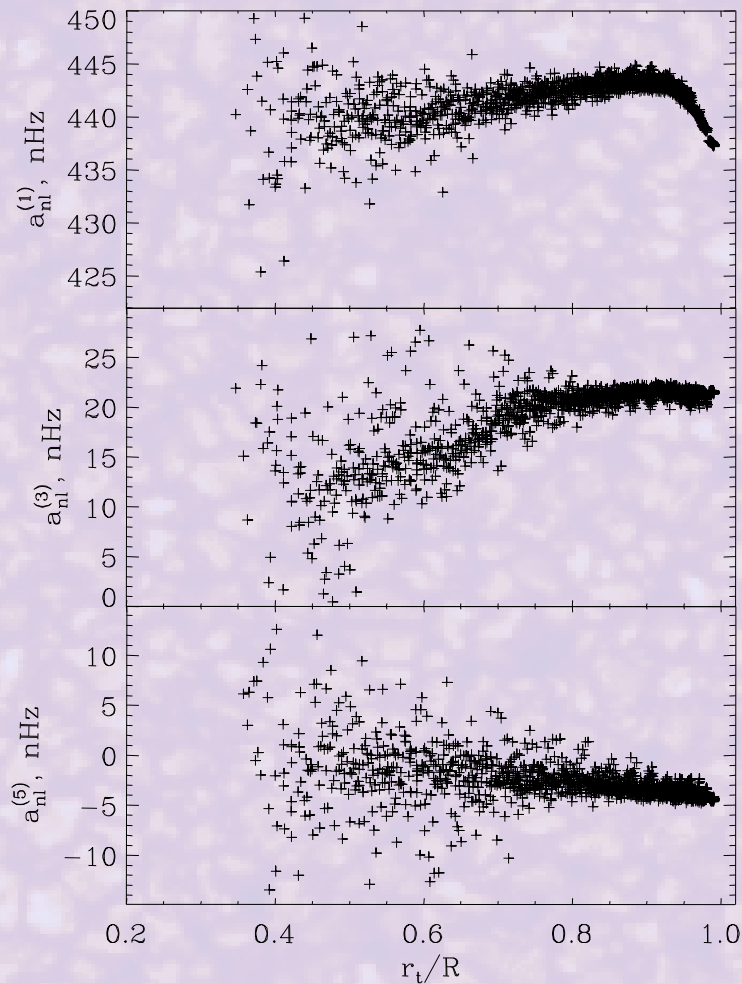
koeficienty  $c_{nlm}$  lokalizují zvolené jádro na pozici  $(r_0, \theta_0)$

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



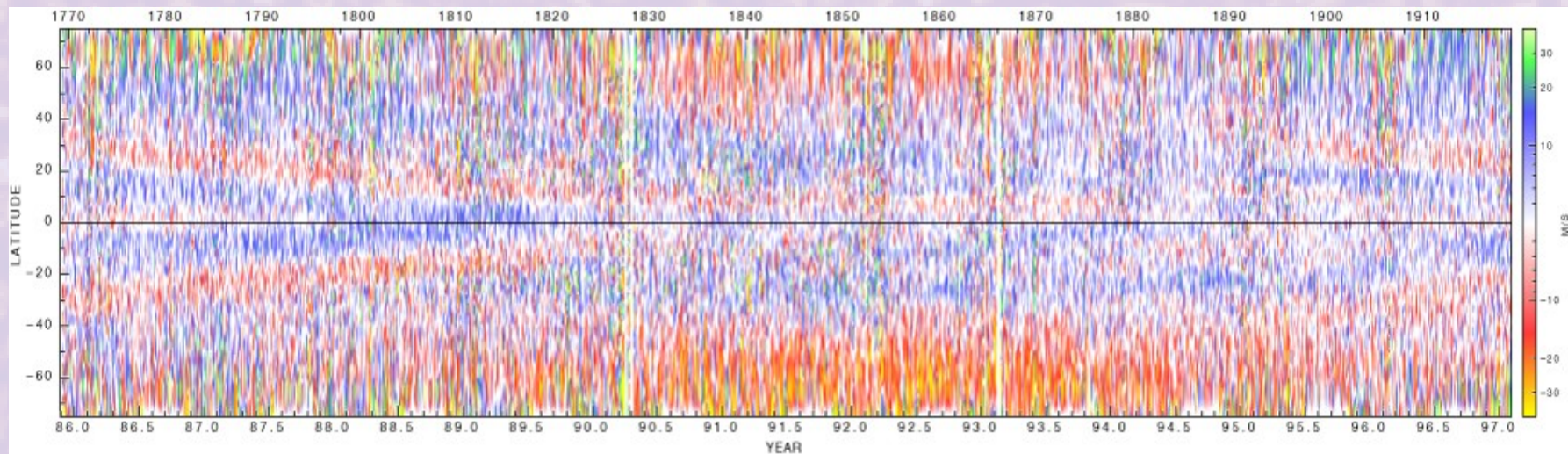
## • Sekulární změny

- 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
  - Jak rotuje jádro?

## • S cyklem aktivity

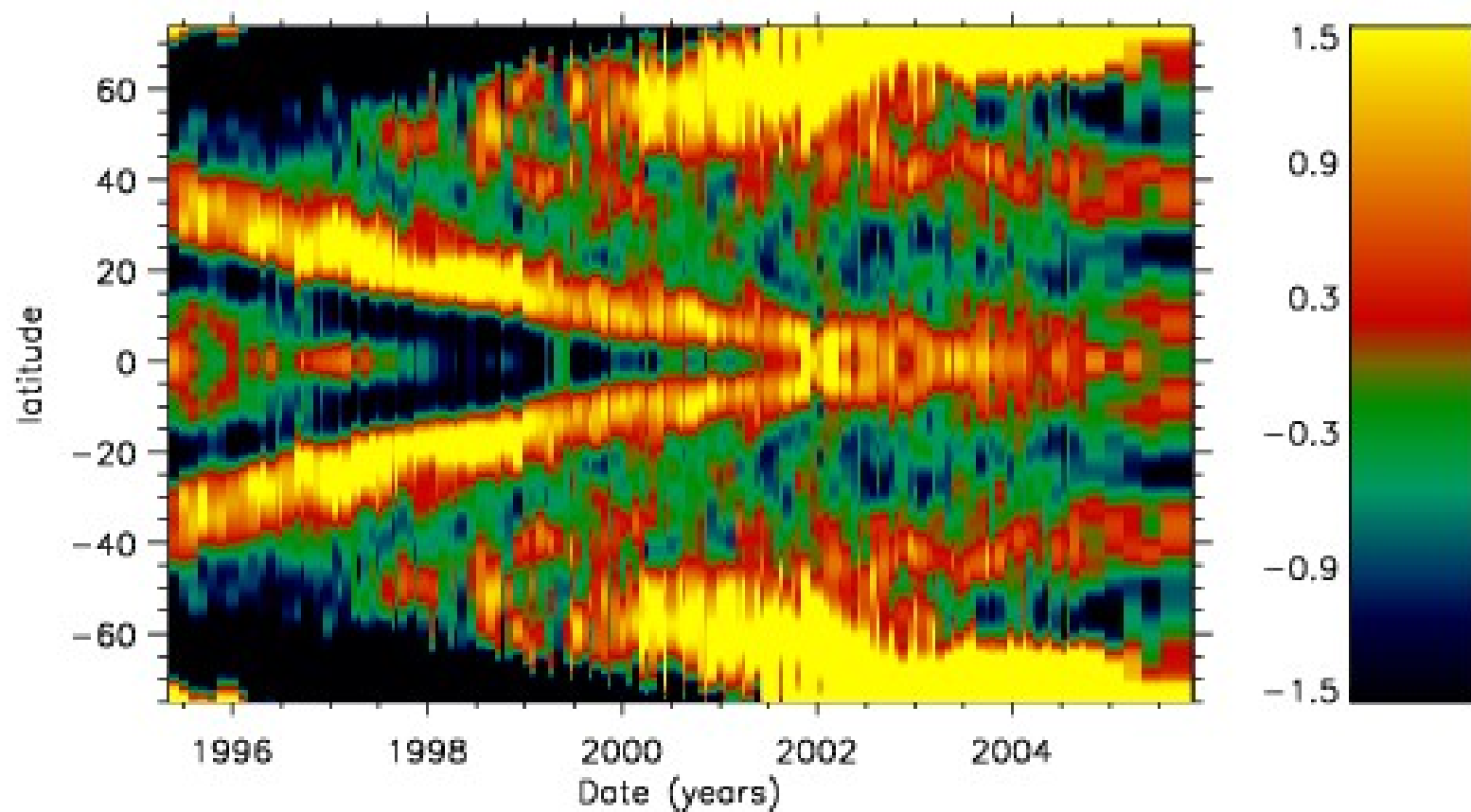
- Severo-jížní asymetrie – polokoule s míň aktivitou rotuje rychleji (Maxwellův tensor)
- Změna profilu na více rigidní v době maxima
- Lokální urychlování lokálními povrchovými magnetickými oblastmi
- Torzní oscilace

# Torzní oscilace

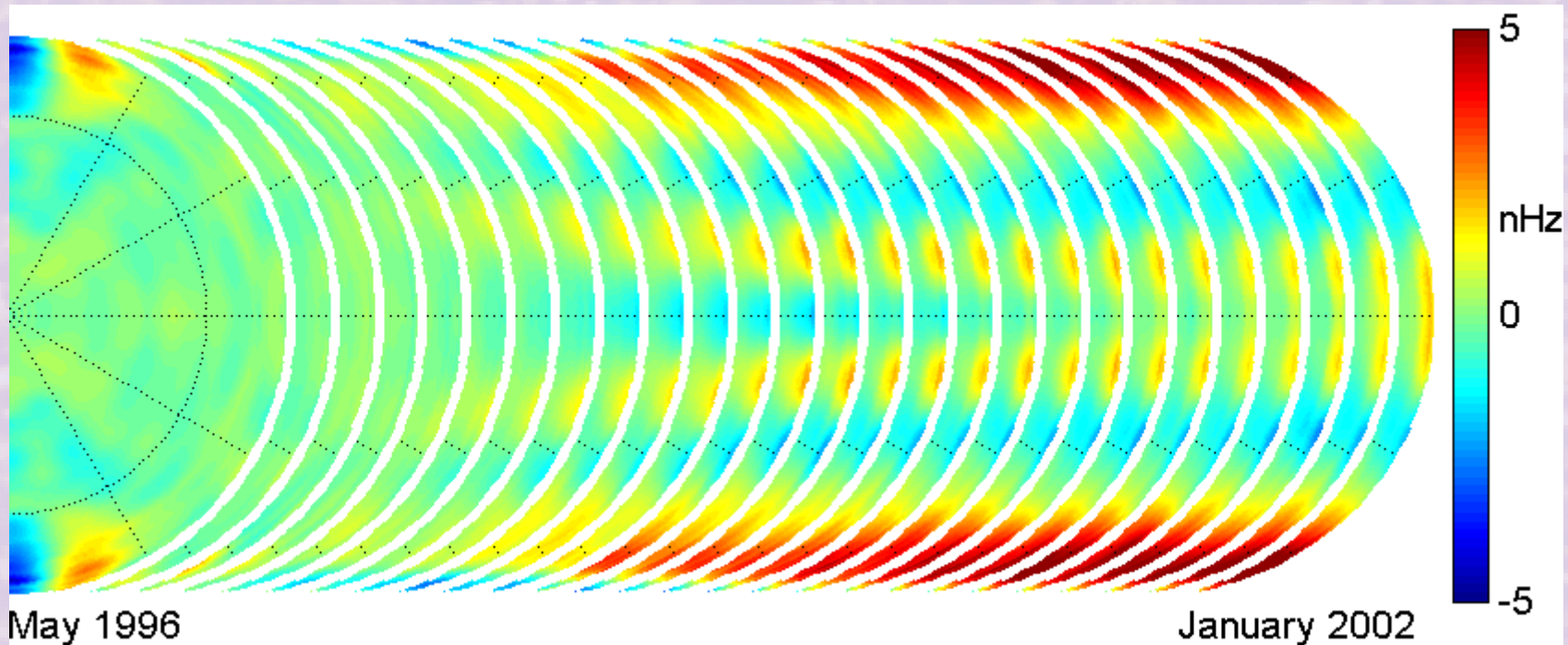


- Pásky rychlejší (pomalejší) rotace (o cca 10 m/s), migrující k rovníku s cyklem aktivity
- Aktivní oblasti na rozhraní pomalého a rychlého pásu
- Druhá větev – migrace k pólu s cyklem aktivity
- Původ
  - Nejasný
  - (Spruit 2003, Rempel 2006) Pás aktivity je o cca 5 K chladnější – vtok hmoty do pásu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

# Torzní oscilace na povrchu – lokální helioseismologie

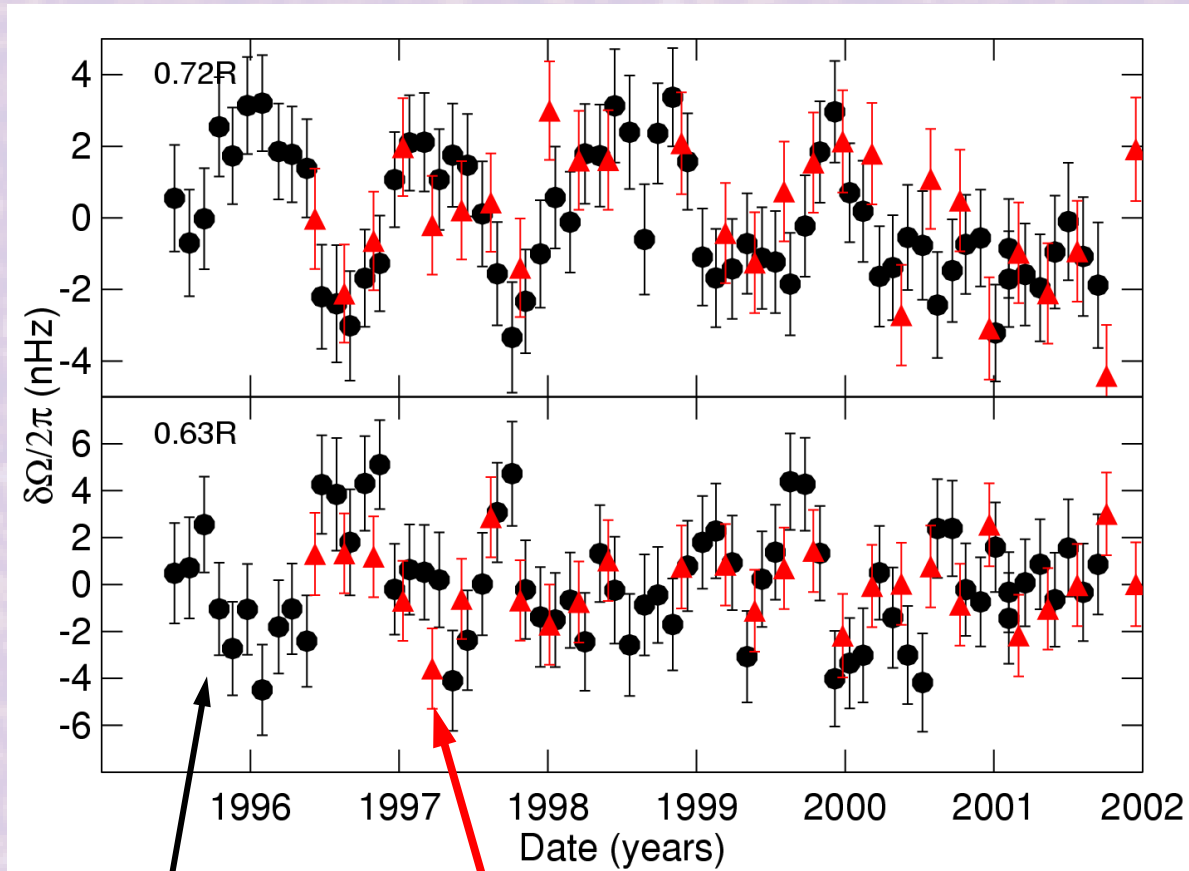


# Torzní oscilace helioseismicky



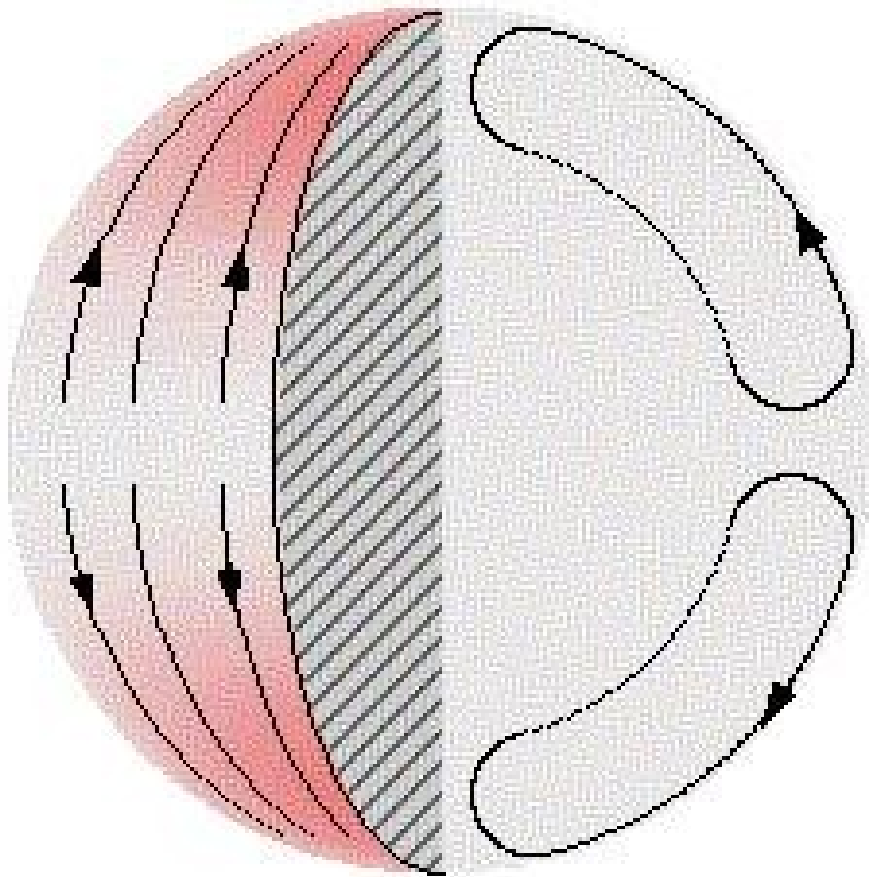
- Low-latitude větev – spíše povrchová, nejspíš efekt termální (Taylor-Proudman state) spojený s povrchovou magnetickou aktivitou – geostrofické proudění
- High-latitude větev – hluboká, nejspíše efekt Reynoldsova tensoru (mechanical forcing)

# Oscilace v tachoklině



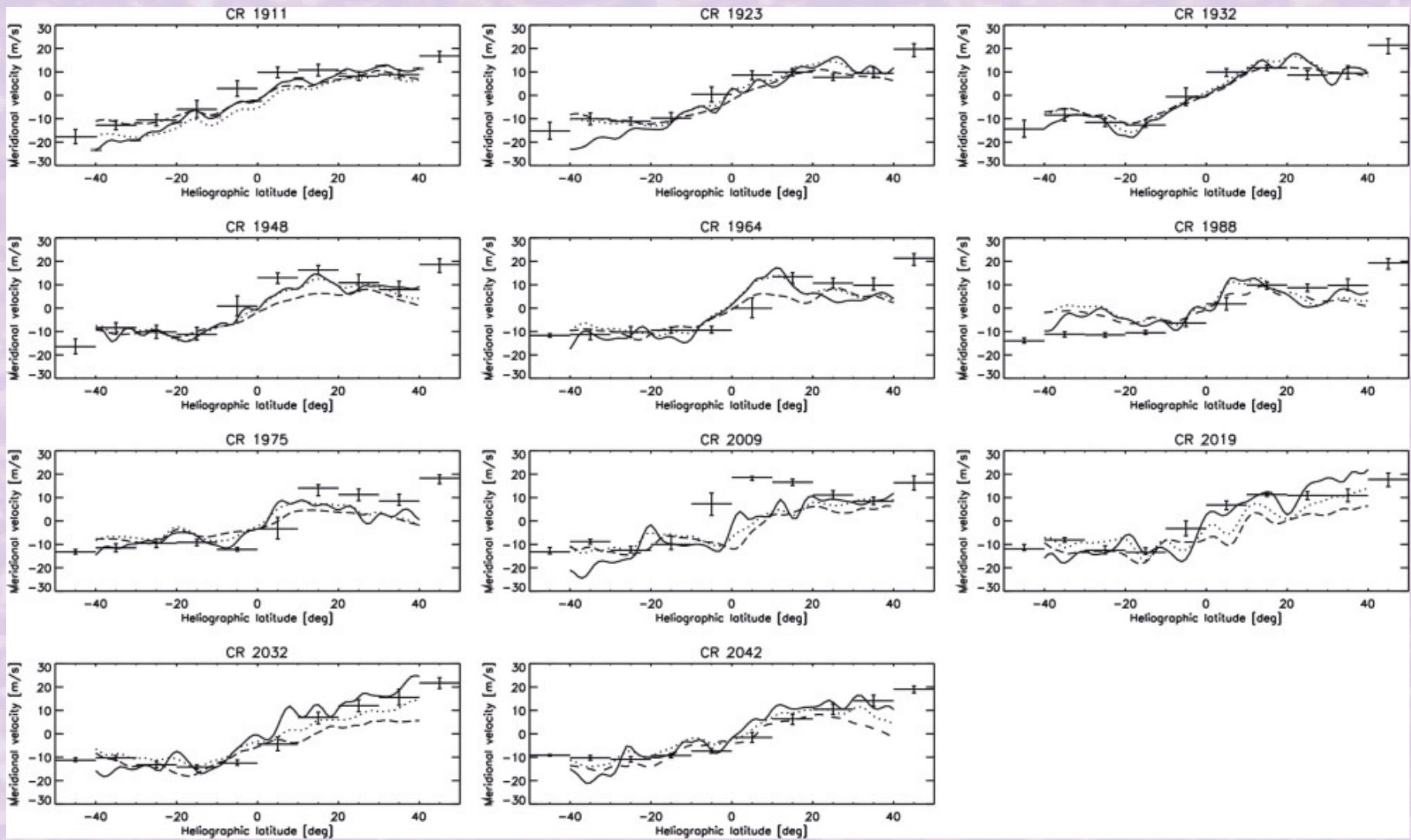
- 1,3 roku perioda
- V minimu klidnější
- ?mechanismus
- ?od roku 2002 již zřejmě neosciluje

## Meridionální cirkulace

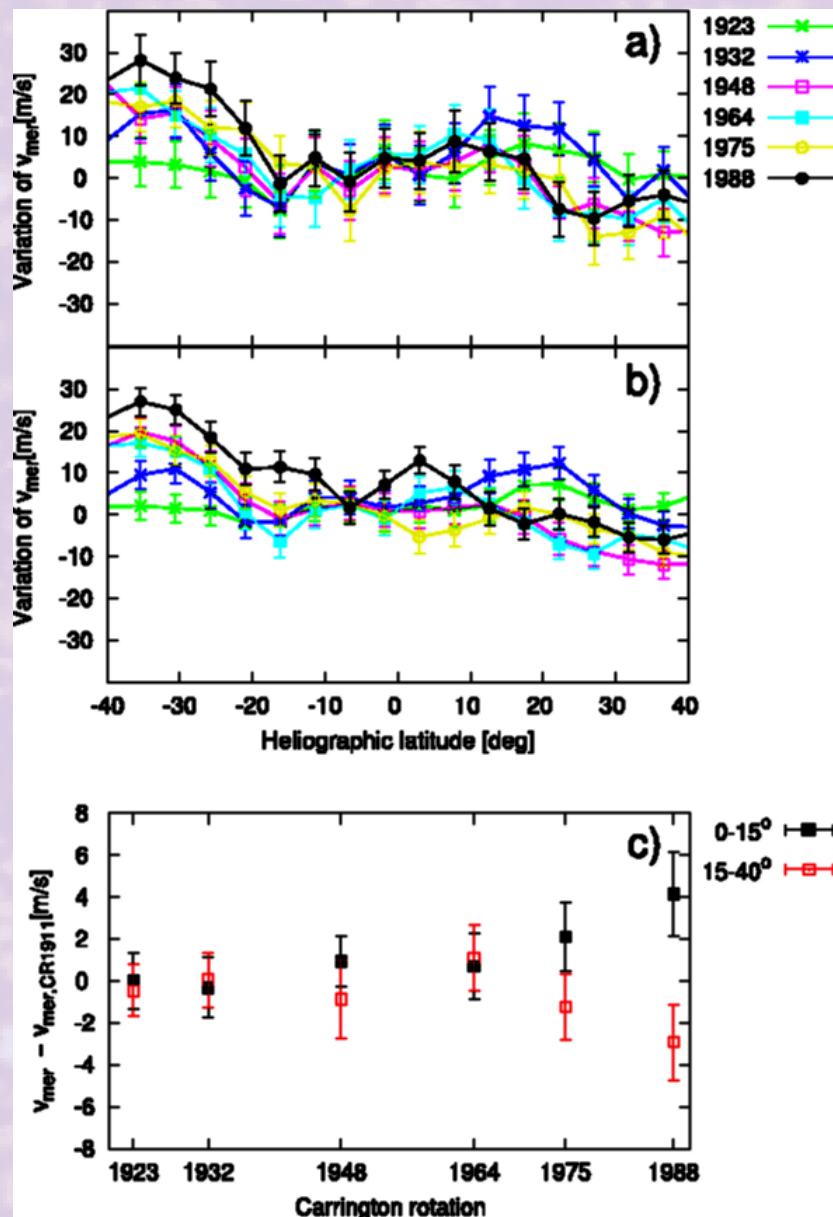


- Pomalý ( $\sim 10$  m/s) tok od rovníku k pólům
- (Zřejmě) odpovídá za odnos magnetického pole k pólu, přepólování globálního pole a jeho recyklaci
- Projeví se pouze statisticky – lokální rychlosti jsou až o dva řády větší
- Jeden z faktorů způsobující diferenciální rotaci

# Meridionální tok v průběhu cyklu



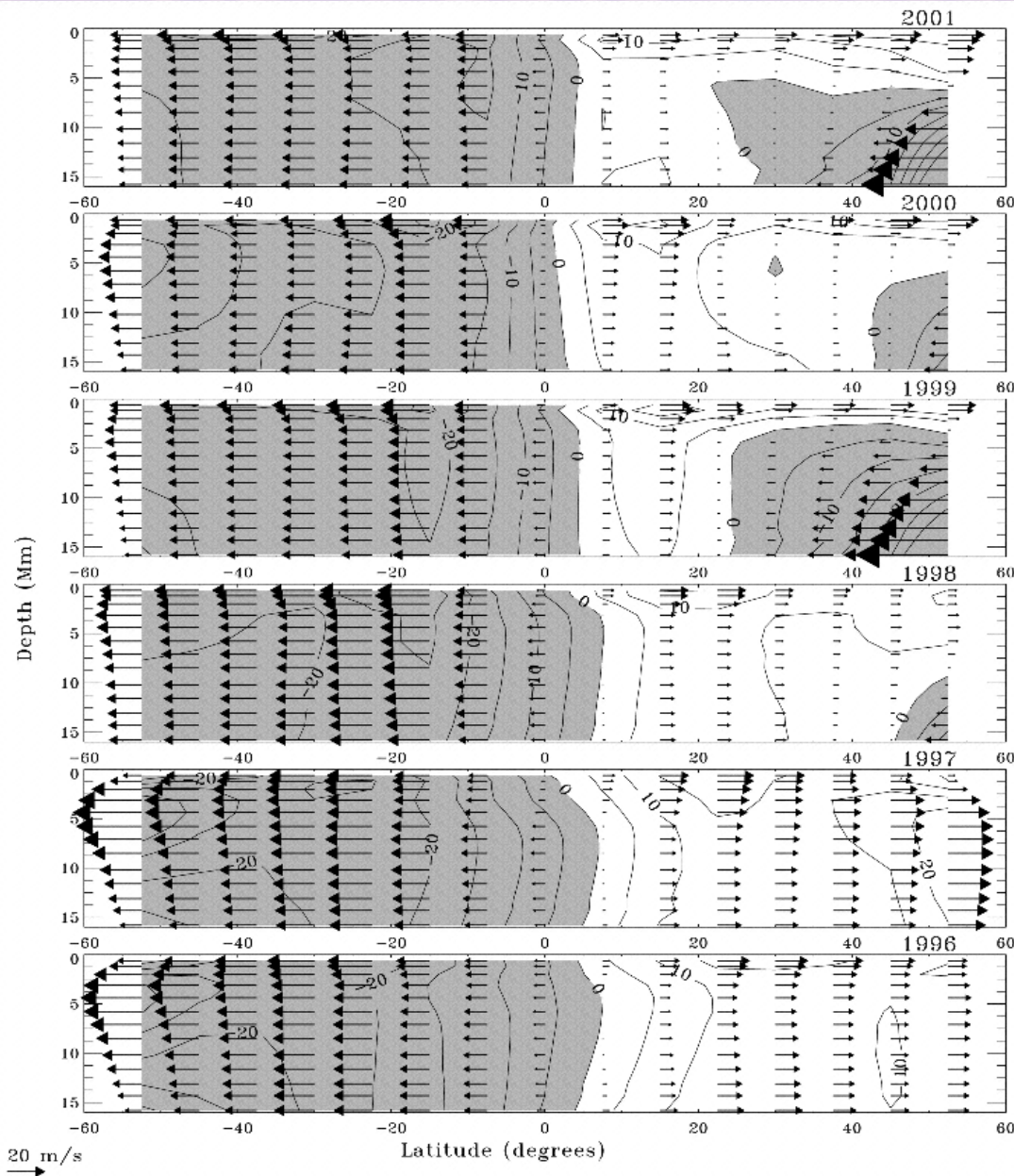
# Meridionální tok – cyklické změny



- 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

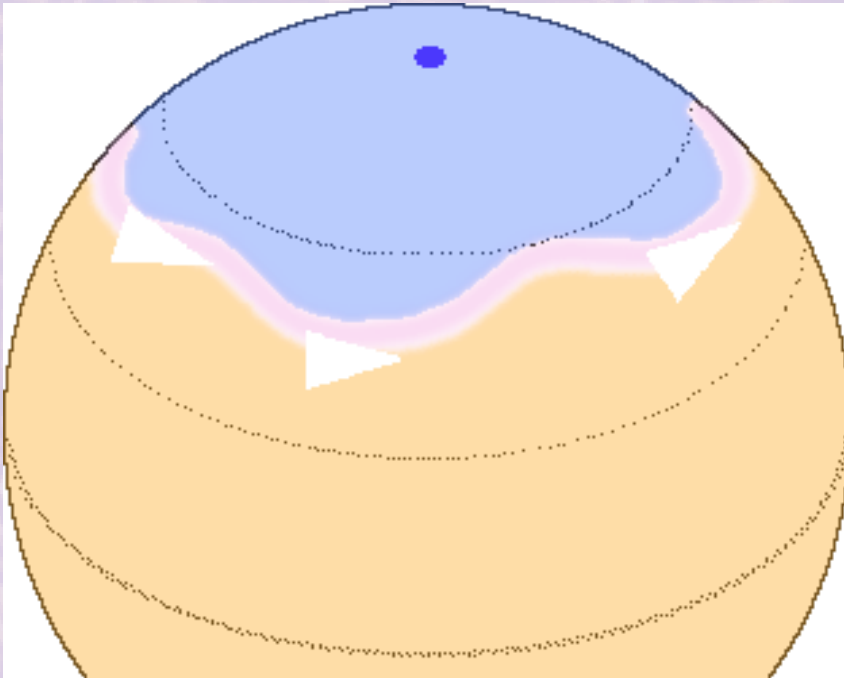


# Meridionální tok v prostoru a čase



- 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

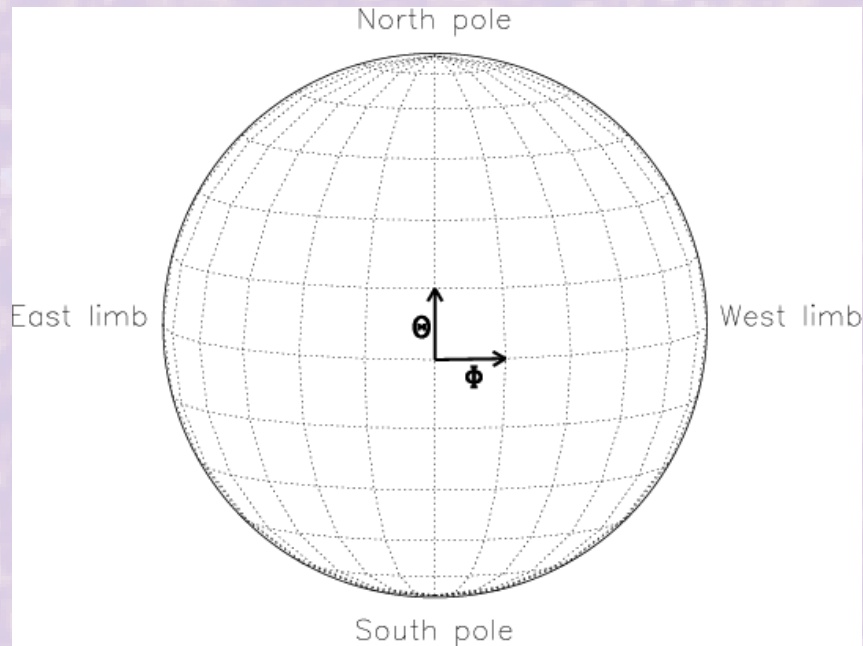
$$c = u - \frac{2\omega \cos \phi}{Rk^2}$$

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

- 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