

日震学

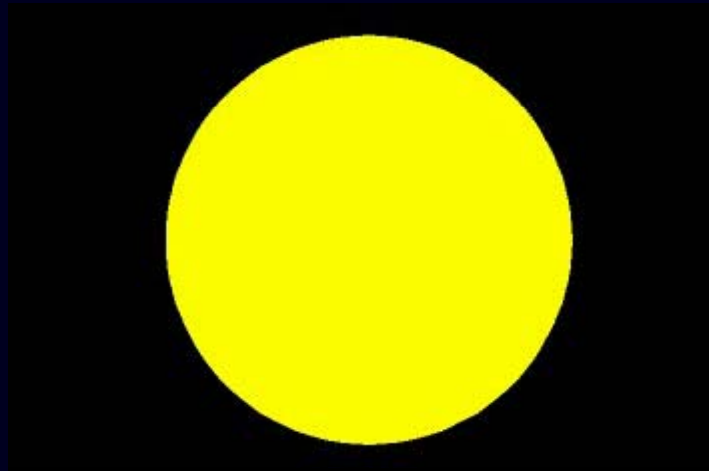
関井 隆

国立天文台

日震学とは

- 太陽表面の(主に音波による)振動・波動現象に基づいて太陽内部を調べる研究分野
 - 目的は太陽内部の観測的研究
 - 方法論の組み立ては理論的研究

太陽内部を伝わる音波の
ray path



日震学とは

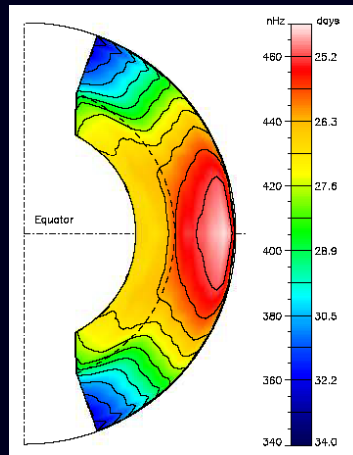
□ 太陽内部を調べる動機

■ 古くは、太陽ニュートリノ問題

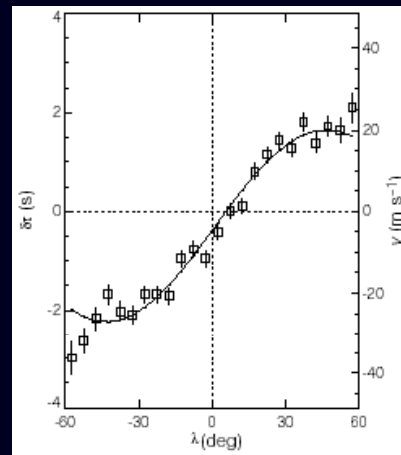
□ 恒星進化・内部構造論の検証

■ 新しくは、太陽内部のさまざまな流れ

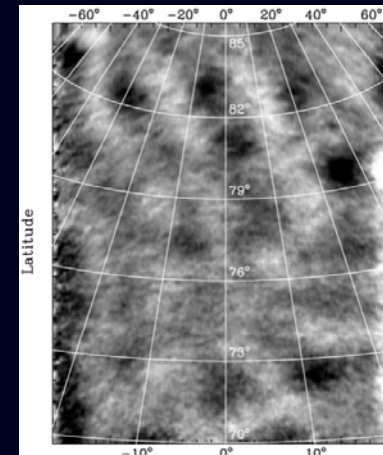
□ 太陽ダイナモ機構の重要なcomponents



差動回転



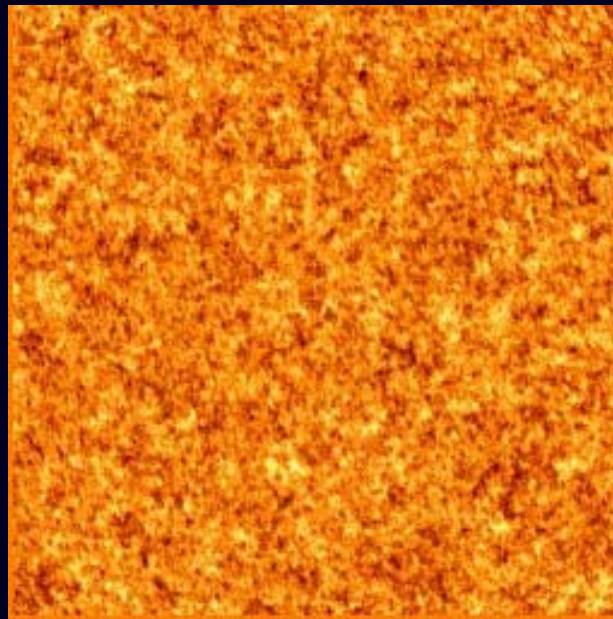
子午面流



対流(超粒状斑)

太陽のドップラー速度場

- 科学衛星SOHO搭載のマイケルソン干渉計撮像装置(MDI)による



<http://soi.stanford.edu/>

フーリエ＝球面調和関数展開

- 話を単純にするため、太陽表面速度場の動径成分が測定出来ているとする
 - 実際にはもちろん視線方向成分
- 球面調和関数分解(空間)＋フーリエ分解(時間)

$$v(\theta, \phi, t) = \sum_{lm} \int d\omega a_{lm}(\omega) Y_l^m(\theta, \phi) e^{i\omega t}$$

$$a_{lm}(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int d\Omega dt v(\theta, \phi, t) Y_l^{m*}(\theta, \phi) e^{-i\omega t}$$

$$l = 0, 1, 2, \dots$$

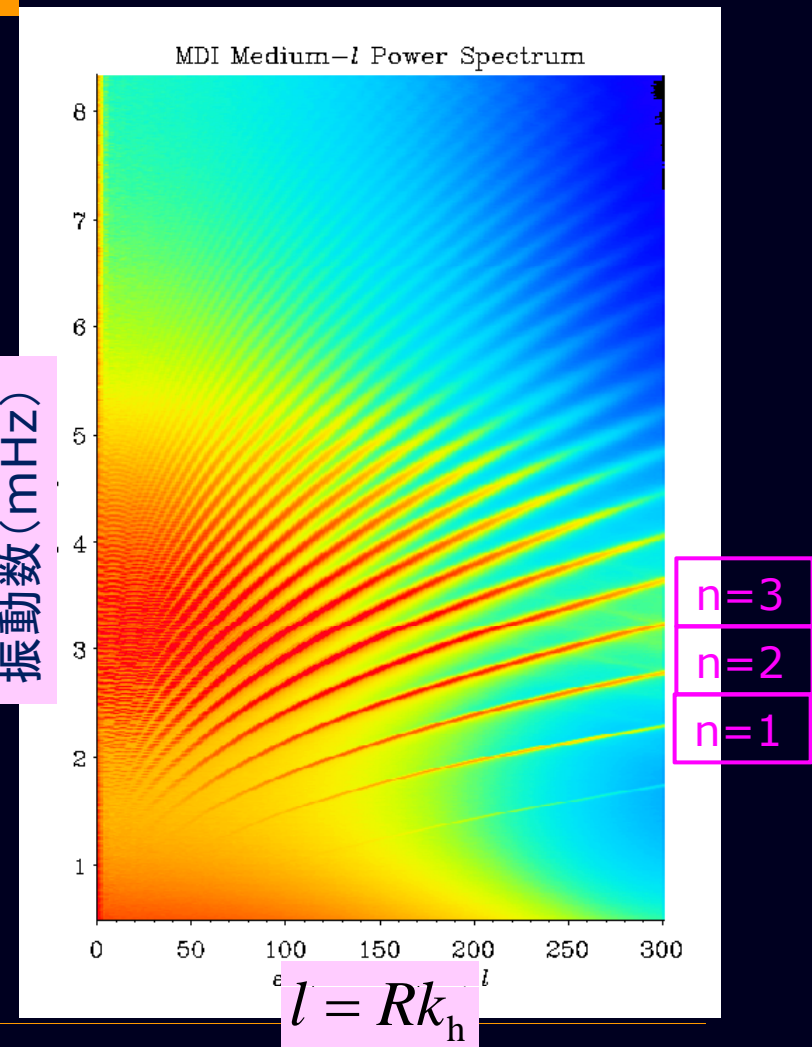
$$m = -l, -l+1, \dots, l-1, l$$

$k-\omega$ 図

- 太陽面速度場は(統計的にはほぼ)球対称なので m -平均したパワースペクトルを考えるとよい

$$p_l(\omega) = \frac{1}{2l+1} \sum_m |a_{lm}(\omega)|^2$$

- 特徴的な「リッジ構造」:
 - pモード振動(=音波的固有振動)の証拠

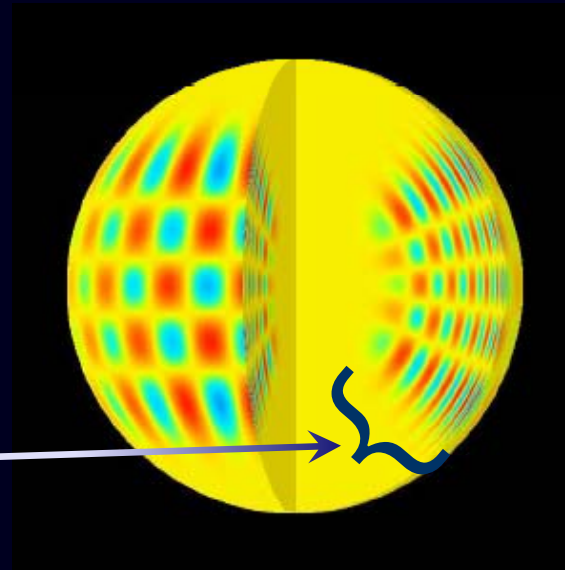


球体の固有振動パターン

□ 球体の固有振動パターン

$$l = Rk_h = R\sqrt{k_x^2 + k_y^2}$$
$$m = Rk_\phi (\text{赤道で})$$

n : 動径方向の節線数



$k-\omega$ 図

□ 固有振動数を測定可能

$$\omega_{nl} = \langle \omega_{nlm} \rangle_m$$

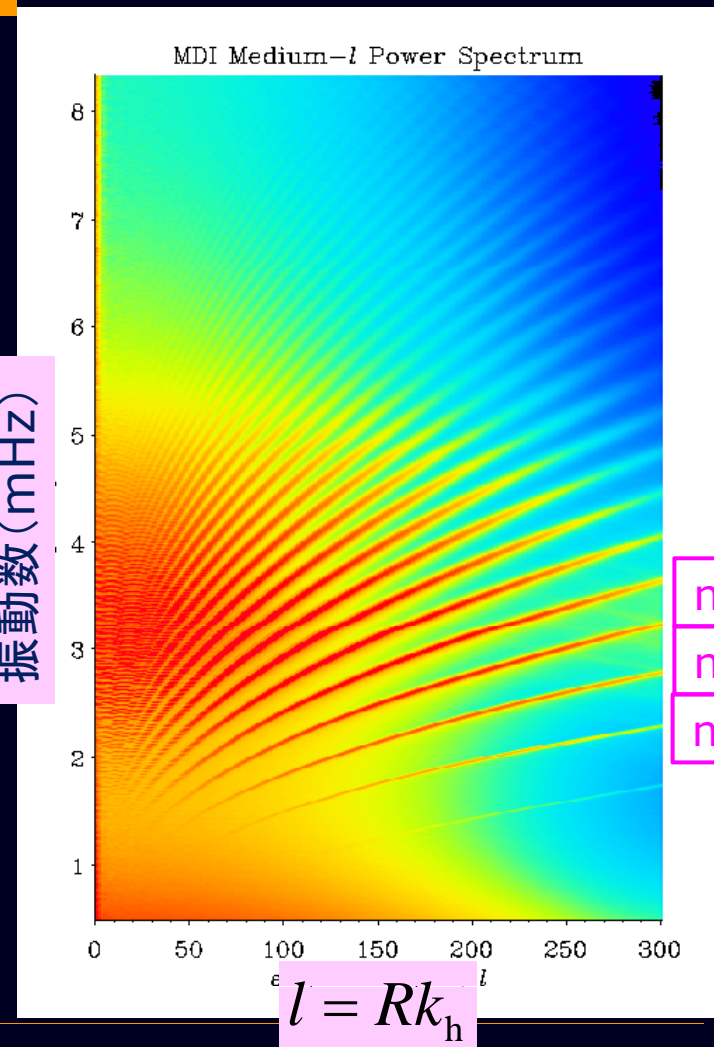
□ 球対称構造が決める部分

$$\omega_{nl} \approx \omega_0 \left(n + \frac{l}{2} + \varepsilon \right) \quad (n \gg l)$$

□ 別に m 依存性も測定

$$\Delta\omega_{nlm} = \omega_{nlm} - \omega_{nl}$$

□ 球対称からのズレが決める部分

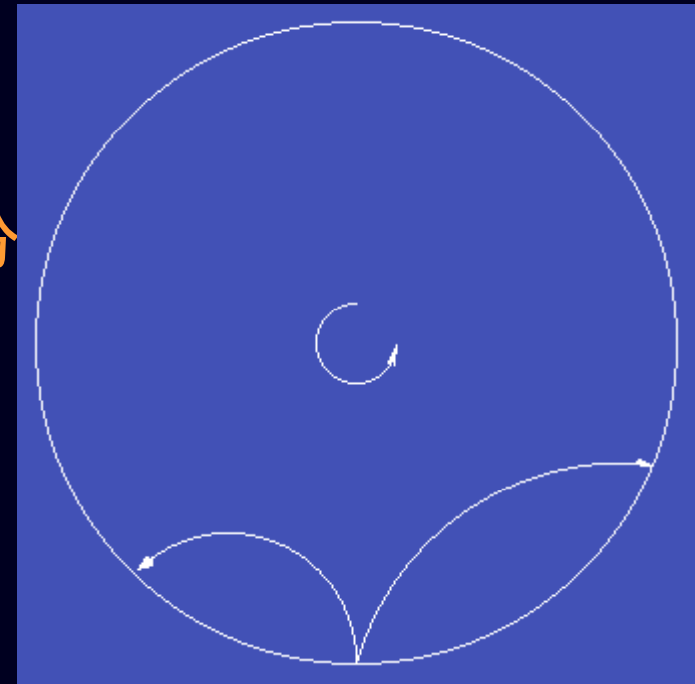


太陽の自転

- 太陽の自転は波の伝播に影響
 - 主に移流の効果

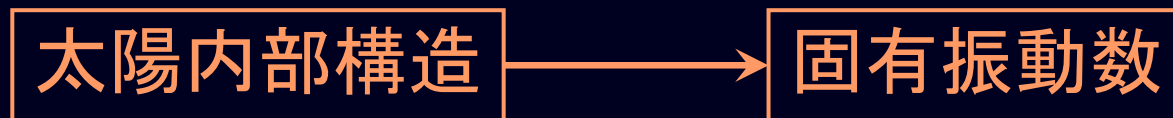
$$\Delta\omega_{nlm} \approx m\langle\Omega\rangle$$

- ただし太陽はslow rotator
 - 力学的タイムスケール～30分
 - 自転周期～1ヶ月



(グローバルな) 日震学

- 太陽の固有振動数は太陽内部構造で決まる



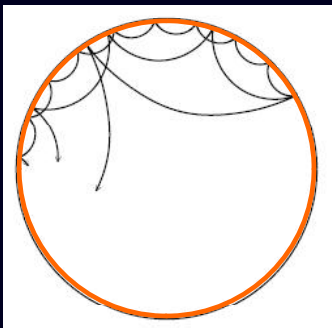
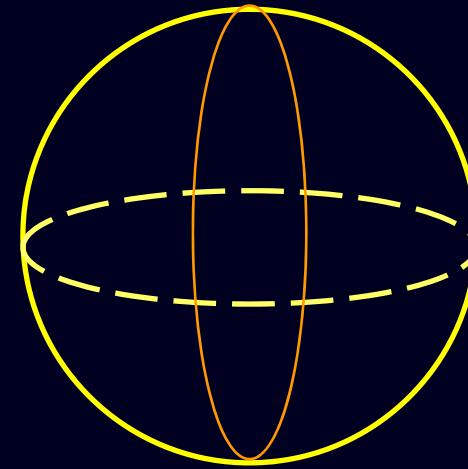
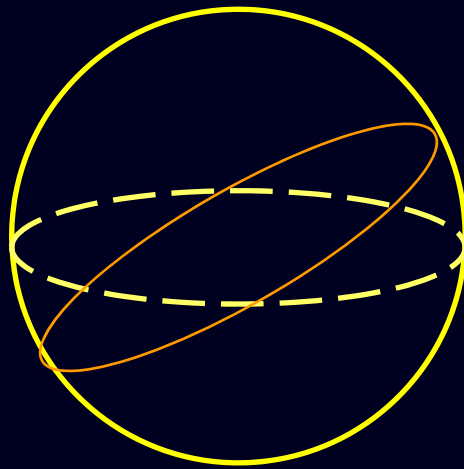
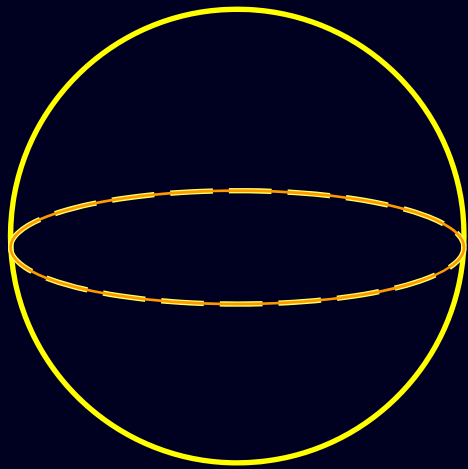
- 日震学では、逆に固有振動数から太陽内部構造を決める



インバージョン

固有振動数のインバージョンの限界

□ Ray paths for various sets of (l,m)



$m=l$

$m=l/2$

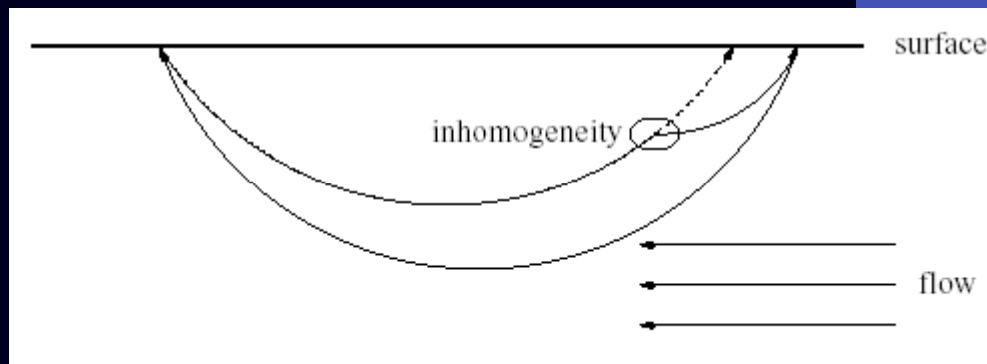
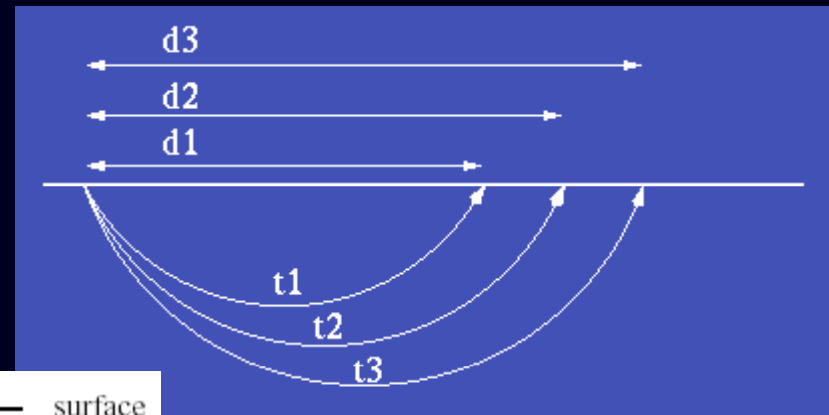
$m=0$

$$\cos \theta = \sqrt{1 - \frac{m^2}{l(l+1)}}$$

対称性の高い構造しか拾わない

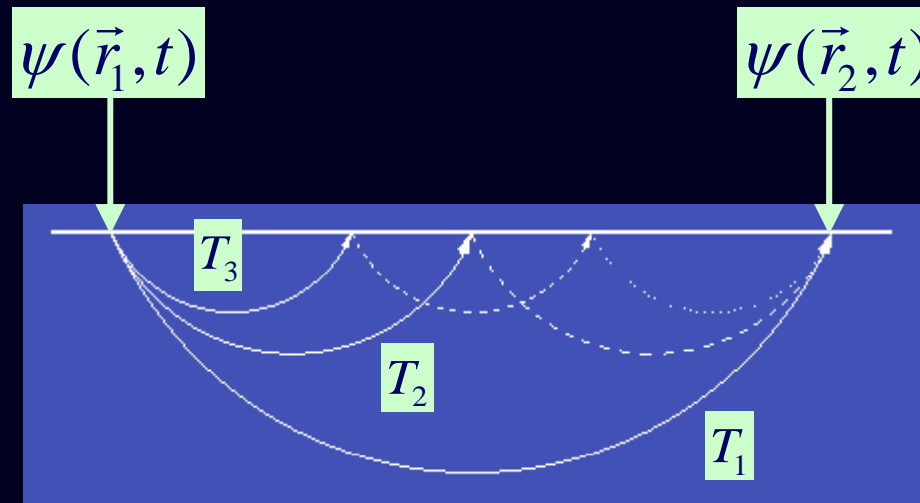
局所の日震学(≠グローバルな日震学)

- 固有モードによる記述を離れる
- 表面下の波の局所的な伝播の測定を試みる



時間-距離法

□ 相互相関関数

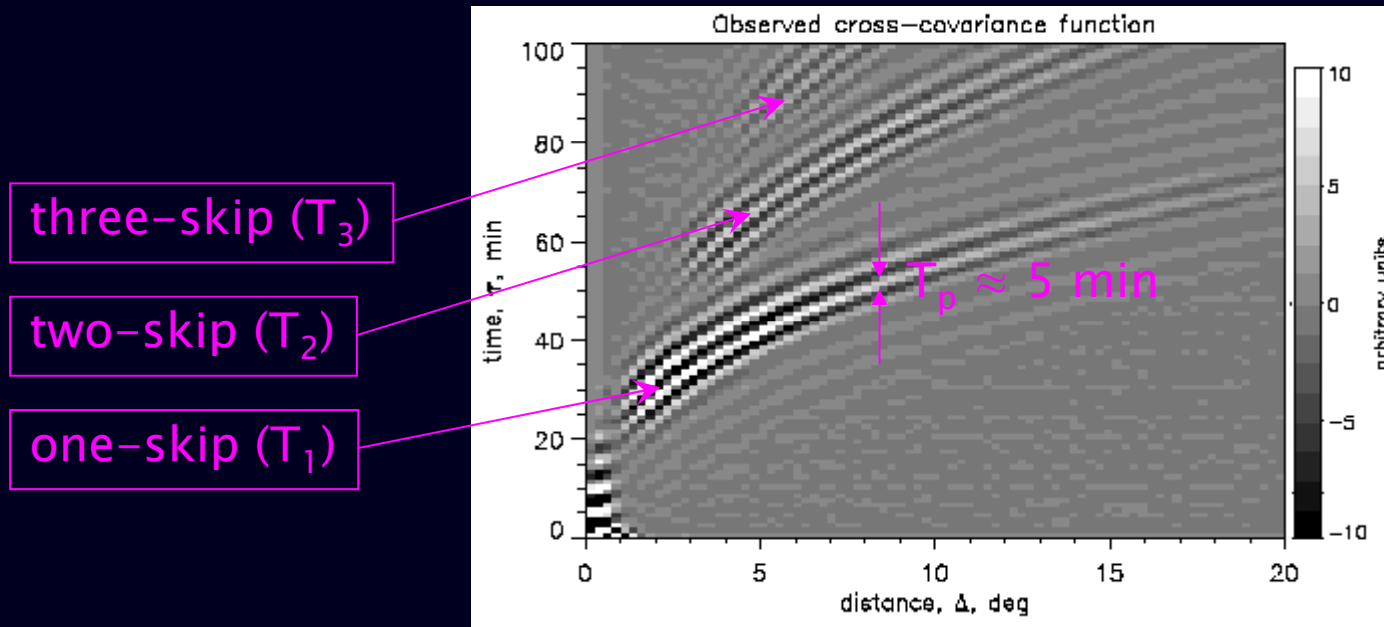


$$C(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \tau) = \int \psi^*(\vec{r}_1, t) \psi(\vec{r}_2, t + \tau) dt$$

C は $\tau \approx T_1, 2T_2, 3T_3$ 付近で大きくなる

時間-距離法

□ 実際の時間-距離図(相互相関関数)



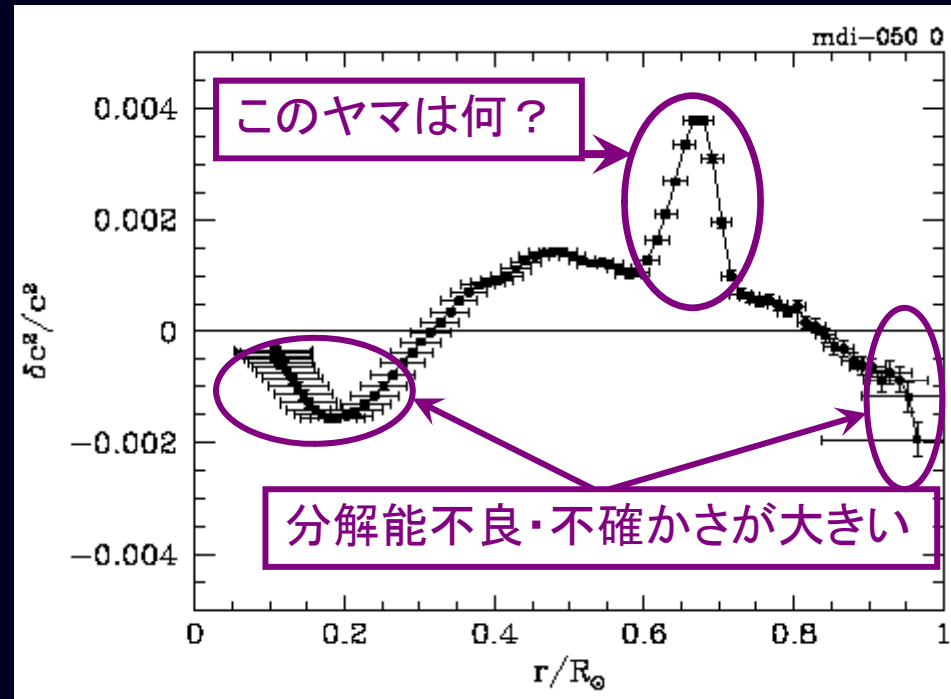
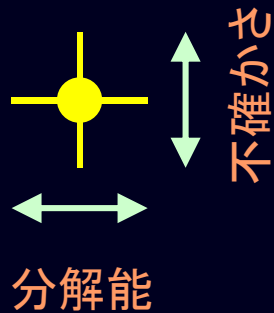
相互相関関数

$$C(\Delta, \tau) = \int_{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2| = \Delta} \psi^*(\vec{r}_1, t) \psi(\vec{r}_2, t + \tau) d\vec{r}_1 d\vec{r}_2 dt$$

太陽内部の音速分布

□ 日震学では・・・モデルとの差は0.5%以下

$$\frac{\delta c^2}{c^2} = \frac{c^2(\text{sun}) - c^2(\text{model})}{c^2(\text{model})}$$



太陽の内部回転

□ 日震学の結果

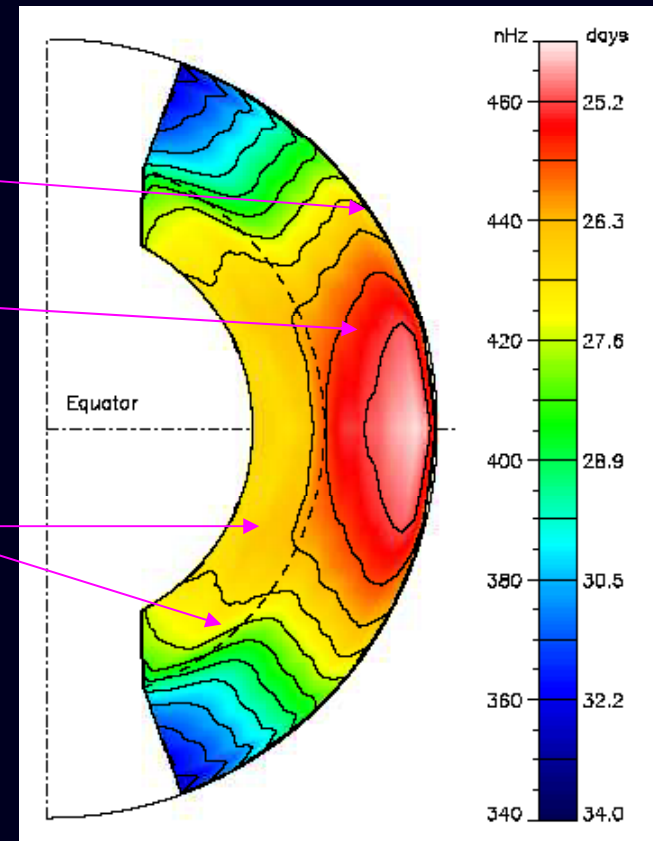
表面付近の急勾配(シア)

テイラー柱はない

「タコクライン」

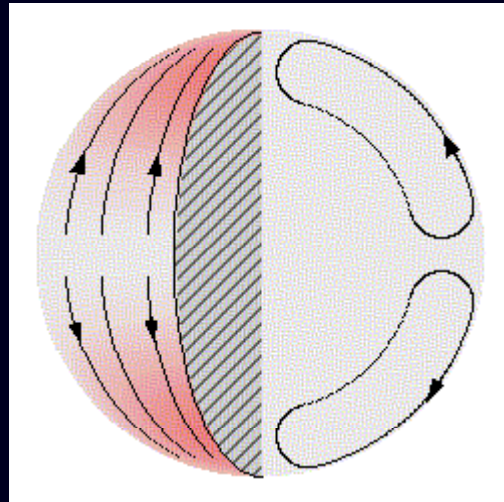
剛体回転？

90年代以前のシミュレーションや
ダイナモ計算は却下

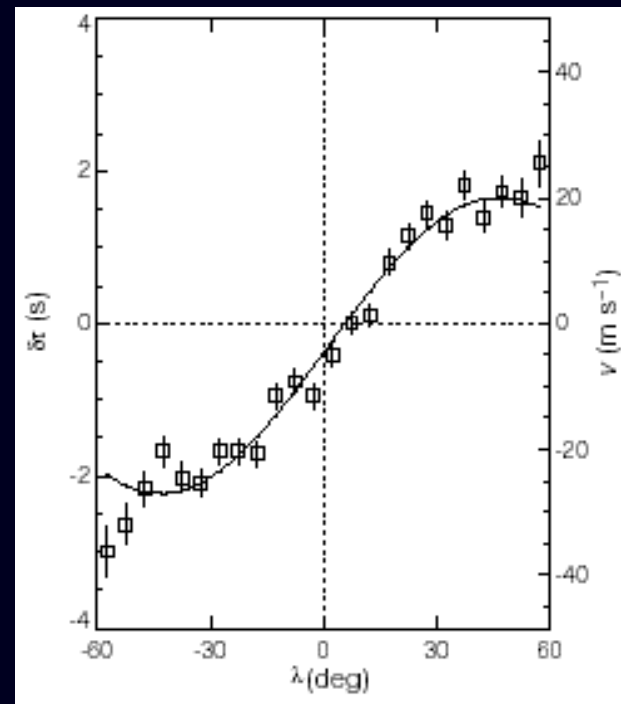


子午面環流

- 子午面環流の時間—距離法による測定
 - 極向きに最大20m/s程度の速度
 - ある種のダイナモには重要な要素



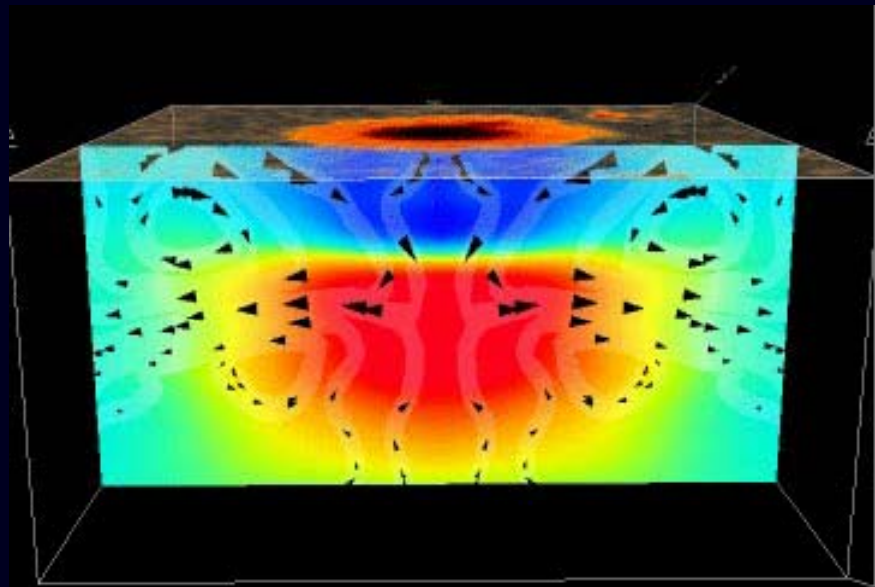
Giles et al (1997)



黒点周囲の構造

□ 時間-距離法から

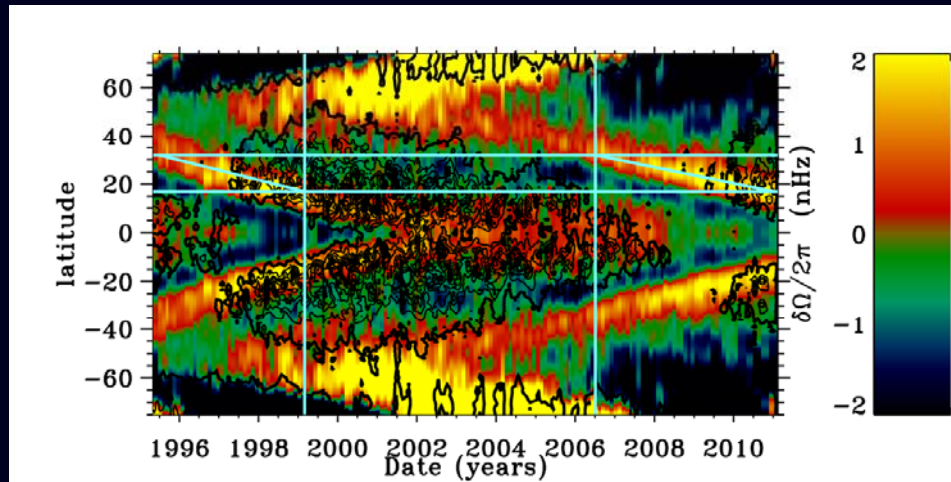
- 表面直下では黒点の中心に向かう流れ
- Parkerのスパゲッティ・モデル？



<http://soi.stanford.edu/press/ssu11-01/>

内部回転のsolar-cycle variation

□ 自転角速度から平均値を除いた残り



$r=0.99R$

Hill et al (2011)

- バンド構造は活動領域下の低温が作る流れ (Spruit 2003) ?
 - もしそうなら、これは異常な極小期の原因でなく結果
 - とは言え、new branchの不在は気になる

まとめ

- 日震学: 太陽の内部を探る観測的アプローチ
 - 音波による内部構造診断
 - 対称性の高い構造 → グローバル日震学
 - 対称性の低い構造 → 局所的日震学
 - グローバル日震学で、静的構造や自転の様子はかなりわかって来た
 - 局所的日震学はまだ発展中の分野だが、太陽の局所的な構造や力学的構造を明らかにするのに役立つと期待される
 - SDO/HMI: full discを4K×4K、45-sec cadenceで
 - DCを離れた時の解析の困難を認識