

## 4 太陽の外層と活動現象

### 4.1 太陽の外層

- 直接観測ができる領域
- 光球：可視光で見える「表面」
  - ▷ 厚み約 100km の層、温度 6000K 4500K
  - ▷ 周縁減光 ( limb darkening )
  - ▷ 粒状斑 ( granule )、超粒状斑 ( supergranule )、黒点 ( sunspot )、白斑 ( facula ) などの構造
- 彩層：光球とコロナの間の層
  - ▷ 光球上 2000km くらいまで、温度 4500K 10000K
  - ▷ 最上部は遷移層と呼ばれる
- コロナ：太陽大気の最外層
  - ▷ up to ~ a few  $R_{\odot}$
  - ▷ 数百万 K の高温・希薄な領域
  - ▷ コロナは何故熱いか？「コロナ加熱問題」
    - フレアによる加熱？
    - 波動 ( 磁気流体波 ) による加熱？

### 4.2 太陽外層の諸現象

- 活動領域の生成・進化・散逸
- 太陽風
  - ▷ 惑星間空間へ吹き出すプラズマの流れ

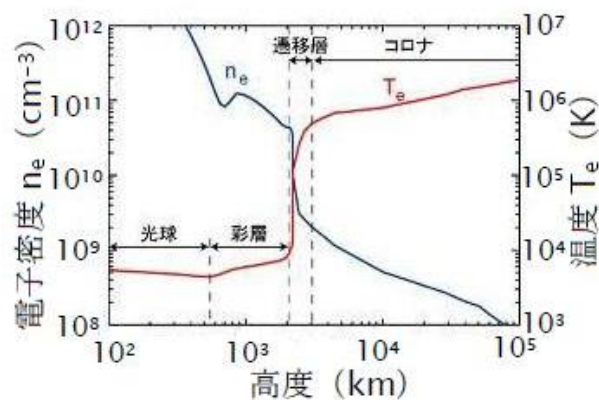


図 7: 太陽外層の構造

<sup>1</sup><http://solarwww.mtk.nao.ac.jp/helioseismology/Komaba2009/>

▷ 速度  $\lesssim 800\text{km/s}$ 、粒子密度  $1 - 10\text{cm}^{-3}$

• フレア

- ▷ 激しいエネルギー解放現象：磁気リコネクション？
- ▷ 数分～数時間の間に  $10^{29} - 10^{32}\text{erg}$
- ▷ 電波から X 線・  $\gamma$  線まで。粒子加速も
- ▷ CME(Coronal Mass Ejection) と呼ばれる、大量の質量放出を伴うことも

• 5分振動

- ▷ 1961年に Leighton らが発見
- ▷ 太陽面の速度場（場所の関数としての速度）が約5分の周期で振動
- ▷ 日震学へと発展

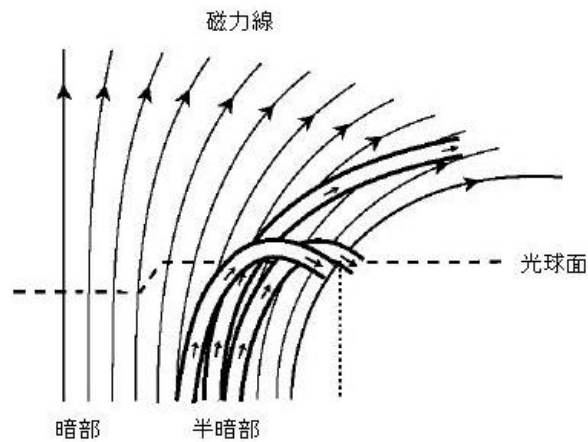


図 8: 黒点の磁場構造

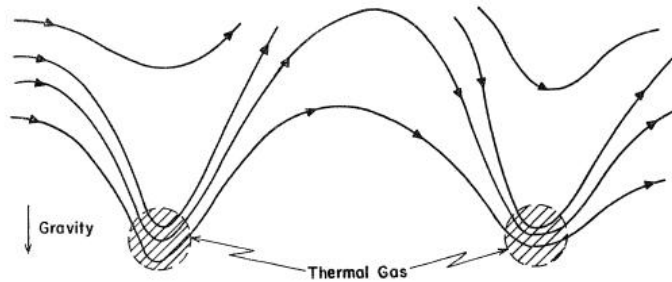


図 9: Parker のメカニズム

	大きさ	寿命	
粒状斑	~ 1,000km	~ 10 min	
超粒状斑	~ 30000km	~ 1 day	
黒点	~ 1000 - 10000km	a few days to a few months	4000K、~ a few kG
白斑	~ 200km	~ 20 min	光球+~ 200K、~ kG

表 5: 光球にみられる様々な構造

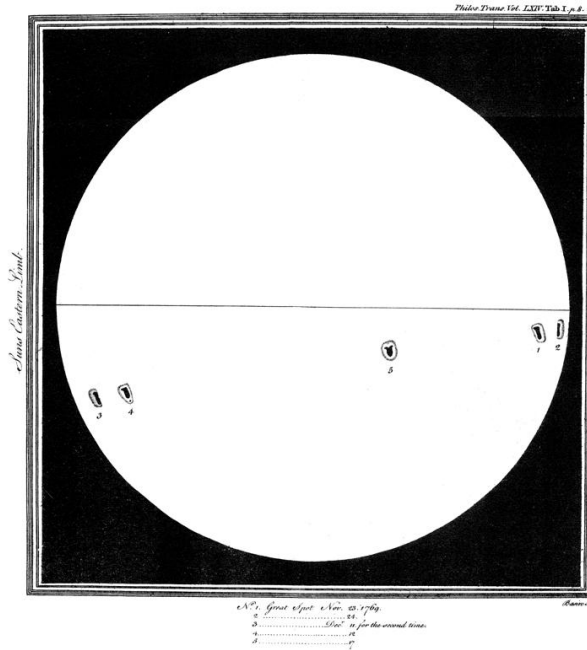


図 10: Wilson 効果 (A. Wilson の 1774 年の論文より)

### 4.3 黒点・活動領域

- Hale は 1908 年に黒点の磁場を測定 (Zeeman 効果を利用)
- 暗部・半暗部に分かれる。半暗部では磁力線が寝ている
- 浮上した磁束管の断面：対になって現われる
  - ▷ 磁場の凍りつき・磁気圧・磁気張力・Parker 不安定
  - ▷ 先行黒点と後続黒点とは極性が反対
  - ▷ 先行黒点の方が緯度が低い (Joy's law)
  - ▷ Wilson 効果、Wilson depression
- 半暗部には外向きの流れ (Evershed 流): 一種のサイフォン効果? 対流?
- 生成・進化・崩壊の過程には磁場と流れの相互作用の理解が重要

### 4.4 活動周期とダイナモ機構

- 太陽黒点数は 11 年周期で増減
  - ▷ Maunder 極小期
  - ▷ 2009 年現在、黒点数は異常に低い
- 磁場の極性まで考えると、22 年周期
- 活動の極大期の太陽は明るい? 暗い?
- ダイナモ機構：磁場と流れ (自転・対流) との相互作用
  - ▷  $\alpha$ - $\omega$  ダイナモ
  - ▷ 子午面流 (meridional flow) も重要な役割を果たしている?

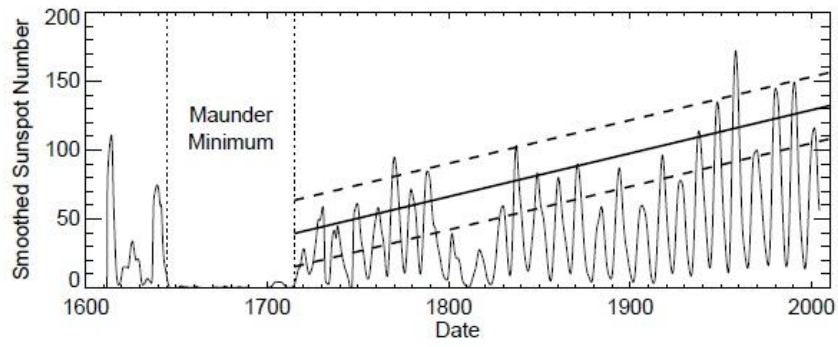


図 11: 太陽の活動周期と Maunder 極小期

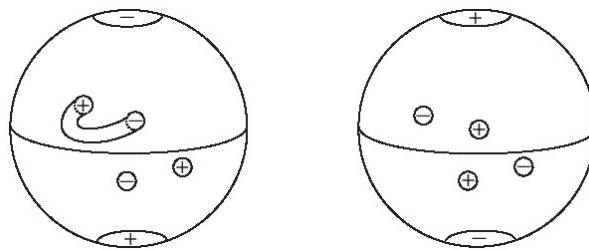


図 12: 連続する活動周期における典型的な磁場の極性配置の反転

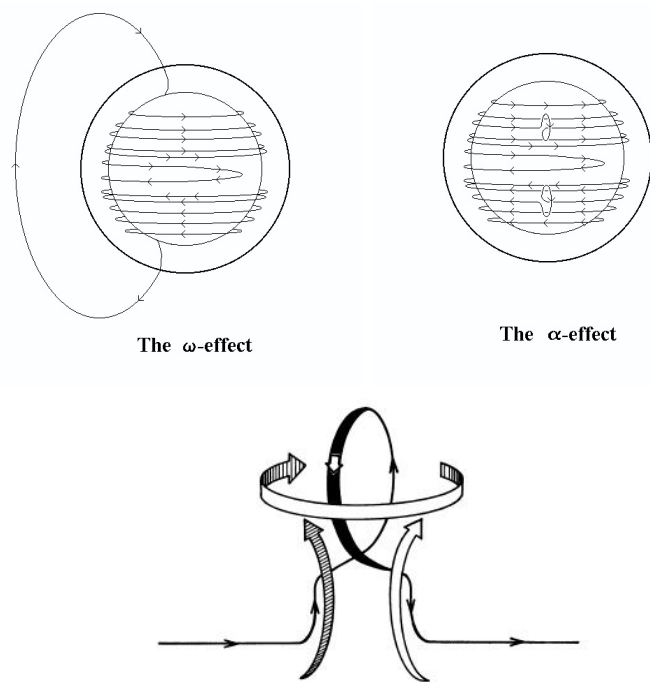


図 13: ダイナモ機構 ( $\alpha - \omega$  ダイナモ) による磁場の再生

## 5 太陽振動と日震学

### 5.1 太陽振動と日震学

- 太陽は振動 (脈動) している — Leighton 達が supergranule による速度場の変動成分を探している際に発見 (5分振動) 後に、太陽の固有振動であることがわかる
  - ▷ 振動の様相 (例えば振動数) は振動体の構造で決まる
  - ▷ だから、太陽の振動を観測すれば、太陽の内部構造を調べることが出来る (日震学, Solar seismology, Helioseismology)
  - ▷ 何故、太陽の内部を調べたいか: (古くは) 太陽ニュートリノ問題・(現在でも) 太陽内部のダイナミクスなど
  - ▷ 地震学と類似
- 1990年代まで: 固有振動数を基礎データとする方法が主流 (グローバルな日震学)
- 1990年代終わり頃から: 波の伝播時間と伝播距離の関係を基礎データとする方法が急発展 (局所の日震学)
- 日震学の中心となるのは、「逆問題」(inverse problem) の方法 (⇔ 順問題)
- 対象を星にすれば星震学 (Asteroseismology)

### 5.2 5分振動の観測

#### 5.2.1 太陽振動の観測

- Doppler 速度の測定: 吸収線の受ける Doppler 効果を利用
- 振動成分の取り出し

$$\mathbf{v}_{\text{surface}} \simeq \mathbf{v}_{\text{rot}} + \mathbf{v}_{\text{conv}} + \mathbf{v}_{\text{osc}}$$

回　　転　　対　　流　　振　　動

- ▷ 対流成分
  - granule —  $d \sim 10^3 \text{km}$ ,  $\tau \sim 8 \text{min}$
  - supergranule —  $d \sim 3 \times 10^4 \text{km}$ ,  $\tau \sim \text{day}$
- ▷ 適当な長時間平均 (例えば  $\gtrsim 30 \text{min}$ ) を取ると回転運動による成分と、対流運動のうち supergranule による成分とが残る (回転運動による成分は低次の polynomial fit で取り出せる)  
⇒ 長時間平均を差し引くことで、振動の成分 (+ granule の成分) を取り出せる
- Doppler 速度の空間マップが Dopplergram

#### 5.2.2 振動の成分解析: $k - \omega$ 図

- 振動現象を解析する場合、色々な波長や周波数ごとの成分にわけて考えると便利ことが多い

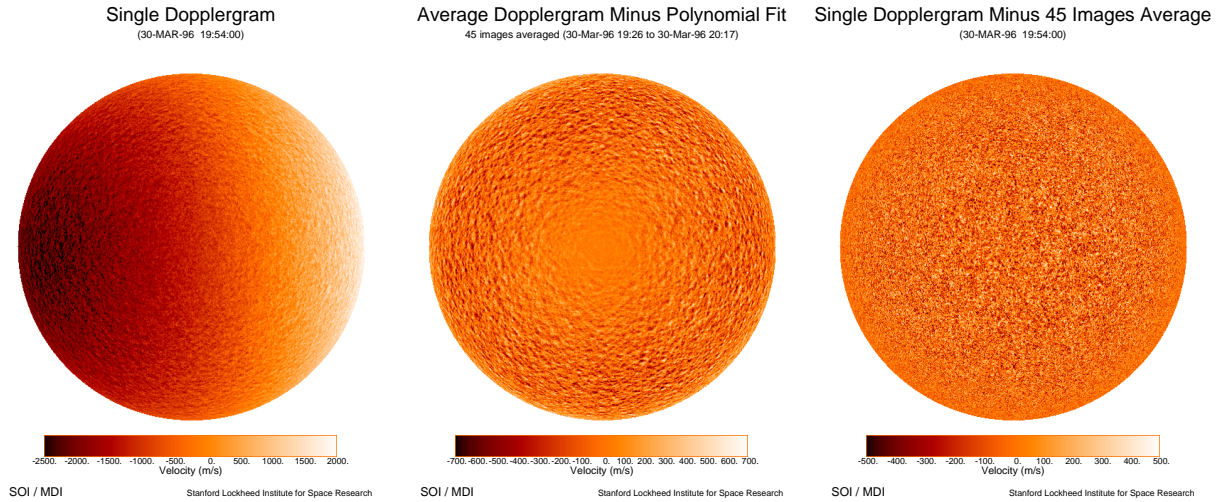


図 14: MDI による Dopplergrams 左 : 全 Doppler signal、中 : supergranule 成分、右 : 振動成分

- ▷ 例 : 1次元の弦の振動 (固定端) の場合、時刻  $t$  における場所  $x$  の変位を  $\xi(x, t)$  ( $0 \leq x \leq 1$ ) として

$$\xi(x, t) = \int d\omega \sum_{n=1}^{\infty} a_n(\omega) \sin(\pi n x) e^{i\omega t}$$

- ▷ 例 : 2次元の膜の振動 (固定端) の場合、同様に時刻  $t$  における場所  $(x, y)$  の変位を  $\xi(x, y, t)$  ( $0 \leq x \leq 1, 0 \leq y \leq 1$ ) として

$$\xi(x, y, t) = \int d\omega \sum_{m,n=1}^{\infty} a_{mn}(\omega) \sin(\pi m x) \sin(\pi n y) e^{i\omega t}$$

- 上記の例の様に

(変位) = (色々な周波数・色々な空間パターンについての成分の和)

の形をとる。球面では球面調和関数

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

を使う ( $l = 0, 1, \dots$  は節線の総数、 $m = -l, -l+1, \dots, l$  は緯度方向に走る節線の総数で、 $P_l^m(\cos \theta)$  は Legendre 陪関数と呼ばれる)

- 太陽表面の動径速度場は  $\{Y_l^m(\theta, \phi)\}$  で展開して

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

となる。係数  $a_{lm}(\omega)$  は

- ▷ 時間的には角周波数  $\omega$  で変動し
- ▷ 空間的には  $Y_l^m(\theta, \phi)$  で表されるパターンをもつ

成分の強さを表わし、 $|a_{lm}(\omega)|^2$  をパワーという

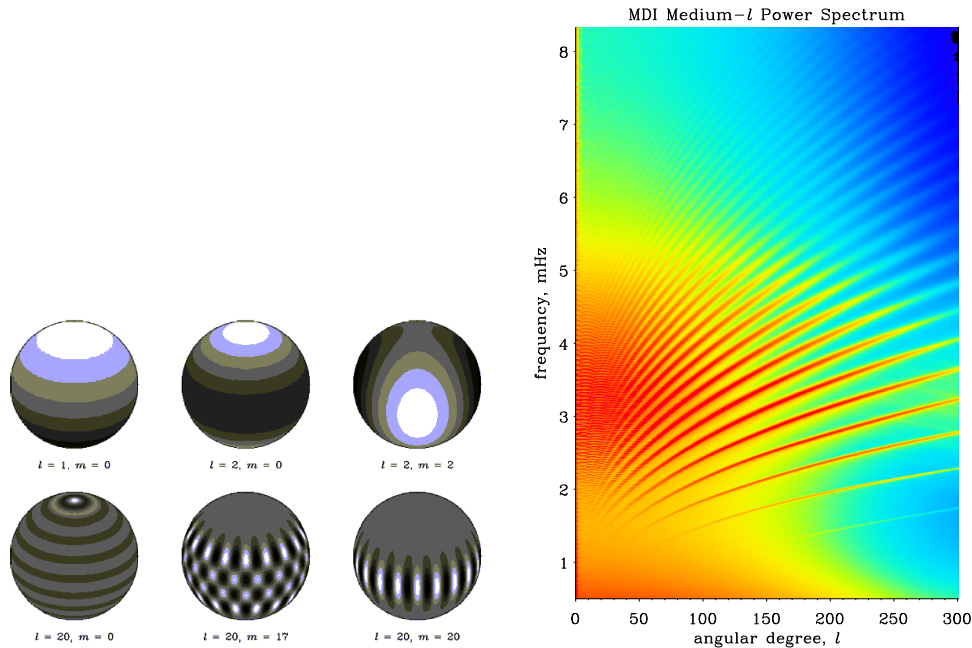


図 15: 左：球面調和関数の例、右：MDI による  $k - \omega$  図

- 表面速度場を記述するパラメータ:  $l$ 、 $m$ 、 $\omega$  の 3 つ。パラメータ  $m$  は特定の軸周りの構造を表わすパラメータだが、太陽は大雑把に見て球対称なので、速度場も統計的には球対称だとすると、 $m$  に関する縮退があるはず
- $k - \omega$  図: パワー  $|a_{lm}(\omega)|^2$  を  $m$  について平均した

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

を図示したもの  $\Rightarrow$  ridge structure の存在

### 5.2.3 固有振動モードの分類

- 球対称構造の固有振動:

$$v_{\text{rad}}(r, \theta, \phi, t) = f_{nl}(r) Y_l^m(\theta, \phi) \exp(i\omega_{nlm}t)$$

$f_{nl}(r)$  は固有関数の動径部分で、 $n$  個の節を持つ。関数  $f_{nl}$  が量子数  $m$  によらないのは、対称性による

- Ridge structure: 固有振動成分。一本一本の ridge は異なる  $n$  (動径方向の節の数) に対応する
- 固有振動数の計算: 流体力学的な方程式系で振動を記述し、4 階の微分方程式の固有値問題を解く
- モード分類
  - ▷ p モード: 音波モード (p for pressure)。圧力を復元力とする振動。振動数の高い極限で純粋な音波
  - ▷ g モード: 重力波モード (g for gravity)。浮力を復元力とする振動。振動数の低い極限で純粋な重力波
  - ▷ f モード: 表面重力波モード (f for fundamental)。表面に立つ重力波モード
- 振動の励起メカニズムは？ 乱流的対流による音波放射

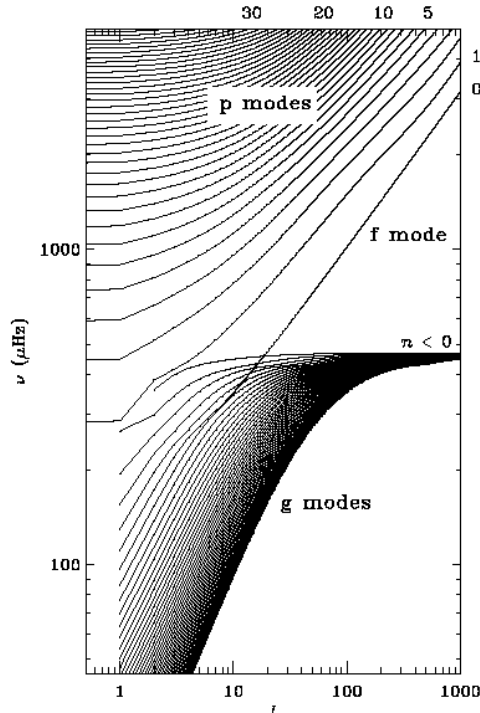


図 16: 理論的な  $k - \omega$  図

### 5.3 太陽 $p$ モード波の伝播

- 太陽内部では、(中心部を除いて)深いところほど音速が大きい。球対称構造を考えると音速  $c = c(r)$  ( $r$  は中心からの距離)
- 太陽内部を伝わる音波は中心を含む一定の面内 ( $r, \phi$  で記述) を伝播する。表面では反射を受け、内部では音速の変化に従って屈折する
- 表面から太陽内部に向けて、動径となす角  $\theta$  の向きに出発する音波を考える。
  - ▷ 角周波数  $\omega$ 、波数  $k$ 、音速  $c$  として  $\omega = kc$
  - ▷ 表面では水平方向の波数  $k_h = k \sin \theta \equiv L/R$
  - ▷ 音速分布は  $r$  だけの関数なので  $rk_h = \text{一定} = L$  (波の角運動量保存、Snell の法則からも)
  - ▷ 従って、動径方向の波数は  $k_r = \sqrt{k^2 - k_h^2} = \sqrt{\omega^2/c^2 - L^2/r^2}$
  - ▷  $w \equiv \omega/L$ 、 $a \equiv c/r$  を導入すると

$$k_r = \frac{\omega}{c} \left(1 - \frac{a^2}{w^2}\right)^{1/2}, k_h = \frac{\omega a}{c w}$$

- ▷ 波の進む方向は本来は群速度で決まるが、分散のない音波では波数ベクトルの方角に進む

$$r \frac{d\phi}{dr} = \frac{k_h}{k_r} = \left(\frac{w^2}{a^2} - 1\right)^{-1/2}$$

- ▷  $c/r = \omega/L$  となる場所  $r = r_{\text{in}}$  で  $k_r = 0$  となって、音波は表面へ向かって折り返す



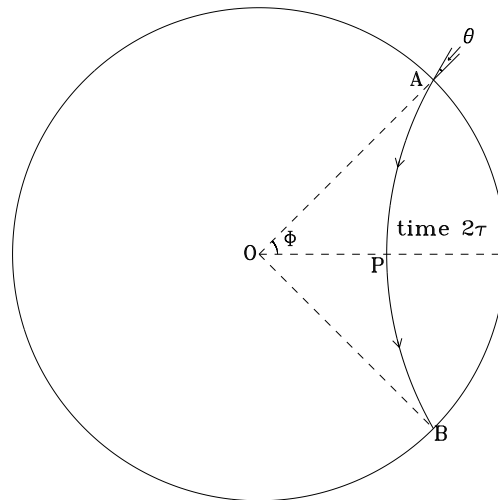


図 17: 太陽内部の音波の伝播

- 2点 AB の角距離を  $2\Phi$  とすると

$$\Phi = \int_P^B \frac{d\phi}{dr} = \int_w^{a_s} \left( \frac{w^2}{a^2} - 1 \right)^{-1/2} \frac{d \ln r}{da} da$$

- 2点 AB 間を伝わるのに要する時間を  $2\tau$  とすると

$$\tau = \int_P^B \frac{ds}{c} = \int_{r_{in}}^R \left( 1 - \frac{a^2}{w^2} \right)^{-1/2} \frac{dr}{c} = \int_w^{a_s} \frac{1}{a} \left( 1 - \frac{a^2}{w^2} \right)^{-1/2} \frac{d \ln r}{da} da$$

- Fermat の原理：2点間を伝わる波は、伝播時間が最小になる経路を通る（厳密には「最小」でなく「極値」）

## 5.4 日震学における逆問題

- 順問題・・・「普通の問題」、普通に解かれている問題
- 逆問題・・・順問題の問題設定と答を入れ換えたもの
- 日震学で問題とするのは固有値問題の逆問題
  - ▷ 順問題：太陽の構造 ⇒ 固有振動数を計算
  - ▷ 逆問題：太陽の固有振動を測定 ⇒ 太陽の構造

### 5.4.1 これまでにわかったこと

- 対流層の深さ
  - ▷ 音速分布に勾配の不連続 ⇒ 対流層の深さ
- 状態方程式、opacity 等の microphysics に対する feed back

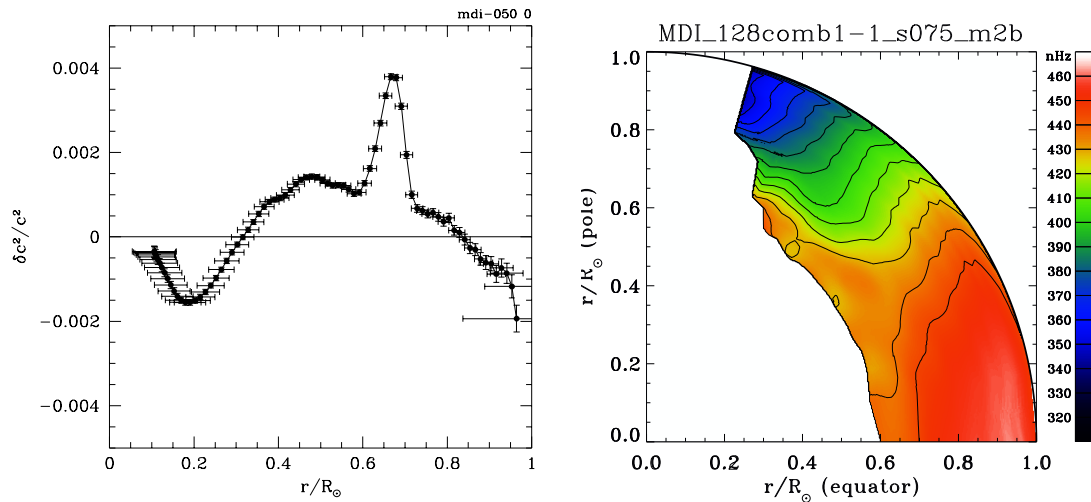


図 18: 音速のインバージョン（左）と自転の速さ（自転周波数）のインバージョン（右）の例。

- 現在では標準モデルは日震学的観測と概ねよく一致
- 対流層底部付近に sound-speed bump
  - ▷ less helium due to some extra mixing?
- 中心部不確定
- 表面における緯度方向の微分回転は対流層内部まで概ね続いている。
  - ▷ Taylor-Proudman 型の回転則にはなっていない (何故か?)
  - ▷ dynamical dynamo の数値計算は見直しを余儀なくされた
- 放射層では微分回転は弱い
- 赤道面上の  $r/R_\odot \simeq 0.95$  付近で自転角速度は最大になっている。また、sub-photospheric shear layer が存在している (→ small-scale dynamo?)
- 対流層の底にも shear layer がある (→ tachocline)

#### 5.4.2 Tachocline

- ‘tachocline’(Spiegel & Zahn 1992)
- 対流層の底では、音速のインバージョンでも異常がみつかった。→extra mixing の証拠?
  - ▷ 標準モデルは helium の gravitational settling を考慮 ( $\mu \nearrow$ )
  - ▷ extra mixing で helium が対流層内部に戻ると  $\mu \searrow \Rightarrow c^2 \propto T/\mu \nearrow$
- interface dynamo? (Parker 1993)

### 5.5 局所的日震学

#### 5.5.1 局所的日震学とは

- 日震学の新しい branch

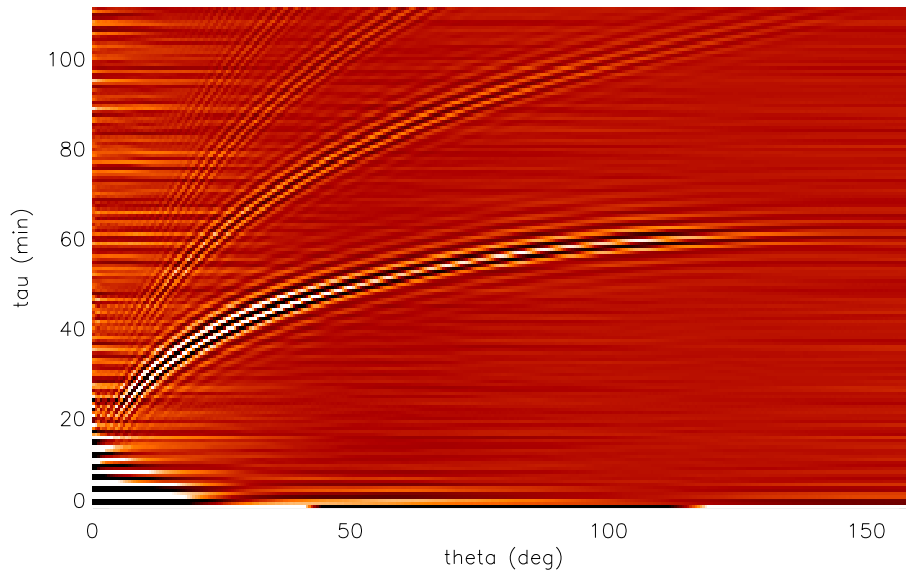


図 19: Time-distance 図の例

- これまでの標準的な日震学は、太陽の「グローバルな」固有振動に基づく
  1. 太陽面速度場 (輝度分布) の時間変動を観測
  2. Fourier/Spherical-harmonic component に分解
  3. 固有振動数の決定
  4. 固有値問題の逆問題 → 内部構造
- 太陽全体の固有振動から離れ、局所的な観点から考えることも可能
  - ▷ 太陽表面上の 1 点を出発した波 (wave packet) が別の 1 点に達するまでの時間 (↔ 太陽表面上の 2 点間の相関) ← 太陽内部での波の伝播速度の構造を反映
  - ▷ 磁場などによる音速異常や 3 次元的な流れも調べることが出来る
- 基礎となる測定: 2 点相関

$$C(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \tau) = \int_{-\infty}^{\infty} f^*(\mathbf{x}_1, t) f(\mathbf{x}_2, t + \tau) dt$$

( $\mathbf{x}_i$  は太陽表面上の点の位置ベクトル、 $f(\mathbf{x}, t)$  は速度場) やその平均

$$\bar{C}(\Delta, \tau) = \int d\mathbf{x}_1 C(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_1 + \Delta, \tau)$$

(→time-distance 図)。Time-distance 図から i) ある距離  $\Delta (= |\Delta|)$  を波が伝わるのに要する時間、あるいは ii) ある時間  $\tau$  の間に波が到達する距離を測ることができる。

### 5.5.2 局所の日震学のこれから

- これまでに

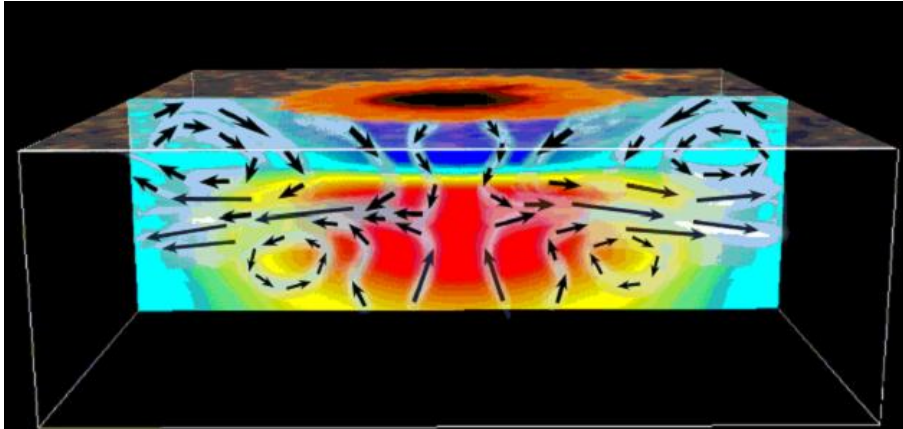


図 20: Time-distance 法で求めた、活動領域付近の音速異常と速度場

- ▷ 黒点のまわりの音速異常・速度場
- ▷ 太陽の裏側の acoustic imaging
- ▷ 浮上磁束管の検出?

等の成果が上がっている

- 測定値 (例えば伝播時間) の解釈や、逆問題の解法等の点で、まだ発展途上
- 太陽観測衛星「ひので」や、2009 年秋に打ち上げ予定の科学衛星 Solar Dynamics Observatory に搭載の観測装置を使った研究が計画されている
- 太陽活動周期・ダイナモ機構の解明には局所的日震学!