

理系大学生のための太陽研究最前線体験ツアー

日震学と太陽内部のダイナミクス

関井 隆

国立天文台

太陽天体プラズマ研究部／ひので科学プロジェクト

+

総合研究大学院大学・天文科学専攻

今日のお話

□ 日震学

- 地震波を使って地球内部を探る地震学・・・の太陽版

□ ダイナミクス (*dynamics*):

- もともとは、力学のこと
- 転じて、静的な(じっと動かない)現象に対して動的な現象のこと
- ダイナミカル (*dynamical*): 動的なこと

太陽内部のダイナミクス

- 太陽は太陽系の中心にあってどっしりと動かず、じっとしている様に見えるが、実は結構ダイナミカルである
 - 約1ヶ月の周期で自転
 - 「対流」とよばれる運動(流れ)
 - その他の流れ

- 太陽内部のダイナミクスがどういう現象につながっているか
 - 太陽表面の諸現象
 - 太陽黒点の増減・活動周期

太陽内部のダイナミクス

- こうした現象や、その背後のダイナミクスを研究するための手段としての日震学について紹介

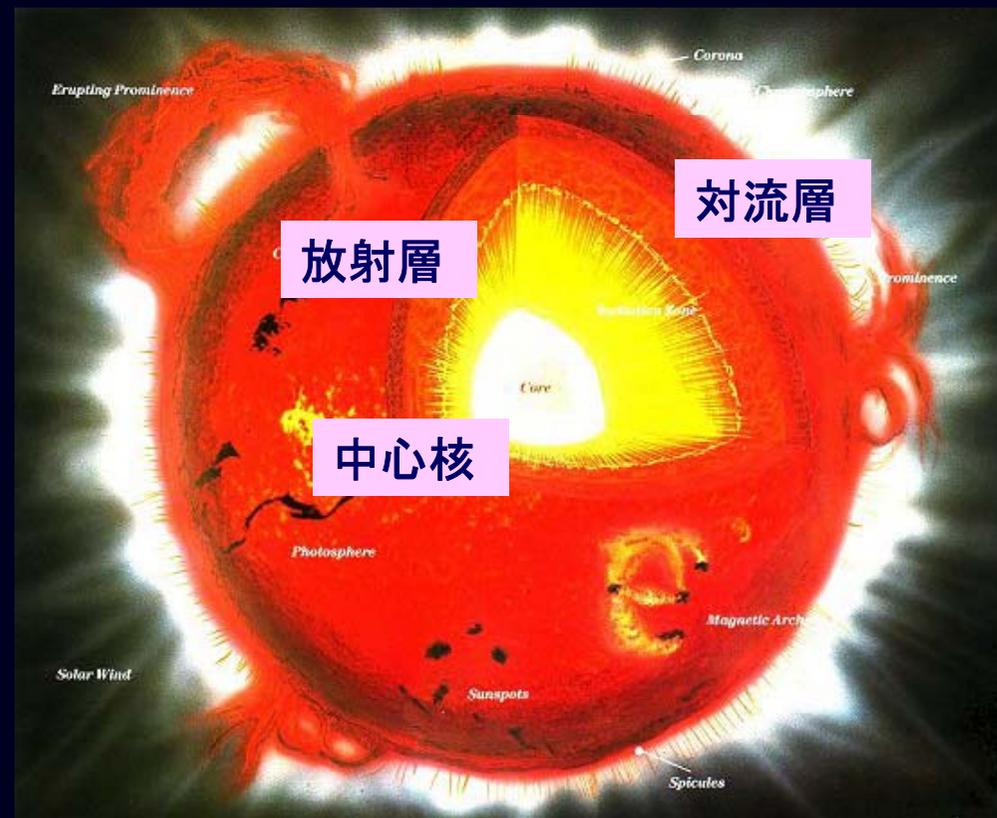
太陽:もっとも身近な星

□ 太陽・・・核融合反応で輝く巨大なプラズマ球

中心核・・・核融合反応
でエネルギーを生成

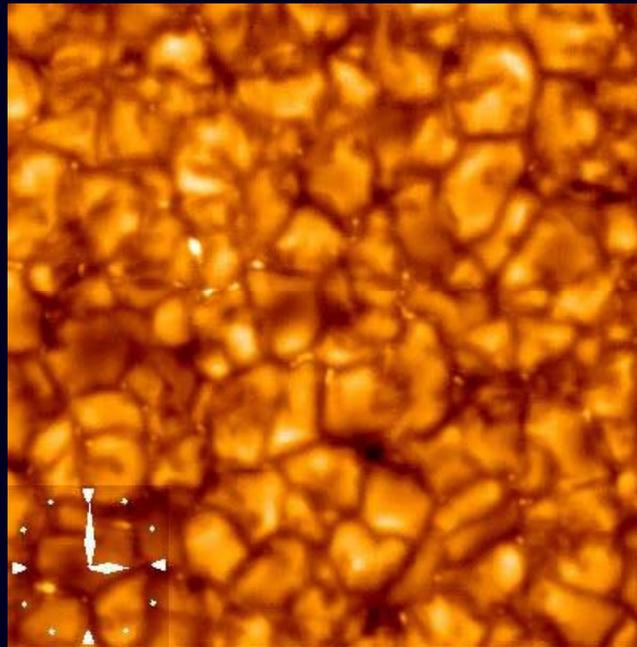
放射層・・・エネルギー
を光だけで運ぶ層

放射層・・・エネルギー
を主に対流で運ぶ層

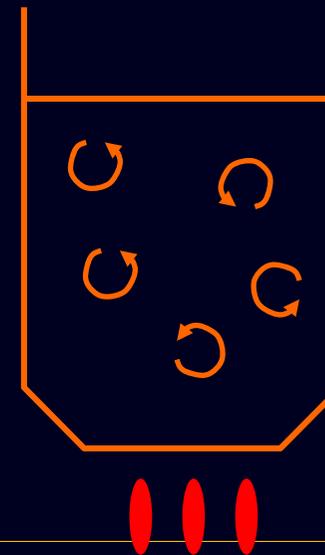


グラニュール(粒状斑)

- 表面に、つぶつぶの構造(グラニュール)がある
 - 太陽の外の方で対流が起きている証拠
 - エネルギーの輸送: 放射・伝導・対流



太陽の表面近くでは
対流で熱を運んでいる



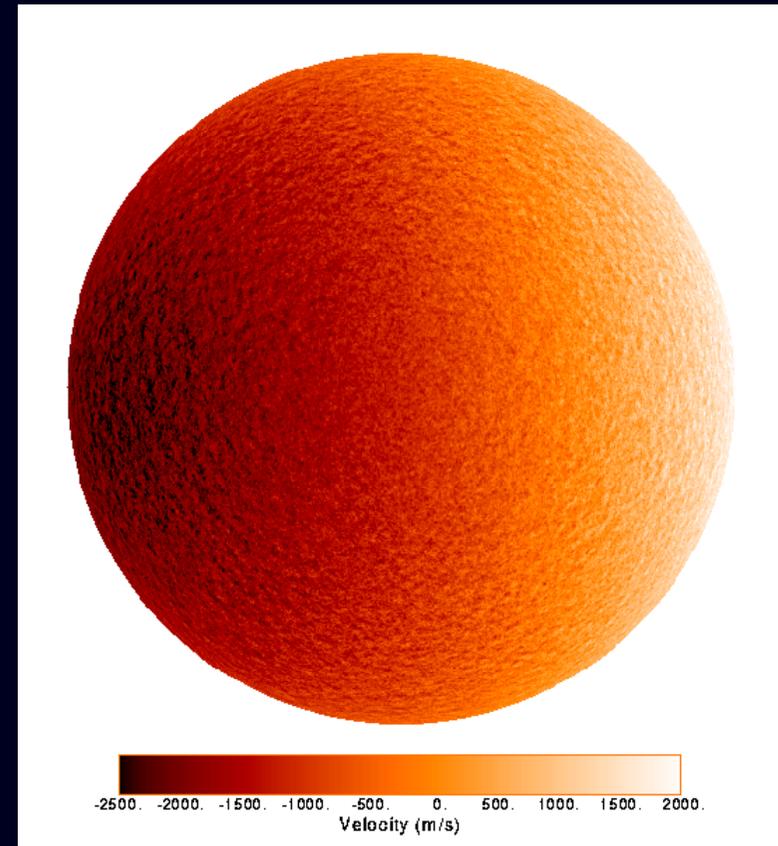
太陽の自転

- 自転周期: 約27日(赤道)
 - 遠心力/表面重力 $\sim 10^{-5}$
 - 「差動回転」: 赤道は約27日、極は約32日で一回転

ドップラー速度図

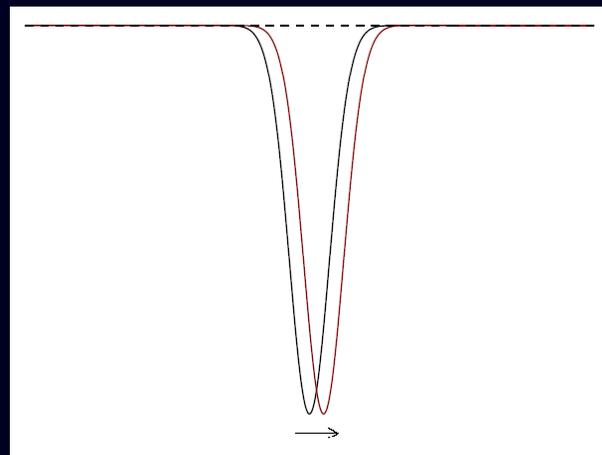
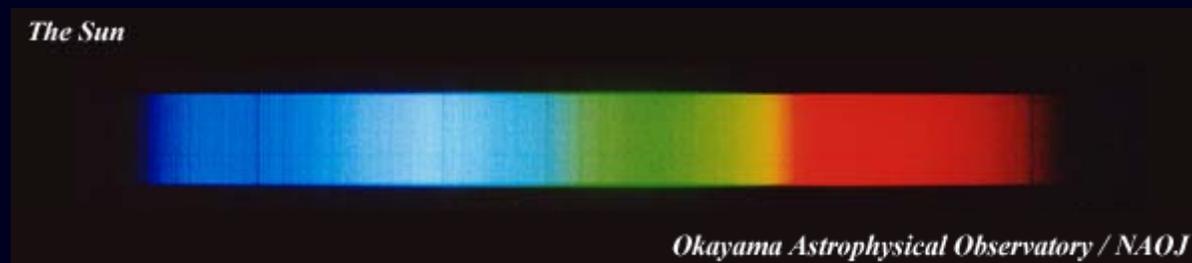
色: 黒→赤→白

速度: こちら向き→ゼロ→あちら向き



<ドップラー速度>

- 分光観測によるドップラー速度の測定
 - 吸収線の動きでドップラー効果が測れる



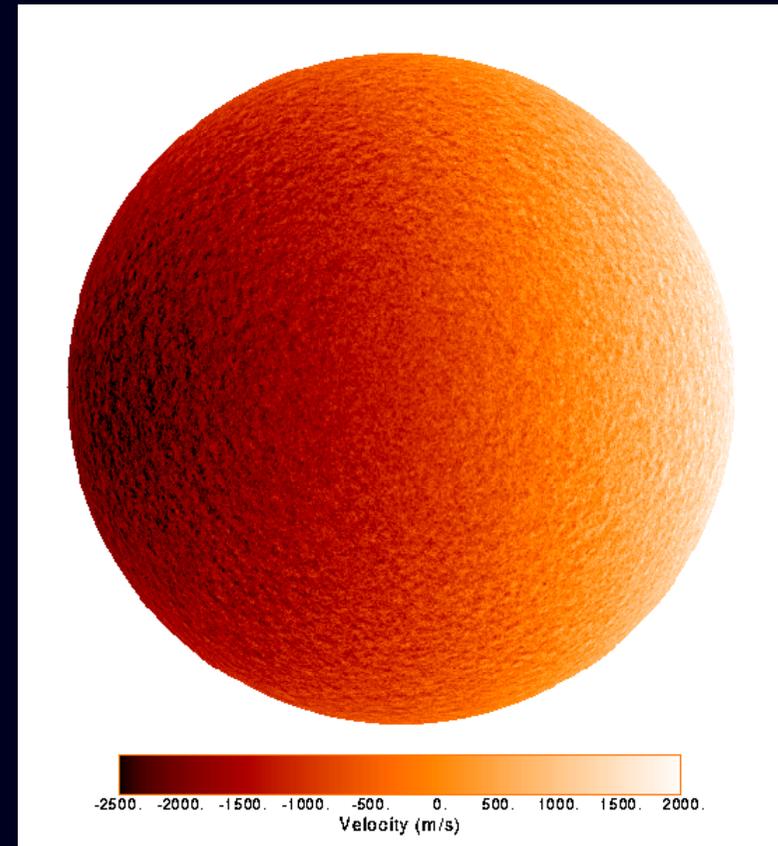
太陽の自転

- 自転周期: 約27日(赤道)
 - 遠心力/表面重力 $\sim 10^{-5}$
 - 「差動回転」: 赤道は約27日、極は約32日で一回転

ドップラー速度図

色: 黒→赤→白

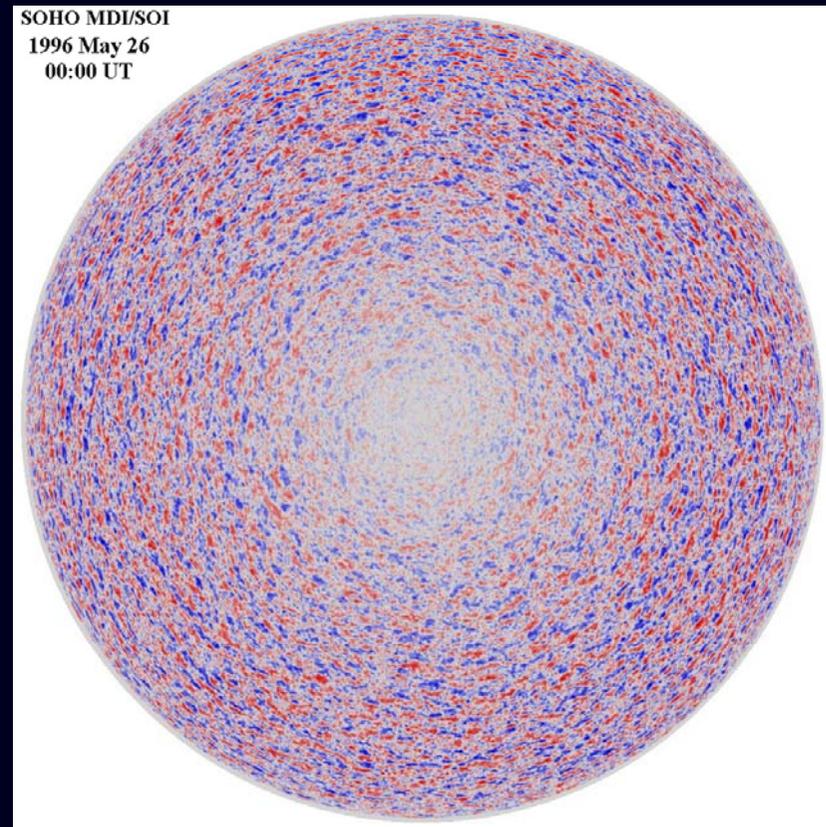
速度: こちら向き→ゼロ→あちら向き



スーパーグラニュール(超粒状斑)

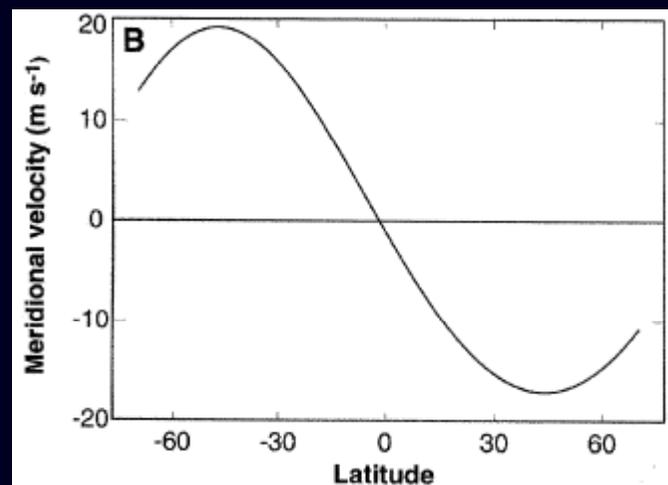
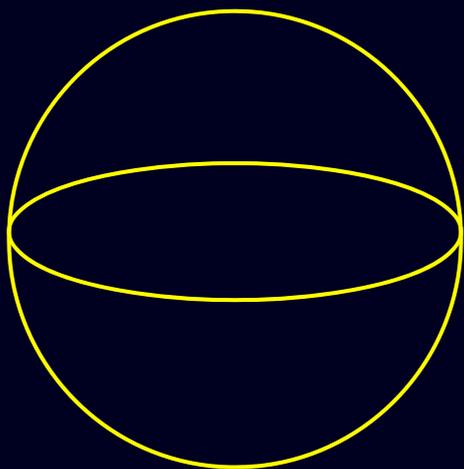
□ 超粒状斑という構造も(ドップラー速度)

- 粒状斑: ~1000km
- 超粒状斑: ~30000km



子午面流

- 子午線に沿った流れも、表面のドップラー速度から測定できる(関数形のフィット)



Hathaway et al (1996)

太陽のダイナミクス

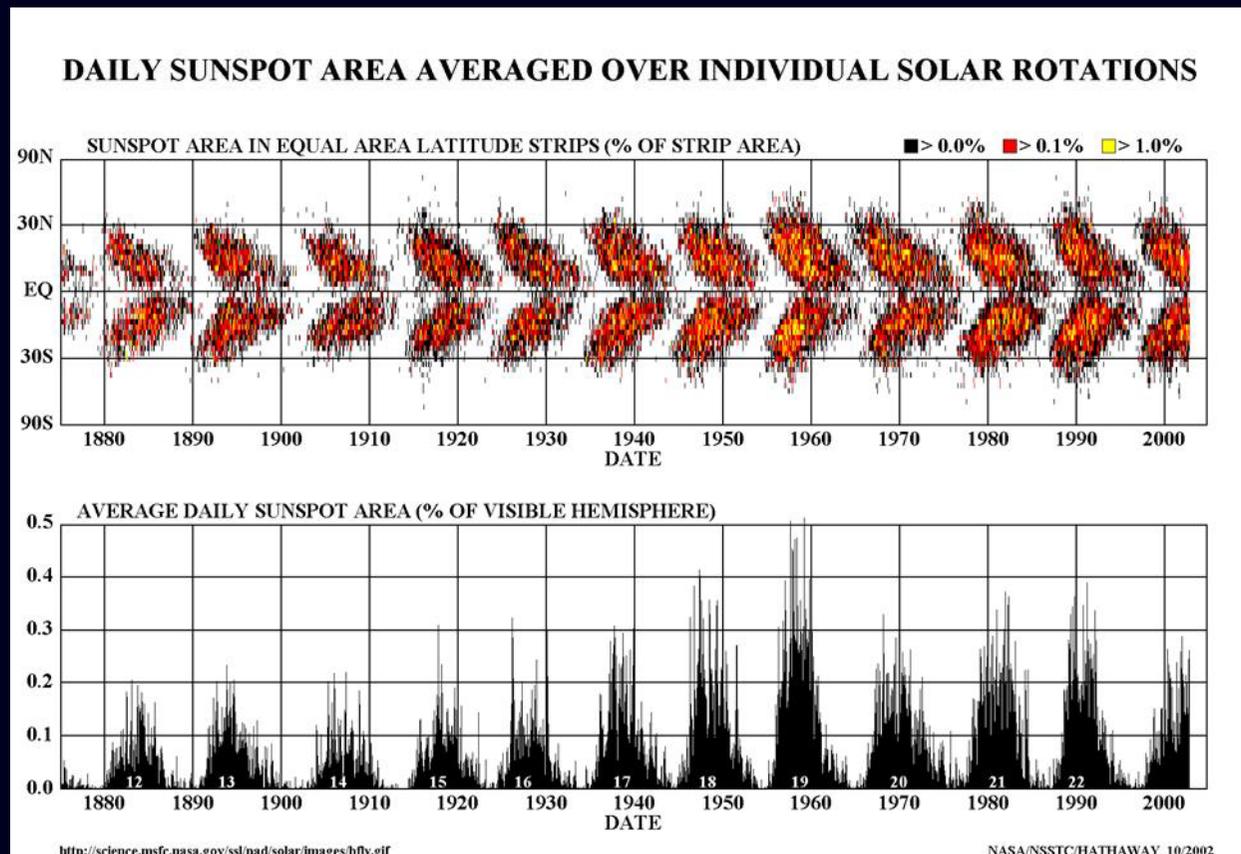
太陽の外側では対流運動が起きている

太陽は差動回転している

子午面流も存在

活動周期

□ 黒点数は11年周期で増減

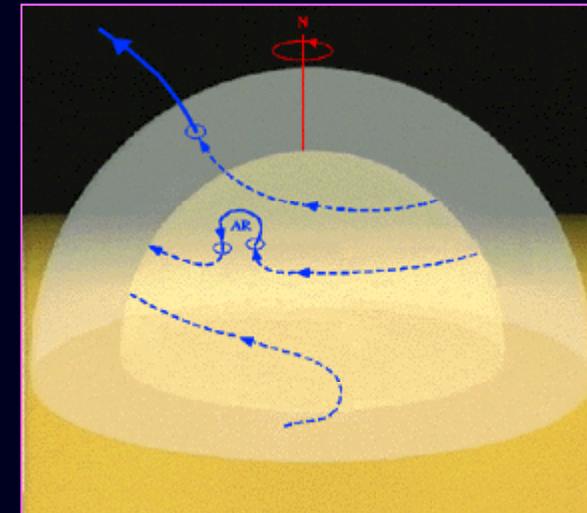


黒点の現われ
る緯度の変化

黒点数の変化

活動周期

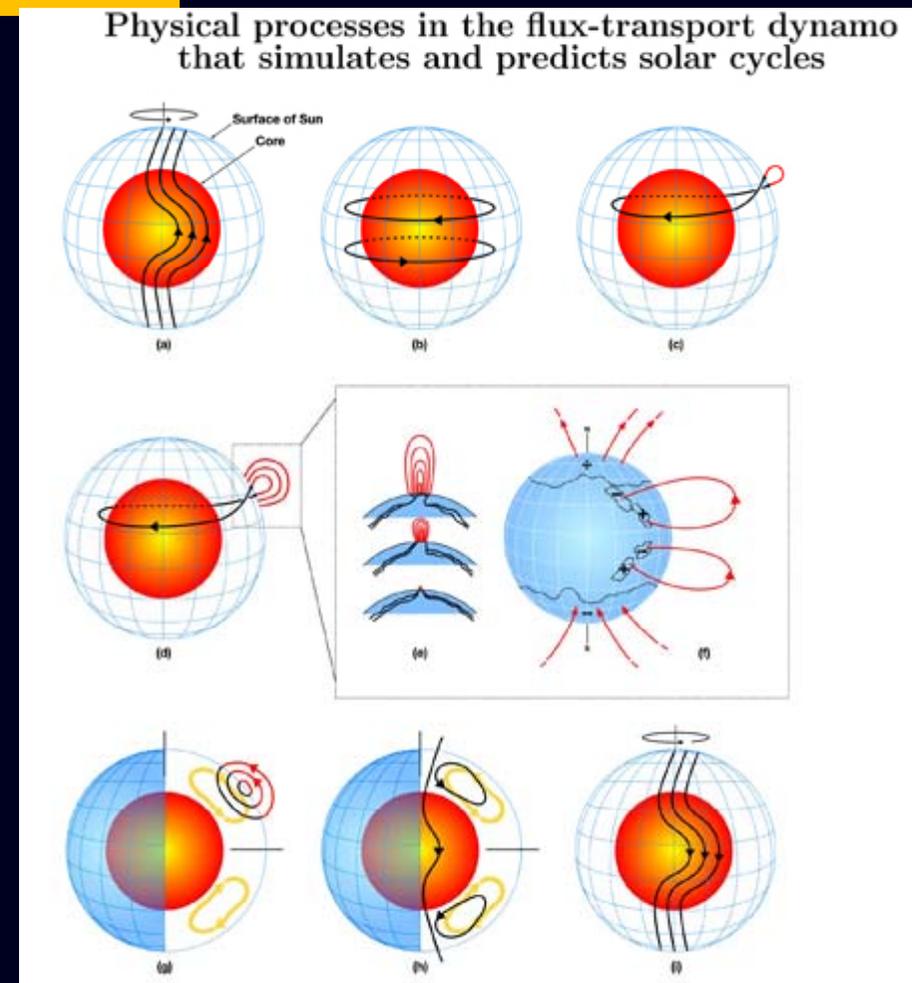
- 太陽の黒点数の増減や、その現われ方の変化はどうして起きるのか？
- ダイナモ機構・・・プラズマの運動と磁場との相互作用
 - プラズマの運動: 差動回転や対流運動など太陽内部の流れ
 - プラズマ中の磁場
 - プラズマに「凍りつく」
 - 磁気張力や磁気圧でプラズマに力がはたらく



ダイナモ機構

□ 子午面流を考えたダイナモ機構

Dikpati & Gilman (2006)



太陽のダイナミクス

太陽の外側では対流運動が起きている

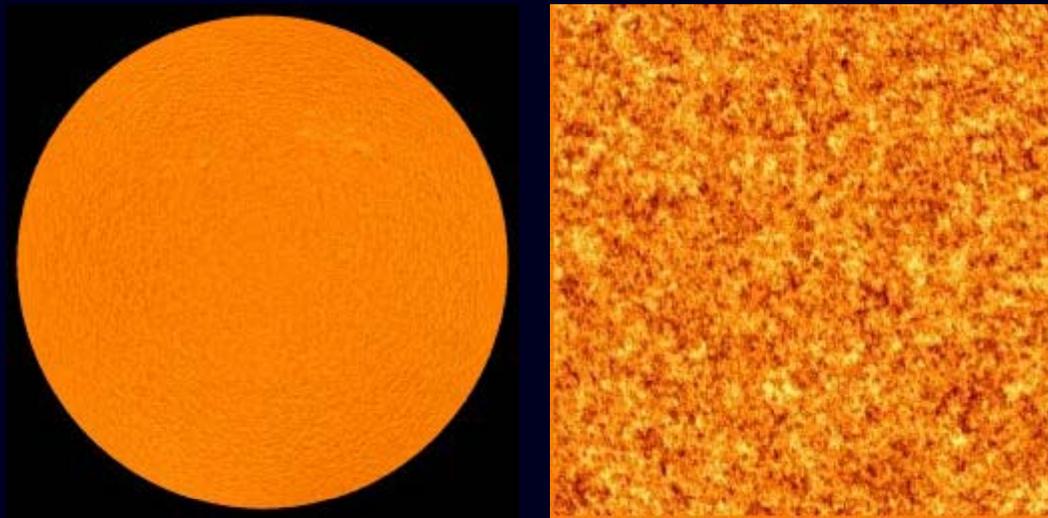
太陽は差動回転している

子午面流も存在

プラズマの運動と磁場との相互作用
⇒活動周期

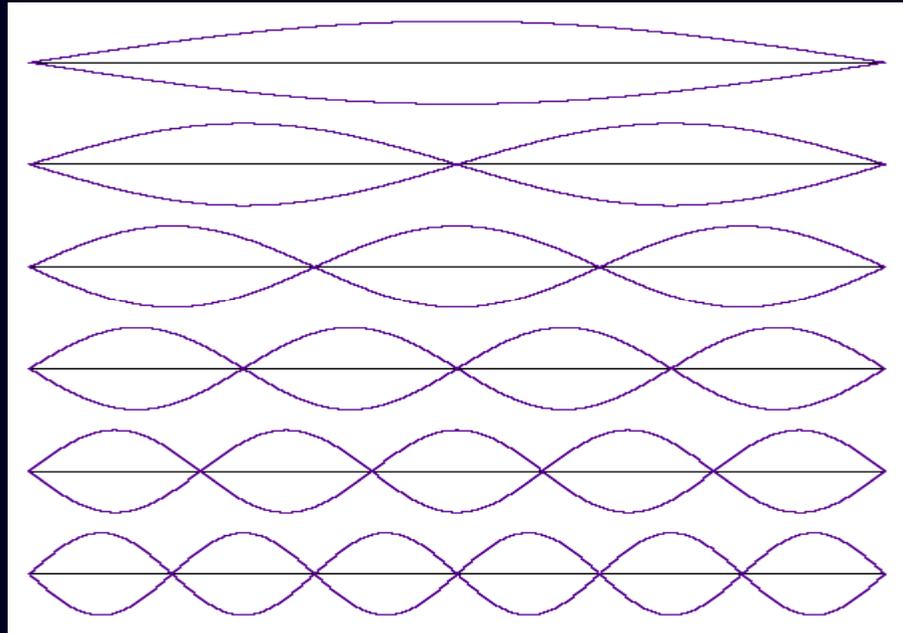
太陽の地震

- 太陽の表面がふるえている／脈動(振動)している
 - 太陽の地震:「日震(にっしん)」
 - 周期は5分位:「5分振動」
 - 対流層中で乱流が放射する音波



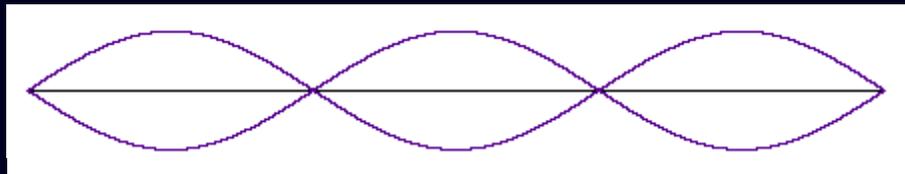
<固有振動>

- ある物体の中の波の伝わり方は、その物体の構造で決まる
- ある波長(や振動数)の波が特に強くなる(固有振動)
 - 振り子
 - 弦の場合

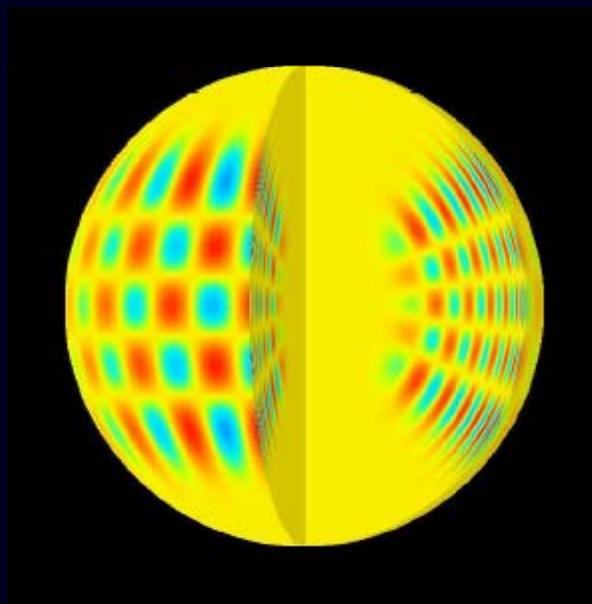


太陽の固有振動

□ 弦の固有振動

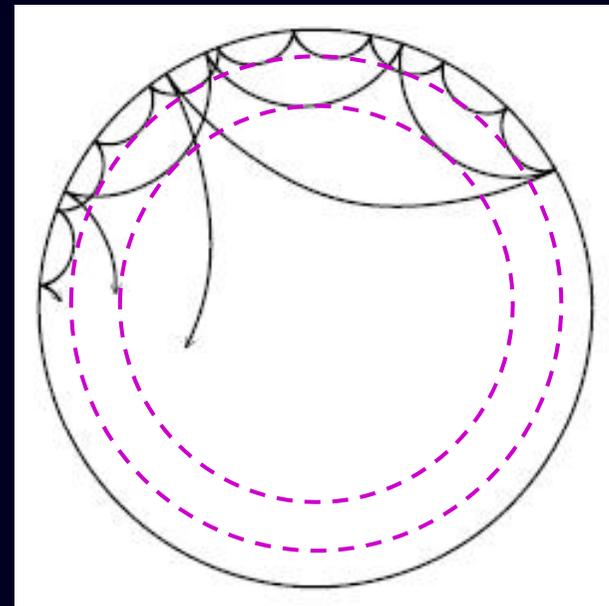
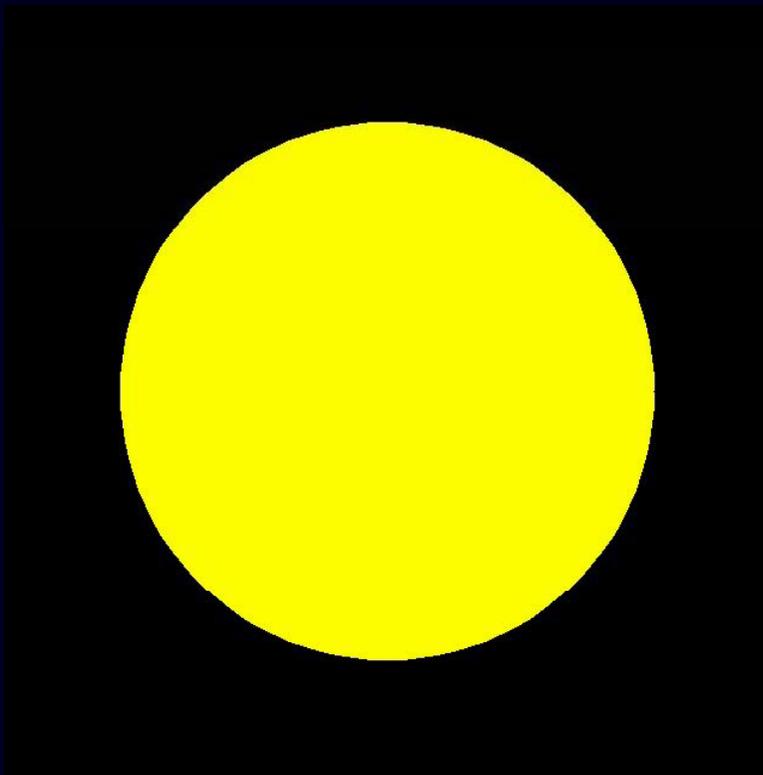


□ 太陽の固有振動



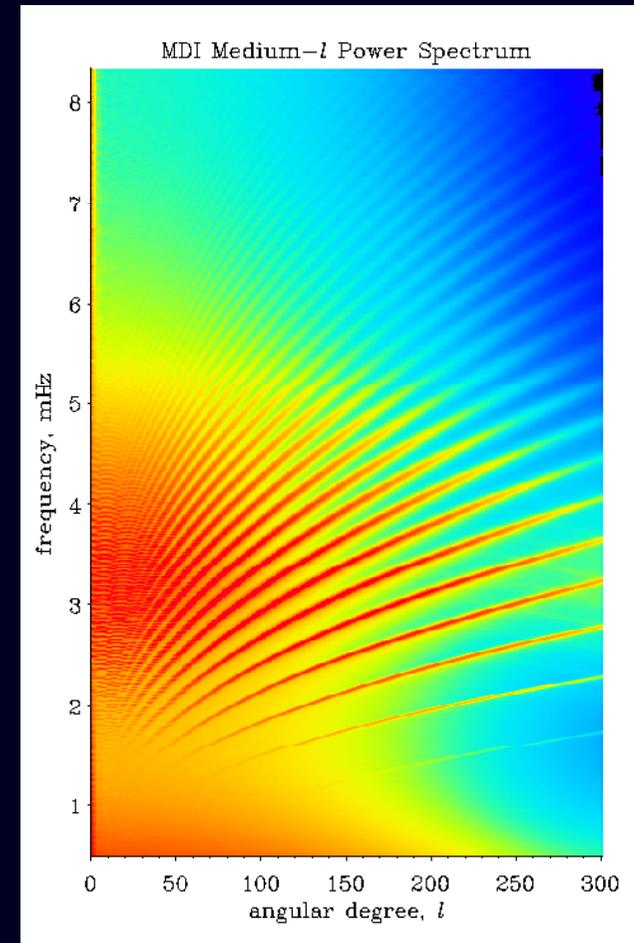
太陽内部の音波の伝わり方

- 中心部に向かって音速が増大
⇒ 音波は屈折する



太陽の音色

- ドップラー速度図から、どんな波が強いかを計算
- 固有振動の「スペクトル」
 - 赤いところが強い
 - 横軸・・・ $\propto 1 / \text{波長}$
 - 縦軸・・・振動数
- 特徴的なリッジ構造
 - 固有振動数(太陽の音色)



日震学

- 太陽の固有振動数は太陽内部構造で決まる



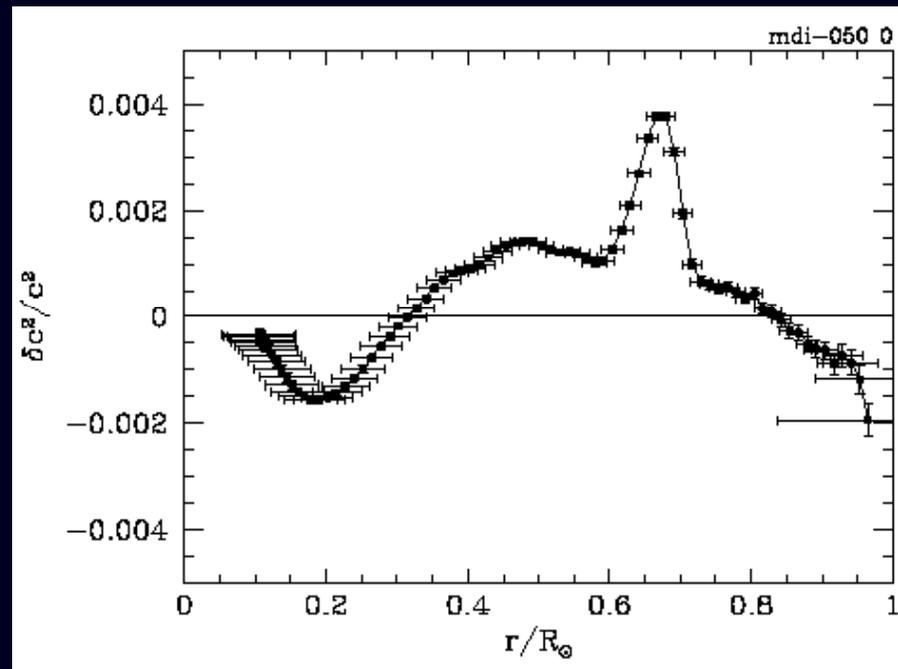
- 日震学では、逆に固有振動数から太陽内部構造を決める



太陽内部：日震学

□ 音速分布(観測値-モデル値)

- $(\text{音速})^2 \propto \text{温度} / \text{平均分子量}$
- 日震学の発展とともに改良されて来たモデル



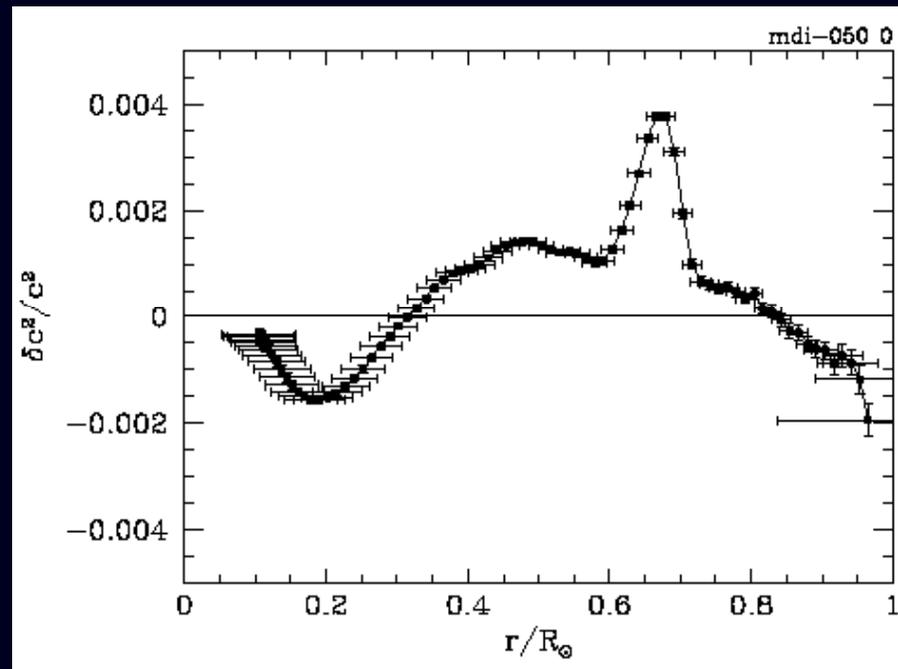
<実際にはどうやって測る？>

- 太陽のモデルをひとつ用意
- このモデルの固有振動数を計算（観測値とは合っていない！）
- モデルを少しずつらしてみても、固有振動数がどれだけずれるか見る（「線型摂動論」）
- モデルをどれだけずらしたら、観測値に合う様になるかを計算する

太陽内部：日震学

□ 音速分布(観測値-モデル値)

- (音速)² ∝ 温度 / 平均分子量
- 日震学の発展とともに改良されて来たモデル

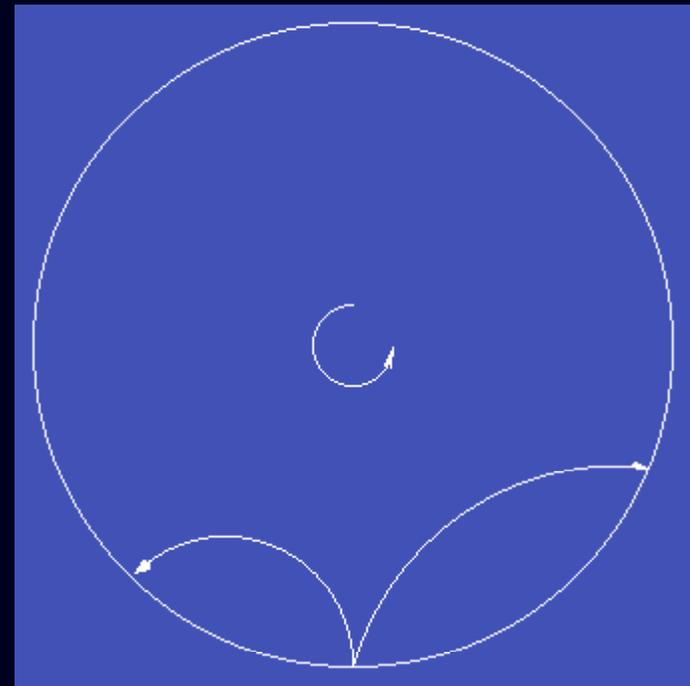


自転角速度の効果

□ 太陽の自転により、振動数がシフト

- 回転と同じ向きに伝わる波と、逆向きに伝わる波とでは伝わり方が異なる
- 線型摂動として扱う

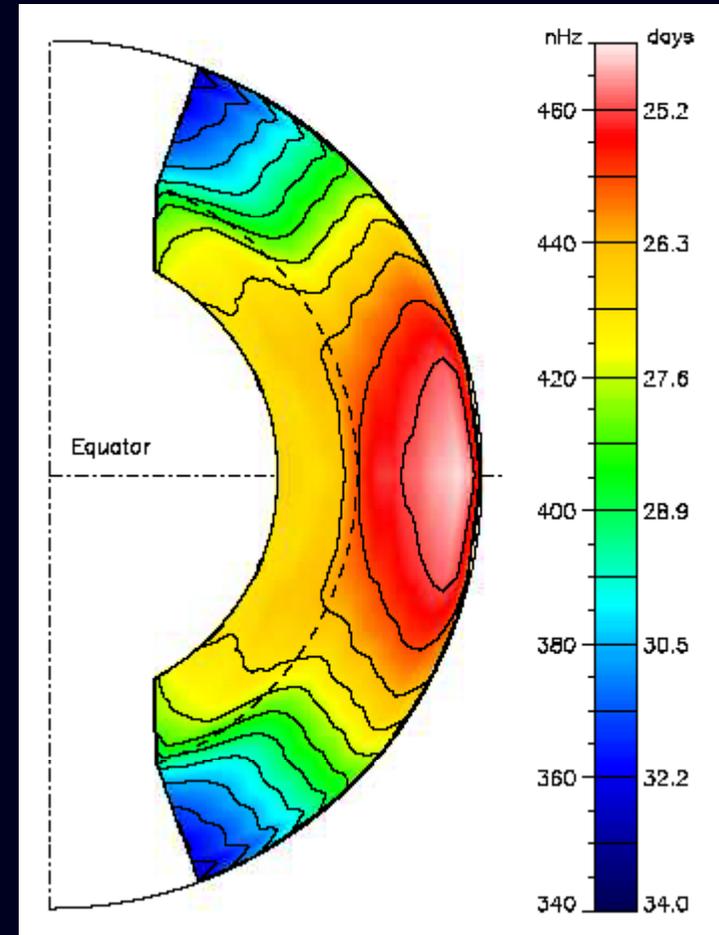
$$\delta\omega_i = \int K_i(r, \theta) \Omega(r, \theta) dr d\theta$$



日震学でみた太陽の内部差動回転

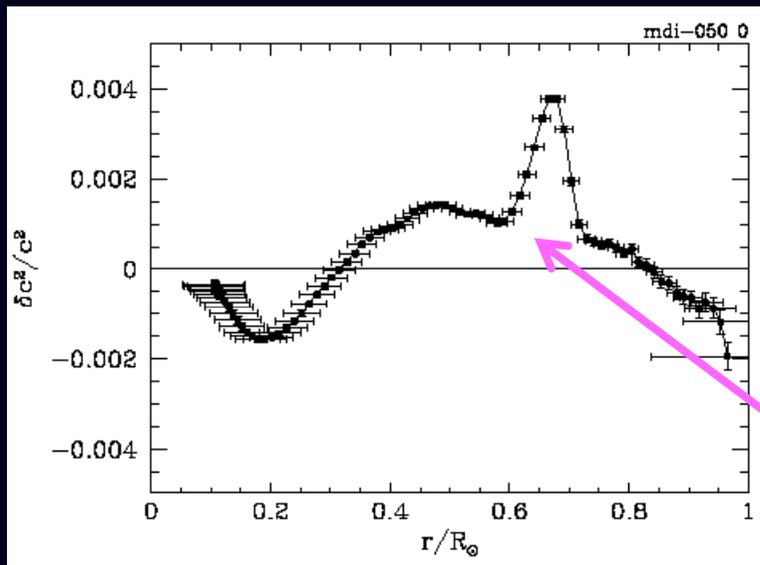
- 太陽がこの様な差動回転をしている時、ダイナモ機構はうまく働くか？
 - 日震学以前の理論は却下された

日震学で明らかになった太陽内部の差動回転の様子

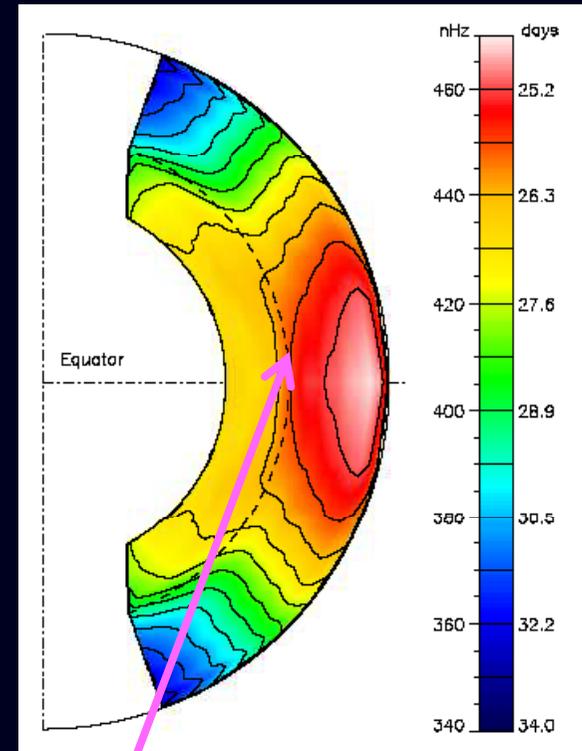


速度勾配層

- Tachocline (タコクライン): 対流層底部付近で自
転角速度が急激に変わる層
- Dynamo action?



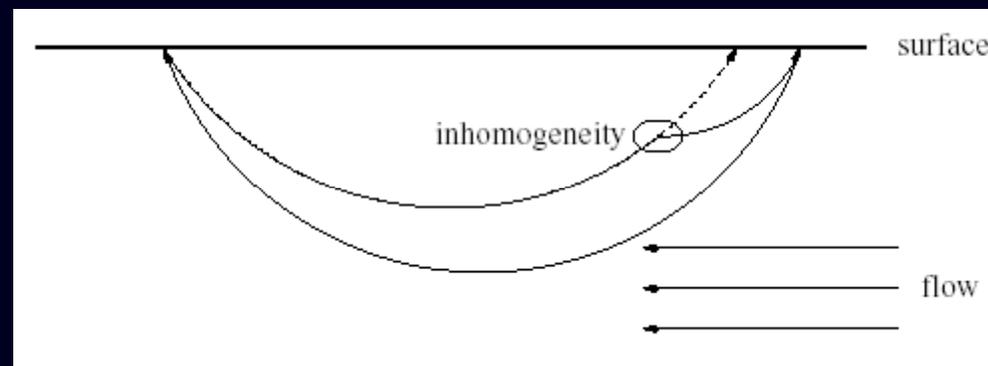
物質の混合が起きている？



Tachocline

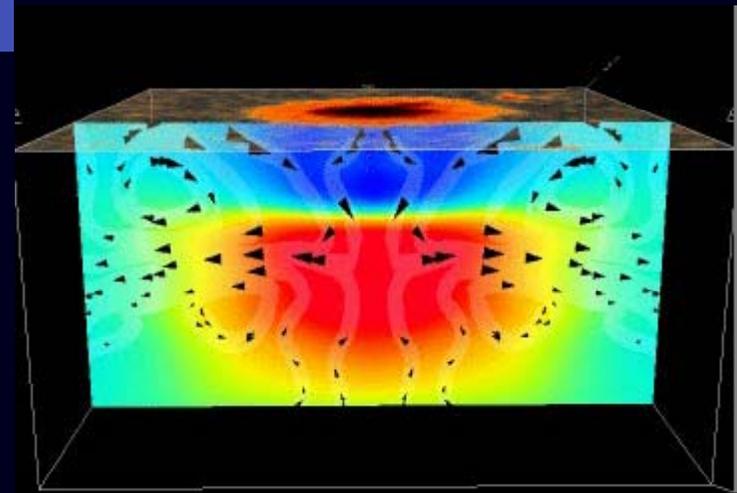
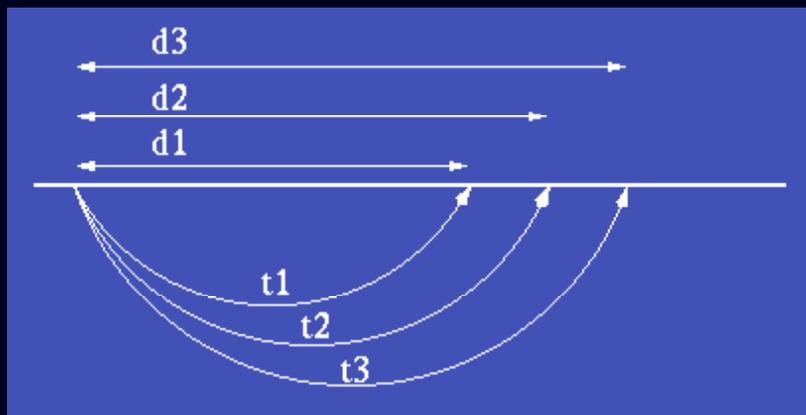
局所的日震学

- 日震学: 太陽表面の振動・波動現象をもとに太陽の内部構造を探る
- (グローバルな) 日震学: 固有振動数スペクトルのインバージョンが主な武器
- 局所的日震学: 固有振動に拘らず、局所的な波の伝播の観測から内部構造を探る



太陽内部：局所的日震学

□ 主流は時間一距離法

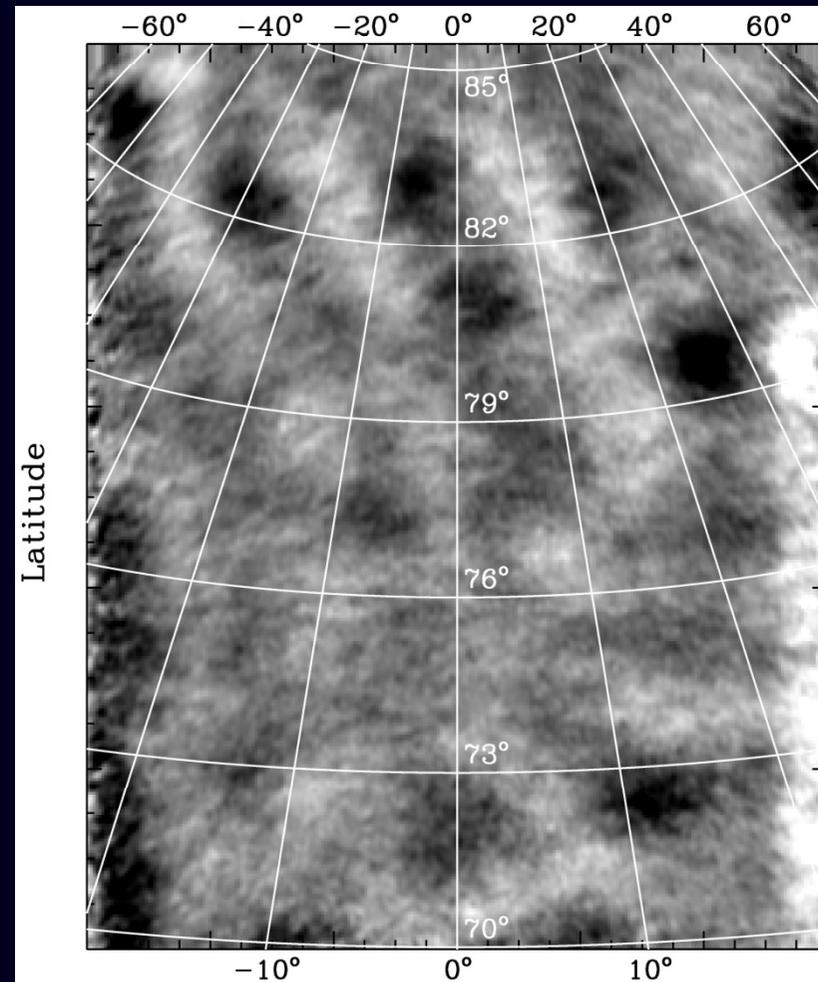


黒点下部の構造

局所的日震学でみた表面下の流れ

□ 太陽の北極付近の supergranule

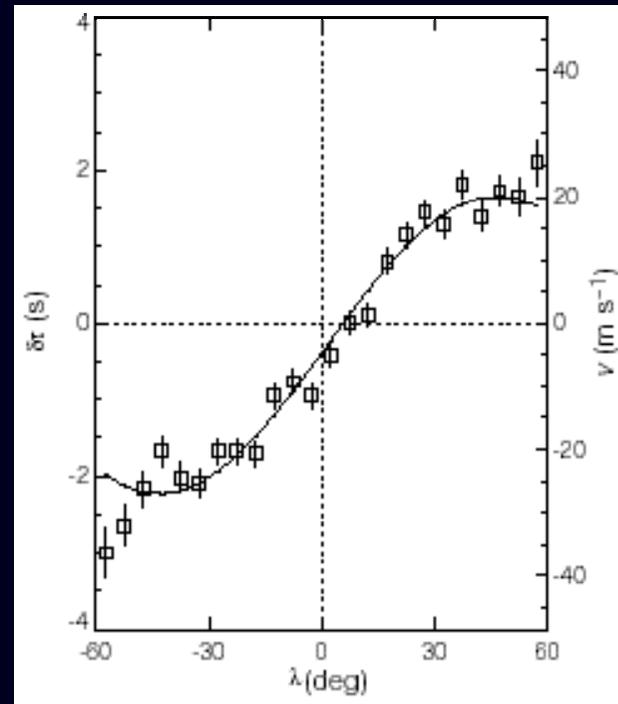
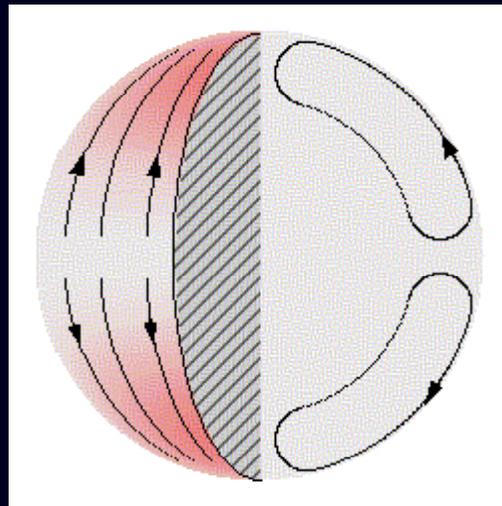
Nagashima et al (in prep)



子午面流

□ 子午面流 (Meridional flow)

- 極に向かう20m/sの速さの流れ



太陽のダイナミクス

太陽の外側では対流運動が起きている

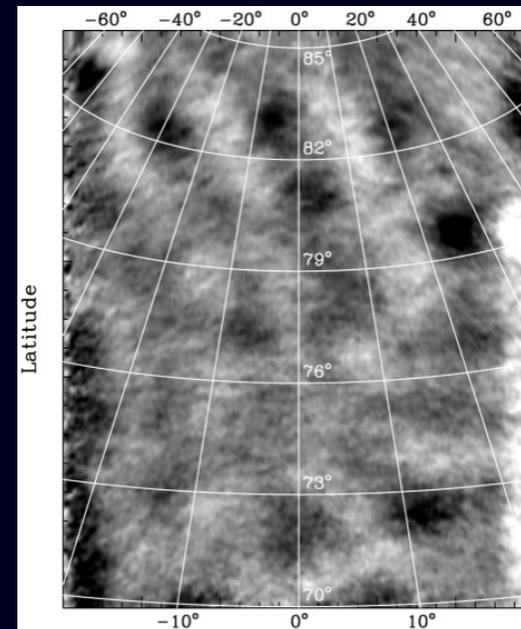
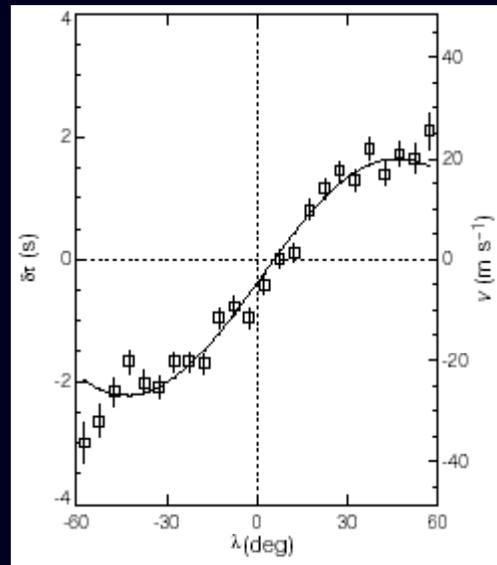
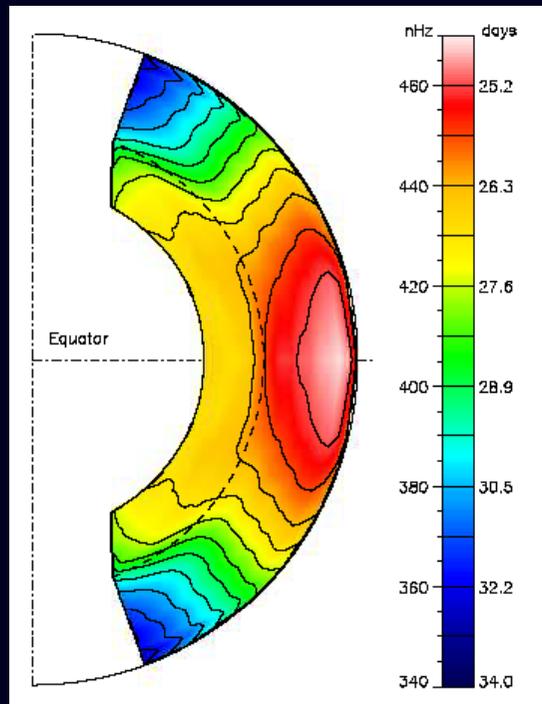
太陽は差動回転している

子午面流も存在

プラズマの運動と磁場との相互作用
⇒活動周期

日震学と太陽内部のダイナミクス

□ 日震学では、太陽内部の音速分布だけでなく、プラズマの様々な流れも研究できる



太陽内部：残された課題は？

□ 太陽ニュートリノ問題

- ニュートリノ振動解で「解決」

□ 太陽活動周期

- ダイナモ機構は実際のところどう働いているか？

ダイナモ理論

- いずれにせよ、太陽内部のプラズマの流れが重要な役割を果たしている
 - 表面での磁場・流れは観測可能
 - 内部では？ ⇒ 日震学

最後に

- 太陽はダイナミカルである
- 太陽研究: 次の大目標は

太陽活動周期の解明

- ダイナモ機構は太陽で実際にどの様に働いているのか？
- 日震学による観測的研究と、数値シミュレーション等による理論的研究による太陽の内部ダイナミクスの研究がカギ
- SOLAR-C?