



CHIBA UNIVERSITY

理論懇シンポジウム@東京大学本郷キャンパス
2017年12月27日

太陽内部熱対流・ダイナモの最新理論

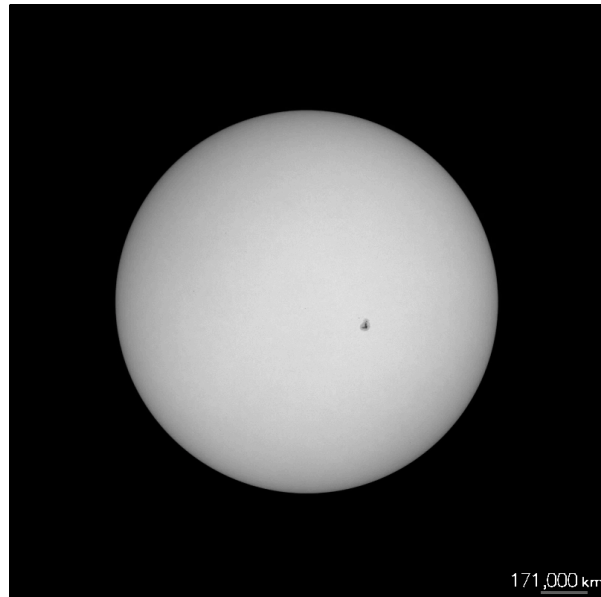
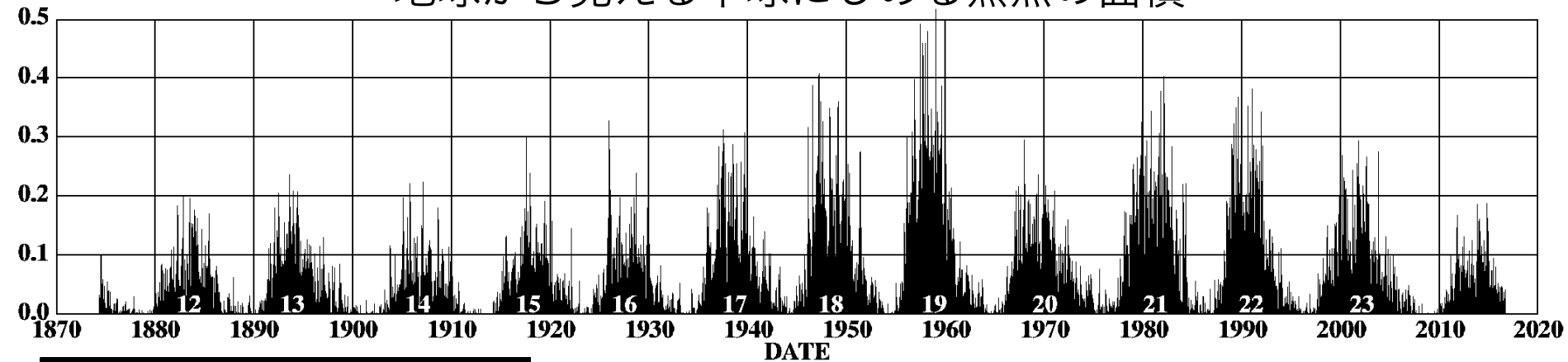
千葉大学
堀田英之

謝辞：研究に協力してくれている人々

Matthias Rempel[NCAR], 飯島陽久[名古屋大学], 横山央明[東京大学]

太陽活動11年周期

地球から見える半球にしめる黒点の面積

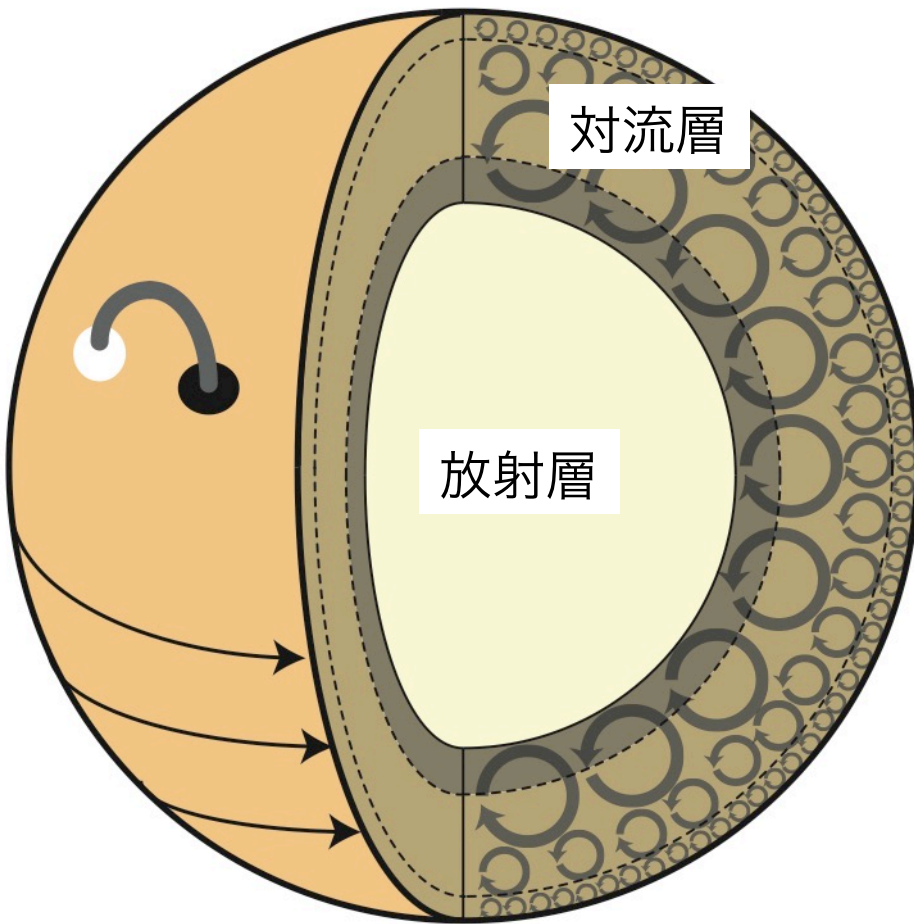


黒点相対数(～黒点の面積)は、11年の周期を持って変動している。**黒点周期は磁場の周期**

400年以上にわたる観測から明らかになっているが、その物理機構は未だ謎。
太陽物理学最古の謎

NASA/NAOJ/岡本文典

熱対流による太陽の磁場生成



放射層からのエネルギー注入により、**対流層は乱流的な熱対流**に満たされている。

この乱流と磁場が相互作用することで11年周期を維持。

磁場の誘導方程式

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B} - \eta \nabla \times \mathbf{B})$$

$$\mathbf{B} = \langle \mathbf{B} \rangle + \mathbf{B}'$$

$$\mathbf{v} = \langle \mathbf{v} \rangle + \mathbf{v}'$$

$\langle \rangle$: 大きなスケール
' : 小さなスケール



$$\frac{\partial \langle \mathbf{B} \rangle}{\partial t} = \nabla \times (\langle \mathbf{v} \rangle \times \langle \mathbf{B} \rangle) + \nabla \times (\langle \mathbf{v}' \times \mathbf{B}' \rangle) - \nabla \times (\eta \nabla \times \langle \mathbf{B} \rangle)$$

大規模な流れ場が大規模な磁場に作用する効果

小規模な乱流の非線形効果によって、大規模な磁場に作用する効果

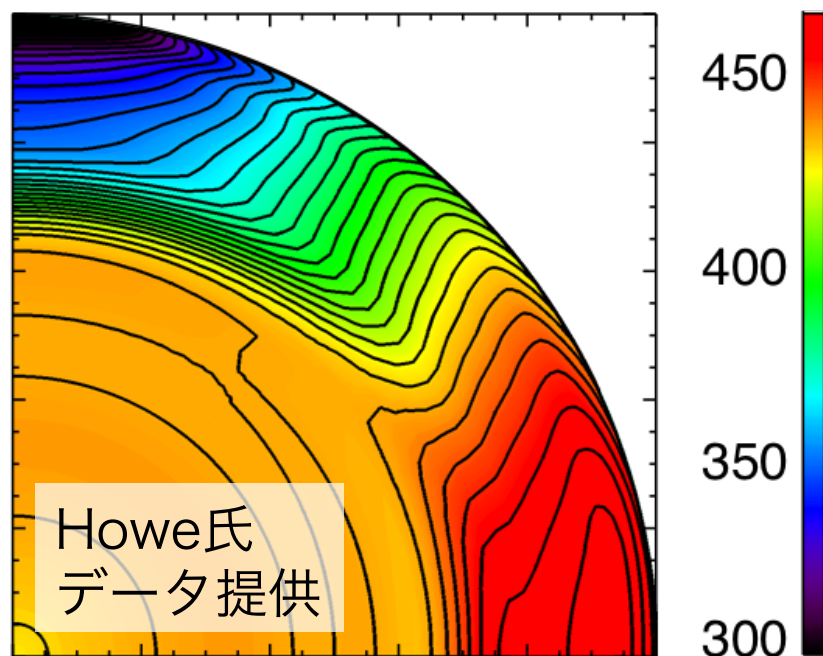
磁場生成の方法：差動回転による引き伸ばし

$$\nabla \times (\langle \mathbf{v} \rangle \times \langle \mathbf{B} \rangle) = -\nabla \cdot (\langle \mathbf{v} \rangle \langle \mathbf{B} \rangle) + \boxed{(\langle \mathbf{B} \rangle \cdot \nabla) \langle \mathbf{v} \rangle}$$

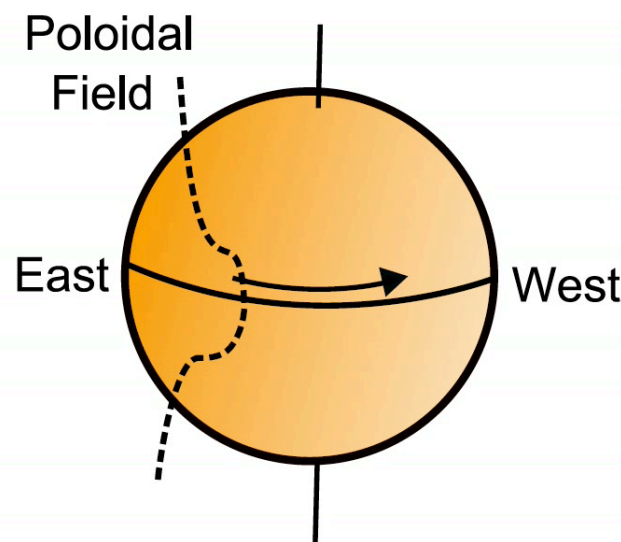
移流・圧縮

引き伸ばし

$\Omega/2\pi$ [nHz]



経度方向の磁場を作る(Ω 効果)



太陽ダイナモの中で最も重要な機構
e.g. Parker, 1955

磁場生成の方法： α 効果と乱流拡散

$$\langle \mathbf{v}' \times \mathbf{B}' \rangle = \alpha \langle \mathbf{B} \rangle - \eta_t \nabla \times \langle \mathbf{B} \rangle$$

α 効果

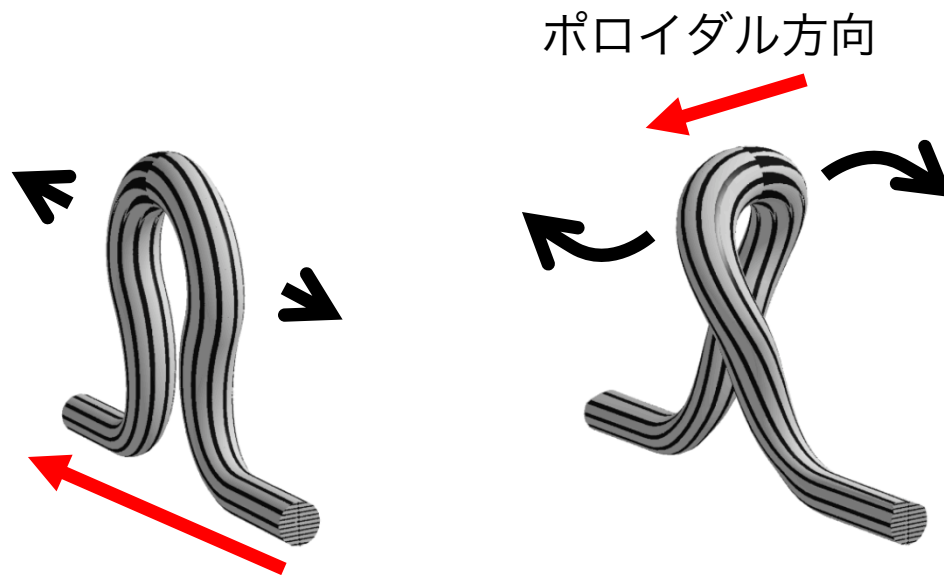
乱流拡散

e.g. Krause & Rädler, 1988

$$\alpha = -\frac{\tau}{3} \mathbf{v}' \times \nabla \times \mathbf{v}'$$

太陽自転により、熱対流がヘリシティを持つことにより、統計的に大規模なポロイダル磁場を生成する効果。

いつ、どこで、どんなスケールで起こっているかは謎
(本講演の主テーマ)

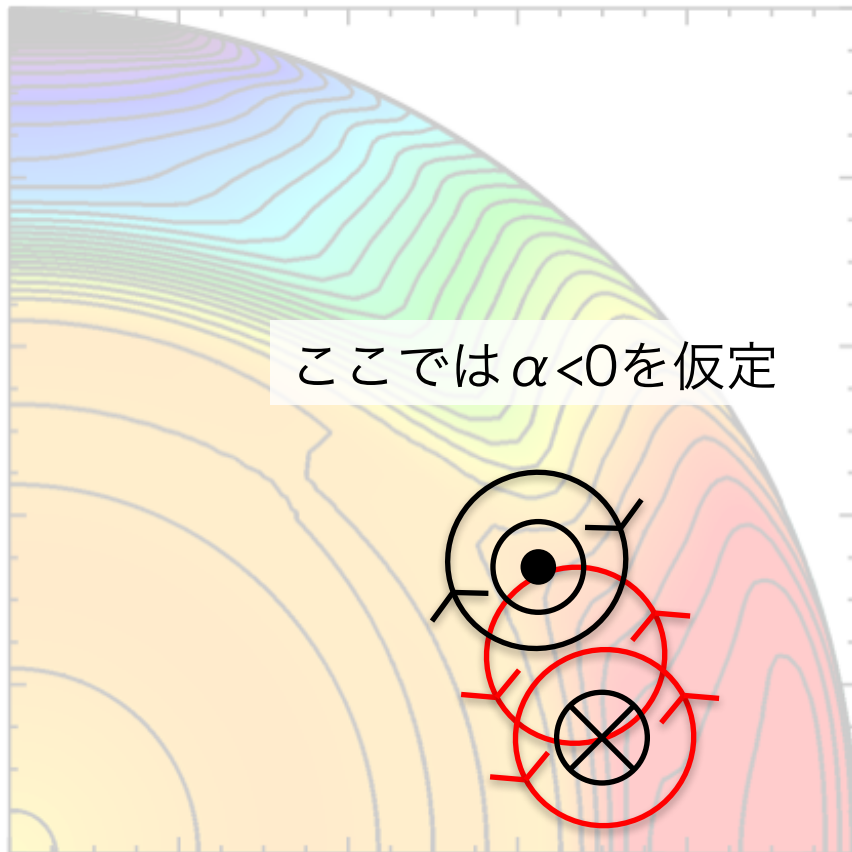


ポロイダル方向

トロイダル方向

11年周期とは： $\alpha\Omega$ ダイナモ

$$\frac{\partial \langle \mathbf{B} \rangle}{\partial t} = \nabla \times (\langle \mathbf{v} \rangle \times \langle \mathbf{B} \rangle) + \alpha \langle \mathbf{B} \rangle - \eta_t \nabla \times \mathbf{B}$$



1. 大規模なポロイダル磁場が差動回転によって、引き伸ばされトロイダル磁場を生成(Ω 効果)
2. 乱流的な α 効果により、ポロイダル磁場が生成。
3. ポロイダル磁場からトロイダル磁場を再生成

$$P_{\text{cyc}} \sim \frac{\eta_t}{L^2} \sim 10 \text{ yr}$$

$\alpha < 0$ ならば、赤道に大規模構造が伝わっていく (パーカー=吉村の符号規則, Parker+1955, Yoshimura, 1975)

熱対流数値計算

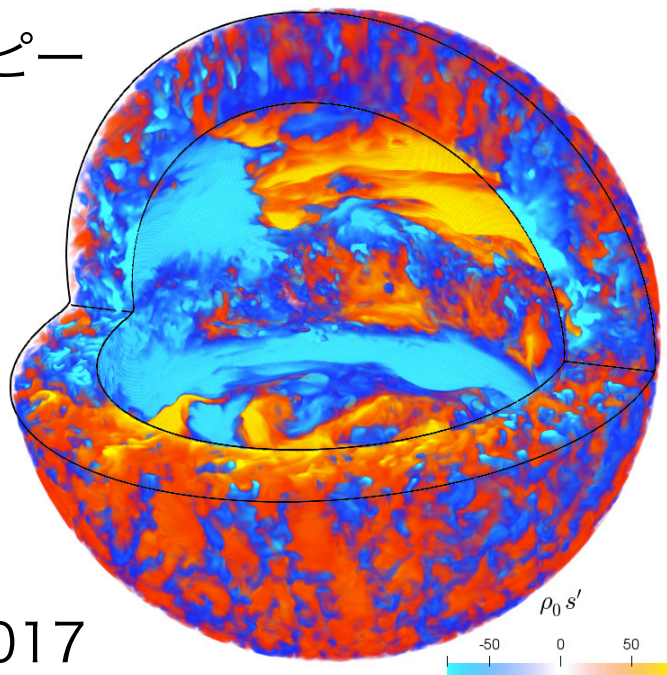
太陽の状況で磁気流体力学の方程式を解く

太陽成層(密度, 圧力, 温度..)に太陽のエネルギーを注入放出

→乱流により差動回転生成

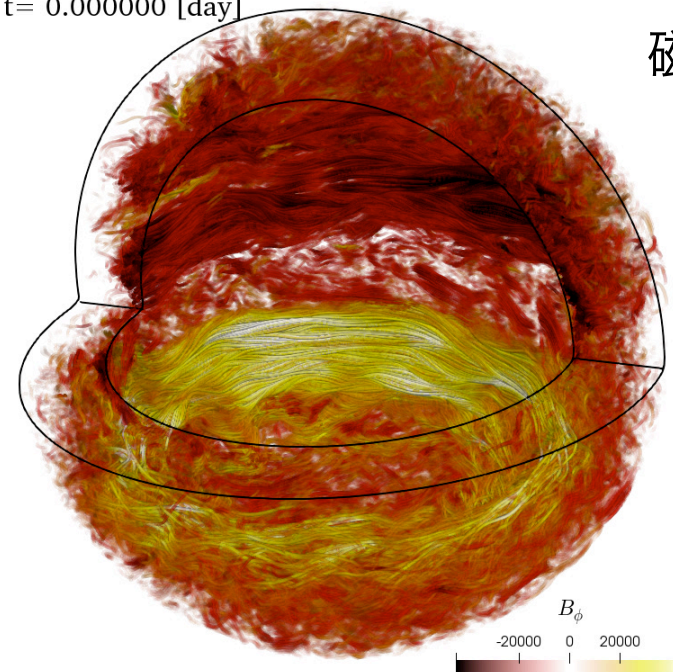
→差動回転と乱流の非等方性により大規模磁場生成

エントロピー



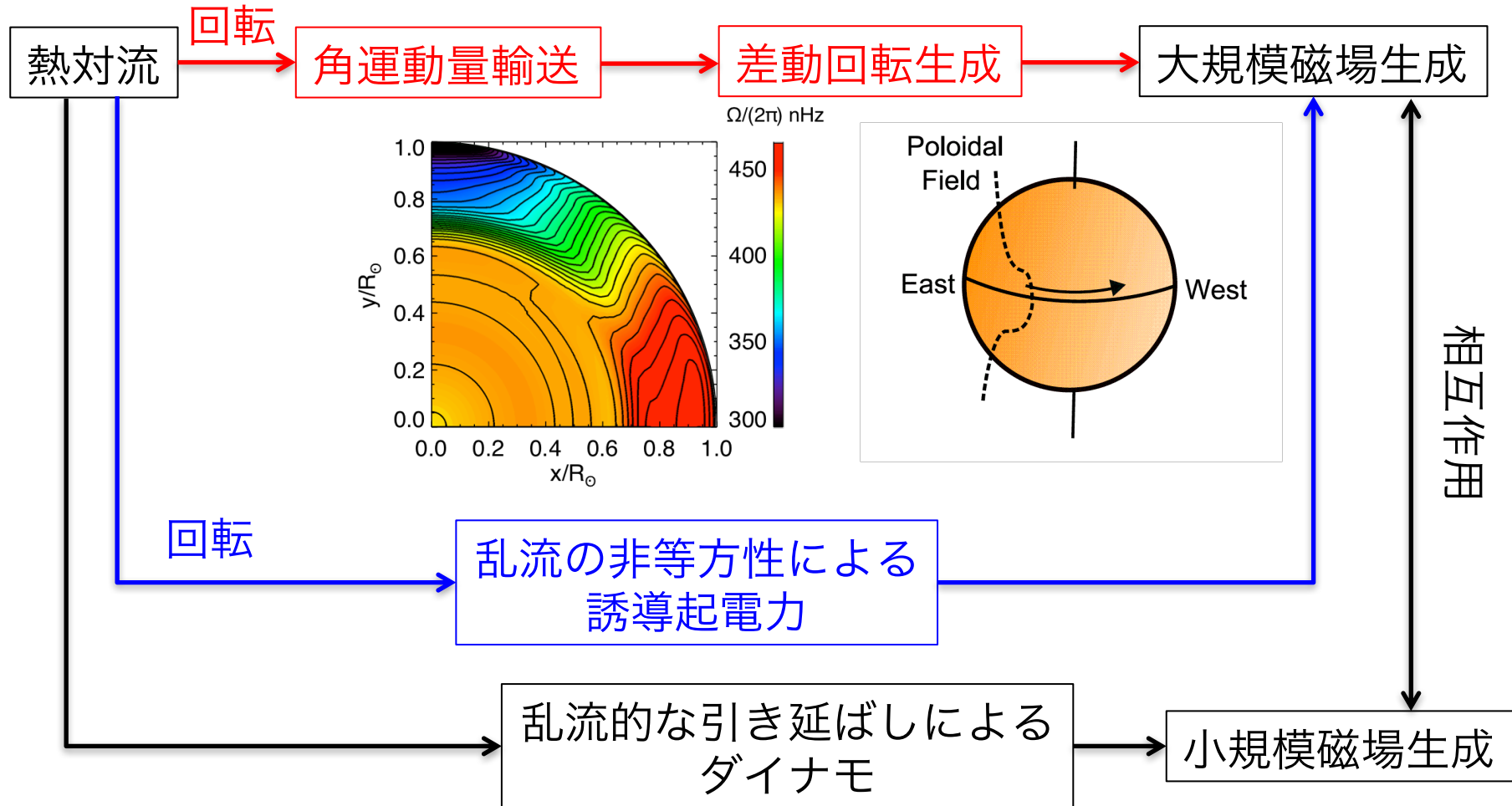
t= 0.000000 [day]

磁力線



Hotta, 2017

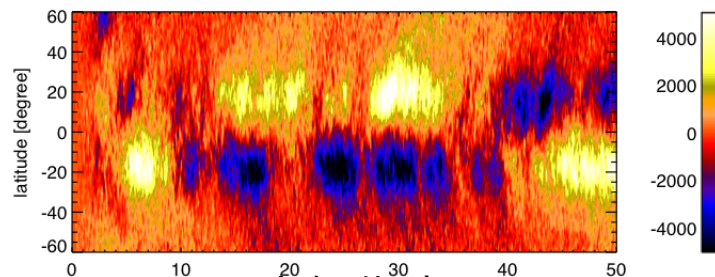
磁場生成の経路



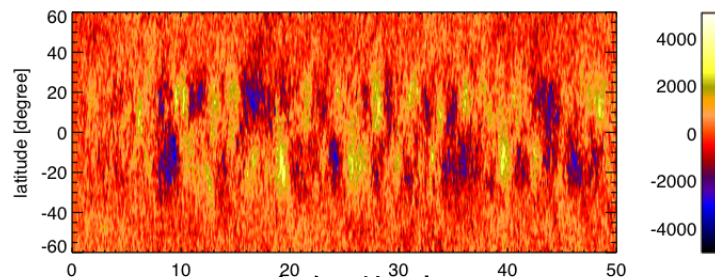
これらのことが自己無撞着に3次元計算の中で起きる

最近のモデルから

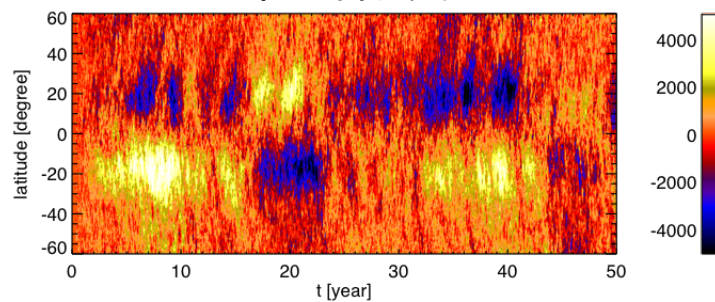
低解像度



中解像度

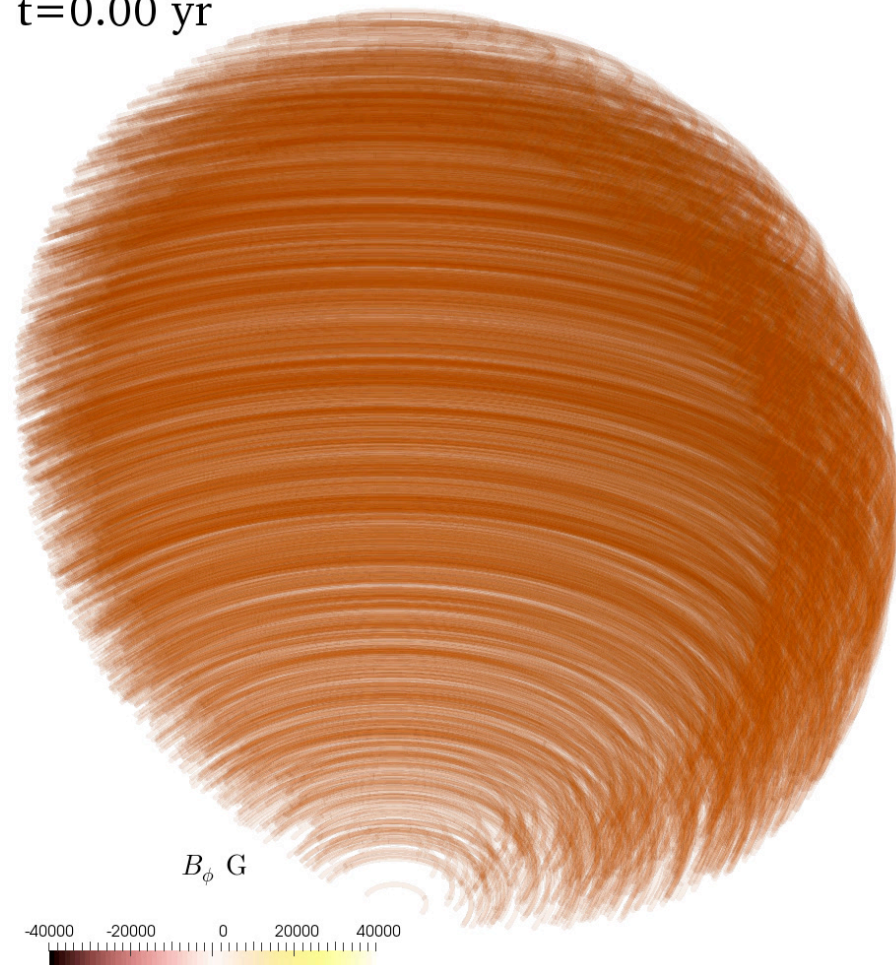


高解像度



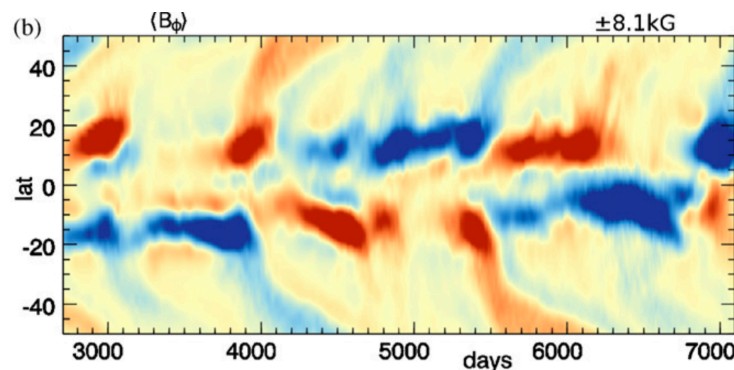
Hotta+2016, Science

$t=0.00$ yr

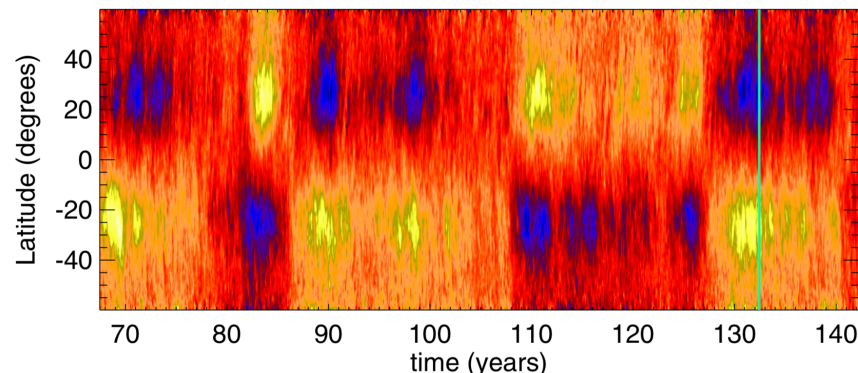


Hotta, 2018

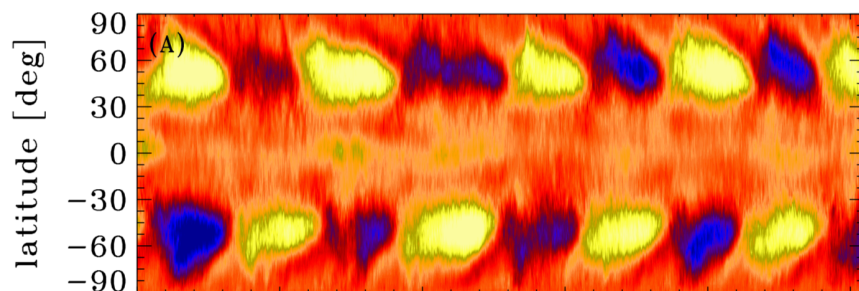
熱対流計算をすると乱流 $\alpha\Omega$ で「説明可能」



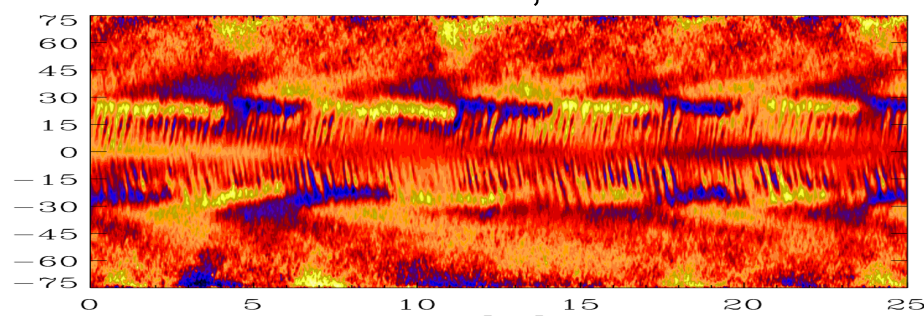
Brown+2011, ASH



Fan+2014, FSAM



Ghizaru+2010, EULAG



Käpylä+2017, Pencil

対流層の中の α 効果で全て説明できる(Brown+2010, Racine+2011, Käpylä+2012, Masada+2013, Warnecke+2015, Karak+2015, Käpylä+2017)

ここから話が変わるのでまとめ

$$\frac{\partial \langle \mathbf{B} \rangle}{\partial t} = \nabla \times (\langle \mathbf{v} \rangle \times \langle \mathbf{B} \rangle + \alpha \langle \mathbf{B} \rangle - \eta_t \nabla \times \mathbf{B})$$

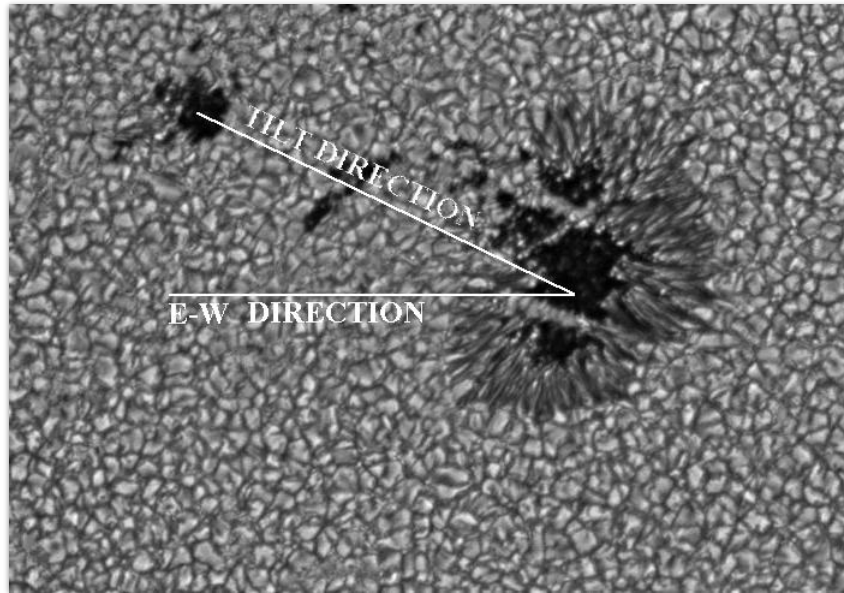
- 太陽には、11年周期がある。
- 差動回転によって、経度(トロイダル)方向の磁場を作っているのは、ほぼ疑いがない
- α 効果はよくわからないが、熱対流の数値計算をすると、対流層の奥底でコリオリ力による非等方乱流でぐちゃぐちゃすることにより、起きている。
- α 効果と差動回転が同じような場所で働いている状況では、乱流拡散の時間スケールくらいの磁場周期が発生する。

α 効果の場所について、観測からもう少しなにか言えないか

α 効果はどこで働いているのか

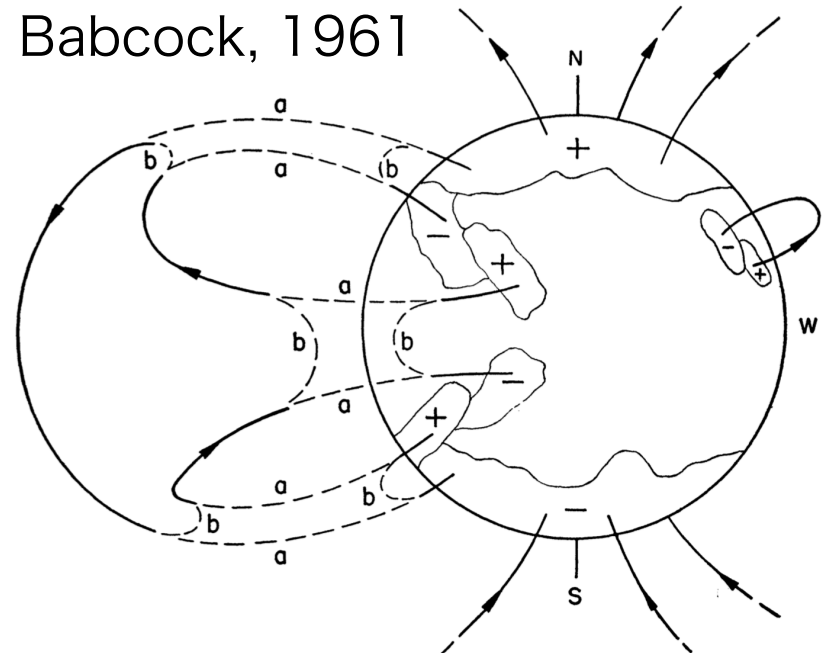
Babcock-Leighton α 効果

Joy's law



(Hathaway slide)

Babcock, 1961

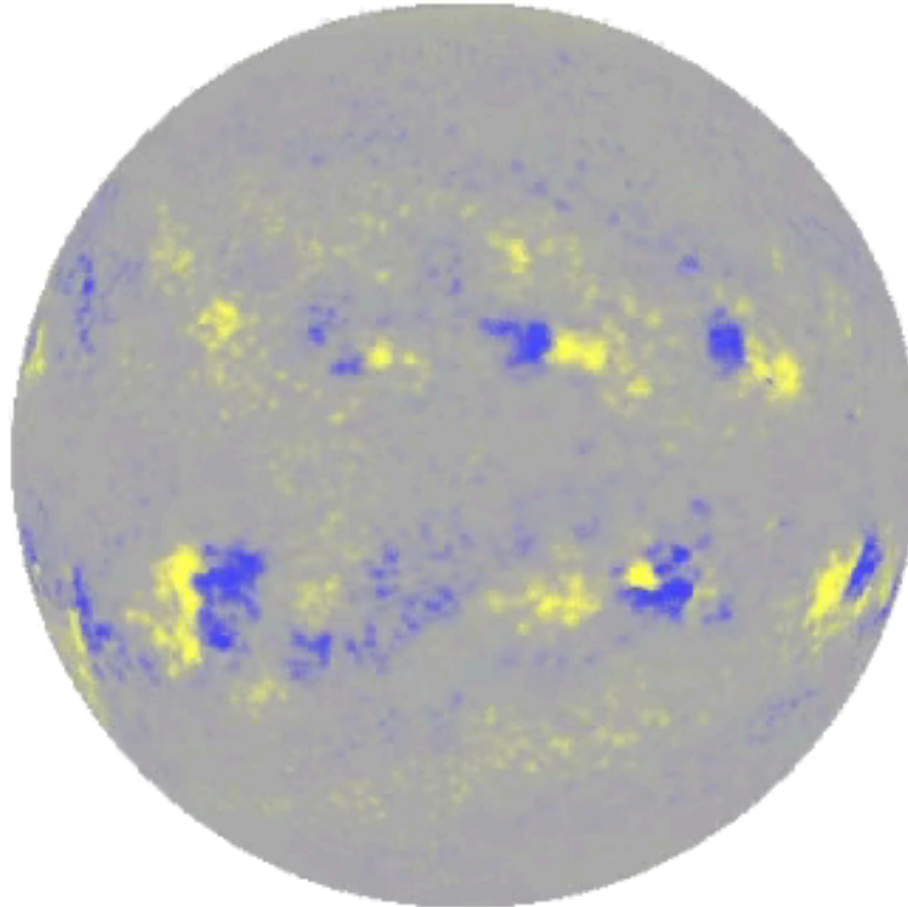


黒点を作るような磁場が浮上してくるときに、周りの圧力がさがり膨張する運動にコリオリ力がかかることで、東西に向いた磁場がやや南北に向く (Joy's law : 観測的結果)

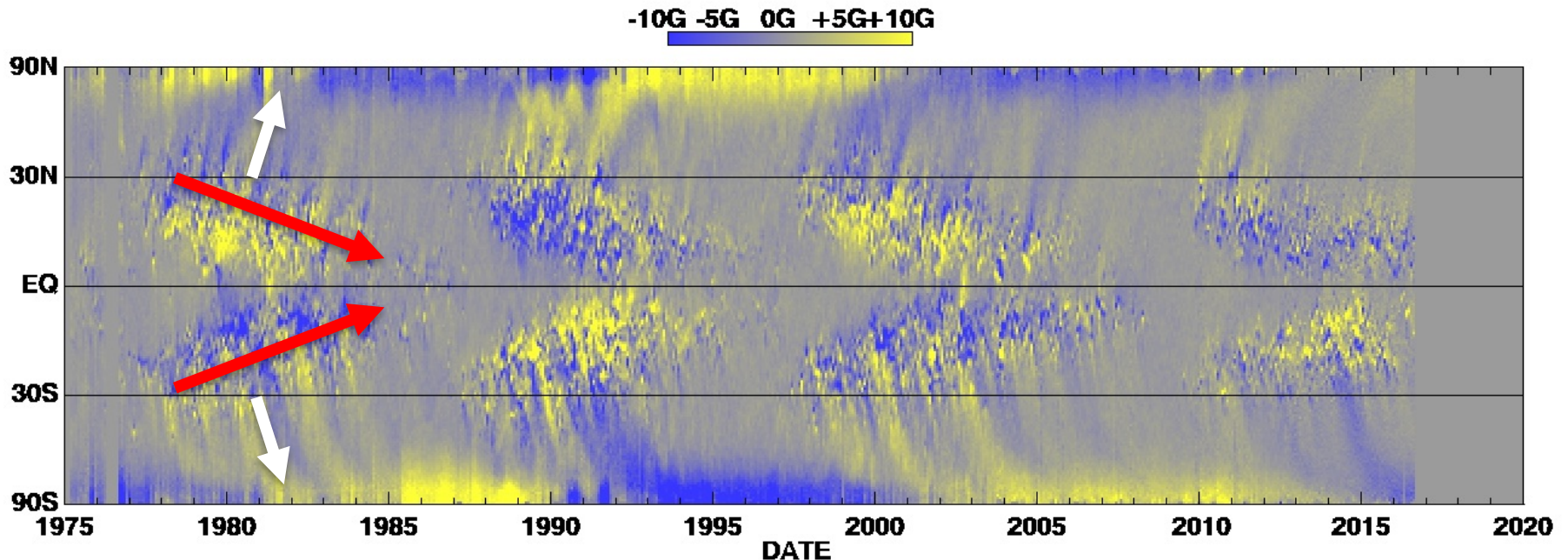
トロイダル磁場からポロイダル磁場を作る確かな機構

どのくらい重要かはよくわからない。

長期間の黒点の統計：移流拡散し極へ

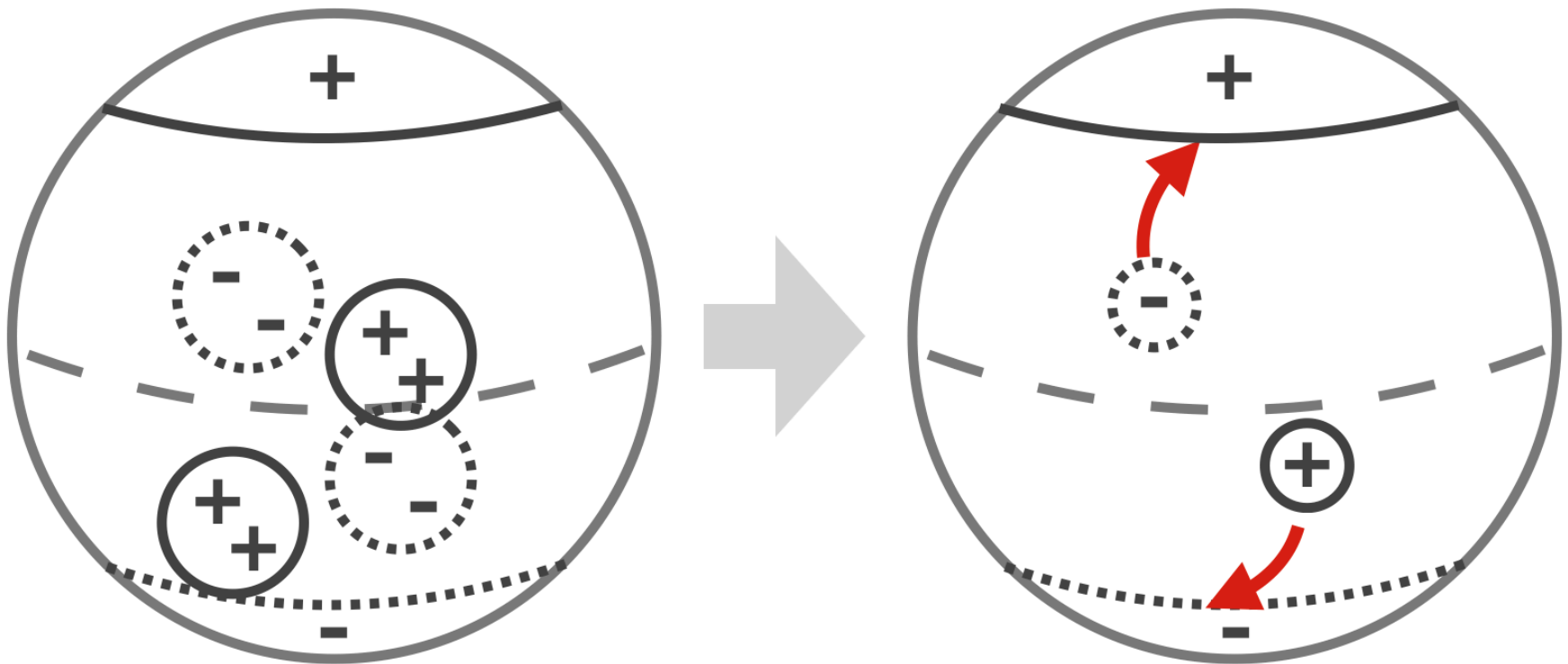


磁場の蝶形図



太陽の極磁場は、11年周期で反転
Joy's lawにしたがって、出現した黒点が移流拡散することにより、
極磁場が反転する。

極地方の磁場はどのようにつくられるか

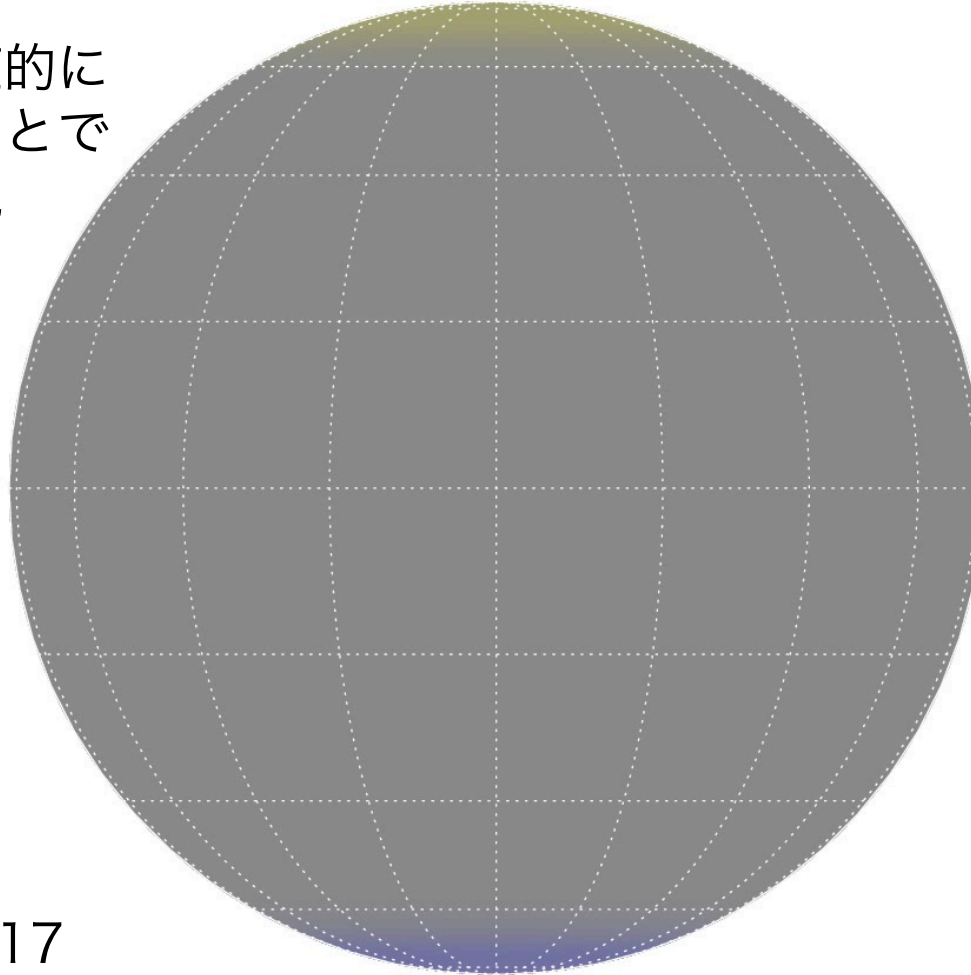


赤道をまたいで、反対称なのでそれらが拡散して極磁場を構成

観測データを黒点の動向 数値計算でシミュレート

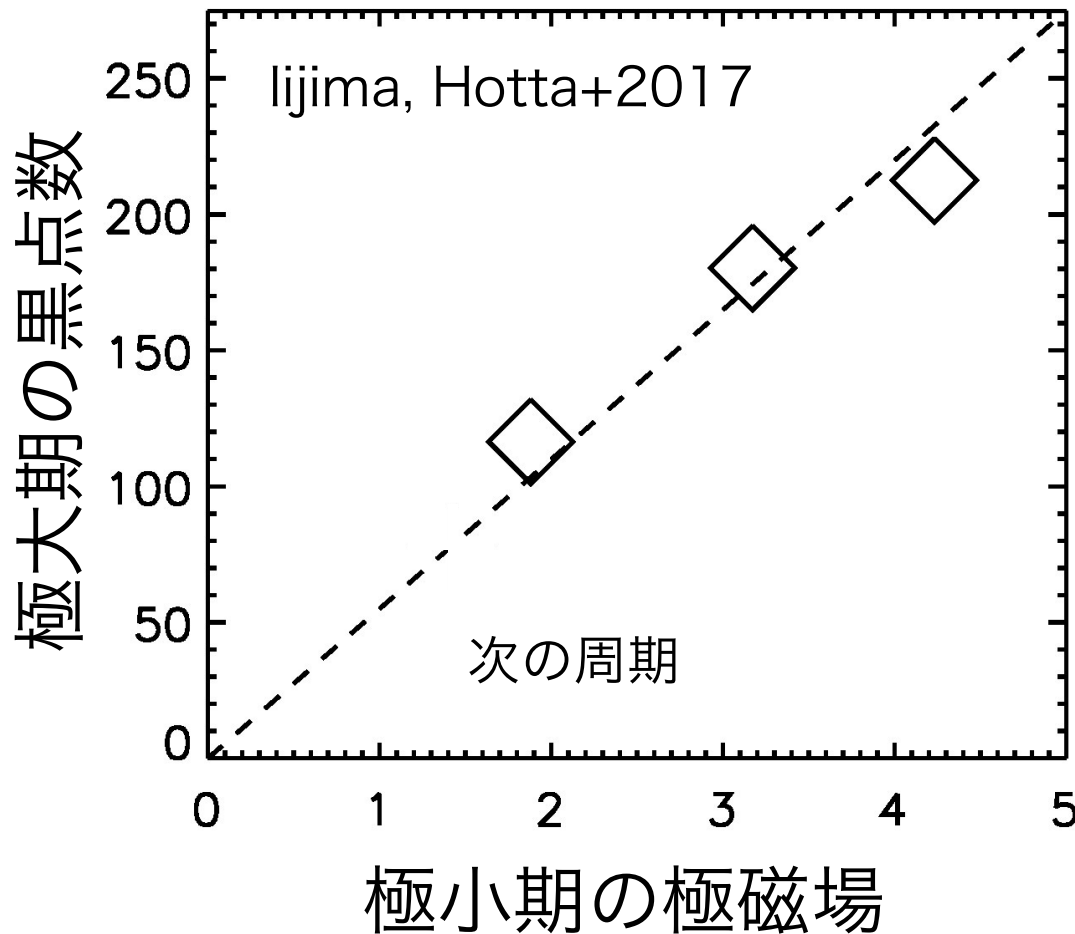
1996/04/14 23:59:30.000

観測データを数値的に
移流拡散させることで
極磁場はよく再現
できる



Iijima, Hotta+2017

極小期の極磁場と黒点数



周期 n と周期 $n+1$ の間の極磁場強度と周期 $n+1$ の黒点数は、非常に相関がいい

→極磁場が次の周期のトロイダル磁場の種磁場になっていることを示唆

極磁場が測れたのは今回も含めて4回しかないが、極域白斑、地球磁場を絡めると、もう少し統計性が増す。

いずれにせよ、極磁場と次の周期の黒点数は相関がいい

黒点は副産物かメインプレイヤーか

三次元磁気流体計算：

太陽内部でのぐちゃぐちゃする α 効果で説明可能
黒点は副産物

表面観測：

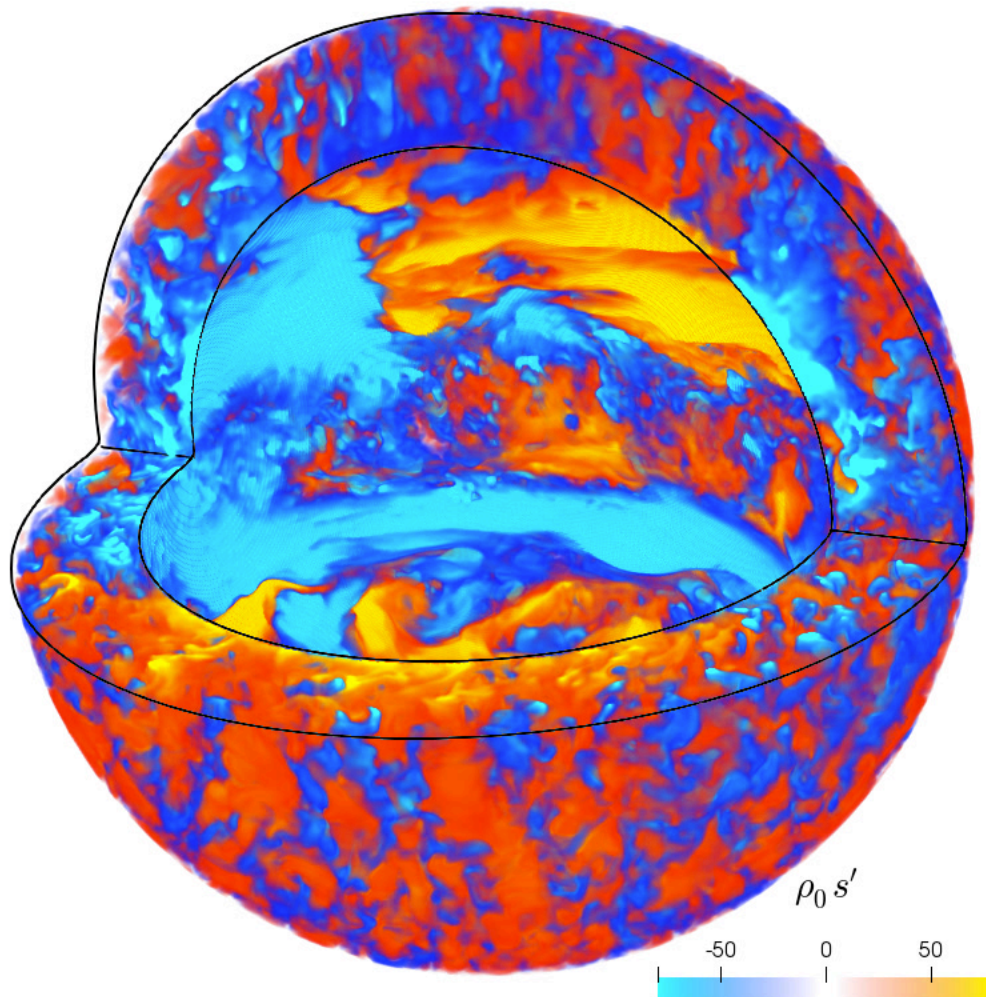
黒点は統計的に傾いて出てくる(Joy's law)
→その効果を精密・統計的に観測することで
極磁場をよく説明できる
→極磁場と次の周期の黒点数はよく相関する
→極磁場が次の周期の種磁場
黒点はメインプレイヤー

どちらかをはっきりさせることは重要。

11年周期を決める物理も変わってくると考えられる。

乱流拡散の時間スケールか大規模な流れの時間スケールか

3次元熱対流には太陽表面は入ってない



全ての3次元全球計算では、太陽表面(光球)が計算領域の中に入っておらず、当然黒点が現実的に形成することはない。

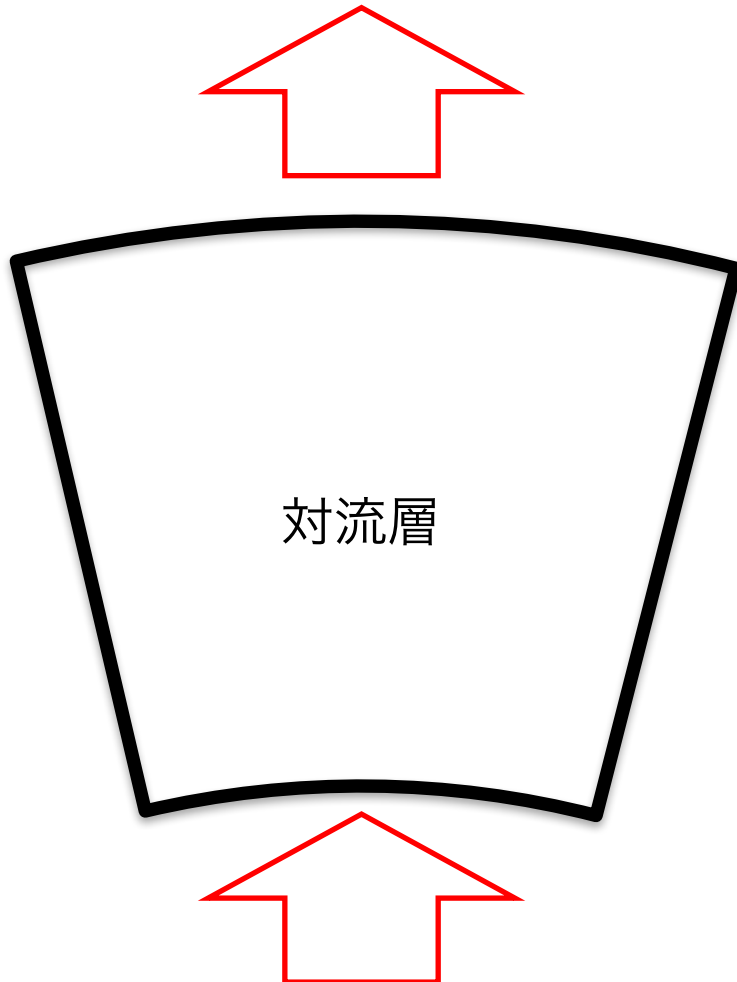
多くの計算は $r_{\text{top}}=0.96R_{\text{sun}}$
一番高くても $r_{\text{top}}=0.99R_{\text{sun}}$
(Hotta+2014, 2015)

よって、このような計算の中ではBabcock-Leighton α 効果が実現するはずもなく、結果として太陽内部の α 効果のみが効いてしまっているのではないか

太陽ダイナモを正しく理解するためには光球を入れることが必須

なにが難しいのか (1/2)

混合距離理論による大雑把な見積もり



対流層

対流速度

$$\frac{L_{\odot}}{4\pi r^2} = F_{\odot} \sim \rho v_c^3$$

$$\longrightarrow v_c \sim \rho^{-1/3}$$

対流スケール

$$L \sim \frac{k_B T}{mg}$$

なにが難しいのか (2/2)

	光球(表面)	対流層の底
熱対流速度	4 km/s	50 m/s
空間スケール	1 Mm	200 Mm
時間スケール	数分	一ヶ月
音速	10 km/s	200 km/s
温度	6000 K	1 MK
密度	$10^{-7} \text{ g cm}^{-3}$	$10^{-1} \text{ g/cm}^{-3}$
光学的厚さ	~ 1	大きい
δ	0.1~1	10^{-6}

$$\delta \sim \frac{p_1}{p_0} \sim \frac{\rho_1}{\rho_0} \sim \frac{T_1}{T_0}$$

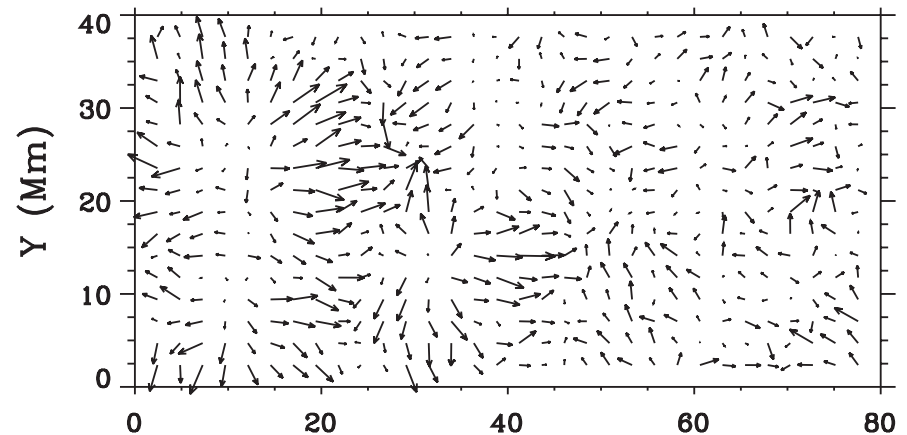
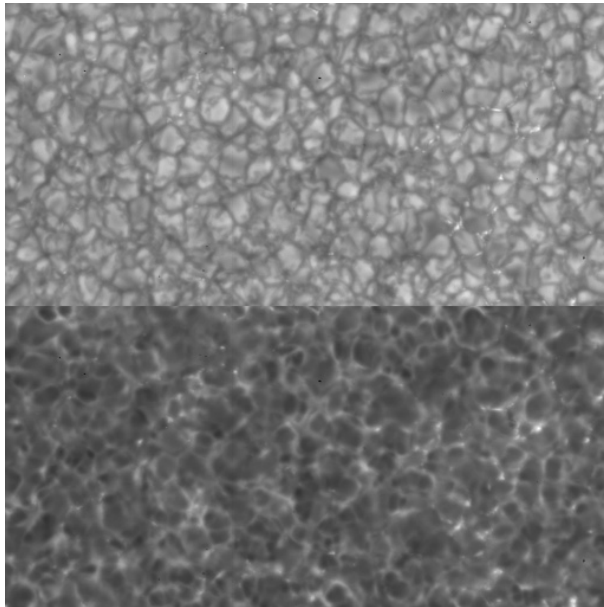
太陽内部と表面で極端に違う
空間・時間スケール

1. 輻射輸送を解く
 - ✓ 内部→拡散近似
 - ✓ 光球→輻射輸送
2. 方程式を内部・光球包括して解けるように
3. 状態方程式を内部・光球を包括して扱えるように

これまでに全対流層を一貫して扱った数値計算は存在しない
ここからは、全対流層を扱うための挑戦を紹介する

観測的には何をやればいいのか

対流層内部の熱対流の分布を確かめる



局所日震学による内部流れ測定
(Sekii+2007)

大規模磁場の生成場所を確かめる

日震学で磁場測定そのものを行うのは難しいので、大規模な特徴的な流れ。ローレンツ力による熱対流の抑制を日震学で観測する。

まとめ

太陽には11年の磁場周期がある。

トロイダル(経度方向)磁場は、差動回転の引き伸ばし、
ポロイダル磁場は α 効果で作るという基本方針は多分あってる。

3次元の熱対流計算をやると、対流層内部の α 効果で計算結果を説明できる。

表面の観測に統計的な処理を行なうと、黒点の傾きによる α 効果(Babcock-Leighton α 効果)が重要な役割を果たしていることが示唆される。

現在のところ、Babcock-Leighton α 効果は再現できないような計算設定になっているので、今後10年程度で、ここを実現できるように頑張っていく。