



SCHOOL OF SCIENCE
THE UNIVERSITY OF TOKYO

太陽大規模流れ場・ダイナモ研究 のこれまでと展望

東京大学 地球惑星科学専攻
堀田英之

2011年12月27日太陽物理学と恒星物理学の相互交流と将来的展望@東京大学(本郷)

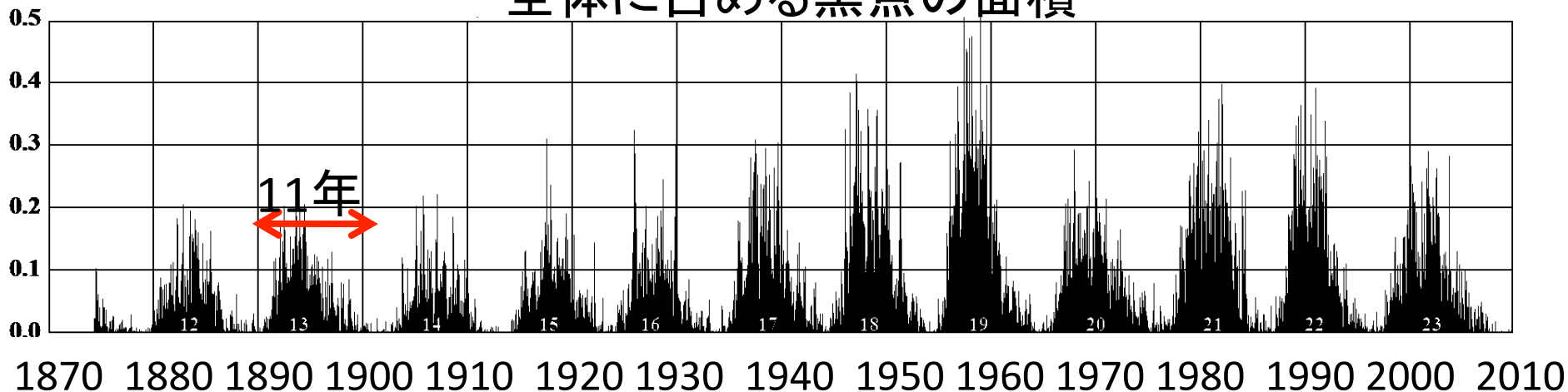
目次

1. 太陽の活動周期
2. 太陽ダイナモ(磁束輸送ダイナモ)
3. 現代のダイナモ研究のモチベーション
4. 角運動量輸送と大規模流れ
5. グローバルダイナモにまつわる話
6. まとめと展望

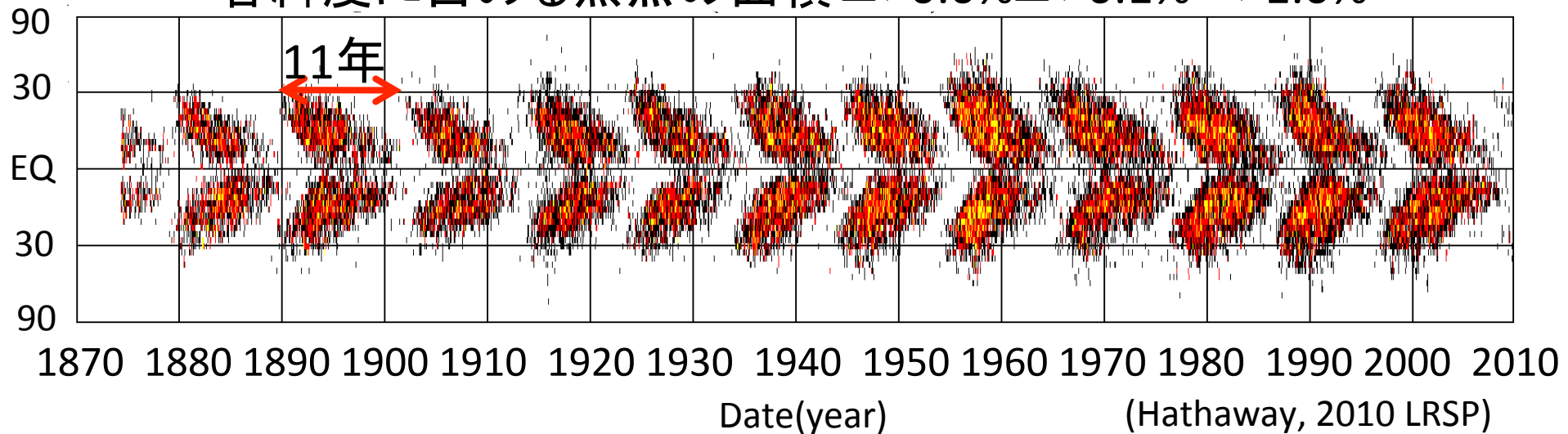
太陽黒点数11年周期

太陽の黒点数(面積)・磁場は11年の周期を持って変動している

全体に占める黒点の面積

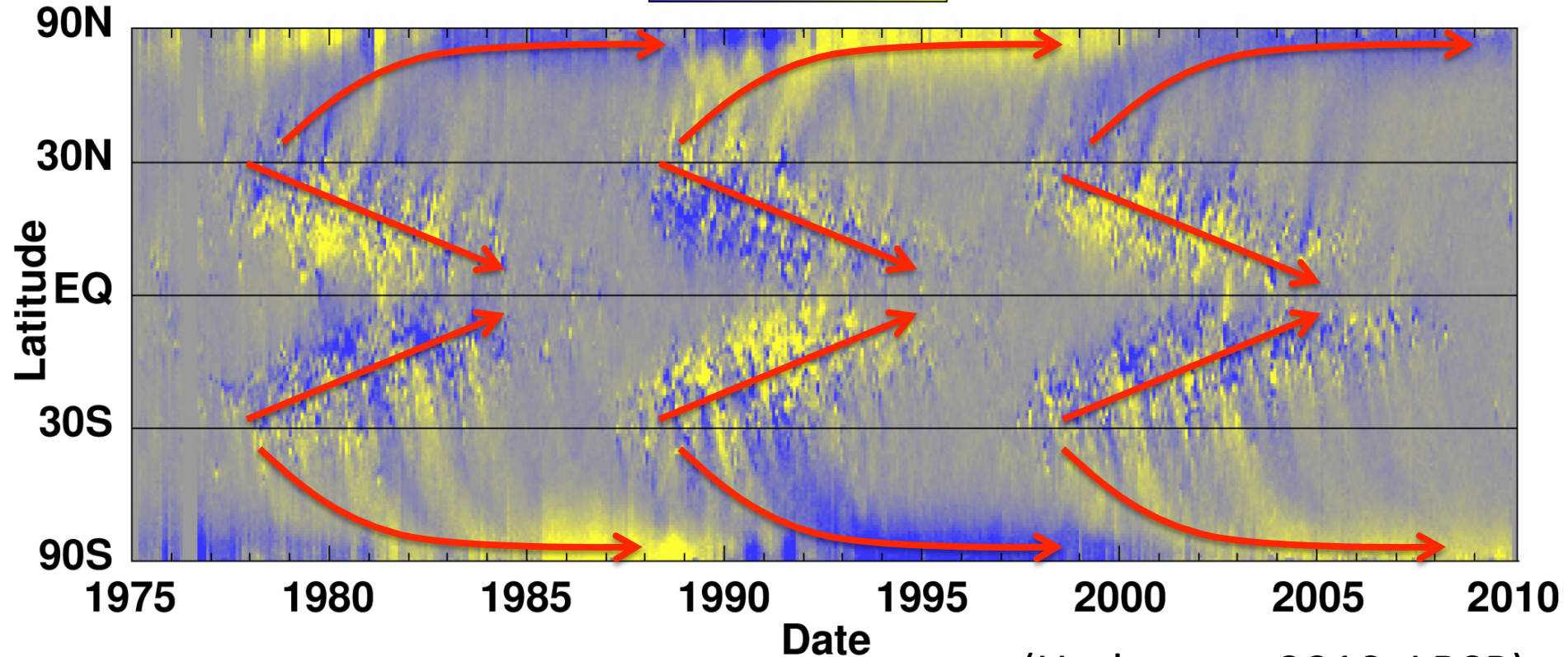


各緯度に占める黒点の面積 ■ >0.0% ■ >0.1% ■ >1.0%



磁場の22年周期

-10G -5G 0G +5G +10G



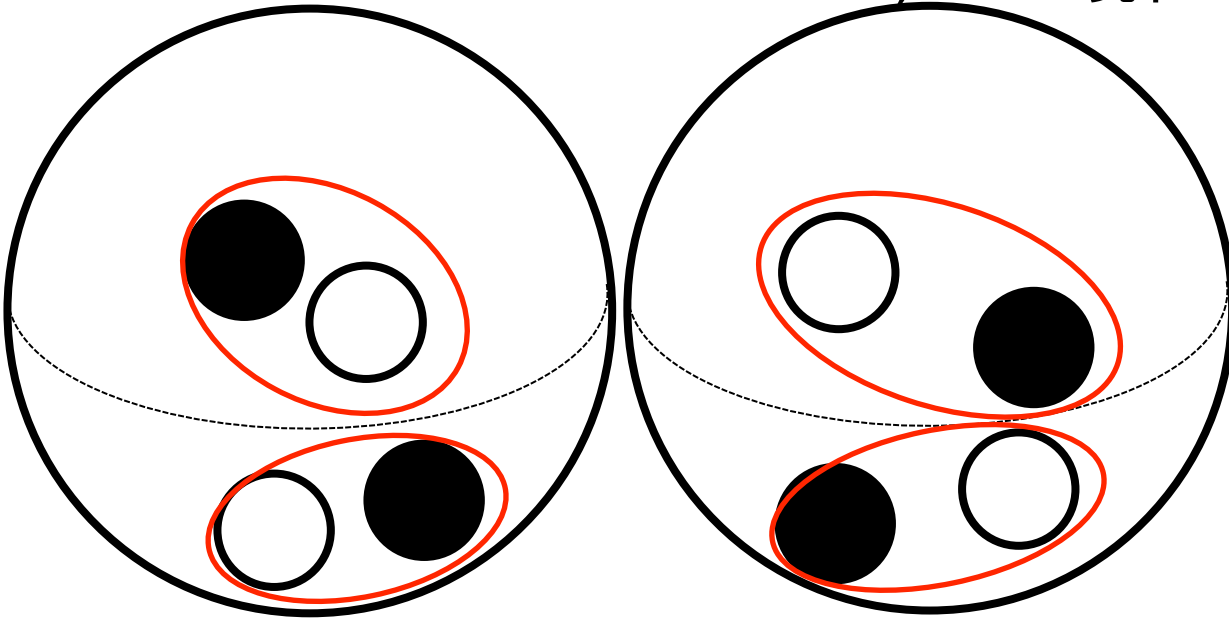
(Hathaway, 2010, LRSP)

- ✓一般磁場が極へと移動する
- ✓極地方の磁場の極性が11年ごとに反転している

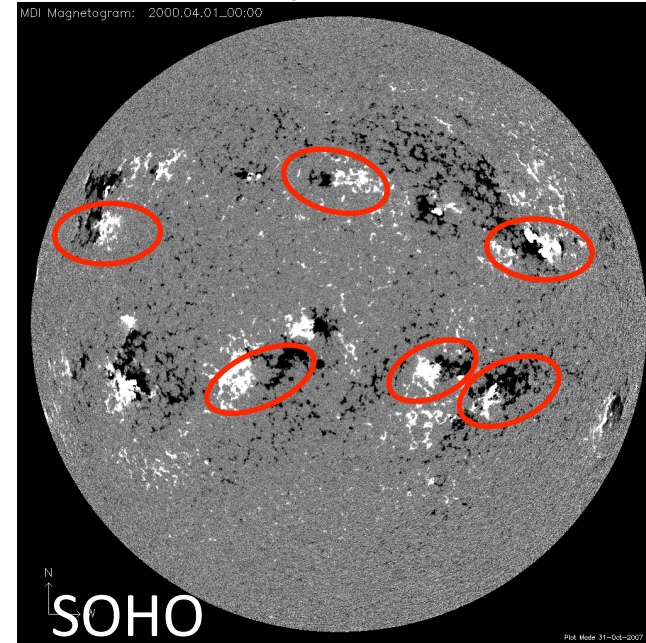
ヘールニコルソンの法則

1996-2009

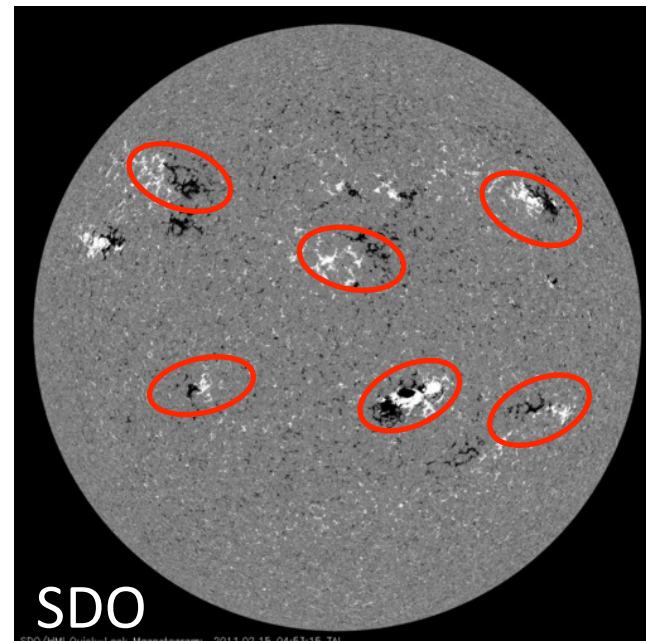
1986-1996, 2009-現在



4, Apr, 2000



15, Feb, 2011

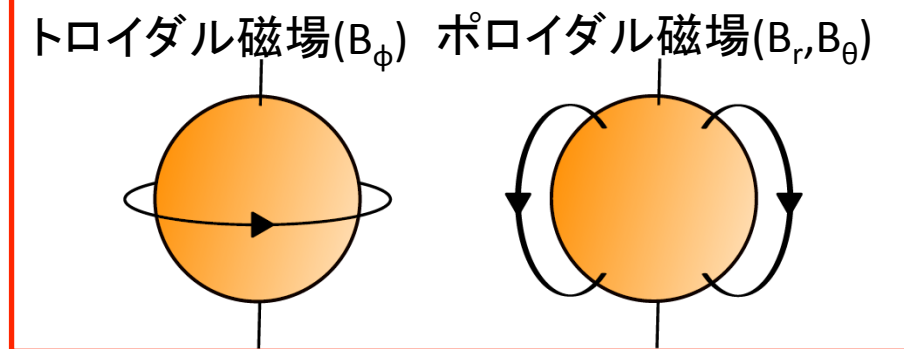
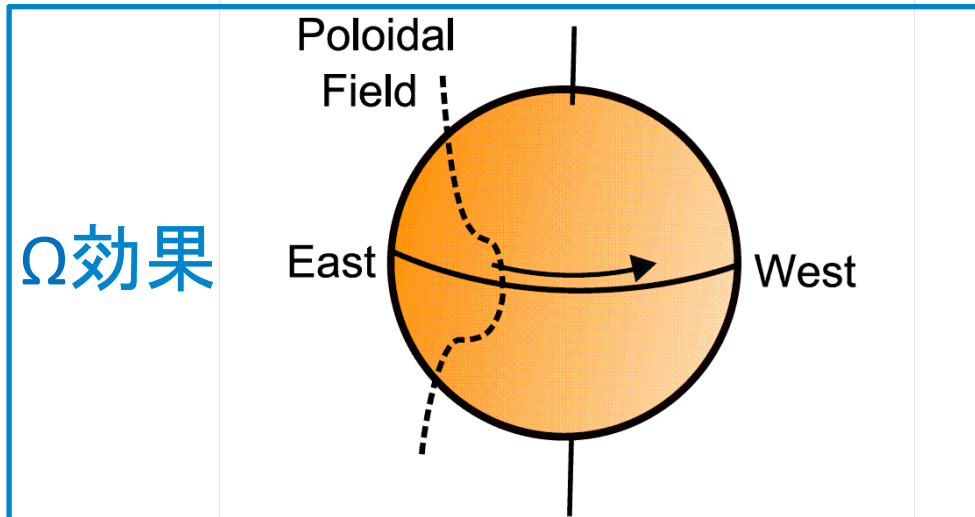


黒点对の対称性には以下のような法則がある

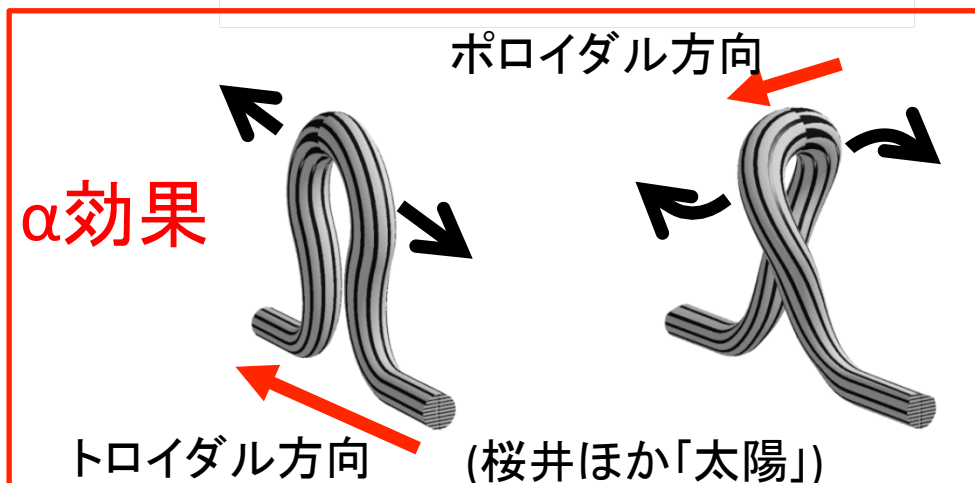
1. 一つの周期の間は一つの半球の先行黒点の極性はいつも同じ
2. 黒点对の極性は赤道に対して反対称
3. この関係は11年ごとに反転する

太陽ダイナモ

太陽の磁場活動を駆動していると考えられているのが**太陽ダイナモ**
ダイナモとは運動エネルギーを磁場エネルギーに変換すること



Ω 効果: 差動回転により磁場を引き延ばす。ポロイダル磁場からトロイダル磁場



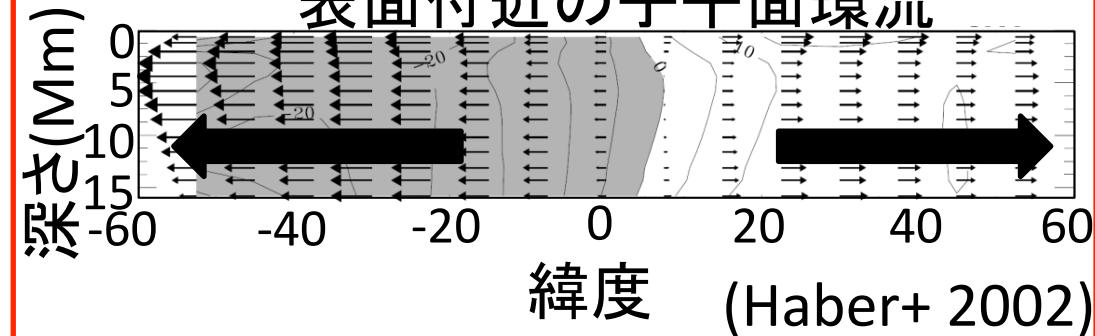
α 効果: いつどこで、効果が効いているのか諸説あるが、コリオリ力によって、磁場の方向を変える。トロイダル磁場からポロイダル磁場

大規模流れ場に関する観測事実

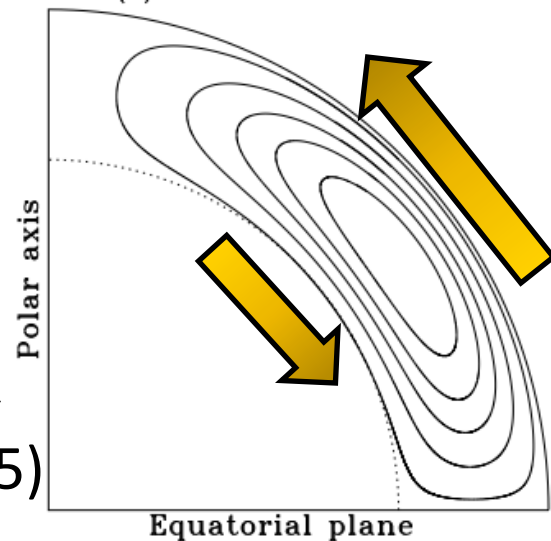
子午面環流と差動回転

表面付近で極へ向かう子午面環流が見つかった。磁束の輸送に重要

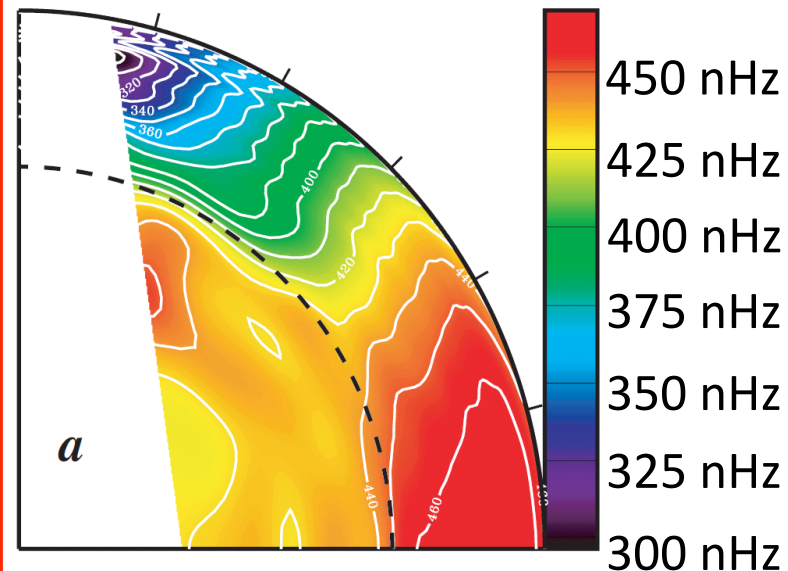
表面付近の子午面環流



考えられている
子午面環流
質量保存を考えて
対流層の底では
赤道へ向かう流れ
(Charbonneau 2005)



日震学が明らかにした
太陽内部の角速度分布。
対流層の底にtachocline
と呼ばれる。角速度勾配層
がある Ω 効果に重要

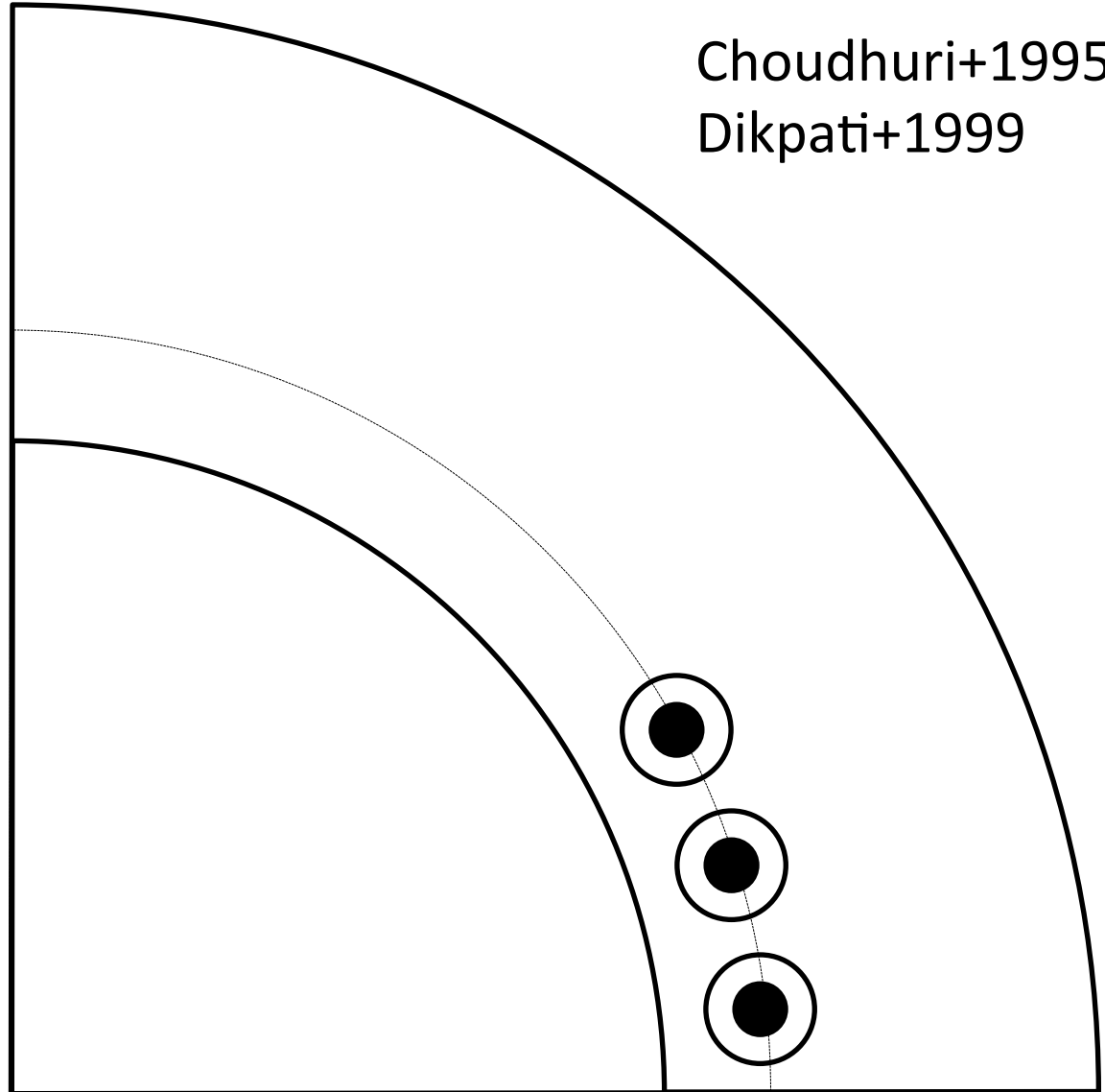


(Thompson+ 2003, ARAA)

磁束輸送ダイナモ(Flux-transport dynamo)

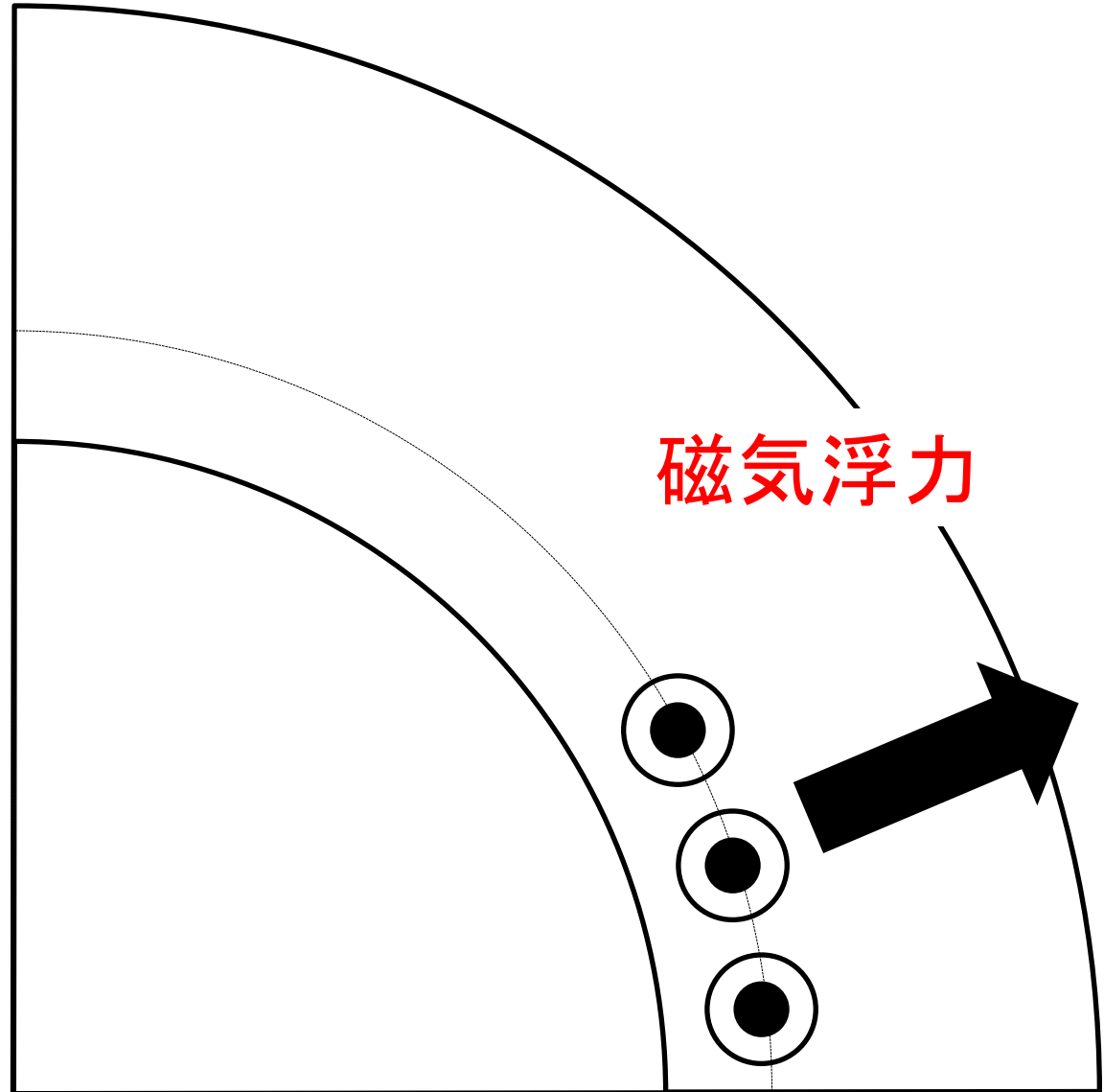
Choudhuri+1995
Dikpati+1999

1. タコクラインでの
速度勾配により、
強いトロイダル磁場が
作られる



磁束輸送ダイナモ(Flux-transport dynamo)

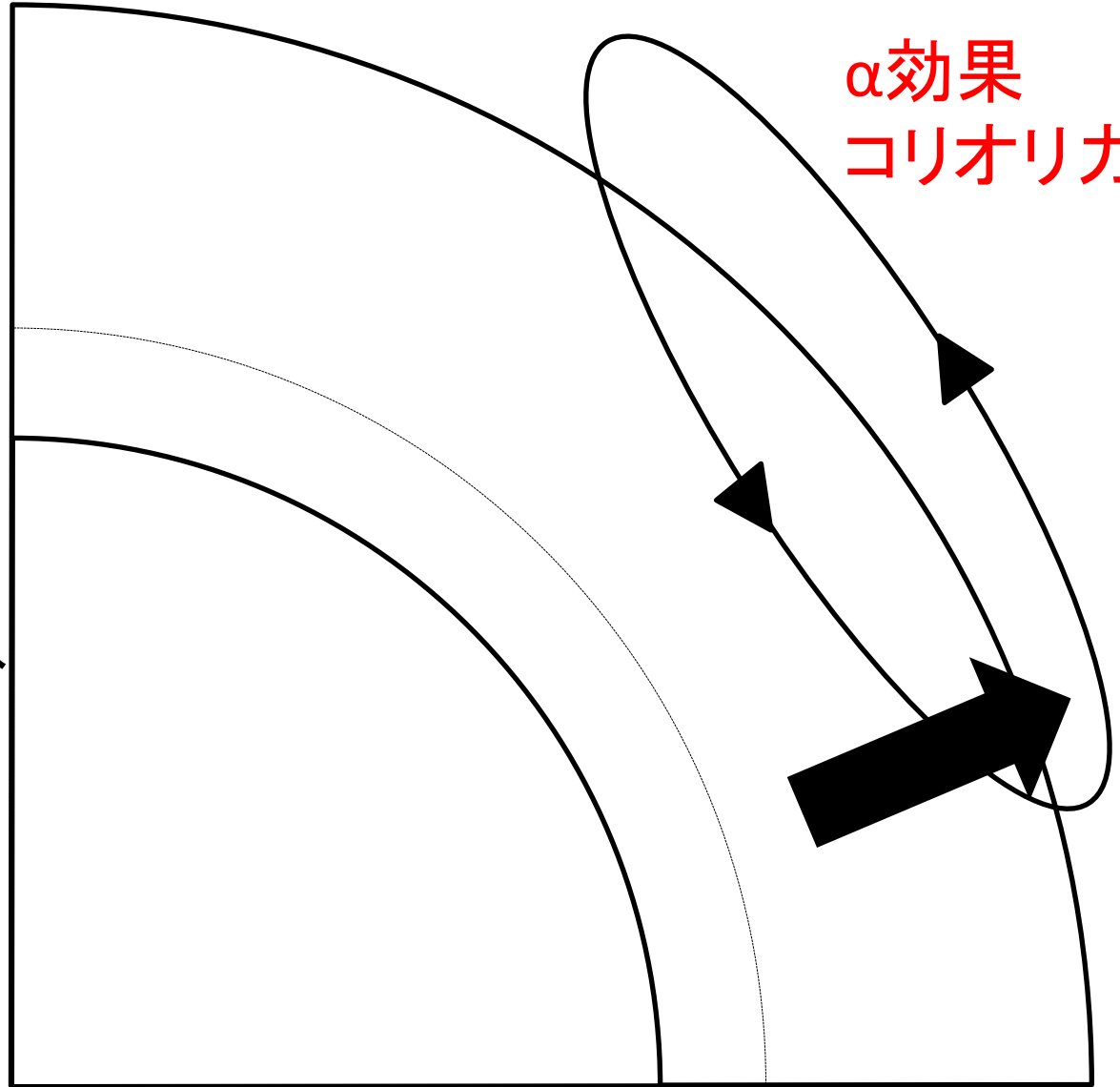
2. トロイダル磁場が
磁気浮力によって、
表面付近に浮上する



磁気浮力

磁束輸送ダイナモ(Flux-transport dynamo)

α 効果
コリオリカ

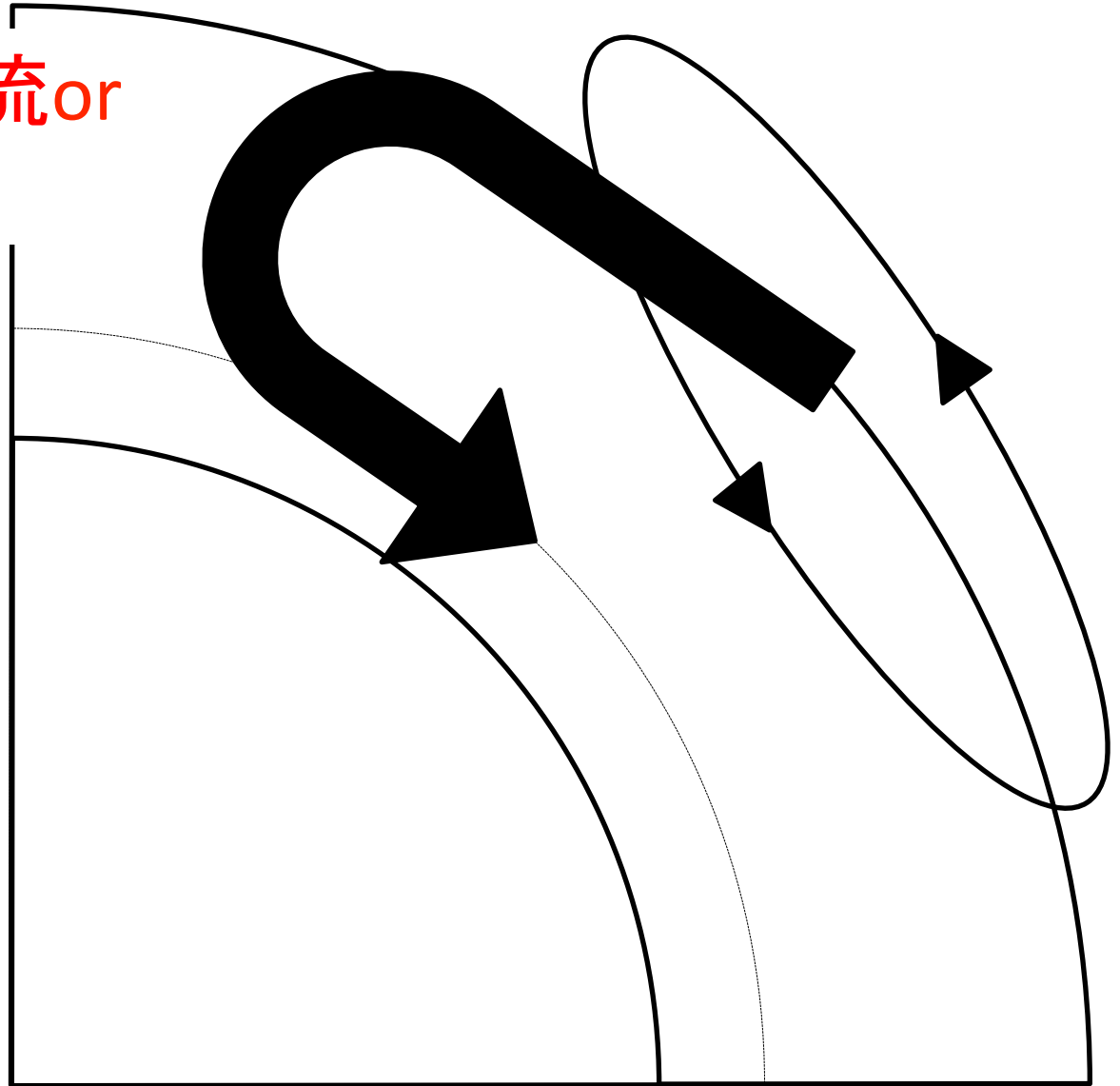


3. 浮上の途中で
コリオリカにより
トロイダル磁場が
曲げられて、
表面でポロイダル成分
を持つ

磁束輸送ダイナモ(Flux-transport dynamo)

子午面還流or
乱流拡散

4. 子午面還流or
乱流拡散で、
磁束を、対流層の
底に移流する

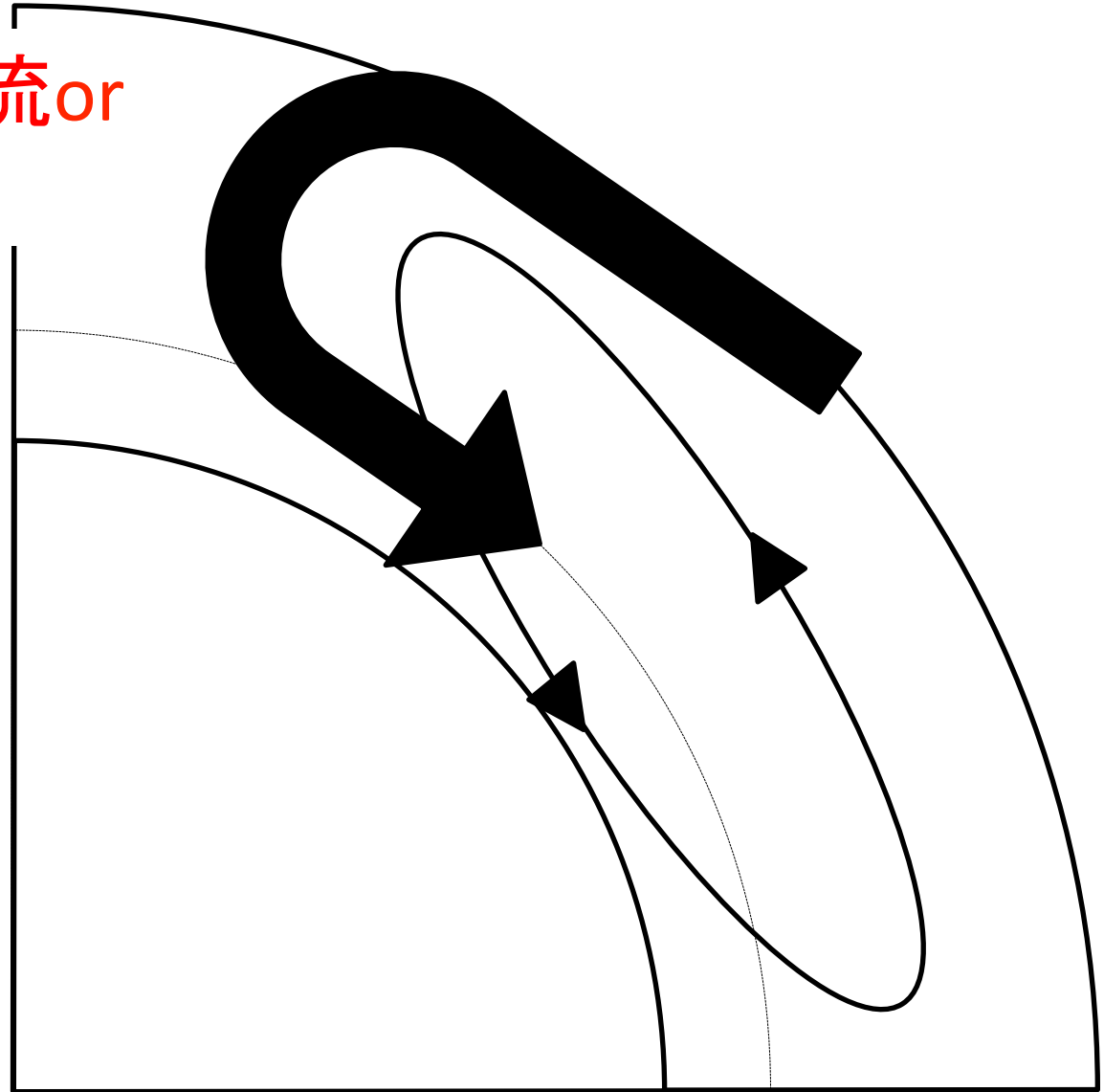


磁束輸送ダイナモ(Flux-transport dynamo)

子午面還流or
乱流拡散

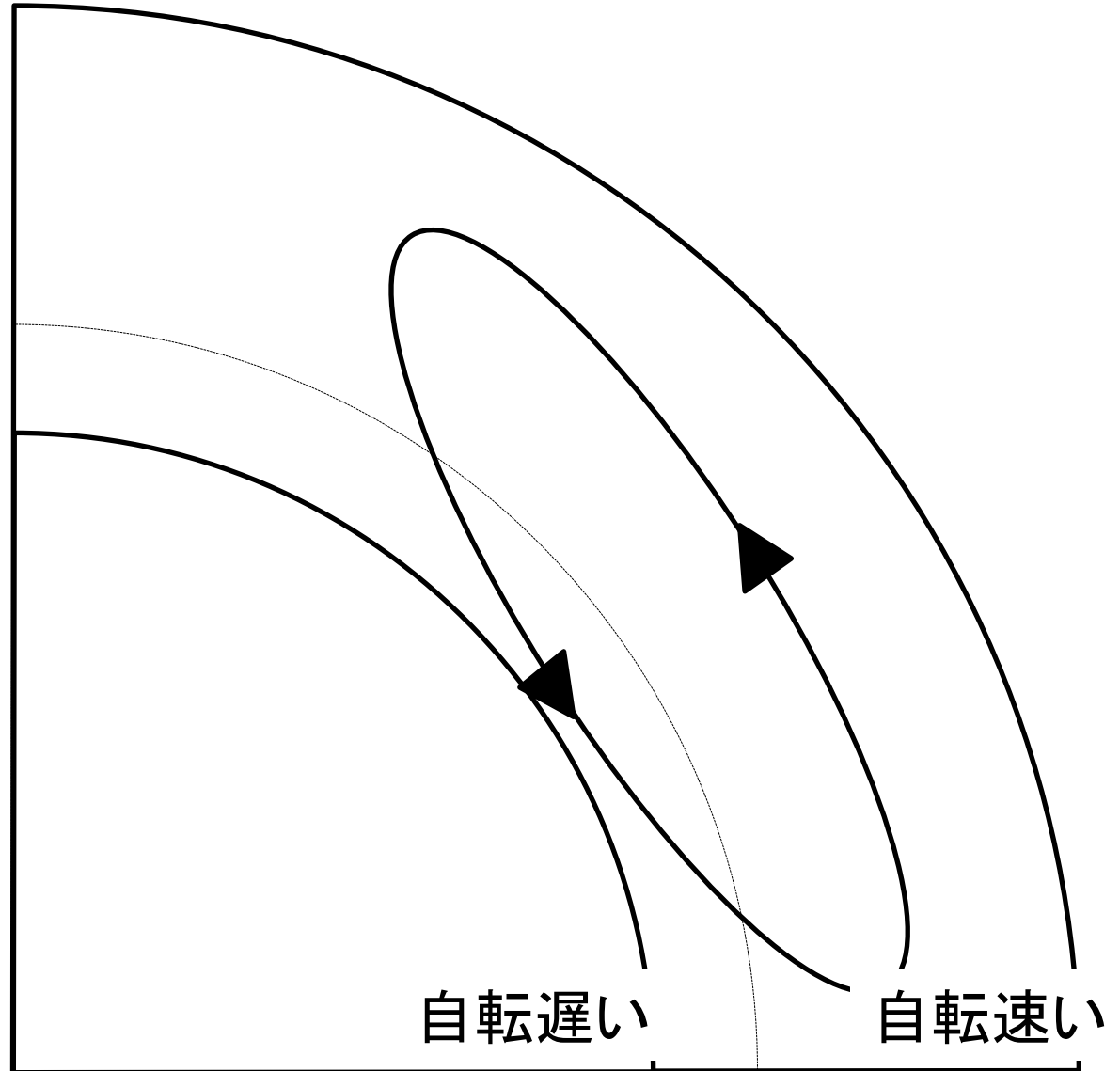
4. 子午面還流or
乱流拡散で、
磁束を、対流層の
底に移流する

対流層の底での
赤道への移流が
蝶形図に対応



磁束輸送ダイナモ(Flux-transport dynamo)

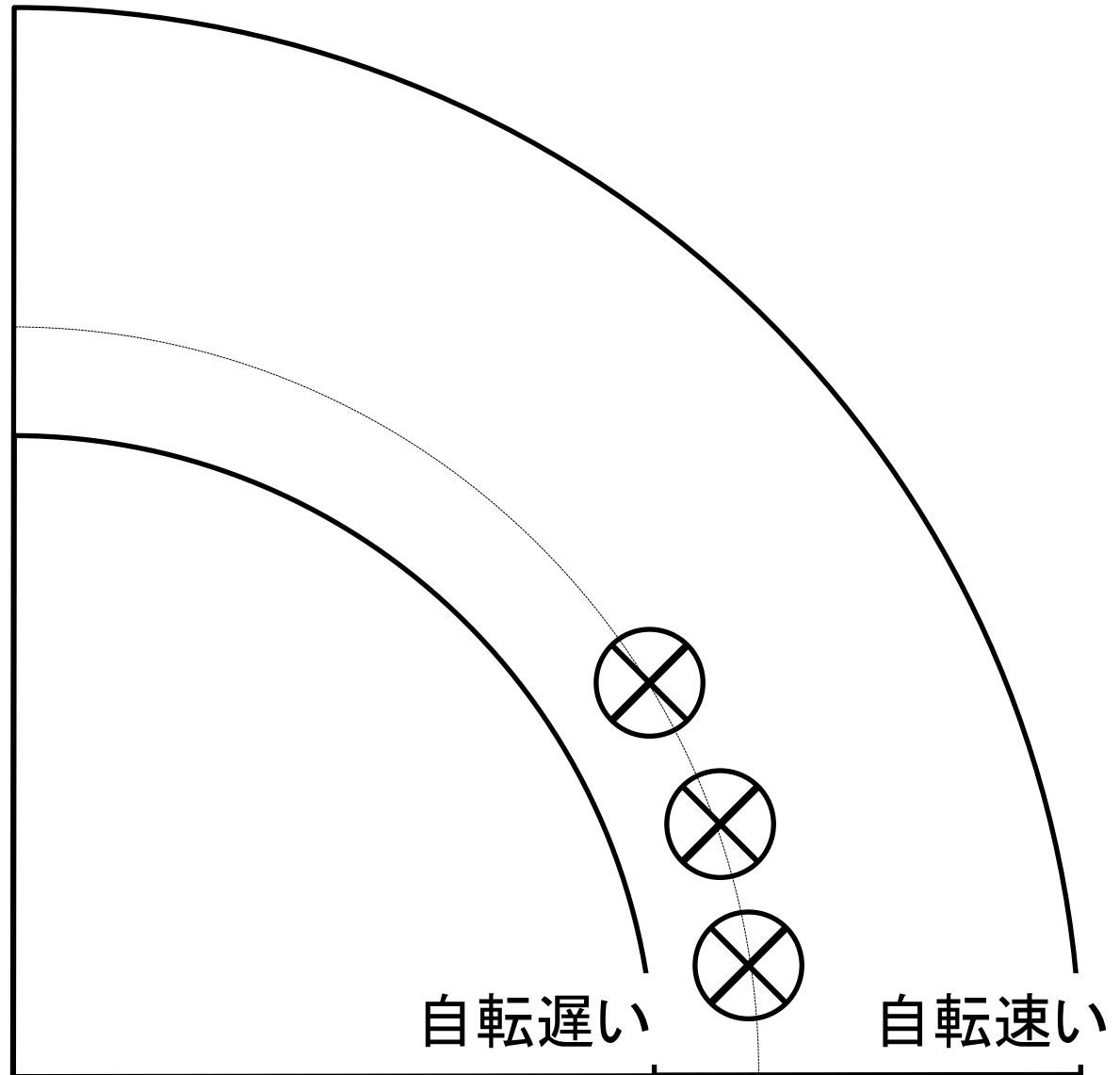
5. 対流層の底の
速度勾配により
再度、トロイダル磁場
が作られる



磁束輸送ダイナモ(Flux-transport dynamo)

5. 対流層の底の
速度勾配により
再度、トロイダル磁場
が作られる
これが11年周期

はじめと反対の向きの
トロイダル磁場ができ
ているので、22年
周期になる。



運動学的ダイナモ

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B} - \eta_t \nabla \times \mathbf{B} + \alpha B_\phi \mathbf{e}_\phi)$$

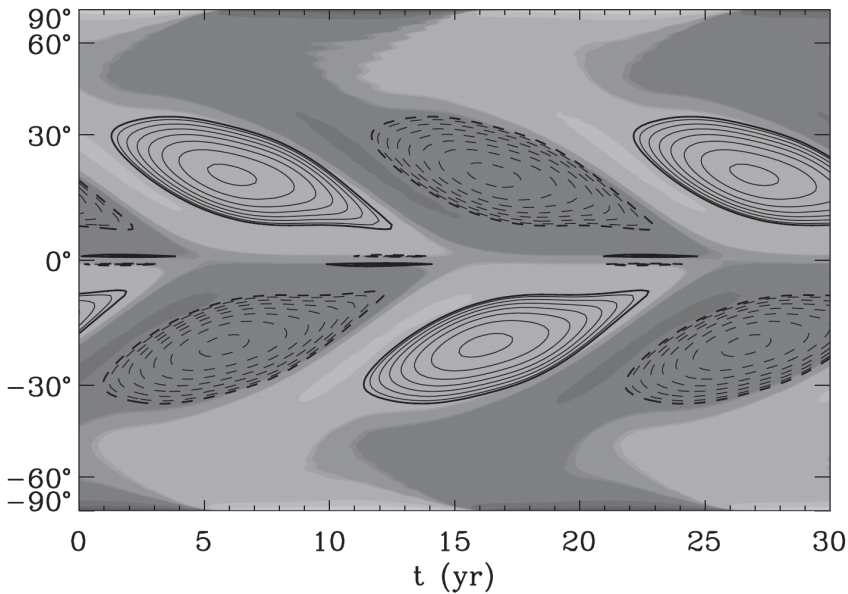
差動回転

子午面環流

乱流拡散

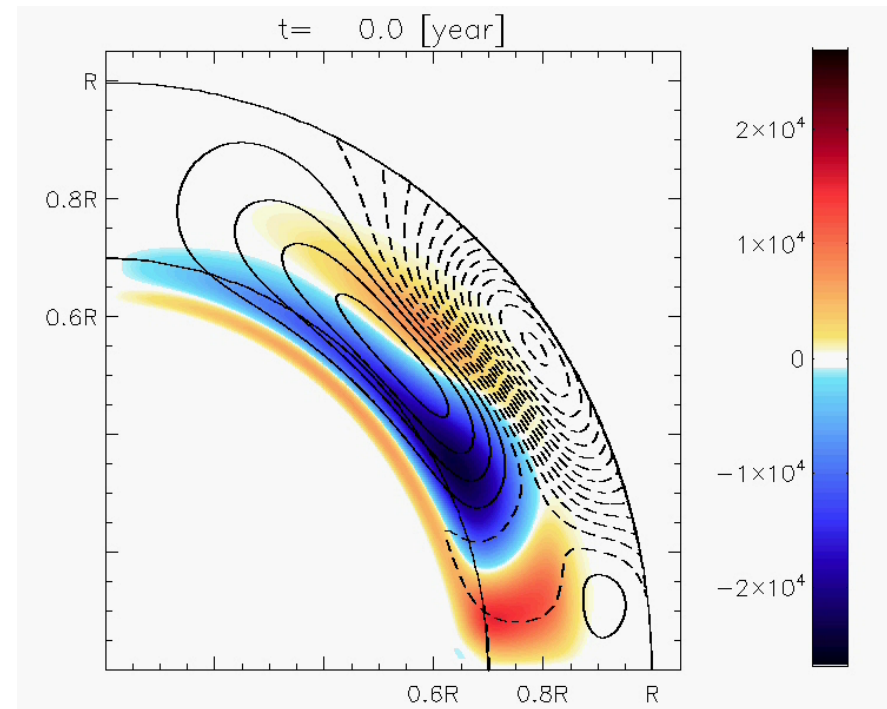
α 効果

運動学的ダイナモによる
太陽活動周期の再現



(Dikpati+ 2004)

線: ポロイダル磁場の磁力線
色: トロイダル磁場の強さ



(Hotta & Yokoayama, 2010a)

運動学的ダイナモのトピック

・次期太陽活動周期の予想

太陽内部の乱流拡散分布によって、予想は大きく変わる。

Dikpai+2006 Cycle 24は強い Choudhuri+2007 Cycle 24は弱い

・太陽内部の乱流拡散の分布

- ・磁場の対称性(双極子)を維持するためには、強い乱流拡散が表面近くになければいけない

(Chatterjee+2004, Hotta & Yokoyama 2010b)

- ・tachocline付近でポロイダル磁場を作ることができれば、乱流拡散がなくても、対称性は維持できる。(Dikpati+2001)

・Cycle 23はどうして長かったか？

- ・子午面環流の経路が伸びた。(Dikpati+2010)
- ・子午面環流は速かった。(Hathaway+2010)

太陽ダイナモ問題における 問題意識(モチベーション)

運動学的ダイナモによって、太陽活動周期は再現可能になった。
これで理論的に太陽ダイナモ問題は解決でいいのか？

→No

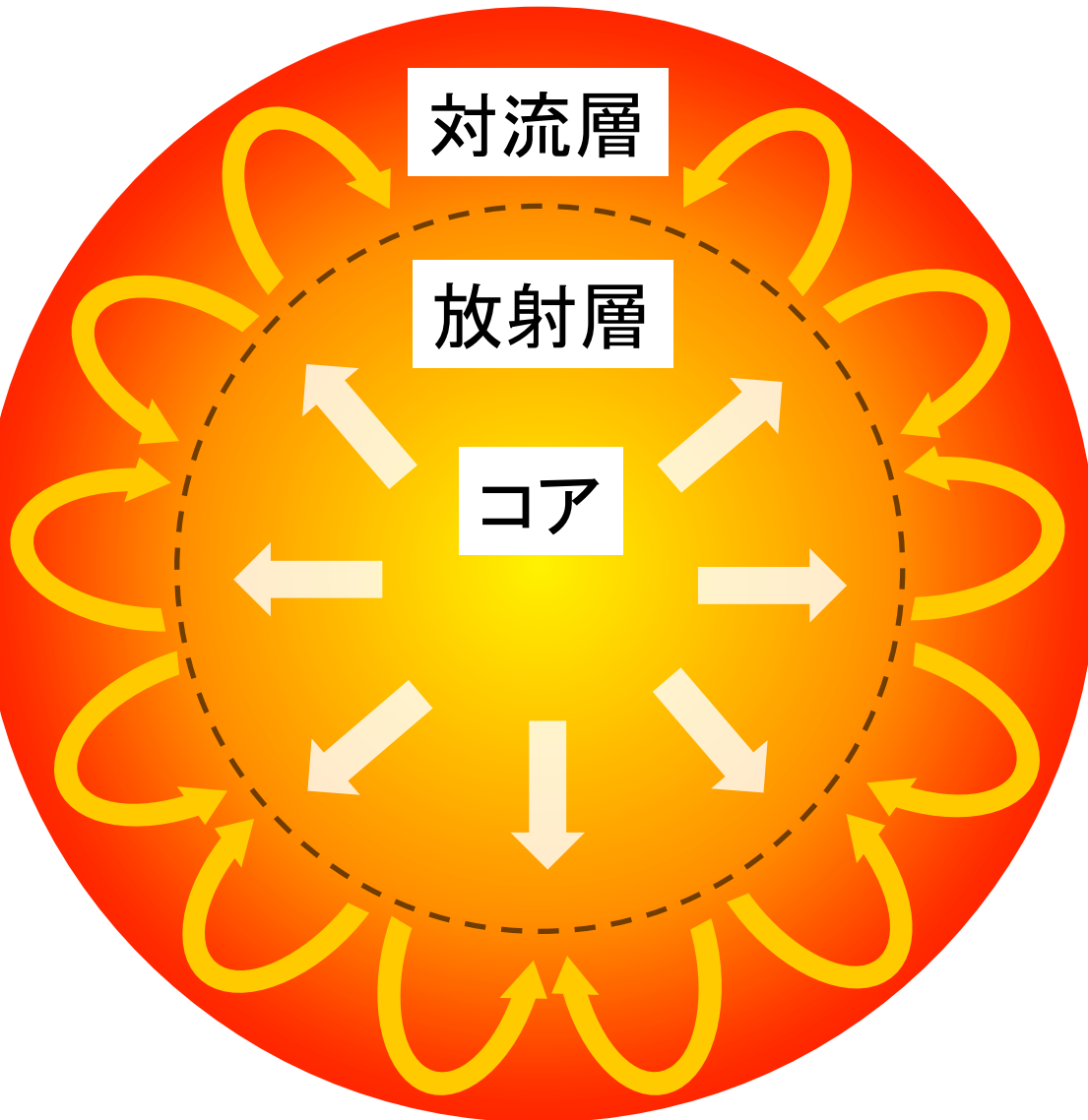
太陽ダイナモ問題の**理論的な**解決とは、以下の物理プロセスを理解することである。

1. なんらかの角運動量輸送・熱力学的作用によって、差動回転・子午面環流が実現される。
2. 実現された速度場と磁場との相互作用によって、太陽活動周期が実現される

大雑把に言うと、MHD方程式の解としての11年周期を理解する

太陽内部の速度場の物理を理解することは、太陽ダイナモ問題を理解する上で重要

太陽内部構造



太陽は、中心付近のコアで核融合により、熱を発生させている。(約 $4 \times 10^{26} \text{W}$)

そこから、約 $0.65R_{\text{sun}}$ までは**放射**により外向きにエネルギーを伝えている。

そこから先は、不透明度が大きくなり、放射によるエネルギー輸送効率が悪くなる。表面までは**対流**によってエネルギーを運ぶ

→対流が大変重要

対流による角運動量輸送

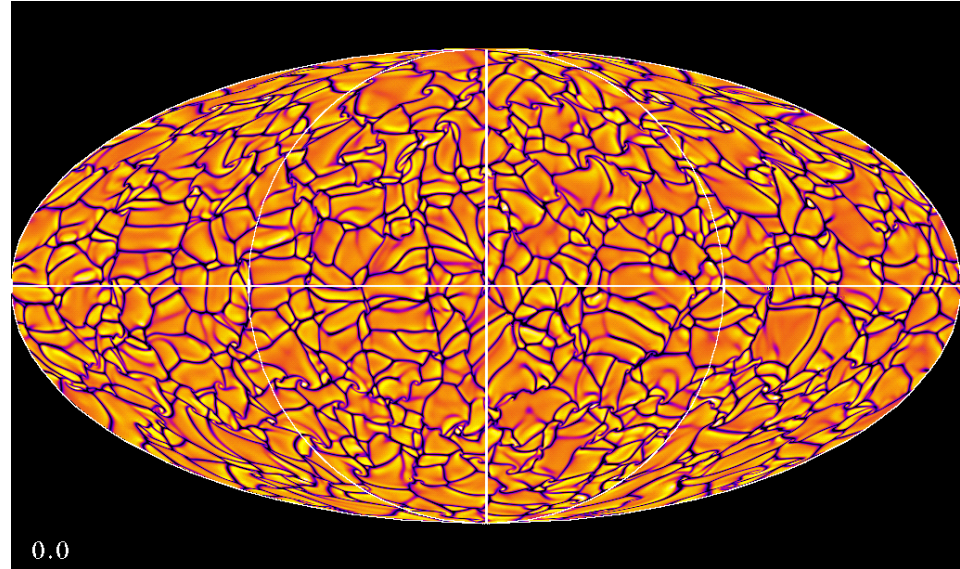
乱流による角運動量輸送

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{\mathbf{v}}) = -\nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{v}\mathbf{v}}) - \nabla \cdot (\rho \langle \mathbf{v}'\mathbf{v}' \rangle) + \mathbf{F}$$

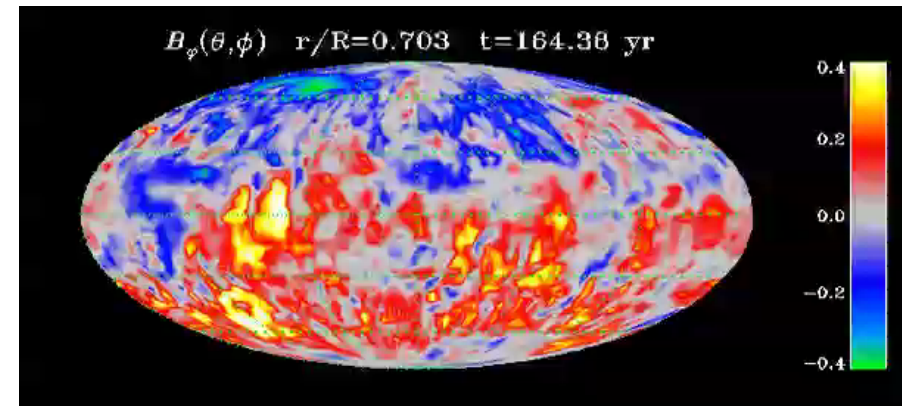
近年では、太陽内部の熱対流を数値的に解くことで、乱流による角運動量輸送・差動回転・子午面還流、ひいては11年周期を理解しようとしている。

乱流角運動量輸送で説明したい物理(簡単な順)

1. 差動回転(赤道速い、極遅い)
 2. 子午面還流
 3. タコクライン
- 「太陽の」11年周期



(Miesch氏提供)



(Ghizaru+2010)

Taylor-Proudmanの定理 と温度風平衡の式

渦度方程式(慣性項と粘性項は無視)

$$\frac{\partial \omega_\phi}{\partial t} = [\dots] + r \sin \theta \frac{\partial \Omega^2}{\partial z} - \frac{g}{\gamma r} \frac{\partial s_1}{\partial \theta}$$

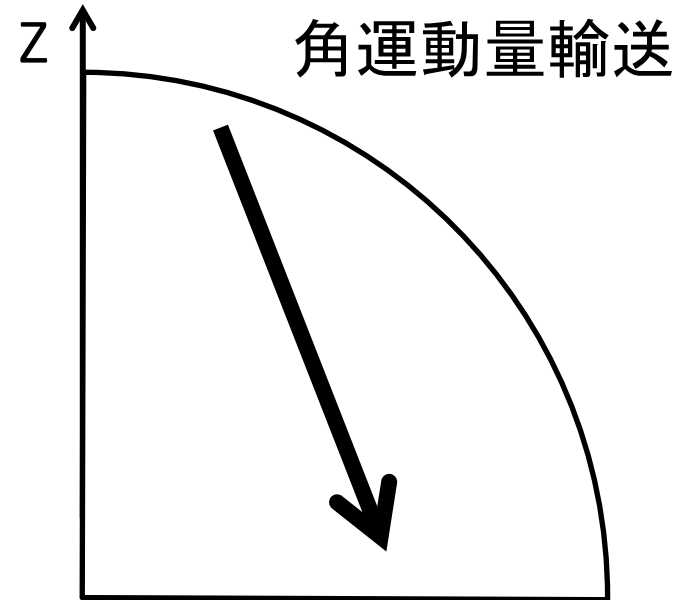
z: 回転軸方向 s: エントロピー

エントロピーが全球内で一定の時、
(最後の項がゼロの時)

定常状態では

$$\frac{\partial \Omega}{\partial z} = 0$$

となる。回転軸方向に、角速度が
変化しない(Taylor-Proudmanの定理)



太陽の角速度分布を考えると赤道に比べて、極が10Kほど高い。(200万Kの背景場の中で！！)

Taylor-Proudmanの定理 と温度風平衡の式

渦度方程式(慣性項と粘性項は無視)

$$\frac{\partial \omega_\phi}{\partial t} = [\dots] + r \sin \theta \frac{\partial \Omega^2}{\partial z} - \frac{g}{\gamma r} \frac{\partial s_1}{\partial \theta}$$

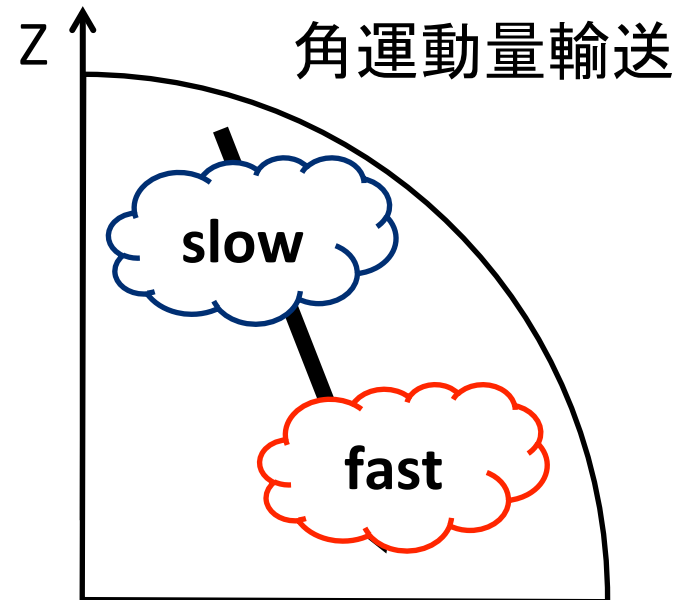
z: 回転軸方向 s: エントロピー

エントロピーが全球内で一定の時、
(最後の項がゼロの時)

定常状態では

$$\frac{\partial \Omega}{\partial z} = 0$$

となる。回転軸方向に、角速度が
変化しない(Taylor-Proudmanの定理)



太陽の角速度分布を考えると赤道に比べて、極が10Kほど高い。(200万Kの背景場の中で！！)

Taylor-Proudmanの定理 と温度風平衡の式

渦度方程式(慣性項と粘性項は無視)

$$\frac{\partial \omega_\phi}{\partial t} = [\dots] + r \sin \theta \frac{\partial \Omega^2}{\partial z} - \frac{g}{\gamma r} \frac{\partial s_1}{\partial \theta}$$

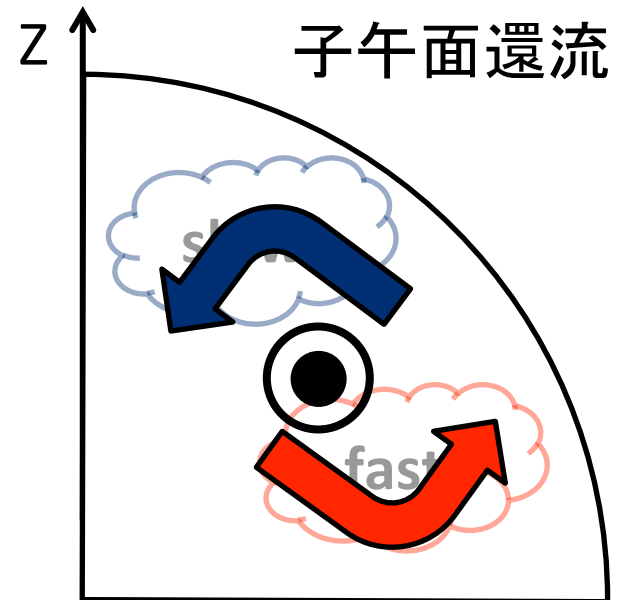
z: 回転軸方向 s: エントロピー

エントロピーが全球内で一定の時、
(最後の項がゼロの時)

定常状態では

$$\frac{\partial \Omega}{\partial z} = 0$$

となる。回転軸方向に、角速度が
変化しない(Taylor-Proudmanの定理)



太陽の角速度分布を考えると赤道に比べて、極が10Kほど高い。(200万Kの背景場の中で！！)

対流による角運動量輸送

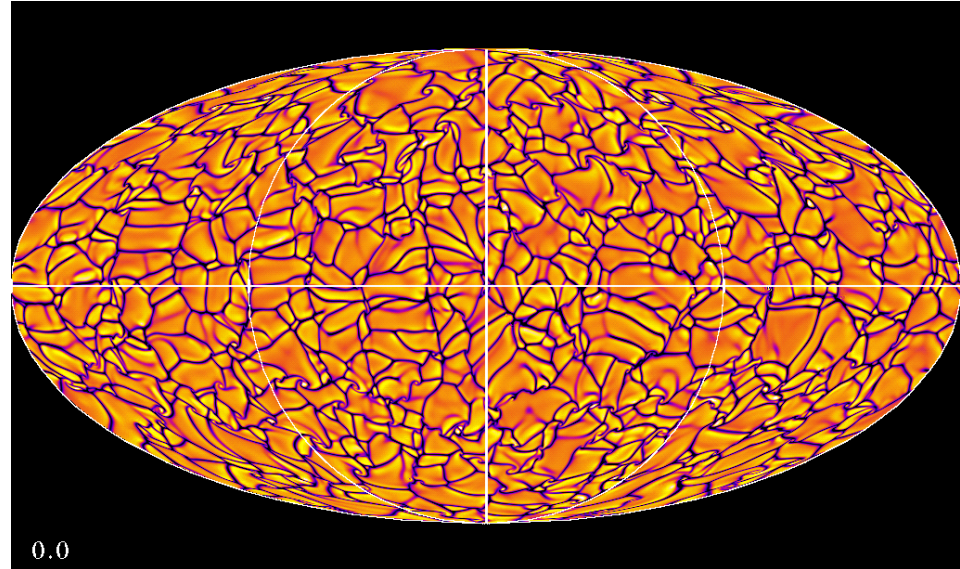
乱流による角運動量輸送

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \bar{\mathbf{v}}) = -\nabla \cdot (\rho \bar{\mathbf{v}\mathbf{v}}) - \nabla \cdot (\rho \langle \mathbf{v}'\mathbf{v}' \rangle) + \mathbf{F}$$

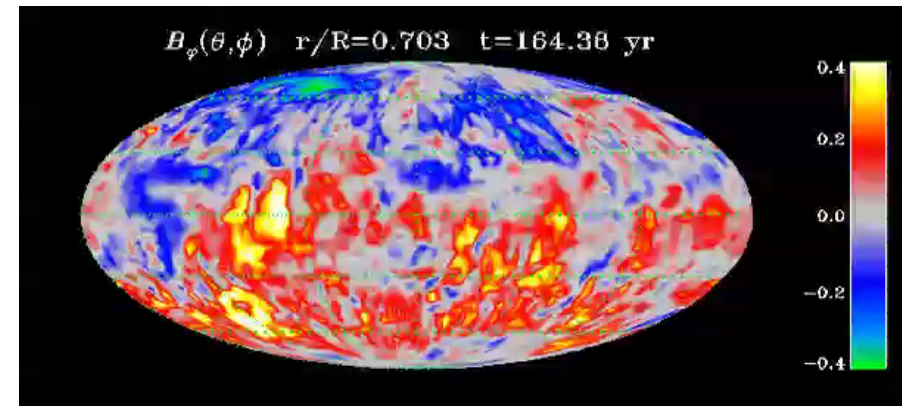
近年では、太陽内部の熱対流を数値的に解くことで、乱流による角運動量輸送・差動回転・子午面還流、ひいては11年周期を理解しようとしている。

乱流角運動量輸送で説明したい物理(簡単な順)

1. 差動回転(赤道速い、極遅い)
 2. 子午面還流
 3. タコクライン
- 「太陽の」11年周期



(Miesch氏提供)



(Ghizaru+2010)

10⁴Gから10⁵G磁場生成

(差動回転のエネルギー) ~ (磁場の平均エネルギー)

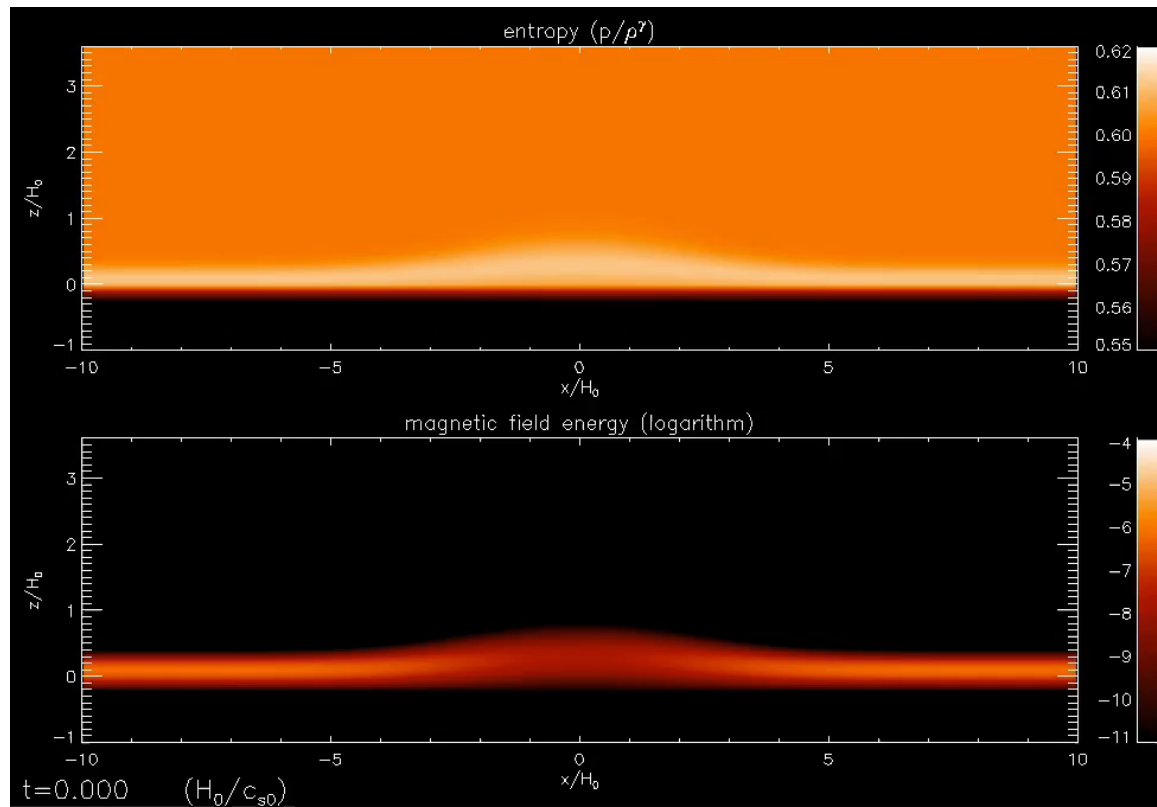
$$\frac{1}{2} \rho (\Delta v)^2$$

$$\frac{B^2}{8\pi}$$

差動回転で磁場をつくる
とせいぜい10⁴G

(Parker+1994, Moreno-Insertis+1995,
Rempel+2001, Hotta+2012, in prep)

磁束管内部と外部の
エントロピーの差により
磁束管の中の物質を
外に出す
「エクスプロージョン」
という過程で、10⁵Gの
磁場が作れる。
この過程では成層で
磁場の強さがきまる。



黒点形成における グローバルダイナモの役割

対流層の底: 10^5G

→

光球の10Mm下: 10^4G

→

光球直下: 10^2G

→

黒点: 10^3G

なので、黒点の磁場の
強さを作るのは
光球の内部エネルギー
であり、グローバルダイナモの
役割はここでもフラックスを
つくること

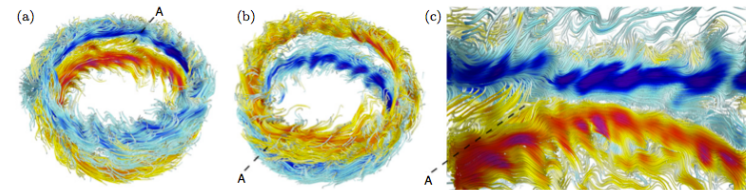
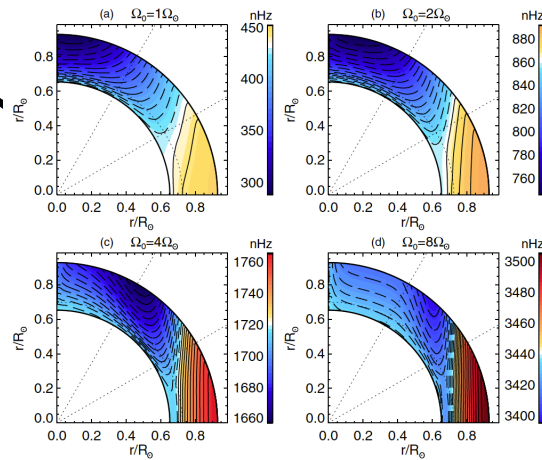
Radiative MHDによる黒点形成
Rempel氏提供

まとめと展望

- ✓ 太陽ダイナモ研究は運動学的ダイナモからMHDダイナモへ
- ✓ 太陽内部大規模ながれ場と統一的に11年周期を理解するには対流による角運動量輸送理解することが大切

- ✓ より高解像度の計算で、角運動量輸送を理解
 - ✓ 実は今の手法(アネラスティック近似ではスケールしない)
 - ✓ 音速抑制法(Hotta+2012,submitted)
- ✓ 対流層の底から表面での黒点形成までを統一的に理解

- ✓ 恒星ダイナモへ



Brown+2010

Hotta+2011