

# Solar-Cで探るダイナモ

横山 央明  
(東京大 地球惑星)

## What is our standpoint now ?

We have learned (been learning) much about the **plasma dynamic phenomena strongly coupled with the magnetic evolutions on the surface** of the Sun by Yohkoh, Hinode, other spacecrafts', and ground-based observations.

The **origin and the maintenance of the magnetic fields** might be one of the most interesting issues which we should address **next**.

What is the background for the appearance of the dynamo as an important subject of Solar-C/a ?

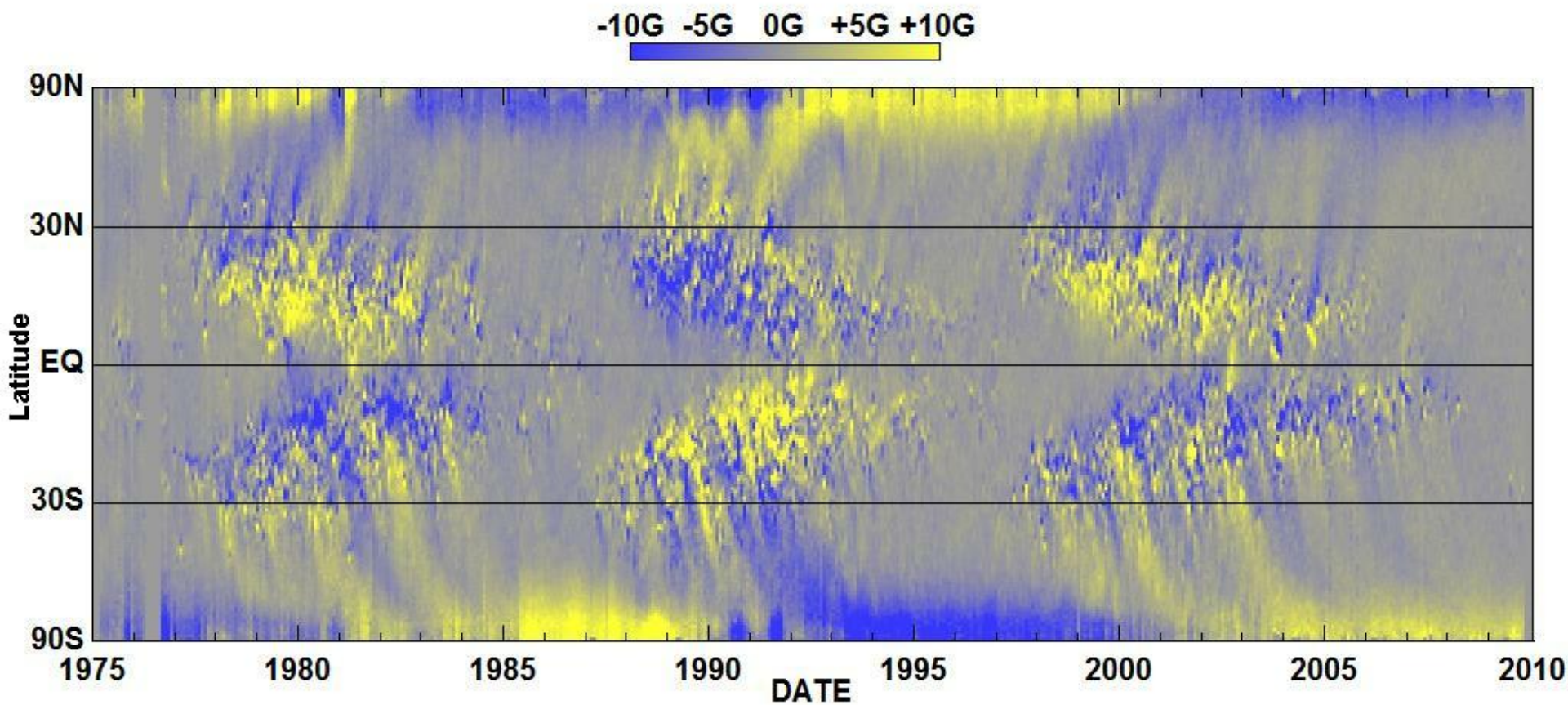
**Theoretical frameworks of the dynamo** have been established based on the helioseismic observations in this a few decades. The roles of **the tachocline and the meridional flow** is becoming more and more important. (e.g. Charbonneau 2005)

**The simulation studies** have made clearer (though still much has to be done) the mechanisms for sustaining **the differential rotation and meridional flows**. (e.g. Rempel 2005, Miesch et al. 2005)

**The local helioseismological technique** gave more new information on the local structures of the interior.

# 大域的磁場の観測

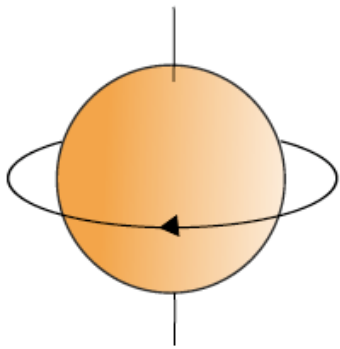
黒点磁場と極域磁場



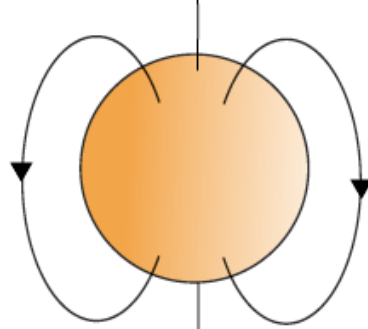
Hathaway/NASA/MSFC 2009/12

# ダイナモの素過程: $\Omega$ 効果と $\alpha$ 効果

トロイダル磁場



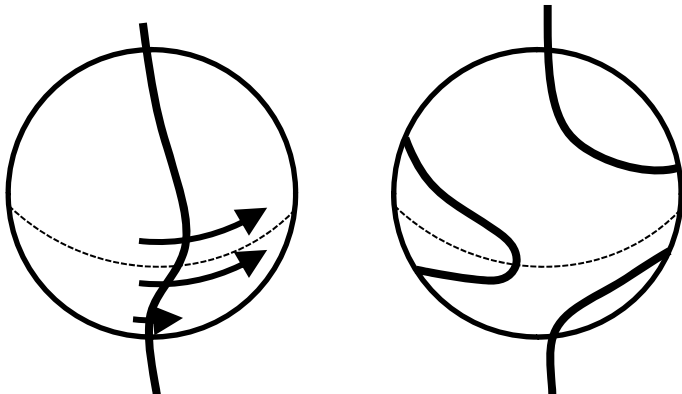
ポロイダル磁場



トロイダル磁場の生成:

「 $\Omega$ 効果」

差動回転



ポロイダル磁場の生成:

「 $\alpha$ 効果」

乱流や大局的対流+コリオリ力効果

✓ 局所的乱流による $\alpha$ 効果

✓ 大域的磁束浮上によるBabcock-Leighton型 $\alpha$ 効果



# ダイナモ理解の現在の到達点 1/2

## 対流層の底(速度勾配層・対流侵入層)

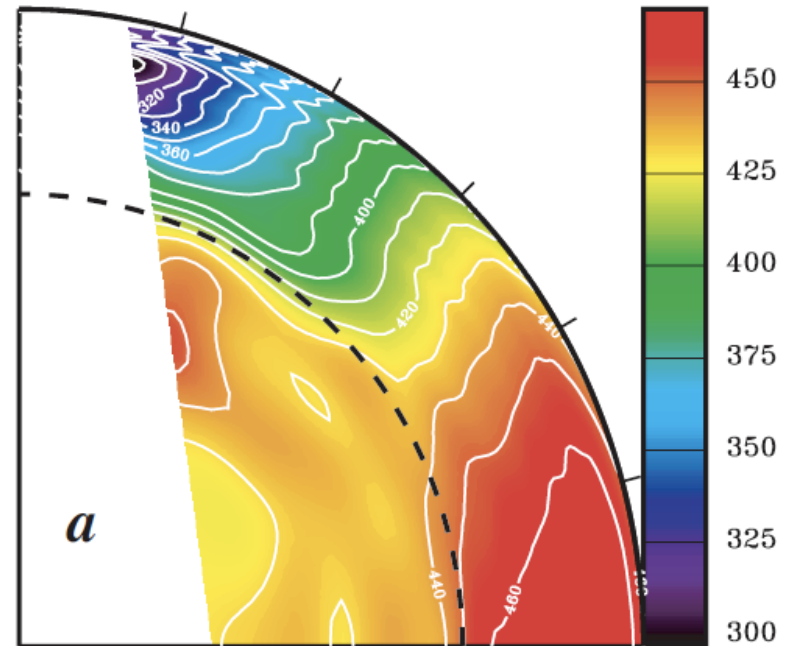
- ✓ 「速度勾配層 tachocline」という観測事実
- ✓ 対流安定層(対流侵入層overshoot層)での磁束の保持

という理由で

対流層の底でトロイダル磁場を保持・増幅

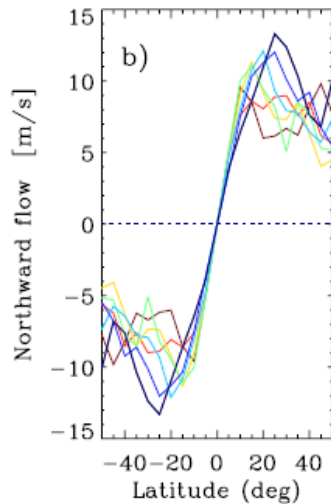
速度勾配層＋対流侵入層での $\Omega$ 効果は共通  
だが、 $\alpha$ 効果の採り方でさらに分かれて

- ✓ インターフェイスダイナモ(Parker 1993)
- ✓ 磁束輸送ダイナモ(e.g. Dikpati & Charbonneau 1999)

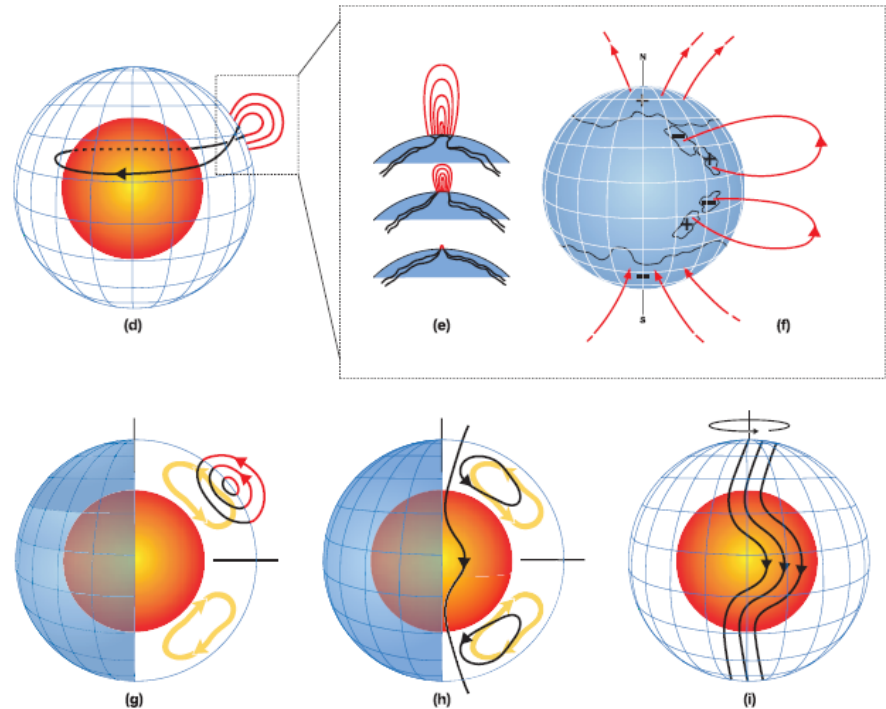
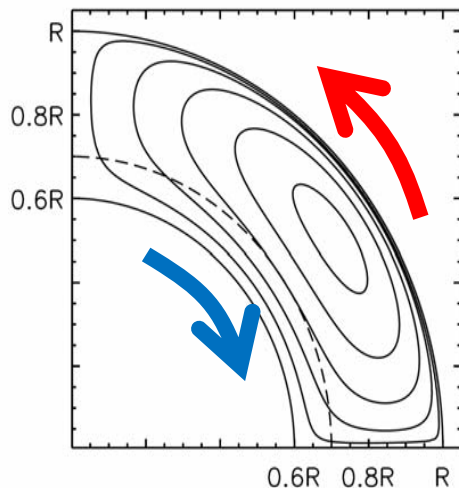


# ダイナモ理解の現在の到達点 2/2

## 子午面循環流と磁束輸送ダイナモ



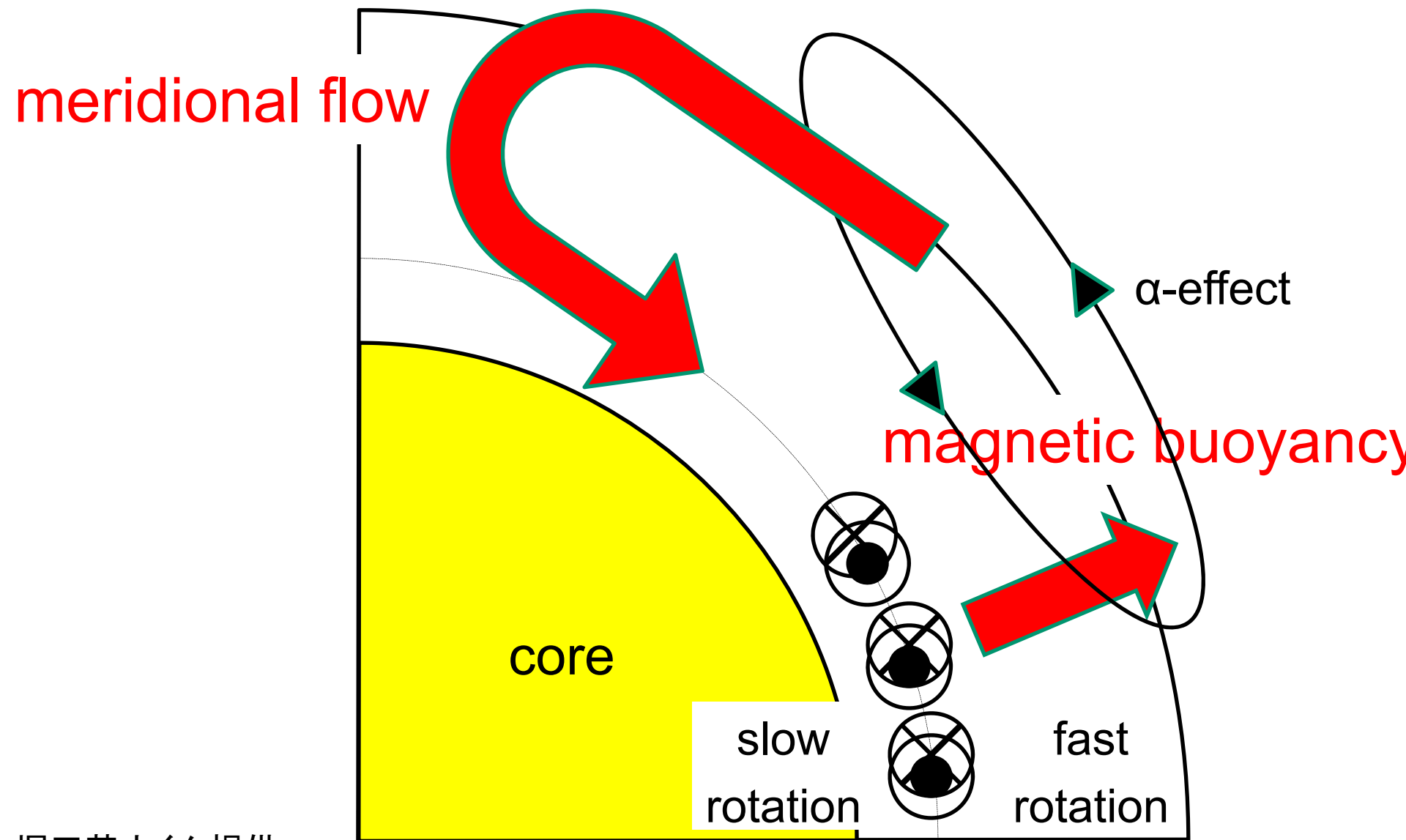
Gizon & Rempel (2008 MDI)



表面付近のBabcock-Leighton効果でポロイダル磁束を生成、速度勾配層へ輸送して $\Omega$ 効果で増幅する。子午面循環流が底では赤道方向なので、蝶形図を自然に説明する。

Wang, Y. et al. 1991、Dikpati & Charboneau 1999ほか

flux-transport dynamo  
(Dikpati & Charbonneau 1999)





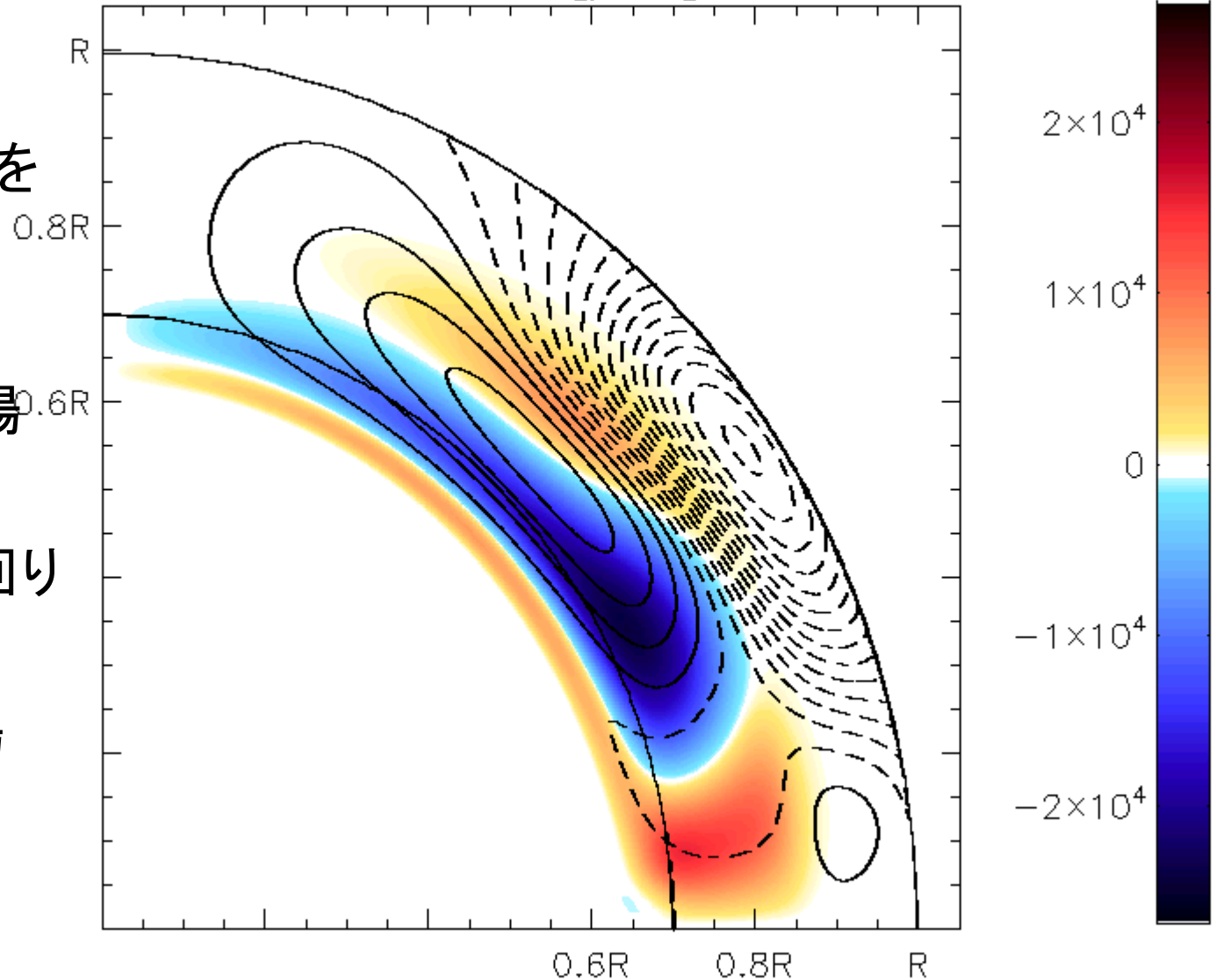
# Hotta & Yokoyama (2010, ApJ)

$t = 0.0$  [year]

太陽の子午面を  
見た図

ポロイダル磁場  
実線: 時計回り  
破線: 反時計回り

トロイダル磁場  
赤: あちら側  
青: こちら側

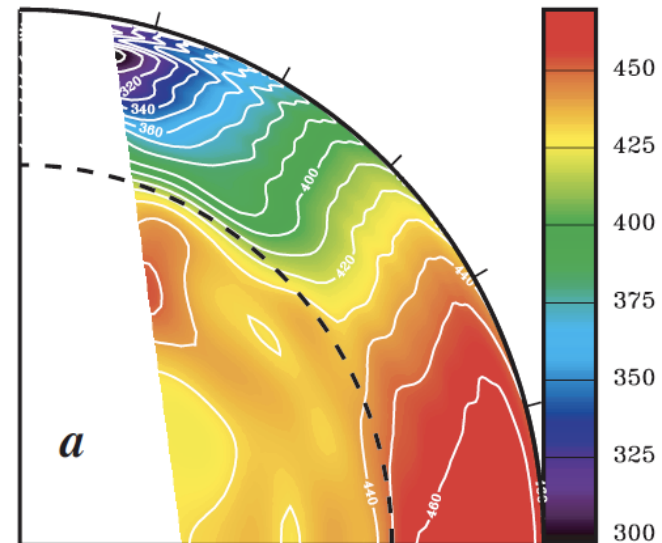
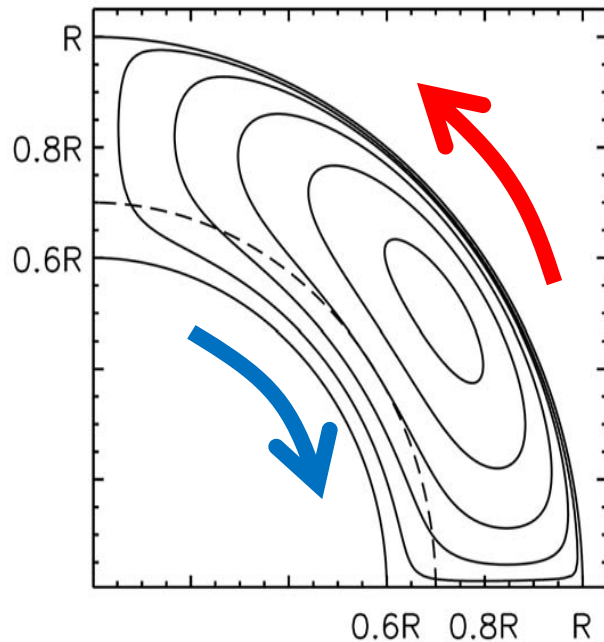


# ダイナモ理論から観測に期待すること

磁束輸送：子午面循環流

トロイダル磁場：速度勾配層・対流侵入層

ポロイダル磁場：極域磁場反転・乱流効果



## Note

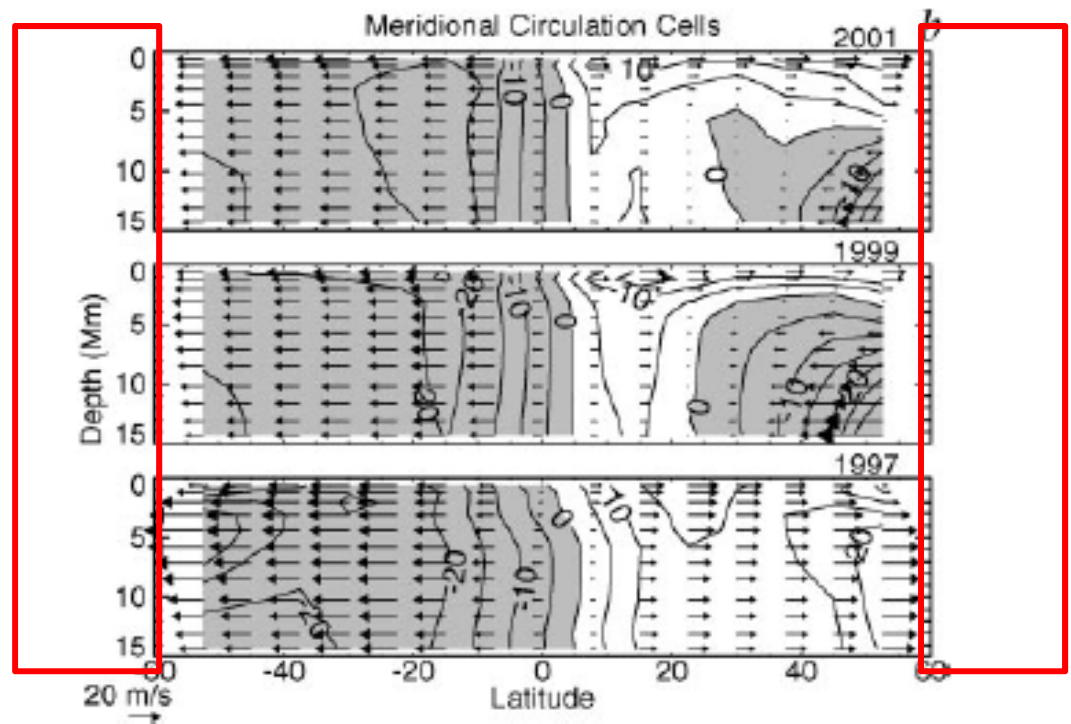
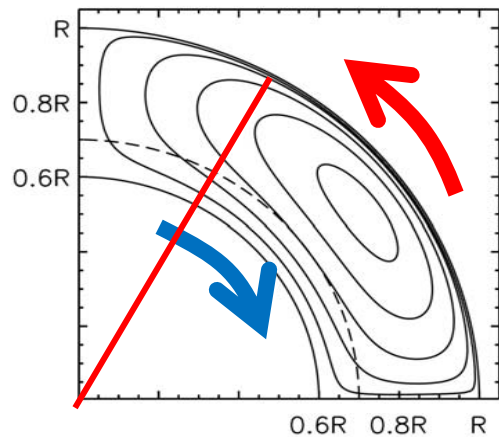
Solar dynamo theory is still "fragile" (by A. Title?).  
(following is my personal interpretation ...)

There does not exist a theoretical perfect model which describes all of the observational aspects. So we should not expect that "some key observations" may solve the dynamo issues.

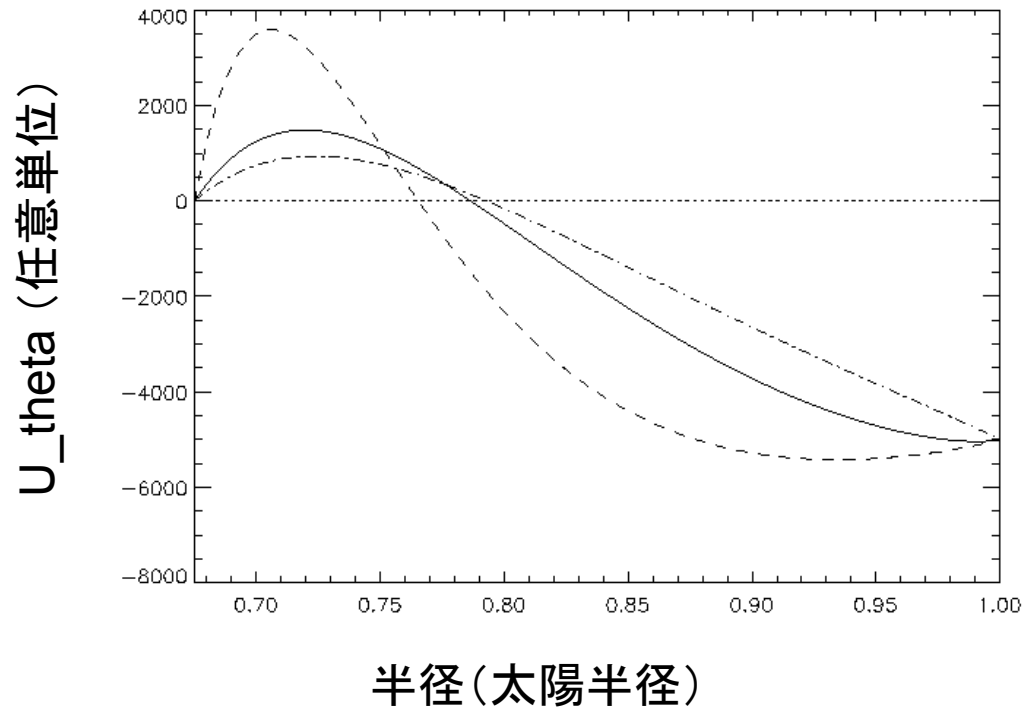
However, any information on polar observations by plan-A may greatly advance the dynamo science.

## 磁束輸送：子午面循環流

- What is the flow pattern/speed near the poles ? Especially the latitude of the flow sink is of much interest.
- Flows in the interior. What is the depth of the return flow ? Is it a single-cell flow ?
- Solar cycle variability. (e.g. Gizon & Rempel 2008)



# 子午面循環流のモデル



# トロイダル磁場：速度勾配層・対流侵入層

## Flux tube in the overshoot layer

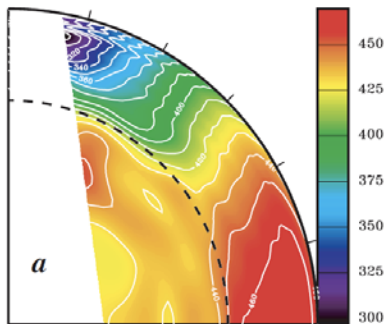
- Does it anyway exist ? ( $10^{-5}$  anomaly)
- Where in latitude ? Do they show variability ?
- What is the structure, tubes, sheets or else ?

## Rotating flow in a toroidal tube (e.g. Rempel et al. 2000)

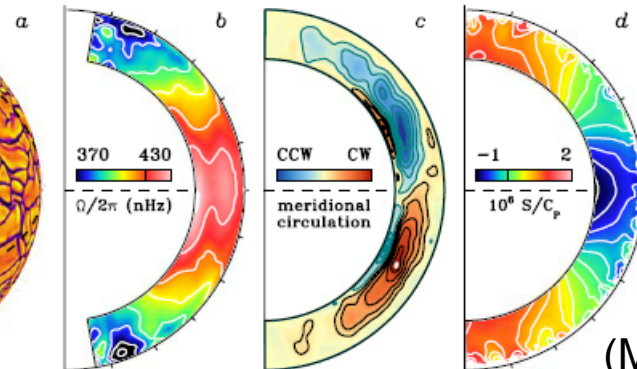
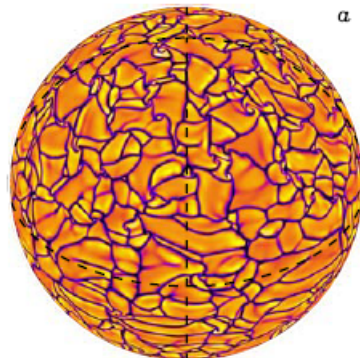
- 200m/s flow is expected to keep the dynamical equilibrium
- in the emerging phase on the way up to the surface

## Differential rotation

- Omega distribution in the poles
- $\Delta T$  as a function of latitude: Source of the non-Taylor-Proudman rotation (e.g. Brun et al. 2009)



(Schou et al. 1998)



(Miesch 2007)

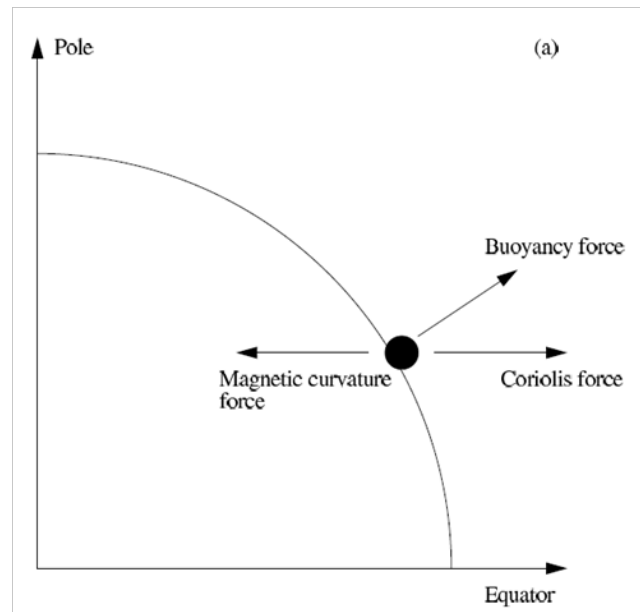
# 対流層底の磁束中の流れ

「100k Gaussが、overshoot層で力学平衡で存在」が理論的に示唆

力学平衡条件のため (poleward slipを避けるため) には、回転速度が必要

トロイダル磁場の張力につりあうCoriolis力を作り出すには、周囲のガスより余分に回転速度が必要

$$C_A^2/v_{\text{rot}}=200\text{m/s} (10^5\text{G/B})^2 ! \text{ (e.g. Rempel 2000)}$$



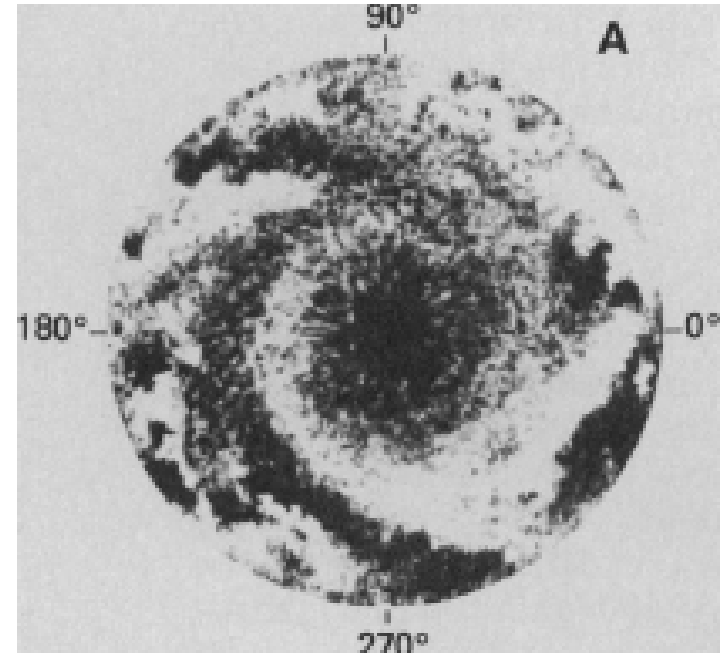
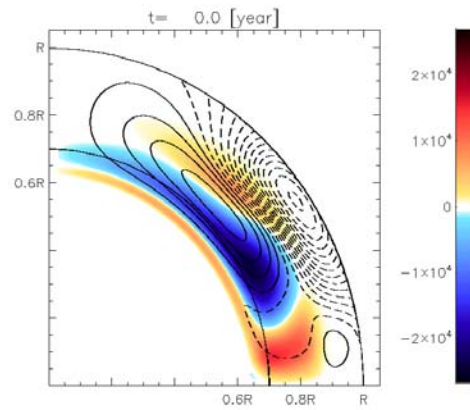
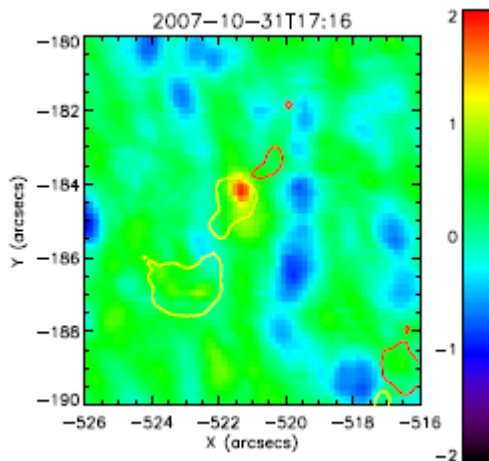
# ポロイダル磁場：極域磁性反転・乱流効果

## Polar surface magnetism

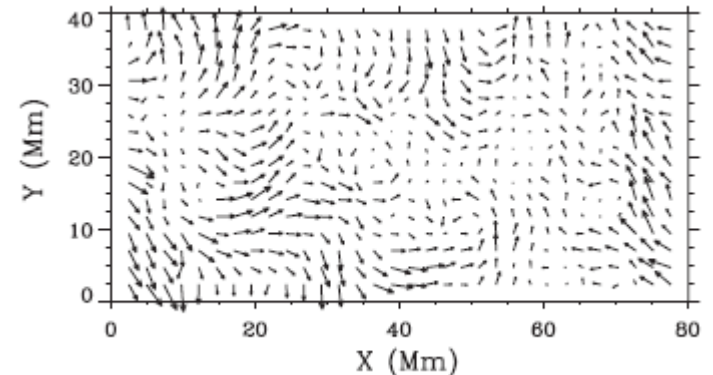
- Cycle polar-field reversal
- magnetic flux budget
- magnetic submergence ?

## Turbulent diffusion

- On the surface
- In the convection zone



Wang, Y. M. et al. (1989)



3-4Mm depth: Sekii et al. (2007)

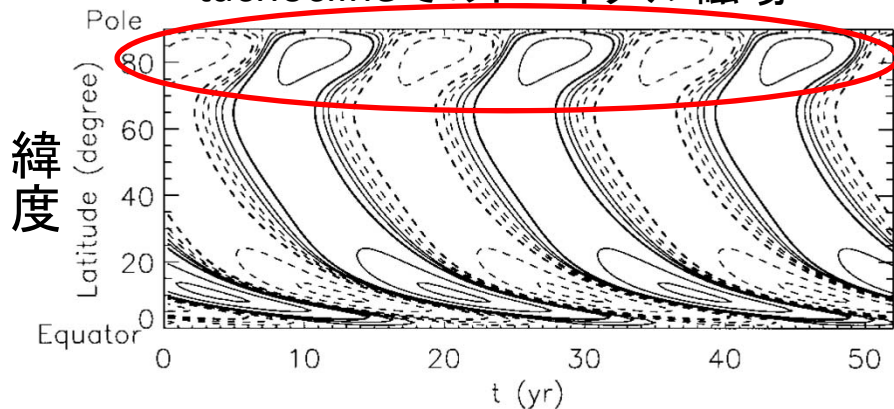


# Hotta & Yokoyama (2010, ApJ)

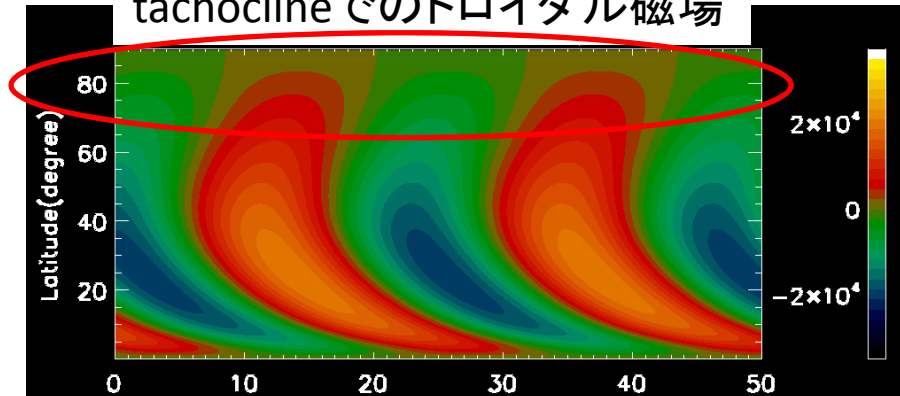
高緯度でのトロイダル磁場の増幅も見られない

本研究の結果

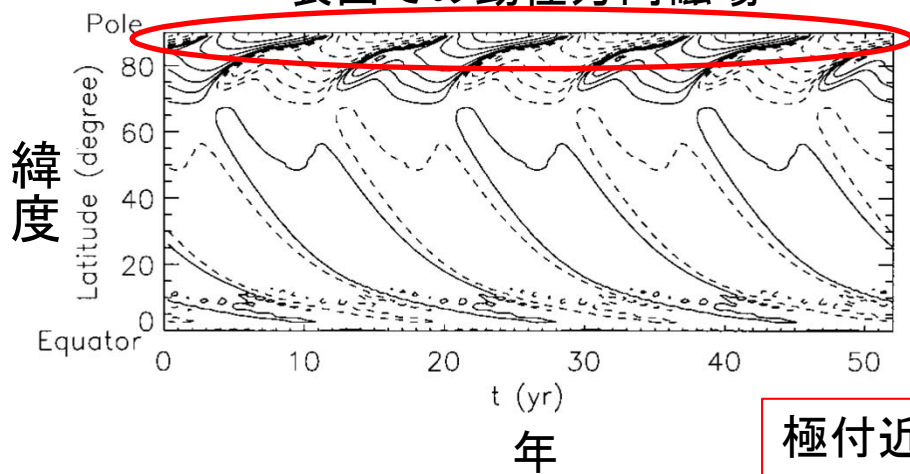
Dikpati & Charbonneau 1999  
tachoclineでのトロイダル磁場



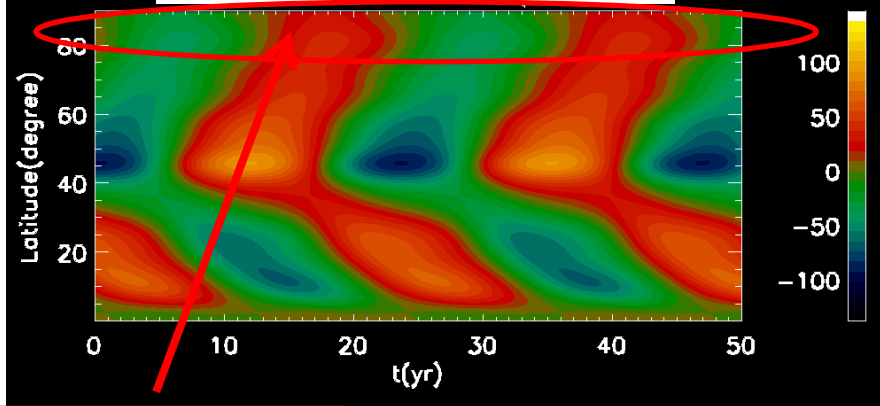
tachoclineでのトロイダル磁場



表面での動径方向磁場



表面での動径方向磁場

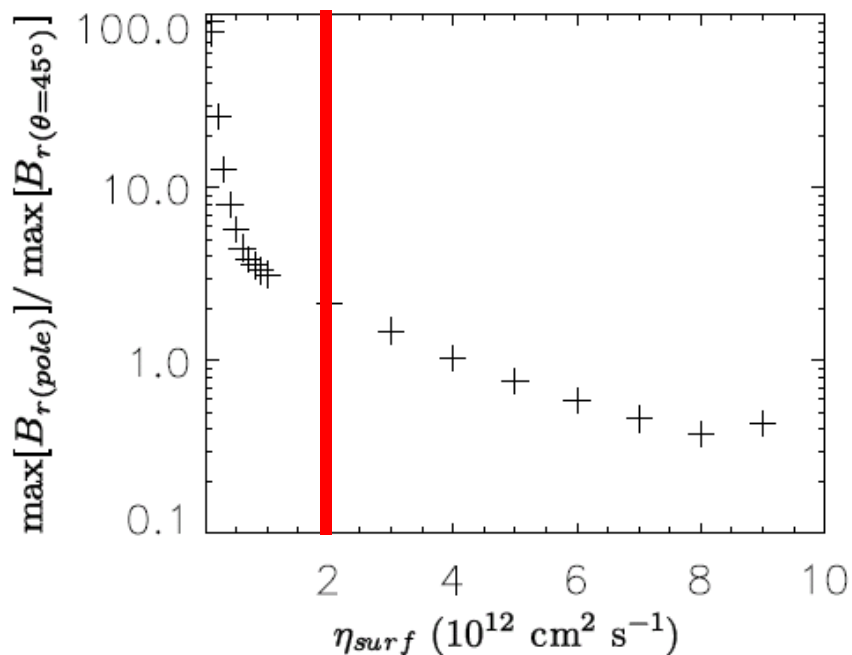


極付近の磁場は40Gほど

年

# 極の磁場が強くなる条件

(子午面環流によって極に集める時間) > (表面拡散によって拡散する時間)



$$\frac{L}{v} > \frac{L^2}{\eta}$$

L: 極付近の長さ

v: 極付近の子午面環流の速さの平均

$\eta$ : 表面拡散の強さ

本研究のモデルでは

$$\eta > 2 \times 10^{12} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$$

## まとめ

ダイナモについて理論モデルの基礎的な情報の取得が目標

- ✓ 極域での子午面循環流の沈み込みプロファイル
- ✓ 極域での磁性反転
- ✓ 対流層底での磁束管内部の流れ
- ✓ 底での赤道方向流の情報

これらの観測によって、理論モデルを取捨選択する決定的な観測は困難であるが、確実な前進ではある。

## 個人的見解 A案 vs. B案

A案だと、理論(ダイナモ)も観測(日震学)も人不足  
コミュニティの組み立てから必要  
正直見通しはまったくたたない。

しかしながら、「新しい地平を開く」という言葉は魅力的