

# Babcock-Leighton型太陽ダイナモモデル

新潟大学自然科学研究科  
宇宙物理学研究室

M1 三津谷 浩平

参考文献: H.W.Babcock, 1961, ApJ, 133,572

# イントロダクション

太陽活動:

約22年の周期性を持つ。

多くは磁場に依存。

太陽の磁場の拡散のタイムスケール

$\approx 10^{10} \text{ yr}$  (宇宙年齢のオーダー)

他の磁場メカニズムが必要！



ダイナモ機構

運動エネルギーを磁場のエネルギーへ  
変換する機構。

# 目的

- Babcock-Leighton型のダイナモモデルの紹介と、現在のダイナモ理論との関連を述べる。

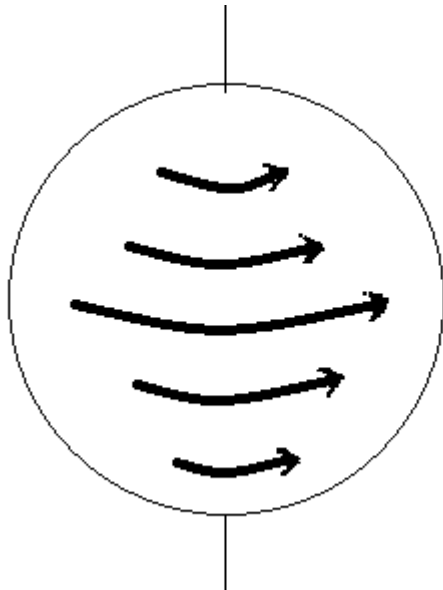
## アウトライン

- イントロダクション
- 太陽の性質
- 基礎方程式
- 太陽ダイナモ
- Babcock-Leighton型ダイナモモデル
- 現在の位置づけ

# 太陽の性質

(モデルと関係のあるものを中心に)

- 強力な磁場を持つ。
- 差動回転している。
- 表面に黒点と呼ばれる黒いシミがある。
- 活動に周期性を持つ。

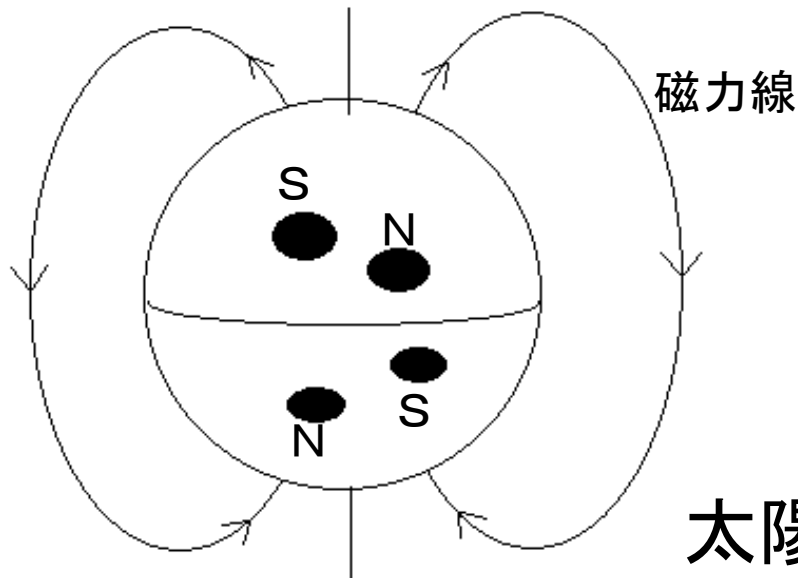


差動回転の図。  
赤道付近ほど早く回転している。

# 太陽磁場の性質

## 太陽磁場

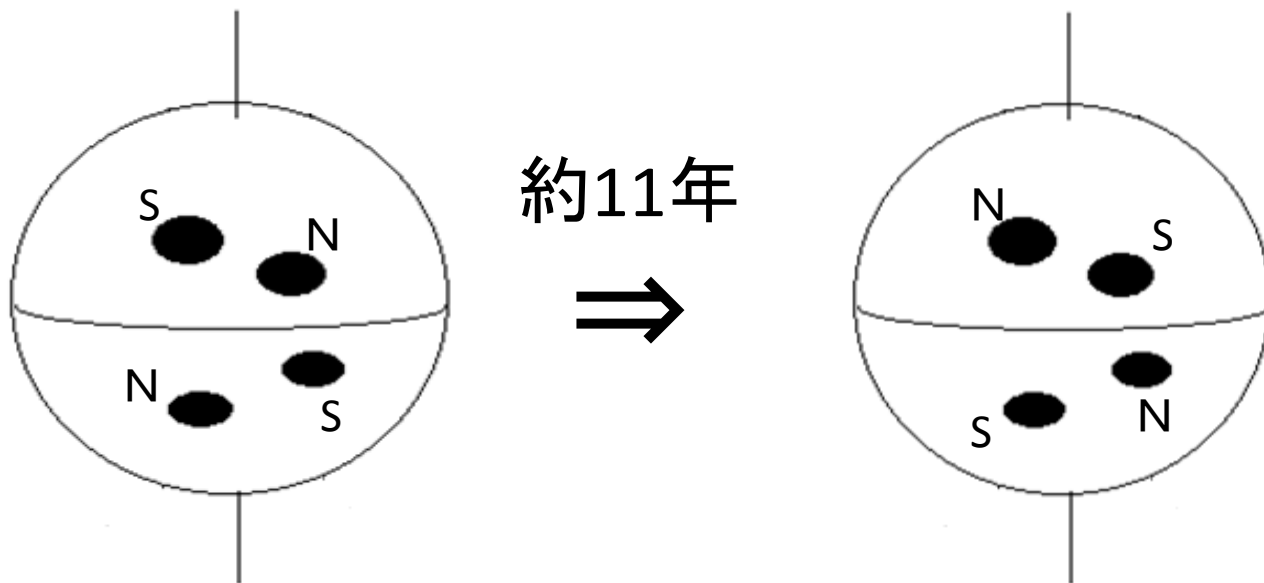
- ・グローバルな双極子磁場を持つ。(一般磁場)
- ・黒点のようなローカルなBipolar磁場が存在。
- ・一般磁場は約11年の周期で極性を反転。



太陽の磁場の図

# 太陽黒点について

- 強力な磁場を持つ。(～1k gauss)
- 東西にペアで出現。(赤道面に対し傾きを持つ)
- 東西で異なる極性を持つ。
- 同一周期の間、各半球で必ず同じ極性を持つ。
- 赤道に対して反対称性を持つペアも出現。
- 出現位置が中緯度から赤道方向へシフト。
- 11年周期で赤道に対し極性を反転。



# 基礎方程式

## 磁場を含む流体の運動方程式

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{g} + \vec{J} \times \vec{B} - \nabla p \quad \text{※単位はMKSA単位系}$$

## MHD(magneto hydrodynamics) 誘導方程式

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) + \frac{1}{\mu \sigma} \Delta \vec{B}$$

$\rho$  : 密度  
 $v$  : 速度  
 $p$  : 圧力  
 $\vec{B}$  : 磁束密度  
 $\vec{J}$  : 電流密度  
 $\mu$  : 透磁率  
 $\sigma$  : 電気伝導率  
 $g$  : 重力加速度

太陽はプラズマ

→電気伝導率が十分大きい。



磁気拡散のタイムスケールが  
無視できるほど大きい。  $\sigma \rightarrow \infty$

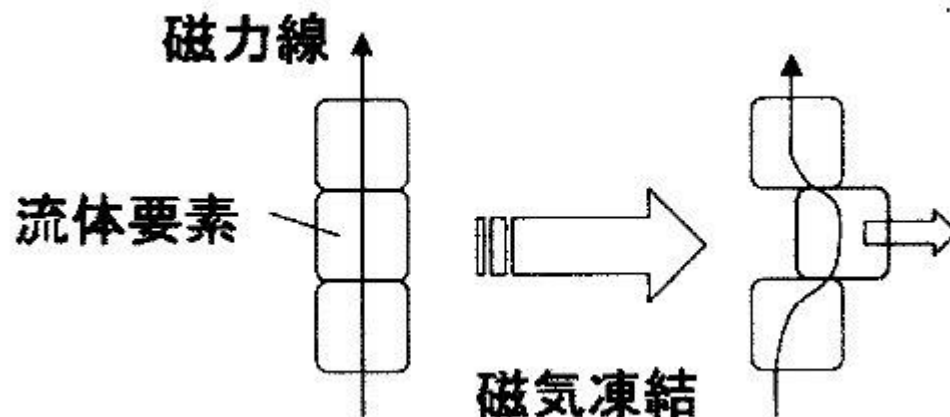
$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B})$$

$$\Rightarrow \frac{D\Phi}{Dt} = 0$$

磁気凍結

$\Phi$  磁束

$\frac{D}{Dt}$  ラグランジュ微分





# ダイナモ機構

## ダイナモ理論

→運動エネルギーを磁場のエネルギーに変換する理論。

### 運動学的ダイナモ

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) + \frac{1}{\mu\sigma} \Delta \vec{B}$$

磁場から速度場への  
揺り返しを考えない。

※磁場が速度場に影響を与えるほどまで強くない場合。

### 力学的ダイナモ

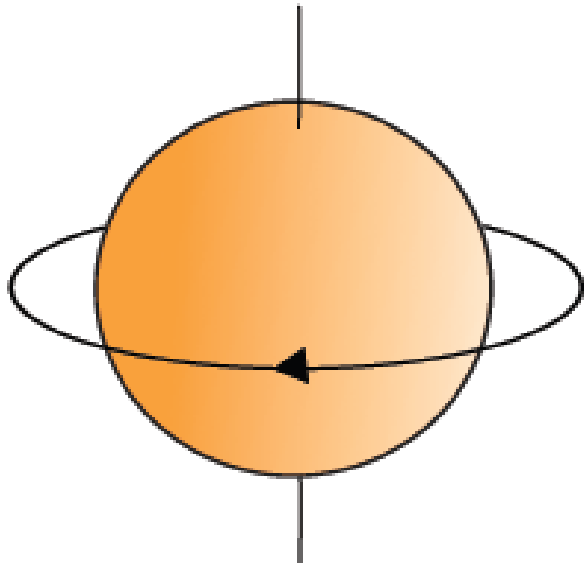
誘導方程式 &

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{g} + \vec{J} \times \vec{B} - \nabla p$$

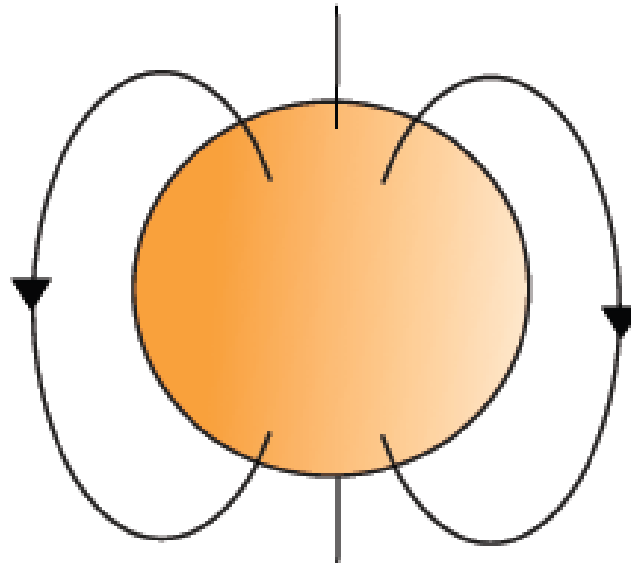
誘導方程式と同時に  
運動方程式を解いて  
磁場から速度場への  
揺り返しを考える。

# 太陽ダイナモ機構

トロイダル磁場とポロイダル磁場を導入。



トロイダル磁場

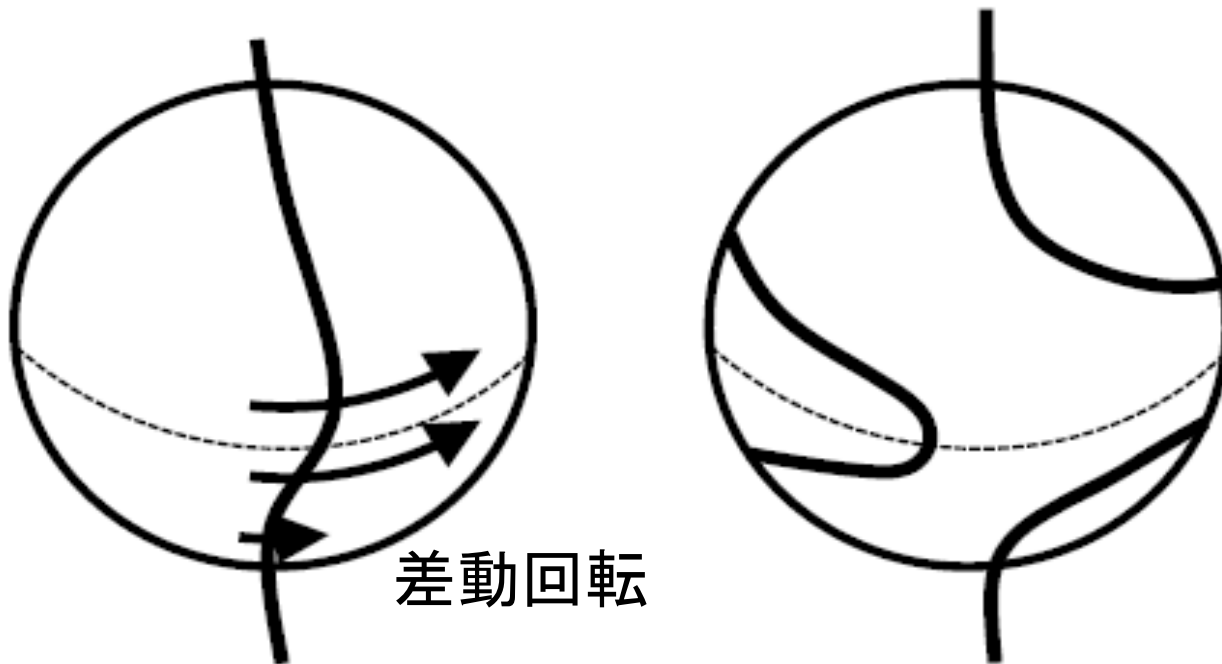


ポロイダル磁場

太陽周期の開始をポロイダル磁場のみとする。

# $\Omega$ 効果

差動回転によりポロイダル磁場からトロイダル磁場が生成。



# $\alpha$ 効果

トロイダル磁場からポロイダル磁場を生成する効果。



トロイダル磁場

$\alpha$  effect

逆向きの  
ポロイダル磁場

ダイナモ理論の主な課題のひとつ。

# Bipolar磁場と黒点の形成

- ・磁力線が束になった磁束管を考える。

磁束管内外の圧力のつり合いの式

$$p_e = p_i + \frac{1}{2\mu} B^2$$

$T_e = T_i$  だとすると

理想気体の状態方程式より

$$\frac{k_b T \rho_e}{m} = \frac{k_b T \rho_i}{m} + \frac{1}{2\mu} B^2$$

$$\therefore \rho_e > \rho_i$$



磁束管のイメージ

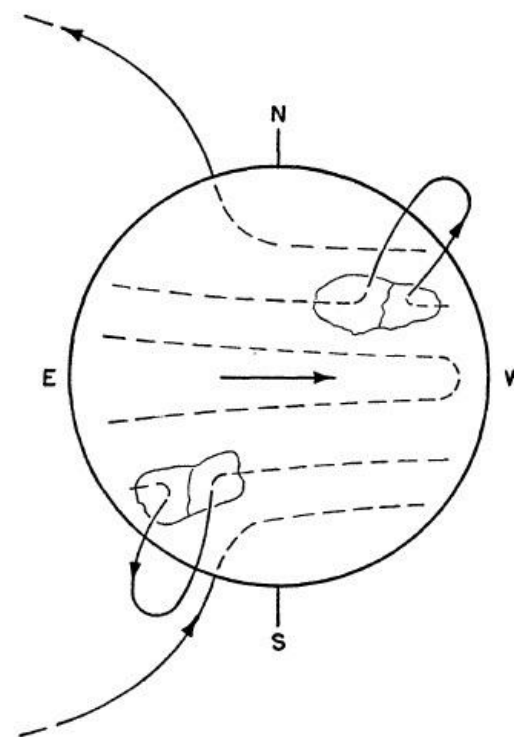
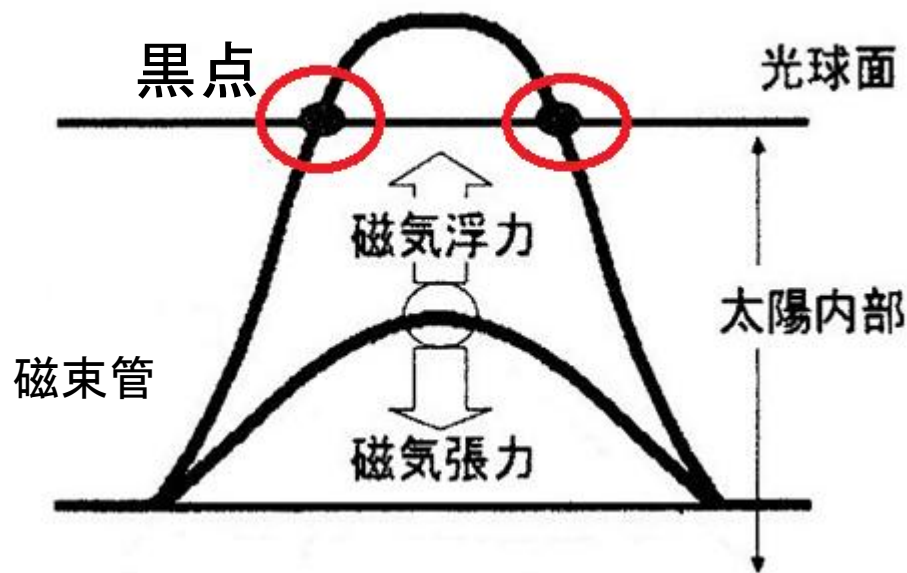
$m$  ガス粒子の平均質量  
 $p_e$  磁束管外のガスの圧力  
 $p_i$  磁束管内のガスの圧力  
 $\rho_e$  磁束管外のガスの密度  
 $\rho_i$  磁束管内のガスの密度

$\rho_e > \rho_i$  ならば磁気浮力が働く。

磁気浮力により磁束管が太陽表面に膨張しながら浮上し、太陽表面にBipolar磁場が生成される。

磁場に対流が妨げられ温度が低下。

⇒表面に黒点が形成。



# Babcock-Leighton型ダイナモ

- $\Omega$  効果

⇒ 差動回転による磁力線の引き伸ばし。

- $\alpha$  効果

⇒ コリオリ力による磁束管のねじれ。

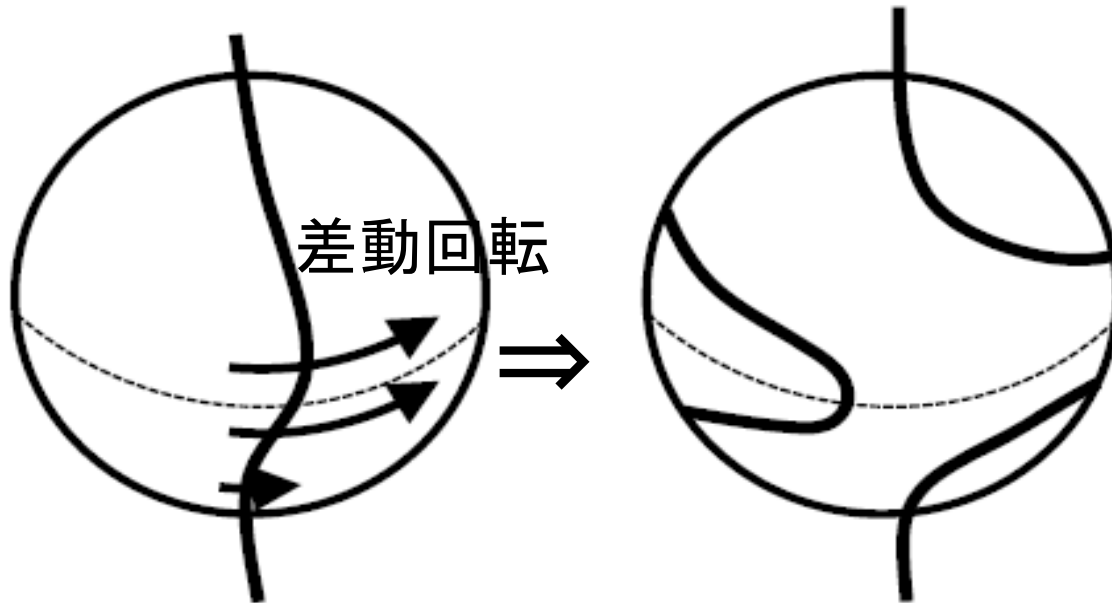
- 一般磁場の反転

⇒ 磁力線のつながりかえ。

# Babcock-Leighton型ダイナモ

$\Omega$  効果

⇒ 差動回転による磁力線の引き伸ばし。

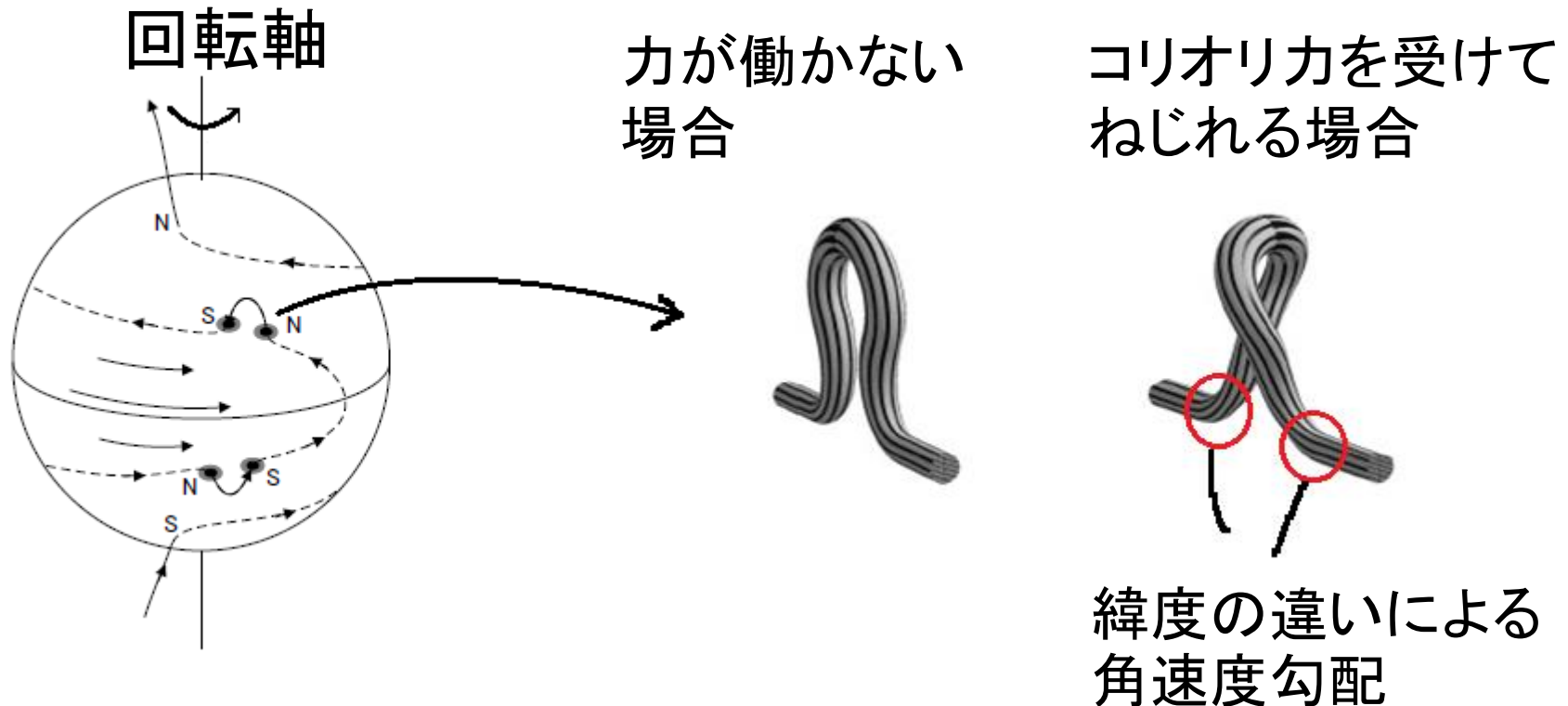




# Babcock-Leighton型ダイナモ

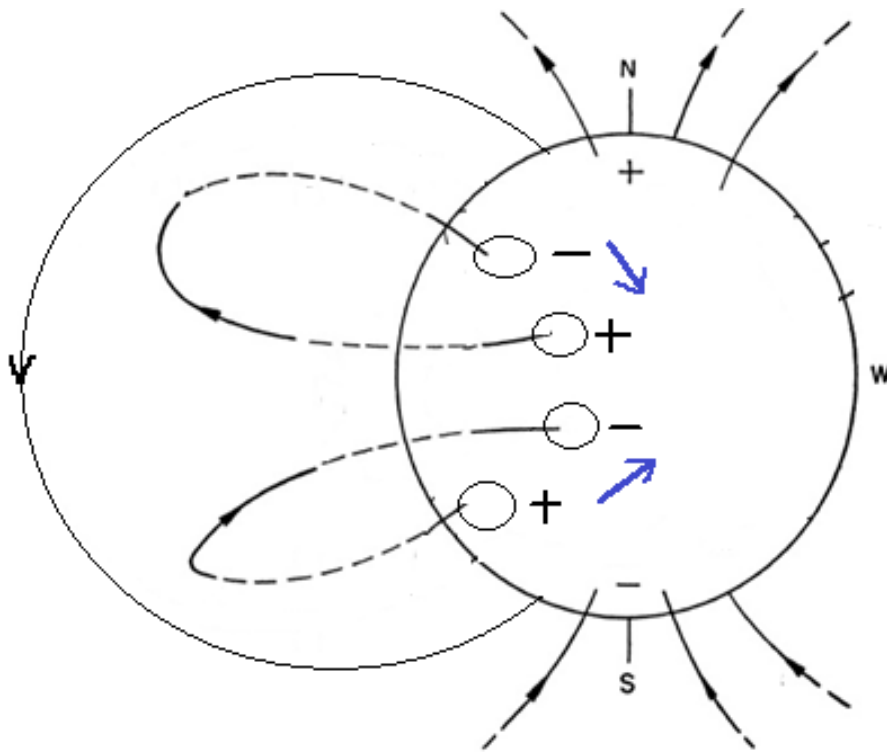
$\alpha$ 効果

⇒磁束管浮上の際に受けるコリオリ力により、  
ポロイダル磁場を生成する。



# Babcock-Leighton型ダイナモ

## 一般磁場の反転

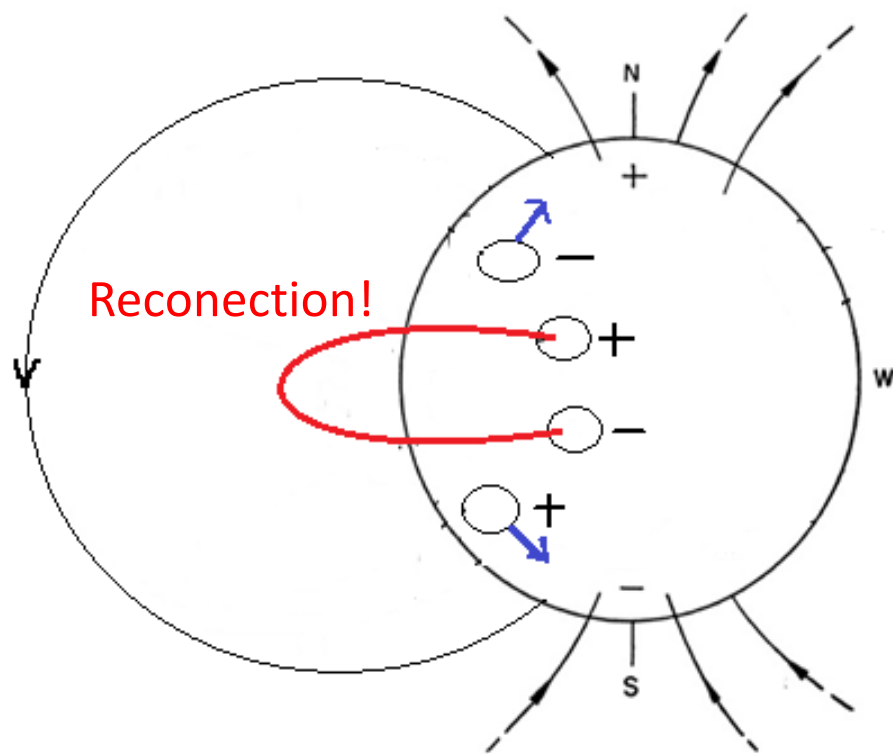


最初の磁力線のつながぎ。

黒点が赤道方向へ向かってシフト。

# Babcock-Leighton型ダイナモ

## 一般磁場の反転

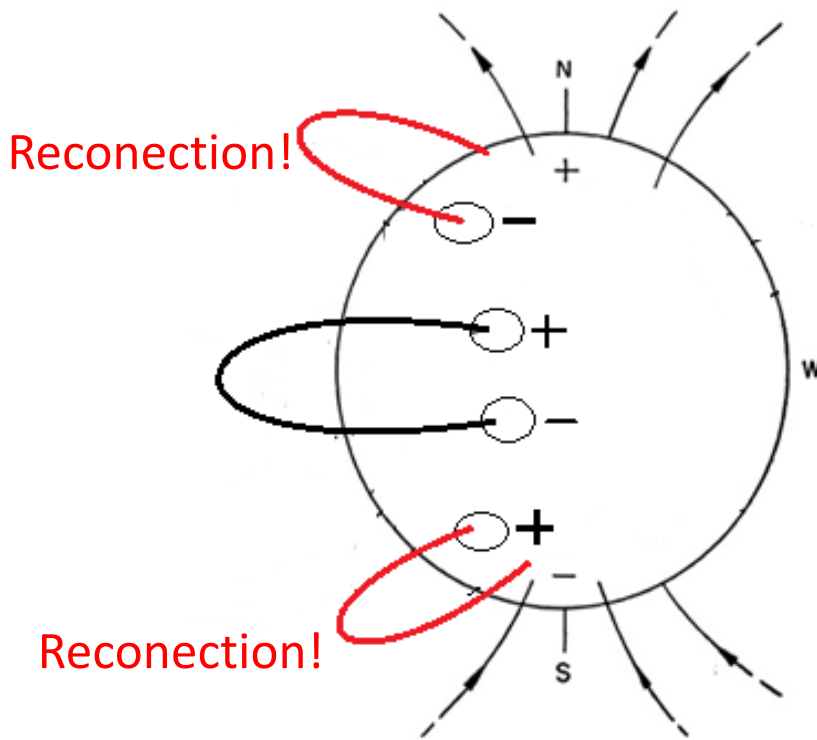


先行黒点同士で磁力線のつなぎかえが起きる。

残った単極磁場は拡散しながら極域へ向かって流れていく。

# Babcock-Leighton型ダイナモ

## 一般磁場の反転

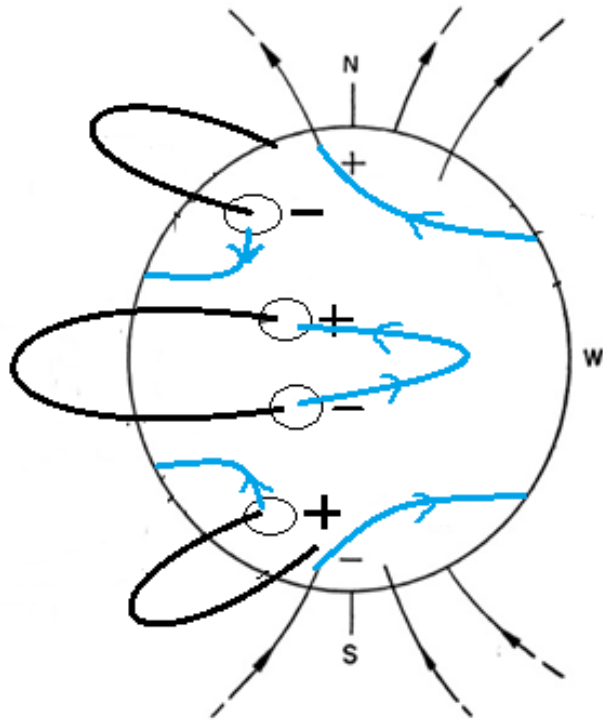


極域で単極磁場と一般磁場とのつなぎかえが起きる。  
(赤い線)

# Babcock-Leighton型ダイナモ

## 一般磁場の反転

ちなみに内部の磁力線は・・・



つなぎかえ後の磁力線  
(ブルーの線)

以上の過程が繰り返される。

⇒ 一般磁場の反転

# Babcock-Leighton型ダイナモ

## ・問題点

速度勾配層(タコクライン)の発見  
( $0.7R_{\odot}$ 付近の角速度勾配が急な場所)  
対流層底

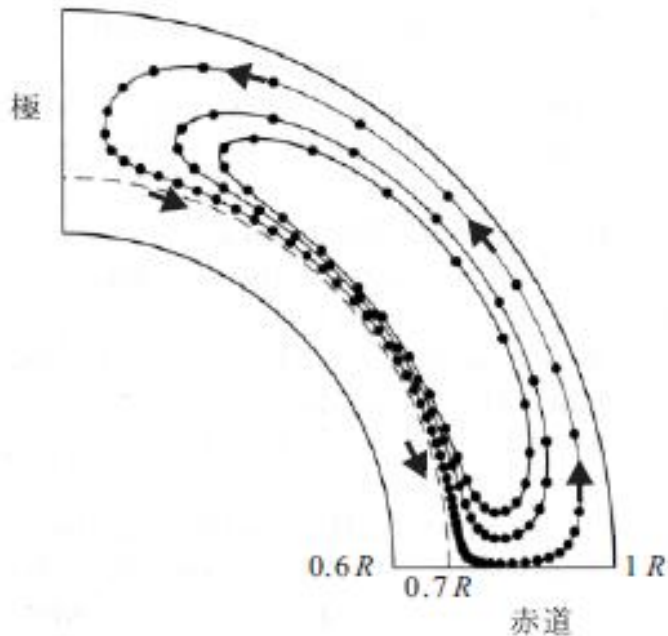
$\Omega$  効果はこのタコクラインで効率的に働く。

Babcock-Leightonのモデル  
ポロイダル成分は太陽表面付近に生成。

⇒次のサイクルの  $\Omega$  効果が効率的に行われない。

# なぜ今 Babcock-Leighton のモデルなのか？

Point: 子午面循環流の発見 (日震学)



子午面循環流の図

- ・極方向へ向かう太陽表面の流れ。
- ・約  $15\text{m/s}$  で動く。
- ・質量保存則を考慮すると対流層で循環していると考えられる。

# 磁束輸送ダイナモ

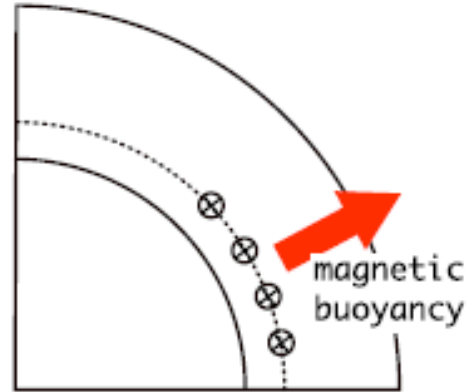
(Dikpati & Charbonneau 1999)

(Babcock-Leightonの応用)

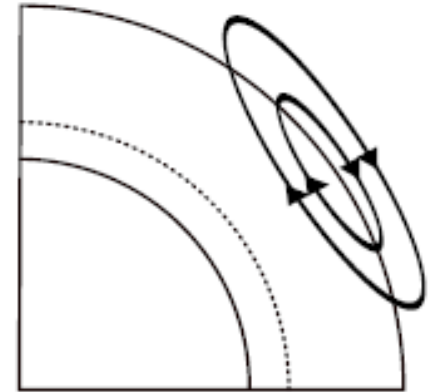
Stage 1

磁気浮力による  
磁束管の浮上。

(Stage 1)



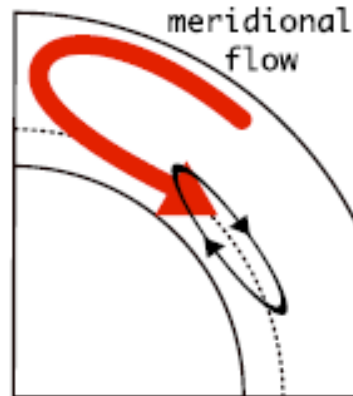
(Stage 2)



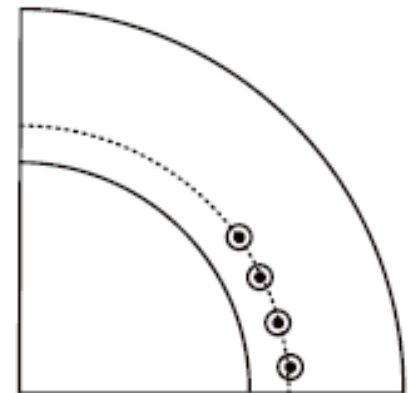
Stage 2

コリオリ力により  
ポロイダル成分獲得。

(Stage 3)



(Stage 4)





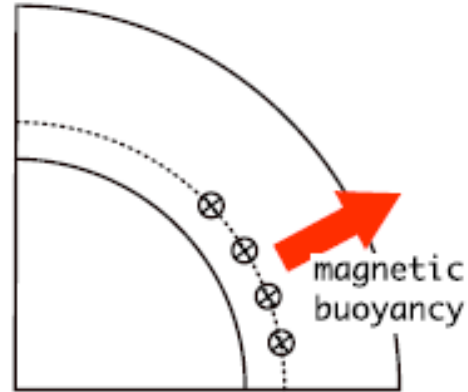
# 磁束輸送ダイナモ

(Dikpati & Charbonneau 1999)

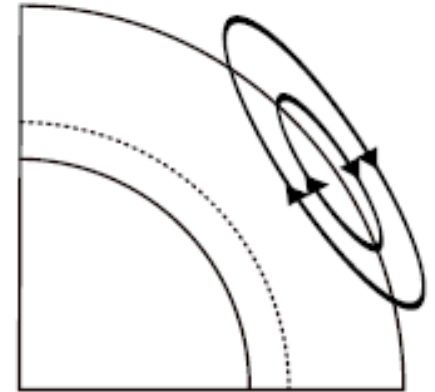
## Stage 3

子午面循環流により  
角速度勾配層へ  
ポロイダル磁場を輸送。

(Stage 1)



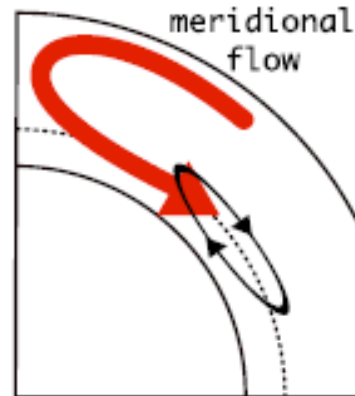
(Stage 2)



## Stage 4

効率的な  $\Omega$  効果に  
より、初めと逆向きの  
トロイダル成分を獲得。

(Stage 3)



(Stage 4)

