

太陽ダイナモ

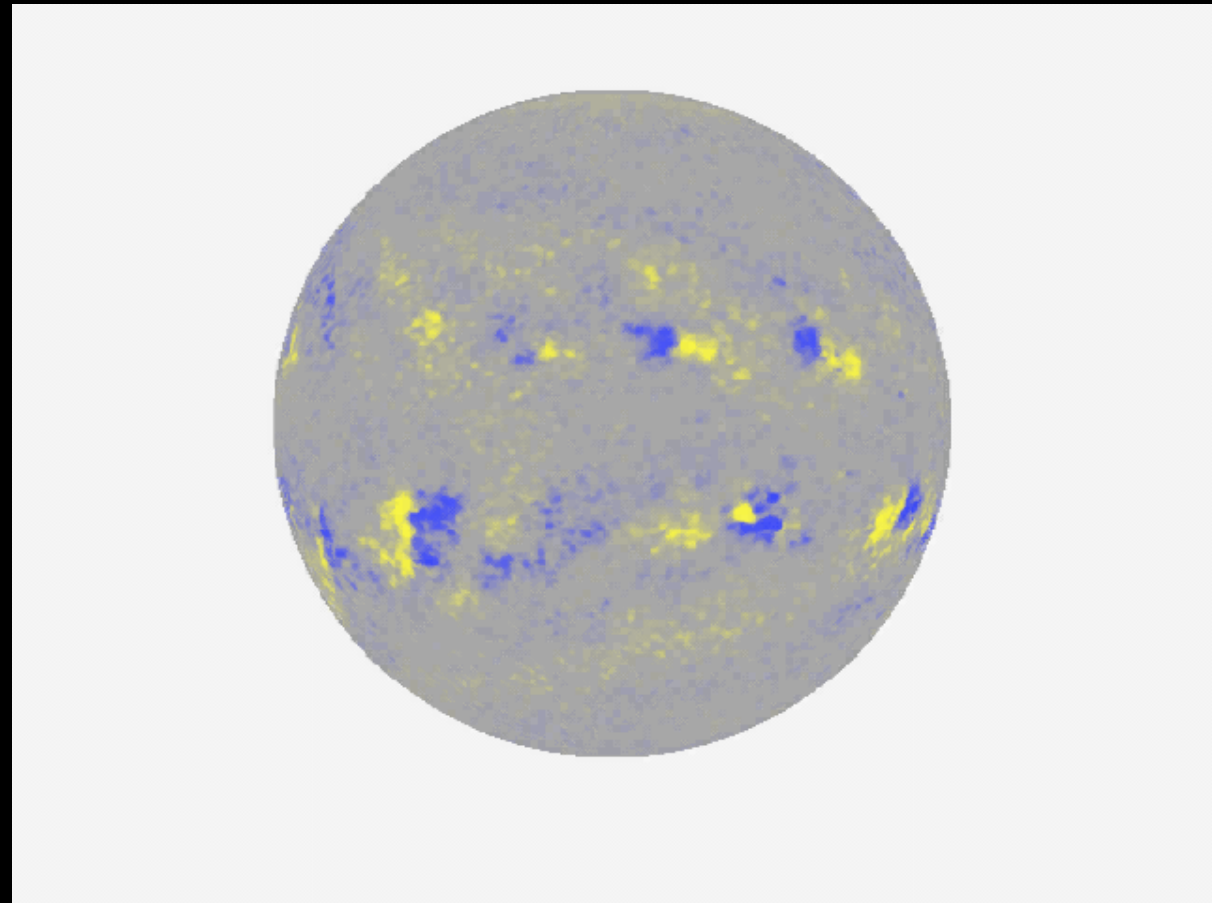
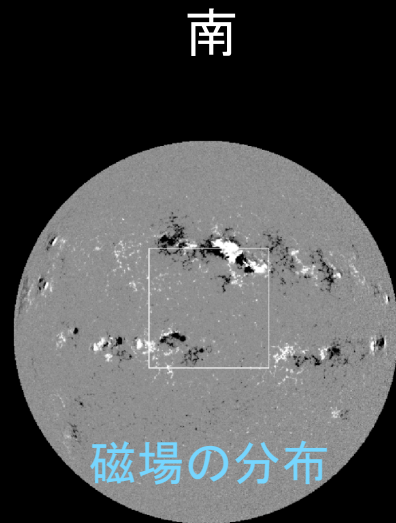
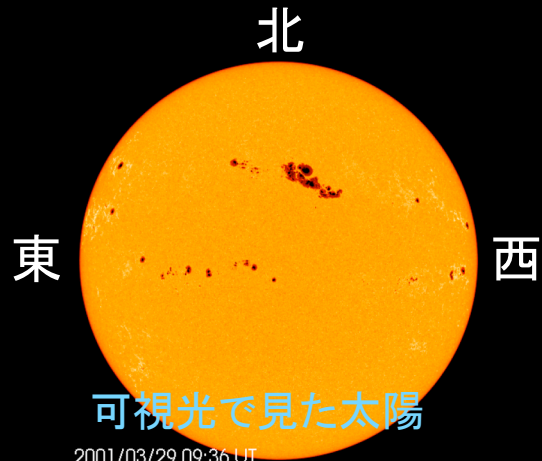
磯部洋明

京都大学宇宙総合学研究ユニット

太陽物理学の課題

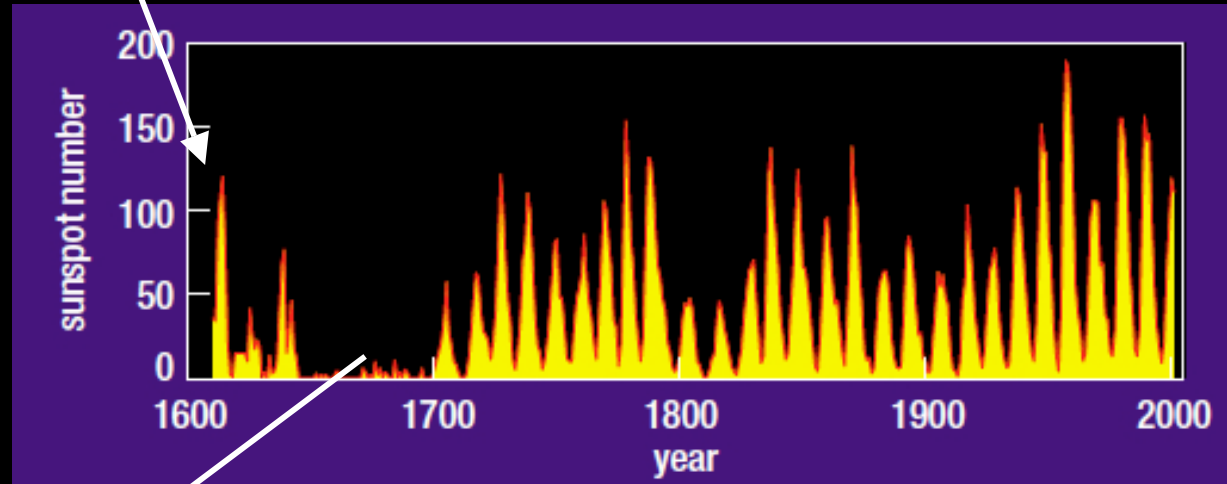
1. 磁場の起源—ダイナモ
2. 爆発現象—フレア、コロナ質量放出
3. 彩層、コロナの加熱、太陽風加速
4. 大気の構造形成
 - 黒点、プロミネンス、ジェット、、、
5. プラズマ素過程
 - 磁気リコネクション、粒子加速、、、

黒点11年周期と太陽活動



黒点数の変動

ガリレオによる発見



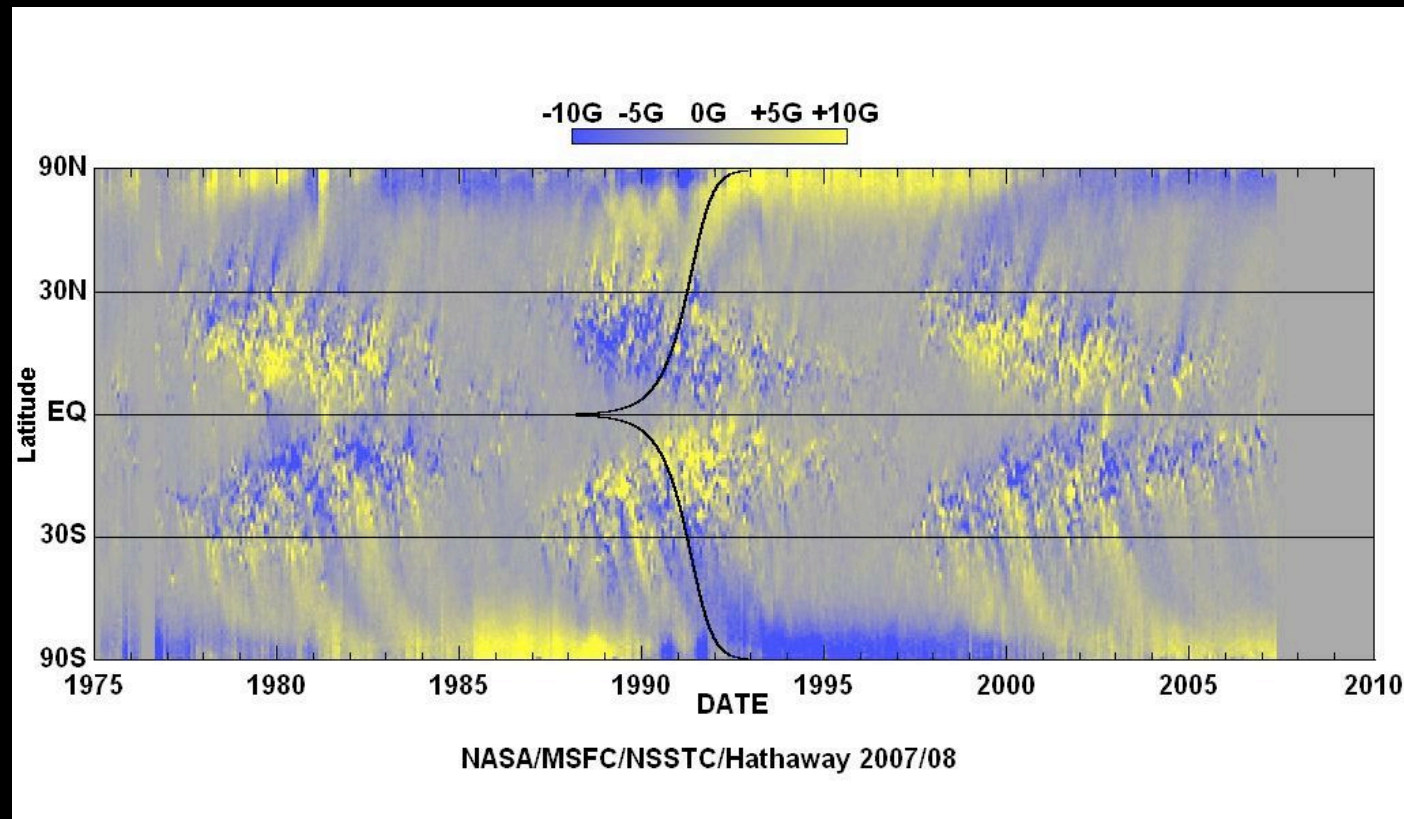
マウンダーミニмум



- 過去の宇宙線の痕跡(C^{14} など)から、数十年程度の極小期は何度も発生していることが知られている

- 極小期中も活動サイクルはあり、周期はやや長い(〜14年; Miyahara et al. 2004)

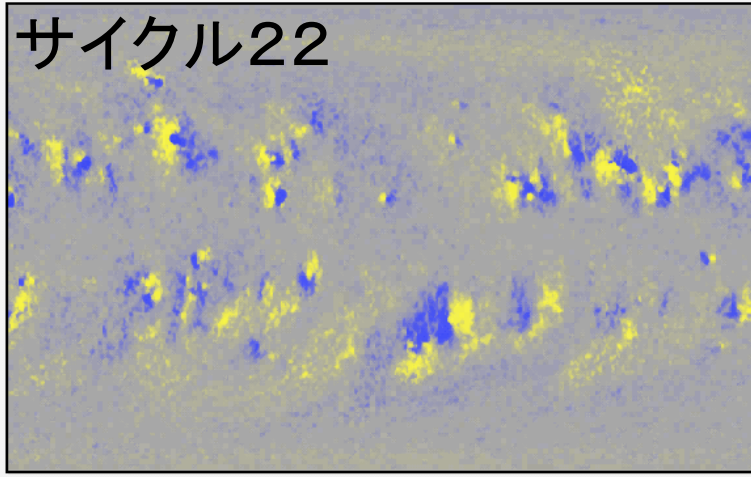
バタフライダイアグラム



- 黒点の出現緯度は約30度から低緯度へドリフト
- サイクルごとに極性が反転

Hale's polarity law

サイクル22



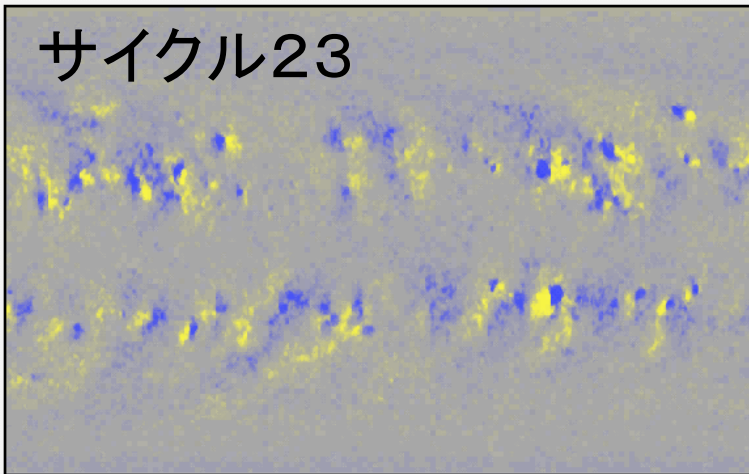
1980 1985 1990 1995 2000 2005

- 黒点は正極と負極のペアで現れる
- 二つの黒点はほぼ東西方向に並ぶ

ヘールの法則

- 例えばサイクル22の場合:
 - 北半球は先行が負、後行が正
 - 南半球は先行が正、後行が負
- 11年周期で逆転する

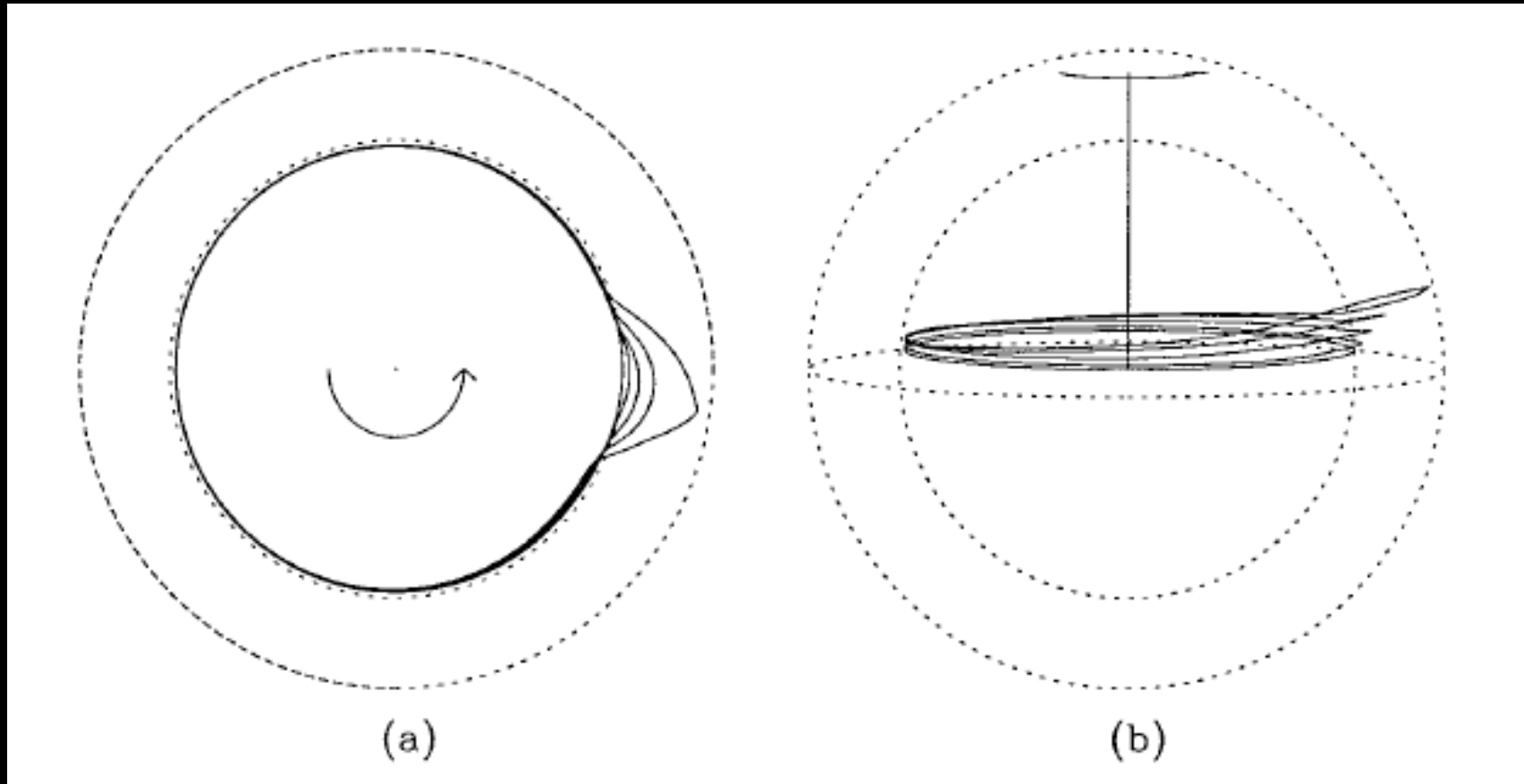
サイクル23



1980 1985 1990 1995 2000 2005

- ヘールの法則から外れた黒点は
大フレアを起こすことが多い

太陽磁場の大規模構造



説明されるべき観測

- 黒点数が約11年で増減する(11年周期)
 - サイクルごとに極性が反転する(22年周期)
 - 黒点の出現緯度(バタフライダイアグラム)
 - 極小期の存在
 - 黒点の種々の特性(Hale's law, Joy's law, ヘリシティ etc.)
-
- ダイナモは太陽物理学の最重要にして最も難しい問題

(線形)ダイナモ問題

誘導方程式

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B}$$

速度場 \mathbf{v} を与えれば、磁場が決まる

=>運動論的ダイナモ理論(kinematic dynamo)

非線形性

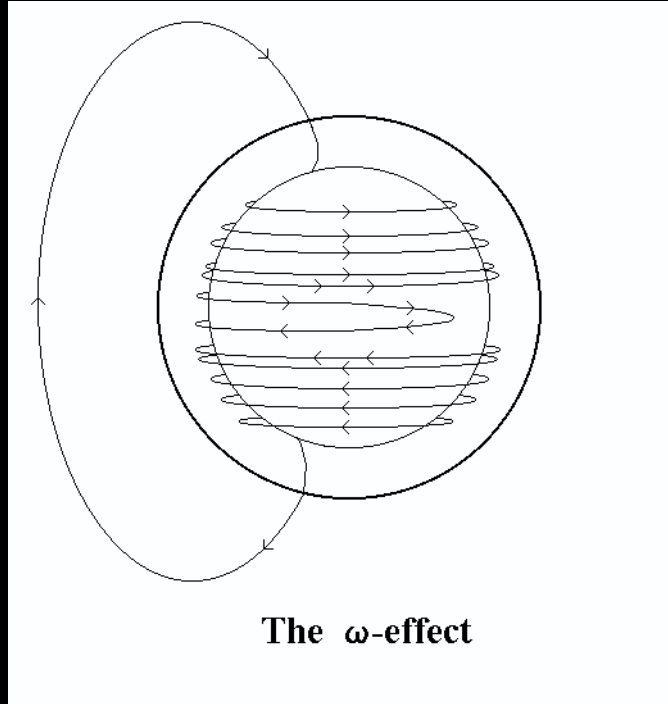
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \eta \nabla^2 \mathbf{B}$$

運動方程式

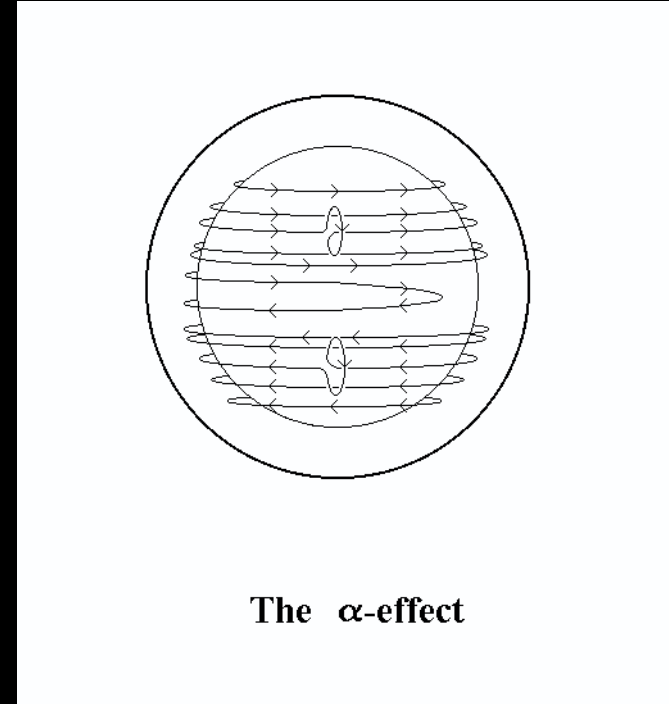
$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} + \frac{1}{\rho} \nabla P - \frac{2}{\beta_0} \frac{1}{\rho} \mathbf{j} \times \mathbf{B} = 0$$

磁場が強くなると、 $\mathbf{j} \times \mathbf{B}$ 力が \mathbf{v} に影響する
=> 誘導方程式が非線形 (Non-linear dynamo)

パラダイム： $\alpha\Omega$ ダイナモ



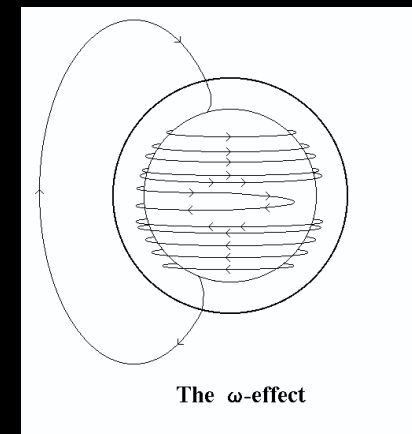
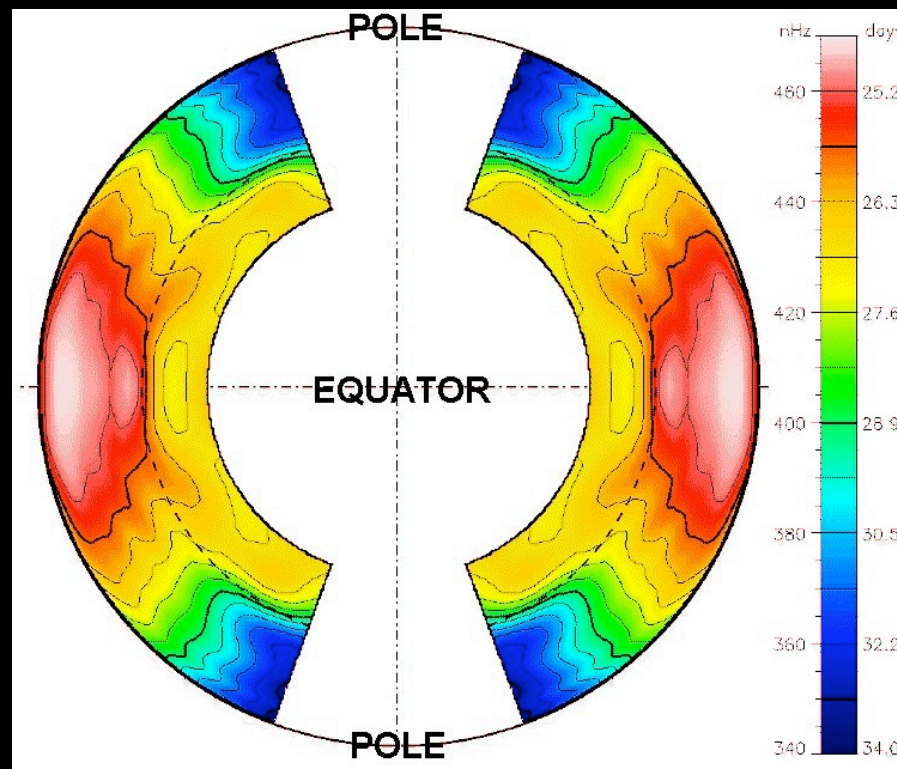
Ω 効果：**差動回転**によりポロイダル磁場からトロイダル磁場が作られる



α 効果：**何らかの効果**によりトロイダル磁場からポロイダル磁場が作られる

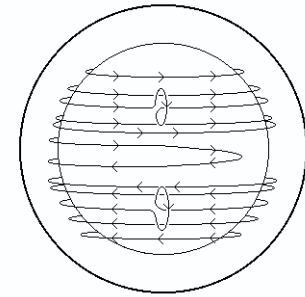
対流、乱流、コリオリ力、磁気浮力、黒点の崩壊...

Ω 効果の起こる場所



- 対流層と放射層の境目付近に速度シア(タコクライン)
- 対流層中にもシアはある。が、対流層中の磁場は磁気浮力により1ヶ月程度の時間スケールで表面に浮上してしまい、十分強くなれない
- 対流安定層に磁場を閉じ込めて、速度シアにより磁場を増幅する

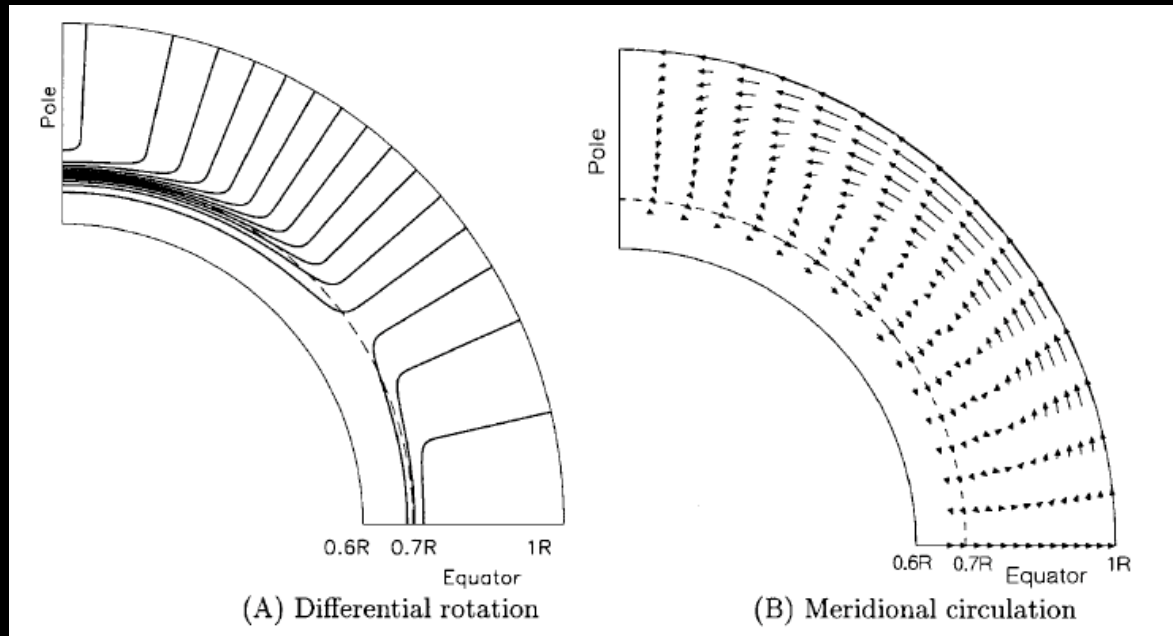
α 効果の起こる場所



The α -effect

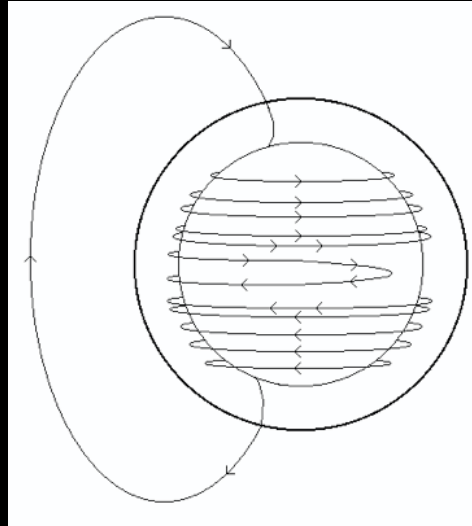
- 全くコンセンサスはなし
- Ω 効果と同じ場所(対流層の底。インターフェイスダイナモ)
- 対流層全体
- 浮上してきた黒点の崩壊(Babcock-Leightonダイナモ)

最近の流行: Flux transport dynamo (Charbonneau, Dikpati, Gilman, Choudhuri...)

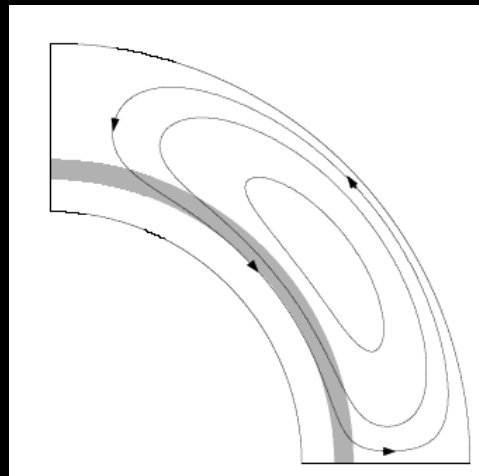


- 観測されてるような差動回転と子午面流を仮定し、誘導方程式を解く (運動論的ダイナモ)
- α 効果は表面で起きると仮定 (Babcock-Leighton型)
- 磁場を子午面流で輸送するのがポイント (ただし内部の子午面流の観測はない)
- 2次元軸対称

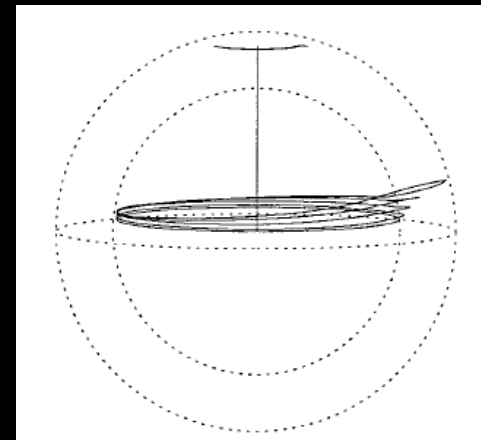
Flux transport dynamoのサイクル



対流層の底(タコクライン)で
 Ω 効果により磁場生成



崩壊した黒点
が子午面還
流により対流
層の底へ



増幅した磁場
が表面に浮上
= 黒点形成

基礎方程式=誘導方程式

軸対称を仮定し、トロイダル成分とポロイダル成分に分ける
(ポロイダル成分はベクトルポテンシャルで記述)

$$B = B_\phi(r, \theta, t)\hat{e}_\phi + \nabla \times [A(r, \theta, t)\hat{e}_\phi]$$

トロイダル成分(B_ϕ)

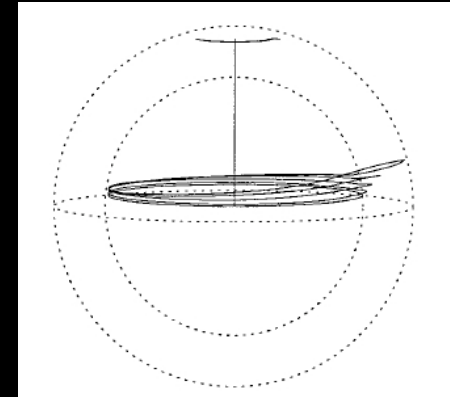
$$\begin{aligned} \frac{\partial B_\phi}{\partial t} + \frac{1}{r} \left[\frac{\partial}{\partial r} (ru_r B_\phi) + \frac{\partial}{\partial \theta} (u_\theta B_\phi) \right] \\ = r \sin \theta (B_p \cdot \nabla) \Omega - \nabla \eta \times \nabla \times B_\phi e_\phi \\ \Omega \text{効果} + \eta \left(\nabla^2 - \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \right) B_\phi \end{aligned}$$

ポロイダル成分($A_\phi \Rightarrow B_r, B_\theta$)

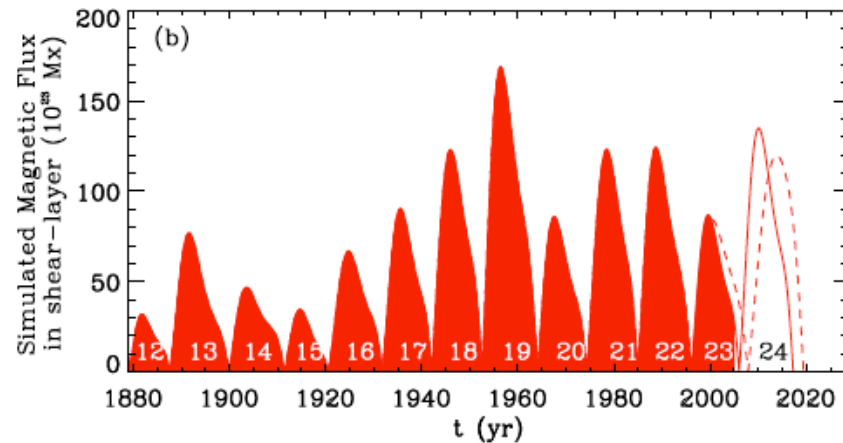
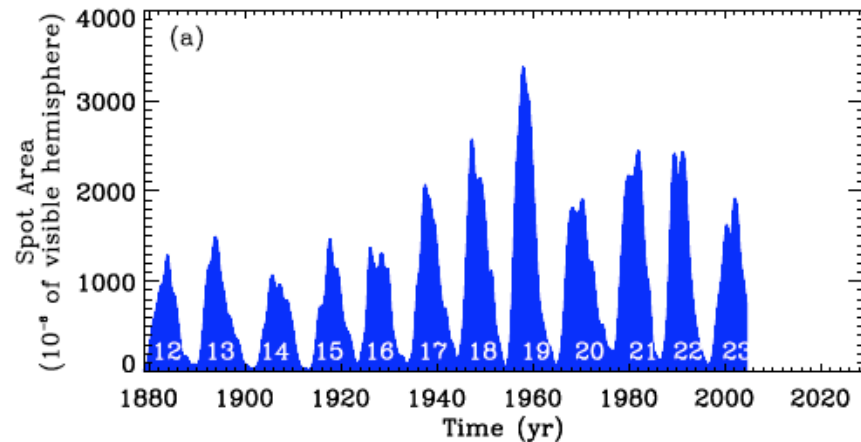
$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{1}{r \sin \theta} (u \cdot \nabla)(r \sin \theta A) \quad \alpha \text{効果(ad hoc)} \\ = \eta \left(\nabla^2 - \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \right) A + S(r, \theta; B_\phi) \end{aligned}$$

α 効果

- 活動領域の形成、崩壊が実効的な α 効果を生む
- Ω 効果で形成したトロイダル磁場は、磁気浮力で表面に浮上する(子午面流ではない)



次サイクルの予想

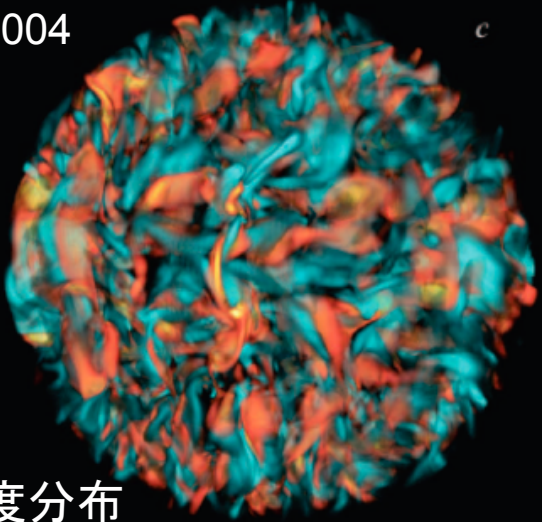


- 過去のデータ(前前サイクルの極域磁場など)を入力データとして運動論的ダイナモを解く
- ある人は次のサイクルが強いといい、ある人は弱いという
- 原因: フリーパラメータが多い
- α 効果の分布と関数形
- 乱流拡散の分布
- 子午面流のプロファイル

Dikpati et al. 2006

非線形ダイナモ：全球MHDシミュレーションは可能か？

Brun et al. 2004



磁場強度分布

$(N_r, N_\theta, N_\phi) = (256, 2048, 1024)$

- anelastic近似
- 磁場が対流層全体が乱流的に分布
- 黒点のようなものはない
- 太陽とは似ても似つかない

- 現実とシミュレーションの乖離
 - レイノルズ数 ($\sim 10^{12}$)
 - 密度比 ($\sim 10^6$)
 - そもそも差動回転の起源が分かっていない
 - 対流安定層の影響は？

シミュレーションの規模と実現の見通し

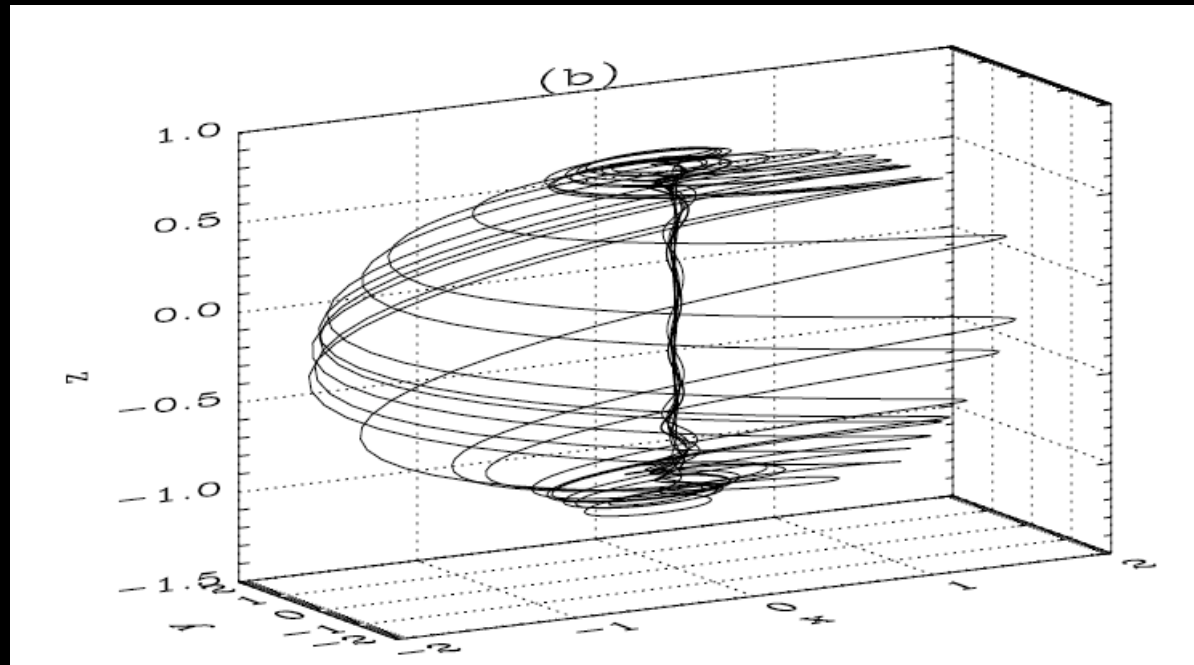
- 対流層底部の磁束は半径1000km程度(磁束量 10^{21} Mx, 磁束密度10テスラ)
 - 必要な格子数 10000x10000x1000
 - 磁場発展の時間スケール(30s)を分解しながら11年間積分すると、
- 1Pflops(実効)で1300時間かかる(既存コードの実績から概算)
- **AMR+次世代スパコンを使えば可能か?**
- 音波を入れるとこれより1000倍厳しくなるが、、、
- マウンダーミニマムは、、、

Grand minimaのモデル

- 第一原理(MHD)からの直接計算は現状望みなし
- 数学的なトイモデルしかない

$$\begin{aligned}\dot{x} &= f [\lambda x - \omega y + azx + d z(x^2 + y^2)], \\ \dot{y} &= f [\lambda y + \omega x + azy], \\ \dot{z} &= f [\mu - z^2 - (x^2 + y^2) + cz^3].\end{aligned}$$

x: $B\phi$, y: Bp z: V

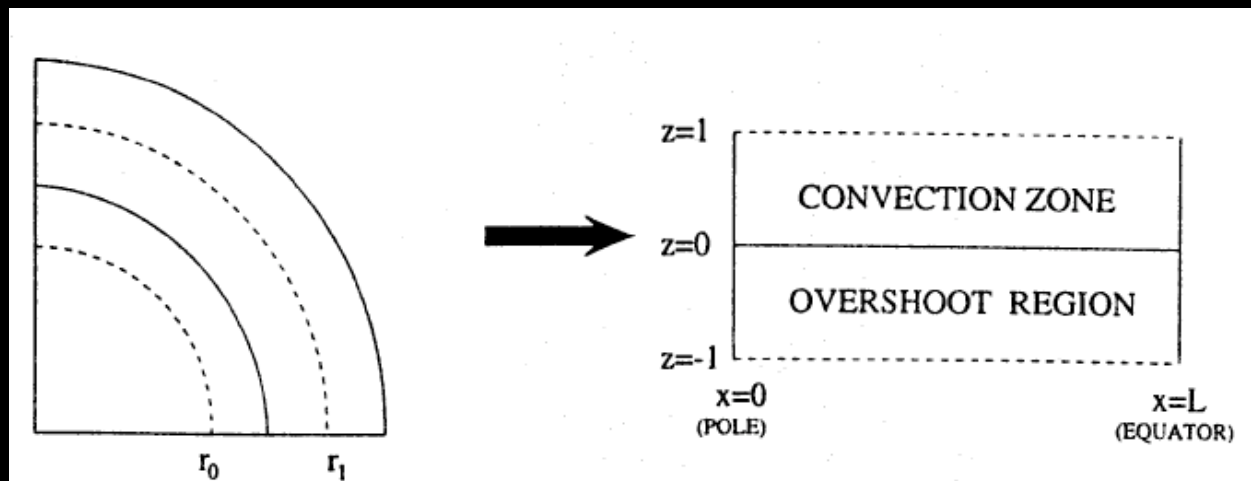


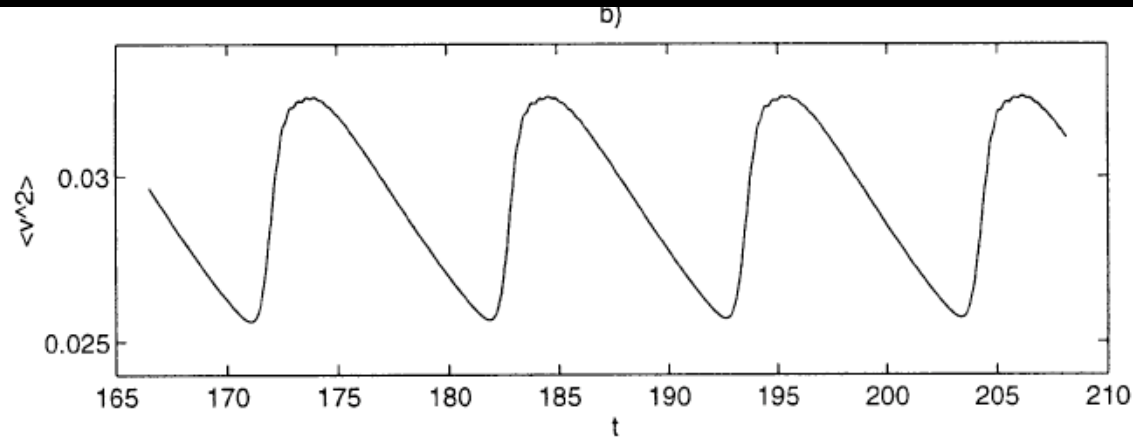
Tobias et al. 1995

もすこし現実に近いモデル

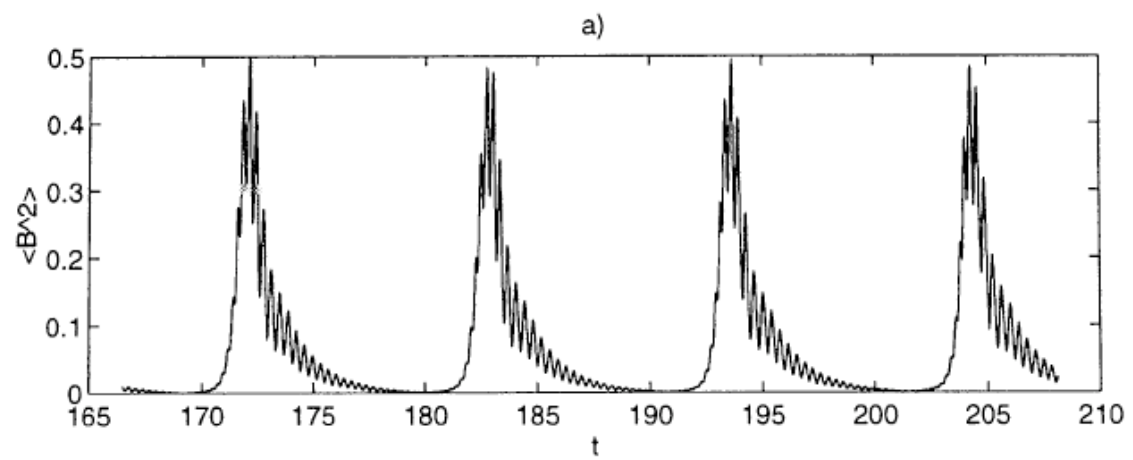
Tobias 1996

$$\begin{aligned}\frac{\partial A}{\partial t} &= h \nabla_H^2 A + f(z) \cos\left(\frac{\pi x}{2L}\right) B, \\ \frac{\partial B}{\partial t} &= h \nabla_H^2 B + D \left(g(z) \sin\left(\frac{\pi x}{2L}\right) + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \frac{\partial A}{\partial x} \\ &\quad - D \left(\frac{\pi}{2L} u \cos\left(\frac{\pi x}{2L}\right) + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \frac{\partial A}{\partial z}, \\ \frac{\partial v}{\partial t} &= \tau h \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right] + R_\alpha \Lambda \left[\frac{\partial B}{\partial z} \frac{\partial A}{\partial x} - \frac{\partial A}{\partial z} \frac{\partial B}{\partial x} \right].\end{aligned}$$

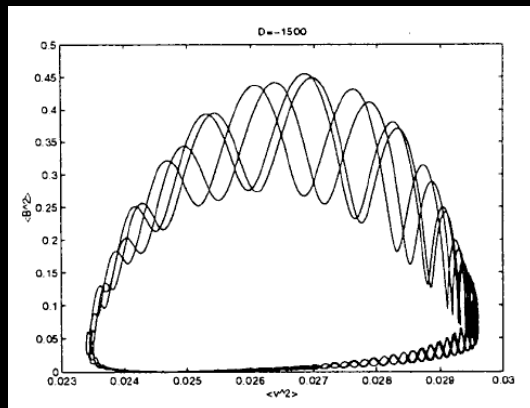




Periodic
solution



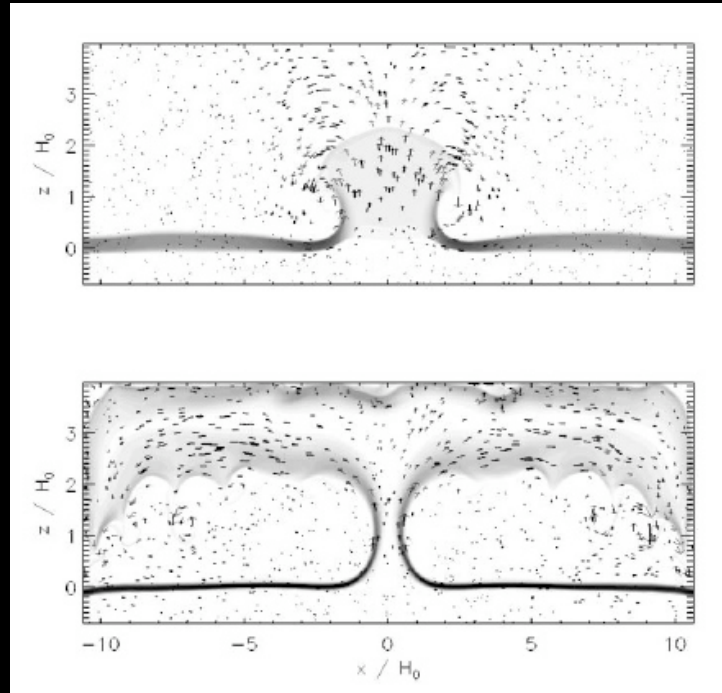
Double periodic
solution



大問題：10Tのトロイダル磁場？

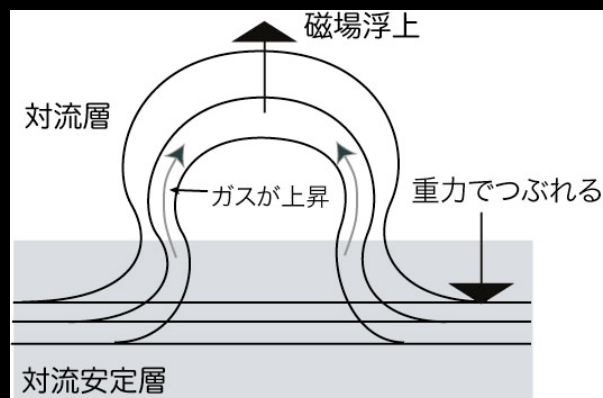
- 対流層の底でできるトロイダル磁場(黒点の起源)は、10T程度の強さが必要と考えられている
 - 磁場が弱いとコリオリ力が高緯度に出現
 - 磁場が弱いと対流に壊されて表面に到達しない
 - 対流安定層から磁気浮力不安定で脱出するのに必要
- 対流層の底の対流、差動回転の運動エネルギーを全て磁場に変換しても、1Tにしかない。
- Ω 効果というパラダイムの崩壊？

“Explosion”による10T磁場形成



- 高エントロピーのガスを持つ磁場が浮上
- 対流層中で周囲と圧力バランスを保てず崩壊(explosion)
- 磁場に沿ってガスが上昇
- 下の磁場が重力でつぶれて磁場強度が上がる

(Rempel & Schuessler 2001)



運動エネルギーだけではなく、熱、重力エネルギーを使って磁場を増幅する

