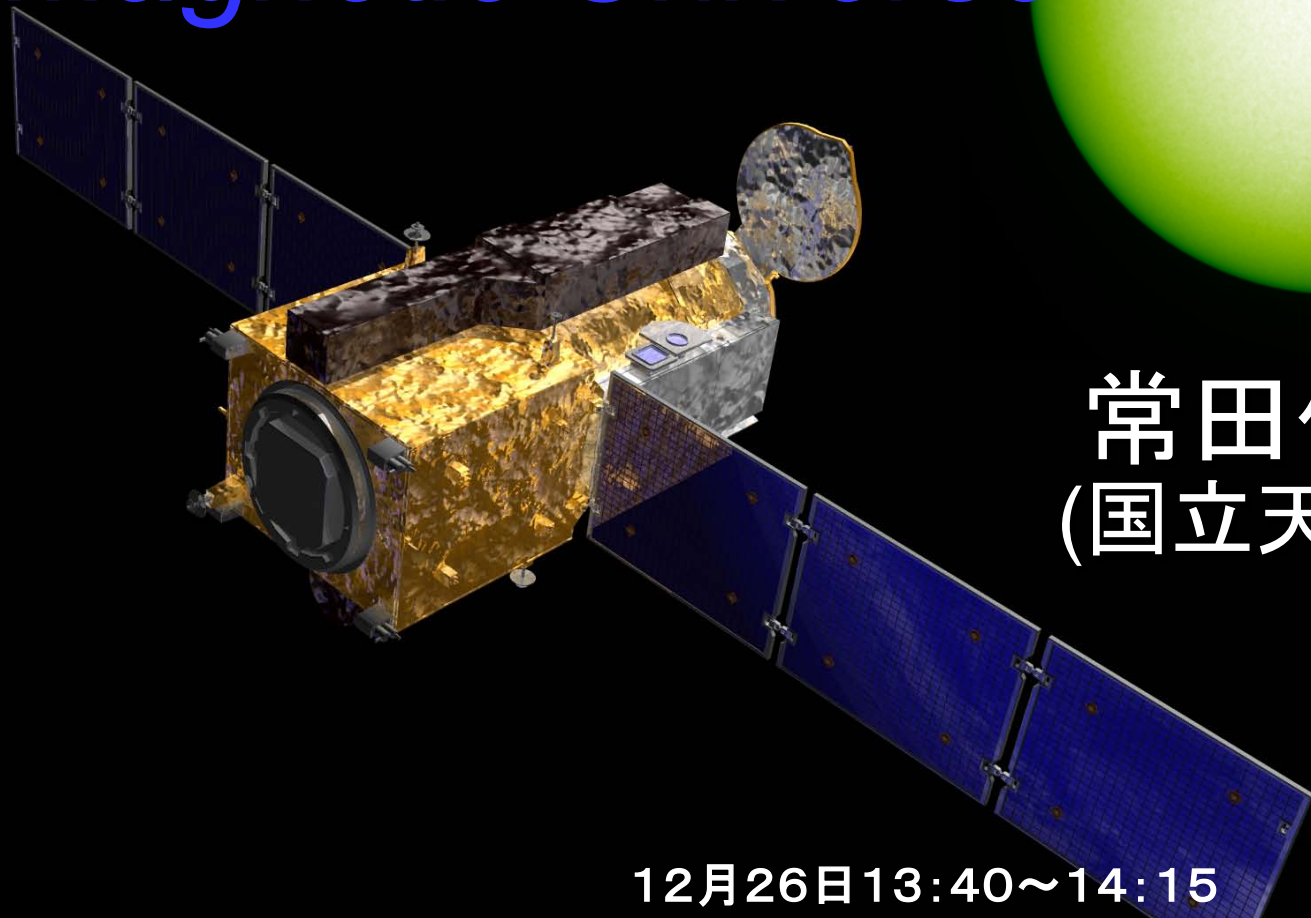


磁氣的宇宙

Magnetic Universe



常田佐久
(国立天文台)

12月26日13:40~14:15

研究会「太陽物理学と恒星物理学の相互交流と将来的展望」
東京大学本郷キャンパス理学部1号館336号室

磁気エネルギー($B^2/8\pi$)とは？

- 宇宙に大局的な磁場に沿った電場は存在しない
- 宇宙に大局的な磁場は存在できる
- CGSガウス単位系を使用すると
 - $[B(\text{G})^2/8\pi]=\text{erg}/\text{cm}^3$

電磁流体力学で最も重要な式

流れ場:しばしば与える

比抵抗

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \underbrace{\nabla \times \mathbf{V} \times \mathbf{B}}_{\text{ダイナモ項}} + \frac{c^2 \eta}{4\pi} \Delta \mathbf{B}$$

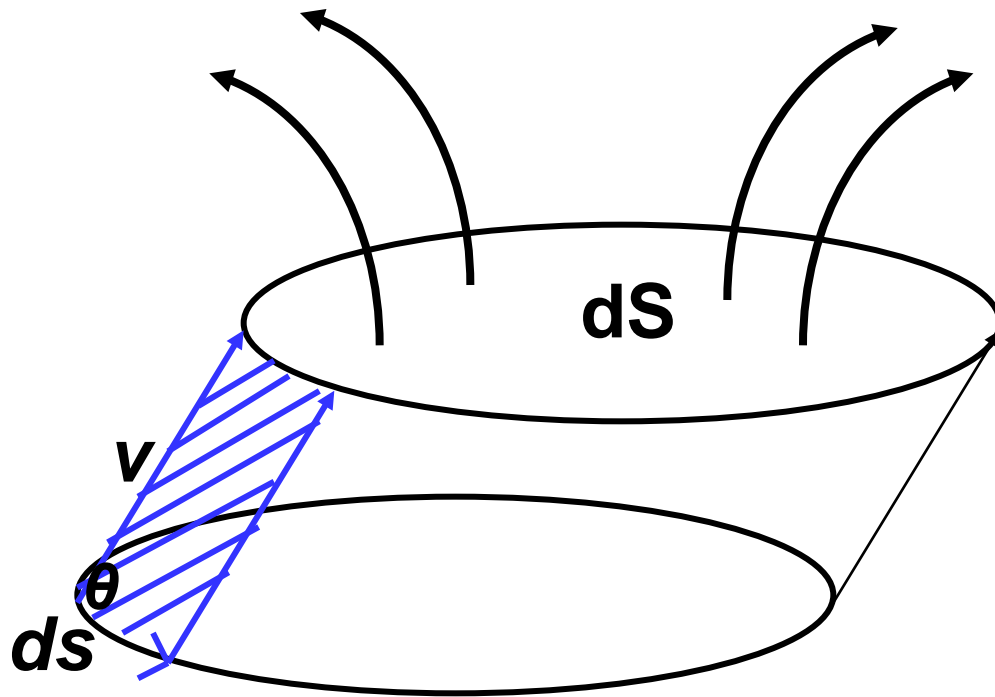
ダイナモ項

散逸項

磁気レイノルズ数 $R_m = \frac{|\nabla \times v \times B|}{\left| \frac{c^2 \eta}{4\pi} \right|} = \frac{4\pi v L}{c^2 \eta} \gg 1$

磁力線の凍結 $\frac{D\Phi}{Dt} = 0$

Magnetic field \mathbf{B}

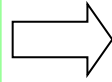


Magnetic flux Φ

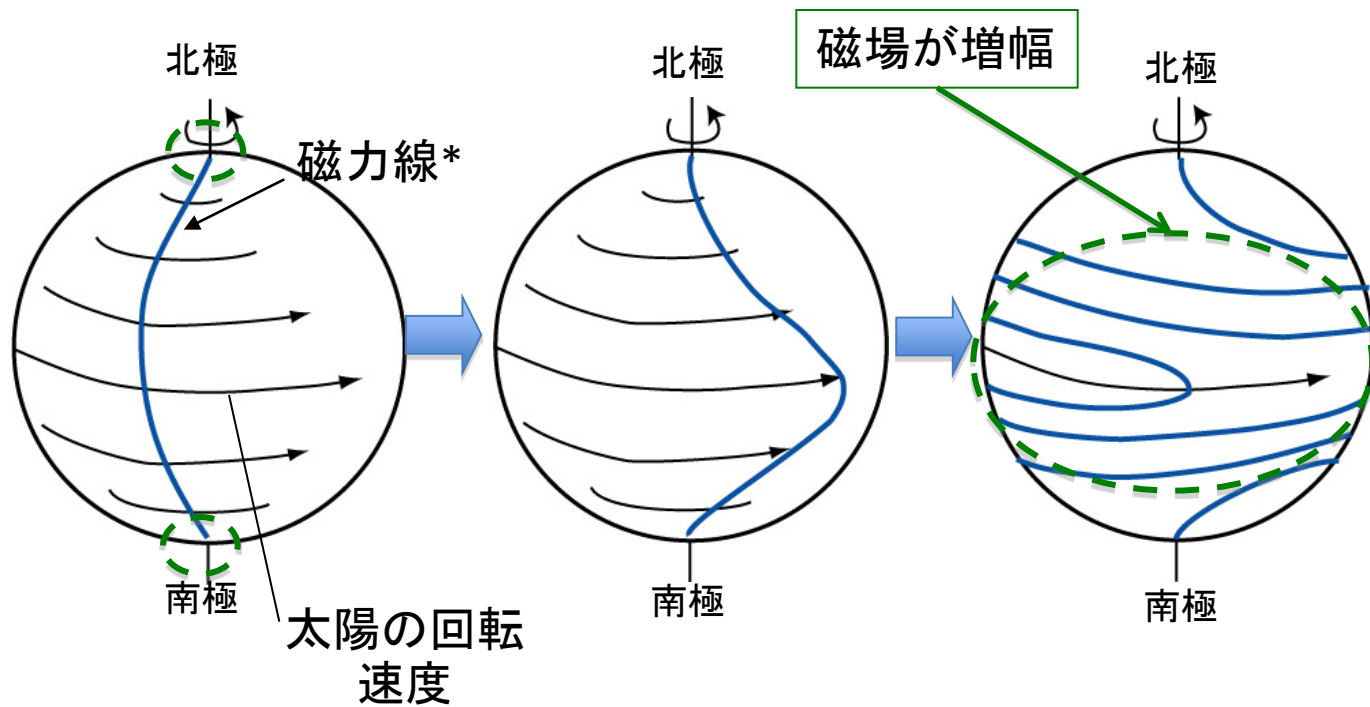
$$| \mathbf{V} \times d\mathbf{s} | = v \cdot ds \cdot \sin(\theta)$$

現在の太陽パラダイム (は他の恒星で通用するか?)

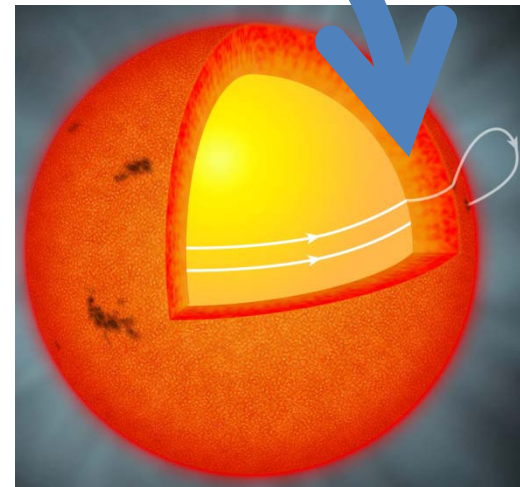
運動エネルギー



磁場エネルギー

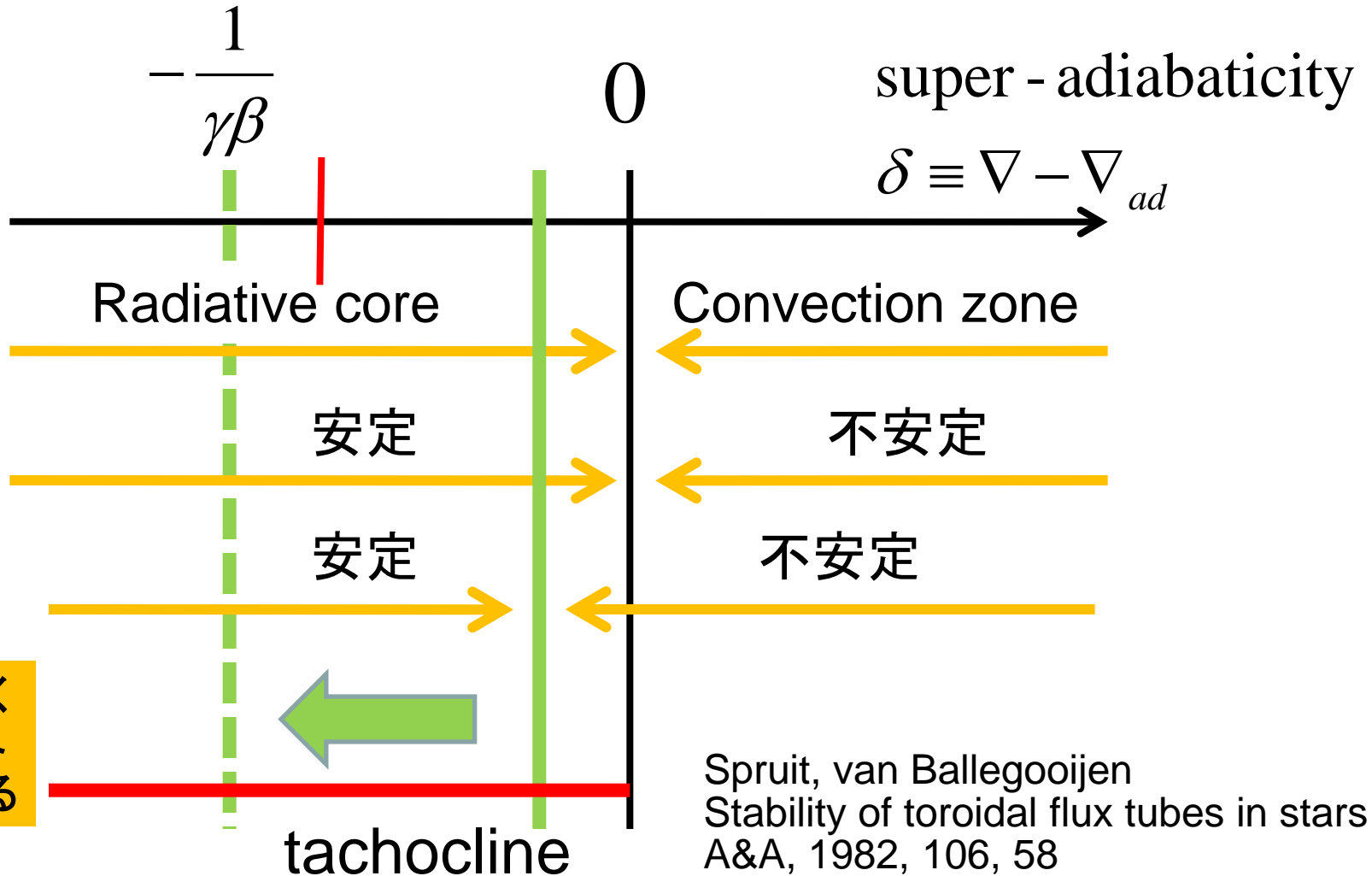


磁力線が浮かび上がって黒点に。



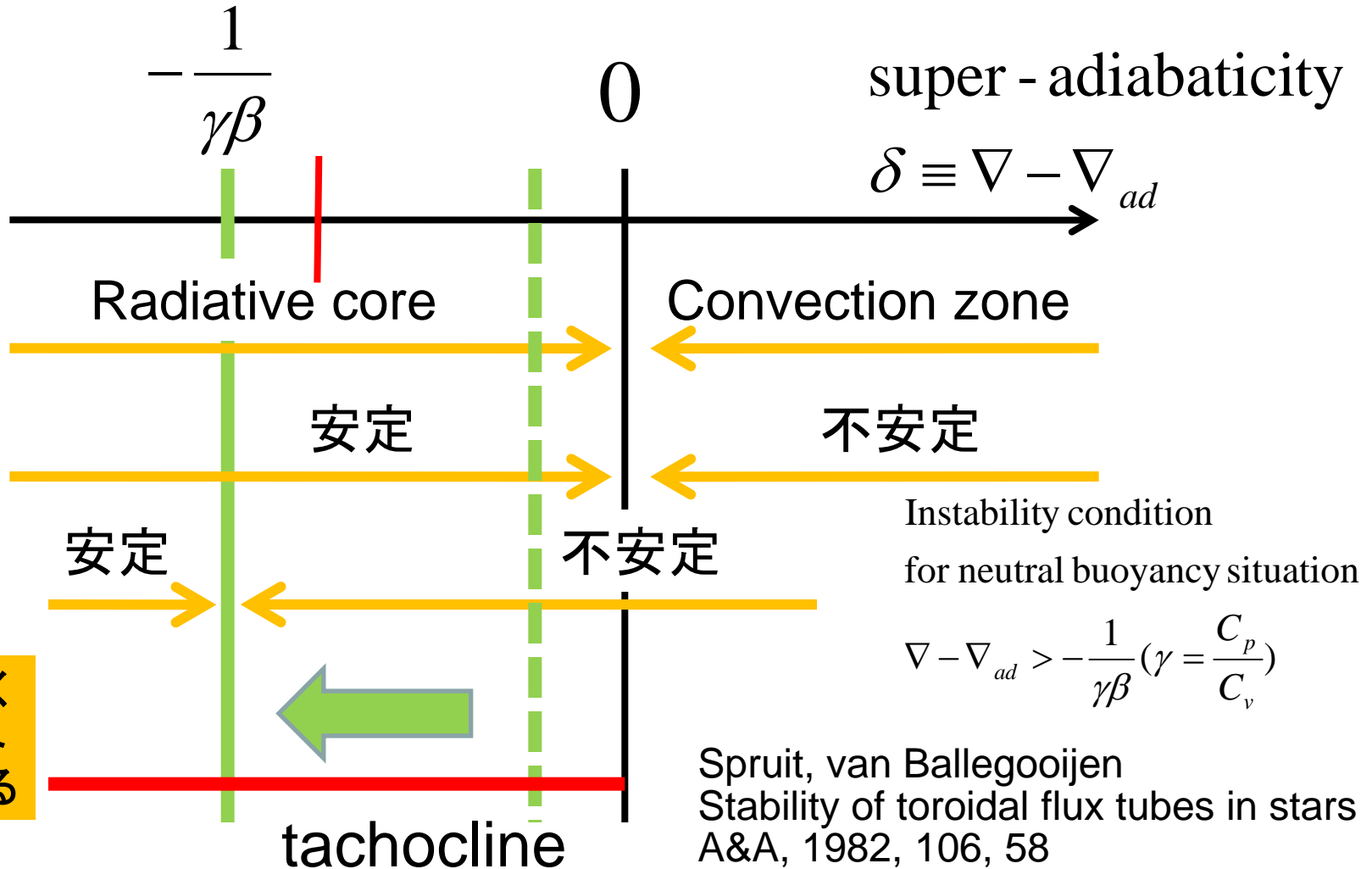
対流層の底で起きていること

ステップ1: 磁場の増幅



磁場が強くなると境界が移動する

ステップ2: 磁場の不安定化



磁場が強くなると境界が移動する

Fully convective な星では？

ダイナモ方程式の課題

0. フラックスチューブを表現していないこと

1. α 項=我々の知識の不完全さ

2. ダイナモの起きる場所

3. ローレンツ反作用

$$B = B_p + B_\phi$$

$$v = v_p + v_\phi$$

toroidal component of induction Eq. ($B_p \Rightarrow B_\phi$)

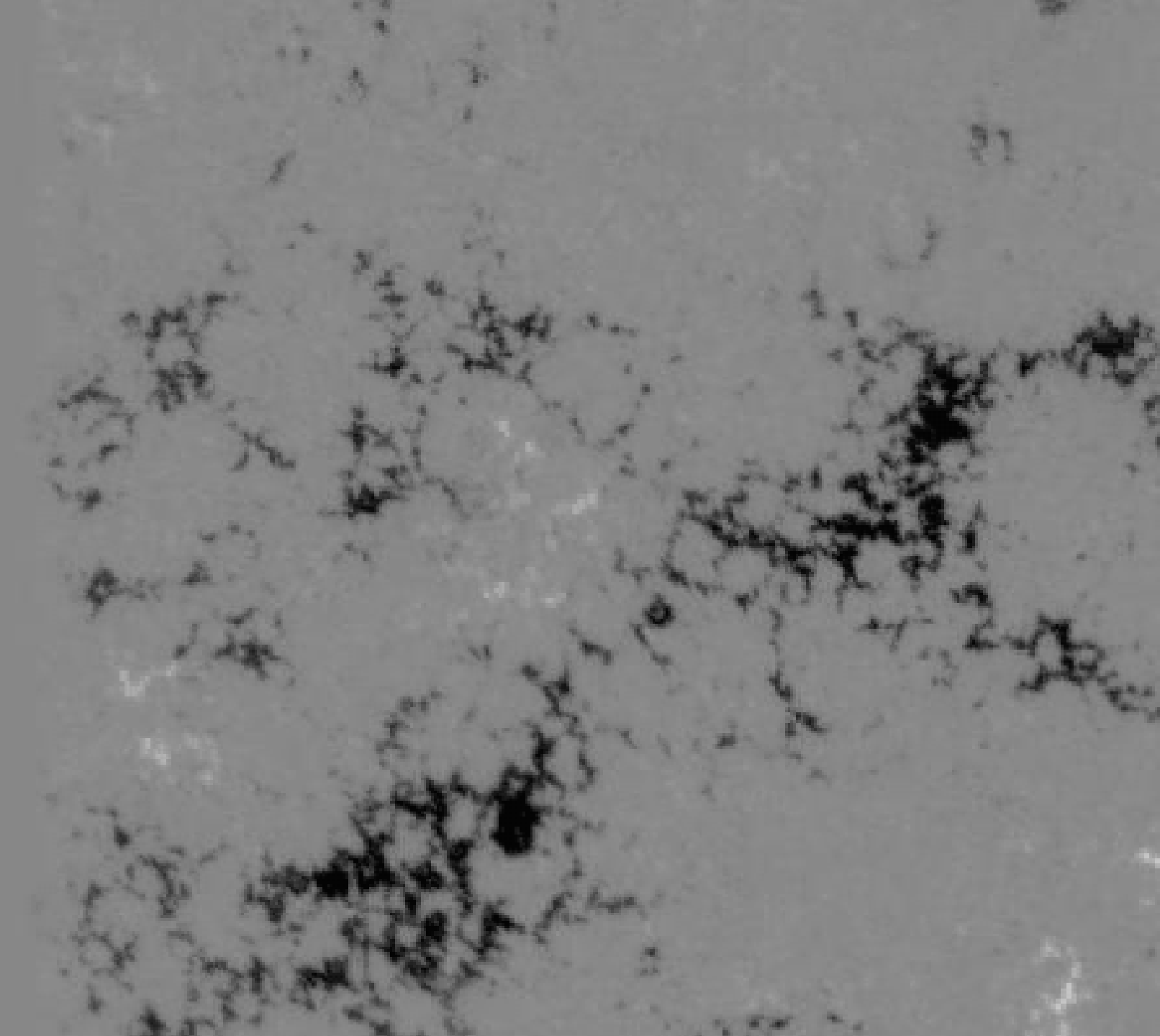
$$\frac{\partial B_\phi}{\partial t} + r[v_p \cdot \nabla] \frac{B_\phi}{r} = rB_p \cdot \nabla \left[\frac{v_\phi}{r} \right] + \eta \left[\nabla^2 - \frac{1}{r^2} \right] B_\phi$$

poloidal component of induction Eq. ($B_\phi \Rightarrow B_p$)

$$\frac{\partial A_p}{\partial t} + r \left[\frac{v_p}{r} \cdot \nabla \right] rA_p = \eta \left[\nabla^2 - \frac{1}{r^2} \right] A_p \quad (\text{decaying poloidal field})$$

$$\frac{\partial A_p}{\partial t} + r \left[\frac{v_p}{r} \cdot \nabla \right] rA_p = \eta \left[\nabla^2 - \frac{1}{r^2} \right] A_p + \underbrace{(cE_\phi = \alpha B_\phi)}_{\alpha \text{項}} \quad (\text{dynamo in operation})$$

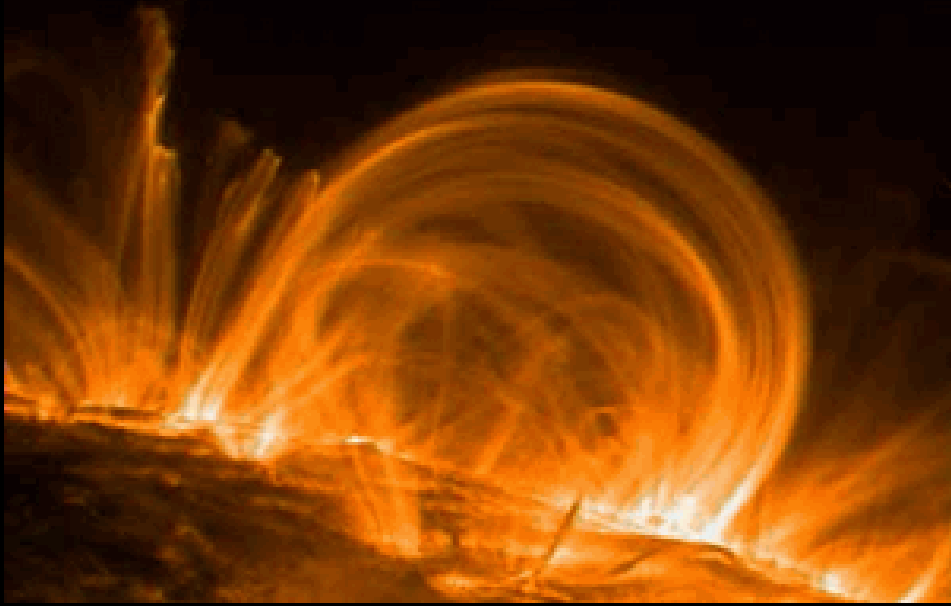
e.g. Priest, Solar Magneto-hydrodynamics



対流層から湧き上がる磁場
磁場の強さは比較的弱い
(**equi-partition**程度)

**自然界はフラックス
チューブを好む？**

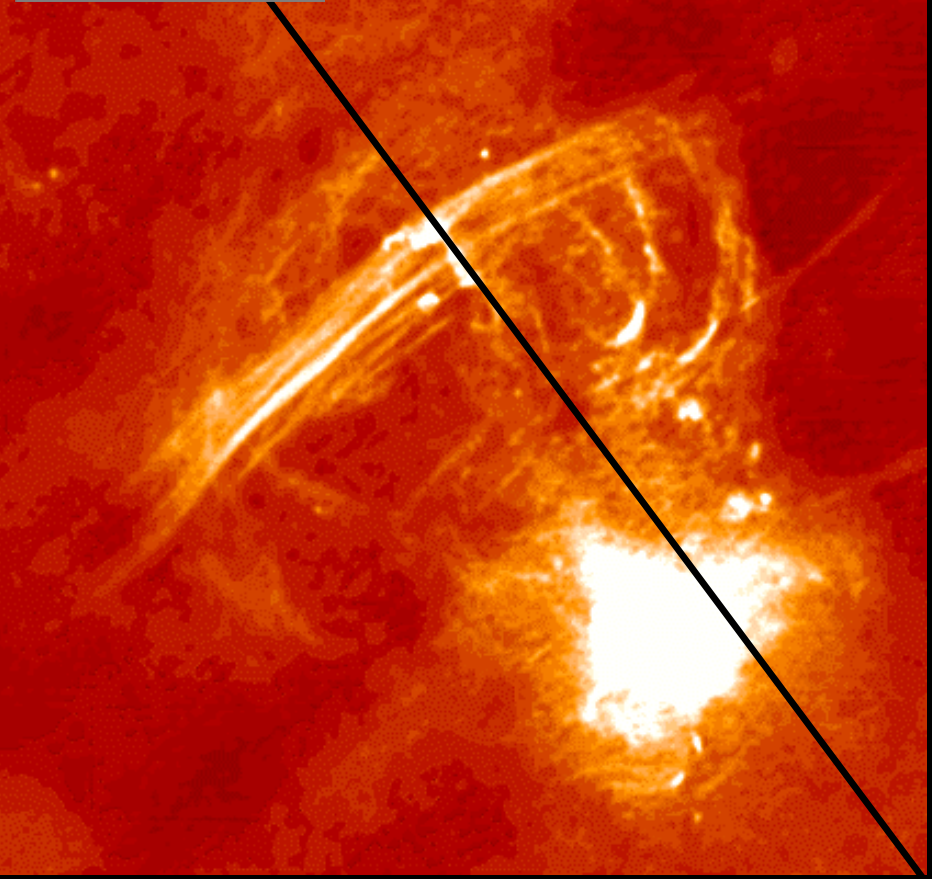
太陽



NASA TRACE

銀河中心

- 1.4 GHz
- VLA



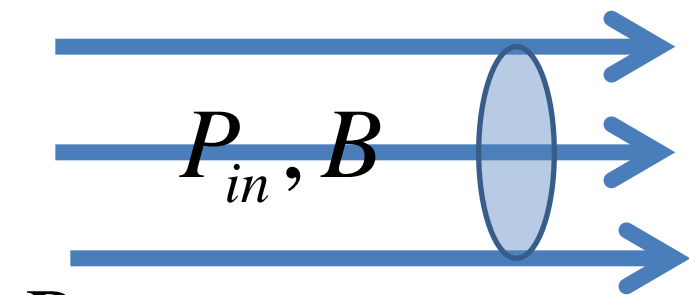
Courtesy of Sofue

熱力学的現象かもしれないのでこれから「自然界はフラックスチューブ」を好むとは言えない

Flux tubeと磁気圧の概念

$$P_{out} = P_{in} + \frac{B^2}{8\pi}$$

$$2n_{out}kT = 2n_{in}kT + \frac{B^2}{8\pi}$$



P_{out}

$\Phi = \text{constant}$

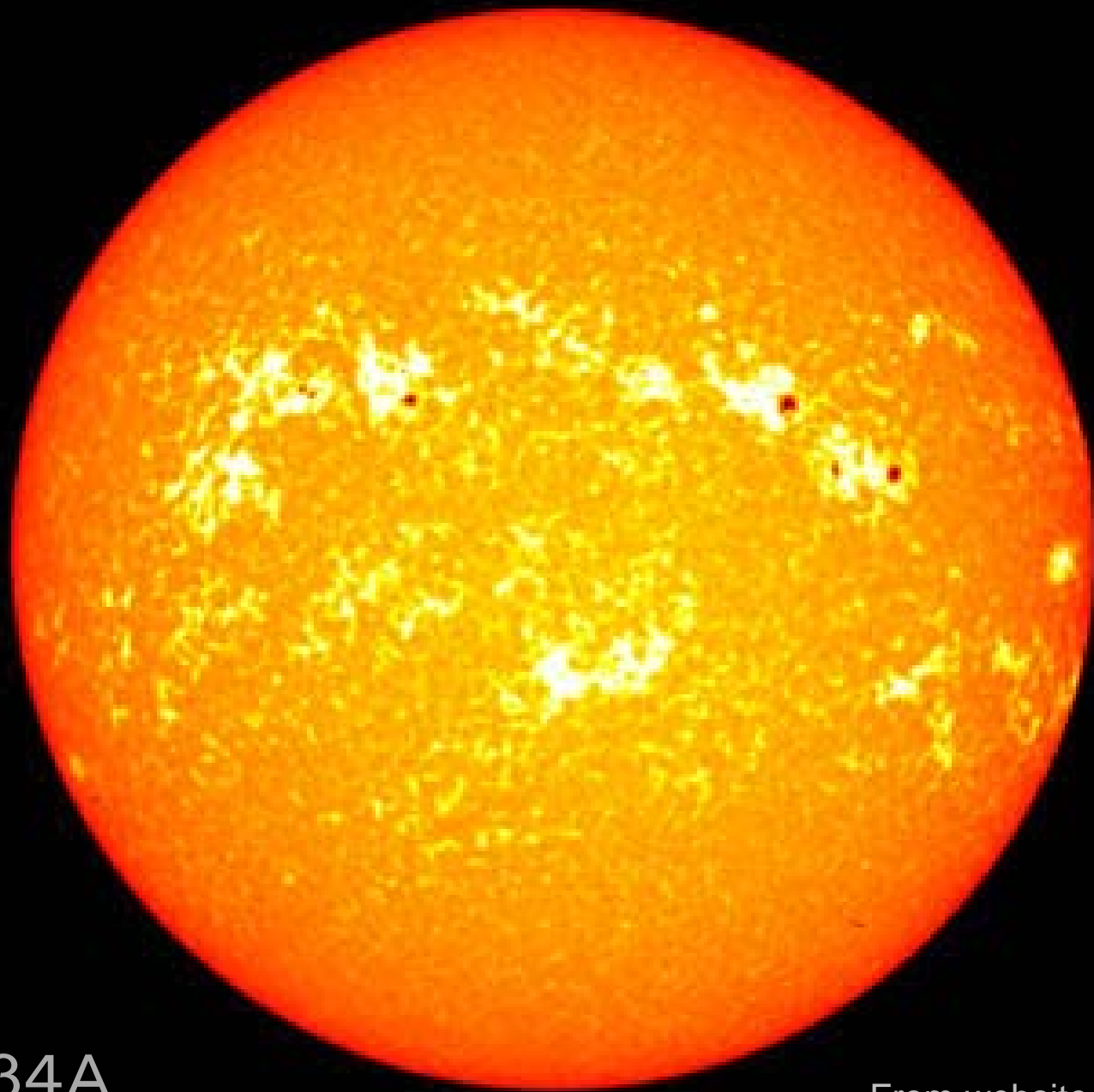
$$E = \frac{B^2}{8\pi} S = \frac{\Phi^2}{8\pi S}$$



注意:

ねじれてない磁力管のみ成り立つ

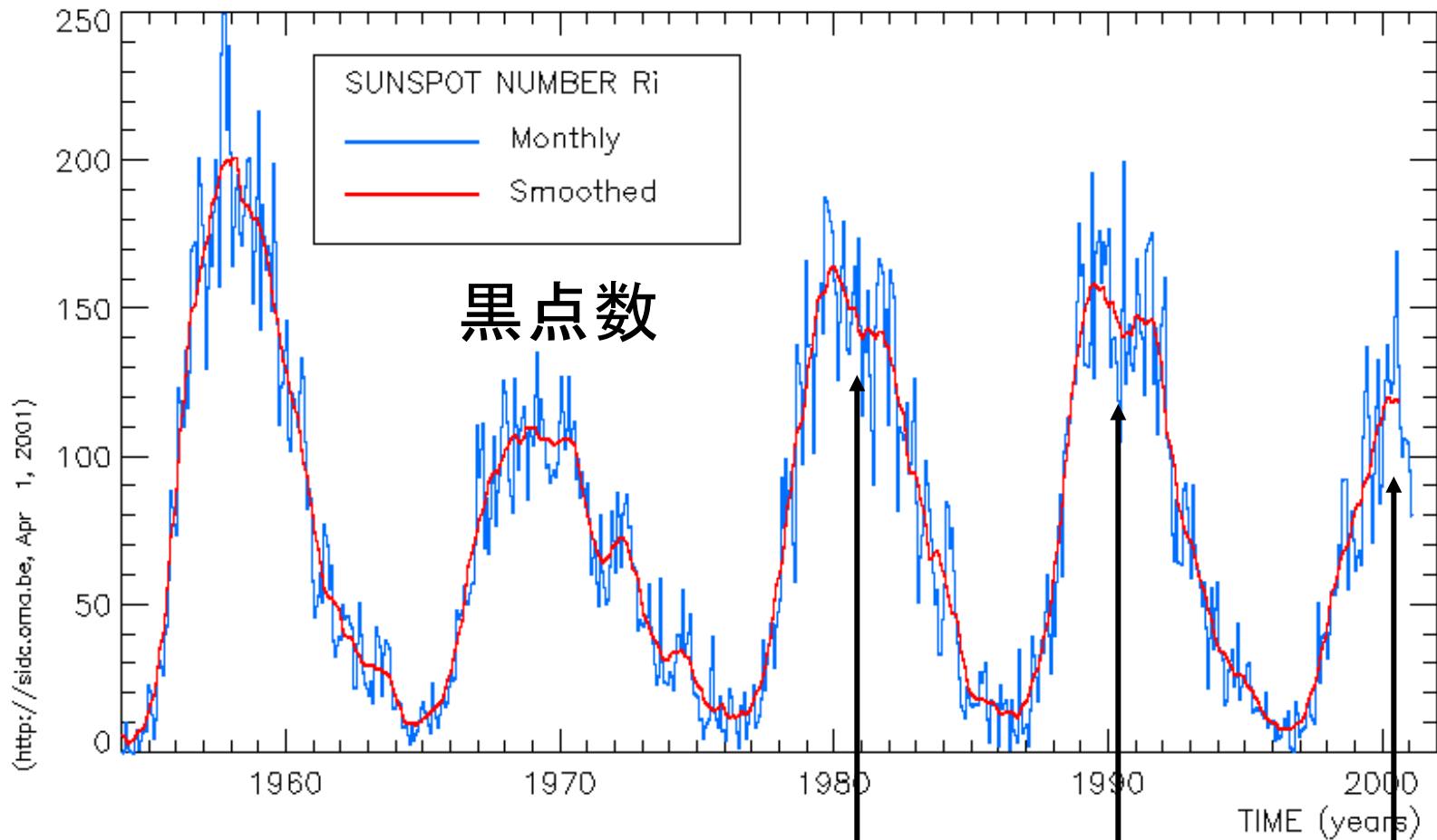
磁気フラックスは同じでもこちらの方がエネルギーが高い



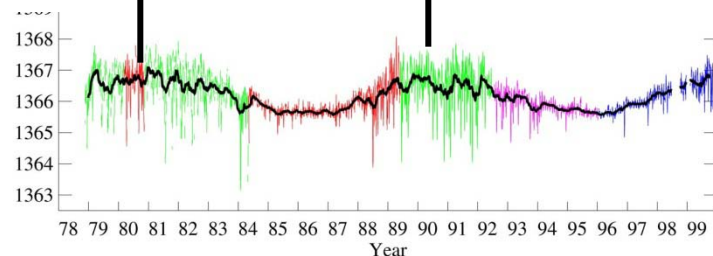
CaII 3934A

From website

太陽黒点がないと太陽は暗い



太陽定数

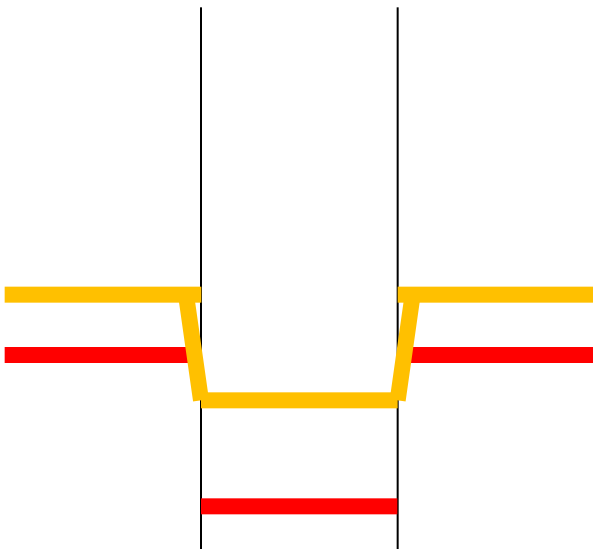


太陽定数の変動は偉大なる磁気圧の効果

黒点 暗い(対流の抑圧)
ファキュラ 明るい
合計 白斑が勝っている

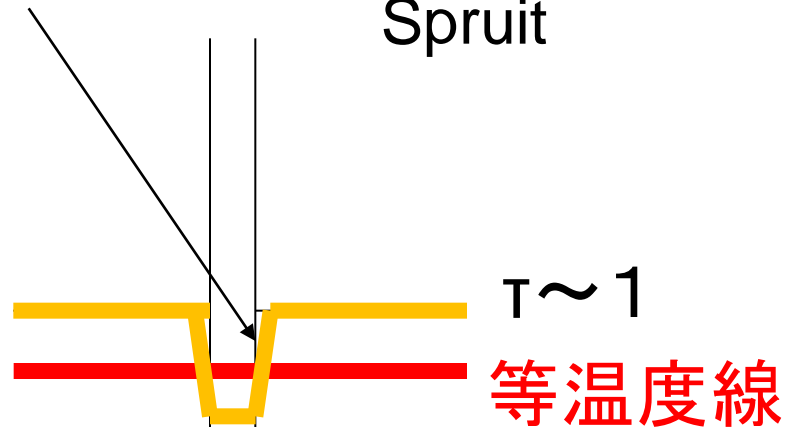
磁気圧の効果により
太陽表面はリアス式
海岸のよう⇒太陽の
表面積の増大

B



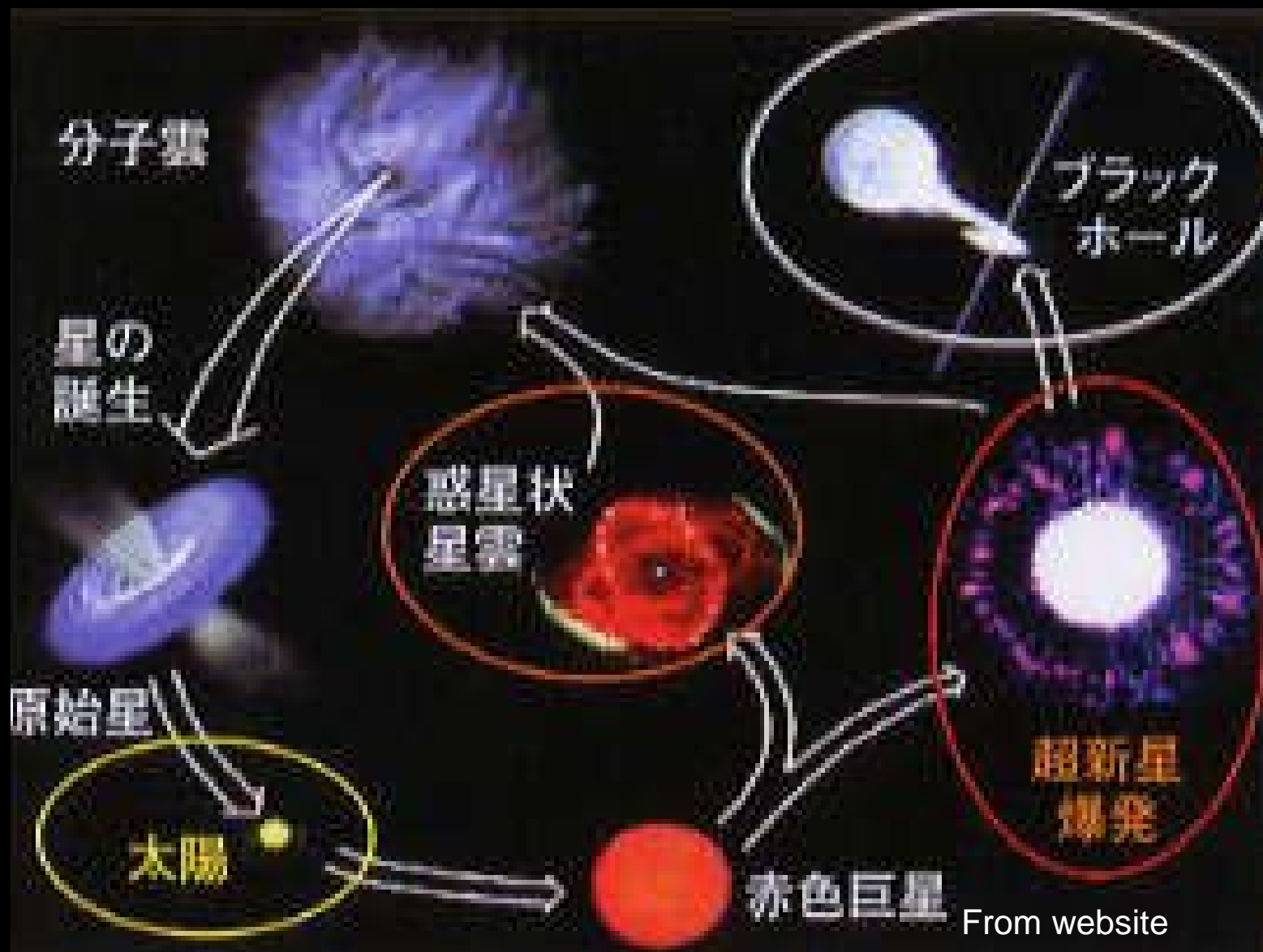
黒点の磁束管

B



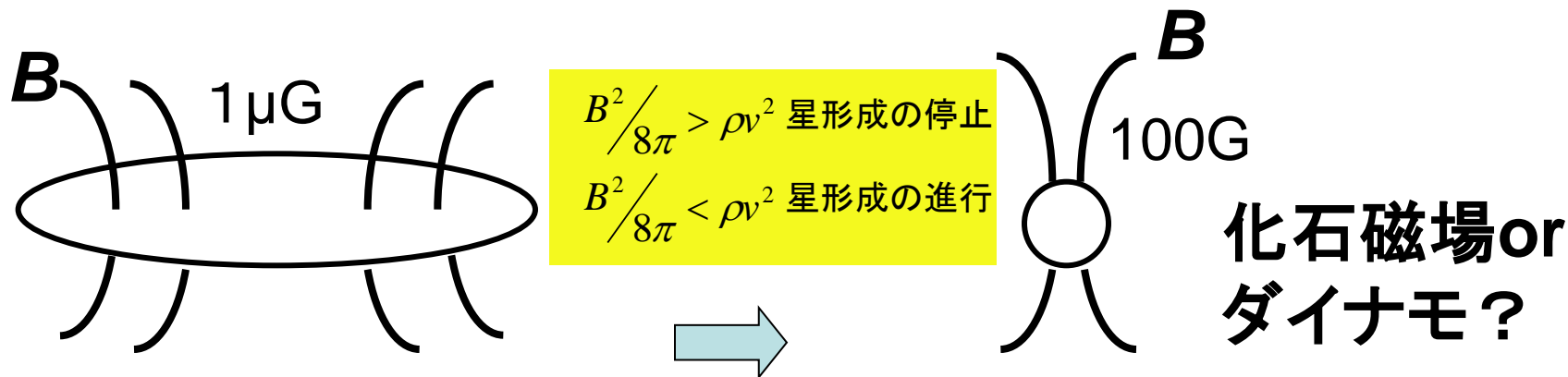
ファキュラの磁束管

星の進化と磁場



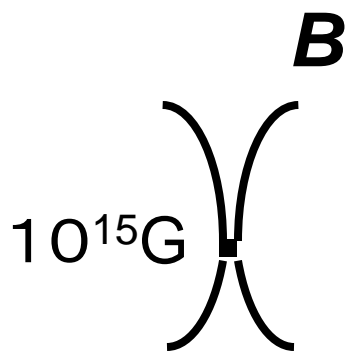
圧縮かダイナモか？

グローバルかローカルダイナモか？



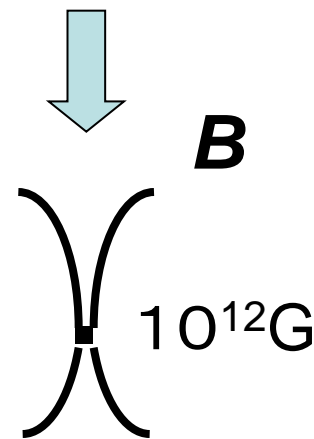
原始惑星円盤 半径~1000AU

星 半径~ 7×10^{10} cm



マグネター

ダイナモ？



中性子星

重要な無次元量

- Equi-partition field strength

$$\frac{B_{eq}^2}{8\pi} = \rho v^2$$

$B > B_{eq}$: super - equipartition field

$B < B_{eq}$: sub - equipartition field

- Plasma- β

$$\beta = \frac{2nkT(\text{プラズマ圧})}{\frac{B^2}{8\pi}(\text{磁気圧})}$$

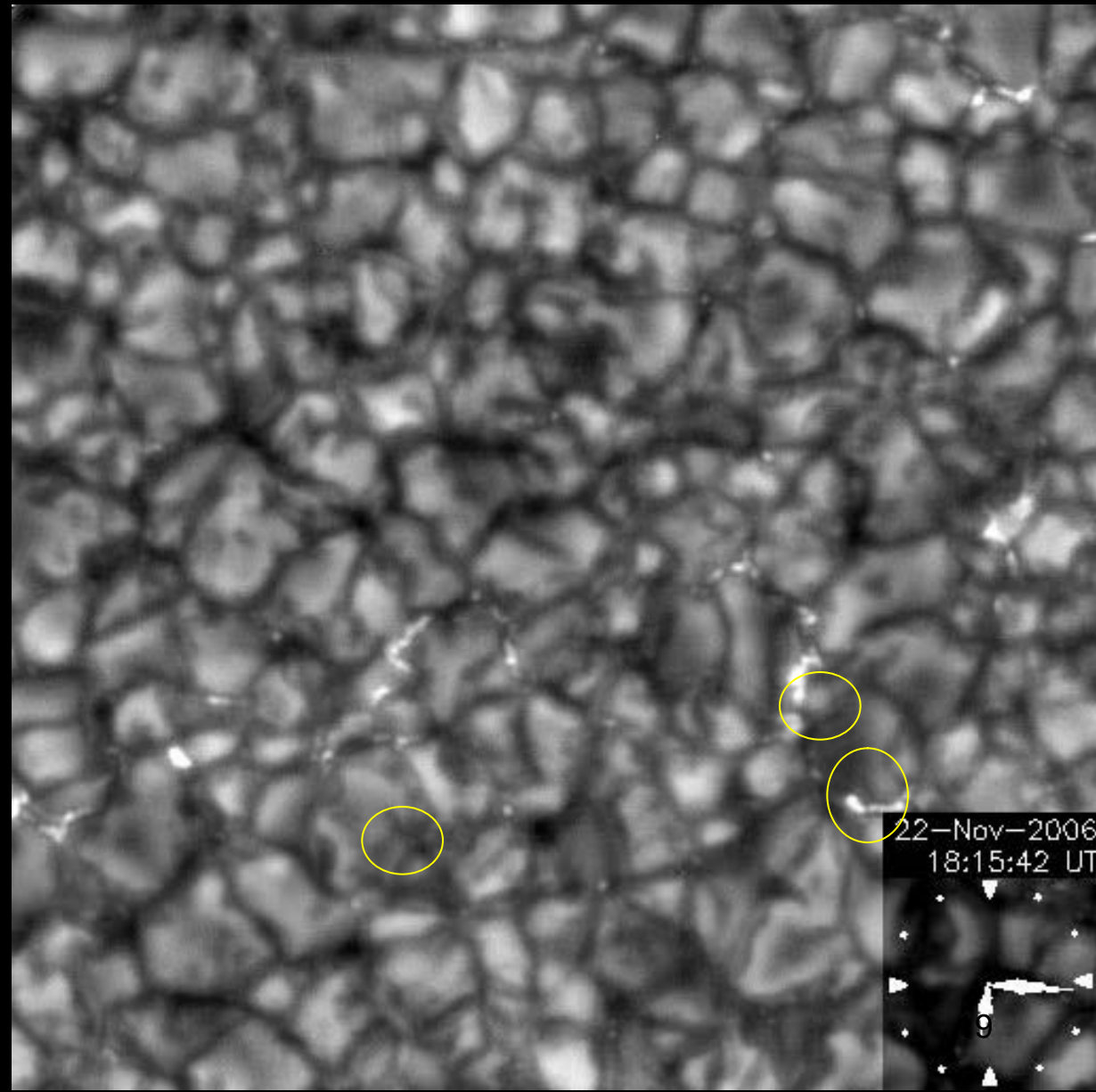
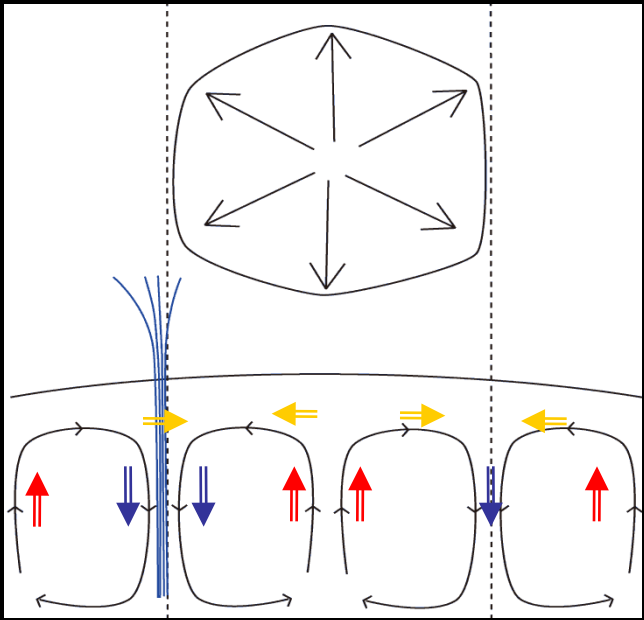
$\beta > 1$: high beta plasma (彩層)

$\beta < 1$: low beta plasma (コロナ)

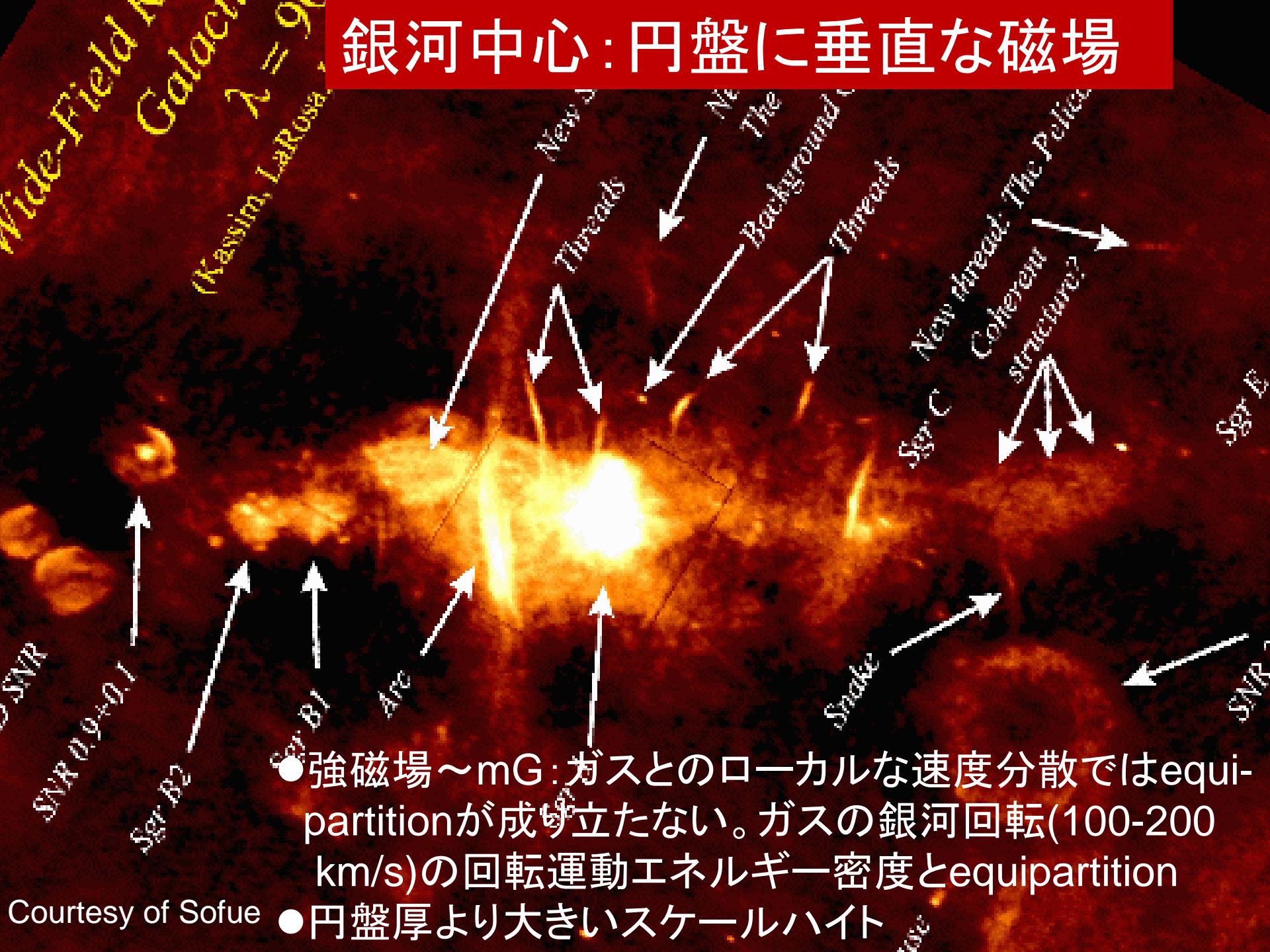
サイズ0.1-0.2秒角の基本磁束管

- **Equipartition-B** より強いkG磁場
- 主に対流セルの間に存在
- 太陽全面に存在

Courtesy of Okamoto



銀河中心：円盤に垂直な磁場



- 強磁場 ~ mG : ガスとのローカルな速度分散では equipartition が成り立たない。ガスの銀河回転 (100-200 km/s) の回転運動エネルギー密度と equipartition
- 円盤厚より大きいスケールハイト

宇宙における強すぎる磁場問題

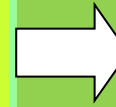
宇宙はどのようにしてsuper-equipartition磁場を作るのか?

- 初期宇宙 $10^{(-21)}$ G?

どのようなダイナモも磁場をequipartition field B_e まで増幅できるだろう:

$$\frac{B_e^2}{8\pi} \approx \frac{1}{2} \rho v^2$$

運動
エネルギー



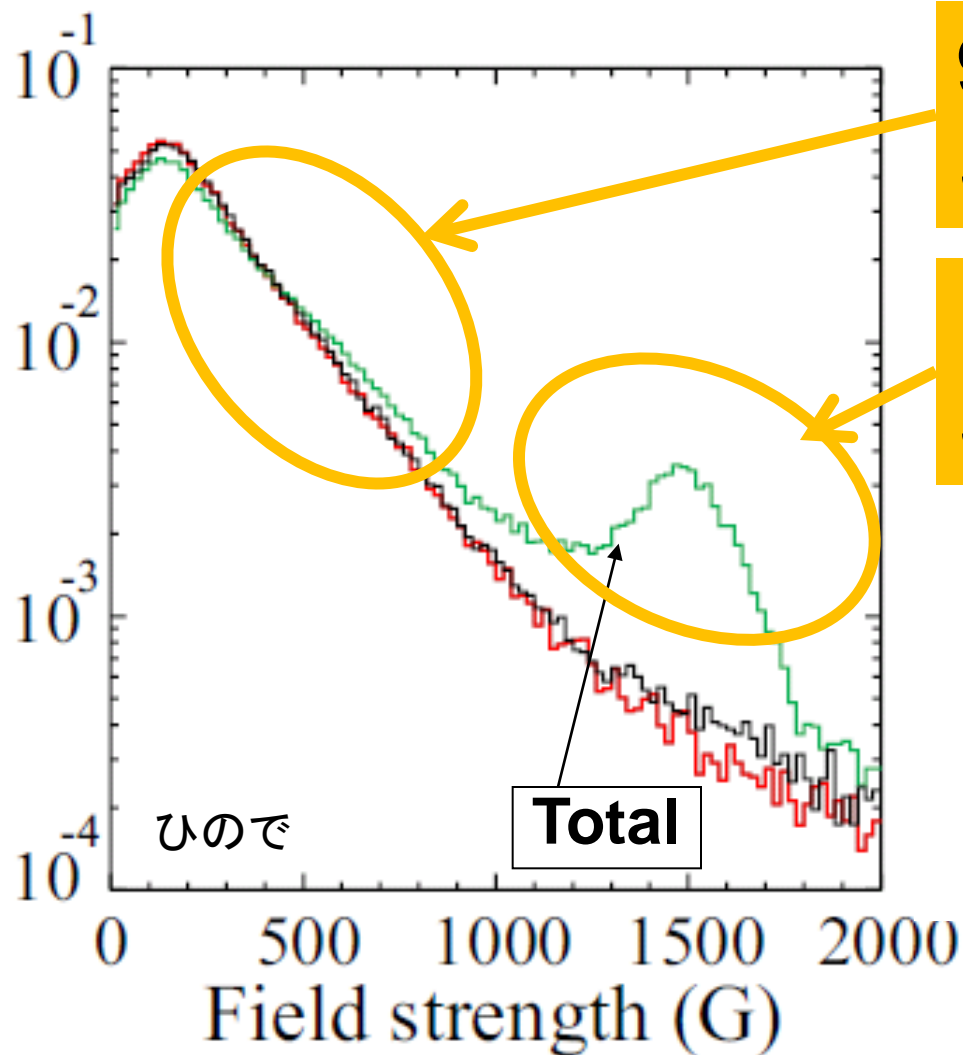
磁場
エネルギー

さらに、equipartition field B_e を超える磁場が存在

例 Sunspot: equipartition field=500G, $B=2-3$ kG

Tachocline: equipartition field=1kG, $B=100$ kG

静穏太陽の磁場強度の分布関数



90%が500G以下
Sub-equipartition

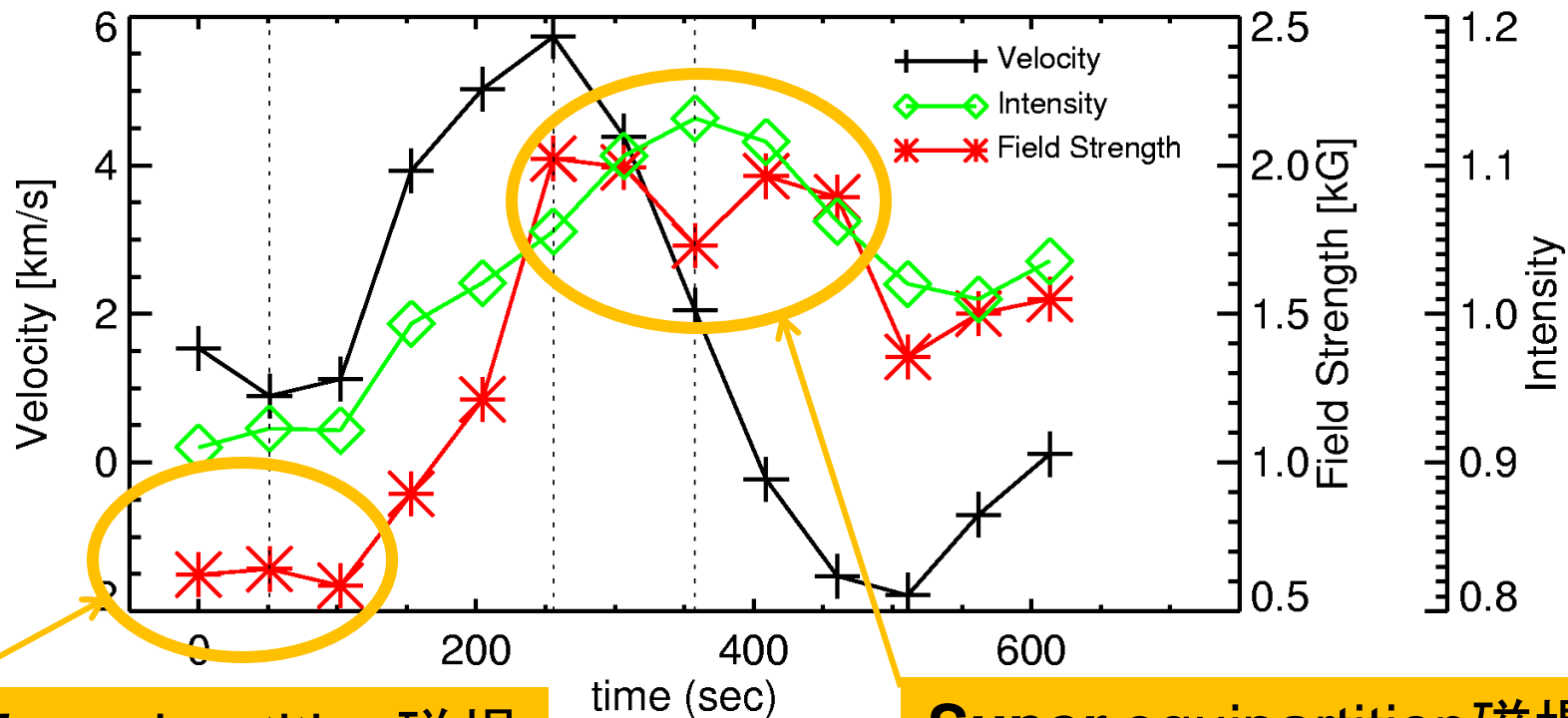
1.5kG近傍にピーク
Super-equipartition

Sub-equipartition
とSuper-equipartition
2つの成分あり

sub equipartition 磁場から super equipartition 磁場が生成

Nagata+08

パーカー予言：熱不安定性による下降流に伴い磁場の圧縮が発生(ダイナモではない)をひのひで確認



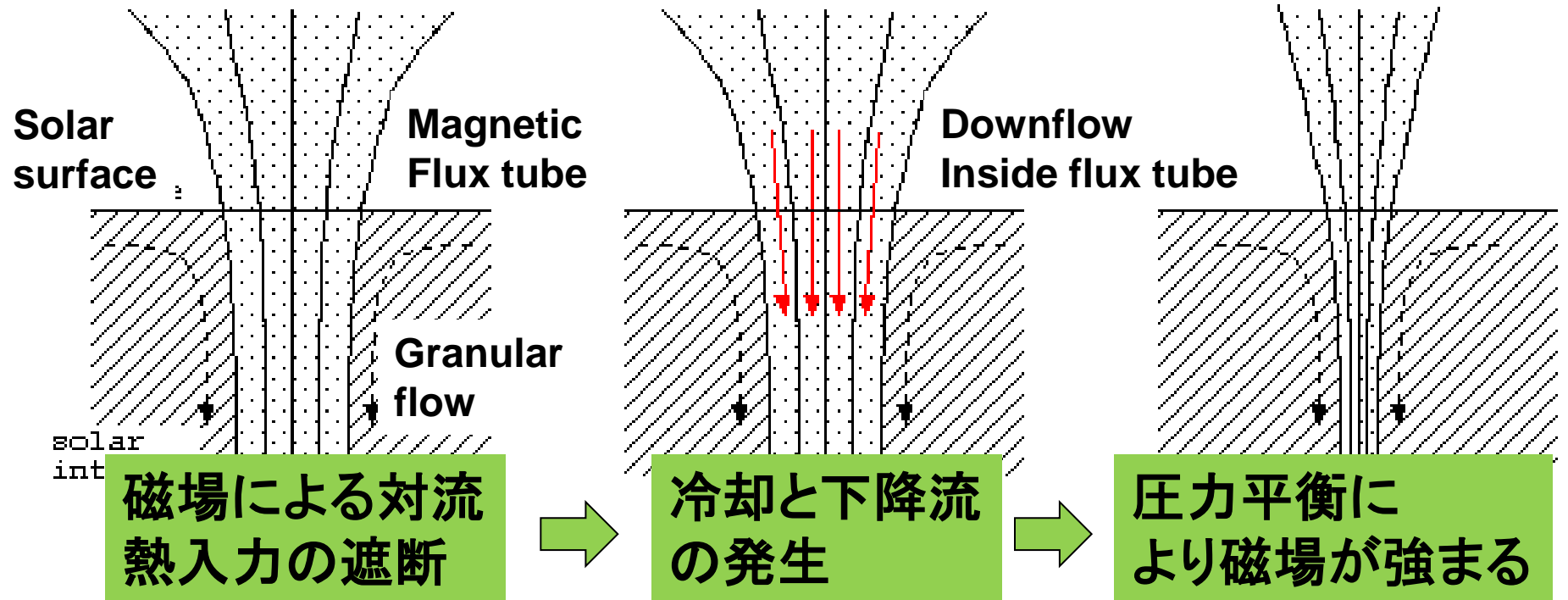
Sub-equipartition 磁場
500G

200秒

Super-equipartition 磁場
2000G

対流と弱い磁場があれば強い磁場ができる という割と普遍的なプロセス

Parker (1978); Hasan (1985), Hasan et al. (2003), Bunte, Hasan, Kalkofen, (1983)



$$\frac{B_e^2}{8\pi} \approx \frac{1}{2} \rho v^2$$

$$B \approx \sqrt{4\pi\rho v} \approx 400\text{G}$$

Sub-equipartition磁場

$$P_i + \frac{B^2}{8\pi} = P_e$$

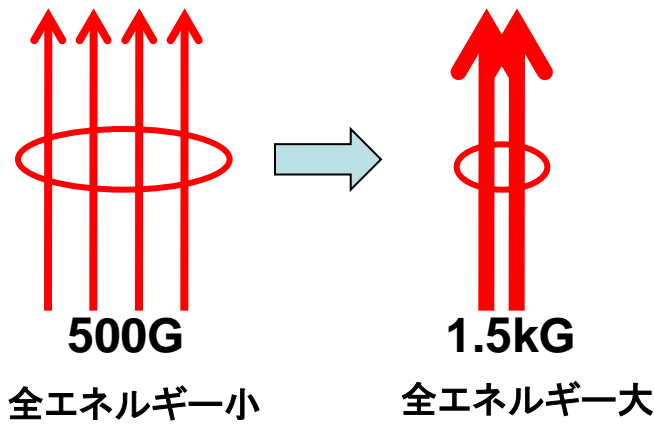
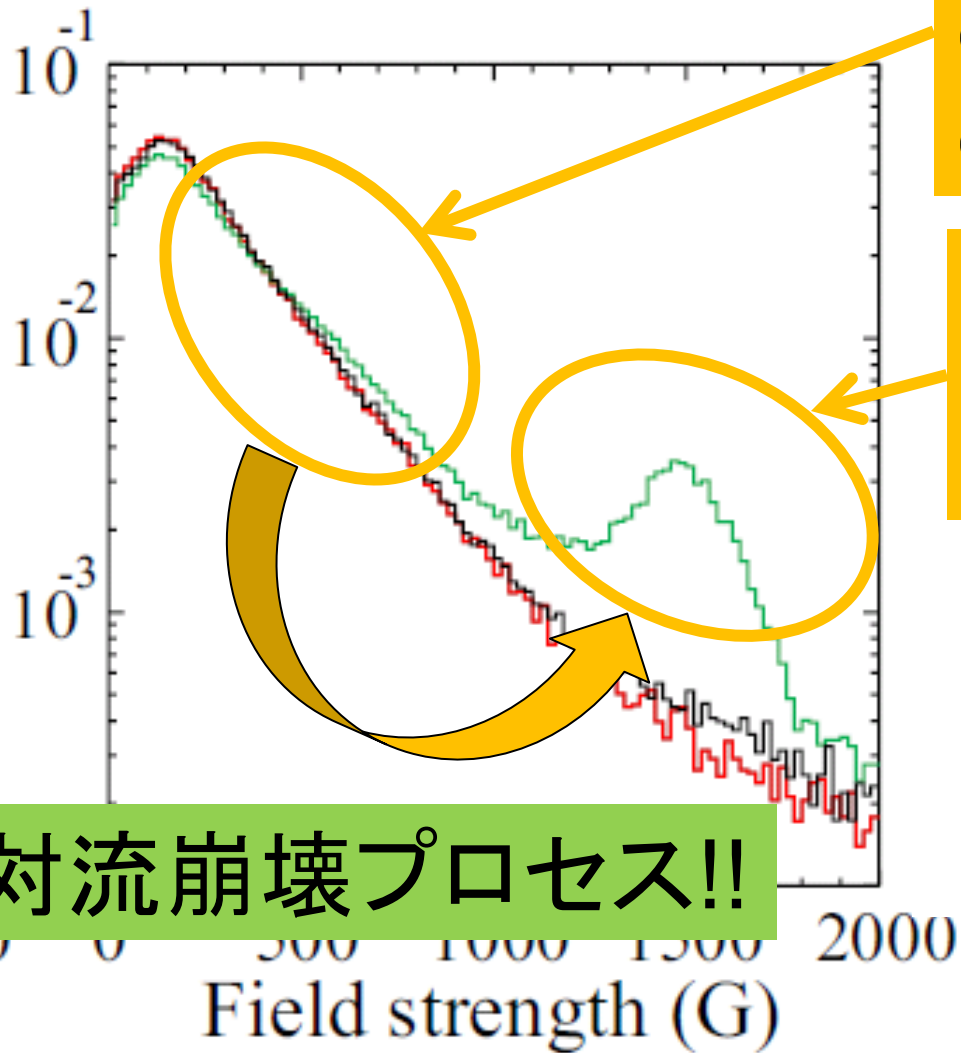
$$B \approx 1 - 2\text{kG}$$

Super-equipartition磁場

対流崩壊が1.5kGの磁束管を生成 (これはダイナモでない)

500G以下の90%
の生まれたばかり?
の成分 (石川講演参照)

1.5kGのピークは
熱的不安定性により
生成 (ダイナモでない)

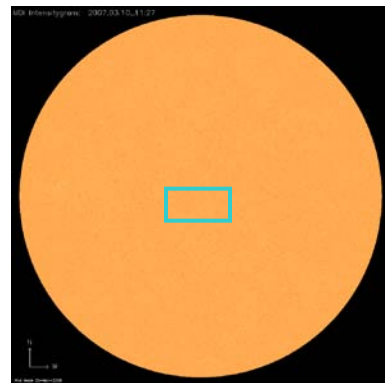


対流崩壊プロセス!!

ひので: 対流駆動水平磁場の発見

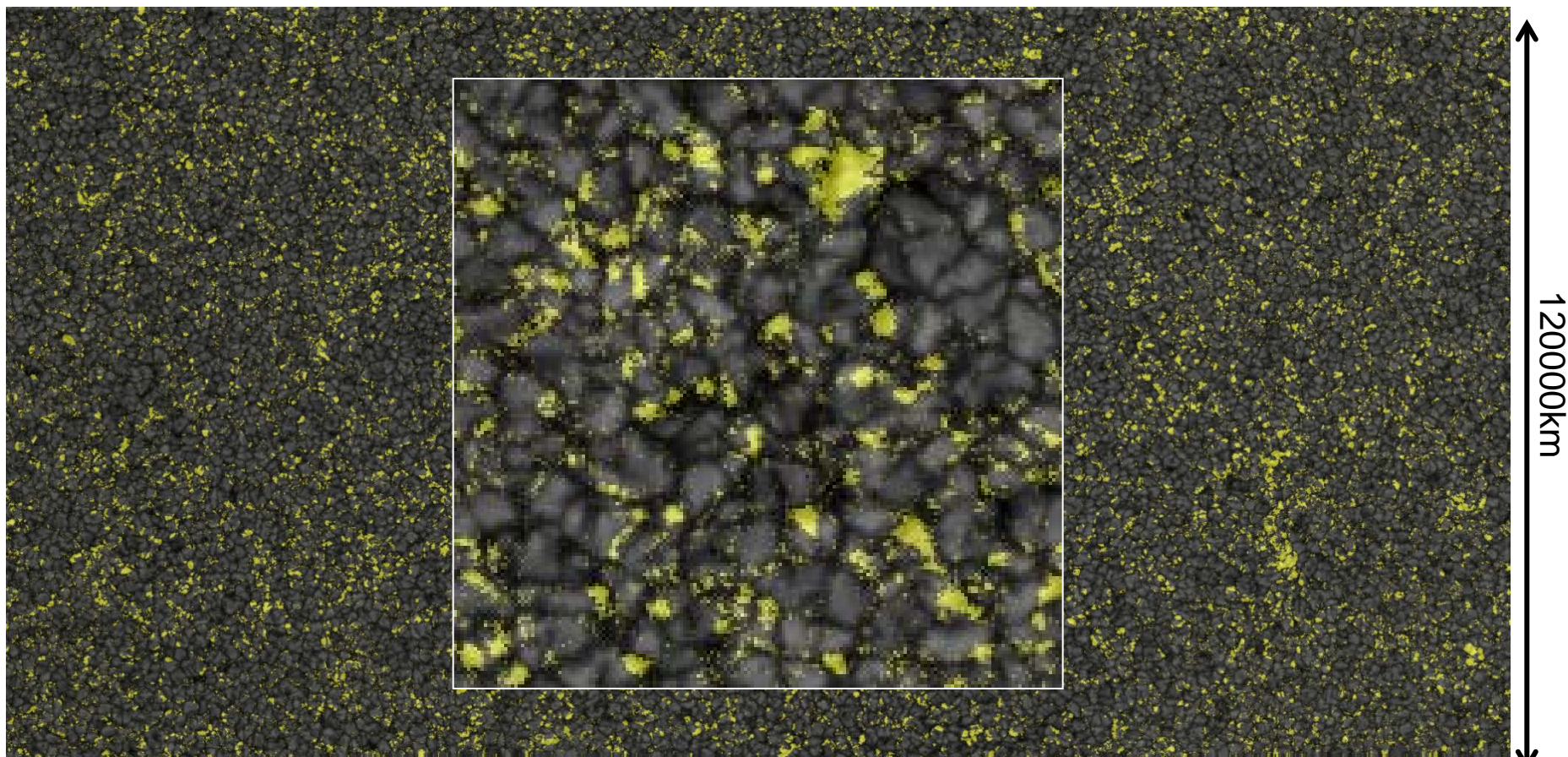
宇宙に乱対流があれば磁場が存在。。

(明日の石川の講演)



ひので

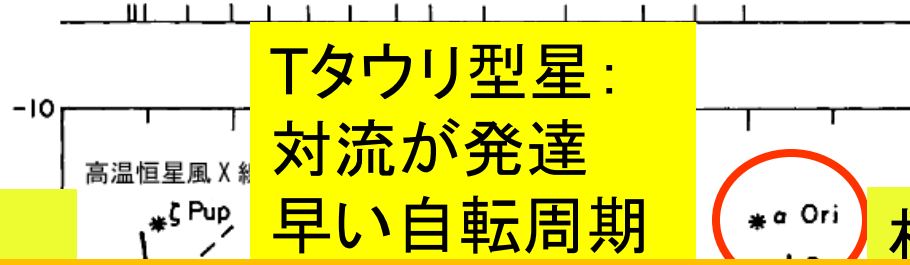
直線偏光マップ(連続光マップに重ねて表示)



250000km

Courtesy of Ishikawa

差動回転(大局的ダイナモ)と 対流(乱流ダイナモ)どちらが大事? 自明でない。。

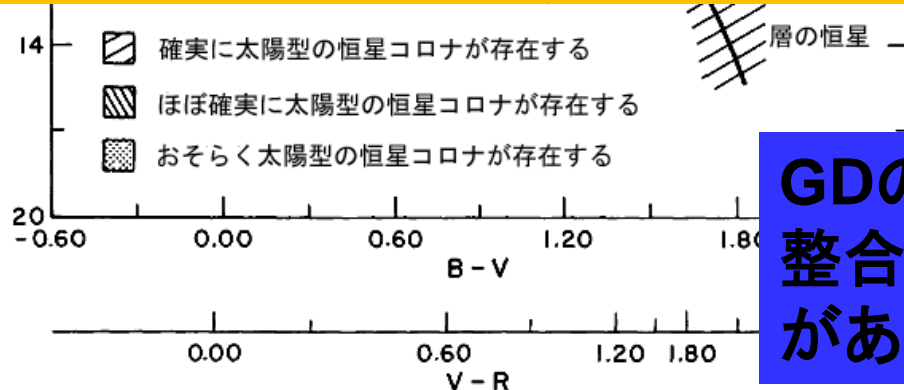


早期型星:
対流
コロナ

林トラック・原始星:
差動
回転

対流 {

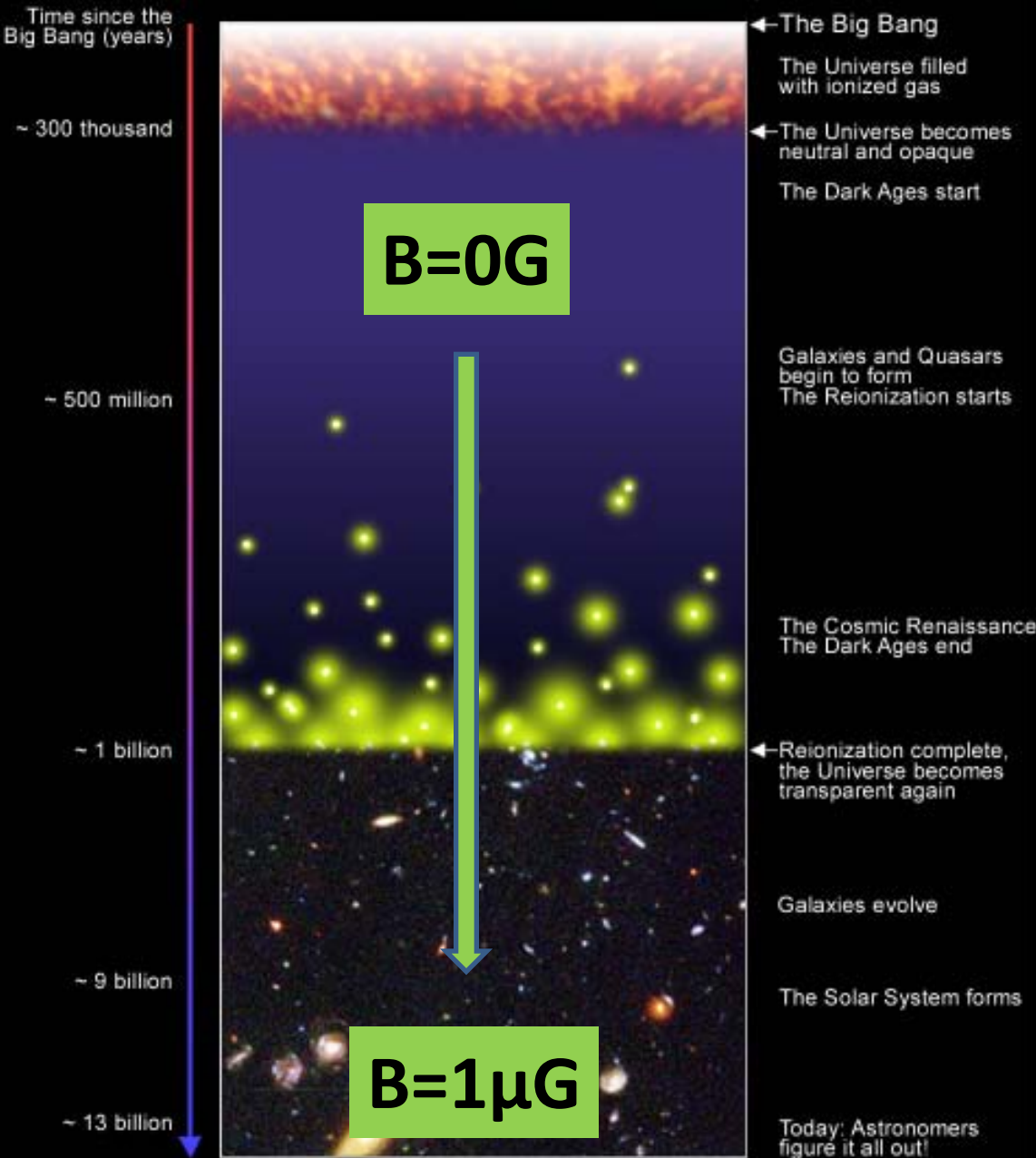
- ⇒ 乱流ダイナモ
- ⇒ + 回転 ⇒ Reynolds応力
- ⇒ 差動回転 ⇒ 大局的ダイナモ



GDの標準的考え方と
整合しない? でもLD
がある。。

What is the Reionization Era?

A Schematic Outline of the Cosmic History



S.G. Djorgovski et al. & Digital Media Center, Caltech

宇宙は電離しておらず
電流なしのため磁場
ゼロ

第1世代銀河の形成
と宇宙の再電離

From website

みなれない基礎方程式?
同じ方程式と初期条件⇒同じ解

$$E + \frac{v \times B}{c} = -\frac{\nabla p_e}{en} \quad (j=0); \text{運動方程式}$$

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) - c \frac{\nabla n \times \nabla p_e}{n^2 e}; \text{誘導方程式}$$

$$\omega = \nabla \times v; \text{渦度の定義}$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} = \nabla \times (v \times \omega) - c \frac{\nabla \rho \times \nabla p}{\rho^2 e}; \text{渦度の誘導方程式}$$

$$\omega \frac{Mc}{e} = B; \text{式が同じなら解も同じ}$$

$$t=0; B = \omega = 0, B(t) \propto \omega(t)$$

What is the Reionization Era?

A Schematic Outline of the Cosmic History



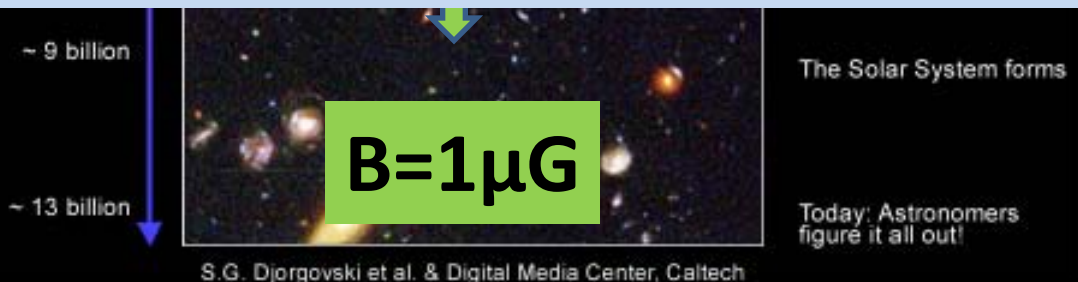
proto-galaxyの乱流渦によるゼロからの磁場形成
 $B=10^{-21}\text{G}$ (Biermann Battery)



「ひので」水平磁場機構によるローカルダイナモ
 $B=B_{eq}=10^{-6}\text{G}$



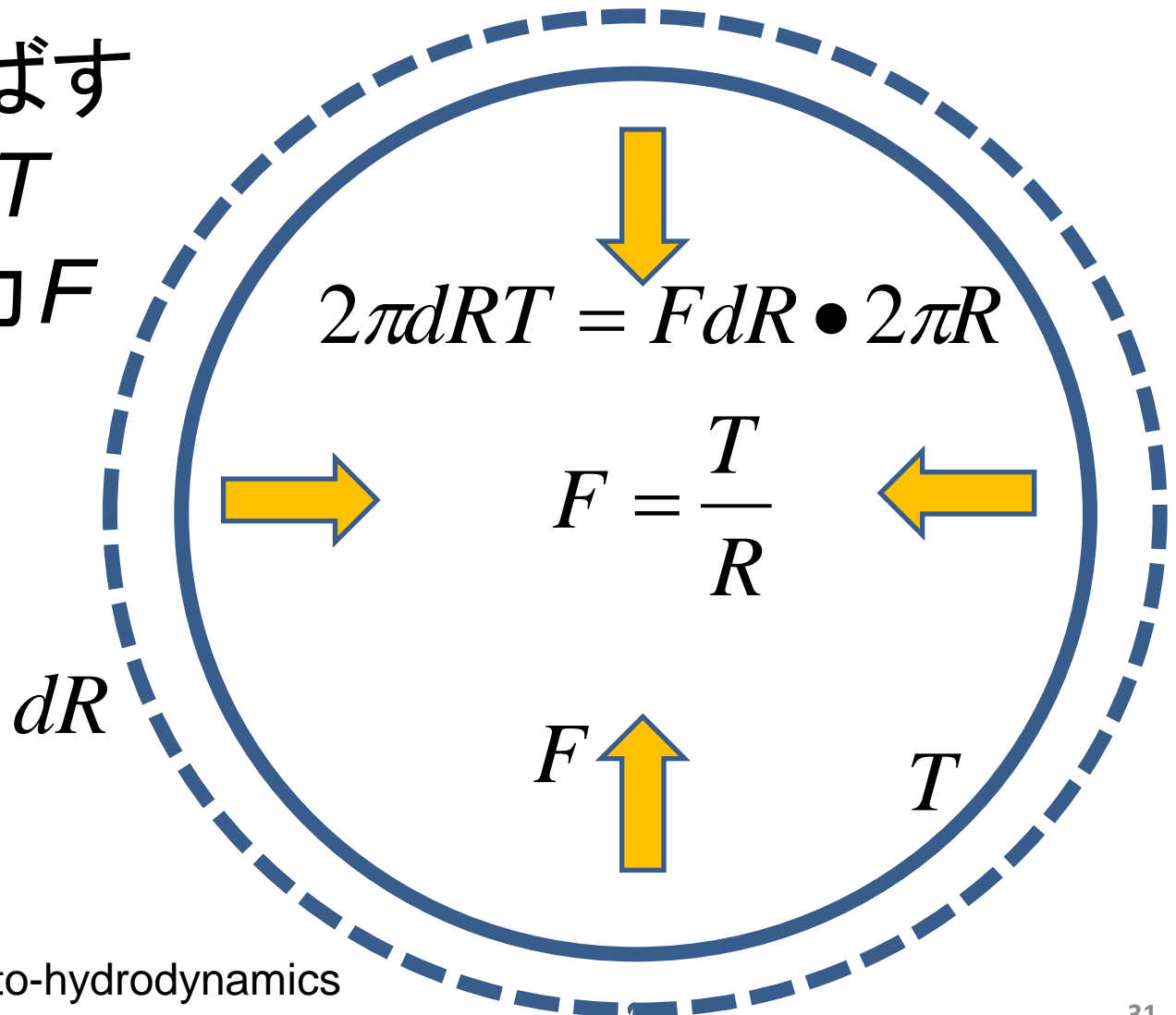
グローバル銀河ダイナモ
 $B > 10^{-6}\text{G}$

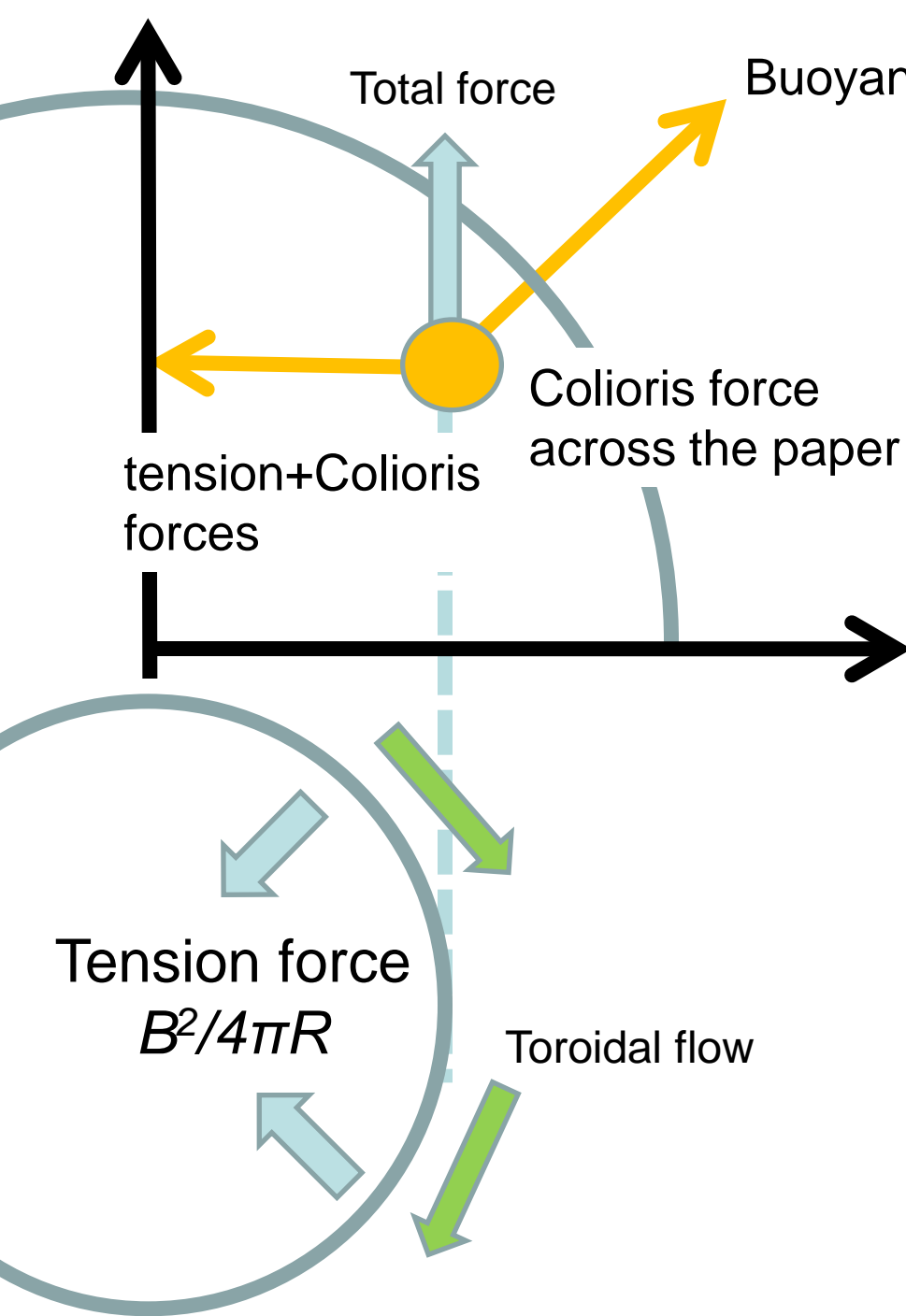


磁気張力

磁力線ゴム紐と思えば良い

ゴム紐を伸ばす
磁場の張力 T
内側に働く力 F





上昇するFlux tube に働く力

- ・浮力
- ・コリオリカ
- ・磁気張力

その合計ベクトルは
高緯度方向となる

Magnetic flux tubes and the solar dynamo - storage, instability and eruption of magnetic flux, 1996, Schuessler, NATO Advanced Study Institute on Solar and Astrophysical Magnetohydrodynamic Flows, 17

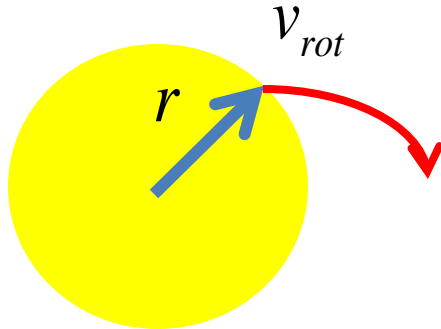
むかしむかし、太陽の自転周期～1日
の頃、極域には大黒点があったかも？



こんな感じでは？

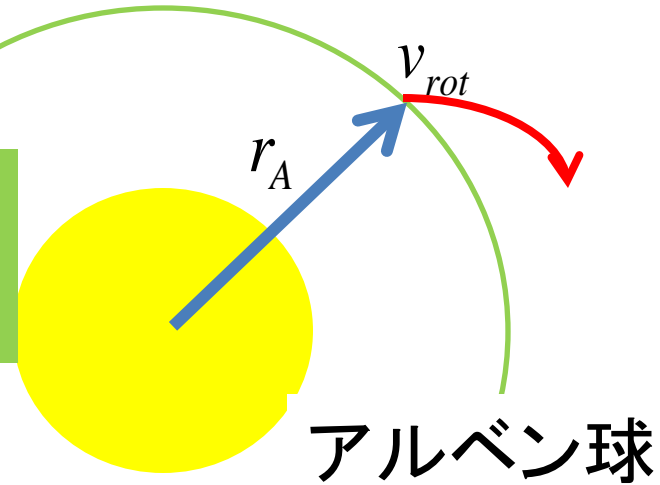
磁場ブレーキ 星の回転減速に大きく寄与

磁場のない星



磁場のある星

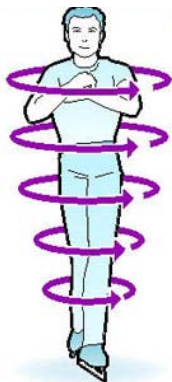
磁場のエネルギーで星の実効半径が大きくなる



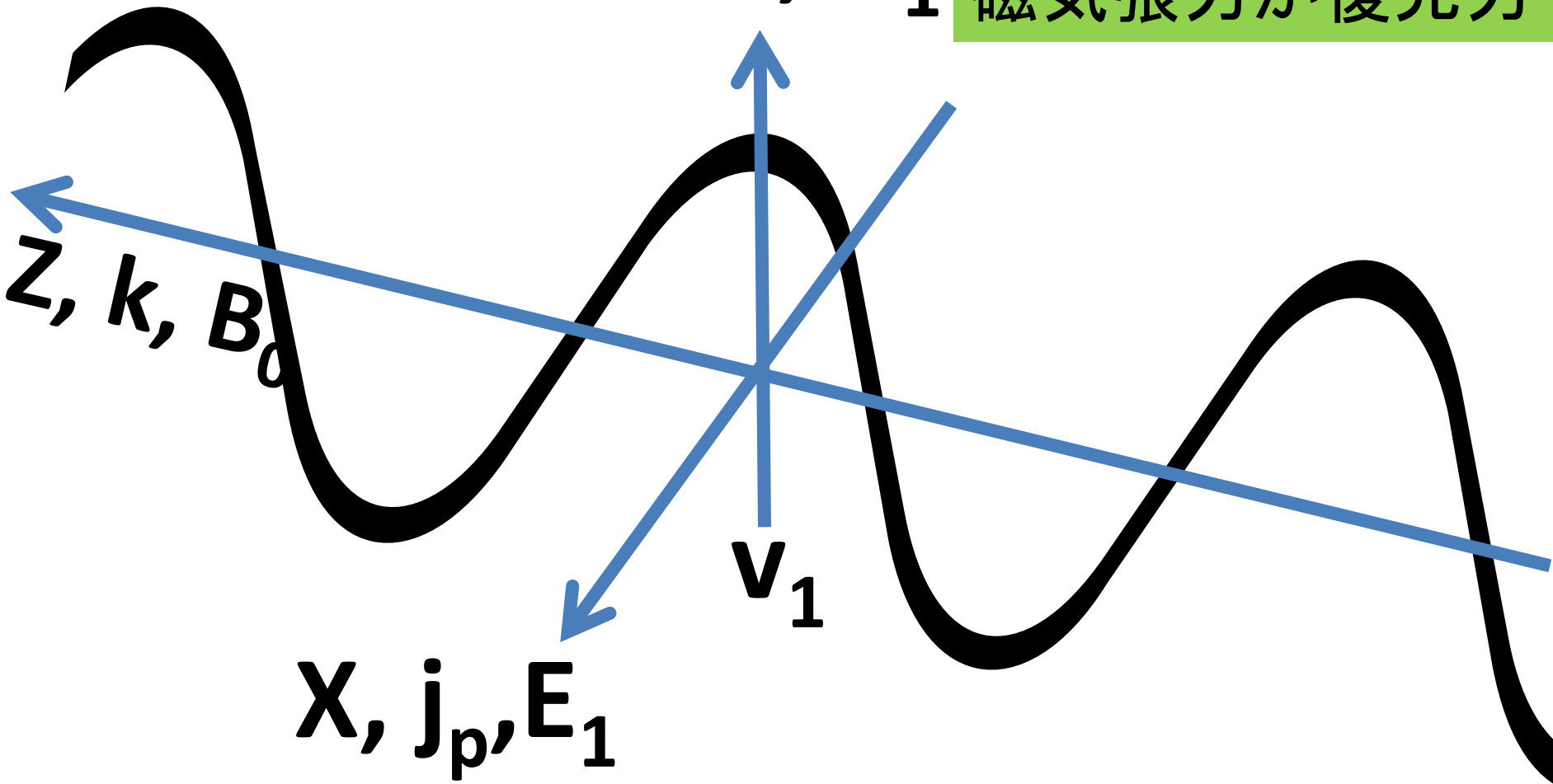
太陽風による角運動量ロス
星の自転に影響を与える
大きさにはならない

太陽風による角運動量
ロスが大きくなる

The Angular momentum
of solar wind, Weber, Davis
ApJ, 1967, 148, 217



アルベン波
磁気張力が復元力

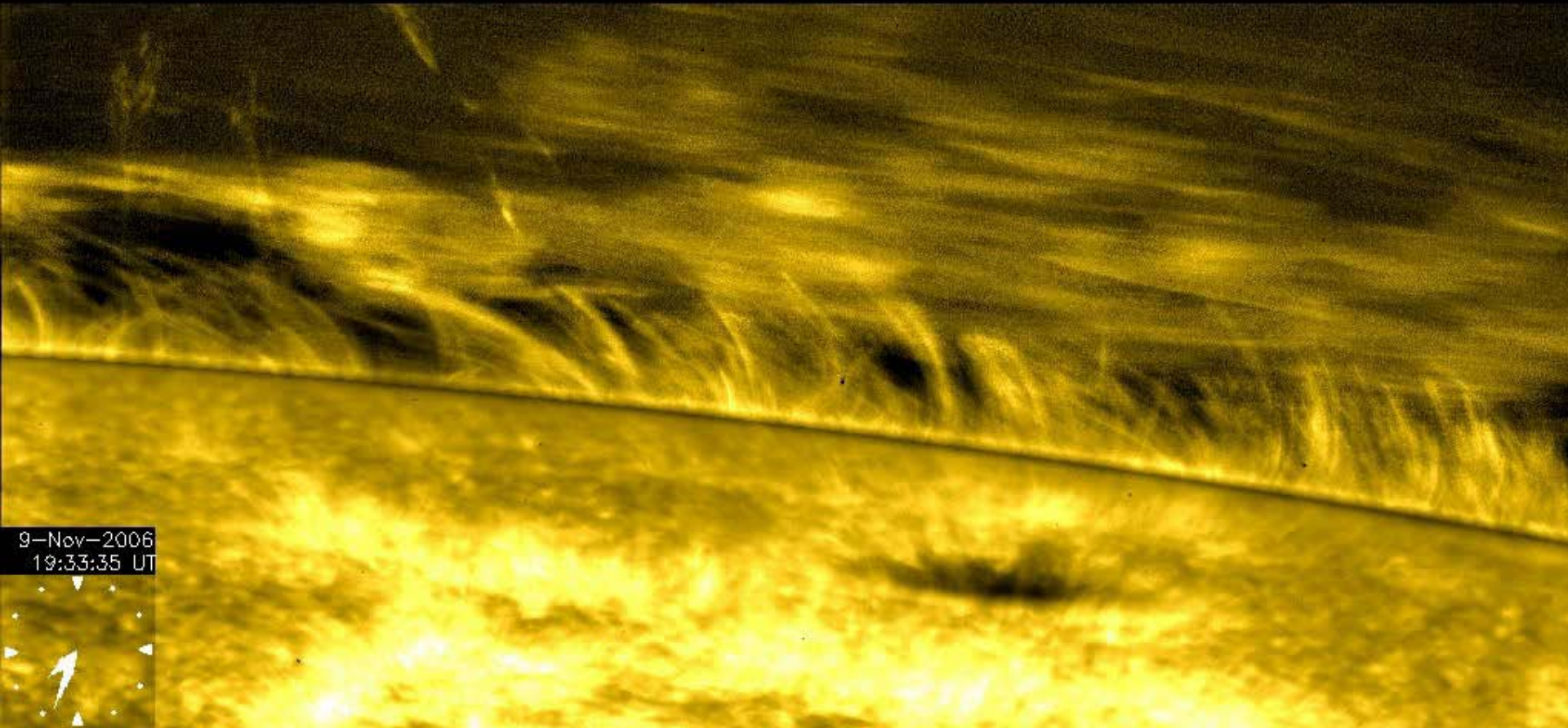


$$\exp\{i(kz - \omega t)\}$$

君はアルベン波動が見えるか？

Okamoto+08 in *Science* journal

ひので

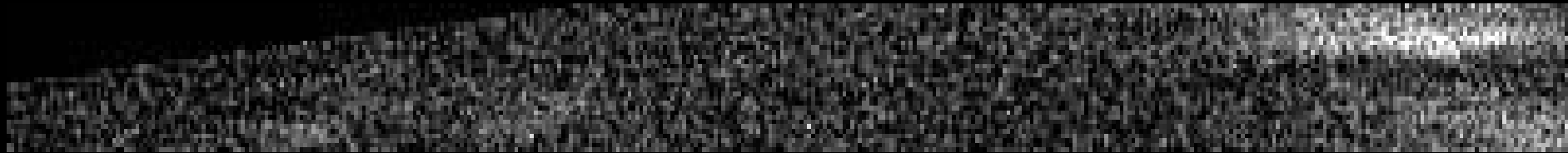


Courtesy of Okamoto

これなら見えるでしょう。。。

プロミネンス(コロナ)中の 直線偏波した横波(アルベン波)

ひので



しかし、
進行波か定在波かは分からない

地球物理の「その場観測」のように 太陽表面の波動を観測する！

波動の検出に必要な観測量:

$$\delta I_{\text{Intensity}}(t)$$

$$\delta B_{//}(t), \delta B_{\perp}(t)$$

$$\delta V_{\text{LOS}}(t)$$

center-to-limb 変化



波動のモード

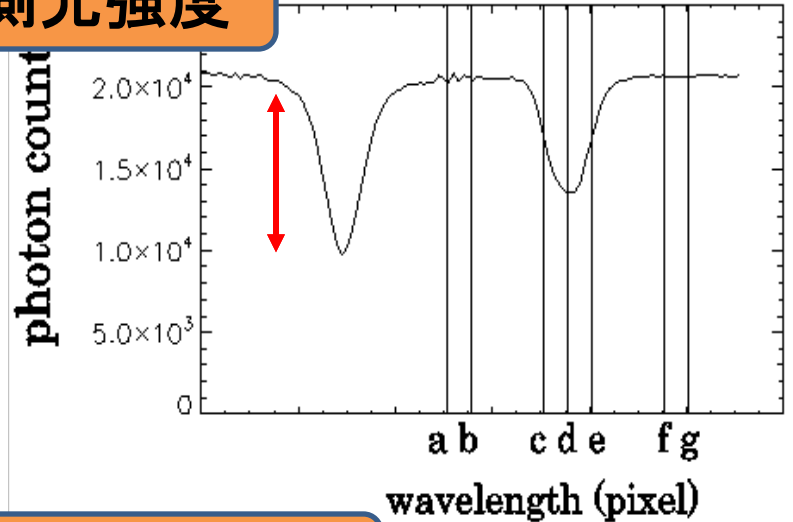
波の進行方向

進行波か定在波か？

磁束管のサイスマロジー

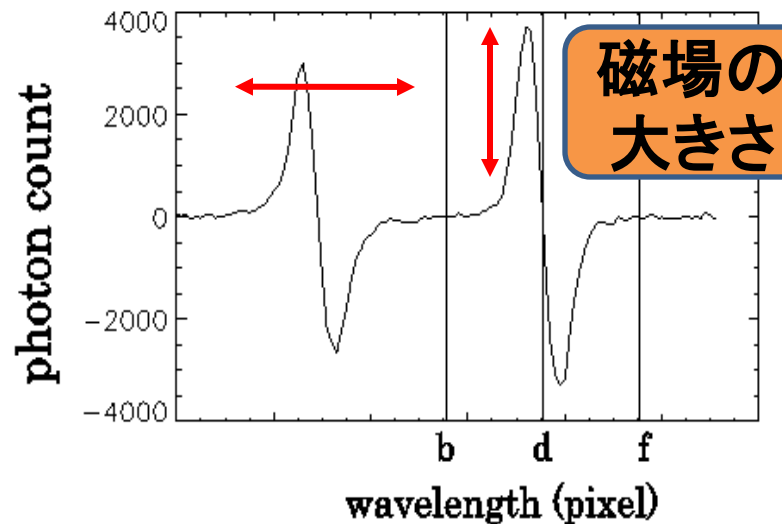
測光強度

Stokes-I



ドップラー速度

Stokes-V

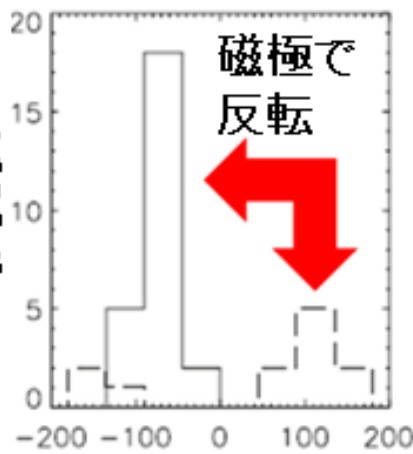


ひので

ひので: 磁場・速度場の位相関係からアルベン波を同定 @光球 Fujimura&Tsuneta09

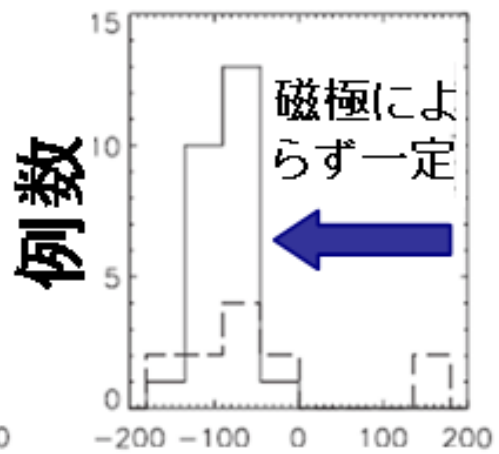
例数

磁場-速度場



位相差(度)

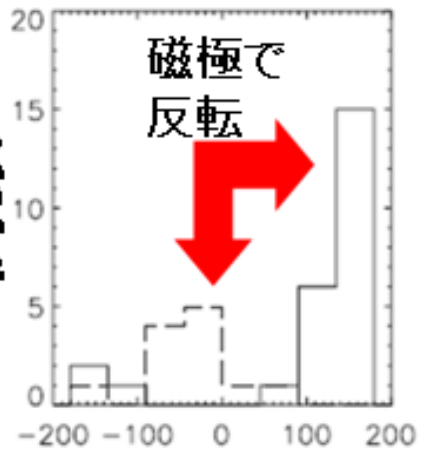
速度場-輻射強度



位相差(度)

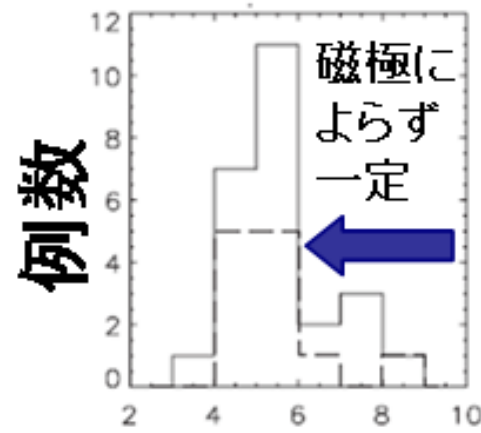
例数

輻射強度-磁場



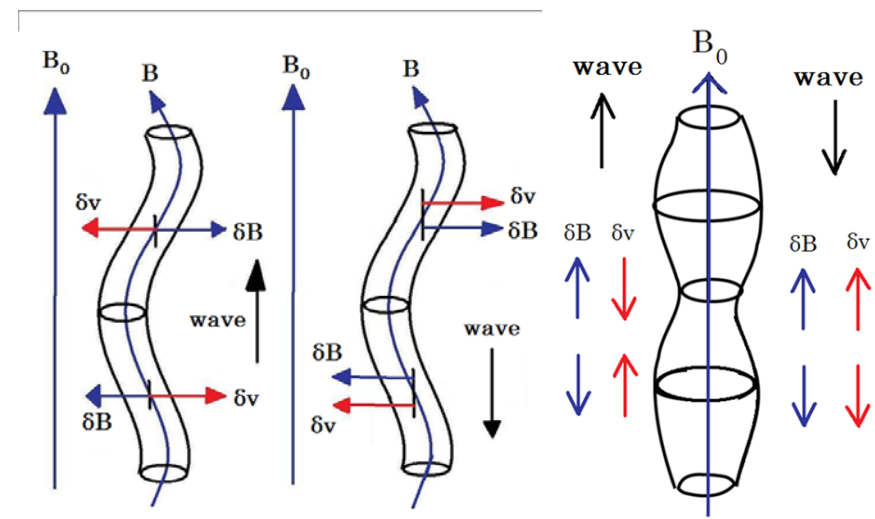
位相差(度)

共通周期



周期(分)

横波はほとんど反射していることが判明



キンク波

ソーセージ波

実線: 正極磁場 破線: 負極磁場

コロナに漏れ出るエネルギーフラックス

上向きフラックスー下向きフラックスは、 $\cos(\phi_B - \phi_v)$ に比例

$$\Delta F = -\frac{fB}{4\pi} \delta B \delta v \cos(\phi_B - \phi_v)$$

f : 平均フィリングファクター

B_0 : 磁場強度、

$\delta B / \delta v$: rms横磁場・速度場の揺らぎ

一例として ($dI/I=0.3\%$)

$f=0.73$, $B_0=1.7 \times 10^3$ (G), $\delta B=21$ (G),

$\delta v=0.059$ (km/s), $\phi_B - \phi_v = -96^\circ$

を代入すると

$\Delta F = 2.7 \times 10^6$ (erg/s/cm²)

～数%～10%程度がリーク

電磁流体力学で最も重要な式

比抵抗

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \underbrace{\nabla \times \mathbf{V} \times \mathbf{B}}_{\text{ダイナモ項}} + \frac{c^2 \eta}{4\pi} \Delta \mathbf{B}$$

散逸項

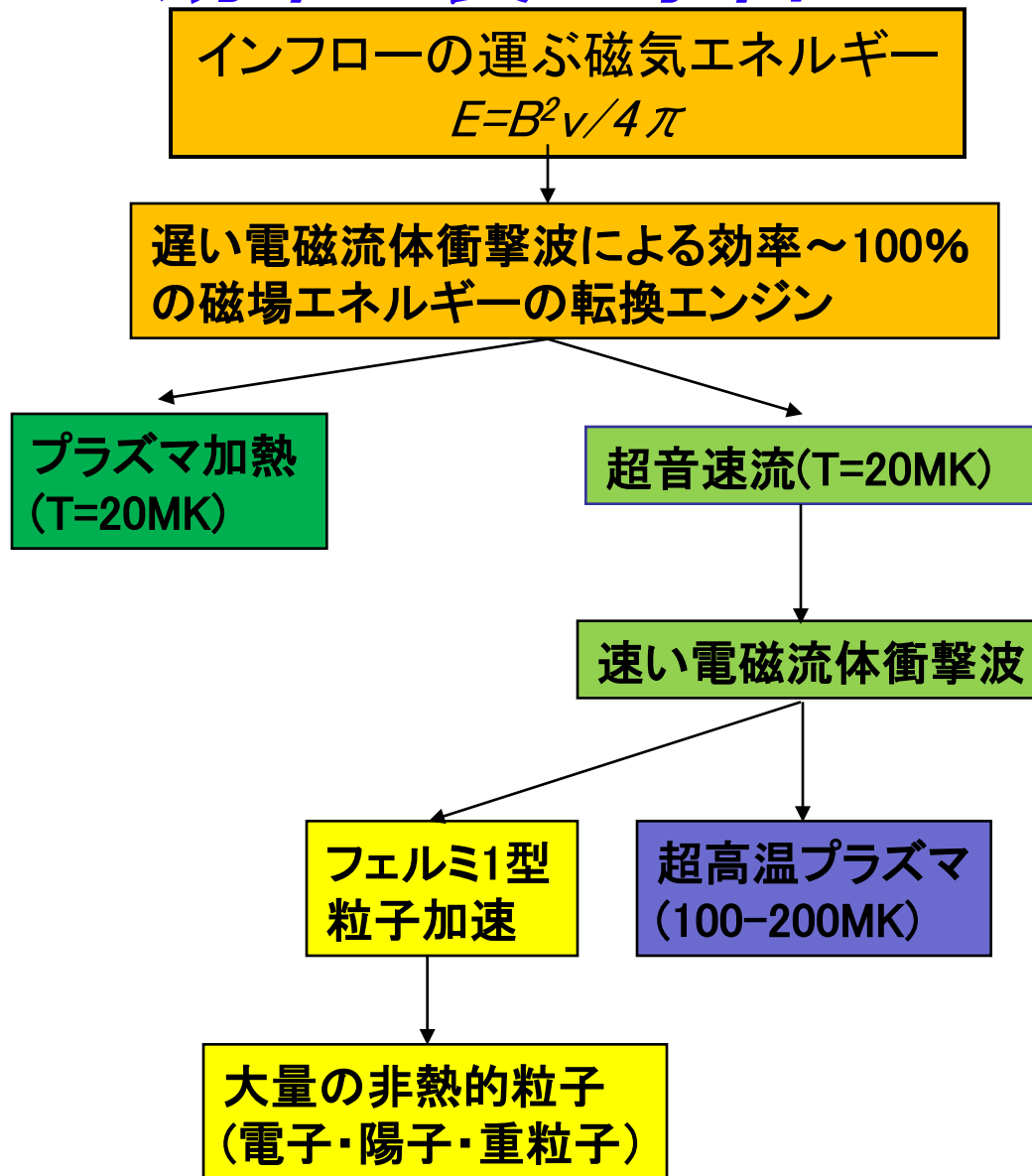
磁気レイノルズ数 $R_m = \frac{|\nabla \times v \times B|}{\left| \frac{c^2 \eta}{4\pi} \right|} = \frac{4\pi v L}{c^2 \eta} \gg 1$



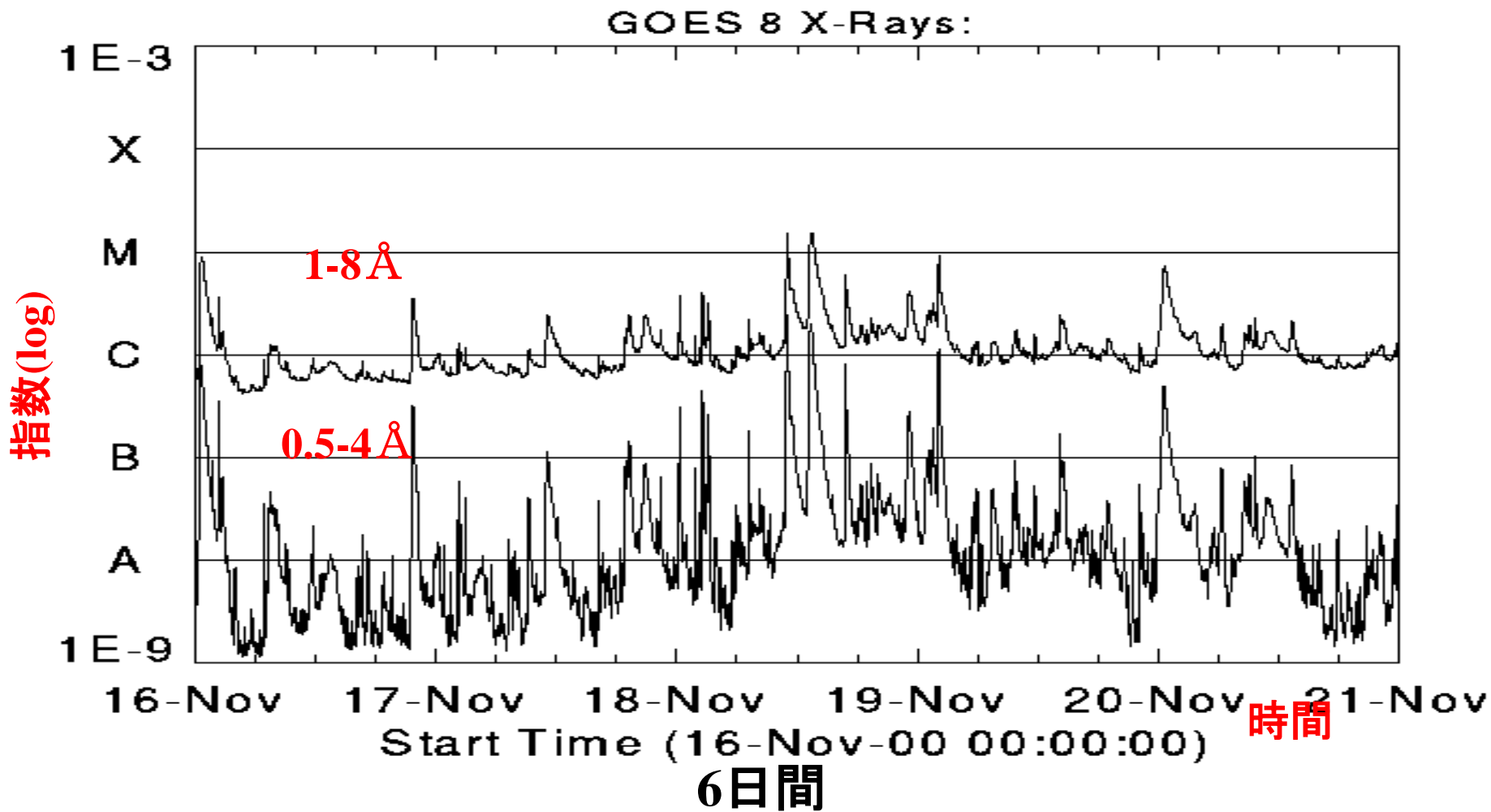
低 β 磁気プラズマの間欠的エネルギー解放(「ようこう」)

遅いMHD衝撃波は 極めて効率の良い宇宙エンジン

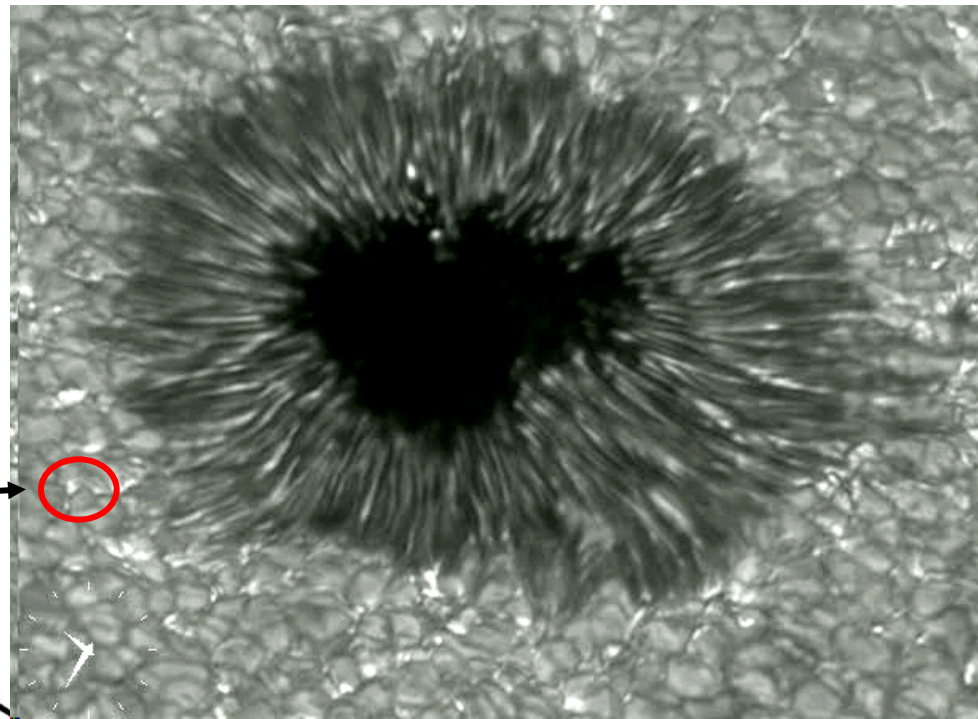
Tsuneta96



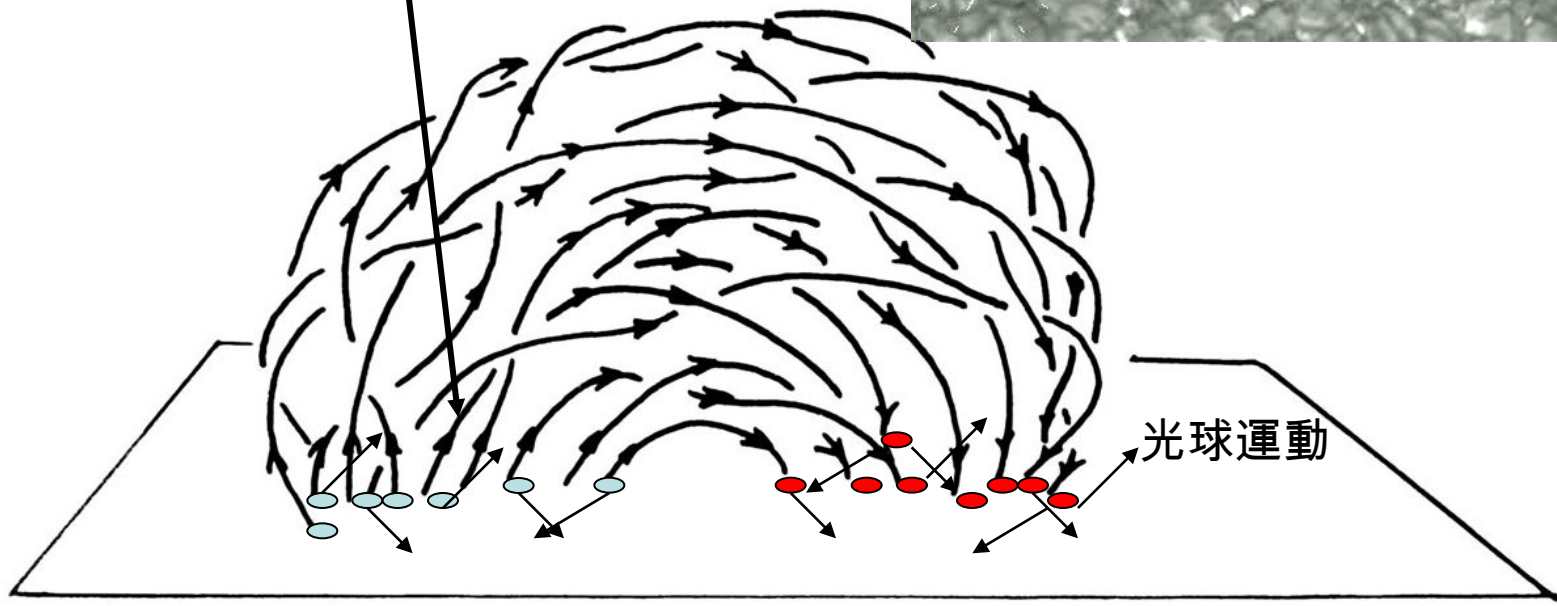
太陽コロナは小爆発よりなる？ コロナ加熱 = Σ 小爆発？



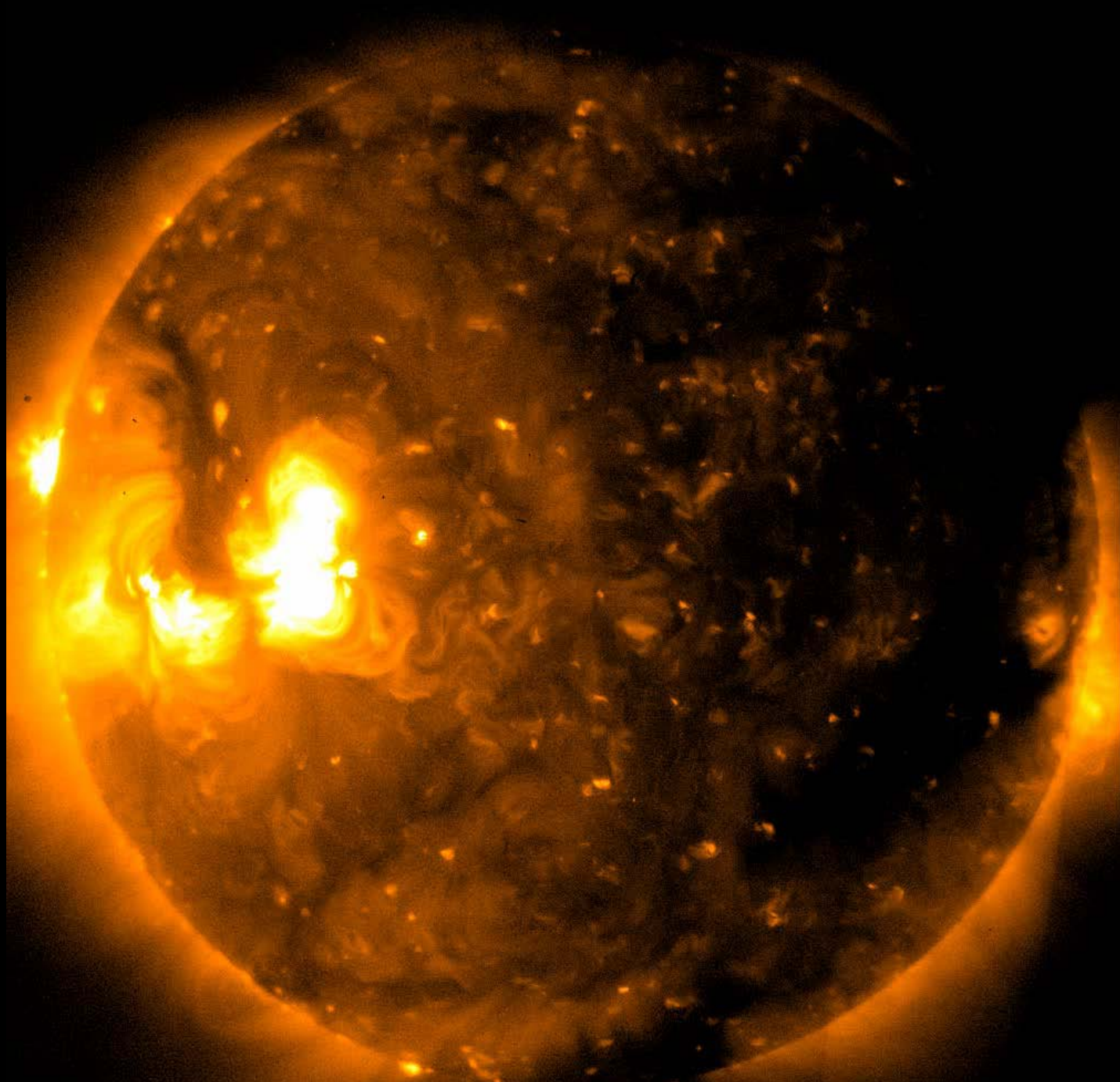
Parkerのナノフレア仮説



0.1秒角の磁気要素に対応



From Parker paper



Hinode/XRT: 2007-01-03 16:19:03UT

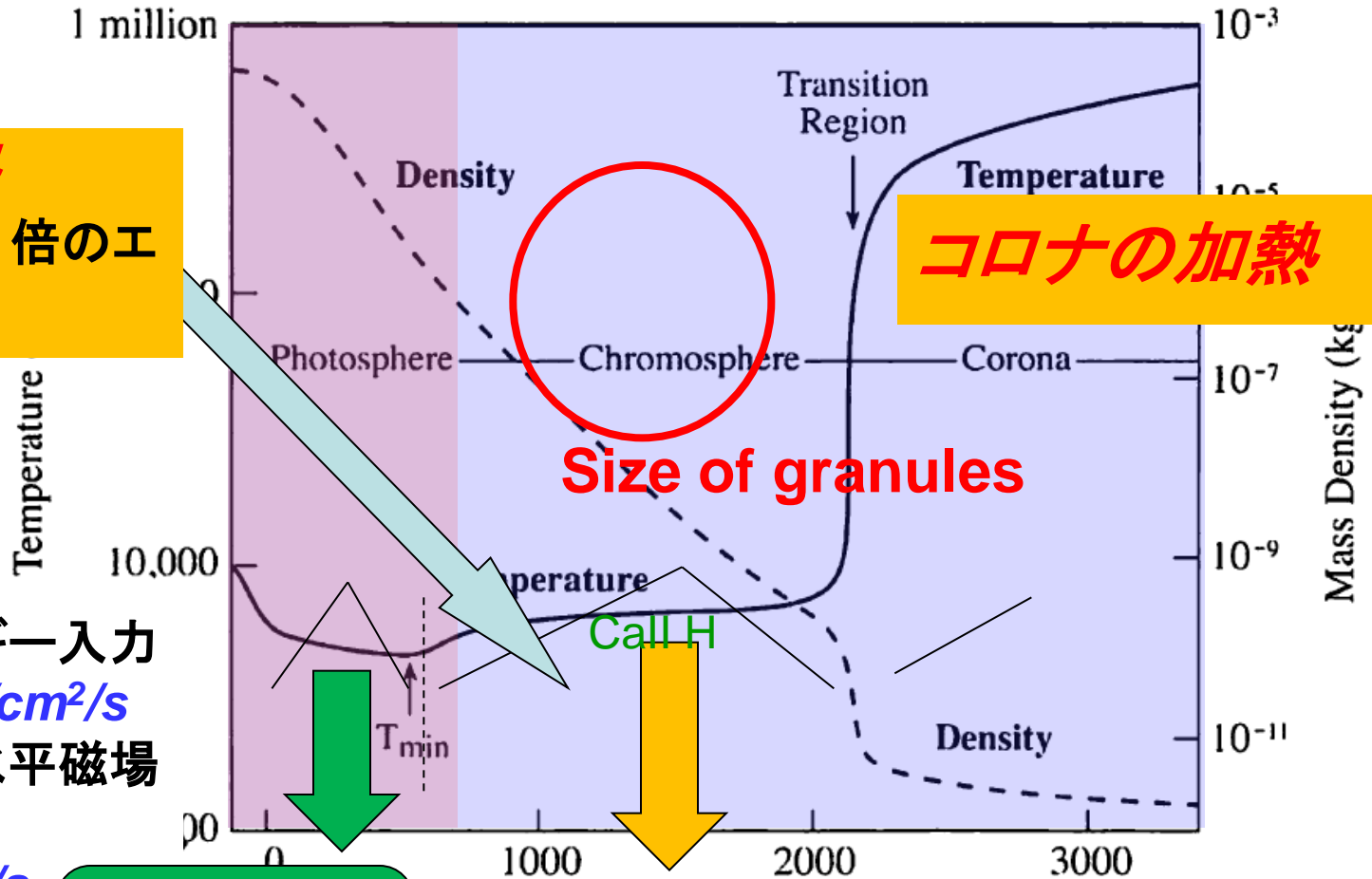
ひので: 彩層加熱の新しい可能性

Ishikawa&Tsuneta 09

彩層の加熱

コロナ加熱の10倍のエネルギーが必要

コロナの加熱



彩層へのエネルギー入力
 $4 \times 10^6 - 2 \times 10^7 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$
 光球に出現する水平磁場のエネルギー
 $3 - 6 \times 10^6 \text{ erg/cm}^2/\text{s}$

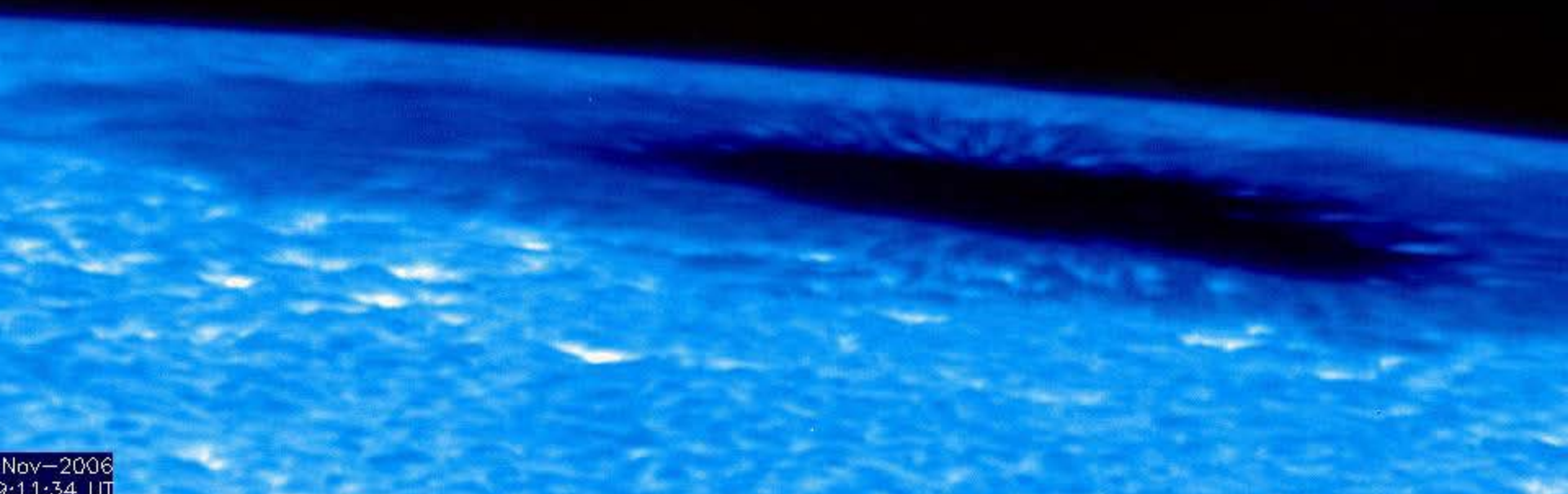
水平磁場が観測された場所

水平磁場はここまでたどり着いているか?

磁気エネルギーのリザーボア

磁気エネルギーの散逸層

ひので最大の発見：彩層のダイナミズム (作成：勝川行雄さん)

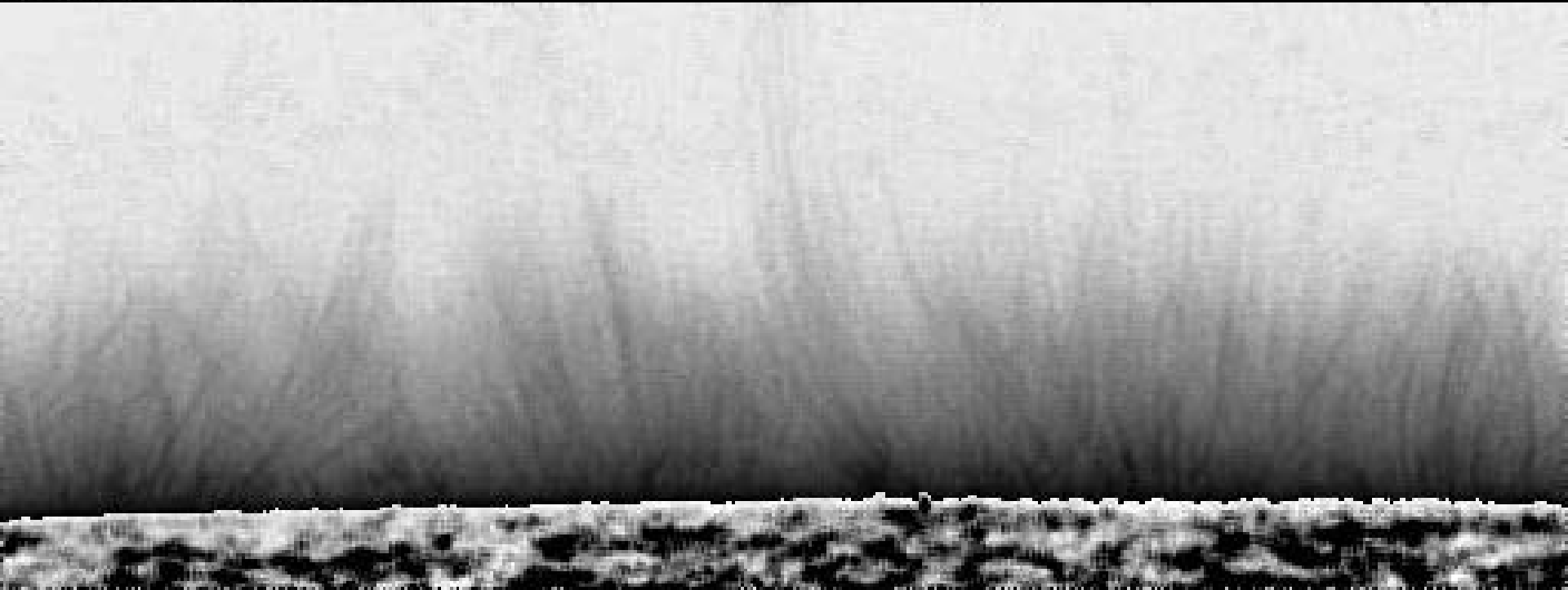


Nov-2006
9:11:34 UT

2006 Dec 17 20:00-21:00 UT Call H broad band filter images taken with Hinode/SOT

スピキキュール

2007-04-01T02:20:30.420



コロナ加熱の機構:2つの路線

- ナノフレア派(パーカーさん)

- 磁気リコネクション
場が崩壊

第3の説 (De Pontieu)

- 波派(鈴木)

- 対流
が強化
着

スピキュールが 物質と熱を供給?

- 圧縮波に変換されてコロナ加熱と
太陽風の加速をまとめて面倒みる
- 位相混合で渦生成と散逸

- 両方派

- ピコフレアが波を発生

Magnetic reconnection



Waves

