

対流層ーコロナ結合の MHDシミュレーション

Inner Corona
Photographed in Hama, China
By Dave Ombrello
On August 1, 2008
www.italifin.com



磯部洋明
京都大学宇宙総合学研究ユニット

太陽物理の主要な課題

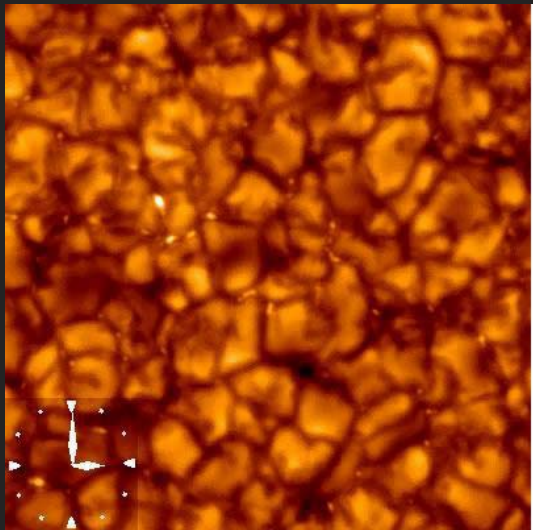
- 磁場の起源(ダイナモ)
- 磁場の散逸
 - フレア(非定常)
 - コロナ加熱、太陽風加速(準定常)
 - プラズマ素過程(粒子加速、リコネクションetc)
- 太陽地球環境、宇宙天気

Outline

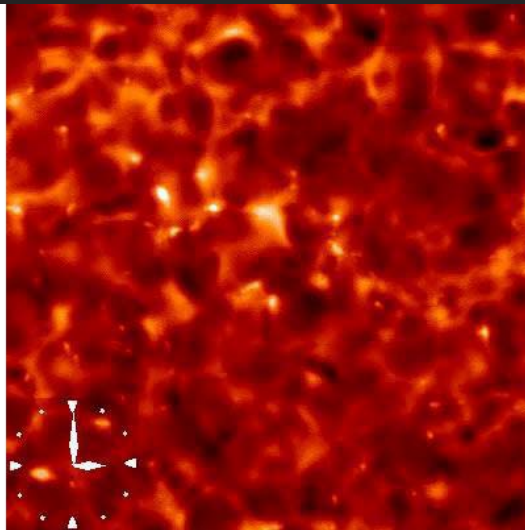
- コロナ加熱問題
 - 対流層—コロナ結合が重要
- 対流層—コロナ結合のMHDシミュレーション
 - 光球、彩層の乱流磁場と磁気リコネクションが重要
 - 光球、彩層は弱電離
- 弱電離プラズマのシミュレーション
 - 基礎方程式
 - 中性流体の効果

コロナ加熱問題 (≒星風加速問題)

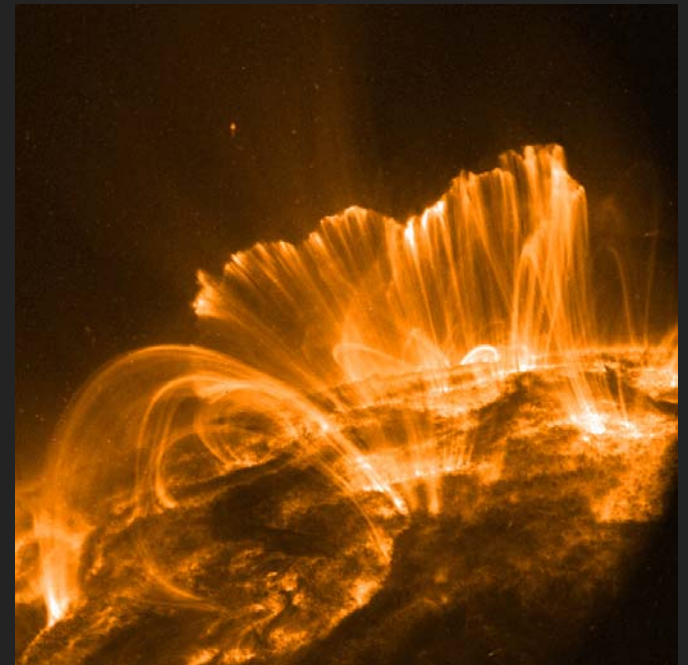
- 問題: 表面は6000度なのになぜ外側が100万度になれるのか
- 答え: 非熱的エネルギー(運動E、磁場E)が輸送、散逸する



光球



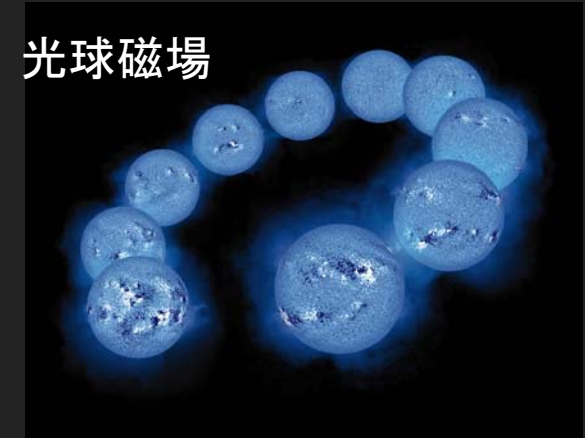
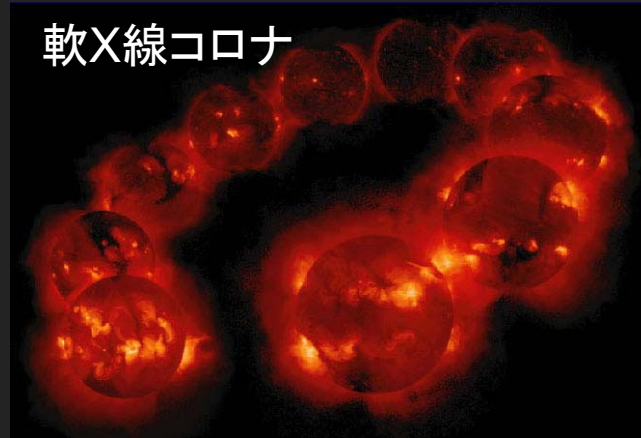
彩層



コロナ

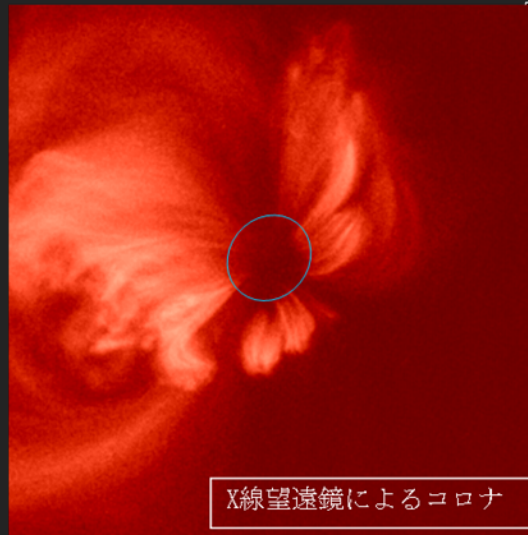
強い磁場＝強い加熱？

大局的にはYes.

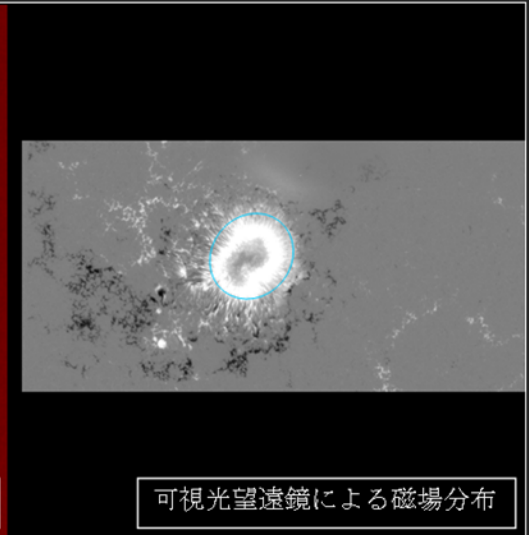


局所的にはNo.

黒点の真上のコロナは暗い



X線望遠鏡によるコロナ

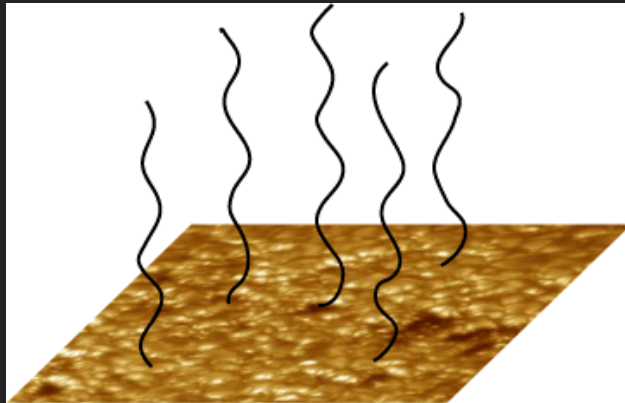


可視光望遠鏡による磁場分布

コロナ加熱の理論モデル

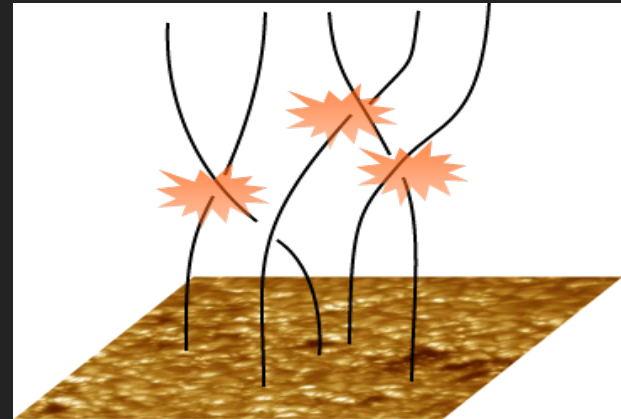
T_{cv} : 対流運動のタイムスケール、 T_A : コロナループのアルフベンタイム

$T_{cv} < T_A \Rightarrow$ アルフベン波



- 波の散逸メカニズムは色々。ショック形成、位相混合、共鳴吸収...
- 高周波が散逸しやすい

$T_{cv} > T_A \Rightarrow$ 磁気リコネクション



小さいフレアの集まり = ナノフレア加熱

- Key question: 対流と磁場の相互作用で発生する擾乱のモードとスペクトル
 \Rightarrow MHD simulation

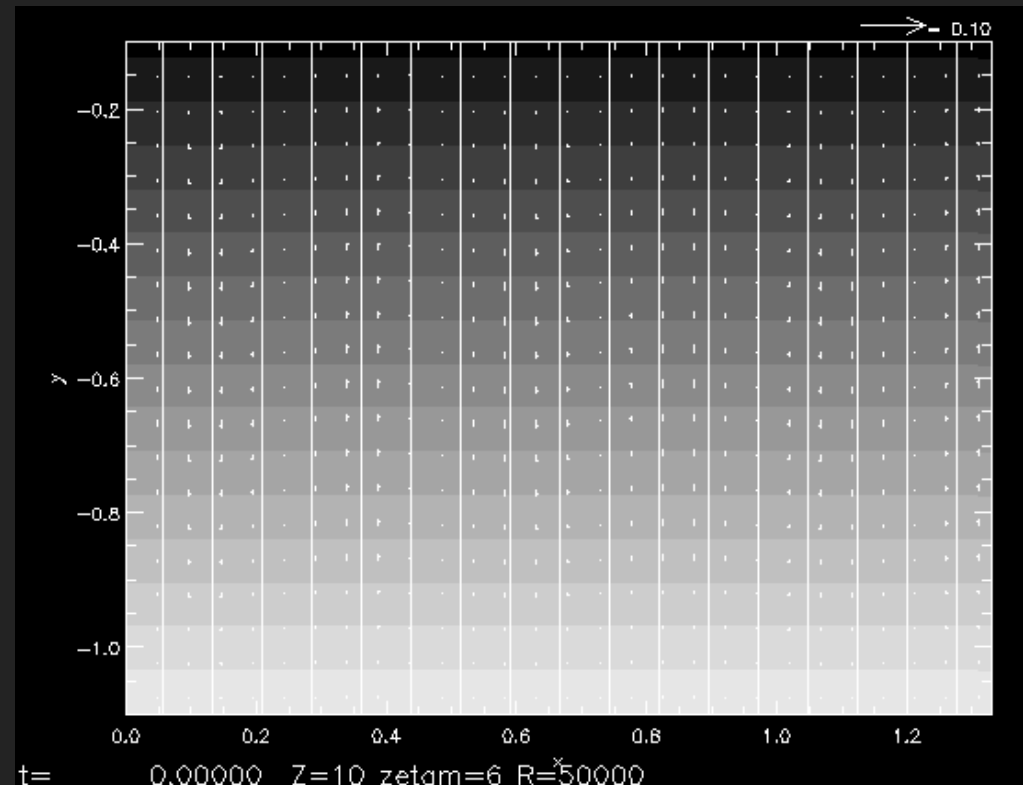
MHDシミュレーションは簡単に信用ならない (問題によりますが)

分岐: パラメータを変えると解の性質が突然定性的に変化する

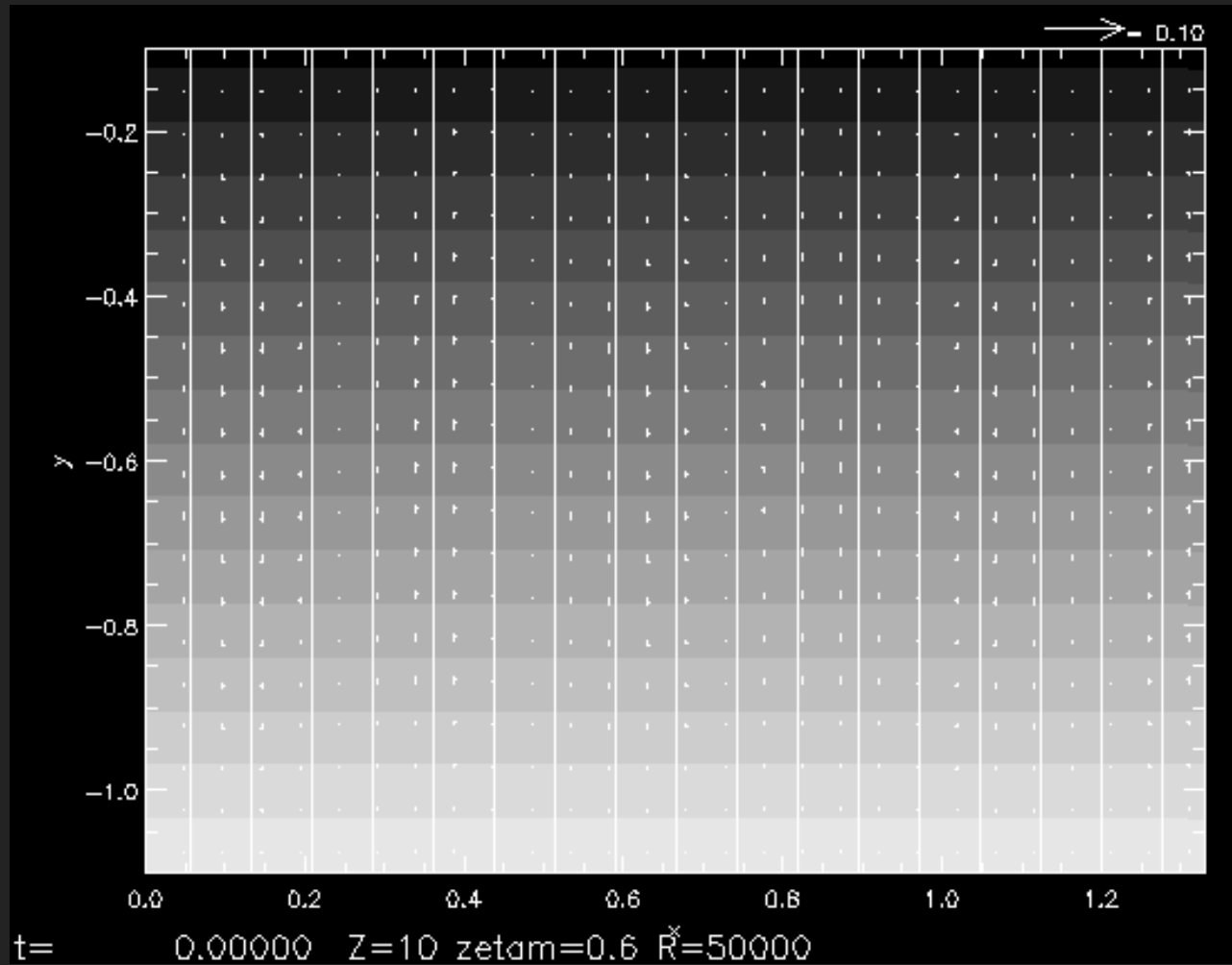
- 2次元磁気対流問題
- 上下境界で温度固定、磁場垂直

パラメータ:

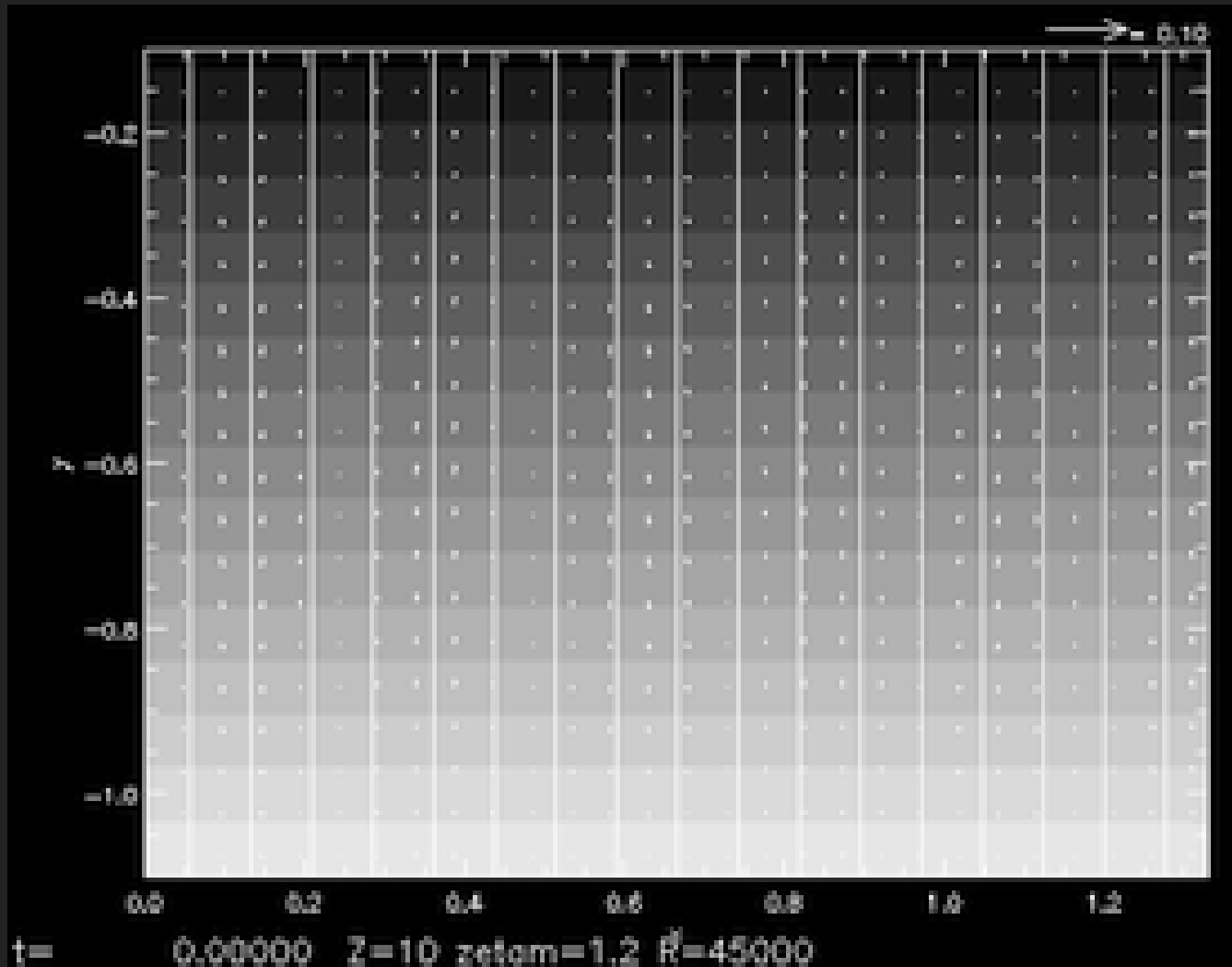
- Rayleigh数 $R = g\Delta T d^4 / \kappa \nu$
- Chandrasekhar数 $Q = B^2 / 4\pi\eta\nu$
- 領域の深さ d
- 領域のアスペクト比 w/d
- Prandtl数 ν/κ
- 磁気/熱散逸係数比 η/κ



$\eta/\kappa > 1$: Steady, overturning convection



$\eta/\kappa < 1$: Oscillatory convection (overstability)

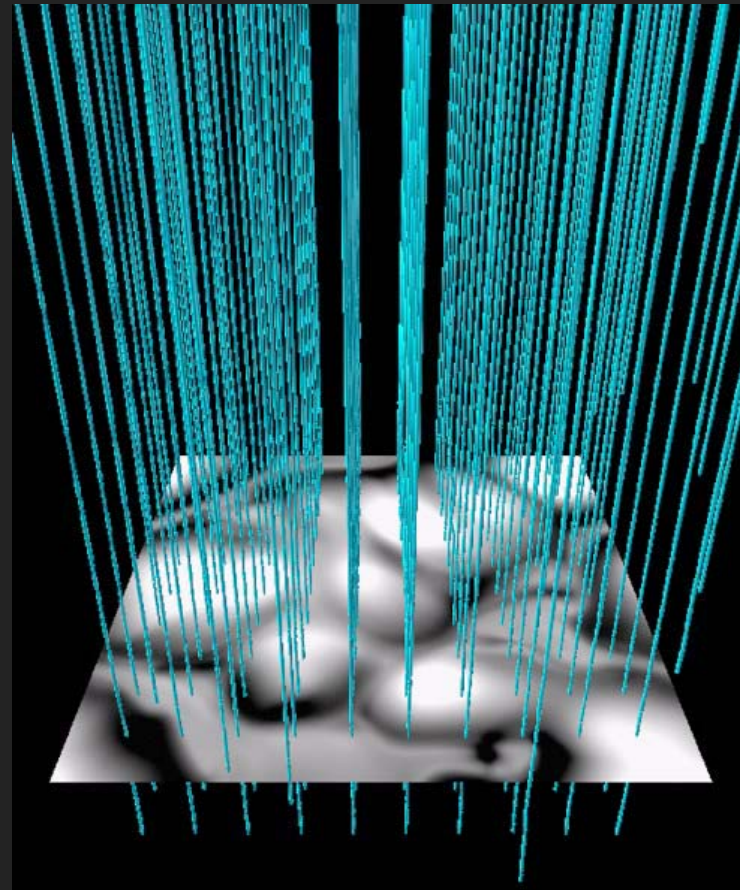


$\eta/\kappa < 1$ near the top, $\eta/\kappa > 1$ near the bottom
 (true for sunspot umbra)

対流層—コロナ結合のMHDシミュレーション

(Isobe, Proctor & Weiss 2008, ApJ, 679, L57)

- 対流層からコロナまで
 - 密度比 ≈ 7 桁
 - $10,000 \times 10,000 \times 25,000 \text{ km}^3$
- 光球を冷却(Newton近似)
- 対流が準定常状態に発達したら、
一様な垂直磁場を入れる



コロナ

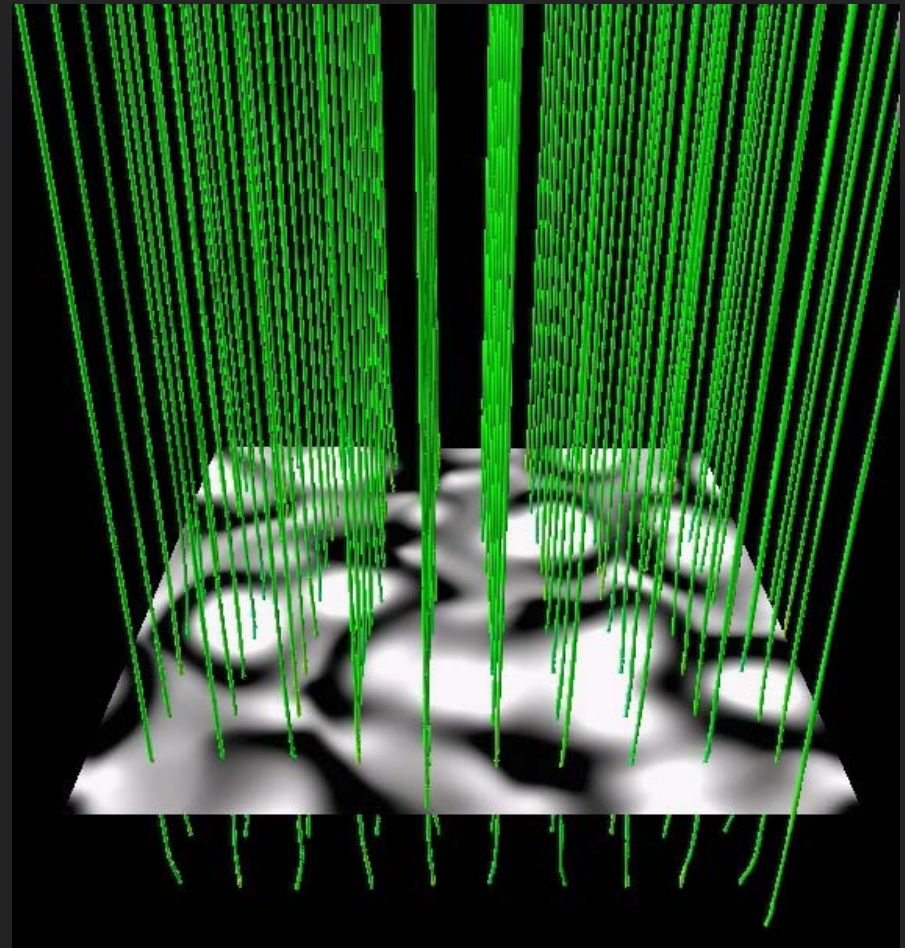
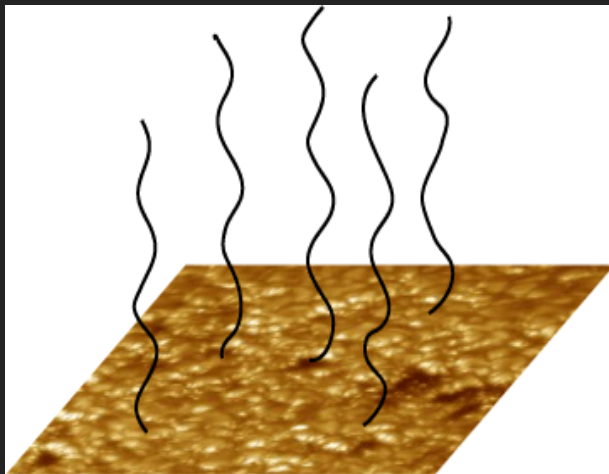
彩層

光球

対流層

$Q=12000$ ($\langle B \rangle \approx 1\text{kG}$, strong B like umbra)

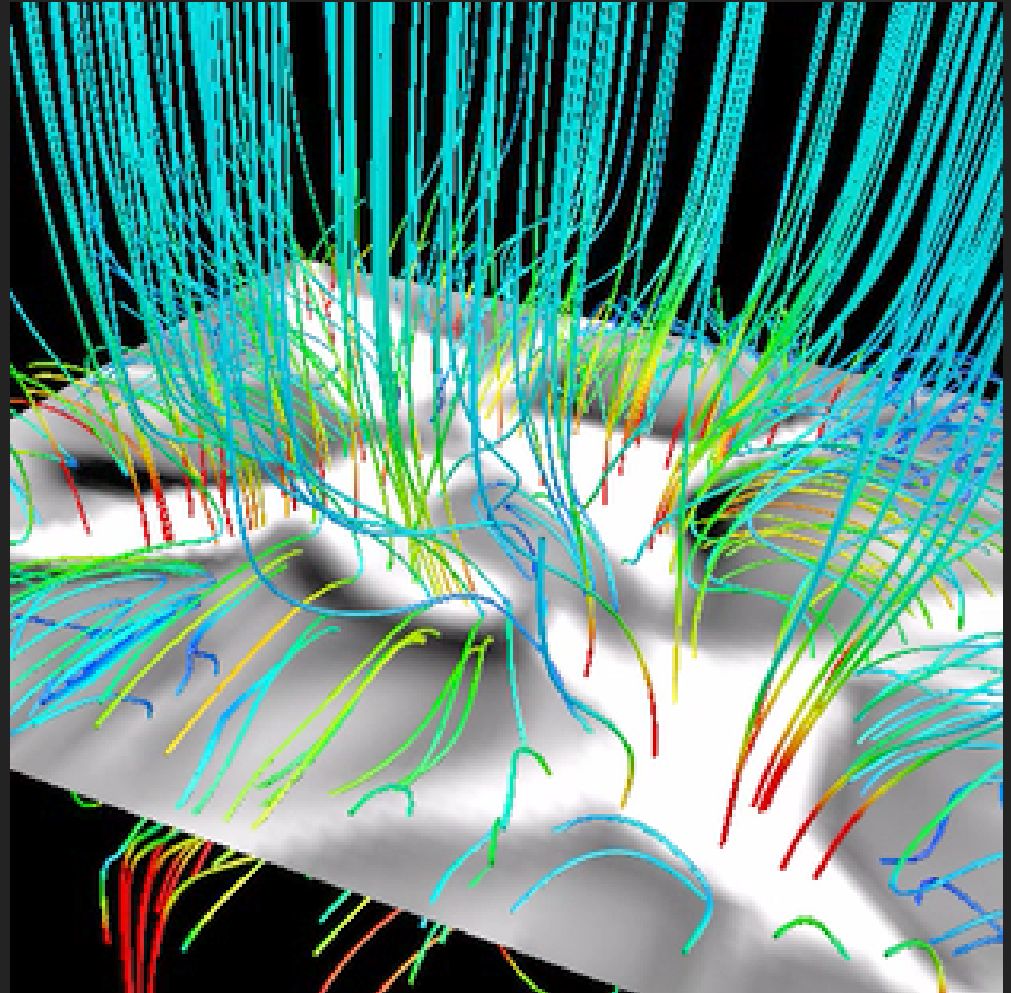
- 振動的対流
- 縦磁場が対流の水平運動で揺らされる。古典的描像。
- 発生したアルフベン波の大部分はコロナの底で反射



光球の V_z と磁力線

$Q=300$ ($\langle B \rangle \approx 100\text{G}$, active region but outside sunspot)

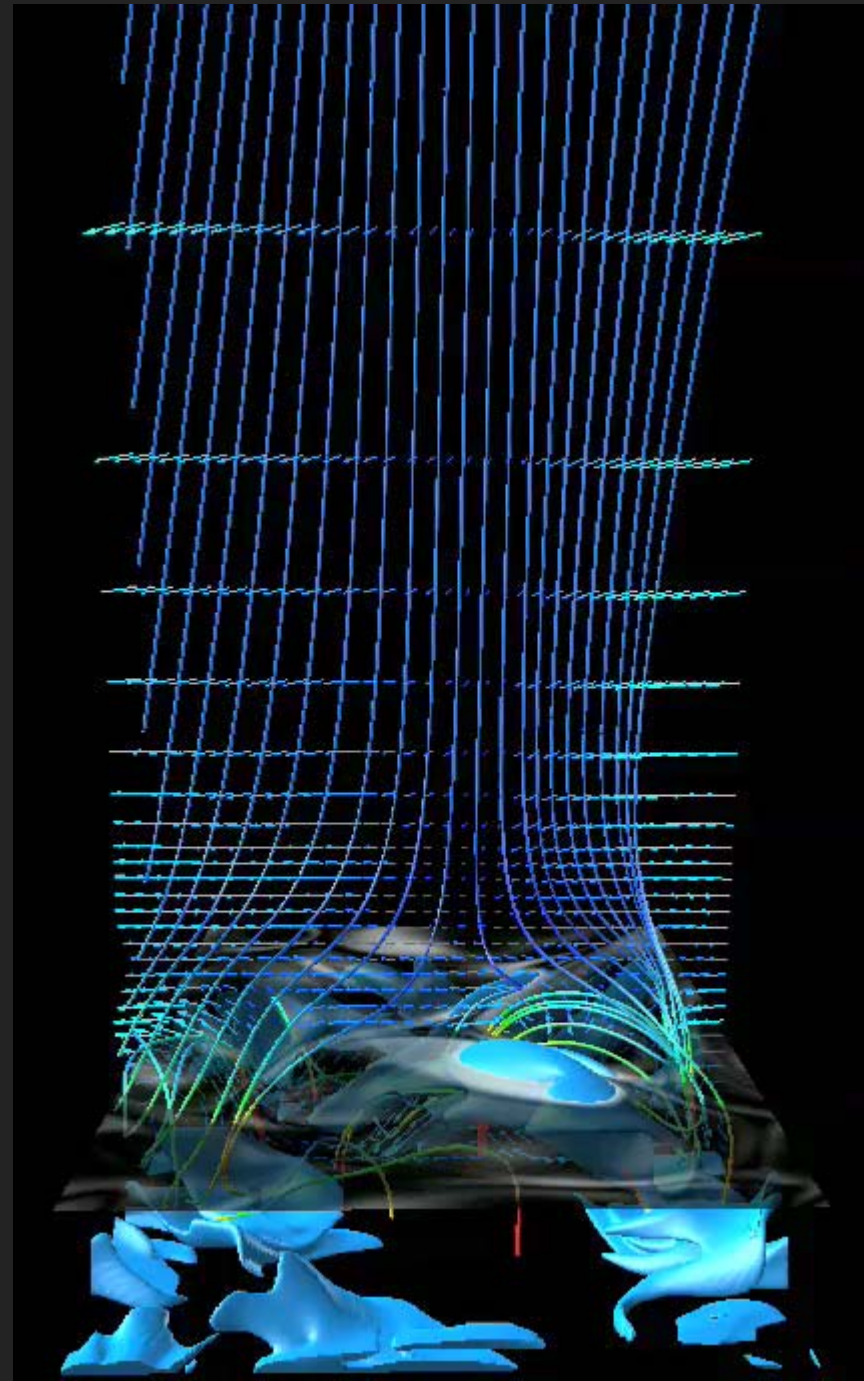
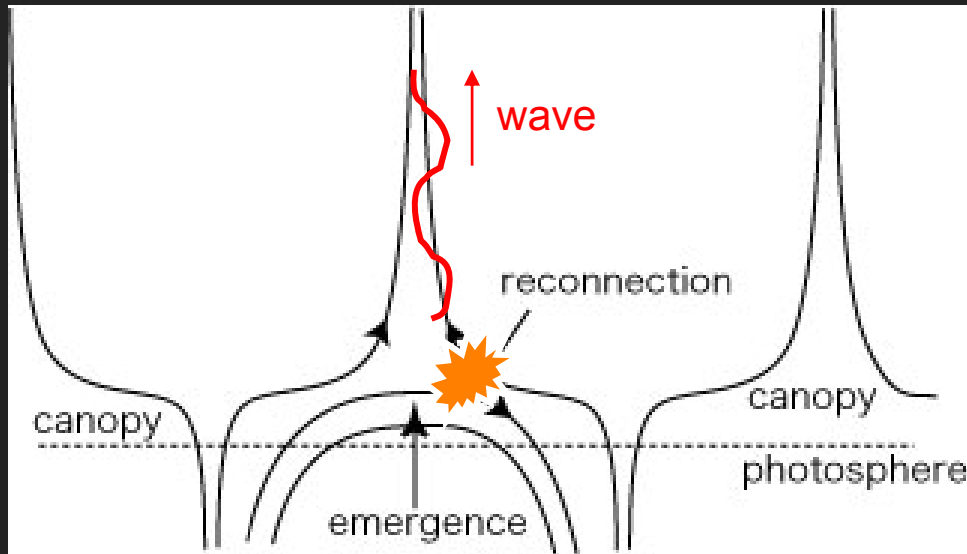
- 縦磁場は対流セル間の下降流に集中($>1\text{kG}$)
- 対流層中の磁場が乱流的になる
- 対流の上昇流に乗って数百Gの磁場が浮上



光球の B_z と磁力線

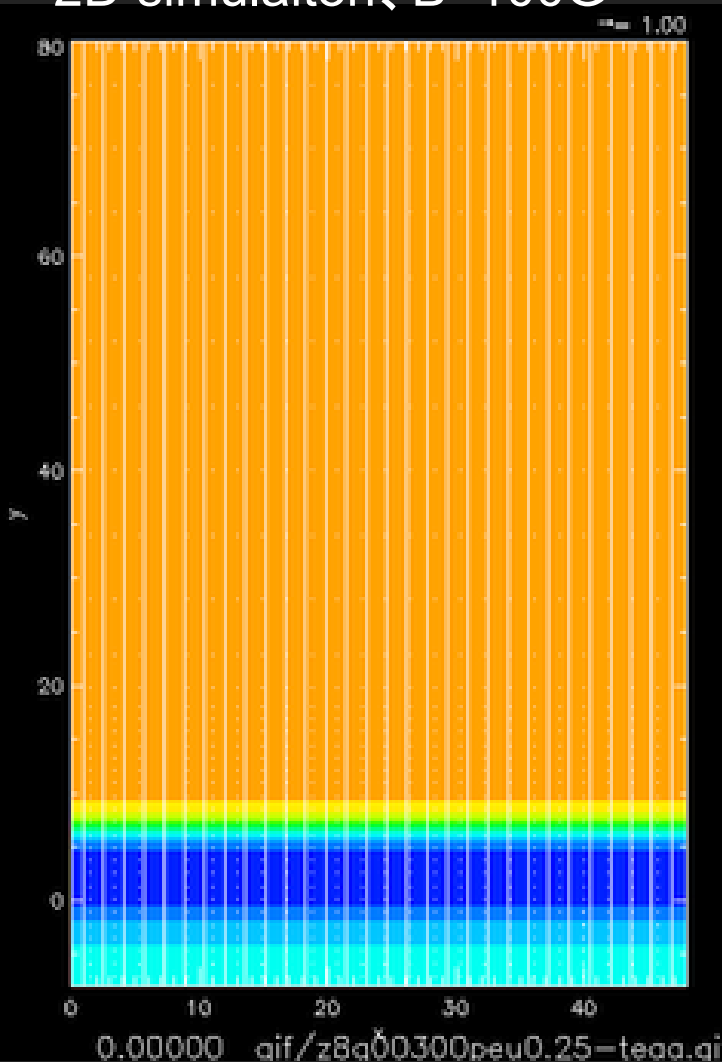
微細浮上磁場と 彩層リコネクション

- 微細浮上磁場は自分ではコロナに届かない
- 縦磁場とリコネクションすることで、エネルギーをコロナに輸送



高周波波動の発生

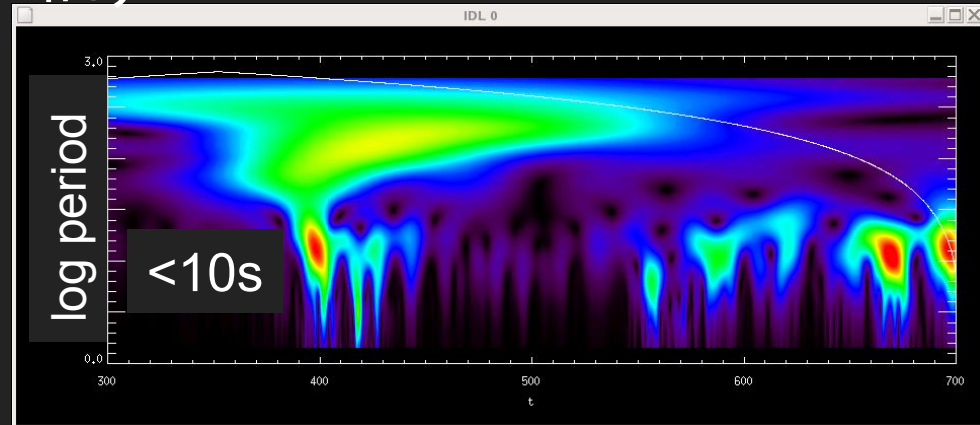
2D simulation, $B \approx 100\text{G}$



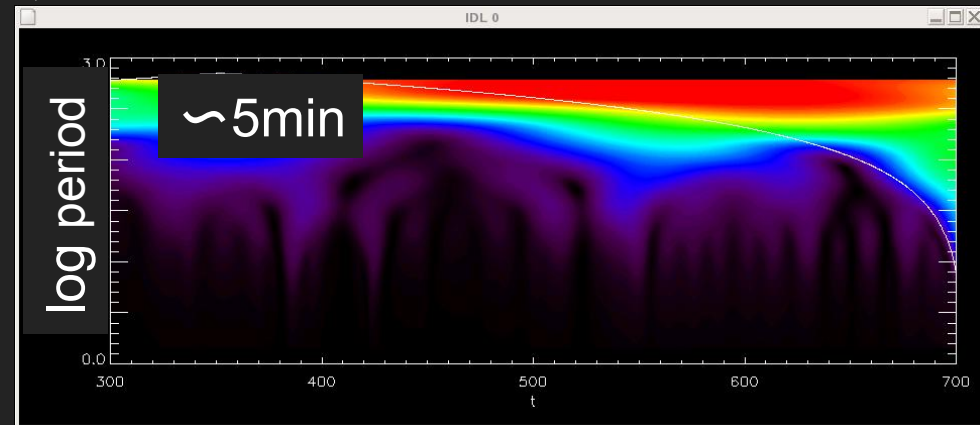
color: log Temperature

V_x のウェーブレットスペクトル

コロナ



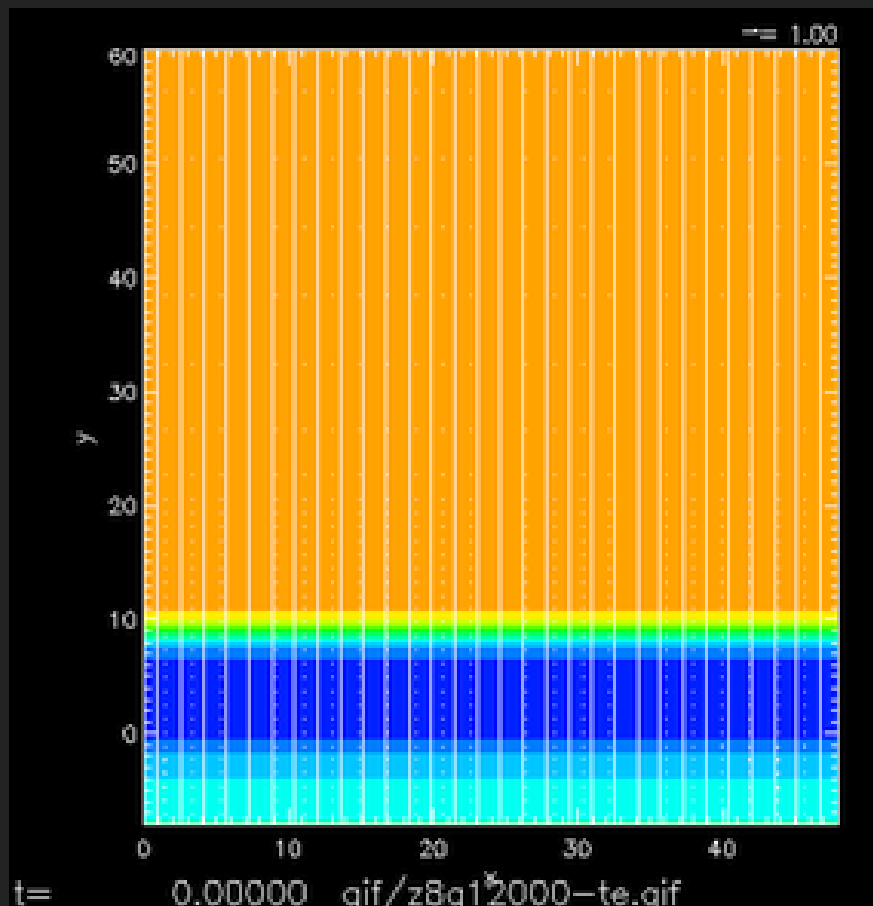
光球



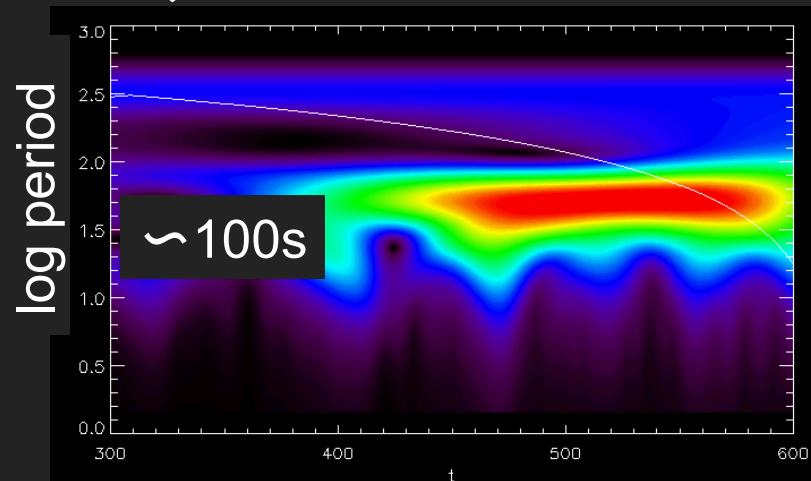
• 彩層でのリコネクションに伴い、高周波波動がintermittentに発生

乱流磁場のない場合

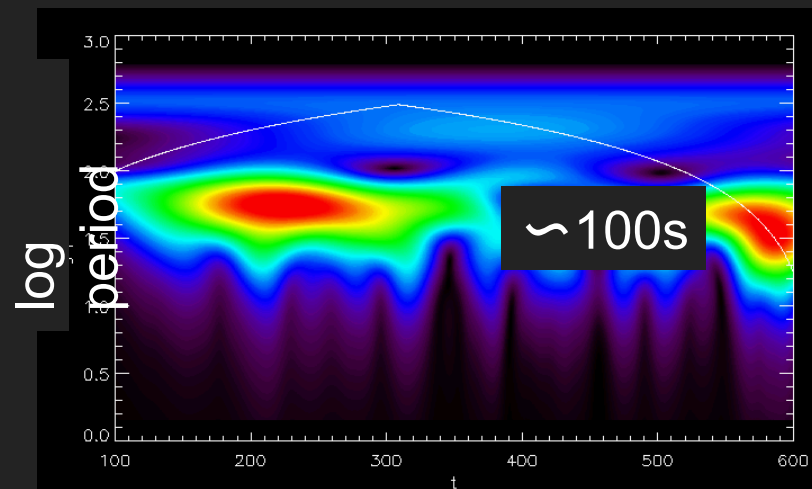
B=400G



コロナ



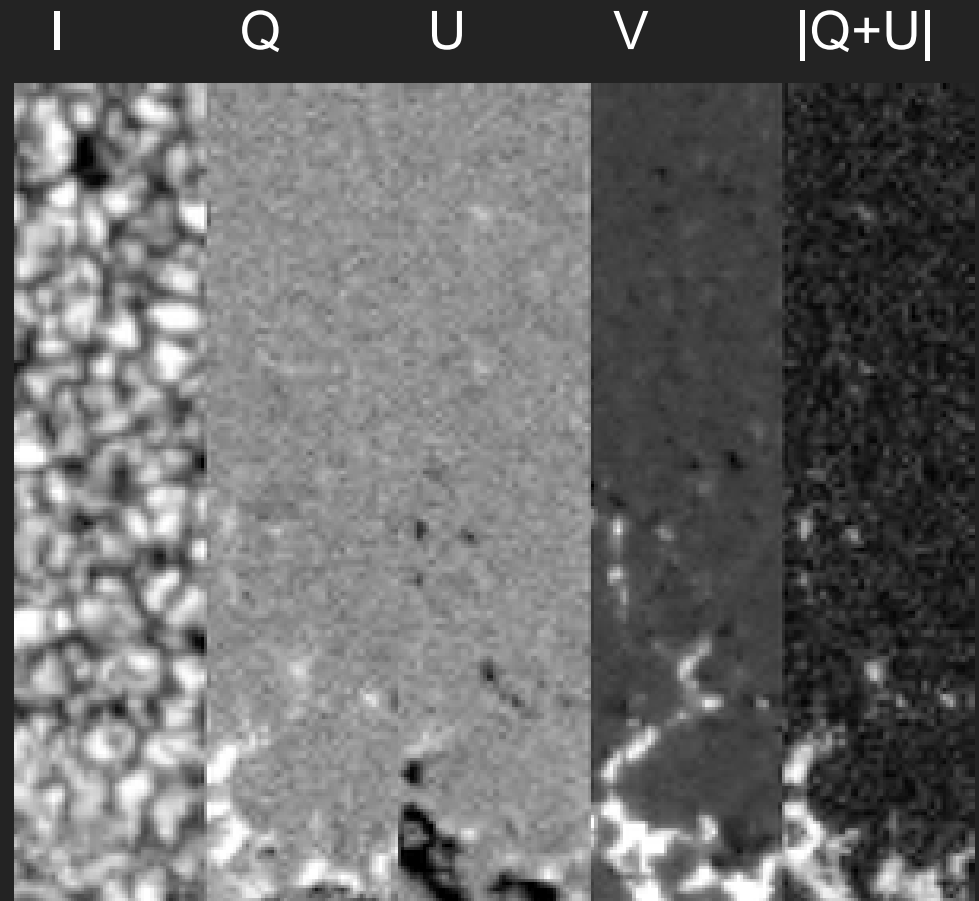
光球



対流のスペクトルとほぼ同じ

観測で見えてきた乱流磁場

- ひので可視光望遠鏡
- はじめてスペースからの偏光観測(IQUV)
- 対流スケールの水平浮上磁場(直線偏光)(Ishikawa+08 ; Centeno+ 07)
- コロナ加熱に要求されるのと同程度のPoynting flux ($>10^6 \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$; Ishikawa & Tsuneta 09)

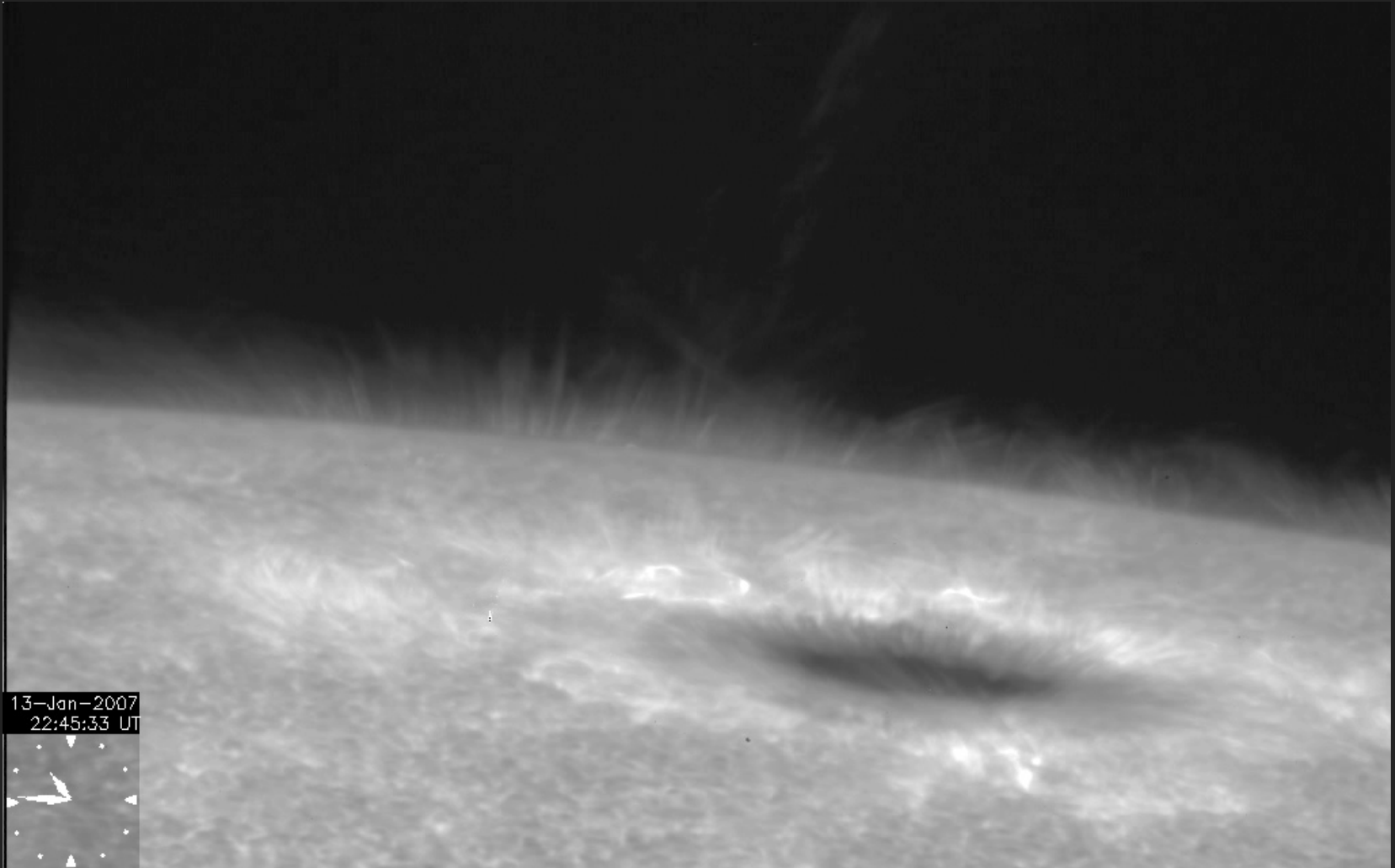


Q and U (linear polarization)

= transverse (\approx horizontal) fields

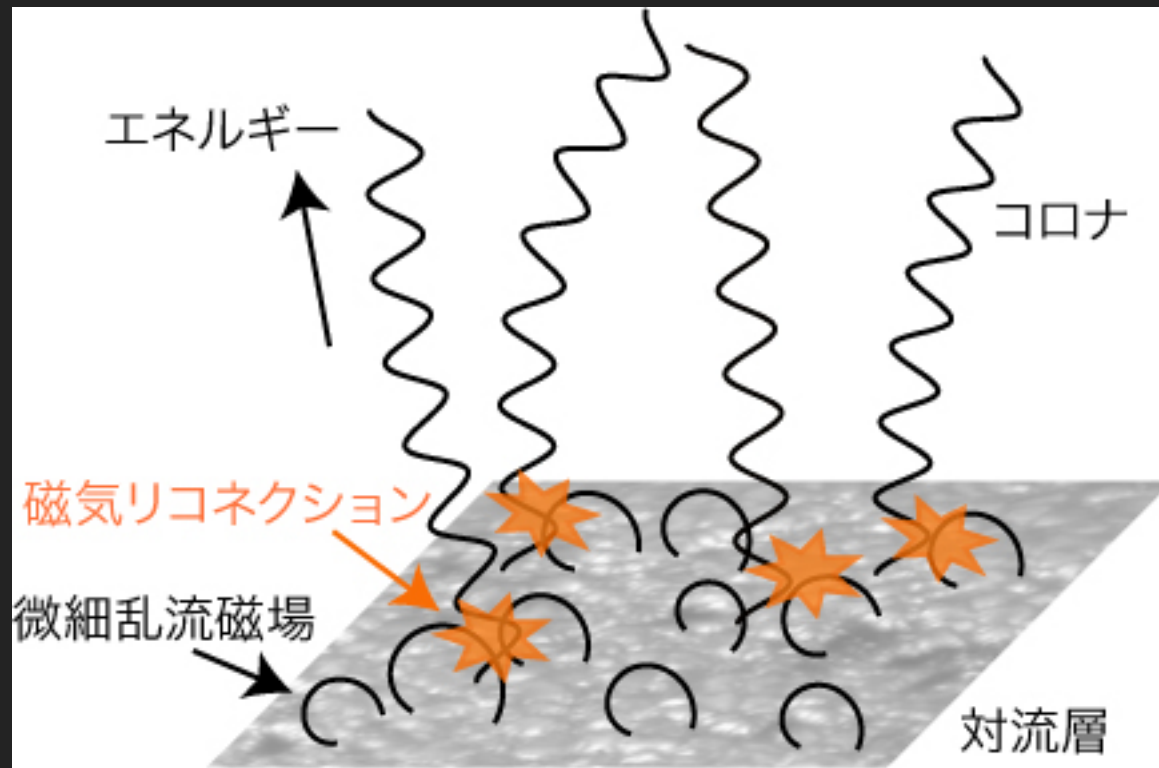
意外と激しい彩層の活動性

Hinode/SOT chromospheric CaH line; movie courtesy of T. J. Okamoto



Ubiquitous jets (Shibata+ 07; Katsukawa+ 07) and “Alfvénic” waves (Okamoto+ 07, De Pontieu+ 07; Nishizuka+ 08)

最新描像



彩層で高速磁気リコネクションは可能か？

- 彩層は完全衝突、弱電離
- コロナのような運動論的効果、異常抵抗は考えにくい
- でも高レイノルズ数プラズマ $S = V_{AL}/\eta \approx 10^{5-6}$
- 古典的Sweet-Parkerリコネクションでは遅い(e.g., Chae et al. 2002)

One fluid description of three fluids

Inertialess
electron eq.

$$0 = -en_e \left[E + \frac{V_e \times B}{c} \right] - [\nabla p_e + \nu_{en} \rho_e (V_e - V_n) + \nu_{ei} \rho_e (V_e - V_i)]$$

Inertialess
ion eq.

$$0 = en_e \left[E + \frac{V_i \times B}{c} \right] - [\nabla p_i + \nu_{in} \rho_i (V_i - V_n) + \nu_{ie} \rho_i (V_i - V_e)]$$

Neutral
eq.

$$\rho_n \left[\frac{\partial V_n}{\partial t} + (V_n \cdot \nabla) V_n \right] = -\nabla p_n - \nu_{ni} \rho_n (V_n - V_i) - \nu_{ne} \rho_n (V_n - V_e) \\ - \rho_n \nabla \phi + \nu \nabla^2 V_n + \mu \nabla (\nabla \cdot V_n)$$

Substituting V
differences:

$$\rho_n \left[\frac{\partial V_n}{\partial t} + (V_n \cdot \nabla) V_n \right] = \frac{J \times B}{c} - \nabla p - \rho_n \nabla \phi_g + \mu \rho_n \nabla^2 V_n$$

$$p = p_n + p_i + p_e \quad J = n_e e (V_i - V_e)$$

- 弱電離プラズマはValid when electron and ion inertia terms are negligible compared with collision terms.

誘導方程式

From electron eq.

$$0 = -en_e \left[E + \frac{V_e \times B}{c} \right] - [\nabla p_e + v_{en} \rho_e (V_e - V_n) + v_{ei} \rho_e (V_e - V_i)]$$

Ohm's law

$$E = -\frac{V_e \times B}{c} - \frac{[\nabla p_e + v_{en} \rho_e (V_e - V_n) + v_{ei} \rho_e (V_e - V_i)]}{n_e e},$$

From ion eq.

$$0 = en_e \left[E + \frac{V_i \times B}{c} \right] - [\nabla p_i + v_{in} \rho_i (V_i - V_n) + v_{ie} \rho_i (V_i - V_e)]$$

Velocity difference => Ambipolar diffusion

$$(V_n - V_i) \left(1 + \frac{v_{en} \rho_e}{v_{in} \rho_i} \right) = -\frac{J \times B}{c v_{in} \rho_i} + \frac{\nabla(p_i + p_e)}{v_{in} \rho_i} - \frac{m_e v_{en} J}{e v_{in} \rho_i}$$

The induction equation

$$\frac{\partial B}{\partial t} = -c \nabla \times E$$

Using $E = -\frac{V_e \times B}{c} - \frac{[\nabla p_e + v_{en} \rho_e (V_e - V_n) + v_{ei} \rho_e (V_e - V_i)]}{n_e e}$, and

$$V_e \times B = [V_n - (V_n - V_i) - (V_i - V_e)] \times B$$

We obtain $\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times \left[V_n \times B - \frac{J \times B}{en_e} + \frac{(J \times B) \times B}{c v_{ni} \rho_n} - \frac{4\pi\eta}{c} J \right]$

Inductive

Hall

Ambipolar

resistive

Hall and Ambipolar effects

$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times \left[V_n \times B - \frac{J \times B}{en_e} + \frac{(J \times B) \times B}{c v_{ni} \rho_n} - \frac{4\pi\eta}{c} J \right]$$

Hall 効果
(lon-electron)

Ambipolar diffusion
(lon-neutral)

$$\text{Ambipolar/Hall} = \omega_{ci}/v_{in}$$

ω_{ci} : lon-cyclotron freq $\propto B$

v_{in} : lon-neutral collision freq $\propto n$

彩層: Ambipolar > Hall, resistive
光球: Hall > ambipolar, resistive

Important only in small scale, e.g., current sheets and high-frequency waves.

Hall/Ambipolar効果が発現するスケール

Hall > Advection =>

$$t < \frac{1}{\omega_{ci}} \frac{n_n}{n_i} \frac{V_{na}^2}{V^2}$$

0.1 ~ 1 s in photosphere

Ambipolar > Advection =>

$$t < \frac{1}{\nu_{in}} \frac{n_n}{n_i} \frac{V_{na}^2}{V^2}$$

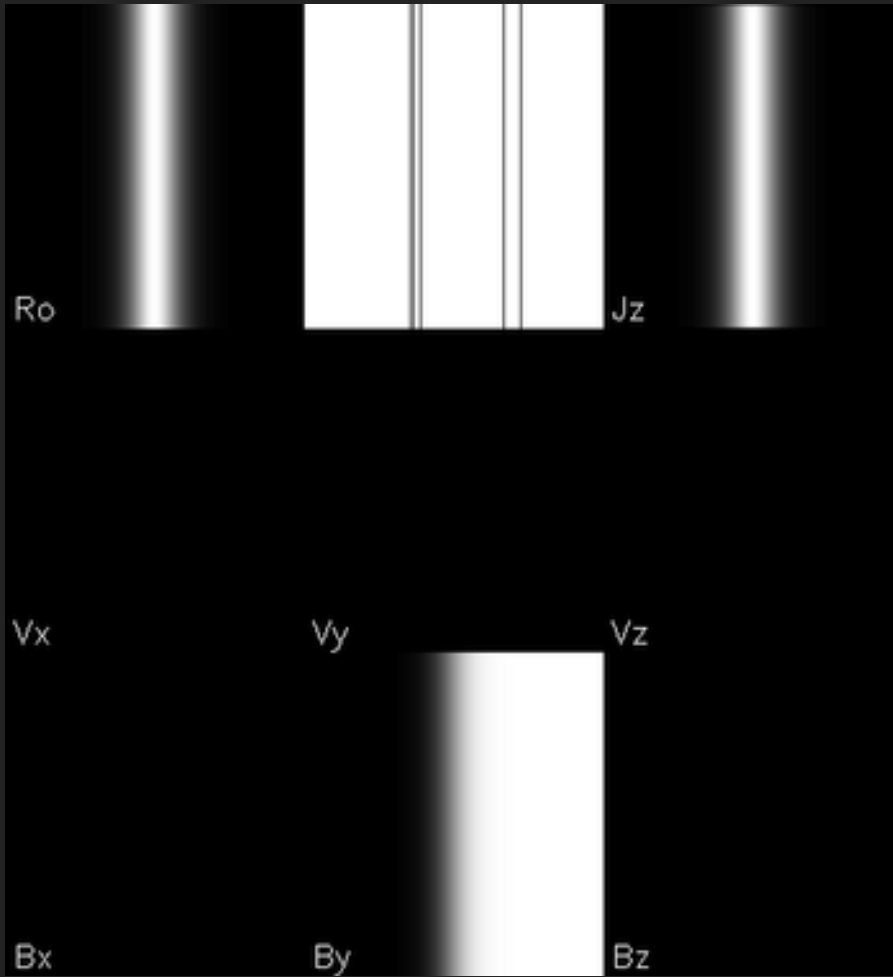
0.1 ~ 1 s in chromosphere

Length scale $\approx t V_{na} = c / \omega_{pi} (n_n / n_i)^{1/2} \approx 1-10 \text{ km}$ (c / ω_{pi} : inertia length)

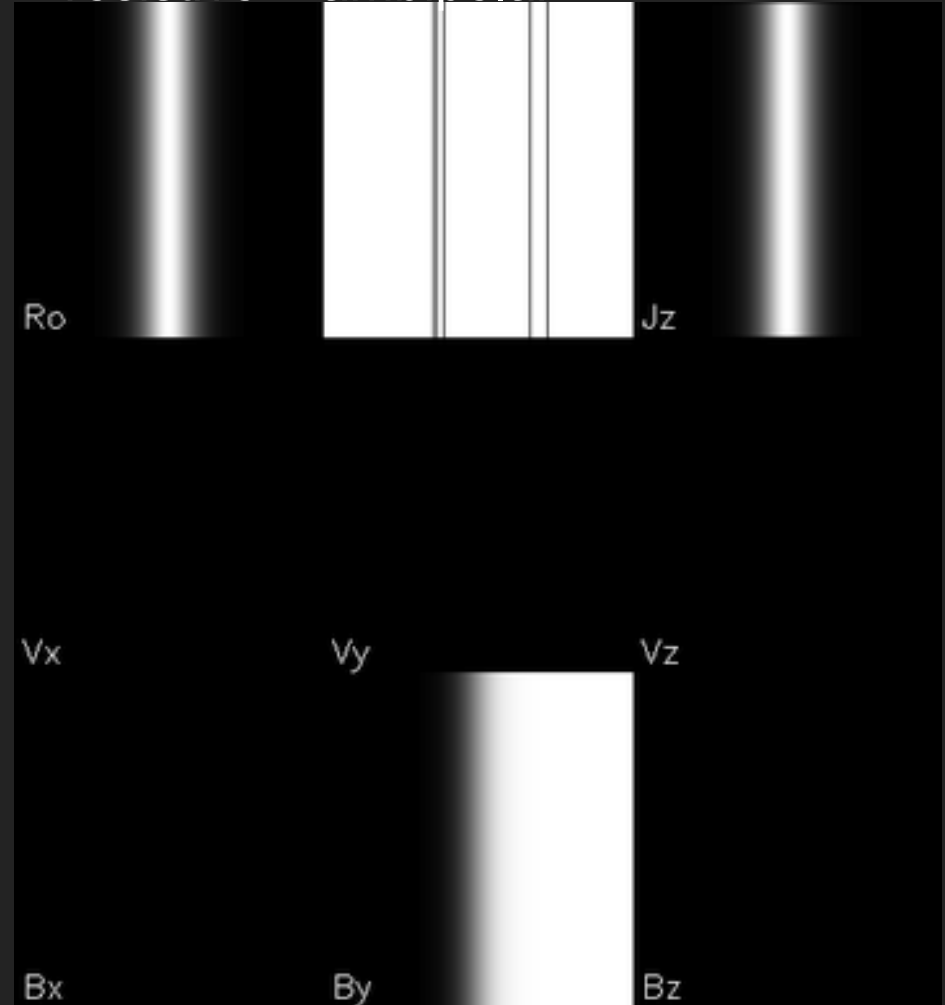
ひのでの空間分解能 $\approx 0.2'' \approx 150 \text{ km}$

2次元電流シートのリコネクション (Preliminary!)

resistive only



resistive + ambipolar

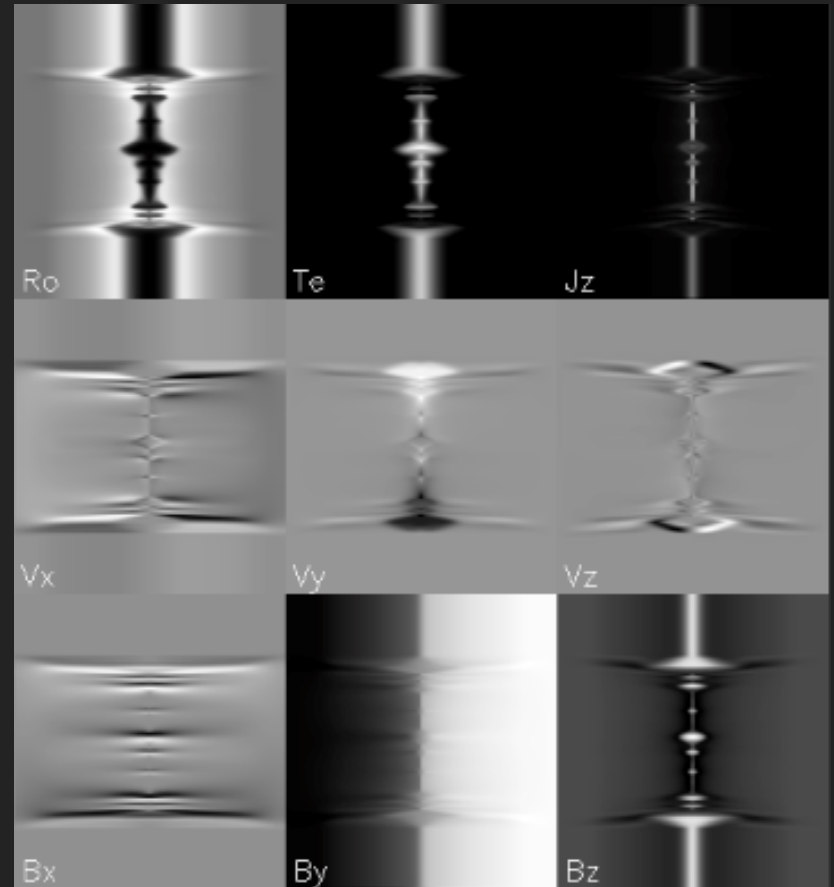


Ambipolarが入ると電流シートが急激に薄くなる

Ambipolar diffusionの効果

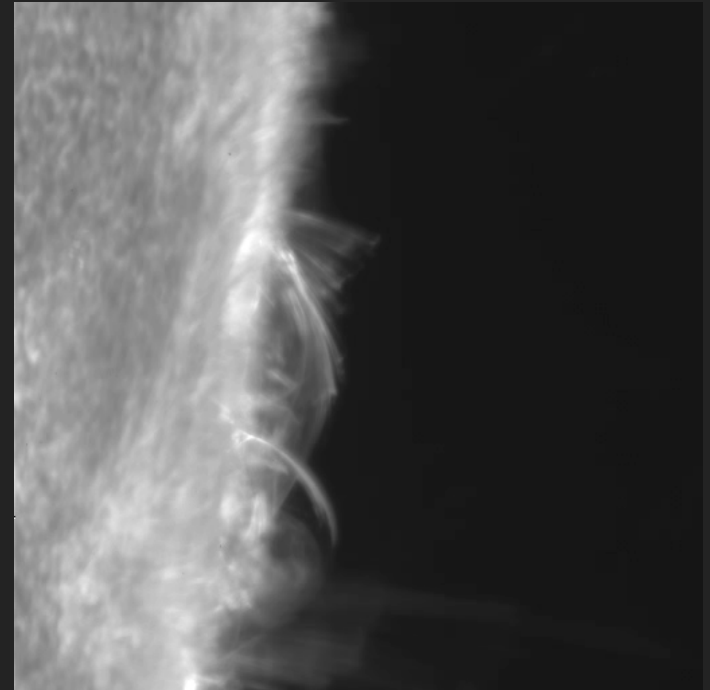
$$\frac{\partial B}{\partial t} \propto \nabla \times (J \times B \times B) \propto -B^2 \nabla \times J_{\perp}$$

- 磁場のあるところから J_{perp} を拡散させる
- 電流シート ($B=0$) に電流が集まる
- 薄くなった電流シートでテアリング不安定
- リコネクションの加速、激しい時間変動、高周波波動発生



結論

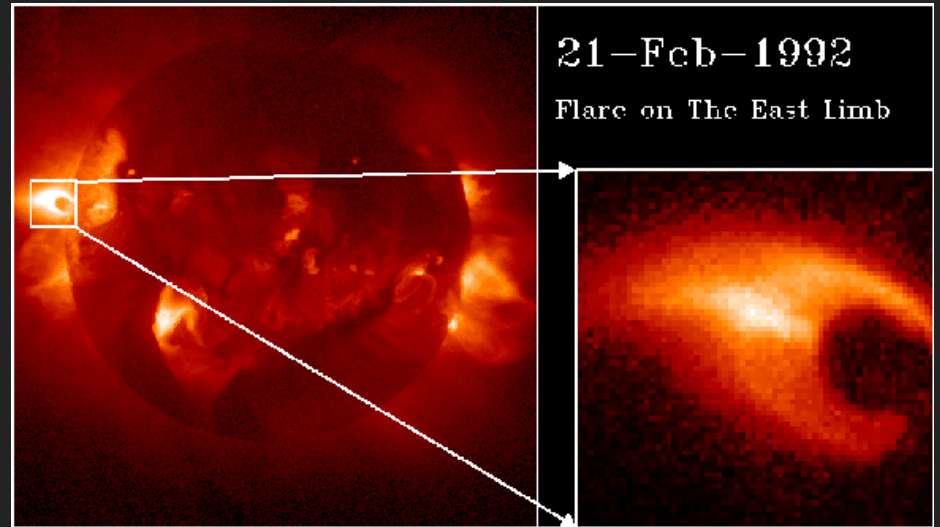
- 彩層が重要
 - 対流層で作られた乱流磁場が彩層で散逸、波動発生
 - 彩層こそがコロナ、太陽風の足下
- 弱電離プラズマの物理が面白い
 - 意外と激しい



ようこう、ひので時代の太陽物理と 天文学へのインパクト

ようこう(1991-2001)

磁気リコネクションを実証的に確立



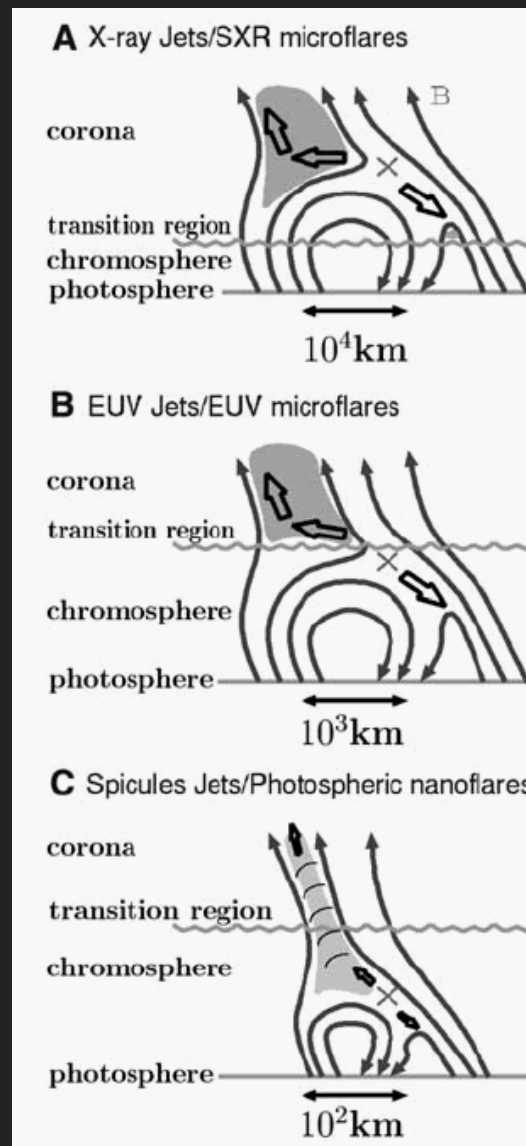
ひので(2006-)

彩層の活動性
アルフベン波
乱流磁場
極域磁場活動
...



ポストひので時代の太陽物理

- 磁場はどれほど速く散逸できるか？
 - 完全電離コロナ=>高エネルギー天体
 - 弱電離彩層=>分子雲、原始惑星系円盤
 - ミクロマクロ結合、粒子加速
- プラズマ実験室としての太陽
- ダイナモ



コロナ：
完全電離
無衝突

遷移層：
中間

彩層：
弱電離
完全衝突