

磁気対流と浮上磁場

磯部洋明

京都大学花山天文台

2004年7月15日 Solar-B初期観測検討会

浮上磁場

- 黒点、活動領域の形成
- コロナ活動との関係
 - エネルギー(ヘリシティ)蓄積
 - フレア、CMEのトリガ
 - ジェット、コロナ加熱
- 太陽内部の磁場構造の情報を持つ => ダイナモ

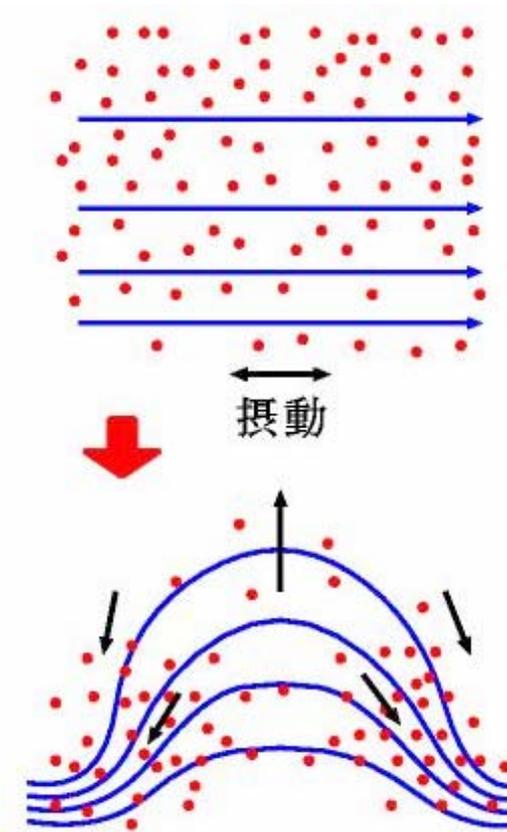
QuickTime® 7.0.0 (32-bit) Player
© 2000 Apple Computer, Inc. All rights reserved.

浮上磁場トピックス

- 浮上する条件
 - Arch Filament System, ポア形成の必要条件。磁束、ねじれ...
- ダイナミクスと構造形成
 - フィラメント形成。なぜフィラメントか。
 - シグモイド
 - 下降流領域のショックと彩層加熱
 - 対流との相互作用
 - サージ:リコネクションは必須か？どこで起きているか？(彩層orコロナ)
- コロナ磁場との相互作用
 - リコネクション = > 加熱、加速(ジェット)
 - コロナ加熱との関係
- 光球下の構造
 - ねじれの起源、ダイナモ

2D simulation

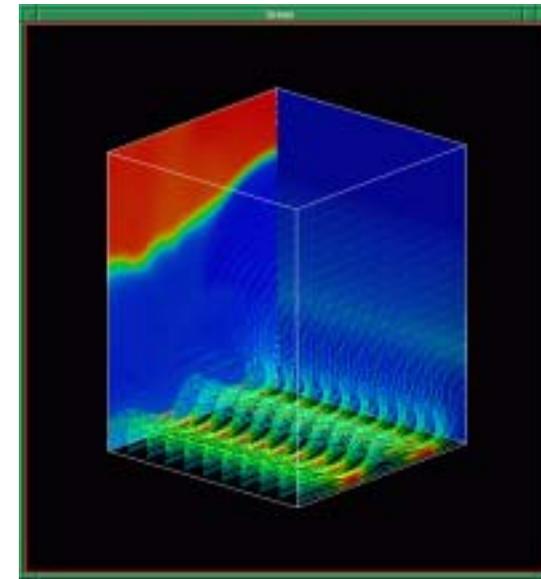
QuickTimey Ç² GIF ðLíÉvÉçÉÓÉáÉÁ Ç™Ç±ÇÃÉsÉNÉ`ÉÉÇ%á©ÇÈÇžÇ½Ç...ÇÕiKónÇ-Ç ÁB



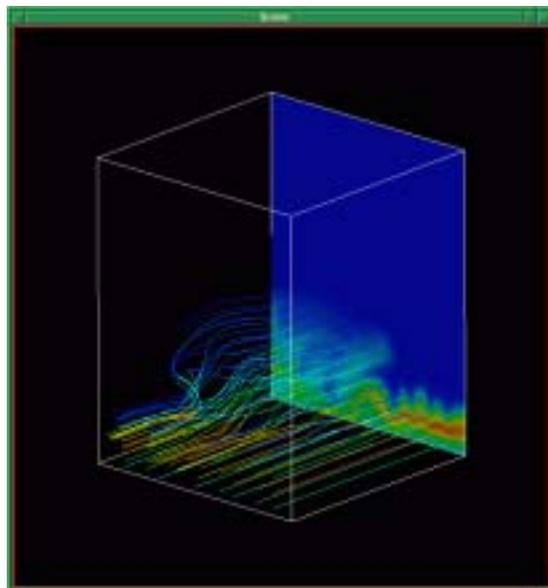
- パーカー不安定 = > 磁気圧による膨張
- 下降流領域で衝撃波形成 (観測的証拠は未発見)

3次元の場合

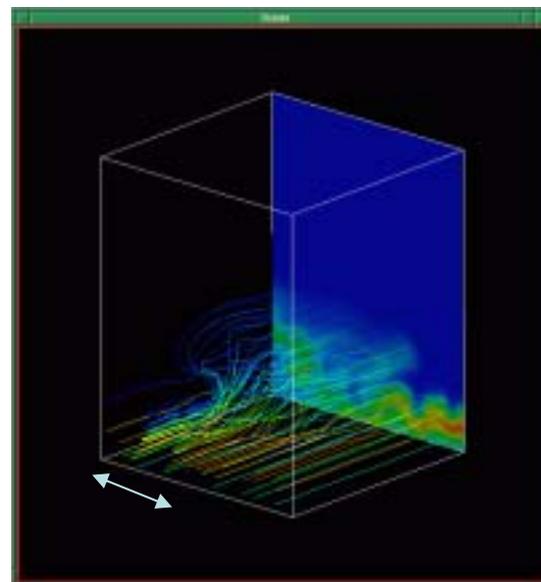
- 水平方向の膨張が卓越し、コロナに浮上しない(しにくい)



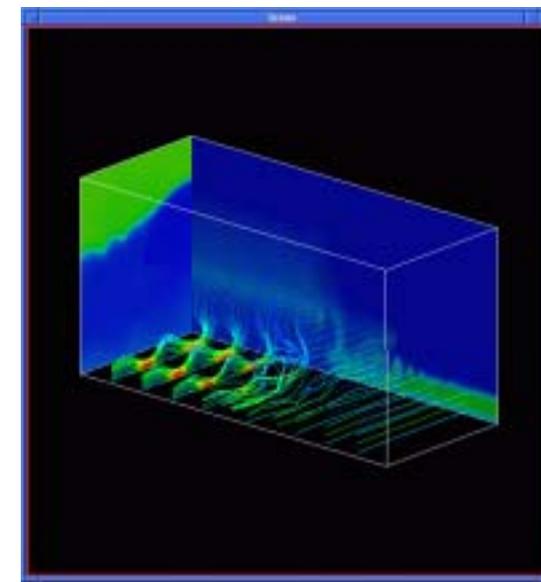
=



= 5



= 10

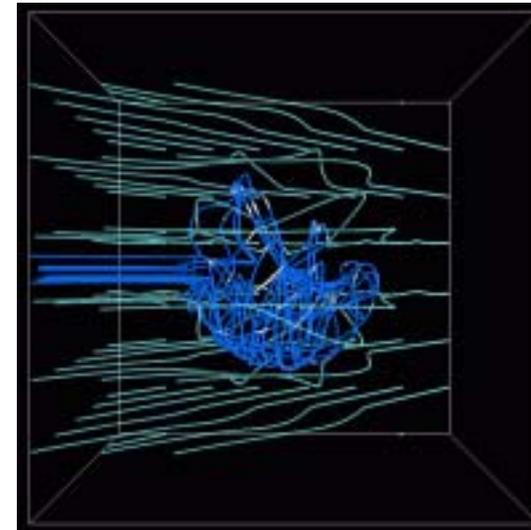
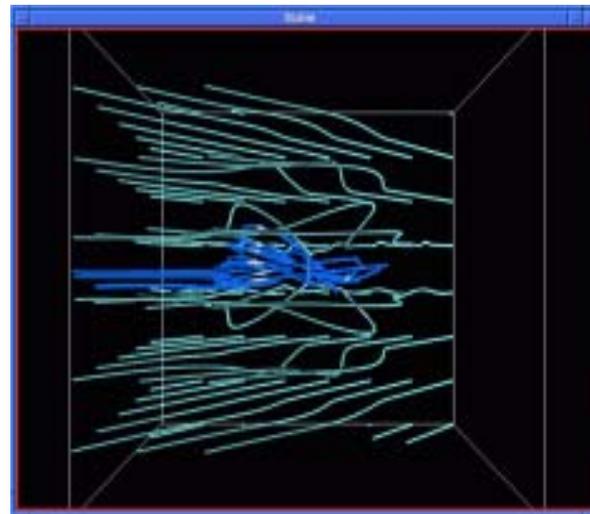


= 100

孤立磁束管の場合

- 強いねじれがあれば水平方向への膨張は抑えられてコロナへ浮上する(Matsumoto et al. 1998, Fan 2001, Magara 2003, 2004)
- 強いコロナ磁場でも膨張を抑えられる
- 要は”2次元”になると浮上しやすい
- 磁束の量も関係あり

QuickTime GIF 6LIEÉVÉçEOÉaÉÁ Ç™Ç±ÇÄEsÉNE'ÉÉÇ%á@ÇÉÇzÇ¼Ç...ÇÖiKávÇ-ÇÁB



コロナへ浮上する条件

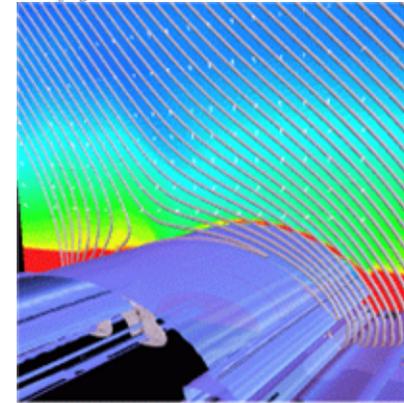
- 磁束 $> 10^{20}\text{Mx}$ (Chou & Wang 1987)
- ねじれは？ 実際にはそれほどねじれているようには見えない。
- 定量的な確認。ヘリシティ入射。
- ごく初期の浮上磁場領域、もしくはエフェメラル領域で水平方向の膨張の様子をとらえたい

コロナ磁場との相互作用

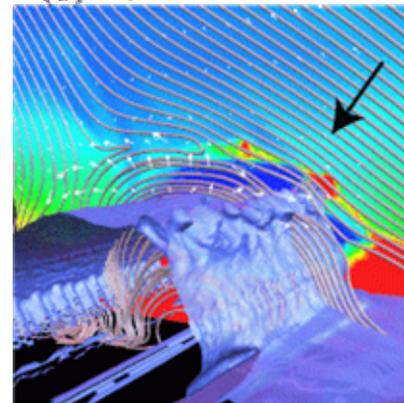
リコネクション = > X線ジェット、サージ

QuickTimey Ç² GIF êLiÉvÉçÉOÉáÉÄ Ç™Ç±ÇÃÉsÉNÉ´ÉÉÇ%á@ÇÉÇzÇ¼Ç...ÇÖiKónÇ-Ç ÁB

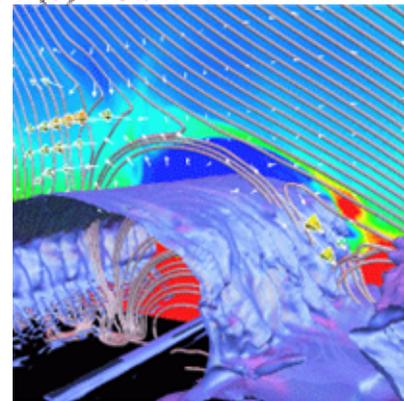
(a) t=70



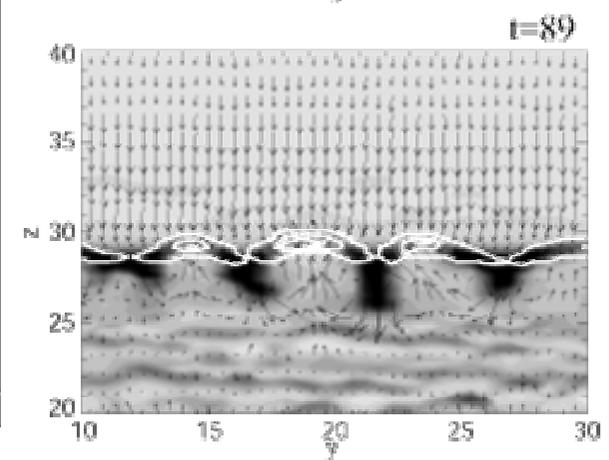
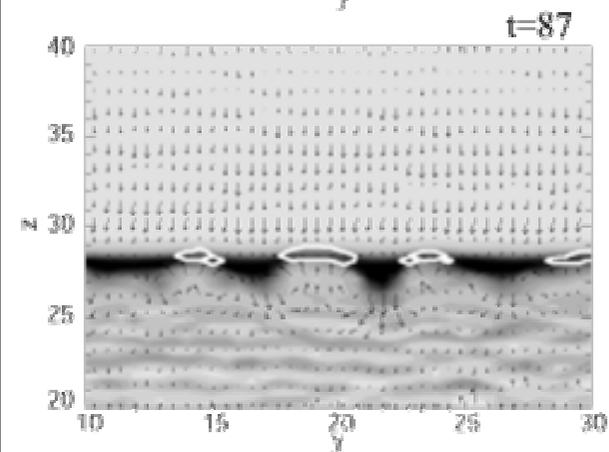
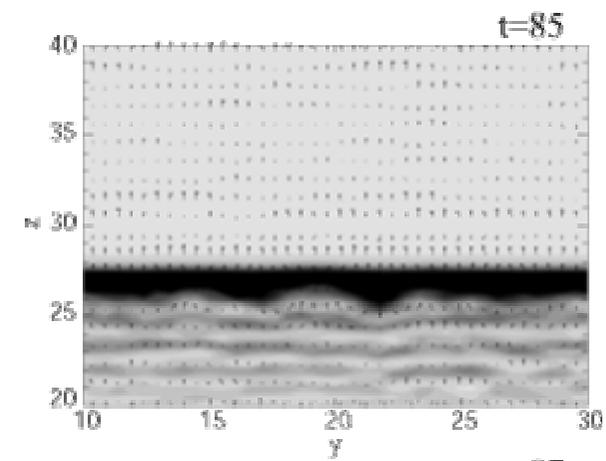
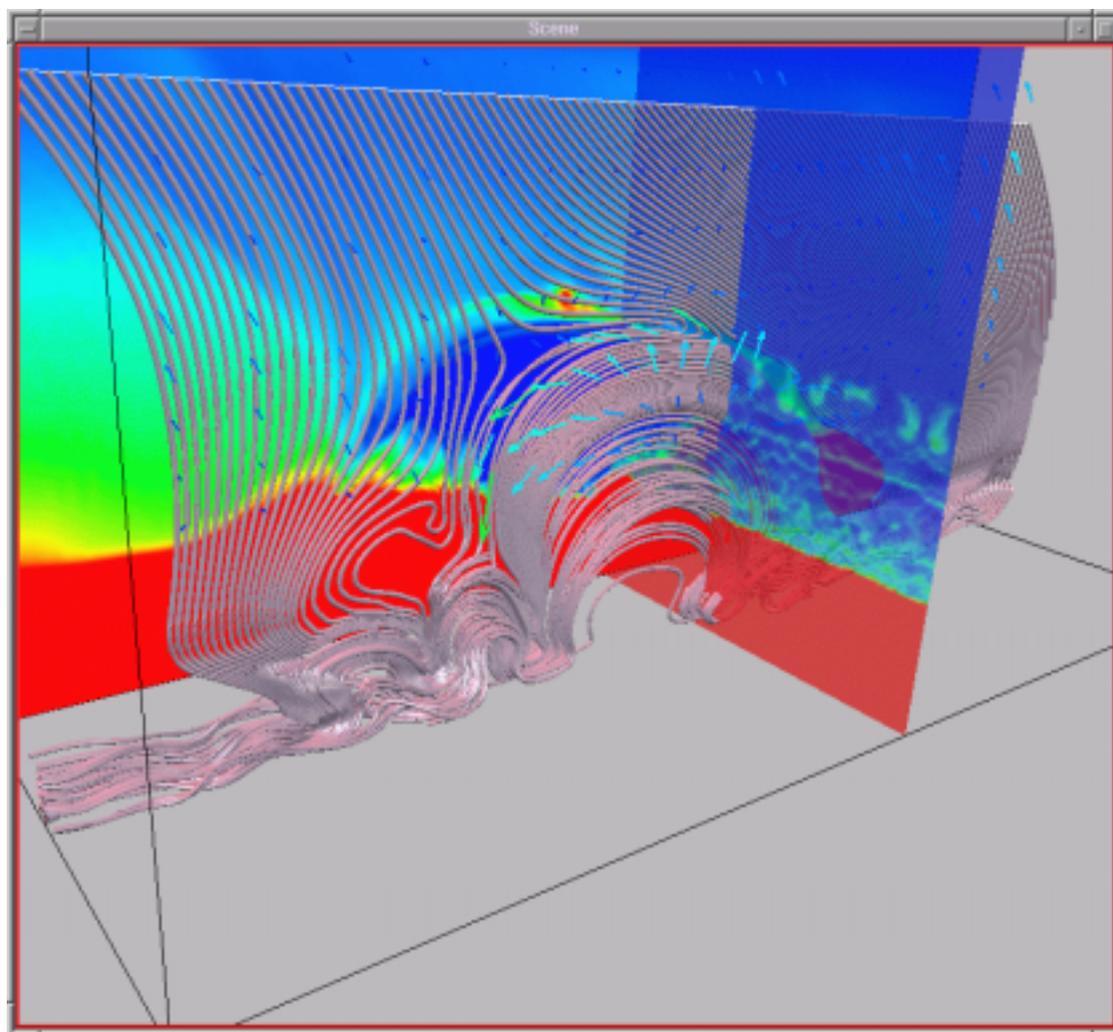
(b) t=92



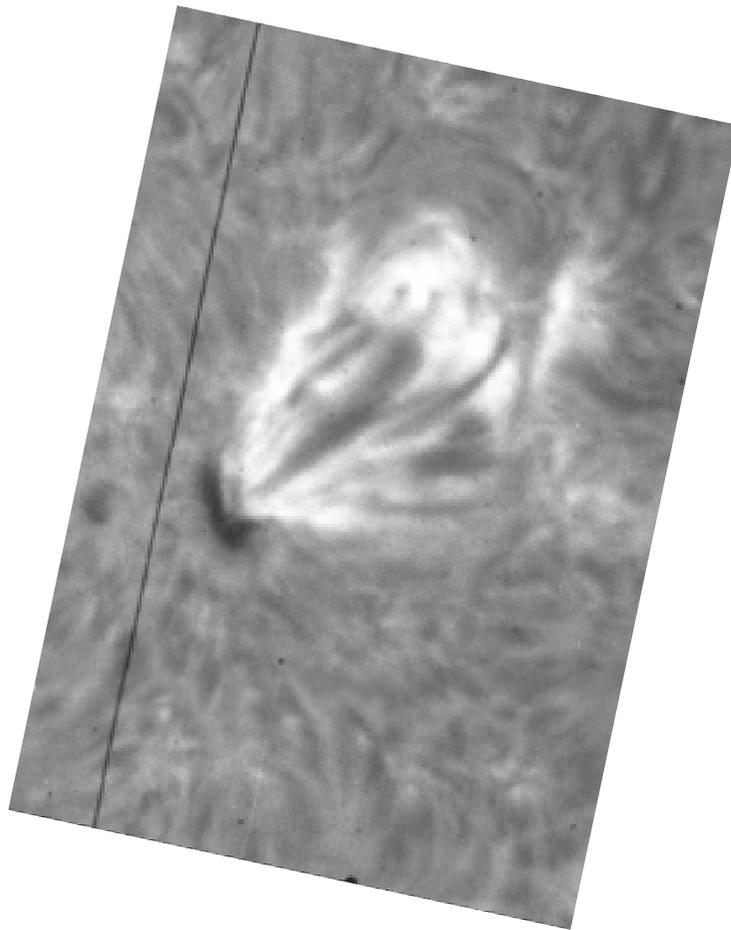
(c) t=97



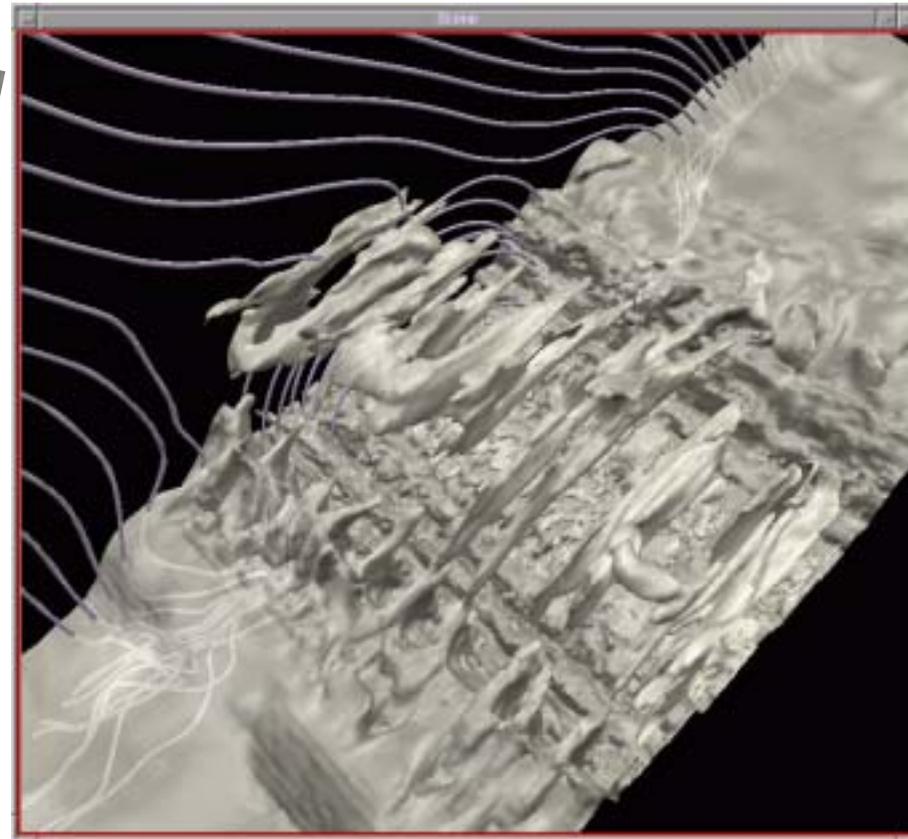
レイリーテイラー不安定



フィラメント構造の形成 (Arch Filament System)



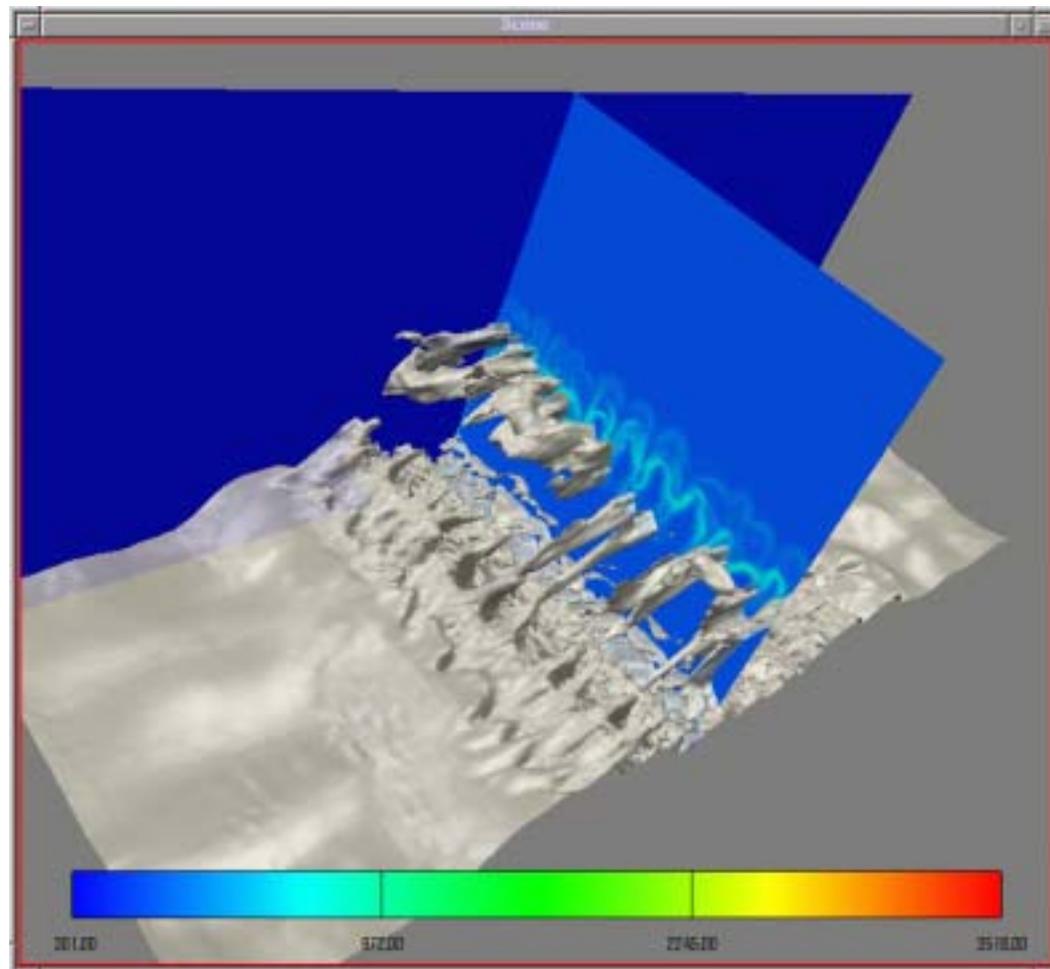
飛騨DST/H



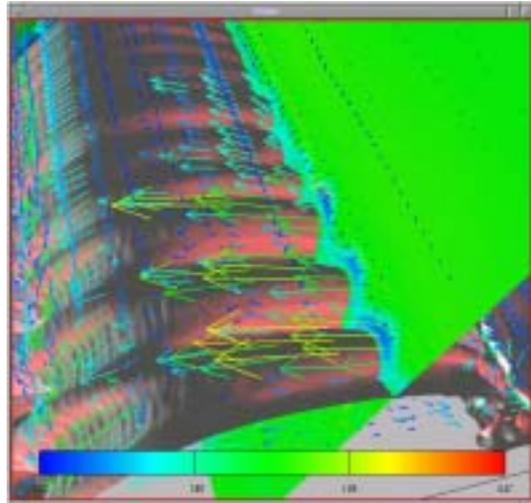
密度等値面

コロナ磁場とのインターチェンジによる電流シート形成

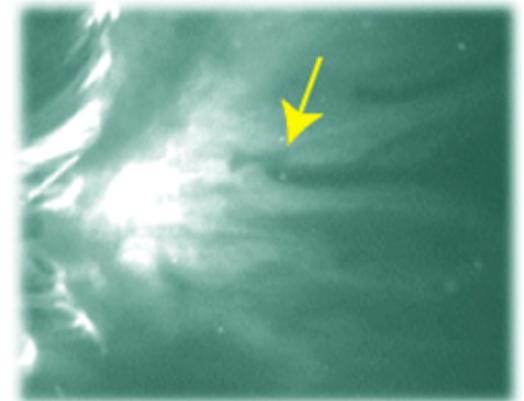
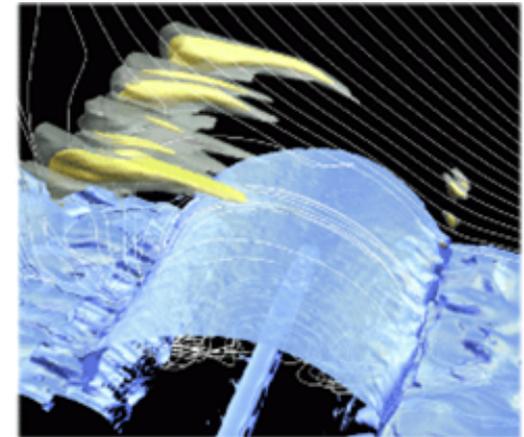
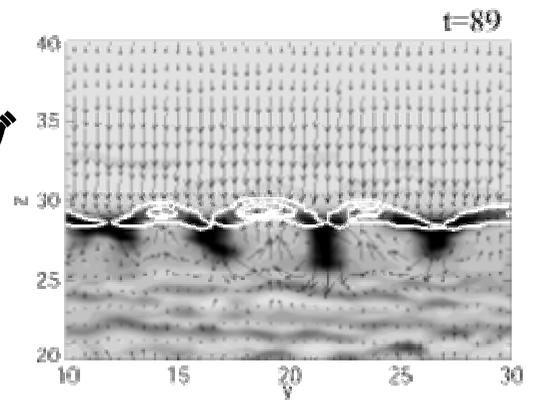
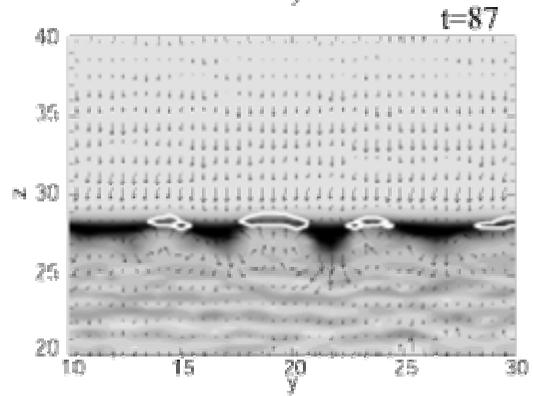
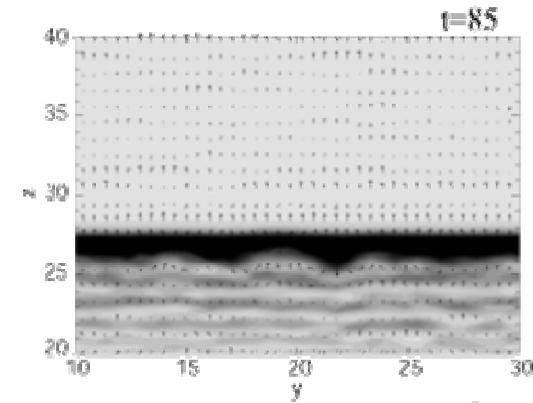
密度等値面
+ 電流分布断面



パッチ状リコネクション

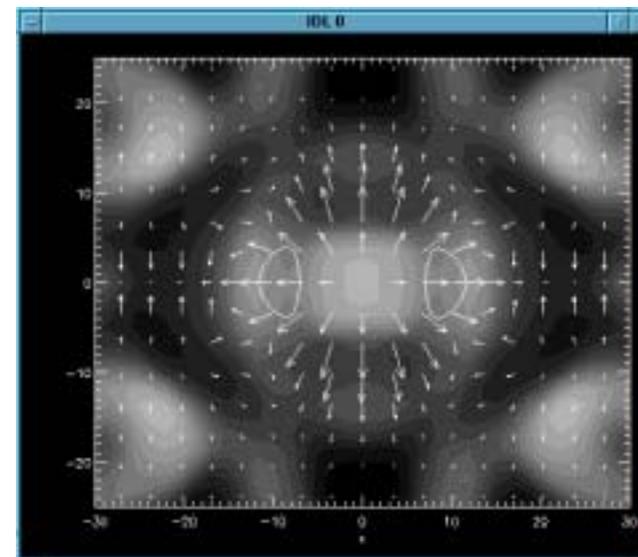
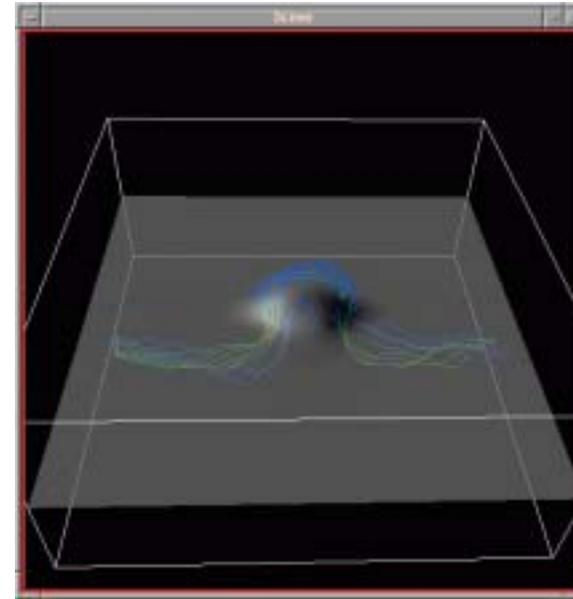


- 上昇部分で電流増加
=> 異常抵抗発生
=> 速いリコネクション
- インターチェンジとリコネクションの非線形カップリング



対流と浮上磁場

- 光球の水平速度場(対流運動)と浮上磁場の関係は観測例も少ない
- 浮上領域に長時間続くわき出し構造(Strous 1996, Kozu 2004)

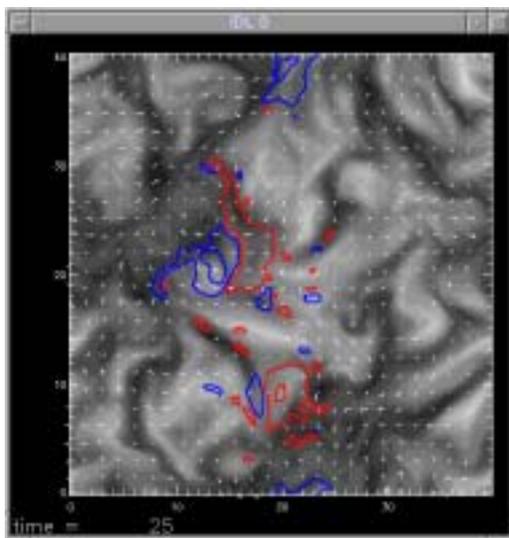


$\text{div}\mathbf{V}$ at $z=0$

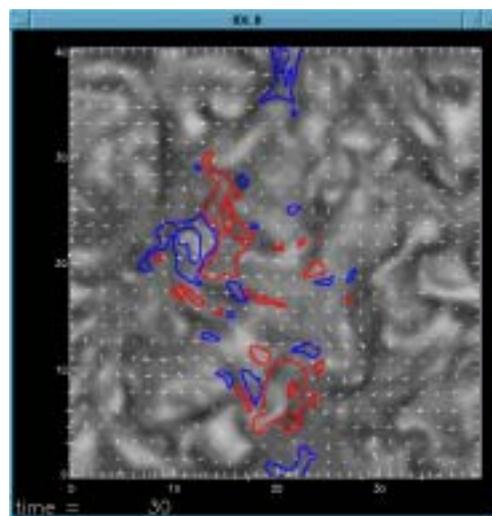
対流 + 浮上磁場の シミュレーション

わき出し、渦度と浮上磁場の相関
はあまりはっきりしない

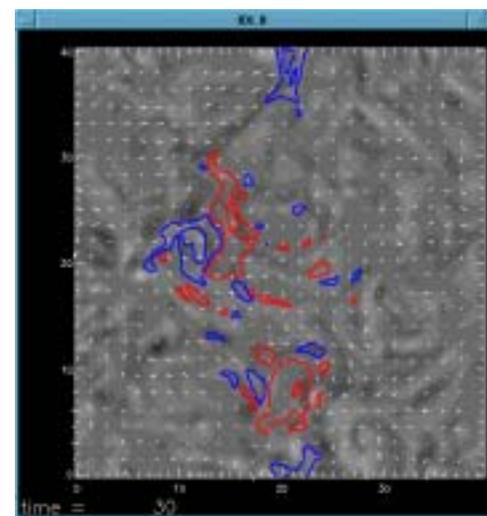
QuickTimey Ç² GIF êLİ&ÉvÉçÉÖÉäÉÁ Ç™Ç±ÇÄÉsÉNÉ`ÉÉÇ%â@ÇÈÇzÇ¼Ç...ÇÖİKóvÇ-Ç AB



B_z, V_z



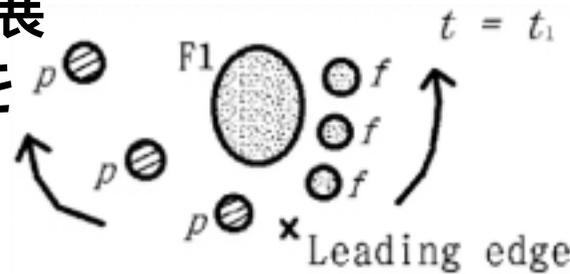
$B_z, \text{div} V$



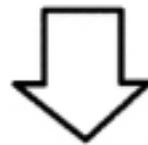
$B_z, \text{Curl} V$

光球の下の構造の推定

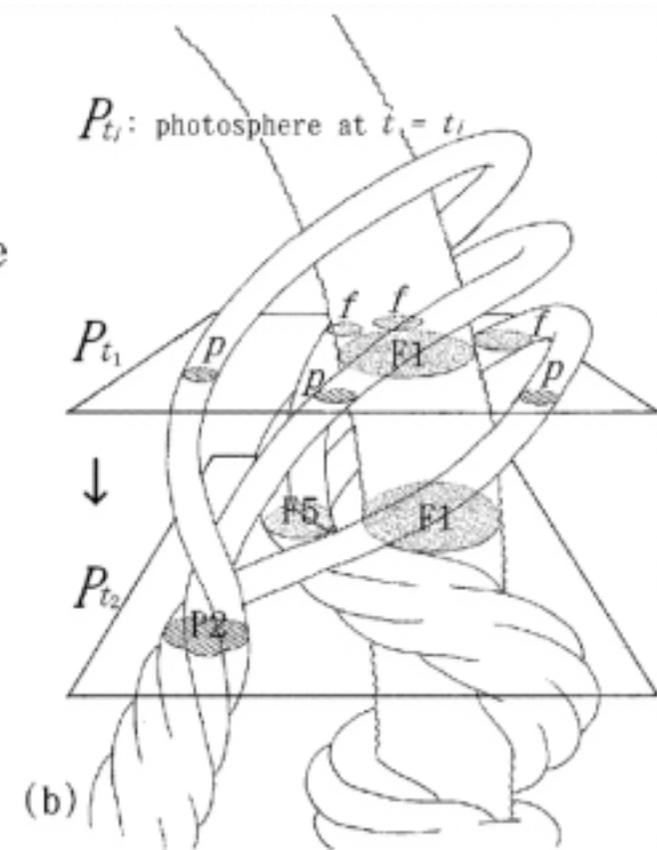
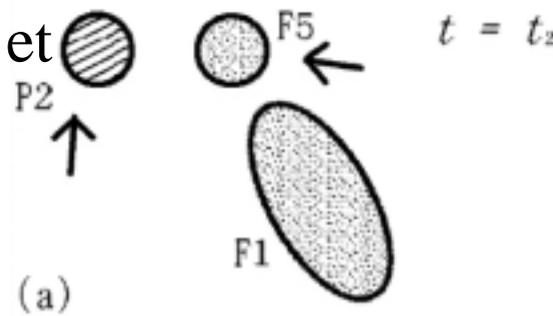
- ベクトル磁場の時間発展を追う => 石井モデルを定量的に。



- フレアの起きなさそうな黒点群でもして。



- ヘリシティ入射(Kusano et al. 2002)



Ishii et al. 1998

浮上磁場まとめ

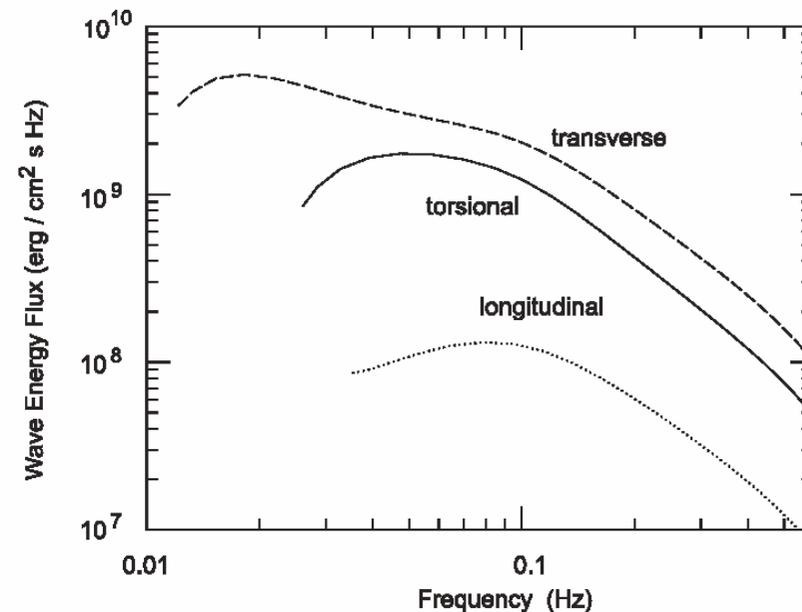
- **ごく初期の観測(ただしどこに出現するかはわからない)**
 - 水平方向の広がり 速度 ~ 10km/s? タイムスケール ~ 数分
 - 彩層(H α)イメージとベクトル磁場
- **コロナ加熱**
 - 加熱を受けている場所を高い空間分解で特定(XRT)
 - H α フィラメントと高温ループの位置関係
 - リコネクションアウトフロー、高温 + 低温ジェットの数値場検出(EIS)
- **対流との相互作用**
 - ベクトル磁場と水平速度場(粒状斑、Gバンド)の同時観測。粒状斑の時間分解の方が重要(< 数分)
- **光球下の構造の再構築**
 - 一つの活動領域を(できれば誕生から)ずっと追う
 - ヘリシティ入射
 - 型(出るかな?)以外でも
- **彩層磁場(Heなど)の同時観測による3次元構造推定**
 - 地上観測との協力が必要?

磁気対流のトピックス

- 黒点の構造と対流
 - 暗部 – oscillatory convection?
 - 半暗部 – filamentary convection?
 - Light bridge – flux separation?
 - MMF, サテライトスポットの起源
 - subsurface structure
- 対流崩壊と微細磁束管の形成
- 粒状斑、中間粒状斑、超粒状斑
- 対流と微細磁束管の相互作用による波動の発生

対流と磁場の相互作用によるMHD波の発生

- コロナ加熱に重要
- Slow modeは証拠有(Ofmanなど)
- 線形理論Lighthill-Stein理論,Ulmschneider et al.
- 非線形理論はまだまだこれから



非線形シミュレーション

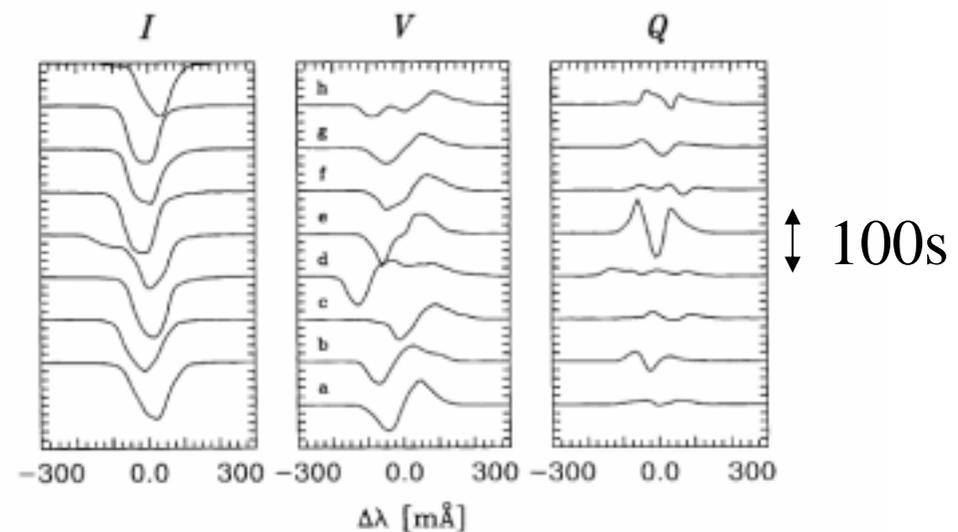
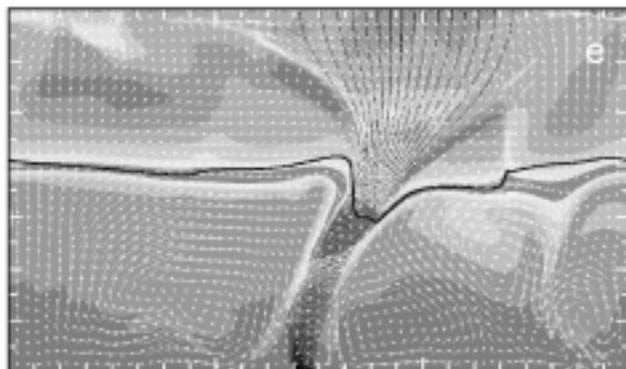
2次元MHD +
輻射輸達

QuickTime[®] ヲ YUV420 ÉRÀ[ÉfÉbÉN êLí£ÉvÉçÉOÉâÉÄ Ç™Ç±ÇÃÉsÉÉNÉ`ÉÉÇ¼â@ÇÈÇzÇ½Ç...ÇÕïKónÇ-Ç ÅB

Steiner et al. 1998

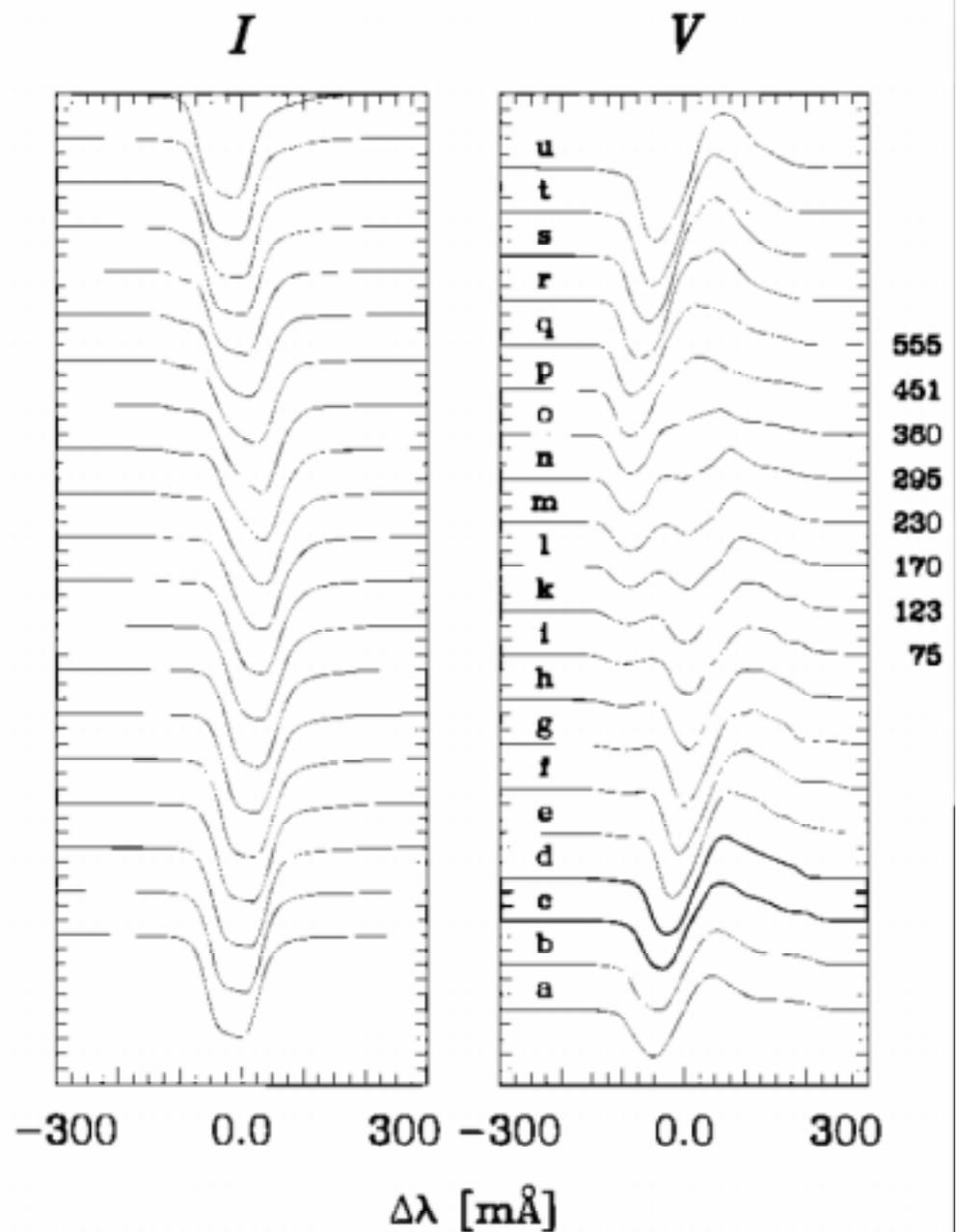
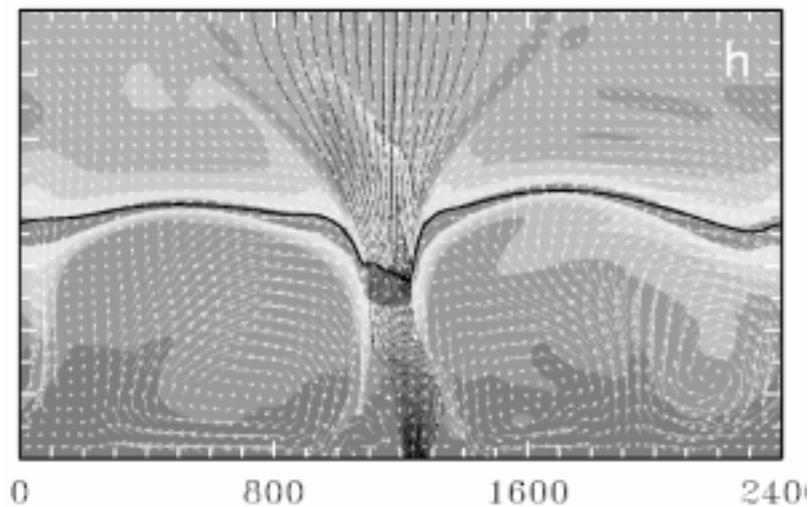
Swaying motion

- 磁場を曲げている力は主にガス圧。dynamic pressureの寄与は小さい
- $t \sim 150\text{s}$, $v \sim 4\text{km/s}$
- $F = 4 \times 10^8 \text{ erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (計算領域内平均) \Rightarrow filling factorを1%とすれば $3 \times 10^7 \text{ erg cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



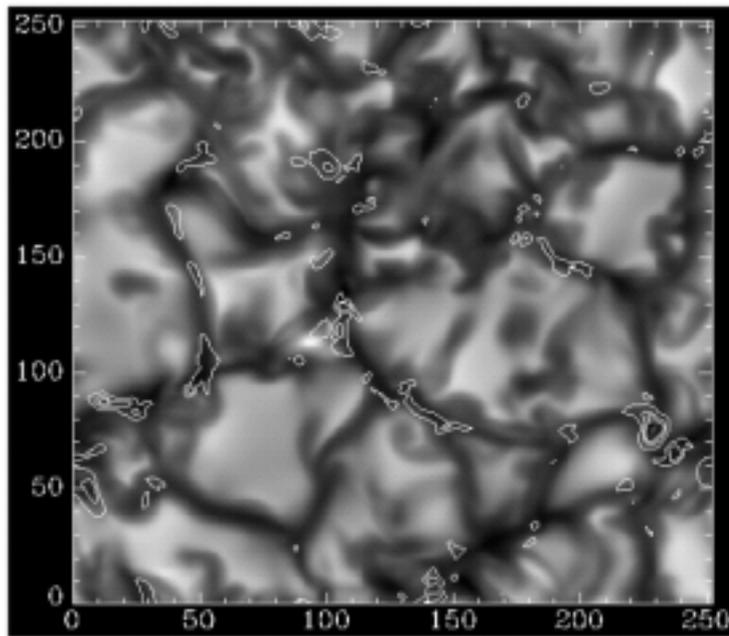
V-profileに現れる shockの徴候

- blue shift成分
- 検出には時間分解10秒程度必要

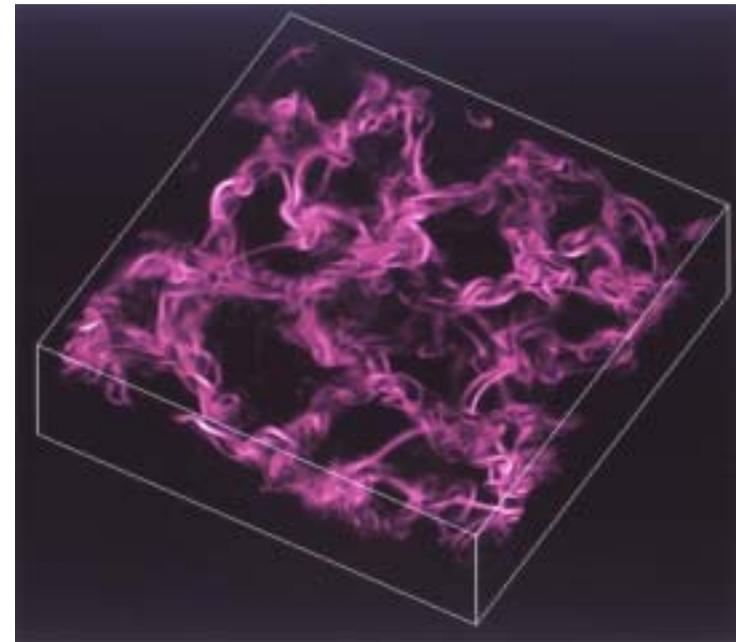


3次元の場合 Stein & Nordlund 1998

光球面垂直速度(gray)
+ マッハ数(コントア)



渦度分布

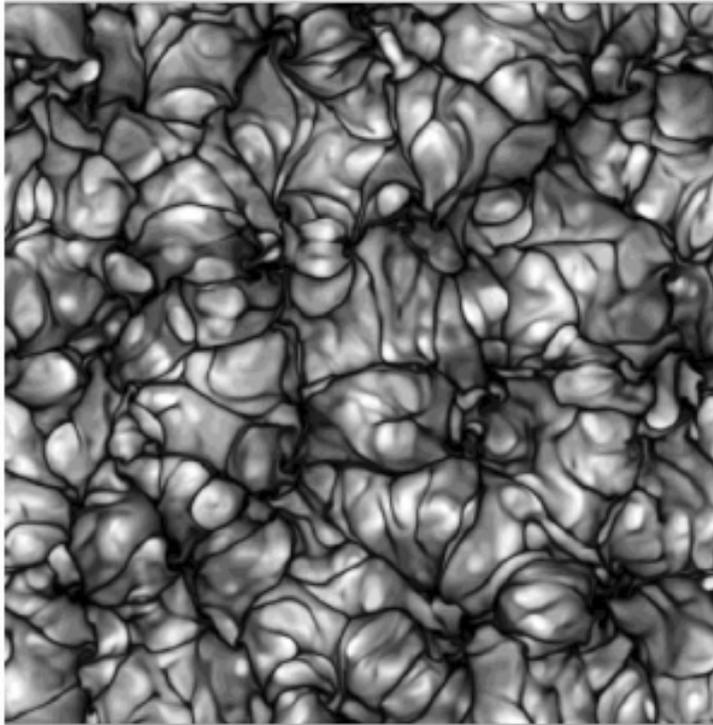


- 対流セルの境界 (下降流領域) に渦集中 = > torsional Alfvén波
- 下降流れ付近でショック = > 非線形波 = > すぐに縦波に？

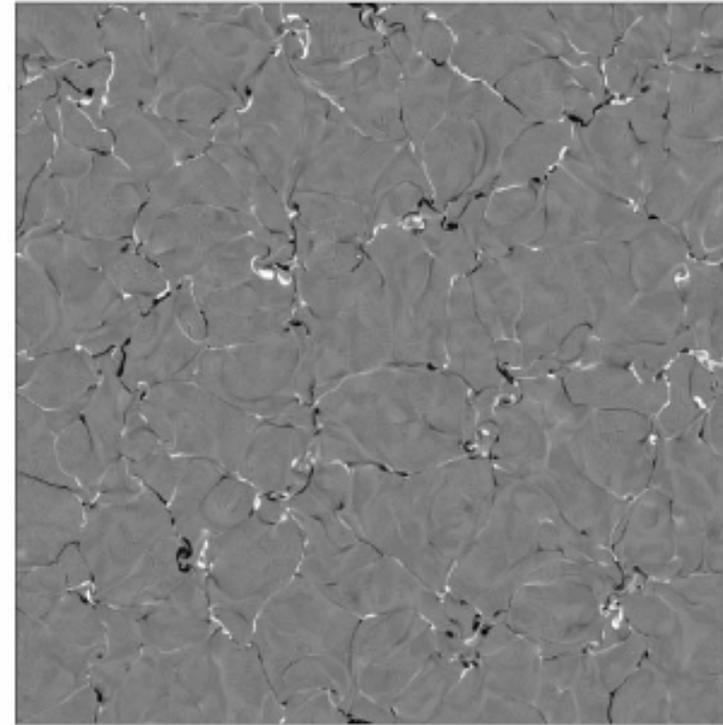
MHD, Bousinesq近似

Cattaneo et al. 2001

temperature



B field

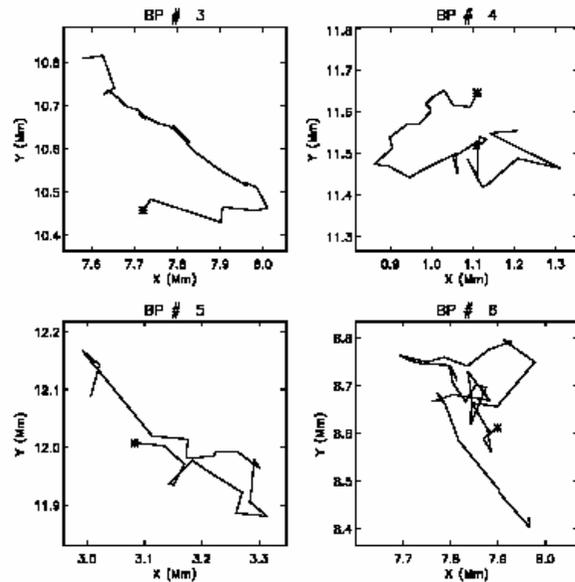


- 対流セルは1層しかないが、個々のセルの相互作用でメソスケールの構造
- 中間粒状斑の境界に磁場集中、渦度も集中

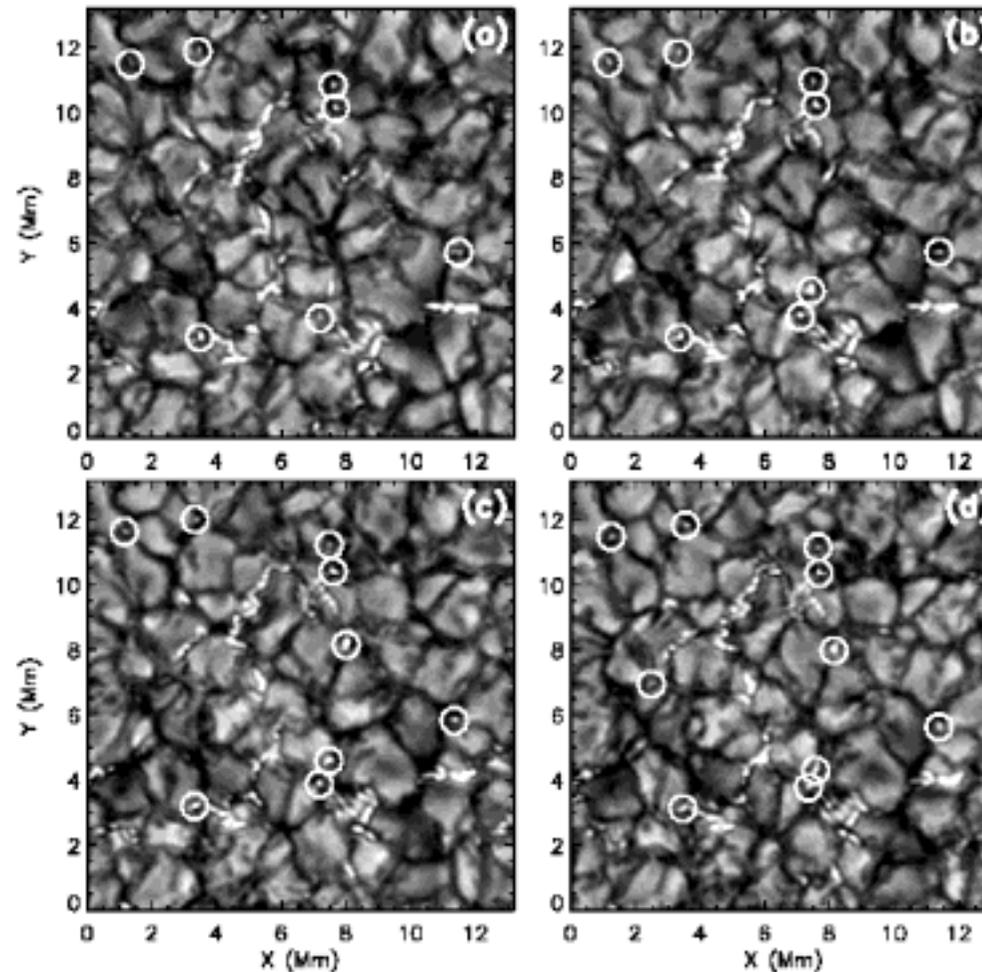
脱線：中間粒状斑の起源

1. 「中くらい」の大きさの対流セル
 - 深さ：粒状斑 ~ 1000km、中間粒状斑 ~ 数1000km、超粒状斑 ~ >10000km
 2. 粒状斑のcollective interaction (Cattaneo et al. 2001)
 - Vortexによる安定化(Weiss)
- Vortex motionの検出：データ処理でどこまで水平速度場を追えるか
 - Correlation tracking, feature tracking, intensity gradient
 - 速度 ~ 1km/s、サイズ ~ 1000km 時間分解100s以下

Vortex motionの検出



- 個々のGバンド輝点の動きを追う
- 今のところシステムティックなVortex motionの証拠はなし



Niselson et al. 2003

磁気対流まとめ

- 波励起、コロナ加熱
 - 静的な構造、統計的性質だけでなく、可能な限り小さいスケールのダイナミクスまでしっかり追う
 - 偏向の時間変化、(地上)分光観測
- 渦、vortex motionの検出
 - torsional Alfvén wave
 - mesogranulation
 - データ解析の手法 : correlation tracking, feature tracking, スペクトル/ウェーブレット解析
 - 浮上してくる磁場が光球下の対流構造のプロープになるかもしれない。