



-- 将来に向けて期待できる観測 --

フレア研究:

ポストフレアループ研究の今後の展望

高棹 真介 TAKASAO Shinsuke

(京都大学 附属天文台)

議論したい内容

ポストフレアループ研究の観点から見る 新たな研究方針

- ペチェックショックの存在を調べる新たな方法の提案
- 他天体フレアへも応用可能な太陽フレア物理の話題

議論したい内容

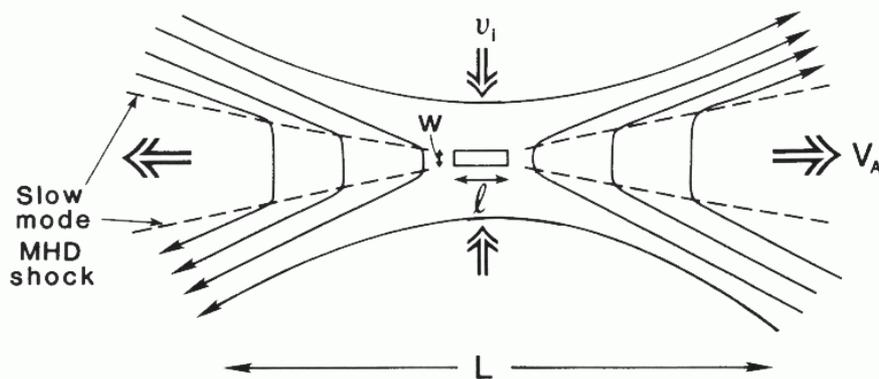
ポストフレアループ研究の観点から見る 新たな研究方針

- ペチェックショックの存在を調べる新たな方法の提案
- 他天体フレアへも応用可能な太陽フレア物理の話題

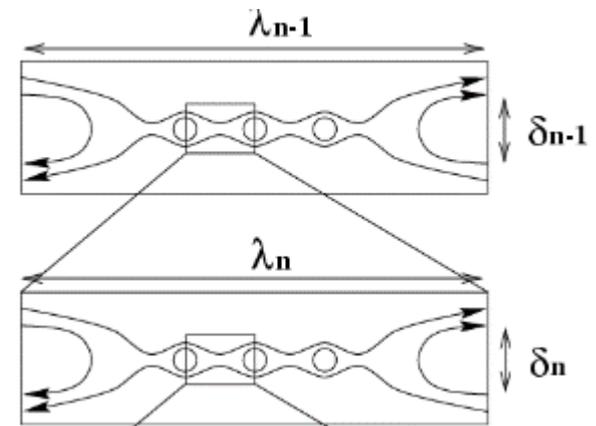
太陽フレアで 未解明で重要なこと

どうやって観測される高いエネルギー解放率(熱化率)を
実現しているのか？

- 「高いリコネクション率」であれば「高いエネルギー解放率」とは限らない！！
- プラズモイドができればリコネクション率が高くなると言われているが、熱化とのつながりが不明瞭
- ショック加熱が有望視(観測的にはバルク加熱を支持？)



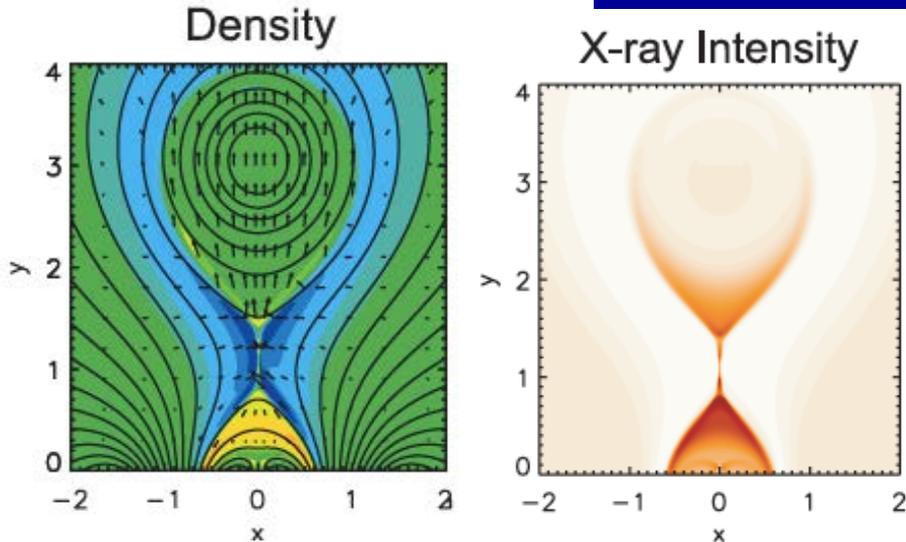
ペチエック的な大きなスケールの
ショック加熱？



無数のプラズモイドの周りに
できるショックの加熱の合計？

インフロー・アウトフロー領域の観測の困難さ

Shiota+2005



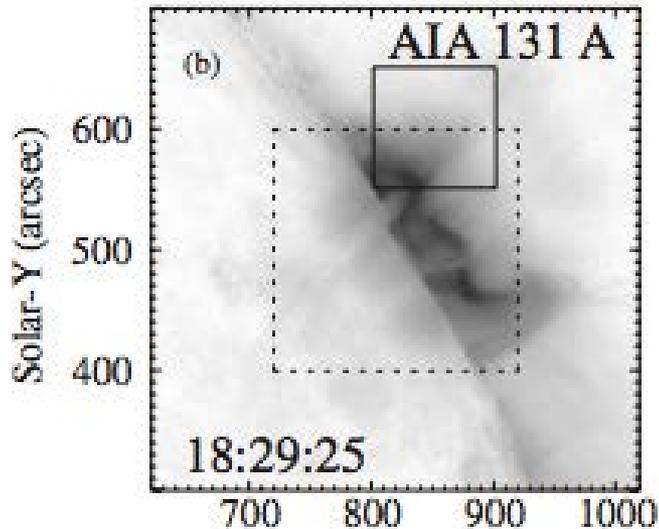
ショックを調べるためには
インフロー・アウトフロー領域の
両方を見る必要
しかし...

インフロー領域:

- ・希薄波によって**密度減少**

アウトフロー領域:

- ・**狭い**領域
- ・多くの場合、X線、EUVで**暗い**
- ・暗いため、**位置の判断も困難**
- ・**電離非平衡**によって解釈が困難



Imada+2013

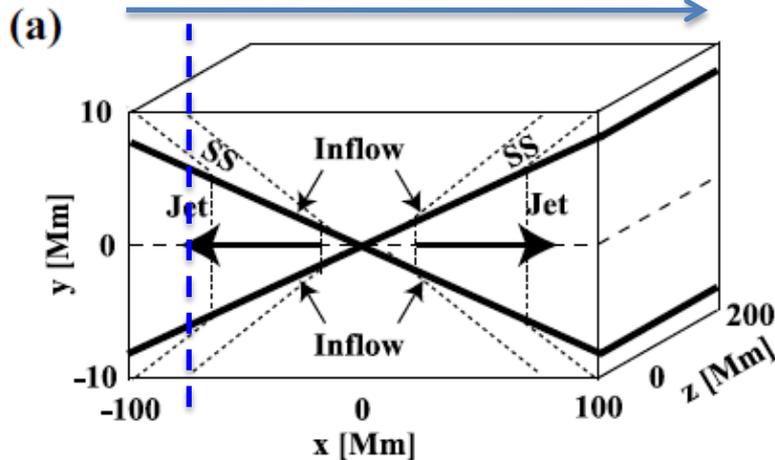
もっと見やすく解釈のしやすい領域で
スローショックの痕跡を見つけられないか？

How to diagnose MRX region?

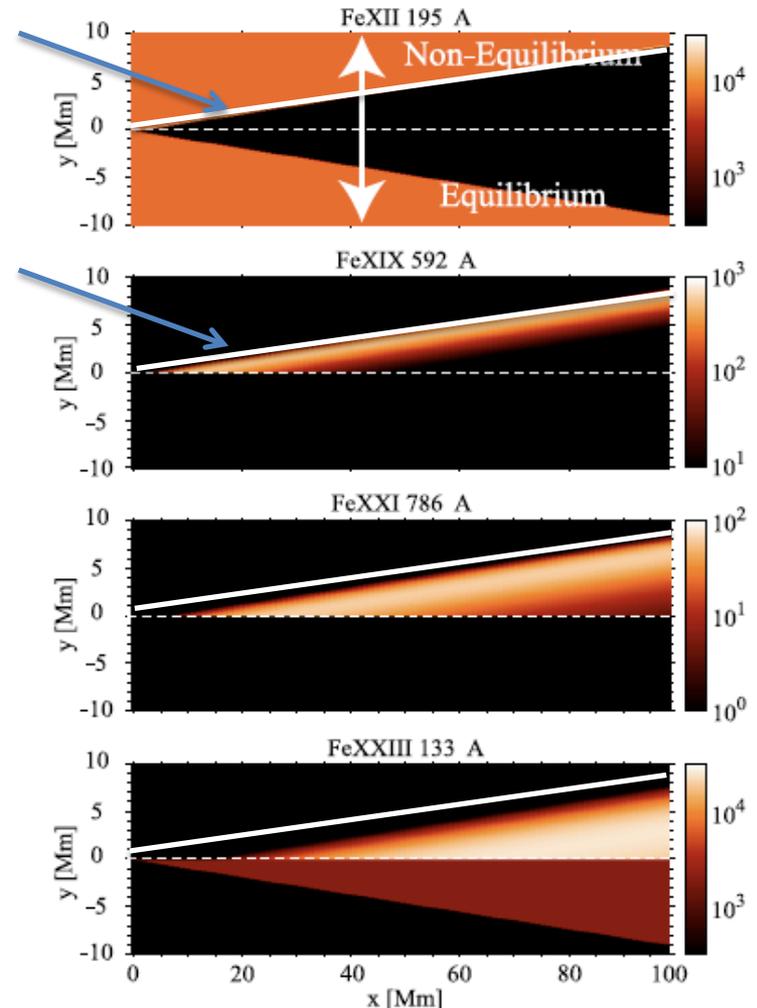
Ionization process with line spectroscopy

Spatial resolution is enough to resolve.

Scanning time $< 100\text{s}$



Slow-mode Shock

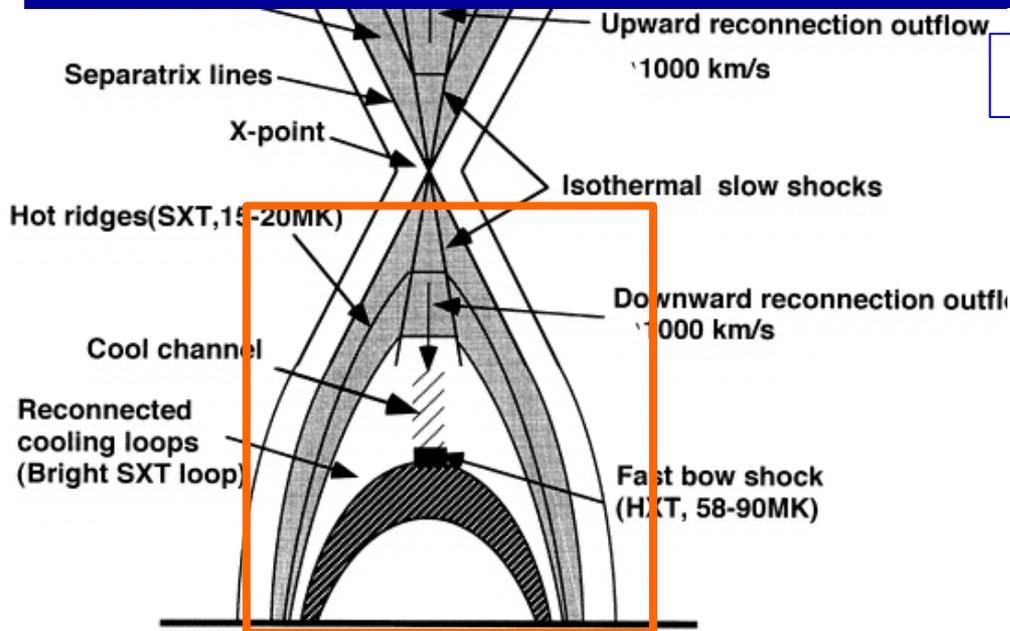


Fast scanning ($< \text{Alfven time} \sim 100\text{s}$)
with high throughput spectrometer.
Wide temperature coverage.

Diagnose velocity, temperature, density
with spectroscopic observation!

Imada et al., 2011 ApJ

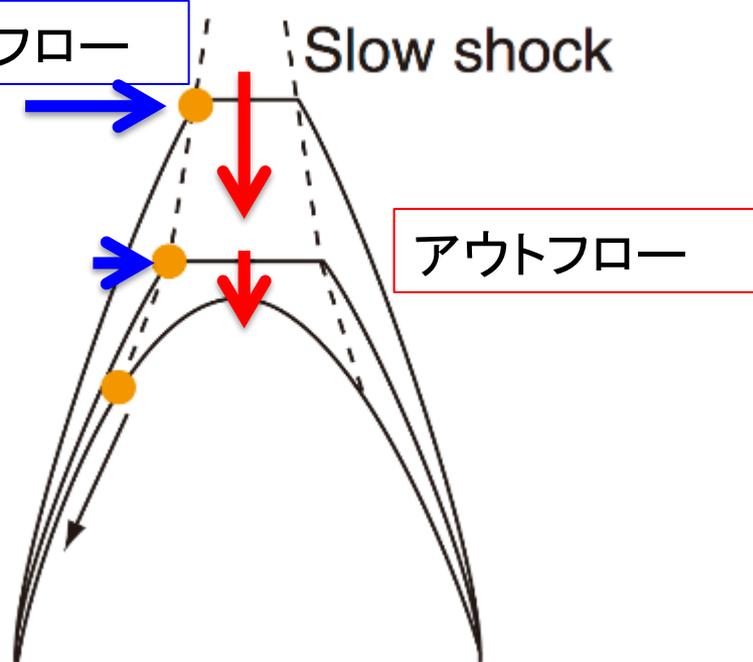
ポストフレアループの観測から ペチェックショックの存在を探る



Tsuneta et al.1997

インフロー

Slow shock



アウトフロー

アウトフローの減衰

➡インフロー速度の減少(質量保存則より)

➡スローショックの伝播速度の増加(上流の速度の減少のため)

一本の磁力線に注目するとスローショックは
足元に向かって伝播するはず

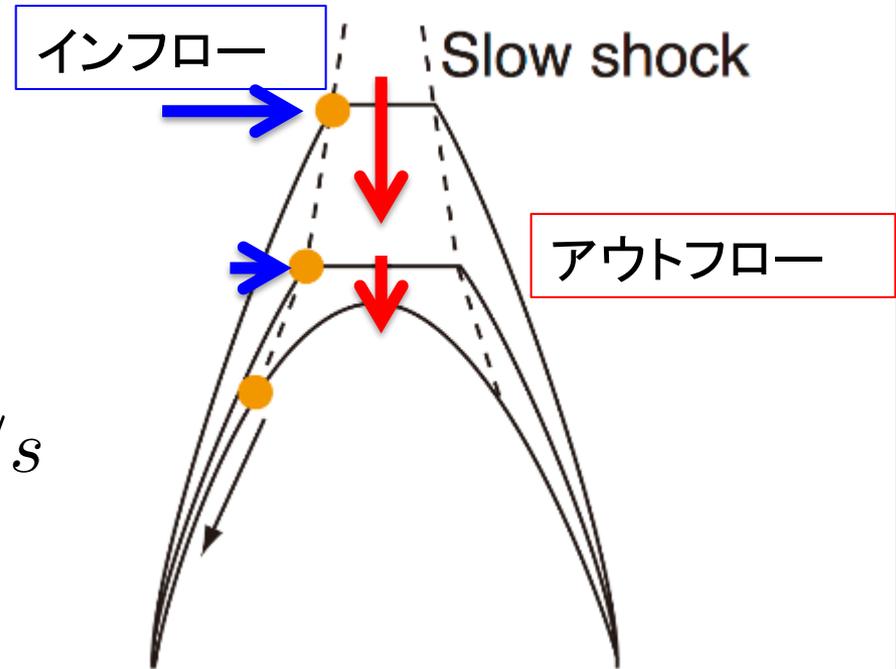
ポストフレアループの観測から ペチェックショックの存在を探る

リコネクションしてから
アウトフローが止まるまでに
かかる時間

$$L \sim 10^{10} \text{ cm}$$

$$V_{outflow} \sim V_A \sim 10^8 \text{ cm/s}$$

➡ $L/V_{outflow} \sim 10^2 \text{ sec}$



電離平衡にかかる時間スケール: $\sim 100 \text{ sec}$

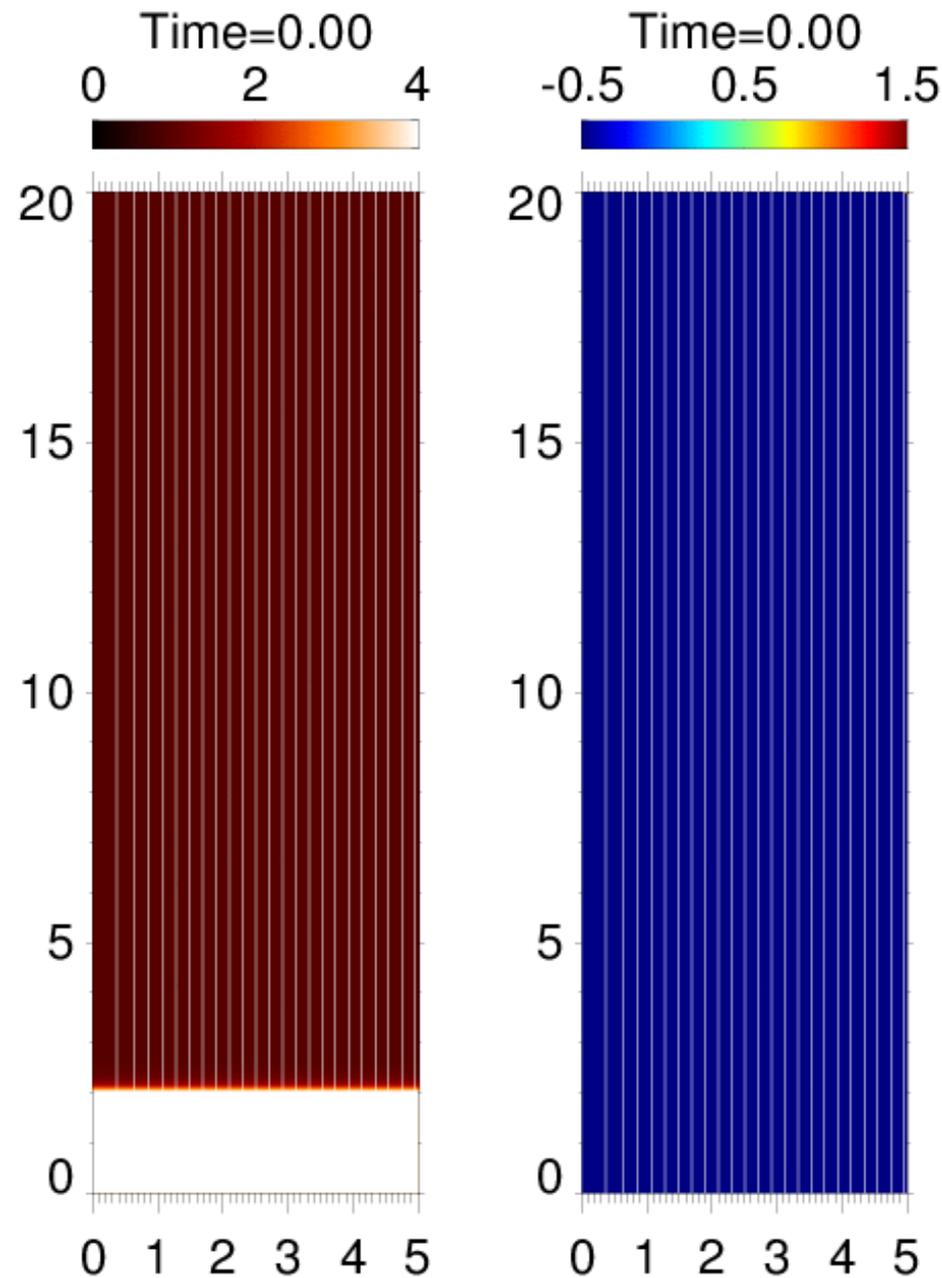
⇒ アウトフローが止まる頃には電離平衡の仮定が使える可能性

問題点

- ・狭い領域
- ・多くの場合、X線、EUVで暗い
- ・暗いため、位置の判断も困難
- ・電離非平衡によって解釈が困難

ポストフレアループ観測で
克服可能では

2次元MHDシミュレーション による考察



2次元MHDシミュレーション
(簡単のため、熱伝導無し)

左:密度
右:エントロピー

ショック面ではエントロピーが
不連続に変化

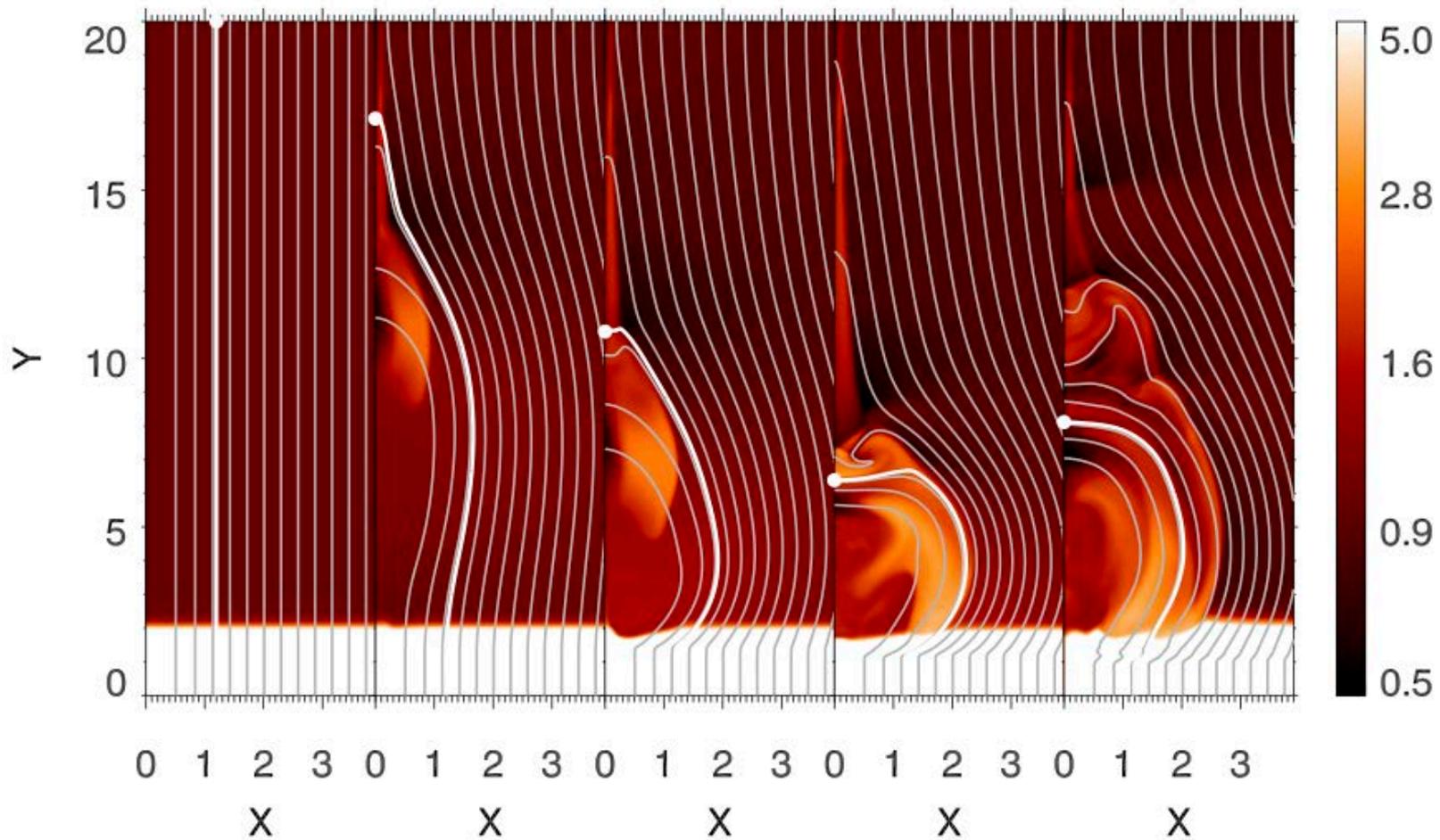
初期の段階以外でも
ポストフレアループのふちで
ショックの伝播は生じ続けている

2次元MHDシミュレーションによる考察

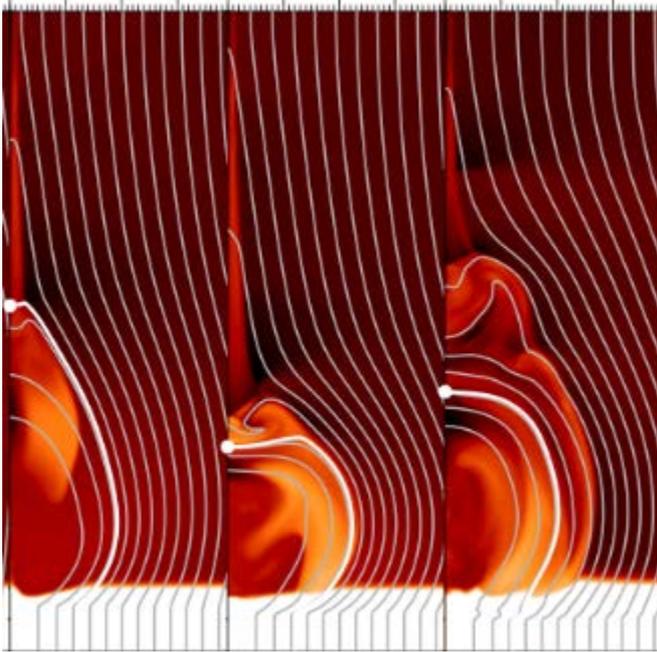
1本の磁力線をトラックして、磁力線に沿って物理量を測る

Log Density (簡単のため、熱伝導無し)

Time = 0.0 Time = 10.0 Time = 12.0 Time = 15.0 Time = 20.0



物理量の測定方法

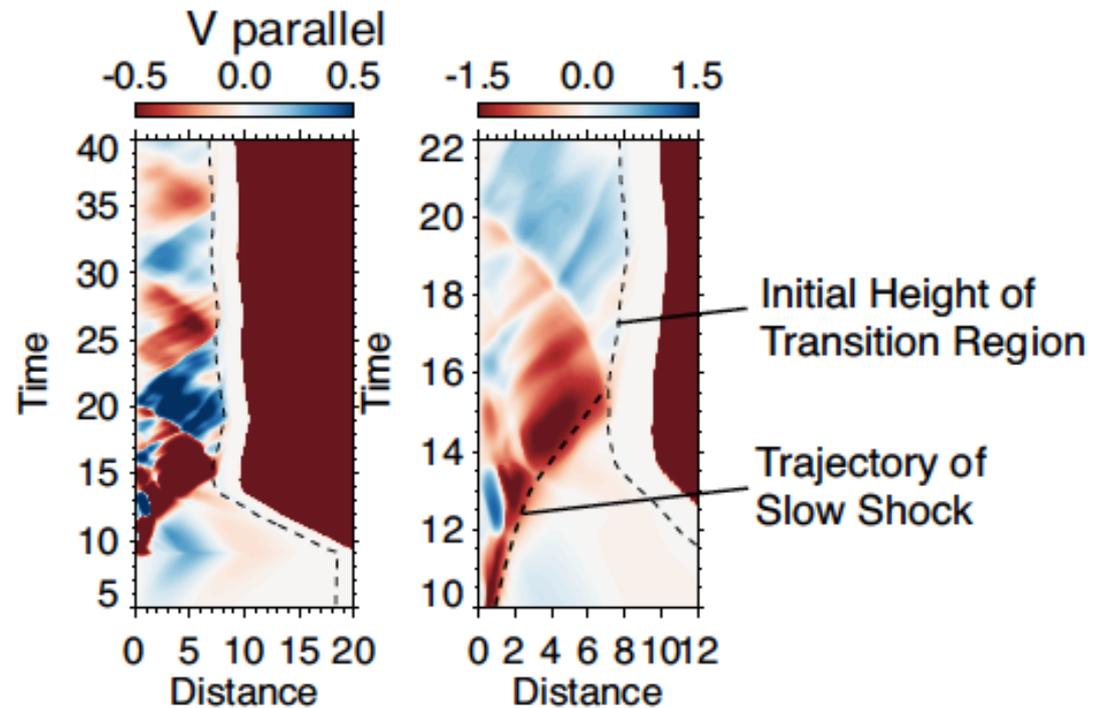
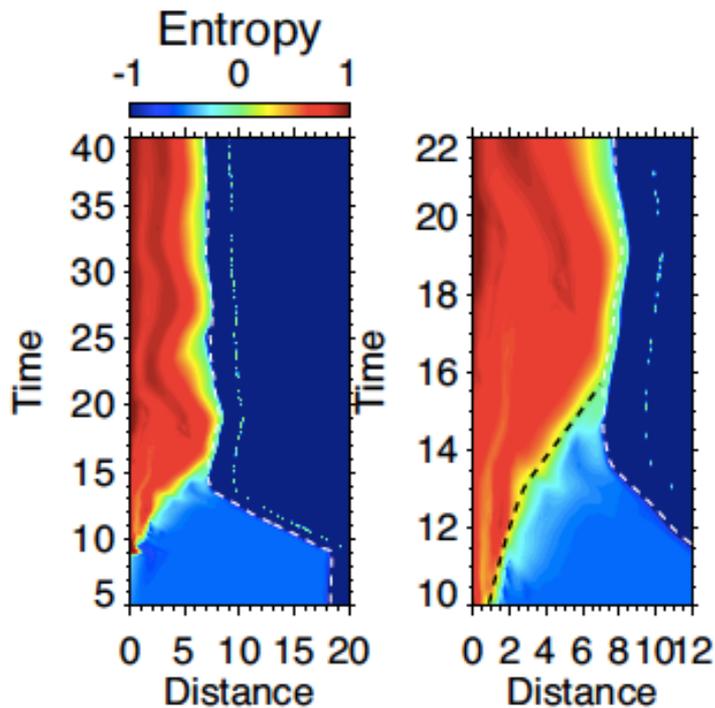


Distance:

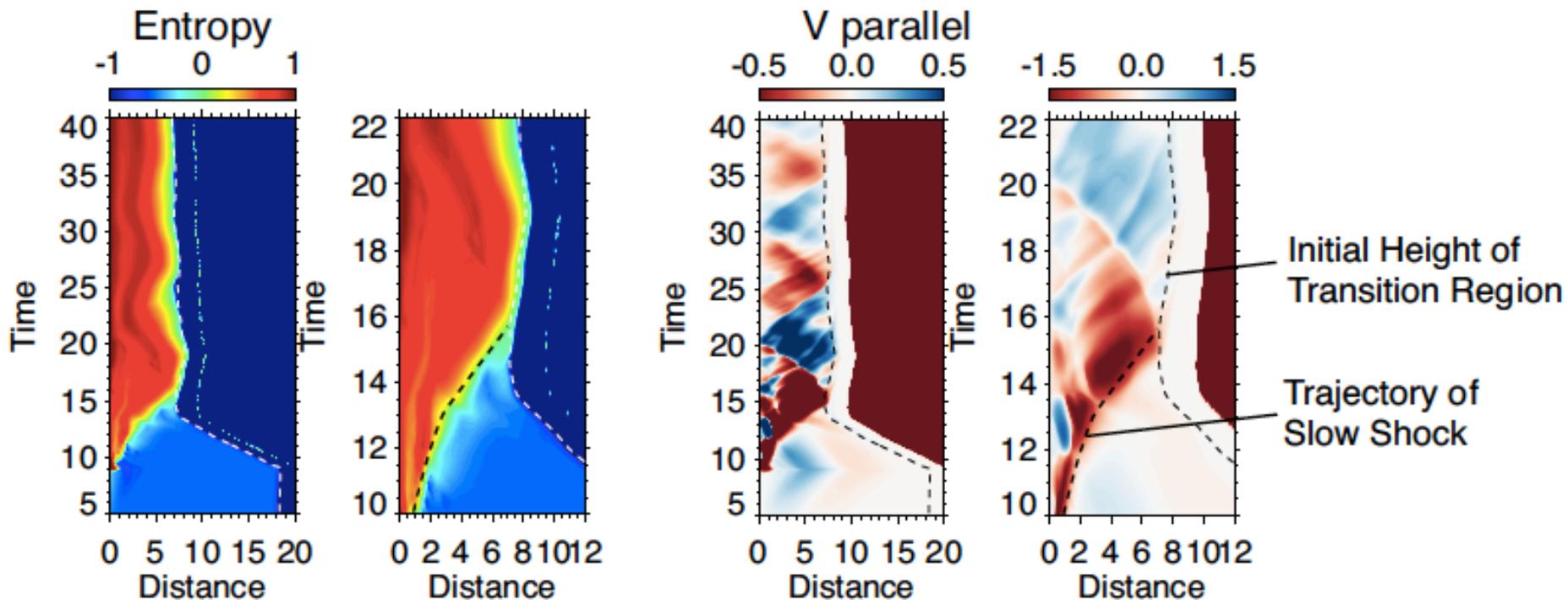
ループトップの位置からの磁力線に沿った距離

Distance = 0 :

ループトップの位置に対応 (左図の白丸)



2次元MHDシミュレーションによる考察



アウトフロー領域に付いていたスローショックがループ内を伝播

→ ループ内のスローショックは
もともとペチェックショックだったことを確認

幅広いパラメータに対してループ内の波動現象を理論的に調べておき
観測と比較できる準備を進めるべき

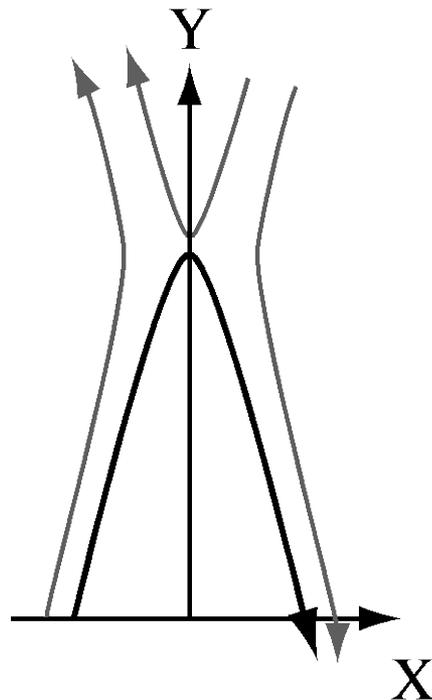
リコネクションの物理をモデル化し 低い計算コストで観測との比較を可能に

多次元MHDシミュレーションに熱伝導、電離非平衡計算を含めて
パラメータサーベイをすることは困難

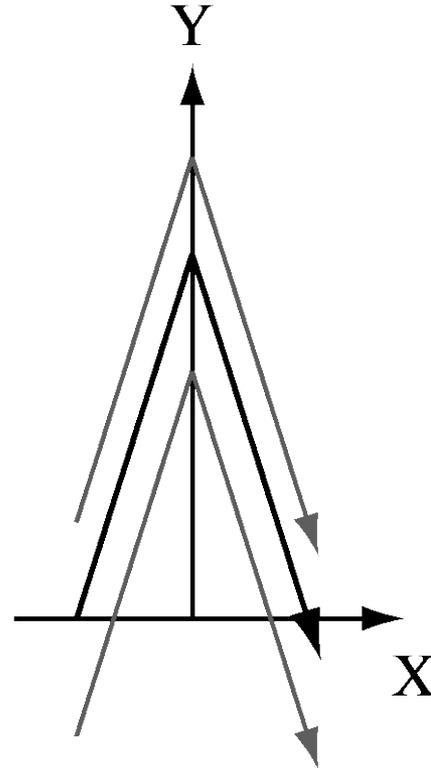
➡簡易MHD(擬2次元MHD)フレアループモデルを構築

(Takasao, Matsumoto, Nakamura, and Shibata, in prep)

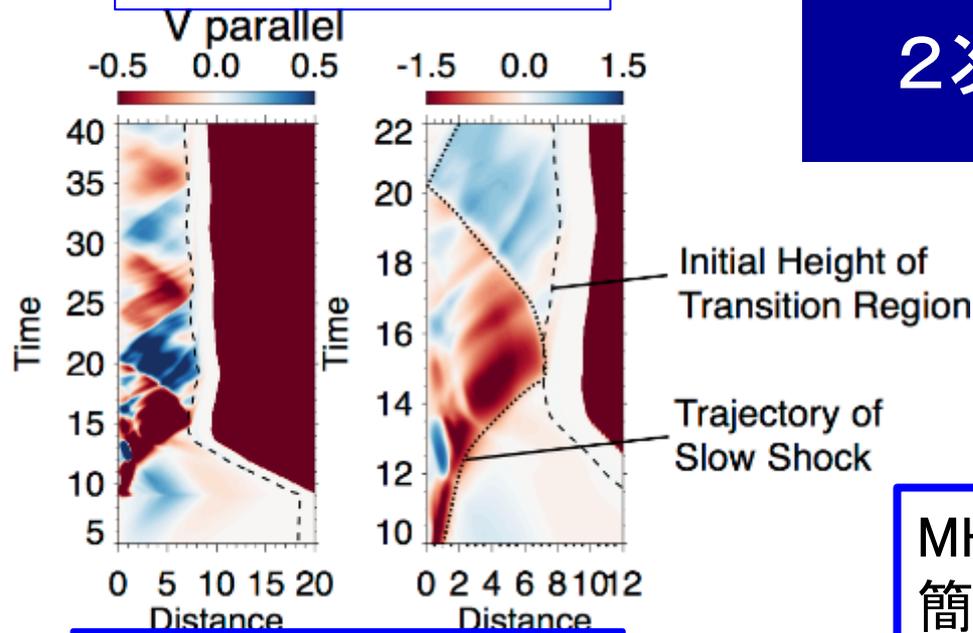
2D picture



1D approximation

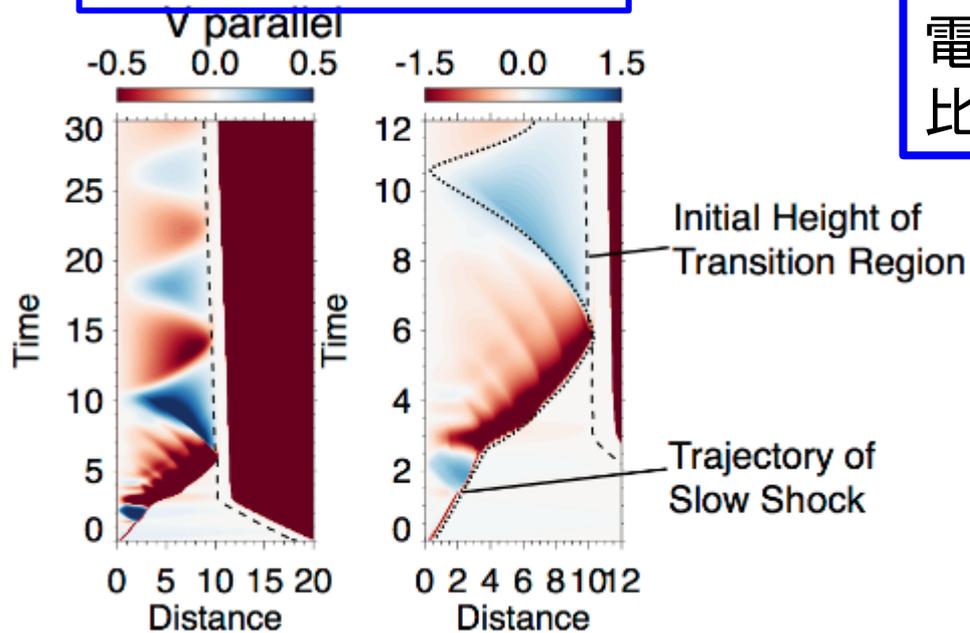


2次元MHDモデル



2次元MHDモデルとの比較

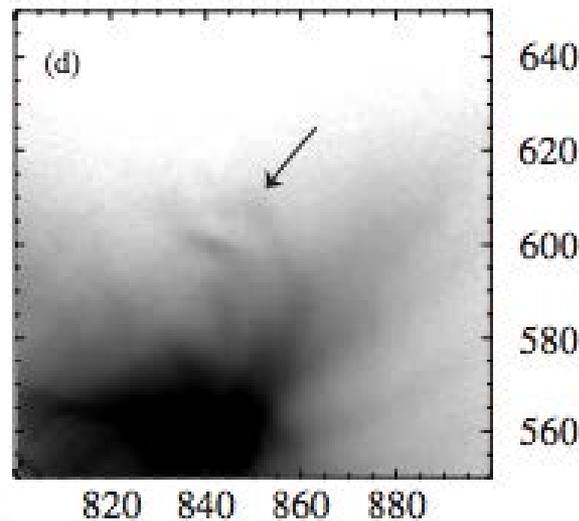
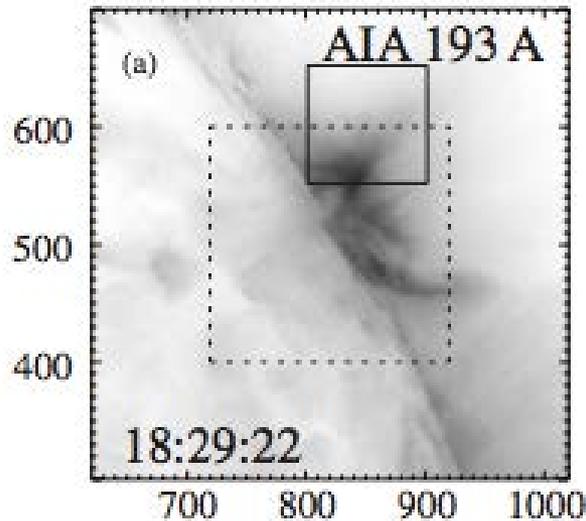
擬2次元MHDモデル



MHD波動を追うことができる
簡易フレアループモデルを構築

電離計算も含めれば、観測との
比較も可能になると期待

ショック観測のために何をすべきか



Imada+2013
アウトフロー中に
下降する高温ループ構造

リコネクションした
磁力線か？

一番必要な物理量は、**エントロピー**

(これを表示しようとした観測的研究はほぼないのでは)

ショック面ではエントロピーが不連続になる

$$s \sim \log(p/\rho^\gamma) \quad p = \rho RT$$

なので、ドップラー情報だけでなく、密度と温度の情報も不可欠。

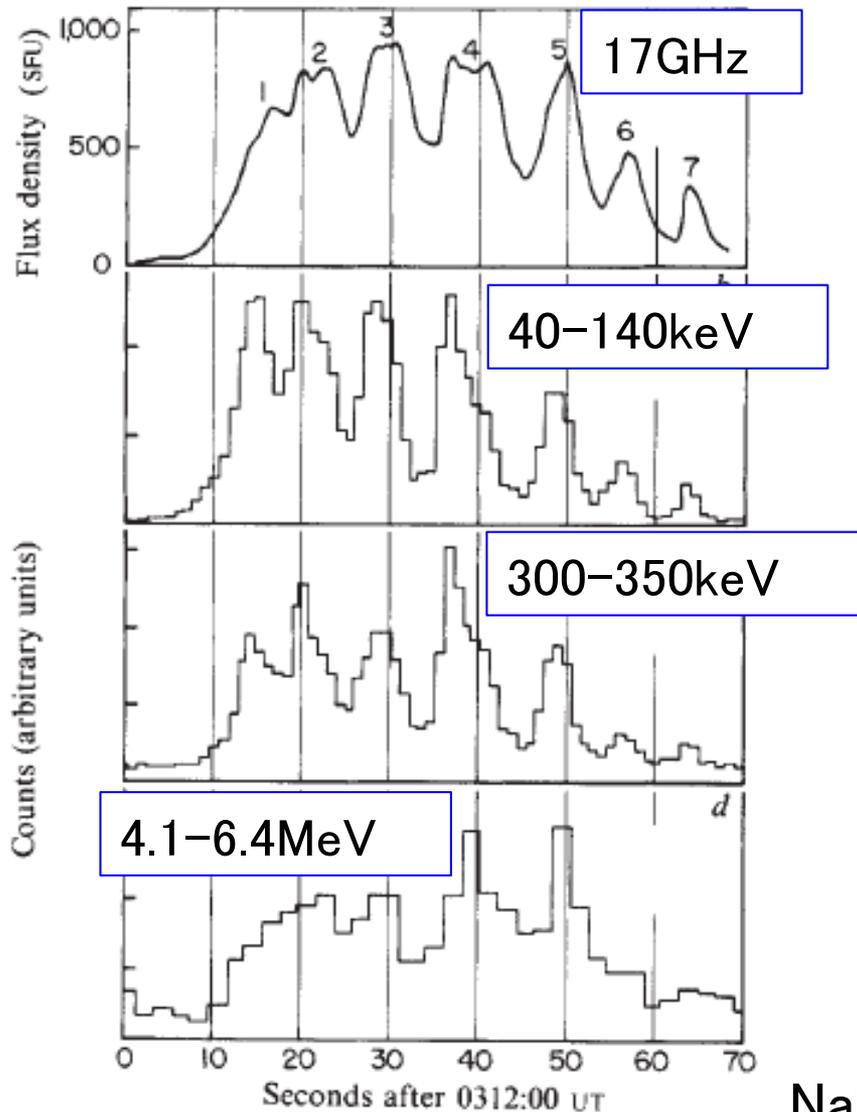
ポストフレアループ内のショック・波動検出、
近年空間分解できはじめつつある下降ループに沿って
1次元的に物理量を測定することが第一歩では

議論したい内容

ポストフレアループ研究の観点から見る 新たな研究方針

- ペチェックショックの存在を調べる新たな方法の提案
- 他天体フレアへも応用可能な太陽フレア物理の話題

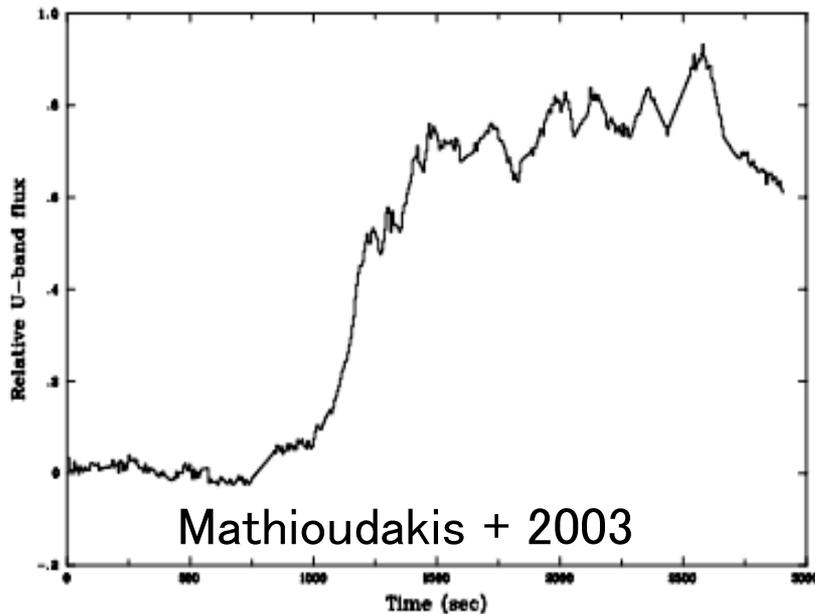
フレアライトカーブの 準周期的変動(非熱的放射で顕著)



- Quasi-Periodic Pulsation (QPP)と言われる
- 周期: 秒以下~数分(様々な物理過程が関わっている?)
- 恒星フレアでも多くの観測例
 - e.g. Mathioudakis + 2003
- 非熱的放射で周期が~1秒以上のQPPが見える場合、MHD現象が粒子加速過程 or 非熱的放射過程に影響を与えている様子を見ているのではとされている

恒星の白色光フレアで見られる準周期的変動

恒星フレアの
白色光のライトカーブ



白色光フレア：
光球面での増光が見えるフレア
(Keplerによるスーパーフレアもこれ)

一般に、太陽フレアで
白色光と硬X線源の振る舞いは類似
(高エネルギー粒子が白色光の増光に
関わっていることを示唆)



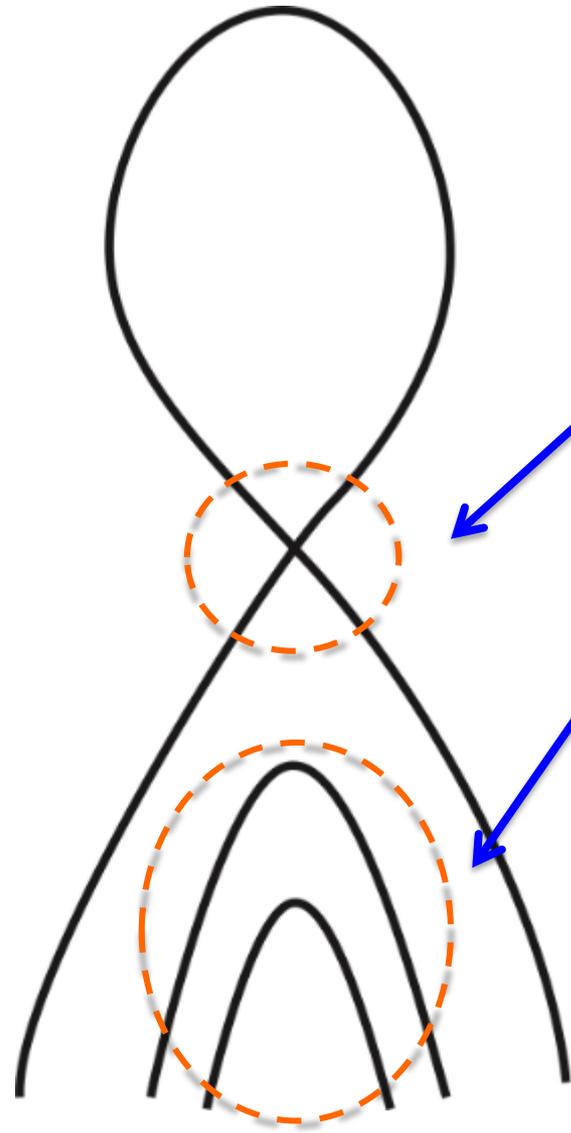
恒星フレアの白色光は
非熱的放射起源と仮定して議論される
(e.g. Anfinogentov+2013)

準周期変動の起源を解明することは
太陽・恒星フレアにおける非熱的過程の理解に重要

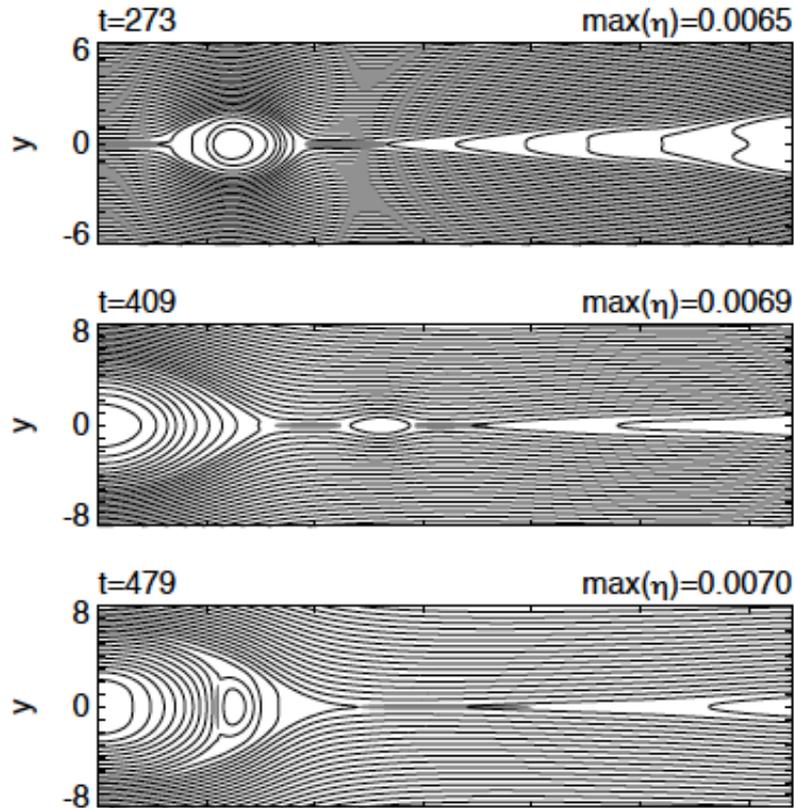
準周期変動の起源は何か？

大別すると2つの可能性:

- 準周期変動するリコネクション
- ループ内のMHD波動



準周期変動の起源は何か？



大別すると2つの可能性:

- 準周期変動するリコネクション
- ループ内のMHD波動

Plamoidの合体が準周期的な非熱的粒子の生成の起源？

e.g. Tajima et al. 1987, Kliem et al. 2000

0.5–10sec 程度の周期なら説明可 (Kliem+2000)

準周期変動の起源は何か？

大別すると2つの可能性:

- 準周期変動するリコネクション
- **ループ内のMHD波動**

ループ内に

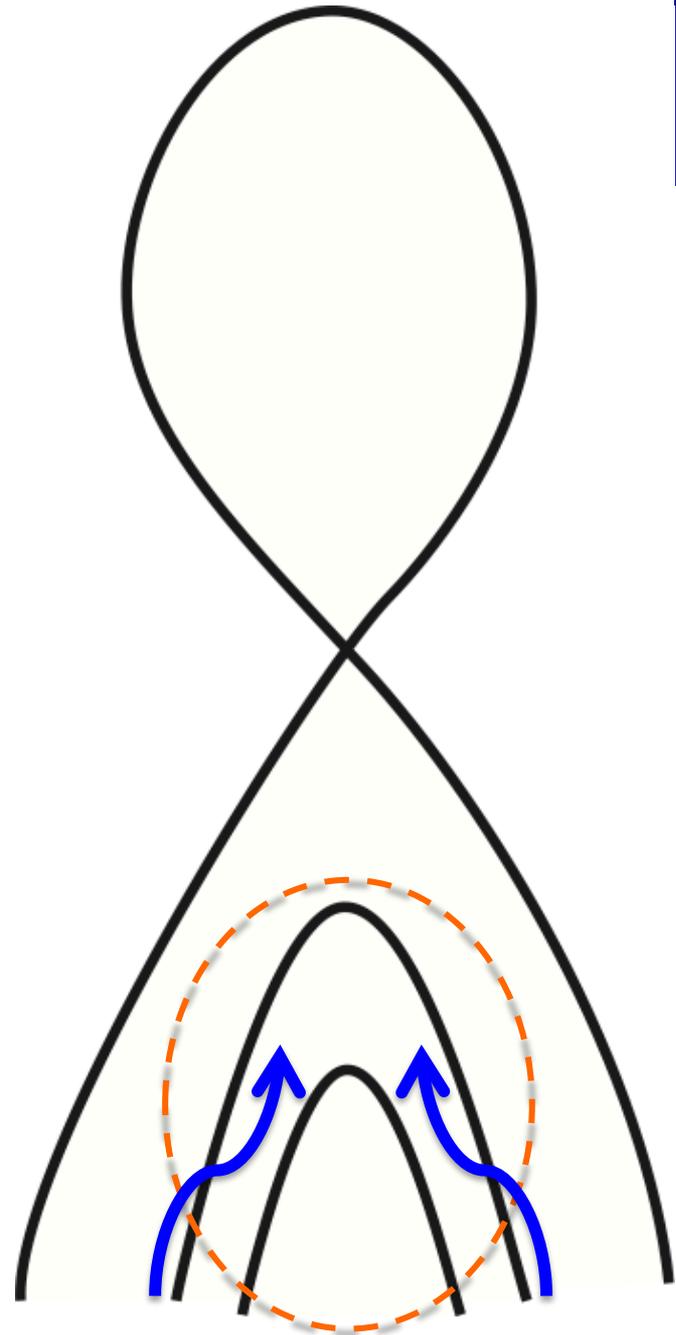
standing/propagating MHD waveが
励起されると、ループトップで振幅が
大きくなり、ループトップの非熱放射源に
影響か？

ただし、

具体的にどう影響するかについては
わからない

Nakariakov & Melnikov 2009

for a detailed review



準周期変動の起源は何か？

大別すると2つの可能性:

- 準周期変動するリコネクション
- **ループ内のMHD波動**

ループ内に

standing/propagating MHD waveが
励起されると、ループトップで振幅が
大きくなり、ループトップの非熱放射源に
影響か？

ただし、

具体的にどう影響するかについては
わからない

Nakariakov & Melnikov 2009

for a detailed review

Liu et al. 2013

Strong
non-thermal
emission

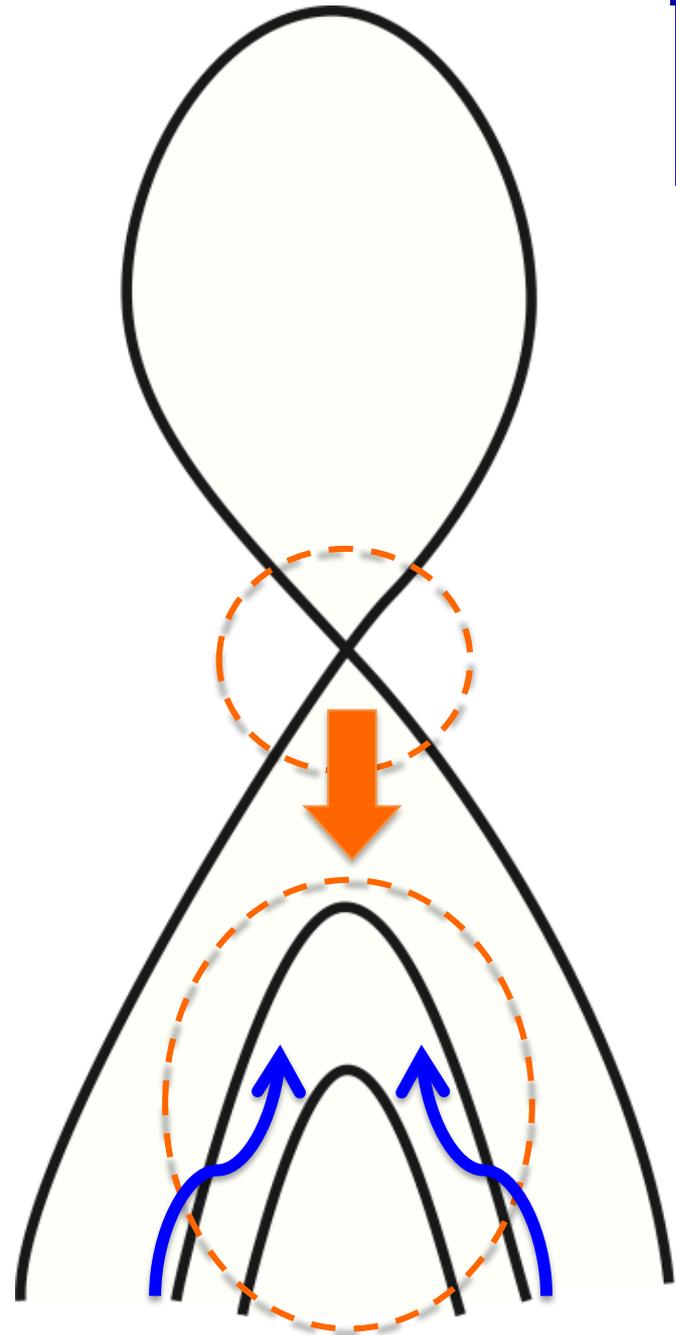


05:04:35-05:08:27

準周期変動の起源は何か？

- 時間変動するリコネクション (アウトフローも時間変動)
 - Repetitive generation and coalescence of plasmoids (Tajima et al. 1987, Kliem + 2000)
- ループ内のMHD波動
 - standing/propagating MHD waves
 - See Nakariakov & Melnikov 2009 for more details

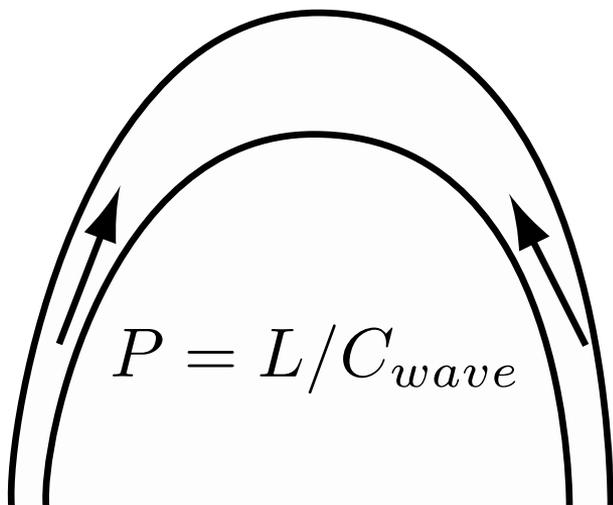
ループトップの物理量変化、
ループトップの上空のアウトフロー速度の
測定がこの謎を解くカギになるのでは



なぜ変動の理解は天文学的に重要か？

MHD波動モデルの例

standing/propagating
slow mode waves



Nakariakov + 2004

Nakariakov & Melnikov 2006

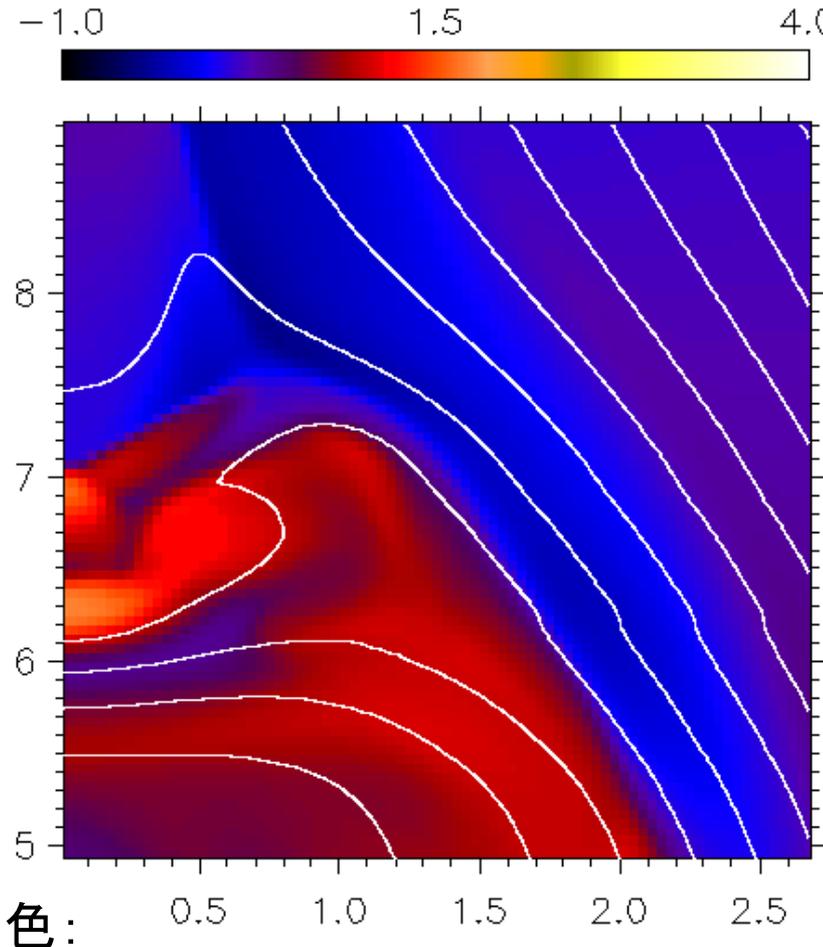
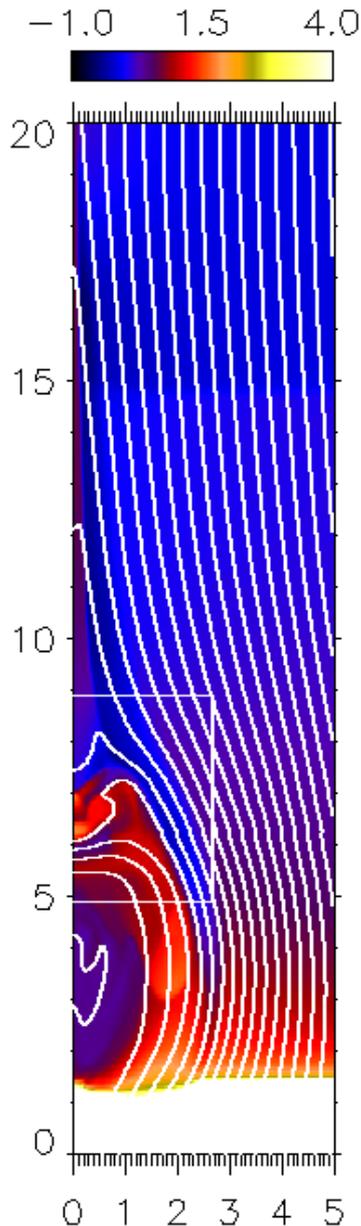
仮に、強い非熱的放射源である
ループトップのプラズマ状態が
ループ内のMHD波動によって変動を
受けると仮定



MHD波動を正しく選べば、
振動周期からループ内の物理量を
推定できる！！

Shibata & Yokoyama 2002の
EM, Tから恒星フレアの
物理量推定方法以外の
新たな推定方法を確立、
クロスチェックができる可能性

熱伝導入り 2次元MHDシミュレーション



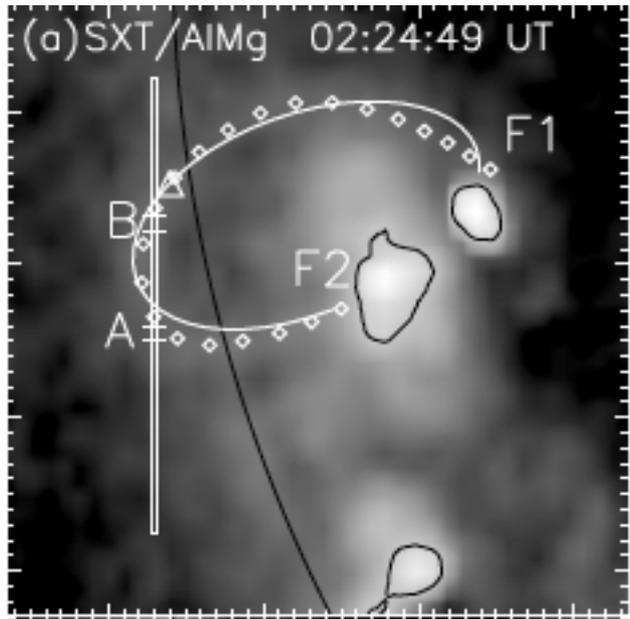
色: thermal free-free emission
 $n^2 T - 1/2$

- ・熱伝導が十分効くとループ内を伝搬するスローモードはほぼ見えない(熱伝導で弱まる)
- ・ループトップに局在化したAlfvénicな動きが周期的な変動を発生、Fast shockの強さが時間変動(非熱粒子の周期的生成に寄与?)
Ugai 1996,
ST + in prep

新たなシナリオまで
見つかってきて混沌

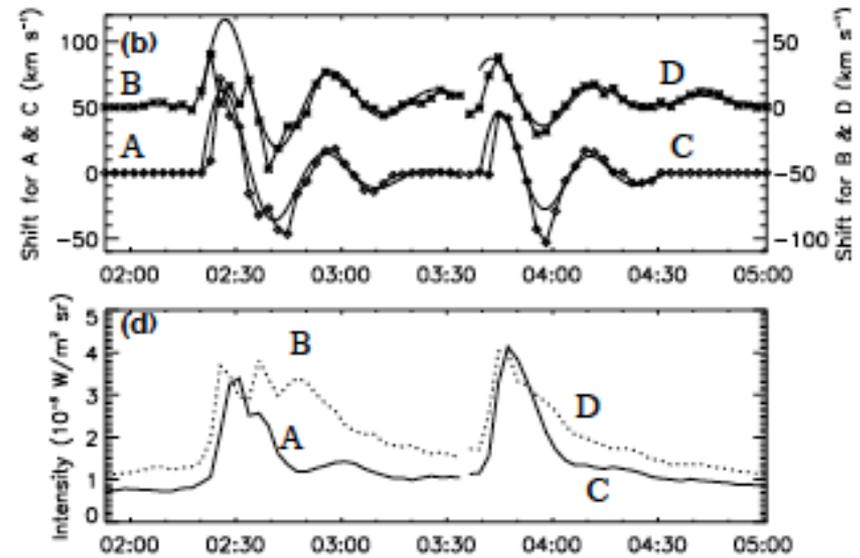
太陽フレアでループ内の波動はどこまで確認されているのか？

Wang + 2003, A&A, 406, 1105



速度

intensity



ポストフレアループをスリット分光・定点観測
スローモード波はあるらしい、という結論。しかし

- ・スローモードの起源
 - ・ループに沿った伝播
 - ・非熱的放射とのつながり(本当に関係しているか?)
- をみた観測例は、調べた限り見つからない

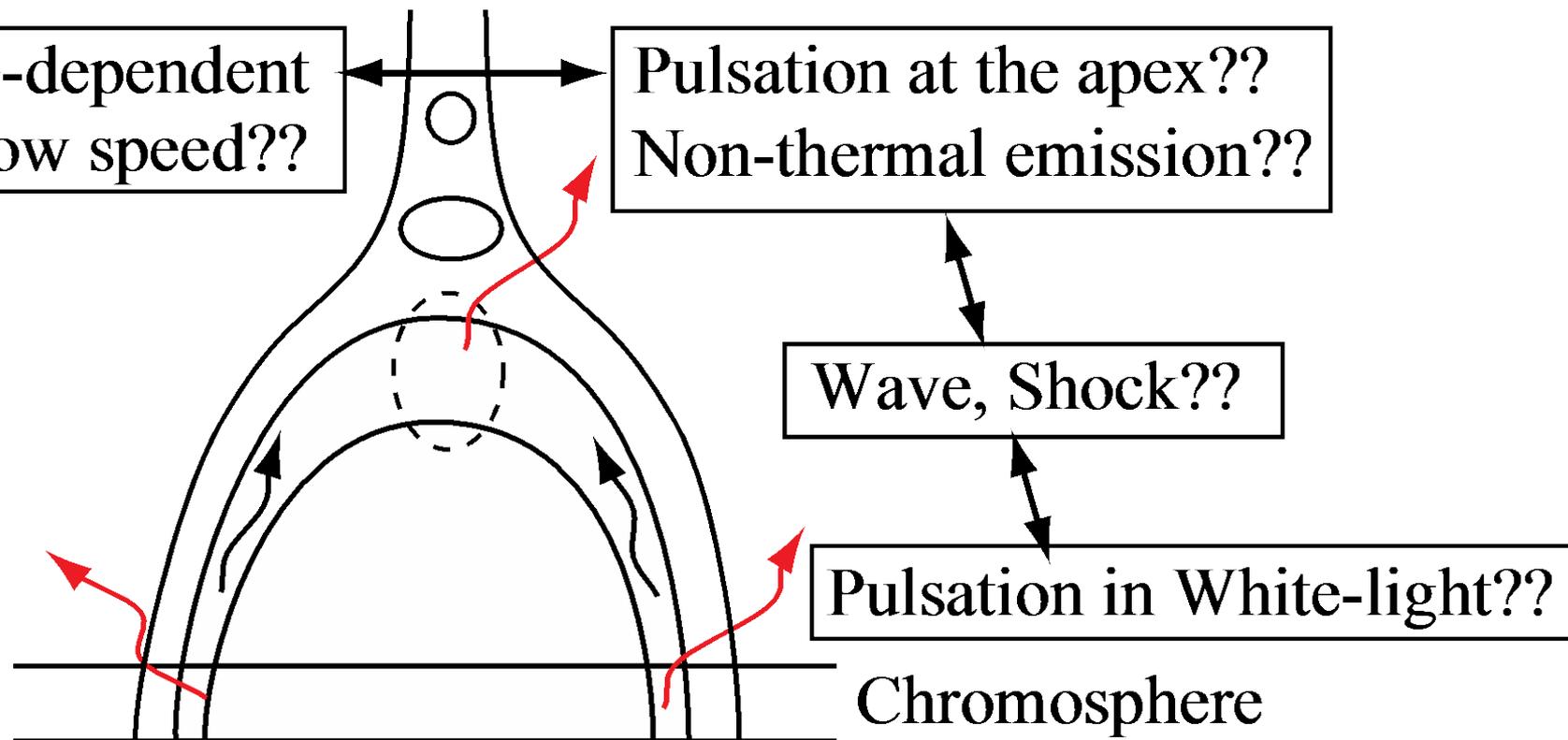
ここまでのまとめ

- MHD現象と非熱的過程のつながりを示す現象である**非熱的放射の準周期変動**に注目
- 様々な理論があるが、**どれも観測的に検証されていない**
- にもかかわらず、**恒星フレアの物理量推定に適用**されている
(MHD波動を使った恒星フレア観測の解釈は、例えば
Tsiklauri+2004, Mathioudakis+2006,
Mitra-Kraev +2005)

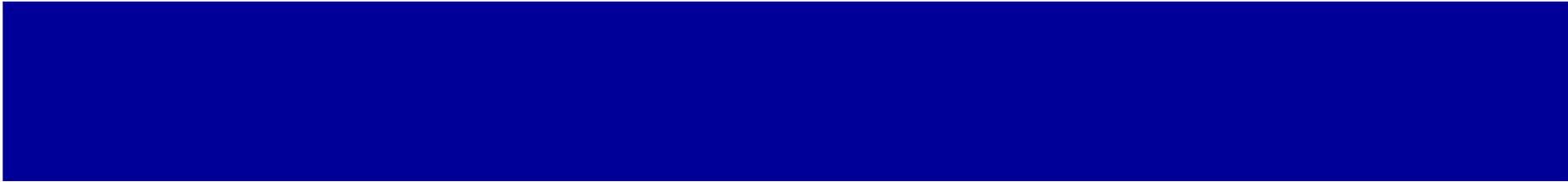
この準周期変動の物理を明らかにすることは

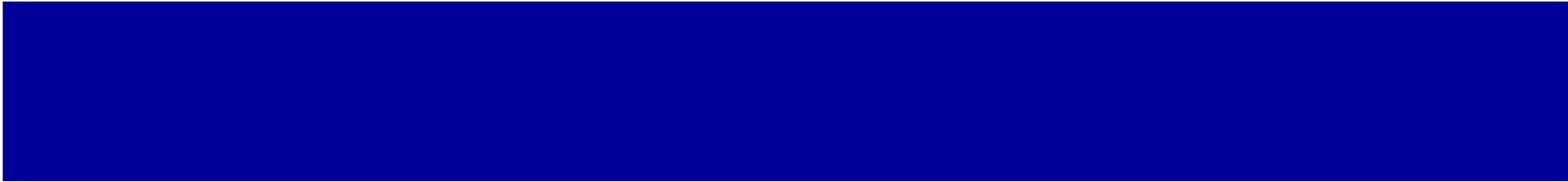
- 1、太陽フレアにおける**粒子加速過程・非熱的放射過程**の理解
- 2、恒星フレアなど**他の天体フレアの物理量推定**に役立つ

観測的に押さえたいことのまとめ： 変動起源を理解するために



- ・ループ上空のアウトフロー速度の変動、ループ内の波動をとらえるための分光観測
- ・ループトップの非熱的放射
- ・足元の白色光放射 を同時にとらえる観測が理想的





QPP of stellar flares

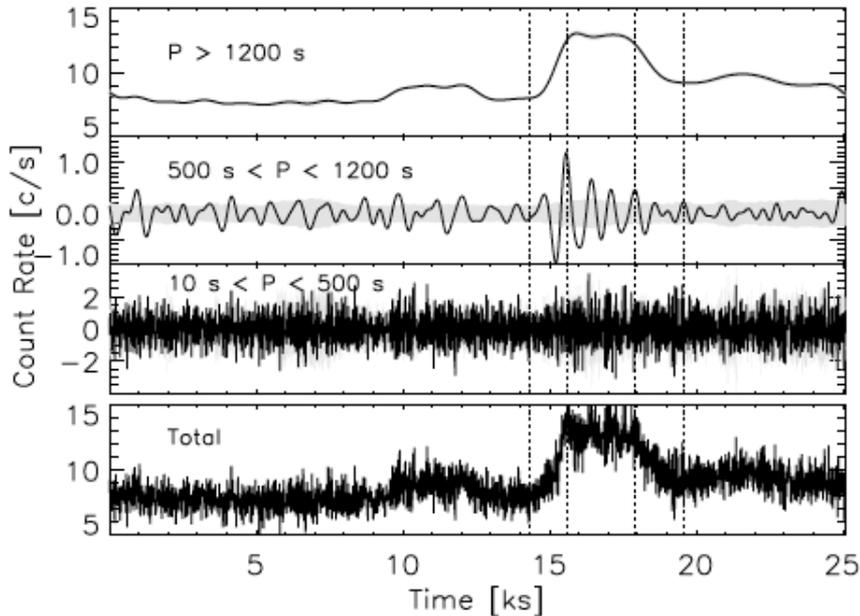


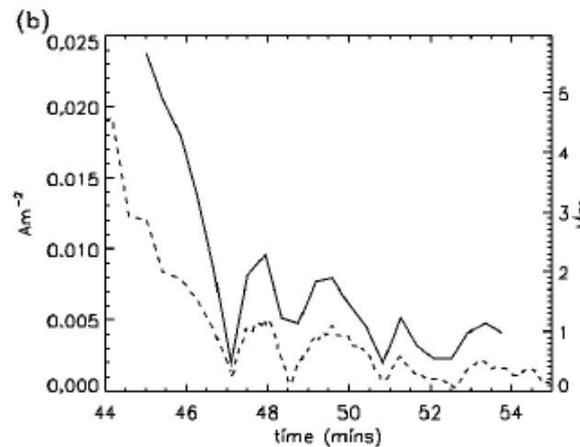
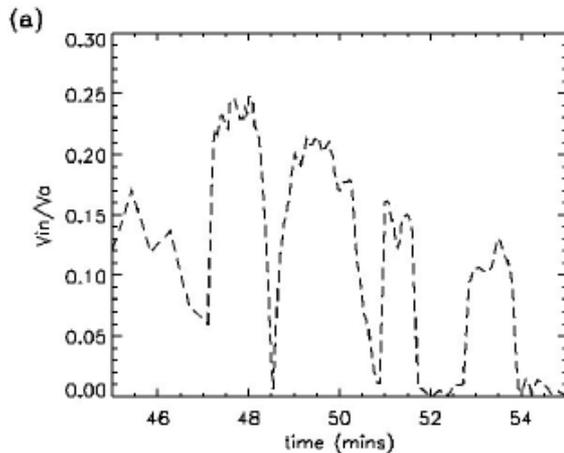
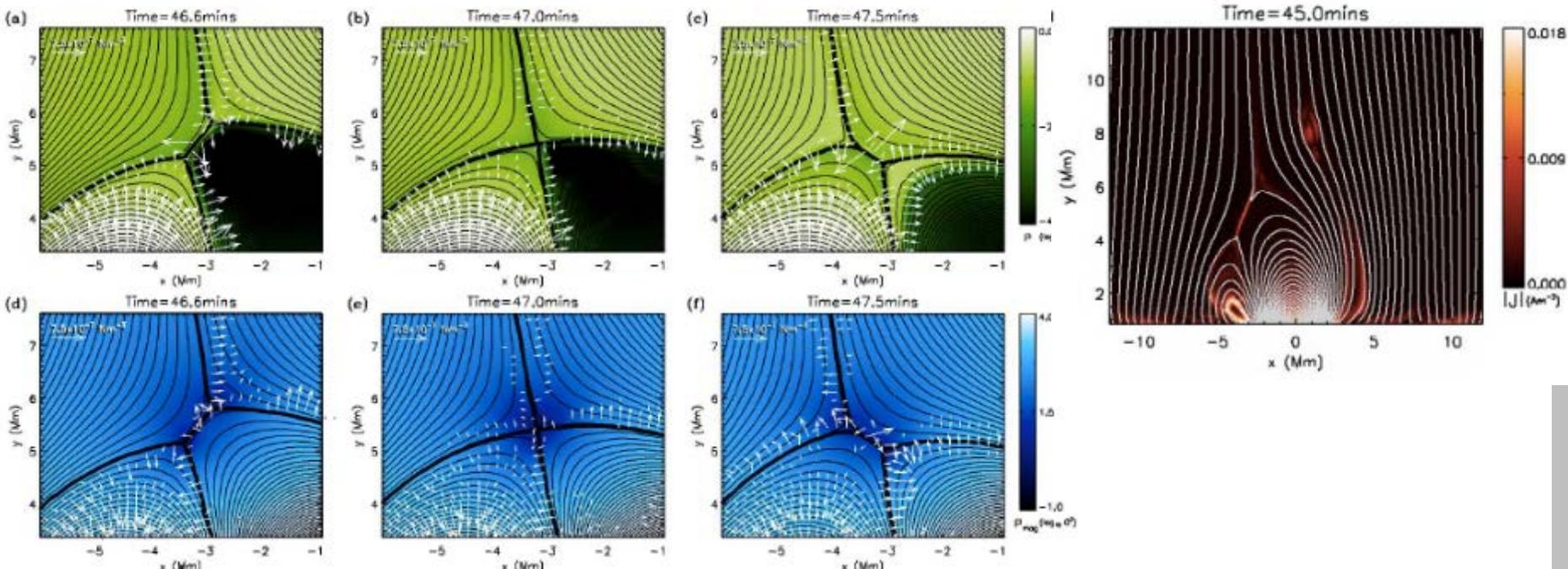
Fig. 3. The reconstructed light curve divided into three frequency bands, low ($P > 1200$ s), medium ($500 \text{ s} < P < 1200$ s, including the oscillation) and high ($10 \text{ s} < P < 500$ s, mainly noise); together they add up to the original data (lowest panel). The shaded areas show the standard errors. The vertical dotted lines are the same as in Fig. 1. A coherent oscillation is easily identified during flare peak.

“The first observed stellar X-ray flare oscillation: Constraints on the flare loop length and the magnetic field”
Mitra-Kraev et al. 2005

M-type dwarf AT Mic
SXR (0.2–12 keV)
period : 750sec

Estimated physical quantities on the basis of the flare theory by Shibata & Yokoyama 2002 and wave theories (e.g. Nakariakov + 2004)

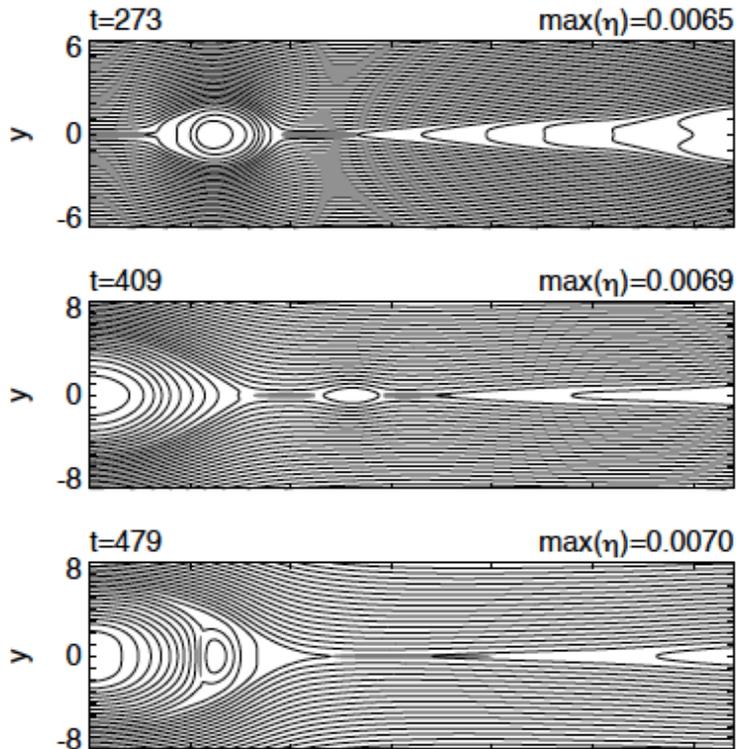
Oscillatory Reconnection



Oscillation in reconnection rate

Murray+2009

準周期変動の起源は何か？

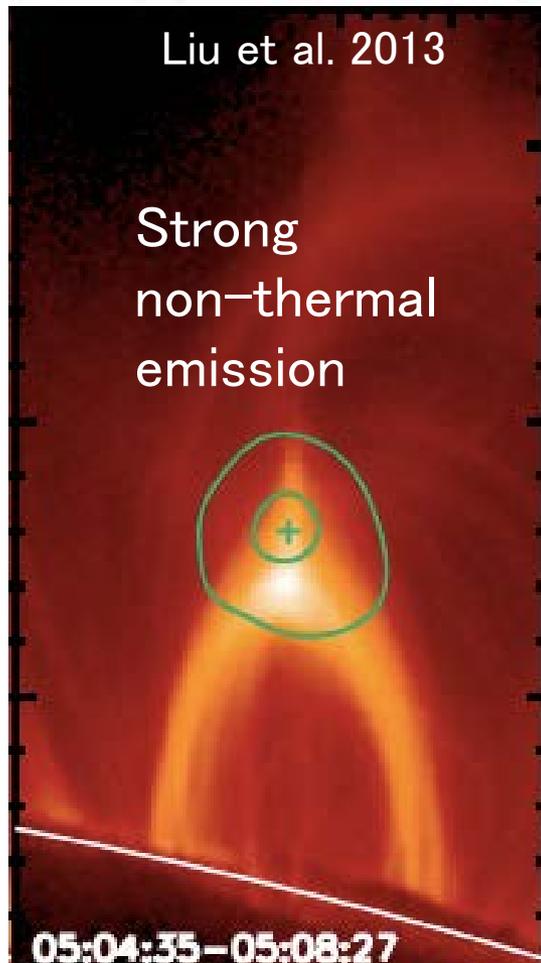


- 時間変動するリコネクション (アウトフローも時間変動)
 - Repetitive generation and coalescence of plasmoids (Tajima et al. 1987, Kliem + 2000 プラズモイド相互作用自体でも周期変動?)
- ループ内のMHD波動
 - standing/propagating MHD waves
 - See Nakariakov & Melnikov 2009 for more details

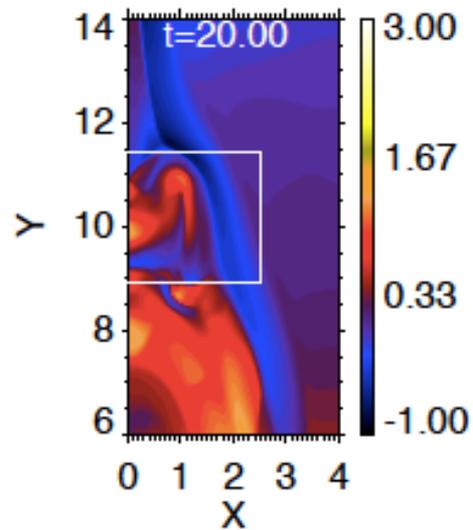
ループトップで強い非熱的放射

準周期変動の起源は、ループトップの非熱的放射源の変動が原因では？

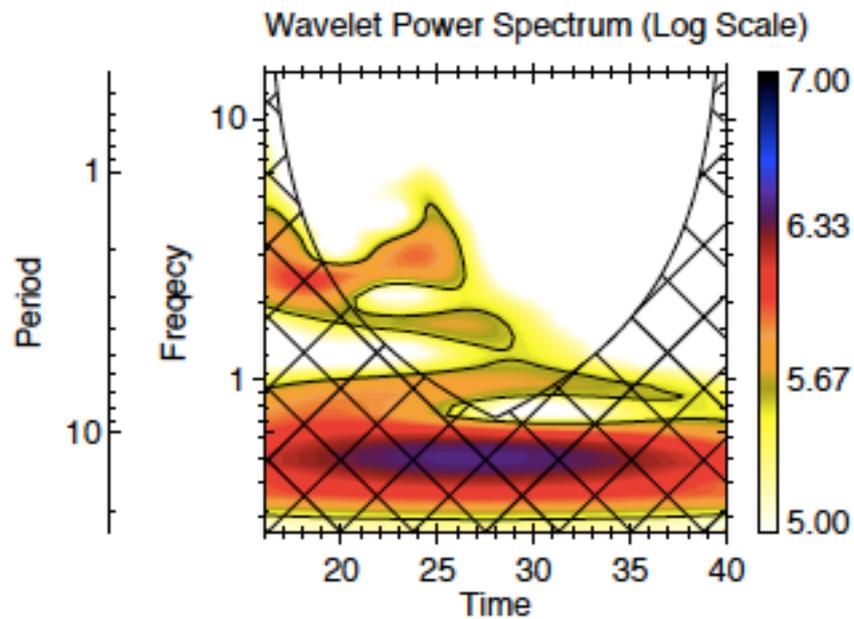
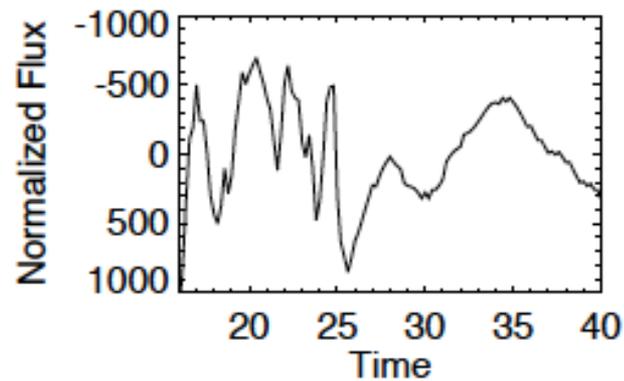
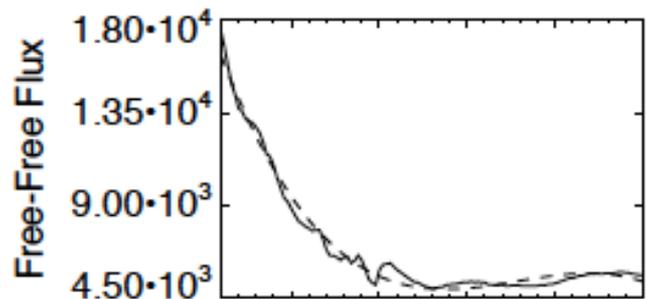
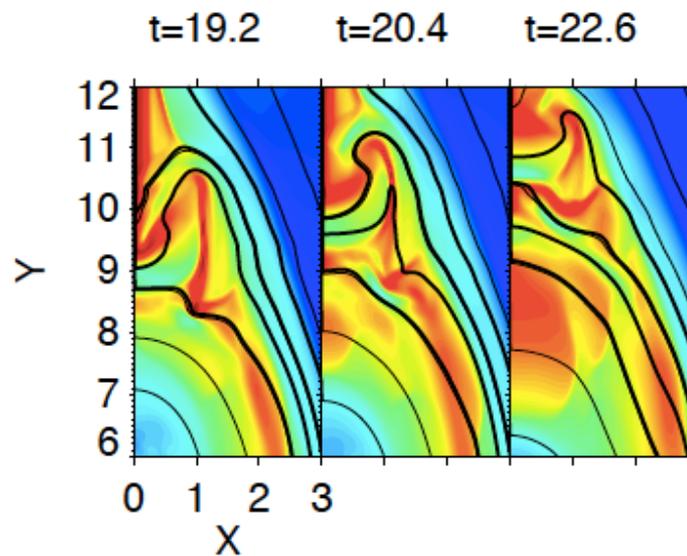
- 時間変動するリコネクション (アウトフローも時間変動)
 - Repetitive generation and coalescence of plasmoids (Tajima et al. 1987, Kliem + 2000 プラズモイド相互作用自体でも周期変動?)
- ループ内のMHD波動
 - standing/propagating MHD waves
 - See Nakariakov & Melnikov 2009 for more details



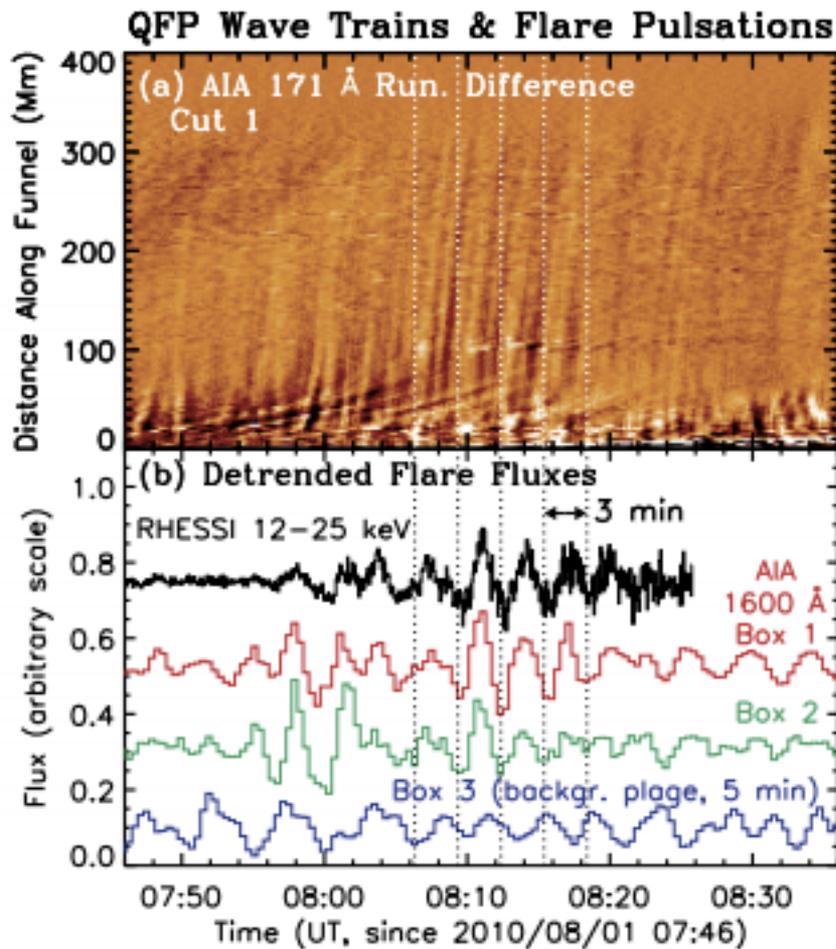
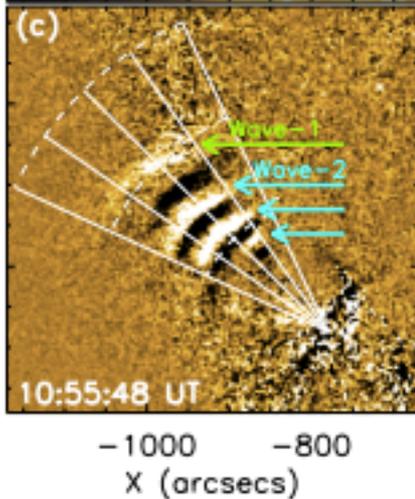
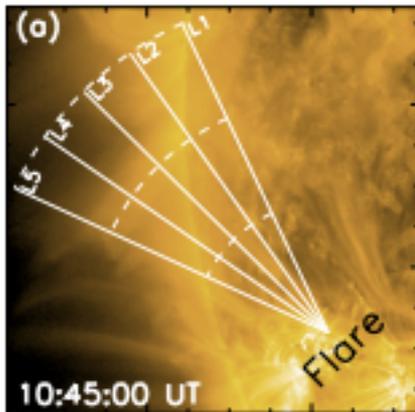
Log Thermal Free-Free Emission



Log β



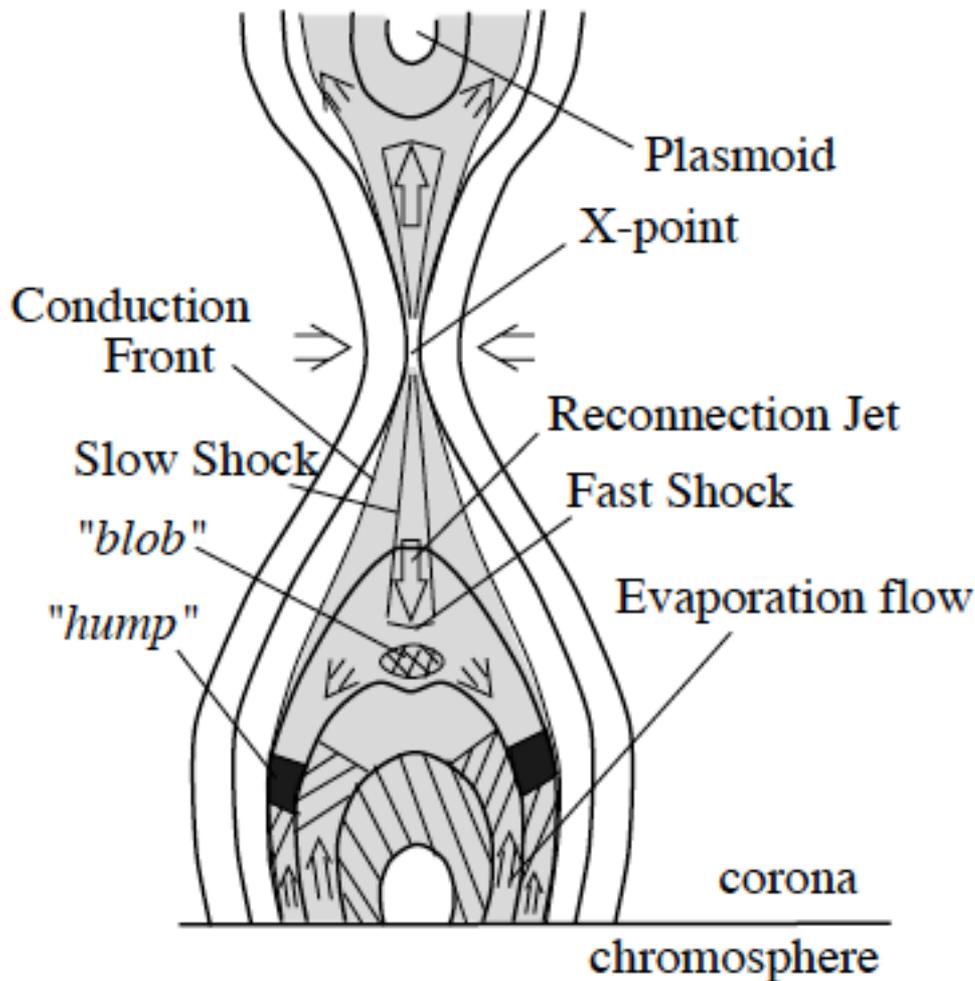
MHD波動と非熱的放射が関係している 可能性を示す観測例



Yuan et al. 2013 (Left)
Liu et al. 2010 (Right)

フレア領域から準周期的な波動の伝播。
この波の周期と非熱的放射の変動の周期が似た振る舞いを見せた例

2次元MHDシミュレーションによる考察 熱伝導有りの場合



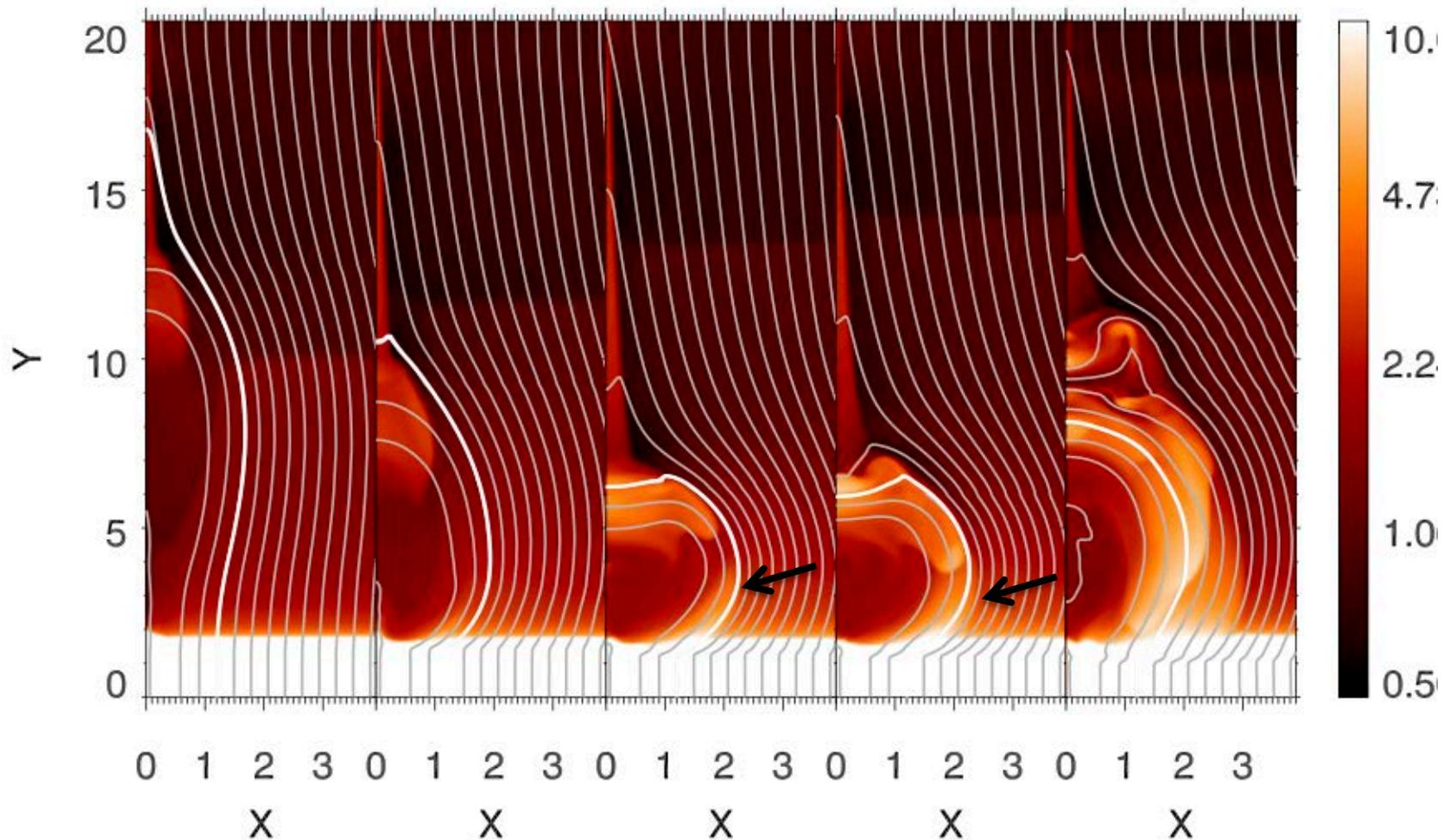
熱伝導がある場合

- 1、(ショックなどで)熱化
- 2、生じた熱が磁力線に沿って彩層に到達
- 3、彩層が急激に加熱されて急膨張
- 4、上昇流が発生 (これが彩層蒸発流)

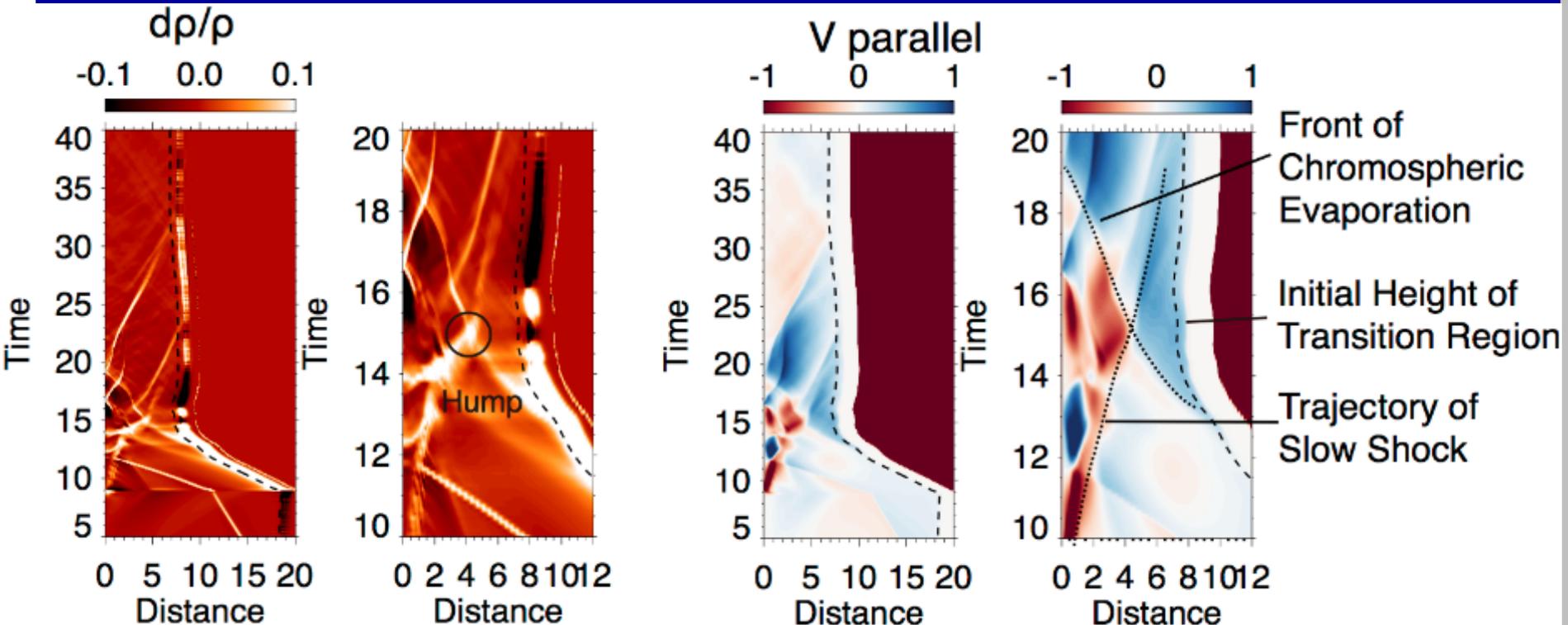
2次元MHDシミュレーションによる考察 熱伝導有りの場合

Log Density. 彩層蒸発流が見える

Time = 10.0 Time = 12.0 Time = 14.0 Time = 15.0 Time = 20.0



2次元MHDシミュレーションによる考察 熱伝導有りの場合



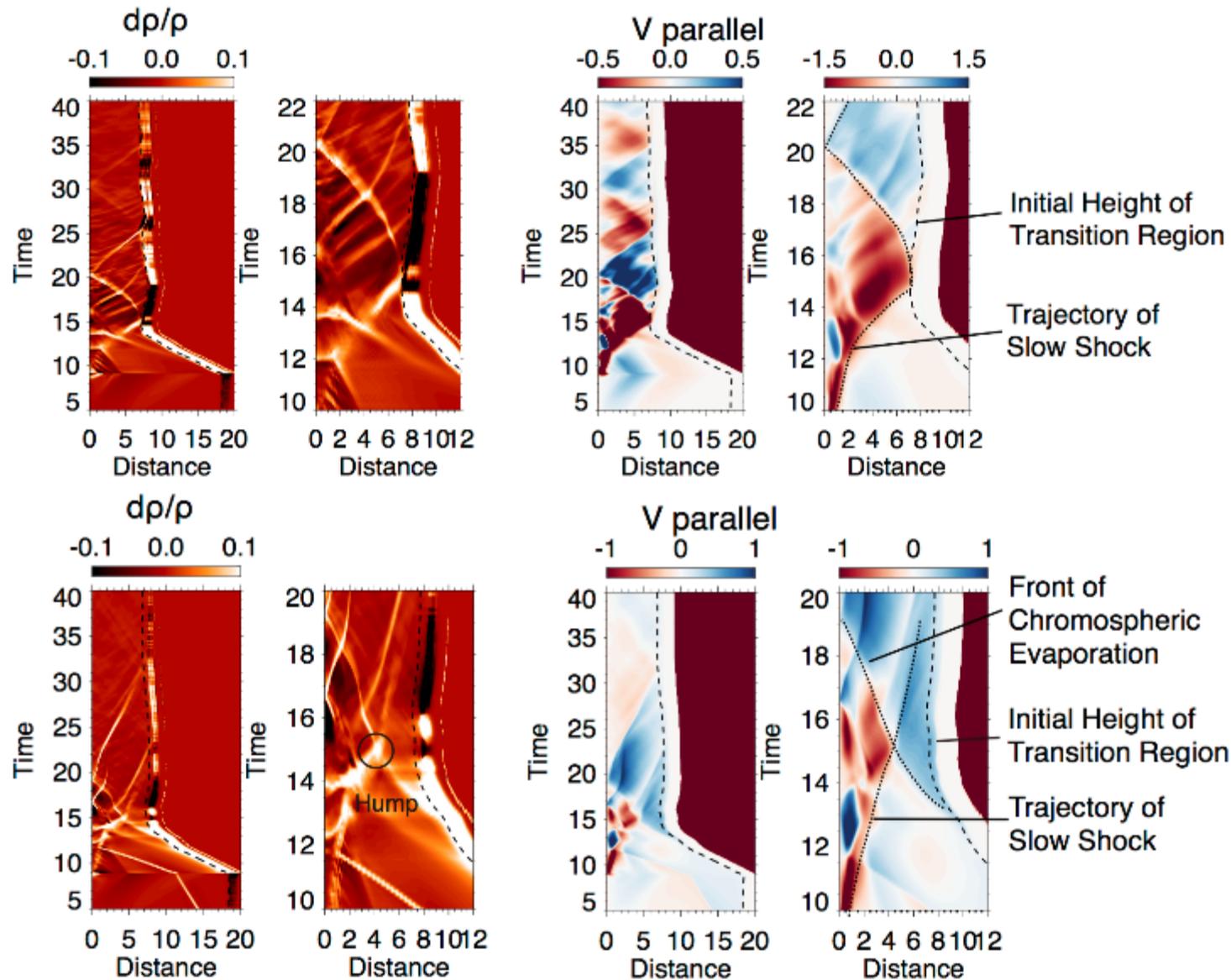
Distance: ループトップの位置からの磁力線に沿った距離

Distance = 0 : ループトップの位置に対応

熱伝導がよく効く場合、スローショックは強い彩層蒸発流にかき消されてしまい
スローショックの繰り返し伝播は見えない

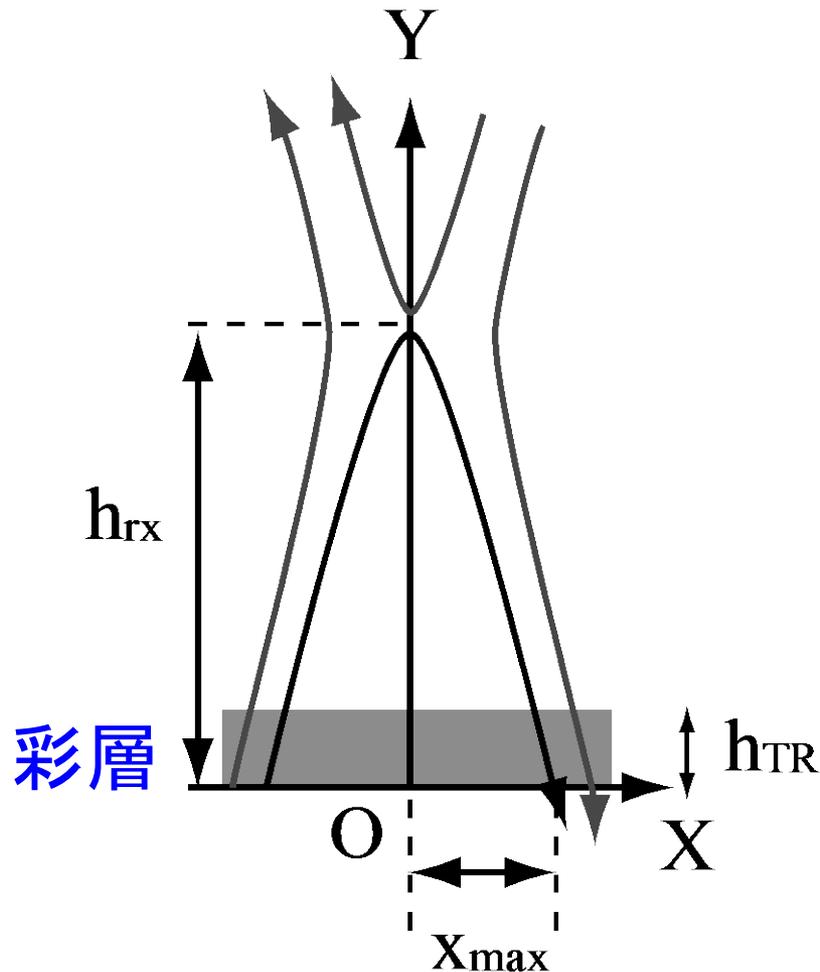
⇒ 熱伝導の強さ(彩層蒸発流の強さ)によってループ内での
スローショックの伝播が見えるかが影響される

熱伝導無し(上)と有り(下)の比較

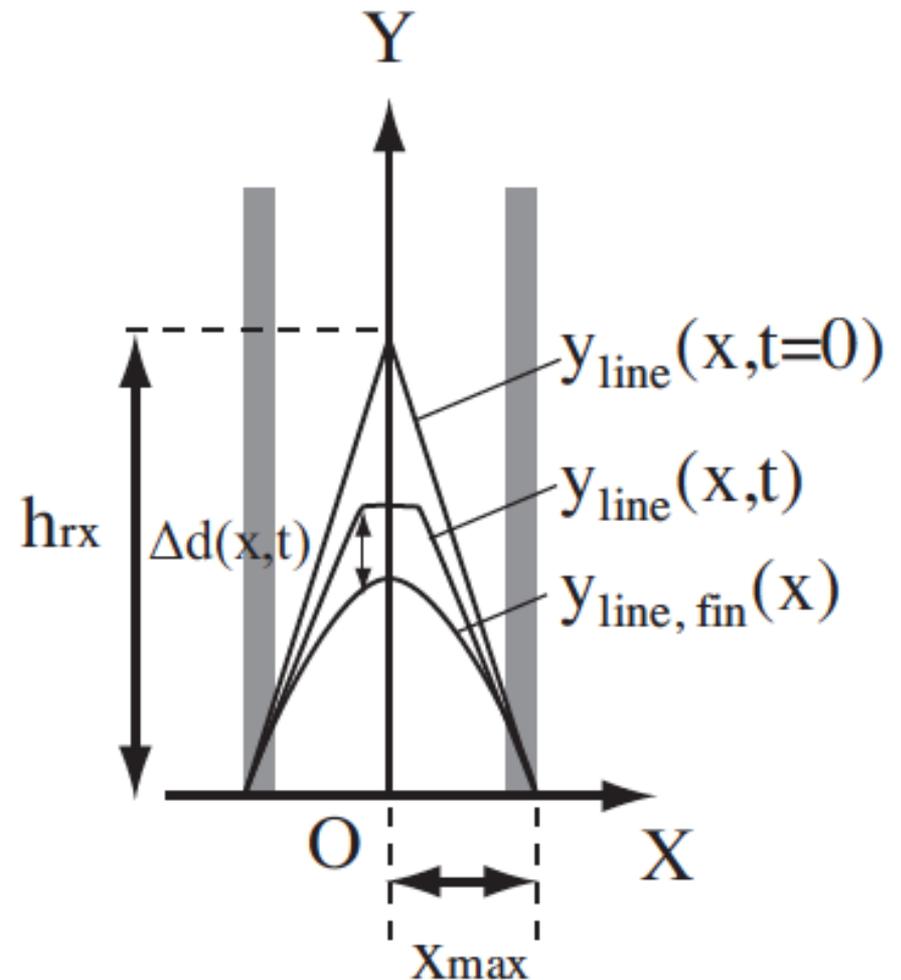


擬2次元MHDモデルの提案： 低コストでリコネクションの物理をモデル化

2D picture

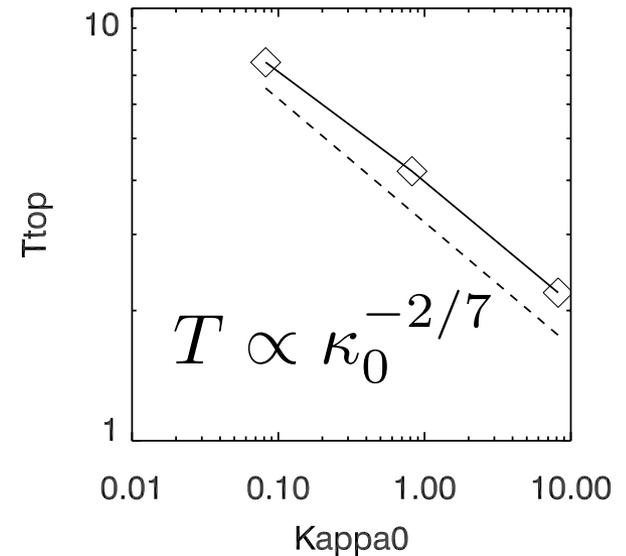
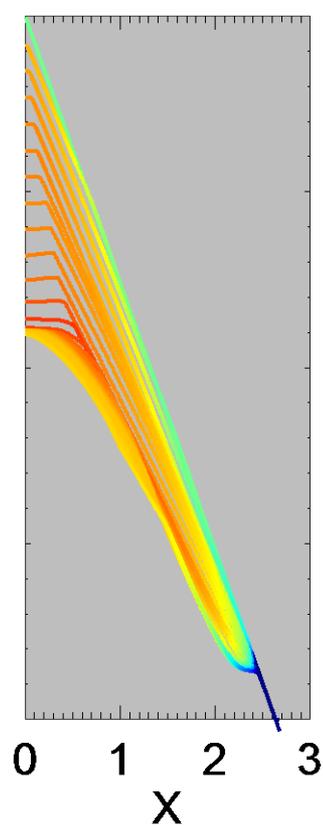
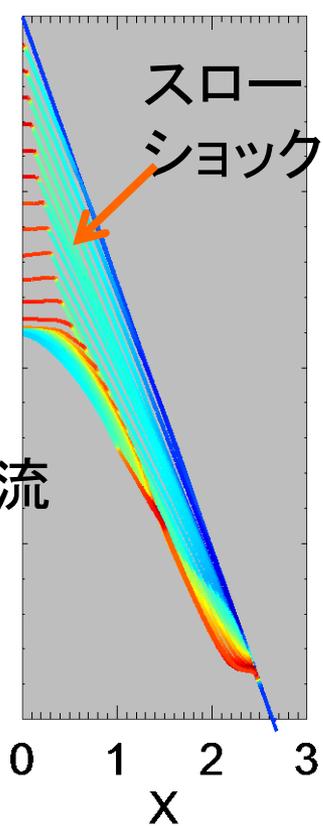
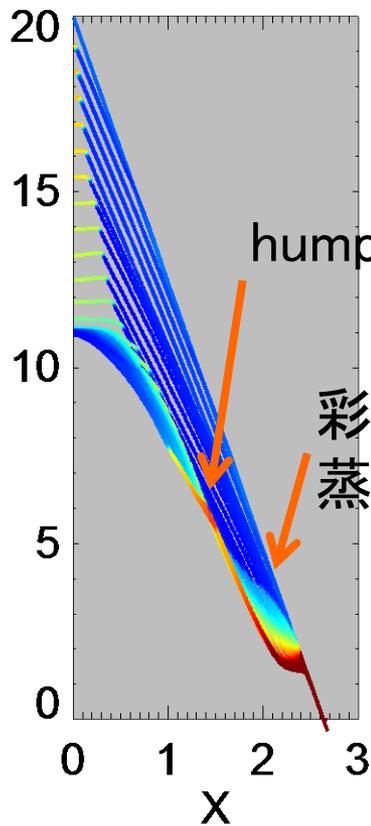
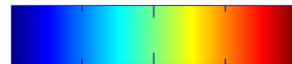
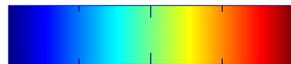


1D model



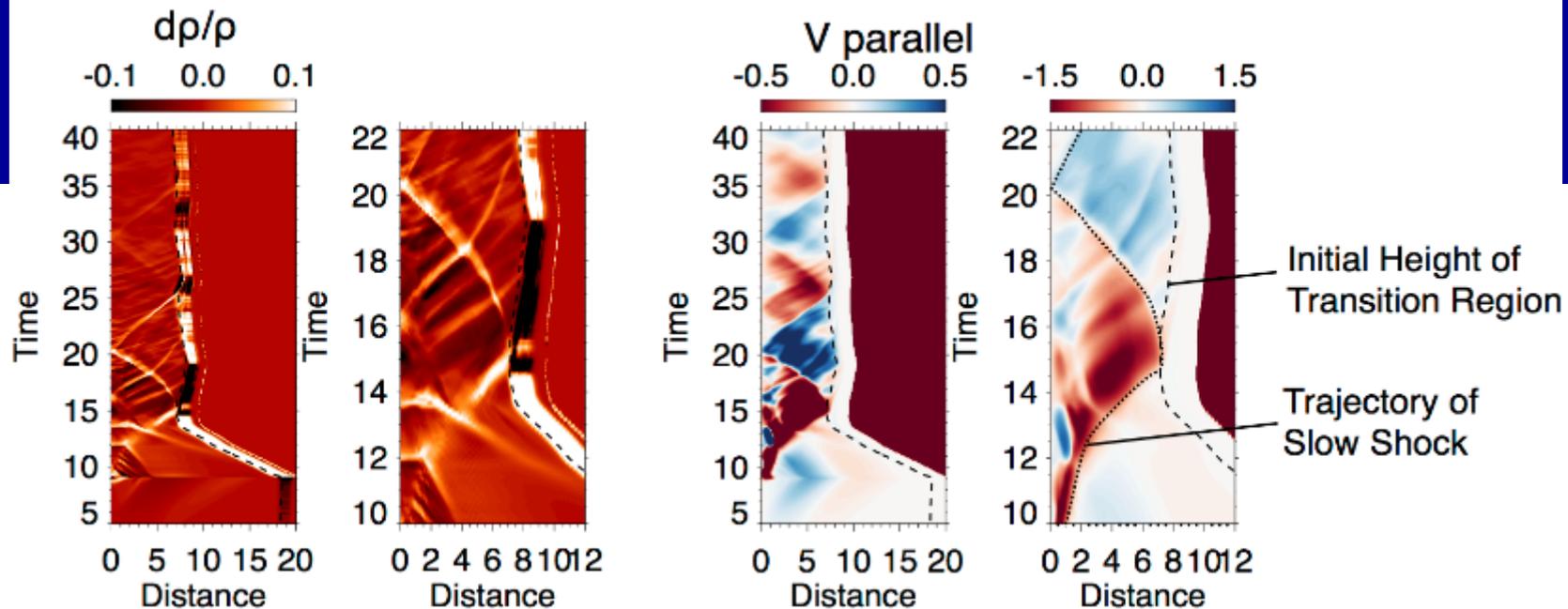
熱伝導入り擬2次元MHDモデルの結果

Log Rho Log Pg Log T
 -0.3 0.3 1.0 -0.5 0.2 1.0 -1.0 0.0 1.0

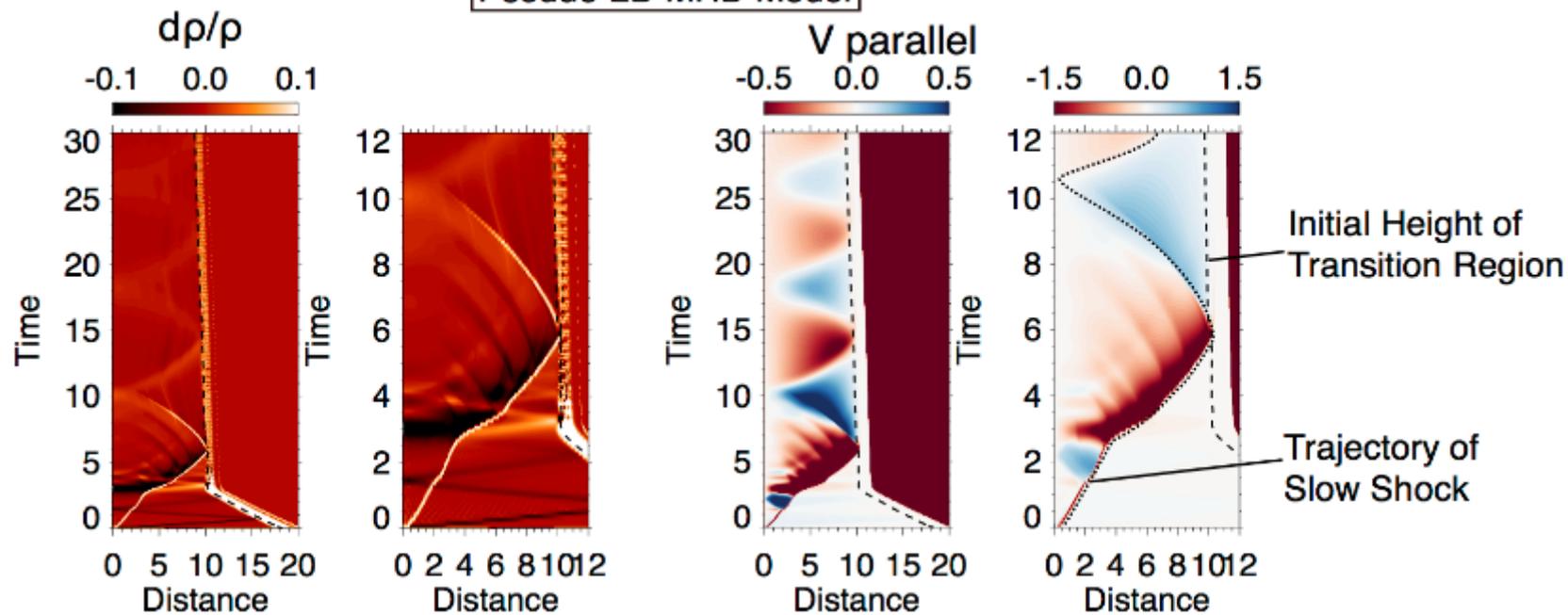


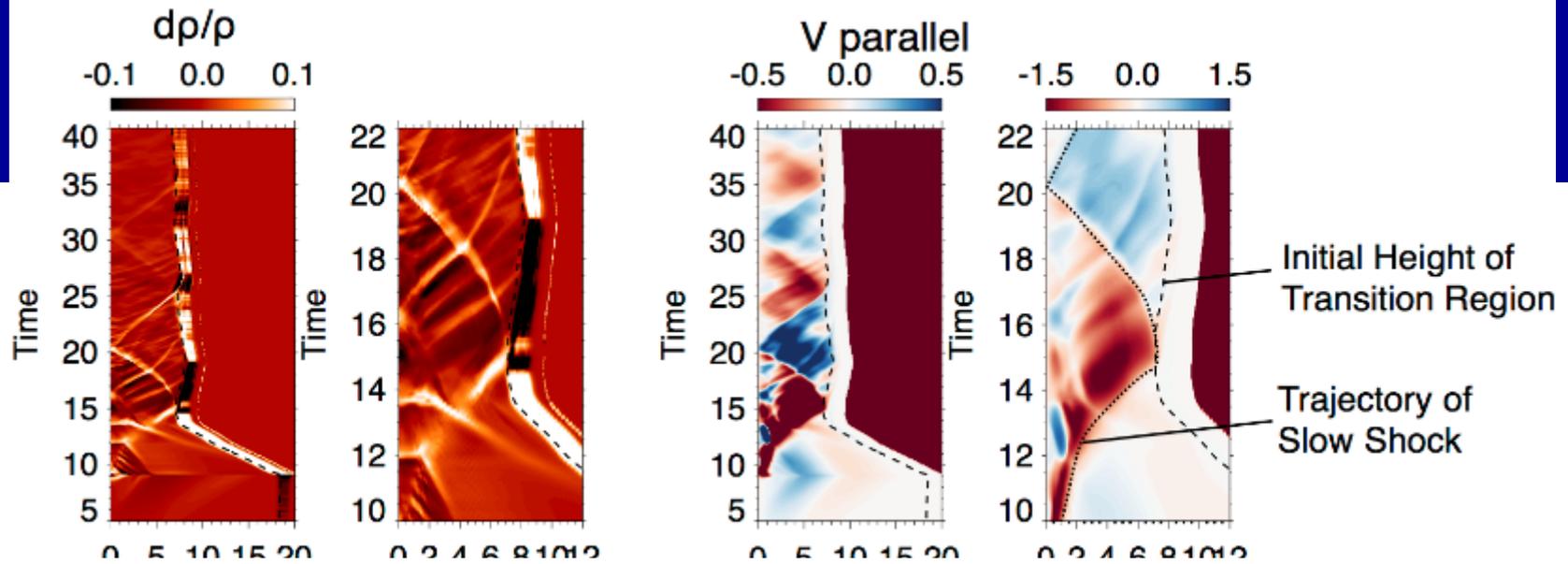
リコネクション理論の
 予測する、
 熱伝導係数
 と温度のスケーリング則
 を再現

2D MHD Model

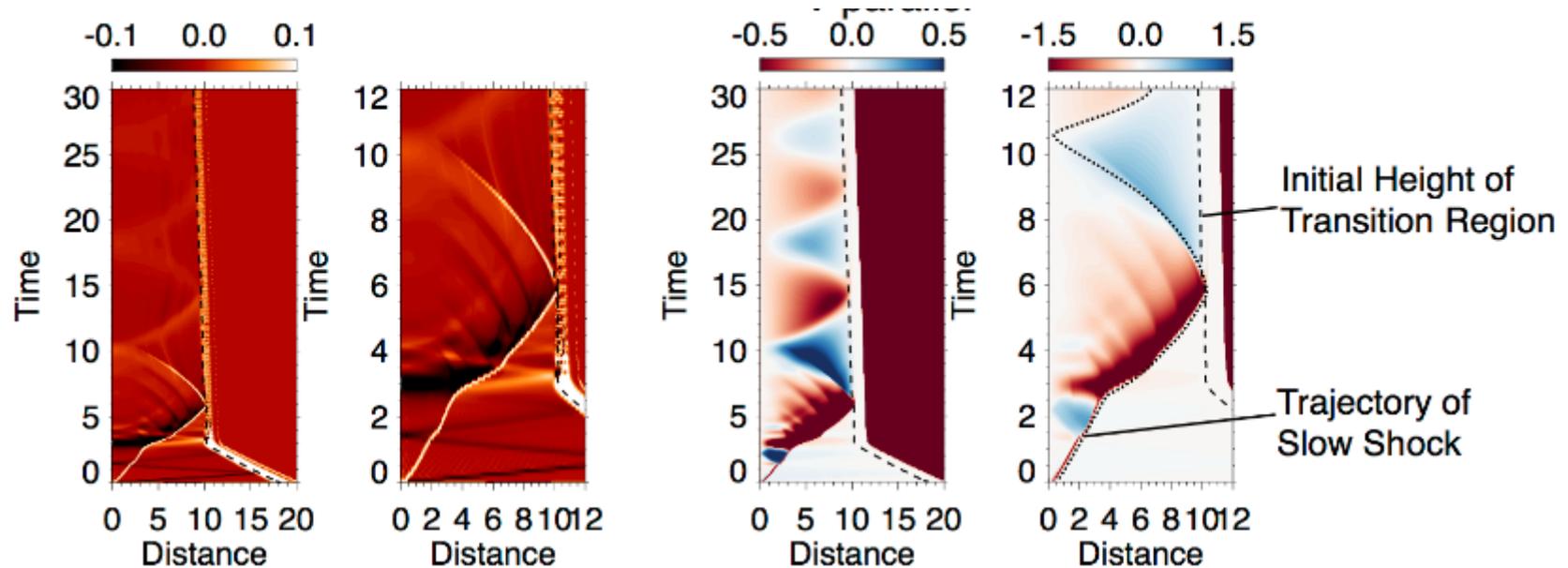


Pseudo-2D MHD Model

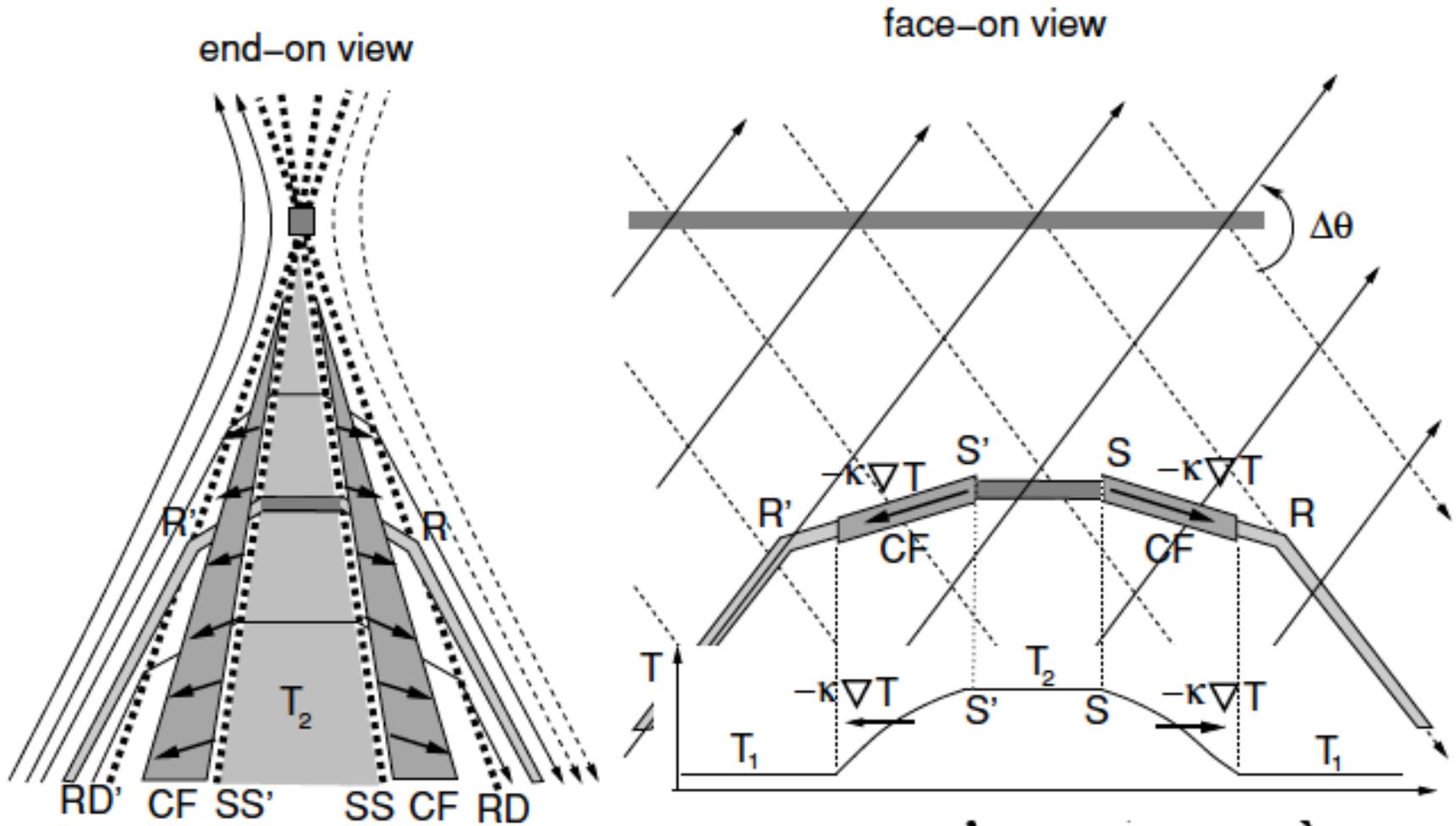




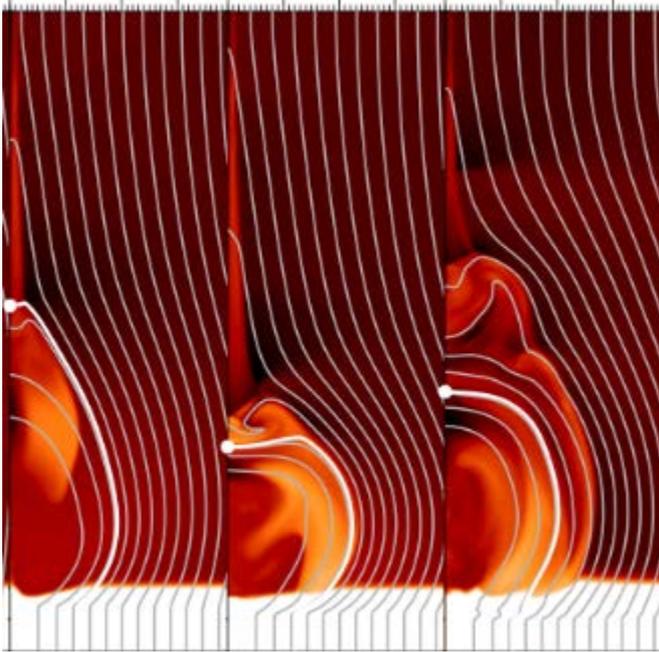
MHD波動を追うことができる簡易フレアループモデル。
電離計算も含めれば、観測との比較も可能になると期待



提案されている 単純化されたリコネクション磁場のモデル



物理量の測定方法

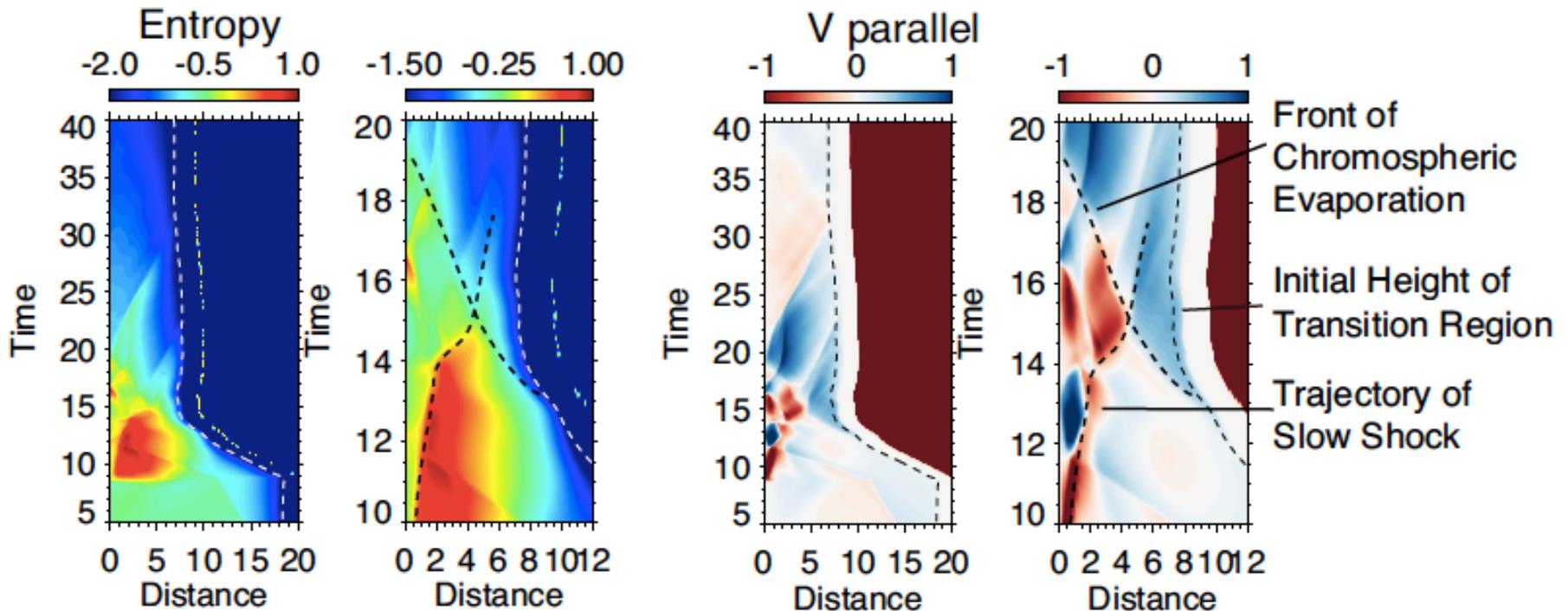


Distance:

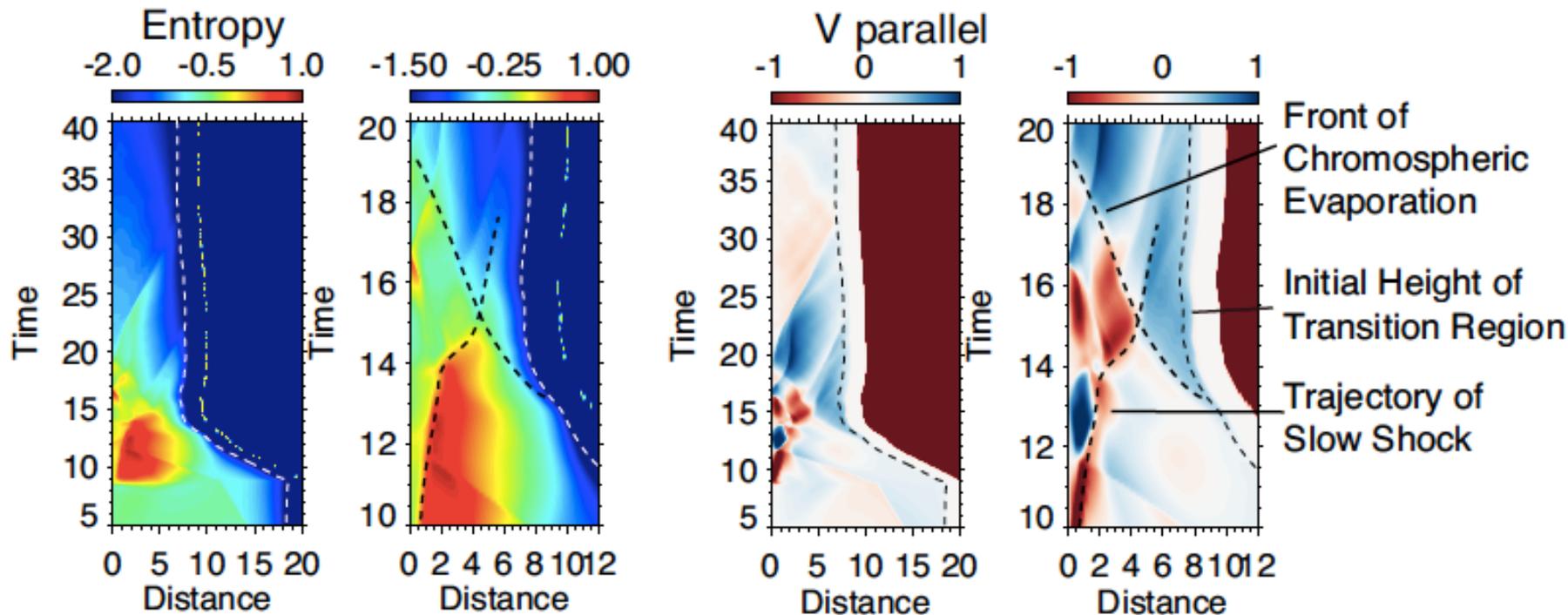
ループトップの位置からの磁力線に沿った距離

Distance = 0 :

ループトップの位置に対応 (左図の白丸)



2次元MHDシミュレーションによる考察



アウトフロー領域に付いていたスローショックがループ内を伝播

→ ループ内のスローショックは
もともとペチェックショックだったことを確認

幅広いパラメータに対してループ内の波動現象を理論的に調べておき
観測と比較できる準備を進めるべき