

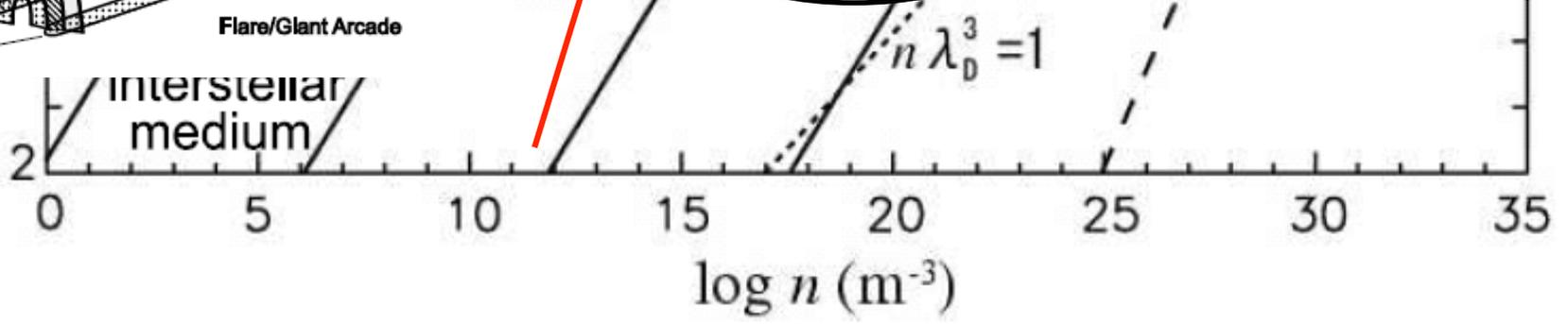
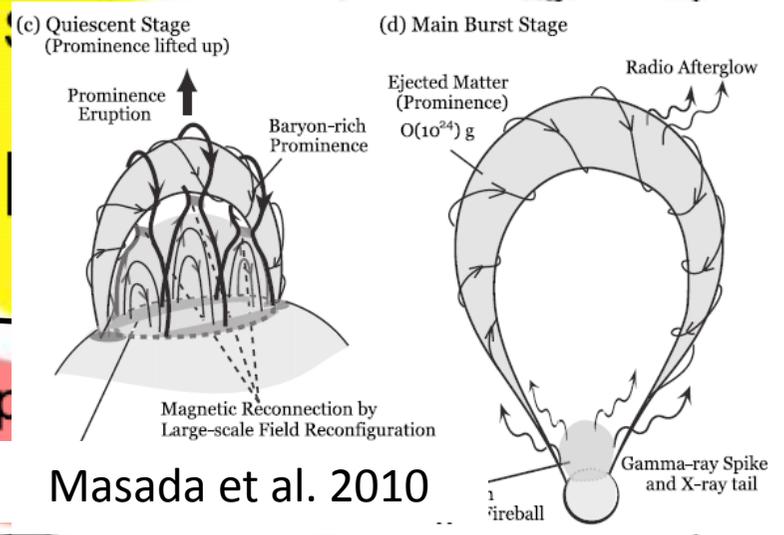
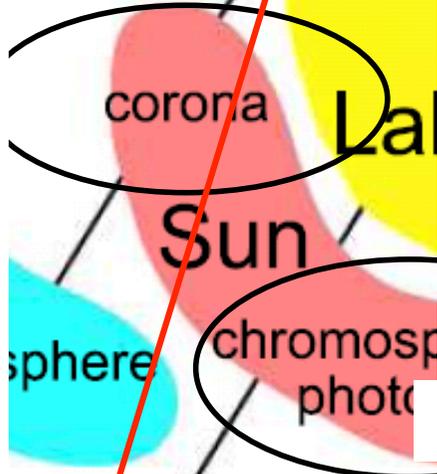
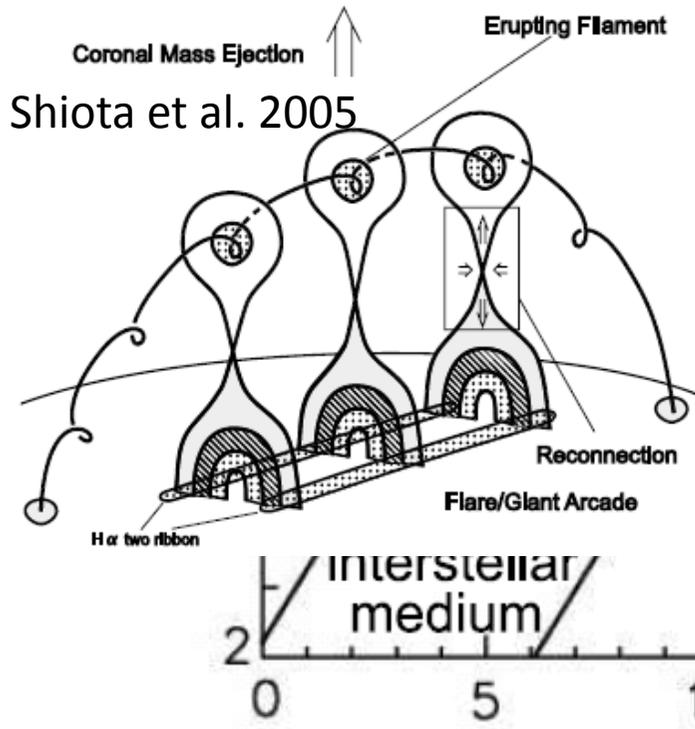
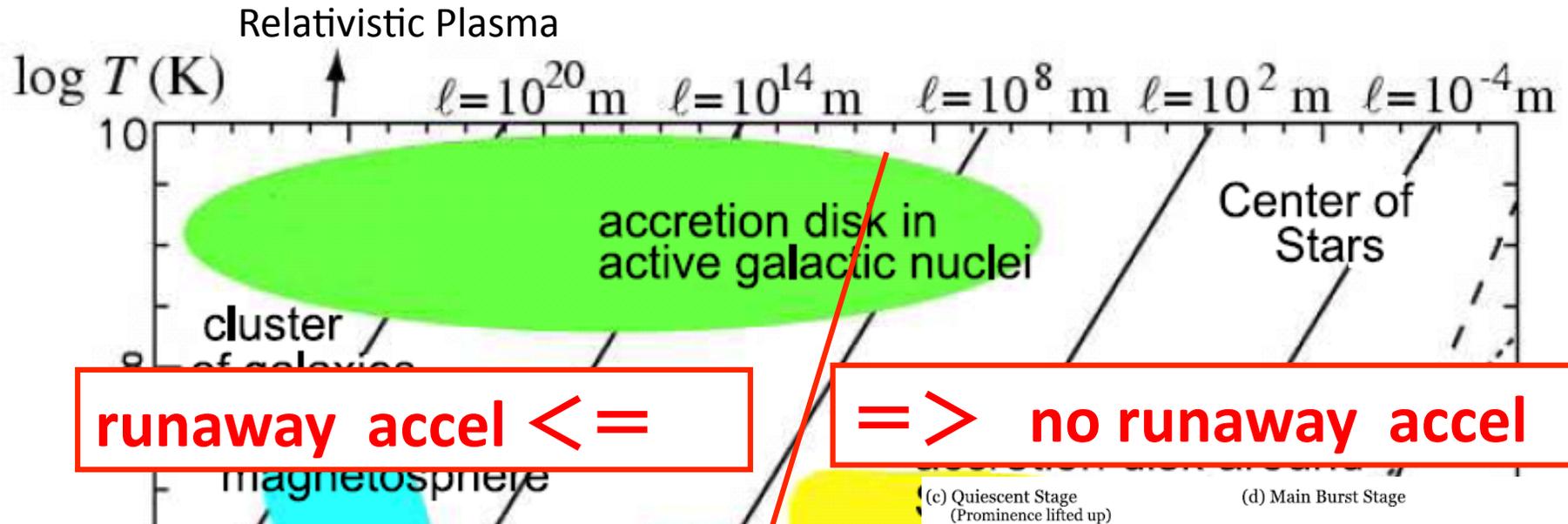
第23回理論懇シンポジウム
2010, Dec 20- Dec 22, 京都

インパルシブ磁気リコネクションに伴うアウトフロー衝撃波多段階加速

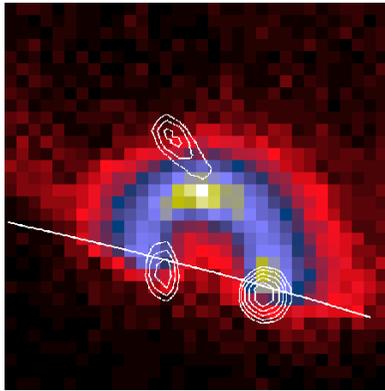
西塚直人 (ISAS/JAXA)

collaborate with

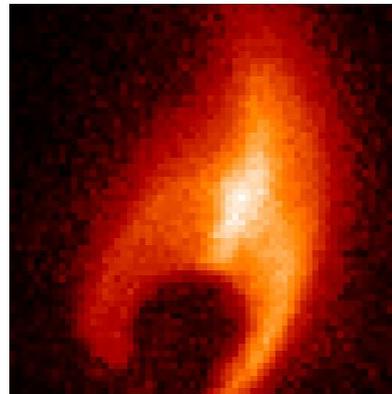
柴田一成 and **西田圭佑**
(Kwasan and Hida obs. Kyoto University)



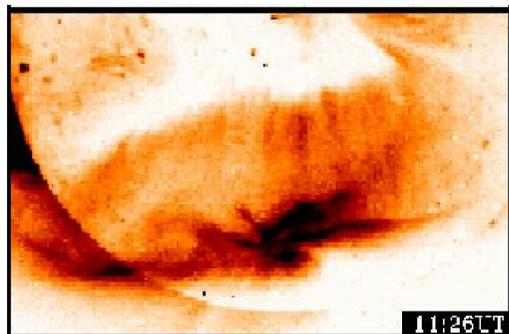
太陽フレアから放出される電磁波



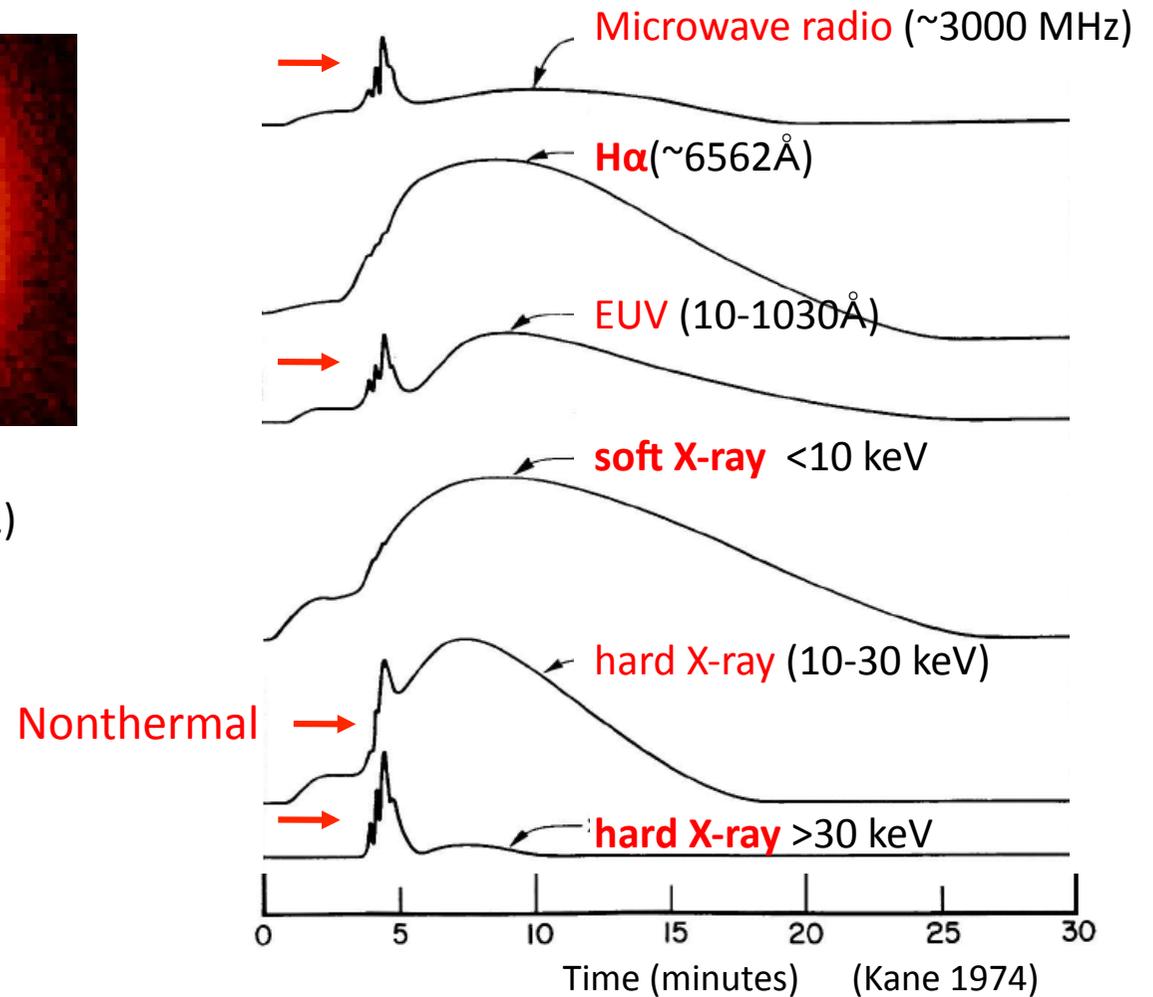
Impulsive flares
(Masuda 1994)



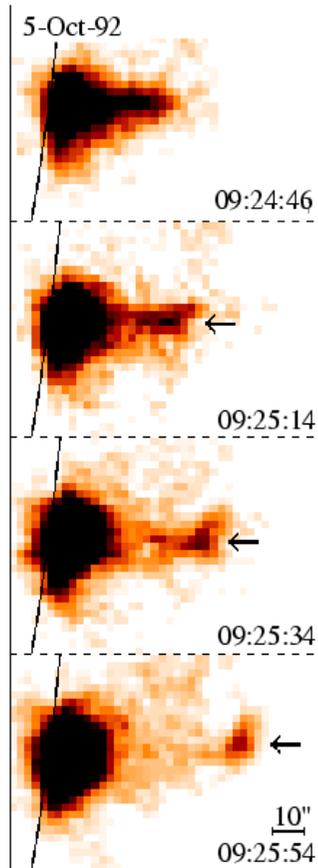
LDE flares
(Tsuneta 1992)



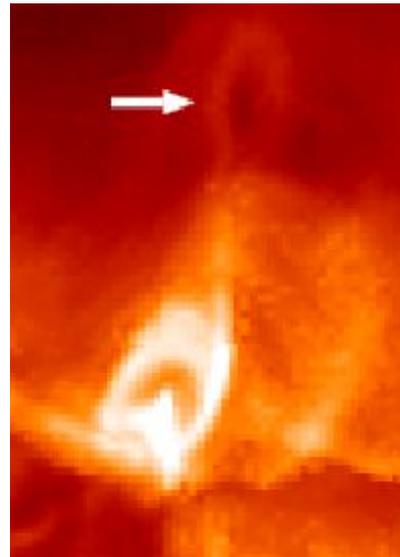
Giant arcades (CMEs)
(McAllister)



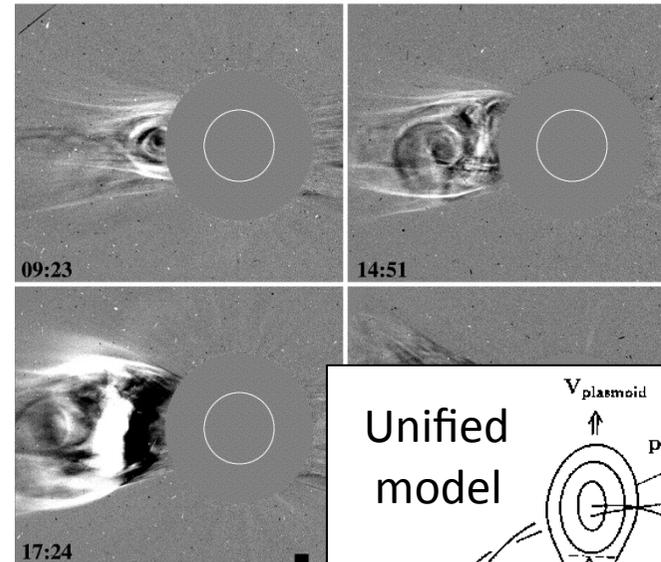
プラズモイド (flux rope) 噴出



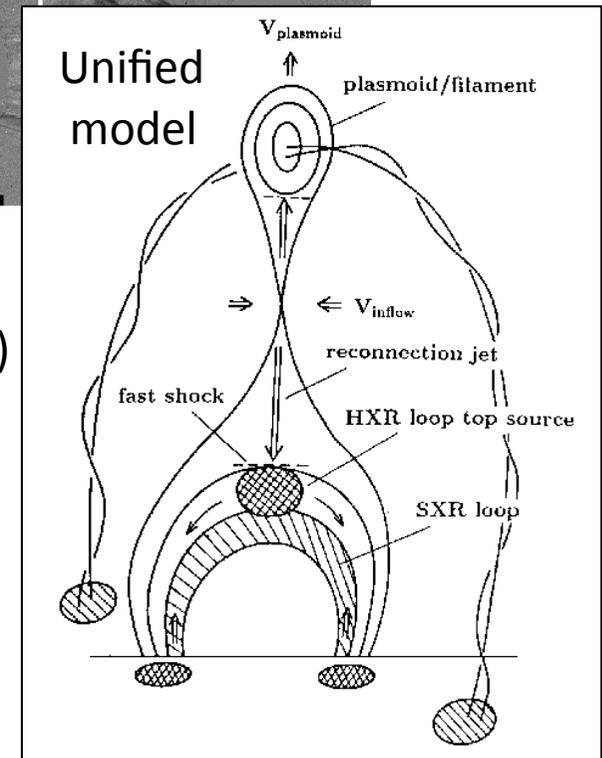
impulsive flares
 $\sim 10^9$ cm



LDE (Long Duration Event) flares
 $\sim 10^{10}$ cm



CMEs (Giant arcades)
 $\sim 10^{11}$ cm

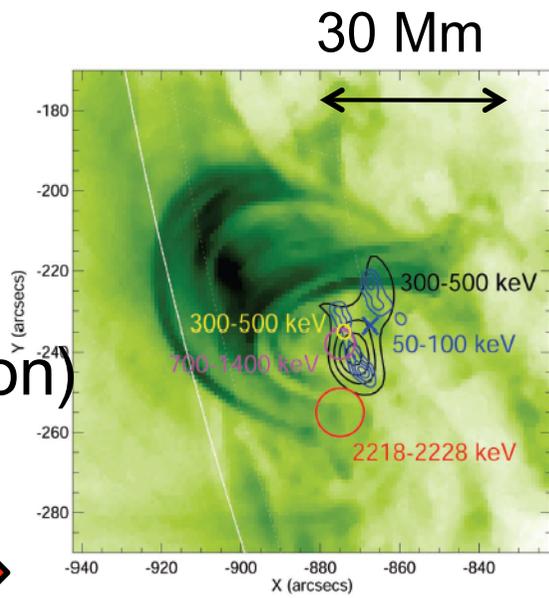
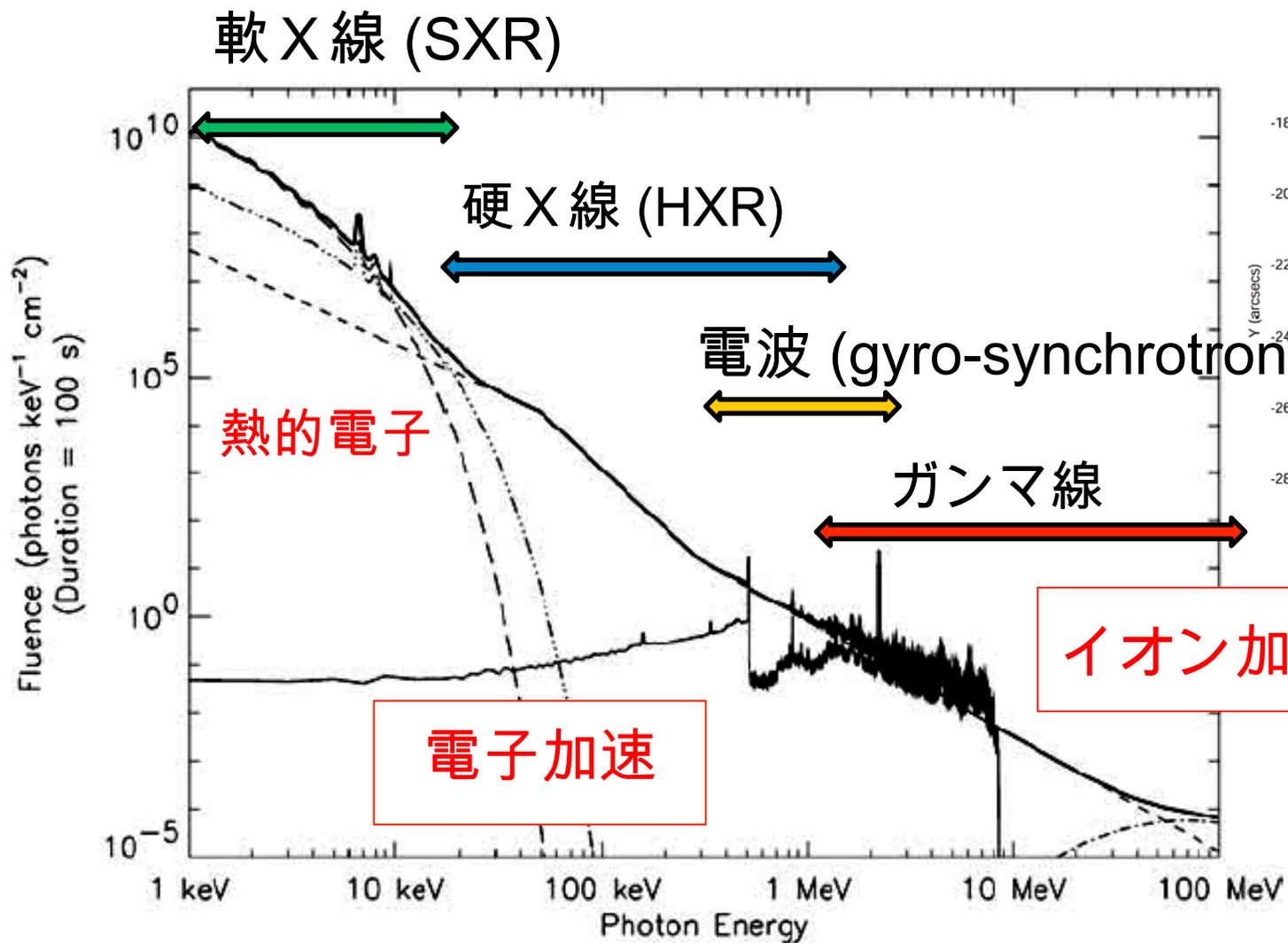


Plasmoid-Induced-Reconnection
 (Shibata 1996)

太陽フレア(ジェット)の未解決問題

- エネルギー蓄積機構は何か？
- トリガー機構は何か？
- 何がエネルギー解放の速さ (リコネクション・レート) を決定するのか？
- 解放エネルギーの何割が非熱的エネルギーに変換されるのか？
- 太陽フレアを説明するためには、マイクロ(~1m)とマクロ(~10¹⁰cm)をいかにつなぐかという根本的問題を解決する必要がある。

太陽フレア中の高エネルギー粒子

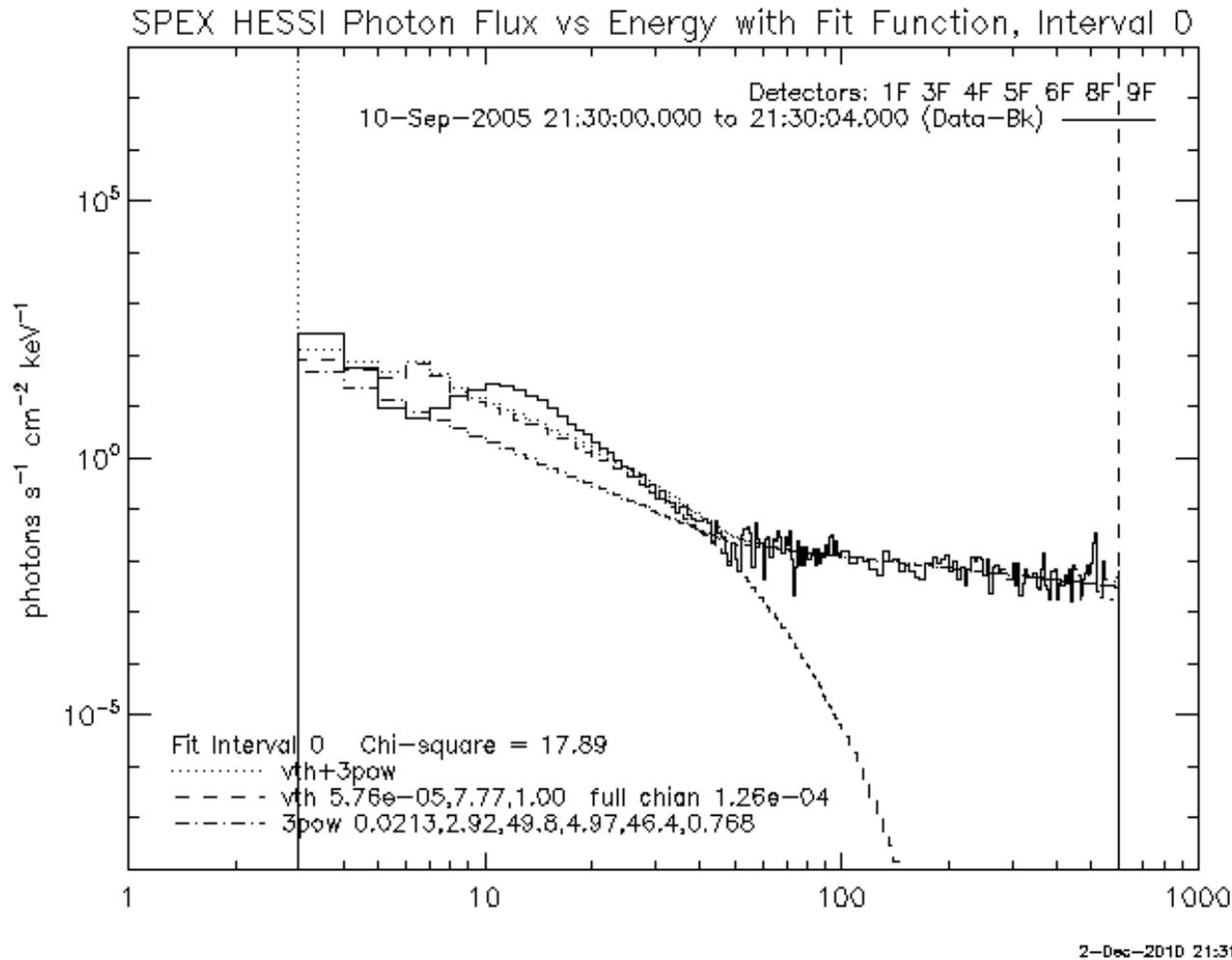


[Lin et al. 2003]

footpoint sources
(+ loop-top)

[Lin et al. 2002]

硬X線スペクトル (RHESSI衛星)

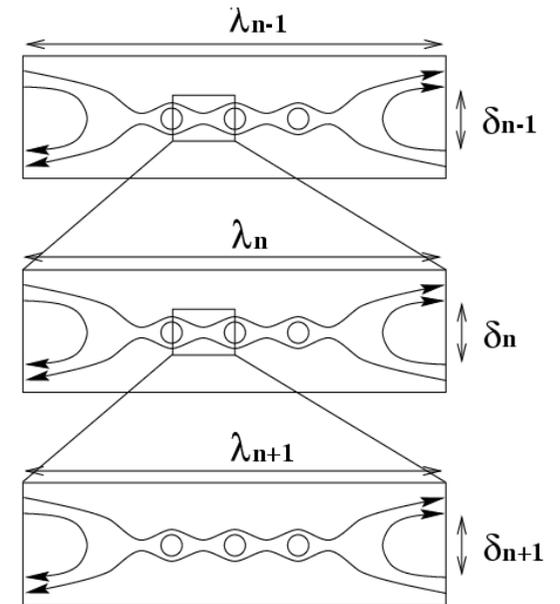


1 Thermal +
3 power-low
(+ super hot
component?)

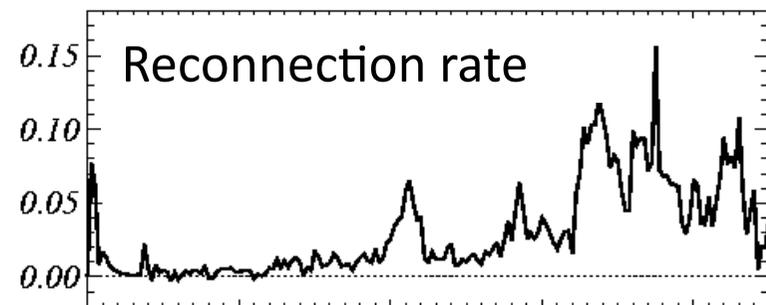
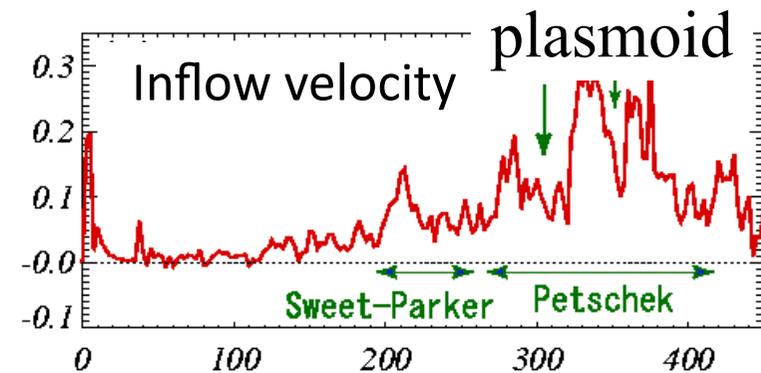
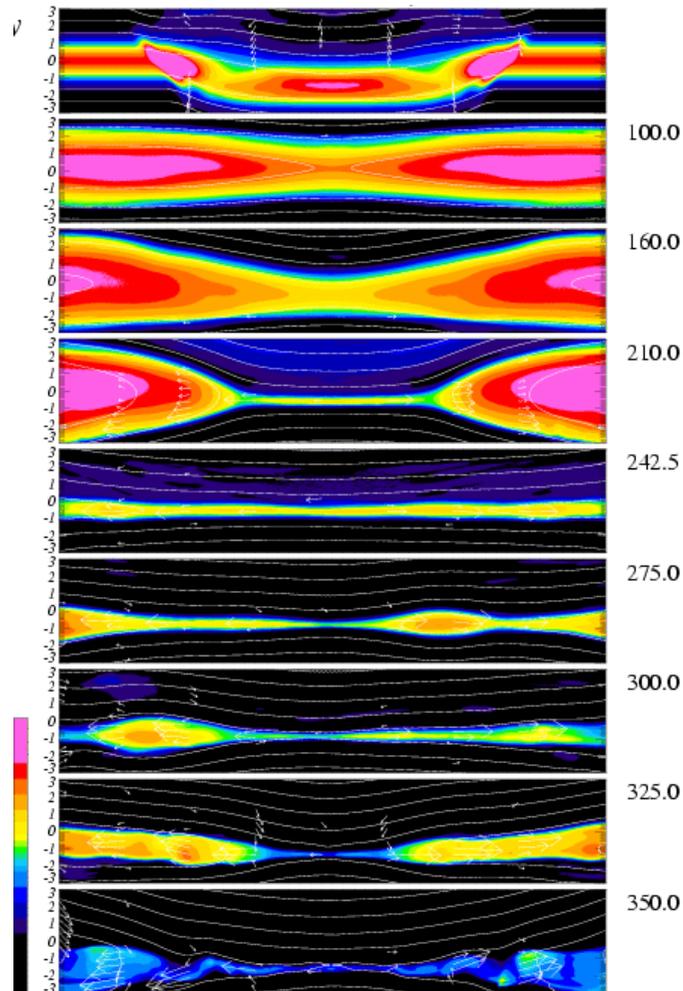
← noise level 0.01

硬X線スペクトルは“**soft-hard-soft**”の時間変動

MHDシミュレーションによるフラクタル 電流シート中のプラズモイド誘導リコ ネクション (Tanuma et al. 2001, Shibata and Tanuma 2001, Barta et al. 2010)



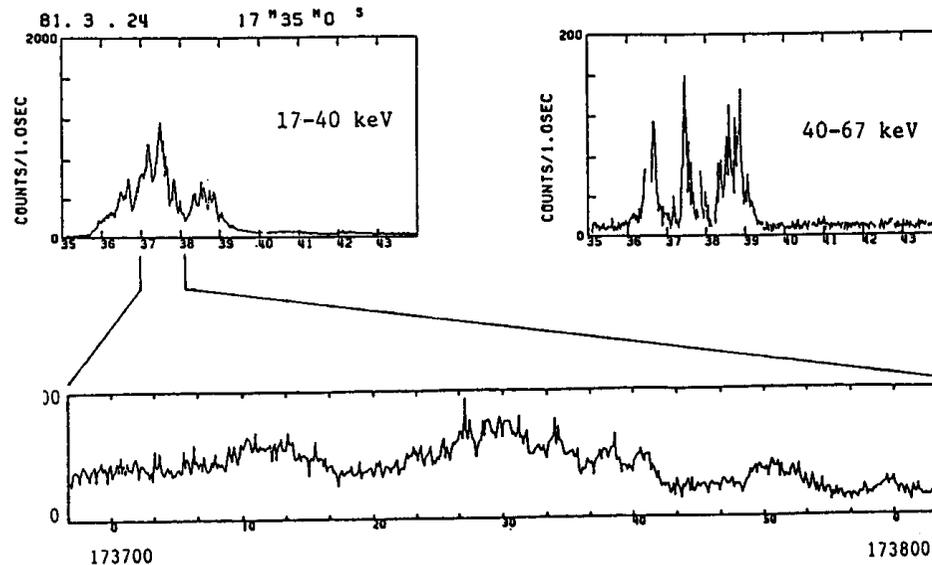
インパルス・リコネ
クション (Priest 1985)



V_{in}/V_A

time

硬X線やマイクロ波放射の観測は**フラクタル的な時間変動**を示す。フラクタル・プラズモイド噴出を示唆する可能性がある。



このフラクタルな構造は、ミクロとマクロの構造やダイナミクスをつなぎあわせる役割をはたすと期待。

Fractal current sheet

(Tajima-Shibata 1997)

Small-scale electric fields
in magnetic X and O points

Aschwanden 2002

Benz and Aschwanden 1989
Zelenyi 1996, Karlicky 2004

軟X線プラズマ噴出

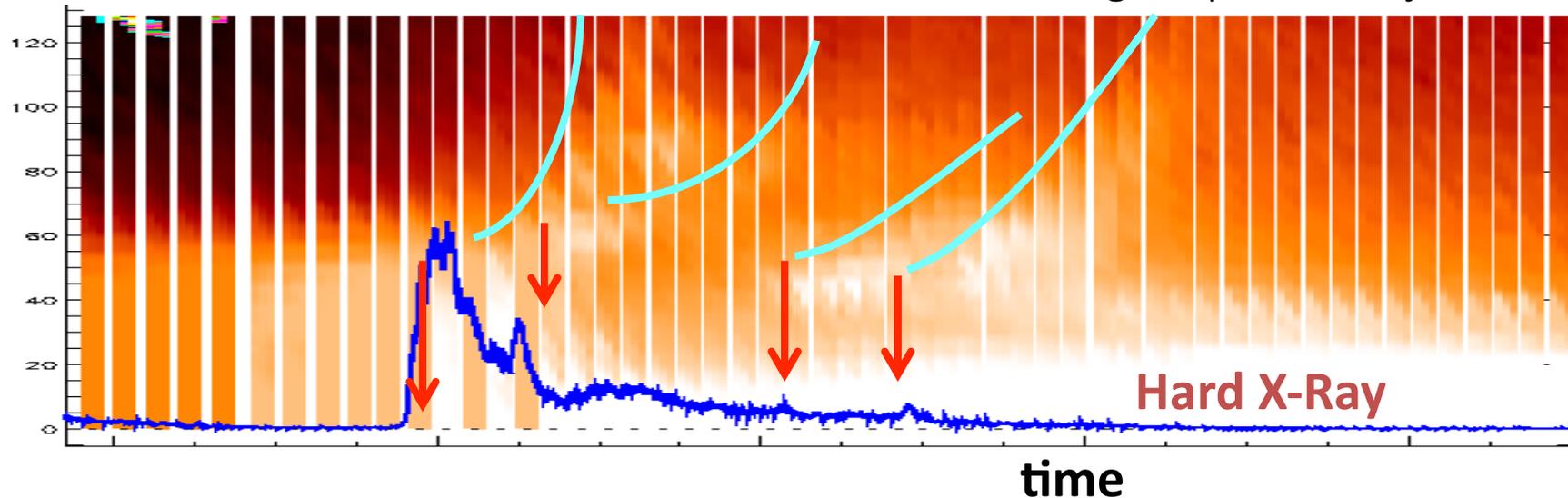
2004 December 10 X2.3 Flare

[Nishizuka et al. 2010]

硬X線のピークとプラズモイド噴出とはタイミングが一致し、ピーク強度と運動エネルギーは相関を示す。

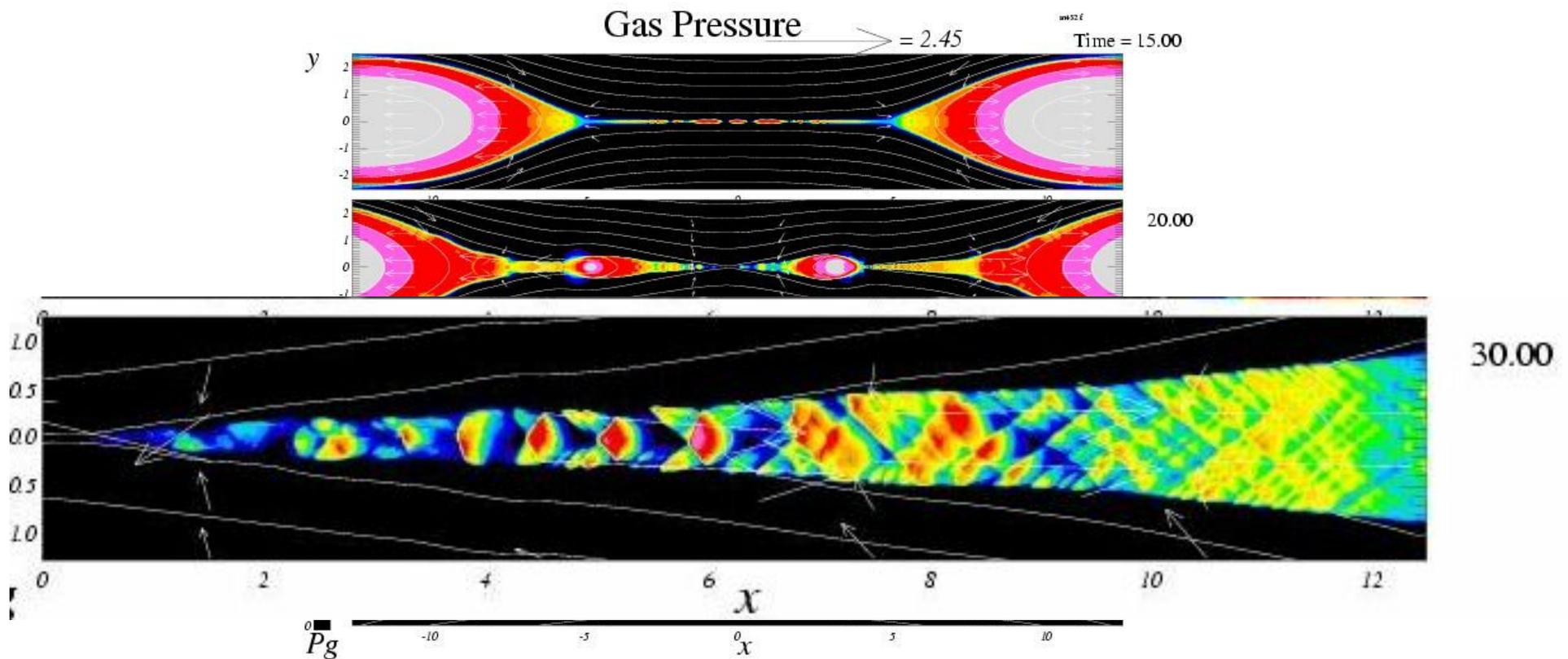
24-NOV-00 14:55:31

Time slice image of plasmoid ejections



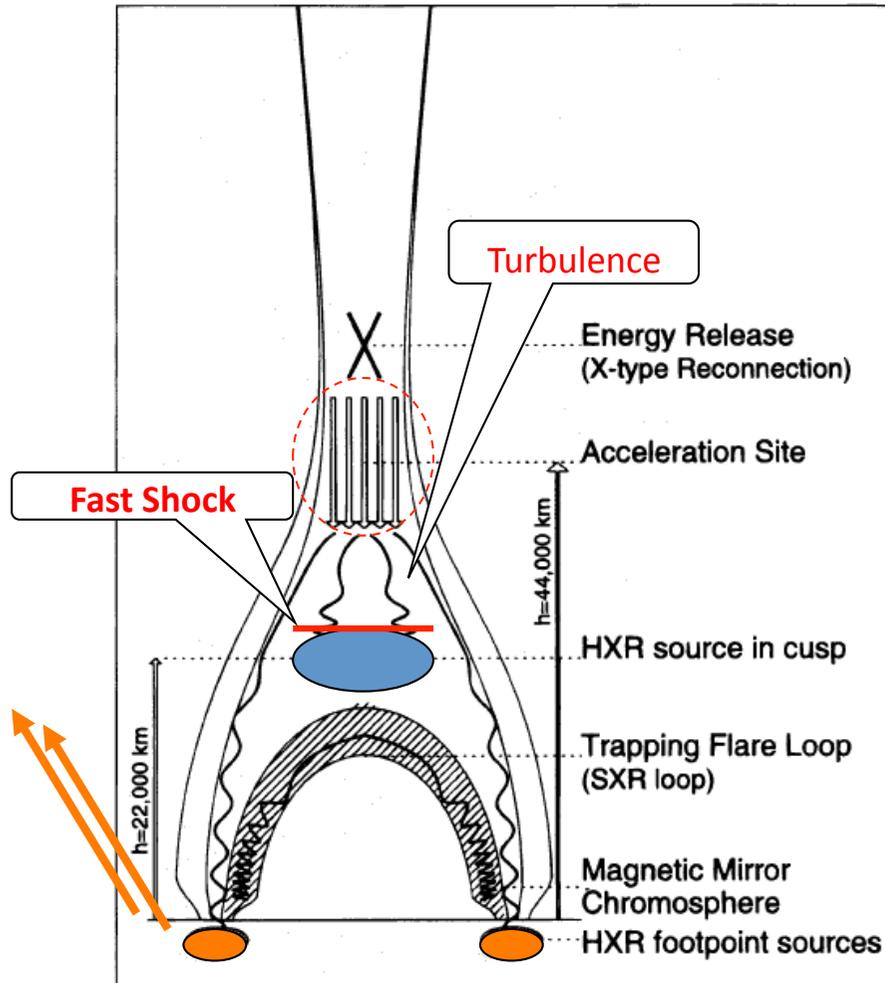
リコネクションジェット中に行ける マルチ・ファーストショック

(Tanuma and Shibata 2007, PASJ, 59, L1-L5)



粒子とプラズモイドのダイナミクス、マルチ衝撃波の相互作用が太陽フレア中の粒子加速機構を解くカギになるかもしれない。

太陽フレアにおける粒子加速モデル

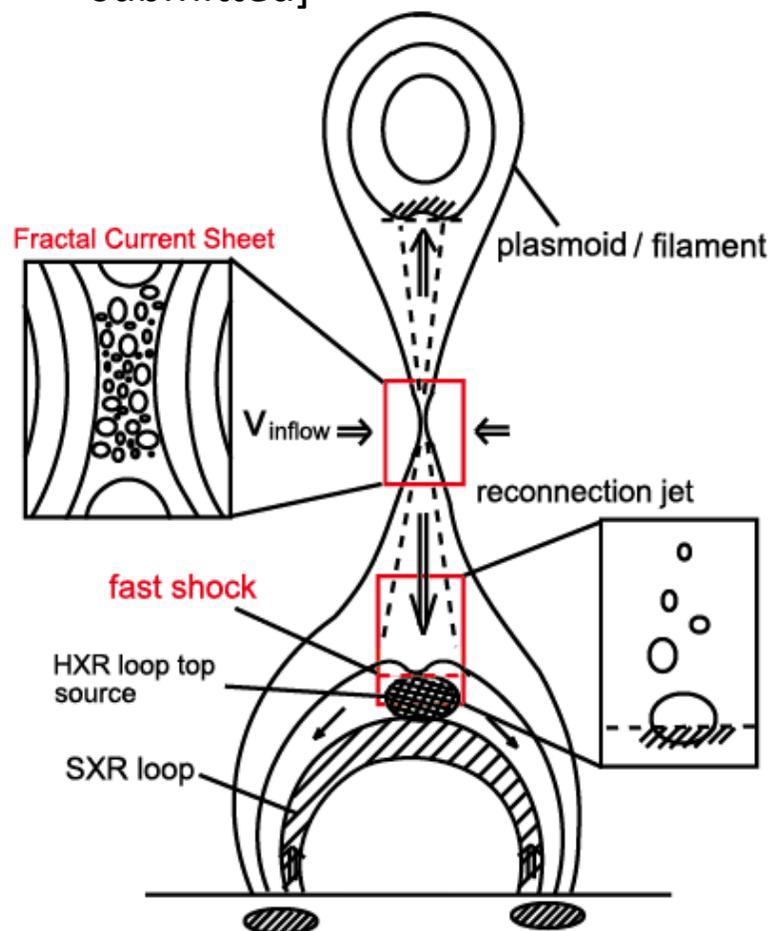


Masuda et al. 1994, Aschwanden et al. 1996

- **直流電場(DC)加速**
(e.g. Holman 1985, Benka & Holman 1994, Litvinenko 1996)
 - **乱流統計加速**
(e.g. Brown & Loran 1985; Benz & Smith 1987; Miller et al. 1997)
 - **衝撃波加速**
(e.g. Cargill 1996, Shimada & Terasawa 1997; Somov & Kosugi (1997), Tsuneta & Naito 1998)
- cf) **プラズモイドの運動に伴う粒子加速**
(e.g. Drake et al. 2006, 2009; Pritchett 2008; Daughton et al. 2009)

ファーストショックに衝突する**フラクタル・プラズモイド**に補足されたフェルミ加速

[Nishizuka , Shibata et al. to be submitted]



フラクタル・リコネクション
(Shibata & Tanuma 2001)

フラクタル・プラズモイド

ファーストショックとの衝突

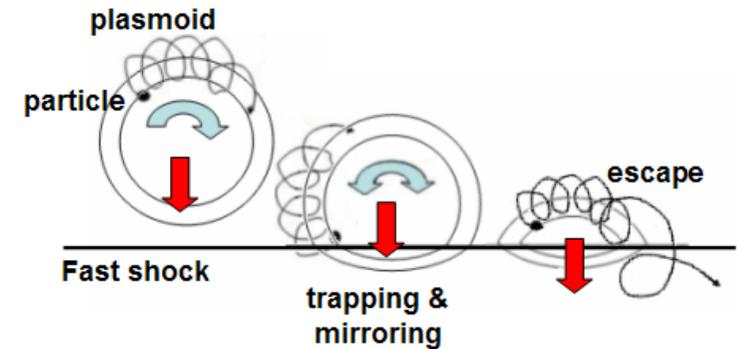
ファーストショックでの
衝撃波粒子加速

cf) Fermi Acceleration at the fast shock: Somov & Kosugi (1997), Tsuneta & Naito (1998)

$M_A \sim 1.2-1.5$ in a solar flare

ファーストショックでのフェルミ加速のシナリオ (2009年度理論懇シンポ)

- 1) 粒子がプラズモイド中に**補足**される。
- 2) 複数プラズモイドがファーストショックに衝突。
- 3) **磁気ミラー効果**により粒子は**反射**される。
- 4) 反射間隔が**だんだんと短くなる**。
- 5) 粒子がフェルミ加速により加速される,
反射間隔がラーマー半径程度になると**逃避・終了**。



• 2つの断熱不変量から:

(i) $E_{\parallel} L^2 = \text{const.}$ → 1次 **フェルミ**加速

$$\frac{E(T_{acc})}{E_0} = \left(\frac{L_0}{L(T_{acc})} \right)^2 = \left(\frac{L_0}{L_{Larmor}} \right)^2 = \underline{\underline{10^3}} \left(\frac{L_0}{10^5 \text{ cm}} \right)^2 \left(\frac{B}{10 \text{ G}} \right)^2 \left(\frac{E_0}{1 \text{ keV}} \right)^{1/2}$$

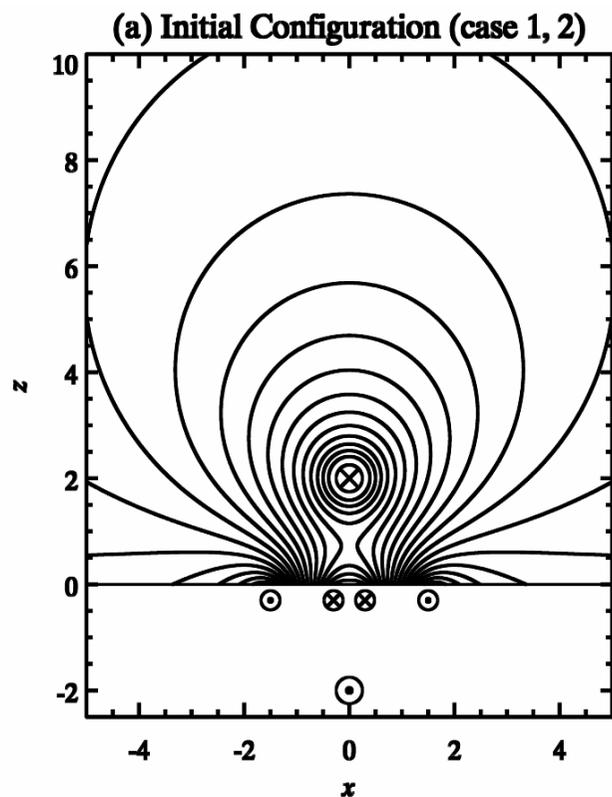
(ii) $E_{\perp} / B = \text{const.}$ → **ベータトロン**加速

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{B}{B_0} \right) \leq \underline{\underline{4}}$$

at the fast shock
磁気パイルアップによる
長周期加速に有効。

プラズモイド噴出のMHDシミュレーションモデル

- 2.5D resistive MHD simulation
[Chen & Shibata 2001, Shiota et al. 2005, Nishida et al. 2009]



$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0,$$

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

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) - \eta \nabla \times \mathbf{j} = 0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T + (\gamma - 1) T \nabla \cdot \mathbf{v} - \frac{2}{\beta_0} \frac{(\gamma - 1) \eta}{\rho} \mathbf{j} \cdot \mathbf{j} = 0,$$

$$\mathbf{B} = \nabla \times (\psi \hat{\mathbf{e}}_z) + (0, 0, B_z)$$

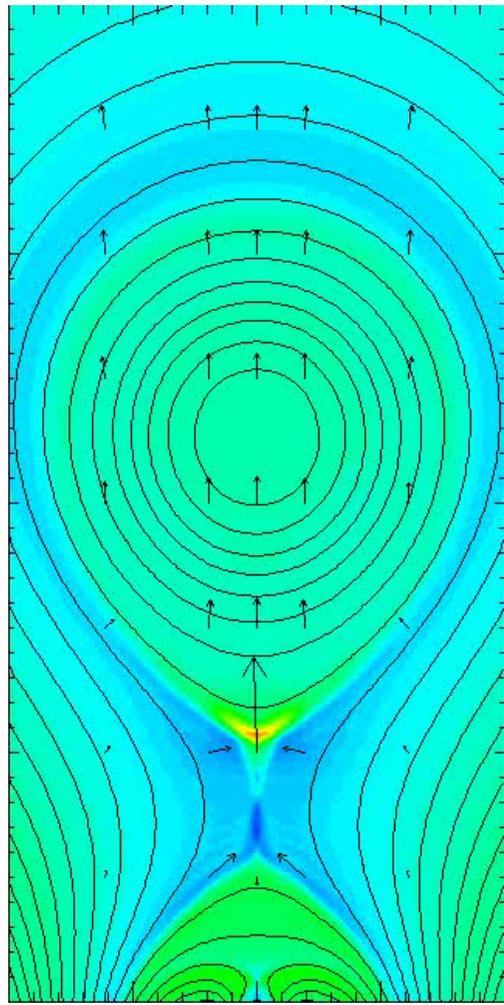
$$\mathbf{j} = \nabla \times \mathbf{B}$$

$$v_a \equiv j/\rho$$

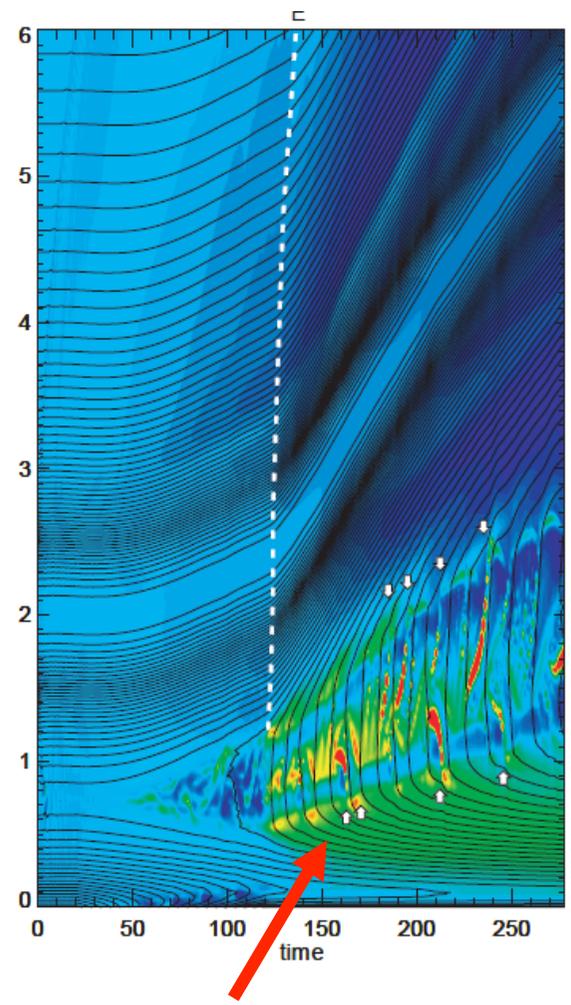
異常抵抗

$$\eta = \begin{cases} 0, & |v_a| \leq v_c, \\ \eta_0 \left(\frac{|v_a|}{v_c} - 1 \right), & |v_a| > v_c, \end{cases}$$

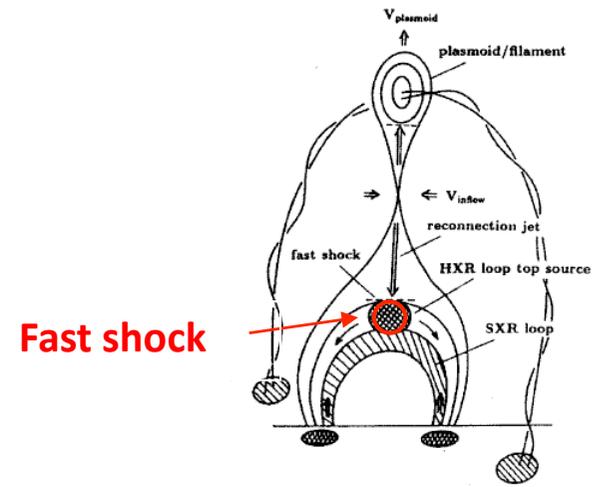
複数プラズモイドの ファーストショックとの衝突



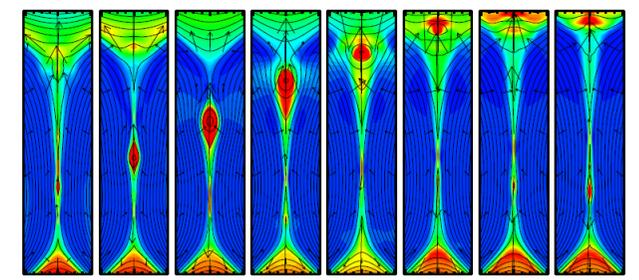
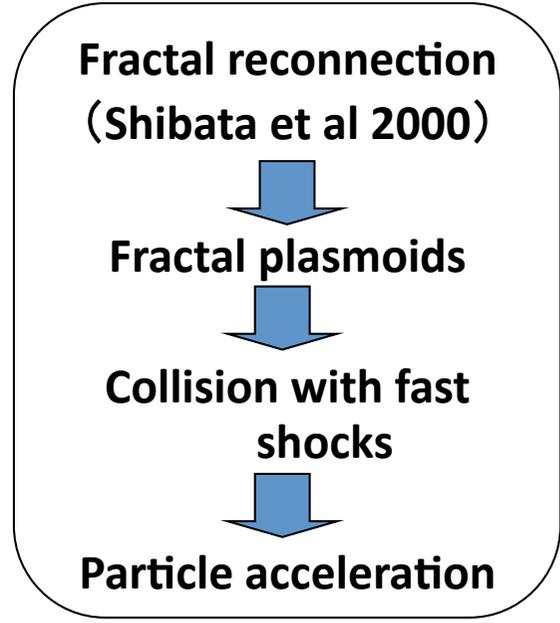
MHD simulation



Plasmoid collide with
Fast shock



Fast shock



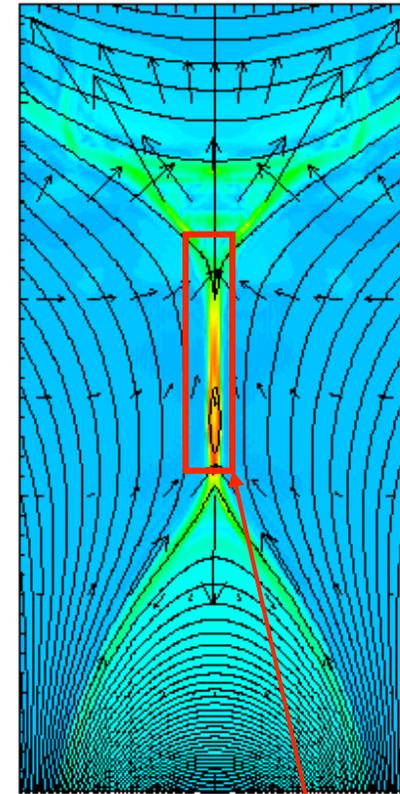
テスト粒子シミュレーション (Injection)

- Buneman-Boris method

$$E = -v_{conv} \times B + \eta J$$

$$\frac{dmv\gamma}{dt} = e(E + v \times B)$$

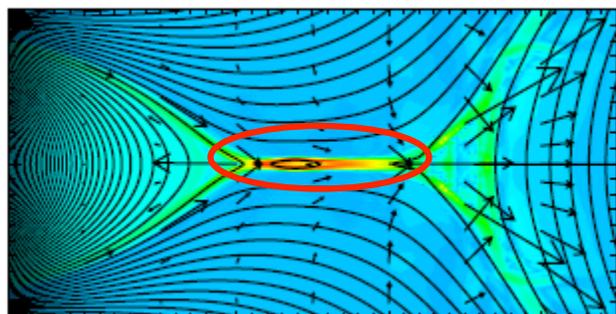
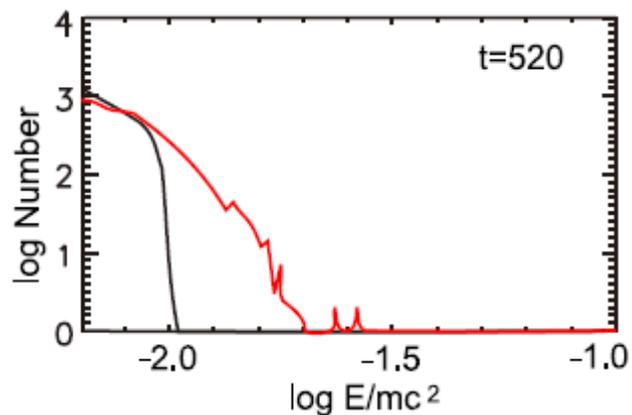
- MHDシミュレーションで計算された電磁場によって粒子は加速される。
- 今回 **プロトン** 加速を考える。
- 注入場所は右図の四角部分。
- X点やスローショックでのプラズマの**プレ加熱・加速 (20MK)** を仮定し、初期のエネルギースペクトルはべき分布を仮定する。



Injection region

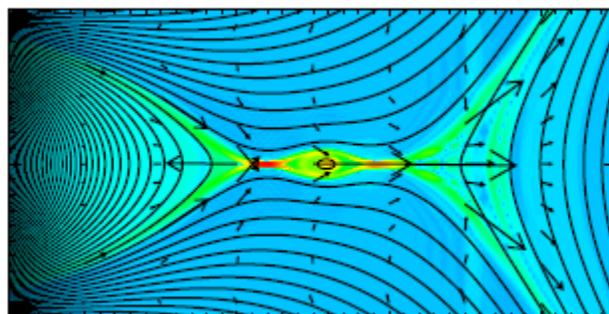
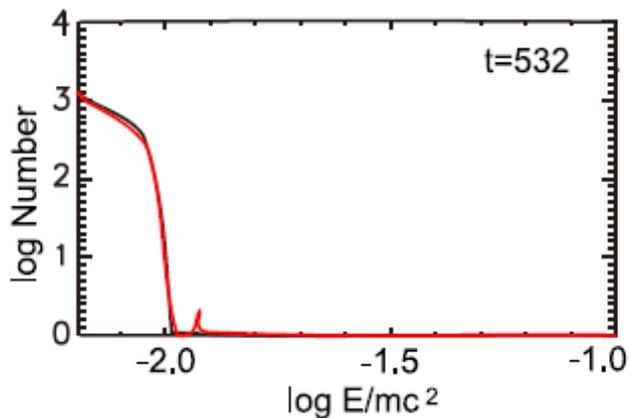
$$V = ED_{acc} = V_{in} BD_{acc} = 10keV \times \left(\frac{V_{in}}{1kms^{-1}} \right) \left(\frac{B}{1G} \right) \left(\frac{D_{acc}}{100km} \right)$$

Case (a)
定常リコネクション

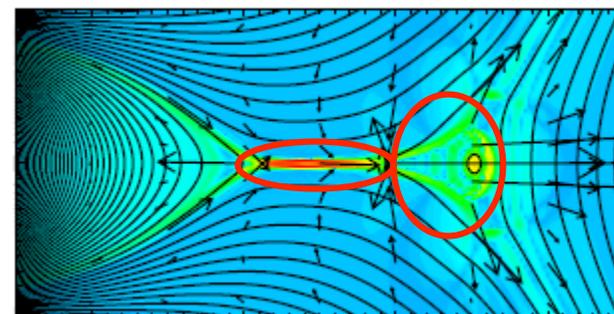
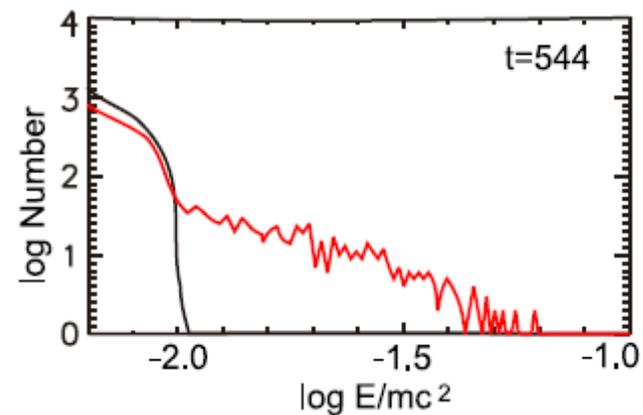


電流シート中での直流
電場加速

Case (b)
プラズモイドによる補足

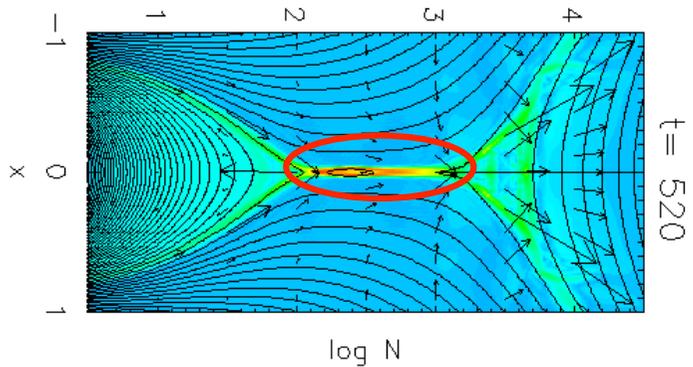
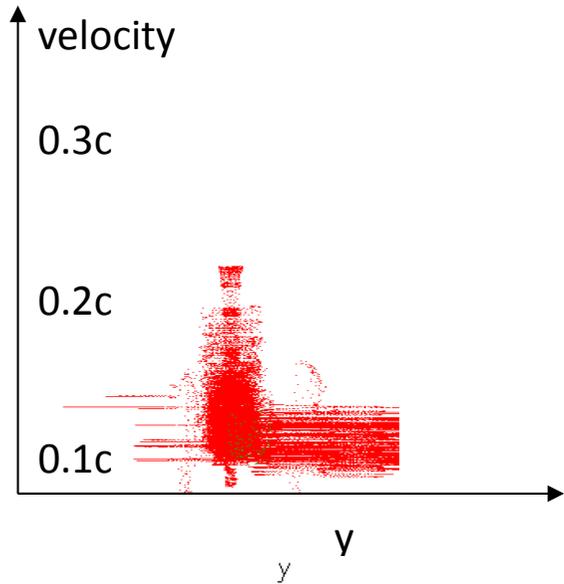


Case (c)
プラズモイドのファースト
ショック衝突時



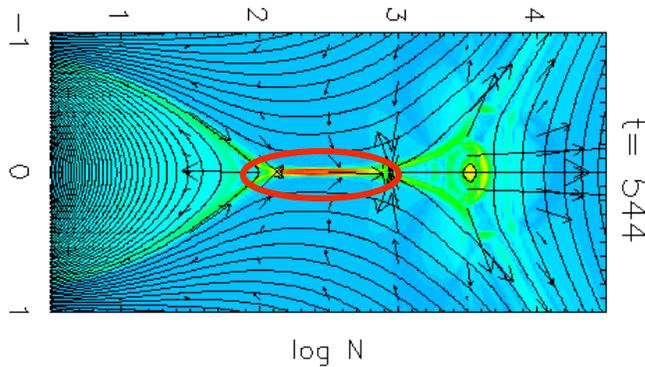
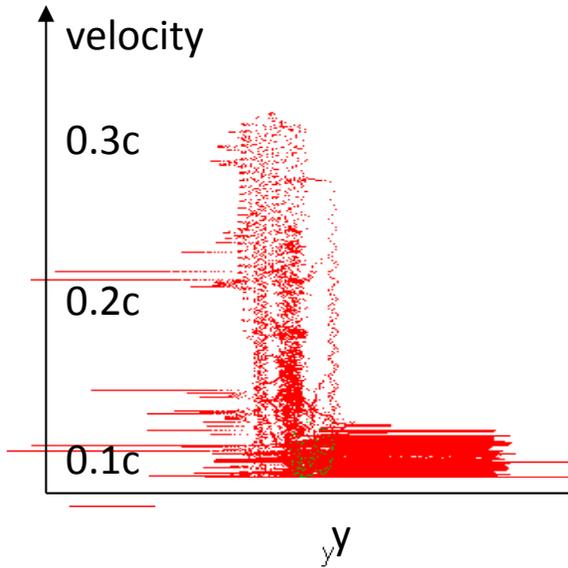
直流電場加速 + s
衝撃波加速

Case (a)
直流電場加速



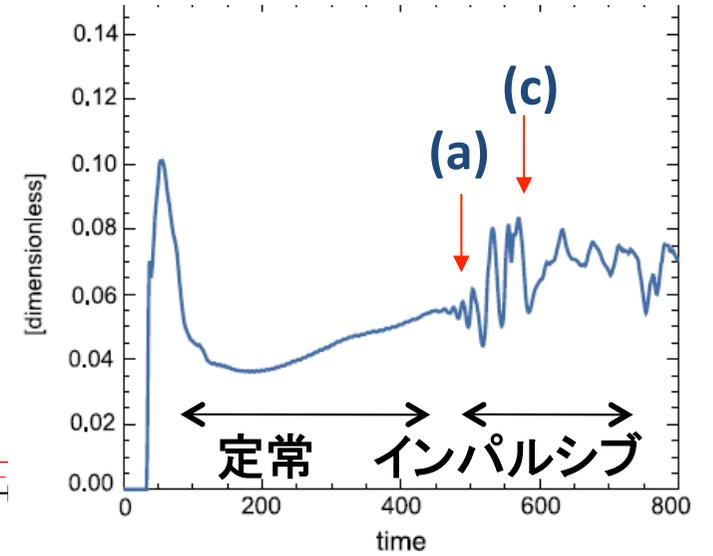
電流シート中での
加速

Case (c-1)
直流電場加速



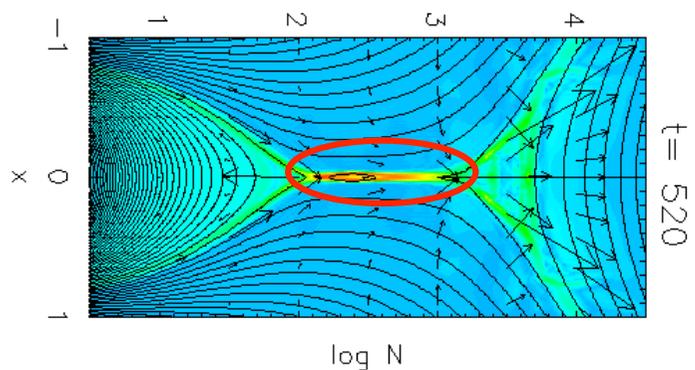
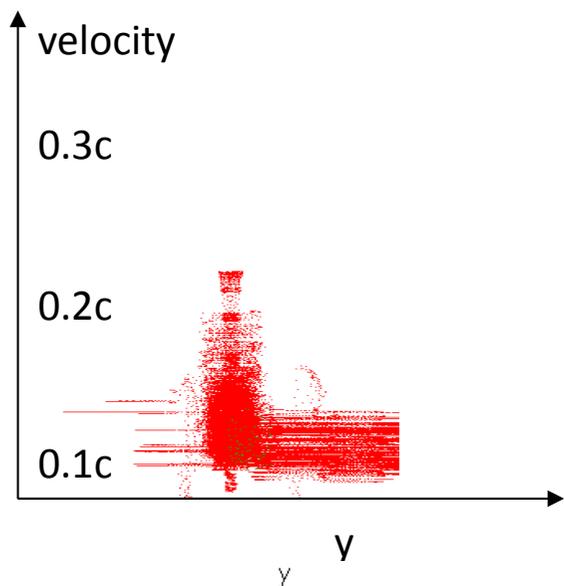
電流シート中での
加速

リコネクションレート



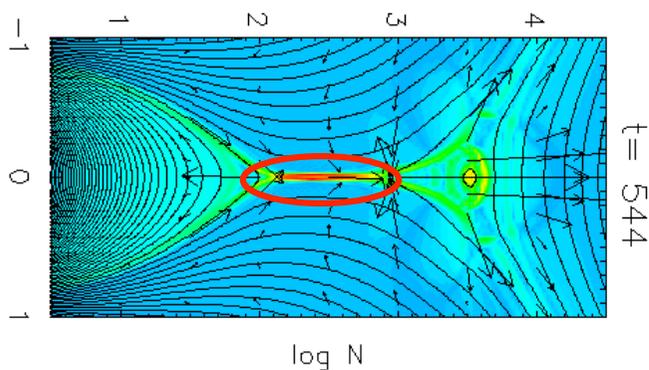
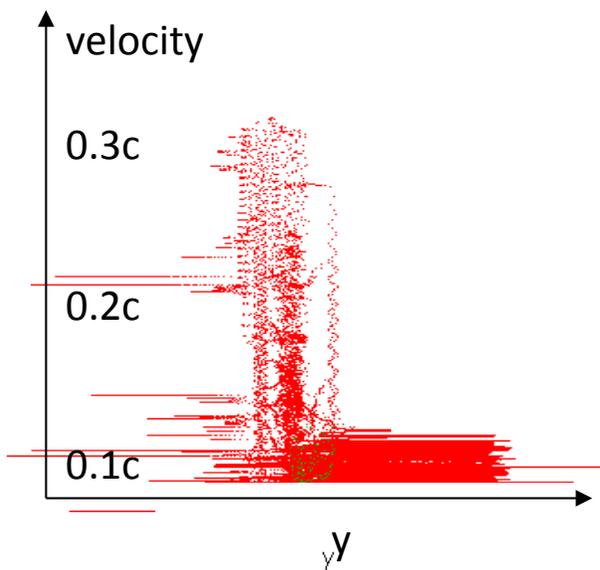
プラズモイド噴出
⇒インフロー ↑
⇒直流電場 ↑
⇒粒子加速↑

Case (a)
直流電場加速



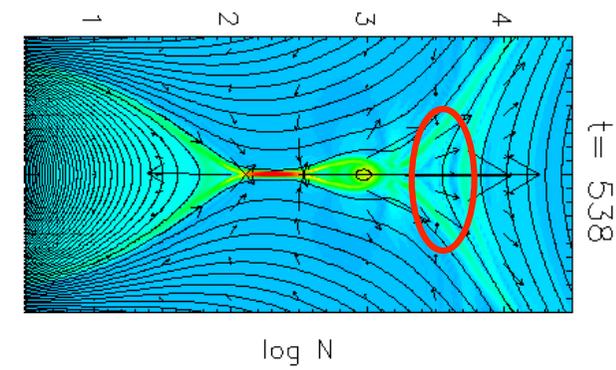
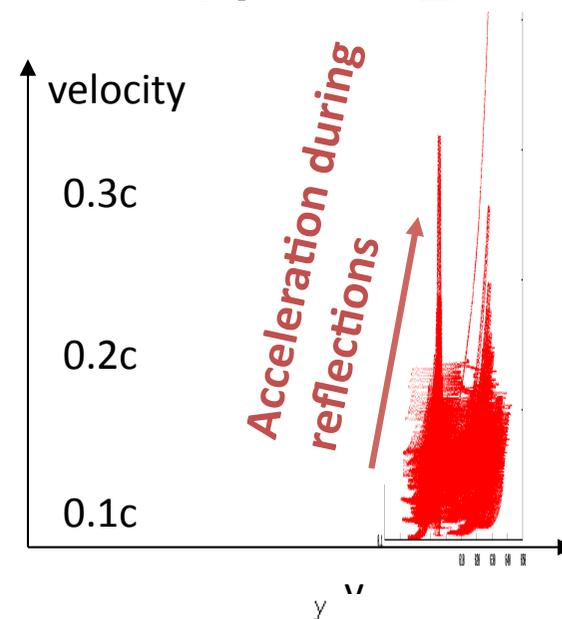
電流シート中での
加速

Case (c-1)
直流電場加速



電流シート中での
加速

Case (c-2)
衝撃波加速

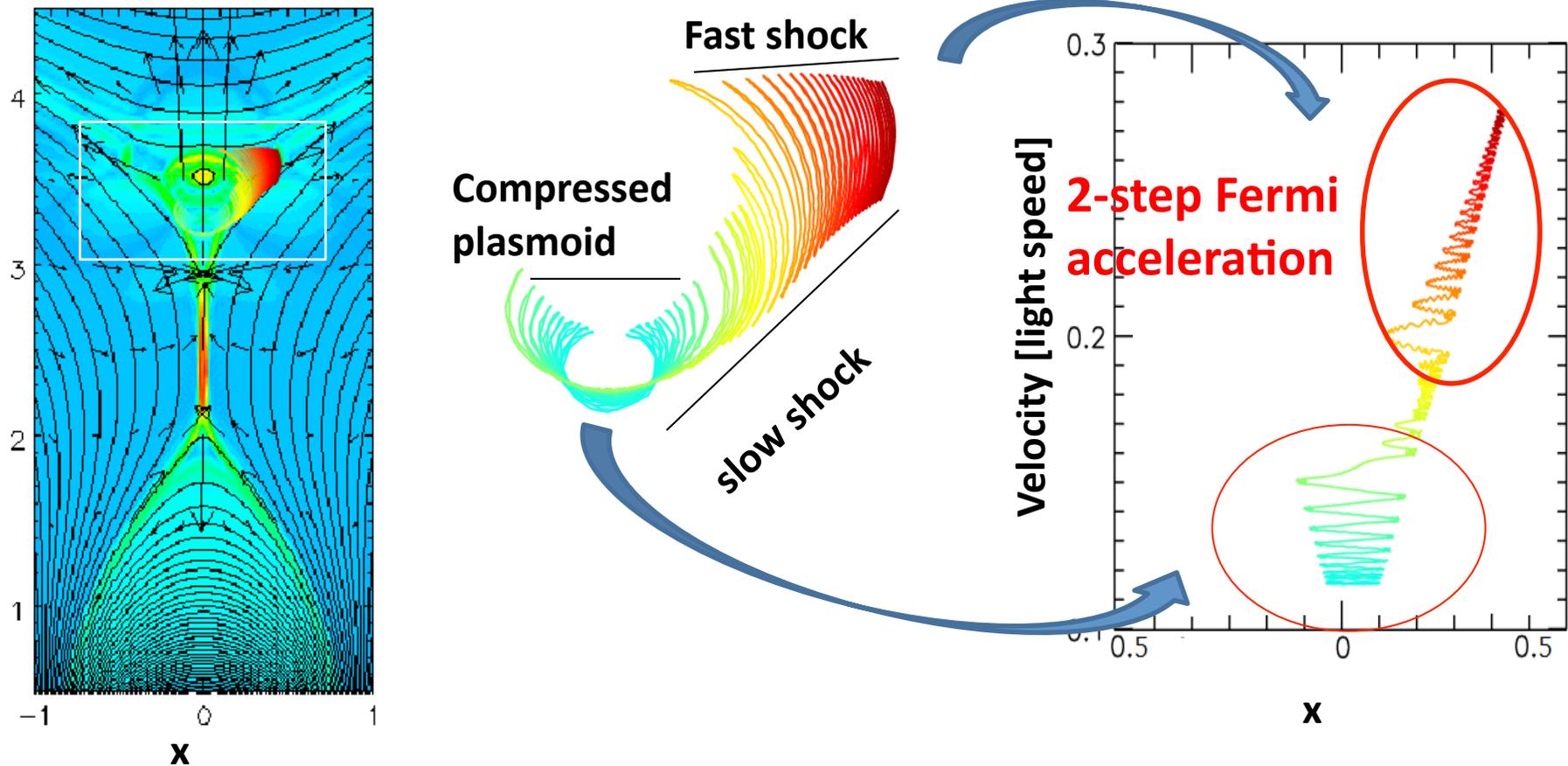


ファーストショックに
おけるフェルミ加速



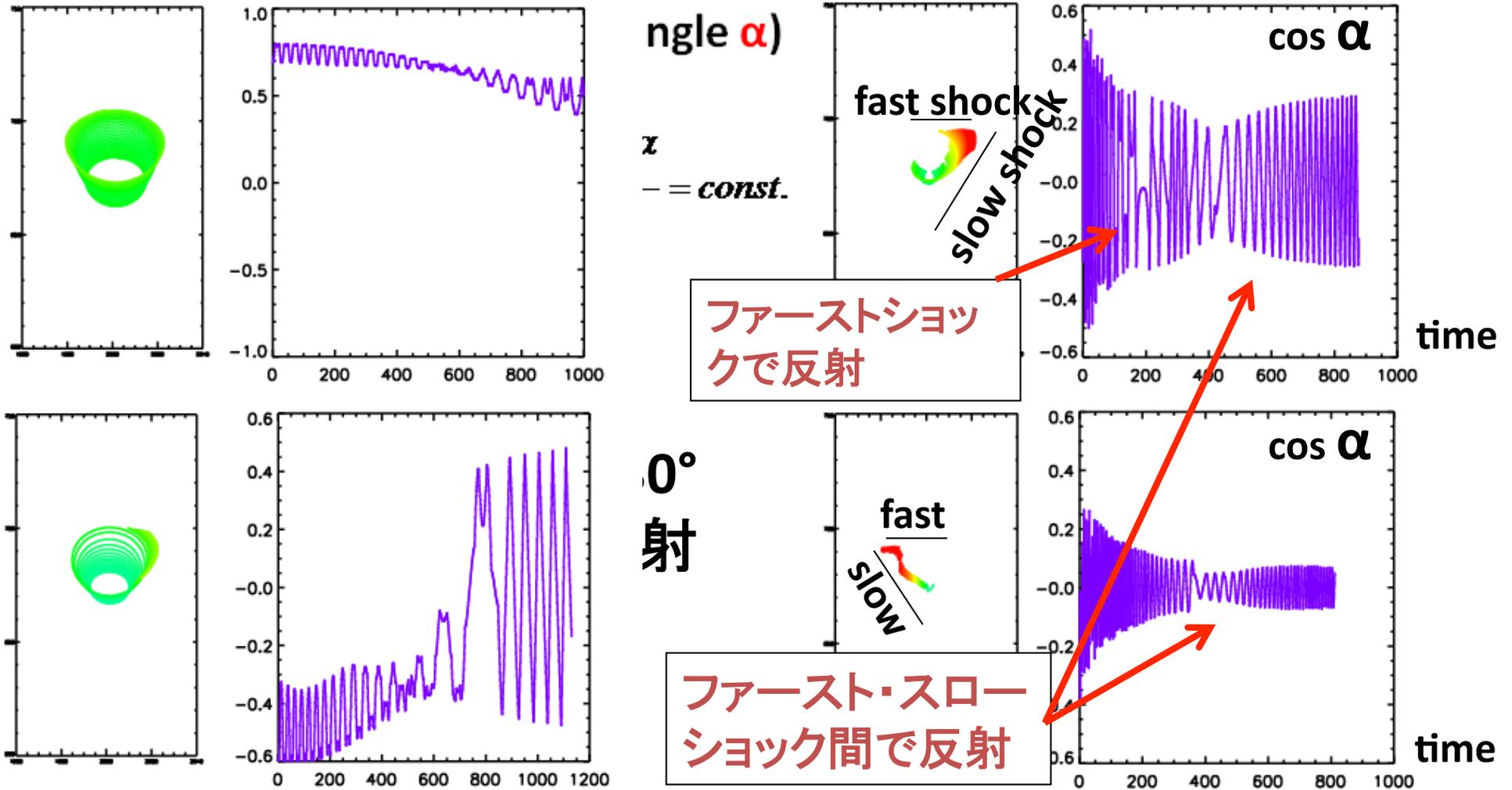
Two step

ファーストショックにおけるフェルミ加速 (テスト粒子軌道)



2段階フェルミ加速: ① ファーストショックの上流と, ② **ファースト**
ショックとスローショックとの間で加速. (総粒子数の5-20%)

粒子のpitch角 α と衝撃波での反射

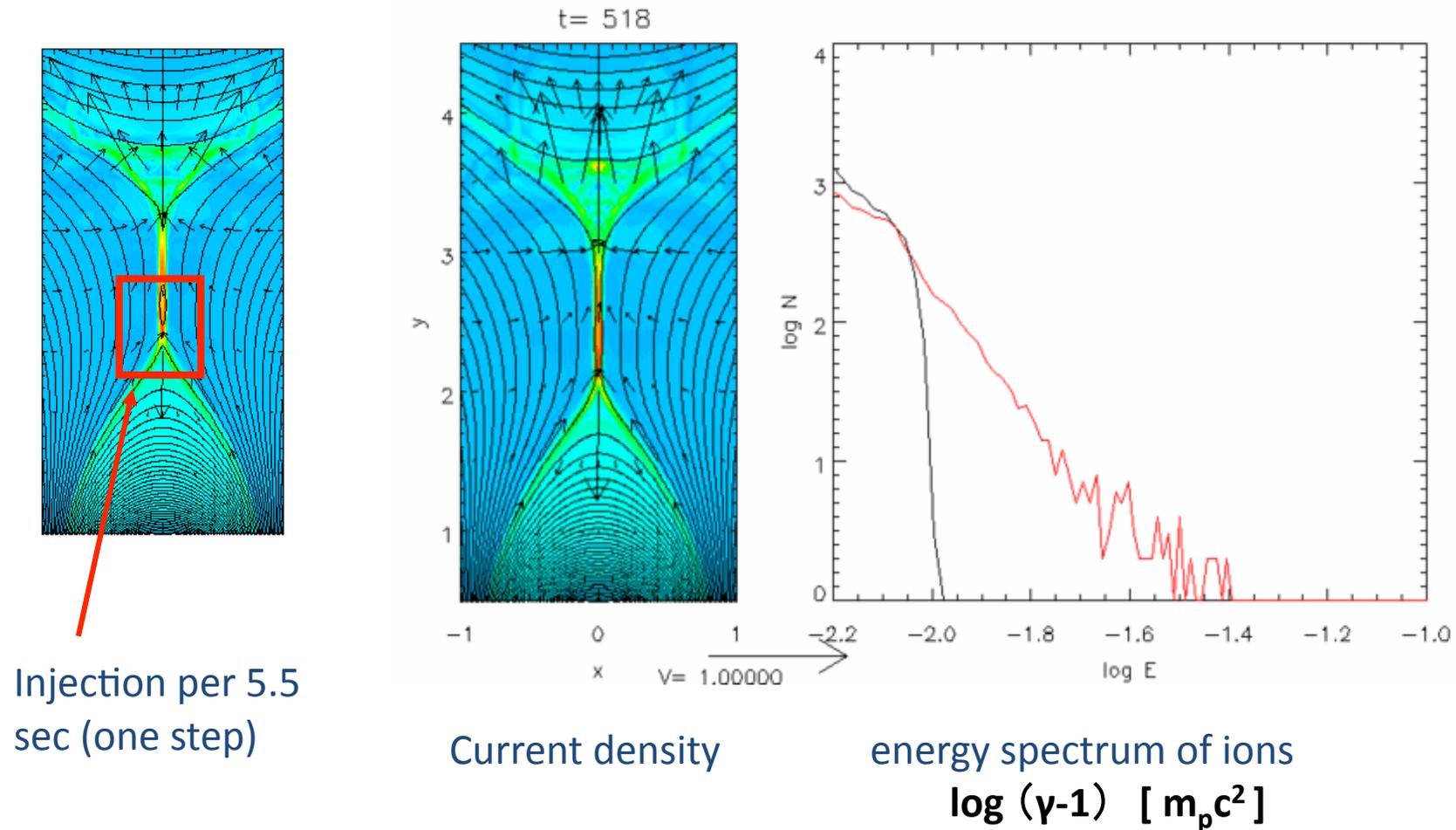


ファーストショックで反射

ファースト・スローショック間で反射

ぎりぎり巻き運動の粒子ほど反射が効き効率よく加速される。低エネルギー粒子は磁力線に沿った運動で、すんなり衝撃波を通過。

プラズモイド噴出とPower-law indexの時間変動



プラズモイド噴出に伴ってPower-law indexが時間変化し, 硬X線の
“Soft-Hard-Soft”という時間変動を再現している。

結果のまとめと考察(1)

- プラズモイド噴出に伴って硬X線バーストが観測されている。我々は、Tsuneta & Naitoモデル(1998)を拡張し、磁気ループ上空におけるファーストショックにおける粒子加速モデルを考えた。
- 解析的に加速率を見積もったのち、さらにMHDシミュレーションとテスト粒子シミュレーションにより、粒子の軌道とエネルギースペクトルの時間変化を調べた。
- シミュレーションの結果、粒子はプラズモイド噴出に伴って定常リコネクションに比べ非常に激しく加速されることを示した。(リコネクション電場加速とファーストショックにおける加速の2段階加速)
またショックでの加速前に、スローショック(もしくは別の物理機構)により20Mk程度までプレ加速されている必要がある。
- ファーストショック上流に補足されたフェルミ加速に加え、ファーストショックとスローショック間に補足されたフェルミ加速による多段階加速が示された。
ピッチ角の大きな粒子が効率的に反射され激しく加速される。

結果のまとめと考察(2)

- シミュレーションによって示した冪分布の指数の時間変動は、X線観測による“Soft-Hard-Soft”の時間変動も説明することができる。
- 陽子と同様電子も同じメカニズムで加速していると考えられる。(ただし電子の場合一回に得るエネルギーは小さいので、回数で稼ぐ。)
- 1つのプラズモイドでなく、Fractalな複数のプラズモイドがファーストショックに衝突する状況を考えると、粒子エネルギースペクトルの冪分布はより自然に説明できそうである。
- ひので衛星X線観測で太陽フレアに伴うプラズモイド噴出、磁気リコネクションはどのように見えるのか !?
- マグネターやGRBでも同様のことは起きそうか？