

磁気リコネクション(太陽フレア) 観測とシミュレーション

西田圭佑 (京都大学)

概要

- ひので衛星によるリコネクション観測
- 3次元MHDシミュレーションによるプラズモイドを含むリコネクション研究とその観測可能性

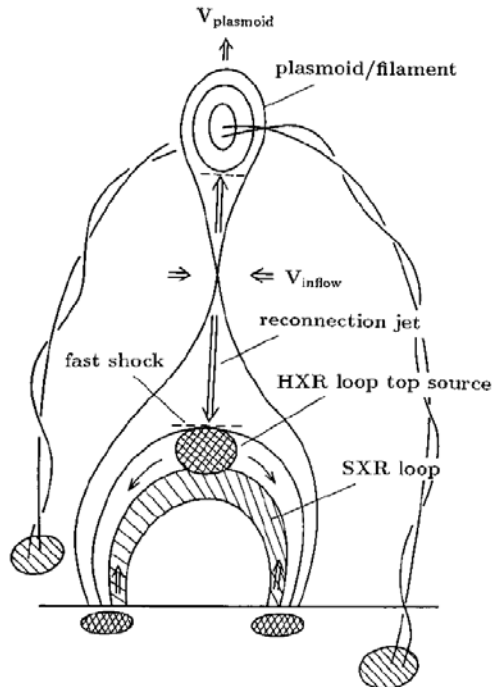
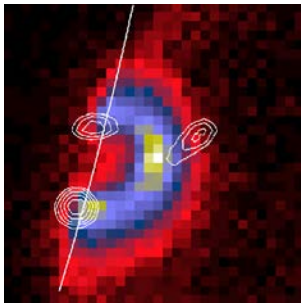
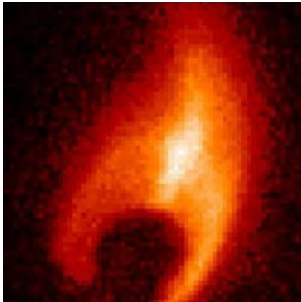
概要

- ひので衛星によるリコネクション観測
- 3次元MHDシミュレーションによるプラズモイドを含むリコネクション研究とその観測可能性

「ようこう」から「ひので」へ

ようこう

太陽フレアのエネルギー解放機構
は磁気リコネクション！



e.g. Tsuneta, Masuda, Shibata, ...

ひので

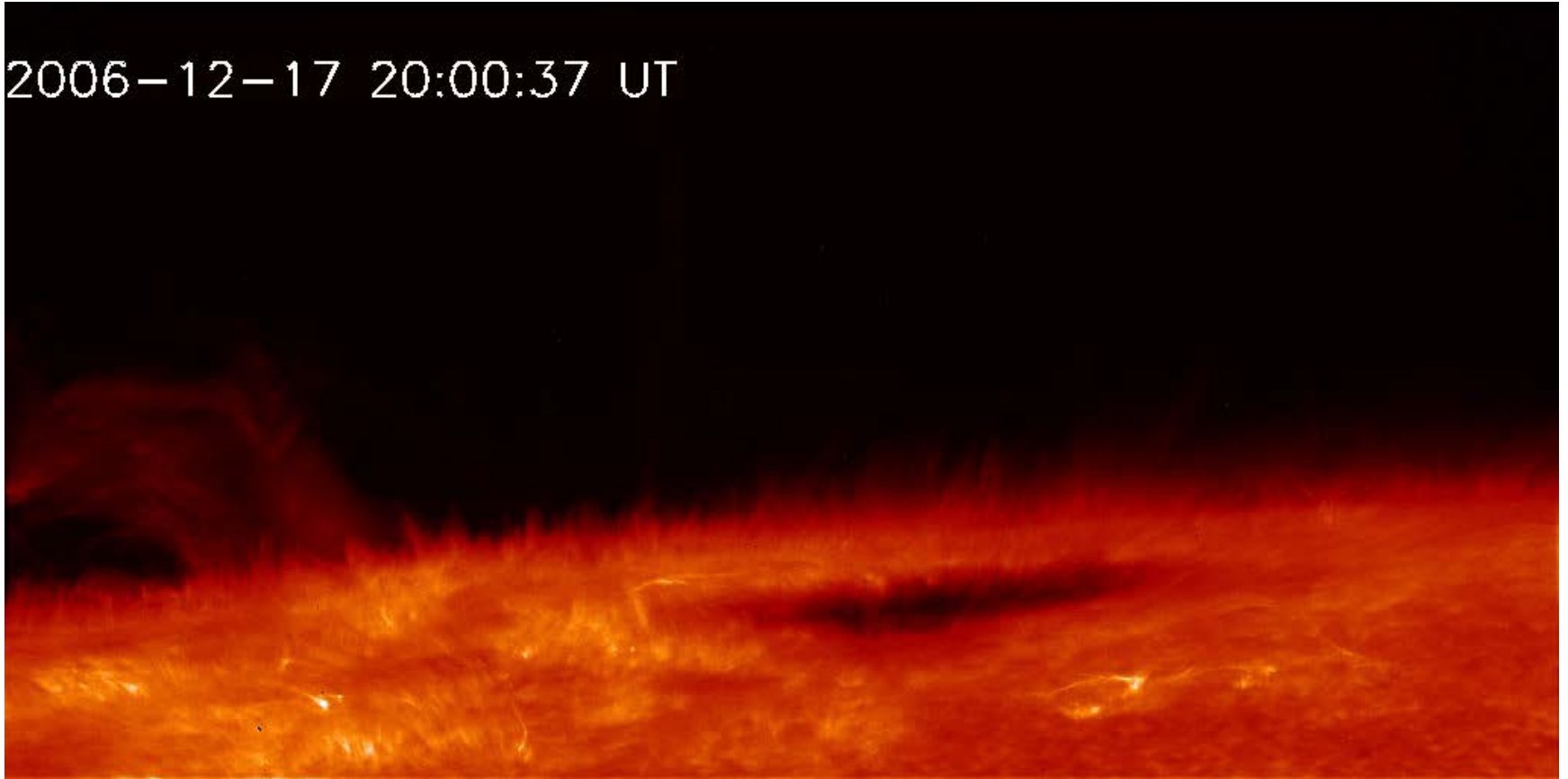
課題:「コロナ中の天体電磁流体
力学現象、とりわけ磁気リコネク
ションの素過程」

リコネクションに関連した主な成果:

- 彩層でのジェット現象
- X線ジェット
- 極紫外線分光装置(EIS)によるフレアの分光観測
- エネルギー蓄積・トリガー機構
- 粒子加速・白色光フレア

彩層ジェット

2006-12-17 20:00:37 UT

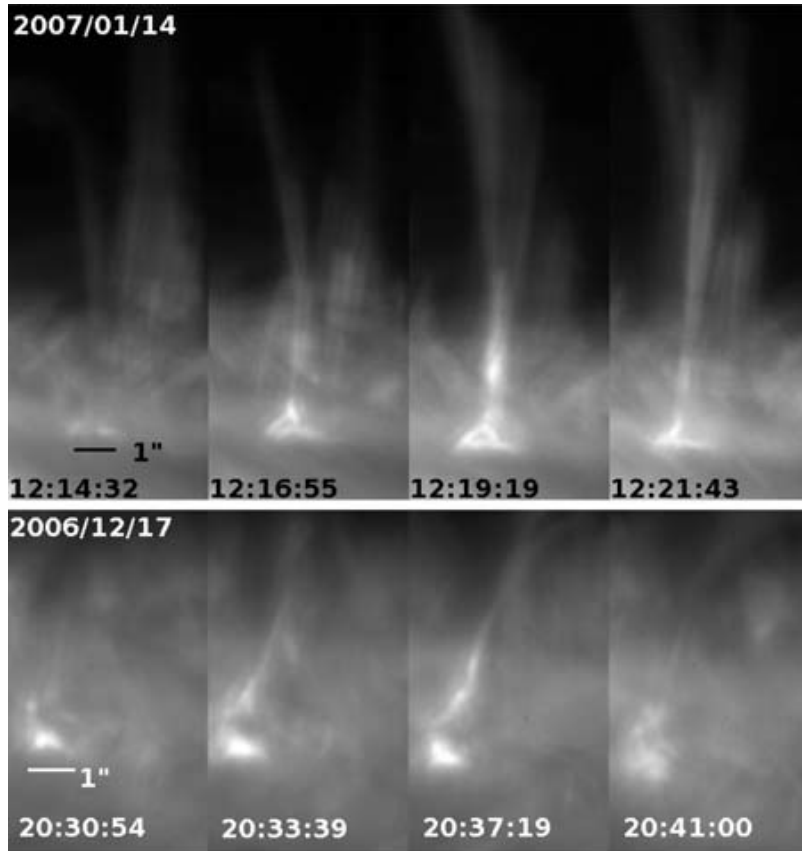


Shibata+ 2007

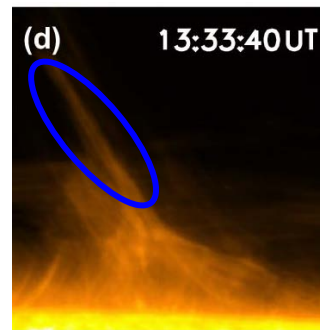
ひので／可視光望遠鏡(SOT)

彩層ジェット

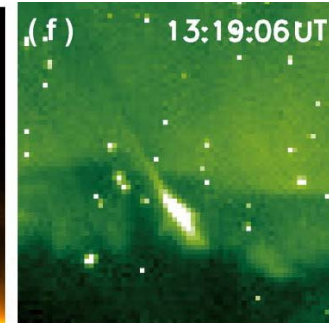
SOT



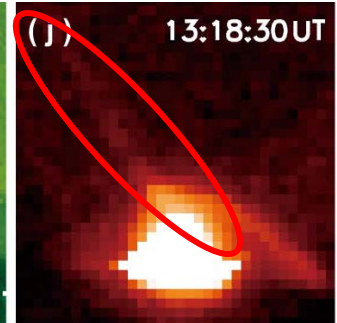
SOT



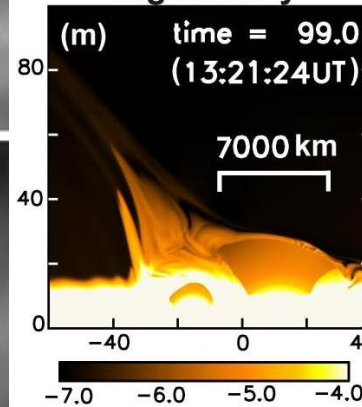
Trace 195 Å



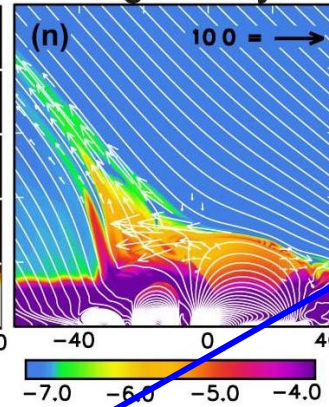
XRT



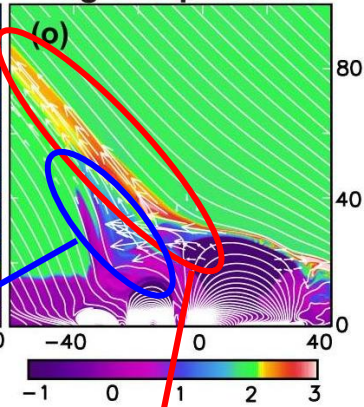
log Density



log Density



log Temperature



彩層ジェット
(低温高密度)

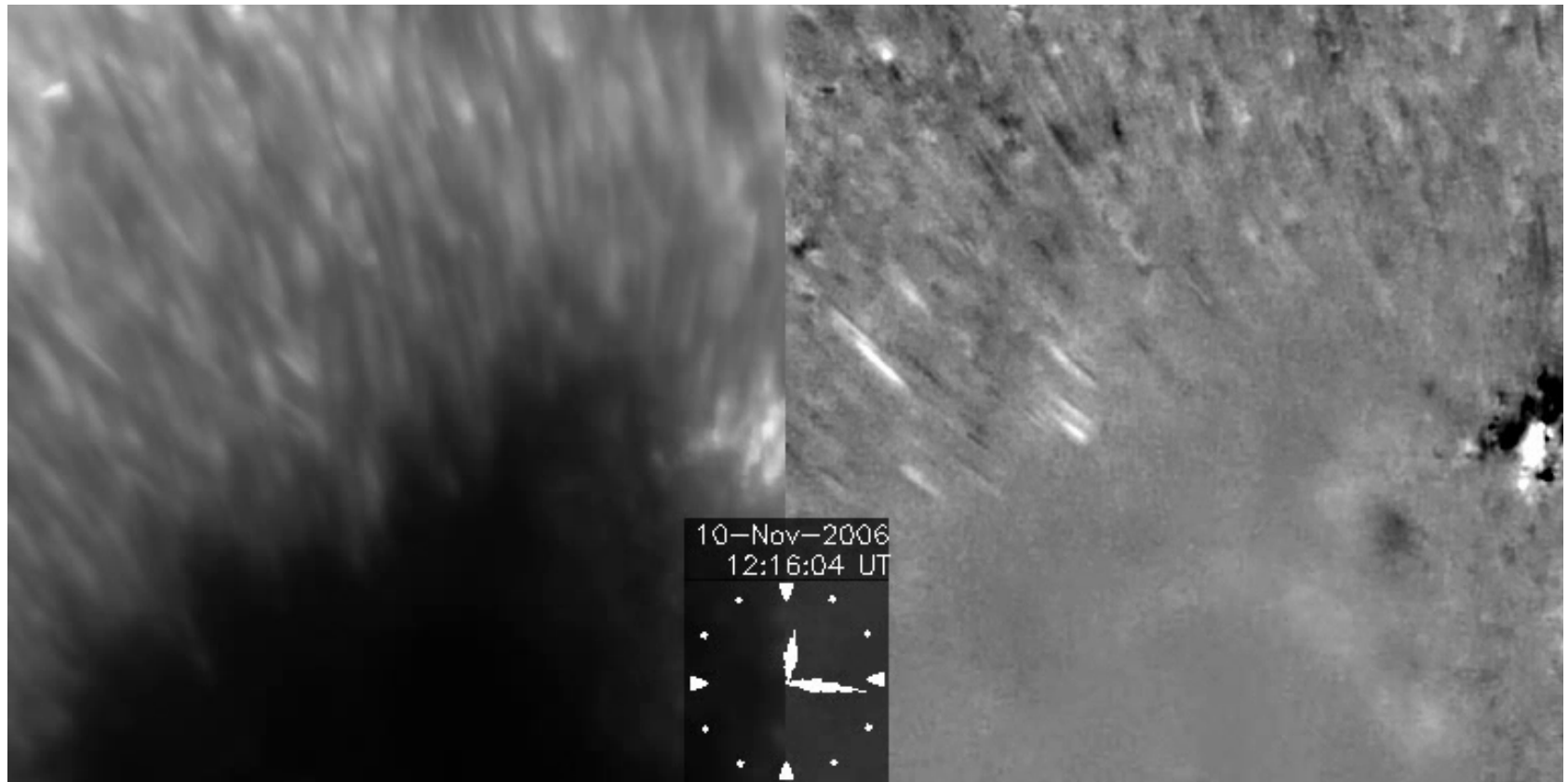
X線/極紫外線ジェット
(高温低密度)

Shibata+ 2007

巨大彩層ジェット
V~100 km/s

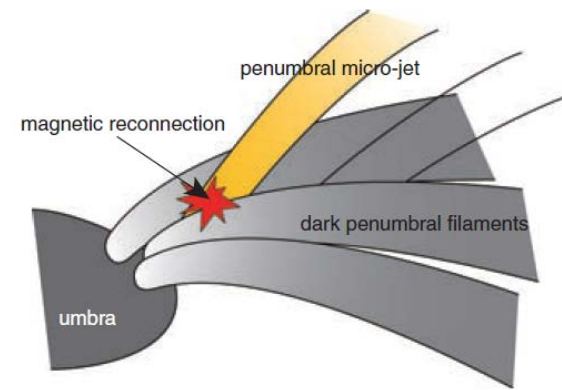
Nishizuka+ 2008

半暗部マイクロジェット

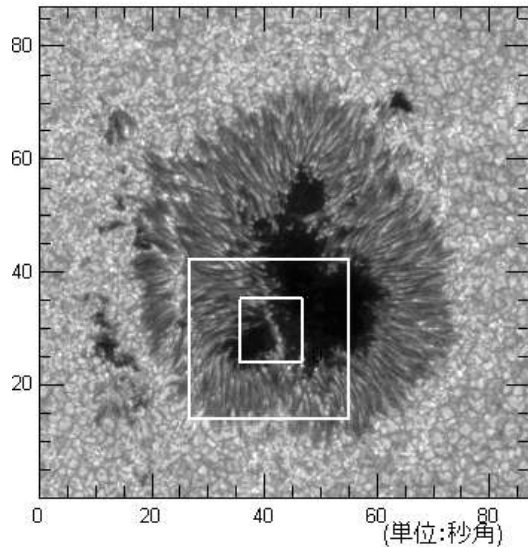


長さ 1000～4000km、幅300km、継続時間1分以下

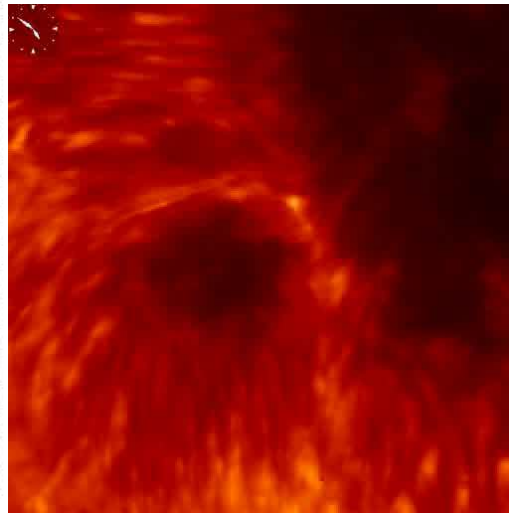
Katsukawa+ 2007



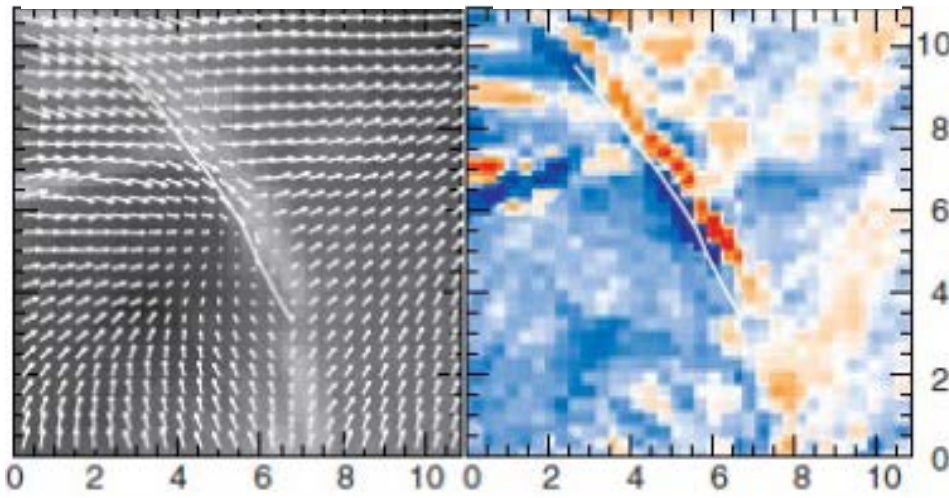
太陽黒点「ライトブリッジ」で 継続的に発生する彩層ジェット



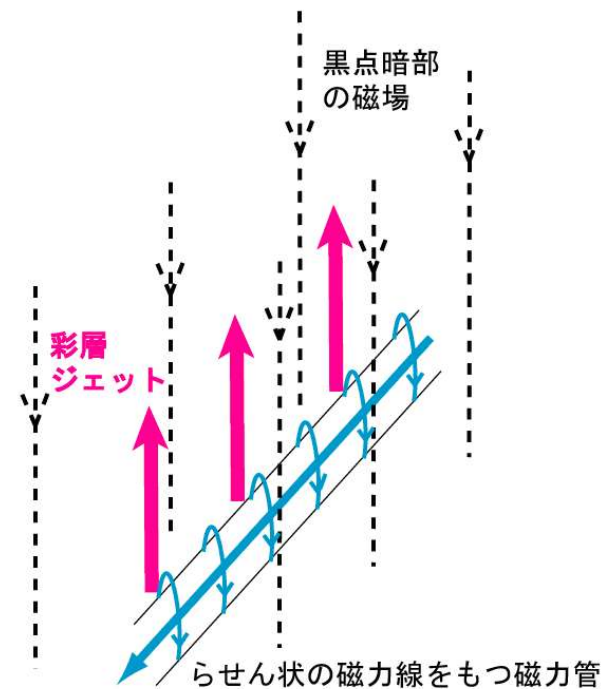
ベクトル磁場



電流密度



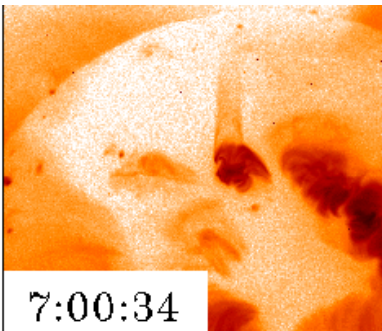
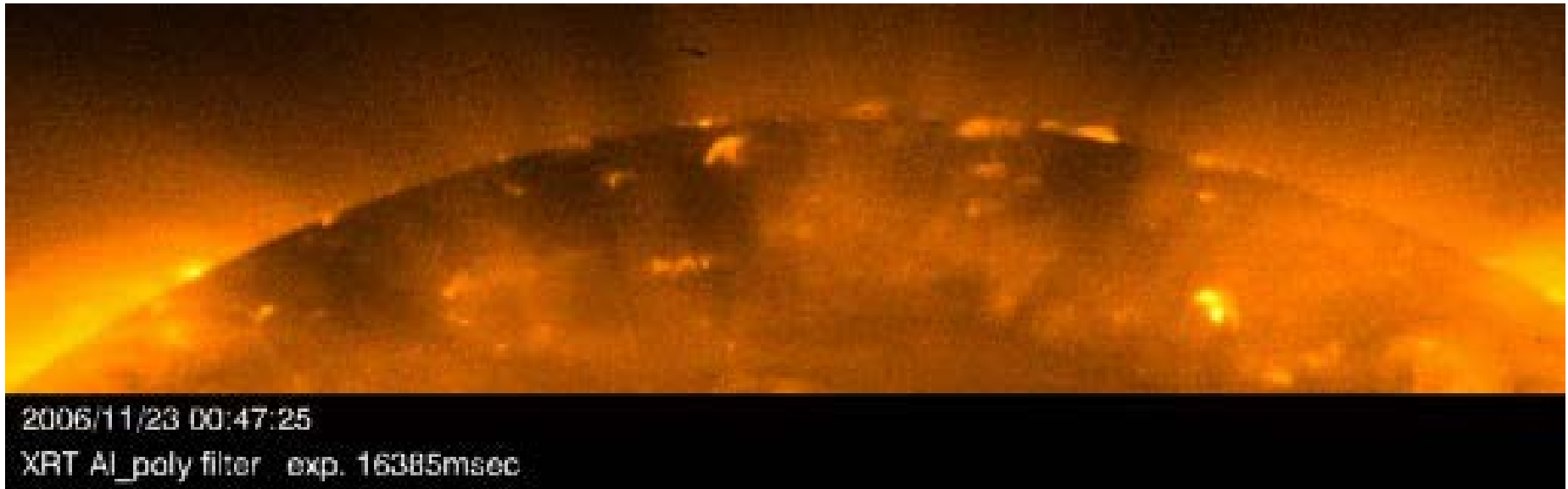
Shimizu+ 2009
2007年4月30日



強い電流が分布
双方向の速度場を観測

ひのてにより観測された 極域X線ジェット

極域のコロナホールで、多数のX線ジェットが発見された
Alfven速度に近い $\sim 800\text{km/s}$ と音速に近い $\sim 200\text{km/s}$ 程度のジェット
Alfven waveも発見。

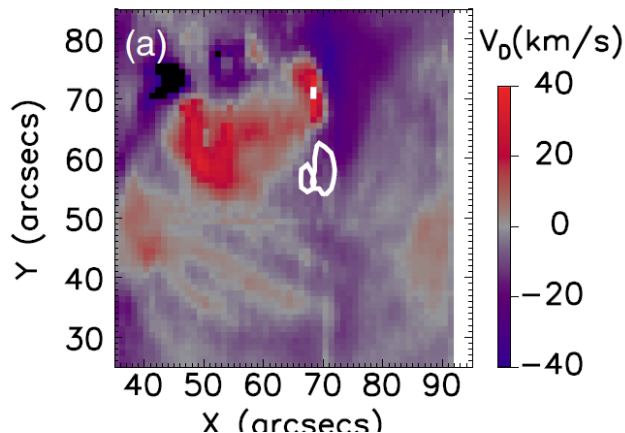


参考：ようこう／軟
X線望遠鏡で観測
されたジェット

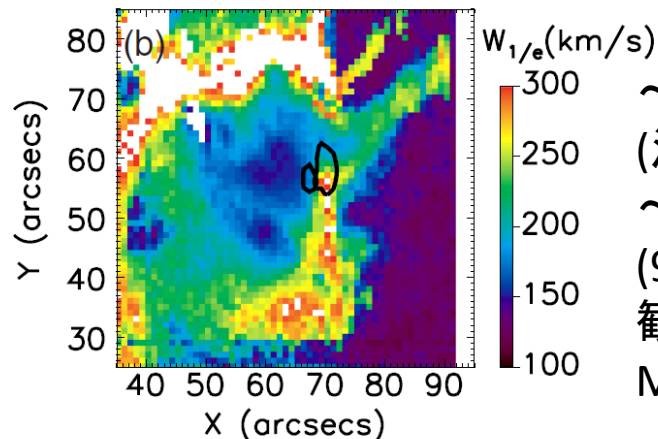
Cirtain+ 2007
Shimojo+ 2007
Savcheva+ 2007

EISによるフレアの分光観測

ドップラー速度 (Fe XII)

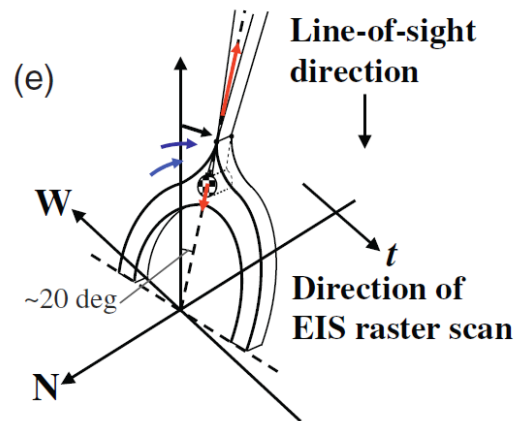
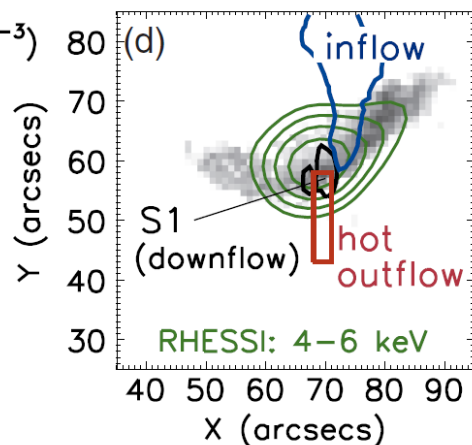
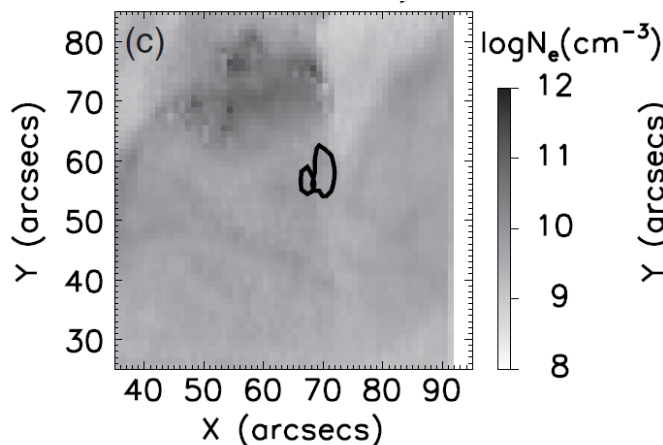


ライン幅 (Ca XVII)



~20km/sのインフロー
(温度1.5MK) と
~200km/sの高温
(9MK)のアウトフローを
観測した
M=0.05~0.1

密度 (Fe XII)



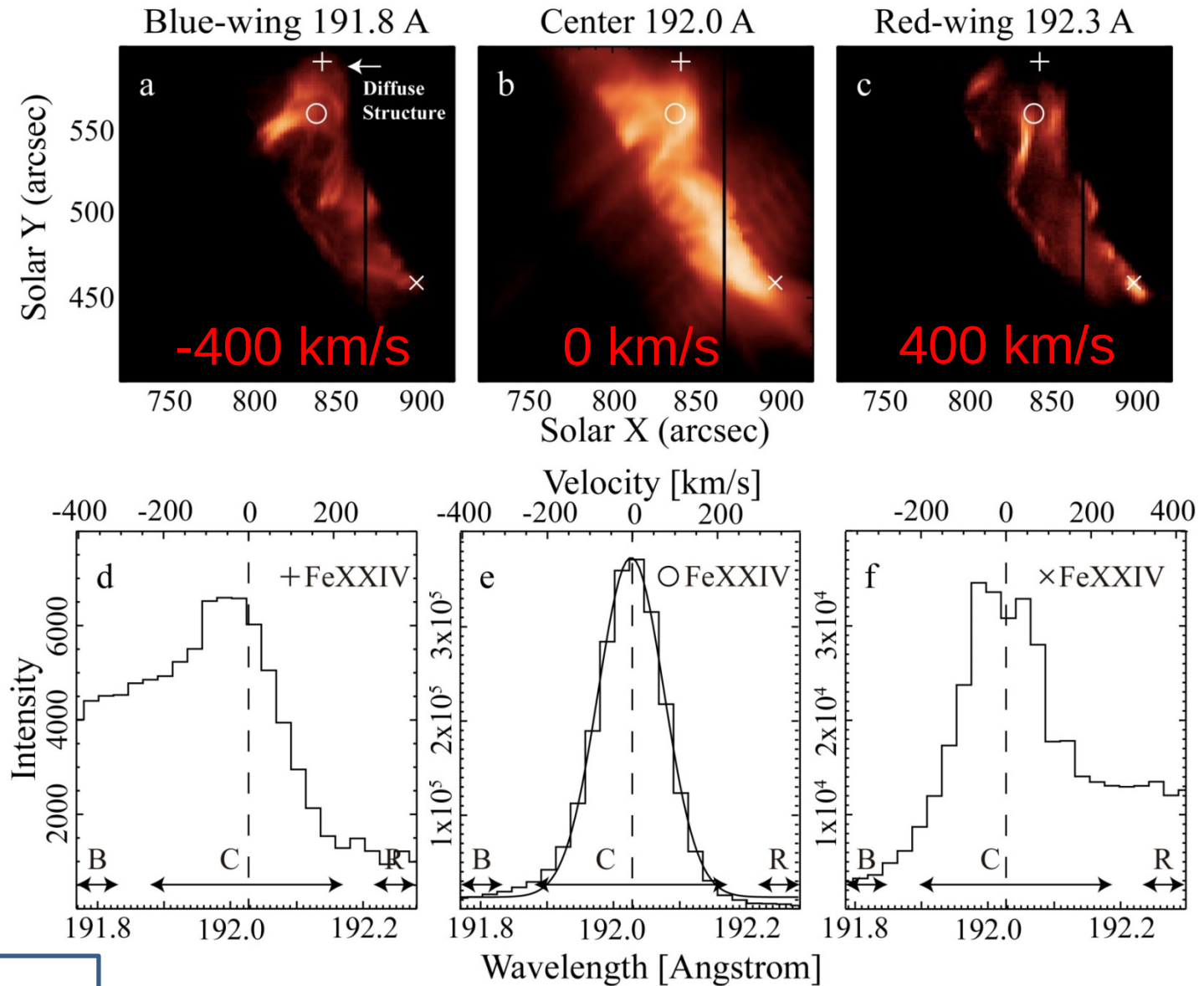
Hara+ 2011

2007年5月19日

EISによるフレアの分光観測

フレアループ上空に、
高温($\sim 30\text{MK}$)で、
高速($>500\text{km/s}$)の
流れを検出した。

リコネクションアウト
フローそのものでは
なく、**fast-mode**
shock下流のフレア
アーケードに沿った
流れ？

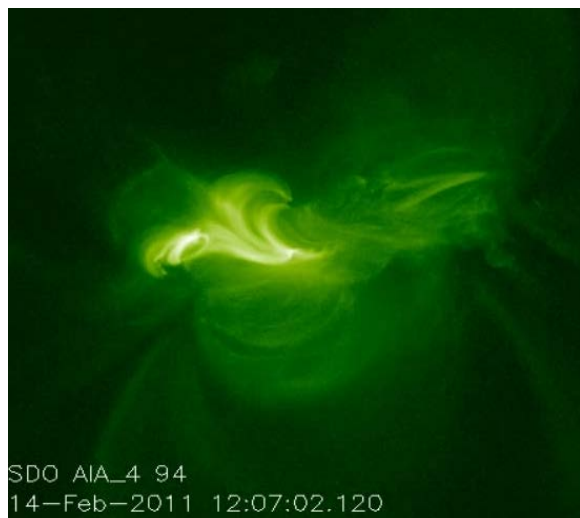


Imada+ 2013

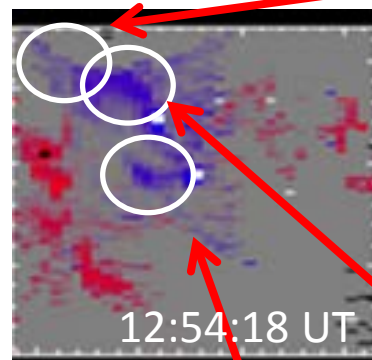
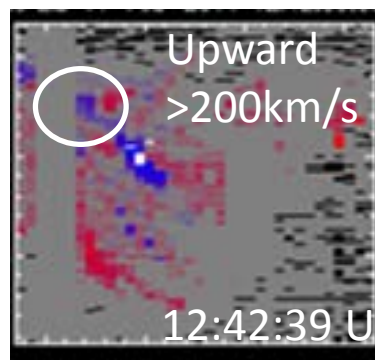
2012年1月27日, AR11402

EISによるフレアの分光観測

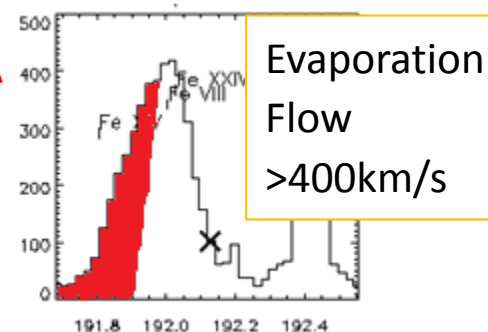
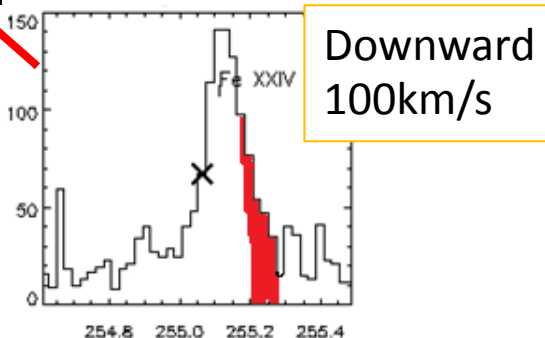
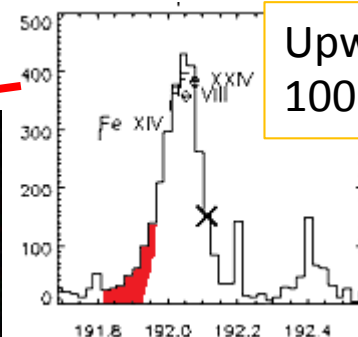
SDO/AIA 94 Å filter



ドップラー速度

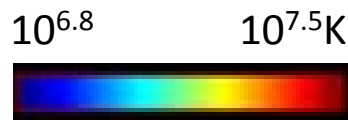
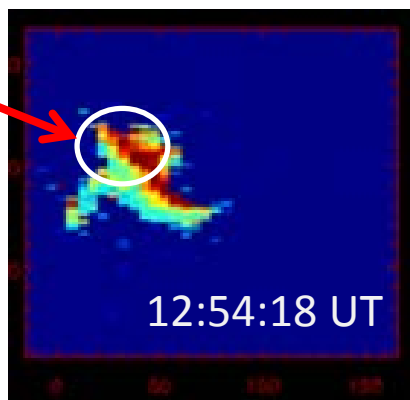


+100km/s (down) -100km/s (up)



リコネクションア
ウトフロー(slow
shock)の電子温
度は 20MK

電子温度
(Fe XXIV/Fe XXIII)

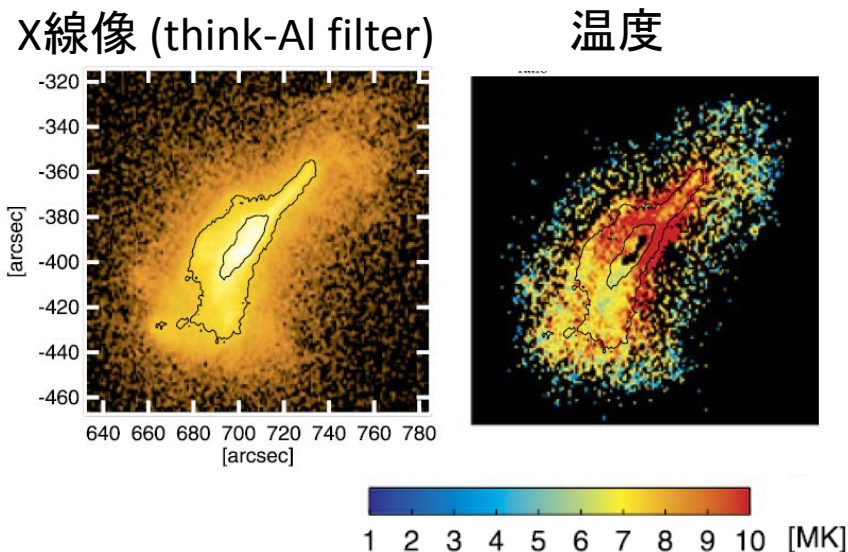


リコネクションア
ウトフローや彩層蒸
発ジェットと思われ
る流れを検出した

Nishizuka+ in prep
2011年2月14日, AR11158

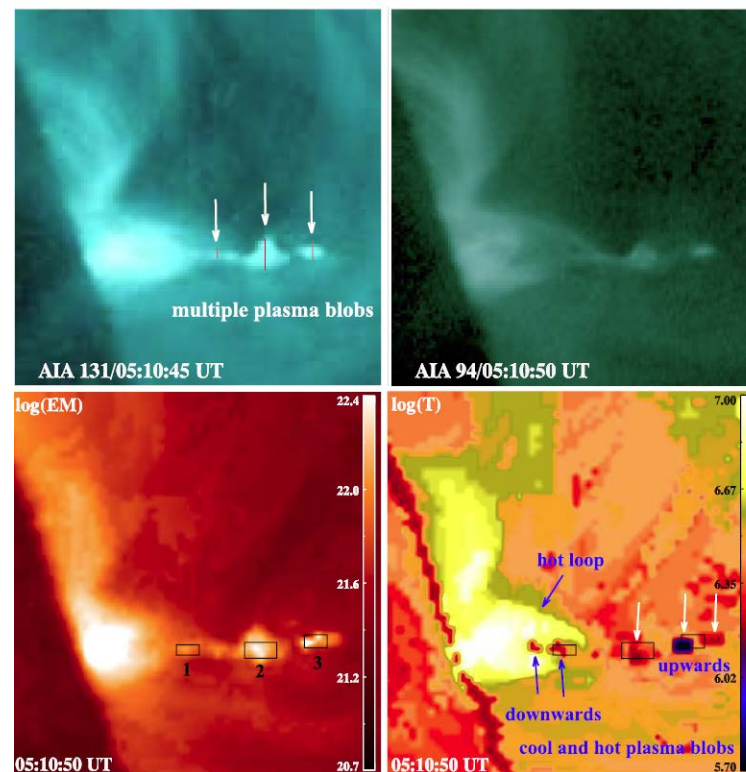
XRTによるフレアの温度解析

Hinode/XRT(X線望遠鏡)では複数のフィルターの画像を組み合わせることで、温度やエミッションメジャー(EM)を求めることが可能だが、フレア・リコネクションに対してはまだあまり活用されていない。



Narukage+ 2014
2011年6月7日, AR11226

SDO/AIAでは、**プラズモイド**などの温度解析が行われている (e.g. Kumar+ 2013)



ひので衛星によるリコネクション観測の サマリー

- ひので衛星は、太陽のさまざまな場所・スケールで、特に彩層で磁気リコネクションによるジェットが普遍的に起こっている(ユビキタス・リコネクション)ことを明らかにした
- SOTによる磁場観測、EISによる分光観測、XRTによる温度解析などで、リコネクションに関する物理量の定量的な計測が試みられた
 - 特にEISによる分光観測で、インフロー・アウトフローなどの検出が行われた
- しかし、磁気リコネクションの素過程の理解はまだ

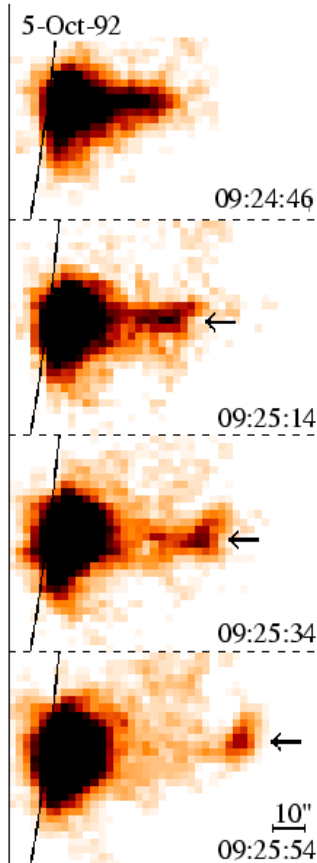
磁気リコネクションの未解決問題

- エネルギー解放の速さを決める物理
 - 「速い」リコネクション: slow shockの有無 (Petchek type?) → 高棹さん発表
 - プラズモイドの役割 (Fractal reconnection?)、ミクロとマクロのつながり
- 磁気リコネクションに伴うフロー
 - リコネクションアウトフローとインフローの観測
→ ひのでで観測された(しかしアウトフローの速度が遅い)
- イオン温度と電子温度、電離非平衡
 - 短い時間スケール、小さい空間スケールでの物理
- 弱電離プラズマの物理 → 中村さん発表
- 粒子加速 → 次のセッション
- エネルギー蓄積過程 とトリガー機構 → 次のセッション
- 2D vs. 3D、ガイド磁場、乱流、etc...

概要

- ひので衛星によるリコネクション観測
- 3次元MHDシミュレーションによるプラズモイドを含むリコネクション研究とその観測可能性

太陽フレアにおける プラズモイド／フィラメント噴出



フィラメント ($H\alpha$)
プラズモイド
(軟X線)

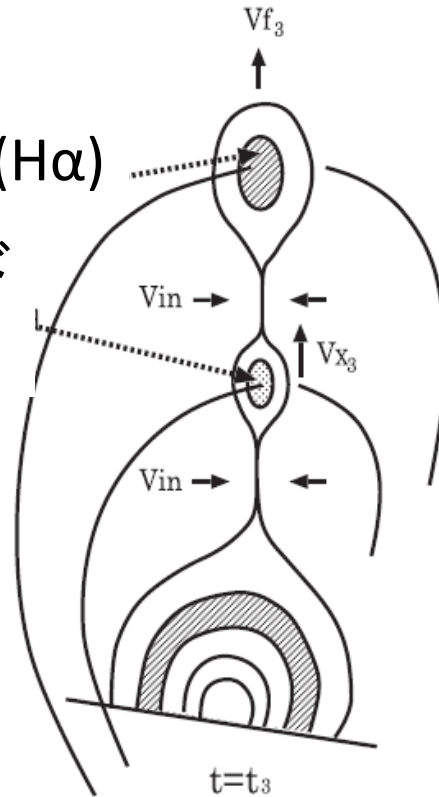
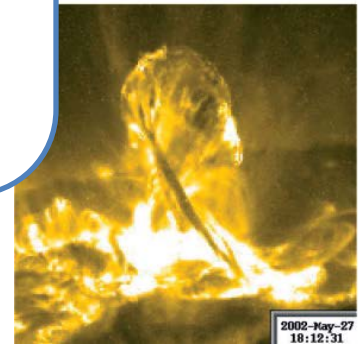
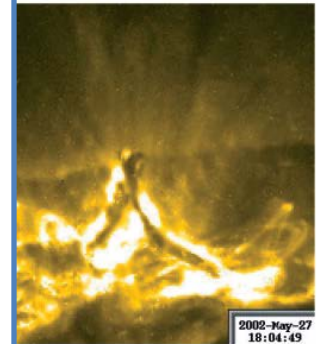
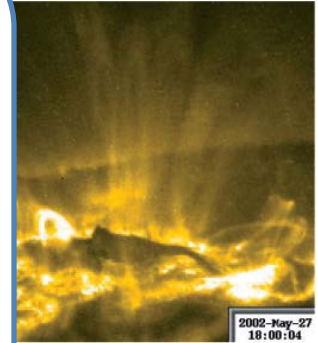


Figure from Ohyama & Shibata (2007)



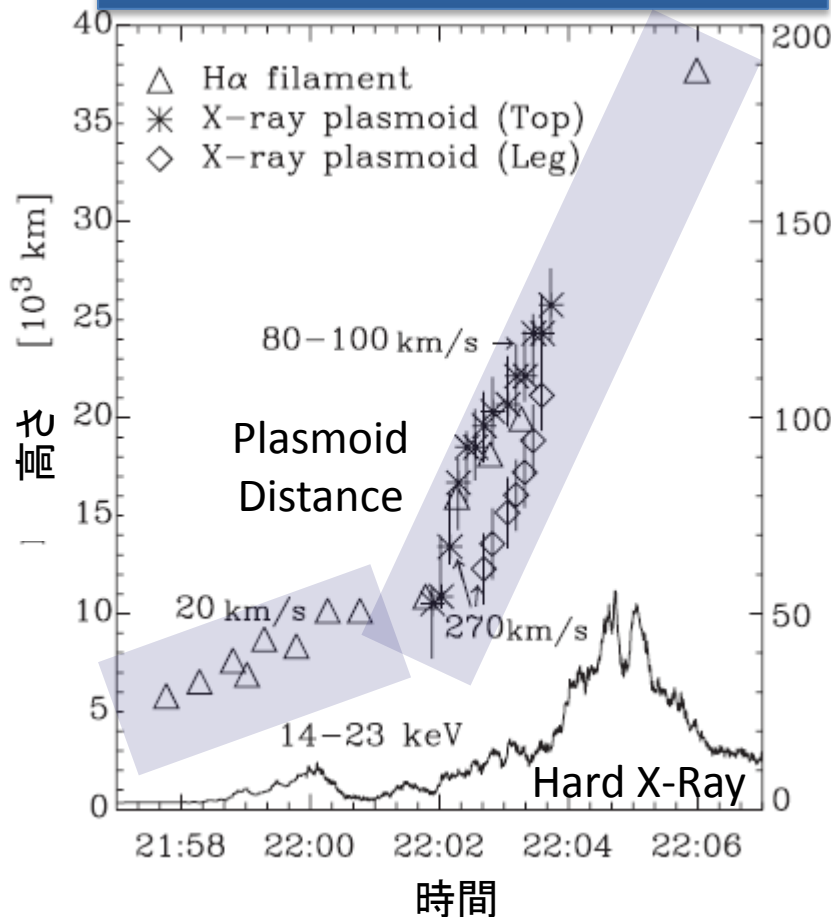
プラズモイド噴出
ようこう/軟X線望遠鏡
(Ohyama & Shibata 1998)

フィラメント噴出
TRACE 195Å EUV
(Torok & Kliem 2005)

プラズモイドとリコネクションの関係

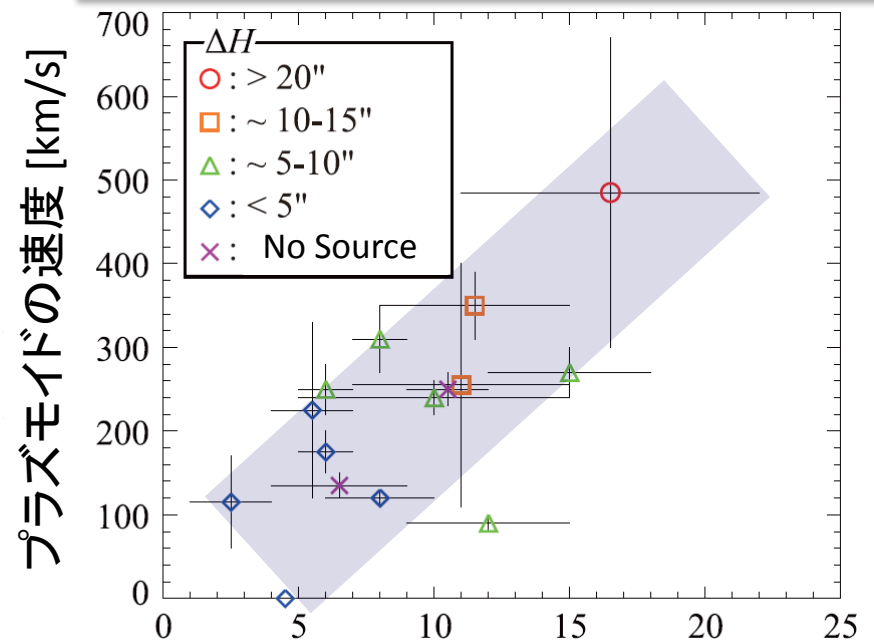
(ようこう衛星による観測)

Impulsive phase にプラズモイドが
強い加速を受ける



(Ohyama & Shibata 1997, 2007)

プラズモイドの速度と
リコネクションの速さに正の相関



フレアループの成長速度 [km/s]
(リコネクションの速度に比例する)

(Shibata 1995, Shimizu+ 2008)

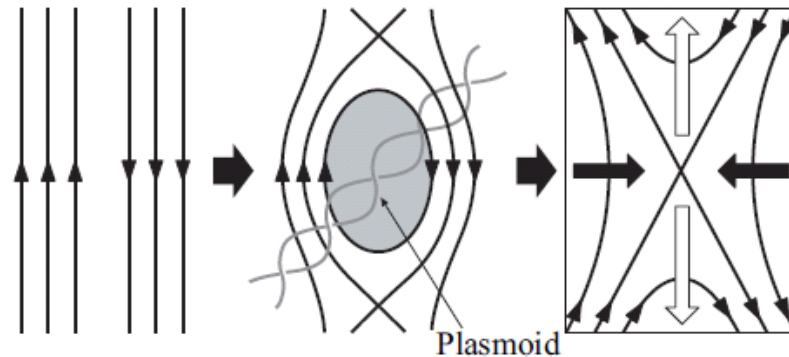
See also Zhang+ 2001, Takasaki+ 2004, Sterling & Moore 2005, Qiu & Yurchyshyn 2005

プラズモイドの役割

(Plasmoid-induced reconnection model)

(Shibata & Tanuma 2001)

(1) リコネクションを妨げ、エネルギーを蓄積する

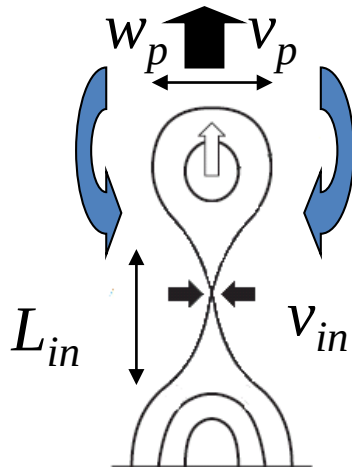


リコネクションを妨げる

エネルギーが蓄積される

プラズモイド噴出時に、急速にエネルギーが解放される

(2) プラズモイド噴出時に強いインフローを励起する



$$v_{in} = \frac{w_p}{L_{in}} v_p$$

リコネクション

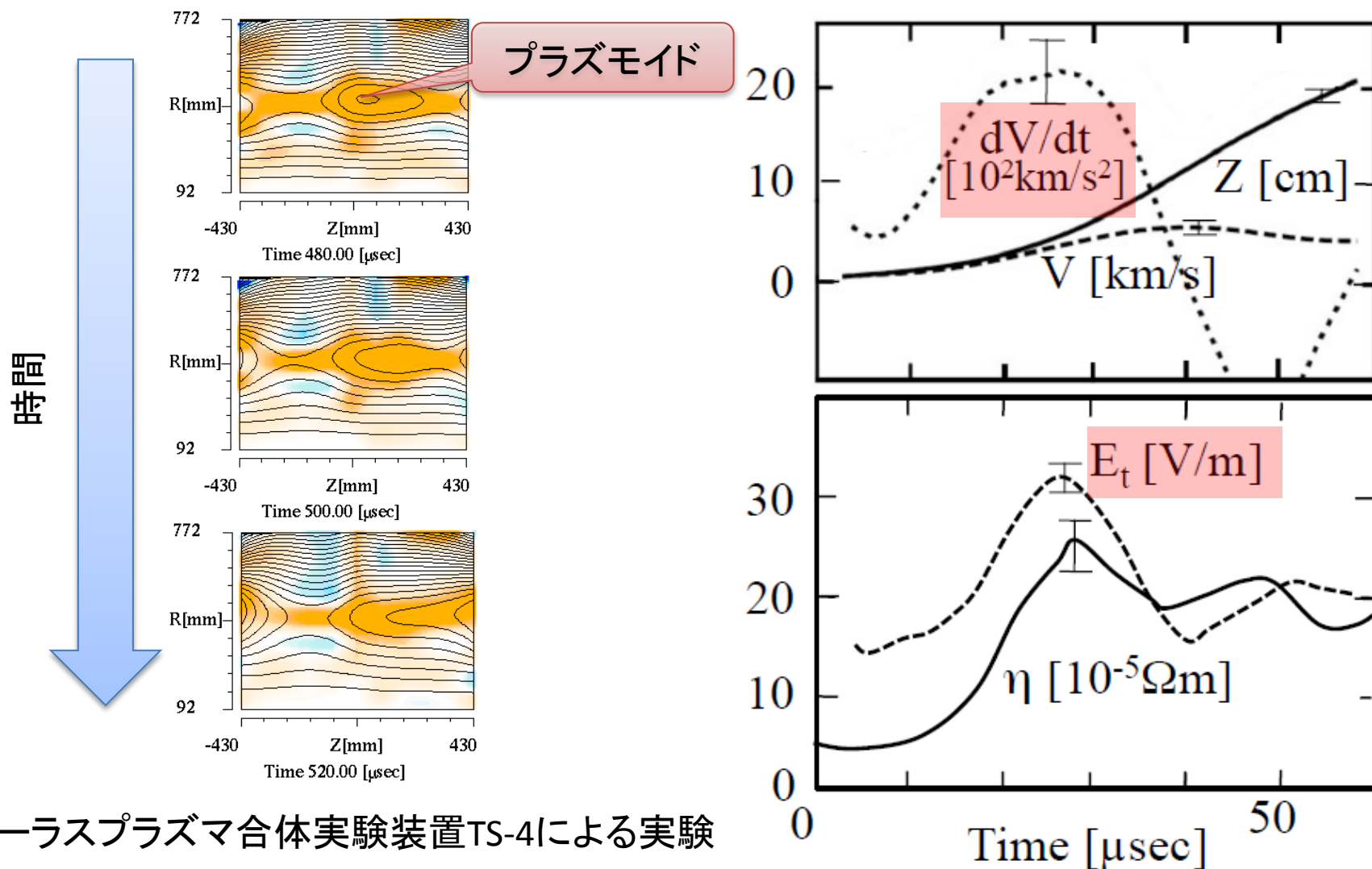
プラズモイド噴出

Nonlinear instability

強いインフロー

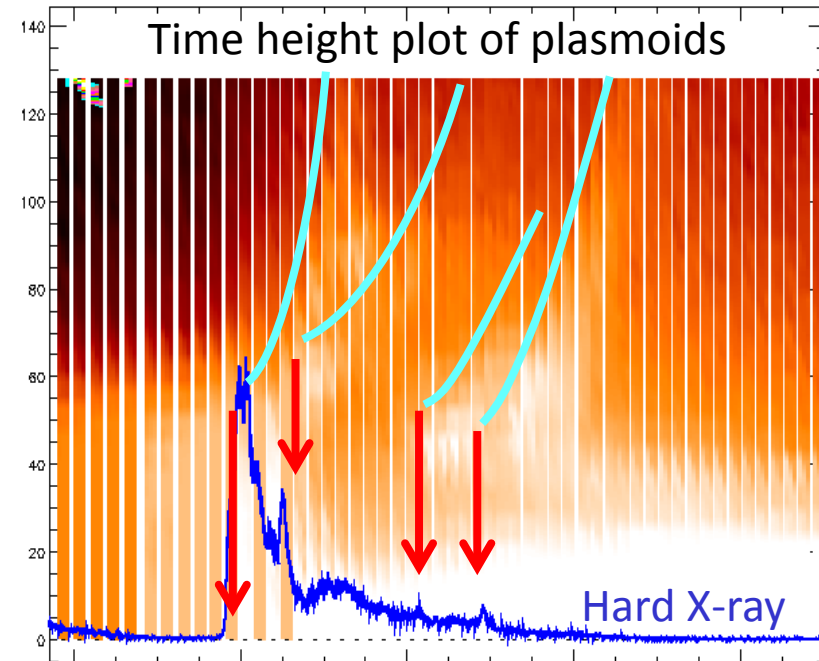
プラズモイド噴出の実験

プラズモイドの加速度と電場に正の相関がみられる (Ono+)



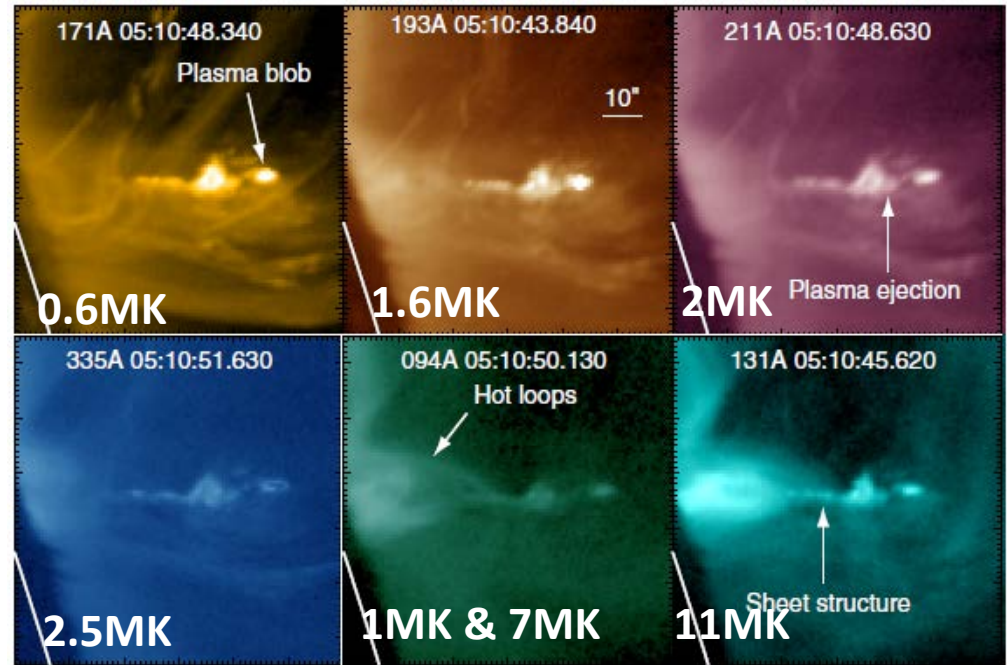
Multiple plasmoidsの観測例

ようこう/軟X線望遠鏡 Nishizuka+ 2010

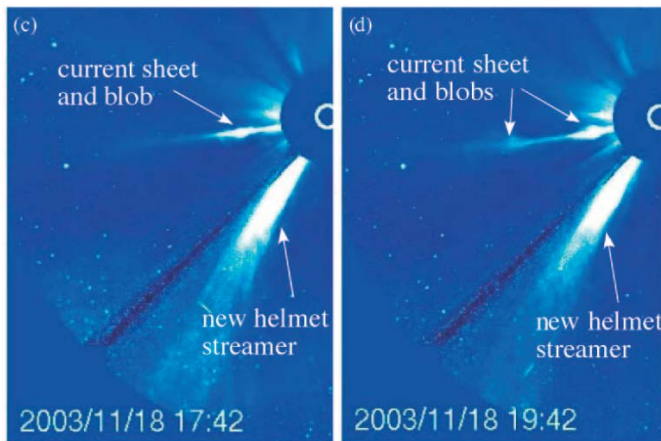


SDO/AIA

Takasao+ 2012



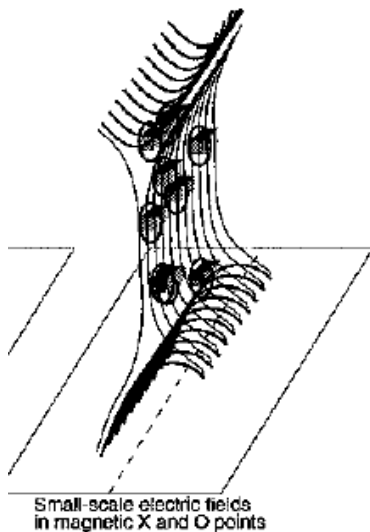
Lin+ 2005



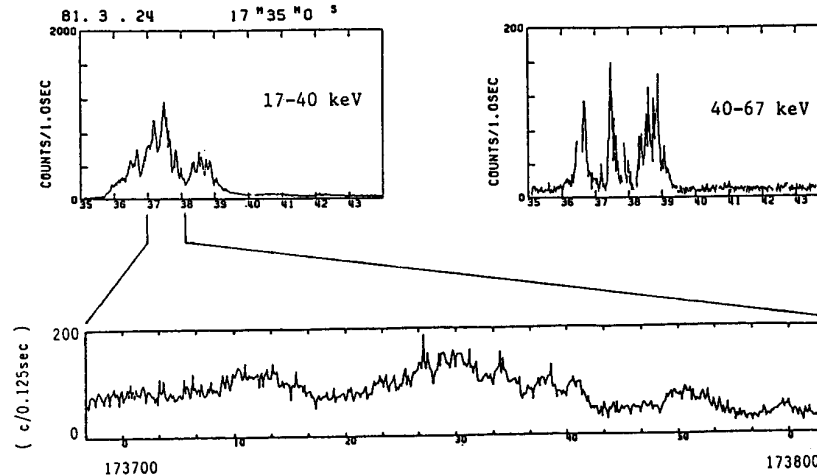
最近のSDOによる観測としては
Kumar+ 2013
Liu+ 2013

Fractal behavior of hard X-ray/ microwave bursts and energy release mechanism

- Intermittent Hard X-ray burst, radio/microwave burst
(e.g. Frost, Dennis, Kane, Kiplinger, Benz, Aschwanden, Karlicky)

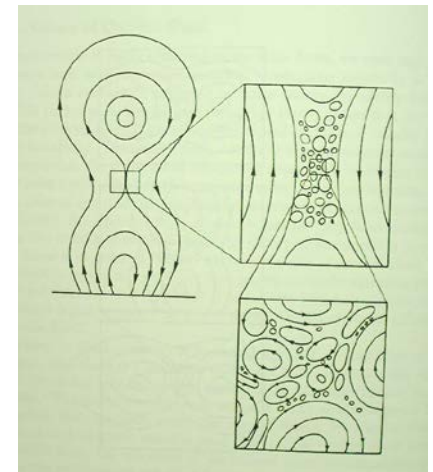


[Aschwanden.2002]



[Ohki+.1992]

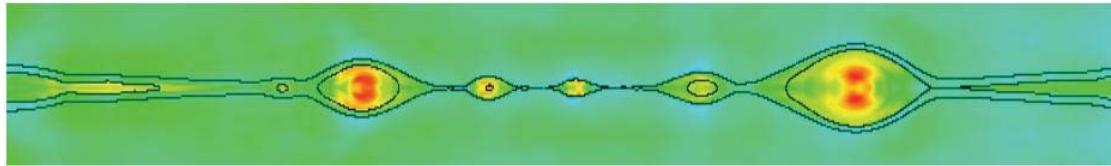
Fractal Current Sheet



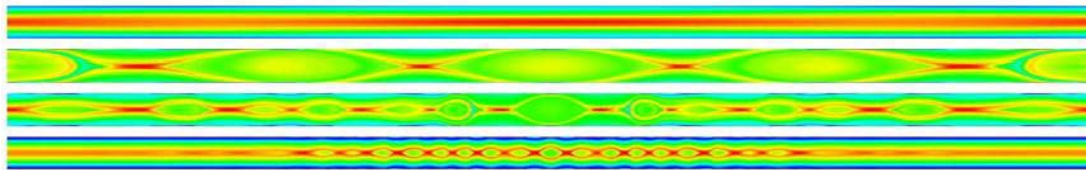
[Tajima & Shibata 1997]

Observation of hard X-rays and microwave emissions show fractal-like time variability, which may be a result of **fractal plasmoid ejections**

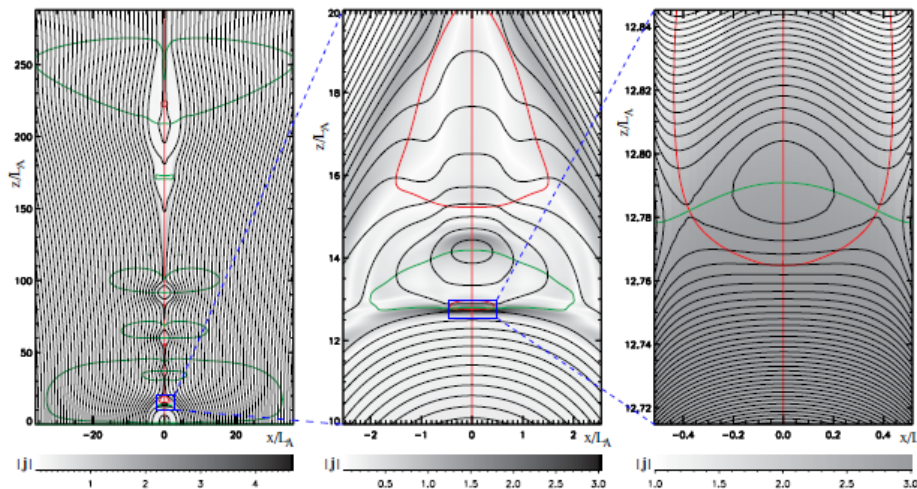
MHD simulations of multiple plasmoids in 2D



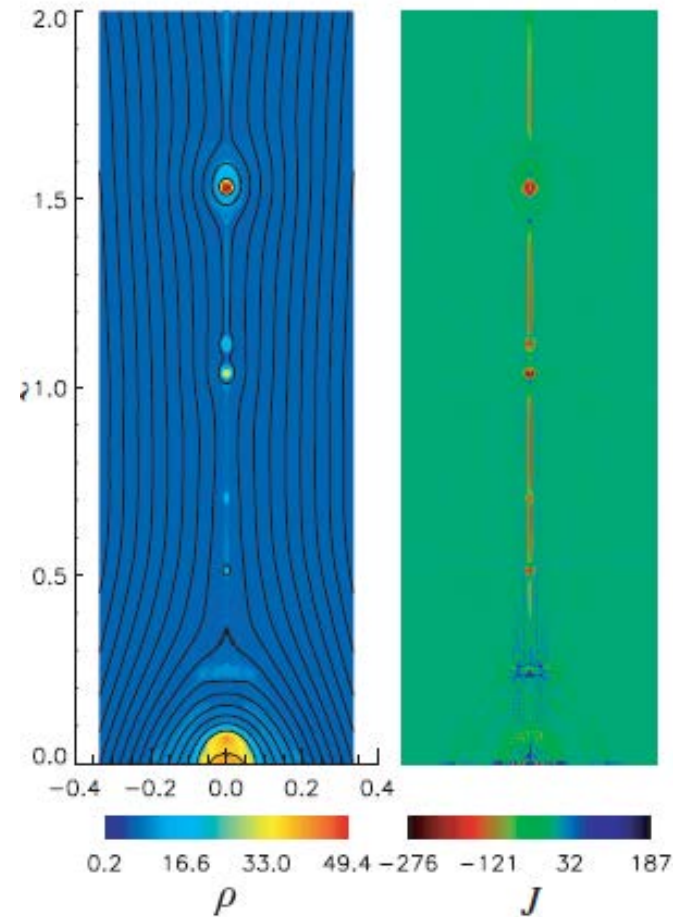
Loureiro+ 2009



Samtaney+ 2009

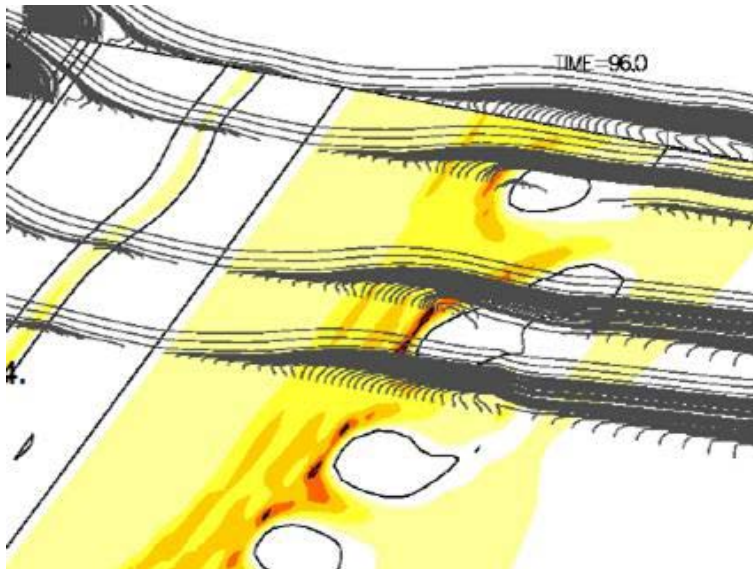


Barta+ 2011

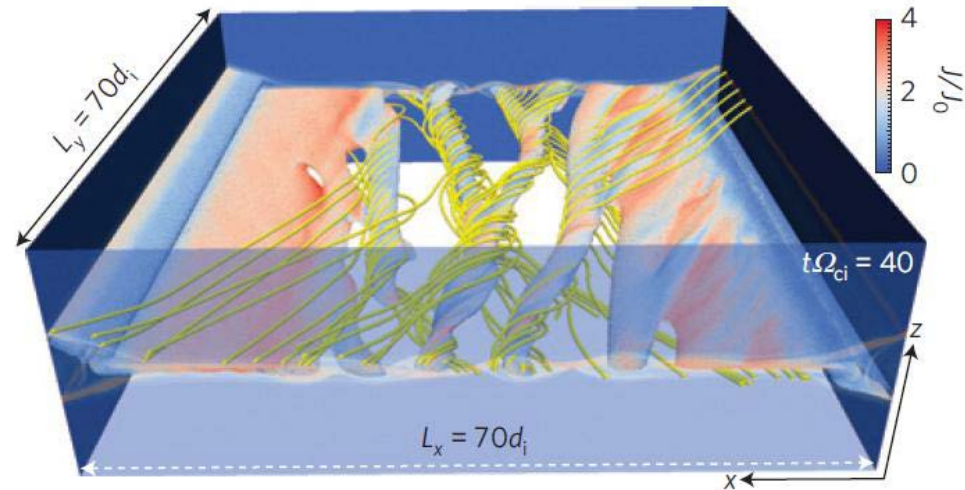


Shen+ 2011

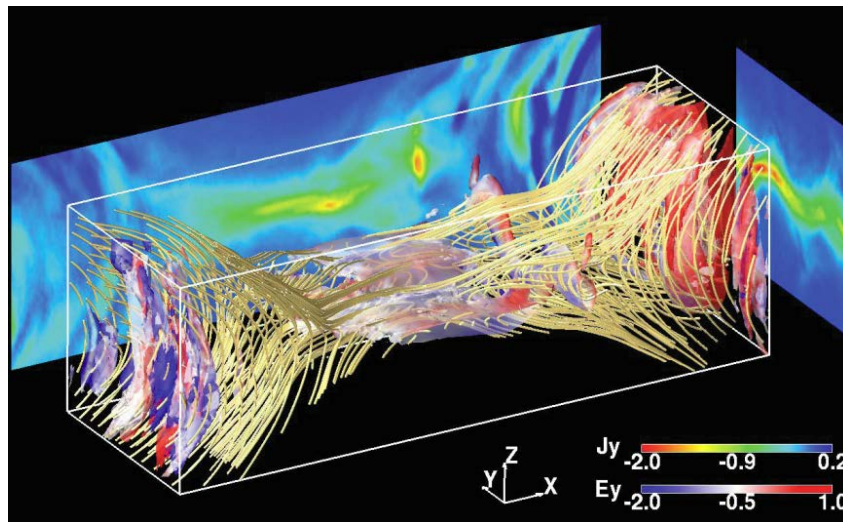
PIC & MHD simulations of multiple plasmoids in 3D



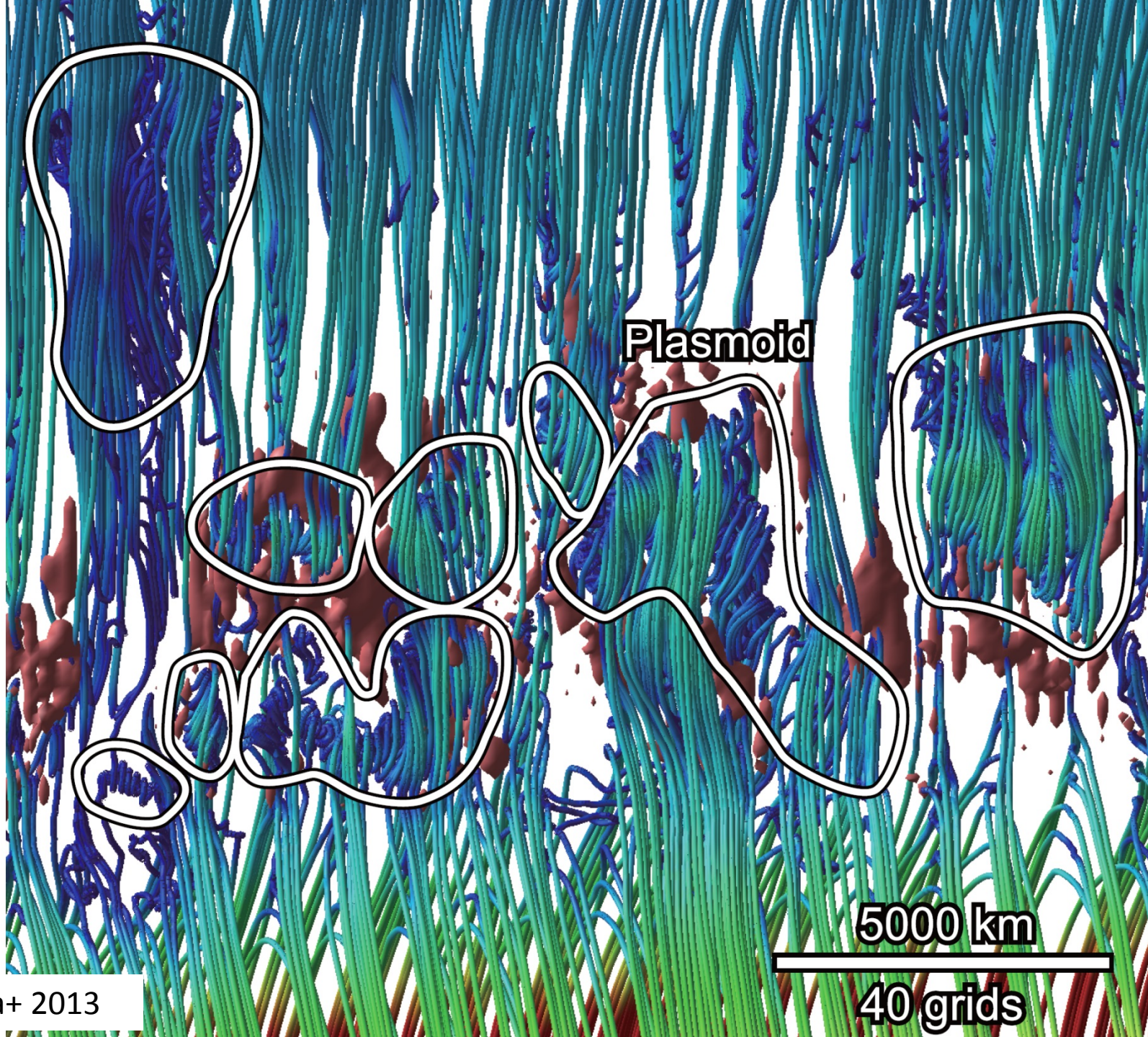
Shimizu+ 2011



Daughton+ 2011

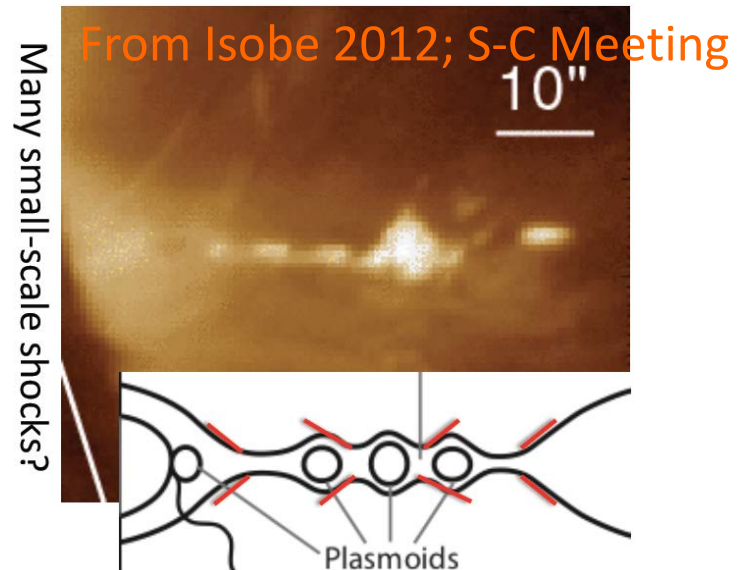
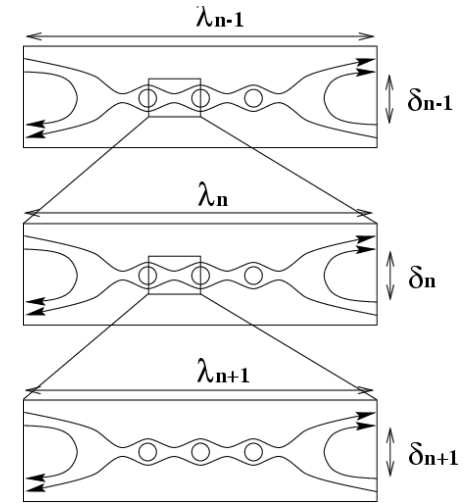


Fujimoto & Sydora 2012



3D MHDシミュレーションより示唆される フレアにおけるプラズモイドの物理量

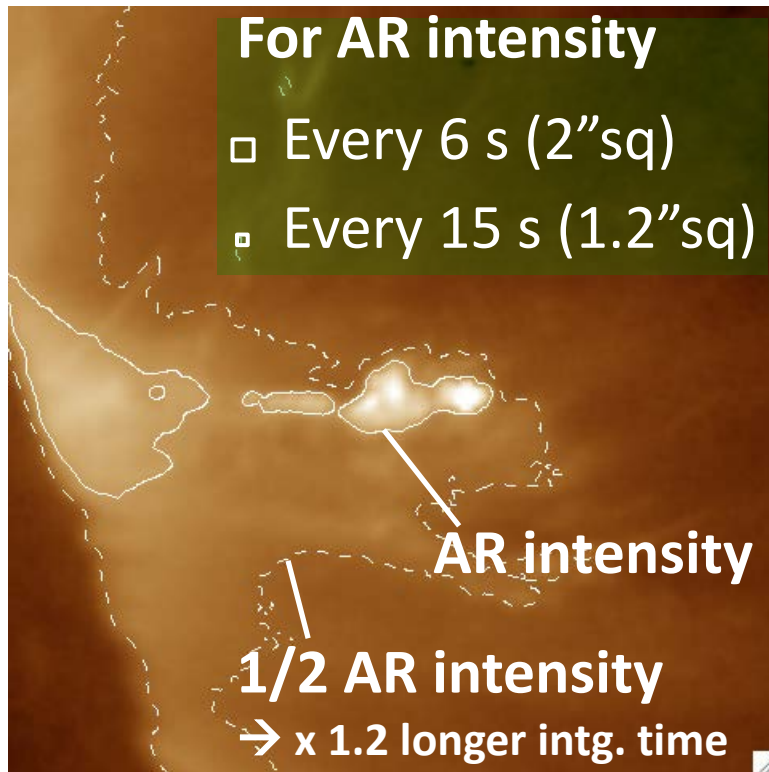
- 大きいものでサイズ 1000～5000km
- 電流シート内に存在できる期間 100～200sec
- フラクタル的かどうか？
 - 特徴的スケールが存在するのかわからないのか？
 - 空間分解能を上げることでなにがわかるのか？
 - 電波バースト観測とシミュレーションを組み合わせで解決できないか？ (Karlický+ 2012, Kumar+ 2013)
- プラズモイドの温度は高温
 - Kumar+ 2013 では低温(1.5～2.4MK)
- プラズモイド噴出・アウトフローが、本当にインフローをエンハンスしているのか？→インフローの速度場構造を知りたい
- Secondary-plasmoidにもslow shockが付随していると考えられる(Mei+ 2012, Isobe unpublished, Nakabou in prep.)



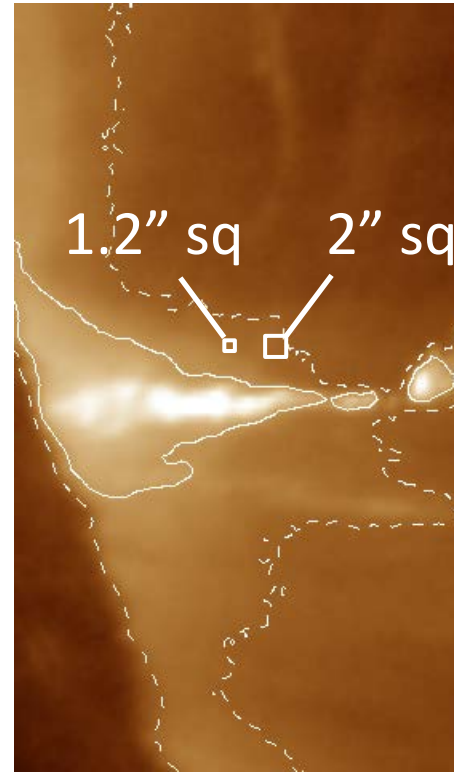
Expected Imaging-Spectroscopic Capability

Case for the 18 Aug 2010

05:10:43 UT



05:13:19



Length of the sheet ... 20 "
Typical blob size ... ~3"
(Takasao+ 2012)

