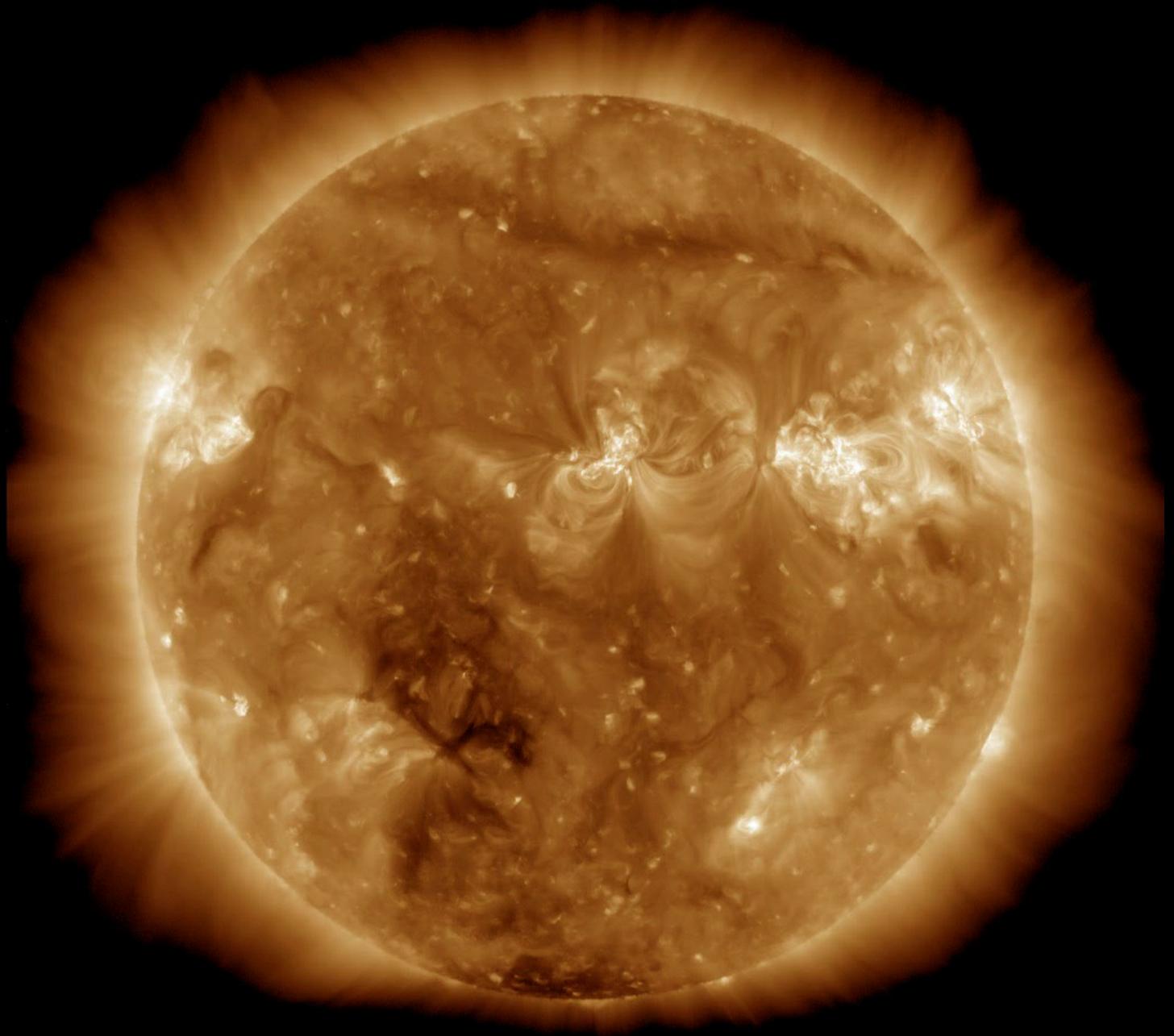


多波長で探る恒星の高エネルギー現象 太陽フレアの話題を中心に

横山 央明
東京大学地球惑星

目次

太陽フレアの多波長観測
恒星・原始星フレア・太陽フレア
フレア物理に残された課題



NASA
SDO
AIA

SDO/AIA 193 2011-08-04 00:12:20 UT

太陽コロナ

温度 2MK

密度 10^9cm^{-3}

磁場 数-100G

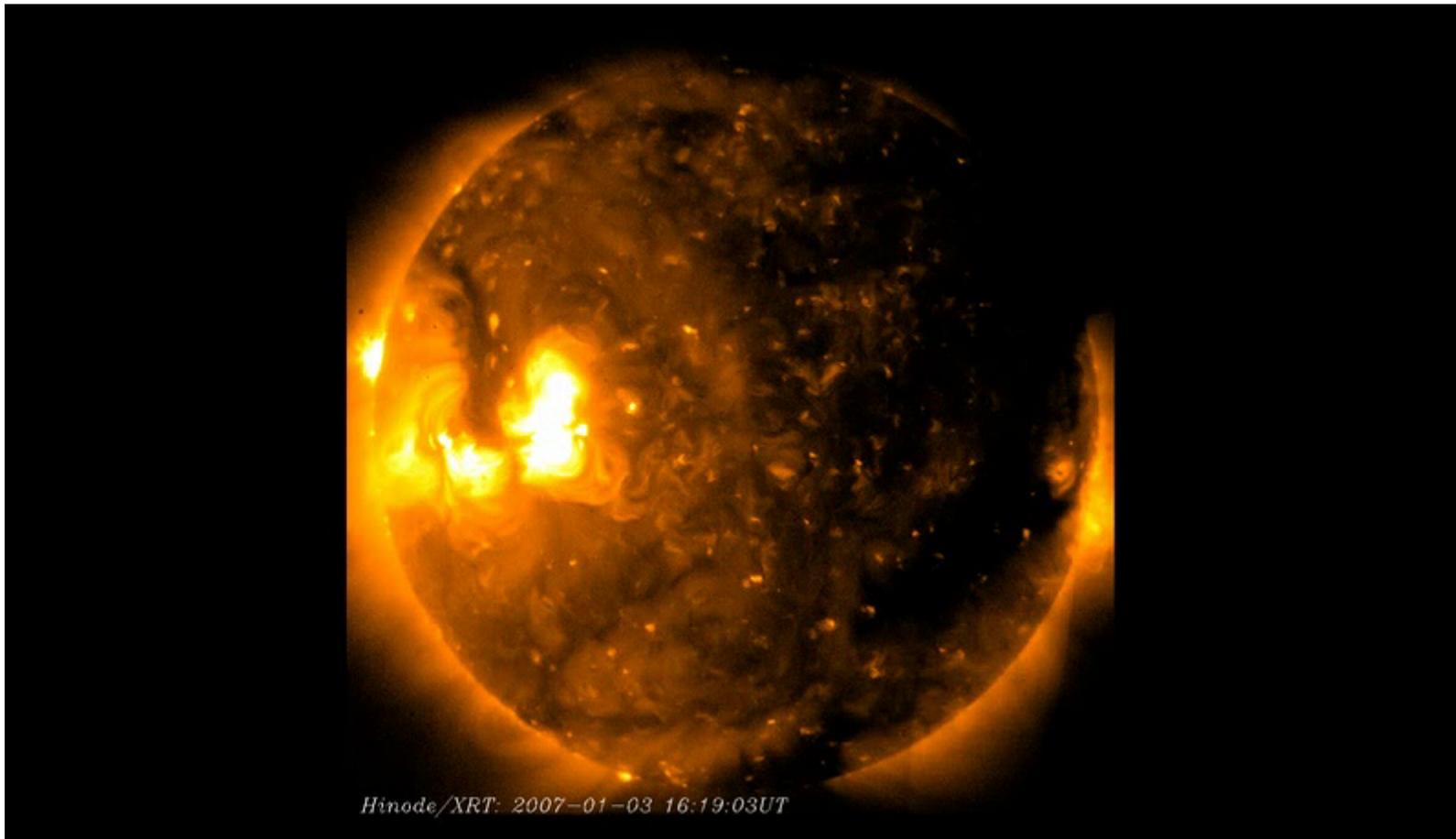
ループ長 $10^4 - 10^5\text{ km}$

プラズマ β (ガス圧/磁気圧) 0.01-0.1

Alfven時間 1-100 sec

拡散時間 1 Myr

磁気Reynolds数 10^{13}



画像
JAXA,
NAOJ

太陽プラズマ

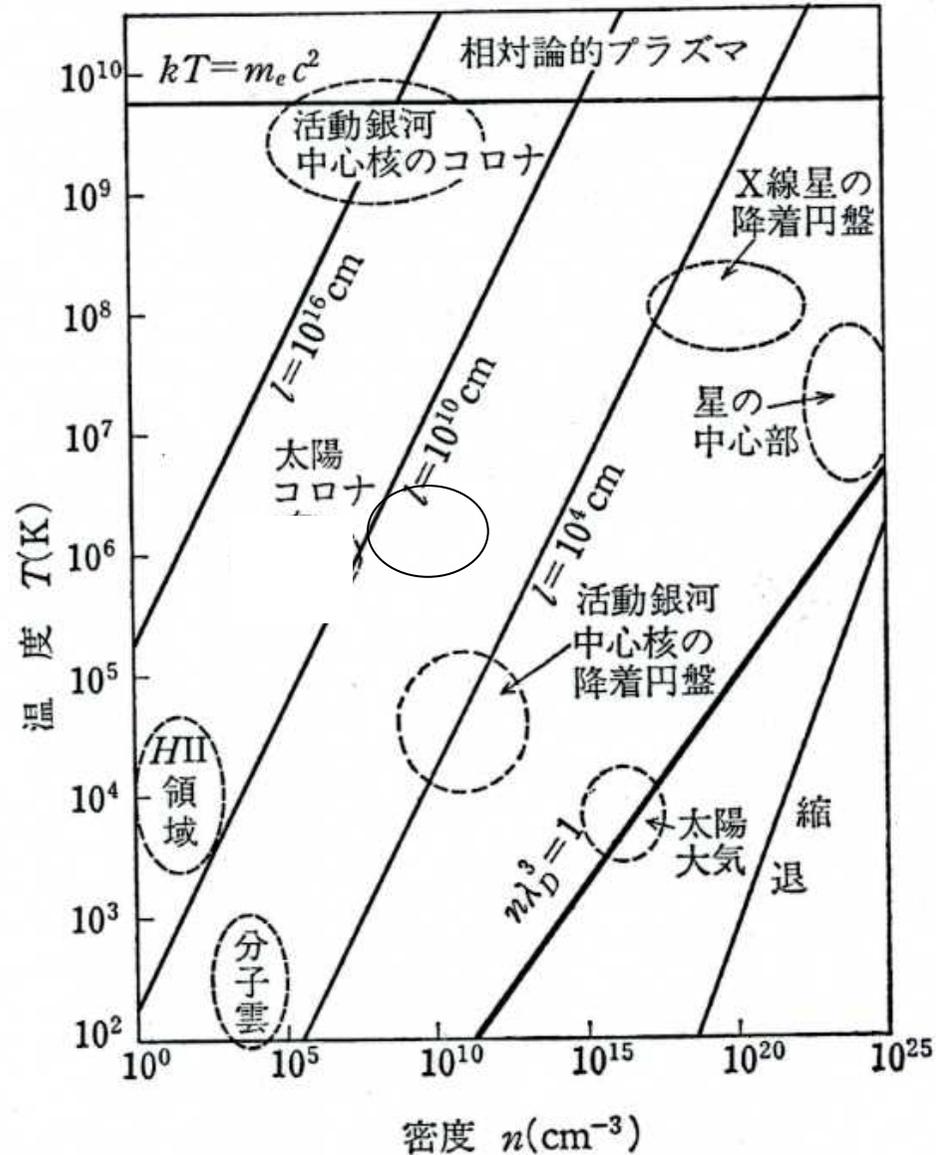


図 1.1 温度-密度面上でのガスの状態の分類. $n\lambda_D^3=1$ の直線の左側の領域ではガスは自由粒子の集合と見なせる. 面上での電子の平均自由行路 l 一定の線も示されている. 種々の天体の温度-密度面上での代表的位置も示されている.

加藤(1989)改変

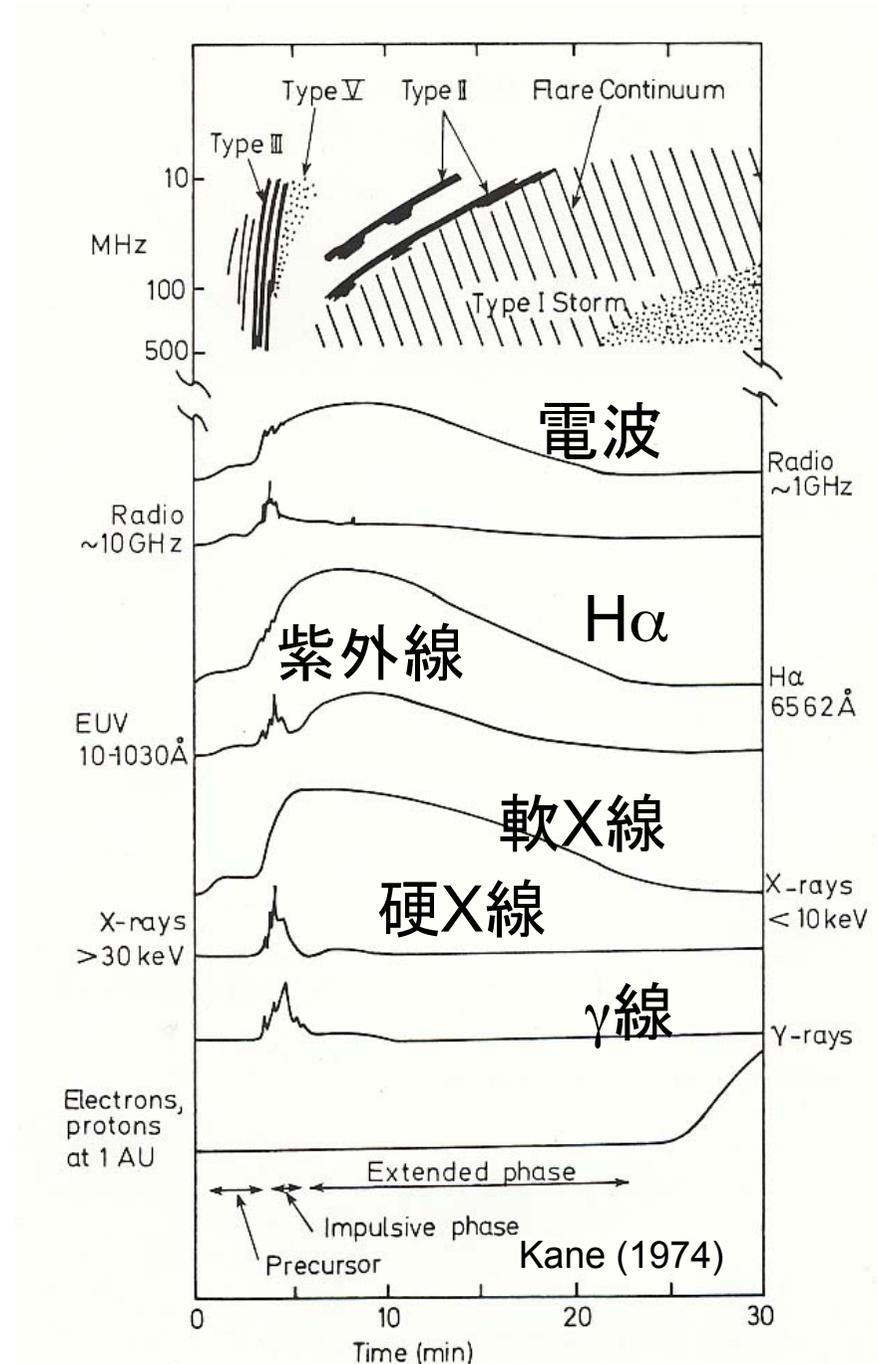
太陽フレア

$$T_{\text{flare}} = 10 - 100 \text{ MK}$$

$$(1 - 10) \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$$

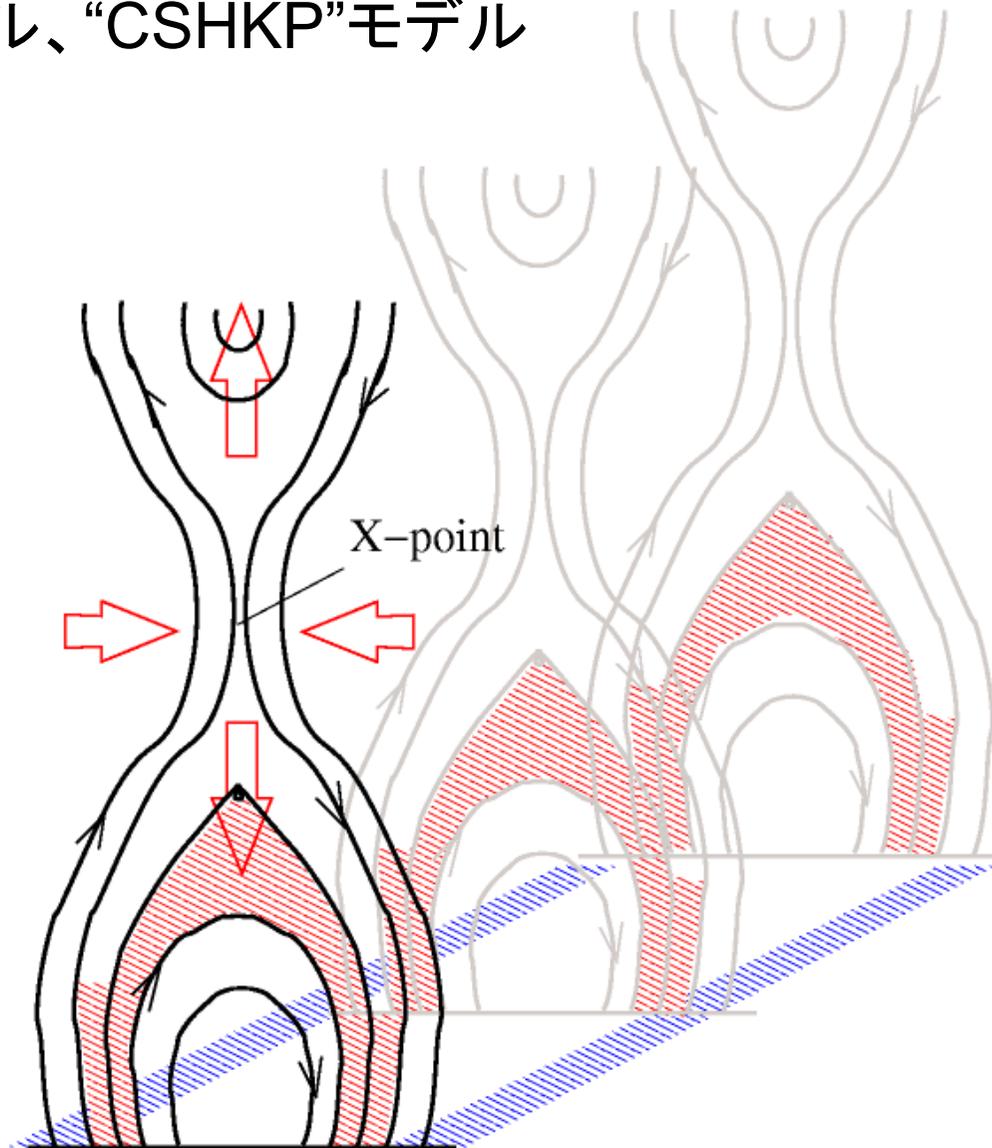
時間スケール $60 - 10^5 \text{ sec}$

エネルギー $10^{29} - 10^{32} \text{ erg}$



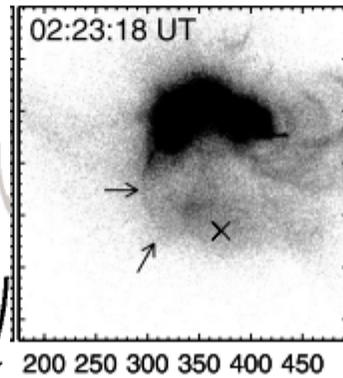
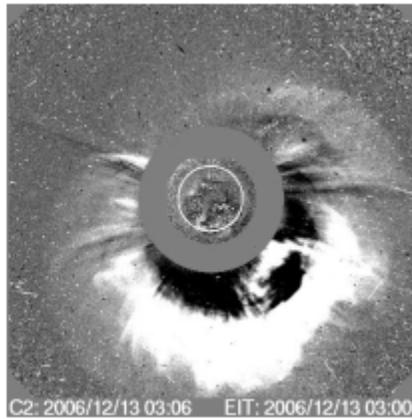
フレアのリコネクションモデル

「標準」モデル、“CSHKP”モデル

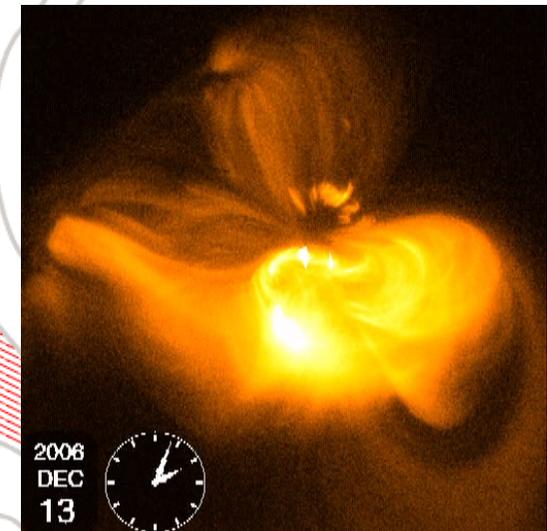


フレアの多波長観測: 2006-12-13フレアを例にして

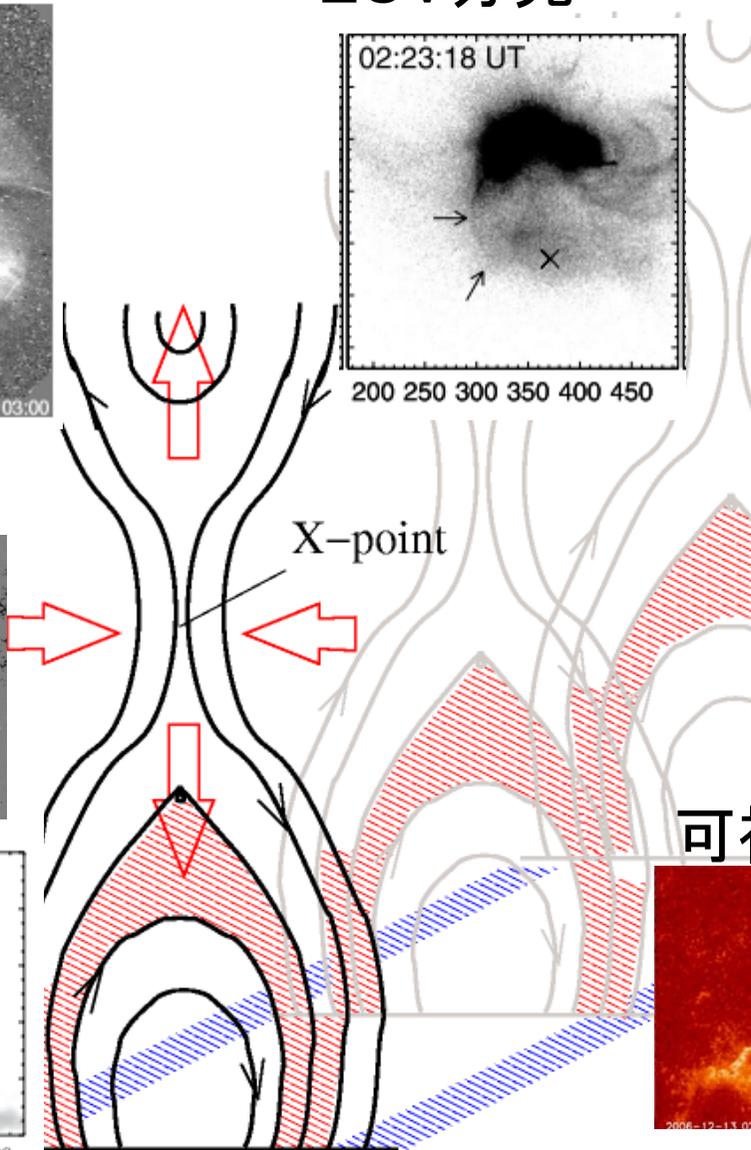
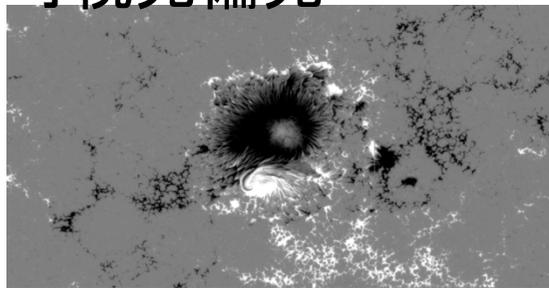
可視光コロナグラフ EUV分光



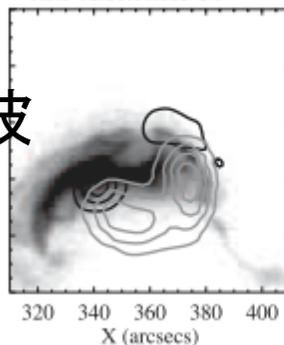
SXR



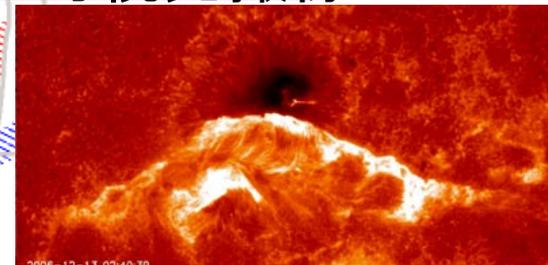
可視光偏光



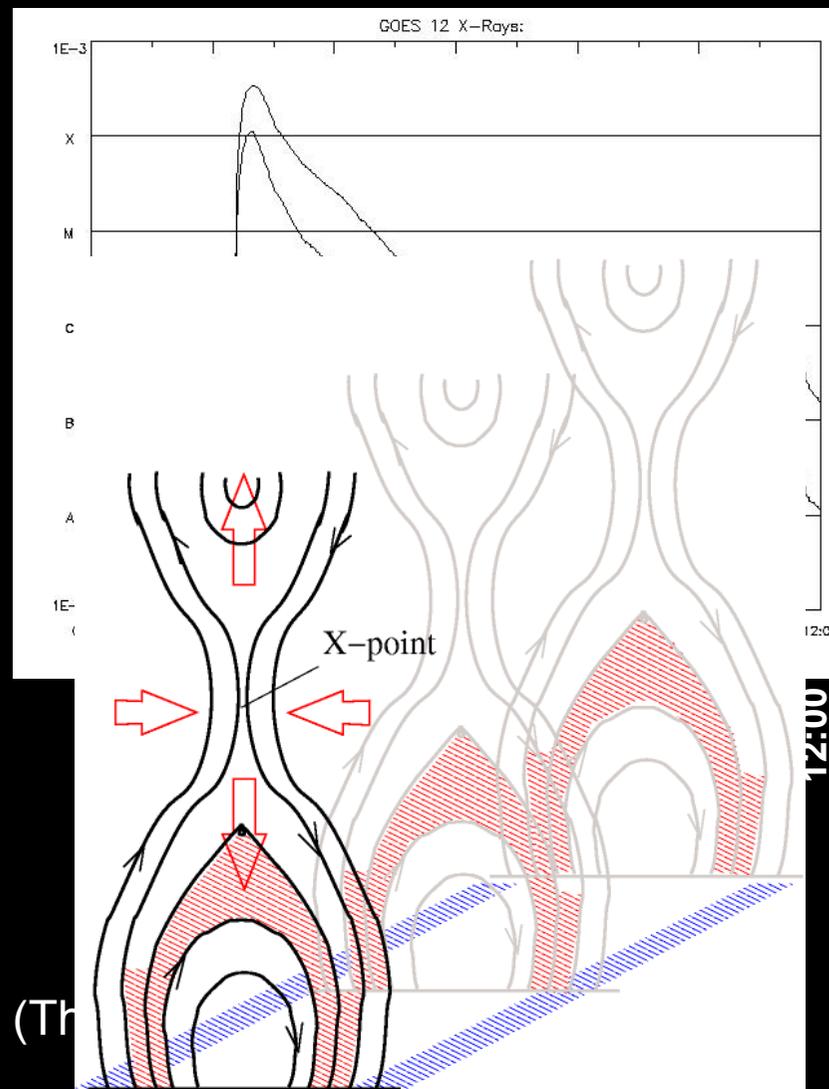
HXR・μ波



可視光撮像

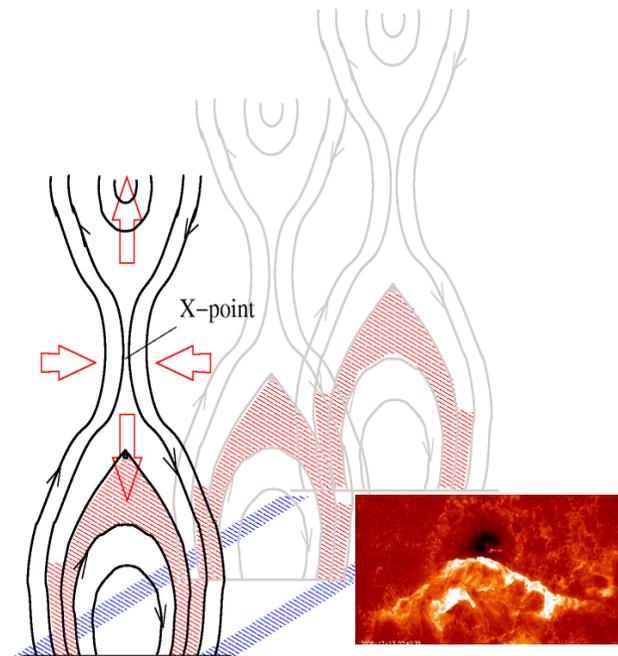
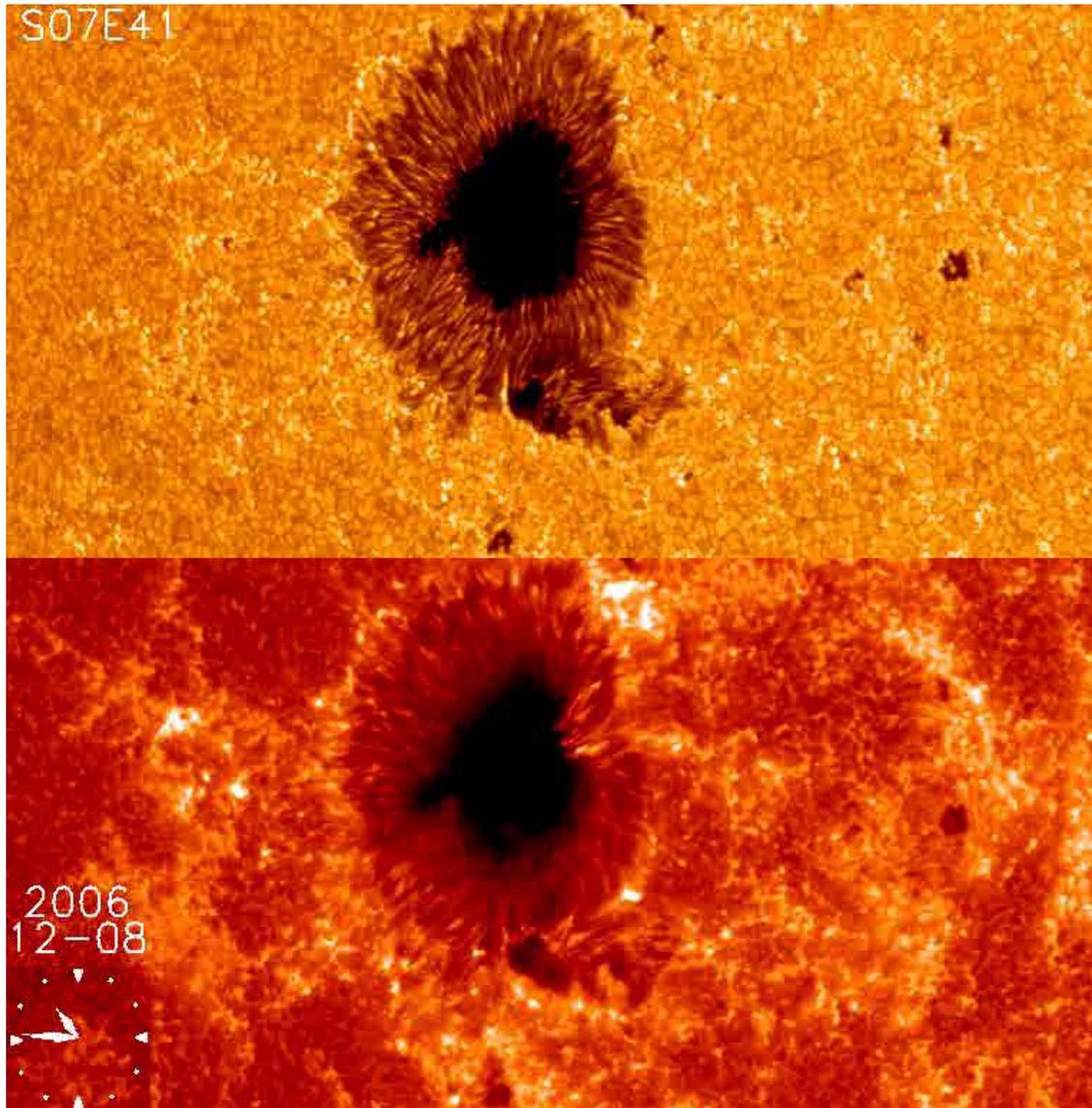


フレアのループ構造



ひのでXRT JAXA・NAOJ (坂尾さん提供)

太陽大気表面(低層大気)でのフレアの様相



Kubo, TY, et al. (2007)

Isobe et al. (2007) G-band + Call H + FeI 6302 magnetogram (JAXA/宇宙研)

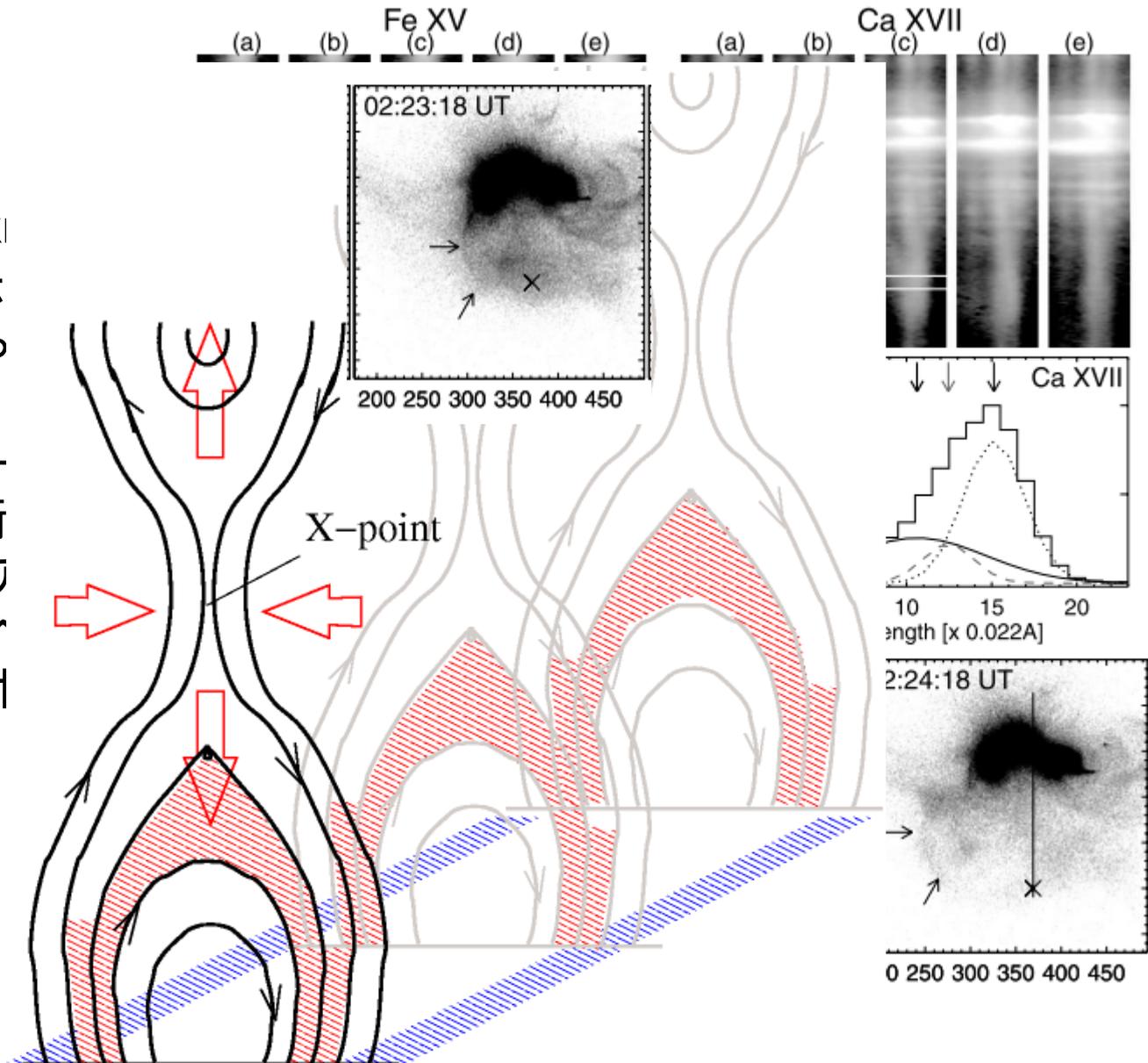
フレア時のプラズマ運動

Asai et al. (2008)

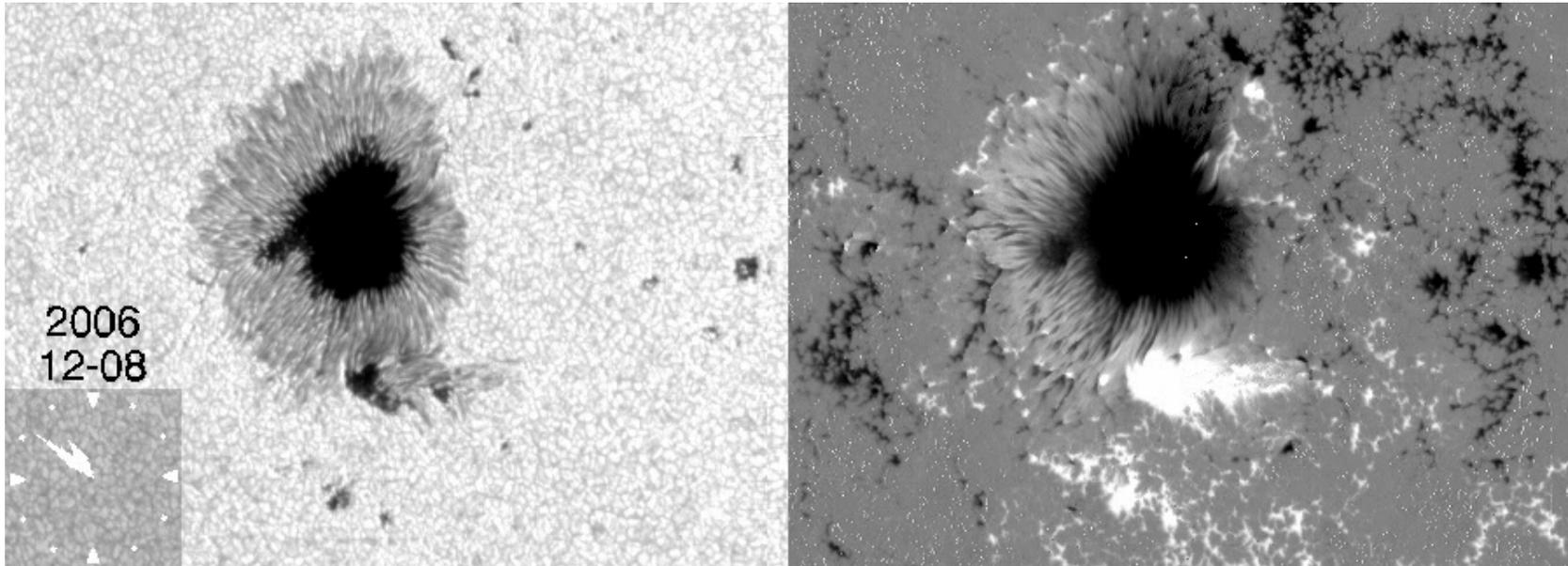
ひのでEIS

強い青色偏移(100 km/s)が、軟X線の伝構造に伴って見られた

詳細な解析から、MHDファストモード衝撃波と同定(フレア時の衝撃波のスポット観測としては初)



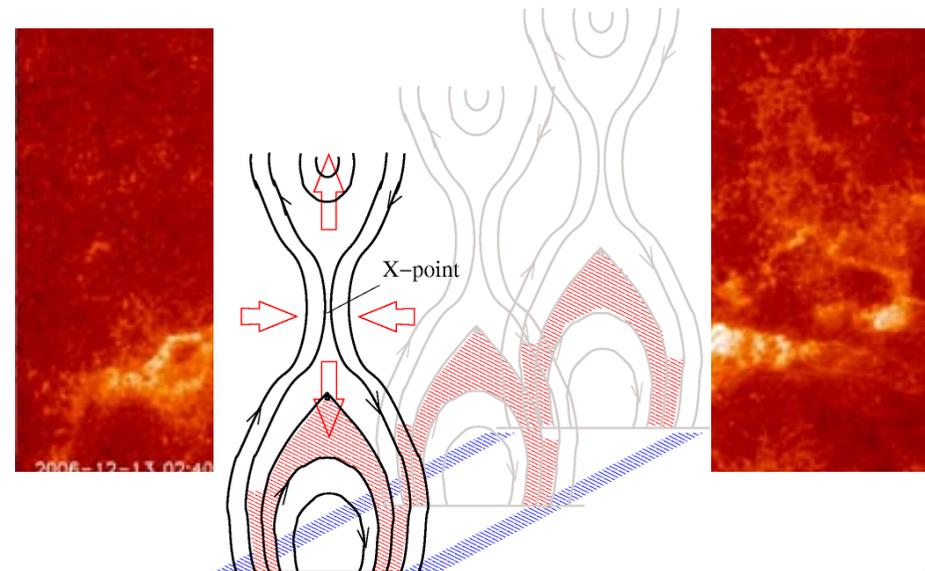
フレア前の足元磁場変動



Kubo, TY et al. (2007)

ひので SOT 偏光分光計による Stokes4成分(強度・直線偏光・円偏光)の分光観測

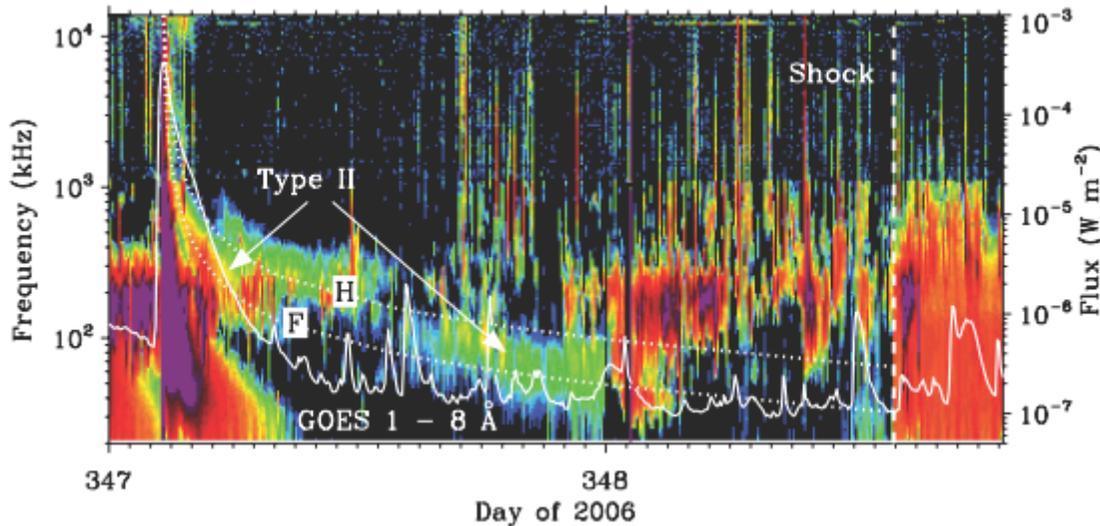
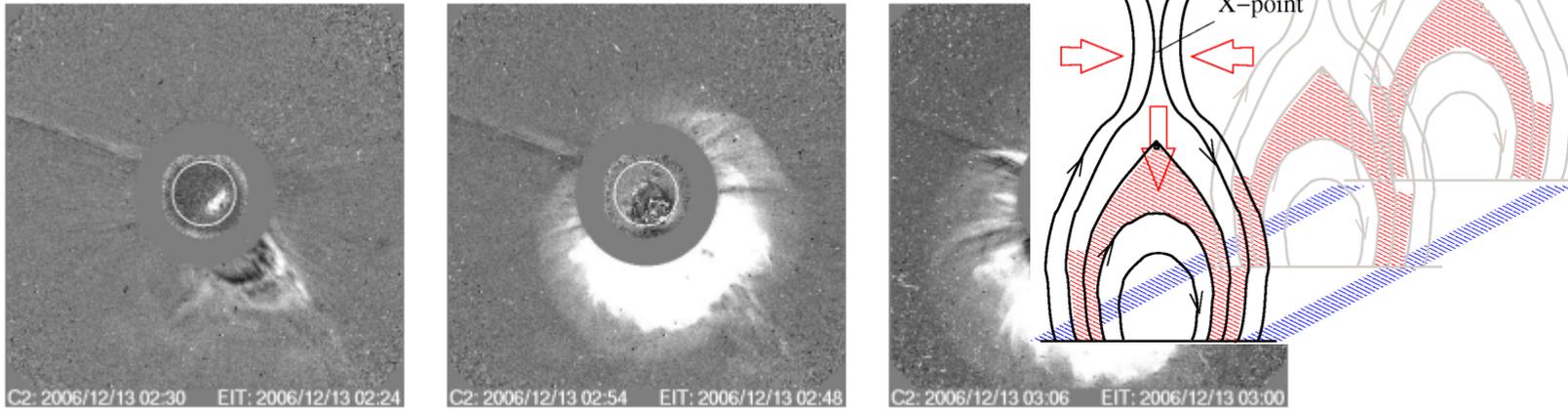
正負黒点の境界付近に複雑な磁場構造(電流構造)が成長、その付近での不安定がフレアのきっかけと考えられる。



惑星間空間への影響

Liu et al. (2008)

コロナ質量放出現象 $\sim 500\text{km/s}$ (SOI



Type II電波バースト
(WIND衛星WAVE)

惑星間衝撃波で加速された電子からのプラズマ放射と考えられている

高エネルギー粒子加速

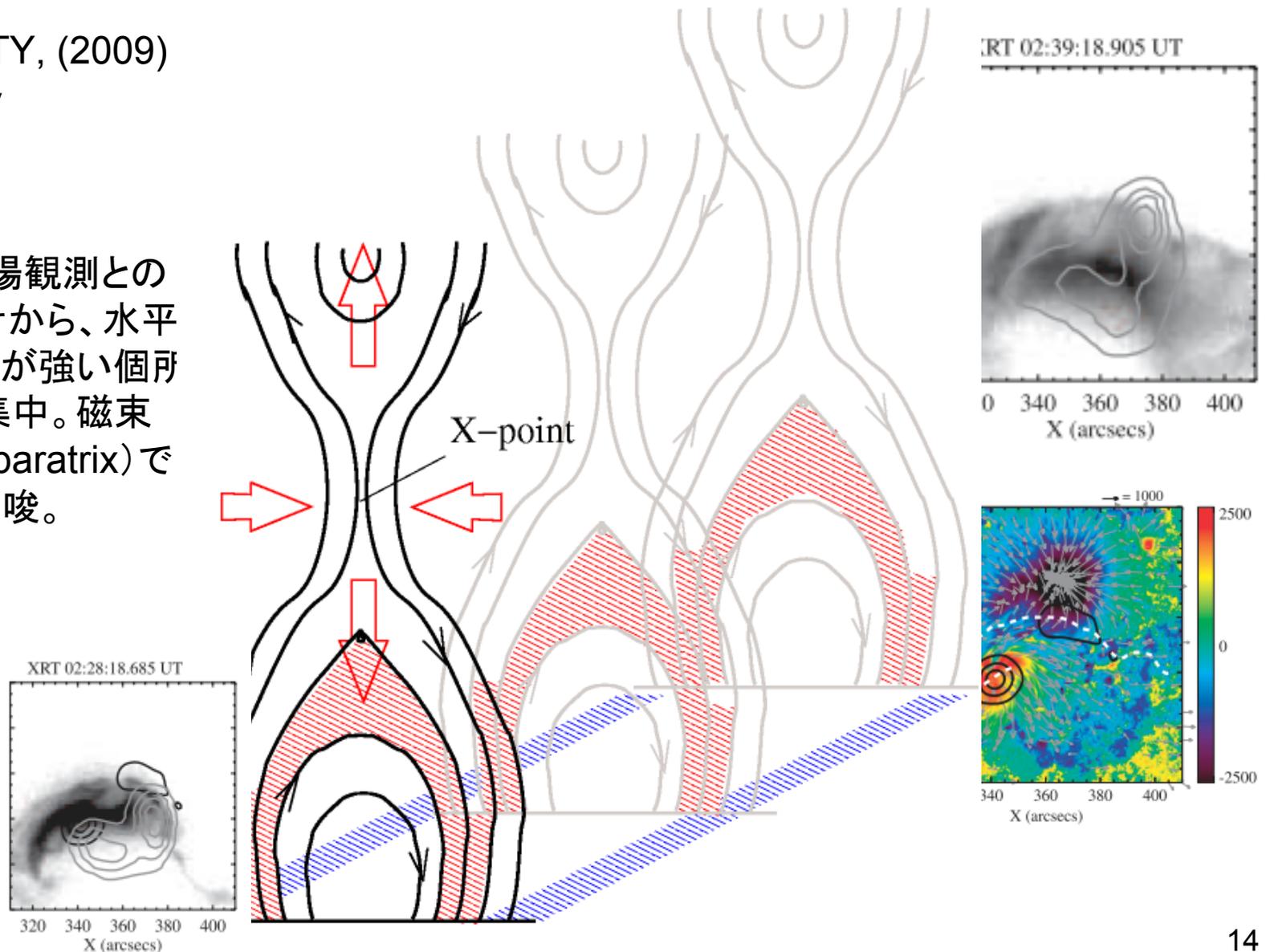
Minoshima .. TY, (2009)

>30keV - MeV

RHESSI

野辺山NoRH

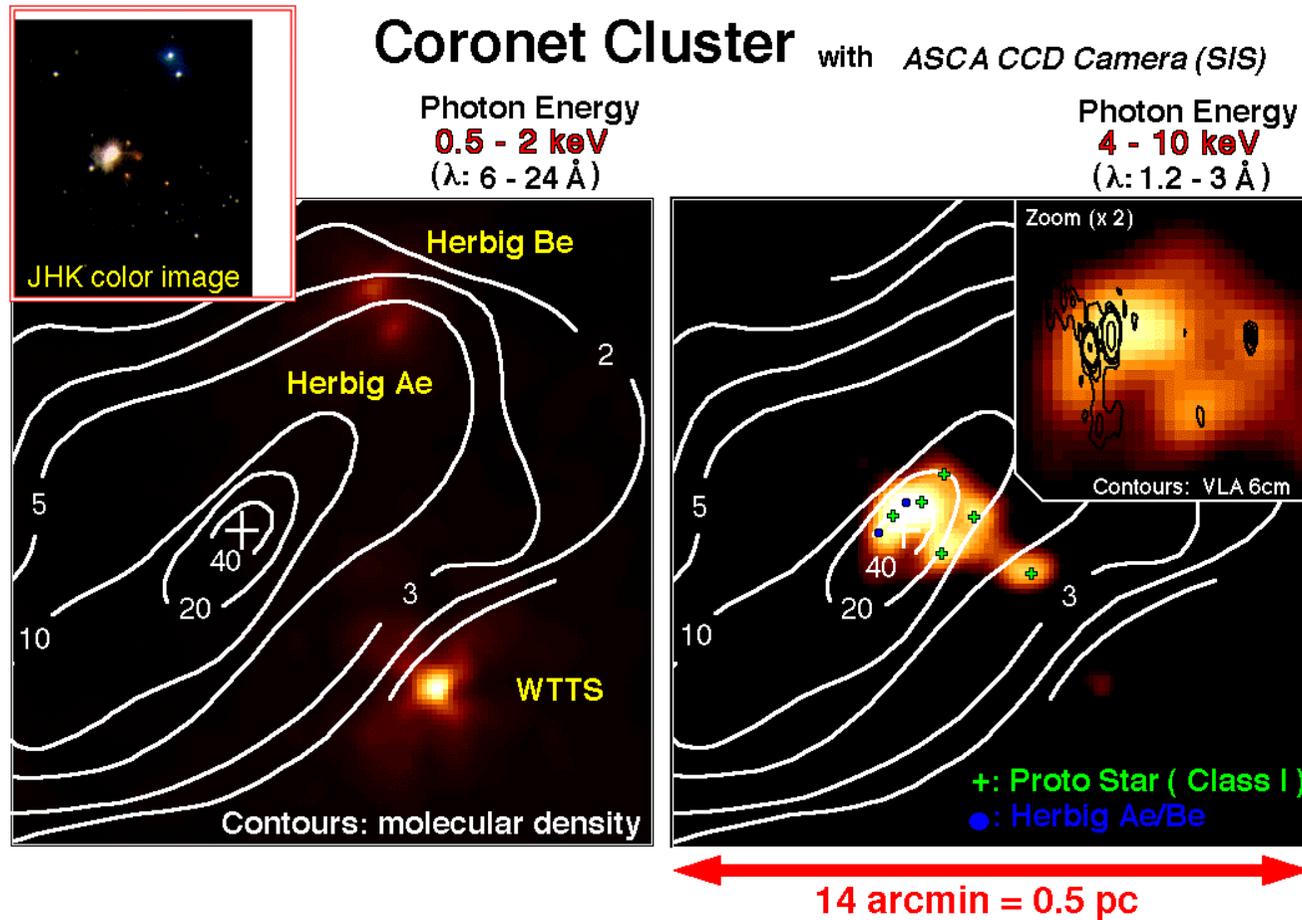
ひのでSOT磁場観測との
組み合わせから、水平
磁場のシアが強い箇所
HXR源が集中。磁束
分離層(separatrix)で
の加速を示唆。



恒星・原始星フレア・太陽フレア

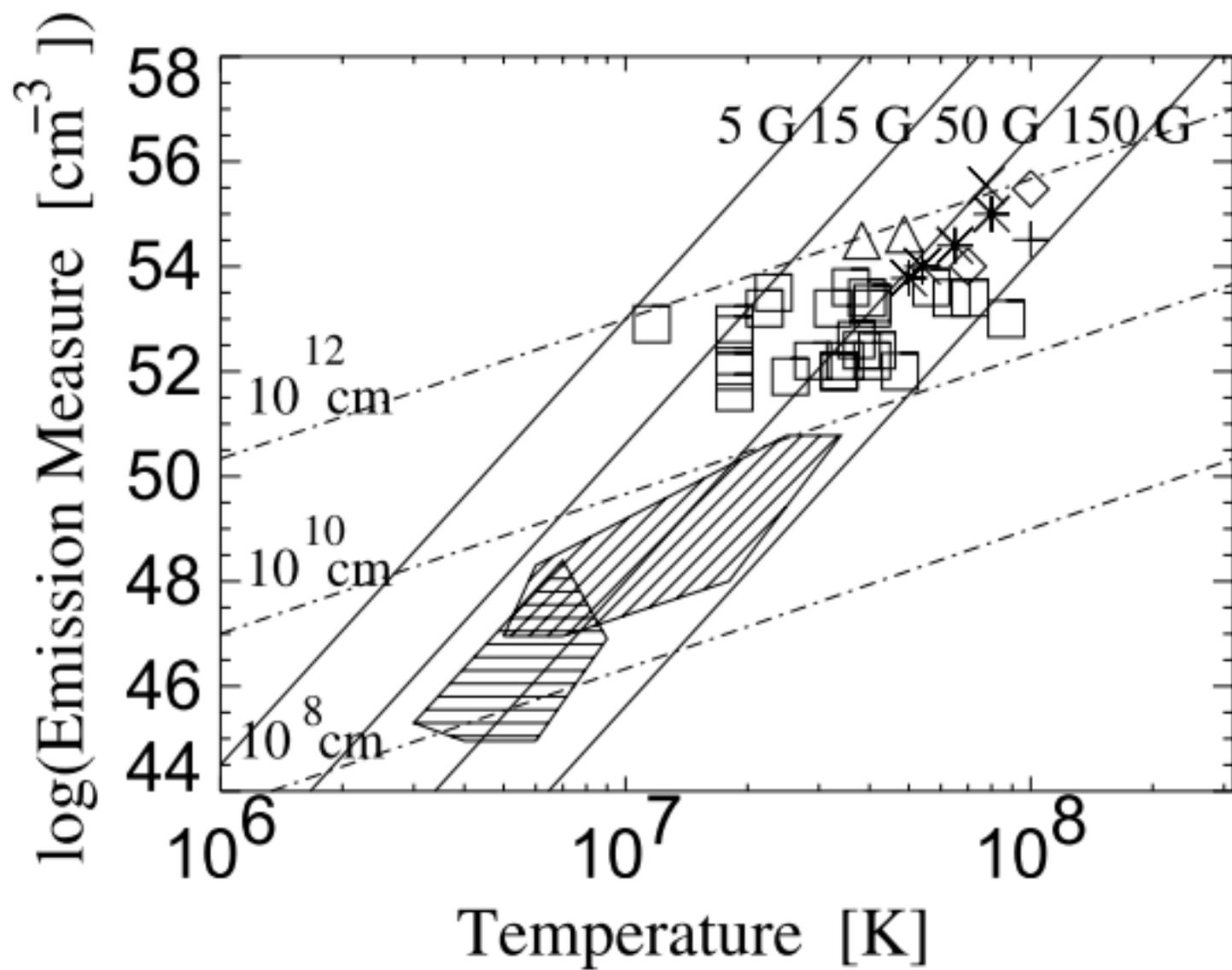
原始星フレア

(X線／あすか衛星: 小山ら1995)



温度～
1億度

太陽フレアの
エネルギーの
1万倍以上



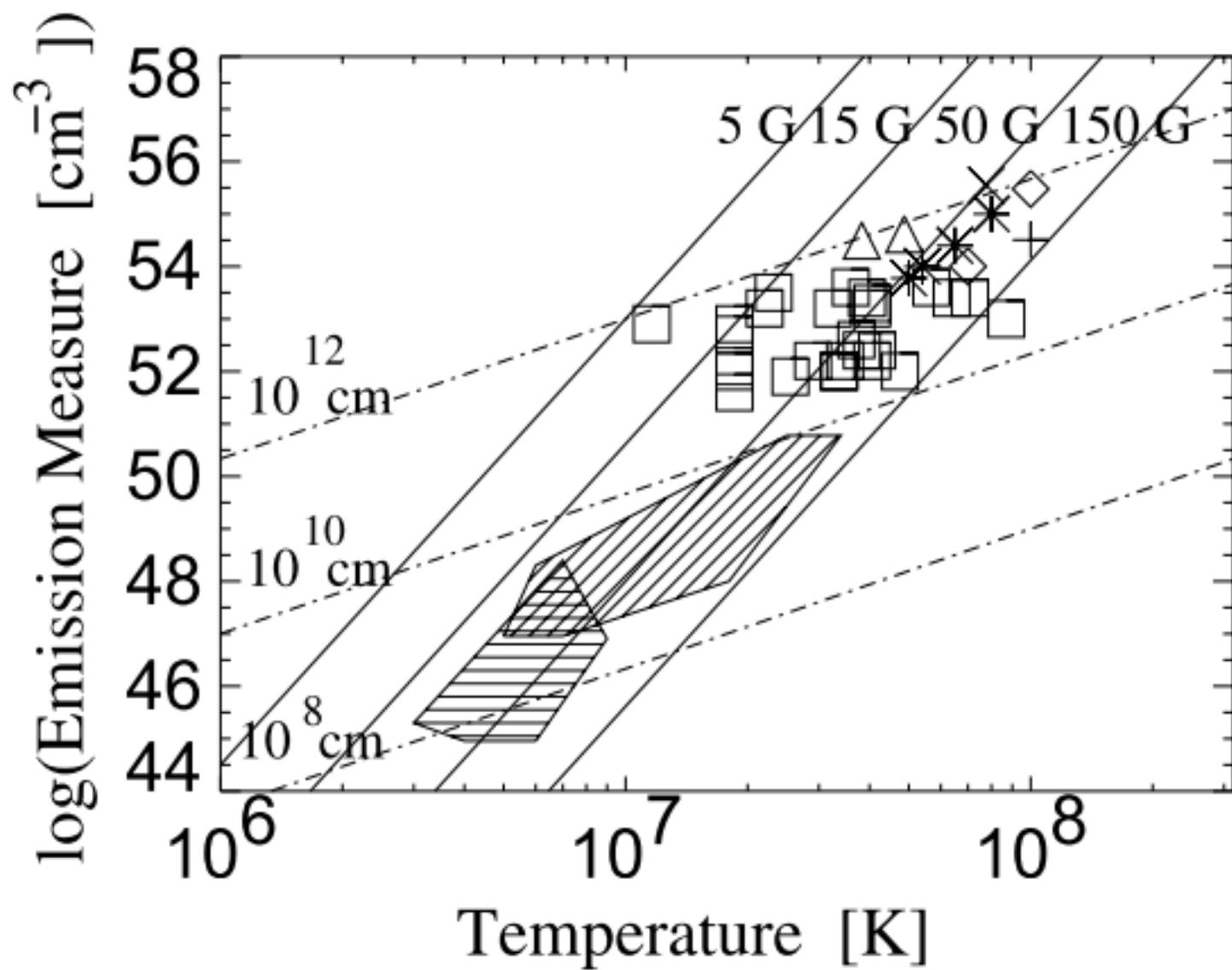
リコネクションモデルによるフレア温度スケール則

フレア温度vs磁場・ループ長則 (TY & Shibata 1998,2001)

$$\begin{aligned} T_{\max} &\simeq \left(\frac{B^2 v_A L}{\kappa_0 2\pi} \right)^{2/7} \simeq 5.3 \times 10^4 B^{6/7} n_0^{-1/7} L^{2/7} \text{ K} \\ &\simeq 3 \times 10^7 \left(\frac{B}{50 \text{ G}} \right)^{6/7} \left(\frac{n_0}{10^9 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/7} \\ &\quad \times \left(\frac{L}{10^9 \text{ cm}} \right)^{2/7} \text{ K}, \end{aligned}$$

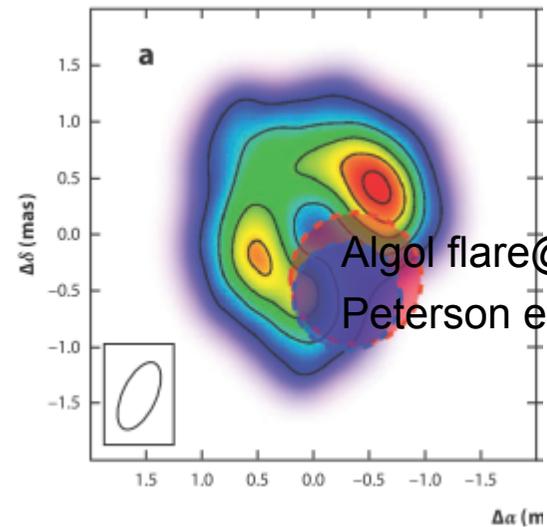
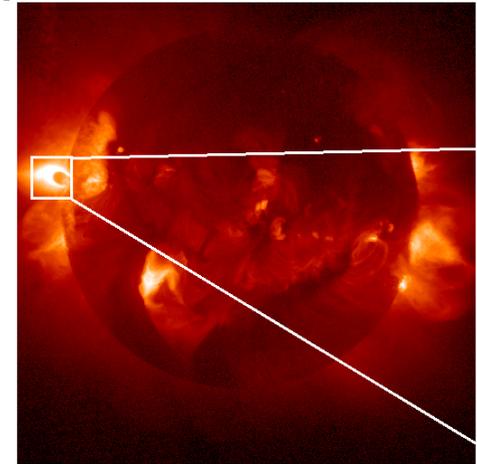
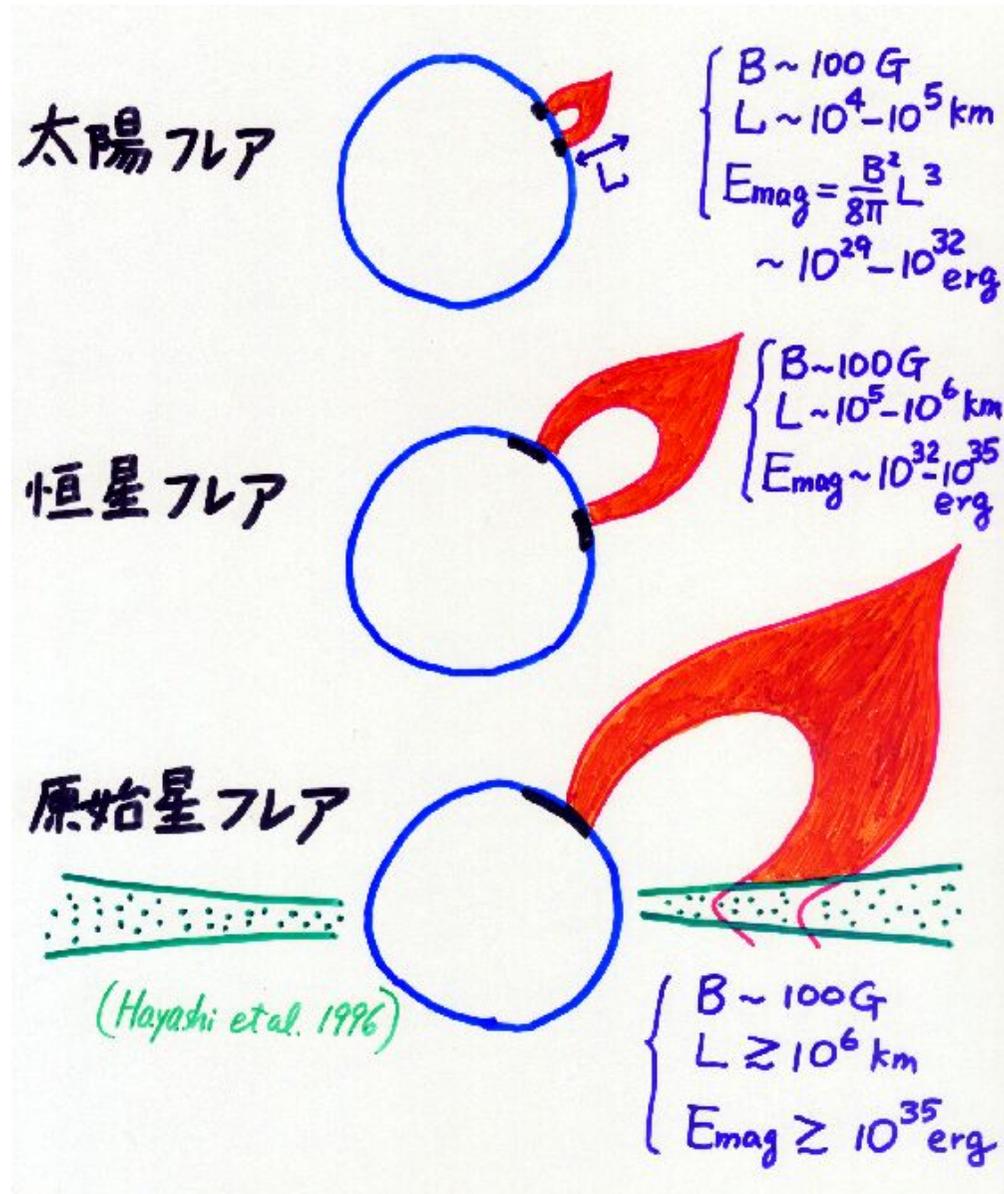
フレアEM vs 温度則 (Shibata & TY 1999,2002)

$$\text{EM} \simeq 10^{48} \left(\frac{L}{10^9 \text{ cm}} \right)^{5/3} \left(\frac{n_0}{10^9 \text{ cm}^{-3}} \right)^{2/3} \left(\frac{T}{10^7 \text{ K}} \right)^{8/3} \text{ cm}^{-3}. \quad (6)$$



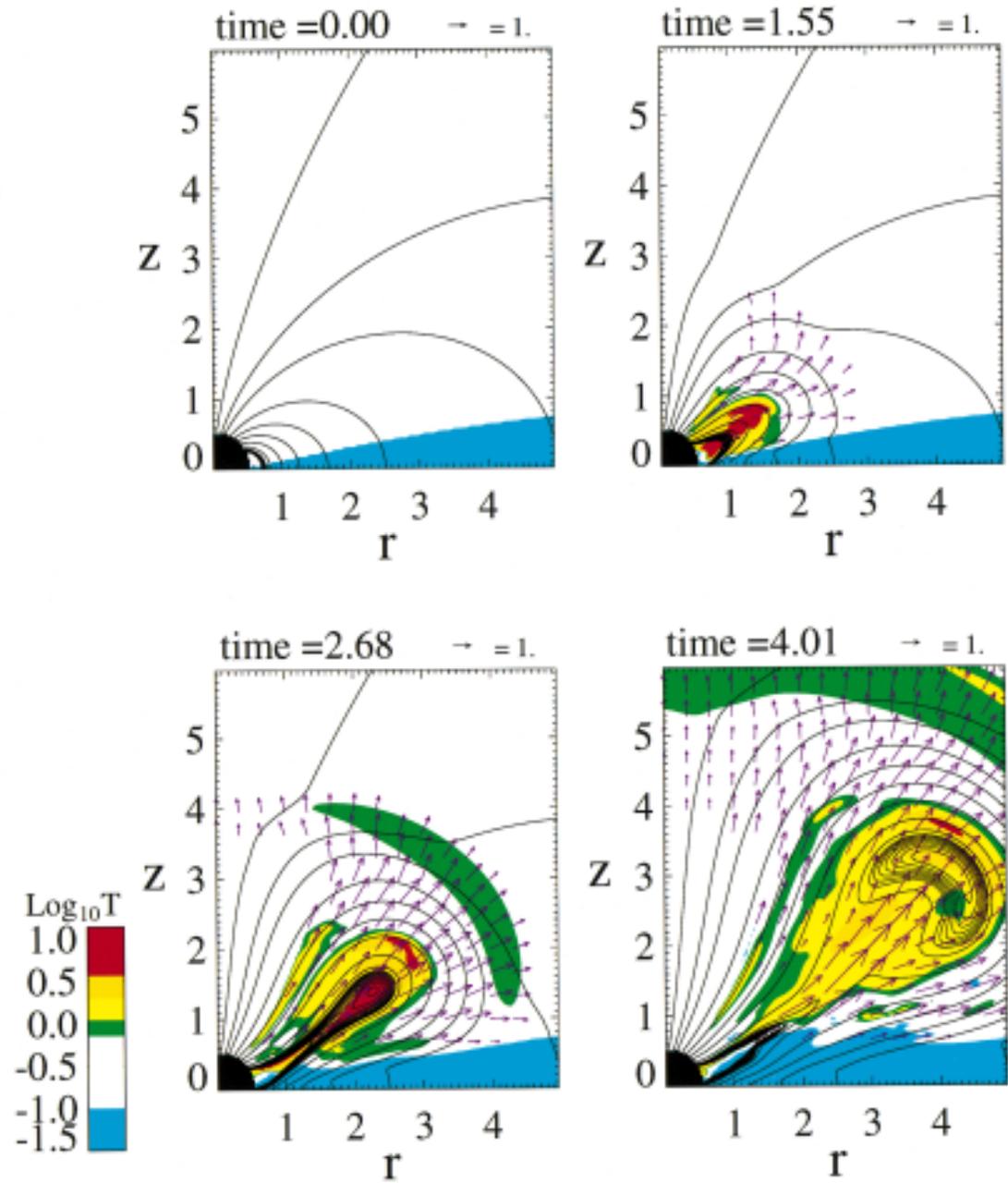
フレアの統一的描像

柴田1999



原始星フレアの2次元シミュレーション

Hayashi et al. 1996



フレア物理に残された課題

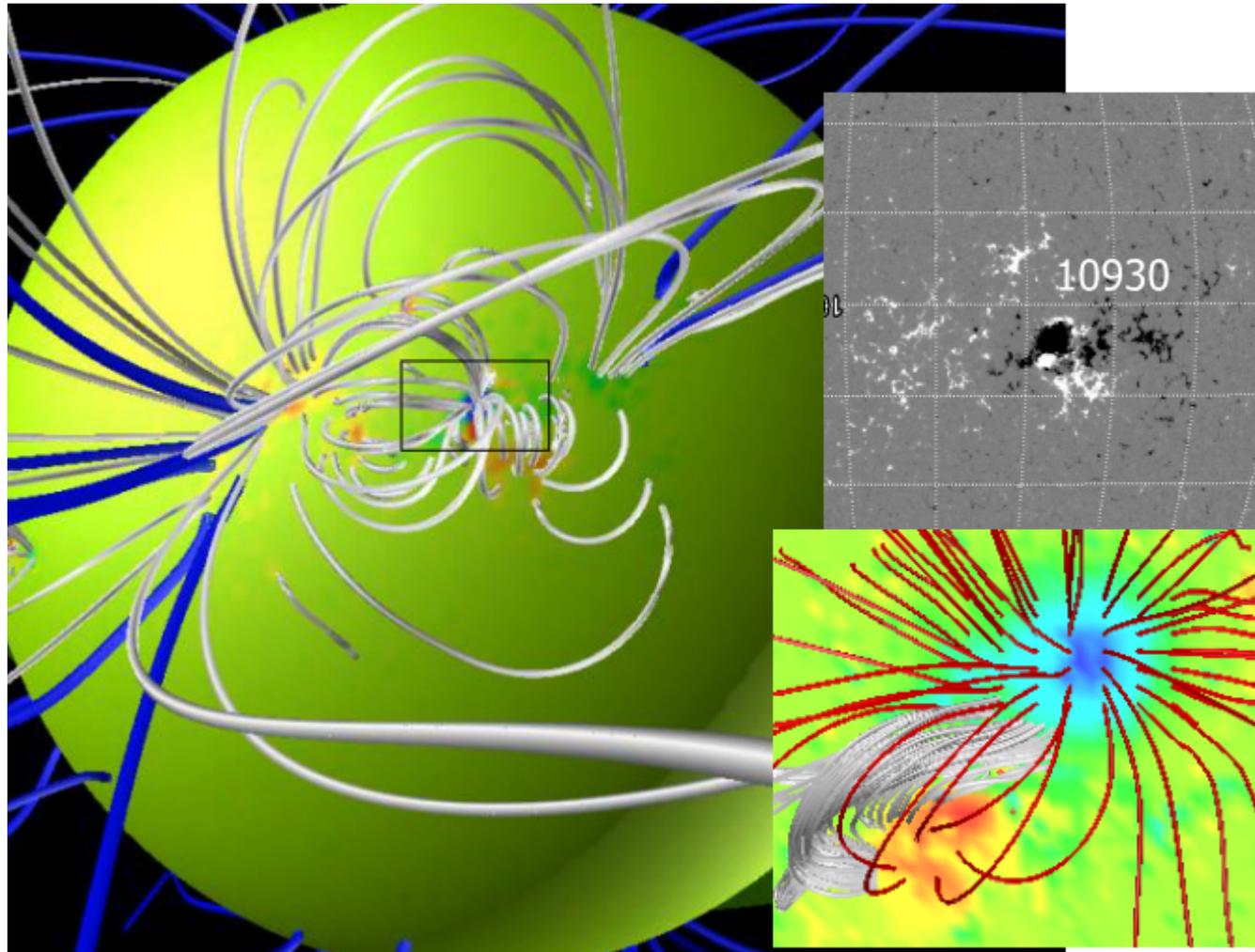
フレアトリガ

粒子加速

リコネクション物理

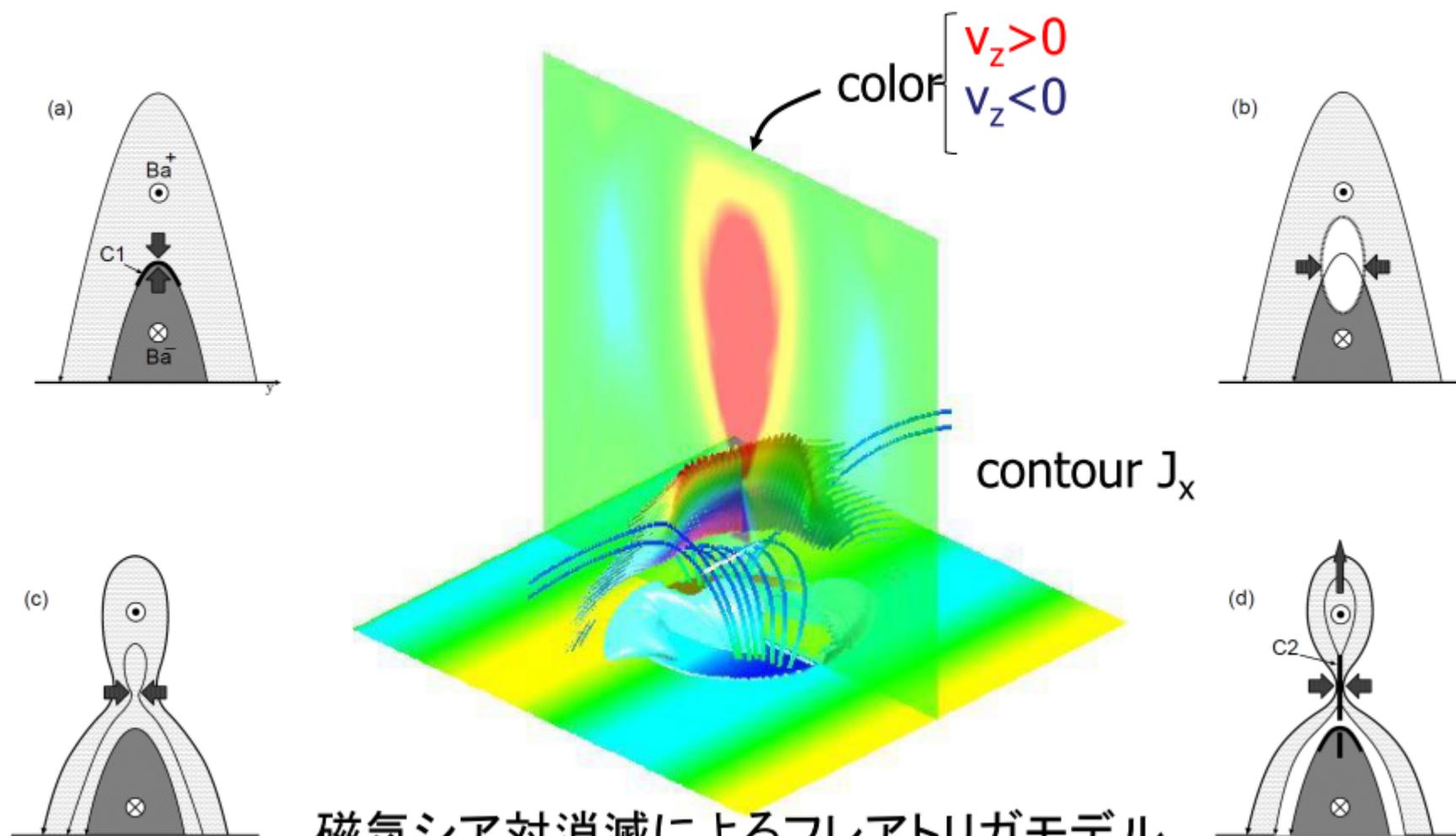
リコネクションの直接証拠観測

フレアのトリガ



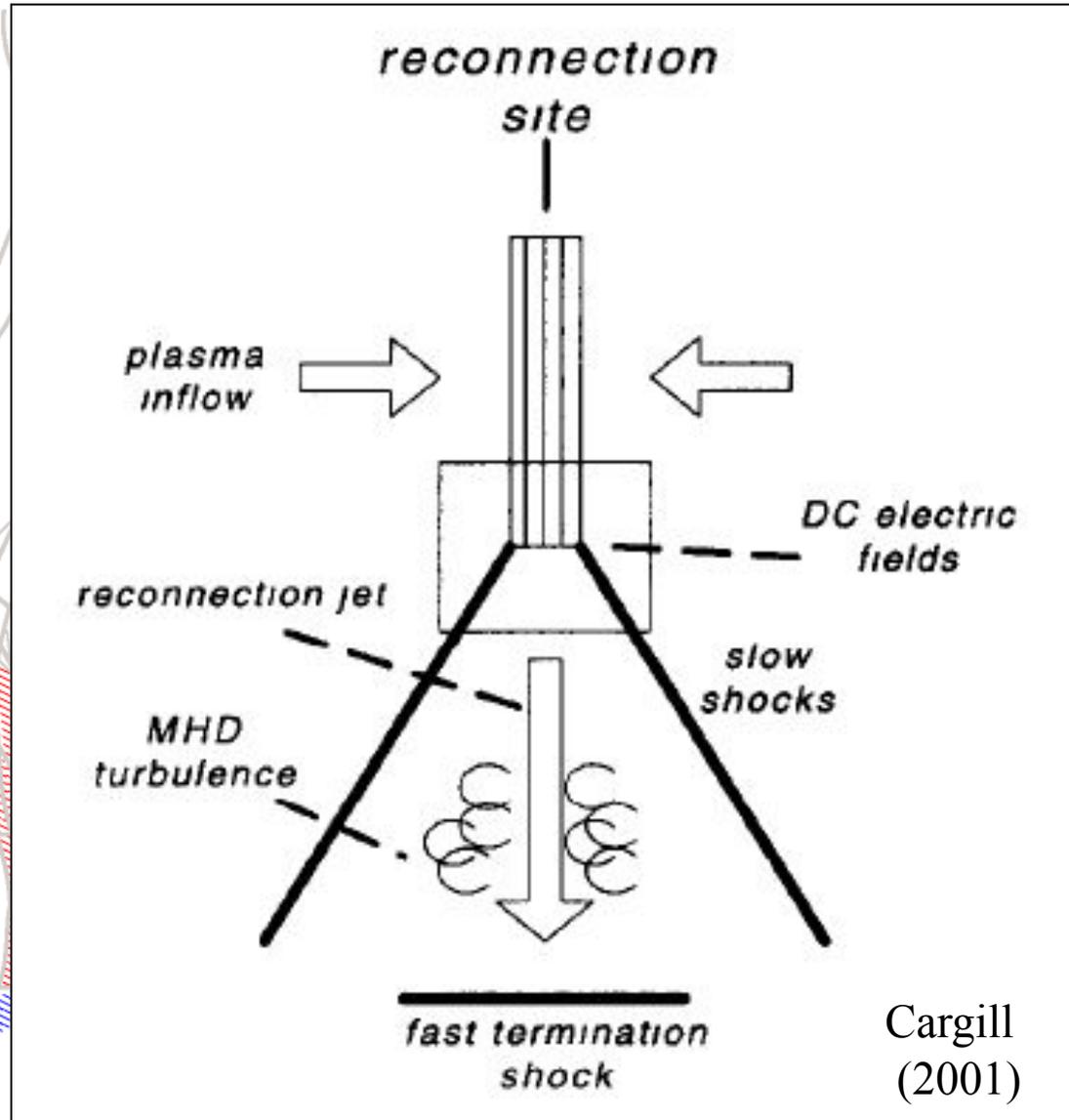
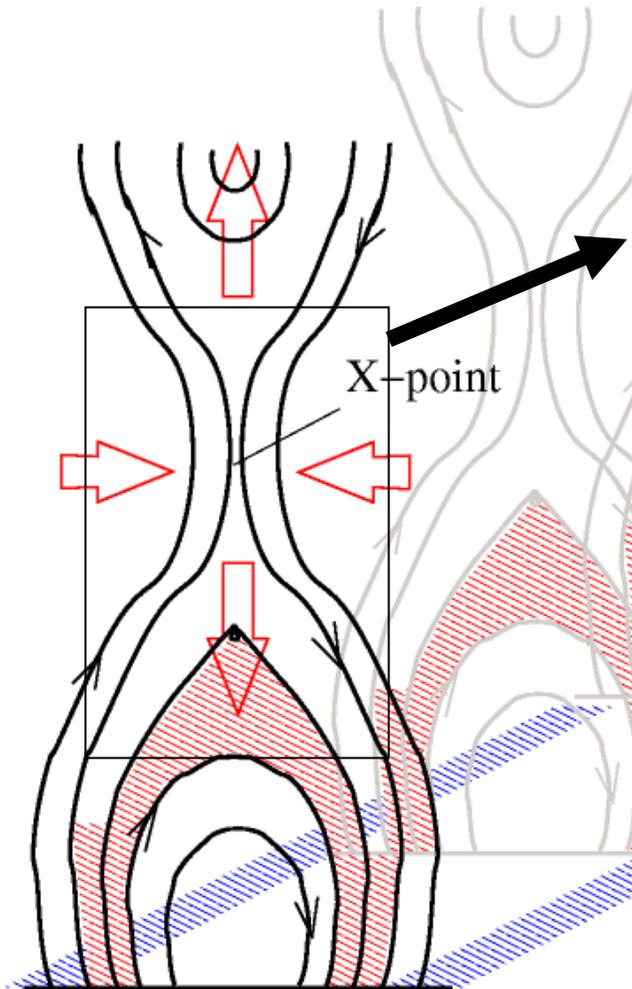
Kusano et al. (2011 in prep)

シア対消滅によるフレアのトリガ



磁気シア対消滅によるフレアトリガモデル
(Kusano et al. 2004)

太陽フレアの粒子 加速理論モデル



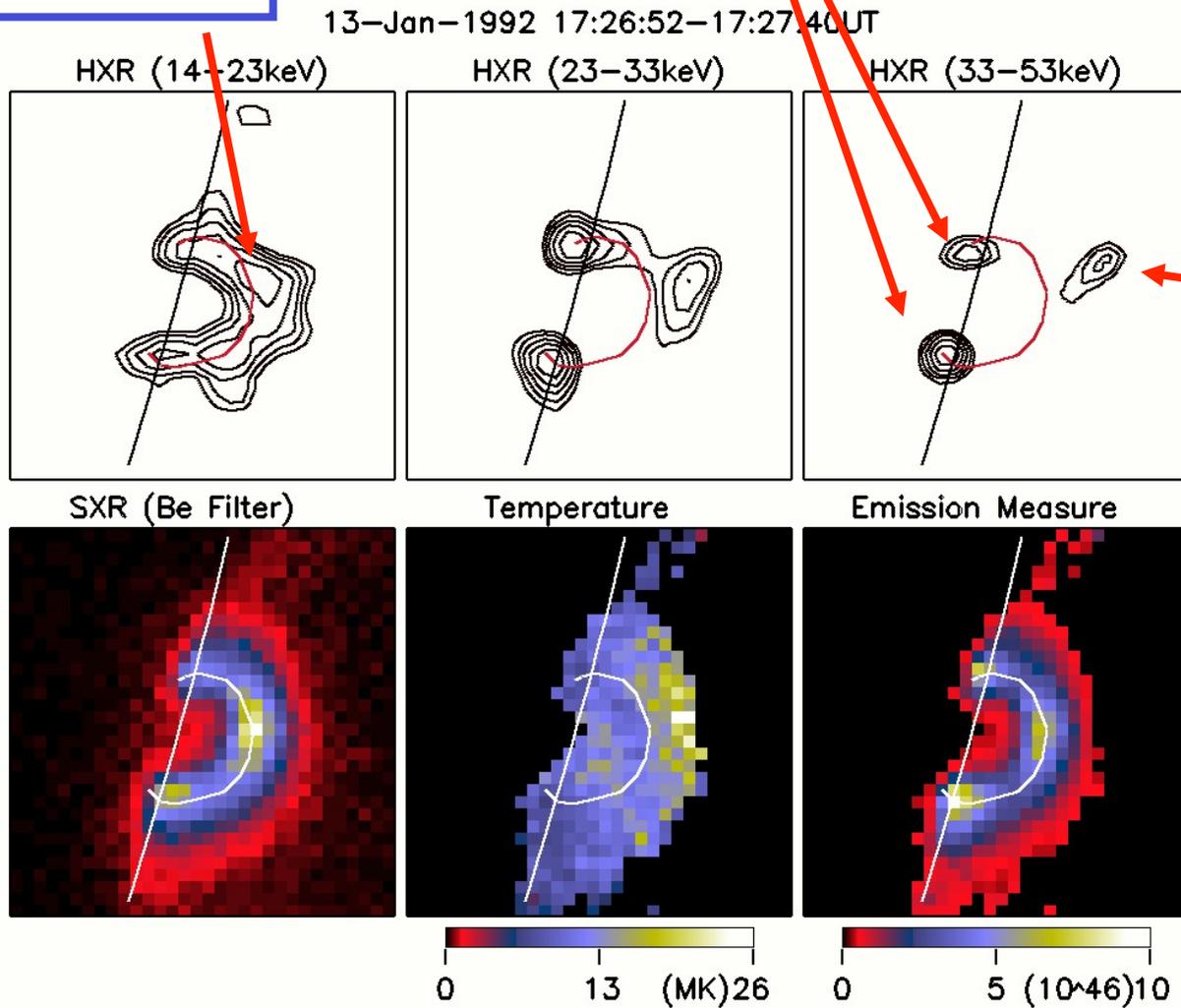
Cargill
(2001)

Three types of Hard X-ray Sources

(増田 2004)

(3) Looptop
Gradual Source

(1) Double Footpoint Sources



(2) Looptop
Impulsive
Source

太陽フレア粒子輸送のFokker-Planckモデリング

空間1次元、Fokker-Planck方程式

- ミラー反射・Coulomb散乱・足元落下を考慮

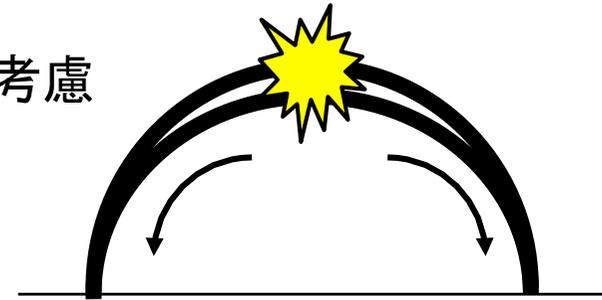
$$\frac{\partial F}{\partial t} + \mu c \beta \frac{\partial F}{\partial s} + \frac{\partial}{\partial \mu} (\dot{\mu} F) + \frac{\partial}{\partial E} (\dot{E} F) = \frac{\partial}{\partial \mu} \left(D_{\mu\mu} \frac{\partial F}{\partial \mu} \right)$$

$F(t, s, \mu, E)$ 電子位相空間密度 (ループ断面・ジャイロ位相角積分)

μ : 電子ピッチ角正弦

s : ループに沿った空間座標 $\beta = v/c$

E : 電子運動エネルギー、

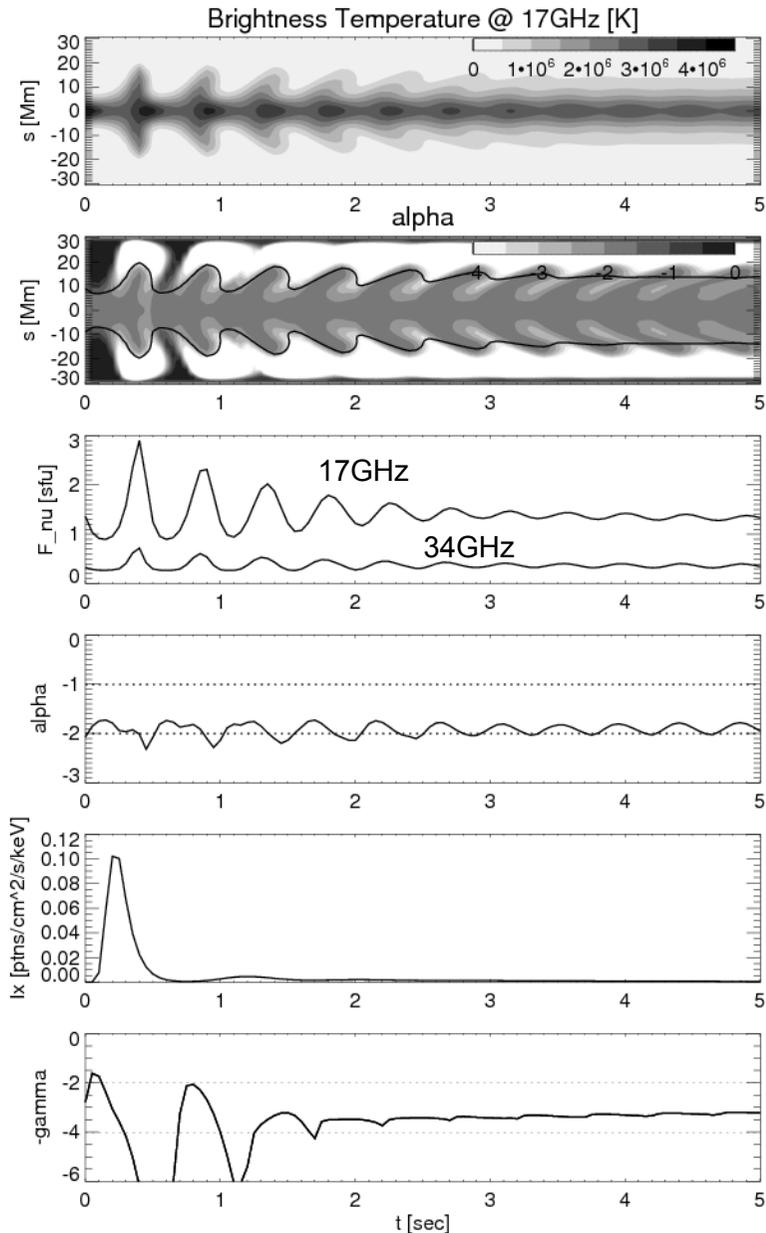


後処理

- ジャイロシンクロトロン電波放射 Petrosian (1981)
- 厚い標的硬X線放射 Brown (1971)

結果

距離、距離、電波強度、電波放射べき、電波強度、硬X線光子べき 50keV強度、電波放射べき、電波強度、電波放射べき



ループ半長 30Mm

磁場強度比 Bf1:Bs:Bf2=320G:200G:320G

磁束 6e21 Mx、断面半径10Mm

注入電子

- $\delta=4$ (Dulk式だと $\alpha=-2.4$ が期待)
- 10^{33} 個、 $\sim 10^{27}$ erg(>50keV)
- ループ頂上
- 初期注入空間幅 $\Delta s_{inj}=7$ Mm
- ピッチ角分布 等方
- 初期に全注入

観測者は、真上方向に

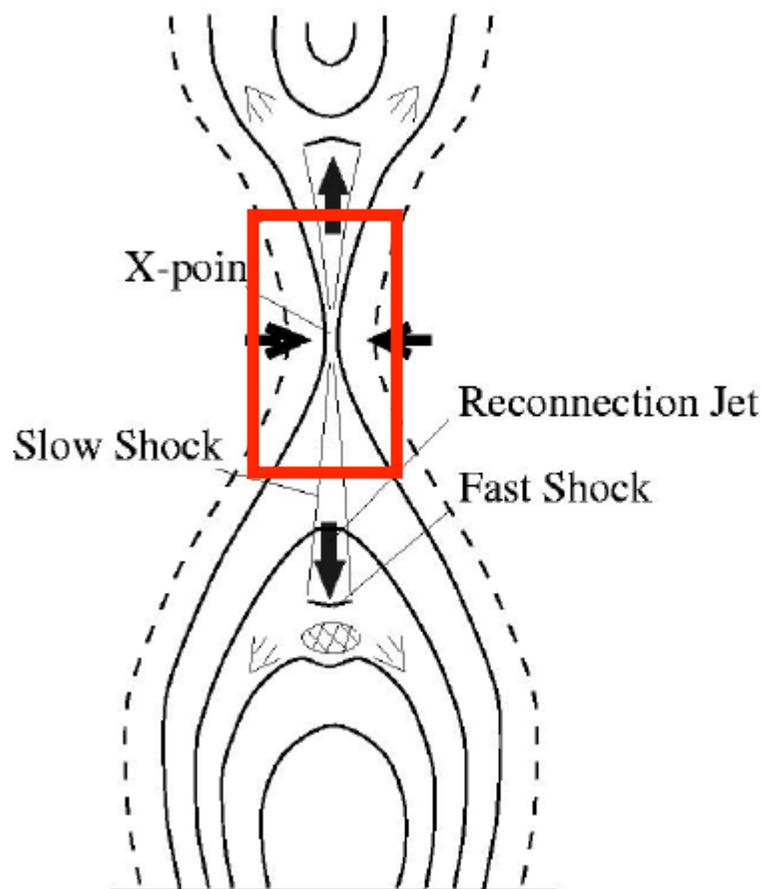
電波では、

- 周期的ふるまい(ミラー反射の効果)
- 角積分放射のべきはDulk式より硬い
- ループ足元より頂上が明るい(次のスライド)
- 放射域両端のべきが軟らかい(次のスライド)

硬X線では、

- 最初の一撃のみ(初期にロスコーン内の電子が直接落下)
- べきは、硬→軟(高エネルギーが先に落下)

リコネクション物理の課題：空間スケールのギャップ問題



プラズママイクロ過程による抵抗が効く空間スケール

$$\delta = \rho_i \sim \underline{1 \text{ m}}$$

δ ; 電流シートの厚み

ρ_i ; イオンLarmor半径

フレアの空間スケール

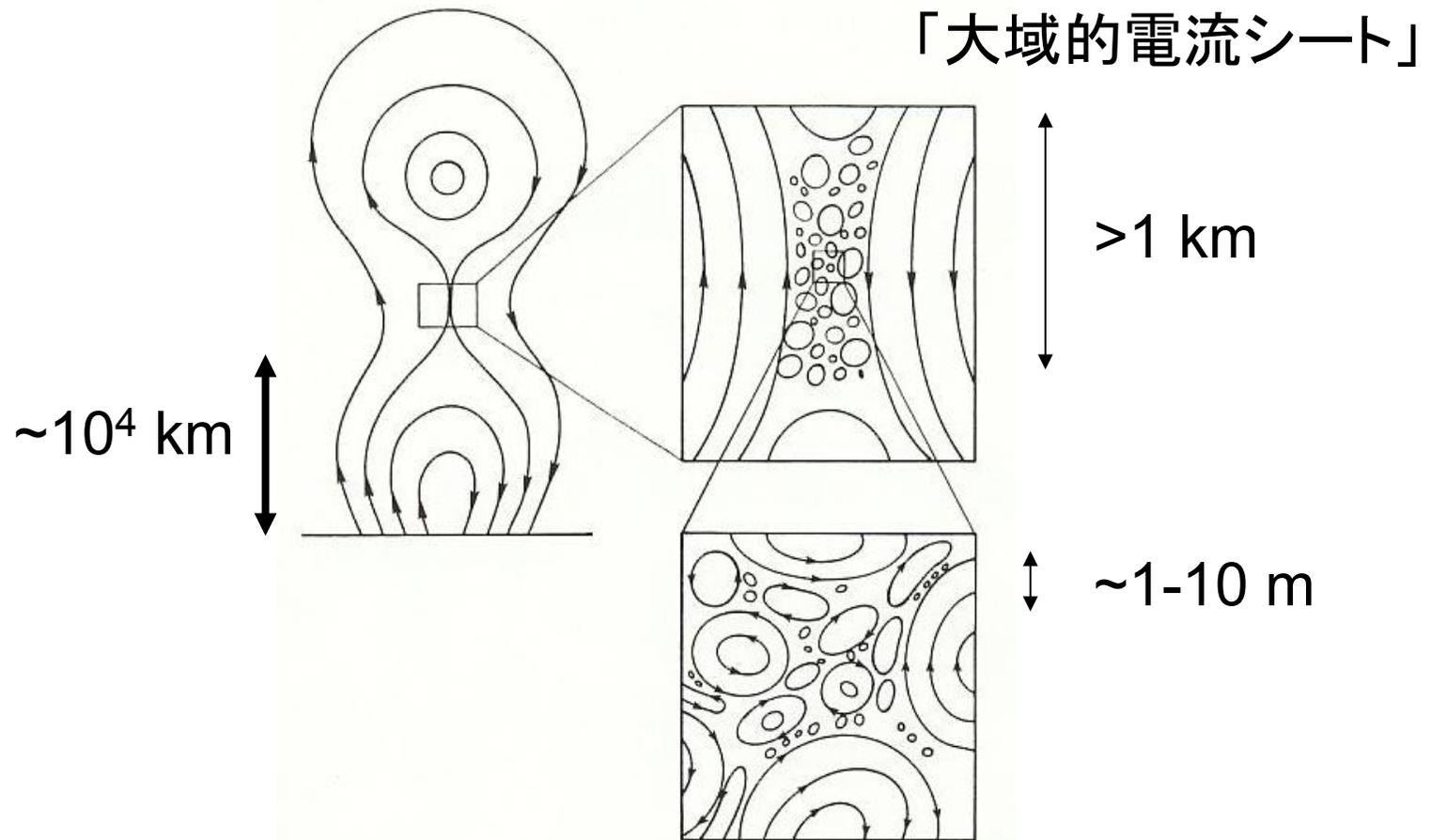
$$- \underline{10^4 - 10^5 \text{ km}}$$

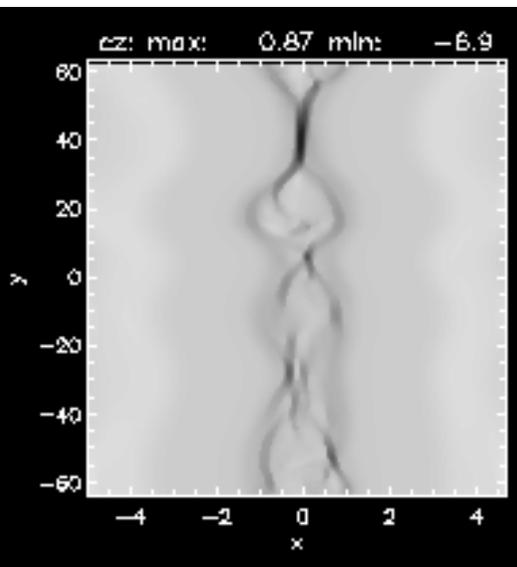
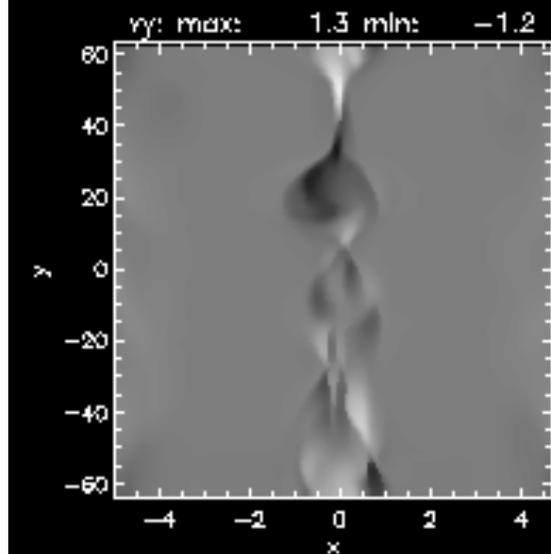
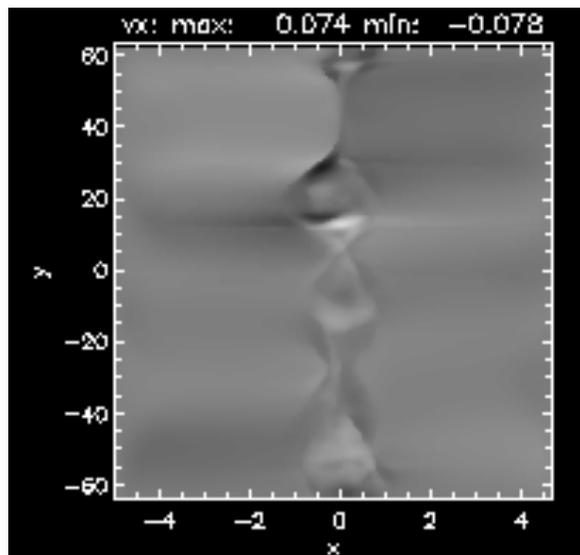
10^7 から 10^8 ものギャップ！

- 安定に(層流で)つながっているとは考えがたい
- MHD乱流が重要？

フラクタル電流シート

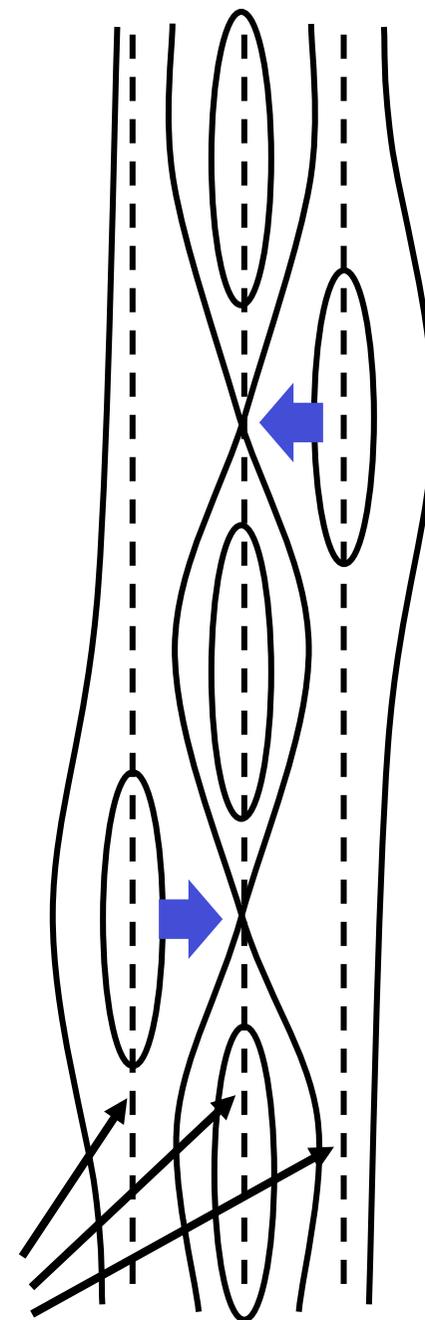
Tajima & Shibata (1997)



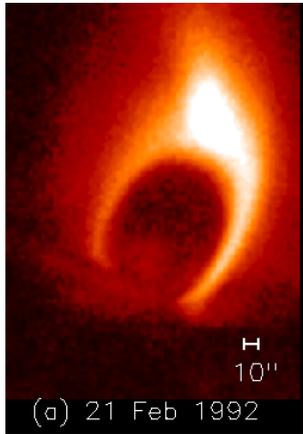


磁気島の相互作用によるリコネクション率の増幅

複数の共鳴面上で、磁気島が形成される。磁気島が隣りあう磁気X点を横から押すことでリコネクションを増幅する。

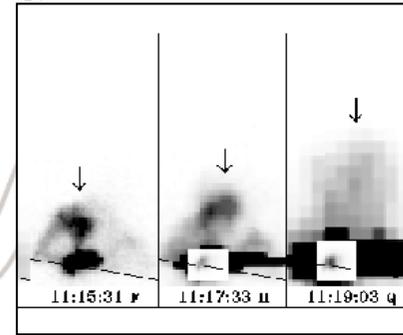
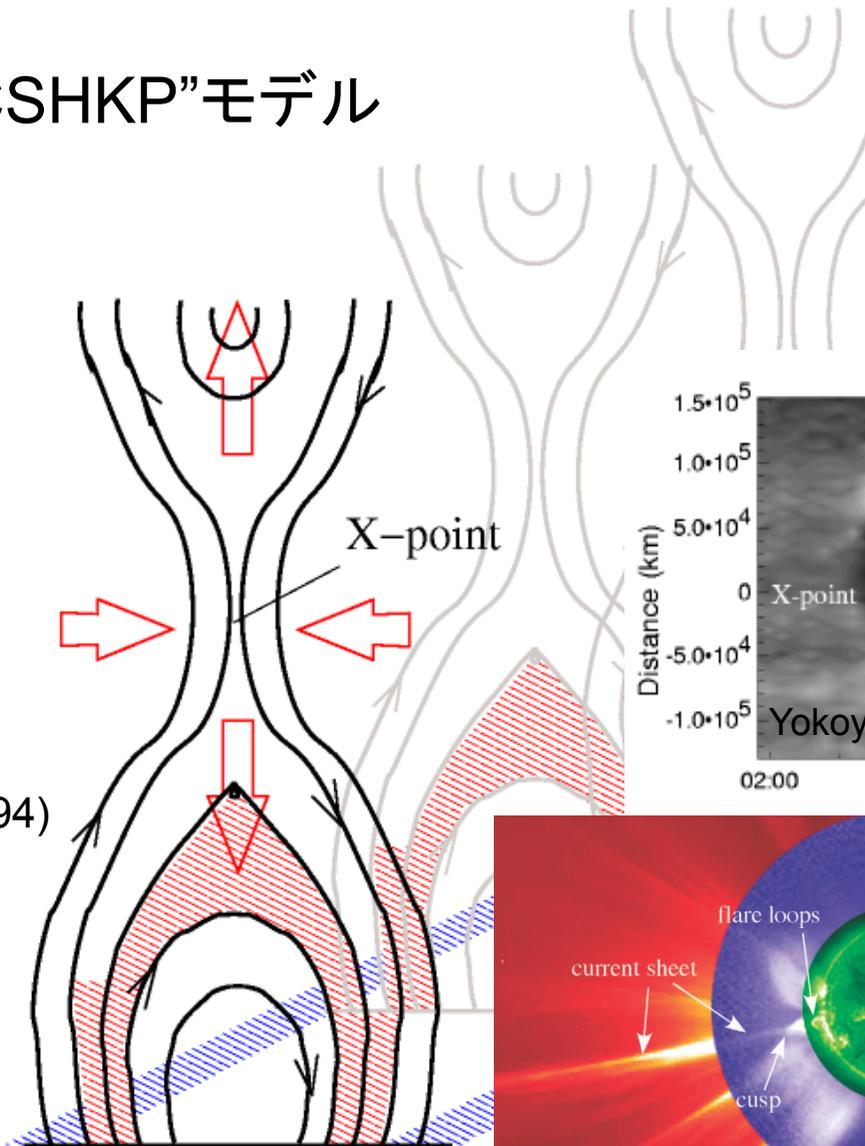


フレアのリコネクションモデルの観測的証拠

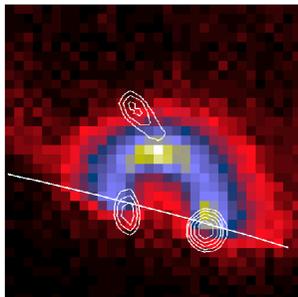


(a) 21 Feb 1992
Tsuneta et al. (1992)

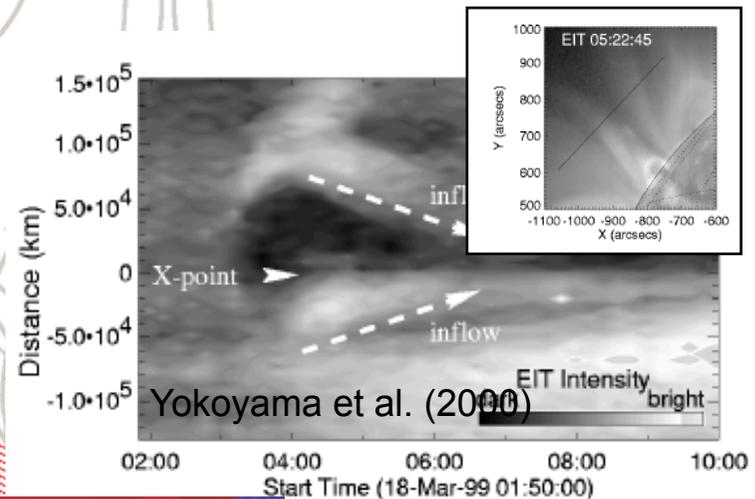
“CSHKP”モデル



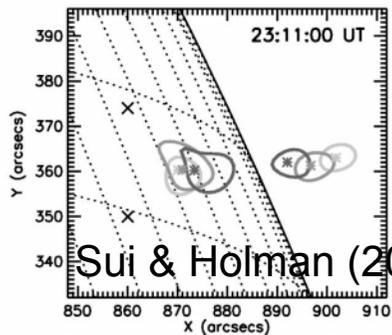
Shibata et al. (1995)



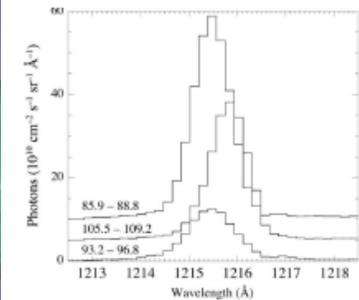
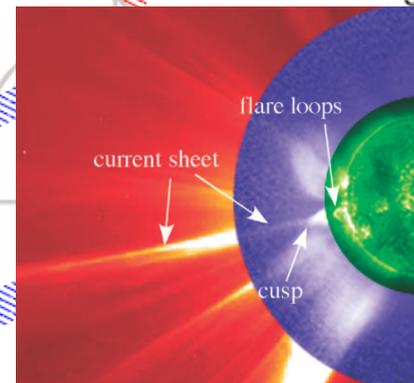
Masuda et al. (1994)



Yokoyama et al. (2000)



Sui & Holman (2003)

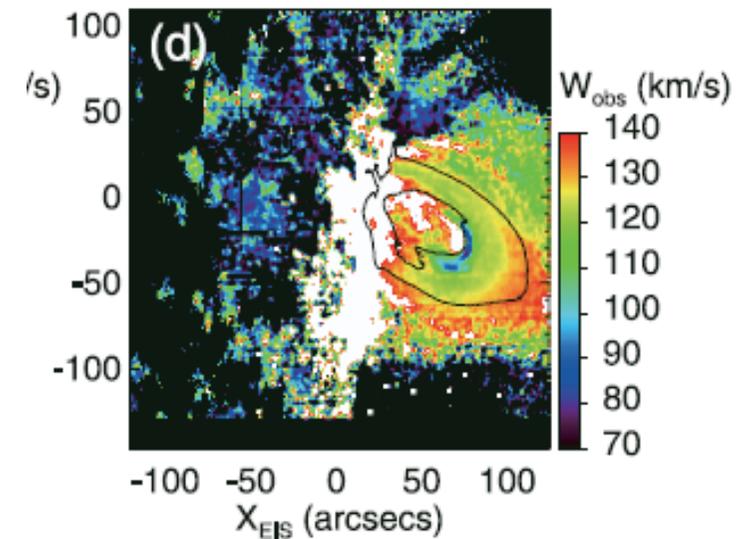
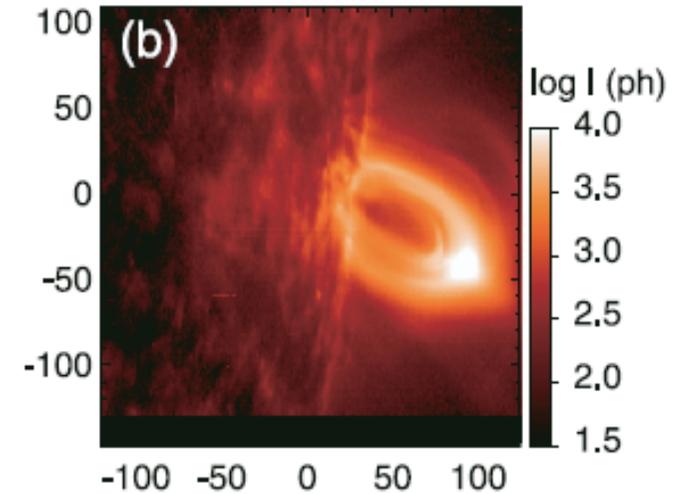
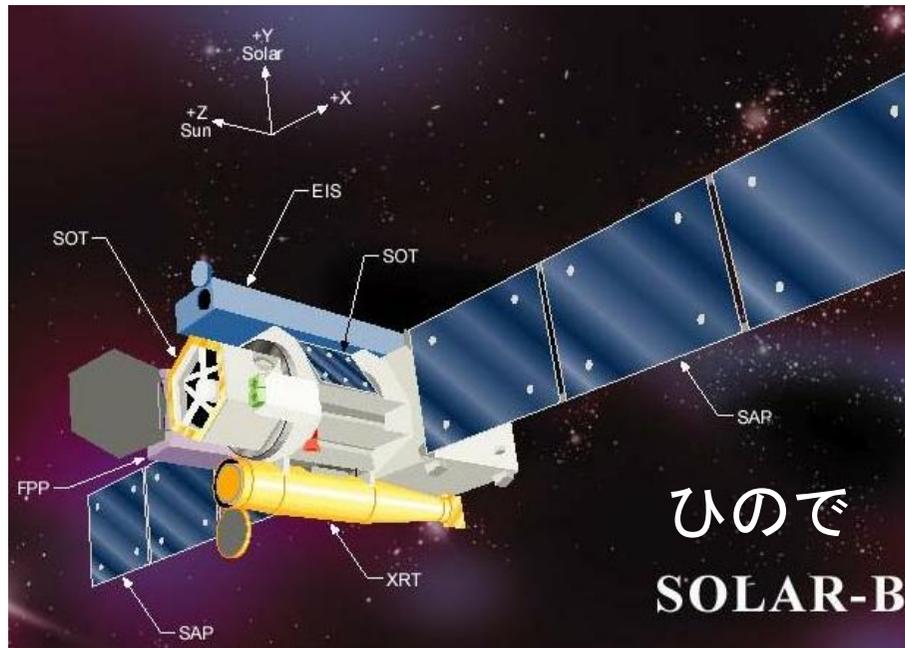


Lin, J. et al. (2005)

フレアループ頂上でのライン幅 (Doppler幅) の増大

Hara et al. (2008, PASJ)

- ✓ 太陽縁でのフレアのHinode/EIS観測
- ✓ CaXVII輝線 ($\log T_e = 6.7$) で、ループ頂上での非温度由来のライン幅増を観測



まとめ

太陽フレアは、多波長観測が基本となっている

SXR: 熱プラズマの全体像

EUV分光: プラズマダイナミクス

可視光偏光: 磁場変動

電波・ μ 波: 粒子加速

恒星フレア

統一モデルの精密化が課題

残された謎

トリガ: 磁場の精密観測とその3次元構造の把握が課題

粒子加速: 加速スケールが微小なため、理論との連携が必要

リコネクション物理: 決定的現場の観測が必要。あと大規模シミュレーション