



Project for
Solar-Terrestrial
Environment Prediction



太陽における大気加熱と爆発現象 磁気リコネクション実験場としての太陽

今田晋亮

(名古屋大学、宇宙地球環境研究所)

太陽物理学の3大課題

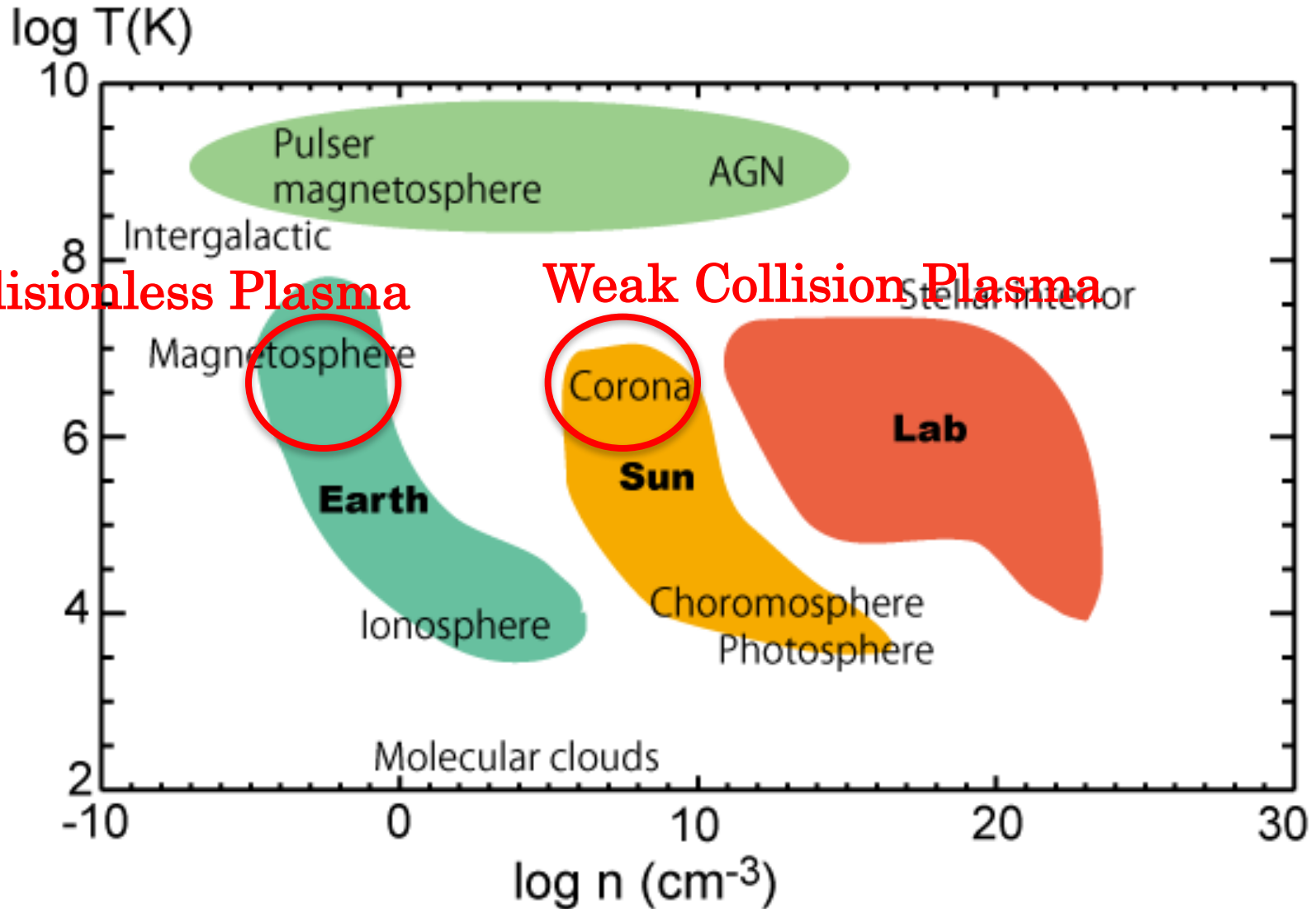
- 太陽大気加熱問題(どうして太陽の外側の大気は熱いのか?含むコロナ加熱、太陽風加速など)
- 太陽フレアに関する問題(含むフレアトリガー、粒子加速、質量放出など)
- 太陽活動長期変動に関する問題(含むダイナモ、総放射変動、マウンダー極小期など)

堀田さんのお話

物理実験場としての太陽大気

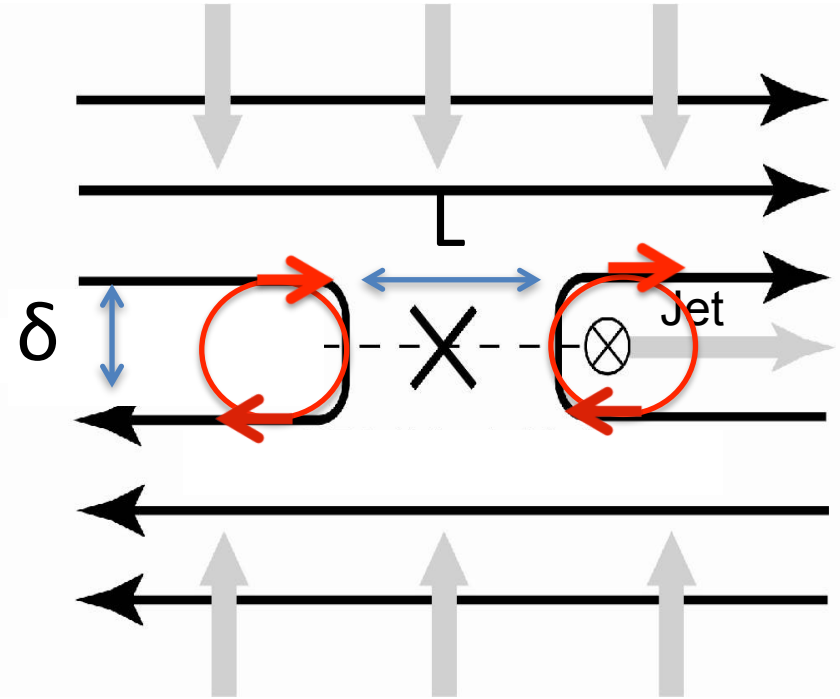
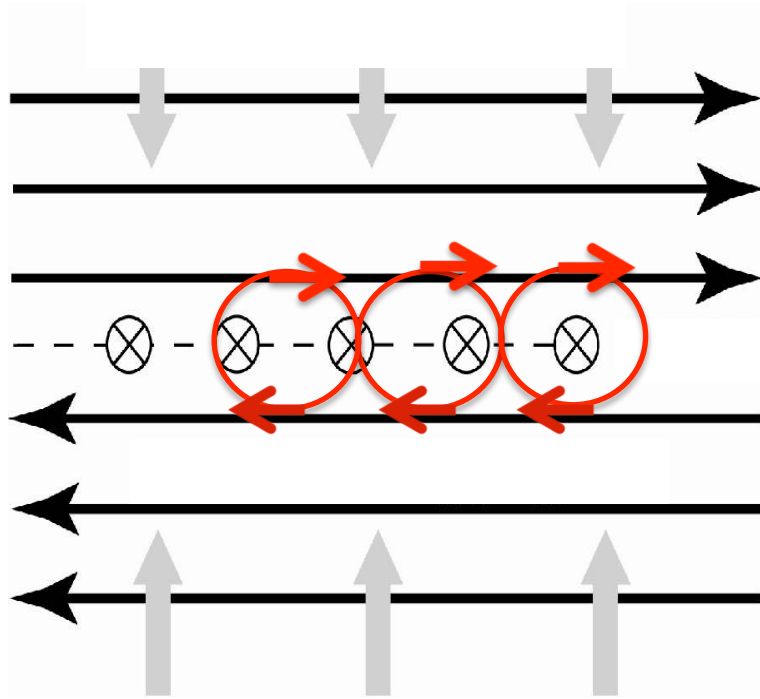
共通の物理: 磁気リコネクション

Plasmas conditions in solar corona & Earth's magnetosphere



Magnetic Reconnection

電磁流体力学



磁気圧: $B^2/8\pi$ ~ ガス圧: P ~ 動圧: ρnV^2

$V \sim B/\sqrt{4\pi \rho n}$ アルフベン速度

$$U_{in} = \frac{V_A}{\sqrt{R_m}}, \quad \frac{\delta}{L} = \frac{1}{\sqrt{R_m}}$$

磁気レイノルズ数は 10^{14} 程度

古典的な太陽での抵抗値を使うとフレアを起こすのに300万年かかる

Sweet Parker vs Petschek

名古屋大学D2の柴山さん提供



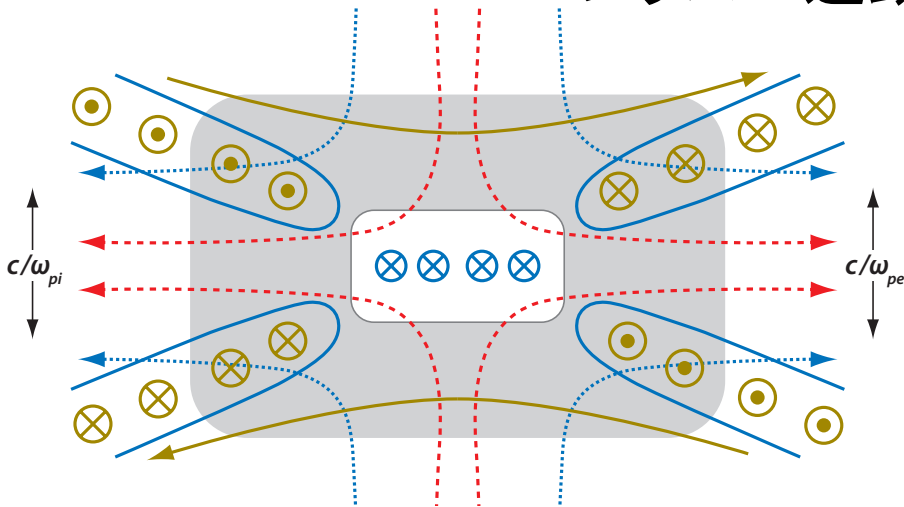
Plasmoid-Unstable Reconnection



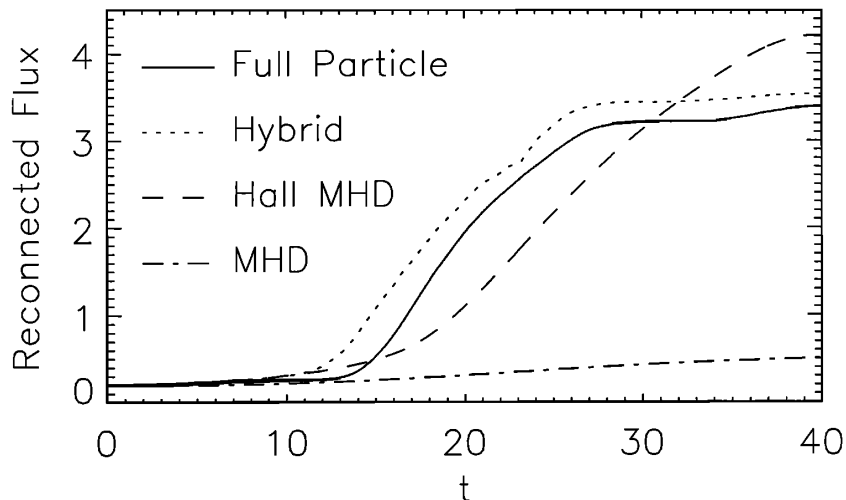
Shibayama et al. 2015
動画柴山さん提供

Collisionless Reconnection

プラズマ運動論



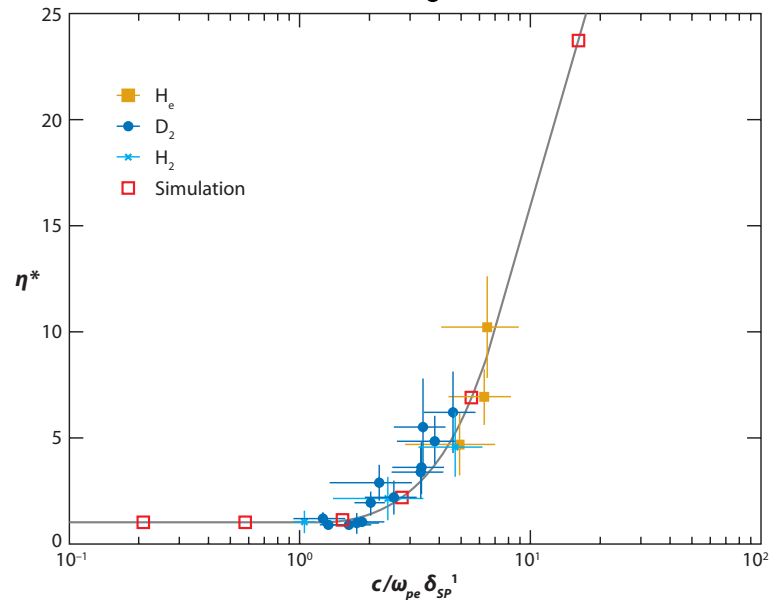
- Current sheet thickness < ion inertia length**
- \rightarrow B-field
 - \rightarrow Current
 - \rightarrow Ion flow
 - \rightarrow Electron flow
 - Ion dissipation region
 - Electron dissipation region



Collisionless (Hall) RX \rightarrow Fast RX

Birn +, 2001

Laboratory Plasma



Yamada +, 2006

Generalized Ohm's Law

$$\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \eta \mathbf{j} + \frac{m_e}{ne^2} \left[\frac{\partial \mathbf{j}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{j} \mathbf{v} + \mathbf{v} \mathbf{j}) \right] - \frac{1}{ne} \nabla \cdot \mathbf{P}_e + \frac{1}{ne} \mathbf{j} \times \mathbf{B}$$

磁場の拡散スケール

$$\frac{|\eta \mathbf{j}|}{|\mathbf{E}|} = \frac{|\frac{\eta}{\mu_0} \nabla \times \mathbf{B}|}{|\mathbf{E}|} \approx \frac{\eta}{\mu_0} \frac{B/L}{VB} = \frac{V_A}{V} \frac{\lambda_\eta}{L}$$

電子のジャイロ半径

$$\frac{|\frac{1}{ne} \nabla \cdot \mathbf{P}_e|}{|\mathbf{E}|} \approx \frac{(1/ne)(nm_e v_e^2/L)}{VB} = \frac{v_e}{V} \frac{\lambda_{Le}}{L}$$

イオン慣性長

$$\frac{|\frac{1}{ne} \mathbf{j} \times \mathbf{B}|}{|\mathbf{E}|} = \frac{|\frac{1}{\mu_0 ne} (\nabla \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}|}{|\mathbf{E}|} \approx \frac{1}{\mu_0 ne} \frac{B^2/L}{VB} = \frac{V_A}{V} \frac{\lambda_i}{L}$$

太陽フレアと磁気圏サブストーム

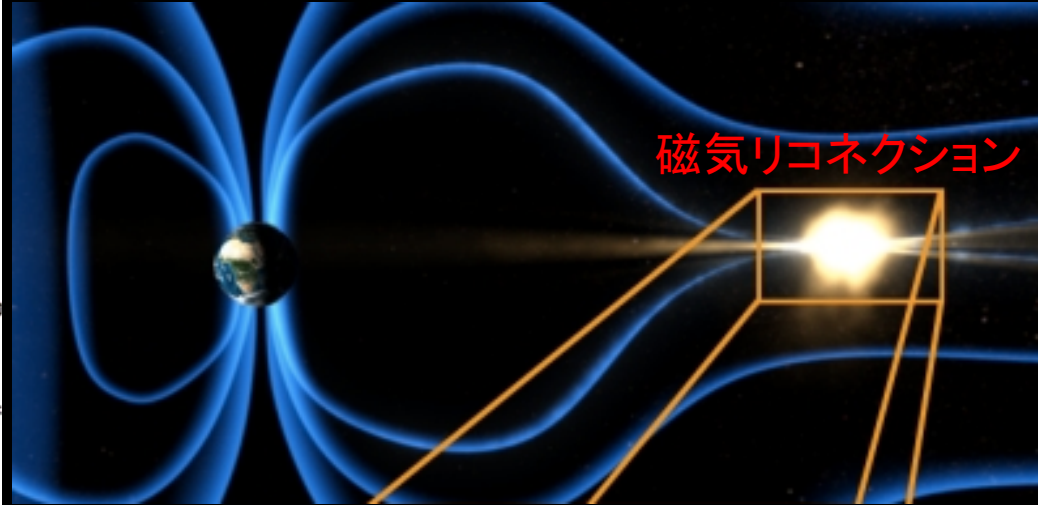
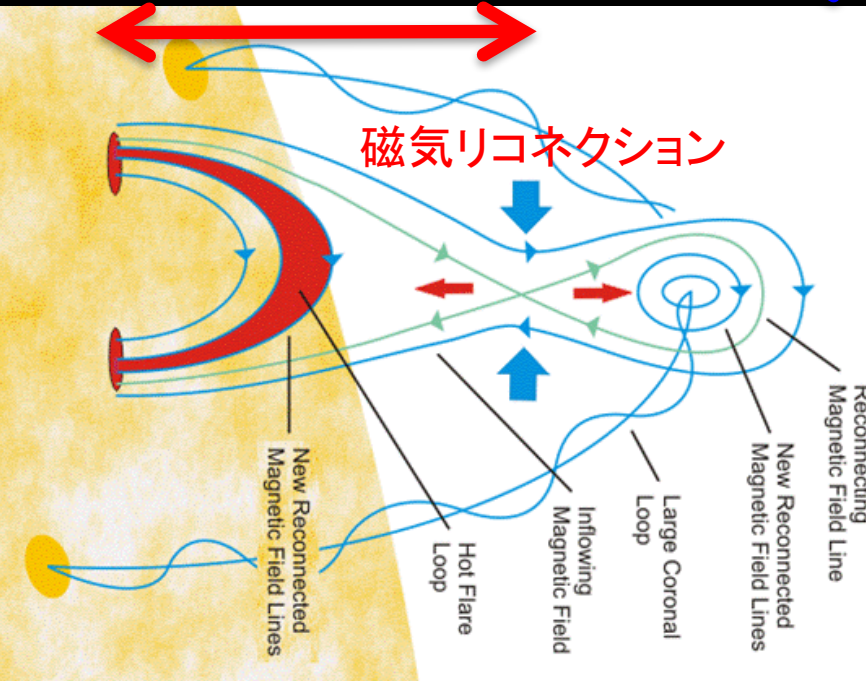
太陽フレア

典型的な空間スケール = 100 Mm

同じ

磁気圏サブストーム

典型的な空間スケール = 100 Mm



典型的な速度 = 1000 km/s

巨視的空間スケール(境界条件)

微視的空間スケール(粒子の旋回半径)

衝突スケール(クーロン衝突)

巨視的 > 衝突 >> 微視的

同じ

典型的な速度 = 1000 km/s

→ S: 10^5 km

E: 10^5 km 同じ

→ S: 10^{-3} km

E: 10^3 km 6桁違う

→ S: 10^2 km

E: 10^8 km 6桁違う

衝突 >> 巨視的 > 微視的

違い

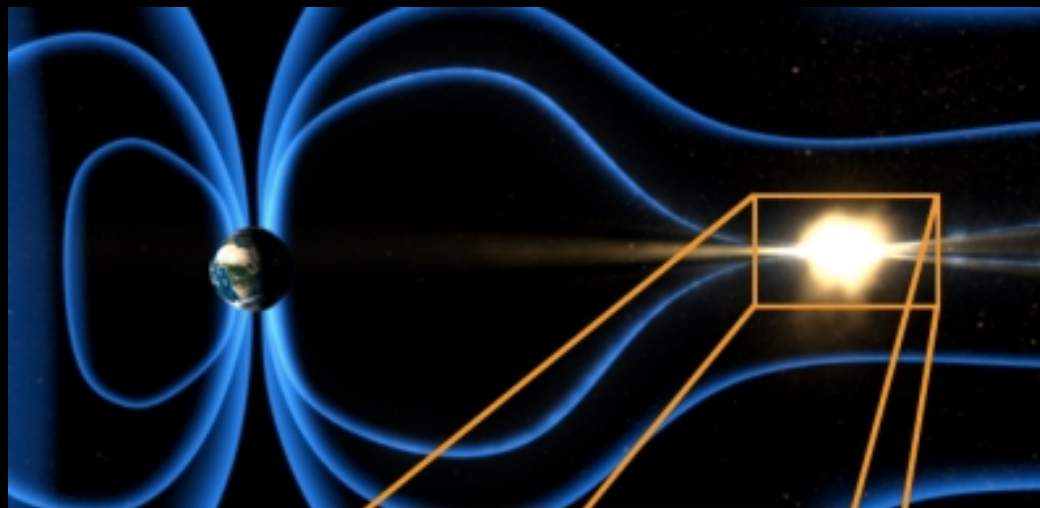
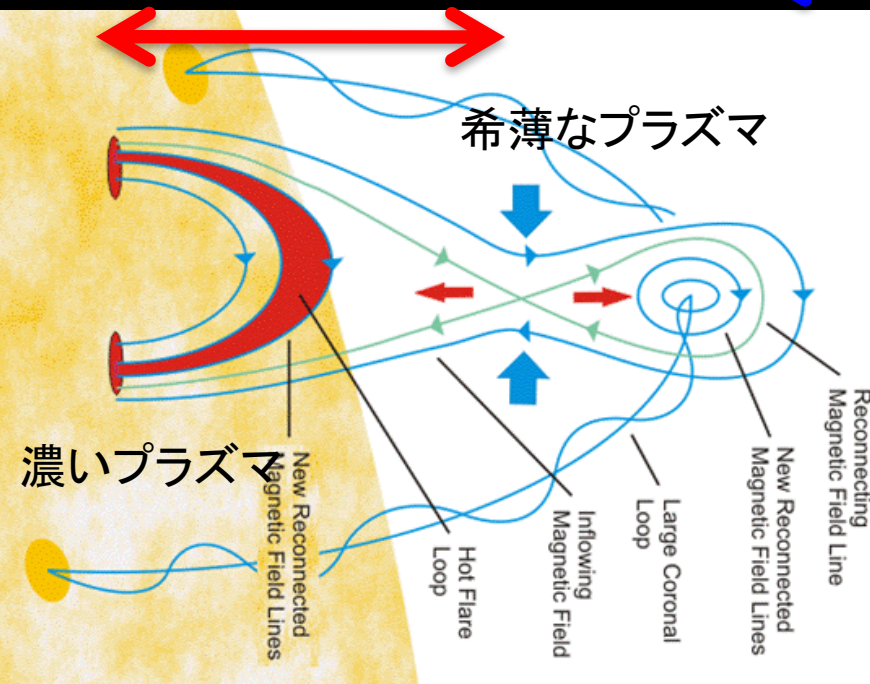
太陽フレア

典型的な空間スケール = 100 Mm

同じ

サブストーム

典型的な空間スケール = 100 Mm



巨視的 > 衝突 >> 微視的

衝突 >> 巨視的 > 微視的

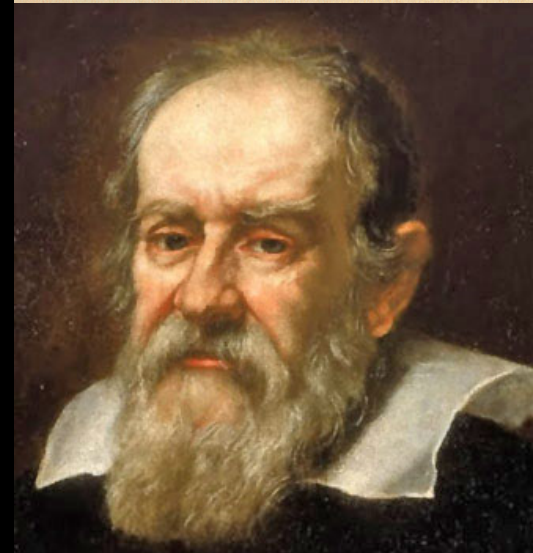
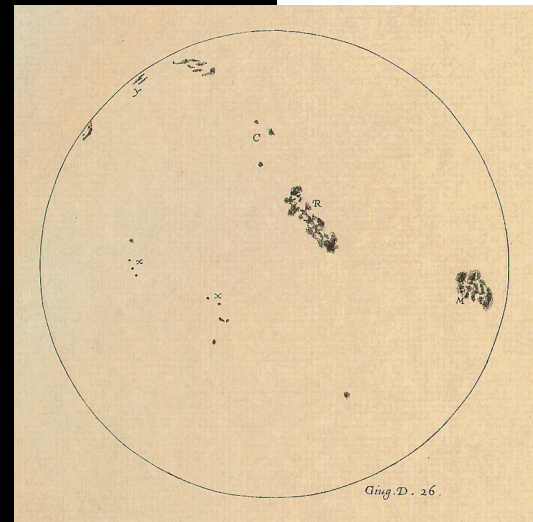
衝突—マクロカップリング

マイクロ-マクロカップリング

太陽大気構造

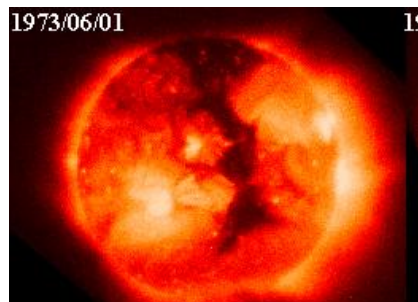


国立天文台
岡本文典氏提供

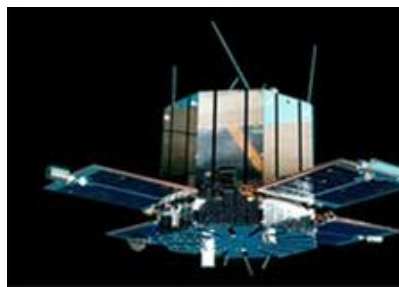


ガリレオ・ガリレイ 1564~1642

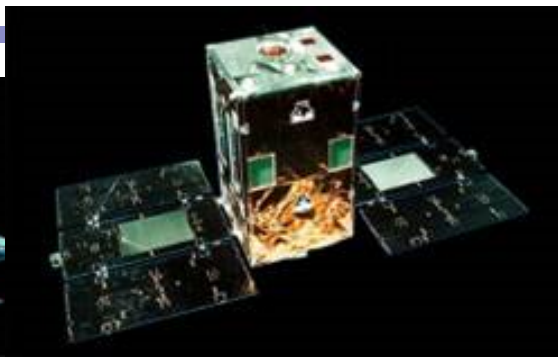
現代の太陽観測衛星



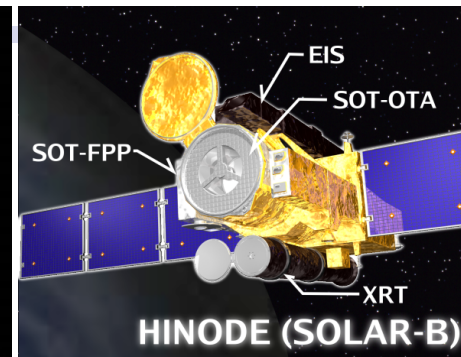
1973/06/01



ひのと 日 1981~1991



ようこう 日 1991~2004



ひので 日 2006~



スカイラブ 米 1973~1979



SMM(Solar Maximum Mission) 米 1980~1989



SOHO 米欧 1995~



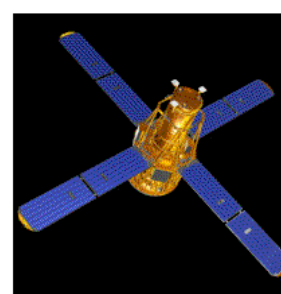
SDO 米 2010~

衛星観測のメリット

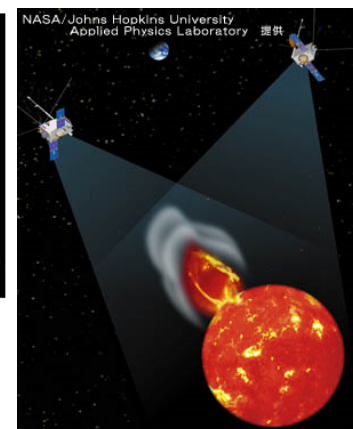
- 可視光以外(X線、紫外線など)による観測
- 地球に制約されない観測
- 大気の揺らぎの無い観測



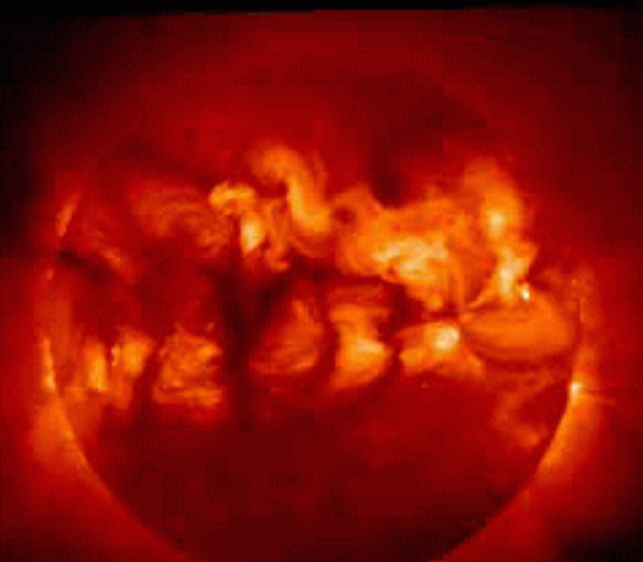
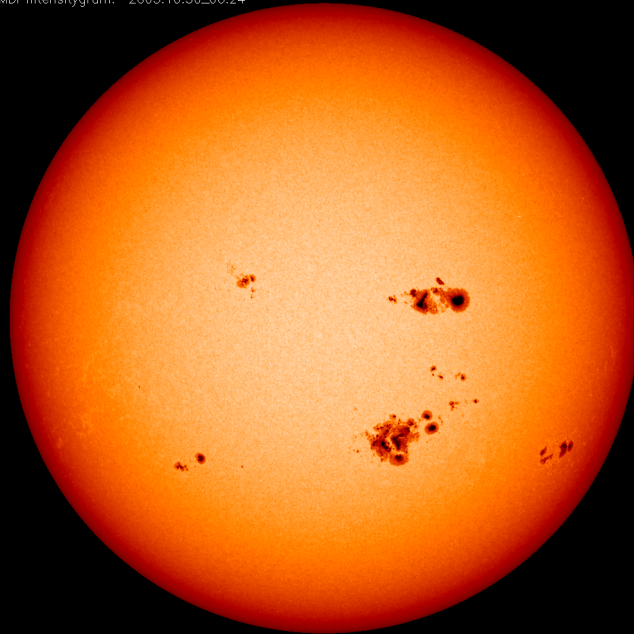
TRACE 米 1998~



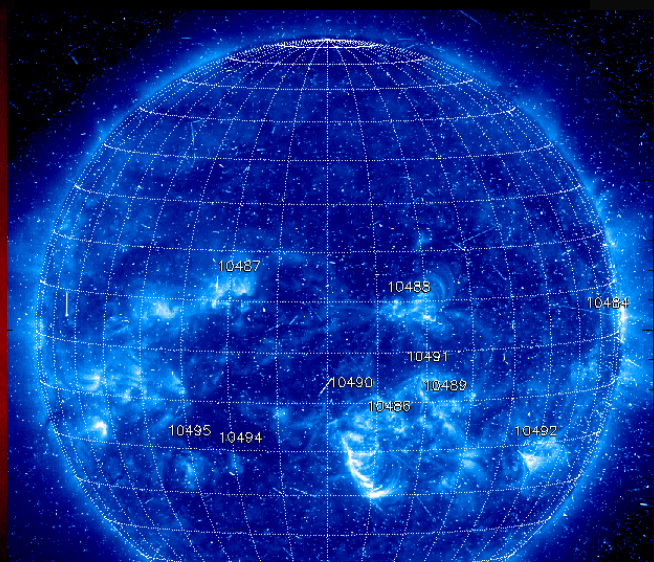
RHESSI 米 2002~



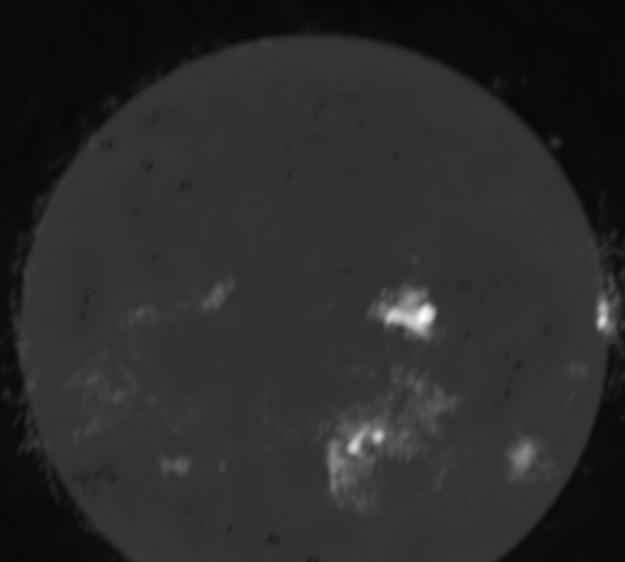
STEREO 米 2006~



X線 (0.2~20nm)



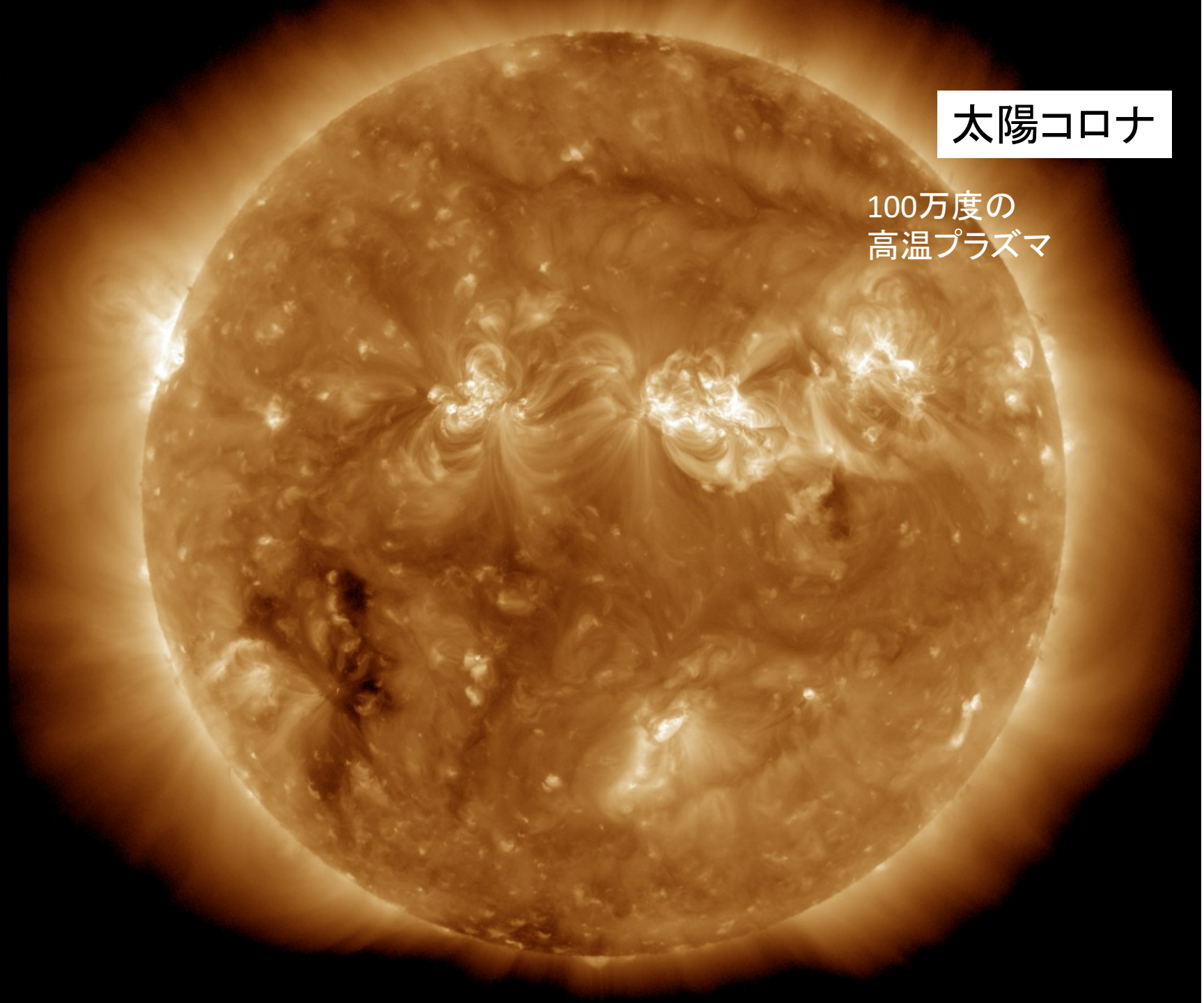
極端紫外線 (10~20nm)



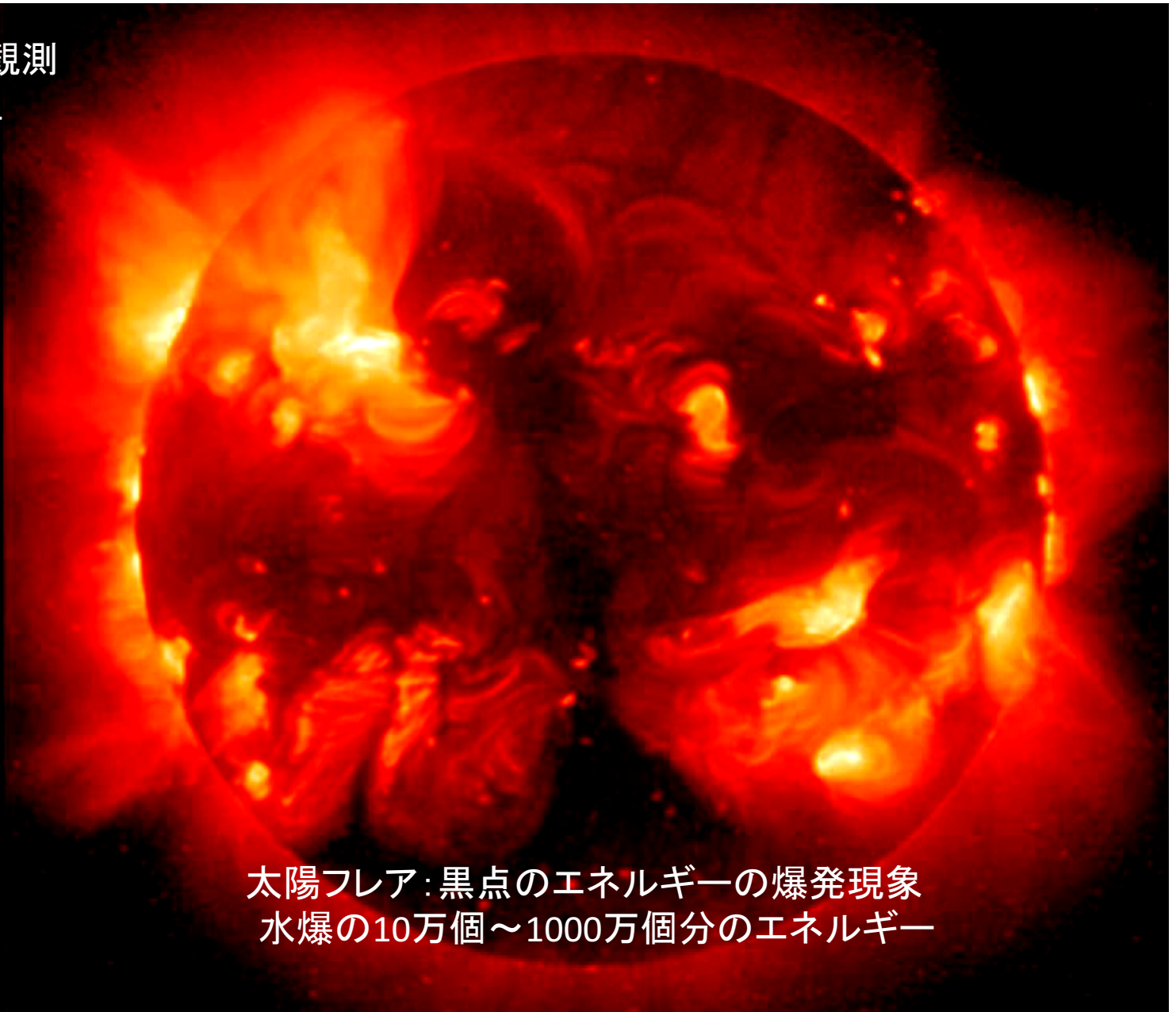
電波 (1mm)

太陽コロナ

100万度の
高温プラズマ



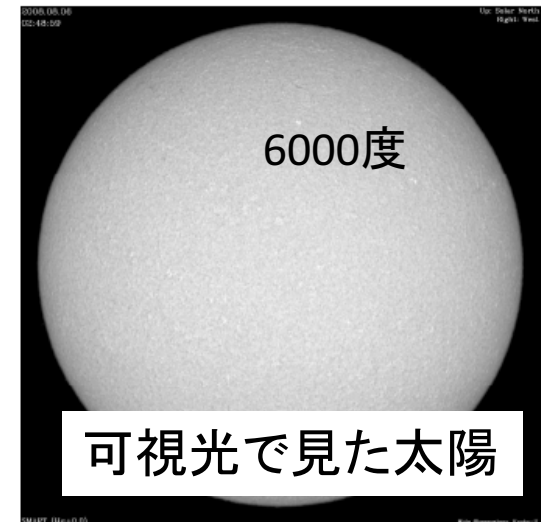
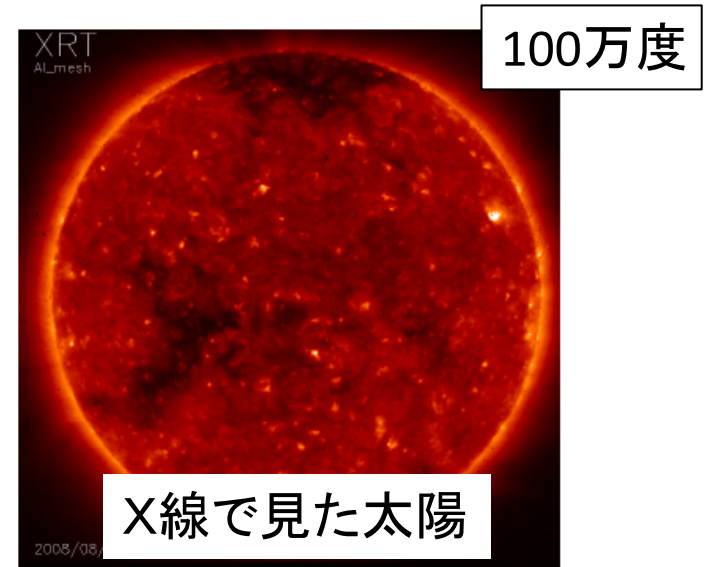
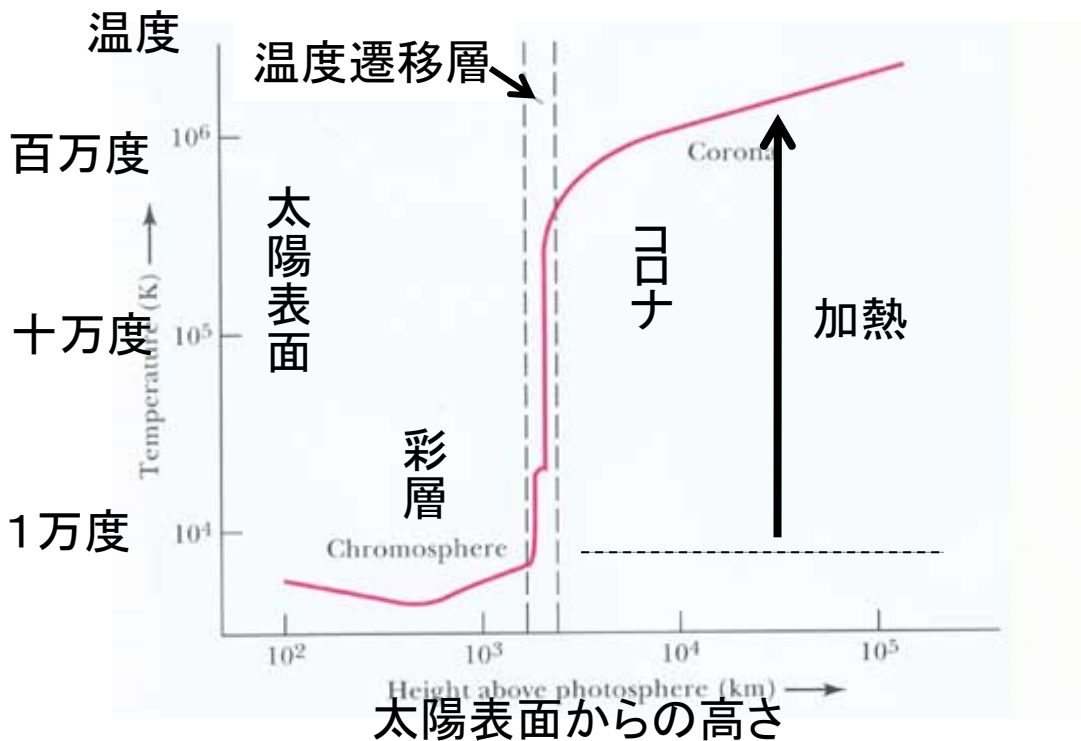
太陽のX線観測
ようこう衛星



太陽フレア: 黒点のエネルギーの爆発現象
水爆の10万個～1000万個分のエネルギー

太陽コロナの謎

- 100万度のプラズマ

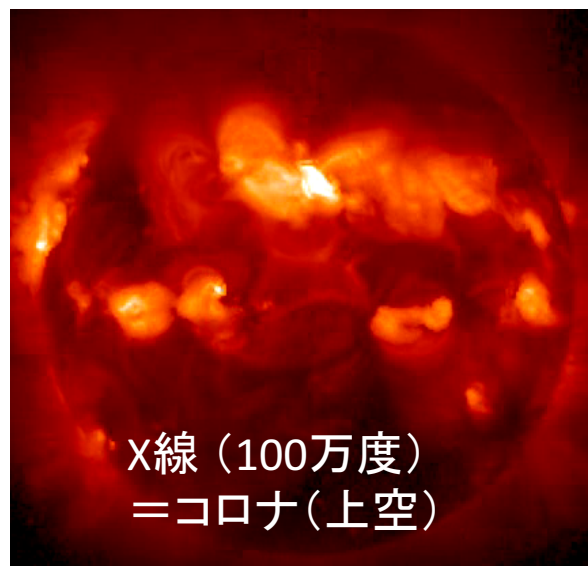
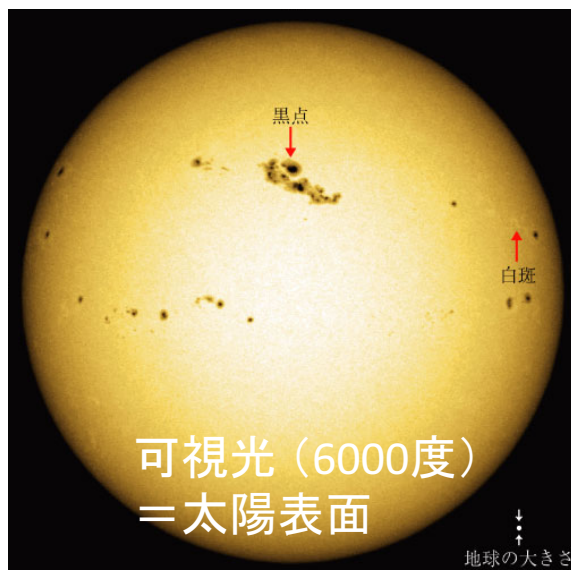


コロナ加熱問題

- なぜコロナは熱いか？

太陽表面は 6,000度であるのに対して上空のコロナは 100万度もある

どうやって加熱しているのか？

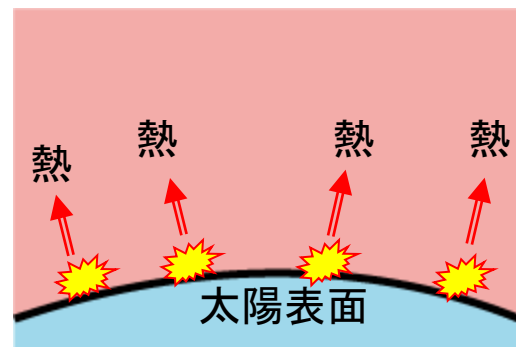


コロナ加熱問題の解明

- 磁場の役割

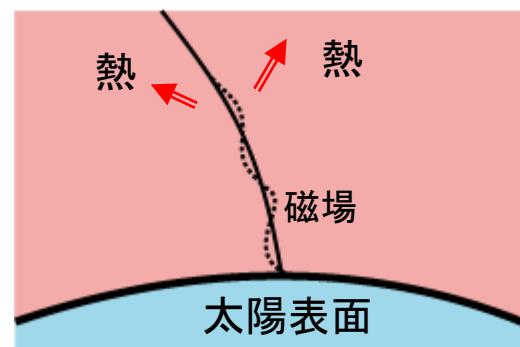
- ナノフレア加熱

- 見えなくらい小さな爆発がたくさんある
 - エネルギー源として十分にあるか？



- 波動加熱

- 磁場を揺すって、熱に換える
 - どうやって波を熱に換えるのか
 - 観測されている波は十分にあるのか？

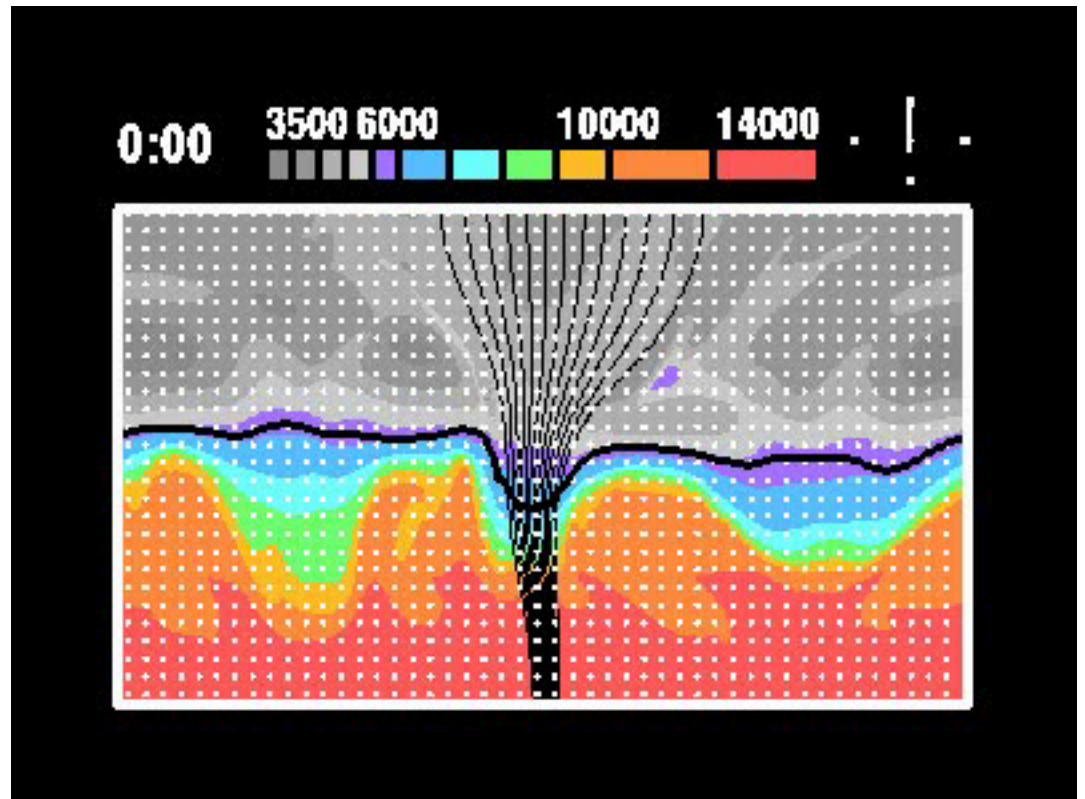
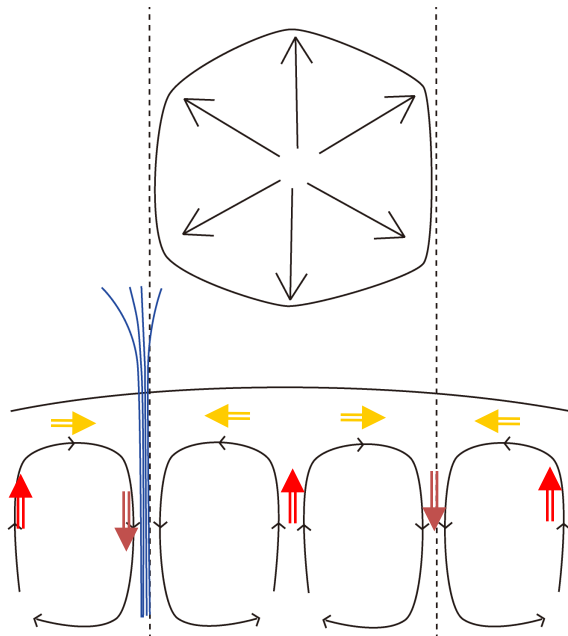


波によるコロナ加熱

グラニュールにより揺らされる？

波動発生→コロナ加熱？

アルフベン波が重要？



エネルギーの定量的評価

光球からのエネルギーフラックス (erg/cm²/s)

熱エネルギー	運動エネルギー
~10 ¹⁰	~10 ⁹

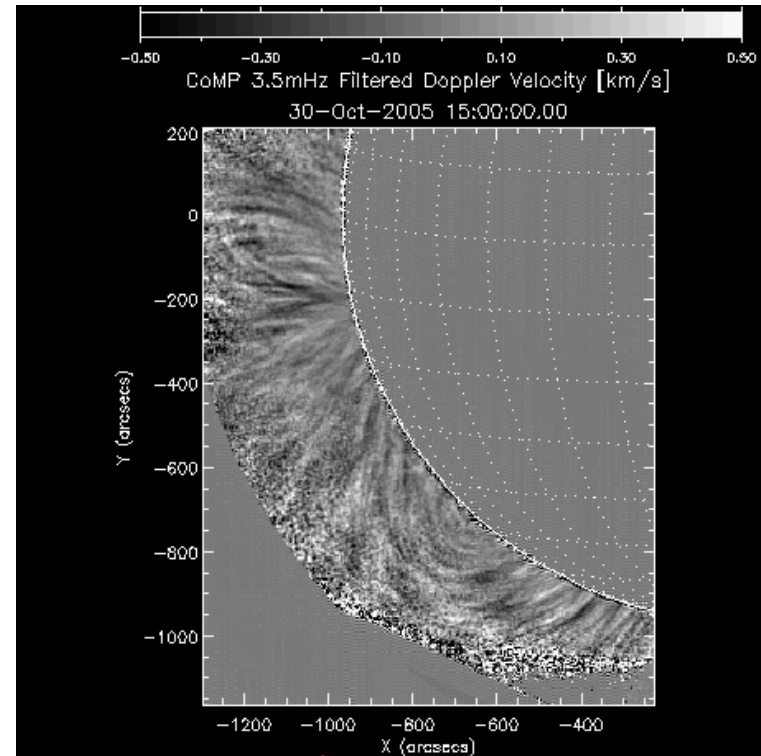
0.01~1%

コロナ加熱に必要なエネルギーフラックス (erg/cm²/s)

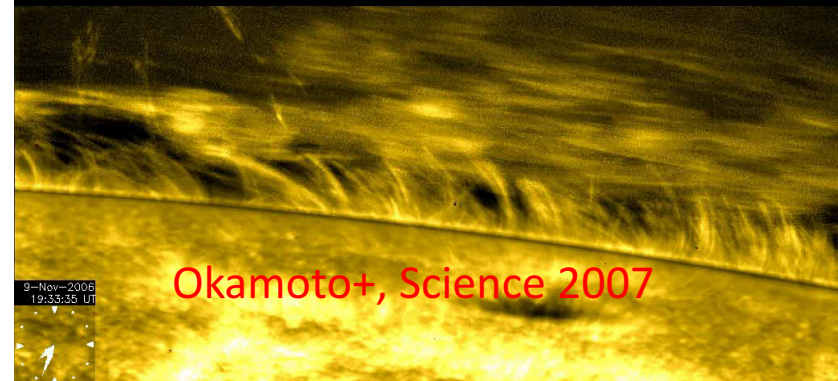
活動領域	静穏領域	コロナホール
~7	10 ⁵	10 ⁵

Withbroe & Noyes, 1977

波のエネルギーを見積もると活動領域を加熱するには不十分。
 時間分解能の問題でイメージング観測のみ
 地上観測は空間分解能が足りないせいかな？



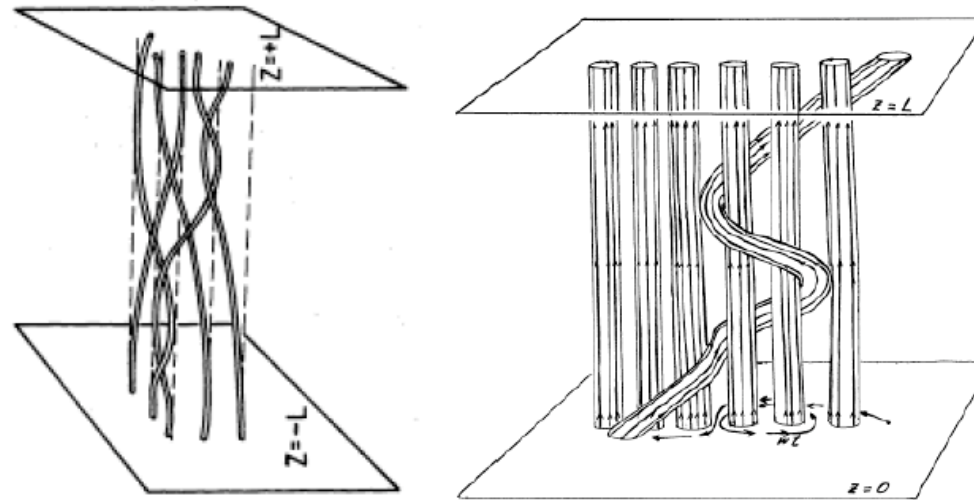
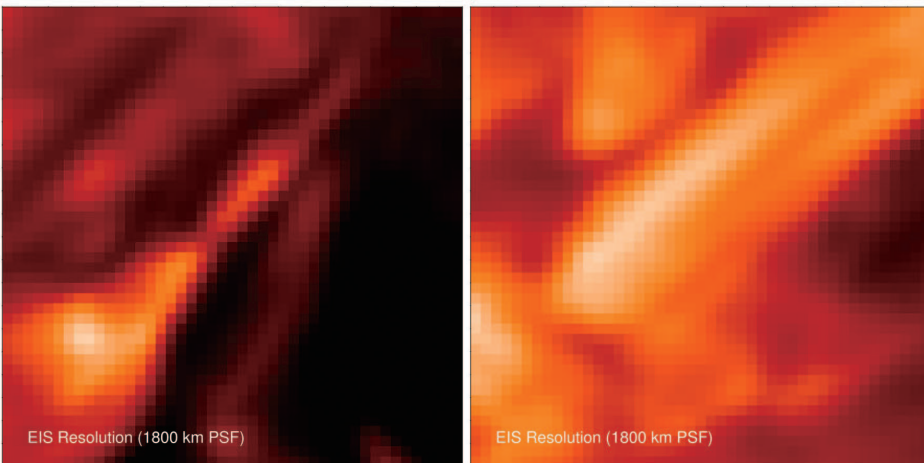
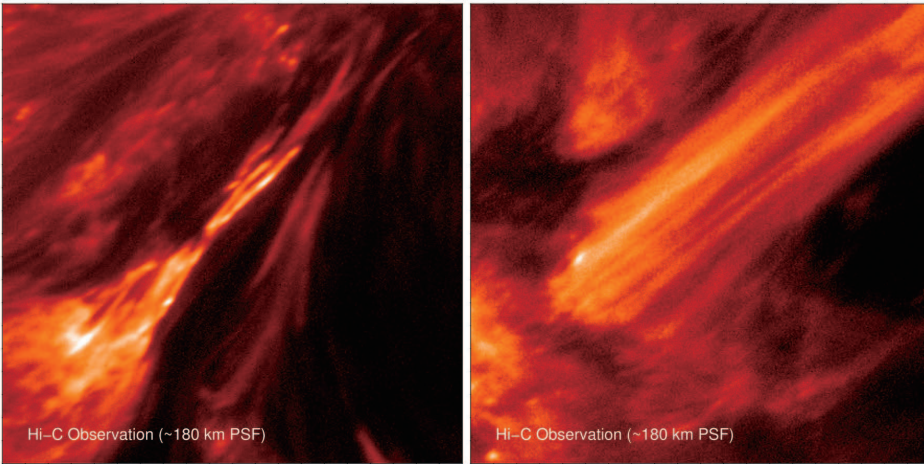
Tomczyk+, Science 2007



Okamoto+, Science 2007

ナノフレア

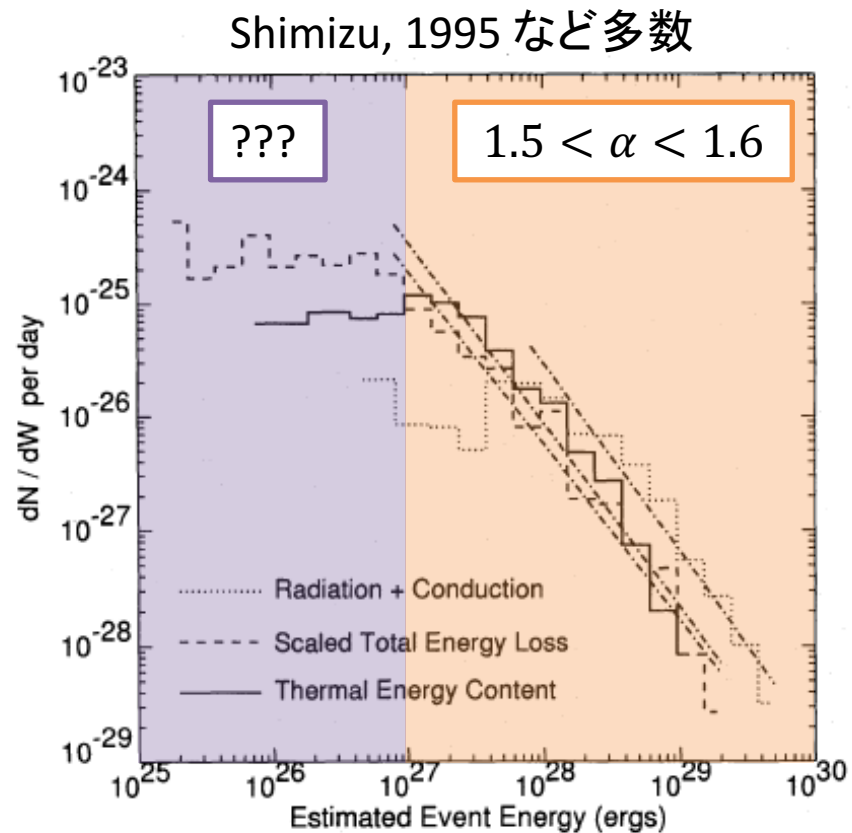
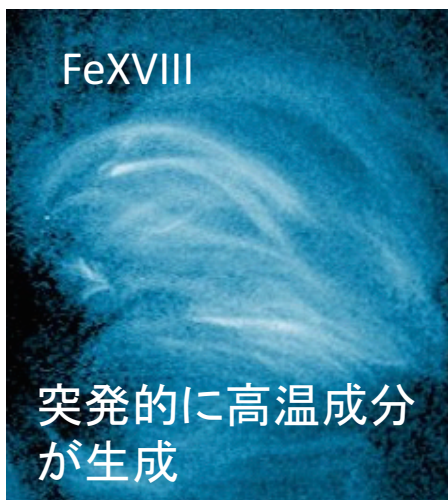
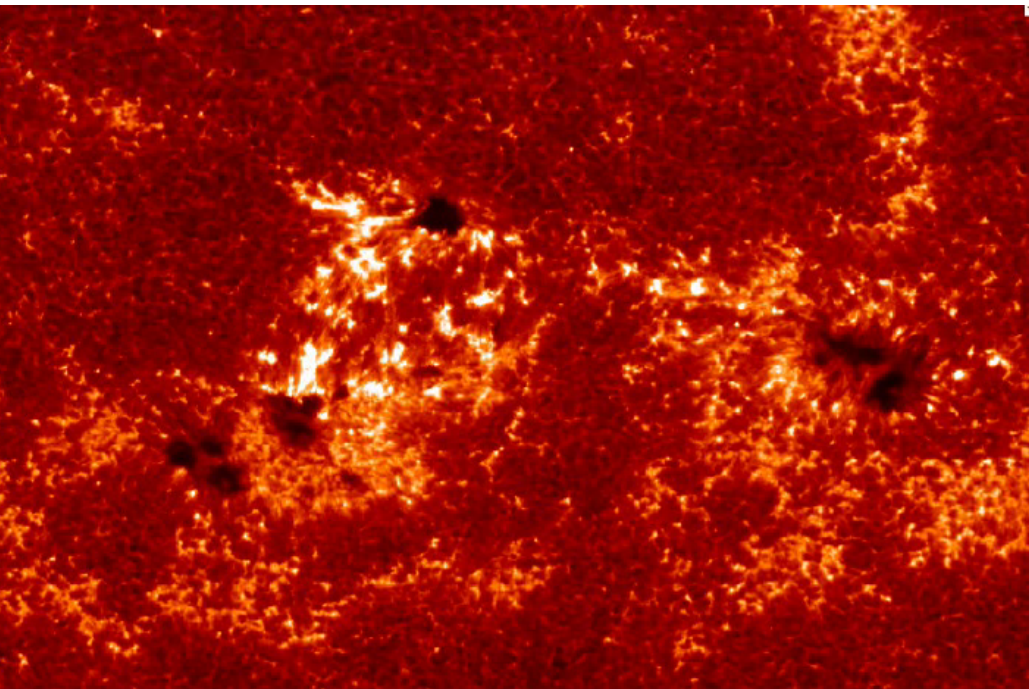
Hi-Cロケット実験の解像度 $\sim 200\text{km}$



磁気リコネクション
Braiding Structure

ひのでEISの解像度 $\sim 2000\text{km}$

ナノフレア定量的な解析



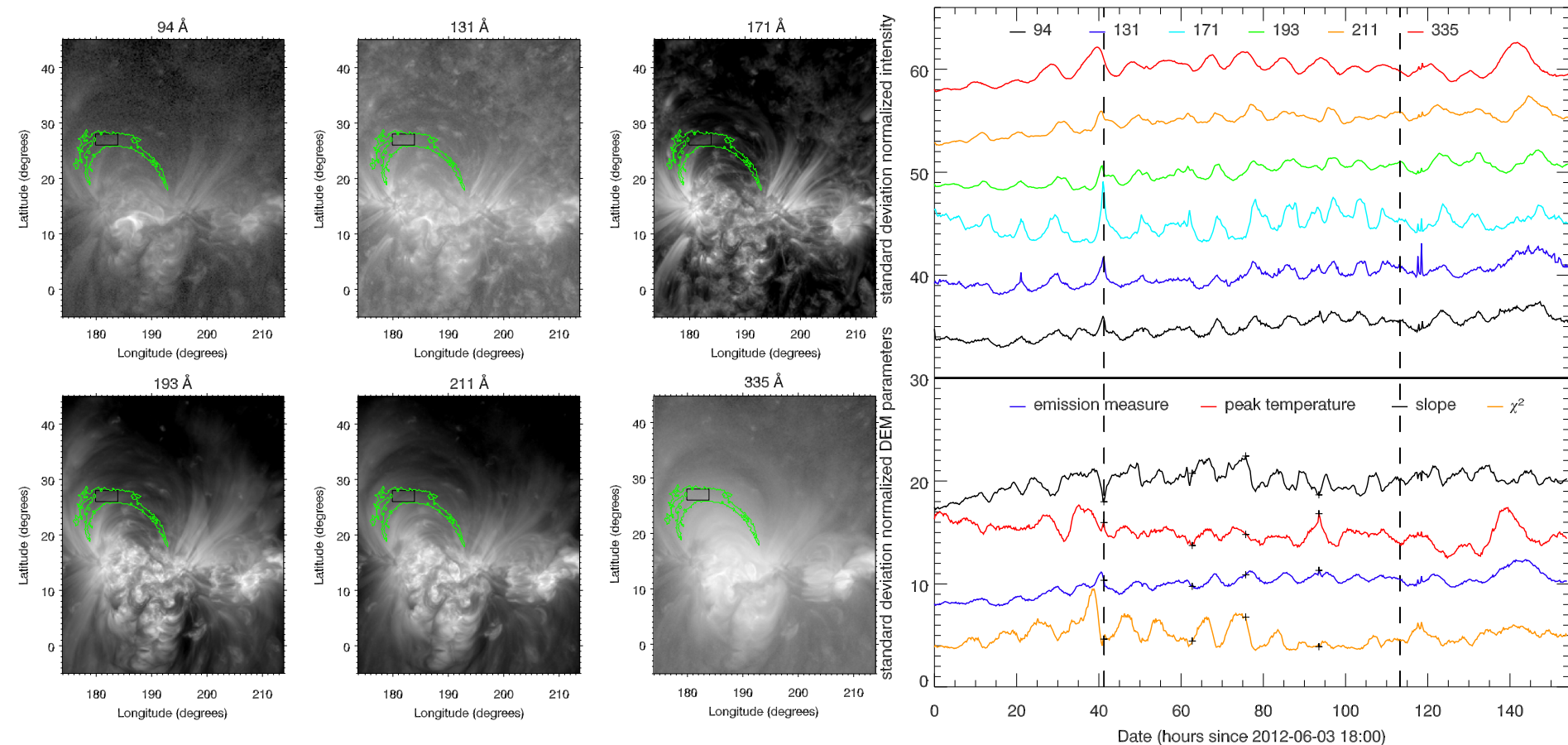
10^{23}

nanoflare

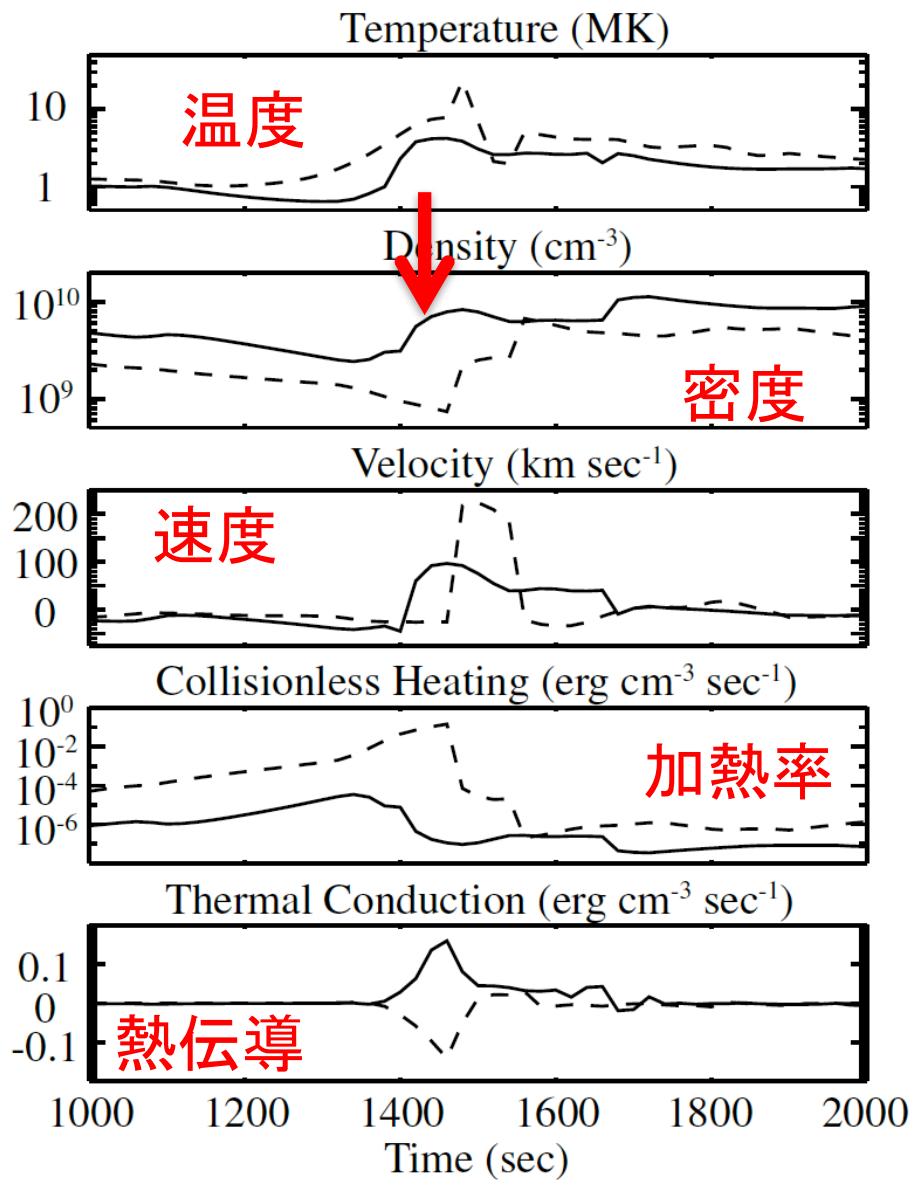
microflare

Long period intensity oscillation

Froment+ 2015



何が起きているか？

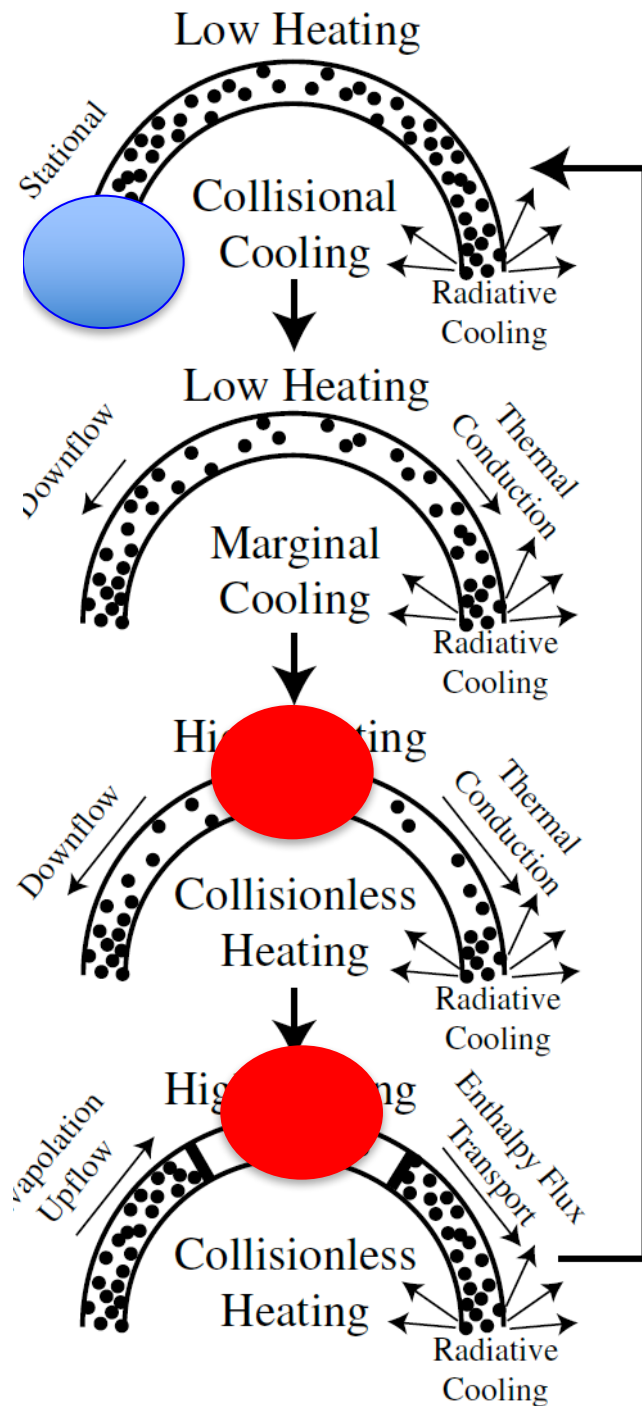


輻射冷却

冷却落下
密度低下

加熱オン
圧力勾配

彩層蒸発
密度上昇
加熱オフ



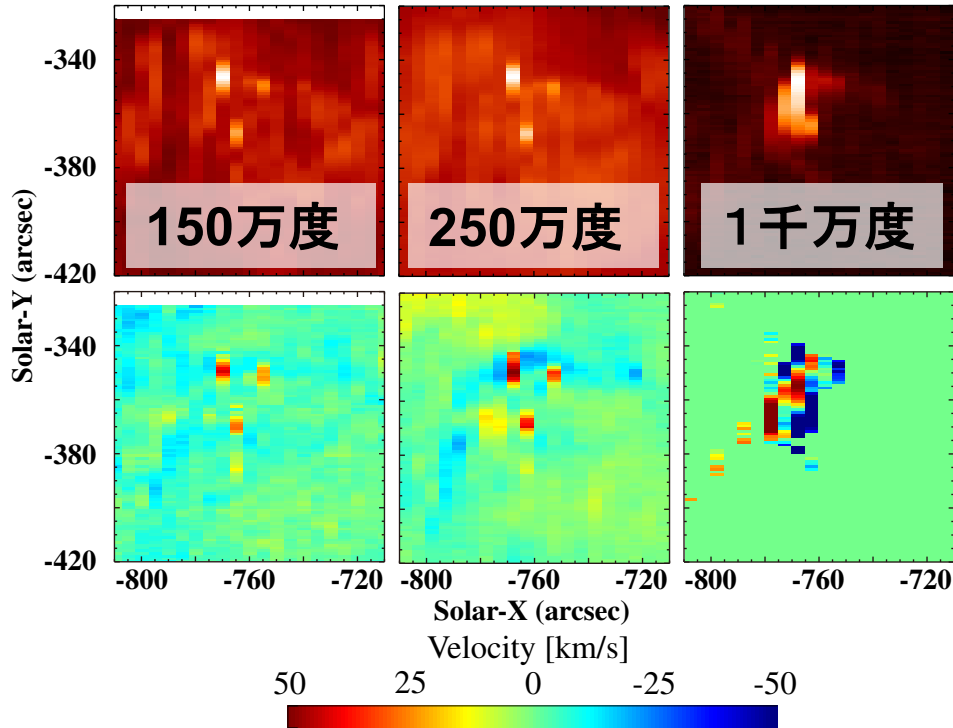
彩層蒸発流

15:28:08 6 Nov 2010

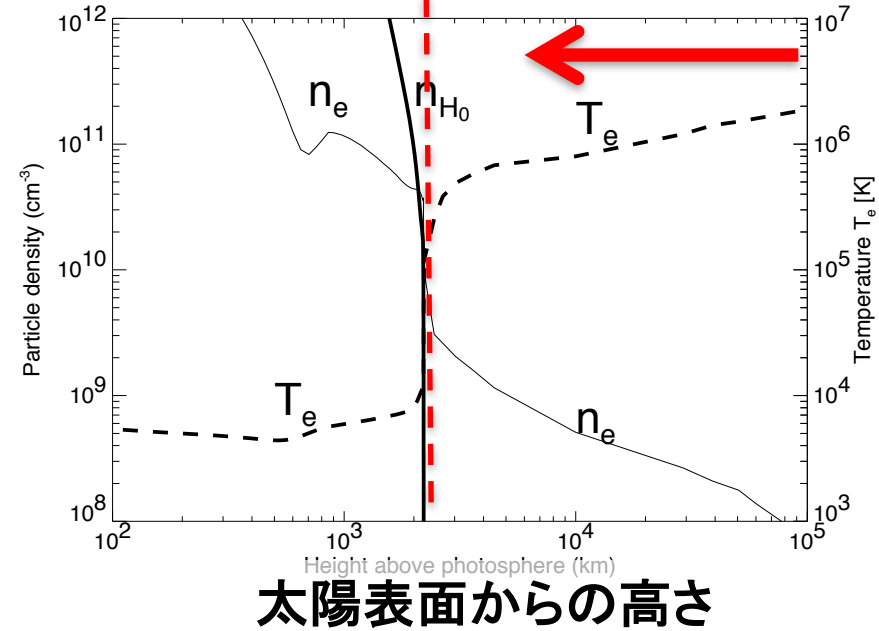
Fe II 192.39Å

Fe XV 284.16Å

Fe XXIII 263.77Å



密度・温度勾配
Thermal conduction



1D Hydrodynamic Calculation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho V_x) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho V_x) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho V_x^2 + p) = -\rho g_{\parallel},$$

gravity

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{\gamma - 1} + \frac{1}{2} \rho V_x^2 \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} p + \frac{1}{2} \rho V_x^2 \right) V_x - \kappa_{\parallel} \frac{\partial T}{\partial x} \right]$$

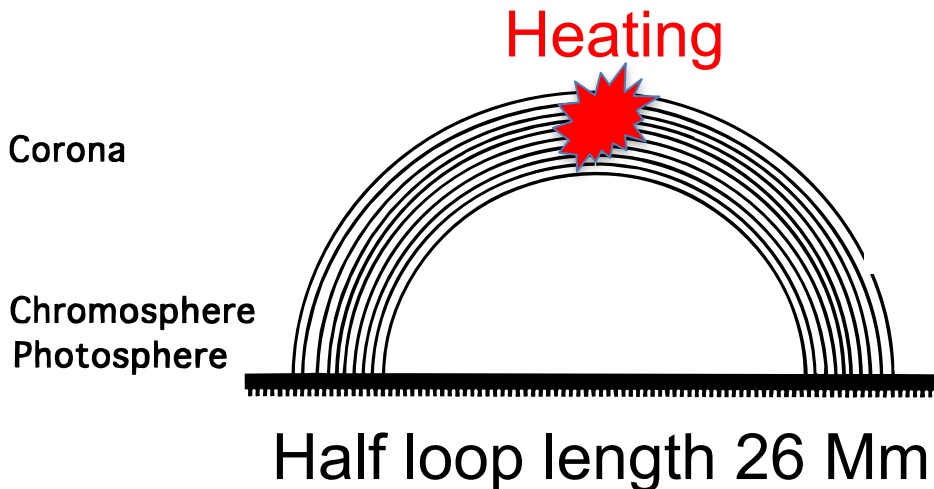
熱伝導係数

Case1: Spitzer value

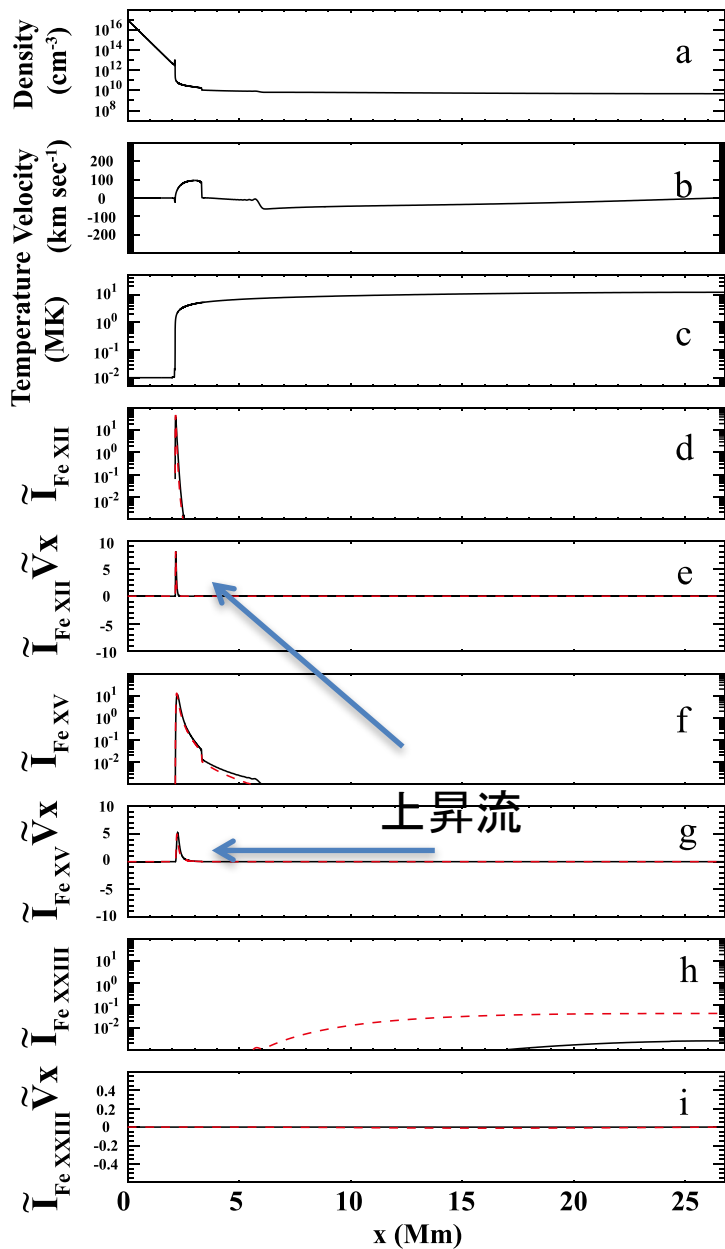
Case2: **0.1 * Spitzer value**

$$= -\rho g_{\parallel} V_x + H - R,$$

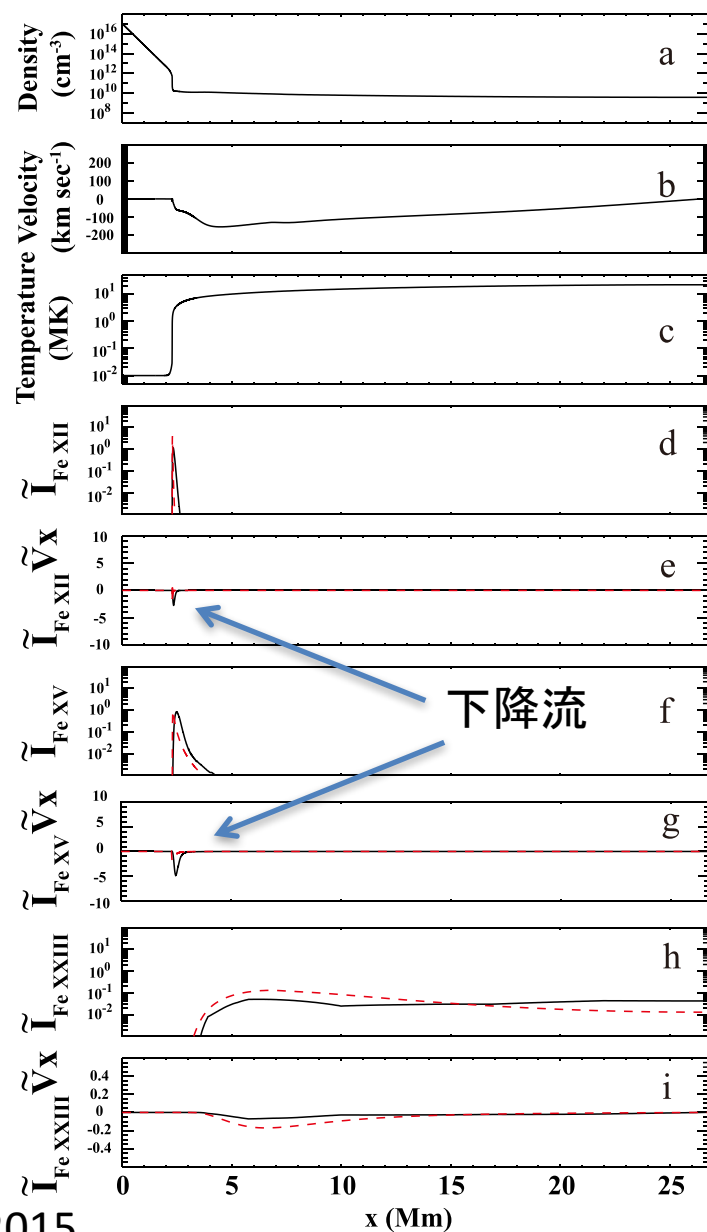
Heating Radiative cooling



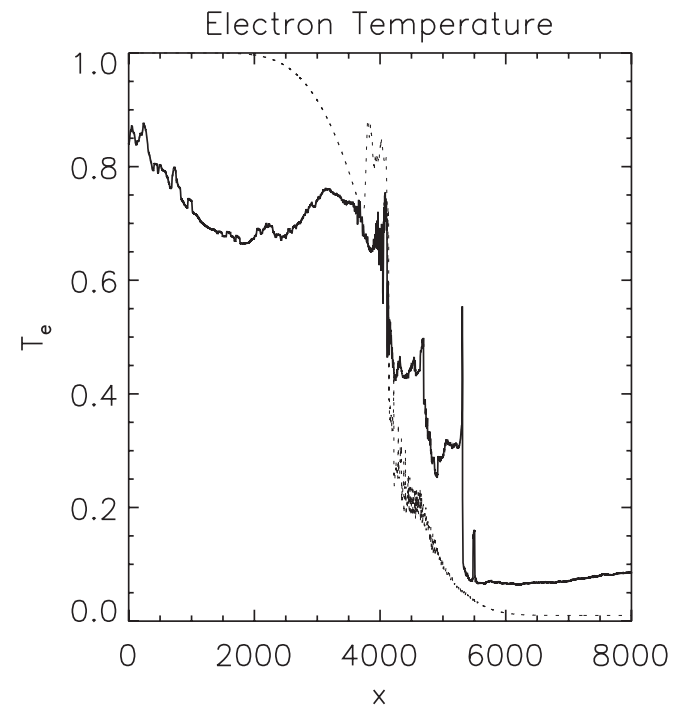
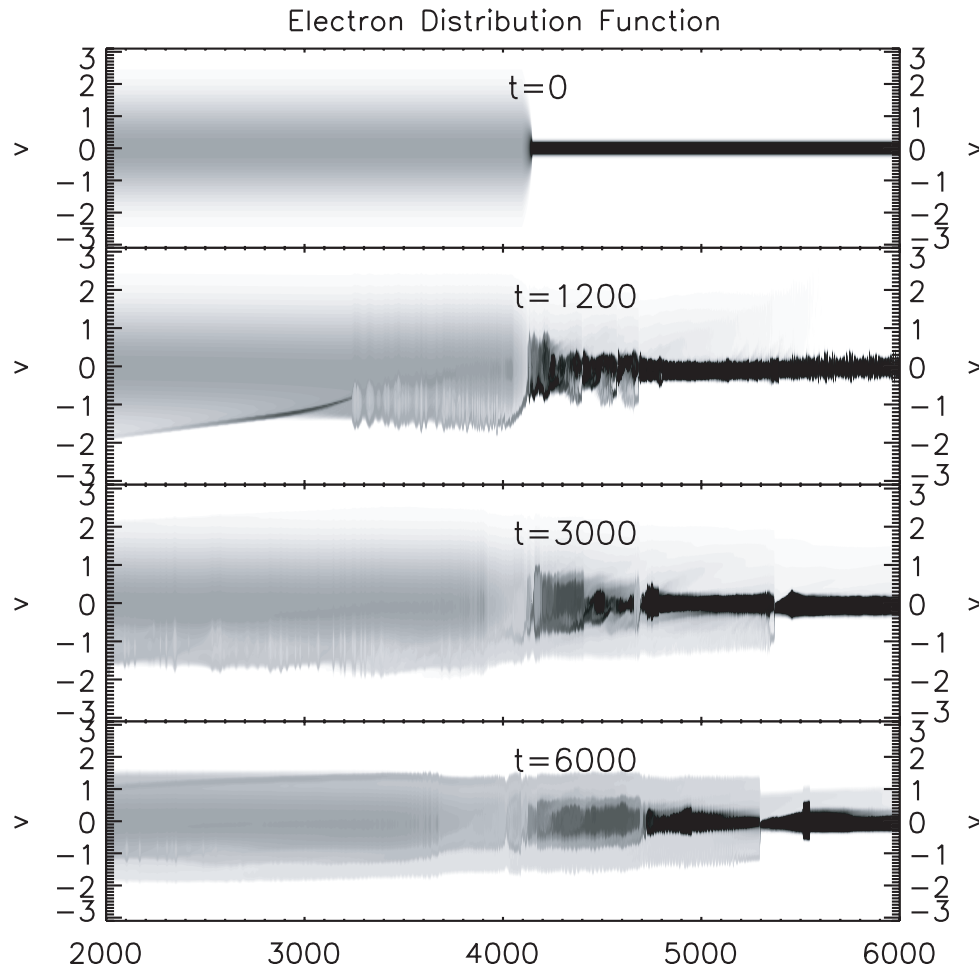
熱伝導 Dominant



Enthalpy Flux Dominant



1次元静電Vlasov計算



熱伝導フロント速度～音速程度

ペッチェック構造での熱伝導: オーダー評価



- ペッチェックでのリコネクションレート ~ 0.01
- ショックの上下流での磁場比 $B1/B0 \sim 0.01$
- 衝撃波の厚みはメートルオーダー(?) 無視
- 電子衝突時間 4秒 @ $T=40MK$ 、 $N=10^9/cc$
- 4秒程度で第一断熱不変量は保存している
- 上流に逃げれるロスコーン角は約5度、割合にして全体の0.5%
- ざっくりと、4秒で0.5%なので、800秒程度のタイムスケール? \gg Alfvén time

イオンのみ加熱されている？

- 熱伝導は電子によるもの
- イオンのみ加熱されているとすると熱伝導の効率は下がる
- イオンと電子の温度緩和時間 $>$ イオンの移流の時間スケール

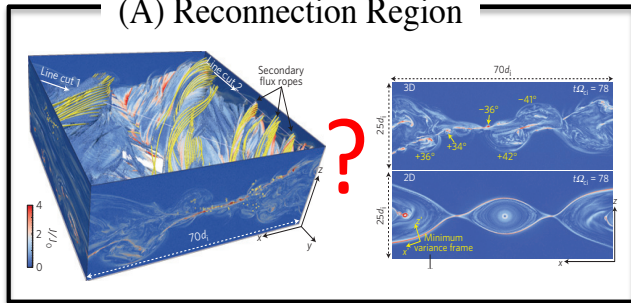
イオン温度の測定できるが、時間分解能が足りない

太陽フレア

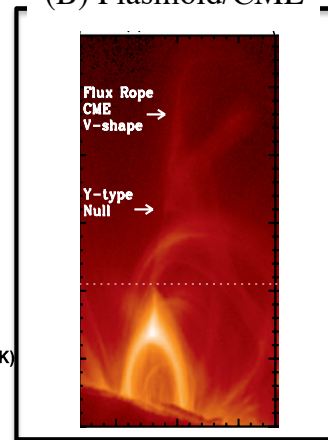
フレア観測：リコネクションの大局的構造

Yokoyama&Shibata2001

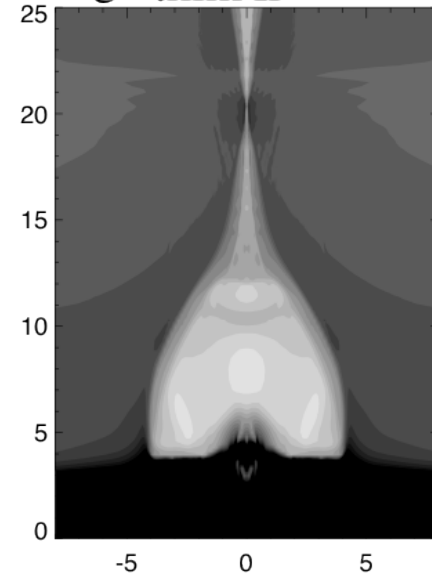
(A) Reconnection Region



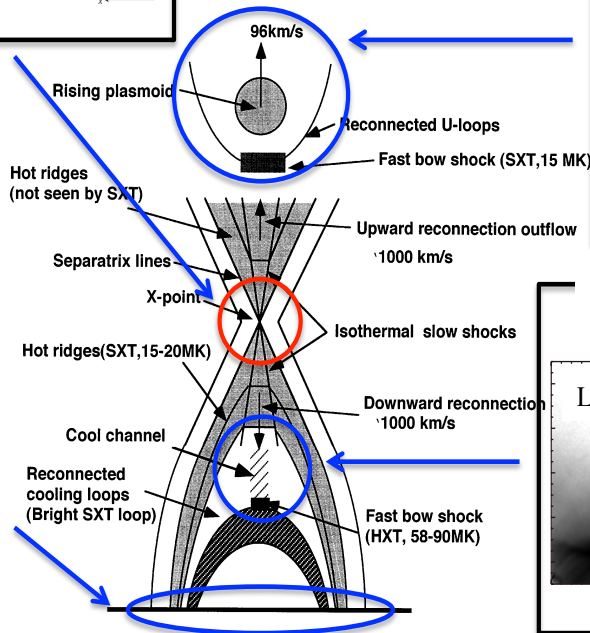
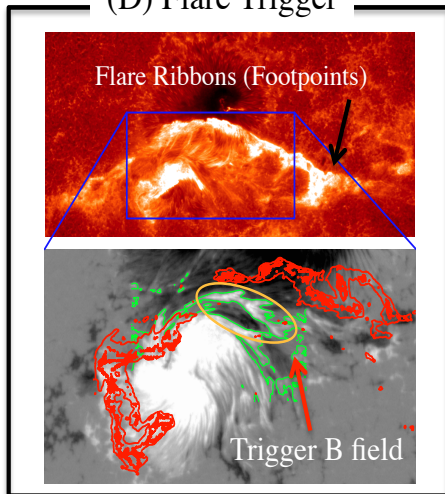
(B) Plasmoid/CME



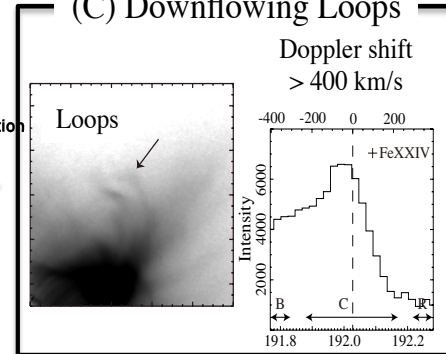
$\log I_{\text{thin Al}}$



(D) Flare Trigger



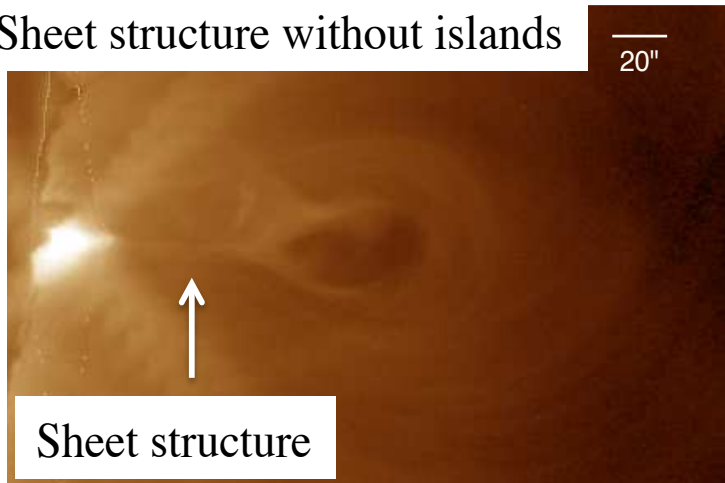
(C) Downflowing Loops



Sweet-Parker .vs. Petschek RX

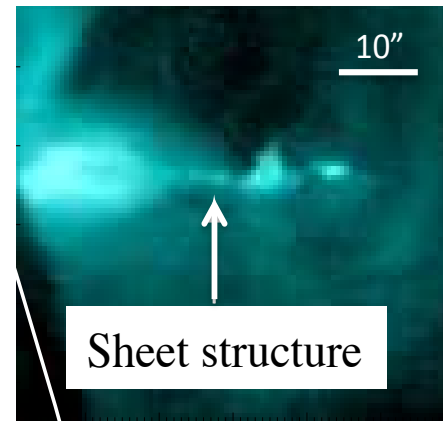
Warren et al., 2018

(A) Sheet structure without islands

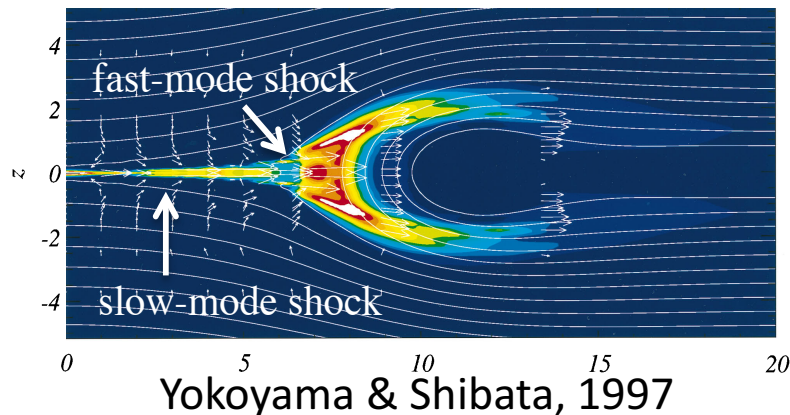


Takasao et al., 2012

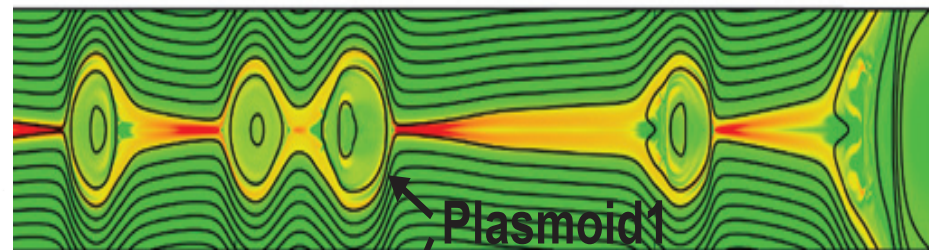
(B) Sheet structure with islands



(C) Petschek Reconnection



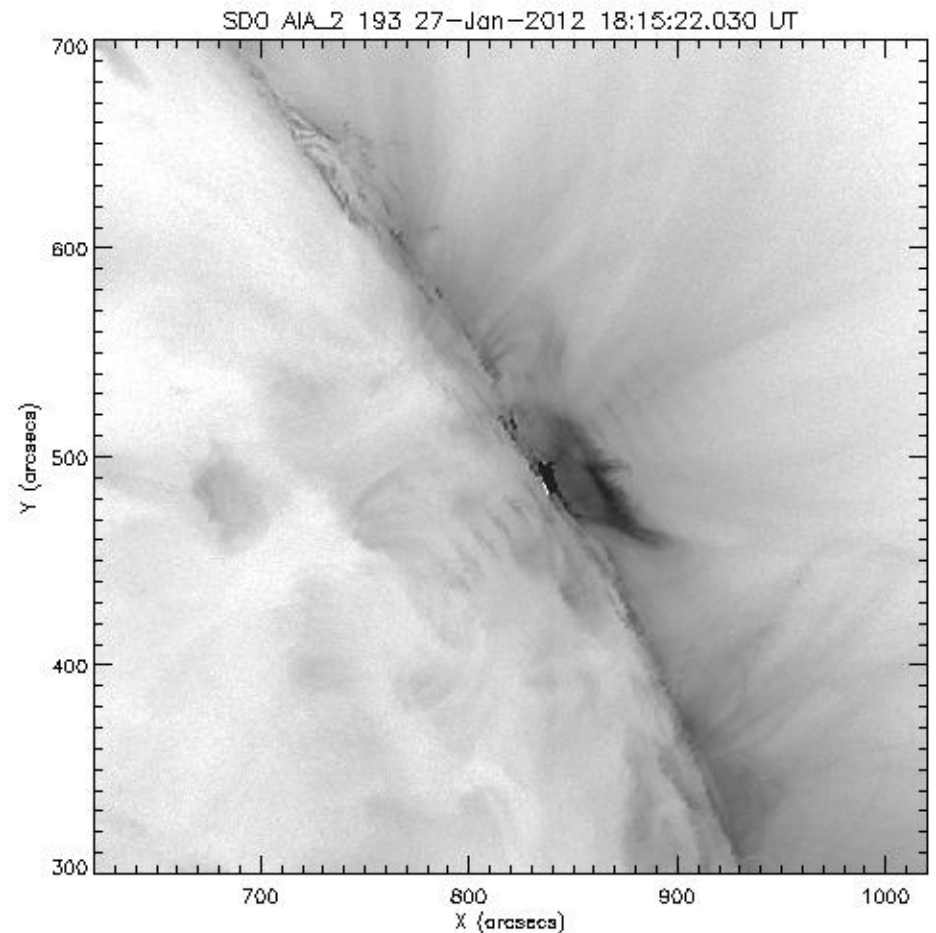
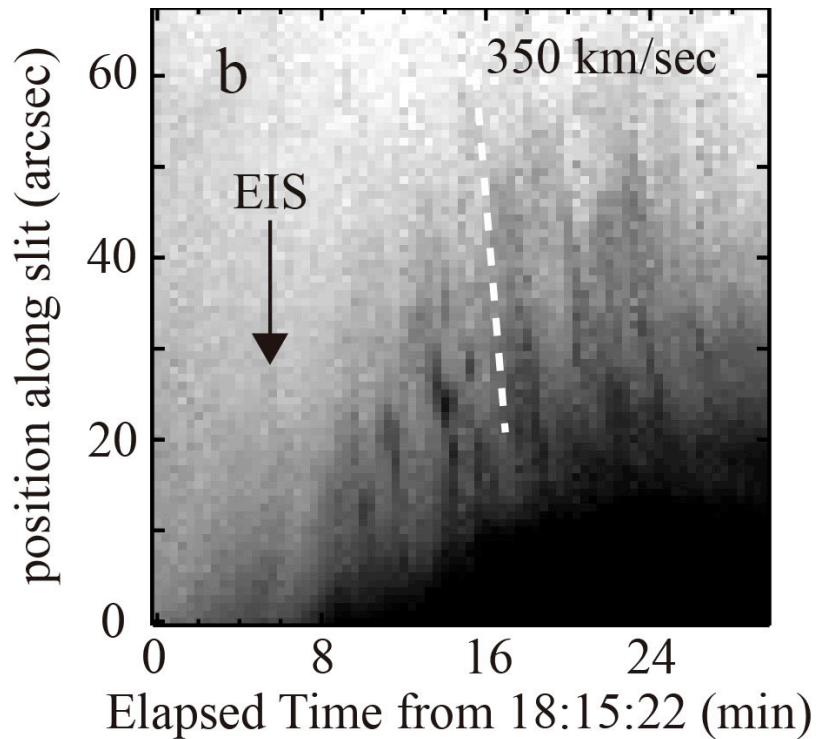
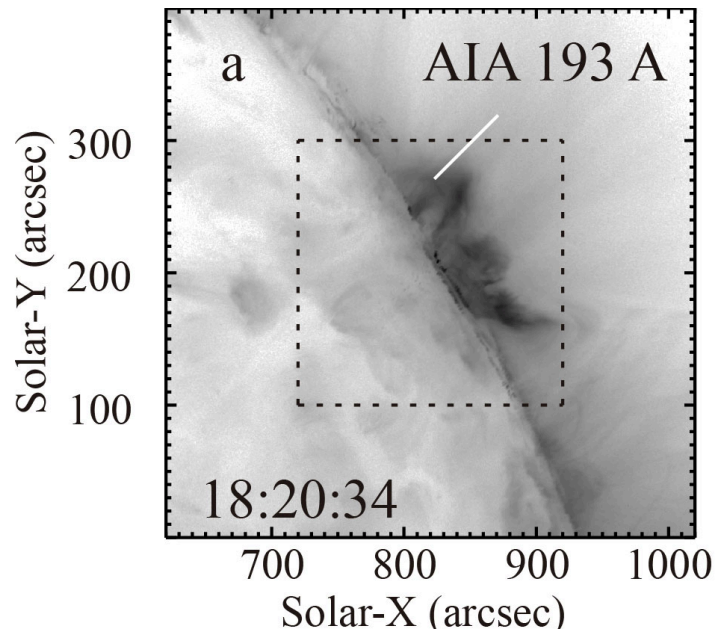
(D) Plasmoid-Unstable Reconnection



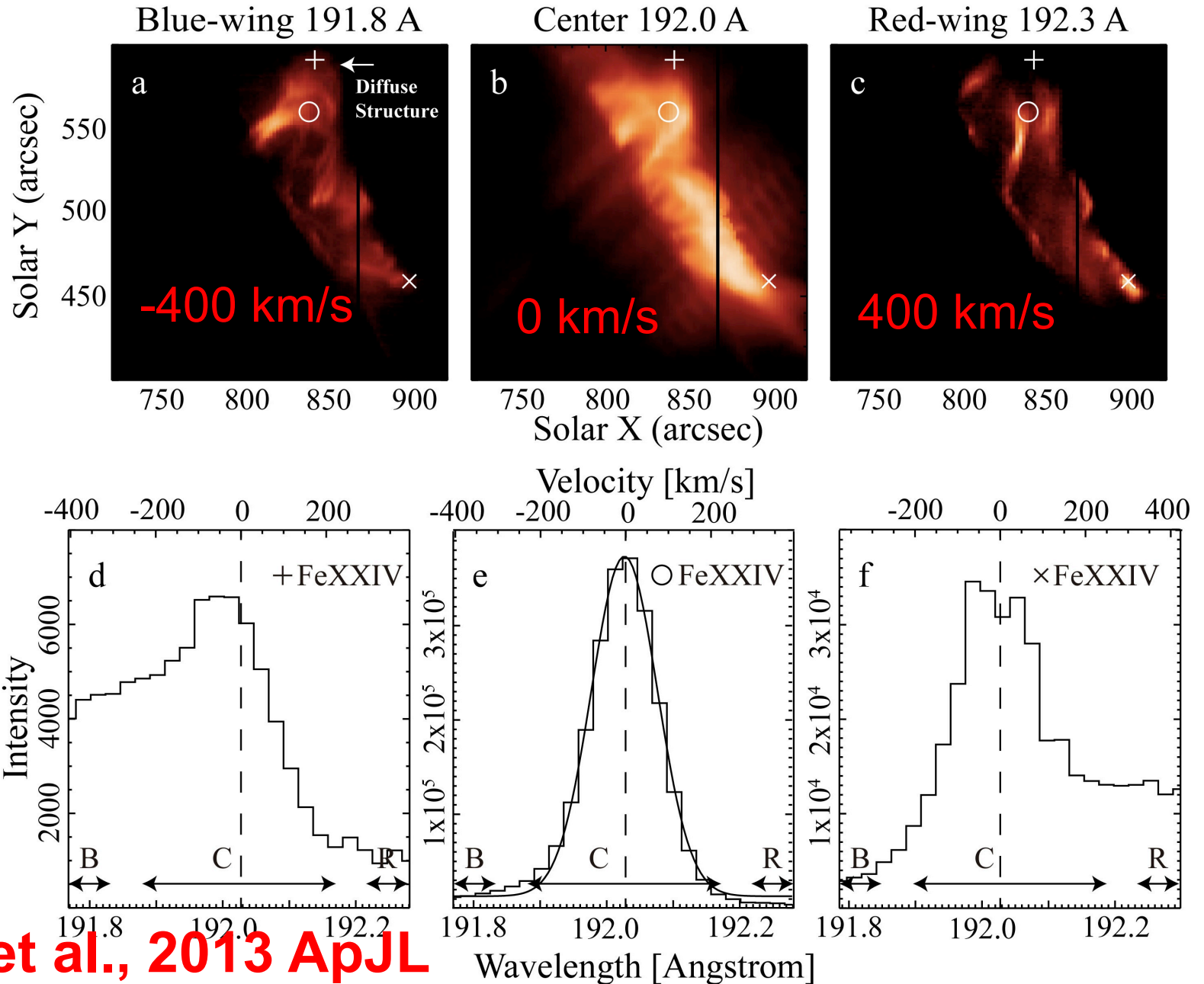
Shibayama et al., 2015

AIA Observation

193 A (1.5 and 15MK)



Spectroscopic obs: EIS Line Profiles



Why we cannot observe reconnection region: Alfvénic flow

- Unlucky... Need time resolution.

不運

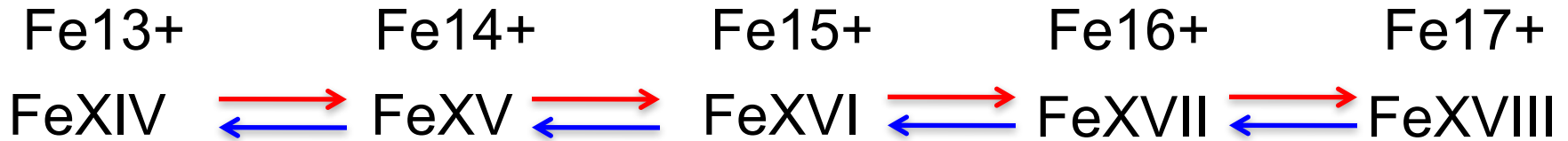
- Less emissions from reconnection region
 - plasma condition differ from what we think

非平衡プラズマ

- Standard Flare model cannot apply in general
 - e.g., Loop Flare model..

フレアモデルが間違っている

Ionization Process



\longrightarrow ionization \longleftarrow recombination

$$\frac{\partial n_i^Z}{\partial t} + \nabla \cdot n_i^Z \mathbf{v} = R_i^Z$$

$$(Z = 1, \dots, N_{\text{elem}}) \quad (i = 1, \dots, N_{\text{ion}}^Z),$$

where

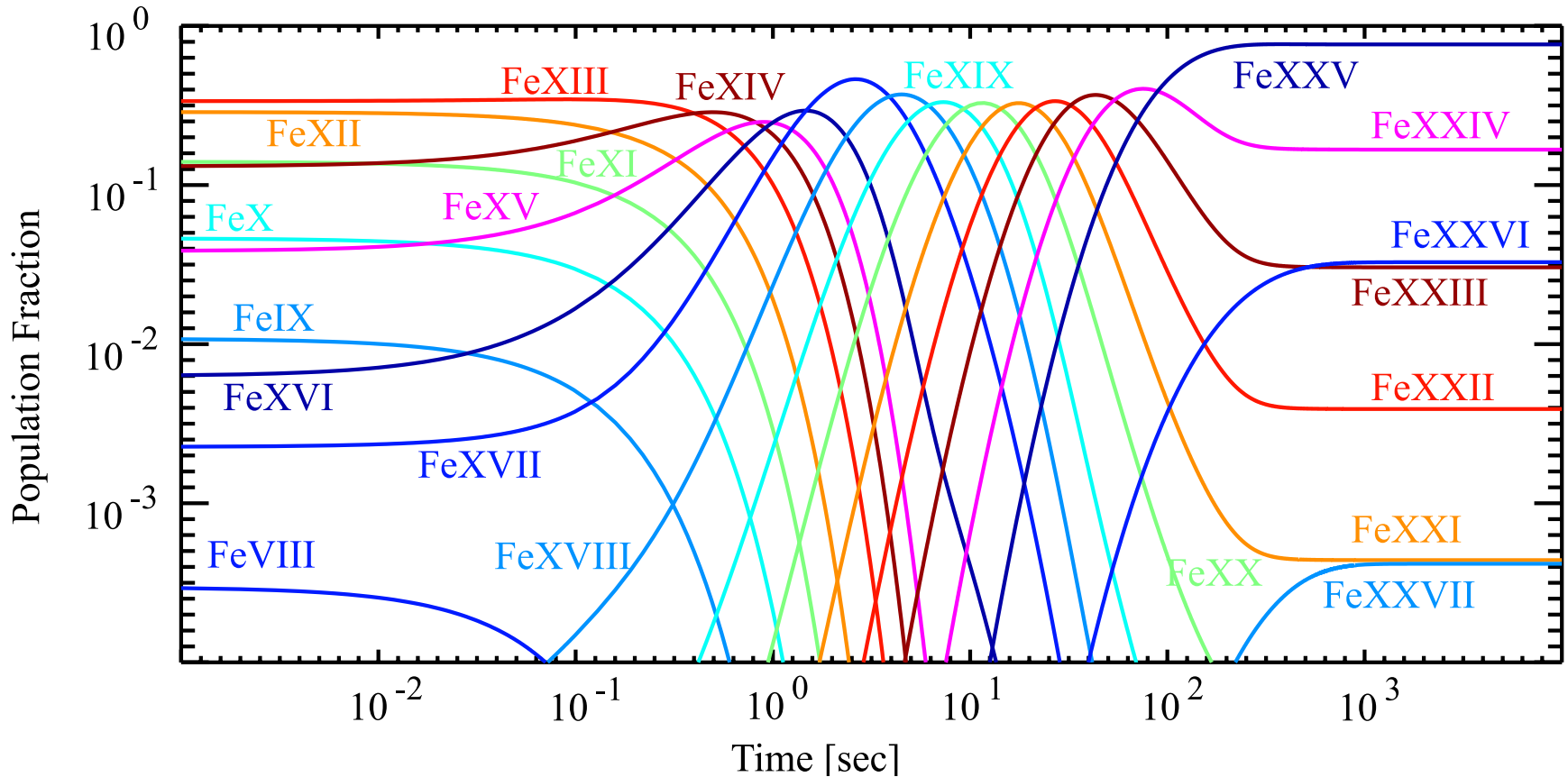
$$R_i^Z = n_e \left[n_{i+1}^Z \alpha_{i+1}^Z + n_{i-1}^Z S_{i-1}^Z - n_i^Z \left(\alpha_i^Z + S_i^Z \right) \right],$$

α collisional and dielectronic recombination

S collisional ionization

We can discuss the history of heating!

Example of Ionization Calculation



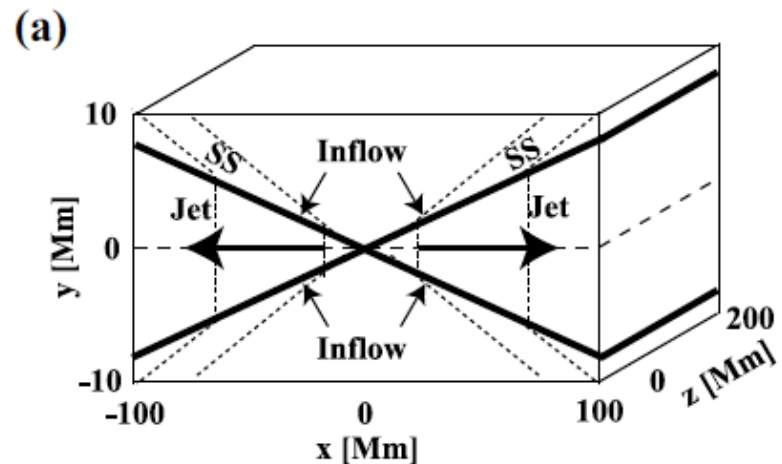
Initial : Ionization Equilibrium

Te: 1.5 MK → 31.3 MK @ t=0

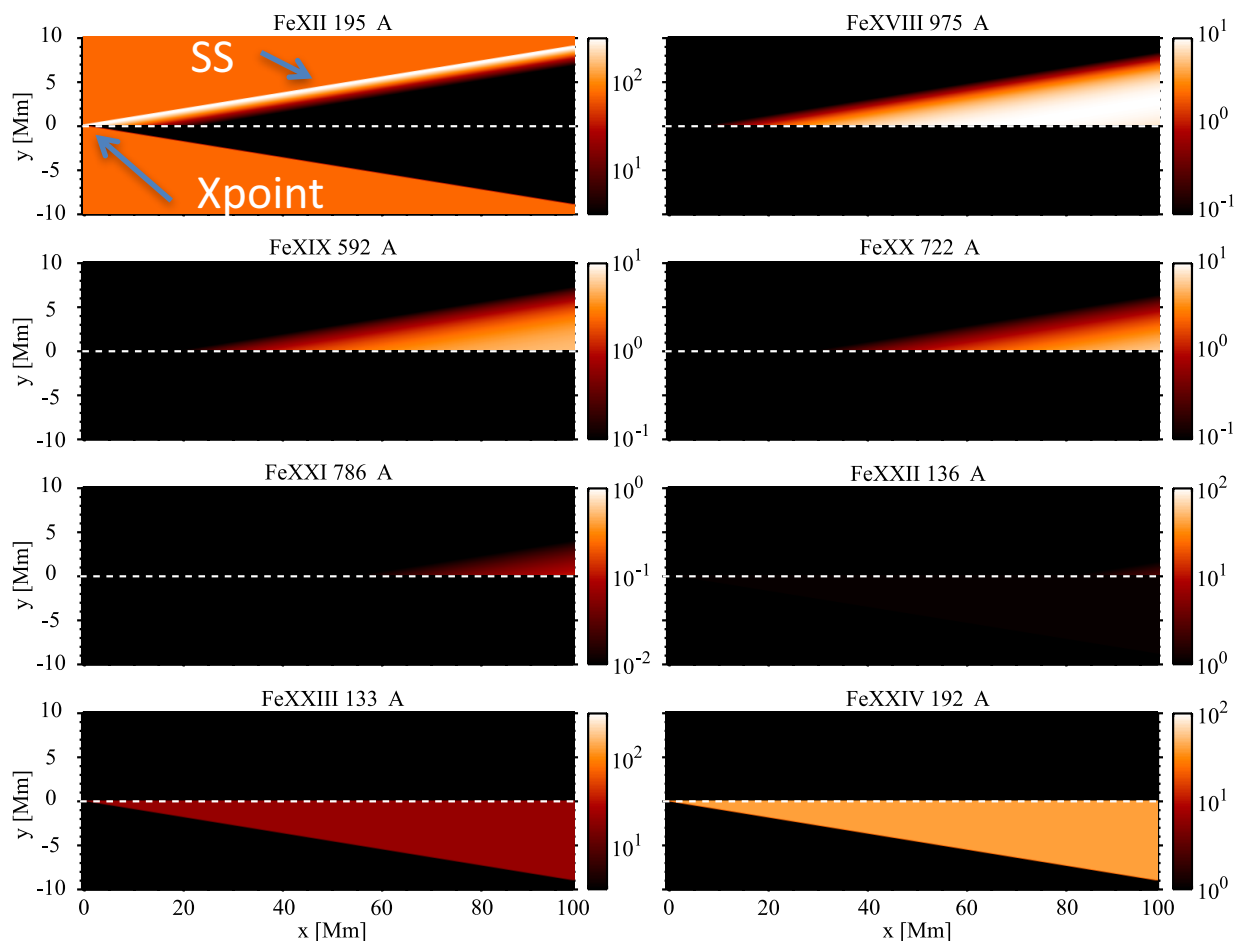
Ne: 2.45 x 10⁹ /cc

Petschek Reconnection

Density $N_e = 10^8 / \text{cc}$

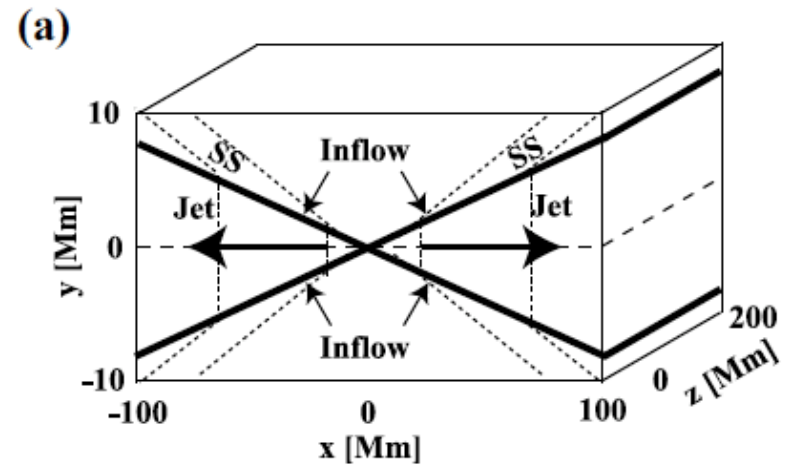


Imada et al., APJ, 2011

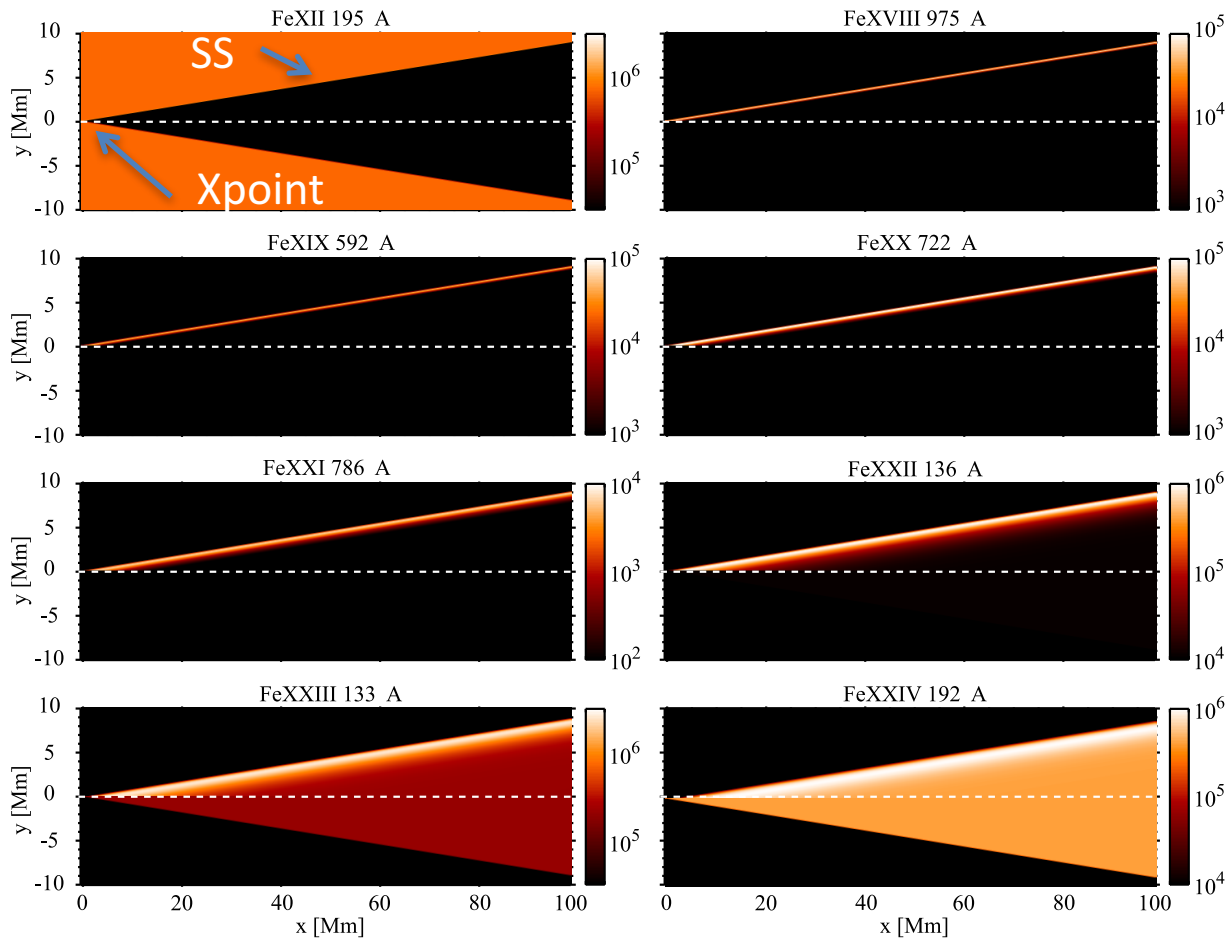


Petschek Reconnection

Density $N_e = 10^{10} / \text{cc}$



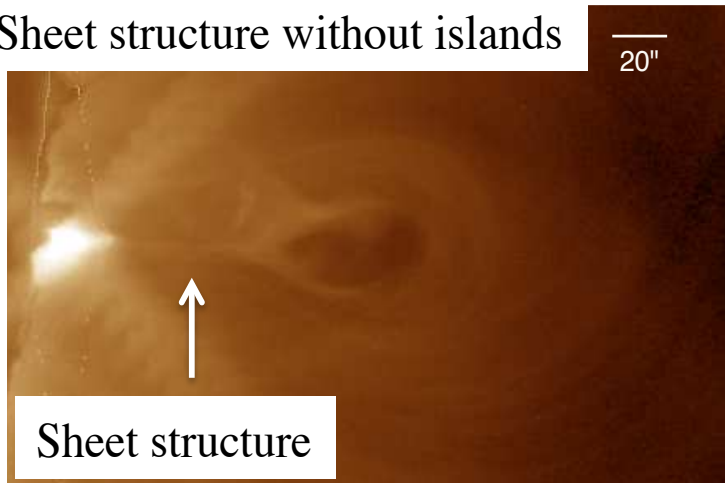
Imada et al., APJ, 2011



Sweet-Parker .vs. Petschek RX

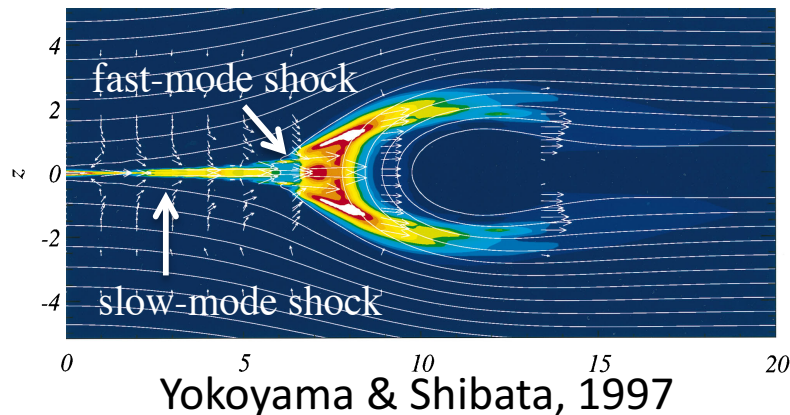
Warren et al., 2018

(A) Sheet structure without islands



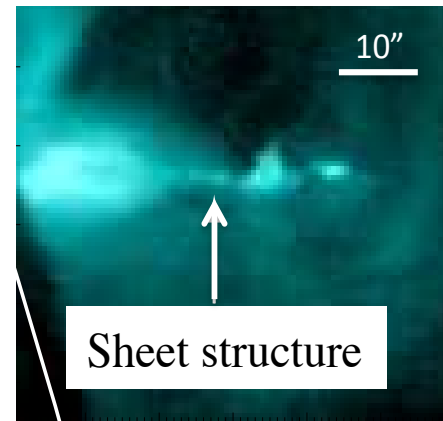
Laminar な流れ

(C) Petschek Reconnection



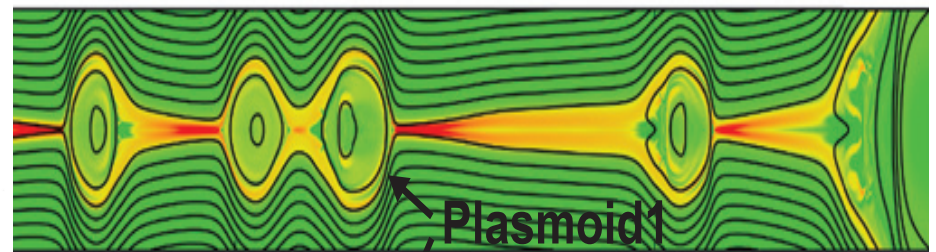
Takasao et al., 2012

(B) Sheet structure with islands



乱流的？

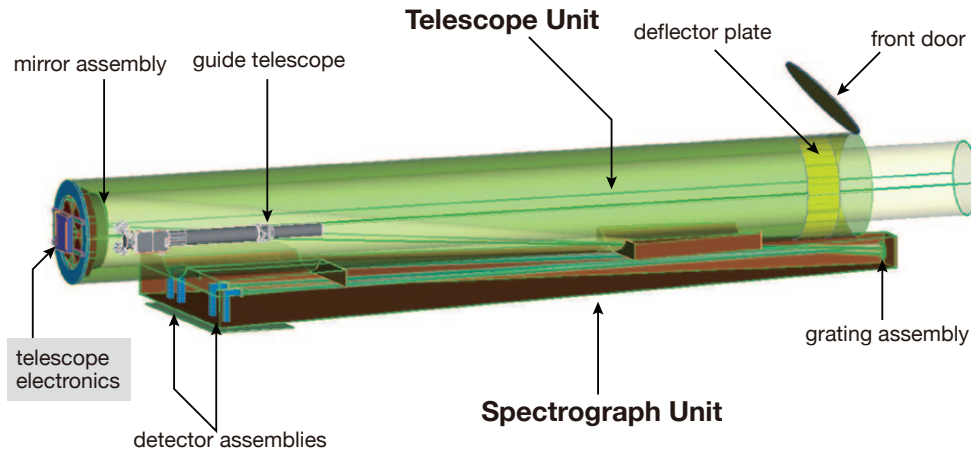
(D) Plasmoid-Unstable Reconnection



Shibayama et al., 2015

次世代太陽観測衛星 Solar-C EUVST

Figure 3.10: The instrument opto-mechanical layout



紫外線分光観測

Solar-C (EUVST)

→ 小型衛星

Telescope	Off-axis single mirror telescope		
Primary mirror	diameter 30 cm		
Mirror micro-roughness	<5 Å rms		
Focal Plane Instruments	Spectrographs, Slit imaging camera for co-alignment		
Wavelength coverage	Spectrographs:	First order:	17.0 – 21.5nm, 69.0 – 85.0nm, 92.5 – 108.5nm, 111.5 – 127.5nm
		Second order:	46.3 – 54.2nm, 55.7 – 63.7nm
	Slit imaging camera:	baseline T_{min} (160 nm)	
Temperature coverage	0.01 – 20 MK		
Imaging performance	≤0.28" in 67% encircled energy over nominal field-of-view		
Spatial sampling	0.14" per detector pixel		
Slit	0.14" - 2.8"		
Spectral resolution	16,000 – 30,000		
Exposure time	0.1 – 20s nominal		
Field-of-view	280° (along slit) × 300° (scanning direction) w/o repointing; coarse pointing to 1.5 solar radii		

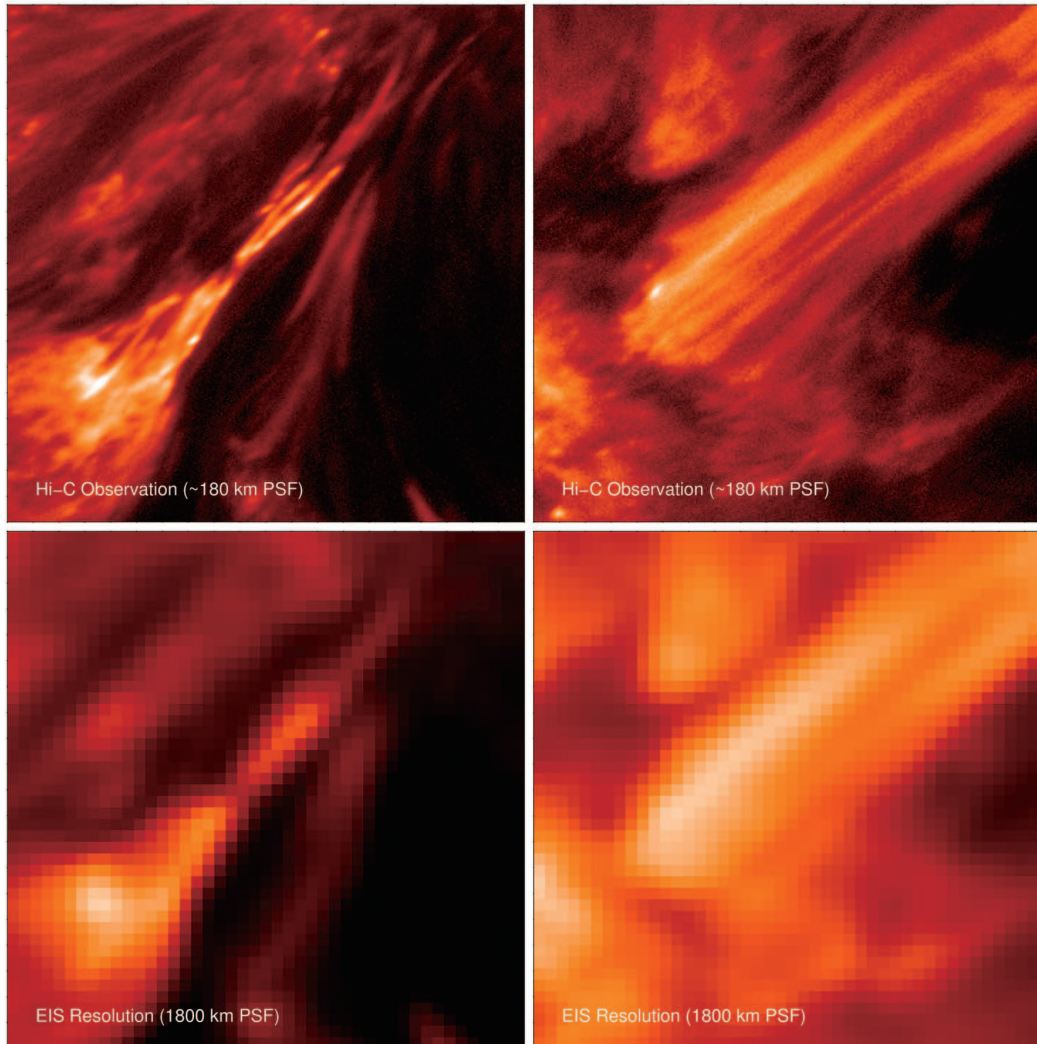
広い温度範囲 (0.01-20MK)

高い空間分解能 (0.4")

高い時間分解能
(露出0.1-20sec)

高い空間分解能で運動を理解する

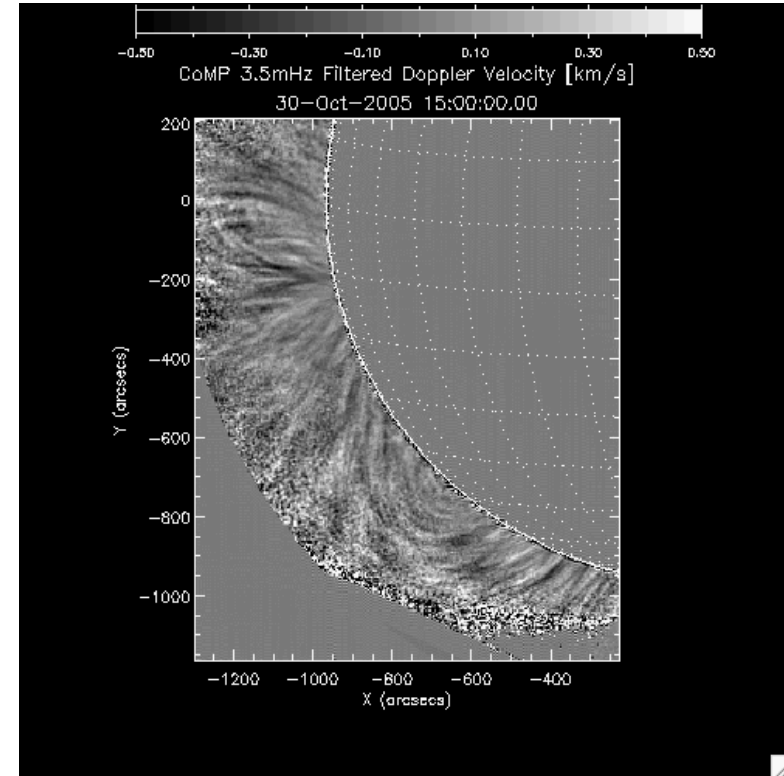
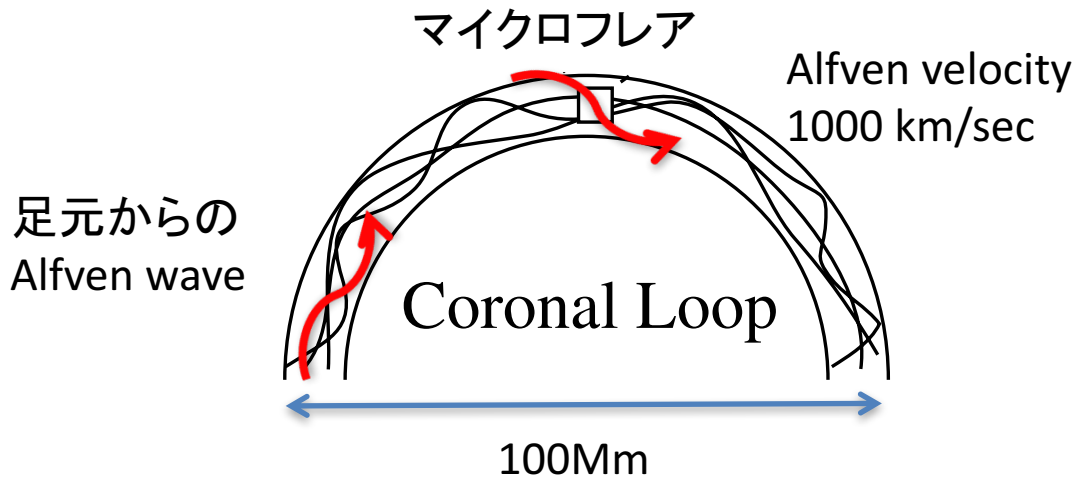
Hi-Cロケット実験の解像度 ~200km



ひのでEISの解像度 ~2000km

高い時間分解能

- アルベン時間 ~ 数10秒

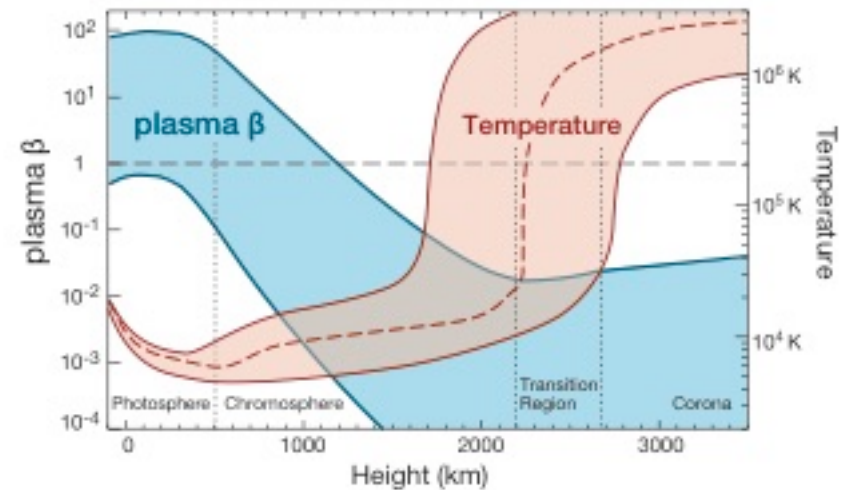
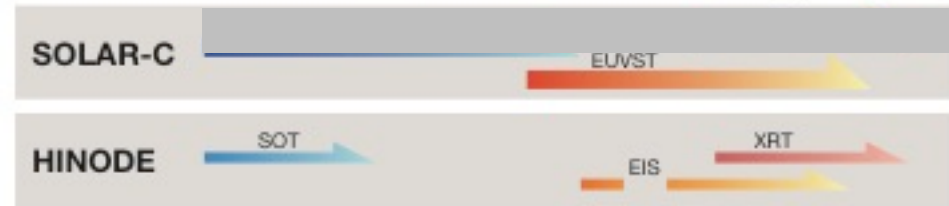
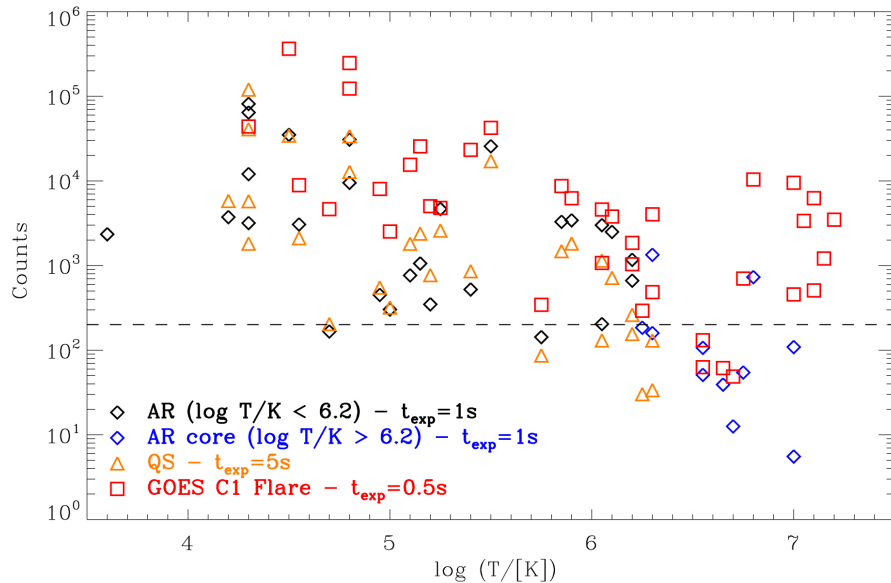


ひのでEISでは10秒露出で1000秒かかる

Tomczyk+, Science 2007

- 音波伝搬時間 ~ 100 秒
- 電離の時間スケール ~ 100 秒
- イオン-電子間での緩和時間 ~ 100秒

広い温度範囲



1万度の彩層から100万度のコロナ(フレアは数千万度)まで連続的にエネルギーの輸送・散逸を捉える！

Ni, Fe, Ca, S, Si Mg, Oなど温度範囲だけでなくイオン種のカバーも豊富
電離非平衡・イオン温度などにも議論も有効

SolarC EUVST小型で目指すサイエンス

- 彩層・コロナと太陽風形成に必要なエネルギー・質量輸送機構の究明
- 太陽面爆発現象の物理過程の解明

別の言い方をすると

- 天体プラズマにおけるエネルギー輸送過程の解明
- 天体プラズマにおけるエネルギー散逸過程の解明

ポイント: 1) エネルギー散逸領域を捉える

2) エネルギー輸送を適切な時間スケールで観測