

自己紹介

- 名前：高棹 真介 (たかさお しんすけ)
- 所属：名大 理学研究科 Ta 研 (学振 PD 1年目)
 - 共同研究者：犬塚教授、鈴木 建 教授 (名大 => 東大)
- 京大 宇宙物理 (柴田 一成 教授) のもとで博士号

専門：太陽物理・若い星と円盤の相互作用

手法：磁気流体シミュレーション・観測

柴田さんとの仕事

Astrophysics and Space Science Library 427

Walter Gonzalez
Eugene Parker
Editors

Magnetic Reconnection

Concepts and Applications

AS
SL

 Springer

Parkerさん80歳記念の本の
第10章を共著
(太陽・恒星フレアのレビュー)

Chapter 10
Fractal Reconnection in Solar and Stellar Environments

K. Shibata and S. Takasao

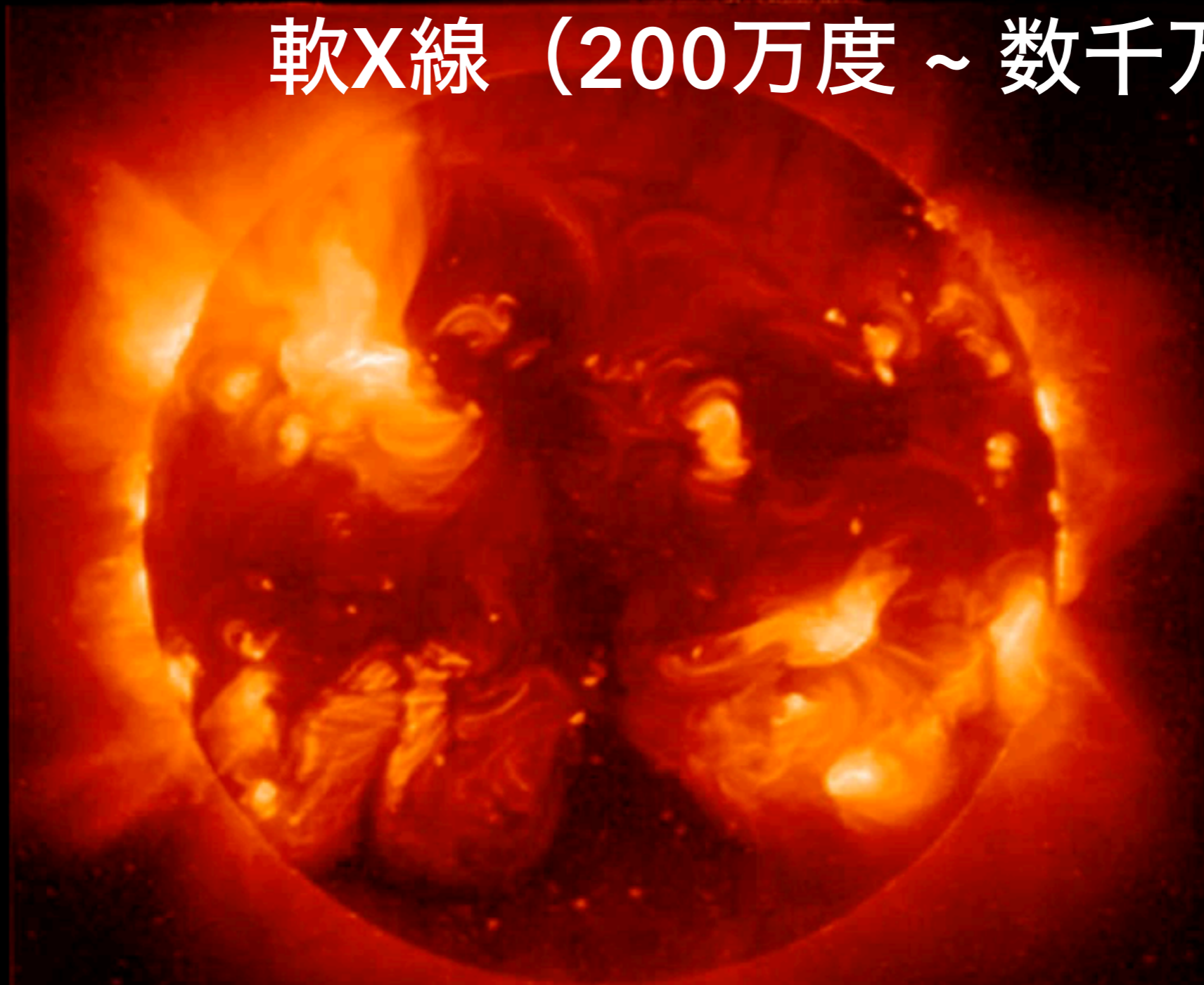
Shibata & ST 2016

Abstract Recent space based observations of the Sun revealed that magnetic reconnection is ubiquitous in the solar atmosphere, ranging from small scale reconnection (observed as nanoflares) to large scale one (observed as long duration flares or giant arcades). Often the magnetic reconnection events are associated with mass ejections or jets, which seem to be closely related to multiple plasmoid ejections from fractal current sheet. The bursty radio and hard X-ray emissions from flares also suggest the fractal reconnection and associated particle acceleration. We shall discuss recent observations and theories related to the plasmoid-induced-reconnection and the fractal reconnection in solar flares, and their implication to reconnection physics and particle acceleration. Recent findings of many superflares on solar type stars that has extended the applicability of the fractal reconnection model of solar flares to much a wider parameter space suitable for stellar flares are also discussed.

太陽表面上の爆発現象：太陽フレア

2000/06/05

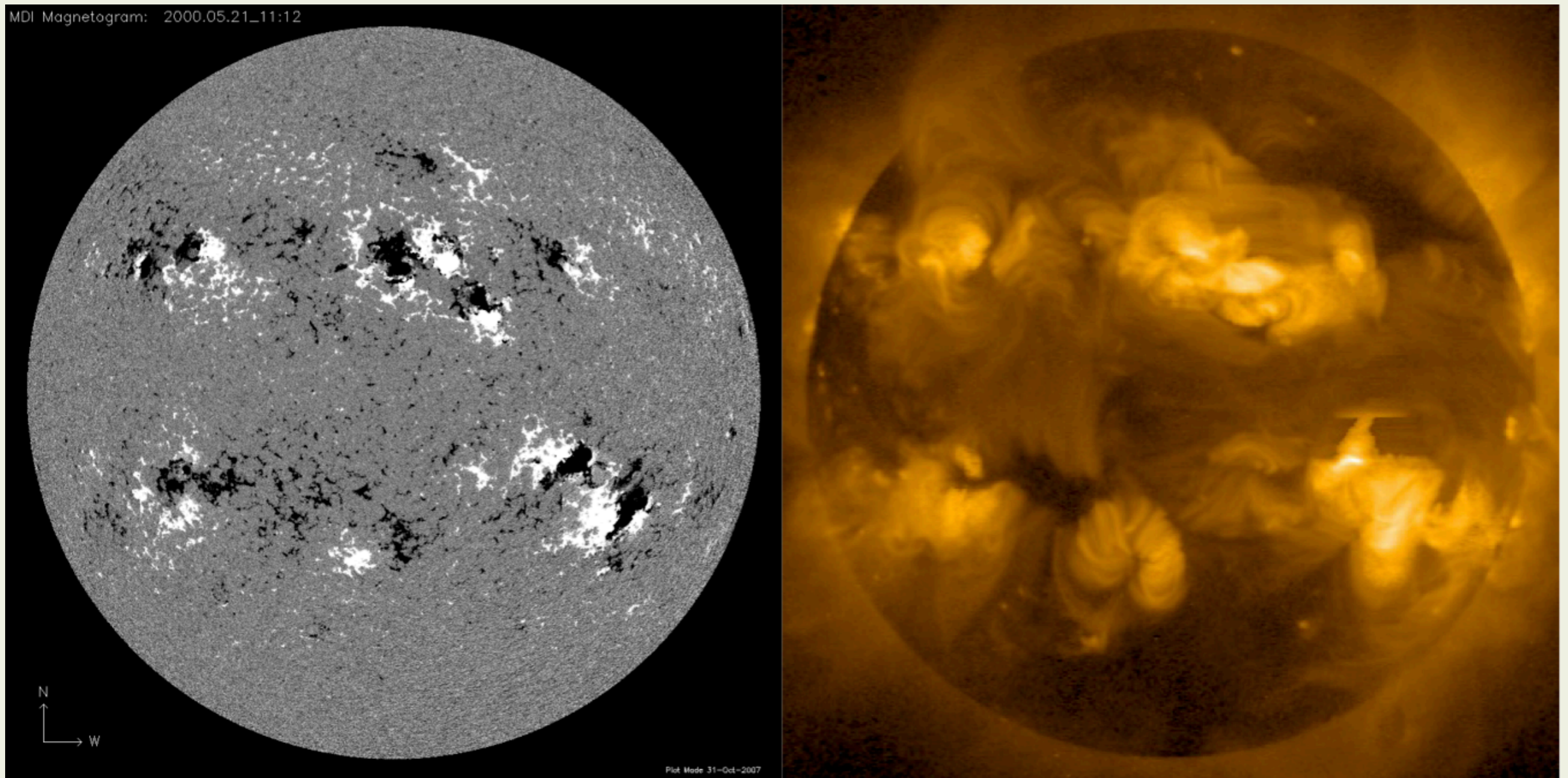
軟X線 (200万度 ~ 数千万度)



Yohkoh / SXT
Kyoto 4D

太陽の活動性と磁場

視線方向の磁場成分 軟X線 (200万度~数千万度)

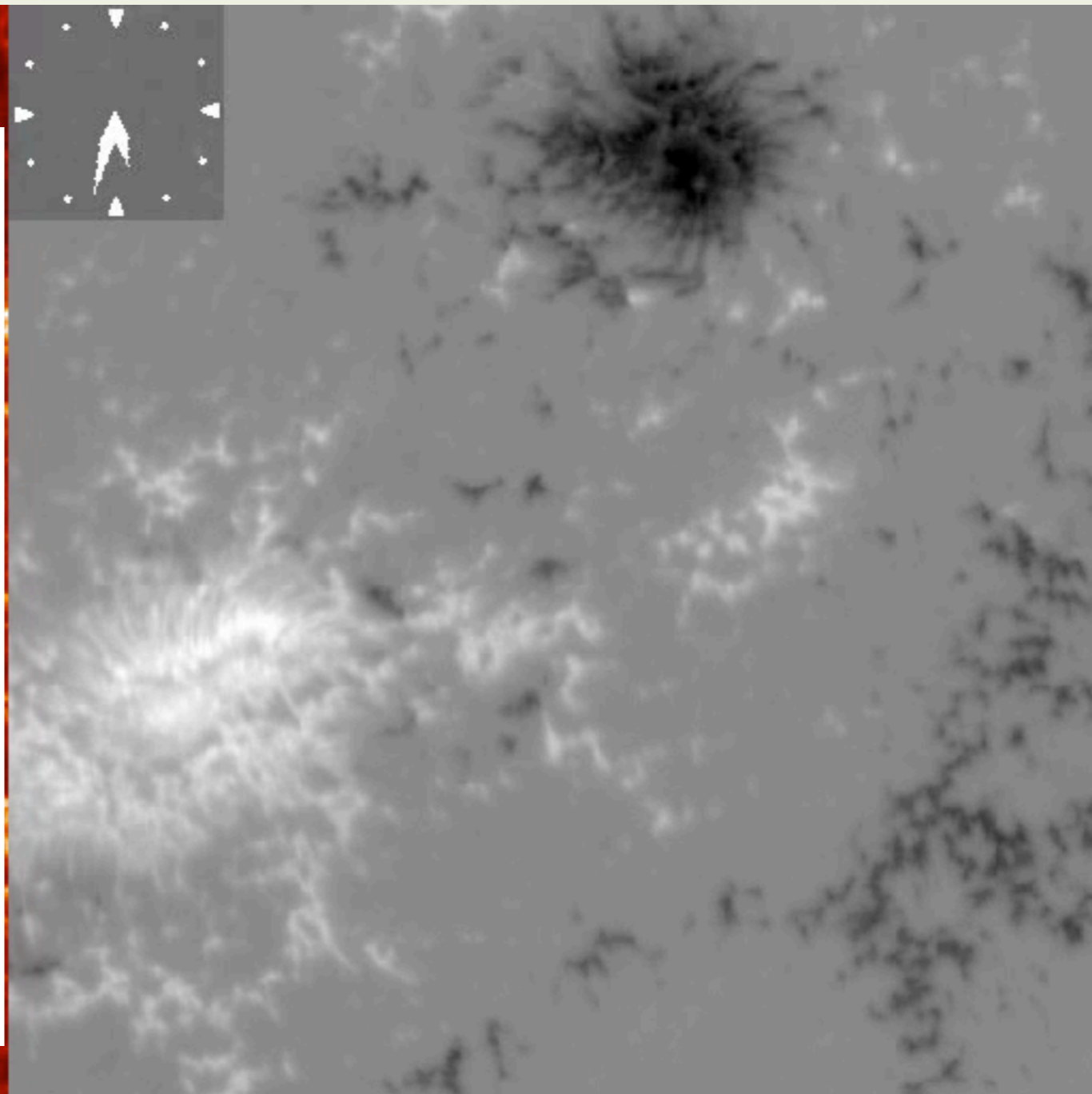
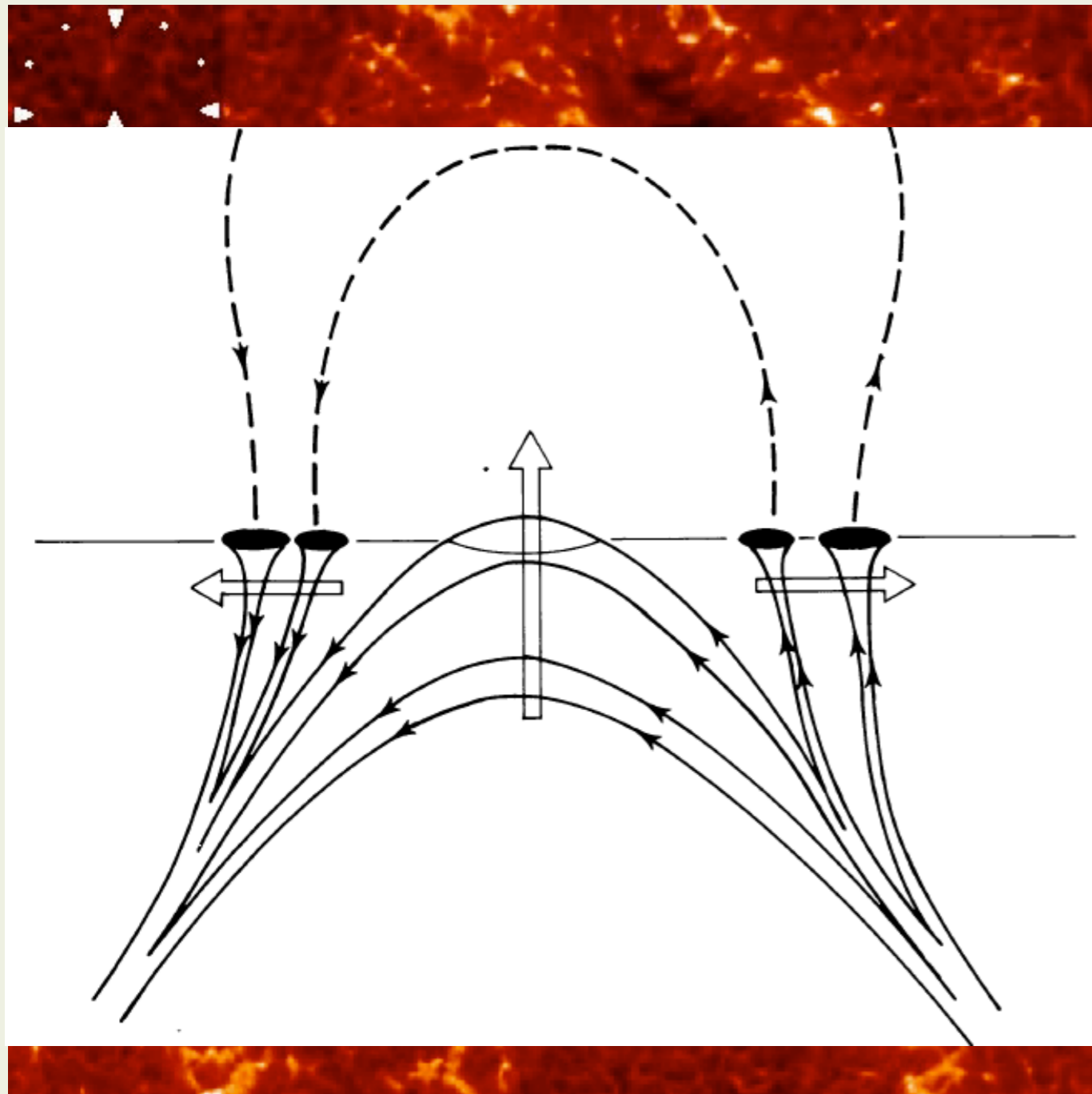


太陽表面上の爆発のエネルギー源は
磁気エネルギー

活動領域の形成：磁束の浮上

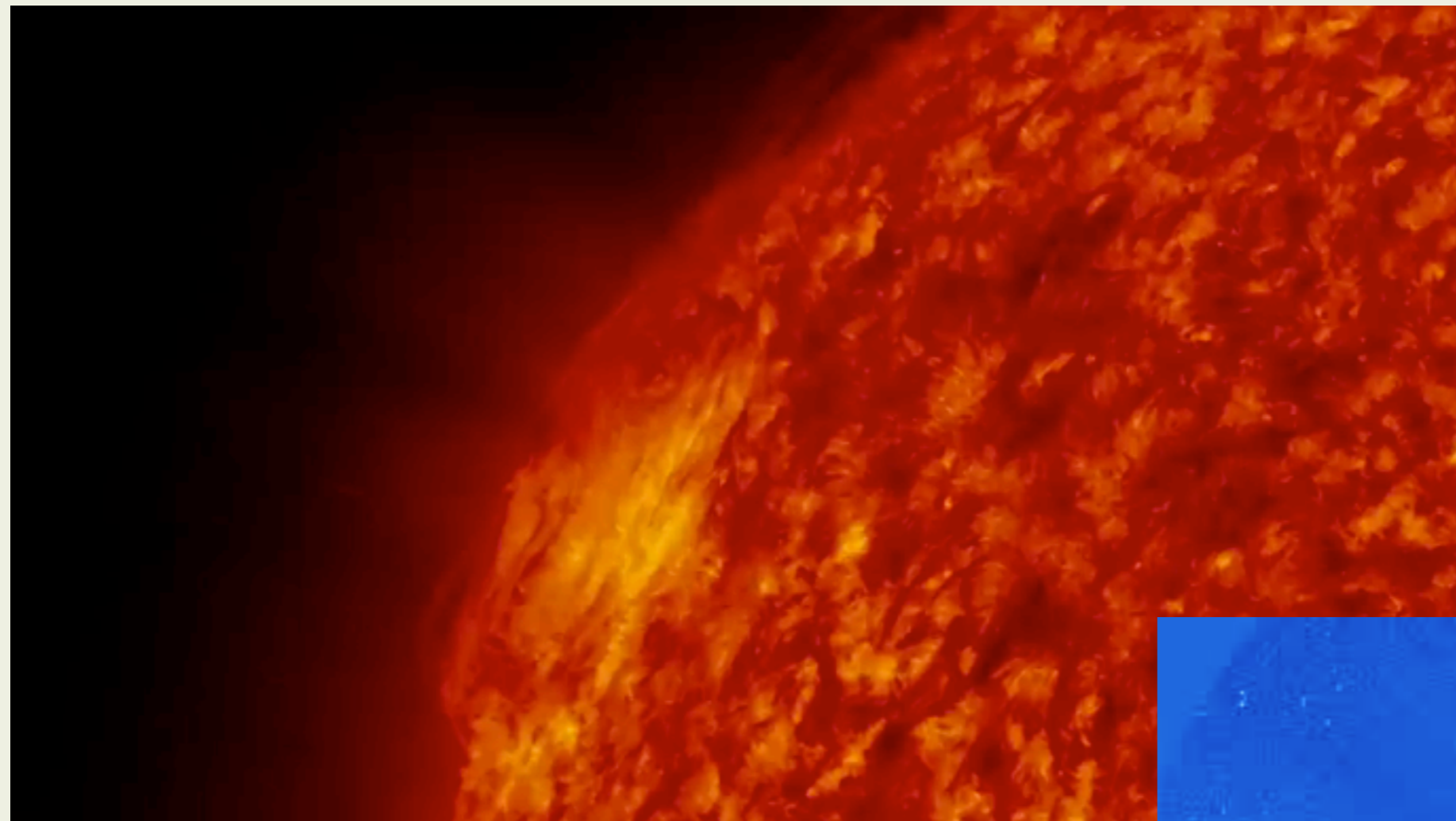
Ca II：彩層 (~1万度) の明るさ

視線方向の磁場成分



フレアに伴うプラズマ噴出

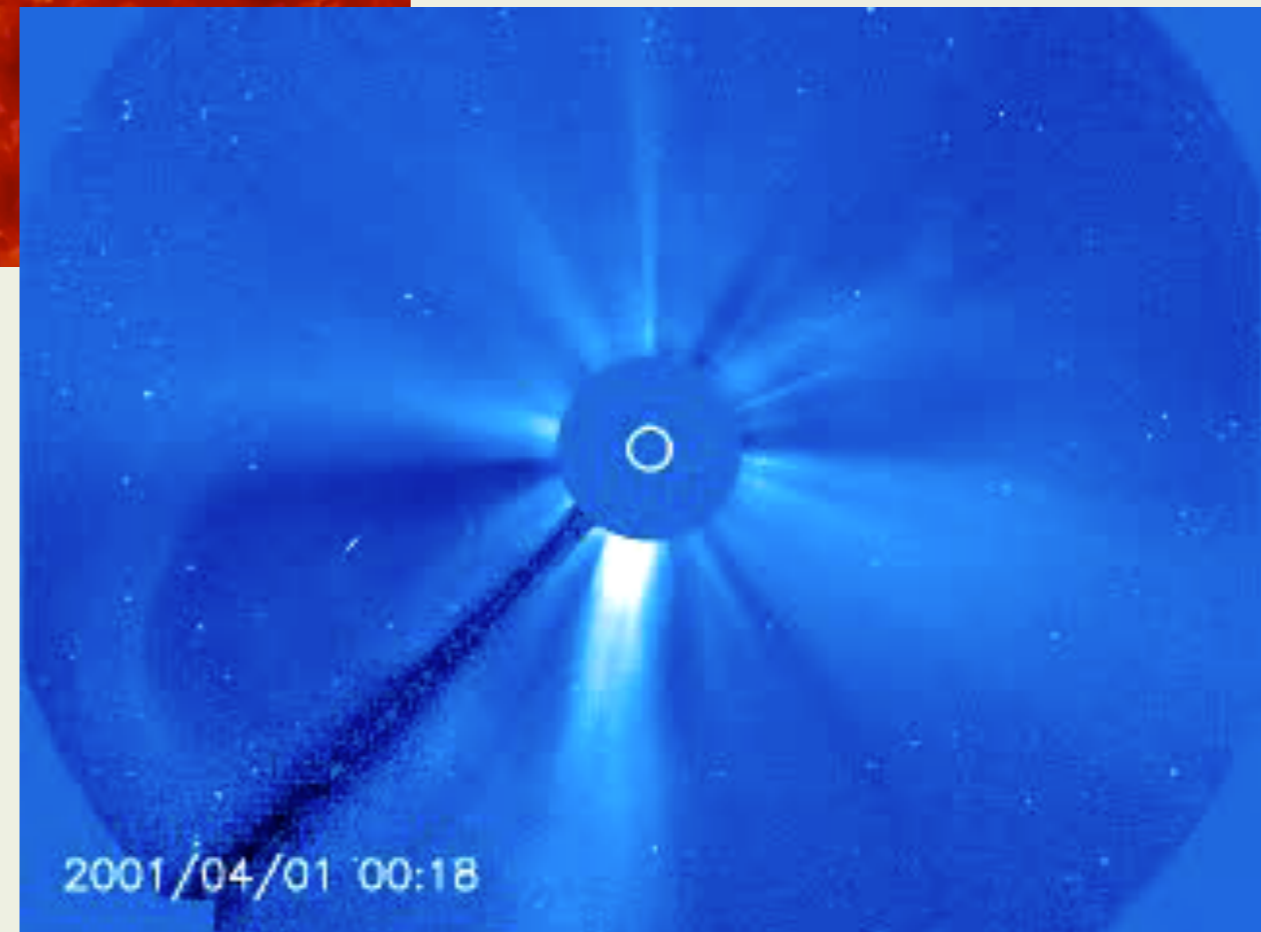
He Iのライン
(~10 万度)



星表面から出た
白色光の散乱光

~100 - 1,000 km/s

$10^{(15-16)}$ g の噴出



基礎方程式：流体 + Maxwell eqs

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

$$\frac{\partial \rho \mathbf{v}}{\partial t} = -\nabla \cdot \left[\rho \mathbf{v} \mathbf{v} + \left(p + \frac{|\mathbf{B}|^2}{8\pi} \right) \mathbf{1} - \frac{\mathbf{B} \mathbf{B}}{4\pi} \right] + \rho \mathbf{g},$$

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

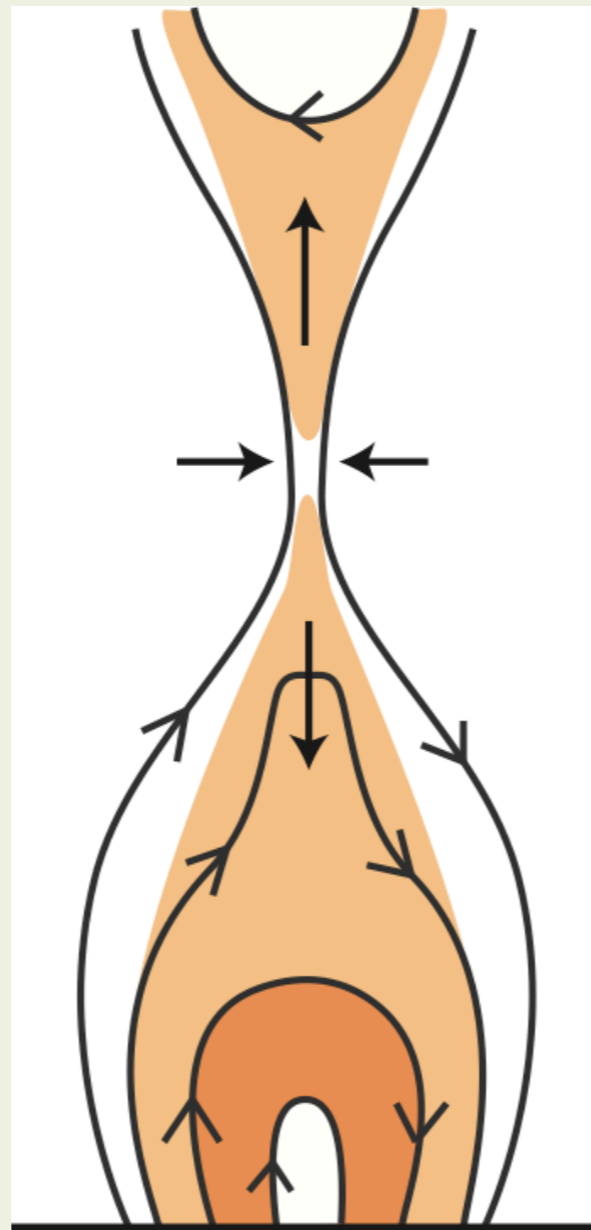
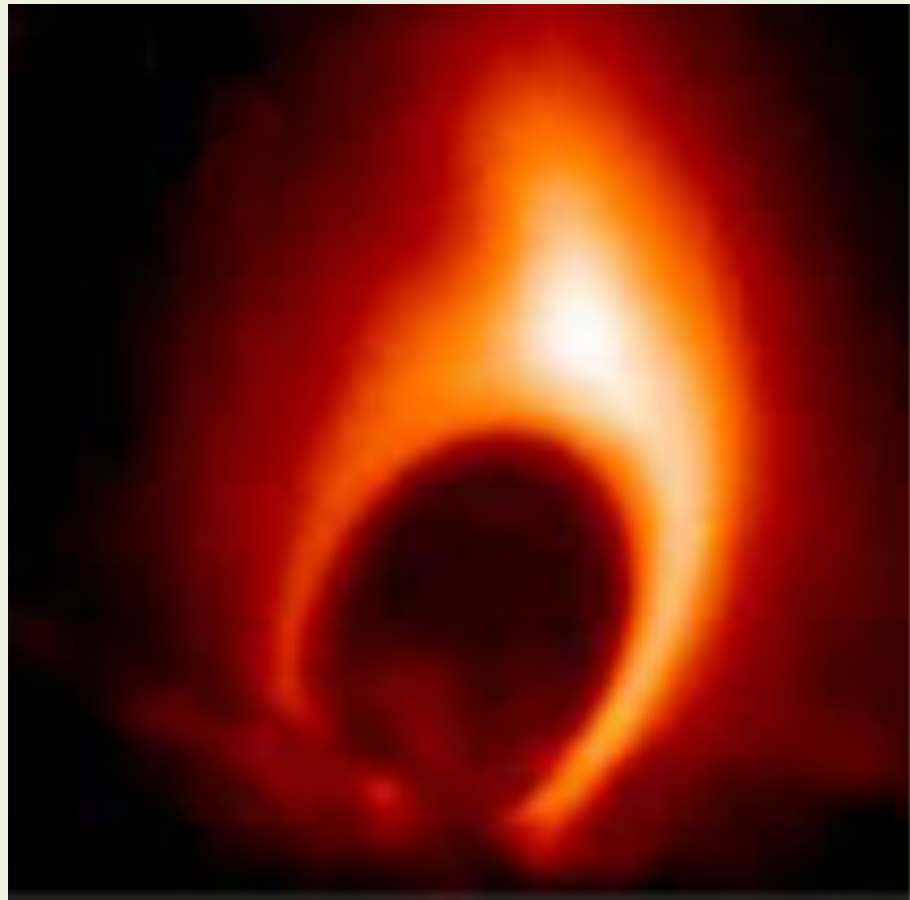
$$\begin{aligned} \frac{\partial e}{\partial t} = & -\nabla \cdot \left[\mathbf{v} \left(e + p + \frac{|\mathbf{B}|^2}{8\pi} \right) - \frac{1}{4\pi} \mathbf{B} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{B}) \right] \\ & + \frac{1}{4\pi} \nabla \cdot (\mathbf{B} \times \eta \nabla \times \mathbf{B}) + \rho (\mathbf{g} \cdot \mathbf{v}), \end{aligned}$$

$$e = \frac{p}{\gamma - 1} + \frac{\rho |\mathbf{v}|^2}{2} + \frac{|\mathbf{B}|^2}{8\pi},$$

爆発駆動機構：磁気リコネクション

軟X線

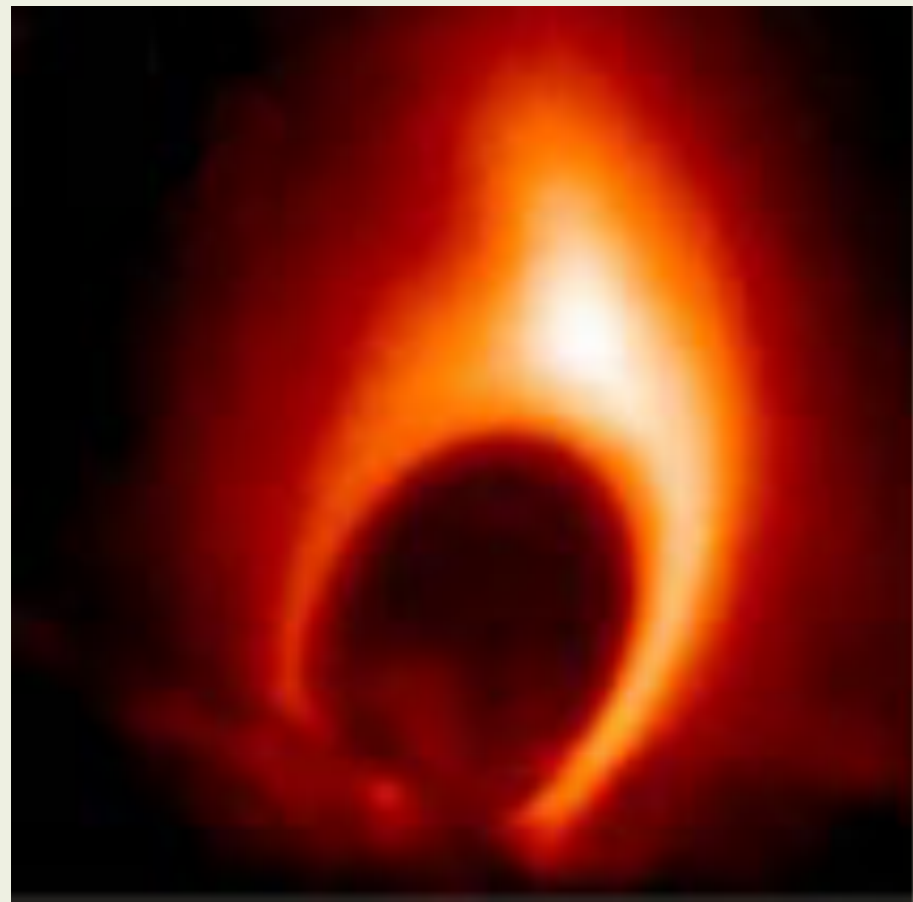
(200万度~数千万度)



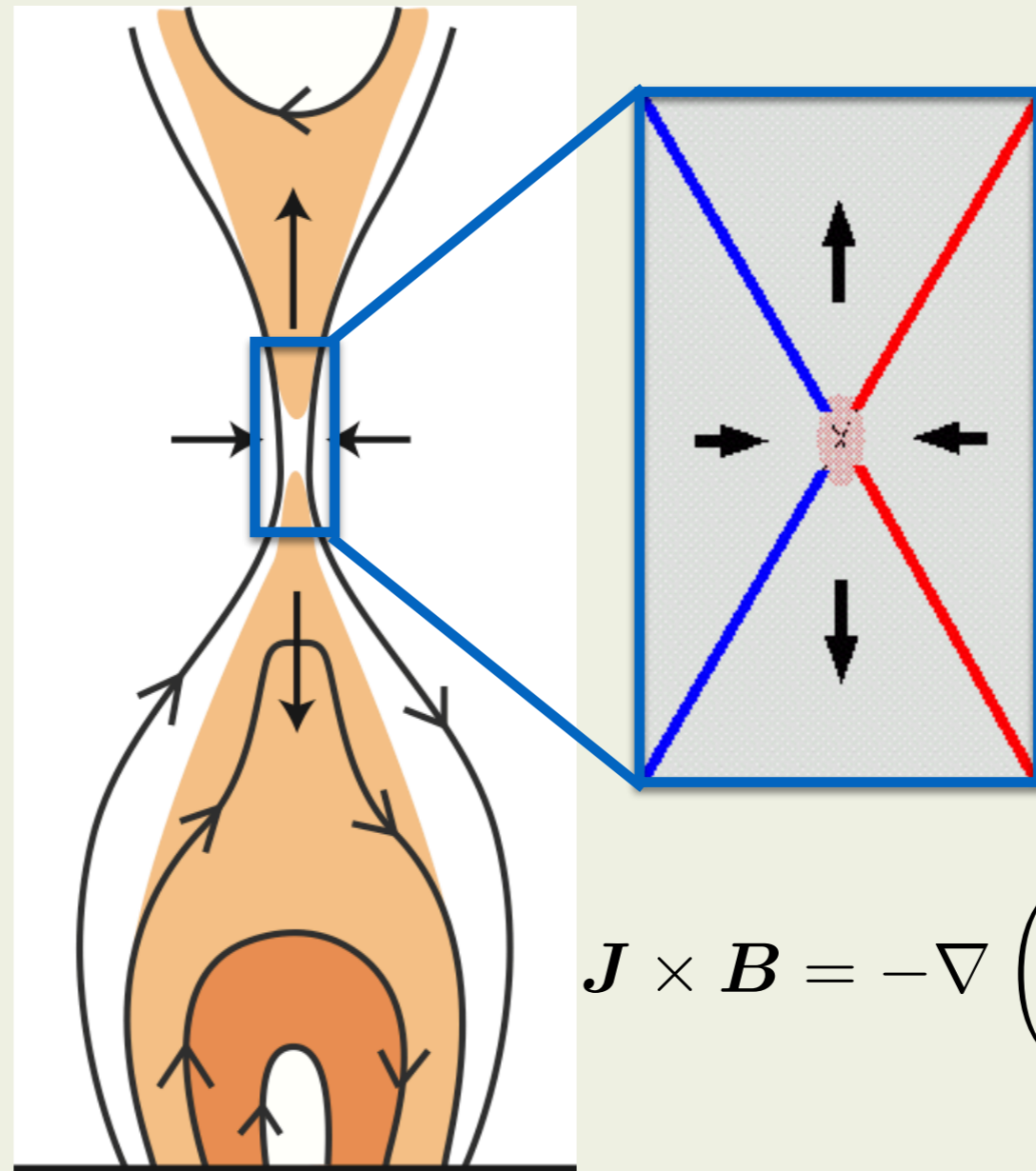
爆発駆動機構：磁気リコネクション

軟X線

(200万度~数千万度)



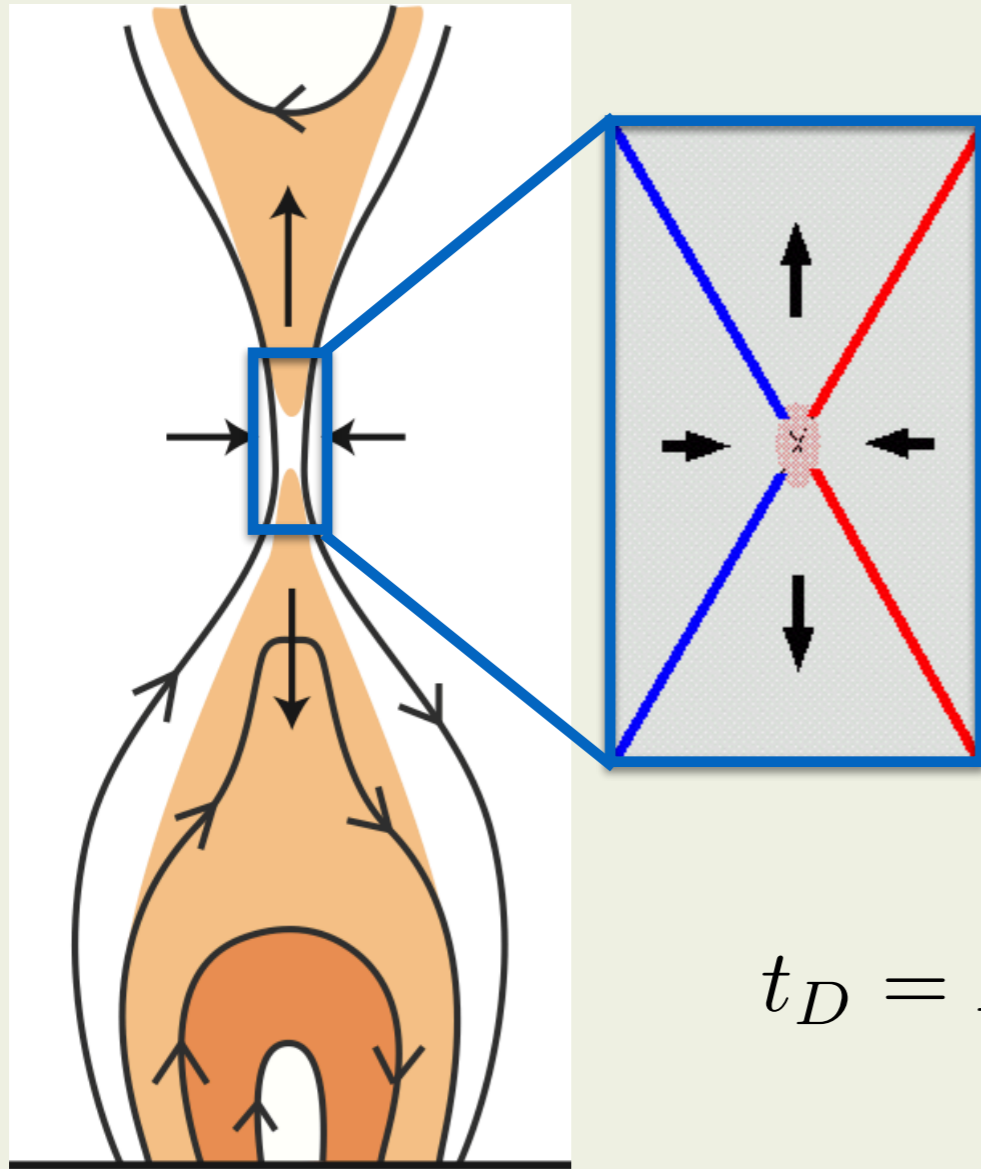
$$\frac{\partial B}{\partial t} = \nabla \times (v \times B) + \nabla(\eta \nabla B)$$



$$J \times B = -\nabla \left(\frac{B^2}{8\pi} \right) + \frac{(B \cdot \nabla) B}{4\pi}$$

超音速流を駆動 => 噴出流、衝撃波加熱による高温プラズマ
見かけのループ構造などを説明可能

フレアの発生機構



磁気拡散のタイムスケールを
フレアの典型的なサイズを使って
見積もると

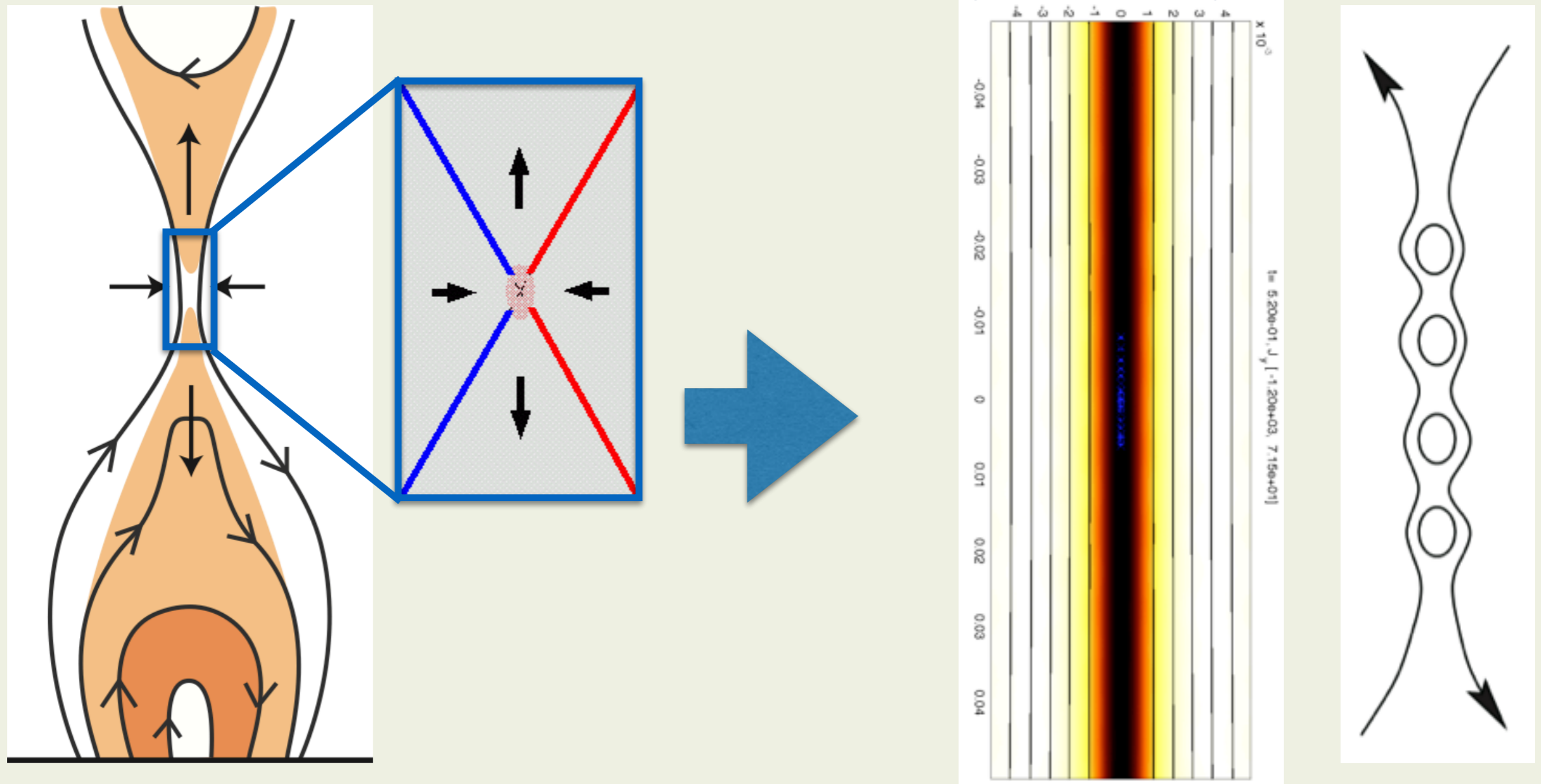
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B}) + \nabla(\eta \nabla \mathbf{B})$$

$$t_D = L^2 / \eta \sim 10^{14} \left(\frac{L}{10^9 \text{ cm}} \right)^2 \left(\frac{T}{10^6 \text{ K}} \right)^{3/2} \text{ [s]}$$

リコネクションは磁場の拡散過程が絡む現象なので、フレアの
短い時間スケール (~hours) を実現するには細かい構造を作る必要性

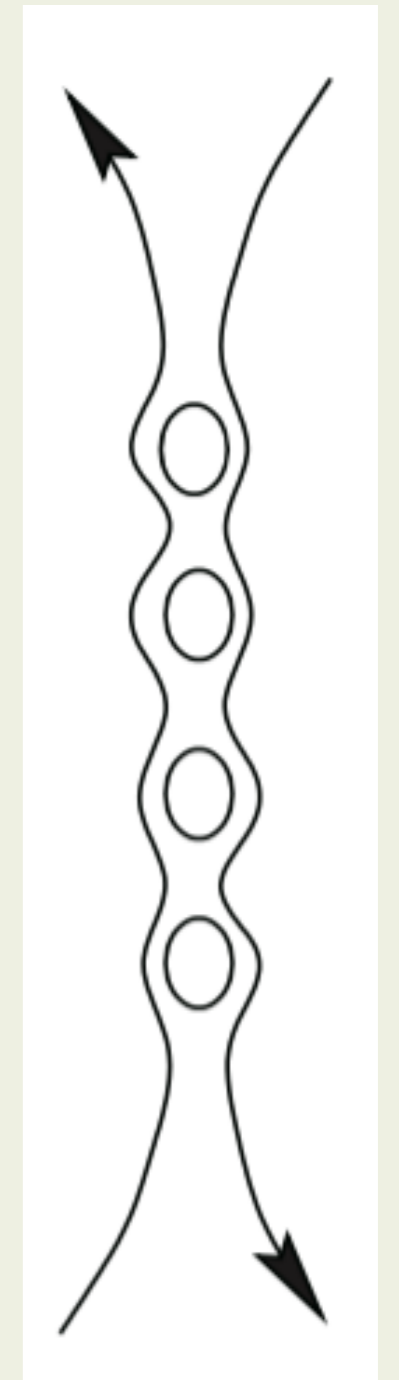
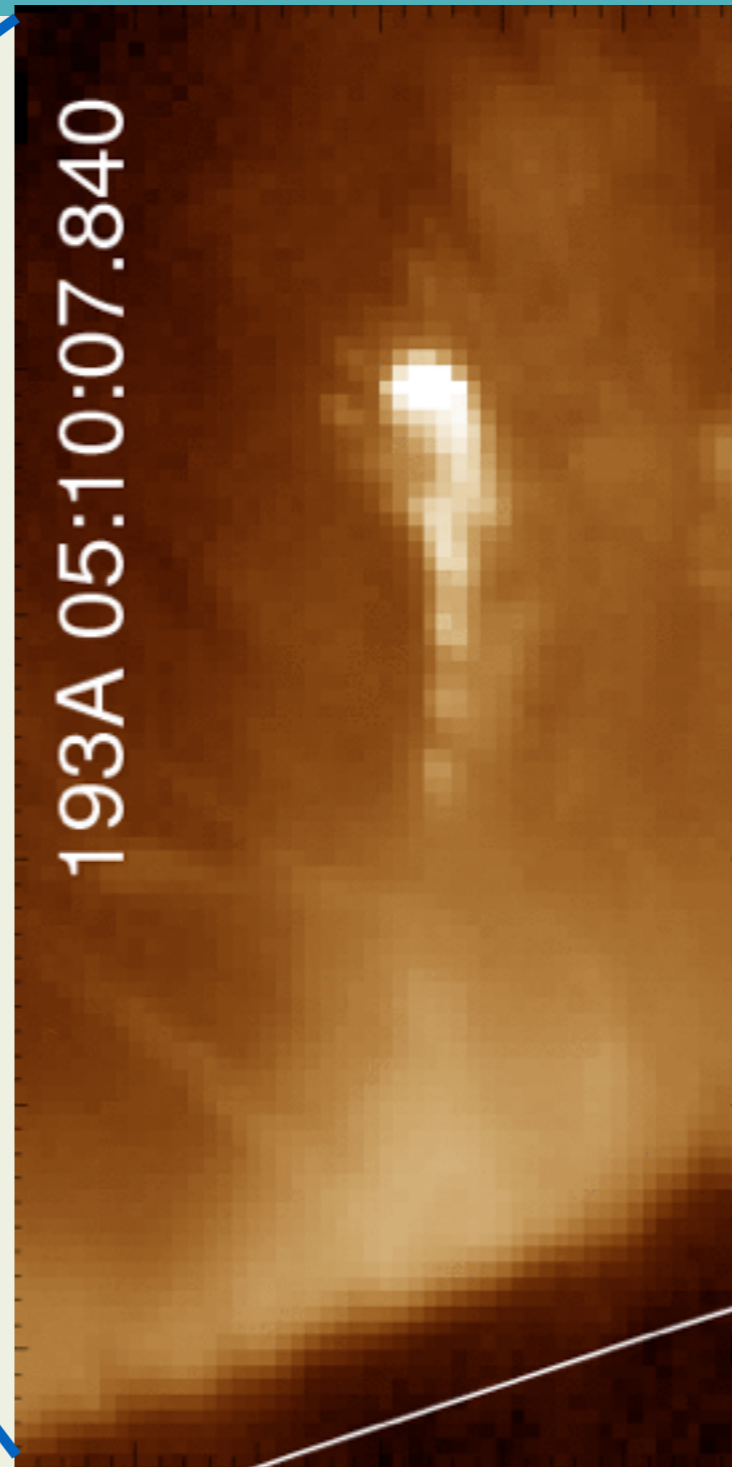
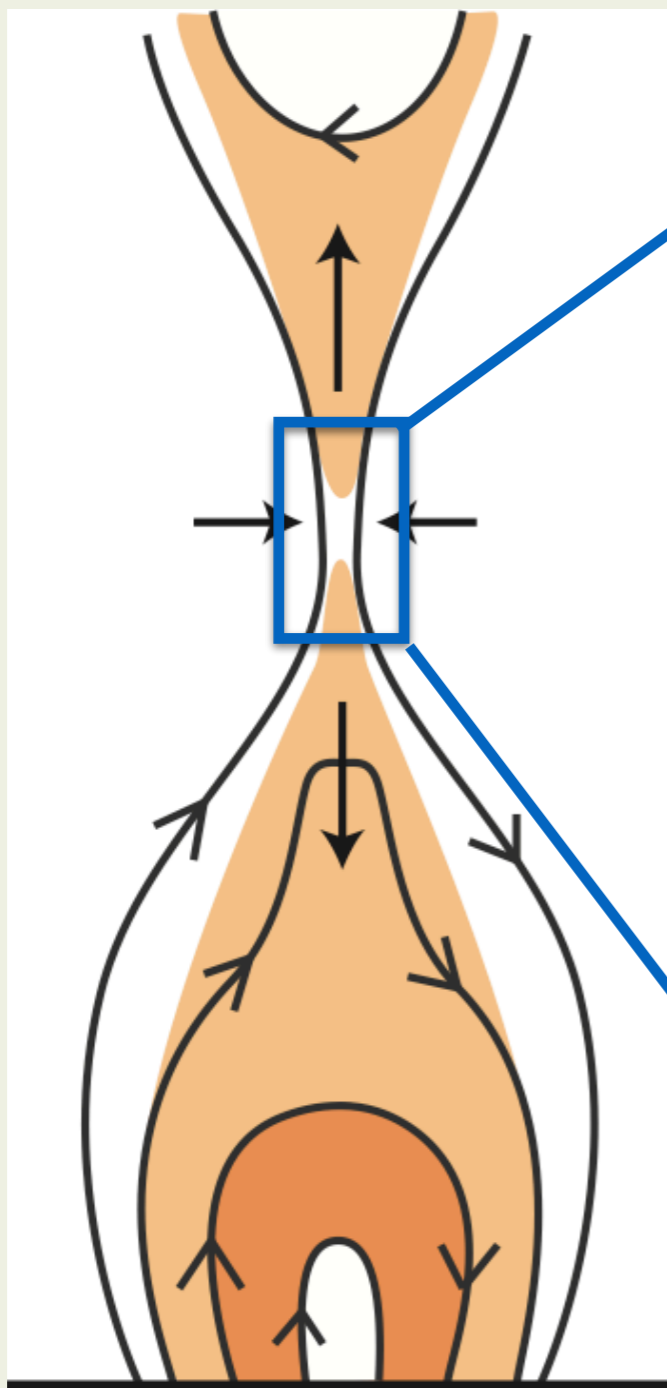
フレアの発生機構

Huang & Bhattacharjee 2009



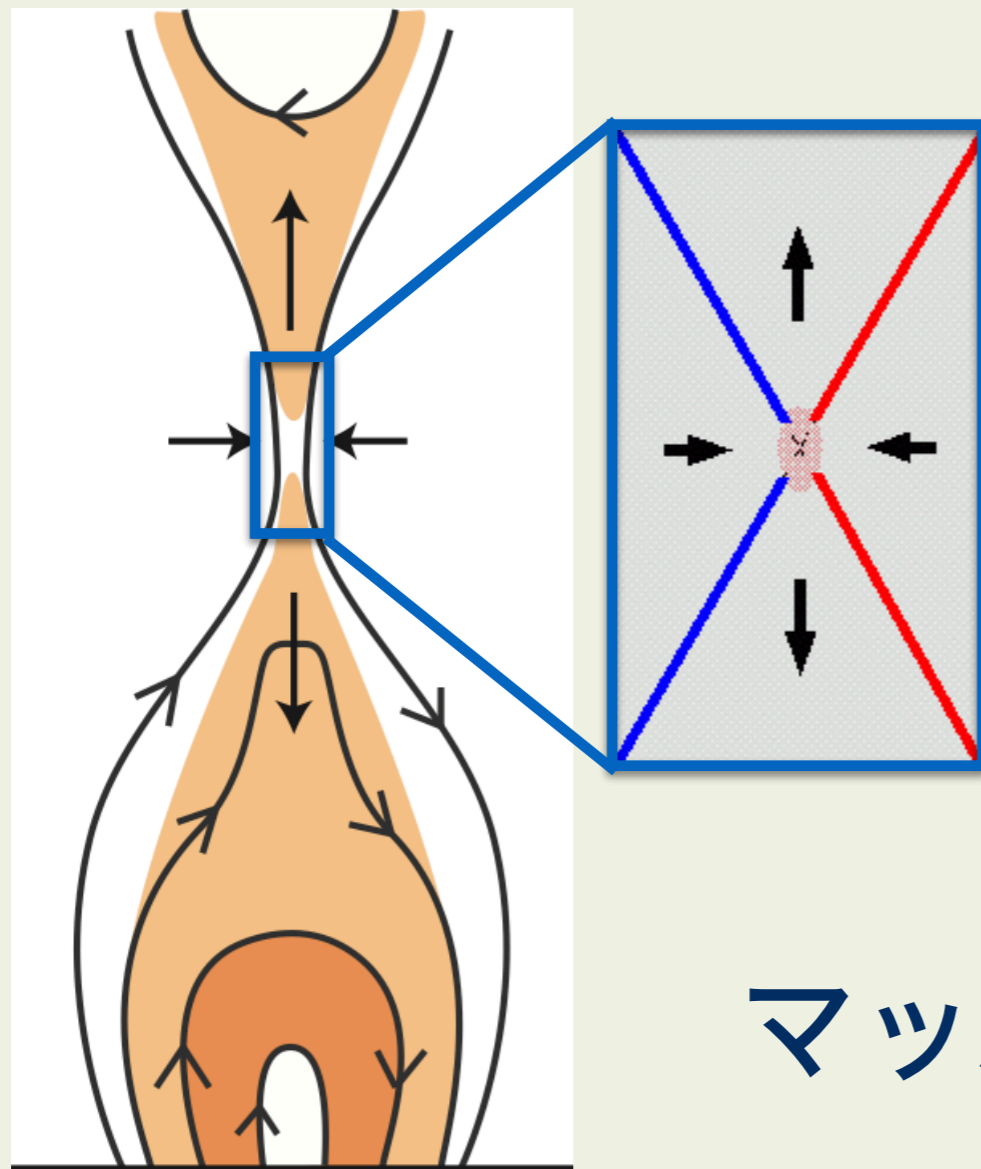
リコネクションは磁場の拡散過程が絡む現象なので、フレアの短い時間スケール (~hours) を実現するには細かい構造を作る必要性
理論：電流シートの分裂が鍵では？

フレアの発生機構



電流シート分裂と思われる構造を発見 (ST+2012, 2016b)
(合体・噴出する様子も観測)

衝撃波の構造と役割



太陽のコロナは磁気エネルギーが
ガスの内部エネルギーに対して卓越

$$\frac{p_{gas}}{p_{mag}} \simeq \left(\frac{C_s}{V_A} \right)^2 \sim 0.01$$

$$V_{outflow} \simeq V_A$$

(大きく見積もると)

マッハ数

$$\frac{V_{outflow}}{C_s} \simeq \frac{V_A}{C_s} \simeq 10$$

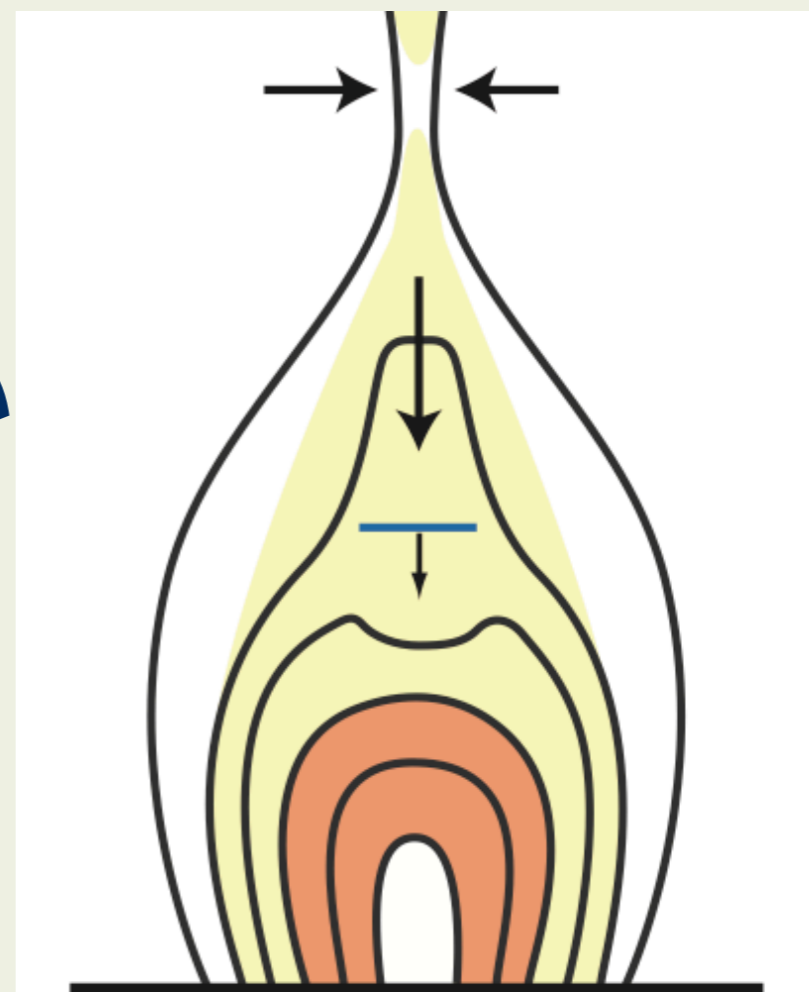
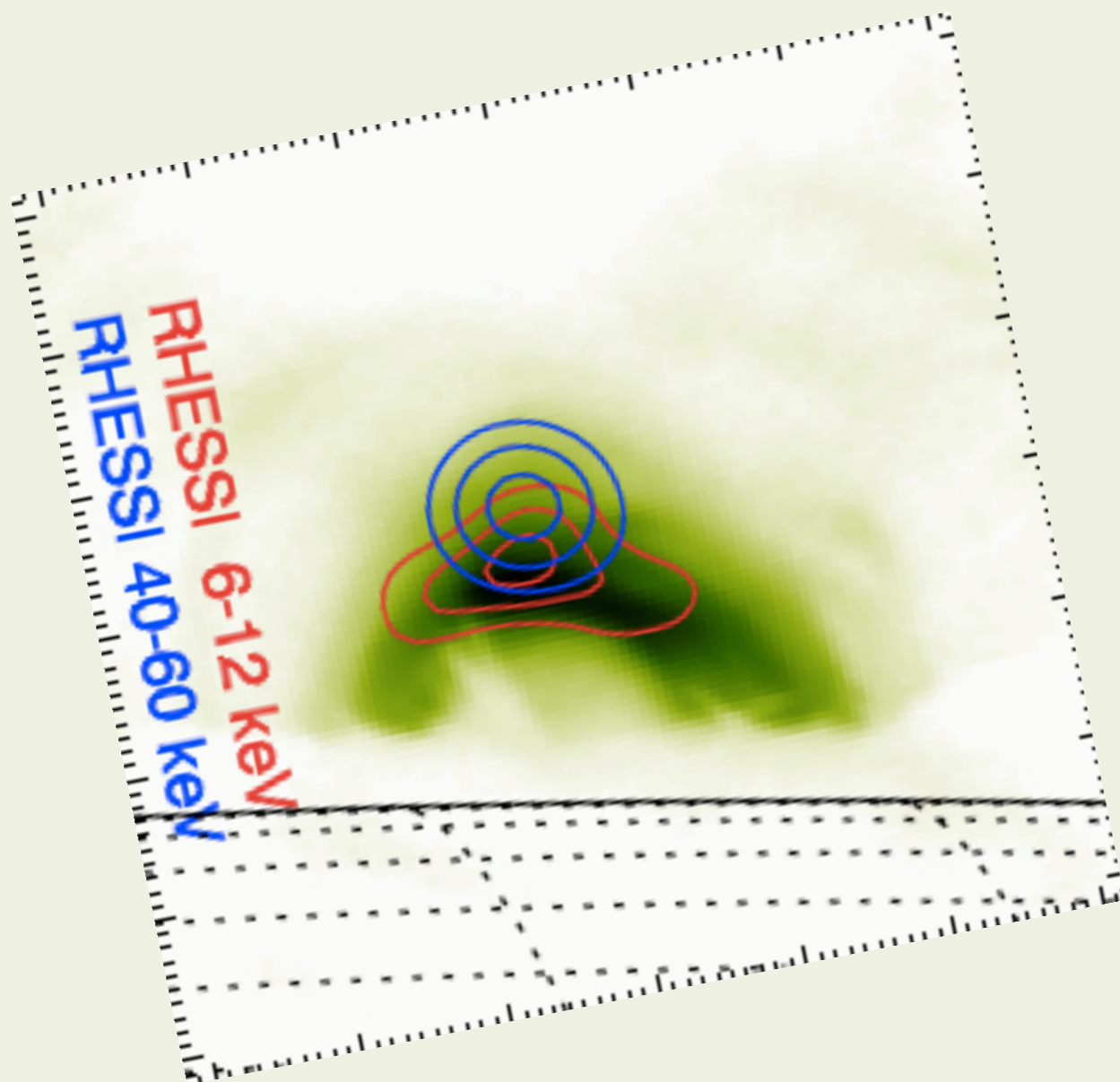
コロナではリコネクションに伴って
衝撃波の形成が期待される

衝撃波の構造と役割

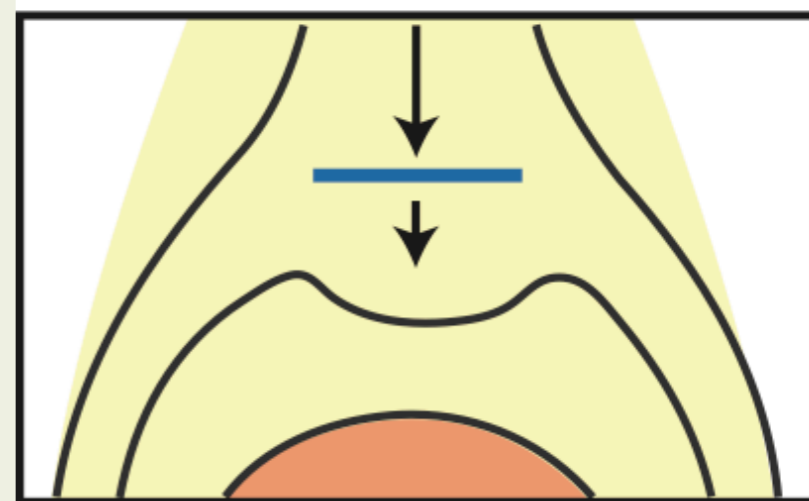
非熱的・高エネルギー電子は

衝撃波で加速か？

衝撃波構造はよくわかっていない

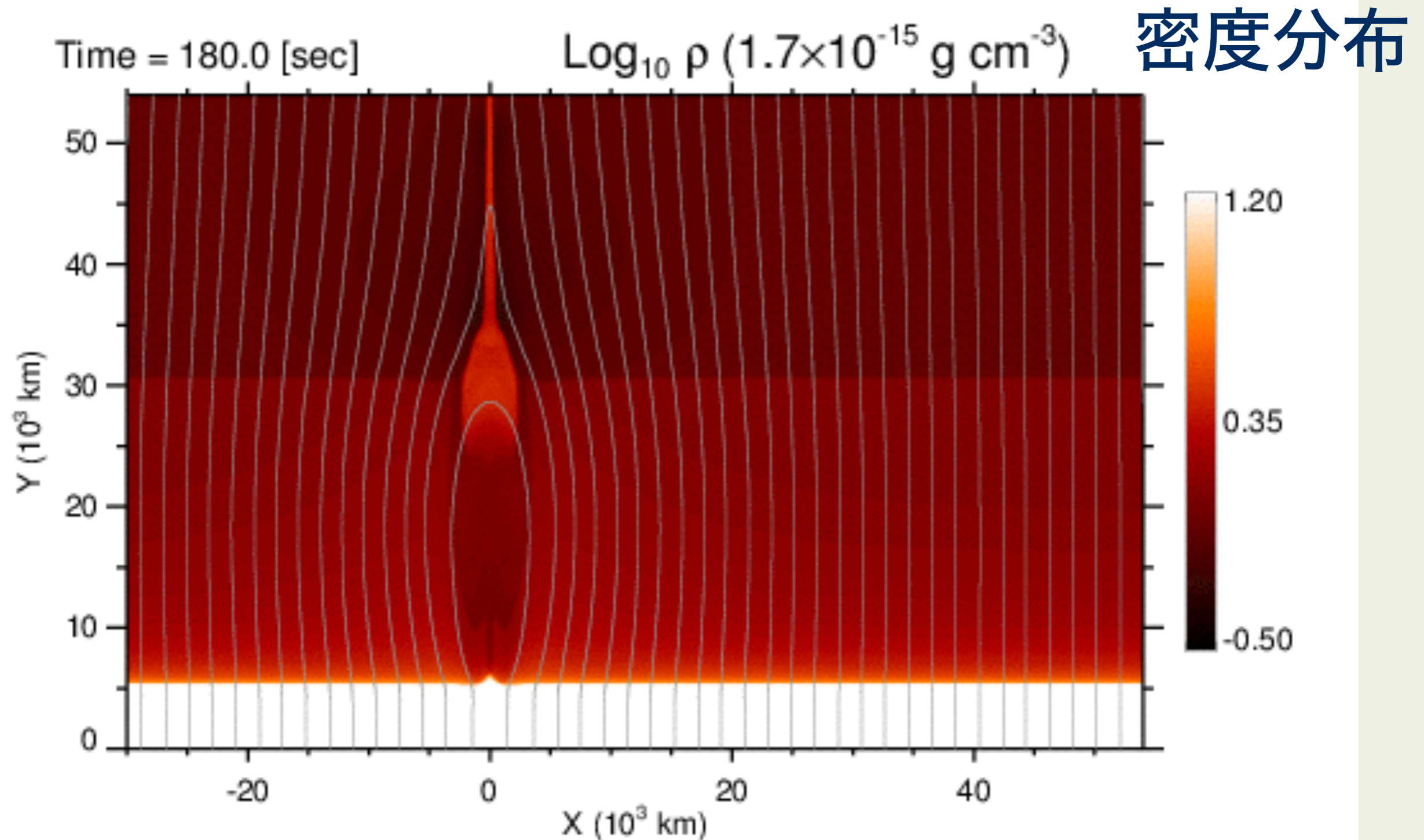


Termination shock



衝撃波の構造

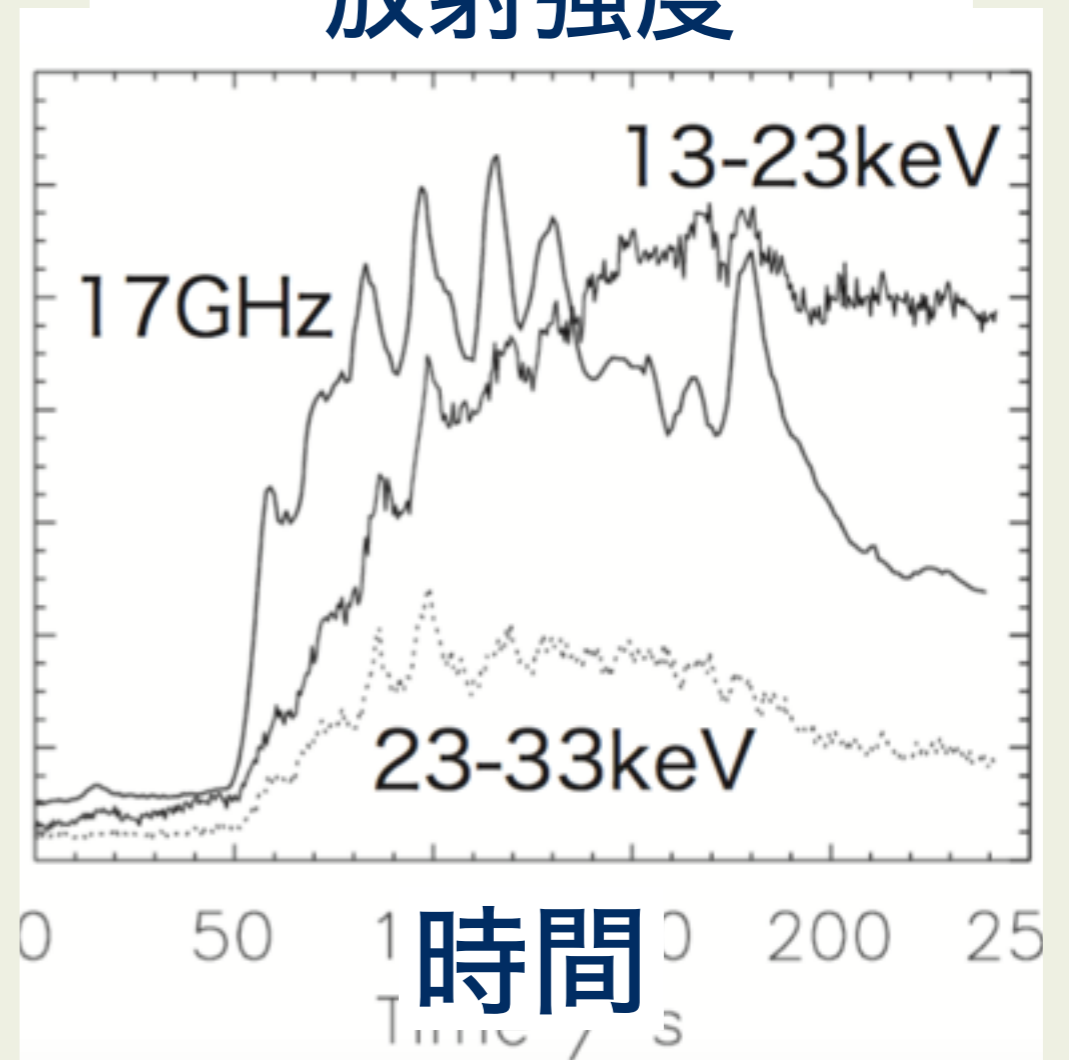
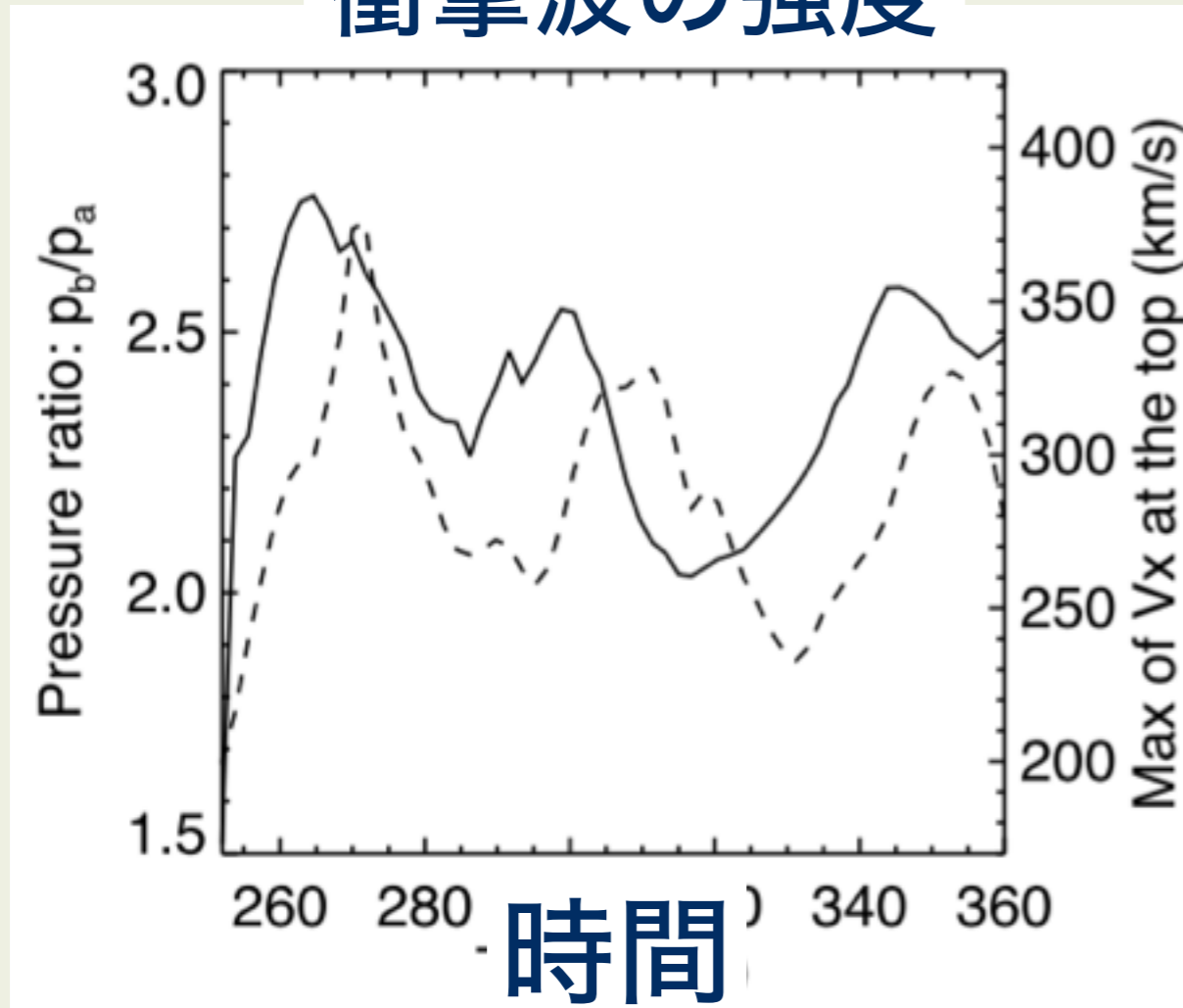
フレアの2次元磁気流体シミュレーション



衝撃波構造の振動

時間変動する
衝撃波の強度

非熱的電子起源の
放射強度



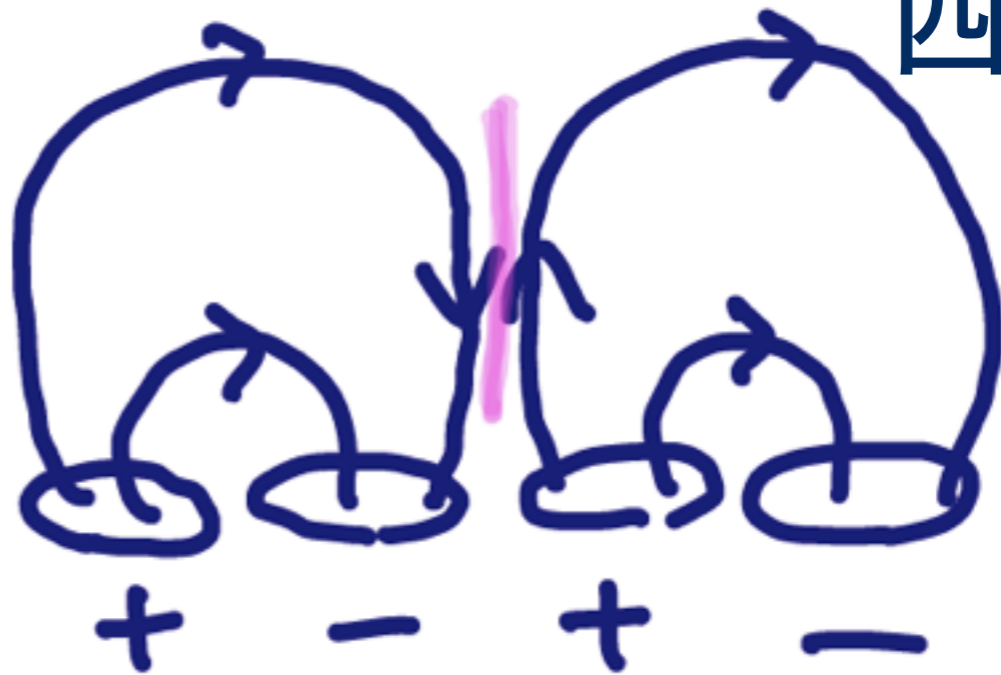
- 衝撃波構造の振動は観測とも整合的
- 振動周期と磁場強度を結ぶスケーリング則を導出

黒点構造とフレア活動性

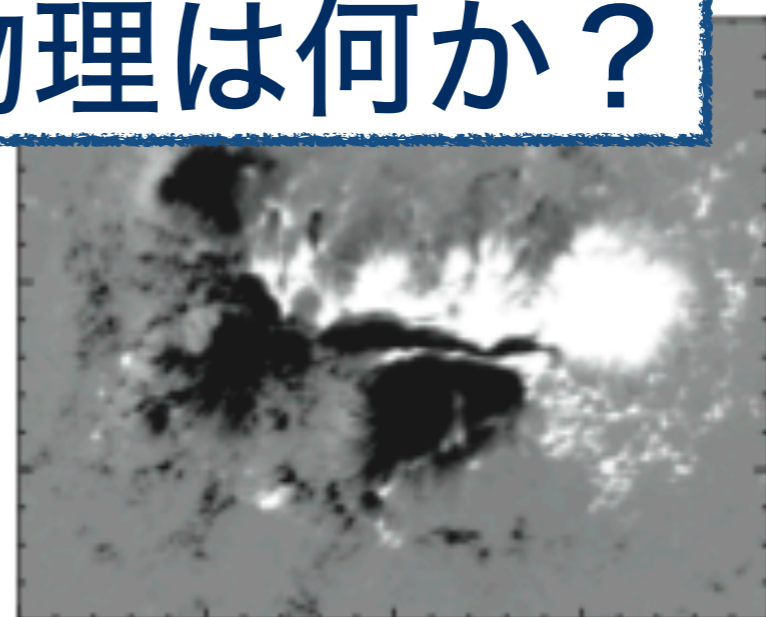
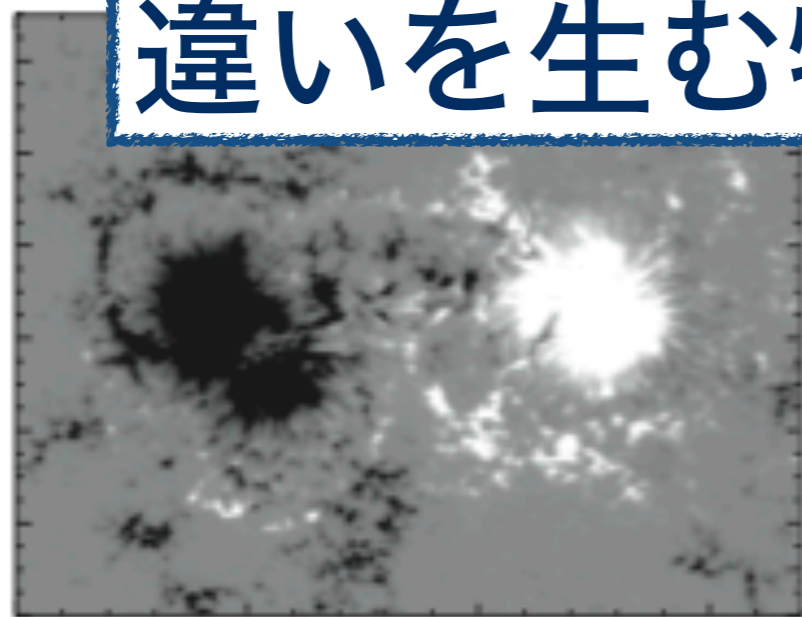
双極型



四重極型



違いを生む物理は何か？

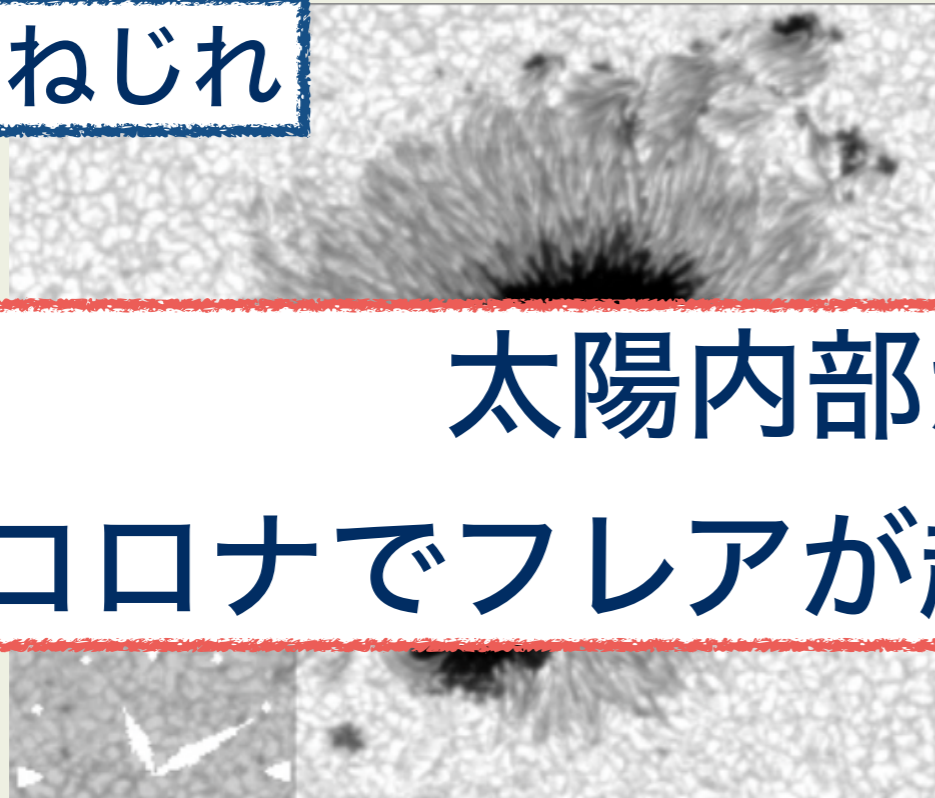


単純 (不活発)

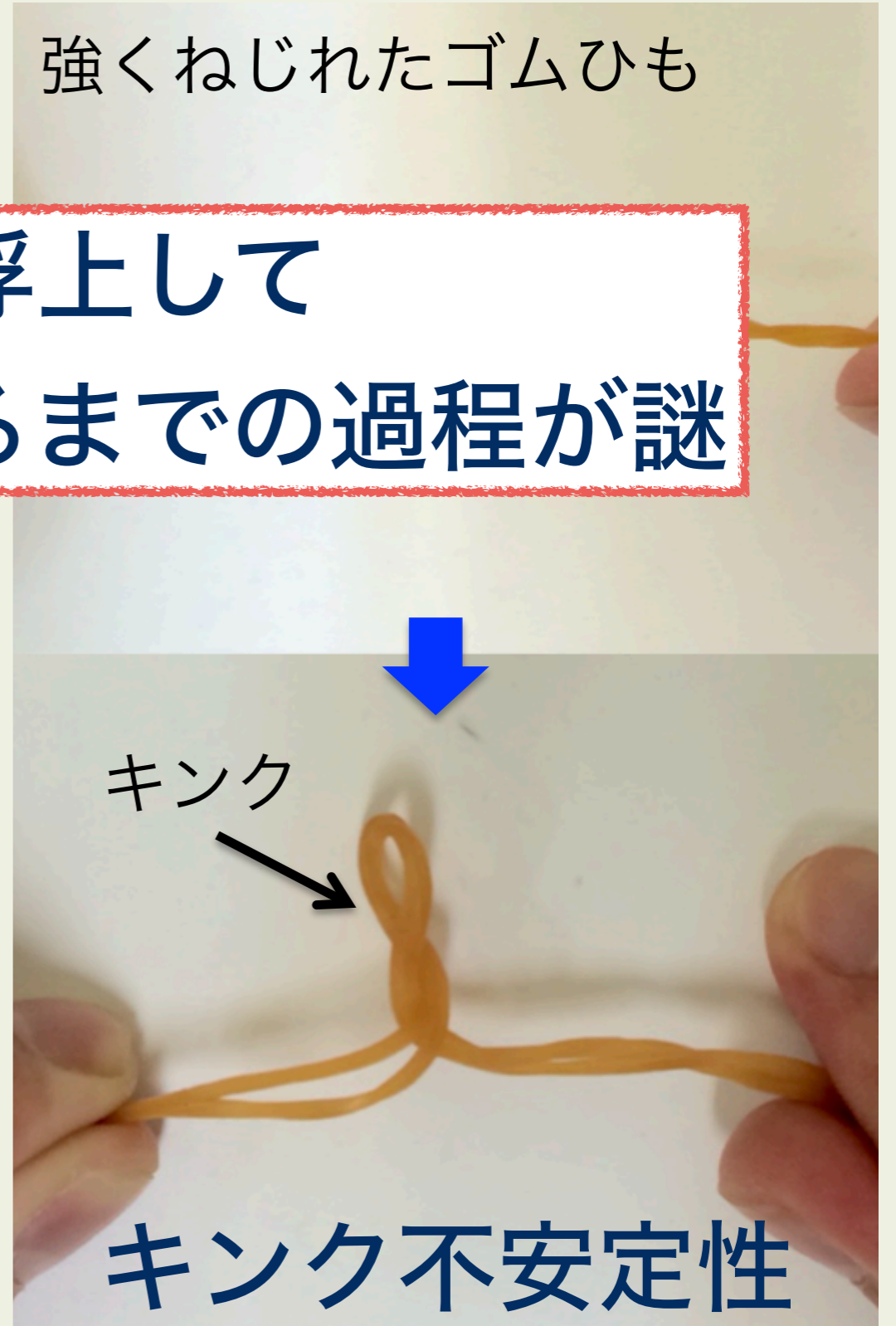
複雑 (活発)

大フレアを起こす黒点の特徴

強いねじれ

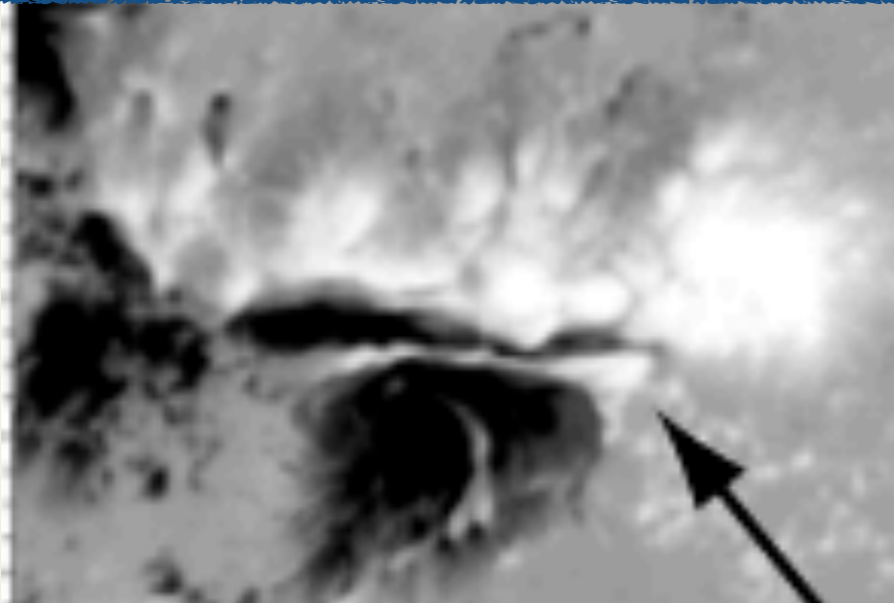


強くねじれたゴムひも



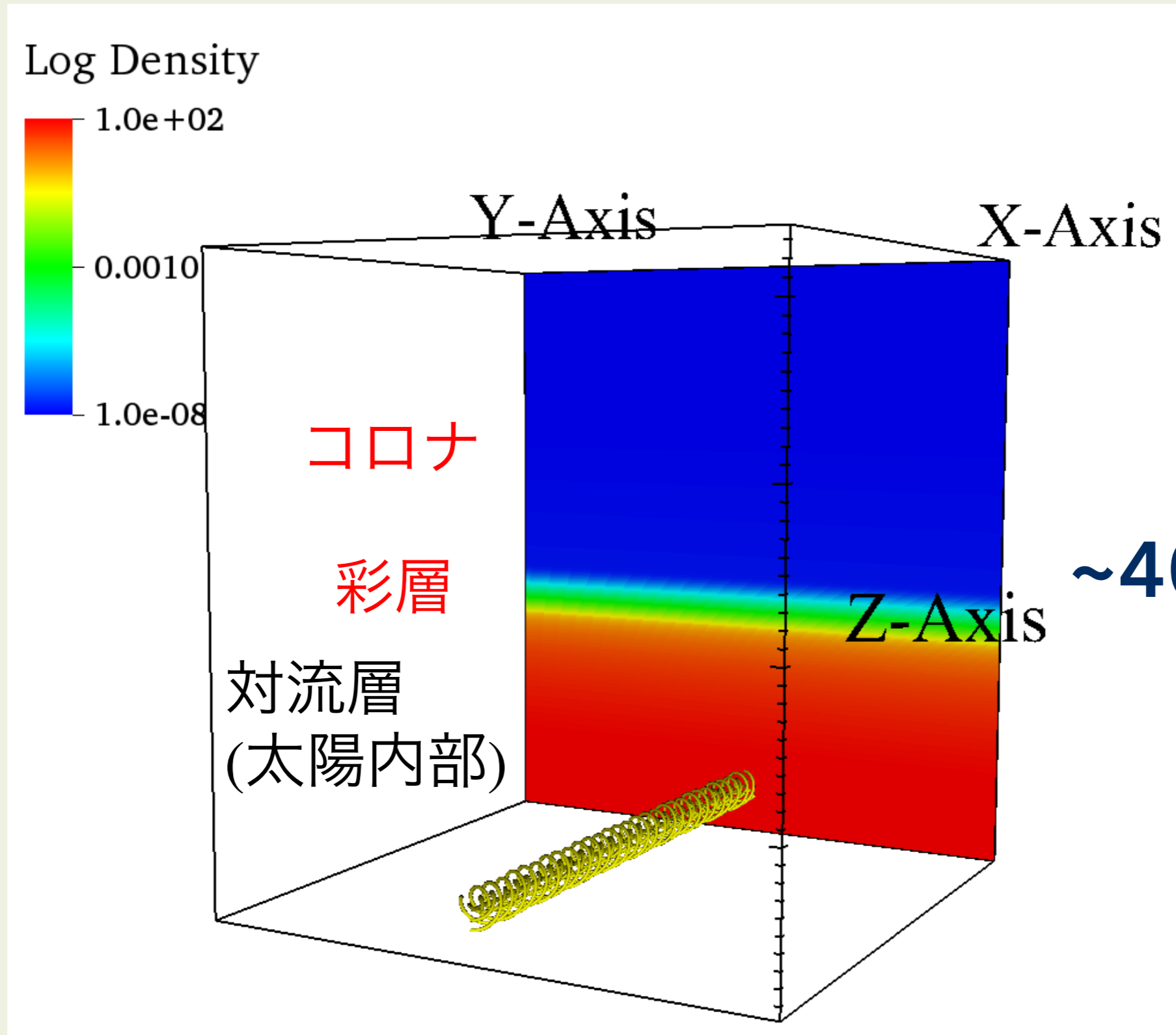
太陽内部から浮上して
コロナでフレアが起きるまでの過程が謎

東西方向から大きくずれた傾き
四重極構造



キック不安定性

3次元磁気流体シミュレーションの初期条件



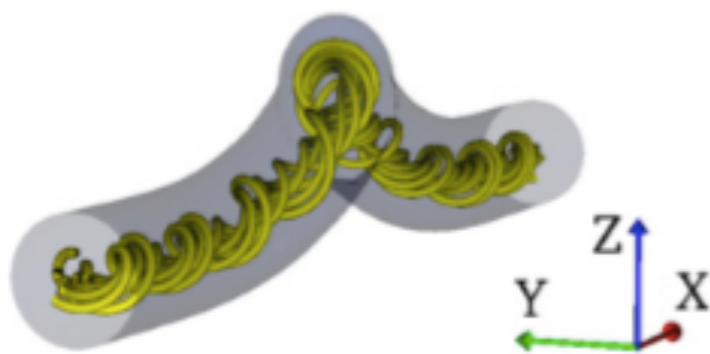
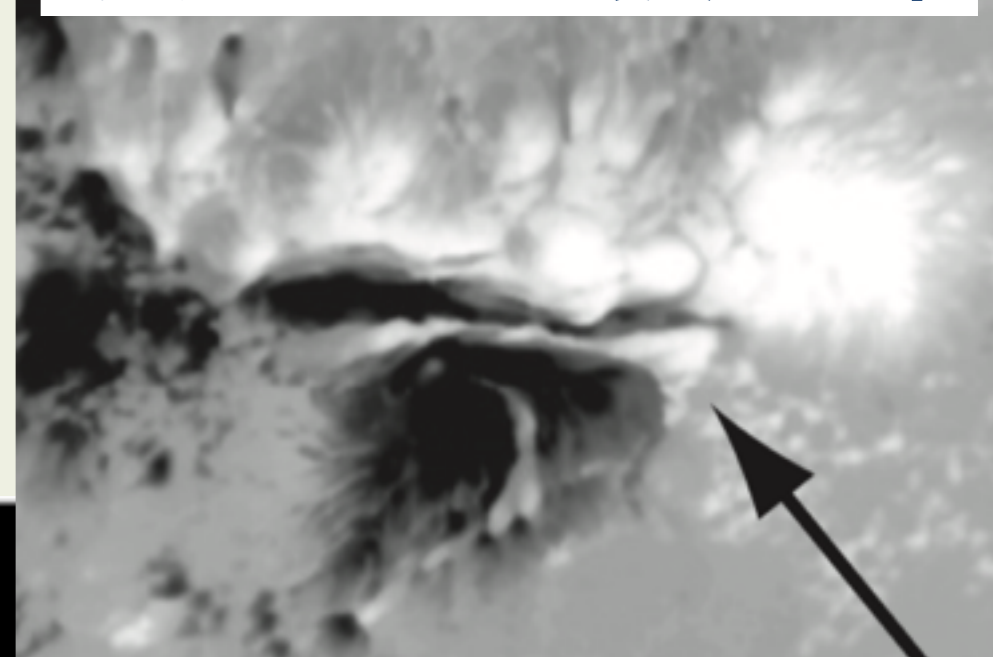
大フレアを起こす黒点の形成過程

強くねじれた磁場の束は
自発的に大フレアを起こすような
磁場構造を表面上に形成

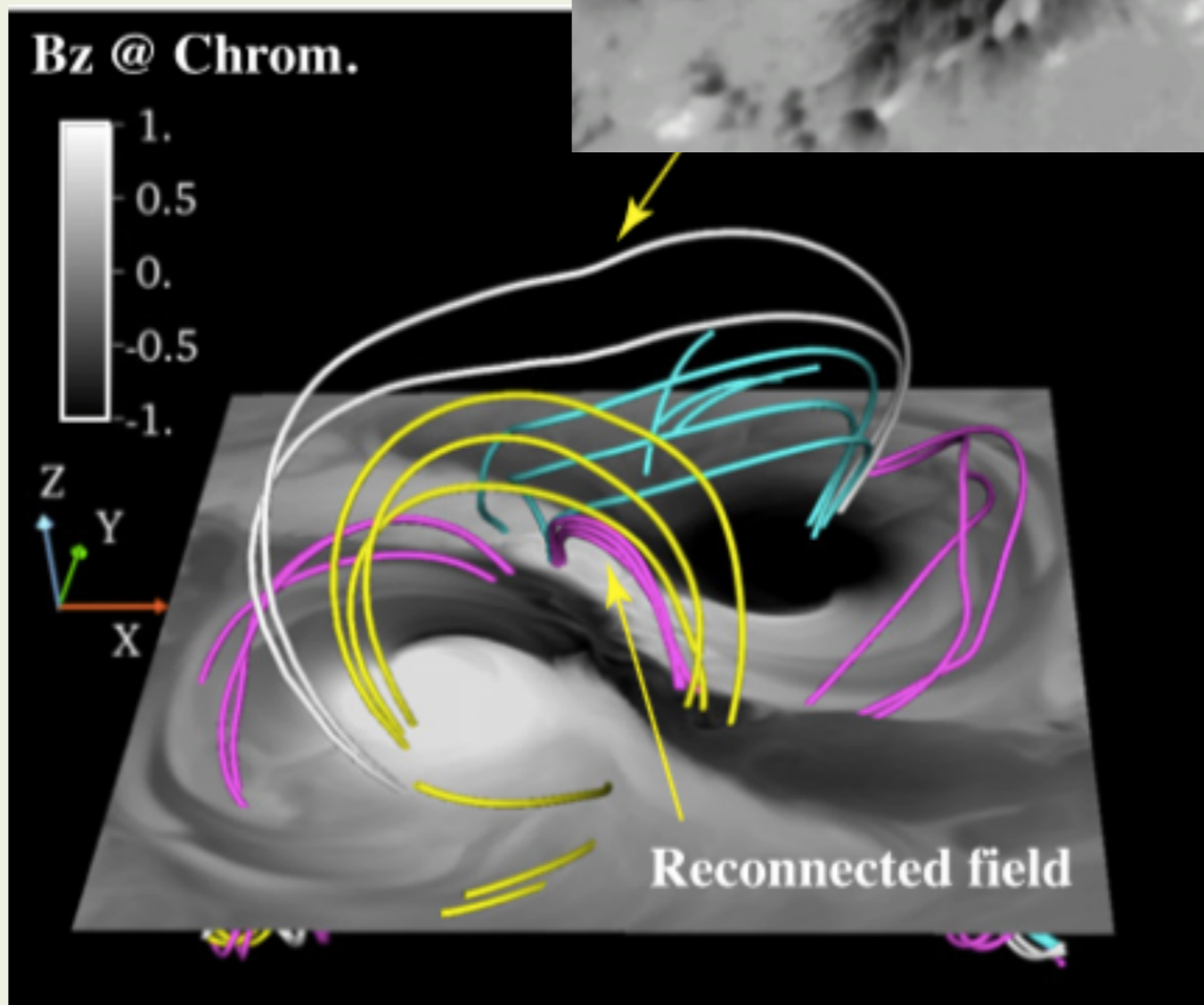
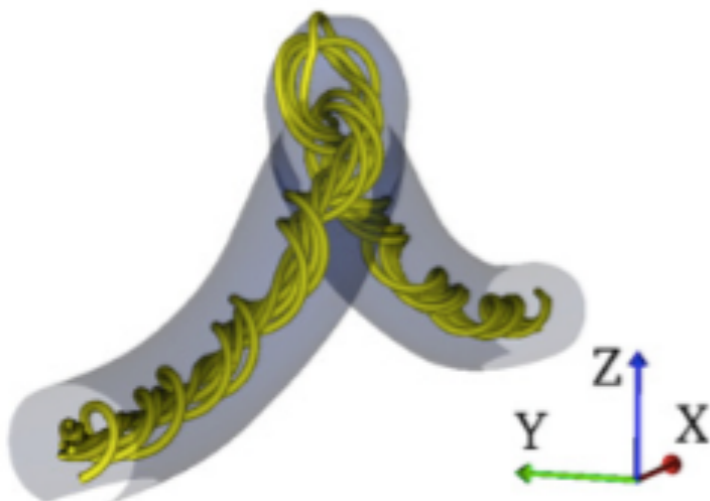
ST+2015b

太陽内部 → 表面上

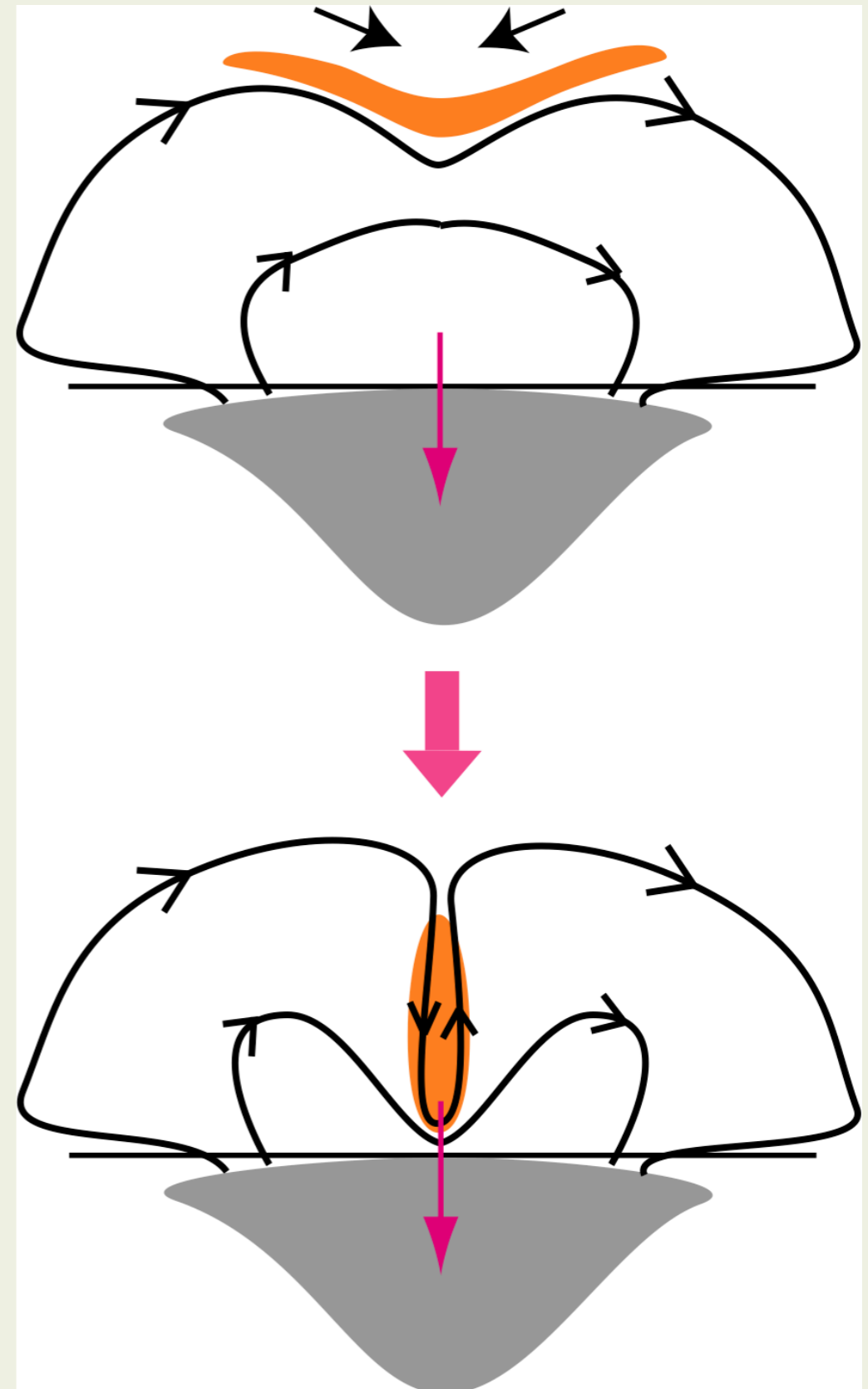
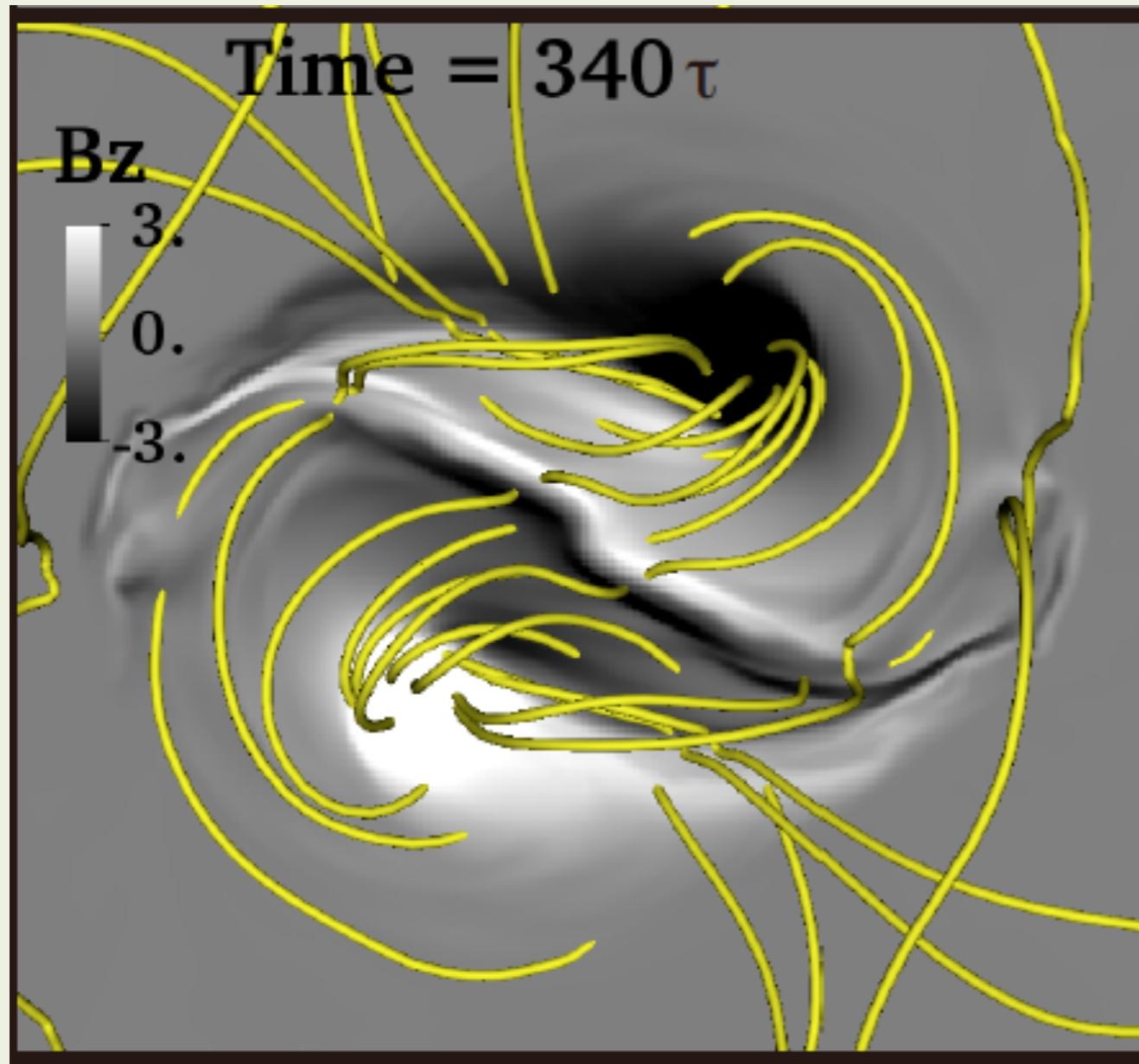
観測された磁場分布



キンク不安定化



四重極構造の形成



次の研究対象

円盤の内縁：星磁場と円盤の相互作用領域

- 若い星の高いフレア活動性とその円盤への影響
- 円盤内縁付近の構造（惑星軌道などに大事）
- 星への降着流・ジェットによる質量・角運動量流出

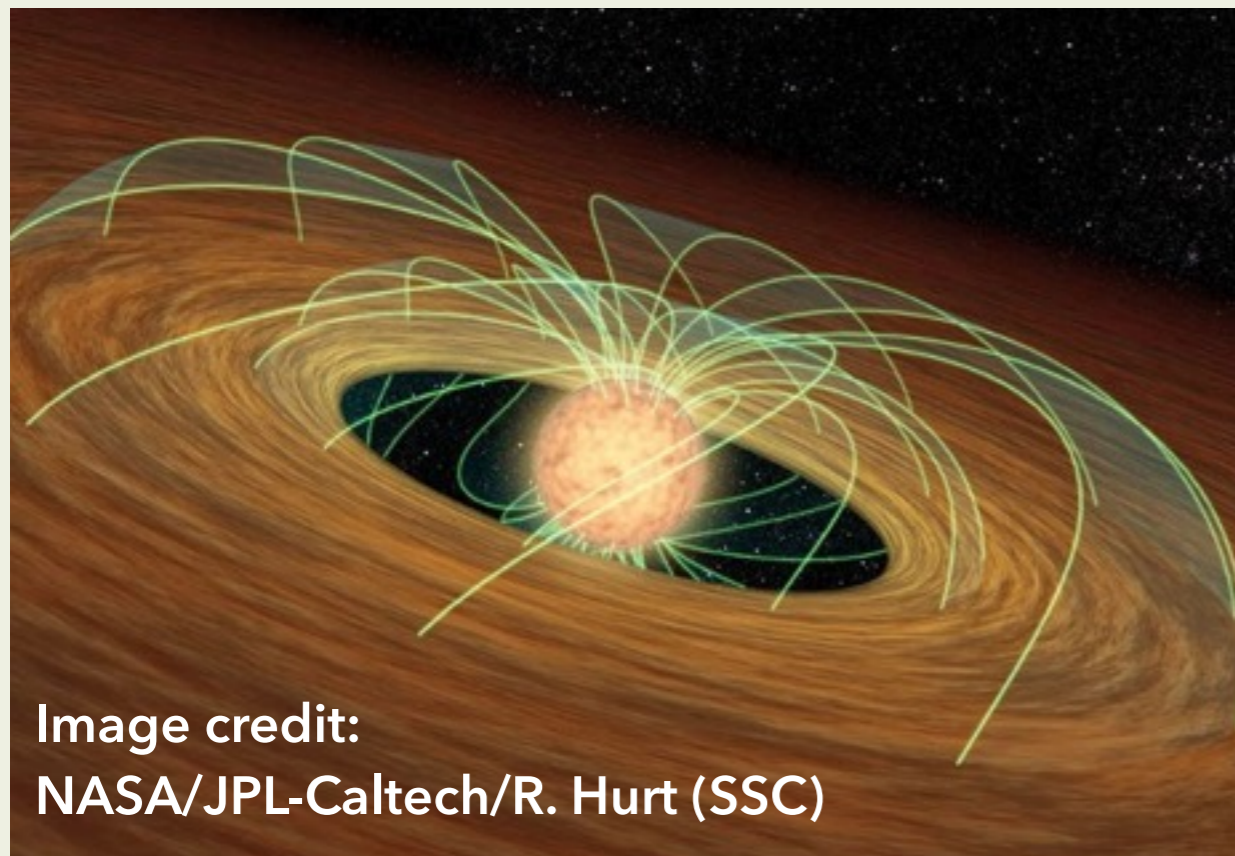
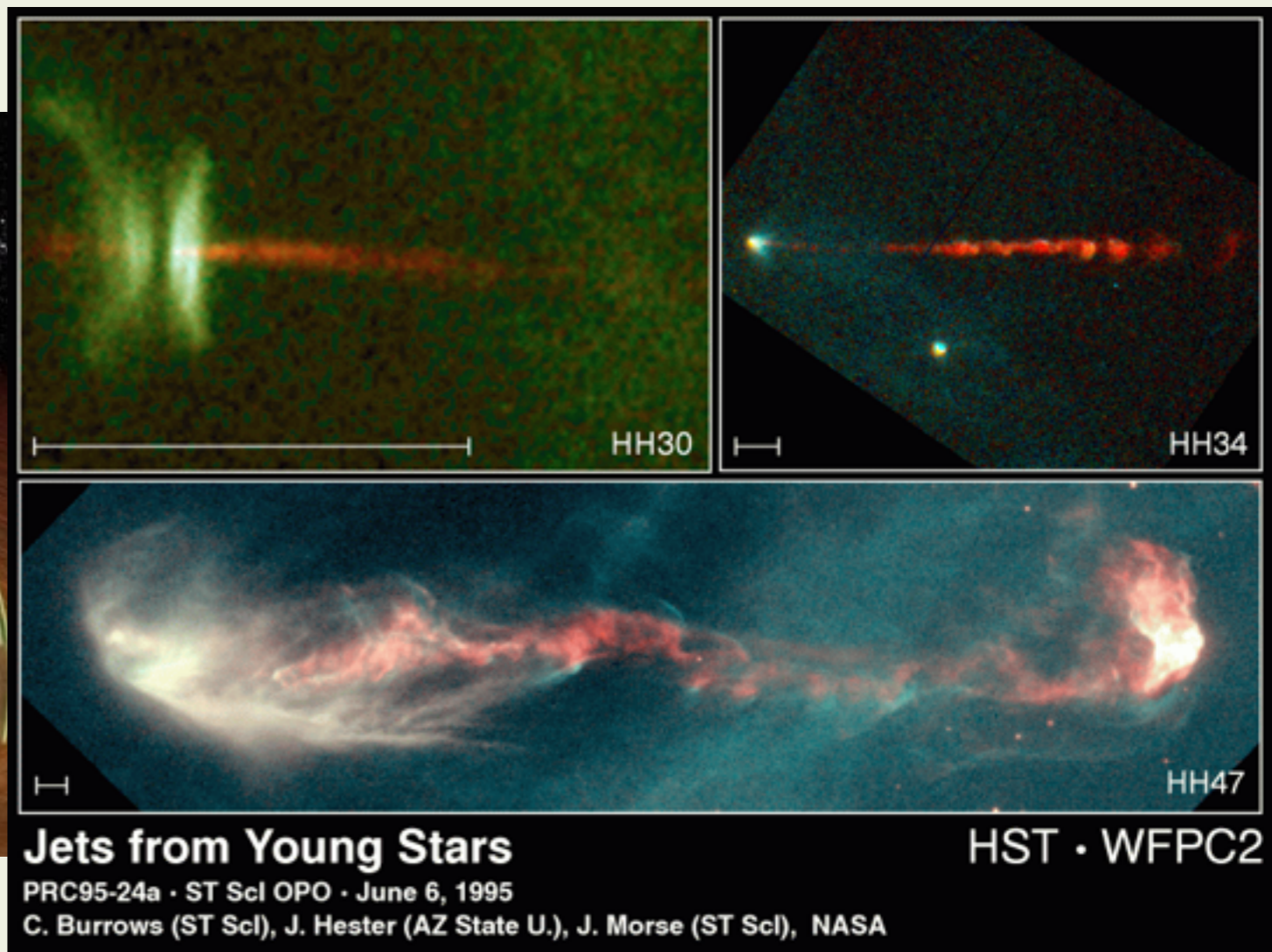


Image credit:
NASA/JPL-Caltech/R. Hurt (SSC)



Jets from Young Stars

PRC95-24a · ST Scl OPO · June 6, 1995

C. Burrows (ST Scl), J. Hester (AZ State U.), J. Morse (ST Scl), NASA

HST · WFPC2