

宇宙天気サマースクール 2008年8月28日―31日  
(山梨県清里 清泉寮)

# フレアにともなう質量噴出と コロナ質量放出

柴田一成

京大理・花山天文台

# 講義予定

## 6章: フレアにともなう質量噴出とコロナ質量放出

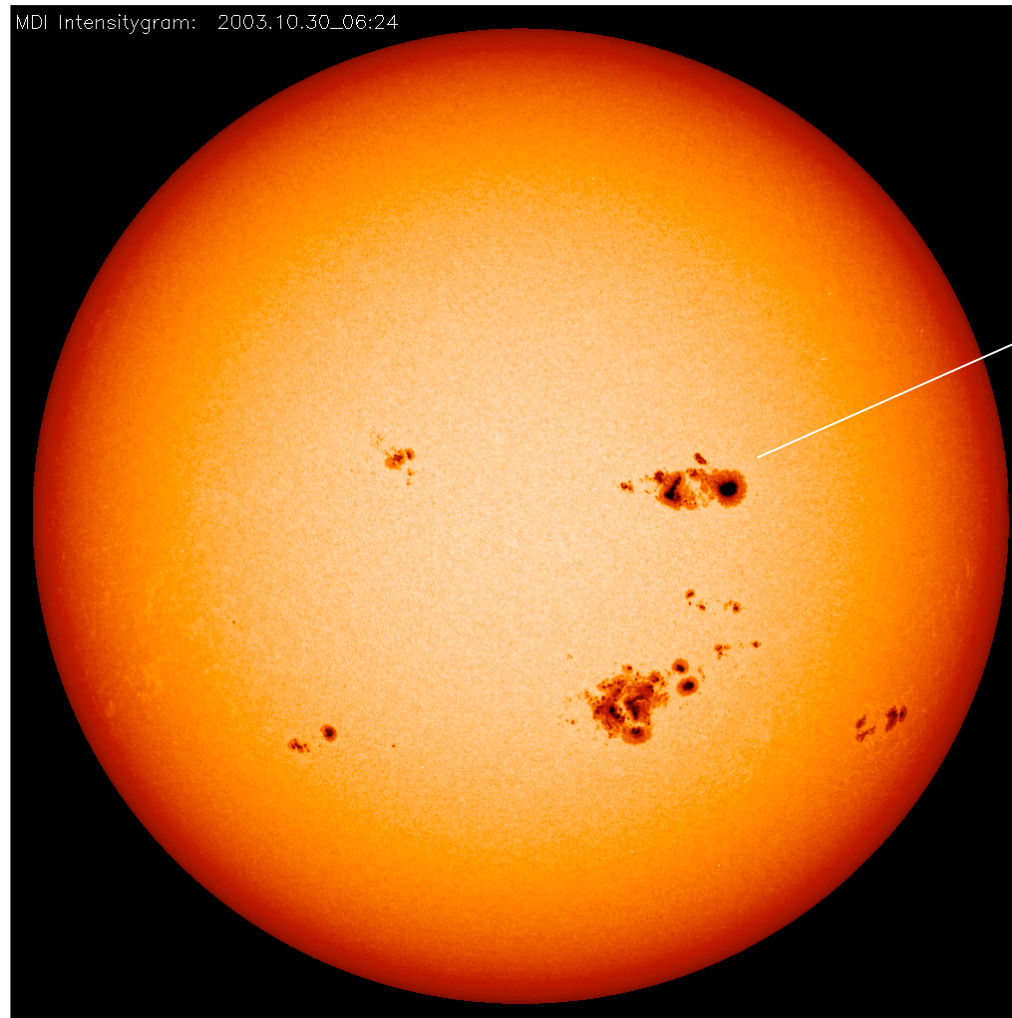
- 6. 1 はじめに(太陽とは? フレアとは? よくある質問)
- 6. 2 フィラメント(プロミネンス)噴出
- 6. 3 コロナ質量放出
- 6. 4 フレア衝撃波
- 6. 5 彩層蒸発
- 6. 6 フレアの現象論的磁気リコネクション・モデル
- 6. 7 フレアの統一モデル(plasmoid-induced-reconnection model)

# 参考文献

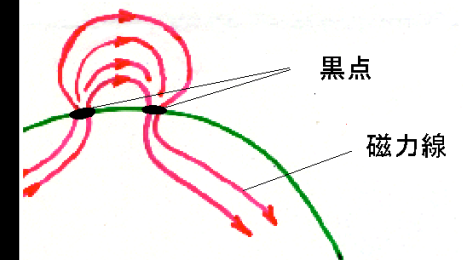
- Priest “Solar Magnetohydrodynamics”
- Tajima and Shibata “Plasma Astrophysics”
- Parker “Cosmical Magnetic Fields”
- Svestka “Solar Flares”
- 柴田一成、大山真満「写真集太陽」
- 柴田、福江、松元、嶺重編「活動する宇宙」

太陽とは

# 可視光で見た太陽 (光球=6000度)

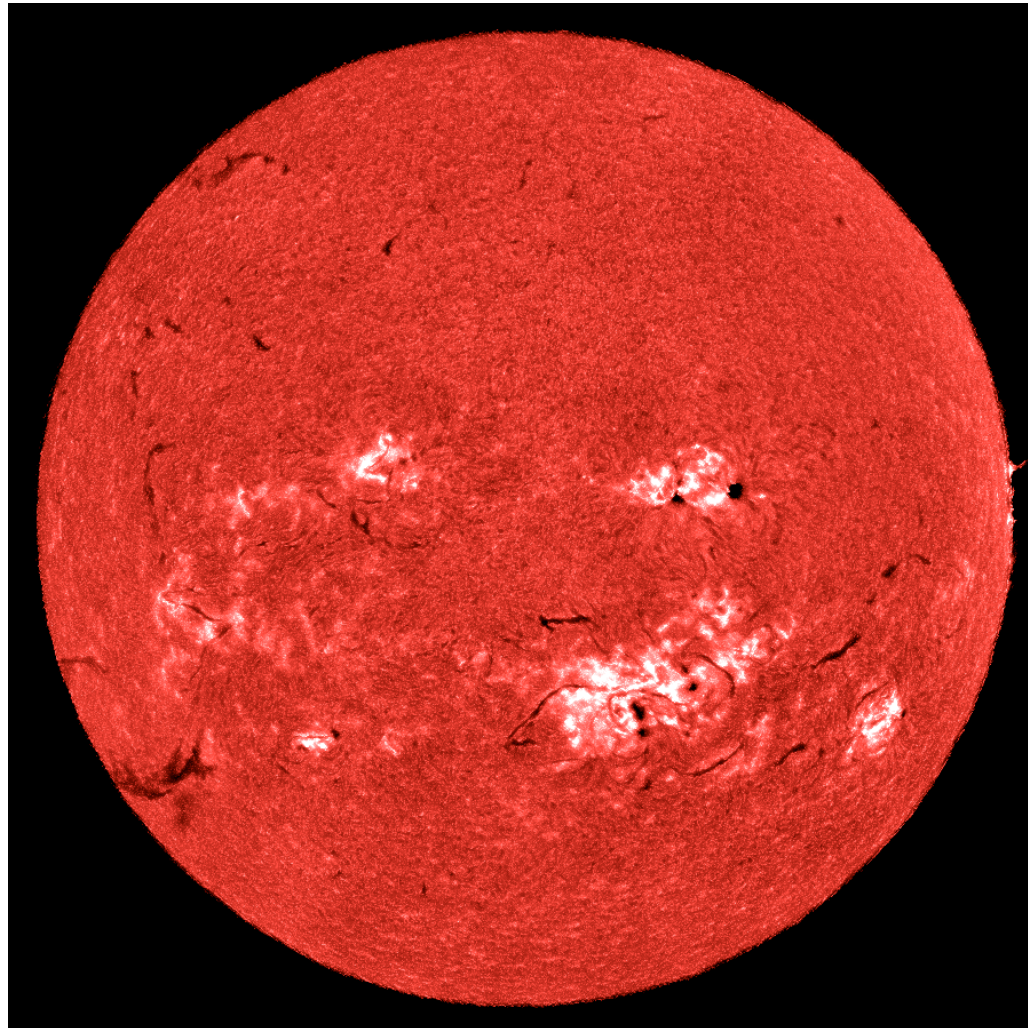


黒点  
(磁束管の  
切り口)  
しかし生成  
機構は謎



SOHO  
(NASA&ESA)

# H $\alpha$ 線(水素原子のスペクトル線)で見た太陽 (彩層=1万度: 光球の上層大気)



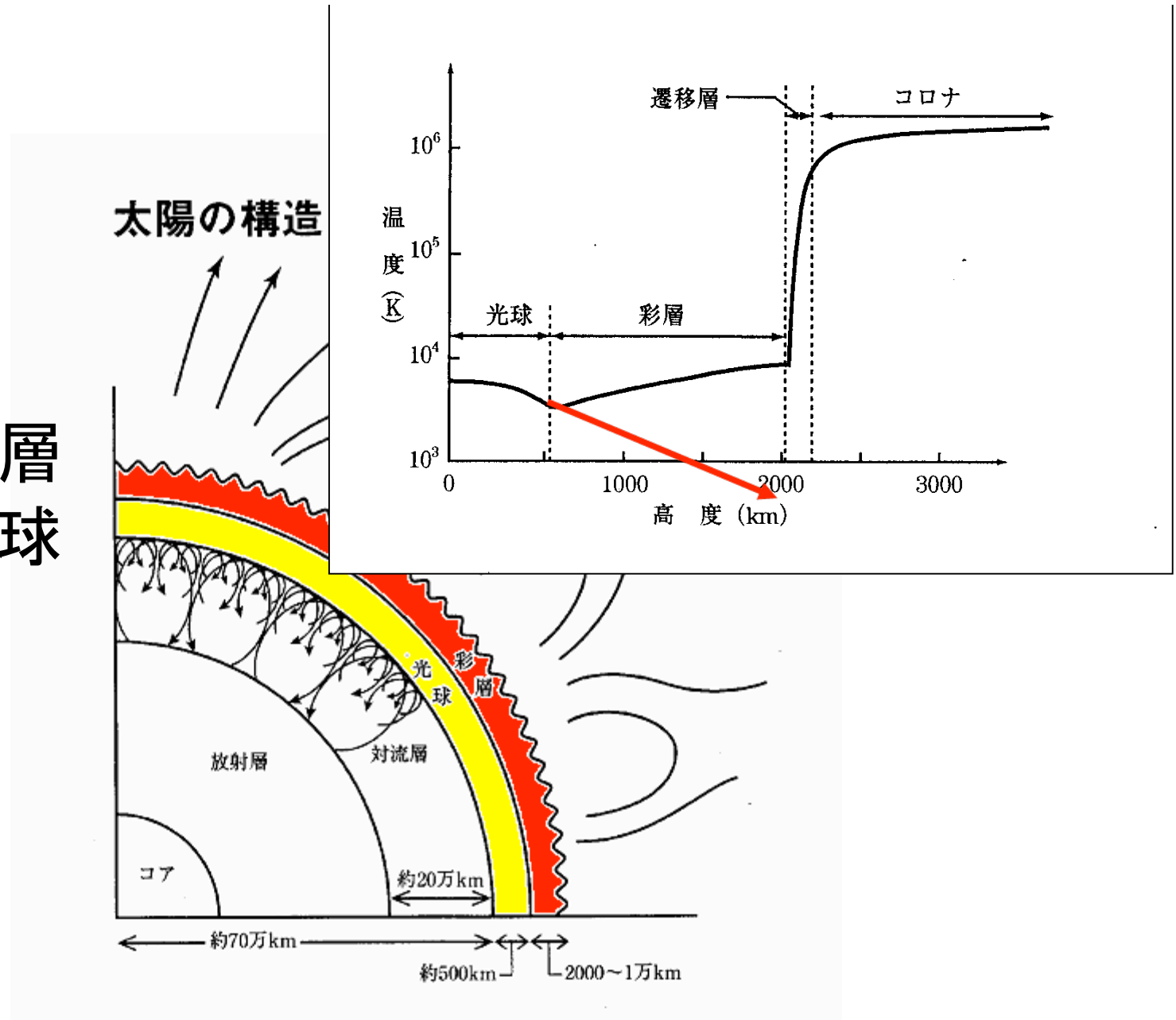
2003年10月  
京大飛驒天文台  
SMART望遠鏡

# 太陽コロナ



コロナは100万度もの超高温状態にある(1940年代発見)  
なぜ、こんなに超高温になっているのか？  
天文学最大のなぞの一つ

彩層  
光球



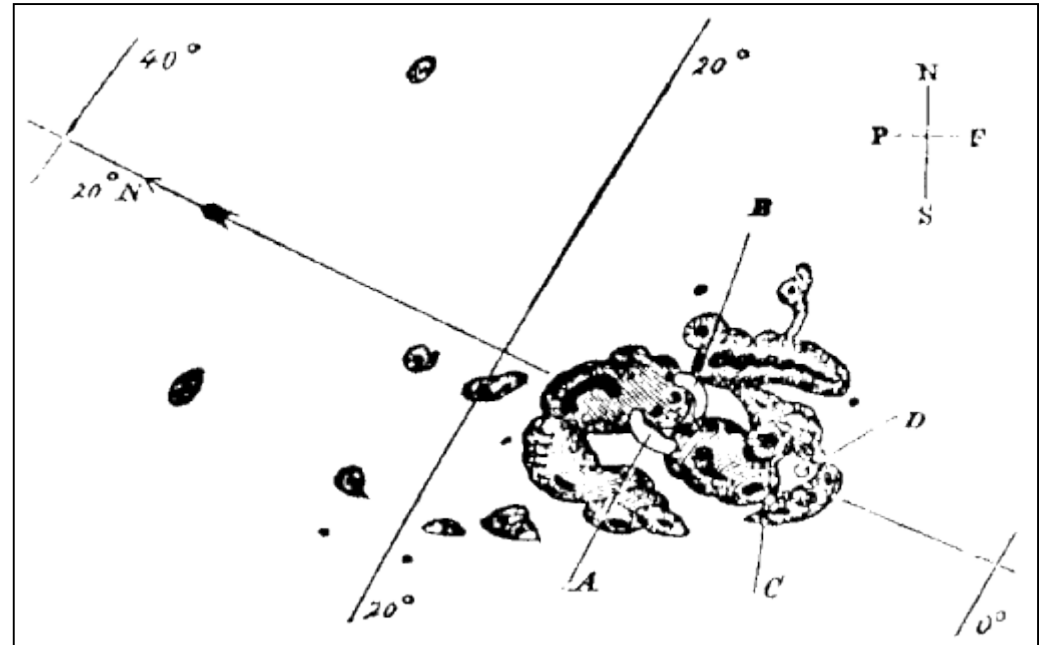
柴田、大山 (2004) 写真集 太陽(裳華房)より



フレアとは

# フレアの発見

- 最初の発見
  - 19世紀中頃
  - Carrington , Hodgson
  - 可視光(白色光)
  - 黒点観測中
  - 白色光フレア
- 本格観測は20世紀になってから
  - スペクトロヘリオグラフ発明後
  - H $\alpha$ 単色光で彩層フレア観測が可能になる



# 太陽フレア

19世紀中頃発見

黒点近傍で発生 =>

**磁気エネルギー**が源

サイズ～(1-10)万km

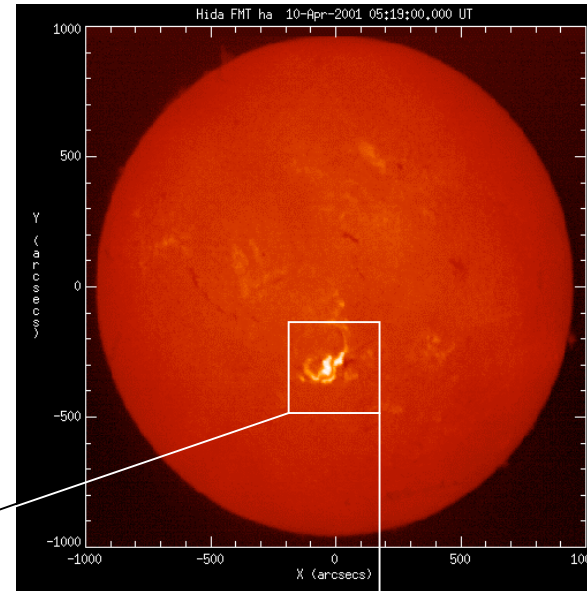
全エネルギー

$10^{29} - 10^{32}$ erg

(水爆10万-1億個)

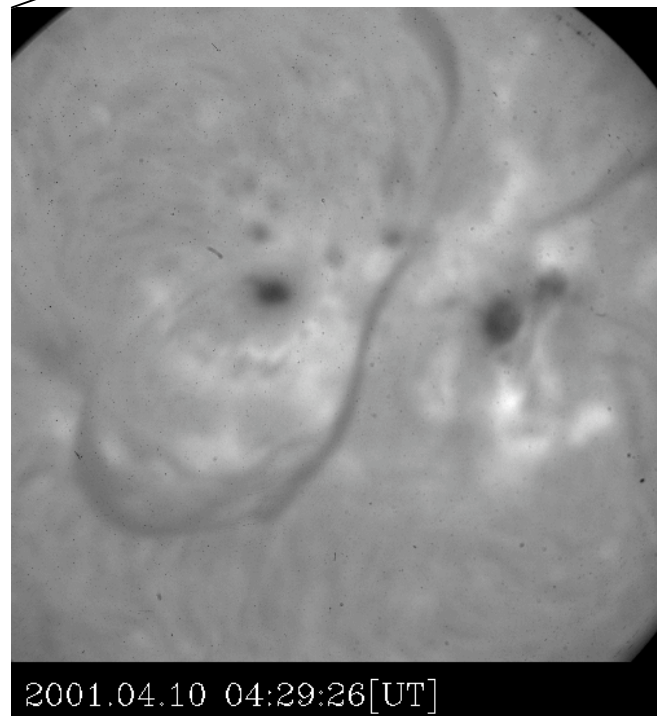
太陽系最大の爆発現象

発生メカニズムが  
1世紀以上謎



H $\alpha$

彩層  
1万度

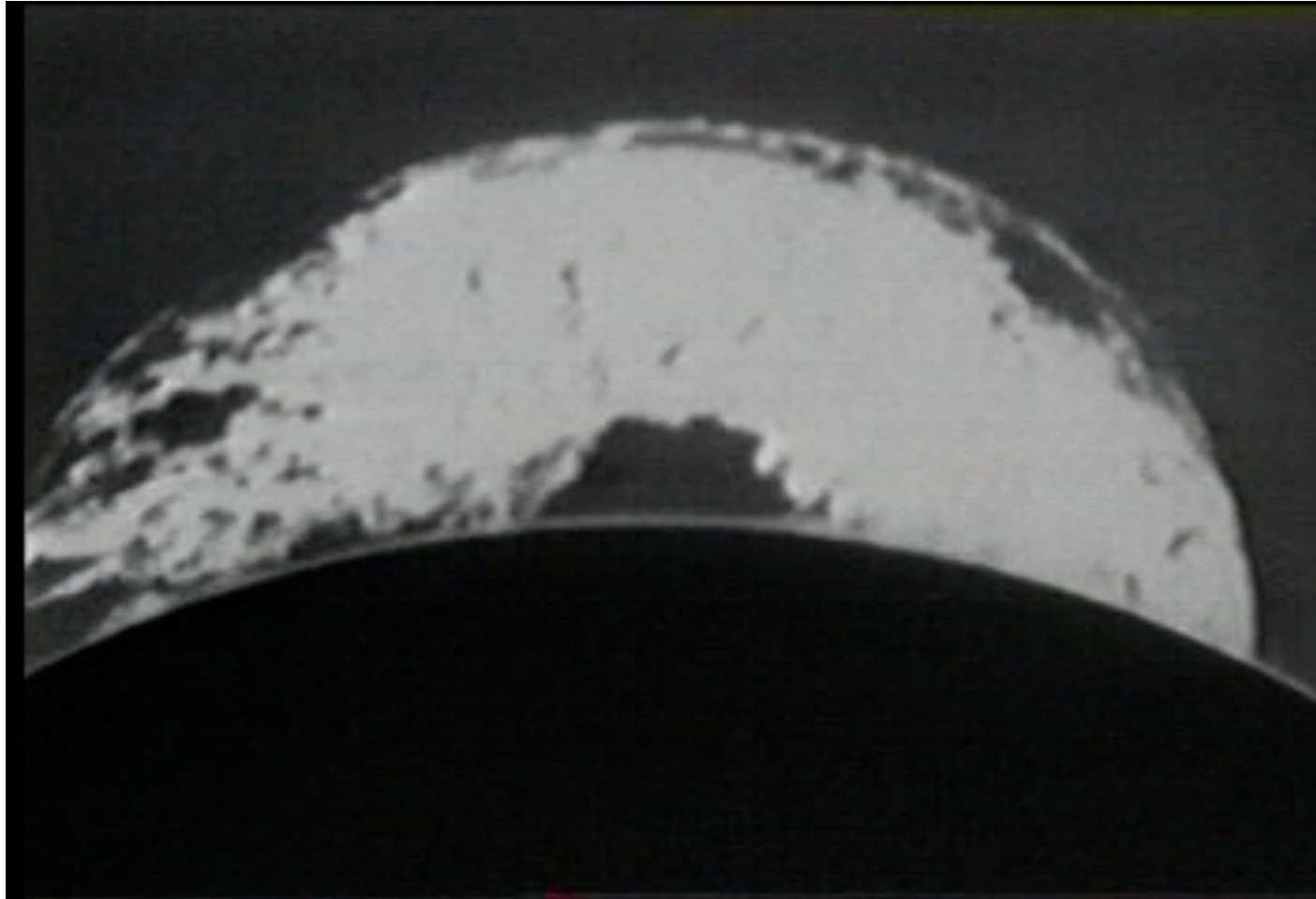


京大飛驒天文台

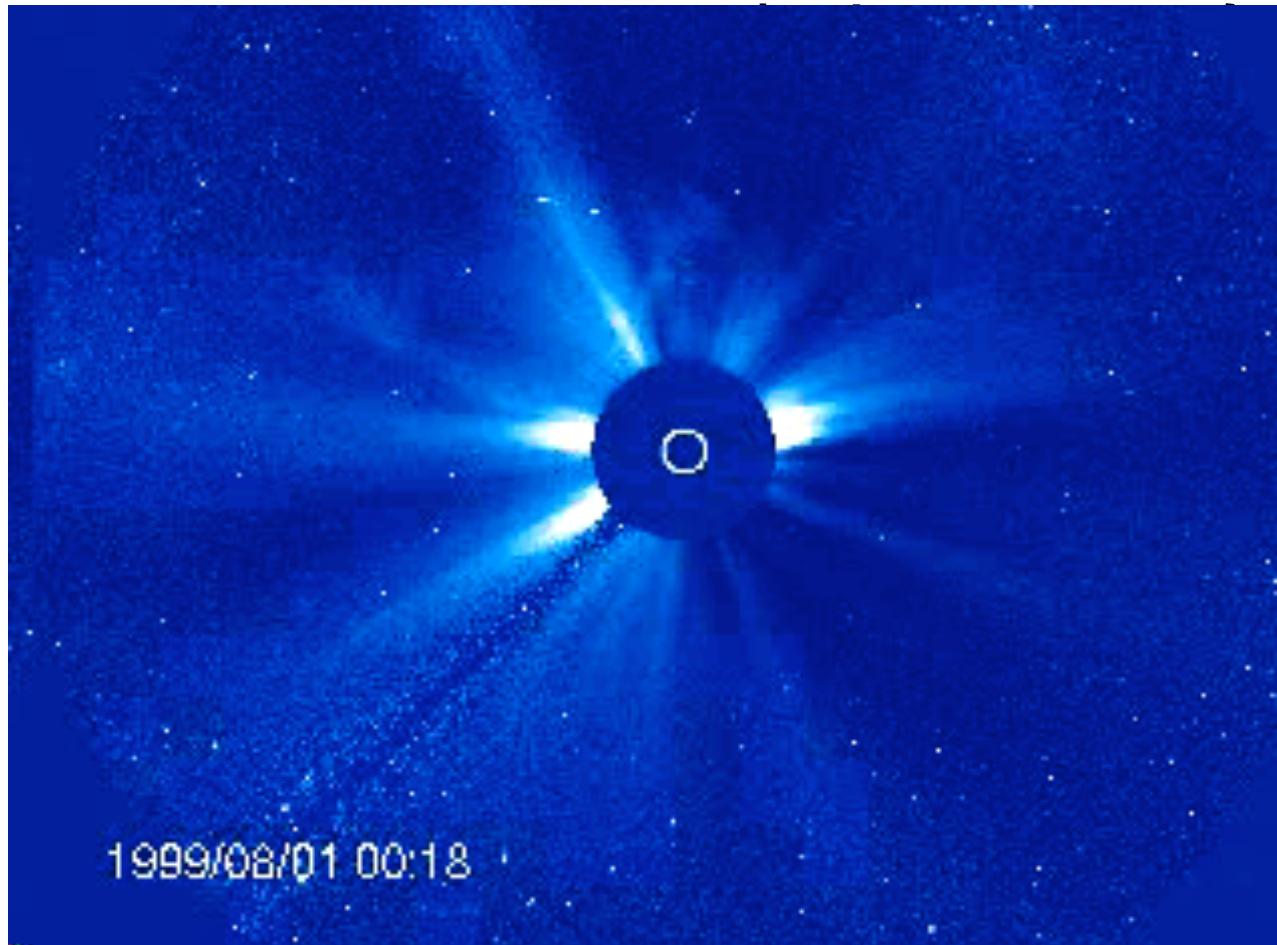


# 太陽プロミネンス噴出

(史上最大:1946年6月4日:米国)

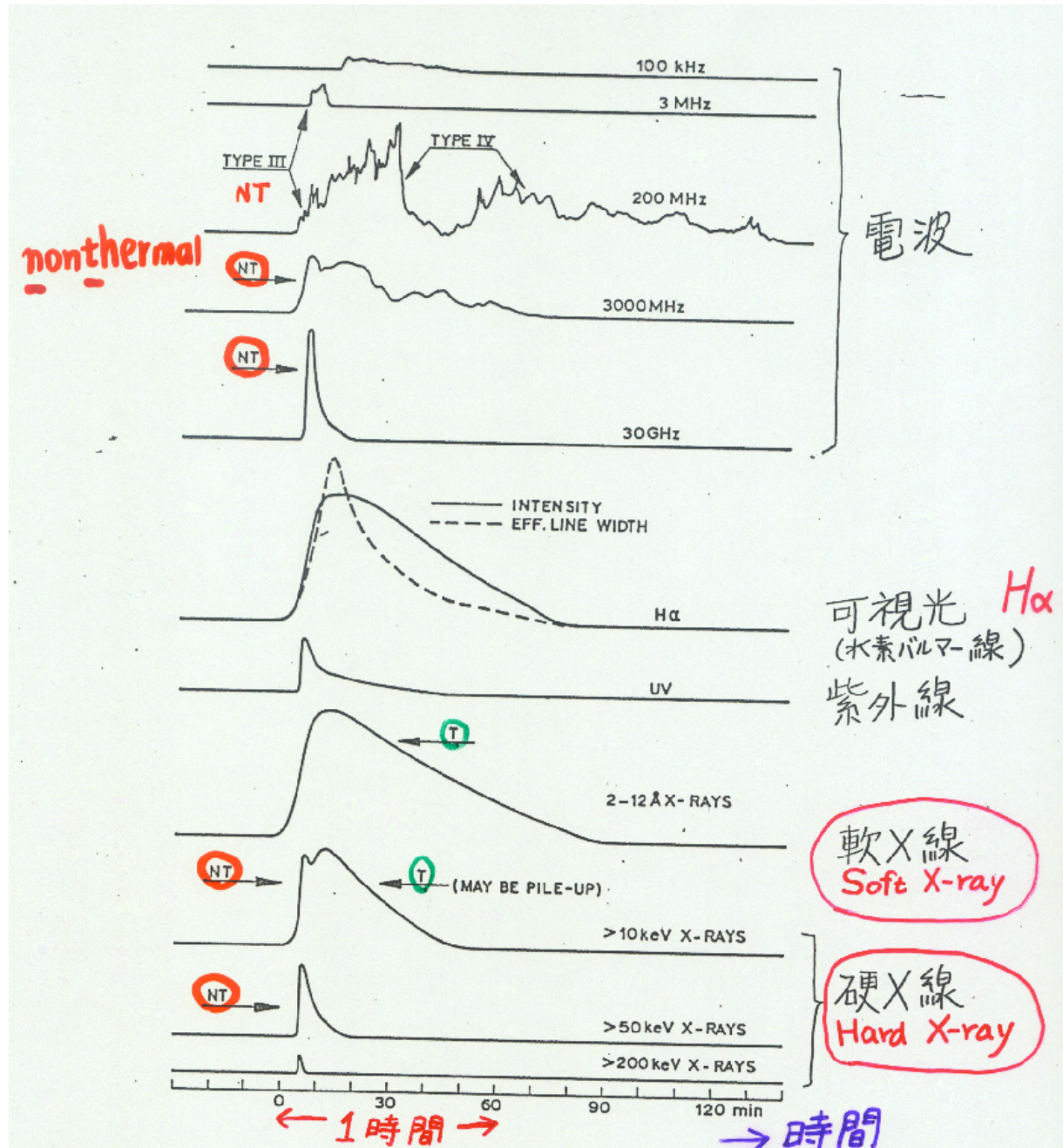


コロナ質量放出  
(Coronal Mass Ejections = CME  
E)



速度 $\sim 10-1000\text{km/s}$ 、質量 $\sim 10^{(15)}-10^{(16)}\text{g}$

# 太陽フレアから放出される電磁波



X線で見た  
コロナ  
(「ようこう」衛星  
による)

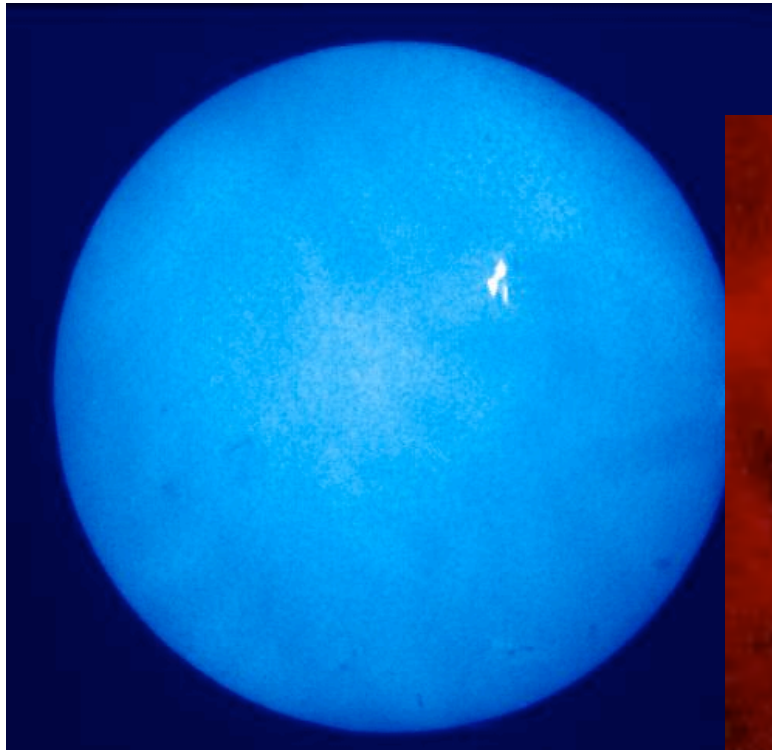
軟X線  
(1 keV)  
200万度一  
数千万度



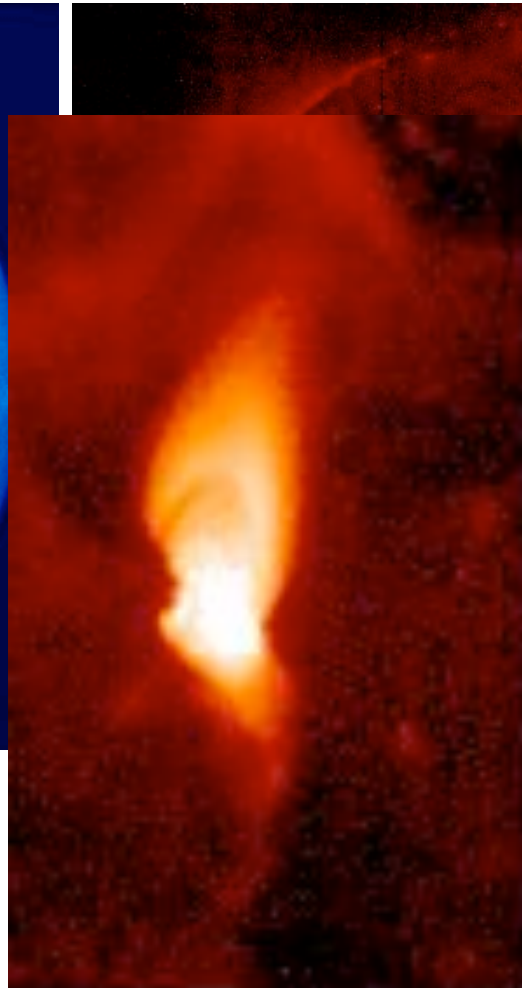
1992/02/17 02:37:01

# フレアの正体

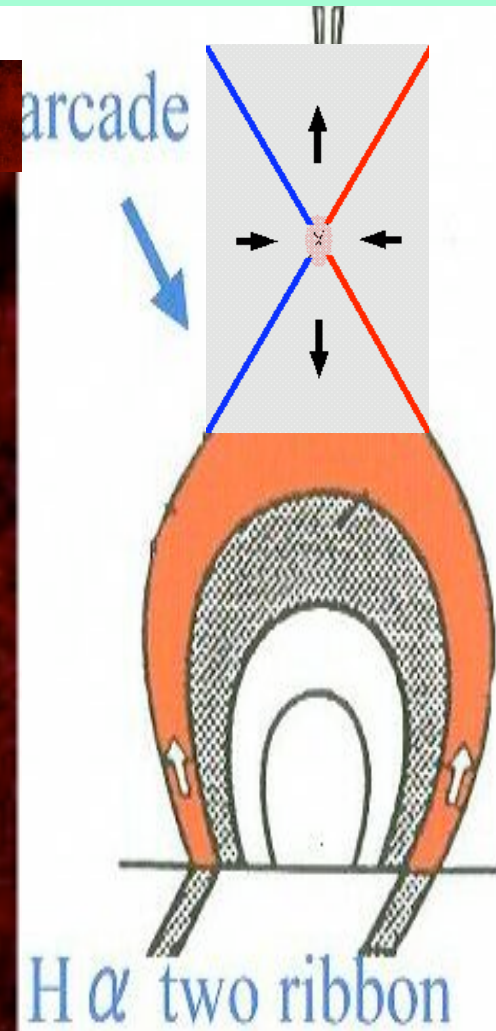
H $\alpha$



X線

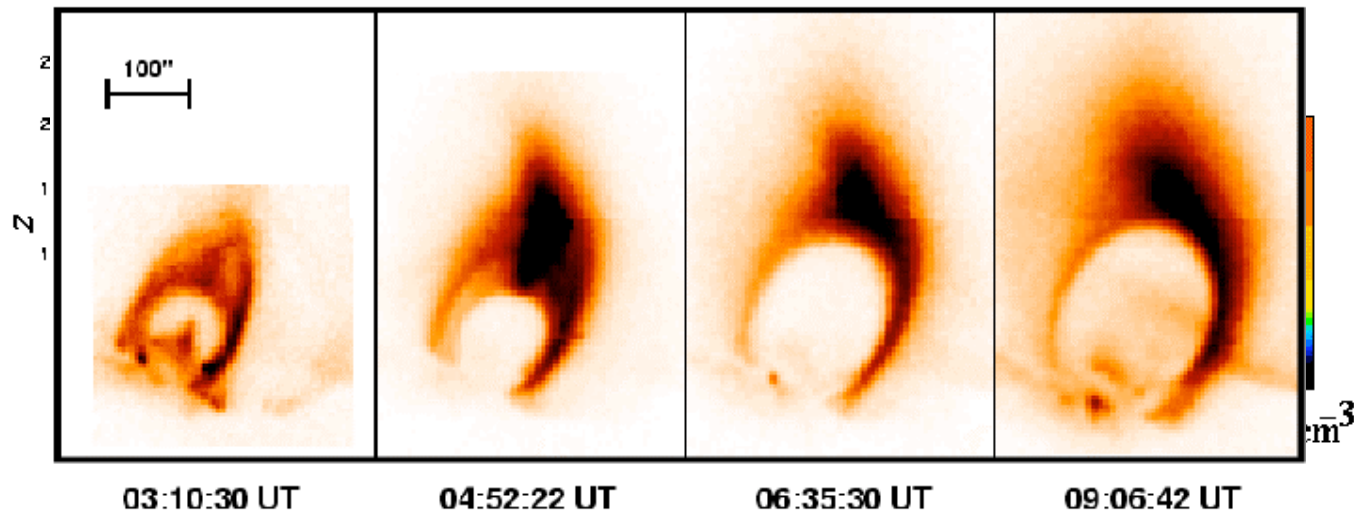
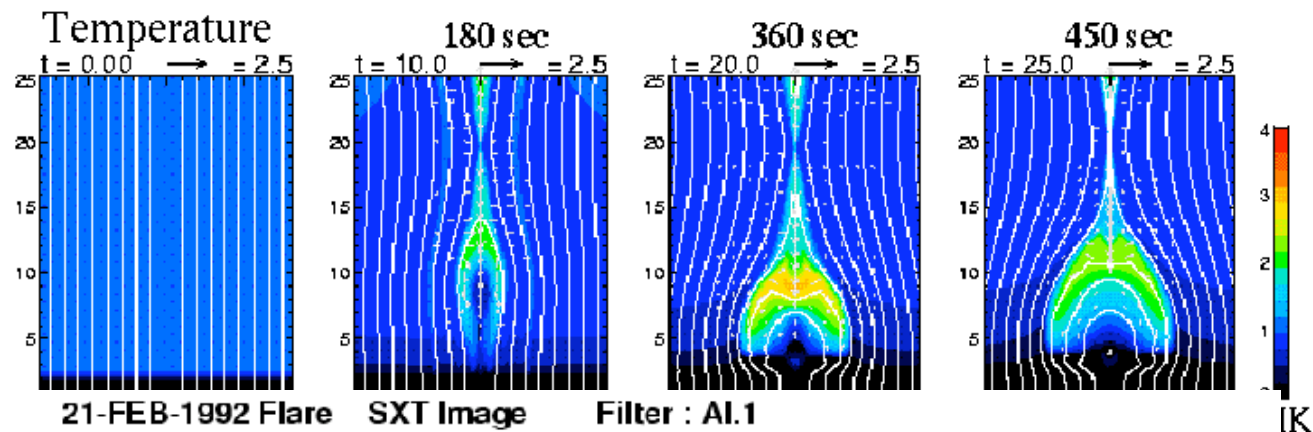


磁気リコネクション  
(磁力線つなぎかえ)



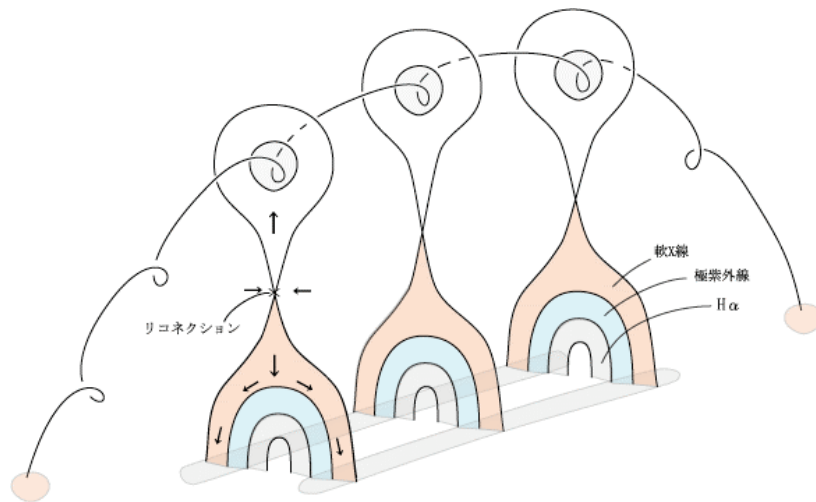


# フレアの磁気リコネクション・モデルの コンピュータ・シミュレーション (Yokoyama-Shibata 1998)

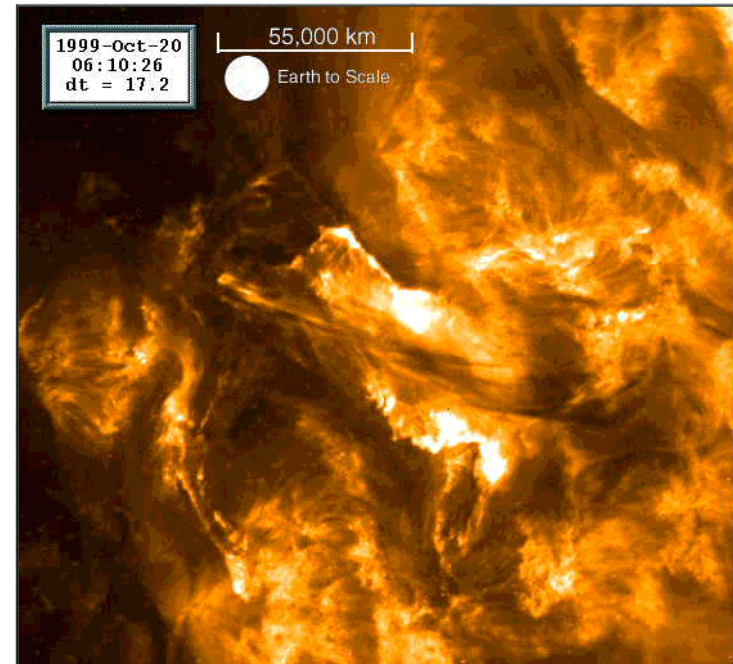


ようこう  
 軟X線望遠鏡  
 で観測された  
 太陽フレア  
 (Tsuneta)

# フレアとフィラメント噴出の関係



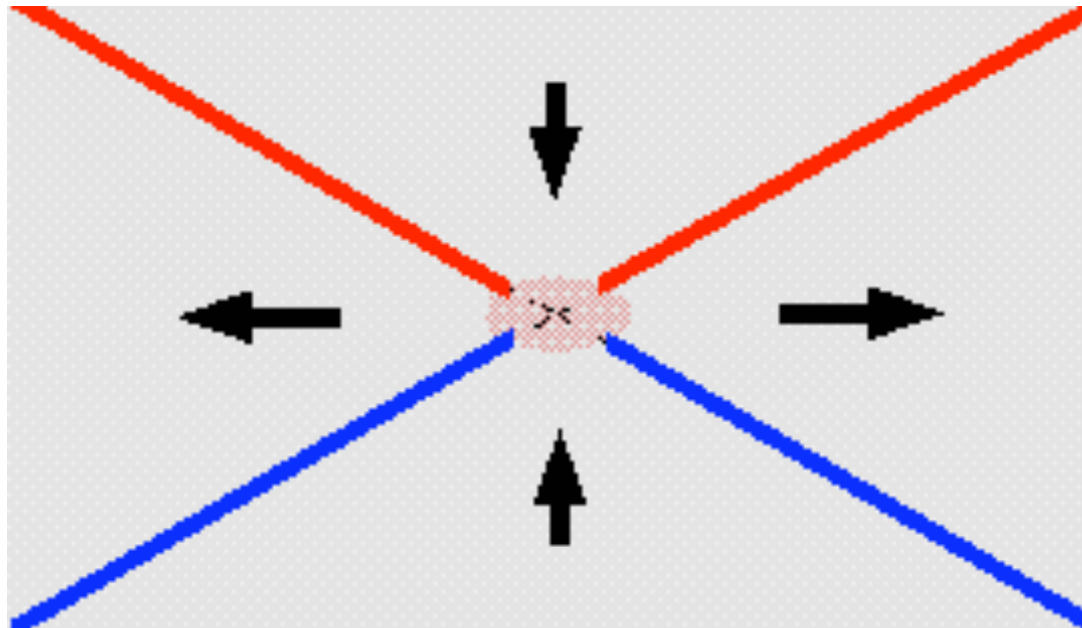
想像図



極紫外線で見たフレア  
(TRACE衛星:100万度)

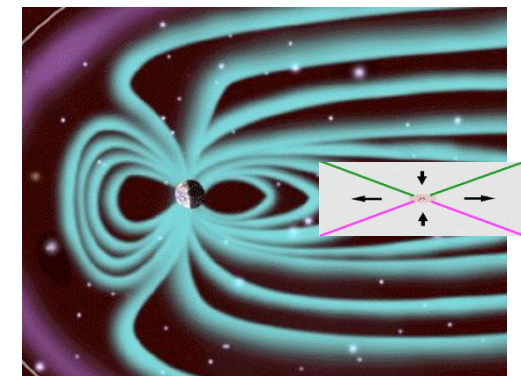
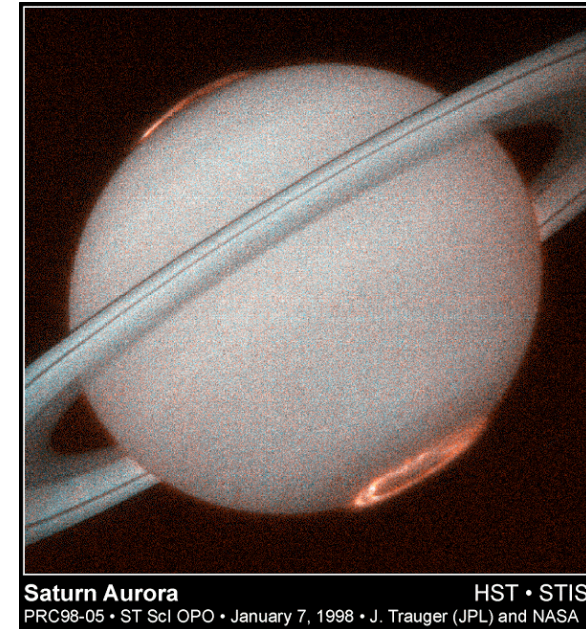
# 磁気リコネクション とは？

磁力線(「ゴムひも」に似た性質)



<http://www-solar.mcs.st-andrews.ac.uk/~eric/>

磁気エネルギーを短時間の内にプラズマの  
運動エネルギーや熱エネルギーに変換



地球磁気圏でも発生

# よくある質問

# よくある質問 1

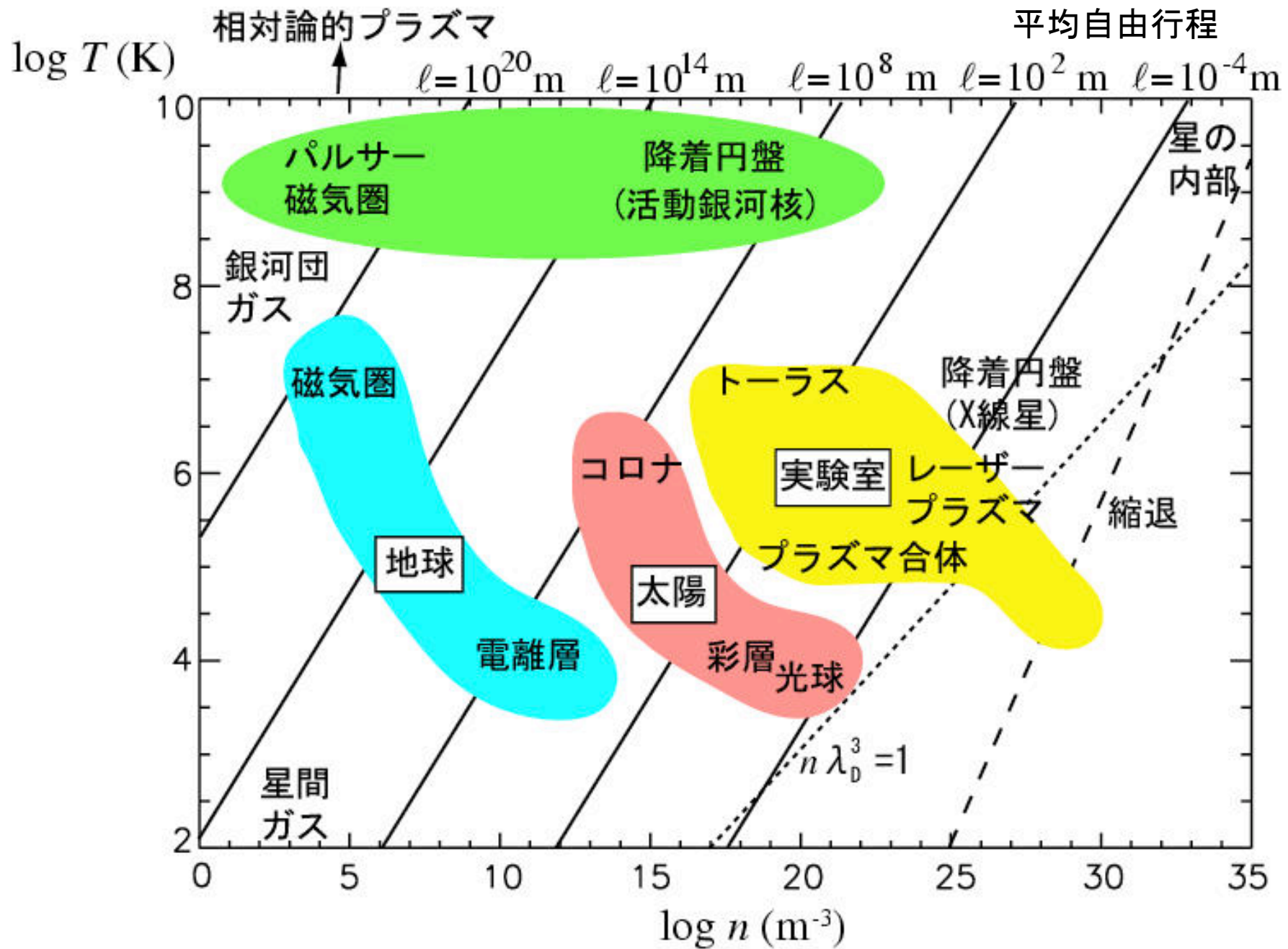
- フレアとプロミネンスの違いは？
- フレアとCMEの違いは？
- フレアとCMEとどちらが重要か？
- フレアが先かCMEが先か？
- リコネクションが先か、プロミネンス噴出／CMEが先か？
- CMEはリコネクションが起きなくても起こるか？

## よくある質問 2

- 粒子加速はどこで起きるか？
- リコネクションは境界条件だけで決まるのか？  
それとも、ミクロな物理過程が本質的か？
- 電流が先か、磁場が先か？

## よくある質問 3

- MHDは近似にすぎないから、太陽物理学者もミクロなプラズマ運動論を使うべきか？
- 無衝突プラズマにもMHDを適用して良いか？
- 彩層は電離層と同じか？
- 彩層は「ほとんど中性気体」(弱電離プラズマ)だから、MHDは適用できないか？
- 彩層中で粒子加速は起きないのか？





# 太陽コロナ・プラズマの 特徴的長さ

- デバイ長  $\lambda_D = \left( \frac{kT}{4\pi n e^2} \right)^{1/2} \approx 0.3 \text{ cm} \left( \frac{T}{10^6 \text{ K}} \right)^{1/2} \left( \frac{n}{10^9 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/2}$

- ラーモア半径  $r_{Li} = \frac{m_i v c}{eB} \approx 10 \text{ cm} \left( \frac{B}{100 \text{ G}} \right)^{-1} \left( \frac{T}{10^6 \text{ K}} \right)^{1/2}$

- 平均自由行程

$$l_{mfp} = \frac{1}{n} \left( \frac{kT}{e^2} \right)^{1/2} \approx 10^8 \text{ cm} \left( \frac{T}{10^6 \text{ K}} \right)^2 \left( \frac{n}{10^9 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1}$$

# 太陽コロナ・プラズマの 特徴的時間

- プラズマ振動数  $\omega_{pi} = \left( \frac{4\pi n e^2}{m_i} \right)^{1/2} \approx 10^9 \text{ Hz} \left( \frac{n}{10^9 \text{ cm}^{-3}} \right)^{1/2}$

- ラーモア振動数  $\Omega_i = \frac{eB}{m_i c} \approx 10^6 \text{ Hz} \left( \frac{B}{100 \text{ G}} \right)$

- 電子-イオン衝突時間

$$t_{coll} = \frac{m_e^{1/2} (kT)^{3/2}}{n e^4} \approx 10 \text{ sec} \left( \frac{T}{10^6 \text{ K}} \right)^{3/2} \left( \frac{n}{10^9 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1}$$

# 磁気レイノルズ数

$$R_m = \frac{V_A L}{\eta}$$
$$\approx 10^{14} \left( \frac{B}{100G} \right) \left( \frac{n}{10^9 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1/2} \left( \frac{T}{10^6 \text{ K}} \right)^{3/2} \left( \frac{L}{10^9 \text{ cm}} \right)$$

磁気拡散係数  
(magnetic diffusivity)

$$\eta = \frac{c^2}{4\pi\sigma} \approx \frac{c^2 e^2 m^{1/2}}{4\pi (kT)^{3/2}}$$

$$\approx 10^4 \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1} \left( \frac{T}{10^6 \text{ K}} \right)^{-3/2}$$

# Dreicer 電場

$$m \frac{dV}{dt} = eE - m \frac{V}{\tau_{coll}}$$

$$\tau_{coll} = \frac{m^2 V_{th,e}^3}{ne^4} \quad \text{for } V < V_{th,e}$$

$V > V_{th,e}$  となると drag force が速度の増大とともに減少するので runaway acceleration が起こる。  
 $V = V_{th,e}$  まで粒子を加速する電場のことを **Dreicer電場** という

$$\tau_{coll} = \frac{m^2 V^3}{ne^4} \quad \text{for } V > V_{th,e}$$

$$E_D = \frac{mV_{th,e}}{e\tau_{coll}} = \frac{ne^3 \ln \Lambda}{mV_{th,e}^2}$$

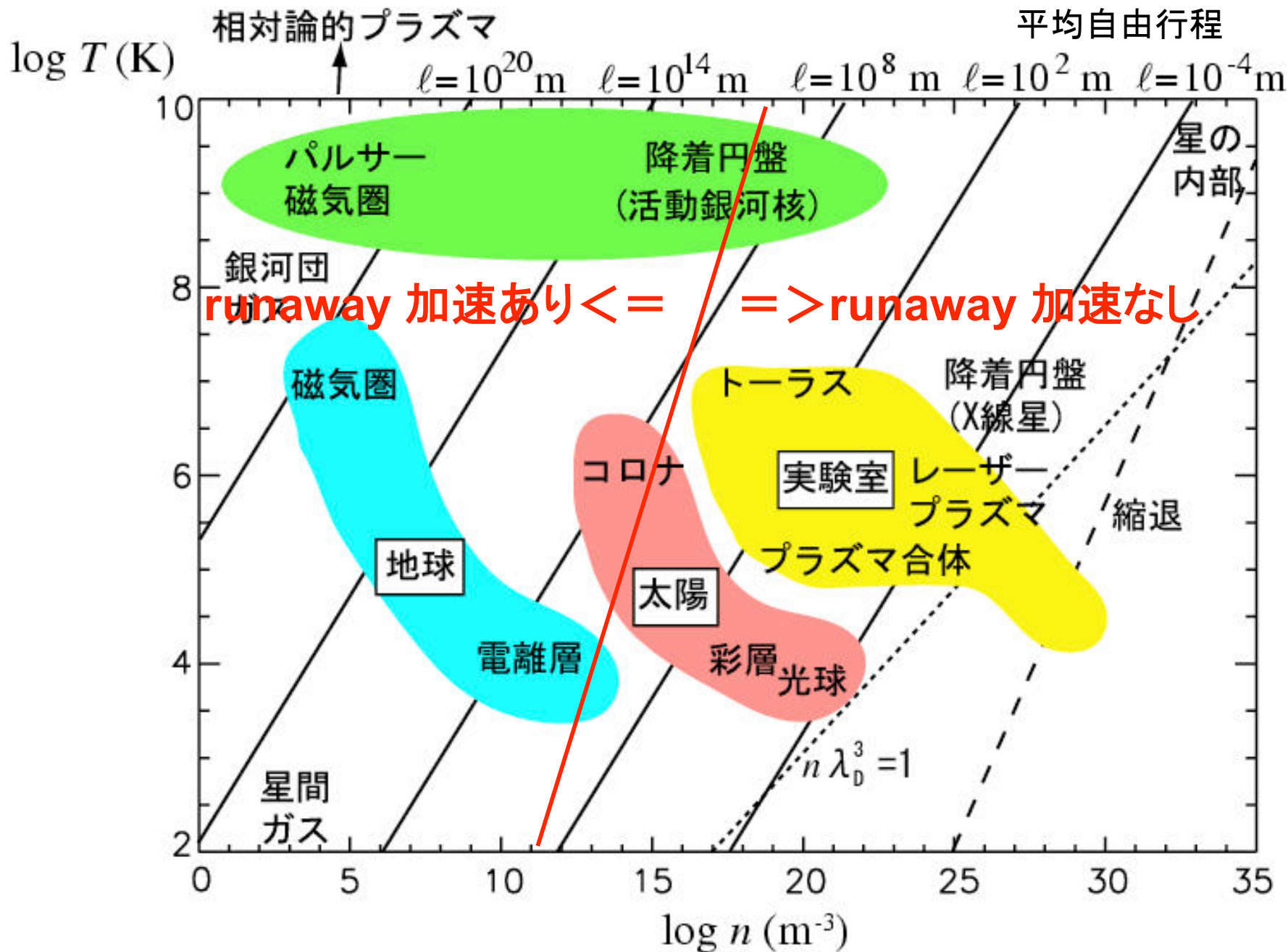
# 電場がDreicer電場を超える条件

電場は通常、 $V \times B$ 電場が大体の大きさを決める。

そこで  $E = V \times B = E_D$ となる速度の大きさを求め

$$V_c \text{ すると } = 2 \times 10^6 \left( \frac{n}{10^9 \text{ cm}^{-3}} \right) \left( \frac{T}{10^6 \text{ K}} \right)^{-1} \left( \frac{B}{100 \text{ G}} \right)^{-1} \text{ cm/s}$$

コロナ中では、プラズマの音速は100km/s 程度なので、 $V > V_c$  はしばしば満たされる。よってコロナ中の $V \times B$ 電場はDreicer電場を超え得る。これが粒子加速がコロナ中で起きる理由。それに対して彩層中では、 $n > 10^{11} \text{ cm}^{-3}$  なので、通常  $V < V_c$ 。したがって彩層中では、粒子加速は起きない。



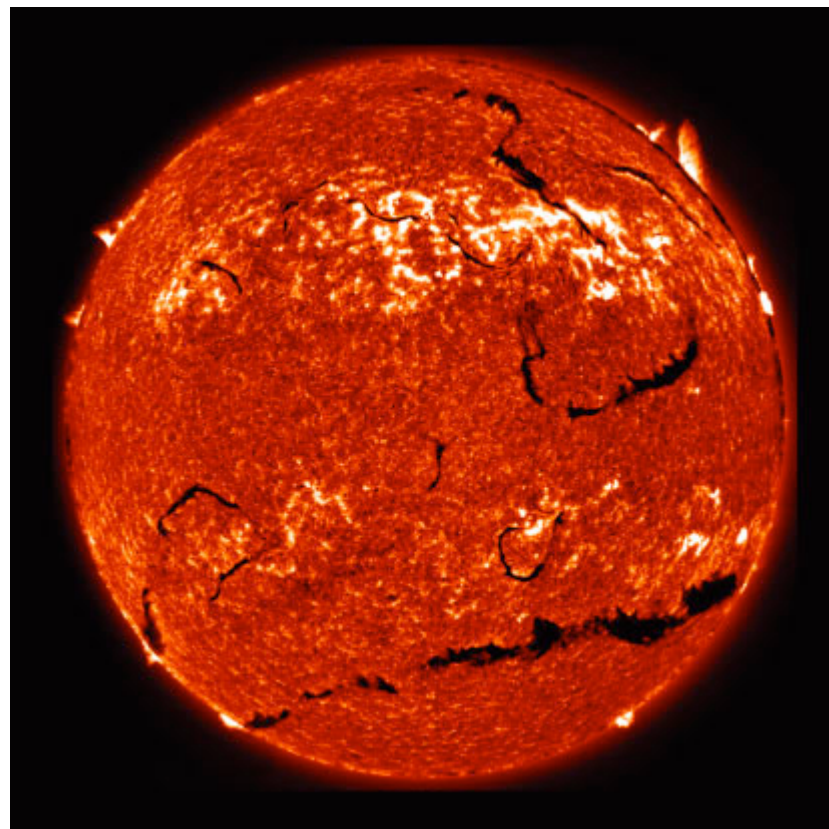
プロミネンス(フィラメント)噴出



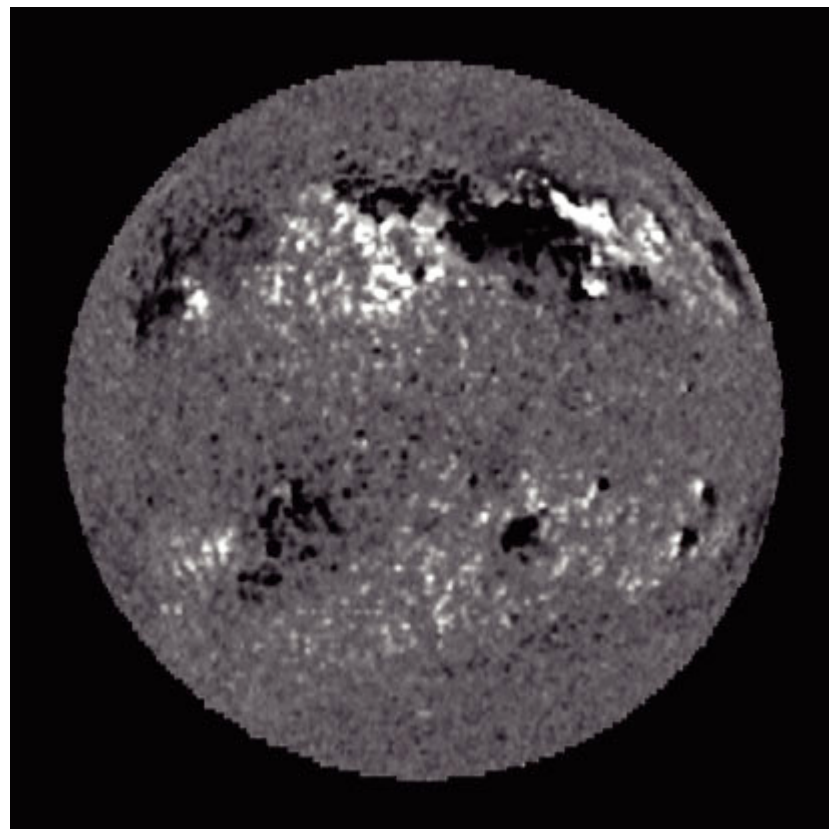
縁で光って見えるのが、プロミネンス(紅炎) = 日食の時に赤く見える  
円盤内で暗く見えるのが、ダーク・フィラメント(暗条)



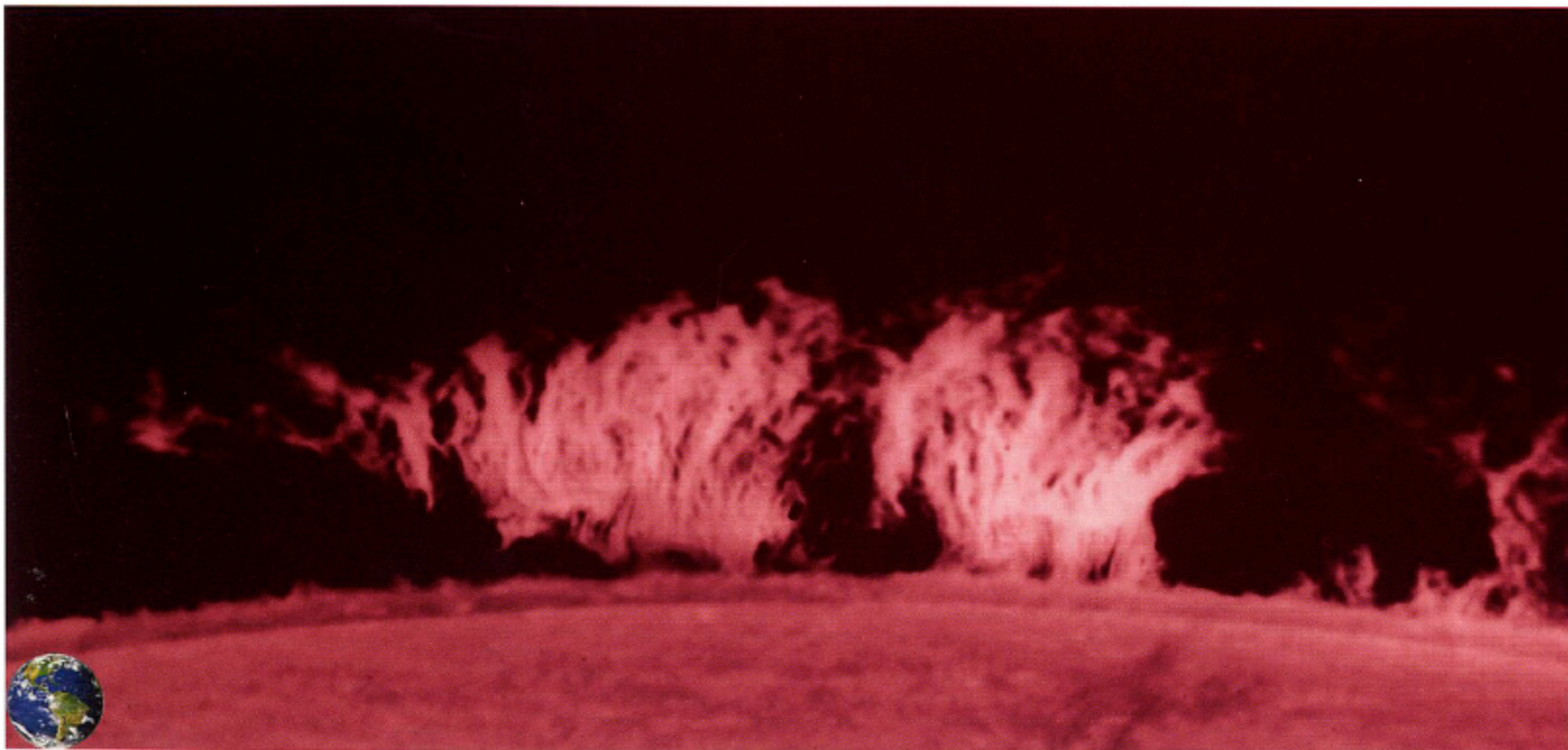
フィラメント(=プロミネンス)  
H $\alpha$



# フィラメント(=プロミネンス) 磁場



# プロミネンスはなぜ浮かんでいるのか？



太陽の縁に姿を現した美しい紅炎  
太陽磁場によって支えられていると考えられています。

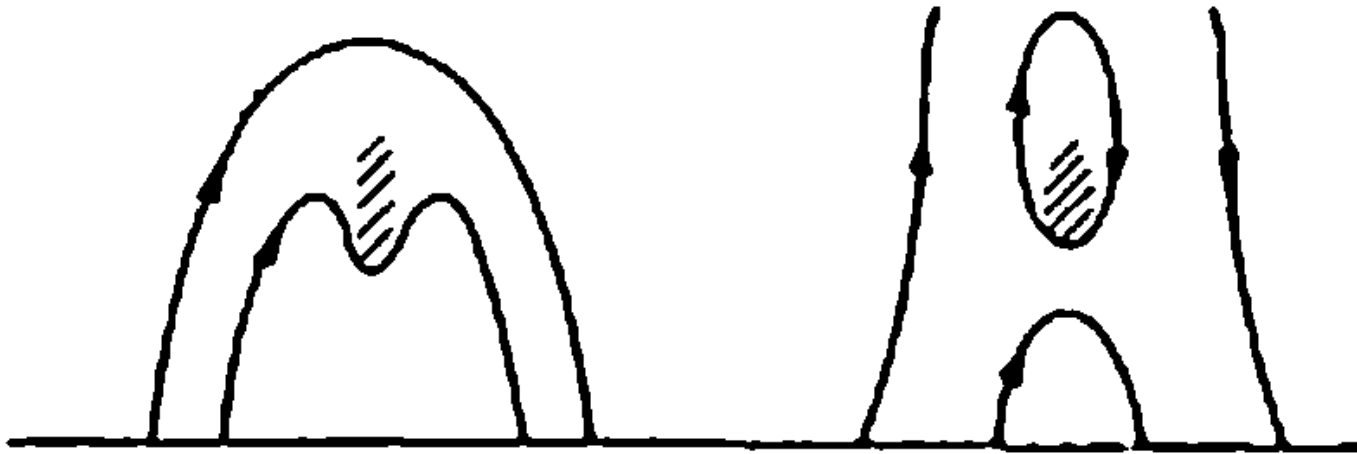
京大飛騨天文台撮影



# プロミネンスのモデル

(a) K-S

(b) K-R



Kippenhahn-Schluter

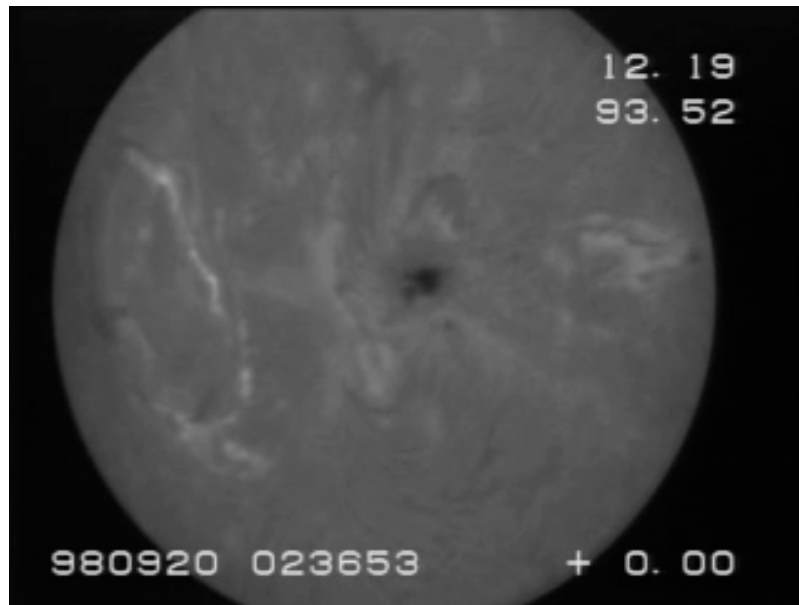
Kuperus-Raadu

Normal polarity

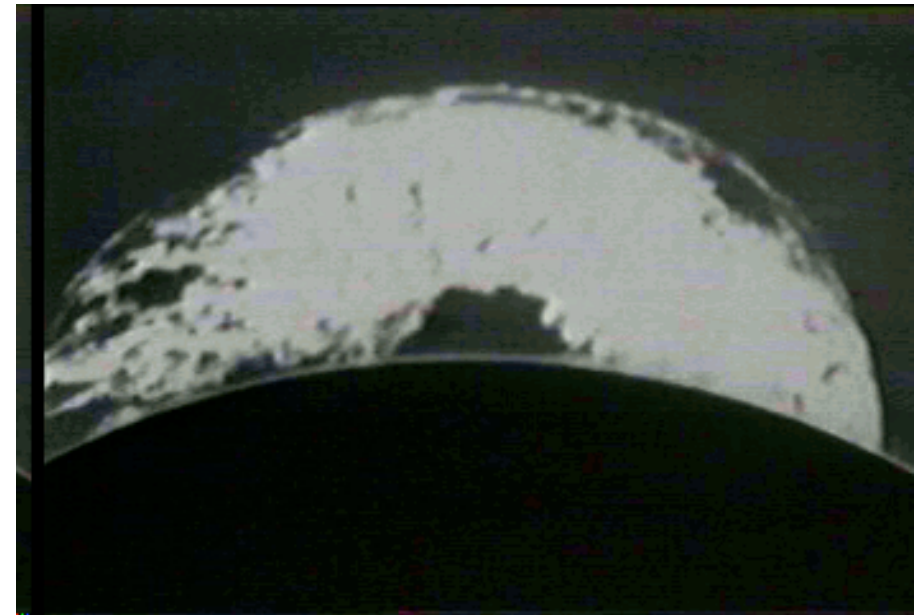
Inverse polarity

実際の磁場観測 (Leroy et al. 1989) によれば静穏領域にある巨大な静穏型プロミネンスでは逆極性が多く、活動領域内の小さなプロミネンスでは正規極性が多いという。

# H $\alpha$ 観測:しばしば、フレア時に プロミネンス噴出が発生



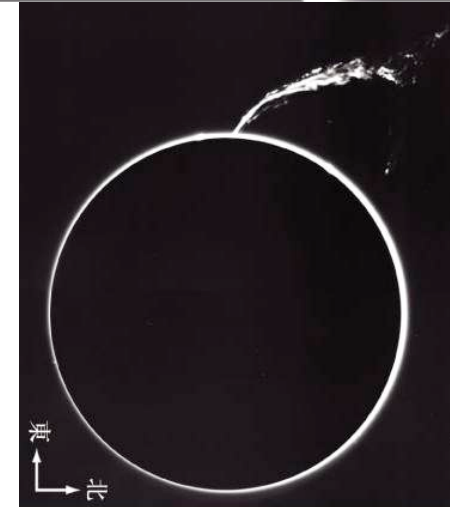
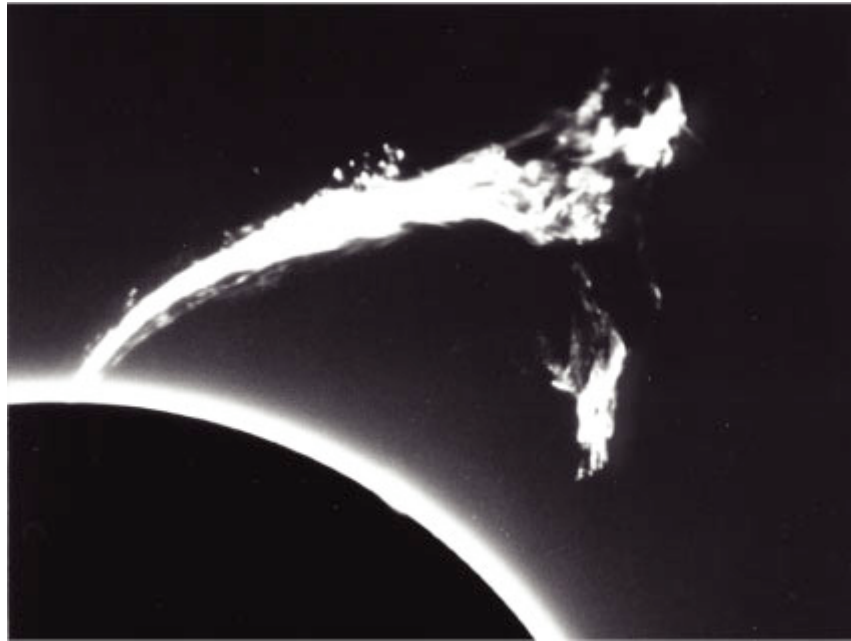
1998年9月20日  
(飛騨天文台)



史上最大:1946年6月4日  
(High Altitude Obs., USA)

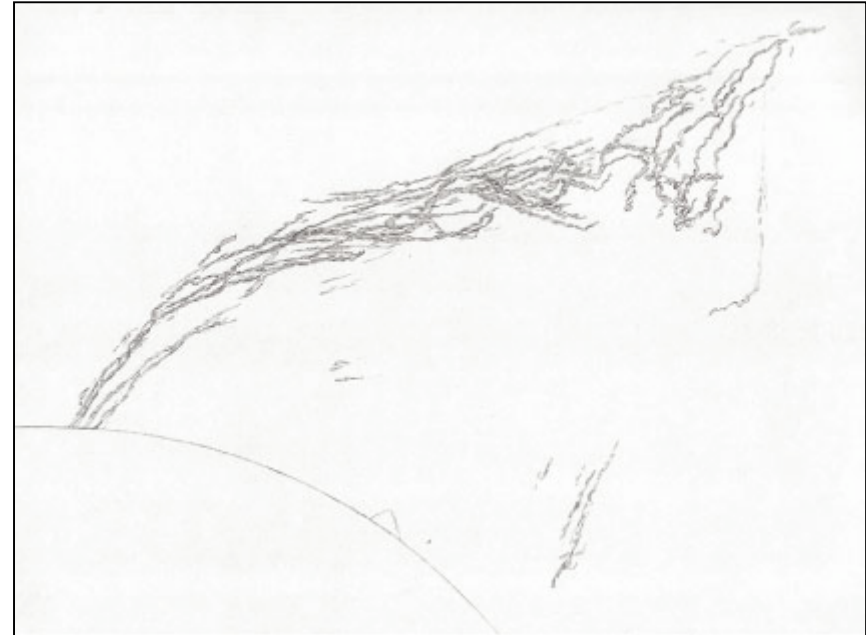
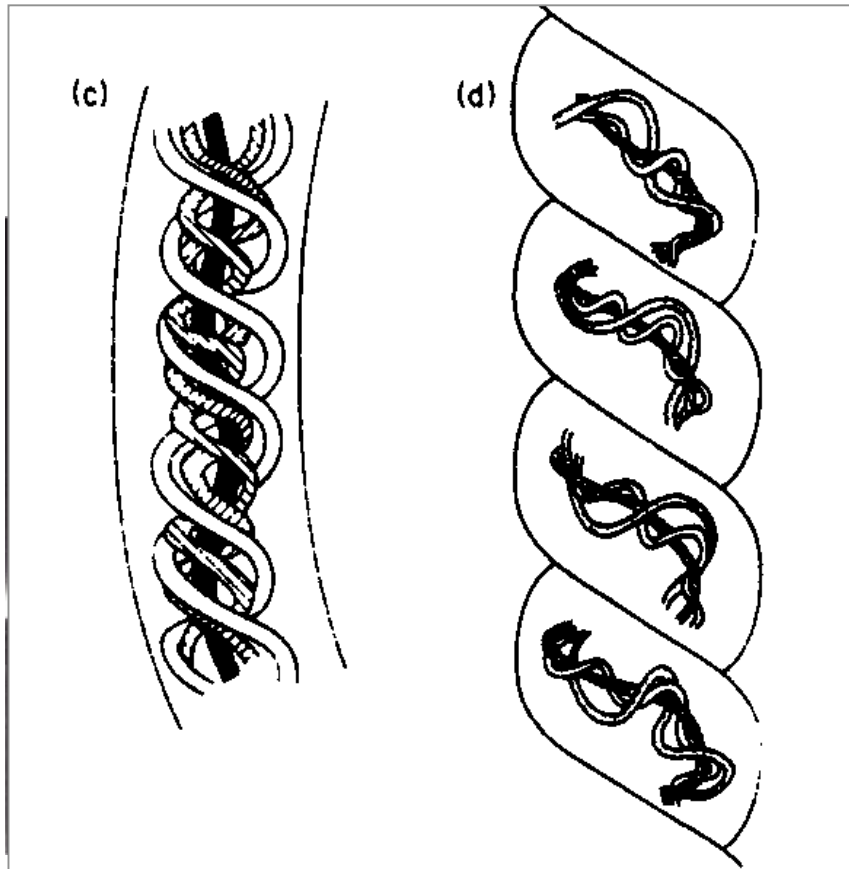
プロミネンス(フィラメント)は、ヘリカル形状。  
磁気中性線に沿って存在していたものが、  
突然噴出

# Eruptive prominence



乗鞍コ口ナ観測所

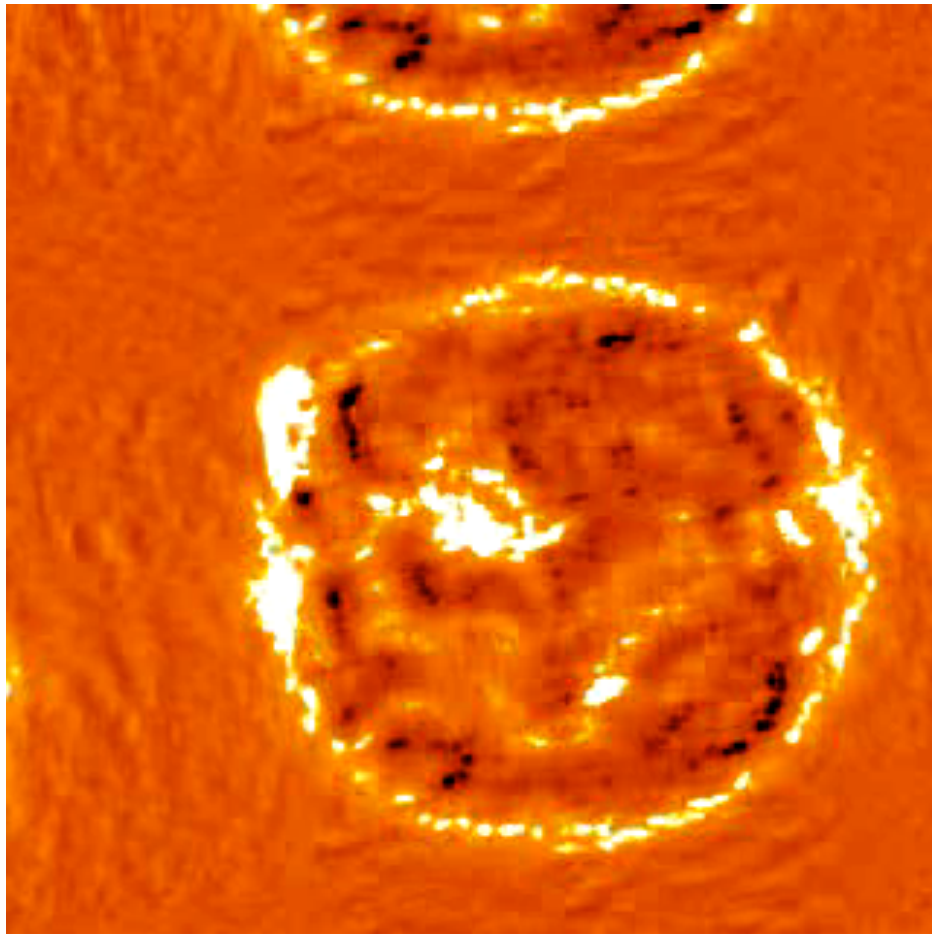
# Double helical structure



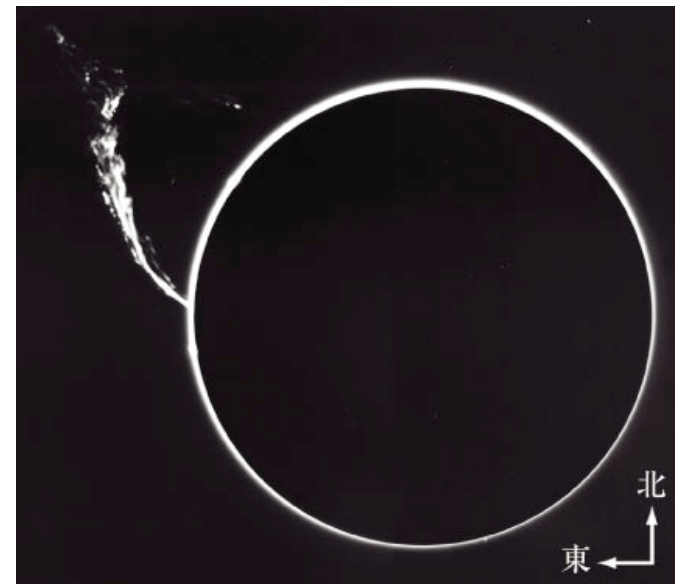
From Tajima and Shibata (1997) Plasma Astrophysics  
Chapter 2

Miyazaki (1993)

# Eruptive prominence observed by Nobeyama Radio Heliograph



1992 July 31 00:16UT  
Y. Hanaoka





# terminology

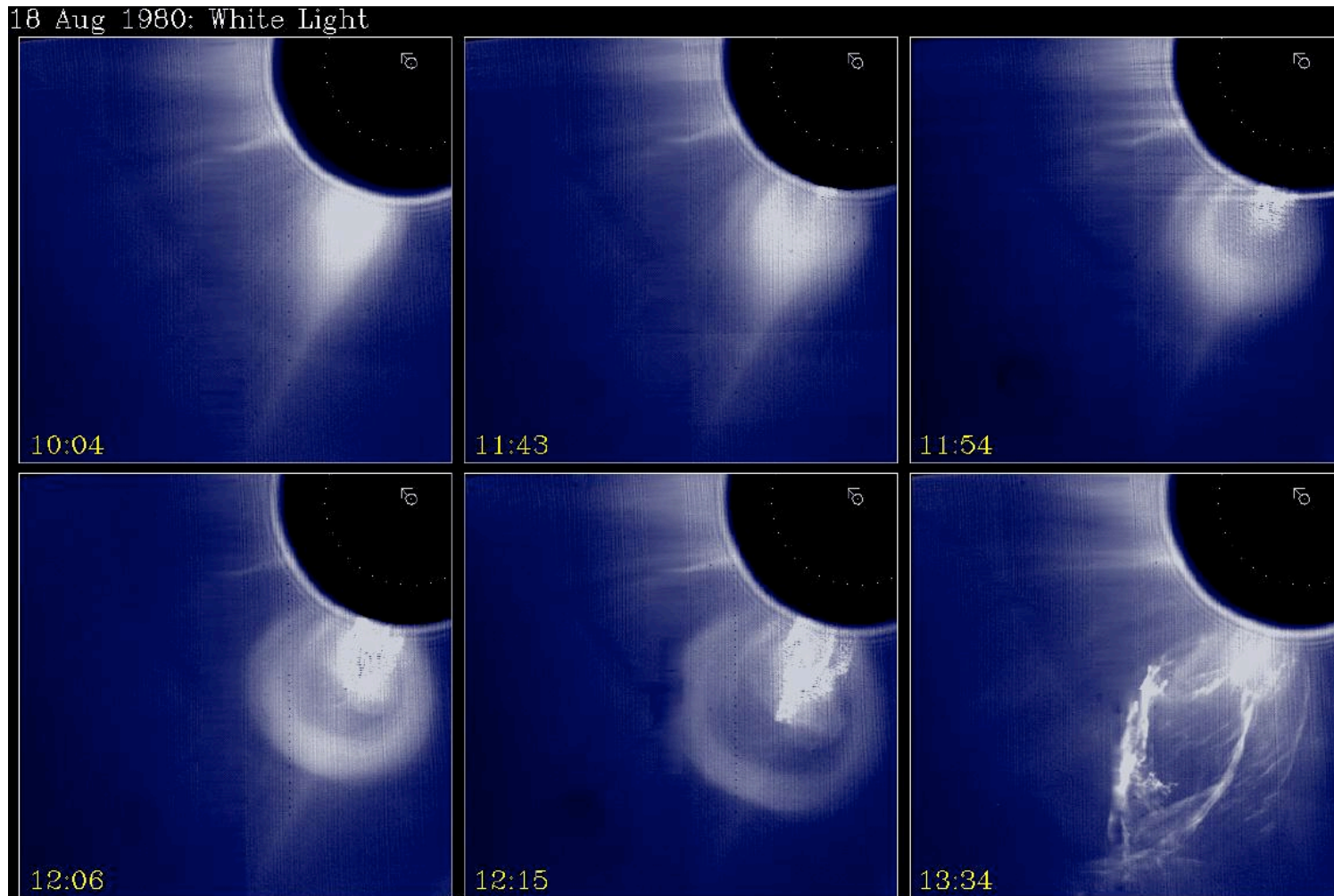
- prominence eruption
- filament eruption
- filament disappearance  
(Dispartion Brusque = DB)

# コロナ質量放出 = Coronal Mass Ejections (CME)

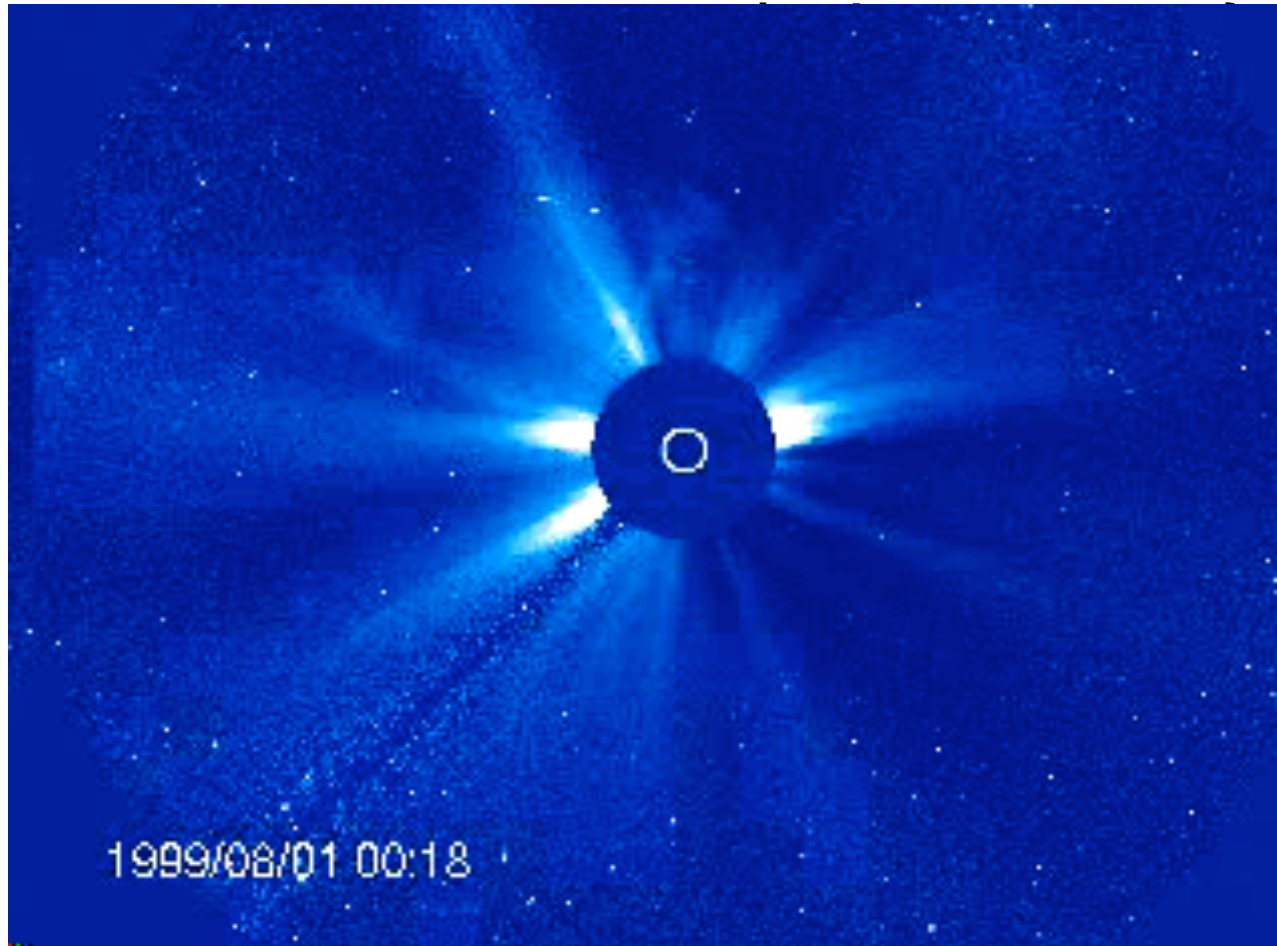
(注) コロナ大規模噴出

と訳す人もいるが、米国人の太陽物理学者の友人(A.Sterling, J.Davis)に聞くと、  
Massは「大規模」の意味ではなくて、  
「質量」の意味だという

# コロナ質量放出 (CME=Coronal Mass Ejection) (スカイラブ、人工日食、白色光)



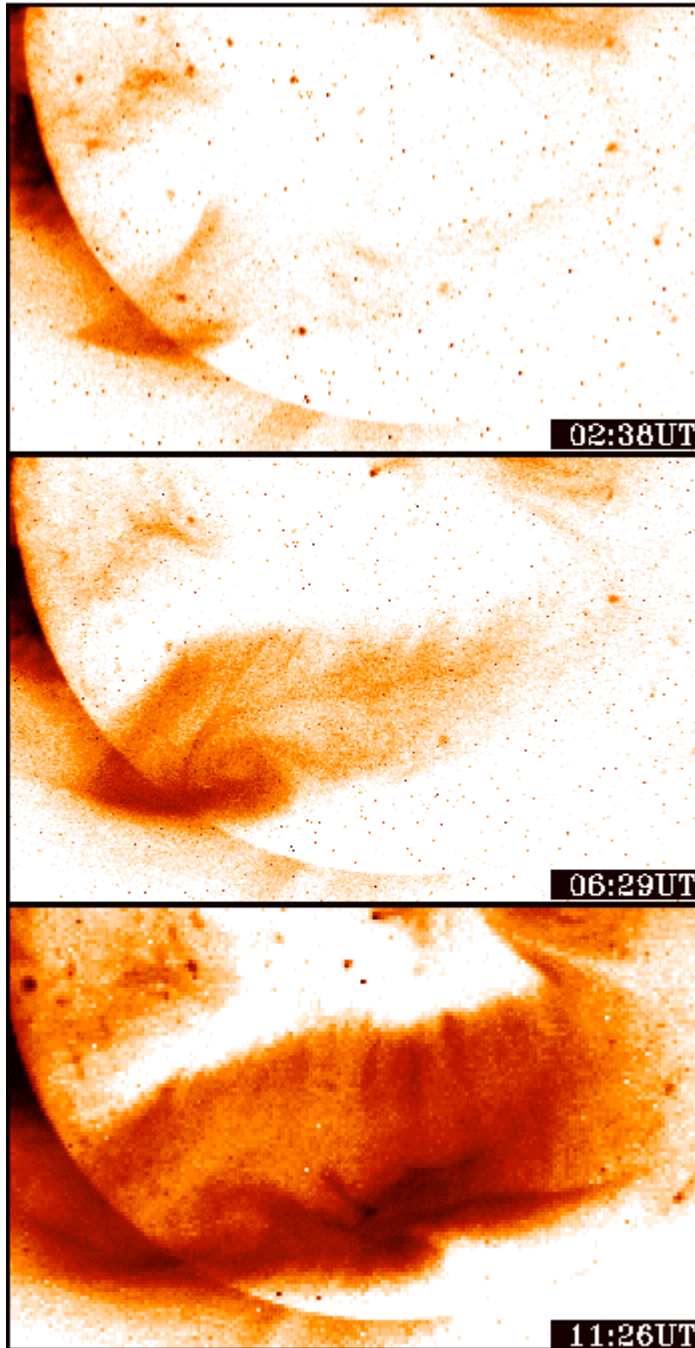
コロナ質量放出  
(Coronal Mass Ejections = CME  
E)



速度 $\sim 10-1000\text{km/s}$ 、質量 $\sim 10^{(15)}-10^{(16)}\text{g}$

# コロナ質量放出とフレア

- 地磁気嵐を引き起こす直接の原因はコロナ質量放出(CME)(=>惑星間空間における南向きの磁場)
- コロナ質量放出の約50%はフレアに付随していない。(これらはフィラメント噴出に付随している)
- フレアは地球にとって重要でない？(Gosling's flare myth)
- フレアとコロナ質量放出の関係は？



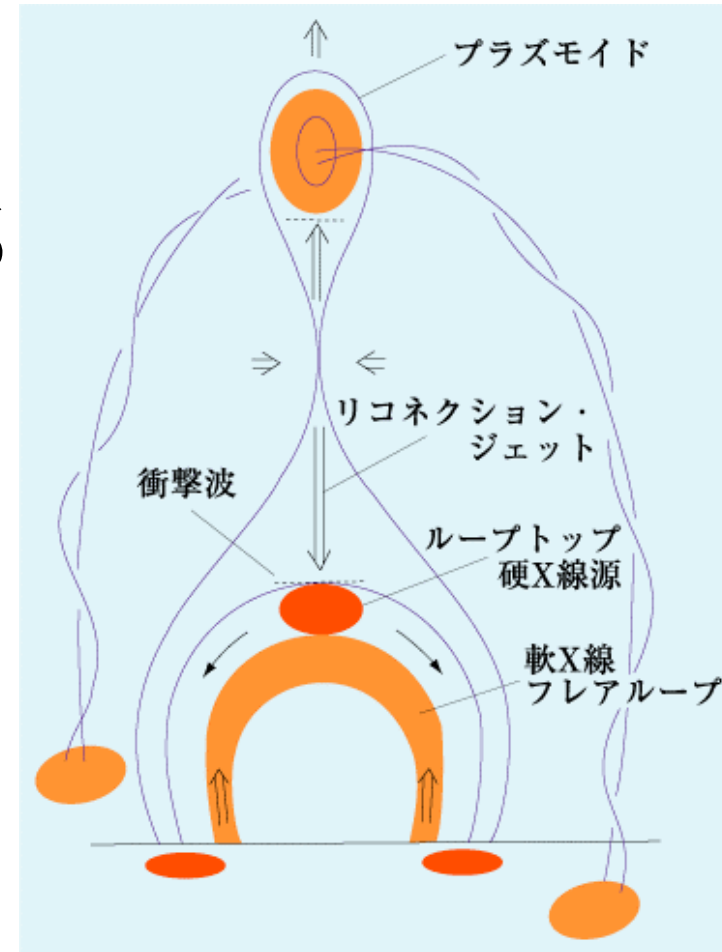
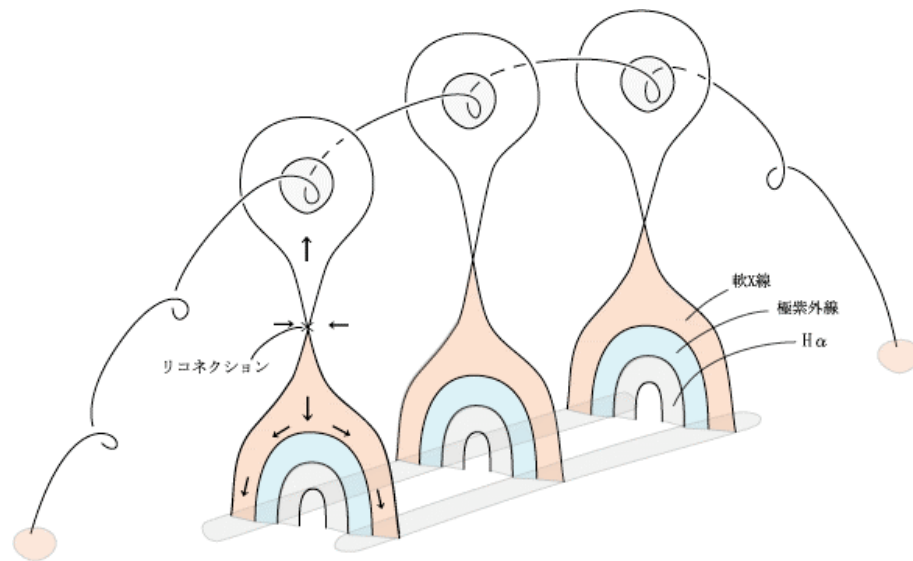
# 巨大アーケード

- 1994年4月14日
- 大量のプラズマ噴出が起きているはずと世界に電子メール通報
- それにともなって起こる地球の巨大磁気嵐を予言
- シカゴの電力会社の変圧器(数億円)を救う!

惑星間空間CMEが観測された  
(McAllister et al. 1996)

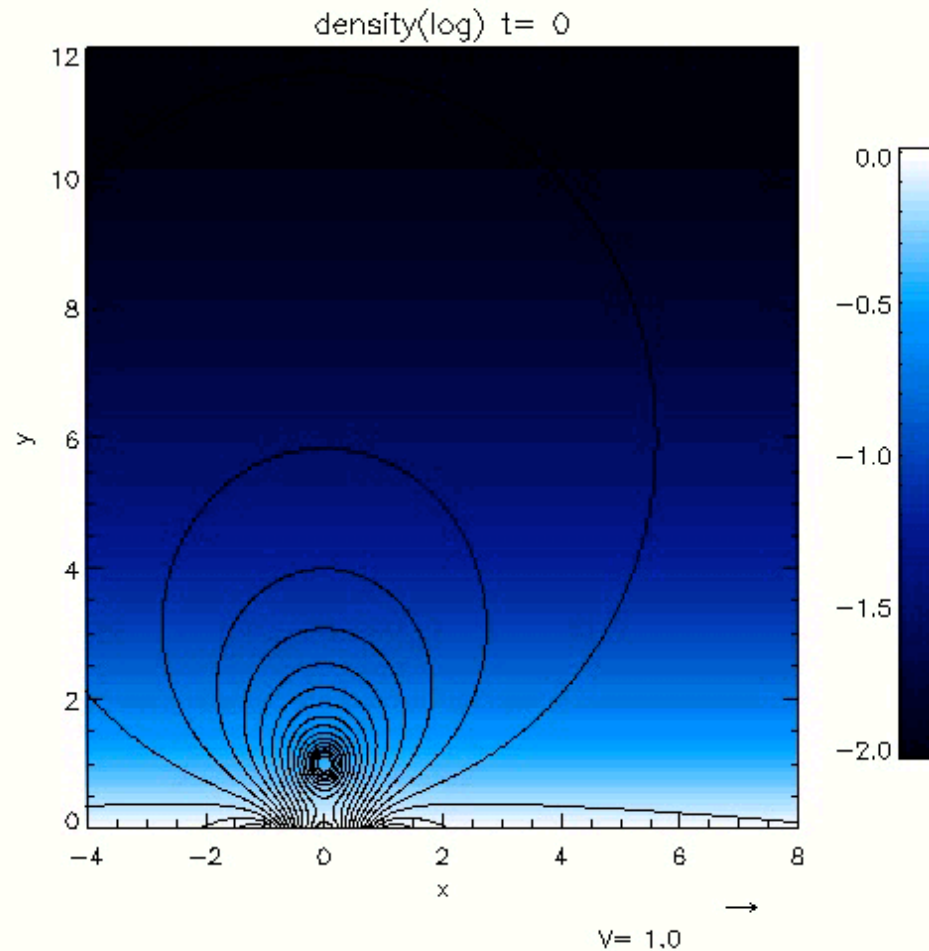
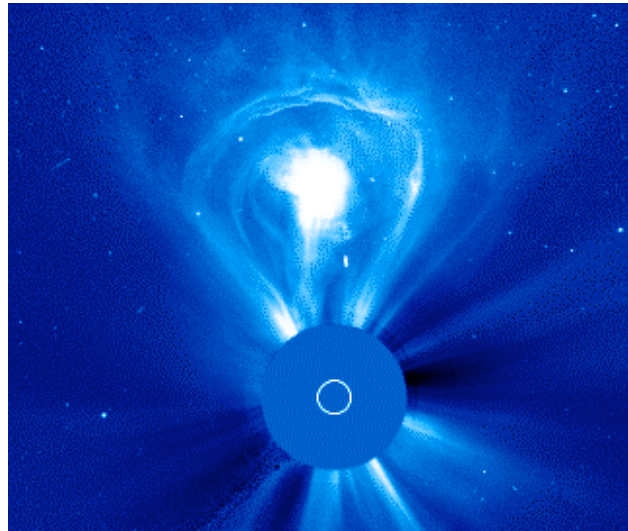
# フレアとCMEの関係

フィラメント噴出  
プラズモイド  
は、いずれもCMEの一部



# フレア・コロナ質量放出のモデル(2次元)

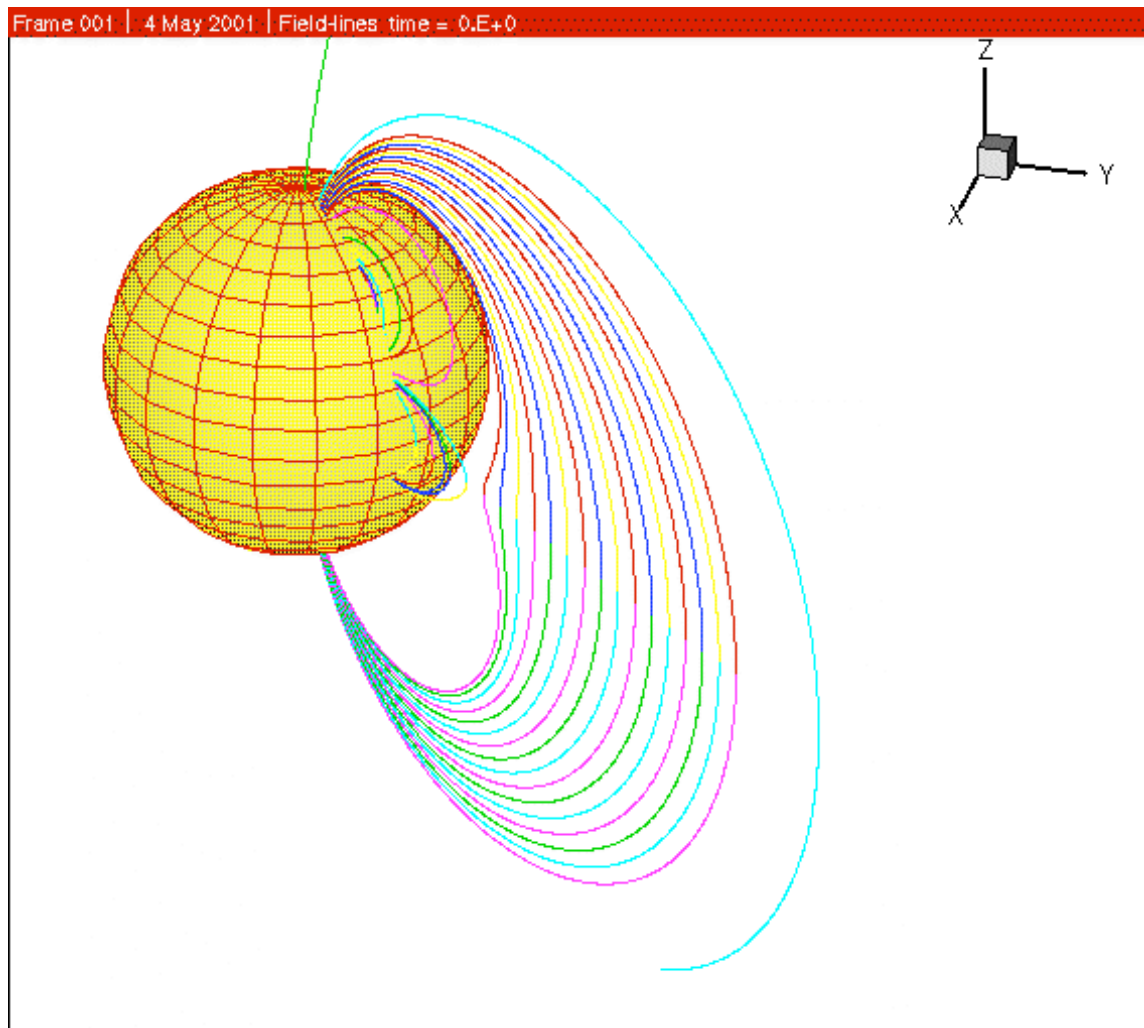
(Shiota et al. 2005)





# CME model (3次元)

(Antiochos, DeVore, Klimchuk 1999)



# フレアとコロナ質量放出の関係

- フレア(周辺のコロナ)から噴出するガスがコロナ質量放出
- コロナ質量放出の足元ではフレアに類似の物理現象が起きている
- つまり、両者を区別する理由はない。「同じ」物理現象の異なる側面を見ているにすぎない。
- 両者を区別する議論は生産的でない
- しばしば物理と terminology の問題がごっちゃに議論されている

今後は、フレア／CME と統一的に扱う

# フレア／CMEの残された謎

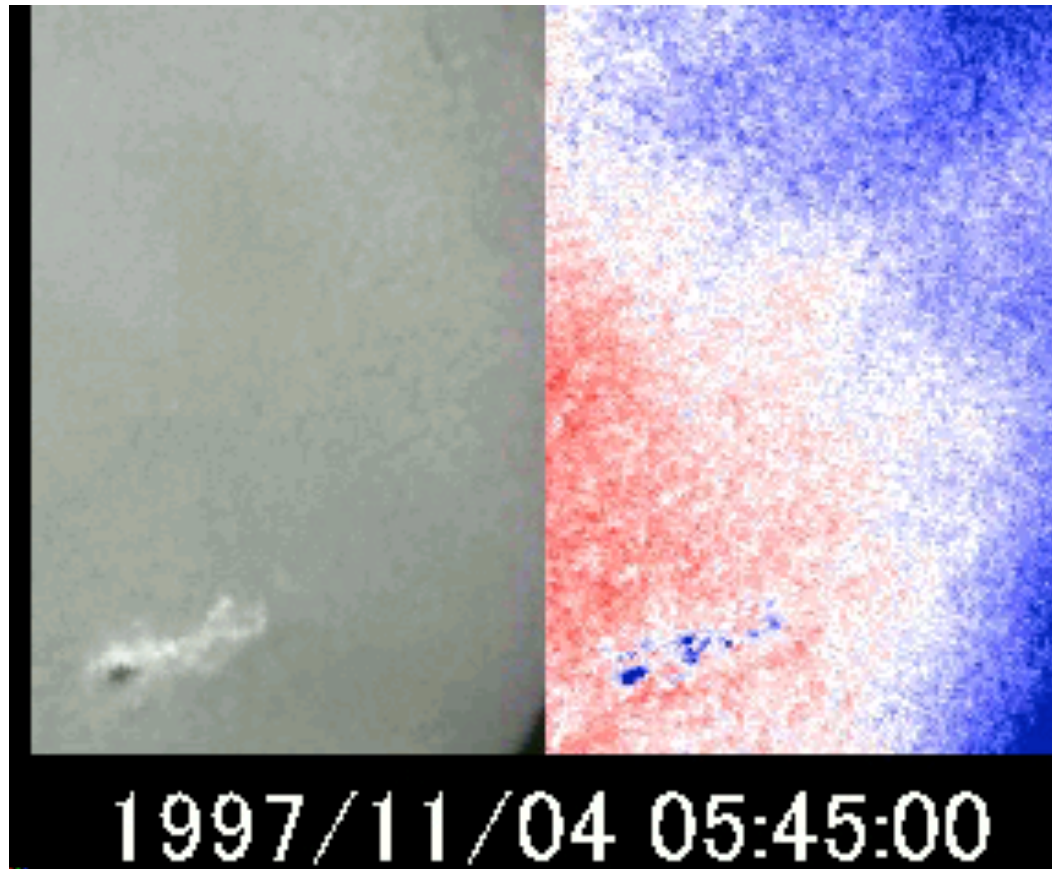
- 磁気リコネクションの速さ(エネルギー解放率)を決める物理は何か？
- 解放された全エネルギーのうち、何%が非熱的粒子(太陽宇宙線)の加速に使われるか？
- エネルギー蓄積機構
- トリガー機構

これらの問題を解決するには  
実験室プラズマ、磁気圏プラズマ  
の研究者との協力が不可欠

# フレア衝撃波

# フレアから発生する衝撃波 (モートン波: Moreton 1960 が発見)

伝播速度  
700km/s



コロナ中を  
伝播する  
MHD fast  
Shock が  
彩層と交差  
するところ  
に対応  
(Uchida  
1968)

(H $\alpha$ 単色光: 京大飛騨天文台)

# 彩層蒸発

# Nagai (1980) 世界で最初のフレアルー プ彩層蒸発の1次元流体シミュレーション

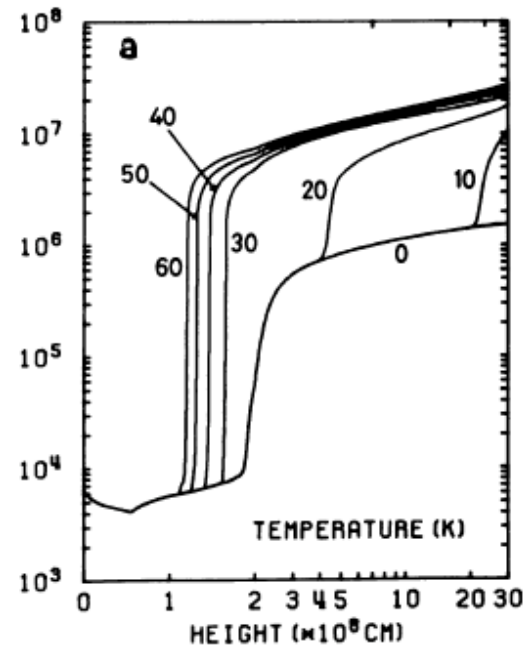
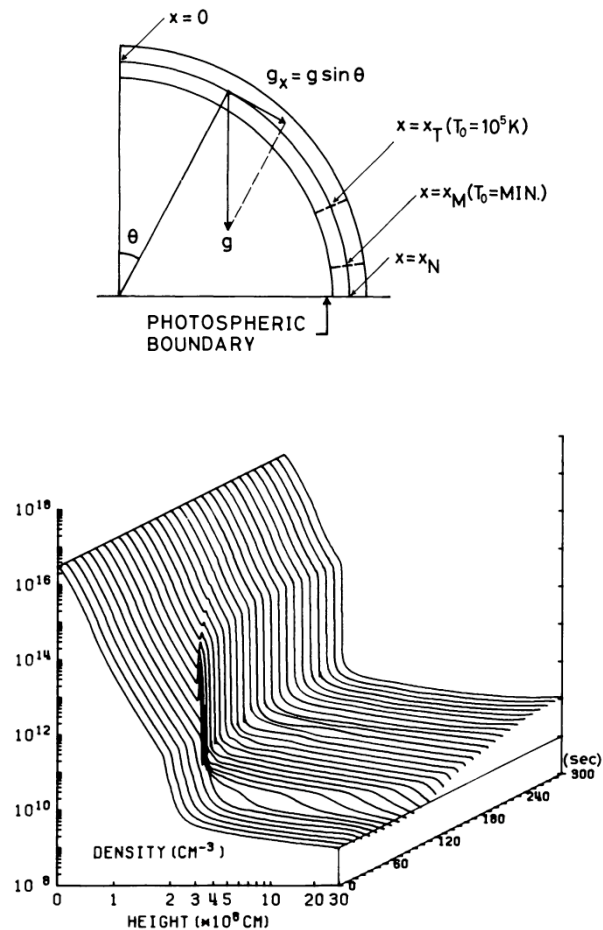


Fig. 13a. The temperature distributions in case B, which are displayed every 10 s. Each curve is labeled with time in seconds elapsed since the flare onset in Figures 13-15.

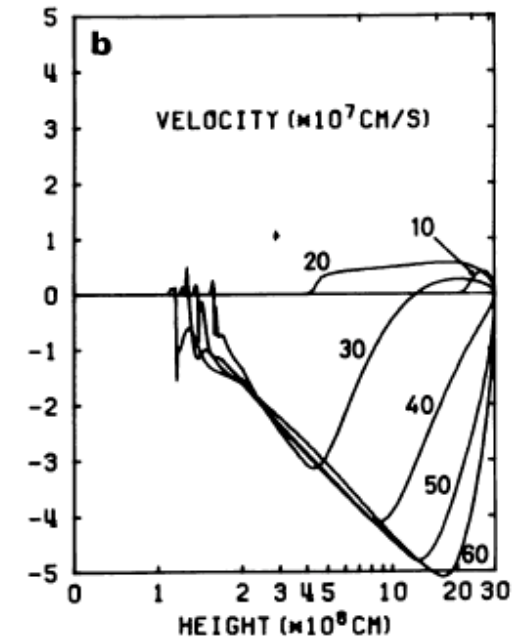
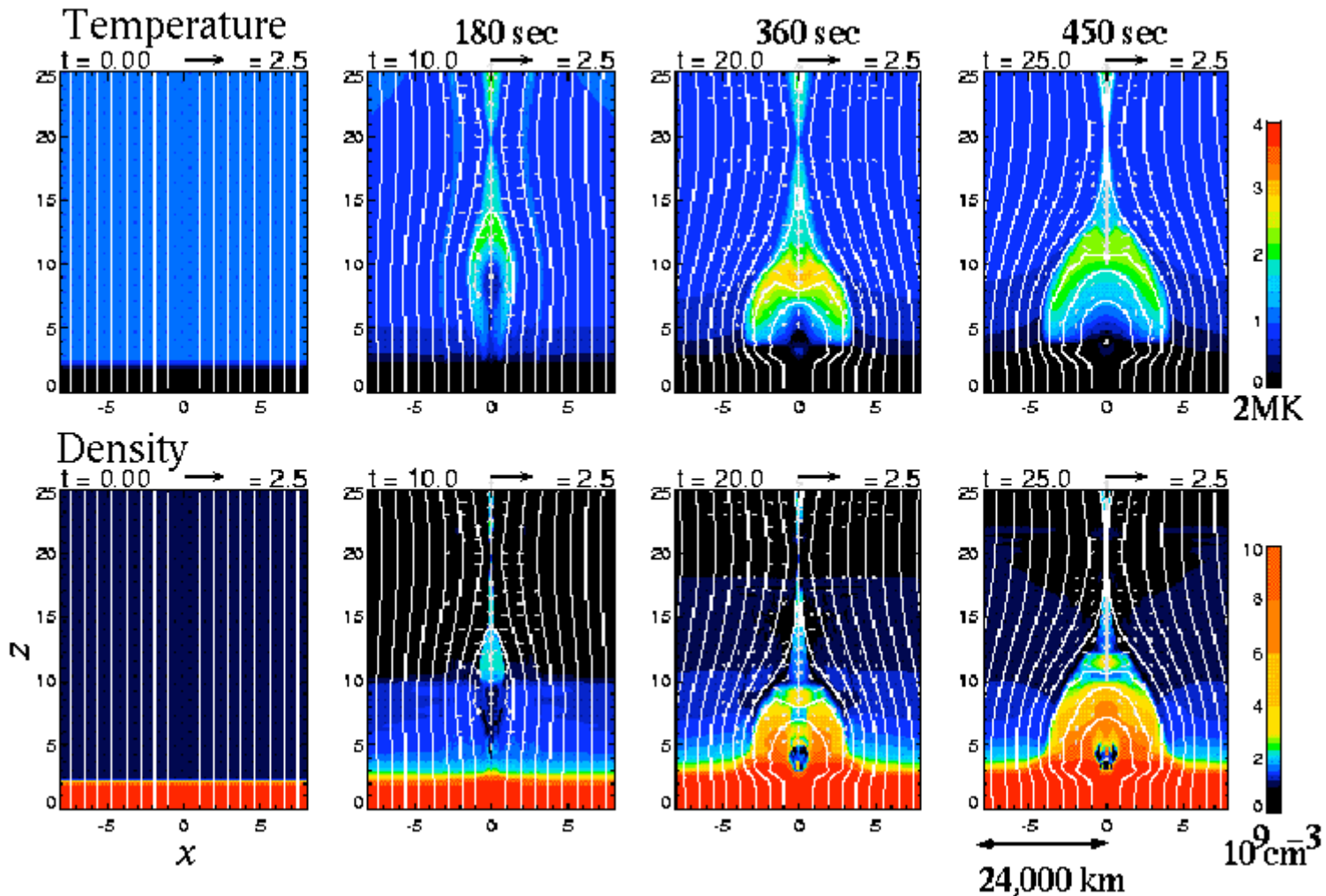


Fig. 13b. The velocity distributions in case B. In this case, the velocity of the expanding material exceeds  $5 \times 10^7 \text{ cm s}^{-1}$ .

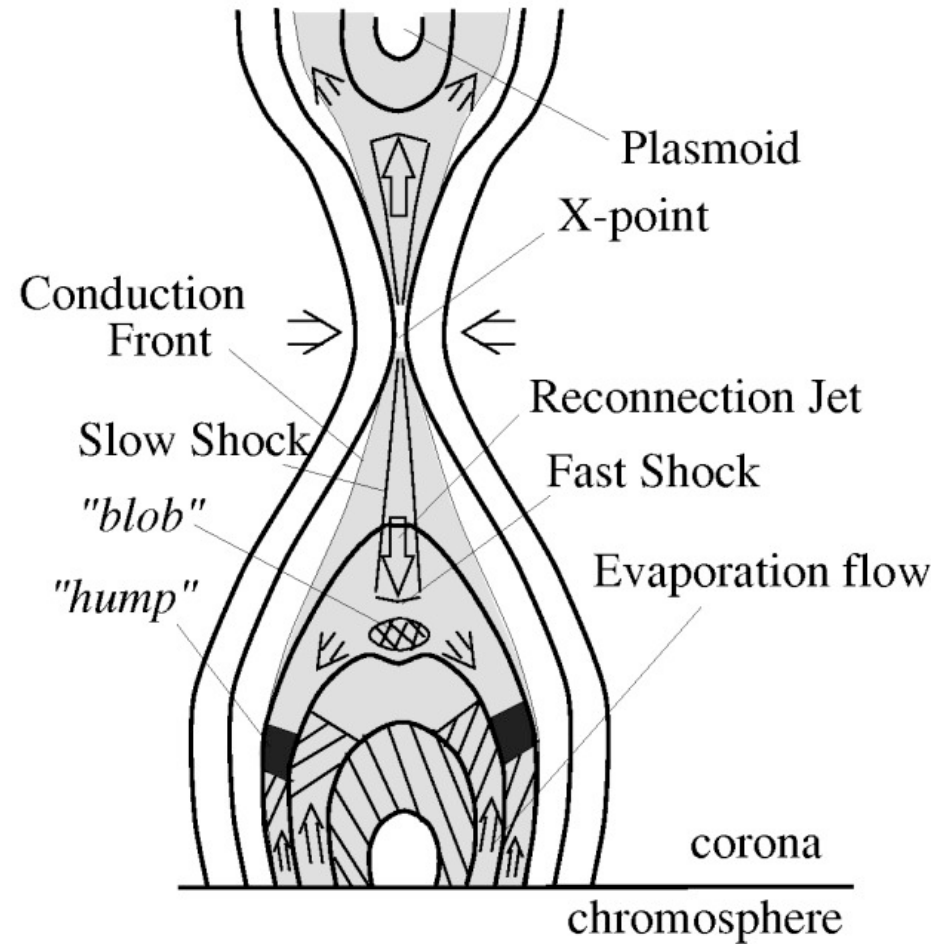
# 彩層蒸発+リコネクションの 2次元MHDシミュレーション (Yokoyama and Shibata 1998、2001)





# フレアの構造

(Yokoyama and Shibata 1998)



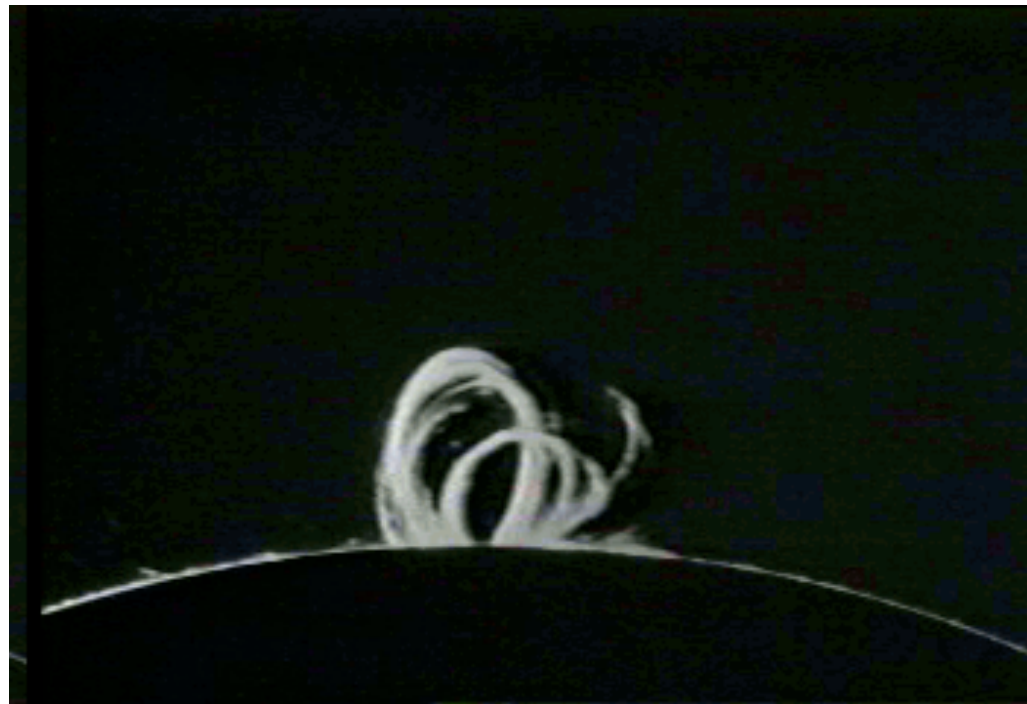
# フレアの現象論的 磁気リコネクション・モデル

# H $\alpha$ 観測のまとめ(その1)

- しばしば、**磁気中性線**に沿って存在していたフィラメント(プロミネンス)がフレア時に噴出
- ときおり、フレアにともなって衝撃波(**モートン波**)が発生。伝播速度400–1200km/s。
- 大きなフレアでは、二つの明るい領域がほぼ平行なリボン状(**two ribbon**)となり、時間とともにその間隔が広がっていく。広がる速度は初期は数10km/s。次第に減速(後半では数km/s)。
- 二つのリボンは、磁極のNSに対応。

## H $\alpha$ 観測のまとめ(その2)

- 後期には、ループプロミネンスが、two ribbonをつなぐように発生。1万度プラズマが雨のように落下。

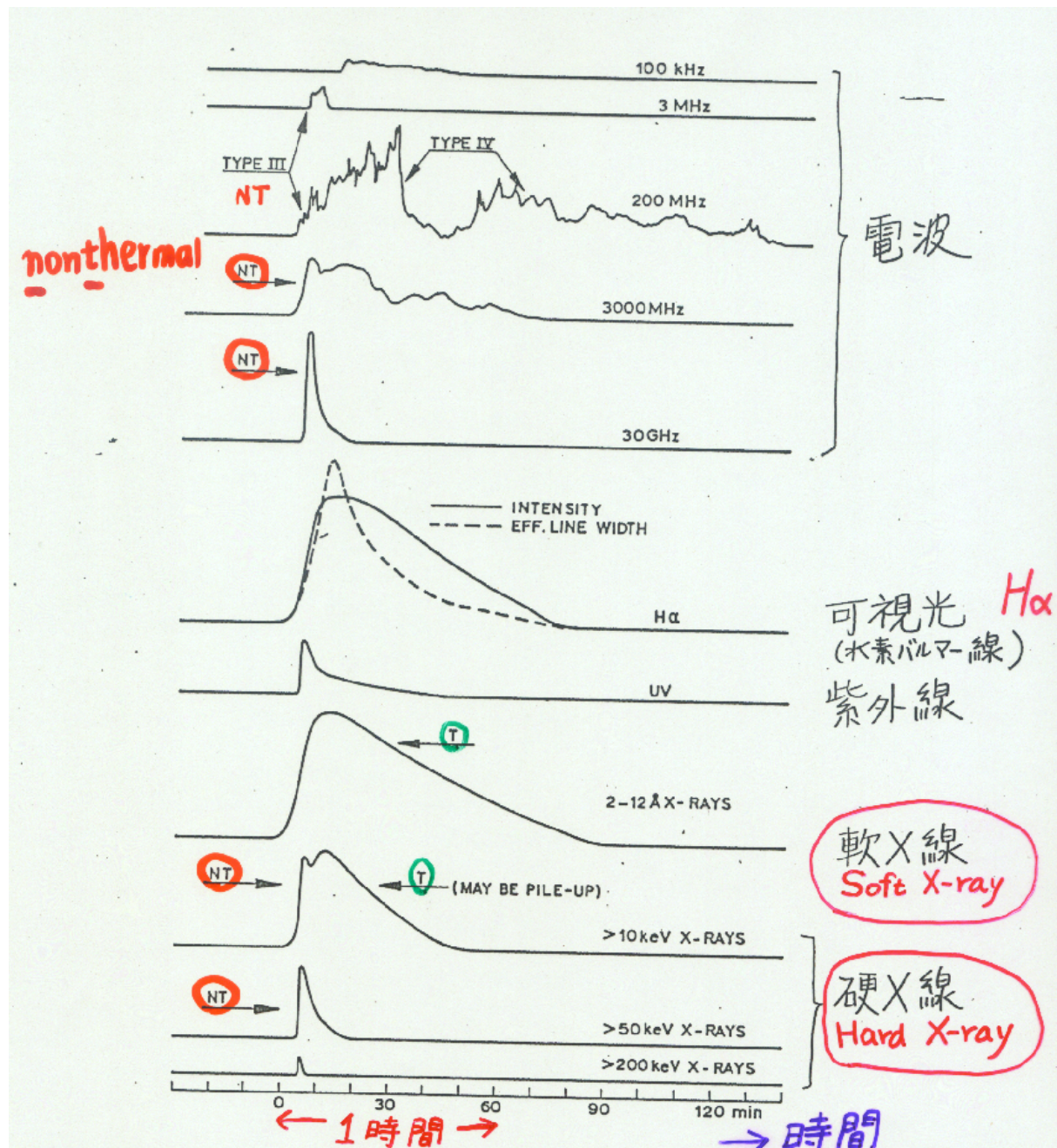


USA, NSO  
1957 June 28

# 太陽フレアから放出される電磁波

## X線バースト

軟X線=>  
フレアの本体は  
数千万度プラズマ



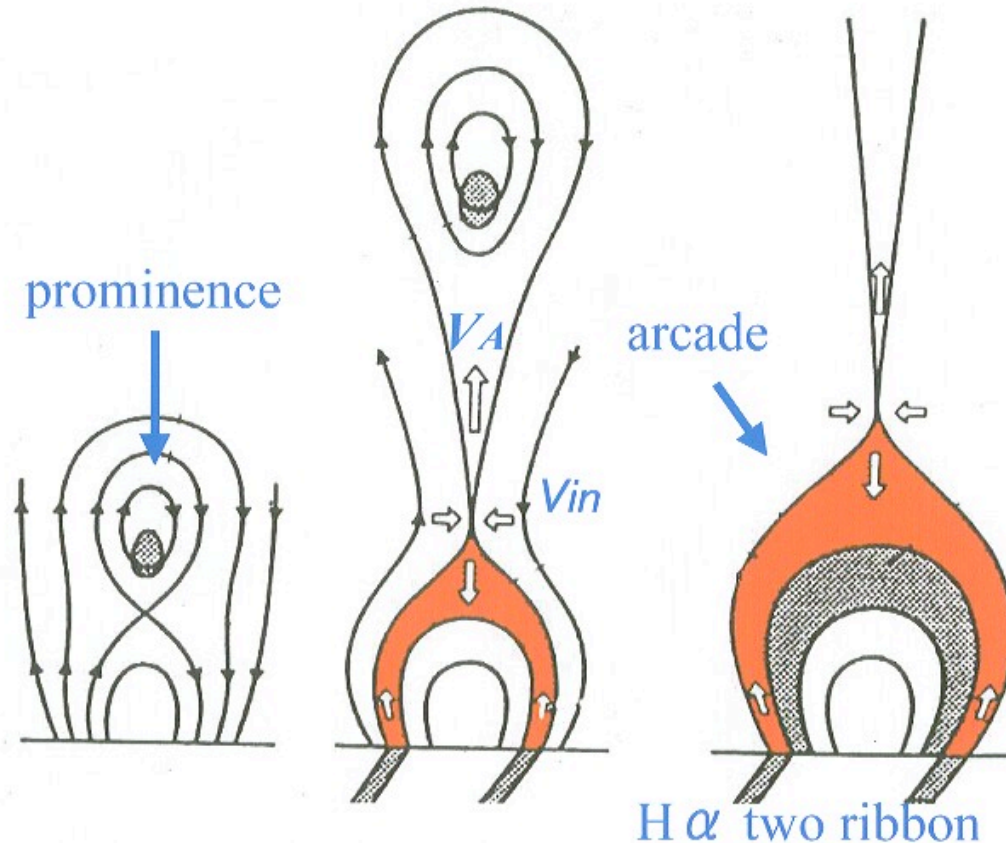
# 磁場との関連

- 大部分のフレアは黒点近傍（活動領域）で発生。磁場強度は、平均100G程度。
- フレアは、
  - 浮上磁場 (emerging flux)
  - 磁気シアー (magnetic shear)にともなうことが多い。

# 現象論的

## 磁気リコネクションモデル

(Carmichael 1964, Sturrock 1966,  
Hirayama 1974, Kopp-Pneuman 1976) =  
CSHKPモデル

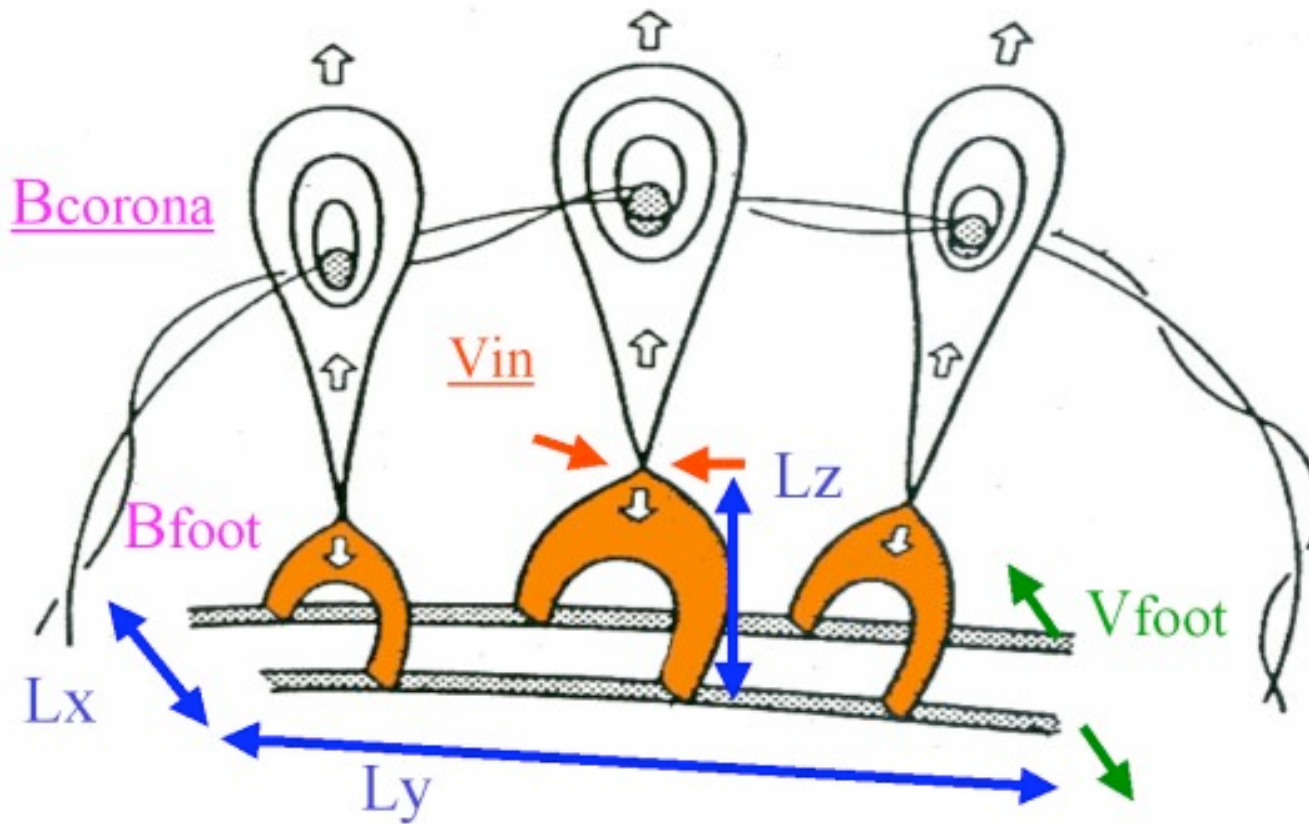


# Prof P. Sturrock and his wife (1999) 花山天文台にて





# 現象論的 磁気リコネクション・モデル (3次元構造)



フレアの統一モデル  
plasmoid-induced-  
reconnection model  
as extension of CSHKP model

# 太陽フレアの謎

ジュール散逸ではフレアを説明できない

磁気拡散時間  $t_D = L^2 / \eta \approx 10^{14} L_9^2 T_6^{3/2} \text{ s}$

(電流散逸時間)  $\eta = \eta_{\text{Spitzer}} \approx 10^4 T_6^{-3/2} \text{ cm}^2 / \text{s}$

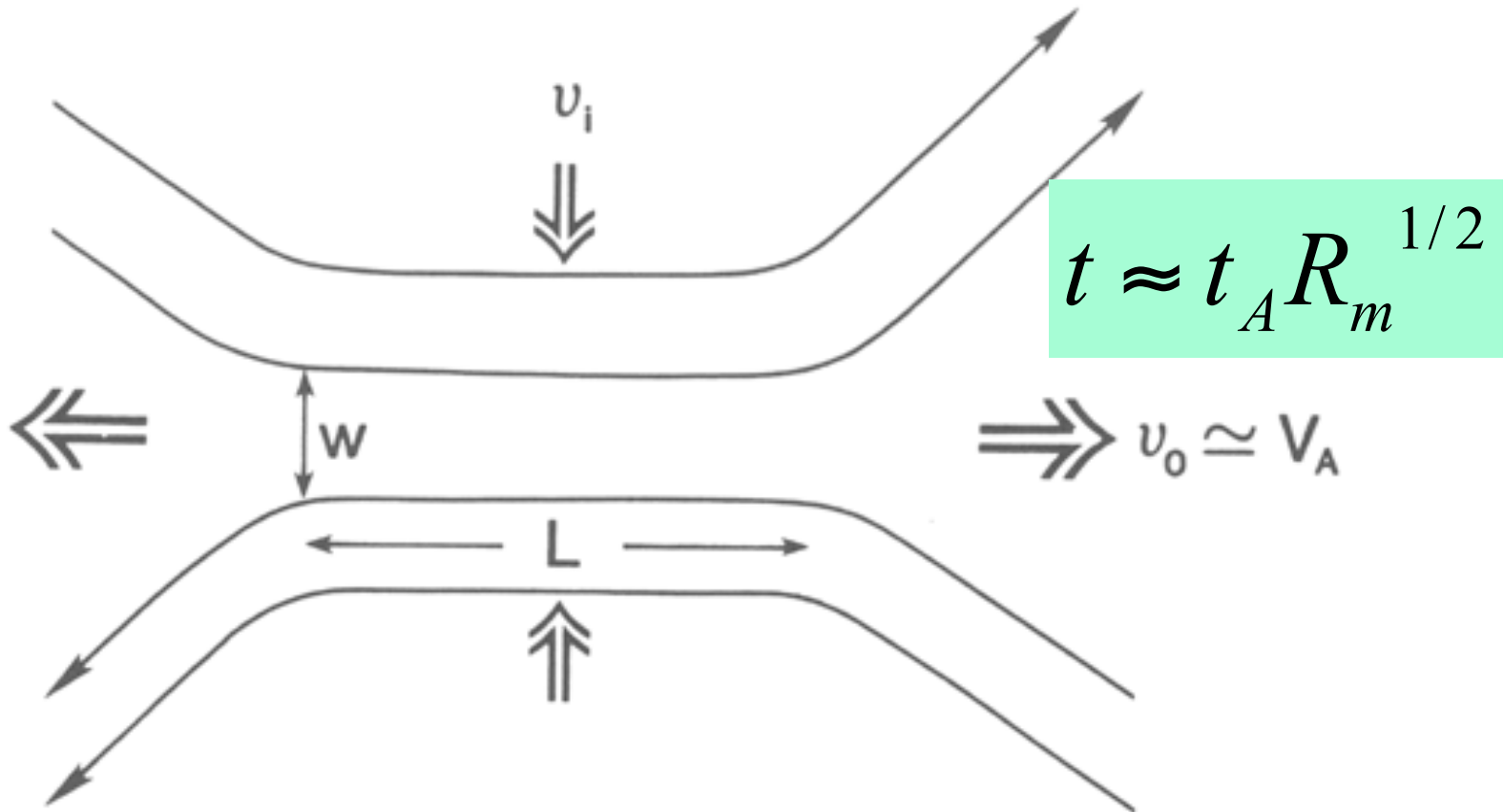
フレア発生時間  $t_{\text{flare}} = 10^2 - 10^3 \text{ sec}$

Alfven時間  $t_A = L / V_A = 10 \text{ sec}$

磁気レイノルズ数  $R_m = t_D / t_A \gg 1$

# 最初の磁気リネクション理論 Sweet-Parker モデル(1957)

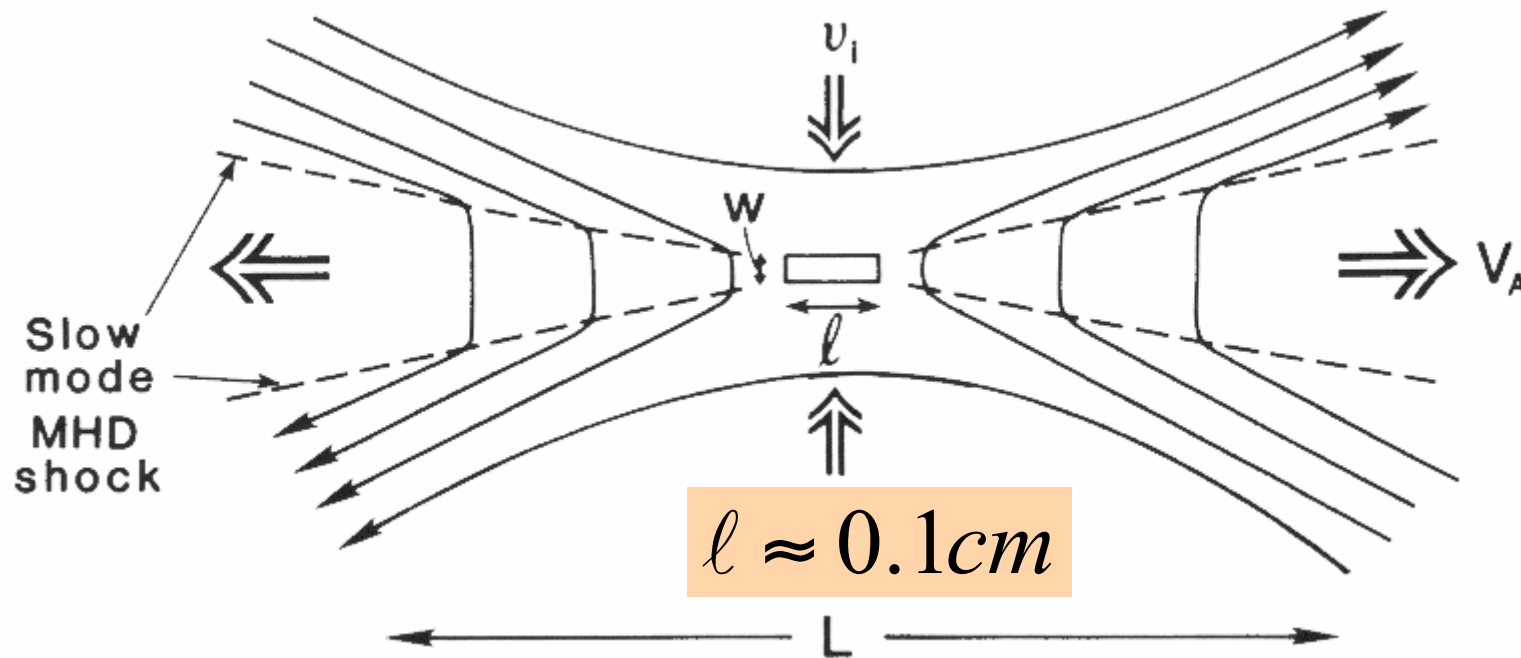
ジュール散逸より格段に速くなったが、  
まだフレアを説明するには、おそい



# Petschek モデル(1964)

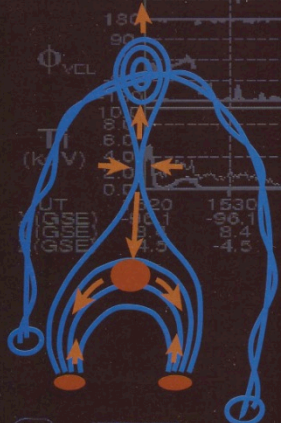
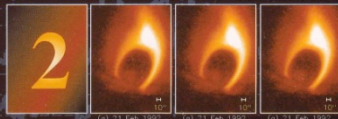
速い、しかし、拡散領域があまりにも小さい

$$t \approx t_A (8 / \pi) \log R_m$$



University of Tokyo Symposium in 2000 on  
**Magnetic Reconnection**  
 in  
**Space and Laboratory Plasmas**

at Sanjo-Kaikan, University of Tokyo  
 Tokyo, Japan Feb. 29 - Mar. 4



**Chairpersons:**

Y. Ono, K. Shibata, T. Terasawa

**Scientific Organizing Committee:**

D. Biskamp, M. Katsurai, K. Makishima,  
 A. Nishida, E.R. Priest, T. Sato,  
 M. Scholer, R. Stenzel, S. Tsuneta,  
 M. Yamada

**Local Organizing Committee:**

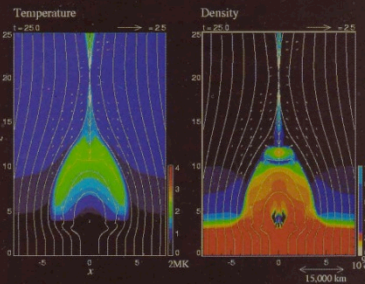
M. Hoshino, R. Matsumoto, T. Yokoyama  
 A. Ejiri, T. Itagaki, T. Kosugi,  
 H. Kurokawa, T. Mukai, T. Shimizu,  
 Y. Takase, M. Ugai, Z. Yoshida

**Contact Address:**

Y. Ono  
 High Temperature Plasma Center  
 University of Tokyo  
 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku,  
 Tokyo 113-8656, JAPAN  
 fax: +81-3-5841-6790  
 email: mr2000@mr.nro.nao.ac.jp

**Further Information:**

web: <http://mr.nro.nao.ac.jp/mr2000/>



Parker



Petschek

# Prof E. N. Parker and Shibata



# 太陽コロナ・プラズマの 特徴的長さ

- ラーモア半径

$$r_{Li} = \frac{m_i v_c}{eB} \approx 10 \text{ cm} \left( \frac{B}{100 \text{ G}} \right)^{-1} \left( \frac{T}{10^6 \text{ K}} \right)^{1/2}$$

- 平均自由行程

$$l_{mfp} = \frac{1}{n} \left( \frac{kT}{e^2} \right)^2 \approx 10^8 \text{ cm} \left( \frac{T}{10^6 \text{ K}} \right)^2 \left( \frac{n}{10^9 \text{ cm}^{-3}} \right)^{-1}$$

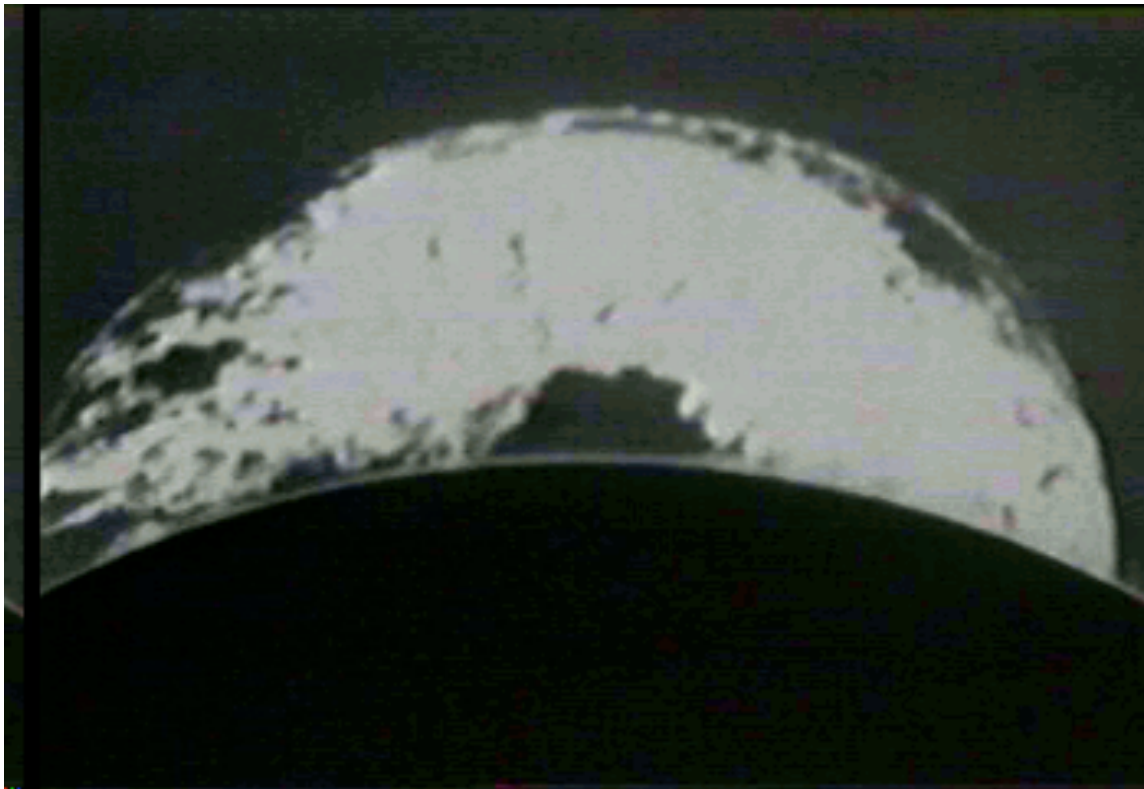
- フレアのサイズ  $r_{flare} \approx 10^9 \text{ cm}$



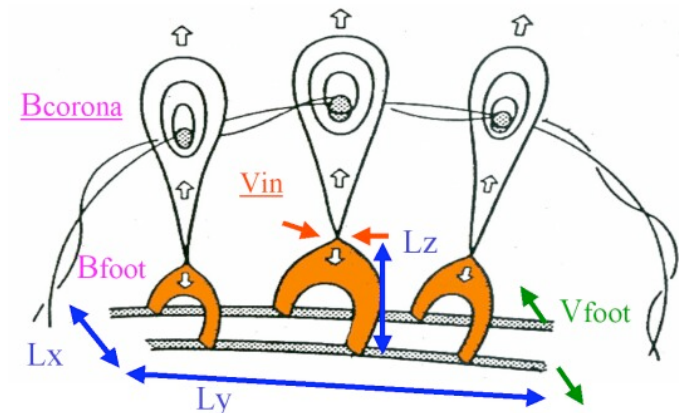
# 太陽フレアの正体は？

- 磁気エネルギーの解放が原因  
=> 1970年代に確立
- 爆発のメカニズムは  
磁気リコネクションか？  
(Petschek model は有望だが、理論的  
困難が残る。1990年代まで論争が続く)

# 観測からのヒント： プロミネンス噴出 フレアにともなうことが多い

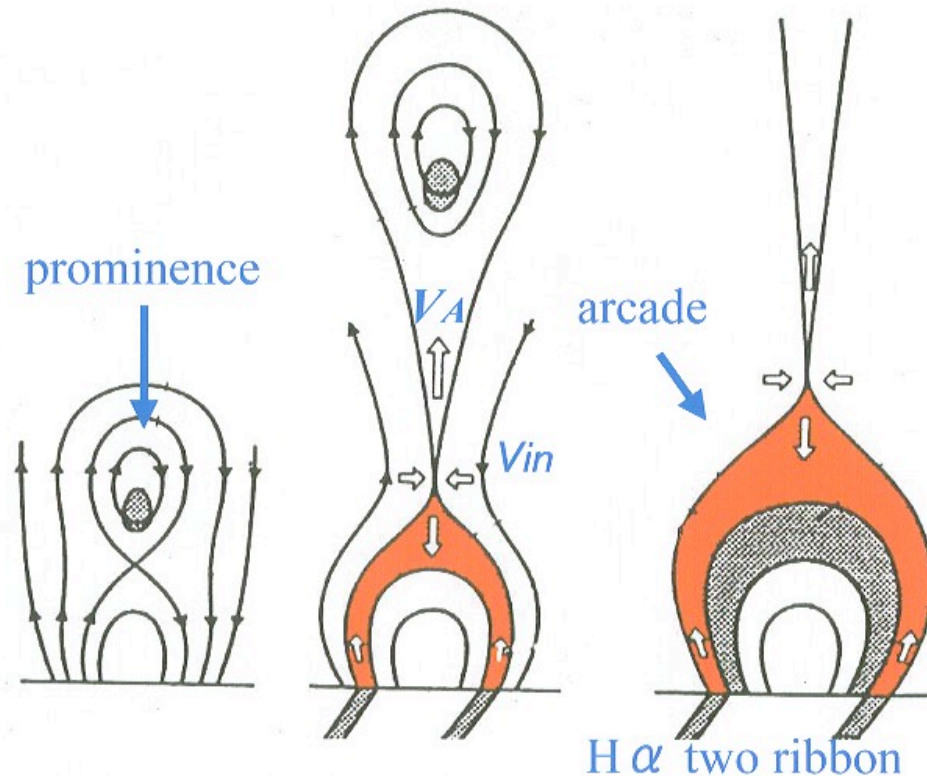


現象論的リコネクション・モデル



史上最大のプロミネンス噴出(1946年6月4日、HAO)

# 本当に磁気リコネクション は起きているのか？



現象論的リコネクション  
モデル(CSHKP モデル;  
Carmichael 1964,  
Sturrock 1966, Hirayama 1974,  
Kopp-Pneuman 1976)

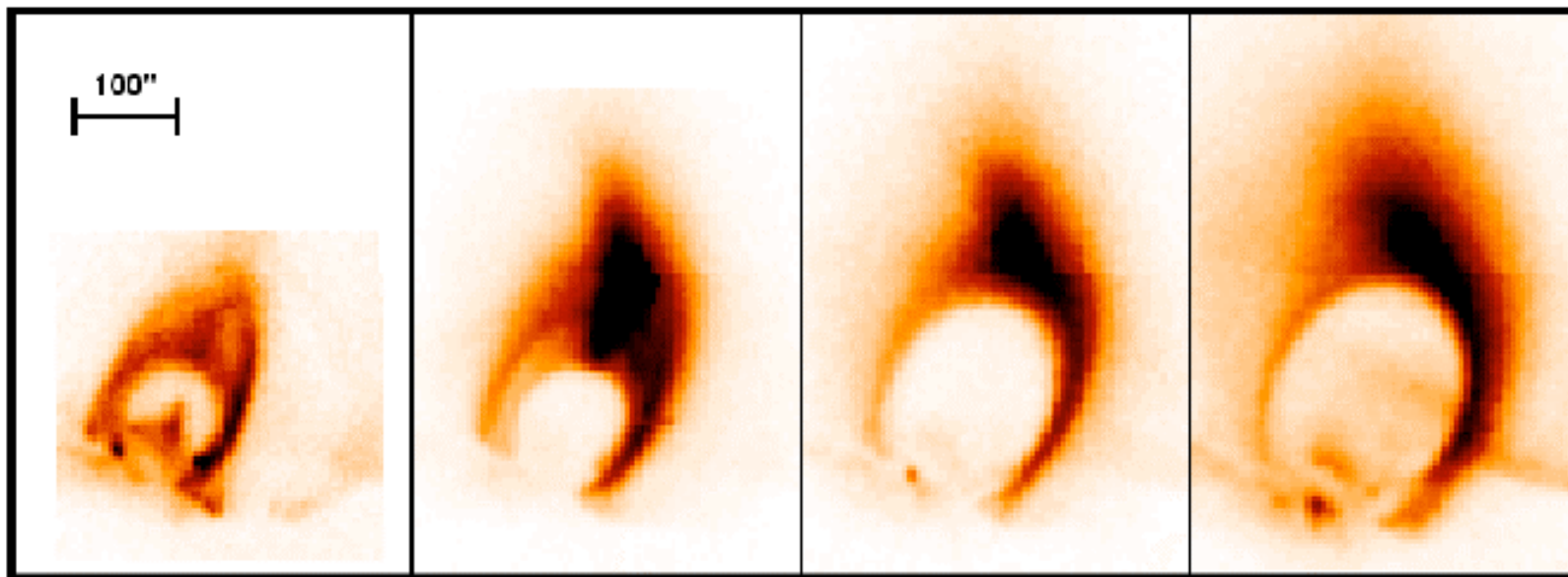
は正しいか？ =>これを  
検証するには、X線観測  
が必要=>ようこう

# 「ようこう」が見たフレア

(長寿命(LDE)フレア:

軟X線 $\sim 1$  keV、Tsuneta et al. 1992 )

21-FEB-1992 Flare SXT Image Filter : Al.1



03:10:30 UT

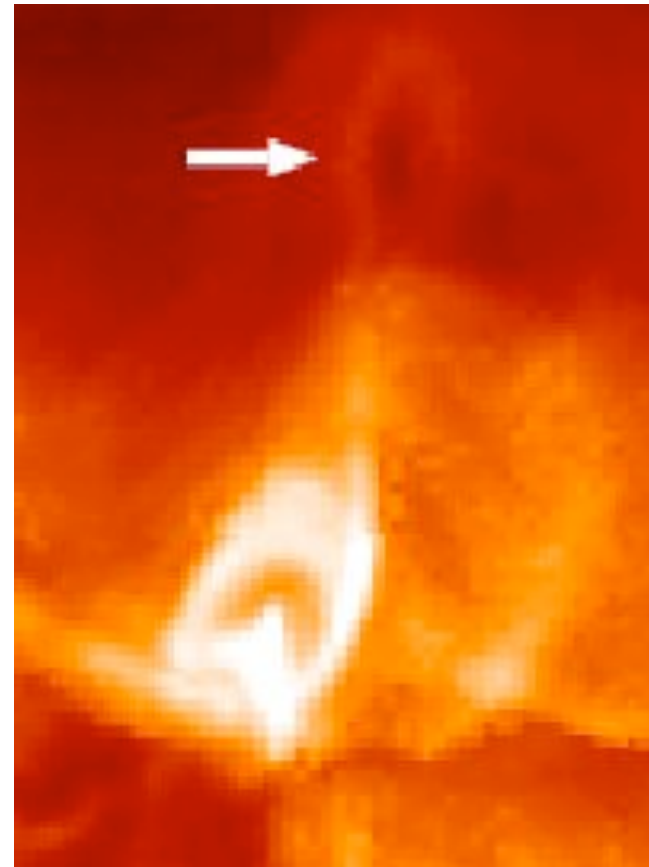
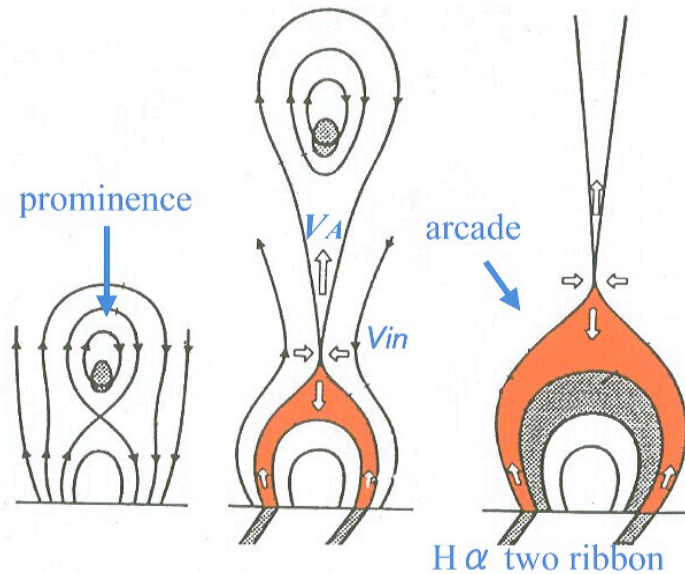
04:52:22 UT

06:35:30 UT

09:06:42 UT

電子温度 $\sim 10^7$  K、電子密度 $\sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$

# フレアにともなう プラズモイド噴出



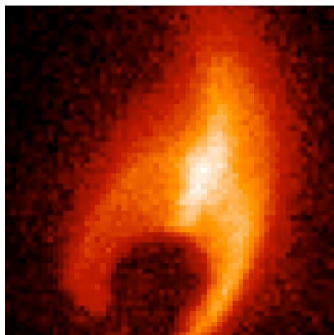
ようこう軟X線像

プラズモイド速度 = 約300km/s

# 長寿命フレア vs インパルシブ・フレア

寿命	1時間以上	1時間以下
サイズ	大	小
発生頻度	少ない	多い
軟X線像	カスプあり	カスプなし

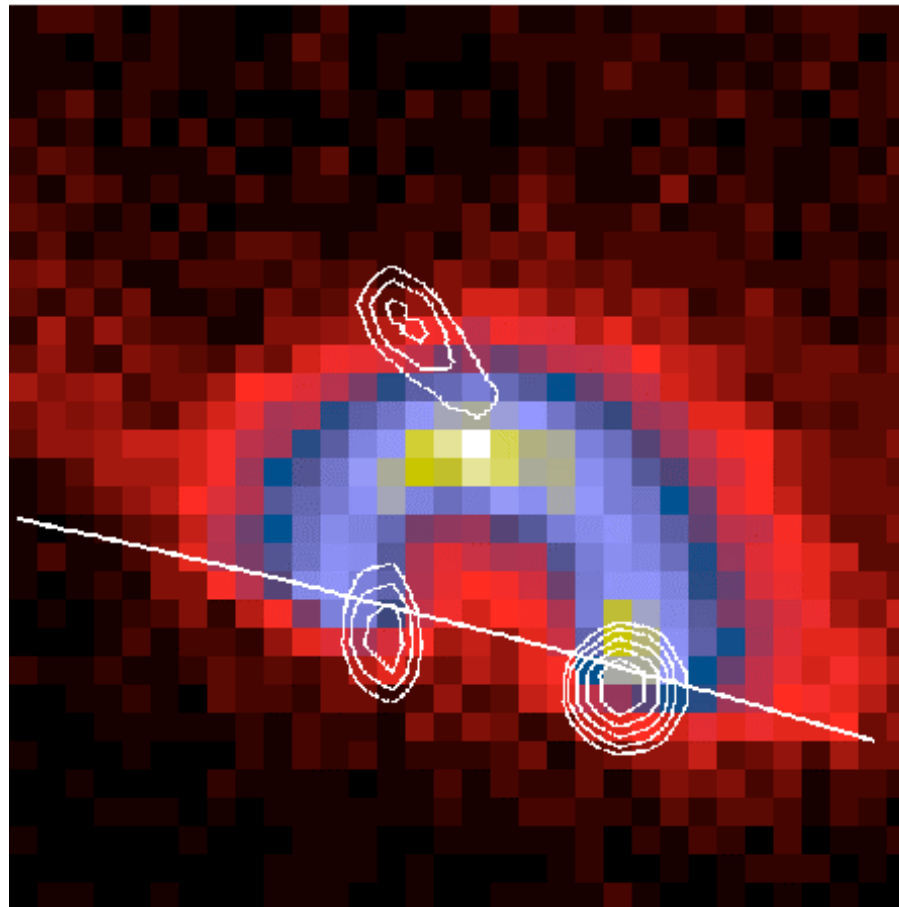
磁気リコネクション説でOK



磁気リコネクション説では説明できない! ?



# インパルシブ・フレアにおける ループトップ硬X線源の発見 (Masuda et al. 1994 Nature)



カラー：  
軟X線像  
(1keV)

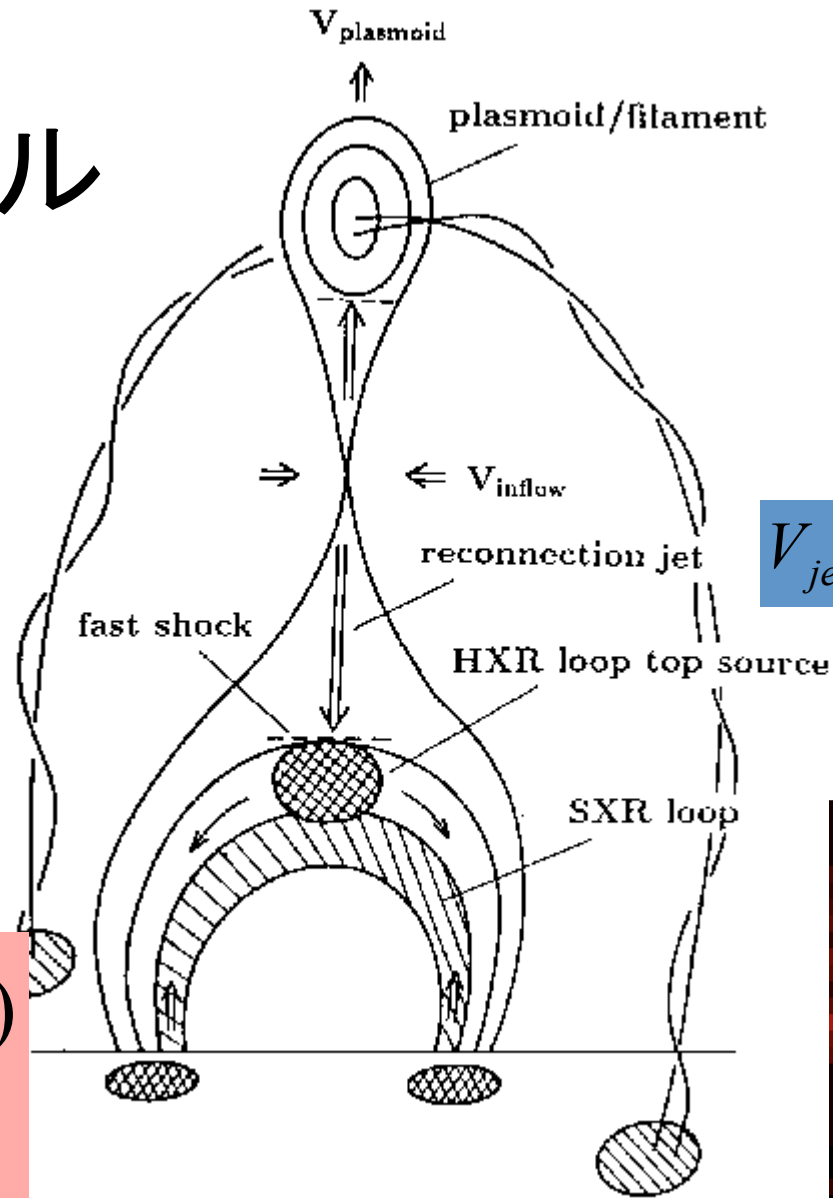
等高線：硬X線  
(30keV)  
=>高エネルギー電子

ループトップ～1億度

# 統一モデル

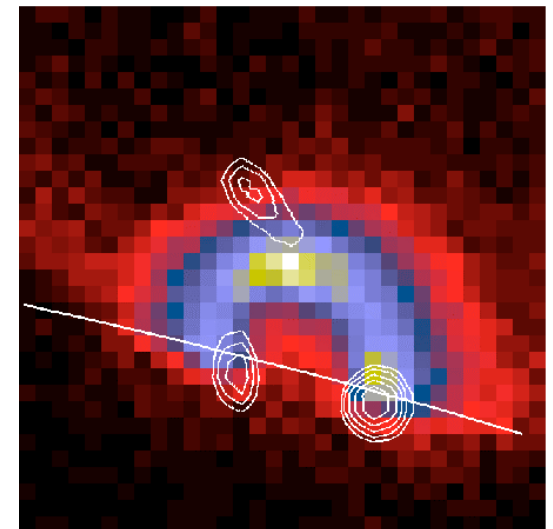
- ループトップ  
硬X線源  
は、fast  
shock か？

$$T \approx mV_A^2 / (6k) \\ \approx 10^8 K$$



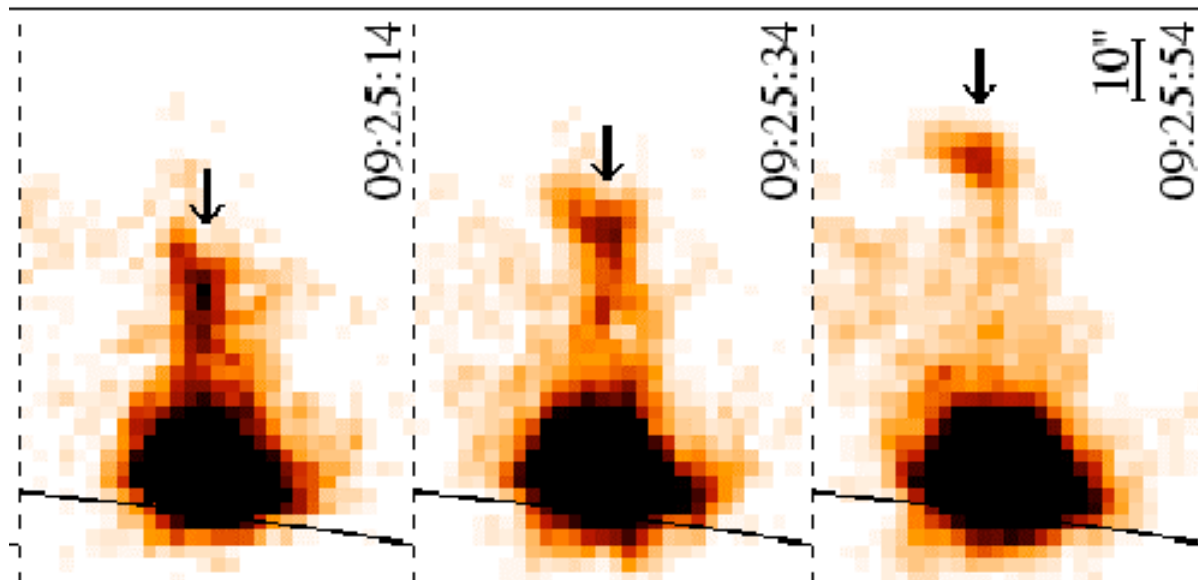
X線プラズマ  
モード噴出  
を予言

$$V_{\text{jet}} \approx V_A \approx 1000 \text{ km/s}$$



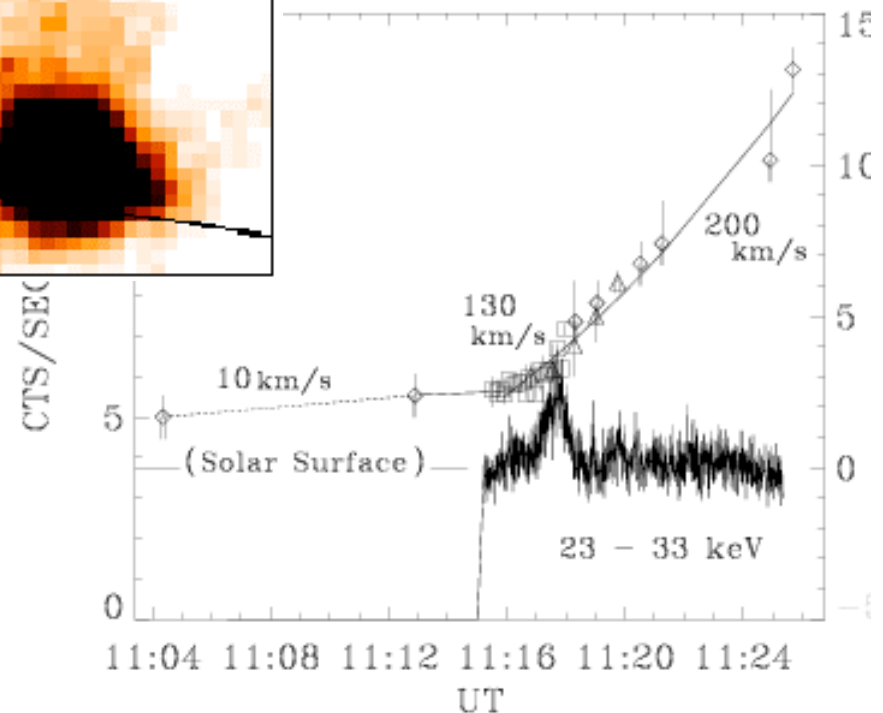


# インパルシブ・フレアの 上空にプラズモイド発見

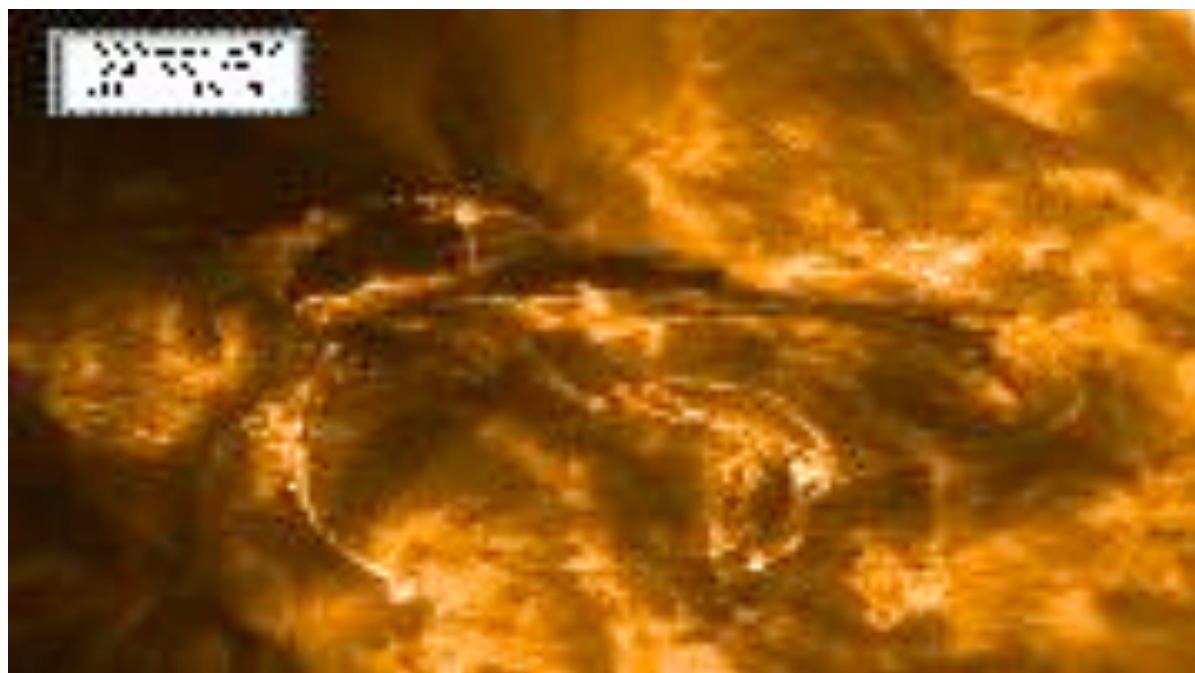


プラズモイド速度  
~130–200km/s

- Ohyama and Shibata (1997, 1998): プラズモイド噴出とリコネクションは密接に関係

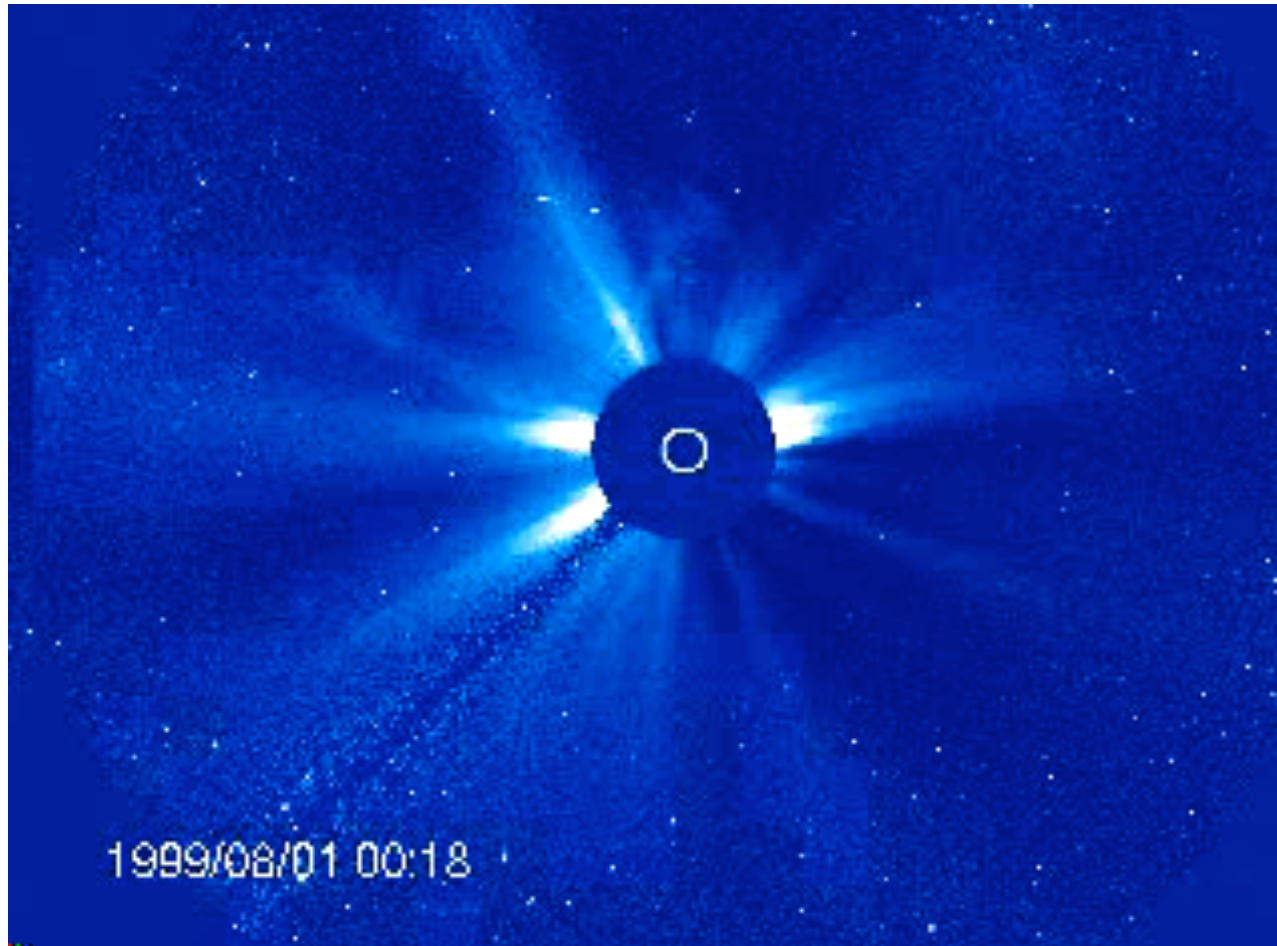


# TRACEの見たフレア (極紫外線: 100万度)

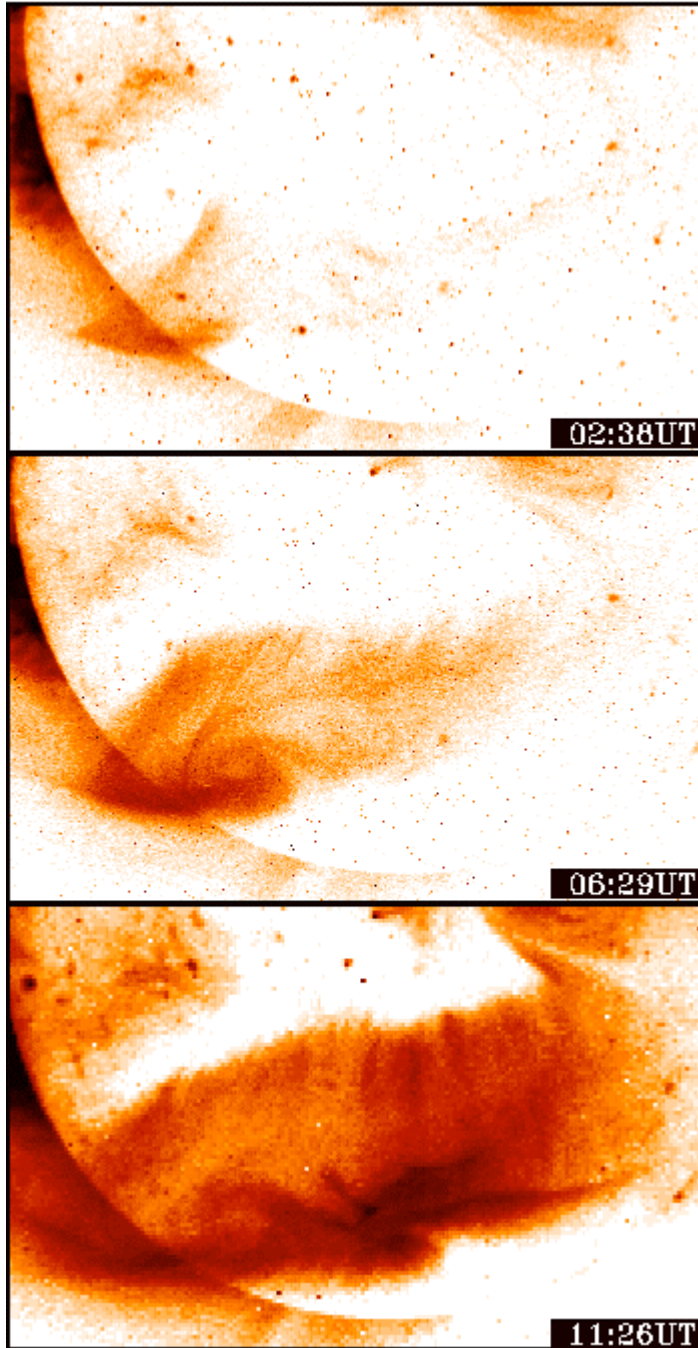


# コロナ質量放出 (CME)

(SOHO/LASCO,  
可視光/人工日食)



速度 $\sim 10-1000\text{km/s}$ 、質量 $\sim 10^{(15)}-10^{(16)}\text{g}$

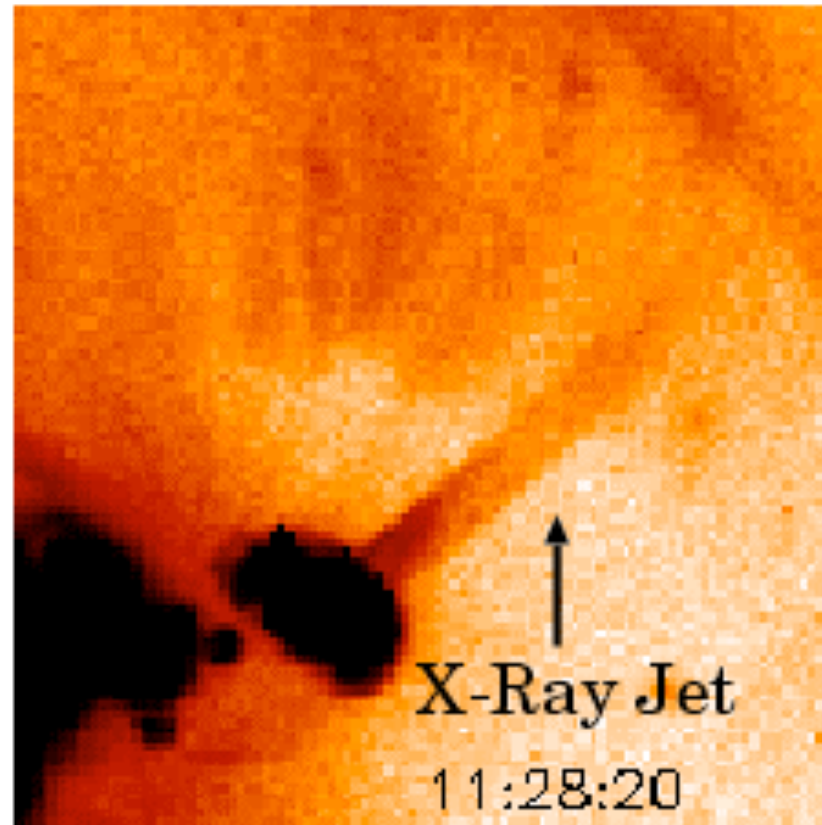


# コロナ質量放出 にともなう巨大 アーケード

- 1994年4月14日
- 大量のプラズマ噴出が  
起きているはずと世界  
に電子メール通報
- それにともなって起こ  
る地球の巨大磁気嵐  
を予言
- シカゴの電力会社の変  
圧器(数億円)を救う!

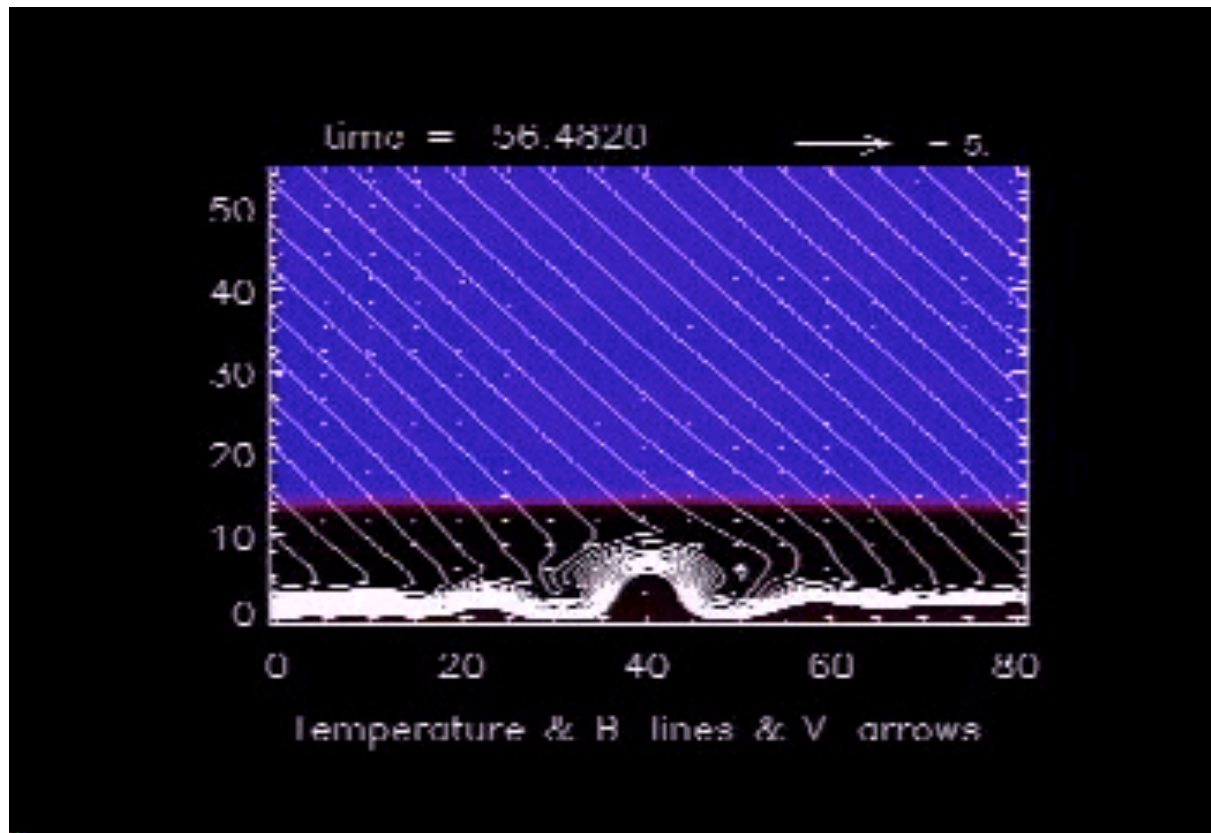
# 太陽コロナにもジェット発見

- 足元でマイクロ・フレア
- 長さ = 数万 - 数10万km
- 速度 = 10 - 1000km/s  
(X線 / ようこう)



# 太陽ジェットのリコネクション・モデル (Yokoyama and Shibata 1995 Nature 375, 42)

温度分布： 斜め磁場の場合



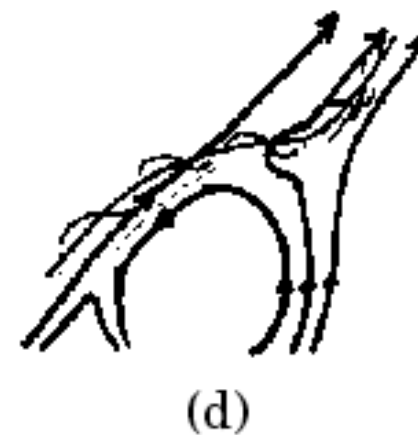
# フレア観測のまとめ

現象	長さ (L)	寿命 (T)	Alfven Time (TA)	T/TA	Mass ejection
大フレア	数万—数 10万km	1時間 — 数日	30— 1000秒	~100	プラズモイ ド
小フレア	千km— 数万km	数分— 1時間	1—30秒	~100	ジェット

# フレア・ジェット の統一モデル

(a,b): 大フレアと  
プロミネンス噴出  
コロナ質量放出

(c,d) : 小フレアと  
ジェット

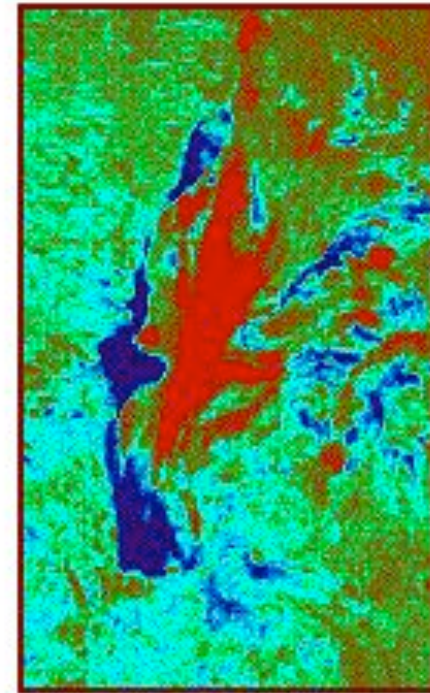
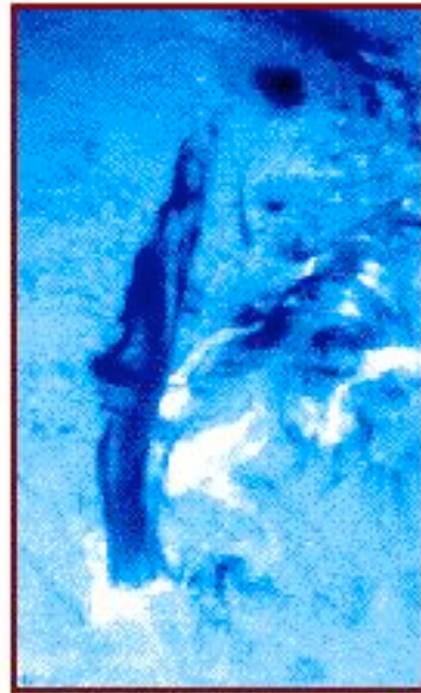
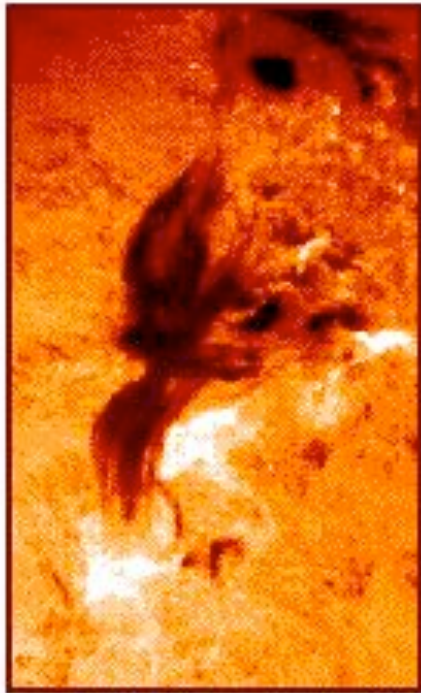


$$\text{エネルギー解放率} = \frac{dE}{dt} \approx \frac{B^2}{4\pi} V_{in} L^2 \approx 10^{-2} \frac{B^2}{4\pi} V_A L^2$$



# 回転噴出ジェット・フィラメント

(京大飛騨天文台:黒河ら1988)



レッドシフト

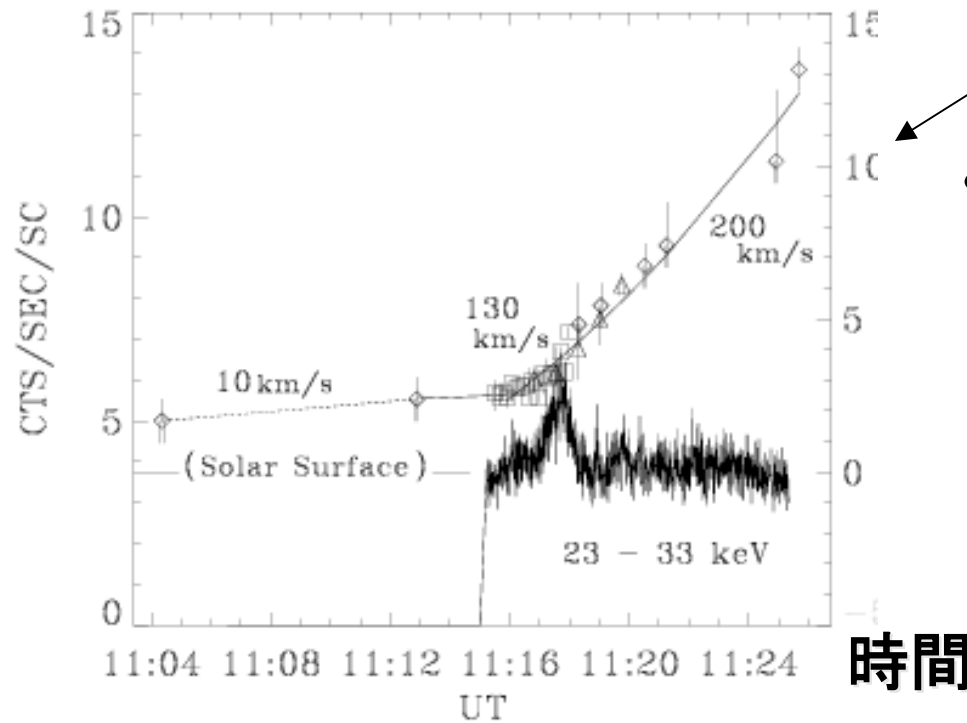
ブルーシフト

合成

「ようこう」によってリコネクションが起きていることは確かになったが、リコネクションの基礎物理は解明されたか？

- 答： まだ解明されていない。
- 速いリコネクションの要因は？  
=>プラズモイド噴出とリコネクションのカップリングではないか？

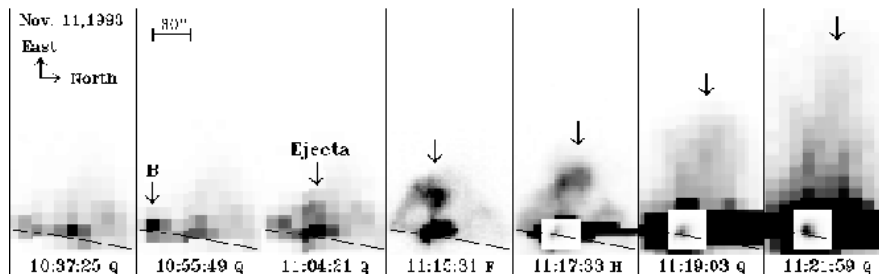
# X線プラズモイド高度— 時間変化



高さ10万km

- Ohyama and Shibata (1997): プラズモイド噴出とリコネクションは密接に関係

プラズモイドが急激に加速されるときに激しいエネルギー解放が起きている



# CME height vs. SXR light curve (Zhang 2001)

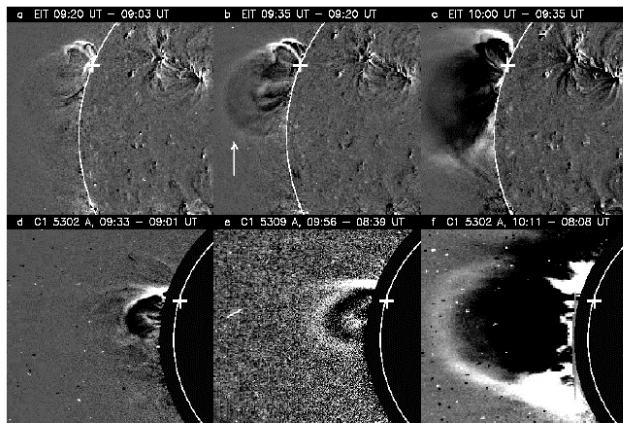
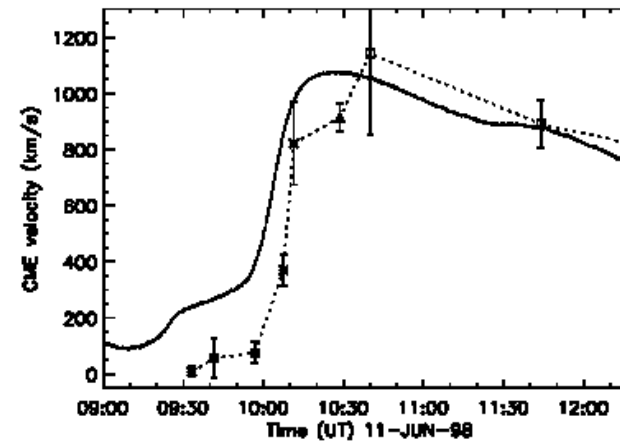
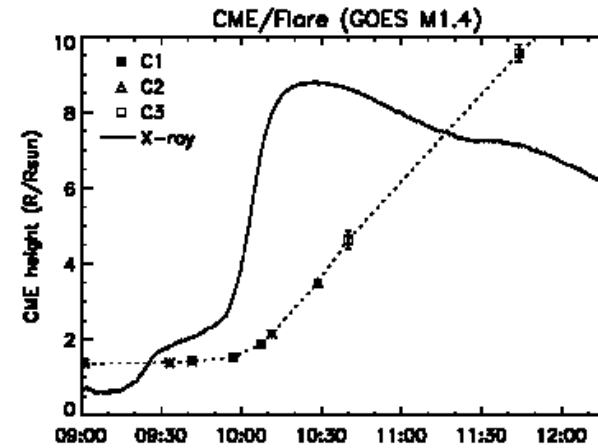
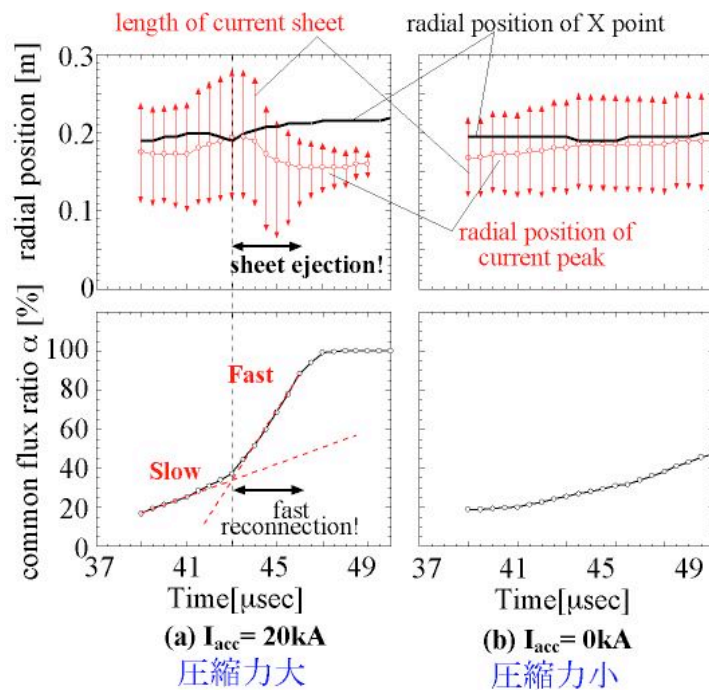


FIG. 1.—Running difference images of EIT 2195 (upper three panels) and LASCO/C1 (lower three panels), which show early evolution of the CME on 1998 June 11. Their timings are indicated at the top of each panel. The white circle in each panel indicates  $1.0 R_{\odot}$  solar limb. The plus sign in each panel indicates the position of the corresponding flare. The arrow in (b) points at the CME front.



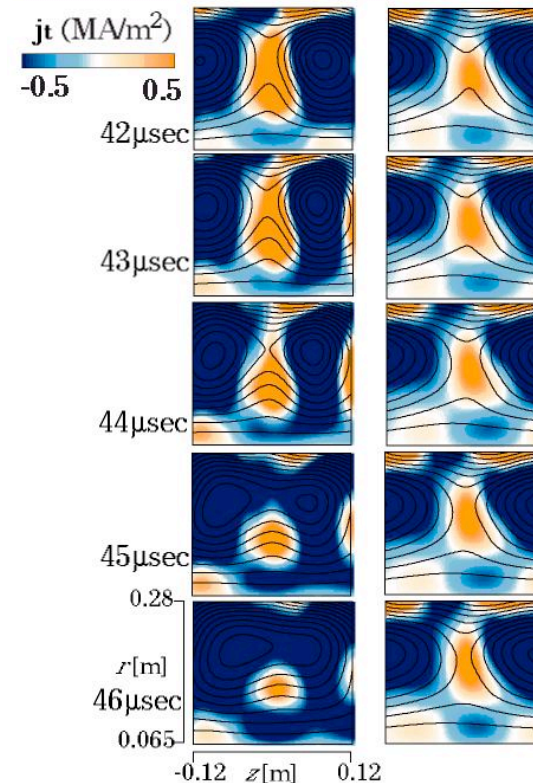
# Laboratory experiment (Ono et al.)

電流シートが（間欠的に）放出される時、  
リコネクション速度が急上昇する



電流シートおよびX点の位置の時間変化と  
再結合速度の時間変化の比較

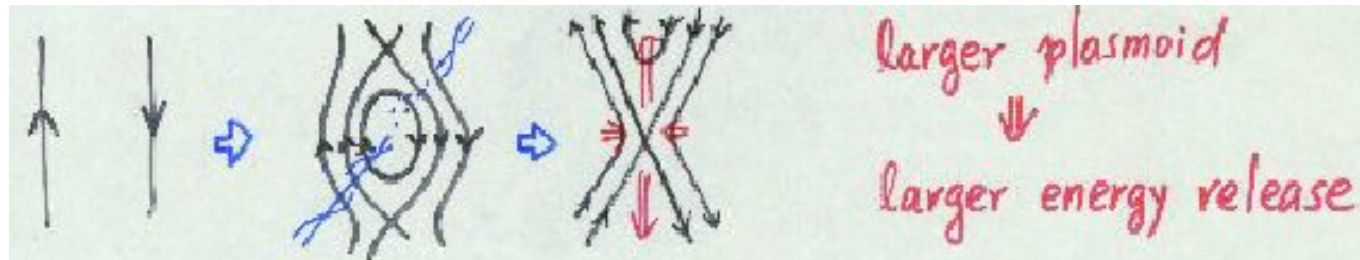
Fast compression of current sheet causes  
its mechanical ejection in high-Bx MHD regime.



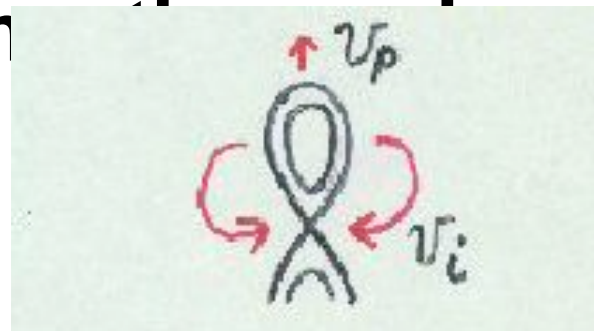
(a) Fast Compression ( $J_{acc}=20\text{kA}$ ) (b) Slow Compression ( $J_{acc}=0$ )

# Role of Plasmoid

1. To store energy by inhibiting reconnection



2. To induce strong inflow into reconnection



# Plasmoid Velocity vs. Reconnection Inflow Velocity

- Yohkoh/SXT observations (Shibata et al 1995, Shimizu et al. 2008) show

$$V_{plasmoid} \propto V_{loop}$$

$V_{loop}$  = apparent rise velocity of flare loop

$$V_{loop} = (B_{in} / B_{loop}) \times V_{in}$$

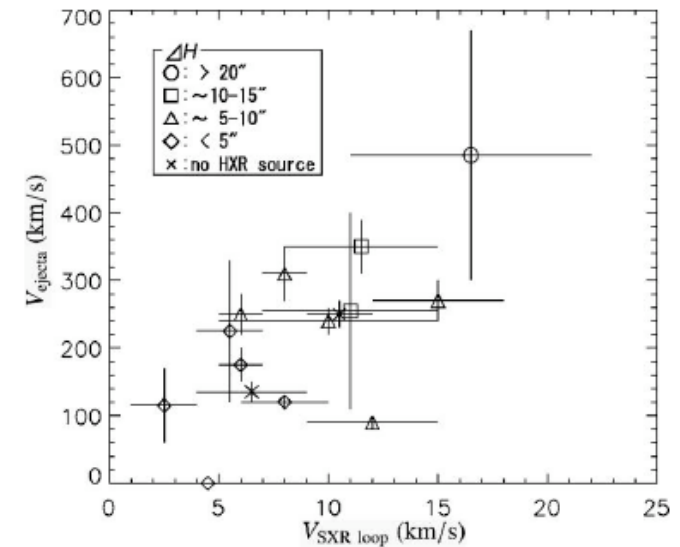
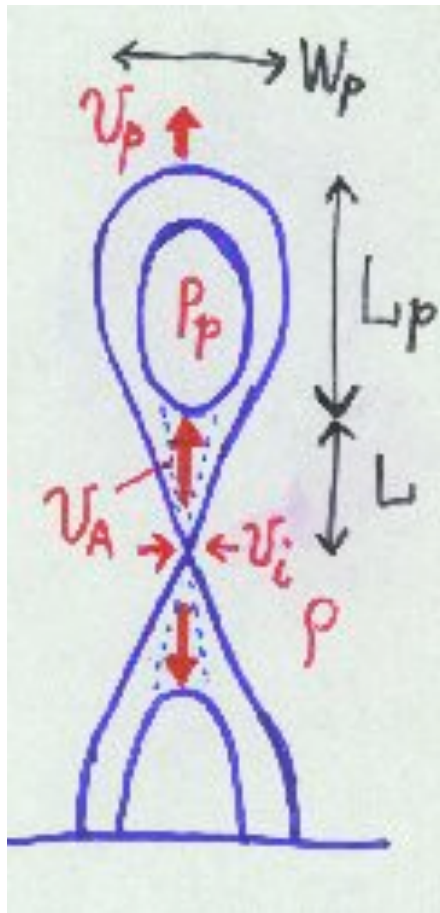


FIG. 5.—Relation between the rise velocity of the SXR loop and the ejection velocity of the plasmoid in 15 Masuda-type flares. Circle, squares, triangles, diamonds, and crosses represent  $>20''$ ,  $10''-15''$ ,  $5''-10''$ ,  $<5''$ , and no HXR source, respectively.

Shimizu et al. 2008, ApJL

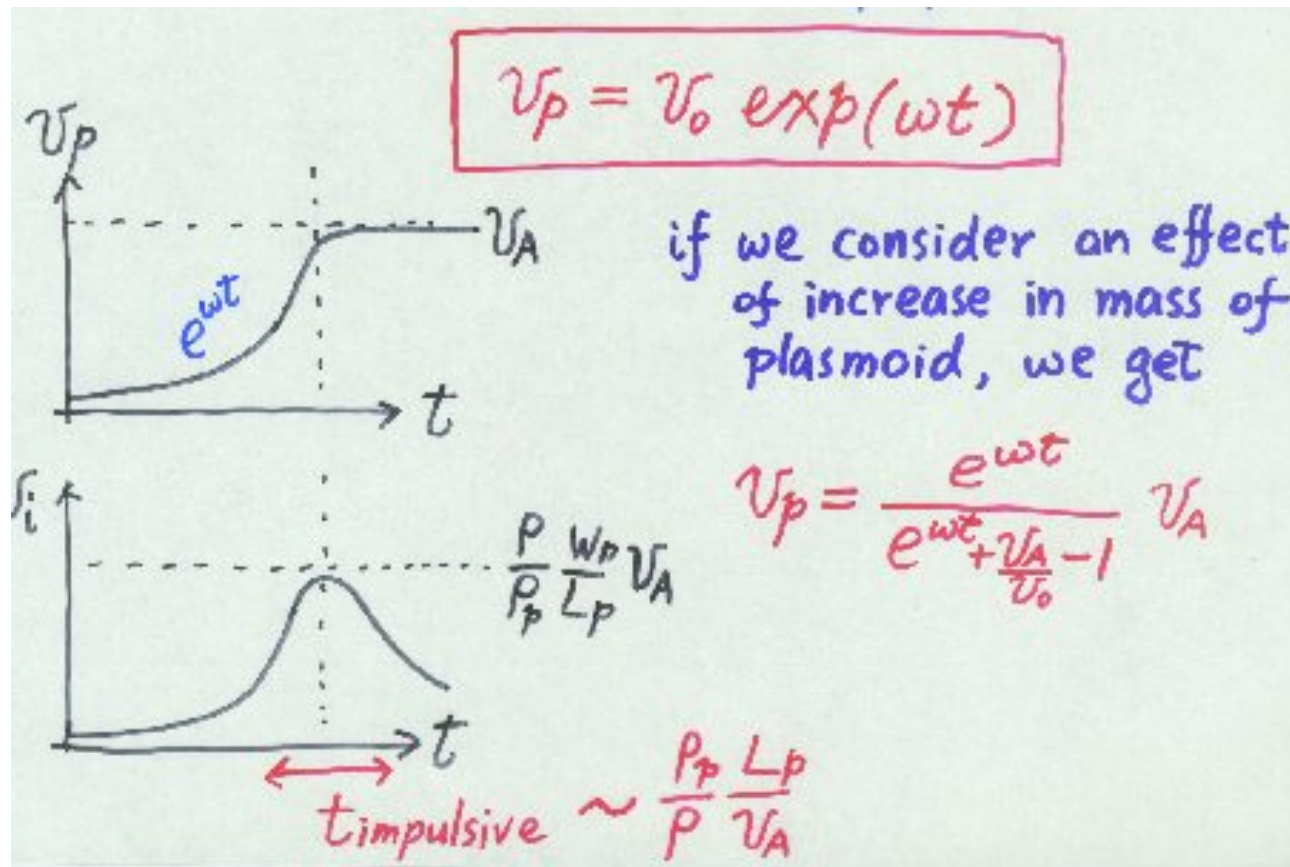
# plasmoid-induced-reconnection: nonlinear instability



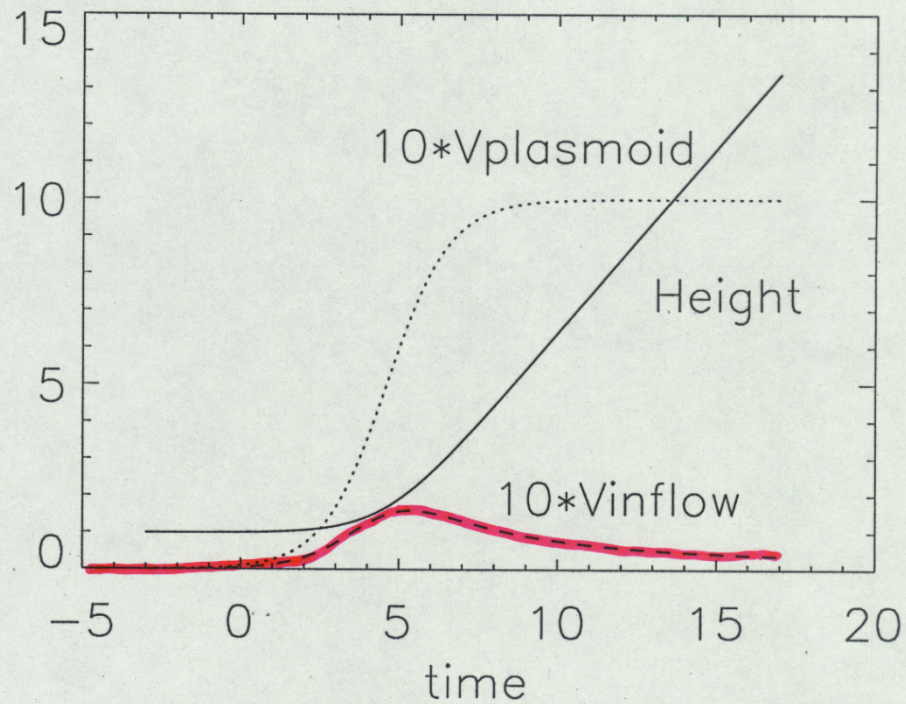
$$\begin{aligned}
 \rho_p L_p W_p \frac{dv_p}{dt} &= \rho v_i L v_A \\
 &= \rho v_p W_p v_A \\
 (\because v_i &= \frac{W_p}{L} v_p) \\
 \frac{1}{v_p} \frac{dv_p}{dt} &= \omega \equiv \frac{\rho v_A}{\rho_p L_p} \\
 v_p &= v_0 \exp(\omega t)
 \end{aligned}$$



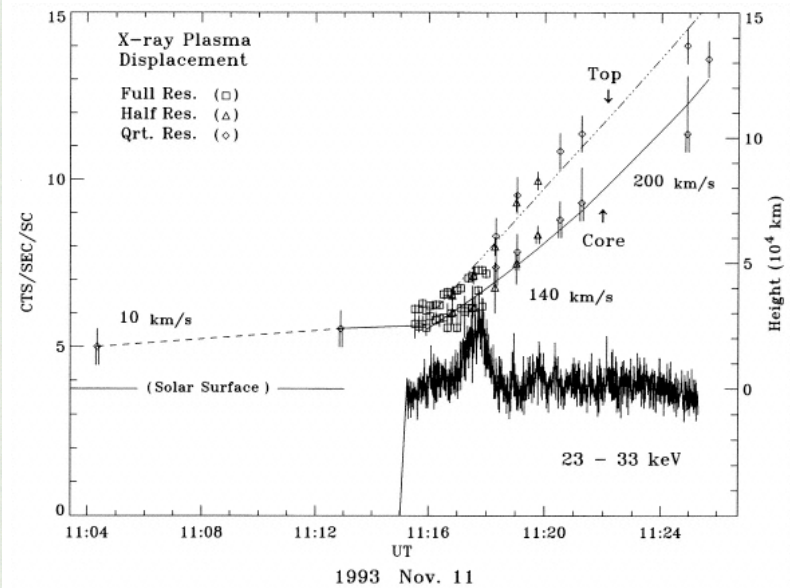
# Analytical model of plasmoid-induced-reconnection : **saturation** of nonlinear instability



# Typical analytical solution



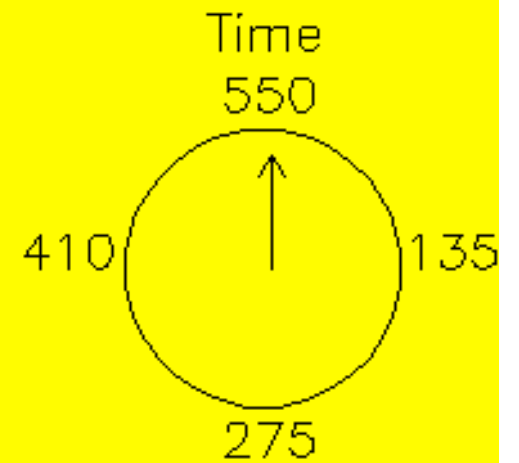
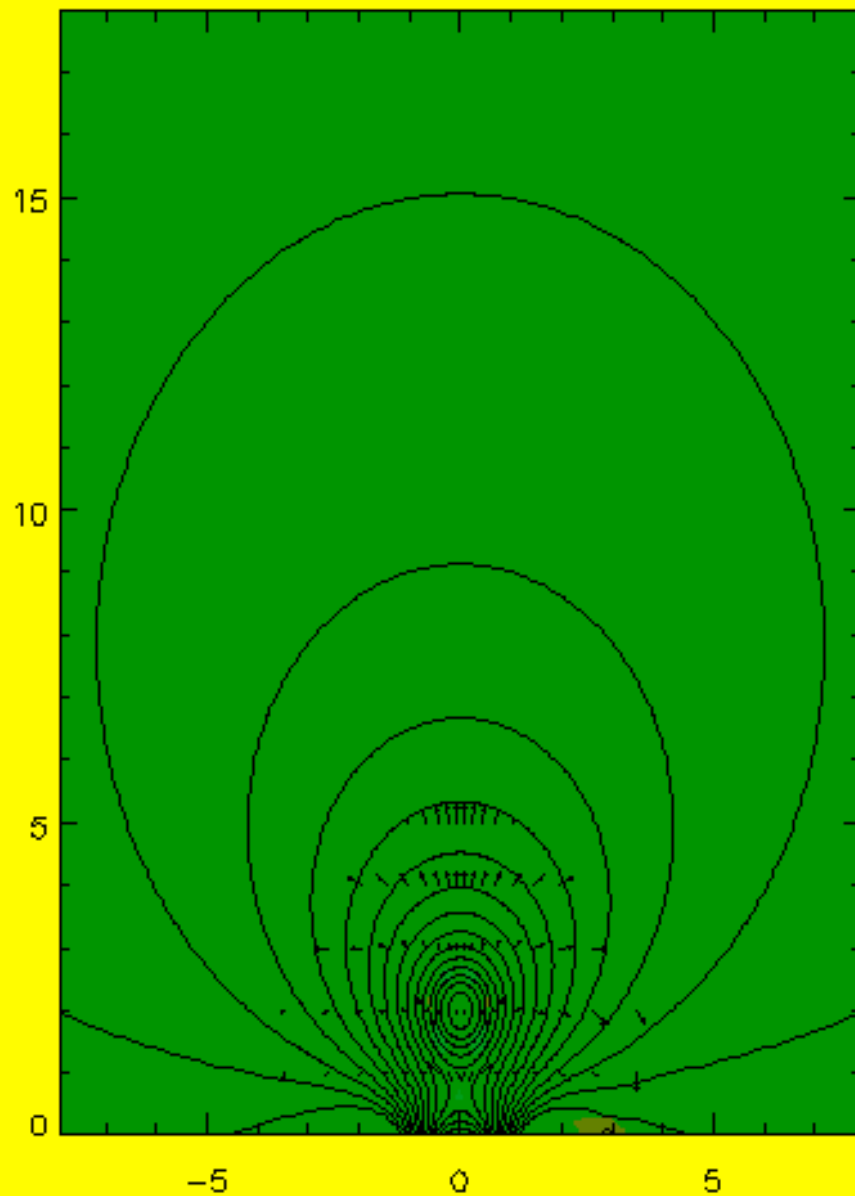
$$\left(\frac{U_i}{U_A}\right)_{\max} = \frac{P}{P_p} \frac{W_p}{L_p}$$



Yohkoh/SXT Obs.  
(Ohyama and Shibata  
1997)

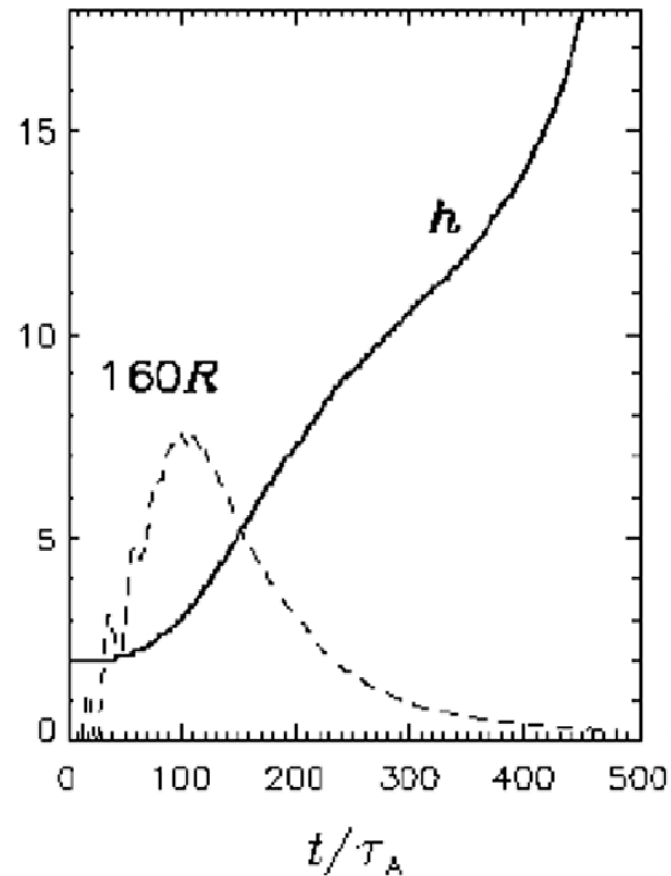
# Chen-Shibata (2000)

浮上磁場が  
既存磁場の平衡  
をこわすため  
プラズマ噴出が  
トリガーされる



Distributions of Temperature, magnetic field & velocity

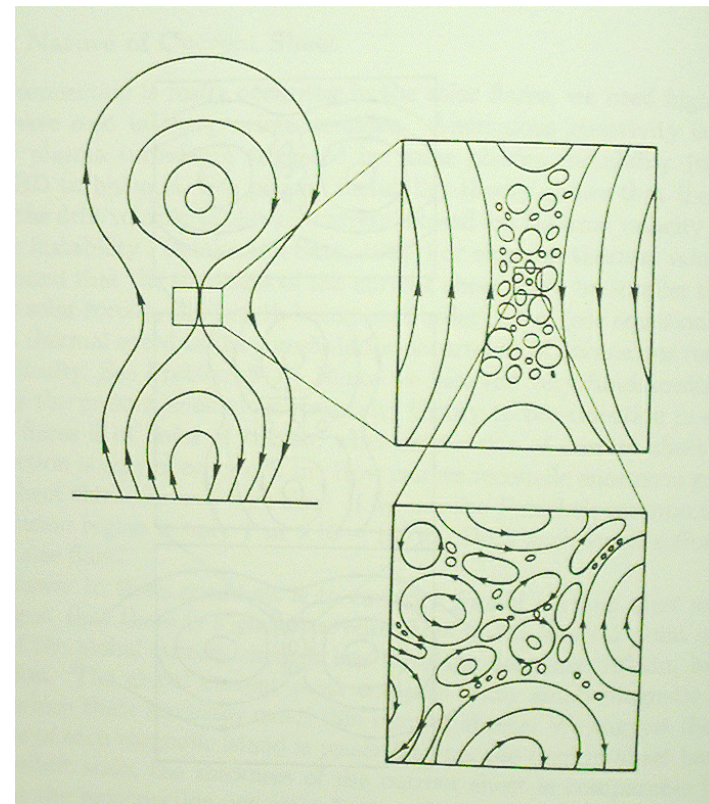
# Plasmoid height vs. reconnection rate



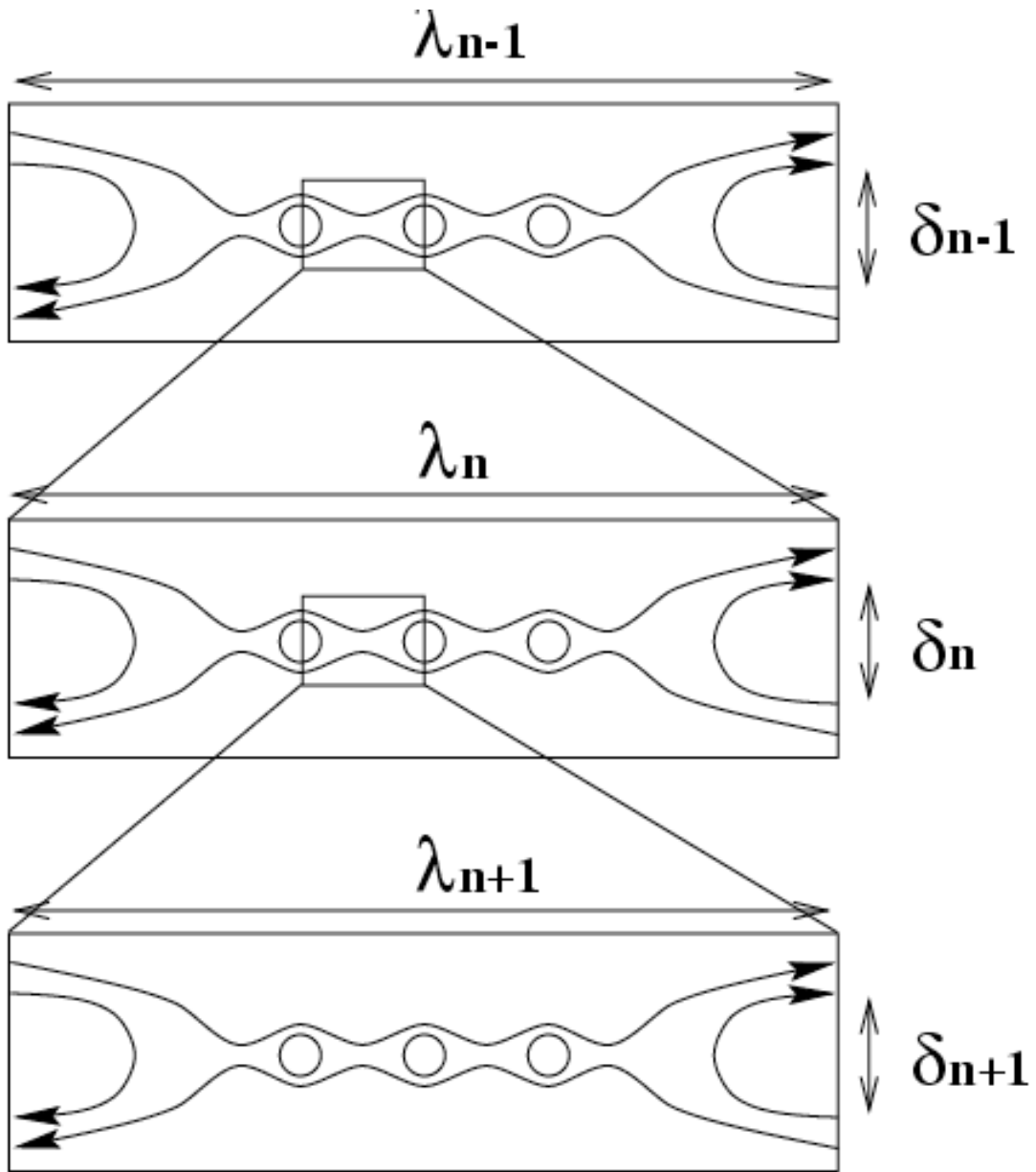
- If we inhibit reconnection, fast mass ejection can not occur

# フレアサイズ(1万km)とマイクロプラズマ のスケール(1m) とのギャップは、いかに克服するか？

- フラクタル電流シート  
(MHD乱流)を考える  
必要があるのではない  
か？ (Tajima and  
Shibata 1997)

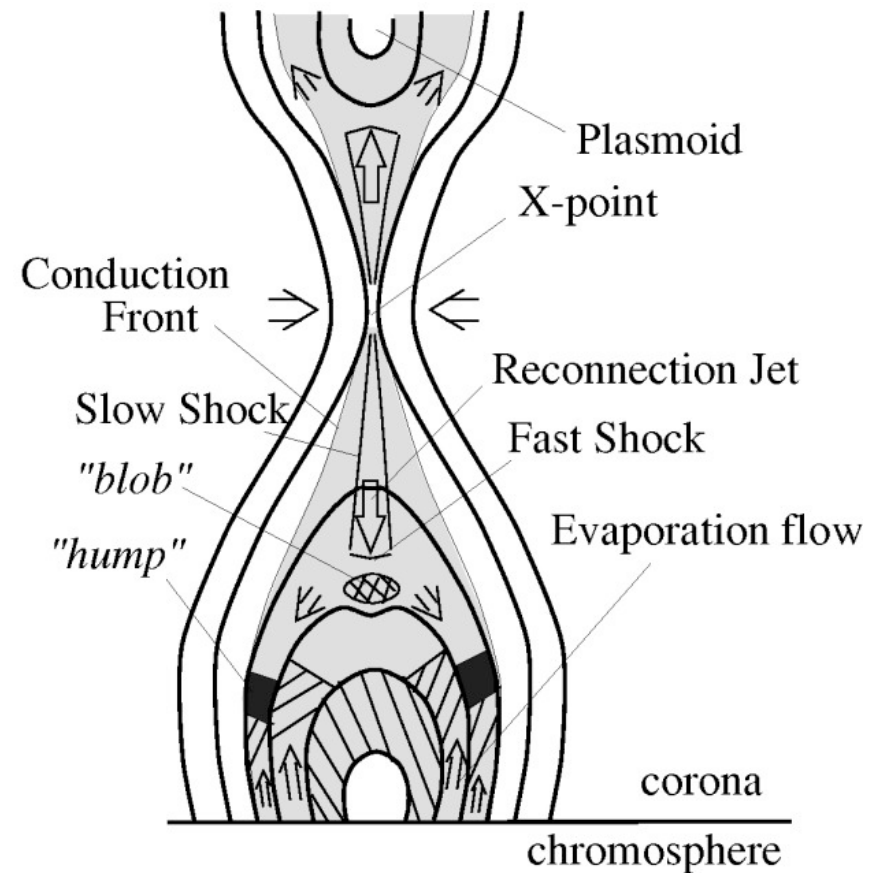


Fractal  
nature of  
current  
sheet  
(Shibata and  
Tanuma  
2001)



# 残された謎

- リコネクション・ジェット、リコネクション・インフローは、どこにあるのか？
- リコネクション率は、何で決まっているのか？





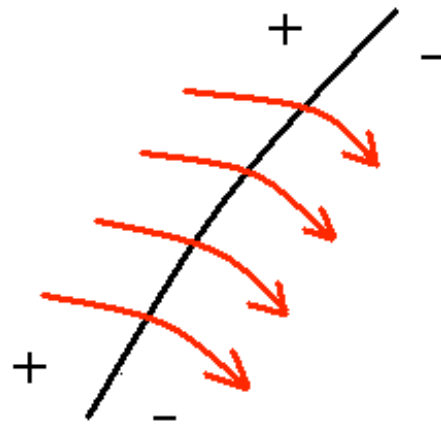


以下、参考資料

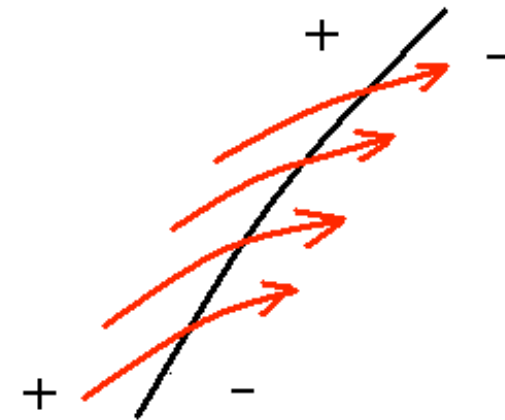
フレア／コロナ質量放出(CME)  
は予報できるか？

# フレア／コロナ質量放出は どこで起きるか？

- 磁気中性線
- 磁気シアーのある場所



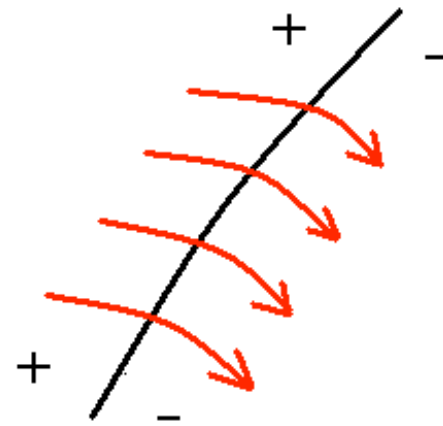
磁気シアーなし



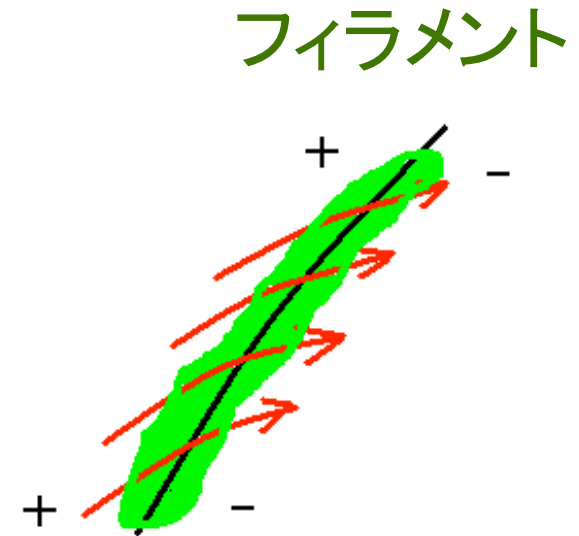
磁気シアーあり

# フレア／コロナ質量放出は どこで起きるか？

- 磁気中性線
- 磁気シアーのある場所

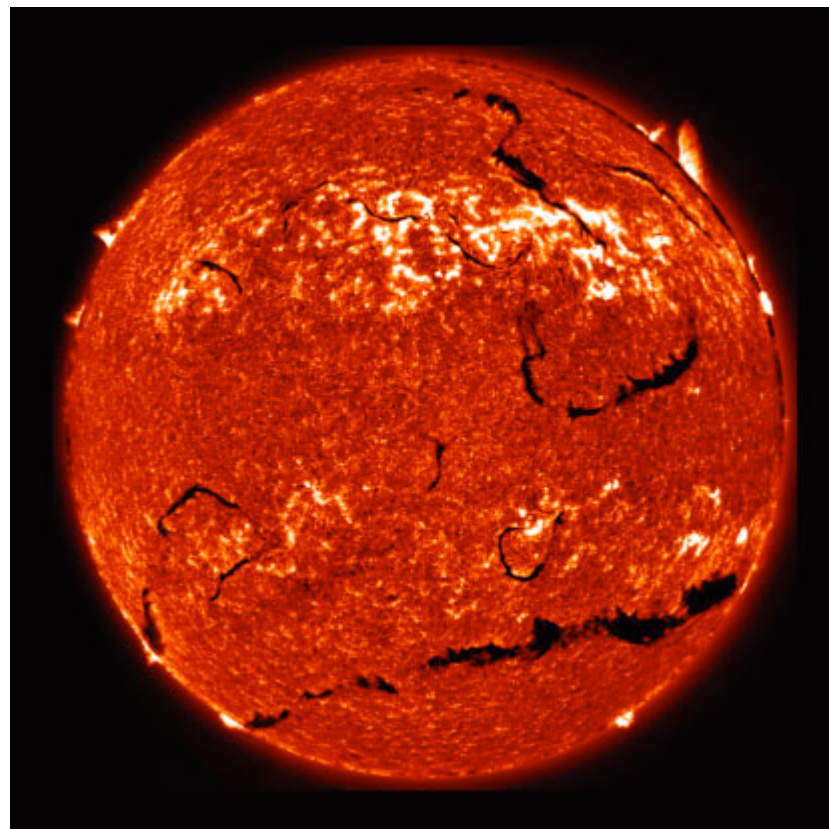


磁気シアーなし

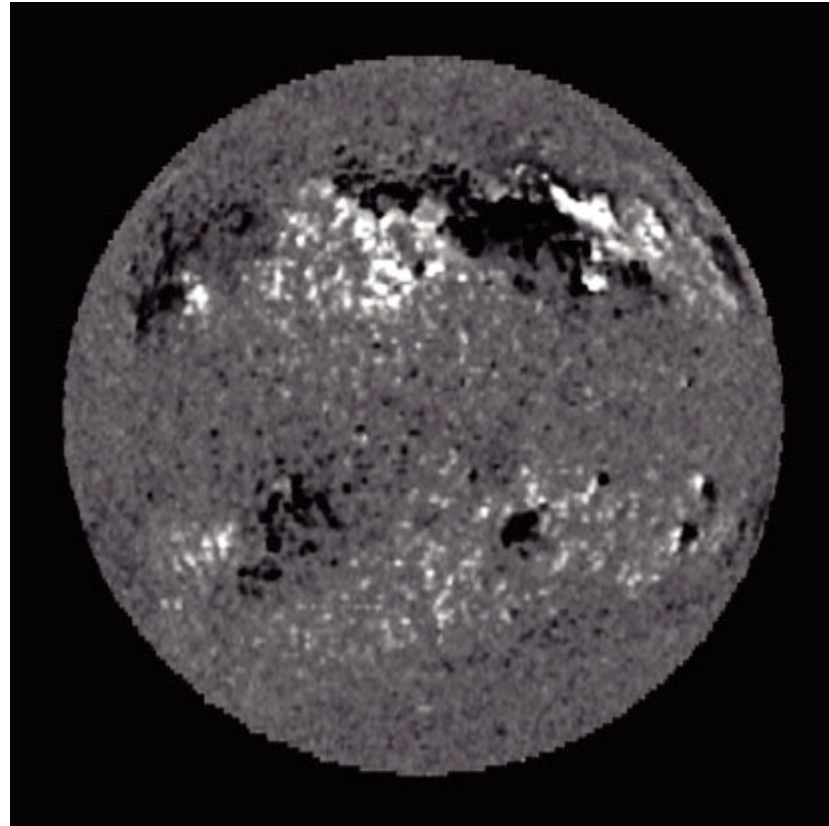


磁気シアーあり

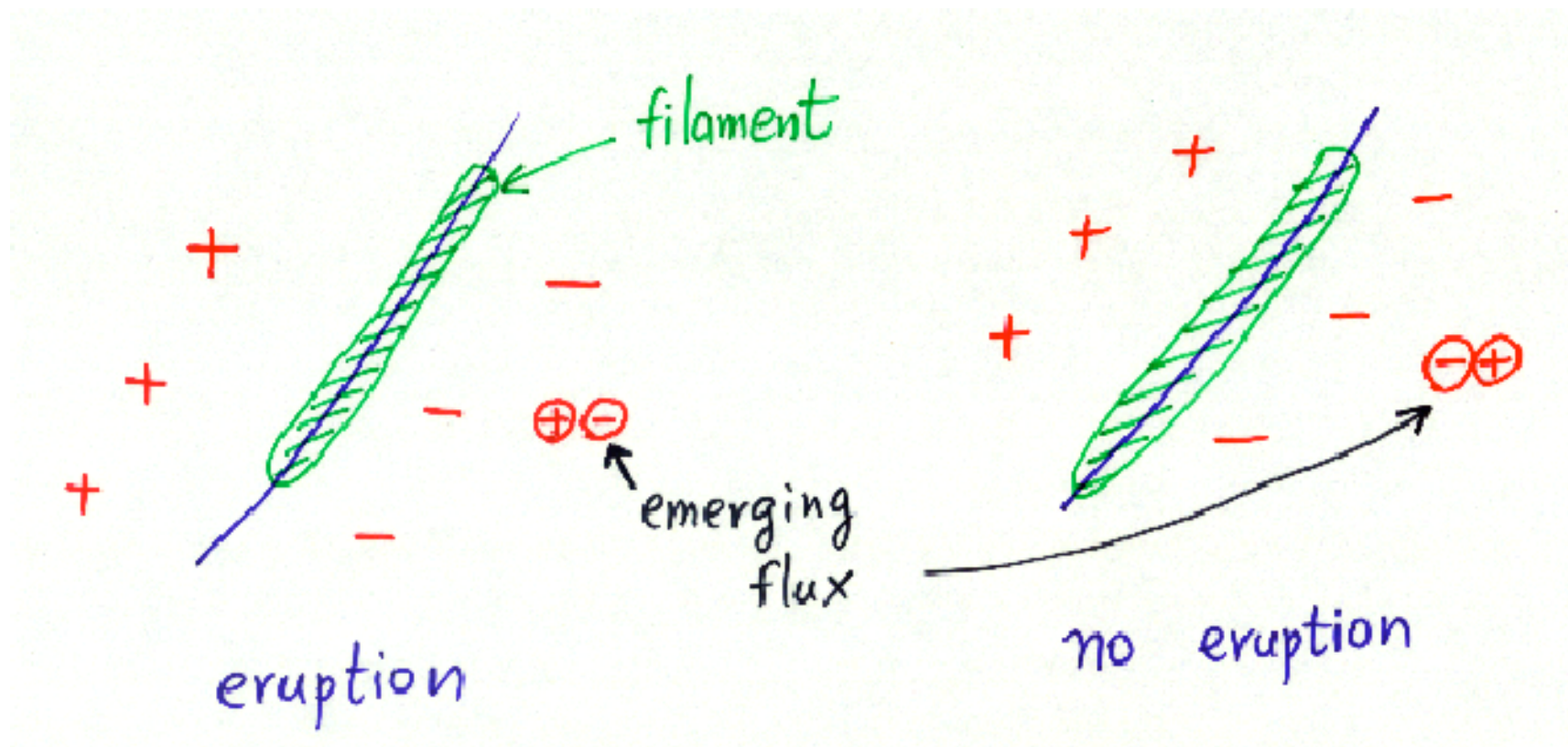
フィラメント(=プロミネンス)  
H $\alpha$



# フィラメント(=プロミネンス) 磁場

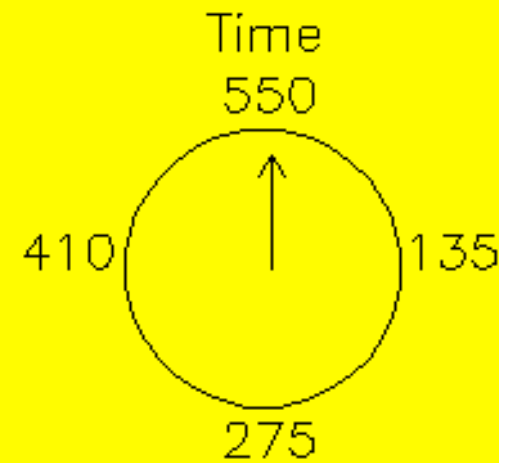
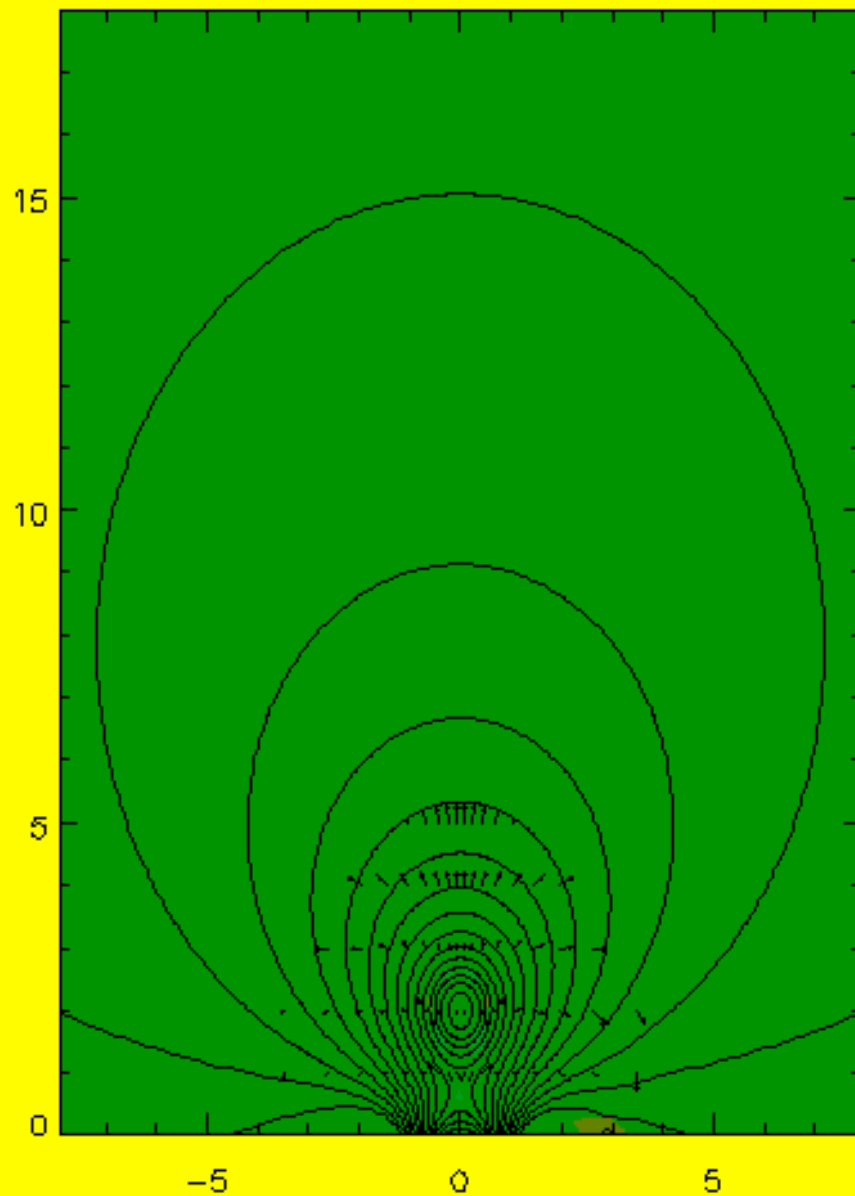


# Observations of emerging flux triggering filament eruption (Feynman and Martin 1994)



# Chen-Shibata (2000)

浮上磁場が  
既存磁場の平衡  
をこわすため  
プラズマ噴出が  
トリガーされる



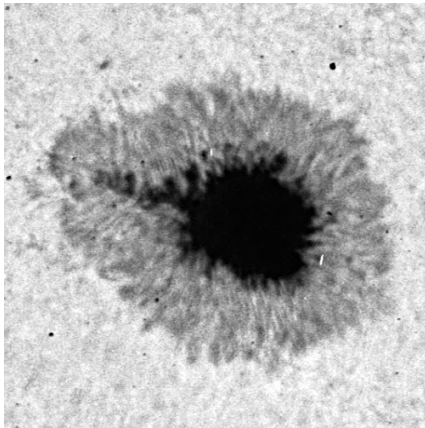
Distributions of Temperature, magnetic field & velocity



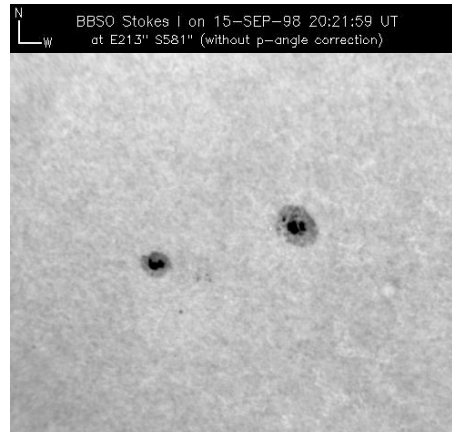
大フレアの予報は  
経験的に可能！？

# 大フレアは $\delta$ 型黒点群で発生する 頻度が高い

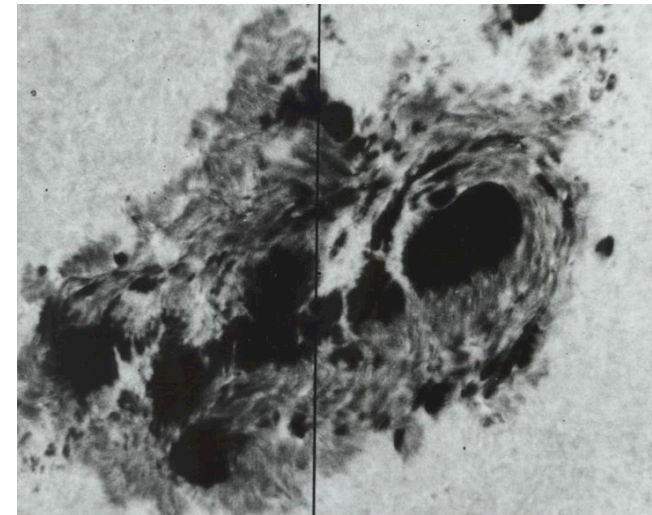
$\alpha$ 型



$\beta$ 型



$\delta$ 型



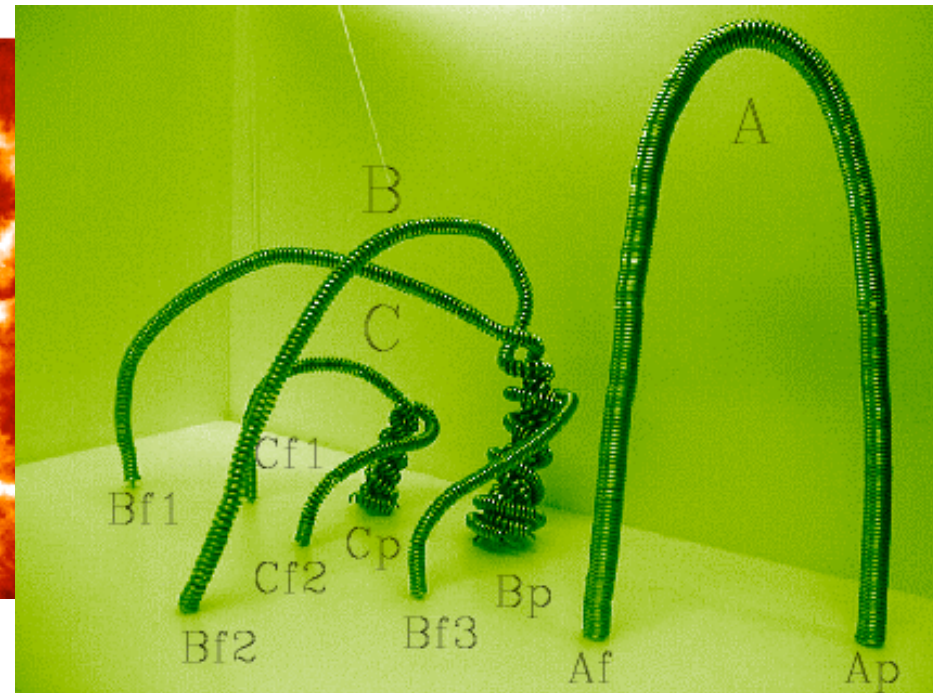
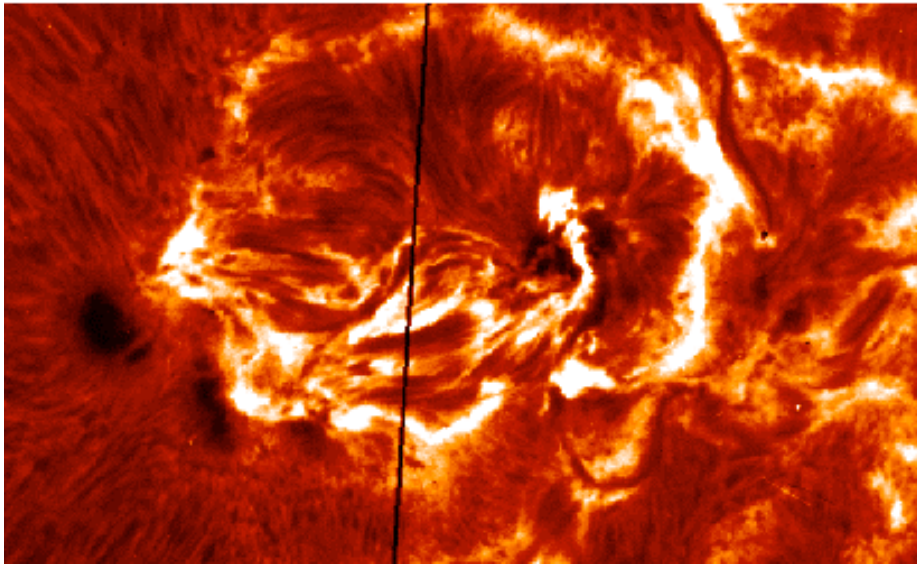
# フレアの発生頻度と $\delta$ 型黒点群の 関係

GOES flare class	C	M	大フレア X
1986－1996 全黒点群 (3089)	39.7 %	14.4 %	2.2 %
$\delta$ 型以外の黒点群 (2698)	32.2 %	7.1 %	0.3 %
$\delta$ 型黒点群 (391)	91.3 %	64.5 %	15.9 %

From Ishii (2001)

# δ型黒点群の正体？

ねじれた磁束管



Kurokawa(1987)  
Tanaka(1990)  
Ishii et al.(1998, 2000)

# フレア・CME予報は可能か？

## まとめ

- 浮上磁場によるトリガーが有力  
=> 観測・理論の発展が望まれる
- 大フレアの発生には $\delta$ 型黒点が重要  
=> ねじれた磁束の浮上  
3次元モデリングが必須



次の資料も、一部、上記と重複しているが、国際天文学連合 (IAU) シンポジウムでの専門家向けのレビュー講演PPTなので、参考にしてください  
(短い集録レビュー論文も出ています)

IAU Symposium No. 226  
Coronal and Stellar Mass Ejections  
Sep 13-17, 2004, Beijing, China

# Theories of Eruptive Flares

K. Shibata

Kwasan and Hida Observatories

Kyoto University



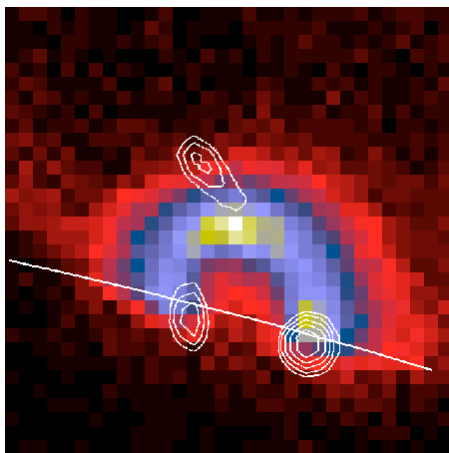
# contents

1. Introduction
2. Present Status of Reconnection Theory
3. Standard model (CSHKP Model = Carmichael-Sturrock-Hirayama-Kopp-Pneuman model)
4. Aly-Sturrock theorem
5. Current Sheet Formation Models
6. Triggering Mechanism
7. Chen-Shibata model and Its Recent Development
8. Remaining Questions

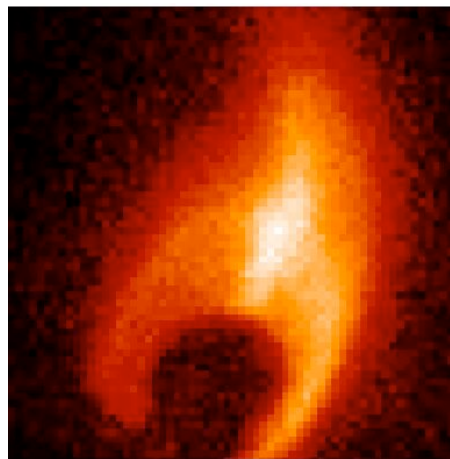
No comment on non-reconnection CME model

# 1. Introduction

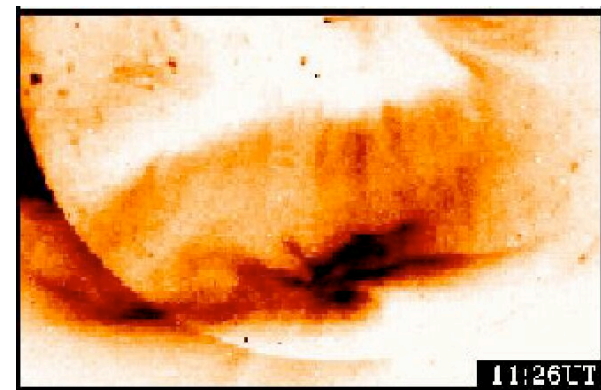
- Recent space observations such as Yohkoh, SOHO, TRACE have revealed various evidence of **magnetic reconnection** and common properties in flares/CMEs, leading to unified view of flares/CMEs.



Impulsive flares  
(Masuda)

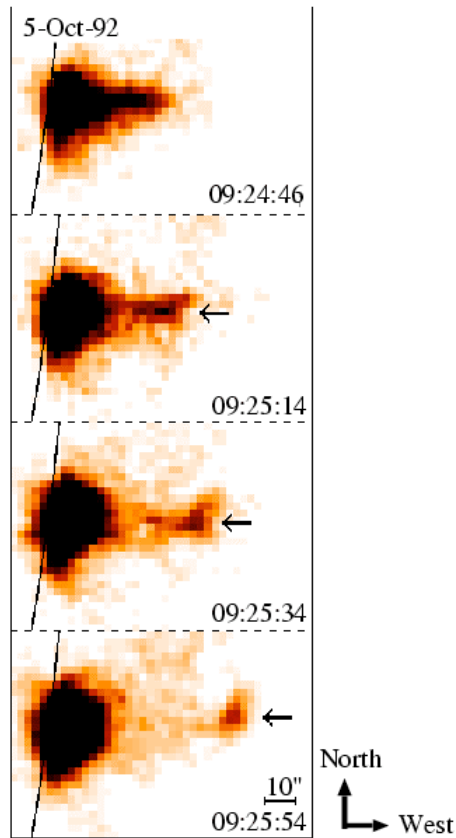


LDE flares  
(Tsuneta)

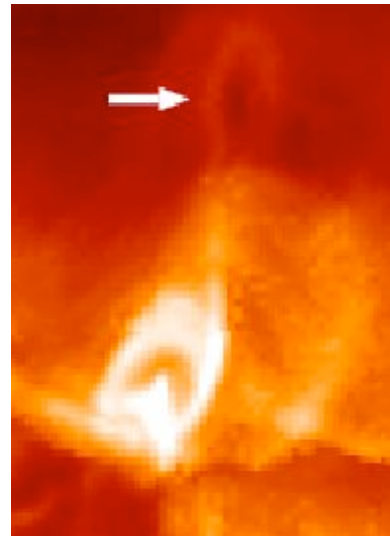


Giant arcades (CMEs)  
(McAllister)

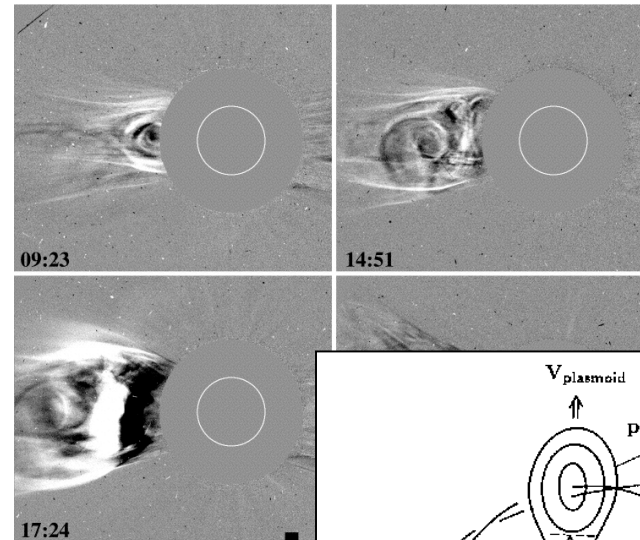
# Plasmoid (flux rope) ejections



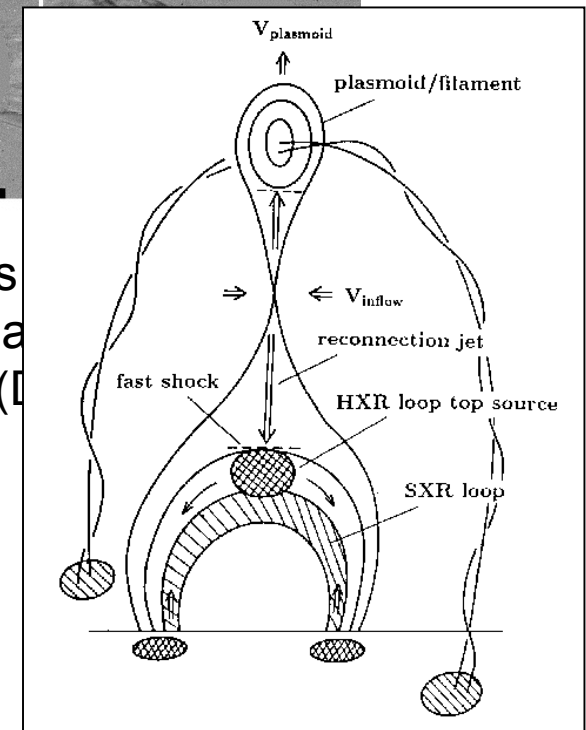
small flares  
 $\sim 10^9$  cm  
 (Ohyama-Shibata)



large flares  
 $\sim 10^{10}$  cm  
 (Hudson)



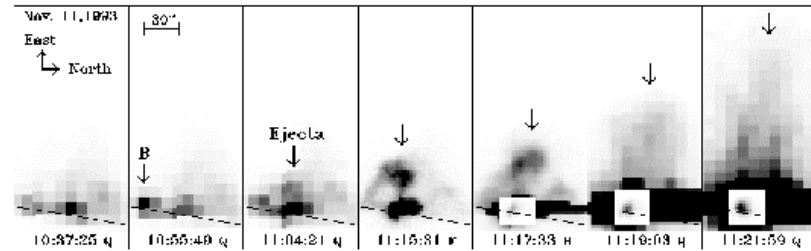
coronal mass  
 (CMEs) from la  
 $\sim 10^{11}$  cm (L...



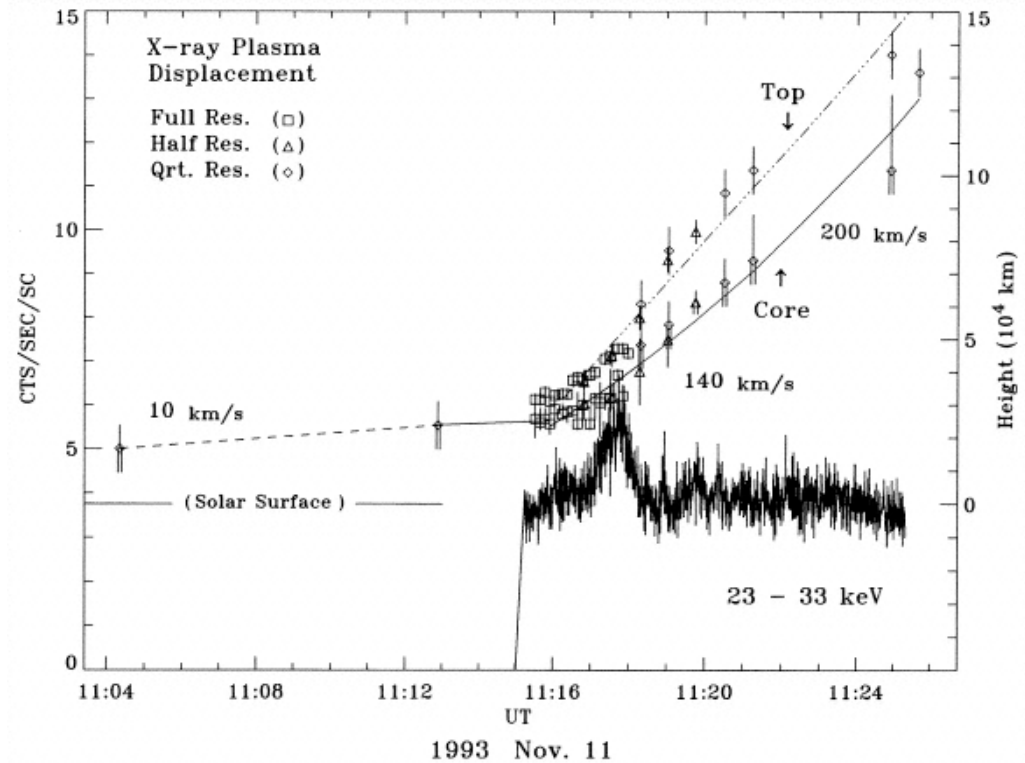
# Plasmoid Acceleration during impulsive phase (Ohyama and Shibata 1997) observed with Yohkoh/SXT

(see also Kahler et al. 1988, Sterling et al. 2003,,,) )

There is evidence of Preflare heating ~10MK



Ohyama & Shibata (1997)



# CME height vs. SXR light curve (Zhang 2001)

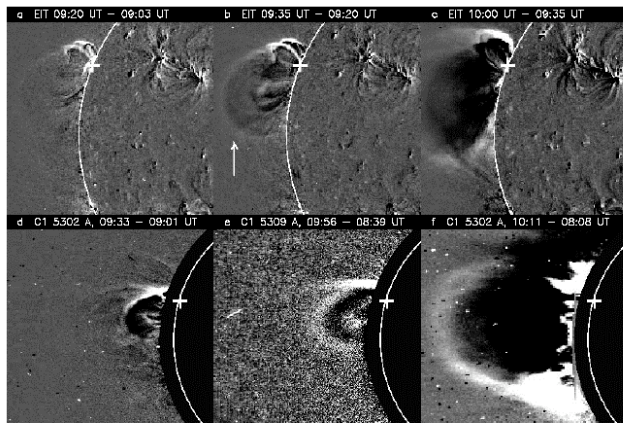
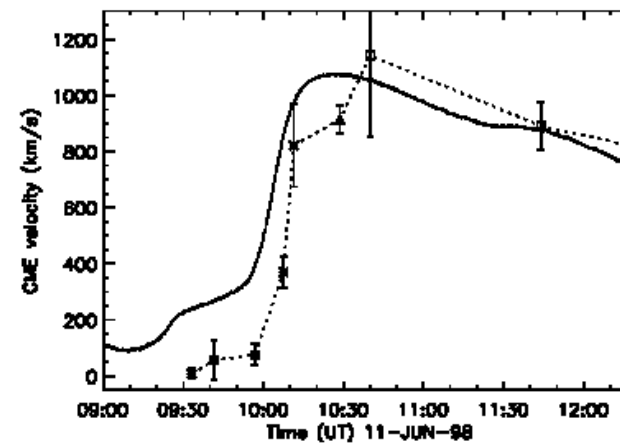
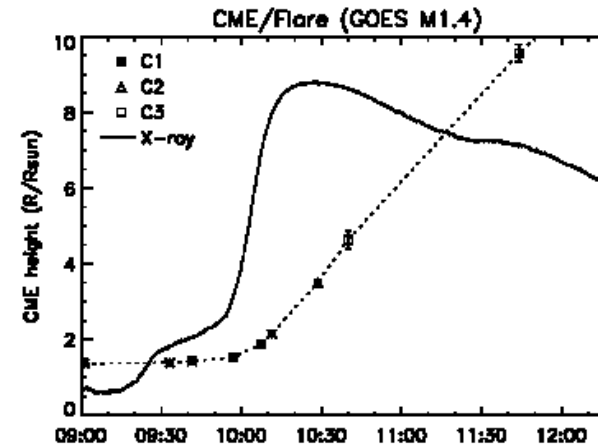
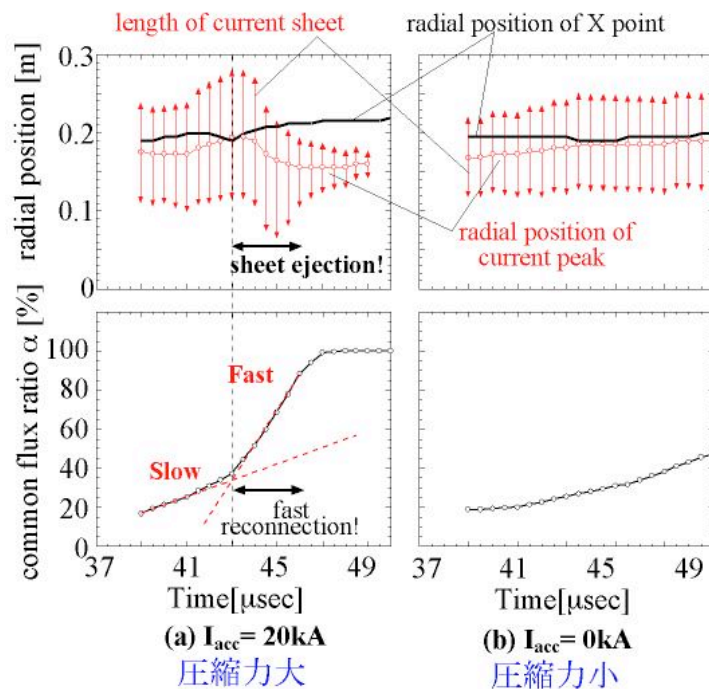


FIG. 1.—Running difference images of EIT 2195 (upper three panels) and LASCO/C1 (lower three panels), which show early evolution of the CME on 1998 June 11. Their timings are indicated at the top of each panel. The white circle in each panel indicates  $1.0 R_{\odot}$  solar limb. The plus sign in each panel indicates the position of the corresponding flare. The arrow in (b) points at the CME front.



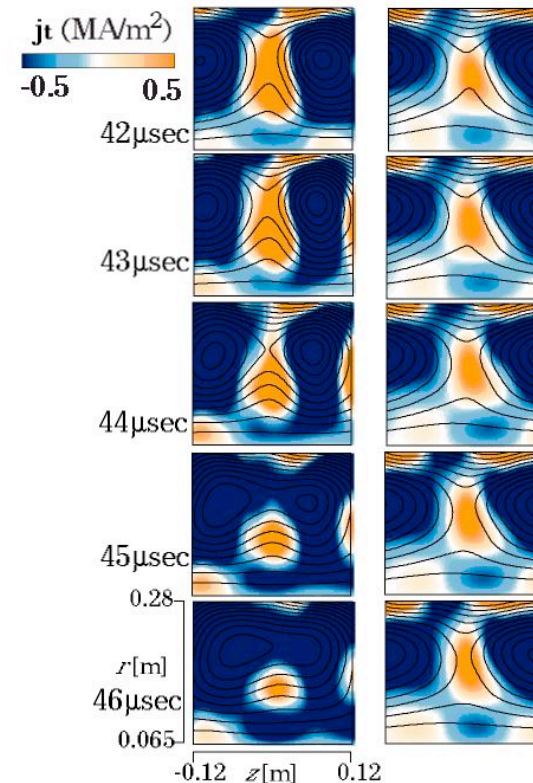
# Laboratory experiment (Ono et al. 2000)

電流シートが（間欠的に）放出される時、  
リコネクション速度が急上昇する



電流シートおよびX点の位置の時間変化と  
再結合速度の時間変化の比較

Fast compression of current sheet causes  
its mechanical ejection in high-Bx MHD regime.



(a) Fast Compression ( $I_{acc} = 20\text{kA}$ ) (b) Slow Compression ( $I_{acc} = 0$ )

## 2. Present Status of Reconnection Theory

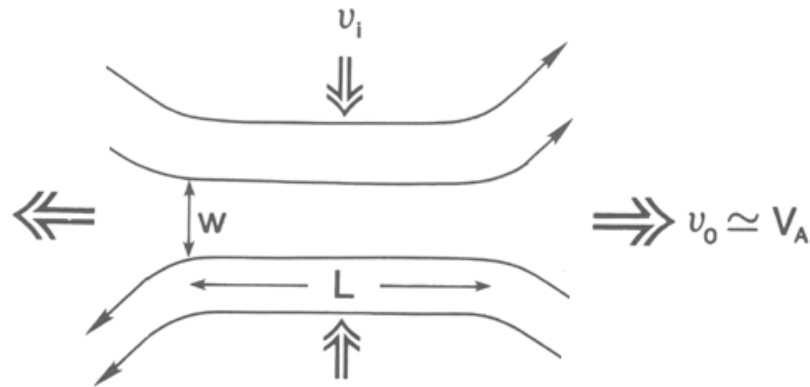
- Basic physics of magnetic reconnection has not yet been established
- Now is the stage that laboratory, space, and solar plasma physicists are collaborating to solve this basic physics

# Puzzles of Magnetic Reconnection

- Reconnection rate ( $\sim 1/t_{\text{rec}}$ ) ?
  - What is the condition for fast reconnection ?
- Structure of Reconnection Region ?
  - Sweet-Parker vs Petschek  
( i.e., no shock vs slow shock)
- How much fraction of energy goes to nonthermal particles ?



# Sweet-Parker model (1957,58)



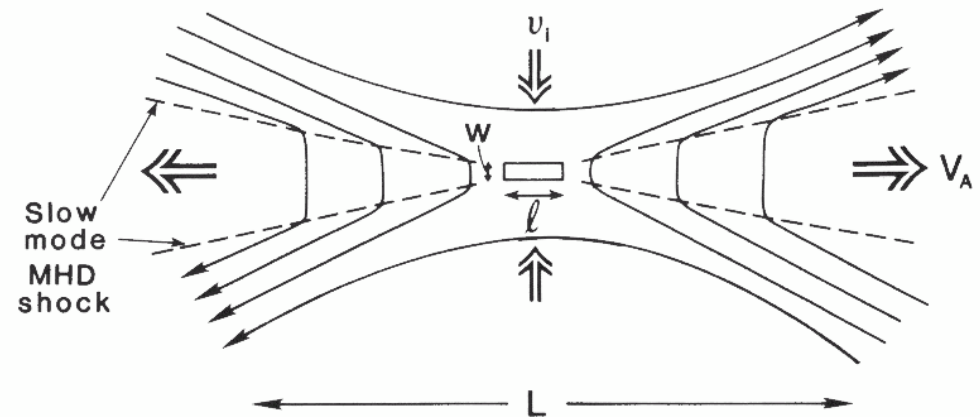
$$t_{rec} \approx t_A R_m^{1/2}$$

$$\approx 10^6 - 10^7 t_A$$

Slow reconnection

$$R_m = V_A L / \eta$$

# Petschek model (1964)



$$t_{rec} \approx t_A \log R_m$$

$$\approx 10 - 100 t_A$$

Fast reconnection

Which is occurring ? Other models ?

# Further Questions

- How are energy stored ?  
shearing motion ?  
emergence of twisted flux tube ?
- What is the triggering mechanism for flares/CMEs ?
- What is the role of magnetic helicity in flares/CMEs ?  
=> Talks by Kusano, Hu

# 3. Standard Model

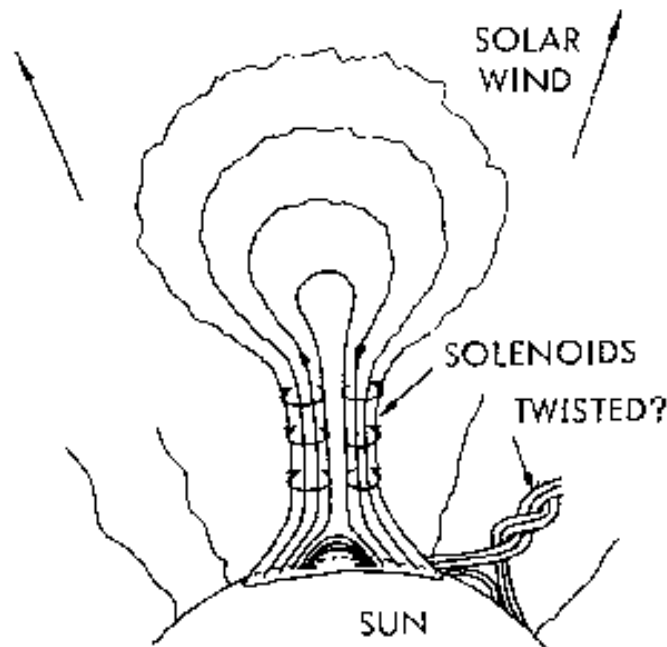
(**CSHKP model** : Carmichael (1964)-Sturrock (1966)-Hirayama (1974)-Kopp-Pneuman (1976))

## Brief history

- At first, US people called “Kopp-Pneuman” model
- Shibata proposed to change it to “SHKP model” in 1991
- Sturrock added “C” just in front of “SHKP” in 1992

# Carmichael (1964)

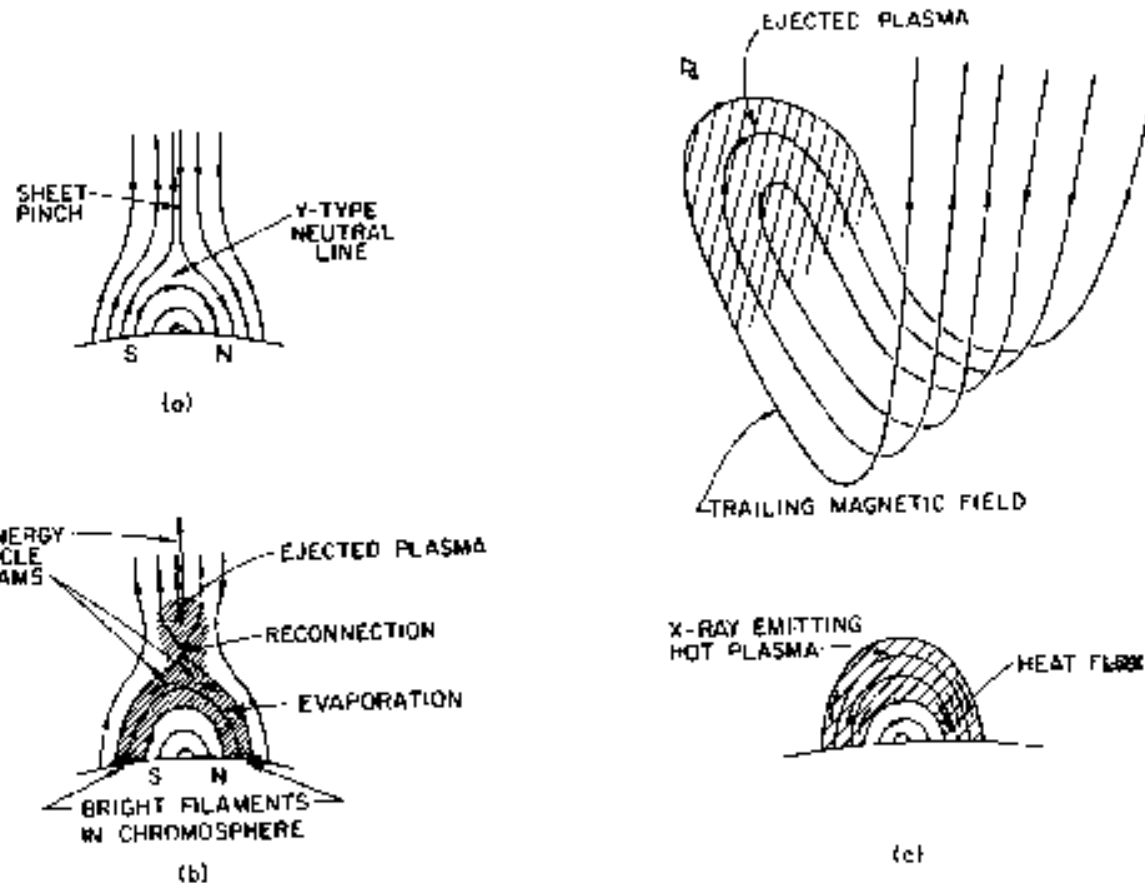
- Carmichael, H., "A process for flares," in AAS-NASA Symposium on the Physics of Solar Flares, NASA SP-30, p. 451 (1963).



<http://solarmuri.ssl.berkeley.edu/~hudson/cartoons/>

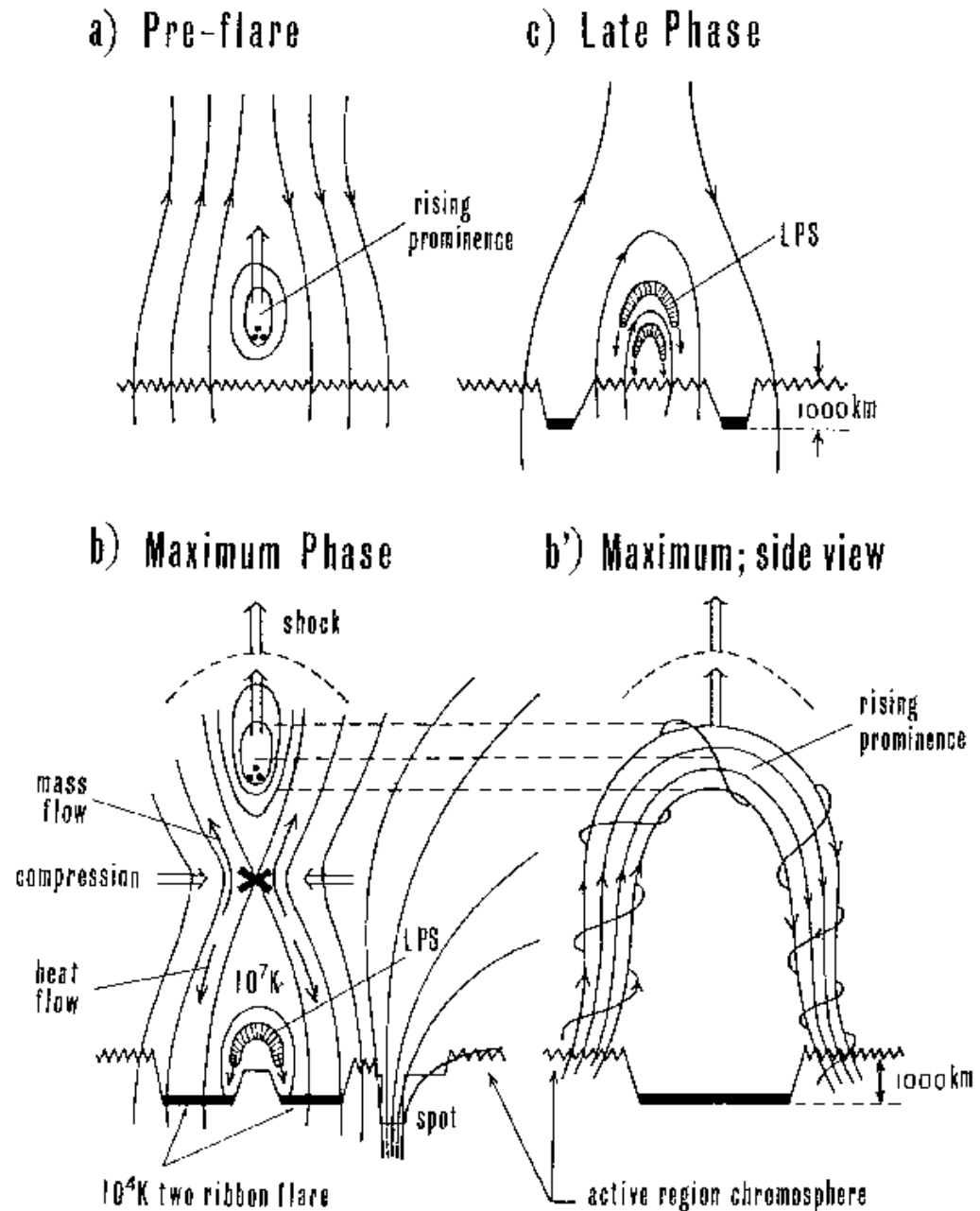
# Sturrock (1966)

Sturrock, P. A., Nature 211, 695 (1966)



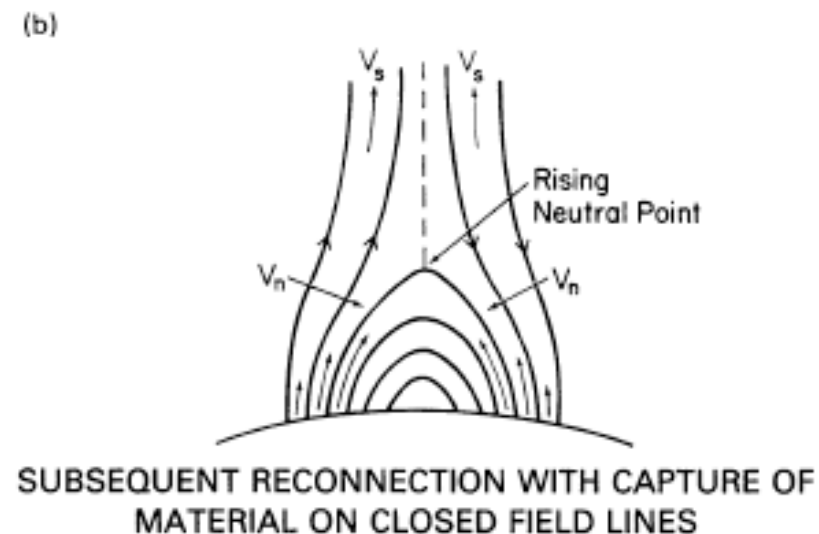
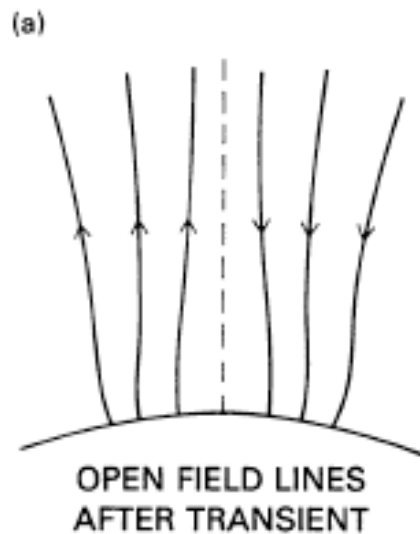
# Hirayama (1974)

Hirayama, T.,  
Solar Phys.  
34,  
323, 1974



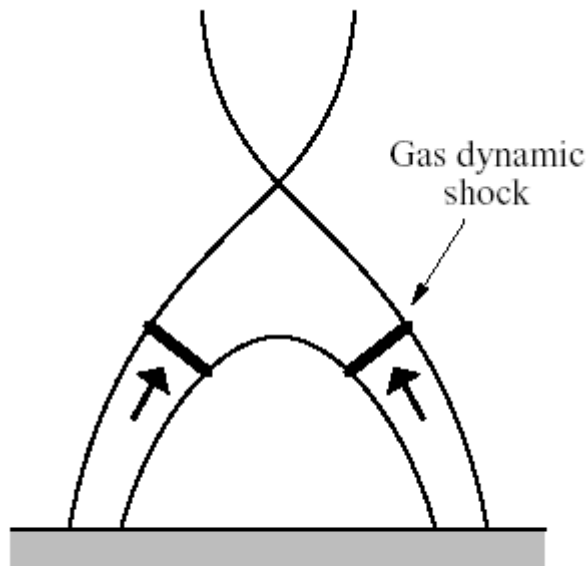
# Kopp-Pneuman (1976).

- Kopp, R. A., and Pneuman, G. W., Solar Phys. 50, 85 (1976).

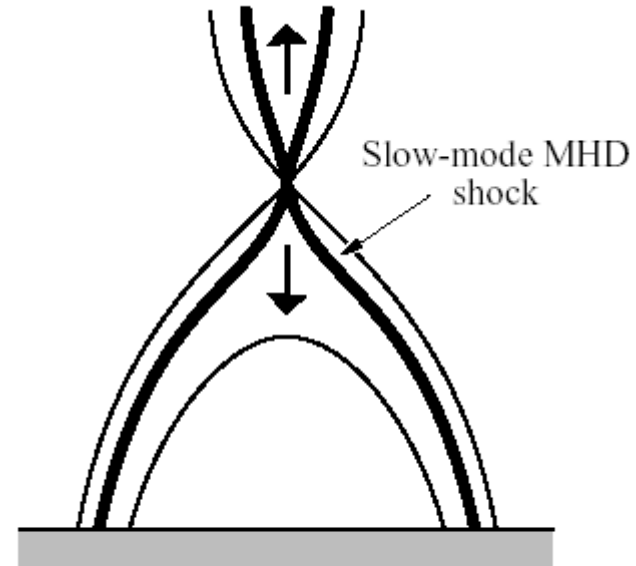


# Evolution of models

(Priest-Forbes 2001)



(a)  
Kopp-Pneuman



(b)  
Cargill-Priest



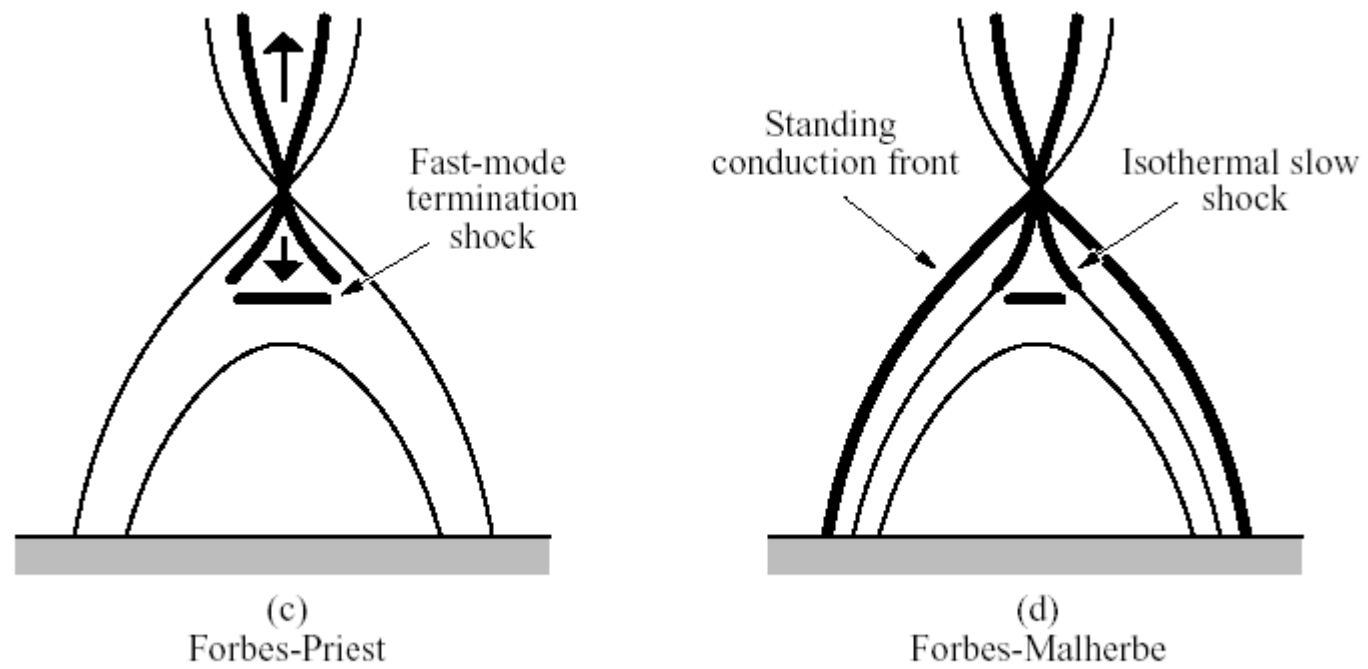
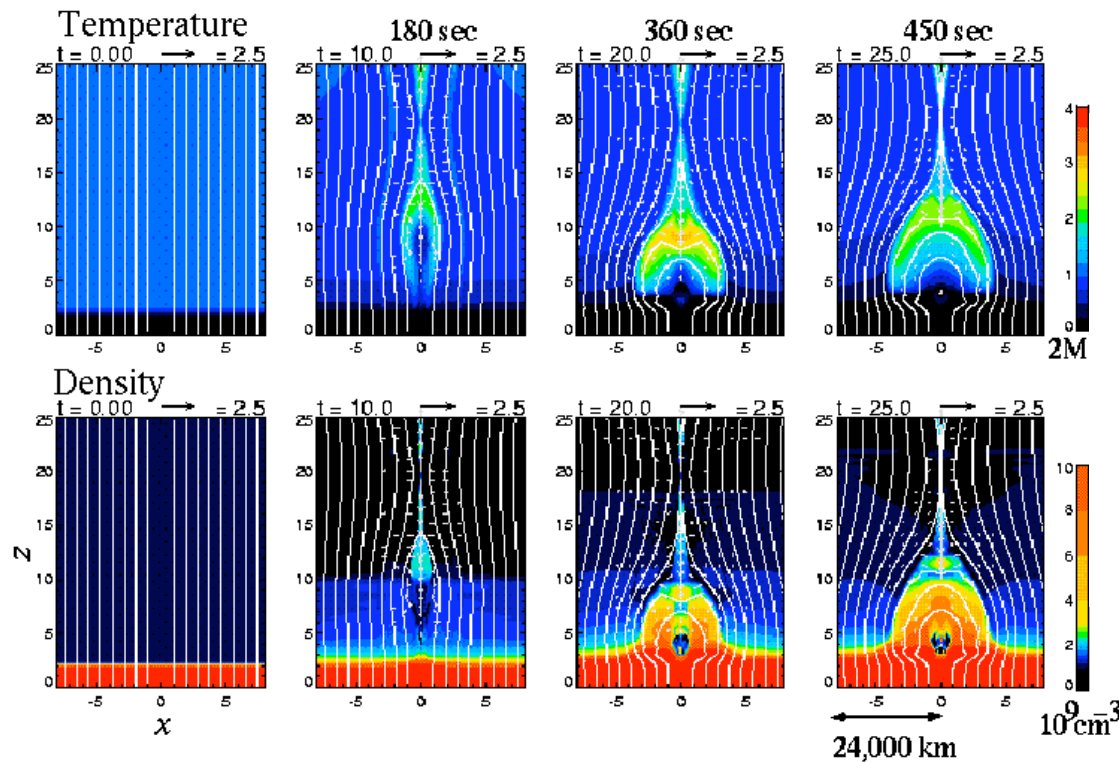


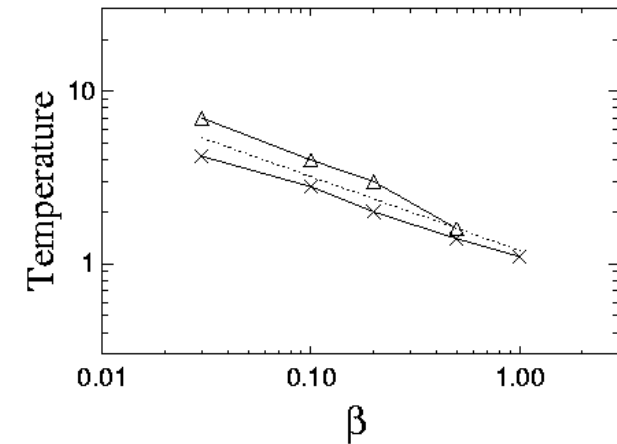
Fig. 37. Developments of the models for flare loops

# First MHD Simulation of Reconnection including Heat Conduction and Evaporation

(Yokoyama and Shibata 1998, 2001)



$$T \propto B^{6/7} L^{2/7}$$



$$\beta = 8\pi r / B^2$$

Talk by Yokoyama

## 4. Aly-Sturrock Theorem

Is this a real difficulty ?

# Barnes and Sturrock 1972

- force free field  $\nabla \times B = \alpha B$
- $$\alpha = \alpha(x, y, z) = \text{non-constant}$$

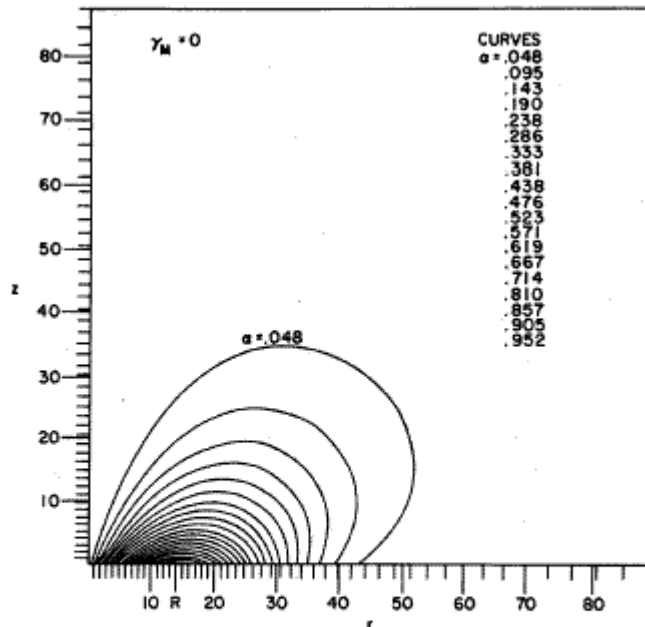


FIG. 1

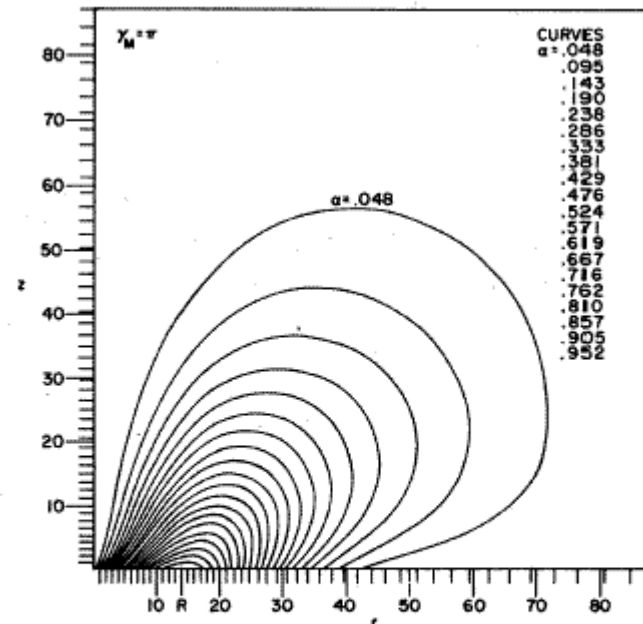


FIG. 2

FIG. 1.—Current-free magnetic-field configuration associated with “photospheric” boundary conditions. Curves are field lines with equally spaced values of magnetic flux.

FIG. 2.—Force-free magnetic-field configuration associated with the same values of  $B_z$  at  $z = 0$  as in fig. 1, but with differential rotation about the  $z$ -axis.

# Barnes and Sturrock 1972

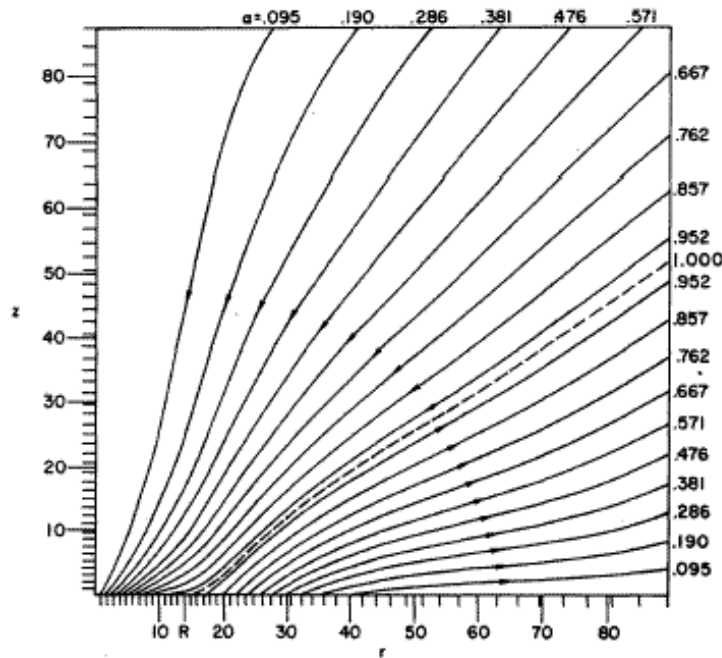


FIG. 4

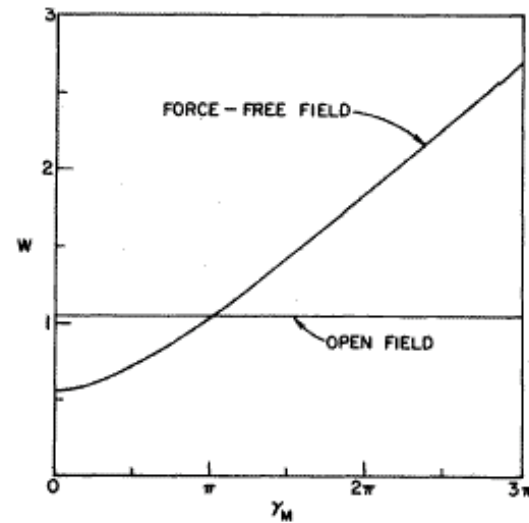


FIG. 5

FIG. 4.—Open-field configuration associated with the same values of  $B_z$  at  $z = 0$  as in fig. 1. The broken line indicates the current sheet.

FIG. 5.—Magnetic energy  $W$  of the force-free magnetic-field configurations as a function of maximum rotation angle  $\gamma_M$ . The current-free field corresponds to  $\gamma_M = 0$ . The energy  $W_0$  of the open-field configuration is shown for comparison.

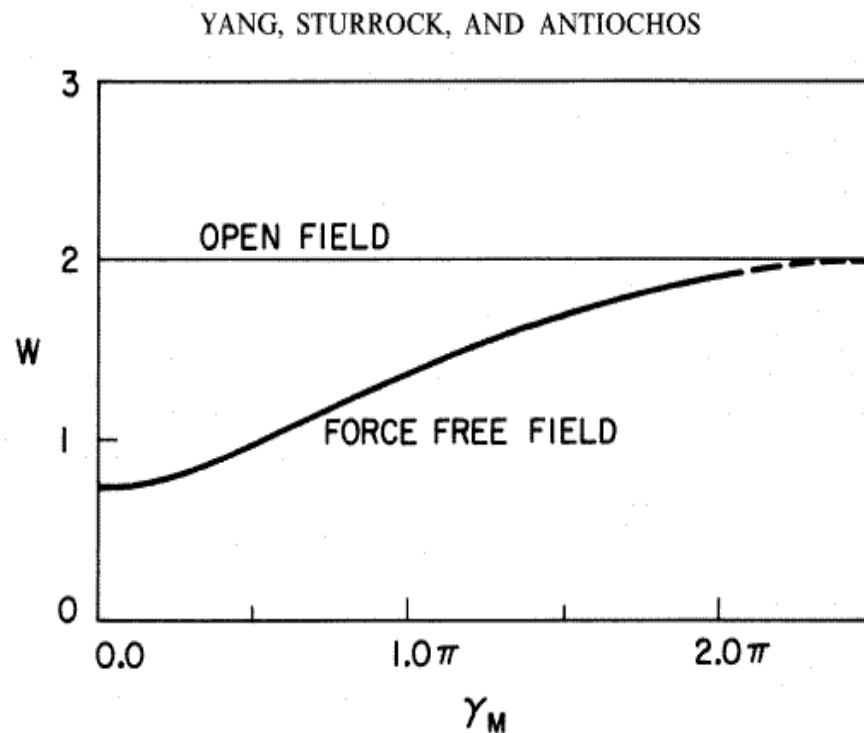
# Aly (1984)

- Aly (1984) presented a conjecture

“the energy of any smooth force free field occupying a “half coronal space” should be smaller than the energy of the so-called **open field** having the same flux distribution on the plane photospheric boundary”

# Yan, Sturrock, Antiochos (1986)

- “Our new results differ from the earlier results of Barnes and Sturrock and we conclude that the earlier article was in error.”

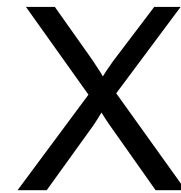
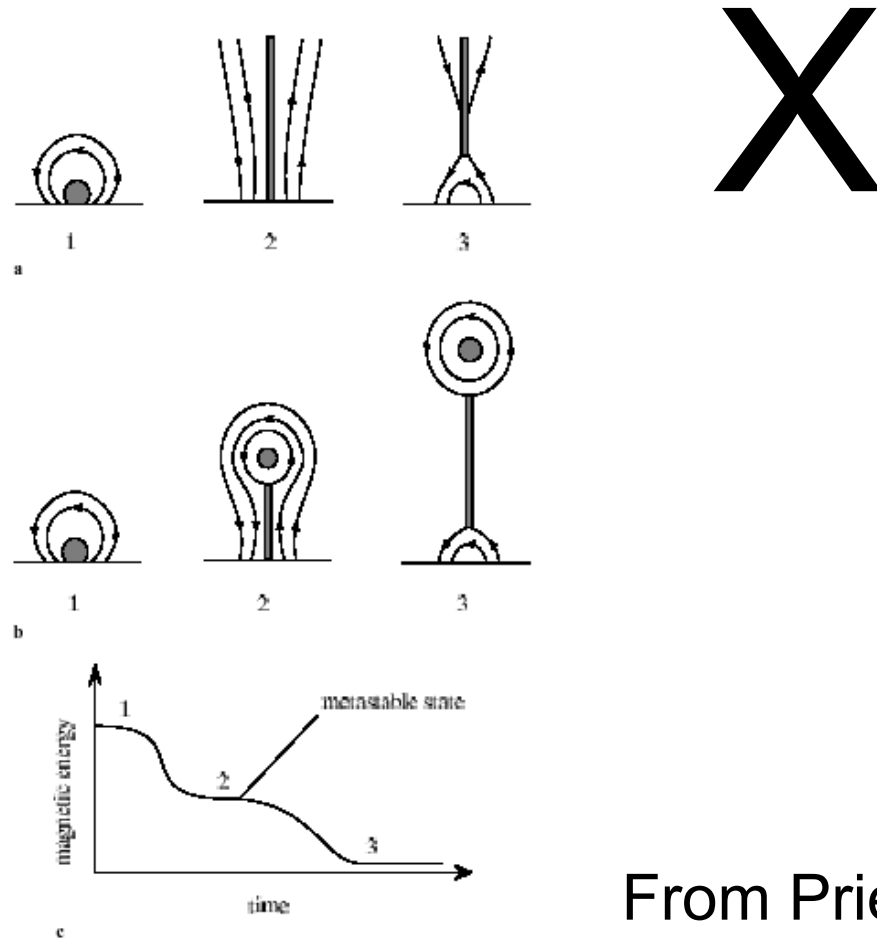


Sturrock (1991)  
showed  
“Aly’s conjecture  
is valid”

Aly-Sturrock theorem

—The energy of the cylindrical force-free model of § V as a function of  $\gamma_M$ , which measures the relative rotation of the positive polarity region and the polarity region. Also shown is the energy of the corresponding open-field configuration.

# Flare scenario



From Priest-Forbes

Fig. 21a-c. Two scenarios which have been proposed for opening the magnetic field. a In the first scenario an ideal-MHD process changes the closed-field configuration [1] into an open configuration [2] during the impulsive phase, and then reconnection recloses the field [3] during the gradual phase. b In the second scenario an ideal-MHD process creates a relatively short current sheet without opening the field, but magnetic flux can still escape into space if rapid reconnection occurs in this sheet. If there is no input of magnetic energy during the eruption, then the magnetic energy continually decreases during both the impulsive and gradual phases of the flare, as shown in c



# possible ways out of this dilemma

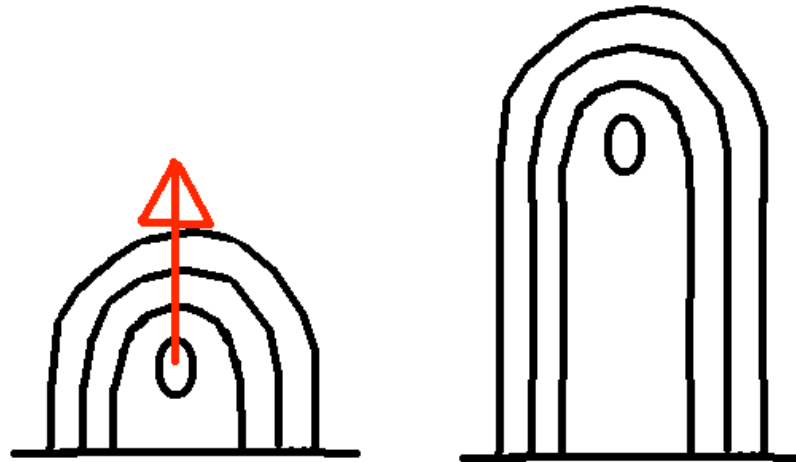
- True opening of field line is not necessary for reconnection and mass ejections (Aly 1991)
- Non-force free (e.g., gas pressure, gravitational) (Sturrock 1991)
- Initially partly open, partly closed field (Sturrock 1991)

# Other ways out of the dilemma

- Cylindrical axisymmetric geometry with spherical boundary (Lynden-Bell and Boily 1994)
- Resistive process (Mikic and Linker 1994)
- Quadrupole magnetic field (Antiochos et al. 1999)=> break out model, many models
- Two bipole sources (Choe and Cheng 2002)

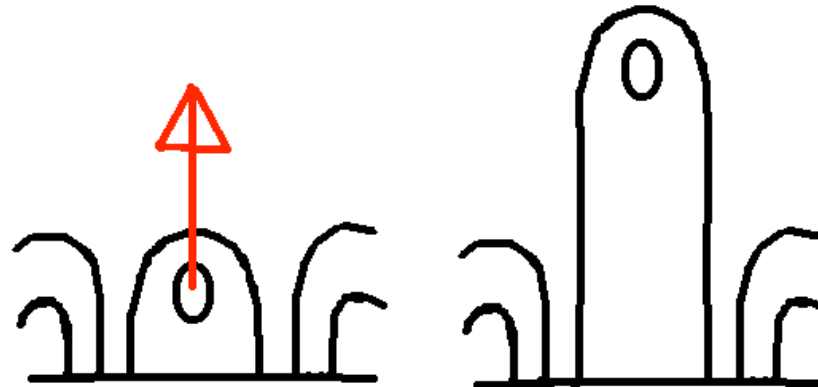
# Why multipolar flux system is favorable ?

Bipolar  
Flux system



Large energy  
Is necessary  
To escape

Multipolar  
Flux system

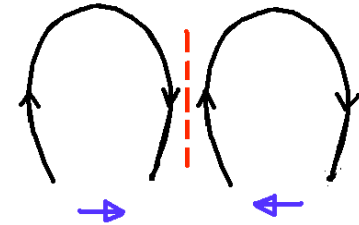


Small energy  
Is enough  
To escape

# 5. Current Sheet Formation (Energy Storage) Model

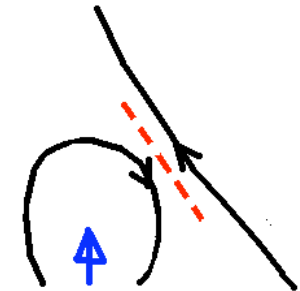
- **Converging flux Model**

(Sweet 1958, Uchida 1981, 1996,  
Priest et al. 1994, Parnel et al. 1994)



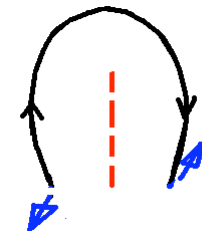
- **Emerging flux Model**

(Heyvaerts et al. 1977, Forbes-Priest 1984,  
Shibata et al. 1992, Yokoyama-Shibata 1995)



- **Sheared or Converging Arcade Model**

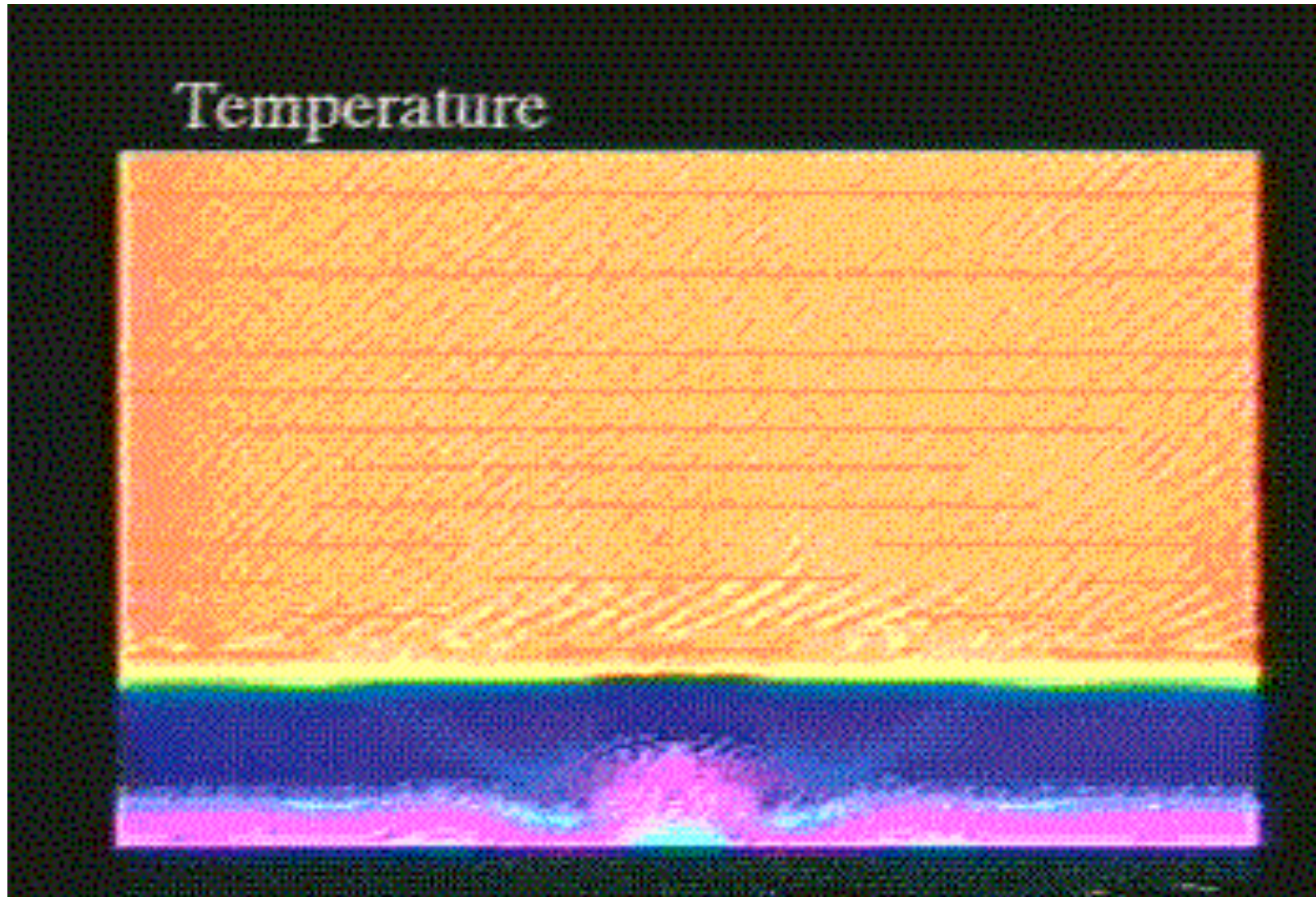
(Mikic et al. 1988, Biskamp and Welter 1989,  
Forbes 1990, Kusano et al. 1995,  
Choe and Lee 1996, Magara et al. 1997,  
Hu 2001, Choe-Cheng 2001)



(=> **emergence of twisted flux tube**)

# Emerging flux model

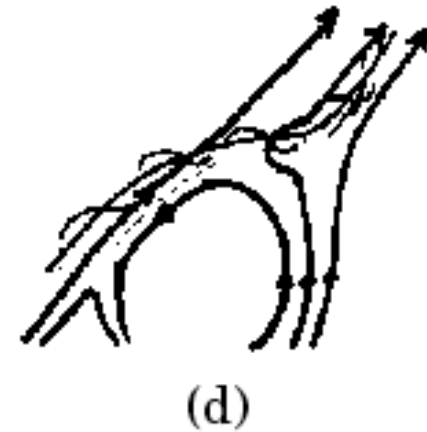
Shibata, Nozawa, Matsumoto (1992)  
(see Yokoyama-Shibata 94, 95, 96)



# Unified model (plasmoid-induced reconnection model)

(a,b): giant arcades,  
LDE/impulsive  
flares, CMEs

(c,d) : impulsive flares,  
microflares, jets



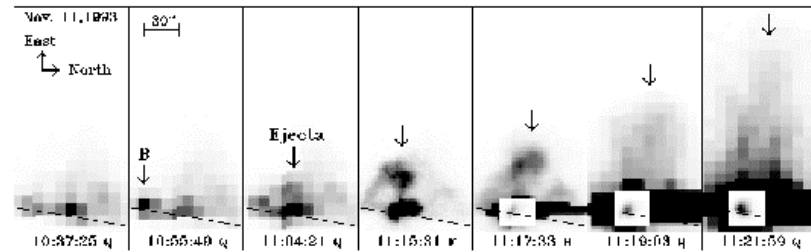
Energy release rate =

$$\frac{dE}{dt} \approx \frac{B^2}{4\pi} V_{in} L^2$$

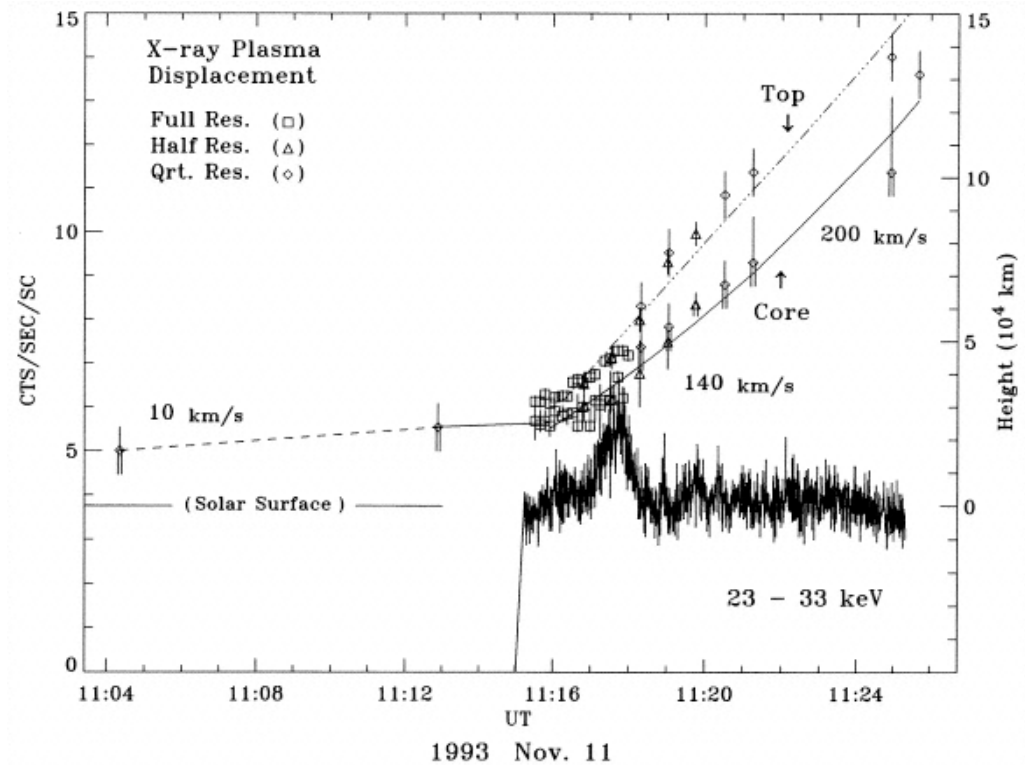
# Plasmoid Acceleration during impulsive phase (Ohyama and Shibata 1997) observed with Yohkoh/SXT

(see also Kahler et al. 1988, Sterling et al. 2003,,,) )

There is evidence of Preflare heating  $\sim 10\text{MK}$

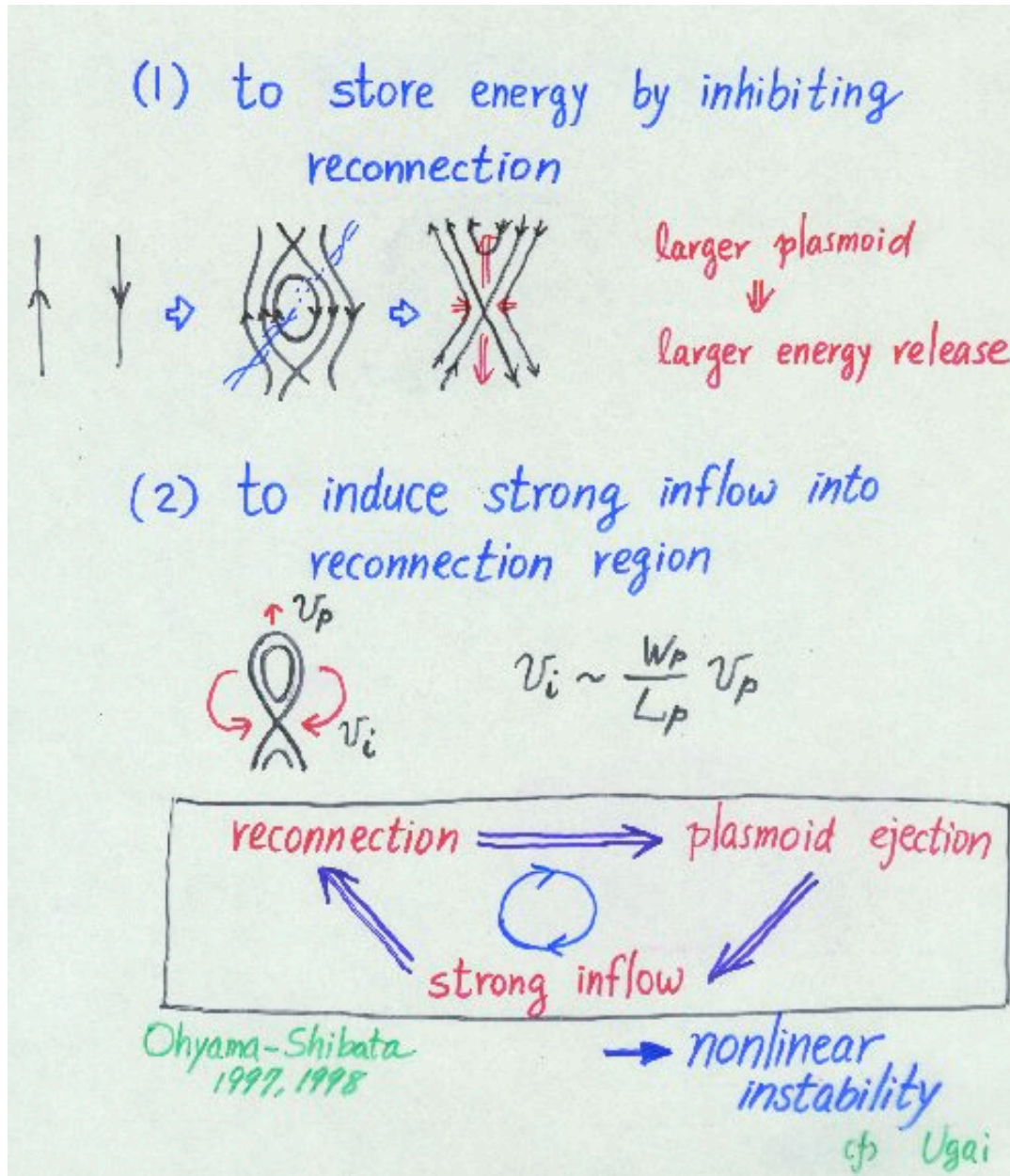


Ohyama & Shibata (1997)



# Role of Plasmoid

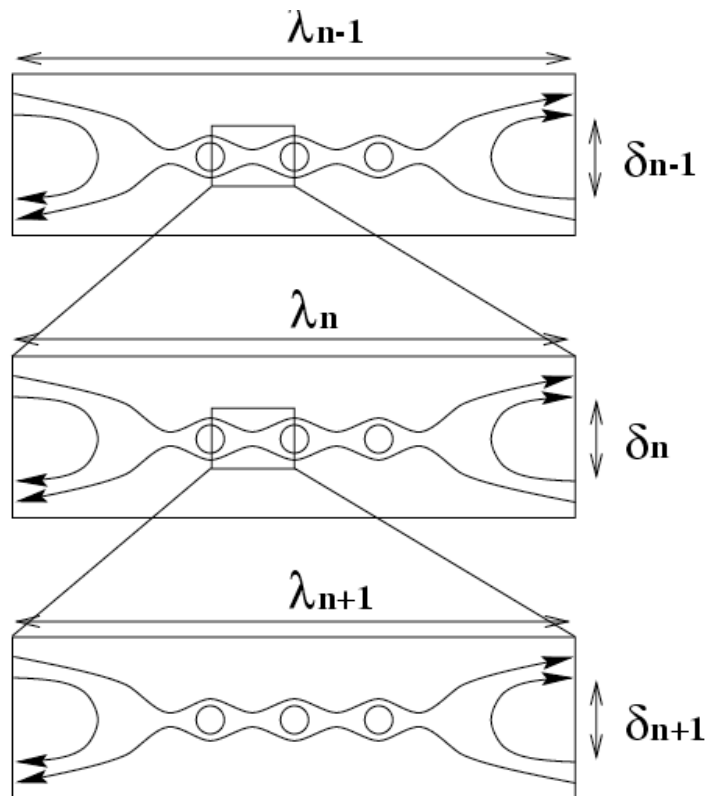
**Which is  
cause and  
effect ?  
plasmoid  
ejection or  
reconnecton ?**



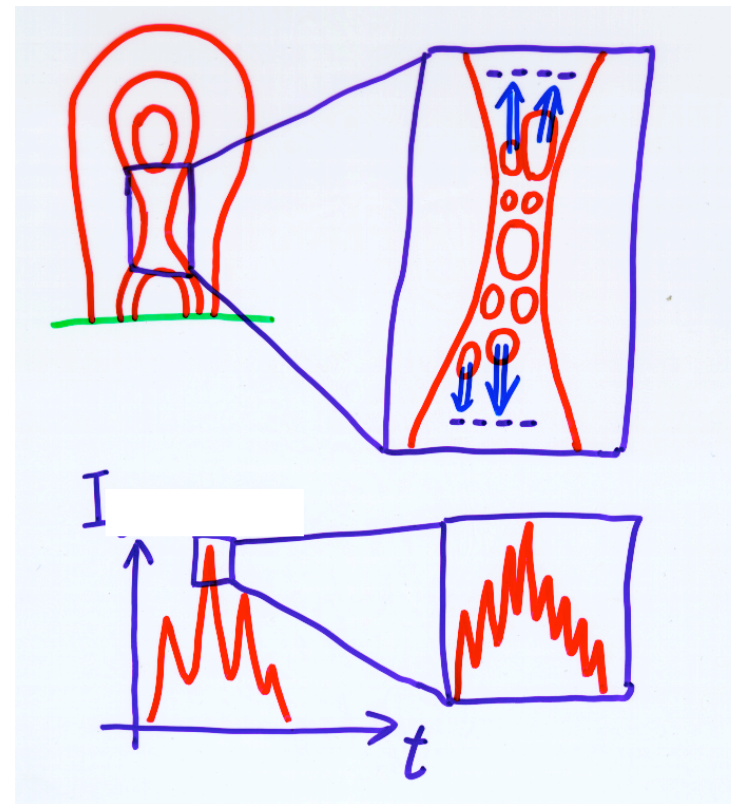


# Fractal reconnection

(Shibata and Tanuma 2001)



Observed fractal-like hard X-ray and microwave emissions may be a result of fractal plasmoid ejections ?



(Tajima and Shibata 1997)

# 6. Flare Triggering Mechanism

- Break Out Model (Antiochos)
- Tether-Cutting Model (Moore)
- Catastrophe Model (Forbes, Lin)  
=>talk by Forbes

Two-step Reconnection Model  
(Wang-Shi, Chen-Shibata)

# Break-Out model

(Antiochos, DeVore, Klimchuk 1999)

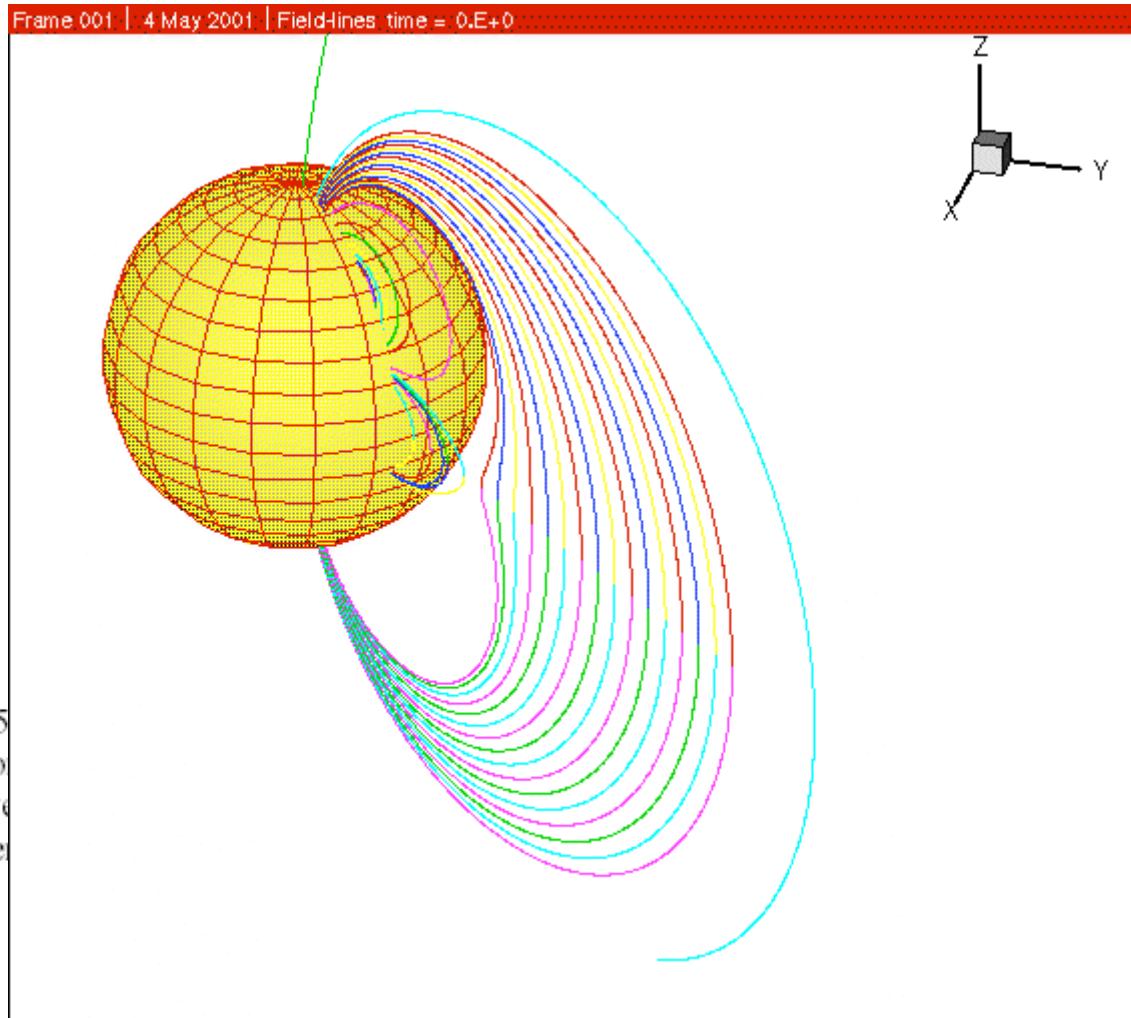


Fig. 27. 2.5  
configuration  
polarity inve  
current layer  
the sheared

the force-free  
field near the  
r time when a  
s layer allows

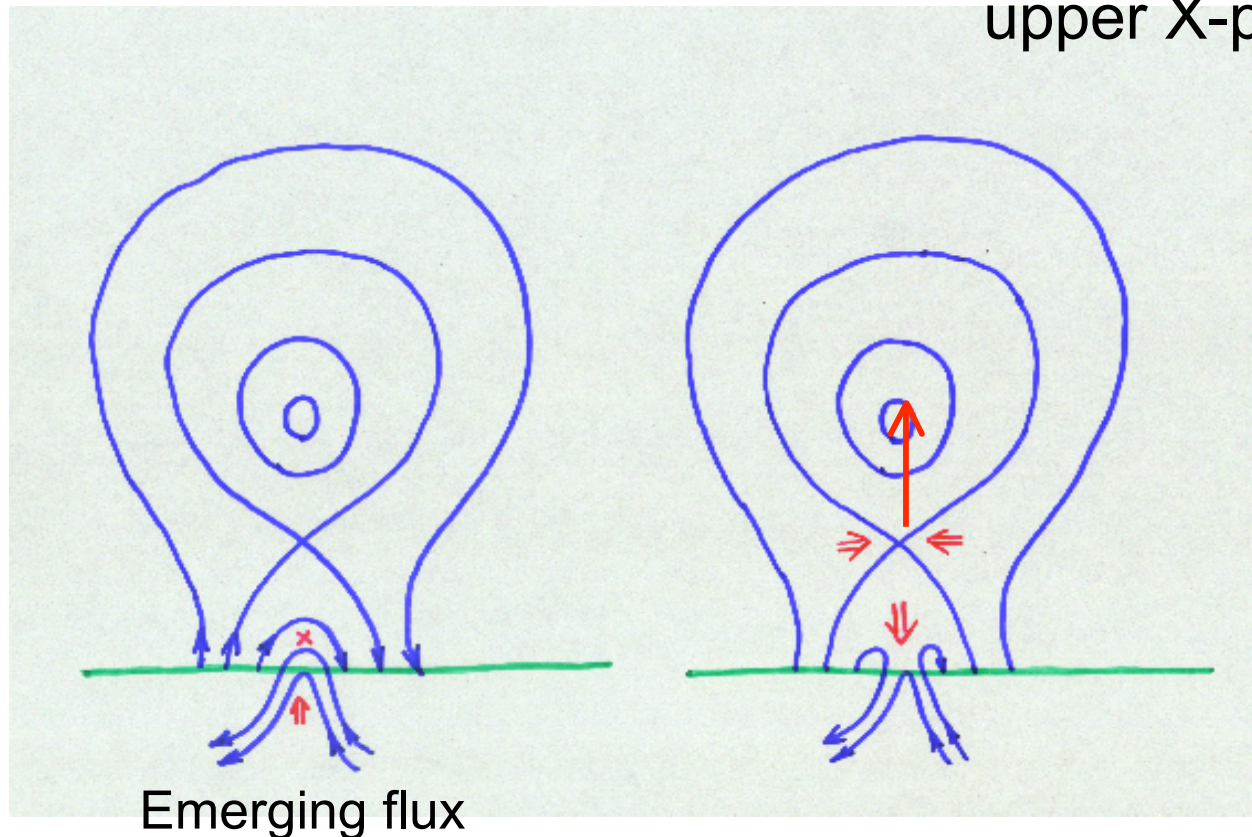
# Two step reconnection model

(Wang-Shi 1993, Chen-Shibata 2000,  
Kusano et al. 2004)

reconnection (cancellation) associated with emerging flux

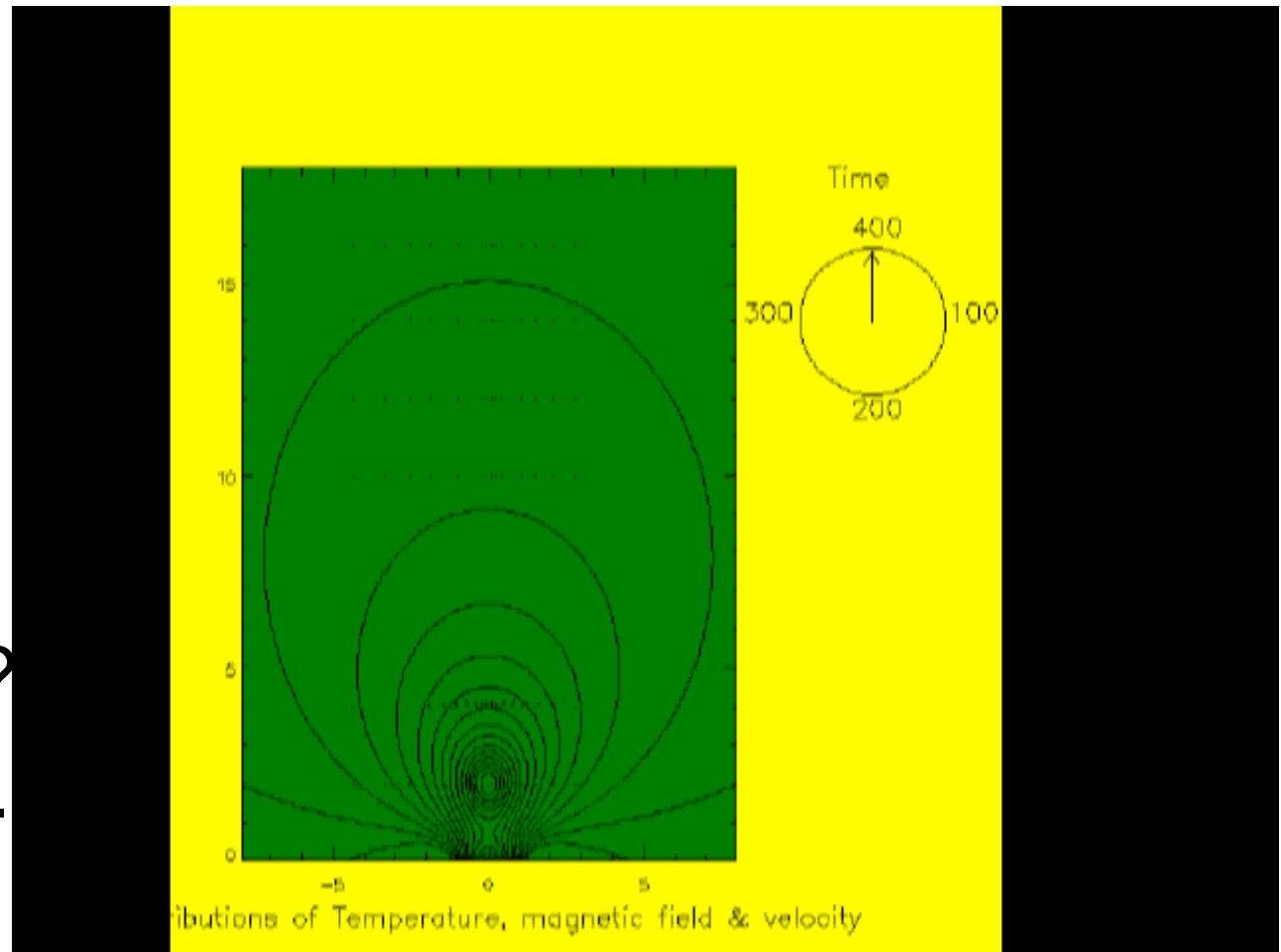
➡ sudden decrease in magnetic pressure

➡ downflow ➡ inflow ➡ fast reconnection at upper X-point



# 7. Chen-Shibata (2000) model

- Chen et al. (2002, 2004)
- Shiota et al. (2003, 2004?)
- Nishida et al. (2004?)

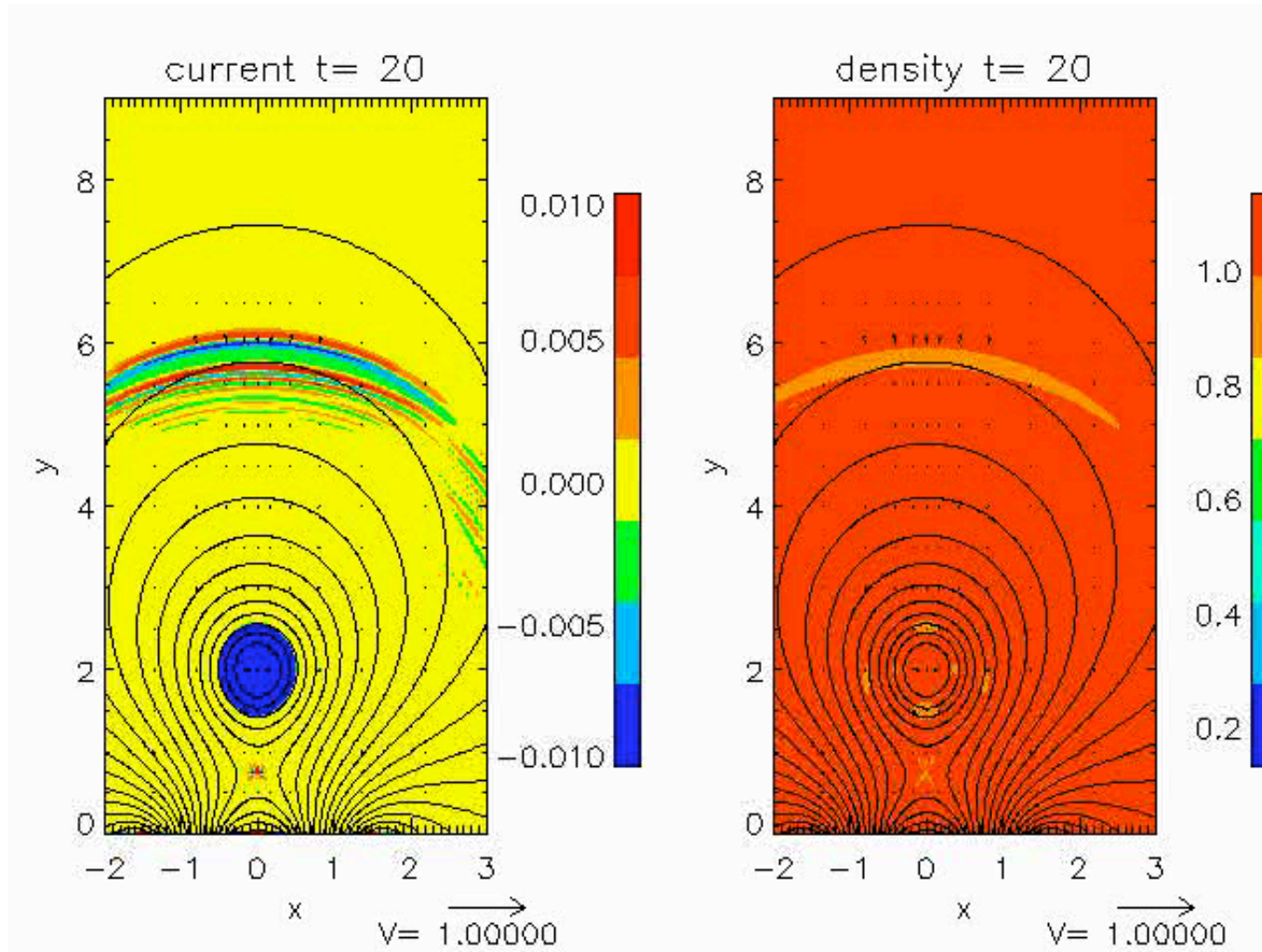


(see also Lin et al. 2001)

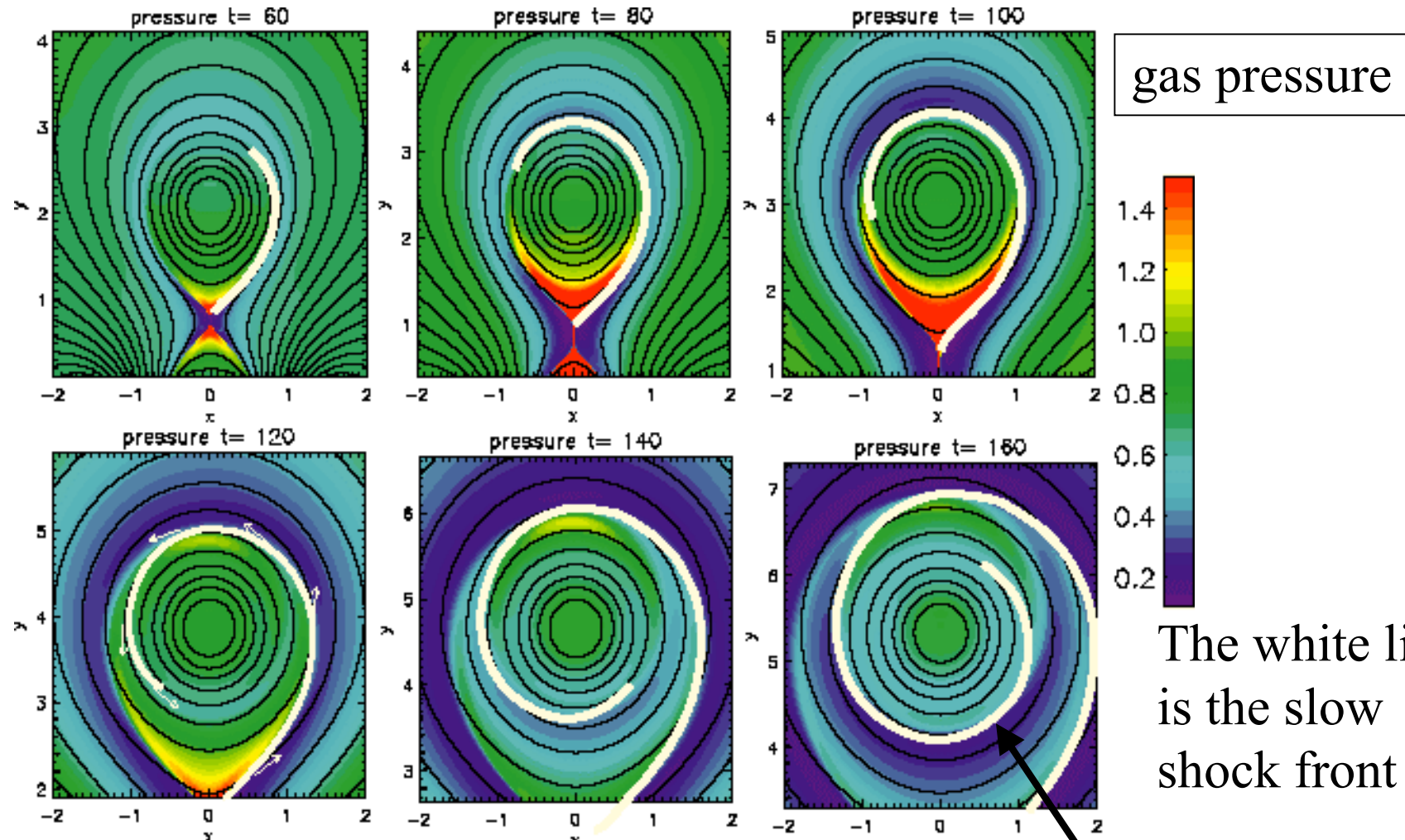
# Discovery of Spiral Slow shocks and Dimming associated with magnetic reconnection (Shiota et al. 2004)

current density

plasma density



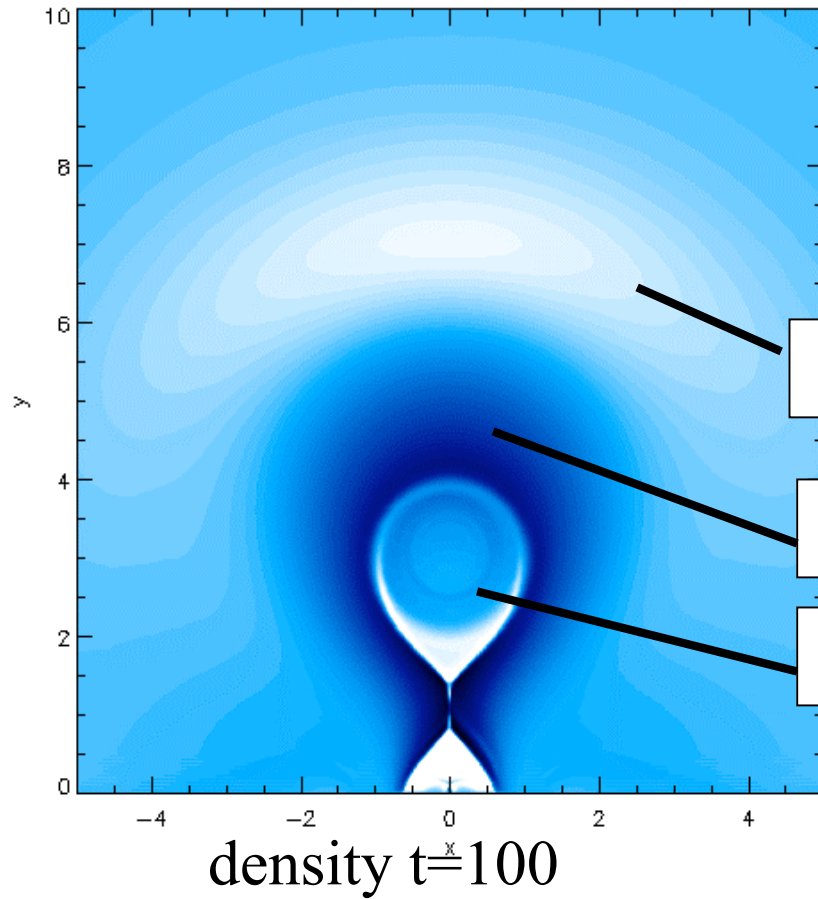
# Propagation of slow shock (Shiota)



Slow shocks continue to propagate along the field lines around the flux rope

and make a discontinuity inside the flux rope

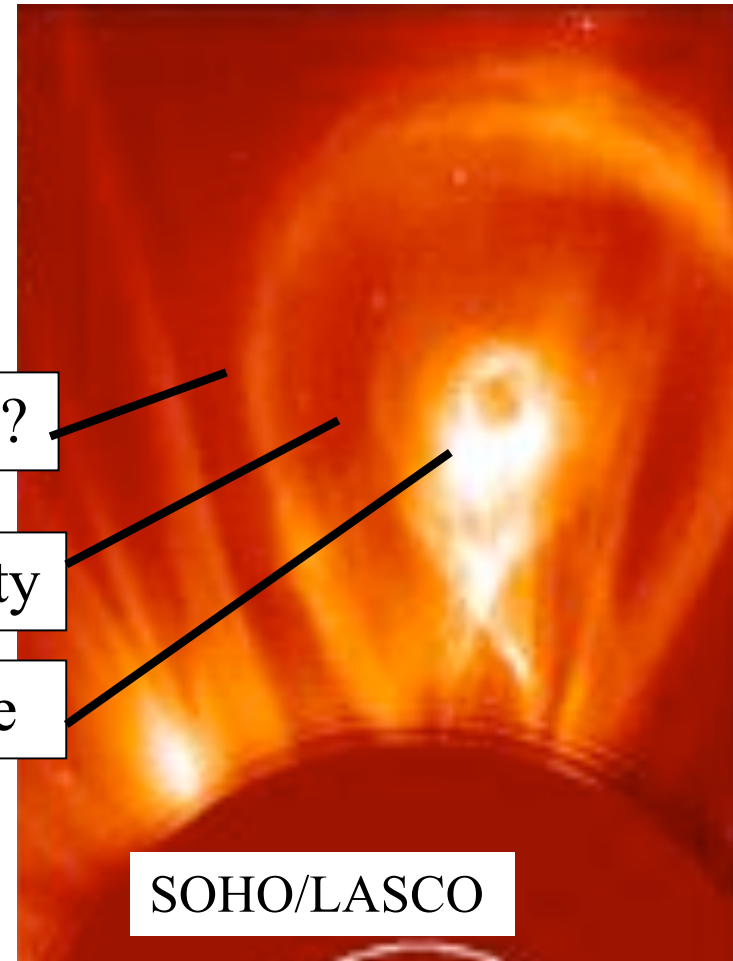
# Three-Part Structure



edge?

cavity

core

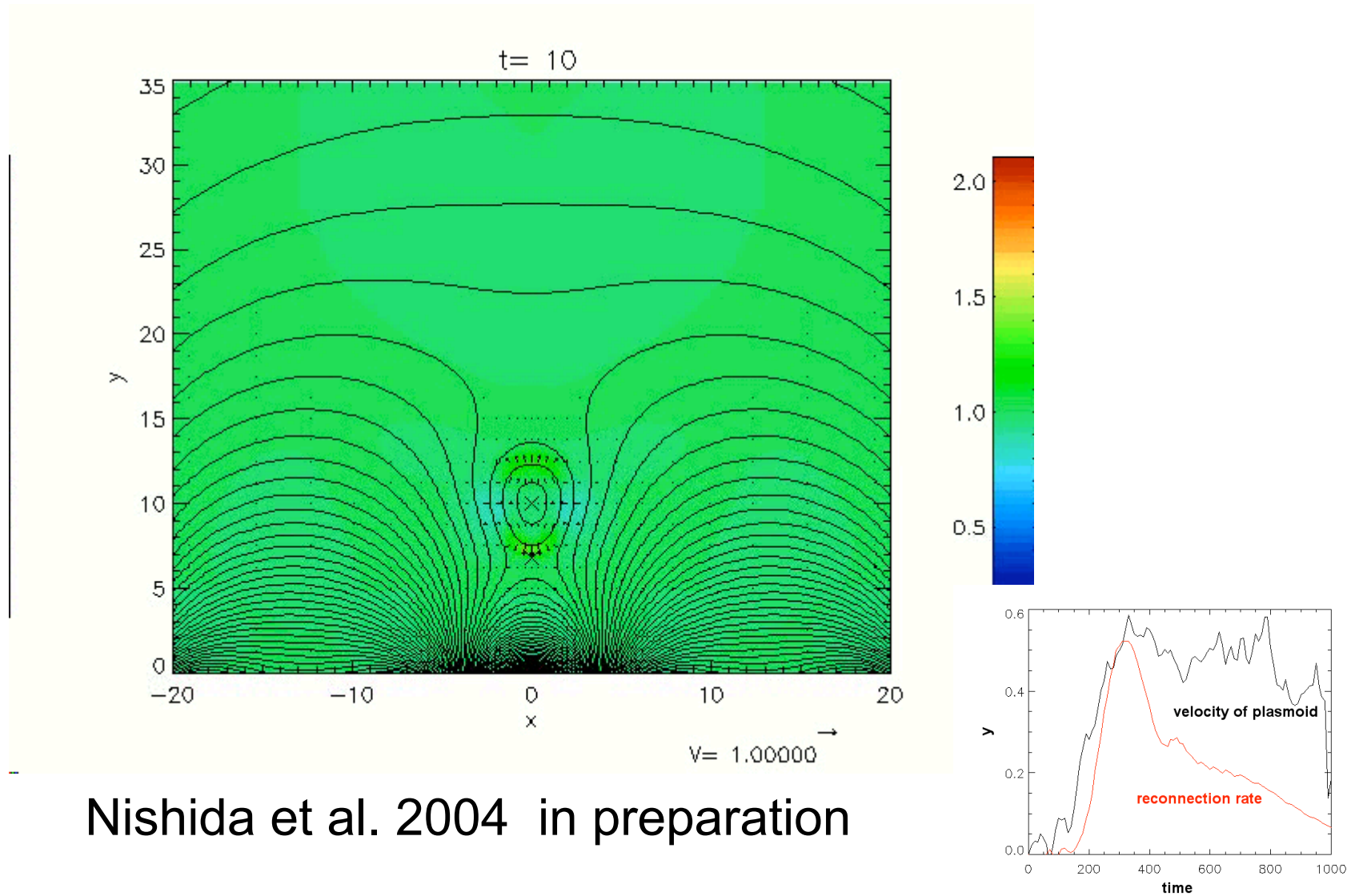


The numerical results reproduce the three-part structure.

.



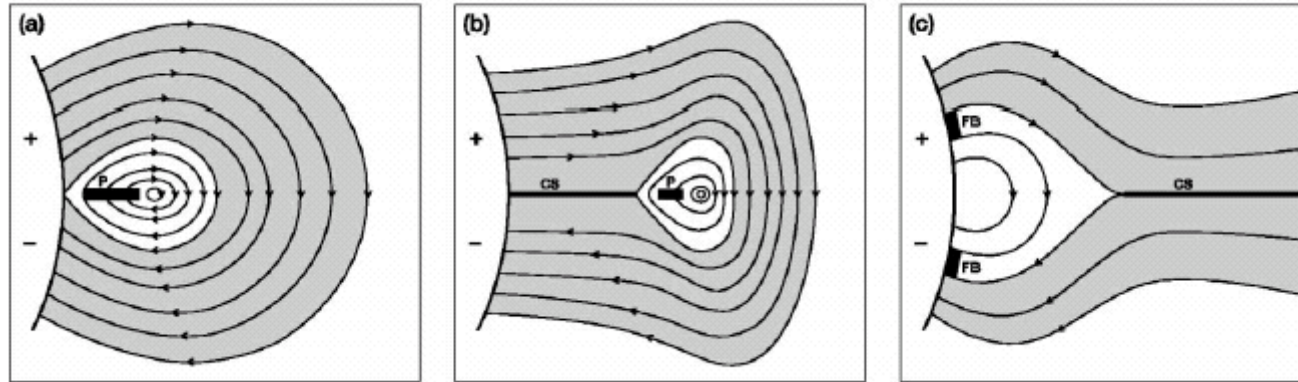
# Model of impulsive flares



Nishida et al. 2004 in preparation

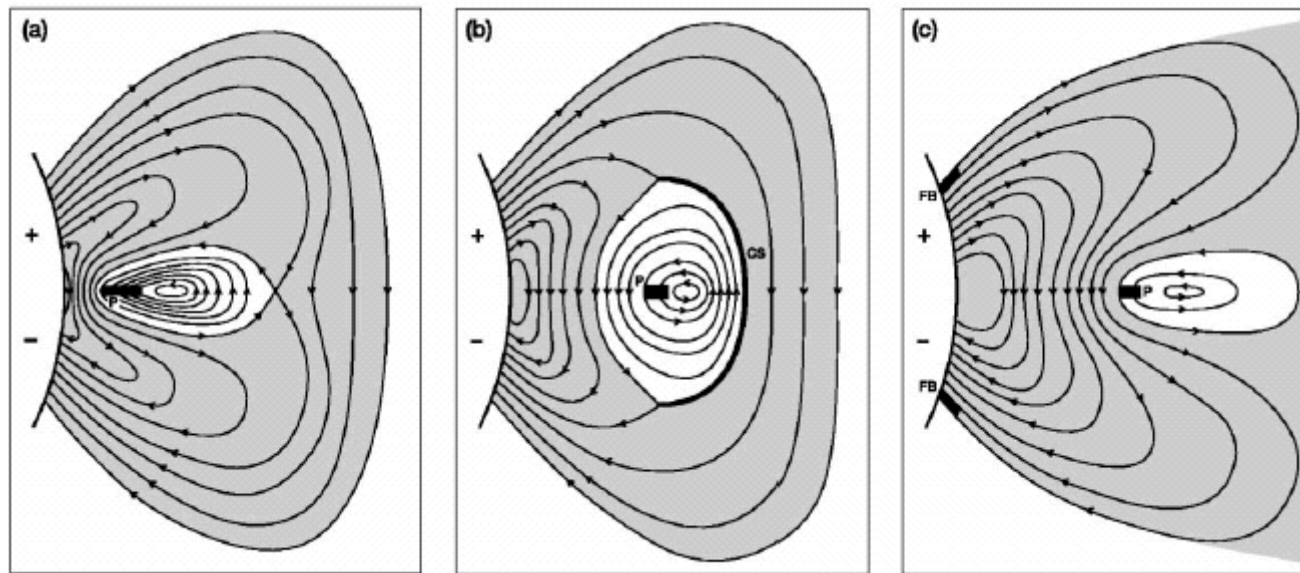
# Low and Zhang, M. (2002)

Inverse  
Slow CME



Normal  
Fast CME

?



# 8. Remaining Questions

- Condition of fast reconnection ?  
(=> plasmoid ejection ?)
- Energy storage mechanism,  
trigger mechanism ? (=> **emerging flux ?**)
- Detection of reconnection jet,  
inflow, and MHD shocks

= > **Solar B (2006)**