2021年1月30日　連星系･変光星研究会2020　14時45分ー15時20分　35分講演

恒星の磁気活動
ーフレアとジェット･質量放出

柴田一成

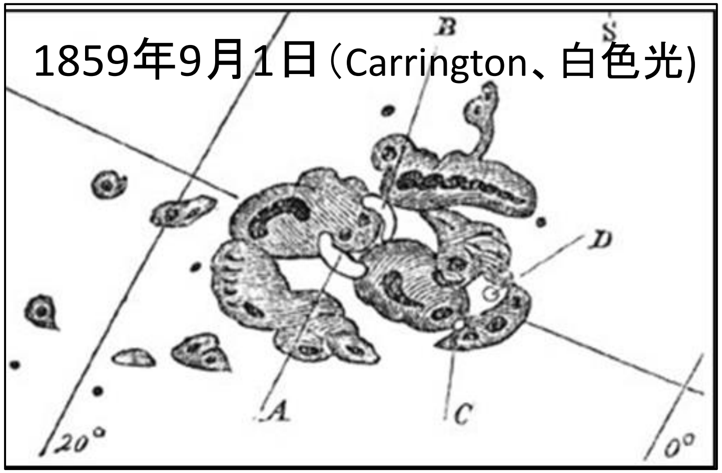
京大花山天文台（名誉教授）

本日の講演内容

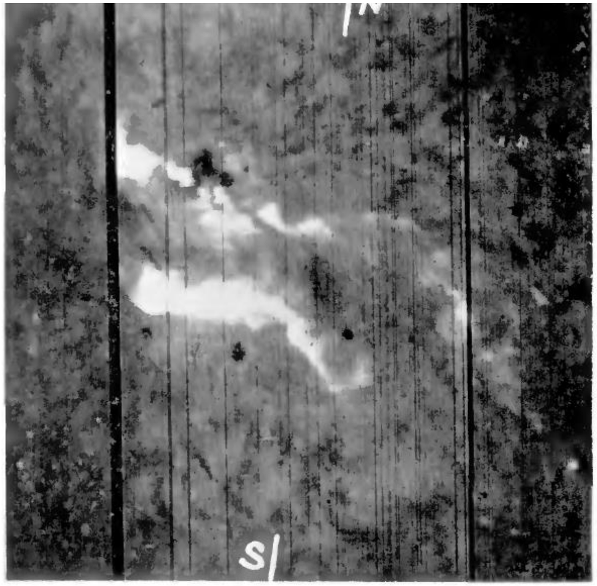
- 太陽フレア･質量放出の観測
- フレアのリコネクション･モデルと統一モデル
- フレアの未解決問題
- 太陽から恒星へ
- 原始星フレアとジェット
- 太陽･恒星フレアの統一モデル

太陽フレア観測の歴史

- 1859年、英国のCarrington とHodgsonが黒点スケッチ中に独立に発見（白色光フレア）
- 1891年、Trouvelotが白色光フレアの2例目を発見
- 1892年、Haleがスペクトロヘリオグラフを用いて、フレアのHα写真を初めて撮影に成功
- 1908年、Hale黒点磁場を発見
- 1933年、Lyotフィルターの発明
- 1934年、スペクトロヘリオスコープを用いてフレアHα観測が定期的に可能となる
- 1939年、フレアの初の分光観測（Richardson and Minkowski 1939)



1859年9月1日（Carrington、白色光)



1909年5月12日(Hale, Hα）

太陽フレア

１９世紀中頃発見

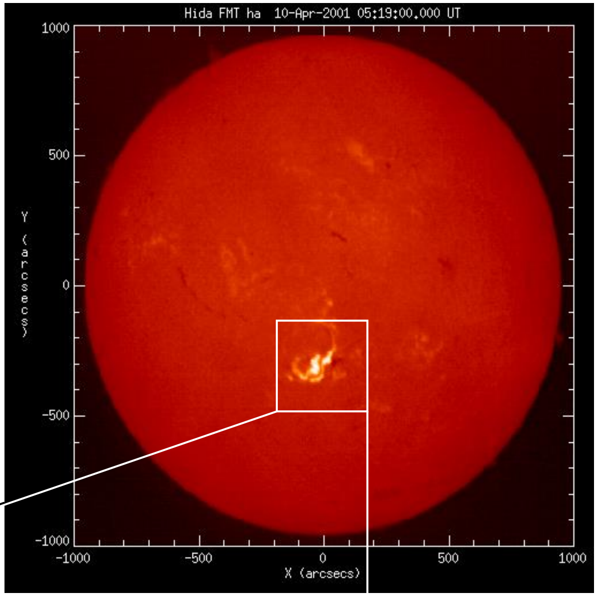
黒点近傍で発生＝＞
　磁気エネルギーが源

サイズ～（１－１０）万km

全エネルギー

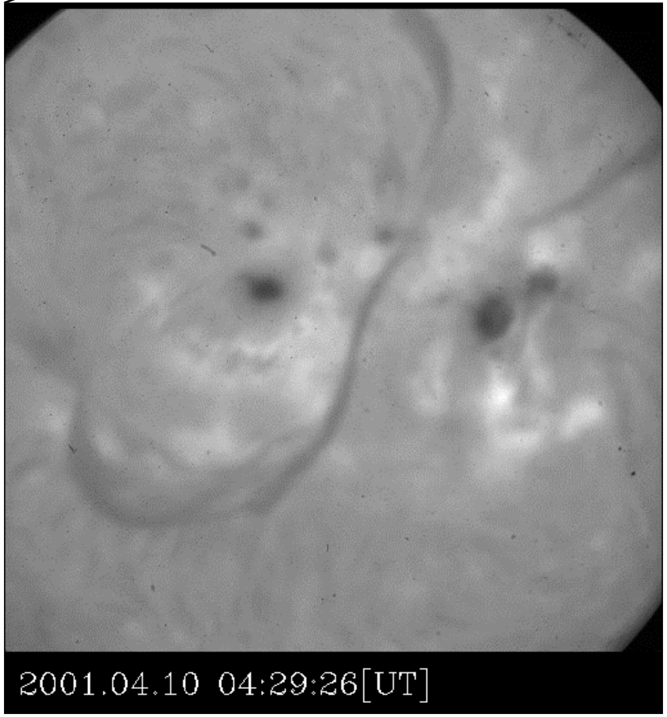
10^{29} - 10^{32}erg
（水爆１０万ー１億個）
太陽系最大の爆発現象

<u>発生メカニズムが
１世紀以上謎</u>



Hα

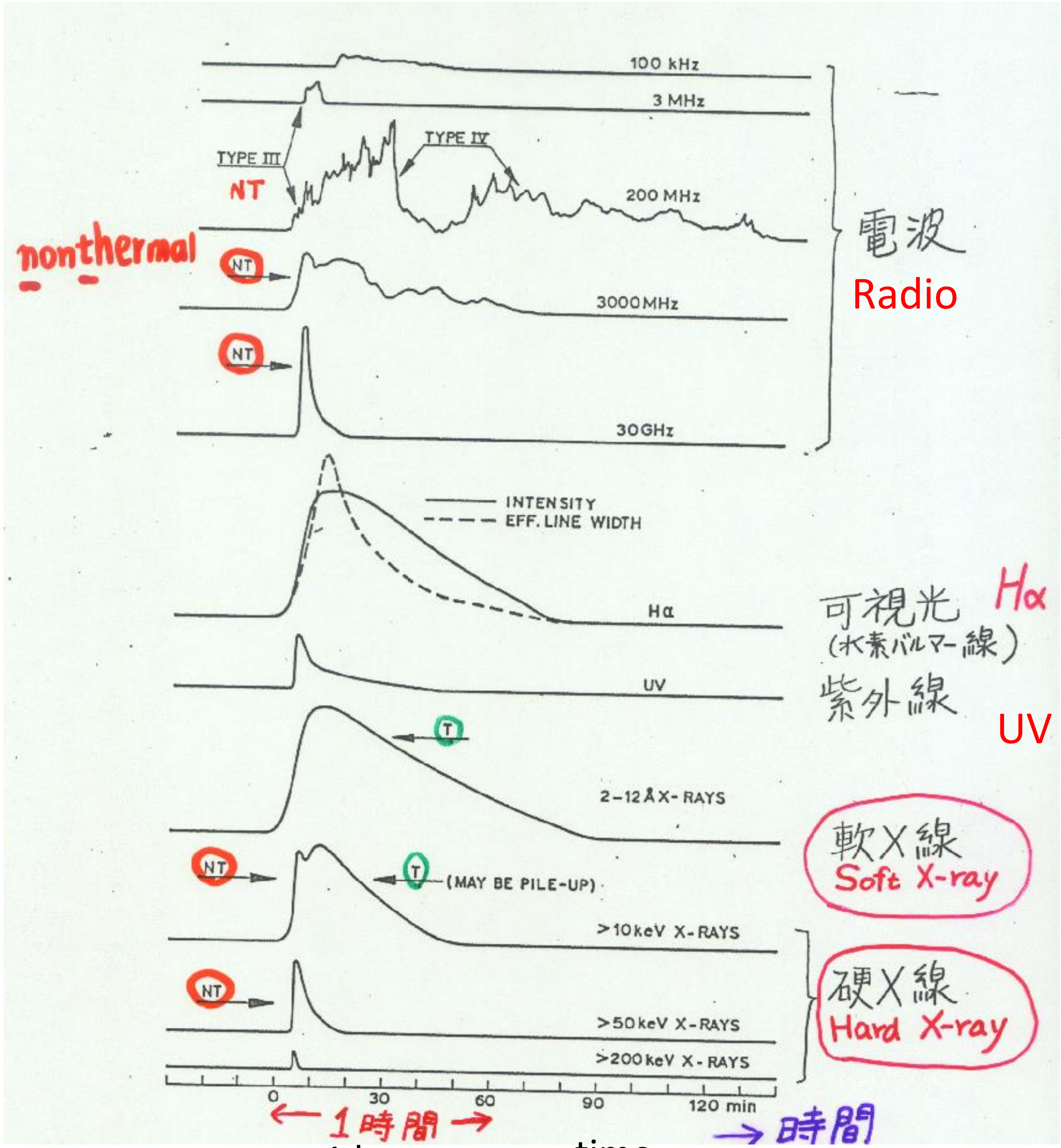
彩層
１万度



京大飛騨天文台

Electro-magnetic wave emitted from a typical solar flare (from Svestka 1976)

John C. Brown (1971)
Revealed physics of flare
Non-thermal Emission as a result of non-thermal electrons

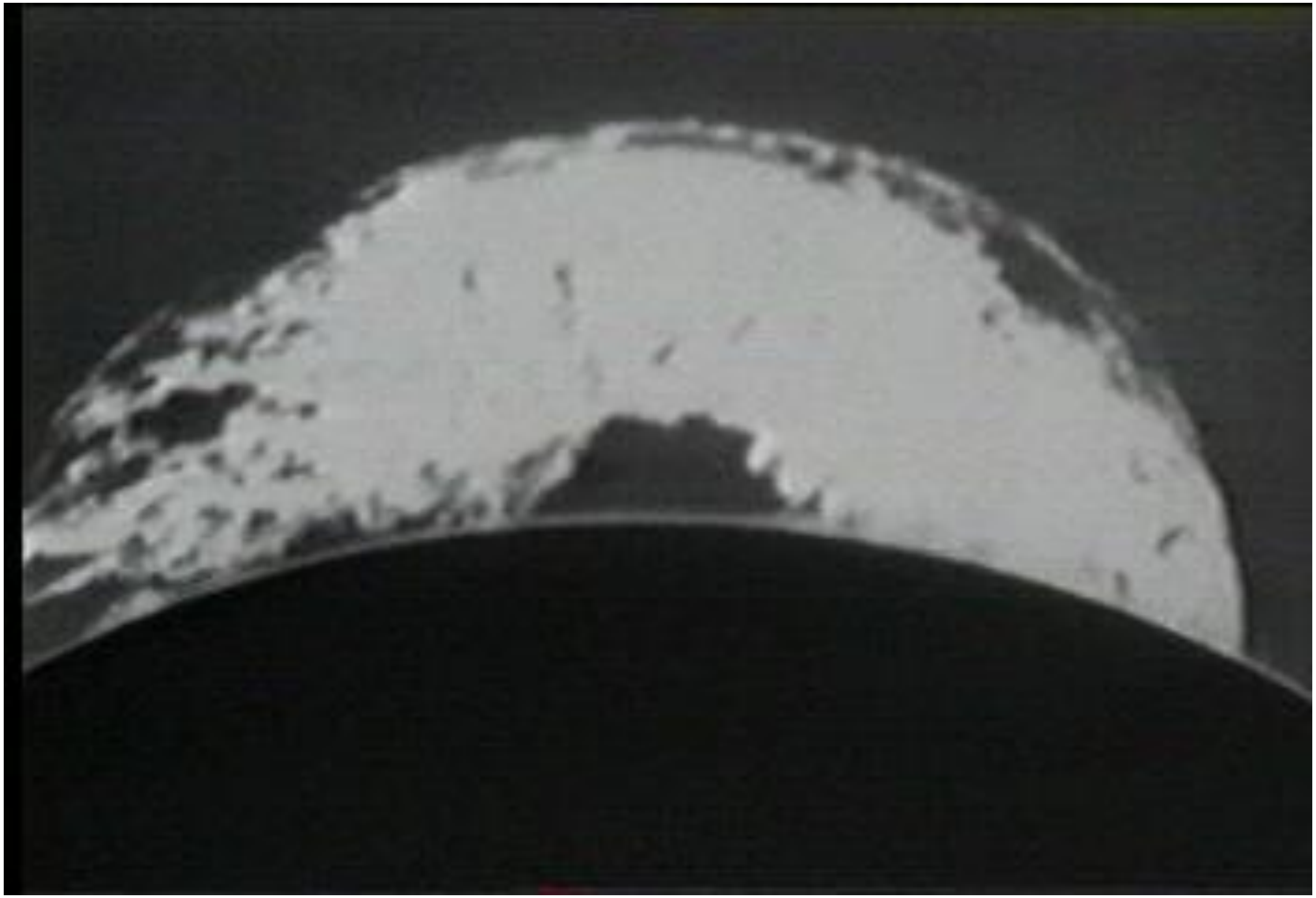


1 hour

time

太陽プロミネンス噴出

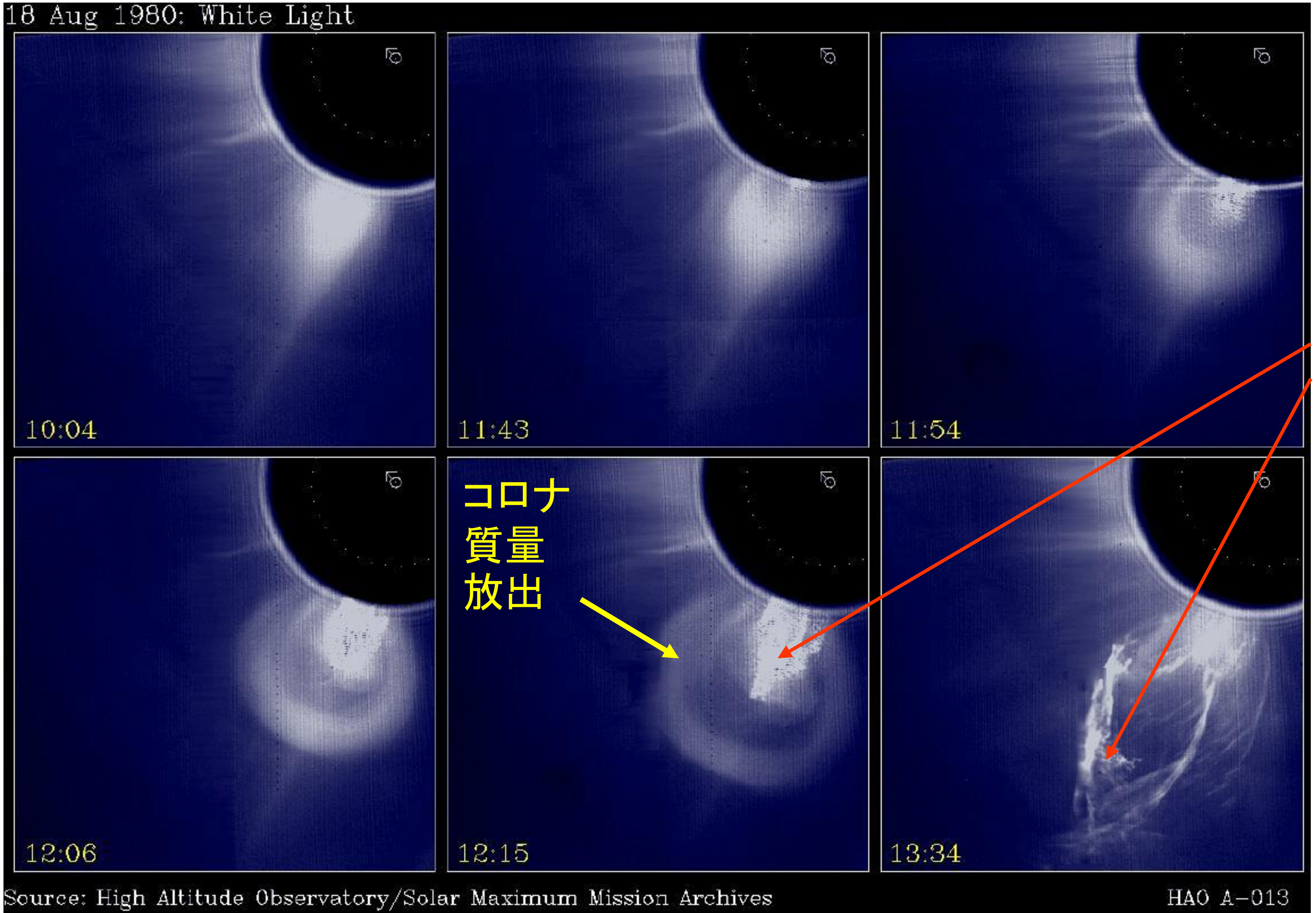
（史上最大：1946年6月4日：米国）



コロナ質量放出 （1972発見）

(CME=Coronal Mass Ejection)

（以下の例はSMM観測、人工日食、白色光）



Source: High Altitude Observatory/Solar Maximum Mission Archives

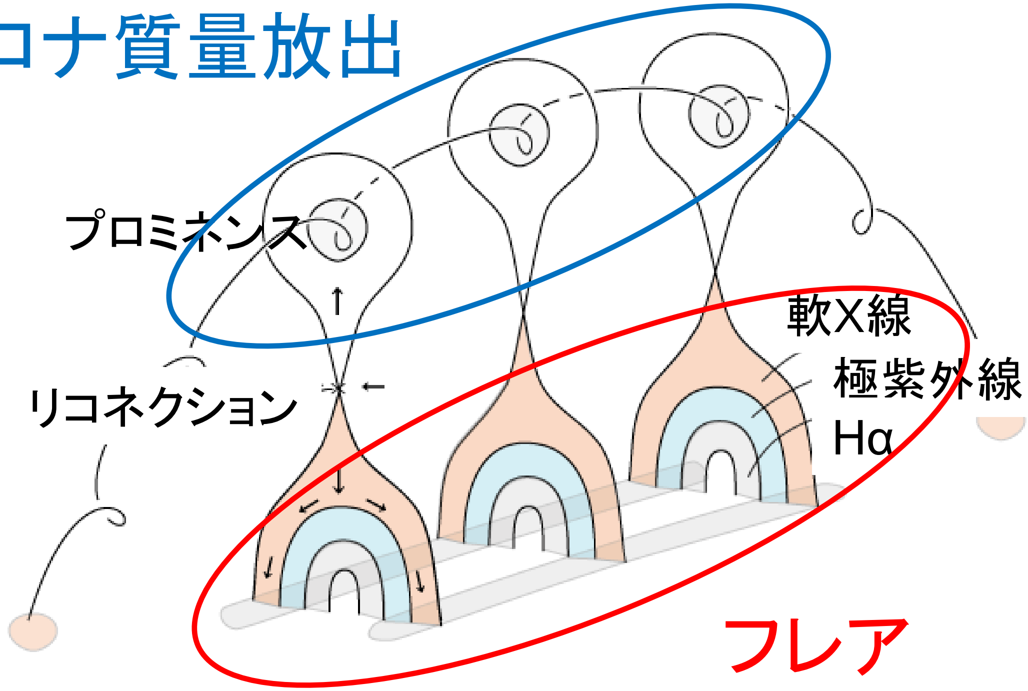
HAO A-013

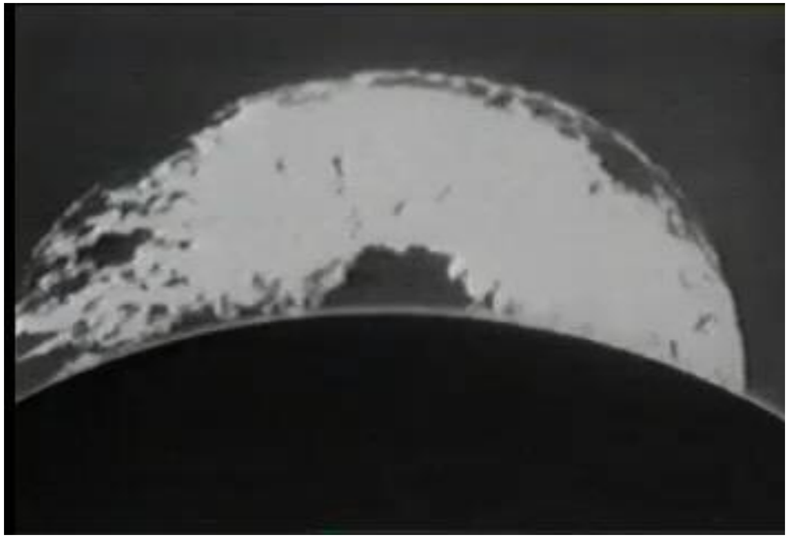
プロミネンス
噴出

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



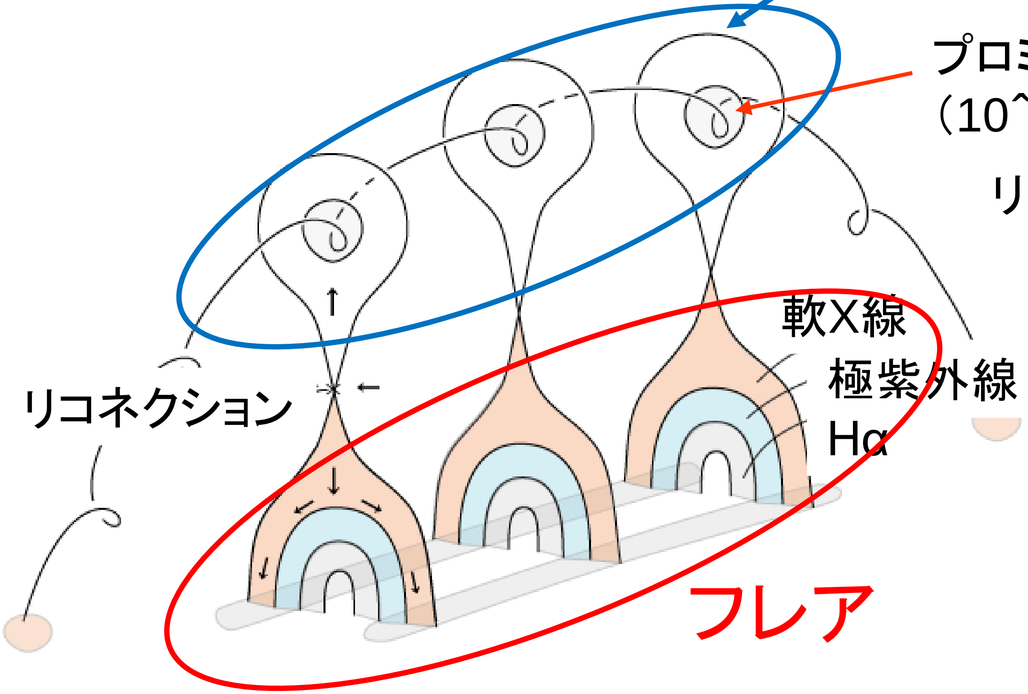


史上最大のプロミネンス噴出（1946年6月4日、HAO)

フレアの standard model

（Carmichael 1964, Sturrock 1966, Hirayama 1974, Kopp–Pneuman 1976）＝ CSHKP model

現象論的リコネクション・モデル



コロナ質量放出（1MK)

プロミネンス
（10^4 K）

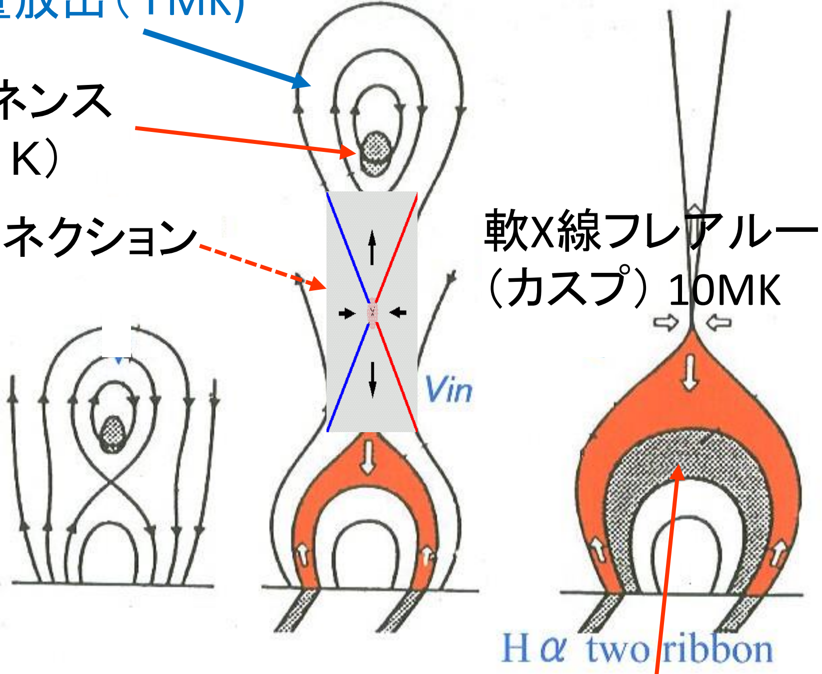
軟X線

極紫外線

Hα

リコネクション

フレア



リコネクション

軟X線フレアルーフ
（カスプ）10MK

コロナ質量放出／プロミネンスは、磁気圧で加速される

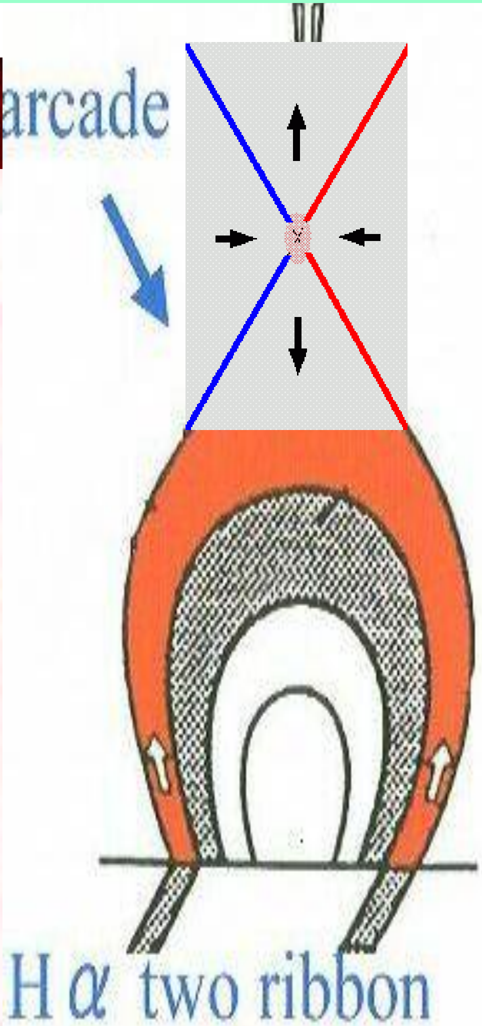
Hαポストフレア
ループ　10^4 K

フレアの正体

**磁気リコネクション
（磁力線つなぎかえ）**

Hα

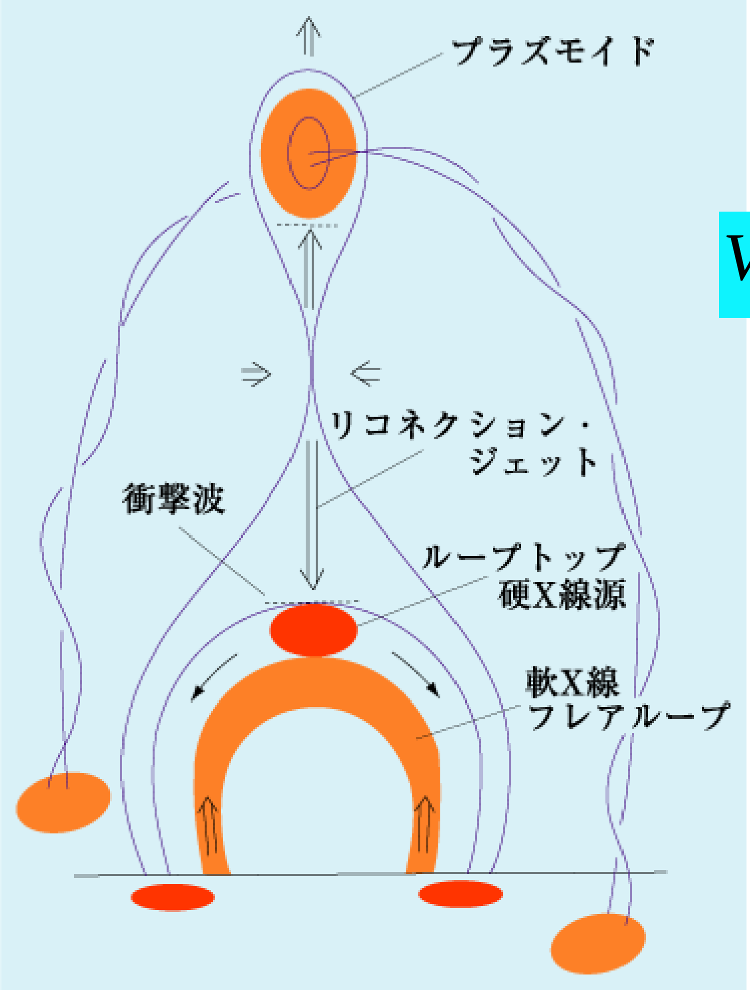
X線



統一モデル
（Shibata
et al. 1995)

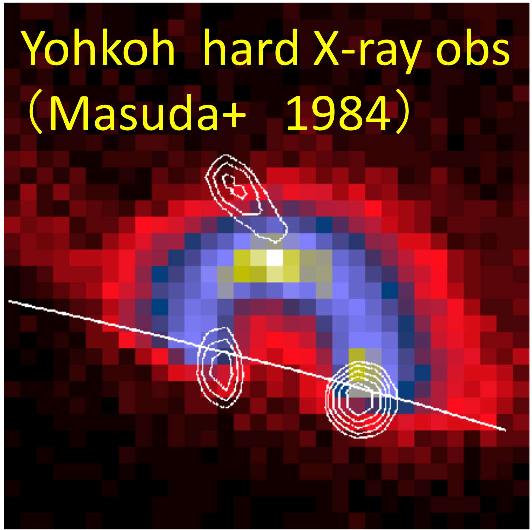
X線プラズ
モイド噴出
を予言

- ループトップ硬X線源は、fast shockか？

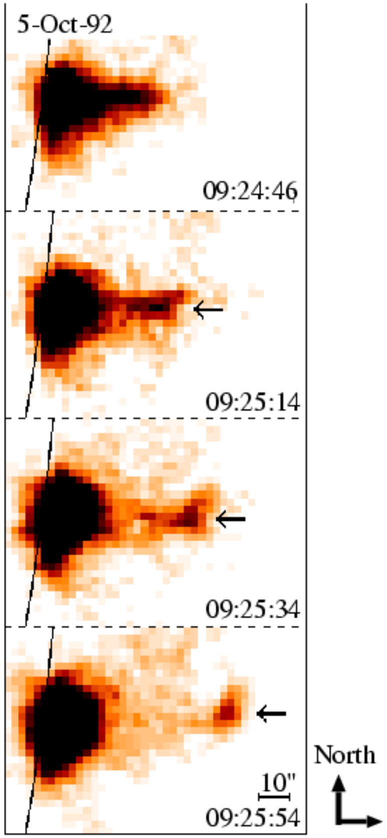


$$V_{jet} \approx V_A \approx 1000 km/s$$

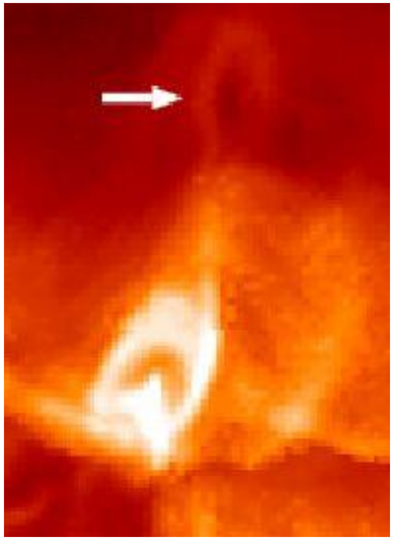
$$T \approx mV_A^2/(6k)$$
$$\approx 10^8 K$$


Yohkoh hard X-ray obs
（Masuda+　1984）

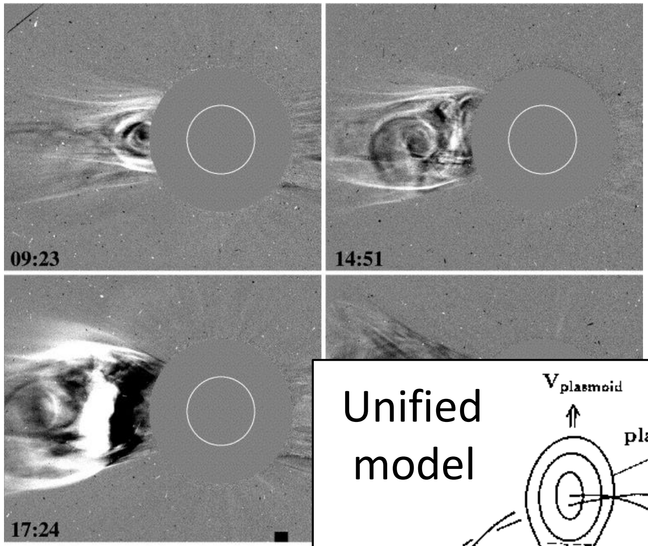
Plasmoid ejections are ubiquitous



impulsive flares
~ 10^9 cm
(Ohyama+S 1998)

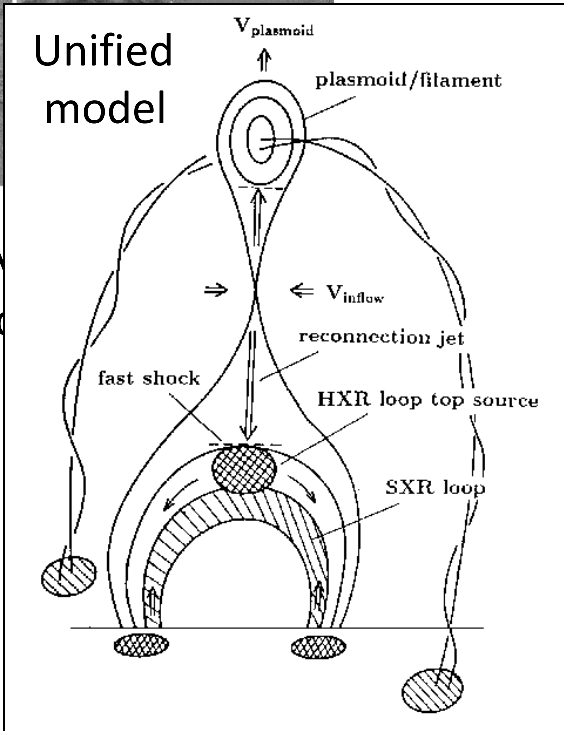


LDE(Long Duration Event) flares
~ 10^10 cm
(Tsuneta 1992, Hudson 1993)



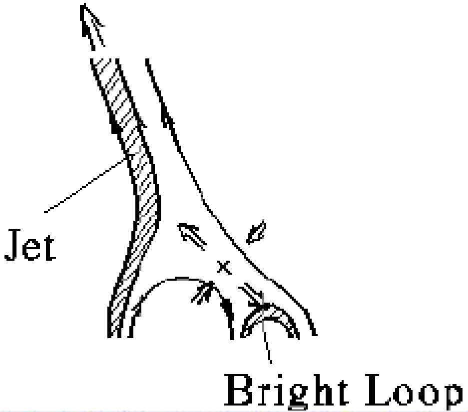
CMEs(Coronal M
from Giant arca
~ 10^11 cm
(Dere 1995)

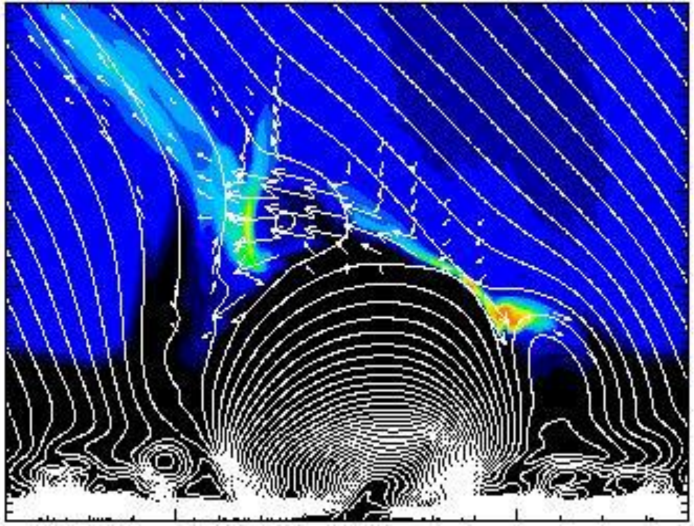
Unified model



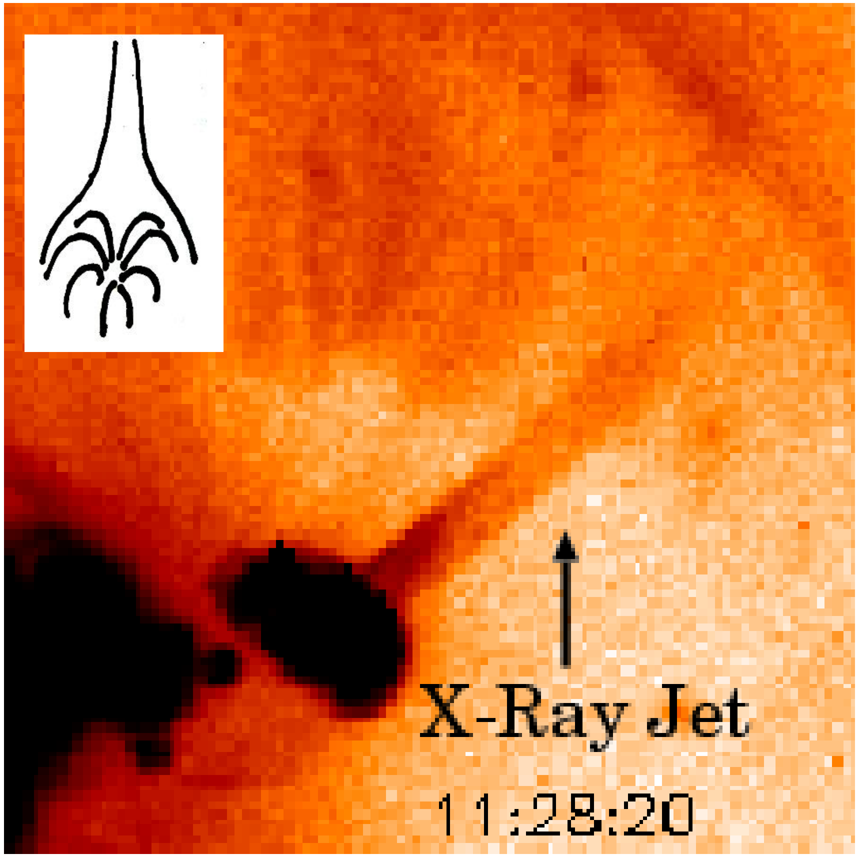
Plasmoid-Induced-Reconnection
(Shibata 1999)

Yohkoh satellite（1991-2000) (Japan-US-UK) discovered coronal X-ray Jets from microflares (Shibata+ 1992; Shimojo+ 1996)



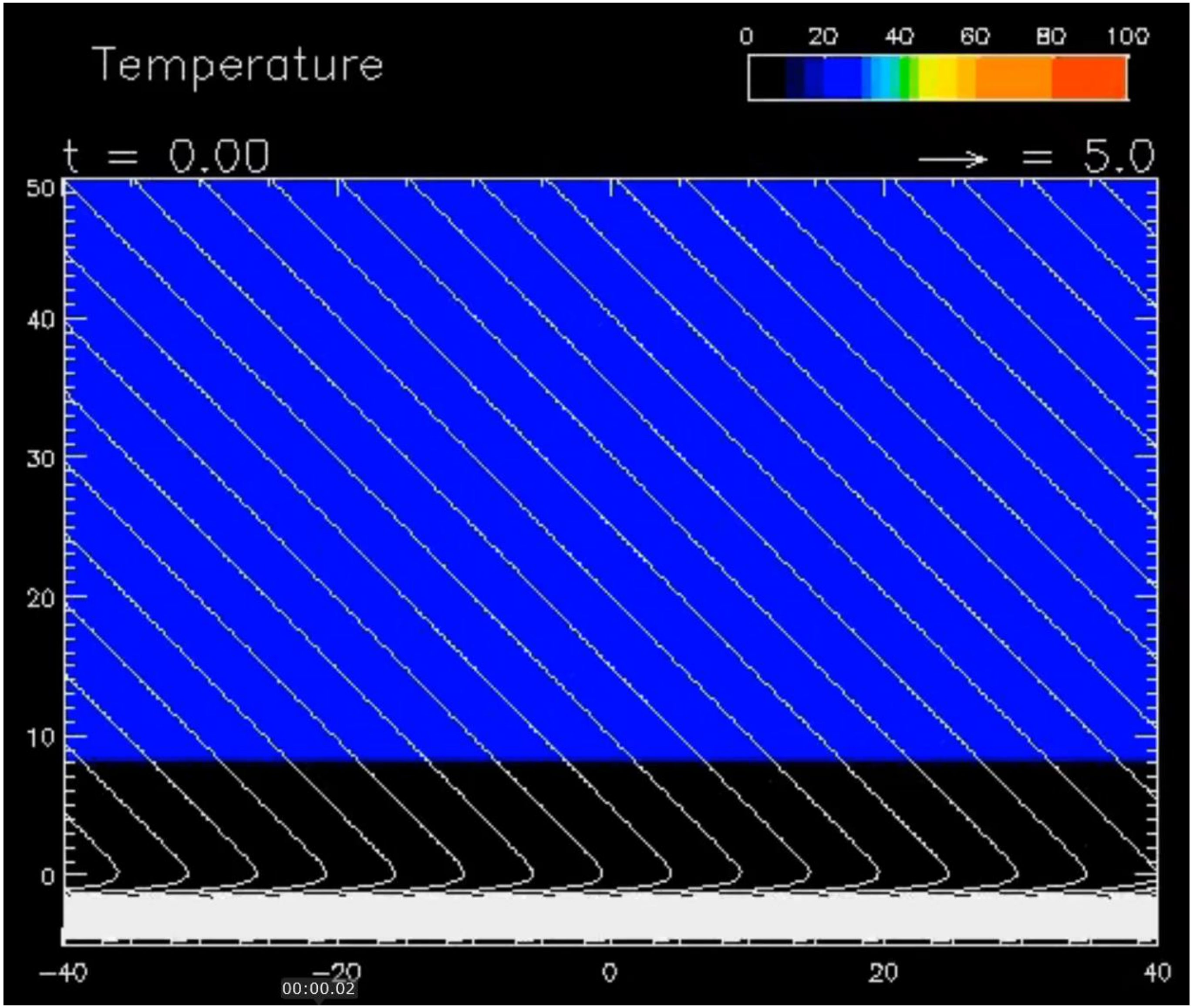


MHD simulations
(Yokoyama and Shibata 1995, 96)



Evidence of
Magnetic reconnection is found

2D MHD simulation of reconnection as a model of coronal X-ray jets (Yokoyama and Shibata 1995)

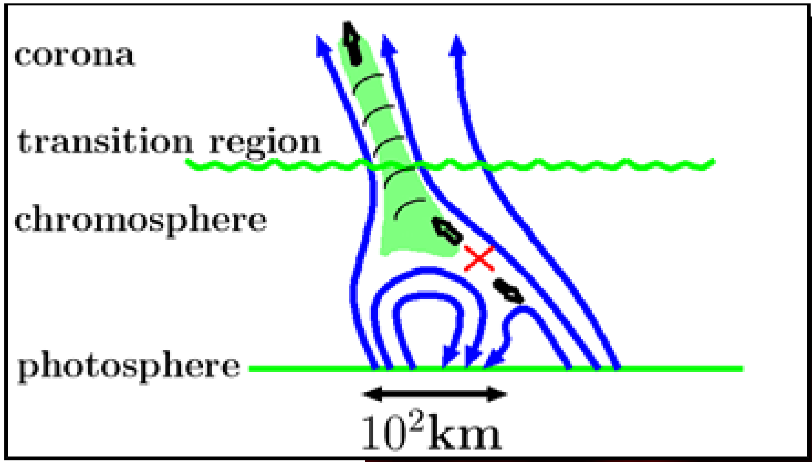


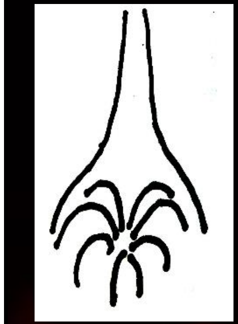
Extention of Emerging flux model of flares Heyvaerts, Priest, Rust (1977), Forbes and Priest (1984)

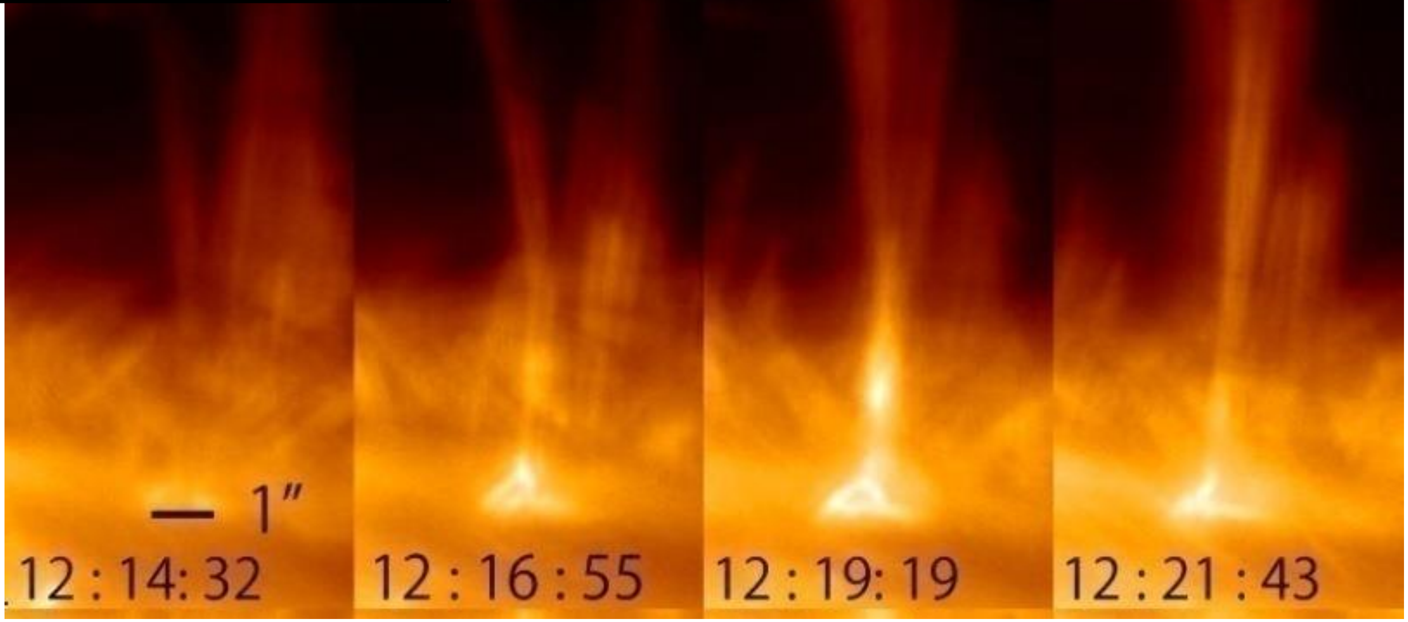
This is also a Model of surge (cool jet) (Canfield+ 1996)

See review by Cheung and Isobe (2014)

Hinode satellite (2006 -)（Japan-US-UK) discovered ubiquitous chromospheric anemone jet (Shibata+ 2007, Science)







Evidence of
Magnetic
Reconnection
Is found
(Nishizuka+ 2010
Singh+ 2012)

Summary of observations of "flares" in the solar atmosphere

$$t_A = L / V_A$$

$$V_A = \frac{B}{\sqrt{4\pi\rho}}$$

(Alfven speed)

"flares"	Size (L)	Lifetime (t)	Alfven time (t_A)	t/t_A	Mass ejection
Microflares	10^3 -10^4 km	100-1000sec	1-10 sec	~100	jet/surge
Impulsive flares	(1-3) x 10^4 km	10 min – 1 hr	10-30 sec	~60-100	X-ray plasmoid/ Spray
Long duration (LDE) flares	(3-10)x 10^4 km	1-10 hr	30-100 sec	~100-300	X-ray plasmoid/ prom. eruption
Giant arcades	10^5 -10^6 km	10 hr – 2 days	100-1000 sec	~100-300	CME/prom. eruption

Summary of observations of "flares" in the solar atmosphere After Hinode's launch

$$t_A = L / V_A$$

$$V_A = \frac{B}{\sqrt{4\pi\rho}}$$

(Alfven speed)

"flares"	Size (L)	Lifetime (t)	Alfven time (t_A)	t/t_A	Mass ejection
nanoflares	~200 km	200-1000sec	20 sec	~10~50	Chromospheric jets (anemone, penumbral)
Microflares	10^3 - 10^4 km	100-1000sec	1-10 sec	~100	jet/surge
Impulsive flares	(1-3) x 10^4 km	10 min – 1 hr	10-30 sec	~60-100	X-ray plasmoid/ Spray
Long duration (LDE) flares	(3-10)x 10^4 km	1-10 hr	30-100 sec	~100-300	X-ray plasmoid/ prom. eruption
Giant arcades	10^5 - 10^6 km	10 hr – 2 days	100-1000 sec	~100-300	CME/prom. eruption

Summary of observations of “flares” in the solar atmosphere
In future ?

$$t_A = L / V_A$$

$$V_A = \frac{B}{\sqrt{4\pi\rho}}$$

(Alfven speed)

“flares”	Size (L)	Lifetime (t)	Alfven time (t_A)	t/t_A	Mass ejection
picoflares					
nanoflares	~200 km	200-1000sec	20 sec	~10~50	Chromospheric jets (anemone, penumbral)
Microflares	10^3 -10^4 km	100-1000sec	1-10 sec	~100	jet/surge
Impulsive flares	(1-3) x 10^4 km	10 min – 1 hr	10-30 sec	~60-100	X-ray plasmoid/ Spray
Long duration (LDE) flares	(3-10)x 10^4 km	1-10 hr	30-100 sec	~100-300	X-ray plasmoid/ prom. eruption
Giant arcades	10^5 -10^6 km	10 hr – 2 days	100-1000 sec	~100-300	CME/prom. eruption

太陽観測は高空間分解能（＜0.1″＝70km)、高時間分解能(＜1sec）へ

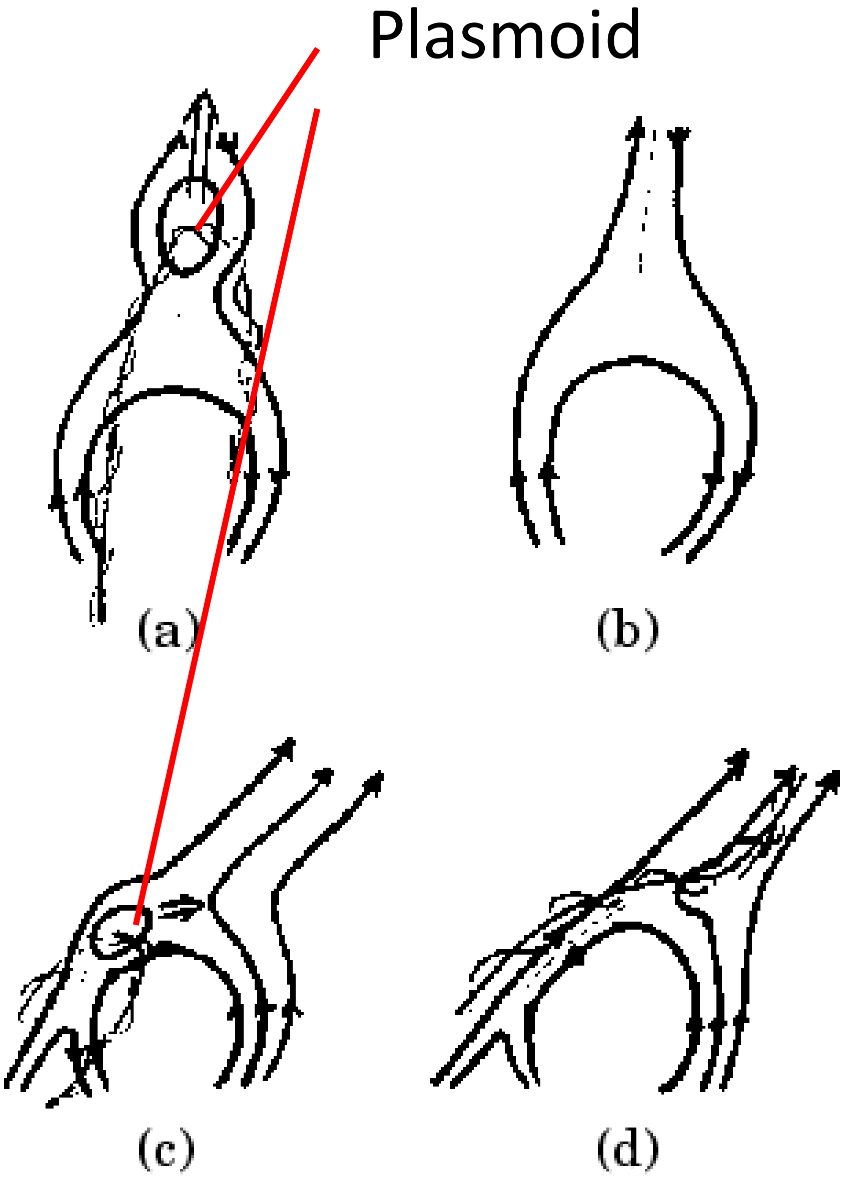
Unified model

(plasmoid-induced reconnection model)

(Shibata 1996, 1999,
Shibata and Tanuma 2001)

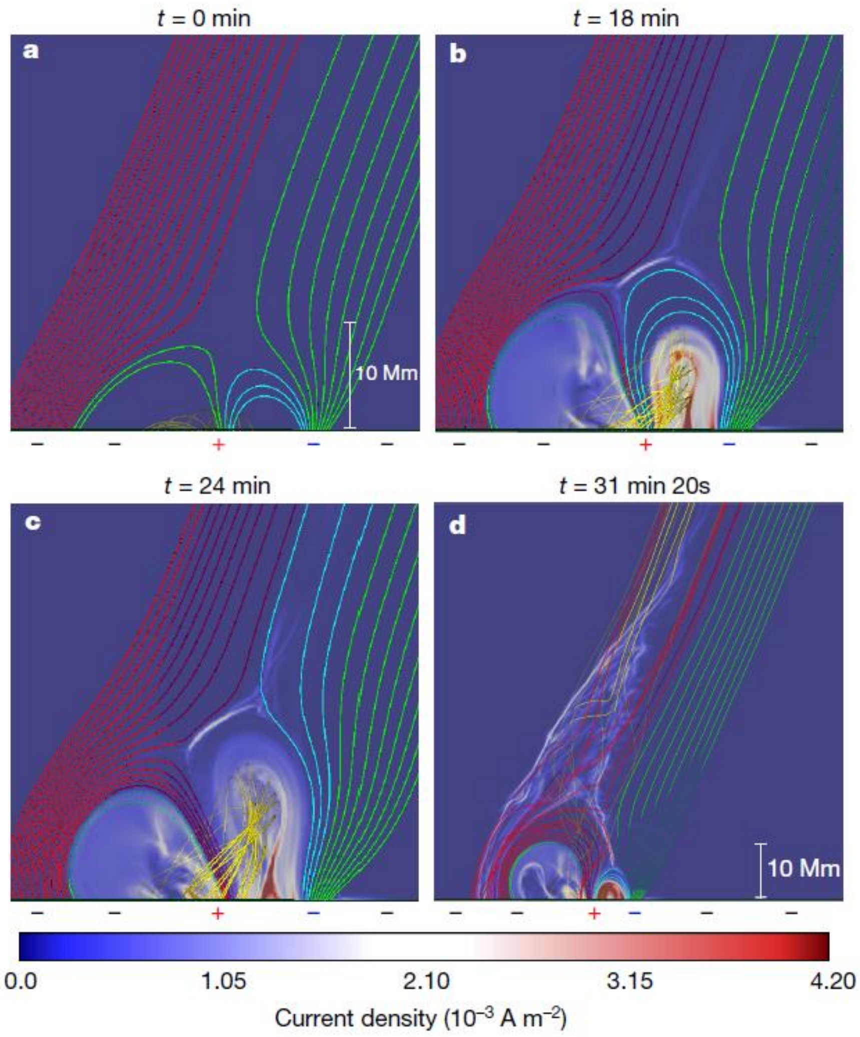
(a,b) : large scale flares,
Coronal mass ejections

(c,d) : small scale flares,
microflares, jets

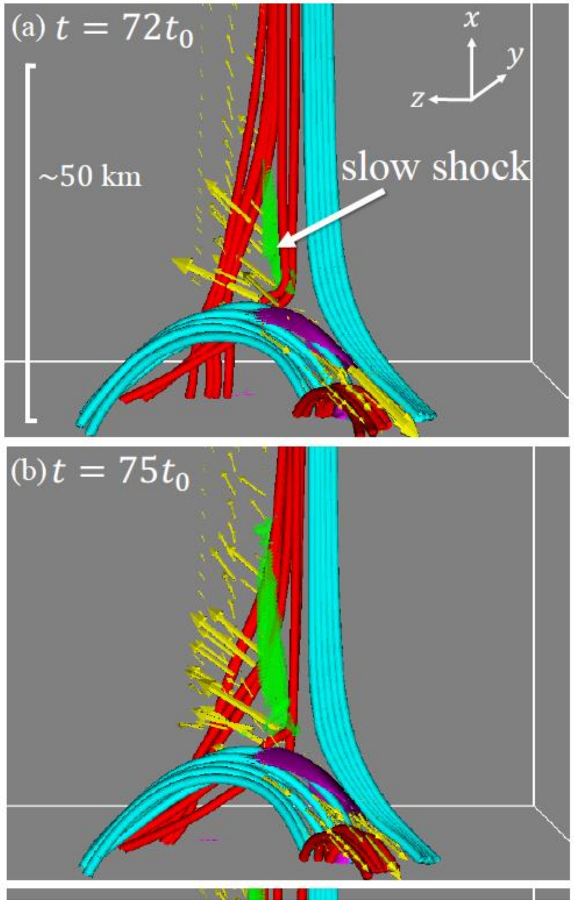


Energy release rate $= \dfrac{dE}{dt} \approx \dfrac{B^2}{4\pi} V_{in} L^2 \approx 10^{-2} \dfrac{B^2}{4\pi} V_A L^2$

3次元ヘリカルジェット：
コロナジェット（Wyper et al. 2018）



光球ジェット
Kotani and Shibata (2020, PASJ)



フレアの未解決問題

- エネルギー解放機構
（速いリコネクションはなぜ起こるか？）
- フレア/コロナ質量放出のトリガー機構
- 非熱的粒子の加速機構

Basic Puzzle of Reconnection

1. What determines the Reconnection Rate ?

Magnetospheric observations and collisionless plasma theory suggest that fast reconnection occurs if the current sheet thickness becomes comparable with

ion Larmor radius or ion inertial length

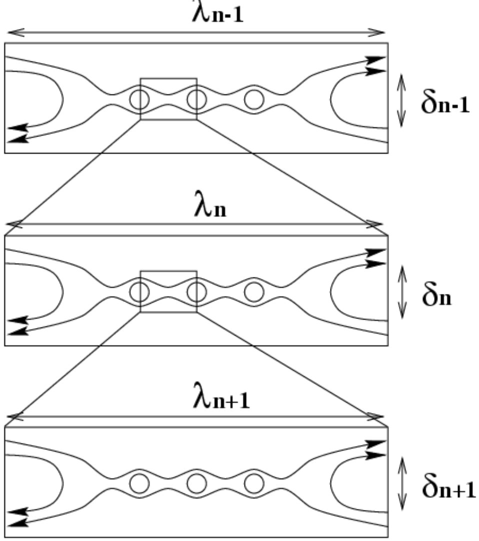
(either with anomalous resistivity or collisionless conductivity)

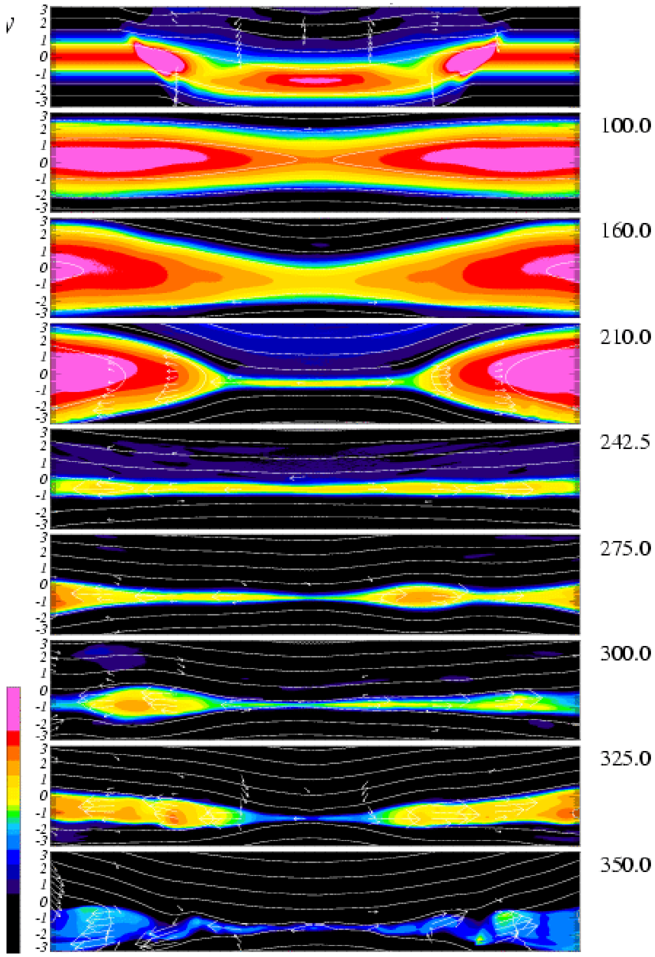
but they are of order of 1m or so for solar corona, which is much smaller than the size of solar flares (~ 10^9 cm)

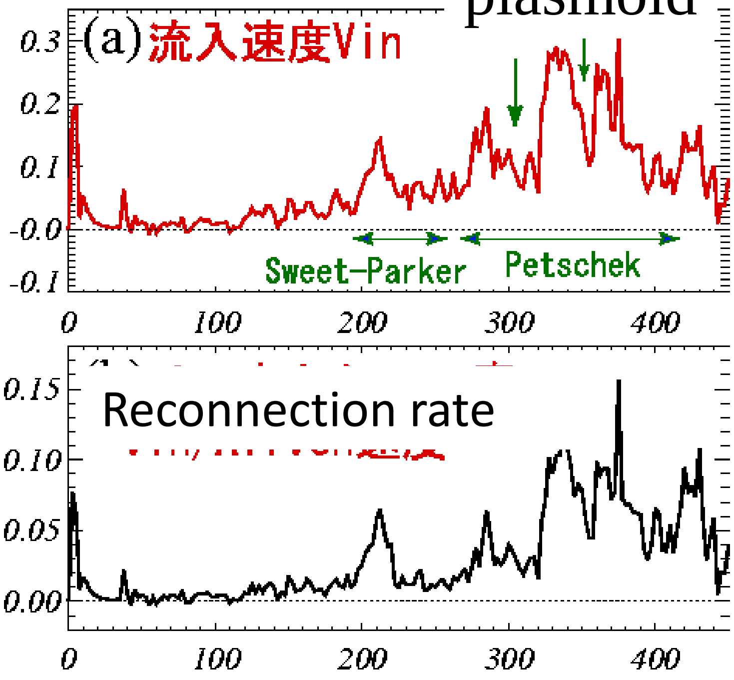
2. How can we reach such small scale to lead to anomalous resistivity or collisionless reconnection in solar flares ?

MHD simulations show plasmoid-induced reconnection in a fractual current sheet

(Tanuma et al. 2001, Shibata and Tanuma 2001)







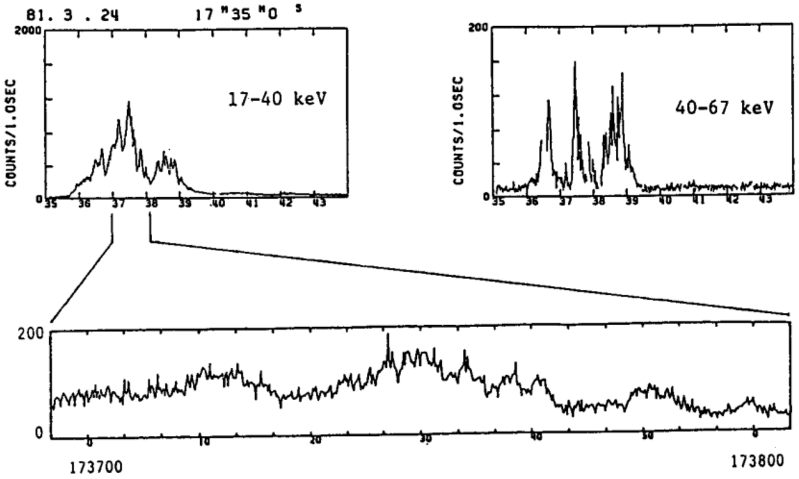
plasmoid

Reconnection rate

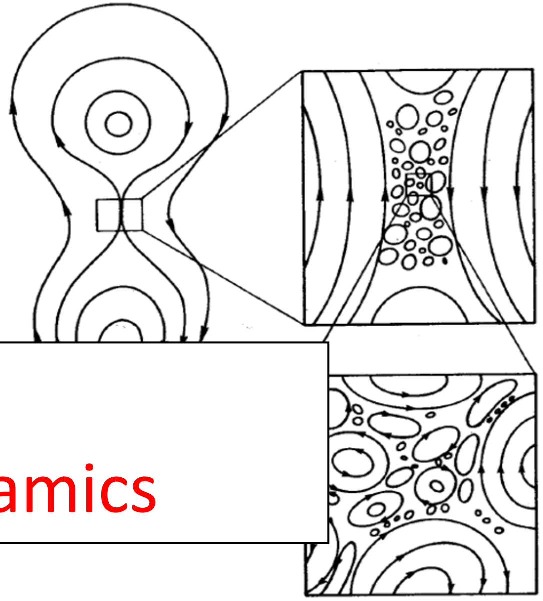
Vin/VA

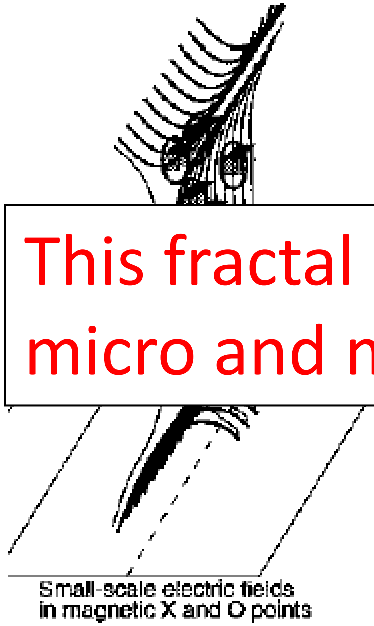
time

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



(Tajima-Shibata 1997)





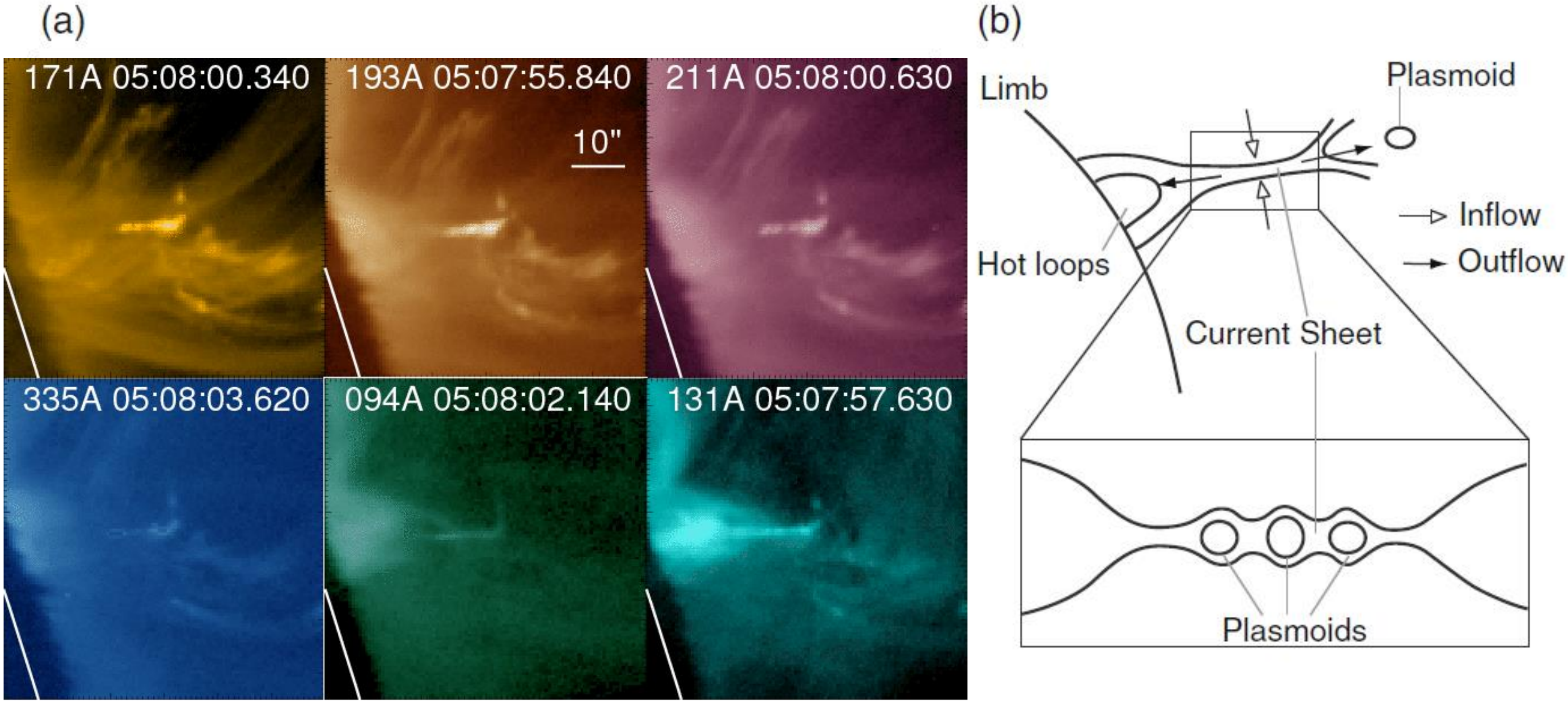
This fractal structure enable to connect
micro and macro scale structures and dynamics

Fractal current sheet

Aschwanden 2002

Benz and Aschwanden 1989
Lazarian and Vishniac 1998
Zelenyi 1996, Karlicky 2004 , Barta, Buechner et al. 2010

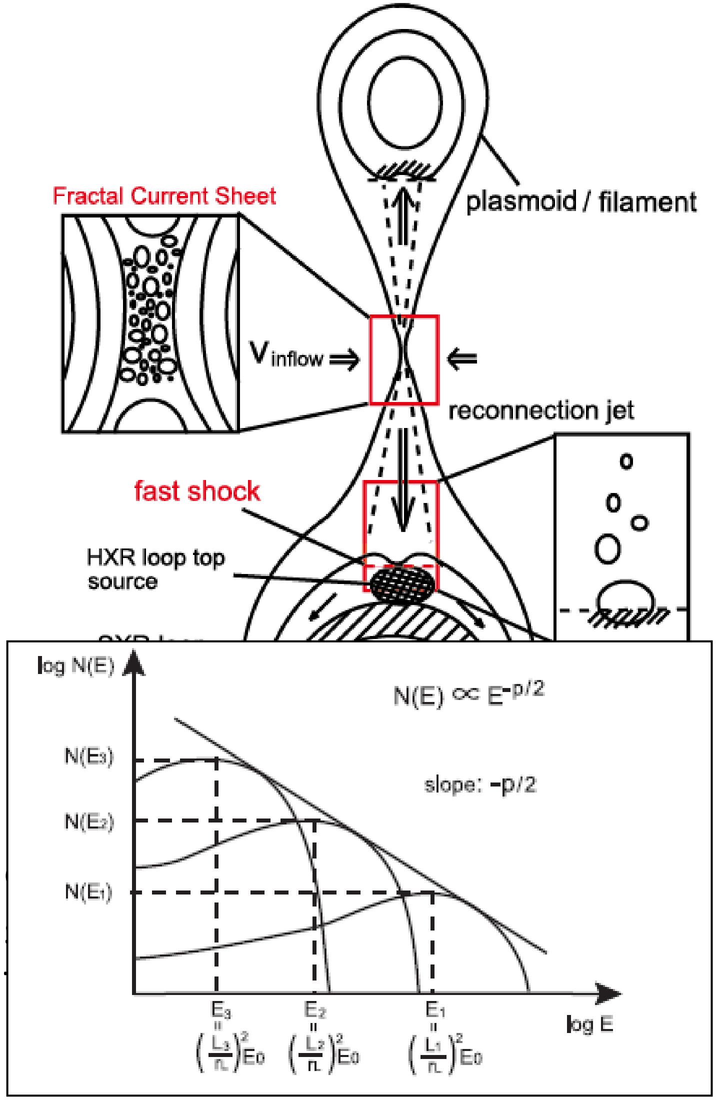
Observations of multiple plasmoids in a flare current sheet (Takasao+ 2012)

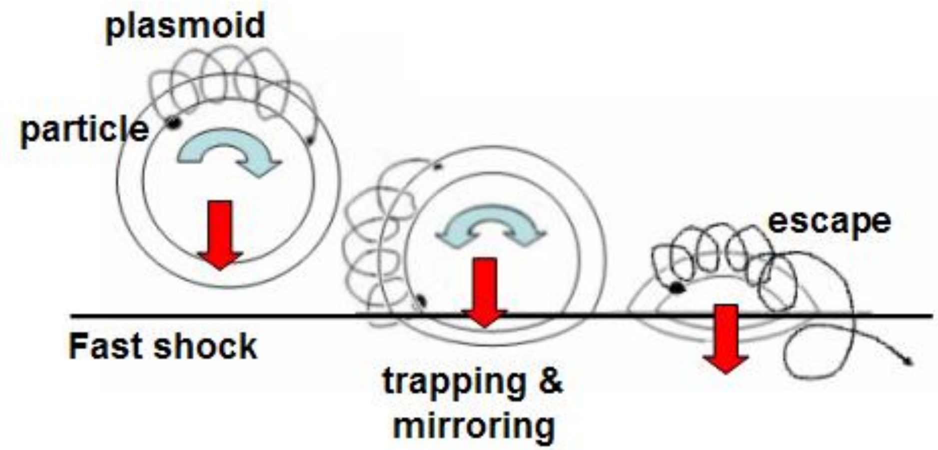


See also recent nice observational work by T. Gou et al. (2019)

Fractal Reconnection & Particle Acceleration by plasmoids colliding with fast shocks

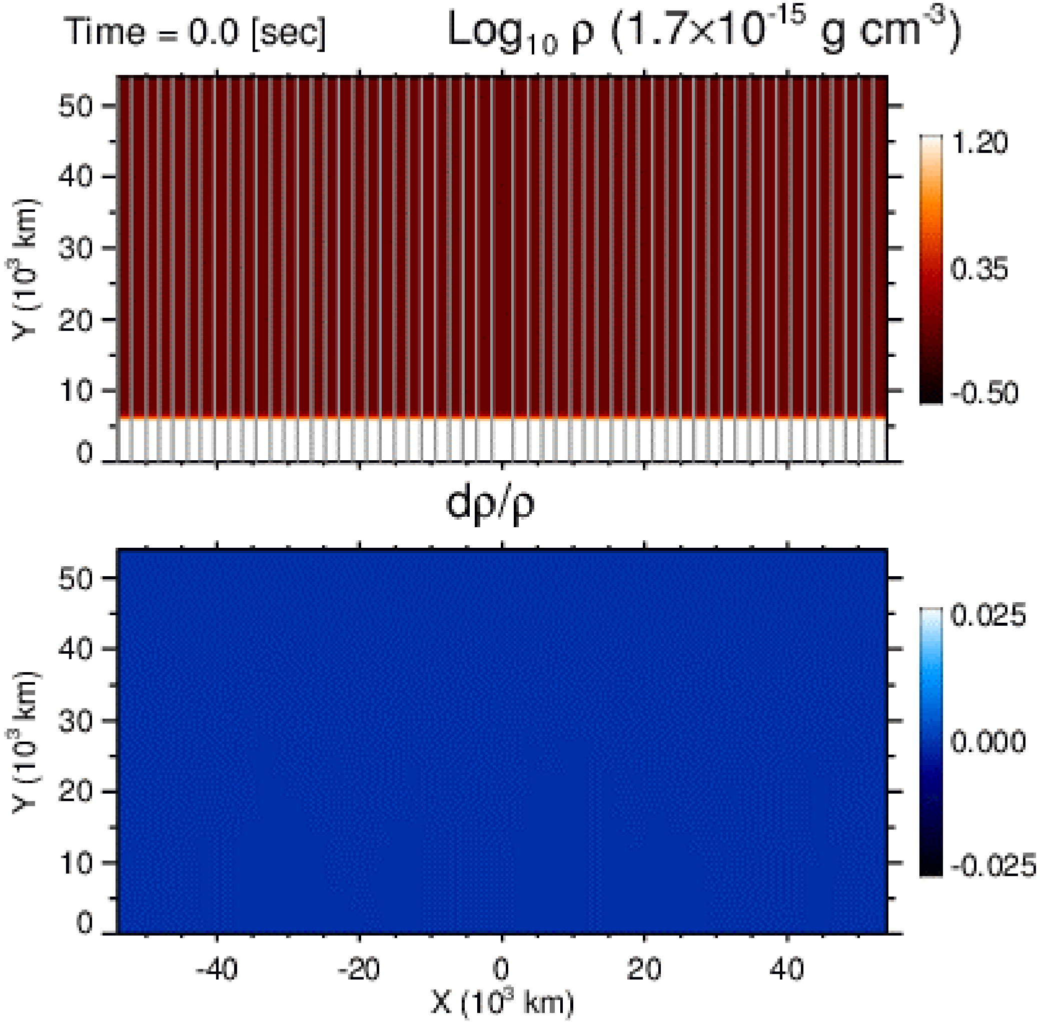
[Nishizuka & Shibata 2013, Phys. Rev. Let. . 110, 051101]

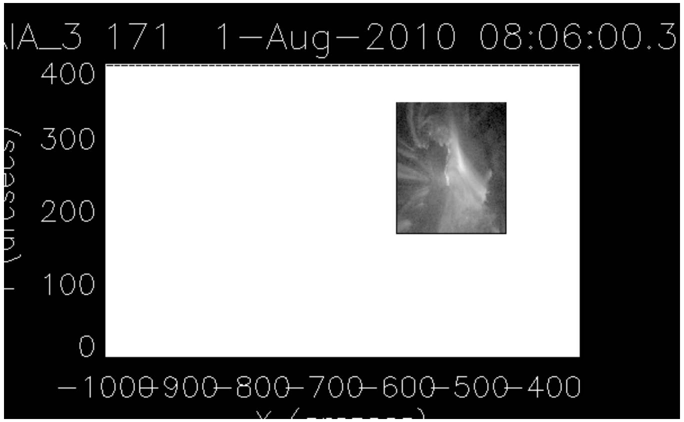




1) Particles are trapped in a plasmoid.
2) Multiple plasmoids collide with fast shock.
3) Particles are reflected due to magnetic mirror effect.
4) Reflection length becomes shorter and shorter.
5) Particles are accelerated by **Fermi process**, until reflection length becomes comparable to ion Larmor radius.

Quasi-periodic oscillations at the top of the flare loop (at the termination fast shock of the reconnection jet) (Takasao and Shibata, 2016)





Observations of quasi-periodic coronal waves from a flare (Liu+ 2011)

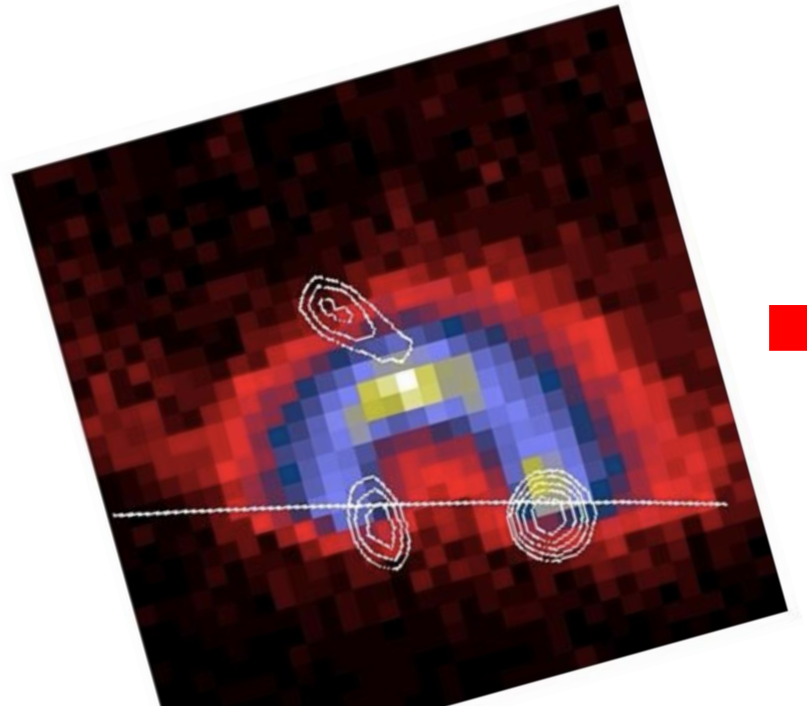
太陽フレアの諸現象に対する統一モデル

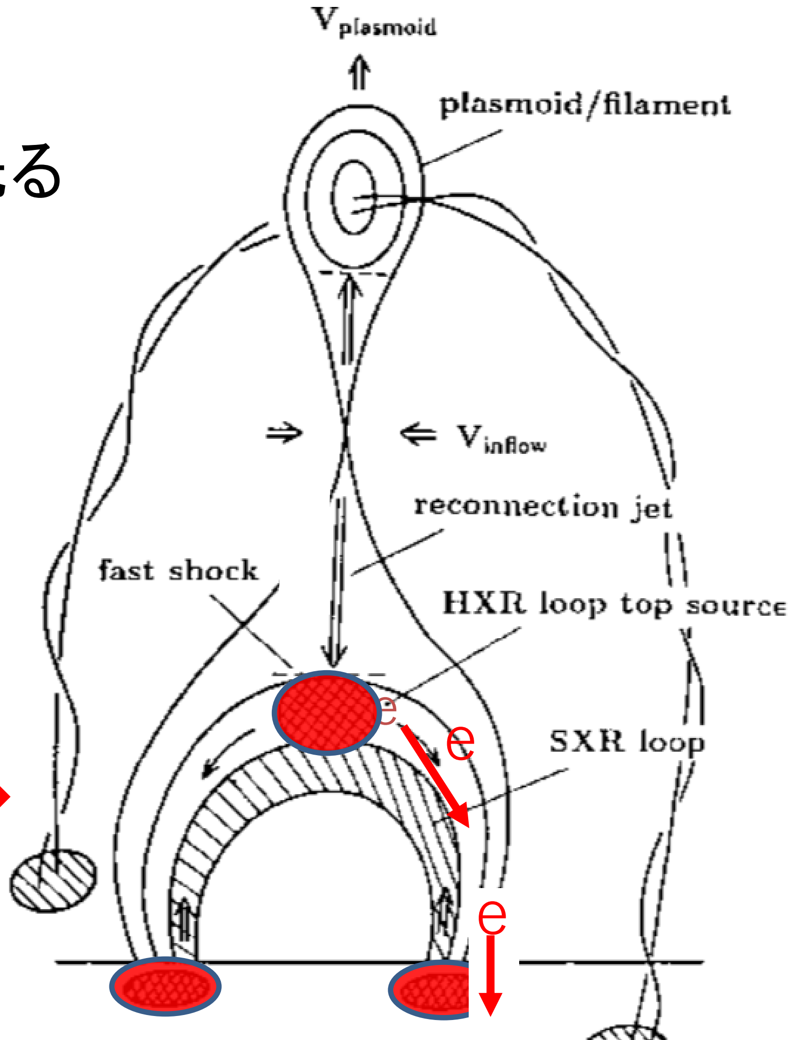
- コロナ中で加速された電子が

1.磁気ループ上の陽子と衝突し光る

2.彩層で陽子と衝突し光る

  - 彩層: コロナ下にある高密の大気

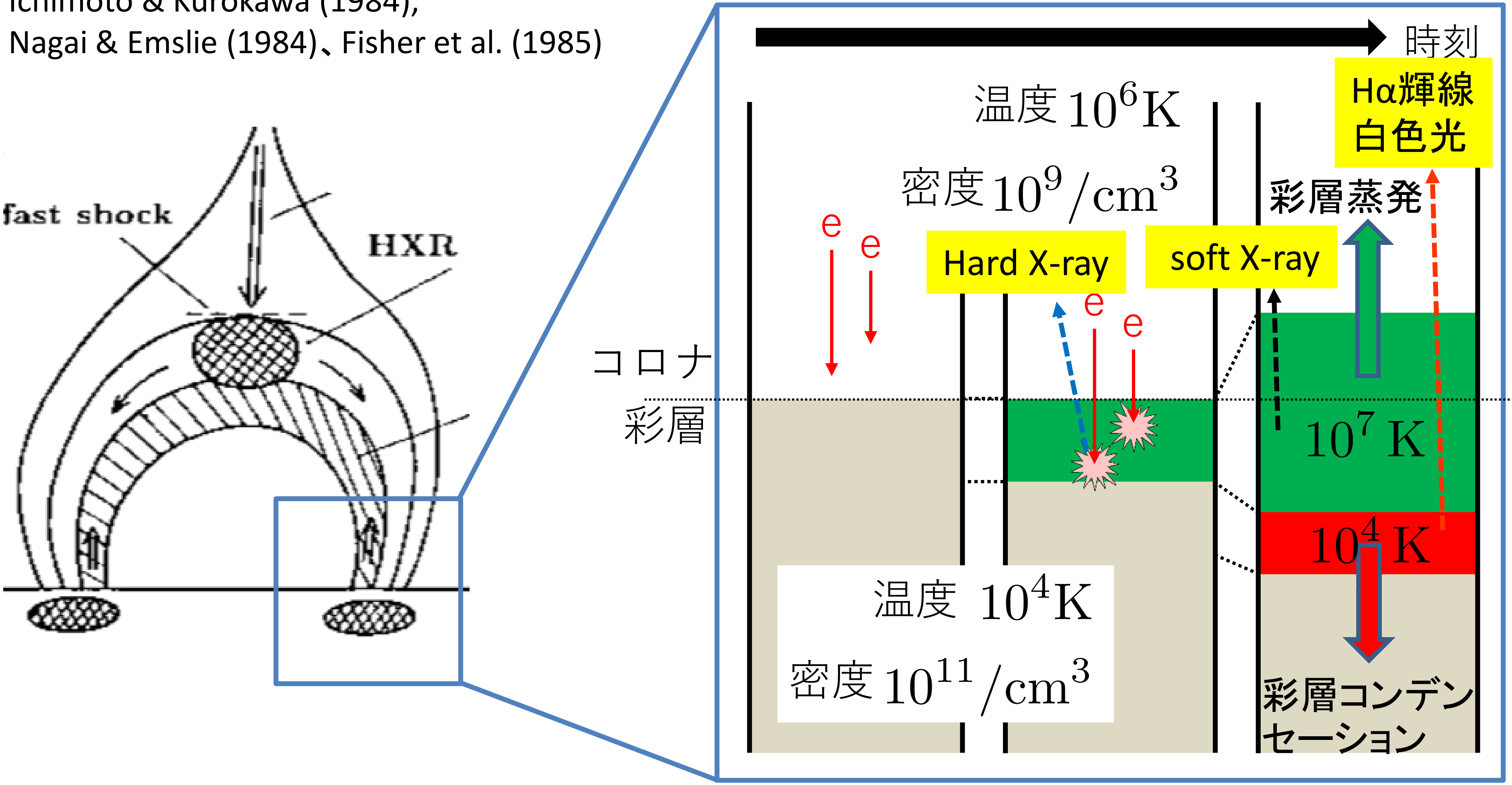




from Shibata (1995)

太陽フレアにおける
彩層蒸発、彩層コンデンセーション

Hirayama（1974）,
Ichimoto & Kurokawa (1984),
Nagai & Emslie (1984)、Fisher et al. (1985)



時刻

温度 10^6K

密度 $10^9/\mathrm{cm}^3$

コロナ

彩層

Hard X-ray

soft X-ray

Hα輝線
白色光

彩層蒸発

10^7 K

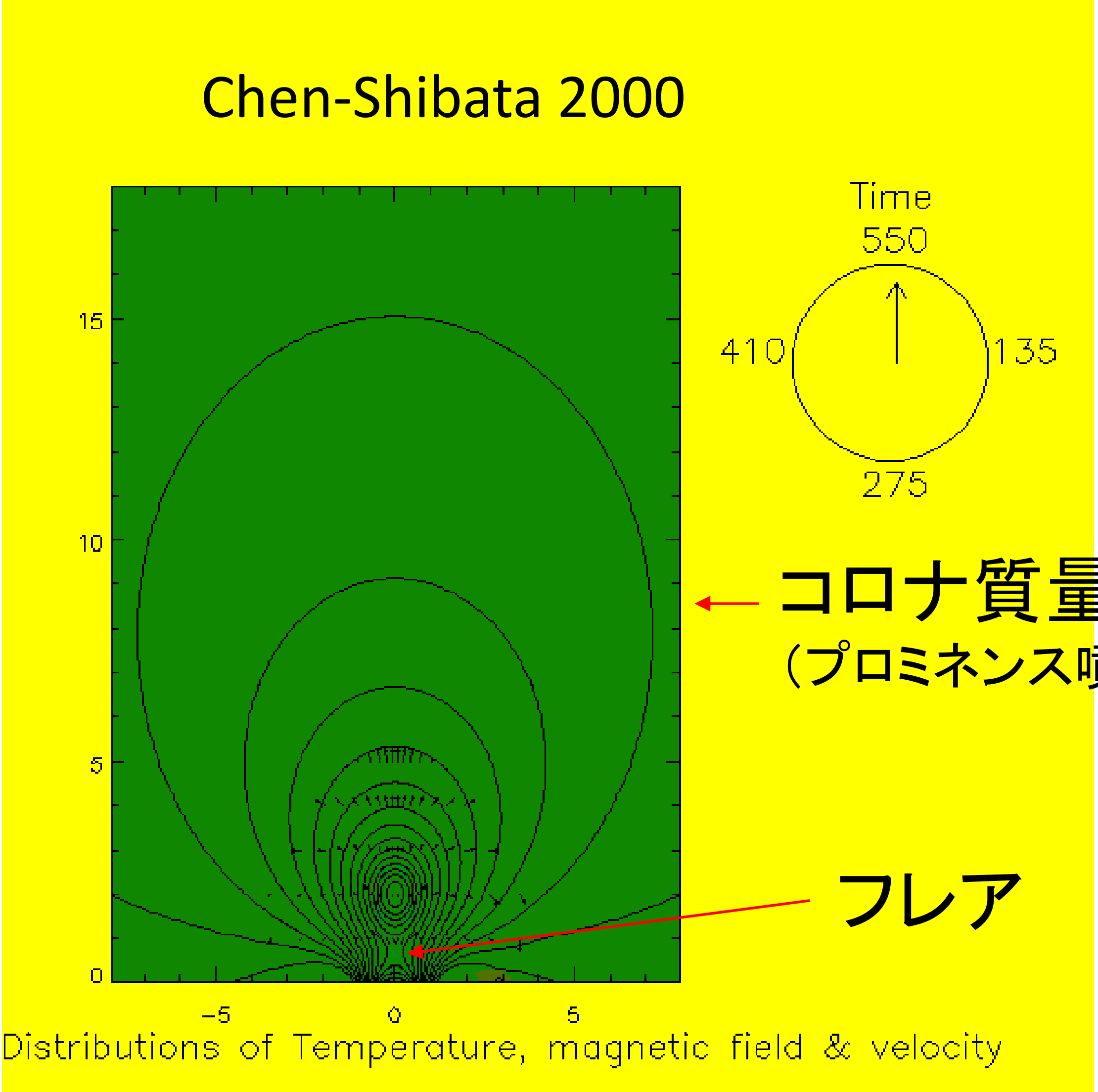
10^4 K

温度 10^4K

密度 $10^{11}/\mathrm{cm}^3$

彩層コンデンセーション

フレアーコロナ質量放出の 2次元電磁流体シミュレーション



Chen-Shibata 2000

コロナ質量放出（CME）
（プロミネンス噴出）

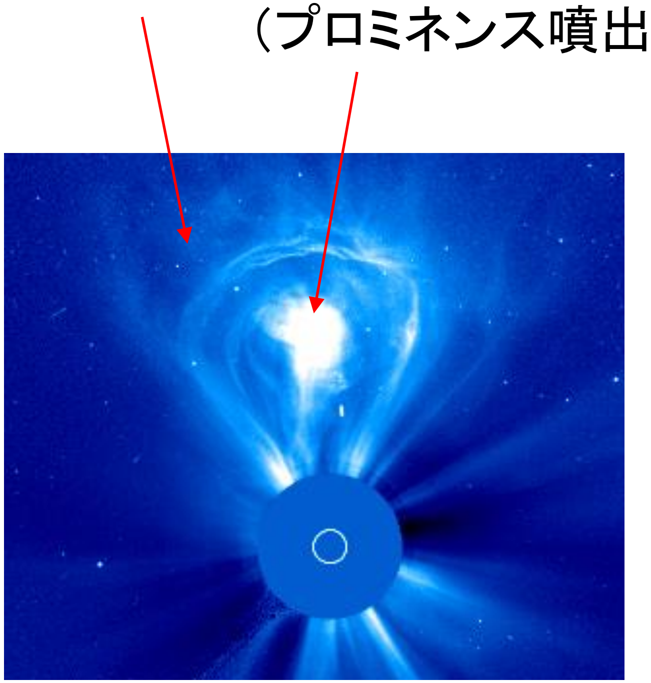
フレア

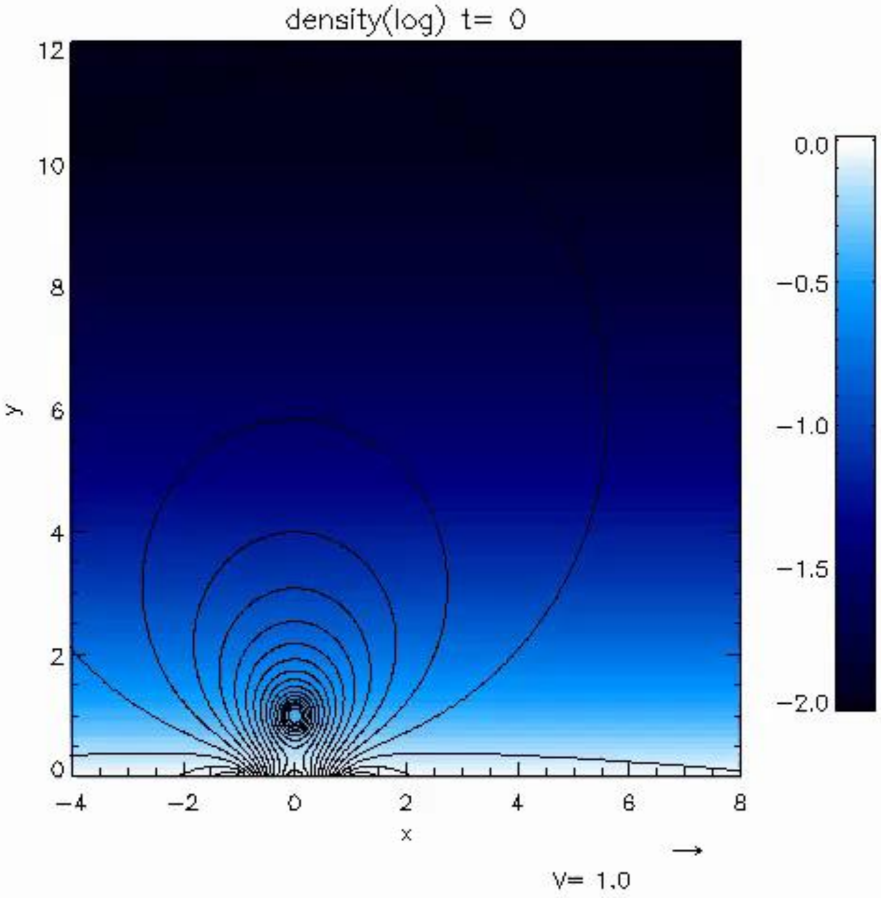
フレア・コロナ質量放出のモデル
（2次元電磁流体シミュレーション）

(Shiota et al. 2005)

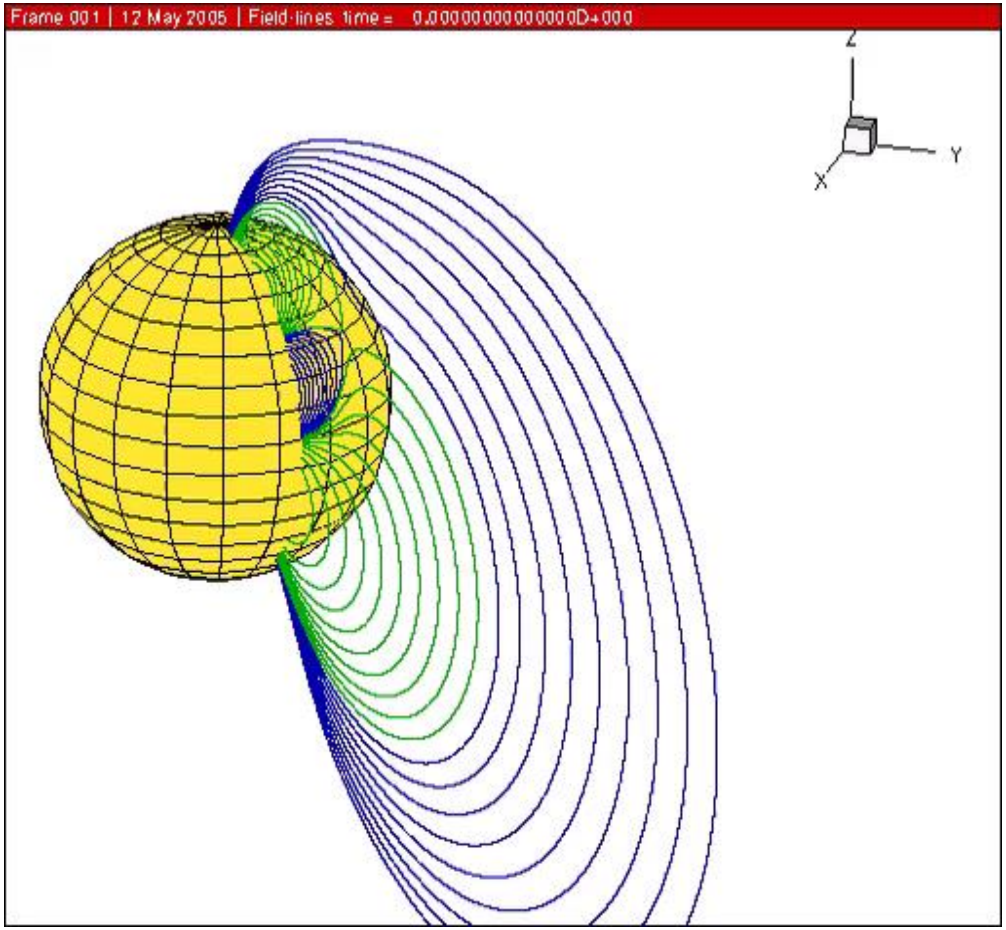
コロナ質量放出（CME）

（プロミネンス噴出）

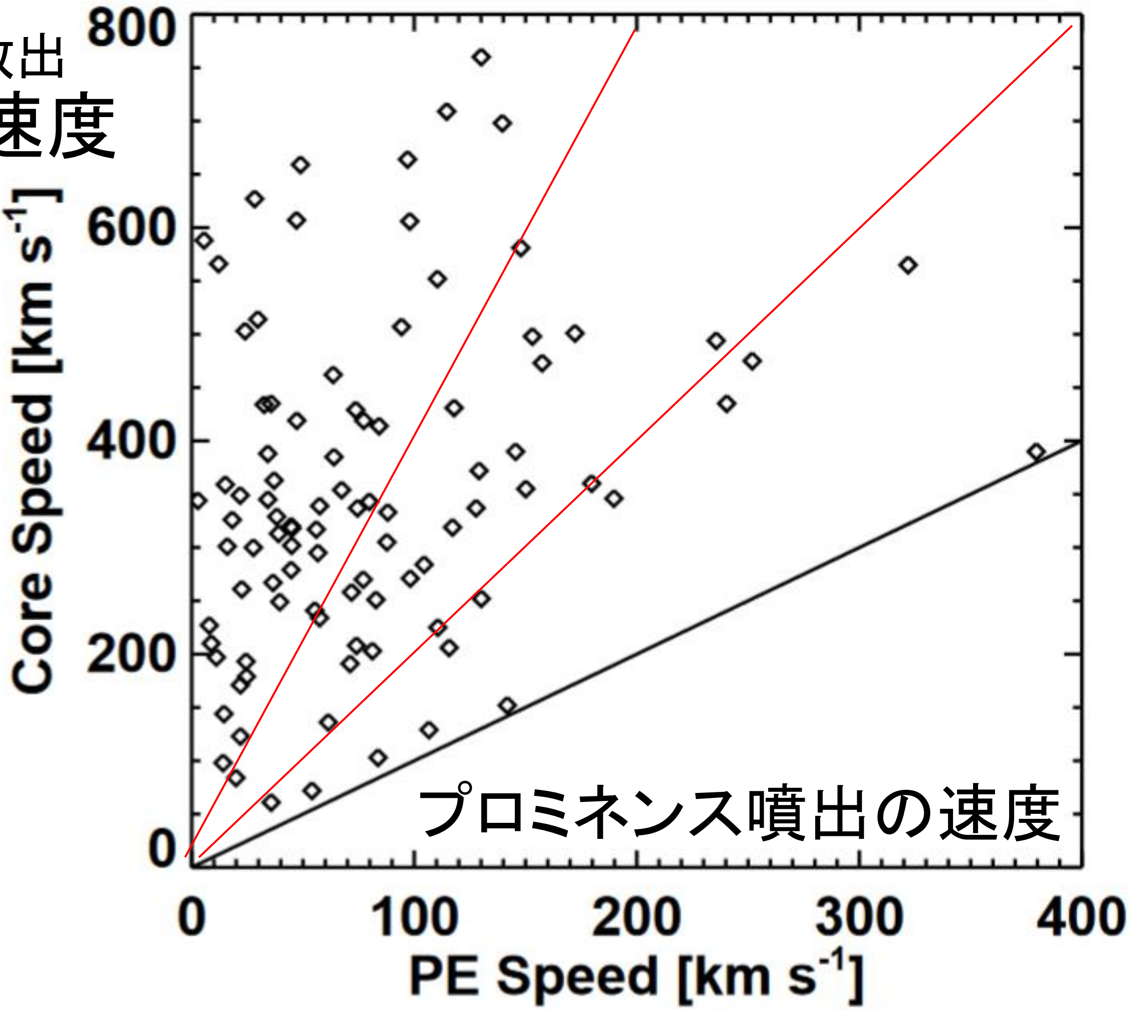




コロナ質量放出の3次元電磁流体シミュレーション(Antiochos, DeVore, Klimchuk 1999)



コロナ質量放出
CME 速度



プロミネンス噴出の速度

CME speed
（core speed)
はプロミネンス
噴出の速度以上、
概ね倍以上

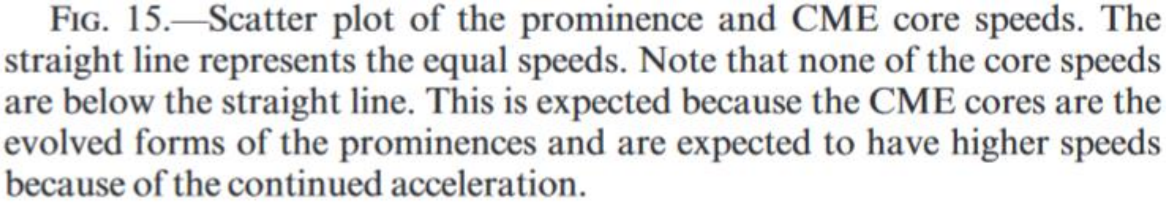
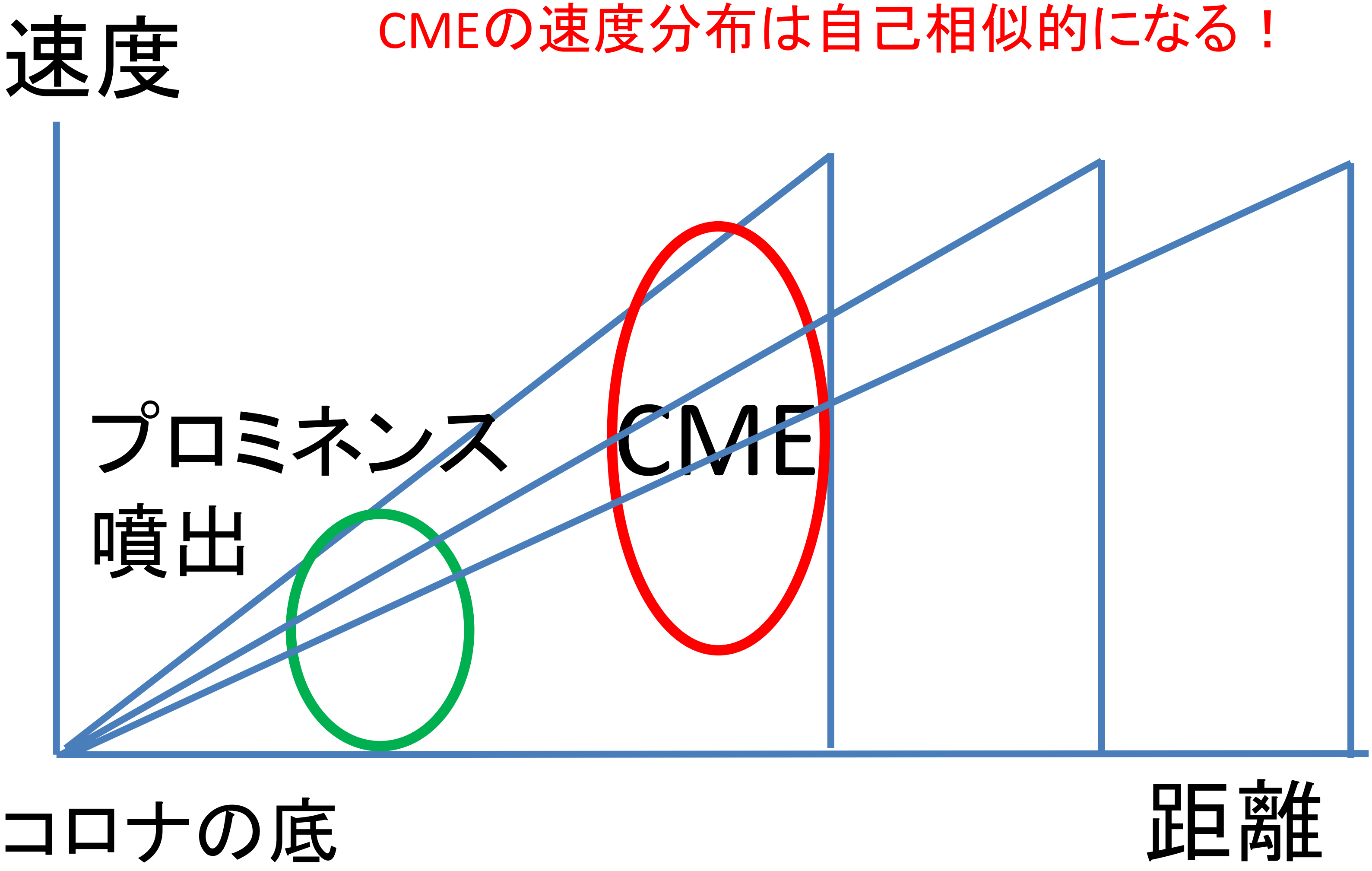


FIG. 15.—Scatter plot of the prominence and CME core speeds. The straight line represents the equal speeds. Note that none of the core speeds are below the straight line. This is expected because the CME cores are the evolved forms of the prominences and are expected to have higher speeds because of the continued acceleration.

Gopalswamy et al. 2003 ApJ

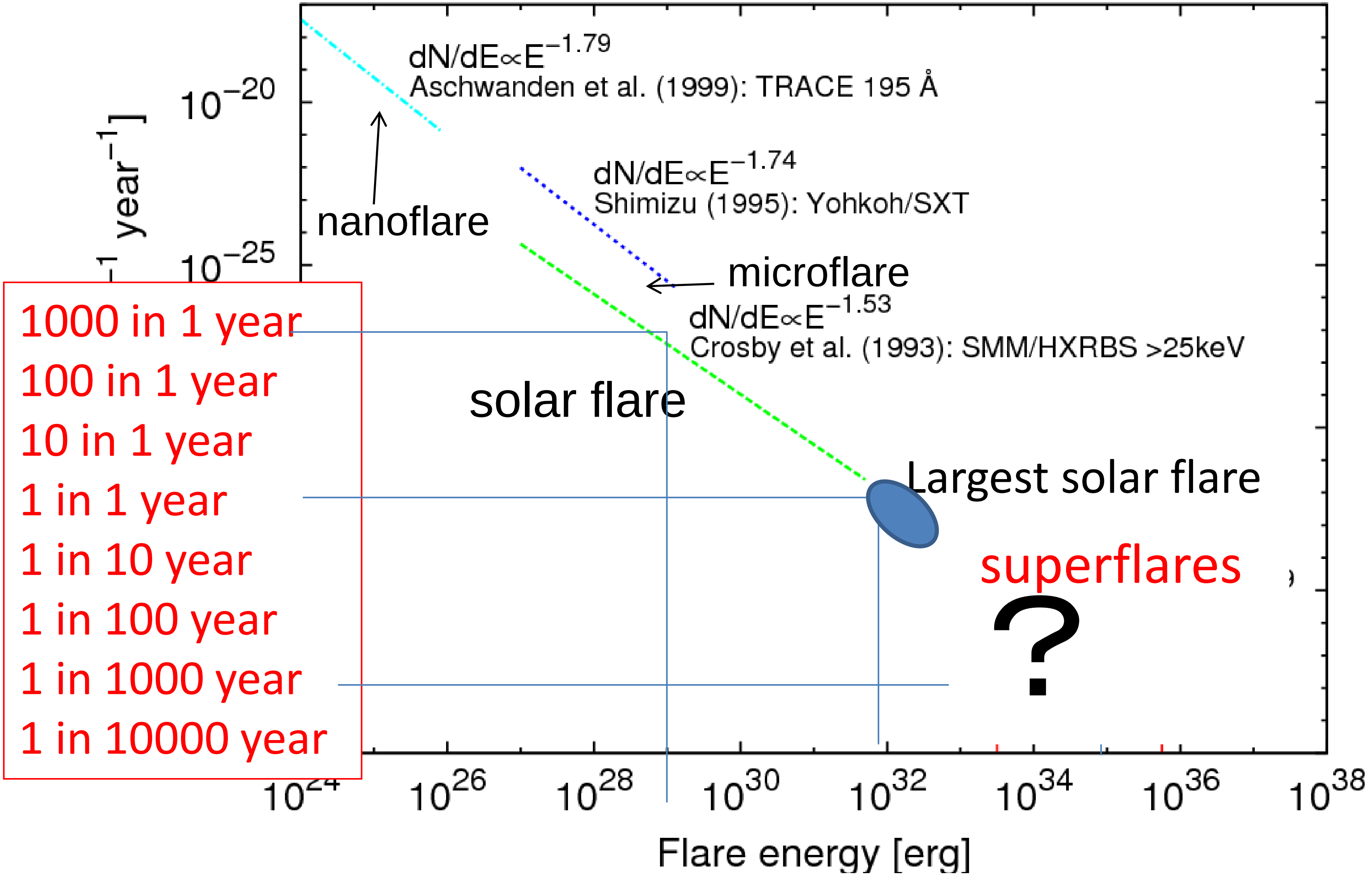
コロナ質量放出（CME）速度とプロミネンス噴出の速度の関係

CMEの速度分布は自己相似的になる！



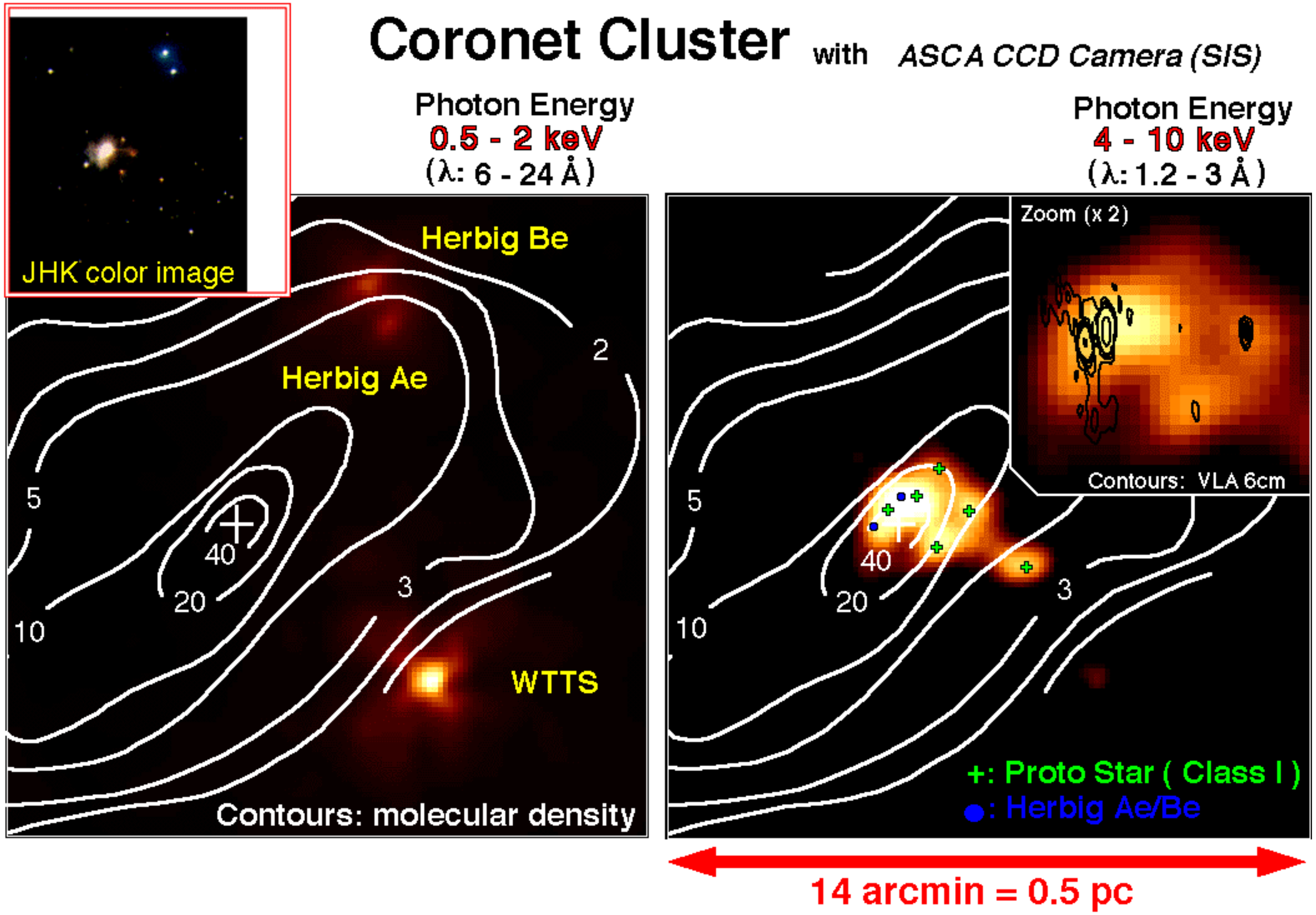
太陽から恒星へ
Superflares on young stars, solar type stars, M dwarfs

statistics of occurrence frequency of solar flares, microflares, nanoflares



原始星フレア

（X線／あすか衛星：小山ら1995）



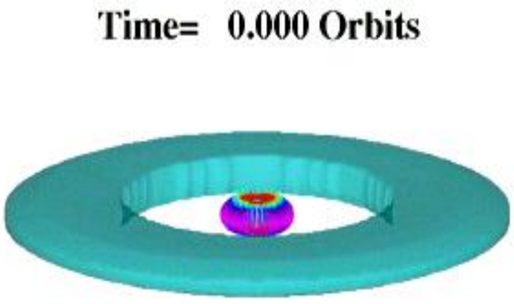
温度～

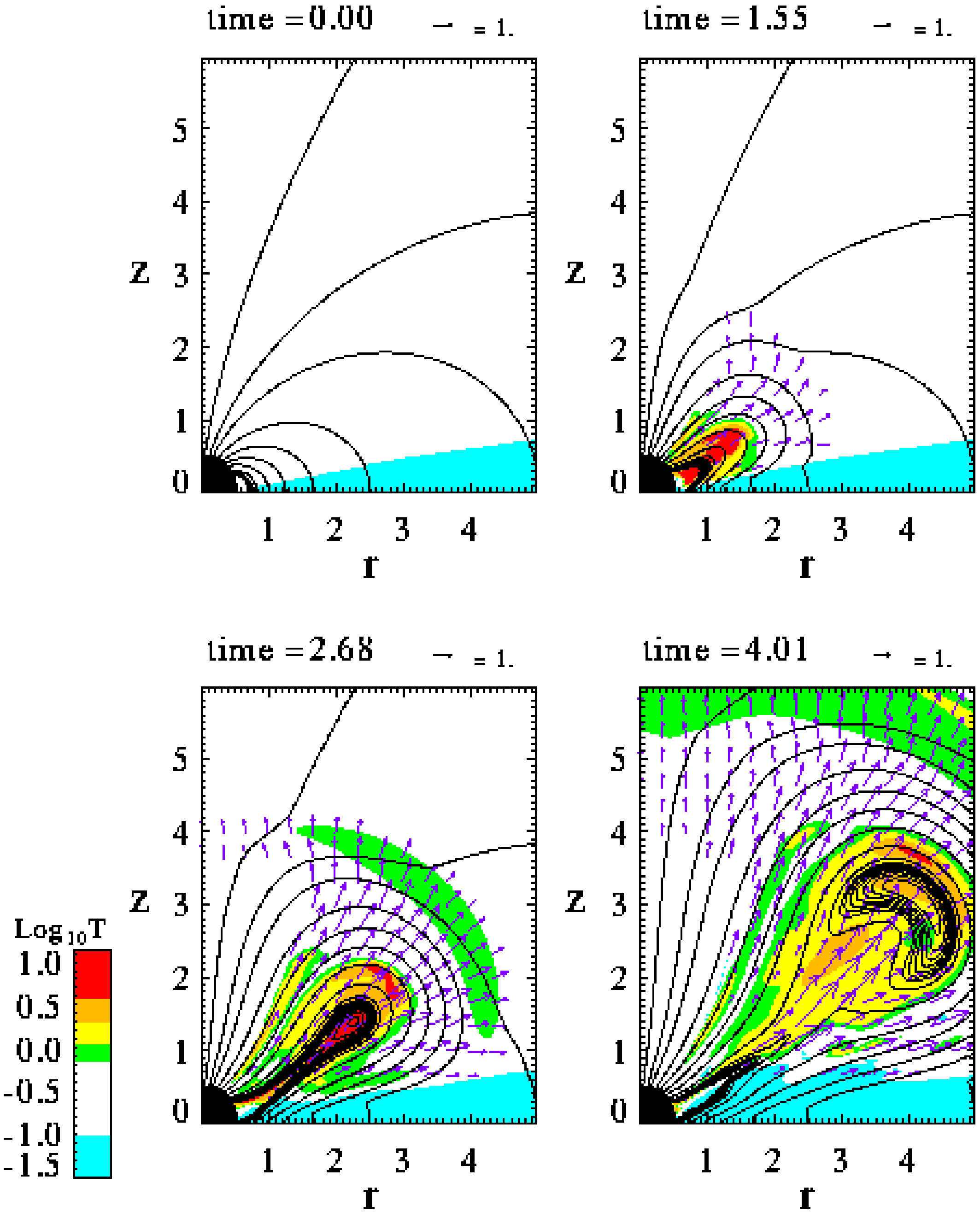
１億度

太陽フレアの
エネル
ギーの1
万倍以上

原始星フレアのモデル

（林、松元、
柴田　1996）

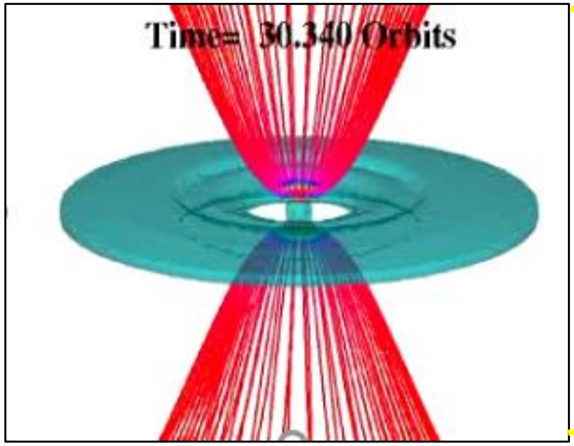


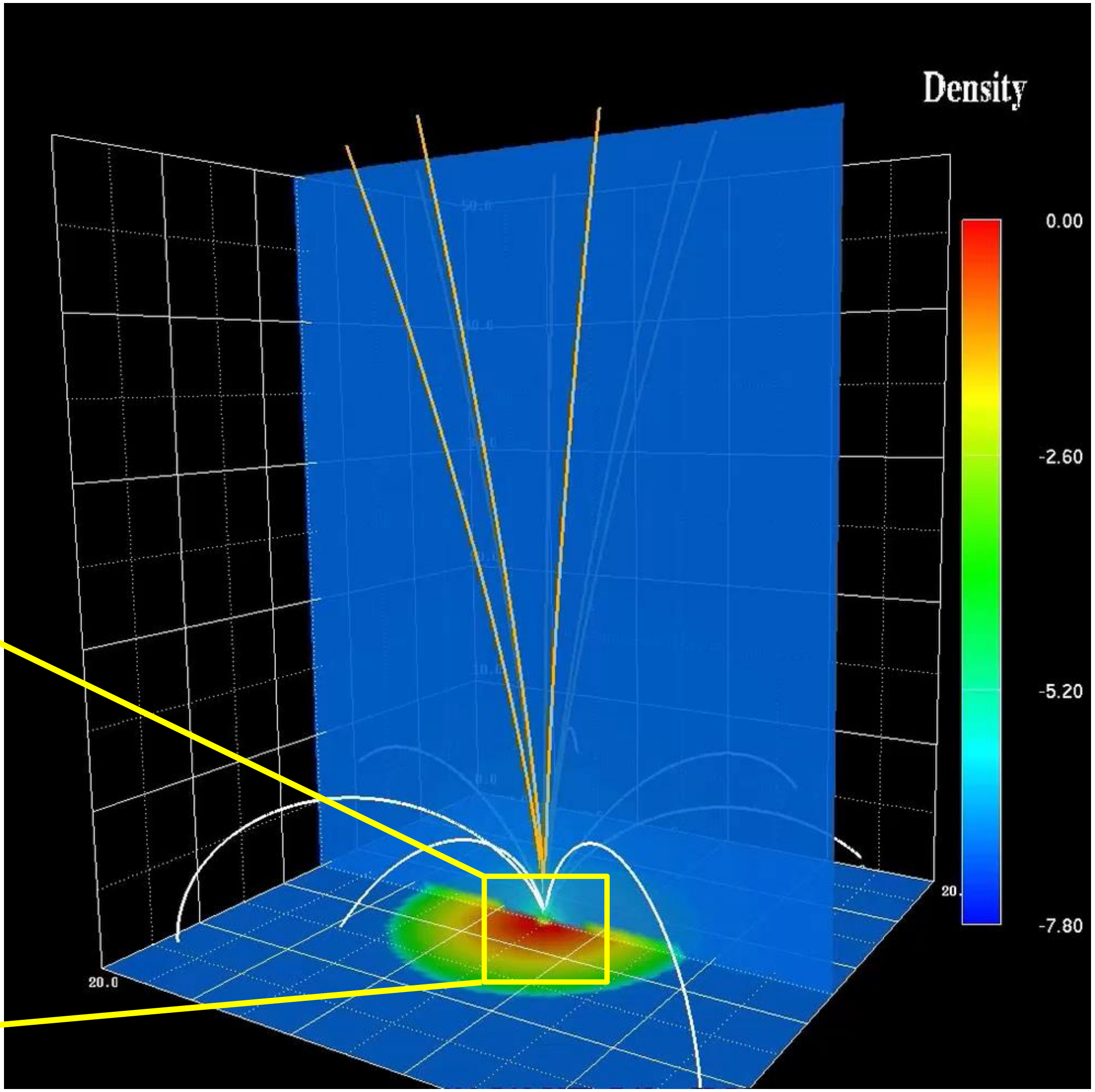


Extension of Hayashi+ (1996) model (Uehara et al. 2005 unpublished)

MHD model of protostellar flare/jet

（Hayashi, Shbata, Matsumoto 1996)





~ Magnetic tower jet (Lynden-Bell 2003)

恒星フレアー太陽フレアの統一モデル:

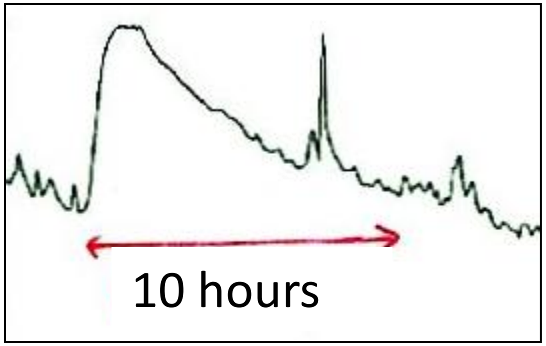
恒星フレアのエミッションメジャー（EM)-温度スケーリング則

Shibata and Yokoyama 1999, 2002

X-ray Observations of Stellar Flares

Solar Flare

X-ray
Intensity
(3-24keV)

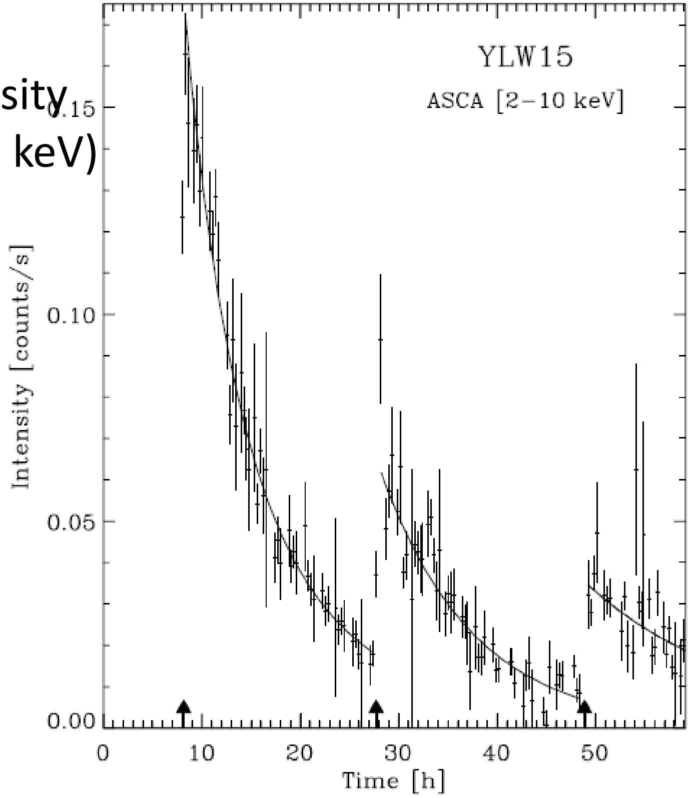


10 hours

time

Protostellar Flare of YLW15
(Monmerle,Tsuboi + 2000)

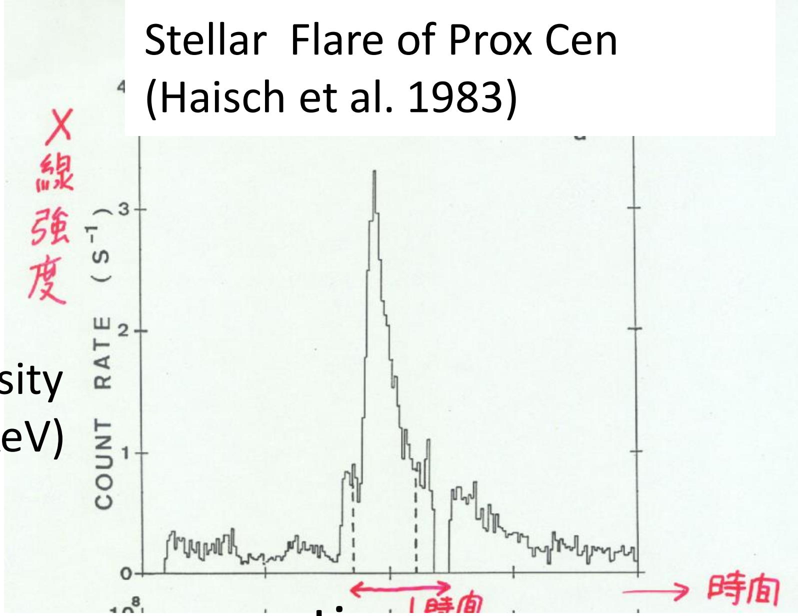
X-ray
Intensity
(2-10 keV)



time

Stellar Flare of Prox Cen
(Haisch et al. 1983)

X-ray
Intensity
(~ 1 keV)



time

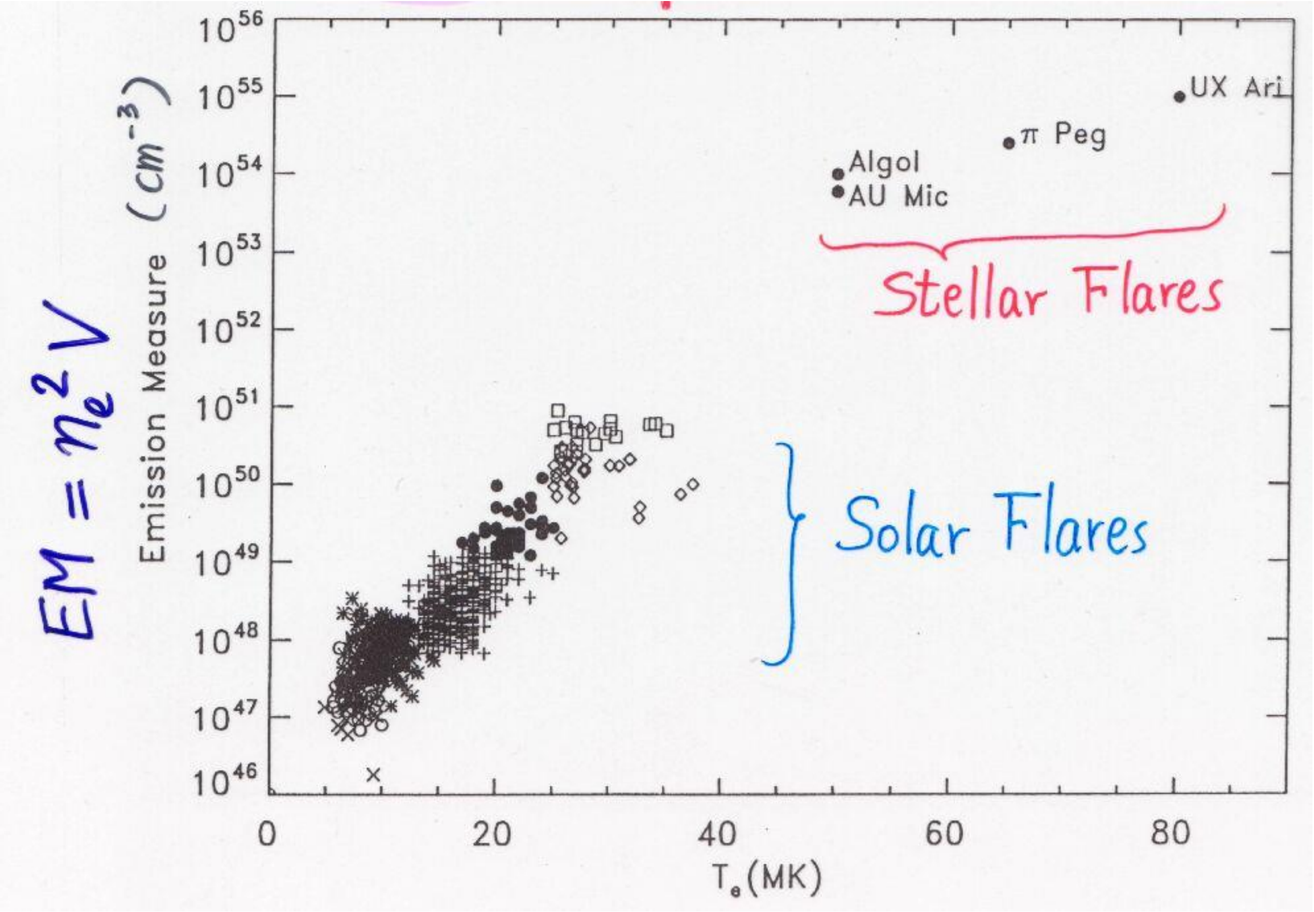
Can stellar flares be explained by magnetic reconnection ?

- Yes !
- Indirect evidence has been found in empirical correlation between Emission Measure ($EM = n^2 L^3$) and Temperature from soft X-ray obs (Shibata and Yokoyama 1999, 2002)

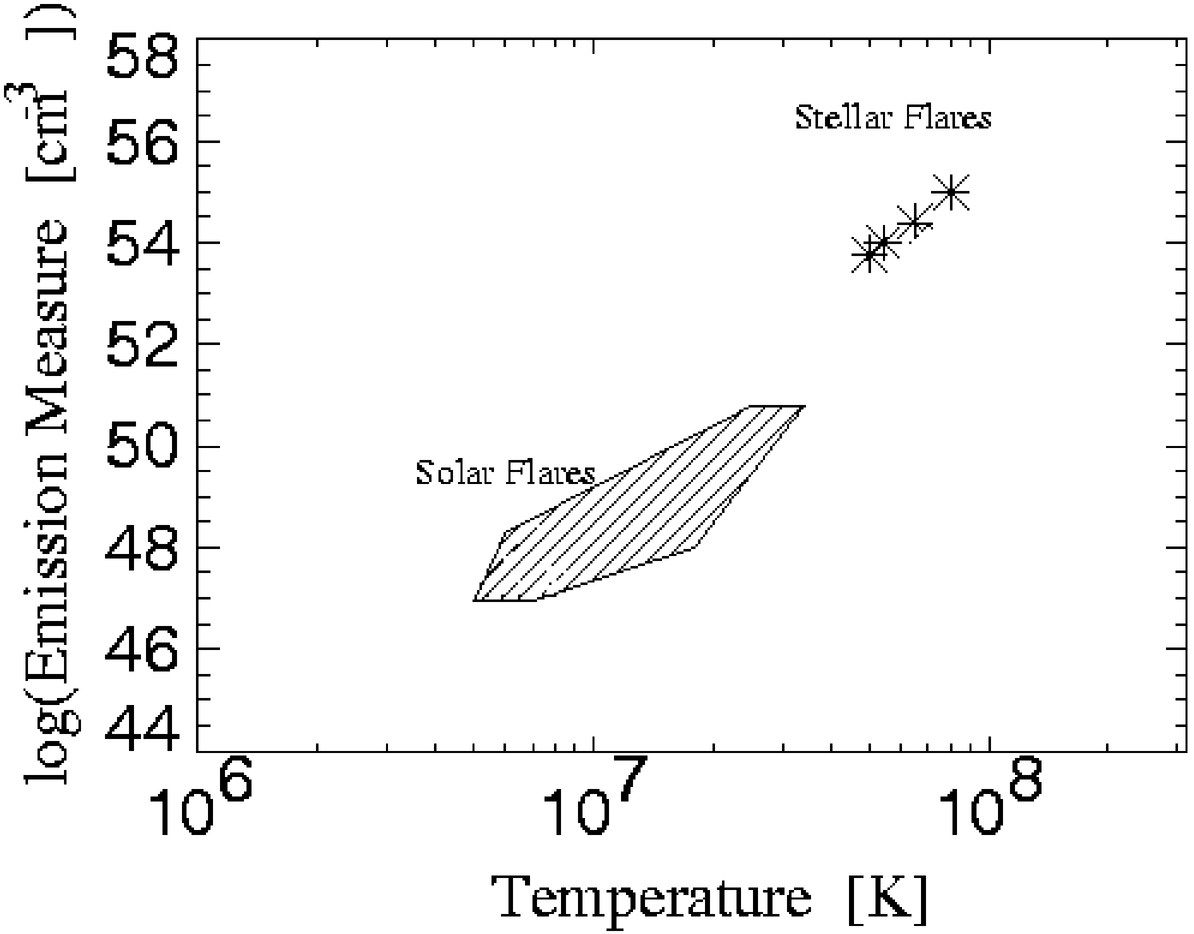
Emission Measure（EM＝n^2V）of Solar and Stellar Flares increases with Temperature（T）

（n：electron density、V： volume）(Feldman et al. 1995)

soft X-ray observations



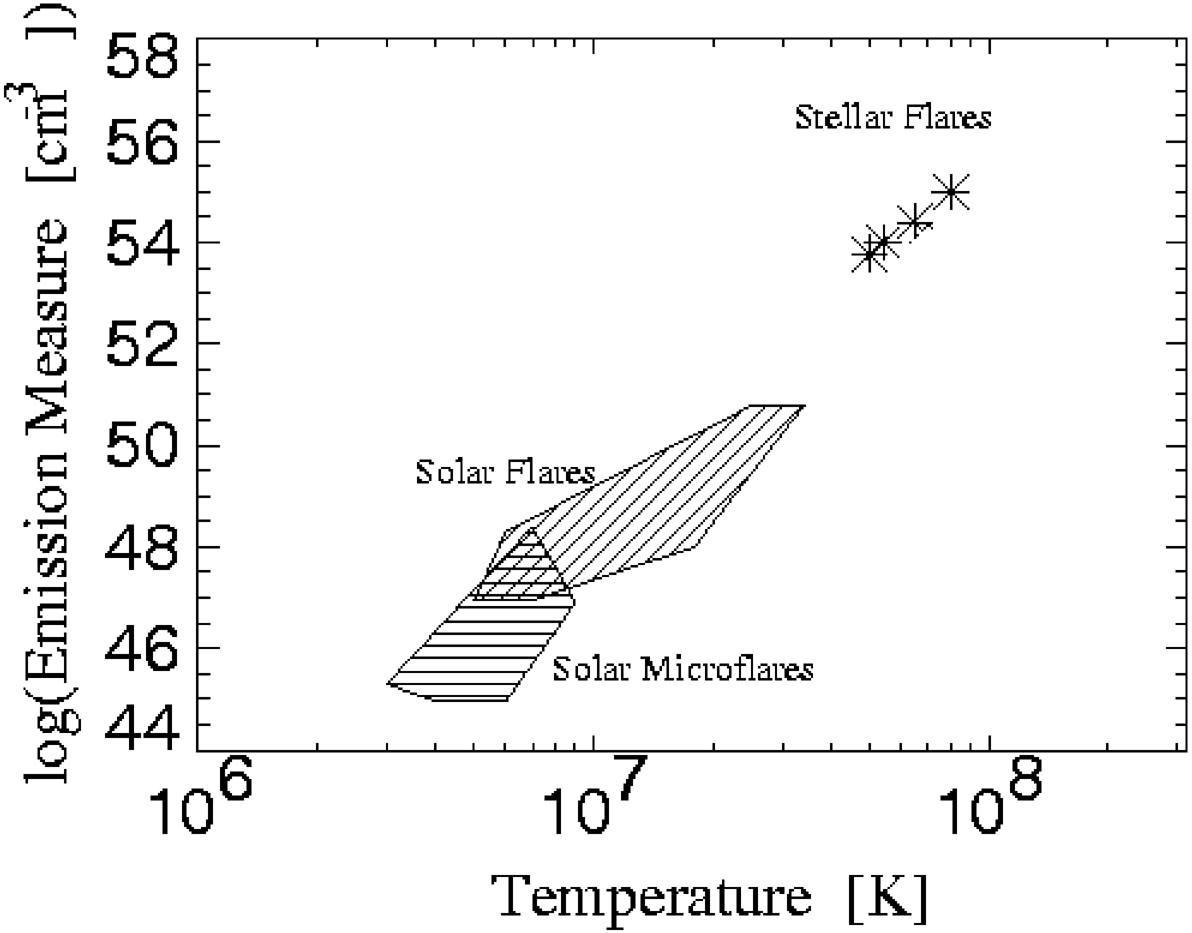
EM－T relation of Solar and Stellar Flares



Log-log plot of Feldman etal (1995)'s figure

Shibata and Yokoyama, 1999, 2002

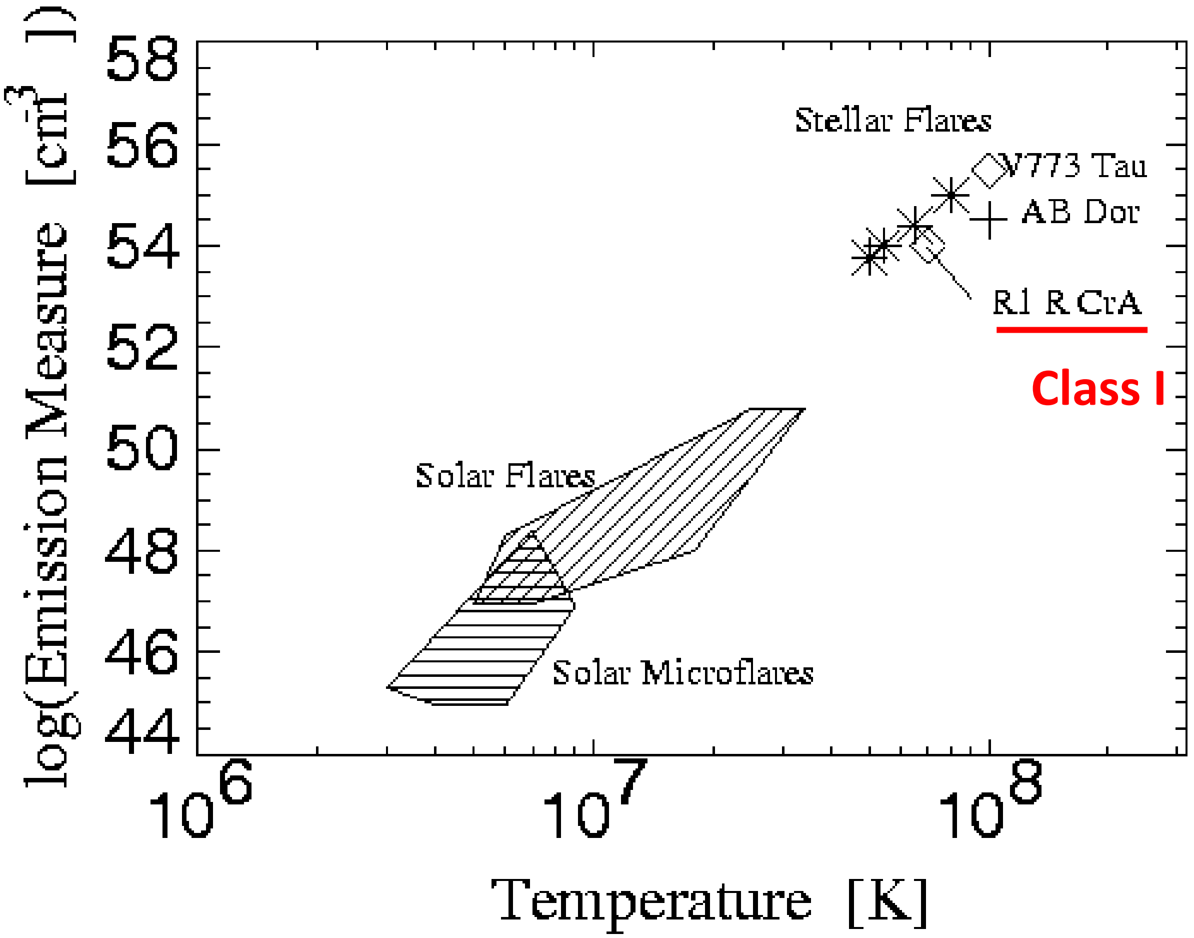
EM－T relation of Solar and Stellar Flares



microflare
(Shimizu 1995)

Shibata and Yokoyama, 1999, 2002

young-star and protostellar flares



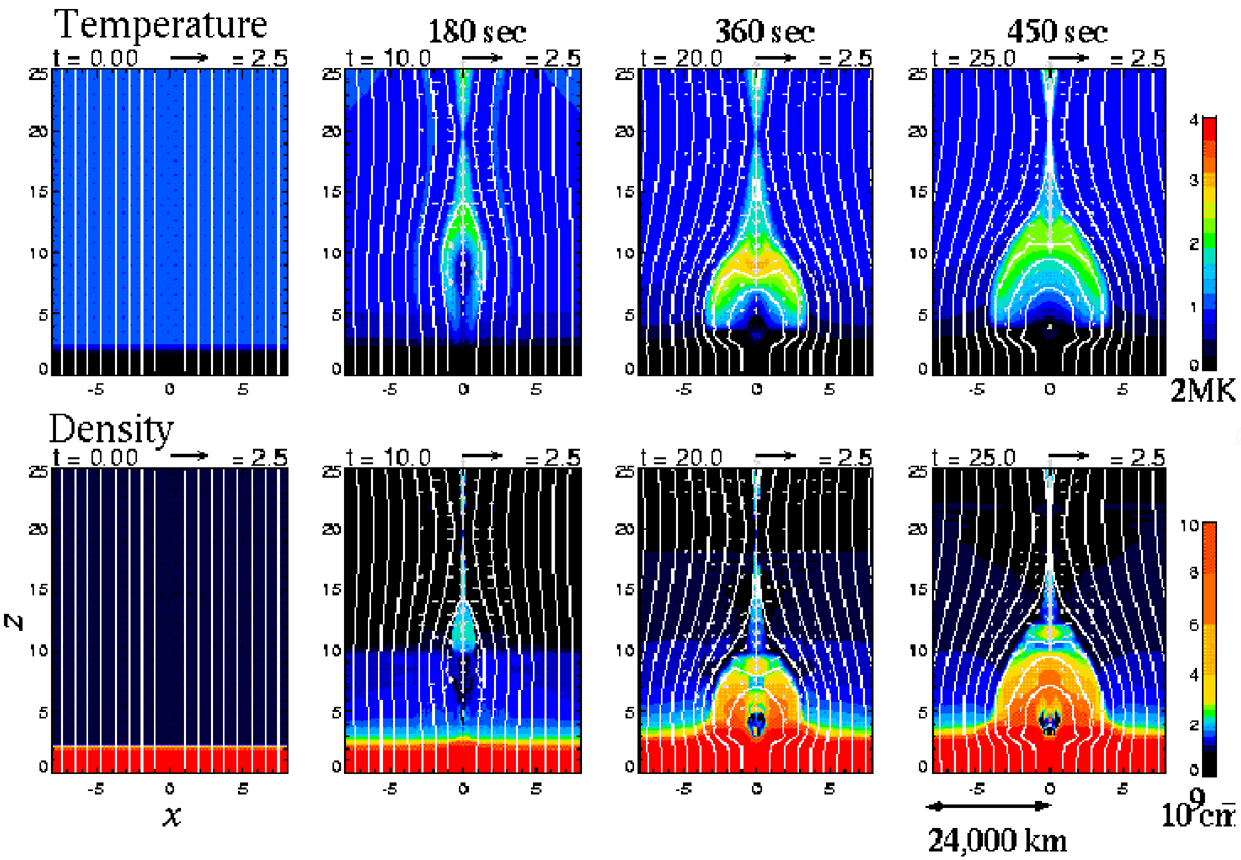
Tsuboi (1998)
Pallavicini (2001)

Koyama (1996)

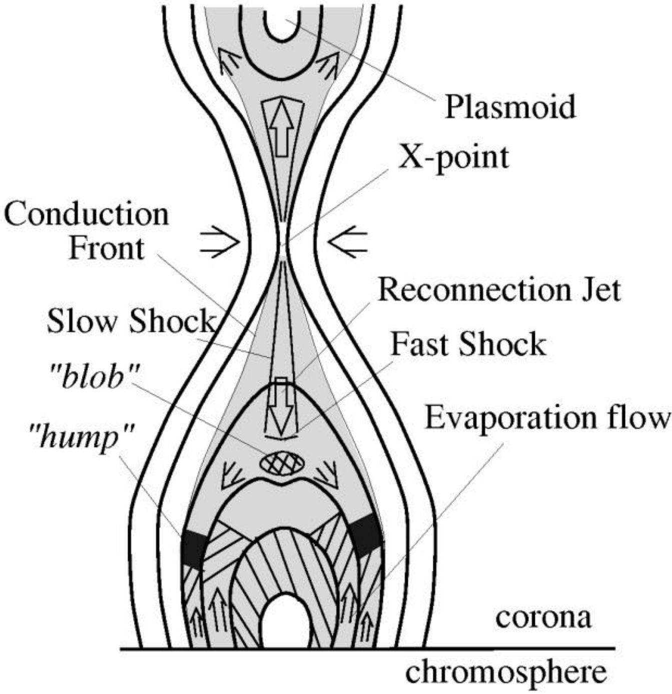
Class I protostar

Shibata and Yokoyama (1999) ApJ 526, L49

2D MHD Simulation of Reconnection with Heat Conduction and Chromospheric Evaporation



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



Yokoyama and Shibata (1998) ApJ 494, L113

------------------------------ (2001) ApJ 549, 1160

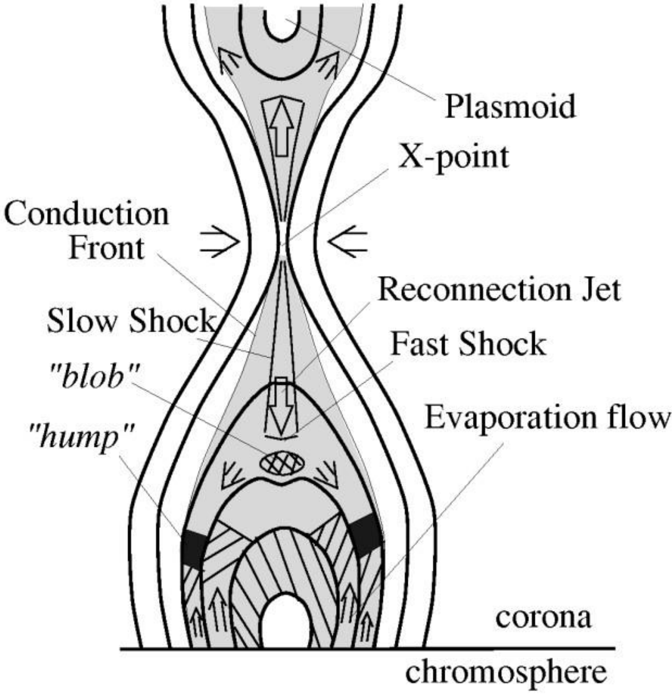
What determines Flare Temperature ?

- Reconnection heating＝conduction cooling （Yokoyama and Shibata 1998)

(radiative cooling time is much longer)

$$B^2 V_A / 4\pi = \kappa T^{7/2} / 2L$$

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



Flare Emission Measure

(Shibata and Yokoyama 1999)

- Emission Measure

$$EM = n^2 L^3$$

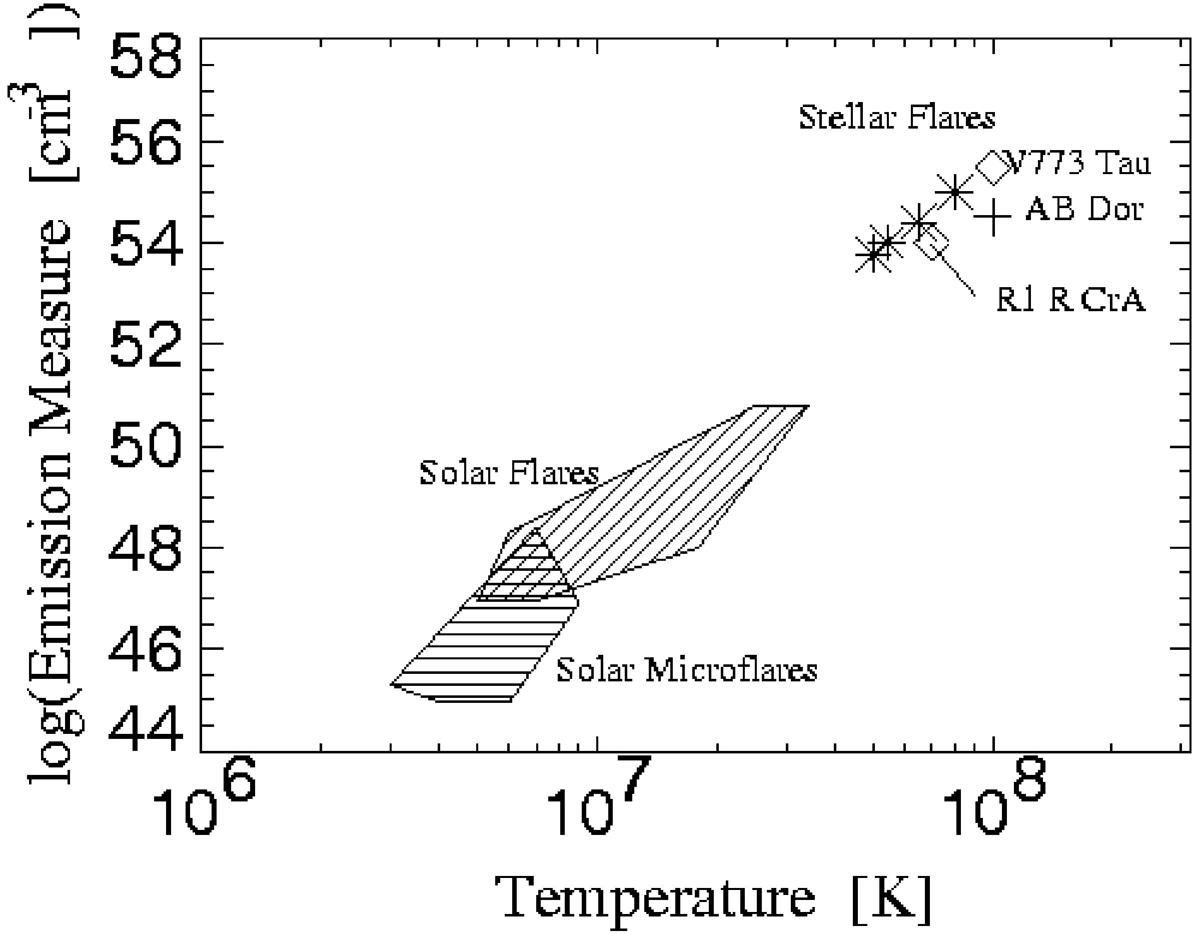
- Dynamical equilibrium (evaporated plasma must be confined in a loop)

$$2nkT = B^2 / 8\pi$$

- Using Flare Temperature scaling law, we have

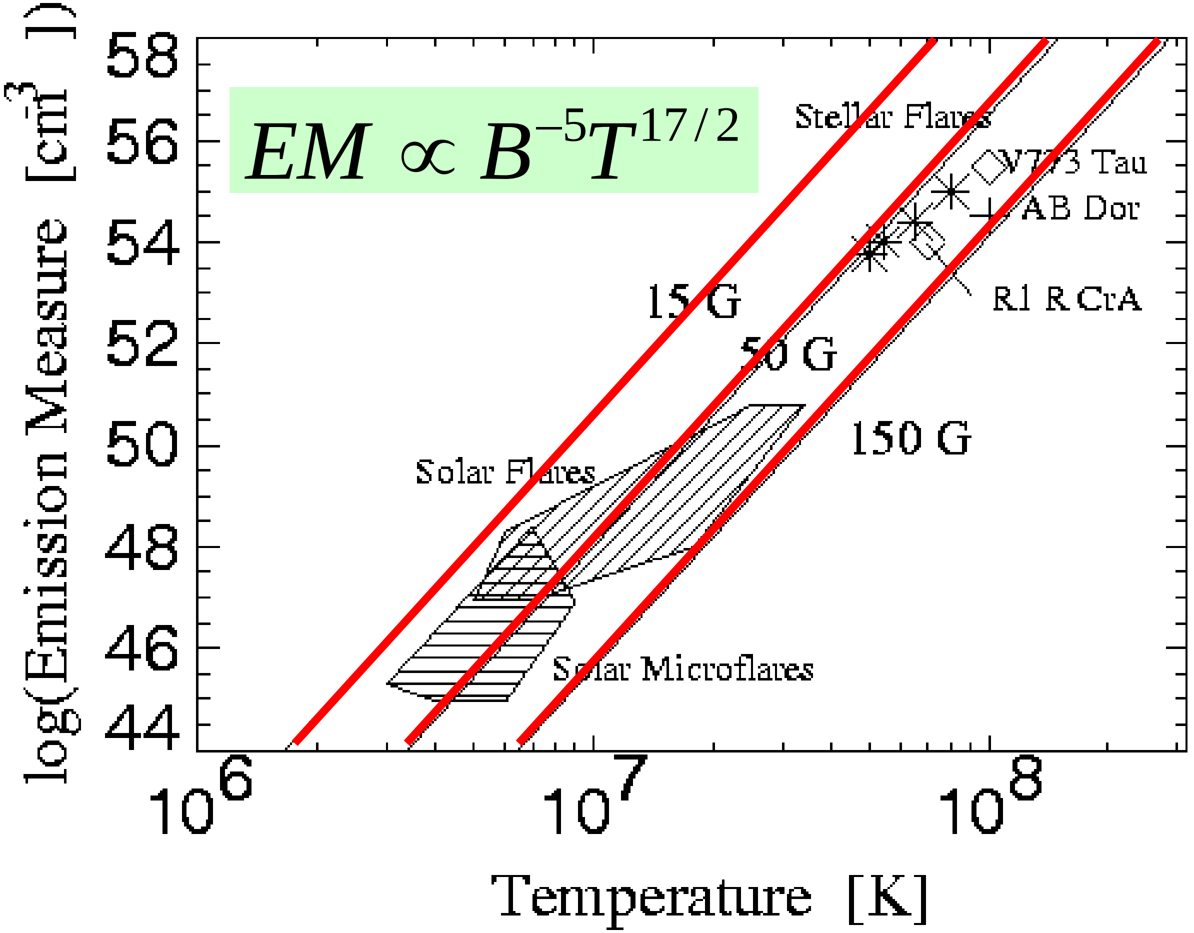
$$EM \propto B^{-5} T^{17/2}$$

EM-T correlation for solar/stellar flares



Shibata and Yokoyama (1999, 2002)

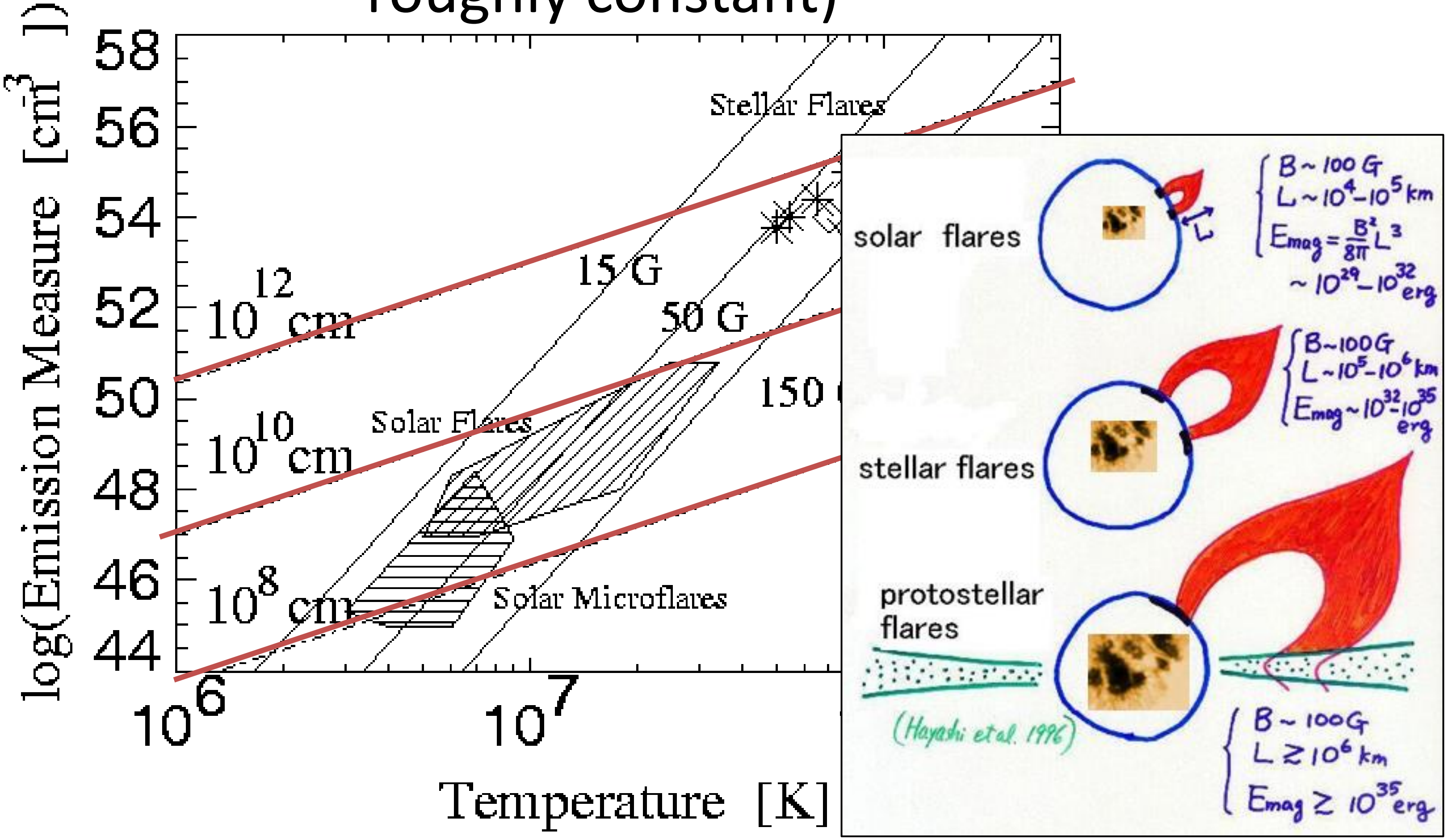
Magnetic field strength（B）＝constant



Magnetic field strengths of solar and stellar flares are comparable ~ 50-100 G

Shibata and Yokoyama (1999, 2002)

Q: What determines flare total energy ?
A: loop length (because magnetic field strength is roughly constant)

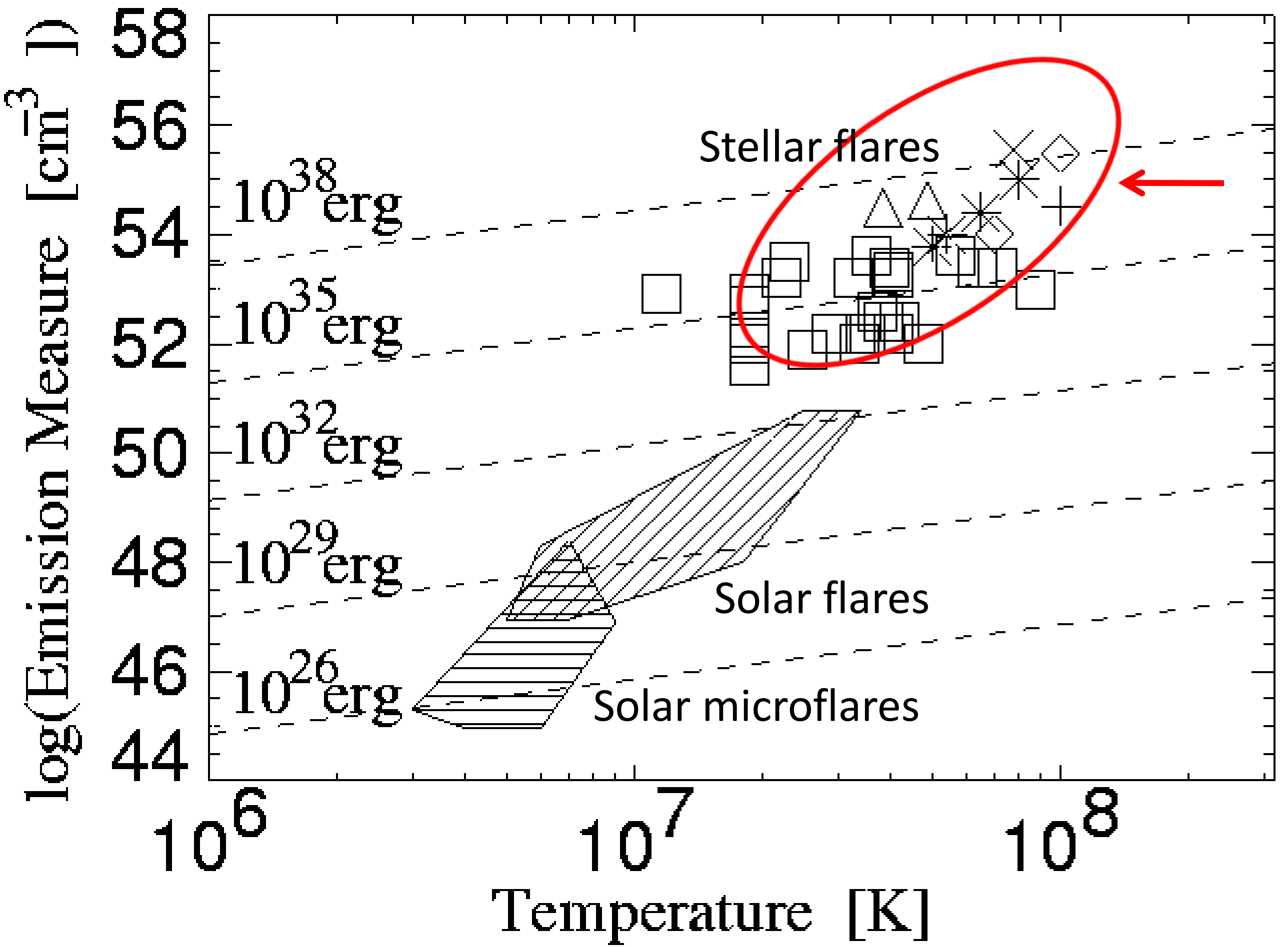


The reason why stellar flares are hot
=> loop lengths of stellar flares are large

Cf Isobe et al. 2003, Aulanier et al. 2013

Shibata and Yokoyama (2002)

Total energy of stellar flares



Superflares

Their energy = 10-10^6 times that of the largest solar flares

Their host stars are young stars and binary stars with fast rotation

様々なスケーリング則

- 黒点面積vsフレアエネルギー

  NotsuY+ 2013, 2019, Maehara+ 2015、Okamoto+2021,,,
- フレア寿命vsフレアエネルギー

  Maehara+2015, Namekata+ 2017,,,
- CME質量･速度vsフレアエネルギー

  Maehara+ 2021, Namekata+2021,,,

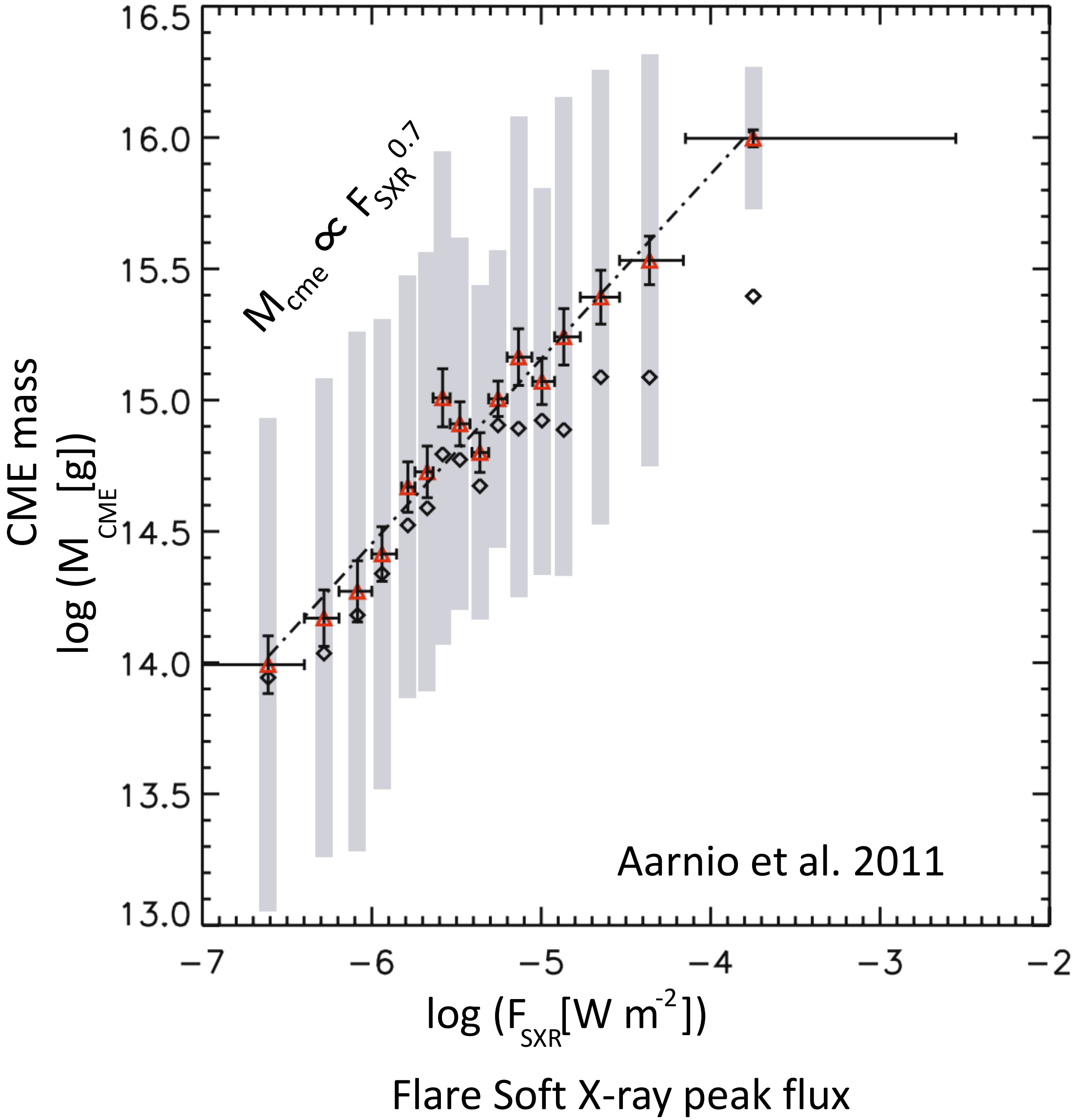
＝＞行方さん、前原さん、岡本さんの講演

Scaling Relations in Coronal Mass Ejections associated with Solar Superflares

Takahashi , T., Mizuno, Y., Shibata, K. ,

2016, ApJL, 833, L8

Empirical relation between CME mass and Flare Soft X-ray Flux



$$M_{cme} \propto F_{SXR}^{0.7}$$

Aarnio et al. 2011

$$\propto E_{flare}^{0.63}$$

Derivation of Scaling Relation between CME mass and Flare energy

Takahashi et al. 2016

太陽フレア･エネルギー vs CME質量の経験的な関係式(Aarnio et al. 2011)　$M_{cme} \propto E_{flare}^{0.63}$ は何を意味するか？

Flare energy

$$E_{flare} \sim \int \frac{B_0^2}{8\pi} dV \sim \frac{B_0^2}{8\pi} L^3$$

$$L \propto E_{flare}^{1/3}$$

CME mass ~ coronal mass around a flare

$$M_{cme} = \int \rho \, dV$$

$$= L^2 \int_0^L \rho_0 \exp\left(-\frac{z}{h_0}\right) dz$$

$$= \rho h_0 L_0^2$$ (h<<Lの時)

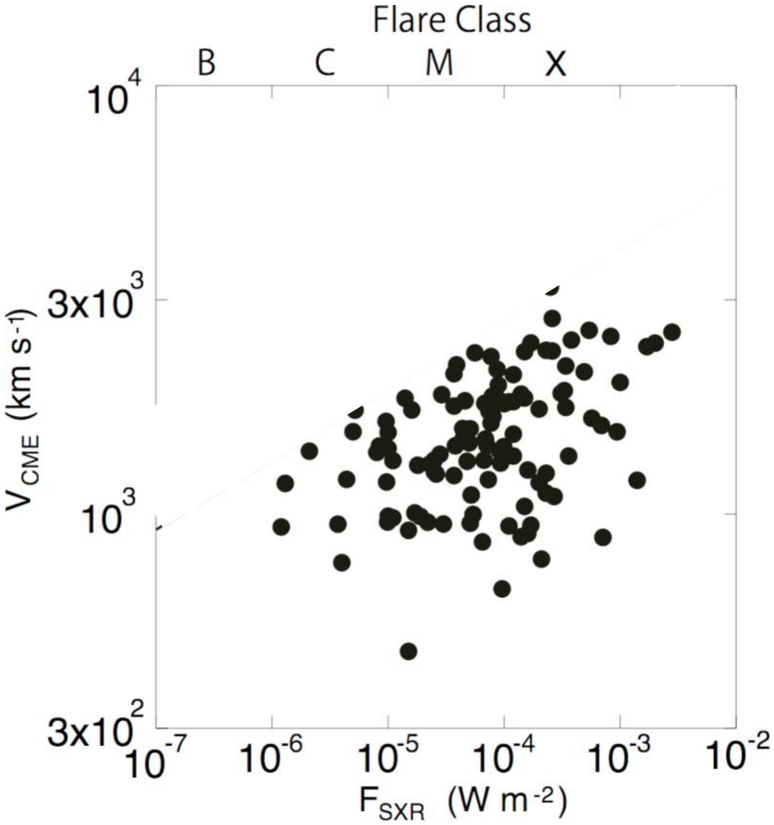
$$M_{cme} \propto L^2$$

フレア規模-CME質量のスケーリング則 (理論)

$$\boxed{M_{cme} \propto E_{flare}^{2/3}}$$

CME speed vs Flare energy

Takahashi et al. 2016



期間：1996年-2014年
大規模太陽高エネルギー陽子イベント
(Yashiro data)

そのうち、フレア軟X線フラックス(F_{SXR})とCME速度(V_{cme})の両方が決められているもの

CME speed vs Flare energy

CME mass

$$M_{CME} \propto E_{flare}^{2/3}$$

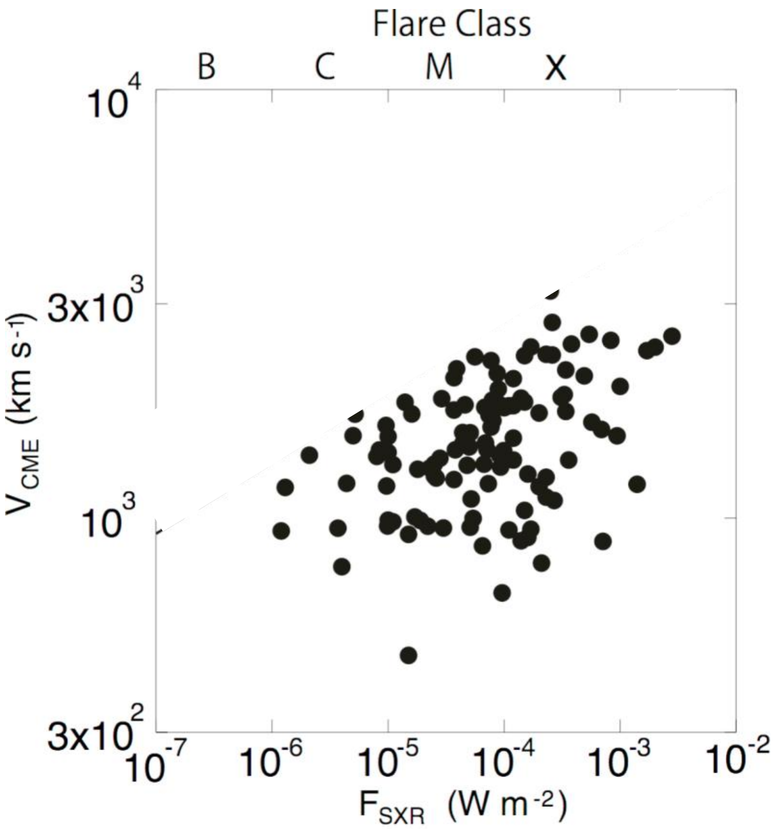
CME kinetic energy ~ Flare energy

$$E_{CME} = \frac{1}{2} M_{CME} V_{CME}^{2}$$

$$\lesssim E_{flare}$$

$$\boxed{V_{CME} \propto E_{flare}^{1/6}}$$

Takahashi et al. 2016



期間：1996年-2014年
大規模太陽高エネルギー陽子イベント
(Yashiro data)
そのうち、フレア軟X線フラックス(F_{SXR})と
CME速度(V_{cme})の両方が決められているもの

CME speed vs Flare energy

Takahashi et al. 2016

CME mass

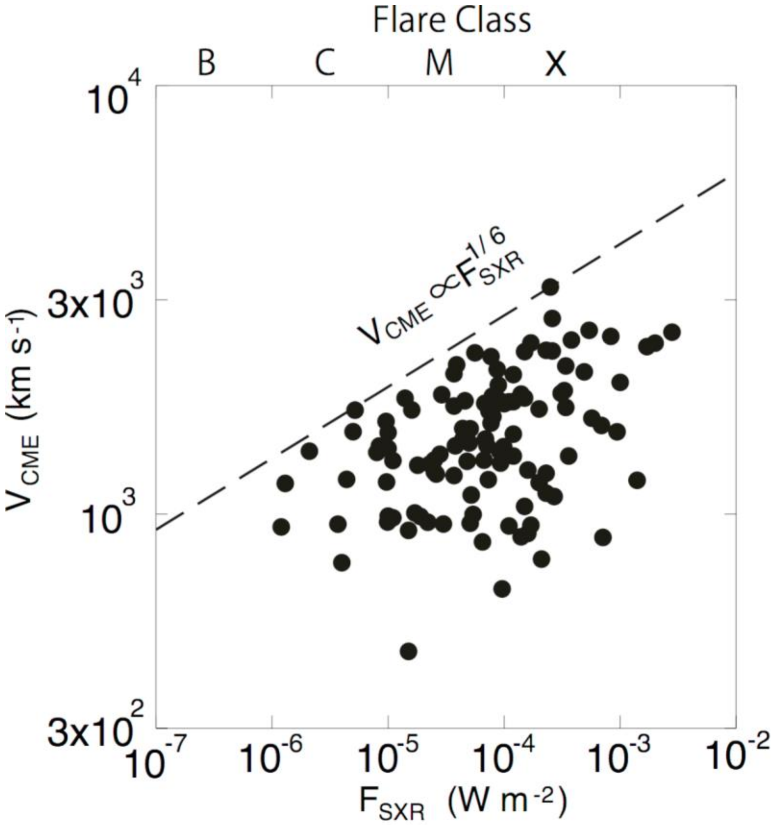
$$M_{CME} \propto E_{flare}^{2/3}$$

CME kinetic energy ~ Flare energy

$$E_{CME} = \frac{1}{2} M_{CME} V_{CME}^{2}$$

$$\lesssim E_{flare}$$

$$\boxed{V_{CME} \propto E_{flare}^{1/6}}$$

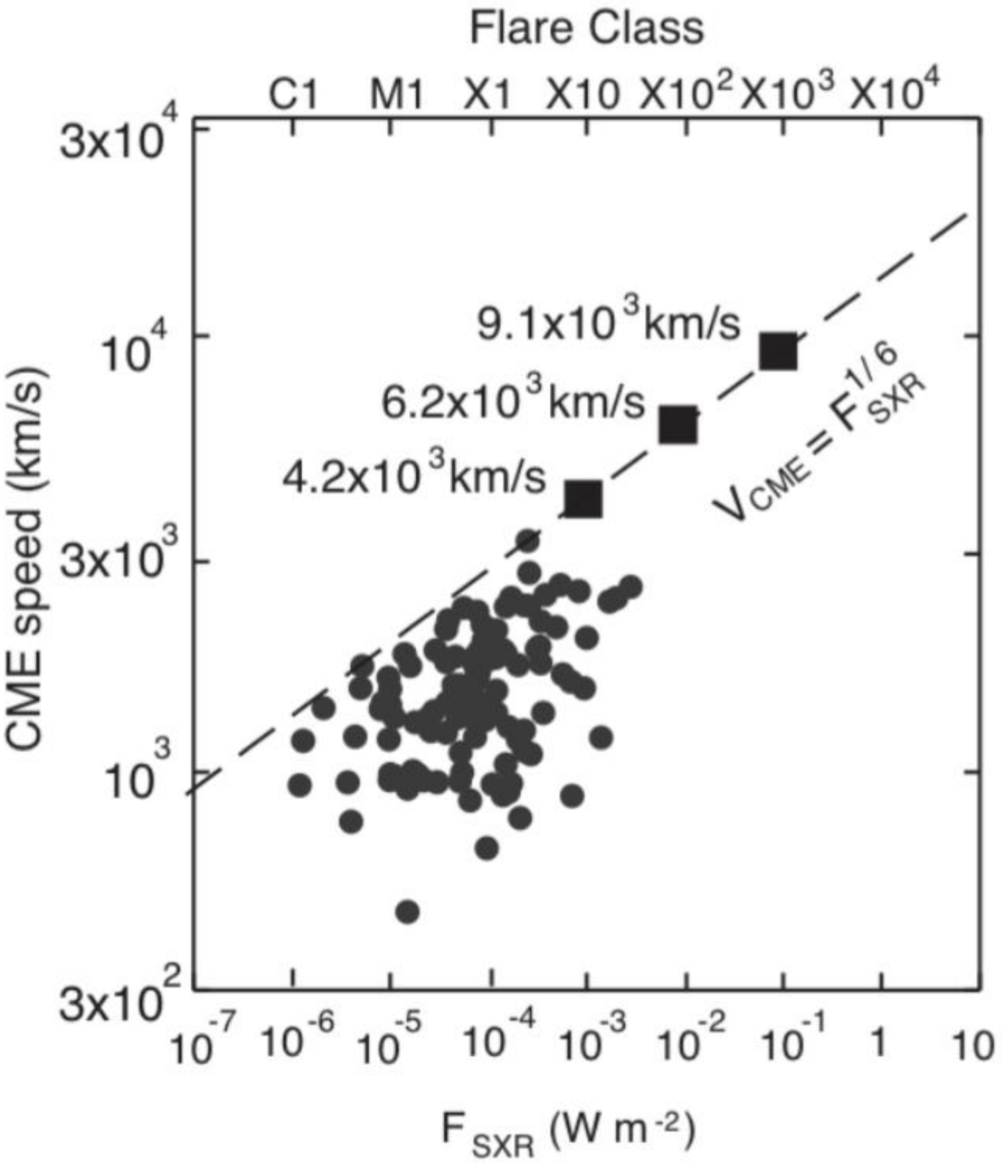


期間：1996年-2014年
大規模太陽高エネルギー陽子イベント
(Yashiro data)

そのうち、フレア軟X線フラックス(F_{SXR})と
CME速度(V_{cme})の両方が決められているもの

CME speed vs Flare X-ray Flux

Takahashi et al. 2016



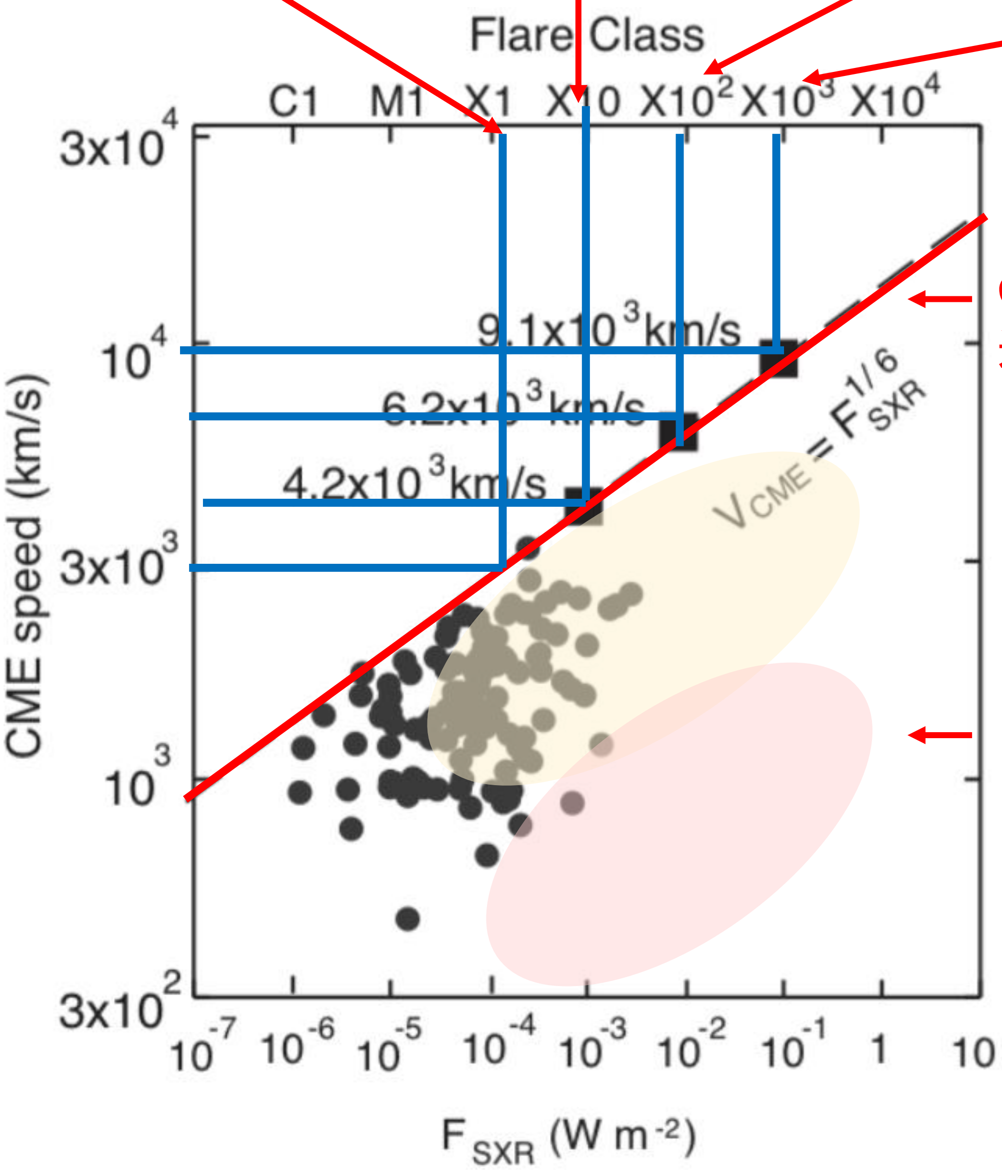
CME speed
vs
Flare
X-ray Flux

X1クラス
10^31 erg

X10クラス
10^32 erg

X100クラス
10^33 erg

X1000クラス
10^34 erg

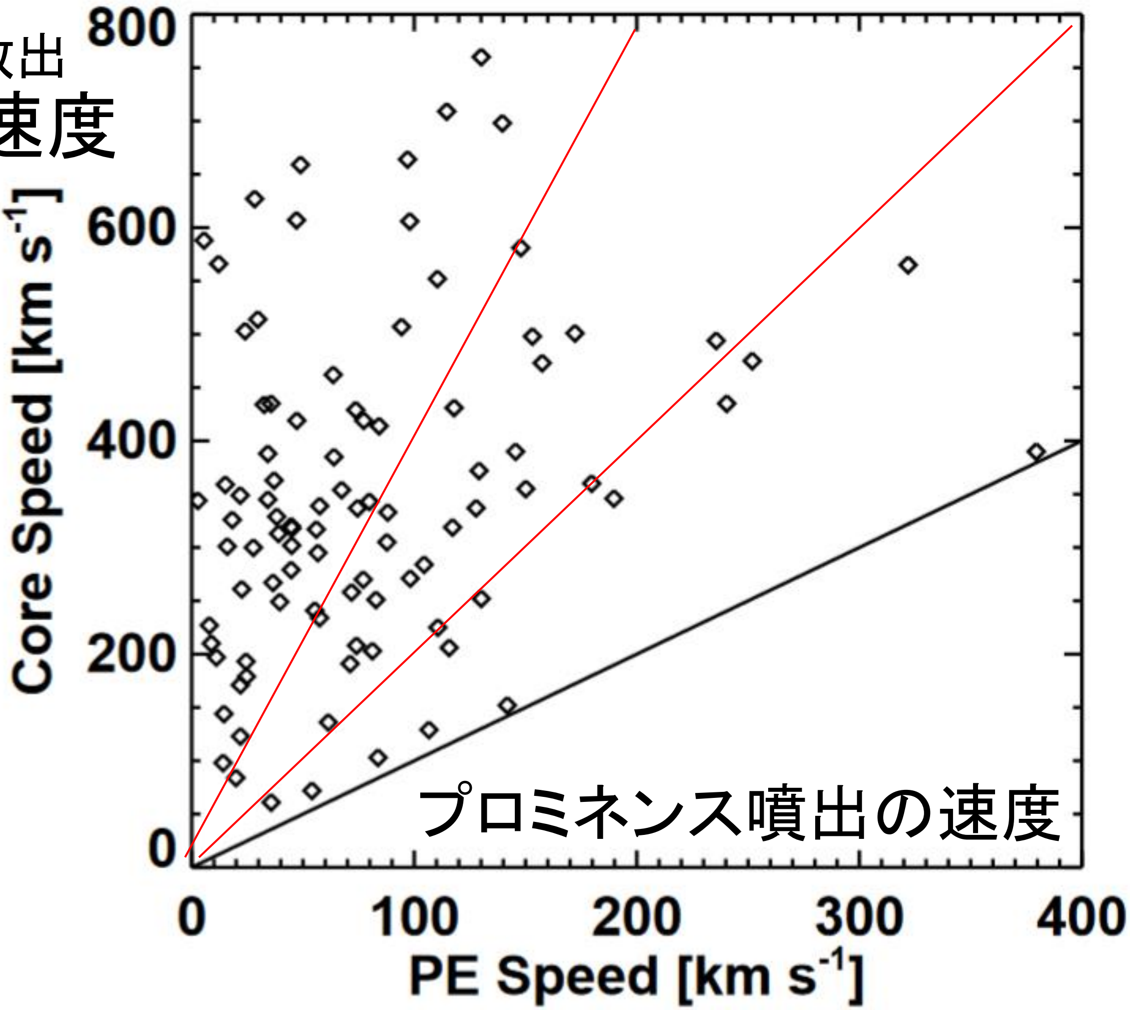


CMEの
速度の上限

Takahashi et al. 2016

スーパーフレアに
ともなってHαで観測される
であろうプロミネンス噴出
の典型的な速度

コロナ質量放出
CME 速度



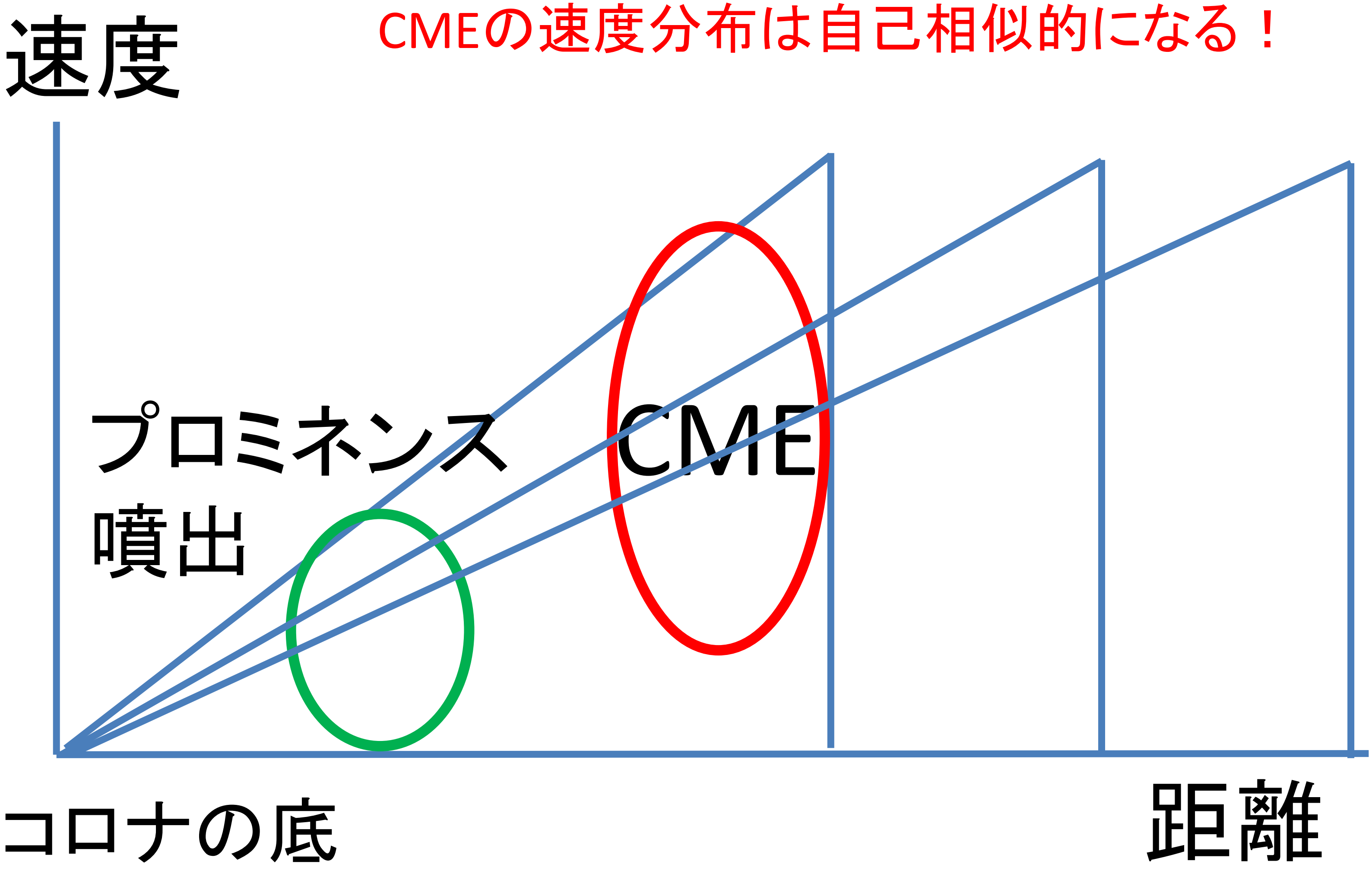
プロミネンス噴出の速度

CME speed
（core speed)
はプロミネンス
噴出の速度以上、
概ね倍以上

FIG. 15.—Scatter plot of the prominence and CME core speeds. The straight line represents the equal speeds. Note that none of the core speeds are below the straight line. This is expected because the CME cores are the evolved forms of the prominences and are expected to have higher speeds because of the continued acceleration.

Gopalswamy et al. 2003 ApJ

コロナ質量放出（CME）速度とプロミネンス噴出の速度の関係



まとめ

- フレア・ジェット・質量放出の電磁流体力学は、ほぼスケールフリーの物理。（磁気レイノルズ数＞＞1なので、無次元化すれば、近似的に同じ理想MHD方程式になる）。したがって、物理現象の構造と力学は自己相似、フラクタルになる。
- 今後、太陽観測が高空間分解能、高時間分解能へ向かうにつれ、どんどん、小さなフレア、ジェット、質量放出が見つかっていくだろう。（最終到達距離はイオンのラーモア半径～1m in corona）
- 今後、恒星では太陽で起きているフレア・ジェット・質量放出と良く似たずっと巨大な現象（スーパーフレア、スーパープロミネンス、スーパーCME）がどんどん見つかっていくだろう。そのとき、太陽現象と比較することにより、スケーリング則が色々発見され、これは恒星だけでなく太陽の現象を理解する上でも役立つことになるだろう。そういう視点で観測と理論の両面から研究を推進するのが、賢明な戦略である。

ご清聴ありがとうございました