

# 太陽フレアと 太陽型星のスーパーフレア

柴田一成

京都大学理学研究科附属天文台

thanks to H. Maehara, T. Shibayama et al.

# contents

- 太陽フレア
  - 最近の観測(ようこう、ひので、ほか)
  - 統一モデル(磁気リコネクション・モデル)
- 恒星フレア
- 太陽型星のスーパーフレア

# 太陽フレア

# 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

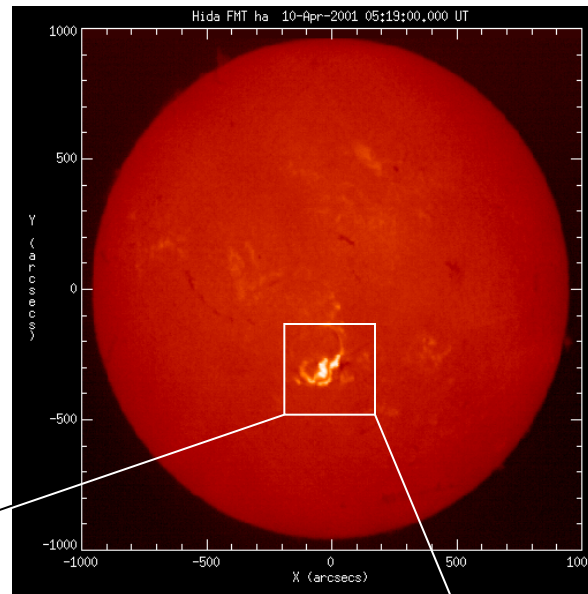
サイズ～(1-10)万km

全エネルギー

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

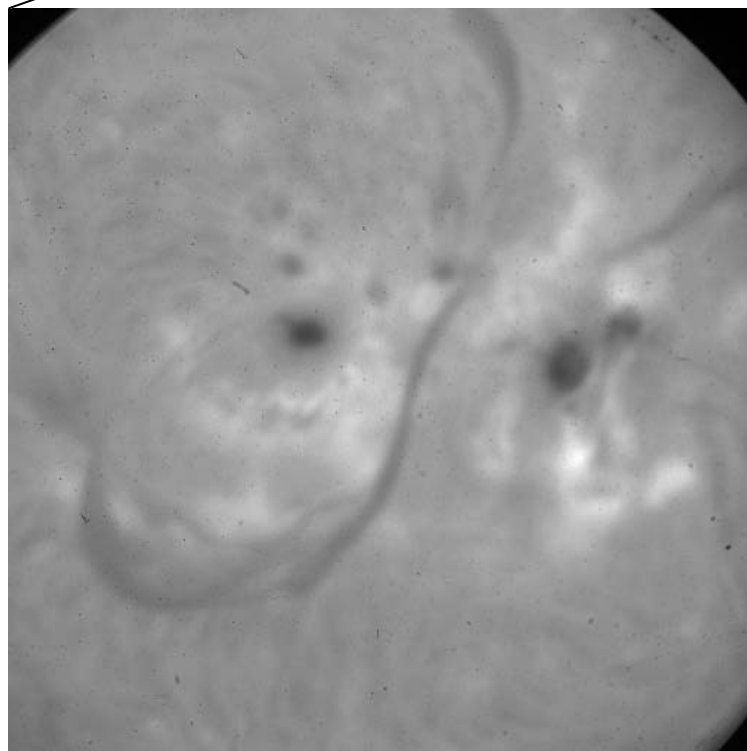
(水爆10万-1億個)

京大飛騨天文台



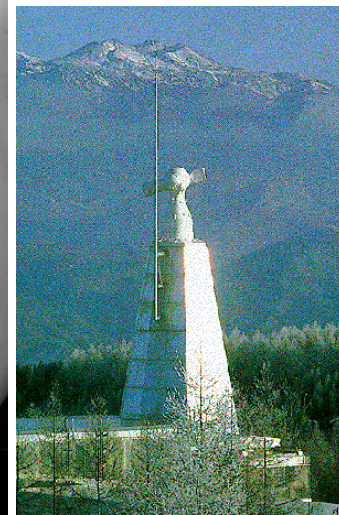
H $\alpha$

彩層  
1万度



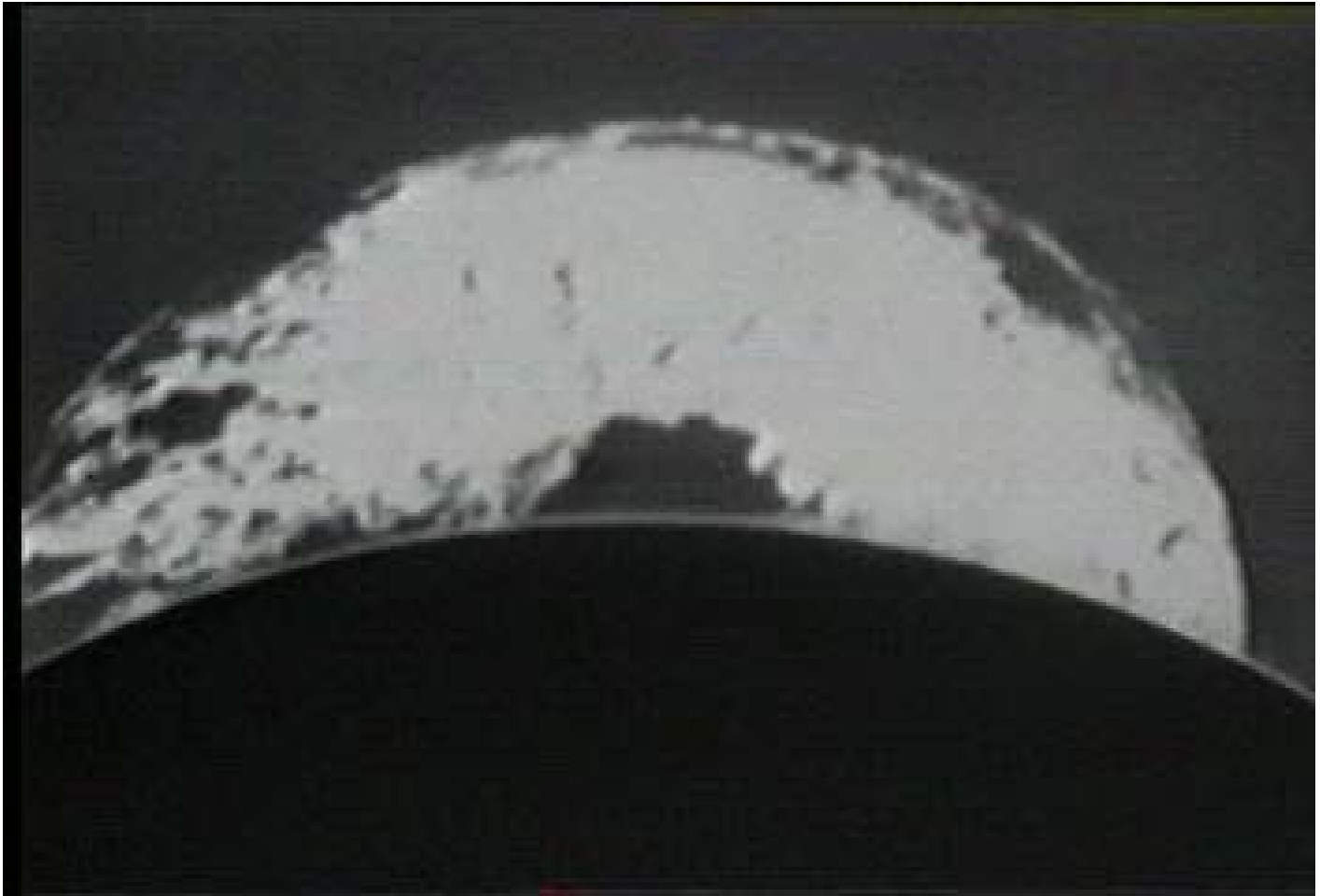
2001.04.10 04:29:26[UT]

Asai



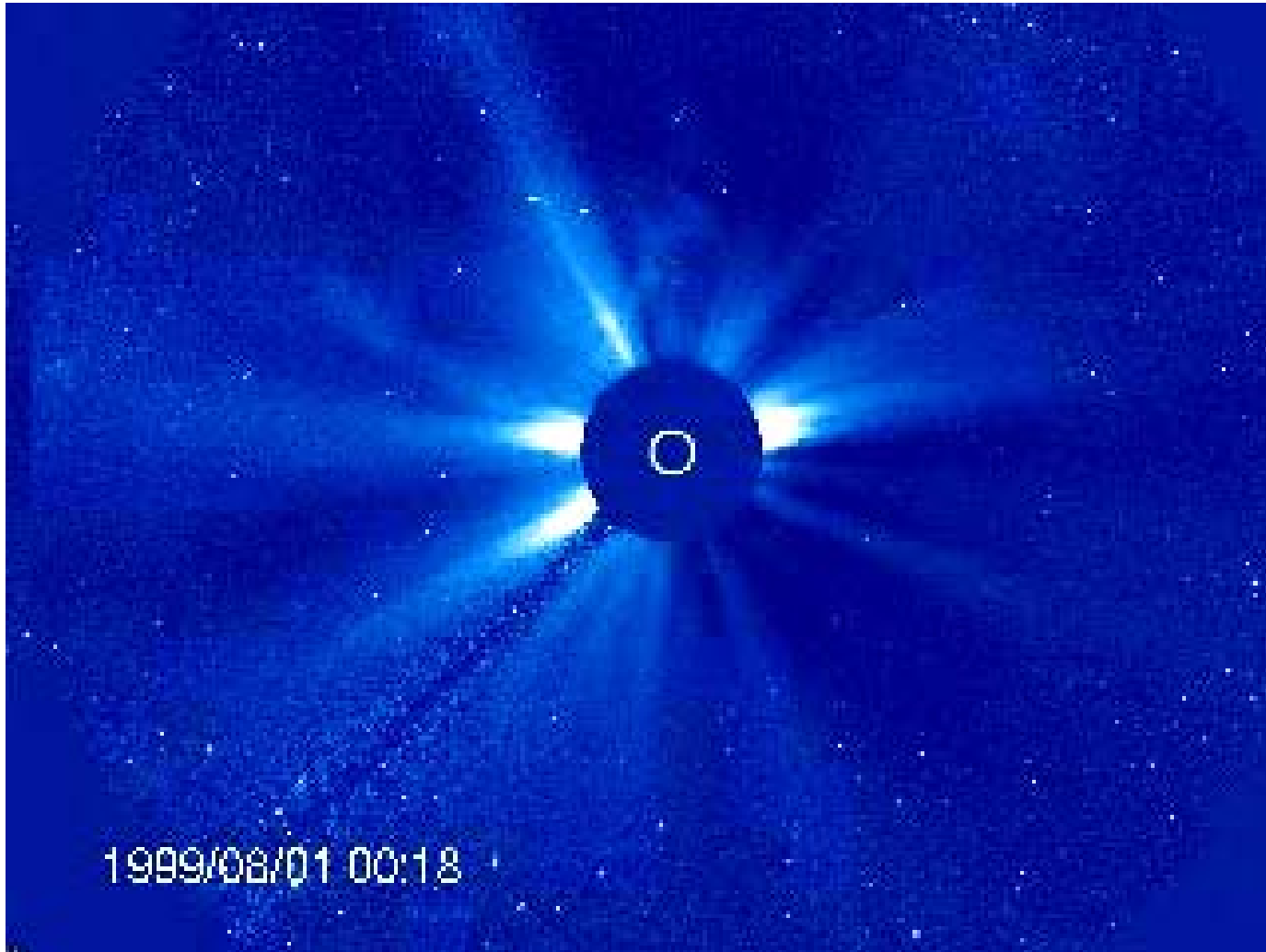
# 太陽プロミネンス噴出

(史上最大: 1946年6月4日: 米国HAO)



# コロナ質量放出 (CME)

(フレアにともなうコロナ・プラズマの噴出流=>地球に影響)

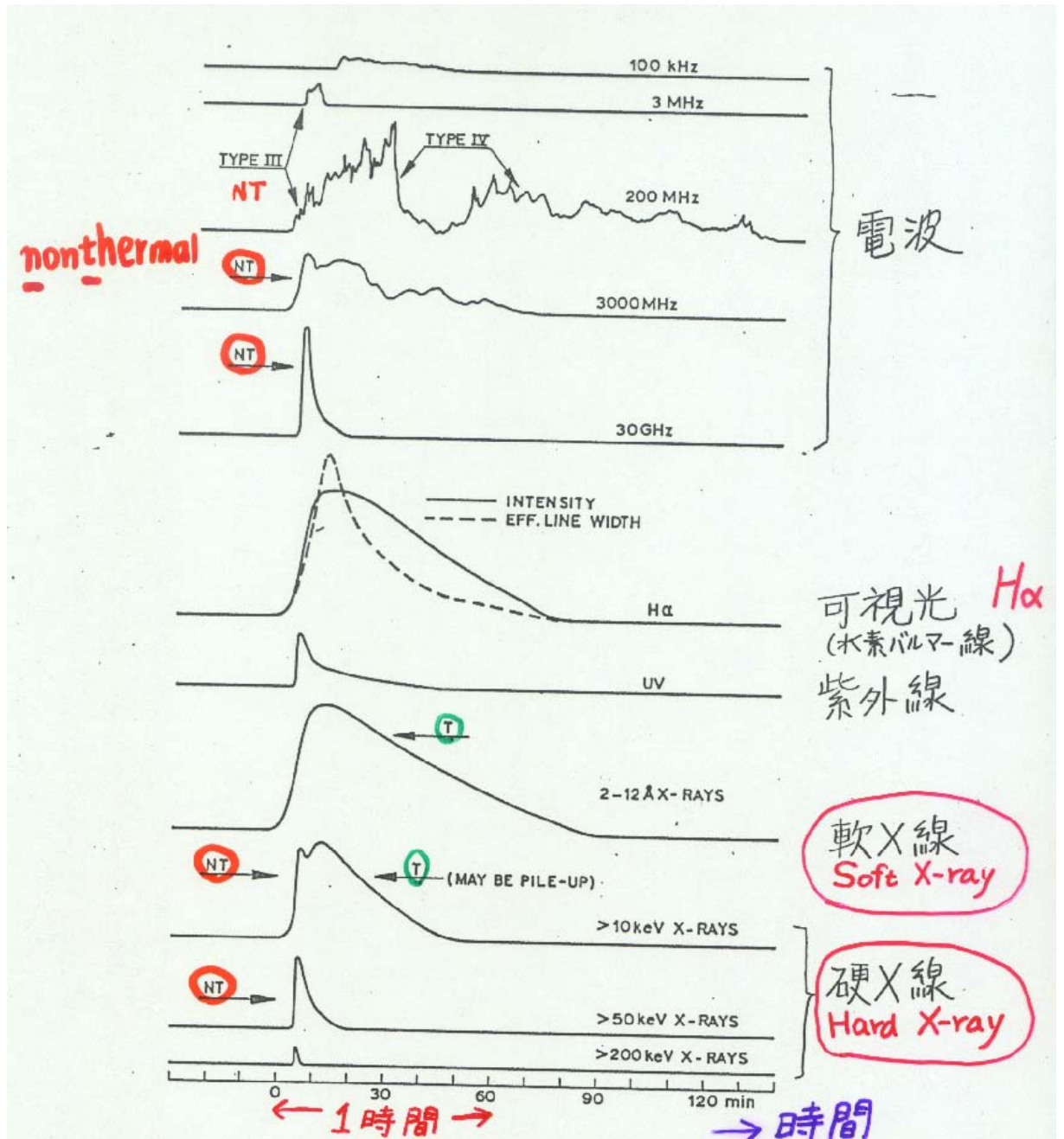


1999/08/01 00:18

常に流れ  
出ている  
のは  
太陽風

(SOHO/LASCO, 可視光/人工日食)

# 太陽フレア から放出される電磁波 (Svestka 1976)





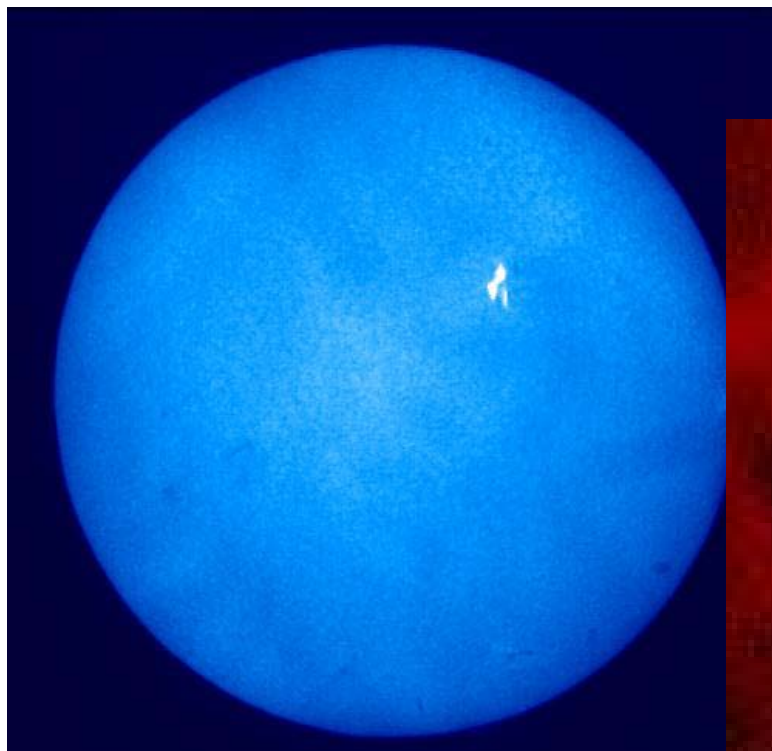
# X線で見た コロナ (「ようこう」衛星 による)

軟X線  
(1 keV)  
200万度—  
数千万度

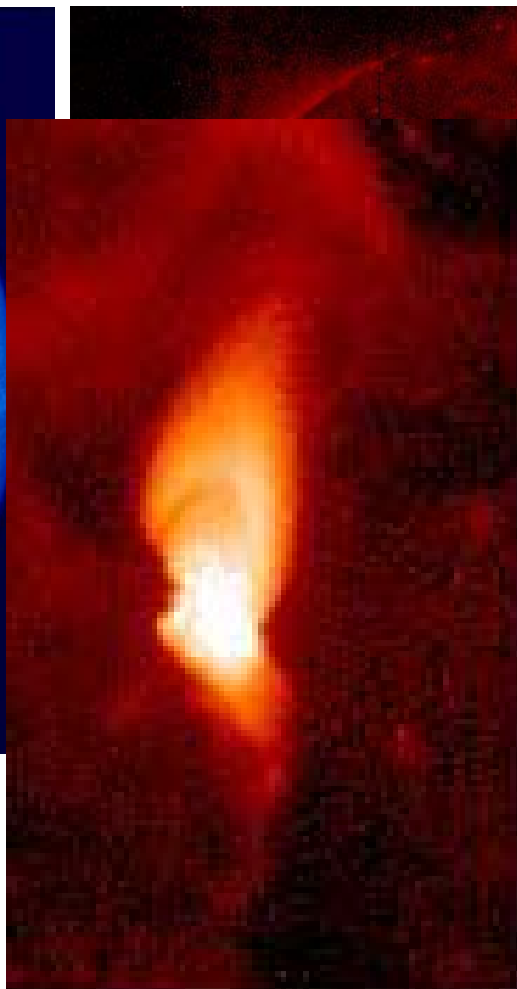


# フレアの正体

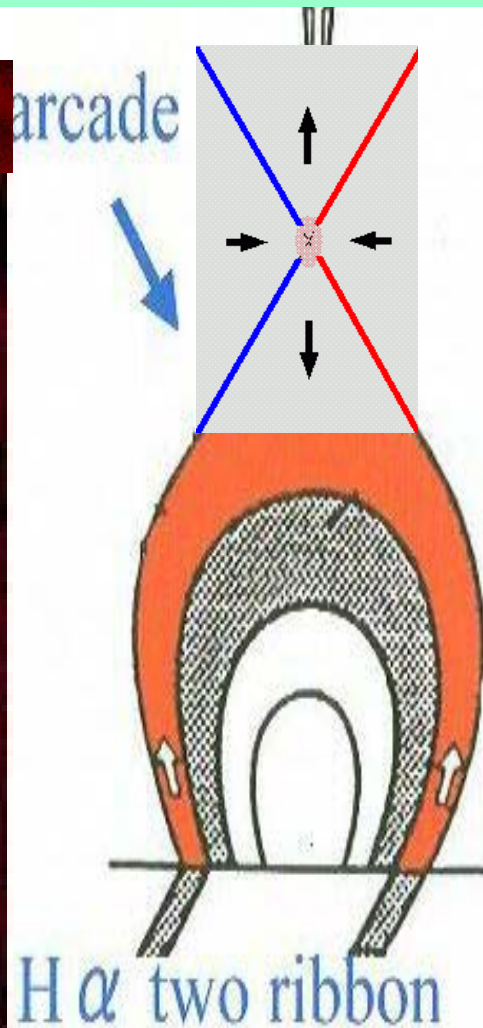
H $\alpha$



X線

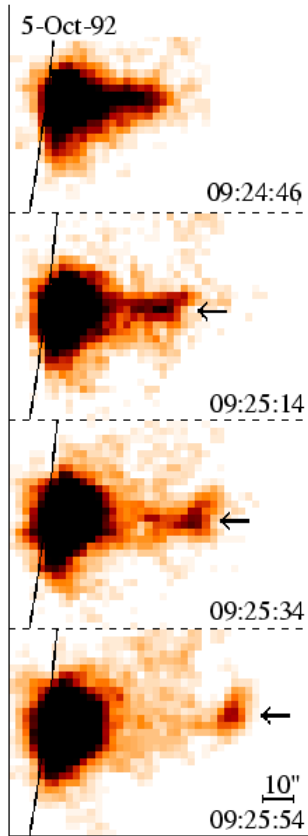


磁気リコネクション  
(磁力線つなぎかえ)



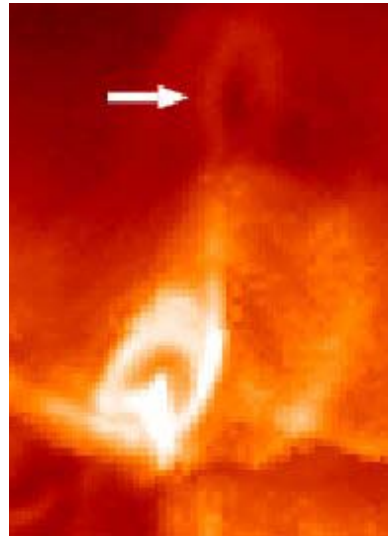
Isobe

# プラズモイド(フラックス・ロープ)噴出



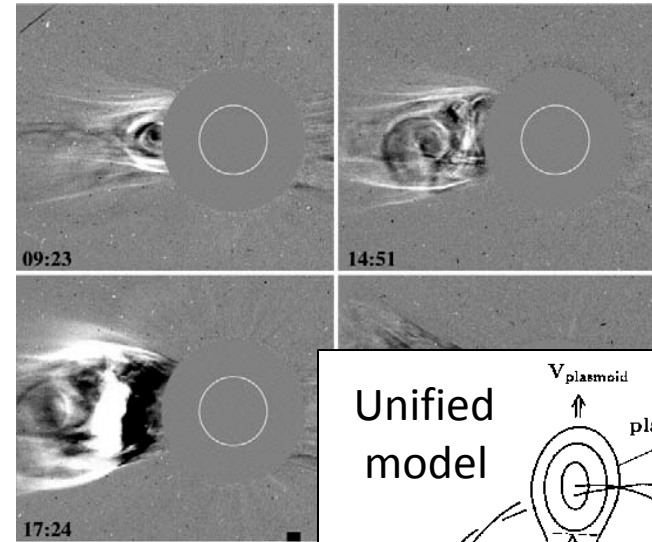
impulsive flares  
 $\sim 10^9$  cm

Ohyama



LDE(Long Duration Event) flares  
 $\sim 10^{10}$  cm

Tsuneta

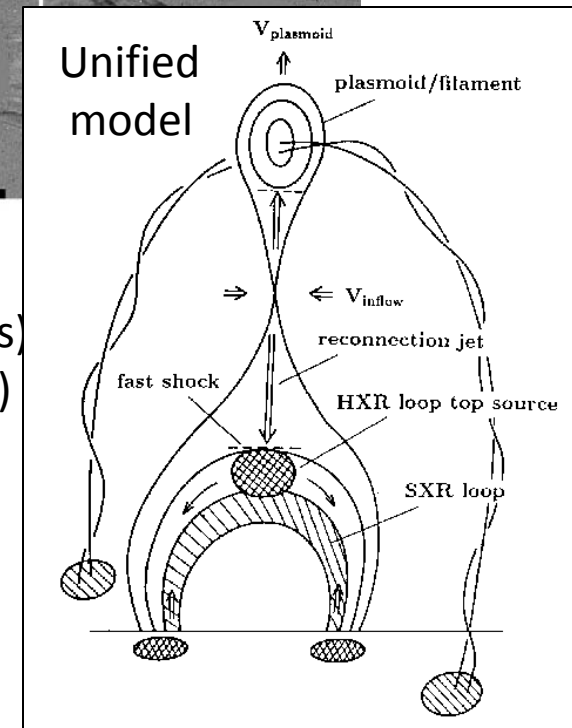


coronal mass Ejections (CMEs)  
 (Giant arcades)  
 $\sim 10^{11}$  cm

Dere

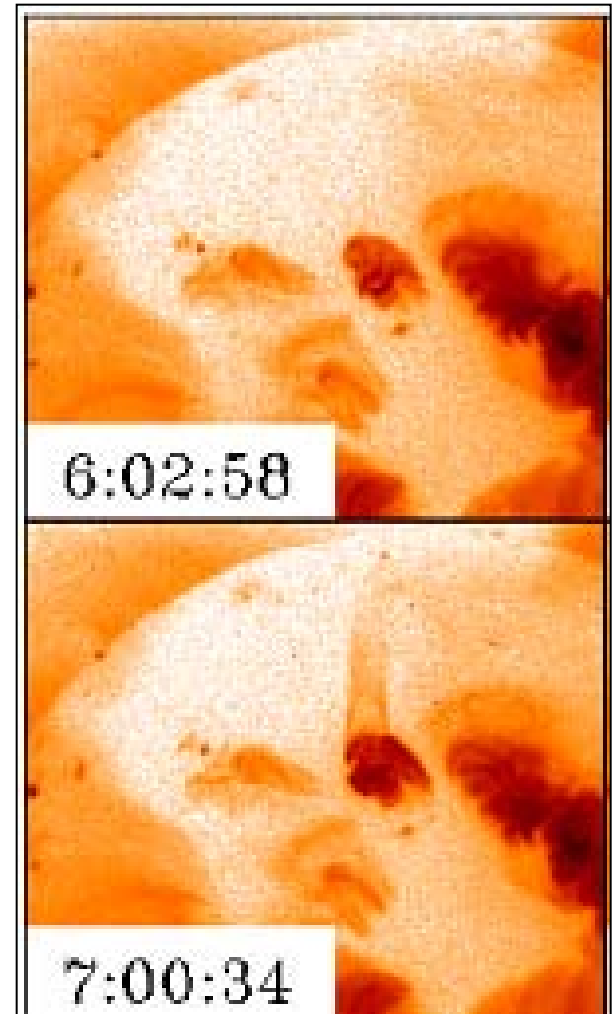
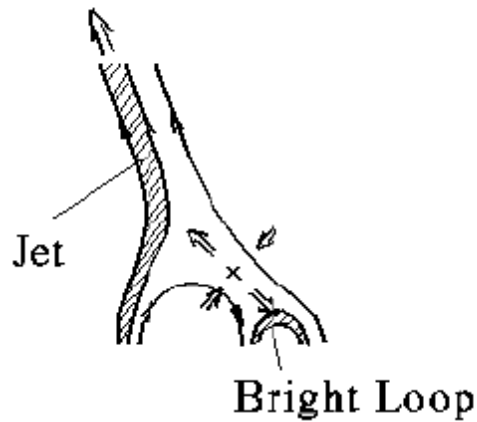
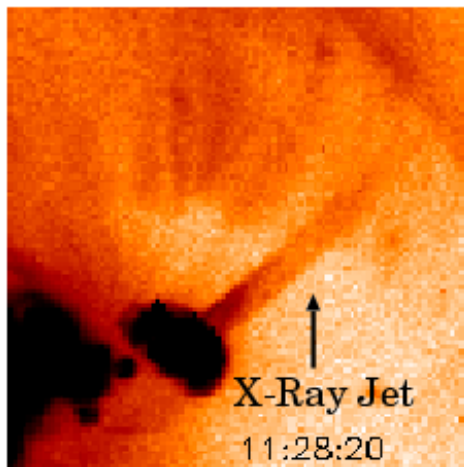
**Plasmoid-Induced-Reconnection  
 (Shibata 1999)**

Masuda



# X線ジェットとマイクロフレア

- Yohkoh/SXT discovered X-ray jet  
jet  
(Shibata et al. 1992,  
Strong et al. 1992,  
Shimojo et al. 1996)



Anemone (Shibata et al. 1994)

# Summary of “flare/CME” observations with Yohkoh

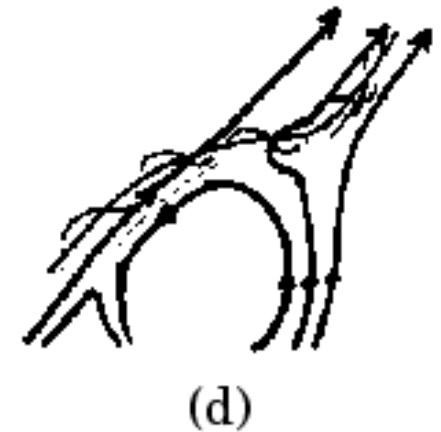
“flares”	Size (L)	Lifetime (t)	Alfvén time ( $t_A$ )	$t/t_A$	Mass ejection
microflares	$10^3 - 10^4$ km	100-1000sec	1-10 sec	~100	jet/surge
Impulsive flares	$(1-3) \times 10^4$ km	10 min – 1 hr	10-30 sec	~60-100	X-ray plasmoid/ Spray
Long duration (LDE) flares	$(3-10) \times 10^4$ km	1-10 hr	30-100 sec	~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

# Unified model

(plasmoid-induced reconnection model)  
(Shibata 1996, 1999)

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

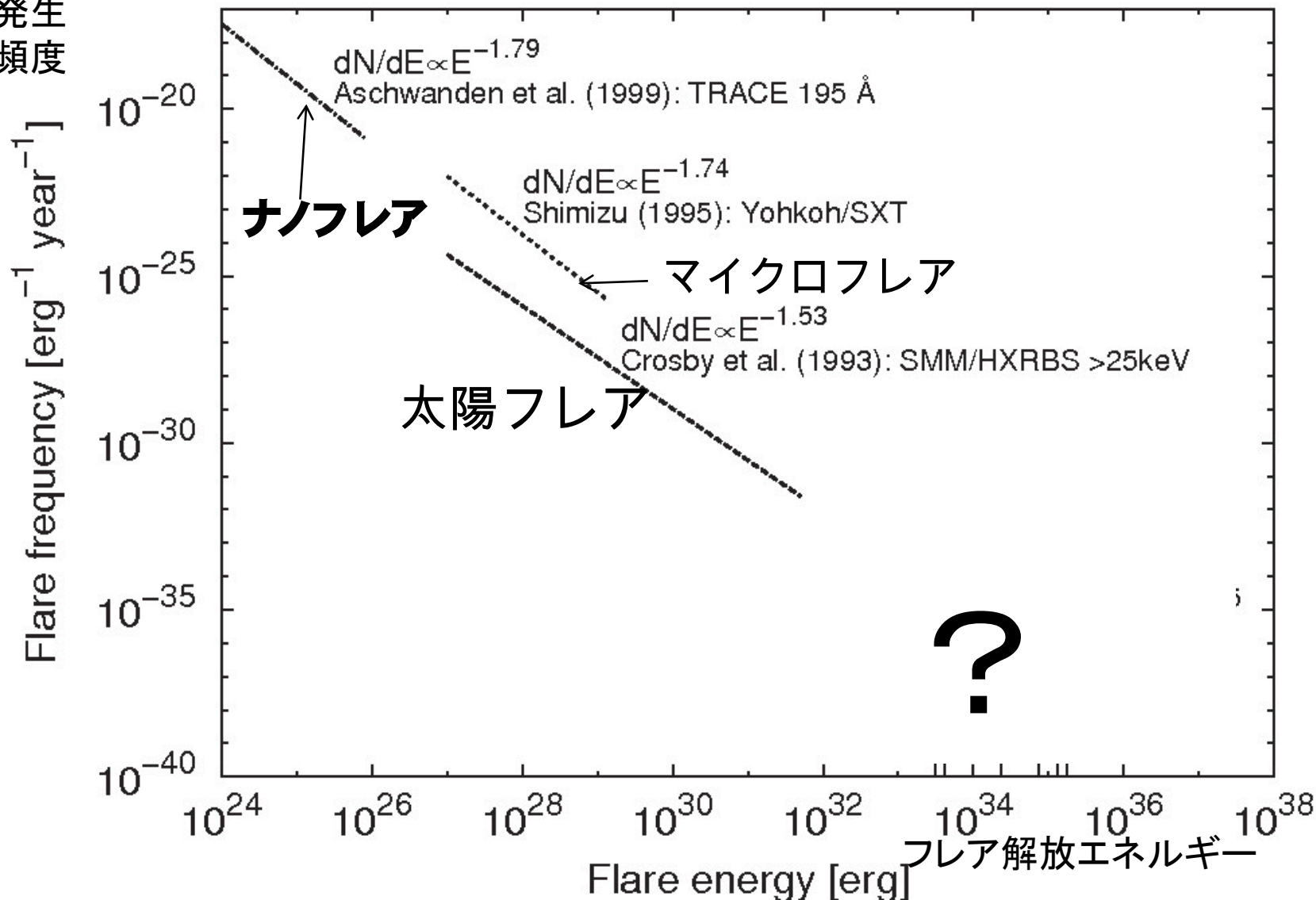
(c,d): impulsive flares,  
microflares, jets



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

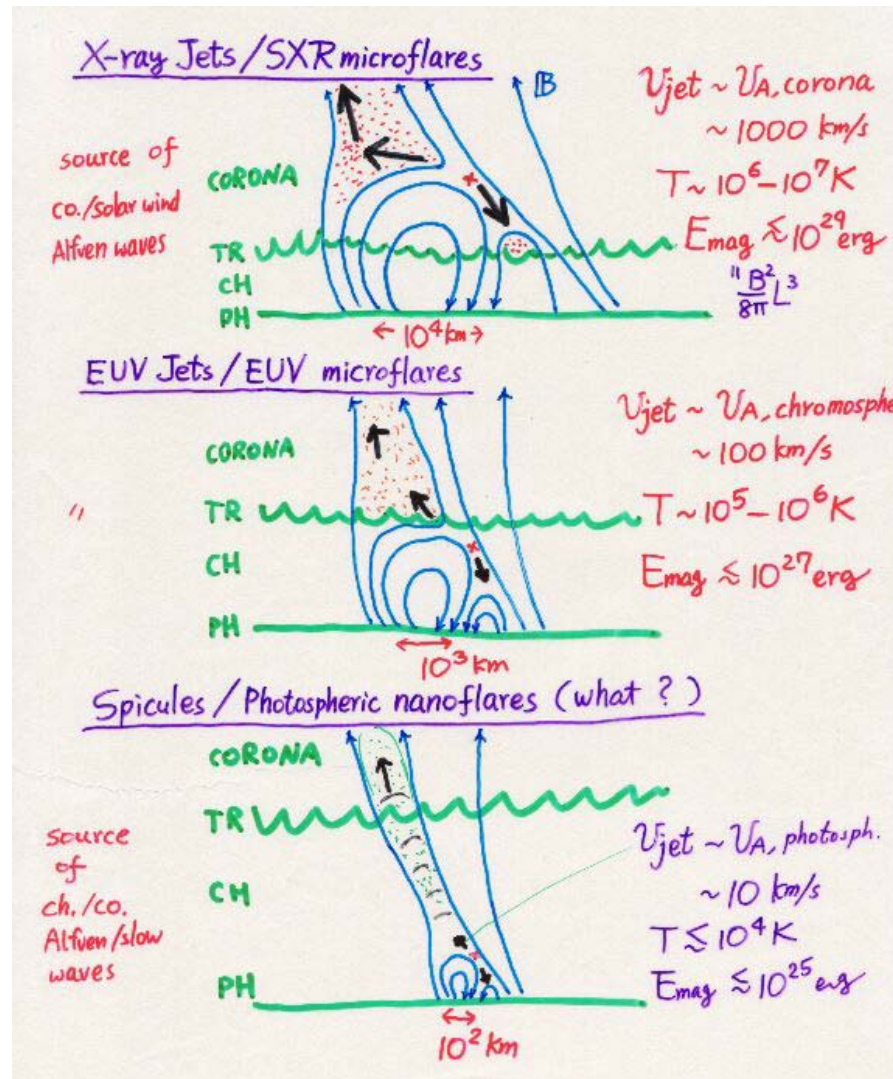
# 太陽フレア、マイクロフレア、ナノフレアの発生頻度分布

フレア  
発生  
頻度





# Prediction of ubiquitous jets in the solar atmosphere (Shibata 1998)



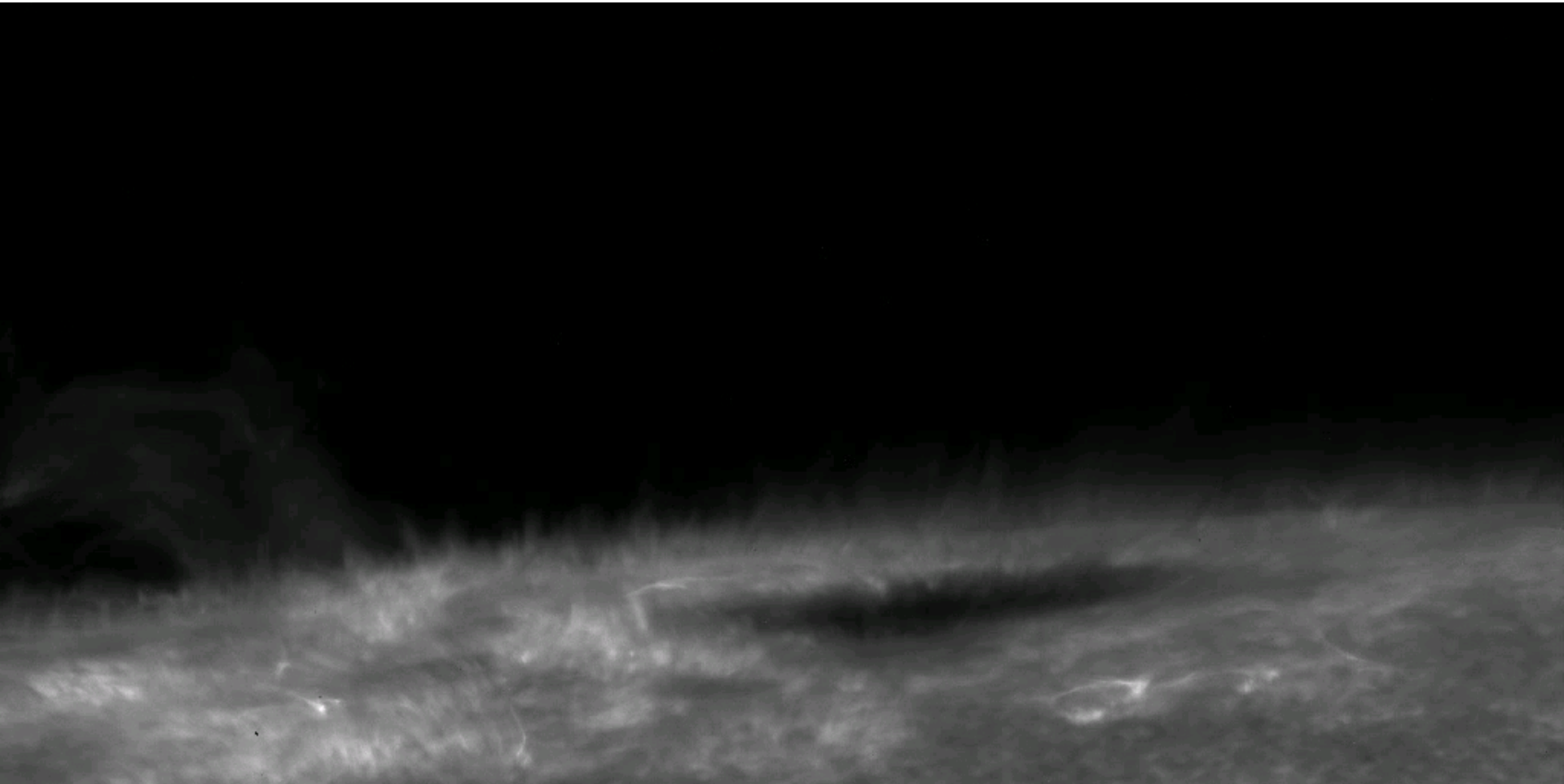
# Question

- Has Hinode really observed ubiquitous cool jets ?



**Answer: Yes !**

Discovery of chromospheric anemone jets  
(Shibata et al. 2007 Science 318, 1591)



2006 Dec 17 20:00-21:00 UT Call H broad band filter images taken with Hinode/SOT

# Summary of “flare/CME” observations with **Yohkoh**

“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	$(1-3) \times 10^4$ km	10 min – 1 hr	10-30 sec	~60-100	X-ray plasmoid/ Spray
Long duration (LDE) flares	$(3-10) \times 10^4$ 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 “flare/CME” observations with Hinode

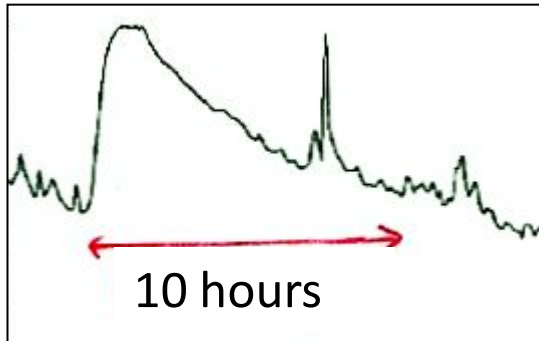
“flares”	Size (L)	Lifetime (t)	Alfven time ( $t_A$ )	$t/t_A$	Mass ejection
nanoflares	~200 km	200-1000sec	20 sec	~10~50	Chromospheric (Ca) jett
Microflares	$10^3 - 10^4$ km	100-1000sec	1-10 sec	~100	jet/surge
Impulsive flares	$(1-3) \times 10^4$ km	10 min – 1 hr	10-30 sec	~60-100	X-ray plasmoid/ Spray
Long duration (LDE) flares	$(3-10) \times 10^4$ 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

# 恒星フレア

# Observations of Stellar Flares

Solar Flare

X-ray Intensity (3-24keV)

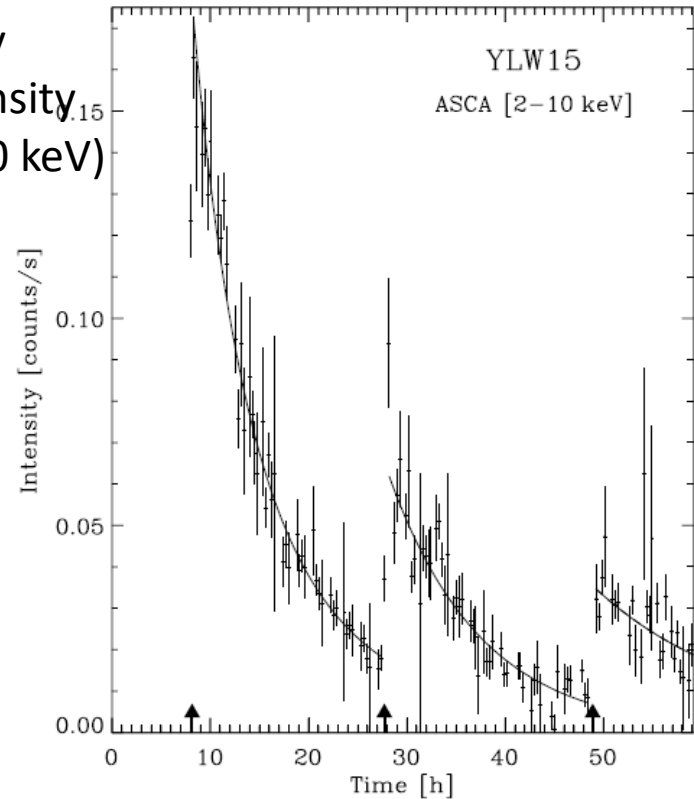


Tsueta

time

Protostellar Flare of YLW15

X-ray Intensity (2-10 keV)



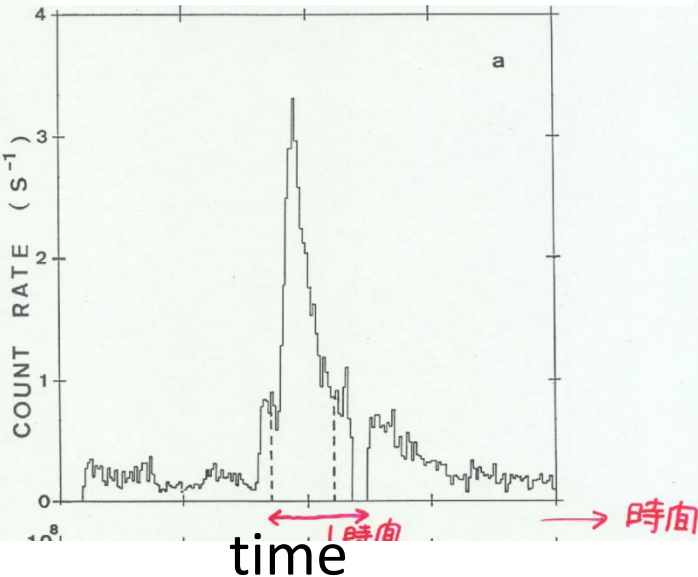
time

Tsuboi

Stellar Flare of Prox Cen

X-ray Intensity (~ 1 keV)

X線強度

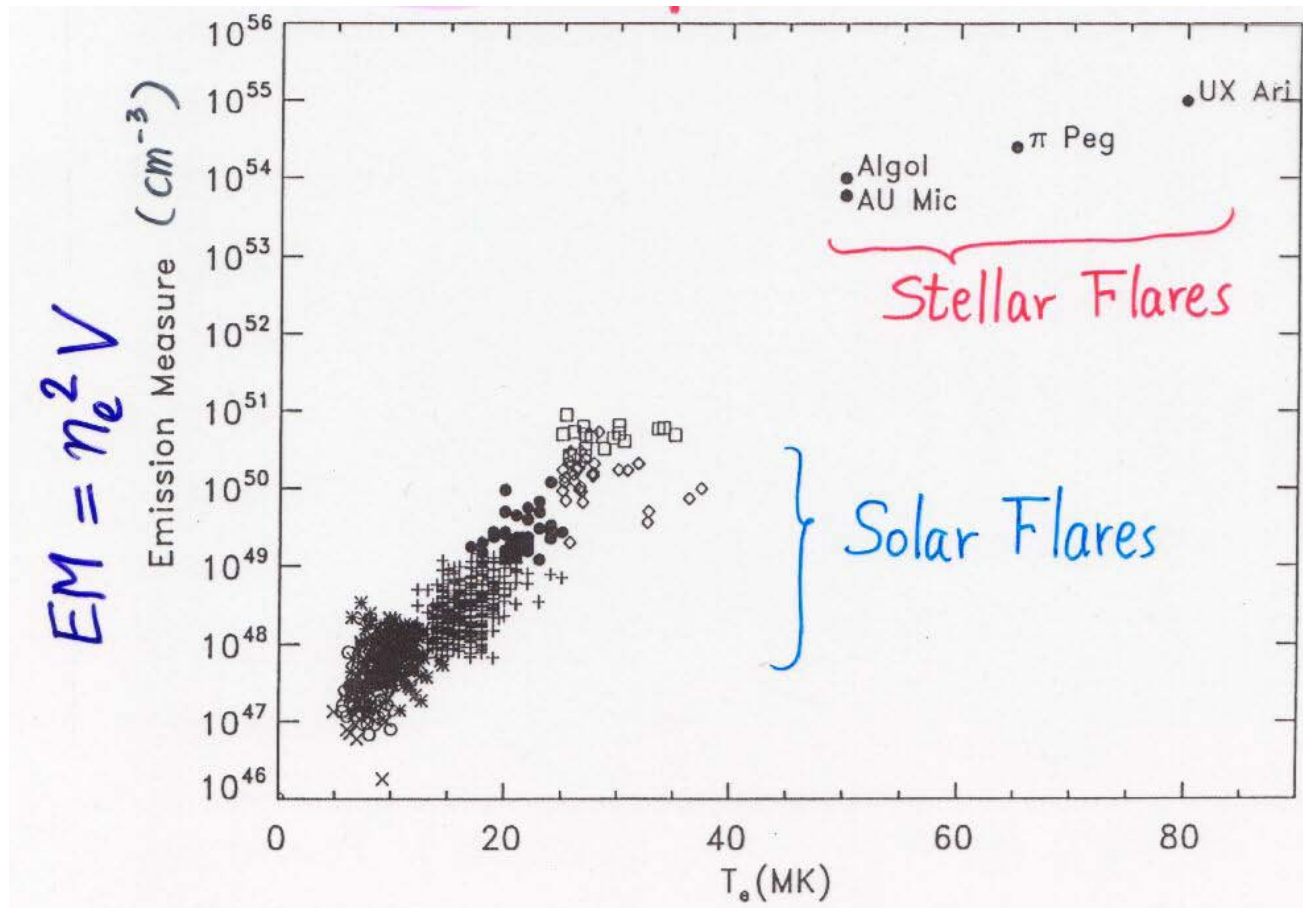


time

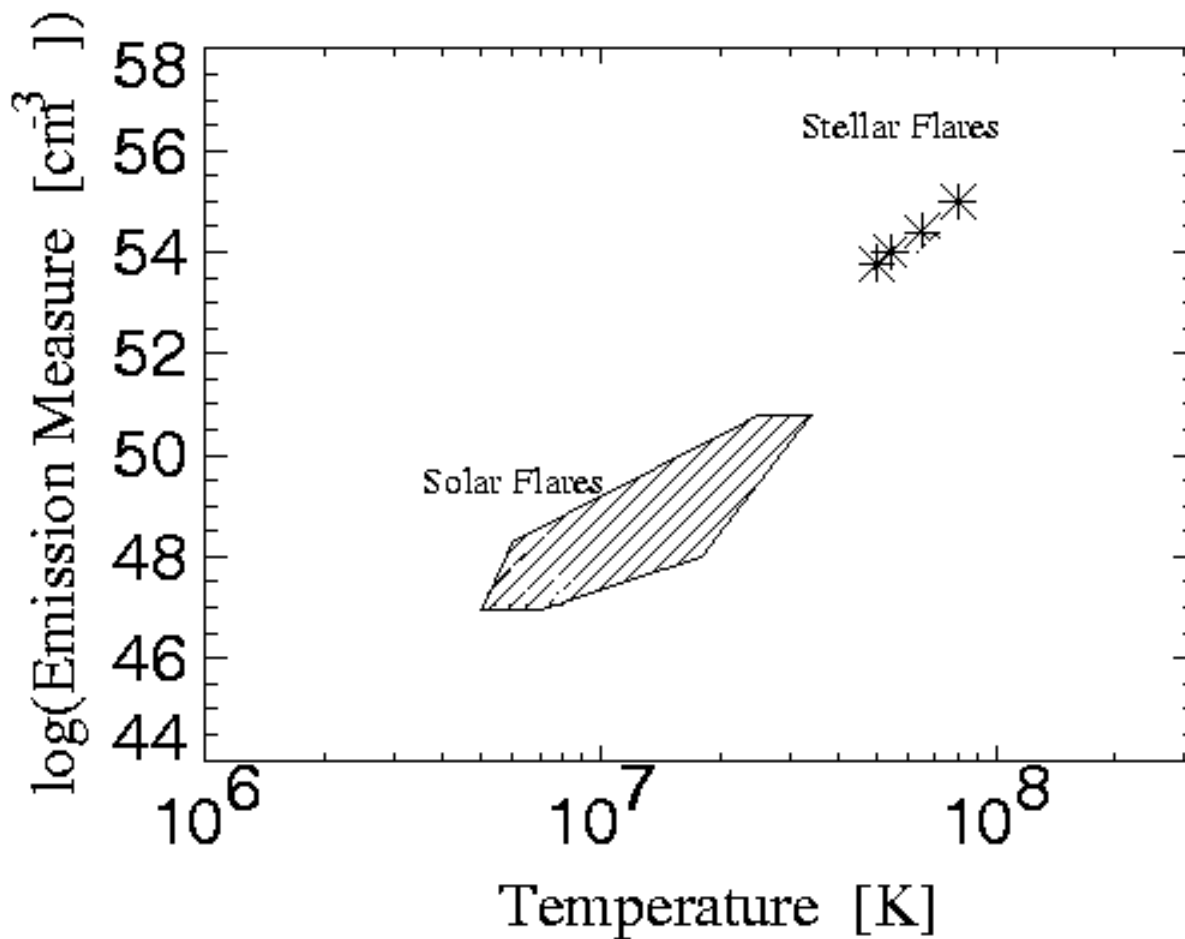
# 原始星フレアは、磁気リコネクション 説で説明できるか？

- Yes
- 間接的な証拠が、  
Emission Measure (  $EM = n^2 L^3$  )  
vs Temperature の関係に見つかった  
(Shibata and Yokoyama 1999、2002)

# 太陽・恒星フレアの Emission Measure ( $EM = n^2 V$ ) は温度 ( $T$ ) とともに増大 ( $n$ : 電子密度、 $V$ : 体積) (Feldman et al. 1995)



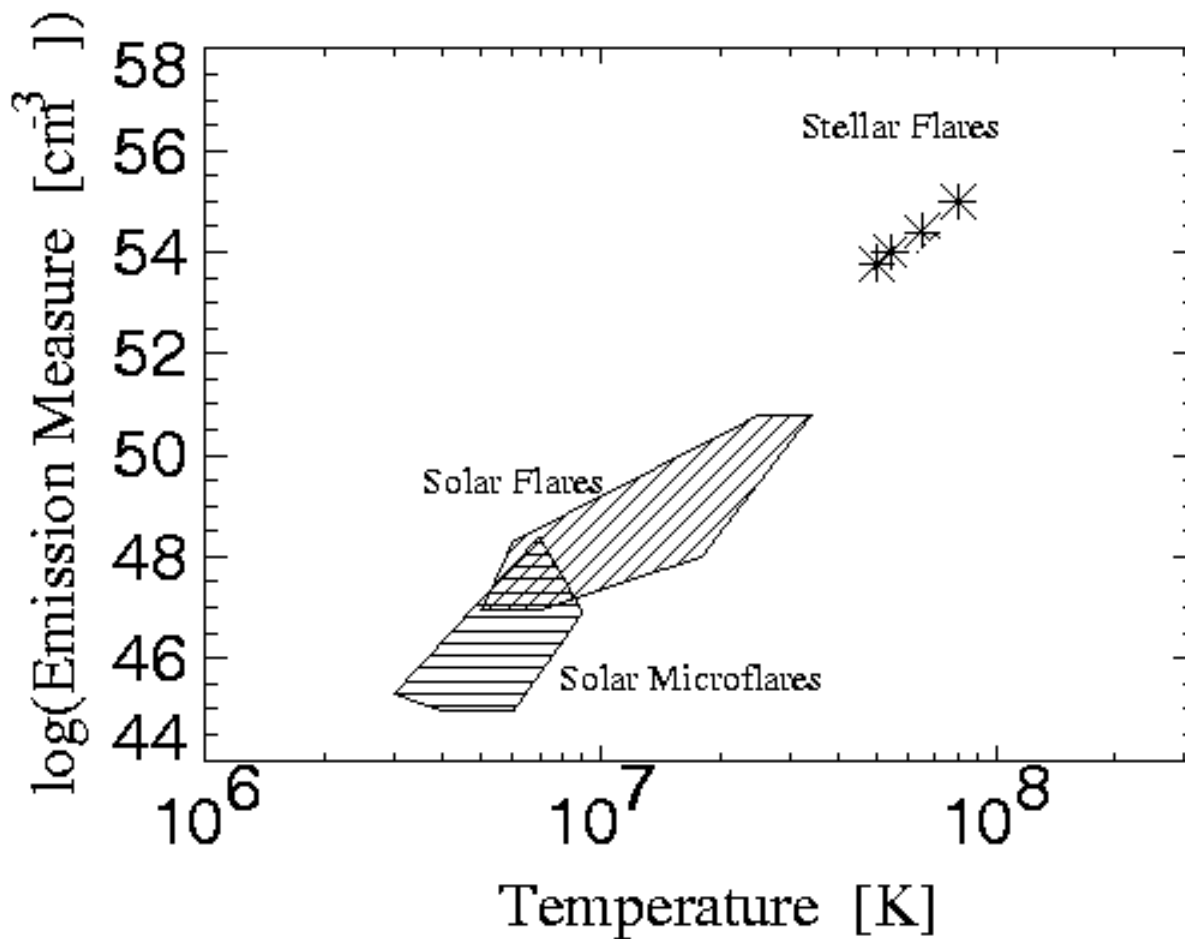
# 太陽・恒星フレアのEM-T関係



Feldman  
et al. (1995)  
の図の  
Log-log plot

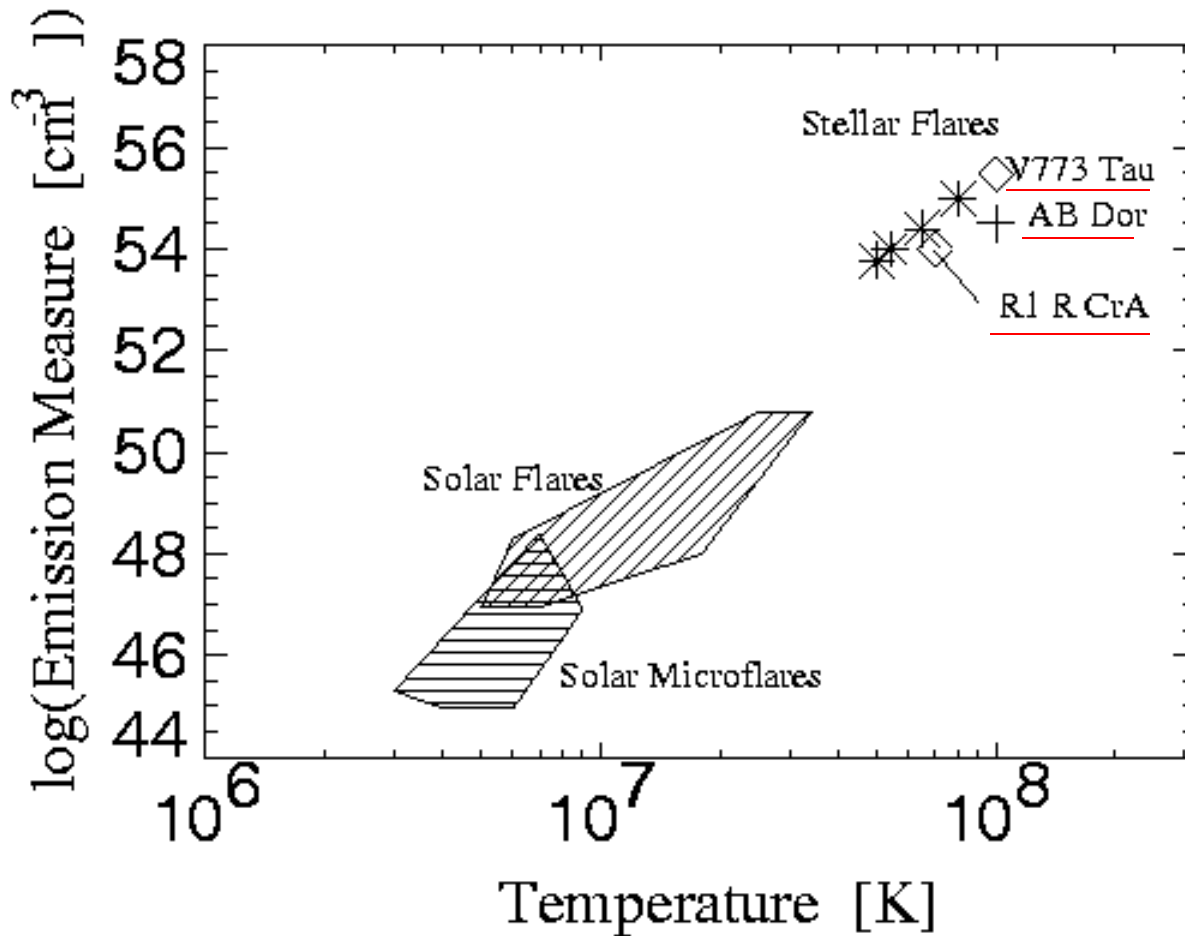


# 太陽・恒星フレアのEM-T関係



マイクロフレア  
(Shimizu 1995)

# 太陽・恒星フレアのEM-T関係



原始星フレア

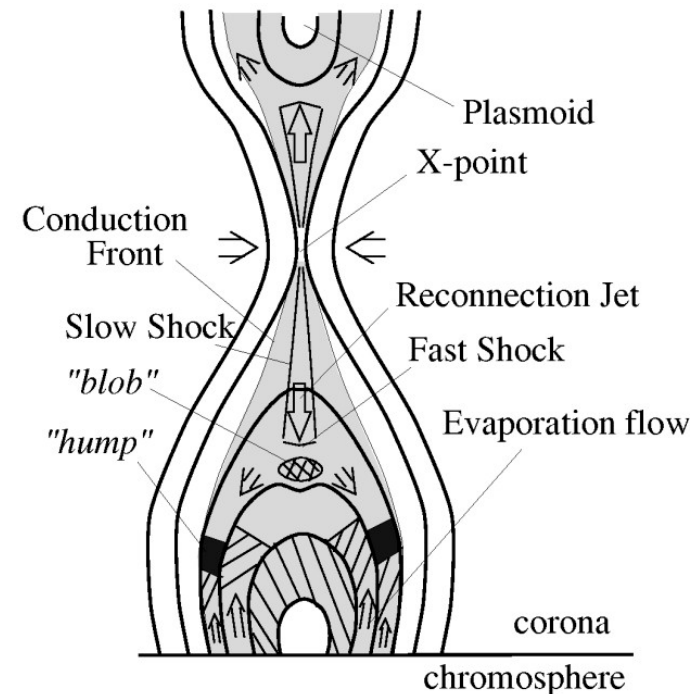
あすか  
(Koyama et al.  
1996, Tsuboi  
et al. 1997)

# フレアの温度は何で決まっているか？

- 磁気リコネクション加熱＝熱伝導冷却のバランスで決まる (Yokoyama and Shibata 1998、2001)

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

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



# フレアの Emission Measure

(Shibata and Yokoyama 1999)

- Emission Measure

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

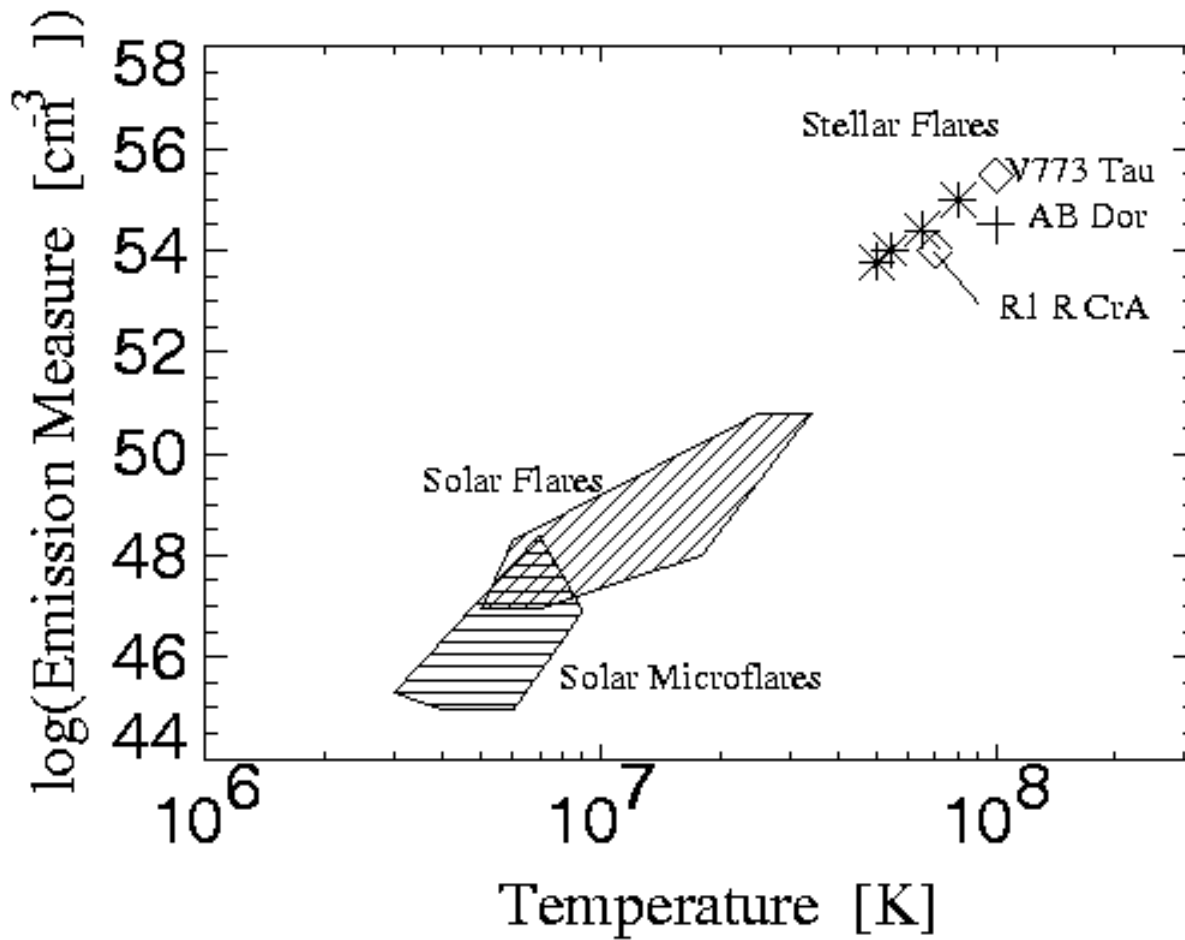
- フレアループの力学平衡

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

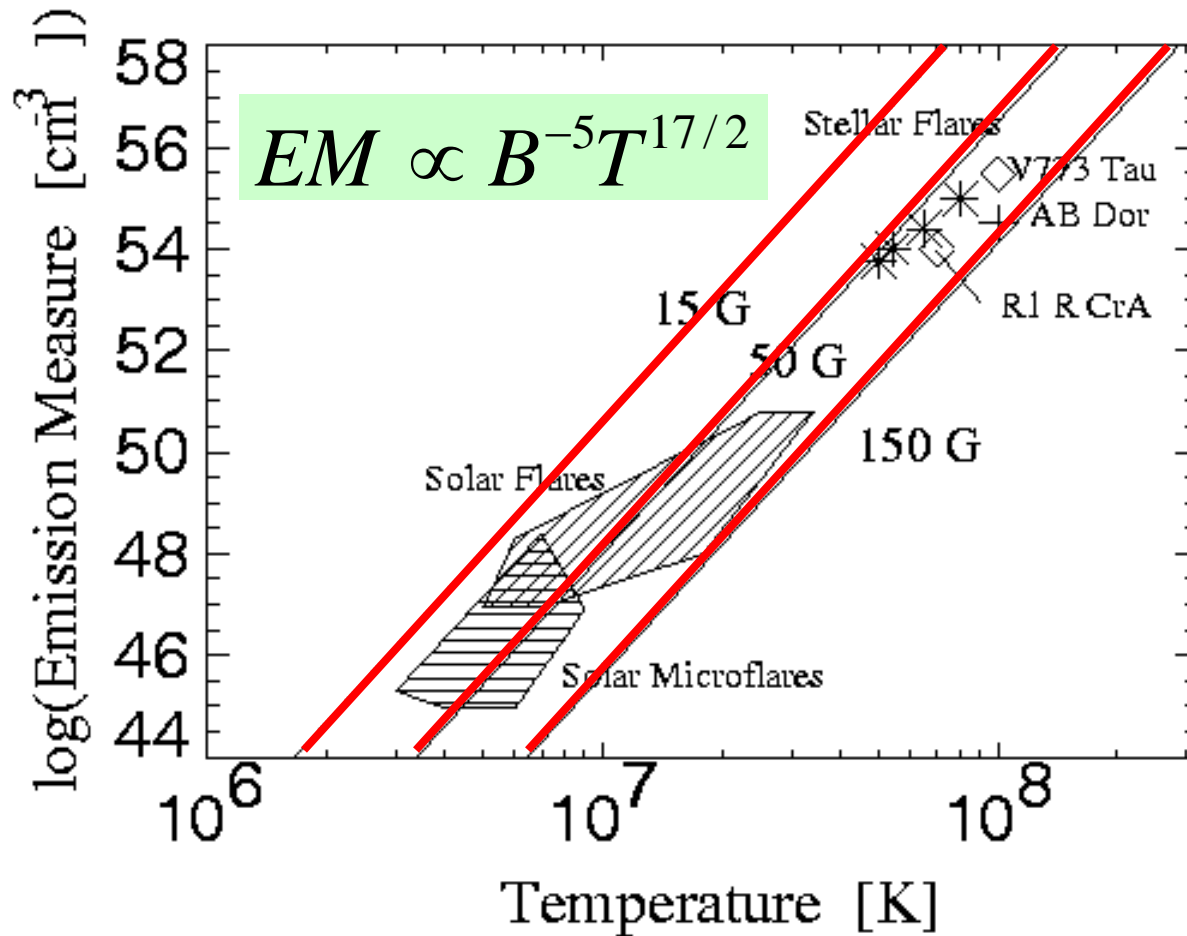
- 以上に温度の関係式を代入すると

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

# EM-T correlation for solar/stellar flares

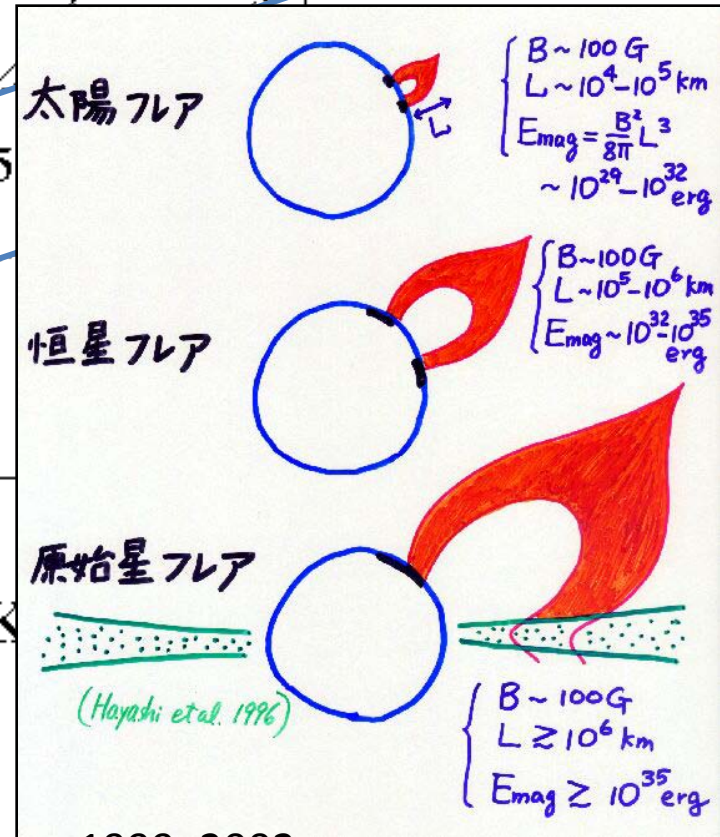
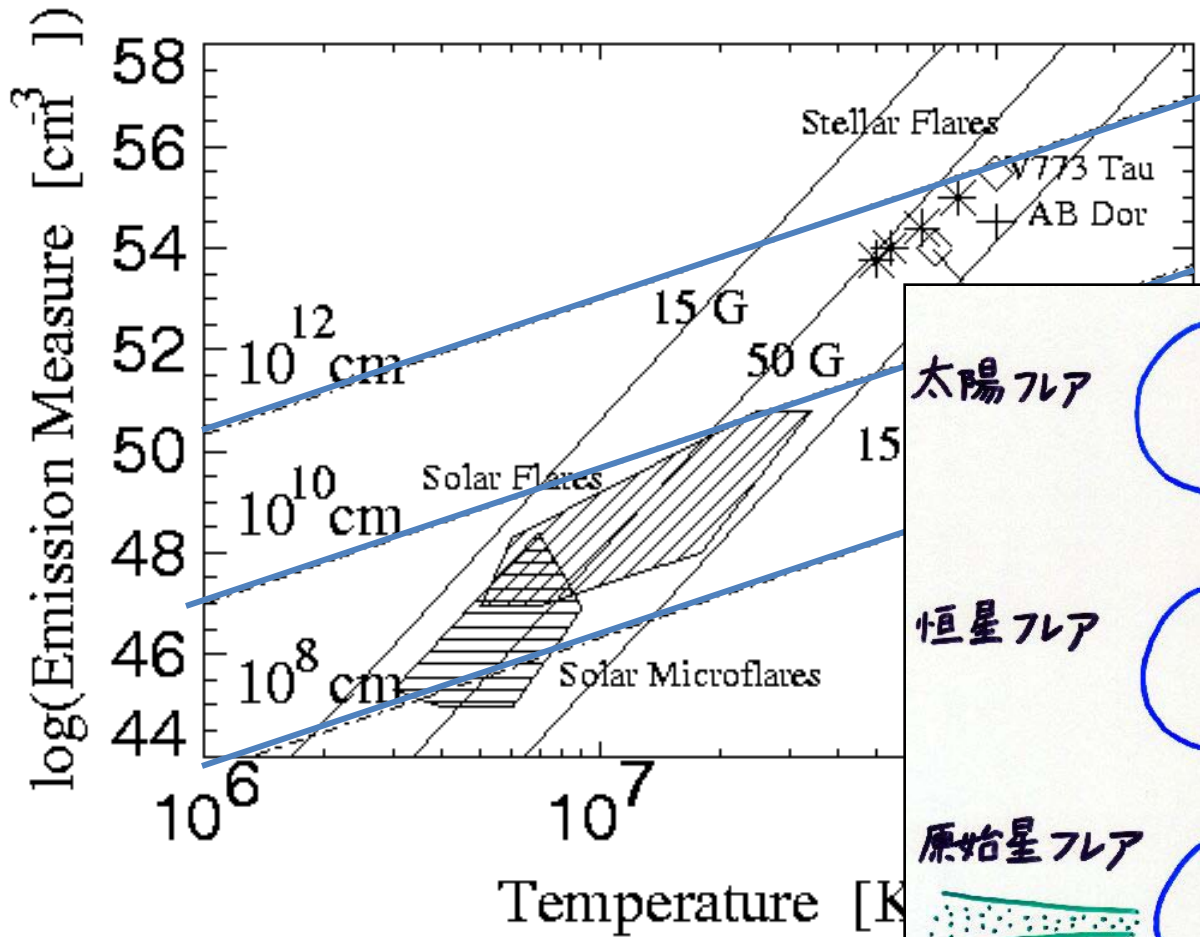


Magnetic field strength ( $B$ ) = constant



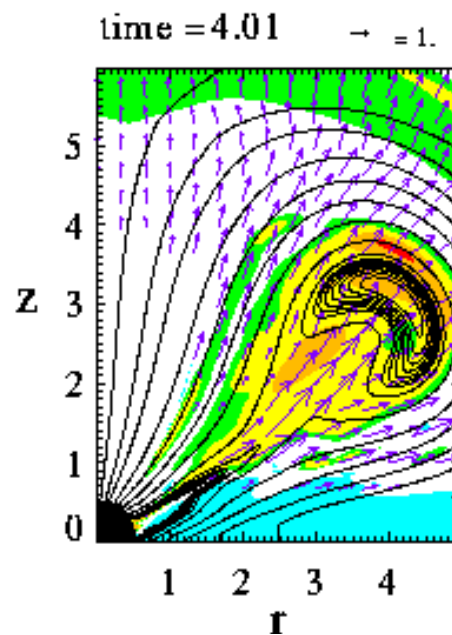
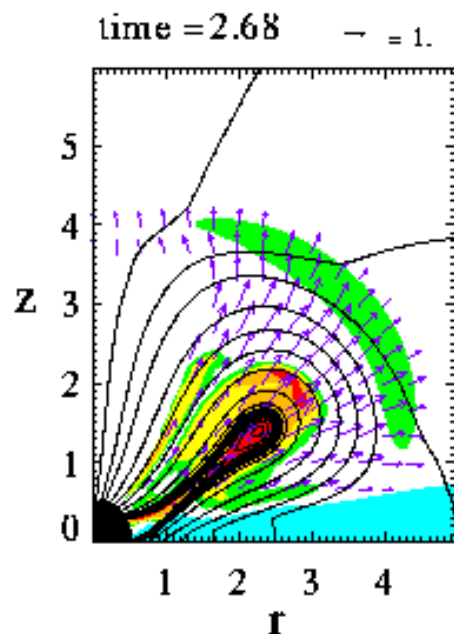
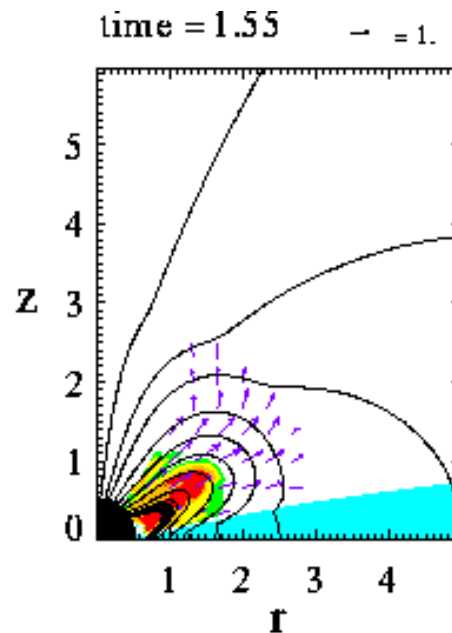
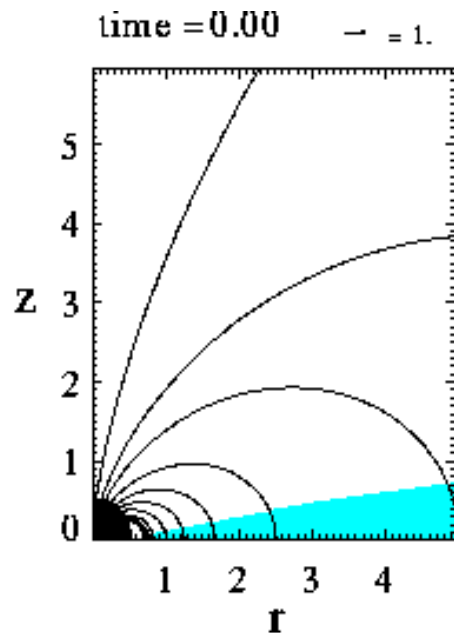
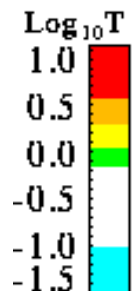
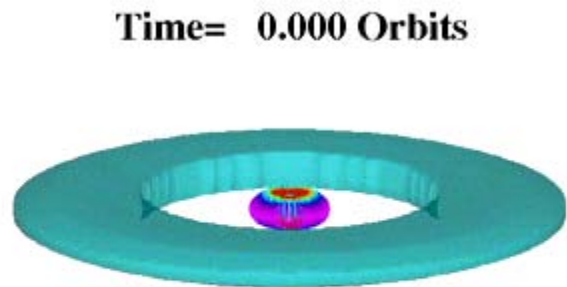
Magnetic field strengths of solar and stellar flares are comparable  $\sim 50\text{-}100 \text{ G}$

# フレアループの長さ＝一定



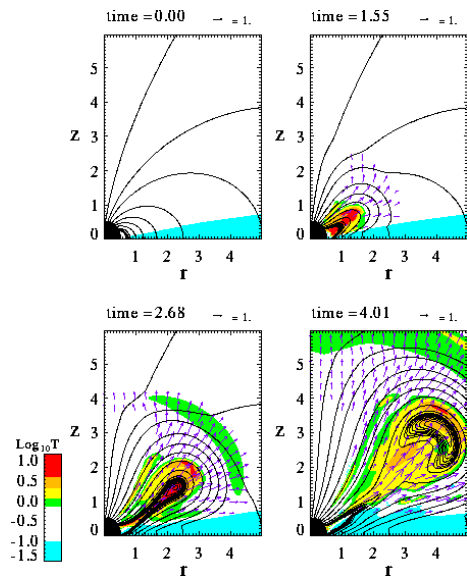
原始星フレアが1億度であるのは、  
フレアループのサイズが大きいため

# 原始星フレアとジェット のモデル (林、松元、 柴田 1996)



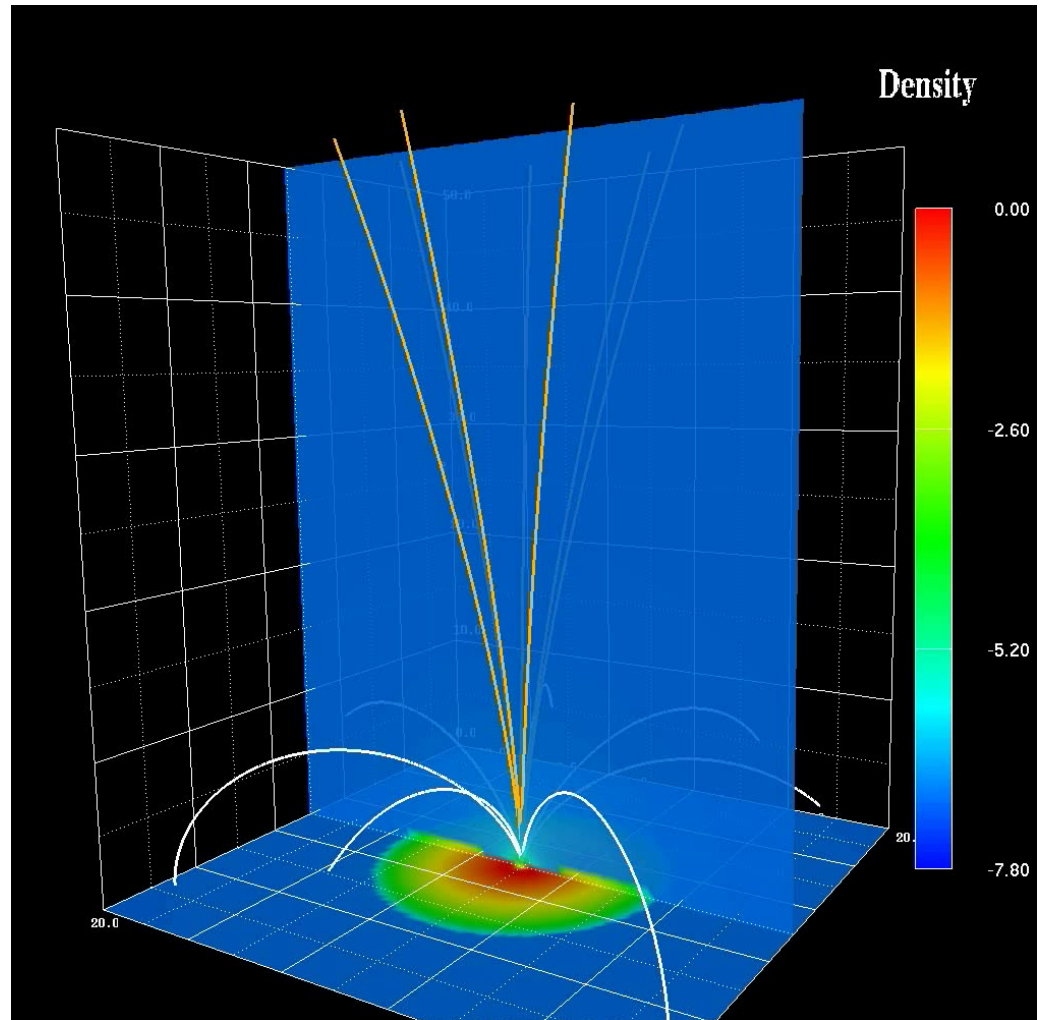


# MHD model of protostellar jets as an extension of Hayashi et al (1996) model (Uehara et al. 2005)

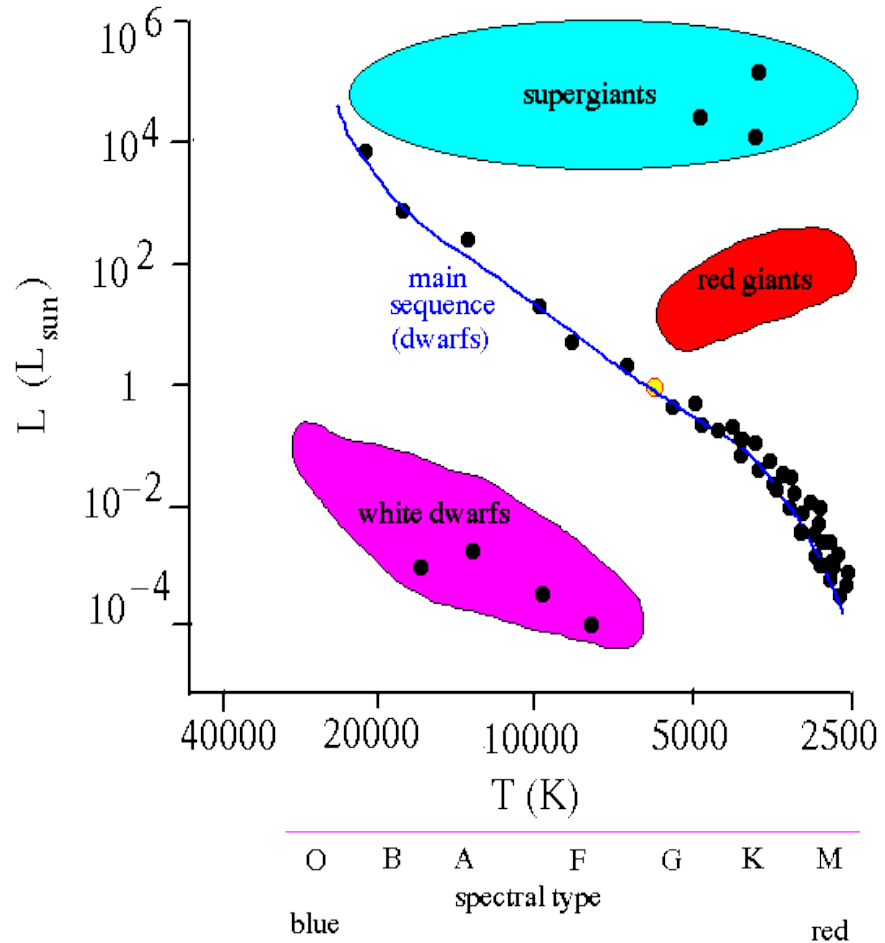
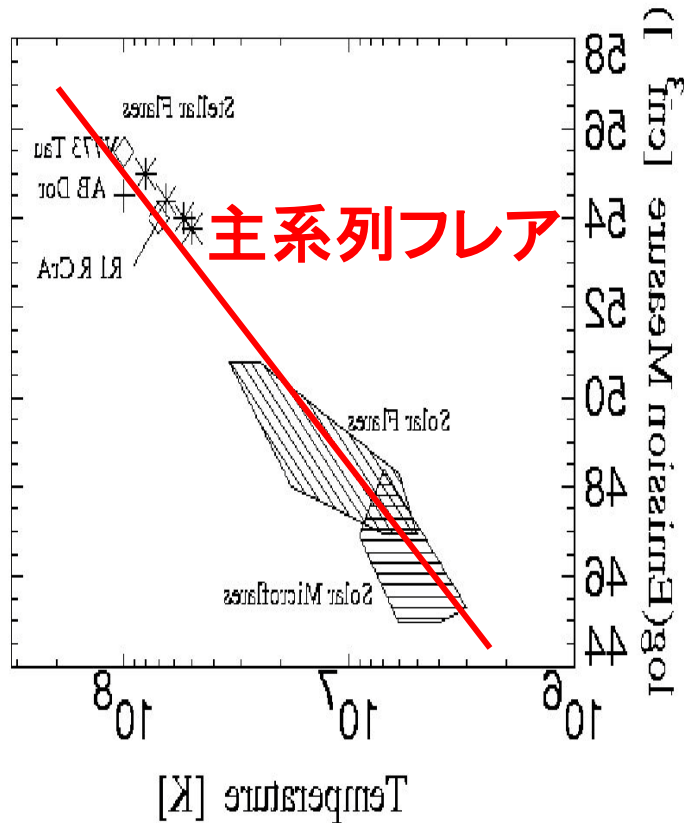


Hayashi et al (1996)

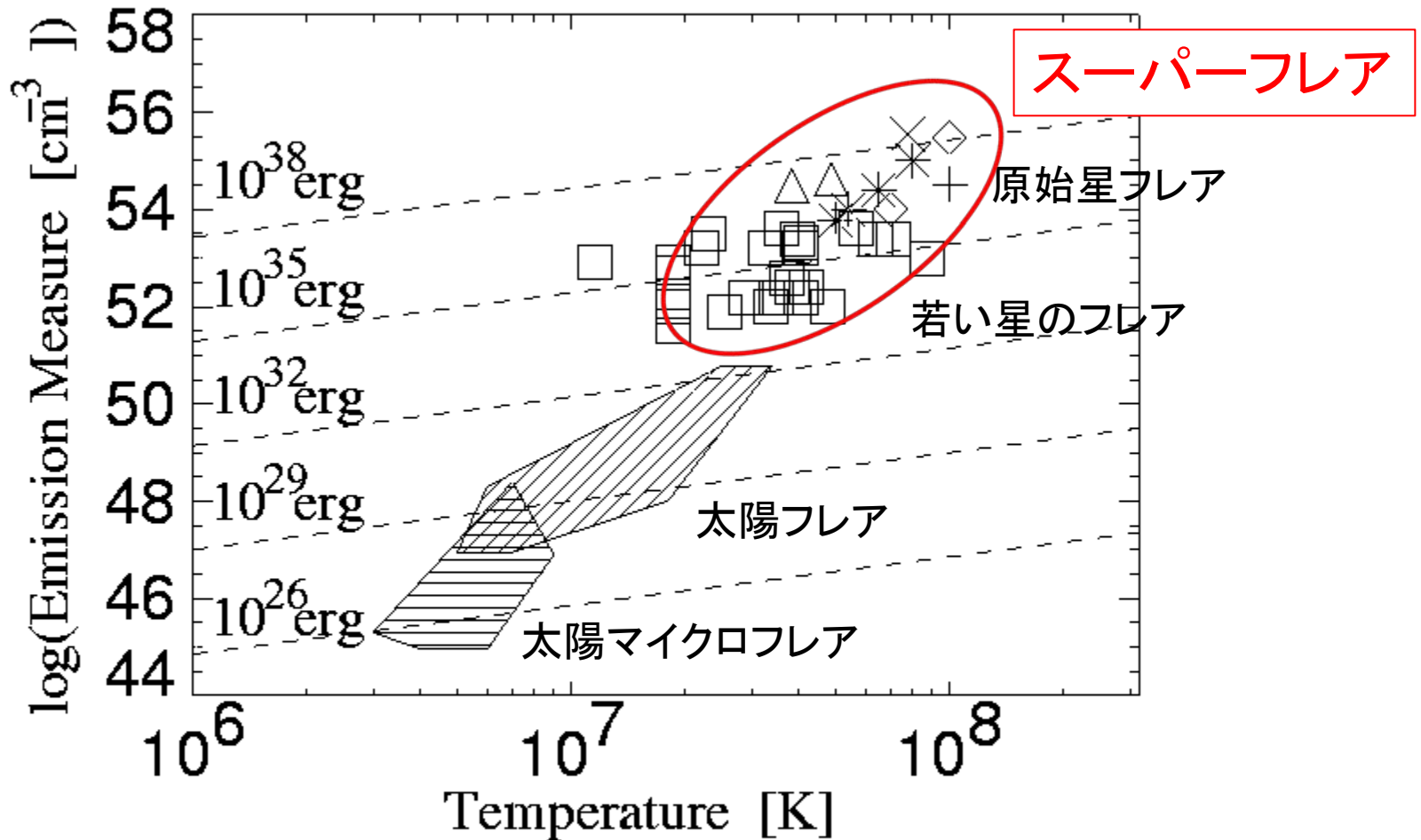
A jet consists of two component:  
**reconnection outflow** and  
**disk wind**



# フレアのEM-T図はHR図に似ている！ (Shibata and Yokoyama 2002)



# 恒星フレアのエネルギー



# Question

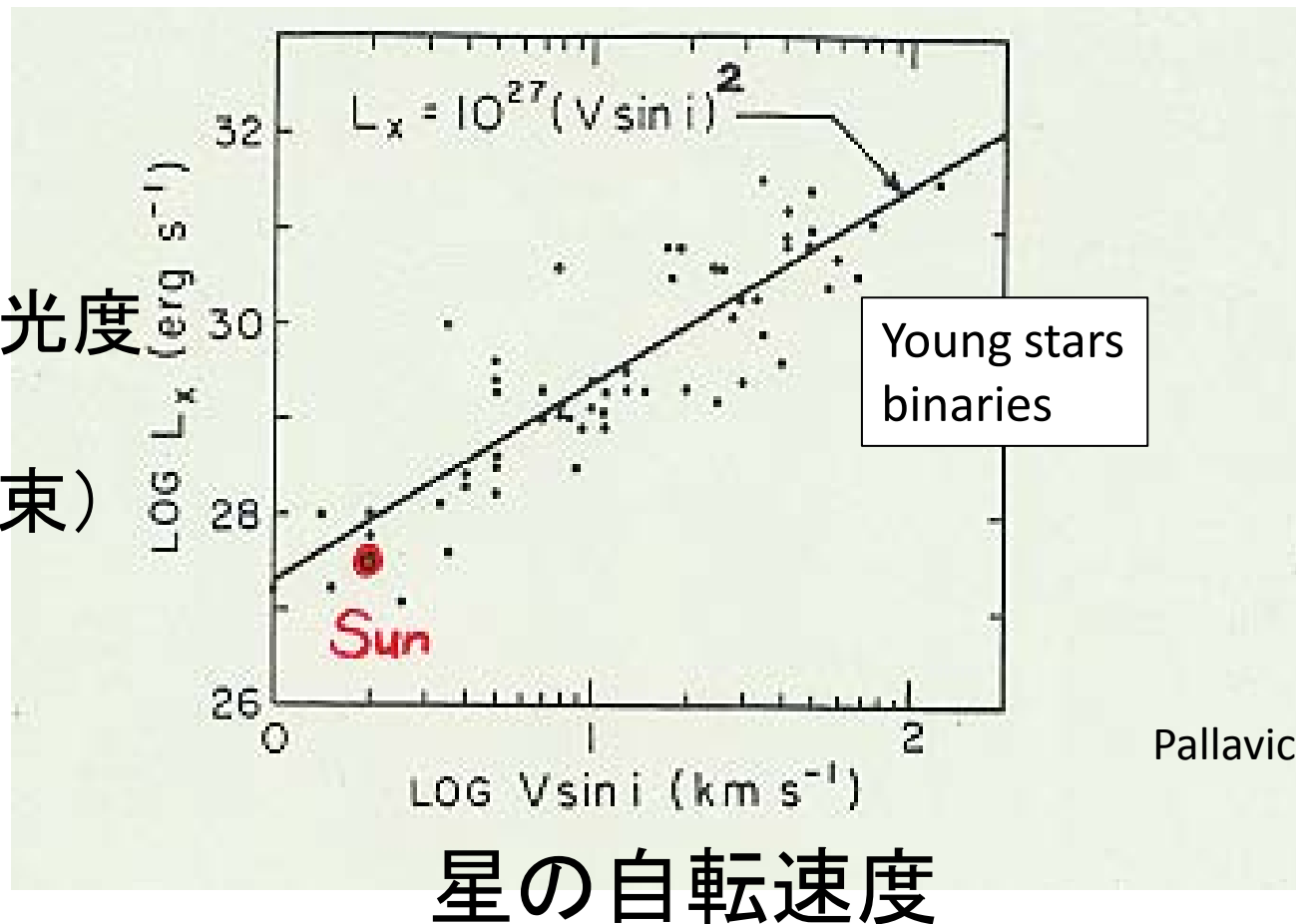
最大級の太陽フレア( $10^{32}$  erg)の、  
10倍～ $10^6$ 倍ものエネルギーの  
スーパーフレアは、  
果たして現在の太陽で起こるのか？

# Answer

- 太陽はすでに若くなく、自転速度も遅いので、現在は、それほど大きなフレアは起きない、と予想される。

なぜなら、(観測によれば)  
星のX線光度(～全磁束)は自転速度で  
決まっているから

星のX線光度  
(～全磁束)



Pallavicini 1981

星の自転速度

# Answer

- 太陽はすでに若くなく、自転速度も遅いので、現在は、それほど大きなフレアは起きない、と予想される。
- と、最近まで思っていたが、、、驚くべき天文観測の論文を発見！

# 通常の太陽型恒星におけるスーパーフレアの発見

Schaefer, B. E., King, J. R., Deliyannis, C. P.

ApJ, 529, 1026 (2000)

- 普通の太陽型恒星でスーパーフレア (最大の太陽フレアのエネルギーの**10倍~100万倍**) を9例発見
- スペクトル型 F8-G8 の主系列星
- 単独星、自転速度は遅い(太陽程度)、若い星ではない



# superflares

TABLE 1  
SUPERFLARES

Shaefer et al. (2000) ApJ 529, 1026

Star	Detector	$V_{\text{normal}}$	Amplitude	Duration	Energy (ergs)
Gmb 1830 .....	Photography	6.45	$\Delta B = 0.62$ mag	18 minutes	$E_B \sim 1 \times 10^{35}$
$\kappa$ Cet .....	Spectroscopy	4.83	$\text{EW}(\text{He}) = 0.13 \text{ \AA}$	$\sim 40$ minutes	$E \sim 2 \times 10^{34}$
MT Tau .....	Photography	16.8	$\Delta U = 0.7$ mag	$\sim 10$ minutes	$E_U \sim 1 \times 10^{35}$
$\pi^1$ UMa .....	X-ray	5.64	$L_X = 10^{29} \text{ ergs s}^{-1}$	$> \sim 35$ minutes	$E_X = 2 \times 10^{33}$
S For .....	Visual	8.64	$\Delta V \sim 3$ mag	17–367 minutes	$E_V \sim 2 \times 10^{38}$
BD + 10°2783 .....	X-ray	10.0	$L_X = 2 \times 10^{31} \text{ ergs s}^{-1}$	$\sim 49$ minutes	$E_X \gg 3 \times 10^{34}$
$\rho$ Aql .....	Photometry	5.11	$\Delta V = 0.09$ mag	$\sim 5$ –15 days	$E_{BV} \approx 9 \times 10^{37}$
5 Ser .....	Photometry	5.06	$\Delta V = 0.09$ mag	$\sim 3$ –25 days	$E_{BV} \approx 7 \times 10^{37}$
UU CrB .....	Photometry	8.63	$\Delta I = 0.30$ mag	$> \sim 57$ minutes	$E_{\text{opt}} = 7 \times 10^{35}$

ただし、たった9例なので、どこまで一般性があるか？

- それで、京大のグループで、Kepler 衛星で観測された太陽型恒星のデータ中に、スーパーフレアの証拠を探してみた。
- そしたら、なんと**360例以上のスーパーフレアを発見！**  
(Maehara et al. 2011, Shibayama et al. 2011, Nozu et al. 2011)

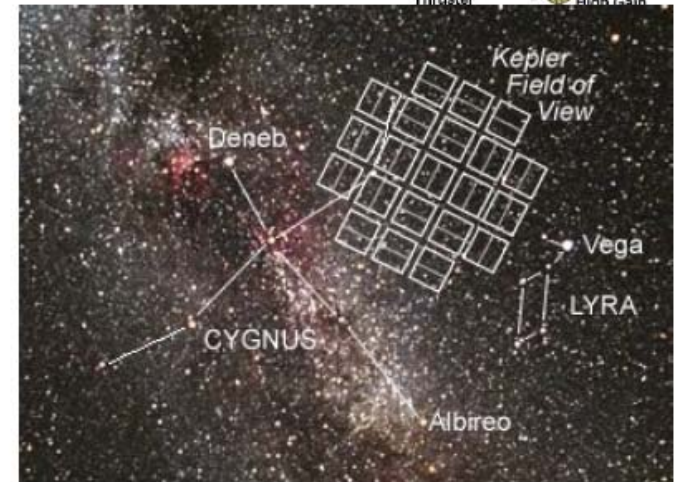
# 太陽型星における スーパーフレアの発見 I

○柴山拓也、柴田一成、前原裕之、本田敏志、野上大作、野津湧太、野津翔太、長尾崇史、草場哲(京都大学)、新井彰(京都産業大学)

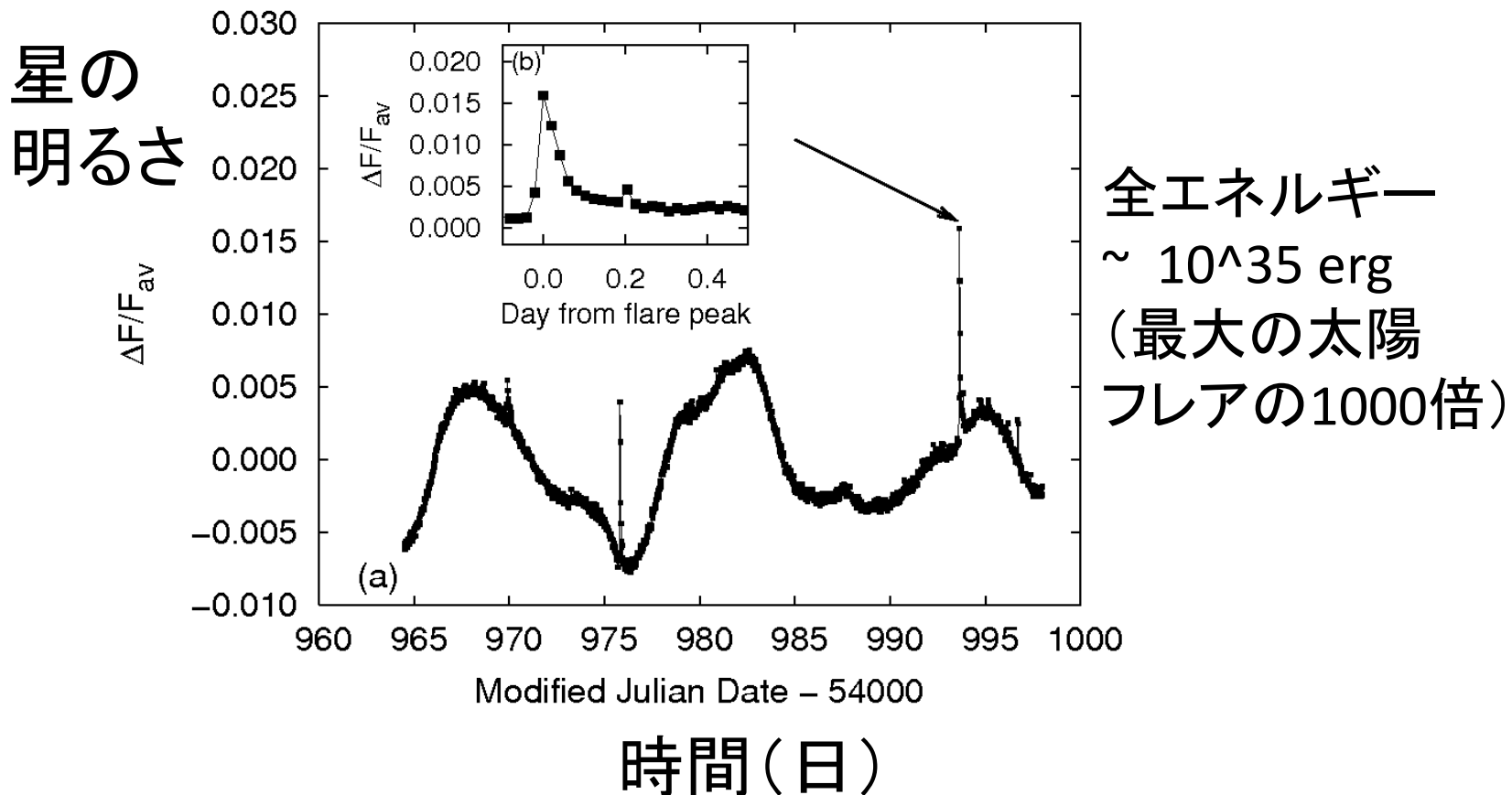
Maehara et al. (2011, Oct 14) submitted to **Nature**

# Kepler 衛星

- 太陽系外惑星探査衛星
- 惑星が中心星の前を通過するとき、星の明るさが少し減少する。それを検出することにより、惑星を検出。
- 95 cm 口径の反射望遠鏡
- はくちょう座と琴座の15万星を常時モニター観測
- 30分間隔の観測データを公開

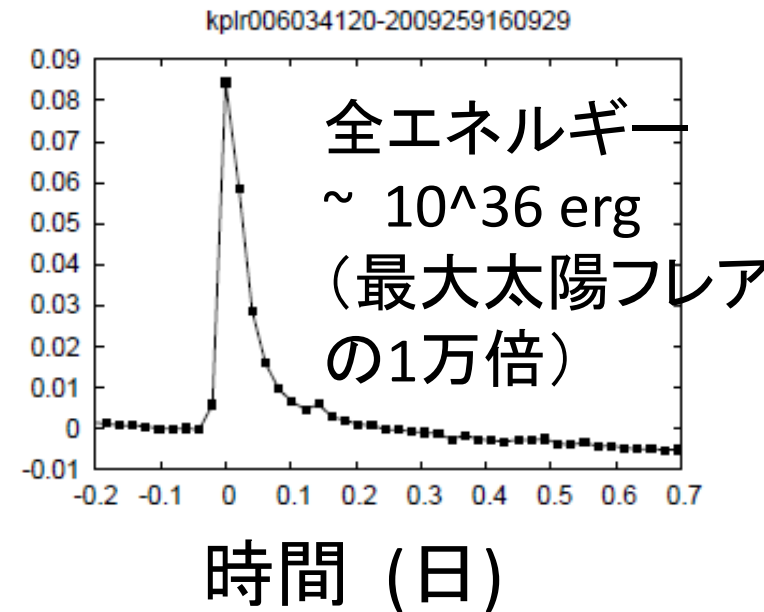
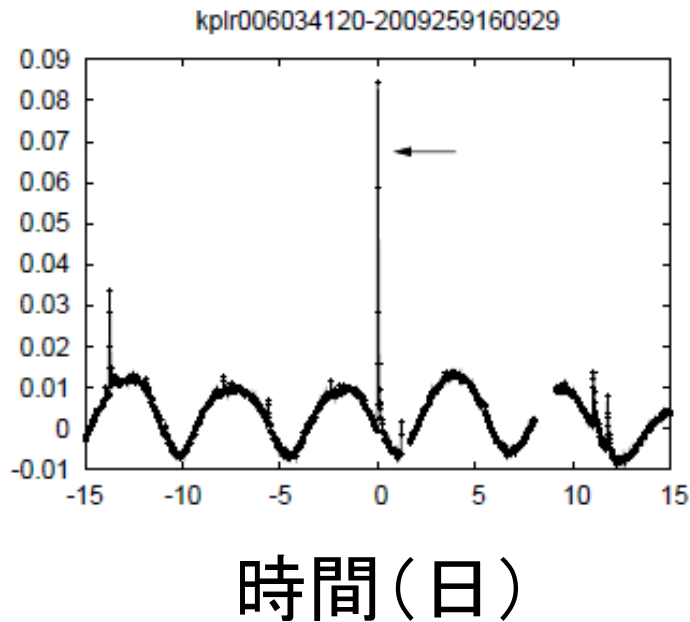


# ケプラー衛星によって観測された スーパーフレア(例1)

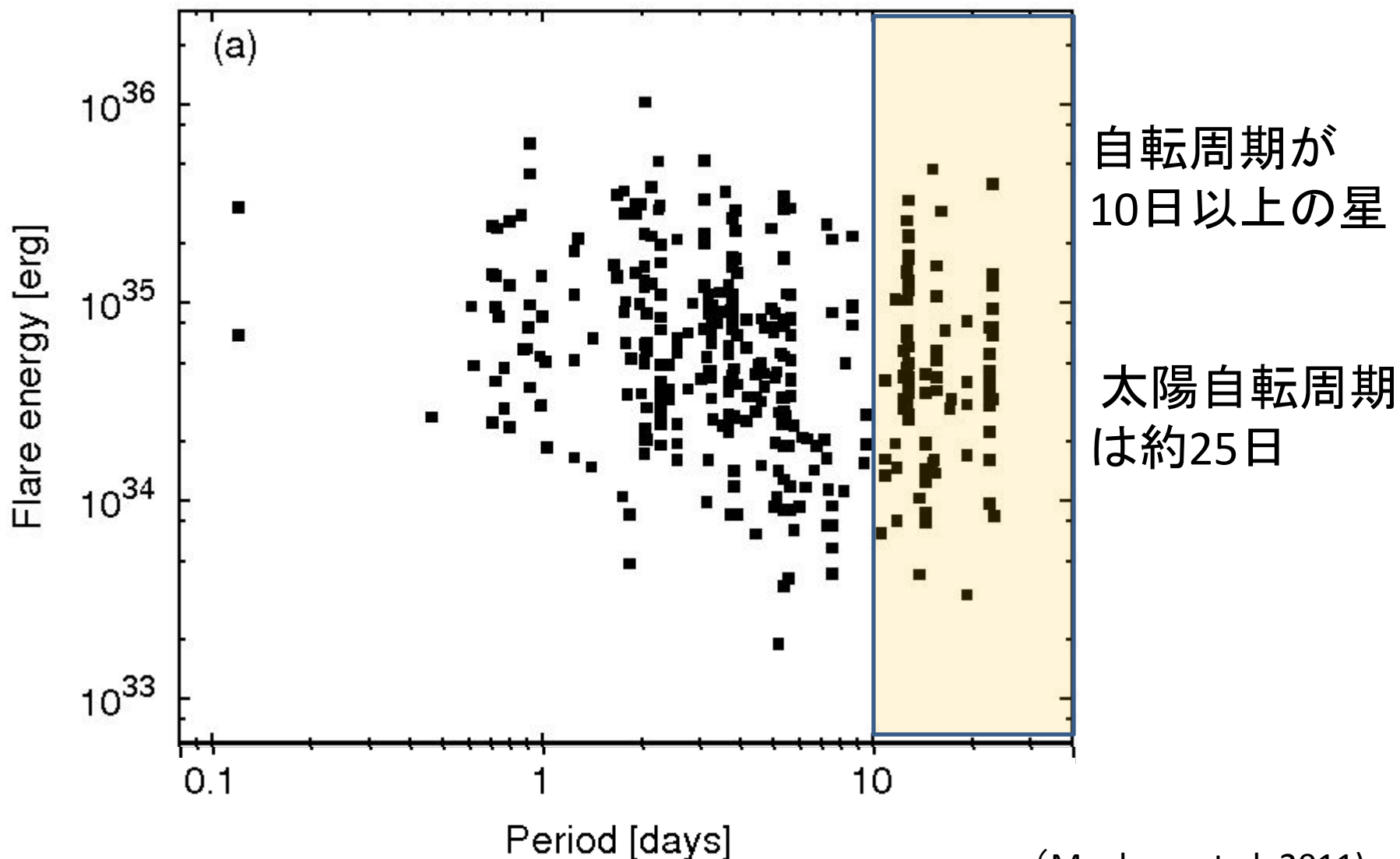


# ケプラー衛星によって観測された スーパーフレア(例 2)

星の明るさ

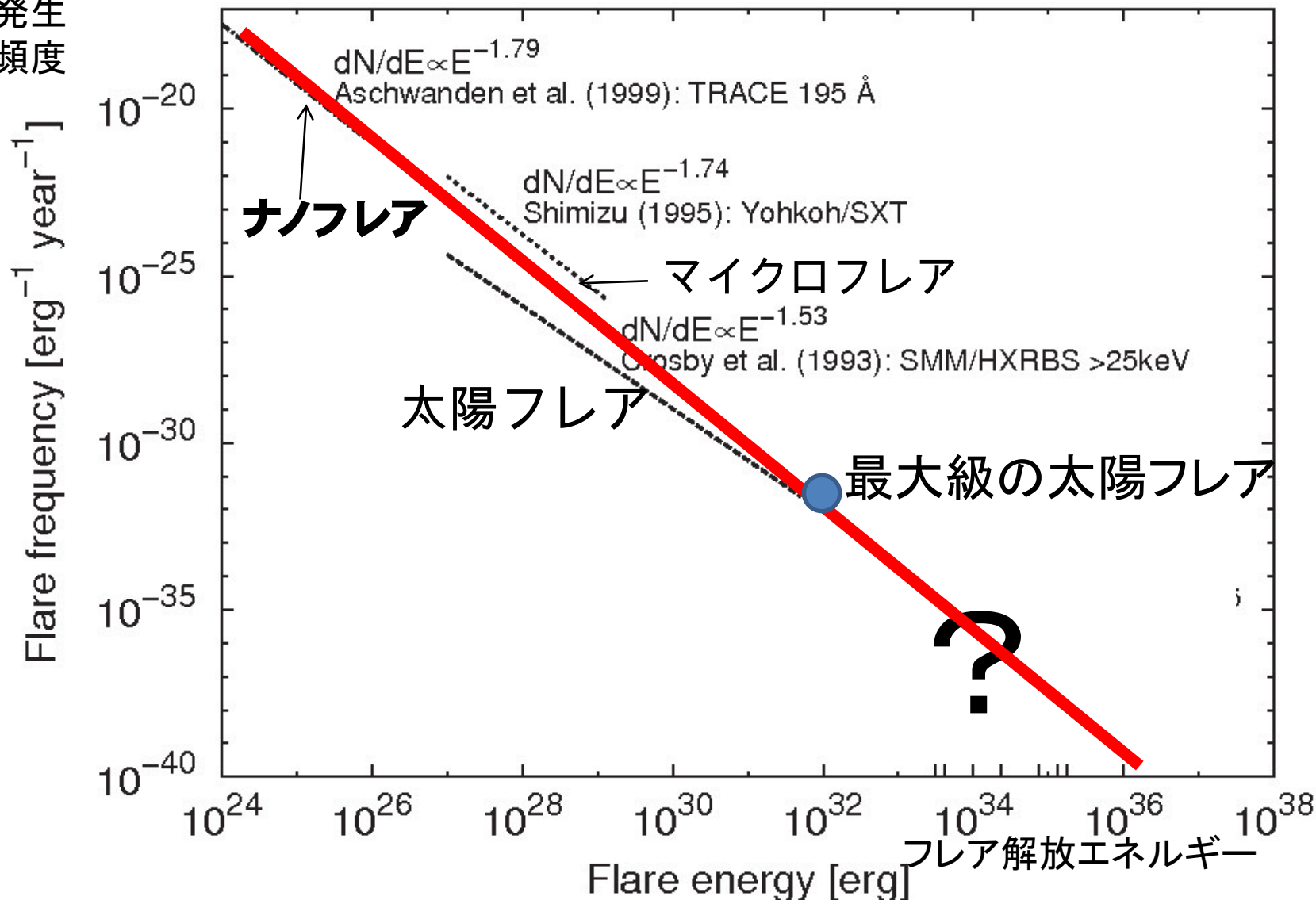


# フレア・エネルギー vs 自転周期



# 太陽フレアとスーパーフレアの発生頻度分布 (Maehara et al. 2011)

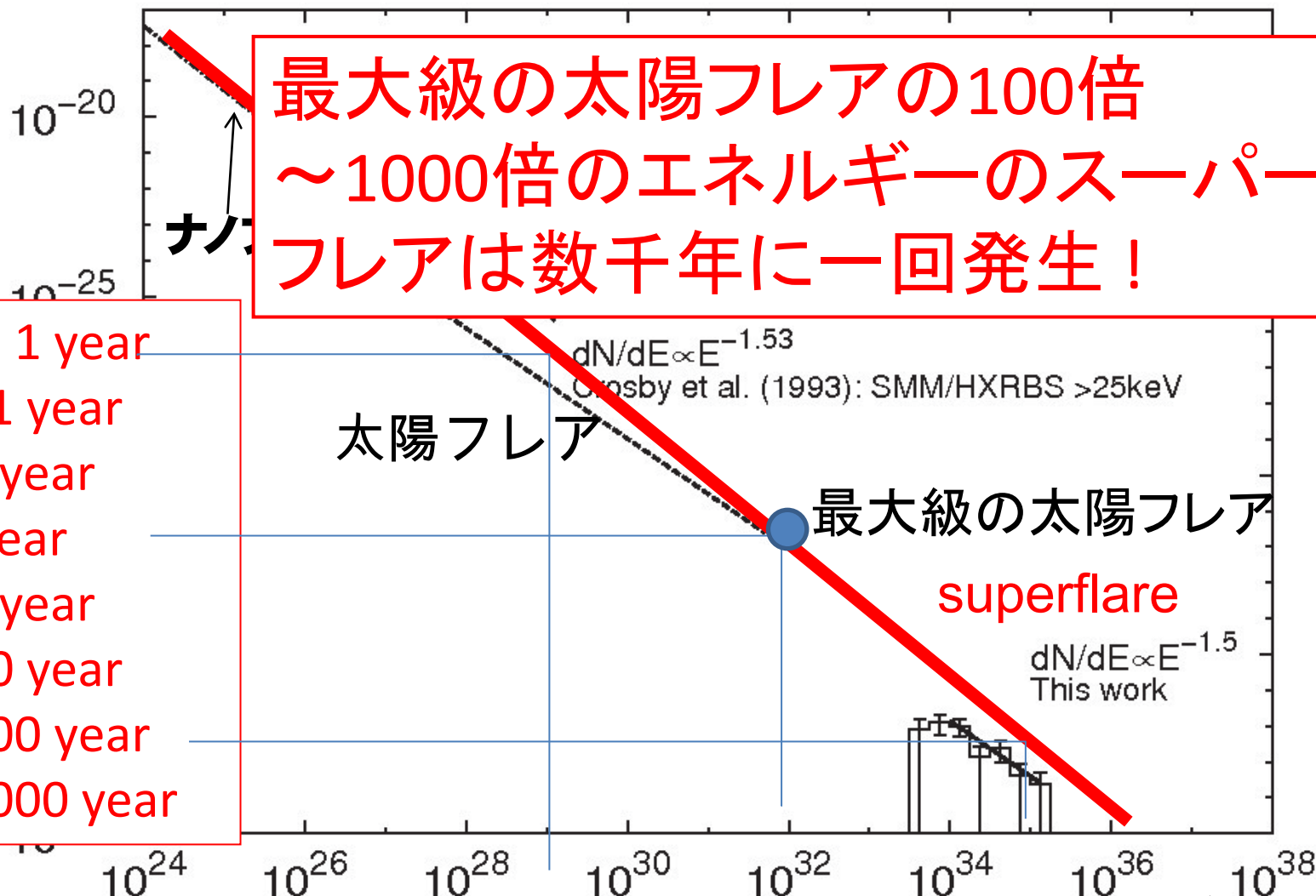
フレア  
発生  
頻度





# 太陽フレアとスーパーフレアの発生頻度分布 (Maehara et al. 2011)

フレア  
発生  
頻度



最大級の太陽フレアの100倍  
~1000倍のエネルギーのスーパー  
フレアは数千年に一回発生!

- 1000 in 1 year
- 100 in 1 year
- 10 in 1 year
- 1 in 1 year
- 1 in 10 year
- 1 in 100 year
- 1 in 1000 year
- 1 in 10000 year

C M X X10 X1000 X100000

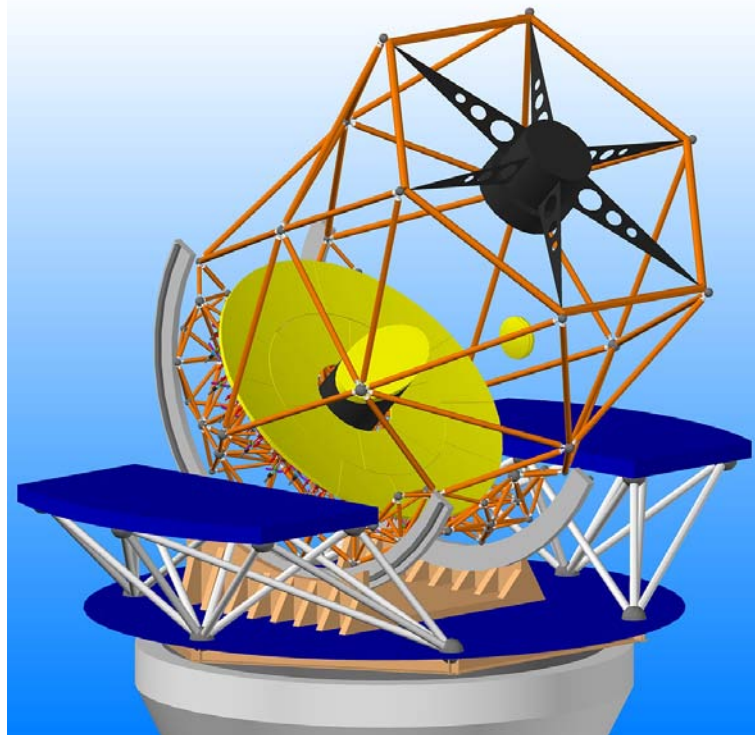
スーパースーフレアを起こしている太陽型星の分光観測が  
きわめて重要！

## 岡山 3.8m 新技術 光赤外線望遠鏡計画



New Technology

Making Mirrors with  
Grinding  
Segmented mirror  
Ultra Light mounting



High speed photometric  
And spectrometric  
Observation of  
transient objects

Gamma ray bursts  
Stellar flares  
(superflares)

Will be completed ~ 2014

courtesy of Prof. Nagata (Department of Astronomy , Kyoto University)

# まとめ

- 最近の太陽観測はフレア ( $10^{29}$ - $10^{32}$  erg)における磁気リコネクションの証拠を多数発見。フレアのリコネクション説は現象論的にはほぼ確立。マイクロフレア、ナノフレアについても、リコネクションの証拠が続々と見つかる。⇒統一モデル。
- 恒星フレアについても、太陽フレアと共通の性質が見つかりつつある。フレアのemission measureと温度の相関関係が、太陽と恒星で幅広く成りたつことが発見された。⇒磁気リコネクション説で統一的に説明可能。
- ケプラー衛星の観測データから、自転速度が太陽と同程度のG型星で、スーパーフレア( $10^{34}$ - $10^{35}$  erg)が数千年に一度の頻度で起こることが判明。

# まとめ(続)と今後の課題

- 最大級のフレア( $10^{32}$ erg)の100倍～1000倍のスーパーフレアは現在の太陽で数千年に1回の確率で起こる可能性がある！
- スーパーフレアの原因は巨大黒点の形成にあるらしい。
- 現在の(自転速度の遅い)太陽で、巨大黒点はいかにして形成されるのか？
- 可視光恒星フレア=White light flare の物理？
- スーパーフレアの性質？ 予兆は？
- スーパーフレアが起きたら地球や文明社会はどうか？ 全地球規模の大停電？

ご清聴ありがとうございました