

太陽型星のスーパーフレア

前原裕之

(国立天文台岡山天体物理観測所)

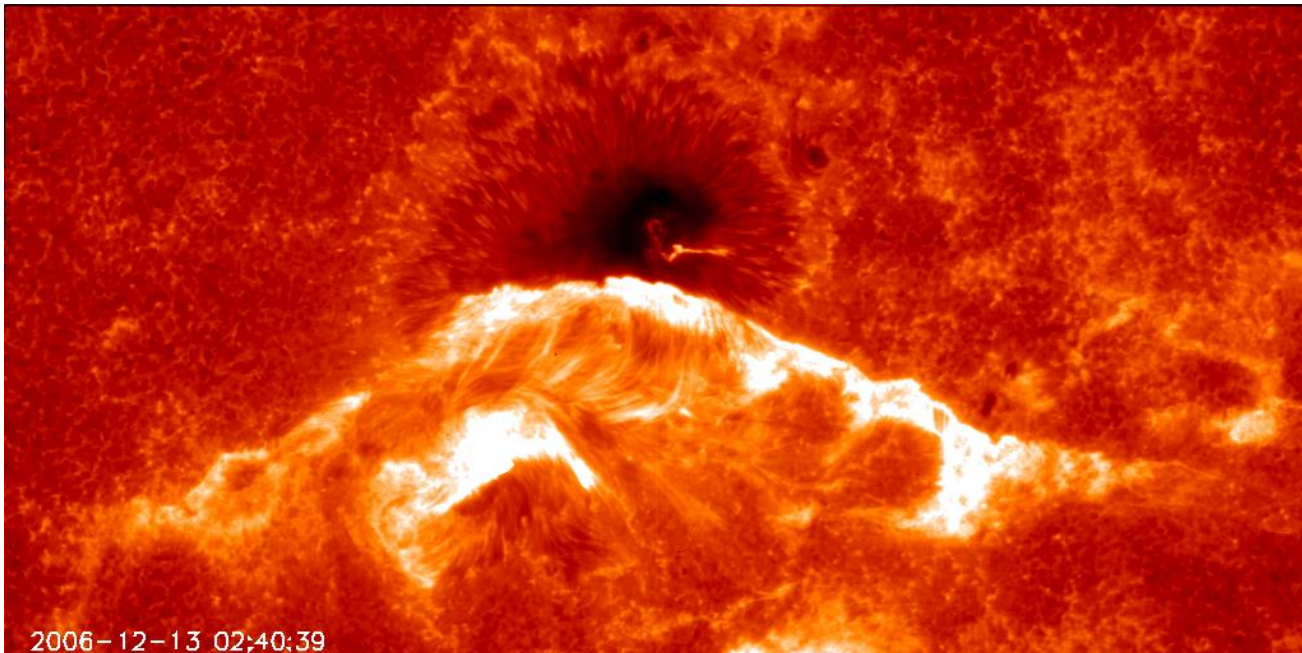
野津湧太, 野津翔太, 行方宏介, 幾田佳, 石井貴子, 野上大作, 柴田一成,
山敷庸亮(京都大学), 柴山拓也(名古屋大学), 本田敏志(兵庫県立大学)

Outline

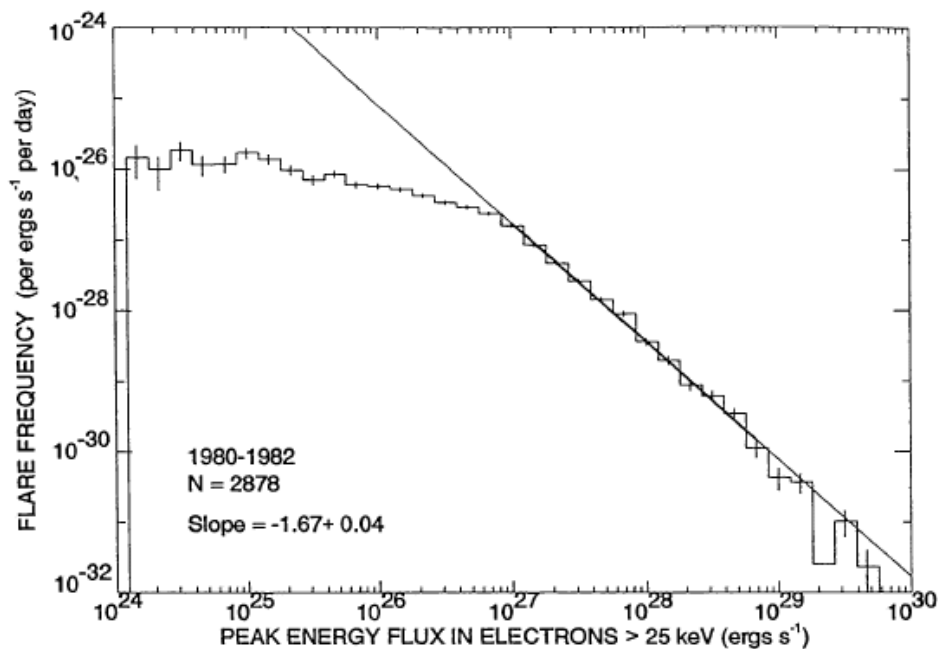
- 太陽型星のスーパーフレア
 - スーパーフレアの統計的性質
 - 星の性質との関係
- 太陽型星の巨大黒点
 - サイズ分布 etc.
 - スーパーフレアの関係
- Keplerで分かったことのまとめと今後の展望

太陽フレア

- 太陽の大気(コロナ)中で起こる爆発現象
 - 太陽の一部が明るく光るように見える
- 黒点のすぐ近くで起こる
 - 黒点付近の磁場エネルギーが磁気リコネクションで解放されることで生じると考えられている



太陽フレアの発生頻度



Crosby et al. 1993, Solar Physics, 143, 275

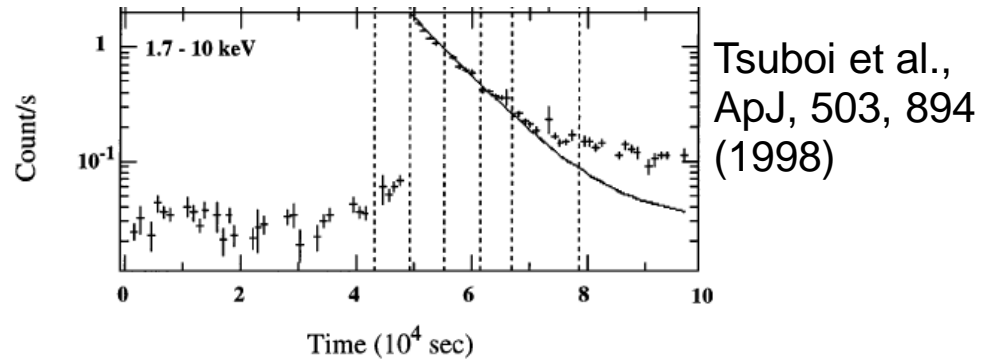
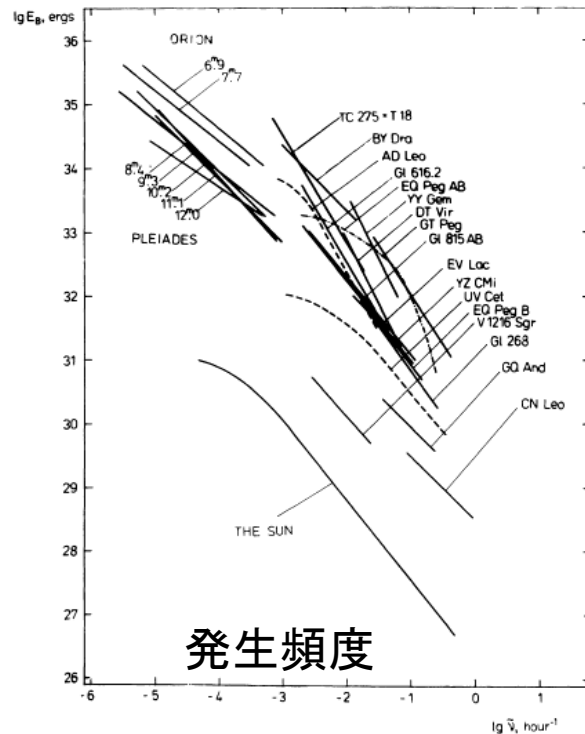
- 大きな太陽フレアほど起こりにくい
- エネルギーが10倍大きいフレアは発生する回数が1/10
- 最大級の太陽フレアはおよそ10年に1回発生
 - エネルギーは10³² erg

スーパーフレア

- フレア自体は太陽以外の星でも起こる
 - 最大級の太陽フレアの100万倍のエネルギーを放出するフレアが観測されたこともある

→ スーパーフレア

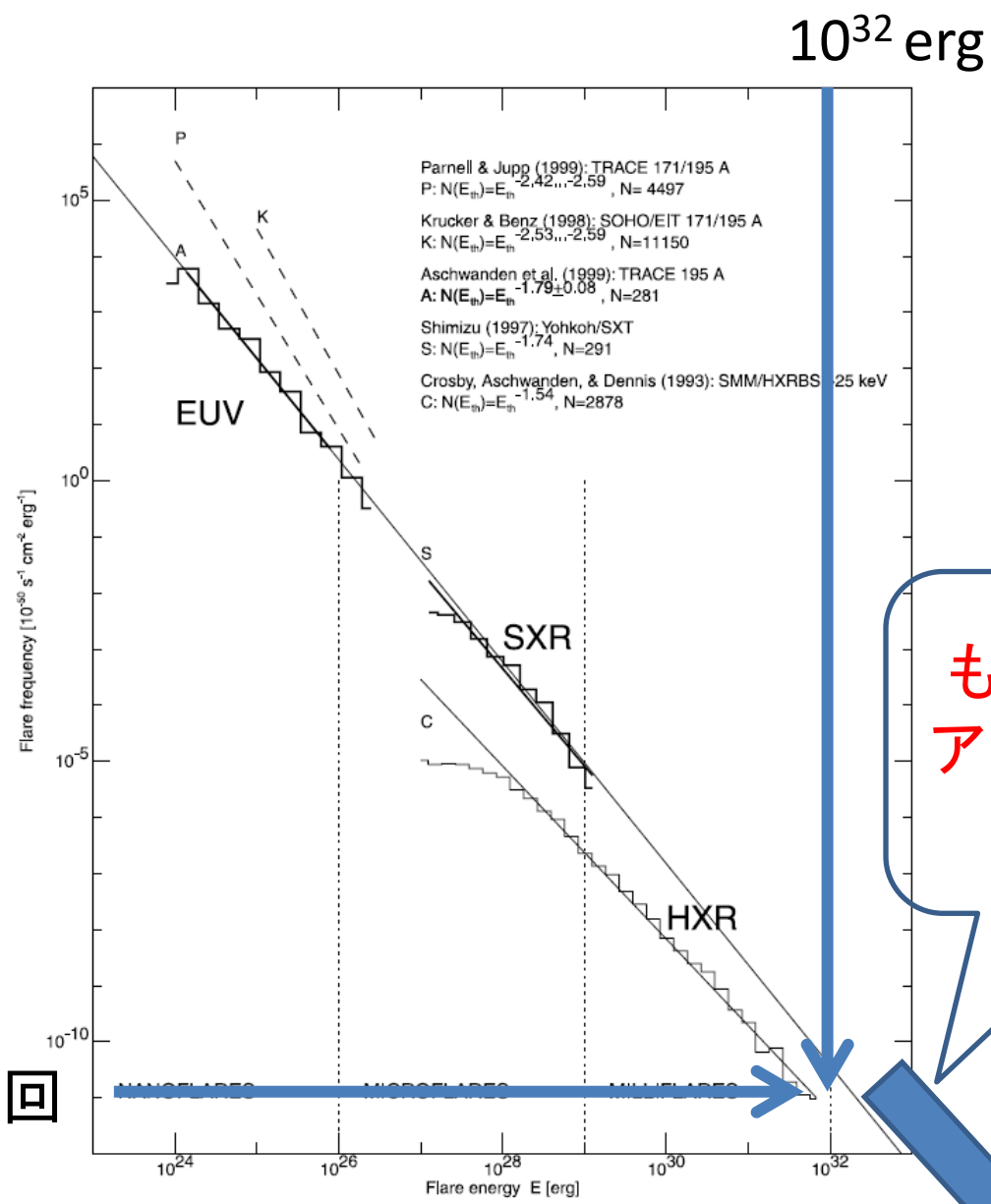
フレアのエネルギー



- スーパーフレアを起こす星のほとんどは連星や若い星
 - 太陽とは性質が異なる
- 太陽では起こるか？
 - 太陽と似た性質の星
 - わずか9例の観測例 (Schaefer et al. 2000)

発生頻度

10年に1回



もっと大きいフレアは起こらないのか？

フレアのエネルギー

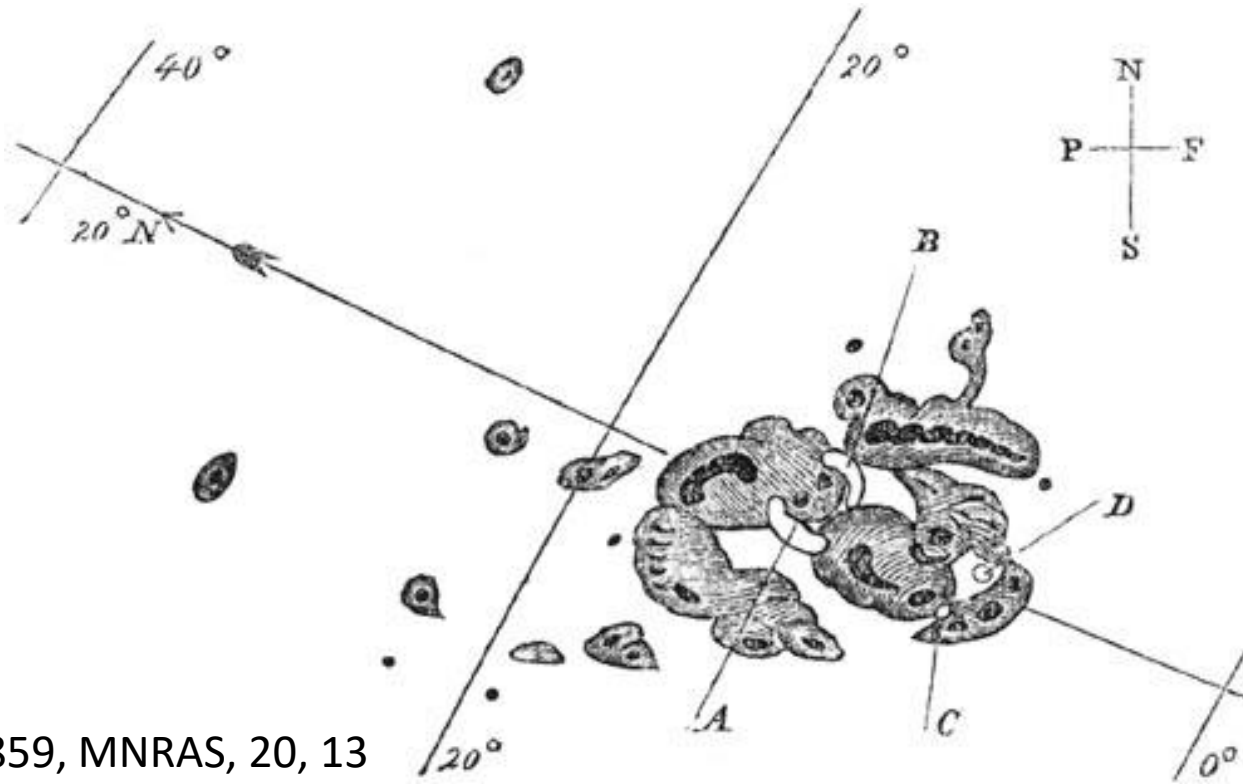
太陽でスーパーフレアは起こるか？

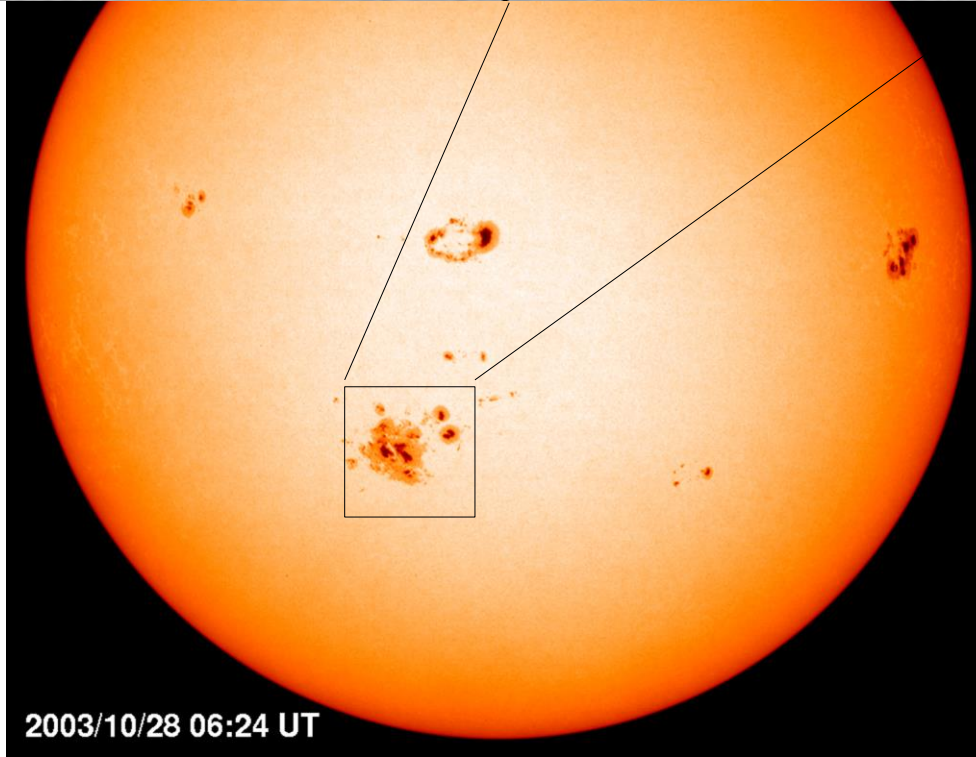
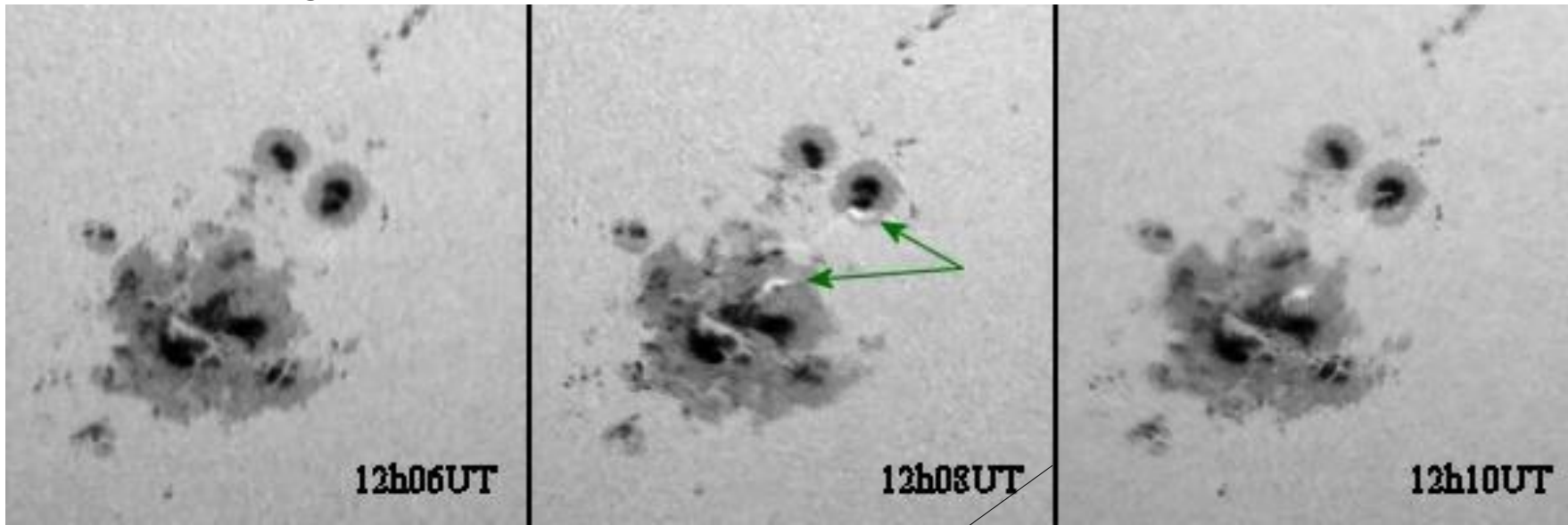
- スーパーフレアはめったに起こらない(はず)
 - 10倍大きなフレアは起こる頻度が10分の1
 - これまでに観測されている最大級の太陽フレアの頻度はおよそ10年に1回
 - 太陽フレアの1000倍のスーパーフレア
→ 10000年に1回
- 人類の太陽フレア観測の歴史: ~160年
 - 100年に1回クラスの巨大フレア(キャリントンフレア)よりも大きなフレアがあるのかどうかは分かっていない

キャリントンフレア

- 1859年9月1日

- 太陽黒点の観測をしていたイギリスのキャリントンとホジソンによって発見された。
- 黒点のすぐ近くが明るく輝き、5分程度で見えなくなった
 - 今日では「白色光フレア」と呼ばれる現象





白色光フレアの
観測例

太陽でのスーパーフレア

- 太陽フレアに起因する現象を反映した長期間のデータを使う
 - 古文獻(低緯度オーロラ etc. の記録)
 - Hayakawa et al. (2017)など
 - 木の年輪 (^{14}C の時間変化)
 - Miyake et al. (2012, 2013)など
 - Ice core (^{10}Be , ^{36}Cl の時間変化)
 - Mekhaldi et al. (2015)など

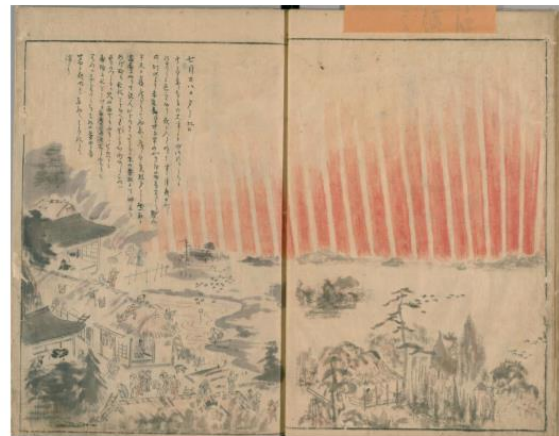


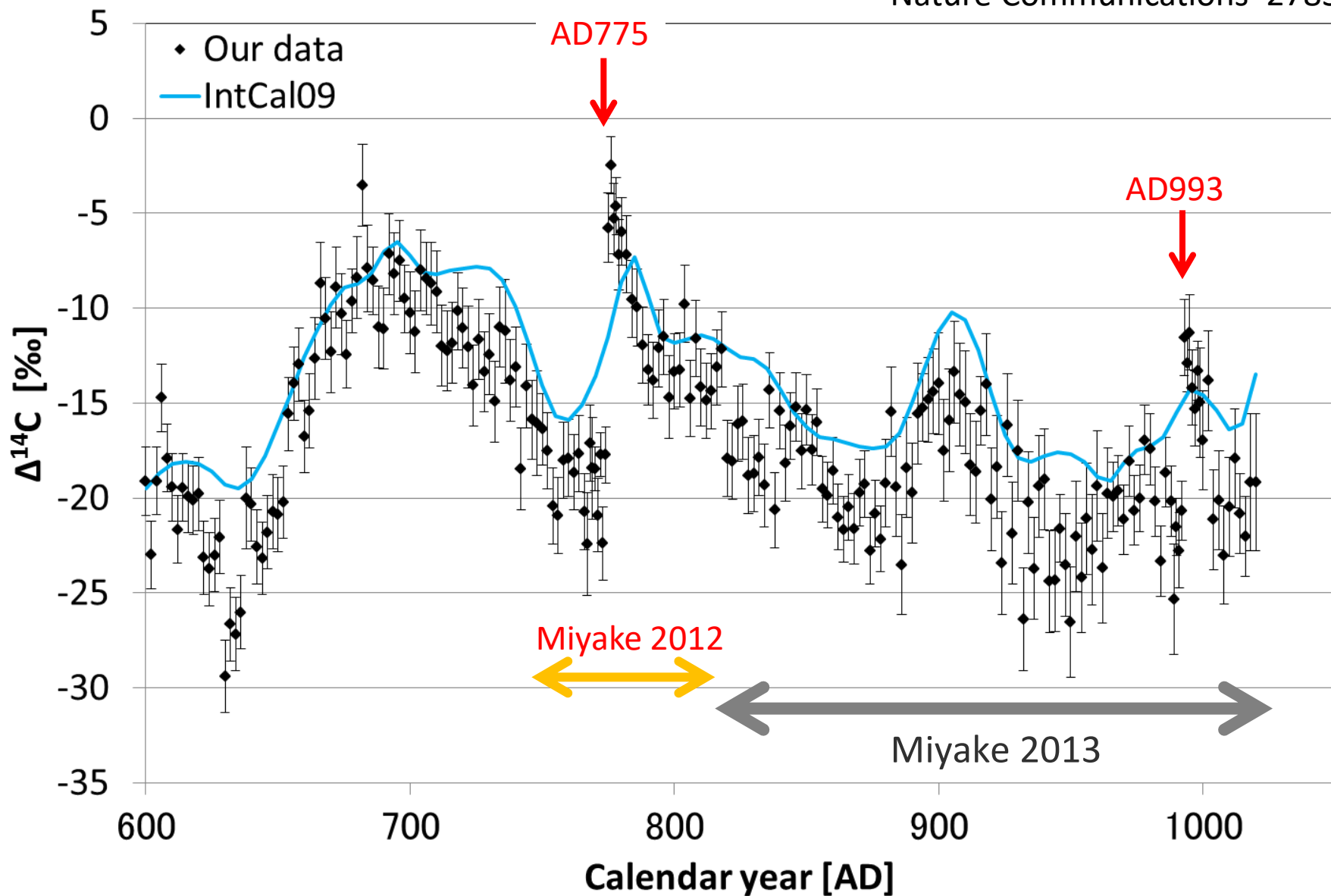
Fig. 1. J091762 = MS Special 7-59, National Diet Library, ff. 6b-7a (at Nagoya); corresponding to the record J091762 in the Table 1 in the Supplemental Data. (Courtesy: the National Diet Library)

Hayakawa et al. (2017)

- 太陽と同じ性質の星をたくさん観測する
 - 10,000年に1回のイベントでも10,000個の星を観測すれば1年に1回は観測される(はず)
 - 太陽と同じG型主系列星をたくさん観測して、フレアが起こる時に星が明るくなる現象を探す

^{14}C の急激な増加

From Miyake et al. (2013)
Nature Communications 2783

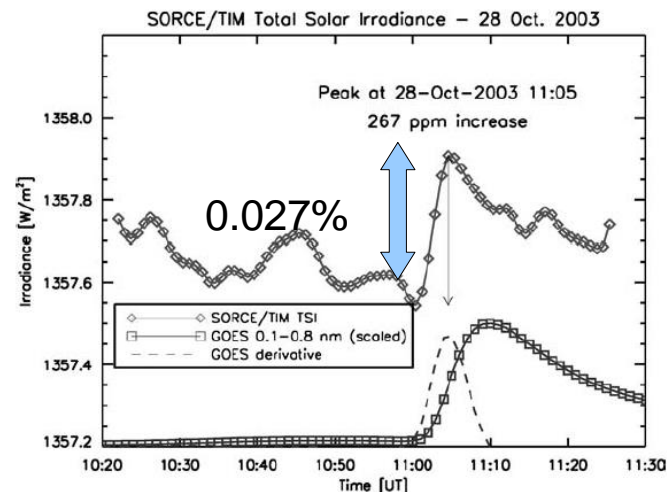


太陽型星のフレア

- 星は表面を分解して観測できない → **星全体の明るさを測定**
 - 最大級の太陽フレアでも太陽の明るさは**1万分の1**しか明るくならない
 - 10^{32} erg/ 10^3 秒 $\sim 10^{29}$ erg/s $\Leftrightarrow L_{\text{Sun}} \sim 10^{33}$ erg/s
 - 太陽フレアの1,000倍だとしても、10%しか増光しない
- スーパーフレアはめったに起こらない
- フレアはいつ起こるかわからない

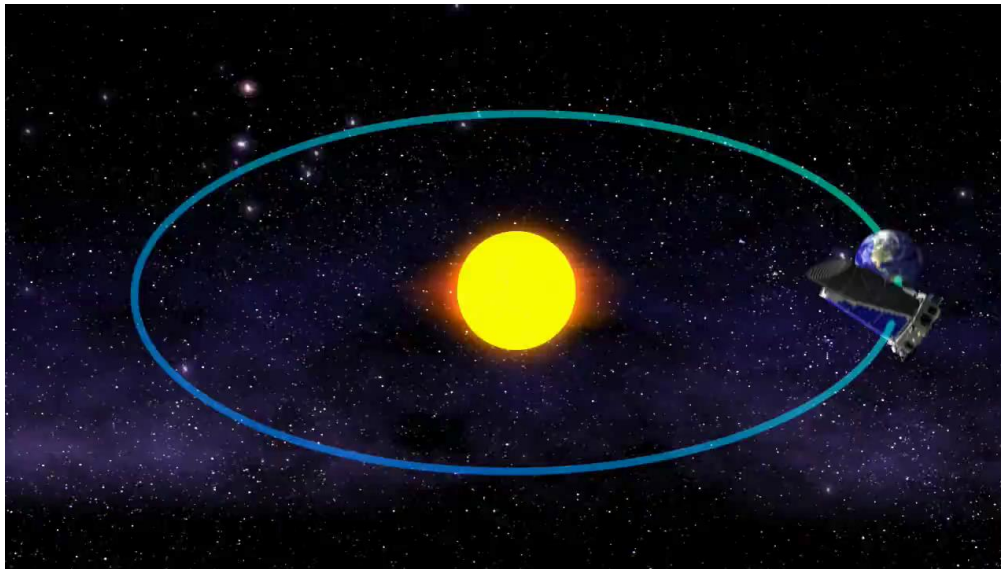
→ 非常に多くの星を、極めて高い精度で、連続して明るさを測定し続ける必要がある。

太陽フレアによる太陽の明るさの変化→

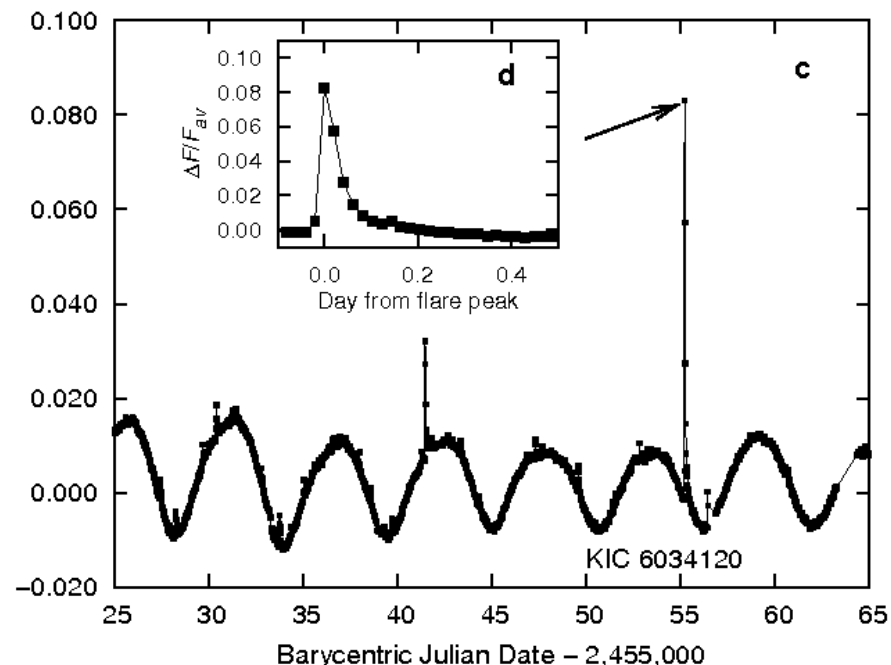
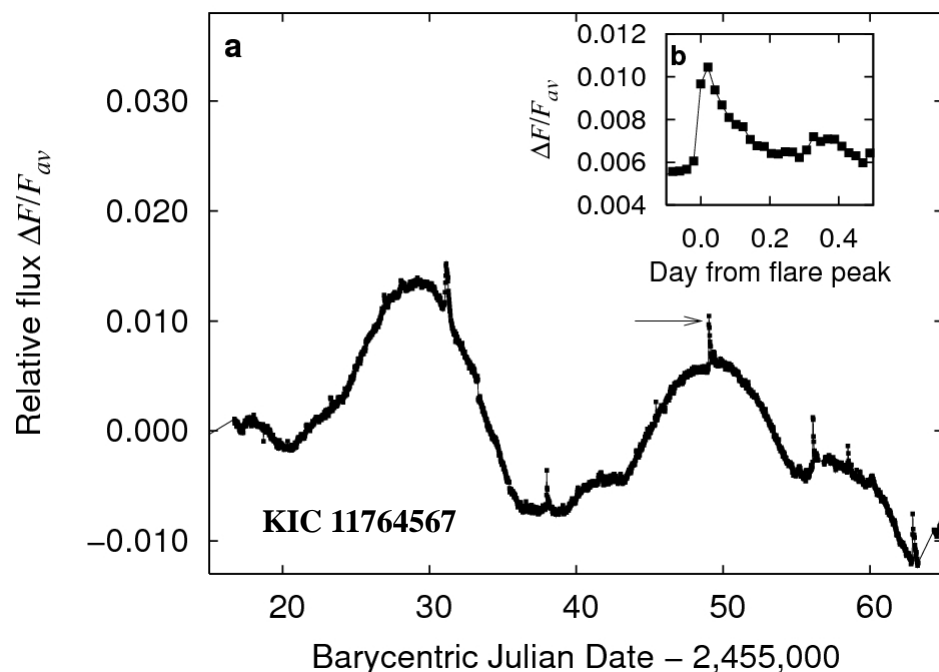


ケプラー宇宙望遠鏡

- 太陽系外惑星を観測するためにNASAが2009年に打ち上げ
 - 口径95cmのシュミット望遠鏡で約16万個の星の明るさを精密に測定(太陽型星は9万天体)
 - 2009年4月から2013年5月まで、ほぼ切れ間なく観測
 - わずか数万分の1の明るさの変化も観測できる

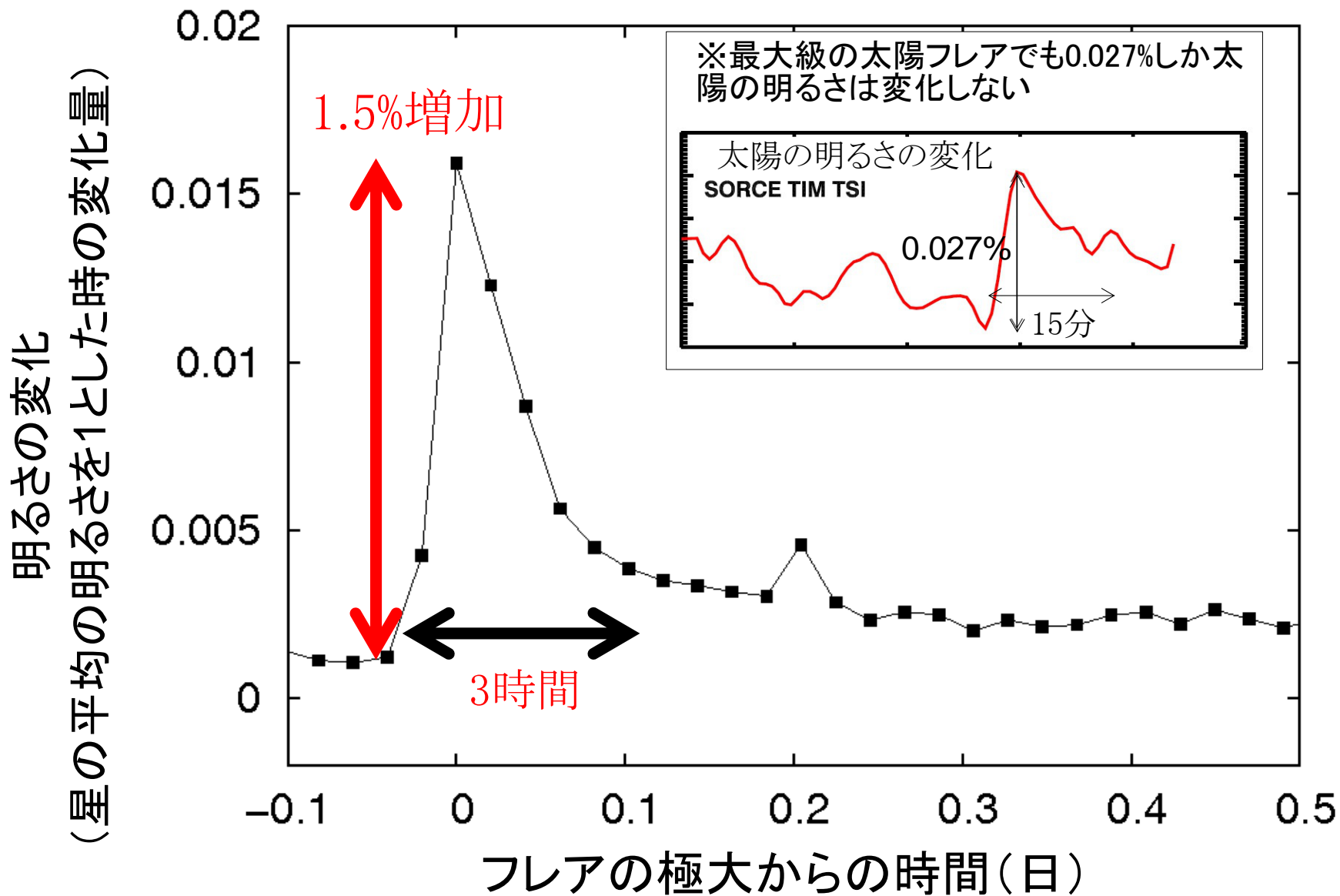


スーパーフレアの例

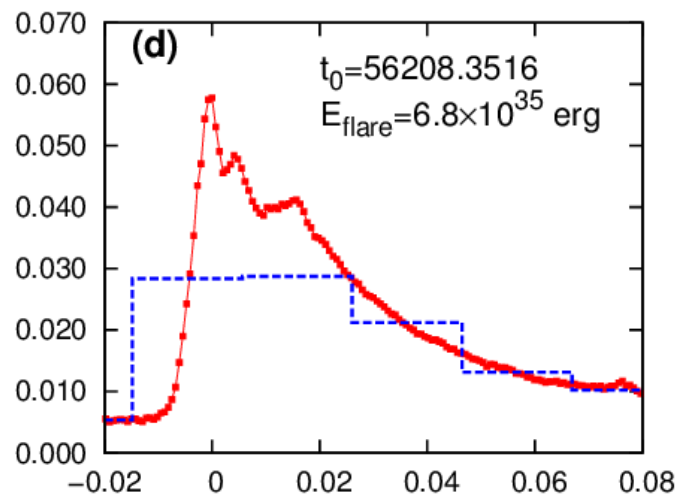
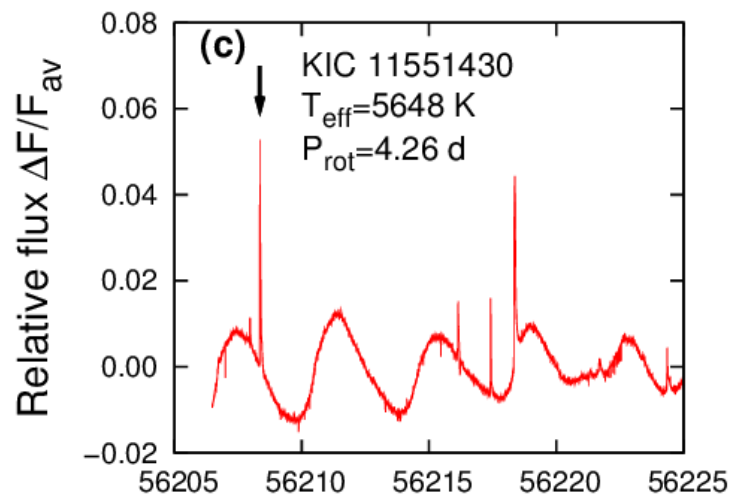
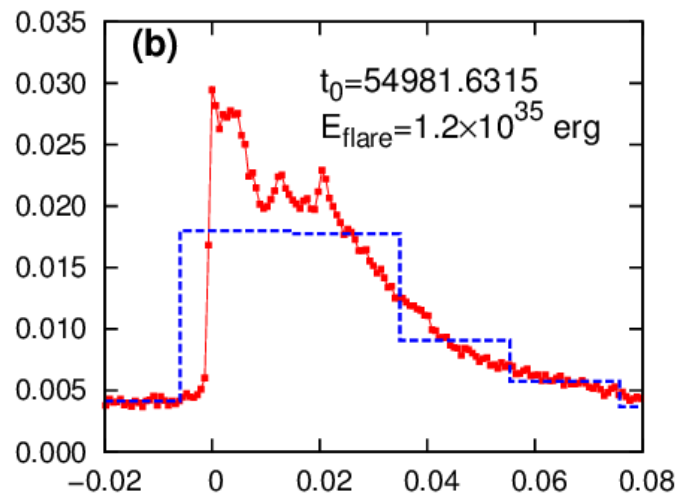
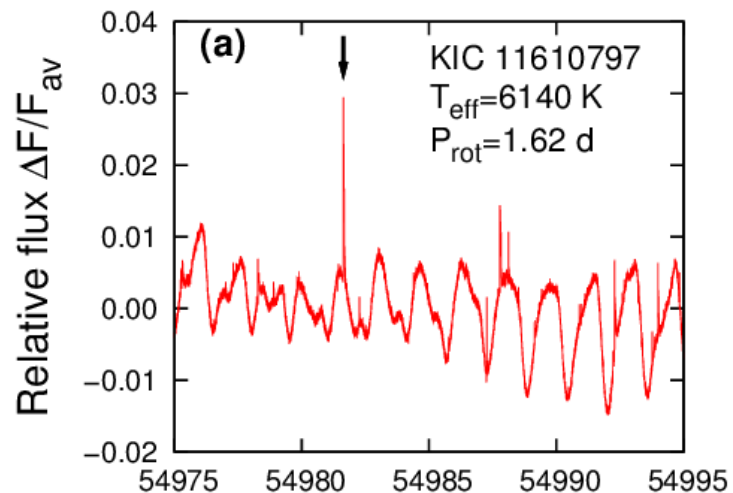


- 振幅: 0.1-10%
- 継続時間: ~ 0.1 days
- 放射エネルギー: 10^{33} - 10^{36} ergs
 - 最大級の太陽フレア($\sim 10^{32}$ ergs)の10-10,000倍のエネルギー!
- フレアの数
 - 365個、148星 (Maehara et al. 2012; 120日間のデータ)
 - 1547個、279星 (Shibayama et al. 2013; 500日間のデータ)

スーパーフレアが起きた時の明るさの変化



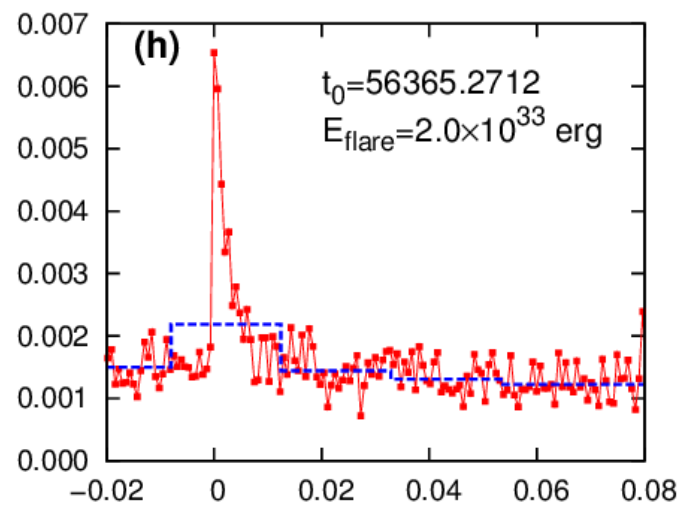
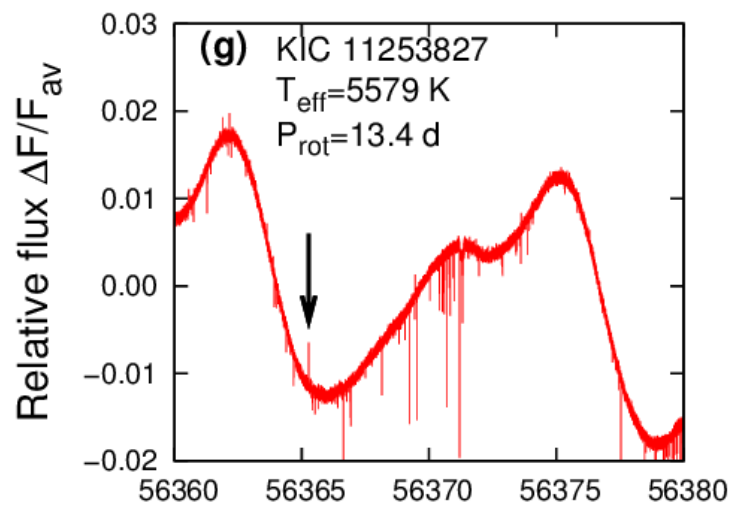
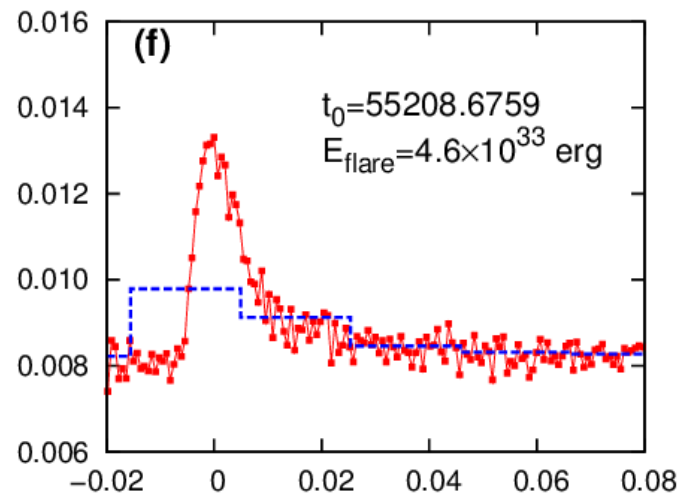
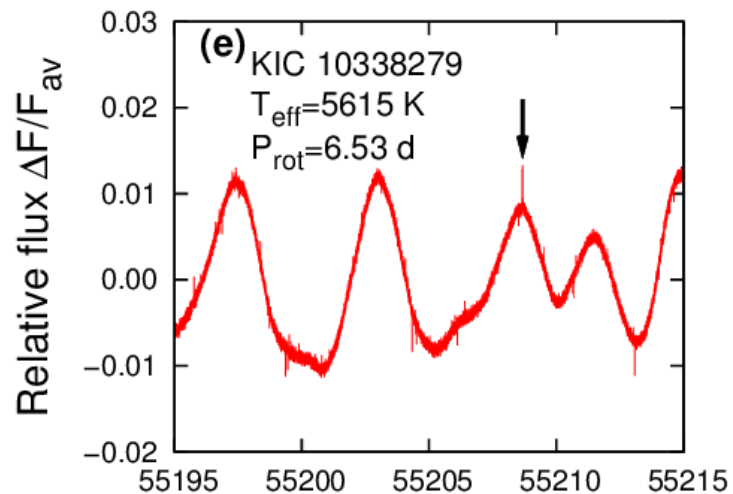
スーパーフレアの例 (時間分解能1分)



BJD - 2400000

Day from flare peak

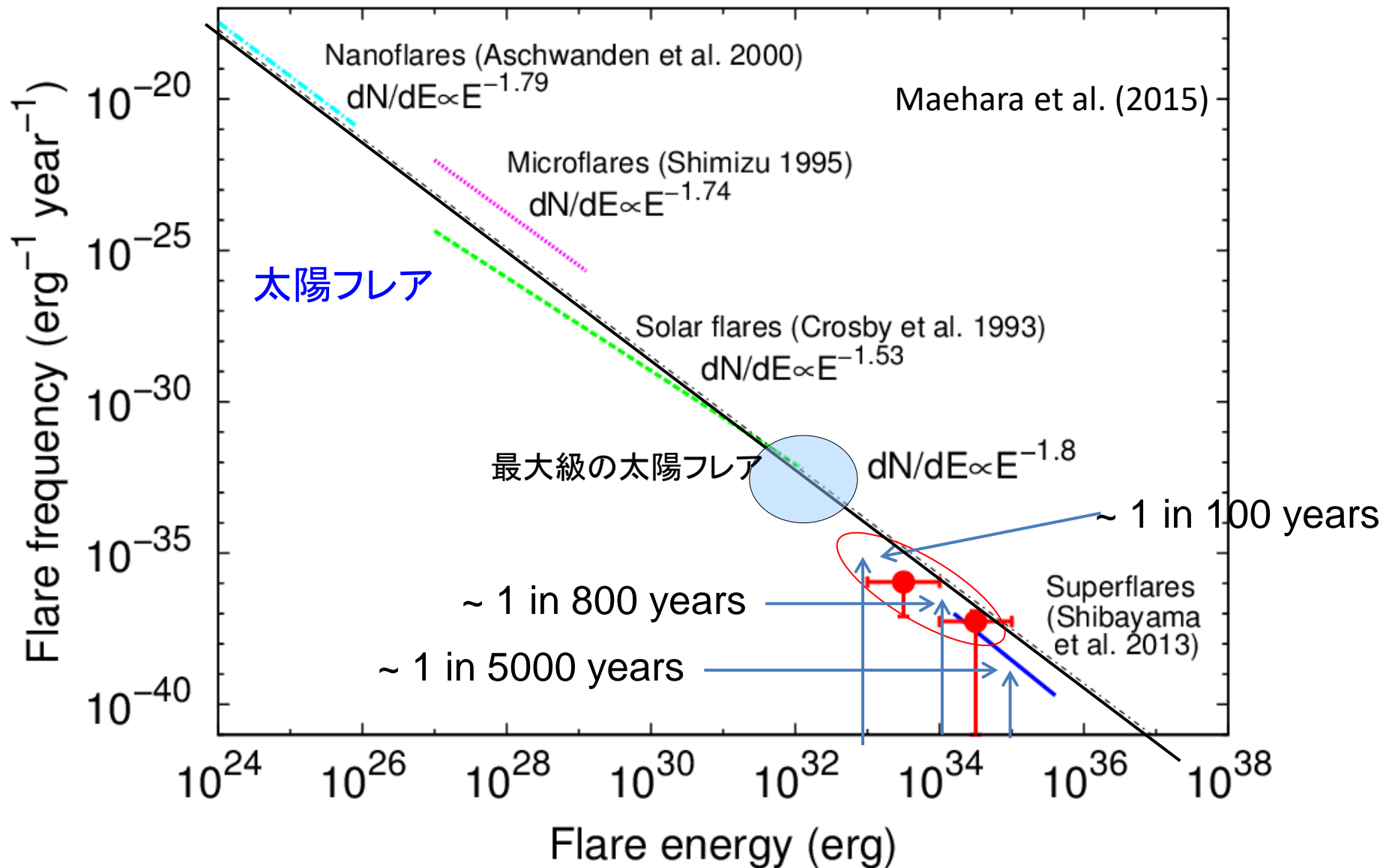
スーパーフレアの例 (時間分解能1分)



BJD - 2400000

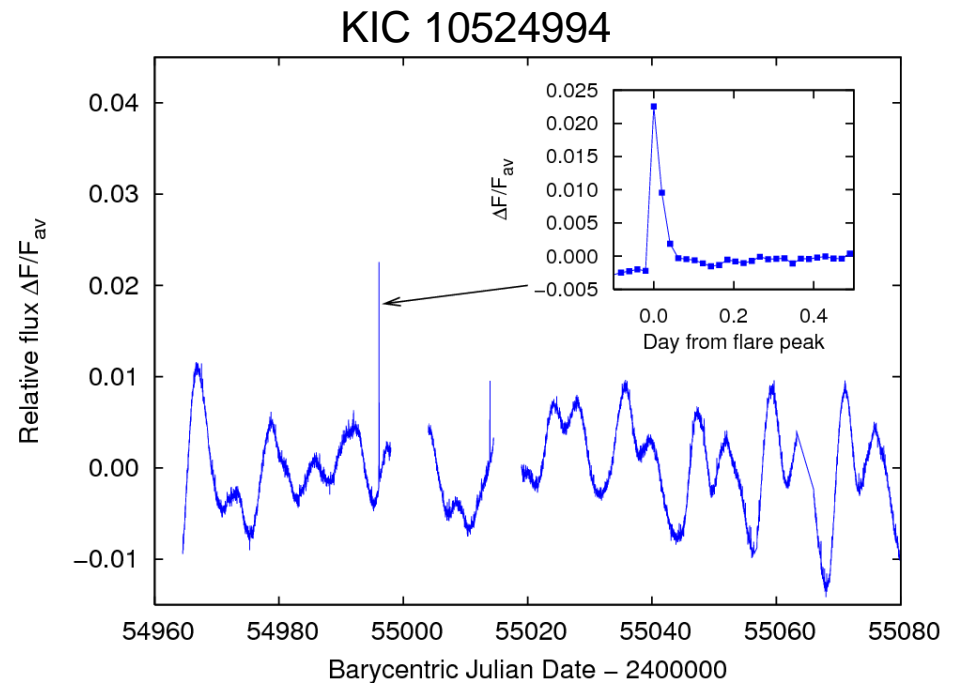
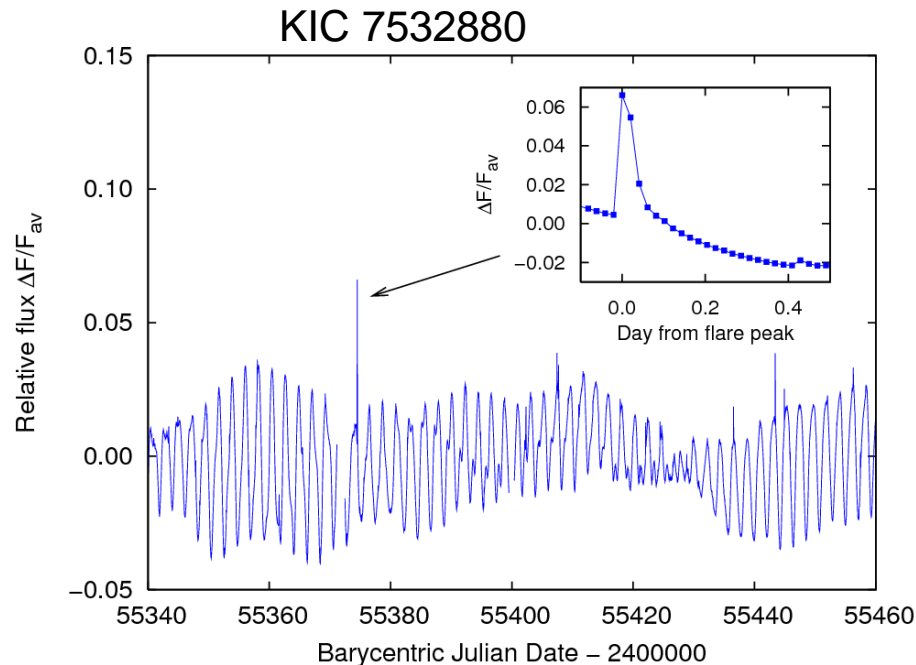
Day from flare peak

スーパーフレアの発生頻度



スーパーフレア星の準周期的な変光

- スーパーフレア星の多くは準周期的な明るさの変化を示す
 - 周期: **~0.5 – 30 日**
 - 振幅: 0.1 - 10%
 - 振幅は一定ではなく、時間変化する



準周期的な変光

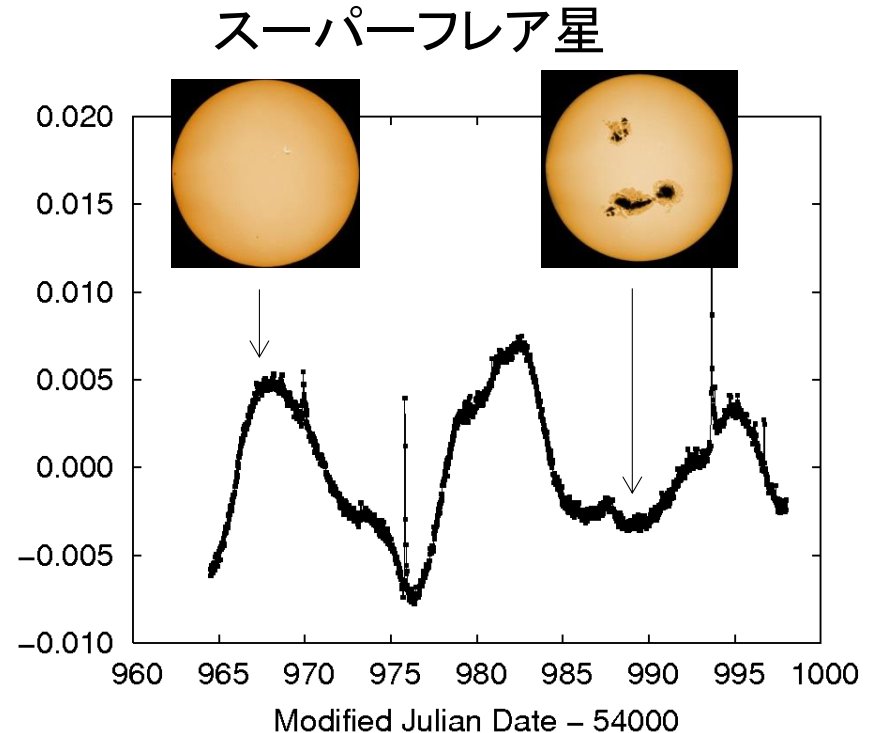
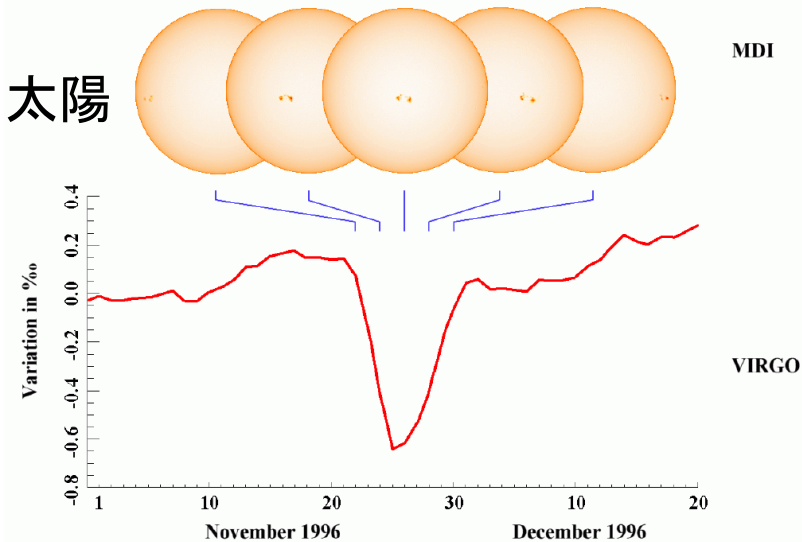
- 太陽でも同様の変光がみられる

- 変光の原因 → 太陽黒点

- スーパーフレア星も同様な原因で変光すると仮定すると

- 変光の周期 → 星の自転周期

- 変光の振幅 → 黒点の面積

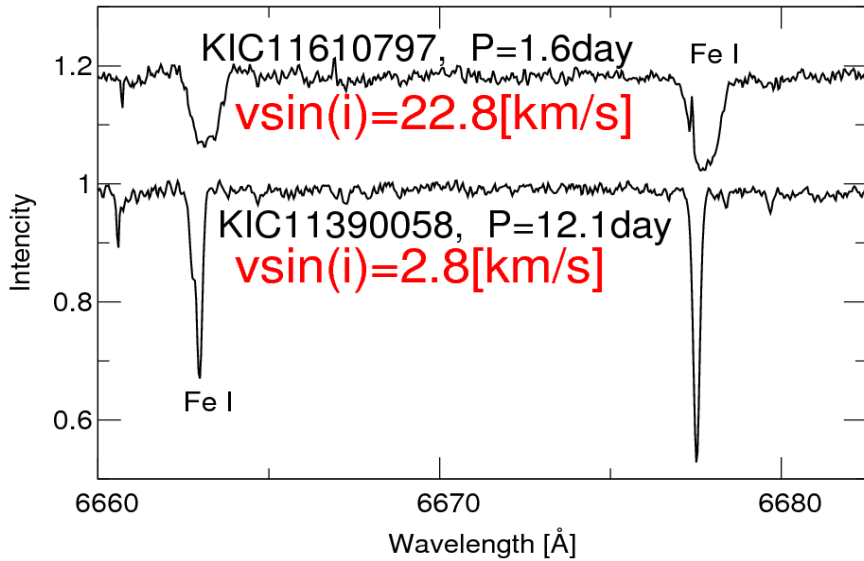
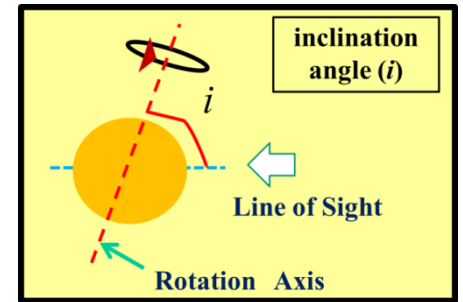


自転速度

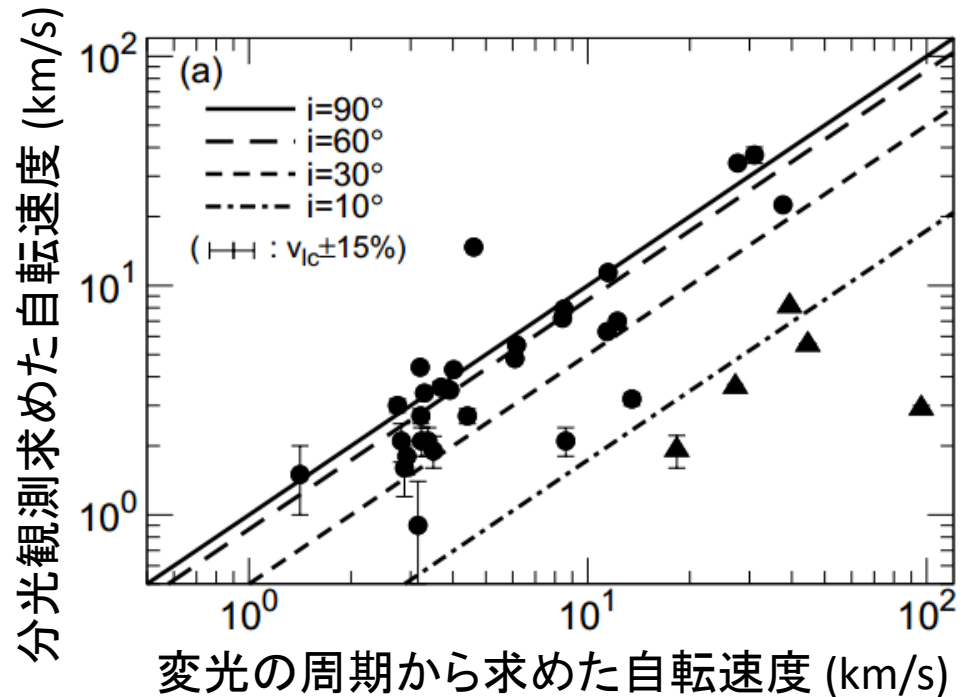
- すばる望遠鏡で、スーパーフレア星の自転速度を分光的に測定(Notsu+ 2015a,b)

→変光周期から推定した自転速度は分光観測から測定した自転速度と矛盾しない

自転周期の長い星が確かに存在する

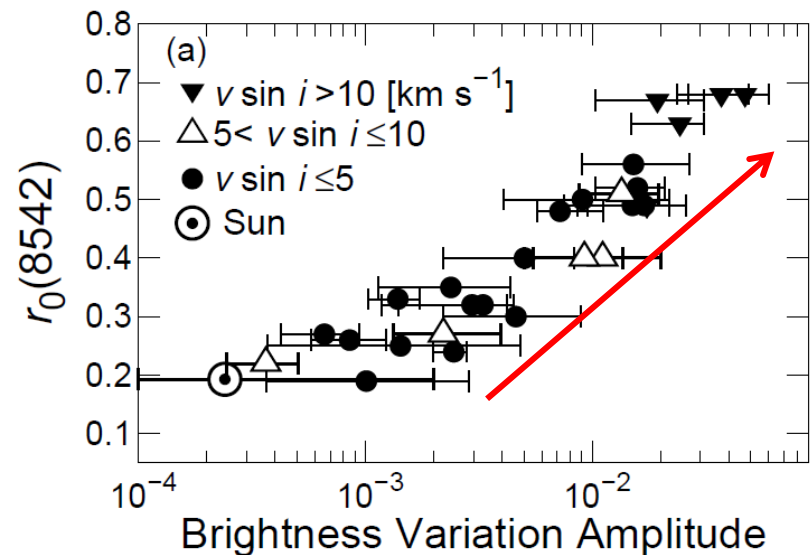
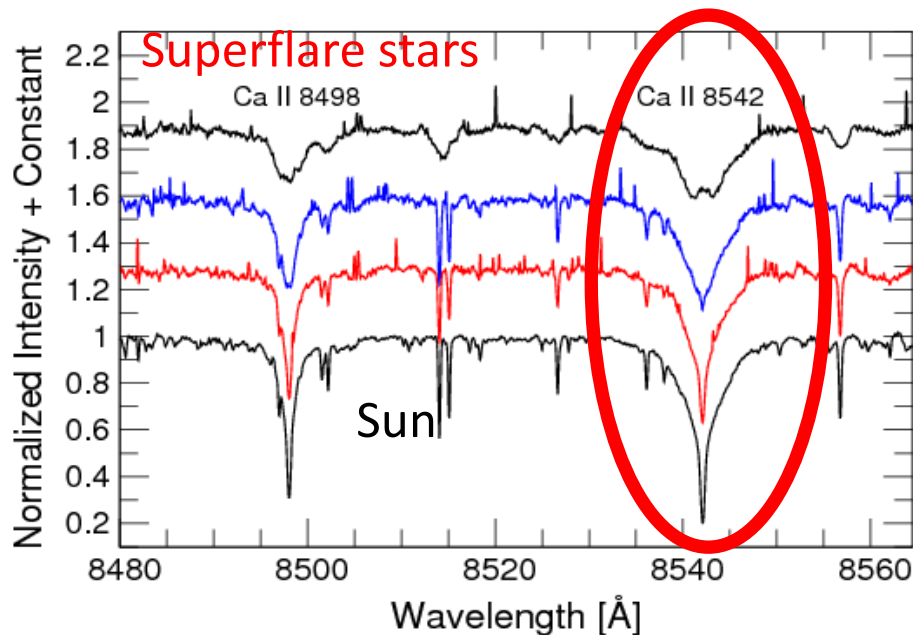


Notsu et al. 2015.



黒点の面積

- スーパーフレア星のカルシウムの吸収線の深さを測定
 - Ca II 8542 の深さが浅くなる → 彩層活動が活発
- 変光の振幅が大きい星のほどカルシウムの吸収線が浅い
 - 変光振幅 → 活動領域(黒点)の面積

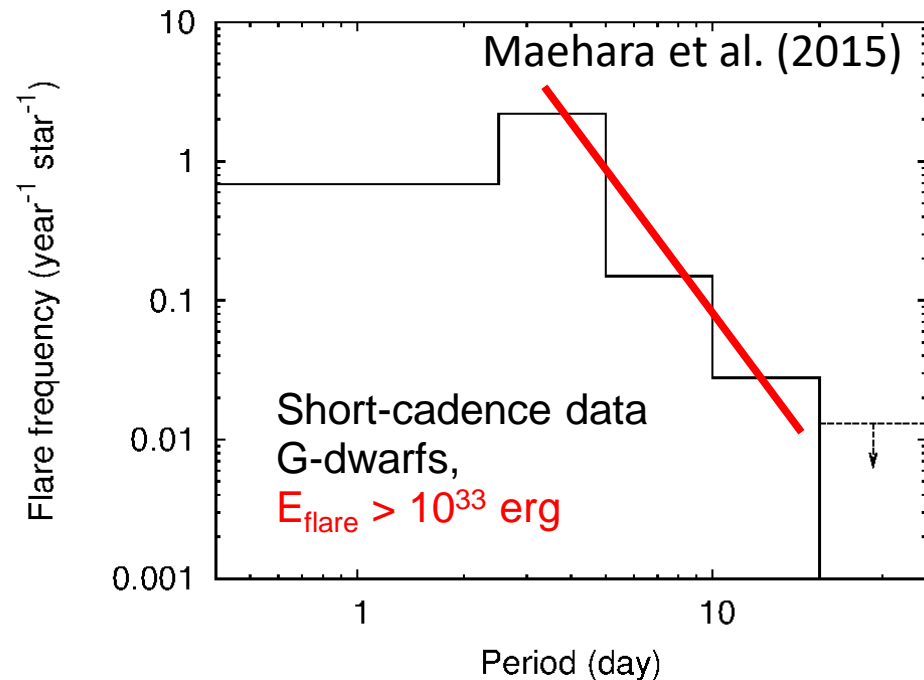
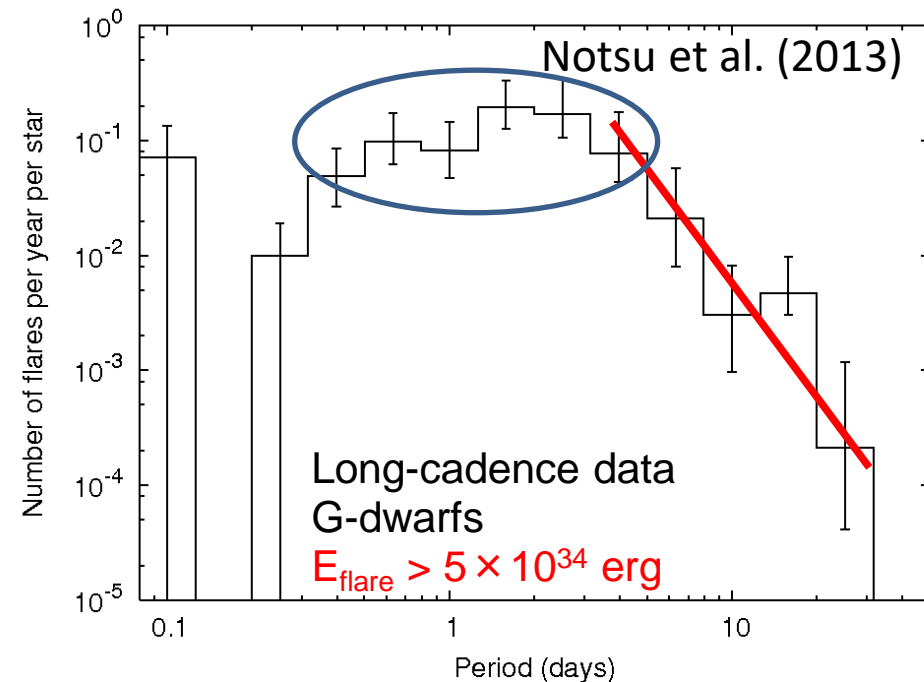


Notsu et al. (2015)

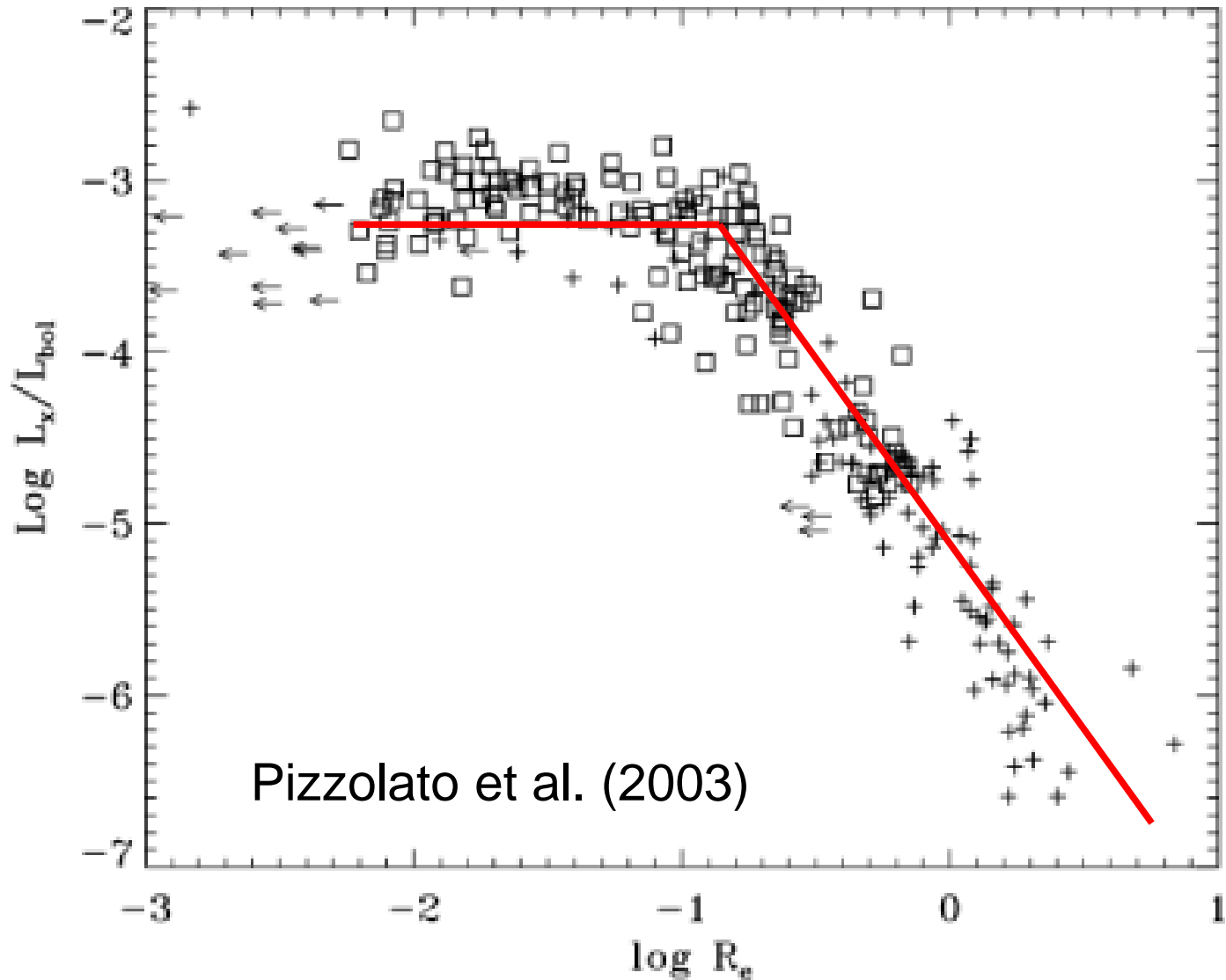
→ 黒点の面積

Flare frequency vs. rotation period

- 自転周期が長くなるとフレアの発生頻度は低下 ($P > 3 \text{ days}$)
 - $P < 3 \text{ days}$ では自転周期に対する依存性がみられない
- 自転周期 \rightarrow 年齢
 - 若い太陽型星ほど高いフレア活動を示す



L_X/L_{bol} vs. Rossby number



自転周期とフレアのエネルギー

最大級の
太陽フレア
のエネル
ギーの

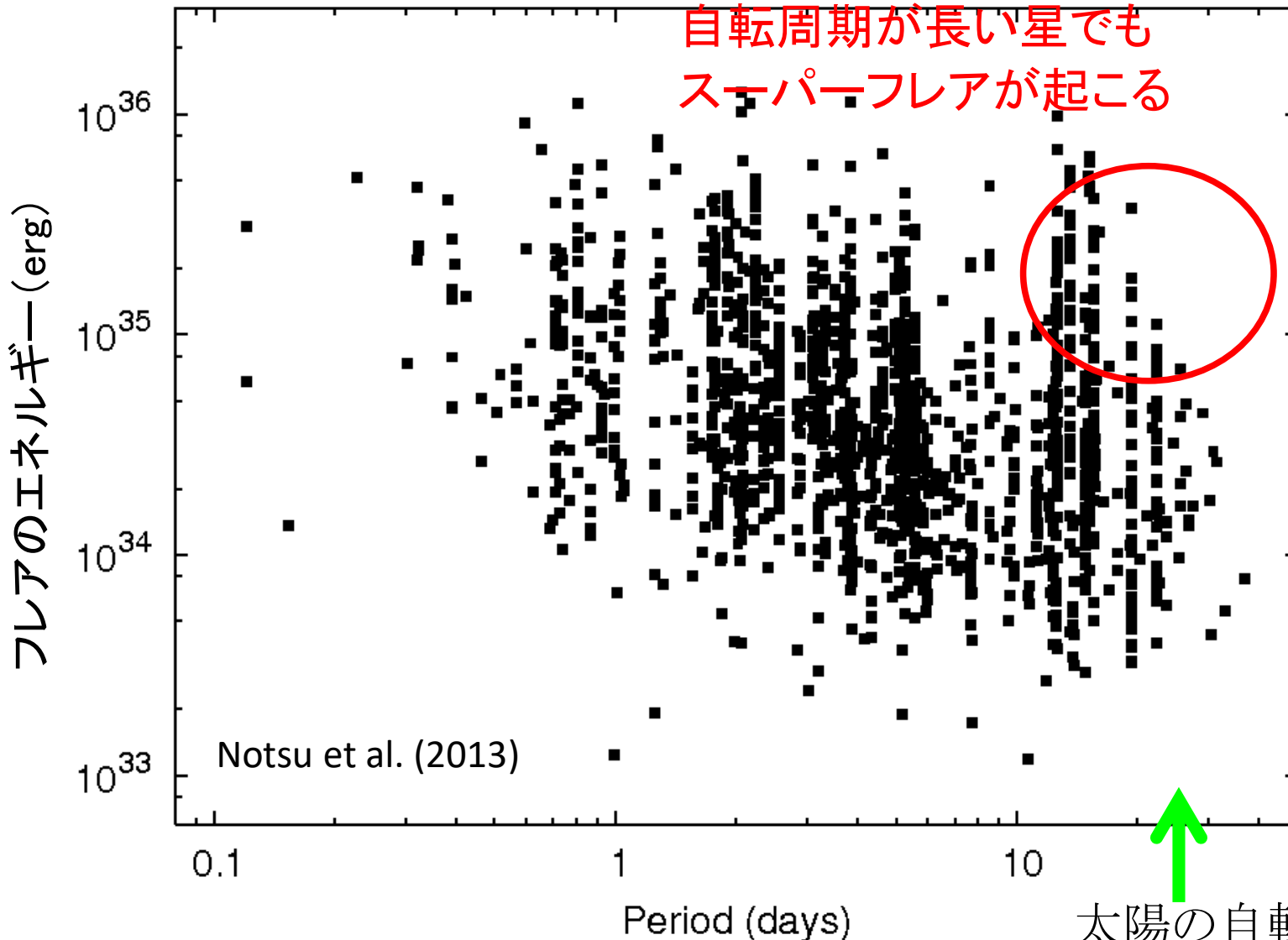
10000倍

1000倍

100倍

10倍

自転周期が長い星でも
スーパーフレアが起こる



Notsu et al. (2013)

Period (days)

太陽の自転周期
(25日)

Flare energy vs. area of starspots

- フレア ← 磁気リコネクション

黒点付近の磁場のエネルギー

→ フレアのエネルギー

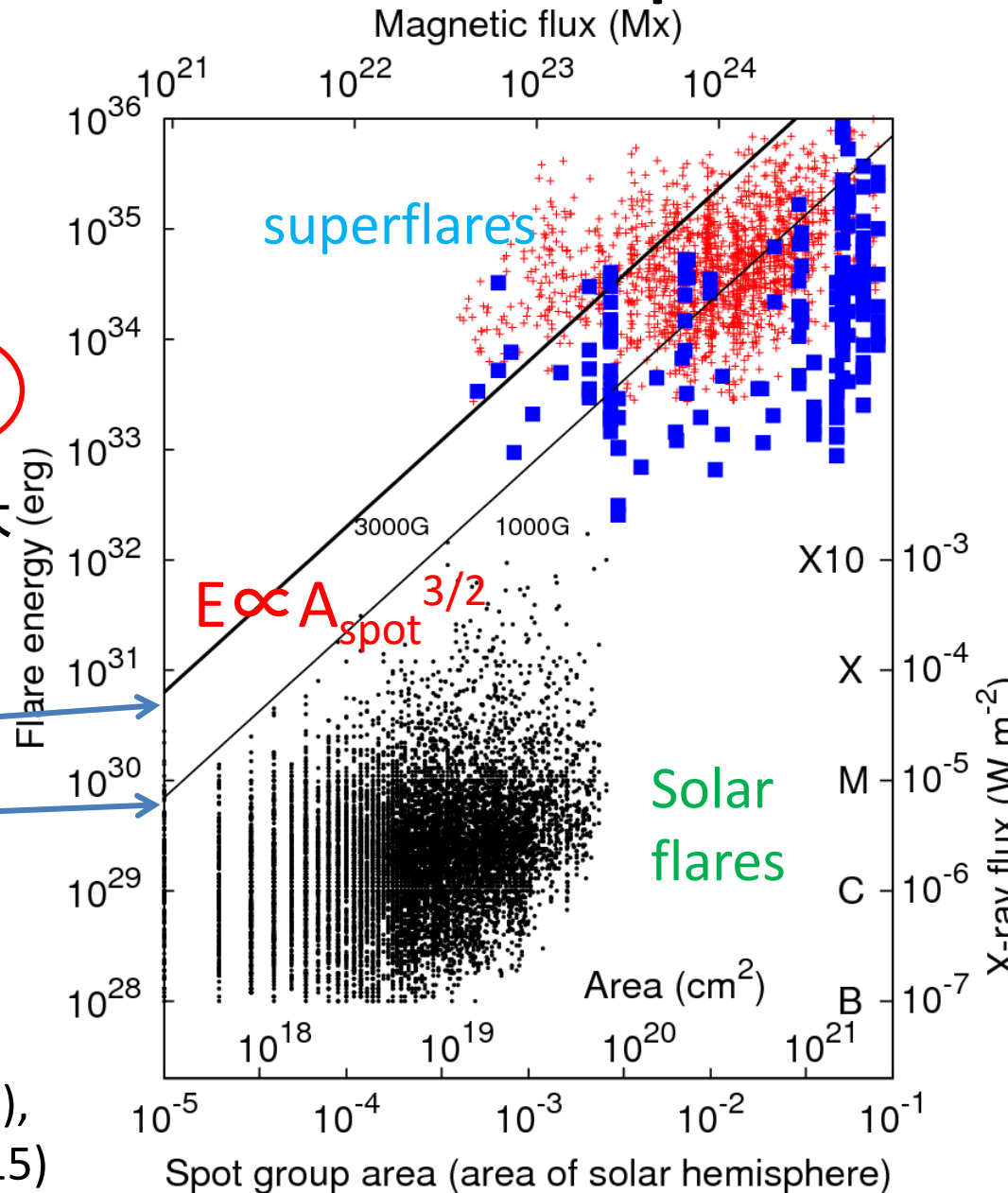
$$E_{\text{flare}} \approx f E_{\text{mag}} \approx f \frac{B^2 L^3}{8\pi} \approx f \frac{B^2}{8\pi} A_{\text{spot}}^{3/2}$$

- スーパーフレアを起こすには大きな黒点が必要

f=0.1, B=3000G

f=0.1, B=1000G

Shibata et al. (2013),
Maehara et al. (2015)



10^{-5} 10^{-4} 10^{-3} 10^{-2} 10^{-1}

10^{18} 10^{19} 10^{20} 10^{21}

10^{21} 10^{22} 10^{23} 10^{24}

10^{28} 10^{29} 10^{30} 10^{31} 10^{32} 10^{33} 10^{34} 10^{35} 10^{36}

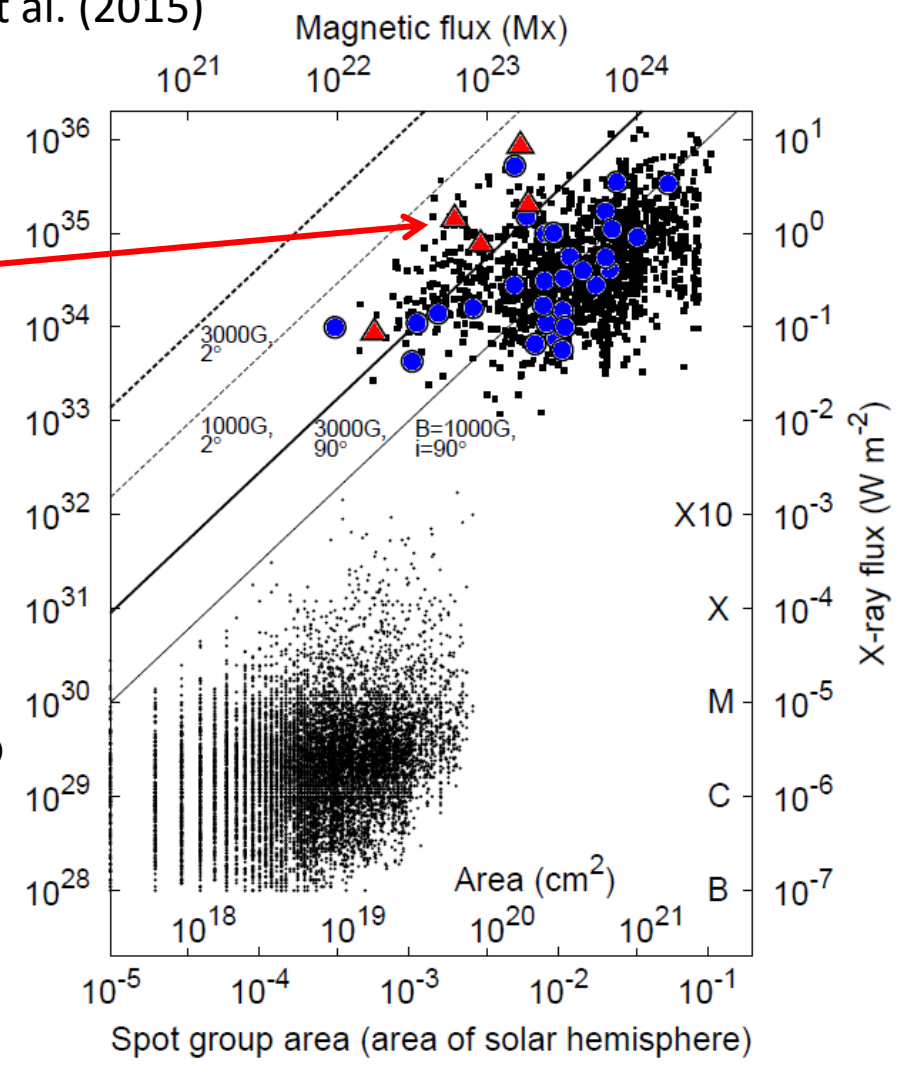
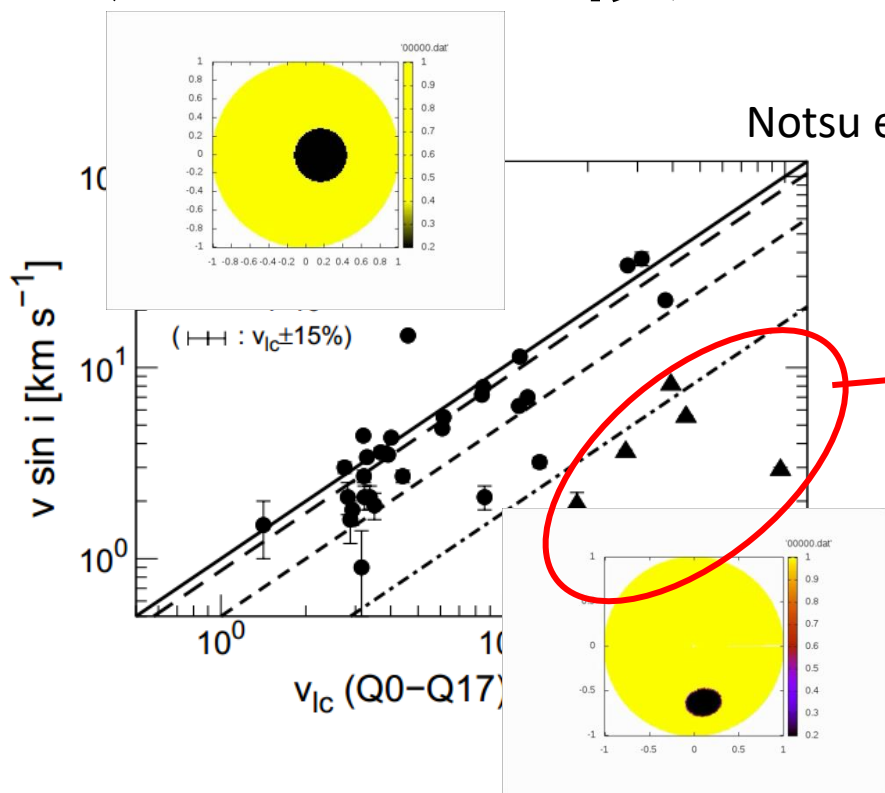
X 10^{-4}

M 10^{-5}

C 10^{-6}

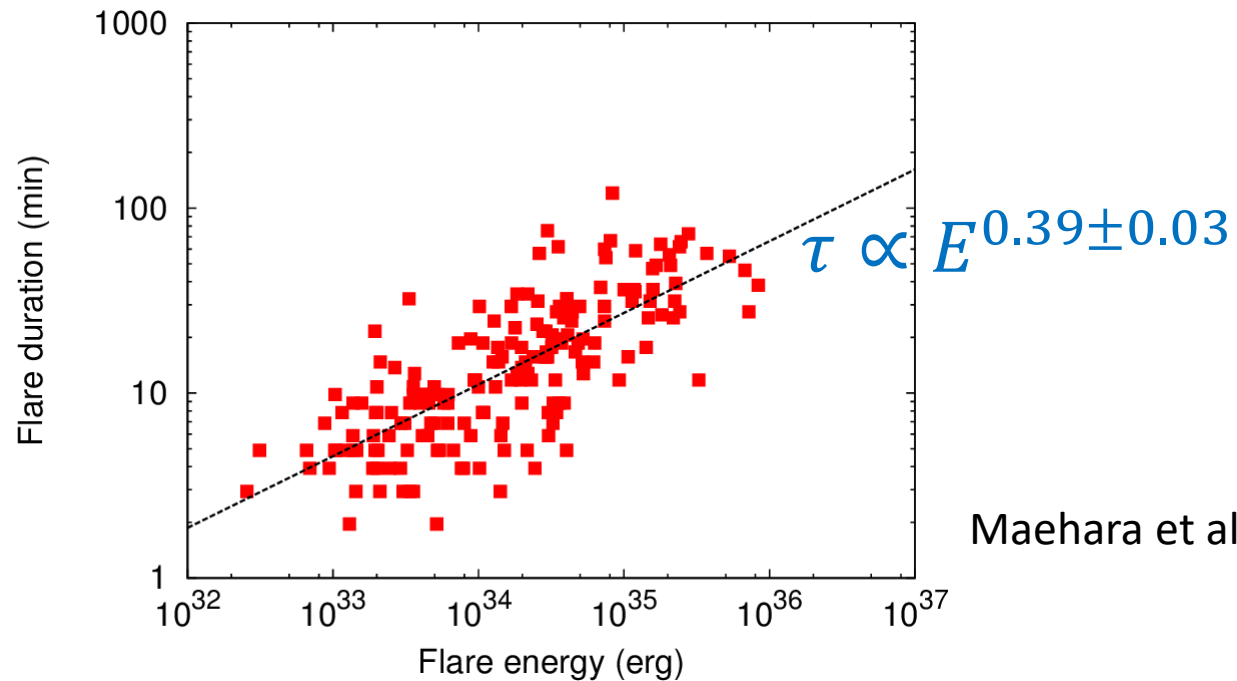
B 10^{-7}

黒点の面積とフレアのエネルギー



スーパーフレアを起こす天体のうち、変光の振幅が小さい天体は軌道傾斜角が小さい
 → 大きな黒点を持つが、みかけの変光の振幅が小さい天体に対応

Flare duration vs. flare energy

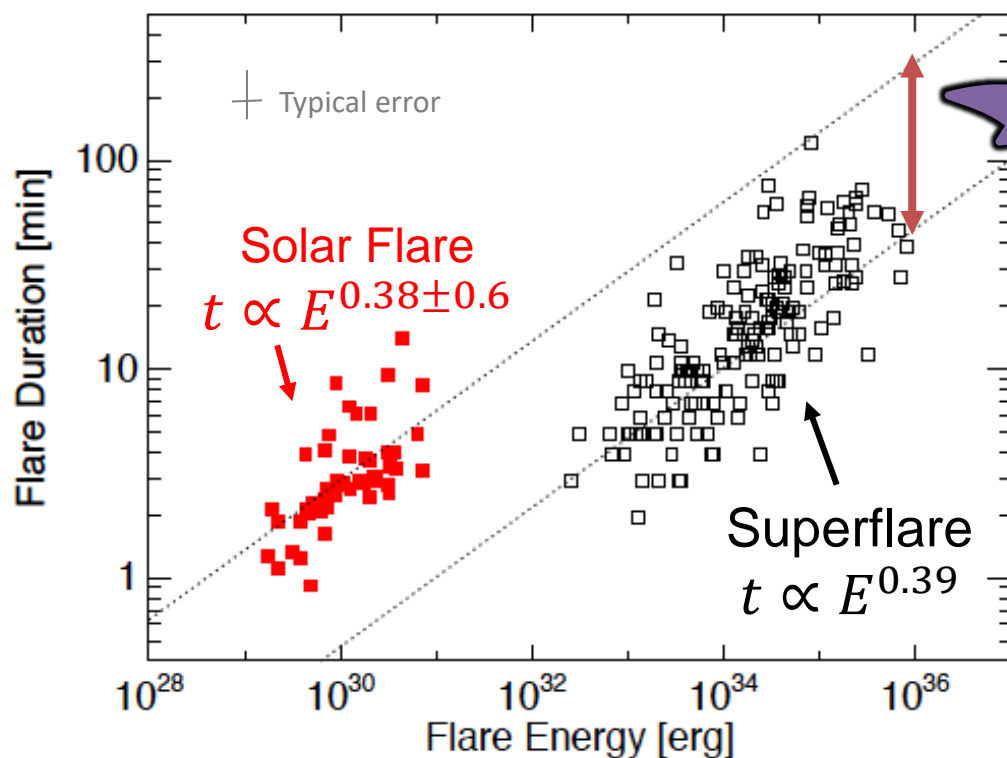


- Observation: e-folding time of flare \propto (flare energy) $^{0.39}$
- Flare energy \propto Magnetic energy \propto volume $\times B^2$
- Timescale of impulsive phase of flare \propto Alfvén time scale \propto (scale length)/(Alfvén velocity)

$$E \propto L^3 B^2, \quad \tau \propto L/v_A \rightarrow \tau \propto E^{1/3}$$

Flare duration vs. flare energy

- 太陽の白色光フレアもG型星のスーパーフレアも同じべき指数を示す
- しかし、、、同じpower-law relationの上にはのらない



スーパーフレアの継続時間とエネルギーの関係は太陽フレアのそれと1桁違う

SDO+Kepler (Namekata et al. 2017)

スーパーフレアの統計的性質

- Frequency distribution of superflares
 - Power-law distribution: $dN/dE \propto E^{-1.8}$
 - 自転周期10日以上 of 太陽型星のスーパーフレアの発生頻度分布は太陽フレアの発生頻度分布と同じpower-law分布上による
- Starspots and superflares
 - 最大のフレアのエネルギー: 黒点面積の3/2乗に比例して増加
 - スーパーフレアを起こすには巨大黒点が必要
- Rotation period and superflare
 - 最大のフレアのエネルギー: 自転周期には依存しない
 - 発生頻度: 自転周期が長くなると減少する ($P_{\text{rot}} > 3\text{days}$)
 - 自転周期の遅い星でもスーパーフレアが起こる

スーパーフレアと黒点

- スーパーフレアを起こす天体の大部分は巨大黒点(太陽表面積の数%の面積)を持つ
 - 変光振幅
 - フレアのエネルギー vs. 磁場のエネルギー

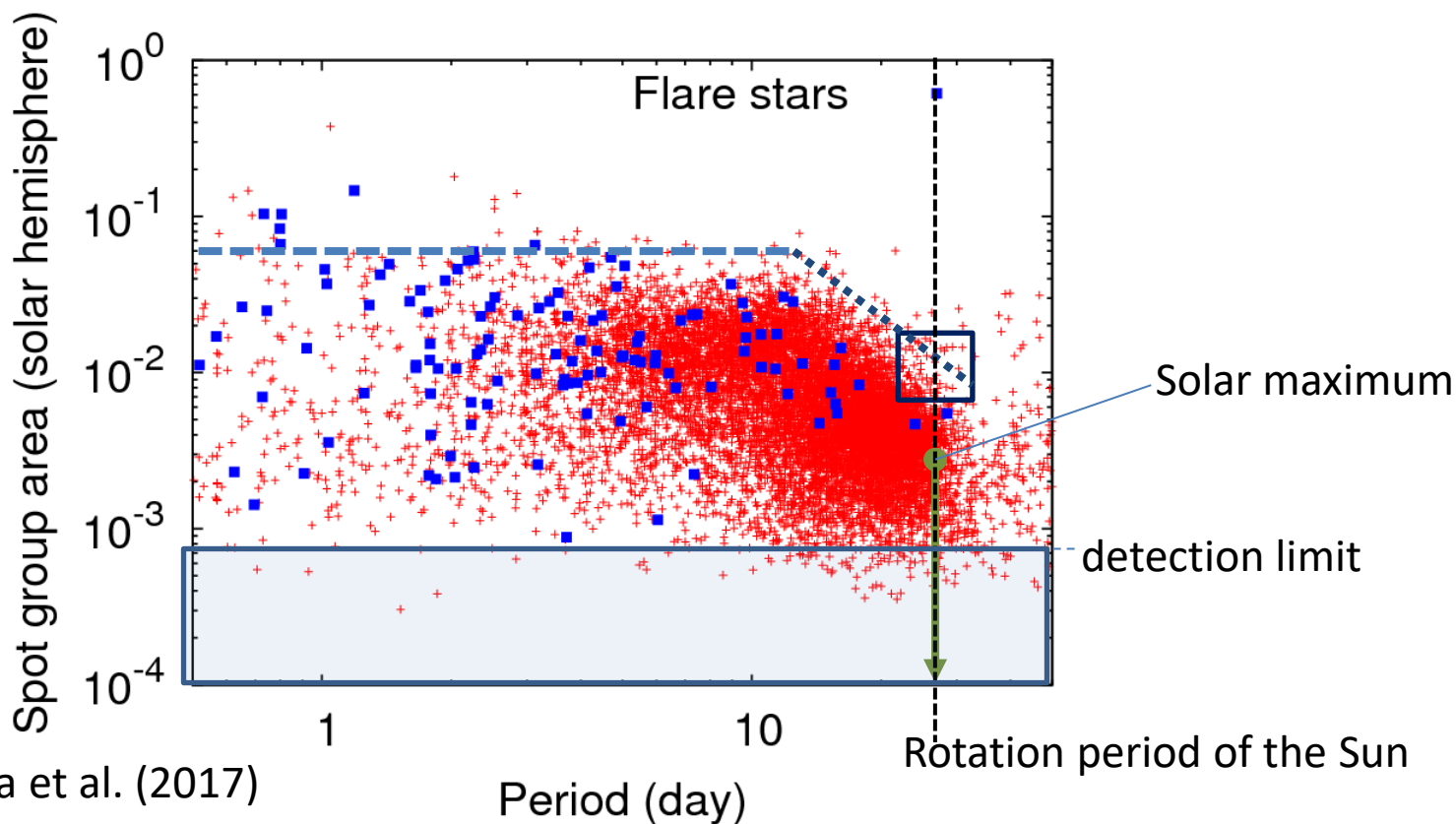
- スーパーフレアを起こすかどうかは巨大黒点があるかどうかで決まる？



- 巨大黒点を持つ太陽型星の性質を詳しく調べる必要がある。

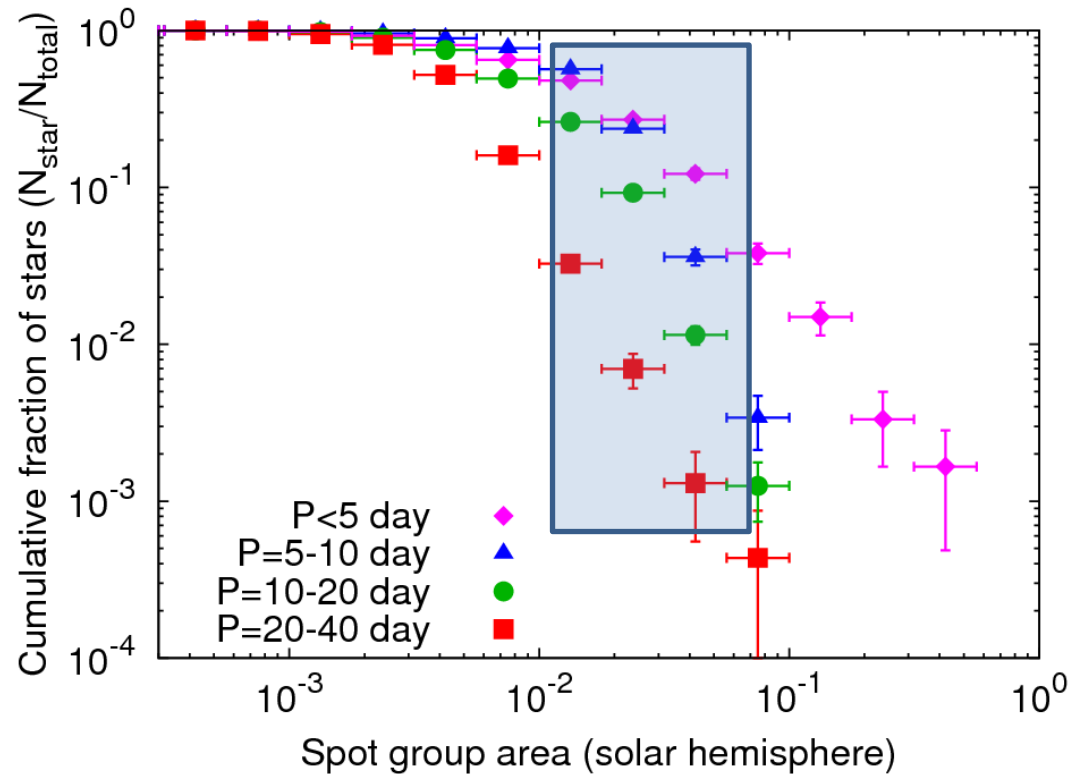
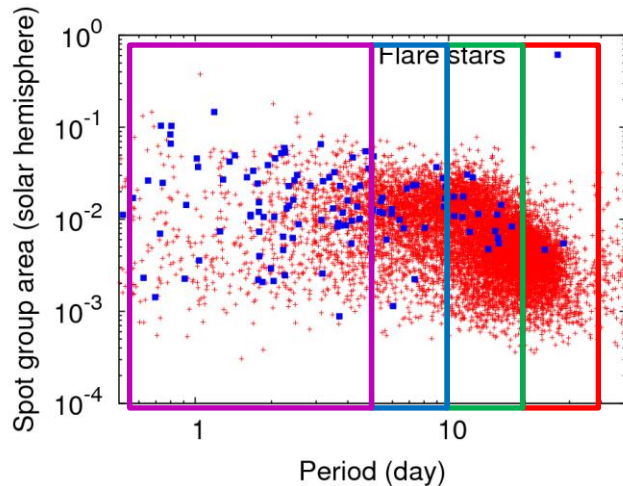
G型主系列星の黒点面積と自転周期

- 自転周期が遅い星でも大きな黒点を持つ天体が存在する
 - P=20-30 daysの星では最大の黒点サイズは太陽表面積の2%
 - 最大の黒点の面積
 - P<~13 days: ほぼ一定($\sim 5 \times 10^{-2}$)
 - P>~13 days: 周期が長くなると減少



恒星黒点のサイズ分布

- 大きな黒点を持つ頻度は自転周期が短いほうが高い



恒星黒点と太陽黒点のサイズ分布

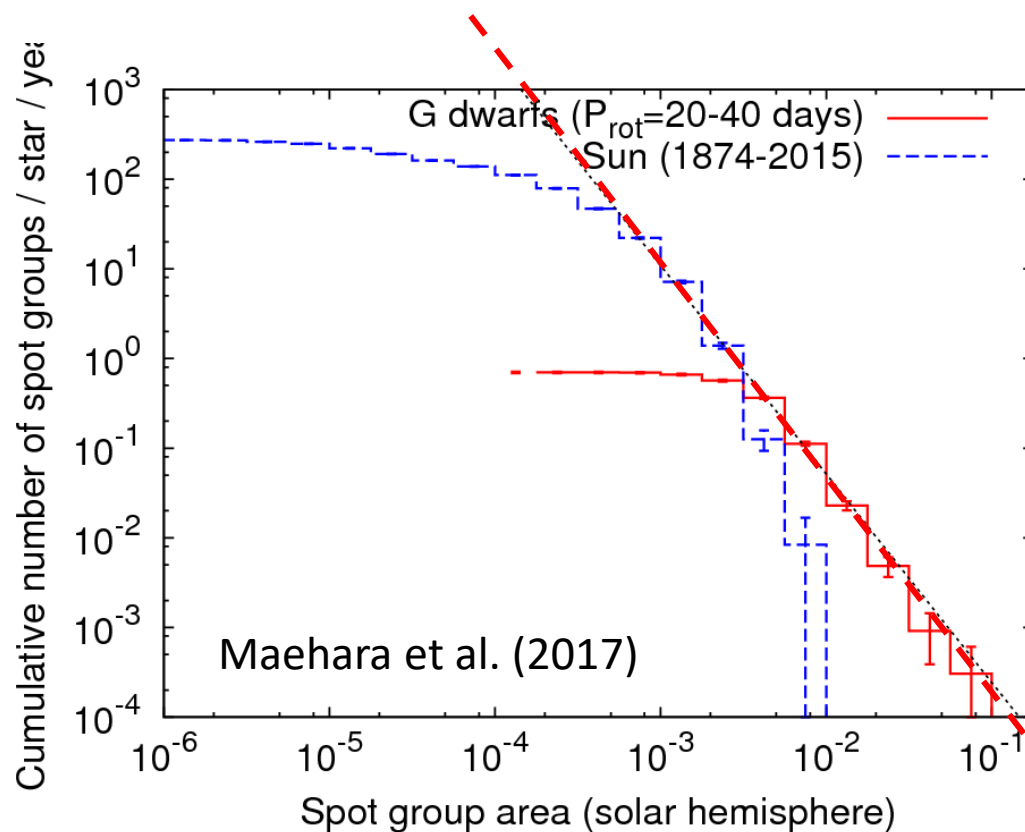
- 自転の遅い(20-40日)G型星の黒点の発生頻度

→べき関数分布を示す (power-law index=-2.3)

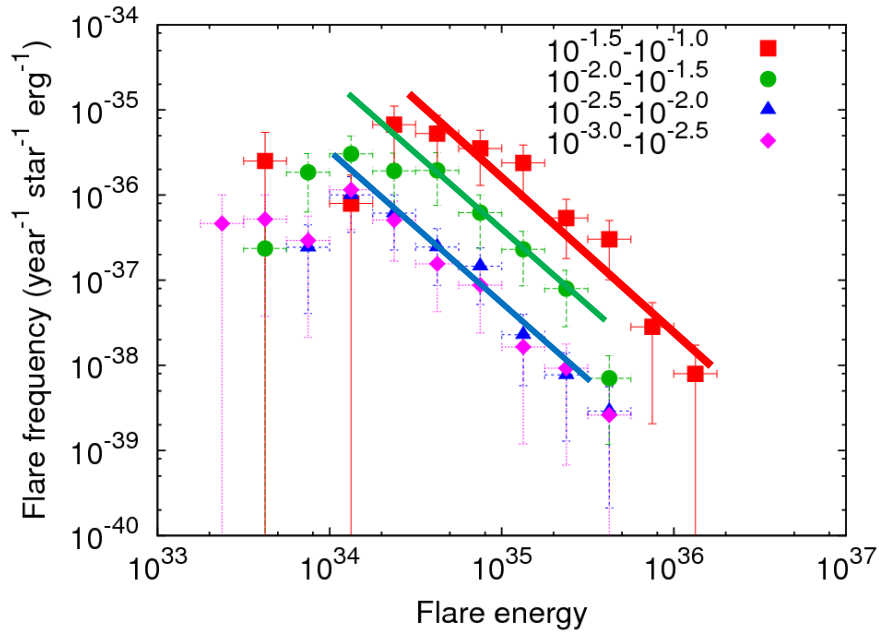
✓ 比較的大きい太陽黒点のサイズ分布の延長線上にのる

- ✓ 太陽表面積の～1%の面積をもつ恒星黒点の発生頻度
- G型主系列星: 約10年に1回
 - 太陽: 過去140年では1例

→太陽は(過去140年間は)あまり活動的ではない?



黒点サイズごとのフレアの発生頻度分布(スーパーフレア)



- 発生頻度分布

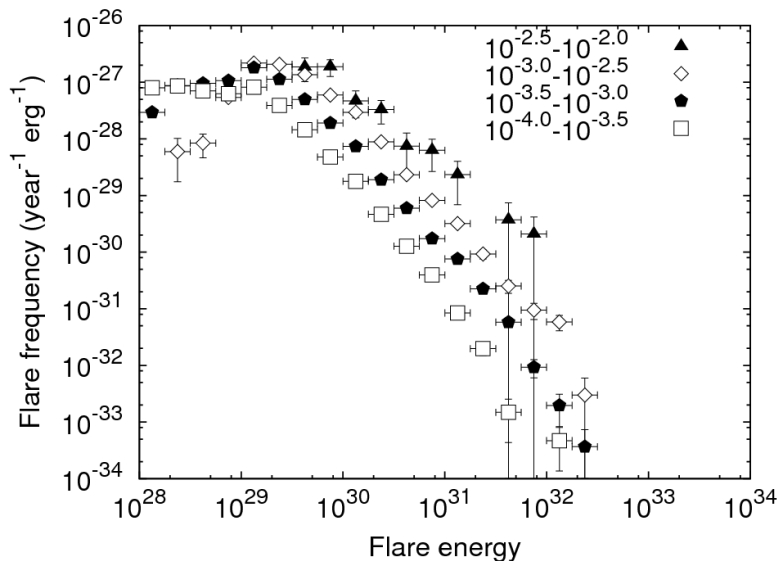
- power-law distribution

- power-law index (-1.8 - -2.0)

- 同じエネルギーのフレアの発生頻度は大きな黒点を持つ星ほど高い

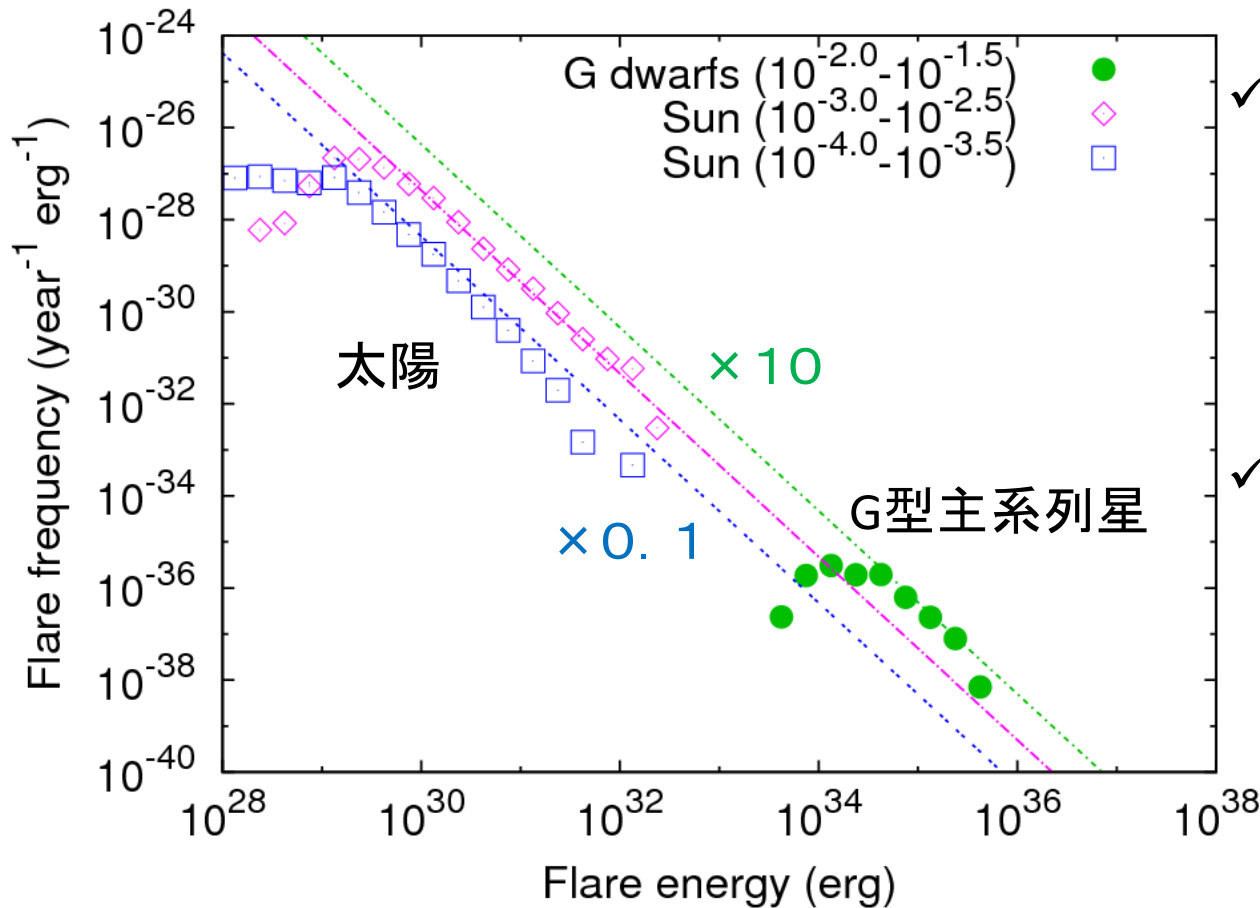
- 最大のフレアのエネルギー

- 大きな黒点を持つ星ほど大きい(e.g., Shibata+2013)



- 太陽フレアも基本的に同じ性質を示す

黒点サイズごとのフレアの発生頻度分布 (太陽フレアとの比較)

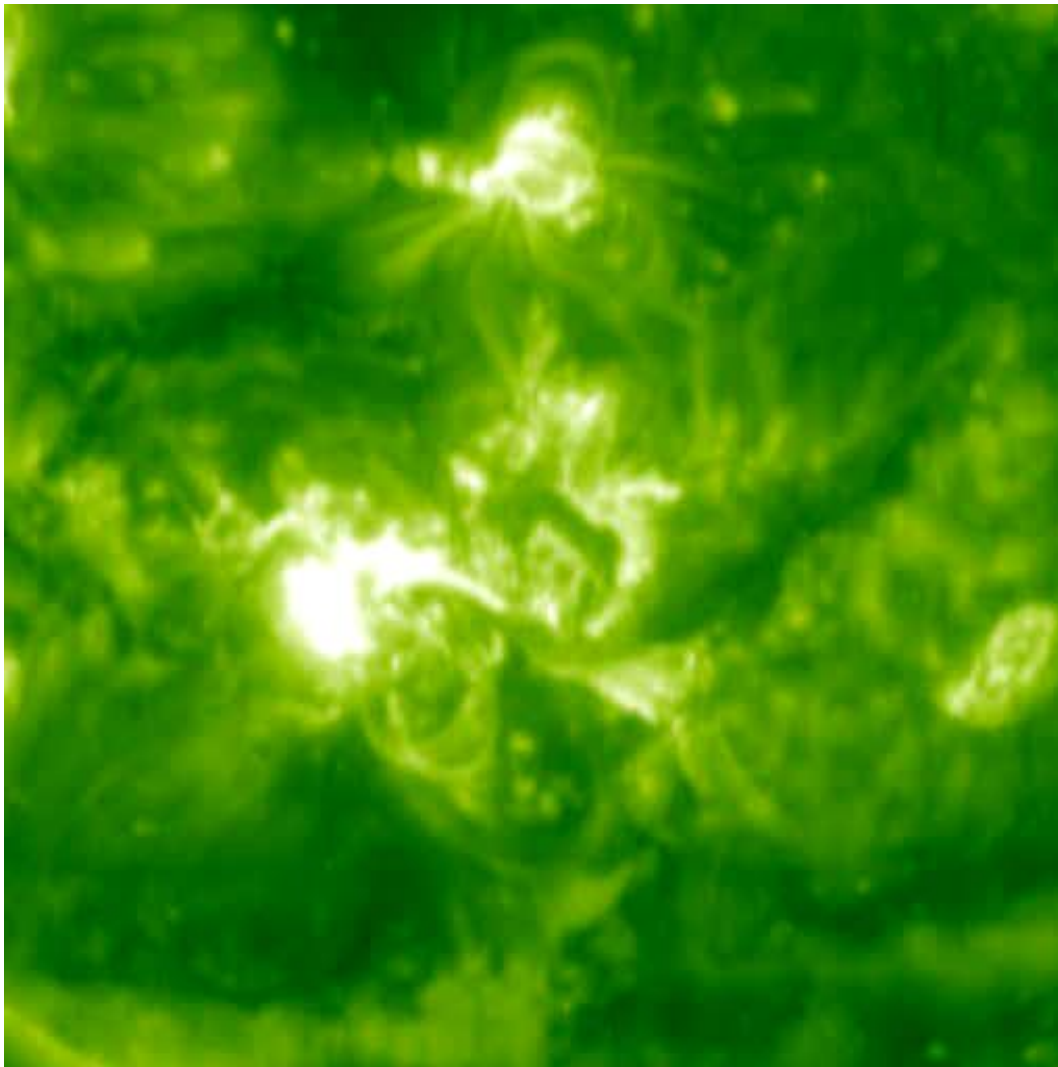


- ✓ 同じ黒点面積で比較すると、太陽フレアと太陽型星のスーパーフレアの発生頻度分布は同じべき関数の上にある
- ✓ 黒点面積が10倍になるとフレアの発生頻度もおよそ10倍になる

まとめと今後の展望

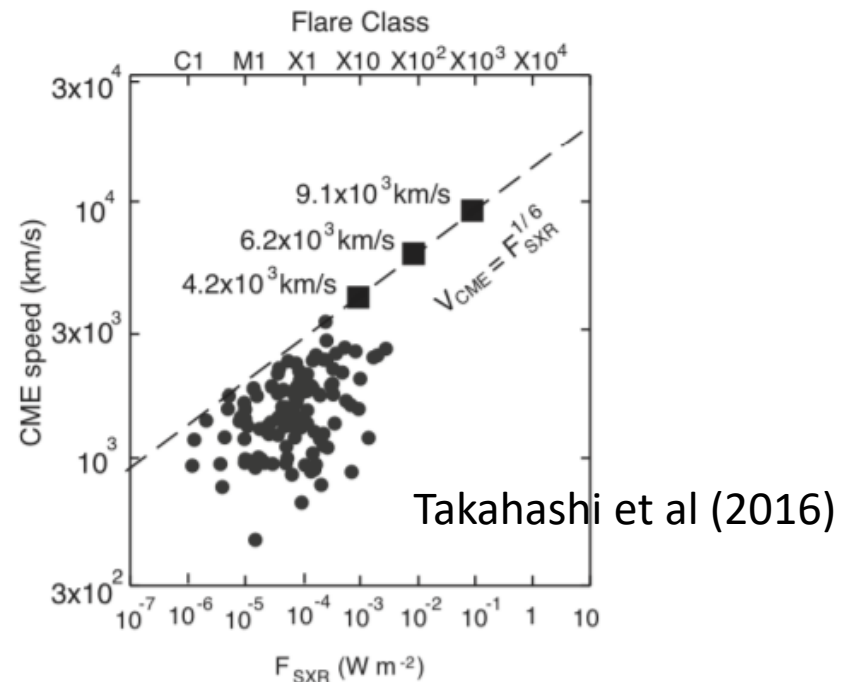
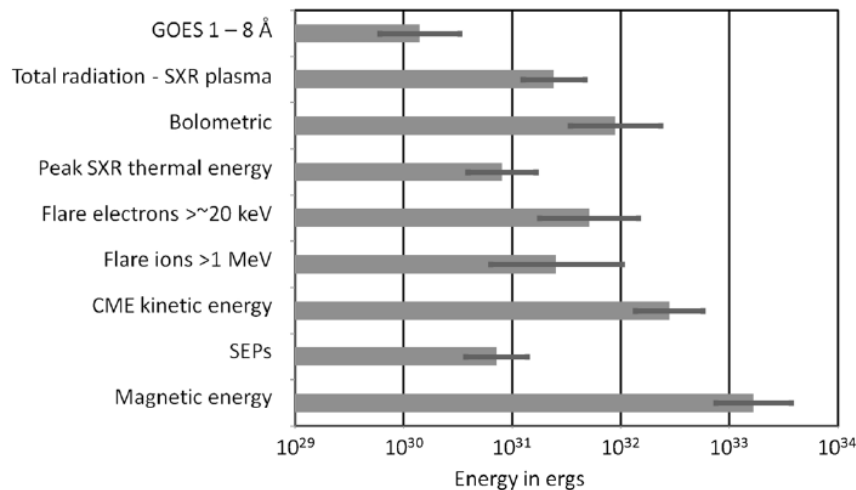
- 太陽型星のスーパーフレアと黒点
 - 発生頻度分布
 - 太陽フレアの発生頻度分布の延長上による
 - 最大のフレアのエネルギー
 - 黒点面積の $3/2$ 乗に比例して増加 → 巨大黒点が必須
 - 自転周期には依存しない
 - フレアの発生頻度
 - 自転周期が長くなると減少する ($P_{\text{rot}} > 3\text{days}$)
 - 巨大黒点
 - 自転周期が短い星ほど大きな黒点を持つ頻度が高い
- 今後の課題と展望
 - フレアに伴う質量放出現象
 - 巨大黒点の生成・発展・消滅とフレアの関係
 - F,G,K,M型星のフレア

Flare and CME



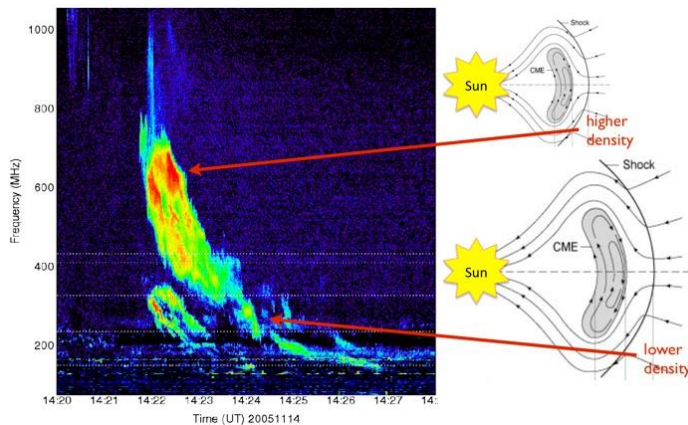
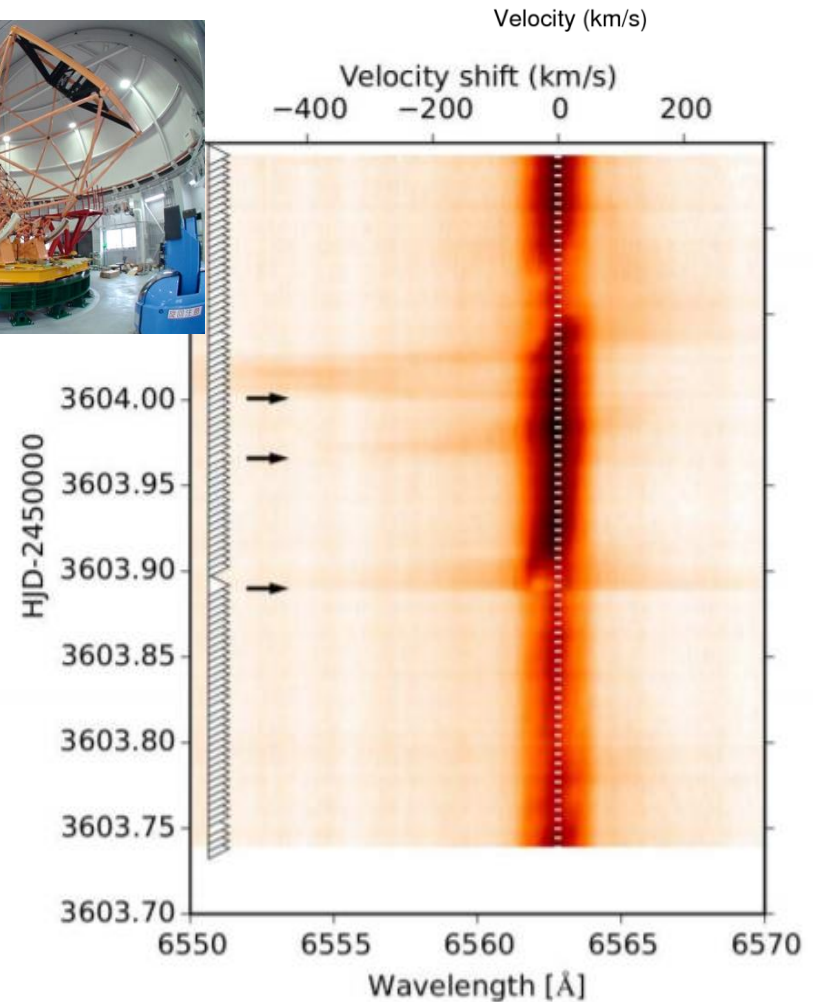
スーパーフレアに伴う噴出現象

- 磁場エネルギー → 熱エネルギー（可視、X線放射）
- ↓
- 運動エネルギー（filament eruption, CME, etc.）
- どの程度が運動エネルギーに分配されるか？
 - CME mass, velocityなどがスーパーフレアの場合はどうなるか？
 - 極端宇宙天気現象の影響評価



スーパーフレアに伴う噴出現象

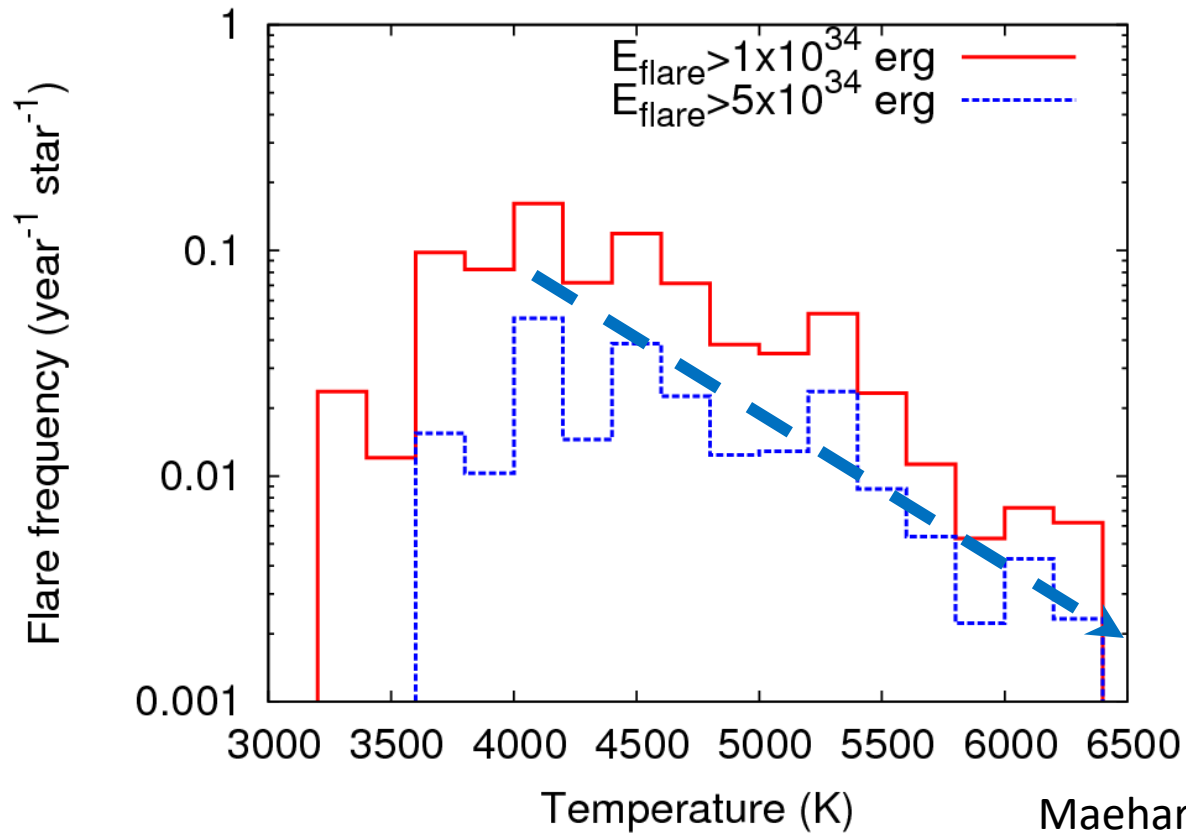
- フレアの可視分光
 - 高時間分解能
 - プロミネンス噴出
- 電波
 - Type II burst



<http://www.tauceti.caltech.edu/starbursts/Background.html>

V374 Peg (M4); Vida et al. (2016)

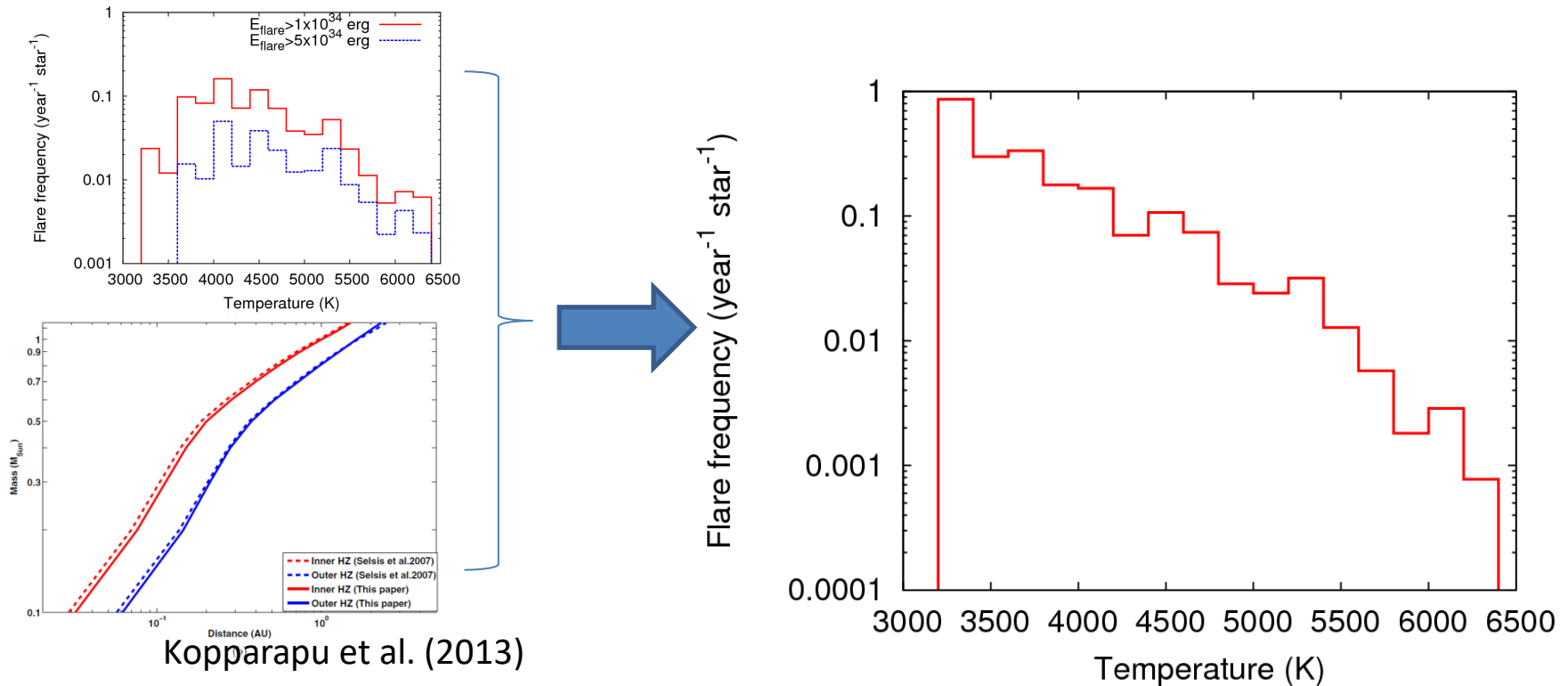
Flare frequency vs. temperature



- Frequency of superflares with the energy of $> 5 \times 10^{34} \text{ erg}$ ($> X5000$)
 - $T_{\text{eff}} > 4000 \text{ K}$: 温度が上がるとフレアの平均発生頻度が下がる
 - $T_{\text{eff}} < 4000 \text{ K}$: 温度が上がるとフレアの平均発生頻度が上がる

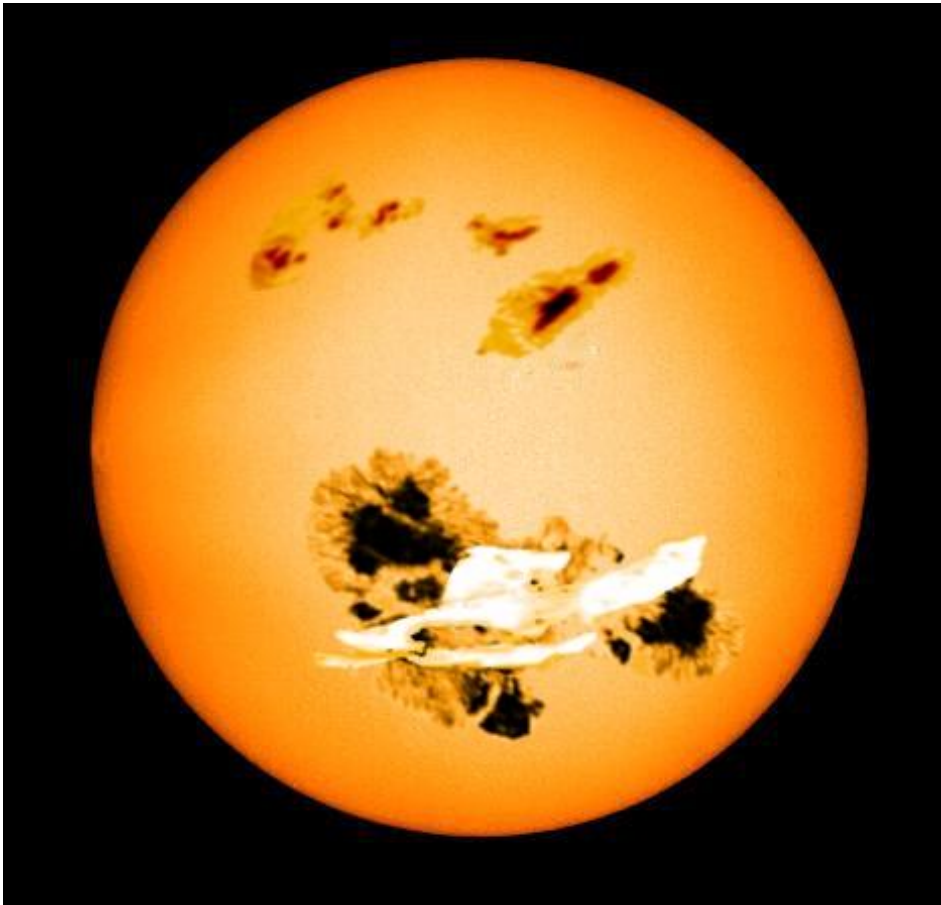
Flare frequency vs. temperature

- ハビタブルゾーン内の惑星へのフレアの影響
 - Flare flux@HZ: E_{flare} と T_{eff} に依存
 - M型星のHZ内の惑星に対しては、小さなフレアでもG型星のスーパーフレアと同等の影響を与える
- HZ内の惑星において、太陽型星の 5×10^{34} erg のスーパーフレアを1 A.U.の距離で観測した時のfluxよりも大きなフレアの発生頻度: **温度が下がると上昇**

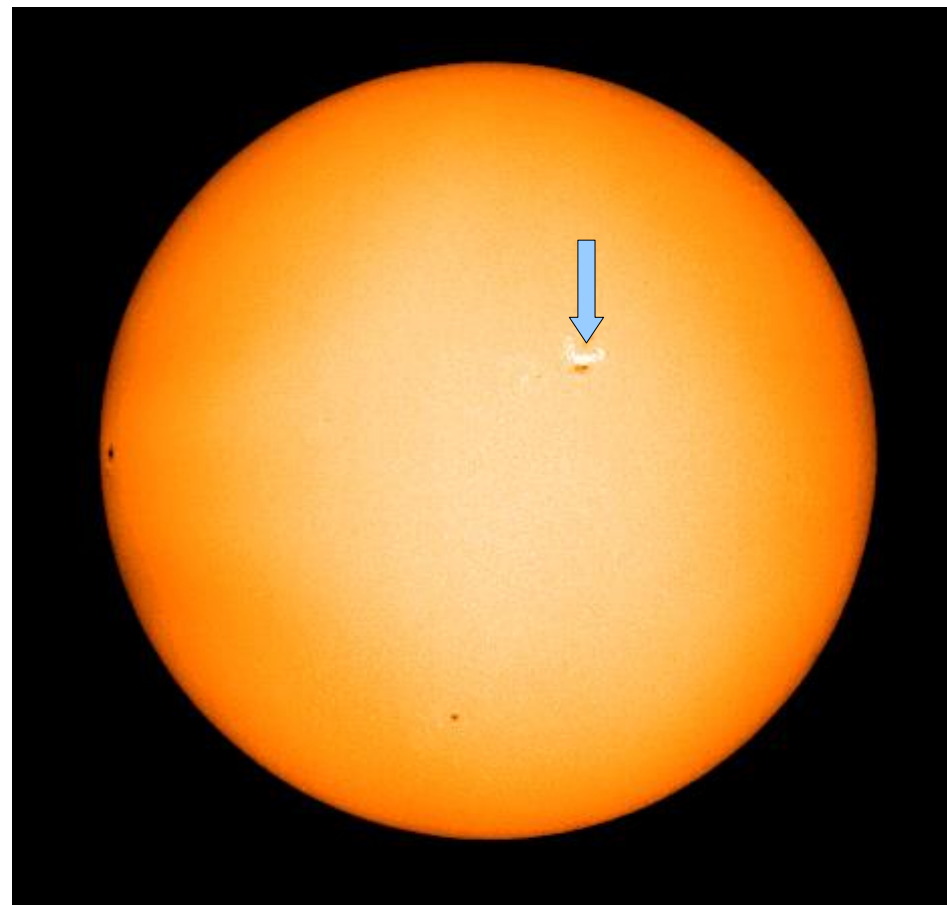


BACKUP

スーパーフレアの想像図



太陽フレア (実際の観測)



Flare frequency vs. T_{eff}

