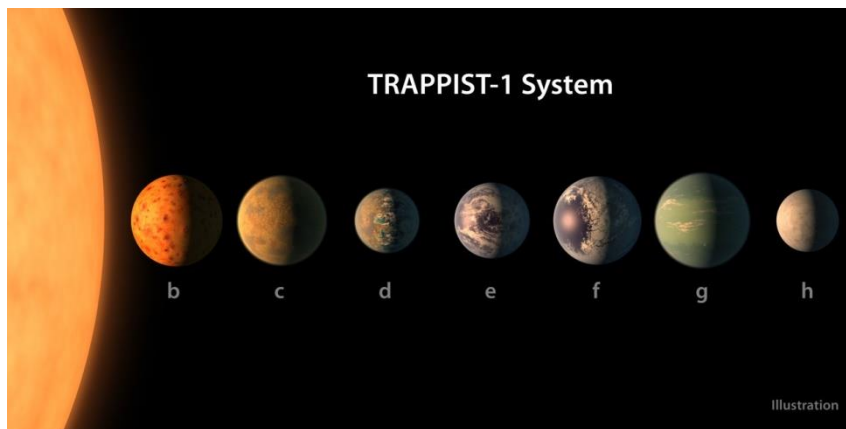
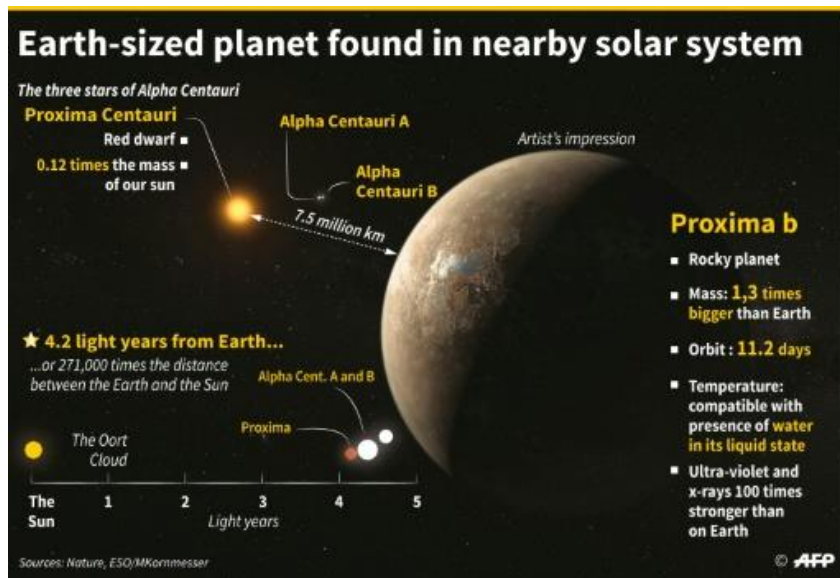


G, K, M型主系列星における フレアと恒星黒点の関係

前原裕之 (国立天文台)

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), 本田敏志 (兵庫県立大学)

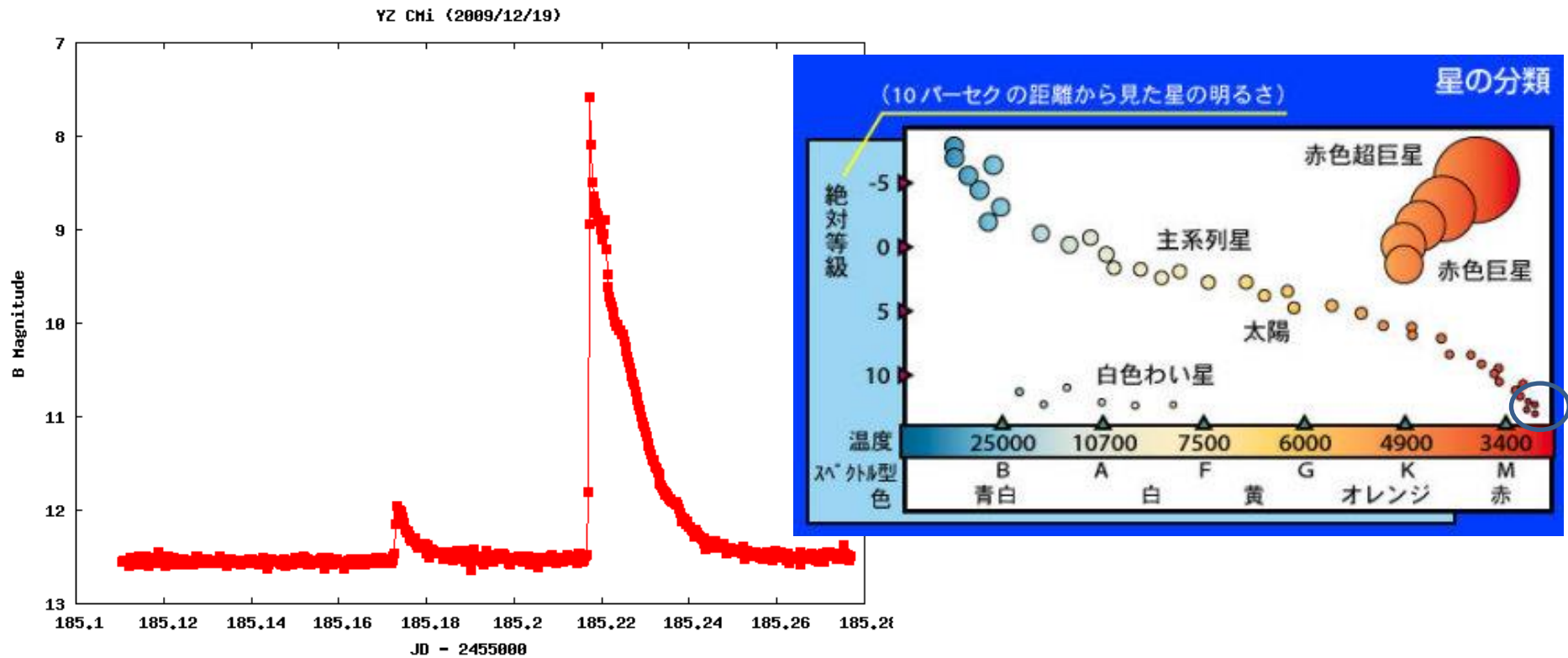
研究の背景



- 近年の系外惑星サーベイで、G,K,M型星の周りのハビタブルゾーン内に地球型惑星が発見されている
- M型星はフレア活動性が高い
 - M型星周りの地球型惑星は本当にハビタブルなのか？
 - フレアによるX線, UVなどによる惑星大気加熱、高エネルギーの陽子による大気組成の変化等の影響を評価する必要がある
 - 星のフレア活動性は何で決まるのか、星の年齢とともにフレアかつ土星はどう変化するか等、中心星のactivityに関する研究が重要

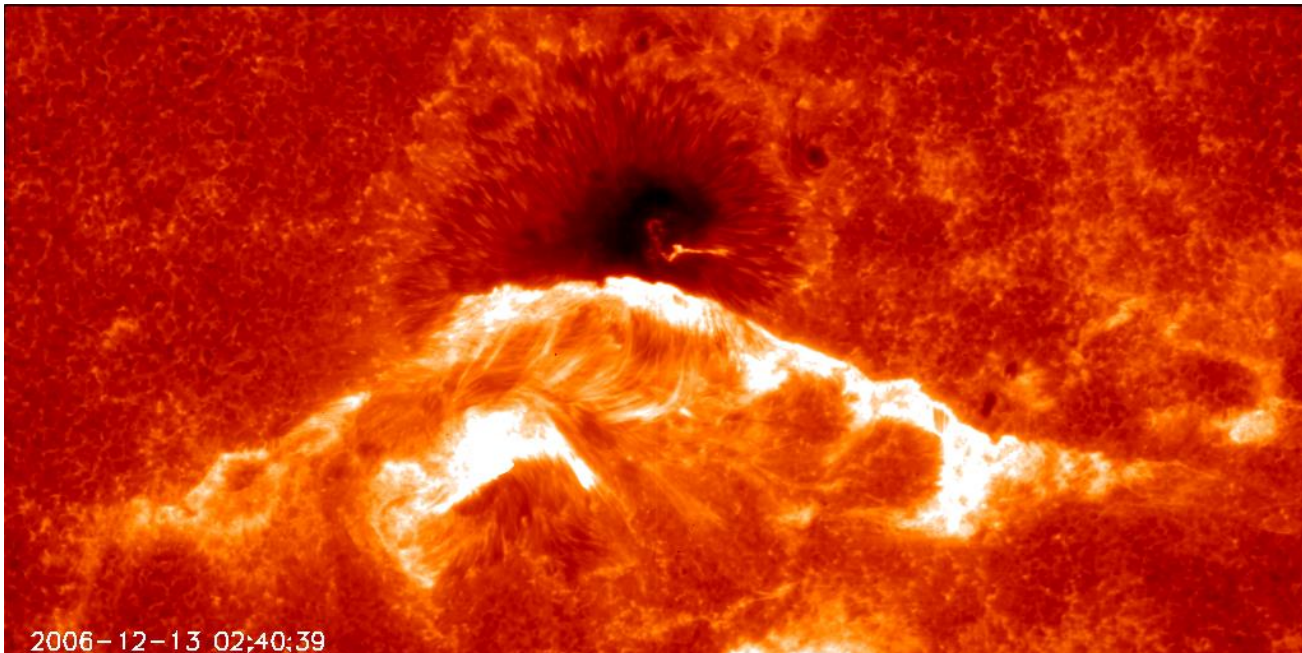
M型星のフレア

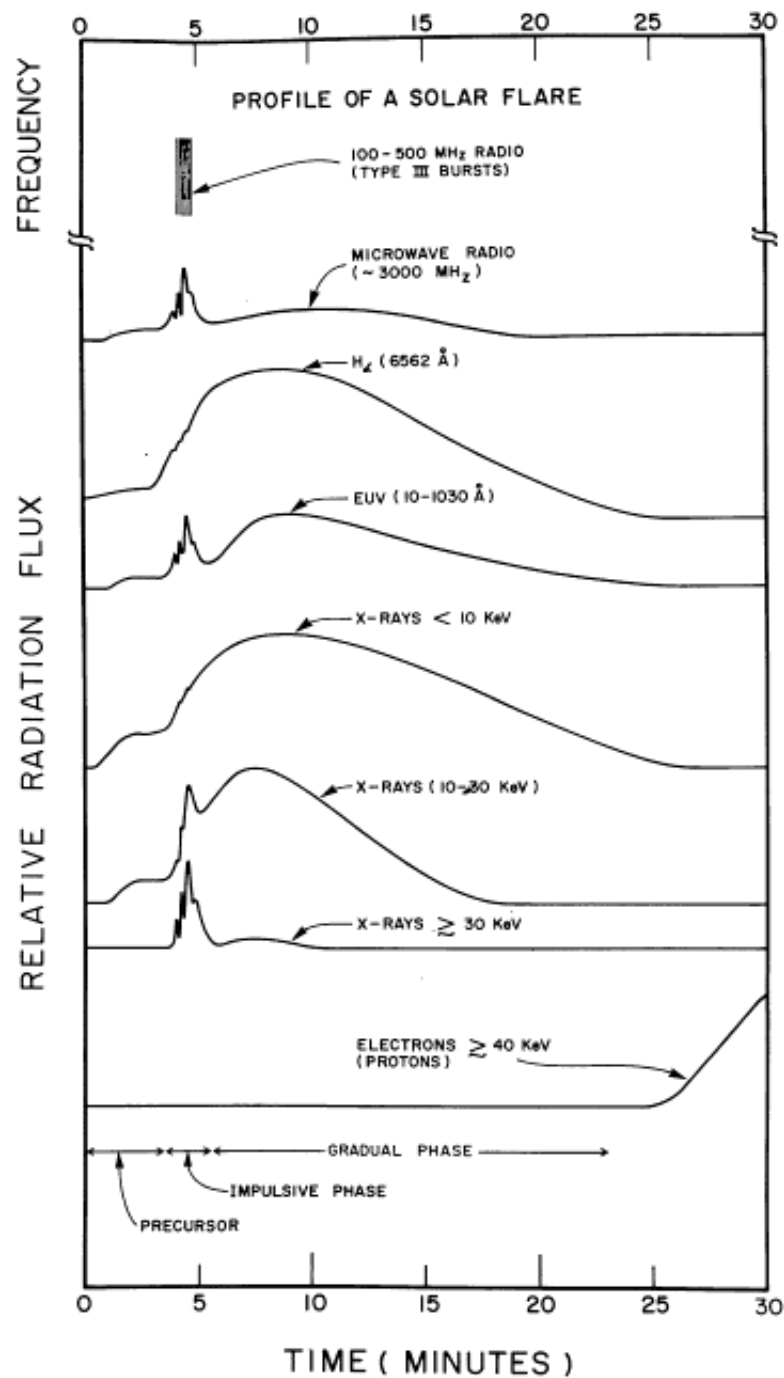
- 可視光での明るさが元の星の100倍近くになるフレアを起こすこともある
 - もとものの星の明るさが暗いために増光振幅が非常に大きい



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
 - 可視光($H\alpha$ 線など)以外にも紫外線、X線などでも明るく光る
- 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





マイクロ波

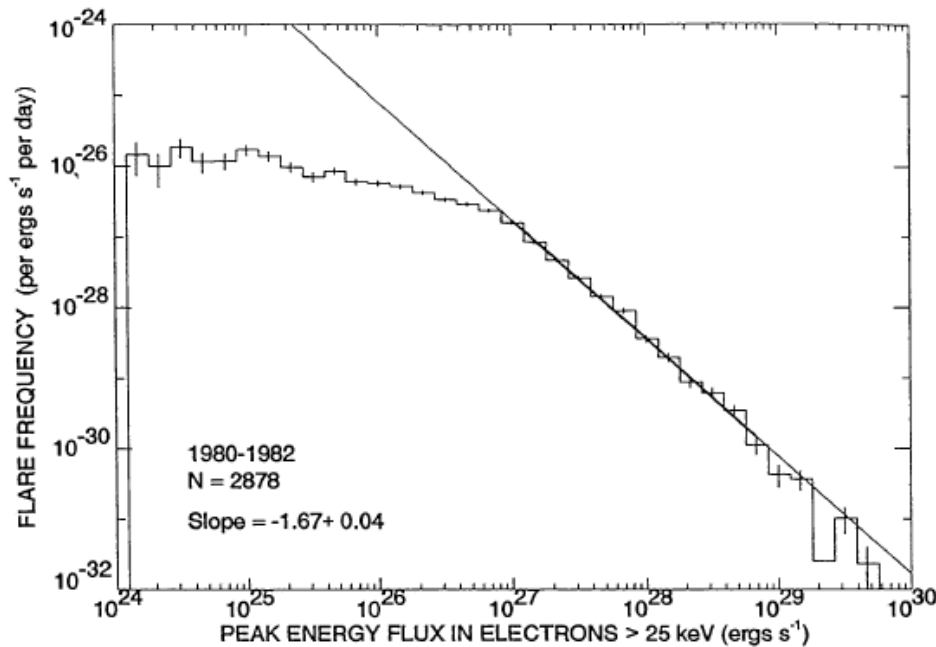
H_{α}
EUV

X線 (<10keV)

X線 (10-30keV)

X線 (>30keV)

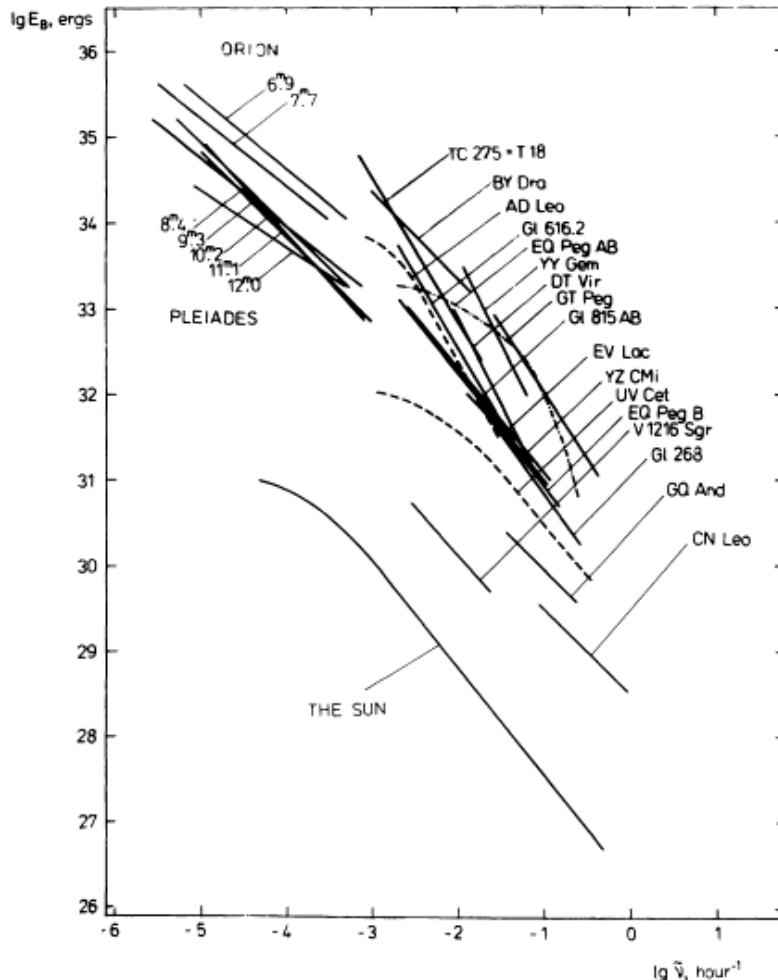
太陽フレアの発生頻度



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 10^{32} erg

恒星フレアの発生頻度分布

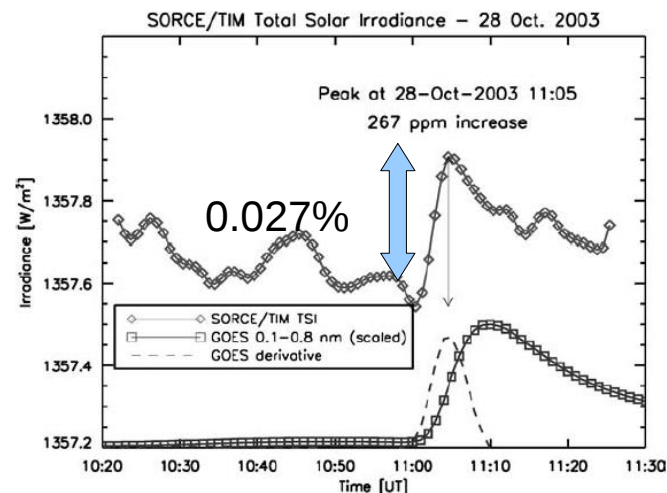


- 太陽フレアと同様のべき分布を示す
 - ただし、エネルギーは太陽フレアよりも大きく ($E \sim 10^{34} - 10^{36}$ erg)、発生頻度も高い

太陽型星 (G型星) のフレア

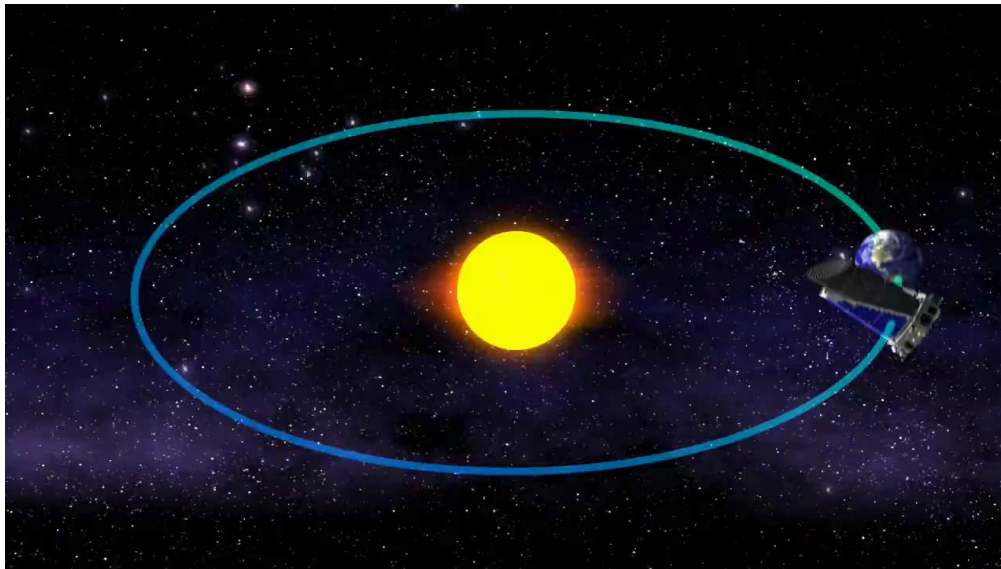
- フレアが起きても星の明るさはほとんど変化しない
 - 最大級の太陽フレアでも太陽の明るさは1万分の1しか明るくならない
 - 太陽フレアの1,000倍でも10%しか増光しない
- 極めて高い測光精度が必要

太陽フレアによる太陽
の明るさの変化→



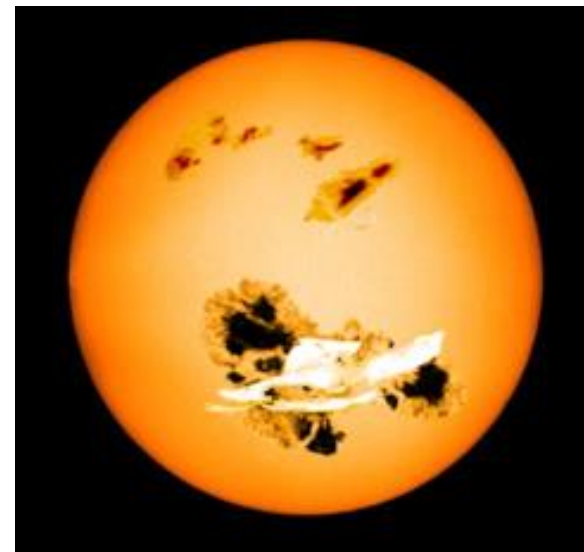
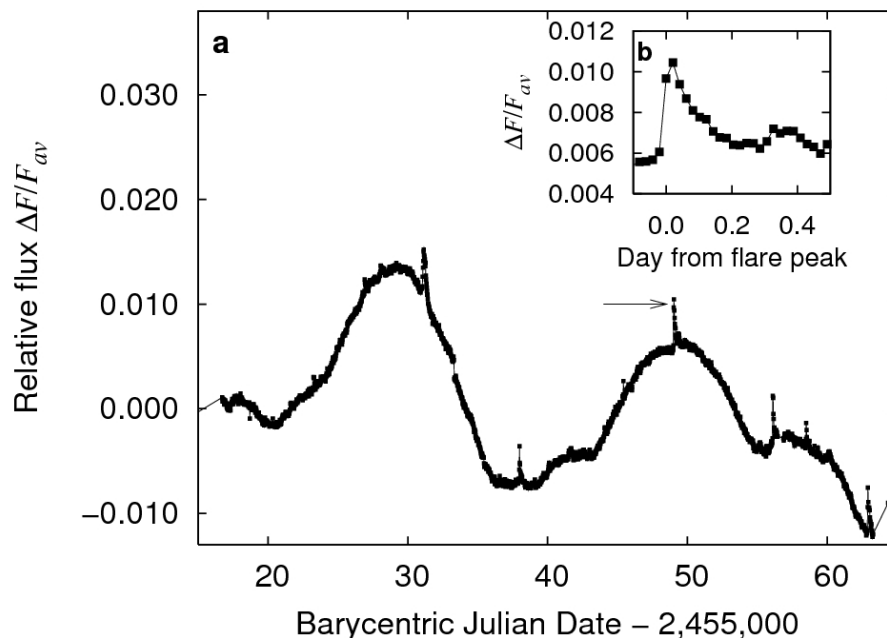
ケプラー宇宙望遠鏡

- 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
 - 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



太陽型星 (G型星) のスーパーフレア

- 太陽フレアの最大1000-10000倍のエネルギーを解放するフレア (スーパーフレア) を多数検出
 - 365例 (Maehara et al. ; 観測期間: 120日)
 - 1547例 (Shibayama et al. ; 観測期間500日)
- スーパーフレアを起こす星の多くは準周期的な明るさの変化を示す
→ 星表面に大きな黒点があることを示唆



Flare energy vs. area of starspots

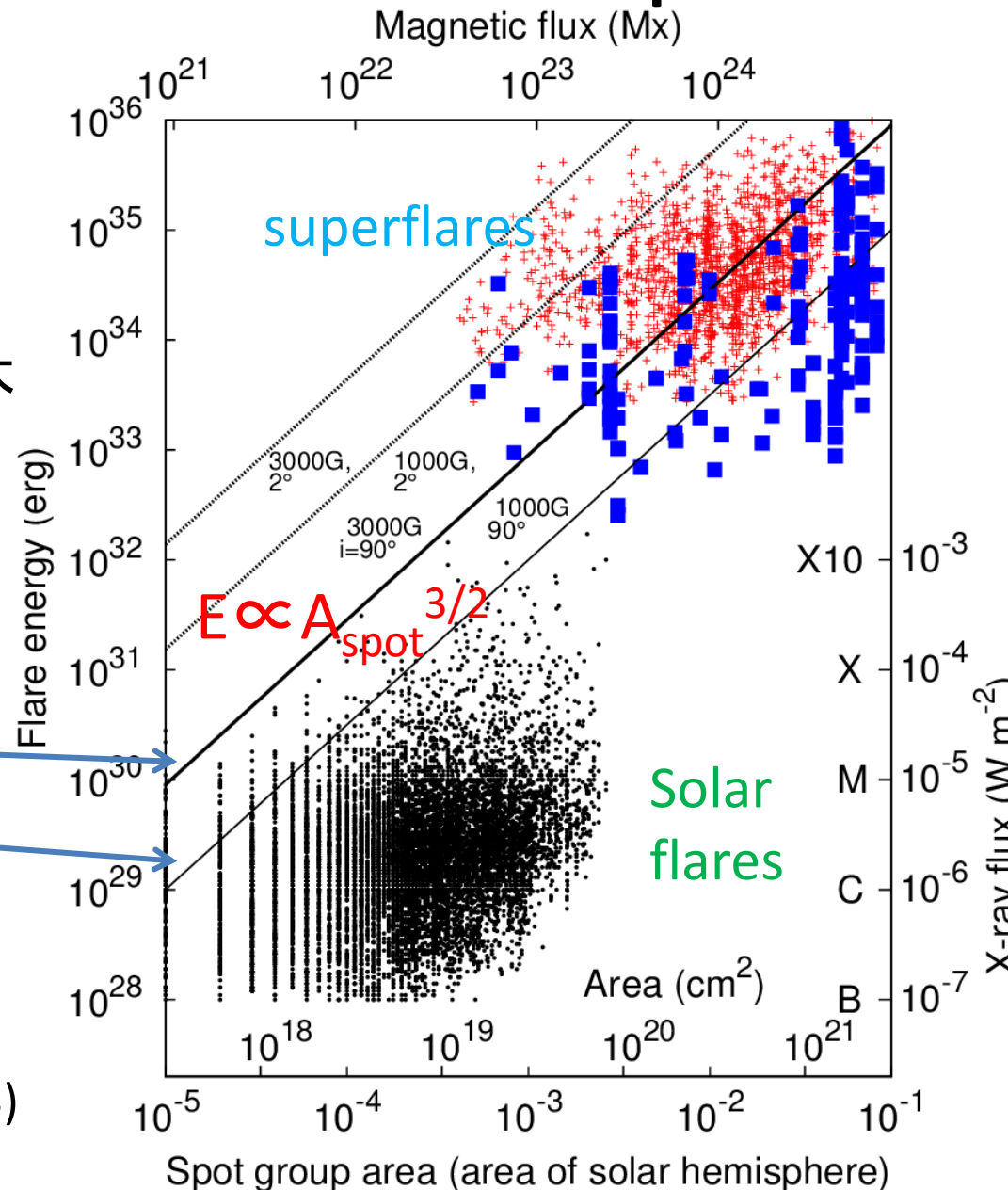
- フレア ← 磁気リコネクション
黒点付近の磁場のエネルギー
→ フレアのエネルギー
- スーパーフレアを起こすには大きな黒点が必要

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

$$f=0.1, B=3000\text{G}$$

$$f=0.1, B=1000\text{G}$$

Shibata et al. (2013)



太陽型星の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



- K, M型星でも同様のフレアと黒点の関係がみられるかどうかを調べた。

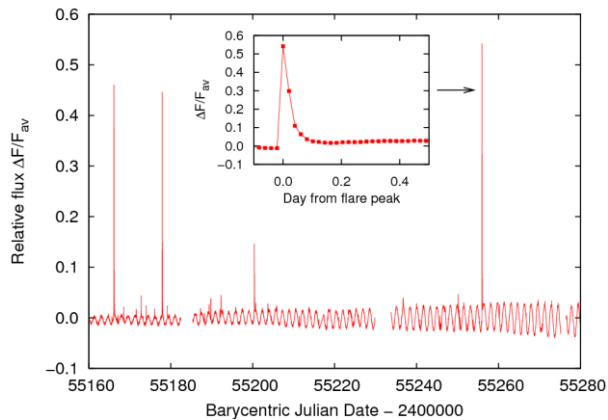
解析に用いたデータ

- 星の温度・表面重力: Hurber et al. 2014
 - $T_{\text{eff}} < 6500 \text{ K}$, $\log g > 4.0$ の天体をG,K,M型矮星として選択
 - 109,092 天体
- 星の自転周期・振幅: McQuillan et al. 2014
 - 太陽型星として選んだ星のうち、変光の振幅・周期の両方が求められている天体を選択
 - 振幅 $> \sim 10^{-3}$, 周期: 0.1-50日
 - 28,988 天体
- フレア: Shibayama et al. 2013 + Candelaresi et al. 2014
 - 795 天体/6830 フレア

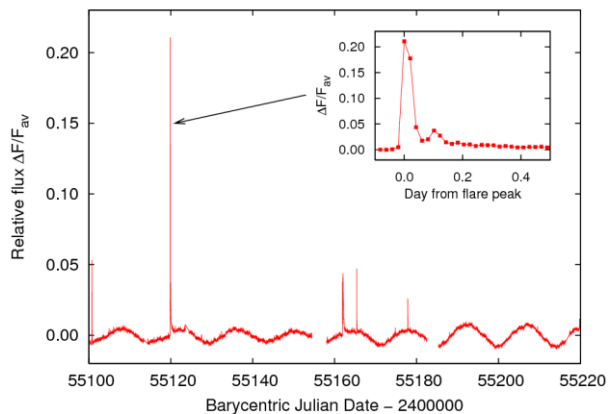
Flares detected by Kepler

1928 flares on 117 stars

KIC 6949412



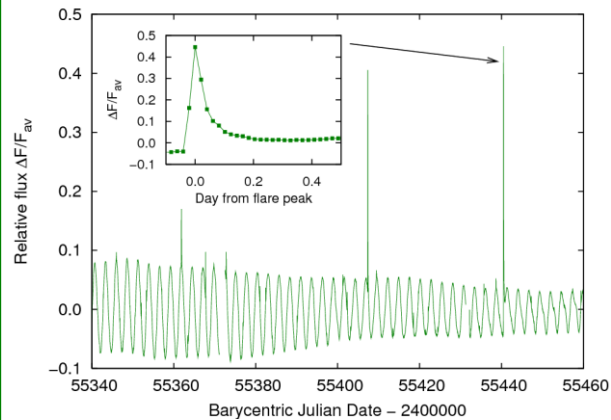
KIC 11349556



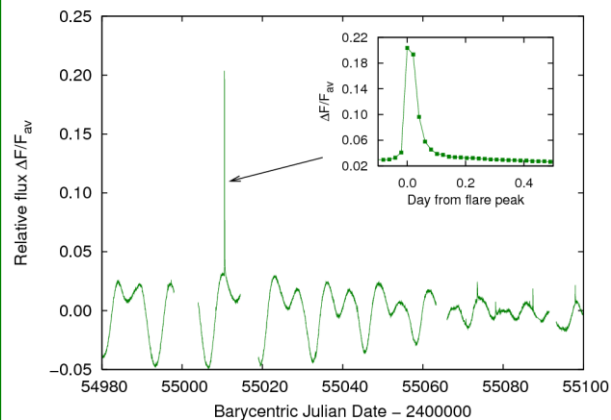
M-dwarfs

3355 flares on 399 stars

KIC 4349043



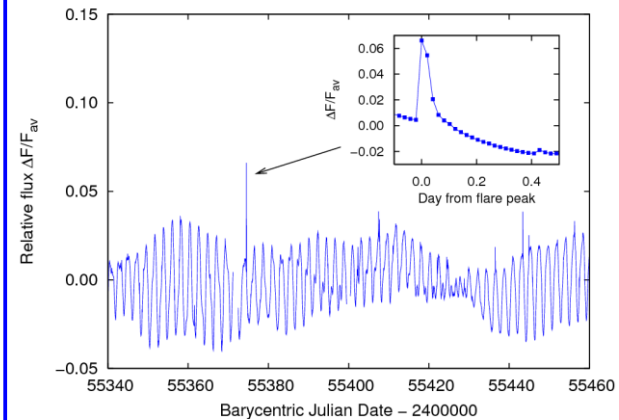
KIC 8142547



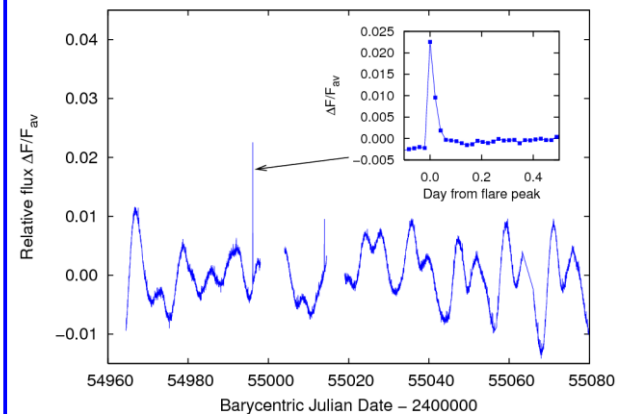
K-dwarfs

1547 flares on 279 stars

KIC 7532880

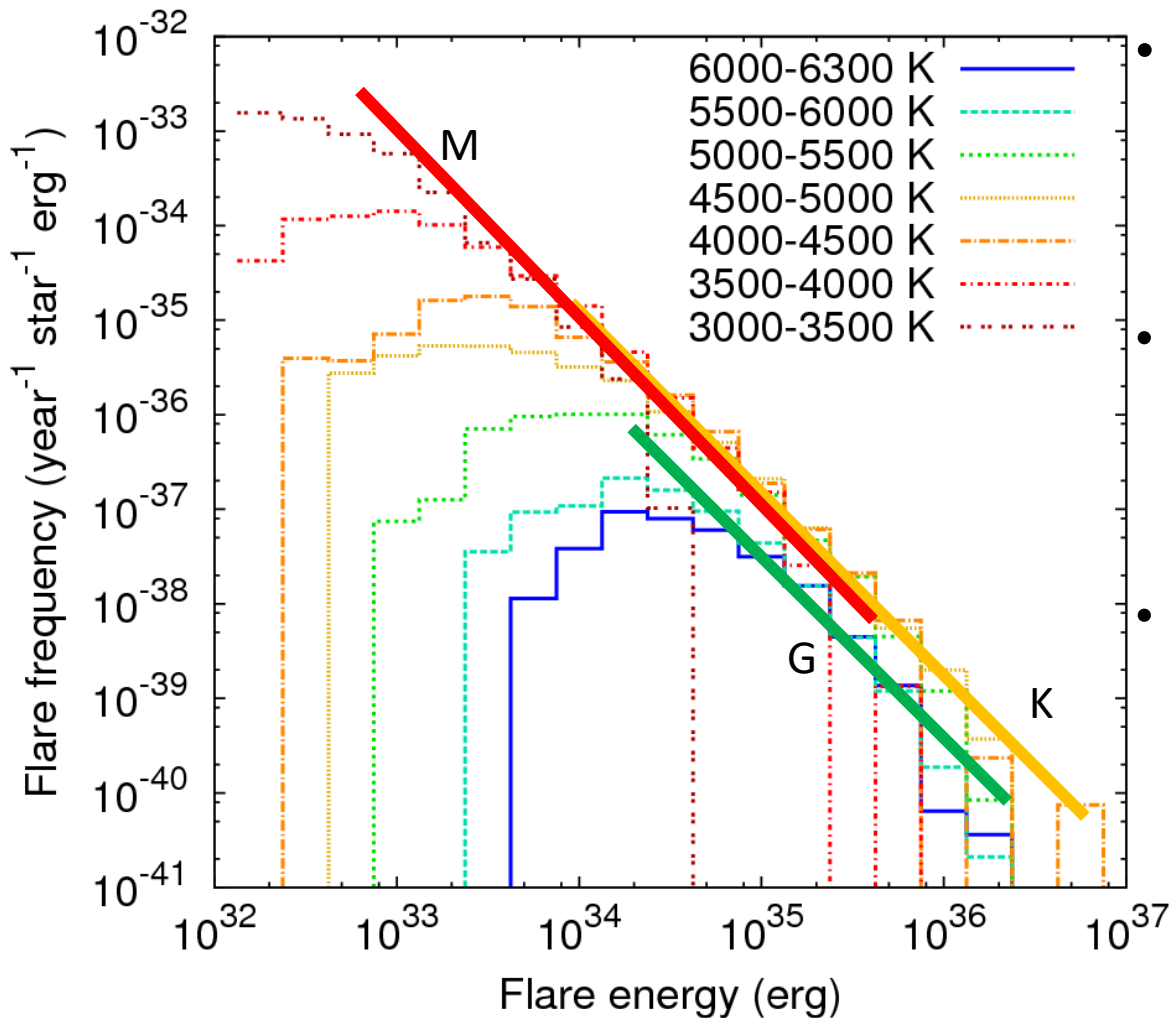


KIC 10524994



G-dwarfs

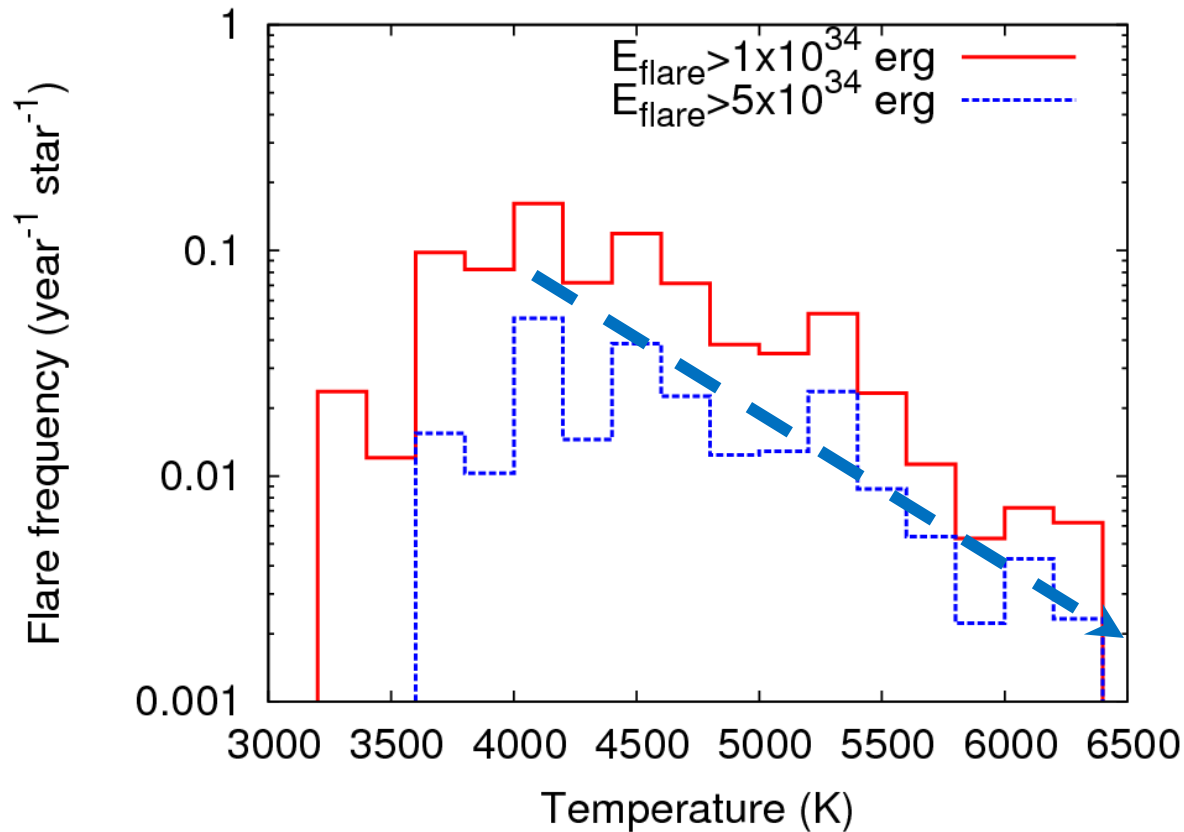
Occurrence frequency distribution



- フレアの発生頻度はべき関数分布を示す
 - power-law index ~ -1.9 - -1.8
- あるエネルギーのフレアの発生頻度は、M, K型星の方がG型星よりも高い
- フレアのエネルギーの最大値
 - K- and G-dwarfs: $\sim 10^{36}$ erg
 - M-dwarfs: $\sim 10^{35}$ erg

→ M型星のフレアのエネルギーの最大値はG, K型星のフレアよりも1桁程度小さい

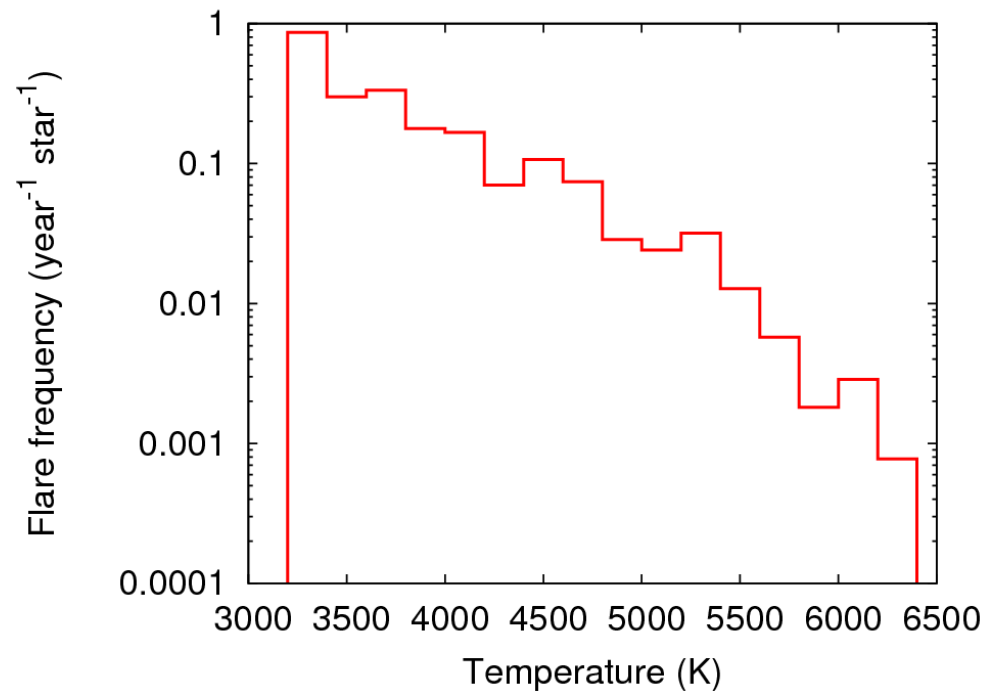
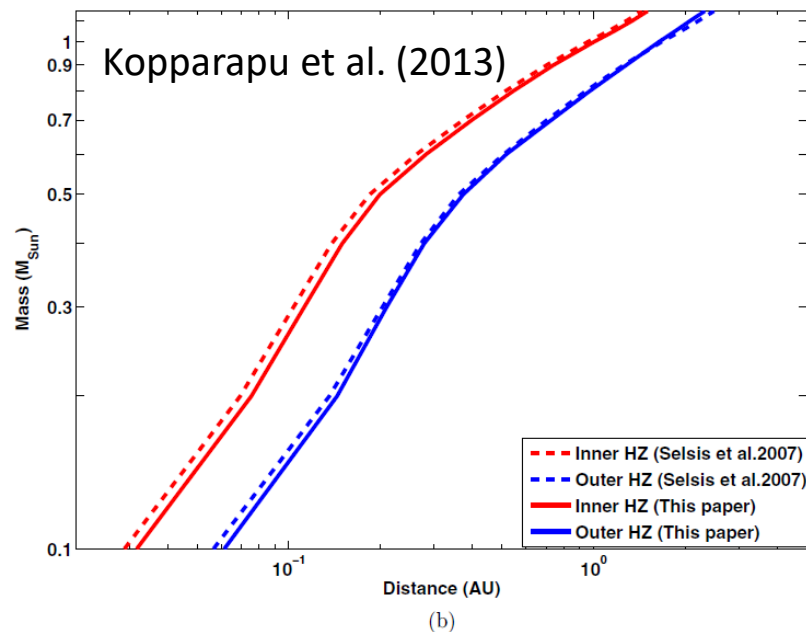
Flare frequency vs. temperature



- 5×10^{34} erg (X5000)以上のスーパーフレアの発生頻度
 - $T_{\text{eff}} > 4000$ K: 温度が上がるとフレアの平均発生頻度が下がる
 - $T_{\text{eff}} < 4000$ K: 温度が上がるとフレアの平均発生頻度が上がる

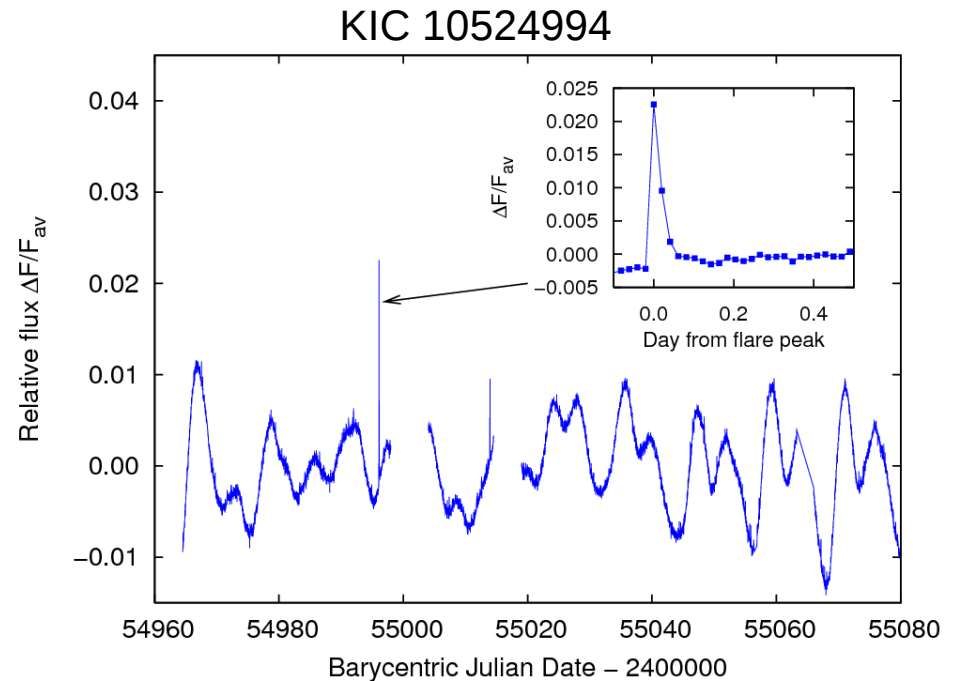
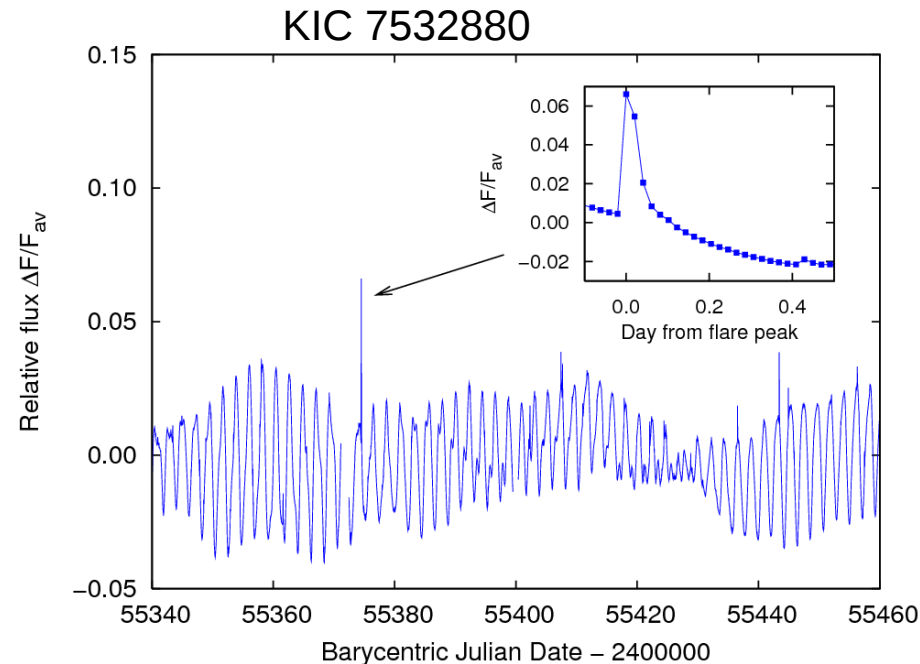
Flare frequency vs. temperature

- 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



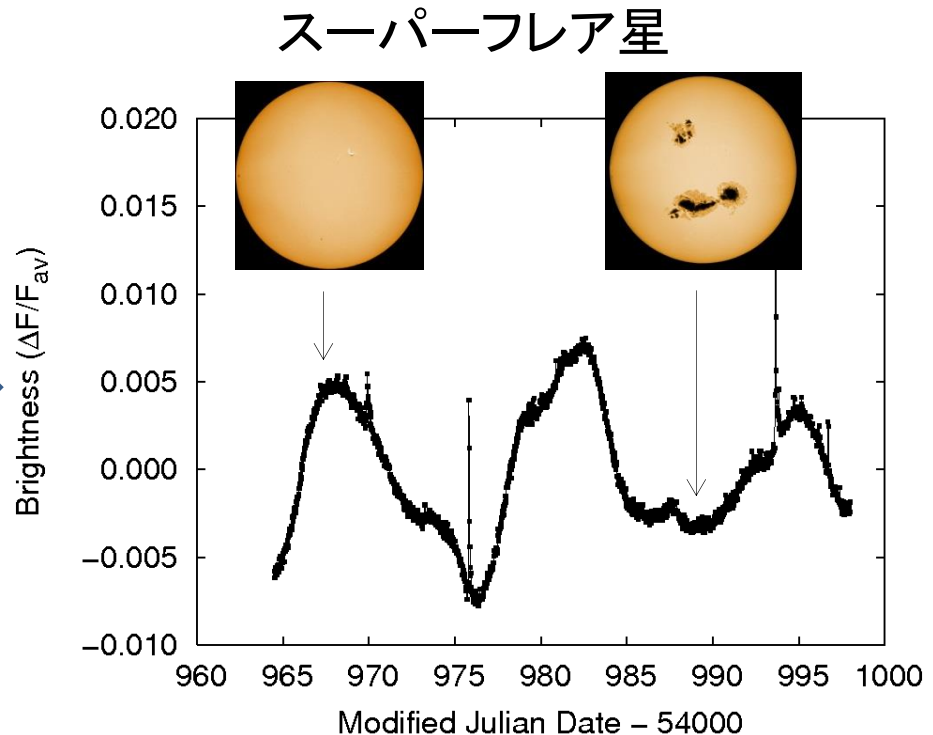
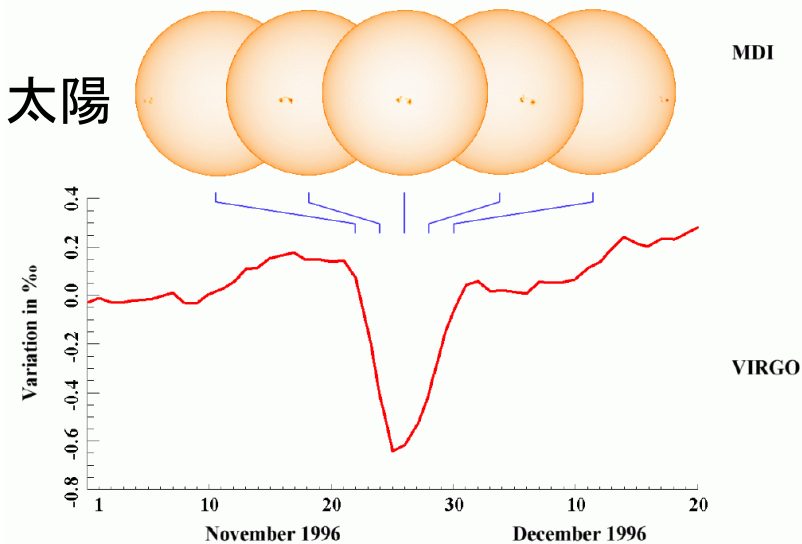
スーパーフレア星の明るさの変化

- フレア星の多くは準周期的な光度変化を示す
 - 変光周期: $\sim 0.5 - 30$ 日
 - 変光振幅: 0.1 - 10%
 - 変光振幅自体も時間変化を示す.



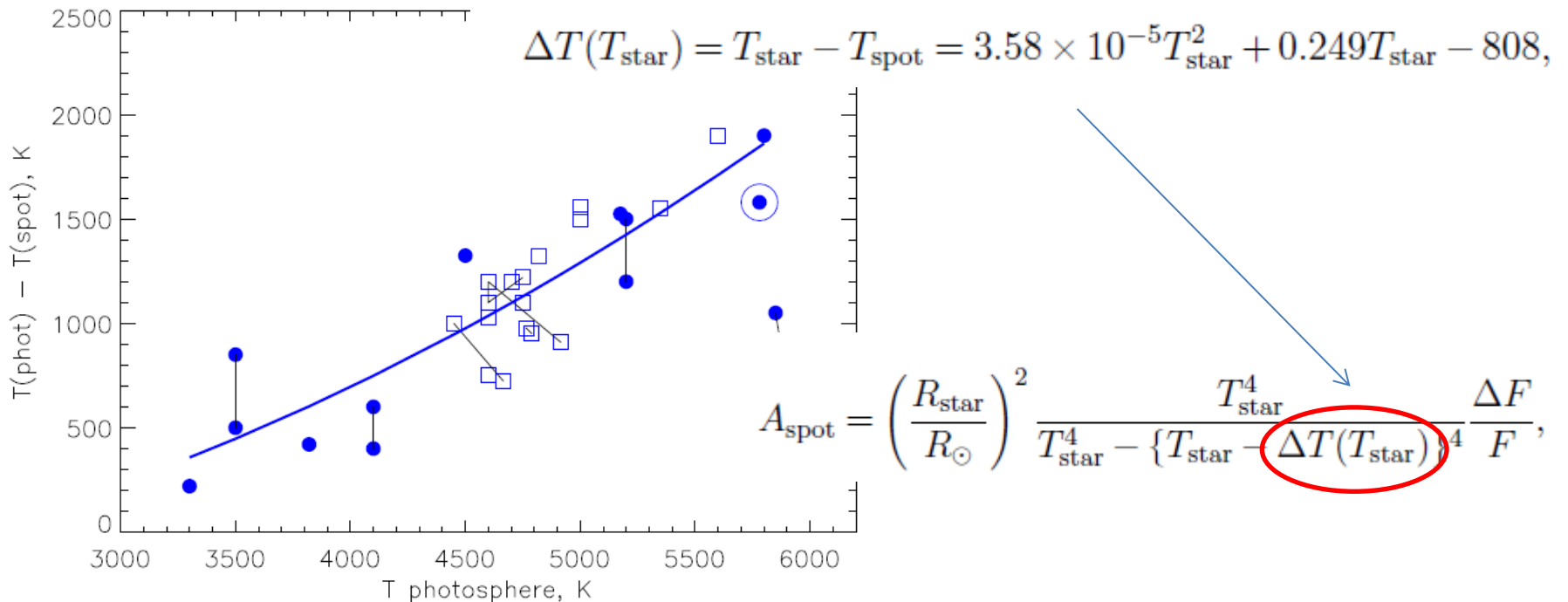
準周期的な変光の原因

- 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

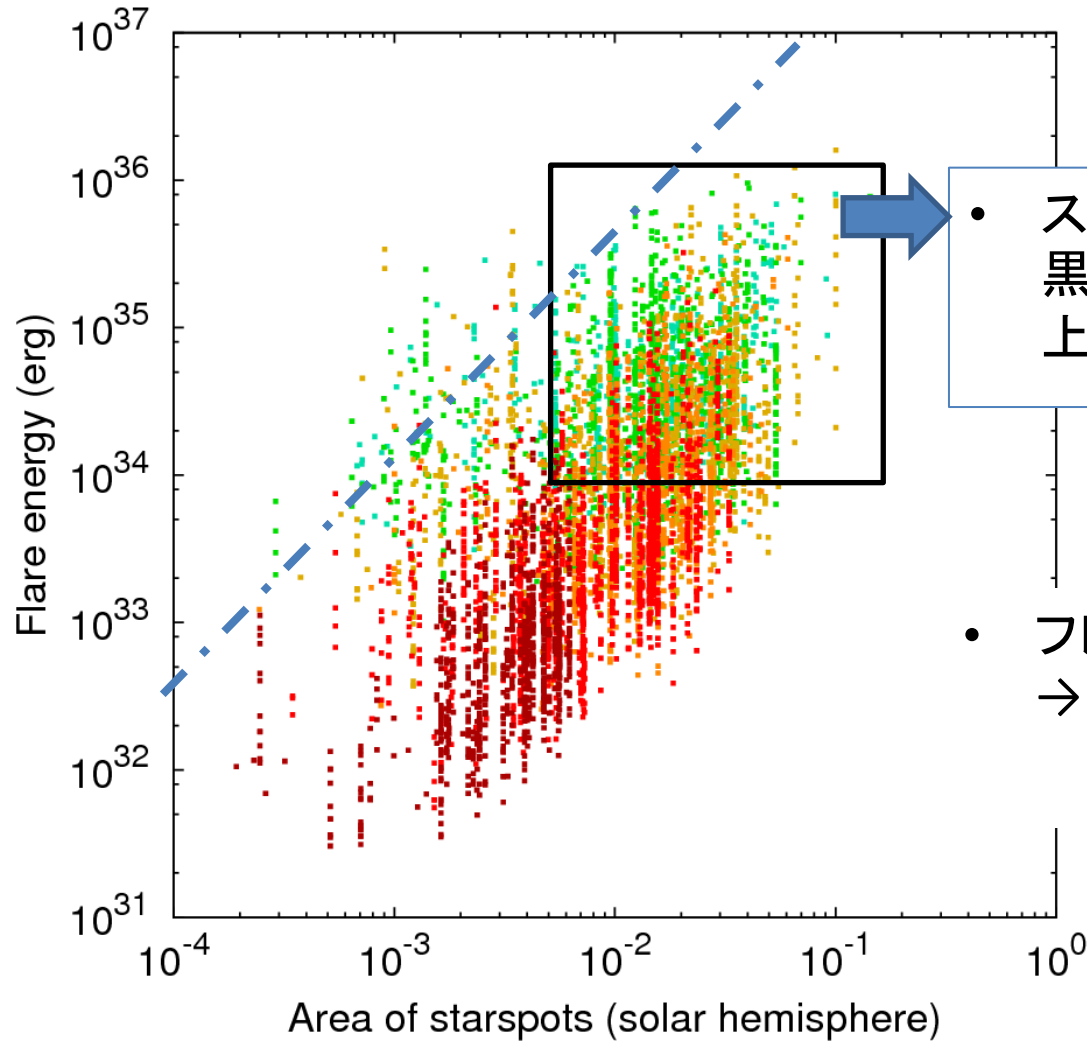


黒点面積の推定

- 変光振幅($\Delta F/F$)から黒点の面積(A_{spot})を推定
 - 変光振幅は黒点と光球の温度差(コントラスト)と黒点の面積で決まる
 - 星の温度、半径はHuber et al. (2014)の値を使用
 - 黒点と光球の温度差はBerdyugina (2005)のデータを用いた



Flare energy vs. spot area



- スーパーフレアの多くは巨大な黒点(太陽半球面積の1%以上)を持つ星で発生
- フレアのエネルギーの上限値
→ 黒点面積と相関がある

5500-6000	●	4000-4500	●
5000-5500	●	3500-4000	●
4500-5000	●	3000-3500	●

Flare energy vs. area of starspots

フレアのエネルギー < 磁場のエネルギー

フレア = 磁場のエネルギーを磁気リコネクションによって熱や運動エネルギーの形で放出

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

Shibata et al. (2013)

- 黒点付近に蓄えられる磁場のエネルギーは黒点面積 (A_{spot}) の3/2乗に比例



- フレアで解放されるエネルギーの上限値も黒点面積 (A_{spot}) の3/2乗に比例

Flare energy vs. spot area

- Keplerで観測されたフレアのエネルギーは黒点面積から予想される磁場のエネルギーで説明可能.

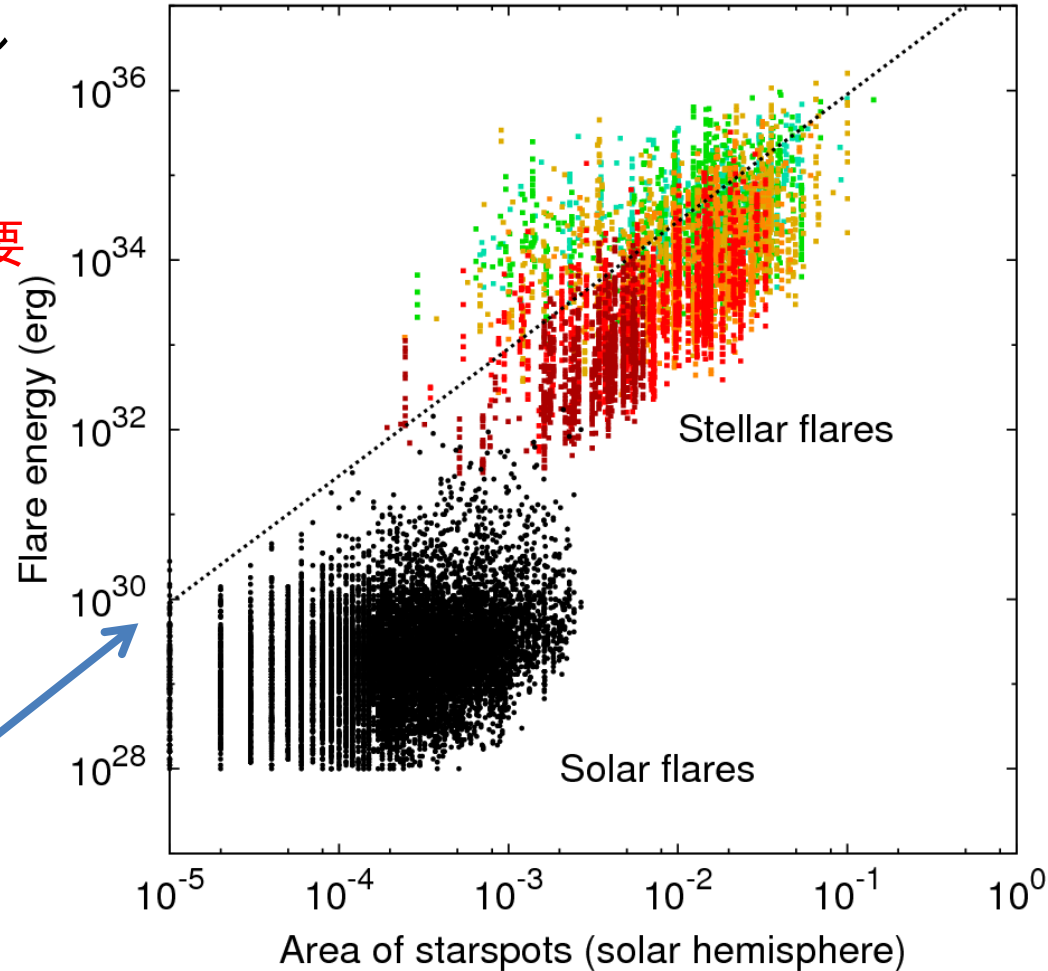
→スーパーフレアには巨大黒点が必要

- M型星 ($T < 3500\text{K}$) は黒点面積が小さい → フレアのエネルギーの最大値も小さい

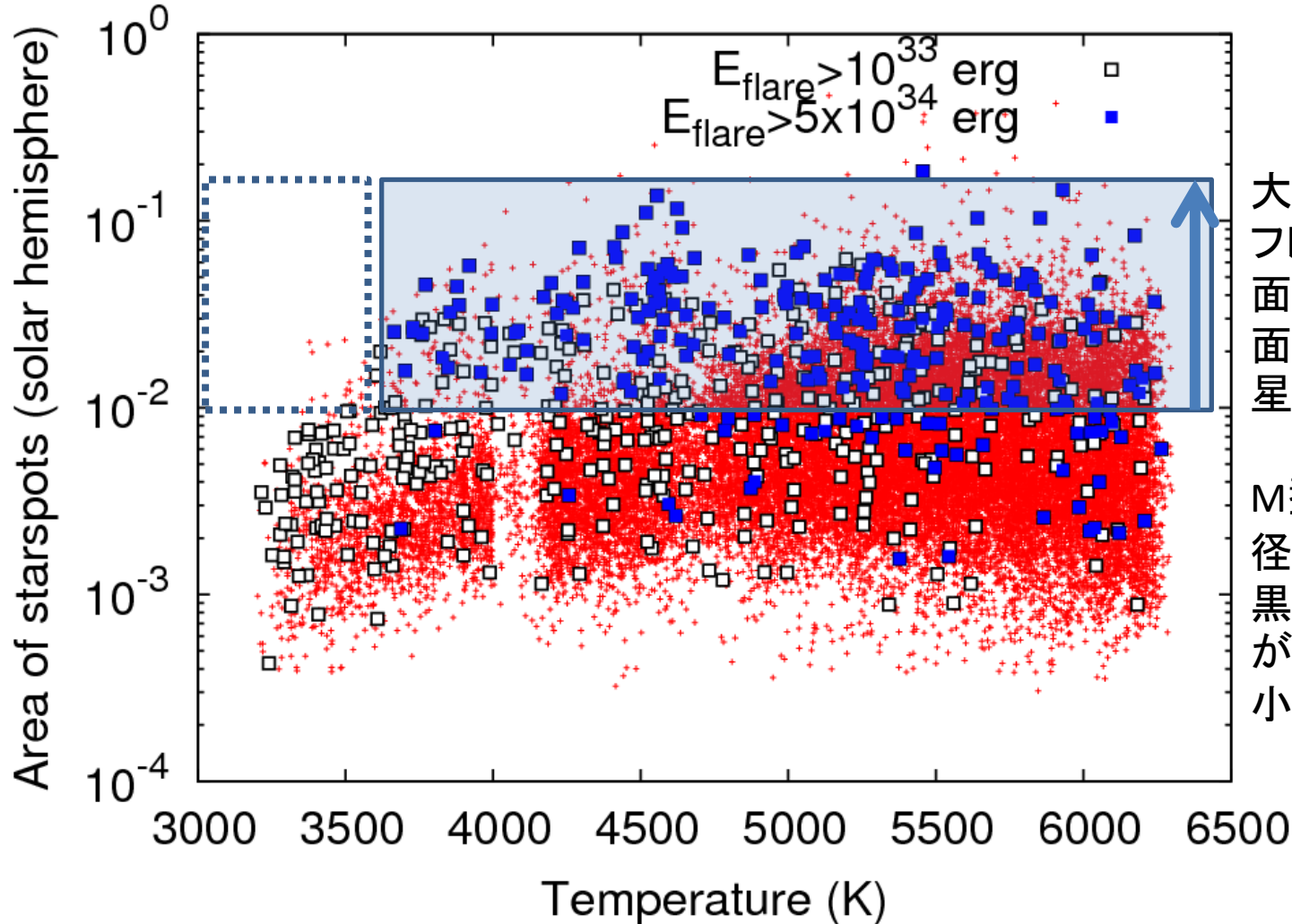
- 星の半径がG, K型星よりも小さい

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

$$f=0.1, B=3000\text{G}$$



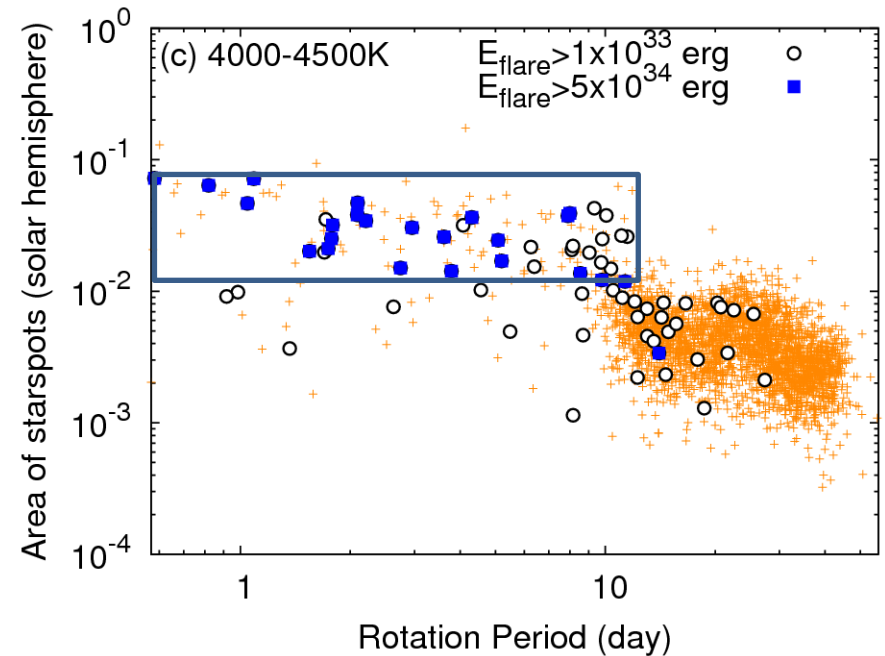
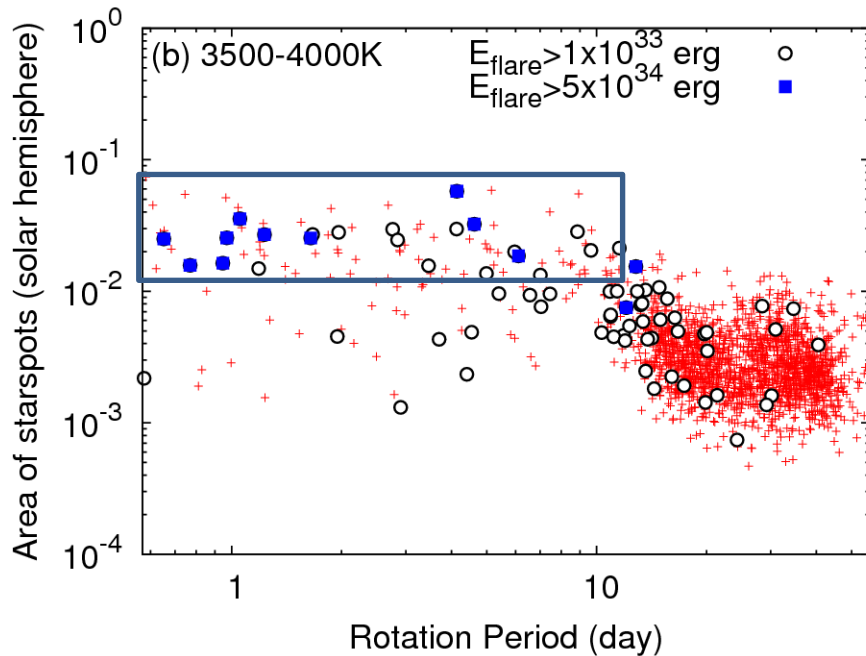
Spot area vs. temperature



大部分のスーパー
フレアは太陽半球
面積の1%以上の
面積の黒点を持つ
星で発生

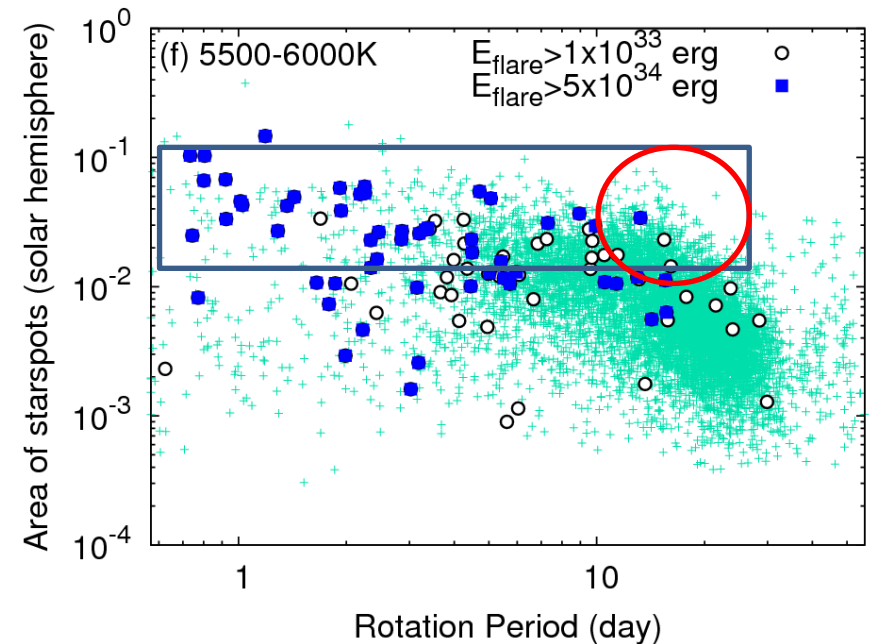
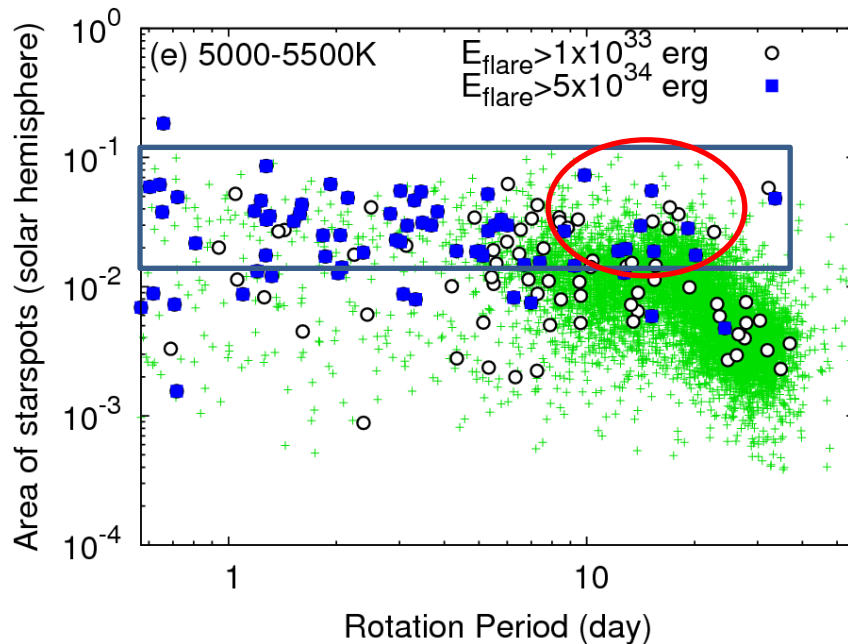
M型星では星の半
径が小さいため、
黒点面積の上限値
がK, M型星よりも
小さい

Spot area vs. rotation period



- M- and late K-dwarfs
 - 自転周期10日以下の天体のみが巨大黒点(太陽表面積の1%以上)を持つ
 - 大部分のスーパーフレア星も自転周期10日以下

Spot area vs. rotation period



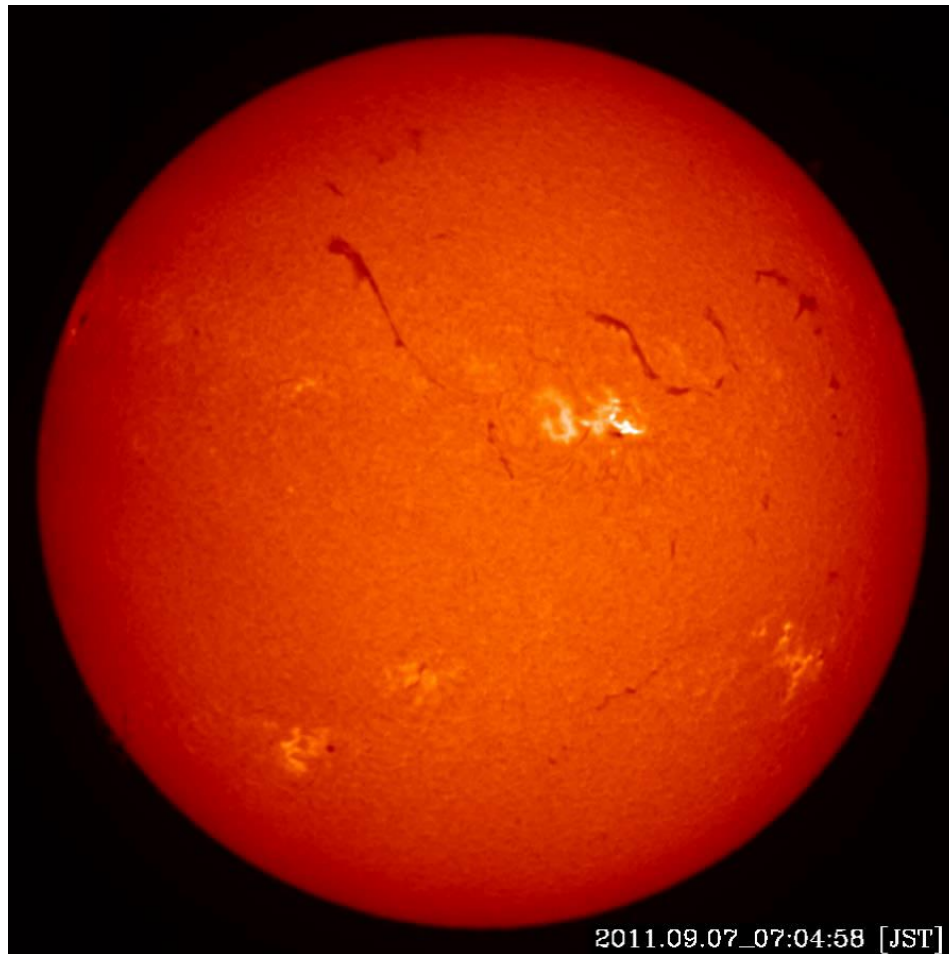
- Early K- and G-dwarfs
 - 自転周期10-20日の星も巨大黒点を持つ
 - 自転周期が遅いスーパーフレア星も見つかっている

まとめ

- G, K, M型星のフレアと黒点の関係
 - フレアのエネルギーの上限値は黒点面積と良い相関がある
 - $E_{\text{flare}} > 5 \times 10^{34}$ ergのスーパーフレアの大部分は太陽半球面積の1%以上の面積の黒点を持つ天体で発生
 - 黒点面積が分かれば、その星で発生するフレアの最大エネルギーが分かる
 - M型星のフレアのエネルギーの上限値はG,K型星のフレアのエネルギーの上限値よりも小さい
 - M型星は星の半径が小さく黒点面積の上限がG,K型星よりも小さいため、フレアエネルギーの上限も小さくなると考えられる
 - 早期M型星では $E_{\text{flare}} > 10^{36}$ ergのスーパーフレアは起こらない
 - 中心星と惑星の距離も考慮すると、M型星まわりのHZ内の惑星におけるスーパーフレア(太陽-地球系でのX5000クラス相当のフレア)の発生頻度はG型星の約1000倍

- backup

太陽フレア



2011.09.07_07:04:58 [JST]

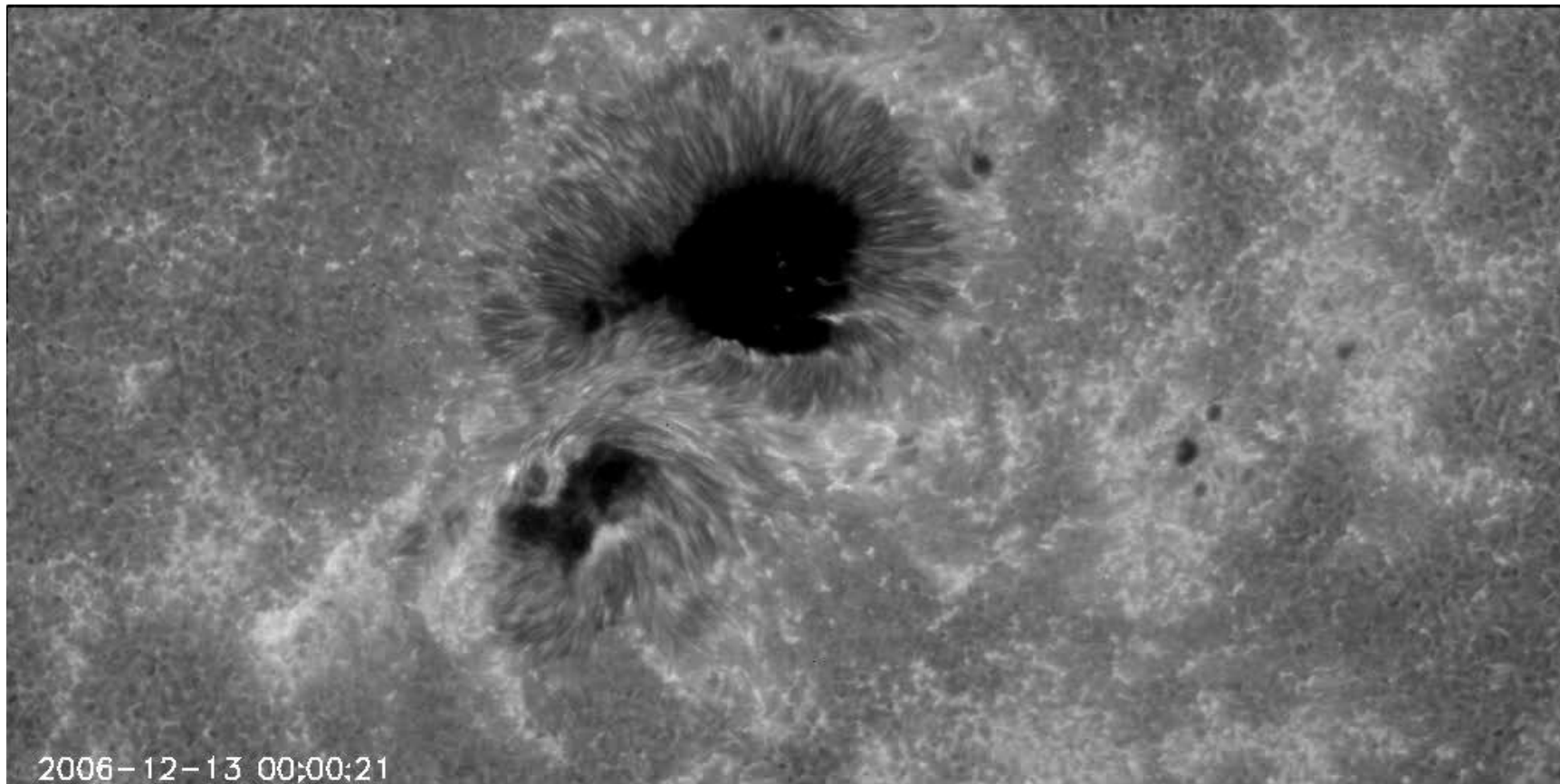
京都大学飛騨天文台 SMART望遠鏡

太陽フレア



京都大学飛騨天文台 SMART望遠鏡

太陽フレア

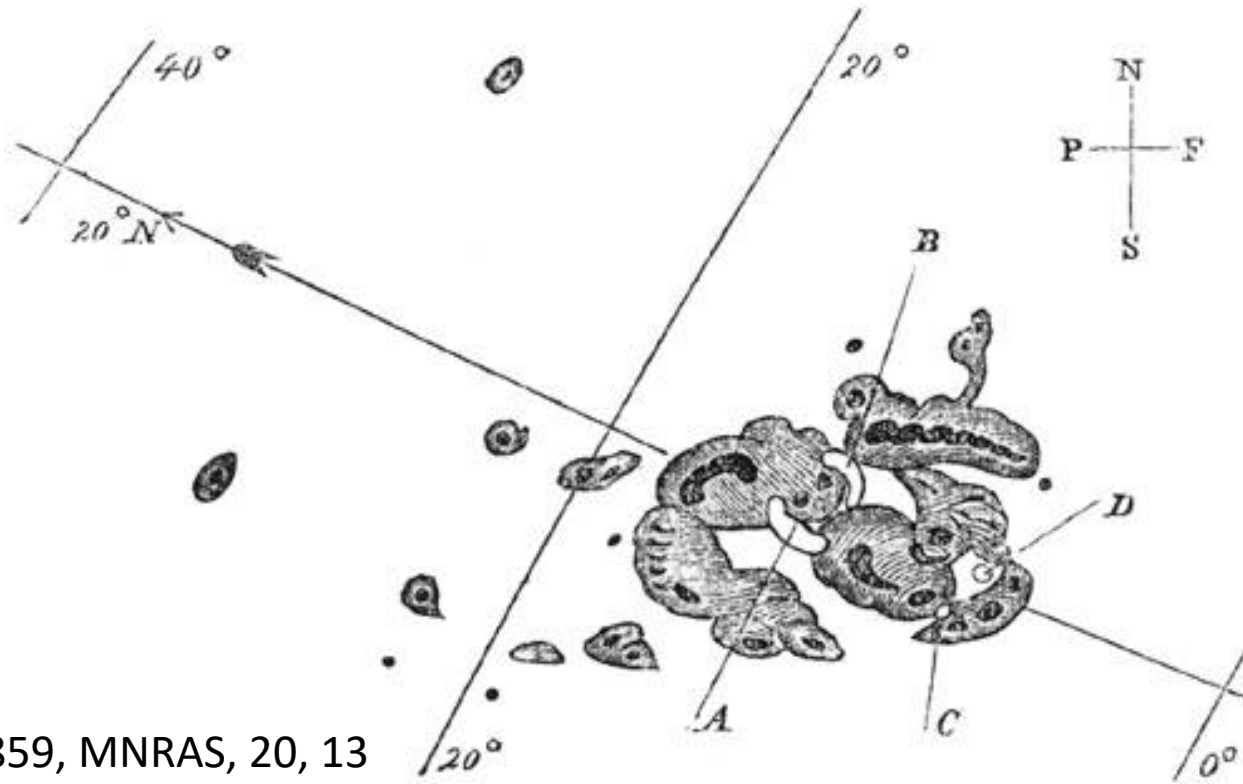


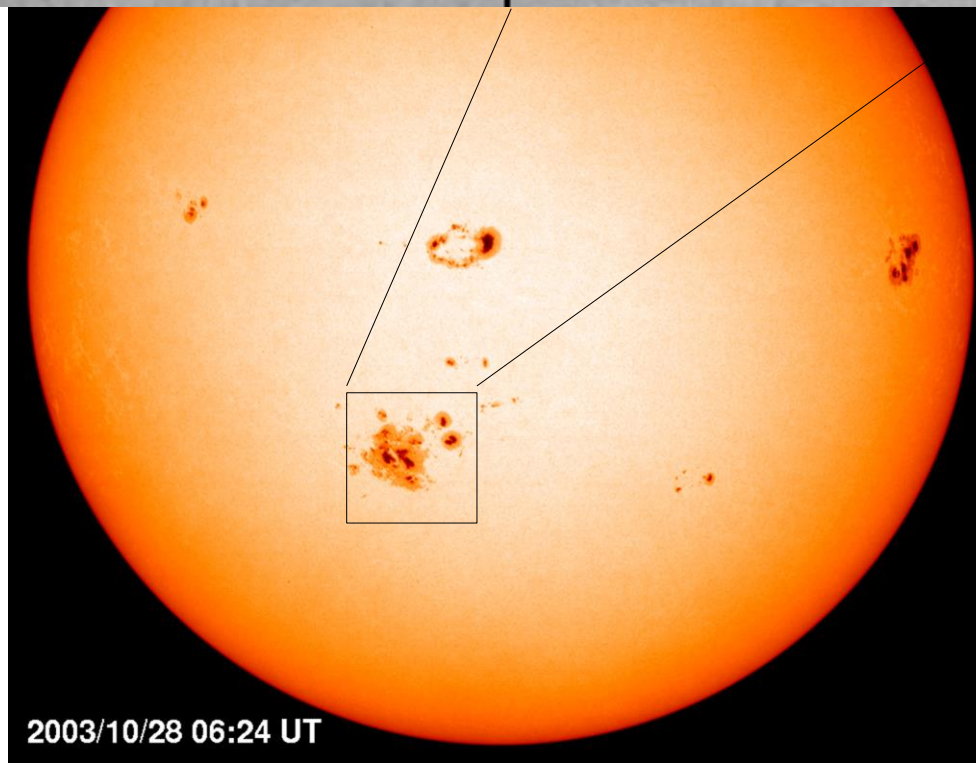
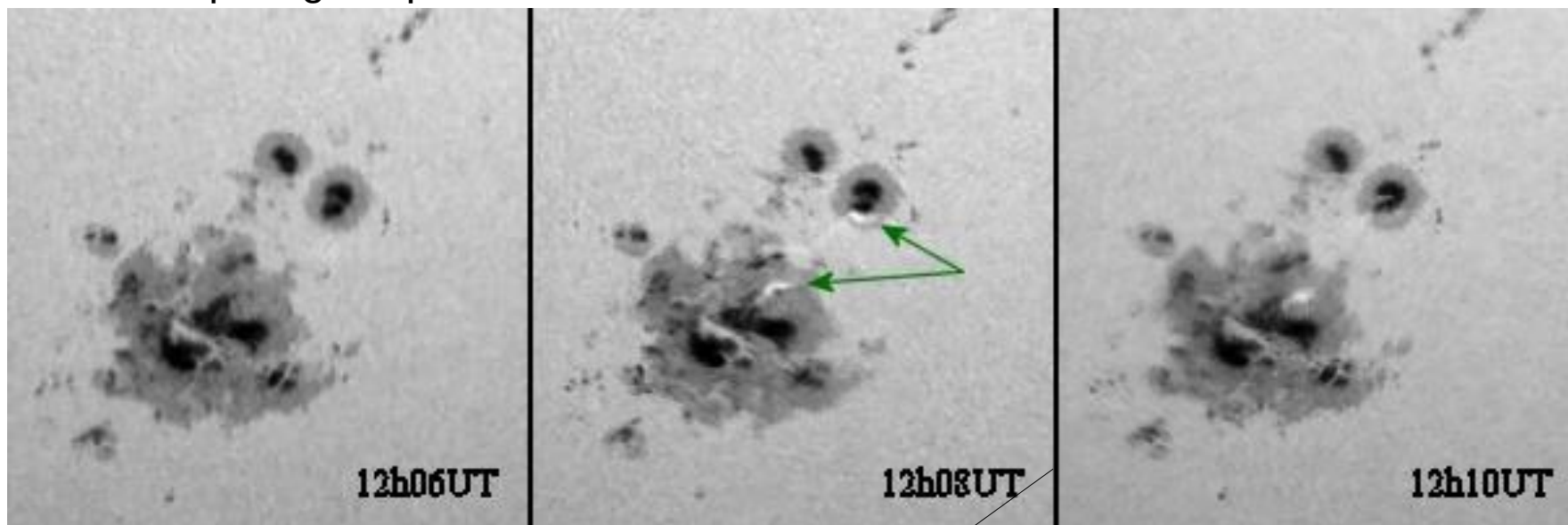
太陽観測衛星 ひので

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





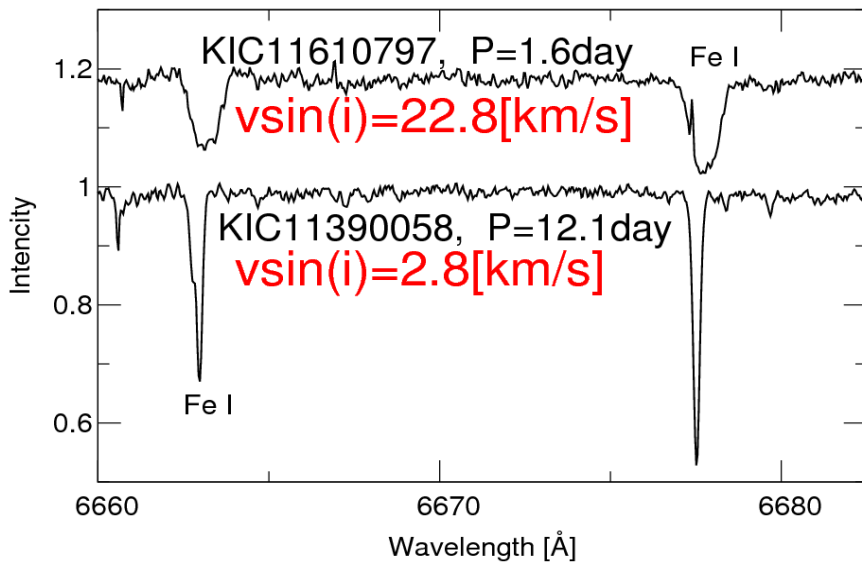
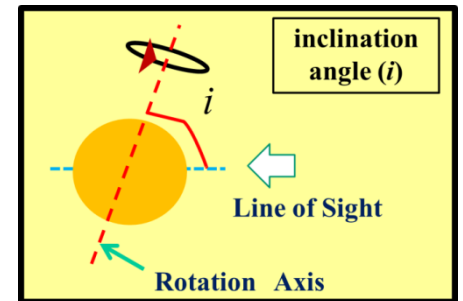
白色光フレアの
観測例

SOHO衛星による太陽像

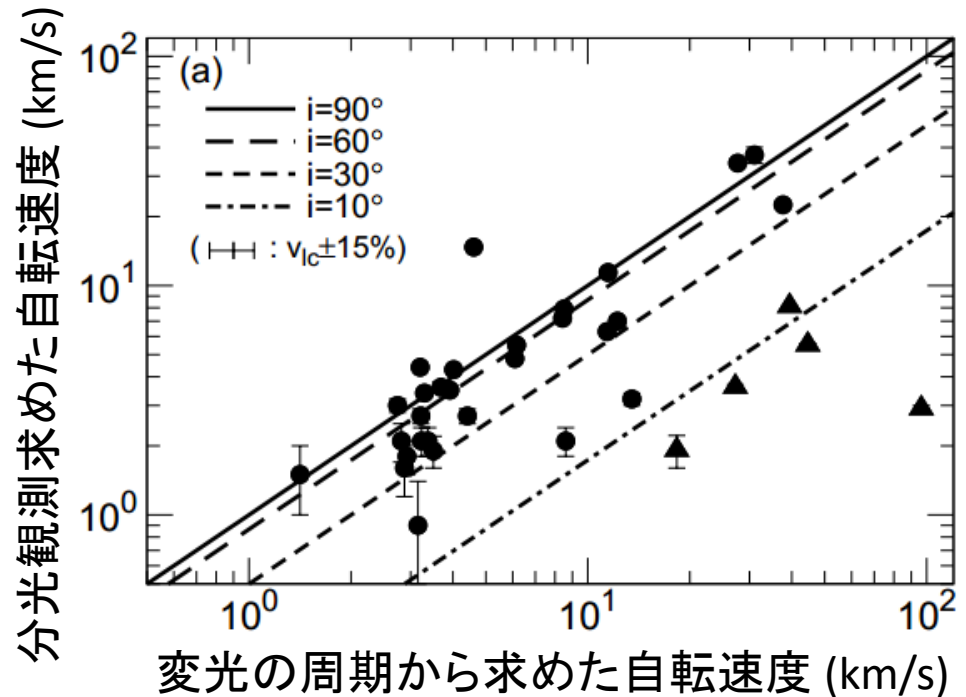
自転速度

- 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

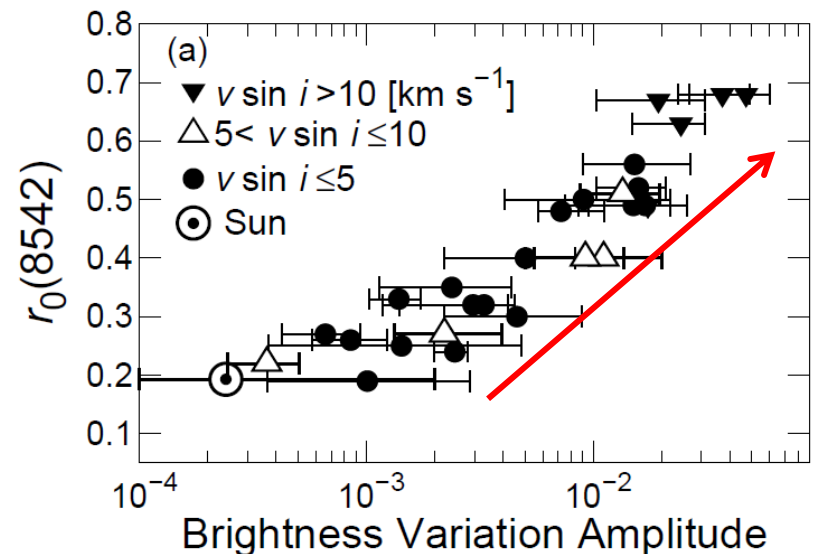
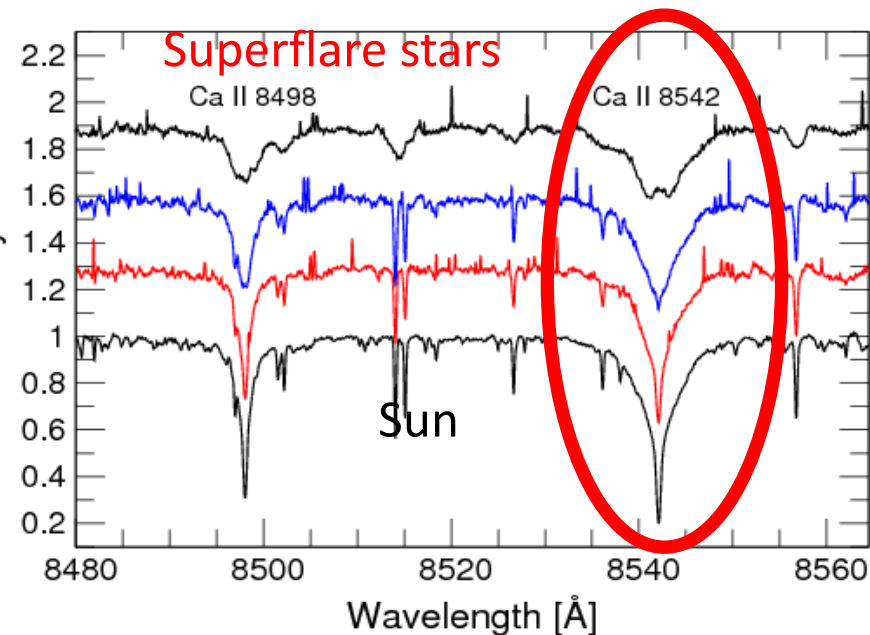


Notsu et al. 2015.



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

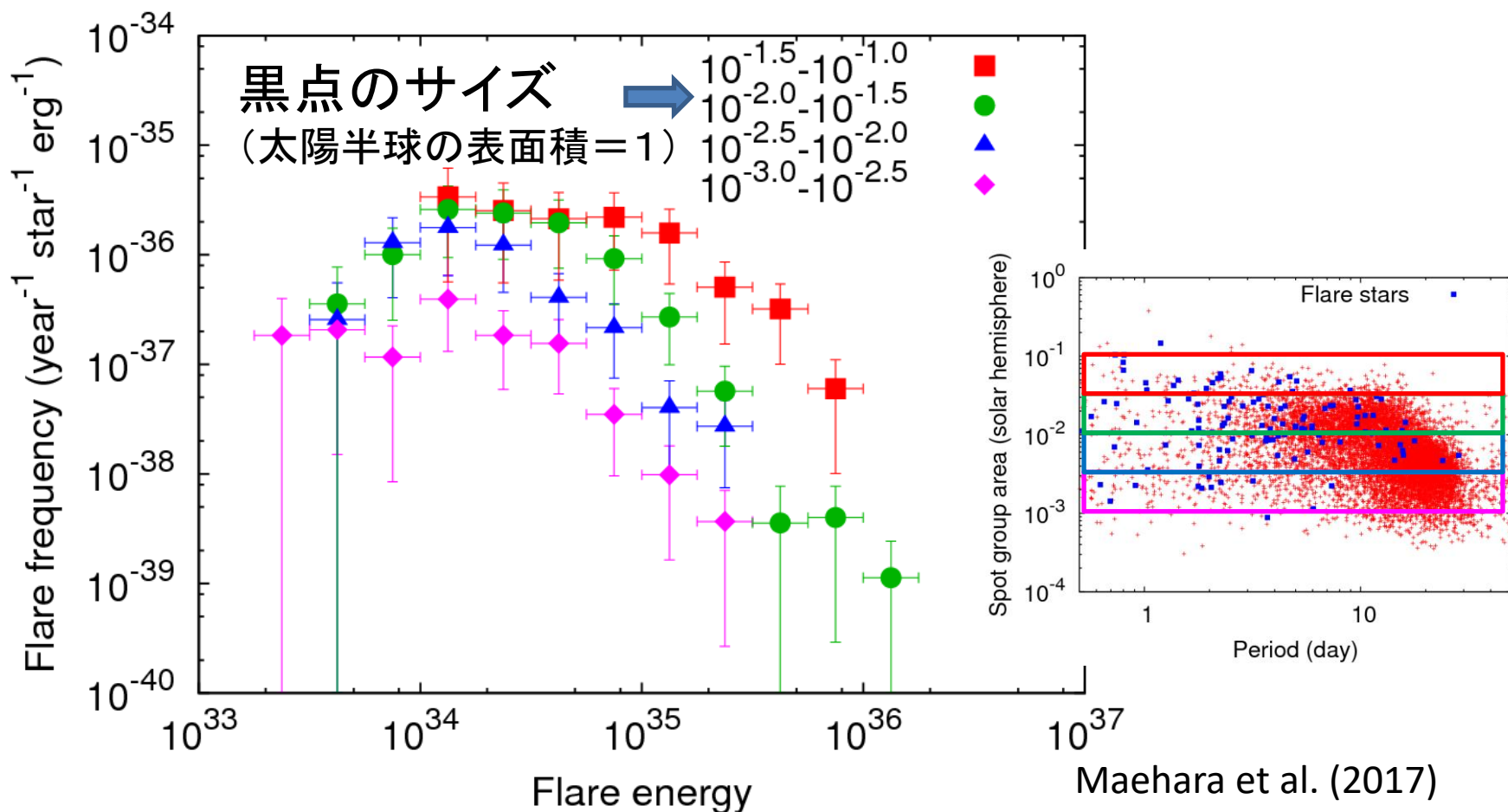


Notsu et al. (2015)

→ 黒点の面積

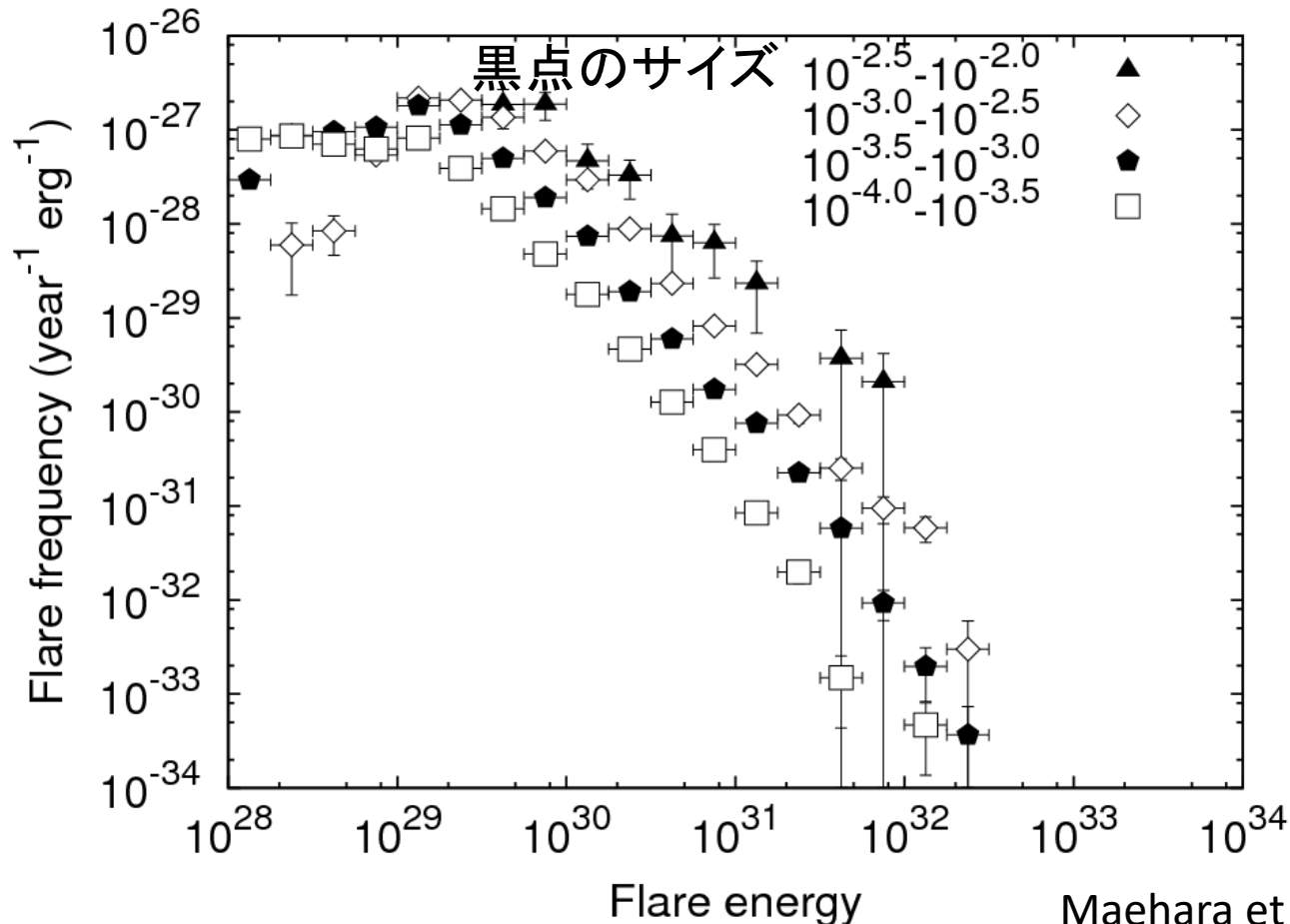
黒点サイズごとのフレアの発生頻度分布(スーパーフレア)

- 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
- 観測された最大のフレアのエネルギーは大きな黒点を持つ星ほど高い



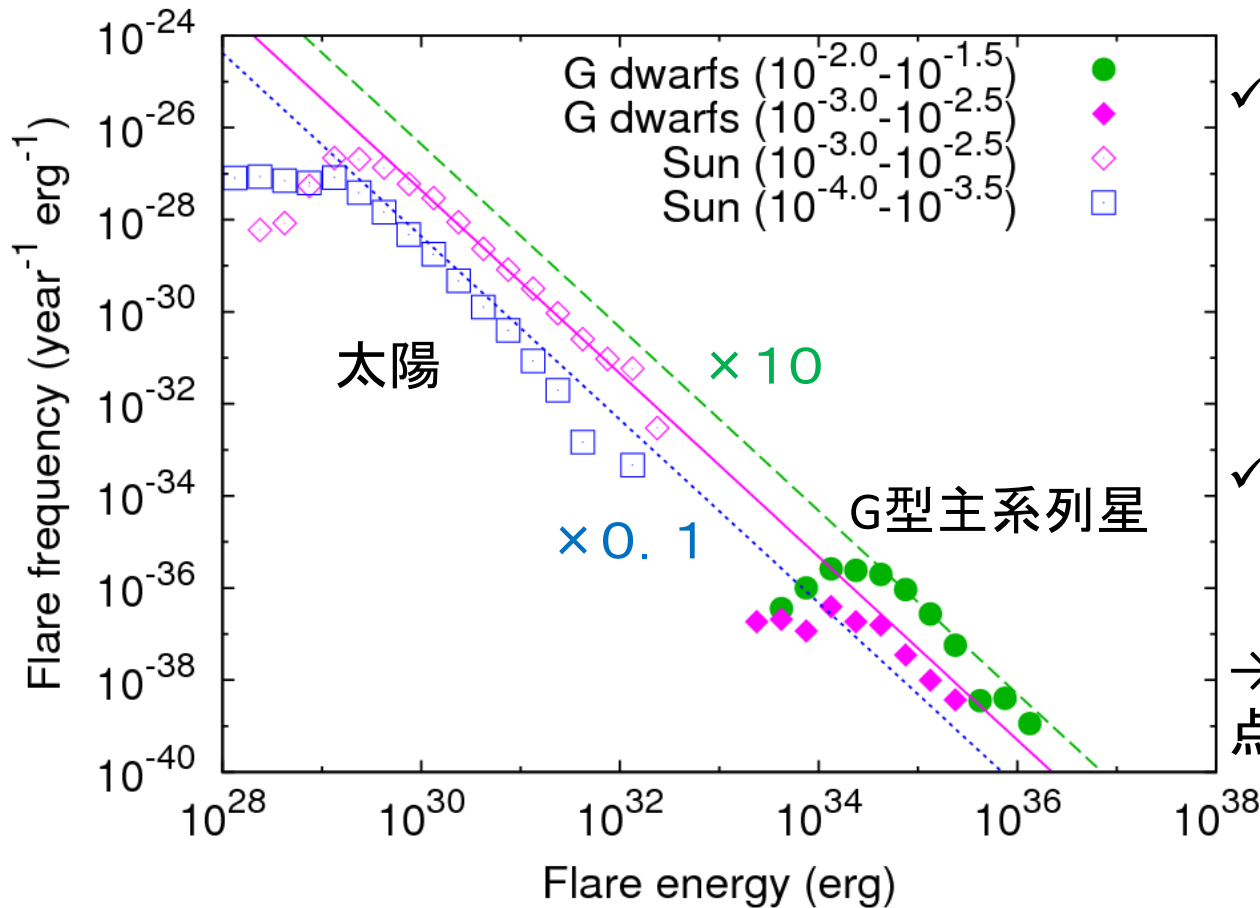
黒点サイズごとのフレアの発生頻度分布(太陽フレア)

- 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
- 観測された最大のフレアのエネルギーは大きな黒点を持つ星ほど高い



Maehara et al. (2017)

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のる

✓ 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
→フレアの発生頻度は黒点面積に比例