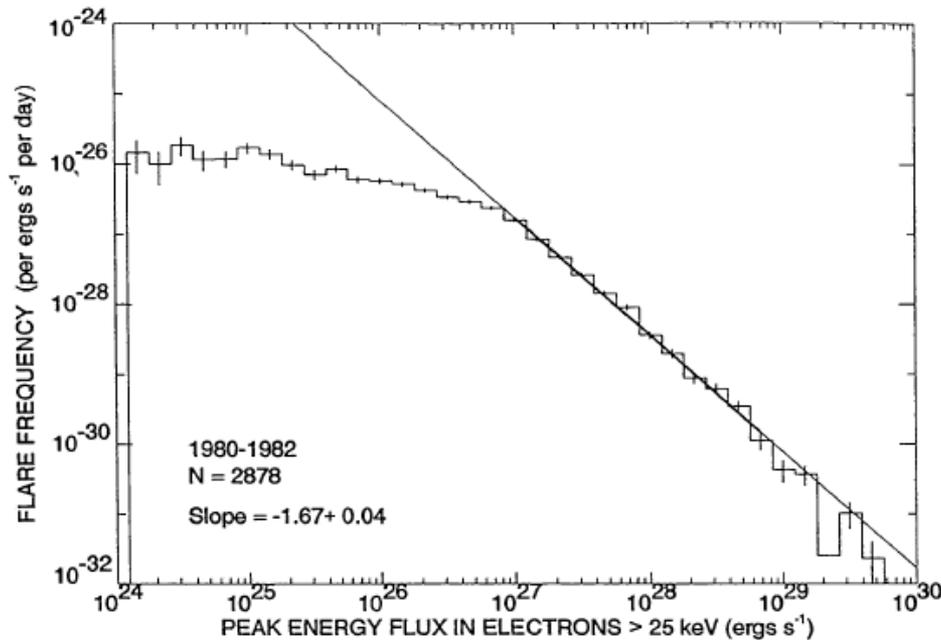


太陽型星におけるスーパーフレア

前原裕之

(国立天文台岡山天体物理観測所)

太陽フレアの発生頻度

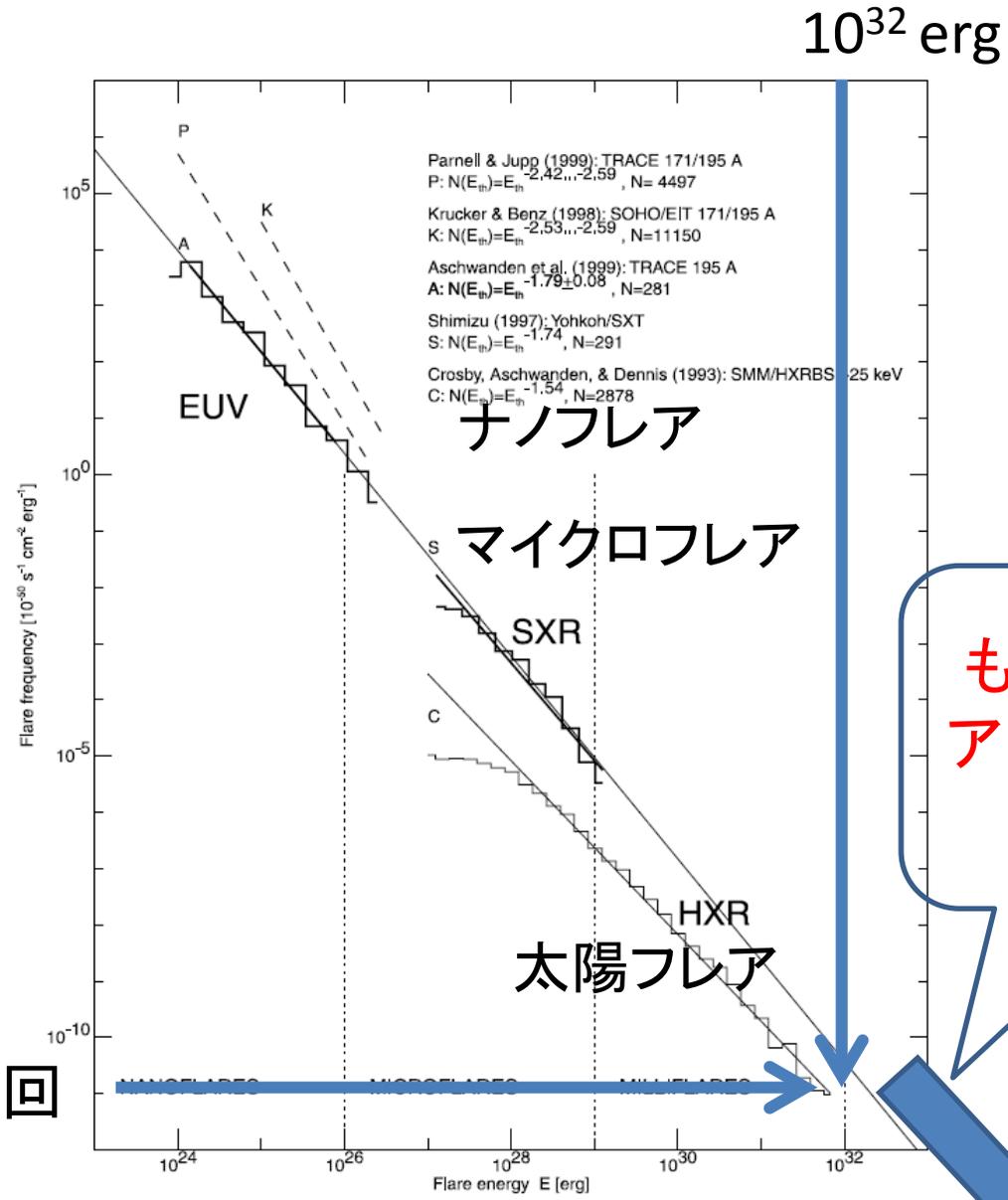


- 大きな太陽フレアほど起こりにくい
- エネルギーが10倍大きいフレアは発生する回数が1/10
- 最大級の太陽フレアはおよそ10年に1回発生

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

発生頻度

10年に1回



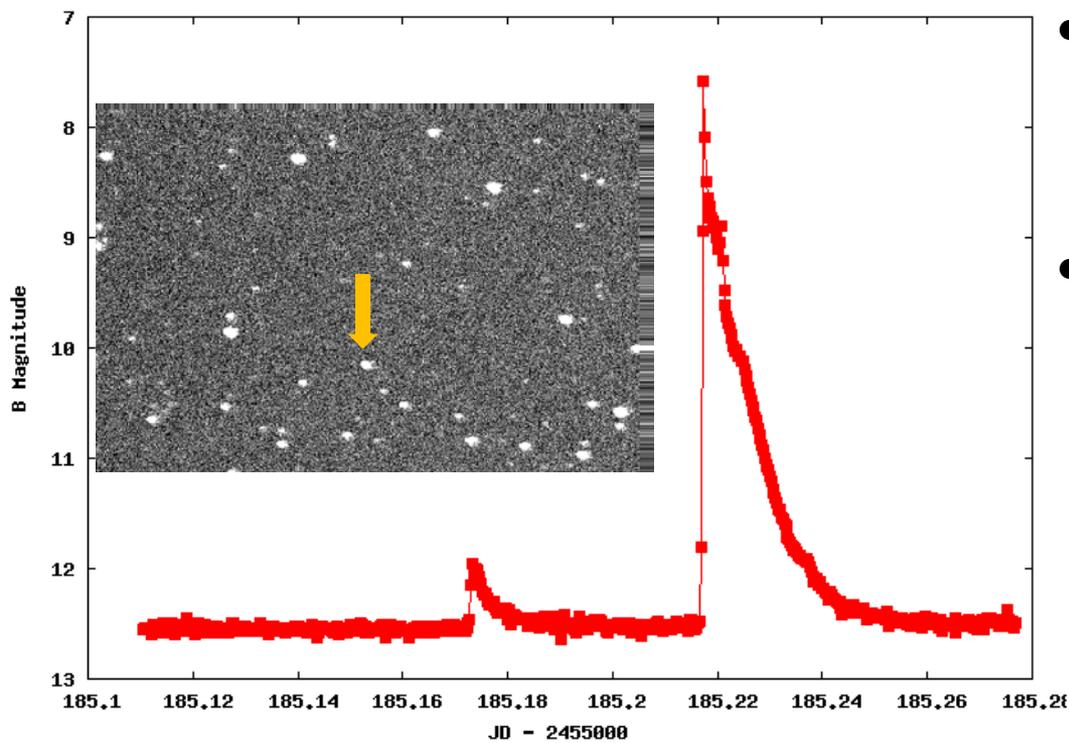
もっと大きいフレアは起こらないのか？

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

YZ CHi (2009/12/19)



- 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)

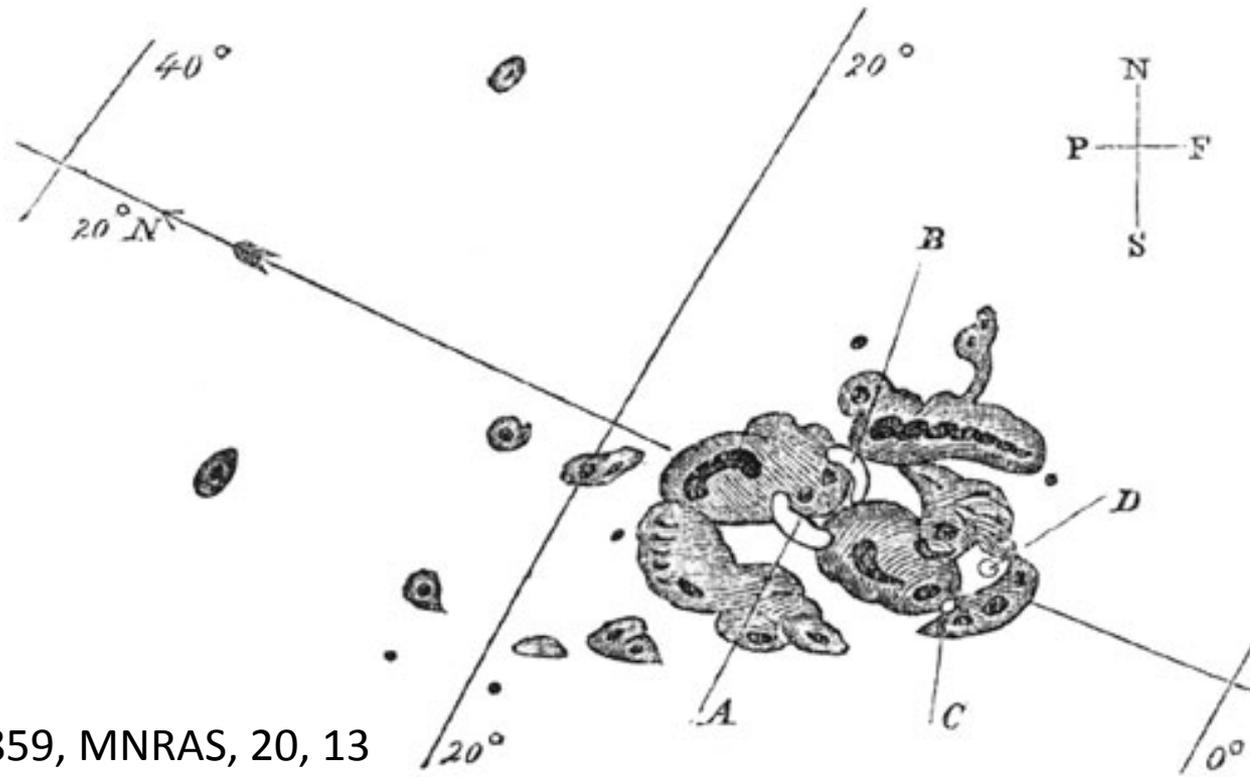
太陽でスーパーフレアは起こるか？

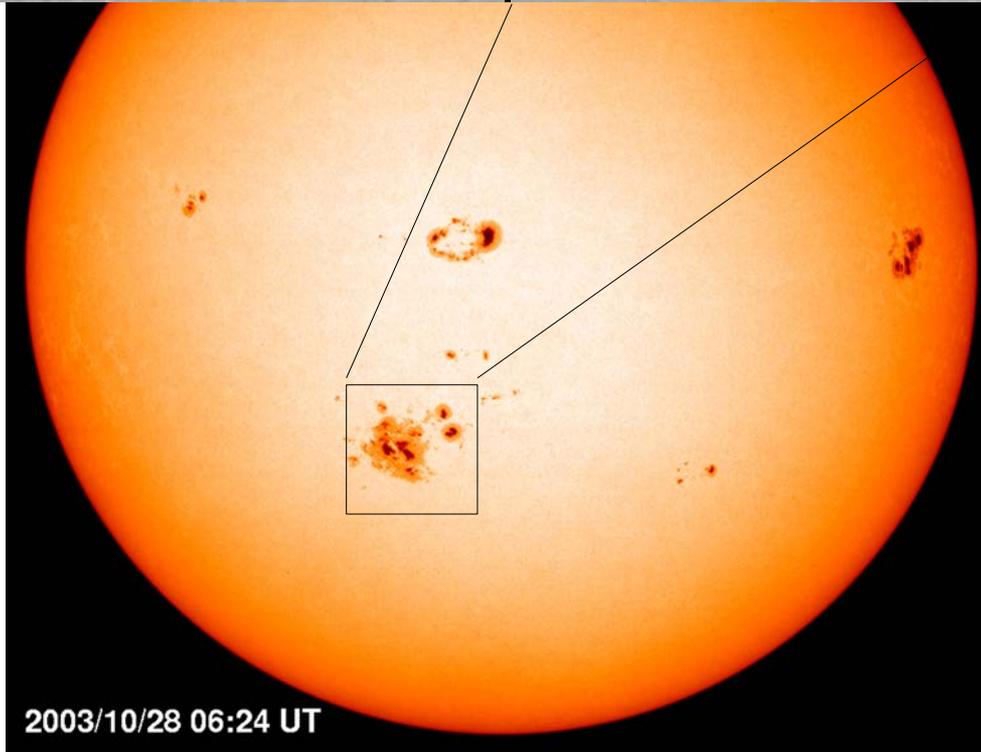
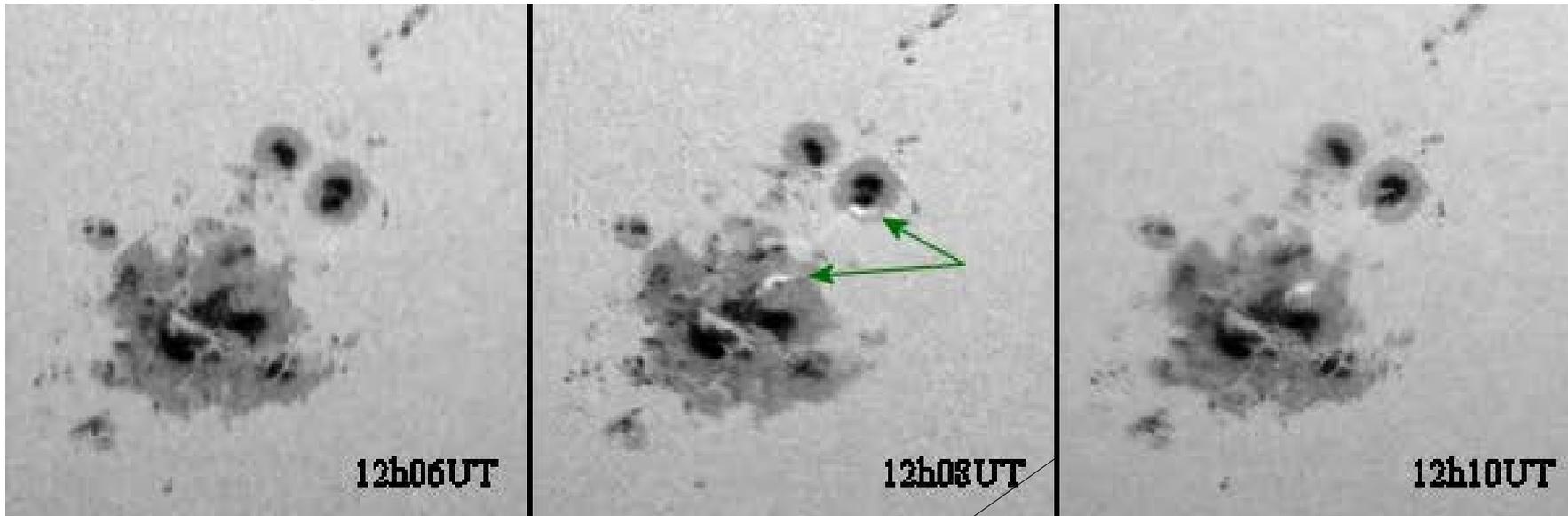
- スーパーフレアはめったに起こらない(はず)
 - 10倍大きなフレアは起こる頻度が10分の1
 - これまでに観測されている最大級の太陽フレアの頻度はおよそ10年に1回
 - 太陽フレアの1000倍のスーパーフレア
→ 10000年に1回
- 人類の太陽フレア観測の歴史はせいぜい150年
 - 100年に1回クラスの巨大フレア(キャリントンフレア)よりも大きなフレアがあるのかどうかは分かっていない

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



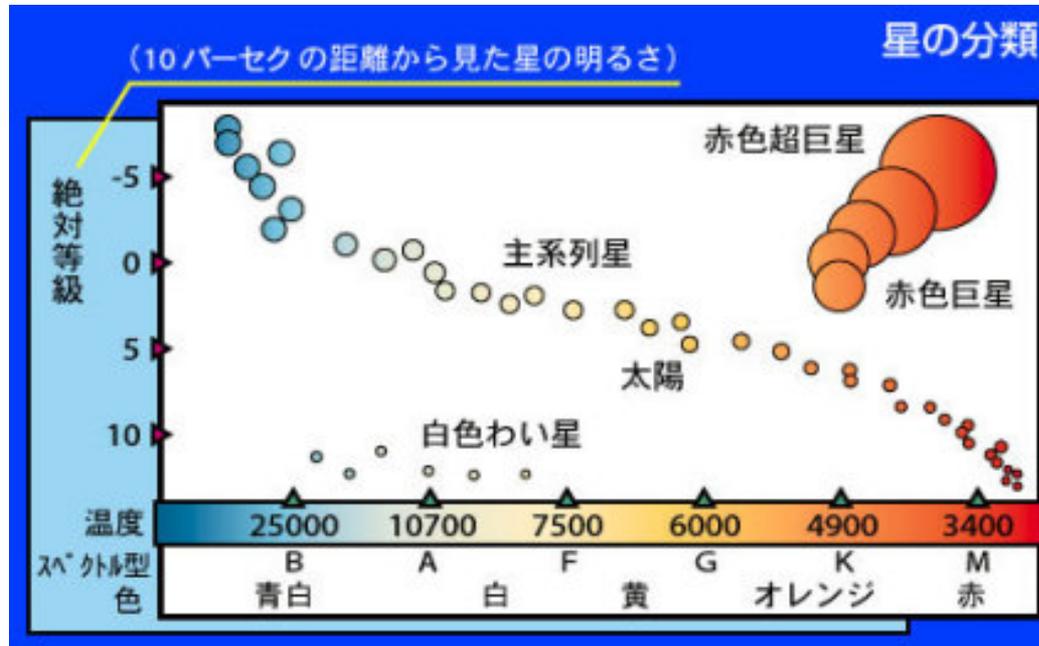


白色光フレアの 観測例

SOHO衛星による太陽像

太陽と似た星

- 太陽と同じ性質の星をたくさん観測すればよい
 - 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回は起こる(はず)



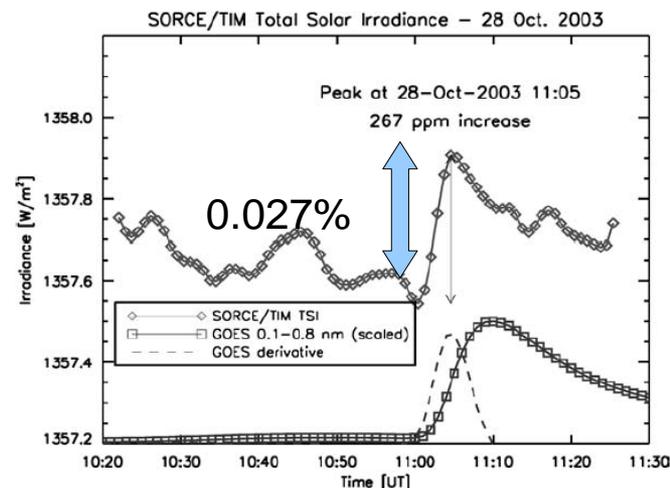
- 太陽と同じG型主系列星をたくさん観測して、フレアが起こる時に星が明るくなる現象をとらえる

太陽型星のフレア

- 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

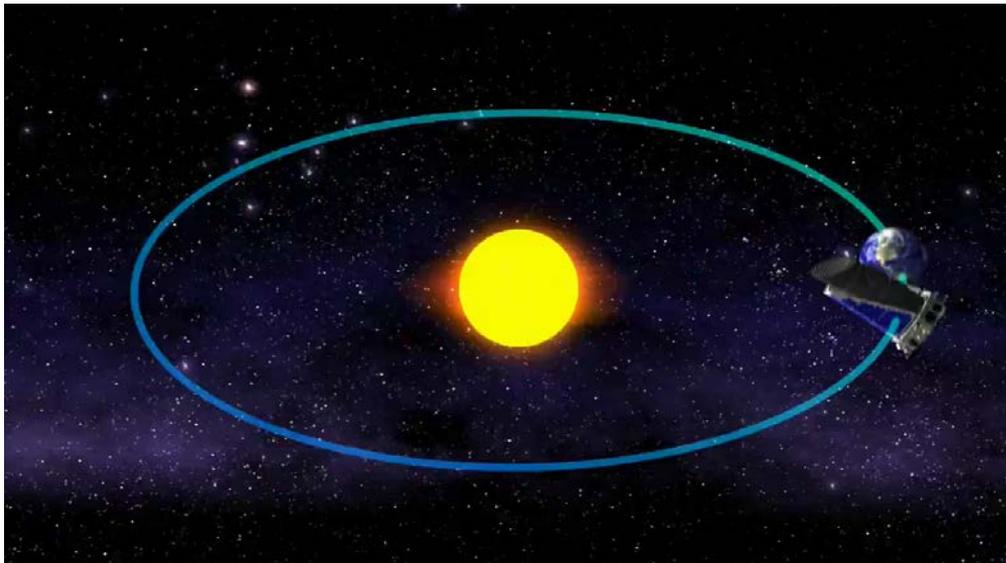
→ 非常に多くの星を、極めて高い精度で、連続して明るさを測定し続ける必要がある。

太陽フレアによる太陽
の明るさの変化→

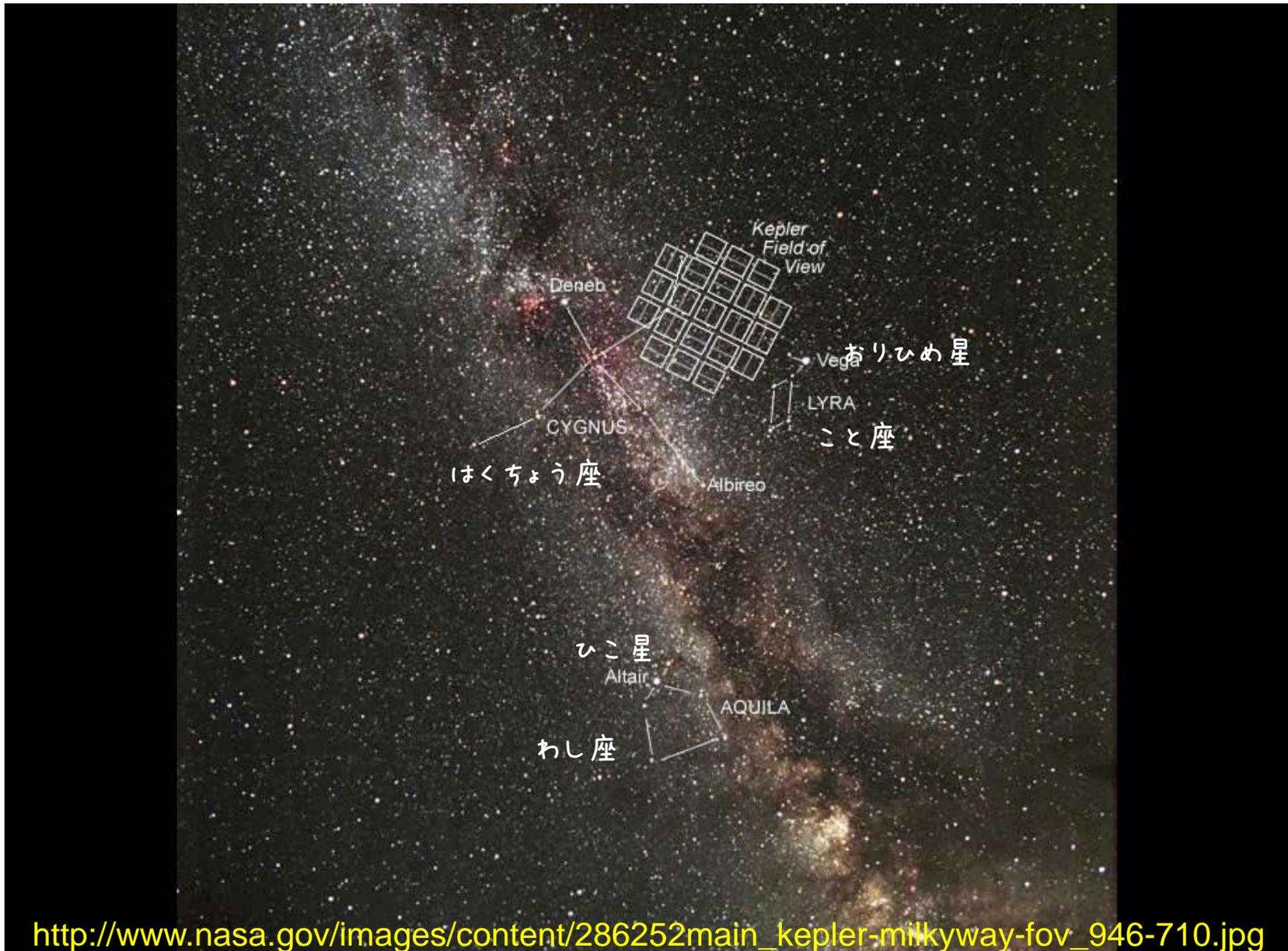


ケプラー宇宙望遠鏡

- 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
 - 2009年4月から観測開始、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



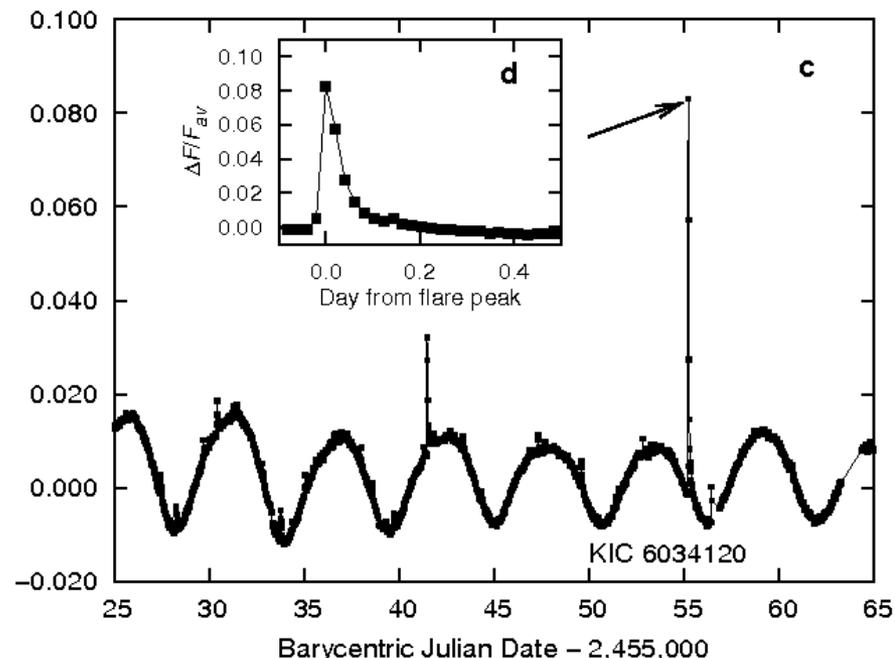
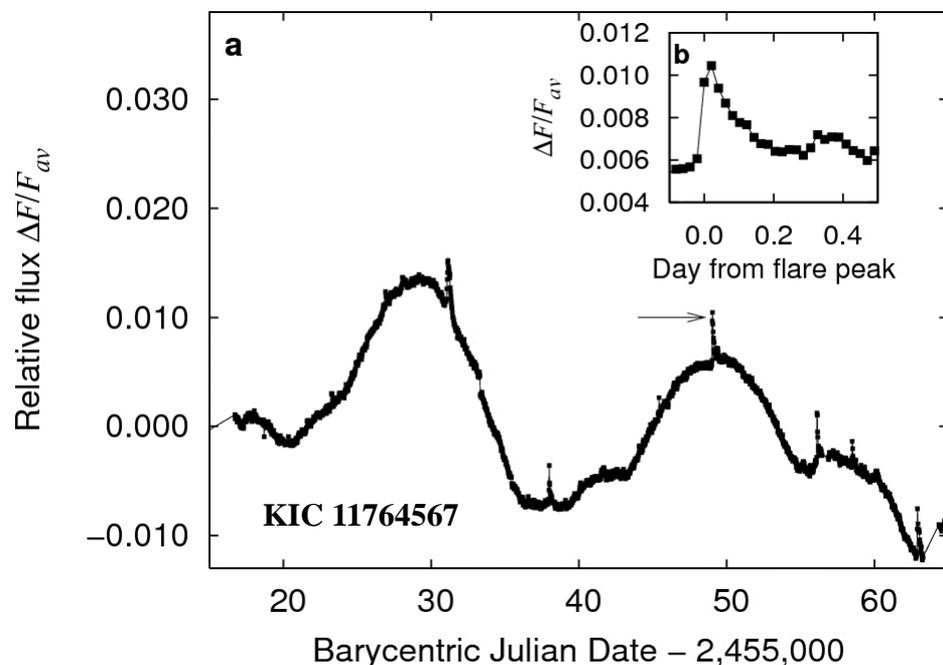
ケプラー衛星の観測領域



解析したデータ

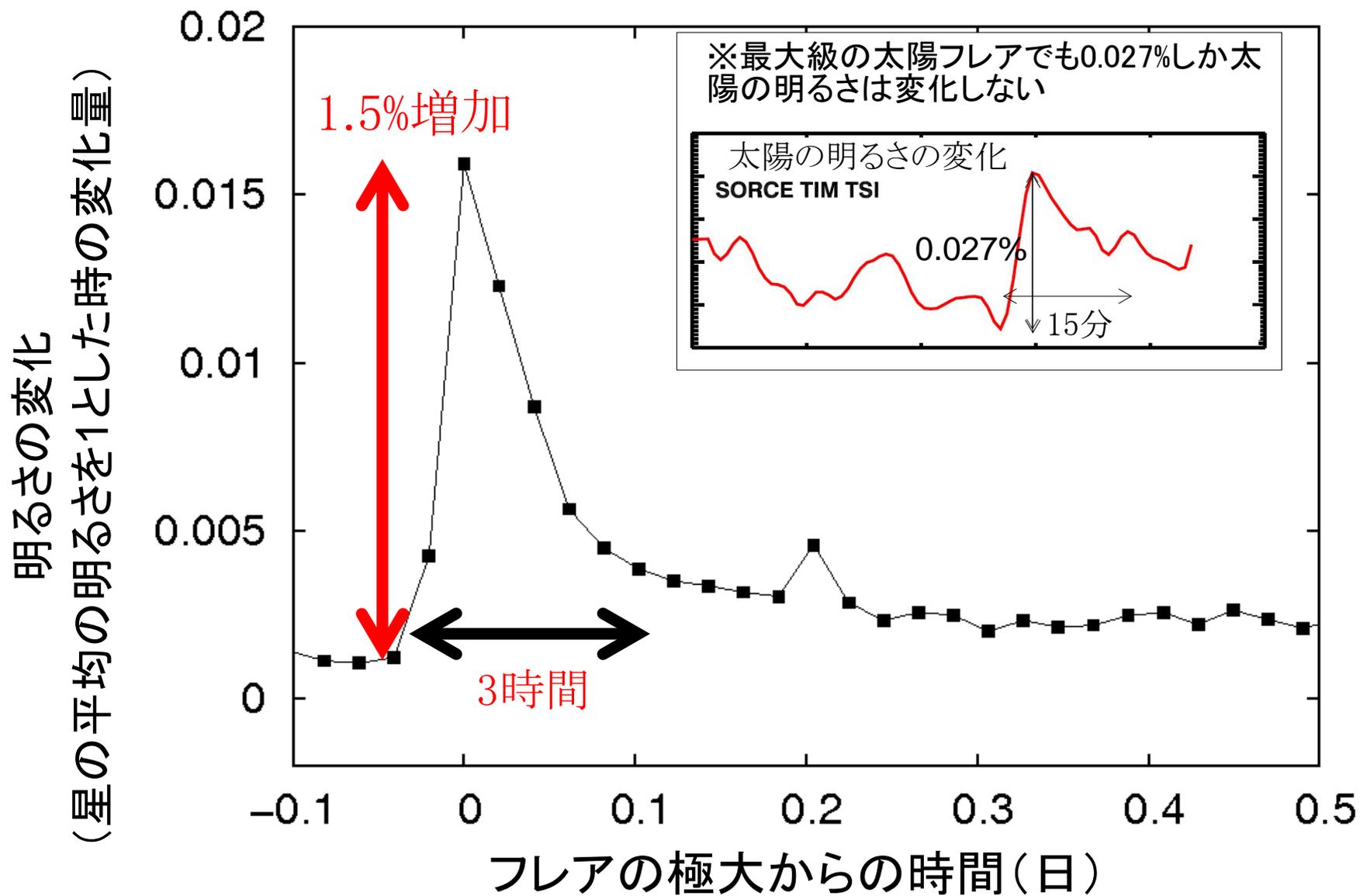
- ケプラーの観測した天体のうち、表面温度が太陽と同じG型主系列星を選択
 - 選択条件: $5100 < T_{\text{eff}} < 6000\text{K}$, $\log g > 4.0$
 - 太陽型星の数: 約90,000個（時間分解能30分）
 - うち1,400個は時間分解能1分のデータあり
 - 観測期間
 - 2009/04-2010/09 (~500 日; 時間分解能30分のデータ)
 - Shibayama et al. (2013) ApJS
 - 2009/04-2013/05 (~1400 日; 時間分解能1分のデータ)
 - Maehara et al. (2015) EPS

スーパーフレアの例

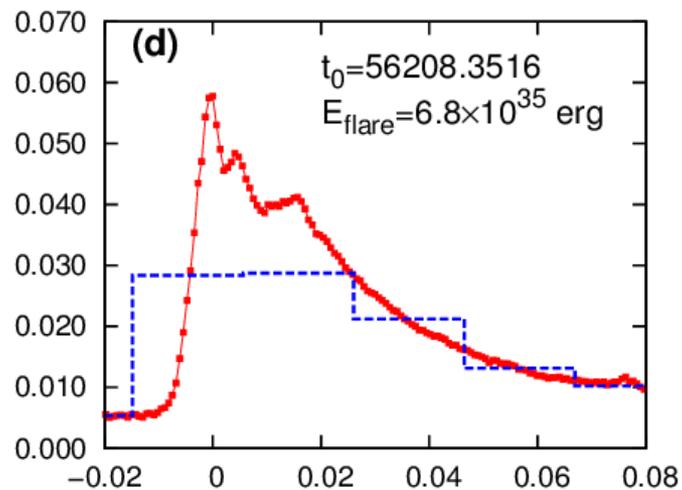
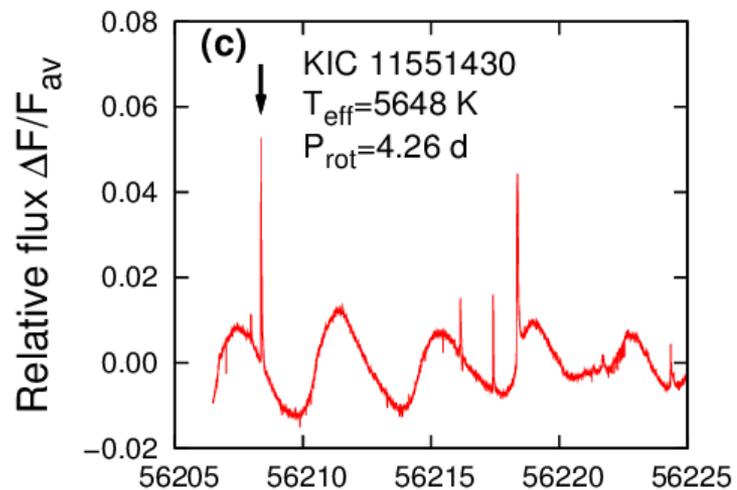
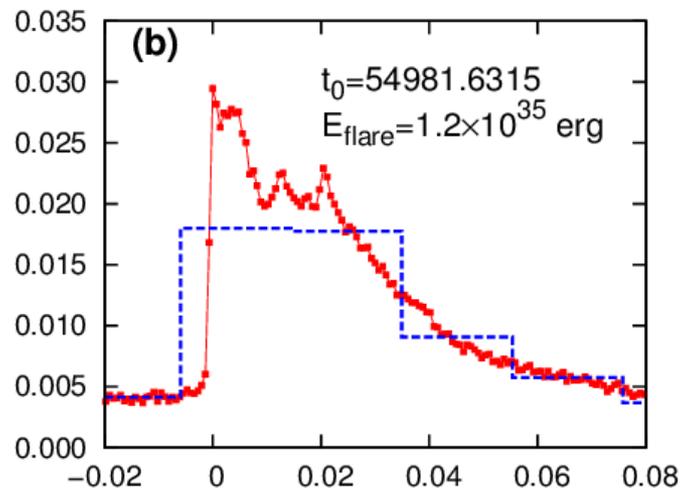
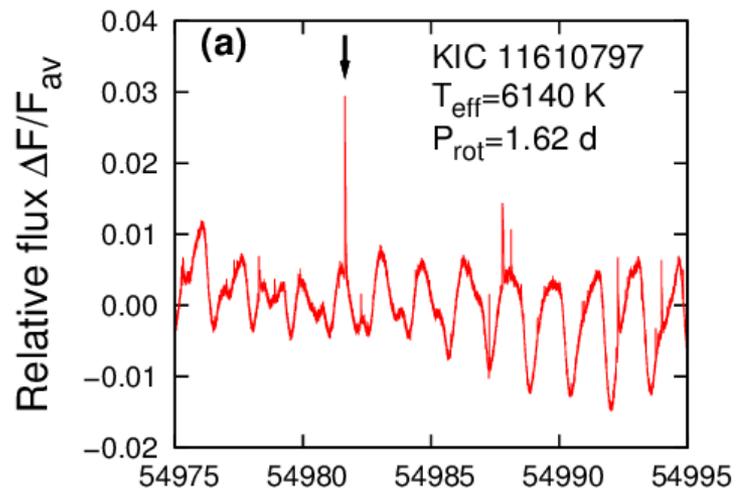


- 振幅: 0.1-10%
- 継続時間: ~ 0.1 days
- 放射エネルギー: 10^{33} - 10^{36} ergs
 - 最大級の太陽フレア($\sim 10^{32}$ ergs)の10-10,000倍のエネルギー!
- フレアの数
 - 365個、148星 (Maehara et al. 2012; 120日間のデータ)
 - 1547個、279星 (Shibayama et al. 2013; 500日間のデータ)

スーパーフレアが起きた時の明るさの変化



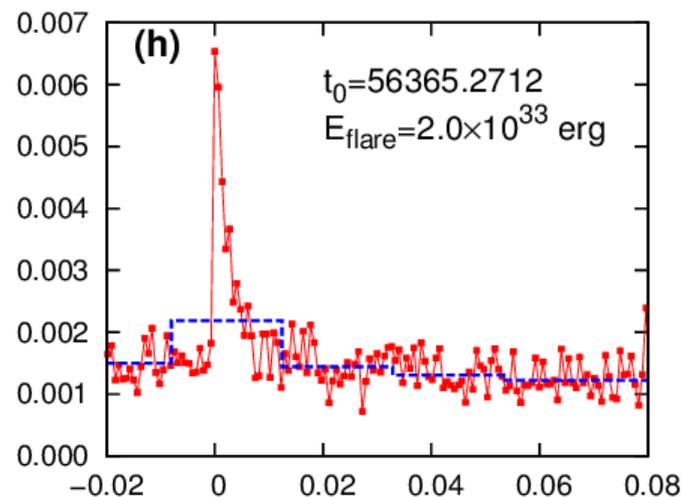
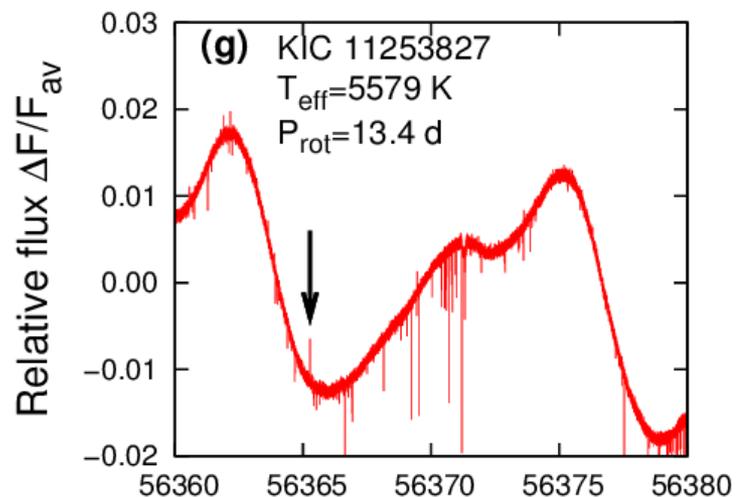
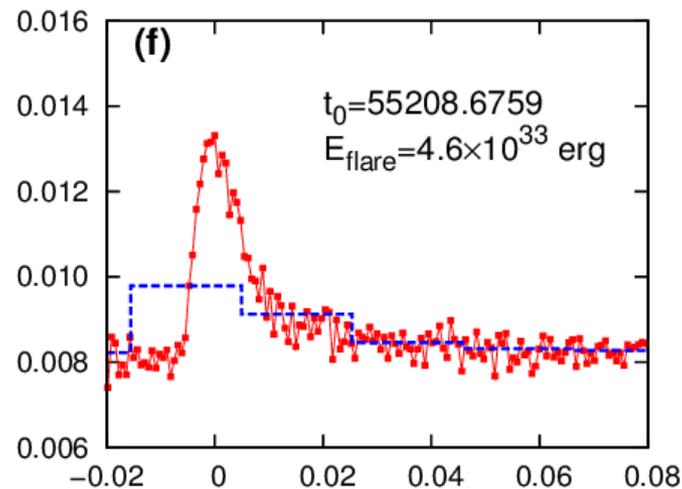
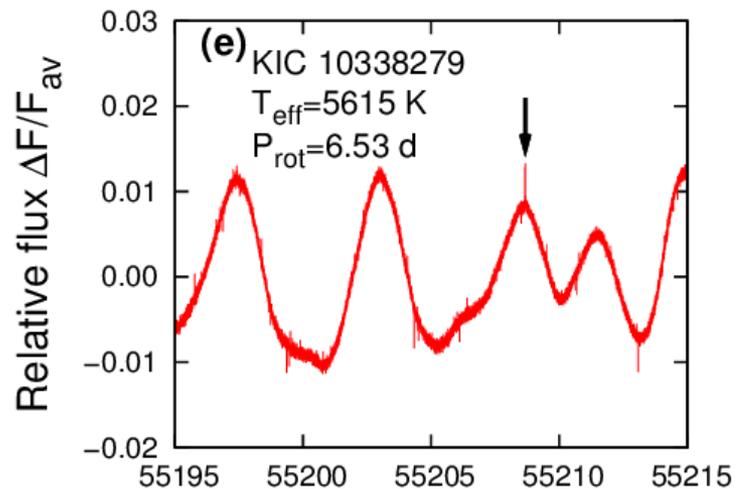
スーパーフレアの例 (時間分解能1分)



BJD - 2400000

Day from flare peak

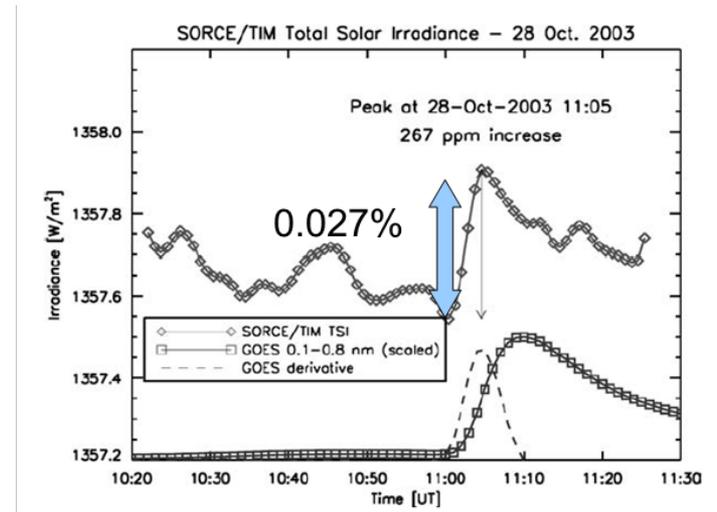
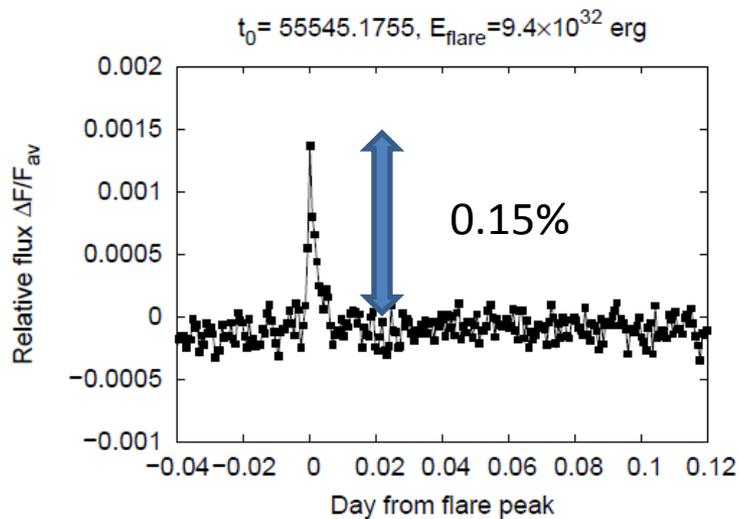
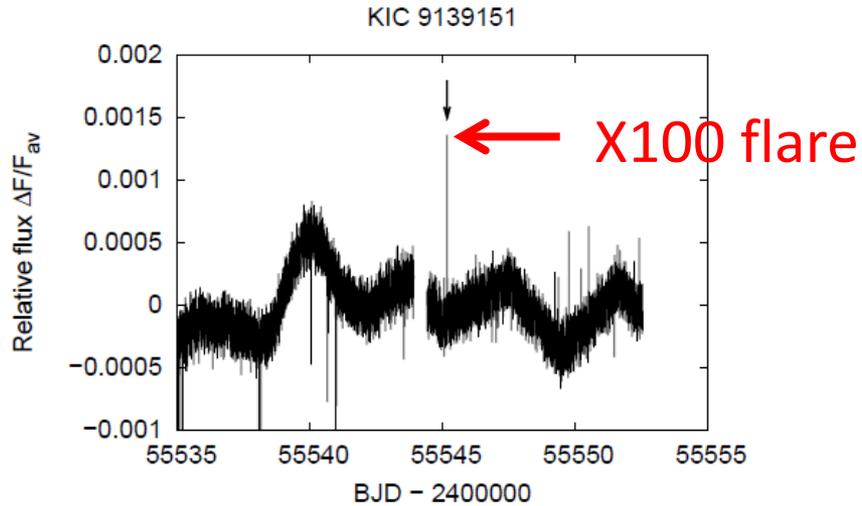
スーパーフレアの例 (時間分解能1分)



BJD - 2400000

Day from flare peak

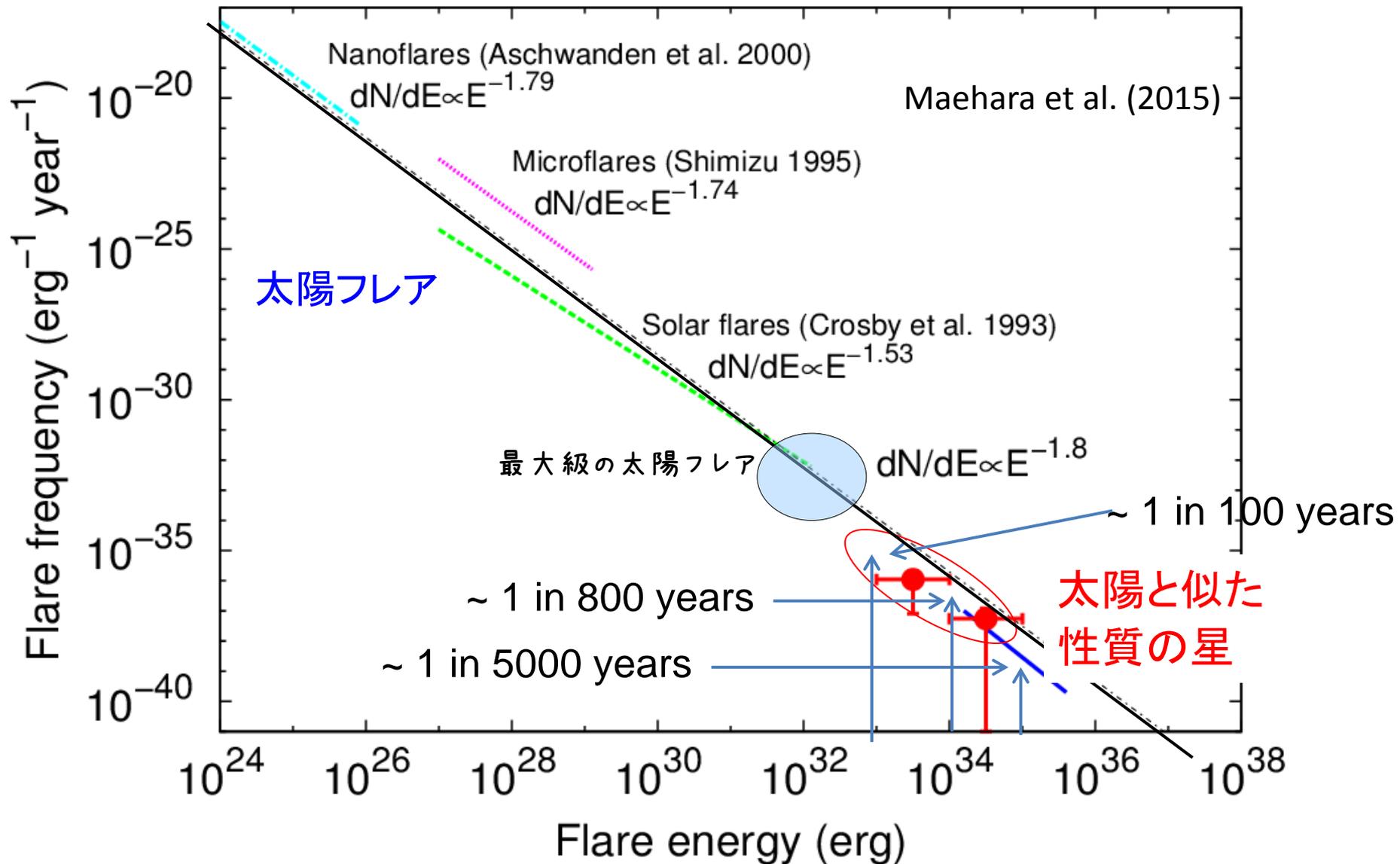
X100クラスのスーパーフレア



Kopp et al., Solar Phys. 230, 129 (2005)

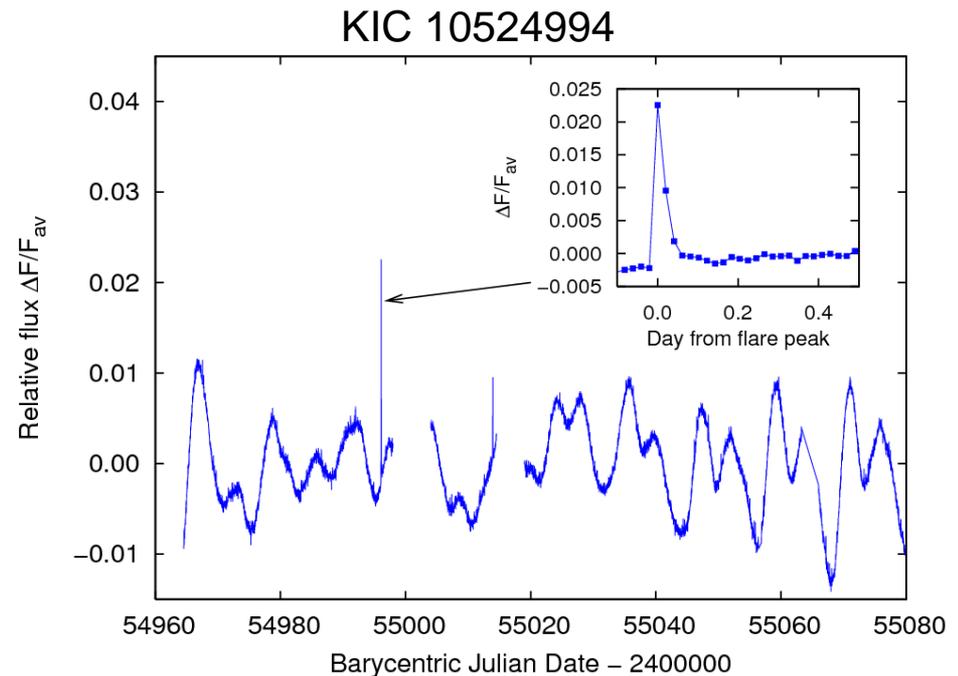
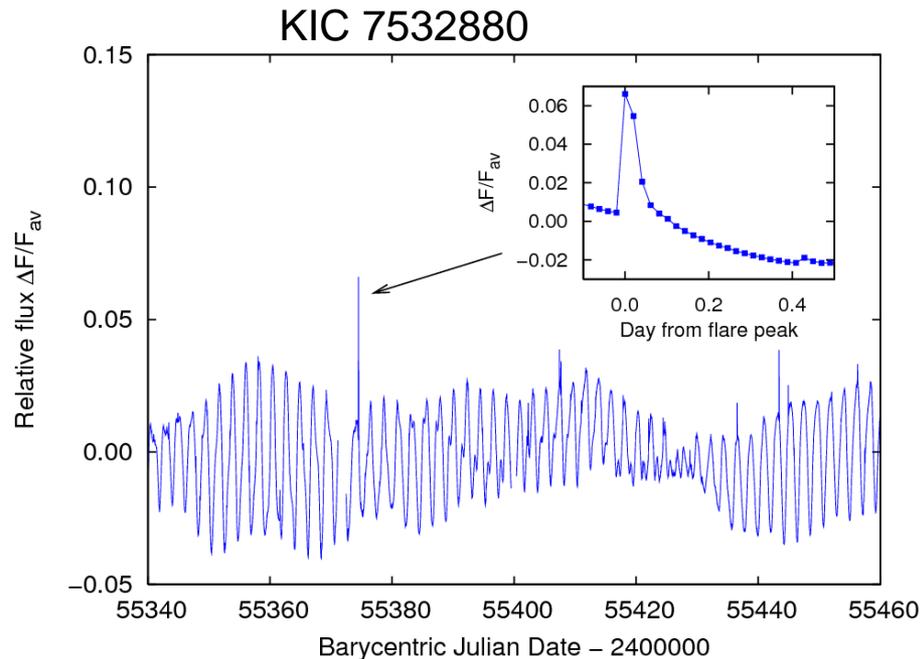
Solar flare (X17)

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

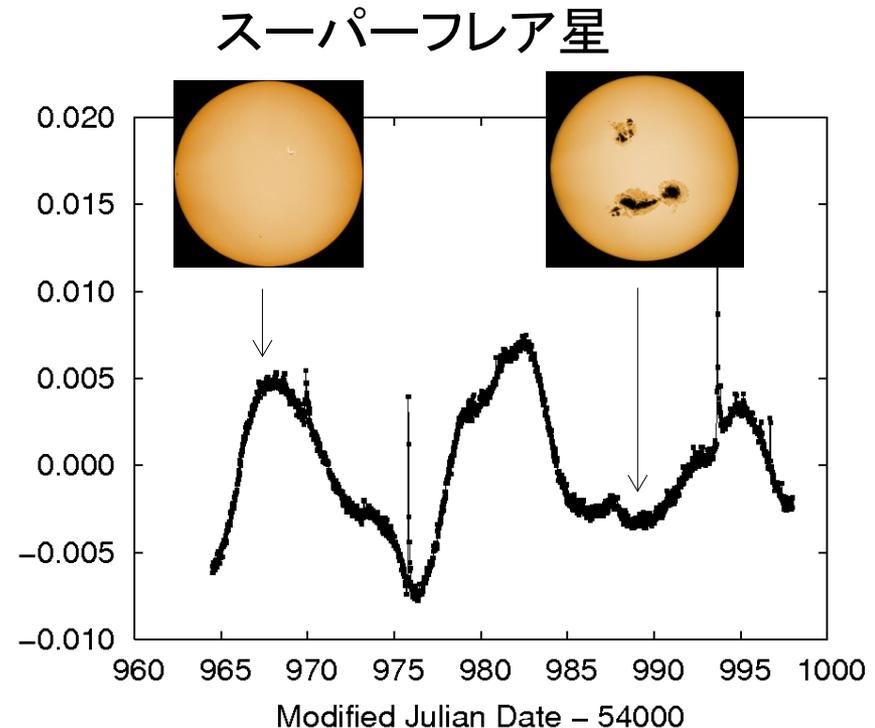
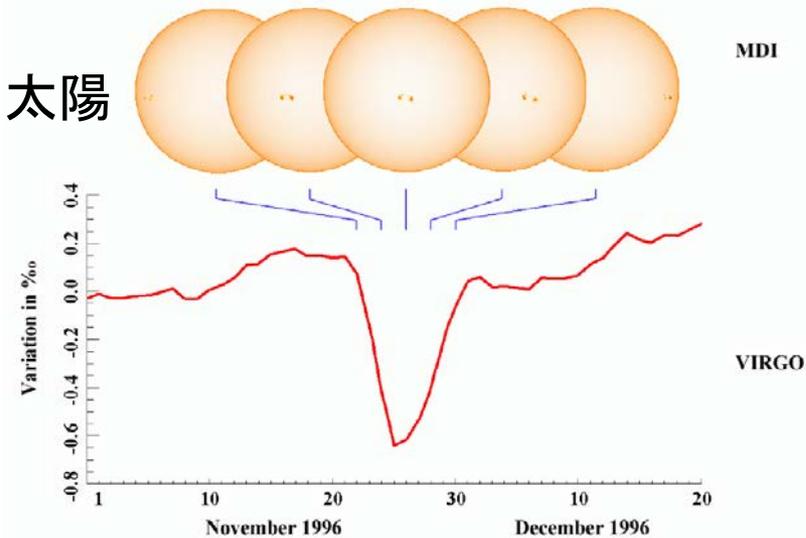
- 太陽でも同様の変光がみられる

- 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

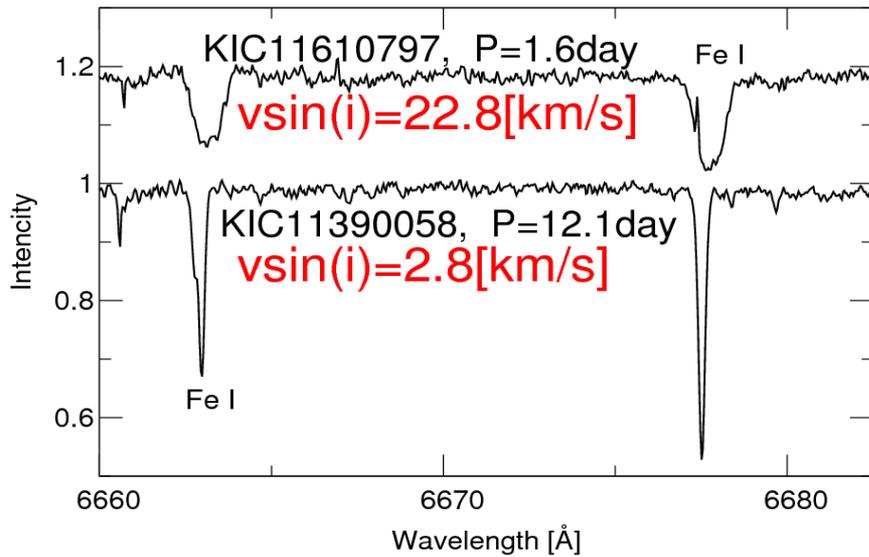
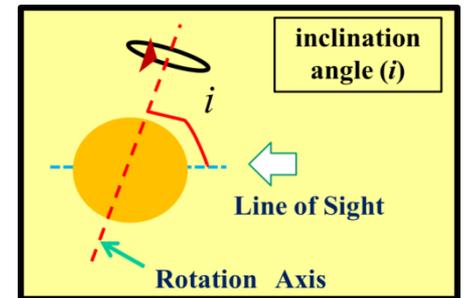
- 変光の振幅 → 黒点の面積



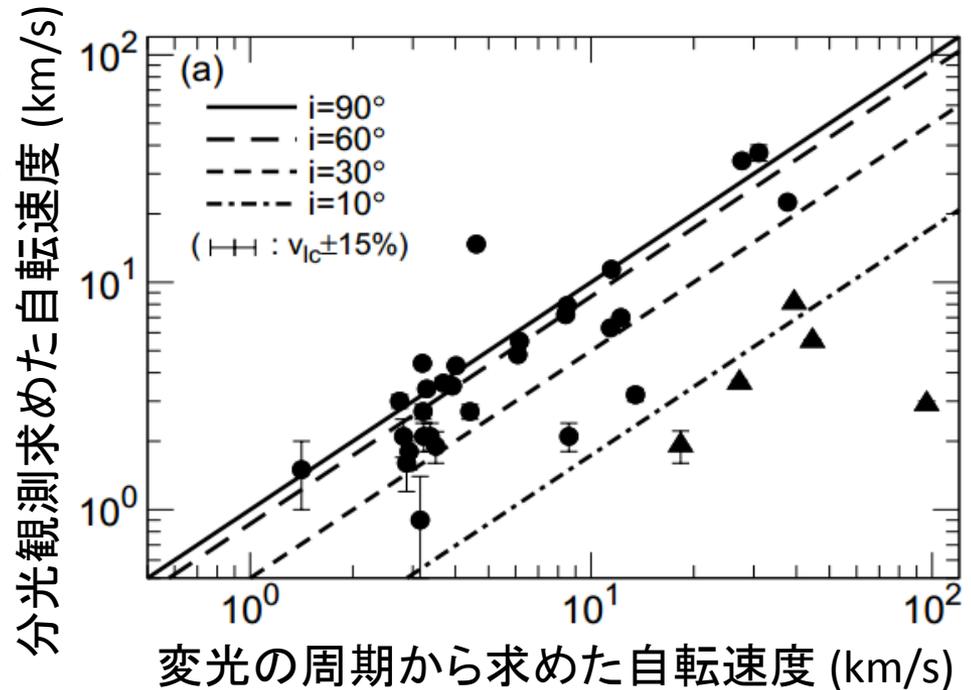
自転速度

- 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

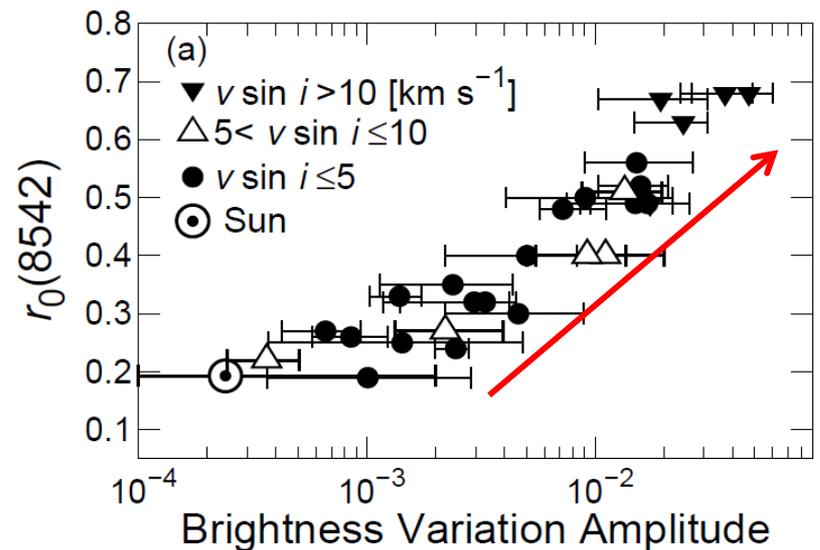
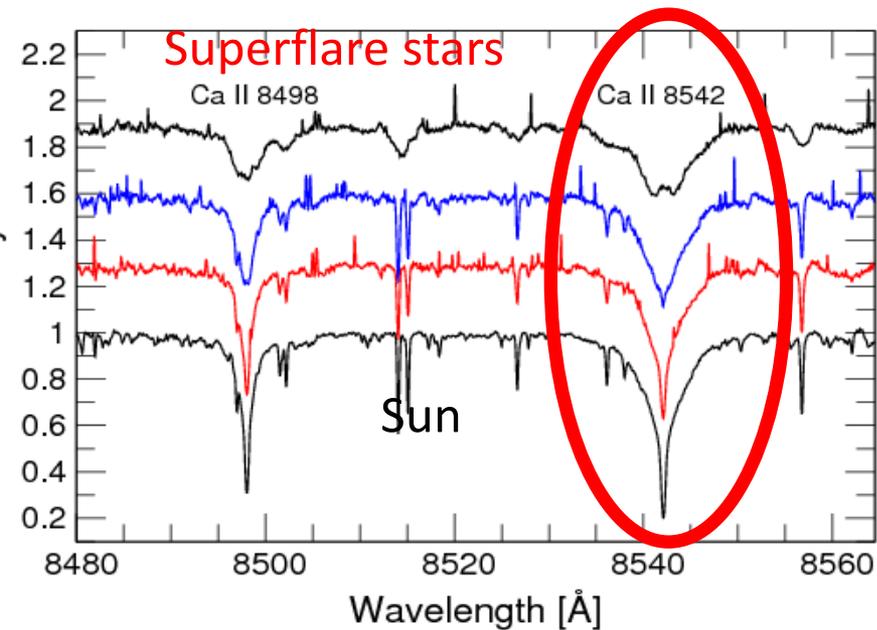


Notsu et al. 2015.



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

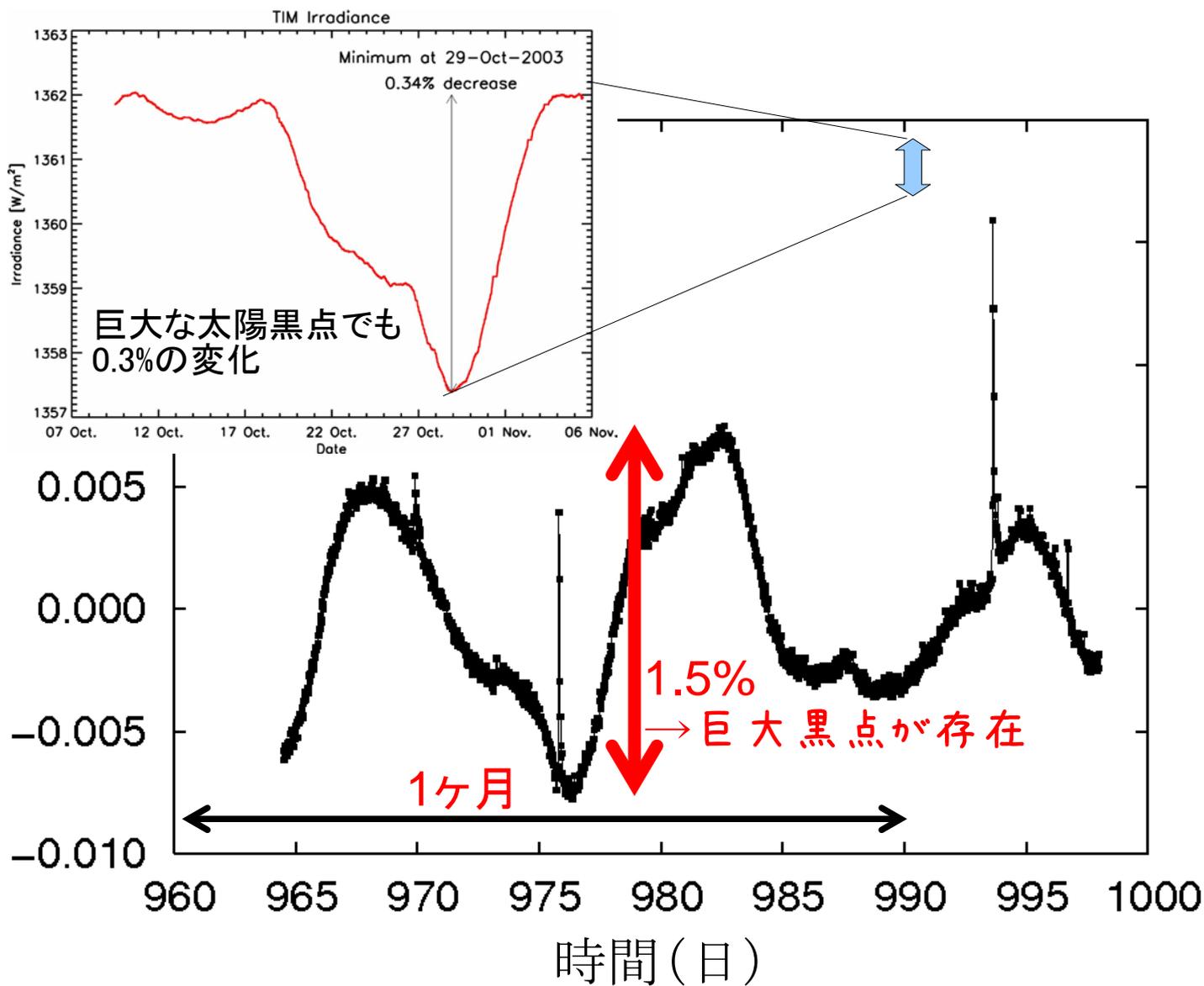


Notsu et al. (2015)

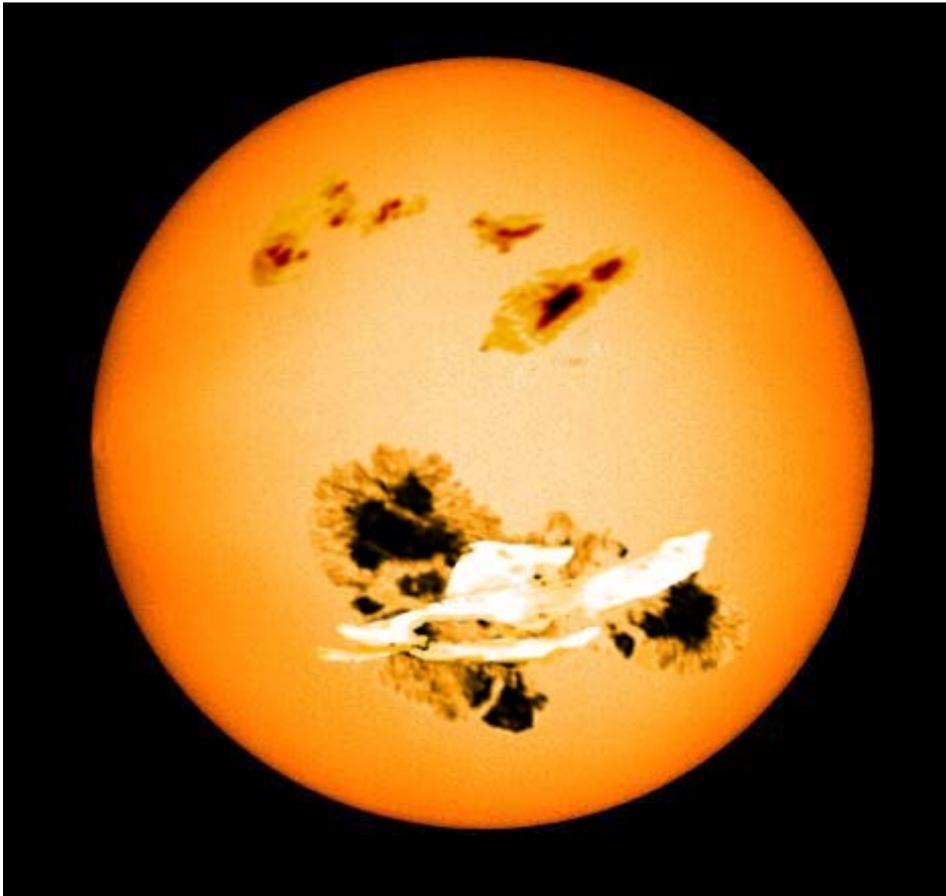
→ 黒点の面積

星の自転による明るさの変化

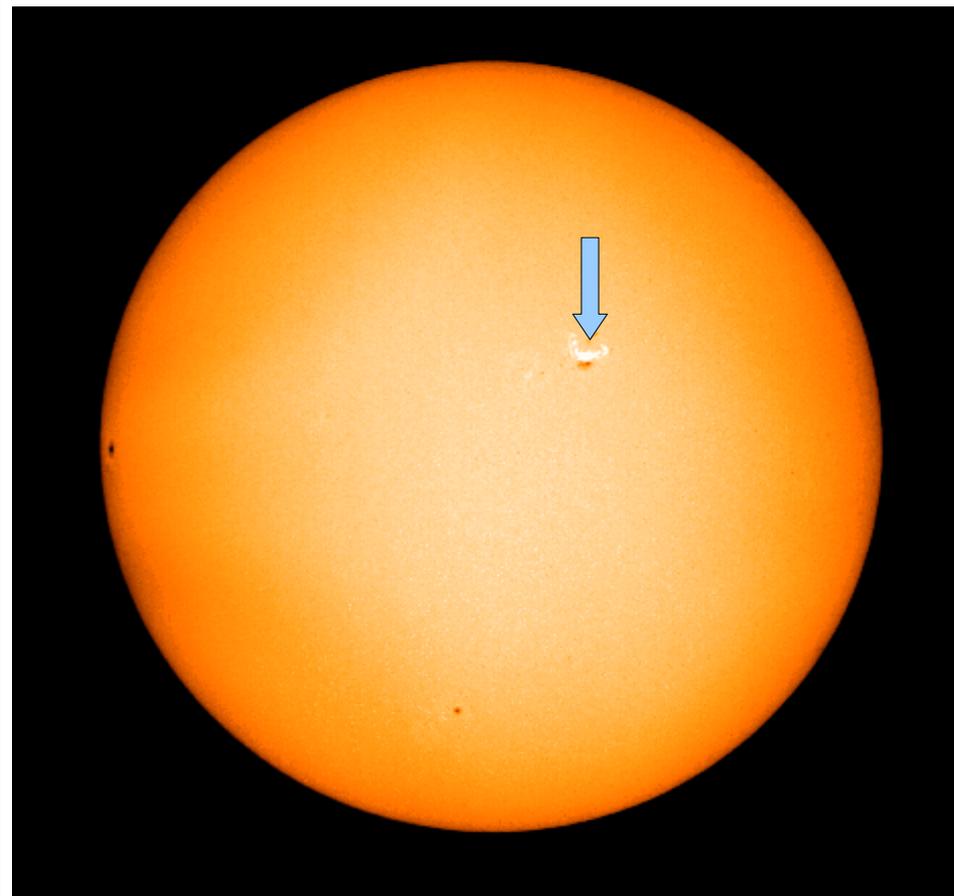
明るさの変化
(星の平均の明るさを1とした時の変化量)



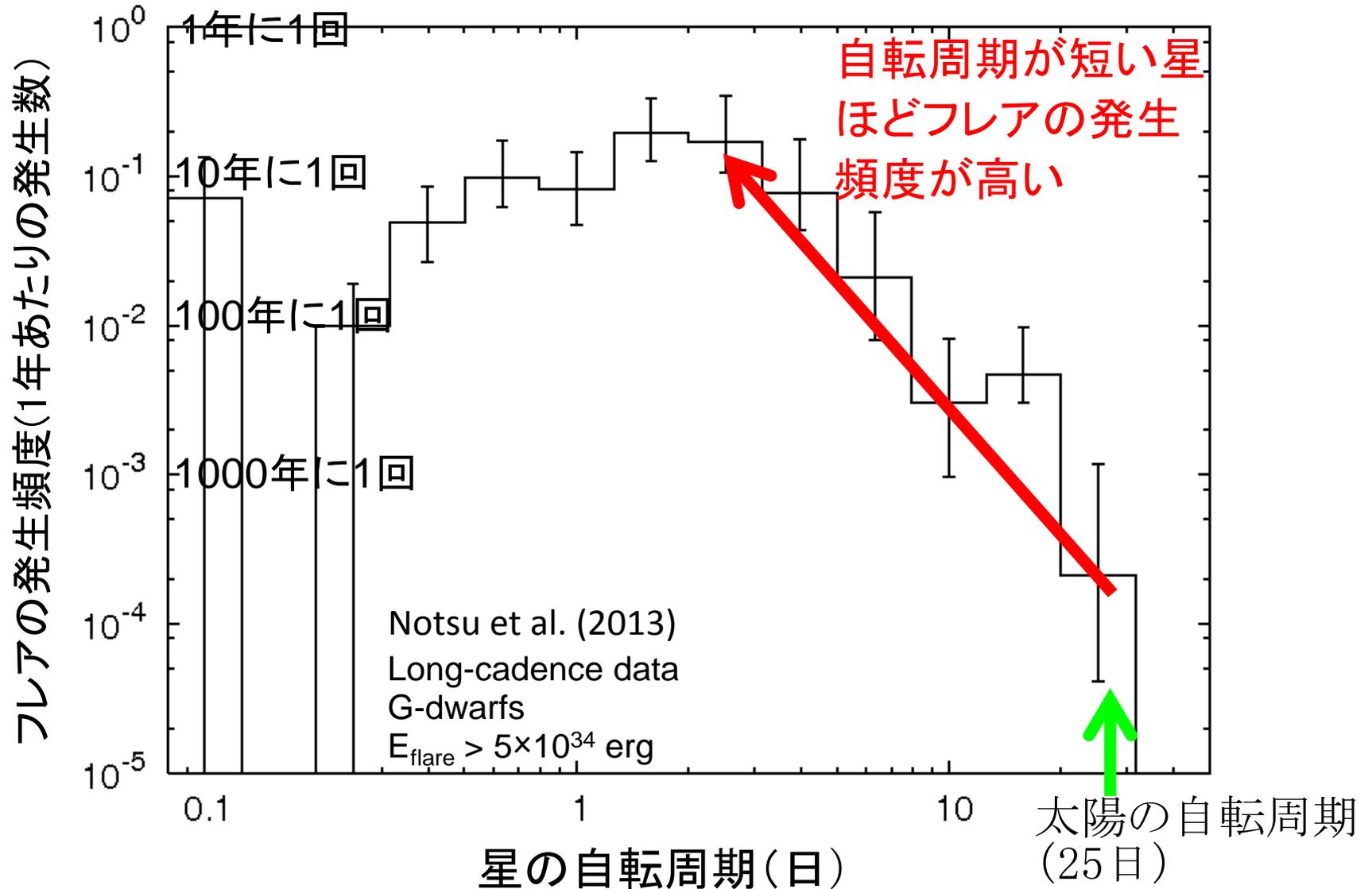
スーパーフレアの想像図



太陽フレア (実際の観測)



星の自転周期とフレアの発生頻度



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

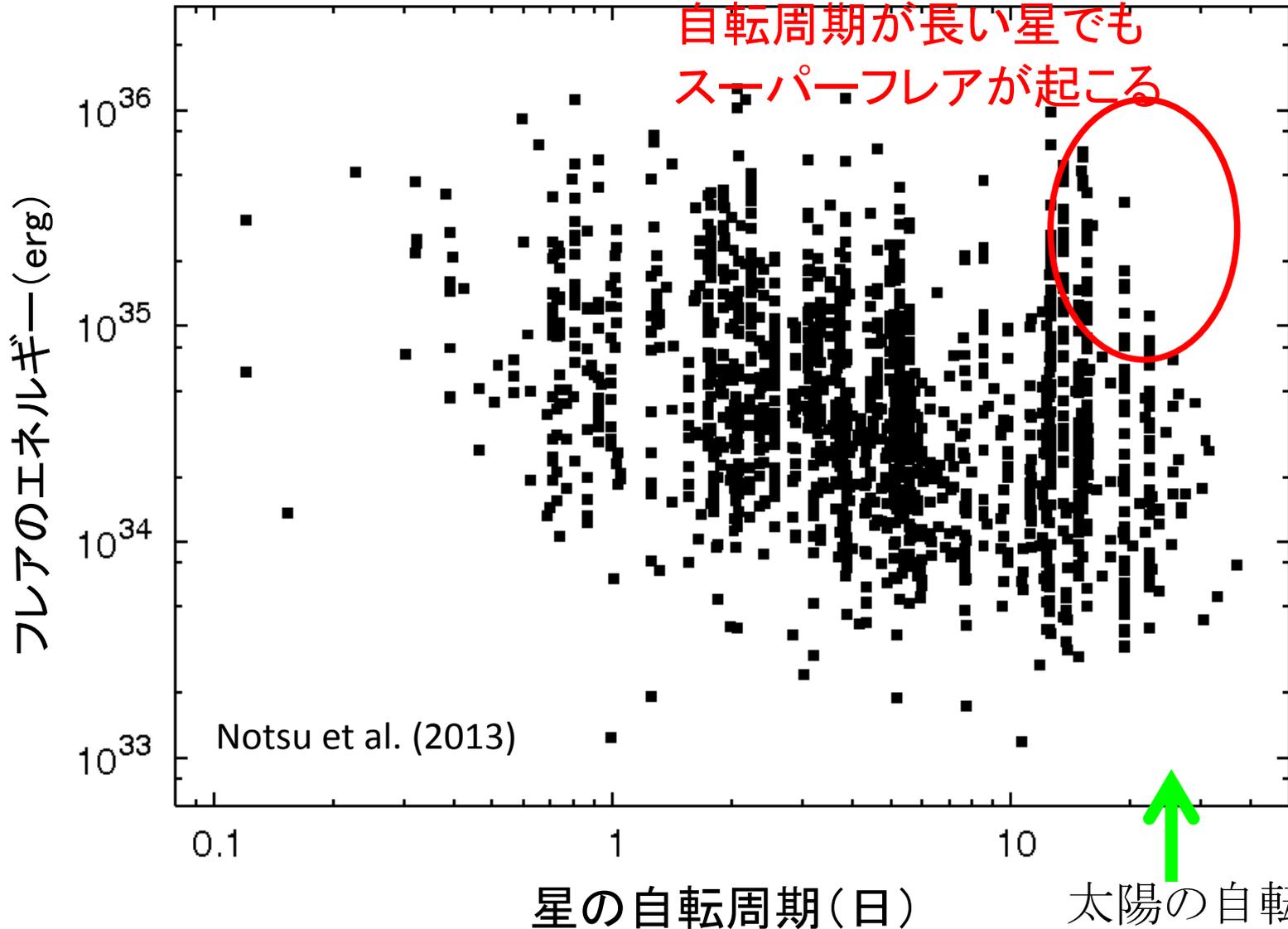
10000倍

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)

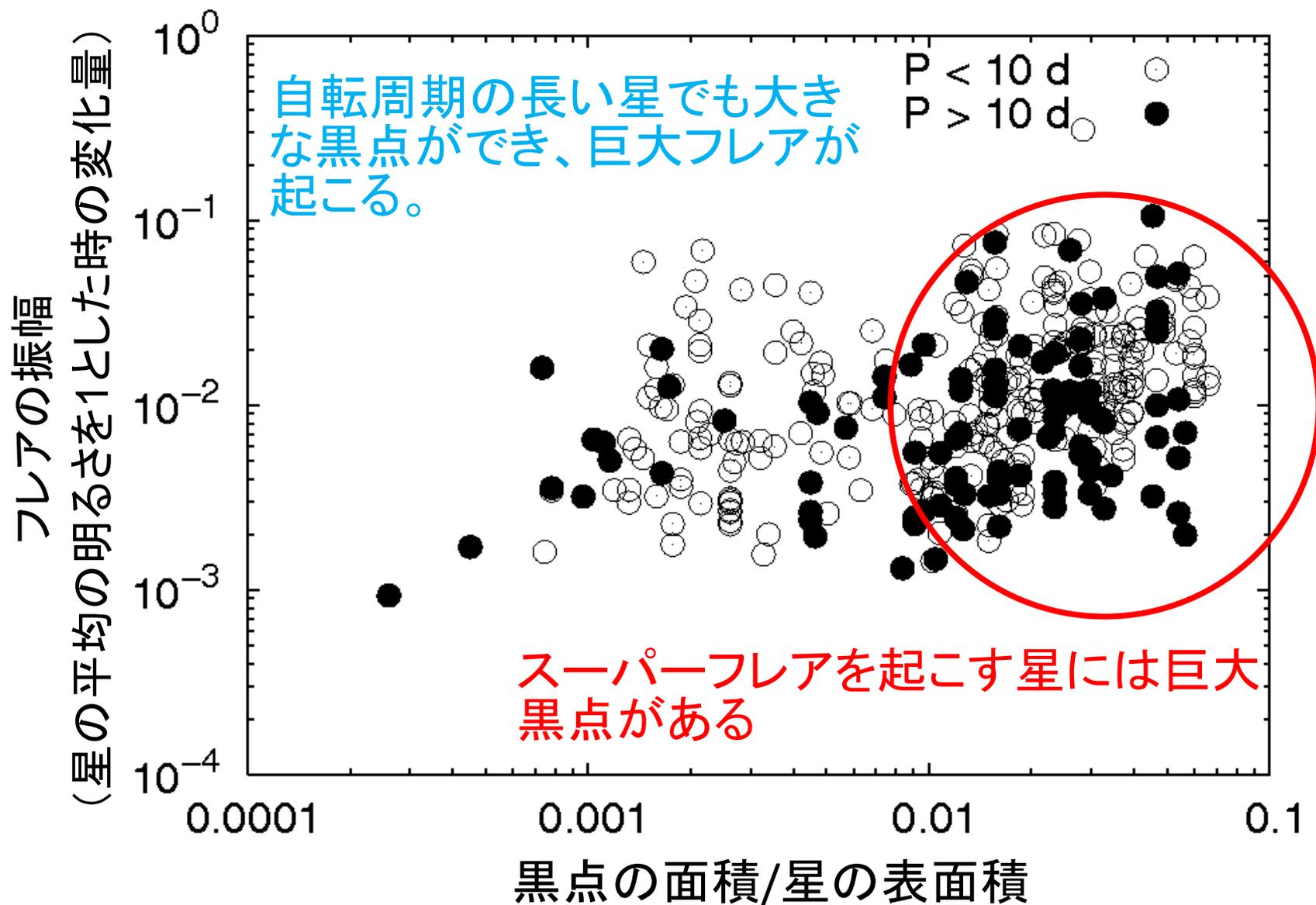
星の自転周期(日)

太陽の自転周期
(25日)

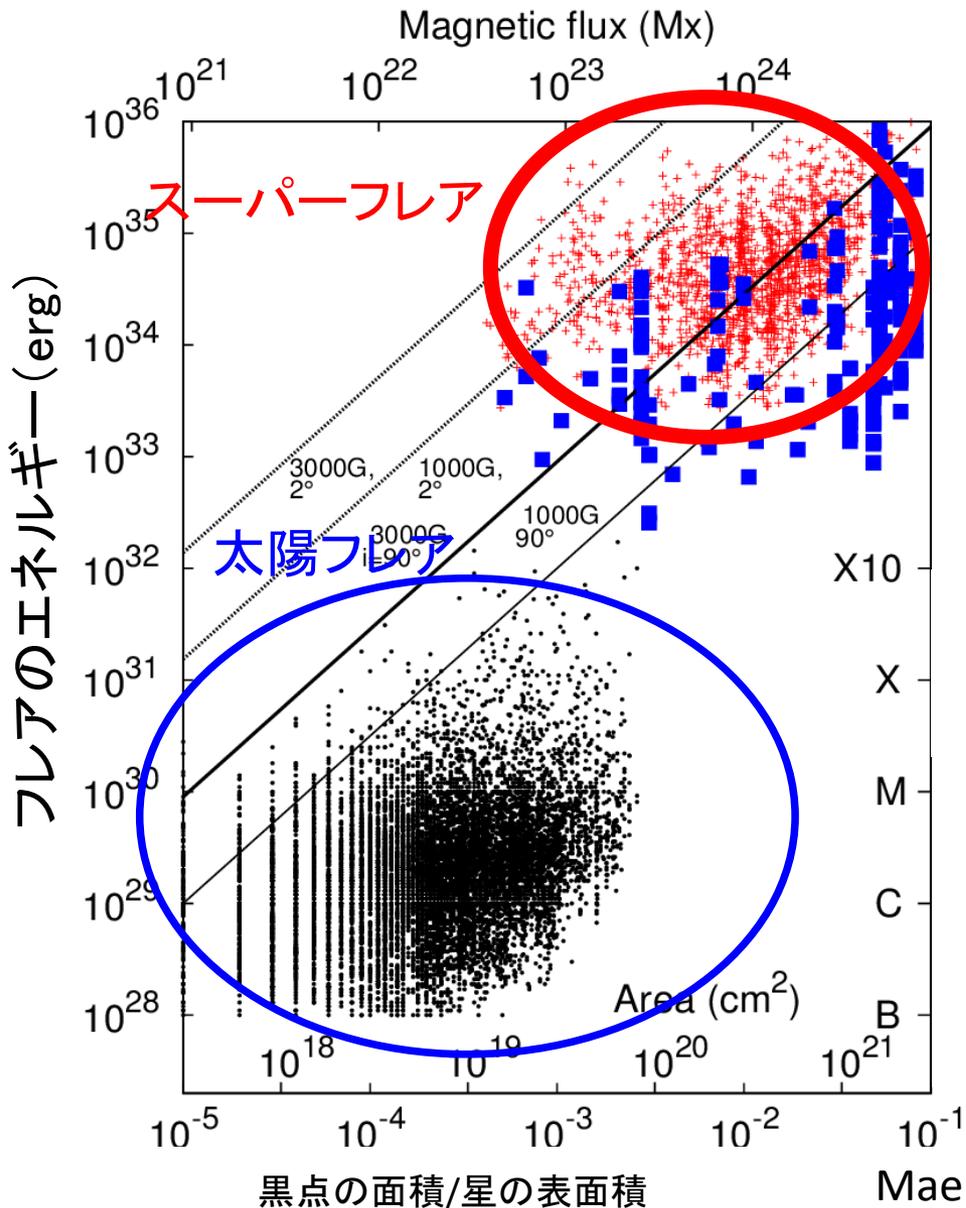
星の自転とスーパーフレアの性質

- 自転の速い星ほど発生頻度が高い
 - 若い星のほうが自転速度が速い
 - 若い星のほうがスーパーフレアが起きやすい
- フレアの最大エネルギーは自転周期に依存しない
 - ⇒ 太陽と同程度の自転周期の星であっても、最大級の太陽フレアの1,000倍程度のエネルギーのフレアを起こす

黒点の面積とフレア振幅



黒点の面積とフレアのエネルギー



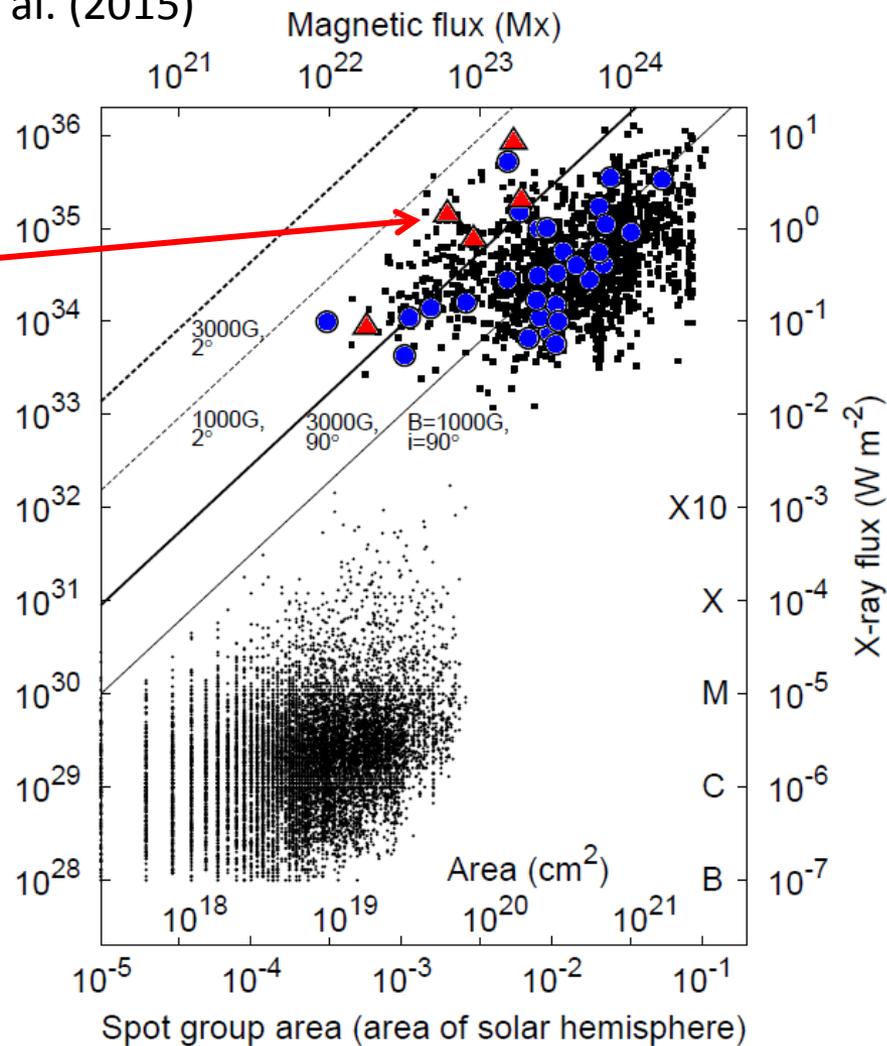
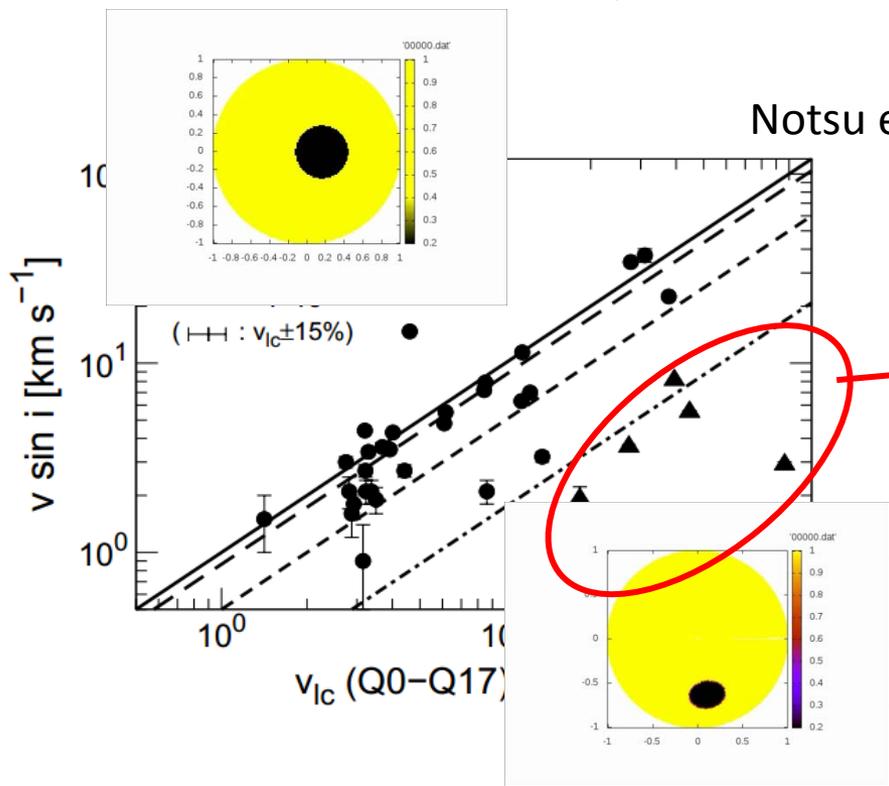
- スーパーフレアは太陽フレアで見られる関係の延長線上に分布
- 観測されたフレアのエネルギーは黒点付近に蓄えられる磁気エネルギーと矛盾しない

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



- 巨大な黒点ができるかどうか
がスーパーフレア発生のカギ
を握っている

黒点の面積とフレアのエネルギー

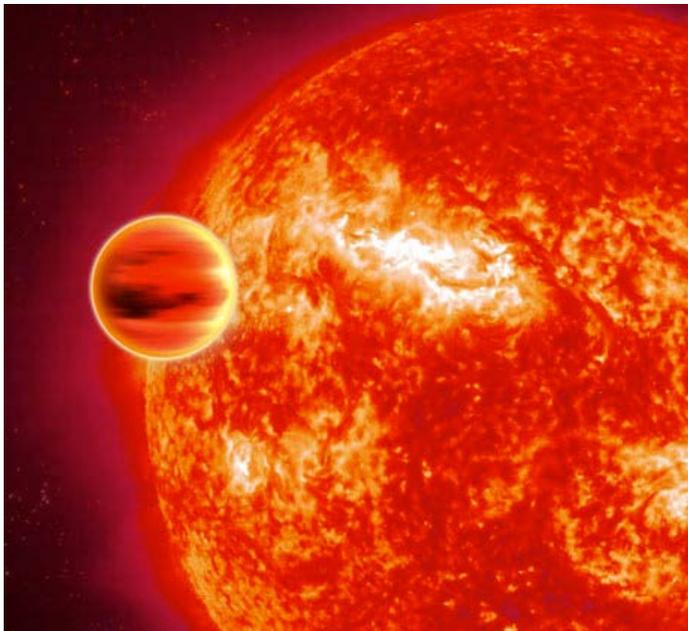


スーパーフレアを起こす天体のうち、変光の振幅が小さい天体は軌道傾斜角が小さい
 → 大きな黒点を持つが、みかけの変光の振幅が小さい天体に対応

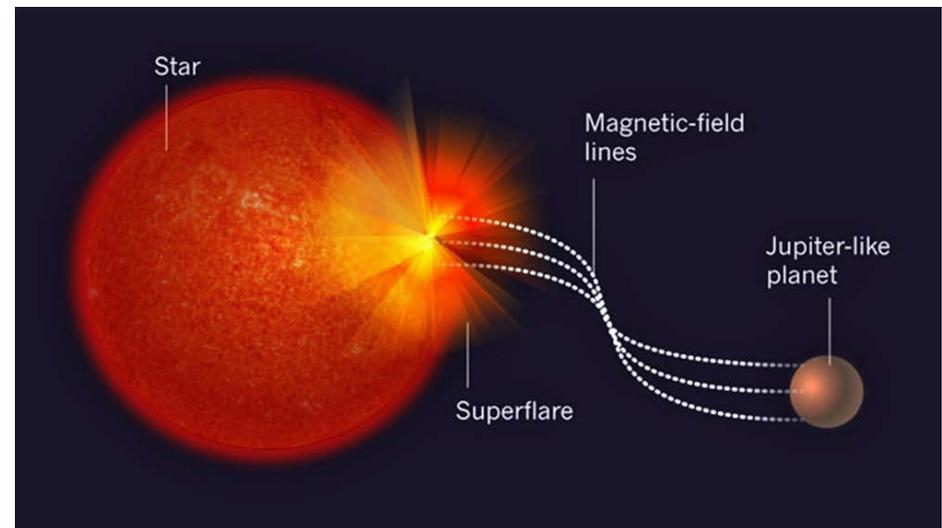
ホットジュピターとスーパーフレア

これまでの説

- 太陽型星で起こるスーパーフレアはホットジュピターによって引き起こされている
 - ホットジュピター: 星のすぐ近くを公転する木星サイズの惑星
- **太陽ではスーパーフレアは起こらない!**



(Courtesy: Christophe Carreau, ESA).

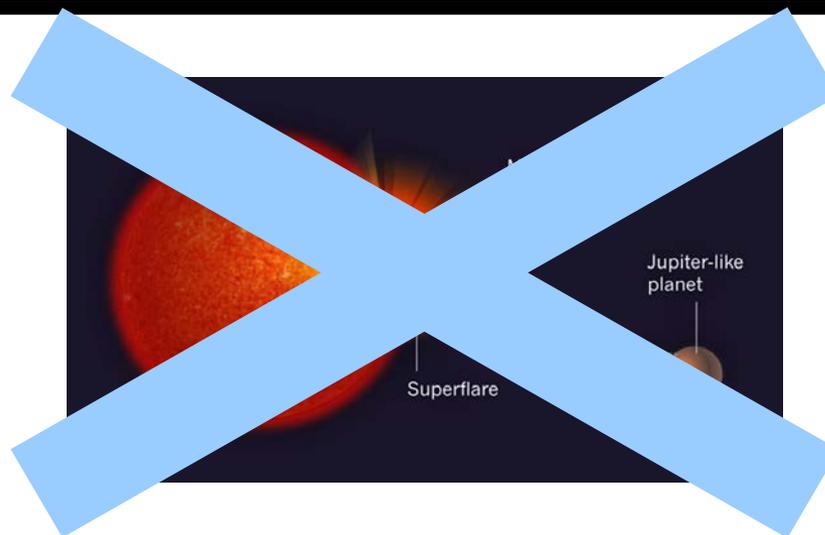


Schaefer, Nature 485, 456 (2012)

ホットジュピターとスーパーフレア

我々の研究で分かったこと

- スーパーフレアを起こす 279星の中に惑星が発見された星は1つだけ
 - スーパーフレアを起こさない太陽型星102551個のうち、惑星系を持つ天体は1029個(約1%)。→ スーパーフレア星の惑星を持つ確率が有意に高いとは言えない
 - 全てのスーパーフレアがホットジュピターによって引き起こされているとするならば、15個程度は惑星を持つ星が見つかるはず
- **ほとんどのスーパーフレアはホットジュピターとは関係なく起こる → 太陽のような星でも起こる可能性を否定できない**



まとめ

- 太陽と同じくらいの自転周期や温度の星でもスーパーフレアが起こる
 - 最大で太陽フレアの1000倍のエネルギーのスーパーフレアの場合、平均の発生頻度は5000年に1回
 - 100倍なら800年に1回
- ホットジュピターとスーパーフレアは関係なさそう
 - 太陽では起こらないとされる根拠の1つが否定された
- スーパーフレアを起こす星には巨大な黒点がある
 - 太陽でもこれまで観測されたことのないくらい巨大な黒点が出たら要注意
 - 太陽とスーパーフレアを起こす星が本当に同じような星なのかは、さらに研究が必要