

大規模サーベイと突発天体の観測的研究

前原裕之（京都大学大学院理学研究科附属天文台）

サーベイ観測

- 天体観測には大きく分けて2種類
 - 特定の天体を詳しく調べる方法
 - 天体の物理的な性質や、天体の活動現象を引き起こす物理を解明するために行なう
 - Xxは△△さんの星…
- ポインティング観測
- 一定の基準を見たす天体を全て拾い出す方法
 - 天体の統計的な性質（出現頻度 etc.）を調べるために行なう。
- サーベイ観測

様々なサーベイ

- 撮像サーベイ

- 天体(星や銀河 etc.)の位置や明るさ、色などを測定
 - IR : IRAS, 2MASS, AKARI
 - Optical : POSS-I, II、 SDSS
 - UV : GALEX
 - X-ray : ROSAT, XMM, MAXI
 - gamma-ray : Fermi/LAT, CGRO/EGRET

- 分光サーベイ

- 天体を分光して輝線やUV excessの有無、赤方偏移の測定等を行なう
 - HQS, HES, SDSS

時間方向のサーベイ

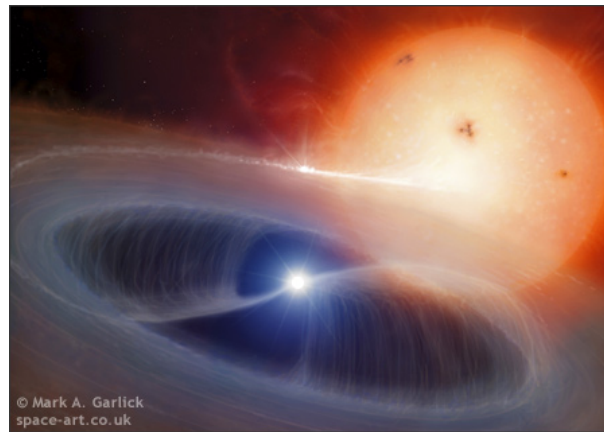
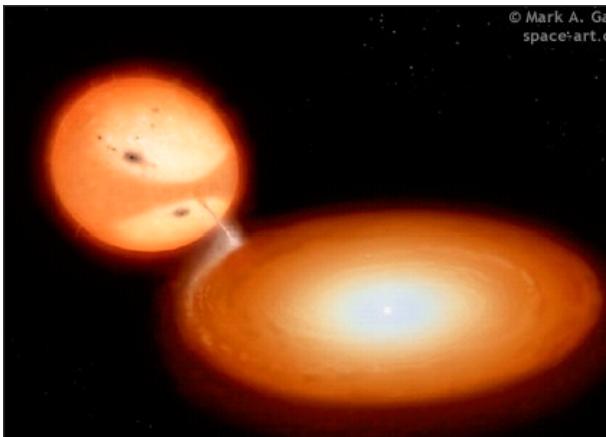
- 同じ領域を複数回観測し、位置や明るさの時間変化を測定
 - 明るさの時間変動、固有運動、移動天体 etc. の観測
 - 古くはHarvard photographic surveyから、最近ではASAS, CRTS, PTF, PanSTARSなど
 - MAXI, Fermi等、可視光以外も行なわれている
- 時間方向の情報量が得られるので、**変光星や特に新星、矮新星などの突発天体の研究に極めて有用**
 - 変光周期や増光確率などの情報も得られる
- 本日の話題
 - (1)軌道周期の短い矮新星
 - (2)太陽型星の恒星フレア

サーベイによる発見+フォローアップ観測
による研究の例

軌道周期の短い矮新星と激変星進化

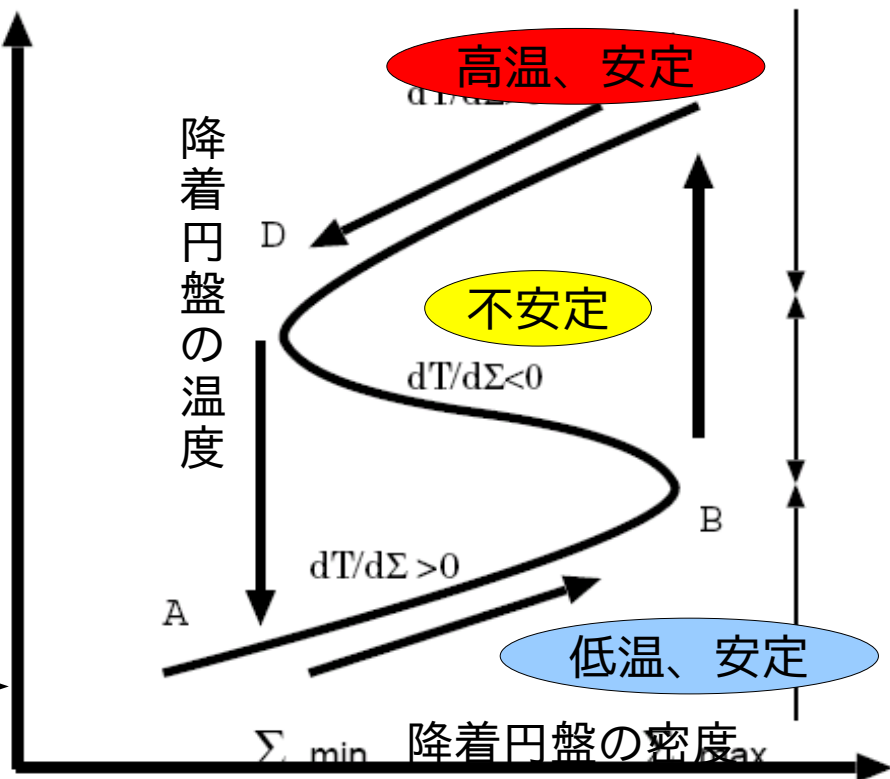
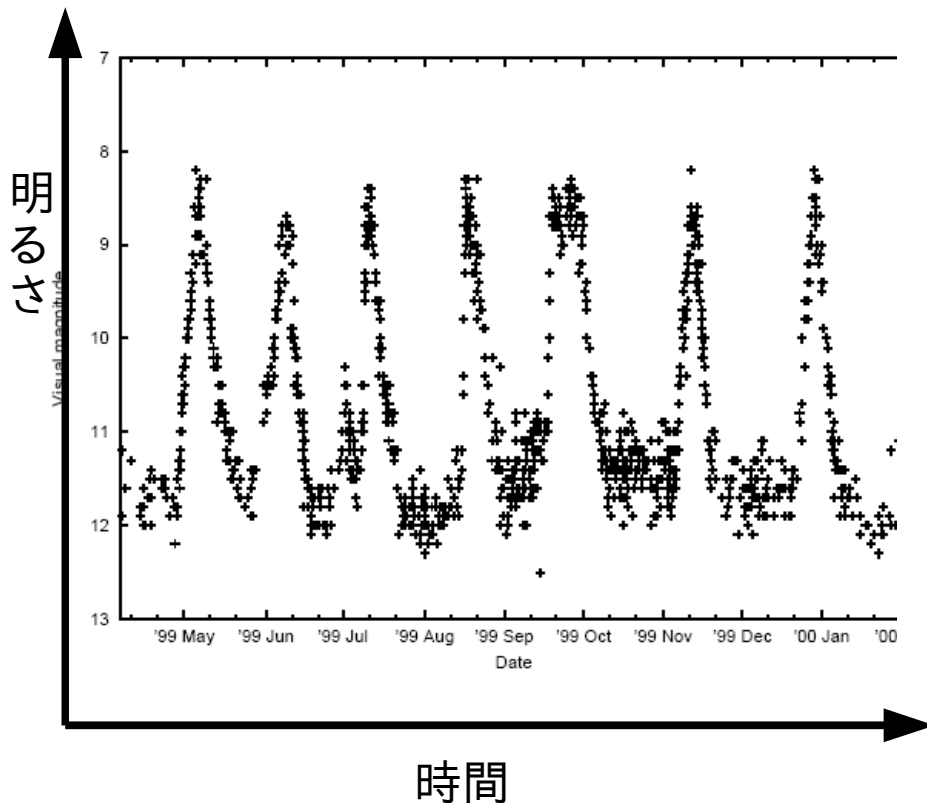
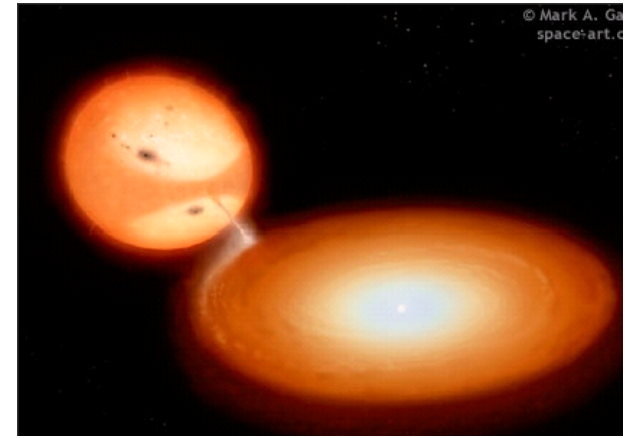
激変星

- 白色矮星の主星と低温の主系列星の伴星からなる近接連星
- 伴星はロッシュローブを満たしており、主星側へ質量移動がある



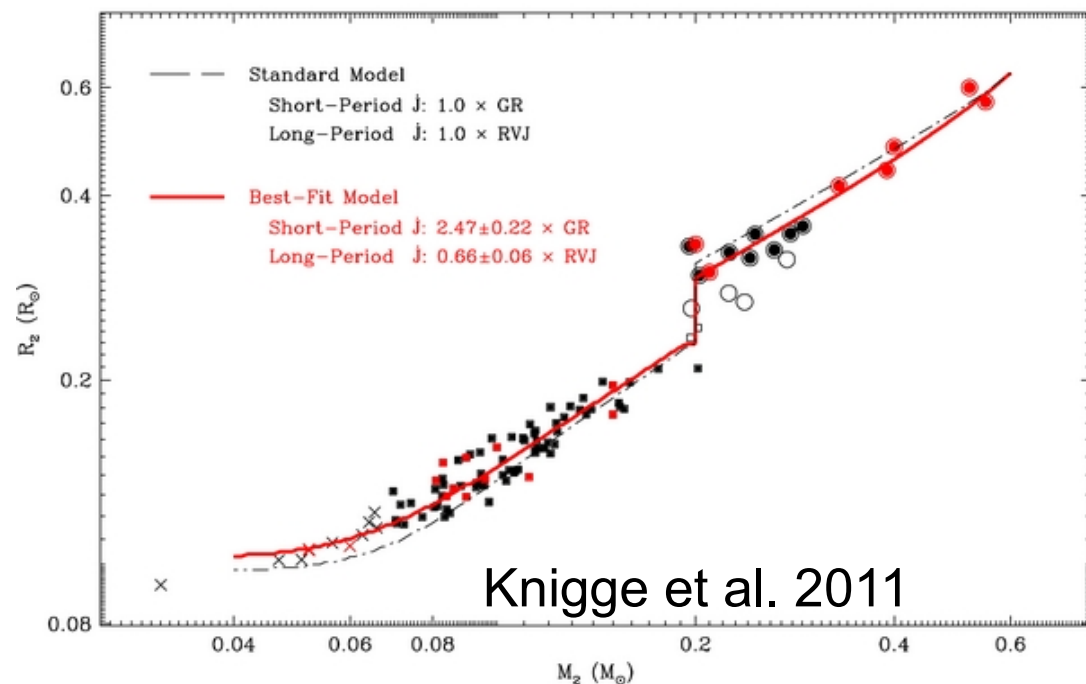
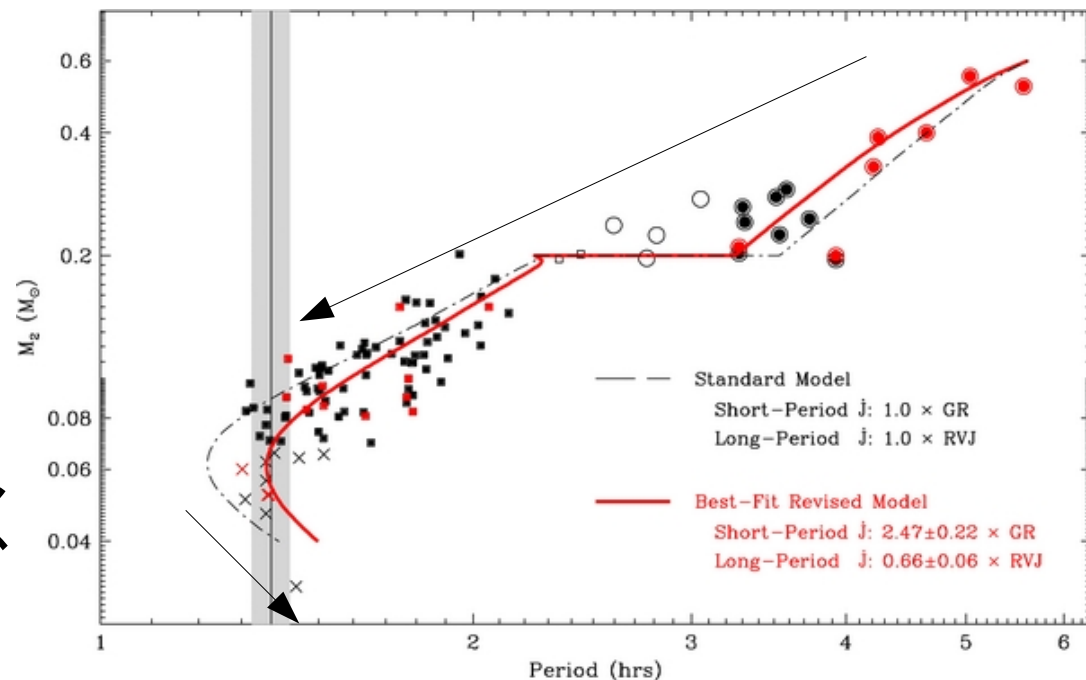
矮新星

- 数十～数百日ごとに5等程度増光
 - 新星は10等以上増光
- 降着円盤の明るさの変化を見ている

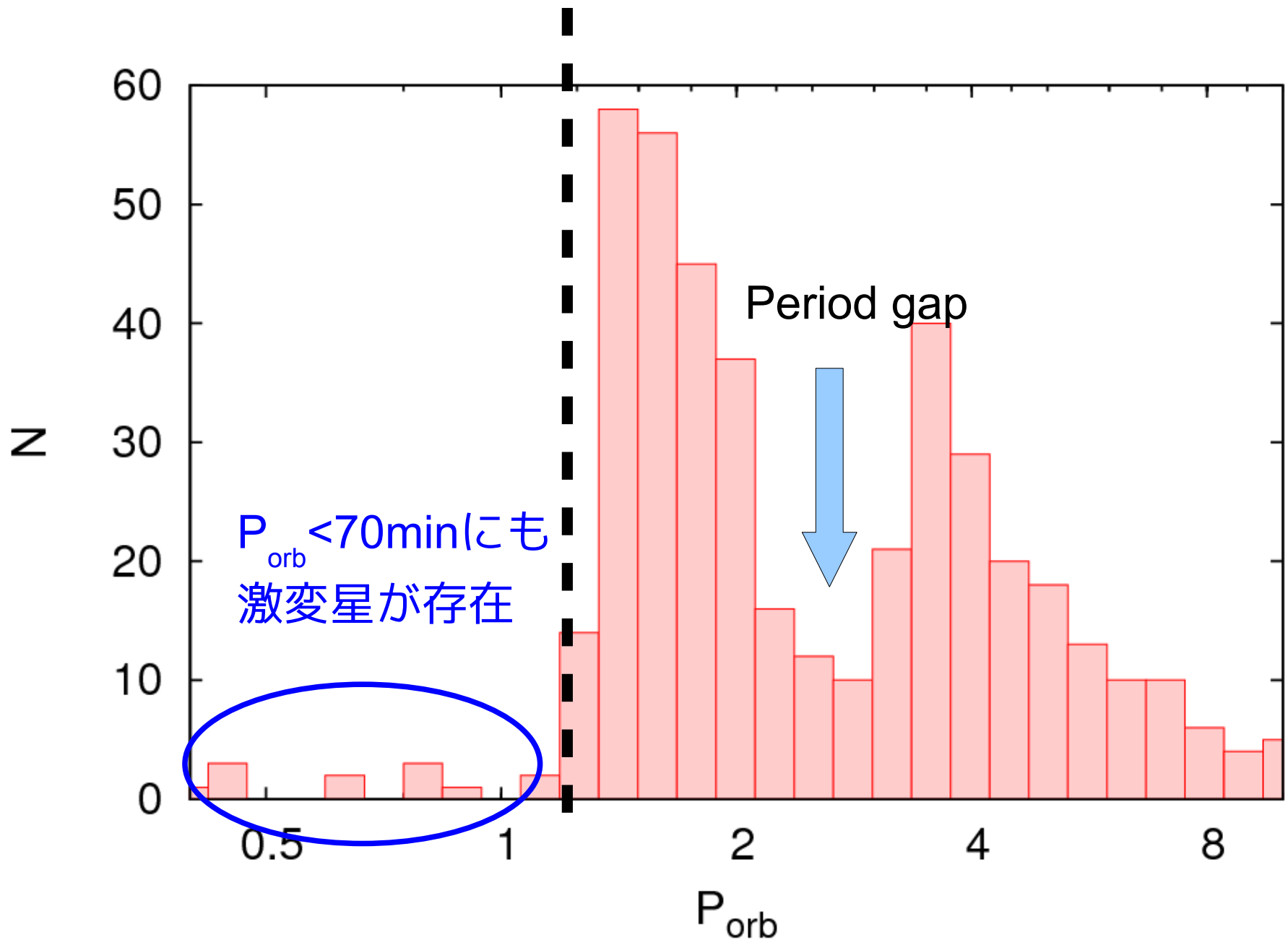


激変星：連星進化の最終段階

- 角運動量を失なうことで軌道周期が短くなる方向に進む
 - $P > 3\text{h}$ では磁気ブレーキ
 - $P < 2\text{h}$ では重力波放射
- 軌道周期70分前後までは短くなる
 - 伴星が縮退するとその後は周期が長くなる方向に進む

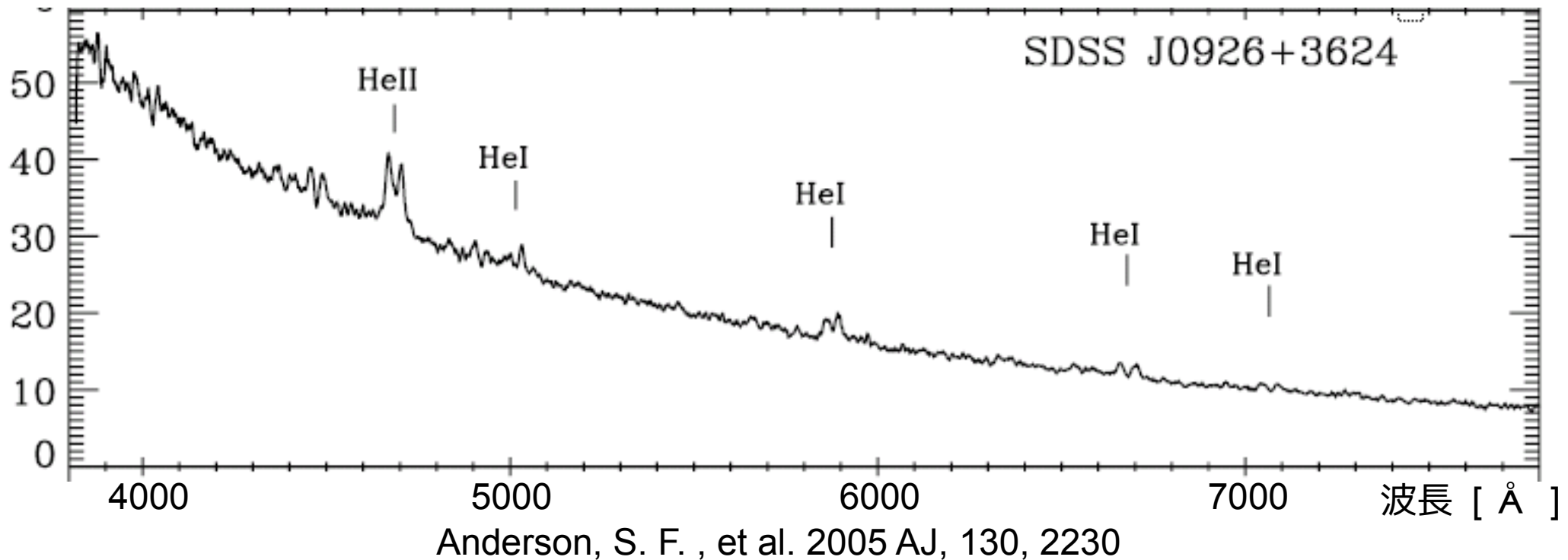


激変星の軌道周期分布



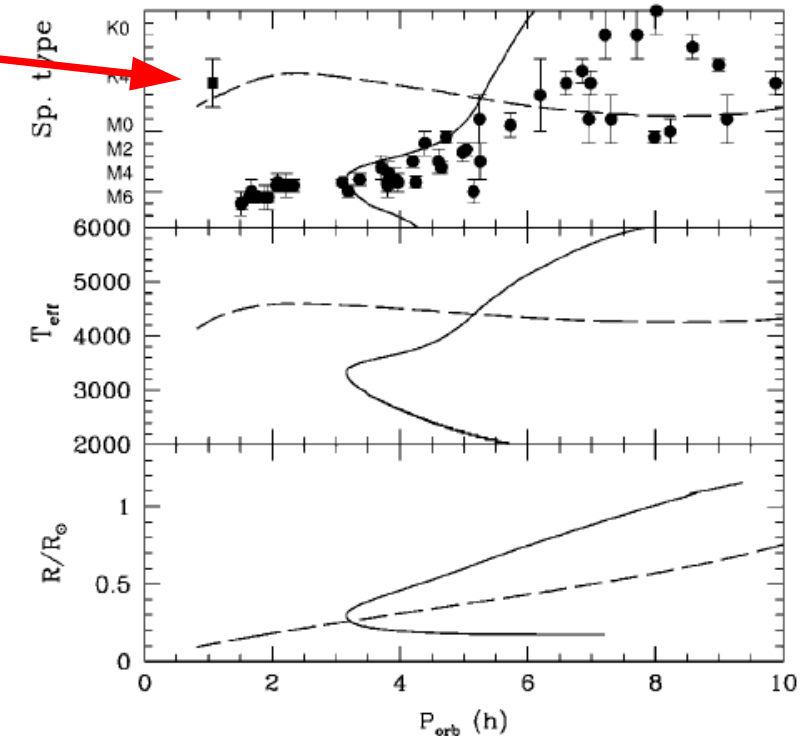
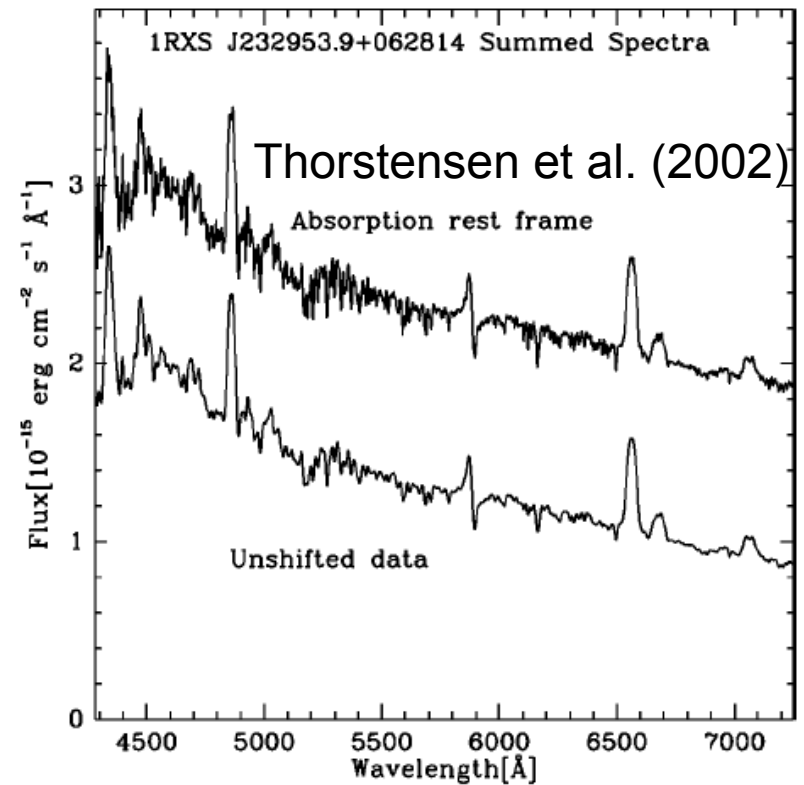
P_{\min} 以下の天体: AM CVn型星

- 伴星がヘリウムWDの激変星
 - 最も短かいものでは軌道周期が5分



P_{\min} 以下の天体: EI Psc

- 最短軌道周期よりも短い軌道周期を持つ矮新星
 - $P_{\text{orb}} = 64\text{min}$
- 伴星はヘリウムWDではない
- 伴星が P_{\min} 付近の矮新星よりも明るい
 - 進化の進んだ伴星
 - 主系列星の最終段階から質量移動を始めた場合の進化経路上にある
- AM CVn型の前段階?



最近のサーベイによる進展

- P_{\min} 以下の軌道周期を持つAM Cvn型以外の矮新星
 - 2008年以前はわずか2個 (EI PscとV485 Cen)
 - **Catalina Sky Surveyによって新たに3個の増光が発見**
 - CSS J1028-0819 : $P=52$ min. (Woudt+ 2012)
 - CSS J1122-1110 : $P=65$ min. (Breed+ 2012)
 - SBS 1108+533 : $P=55$ min. (Kato+ 2012)
- J1122は質量比が求められている
 - $M2/M1=0.017$
 - 典型的な矮新星の主星質量 ($0.7-0.8M_{\text{sun}}$) を仮定すると伴星質量は $0.01M_{\text{sun}}$ 程度
 - 質量比 → Roche lobeの大きさ → mass-radius relationと比較が可能になる

Catalina Real-time Transient Survey

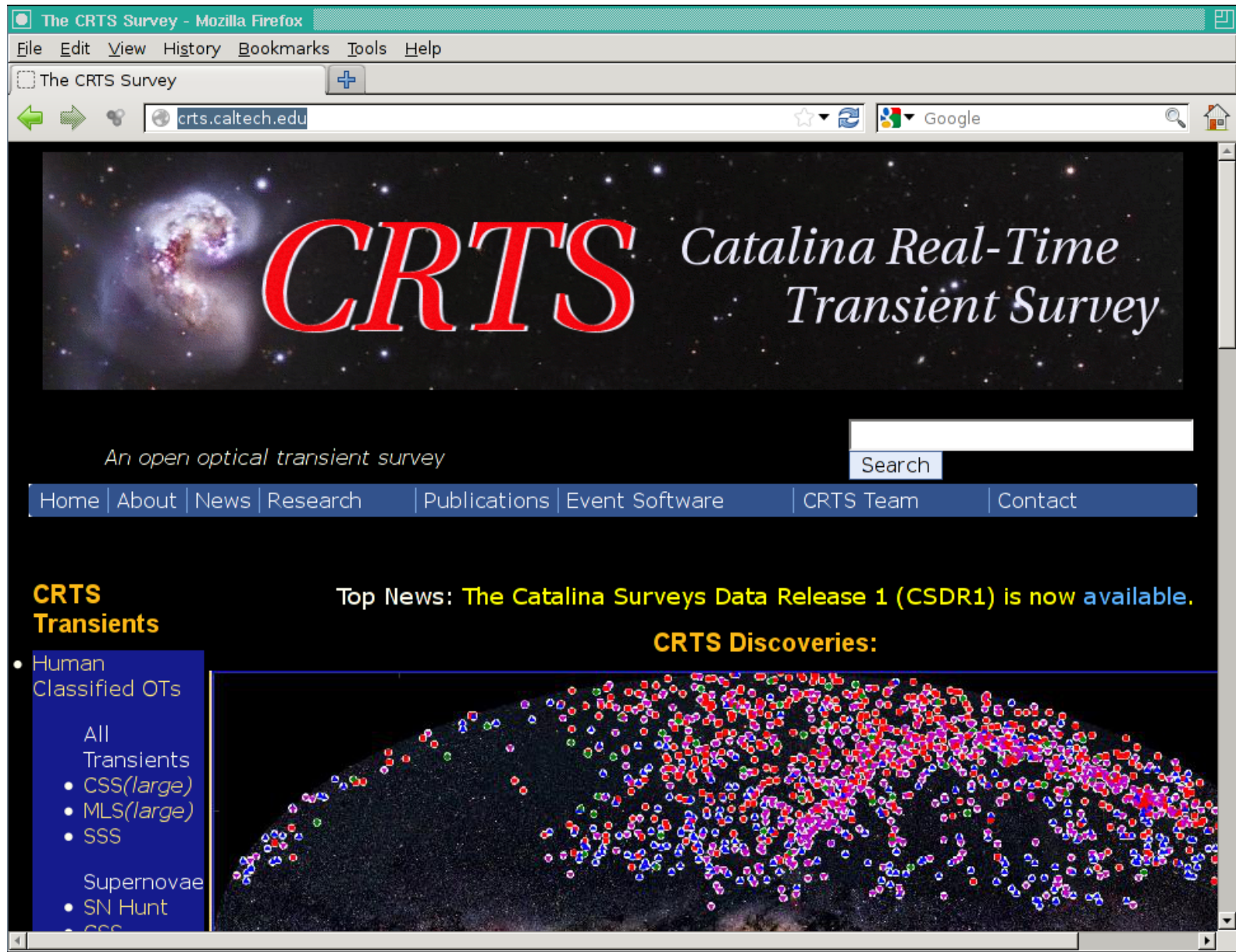
- 0.7m f/1.9のシュミットカメラ + 4k×4k CCDを使ったサーベイ
 - 2.5" / pixelで、8deg²
 - NEOや地球に衝突する可能性のある太陽系小天体を探している
 - 2008 TC3 (Jenniskens et al. 2009, Nature, 458, 485)
 - 1視野あたり30秒露出で4回撮影
⇒ 1晩で1200deg²
 - 搜索範囲: $-30^{\circ} < \delta < 70^{\circ}$ 、 $|b| > 10^{\circ}$
⇒ 26000 deg²



- CRTSのデータは以下のURLで即時公開されており、誰でも利用可能

<http://crts.caltech.edu/>

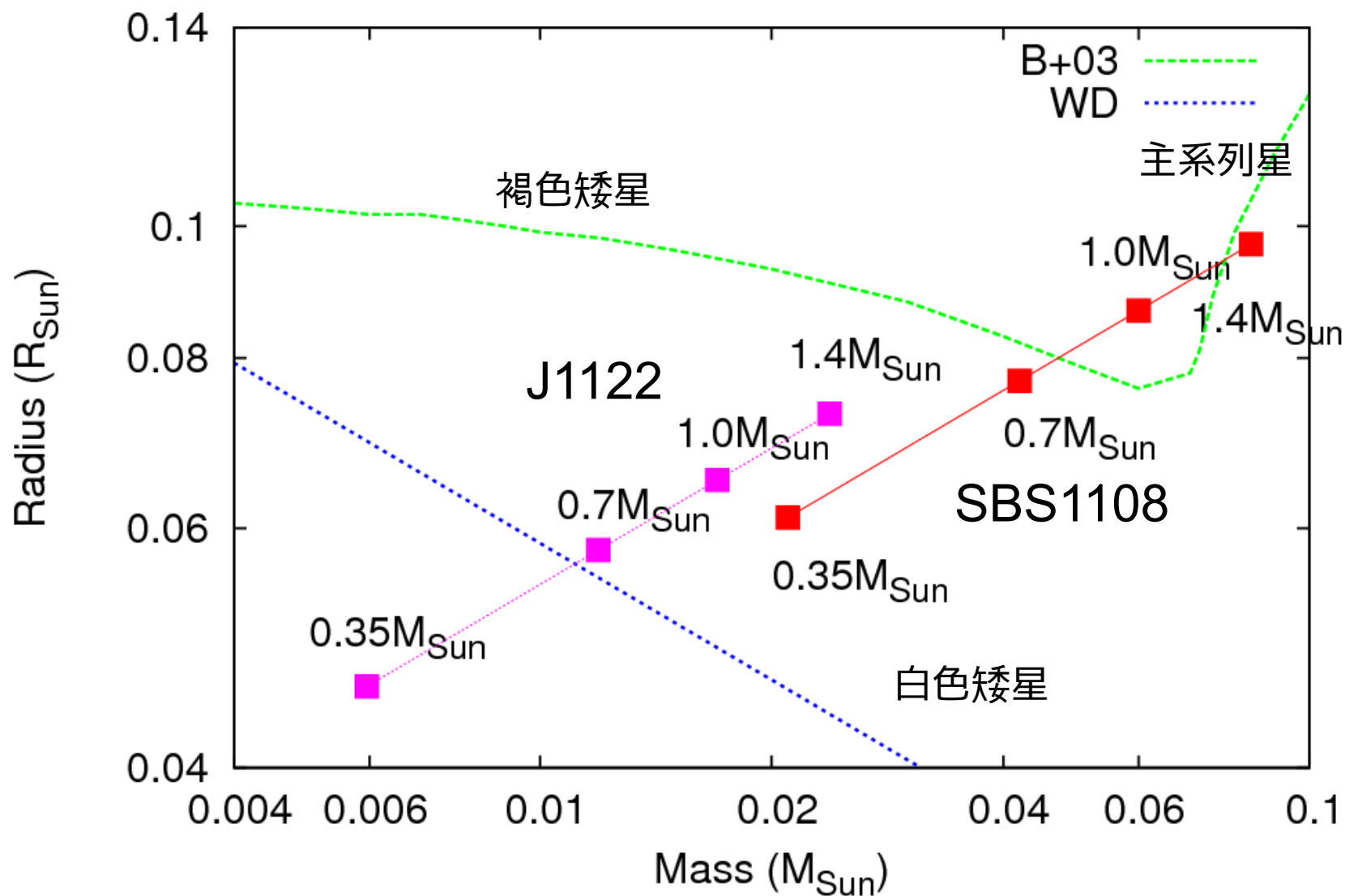
- 矮新星以外にもAGN、SN、恒星フレア等が受かっている



The screenshot shows a Mozilla Firefox browser window displaying the CRTS website. The browser's address bar shows the URL crts.caltech.edu. The website header features the CRTS logo in large red letters, with the text "Catalina Real-Time Transient Survey" to its right. Below the header, there is a search bar and a navigation menu with links for Home, About, News, Research, Publications, Event Software, CRTS Team, and Contact. The main content area includes a "Top News" section with the headline "The Catalina Surveys Data Release 1 (CSDR1) is now available." and a "CRTS Discoveries:" section. A sidebar on the left lists "CRTS Transients" and "Supernovae" categories. The bottom of the page shows a large field of colorful data points representing transient events.

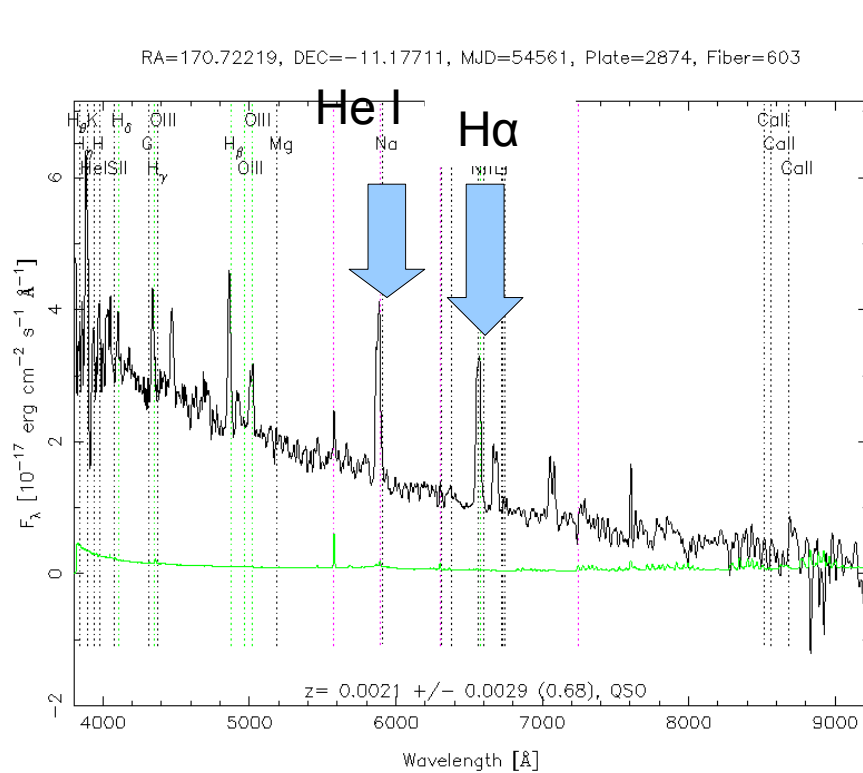
Mass-Radius relationと伴星のサイズ

- 褐色矮星よりも高密度
 - 水素外層がなくなって、AM CVn型星になる直前の状態？

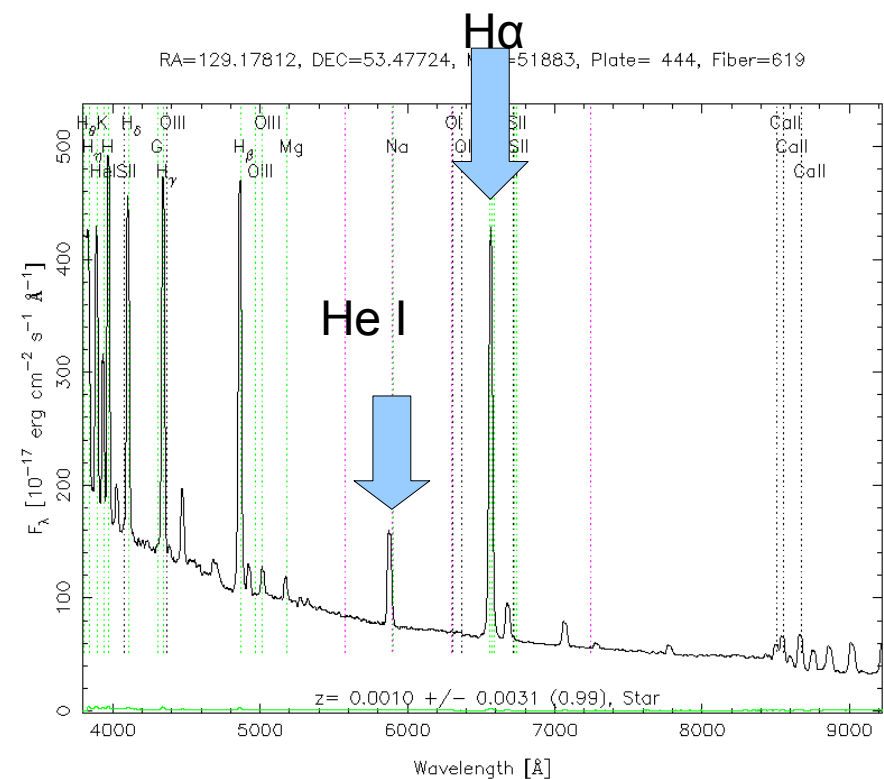


CSS J1122-1110のスペクトル

- Balmer輝線がみられるので、AM CVn型ではない
- 通常のSU UMa型矮新星よりもHe Iが強い
 - 降着物質 (=伴星) にヘリウムが多い
- 水素外層を失ないつつある天体？



J1122



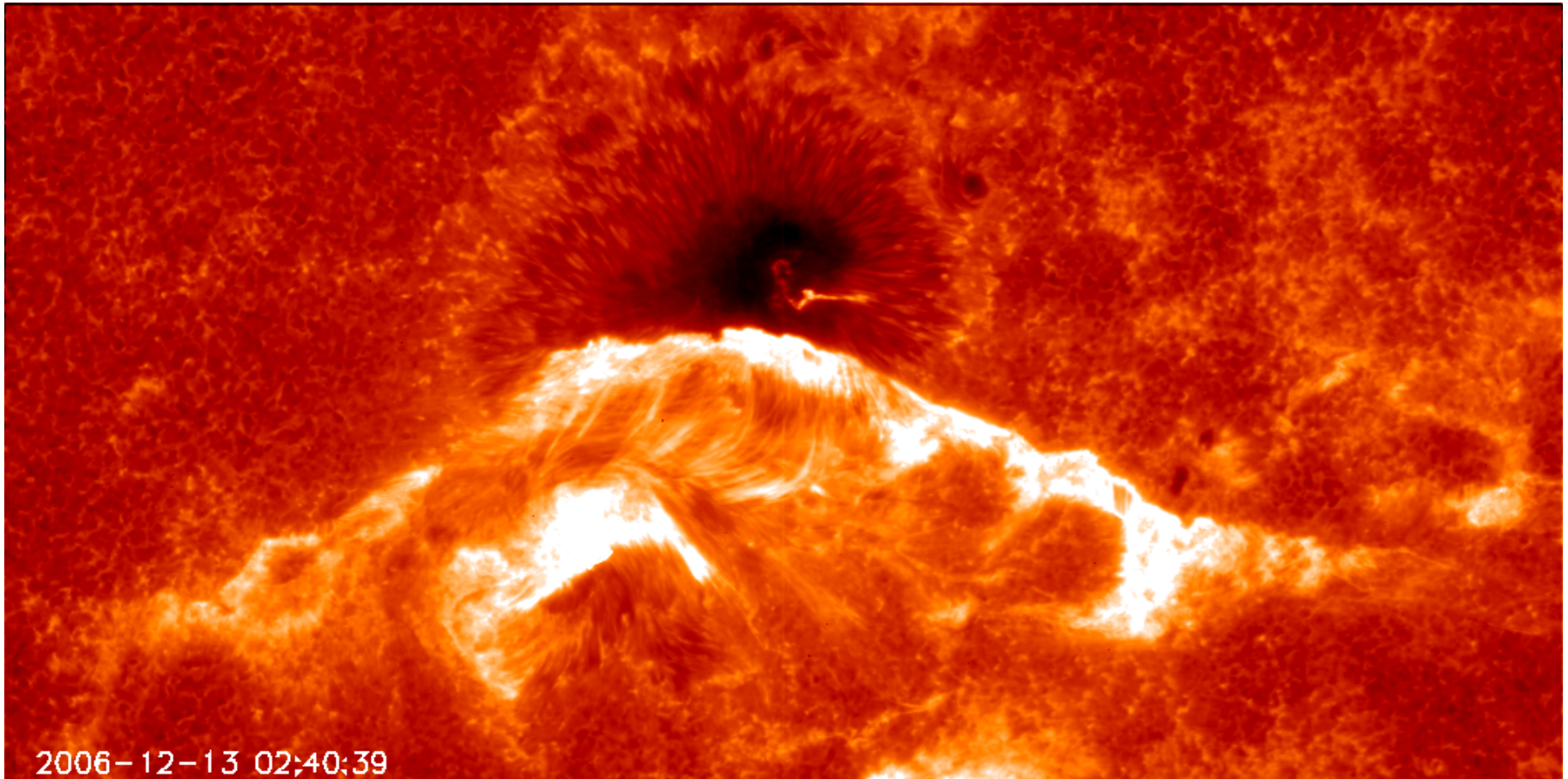
SW UMa

大量サンプル + 超高精度の
時系列データを用いた研究の例

太陽型星のスーパーフレア

太陽フレア

- 太陽大気中で磁気エネルギーを熱や運動エネルギーに変換する過程
- 観測史上最大級のフレアのエネルギー： 10^{32} erg
- $H\alpha$ 線、極端紫外線、X線などで明るく光る

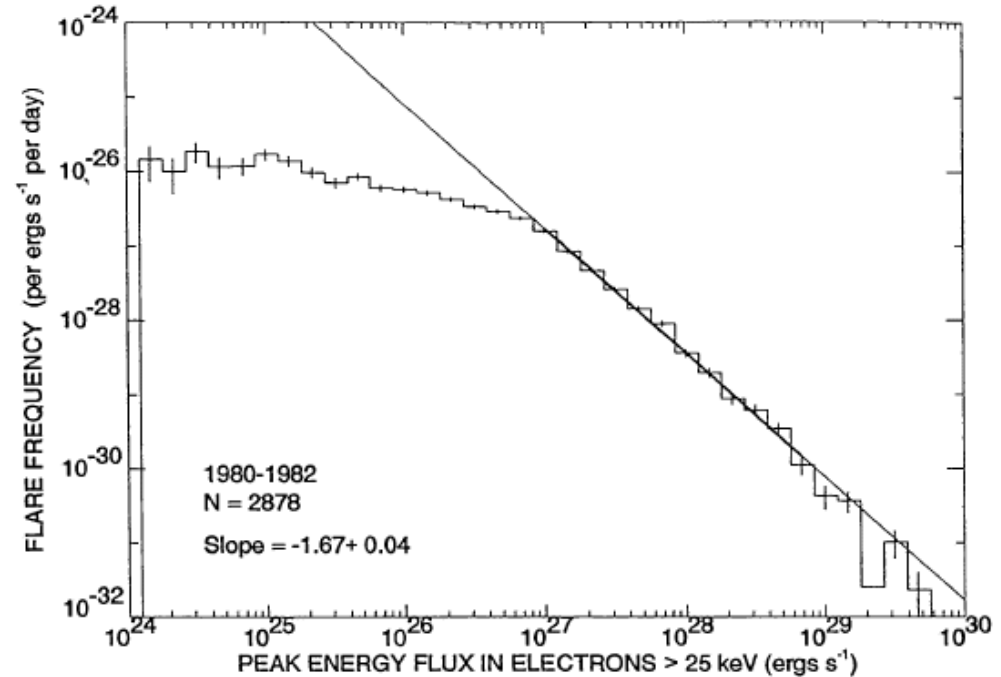


2006-12-13 02:40:39

<http://solar-b.nao.ac.jp/Movies/>

太陽フレアの発生頻度分布

- 太陽フレアは大きなエネルギーを持つフレアほど発生頻度が低い
- エネルギーごとの発生頻度はベキ型分布になることが知られている
- $dN/dE \propto E^{-1.5 \sim -1.9}$

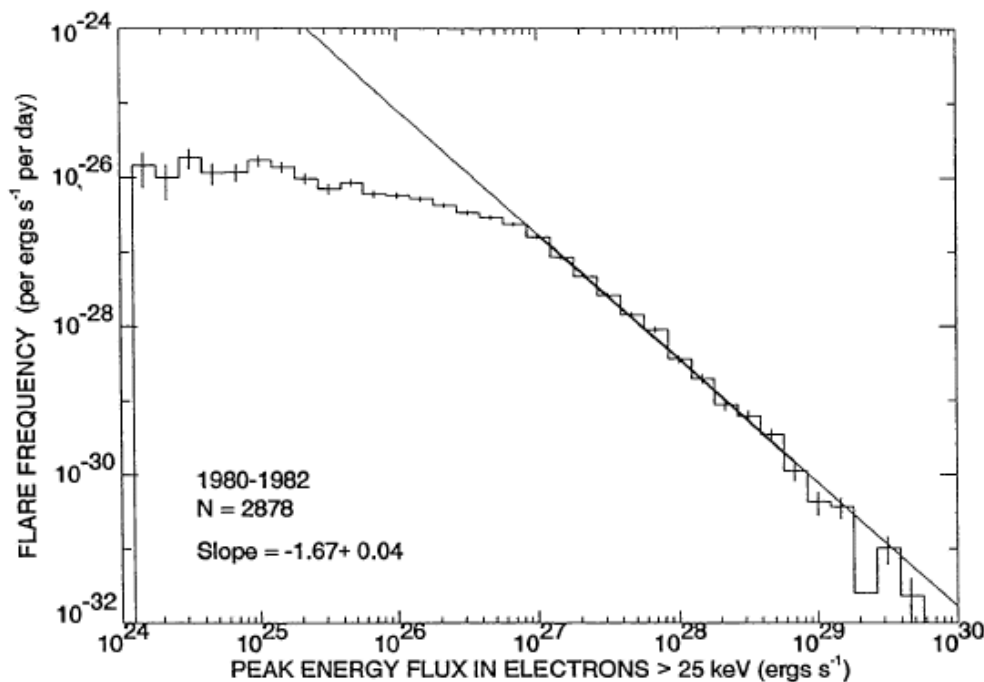


Crosby et al. 1993, Solar Physics, 143, 275

- 太陽フレアでは $10^{24} \sim 10^{32}$ ergの範囲でベキ型分布
- さらに大きいエネルギーのフレアは？

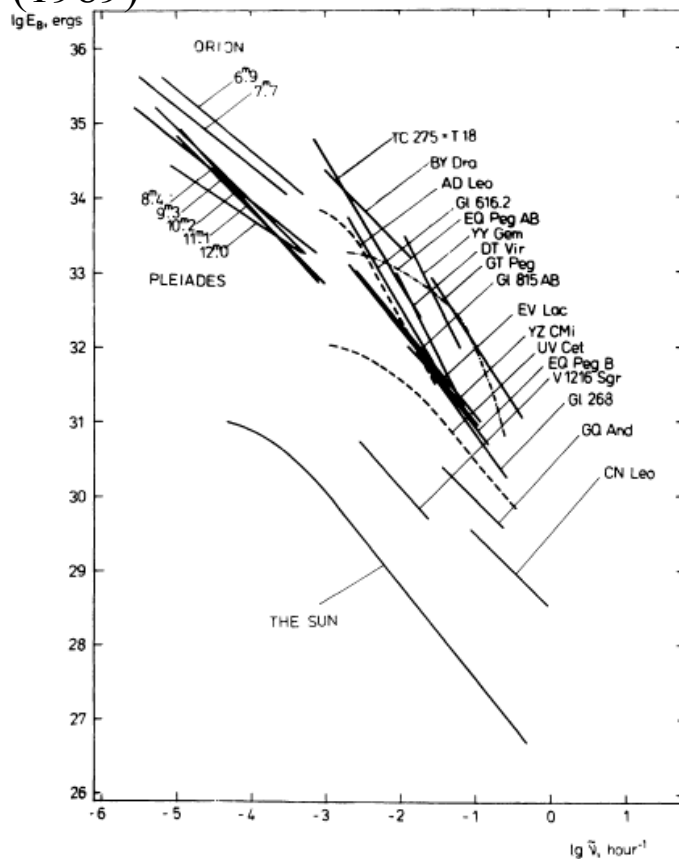
恒星フレアのエネルギーと頻度

- 太陽と同様のべき関数型の分布をすることが知られている
 - 太陽フレア : $dN/dE \propto E^{-1.5 \sim -1.9}$
 - 恒星フレア : $dN/dE \propto E^{-1.4 \sim -2.4}$



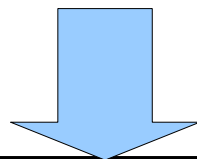
Crosby et al., *Solar Physics*, **143**, 275-299 (1993)

Shakhovskaia, *Solar Phys.* **121**, 375-386 (1989)



スーパーフレア

- フレアは太陽以外の様々な星でも起こっている
- 太陽で観測された最大級のフレアの10~100万倍ものエネルギーを放出するフレアの報告例もある
 - このようなフレアを「スーパーフレア」と呼ぶ
- 太陽とよく似た星で観測されたスーパーフレアはこれまでわずかに9例のみ (Schaefer et al. 2000)
 - 発生頻度やフレアを起こす星の性質との関係はこれまで分かっていなかった。
 - 数が少ないこと、データの質が様々 (眼視、写真、X線など) であること等による。



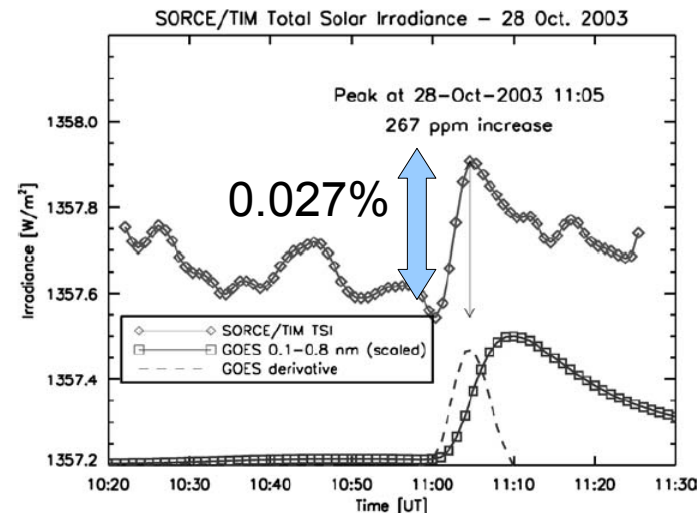
- 太陽でも超巨大フレアが起こるのか？
- 起こるとすればどのくらいの頻度になるか？

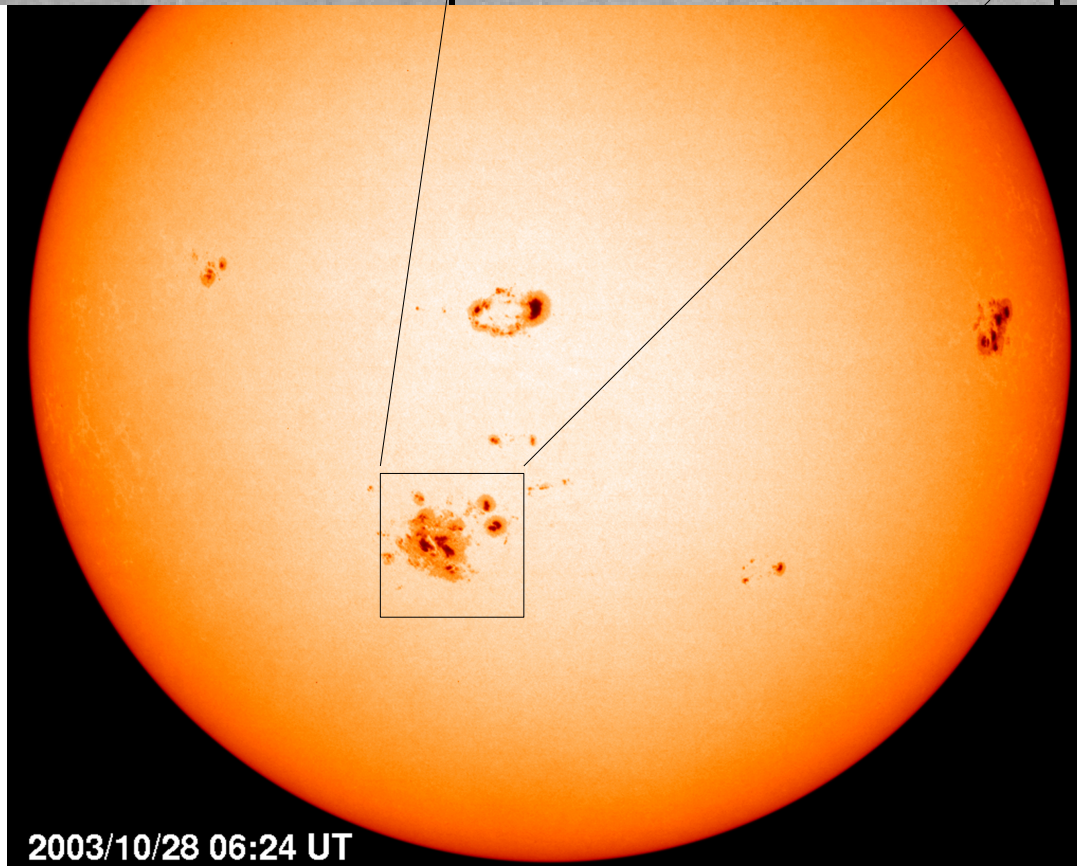
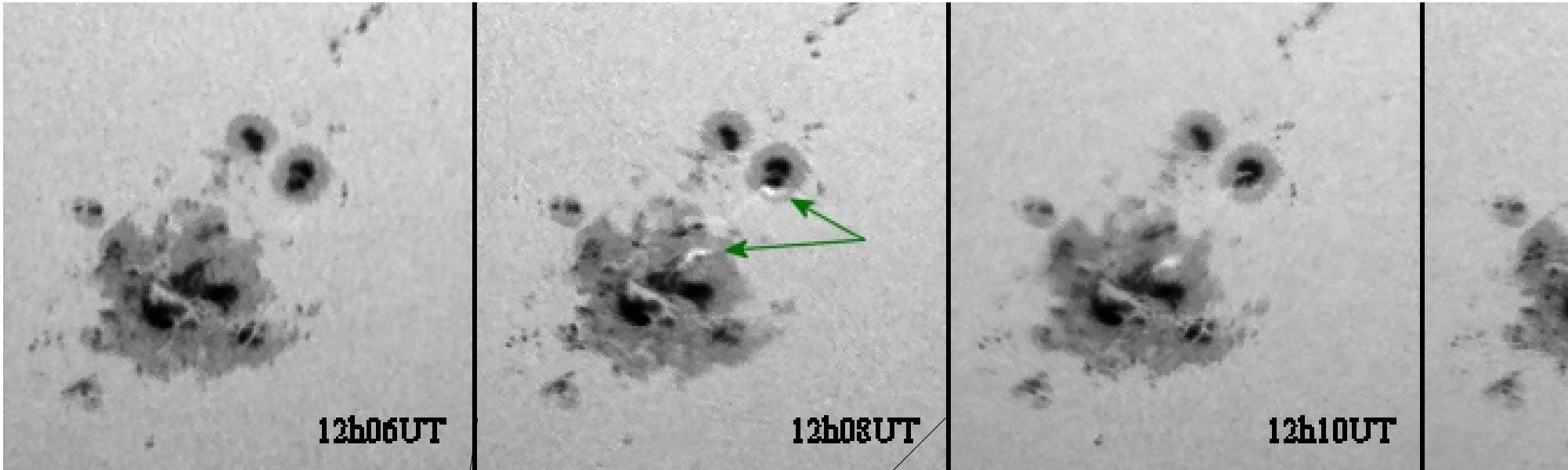
G型星のフレア

- 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は、太陽の明るさは1万分の1程度明るくなる
 - 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
 - 10倍大きいエネルギーのフレアの発生頻度は1/10
- フレアは短時間の突発的な現象

→ 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→





白色光フレアの
実際の観測例

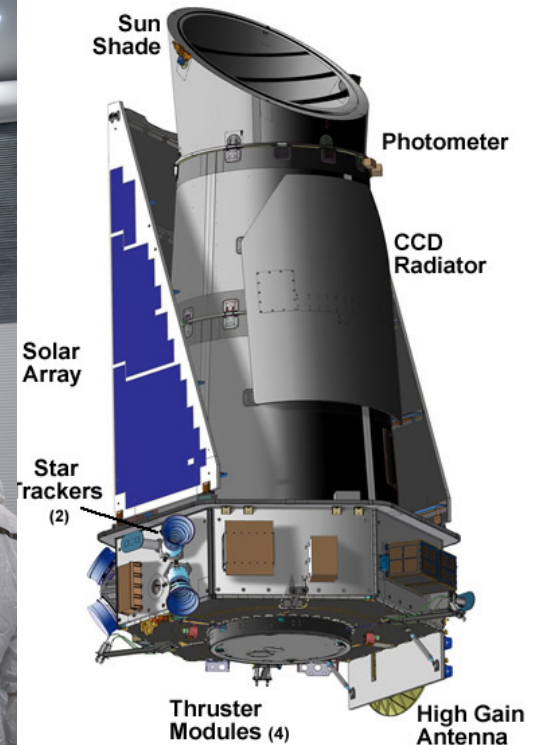
SOHO衛星による太陽像

ケプラー衛星

- 太陽系外惑星を観測するためにNASAが開発・運用している
 - 2009年3月7日の打ち上げ
 - 口径95cmの望遠鏡で約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（現在も観測が継続）、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
 - 惑星が星の前を通過する時に星の明るさがわずかに暗くなる現象を観測

フレアによって星がわずかに明るくなる現象をケプラー衛星によって得られたデータ(2009年4月～2010年8月)から探した。

G型主系列星の数：約9万星



ケプラー衛星の観測領域



- KeplerのデータはMASTで公開されており誰でも利用可能

<http://archive.stsci.edu/kepler/>

- 全てのデータが即時公開されているわけではない
- 現在2011年6月末（Quarter 6）までが公開

MAST Kepler - Mozilla Firefox

File Edit View History Bookmarks Tools Help

MAST Kepler

archive.stsci.edu/kepler/

Barbara A. MIKULSKI ARCHIVE OF SPACE TELESCOPES

MAST STScI Tools Mission_Search Tutorial Site Search

Kepler Home About Kepler Getting Started Registration Kepler Data Search Kepler Target Search FFI+ Search

Kepler Data Search

FAQ

Kepler Science Resource

Search & Retrieval

Documentation

Data Release Notes

Data Reduction & Analysis

Related Sites

Publications/News

MAST Services

Images

Data Use Policy

Acknowledgments

All STScI servers will be unavailable Wednesday, August 1 from 5:00 - 9:00 PM EDT for network configuration.

Latest News

- 7/30/12 - Tarfiles for Quarters 7, 8, and 9 have been created. They contain the data released on July 28, 2012. See the [README](#).
- 6/26/12 - A new canvas-based plotting tool is available for displaying Kepler light curves. Click the mark button(s) for the (public) target of interest and select "Plot marked Light Curves" from the Kepler data search results page.
- 6/5/12 - [Data Release Notes 16](#) describing reprocessed data for quarters 5 - 8 is now available. The [Cotrending Basis Vector \(CBV\) files](#) for data release 16 are also available.
- 5/8/12 - [Data Release Notes 15](#) describing quarter 11 data is now available.
- 3/16/12 - The tarfiles containing the public data for Quarters 0-4 have been recreated to contain the lightcurves reprocessed with the updated version of the SOC pipeline. The most notable improvements include:
 - an improved detrending algorithm (i.e., PDC MAP) that removes instrumental artifacts while retaining astrophysical signals,
 - the addition of the background flux time series measured for the optimal aperture,
 - the addition of RMS CDDP measurements at 3, 6 and 12 hour time scales.

News

July 31, 2012:
Kepler Quarter 7, 8, 9 tarfiles of public data

July 23, 2012:
Searches on Null Values now Possible

July 19, 2012:
New plot routine available for MAST spectral missions

June 18, 2012:
Please try the new MAST Data Discovery Portal (beta version)

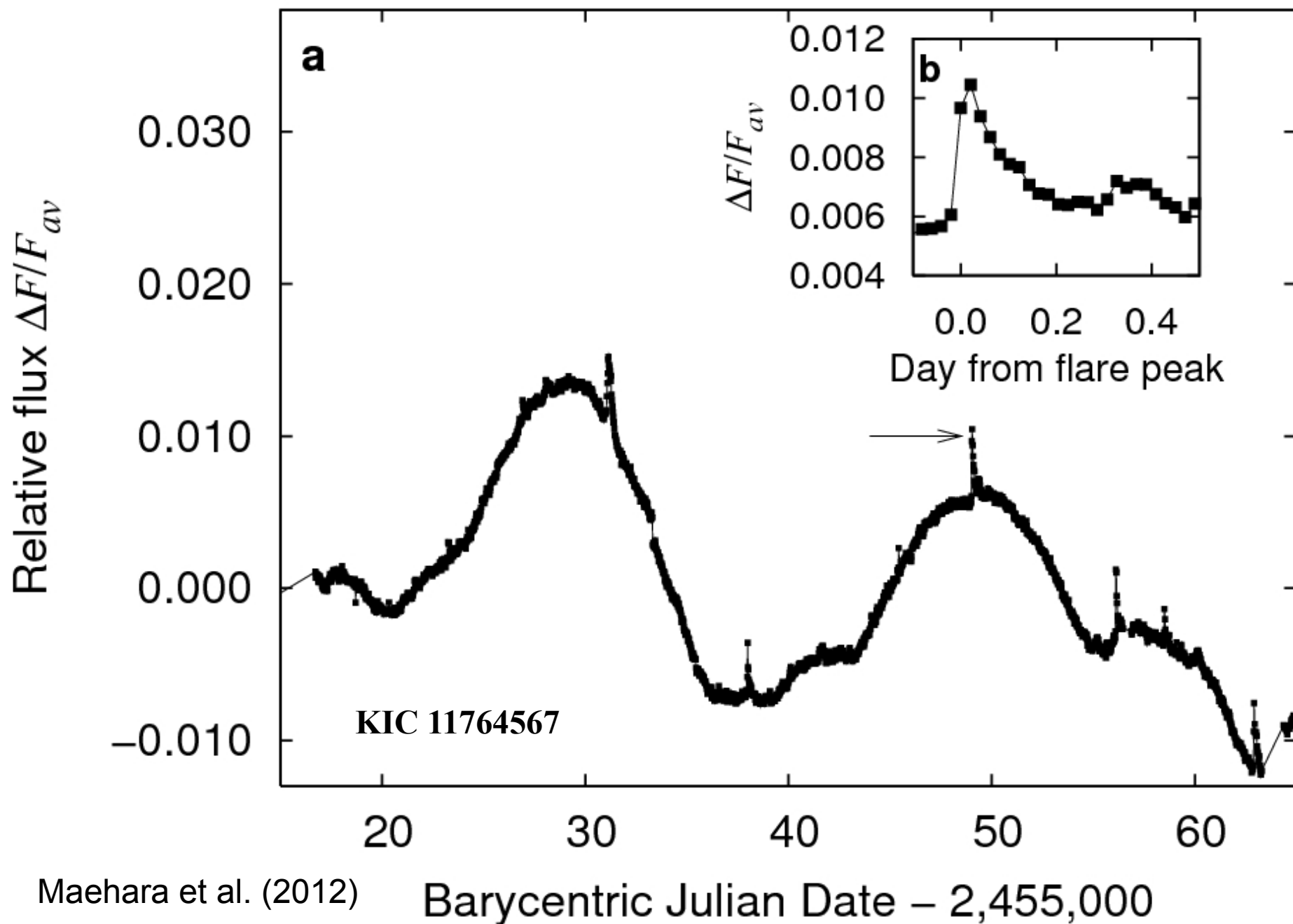
April 05, 2012:
MAST is now the Mikulski Archive for Space Telescopes

2.0

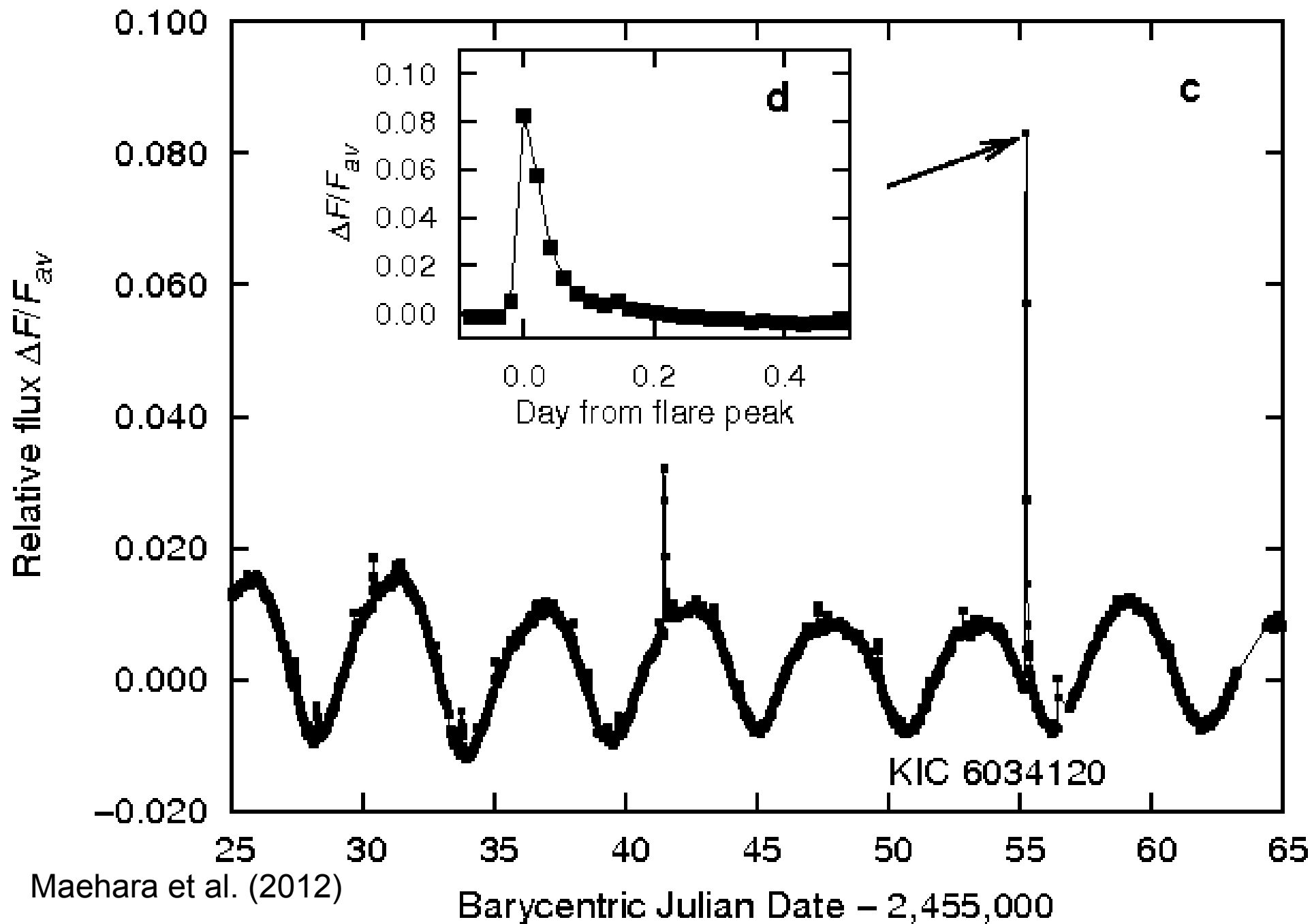
Missions

Hubble
Hubble Legacy Archive
HSTonline
DSS
GALEX

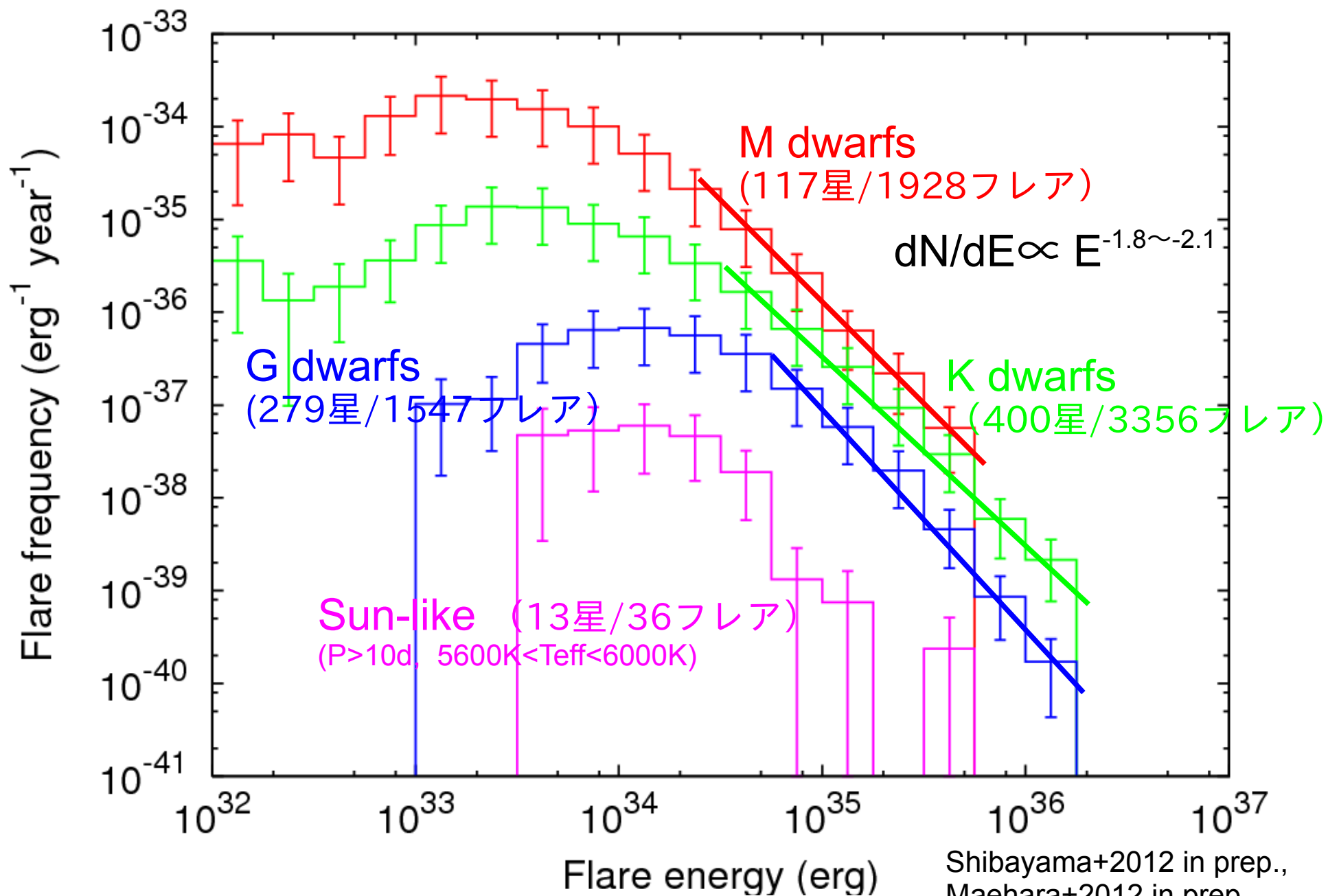
スーパーフレアの例



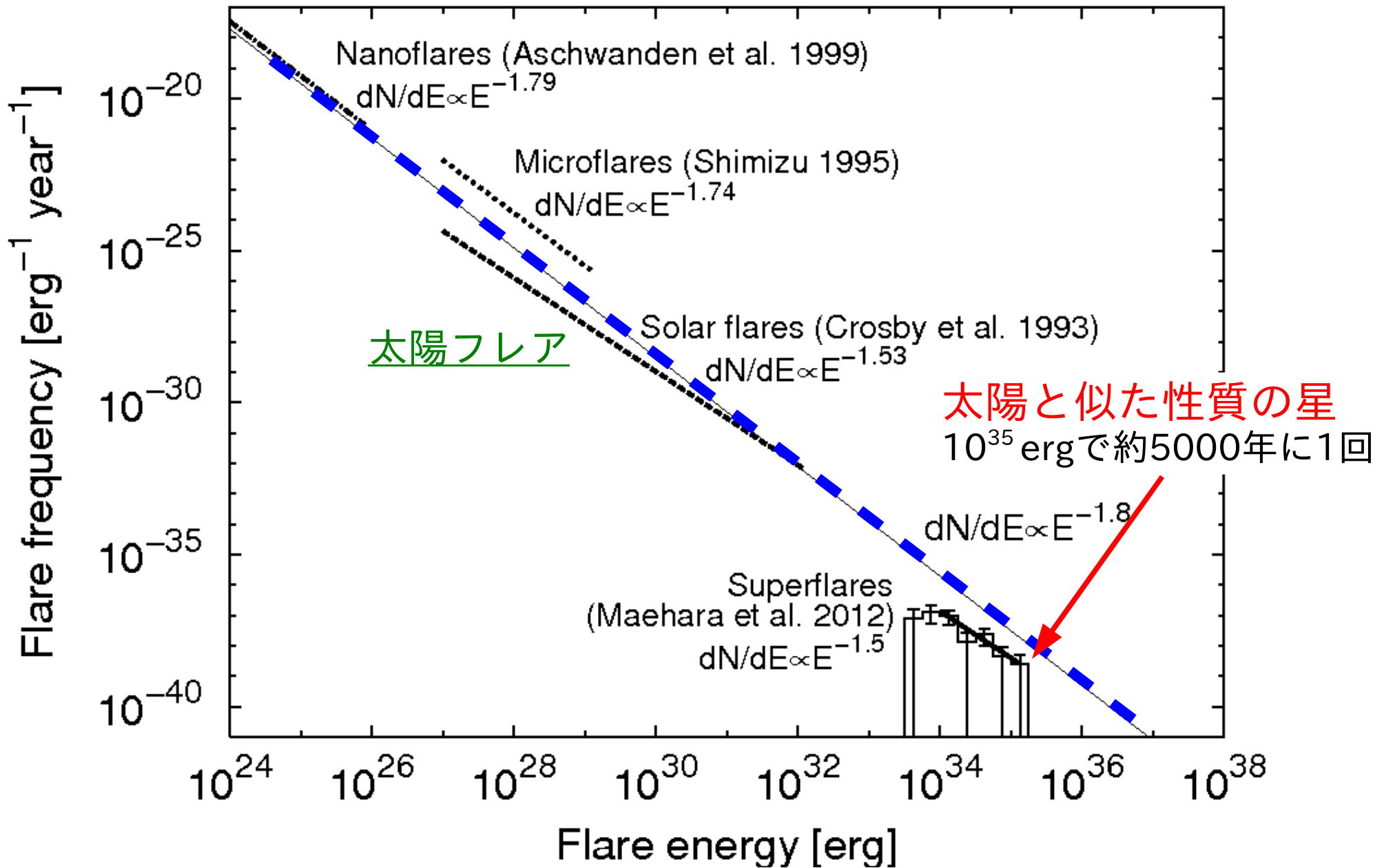
スーパーフレアの例



Energy-frequency distribution

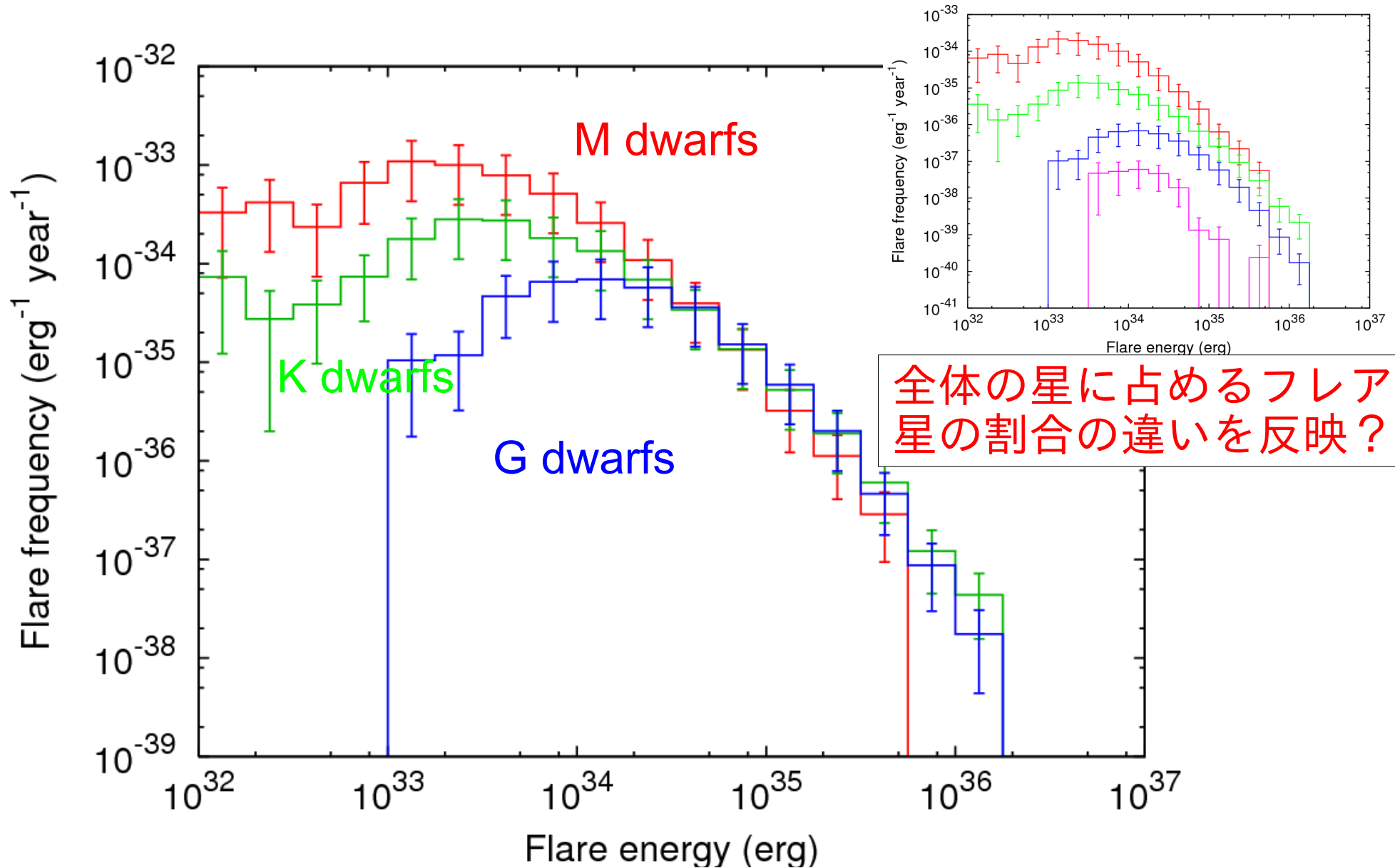


発生頻度 (太陽フレアとの比較)

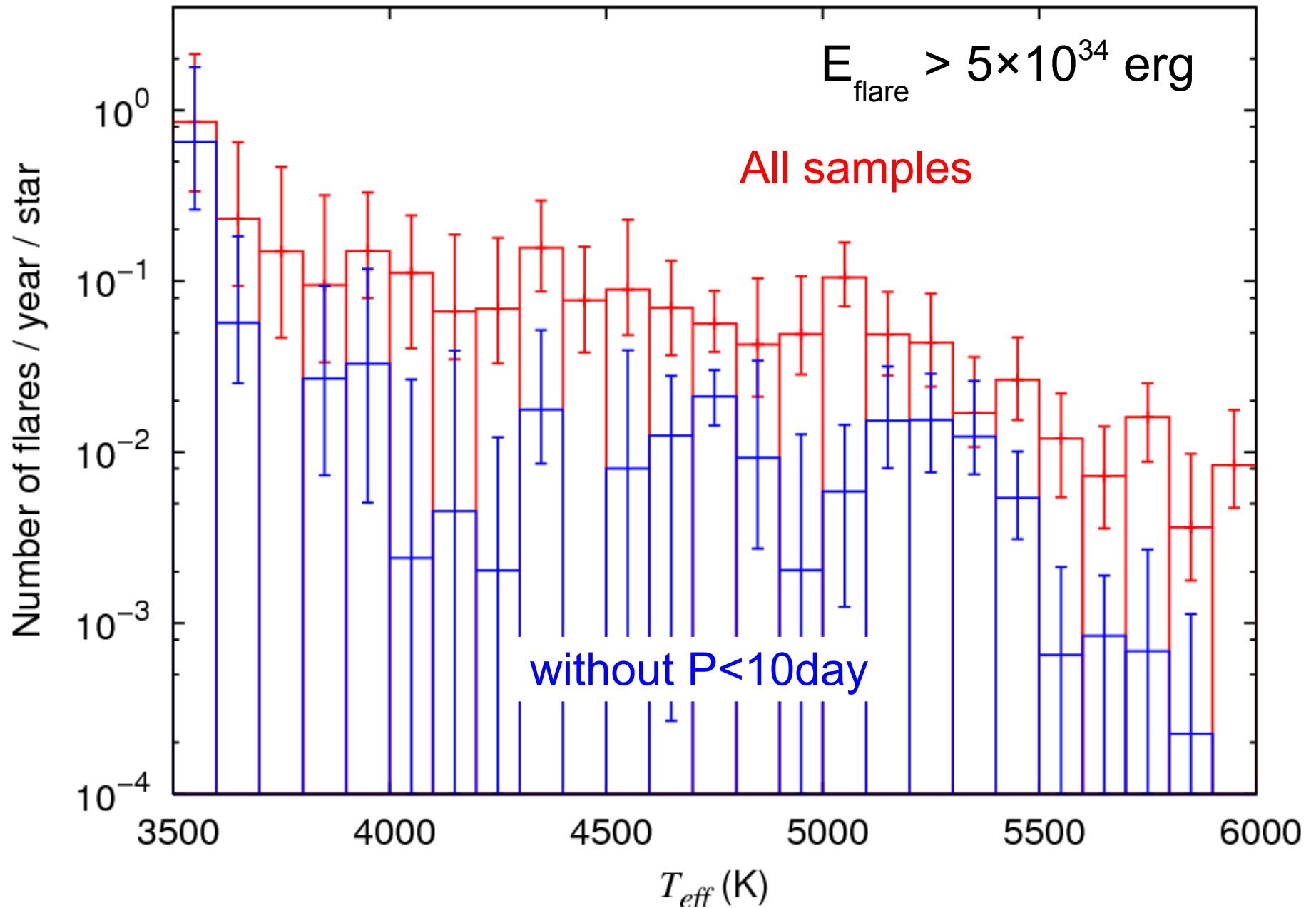


フレア星のみの発生頻度

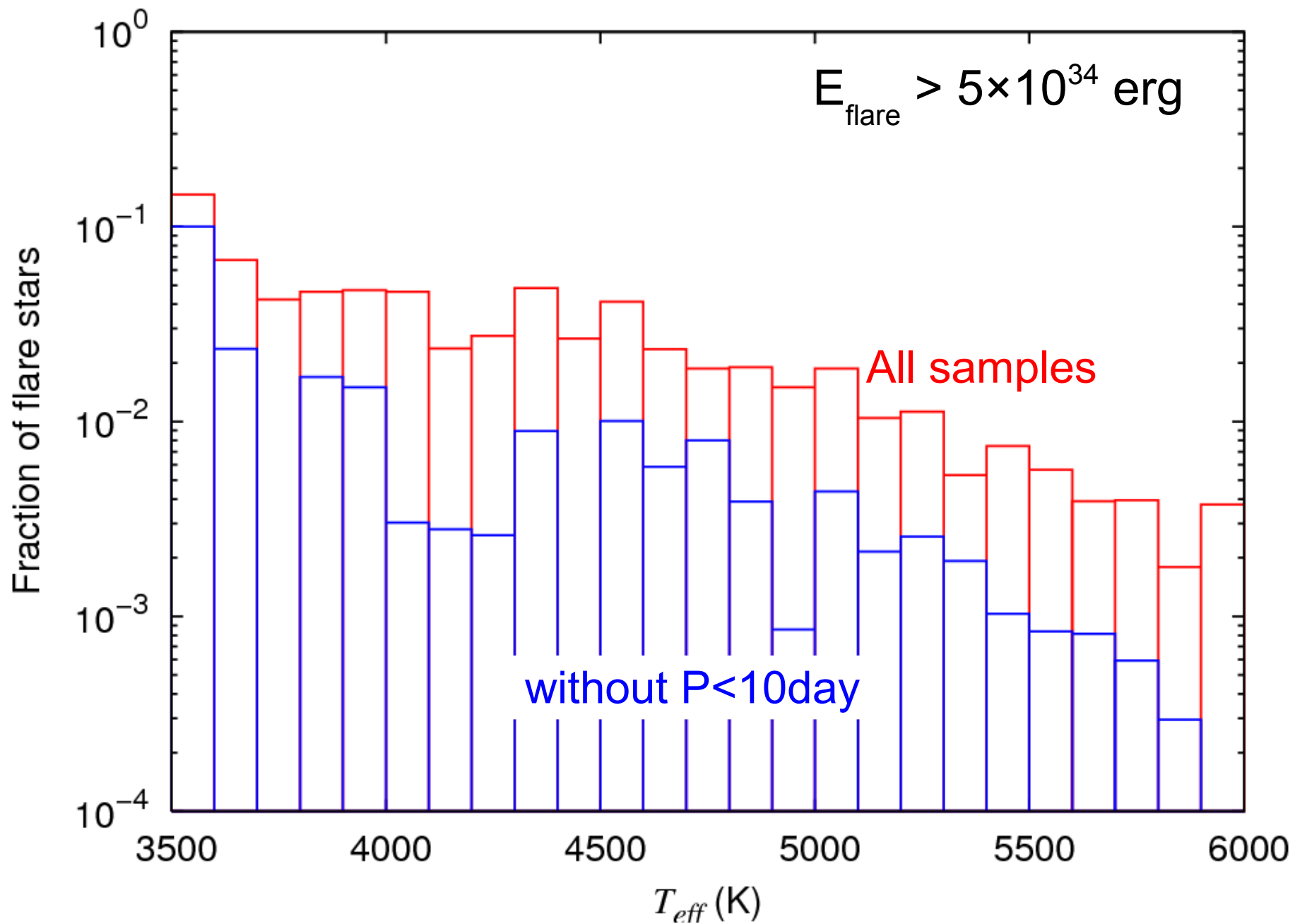
- 星の温度による差はほとんどない



T_{eff} vs. flare frequency

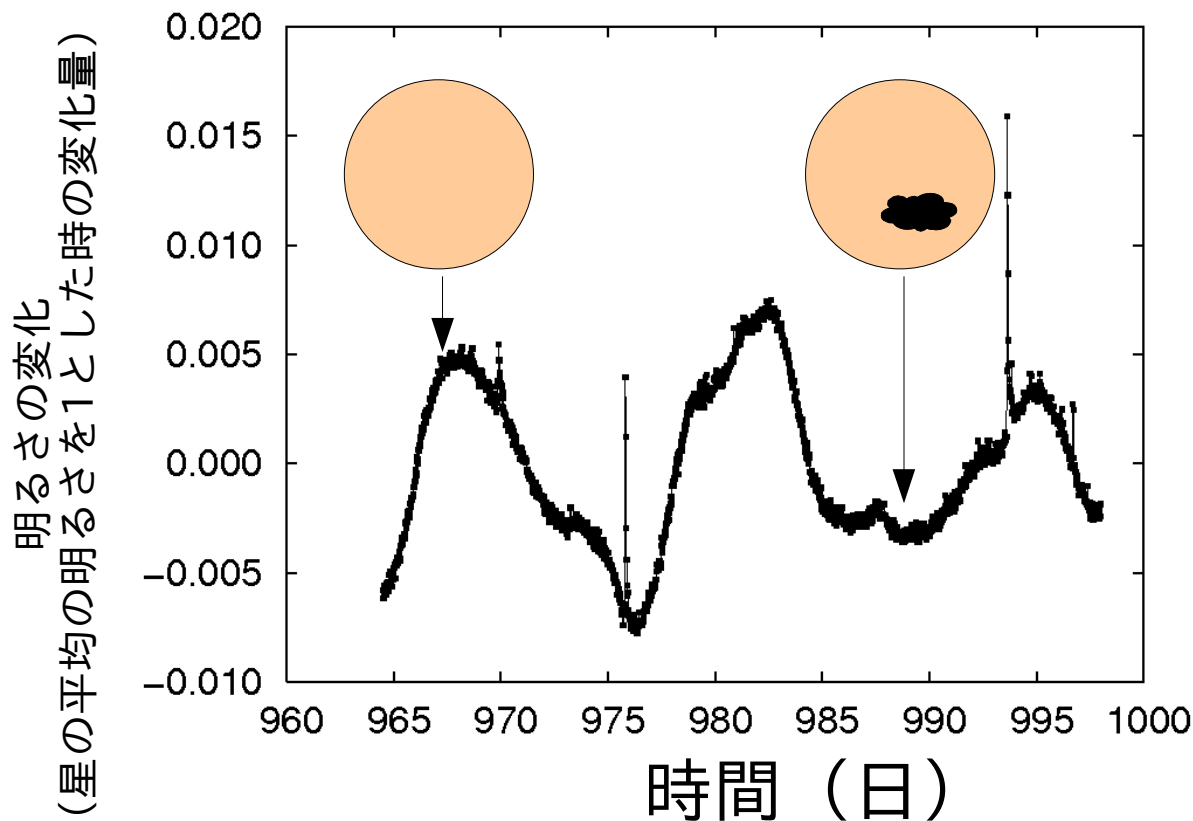


T_{eff} vs. fraction of flare stars

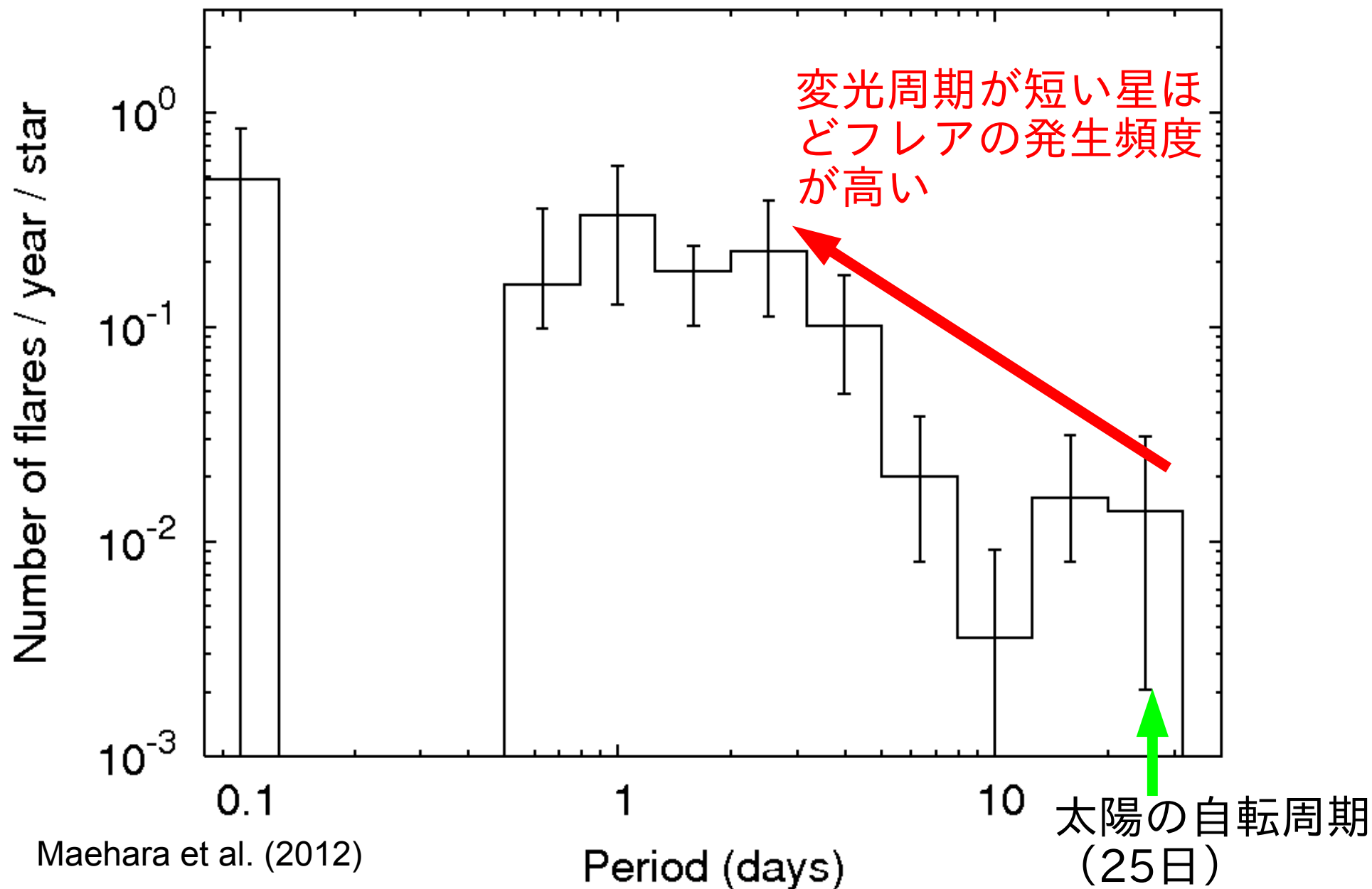


準周期的な星の明るさの変動と黒点

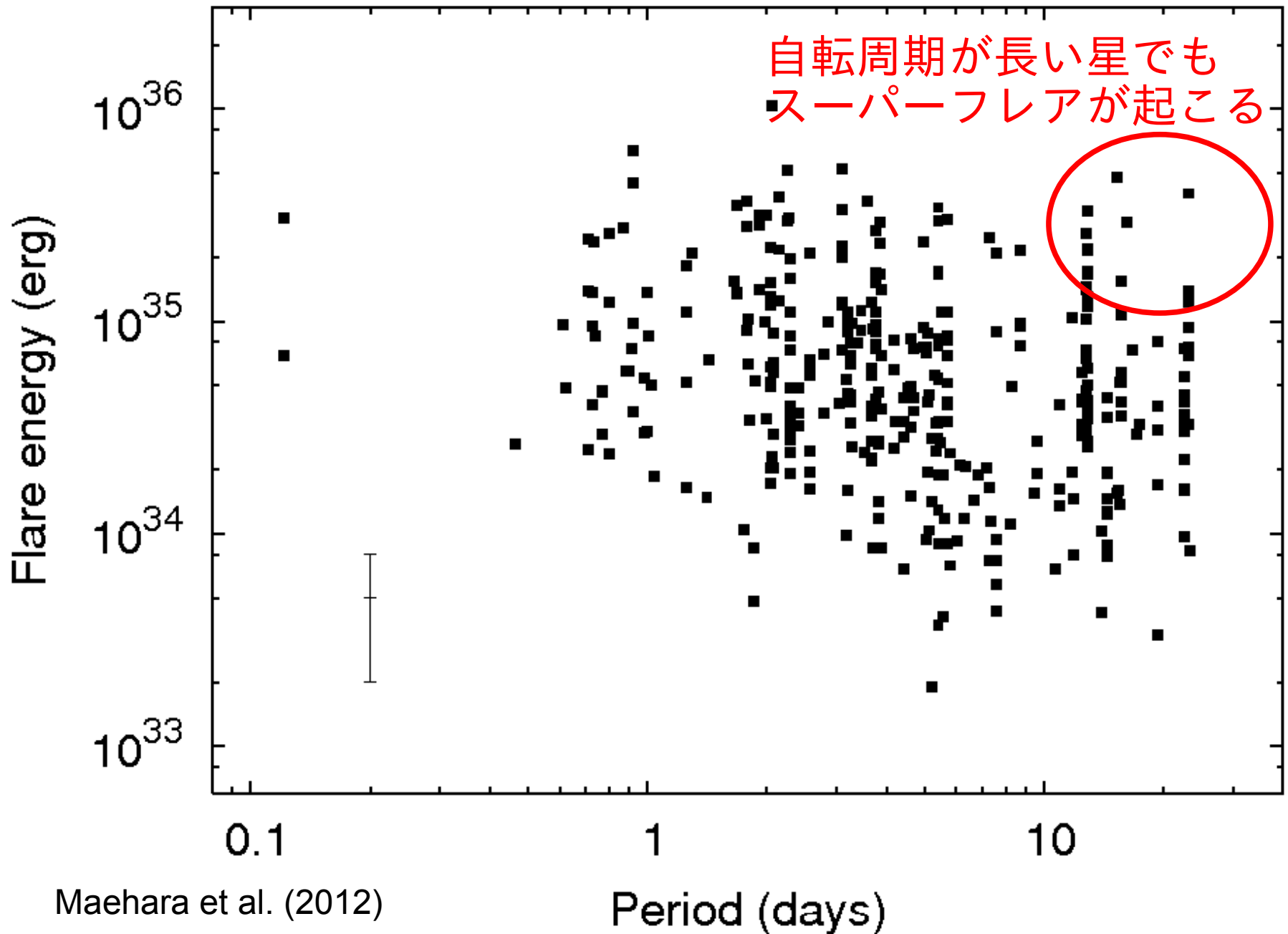
- 明るさの変動 = 黒点のある星が自転するために生じていると仮定
 - 変動の周期 → 星の自転周期を反映
 - 変動の振幅 → 星の表面にある黒点の面積を反映



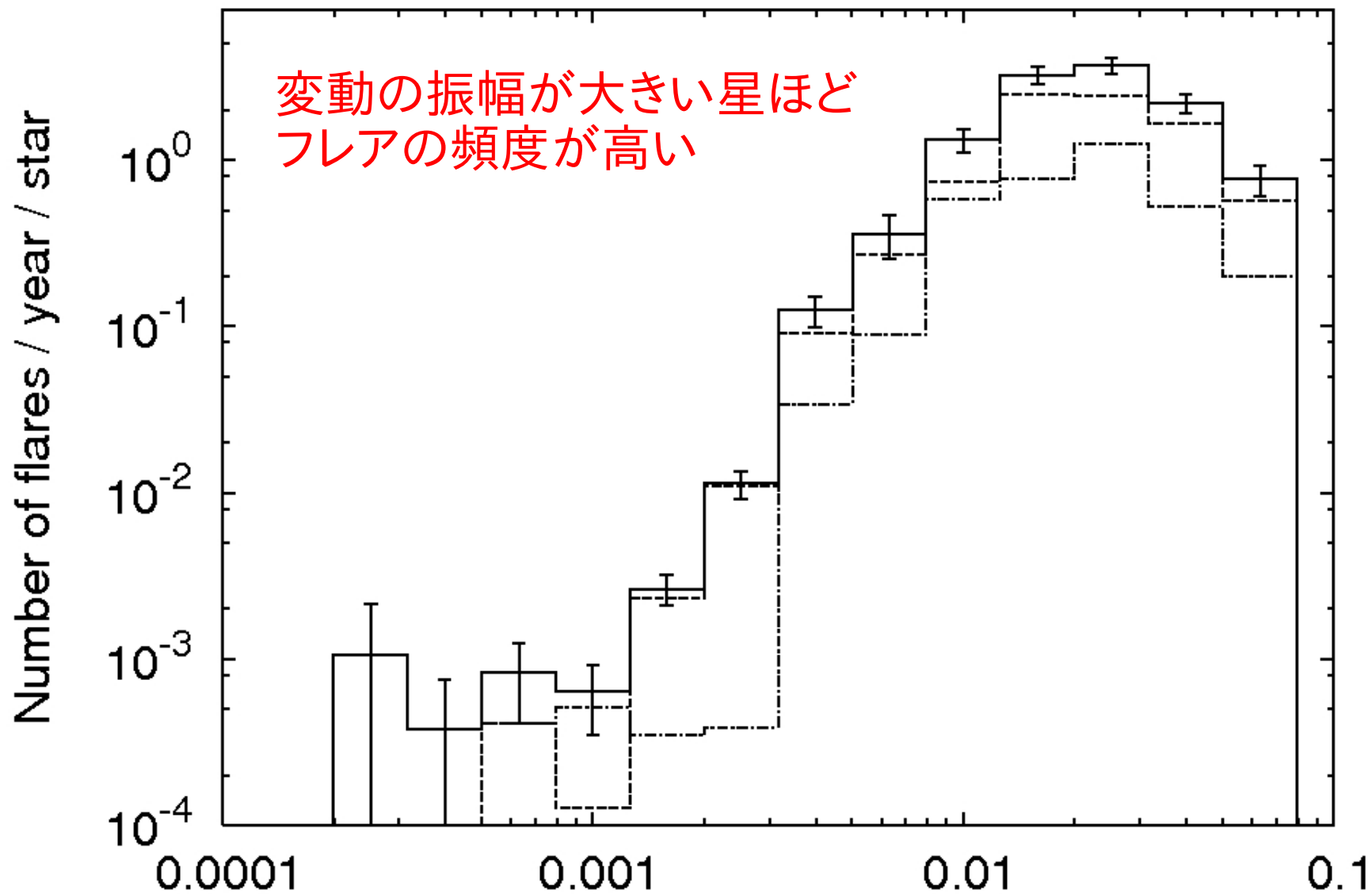
星の変光周期とフレアの発生頻度



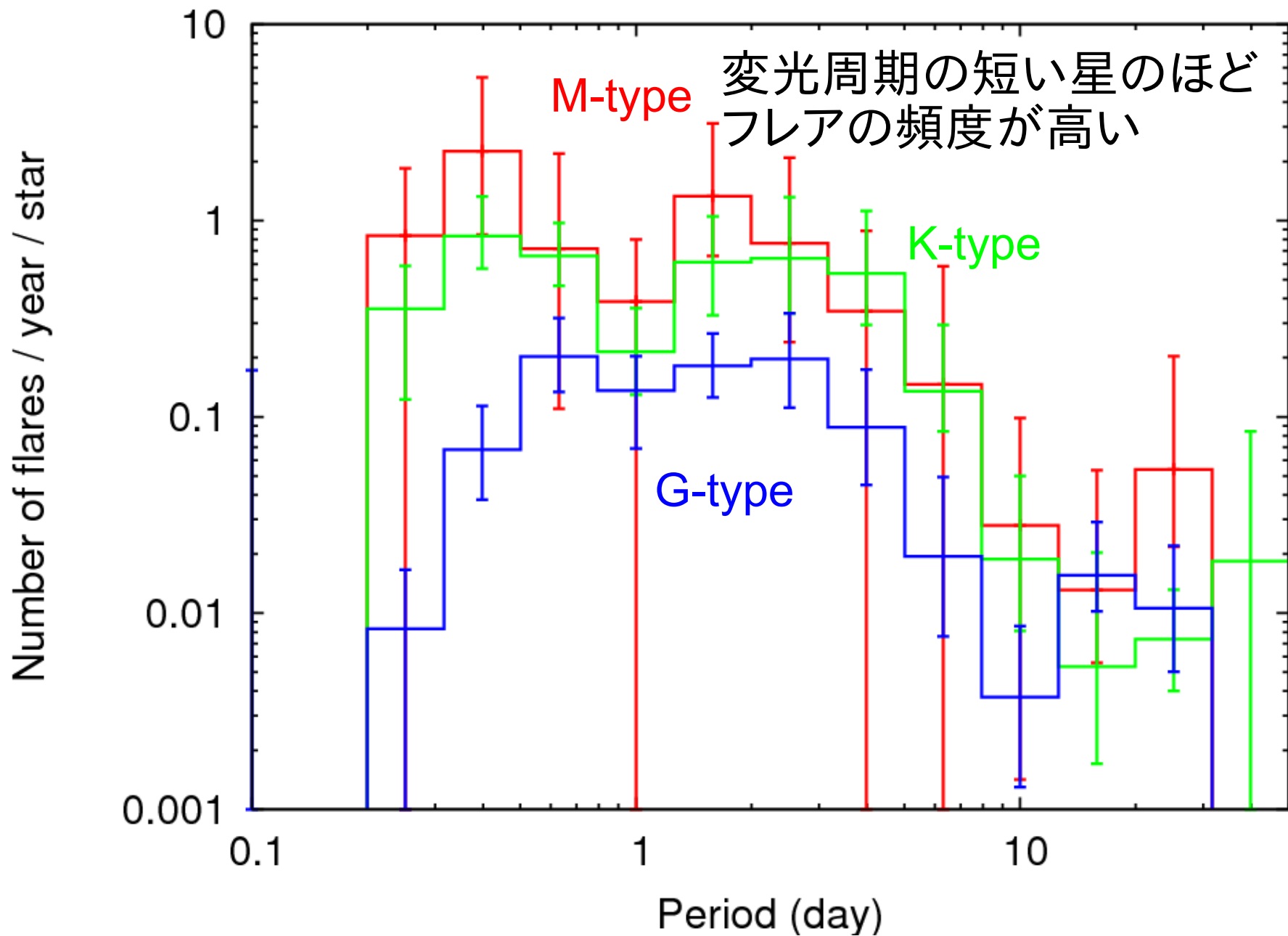
自転周期とフレアのエネルギー



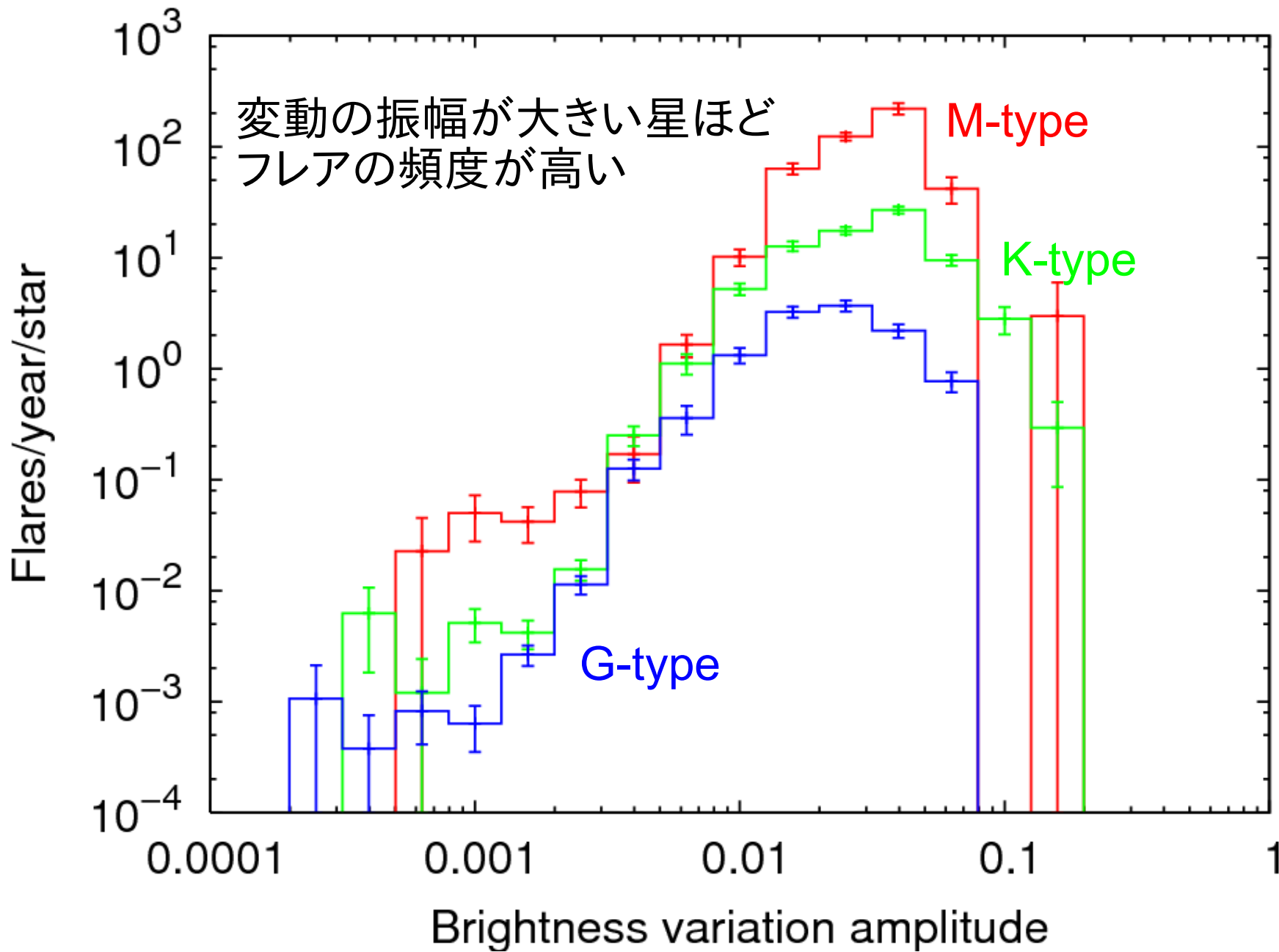
星の変動振幅とフレアの頻度



フレアの発生頻度と星の変光周期

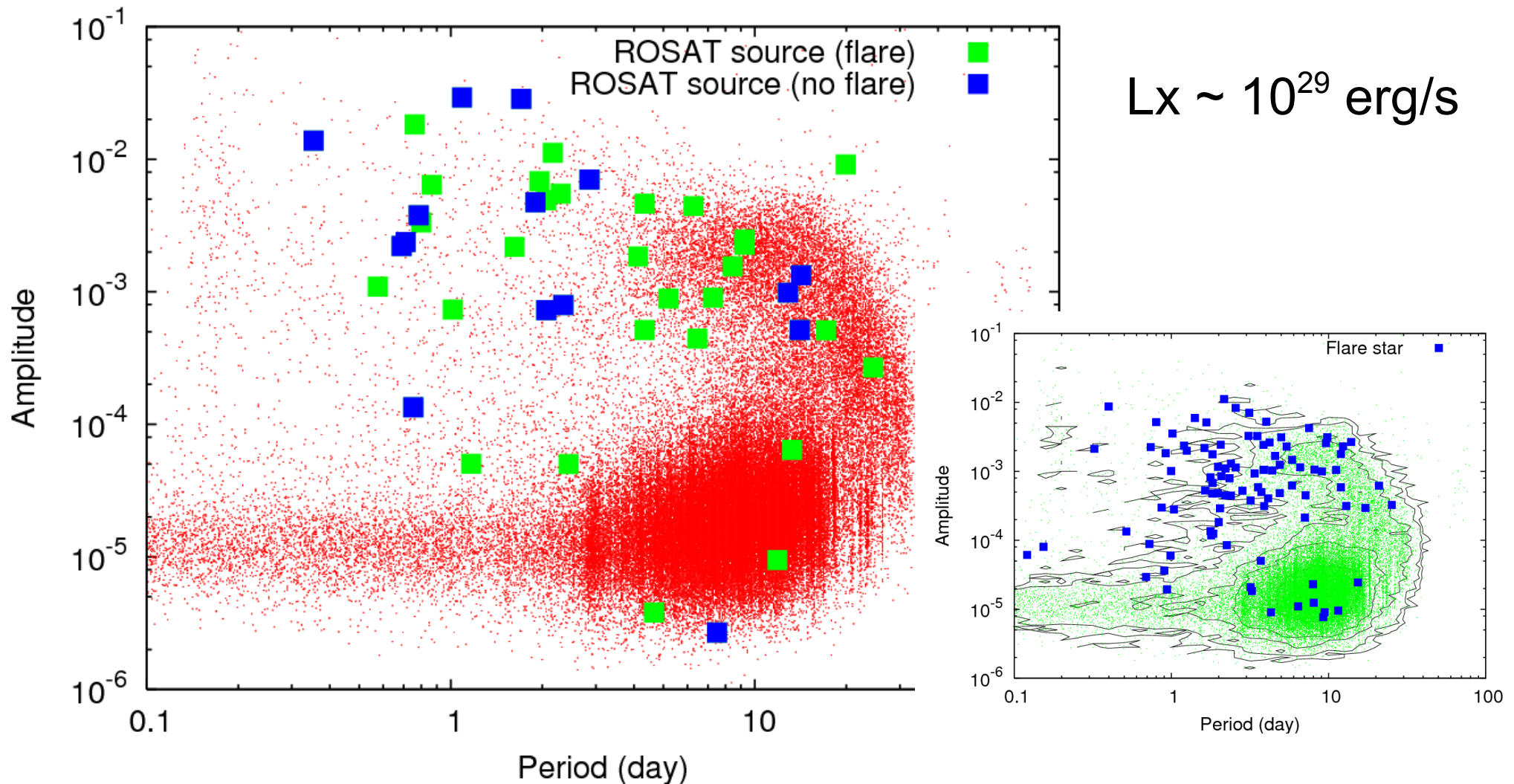


光度変化の振幅とフレアの頻度



X線の検出があるG型星

- Kepler Input CatalogとROSAT catalogを比較
 - 30"以内にX線源があるG型星を選択（43個）
 - 選択された星のフレアの有無をチェック（31個はフレアあり）



スーパーフレアの頻度と星の性質

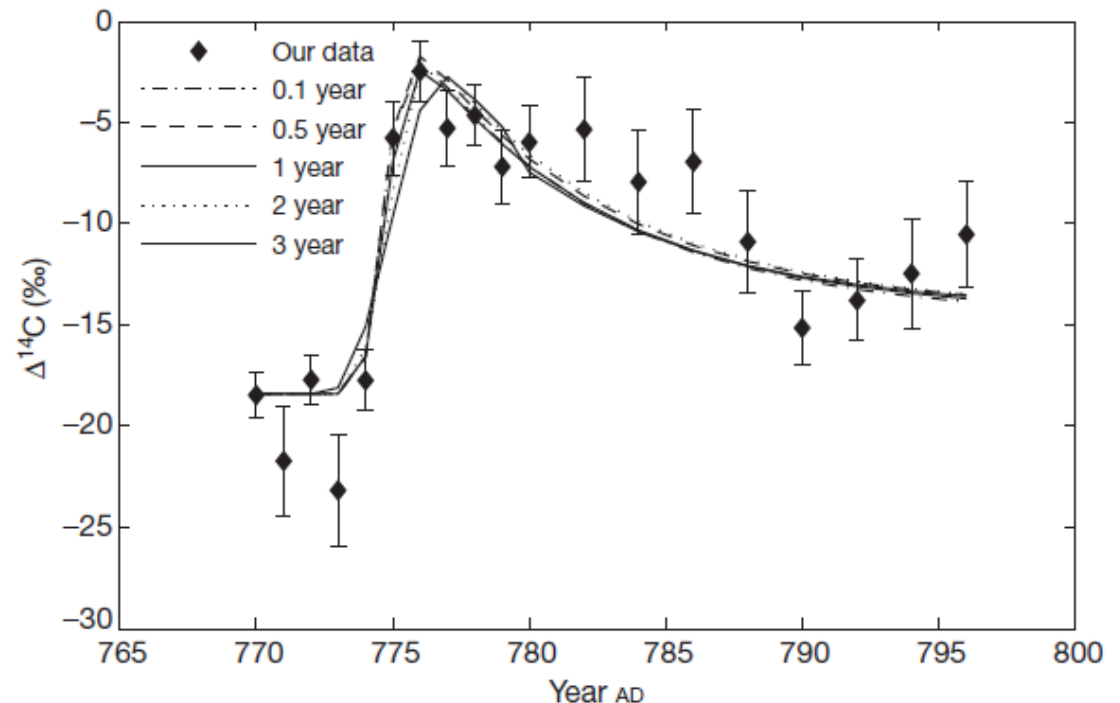
- 星の温度、変光周期、変光の振幅に依存
 - 温度が低い星ほど頻度が高い
 - 変光周期の短い星ほど頻度が高い
 - 変光の原因が自転であれば、自転周期の短い星ほどフレアの頻度が高い
 - 最大のフレアのエネルギーは周期には依存しない
 - 変光振幅の大きい星ほど頻度が高い
 - 変光の原因が自転 → 振幅は黒点の面積を反映
 - 大きな黒点のある星では活発なフレア活動がある
- X線源と同定できる星とフレア星の分布はよく一致

スーパーフレア研究の今後の課題

- **太陽でスーパーフレアは起こるのか？**
 - スーパーフレアを起こす星は本当に太陽とそっくりな星なのか？
 - スーパーフレアを起こす星の高分散分光
 - 8月6～8日にすばる/HDSで分光観測を予定
 - 彩層活動性の検証、 $v \sin i$ の測定、radial velocityの変化の確認
 - 太陽の数値シミュレーション
 - 巨大黒点が形成可能なのか
 - 過去に起きたスーパーフレアの痕跡を探す
 - 南極などの氷の中の大気成分、[木の年輪](#)など
 - 古文書からオーロラや巨大黒点の記録を探す

過去の宇宙線量の推定

- 屋久杉の年輪から ^{14}C の量の変化を測定
 - 774-775年に ^{14}C の量が増えていた
 - 大量の宇宙線が来たことを示唆
- 太陽フレアだとすると 10^{35} erg 程度
 - 地球の近くで起こった超新星爆発の可能性もある



最後に

- 大規模 + 時間方向のサーベイ
 - 多数の天体について、明るさの変動に関する情報が得られる
- 巨大なサンプル数 × 長い観測期間のデータ
 - = 膨大なデータ
 - 発生頻度が低く、観測可能性が小さいイベントでも観測にかかる
 - 変光の周期や振幅・発生頻度など、様々な観測量についての統計解析など、個々の天体の観測だけでは難しい研究も可能に