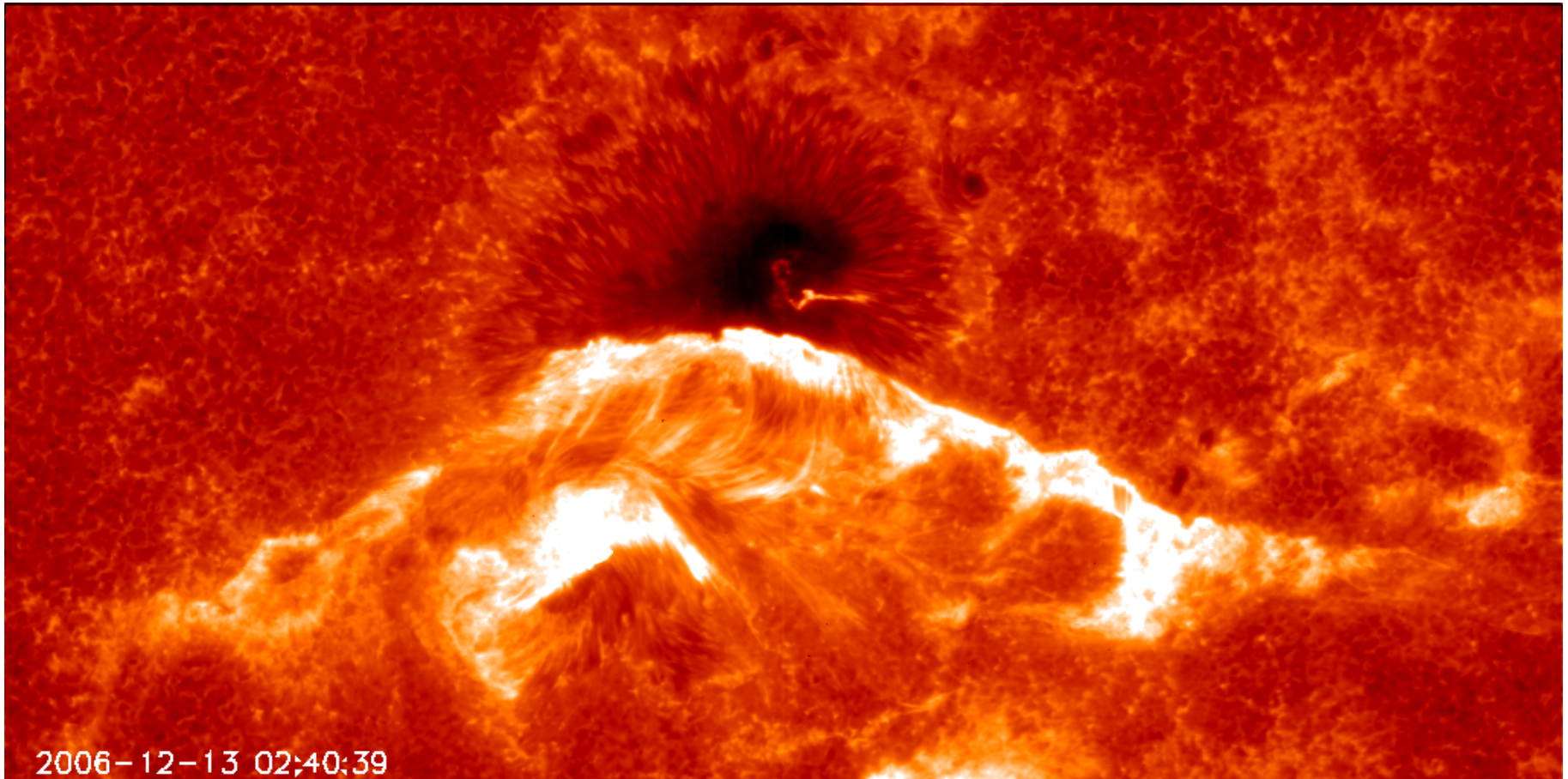


# 広視野サーベイ観測による 恒星フレアの観測可能性

前原裕之（京都大学）

# 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

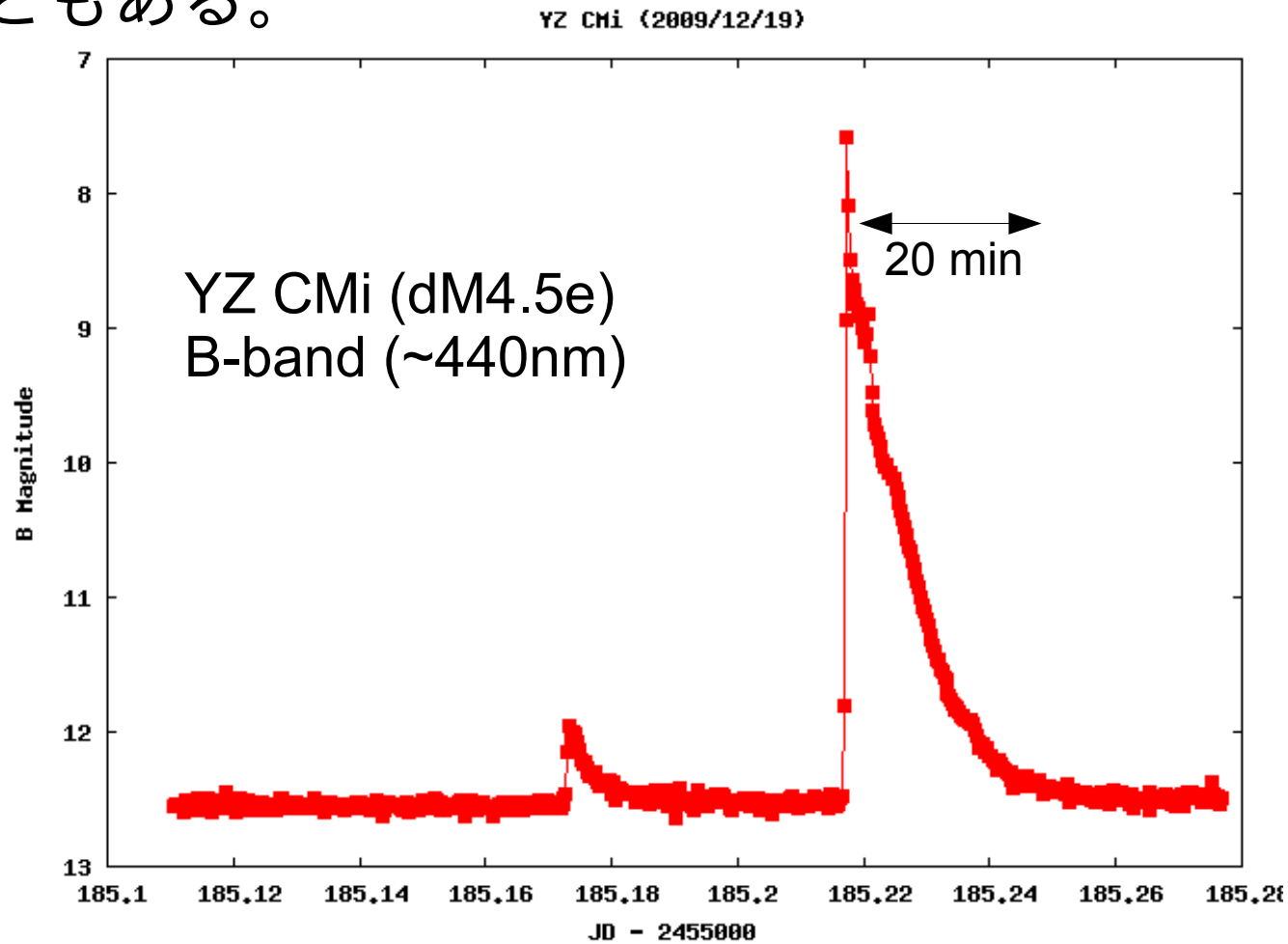


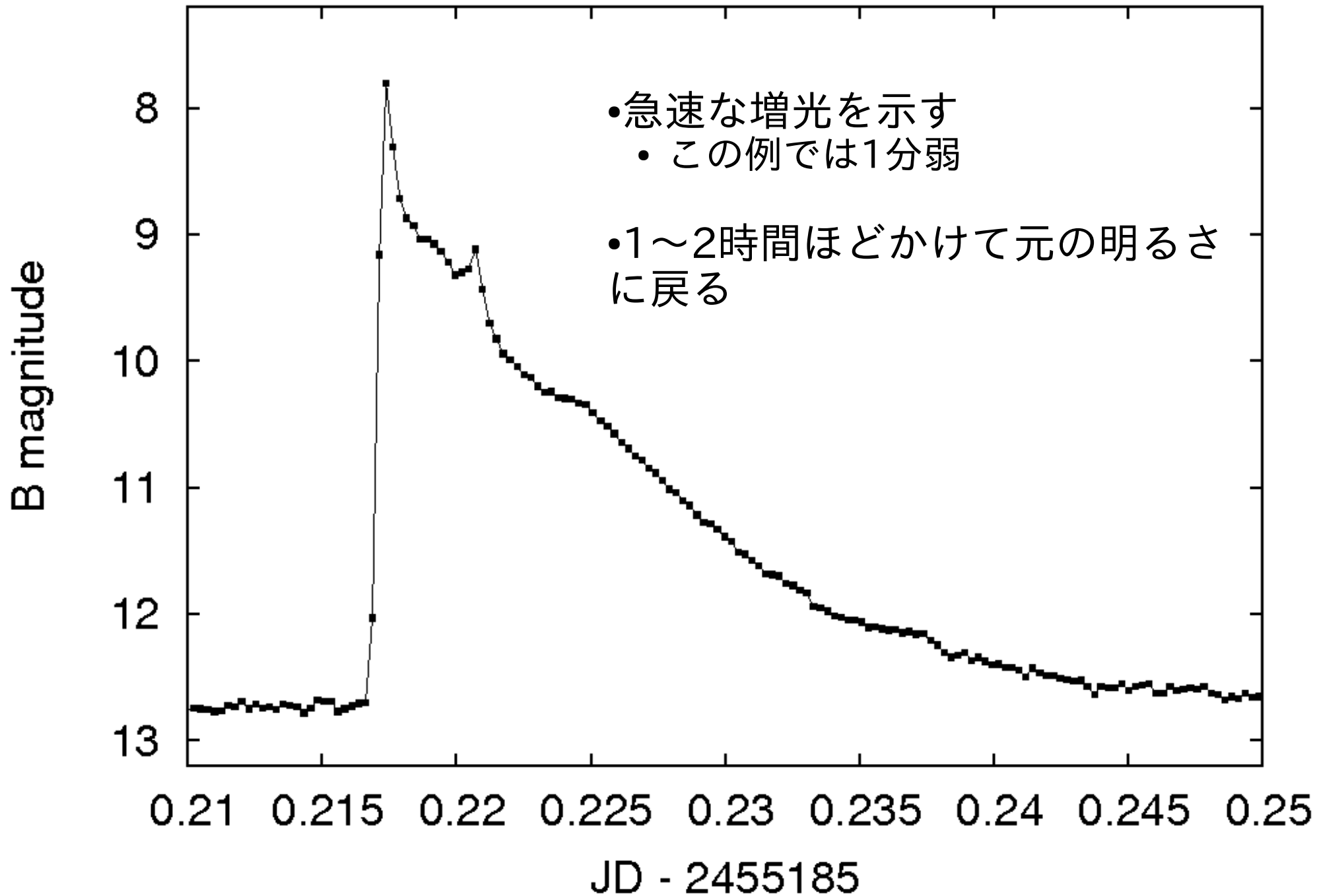
2006-12-13 02:40:39

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

# フレア星

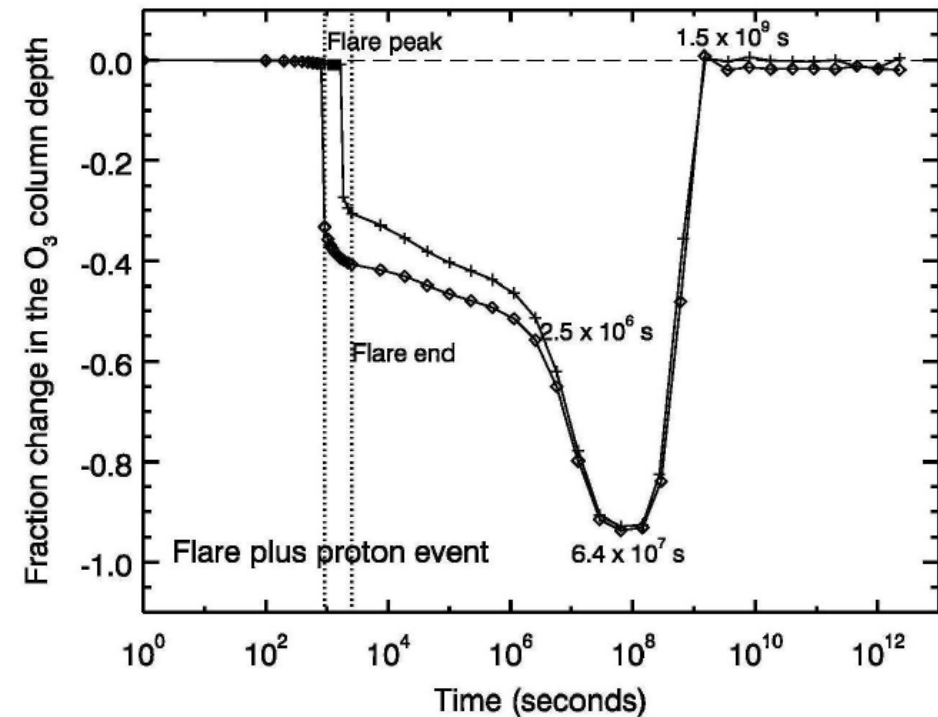
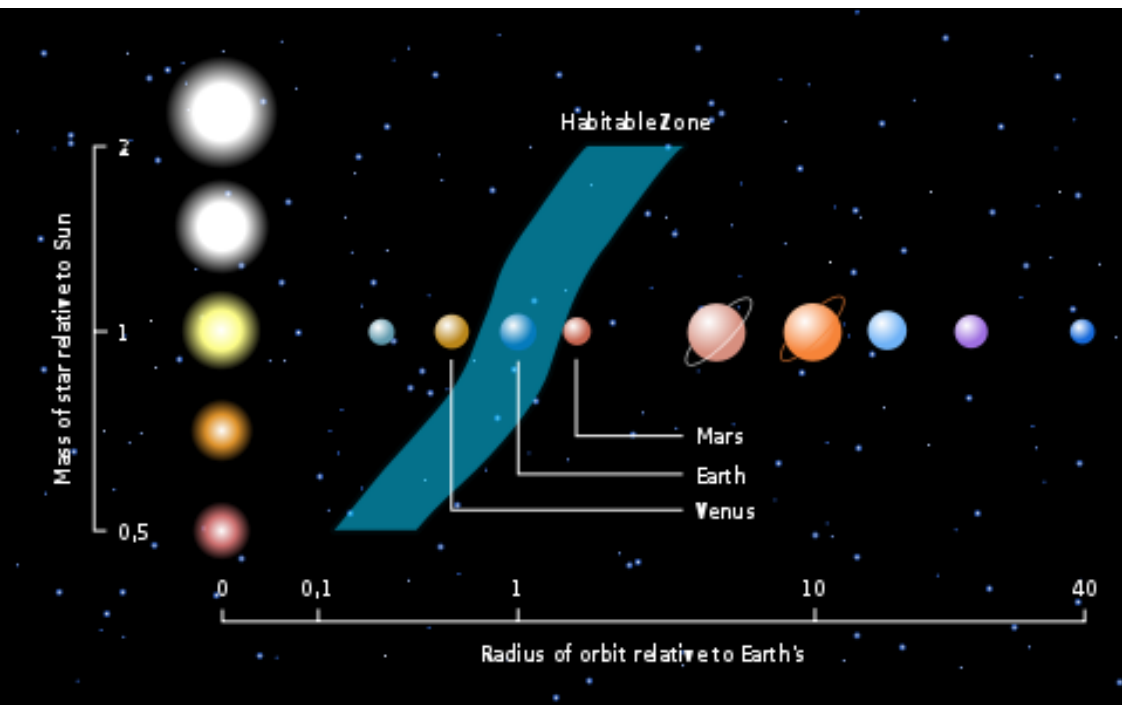
- 恒星フレアの研究は主にM型やK型星が対象
  - 星が暗いのでフレアの検出が容易
  - 巨大フレアではU・Bバンドでは星のfluxの100倍以上になることもある。





# M型星とハビタブルな惑星

- Habitable zone around M dwarfs:  $\sim 0.1$  A.U.
  - 星が暗いのでハビタブルゾーンが星に近い
  - フレアによるUVや高エネルギーの荷電粒子による大気の影響が太陽型星の周辺の惑星よりもずっと大きい



Segura et al. (2010)

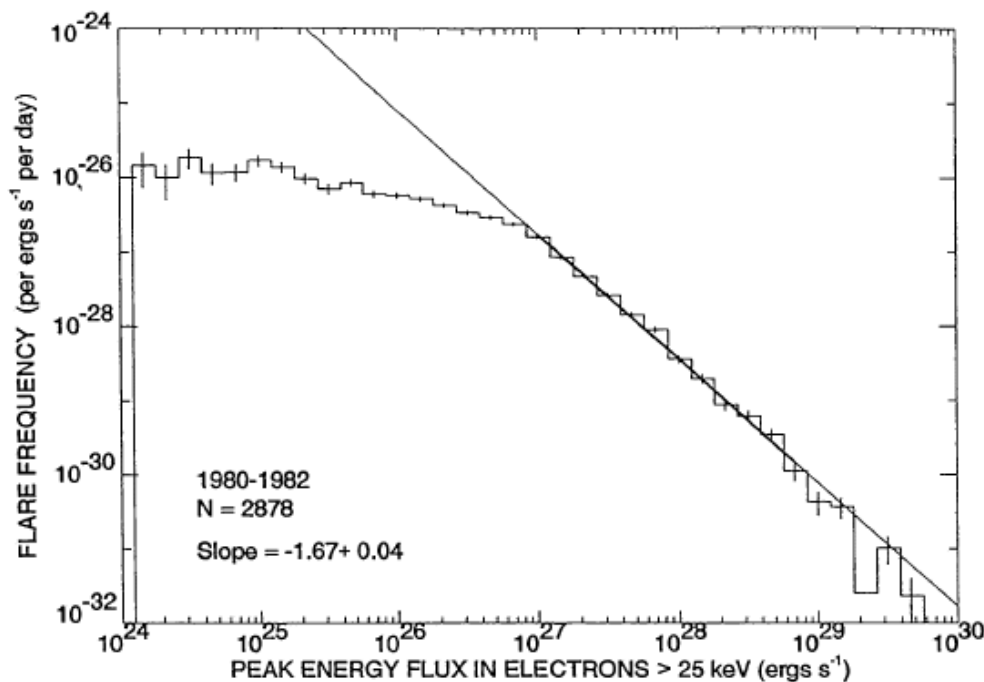
# サーベイ観測と恒星フレア

- 個々のフレアを詳しく観測するのは難しい
  - 複数台で広域をカバーし、高時間分解能の撮像をすれば可能かも
- フレア星の割合やフレアの頻度を求めることは可能
  - 非常に多くのサンプルがあれば星の活動性と星の性質（色や固有運動 etc.）の関連が調べられる。

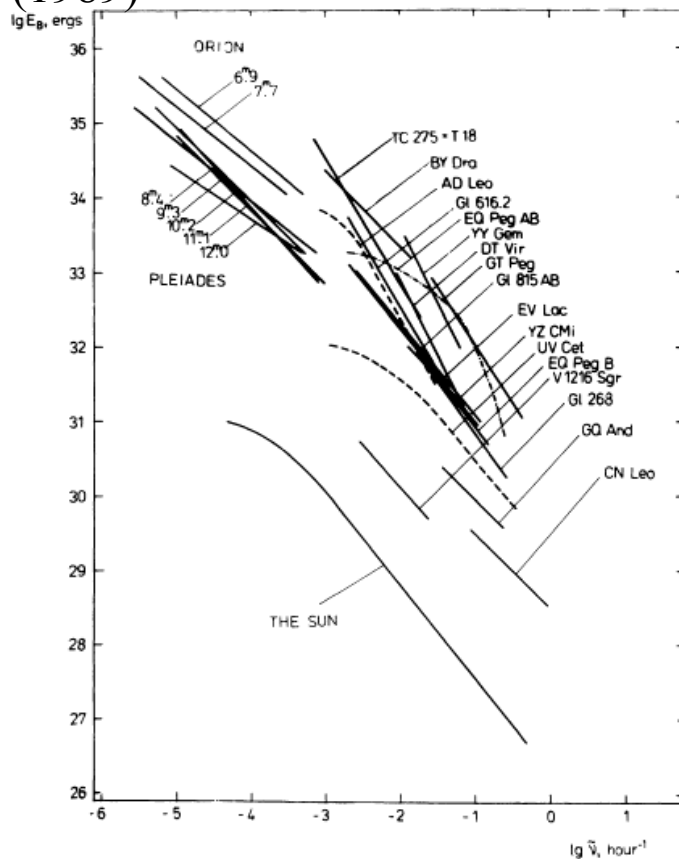
# フレアのエネルギーと頻度

- 解放されるエネルギーが大きいフレアほど頻度が低い
  - 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 :  $dN/dE \propto E^{-1.4 \sim -2.4}$

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



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



# フレア星の割合とフレアの頻度

- どのくらいのM型星がフレア活動を示すか？
  - 観測可能なフレアの頻度は？
  - あるM型星を観測した時にフレアが観測される確率

$$P_{\text{flare}} = \tau_{\text{flare}} \times f_{\text{flare}}$$

–  $\tau$  : フレアの継続時間

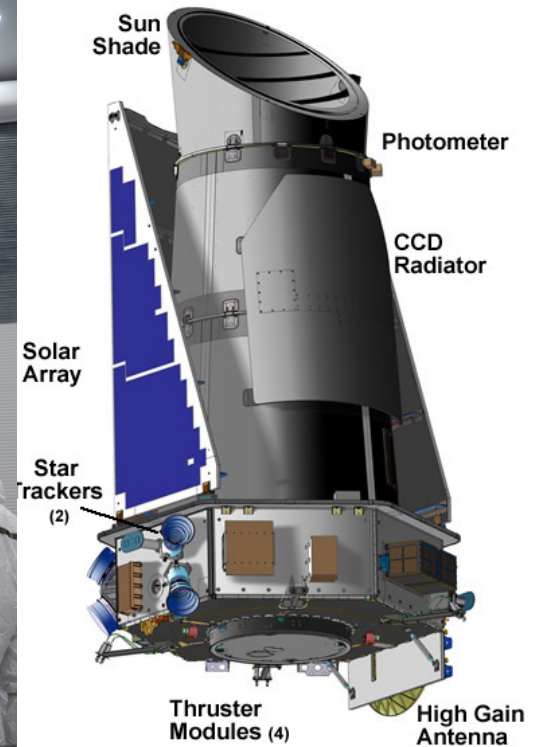
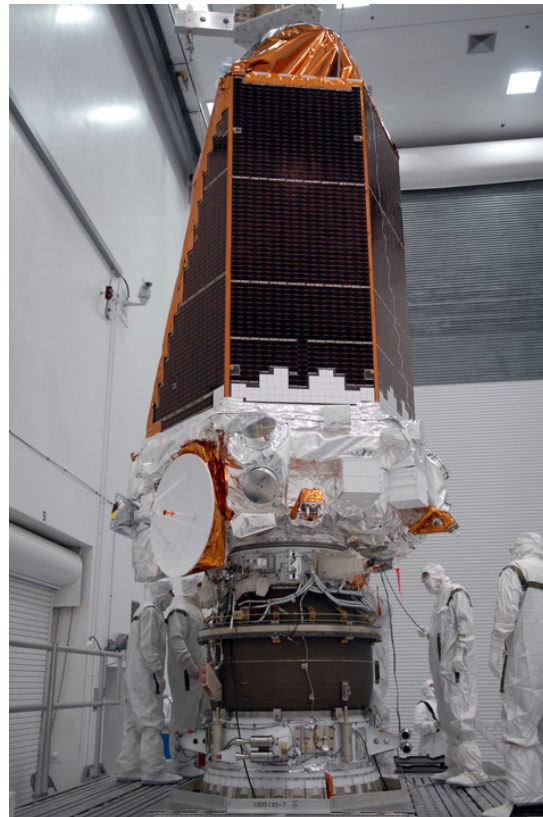
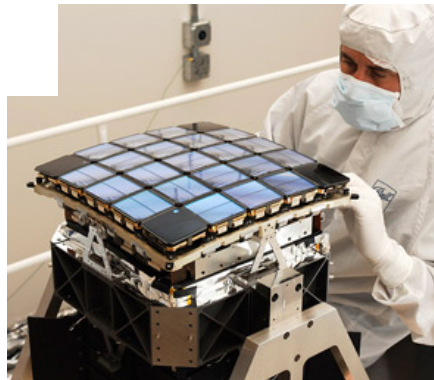
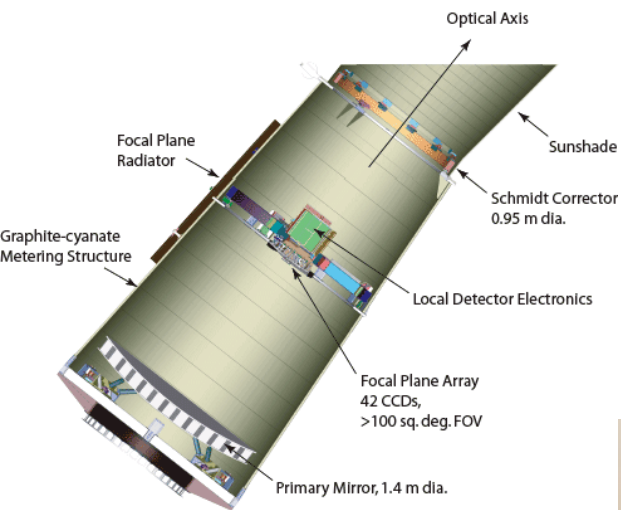
–  $f$  : 平均のフレアの頻度

- ケプラー衛星のデータを用いた解析と、SDSSのデータを使った先行研究の例を紹介
- Catalina Real-time Transient Surveyの結果との比較



# 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



# ケプラー衛星の観測領域

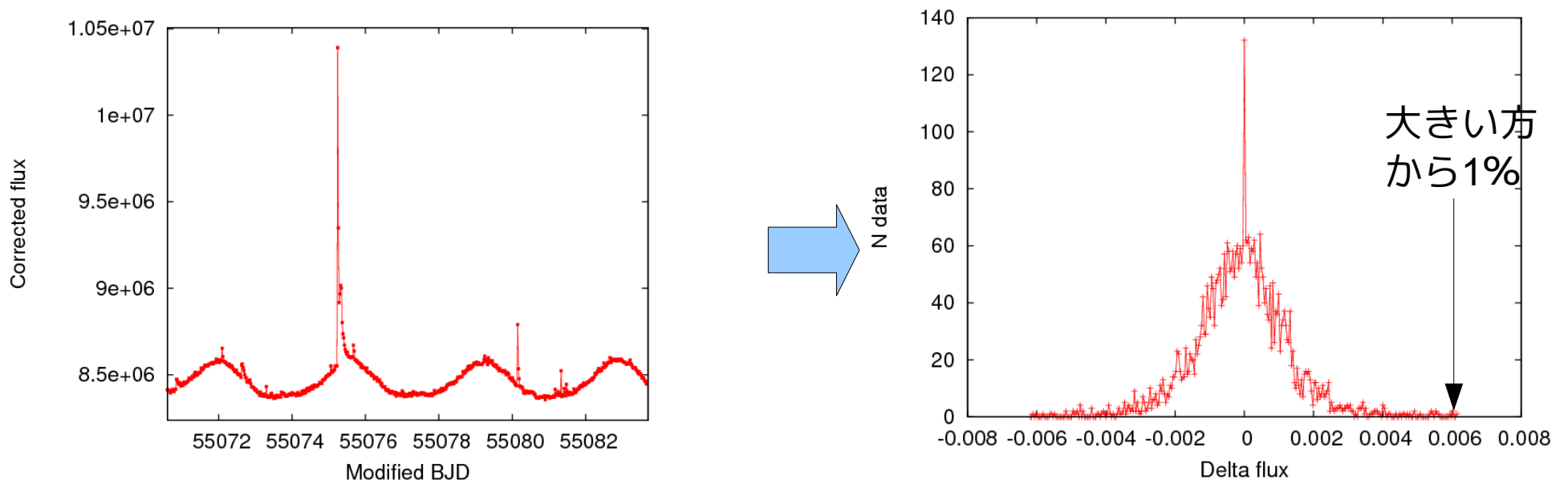


# Number of samples

- M dwarfs
  - $\sim 3500 < T_{\text{eff}} < 3900\text{K}, \log g > 4.0$ :  $\sim 1,800$
- K dwarfs
  - $3900 < T_{\text{eff}} < 5100\text{K}, \log g > 4.0$ :  $\sim 22,000$
- G dwarfs
  - $5100 < T_{\text{eff}} < 6000\text{K}, \log g > 4.0$ :  $\sim 83,000$
- F dwarfs
  - $6000 < T_{\text{eff}} < 7300\text{K}, \log g > 4.0$ :  $\sim 26,000$

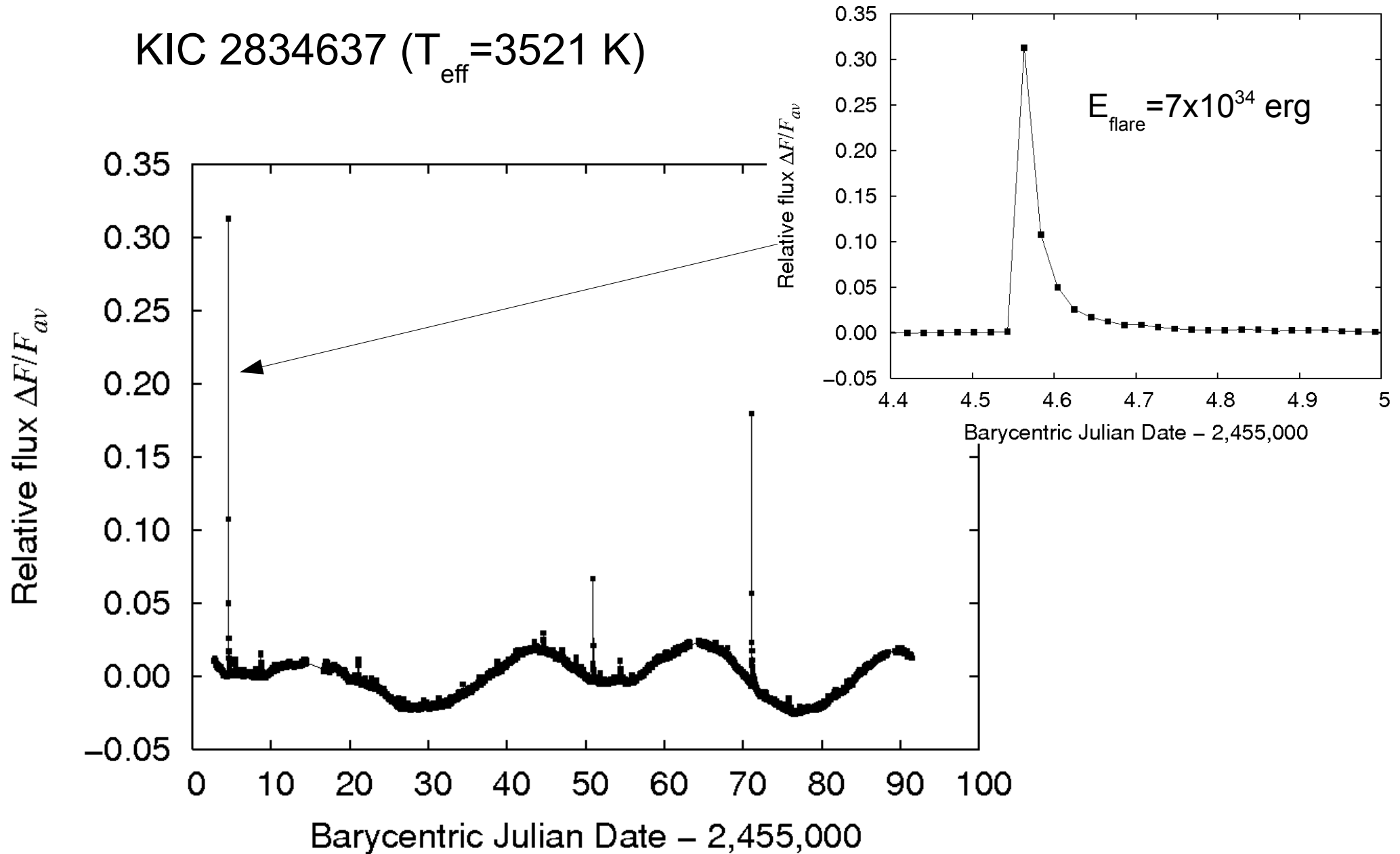
# フレア検出方法

- 連続する2点間の星の明るさの差分を利用
  - 全ての連続する2点間の明るさの差の分布を求める
  - 明るさの差が大きい方から1%に相当する値の3倍を閾値として設定
  - 閾値を越える変動をフレア候補と判定
- フレア候補や天体の情報をデータベース化
  - 他の天体カタログのとの相互検索や統計処理が容易になる



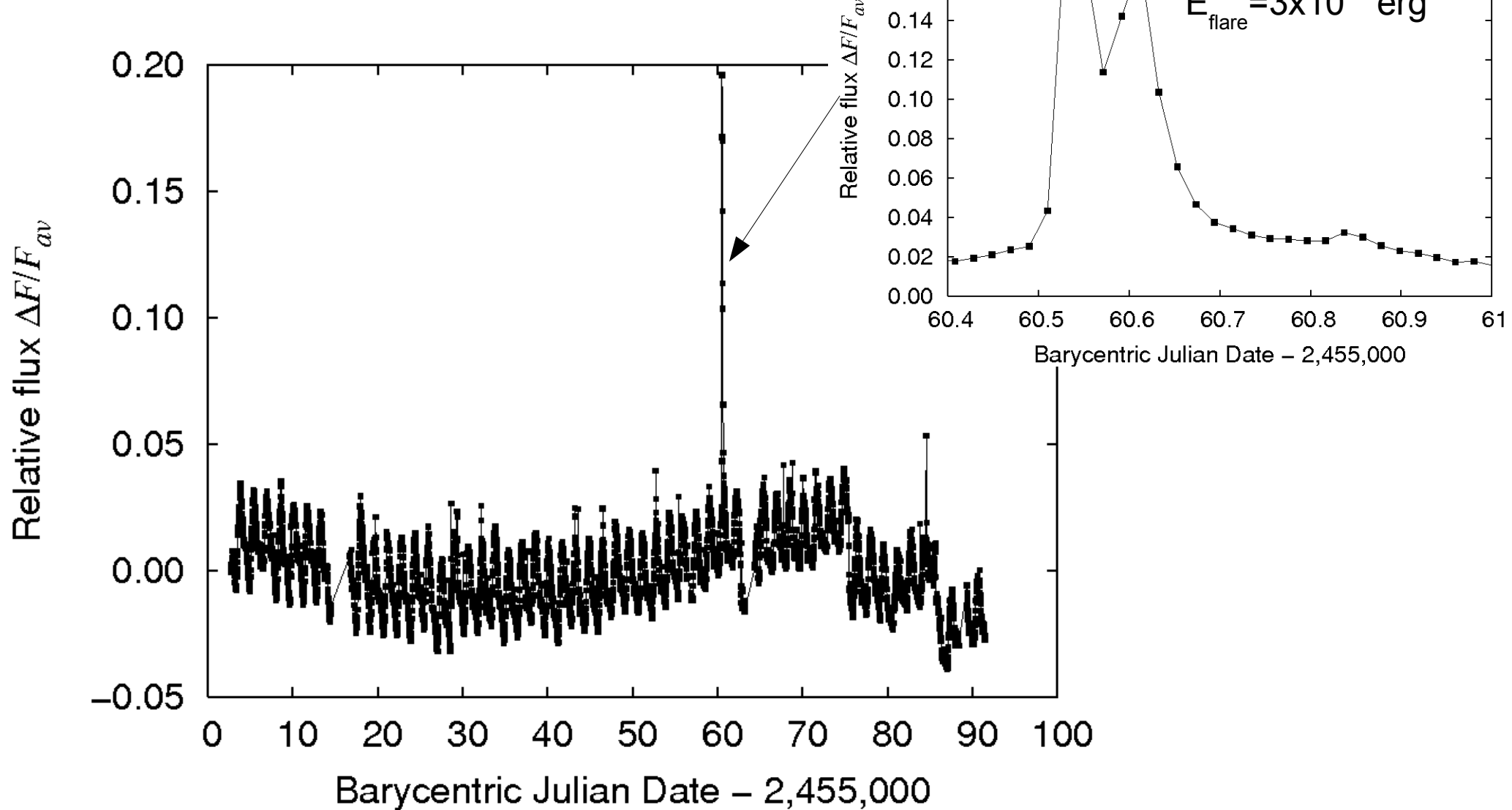
# フレアの例 (M型星)

KIC 2834637 ( $T_{\text{eff}} = 3521 \text{ K}$ )

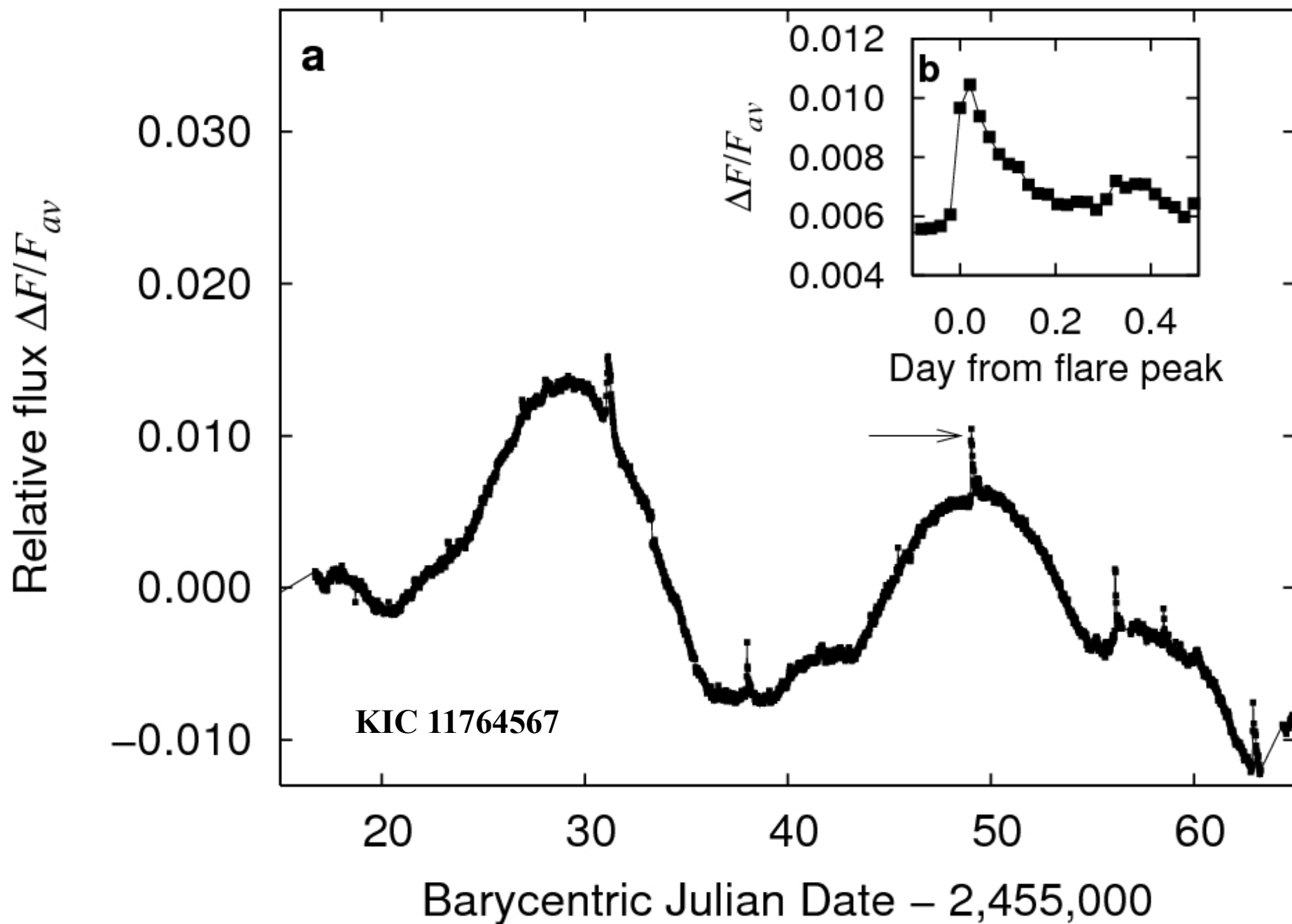


# フレアの例 (M型星)

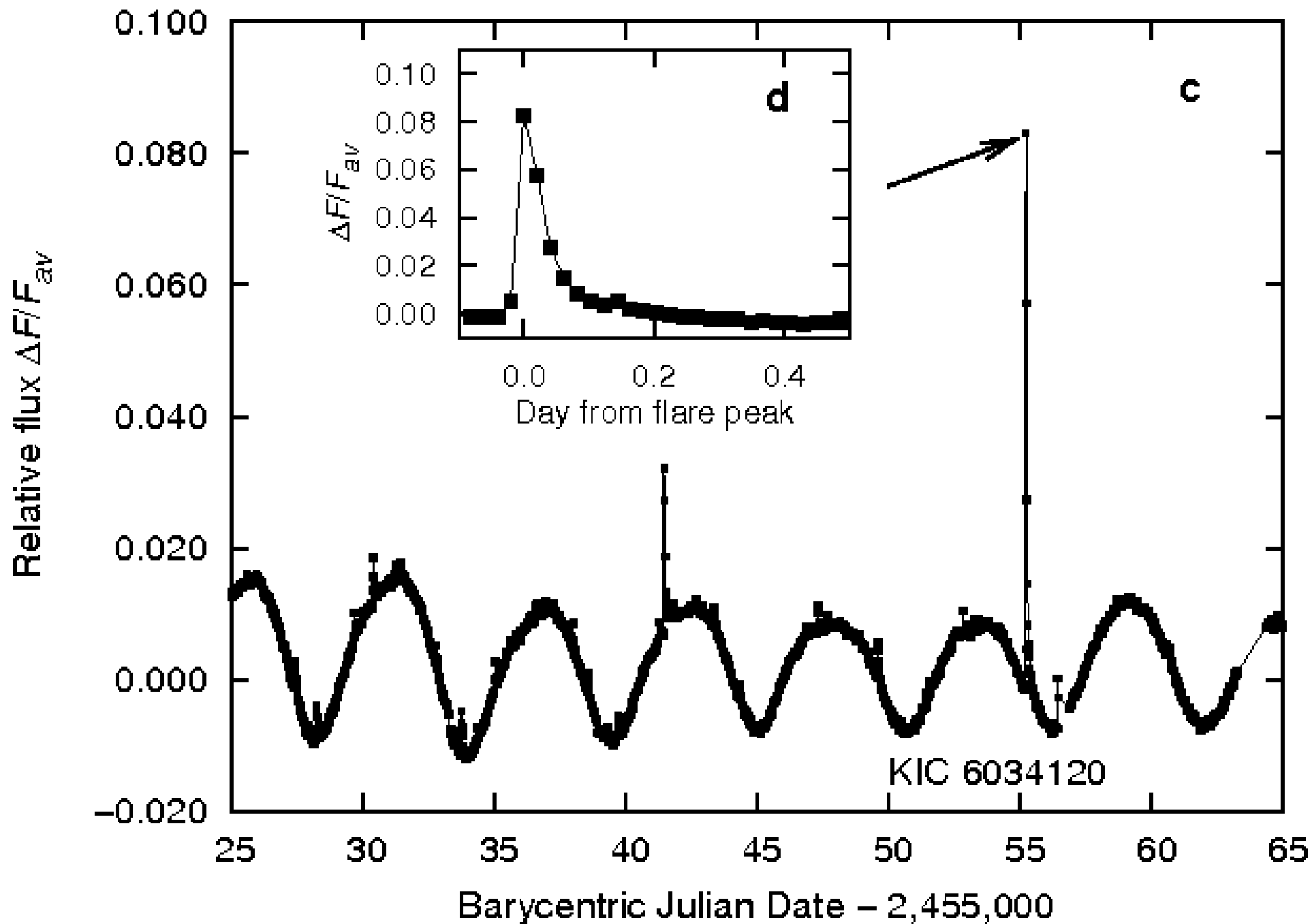
KIC 8611876 ( $T_{\text{eff}} = 3504 \text{ K}$ )



# フレアの例(G型星)

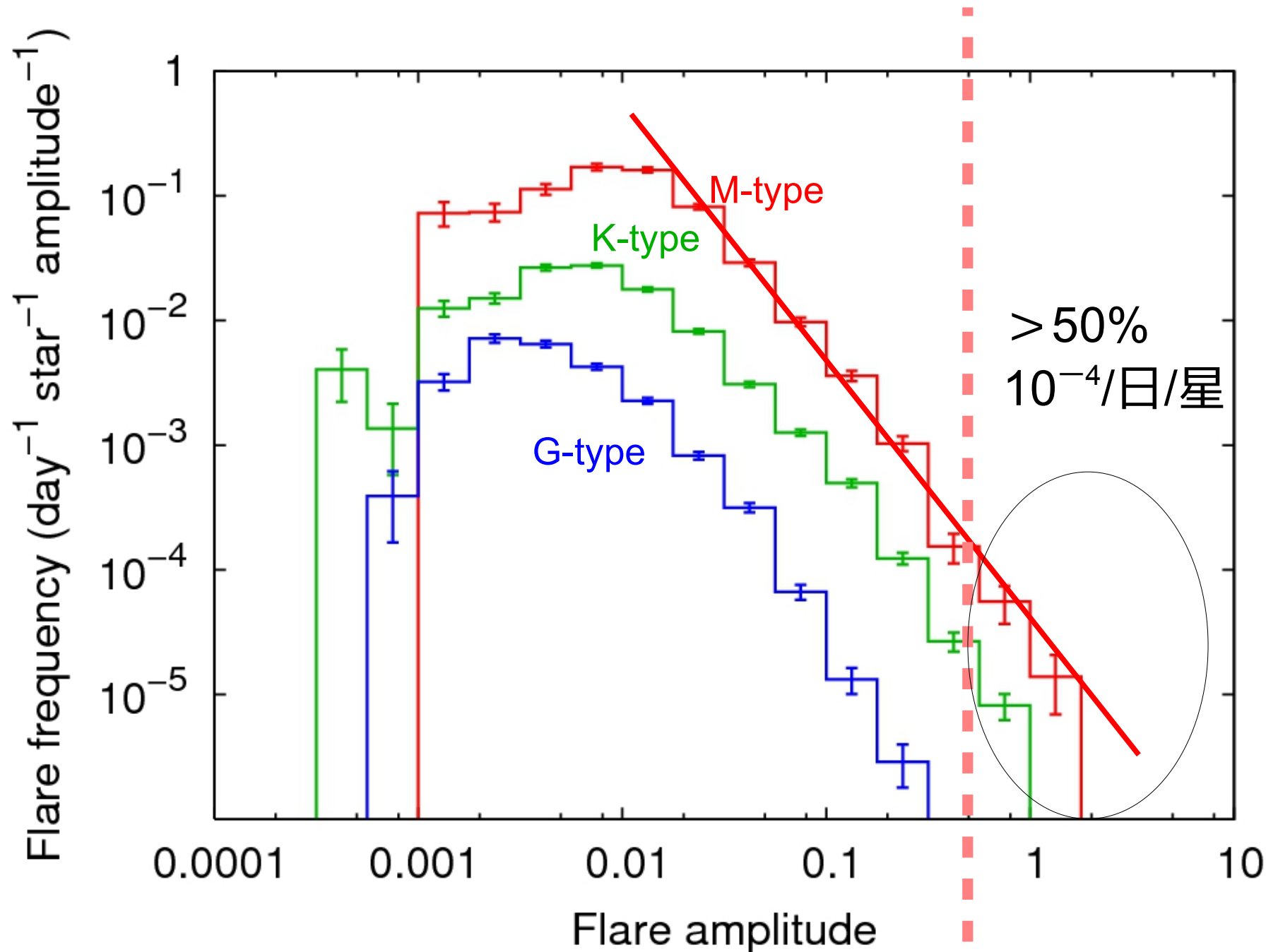


# フレアの例(G型星)

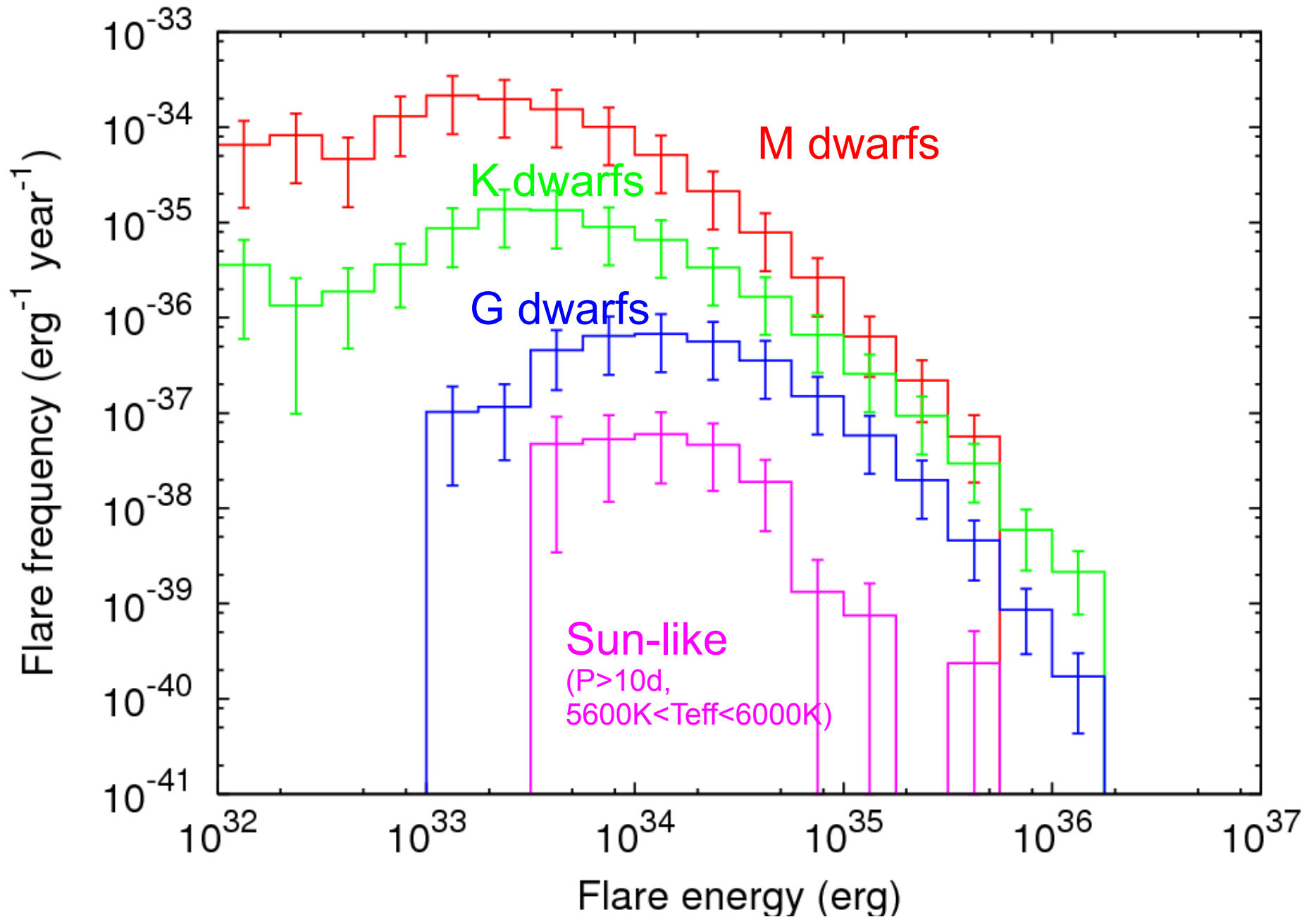




# Flare amplitude v.s. frequency

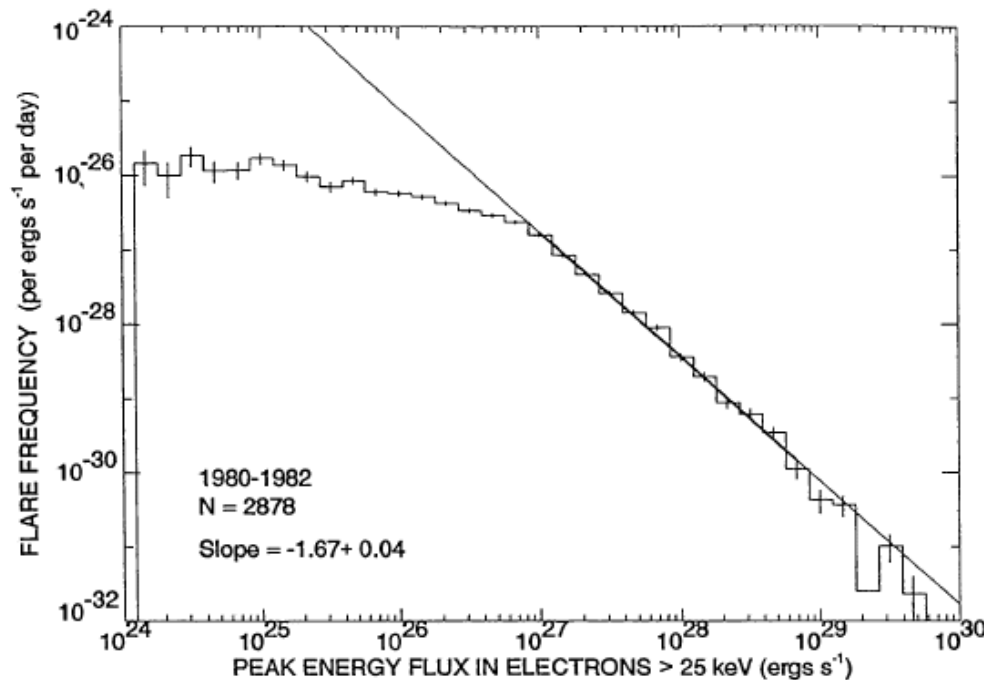


# Flare energy v.s. frequency



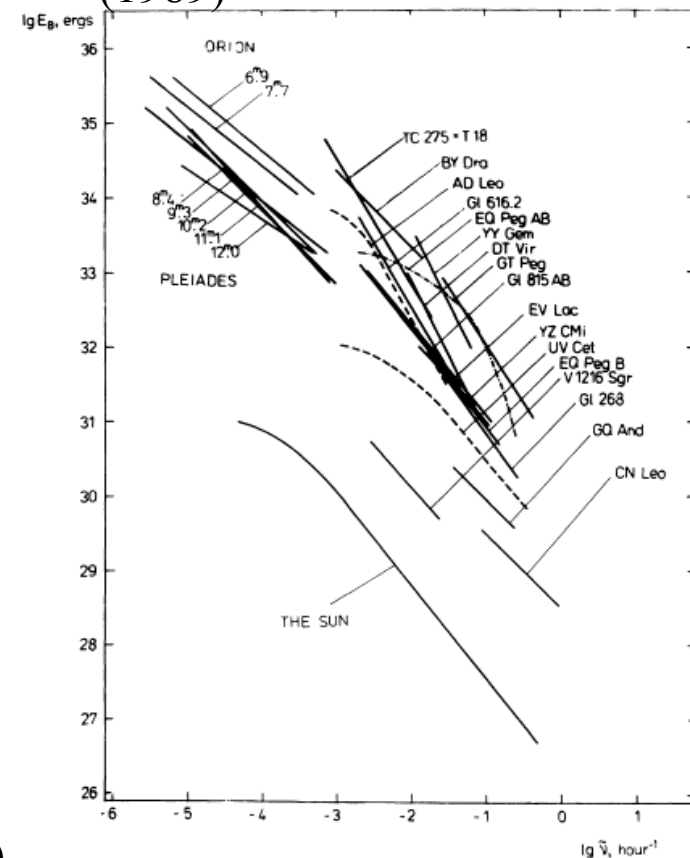
# フレアのエネルギーと頻度

- 解放されるエネルギーが大きいフレアほど頻度が低い
  - 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 :  $dN/dE \propto E^{-1.4 \sim -2.4}$
- Keplerの結果 :  $dN/dE \propto E^{-1.9}$

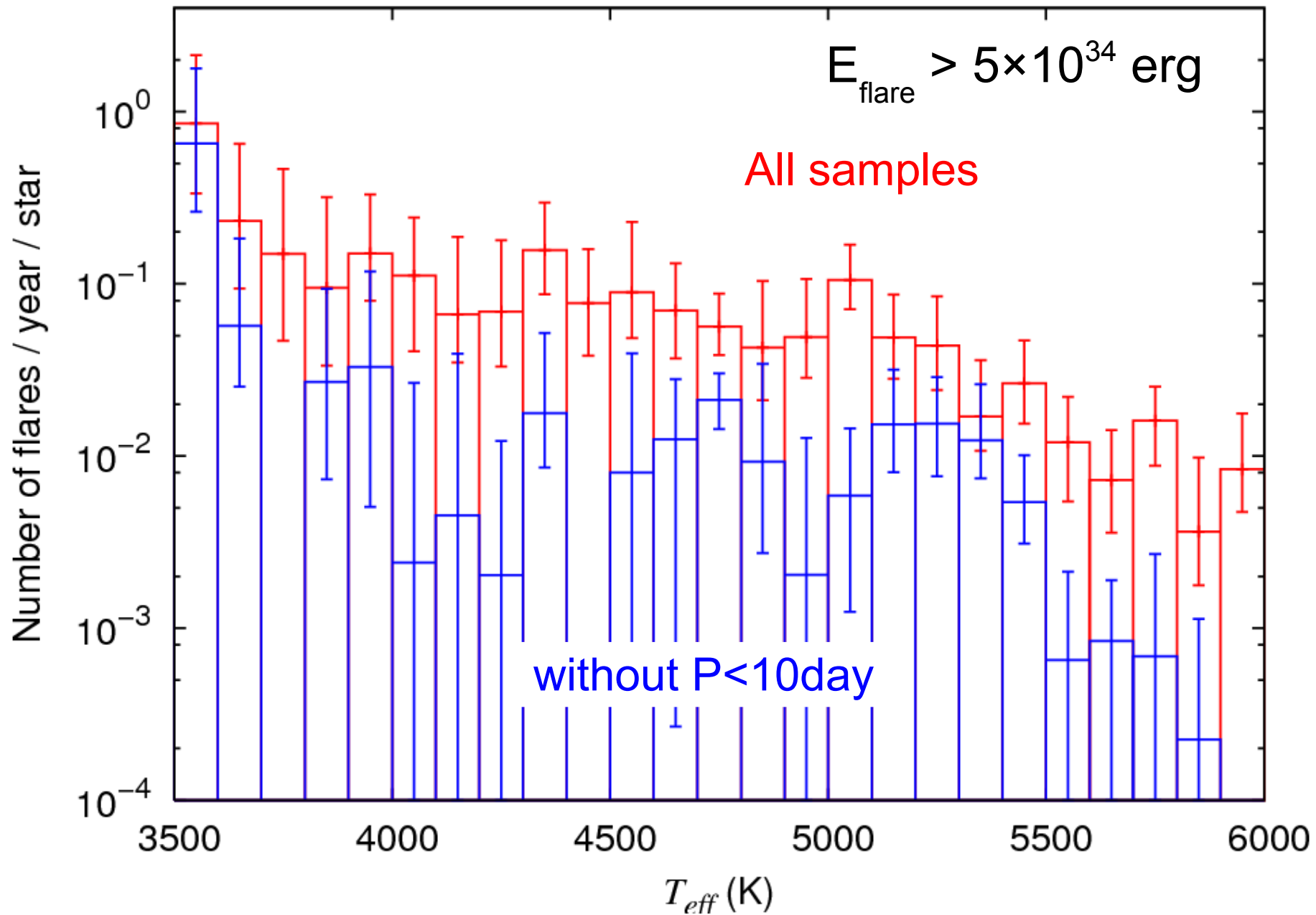


Crosby et al., *Solar Physics*, **143**, 275-299 (1993)

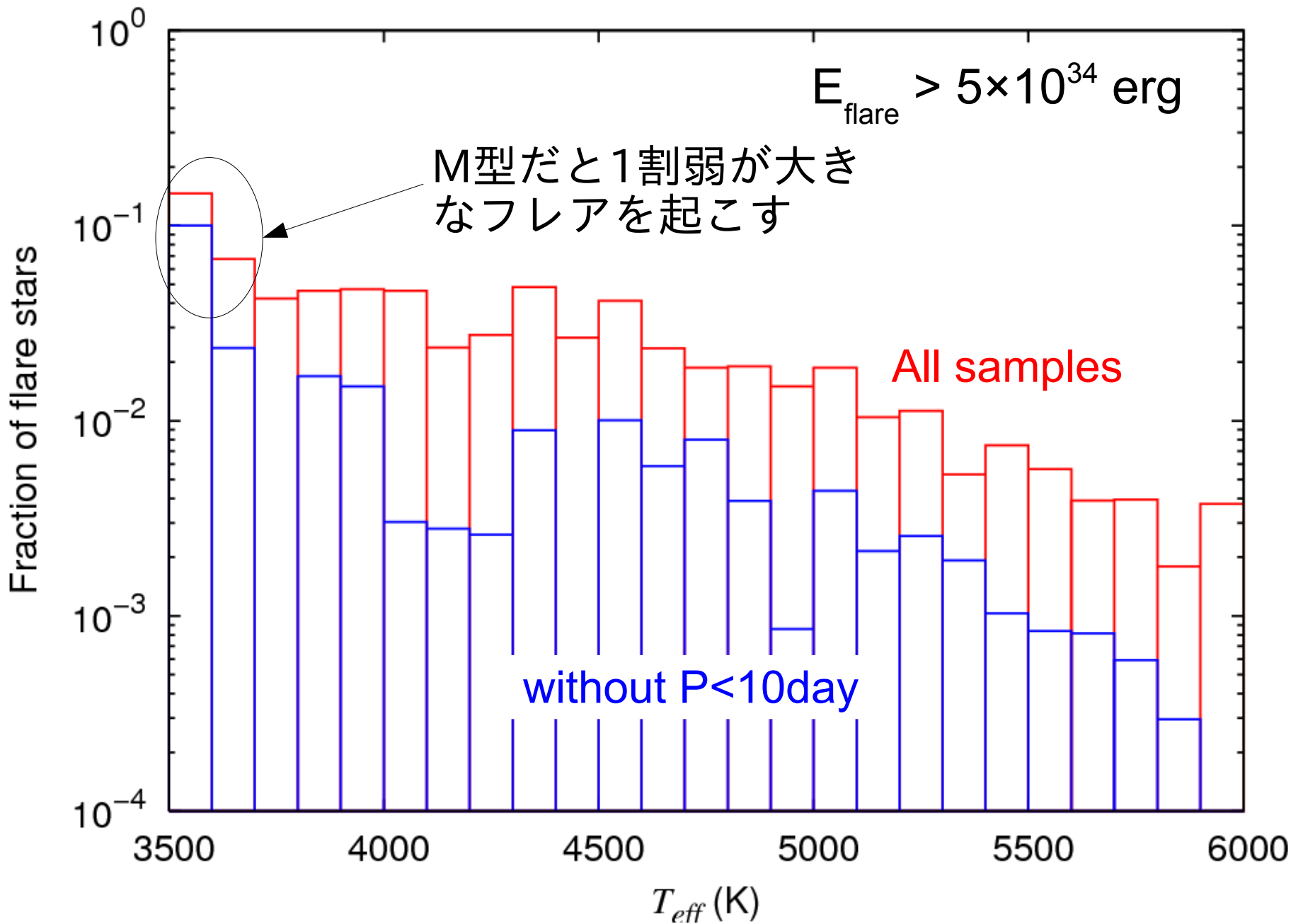
Shakhovskaia, *Solar Phys.* **121**, 375-386 (1989)



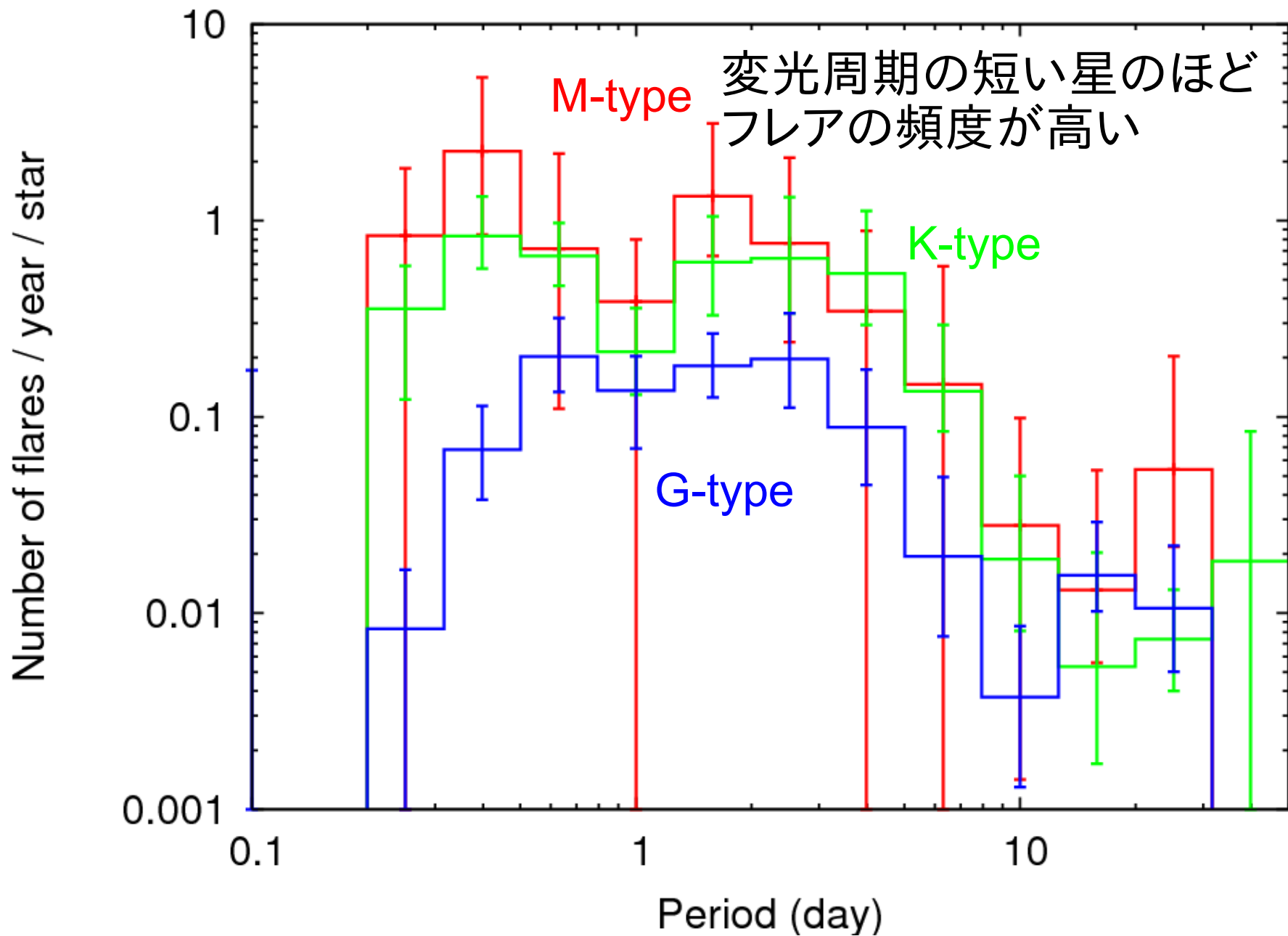
# $T_{\text{eff}}$ vs. flare frequency



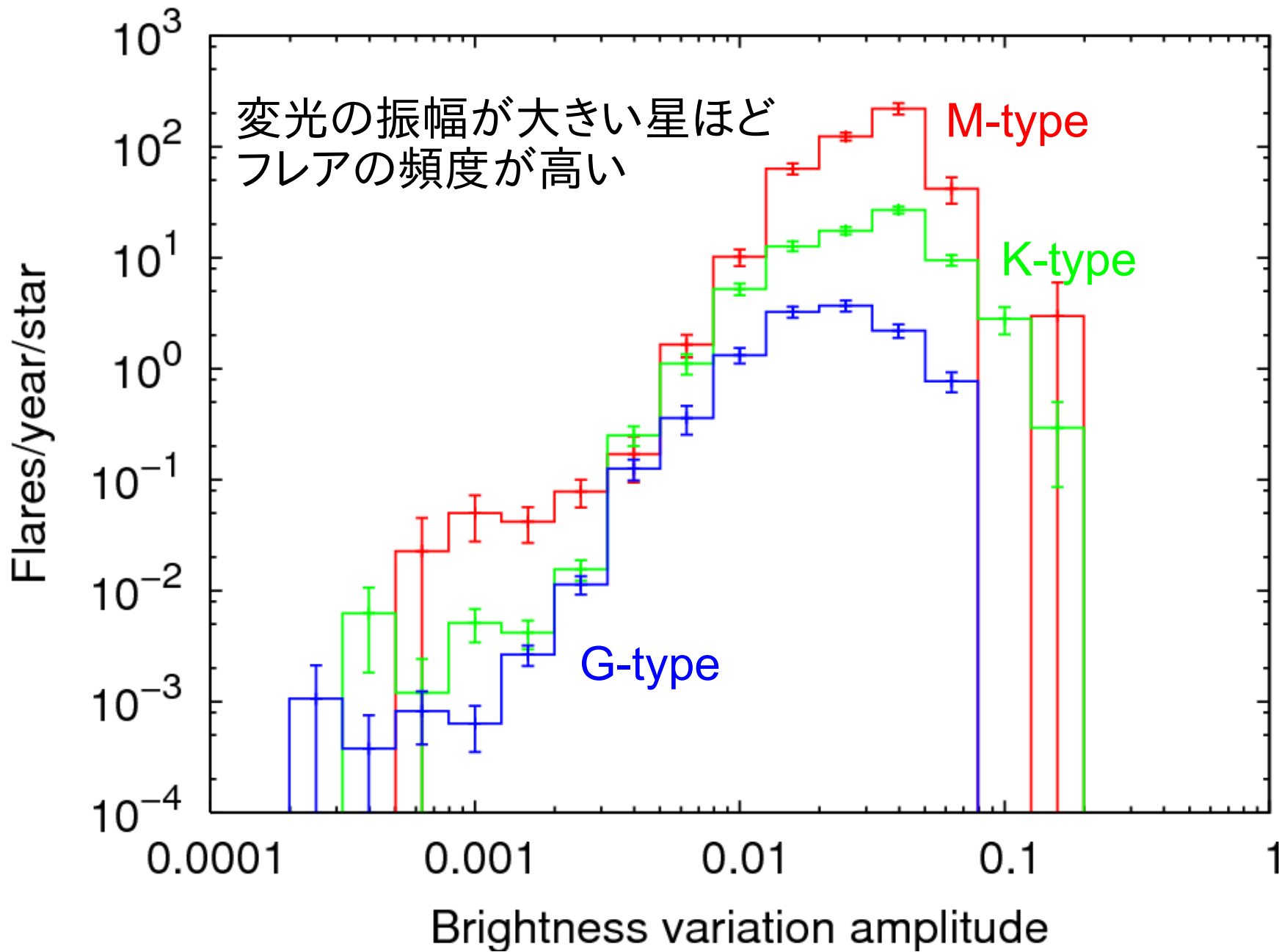
# $T_{\text{eff}}$ vs. fraction of flare stars



# 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



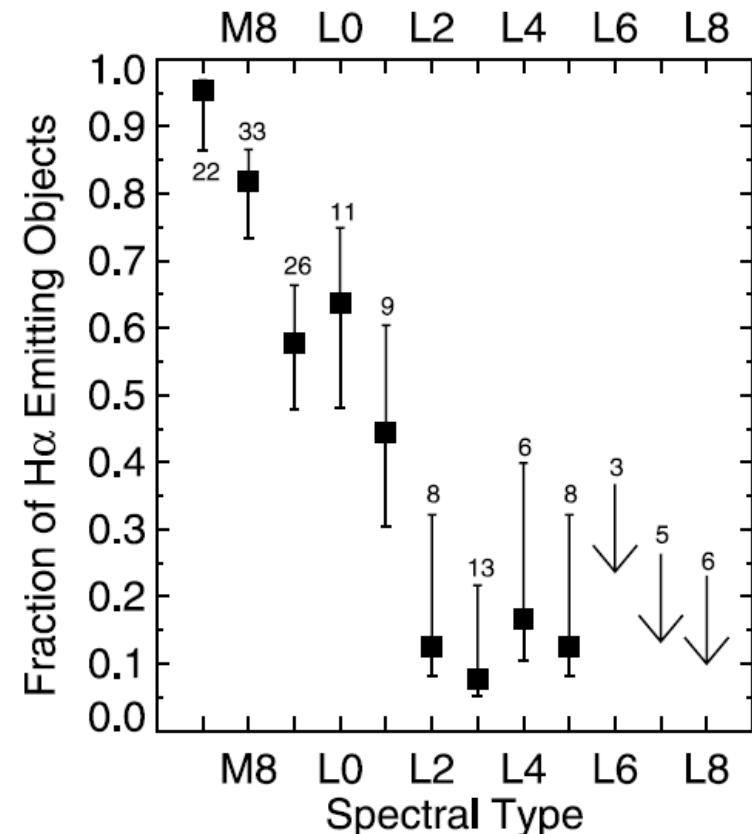
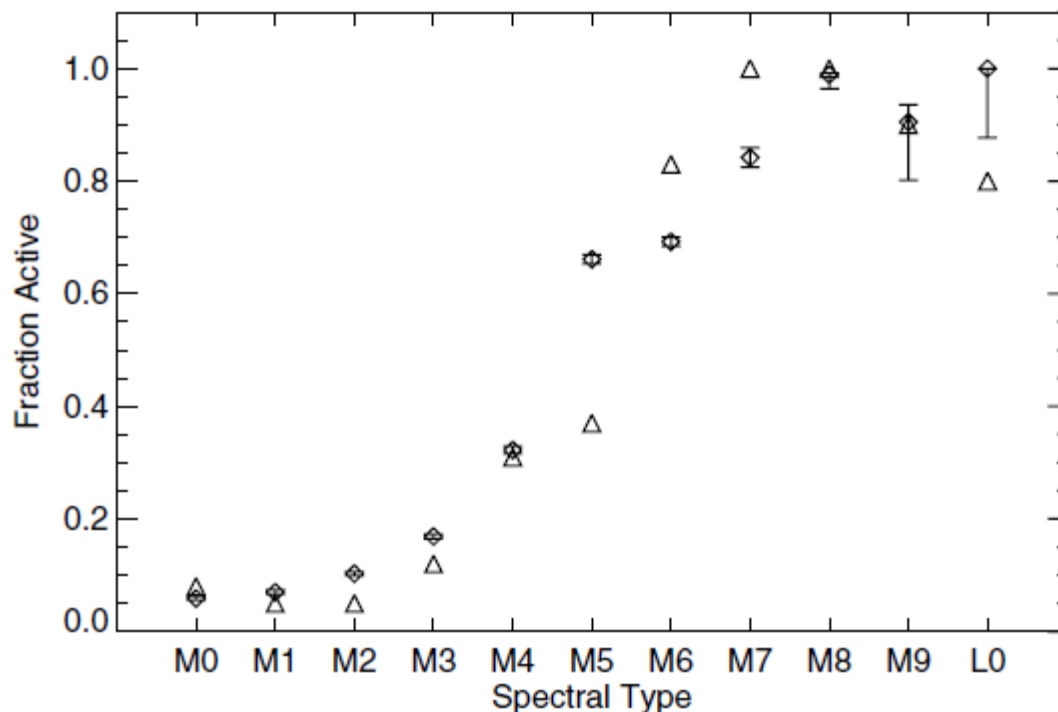
# スーパーフレアの頻度

- 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
- 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



# Late-M dwarfの活動性

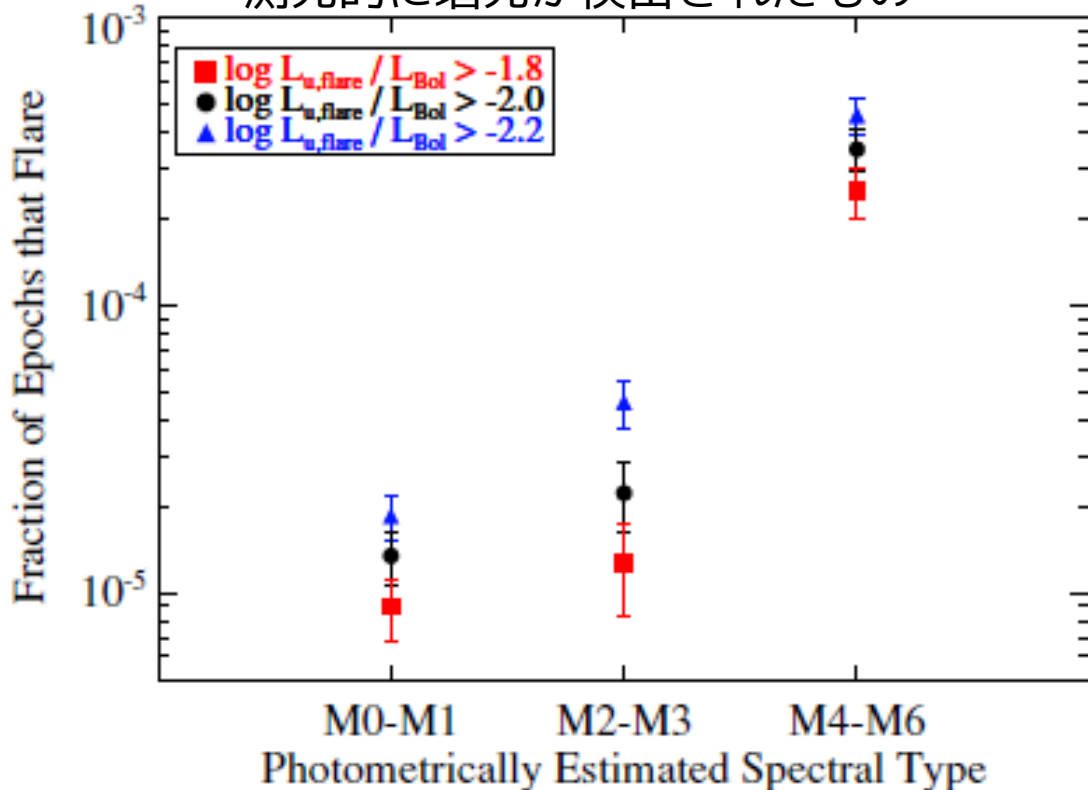
- ケプラーの観測対象はG型星が中心
  - 低温側はM2くらいまでしか入っていない
  - SDSSサンプルを用いた研究からは、M7-M8でH $\alpha$ 輝線を示す天体の割合が最大となる
    - 9割近くが輝線を示す



# Late-M dwarfの活動性

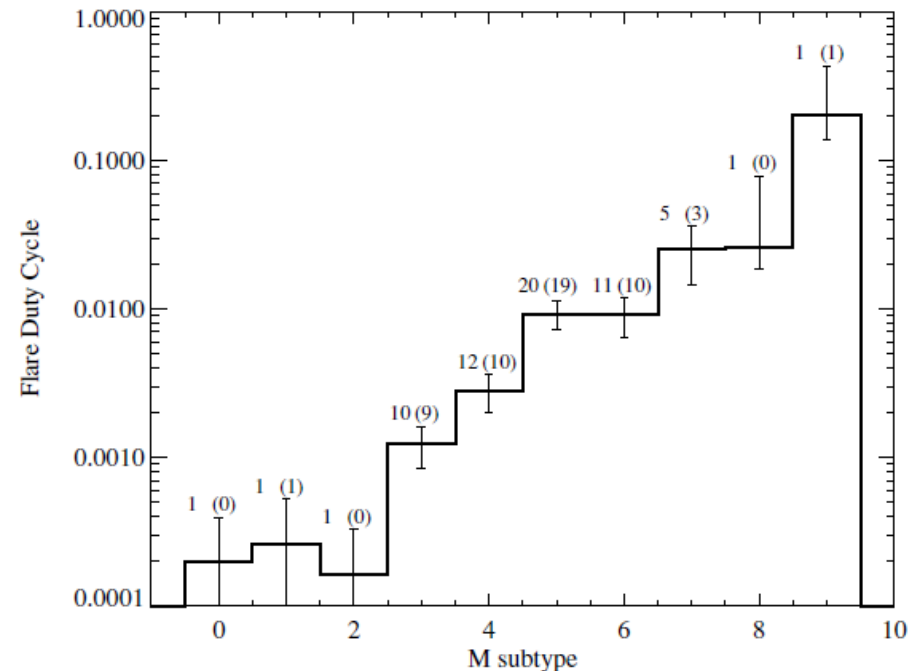
- 全観測時間中にフレアが観測されている時間
  - M0-M1では $10^{-5}$ 、M2-M3でも $3 \times 10^{-5}$
  - Late Mでは  $10^{-3}$ 程度まで上昇
    - 輝線強度の変化からは1桁ほど高い

測光的に増光が検出されたもの



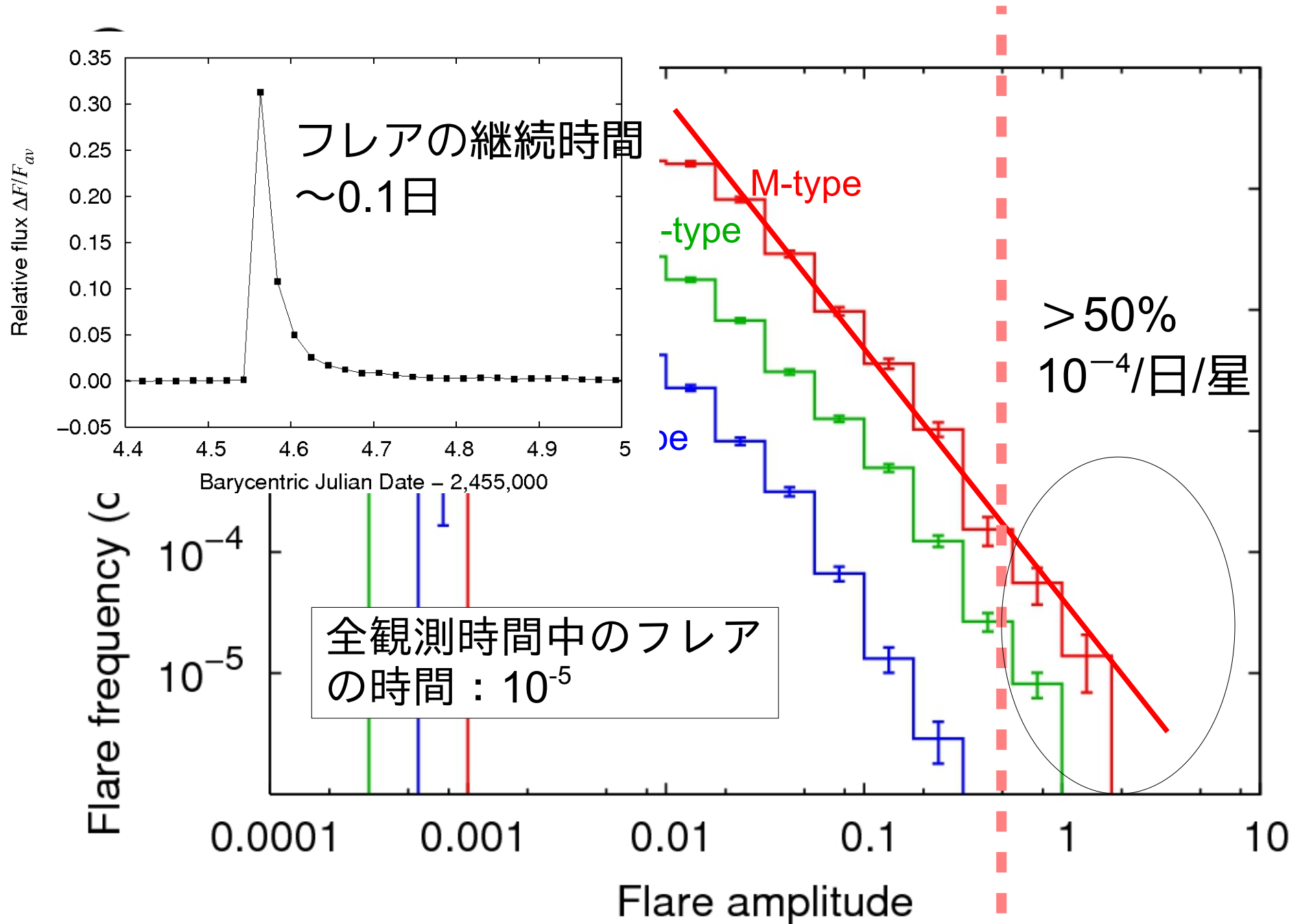
Kowalski et al., *Astron. J.* **138**, 633-648, (2009)

分光的に輝線強度の増加がみられたもの



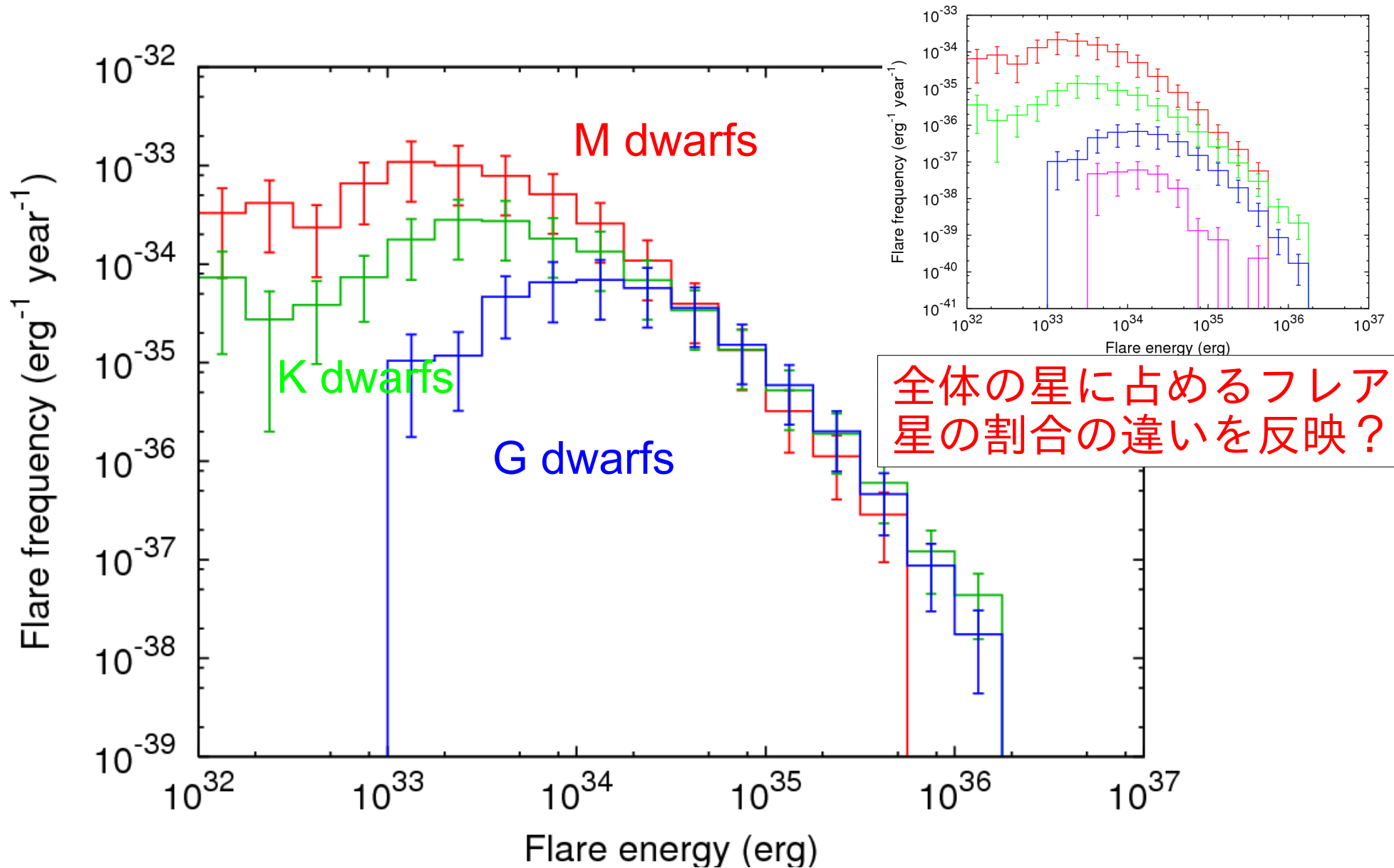
Hilton et al., *Astron. J.* **140**, 1402-1413 (2010)

# Flare amplitude v.s. frequency



# 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



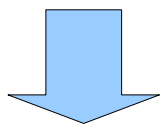
# 観測可能範囲と星の数

- M3V
  - $M_i \sim 10 \text{ mag} \rightarrow d < 250 \text{ pc}$
  - 17等より明るい天体はKWFCの1視野に約40天体
- M7V
  - $M_i \sim 13-14 \text{ mag} \rightarrow d < 40 \text{ pc}$
  - KWFCの1視野に約0.1天体

## フレアの頻度

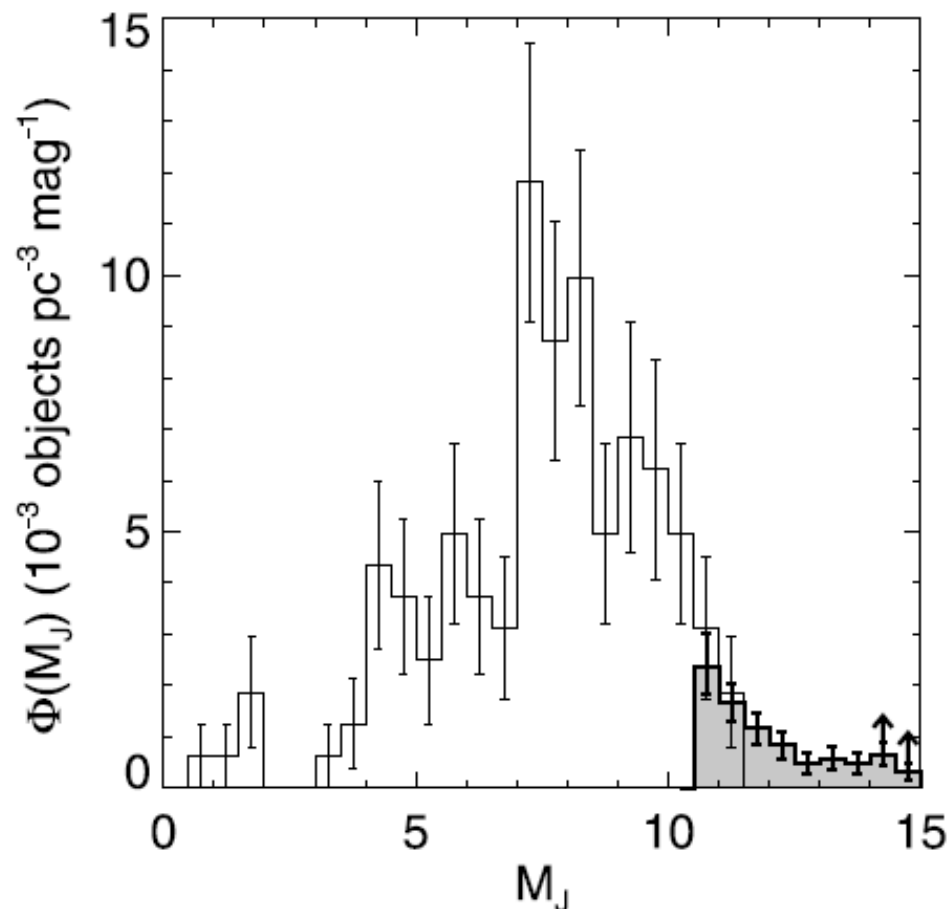
M3Vで  $3 \times 10^{-5}$

M7Vで  $10^{-3}$

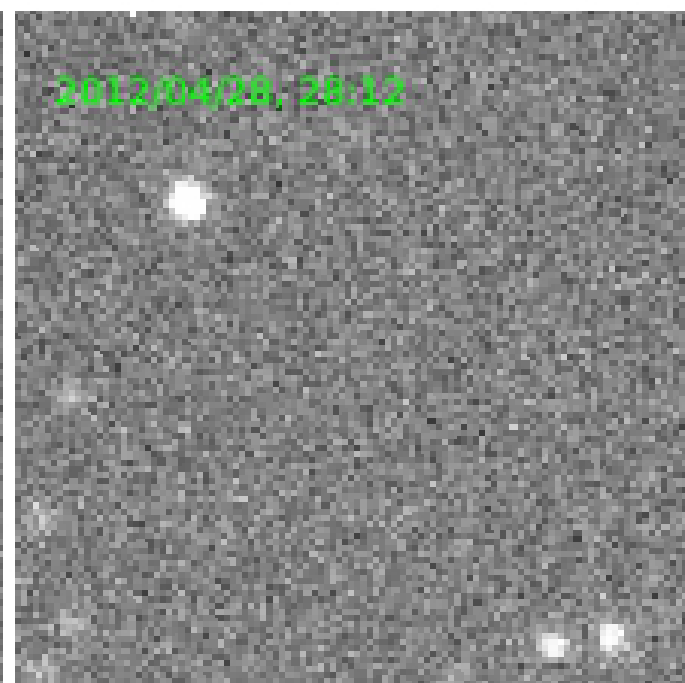
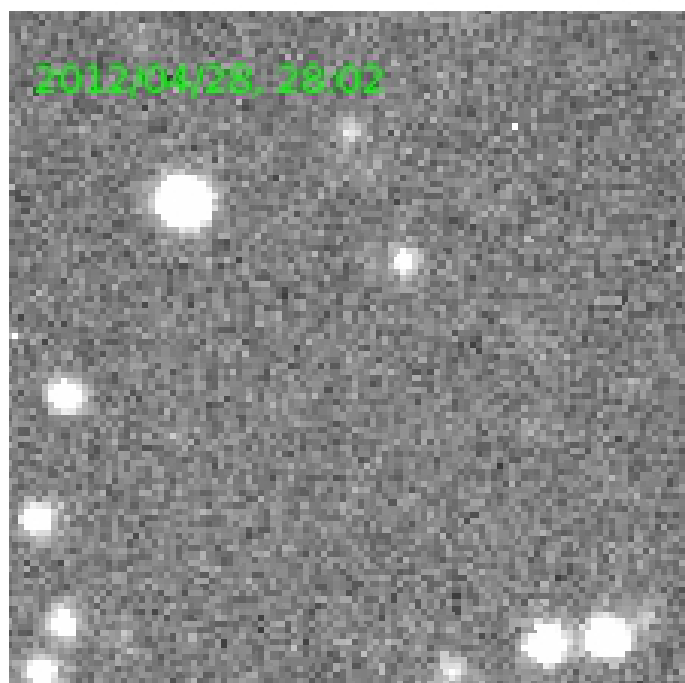
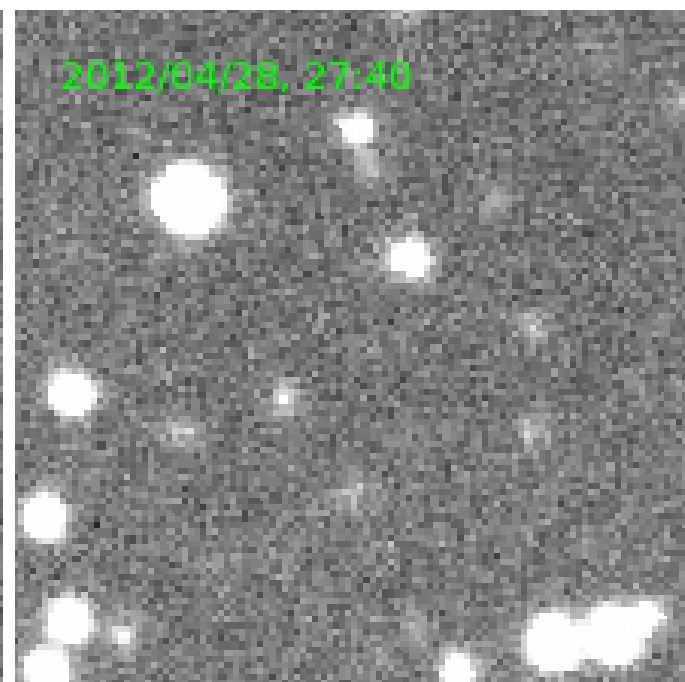
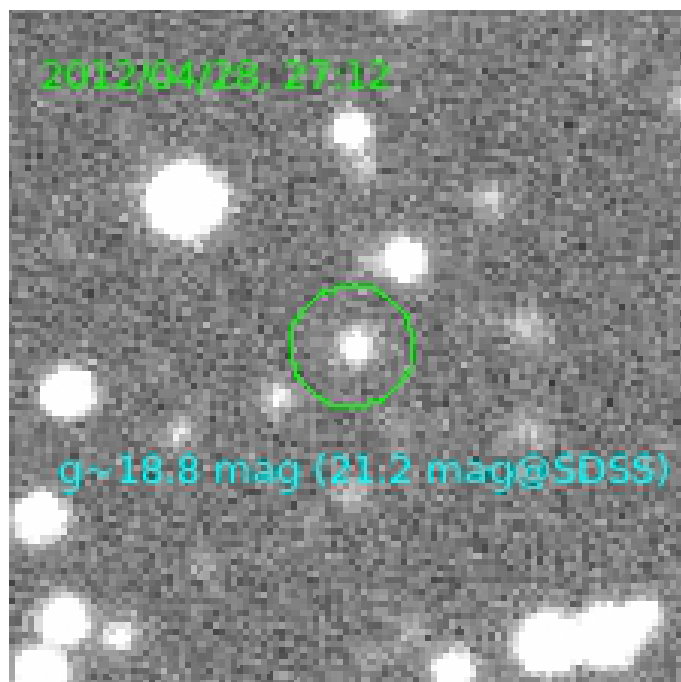
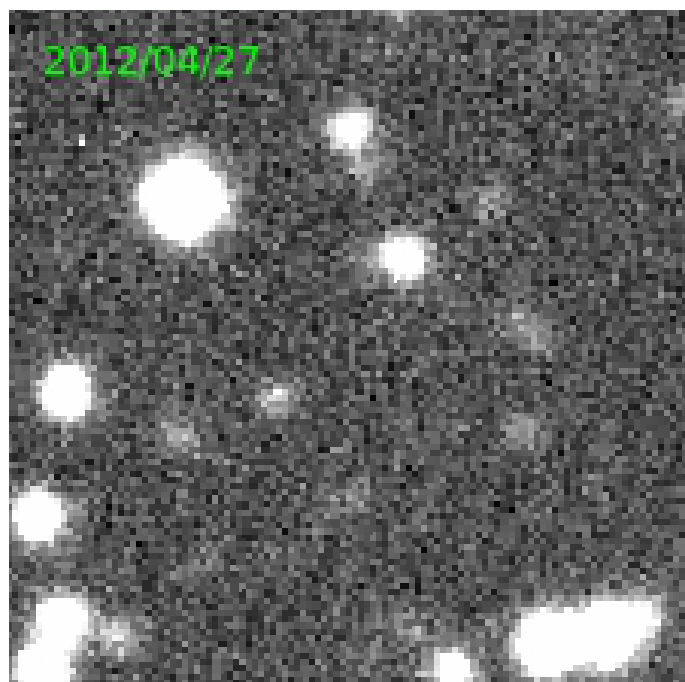


**1000枚に1フレア程度**

※増光した時だけ写る天体も含めると数百枚に1フレア程度？



Cruz et al. *Astron. J.* **133**, 439-467, (2007)



-61

-45

-30

-14

1.2

17

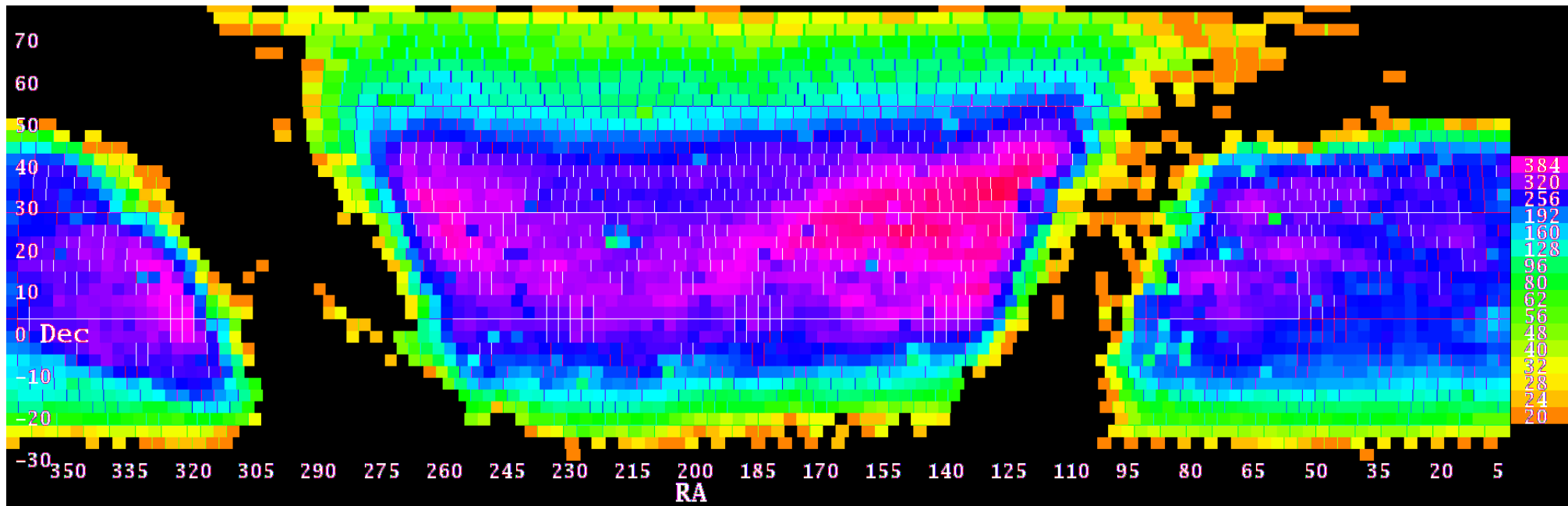
32

48

63

# 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、8deg<sup>2</sup>
  - 1視野あたり30秒露出で4回撮影 ⇒ 1晩で800deg<sup>2</sup>
  - 搜索範囲:  $-30^\circ < \delta < 70^\circ$ 、 $|b| > 10^\circ \Rightarrow 26000 \text{ deg}^2$



# Catalina Sky Surveyの例

- 1夜の観測領域  $800 \text{ deg}^2 \times 4 \times 650$ 夜
- CSS transient(2760個)の内訳  
<http://nesssi.cacr.caltech.edu/catalina/CSSstats.html>
  - SN: 820
  - CV: 611
  - Blazar: 151
  - Flare: 229
    - KWFCの視野( $2^\circ \times 2^\circ$ )だと  $\sim 1 \text{ flare}/2000 \text{ frames}$



# まとめ

- M型星を観測した時のフレアの期待値
  - M0-M3 :  $10^{-5}$
  - late M :  $10^{-3}$
- 観測可能な星の数はearly Mの方が多い
  - 17等より明るければ数十天体/視野
- KWFCの視野に入るフレアの頻度
  - 数百~1,000枚に1フレア程度
    - Catalinaの検出数は矮新星増光の1/3程度の数