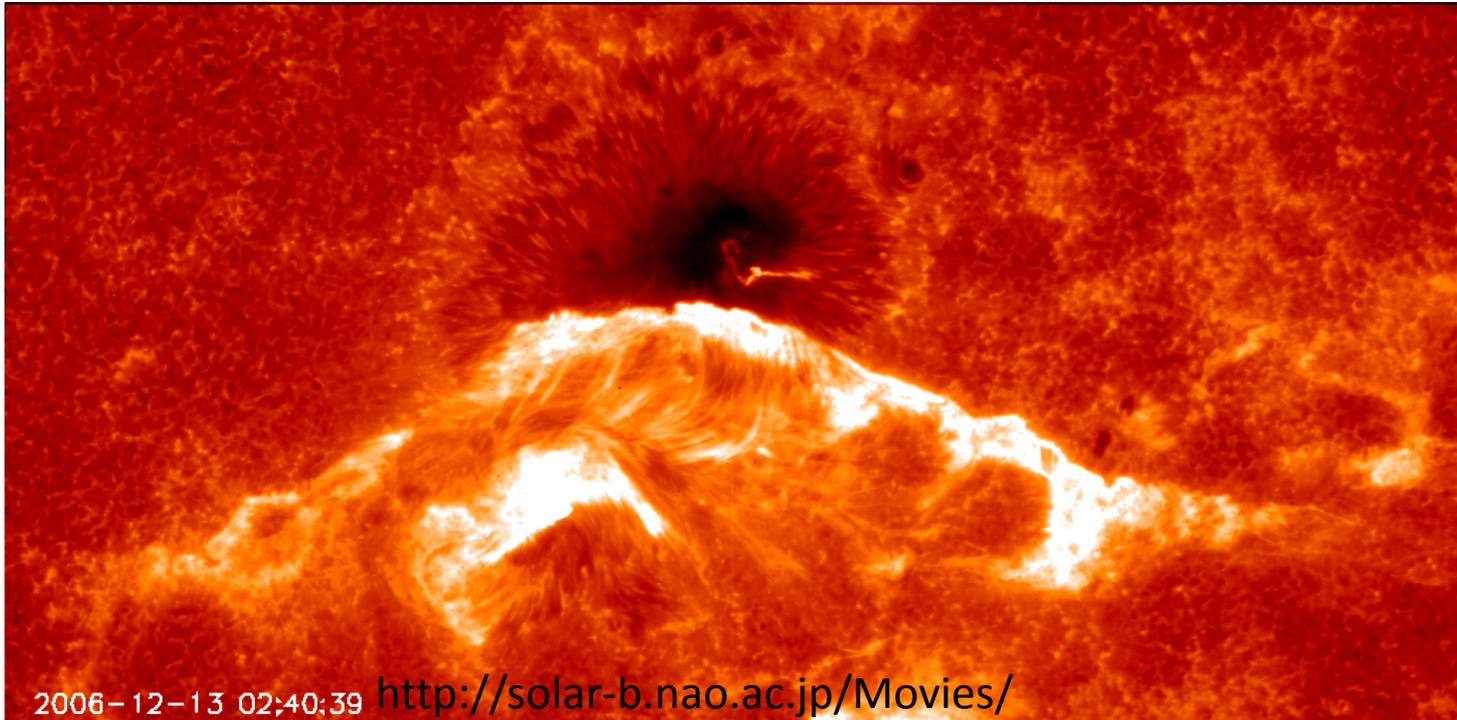


スーパーフレアと可視高分散分光

野上大作(京都大学)

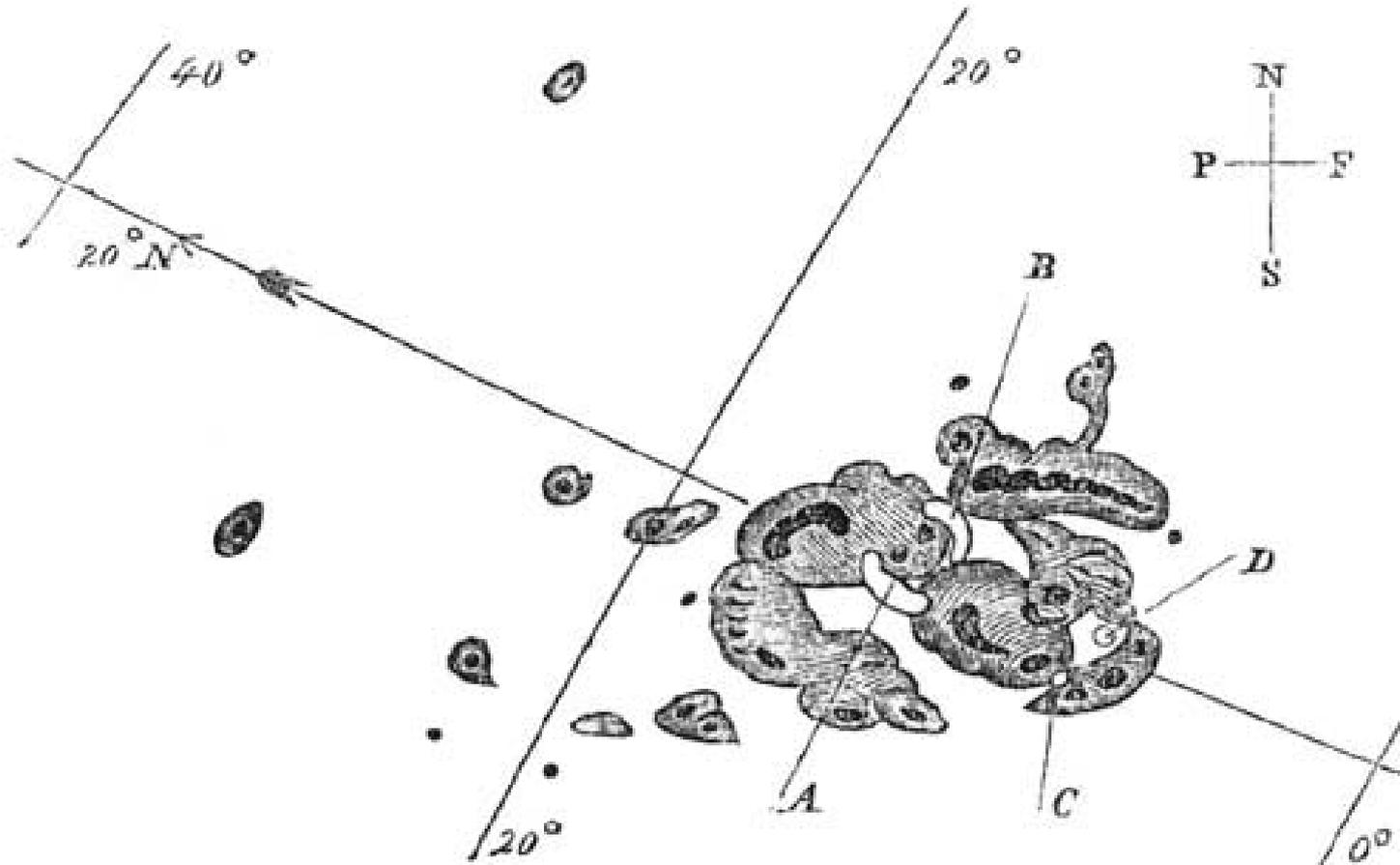
太陽フレア

- 太陽の大気(コロナ)中で起こる爆発現象
- 観測史上最大級のフレアのエネルギー: 10^{32} erg
 - 人類史上最大の核兵器の解放エネルギー: 2×10^{24} erg
 - 水爆約1億個分のエネルギーに相当
- H α 線、極端紫外線、X線などで明るく光る



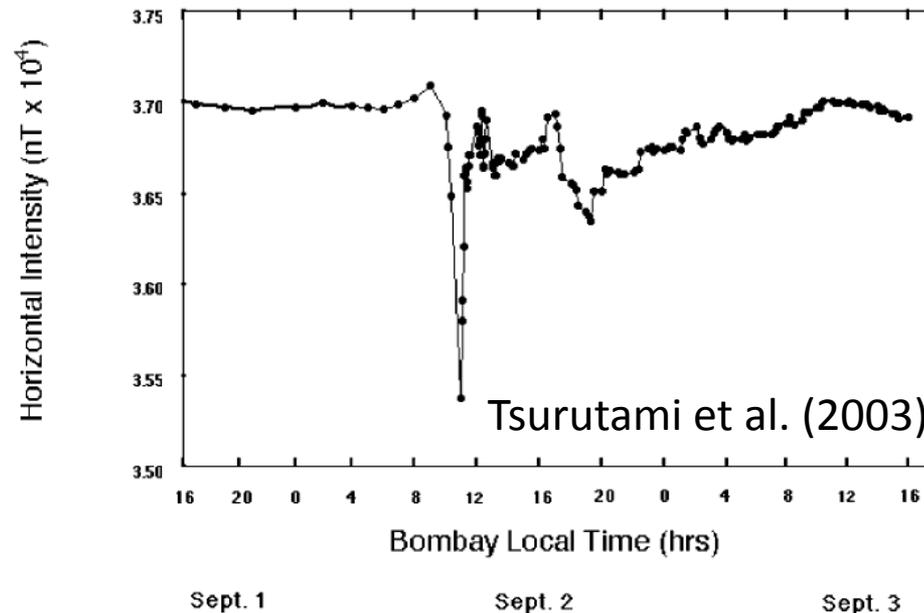
キャリントンフレア

- 1859年9月1日に起きた人類が初めて観測した太陽フレア
 - 黒点の近くで明るく光る現象とし観測された



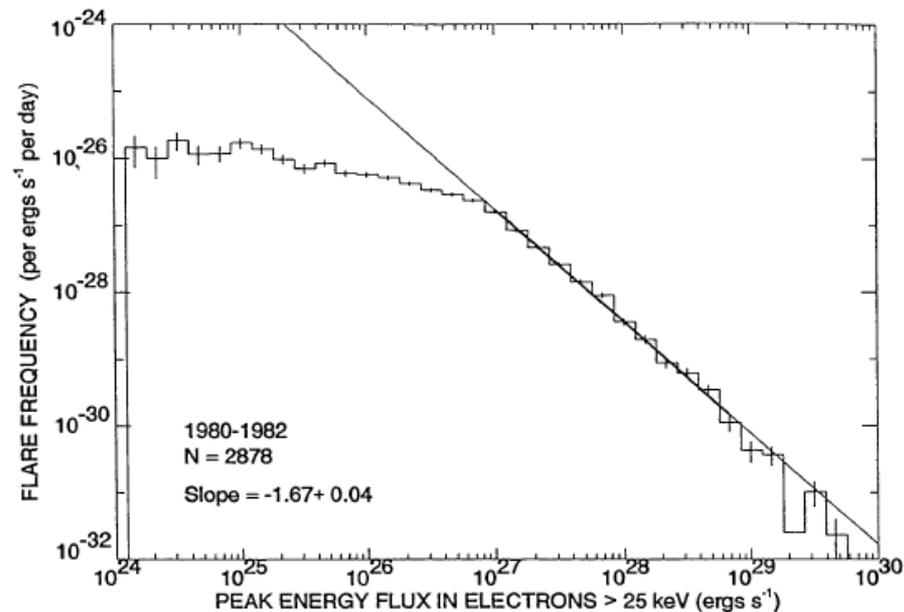
キャリアトンフレア

- フレアの1日後に史上最大の磁気嵐
 - 地磁気の変動が1600nT
 - 電信用の通信ケーブルに誘導電流が流れ、火災やオペレーターの感電事故が多数発生
 - キューバやパナマでオーロラがみられた



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
 - エネルギーが10倍大きいフレアは頻度が1/10
 - 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
 - $dN/dE \propto E^{-1.5 \sim -1.9}$

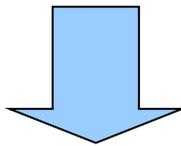


Crosby et al. 1993, Solar Physics, 143, 275

- 太陽フレアでは10²⁴ ~ 10³² 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？

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。

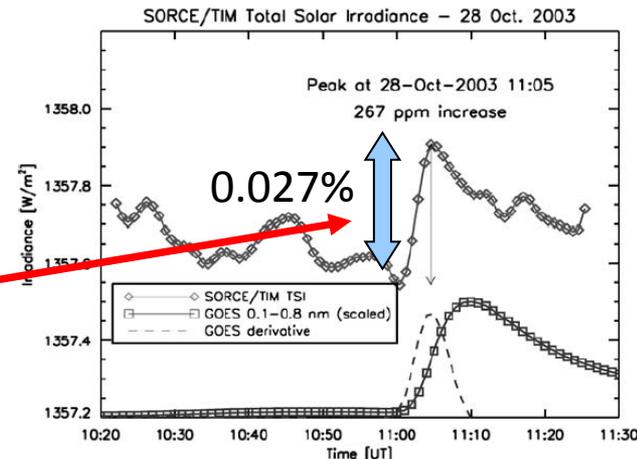
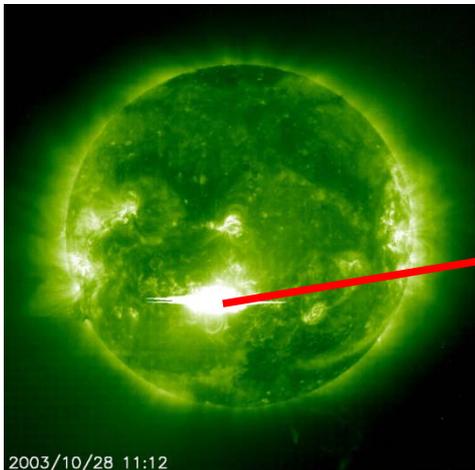


- 太陽でも超巨大フレアが起こるのか？
- 起こるとすればどのくらいの頻度になるか？

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。

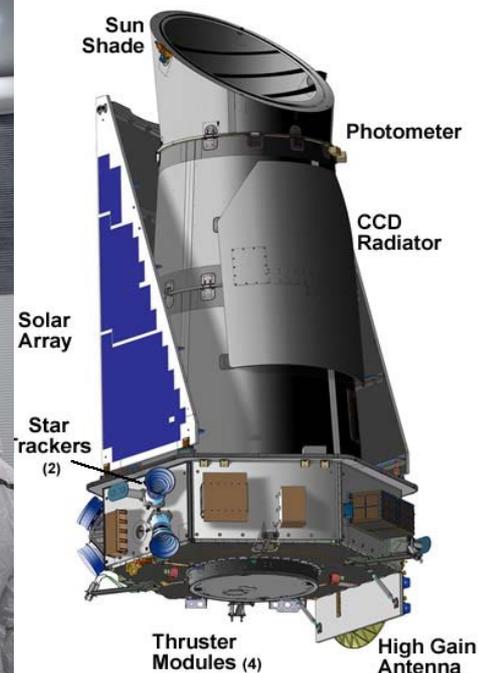


ケプラー衛星

- 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

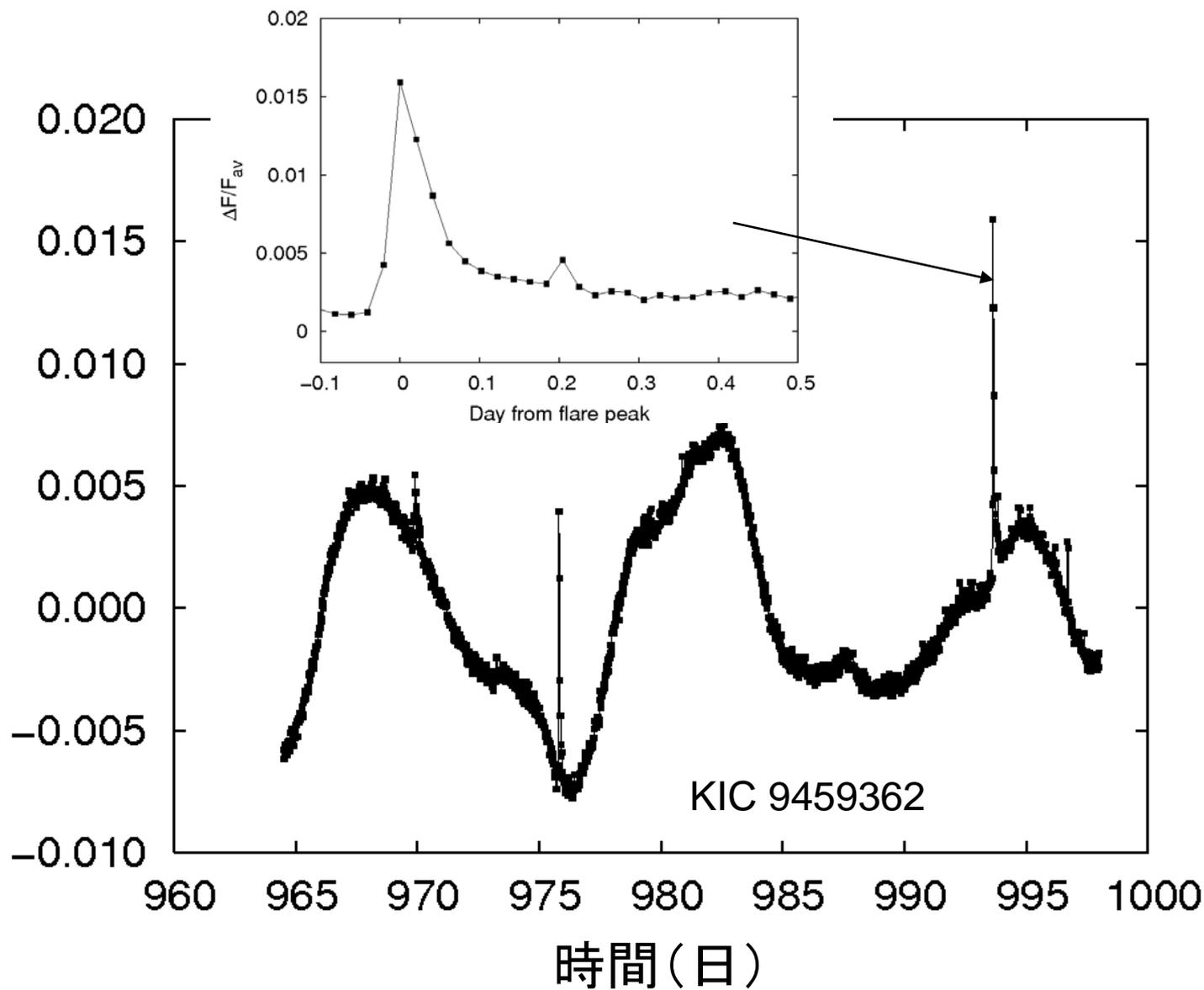
フレアによって星がわずかに明るくなる現象をケプラー衛星によって得られたデータ(2009年4月～2010年8月)から探した。

→これまでに太陽型星約83,000個の観測データから270星で1,500例のフレアを発見(Maehara et al. 2012, Nature, Shibayama et al. 2013, submitted)



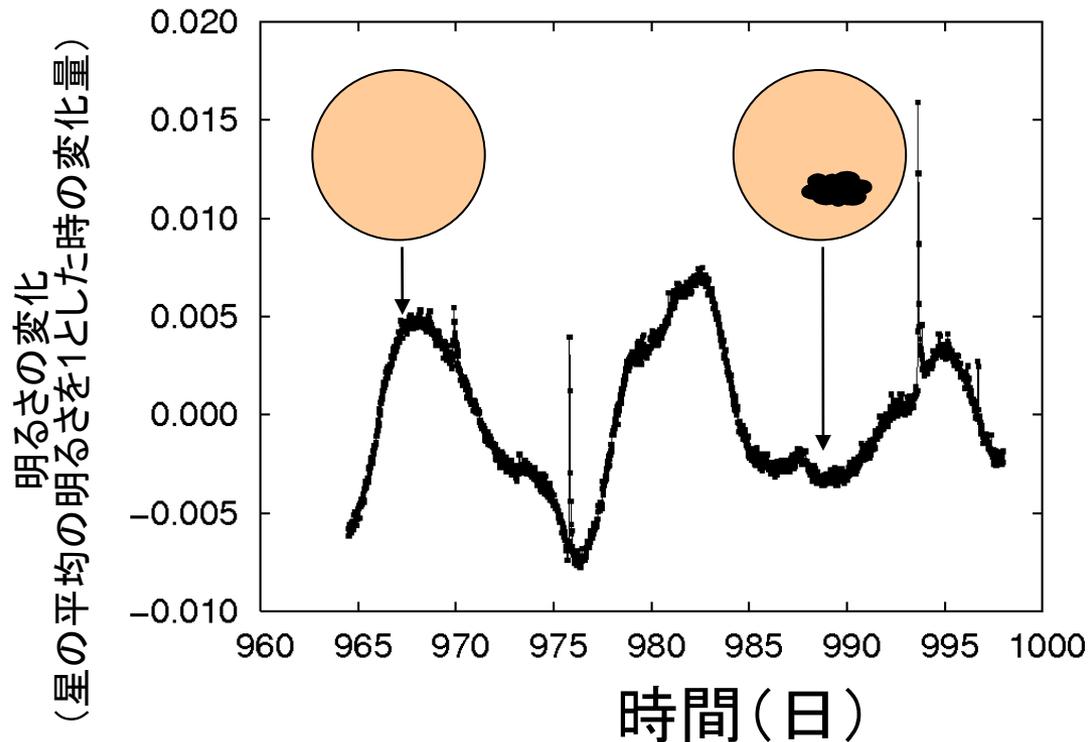
スーパーフレアによる星の明るさの変化

明るさの変化
(星の平均の明るさを1とした時の変化量)

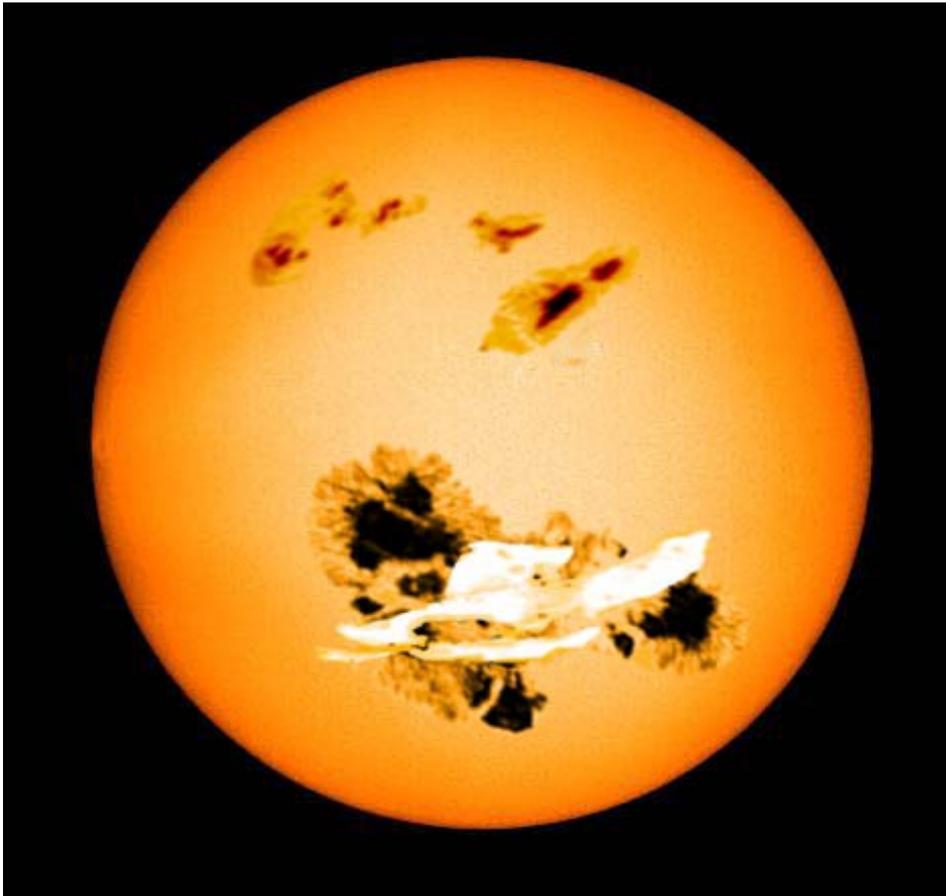


準周期的な星の明るさの変動と黒点

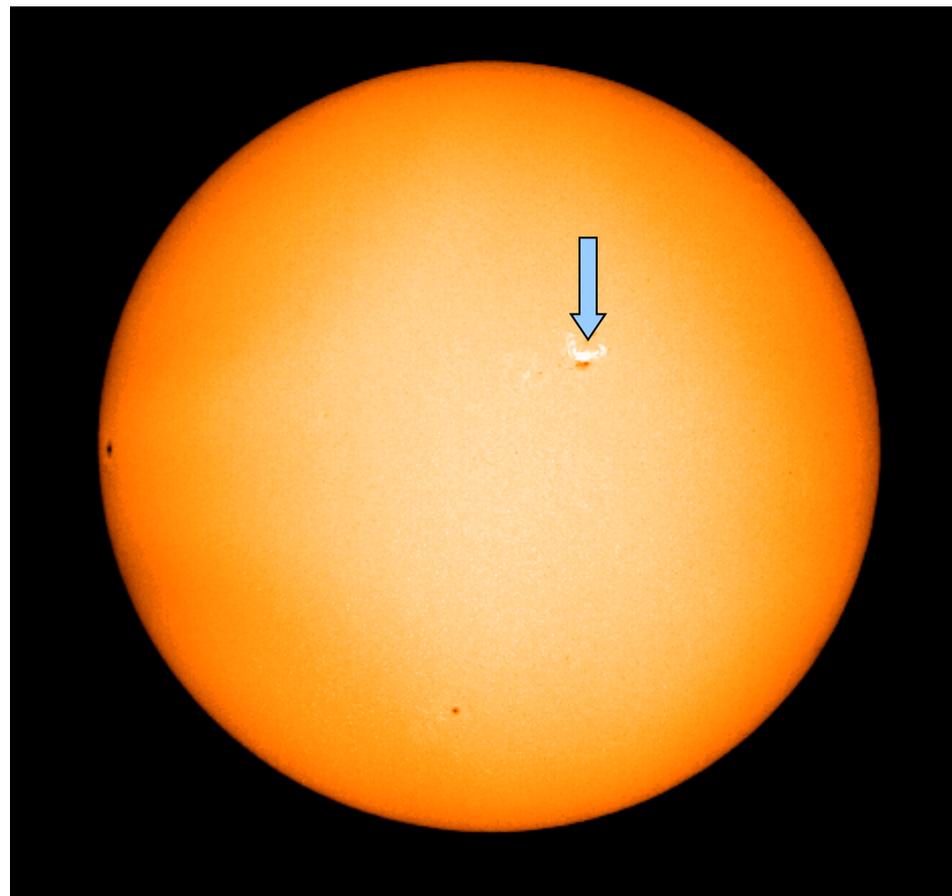
- 明るさの変動 = 黒点のある星が自転するために生じていると仮定
 - 変動の周期 → 星の自転周期を反映
 - 変動の振幅 → 星の表面にある黒点の面積を反映



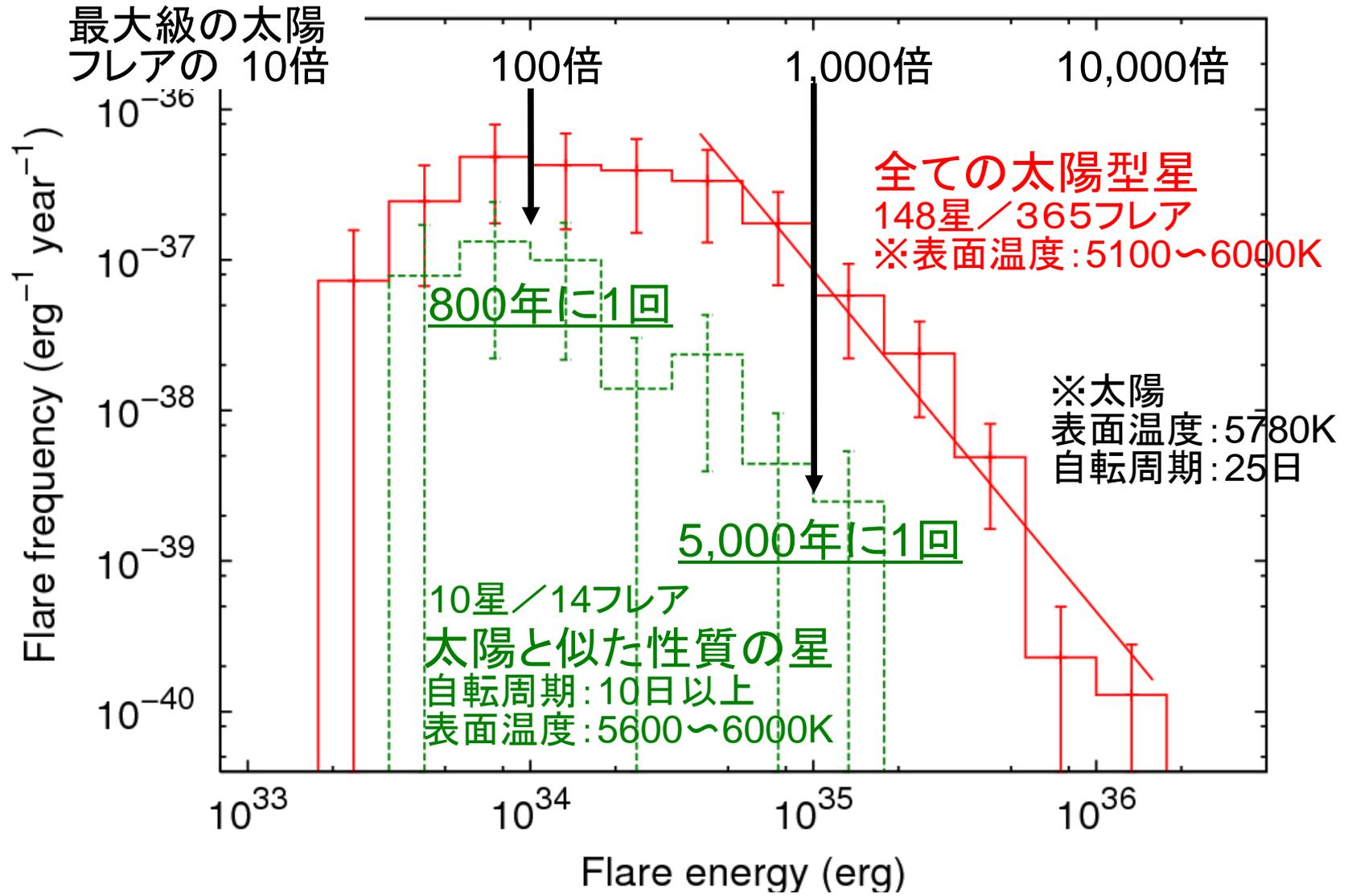
スーパーフレアの想像図



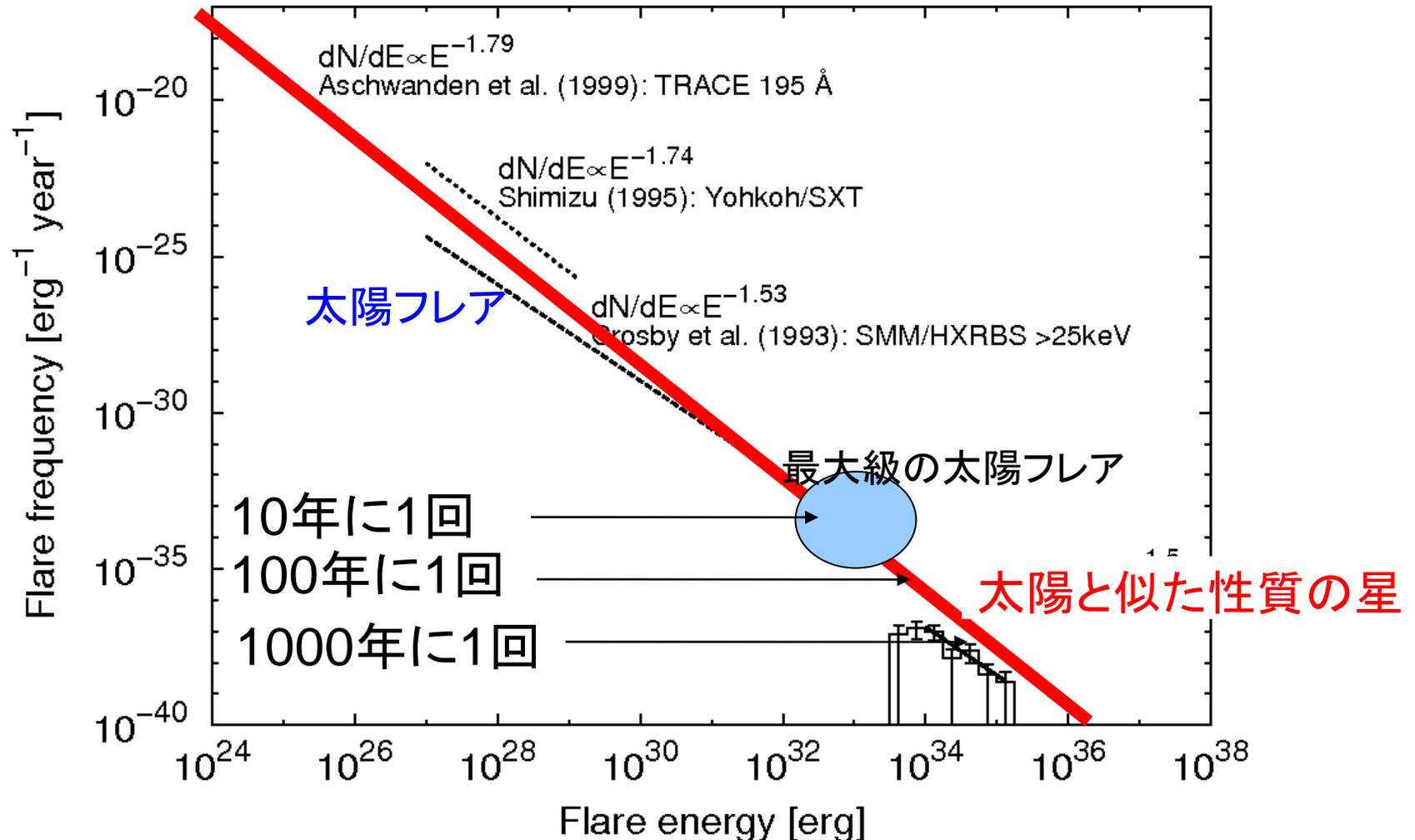
太陽フレア
(実際の観測)



スーパースペアの発生頻度分布



発生頻度（太陽フレアとの比較）



ここで疑問

- スーパーフレアを起こす星は本当に太陽と似た星なのか？(自転周期、化学組成、、、)
- スーパーフレアを起こす星は彩層活動性が非常に高いはず？

→分光観測！

Target Stars

- G-dwarf
 - $5100\text{K} < T_{\text{eff}} < 6000\text{K}$
 - $\log g > 4.0$
 - とりあえず KIC (Kepler Input Catalog) のパラメータは仮定。
 - $10 \leq I \text{ mag} \leq 14$
 - 出来るだけ明るい物から24天体
 - 変光周期の短い星から長い星まで
 - $0.7 < P \leq 20 \text{ (d)}$
 - 短周期の星多い ($P \leq 5\text{d}$ が18天体)
- 3日間の連続した観測日で、自転や連星によるラインの変動は受かるか？
- (黒点による) 振幅の大きな星
low inclination angle でない? 星

Subaru/HDS observations of Solar-Type Superflare stars

- S12B-111B (P.I.: Y. Notsu)

- 観測日: 2012 8月. 6-8 (前半夜)

- 9月. 22-25(前半夜 サービス観測)

- Seeing悪い($\sim 1''.9$)日もあったが、total3日分の観測時間

- 波長分解能 $R(=\lambda/\Delta\lambda)\sim 55,000$

- $\lambda: 6100\sim 8820 \text{ \AA}$ (Ca II IRT, H α , Li など)

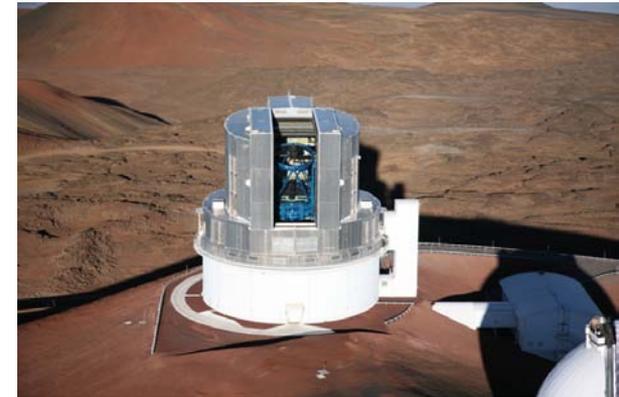
- S/N比 ~ 100 @ 8500 \AA

- 露出時間: 1-2h x (2 \sim 3)

- **24 superflare stars**

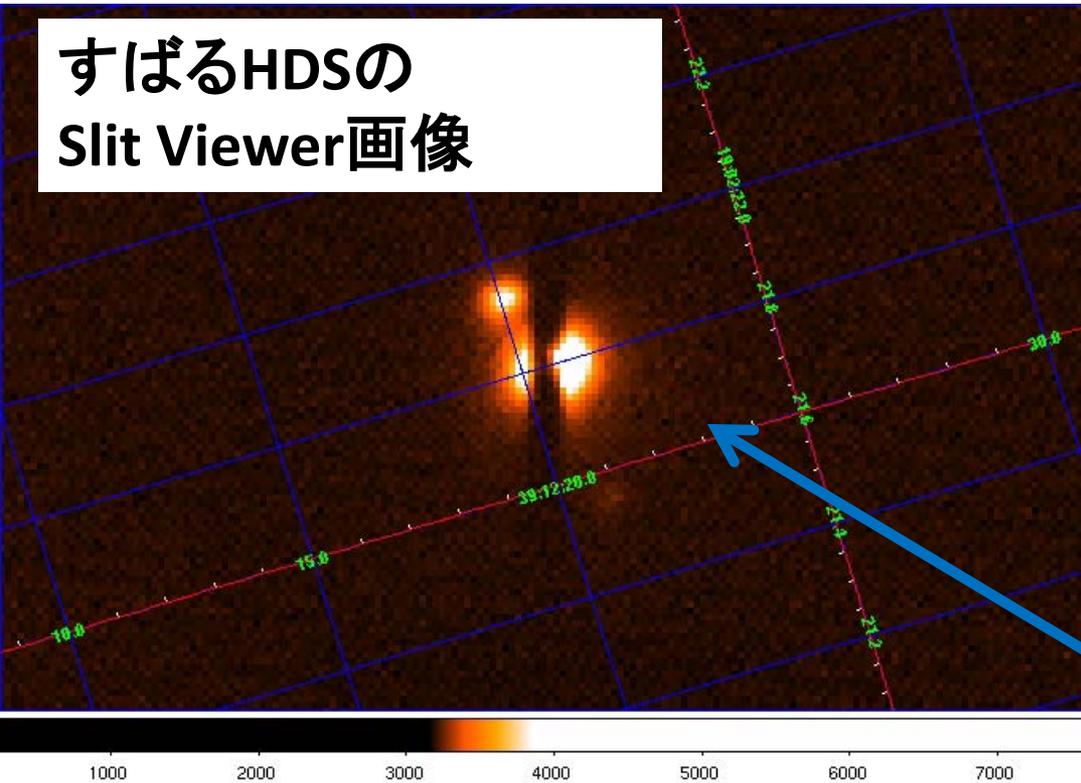
- 22 G-dwarf ($5100\text{K} < T_{\text{eff}} < 6000\text{K}$, $\log g > 4.0$) + 2 K-dwarf

- $10 \leq I \text{ mag} \leq 14$ $0.7 < P \lesssim 20$ (day)



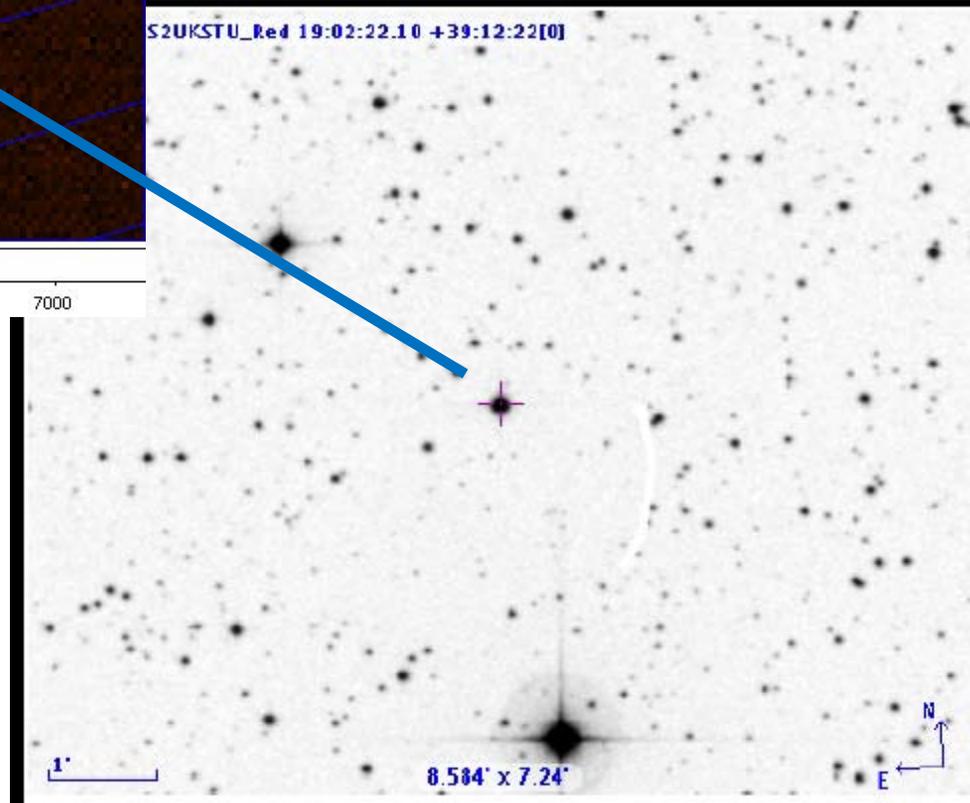
Double star (KIC4138557)

すばるHDSの
Slit Viewer画像



DSSの画像

S2UKSTU_Red 19:02:22.10 +39:12:22[0]

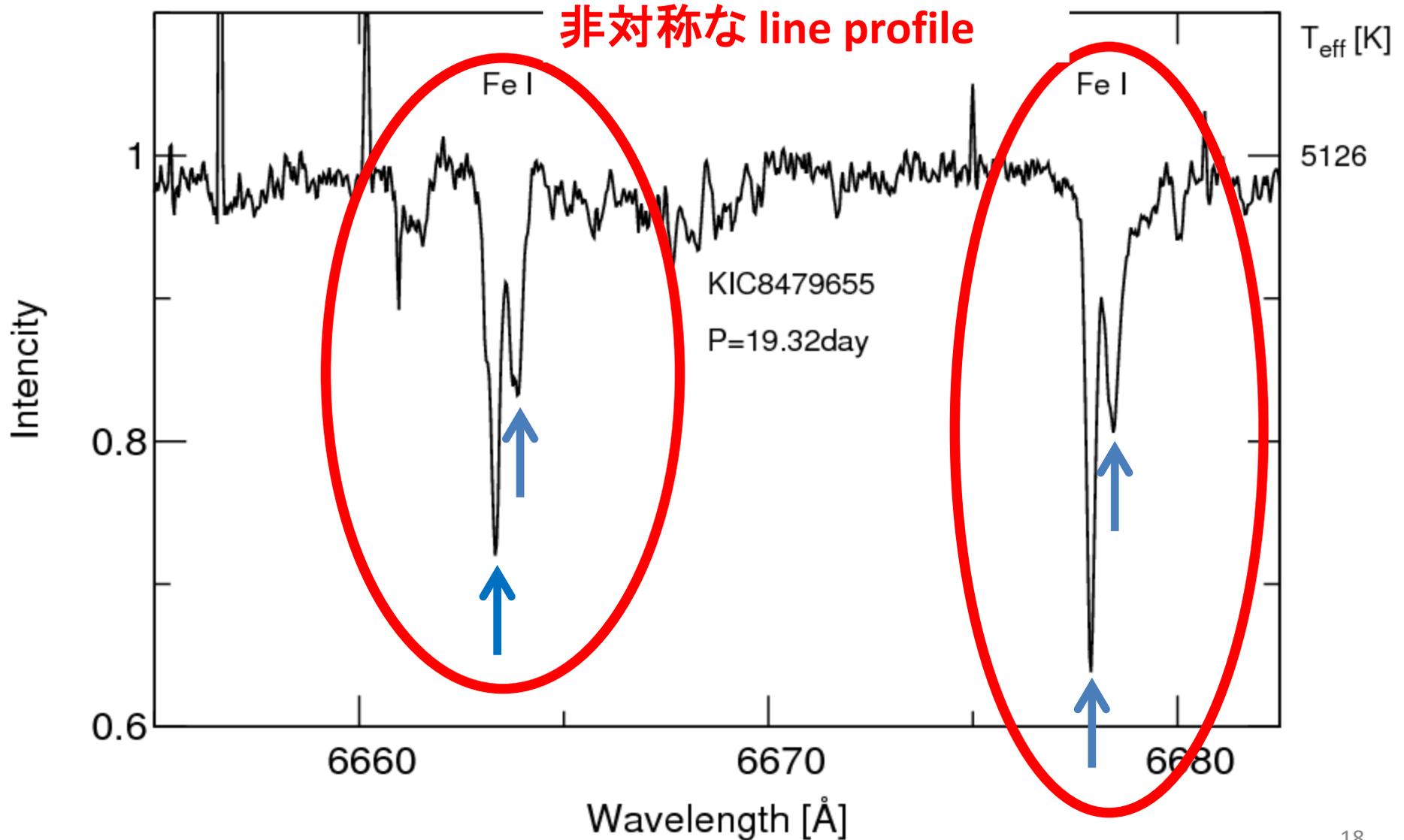


2天体はスペクトルを撮らなかった。

どちらの星がフレアを起こしているの
か判定できない。

分光連星 (Spectroscopic binary)

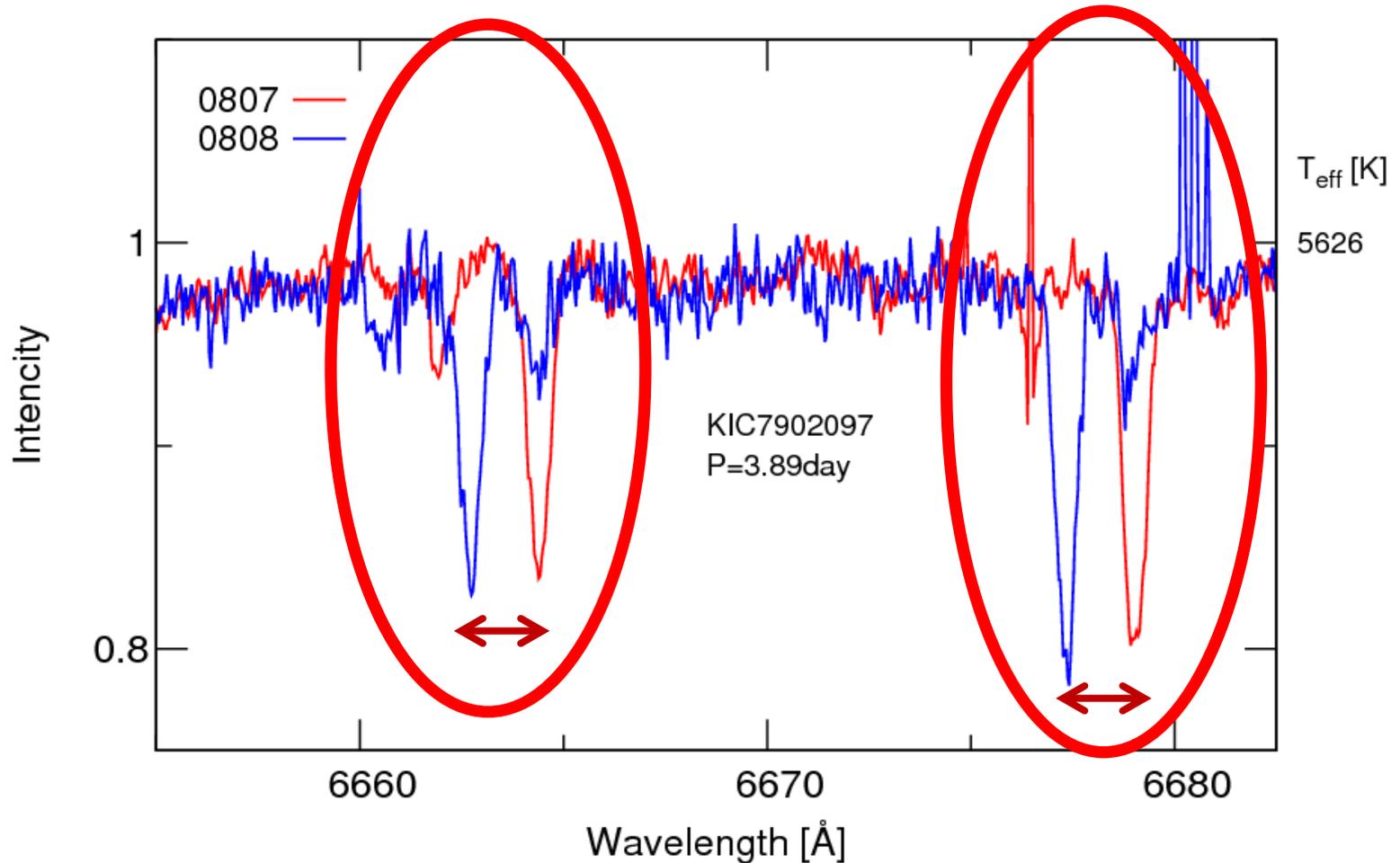
▪ Double line Profile 例



分光連星 (Spectroscopic binary)

- 視線速度(RV)変化

(例) KIC7902097 Radial Velocity change ≈ 76.7 km/s



単独星と連星の比率は半分程度？

以下、本発表では単独星に着目

括弧内の数字は $P > 10$ dayの星

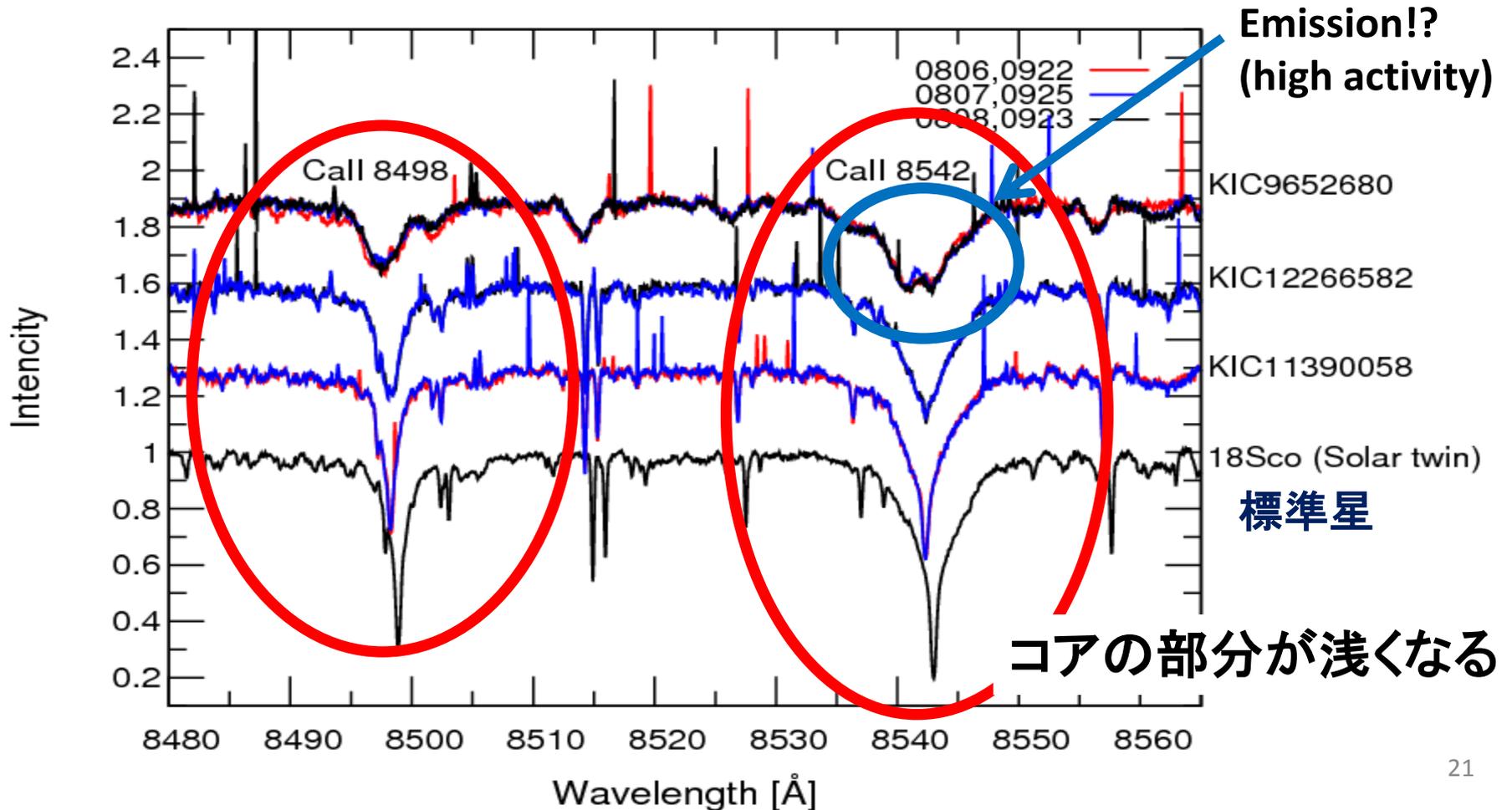
$P > 10$ day, 5600~6000Kである(太陽に似ている)星も！！
(KIC11390058)

Number of Stars

Teff	Total	Single	Spectroscopic Binary	Visual Binary
5600~ 6000K	11	7(1)	2	2 (No spectroscopy)
5100~ 5600K	11	4	6(2)	1
<5100K	2	1	1	0
Total	24	12	9	3

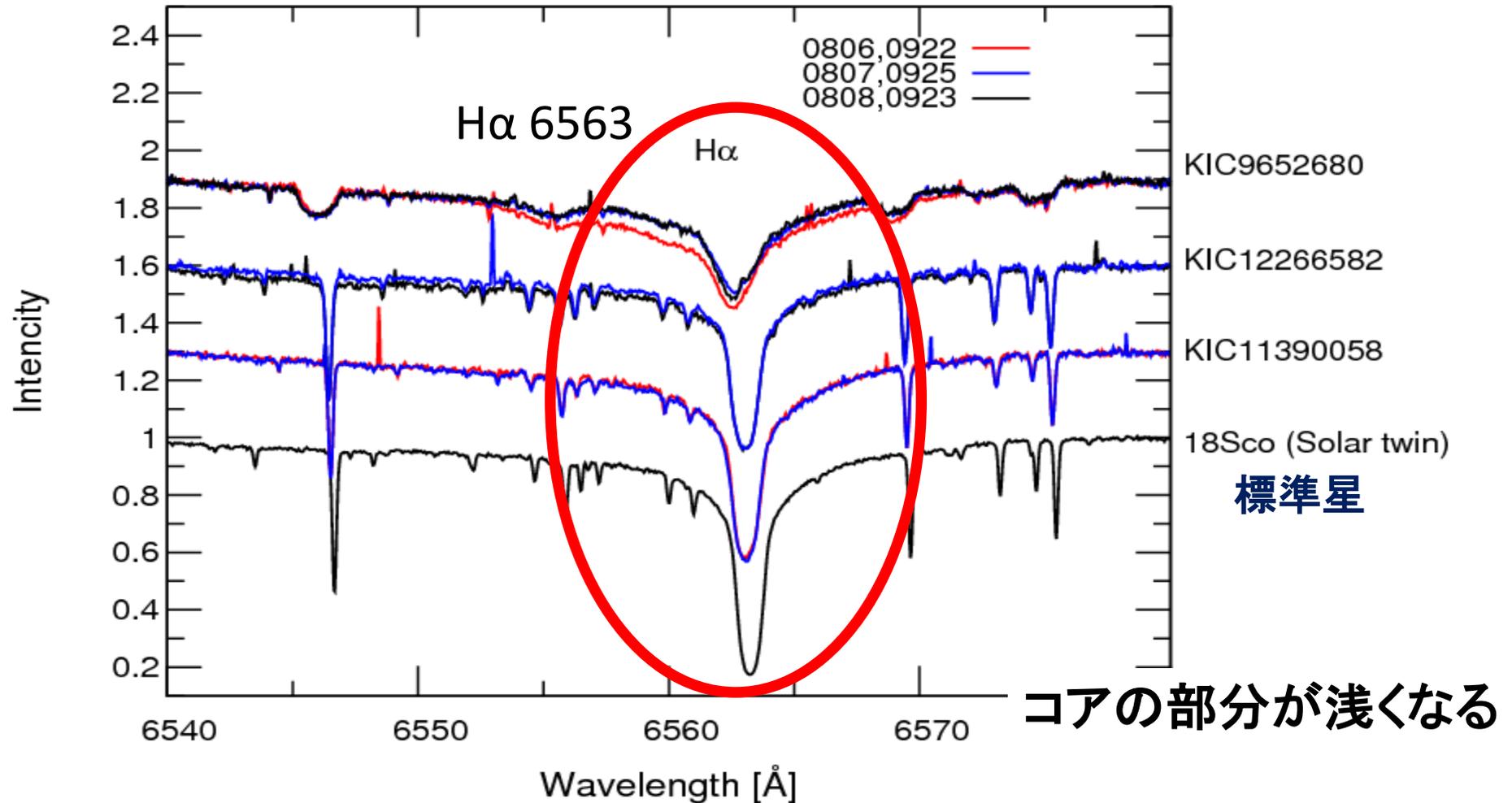
彩層活動性(Ca II 8498/8542)

- 活動性が高くなると, 彩層からのemissionが強くなるため、Ca IIのlineのコア部分が浅くなる。
- 彩層活動性⇒ 大黒点の存在!?



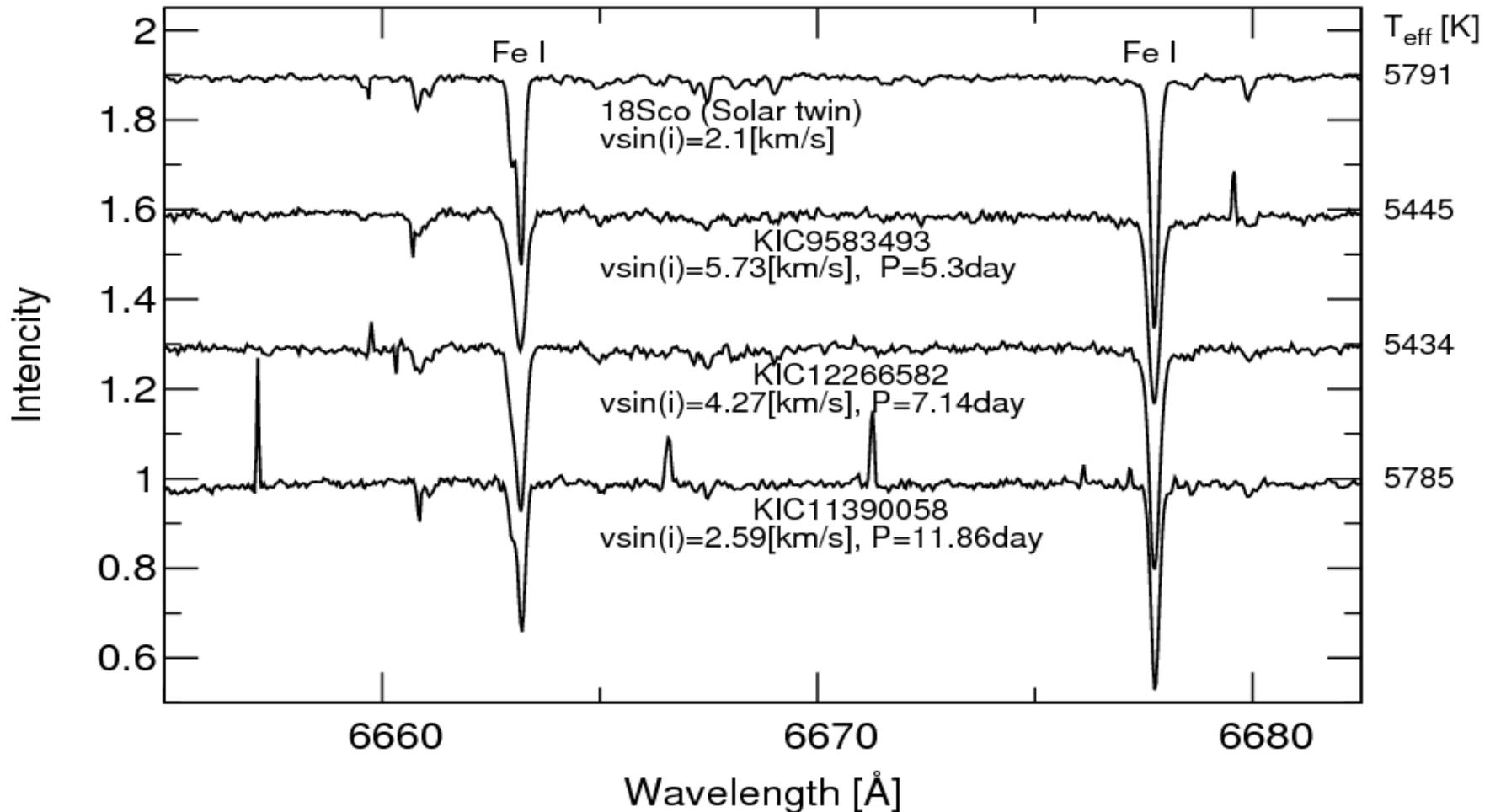
彩層活動性 (H α)

H α のcore fluxも同様に彩層活動性を反映(太陽でも良く用いられる)
Ca II tripletの結果と同様



Slowly rotating stars

太陽のように自転速度の遅い星は細いline profile



Measuring $v \sin i$

現時点はKICのパラメータ(温度、表面重力、金属量)を仮定して評価
⇒スペクトルから大気パラメータを決めていく方法(解析中)
については今回は略。

- Takeda et al. (2008他) に従った方法(sptool)

- Kurucz ATLAS/WIDTH9 (Kurucz 1993) を用いて

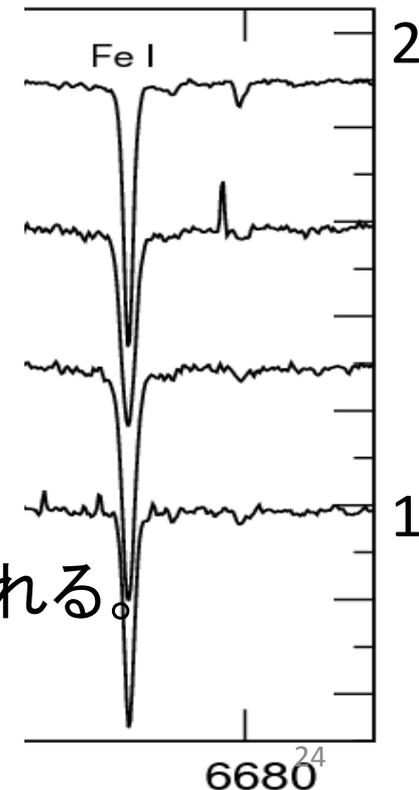
- 各星のモデル大気を得る

- Feのラインに対して合成スペクトルをGaussian fitting

$$[f(v) \propto \exp(-(v/v_M)^2)]: \quad v_M^2 = v_{ip}^2 + v_{rt}^2 + v_{mt}^2$$

- 波長分解能(instrumental profile)、及びマクロ乱流の影響(温度等に依存)を考慮した上で $v \sin(i)$ が得られる。

- ある程度のerrorはありそう



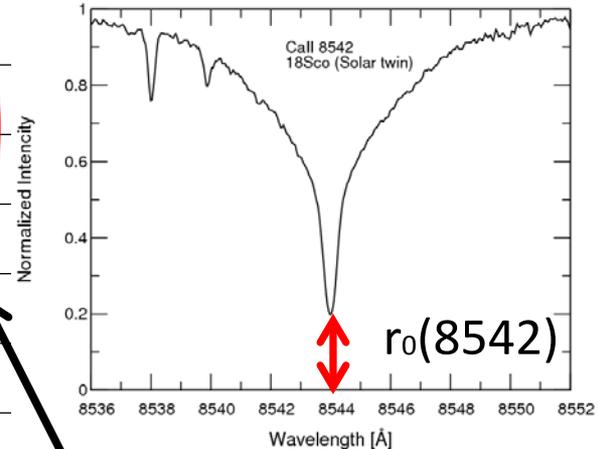
Vsin i error
 $\geq 10\%??$

Single stars

Ca II 8542

$$r_0(8542) = F_{8542} / F_{cont}$$

KIC	Teff[K]	log g	P[day]	v sin i [km/s]	$r_0(8542)$
8429280	4616	4.39	1.17	20	0.67
11764567	5238	4.38	20	15.18	0.49
4831454	5298	4.59	5.19	~0	0.5
12266582	5434	4.35	7.14	4.27	0.52
9583493	5445	4.50	5.3	5.73	0.51
9652680	5618	4.80	1.41	38.81	0.68
4742436	5628	4.15	2.34	2.71	0.3
6503434	5714	4.29	3.89	5.27	0.27
11390058	5785	4.30	11.86	2.59	0.32
11610797	5865	4.50	1.69	25.08	0.63
9412514	5958	4.22	1.85	7.69	0.22
3626094	5835	4.26	0.72	2.37	0.24
Comparison	---	---	---	---	---
18Sco	5791	4.40	---	2.1	0.2
61Vir	5571	4.67	---	0.46	0.19
59Vir	6234	4.25	---	6.68	0.4



ro: core depth

High activity !?

- ← Solar analog
- ← Non-active
- ← Active

r_0 error : mainly depend on determination of continuum (<0.1)

確かにスーパーフレア星は彩層活動度が高いようだ。

また、自転周期が10日以上と、自転が遅い星もある。

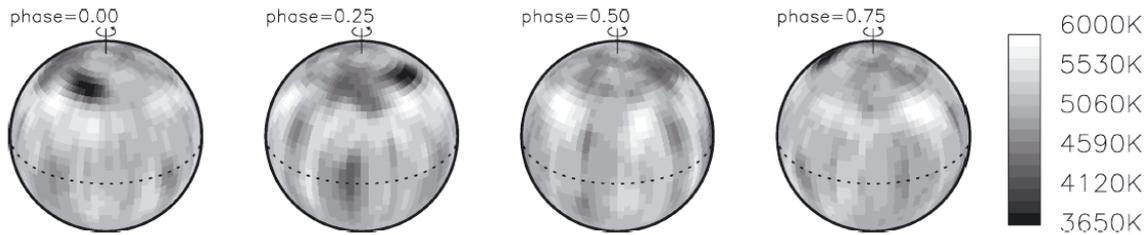
金属量も太陽とほとんど変わらない星が多い(Liは多い傾向)。

そして次は、

- まだサンプルとして十分ではない。(数; 自転によると思われる変動は見られるがスーパーフレアが観測されていない星は?、、、)
- 活動度は変化するかしないのか。
- 黒点のイメージング

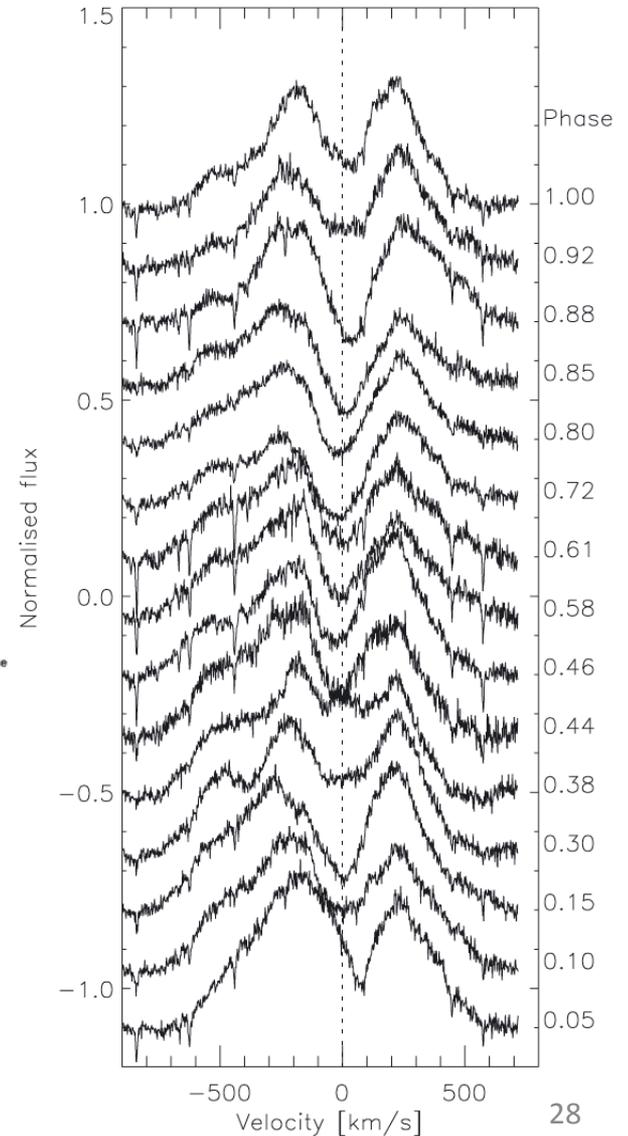
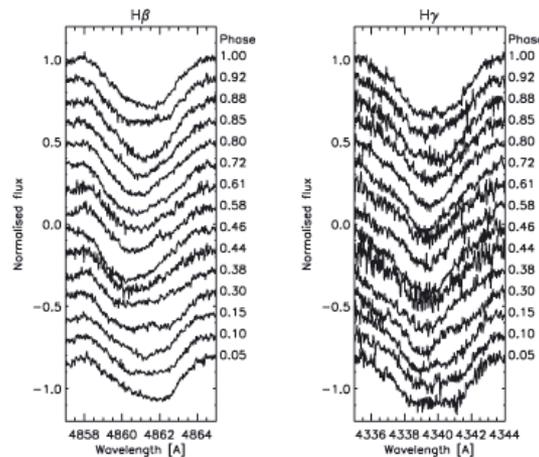
→3.8m望遠鏡で時間をかけてサンプルを増やし、継続的な観測を行おう！

黒点のDoppler imaging



Doppler imaging による温度マップ

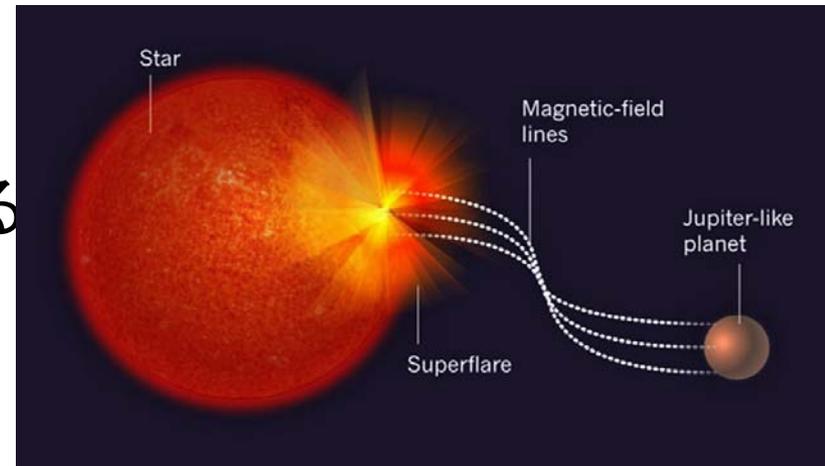
- Korhonen et al. 2009
- FK Com
- $R=55,000$



Hot Jupiterとスーパーフレア

- 太陽では過去2000年にスーパーフレアが起きた記録がない (Schaefer et al. 2000)
 - スーパーフレアの発生にはhot Jupiter が不可欠？ (Rubenstein & Schaefer 2000)
 - Hot Jupiterがあると主星の磁場活動が活発化？ (Cuntz et al. 2000)
 - 惑星の磁気圏と星の相互作用
 - 惑星からの潮汐力
 - 主星の近く($<0.1\text{AU}$)を大きな惑星が公転している場合は有効に働くかもしれない

•しかし、hot Jupiterがなくとも、スーパーフレアを起こすのに必要な磁気エネルギーをダイナモで作り出し蓄えることはできるようだ (Shibata et al. 2013, in press)。→我々の太陽



- Kepler衛星のデータに基づいて系外惑星を持つとされている星は、我々のG型スーパーフレア星リストには存在しなかった。
- 検証のため、3.8m望遠鏡での観測では、hot Jupiterを検出できるくらいの視線速度測定の精度があると嬉しい。
- 12セルを用いるより、HARPSのような、観測波長域を広げて吸収線の本数を増やす+装置の安定性を増す方向が望ましい。

まとめ

- 分光学的にも太陽とよく似た性質の星で、スーパーフレアを起こす星が見つかった。
- 3.8m望遠鏡／高分散分光装置では、サンプル数を増やし、活動度の変化を調べたい。
- Hot Jupiterを持つかどうかの調査は重要。
- 波長分解能は5～6万でも十分だが、長期間安定し、幅広い波長をカバーできる装置が望ましい。
- 小望遠鏡でのサーベイで明るいスーパーフレア星／スーパーフレアの探査も並行して行う。
- 他の高分散分光での長期変化モニタ: 系外惑星探査, Be 星, Be/X-ray binary, R CrB, ...