

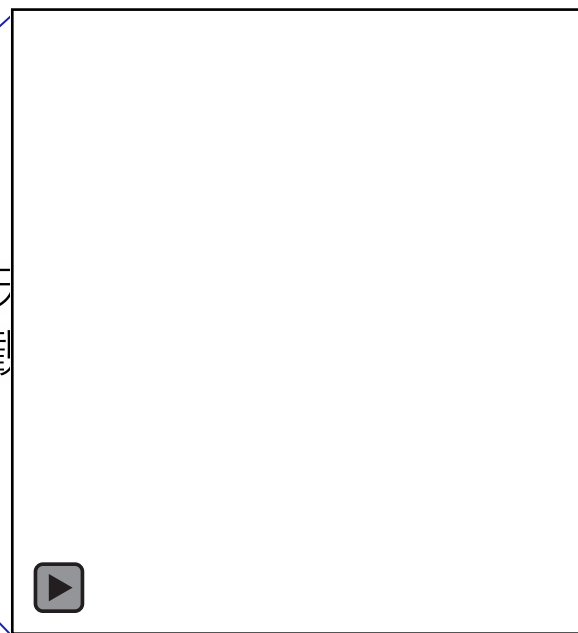
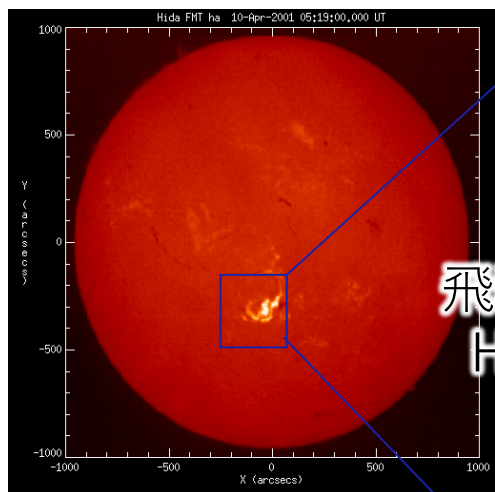
せいめい望遠鏡とTriCCSを用いた M型星フレアの高速分光観測

前原裕之(国立天文台),

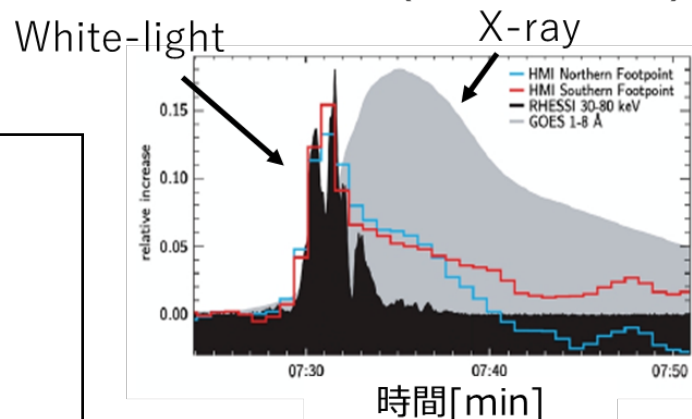
共同研究者：野津湧太(コロラド大学), Adam F. Kowalski(コロラド大学),
行方宏介(京都大学), 前田啓一(京都大学), 他TriCCSチーム

太陽/恒星フレア

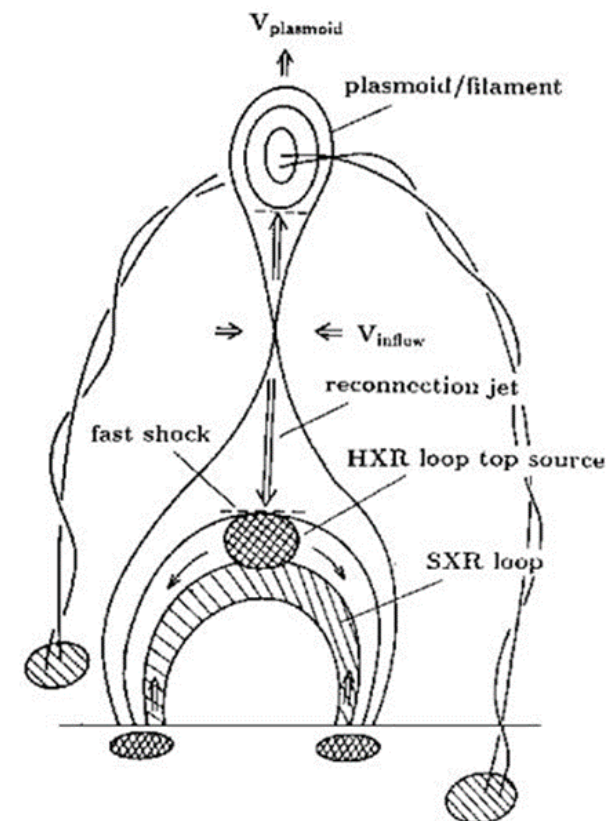
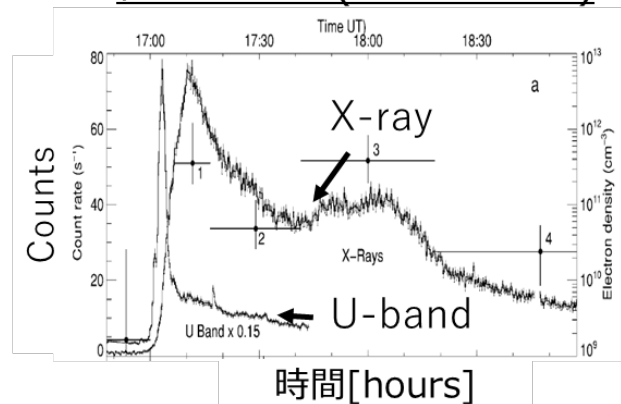
- 太陽/恒星大気（コロナ）中で起こる爆発現象
- 黒点付近の磁場エネルギーが磁気リコネクションで解放されることで様々な波長で増光



太陽フレア(Martinez+12)



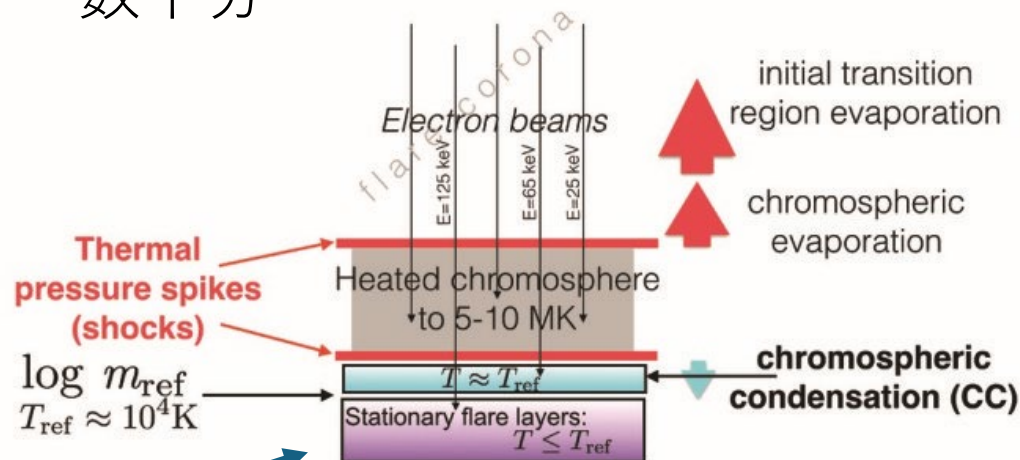
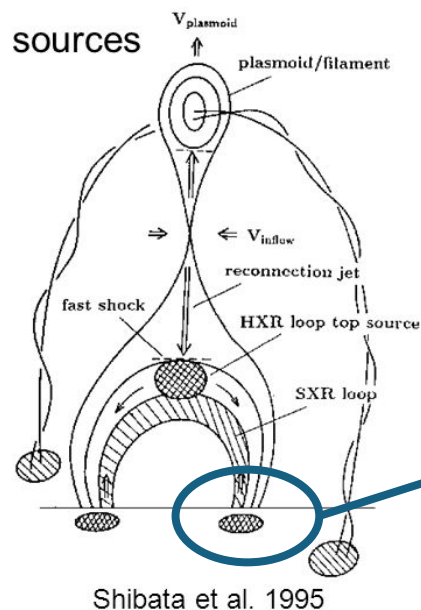
恒星フレア (Guedel+02)



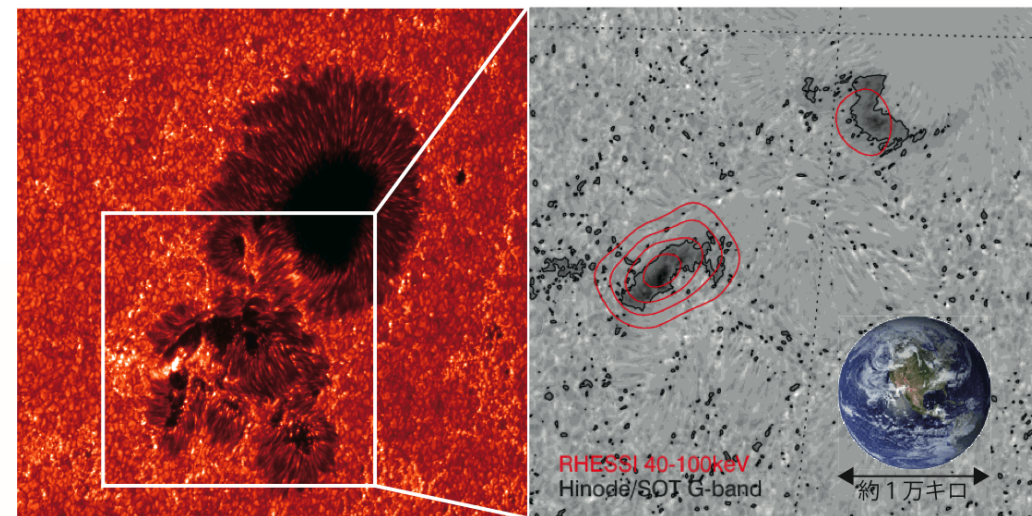
Shibata et al. 1995

フレアに伴う連続光放射

- 非熱的電子が彩層に突入し加熱
 - 彩層プラズマが膨張する反作用で彩層下部が圧縮され光学的に厚くなる→連続光放射
- タイムスケール
 - 太陽：数分
 - 恒星：数分～数十分



Photosphere Figure not to scale
Kowalski et al. (2017)



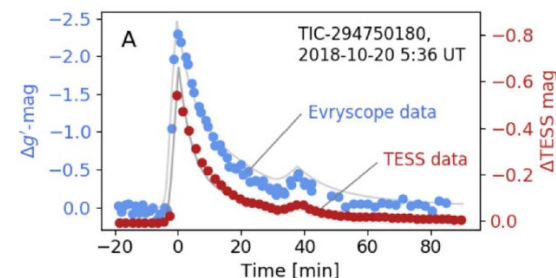
Watanabe et al. (2010)

太陽フレアでは可視連続光と硬X線
(加速された電子が彩層に突入し制
動放射で硬X線を出す)の放射領域が
空間的によく一致していることが観
測されている

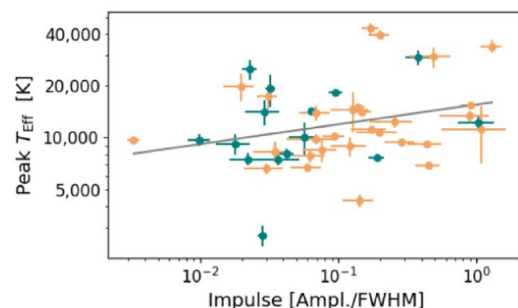
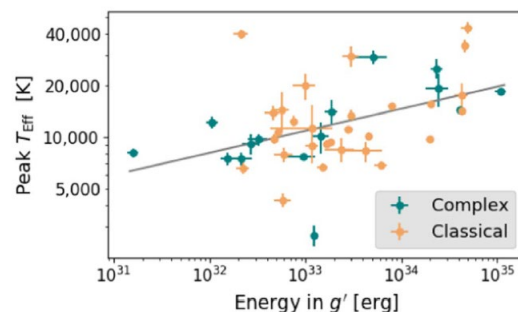
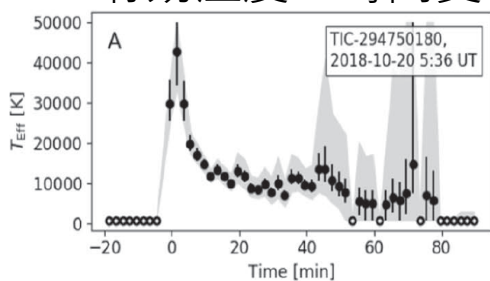
フレアに伴う可視連続光放射

- 可視光域では $T \sim 8,000\text{--}10,000\text{ K}$ の黒体放射に近いSEDを示す (e.g., Hawley & Fisher 1992)
- フレアピーク付近で有効温度最大 $\rightarrow$ 減光に伴って温度が下がる (e.g., Howard et al. 2020)

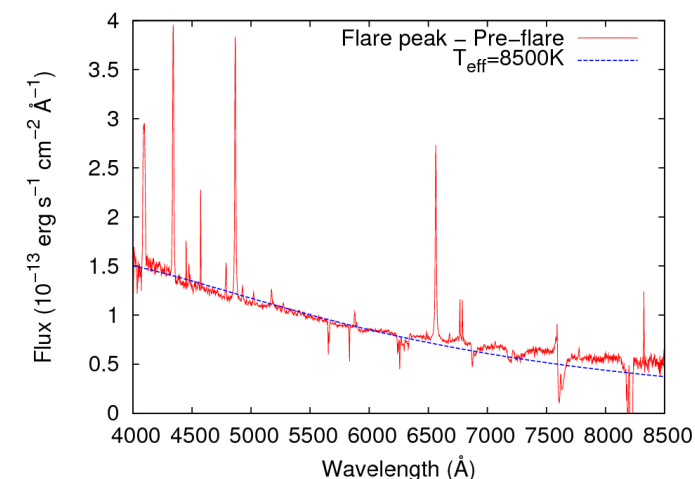
フレア光度曲線



有効温度の時間変化



Howard et al. (2020)



Howard et al. (2020)

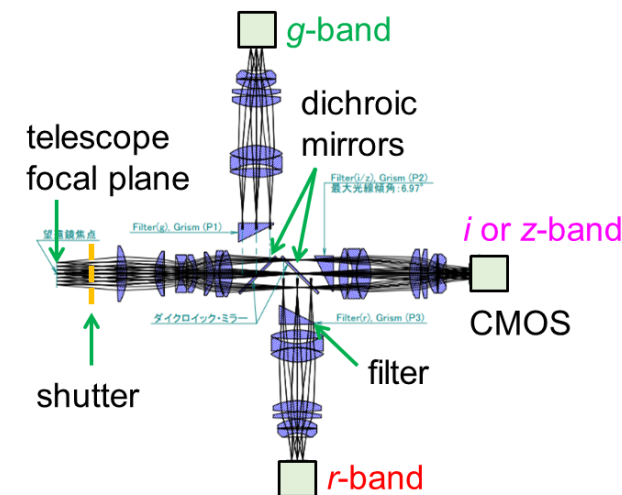
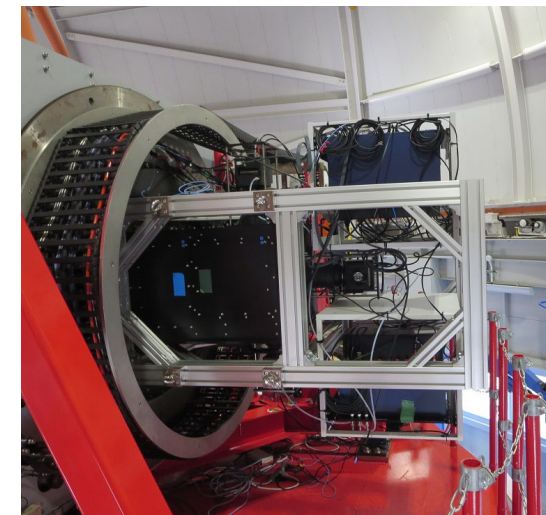
- エネルギーが大きくかつピーク光度と減光時間の比率が大きい（振幅が大きく継続時間の短い）フレアほど有効温度が高い傾向
- g' -bandとTESSの2バンドの結果のため温度の決定精度がそれほど高くない



高時間分解能 & 広帯域分光観測

観測

- 観測天体：CR Dra (M1.5Ve)
 - Prot=1.984 days (Callingham+2021)
 - flare rate $\sim 2.3 \text{ day}^{-1}$ (Callingham+2021)
- 観測期間：2024-05-13 – 2024-05-17
 - HSTによる観測 (Kowalski et al.)との同時観測
- 望遠鏡/装置：3.8-m せいめい望遠鏡 + TriCCS
 - 3800-10500 Å; $\lambda / \Delta \lambda \sim 700 @ H\alpha$
 - time cadence: 5 sec
 - S/N $\sim 30\text{-}40 @ H\text{-beta}$
 - スリットサイズ：1" $\times$ 10'
- スリット長が10'と十分広いため、近くの比較星とCR Draを同時に分光し、フレーム毎に放射強度較正を行った

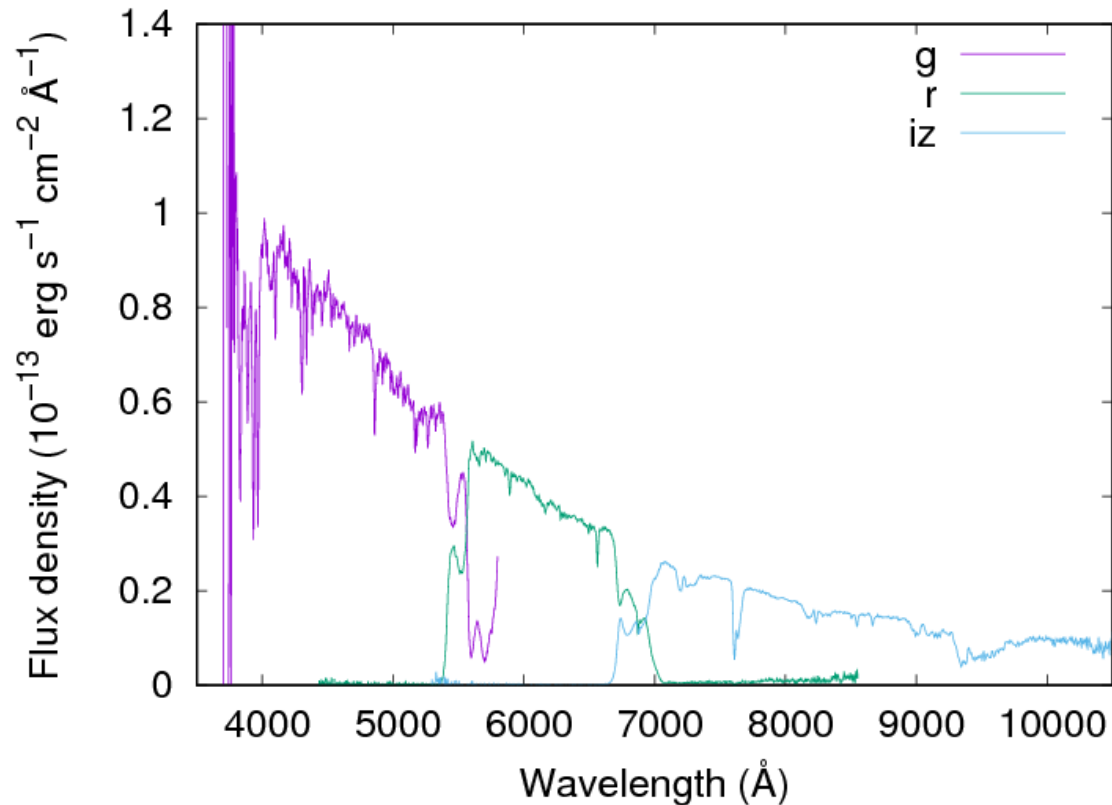


視野と得られるスペクトルの生画像の例

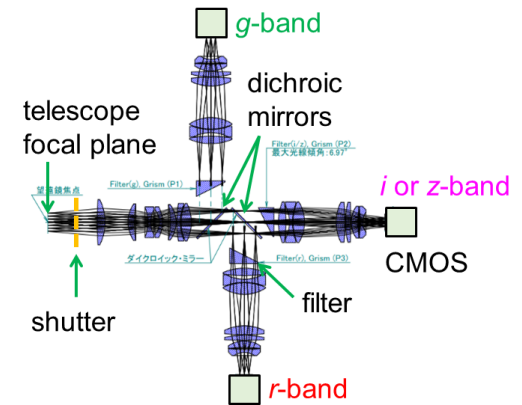
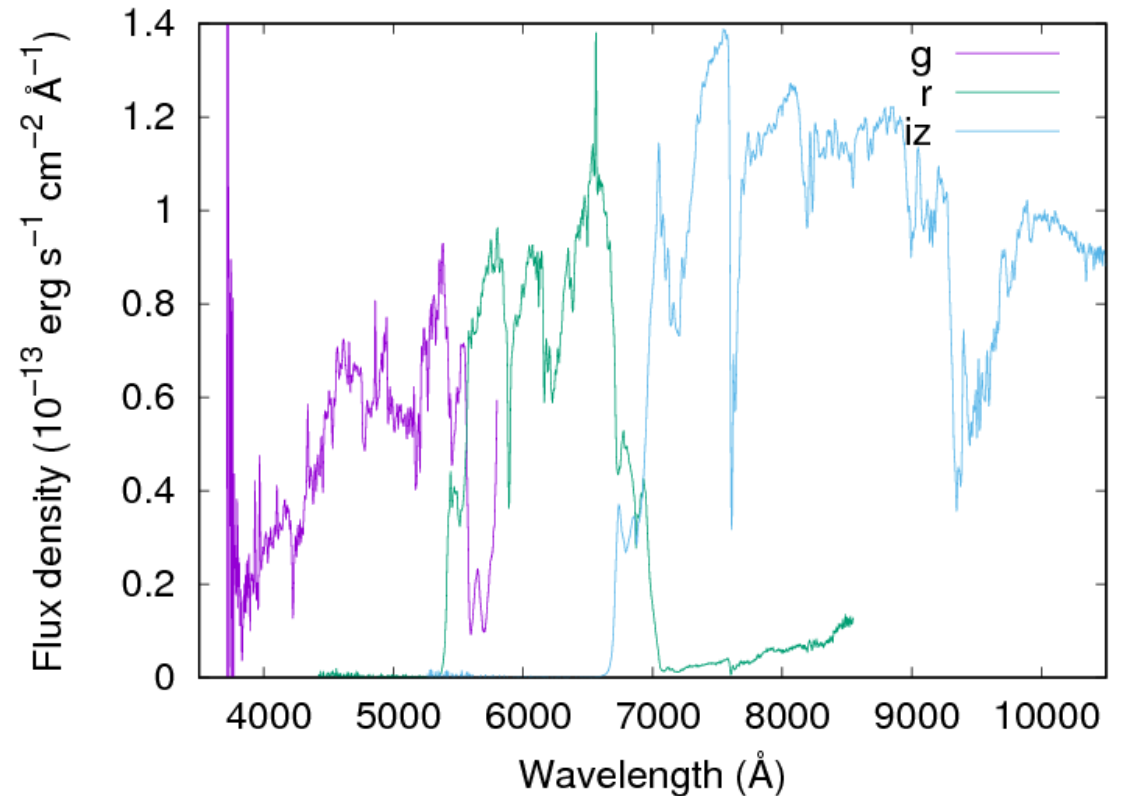


得られるスペクトルの例

- 比較星

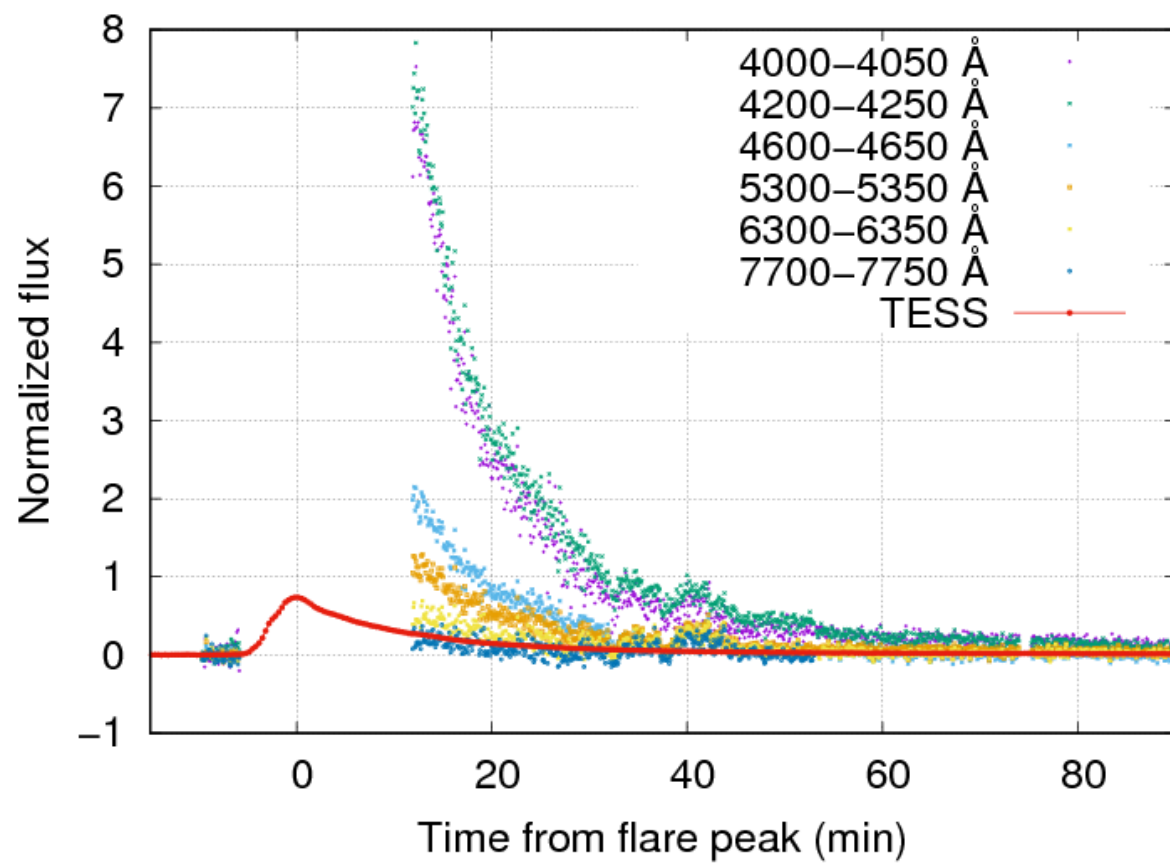


- CR Dra (静穏時)



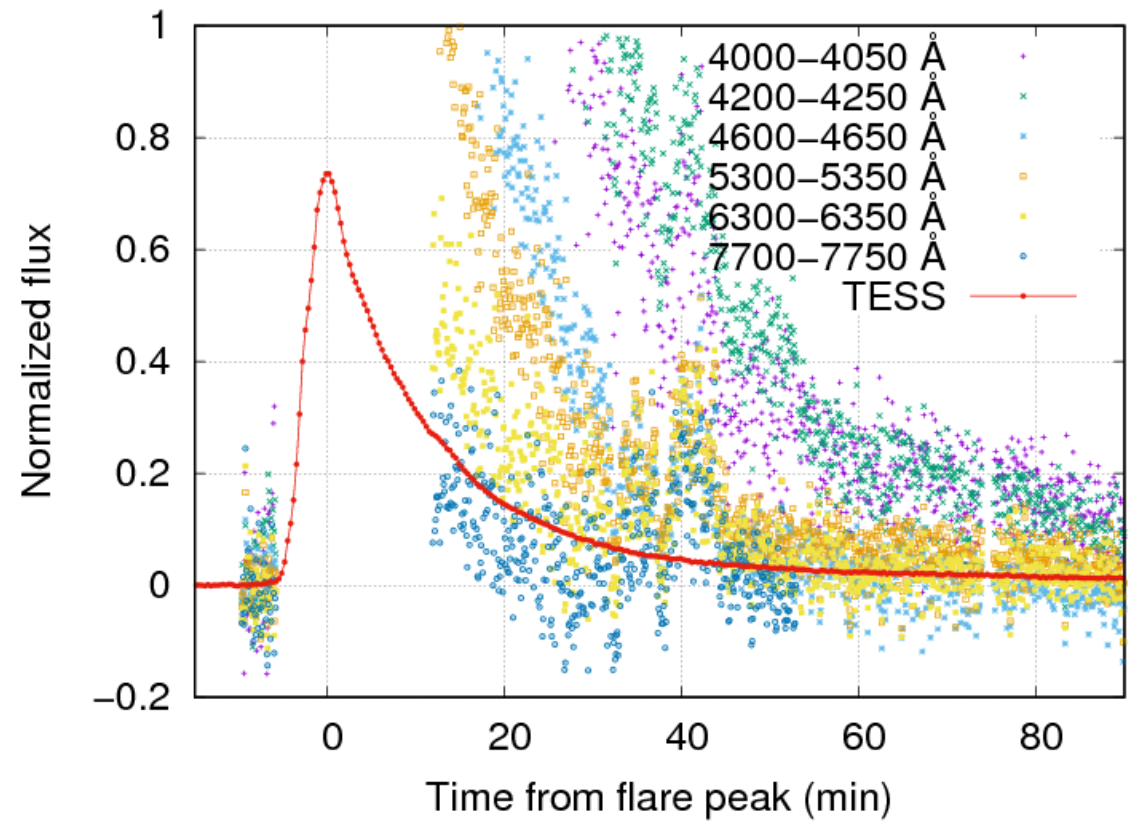
5月17日のスーパーフレア

- フレアエネルギー： $E_{\text{TESS}} \sim 10^{35}$ erg
 - フレアピーク付近は悪天候で観測できていないものの、フレアピークから～12分後以降は連続して観測に成功
- フレアの振幅 ($\Delta F/F$)
 - TESS-bandではフレア前の星の明るさに対して80%増加
 - 4200-4250 Å では > 700%
 - TESS-bandと同じくらいの波長 (7700-7750 Å) のfluxの時間変化はTESSの光度曲線とほぼ一致した



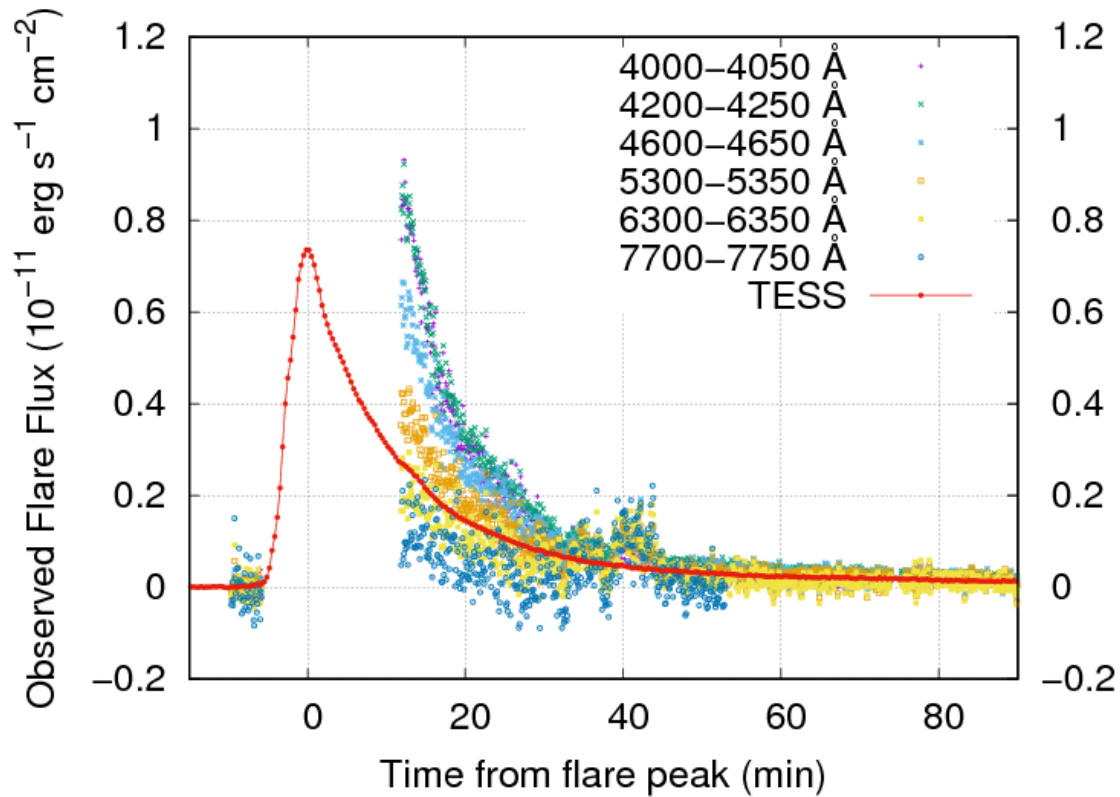
測光精度

- フレア前やフレア後の静穏時では星の明るさに対してRMS~6-7%の精度で測光できていた
- $t=40$ min前後のspike様の変動
 - TESSでは受かっていない
 - スリット为天球面上の向きがずれて、スリットに入る比較星と対象星の光量の比率が変化して生じた可能性がある

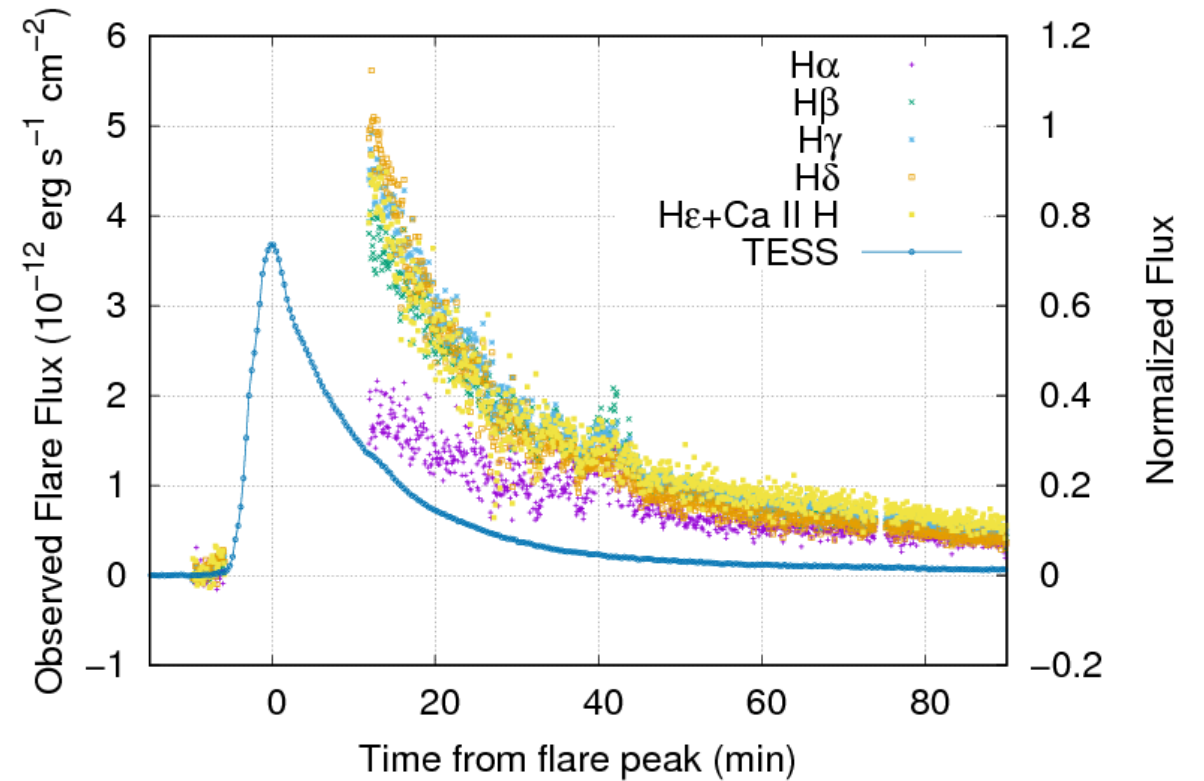


TriCCSで観測されたフレアの光度曲線

- 連続光flux

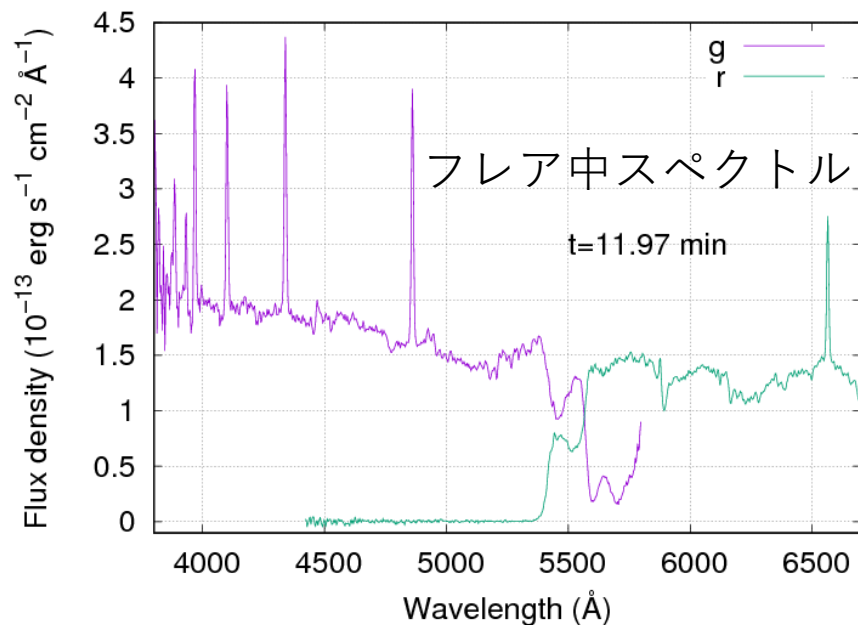


- 輝線flux



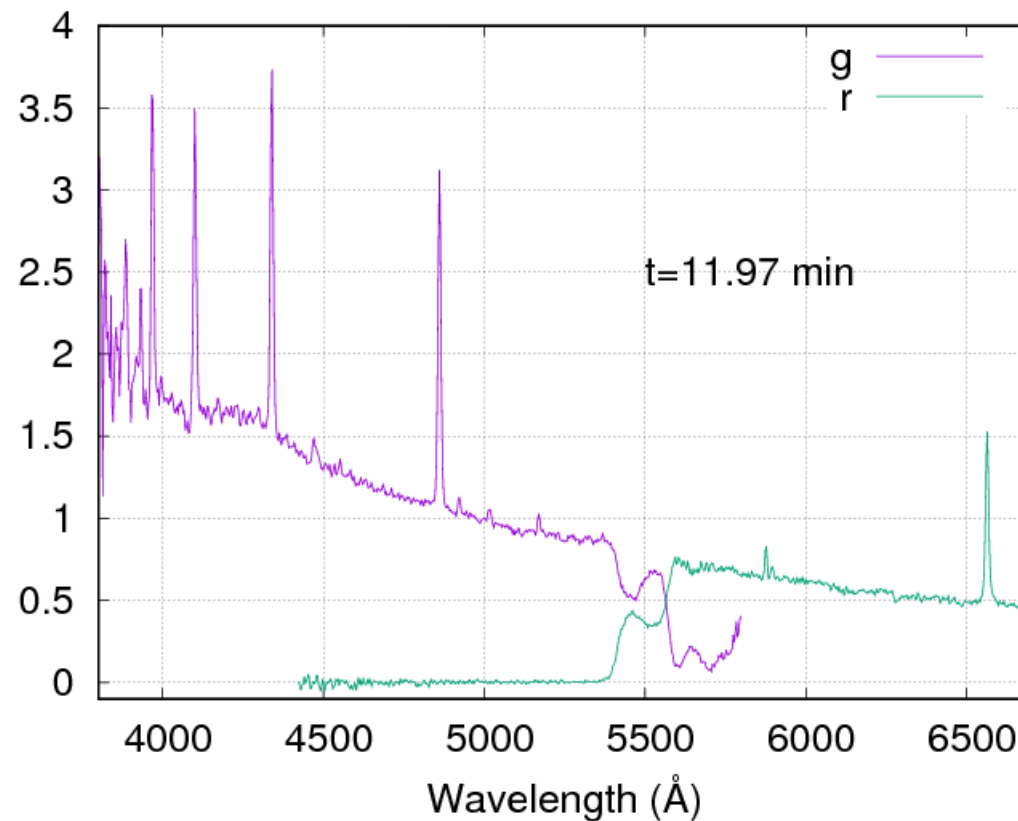
- 輝線の方が連続光と比べてゆっくりと減光
- H α 線fluxはフレアの前半ではH β – H ϵ のよりも弱い

フレア中のスペクトル

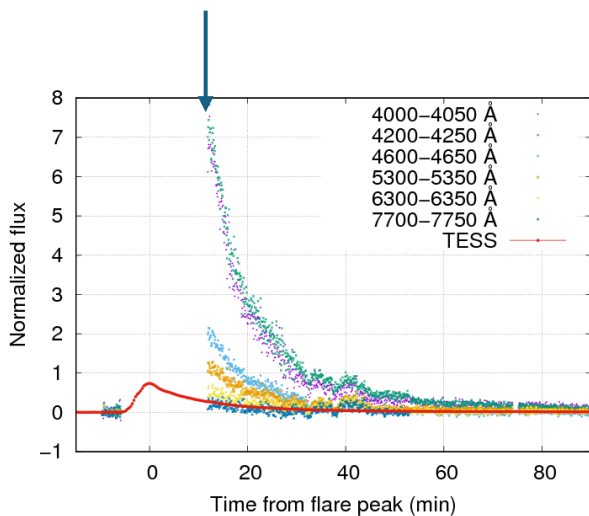
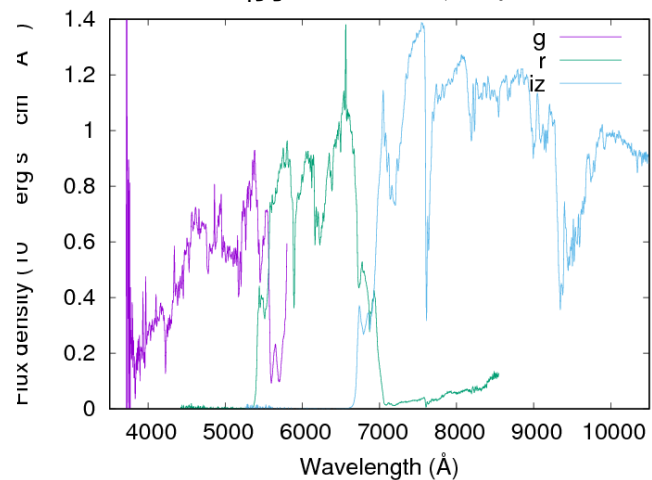


フレア成分のみの差分スペクトル

Flux density ($10^{-13} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ \AA}^{-1}$)

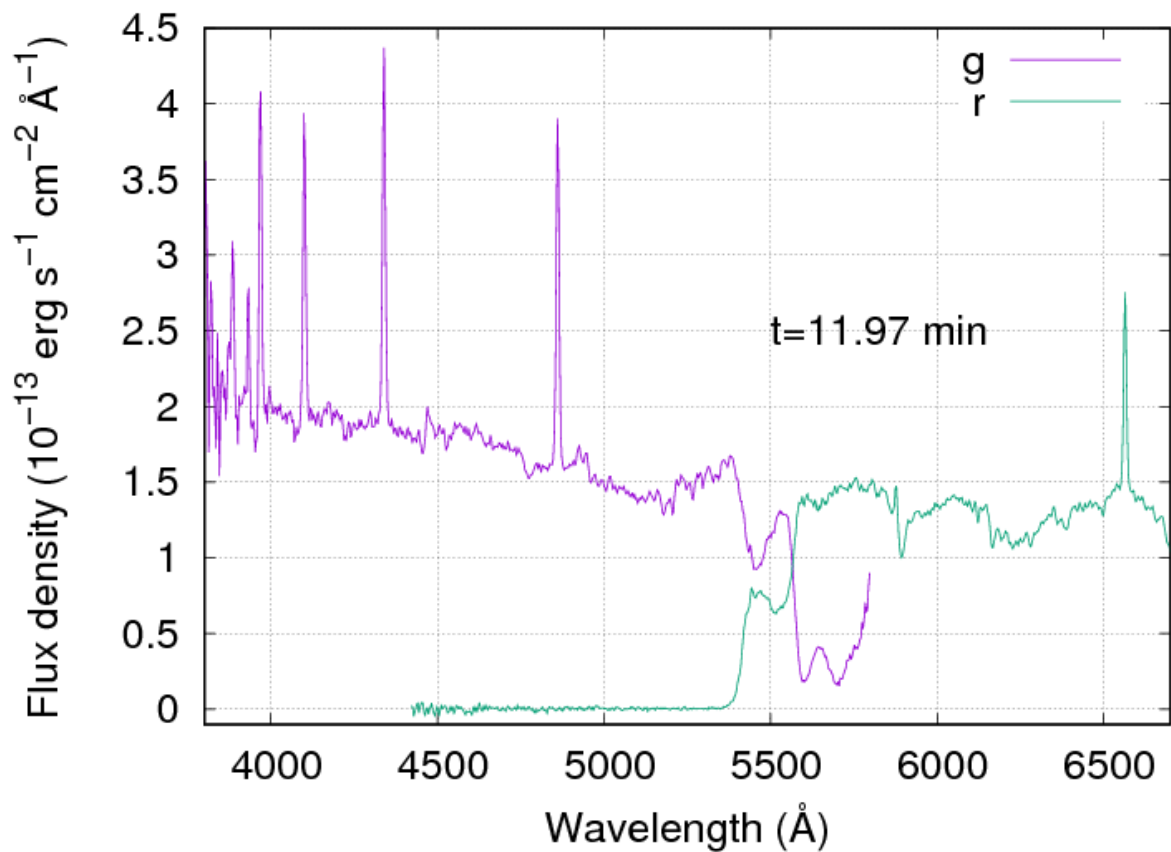


フレア前のスペクトル

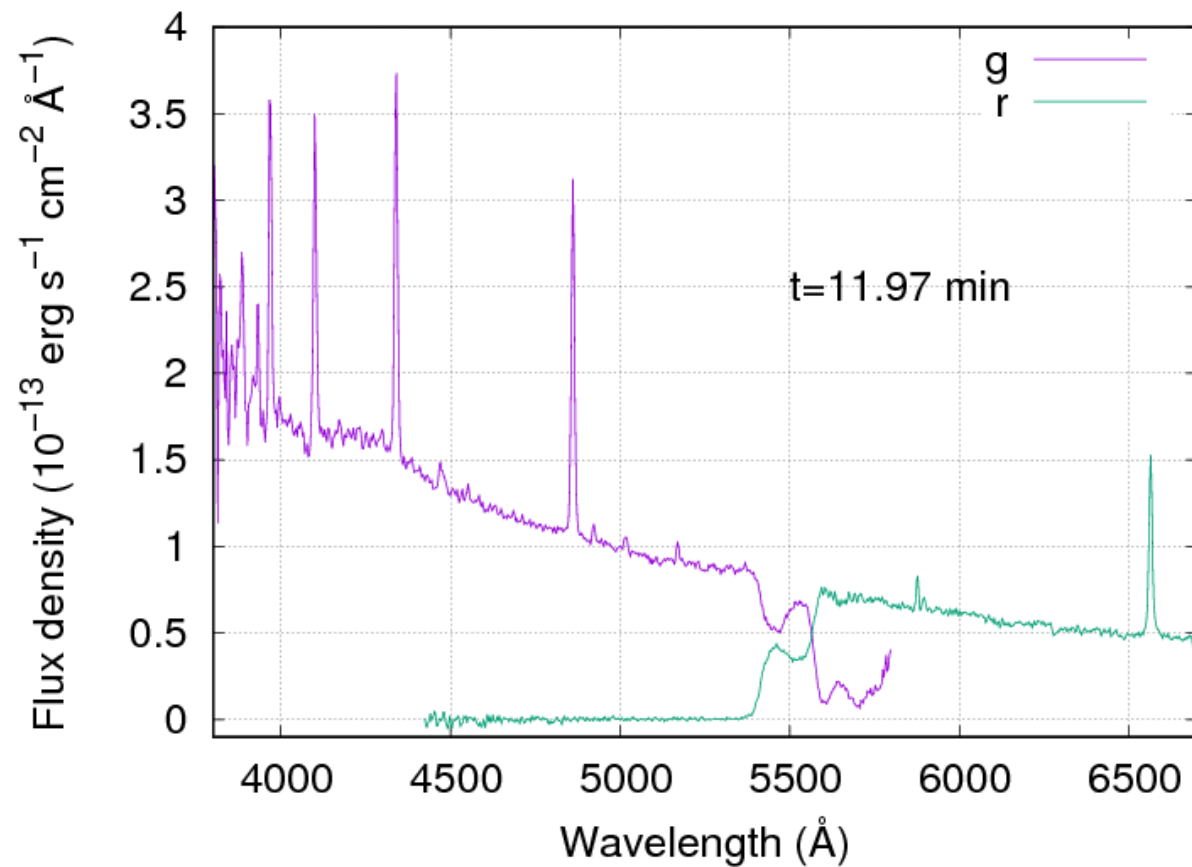


フレア中のスペクトルの変化

観測されたスペクトル



フレア前のスペクトルからの差分

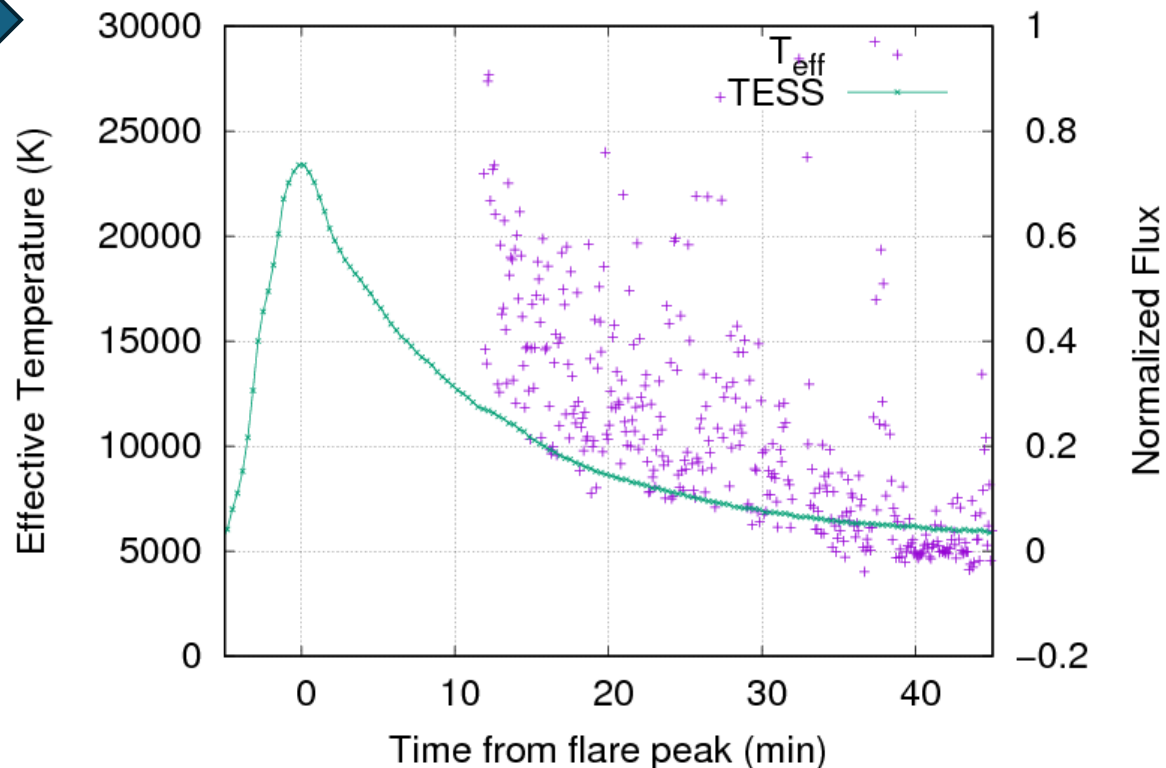
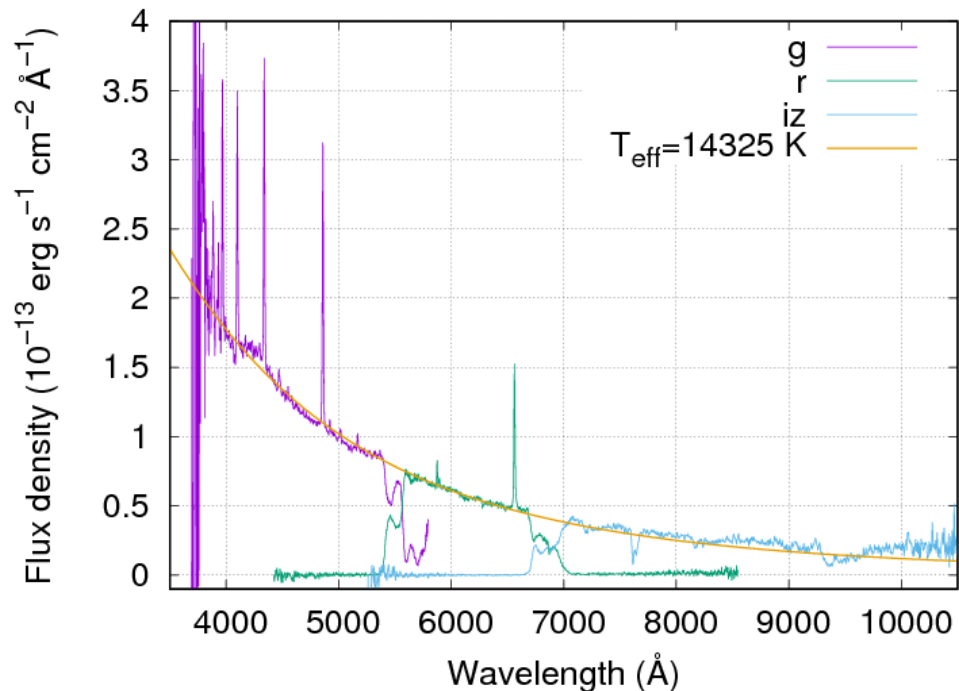


連続光放射の有効温度の時間変化

- フレア前スペクトルを差し引いたフレアのための差分スペクトルから、黒体放射を仮定して有効温度を求めた。

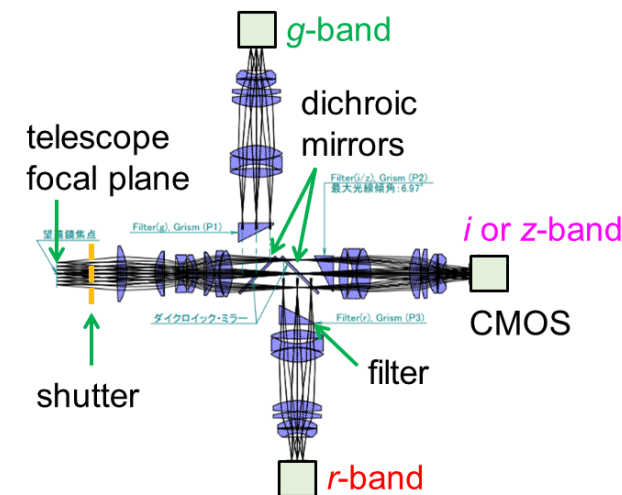
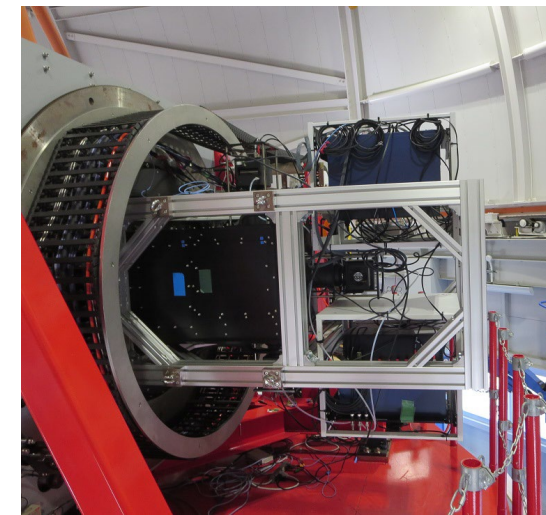
- 連続光の減光に伴って有効温度が低下する傾向が見られた

- $T_{\text{eff}} = \sim 14000\text{--}20000\text{ K}$ @ $t = 12\text{ min}$
 $\rightarrow T_{\text{eff}} = \sim 5000\text{ K}$ @ $t = 40\text{ min}$

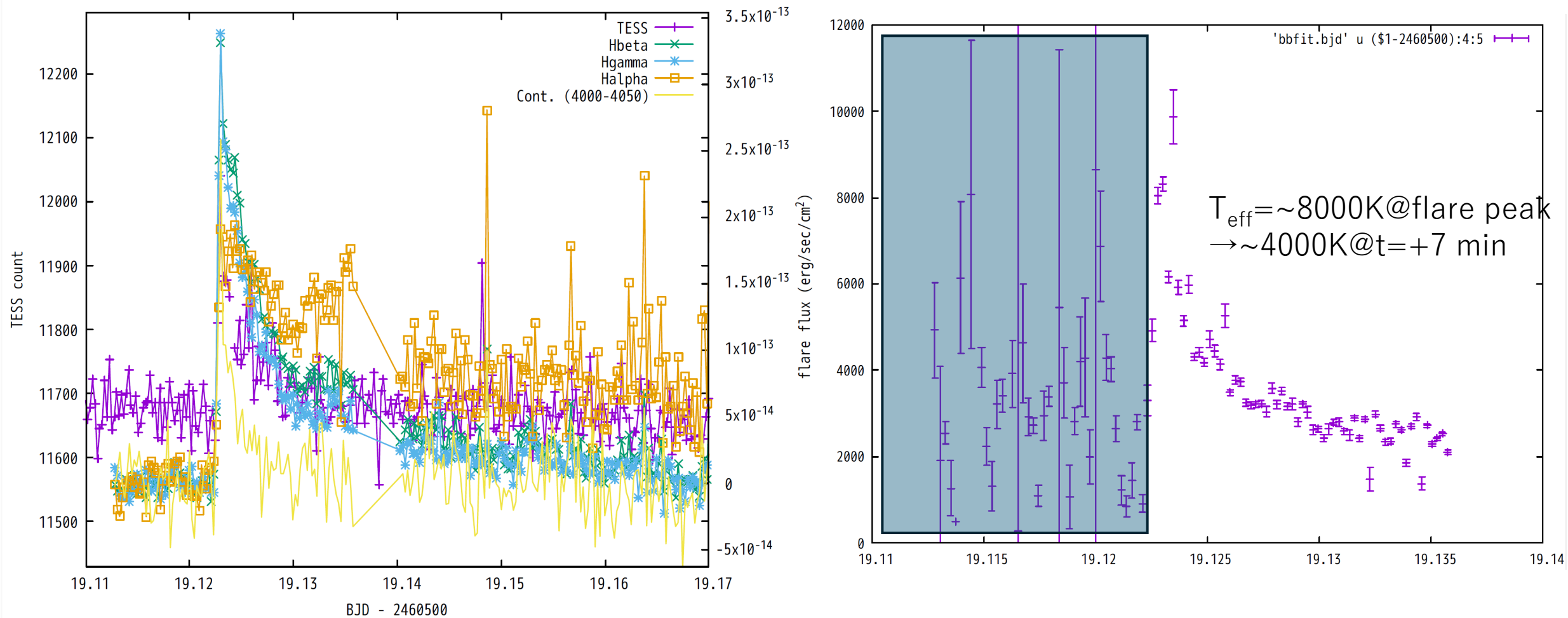


観測

- 観測天体：GJ1243 (M4.0Ve)
 - Prot=0.5972 day (Hawley et al. 2014)
 - flare rate $\sim 10 \text{ day}^{-1} (E > 10^{31} \text{ erg})$; Hawley et al. 2014)
- 観測期間：2024-07-26 – 2024-07-31
- 望遠鏡/装置：3.8-m せいめい望遠鏡 + TriCCS
 - 3800-10500 Å; $\lambda / \Delta \lambda \sim 700 @ H\alpha$
 - time cadence: 10-20sec
 - S/N $\sim 20 @ H\text{-beta}$
 - スリットサイズ：1" $\times$ 10'



GJ1243のフレアの光度曲線とフレア成分の有効温度の時間変化



まとめ

- せいめい望遠鏡とTriCCSスリット分光モードを用いてフレア星CR DraとGJ1243の観測を行った
 - 時間分解能：5–20秒
 - CR Dra: 5月17日に起きたスーパーフレアの減光期をフレアピークの12分後から観測できた
 - GJ1243: 7月27日に起きたフレア観測できた
- フレア連続光の減光に伴う有効温度が低下がみられた
 - CR Dra : $T_{\text{eff}} = \sim 14000\text{--}20000\text{K}$ @ $t = \text{flare peak} + 12 \text{ min}$ $\rightarrow T_{\text{eff}} = \sim 5000\text{K}$ @ $t = +40 \text{ min}$
 - GJ1243 : $T_{\text{eff}} = \sim 8000\text{K}$ @ flare peak $\rightarrow T_{\text{eff}} = \sim 4000\text{K}$ @ $t = \text{flare peak} + 7 \text{ min}$
 - Howard et al. (2020)でも同様の結果が報告されている
- 相対分光を行ったときの連続光の測光精度は10%程度
 - シンチレーションやスリットの天球面上での向きの制御の安定性によってスリットに入る2星の光量比の変化が影響していると考えられる