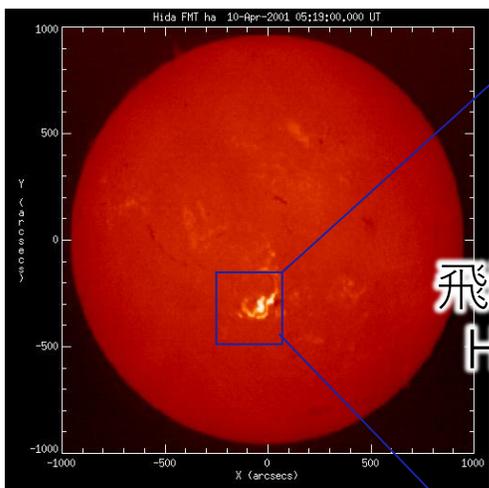


せいめい望遠鏡とTriCCS分光モードを用いた  
M型星YZ CMiにおけるフレアの  
高時間分解能分光観測

前原裕之(国立天文台)

# 太陽/恒星フレア

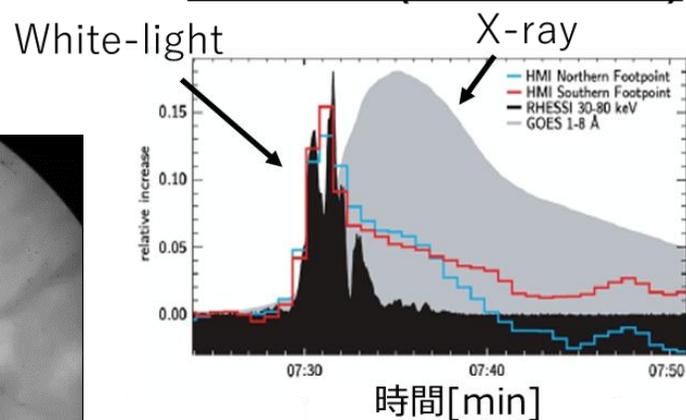
- 太陽/恒星大気（コロナ）中で起こる爆発現象
- 黒点付近の磁場エネルギーが磁気リコネクションで解放されることで様々な波長で増光



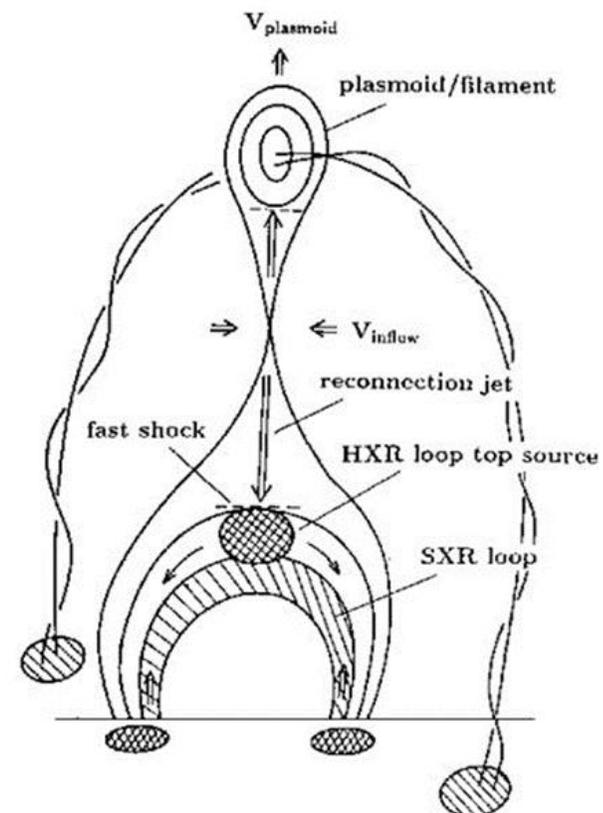
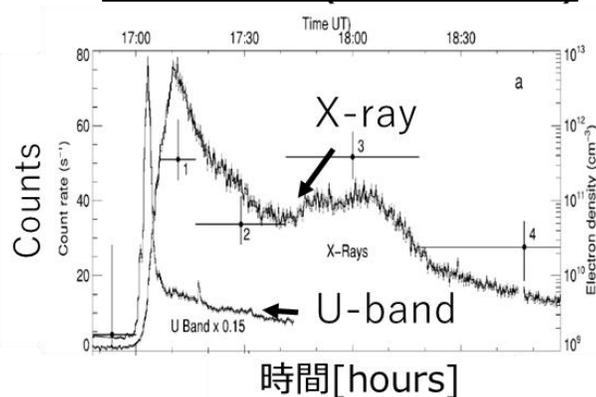
飛騨天文台  
H $\alpha$ 観測->



太陽フレア(Martinez+12)



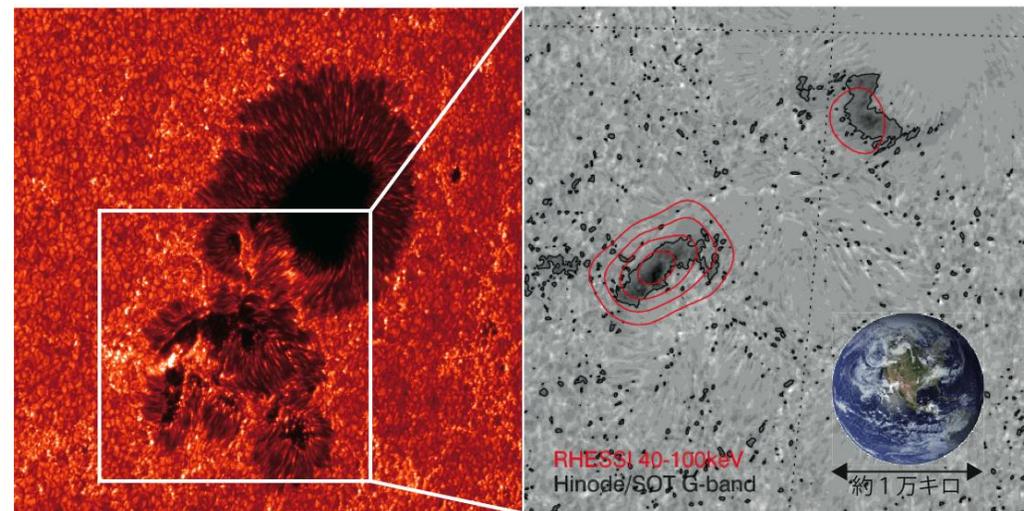
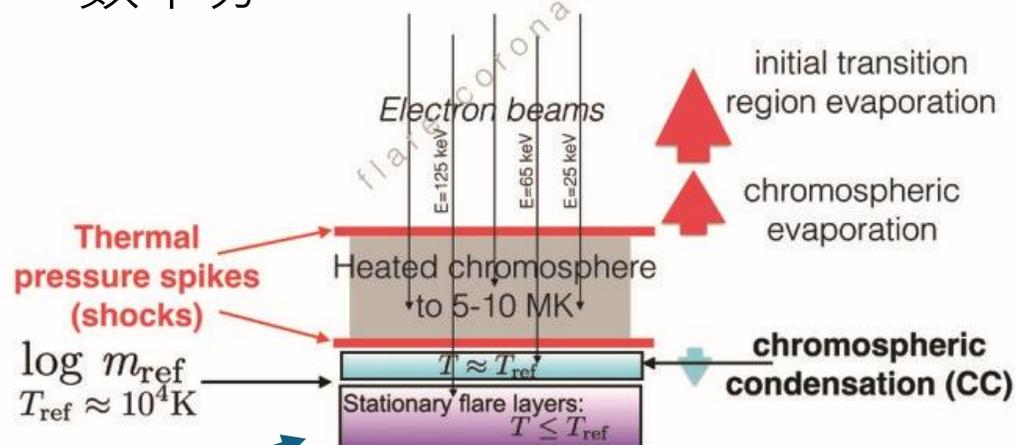
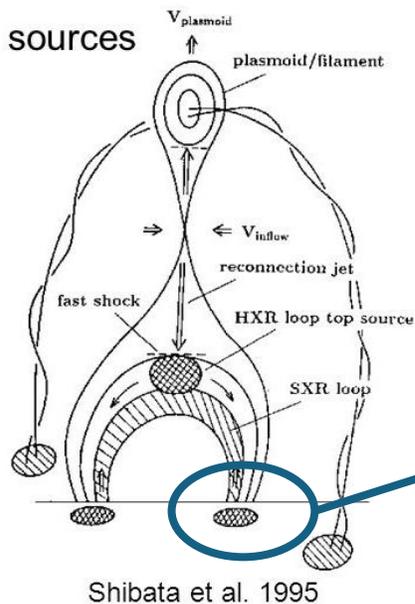
恒星フレア (Guedel+02)



Shibata et al. 1995

# 太陽/恒星フレアに伴う可視連続光放射

- 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→可視連続光放射
- タイムスケール
  - 太陽：数分
  - 恒星：数分～数十分



Watanabe et al. (2010)

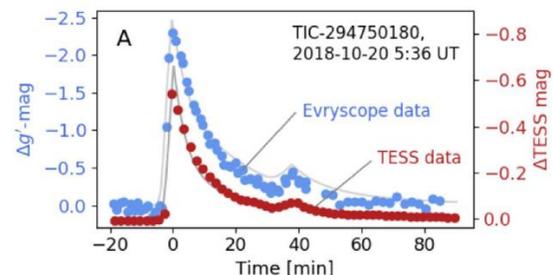
太陽フレアでは可視連続光と硬X線（加速された電子が彩層に突入し制動放射で硬X線を出す）の放射領域が空間的によく一致していることが観測されている

# 恒星フレアに伴う可視連続光放射

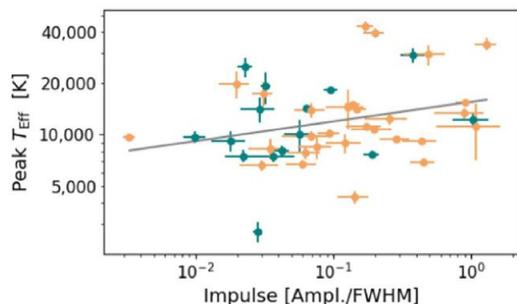
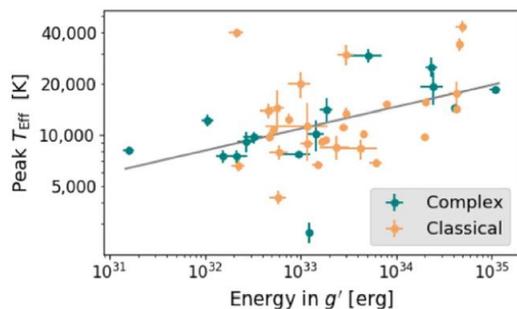
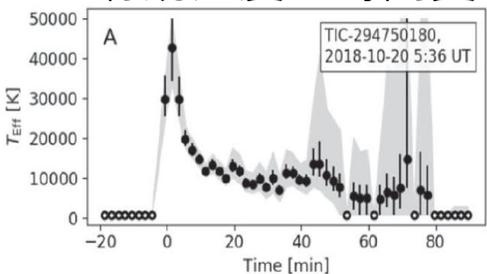
- 可視光域では $T \sim 8,000-10,000$  Kの黒体放射に近いSEDを示す (e.g., Hawley & Fisher 1992)

- 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)

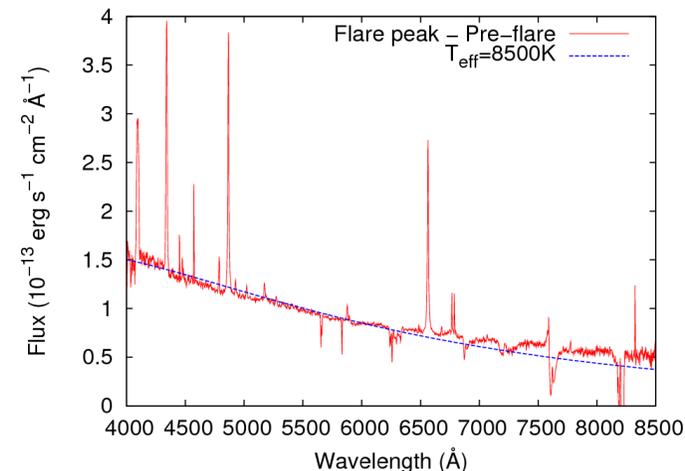
フレア光度曲線



有効温度の時間変化



Howard et al. (2020)



- Howard et al. (2020)

- $g'$ -bandとTESSの2バンドの測光観測(20-sec cadence)からフレア成分のSEDを調べた
- 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

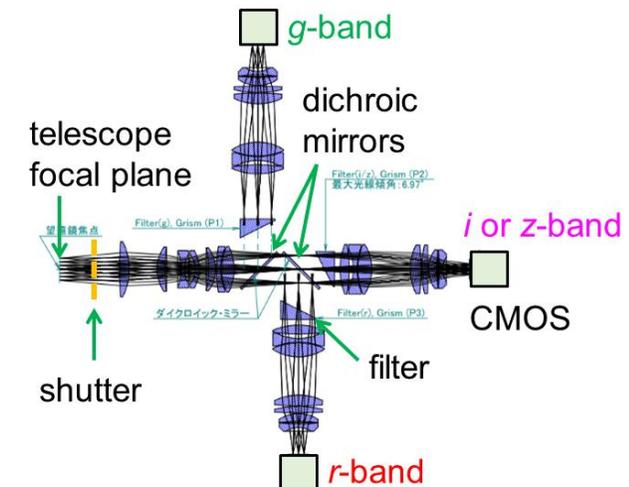
- 時間分解能  $\sim 20$ 秒
- 温度の決定精度がそれほど高くない
- 輝線の情報がない



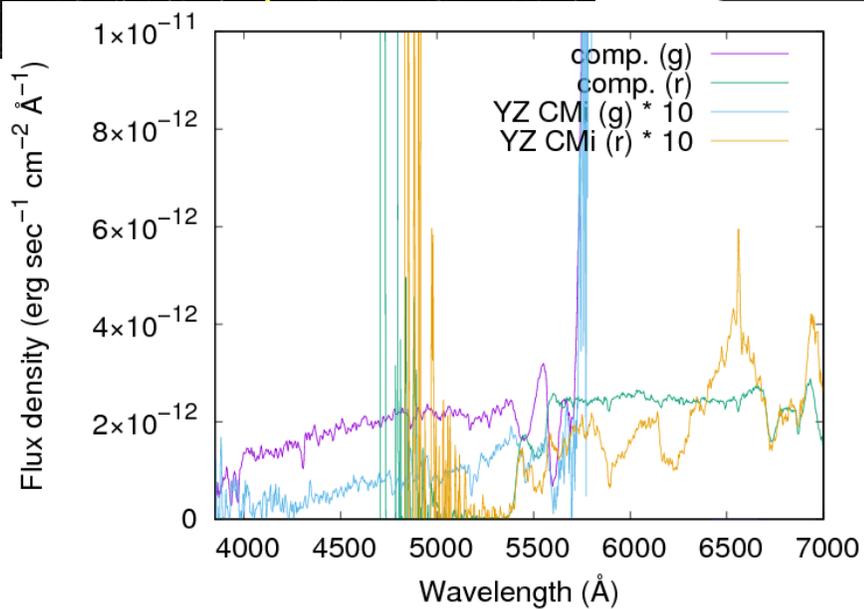
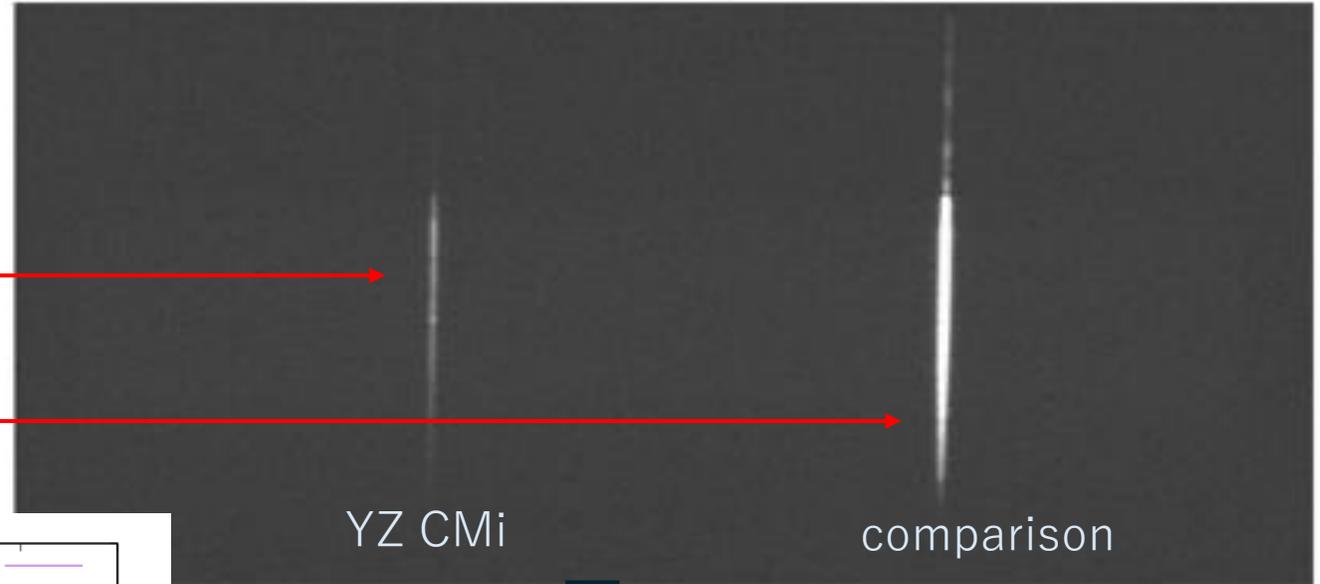
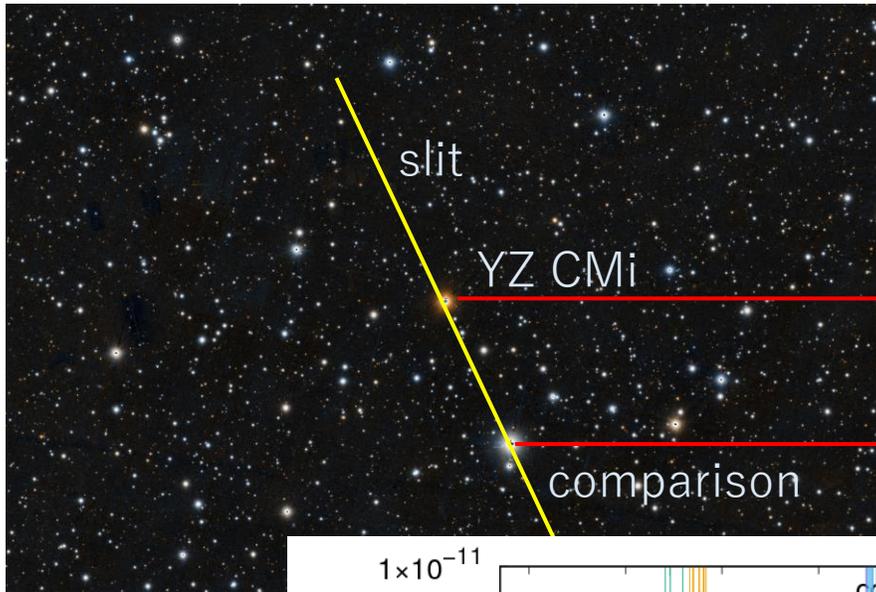
高時間分解能 & 広帯域分光観測

# 観測

- 観測天体：YZ CMi (M4Ve)
  - Prot=2.779 days (Morin + 2008)
  - flare rate  $\sim 2 \text{ day}^{-1}$  for  $E_{\text{flare}} > 10^{32} \text{ erg}$  (Maehara + 2021)
  - 古くから知られている有名なフレア星
- 観測期間：2025-01-15 – 2025-02-09
  - TESSによる観測 (Notsu 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: **1.5 - 3 sec**
  - S/N  $\sim 20 @ H\text{-beta}$
  - スリットサイズ：1"  $\times$  10'
- 近くの比較星とYZ CMiを同時に分光し、フレーム毎に放射強度較正を行った



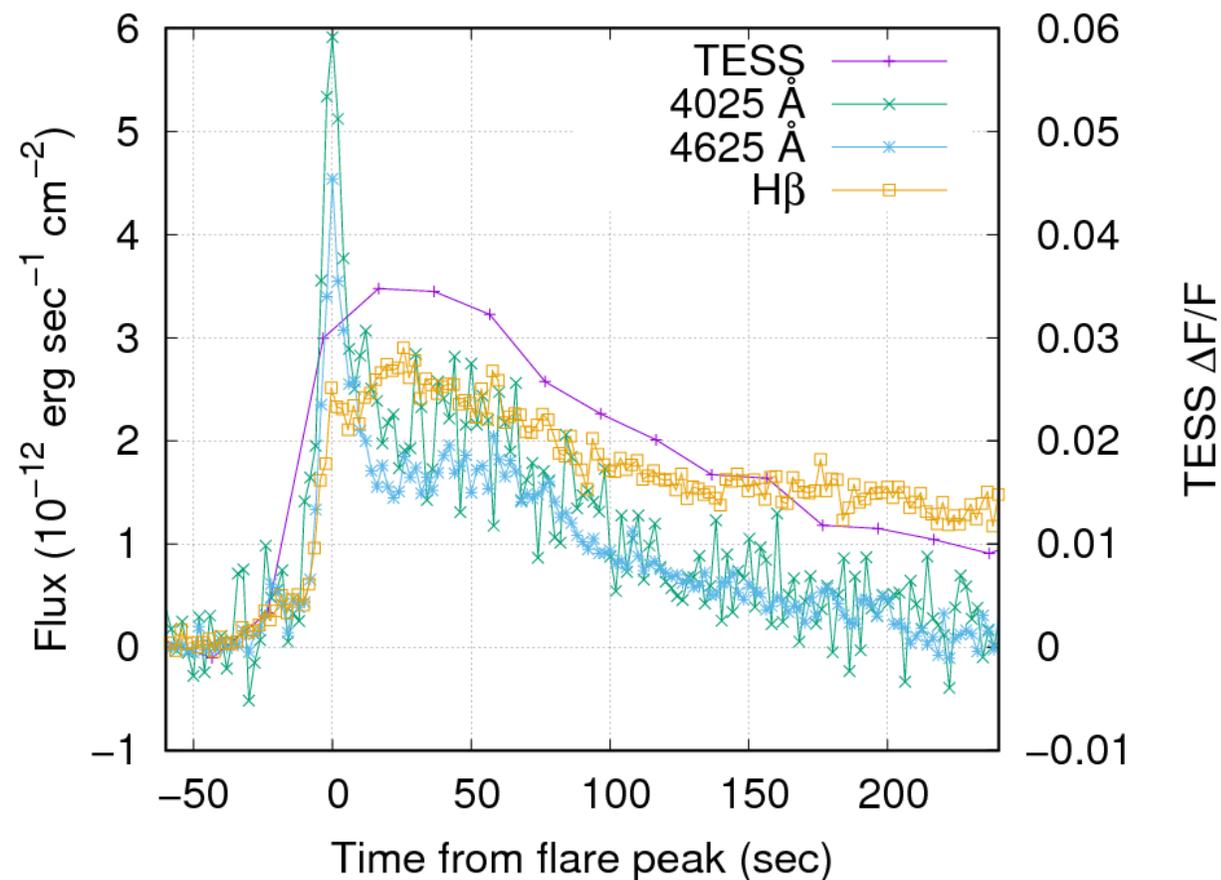
# 観測で得られるスペクトルの例



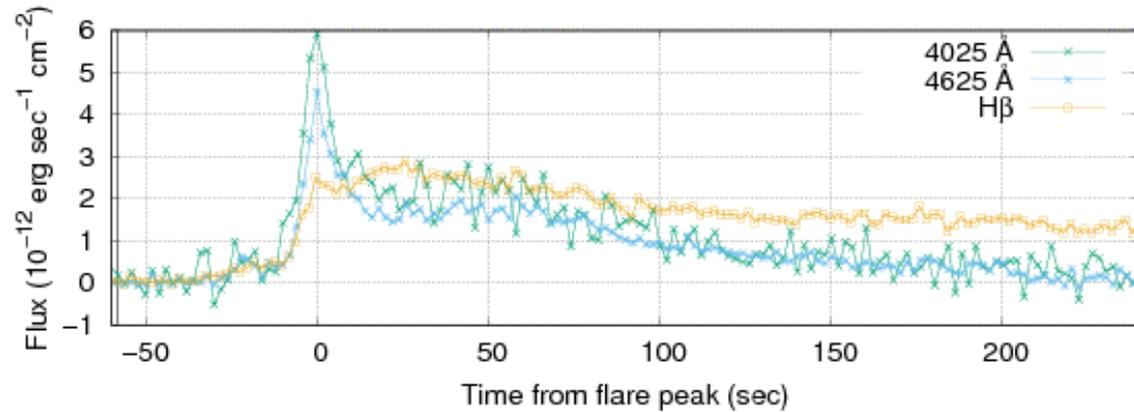
比較星のスペクトルが時間的に不変と仮定  
→波長の関数として補正係数を求める  
→YZ CMiのfluxを露出毎に補正

# 2025年2月8日のフレア (Flare A)

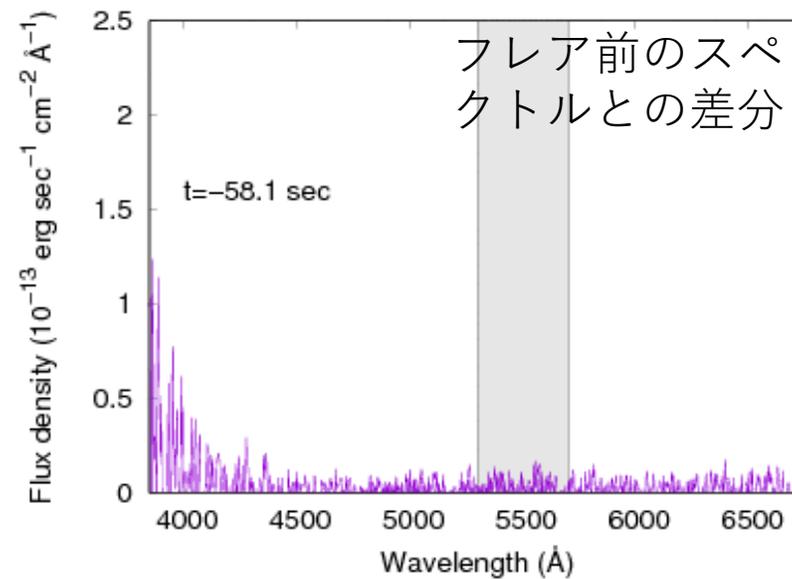
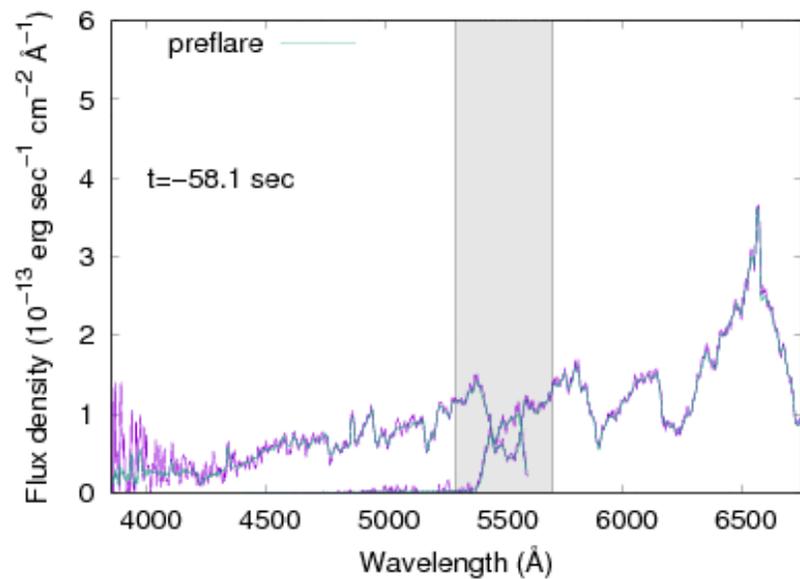
- TESS (20 sec cadence)
  - 継続時間の長いシングルピークのフレア (e-folding time  $\sim 150$  sec)
  - $L_{\text{peak}} \sim 1.4 \times 10^{28}$  erg/sec
- TriCCS (2.5 sec)
  - 継続時間の短い (e-folding time  $\sim 8$  sec) ピークを示す成分 +  $\sim 50$  sec程度継続するピークを持つゆっくりと減光する成分
  - H $\beta$  line flux: 可視連続光と同時に増光する成分 + 可視連続光よりも遅れて増光する成分がある。
    - フレアピークは可視連続光より30 sec遅い
    - 可視連続光より減光速度が小さい



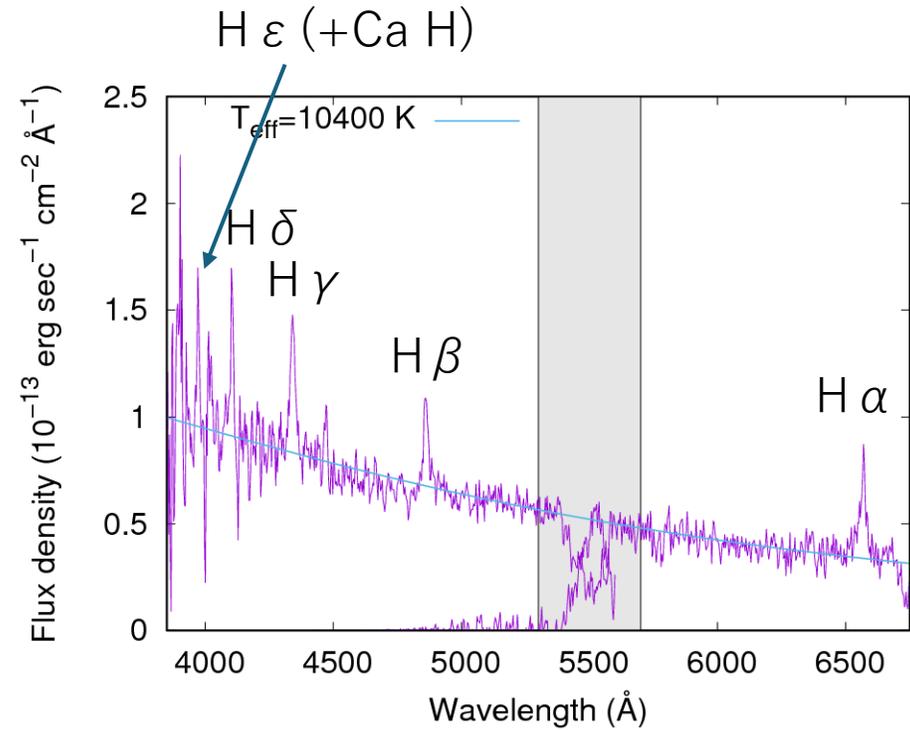
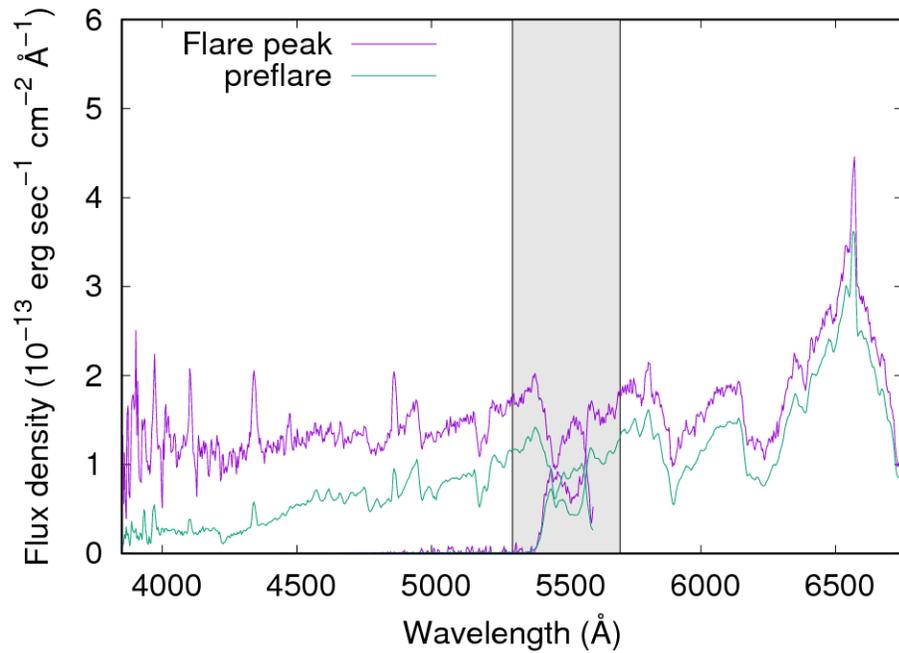
# Flare Aによるスペクトルの変化



可視連続光の減光後もバルマー輝線はフレア前よりも強い状態が継続

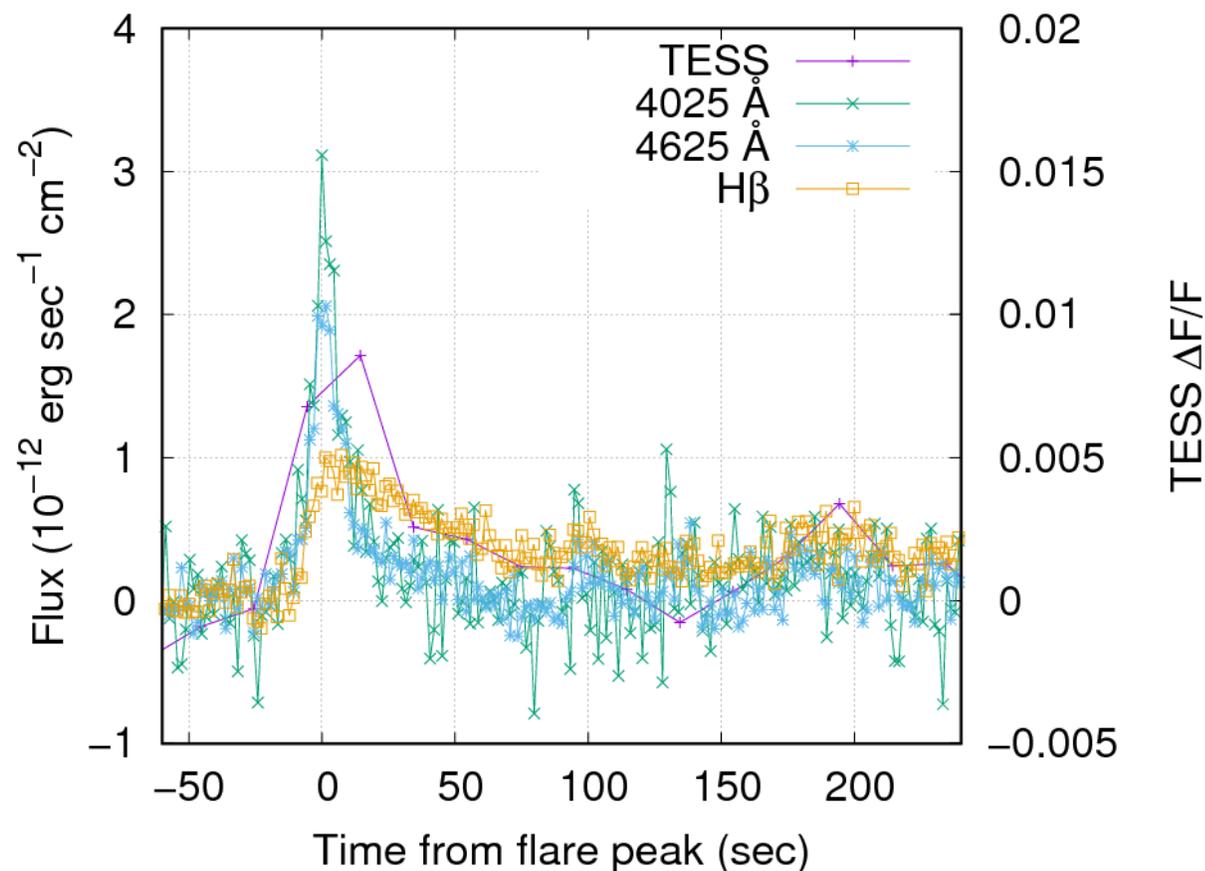


# Flare Aによるスペクトルの変化(flare peak)

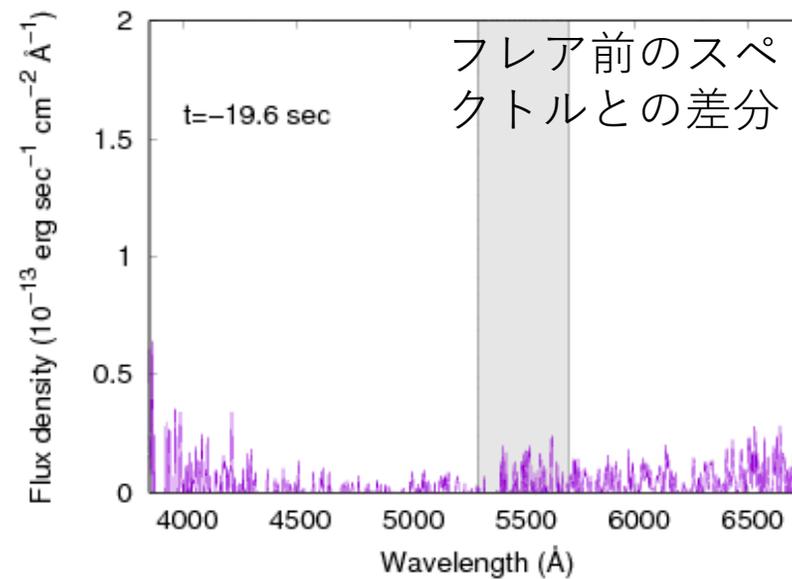
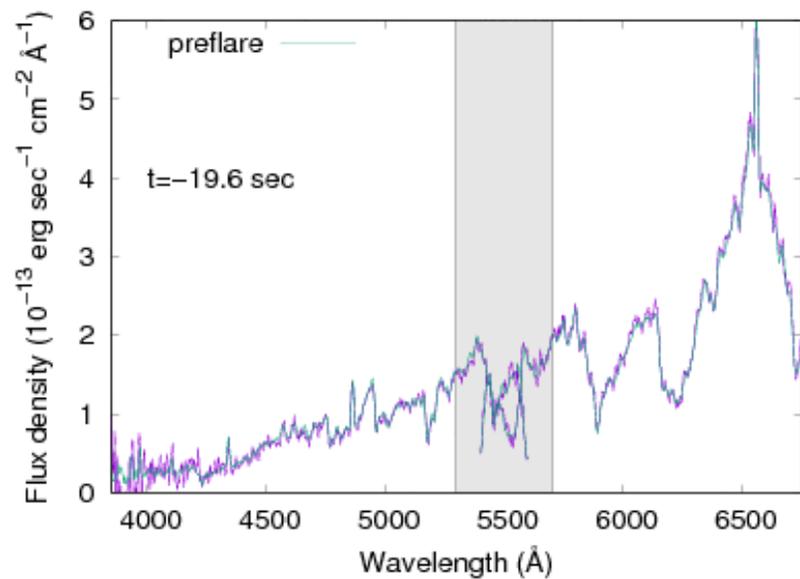
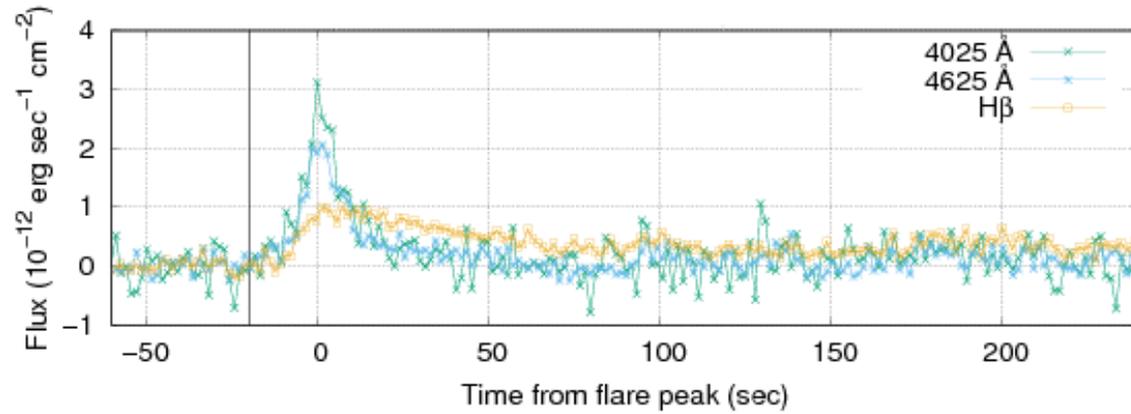


# 2025年1月17日のフレア (Flare B)

- TESS (20 sec cadence)
  - 継続時間の短いシングルピークのフレア (e-folding time  $\sim 30$  sec)
  - $L_{\text{peak}} \sim 0.7 \times 10^{28}$  erg/sec
- TriCCS (2.0 sec)
  - 継続時間の短い (e-folding time  $\sim 9$  sec) ピークを示すフレア
    - TESSの時間分解能よりも短い
  - $H\beta$  line fluxのピークは可視連続光のピークよりも10 sec遅い + 減光速度も小さい

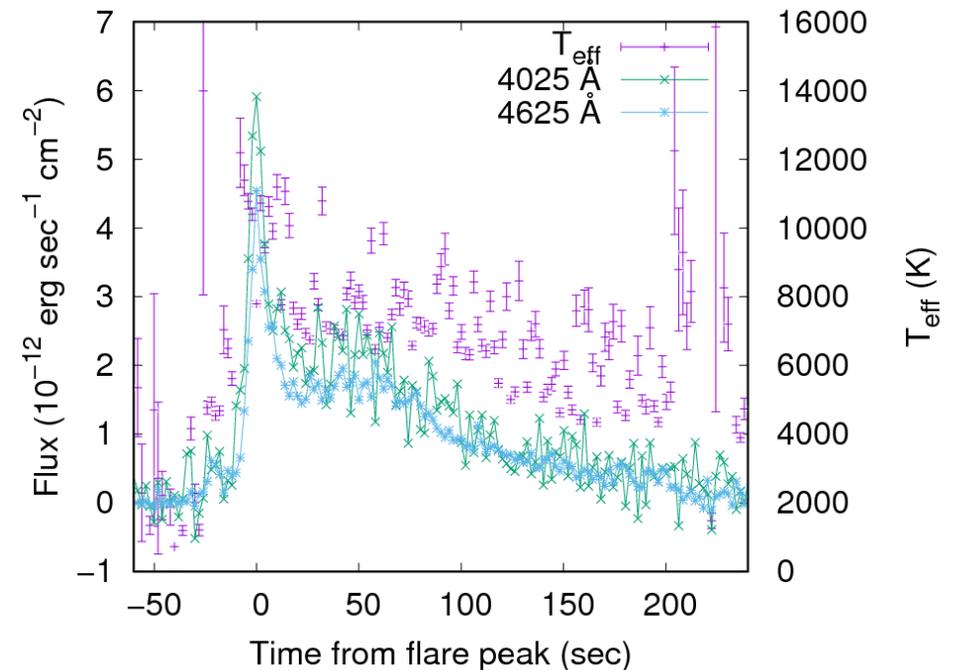
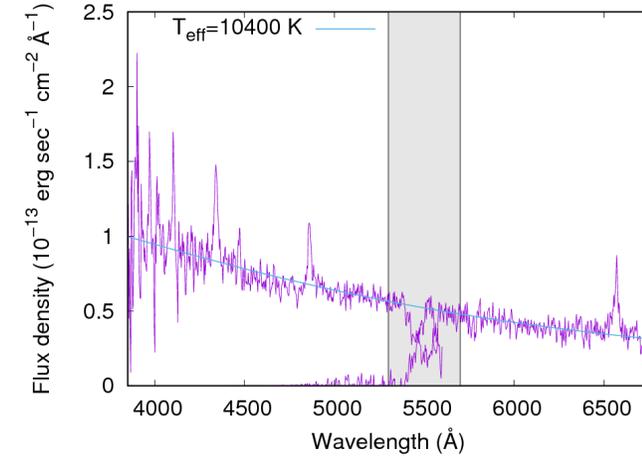


# Flare Bによるスペクトルの変化



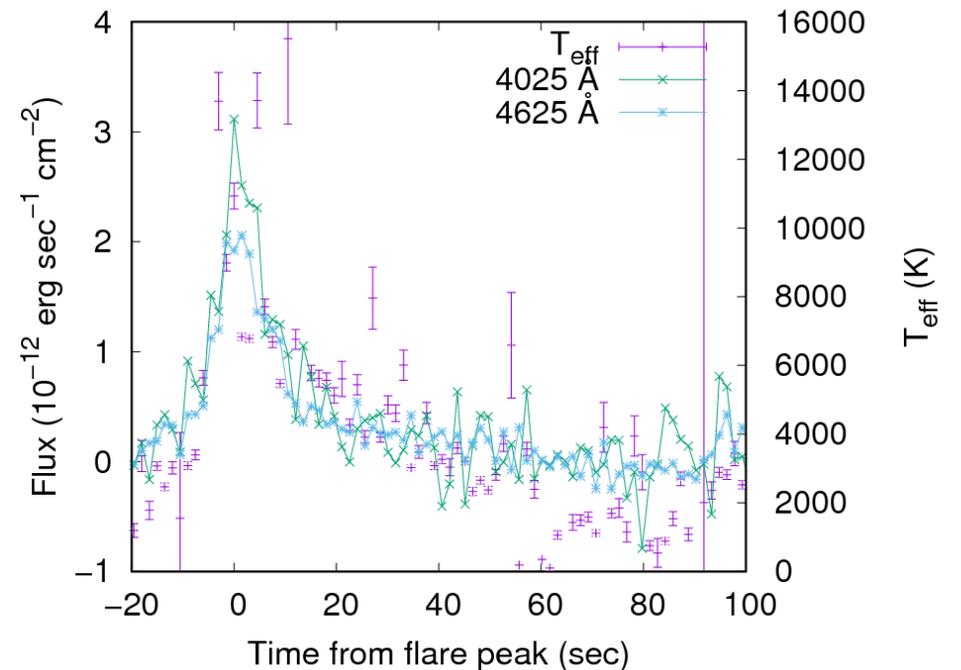
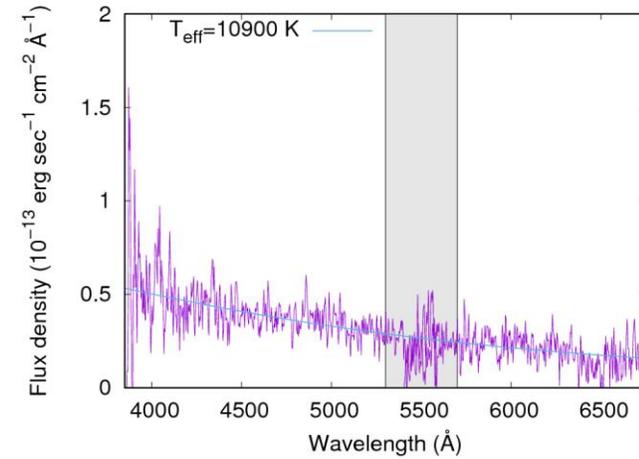
# 有効温度の時間変化 (flare A)

- フレア成分のみの差分スペクトルを用いて黒体放射を仮定して有効温度を求めた。
- 最初の継続時間の短いフレア時が最も有効温度が高い
  - $T_{\text{eff}} \sim 10000 \text{ K}$
- ゆっくりと減光する成分
  - $T_{\text{eff}} \sim 7000\text{-}8000 \text{ K}@t=30 - 70\text{sec}$   
→  $\sim 5000\text{-}6000 \text{ K}@t=180\text{sec}$ と減光するにつれて温度が低下



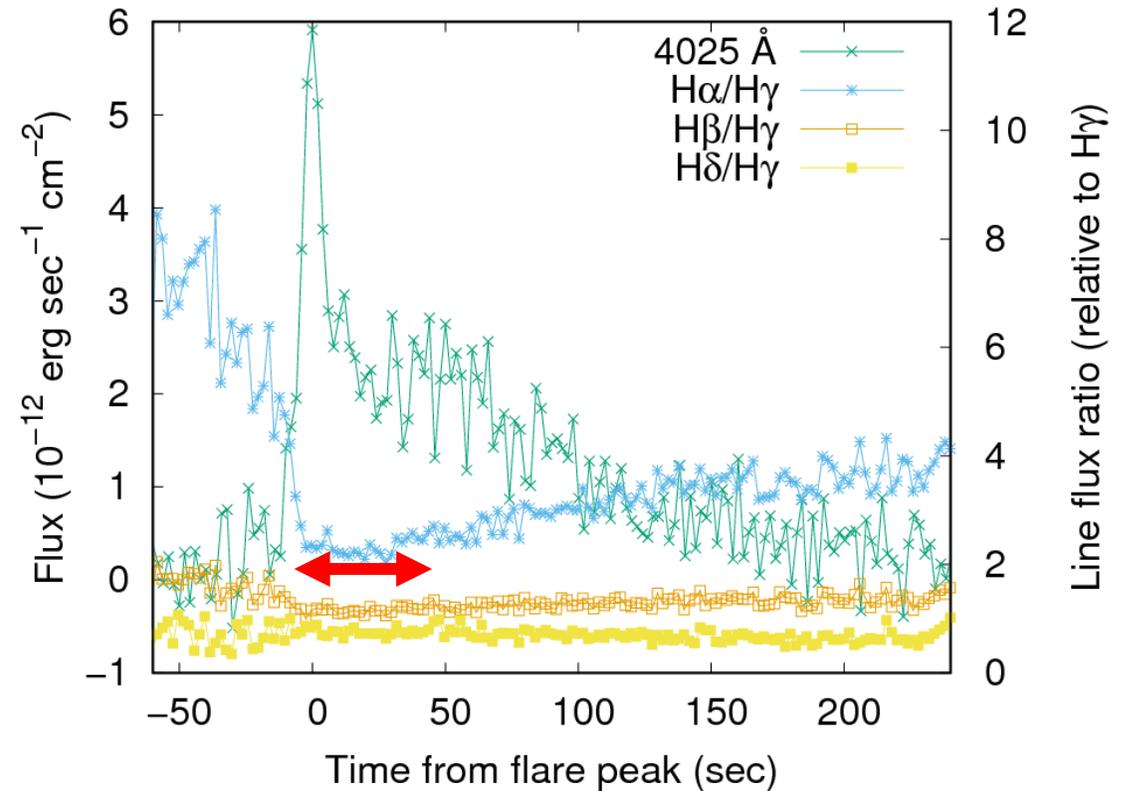
# 有効温度の時間変化 (flare B)

- 継続時間の短い増光のピーク時が最も有効温度が高い
  - $T_{\text{eff}} \sim 10000 \text{ K}$
- フレアの減光と同程度のタイムスケールで有効温度も低下
  - $T_{\text{eff}} \sim 10000 \text{ K} @ t=0 \text{ sec}$   
→  $T_{\text{eff}} \sim 5000 \text{ K} @ t=20 \text{ sec}$



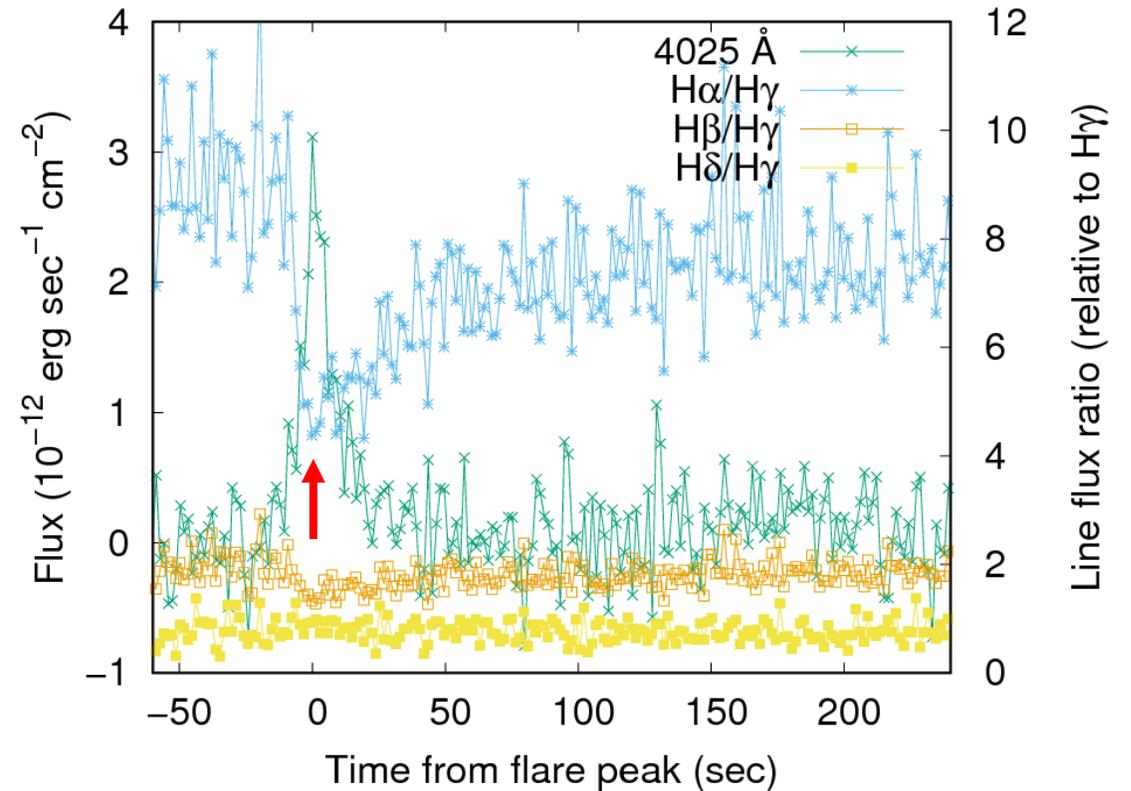
# Line flux ratio (flare A)

- フレアが発生すると  $H\alpha/H\gamma$  が低下
  - 最初の継続時間の短い成分ピーク～ゆっくりと増加する成分の立ち上がりにかけて  $H\alpha/H\gamma$  がほぼ一定
  - 彩層プラズマの圧縮が長時間継続していることを示唆



# Line flux ratio (flare B)

- フレアが発生すると  $H\alpha/H\gamma$  が低下
  - フレアピークで  $H\alpha/H\gamma$  が極小になった後はすぐに増加に転じる
  - 彩層の圧縮が短時間で終了



# まとめ

- YZ CMi：従来より一桁高い時間分解能で複数のフレアを分光観測
  - フレアの初期に短い継続時間(<10 sec)の増光が観測された
  - 継続時間の長いフレア
    - 早い増光と短い継続時間を示す成分
    - 1分程度継続するflatなピークを持ち、ゆっくりと減光する成分
- の2成分 → 時間分解能がそれほど良くない(>10秒)観測では見えない
  - 最初の早い増光のピーク～ゆっくりと増加する成分の立ち上がりにかけて $H\alpha/H\gamma$ がほぼ一定になる
- 継続時間の短いフレア：早い増光と短い継続時間を示す成分のみが観測された
  - フレアピークで $H\alpha/H\gamma$ が極小になった後はすぐに増加に転じる
- 継続時間の違い→フレアループの数の違い？
  - 継続時間の長いフレア：最初の早い増光を示すフレアをトリガーとして複数のループで連鎖的にリコネクションが発生
  - 継続時間の短いフレア：単一のフレアループのリコネクションのみ

