

KOOLS-IFUとTESSの 同時測光分光観測で迫る M型星フレアの可視連続光時間発展

市原晋之介¹

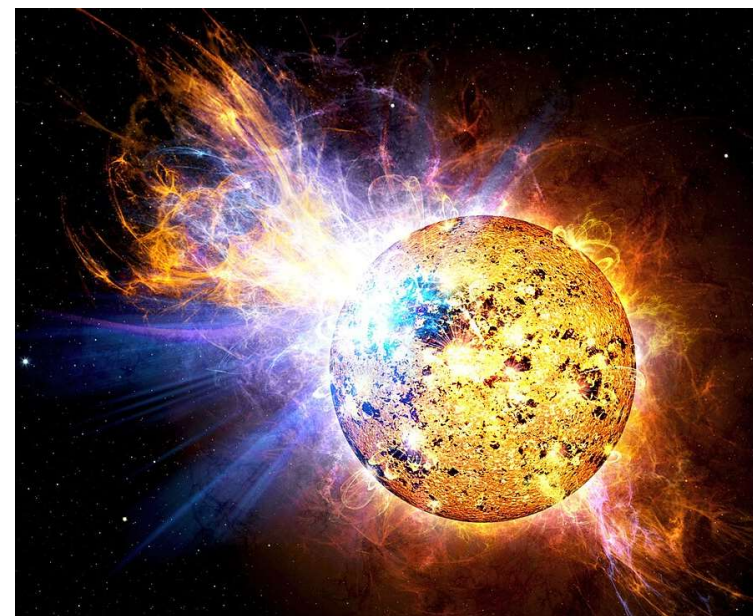
野上大作¹, 前原裕之², 行方宏介¹, 野津湧太³,

柴田一成⁴, 本田敏志⁵, 幾田佳⁶

¹京都大学, ²国立天文台, ³コロラド大学, ⁴同志社大学, ⁵兵庫県立大学, ⁶東京大学

研究背景：フレアとは

- 太陽/恒星表面の爆発・増光現象.
- 太陽フレアのエネルギーは 10^{29-32} erg
一方, 低温M型星では 10^{33} erg を超える
「**スーパーフレア**」が高頻度で発生.
- 恒星フレアに伴う紫外線は周囲の系外惑星の
化学進化に影響を与える
➡観測に基づいた**放射量**の評価



M型星 EV Lacイメージ図 ©NASA

研究背景：大問題

大問題 スーパーフレアの観測は現在盛んだが、

- エネルギーが波長に対してどう分配されるか
- 大規模フレア中のダイナミクスや放射メカニズムが未解明

わかっていること

恒星の紫外線から可視光にかけてのフレアの連続光放射はフレアエネルギーの大部分を占める

➤ **恒星フレアの可視光域と紫外域の観測が重要**

本研究では可視連続光に注目

可視連続光フレアの先行研究

●高時間分解能(2min)の多色測光観測

➡温度を推定(Howard+ 20.)

- フレア成分の**温度変化が極めて激しい**ことを示唆
- 連続光と輝線を分解できないため**温度を正確に見積もれない可能性



輝線スペクトルと連続光スペクトルを分解してエネルギー分配を知るには**広波長域分光**

●長時間露出の**広波長域分光観測**

(Fuhrmeister+ 08.)

- 多数の彩層輝線を新たに発見
- 露出時間が200-1000 sec で長い

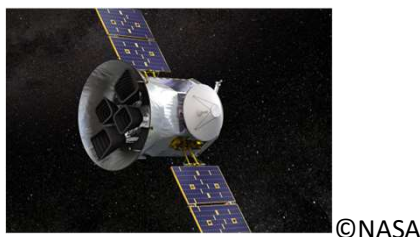


物理プロセスの詳しい時間変化を追うための**高時間分解観測**

を両立した観測は数例しかない(e.g. Kowalski + 13.)

観測手法：可視光域で測光・分光同時観測

• 測光



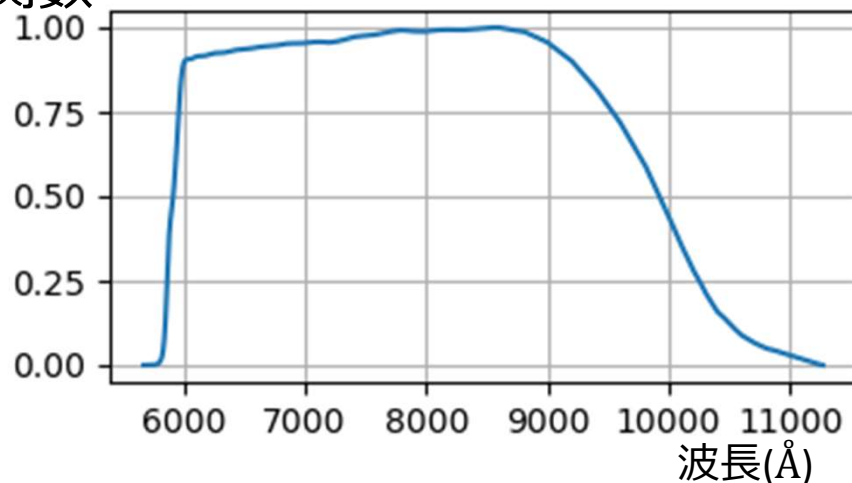
©NASA

TESS衛星

(Transiting Exoplanet Survey Satellite)

観測波長域	時間分解能
6000-10000Å(下図参照)	2min

TESS応答関数



出展：SVO
Filter Profile
Service

• 分光

3.8m岡山せいめい望遠鏡

• KOOLS-IFUのVPH-blueを使用

観測波長域	時間分解能	波長分解能
4300-8000Å	~52sec (露出30sec)	$\lambda/\Delta\lambda \sim 500$



観測対象

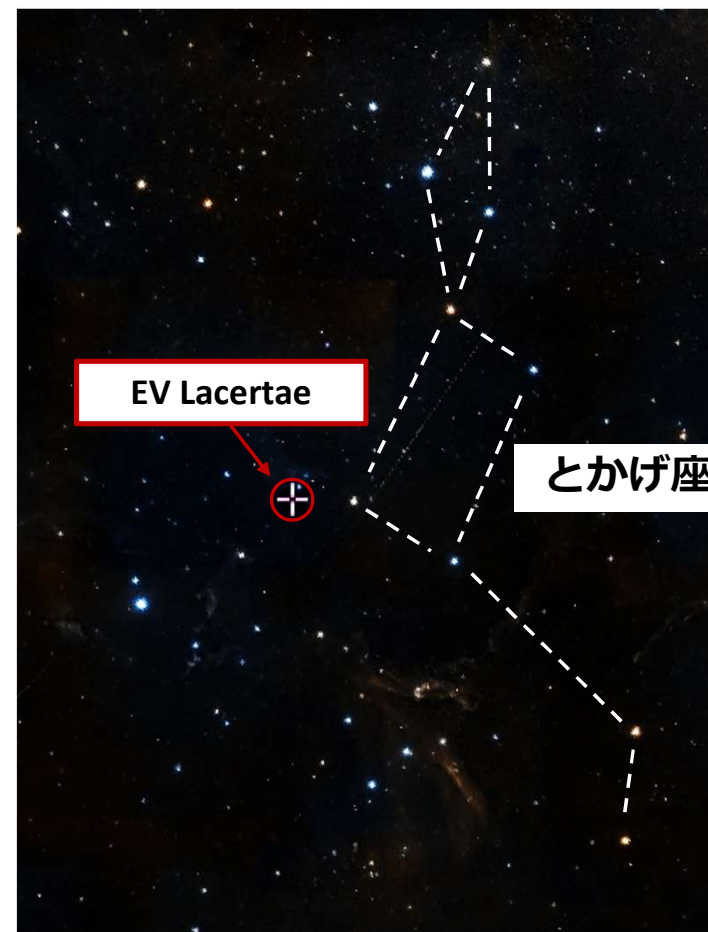
■M型矮星(M4.5 Ve) EV Lac

- 可視連続光・近紫外線(Kowalski+ 2013.)・X線(Inoue+ 2024.)・近赤外(Schmidt+ 2012.)などでフレアが検出されている

自転周期	4.38日(Pettersen 1980.)
年齢	3×10^8 年
有効温度(静穏時)	3270 ± 80 K (Paudel + 2021.)
フレア発生頻度	~0.4event/h (Schmidt + 2012.)

■観測時間 (日本時間)

2019年9月14日 21時-29時

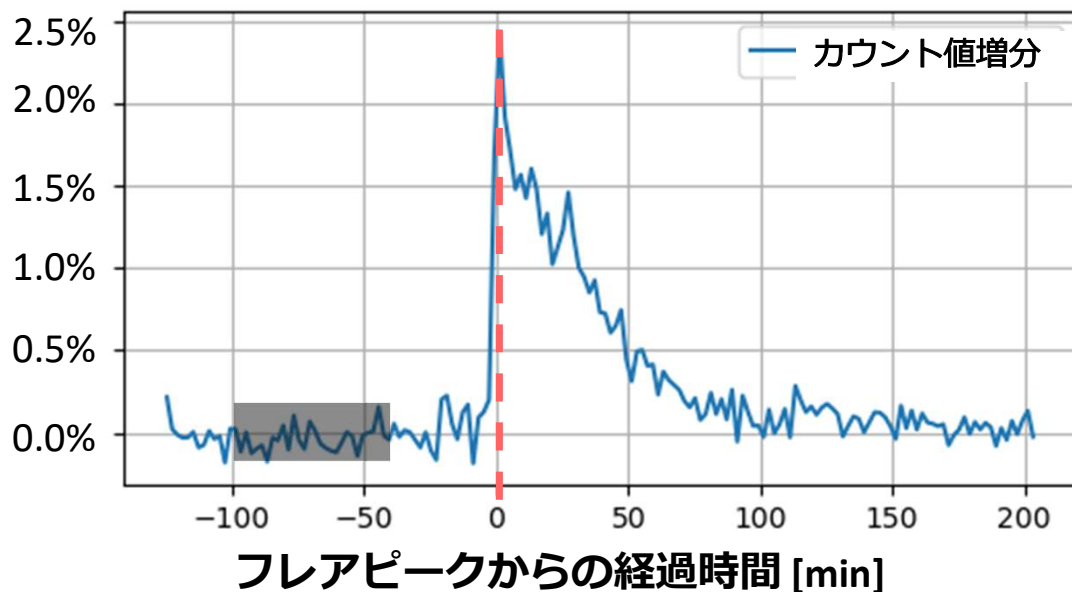


aladinより

光度曲線とスペクトル

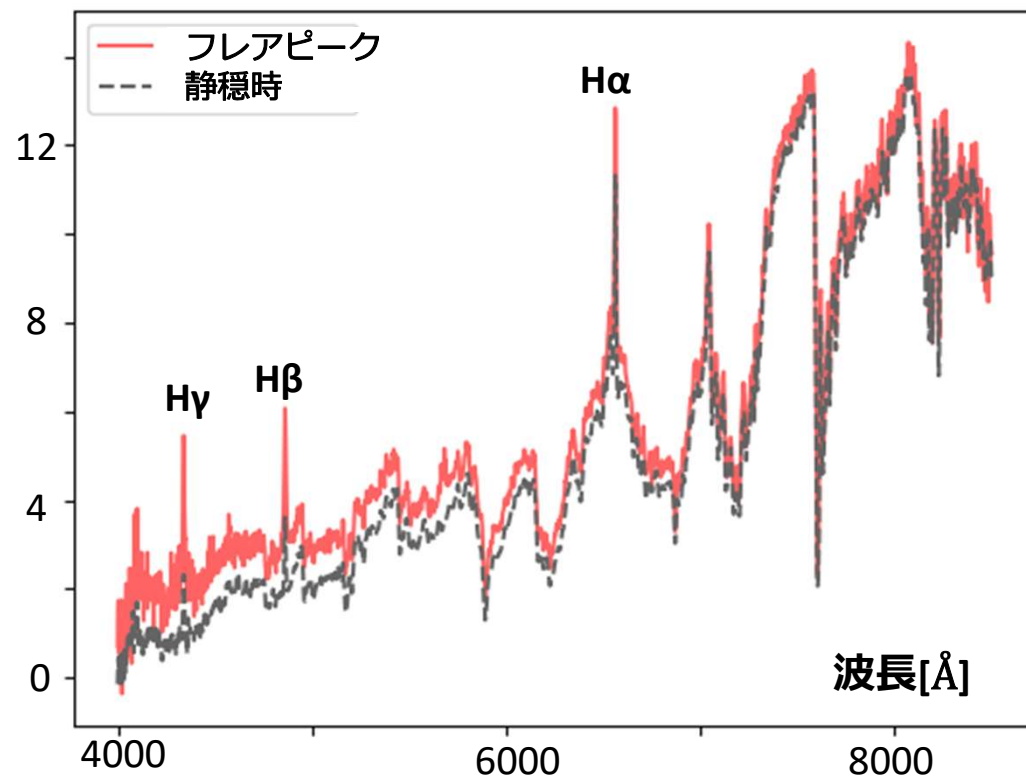
せいめいとTESSで フレアを同時に検出

フレア前静穏時からのカウント値増分 (TESS)



TESSバンドで最大2.5%の増光

フラックス [$\times 10^{-13} \text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1} \text{\AA}^{-1}$] (せいめい)



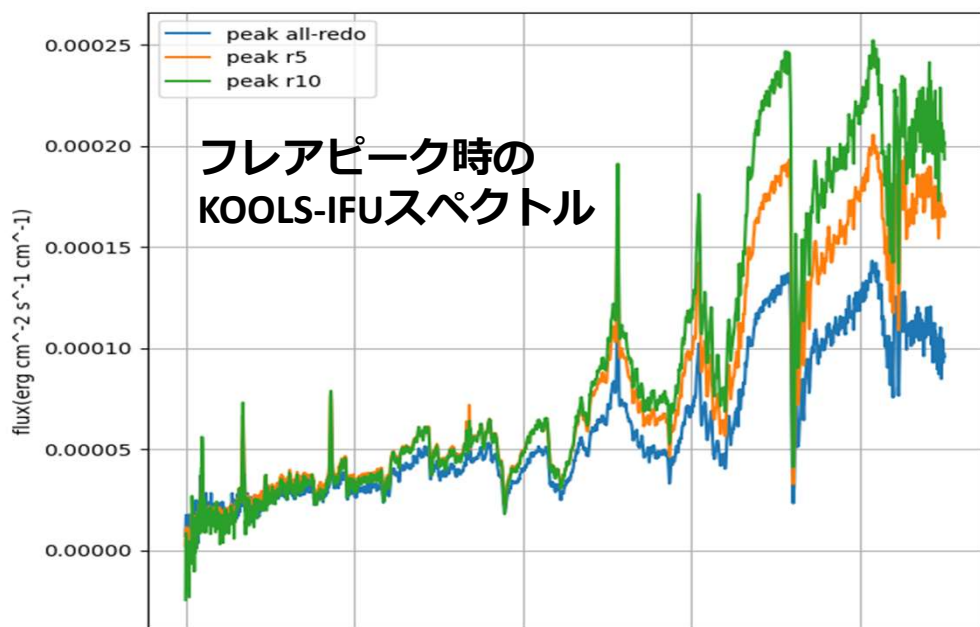
図：標準星でflux補正済の
フレアピーク(赤)と静穏時(点線)のスペクトル

解析：画像処理

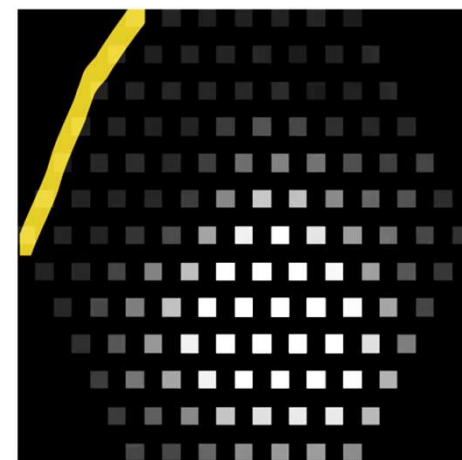
KOOLS-IFUデータ解析マニュアル

(<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/~kazuya/p-kools/reduction-201806/index.html>)

を基にirafを用いてflux calibrationまで行った



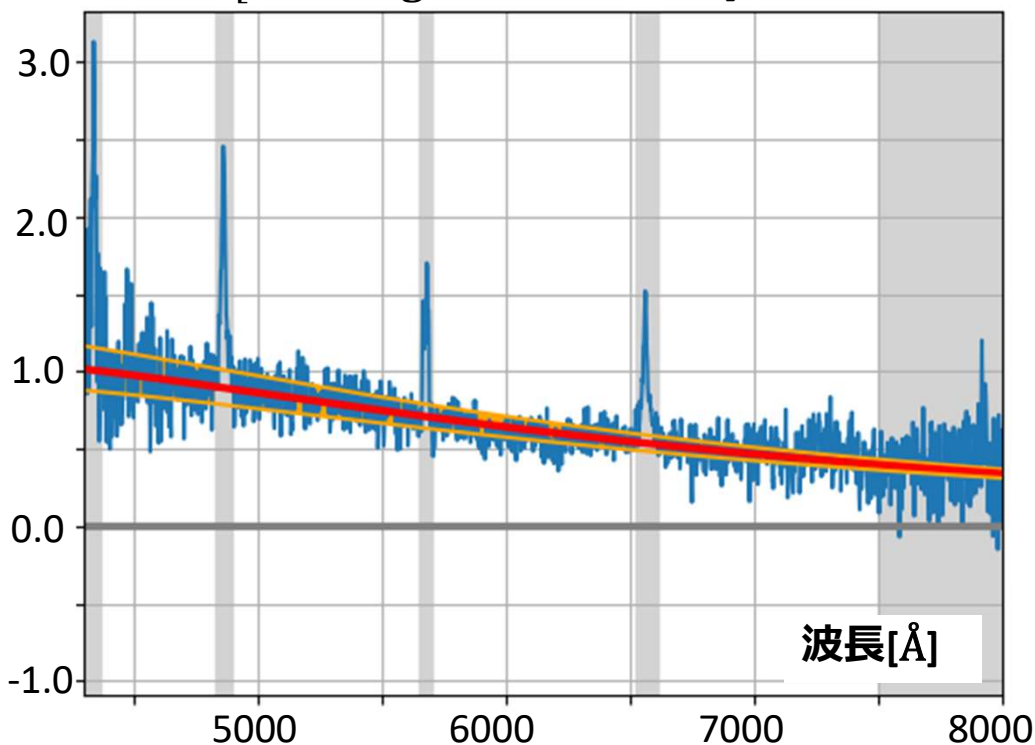
青：アパーチャ半径がファイバー2.5本
橙：アパーチャ半径がファイバー5本
緑：全ファイバー足しあげ



全ファイバーを足し合わせた
Sky fiberは黄色マーカーの一行
(星像位置の大きな時間変化なし)

手法・解析①：黒体輻射を仮定した温度推定

フラックス [$10^{-13} \text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1} \text{\AA}^{-1}$]



図：ピーク時の差分スペクトルと
ベストフィットのプランク関数。網掛は $T_{\text{flare}} \pm 3\sigma_T$
顕著な輝線周辺(グレーの網掛)は除く

フレアピークと静穏時の差分を取り、
フレア成分のスペクトルを作成。

黒体輻射(プランク関数)を仮定し、
フレア成分の温度推定を行った

➡ピーク時の温度：

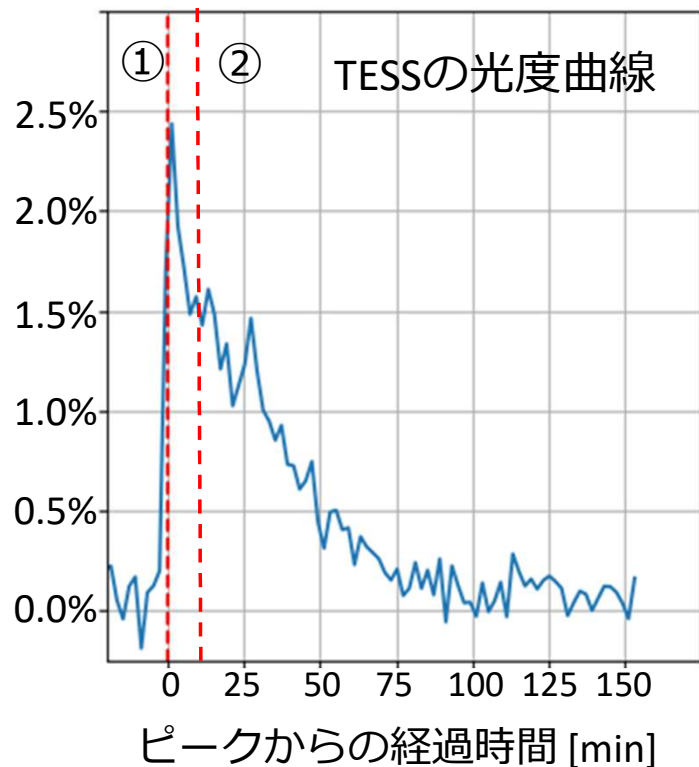
$$T = 8122 \pm 273 \text{ K } (\sigma_T = 91 \text{ K})$$

フレア成分が $T_{\text{eff}} \sim 9000 \text{ K}$ の黒体輻射と、
しばしば報告されるフレアの標準的な
温度と近い結果に

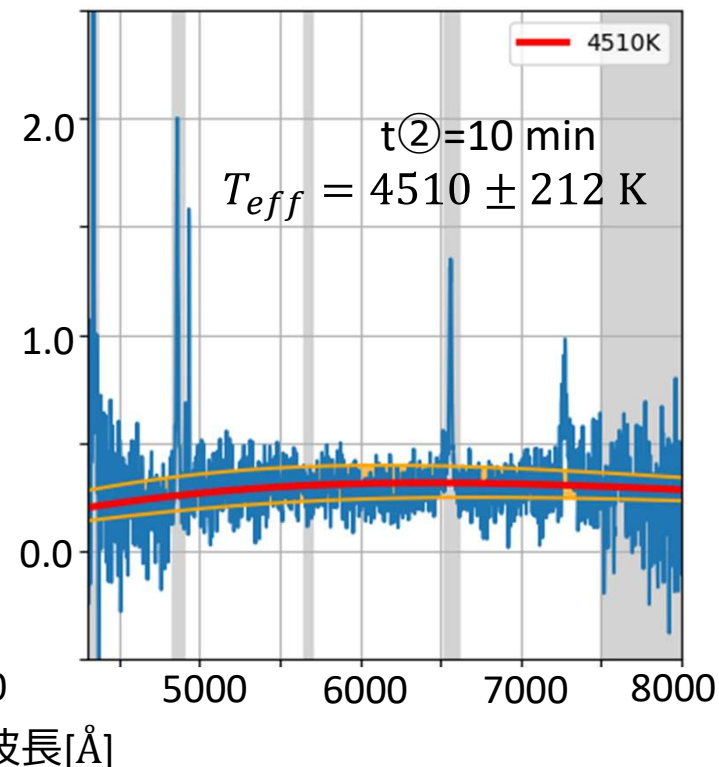
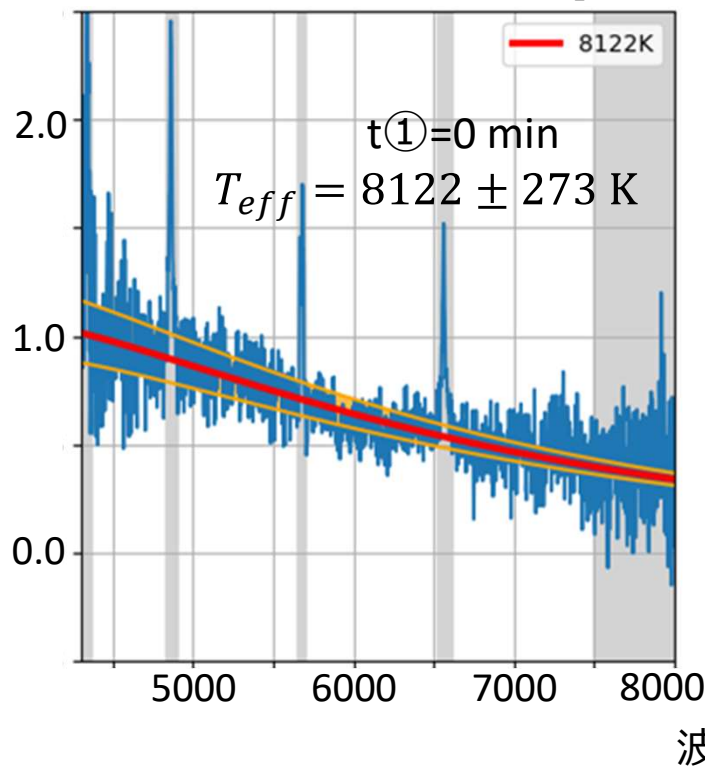
(e.g. Hawley & Fisher 1992.)

解析①：黒体放射でフィッティング

静穏時からのカウント値増分



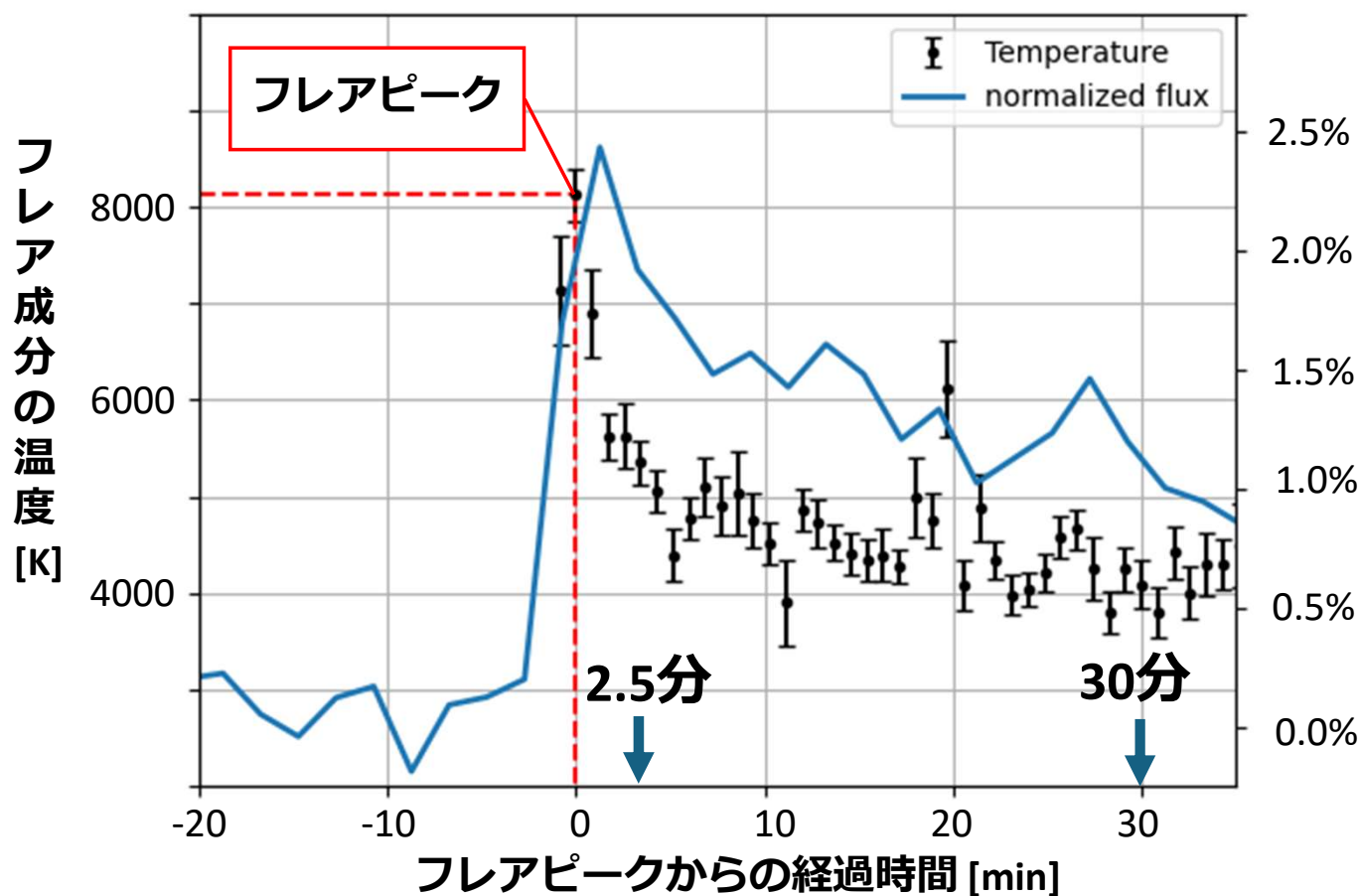
フラックス [$\times 10^{-1} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$]



フレアピーク後10分程度で短波長側のフラックスが大きく減少し、
フレア温度はおよそ半分にまで減衰している

解析①：フレア温度の時間変化

図：フレア温度とTESS測光カウントの時間変化



TESSの減衰と比べて、
温度の減衰が大きい。

E-folding time

黒体温度： 2.5 [min]

TESS光度曲線： 30 [min]

➤次ページからの
エネルギー推定に
影響を与える

手法・結果②：エネルギー推定(TESS測光)

求めた有効温度を用いてエネルギー計算

(Shibayama+ 13)

温度変化を考慮してエネルギーを算出すると、

$$\rightarrow E_{flare} = 4.4 \times 10^{32} \text{ erg}$$

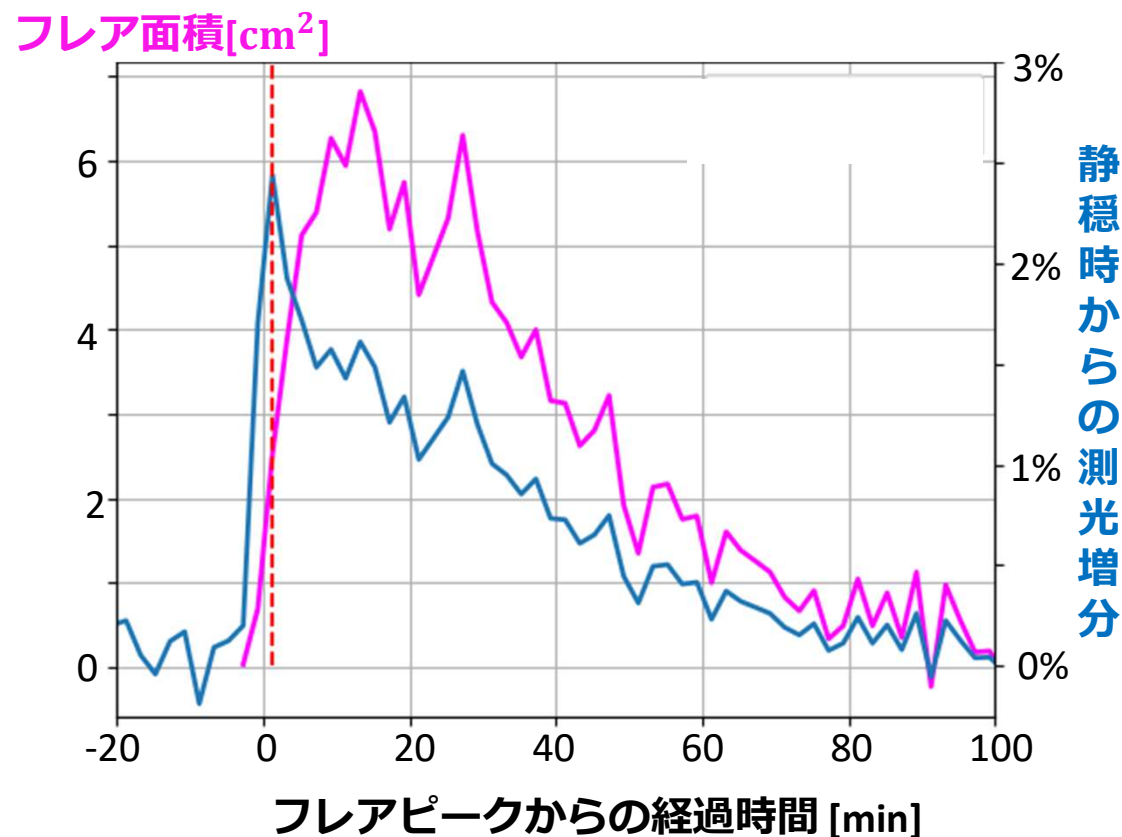
一方、フレア温度をピーク時(8122K)で固定すると、

$$\rightarrow E_{flare} = 8.9 \times 10^{32} \text{ erg}$$

$E_{flare} \propto T^4$ にもかかわらず

推定エネルギーは温度一定時の半分.

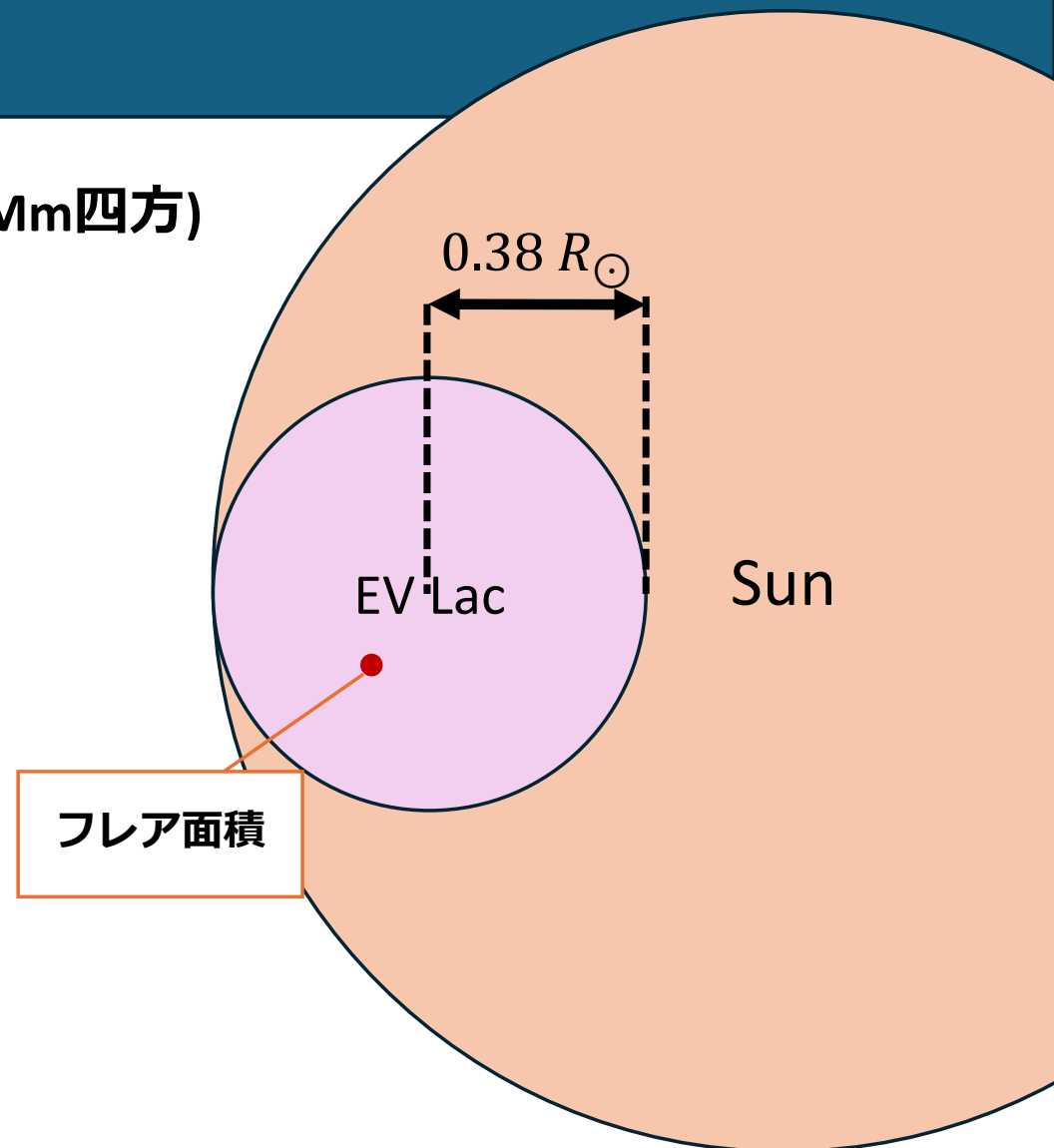
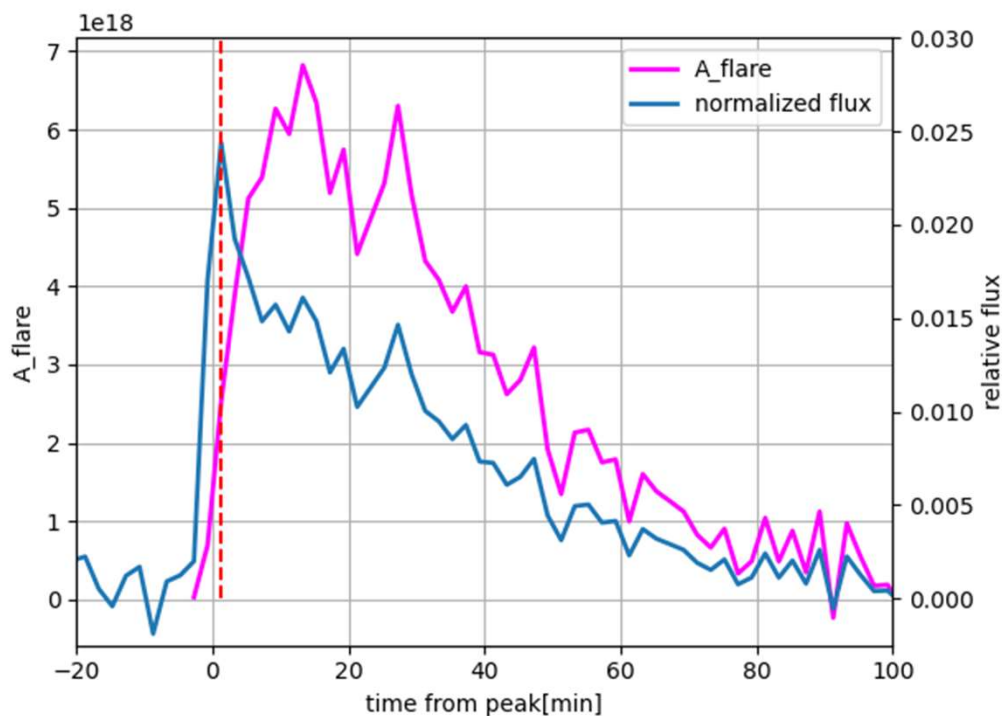
> フレア面積増加による影響が
温度減少による影響を緩和している.



図：静穏時からの測光増分とフレア面積の時間変化

フレア面積の変化

フレア面積の最大値は $7 \times 10^{18} \text{ cm}^2$ (約260Mm四方)
(EV Lacのディスク面積のおよそ0.3%)
太陽のXクラスフレアと同程度の面積



まとめ

背景 フレアの放射メカニズムや放射エネルギーがどのように分配されるかわからない
➤時間分解された広波長域分光データが必要（報告例が少ない）

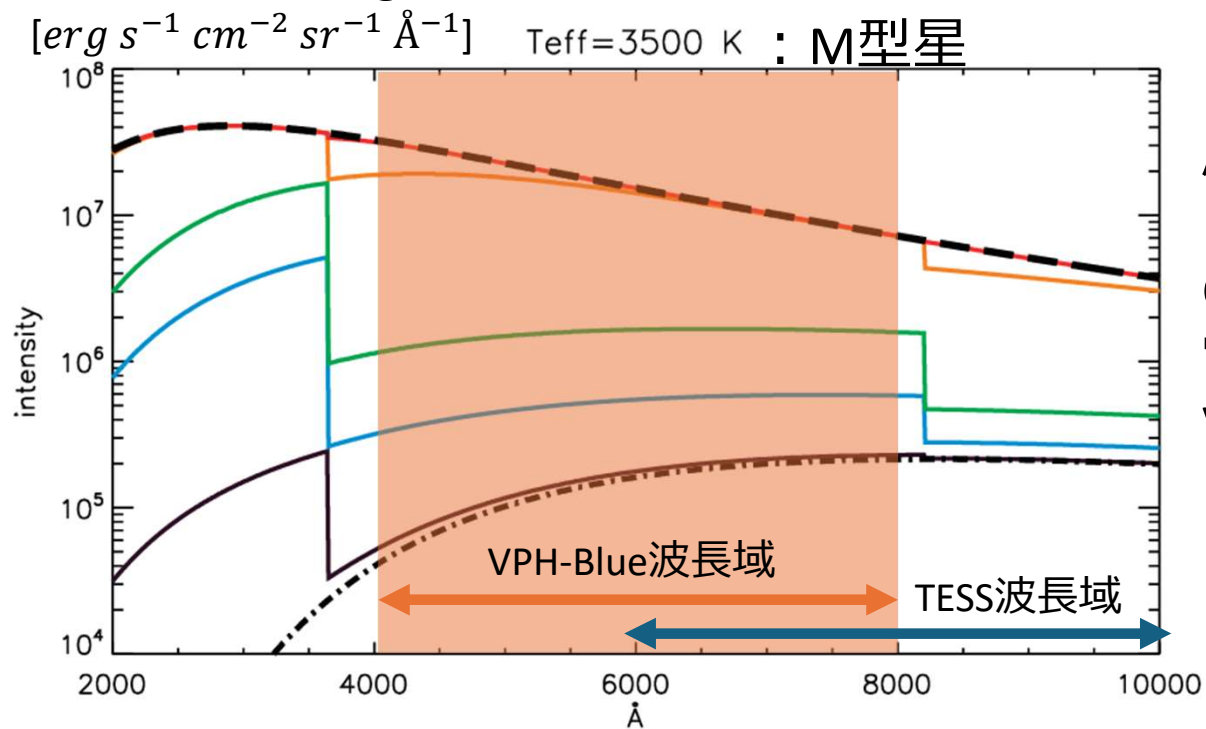
対象 M型矮星EV LacをTESS(測光)・せいめい望遠鏡(分光)で観測

結果 ① フレア成分の有効温度が $8122 \pm 273 \text{ K}$ （誤差は $\pm 3\sigma_T$ ）
② 温度の時間変化を考慮した
推定放射エネルギーは $4.4 \times 10^{32} \text{ erg}$

展望 黒体輻射以外の放射機構は？
理論モデル(e.g. Heinzel 2024.)と比較し、光学的厚さなども考慮した詳細なフレアの物理過程を解明したい
紫外域のバルマージャンプを含めた観測を計画

展望：理論モデルとの比較(e.g. Heinzel 2024)

Figure 1. in Heinzel 2024.



1次元スラブモデルの
RHD(輻射流体力学)シミュレーション
厚み $D = 500\ km$

Color linesの傾きの変化が、
電子密度由来か、温度由来か
VPH-Blueの観測域では判別できない

- 近紫外域バルマージャンプ
($\sim 3600\text{\AA}$)の観測が必要だが、
TriCCS, MIDSSAR(新型)の波長域外
- 衛星観測のデータが必要か？
(e.g. Mauve 2025年)

Dashed line : 10000 Kの黒体輻射

Dash-dotted line : 3500 Kの黒体輻射

Color lines : 上から $n_e = 10^{15}, 5 \times 10^{14}, 10^{14}, 5 \times 10^{13}, 10^{13}\ [cm^{-3}]$



出展 : <https://bssl.space/mauve/>



Stellar Science

UV Spectroscopy (200-700 nm)

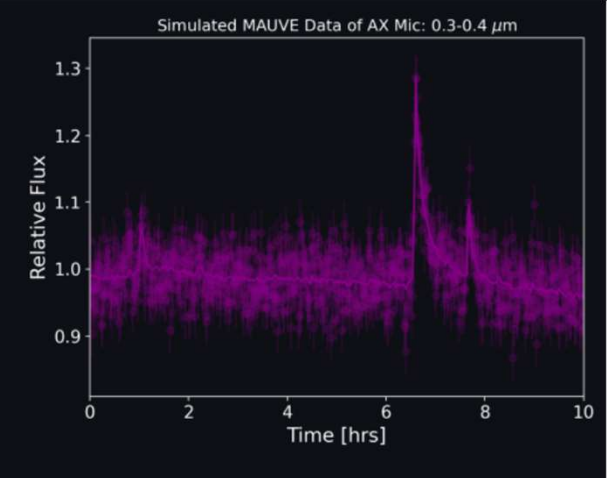
Collaborative 3-Year Survey

October 2025 Launch

Flare Evolution

Long-duration and repeat observations of stars are crucial to understanding flare frequency and evolution through time.

Mauve's short-cadence observations will unlock the amplitude duration and integration area of the flare, enabling the measurement of the flare peak time, $t_{1/2}$ flare duration proxy, and equivalent duration, shown to be correlated with the stellar parameters. Exploring flares on dwarfs and giants, Mauve will expand our knowledge of flare evolution on a large variety of stars via a homogeneous database.



13 cm Primary Mirror	10 nm (max R=65) Spectral Resolution
-46.4 to 31.8 deg Field of Regard	25 kg Satellite Weight

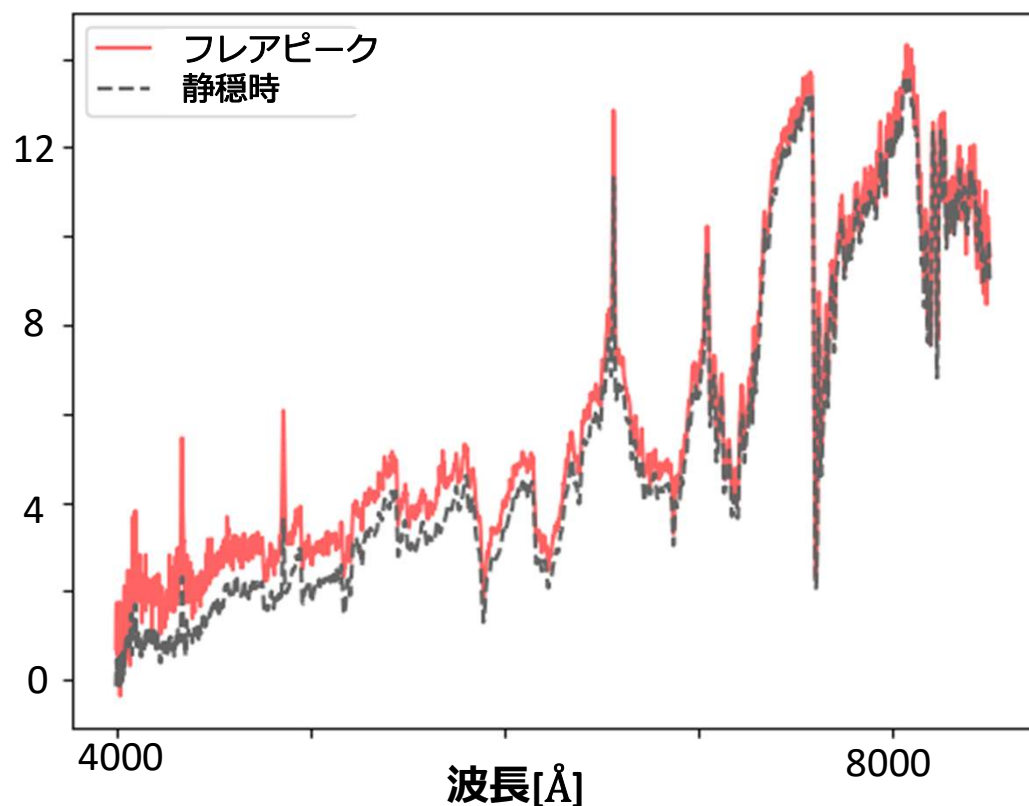
まとめ

今後の展望（本研究について）

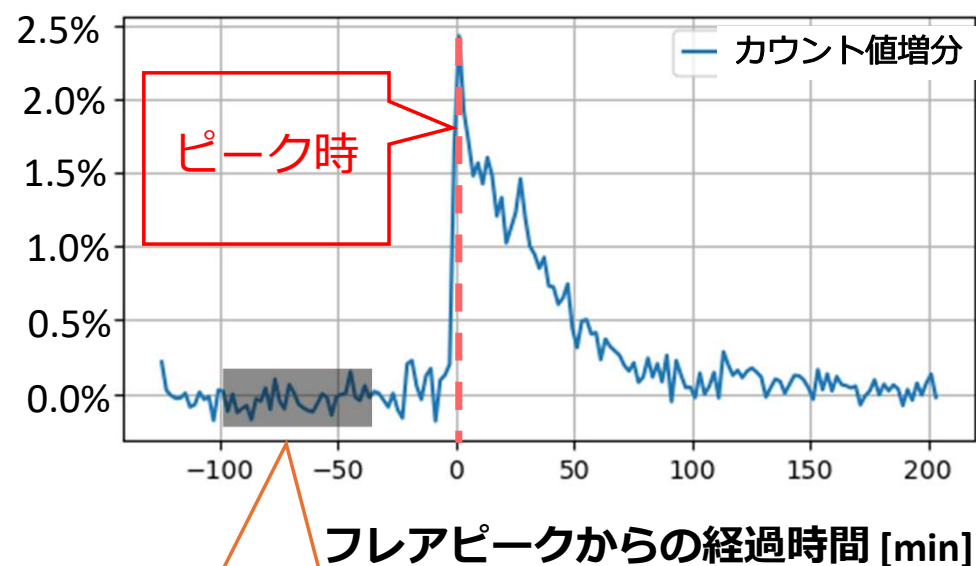
- フレア温度が下がった時($T_{flare} \sim T_{eff}$)は、黒体放射を行う光学的に厚いプラズマが光球を隠す影響も考慮する。

検出したフレアのスペクトル例(せいめい分光)

フラックス[$10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ sec}^{-1} \text{ \AA}^{-1}$]



静穏時からのカウント値増分(TESS)

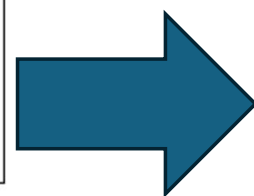
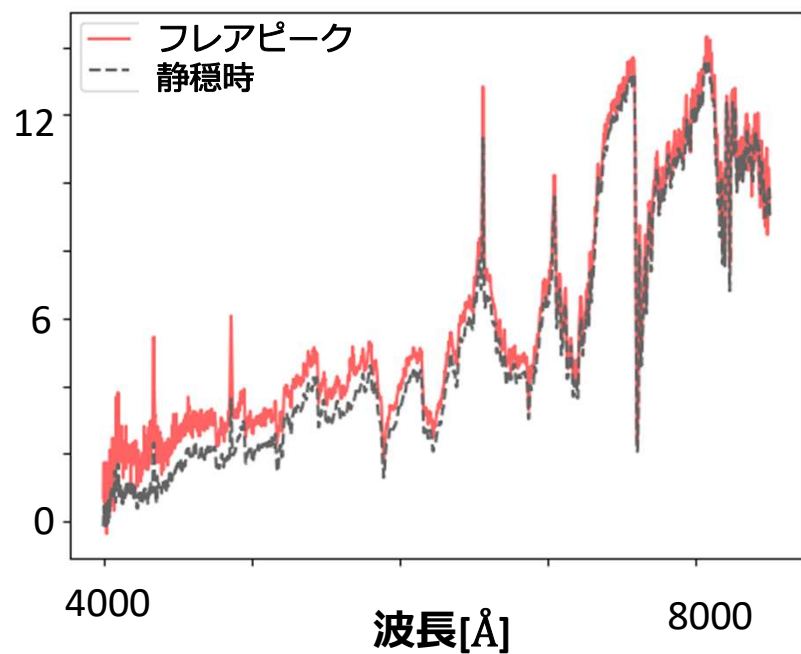


静穏時スペクトルは
 $-100 < t < -40 \text{ min}$
の平均値を使用

図：フレアピーク(赤)と静穏時(点線)のフラックス

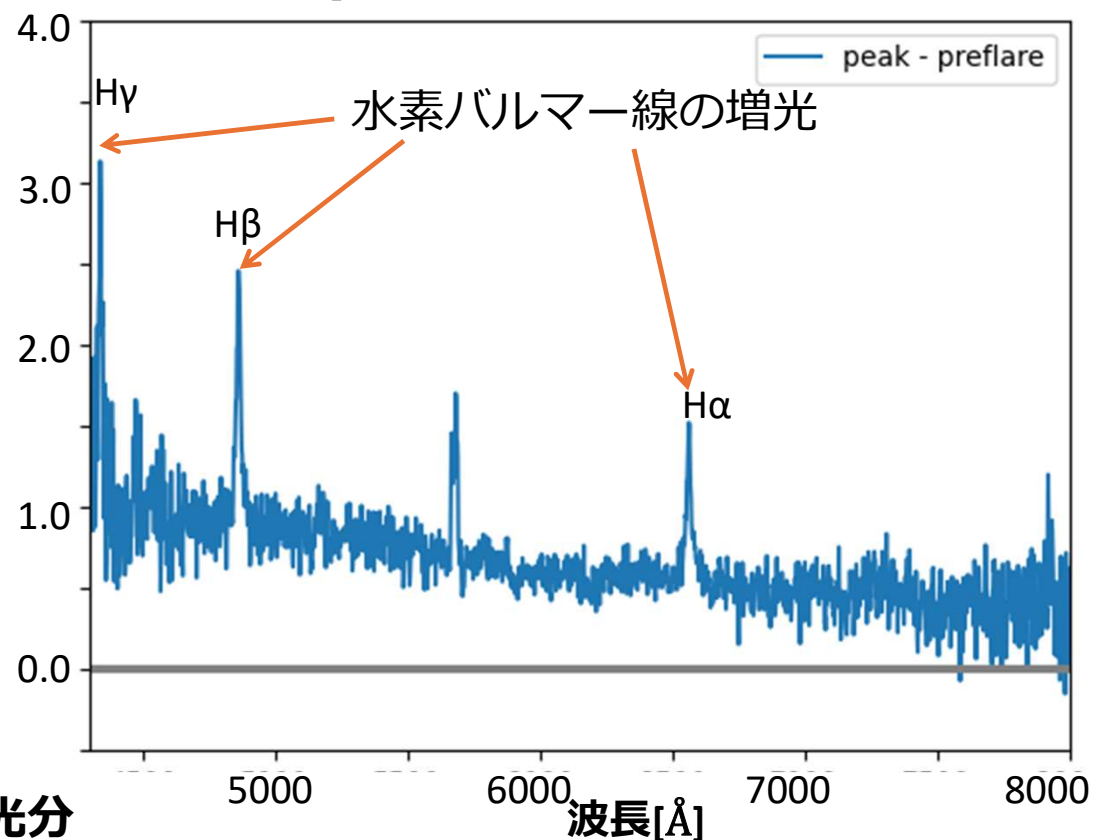
差分スペクトル(せいめい分光)

フラックス[$10^{-13}\text{erg cm}^{-2}\text{sec}^{-1}\text{\AA}^{-1}$]



差分をとり
フレアの増光分
のみ取り出す

フラックス[$10^{-13}\text{erg cm}^{-2}\text{sec}^{-1}\text{\AA}^{-1}$]



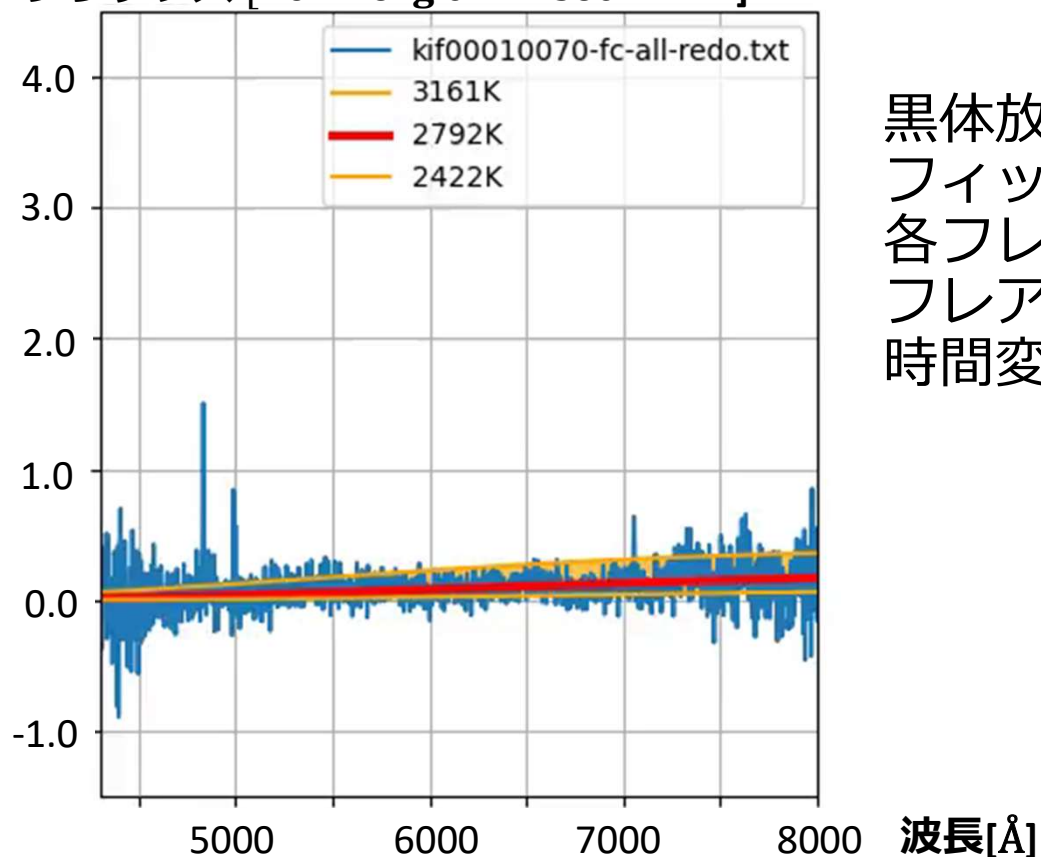
図：フレアピークと静穏時の差分スペクトル

解析①：フレア成分温度の時間変化

TESS光度曲線



フラックス [$10^{-13} \text{erg cm}^{-2} \text{sec}^{-1} \text{\AA}^{-1}$]



黒体放射での
フィッティングを
各フレームで行い、
フレア成分温度の
時間変化を追う

図：差分スペクトルとフィッティングしたプランク関数

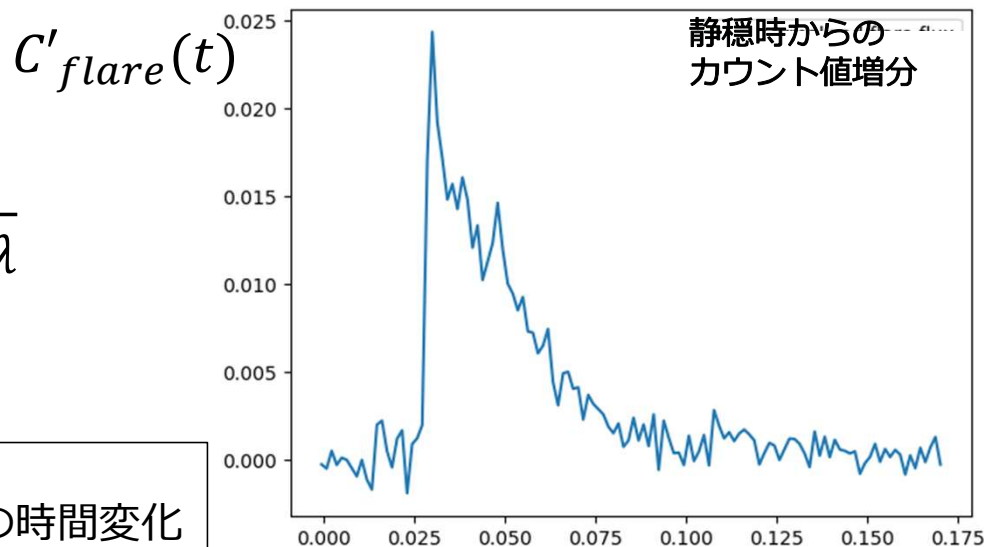
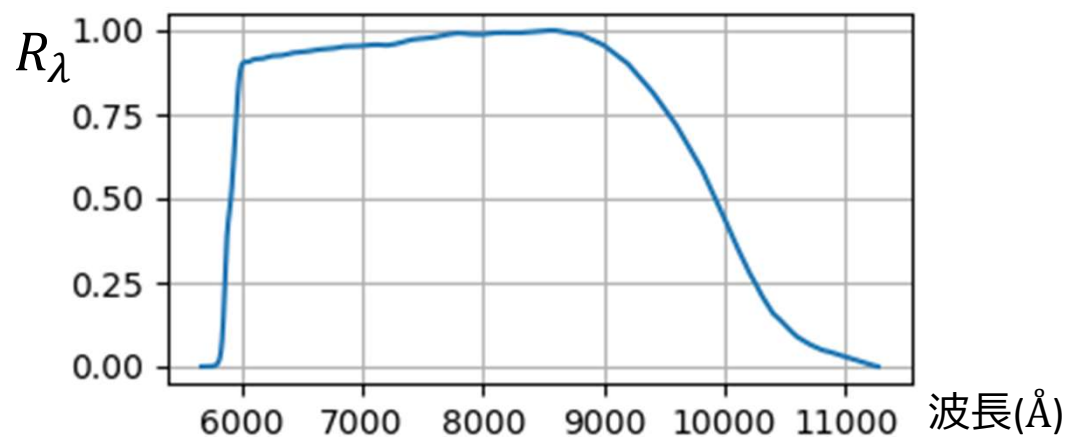
手法②：エネルギー推定(TESS測光)

求めた有効温度を用いてエネルギー計算
 フレア面積(A_{flare})は, 以下の変数・定数を用いて,

$C'_{flare}(t)$	静穏時からの測光フラックス増分
$T_{flare}(t)$	フレア温度
T_{eff}	静穏時の有効温度(= 3270K)
R_{λ}	観測装置(TESS)の感度
R	恒星半径(= $0.35R_{\odot}$)
B_{λ}	プランク関数

$$A_{flare}(t) = C'_{flare}(t) \pi R^2 \frac{\int R_{\lambda} B_{\lambda}(T_{eff}) d\lambda}{\int R_{\lambda} B_{\lambda}(T_{flare}(t)) d\lambda}$$

と表現できる. (Shibayama+ 13)



上図：TESSの感度曲線
 下図：静穏時からの増分の時間変化

解析②：エネルギー推定(TESS測光)

黒体放射を仮定するとボロメトリックな光度は
 $A_{flare}(t)$ を用いてステファンボルツマンの法則より

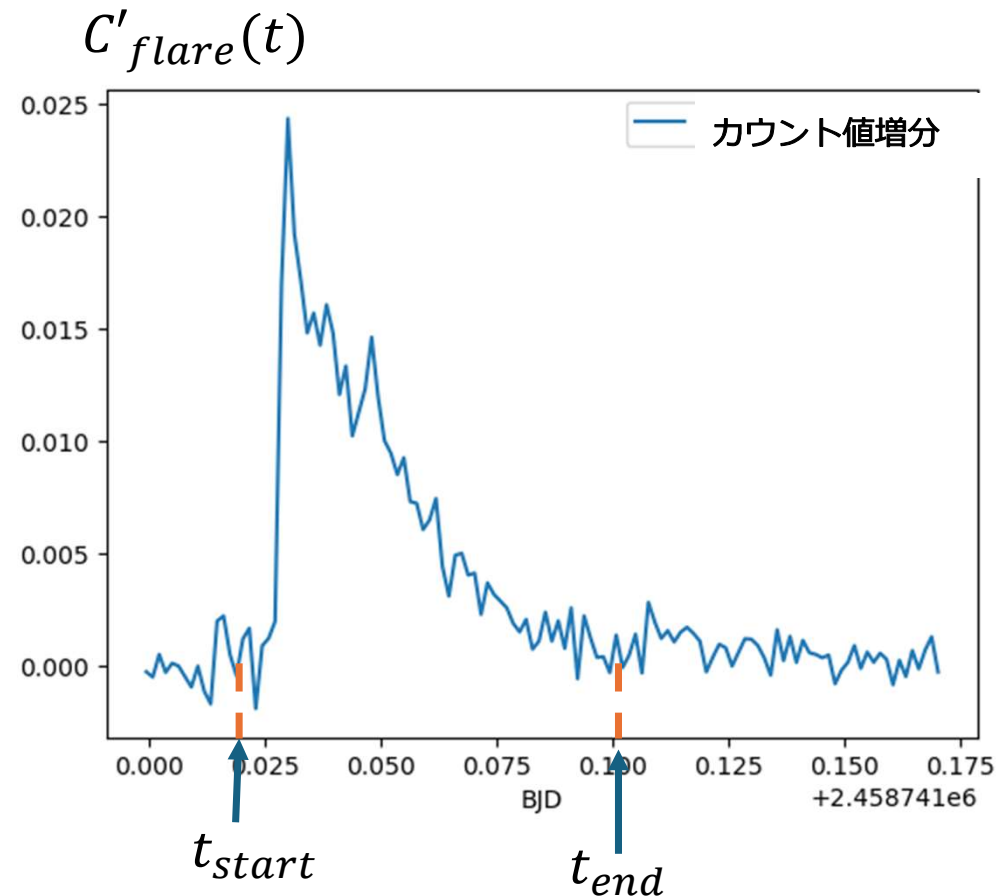
$$L_{flare}(t) = \sigma_{SB} T_{flare}^4(t) A_{flare}(t)$$

フレアの時間積分した放射エネルギーは、

$$E_{flare} = \int_{t_{start}}^{t_{end}} L_{flare}(t) dt$$

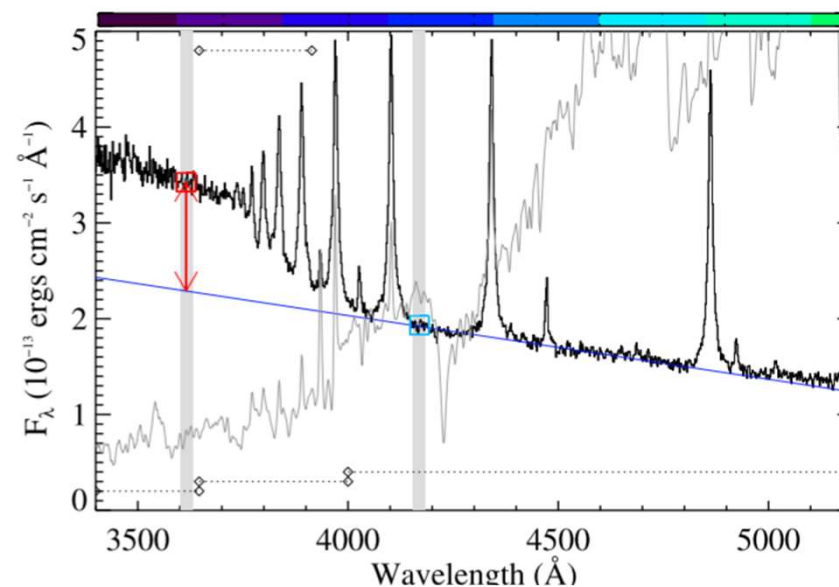
フレアの継続時間は、右図のオレンジ部分

$$\rightarrow E_{flare} = 4.4 \times 10^{32} \text{ erg}$$



短波長の具体的な話

- Kowalski + 2013では、黒体放射+バルマージャンプ (3646Å) の2成分を考えた解析をしている
- $\lambda > 4000$ では黒体でフィッティングしている



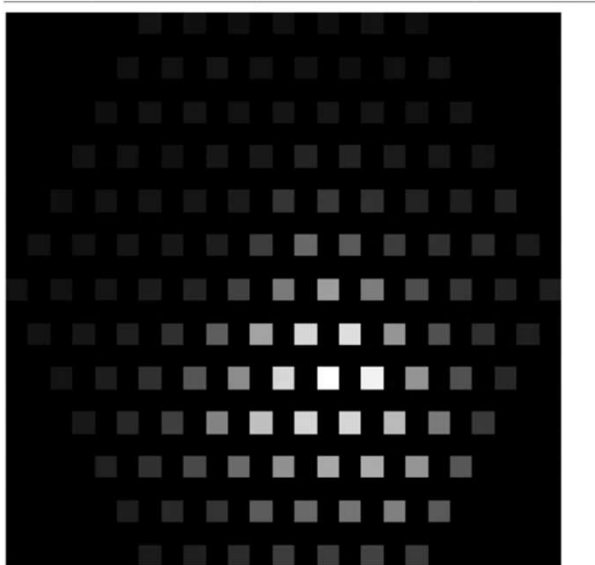
波長毎の2次元画像(ターゲット星)

恒星のelevation毎にairmassが変わり、波長毎の屈折率が異なる

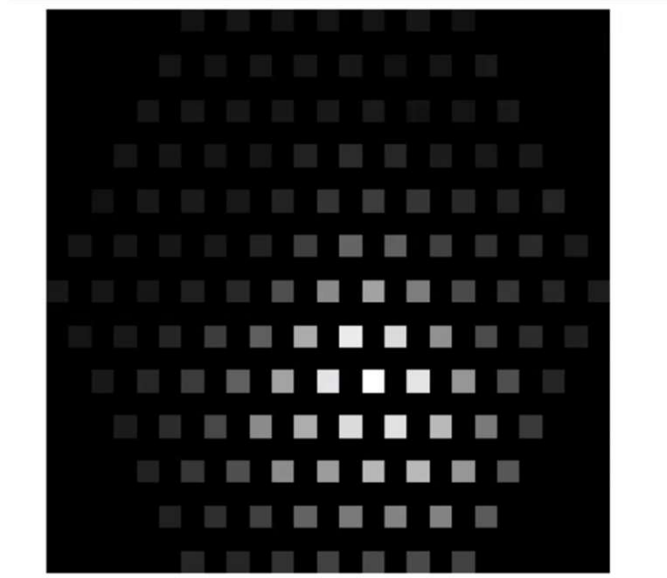
>> 入るファイバーにずれはないか

>> ターゲット星は変化がそれほどない

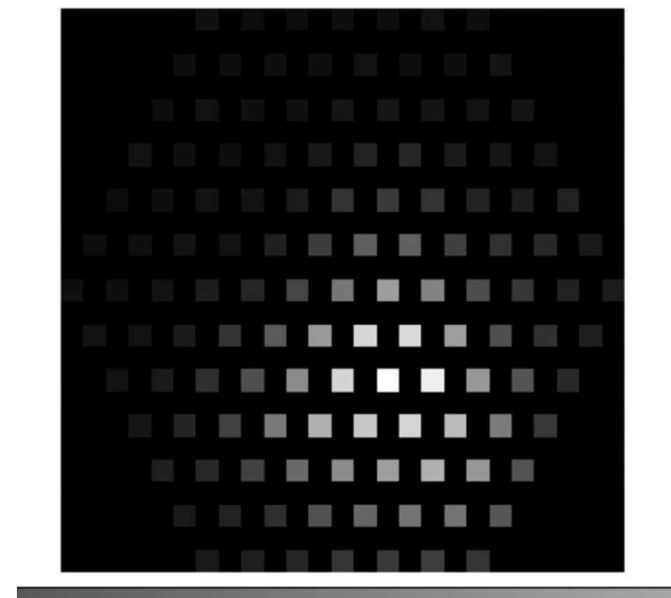
4300-4400Å



6500-6600Å



7700-7800Å



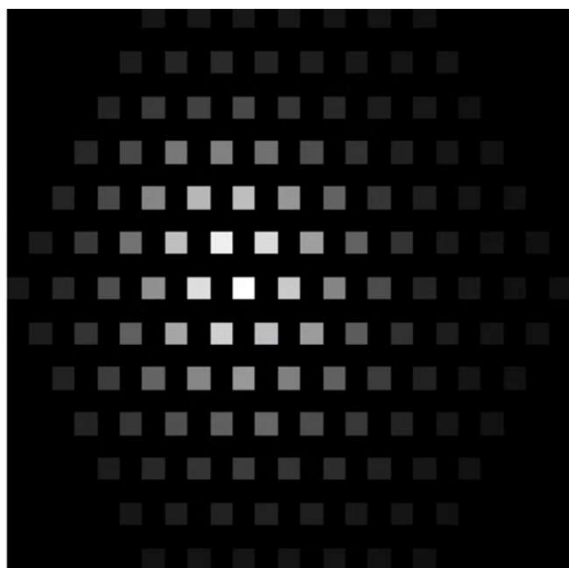
波長毎の2次元画像(標準星)

恒星のelevation毎にairmassが変わり、波長毎の屈折率が異なる

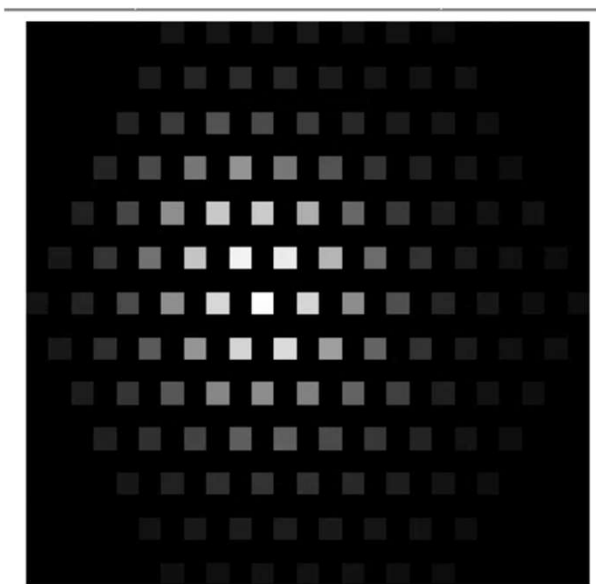
>> 入るファイバーにずれはないか

>> 標準星は、右上がりに少し変化あり

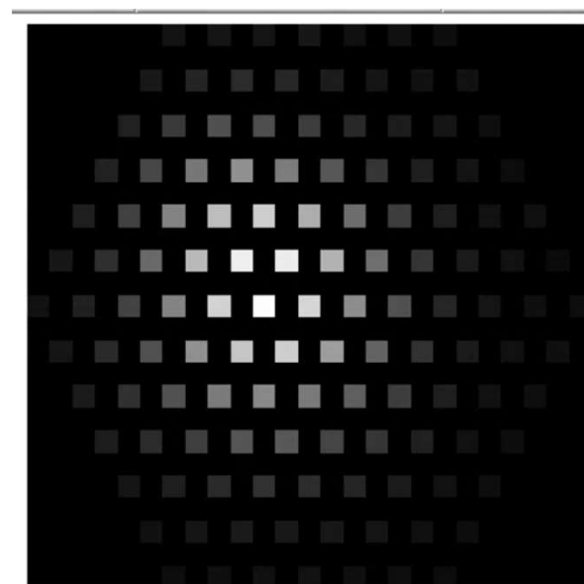
4300-4400Å



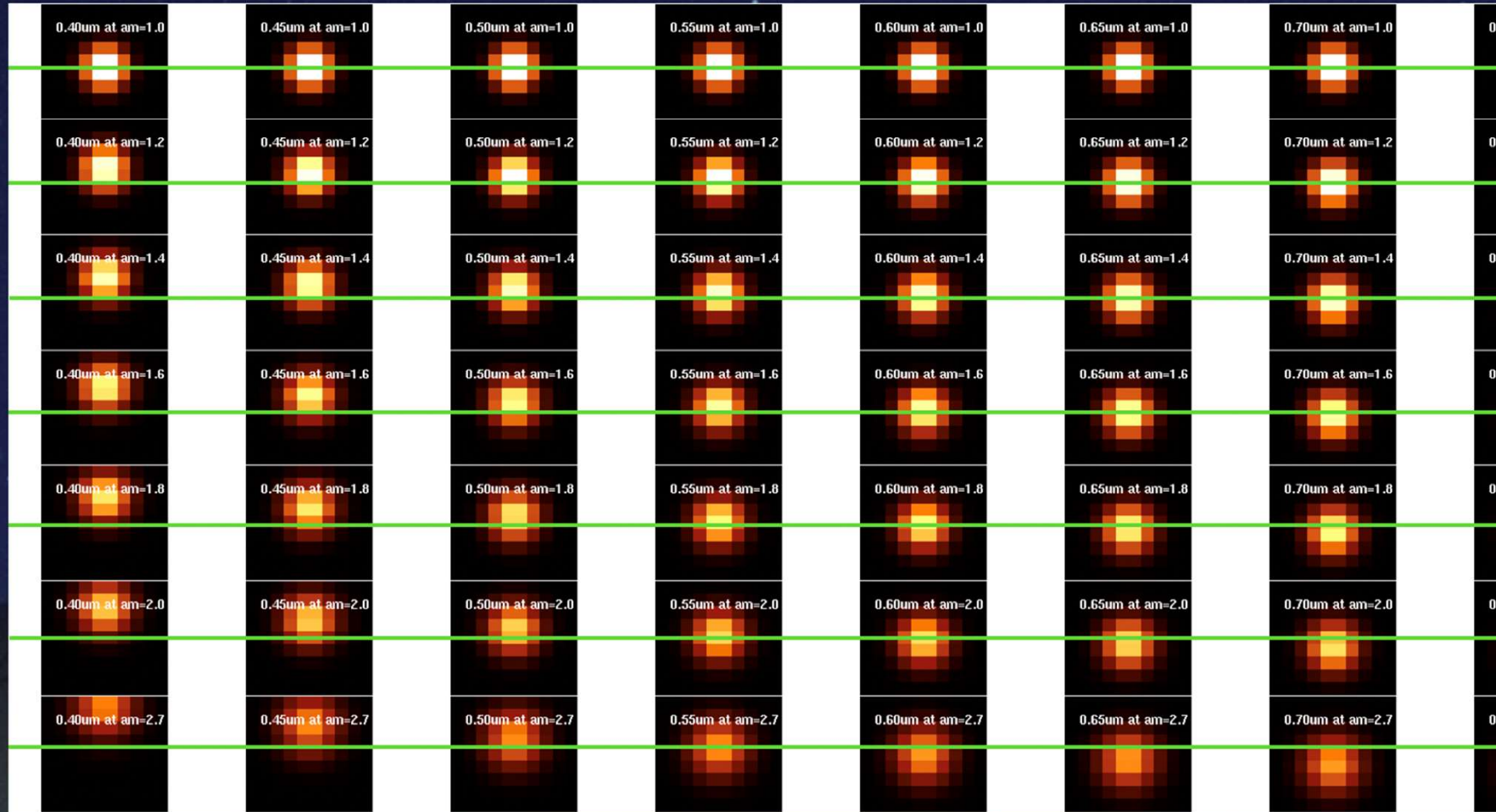
6500-6600Å



7700-7800Å



大気分散: 空気の屈折率による天体の実際の高度と見かけの高度の差が生む、波長毎の位置

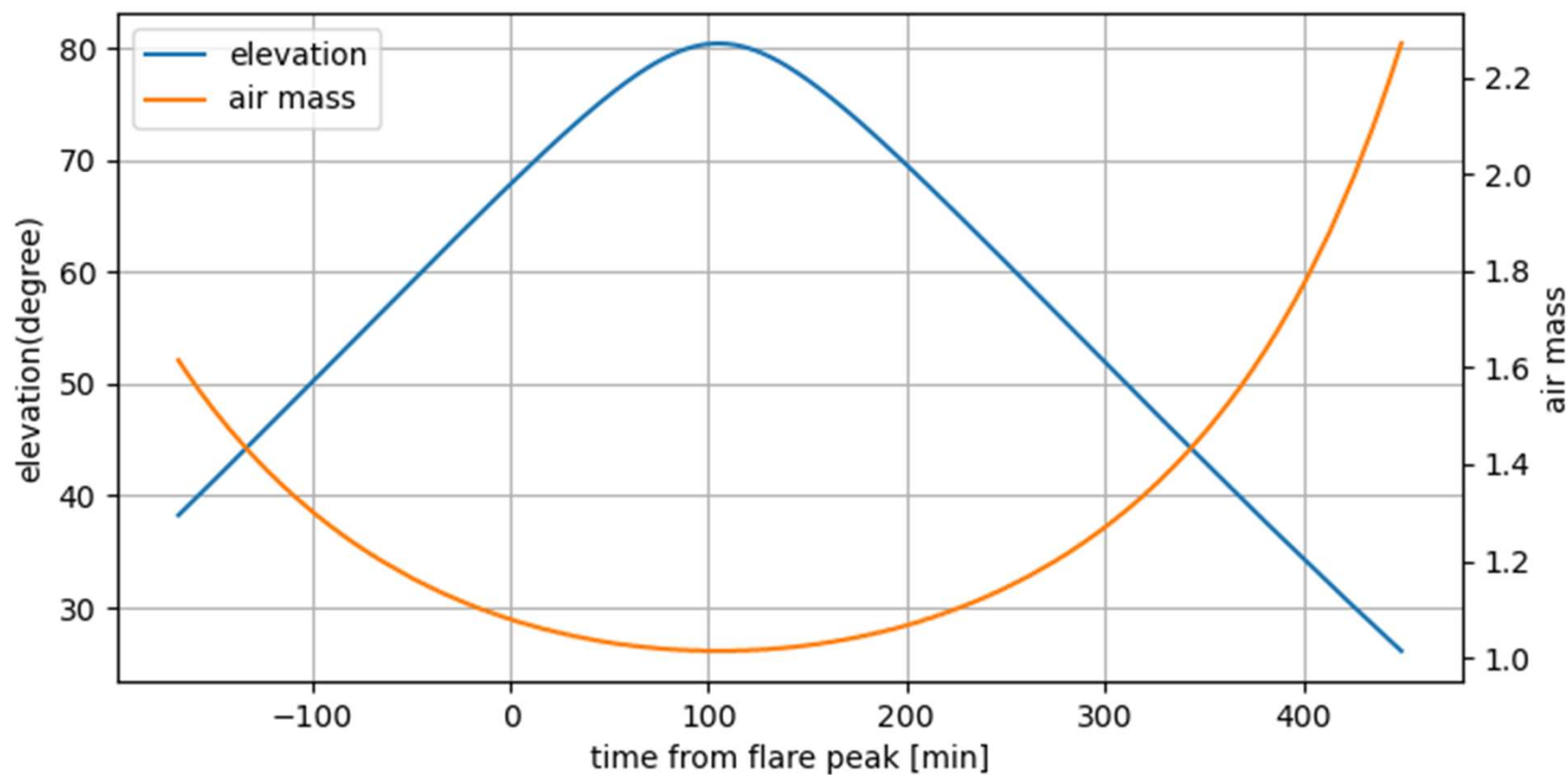


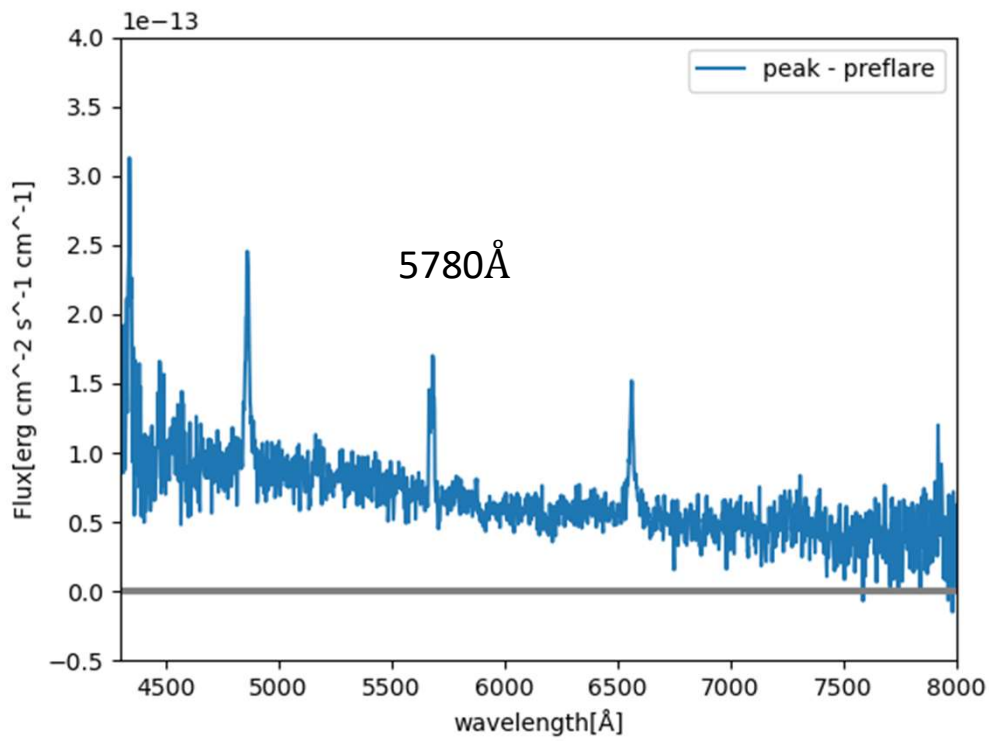
2024/9/9

FWHM=2.0" at 5500Å, Δ airmass = 1.2, airmass changeによる星像ボケも考慮

高度とair mass

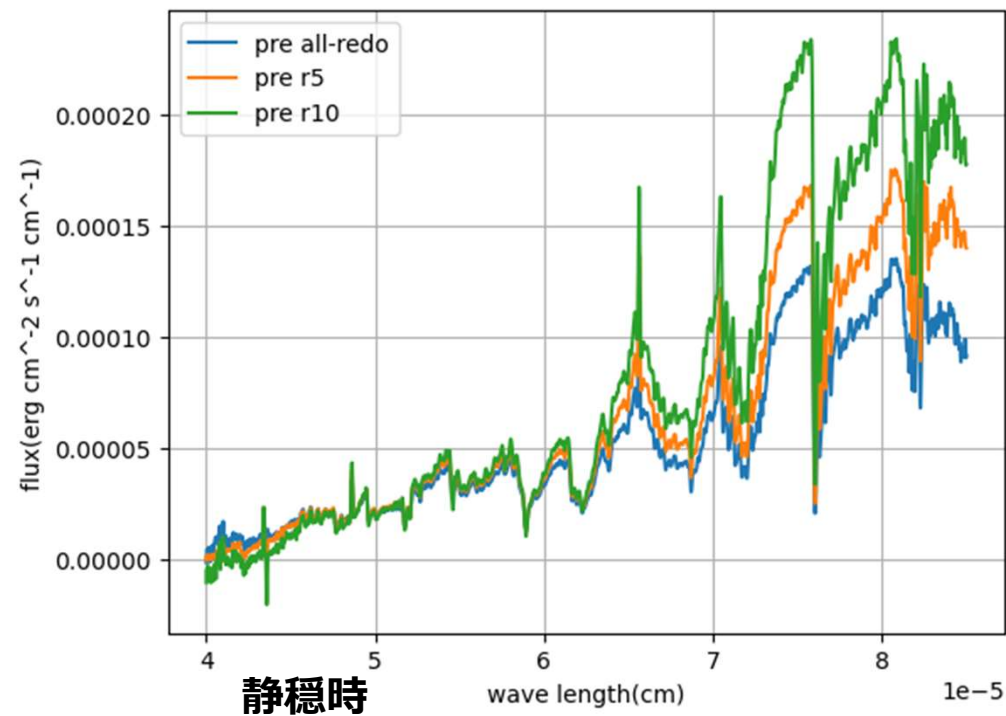
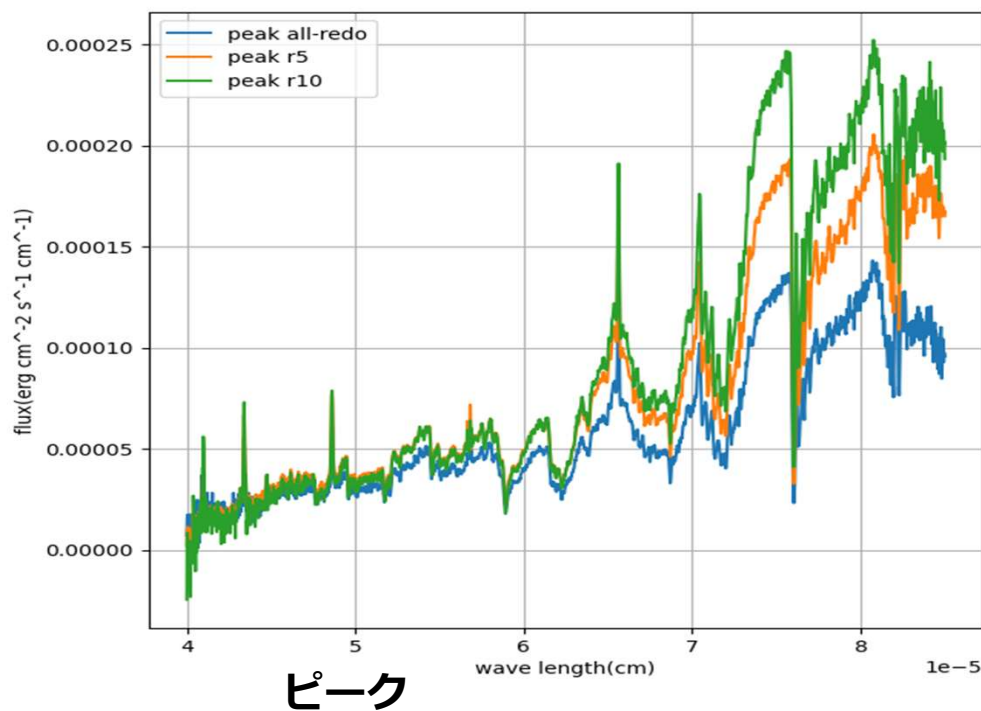
標準星のair mass は1.343 ($\text{airmass} = 1/\sin\theta$)





- 他のフレームでは見られない
>> ノイズか

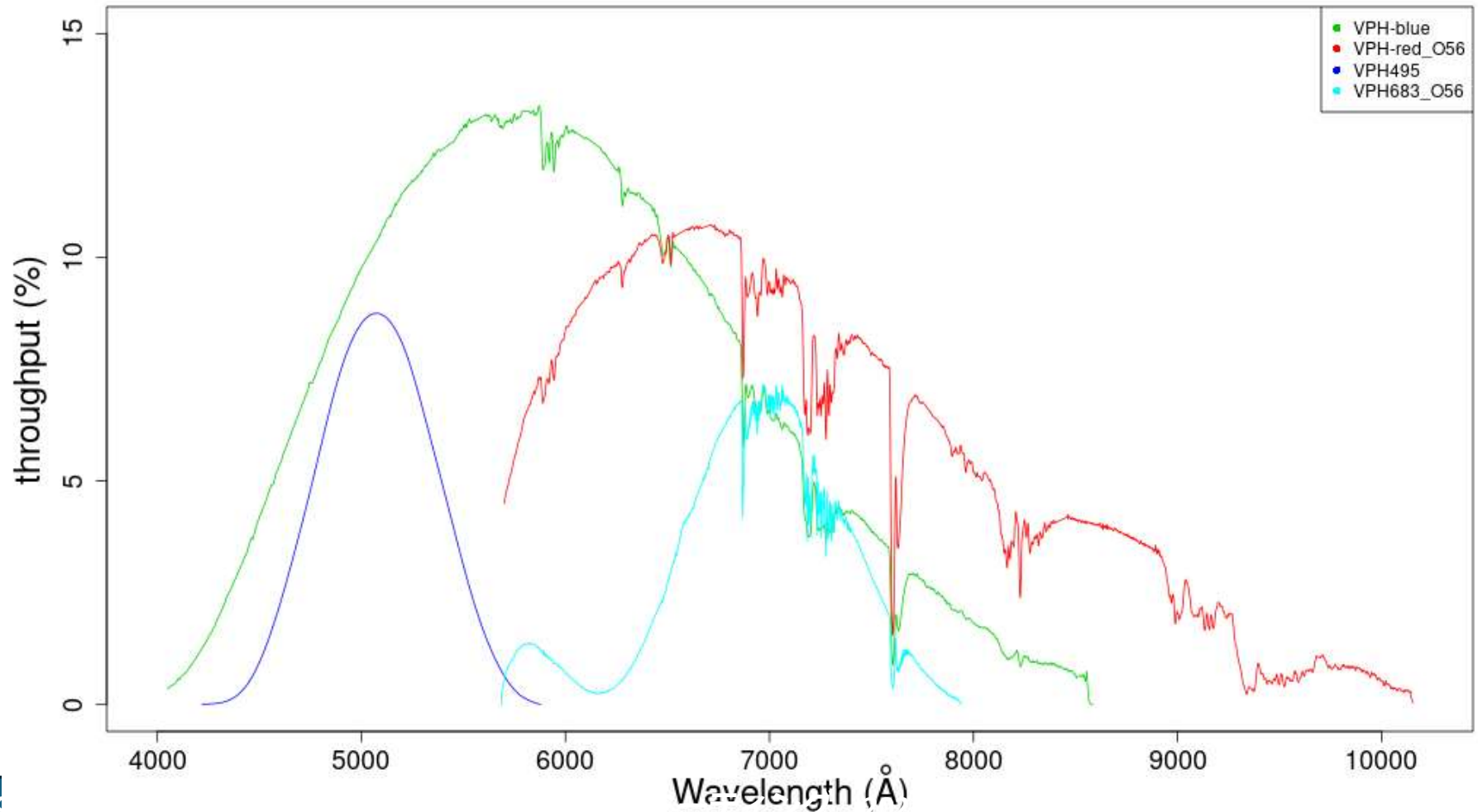
アパーチャ半径を変更したときの フラックスの変化



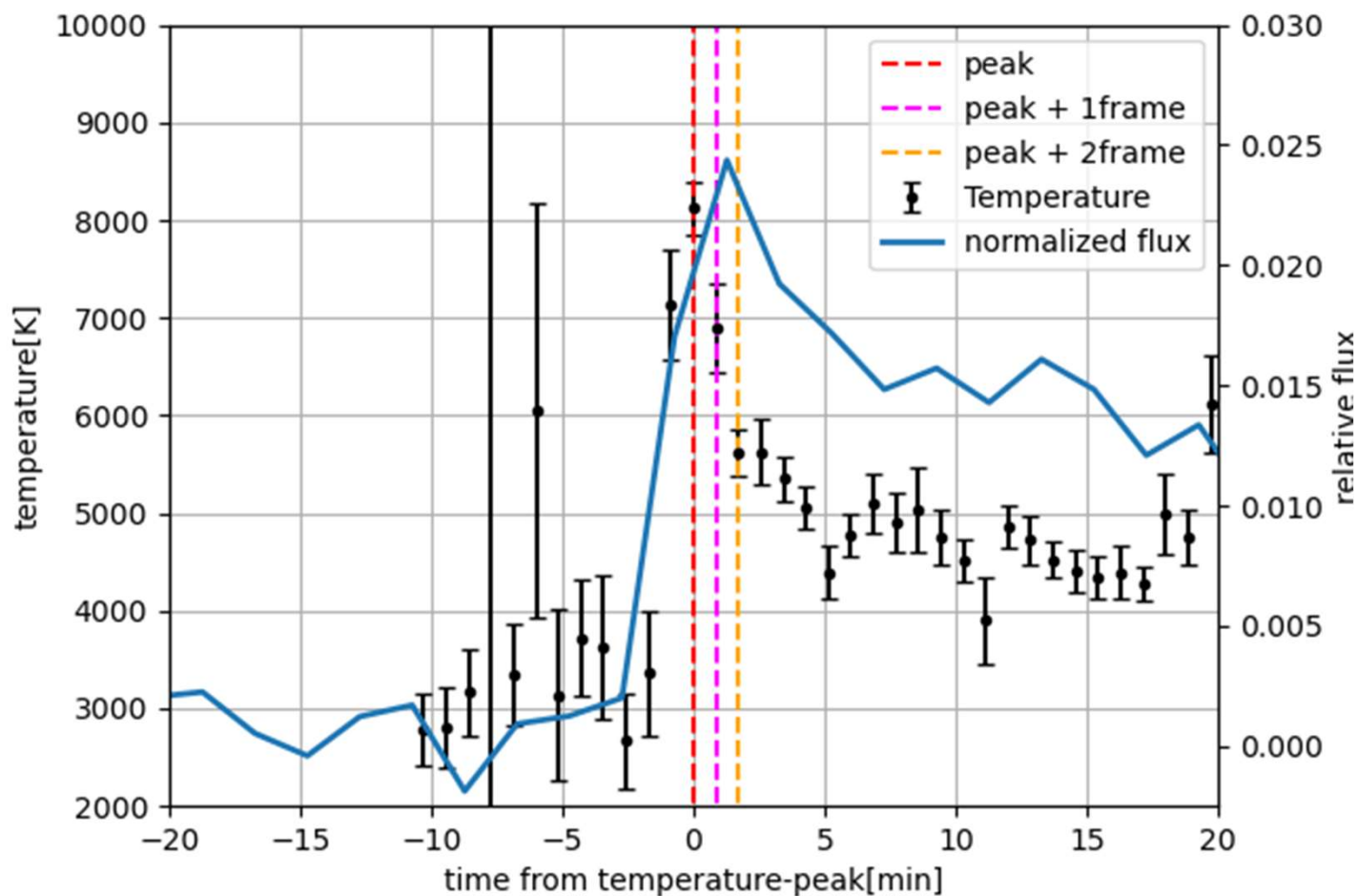
青 : 半径がファイバー2.5本
橙 : 半径がファイバー5本
緑 : 全ファイバー足しあげ

KOOLS-IFU throughput

Optical throughput including telescope and atmosphere



TESSとせいめいのフレアピークのずれ

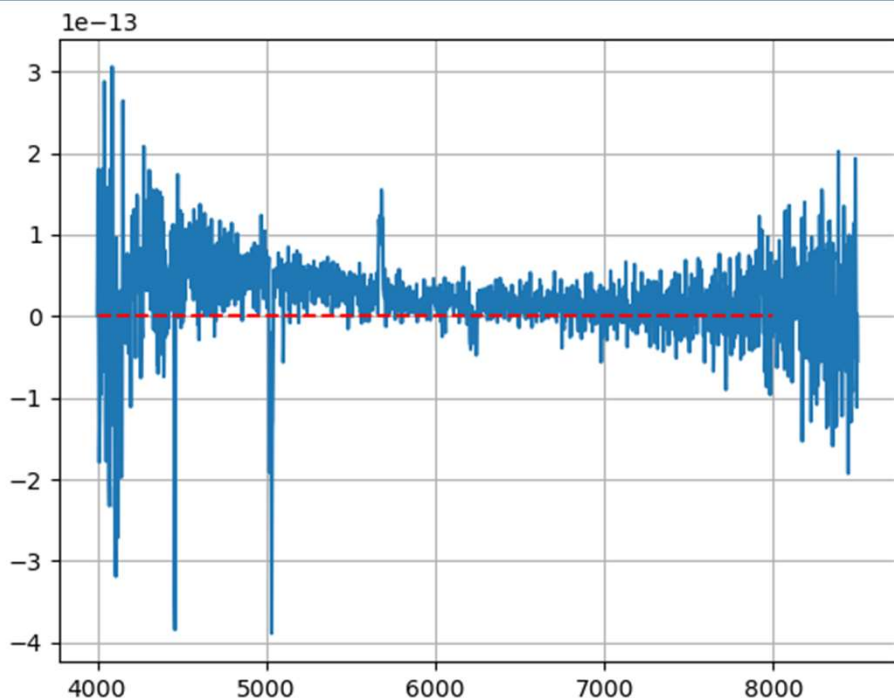


差は1.27[min]

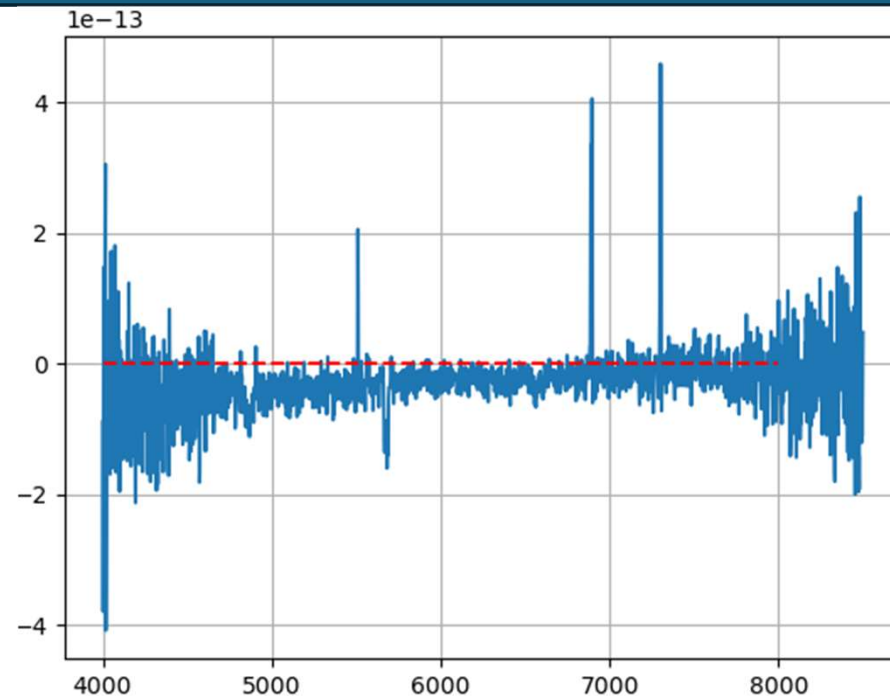
考えられる原因

1. TESS:2[min], せいめい:50[sec]
2. 温度が下がると, 黒体ピークは長波長側に移動する.
> TESS波長域でFLUX増?
3. フレア面積変化の影響
 - フレア初期は
温度高, 面積小
 - 減衰時は
温度低, 面積大

せいめいのピーク時刻判定



ピークとピークの1フレーム前の差分
(全波長域で0より大)



ピークの1フレーム後とピークの差分
(全波長域で0より小)

1. 温度が最大
2. 全波長域でフラックスが最大

黒体フィットの確からしさ

ピーク時刻において、相関係数を計算した

$$\text{pcov(共分散行列)} = \begin{pmatrix} \sigma_T^2 & \sigma_{TA} \\ \sigma_{AT} & \sigma_A^2 \end{pmatrix}$$

$$r = \frac{\sigma_{TA}}{\sigma_T \sigma_A} = -0.99$$

強い負の相関がある。

相関係数行列

```
l: print(pcov)
[[ 8.33667063e+03 -2.68096871e-20]
 [-2.68096871e-20  8.75506529e-44]]
( $\sigma_T^2, \sigma_A^2$ ) = (8336K2, 8.755 × 10-44)
```

```
l: print(np.sqrt(pcov[0,0]), np.sqrt(pcov[1,1]))
91.30537021604415 2.958895958200803e-22
( $\sigma_T, \sigma_A$ ) = (91K, 2.958 × 10-22)
```

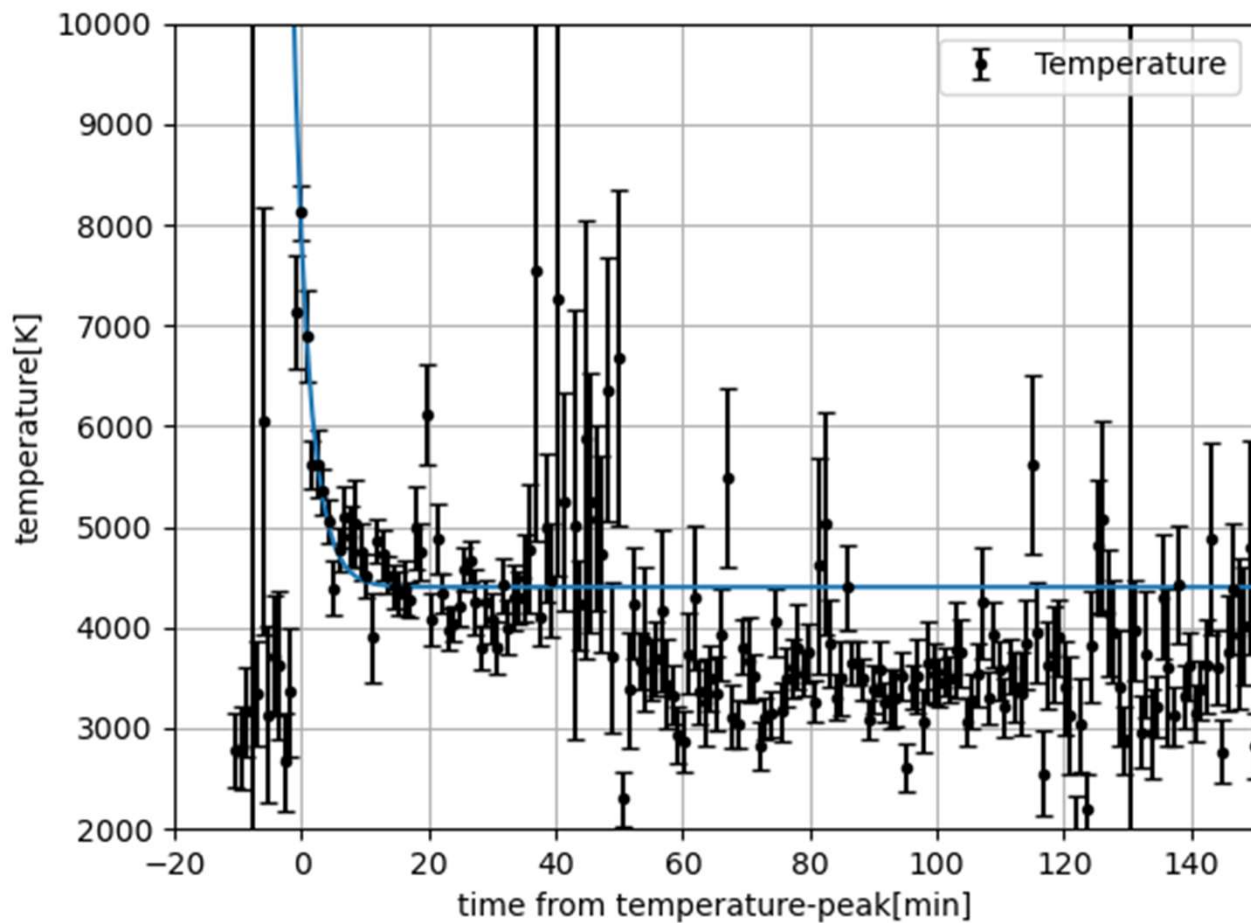
黒体フィッティングの確からしさ>相関係数の確認

```
#相関係数
r = pcov[1,0]/np.sqrt(pcov[0,0]*pcov[1,1])

print("相関係数："+str(r))
```

相関係数： -0.9923519545329752

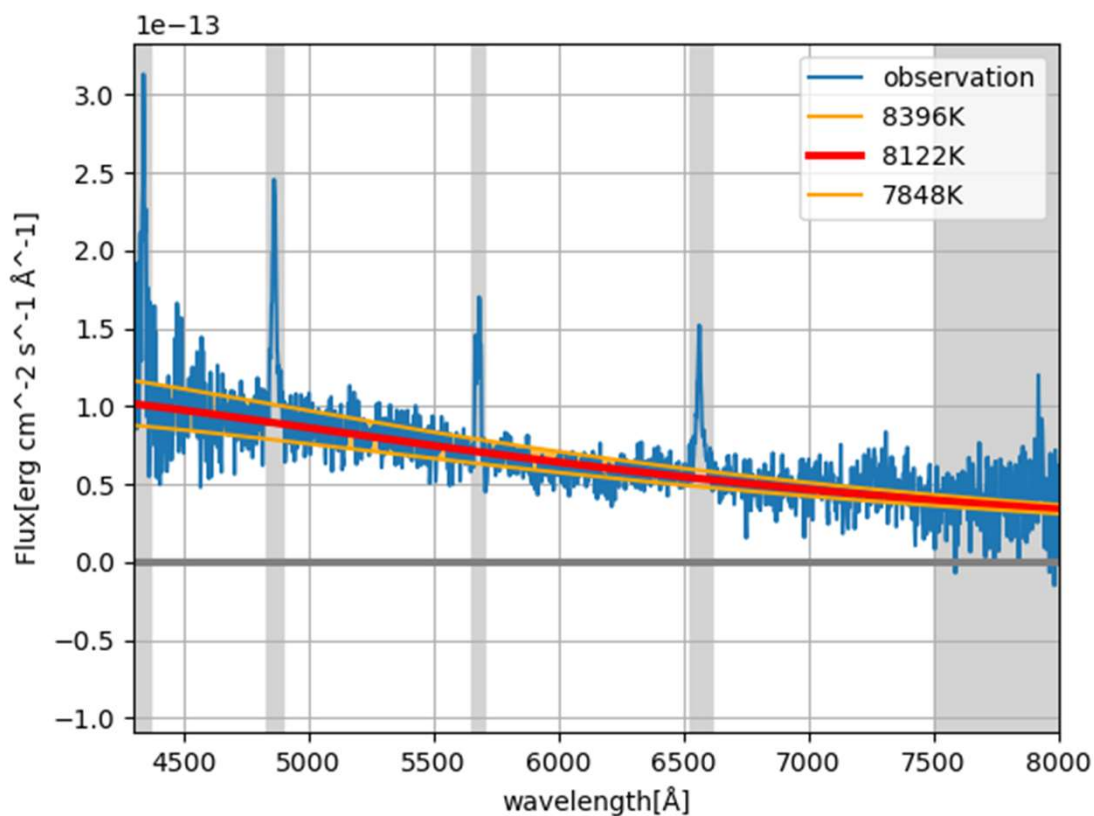
フィッティングに使用した温度の曲線化



TESSの増分が1%以下の
時間帯をフィッティング
に使用

E-folding time : 2.5min

フィッティングの除いた部分



Łowalski et al. 2013参照.

波長域[Å]	
$\lambda < 4300$	
$4310 < \lambda < 4370$	H γ
$4828 < \lambda < 4898$	H β
$5650 < \lambda < 5700$	
$6520 < \lambda < 6610$	H α
$7500 < \lambda$	