

せいめい望遠鏡とTESS,小口径望遠鏡によるM型星フレアの同時測光分光観測

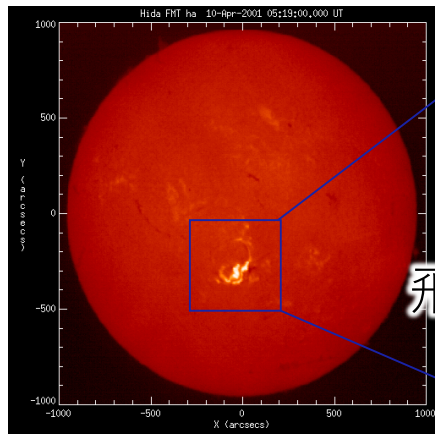
前原裕之 (NAOJ)

行方宏介, 岡本壮師, 野上大作, 柴田一成 (京大), 野津湧太 (コロラド大), 本田敏志, 村瀬光太郎 (兵庫県立大), 村田勝寛, 安達稜, 飯田康太, 大枝幹, 小川風太, 白石一輝, 戸間紗也香, 細川稜平 (東工大), 松村良太, 藤井大地, 松本桂 (大教大), 安藤和子, 山村春香, 田畑佳美, 福田尚也 (岡山理大), 赤澤秀彦 (船穂天文台), 伊藤弘, 清田誠一郎 (VSOLJ), 水谷正則, 白神憲一 (八塔寺星を観る会)

太陽/恒星フレア

○ 太陽/恒星表面での増光現象

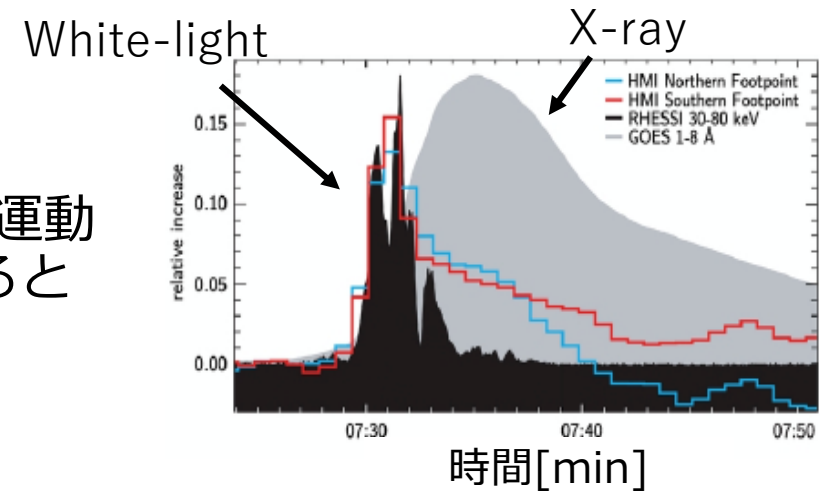
- 様々な波長での増光 (電波、可視、X線)
- 数分～数時間
- 太陽/恒星フレアは、磁場のエネルギーが、熱・運動エネルギーに変換する過程で統一的に説明できると考えられている。
- フレアに伴う放射線の照射・プラズマ噴出
⇒ **地球・社会へも大きな影響**



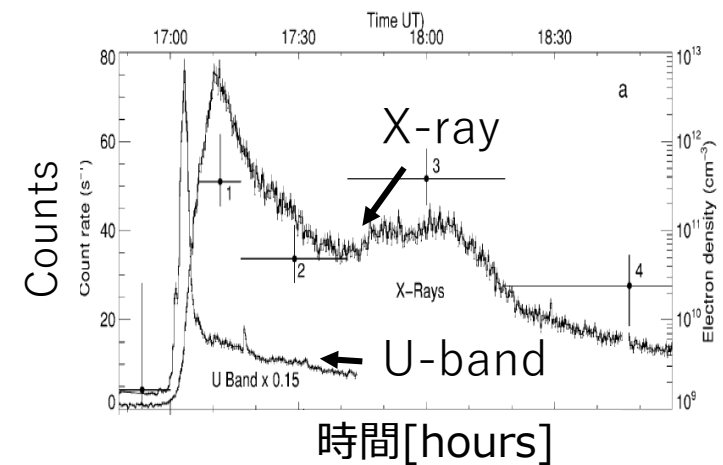
飛騨天文台
Ha観測->



太陽フレア(Martinez+12)



恒星フレア (Guedel+02)



Flare duration vs. flare energy

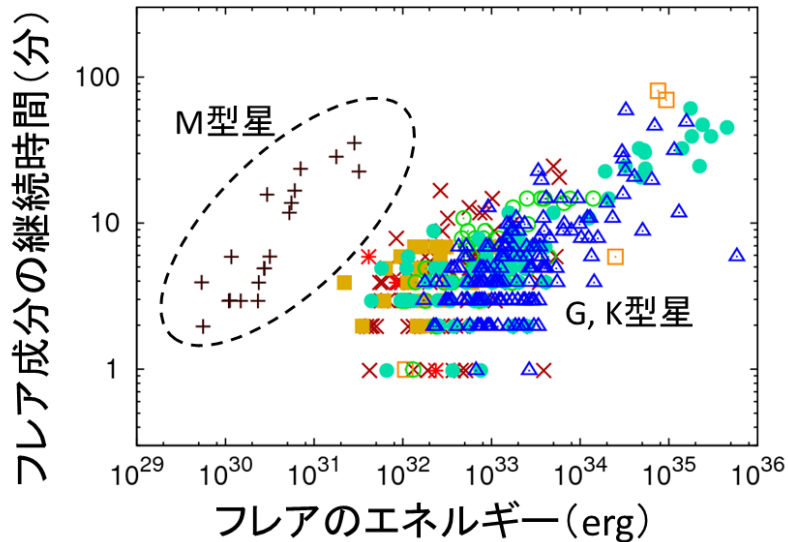
- フレアの継続時間とフレアで解放されるエネルギーの間には相関がある

- G-type stars : $\tau_{\text{flare}} \propto E_{\text{flare}}^{0.39}$ (Maehara+2015)
- Flare energy \propto Magnetic energy \propto volume $\times B^2$
- Timescale of flare \propto Alfvén time scale \propto (scale length)/(Alfvén velocity)

$$E \propto L^3 B^2, \tau \propto L/v_A \rightarrow \tau \propto E^{1/3}$$

- ケプラー宇宙望遠鏡のデータを用いた解析によると、M型星も同様の相関がある

→G, K型星よりもlate M dwarfsのフレアは継続時間が1桁程度長い傾向



2500-3000K	+	4500-5000K	■
3000-3500K	x	5000-5500K	○
3500-4000K	*	5500-6000K	●
4000-4500K	□	6000-6500K	△

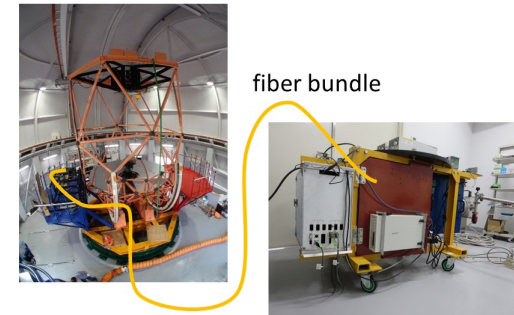
- 磁場のエネルギーのうち可視連続光で解放されるエネルギーの割合がG, K型星とM型星で違う？
- M型星のコロナ中の磁束密度がG, K型星が違う？
 - エネルギー $\propto B^3$
 - Alfvén velocity $\propto B$

観測の概要

- EV Lac, V388 Cas, YZ CMi, AD Leoを測光・分光同時に連続観測

- 非常に活発なフレア星

- 小規模なフレアであればほぼ毎晩起こる
- 時間分解能：<2分
- 低分散分光（せいめい+KOOLS-IFU: $R \sim 600$ ）



- フレアに伴うBalmer線の強度やその比率の変化を高時間分解能(<1分)でとらえる

- 測光（TESS + 小口径望遠鏡）

- 可視連続光の変化(+色の変化)

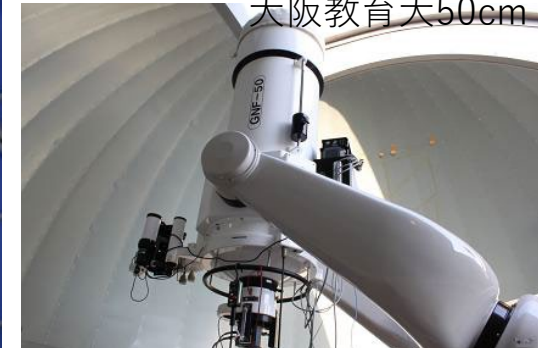


TESS

MITSuME@岡山



大阪教育大50cm



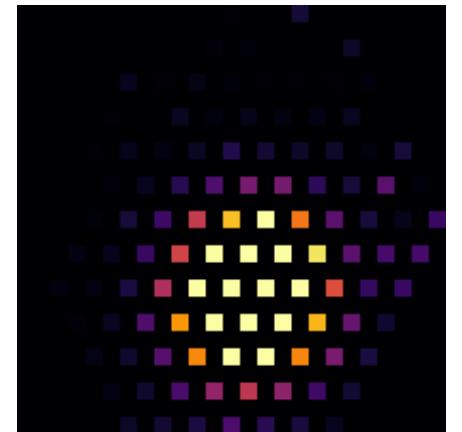
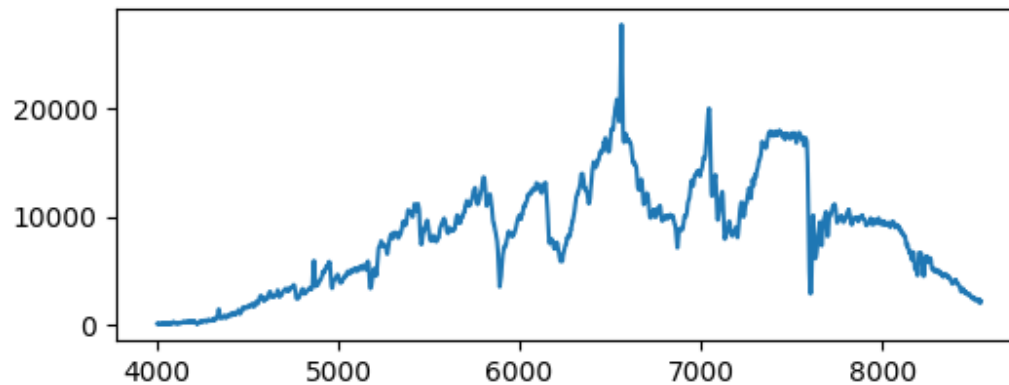
- 可視連続光のフレアに対してBalmer線のフレアがどのような応答を示すのかを調べる

せいめい望遠鏡 + KOOLS-IFUを用いたフレア観測



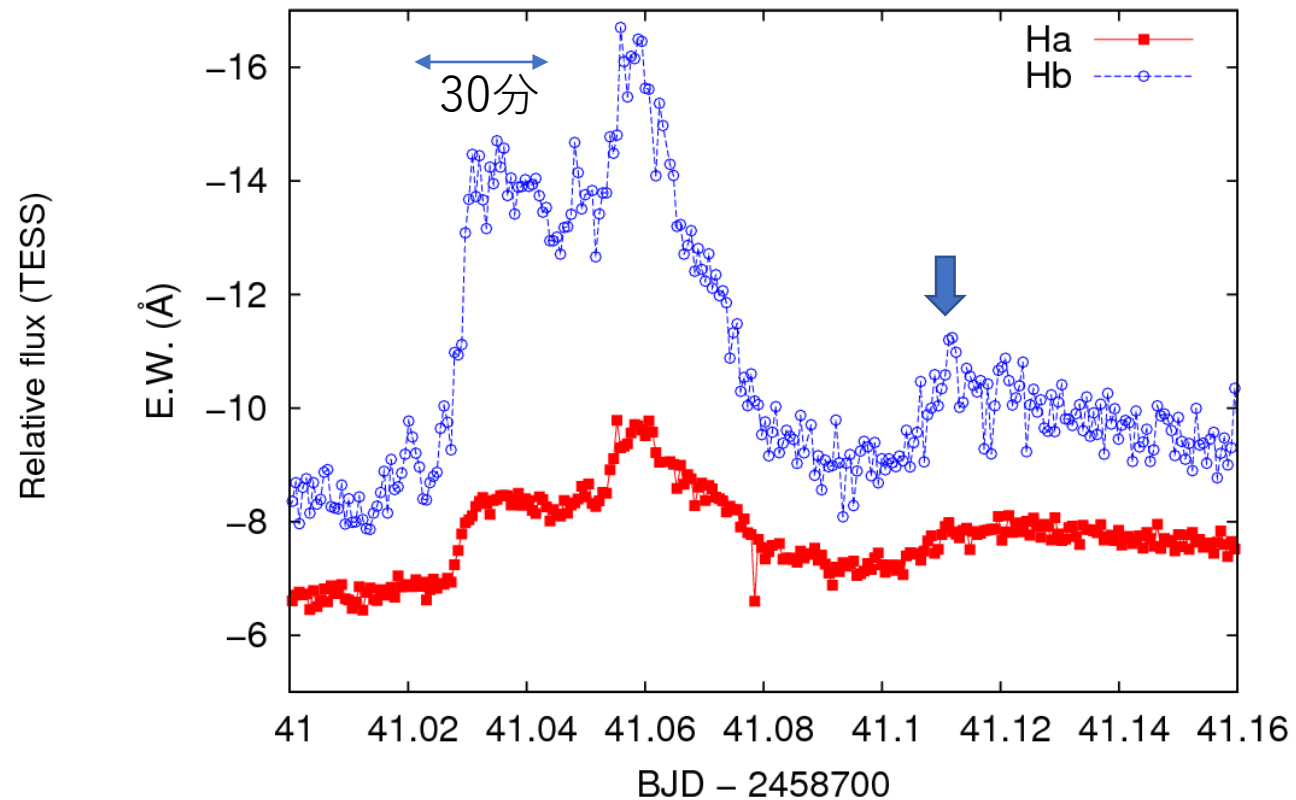
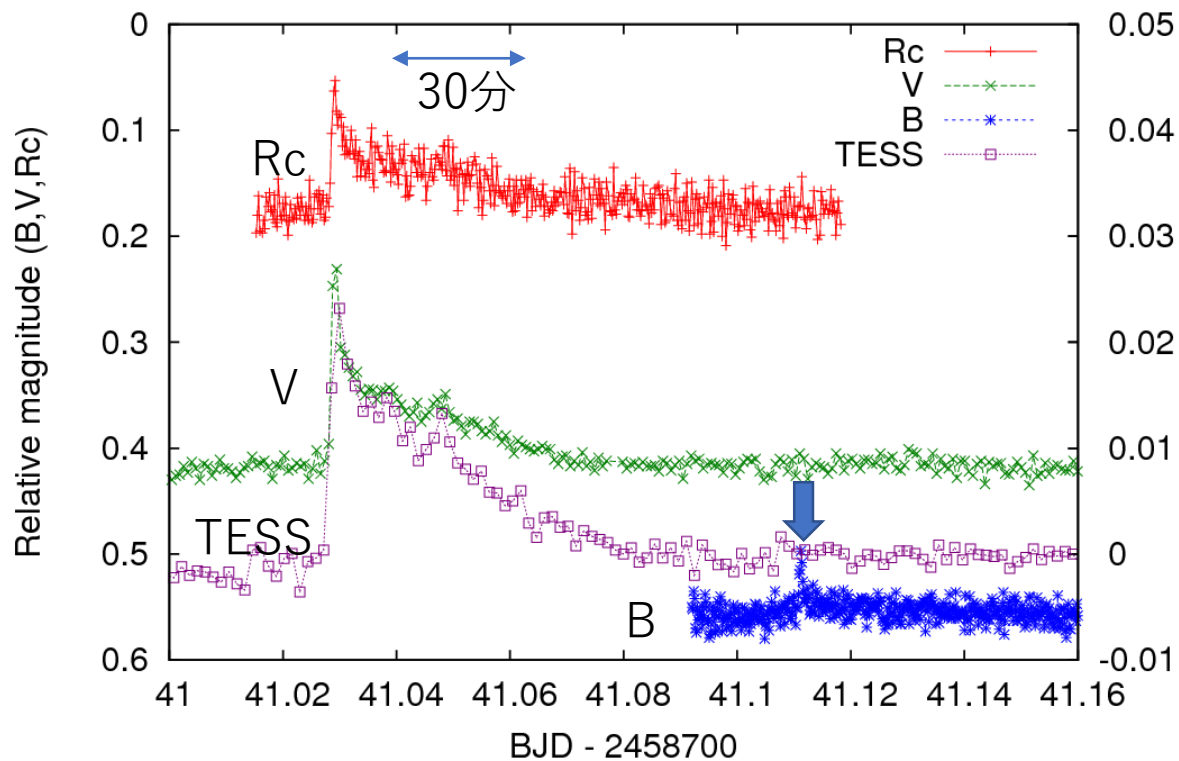
2019年10月4日のフレアの例

- 30-120秒積分：S/N>100@H α
- KOOLS-IFUのクイックルックデータを利用したオートガイドとバルマー線等価幅の即時測定を実施
 - IFUのファイバー端面の輝度分布から追尾誤差を自動補正 → 中断なしで連続観測可能
 - フレア発生をリアルタイムにモニタ可能



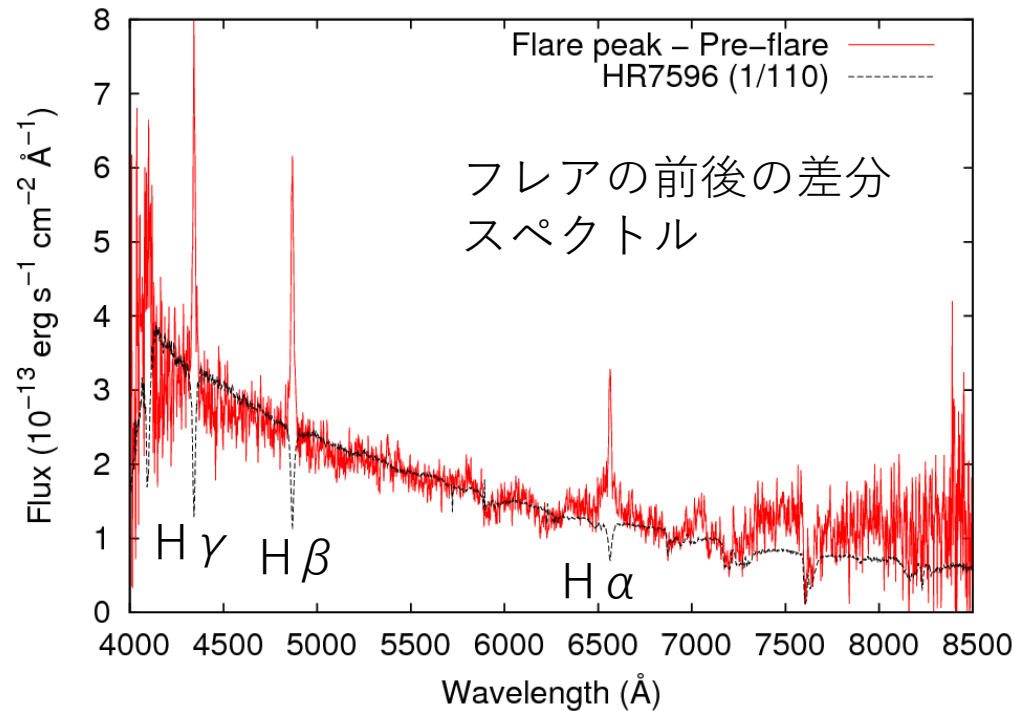
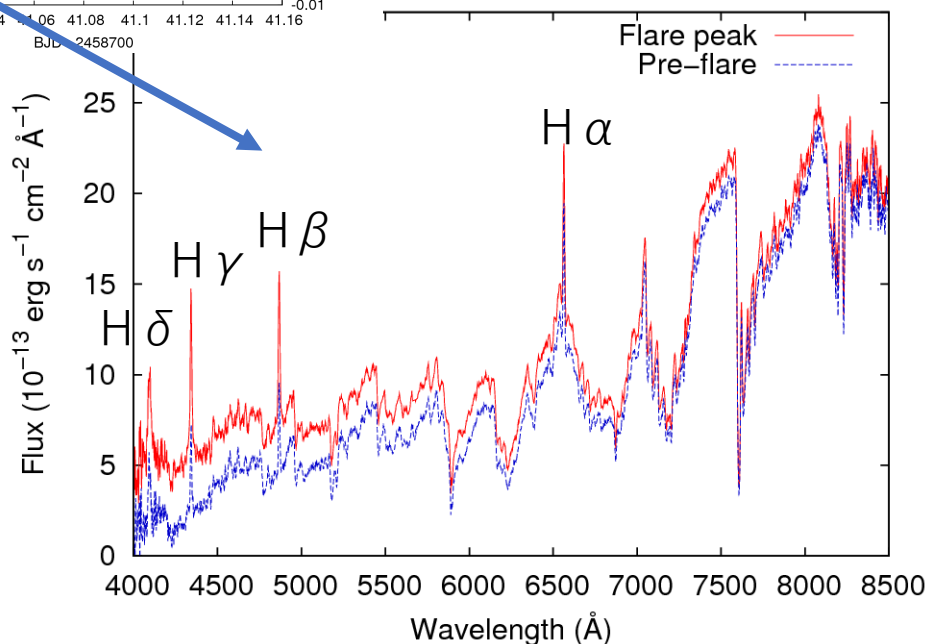
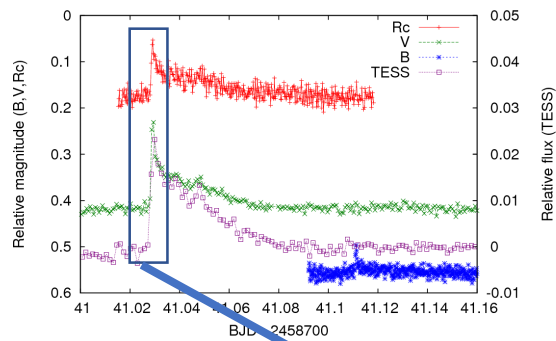
クイックルックデータのスペクトル(左)とファイバー端面の輝度分布(右)

観測されたフレアの例 (EV Lac; 2019年9月14日)



- せいめい望遠鏡 ($H\alpha$, $H\beta$) とTESSの両方で検出されているフレア：24個
- TESSでは明瞭な増光がないものの、高時間分解能のB-band測光(~ 10 sec)と分光でのみ受かっているフレアもあった (上図の下矢印)

9/14のフレア時のスペクトルの変化

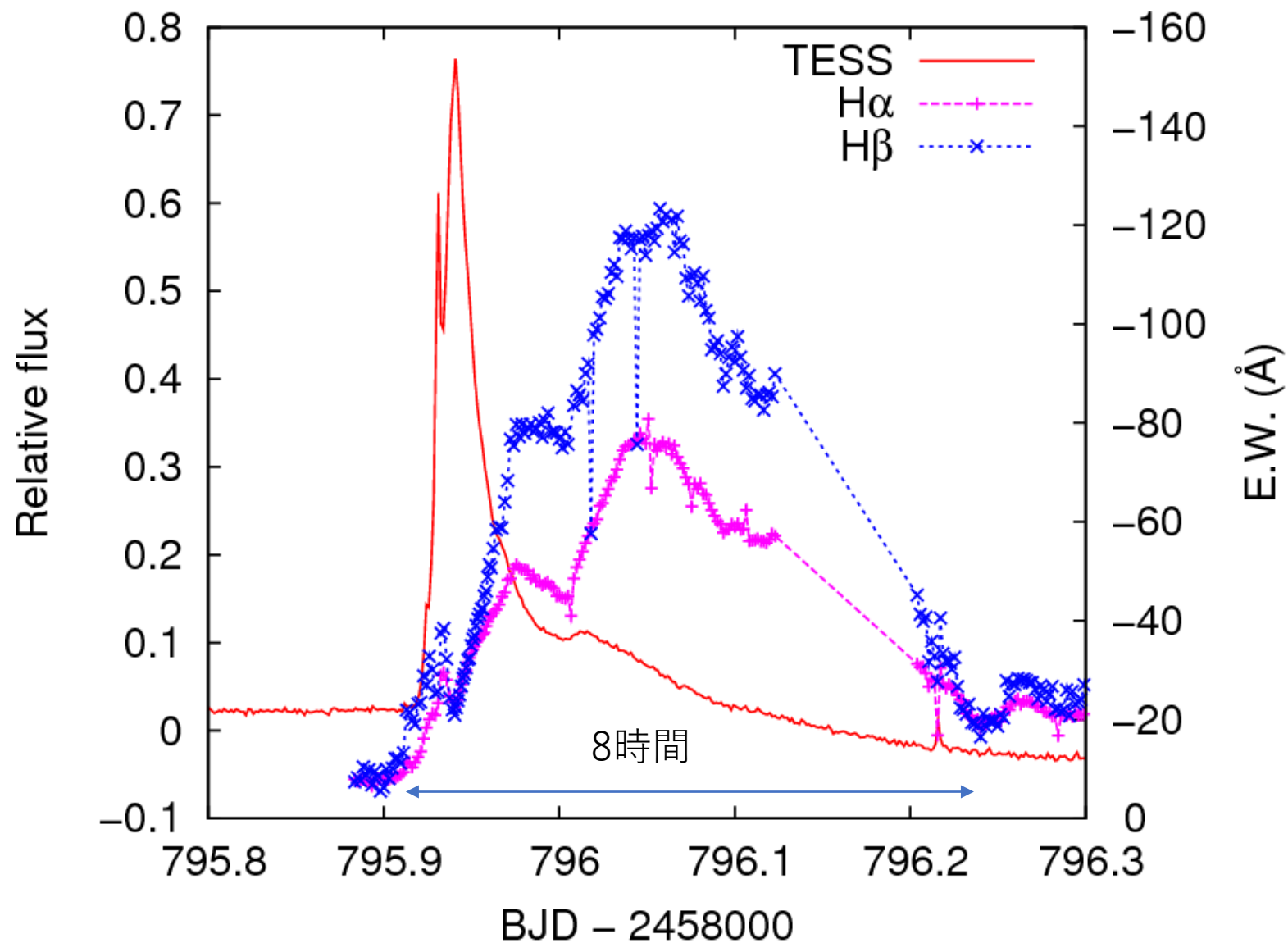


- フレア前後のスペクトルの差分

- フレア成分の連続光：A型星のスペクトルと似ている

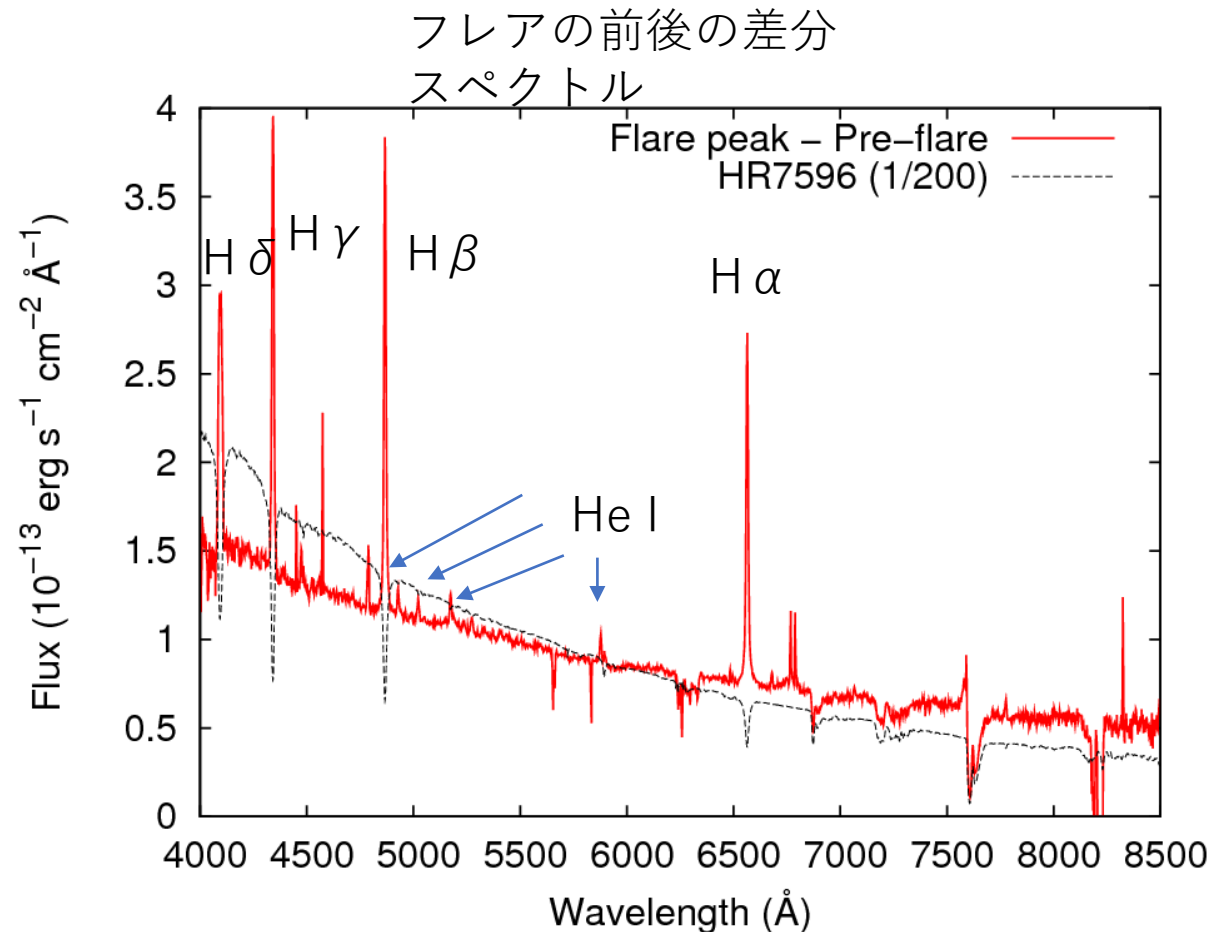
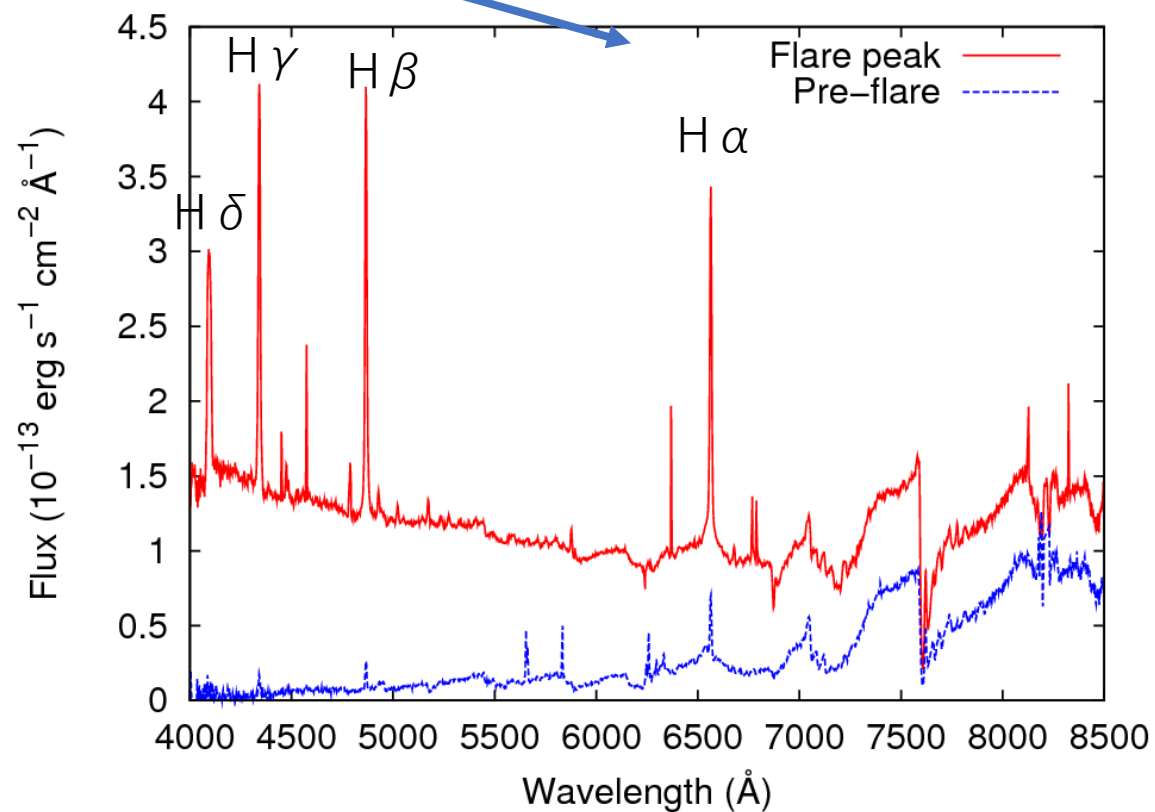
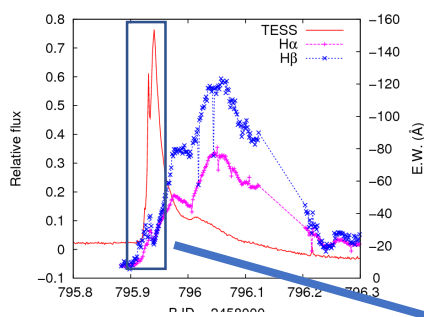
- フレア成分： $T_{\text{eff}} \sim 10,000 \text{ K}$ 程度の黒体放射に近いSEDとする先行研究(e.g. Hawley+2003)と矛盾しない結果が得られた

観測されたフレアの例 (V388 Cas; 2019年11月8日)



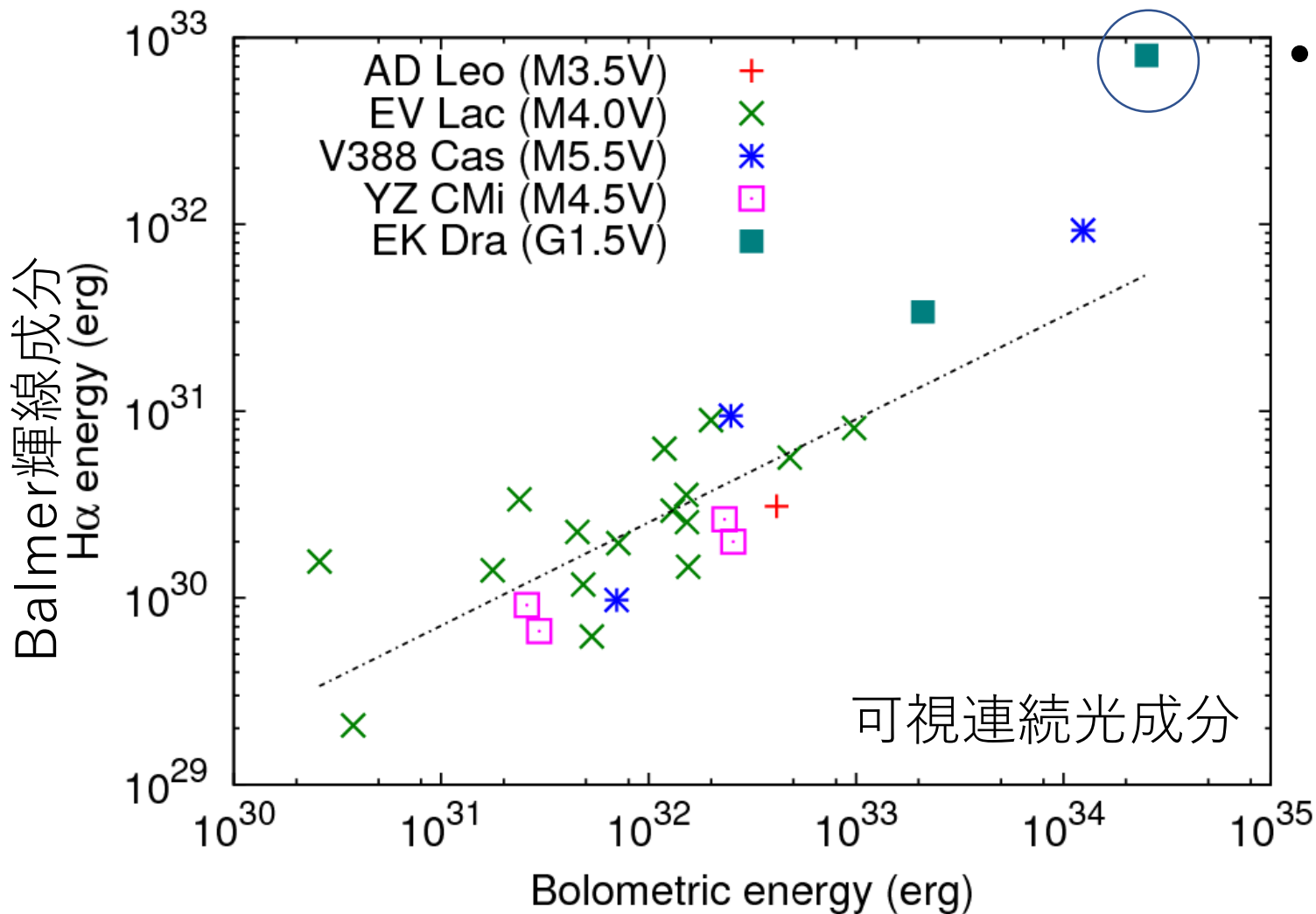
- DDTでの観測
 - 分室職員科学観測
- これまで観測したM型星フレアの中で最大のフレアを検出
 - $E_{\text{bol}} = 10^{34}$ erg
 - 継続時間 > 8時間

11/8のフレア時のスペクトルの変化



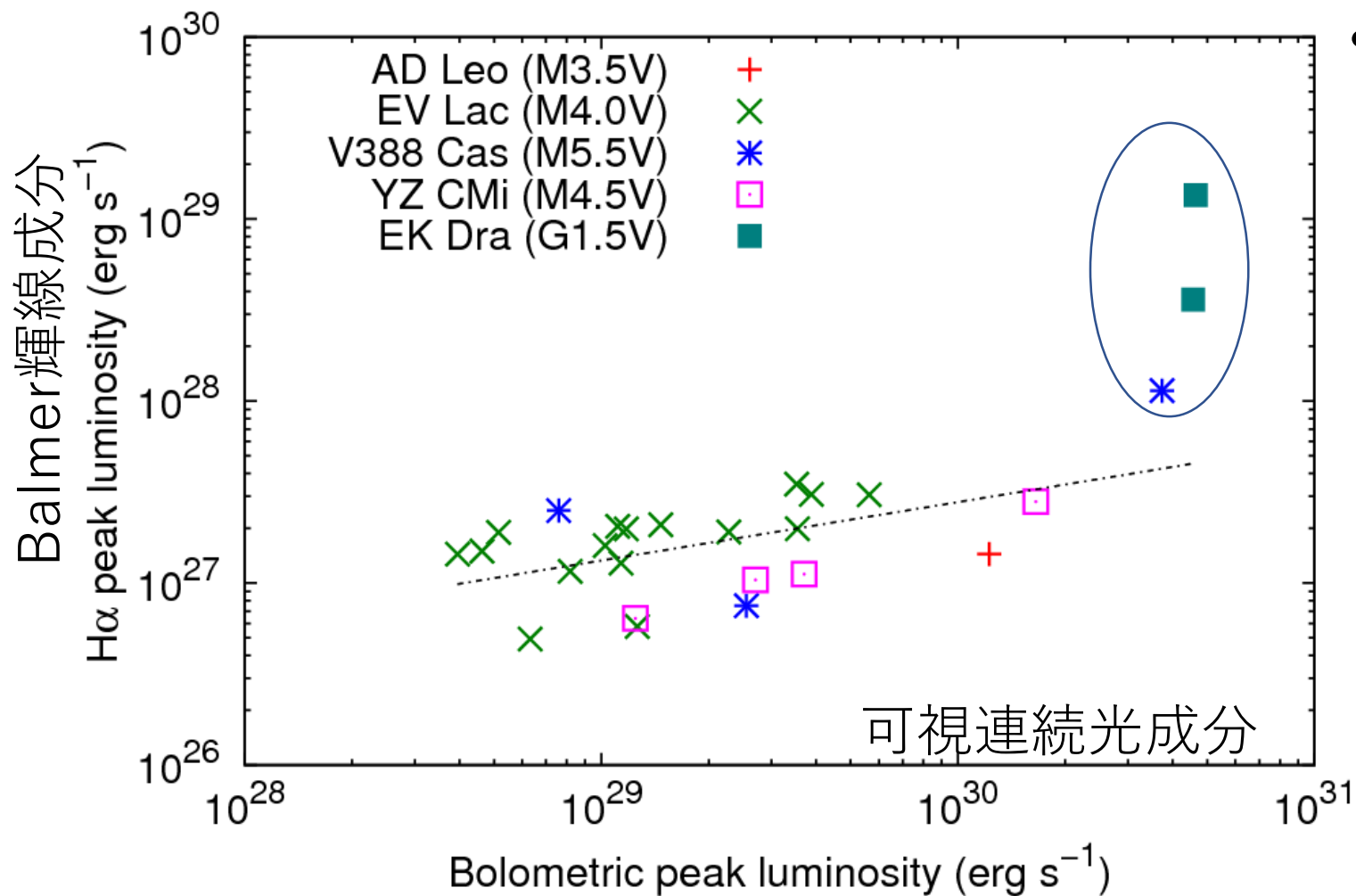
- Balmer線に加えてHe Iの輝線も見られた
- HR7596 (B9IV) よりはやや温度の低いSED

フレアのエネルギー： E_{bol} vs. $E_{H\alpha, H\beta}$



- $E_{H\alpha} \propto E_{bol}^{0.55 \pm 0.11}$
 - Balmer線で解放されるエネルギーは bolometric energy の1%程度 @ $E_{bol} = 10^{33}$ erg
 - 小さいフレアはバルマー線が強く、大きいフレアは連続光放射が強い傾向
 - フレアの連続光成分が増えても $H\alpha$ 線の強度はそれほど増えない
 - 1次元輻射流体計算の結果 (Namekata+2020) と定性的に一致
- G型星フレアはM型星フレアより $H\alpha$ 線のエネルギーが大きい？
- エネルギーが大きいフレアは $H\alpha$ 線のエネルギーが大きい？
 - フレアエネルギーが大きい ($> 10^{34}$ erg) サンプルをもっと増やす必要がある

フレアの最大光度： L_{bol} vs. $L_{\text{H}\alpha}$,



- $L_{\text{H}\alpha} \propto L_{\text{bol}}^{0.32 \pm 0.11}$
 - Balmer線で解放されるエネルギーはbolometric energyの1%程度 ($L_{\text{bol}} = 10^{29}$ ergの場合)
- 小さいフレアはバルマー線が強く、大きいフレアは連続光放射が強い → フレアエネルギーと同じ傾向
- G型星 or $> 10^{34}$ ergのスーパーフレア → H α 線のluminosityが大きい？

まとめ

- M型フレア星を、せいめい望遠鏡による高時間分解能の連続分光観測 + TESS、小口径望遠鏡での測光観測を実施
 - 分光・測光の同時データが得られた24例のフレアについて統計的な性質を調べた。
- 連続光のフレアエネルギー vs. バルマー線のフレアエネルギー
 - $E_{H\alpha} \propto E_{bol}^{0.55}$
 - 大きなフレアほど連続光で解放されるエネルギーの割合が大きい
 - $10^{30} - 10^{34}$ ergの範囲では星によらず同じ傾向
 - $>10^{34}$ ergのスーパーフレアではH α 線のpeak luminosityが小さいフレアよりも大きい？ or G型星とM型星の違い？ → より大きなフレアのデータを集める必要がある
- 他のスペクトル型の天体でのフレアではどうかを検証する必要あり
 - EK Dra (G1.5V), CR Dra (M1.5V), WX UMa (M6.0V)についても2020Aで観測 → 解析中
 - 2020B：RS CVn型星（K型準巨星）の観測を予定
 - 太陽フレアとの比較

(昨年) 望遠鏡・装置への要望

• 望遠鏡

- 指向精度・追尾精度の向上

→ IFU視野に確実に入ってくれば自動観測が実現しやすい (RMS~2-3"?)。

※明るいフレア星の場合は撮ったスペクトルでガイドできるので追尾精度には (実は3月時点のレベルでも) それほど不満はない。そもそも暗いフレア星は時間分解能が上げられないので本研究には向かない

• 分割鏡制御

- 2019Aの我々の観測期間中は予想以上にうまく制御できていた。

• 大きな高度変化があった際にも星像を維持できると長時間の連続観測ができる。←7月の改修で改善

• 装置

- 総合効率の向上。

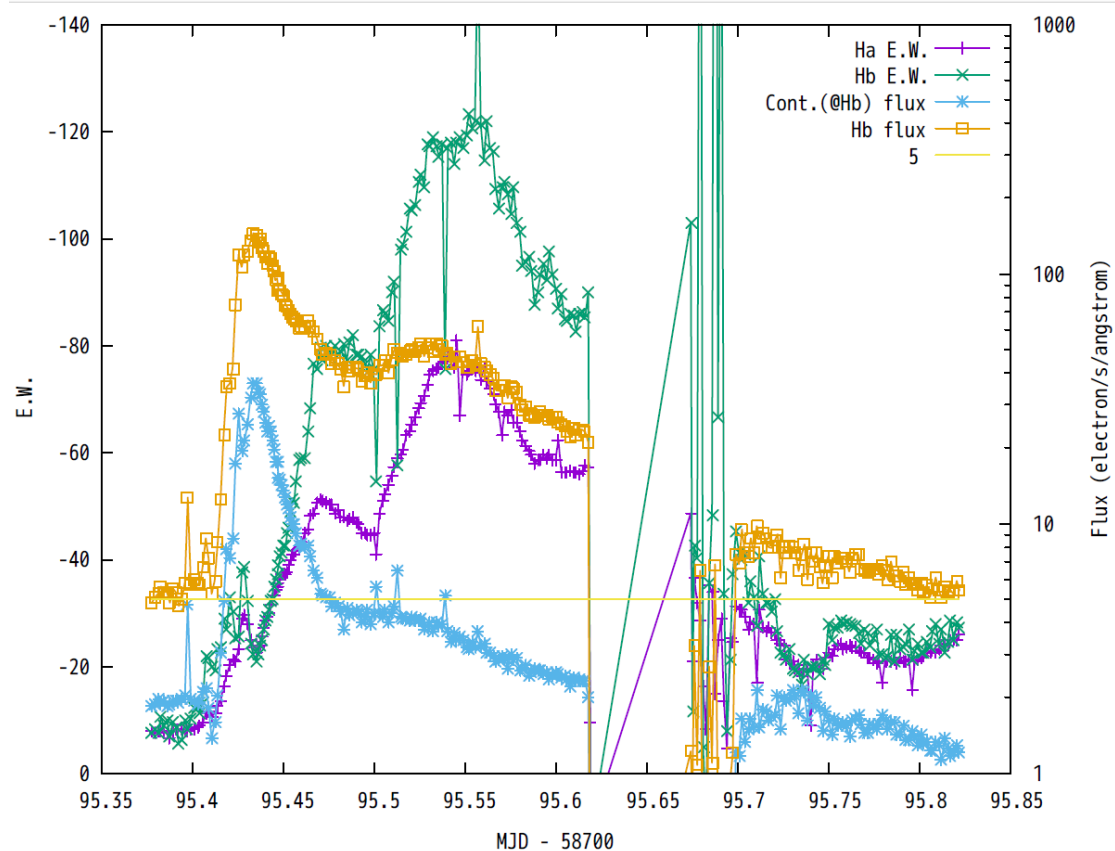
→2019Aは予想の半分だった。2019Bでは簡易イメージローターなしで観測を行い効率の向上 (+40%程度) を図る予定。

- フレアのより高時間分解能 (<10秒) の観測にはもっと読み出しの早い検出器が欲しい。。。



ソフトウェアの改良によりdead timeが減少したこと、wipeなし読み出しモードの追加されたので、短い露出 (<20秒) での観測がやりやすくなった

将来的に欲しい機能



KOOLS-IFU：面分光装置なので空の状態が安定していれば測光分光が可能

- 任意の位置に動かせるファイバーバンドルを増設？して、近傍の星との相対測光分光ができると恒星フレアなど短時間変動の観測に威力を発揮しそう
 - 127本→60本×2セット+skyなど
- 中分散 ($R \sim 10,000-20,000$)
 - H α だけでもよい
 - Line profileの変化→plasma ejectionの検出
- 短波長 ($\lambda < 3500-4000$)