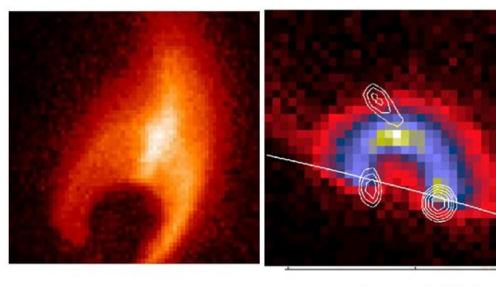
晩期型星におけるスーパーフレアの測光・分光同時観測

前原裕之(NAOJ)

行方宏介 (NAOJ), 野津湧太 (コロラド大/NSO/東工大), 本田敏志 (兵庫県立大), 幾田佳 (東京大), 浪崎桂一, 井上峻, 野上大作, 柴田一成 (京都大)

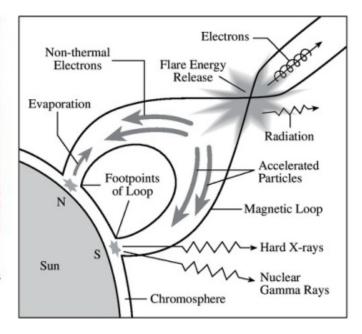
Solar flares

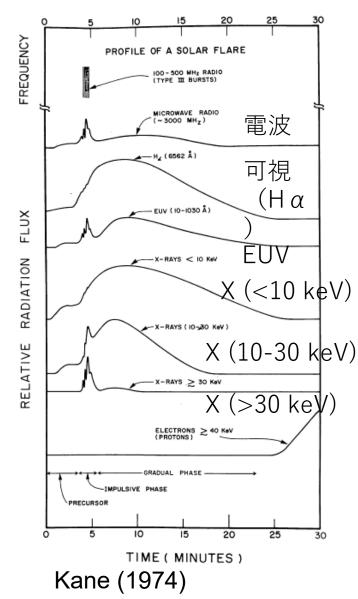
- ・太陽/恒星の大気(コロナ)中で起こる爆発現象
 - 電波から硬X線で増光
- 磁気リコネクションで黒点付近の磁場のエネル ギーを解放することで起こる



Tsuneta et al. 1992

Masuda et al. 1994

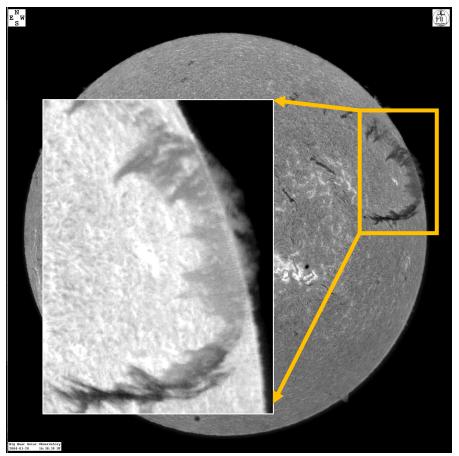




太陽フレアに伴う「フィラメント噴出」

フィラメント:太陽表面の上空に浮かんでいる低温度(\sim 1万度)のプラズマ

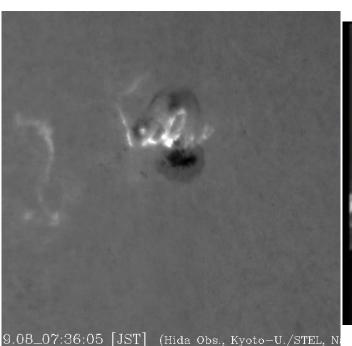
太陽の縁にある時はプロミネンスと呼ばれる \rightarrow 両者は同一のもの



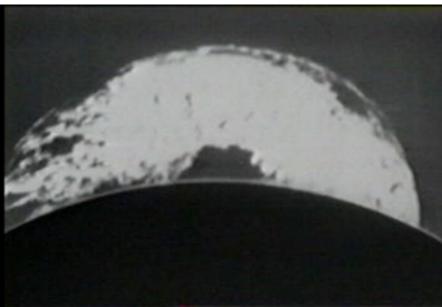
フィラメント (Big Bear Solar Observatory)

フレア等に伴って低温度のプラズマが 上空へ飛び出す**フィラメント噴出**が起 こることがある

フィラメント噴出 (京都大学飛騨天文台SMART 望遠鏡、上から見た動画)



史上最大のプロミネンス噴出 (1946年6月4日: 米国HAO、 横から見た動画)

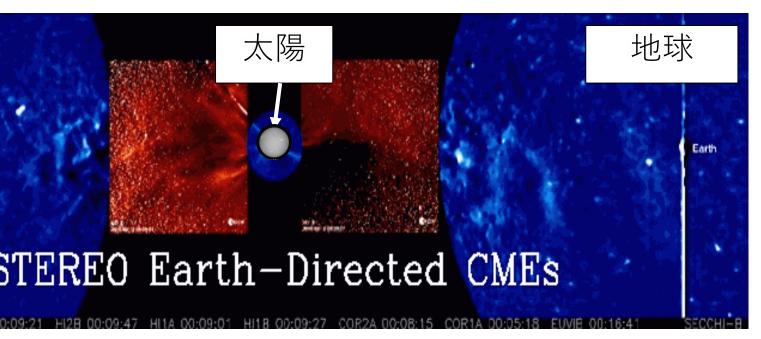


惑星間空間を伝搬するコロナ質量放出

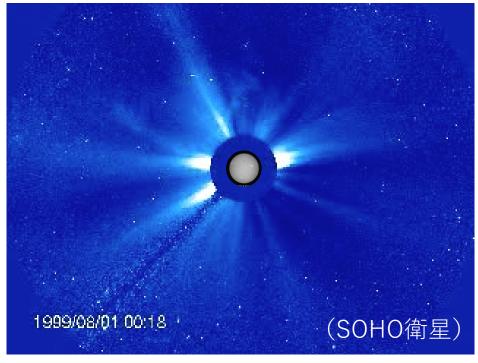
フィラメント噴出は、周りの希薄な物質や、磁場をまとい、惑星間空間を伝搬する ⇒ これらの最終的な質量放出現象は、「コロナ質量放出 (CME) 」と呼ばれる。

• これらは最終的に数1000 km毎秒にも達し、「放射線粒子」をも生み出す

コロナ質量放出(太陽・地球を横から見た)



コロナ質量放出(地球から見た)



Stellar flares

- Hertzsprung によって1924年に最初に発見
 - 主にM型星で同様の突発的・短時間の増光を示す天体が多数発見された(Luyten 1949)
 - X線 (e.g., Heise et al. 1975) や電波 (e.g., Slee et al. 1963, Lovell et al. 1964)でも増光する

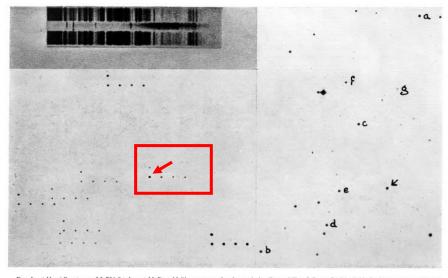
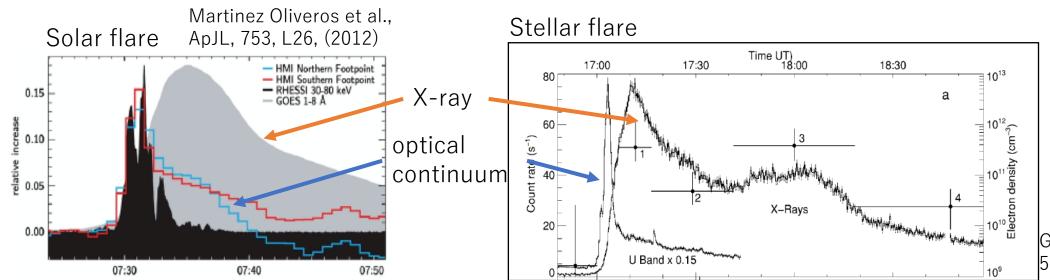


Fig. 1.—(Above) Spectrum of L726-8 taken at McDonald Chservatory, showing emission lines of H and Co II. (Kight) Field of L726-8. North is at top The two brightest stars are BD1-8279 (apper) and BD1-8275 (bown). (Lewer left) Multiple exposure of feld, taken by Carpenter at Tucson, showing sudden brightening of L726-8 on December 7, 1948. The interval of time between the first and last exposures was approximately 20 minutes. The charplate is photovisual; the multiple exposure is photographic.

UV Cet (Luyten, ApJ, 109, 528, 1949)

• 恒星フレアと太陽フレアのの多波長光度曲線はよく似ている

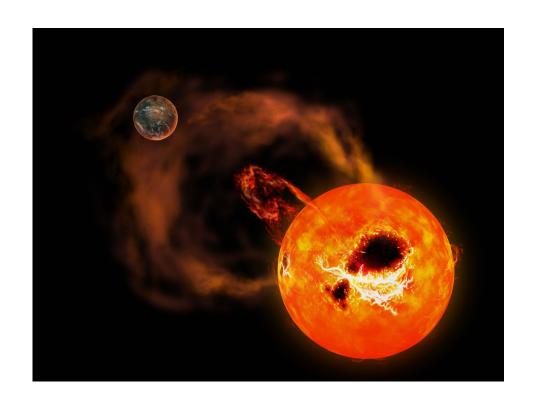
• 基本的に両者の発生機構は同じと考えられている

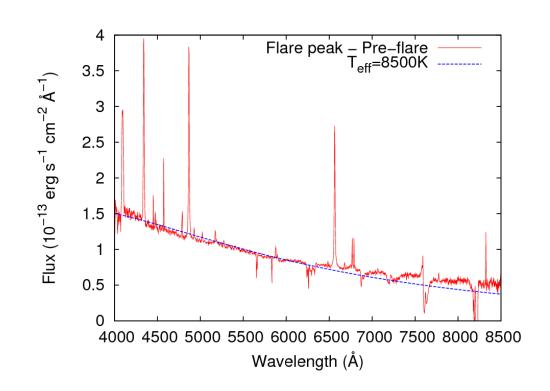


Gudel et al., ApJL, 580, L73, (2002)

恒星フレアの未解明問題

- 恒星フレアではプラズマ噴出現象は起こるのか?
 - フレアエネルギーとプラズマ噴出の質量・速度の関係
- 恒星フレアの連続光はどこからどうやって出ているのか?





恒星フレアに伴うプラズマ噴出の検出方法

Blue-shifted lines

• Chromospheric lines (e.g., "blue asymmetry" in the H α line)

• Prominence eruption?

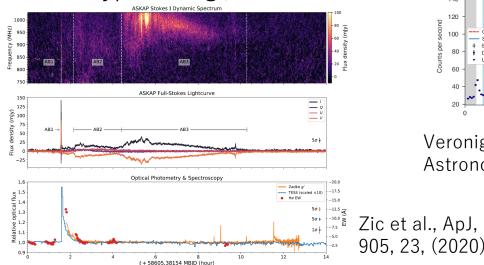
Coronal lines

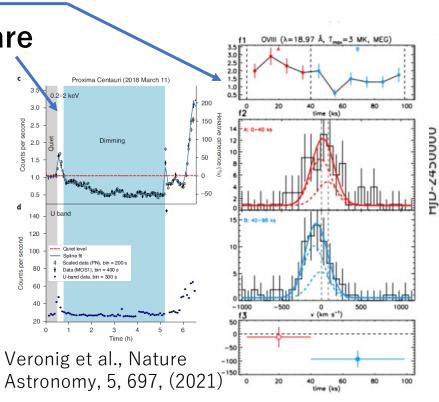
X-ray dimming after the flare

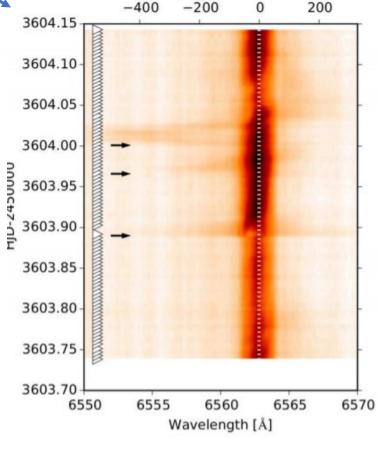
Coronal dimming?

Type II (& IV) radio burst

- Type II: No positive detection (e.g., Crosley&Osten 2018)
- Type IV: e.g., Zic et al. (2020)







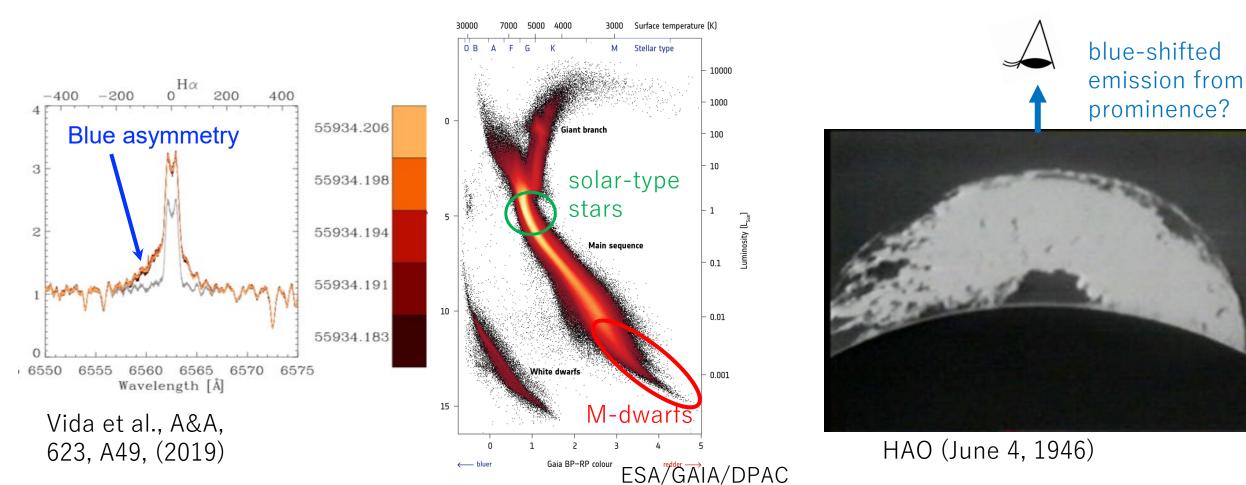
Velocity shift (km/s)

Argiroffi et al., Nature Astronomy, 3, 742, (2019)

Vida et al., A&A, 590, A11, (2016)

Blue-asymmetries during stellar flares

- Blue asymmetry: 主にM型星フレアにおいて、彩層線 (e.g., H α line)のblue-wingに超過(輝線)成分が見られることがある.
 - M型星のプロミネンス噴出?
 - ※M型星は太陽型星よりもはるかに暗いので、相対的にプロミネンスが明るく検出しやすい



OISTERによる観測 (YZ CMi: Maehara+2021)

• YZ CMi (M4V, d=6.0pc Vmag=11.2)のTESSの観測に合わせて測光・分光同時

に連続観測

非常に活発なフレア星

• <u>小規模なフレアであればほぼ毎晩起こる</u>

• 時間分解能:~分

高分散分光(なゆた+MALLS:R~10000)

• 5分程度時間分解能でHα線付近の連続観測

• フレアに伴うline profileの変化

低分散分光(かなた+HOWPol: R~400)

• フレアに伴うBalmer線のE.W.比の変化

高時間分解能(1分)

• 測光(TESS + MITSuME他)

連続光の変化(+色の変化)



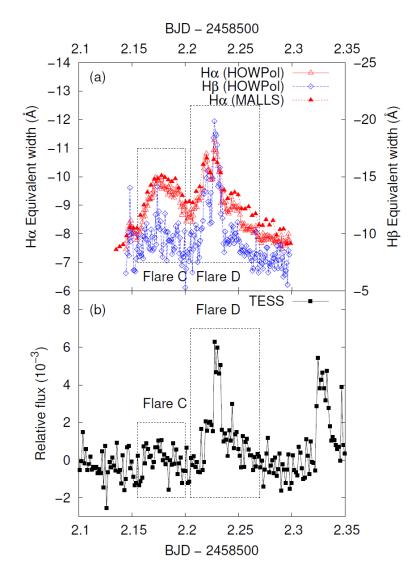






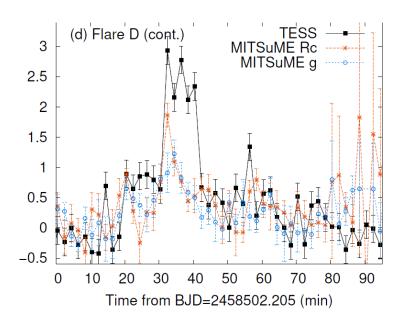
Ηα線線輪郭の変化が可視連続光の増光のどのタイミングで生じるかを調べる

Flare light curve (1/18)

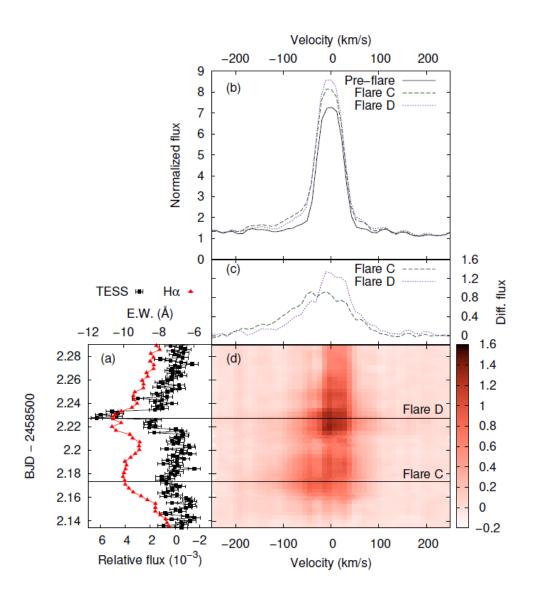


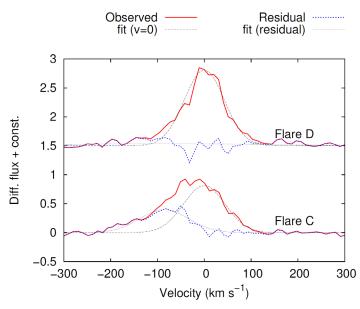
- Hαフレアを2つ検出
 - Flare C: 可視連続光の増光がみられない
 - Hβ線でも大きな変化はなかった
 - Flare D: Hαの増光と同時に可視連続光も増光

 - 増光成分はT_{eff}~6100Kくらいの有効温度



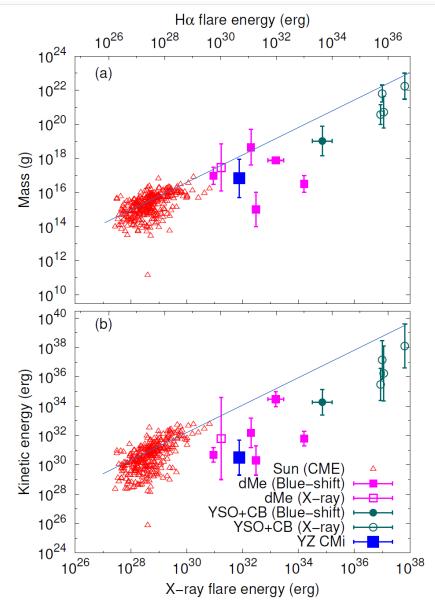
1/18のフレアに伴うΗα line profileの変化





- Flare C (連続光の増光がないフレア) ではフレアの 期間中に青方偏移した超過成分が見られた。
 - 速度:-80 ~ -100km/s
- Flare D (連続光でも増光したフレア) では $H\alpha$ 線の線輪郭に顕著な非対称は見られなかった。

フレアエネルギーと質量・運動エネルギーの関係

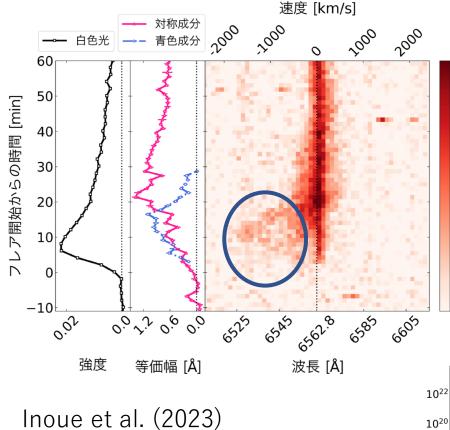


- 質量: $10^{15}-10^{17}$ g \leftarrow H α 線のfluxから推定
- 運動エネルギー: 10^{29.5}-10^{31.5} ←速度と質量から推定
 - フレアの放射エネルギー:X線の観測はないので、H α 線 luminosityとX線(GOES band)のluminosityの関係を利用($L_X=16L_{H\alpha}$)

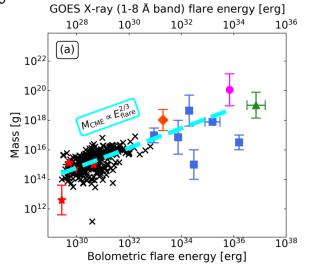
• 質量

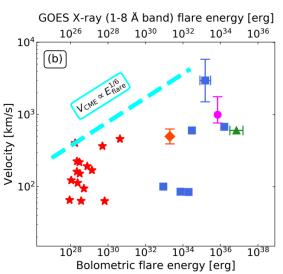
- 他の恒星フレアのプロミネンス噴出で推定されている ものと同じくらい
- 太陽のCMEのmass vs. energy関係の延長線上にくる
- 運動エネルギー
 - 他の恒星フレアと同じだが、太陽のCMEの関係より2 桁程度小さい
 - CMEの速度とプロミネンス噴出の速度の差が関係している可能性を示唆

RS CVn型星のスーパーフレアにおけるプラズマ噴出



- せいめい望遠鏡とTESSでV1355 Oriのスーパーフレアの観測に成功
 - E_{bol}=10³⁶ erg (最大級の太陽フレアの1万倍)
 - フレアに伴って $H\alpha$ 線の線輪郭にに速度 \sim 1700 km/sで青 方偏移する超過成分が見られた。
 - K-subgiantの脱出速度の>4倍→確実に恒星外へ到達する プラズマ噴出
 - プラズマ噴出の質量:~10¹⁹⁻²¹ g
 - 最大級の太陽CMEの質量の100倍以上



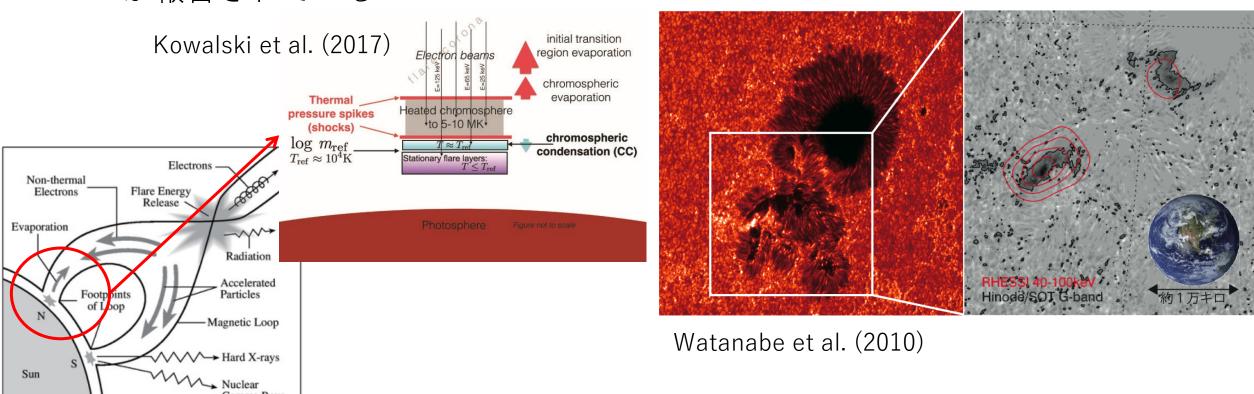


恒星フレアの可視連続光

Gamma Rays

Chromosphere

- 磁気リコネクションによって生じた高エネルギーの電子ビームが 彩層を加熱 →彩層下部が圧縮され可視連続光を放射?
 - 太陽フレアでは硬X線と可視連続光の放射が空間的に良く対応している例 が報告されている



OISTERによる観測例 (AD Leo; Namekata+2020)

- せいめい望遠鏡最初の共同利用観測
 - ✓ 3月22-28日,4月11-13日
 - ✓ 観測可能時間: 8時-2時半 (晴天率50%程度、稼働率80%程度)
- 本観測に合わせ、多くの他観測所でADLeoのキャンペーン観測



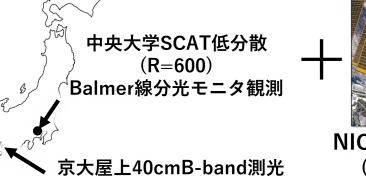


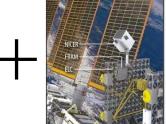
岡山

せいめい望遠鏡/KOOLS-IFU-VPH683

• MITSuME(大学間連携): g, R, I-band測光

西はりま(大学間連携) なゆた/MALLS中分散 (Hα)

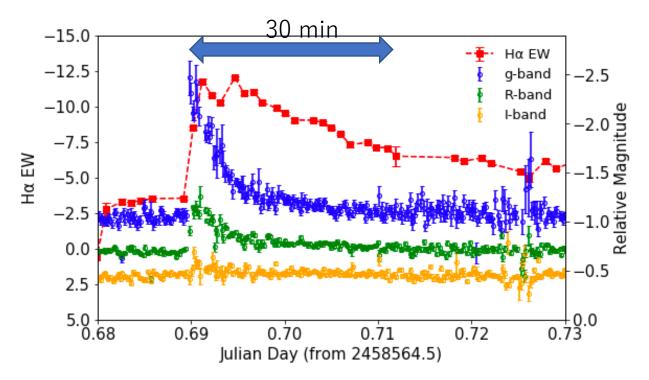




NICER X-ray/ISS (0.2-12keV)

Flare A (2019/03/22)

- 可視連続光の方が、Haよりrise/decayが早い → 太陽フレアと同様
- フレア初期にHa輝線幅が増大し、強度も上昇
 - → Ha線輝線幅はHa線強度よりも早く減衰する
 - ✓ このような時間変化が、恒星フレアで観測されたのは初めて。
 - ✓ Haライン幅 = Stark broadening (+ Self absorption effect)
 - →フレア時に加速された非熱的電子が彩層にエネルギーを注入し可視連続光の放射に寄与

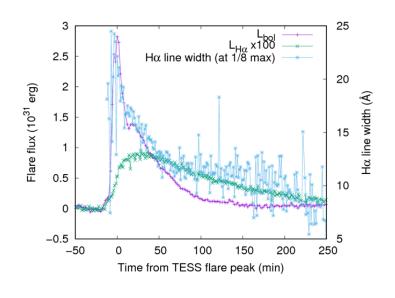


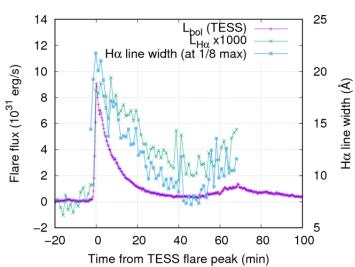
30 min line int. (corrected) 14 1/8 width 12 Hα line width [Å] 10 0.72 0.69 0.70 0.71 0.73 0.68 Julian Day (from 2458564.5)

Fig. ライトカーブ

Fig. Ha輝線幅と強度の時間変化

K型星スーパーフレアの観測例(Maehara+ in prep.)

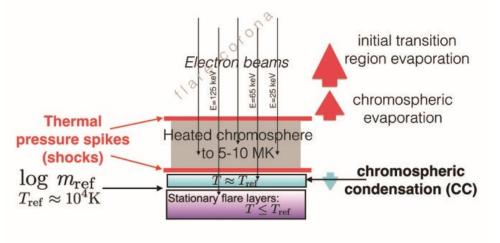


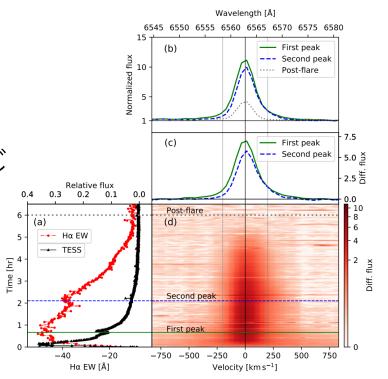


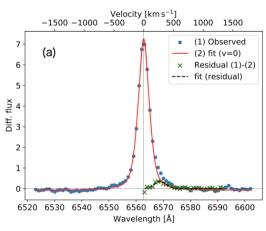
- K型星の 10^{34-35} ergのスーパーフレアでも、同様に $H\alpha$ 線の増光途中や可視連続光のピークで、 $H\alpha$ 線の線幅が> $20\,\text{Å}$ まで増加
 - Hα線の線幅はHα線強度よりも早く減衰
 - 加速された非熱的電子が彩層に突入することで $H\alpha$ 線幅を増大させ、同時に可視連続光放射に も寄与するという描像が、様々なスペクトル型 の恒星におけるスーパーフレアで普遍的に成り 立つことを示唆

スーパーフレアに伴うred-asymmetry (Namizaki+2023)

- ・非熱的電子による彩層の加熱
 - 加熱された彩層プラズマは chromospheric evaporationの形で 上昇流を形成
 - 反作用で彩層下部への下降流も生じる(chromospheric condensation)
 - →可視連続光の放射に寄与?







- スーパーフレアの初期にHα線線幅の増大 +赤方偏移した超過成分が観測された
 - 可視連続光が非熱的電子による彩層加熱で生じた彩層 凝縮の生じている領域から放射されているとするモデ ルをサポートする結果

Kowalski et al. (2017)

まとめと今後

- 恒星フレアの可視光測光分光同時観測で恒星(スーパー)フレアを観測
 - プラズマ噴出
 - Ηα線の線輪郭に青方偏移した超過(輝線)成分が受かる例を多数検出(Maehara+2021, Inoue+2023, Notsu+ in prep., Namekata+ in prep.)
 - 恒星におけるプロミネンス噴出
 - 吸収成分(disk上のフィラメント噴出; Namekata+2022)の例も太陽型星で検出
 - →次の行方さんの講演
 - 連続光
 - 可視連続光の増光と同様の時間変化を示すΗα線線幅の増大や赤方偏移した超過成分の観測例 (Namekata+2020, Namizaki+2023, Maehara+ in prep.)
- 今後の課題
 - Ηα線で見えるプロミネンス噴出がCMEに発展しているか?
 - →電波・X線との同時観測
 - フレアの可視連続光成分
 - →高時間分解能の相対分光観測(せいめい/TriCCS分光 + MITSuME多色同時測光)