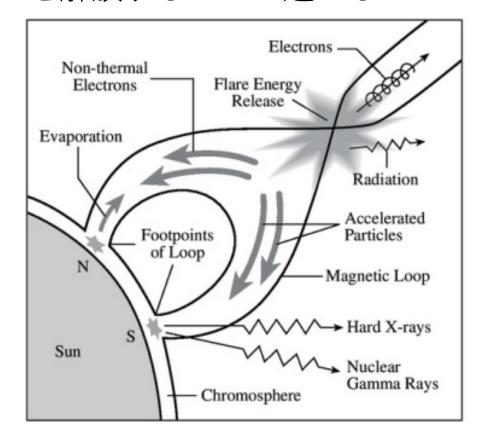
大学間連携とTESSによる M型星フレアの測光分光同時観測

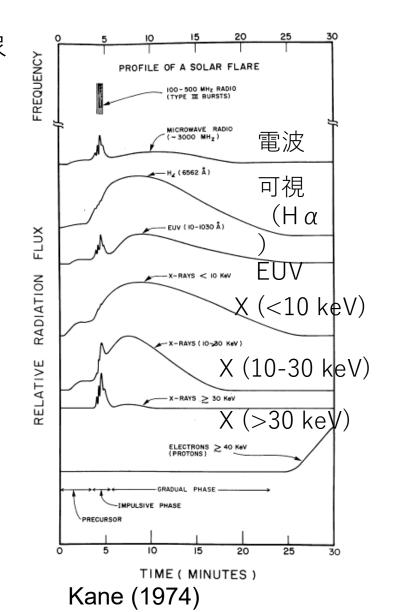
本日はOISTERで観測を行ったYZ CMi(2019年前期)とEV Lac他のM型星(2019年後期-2020年前期)について報告します。

前原裕之(国立天文台)

Solar/Stellar 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





恒星フレアに伴う噴出現象

磁場エネルギー

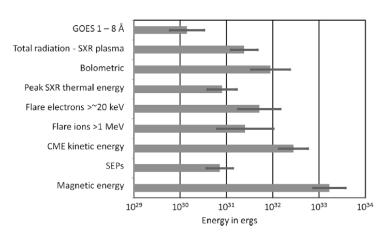


熱エネルギー(可視、X線放射)

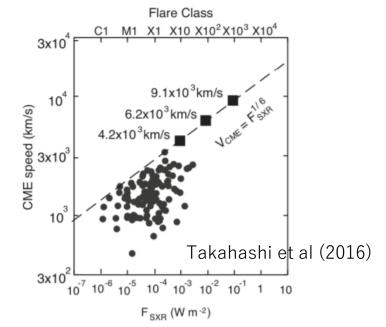


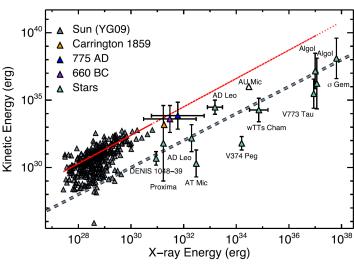
運動エネルギー(filament eruption, CME, etc.)

- どの程度が運動エネルギーに分配されるか?
 - 恒星フレアの場合はCMEの確実な直接観測がなくよく分かっていない
 - CME mass, velocity などがスーパーフレアの場合はどうなるか?
 - 極端宇宙天気現象の影響評価



Emslie et al., ApJ, 759, 71 (2012)

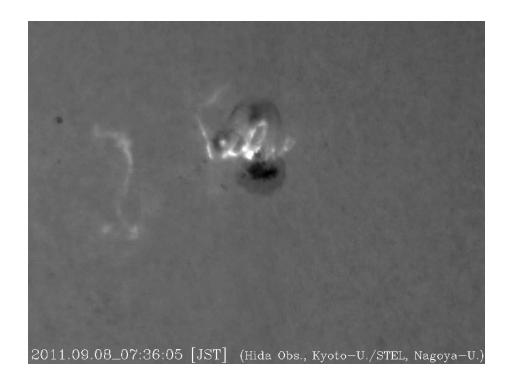


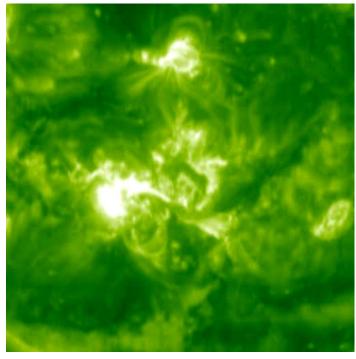


Moschou et al., ApJ, 877, 105 (2019)

Solar/Stellar CME

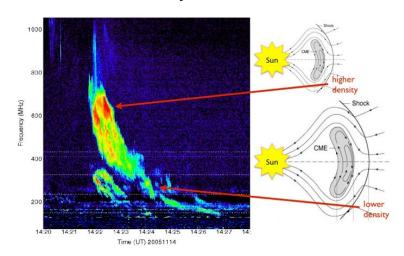
- フレアに伴う惑星間空間へのプラズマ噴出現象
 - M型星周りの惑星大気への影響を考える上でも重要

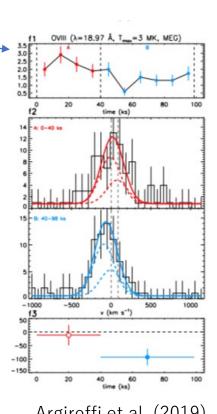




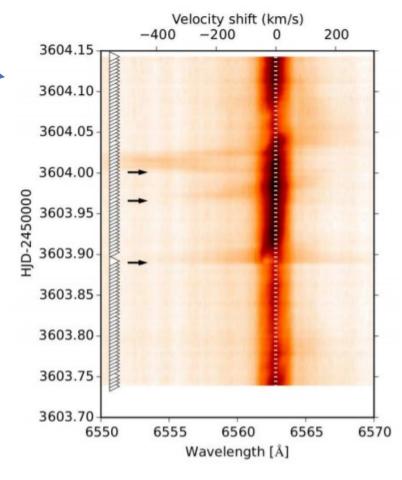
恒星フレアに伴う噴出現象

- フレアの可視分光
 - Prominence eruption?
- X線分光
 - X-ray plasma ejection?
- 電波(100-1000MHz)
 - Type II burst? ※恒星フレアでは未検出 (Crosley&Osten 2018など)









V374 Peg (M4); Vida et al. (2016)

観測の概要(YZ CMi; 2019/01)

• 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

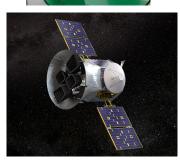
• 高時間分解能(1分)

• 測光(TESS + MITSuME他)

連続光の変化(+色の変化)

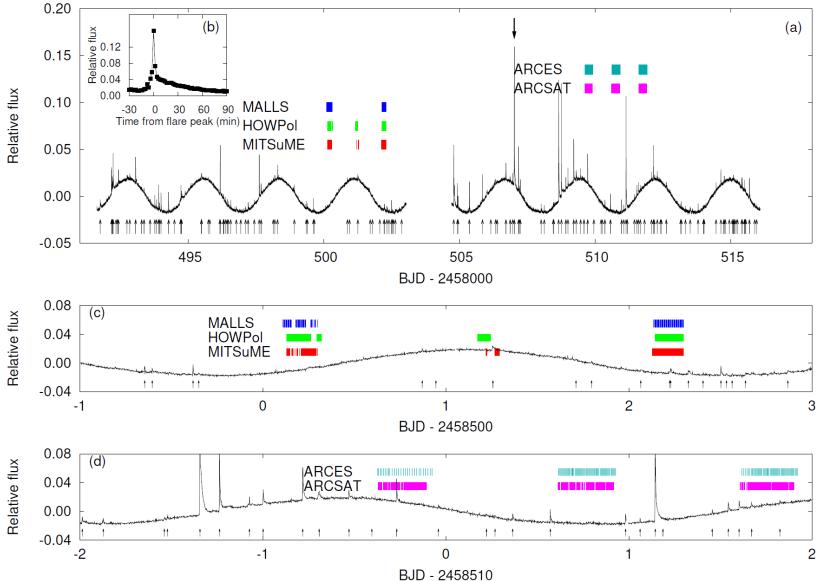






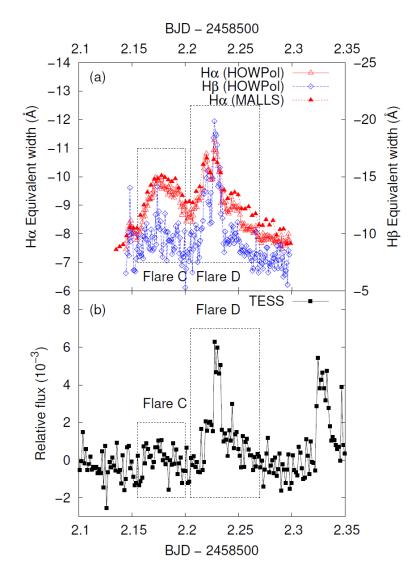
Ηα線の非対称が可視連続光の増光のどのタイミングで生じるかを調べる

TESS light curve



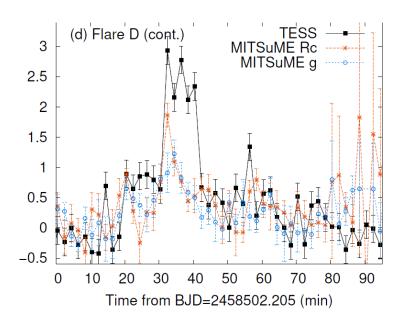
- OISTERの観測期間中には可 視連続光で顕著なフレアが あったのは1例のみ
 - フレア活動が活発でない時期 だった
- 今回は1月18日のフレアについて取り上げる

Flare light curve (1/18)

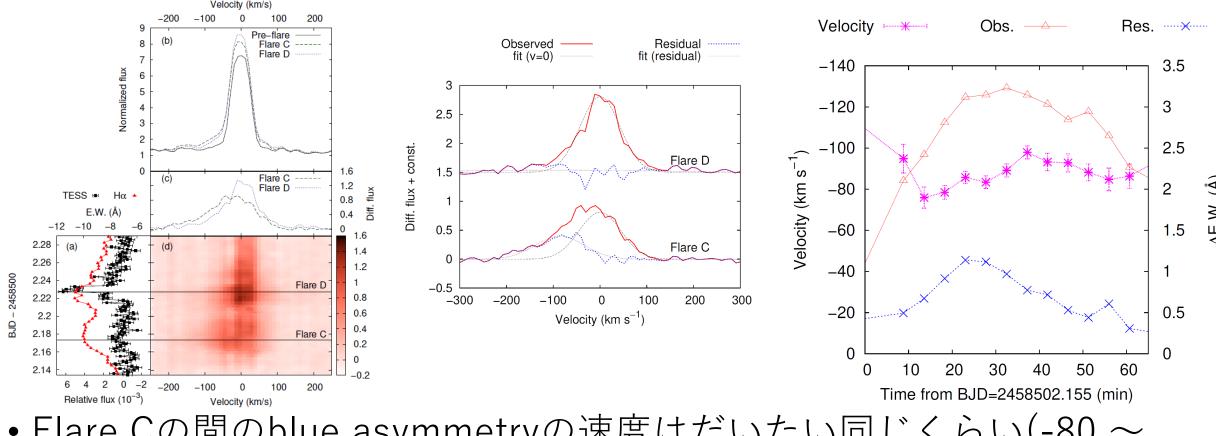


- Hαフレアを2つ検出
 - Flare C: 可視連続光の増光がみられない
 - Hβ線でも大きな変化はなかった
 - Flare D: Hαの増光と同時に可視連続光も増光

 - 増光成分はT_{eff}~6100Kくらいの有効温度

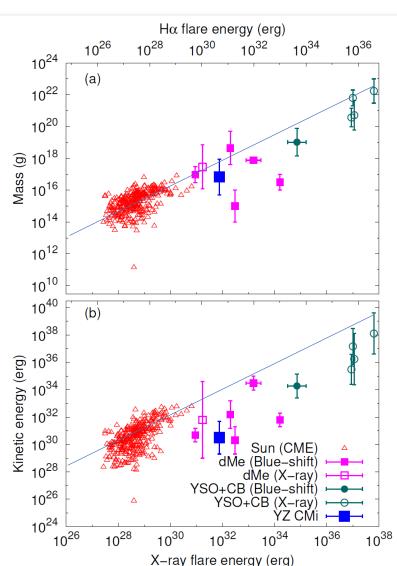


フレアに伴うΗα line profileの変化



- Flare Cの間のblue asymmetryの速度はだいたい同じくらい(-80 ~ -100km/s)
- •ピーク時のHα fluxの約1/3はblue sihftした成分→質量・運動エネルギーの推定

フレアエネルギーと質量・運動エネルギーの関係



- 質量:10¹⁵ 10¹⁷ g
- 運動エネルギー: 10^{29.5}-10^{31.5}
 - X線の観測はないので、 $H\alpha$ 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?

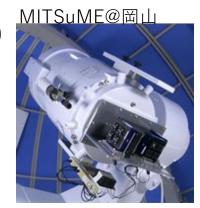
YZ CMiまとめ

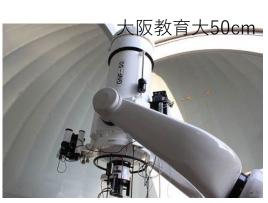
- TESSの観測期間中にフレア星YZ CMiの同時観測を実施
 - OISTERからはMITSuME、Kanata/HOWPol、Nayuta/MALLS
 - OISTER以外にApache Point Observatory 3.5m, 0.5mのデータも一部使用
- Hαフレア4件を検出
 - うち1件は白色光フレアがないイベントで、Hα線に青方偏移した超過成分
- ・Hα線の青方偏移した超過成分からプロミネンス噴出の速度、質量、運動 エネルギーを推定→太陽フレア/CMEと比較
 - 速度:太陽のプロミネンス噴出と同程度(CME velocityの1/4くらい)
 - 質量:太陽CMEのmass-flare energy関係の延長上にのる
 - 運動エネルギー:太陽CMEのkinetic energy-flare energy関係よりも2桁小さい
 - 見ている現象は太陽のプロミネンス噴出のような彩層プラズマの運動でCMEではない
- 論文受理されました(https://arxiv.org/abs/2009.14412)

観測の概要(EV Lac; 2019/09-10)

- EV Lac (M4V, d=5pc Vmag=10.3)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:<1分
 - 低分散分光(せいめい+KOOLS-IFU: R~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+MITSuMEなどの小口径望遠鏡)
 - 可視連続光の変化(+色の変化)

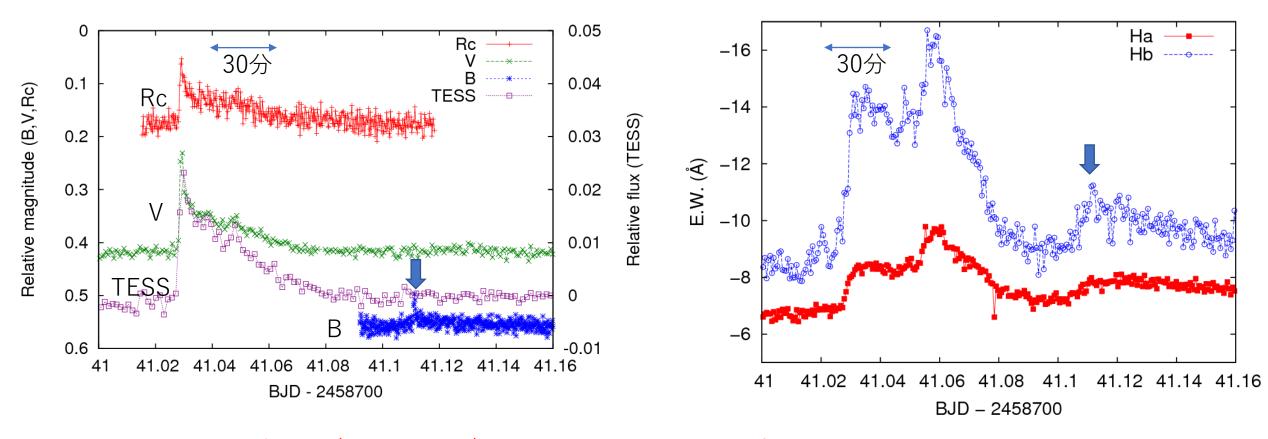






• 可視連続光のフレアに対してBalmer線のフレアがどのような応答を示すのかを調べる

観測されたフレアの例(2019年9月14日)

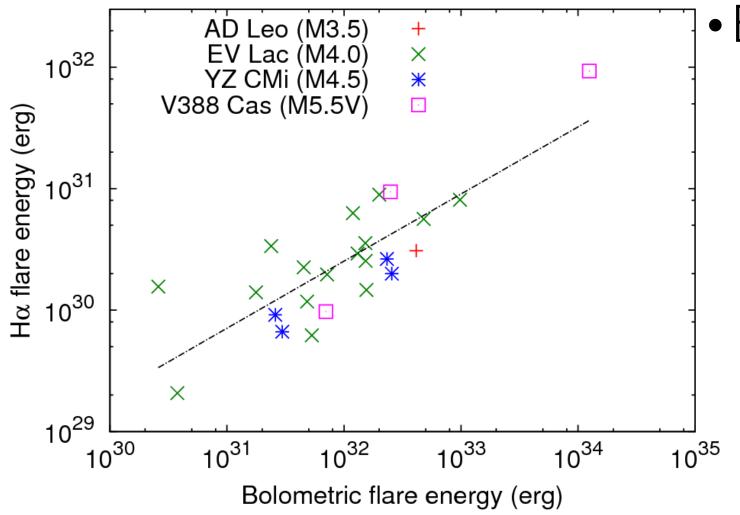


- せいめい望遠鏡($H\alpha$, $H\beta$)とTESSの両方で検出されているフレア:16個
- TESSでは明瞭な増光がないものの、高時間分解能のB-band測光(~10sec)と分 光でのみ受かっているフレアもあった(上図の下矢印)

OISTERやせいめい望遠鏡で観測したフレア

- 連続光 + Balmer輝線両方で観測されているもの
 - EV Lac (M4.0V) : 16 ← OISTER
 - V388 Cas (M5.5V) : 3
 - YZ CMi (M4.5V) : 4
 - AD Leo (M3.5V) : 1
- ・合計24件のフレアを解析

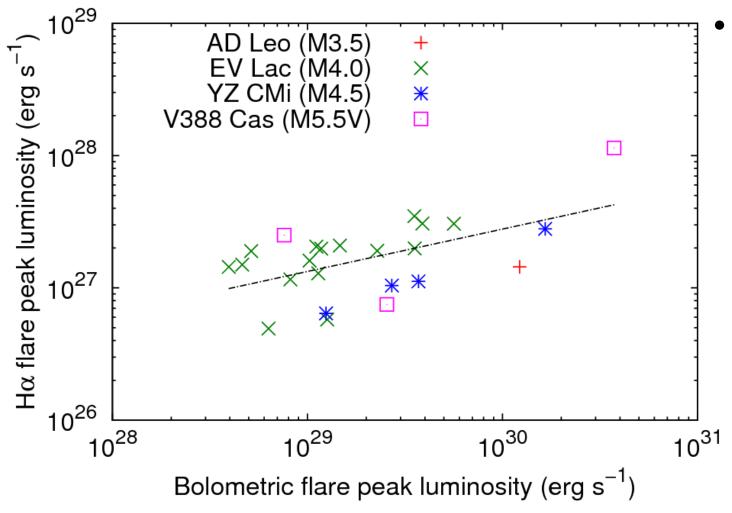
フレアのエネルギー: E_{bol} vs. $E_{H\alpha}$



 $E_{H\alpha} \propto E_{bol}^{0.55+/-0.11}$

- Balmer線で解放されるエネルギーはbolometric energyの 1%程度(@E_{bol}=10³³ 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 $+ \alpha$ 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

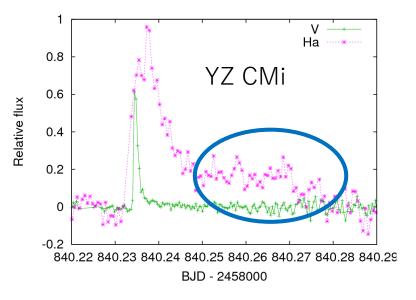
フレアの最大光度:L_{bol} vs. L_{Hα}

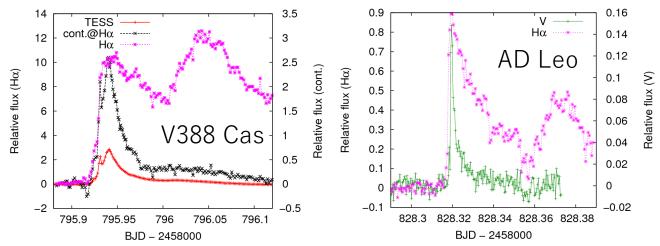


 $L_{H\alpha} \propto L_{bol}^{0.32+/-0.11}$

- Balmer線で解放されるエネルギーはbolometric luminosity の1%程度(@L_{bol}=10²⁹ 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→フレアエネル ギーと同じ傾向

フレアのHα線光度曲線の形状





Single peak

- 可視連続光の増光に対応したピークのみを示す。
 - $H\alpha$ 線のピークは連続光のピークよりも遅れる場合もある

Double peak

- 可視連続光の増光に対応したピーク
 - $H\alpha$ 線のピークは連続光のピークよりも遅れる場合もある
- バルマー線のみで増光を示すピーク
- ピークの間隔はフレアの規模に依存?
- Single peakの $H\alpha$ 光度曲線を示すフレアの中には、連続光の増光終了後も $H\alpha$ では明るい状態が続くものもある
 - 2つ目のピークが目立たないだけ?

まとめ (EV Lac, etc.)

- 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 + OISTERほか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計24件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
 - $E_{H\alpha} \propto E_{hol}^{0.55}$
 - 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
 - 10³⁰ 10³⁴ ergの範囲では星によらず同じ傾向
- Ηα線の光度曲線がdouble peakになっているフレアもあった
 - 1つの目ピーク:可視連続光の増光に対応
 - 2つ目のピーク:バルマー線のみで増光
 - ピークの間隔・2つ目のピークの明るさ:フレアのエネルギーに依存性がある?
- 他のスペクトル型の天体でのフレアではどうかを今後調べる予定
 - EK Dra (G1.5V), CR Dra (M1.5V), WX UMa (M6.0V)についても2020年前期に観測→解析中
 - 2020後期:RS CVn型星(K型準巨星)の観測中
 - 今後:太陽フレアとの比較