

データ科学による 若い太陽型星の動的マッピング

幾田 佳(一橋大学)

行方 宏介(京都大学/NASA), 前原 裕之(国立天文台), 野津 湧太(コロラド大学),
李 尚姫, 野上 大作(京都大学), 本田 敏志(兵庫県立大学), 柴田 一成(同志社大学)
梶木屋 裕斗, 佐藤 文衛(東京科学大学), EK Dra collaboration, GAOES-RV team

太陽/恒星フレア

cf. 野上さん, 行方さん, 前原さん,
梶木屋さん, 市原さん講演

太陽/恒星黒点の磁場エネルギーに駆動される表面の爆発現象

太陽/恒星フレアにはプラズマ噴出(プロミネンス噴出+コロナ質量噴出)が伴う

若い恒星/低温度星(K,M型星)は太陽より高い磁気活動性を示す

Credit: NAOJ

太陽フレア: 可視($H\alpha$)-X線

継続時間: < 数十分

エネルギー: 10^{29} - 10^{32} erg



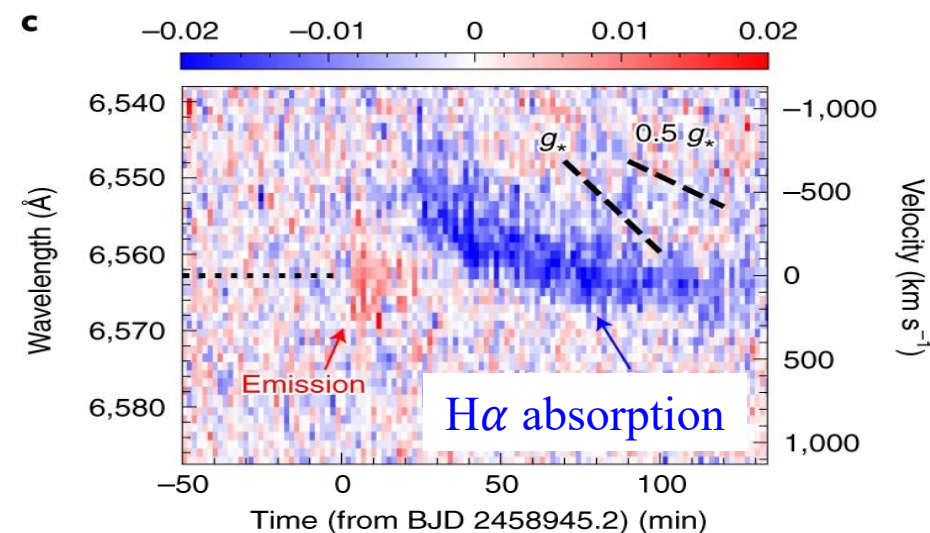
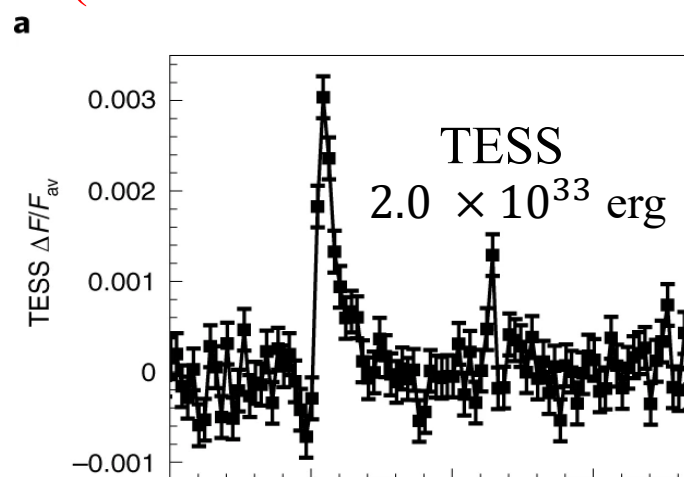
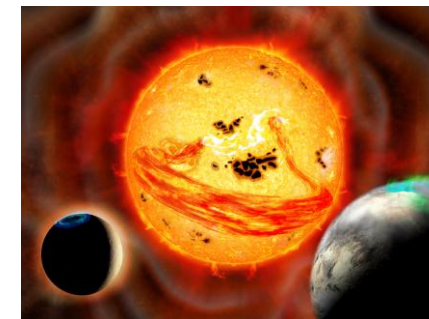
太陽フレア ($H\alpha$ image)
(京大飛騨天文台/フレア望遠鏡FMT)

恒星フレア: 可視($H\alpha$)-X線

継続時間: 数十分-数時間

エネルギー: 10^{31} - 10^{35} erg

(スーパーフレア $> 10^{33}$ erg)



TESS+せいめい望遠鏡/KOOLS-IFUによるスーパーフレア
とプロミネンス噴出 (Namekata et al. 2022)

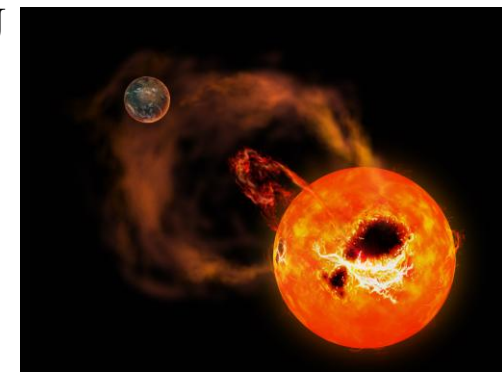
太陽/恒星黒点

Credit: NAOJ

太陽恒星表面の磁力線の切り口で磁気活動の指標

太陽/恒星フレアを引き起こす

若い恒星/低温度星(K, M型星)では太陽より大きな黒点を持つ

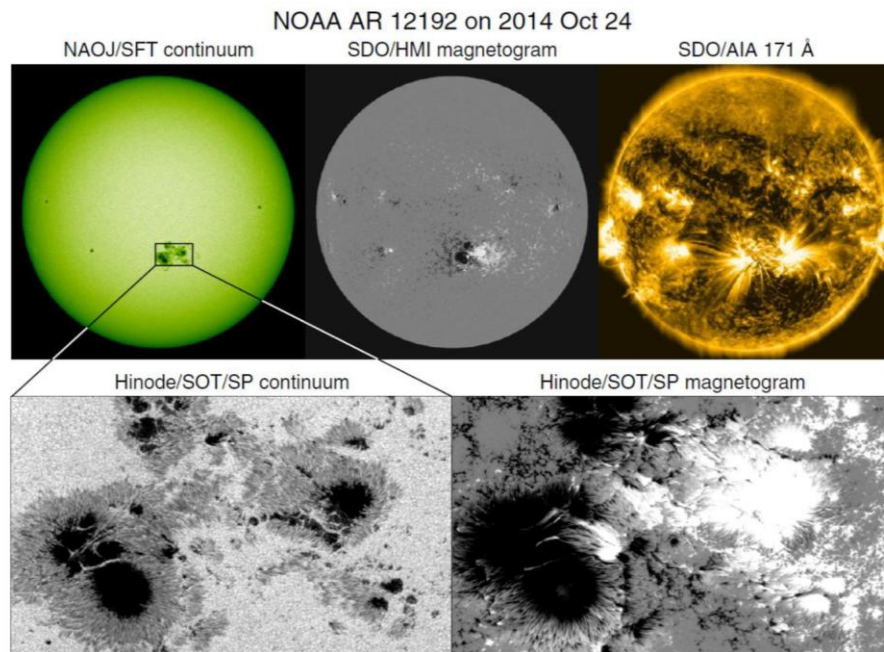


太陽黒点: 可視-X線; 面積<0.1%;

寿命 < 数十日; 赤道から中緯度;

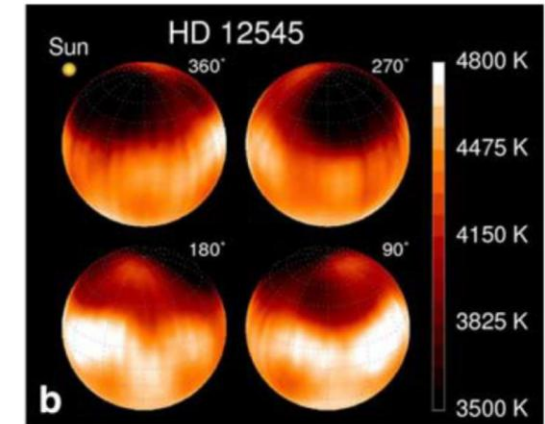
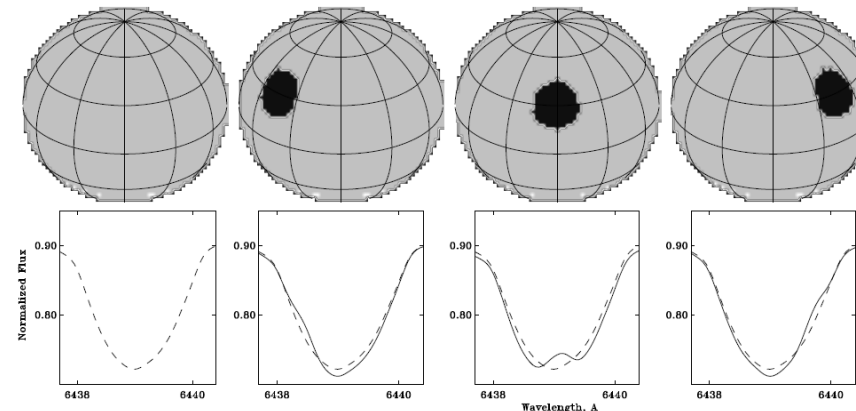
恒星黒点: 可視(+ H α 線, X線); 面積<20%;

寿命 < 数年; 赤道-極域;



Toriumi & Wang 2019

Doppler Imaging (Berdyugina 2005) & K型巨星 (Strassmeier 2009)



地上から高分散分光+地上測光 (1990年代-)

→ 明るく自転が速い太陽型星/巨星(<50天体)

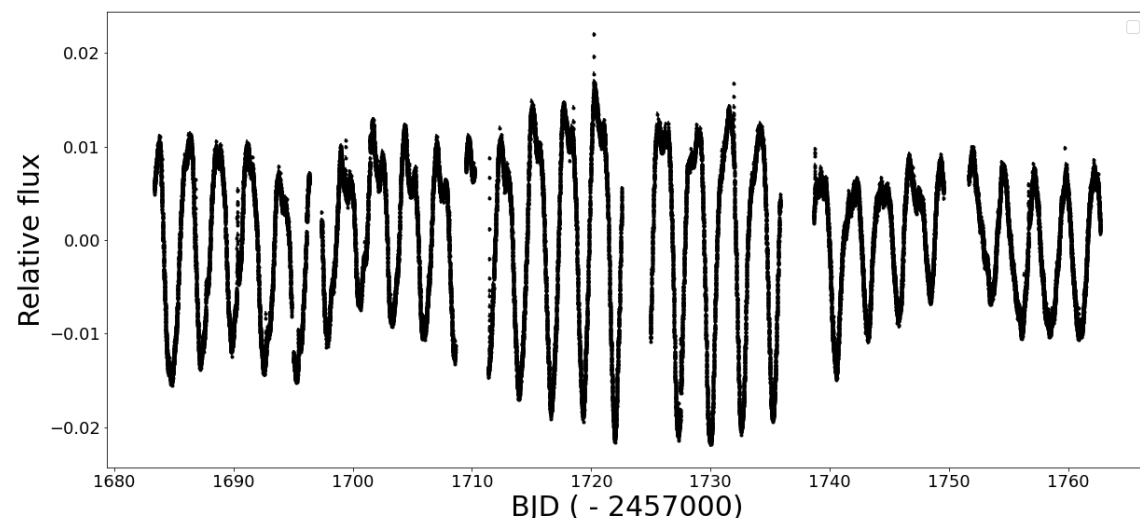
→ 宇宙望遠鏡による測光 (Kepler/TESS; 2000-20s)

測光観測による恒星黒点マッピング

Kepler(2009-2018)/TESS(2018-)による高精度かつ長期(~1カ月)の測光観測

→ 星表面にある黒点の自転(+差動回転)による明るさの変化(Notsu et al. 2013)

若い太陽型星EK DraconisのTESSデータ (~90 days)



黒点マッピング
(ベイズ最適化
逆問題)

自転周期+差動回転
黒点の位置(+温度)
大きさの時間変化



Credit: NASA

Credit: NAOJ



フォワードモデル(大きさが変化する黒点による光度曲線モデル; Ikuta et al. 2020)
による微分可能なベイズ最適化@ JAX/NumPyro (GitHub: KaiIkuta)

- M型星での黒点とフレア(Ikuta et al. 2023; Kajikiya et al. 2025b, Ichihara et al. 2025)
- 太陽型星での黒点とフレア/プラズマ噴出+Doppler Imagingとの比較(Ikuta et al., submitted)

若い太陽型星スーパーフレアの多波長観測

せいめい望遠鏡KOOLS-IFU(H α 線), TESS, NICERのX線によるEK Draの同時多波長観測

→ プロミネンス噴出を伴うスーパーフレアを2例検出(Namekata et al. 2024a)

プロミネンスはH α emissionとして観測→星の周縁部で起きた?

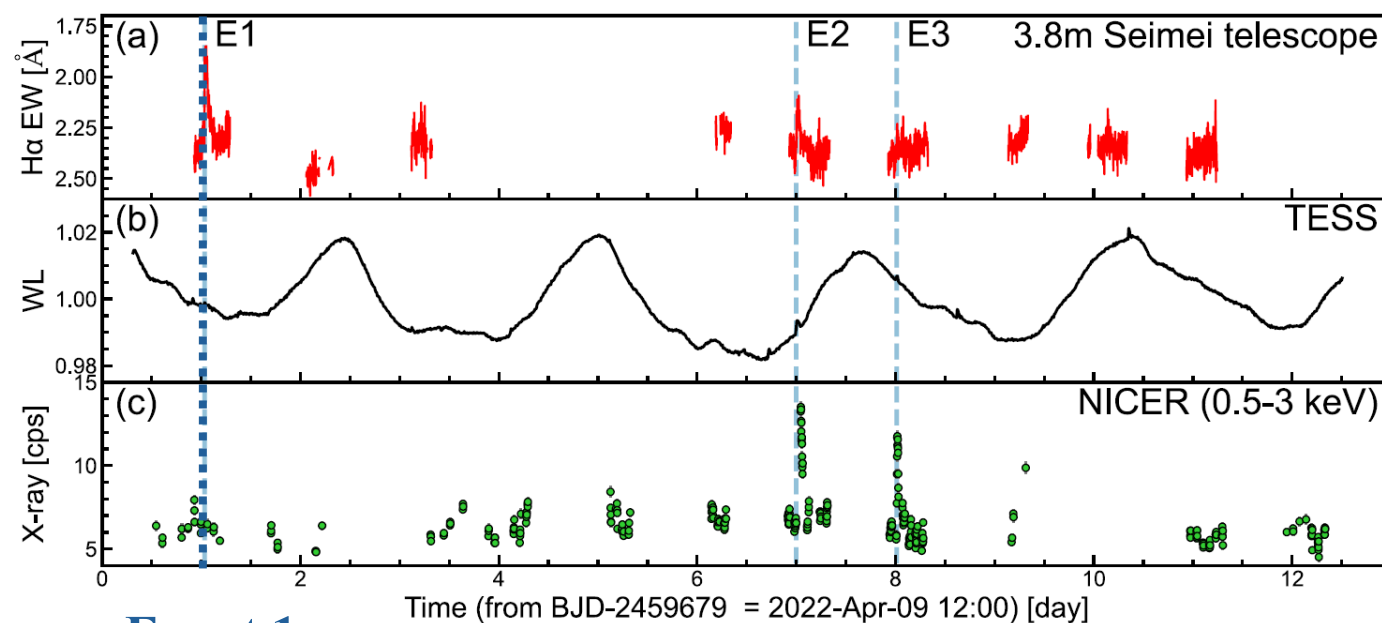
EK Dra:

$T_{\text{eff}}=5700$ K;

$P_{\text{rot}} = 2.7$ d;

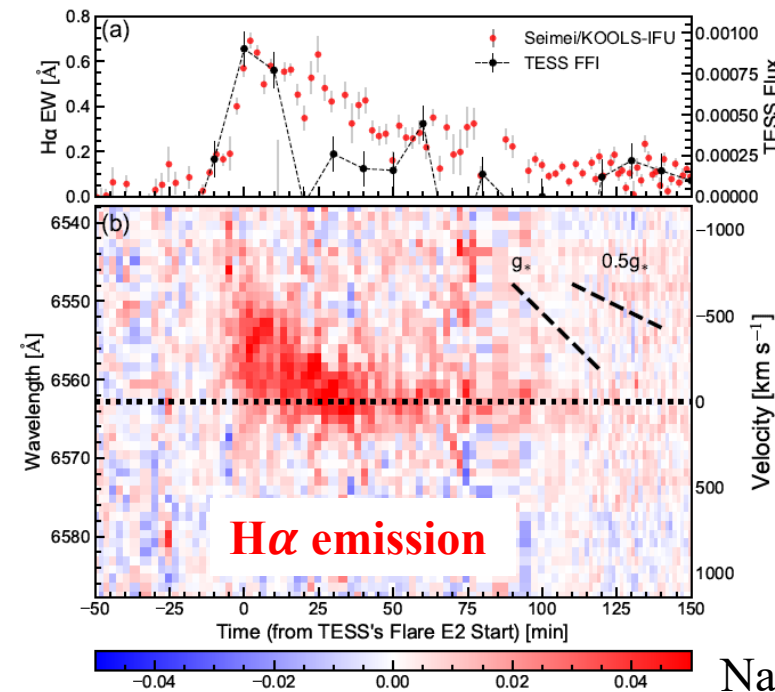
Age<100Myr

2022年4月(TESS Sector 50の後半)のEK Draの観測



Event 1

Event 1: H α スペクトル



Credit: KyotoU

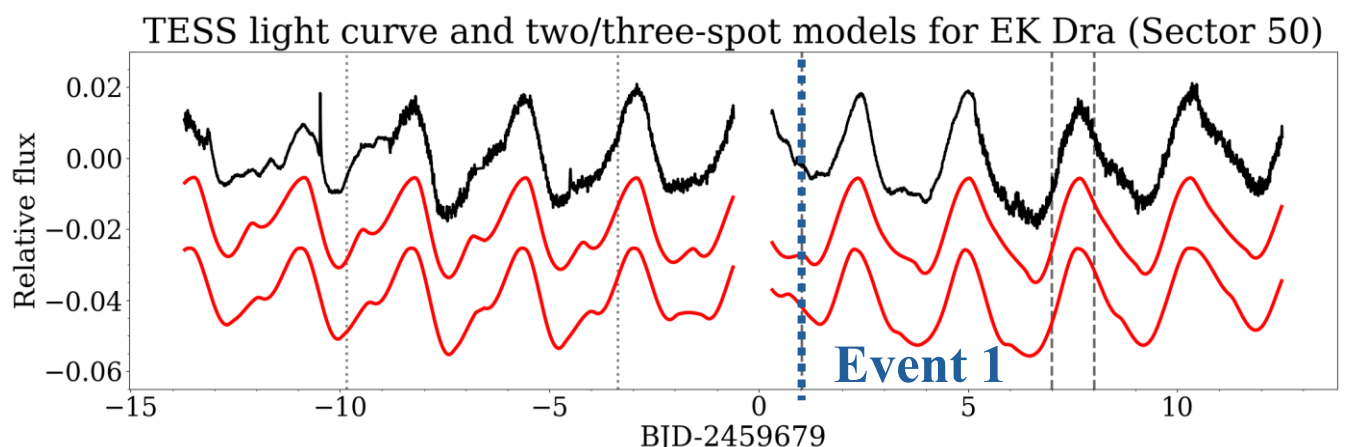
Namekata et al. 2024a

[目的](1)スーパーフレア/プロミネンス噴出(Event 1)が起きた時の黒点配置は?

(2)黒点とH α 線やX線の時間変化は対応しているのか?

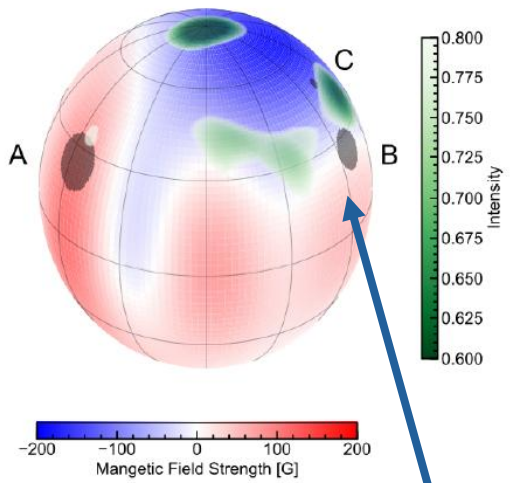
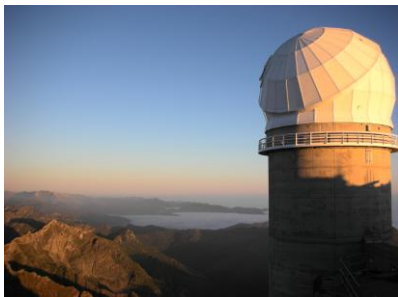
黒点マッピングとプロミネンス噴出

EK DraのTESSデータ(Sector 50)を黒点マッピング→ **大きさが変化する黒点2/3つ**でおおよそ説明



Event 1が起きた時刻の
黒点と動径方向磁場マップ

Credit: TBL

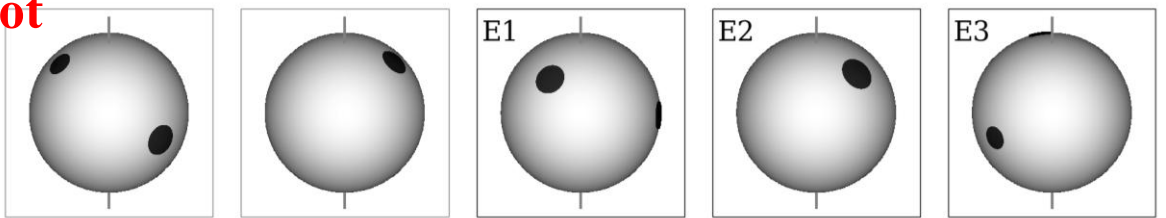


Namekata,
Ikuta et al., 2024b

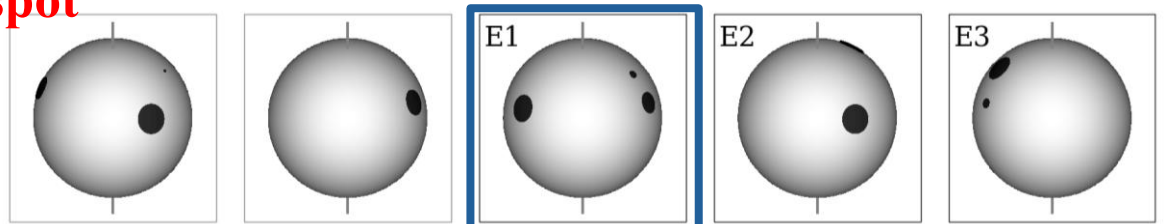
(1) Event 1が起きた時刻に,恒星周縁の
Polarity inversion上にある黒点が存在

黒点の見え方は極域黒点を除いて大体同じ
(正則化の不定性)

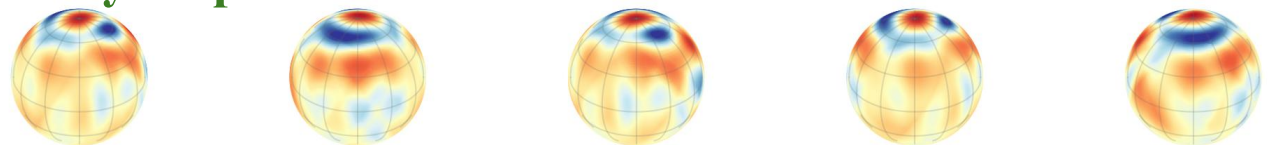
Two-spot



Three-spot



Intensity map of ZDI



Ikuta et al., submitted

恒星黒点による多波長変動

11.5cm望遠鏡@岡山(前原さん所有)

(2) **TESS**, **B-band**, **H α 線**に明確な周期性(~ 2.7 日)
を検出, **X線**には明確な自転周期性はない。
→ 変動を外挿(多次元ガウス過程回帰)

B-band(光球由来): TESSと対応

H α 線(彩層由来):

太陽黒点に放射輝度がほぼ対応
(e.g., Criscuoli et al. 2023)

→ 黒点の磁場形状(放射強度が異なる)を反映

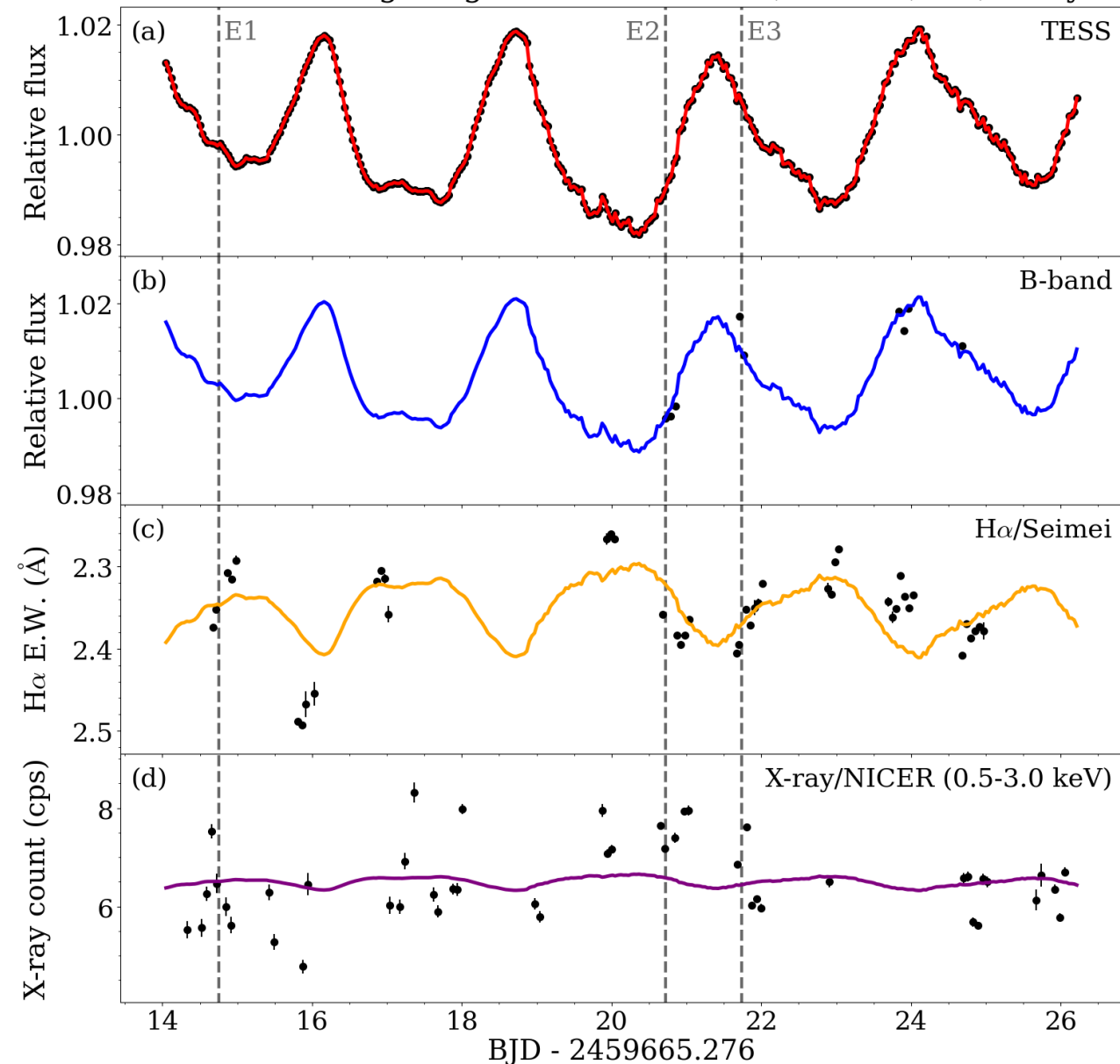
→ 太陽黒点/白斑による解釈

→ **せいめい望遠鏡MIDSSARでの検証**

X線(恒星コロナ由来):

複数黒点によるコロナの空間構造
(e.g., Takasao et al. 2020; Wargelin et al. 2024)

Multiwavelength light curves of TESS, B-band, H α , X-ray



まとめと将来課題

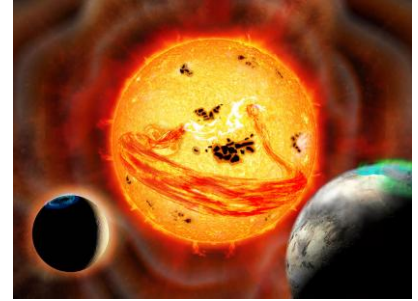
多波長観測+Doppler Imagingの観測期間のTESS(Sector 50)の観測データを黒点マッピング

1)プロミネンス噴出が起きた時刻に, 周縁に黒点が存在

2)TESSとH α 線に自転周期を検出, X線には周期性がない

→ H α 線は黒点の指標, X線は複数の黒点のコロナの空間構造を反映

Credit: Kyoto U



EK Dra黒点観測をTESSに合わせて実施

→ TESS(+地上)などによる多色測光+Doppler Imagingの同時最適化コードの作成中

[将来課題]

GAOES-RV+MIDSSARによる太陽型星の黒点の磁場形状と生成消滅過程の探査

→太陽型星スーパーフレアの「発現」条件の解明

→系外惑星視線速度(Extreme Precision RV)や大気観測への波及(2030s: TMT/E-ELT)

可視高分散分光器(R~120000)を開発する研究課題の探査