

飛騨天文台SMART/SDDIを用いた  
様々な太陽活動現象に関するH $\alpha$ 線スペクトルのSun-as-a-star解析

Sun-as-a-star Analyses of Various Solar Active Events  
Using H $\alpha$  Spectral Images Taken by SMART/SDDI  
(Otsu+ 2022, ApJ)

京都大学大学院 理学研究科 宇宙物理学教室

大津天斗

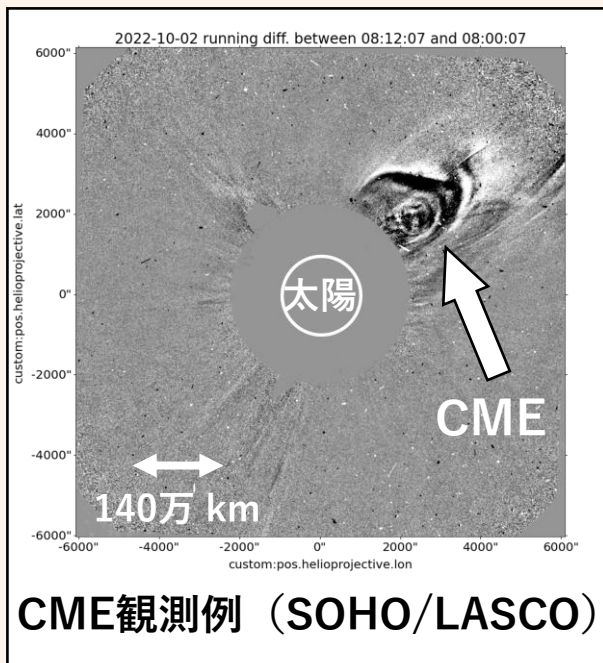
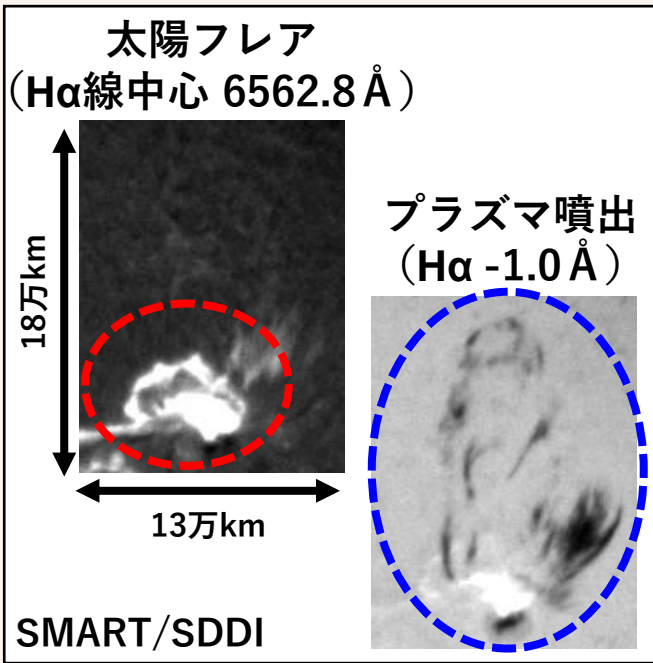
共同研究者：浅井歩、一本潔、石井貴子（京都大学）、行方宏介（国立天文台）

# イントロダクション：太陽フレアと恒星フレア

## 太陽フレア

- ◆ 太陽大気中の突発的な増光現象。
- ◆ 太陽表面近くでのプラズマの噴出を伴うことがある。
- 惑星間空間への質量放出（コロナ質量放出； CME）に発展することがある

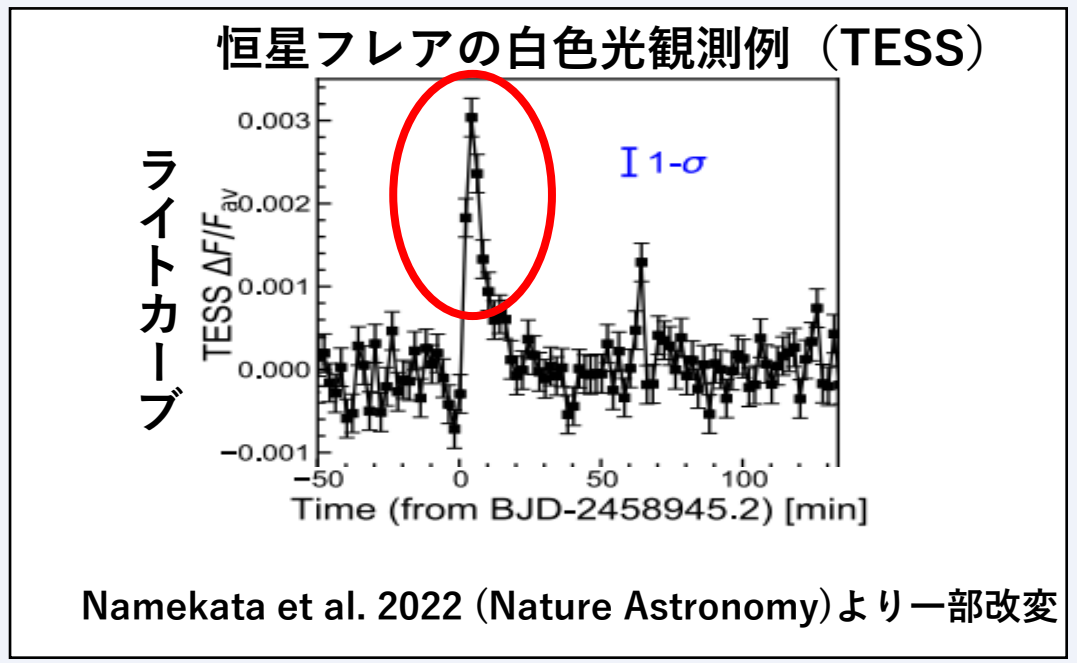
フレアの増光やプラズマ噴出、CMEを空間分解して“見る”ことが可能。



## 恒星フレア

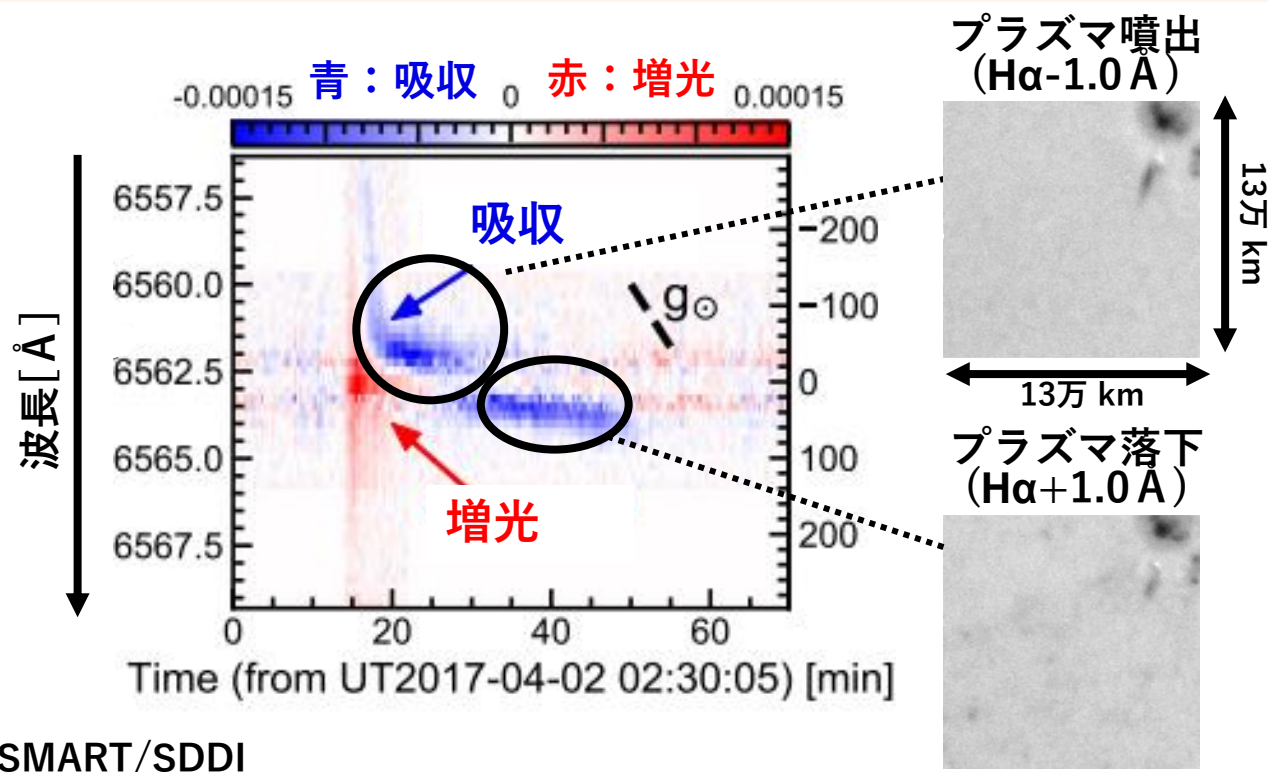
- ◆ 恒星で観測される突発的な増光現象。
- ◆ スーパーフレア：
  - ・ 最大級の太陽フレアの10倍以上のエネルギーを放出。
  - ・ 太陽の場合より大規模なCMEを伴う？

空間積分されたデータしか得られない  
→ 解釈に太陽のデータを活用



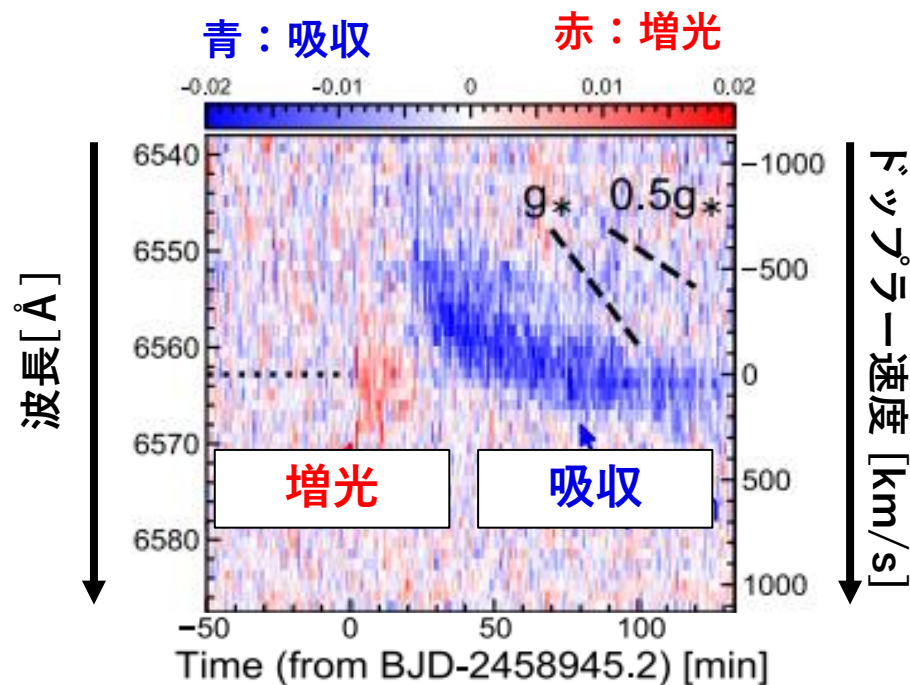
Namekata et al. 2022 (Nature Astronomy) より一部改変

## 太陽フレアのH $\alpha$ 線差分スペクトル



- ◆ 空間積分したH $\alpha$ 線スペクトルの差分：太陽を遠くの恒星のように扱った解析。  
→ Sun-as-a-star 解析
- ◆ blue/redの吸収は、それぞれプラズマの噴出/落下に対応。

## 恒星フレアのH $\alpha$ 線差分スペクトル



左図の太陽の観測例と定性的に同じ。

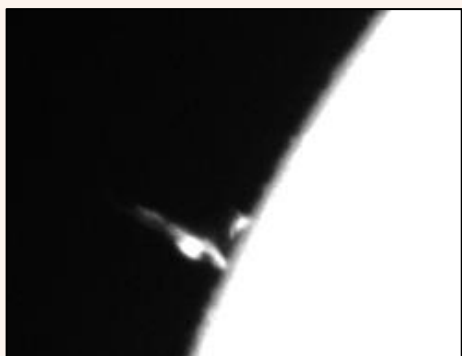


恒星のblue/redの吸収も  
プラズマの噴出/落下に対応すると解釈

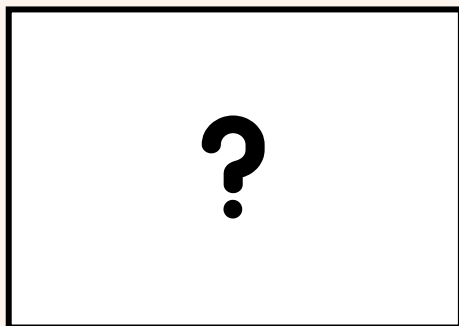
## 解釈が難しい恒星観測の例：H $\alpha$ 線などに現れるblue側に超過した増光

### 太陽面外へのプラズマ噴出のH $\alpha$ 線観測

太陽面外へのプラズマ噴出  
(H $\alpha$ -0.5 Å, SMART/SDDI)



空間積分スペクトル



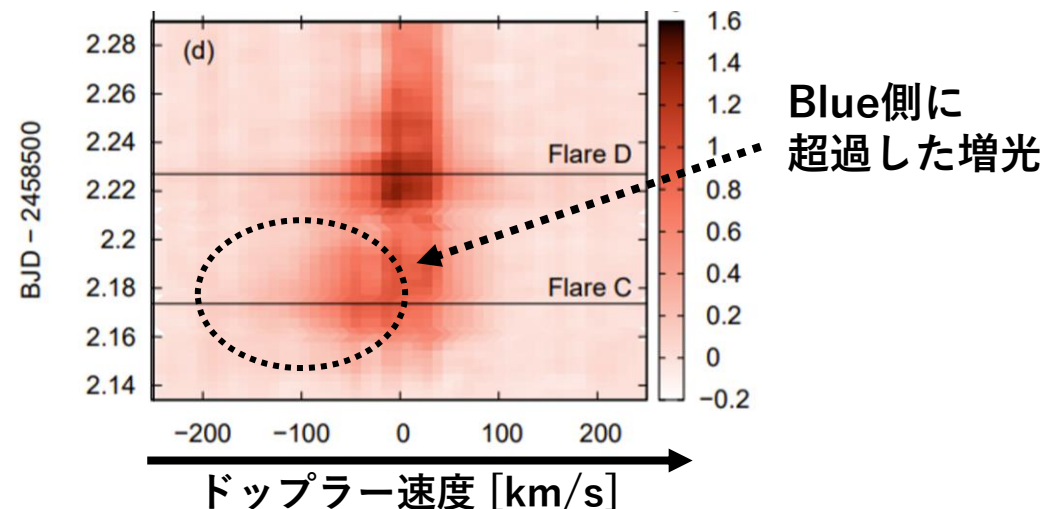
Sun-as-a-star 解析

太陽面外へのプラズマ噴出のSun-as-a-star解析はまだ行われていない

恒星フレアの理解のためには様々な太陽活動現象についてSun-as-a-star解析を行う必要がある

### Blue側に超過した増光を示す恒星フレア

H $\alpha$ 線差分スペクトルの時系列



なゆた望遠鏡

Maehara+ 2021より一部改変

### プロミネンス噴出とする解釈

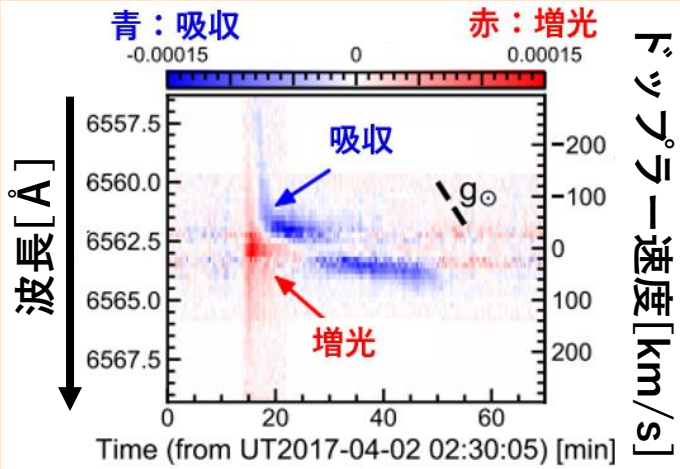
- ・ 恒星フレアによるH $\alpha$ 線中心近傍の増光
- +
- ・ 恒星面外へのプラズマ噴出によるシフトした増光

→ blue側に超過成分をもつ増光

# 研究動機

## ◇太陽面内のプラズマの噴出・落下を伴うフレア

### Sun-as-a-star H $\alpha$ 線スペクトル

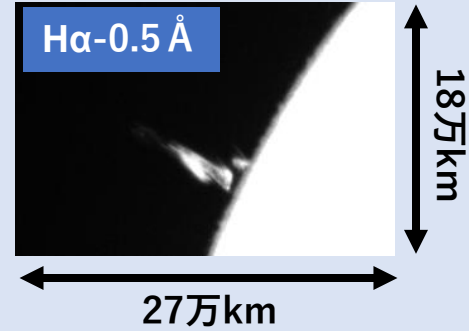


(Namekata et al. 2022)

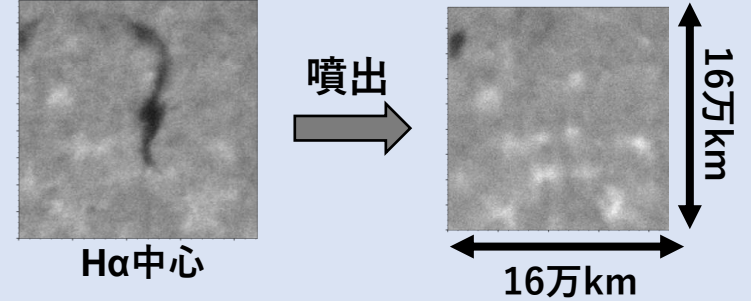
- ・ H $\alpha$ 中心近傍の増光
- ・ blueからredへ走るシフトした吸収

## ◇他の様々な活動現象：

### 太陽面外へのプラズマ噴出



フィラメントの噴出（消失）：  
初め見えていた暗いプラズマが噴出



Sun-as-a-star 解析

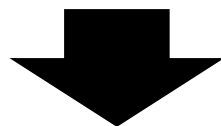
空間積分スペクトルでどのようにみえる？

# 研究内容

フレアやプラズマ噴出のダイナミクスを探るのに適しているH $\alpha$ 線を用いてSun-as-a-star解析。

➡ 様々な太陽活動現象と、空間積分したH $\alpha$ 線スペクトルの定性的な対応を調べた。

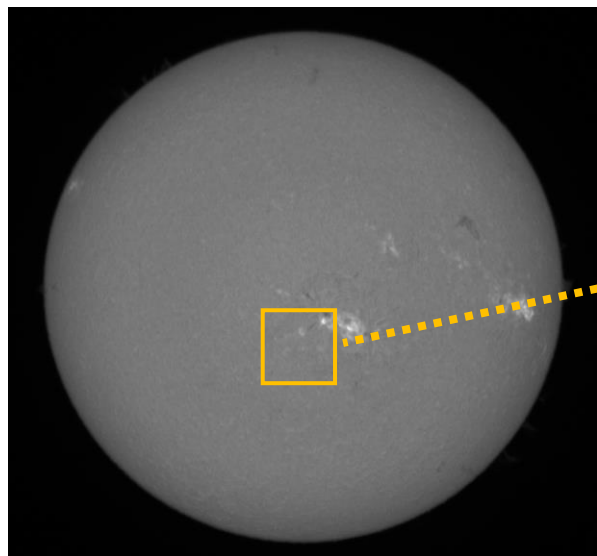
太陽全面を $H\alpha \pm 9.0 \text{ \AA}$ の範囲で撮像分光観測することが可能.



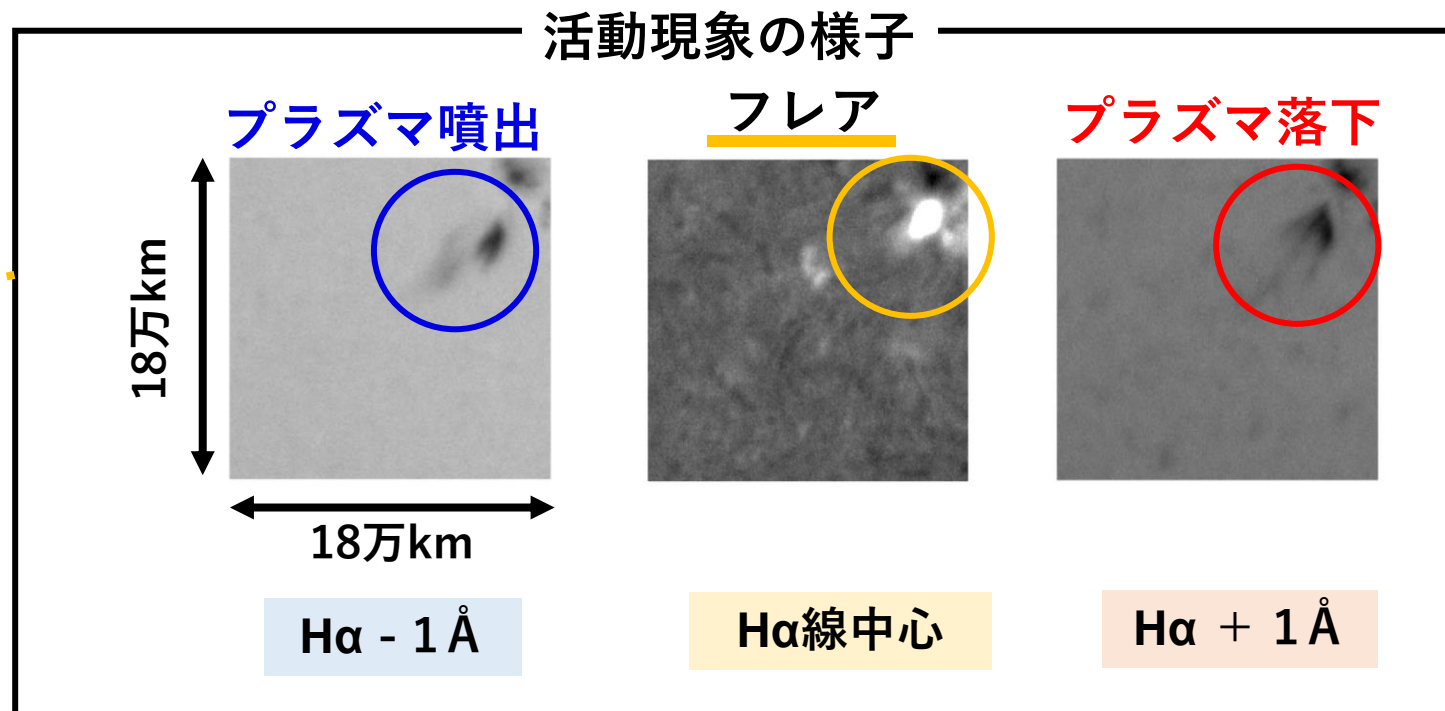
波長分解能 :  $0.25 \text{ \AA}$   
時間分解能 : 12 sec

撮像した各時刻で...

- ✓ 活動現象を空間分解して“見る”ことが可能,
- ✓ 撮像した全面像の任意の領域で $H\alpha$ 線空間積分スペクトルを得ることが可能.

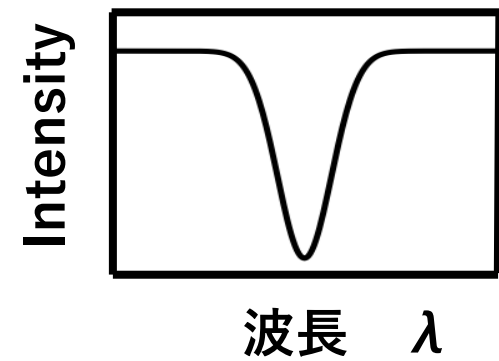
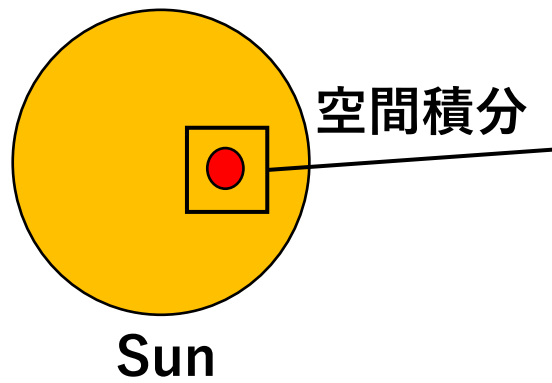


SMART/SDDIによる観測例 ( $H\alpha$ 線中心)



## 1. 空間積分スペクトルの作成

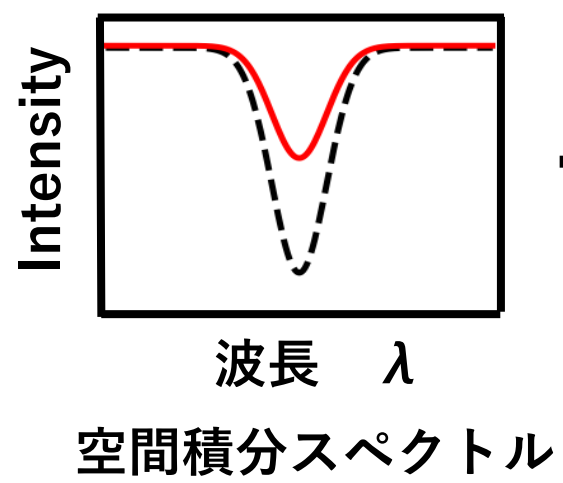
イベントを含む領域内の  
H $\alpha$ 線スペクトルを空間積分。  
(※静穏領域のデータで補正)



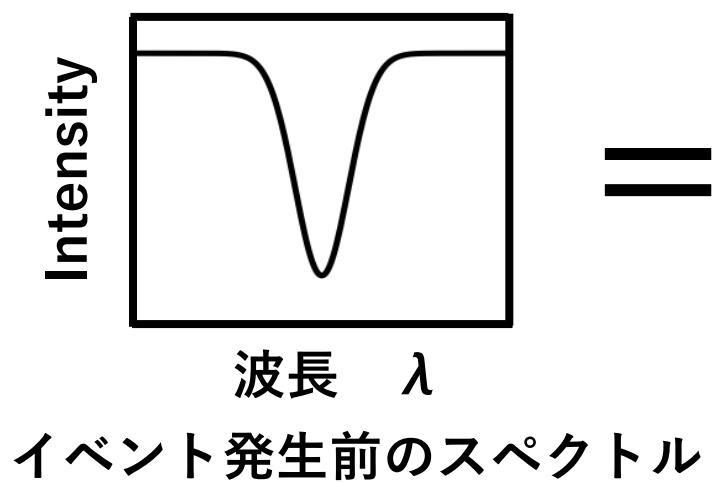
## 2. 差分スペクトルの作成

空間積分したスペクトルについて、イベント発生前のスペクトルとの差分をとる。

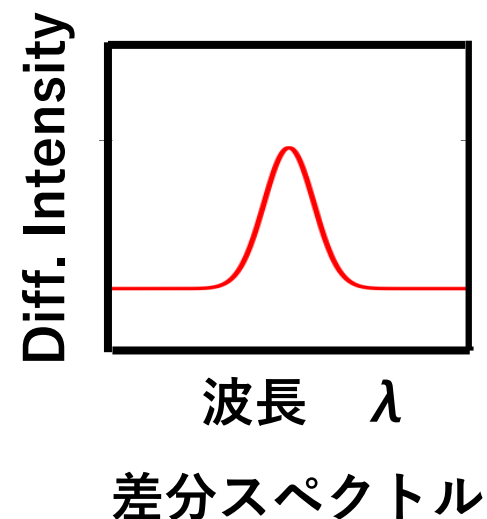
→ イベントの発生によるスペクトルの変化をみる。



—



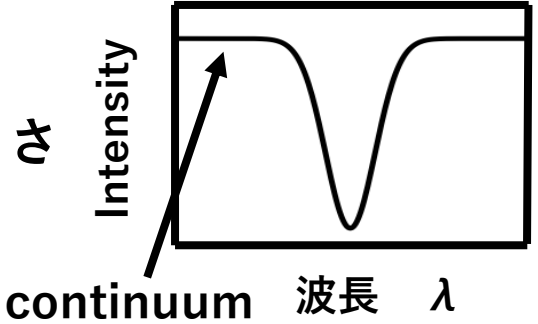
=



### 3. 太陽全面で積算したcontinuumで規格化

太陽全面で積算したcontinuum = “遠くの恒星としての太陽”の明るさ

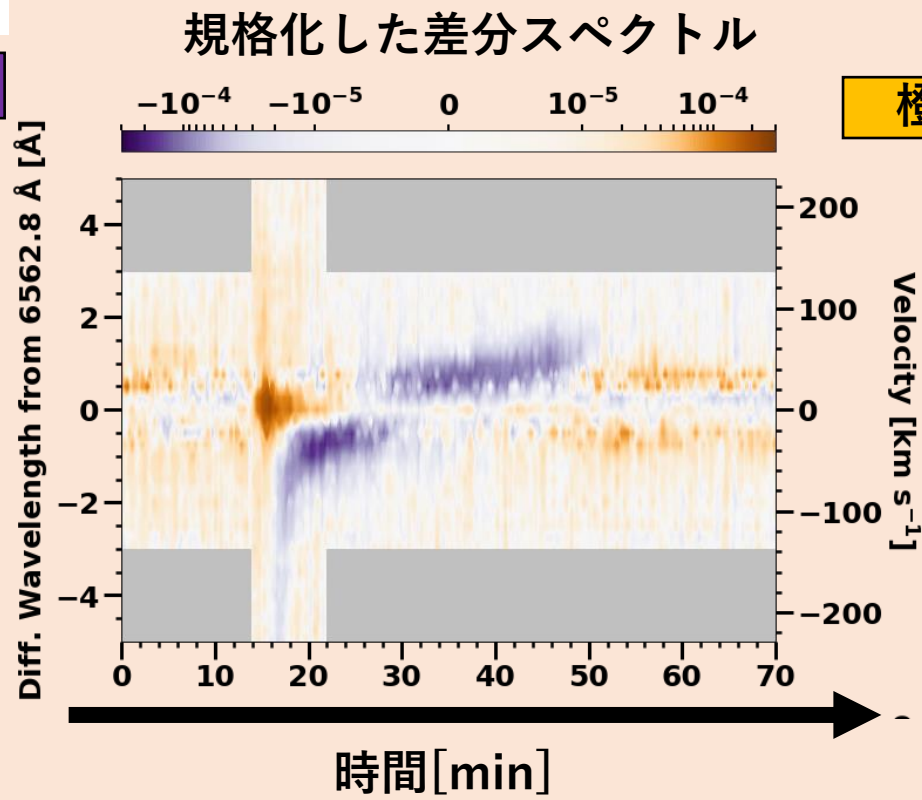
→ “遠くの恒星としての太陽”の明るさに対するスペクトルの変化をみる。



### 4. ダイナミックスペクトル

解析例：2017/04/02 C8.0 class フレア

紫：減光  
赤方偏移  
H $\alpha$ 線中心からの  
波長差 [Å]  
青方偏移



橙：増光

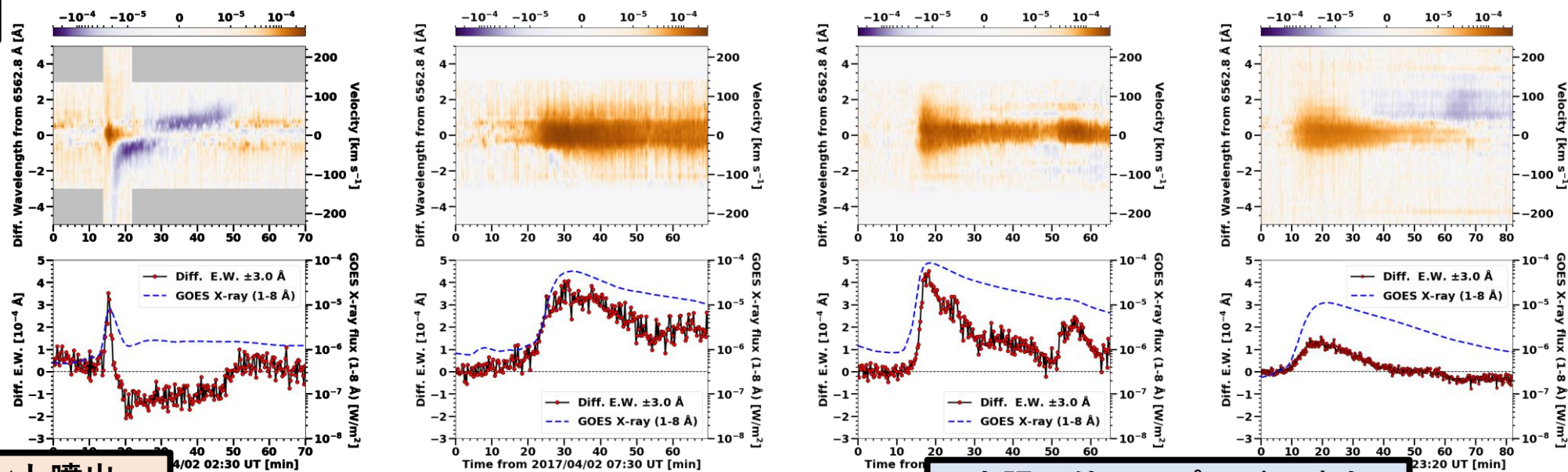
Doppler 速度 [km s<sup>-1</sup>]

※灰色の領域：データ無し

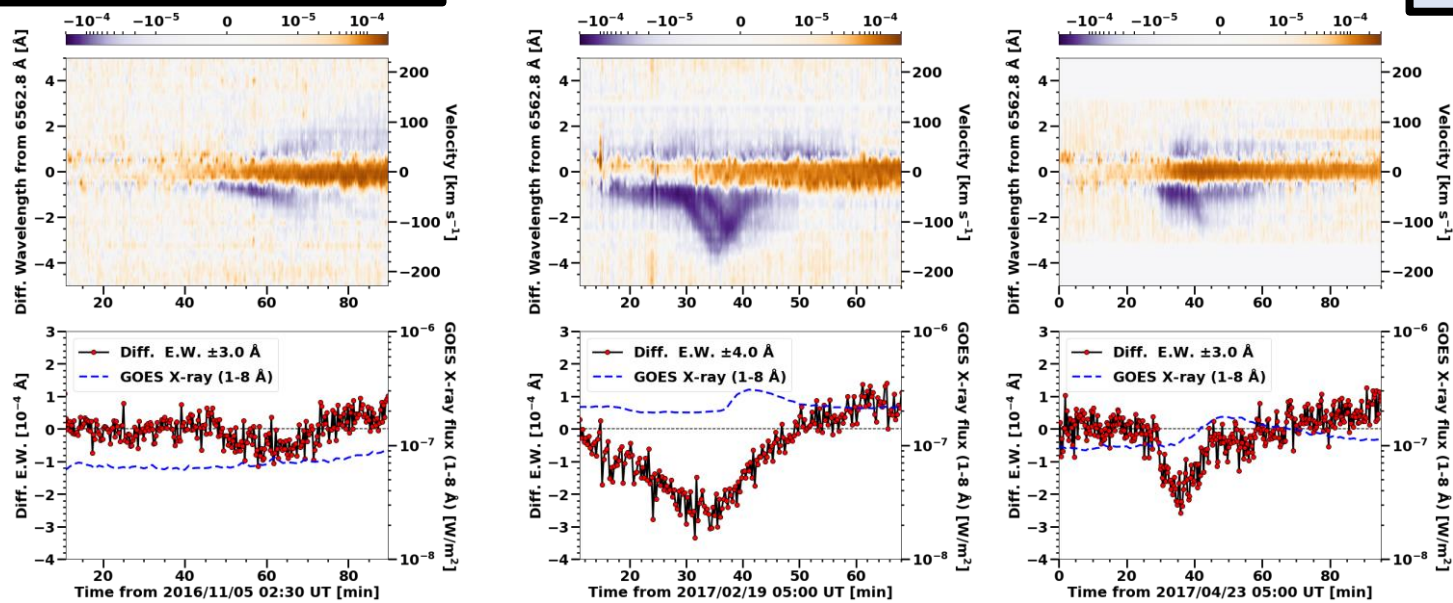


# イベントリスト

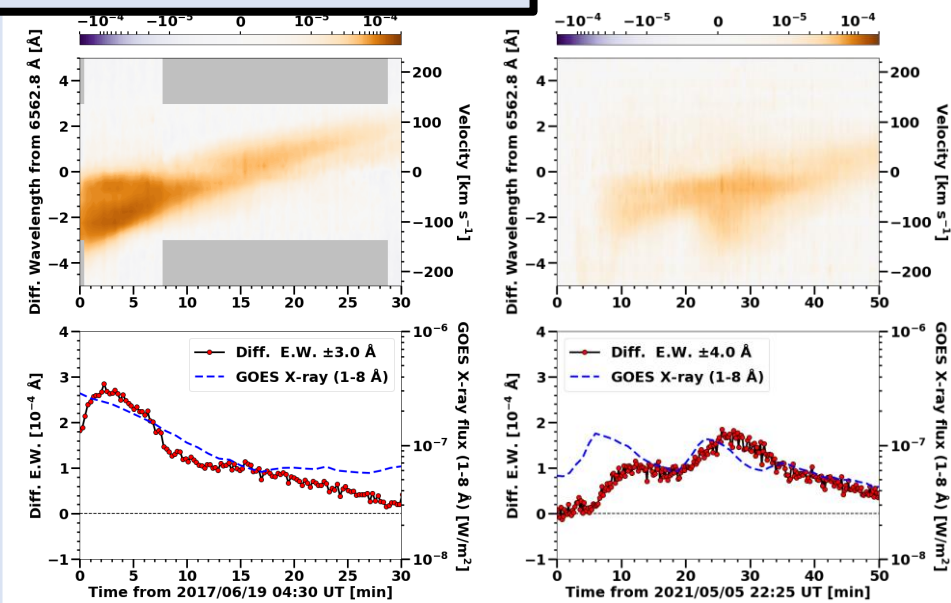
## フレア



## フィラメント噴出

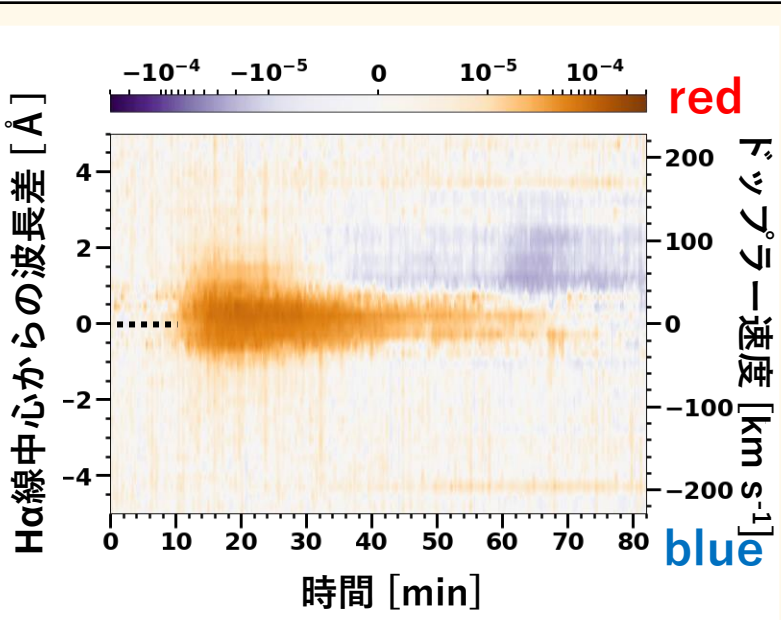


## 太陽面外へのプラズマ噴出

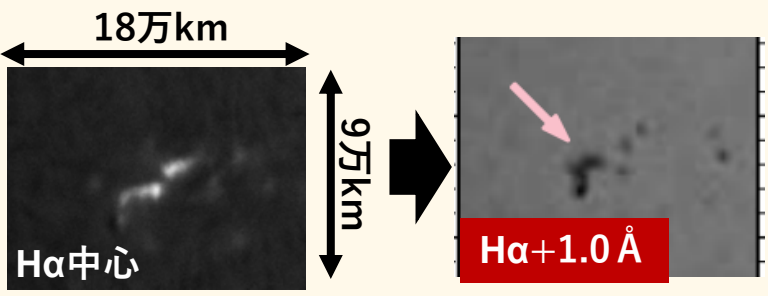


# 結果：ダイナミクススペクトルと撮像画像の対応

2021/04/20 M1.1 フレア

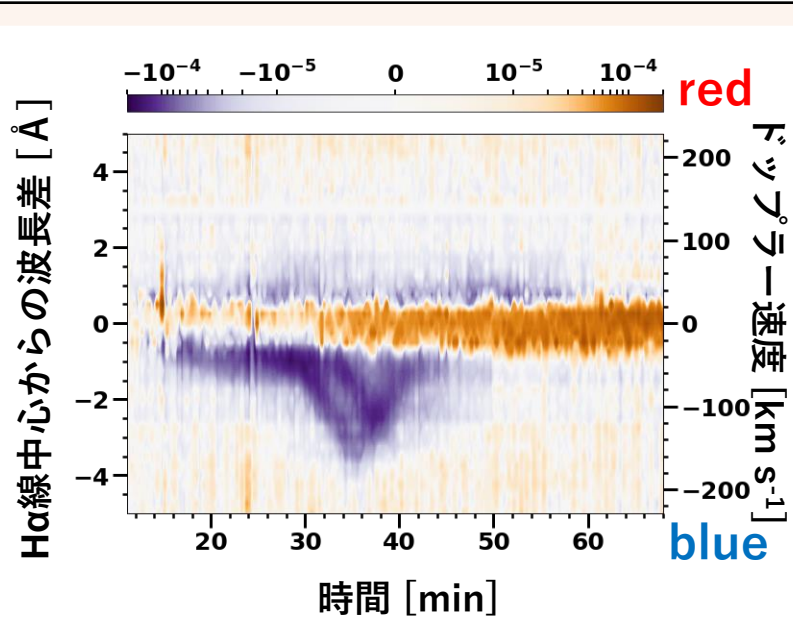


- ・ H $\alpha$ 線中心近傍の増光 (red側に超過した増光)
- ・ 増光後期のredシフトした減光

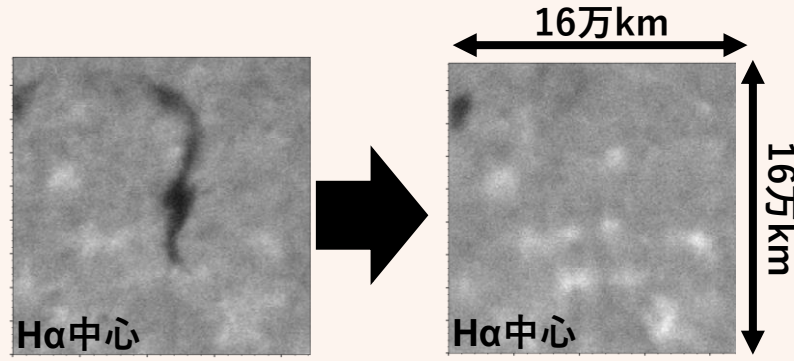


フレア      プラズマの落下

2017/02/19 フィラメント噴出

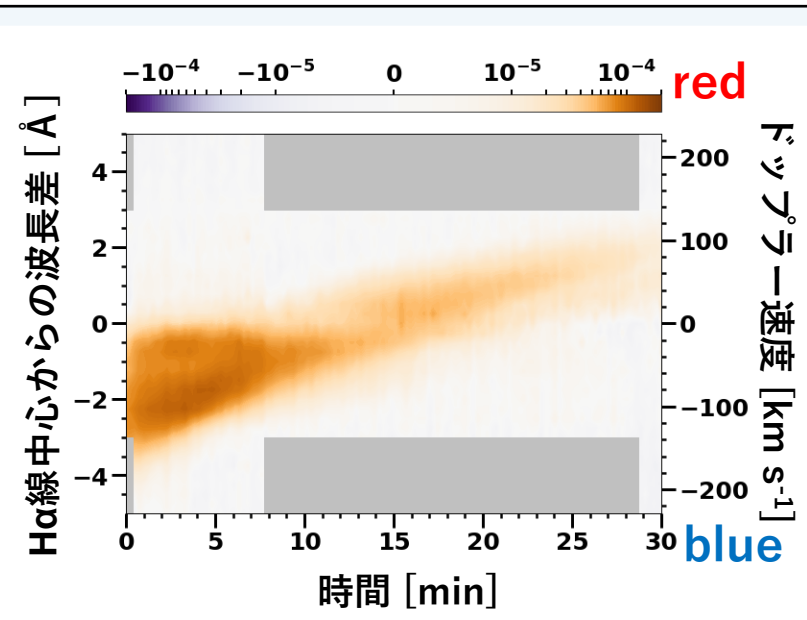


- H $\alpha$ 中心近傍の増光 (シフトした減光を伴う)

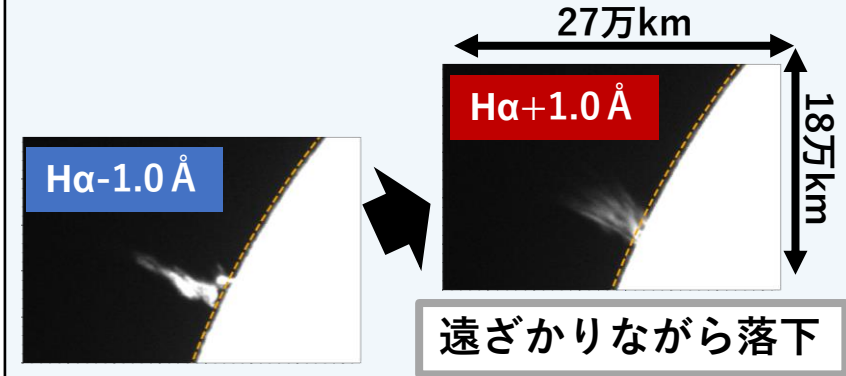


フィラメント噴出

2017/06/19 面外へのプラズマ噴出



- シフトした増光

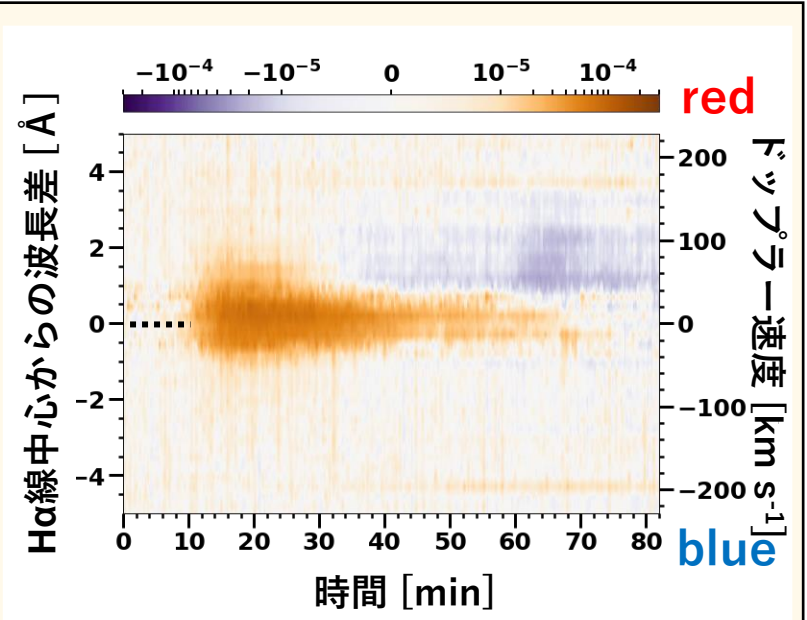


近づきながら噴出

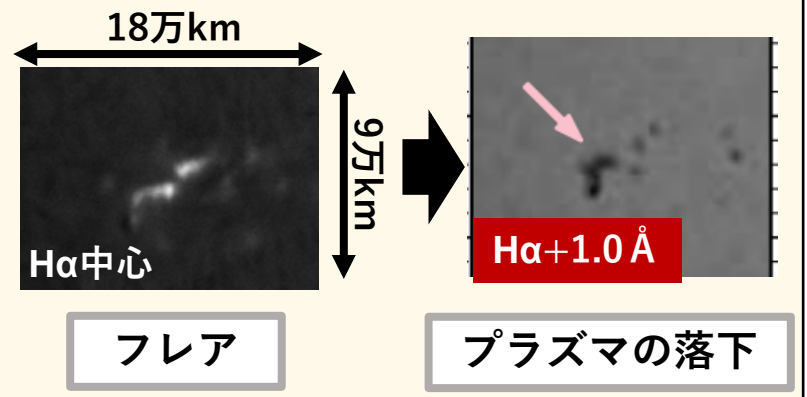
遠ざかりながら落下

# 結果：ダイナミクススペクトルと撮像画像の対応

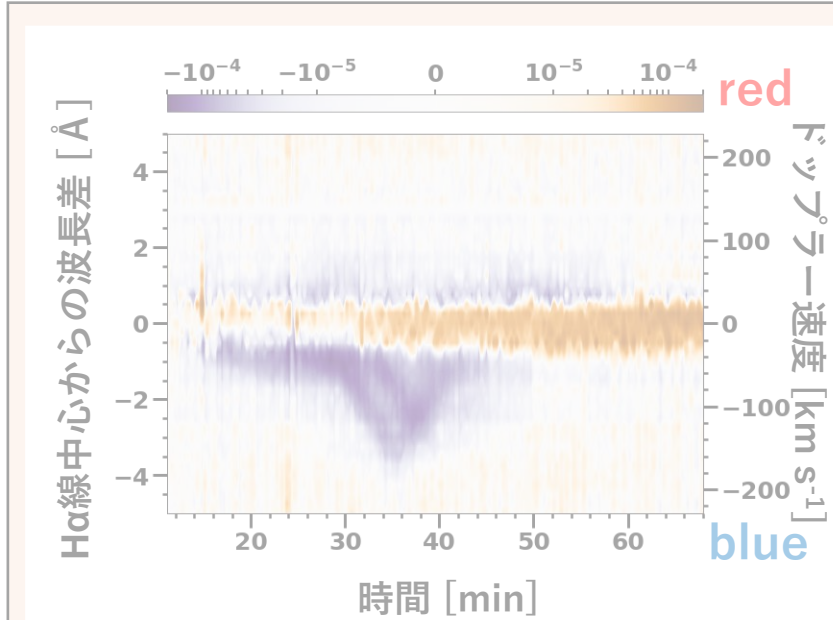
2021/04/20 M1.1 フレア



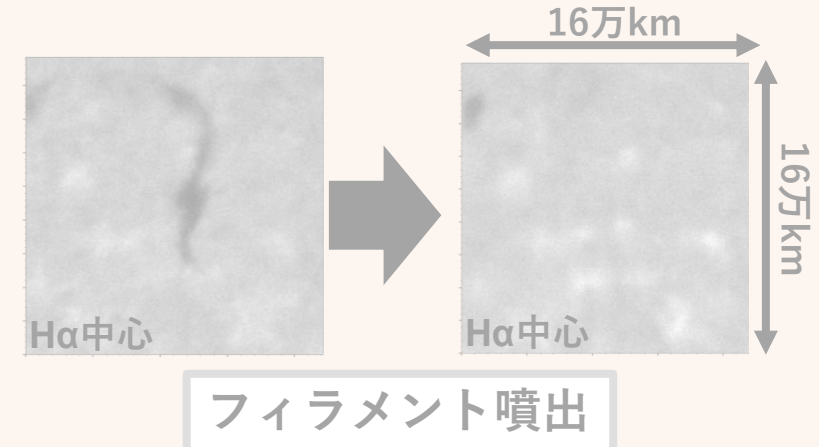
- ・ H $\alpha$ 線中心近傍の増光 (red側に超過した増光)
- ・ 増光後期のredシフトした減光



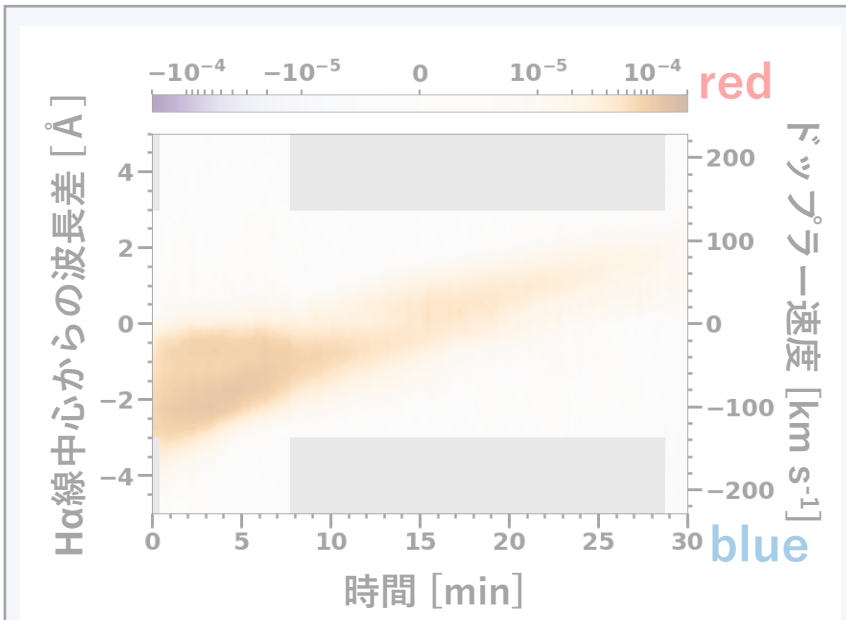
2017/02/19 フィラメント噴出



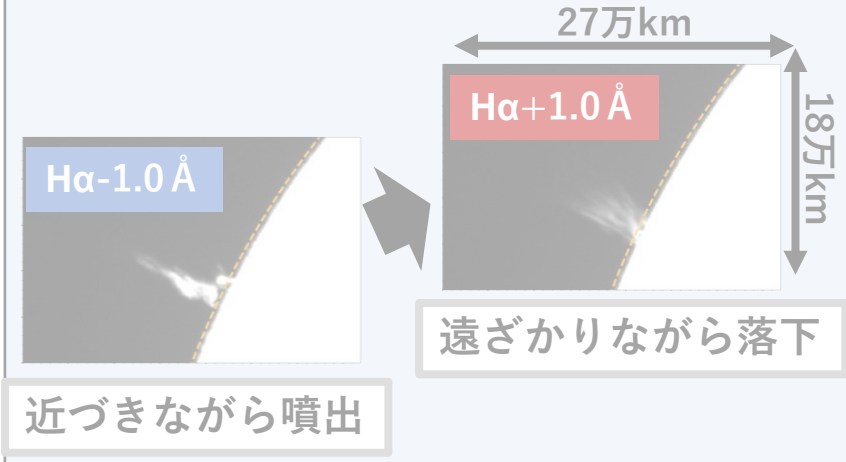
H $\alpha$ 中心近傍の増光 (シフトした減光を伴う)



2017/06/19 面外へのプラズマ噴出

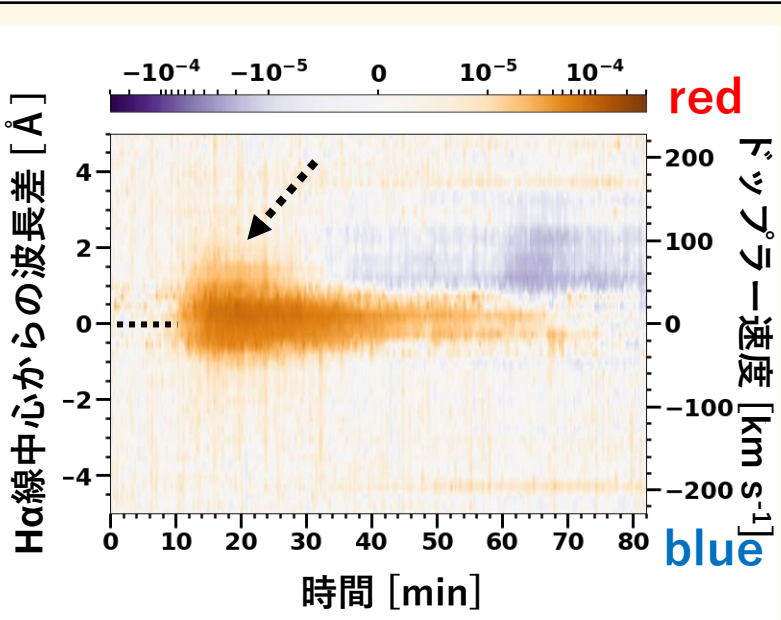


シフトした増光

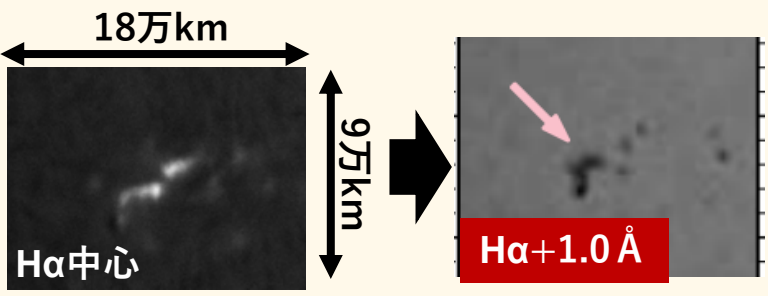


# 結果：ダイナミクススペクトルと撮像画像の対応

2021/04/20 M1.1 フレア

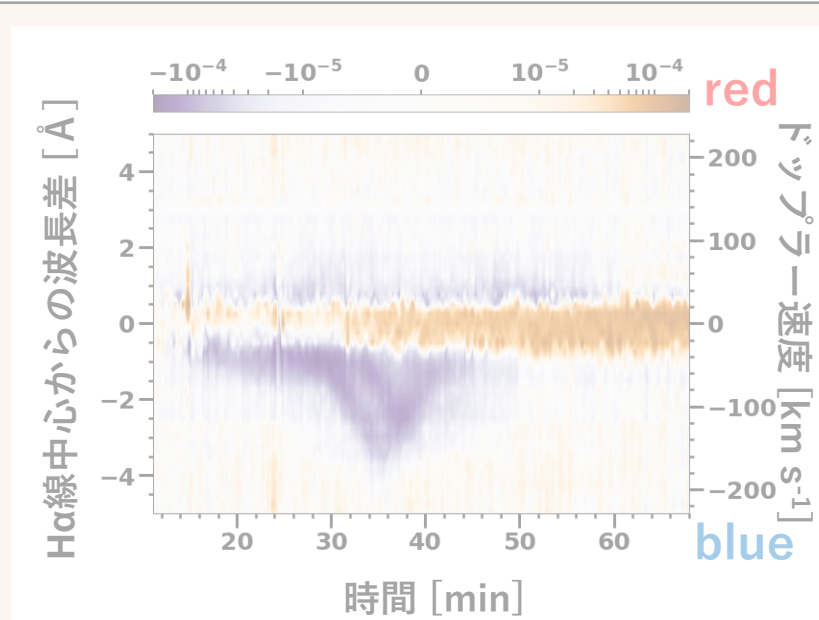


- ・ H $\alpha$ 線中心近傍の増光 (red側に超過した増光)
- ・ 増光後期のredシフトした減光

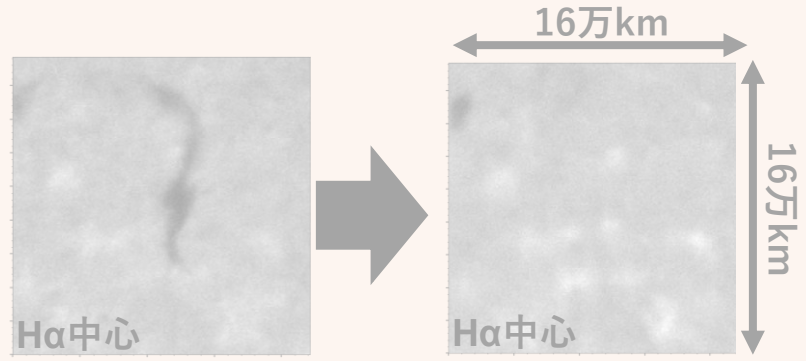


フレア      プラズマの落下

2017/02/19 フィラメント噴出

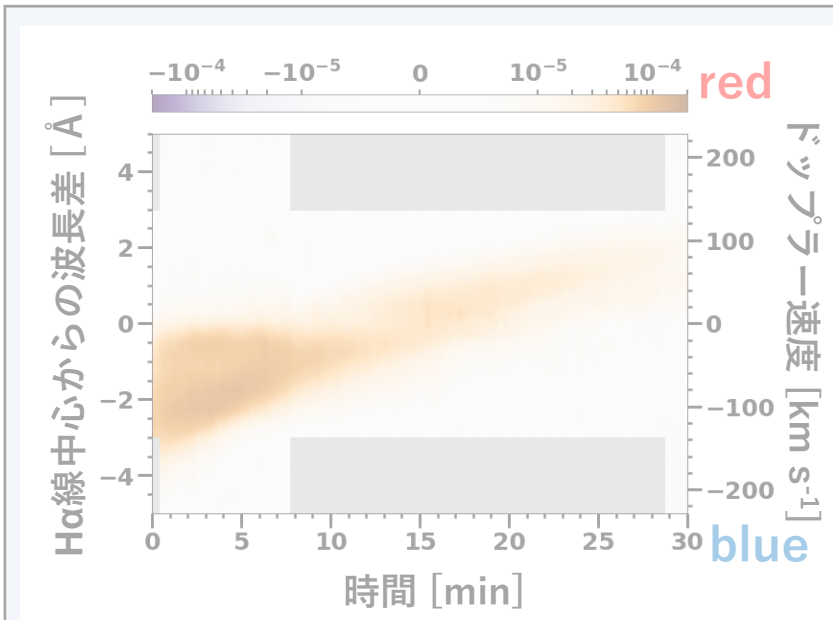


H $\alpha$ 中心近傍の増光 (シフトした減光を伴う)

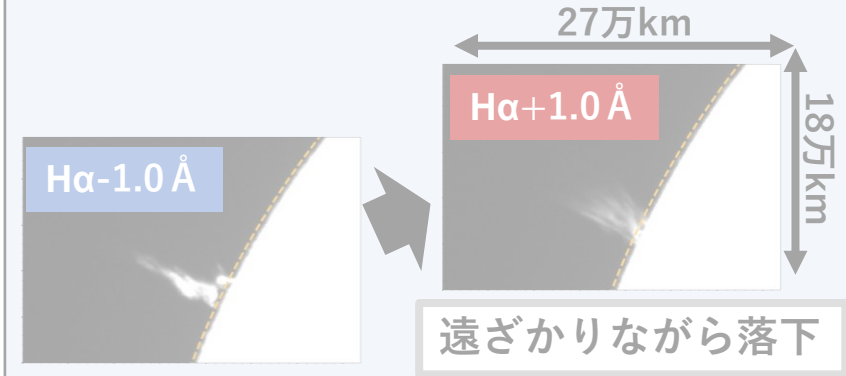


フィラメント噴出

2017/06/19 面外へのプラズマ噴出



シフトした増光

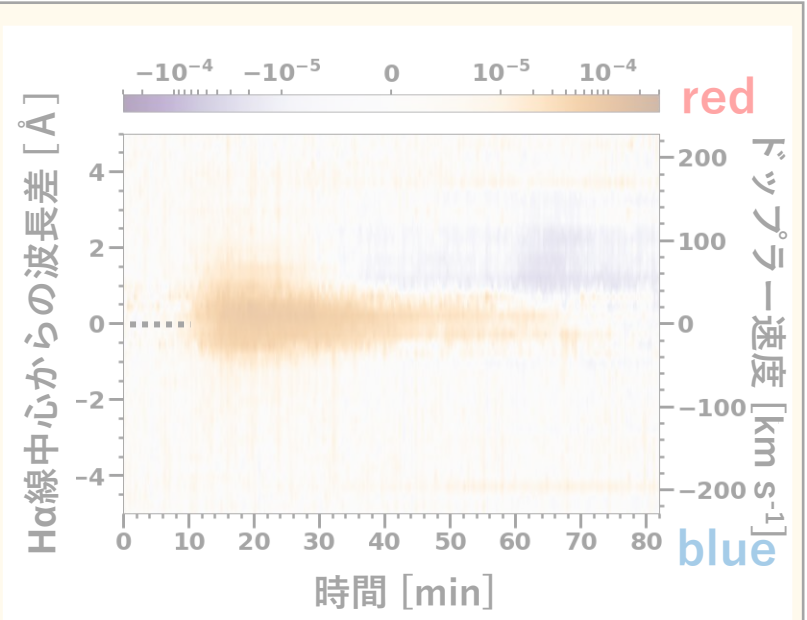


近づきながら噴出

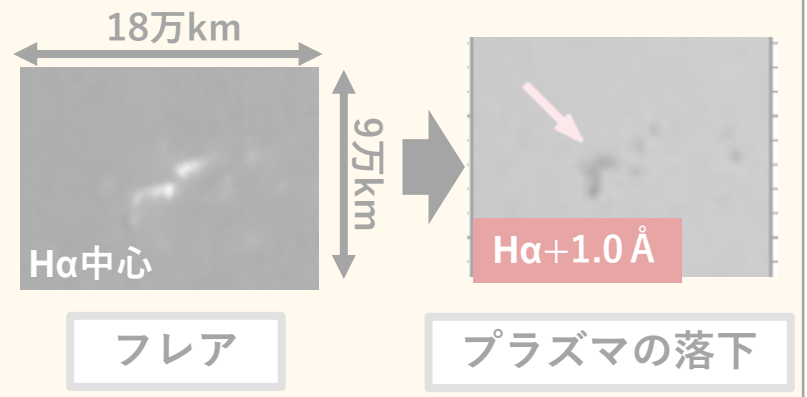
遠ざかりながら落下

# 結果：ダイナミクススペクトルと撮像画像の対応

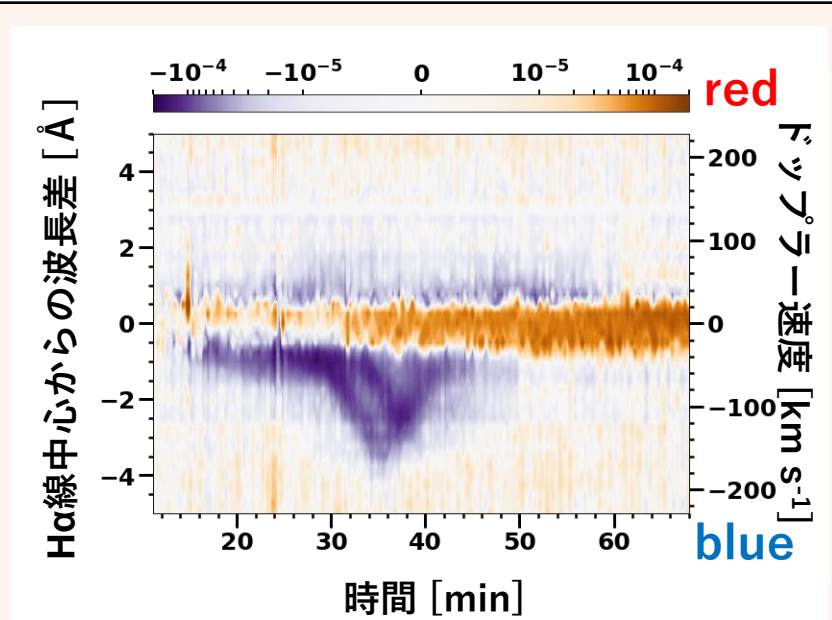
2021/04/20 M1.1 フレア



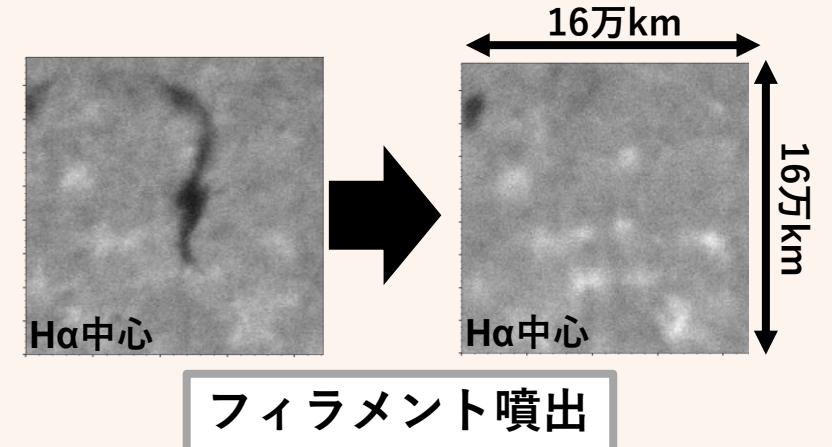
- ・ H $\alpha$ 線中心近傍の増光 (red側に超過した増光)
- ・ 増光後期のredシフトした減光



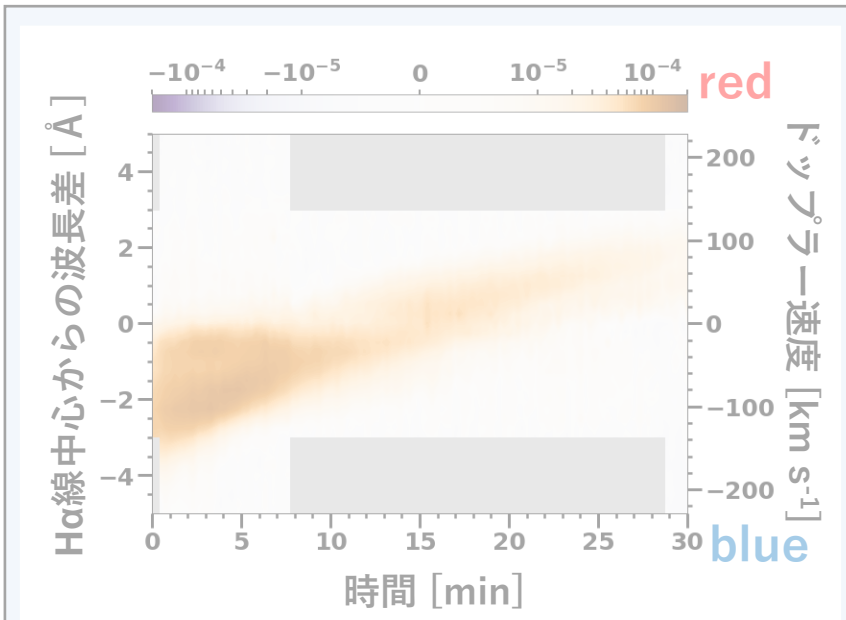
2017/02/19 フィラメント噴出



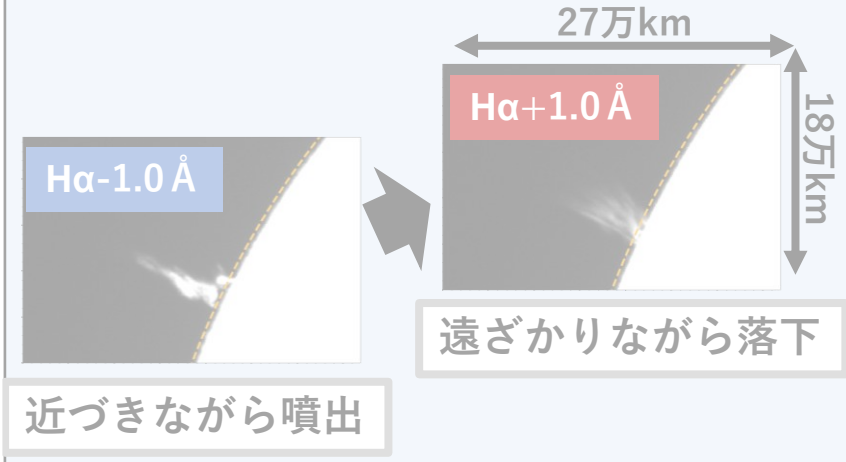
- H $\alpha$ 中心近傍の増光 (シフトした減光を伴う)



2017/06/19 面外へのプラズマ噴出



- シフトした増光



フレア

プラズマの落下

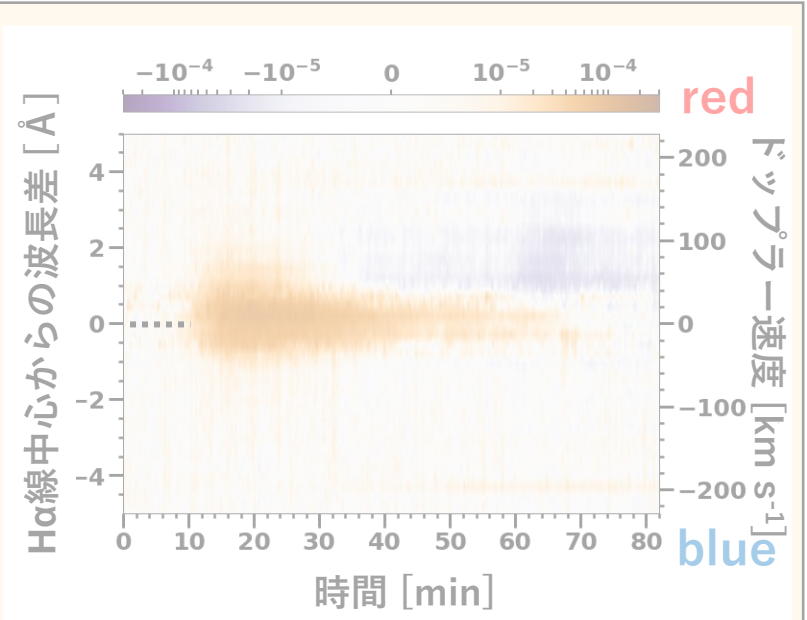
フィラメント噴出

近づきながら噴出

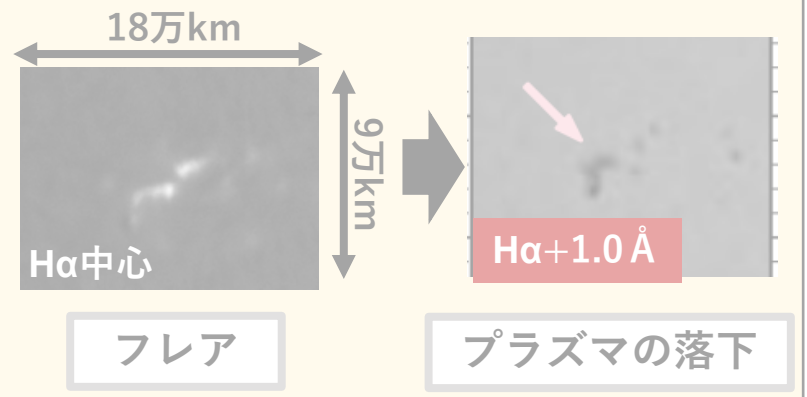
遠ざかりながら落下

# 結果：ダイナミクススペクトルと撮像画像の対応

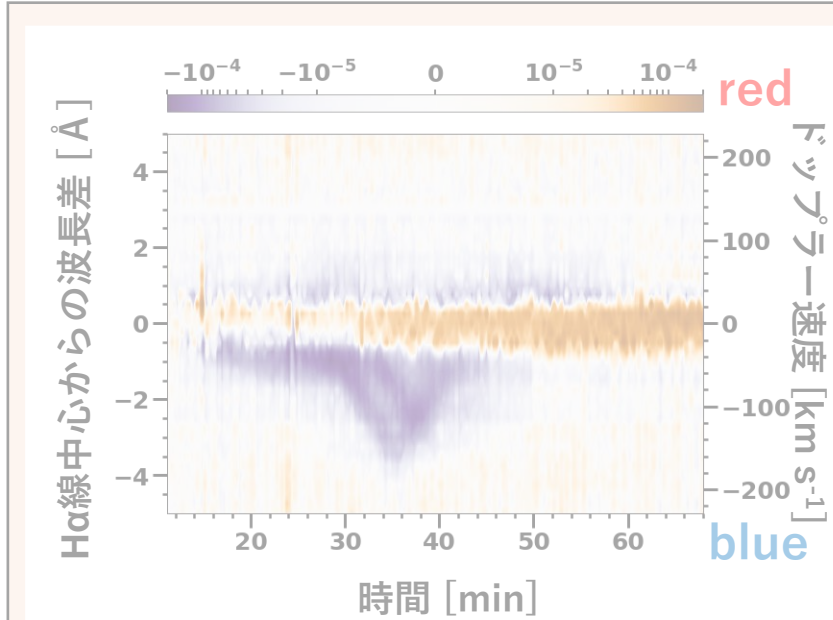
2021/04/20 M1.1 フレア



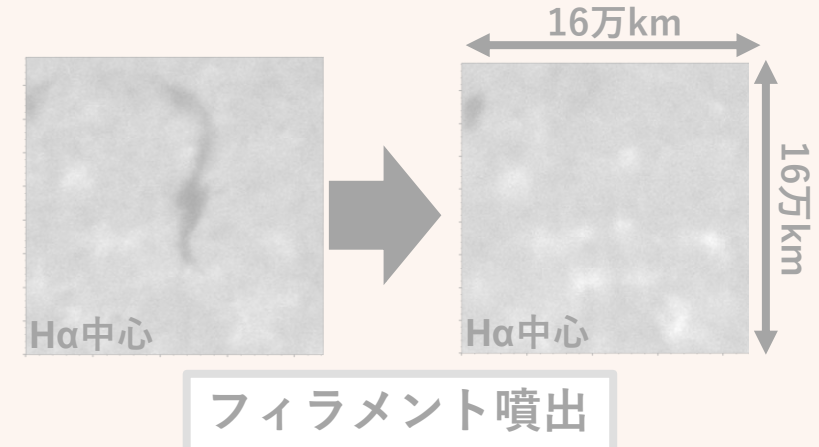
- ・ H $\alpha$ 線中心近傍の増光 (red側に超過した増光)
- ・ 増光後期のredシフトした減光



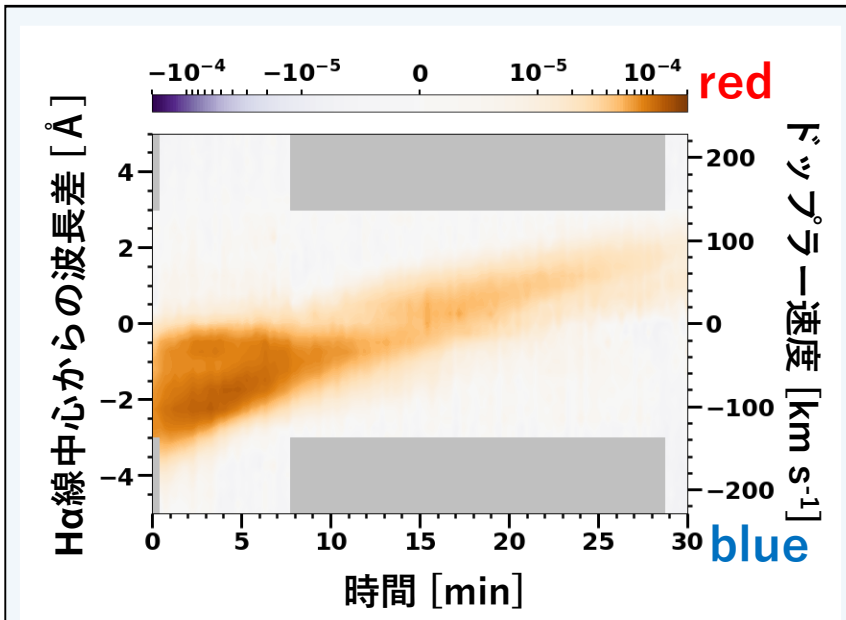
2017/02/19 フィラメント噴出



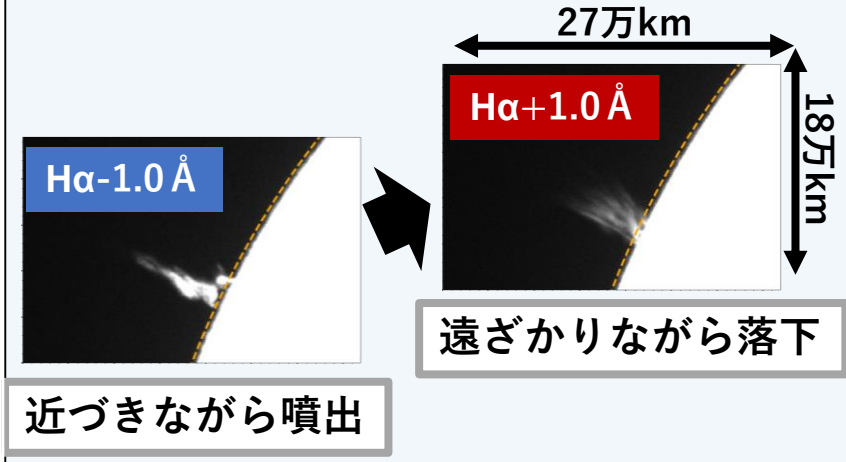
- H $\alpha$ 中心近傍の増光 (シフトした減光を伴う)



2017/06/19 面外へのプラズマ噴出

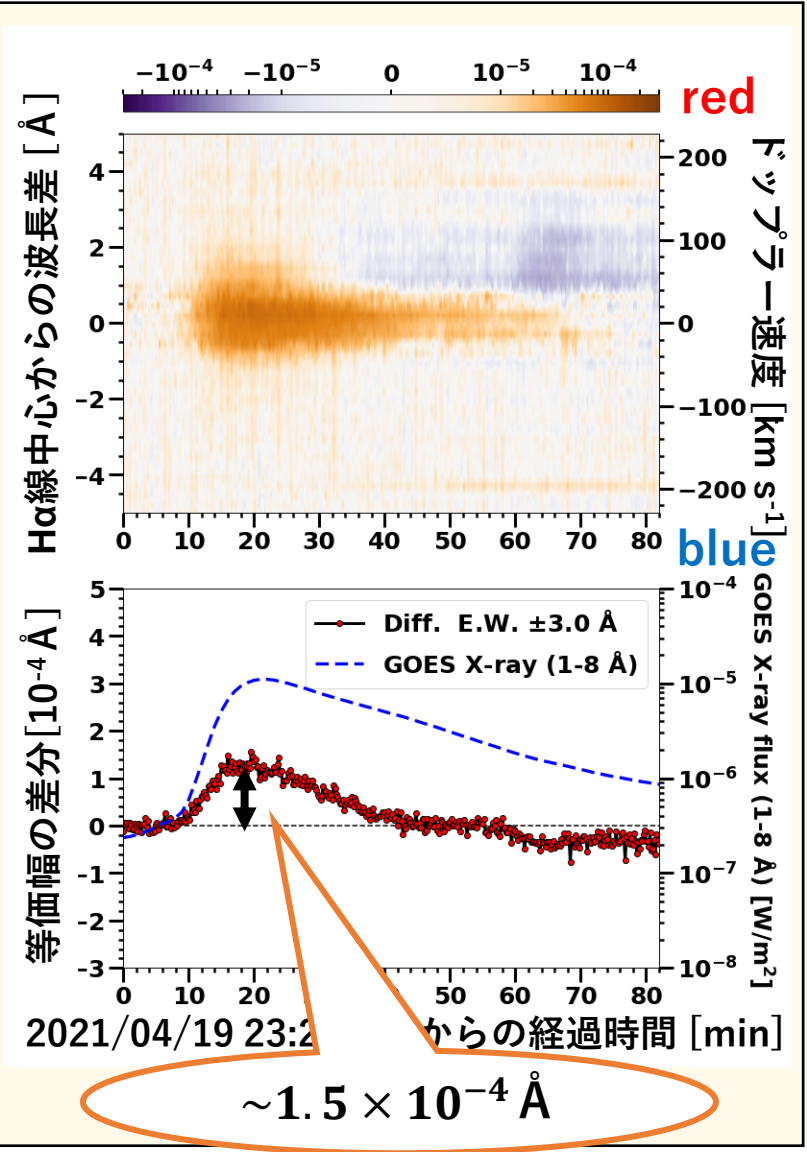


- シフトした増光

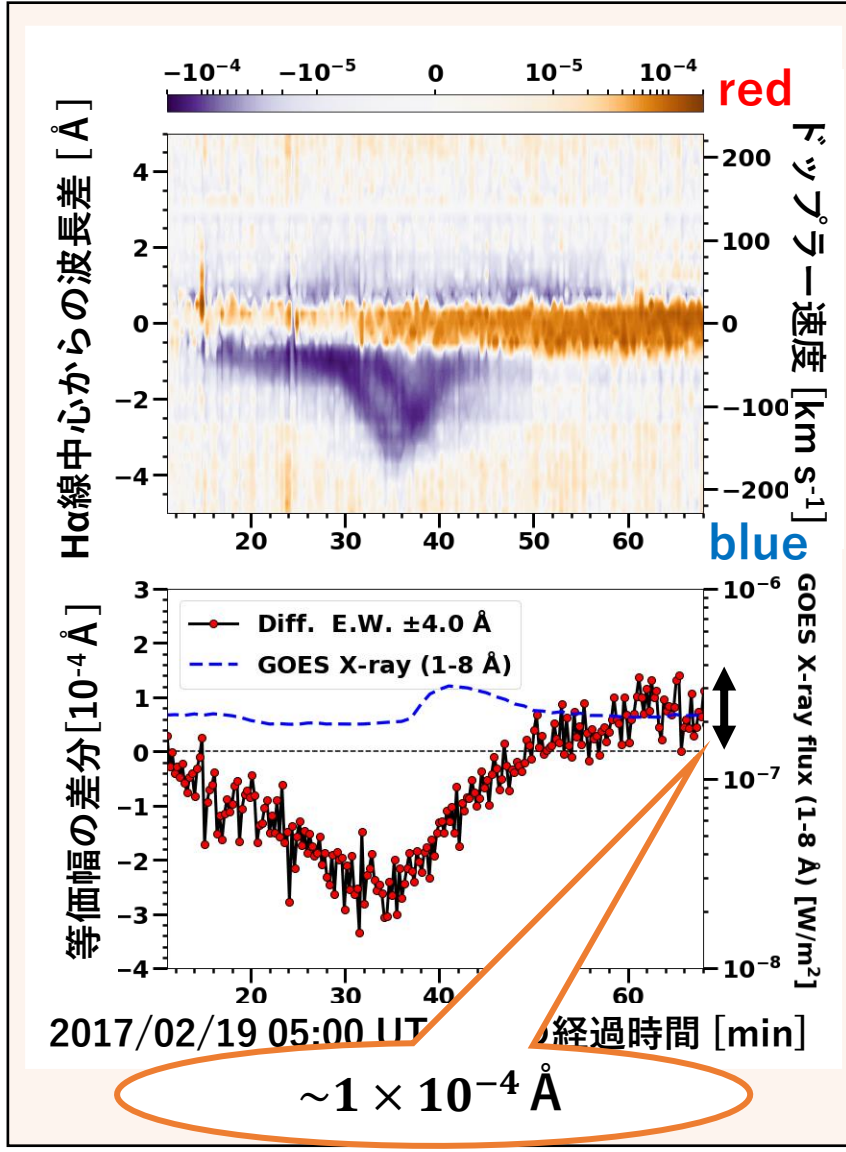


結果：フィラメントの消失、プロミネンス噴出による増光量

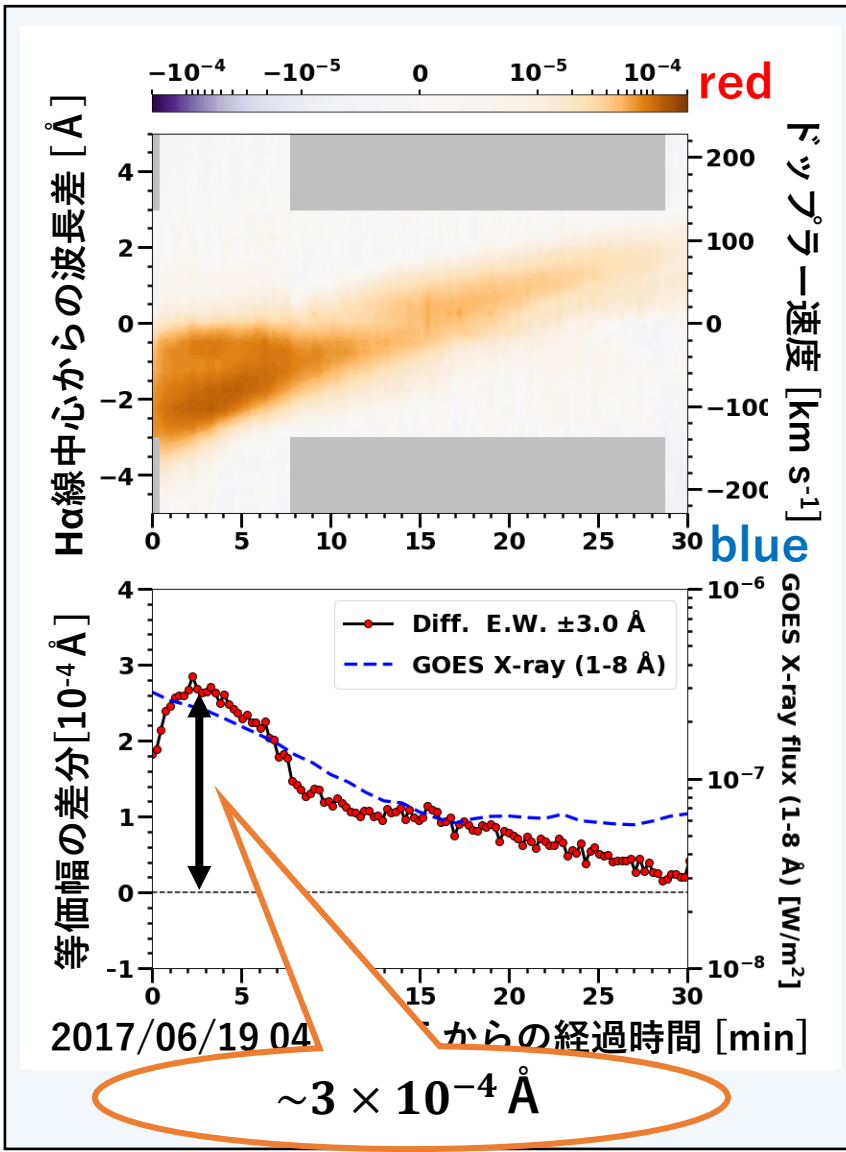
2021/04/20 M1.1 フレア



2017/02/19 フィラメント噴出



2017/06/19 太陽面外へのプラズマ噴出

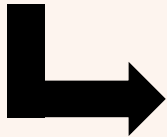


フィラメントの消失、面外へのプラズマ噴出によって、フレアと同等の増光が生じる。

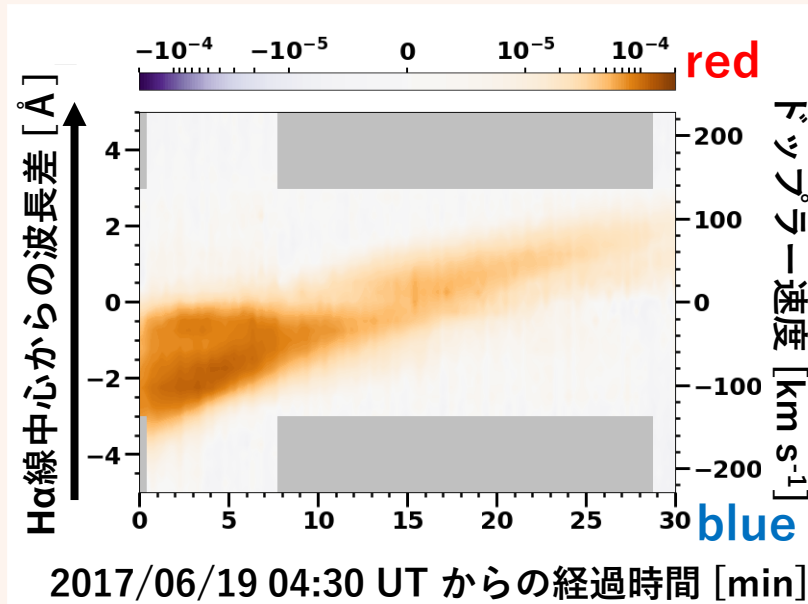
# 恒星観測との比較①：太陽面外へのプラズマ噴出による増光

## 太陽面外へのプラズマ噴出のSun-as-a-star解析

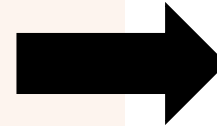
太陽面外へのプラズマ噴出  
( $H\alpha - 1.0 \text{ \AA}$ )



Sun-as-a-star 解析

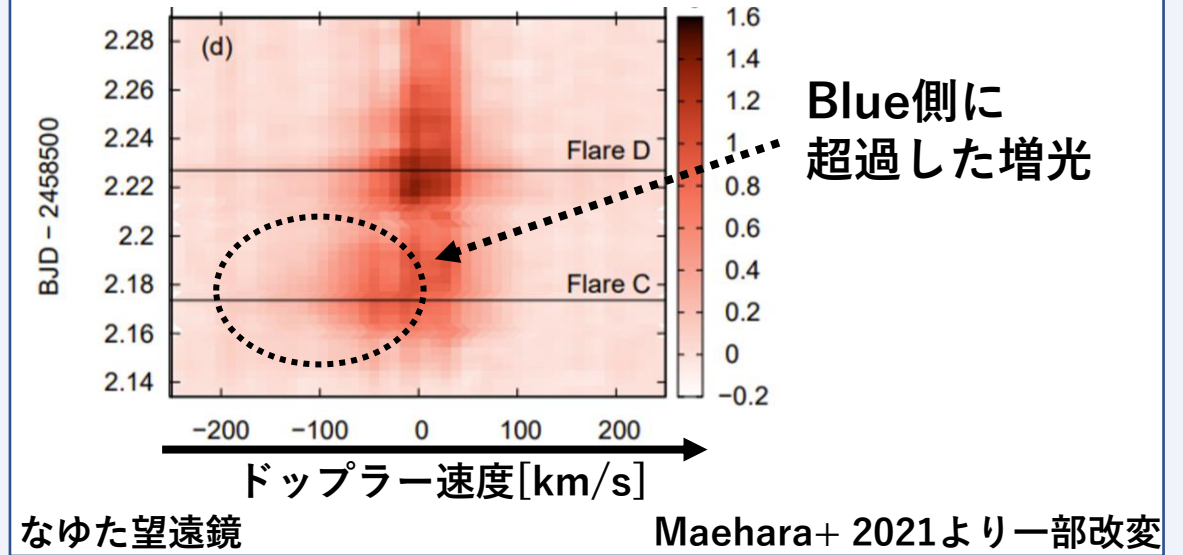


- ・ 太陽面外へのプラズマ噴出 → blue側にshiftした増光
- ・ 太陽フレアと同等の強さの増光を示す ( $\sim 10^{-4} \text{ \AA}$ )



## Blue側に超過した増光を示す恒星フレア

$H\alpha$ 線差分スペクトルの時系列



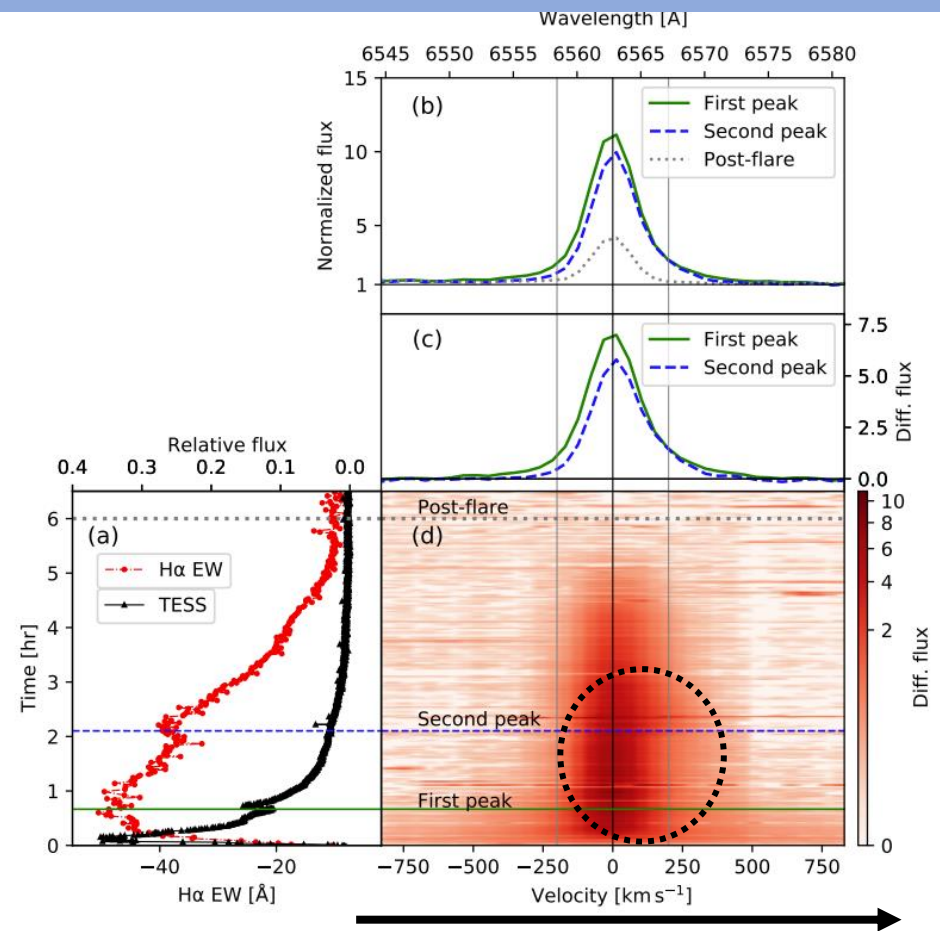
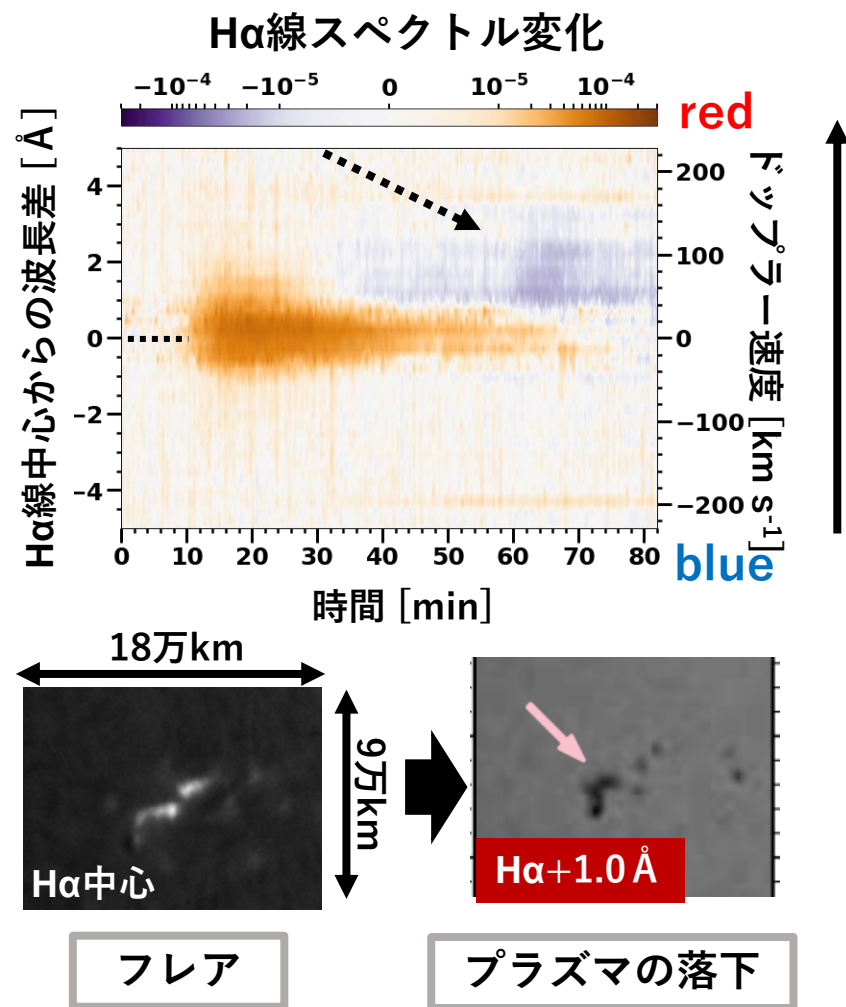
プラズマ噴出による増光が  
フレアと同等の強さであると必要がある

恒星面外へのプラズマ噴出とする解釈を支持

Blue側超過成分のさらなる理解のためには  
太陽フレアと太陽面外へのプラズマ噴出が同時に観測されたイベントのSun-as-a-star解析が必要



# 恒星観測との比較②：フレア後期のプラズマの落下 (downflow)



M型星フレアの後期に観測されたdownflowの例  
(Namizaki+ 2023)

- ✓ 太陽 (G型星) では減光として観測、M型星では増光として観測
- ✓ 星のタイプによって見え方が異なる? → さらなる検証が必要

## 恒星観測の現状と問題点：

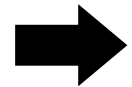
- ・分光観測から多様な活動性が示唆
- ・しかし、空間分解できないので解釈が難しい

## 解決策

- ✓ 太陽のデータを空間積分（Sun-as-a-star解析）して、空間分解した様子との対応を調査.
- ✓ 恒星観測の解釈を与える.

## 研究内容

フレアやプラズマ噴出のダイナミクスを探るのに適しているH $\alpha$ 線を用いてSun-as-a-star解析.



様々な太陽活動現象と、空間積分したH $\alpha$ 線スペクトルの定性的な対応を調査.

## 結果（の概要）

- ✓ 活動現象ごとの特徴は空間積分したH $\alpha$ 線スペクトルでも確認できる.
- ✓ 本研究で得た特徴をもとに、空間分解できない恒星でも表面で発生した現象を特定できると期待.

# 飛騨天文台SMART/SDDIの動画について

京都大学附属天文台

検索 チャット 学校 画像 動画 地図 ニュース さらに表示

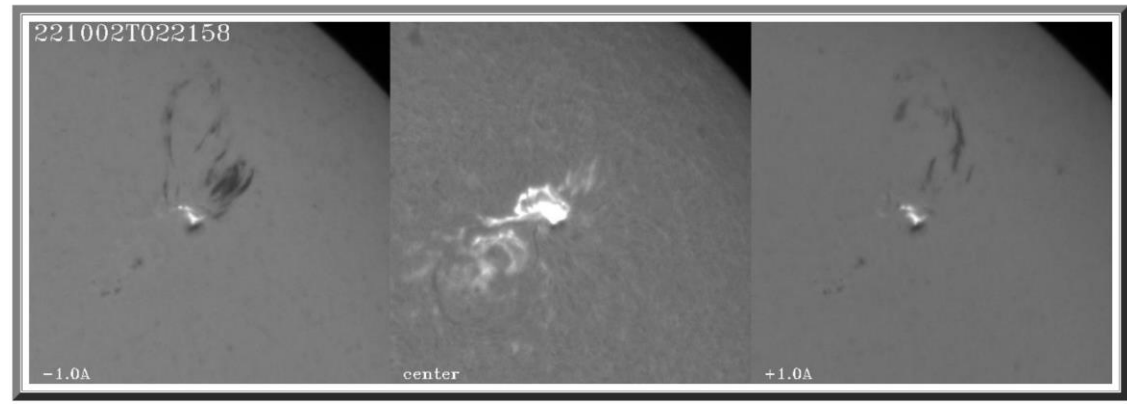
約 8,430,000 件の結果 時間指定なし

① 京都大学大学院理学研究科附属天文台 花山天文台・飛騨天文台 ...  
<https://www.kwasan.kyoto-u.ac.jp>  
 ウェブ 京都大学 国立天文台 国立天文台ハワイ観測所岡山分室 Nature本誌のResearch Highlightで紹介されました。(英語) お知らせ 柴田一成名誉教授が、令和3年度「京都 ...

**SMART (京都大学 飛騨天文台)**

- [SMARTの観測している今の太陽\(SMART Live\)](#) (晴天時のみ)
- [最近の太陽](#) (今日が曇りの場合は昨日の太陽) [今日や昨日の太陽\(動画\)](#)
- [SMART movies \(html/java\)](#) [SDDI event report](#) ← ④
- [過去の太陽\(カレンダー形式\)](#)  
[T1 \(Solar Dynamics Doppler Imager: SDDI\) Data Archive](#)  
[T3 \(Flare Imaging System in Continuum and H-alpha: FISCH\)](#)

(中略)

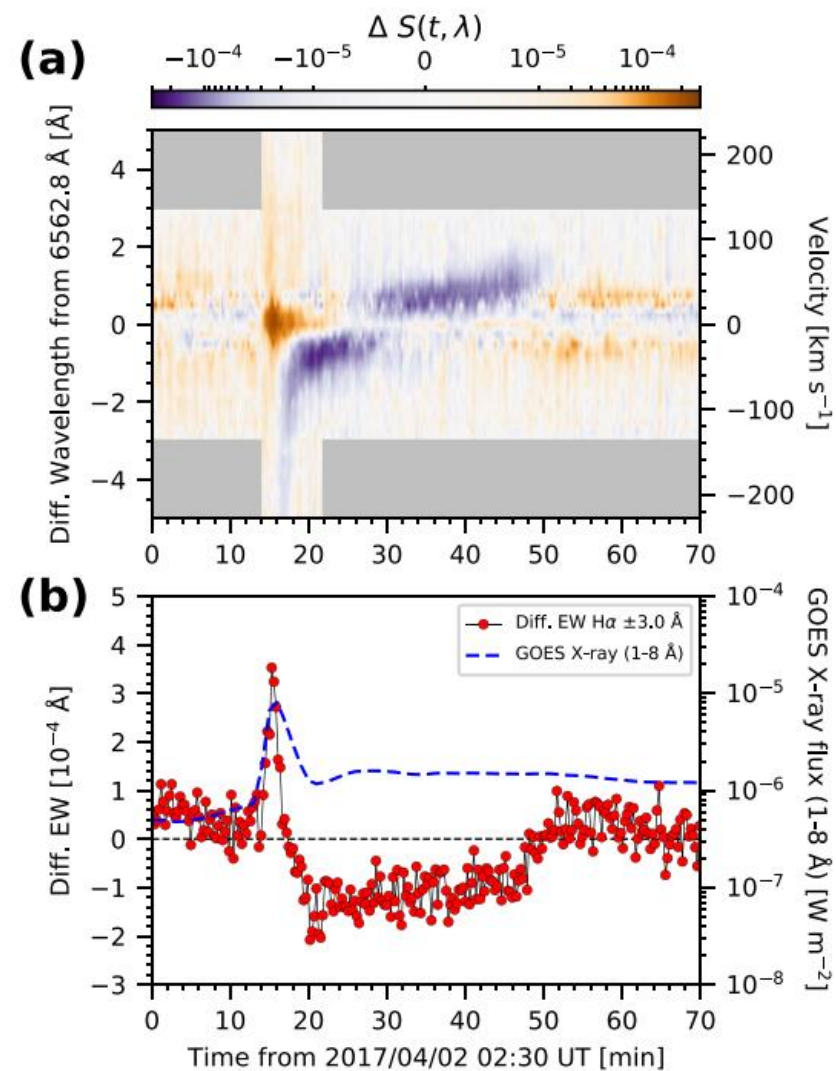
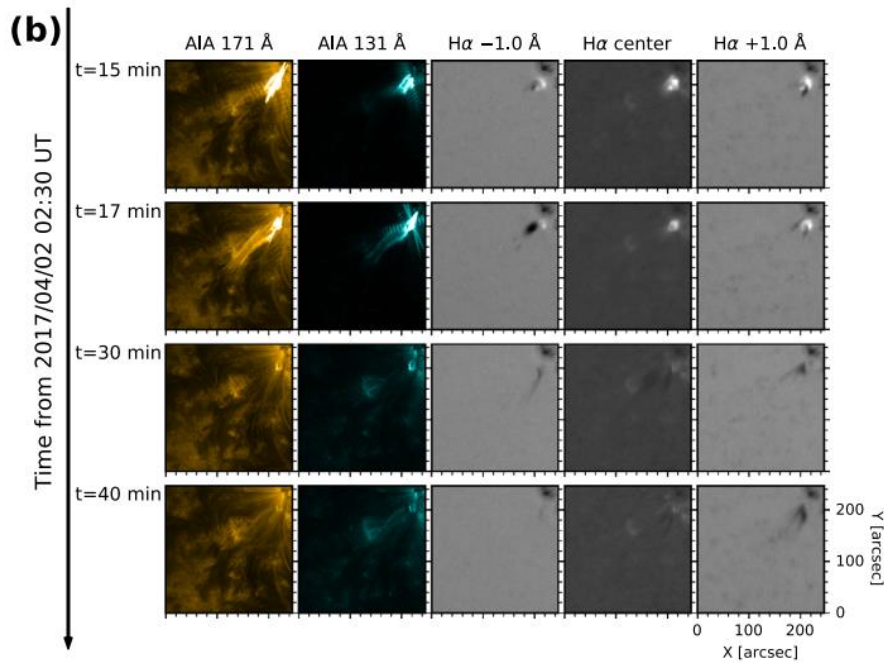
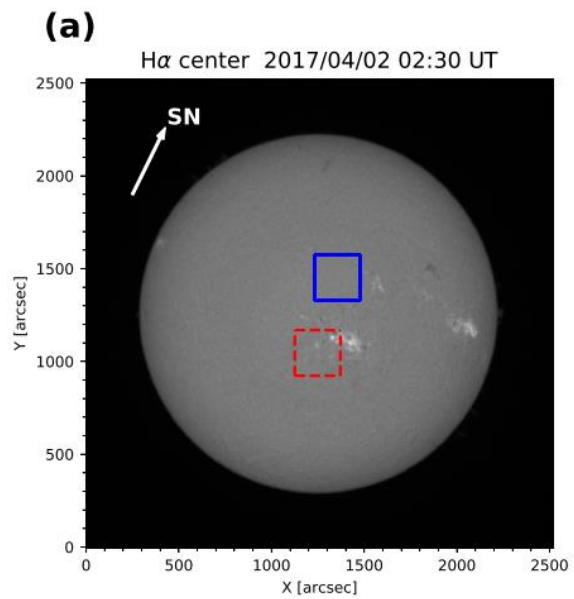


補足資料

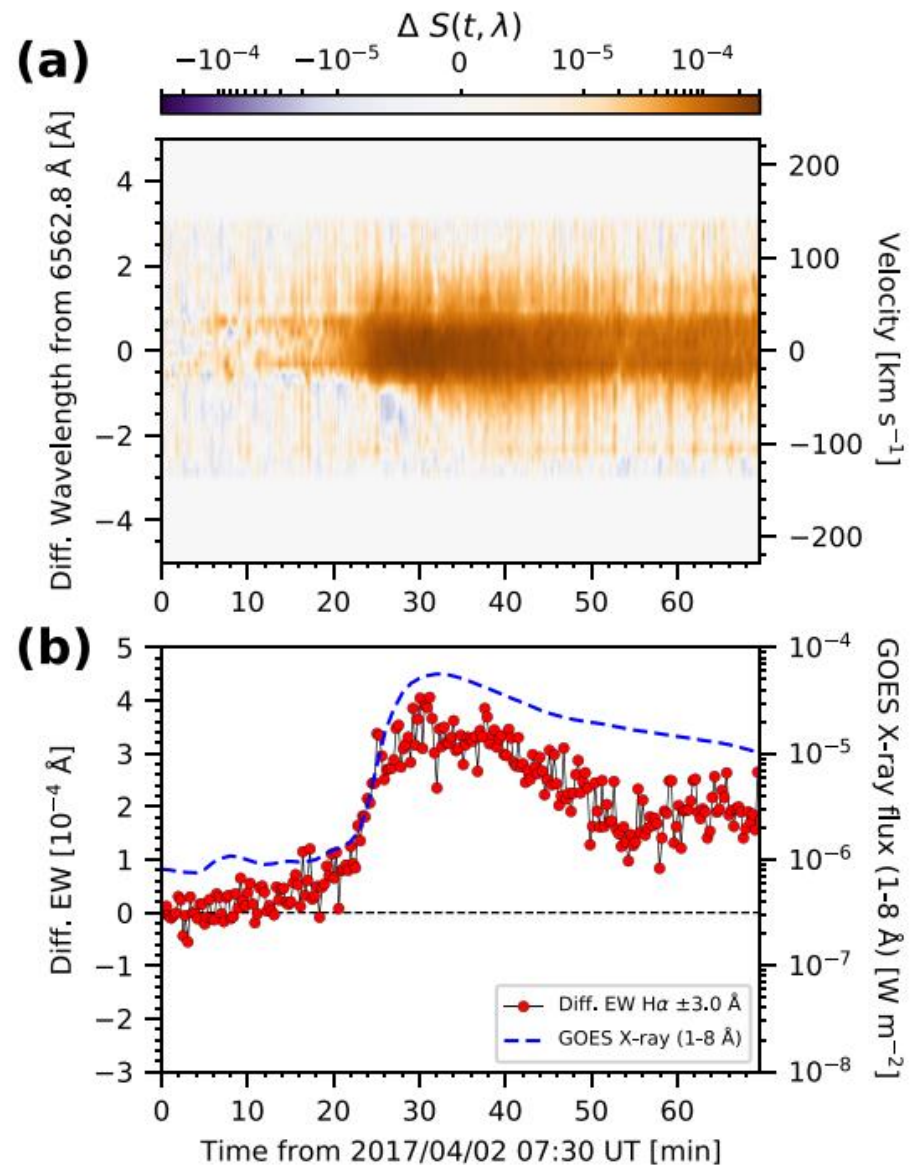
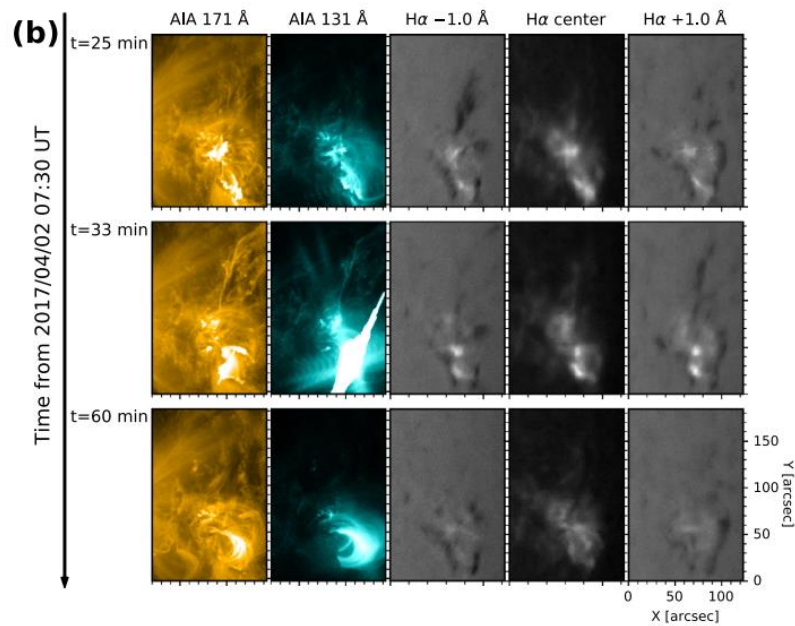
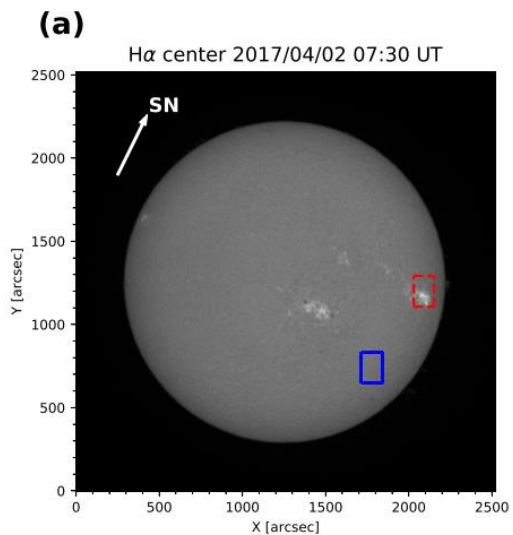
# Summary of 9 events

No.	Features	Sun-as-a-star spectra	Emission [A]	Absorption [A]	CME occurrence
(1)	C8.0 flare + surge	Emission near center Shifted absorption	$3 \times 10^{-4}$	$2 \times 10^{-4}$	No ?
(2)	M5.3 flare + eruption	Emission near center Shifted absorption (weak)	$4 \times 10^{-4}$	-	Yes
(3)	M8.1 flare + eruption	Emission near center (two step)	$4 \times 10^{-4}$ $2 \times 10^{-4}$	-	No ?
(4)	M1.1 flare + coronal rain ?	Emission near center Redshifted absorption	$1.5 \times 10^{-4}$	$0.5 \times 10^{-4}$	Yes
(5)	Filament eruption	Emission near center Red and blue Shifted absorption	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	Yes
(6)	Filament eruption + two ribbon	Emission near center Red and blue Shifted absorption	$1 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$	Yes
(7)	Filament eruption + two ribbon	Emission near center Red and blue Shifted absorption	$1 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-4}$	Yes
(8)	Prominence eruption	Shifted emission	$3 \times 10^{-4}$	-	Yes
(9)	Prominence eruption	Shifted emission (two step)	$2 \times 10^{-4}$ $1 \times 10^{-4}$	-	Yes

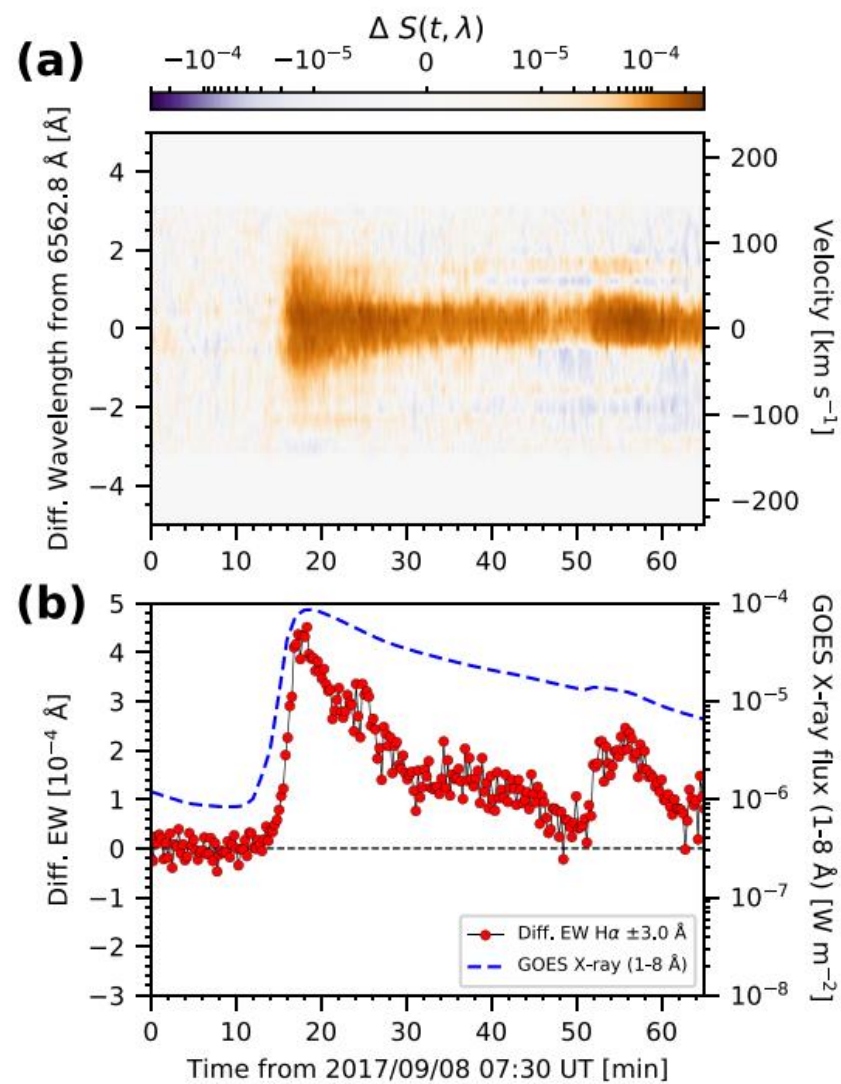
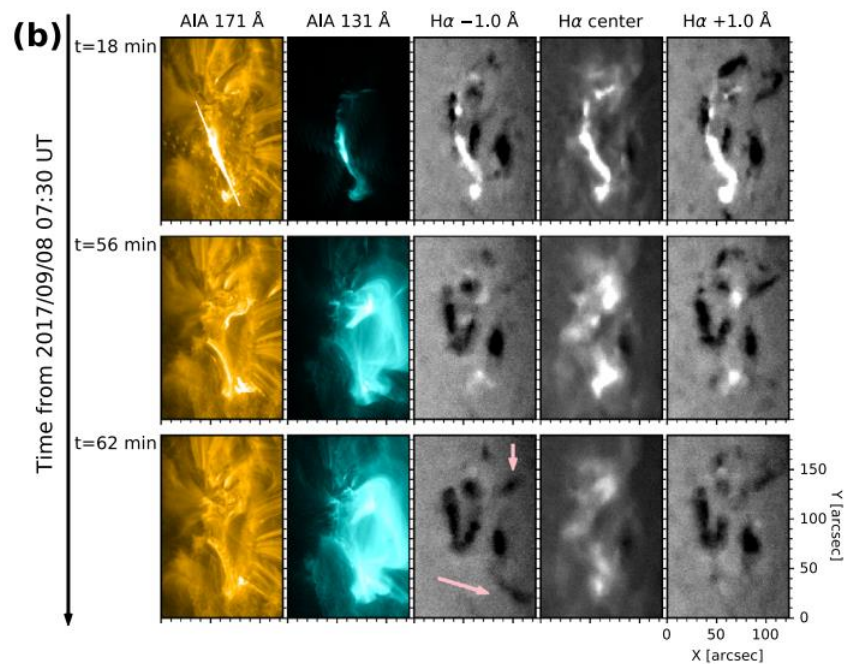
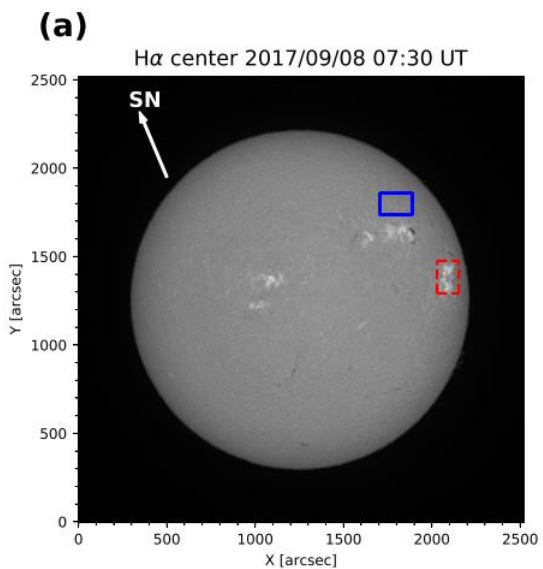
# 2017/4/2 C8.0フレア + サージ (噴出現象)



# 2017/4/2 M5.3フレア+プラズマ噴出

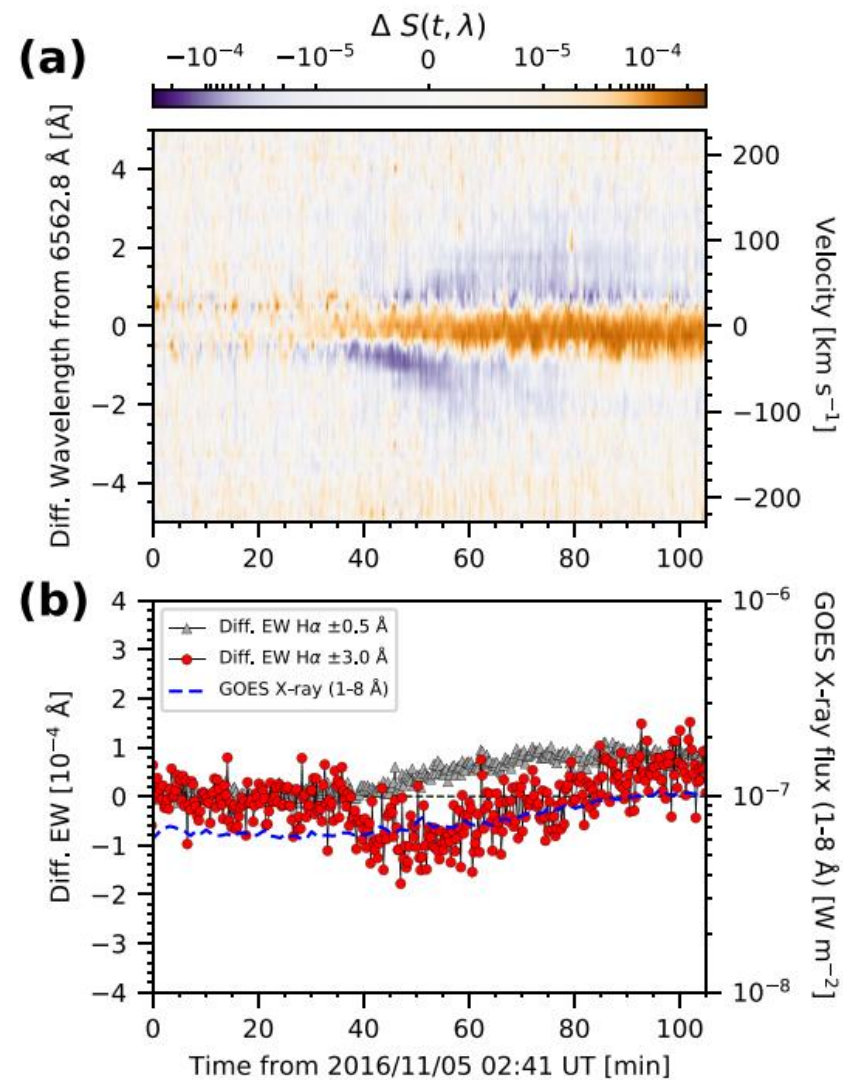
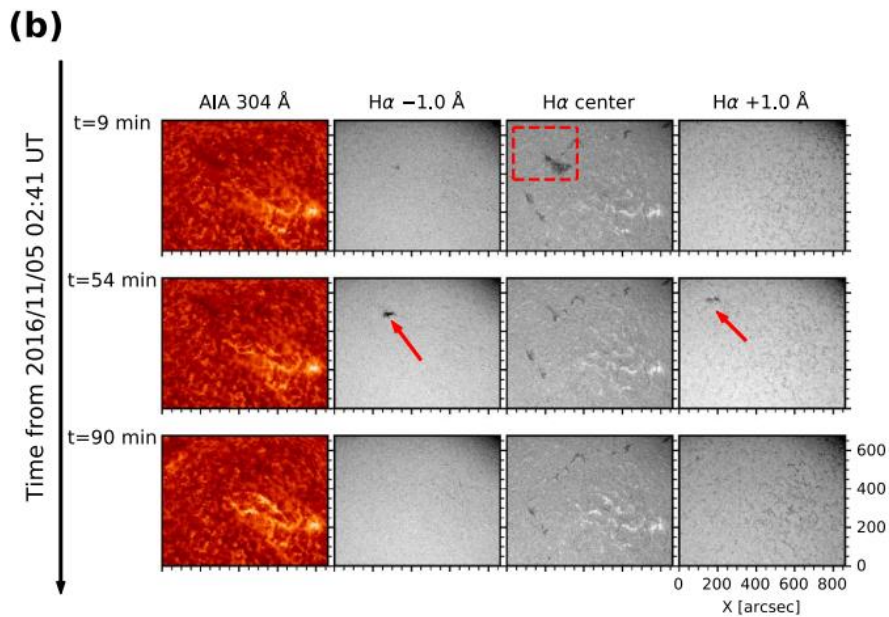
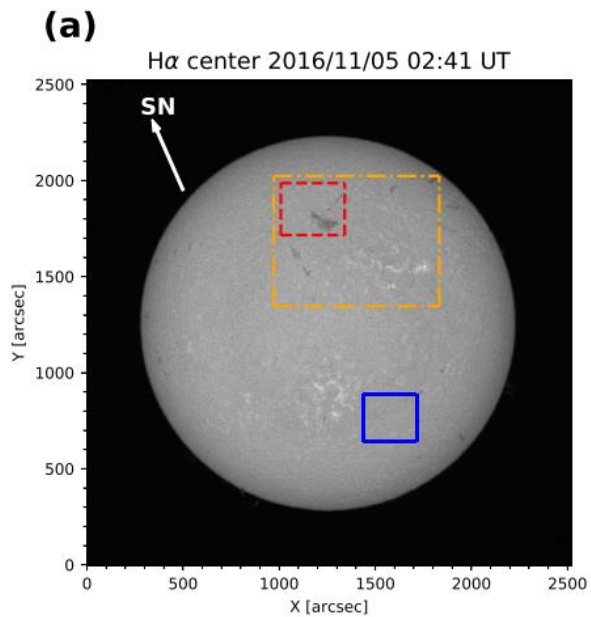


# 2017/4/2 M5.3フレア+プラズマ噴出

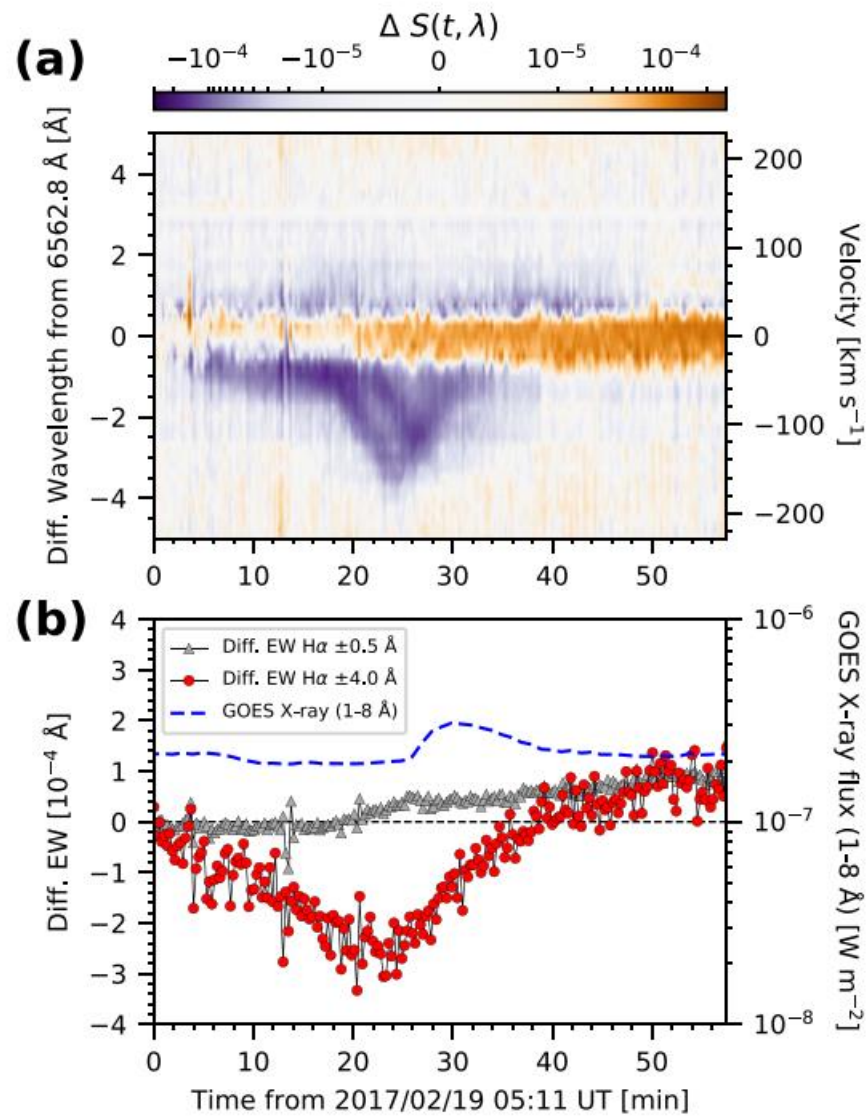
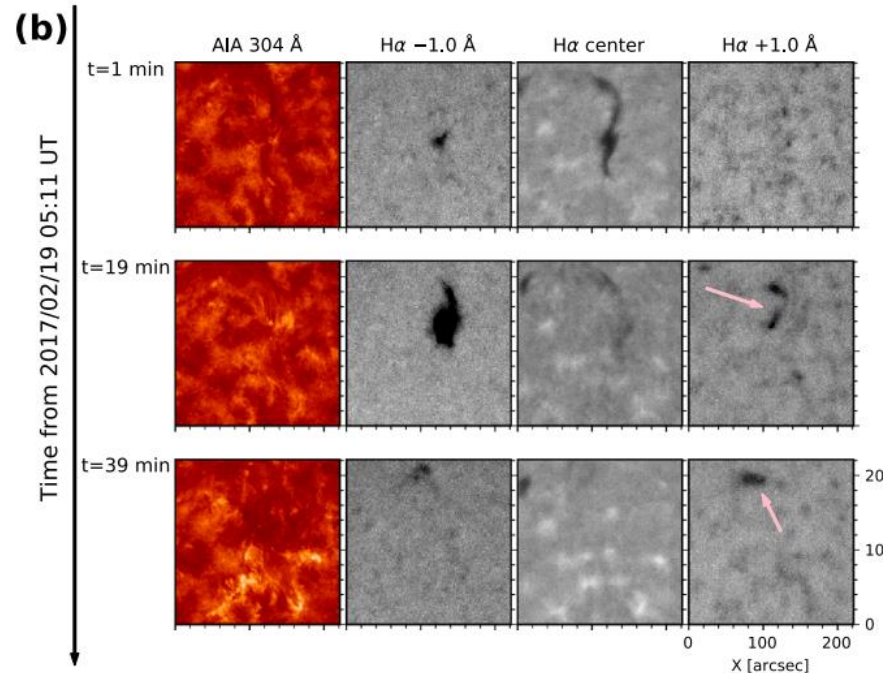
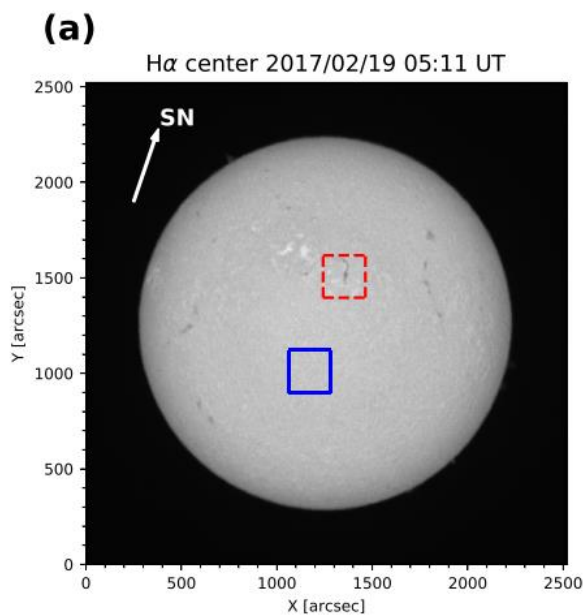




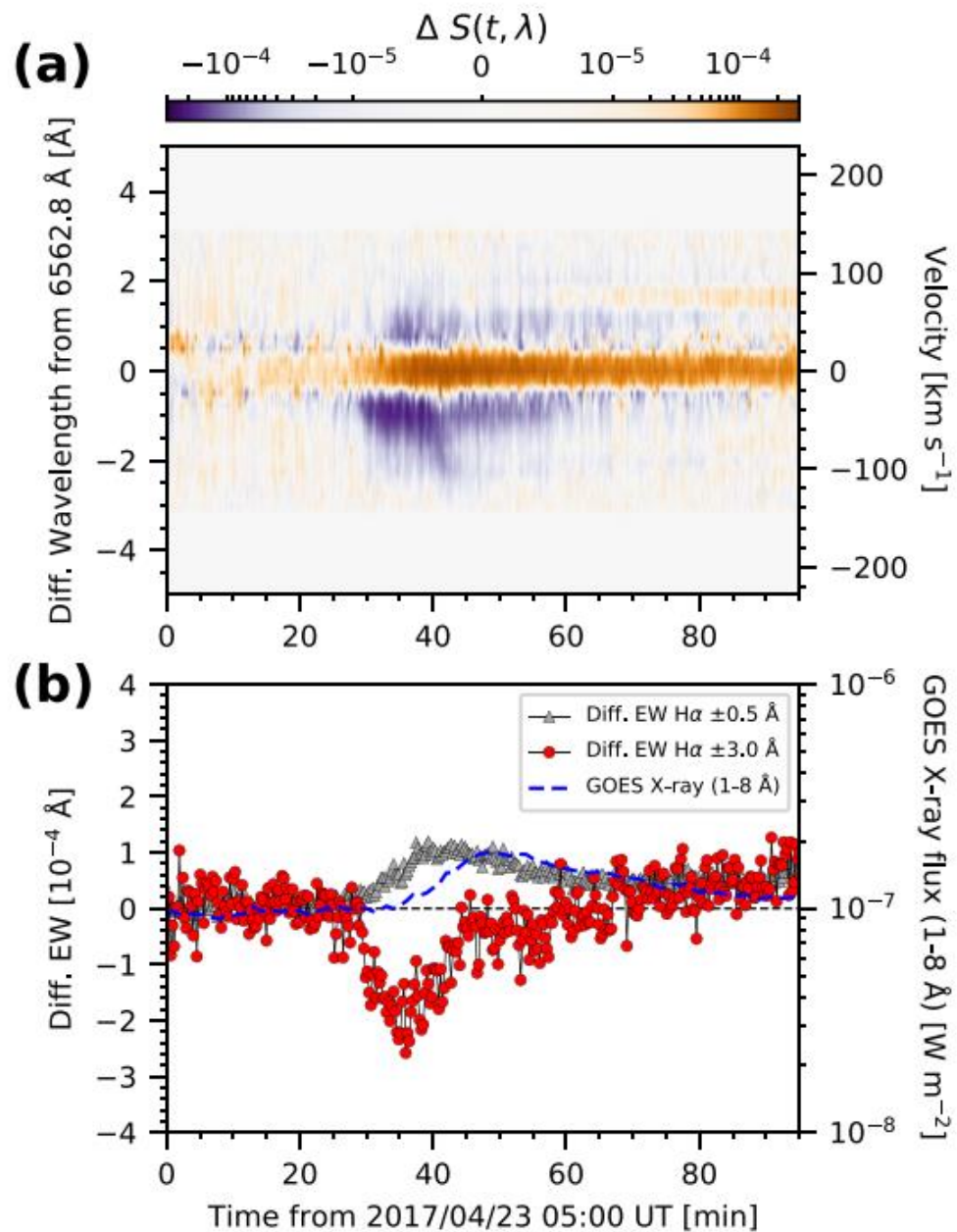
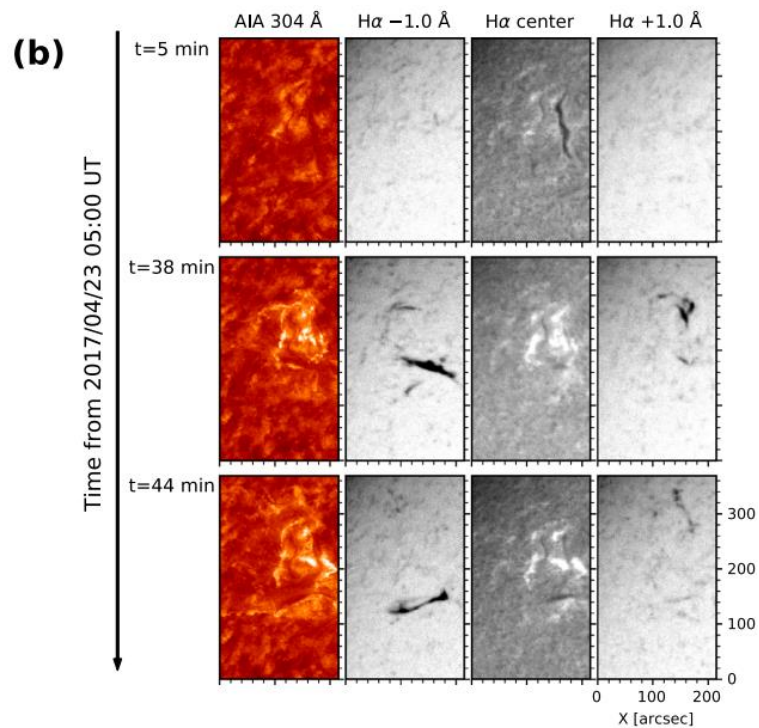
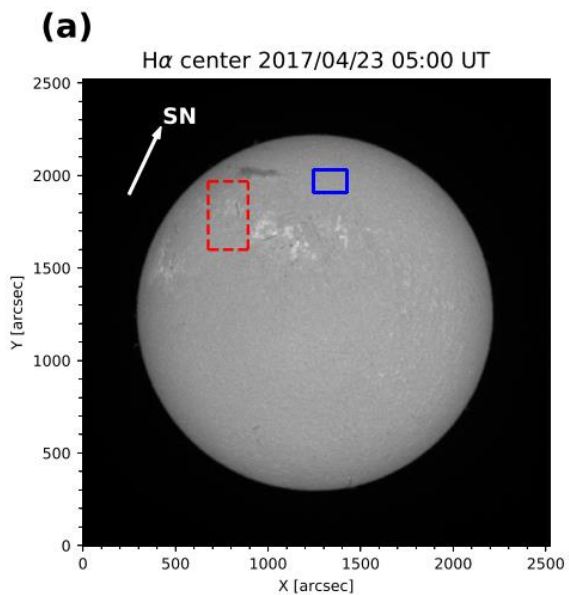
# 2016/11/5 フィラメント噴出



# 2017/2/19 フィラメント噴出+ツーリボンフレア



# 2017/4/23 フィラメント噴出+ツーリボンフレア



# 2021/5/5 太陽面外へのプラズマ噴出

