

理系大学生のための  
太陽研究最前線体験ツアー  
2023年3月31日

# 宇宙天気と宇宙気候 太陽活動を予測する

名古屋大学宇宙地球環境研究所

名古屋大学理学研究科

太陽宇宙環境物理学(SST)研究室

草野完也

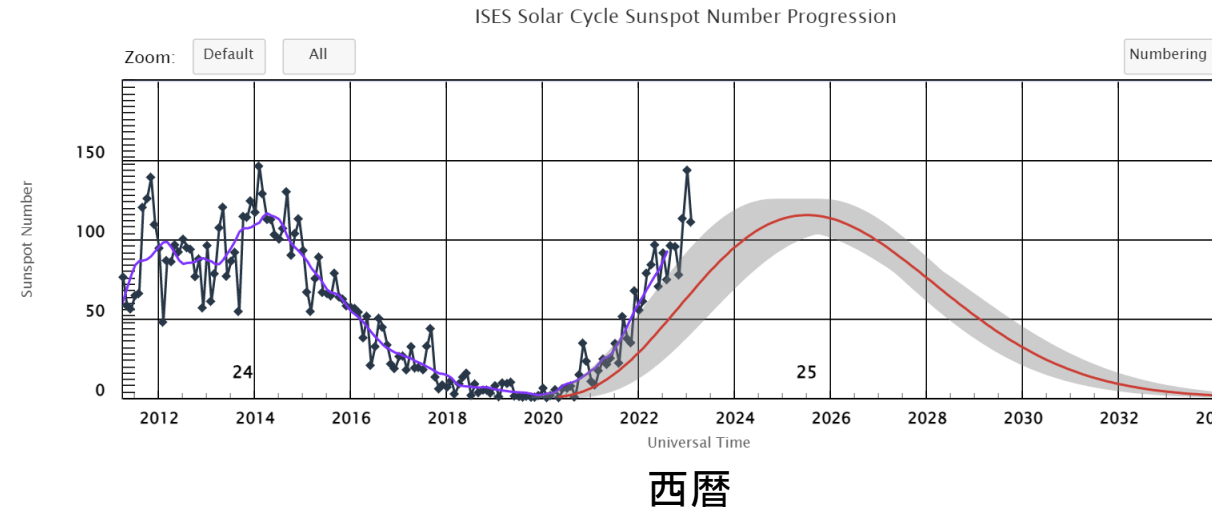
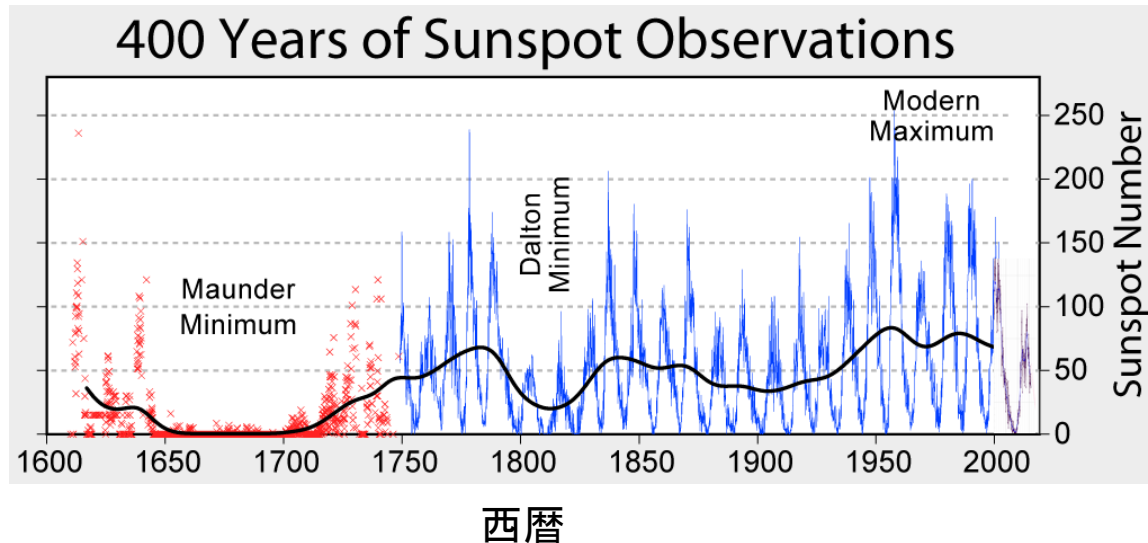
# 宇宙天気と宇宙気候

## ■ 宇宙天気 (Space Weather)

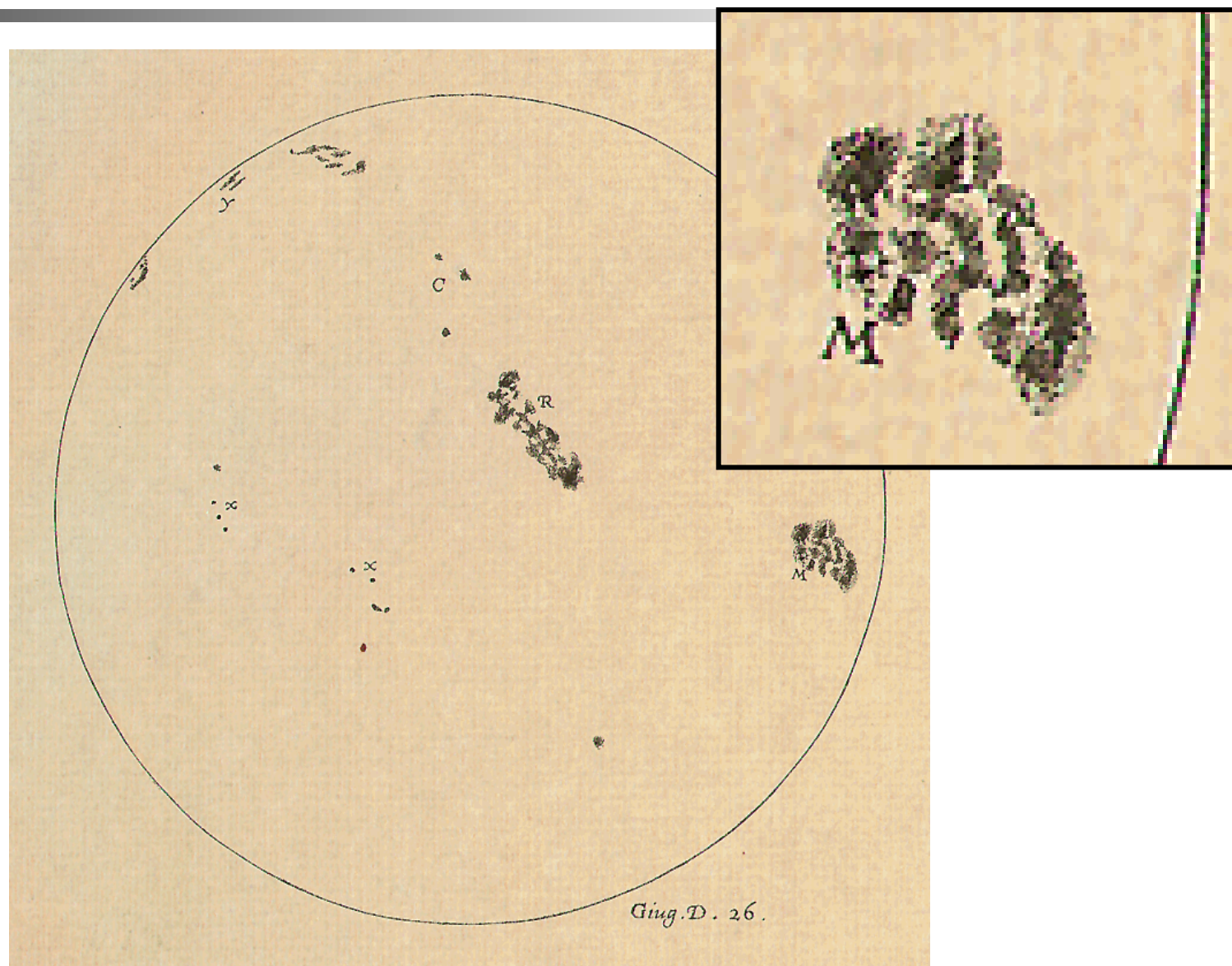
- 短期的な太陽活動(特に、フレア及びコロナ質量放出)に伴って発生する地球と地球周辺宇宙空間の環境変動:オーロラ嵐、磁気嵐、プロトンイベントなど

## ■ 宇宙気候 (Space Climate)

- 長期的な太陽活動の変化(黒点周期変動)に伴って発生する地球と地球周辺宇宙空間の環境変動:気候変動、大気成分変化、大気散逸など

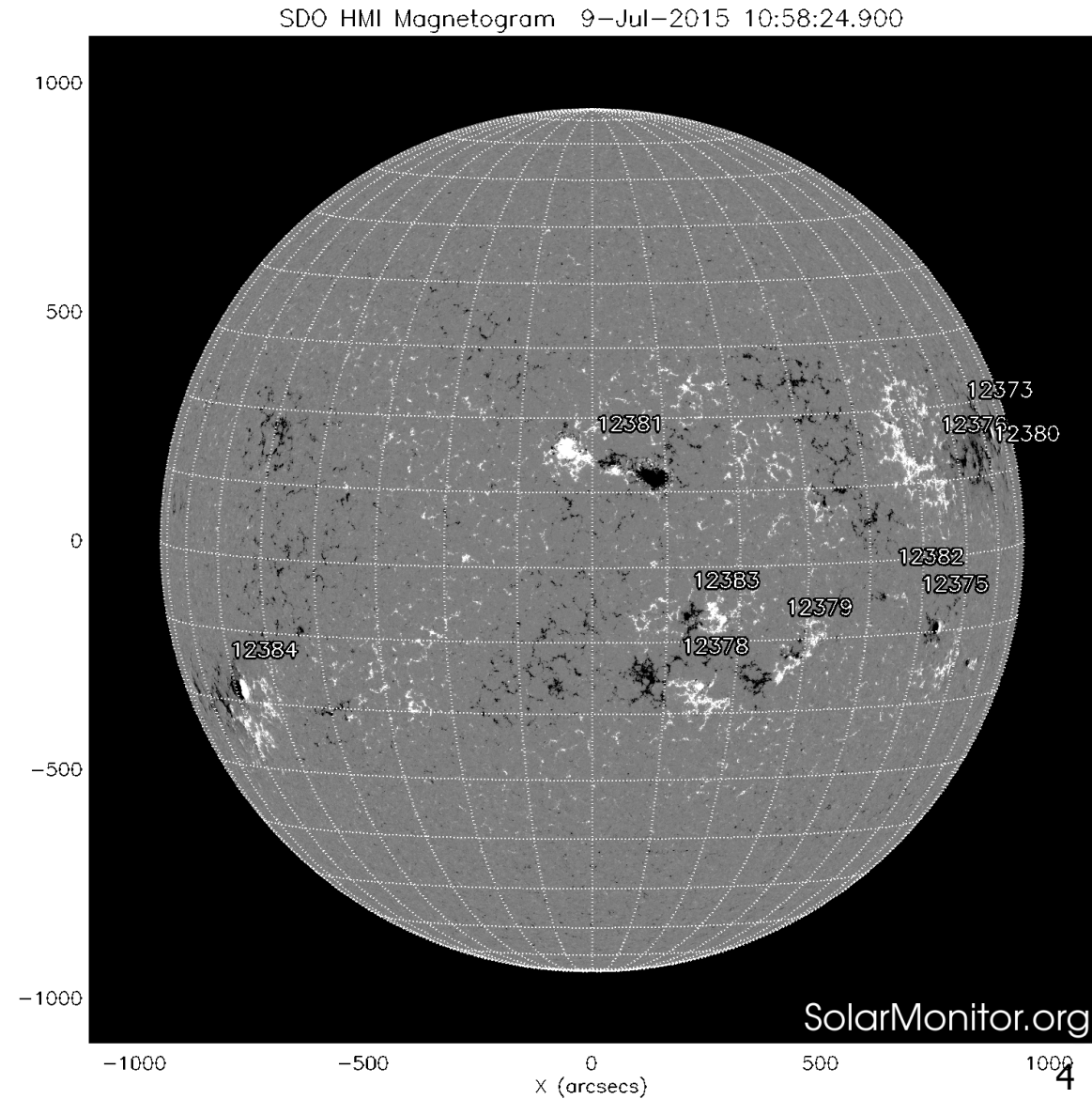


# Galileo's sketches

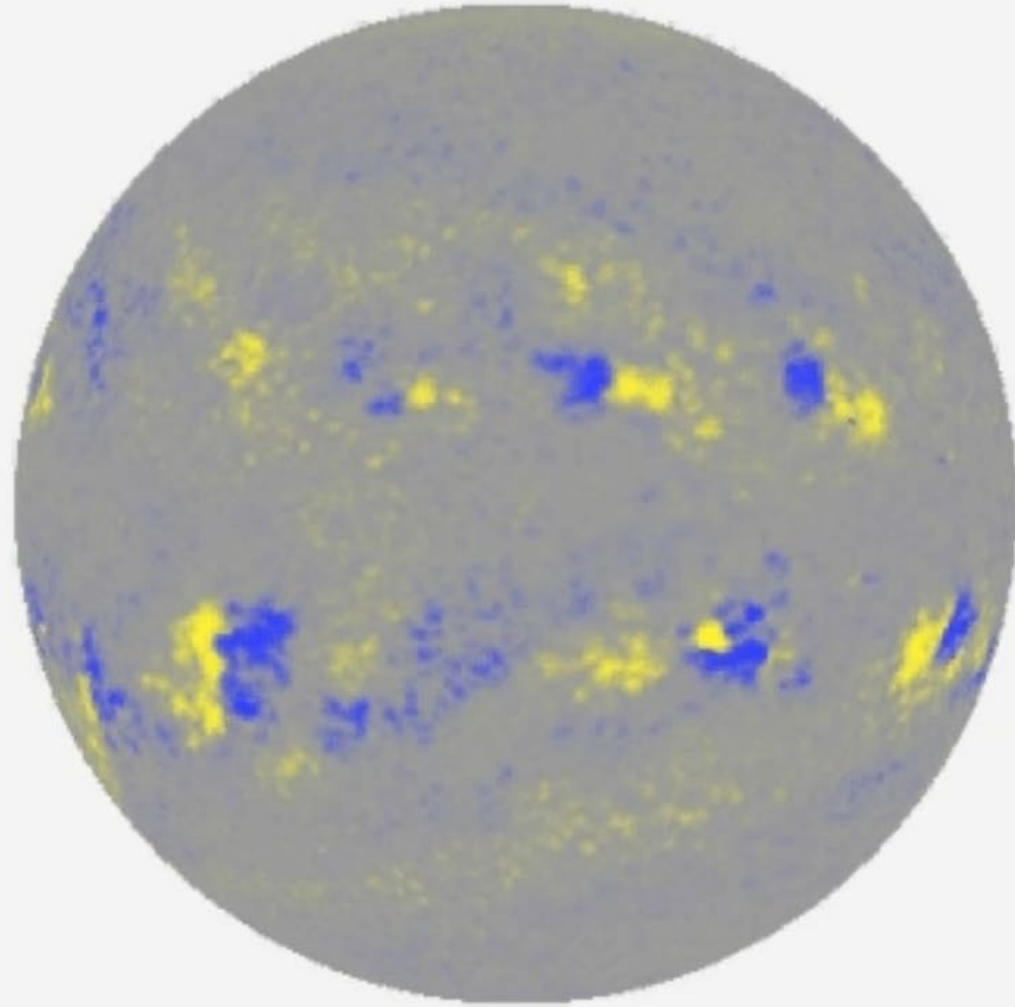


1613年6月~7月

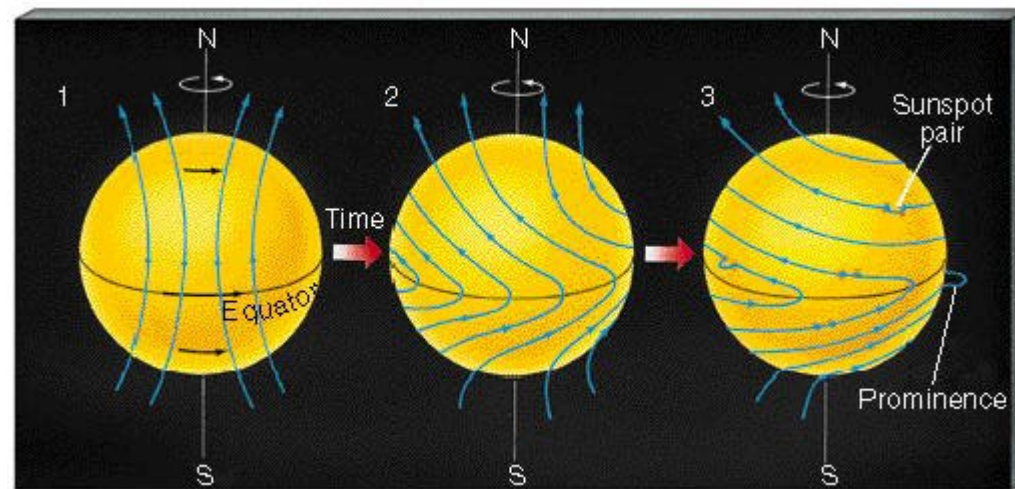
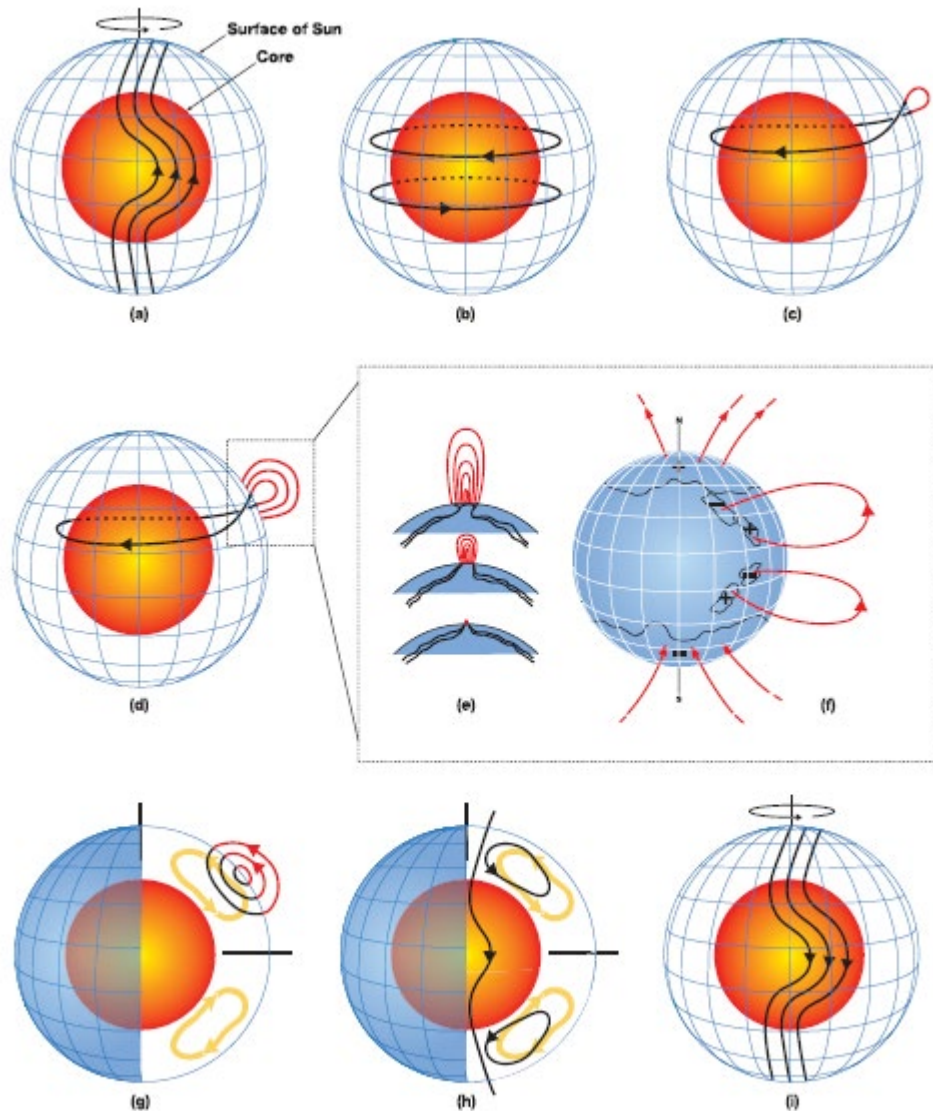
# Solar magnetic field



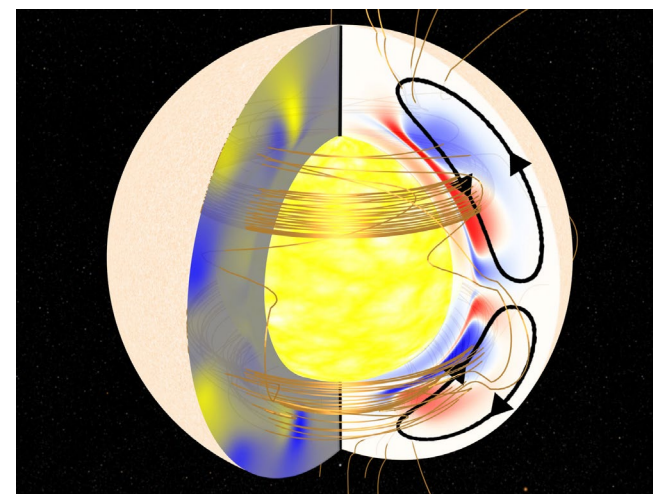
# 過去30年間の太陽磁場(黒点)活動



# 太陽周期を説明する磁束輸送ダイナモモデル

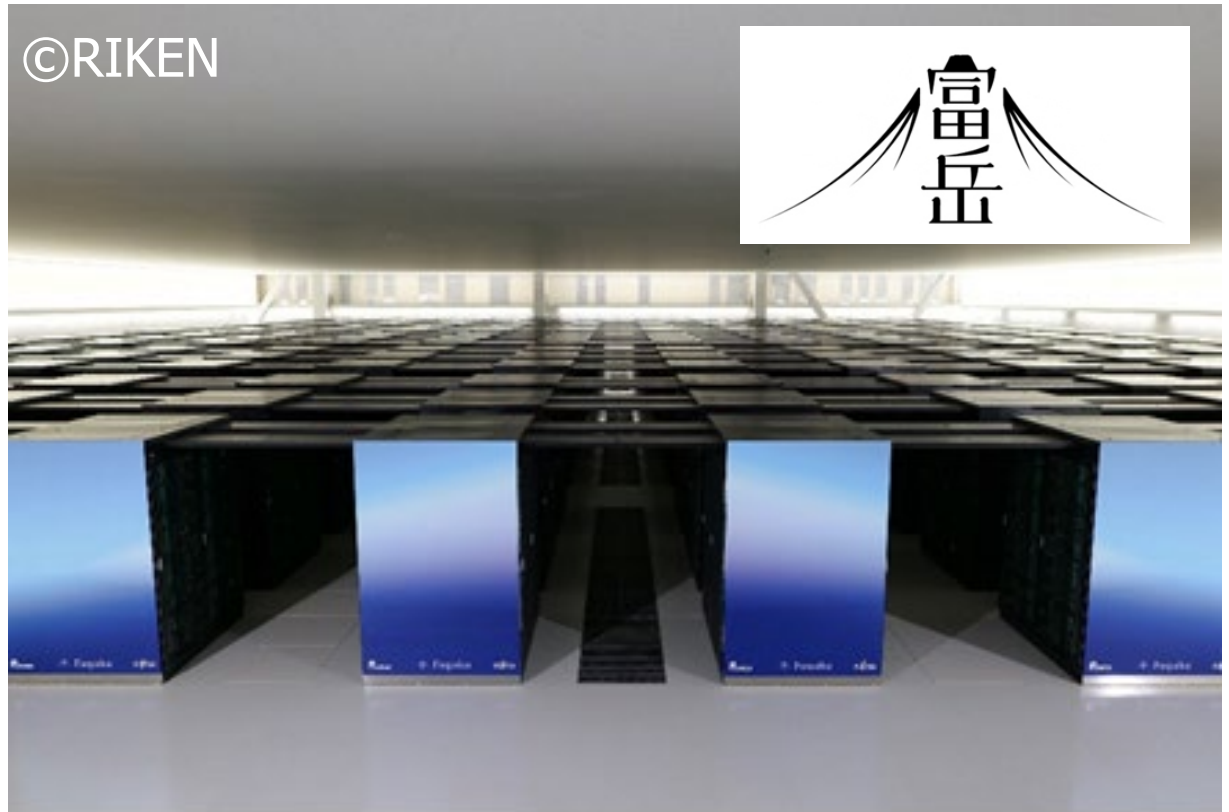
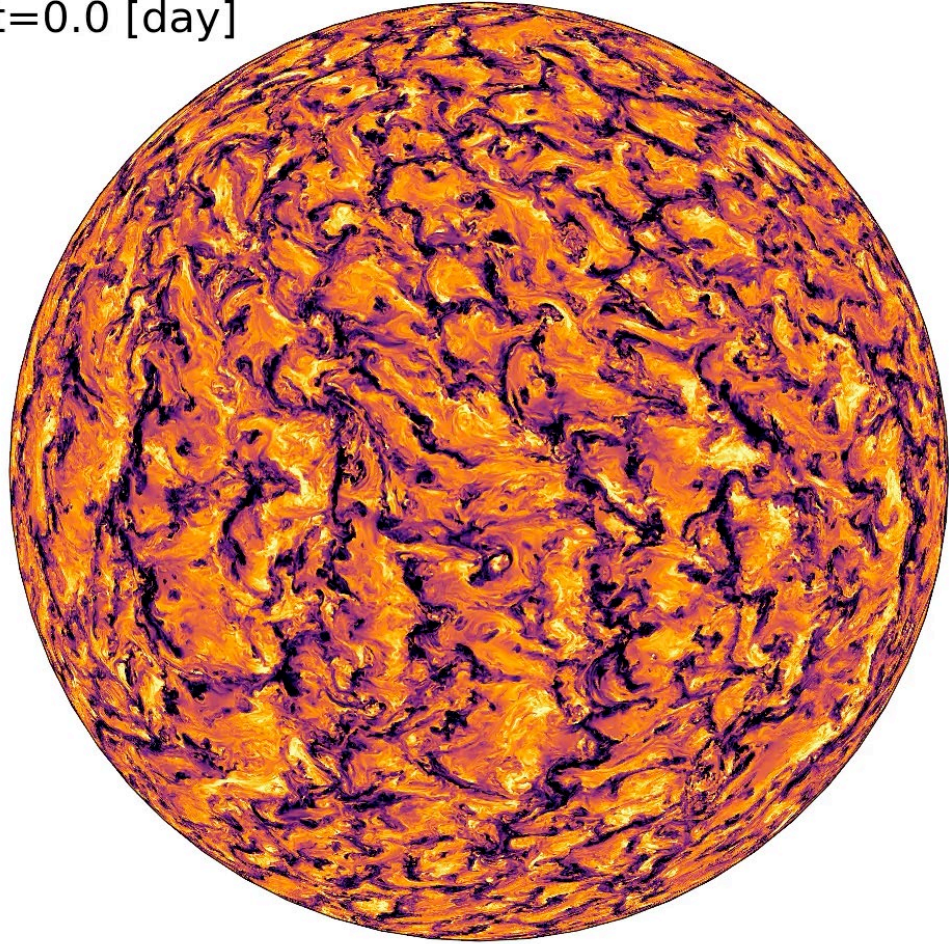


Sun's differential rotation



# 太陽対流層シミュレーション

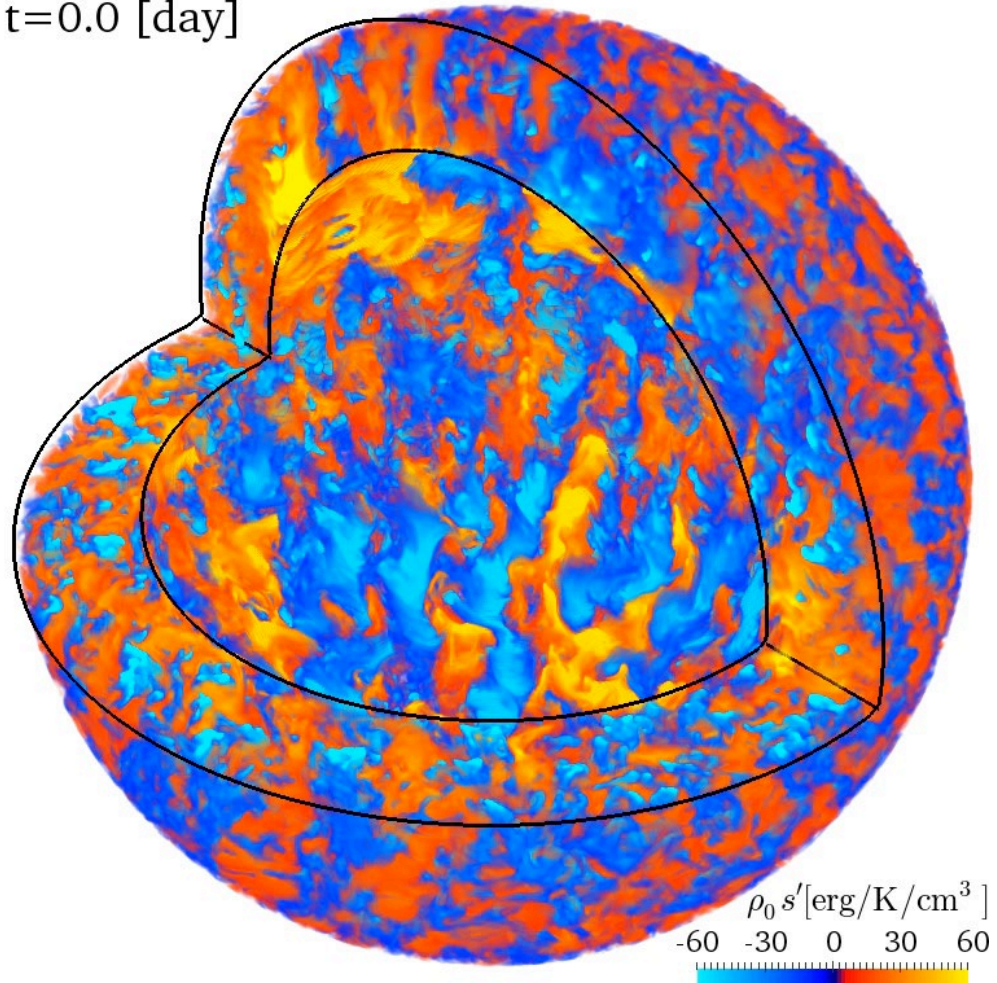
t=0.0 [day]



Hotta and Kusano 2021 Nature Ast.

# 太陽対流層シミュレーション

t=0.0 [day]

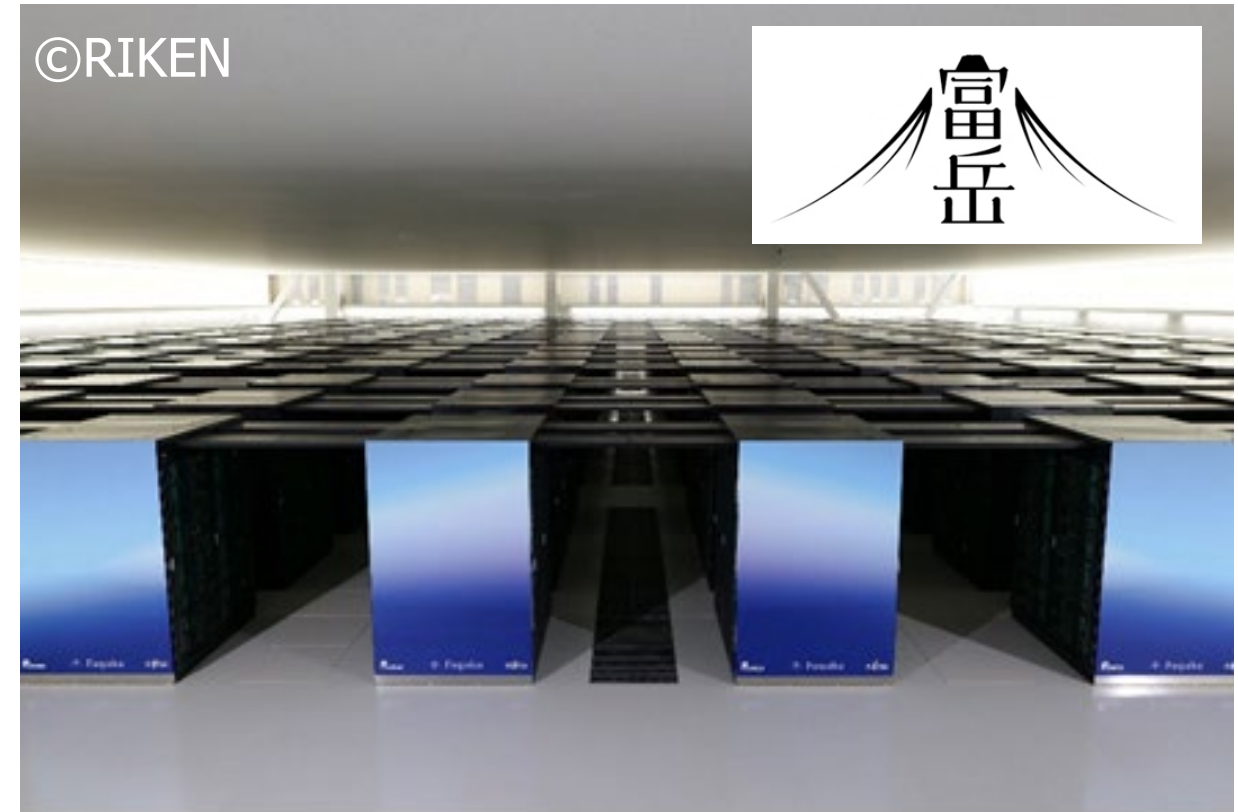
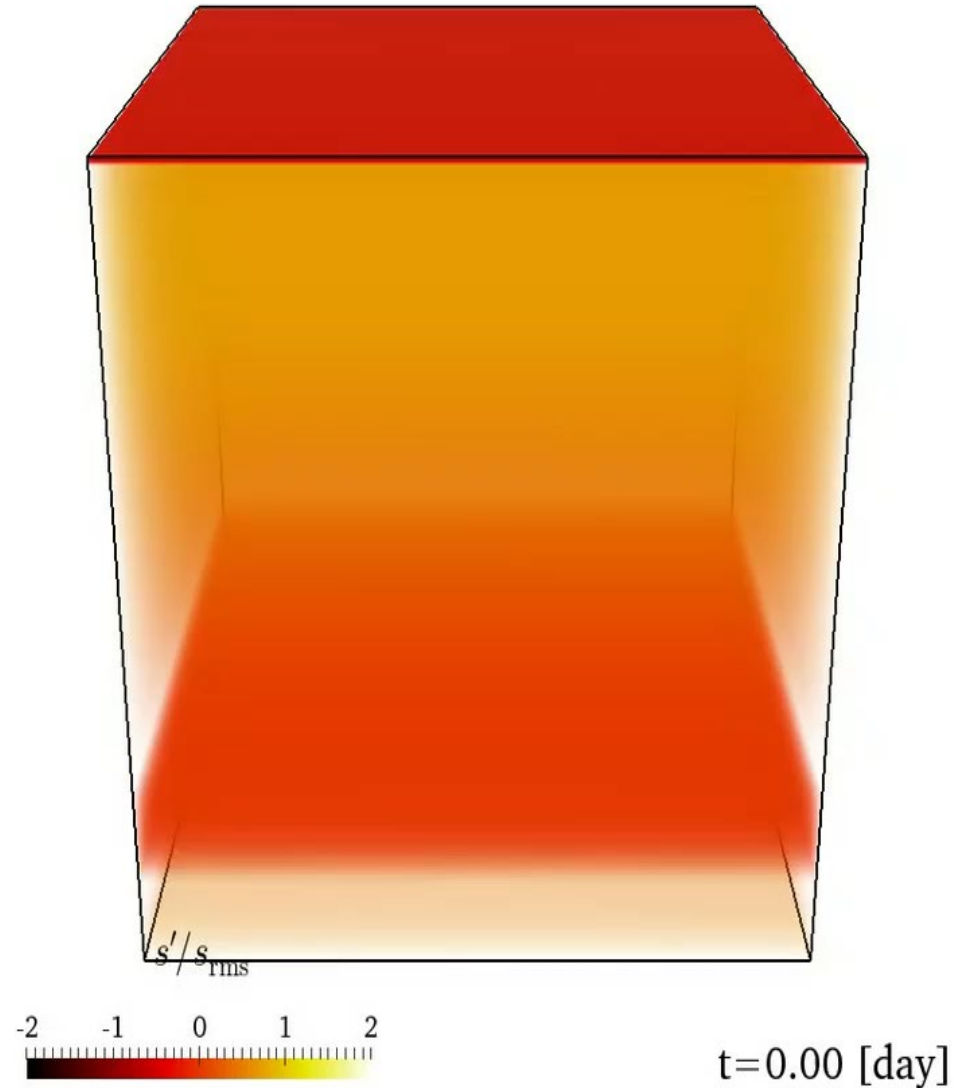


©RIKEN

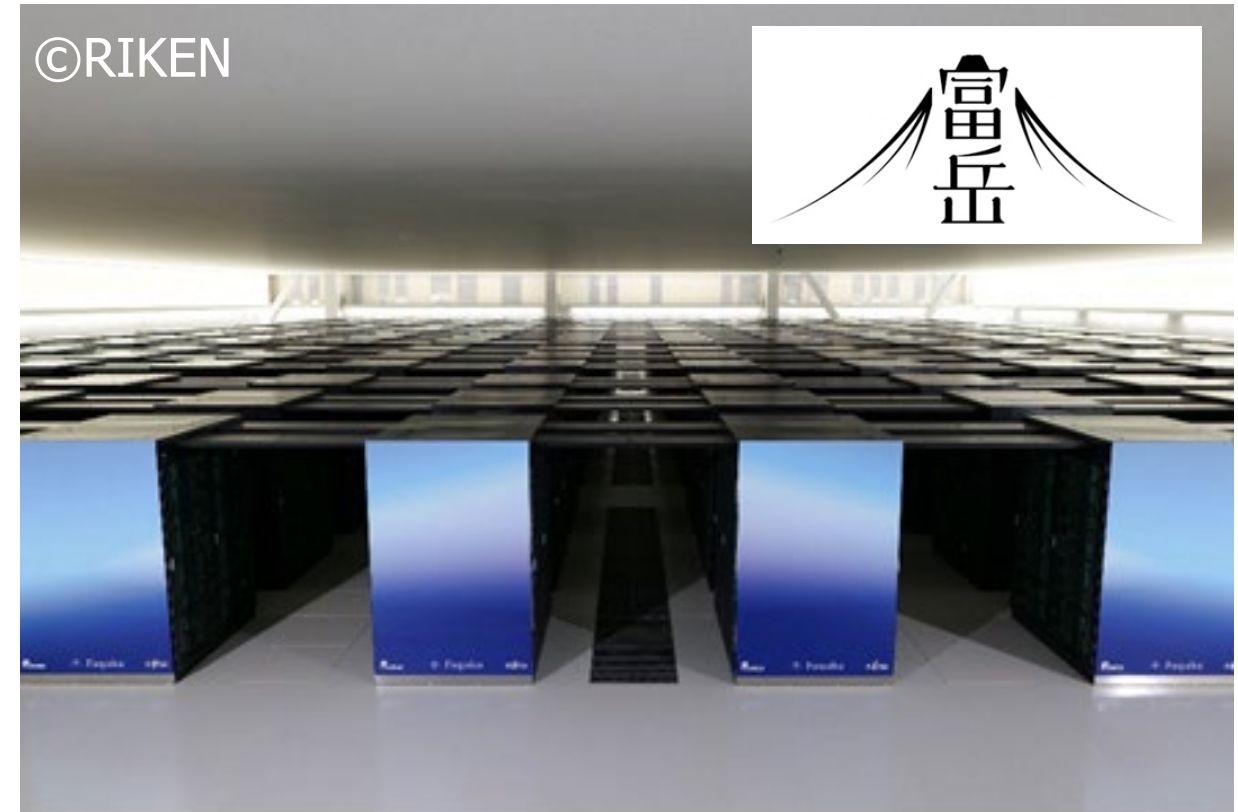
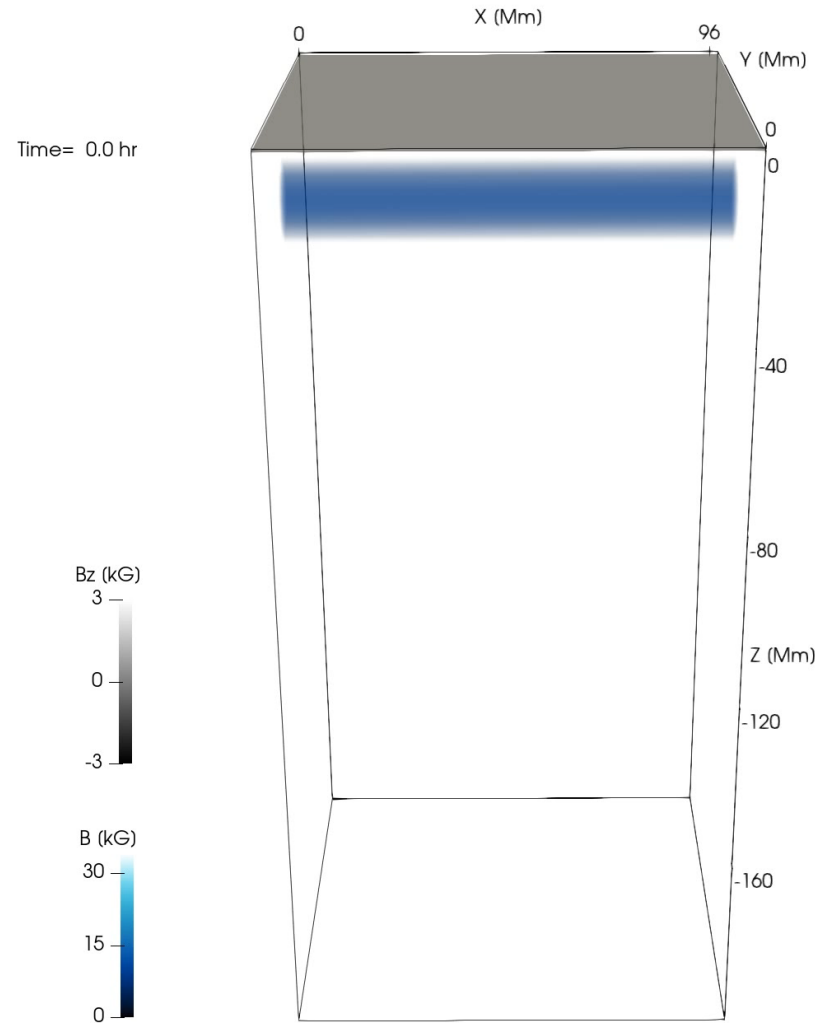




# 太陽対流層シミュレーション

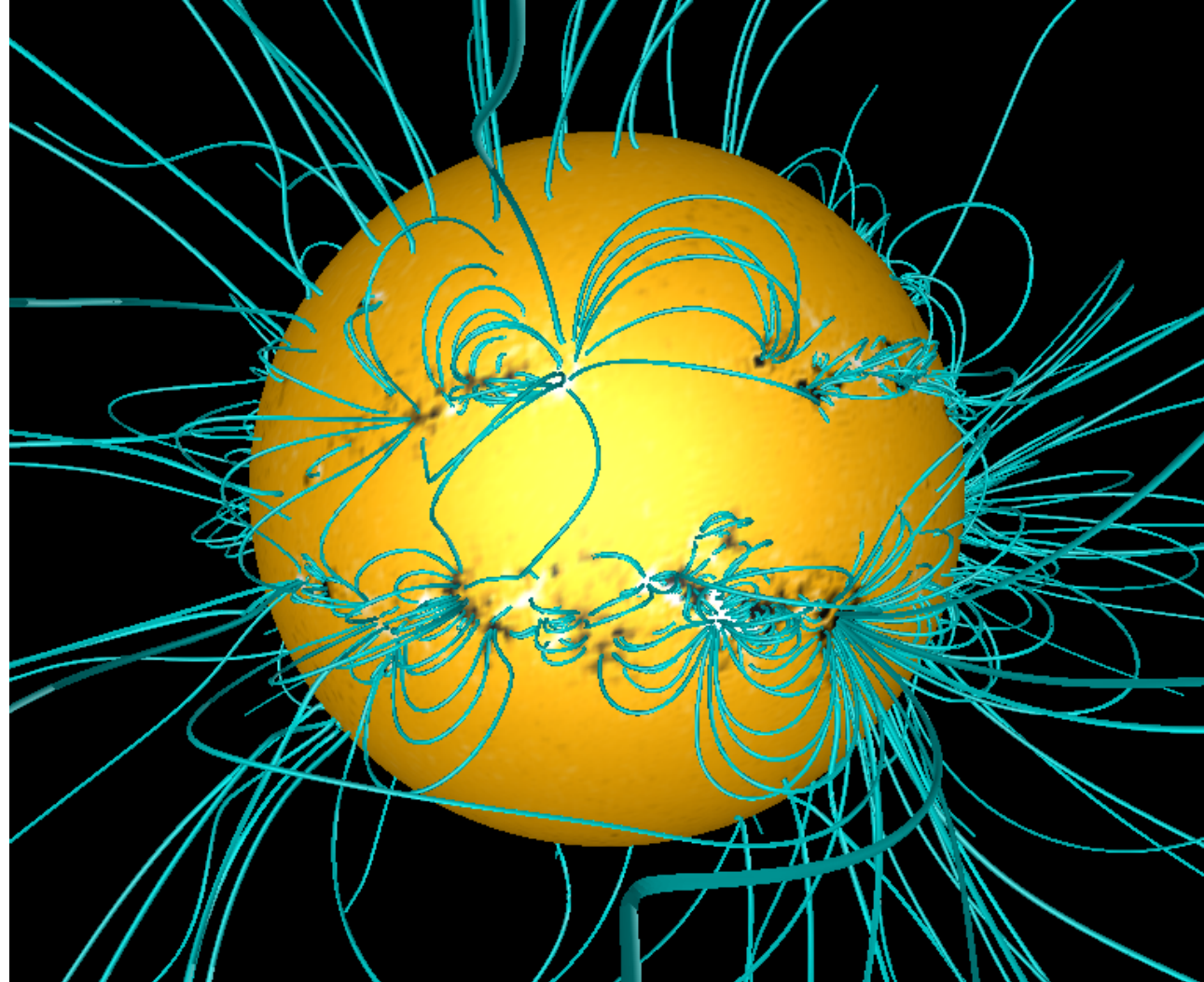


# 太陽黒点形成シミュレーション



# Coronal magnetic field

---



# 太陽面爆発

## 太陽系最大級の爆発現象

### ■ 太陽フレア

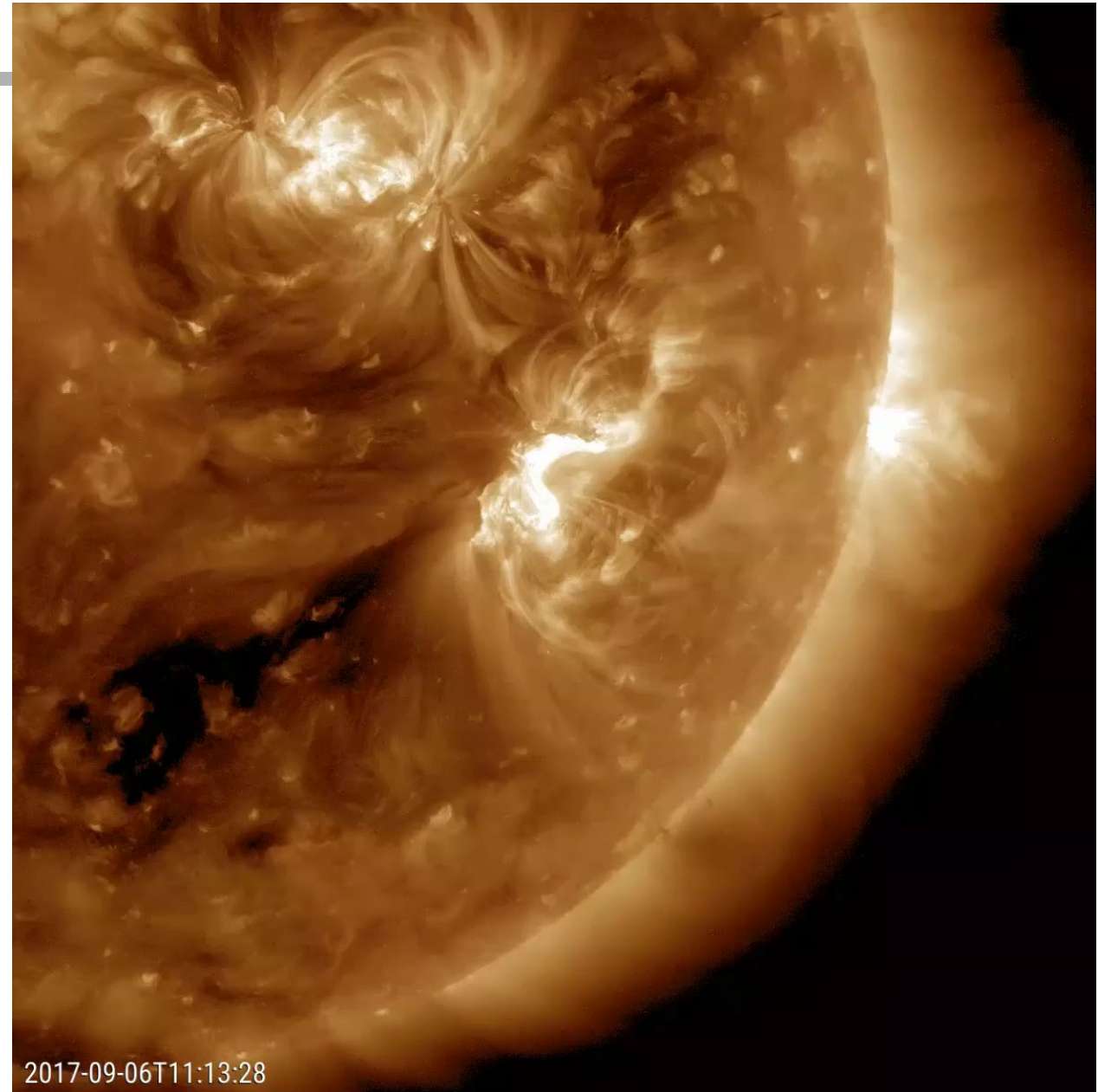
- 突発的で強力な電磁波放射  
(電波～ $\gamma$ 線)
- 高エネルギー粒子

### ■ フィラメント噴出

- フィラメント(プロミネンス)の突発的噴出

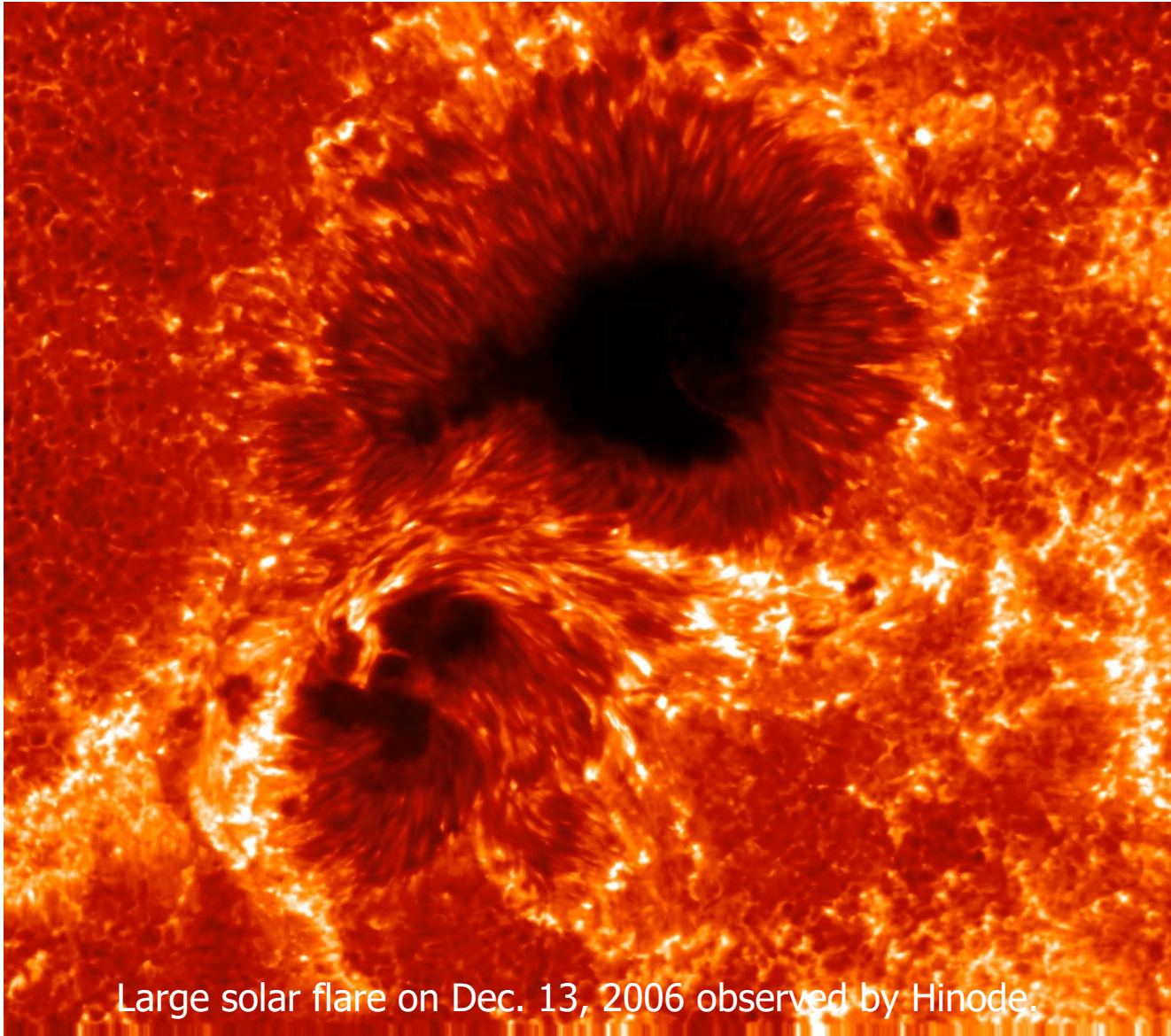
### ■ コロナ質量放出:CME

- コロナプラズマの突発的放出

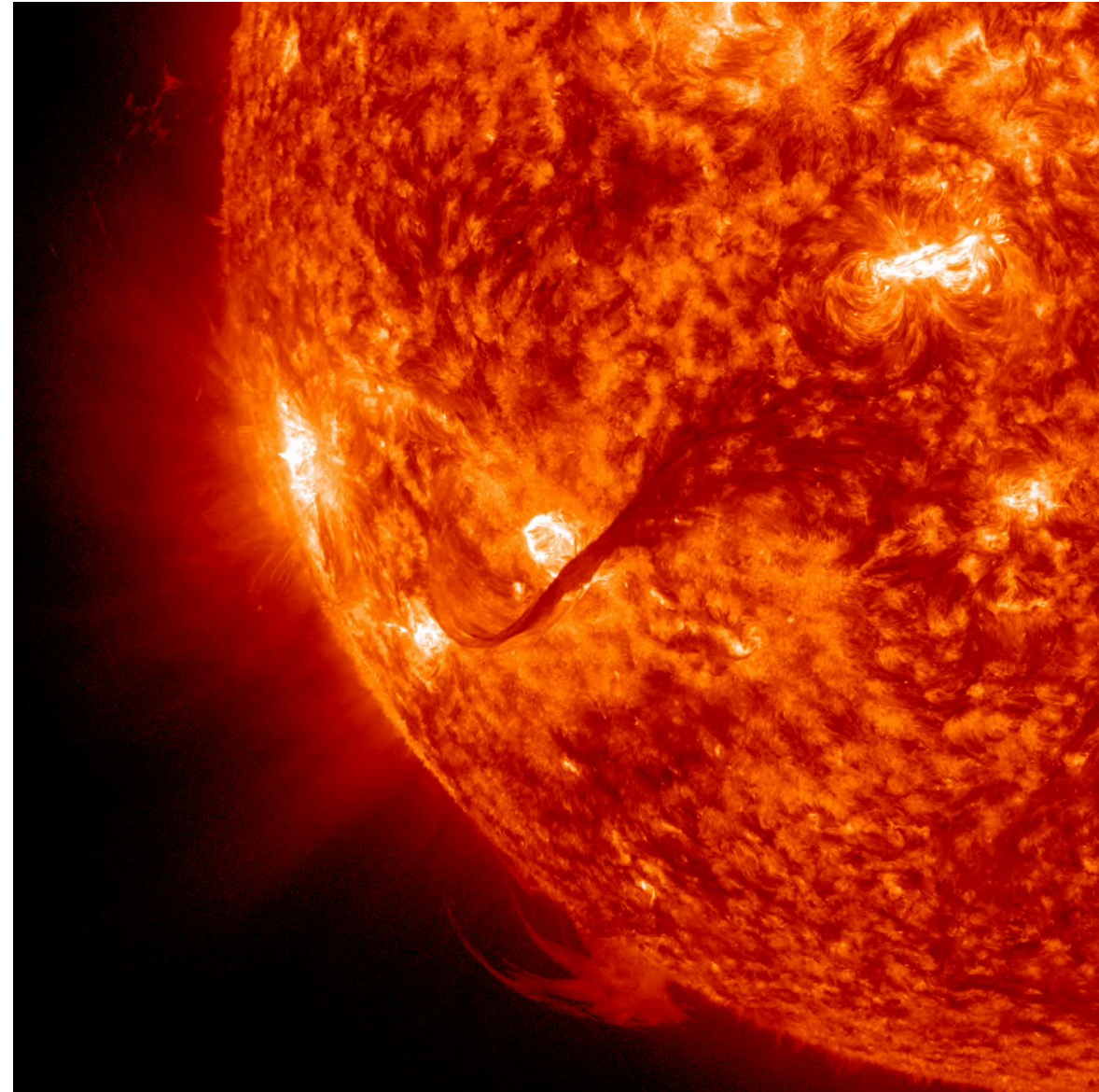


# Solar Flare and Eruption

---

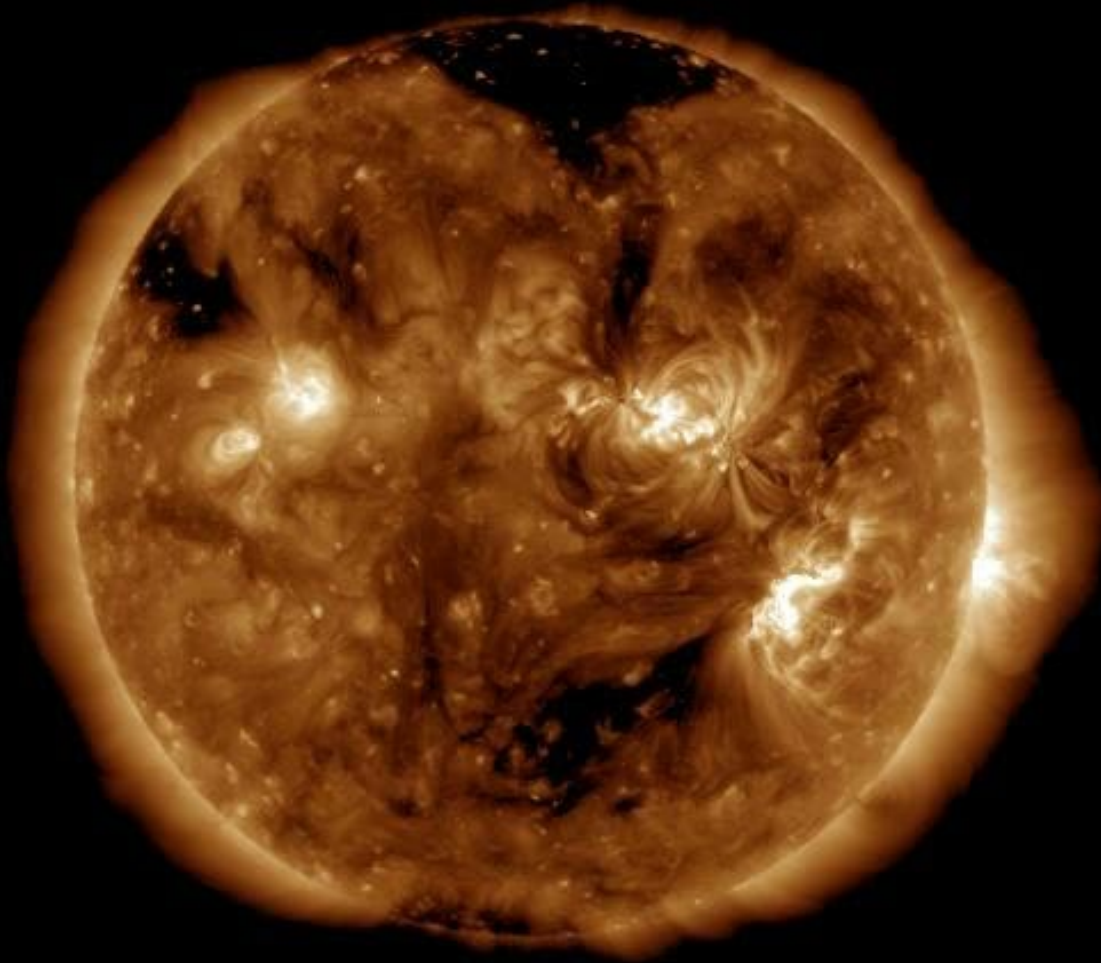


Large solar flare on Dec. 13, 2006 observed by Hinode.



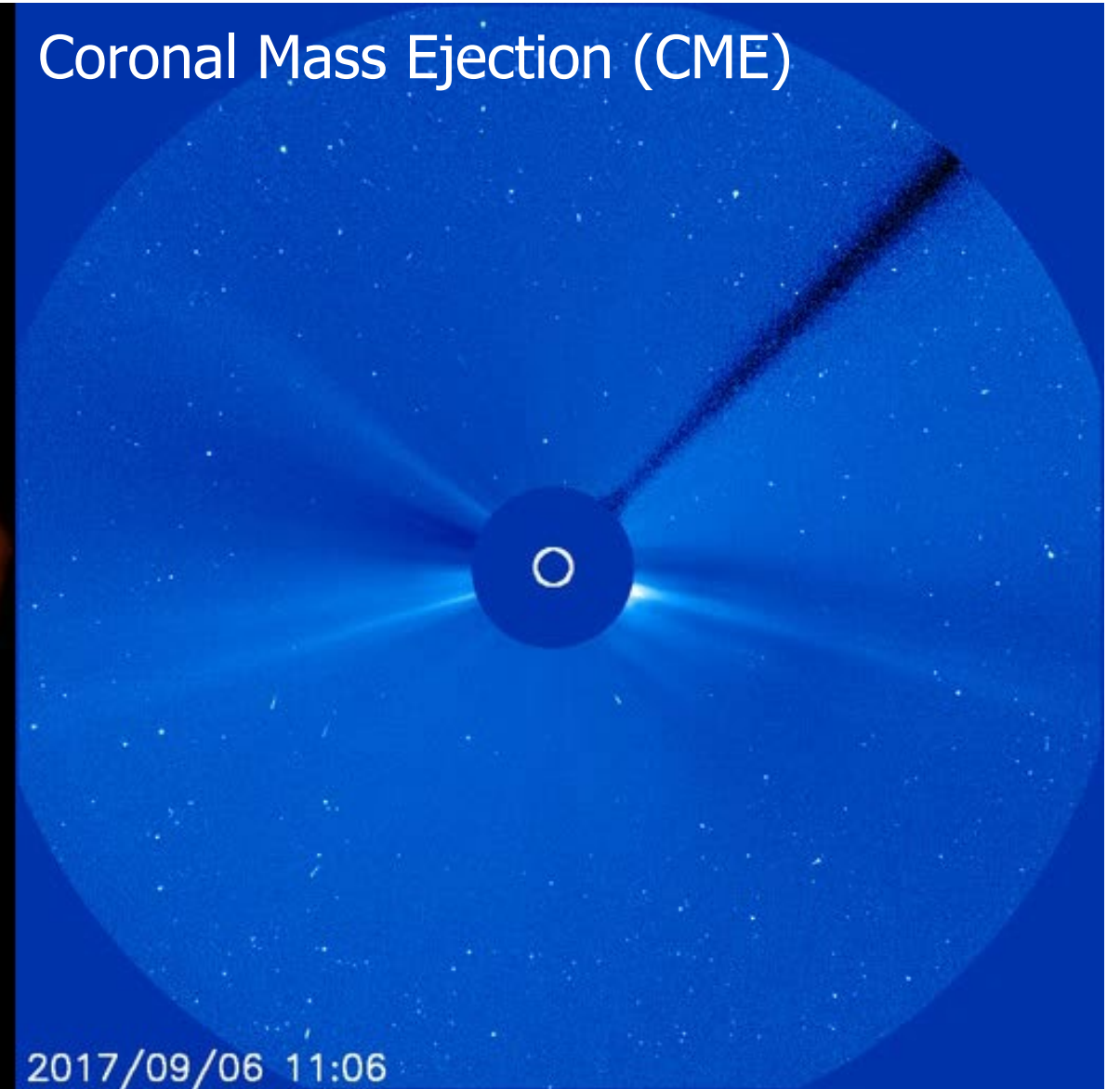
# Solar Flare and CME

Solar flare



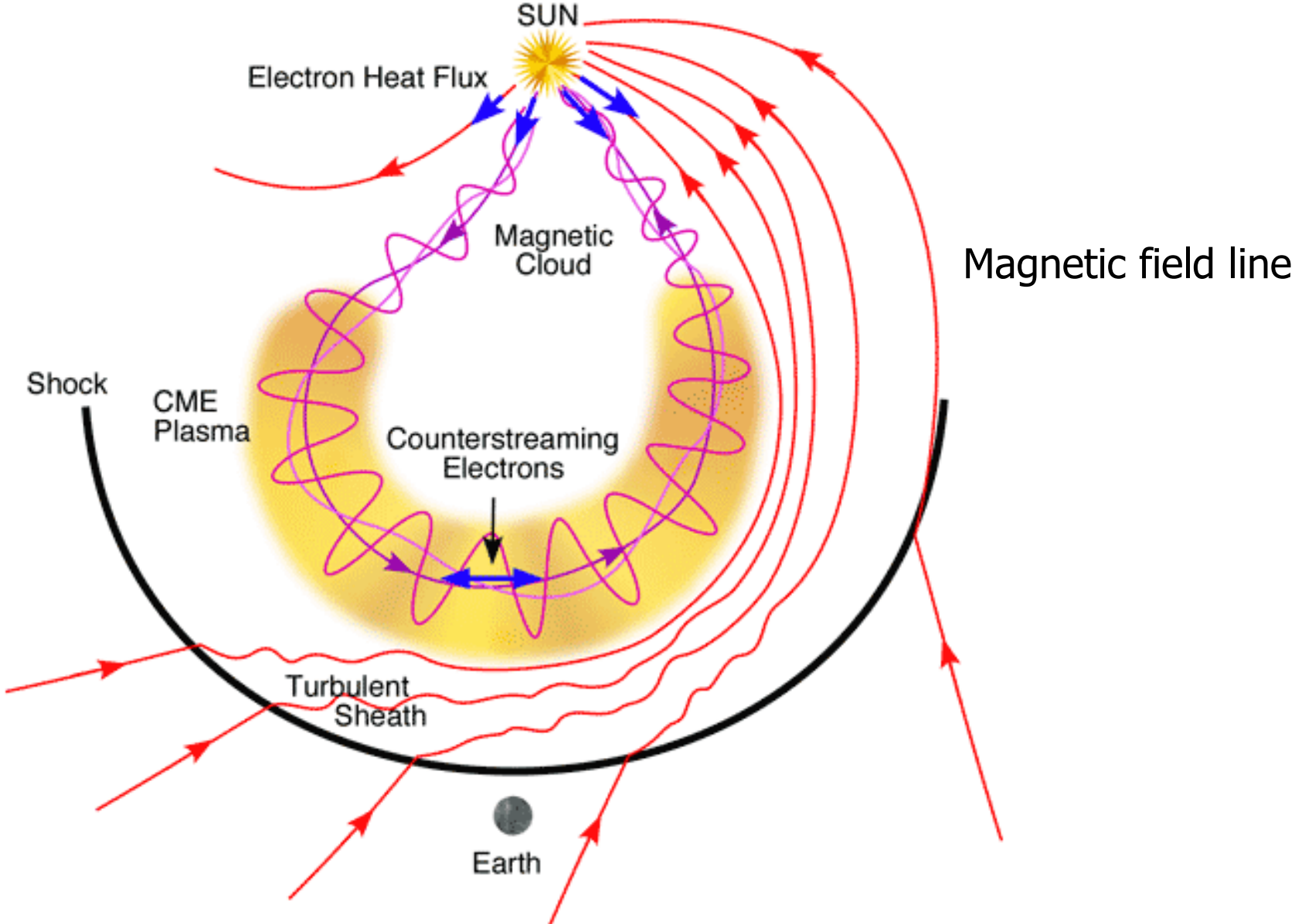
SDO/AIA 193: 2017/09/06 11:00:17

Coronal Mass Ejection (CME)

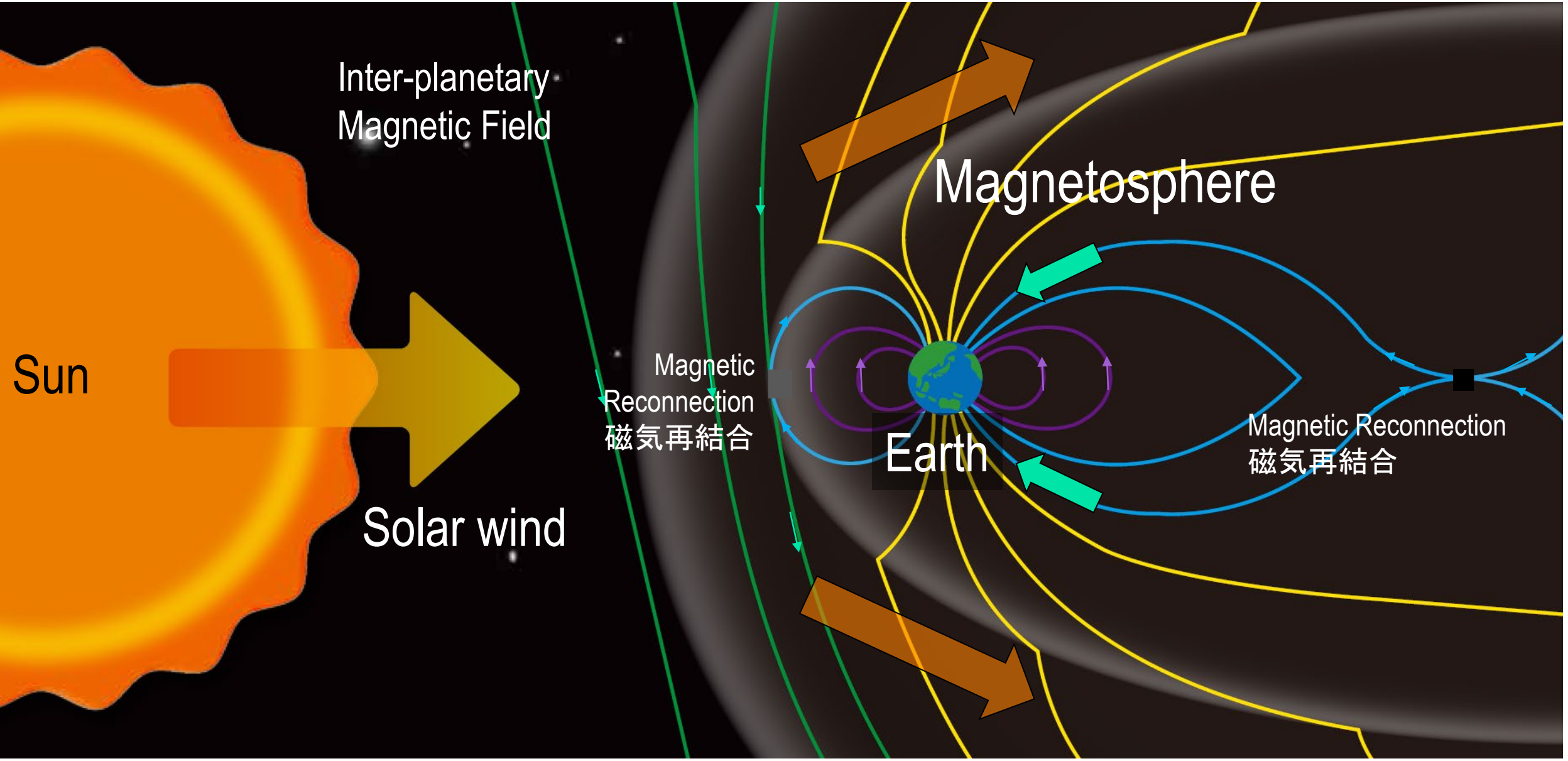


2017/09/06 11:06

# Interplanetary Coronal Mass Ejection (ICME)



# Solar Wind-Magnetosphere Interaction



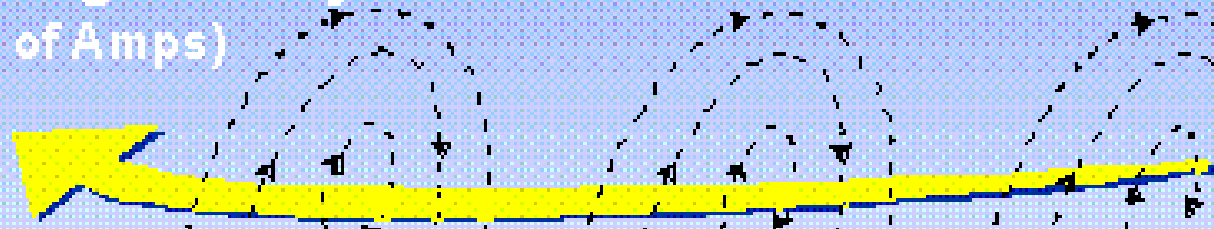




[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Polarlicht\\_2.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Polarlicht_2.jpg)

# Geomagnetically Induced Currents (GICs)

Fluctuating Electrojet  
(Millions of Amps)



Magnetic Field from electrojet induces voltage potential on surface of earth

GIC enters power system through ground connections

Voltage Gradient



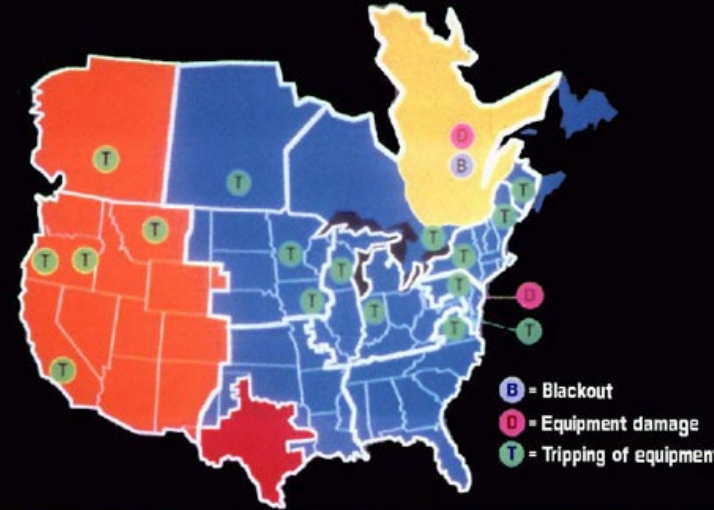
Electric potential induced on earth surface up to 6 Volts/km causes Geomagnetically-Induced Currents



Coastal areas cause abrupt transition in conductivity between resistive rock geology and seawater

Large currents can be induced to flow through highly conductive seawater

POWER SYSTEM EVENTS DUE TO SMD MARCH 13, 1989



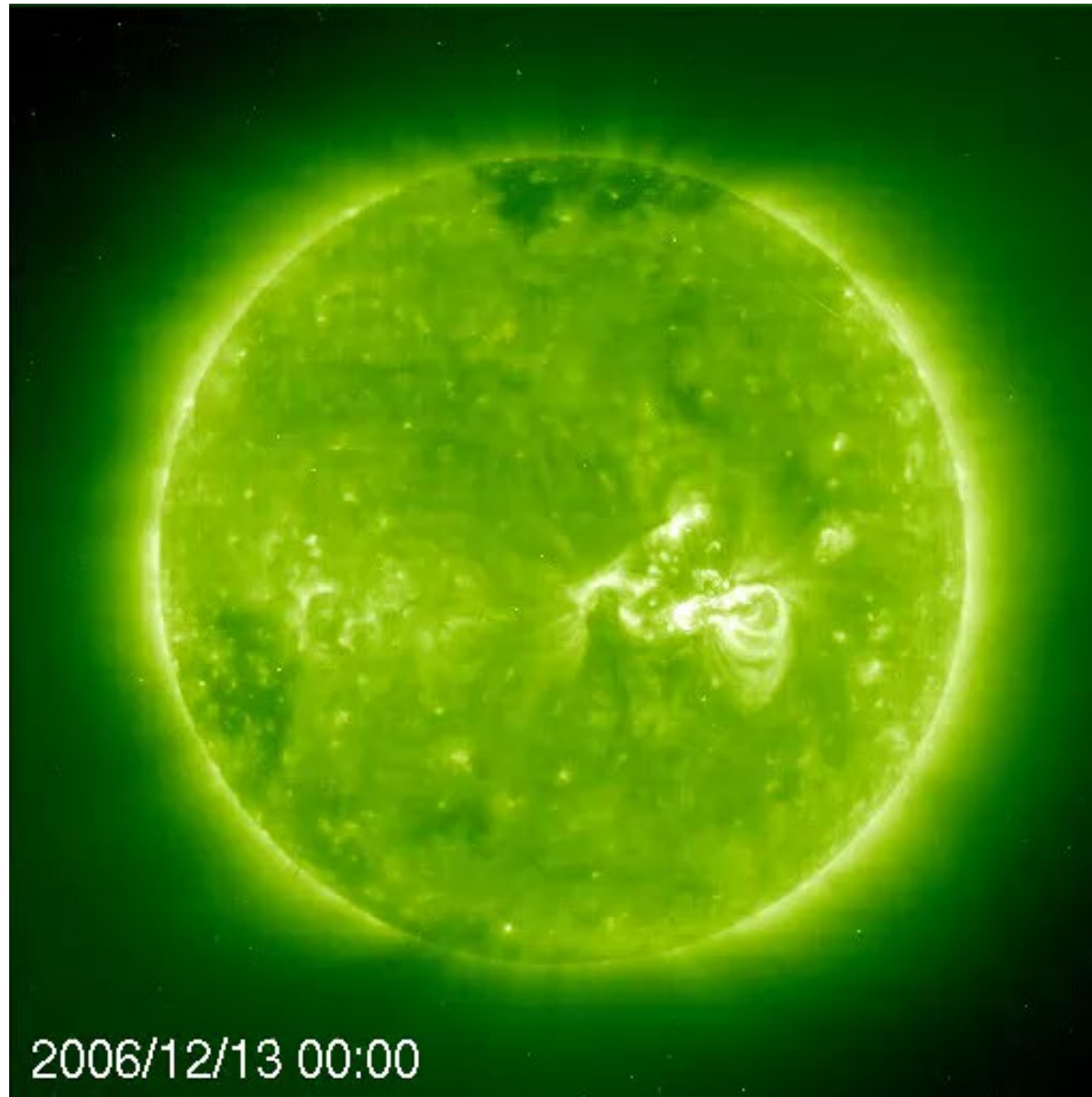
PJM Public Service Step Up Transformer

Severe internal damage caused by the space storm of 13 March, 1989

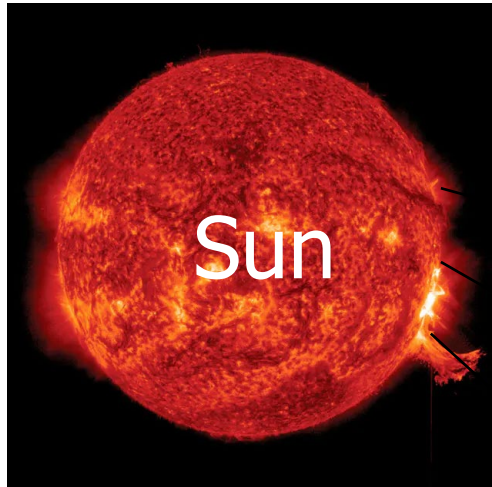


# Solar Particle Events (SPE)

---

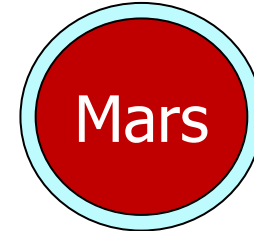
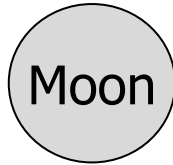


# Space Radiation Health Risk



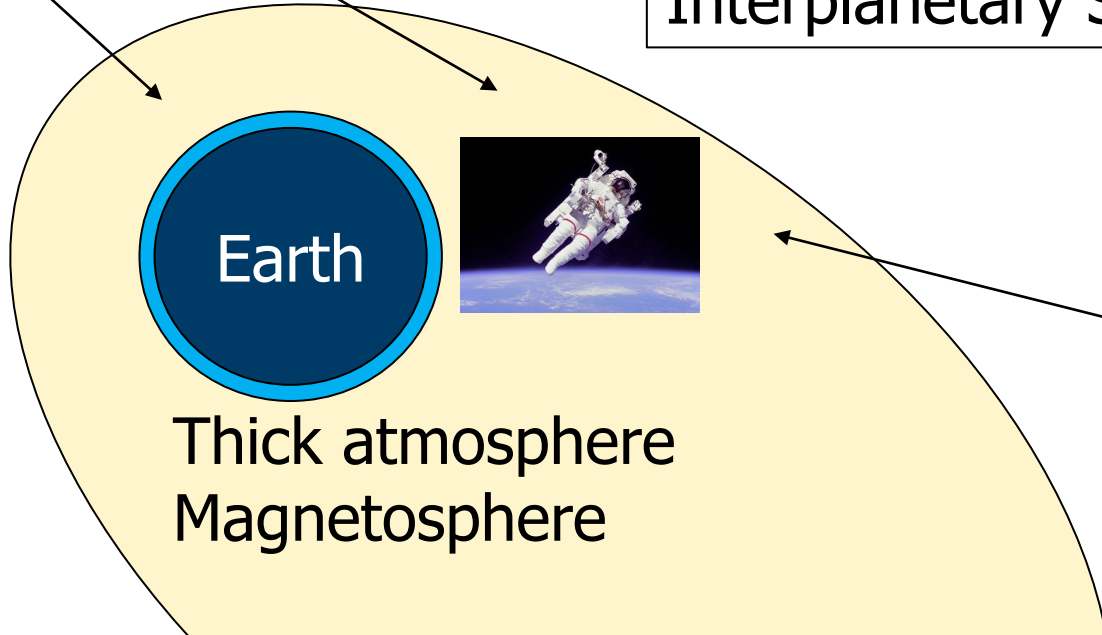
Solar Energetic Particle (SEP)  
~100MeV ( $10^8\text{eV}$ )

No atmosphere  
No magnetosphere



Thin atmosphere  
No magnetosphere

Interplanetary Space

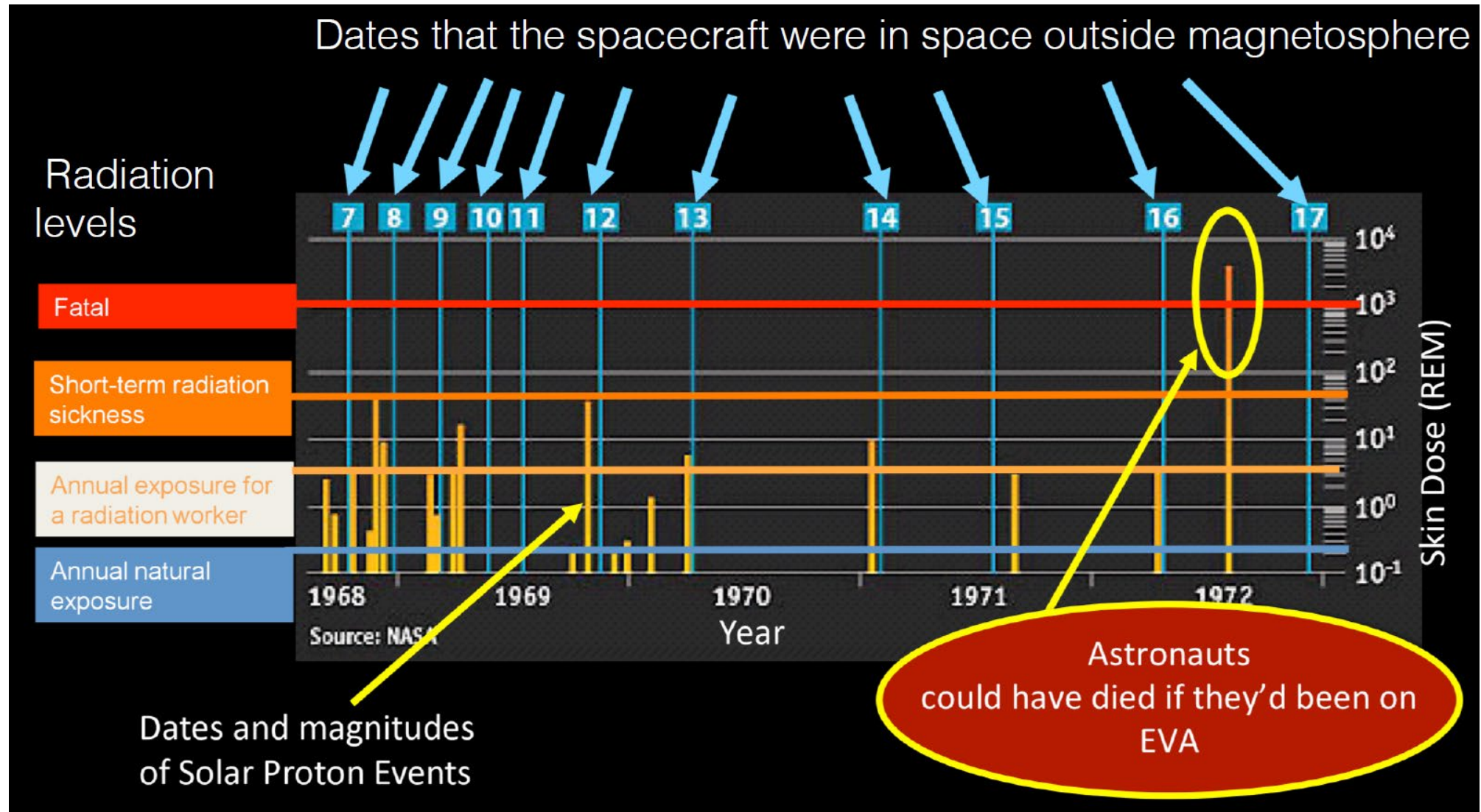


Earth  
Thick atmosphere  
Magnetosphere

Galactic Cosmic Ray (GCR)  
>GeV ( $10^9\text{eV}$ )

Heliopause

# Solar Particle Events during Apollo Missions



Courtesy of Miho Janvier (Institut d'Astrophysique Spatiale, France)

# 太陽

フレア

高エネルギー粒子

地球到達時間  
30分～2日

X線放射 8分

熱圏擾乱

宇宙放射線

CME

太陽風擾乱

2～3日

通信障害

衛星障害

電離圏擾乱

被ばく影響

電力障害

オーロラ活動

地磁気擾乱

磁気圏

地球



## 宇宙天気現象の発生と障害

🏠 &gt; Business

# スペースX、スターリンク衛星40基を喪失へ 太陽嵐の影響

© 2022.02.10 Thu posted at 11:54 JST

シェアする 105

ツイート

B!ブックマーク 5

PR

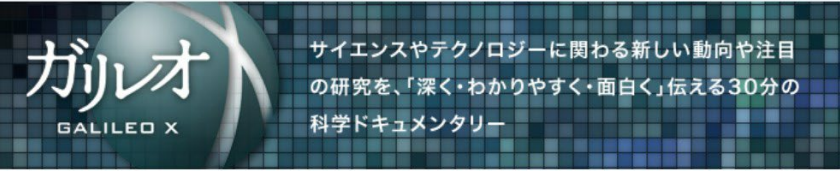
- ・世界で躍進する半導体の黒子企業、日本回帰に秘める3つの狙い
- ・旅に出たい！ CNNが海外の隠れたスポットなど紹介
- ・Microsoft365と既存グループウェア連携で実現する業務効率化



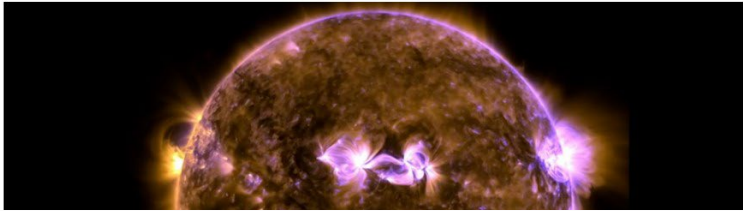
インターネット衛星49基を搭載したスペースXのロケット発射を見る人々=9日、米フロリダ州ケープカナベラルのケネディ宇宙センター/Paul Hennessy/SOPA Images/LightRocket/Getty Images

ニューヨーク(CNN Business) 米スペースXが通信衛星網「スターリンク」計画の一環で今月打ち上げた人工衛星のうち、最大40基が「太陽嵐」の影響で周回軌道から外れる見通しとなった。これらの衛星はすでに地球の大気圏に再突入したか、これから再突入するという。

スペースXは今月3日、スターリンクを構成するインターネット衛星49基を打ち上げていた。同社は現



サイエンスやテクノロジーに関わる新しい動向や注目の研究を、「深く・わかりやすく・面白く」伝える30分の科学ドキュメンタリー



解説委員室 NEWS COMMENTATORS BUREAU

新着

これまでの解説記事

宇宙天気警報 太陽フレアの被害を防げ

2022年04月27日 (水)

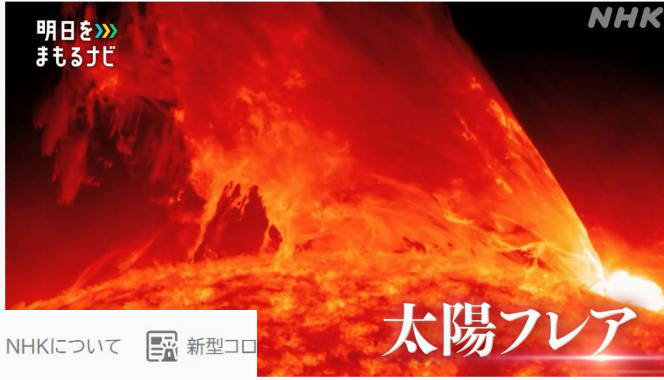
土屋 敏之 解説委員



太陽フレア 現代社会への新たな脅威

明日をまもるナビ

2022年10月6日



発生した電磁波やプラズマの噴出は、地球に伝わります。着くに発達し、

トップへ

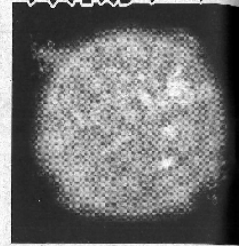
ハロー♪宇宙天気予報

3月29日 (水) よる 7:00~ (第一夜)
3月30日 (木) よる 7:00~ (第二夜)

「2025年、大規模な太陽フレアで大停電が起きるかもしれない!?」太陽の異常活動を予測して伝える『宇宙天気予報』を軸に、宇宙について楽しく深くお伝えする情報番組!



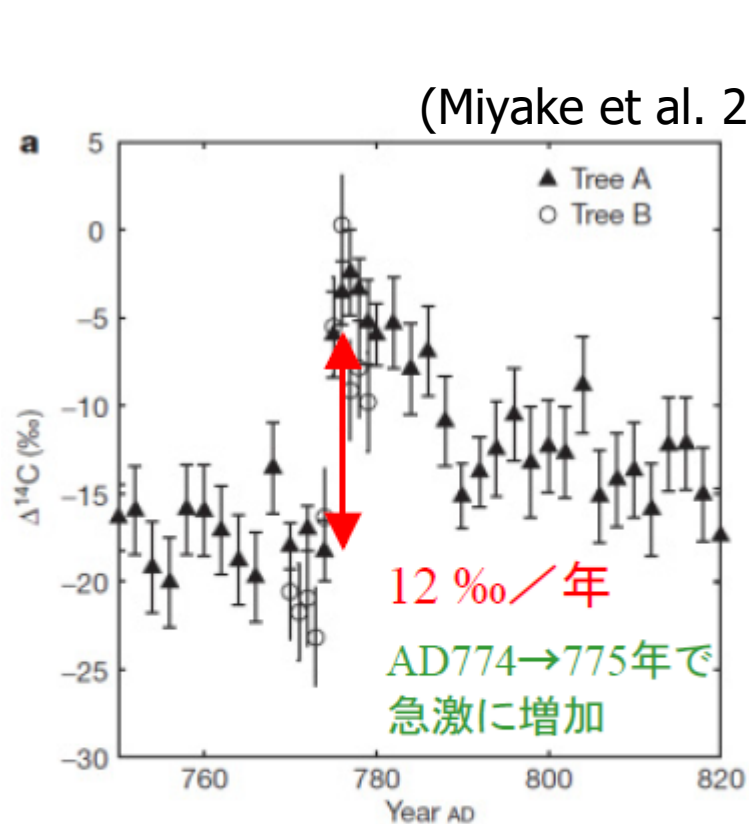
政府が警戒する太陽フレアは 通信や電力が途絶し、衛星は墜落、航空機や船舶はストップ...



太陽フレアが地球に到達すると、電磁波や放射線が地球表面で増幅... 通信や電力が途絶し、衛星は墜落、航空機や船舶はストップ... 2022年9月1日、宇宙天気予報...

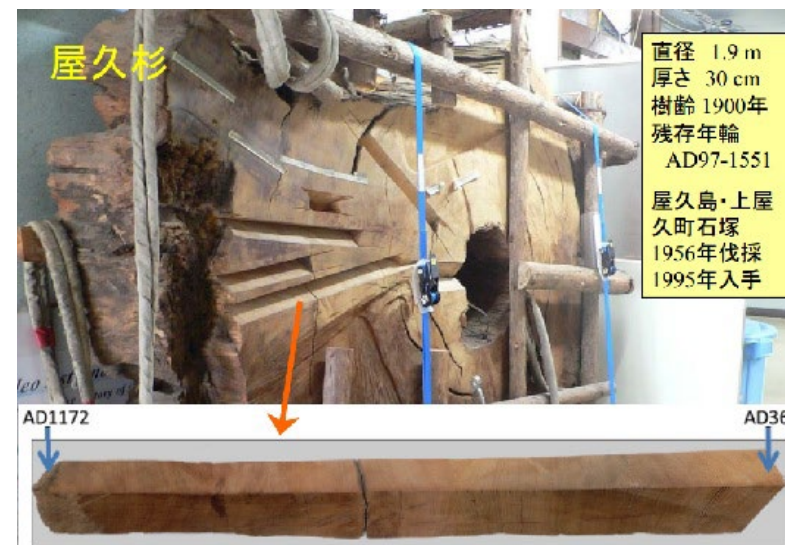


# 西暦774-775年における宇宙線増加の痕跡



a)  $^{14}\text{C}$ 濃度の変化  
(1-2年値)

宇宙線  
窒素  $\rightarrow$   
 $^{14}\text{C}$   
炭素同位体  
(アイソトープ)



# 激甚宇宙天気災害

## ■ 超キャリントン・クラス

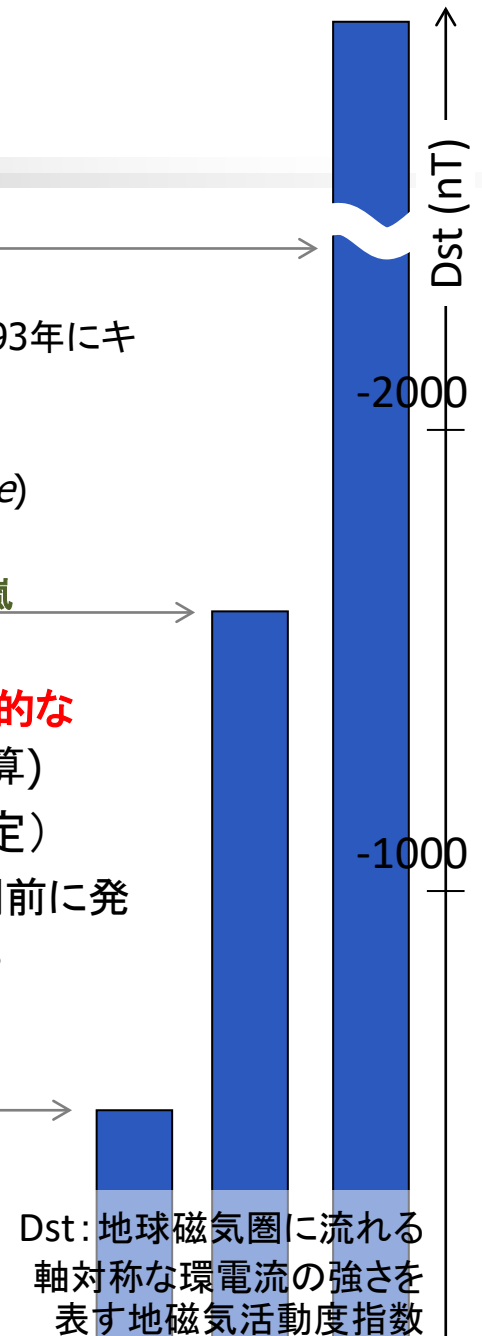
- 樹木年輪中の炭素同位体解析 西暦774~775年及び、西暦992~993年にキャリントン・イベントの10倍程度の放射線急増事象が発生したことを発見 (名大: Miyake et al. 2012 *Nature*, Miyake et al. 2013 *Nature Comm.*)
- 太陽型恒星の超巨大フレアの可能性(京大: Maehara et al. 2012 *Nature*)

## ■ キャリントン・クラス

- 1859年9月 Dst~-1760nT (キャリントン・イベント)  
現代において発生すれば、衛星障害、通信・測位障害など**全地球的な激甚宇宙天気災害**を引き起こす。(被害総額10~100兆円と試算)
- 2012年7月 推定Dst~-1182nT (地球に到達した場合の推定)  
太陽の裏面で発生したため地球には到達しなかったが、もし2週間前に発生した場合、地球に到達し、大規模被害をもたらしたと考えられる。(Baker et al. 2013)

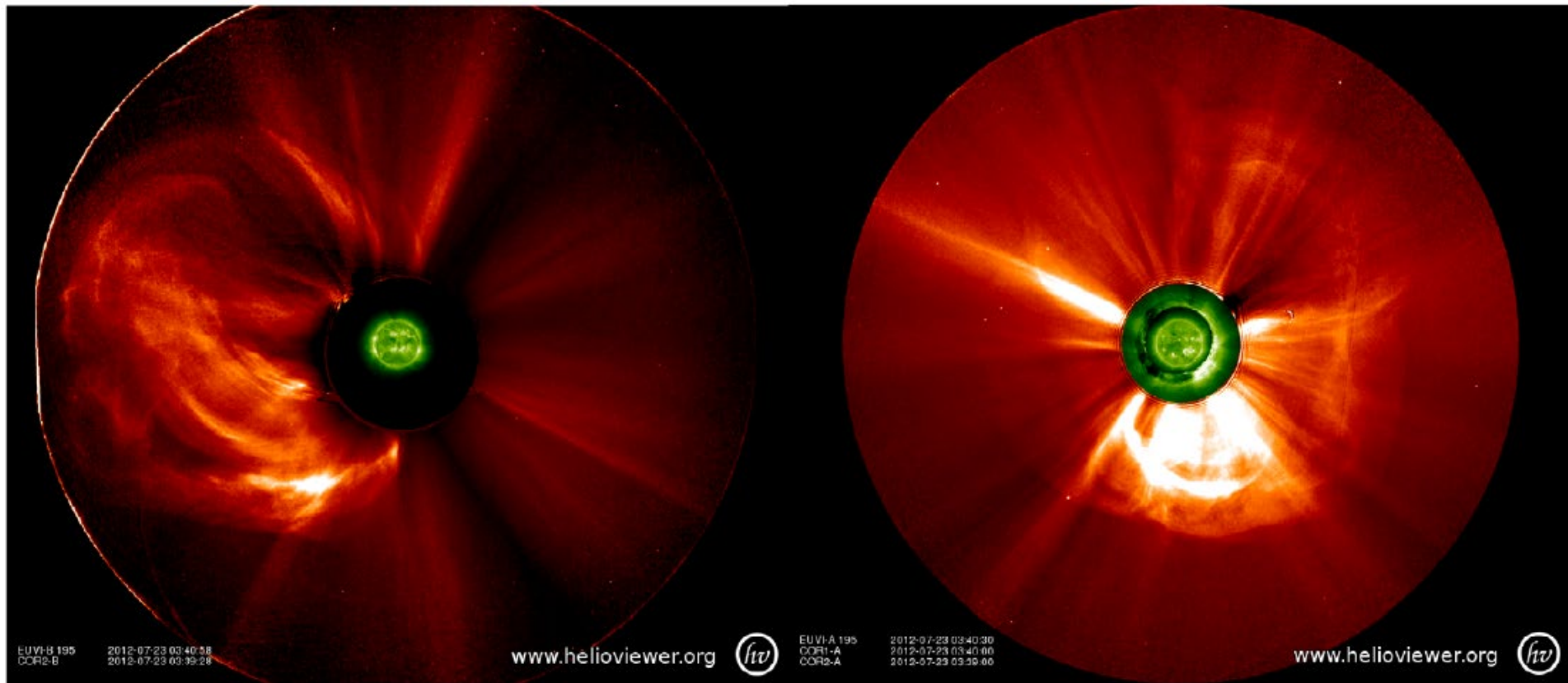
## ■ サブ・キャリントン・クラス

- 1989年3月 Dst= -589nT ケベック州大停電
- 2000年7月 Dst=-301nT X線観測衛星「あすか」制御不良
- 2003年10月 Dst= -422nT スウェーデン、南アフリカで送電システム障害、火星探査機Mars Odyssey障害



# 巨大コロナ放出(2012年7月23日)

- Baker et al. 2013 Defining Extreme Space Weather Scenarios

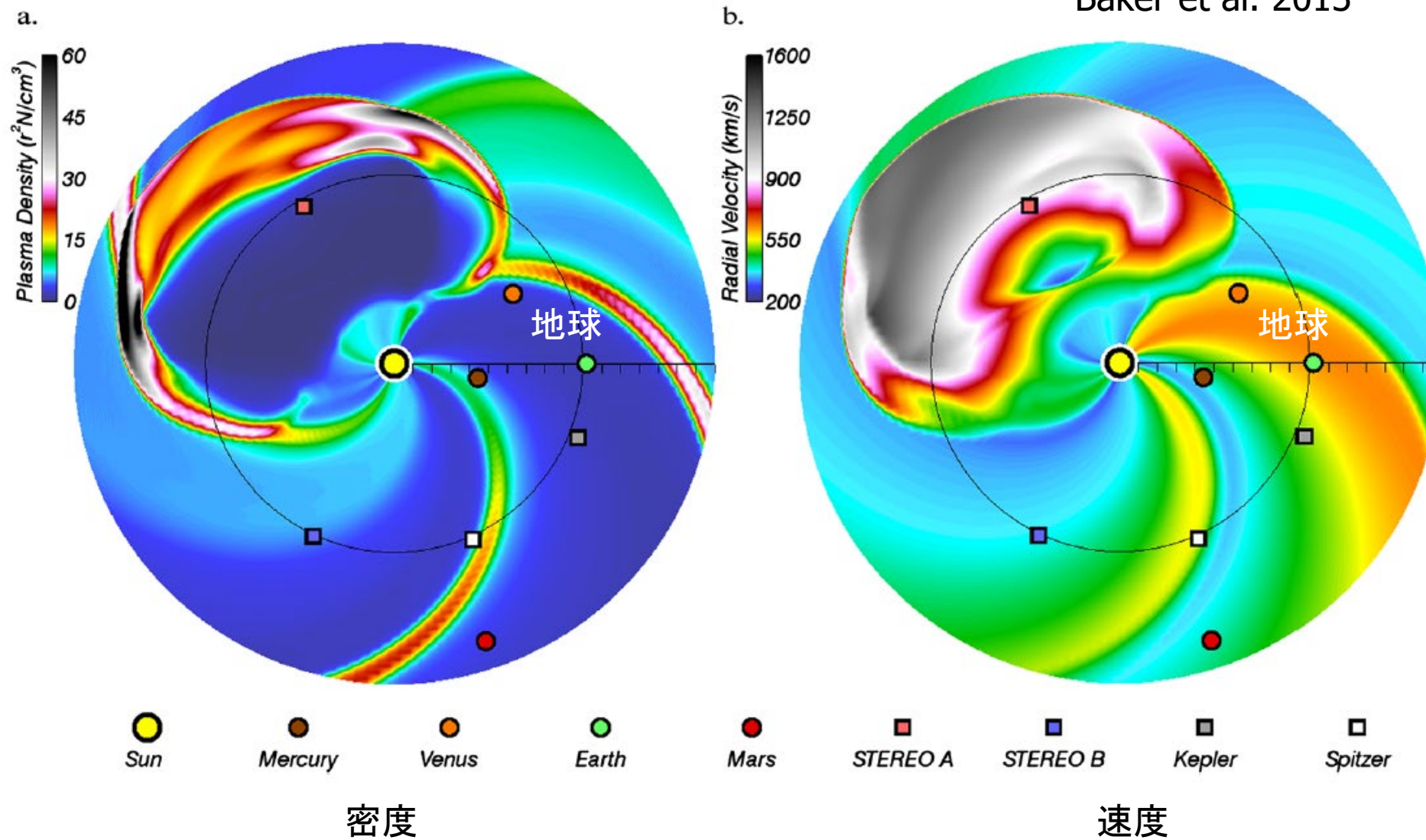


STEREO-B

STEREO-A

# 巨大コロナ放出のシミュレーション

Baker et al. 2013



# 太陽フレア予測の課題 (Issues)

---

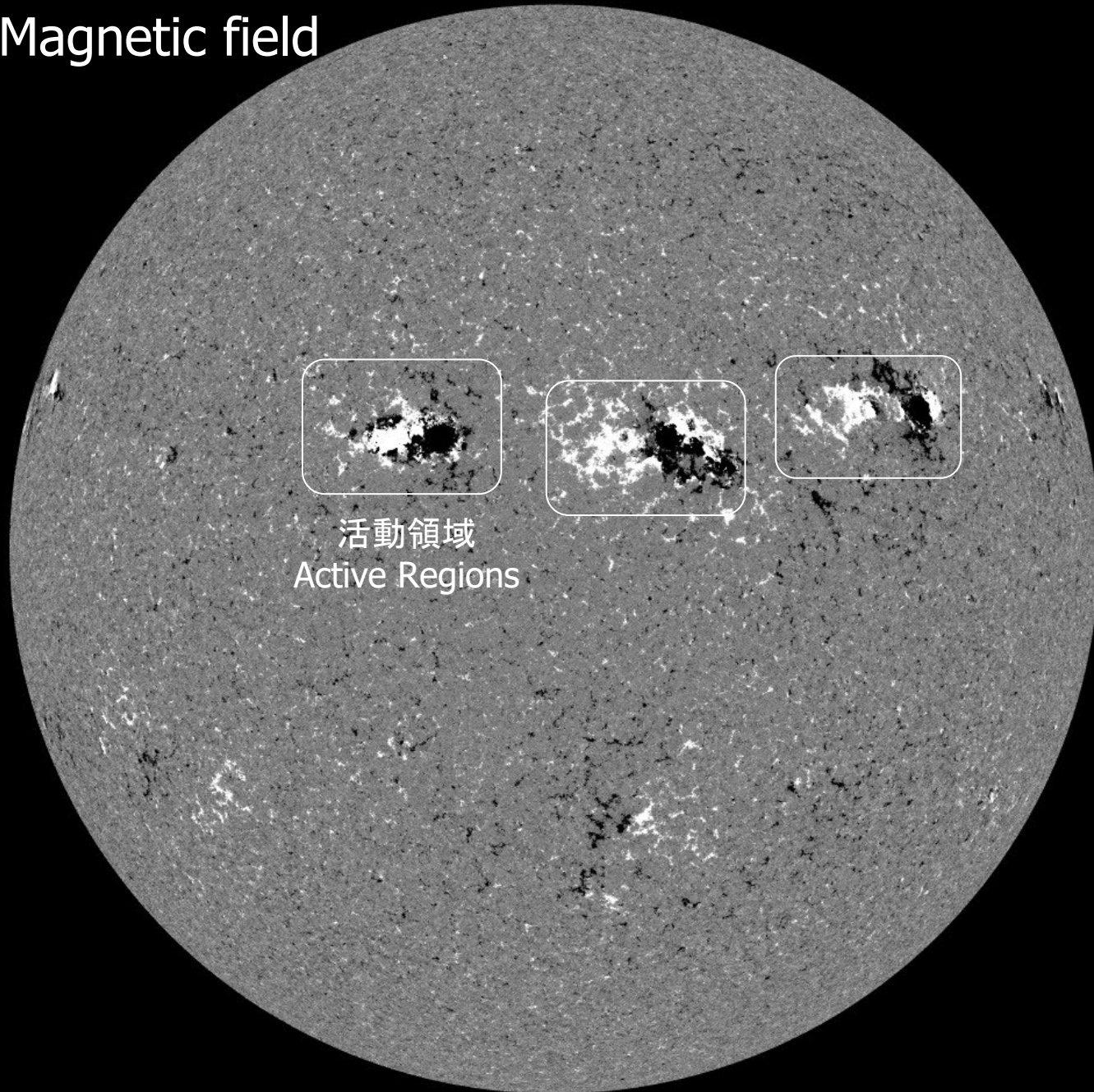
- 巨大フレアを如何にして予測するか？

How can we predict solar flares?

- いつ、どこで、どれほどの太陽フレアがどのように発生するのか？

When, where, and how do solar flares occur?

# Magnetic field



Observed by SDO  
Aug. 2, 2011

# Current status of flare prediction

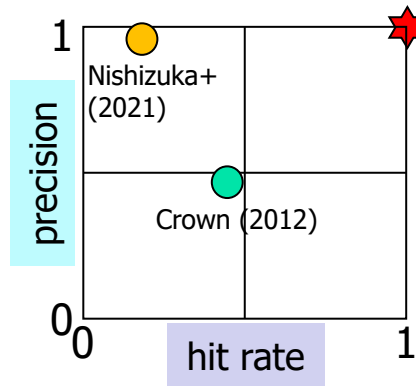
The currently operating flare predictions rely on empirical methods and machine learning based on the correlation between the various parameters of sunspots/active regions and flares.

Crown (2012) NOAA/SWPC for Cycle 23

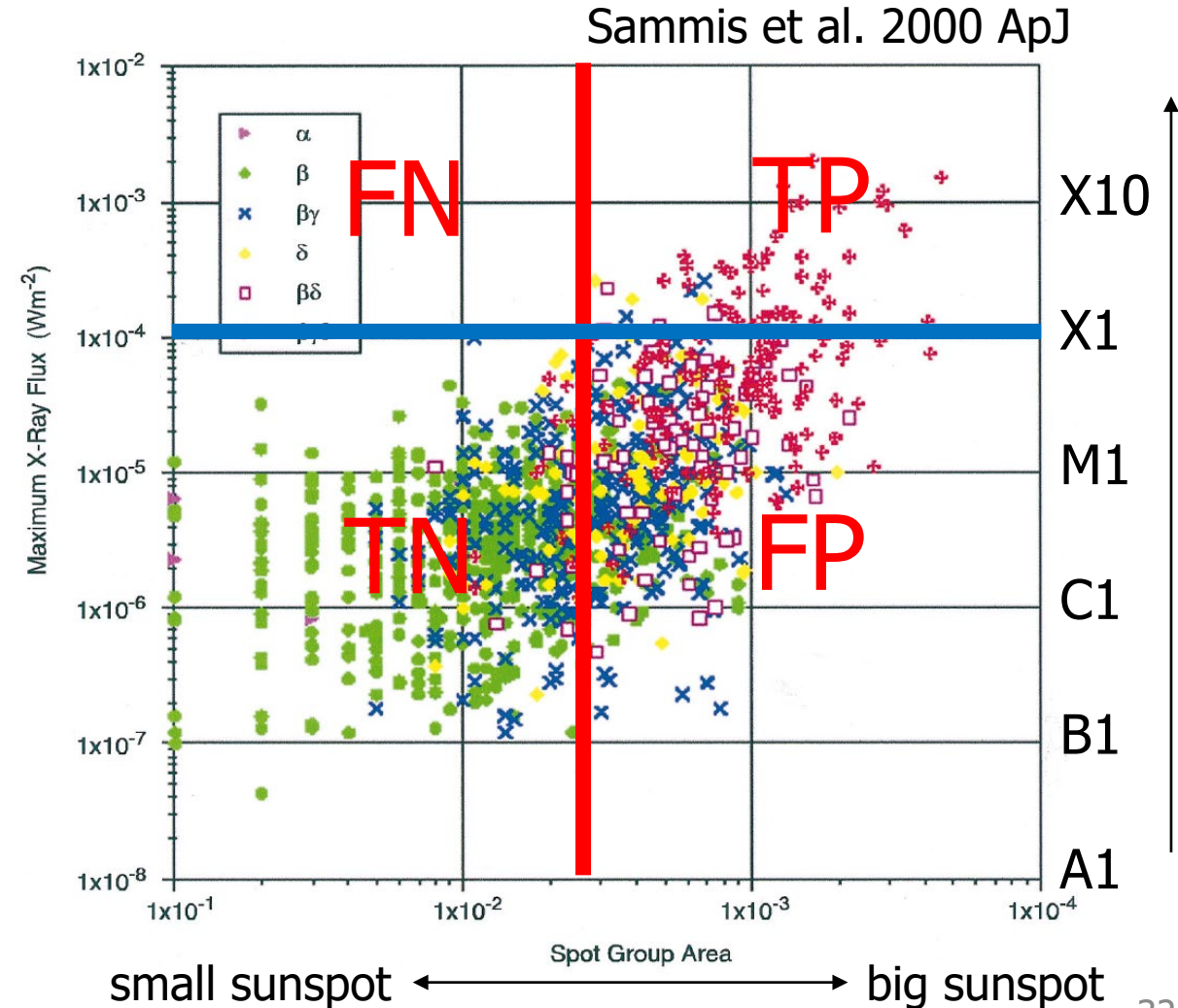
Forecast >X1 24h	Observation positive	Observation negative	
positive	50 TP	67 FP	hit rate TP/(TP+FP)~0.43
negative	52 FN	31315 TN	
precision	TP/(TP+FN)~0.49		

Nishizuka et al. (2021) Deep Flare Net

Forecast >M1 2010-2015	Observation positive	Observation negative	
positive	963 TP	4382 FP	hit rate
negative	54 FN	25937 TN	

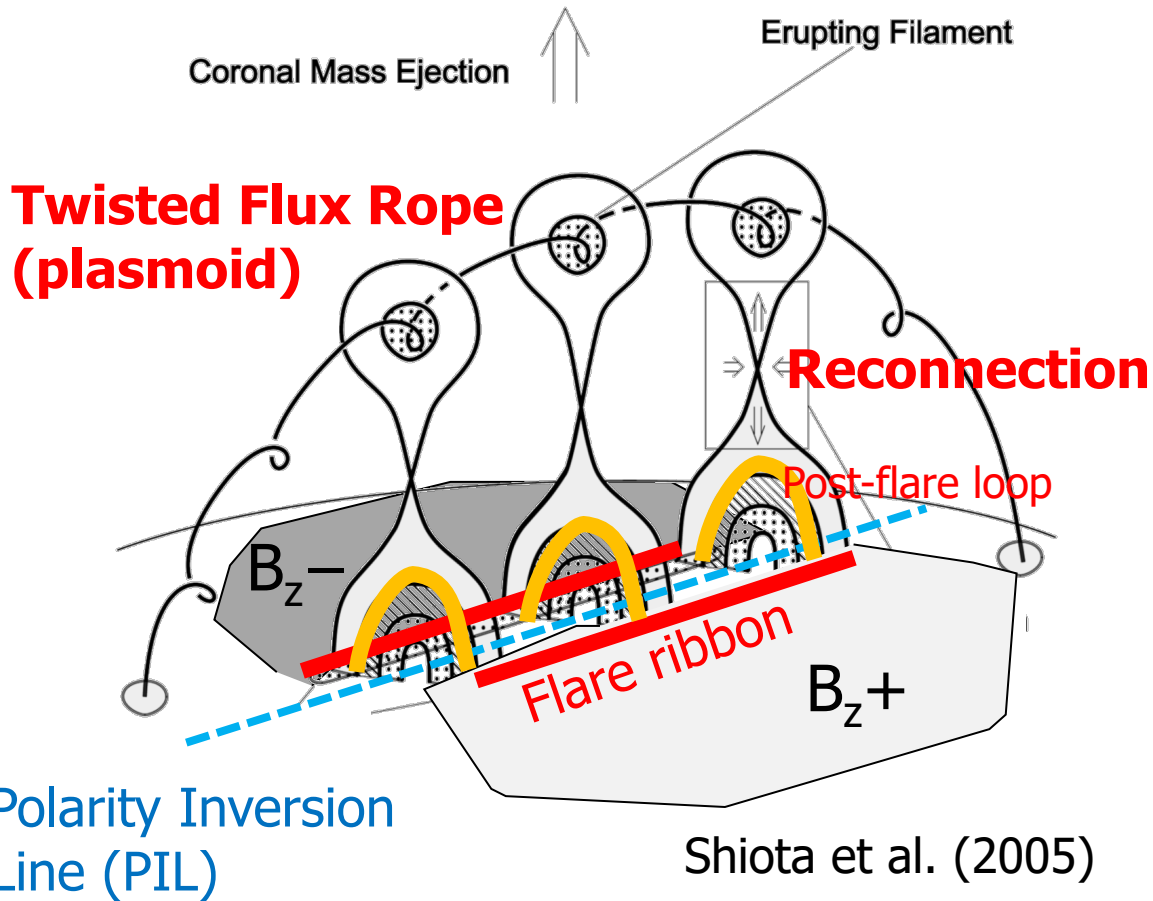


The flare X-ray flux (GOES flare index) vs. sunspot area.



# 太陽フレアの基本モデル(CSHKPモデル)

Carmichael 1964; Sturrock 1966;  
Hirayama 1974; Kopp & Pneuman 1976



X8-class flare on September 10, 2017 SDO/AIA 211

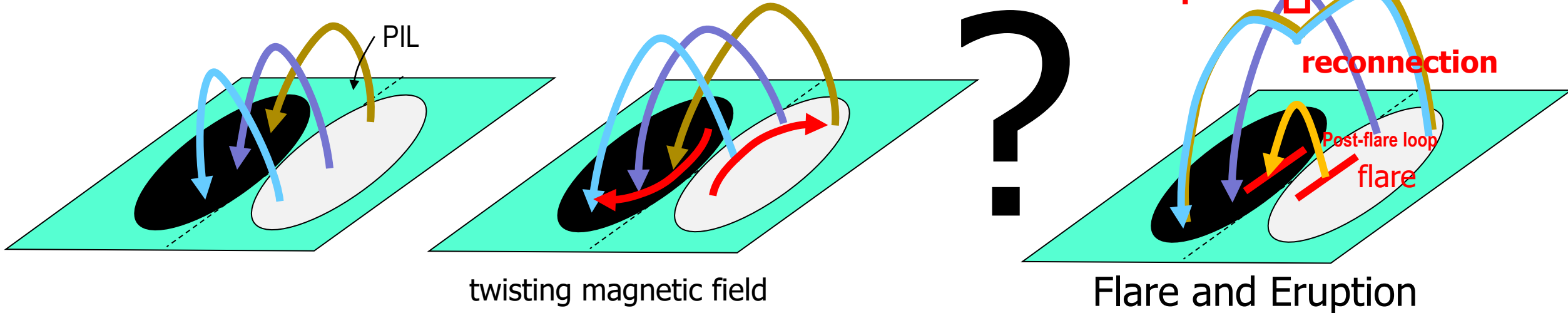


# 太陽フレアはいつ起きるの？

① Formation of active region

② Piling up the free energy

③ Releasing the free energy



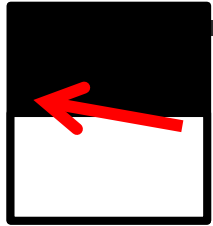
**What determines the onset of reconnection and eruption?**

(similar to the substorm onset problem)

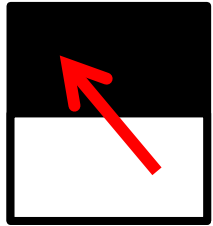
# Numerical Simulation of Flare Trigger Process

K. Kusano et al., MAGNETIC FIELD STRUCTURES TRIGGERING SOLAR FLARES AND CORONAL MASS EJECTIONS, ApJ, 760:31, 2012 November 20.

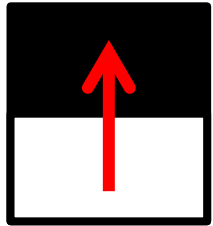
twist angle in force-free magnetic field ( $\theta_0$ )



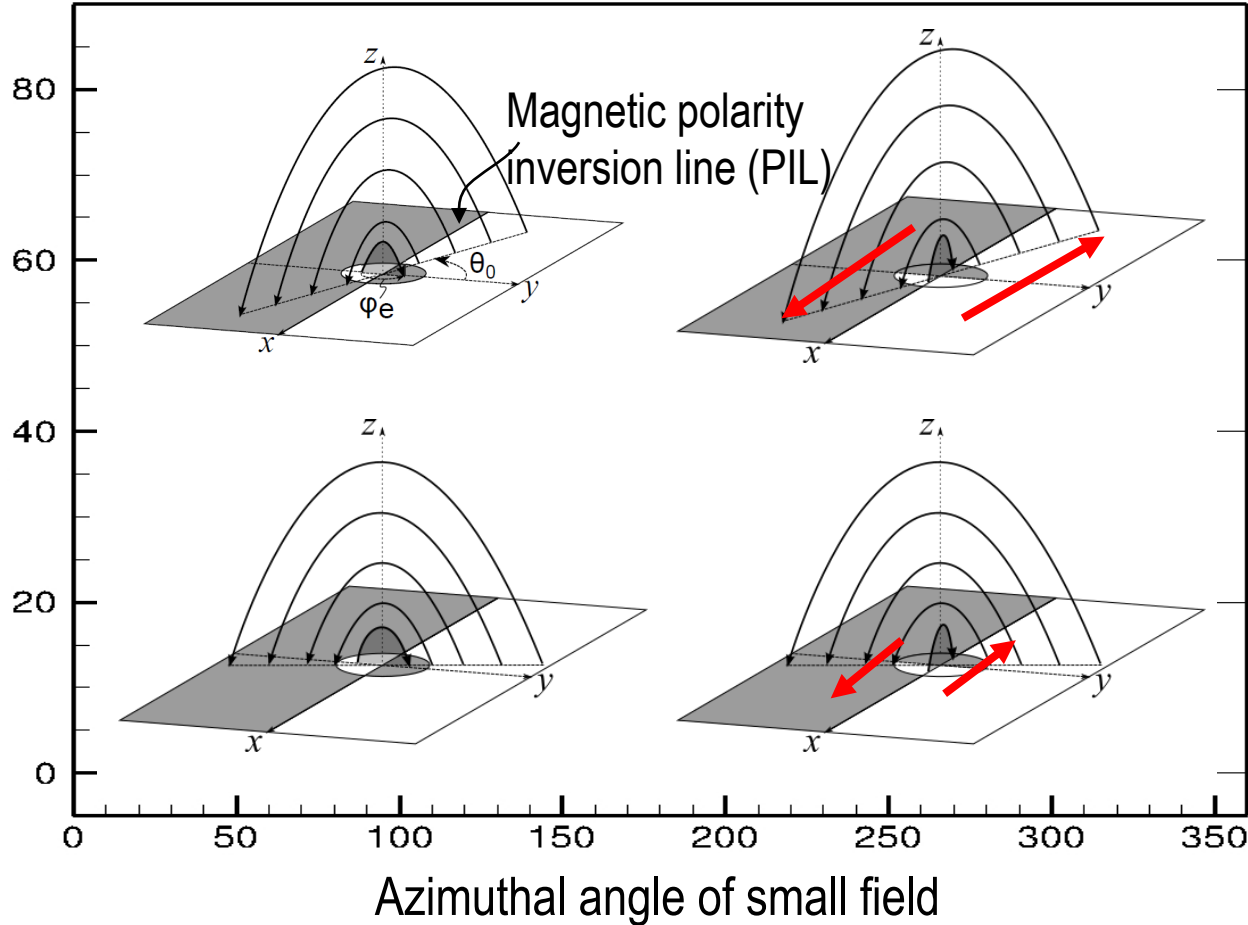
Strong shear



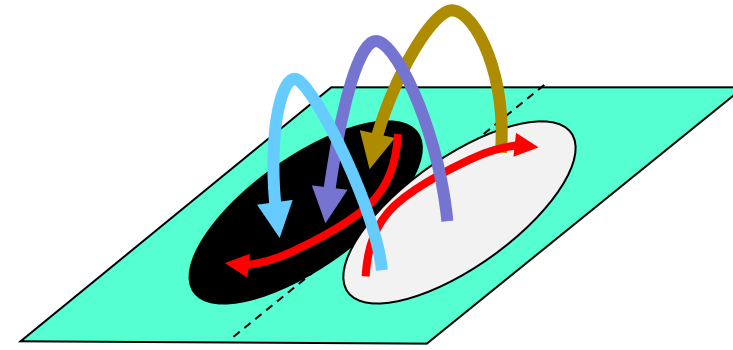
Weak shear



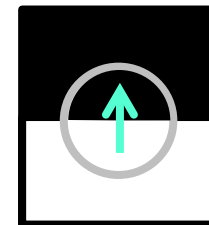
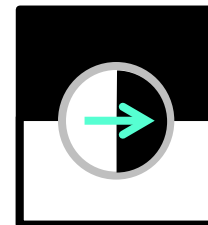
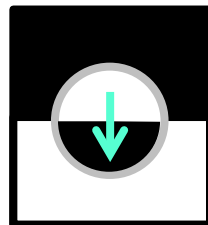
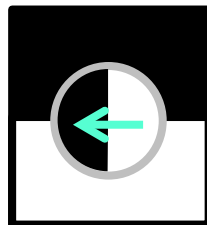
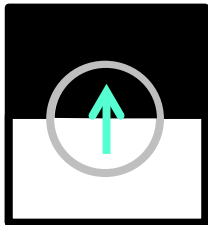
shear free  
(potential field)



large  
↑  
Magnetic Twist  
(magnetic free energy)  
↓  
small

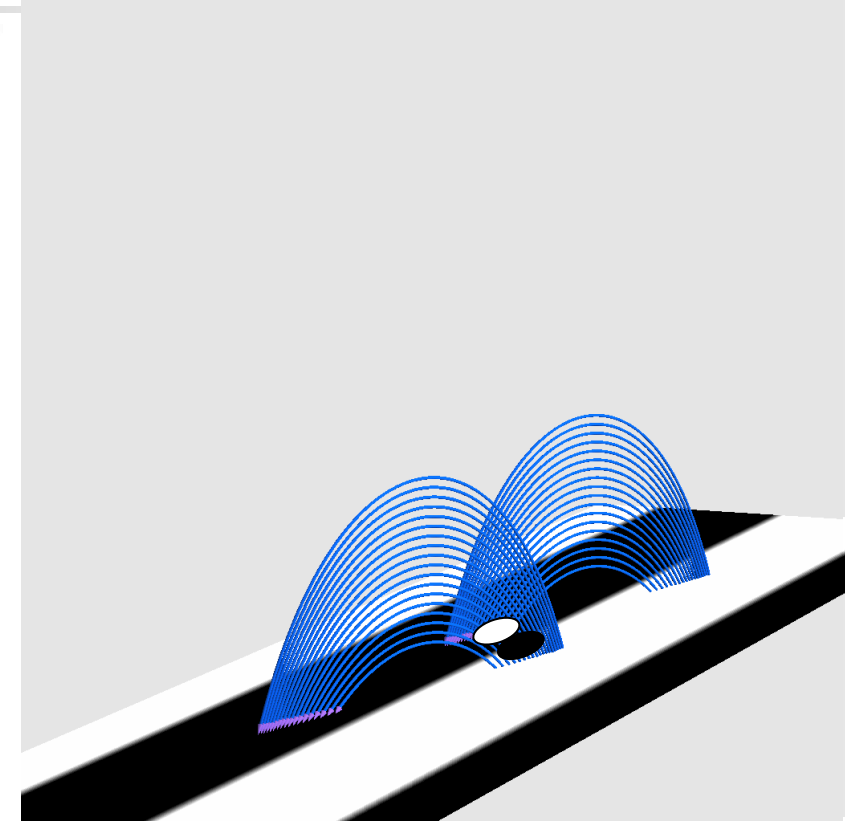
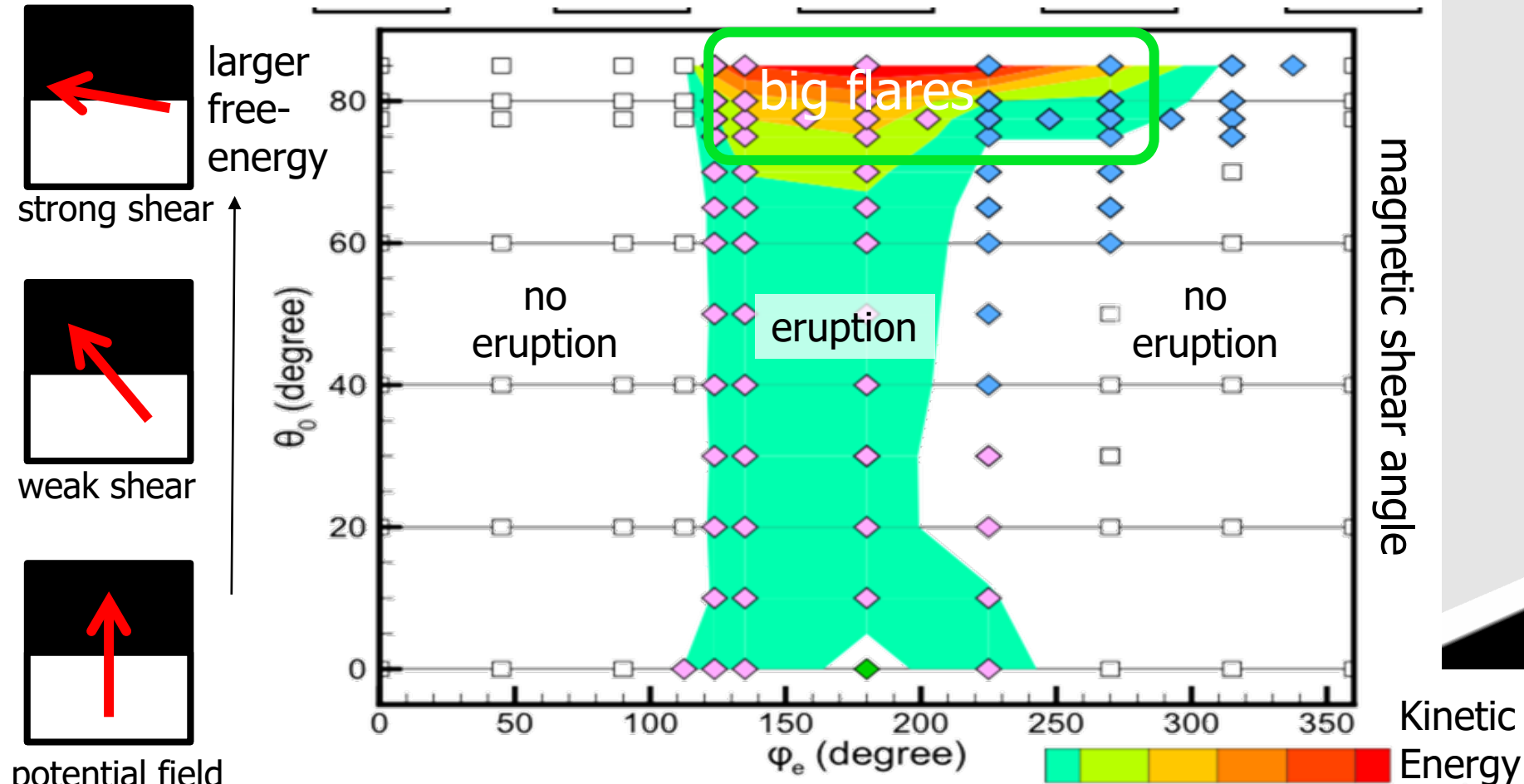


Right Pol (RP) Normal Shear (NS) Opposite Pol (OP) Rev Shear (RS) Right Pol (RP)



# Results of Ensemble Simulation

Kusano et al. 2012

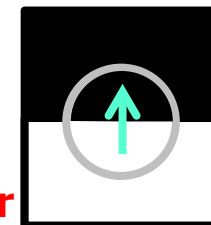
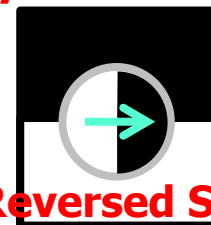
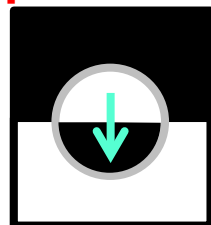
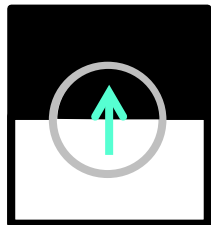


MHD simulation result

$\Theta_0 = \square \quad \phi_e = 180^\circ$

**Right Polarity**

**Opposite Polarity**

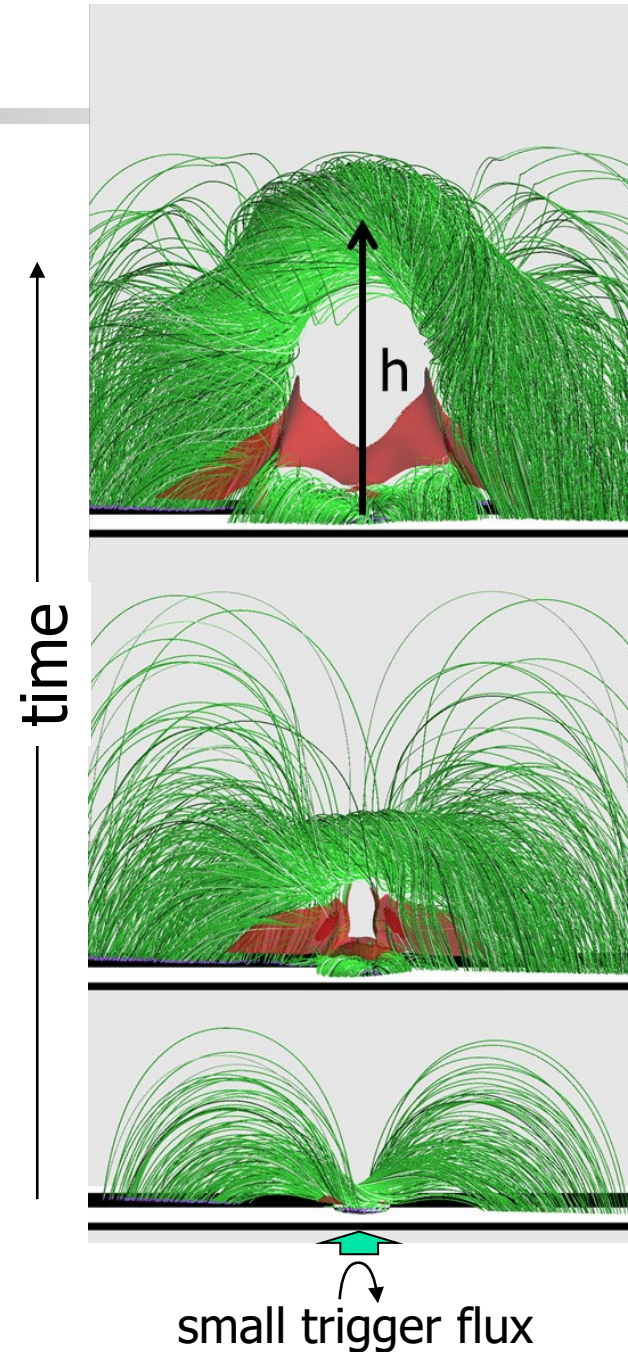
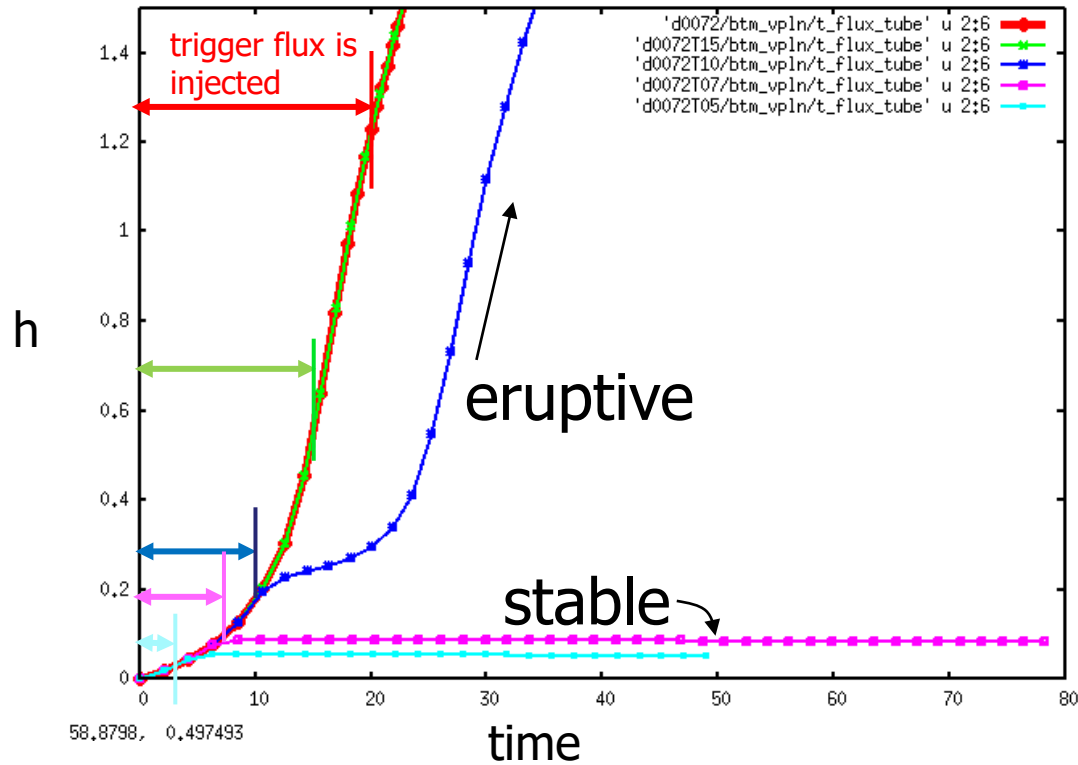


**Normal Shear**

**Reversed Shear**

# What is the Critical State?

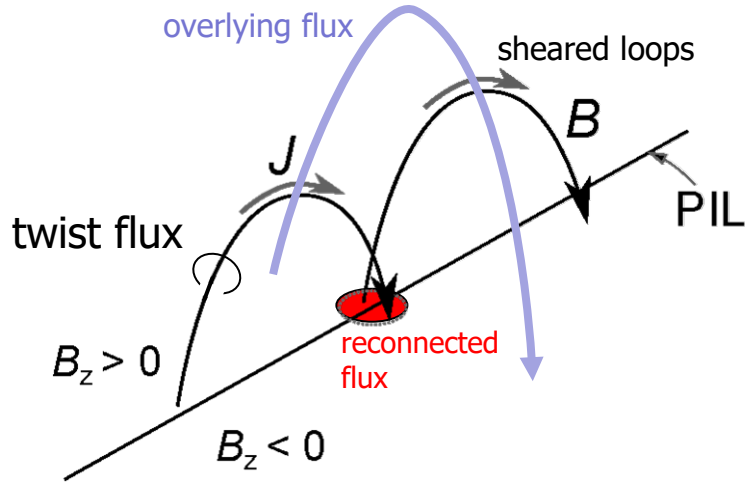
## MHD Simulations for different trigger flux



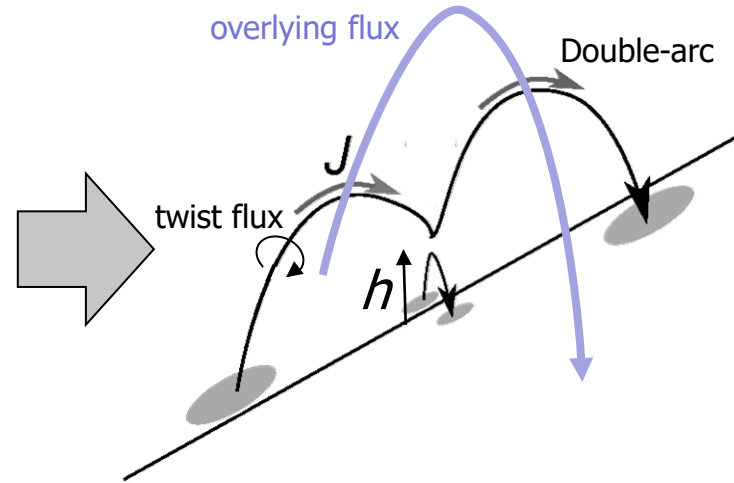
# Double-Arc Instability

Ishiguro and Kusano 2017 ApJ

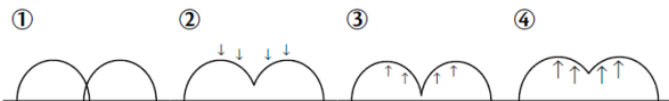
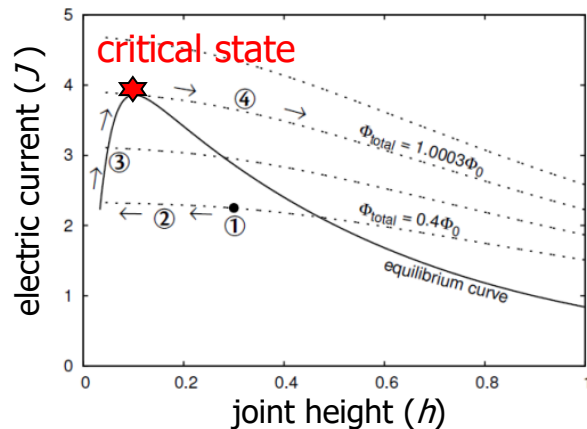
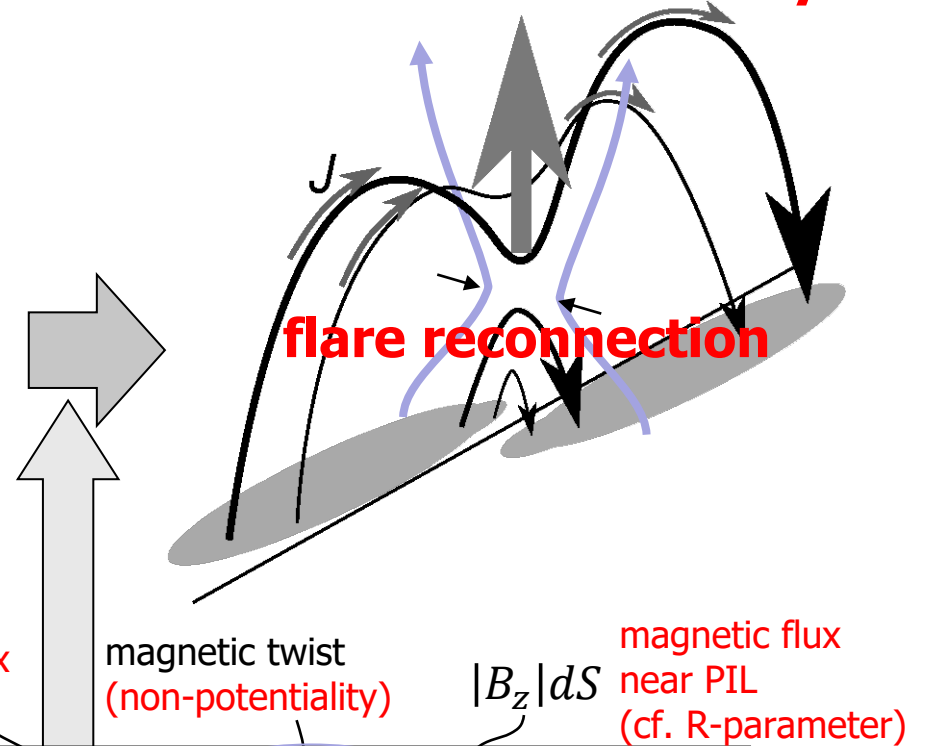
## Trigger Reconnection



## Current-Carrying Double-Arc



## Double-Arc Instability



integration in the reconnected flux (within double-arc loop)

magnetic twist (non-potentiality)

$|B_z|dS$

magnetic flux near PIL (cf. R-parameter)

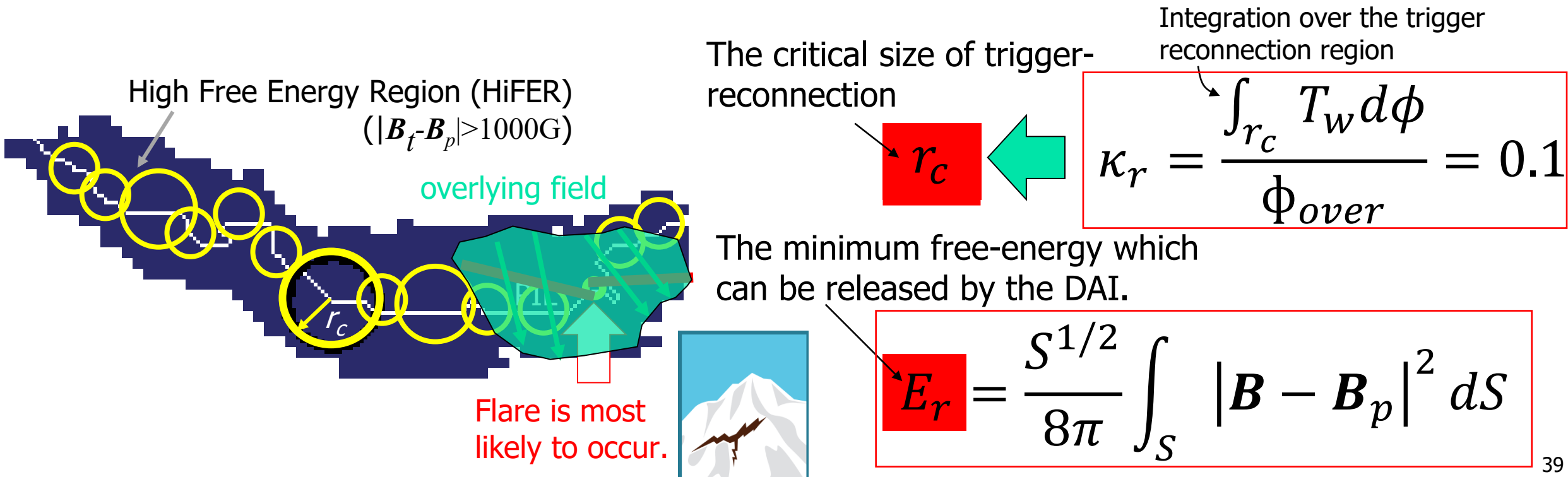
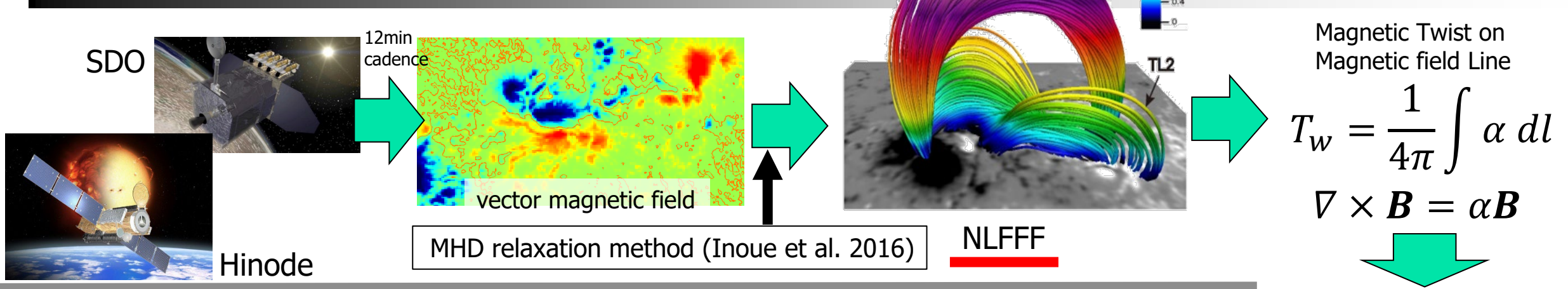
twist flux

overlying magnetic flux (cf. decay index)

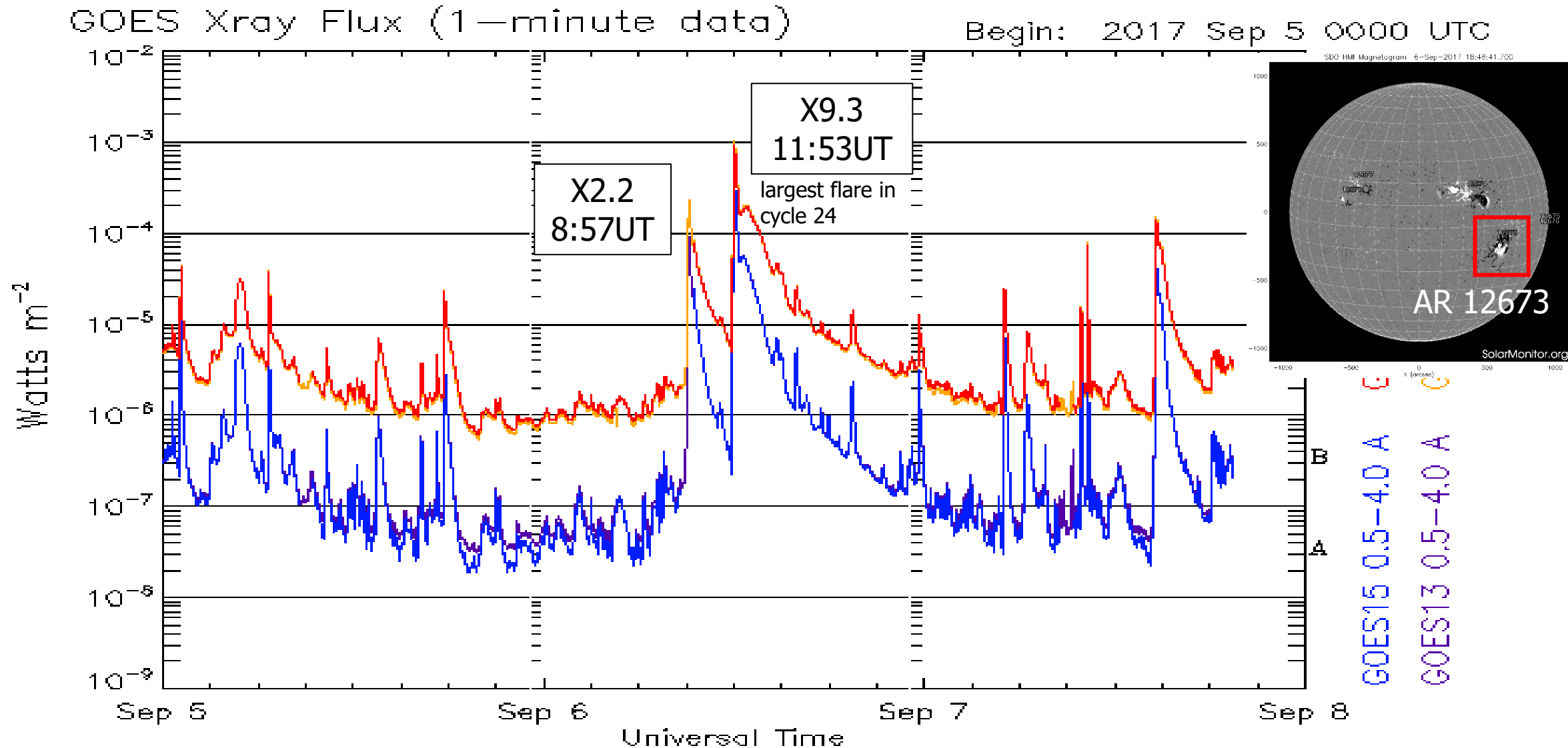
The critical condition of double-arc instability

$$\kappa = \frac{\int_{r_c} T_w d\phi}{\Phi_{over}} \gtrsim 0.1$$

# Prediction scheme ( $\kappa$ -scheme)



# X-class Flares on Sep. 6, 2017



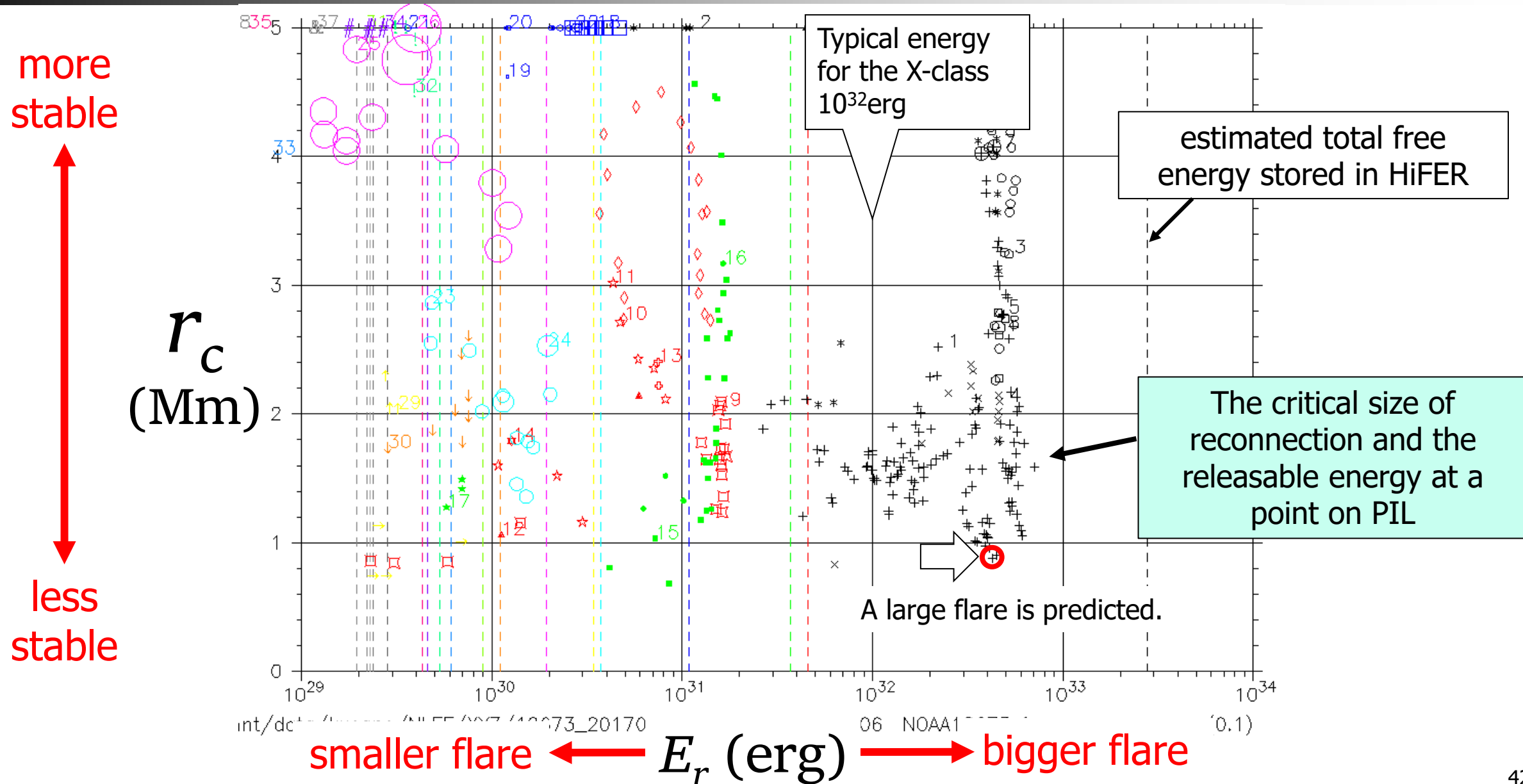
Updated 2017 Sep 7 19:28:12 UTC

NOAA/SWPC Boulder, CO USA

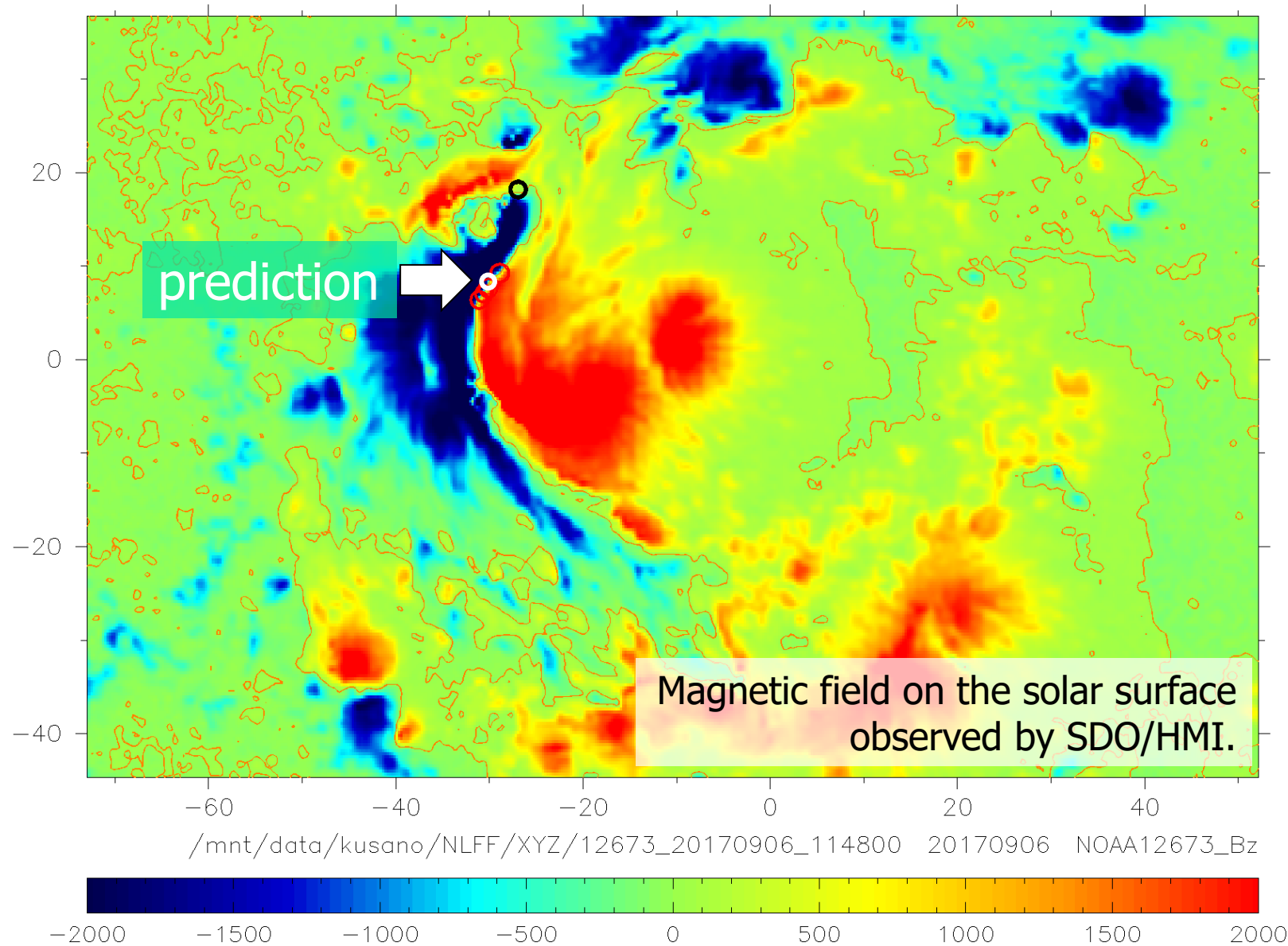




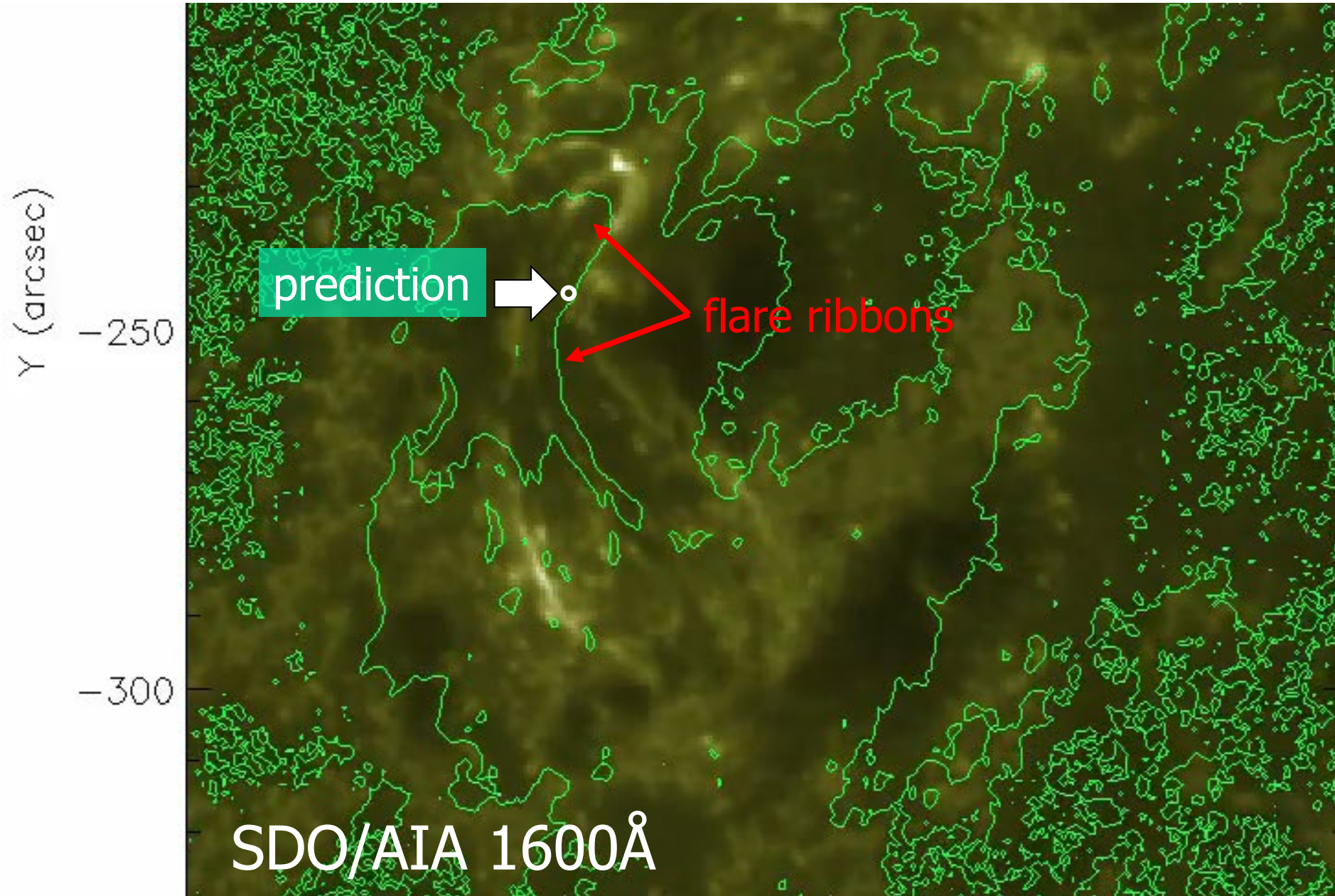
# 11:48 UT on Sep. 6 (12 min prior to the X9.3 flare)



# 11:48 UT (12 min prior to the X9.3 flare)



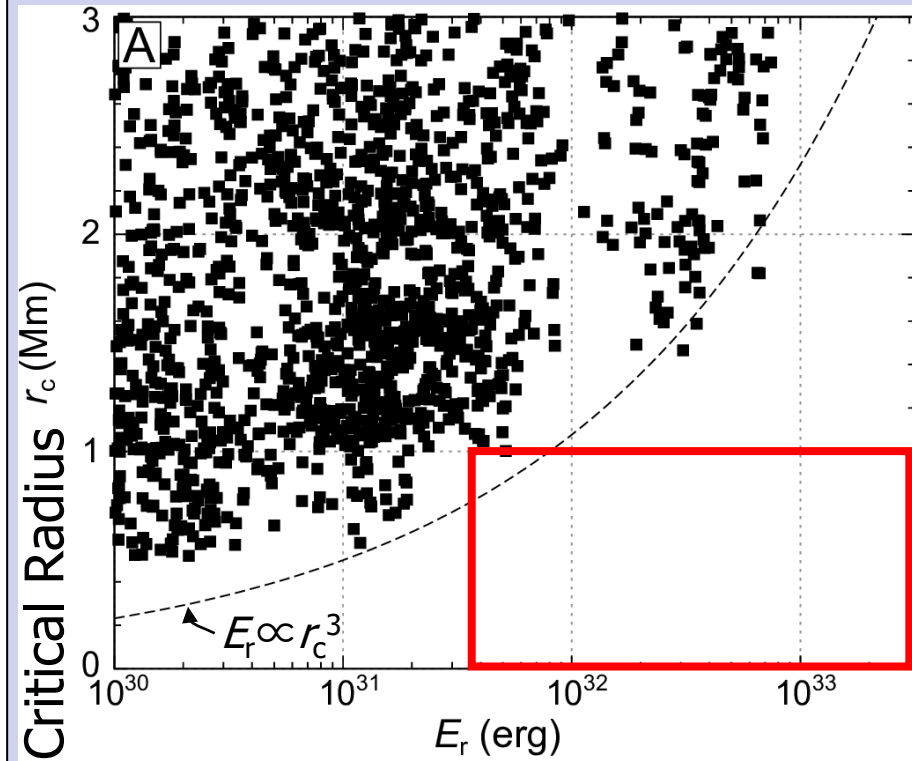
# Ribbons of the X9.3 flare



# Statistical Analysis for 198 Largest ARs in S/C 24

## Group 1 (Non-flaring ARs)

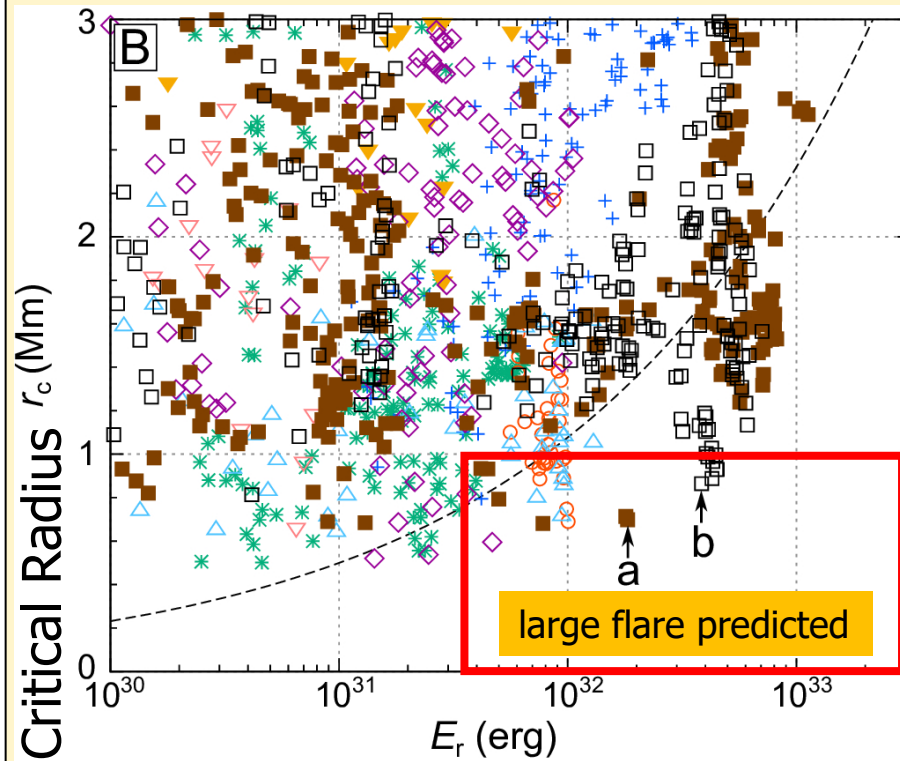
- 198 largest sunspot regions in solar cycle 24
- **No large flare > X2** occurred for 20 h after the observation
- Data when the region was on the central meridian.



Releasable Energy

## Group 2 (Flaring ARs)

- The seven active regions that produced all flares of **class X2 or larger** within solar latitudes  $\pm 50^\circ$  during solar cycle 24.



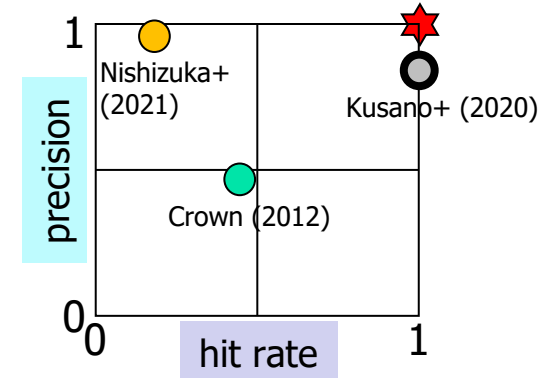
- |                       |                                    |                              |
|-----------------------|------------------------------------|------------------------------|
| AR 11158 X2.2 *       | AR 11890 X3.3 $\triangle$          | AR 12297 X2.1 $\diamond$     |
| AR 11283 X2.1 $\circ$ | AR 12192 X3.1 $\nabla$             | AR 12673 X2.2 $\blacksquare$ |
| AR 11429 X5.4 +       | AR 12192 X2.0 $\blacktriangledown$ | AR 12673 X9.3 $\square$      |
- exceptional

7 ARs produced flares larger than X2 in cycle 24.

Kusano et al., 2020, A physics-based method that can predict imminent large solar flares. Science



Forecast >X2	Observation positive	Observation negative
positive	7 TP	0 FP
negative	2 FN	198 TN



# What determines the onset?

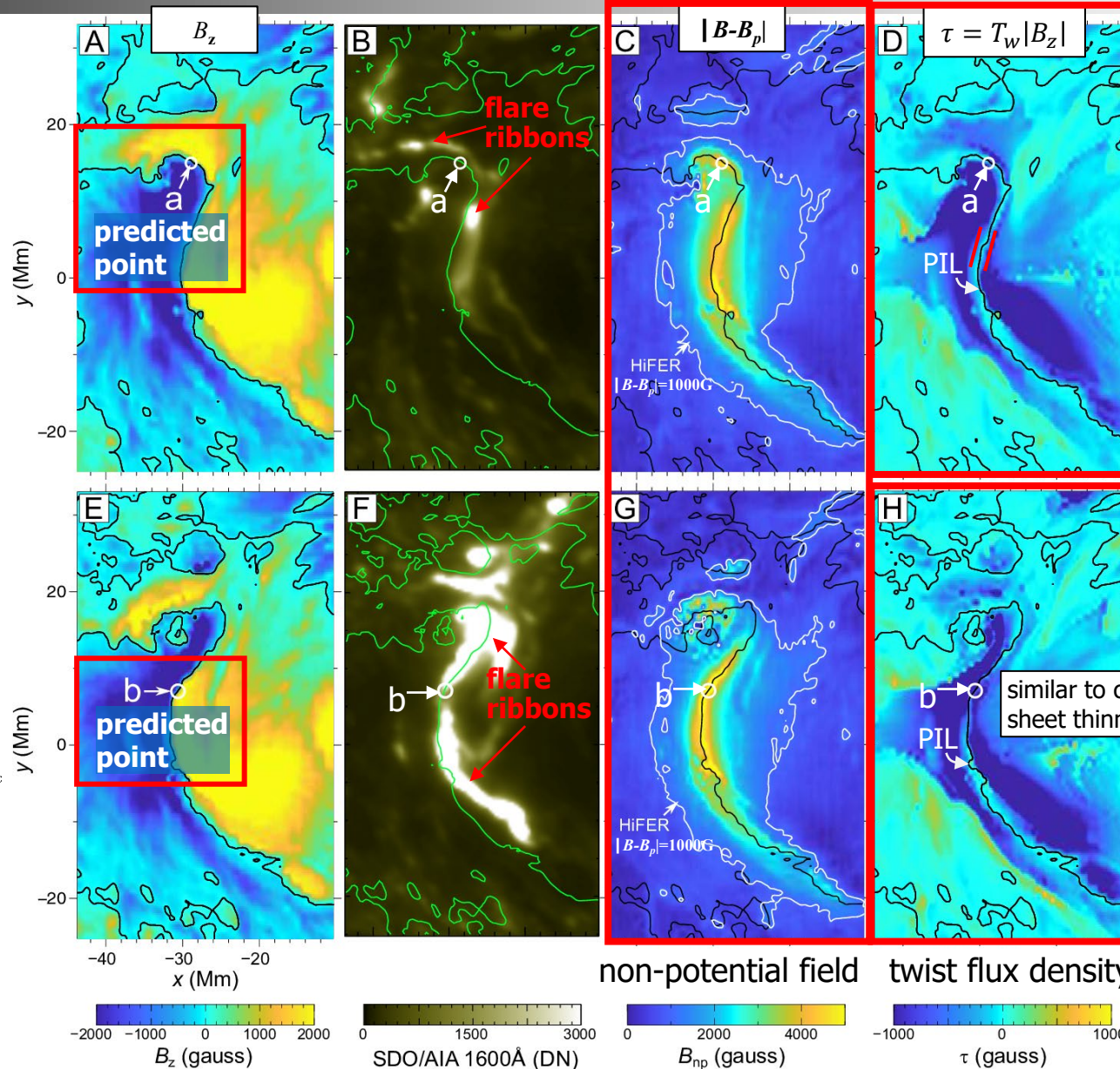
AR12673

Sep 6, 2017

before X2.2 flare

3 hours

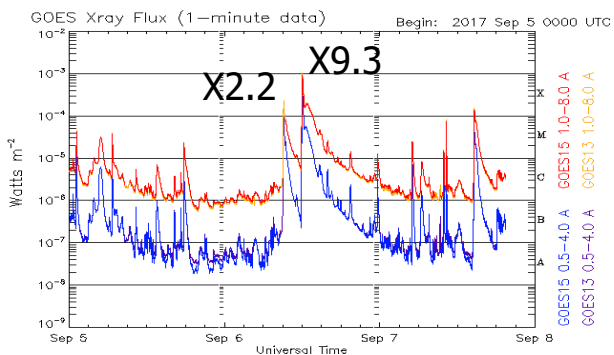
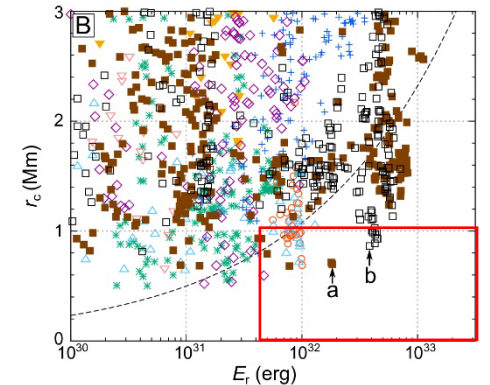
before X9.3 flare



$$\mathcal{K} = \frac{\int_{\phi_{\text{rec}}} T_w d\phi}{\Phi_{\text{over}}} = \frac{\int_{S_{\text{rec}}} \tau dS}{\Phi_{\text{over}}}$$

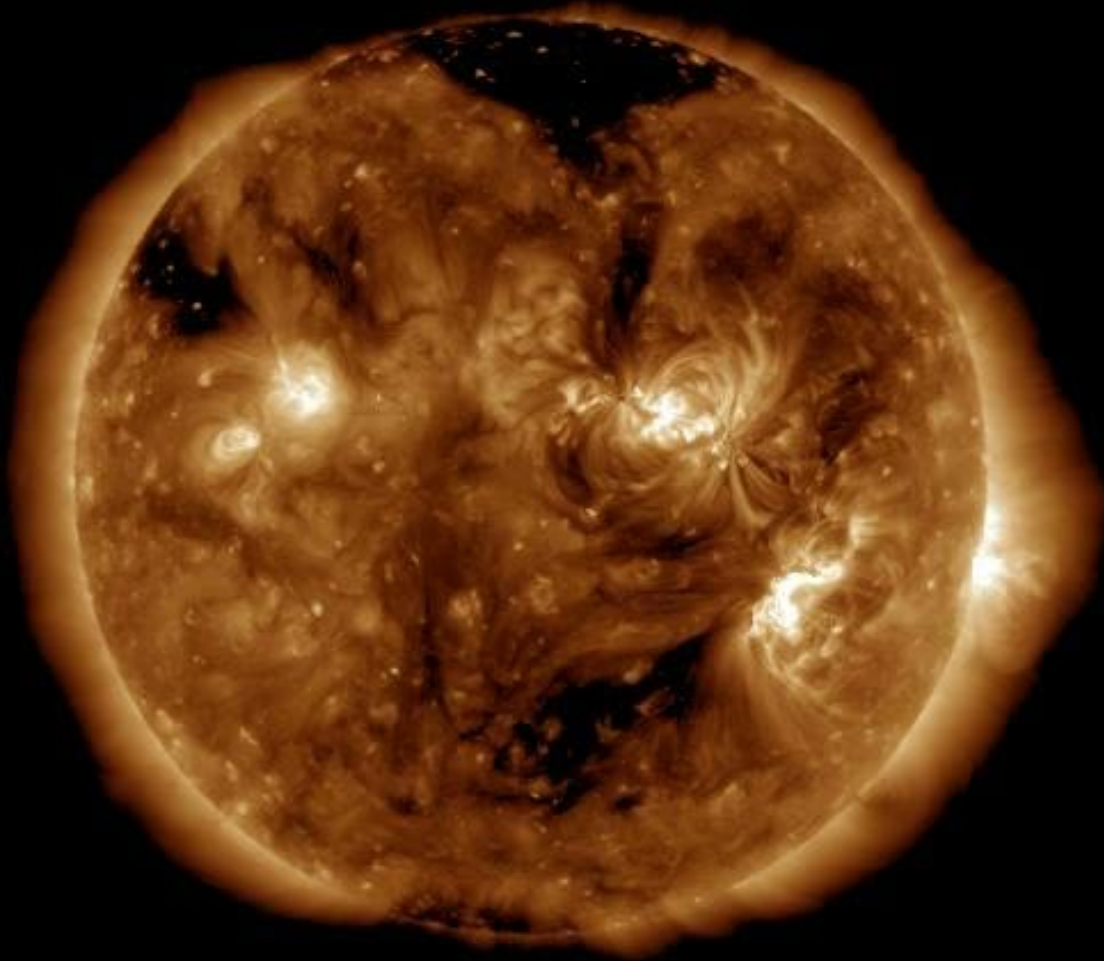
$|B_z| ds$

$\tau = T_w |B_z|$   
magnetic twist  
flux density



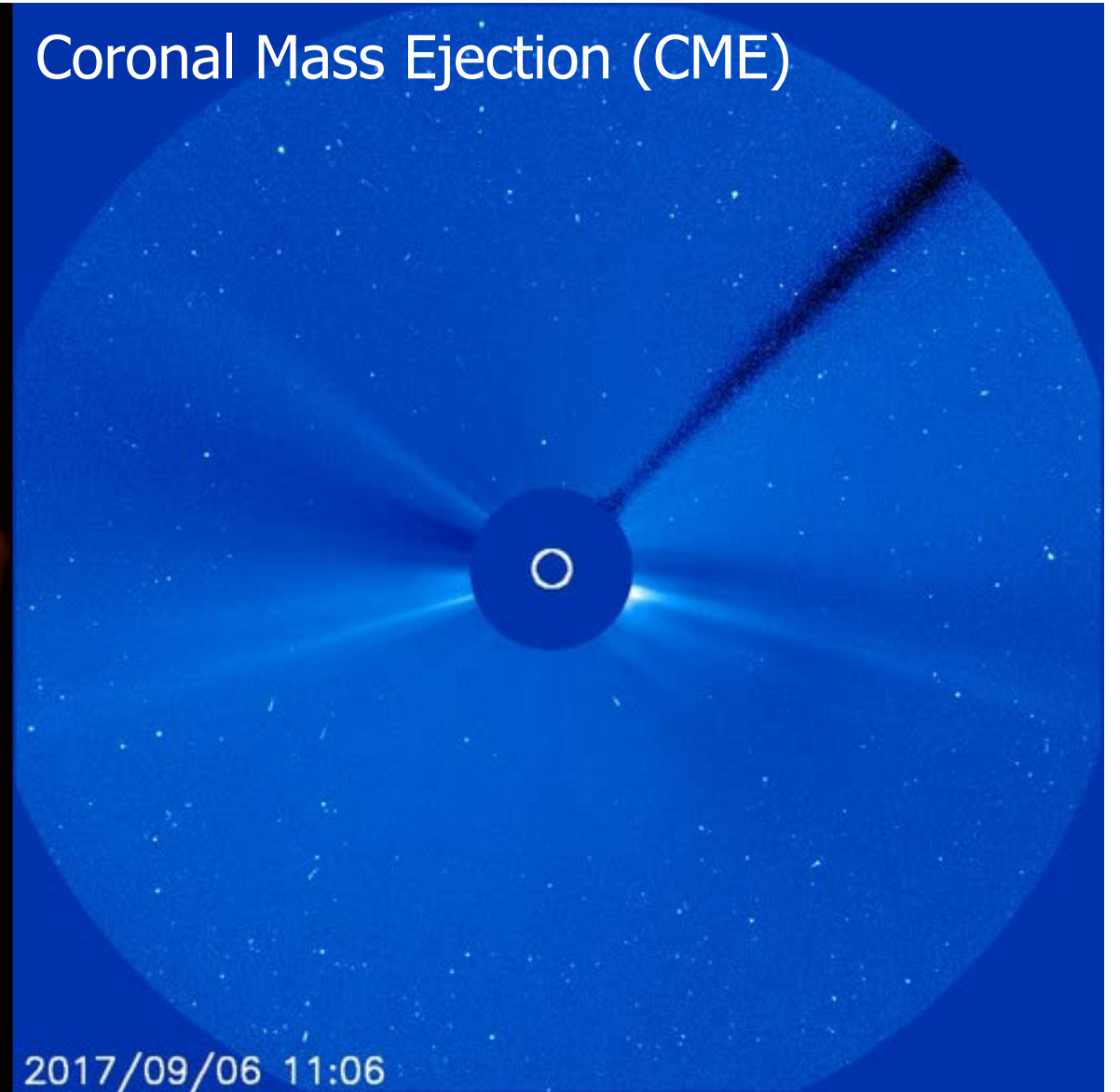
# Solar Flare and CME

Solar flare



SDO/AIA 193: 2017/09/06 11:00:17

Coronal Mass Ejection (CME)



2017/09/06 11:06

# What determines the eruptivity of flares?

- Yashiro et al. 2006 ApJ

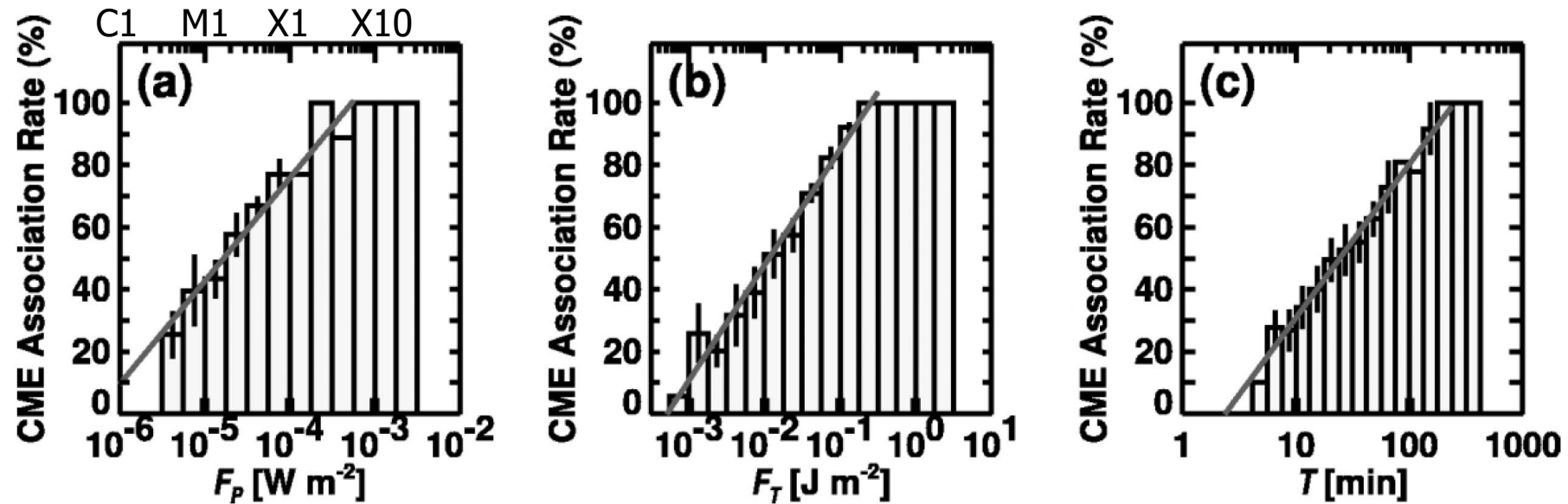
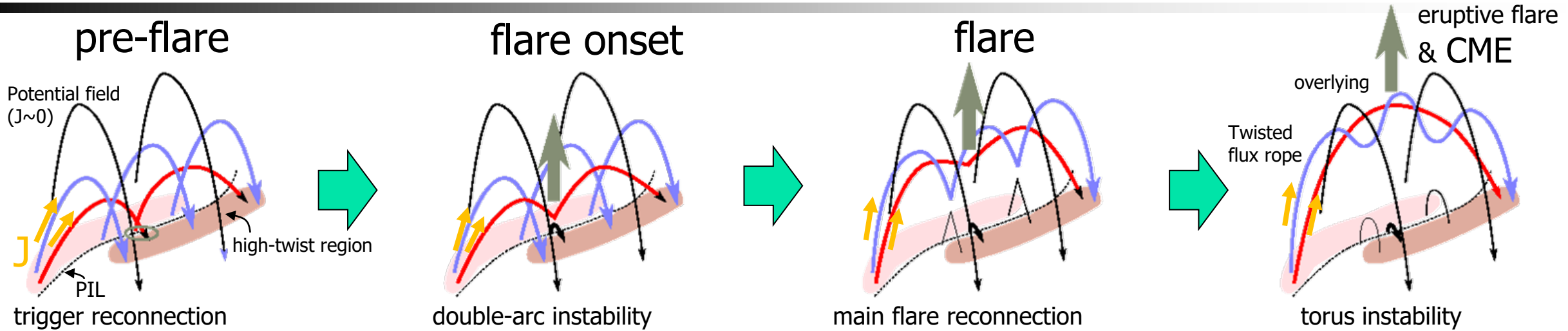


FIG. 1.—CME association rate as a function of (a) X-ray peak flux, (b) fluence, and (c) duration. The gray straight line is the least-squares fit to the data points.

# What determines the eruptivity of flares?



critical parameter for flare-onset

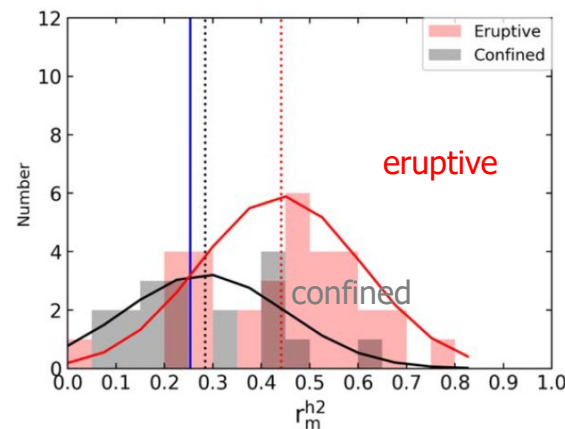
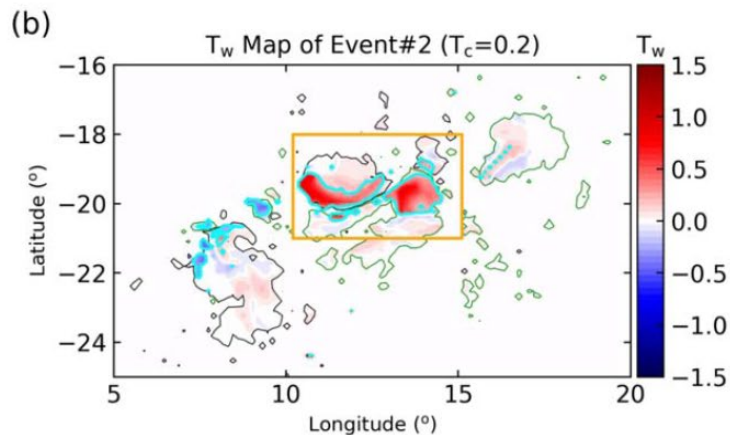
$$\kappa = \frac{\int_{r_c} T_w d\phi}{\Phi_{over}} > 0.1$$

driver  $\int_{r_c} T_w d\phi$   
suppressor  $\Phi_{over}$

critical parameter for CME-onset

$$r_m = \frac{\Phi_{high-twist}}{\Phi_{total\ overlying}}$$

driver  $\Phi_{high-twist}$   
suppressor  $\Phi_{total\ overlying}$



Forecast	Observation eruptive	Observation confined
eruptive	27 TP	6 FP
confined	8 FN	10 TN

$r_m$  is moderately able to distinguish ARs that have the capability of producing eruptive flares and CME.



# まとめ summary

---

- 太陽周期活動は太陽内部のダイナモによって駆動されていると考えられるが、未だに明確なメカニズムは未解明である。ISEEでは、スーパーコンピュータによるシミュレーションと観測の比較によって、解明する試みを進めている。
- 巨大太陽フレアは現代社会における潜在的な脅威であり、その予測は科学課題であると共に社会課題でもあるが、巨大フレアの正確な予測は未だにできていない。ISEEでは、太陽表面磁場の精密観測に基づく新たな予測スキームを開発し、高度な宇宙天気予報のための研究を進めている。
- ISEEでは、太陽周期、太陽黒点、太陽フレア以外にも、CMEの発生と伝搬の予測、磁気嵐の予測など様々な太陽活動と宇宙天気擾乱の予測研究を進めています。

# PSTEPオープン・テキストブック

名古屋大学学術機関リポジトリ

NAG●YA Repository

無料でダウンロード  
できるよ！

## 太陽地球圏環境予測

0.はじめに

1.宇宙天気と社会のつながり

2.地球電磁気圏と宇宙天気予報

3.太陽嵐と宇宙天気予報

4.太陽周期活動の予測と気候影響

5.あとがき

6.用語解説

7.執筆者・編集者紹介

太陽地球圏環境予測

オープン・テキストブック

(PSTEP Open Textbook)

編者 草野完也・石井守・三好由純  
一本潔・余田成男



- 
- Solar-Terrestrial Environmental Prediction (Springer) [電子書籍版]
  - 17,016円(税込)

Kanya Kusano *Editor*

# Solar-Terrestrial Environmental Prediction

 Springer

# 太陽宇宙環境物理学(SST)研究室

太陽・地球・惑星から成る広大なシステムで起こる多様な現象を  
スーパーコンピュータを駆使したコンピュータシミュレーション

人工衛星・地上観測データの総合解析

の融合によって、総合的に探ることができる世界的にも例の無い  
総合的研究室。

- 最先端科学研究としての太陽宇宙環境物理学
- 人間の生存環境を守るための太陽宇宙環境物理学  
(宇宙天気・宇宙気候予測研究)





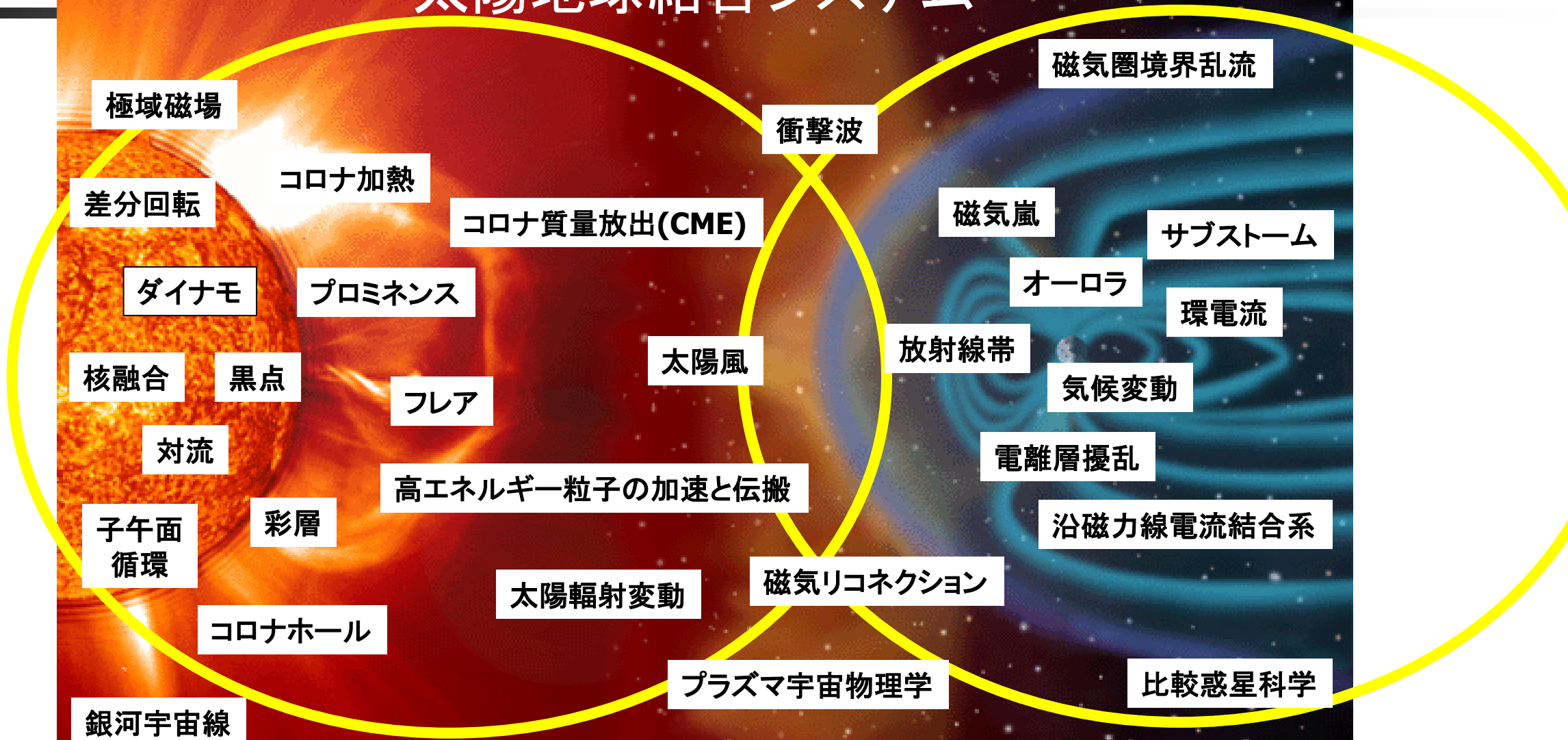
JAPANESE ENGLISH

名古屋大学 宇宙地球環境研究所 総合解析研究部

教授: 草野、三好、堀田  
准教授: 増田、梅田  
助教: 家田  
特任教授: Leka, Kistler  
特任准教授: 堀、中村  
特任助教: 10名  
研究員: 6名  
技術職員: 3名  
研究支援: 2名  
大学院生: D3名、M15名  
学部4年生: 7名



# SST研(総合解析研究部)の研究テーマ 太陽地球結合システム



太陽内部→彩層→コロナ→太陽風→磁気圏→電離圏→大気→地表

# 研究テーマ

---

- 太陽ダイナモ機構、黒点形成、太陽対流層
- 太陽フレアの発生機構と予測
- 太陽フレアにおける高エネルギー粒子加速
- 太陽コロナ加熱機構
- 太陽風の形成と加速
- コロナ質量放出の形成と伝搬
- 爆発的なオーロラ発生の機構
- 放射線帯の変動機構
- 多様なプラズマ・シミュレーション研究
- 宇宙天気・宇宙気候の理解と予測

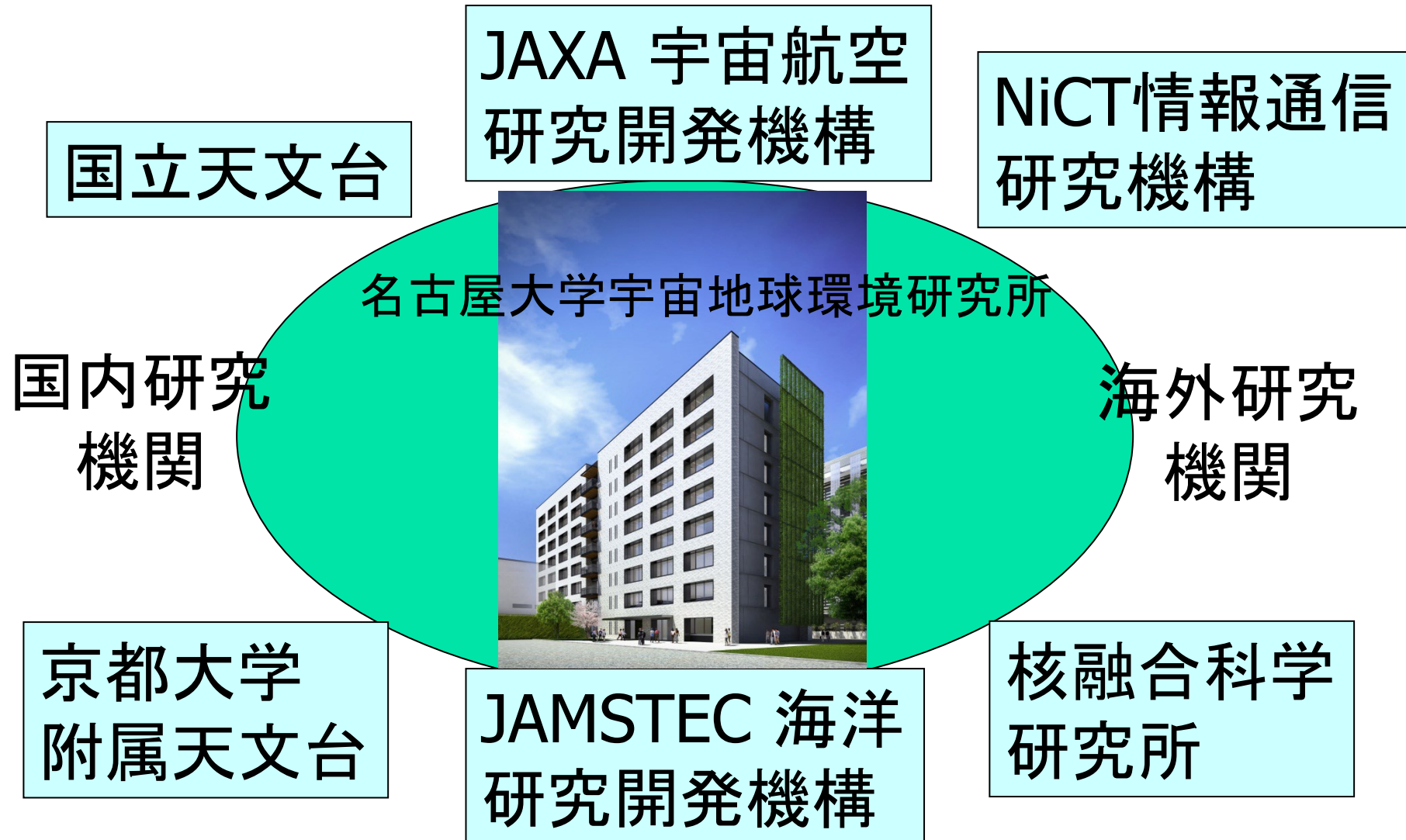
# 学生生活の様子



世界各国との共同研究に参加し、修士課程の段階から国内外の学会等に  
参加・成果発表をしています。スポーツも盛ん。フットサル優勝！



# 分野横断研究と広範なネットワーク



# 卒業後の進路

## 修士課程卒業生：

- 宇宙航空研究開発機構 (JAXA)
- キヤノン電子株式会社
- 三菱スペース・ソフトウェア
- 川崎汽船
- IT企業各社

## 博士課程卒業生：

- 宇宙航空研究開発機構 (JAXA) プロジェクト研究員
- プリファードネットワークス
- 日立製作所
- カリフォルニア大学バークレー校宇宙科学研究所研究員
- オーストリア科学アカデミー宇宙科学研究所研究員
- フランス国立科学研究センター (CNRS) LATMOS ポスドク研究員
- 韓国チュンナム大学ポスドク研究員
- インドネシア国立航空宇宙研究所 (LAPAN)

# 総合解析研究部の特徴

## ■ 学際分野をカバーする豊富な教授陣

- 太陽物理学、地球電磁気学、プラズマ物理学、惑星科学、宇宙物理学、シミュレーション科学の広い分野から自由にテーマを選べる。

## ■ 最先端の研究に直結

- 最新の衛星観測データ、世界最高速のスーパーコンピュータを使った研究の実践

## ■ 国際的な活躍

- 修士学生から国際会議参加、国際共同研究を実施

## ■ 多様な進路

- 様々な研究機関、企業への進路が可能