

# 宇宙天気三二講座 -太陽風編-

情報通信研究機構  
電磁波研究所電磁波伝搬研究センター  
宇宙環境研究室  
塩田 大幸

# 宇宙天気と太陽



## 宇宙天気予報

宇宙環境じょう乱の発生と障害を予測

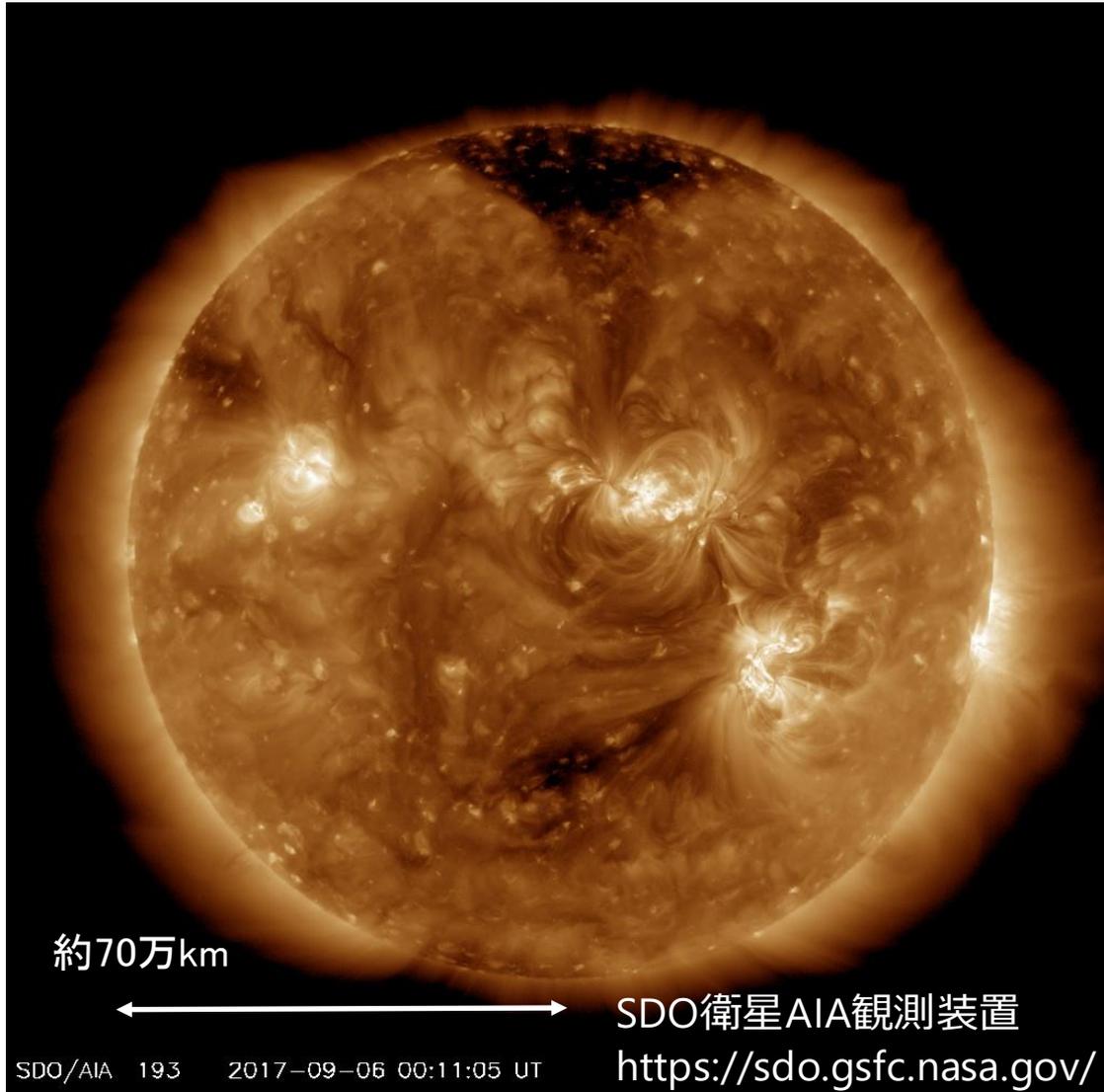
# この三二講座の内容

- 太陽コロナと太陽風・惑星間空間磁場
- 太陽の磁場と高速太陽風
- 太陽風とコロナ質量放出（CME）
- 太陽高エネルギー粒子（SEP）
- 2024年に発生した大規模太陽嵐のCMEとSEP

# この三二講座の内容

- 太陽コロナと太陽風・惑星間空間磁場
- 太陽の磁場と高速太陽風
- 太陽風とコロナ質量放出（CME）
- 太陽高エネルギー粒子（SEP）
- 2024年に発生した大規模太陽嵐のCMEとSEP

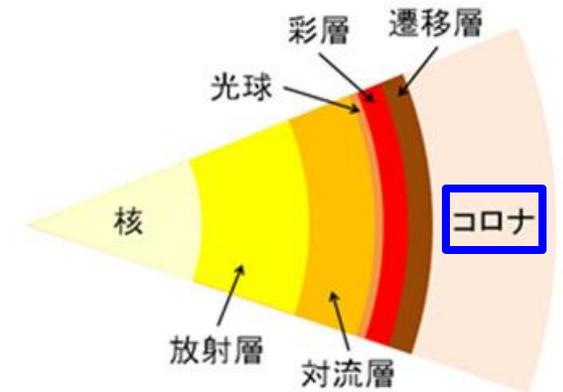
# 太陽コロナ（極端紫外線:波長19.3nm）



100万度超の高温ガス。  
プラズマという電離した  
状態。

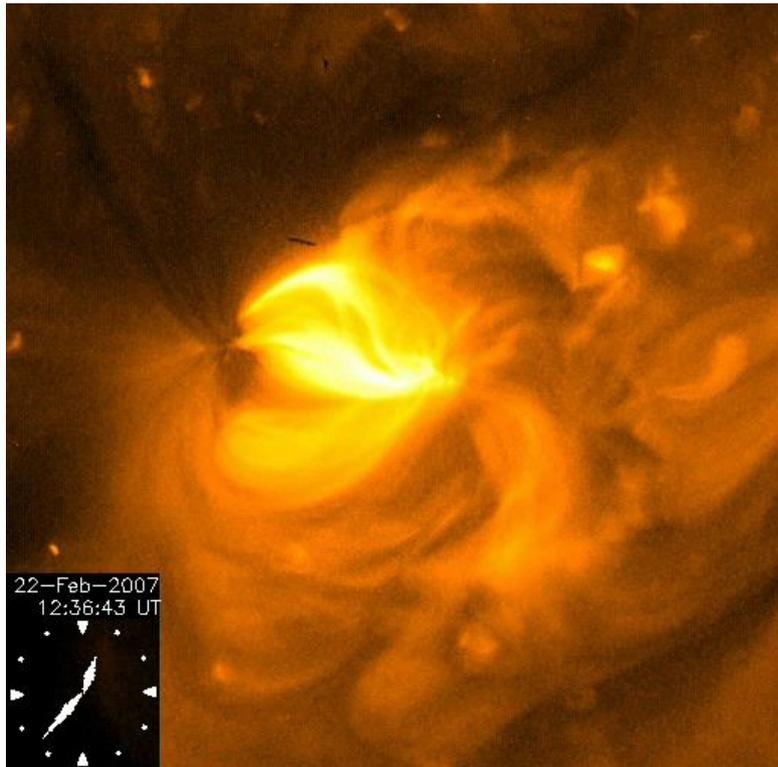
黒点付近の上空で、黒点  
同士をつなぐような筋状  
の明るい構造が見える。

ガスが極端に少ない領域  
コロナホールが見える。

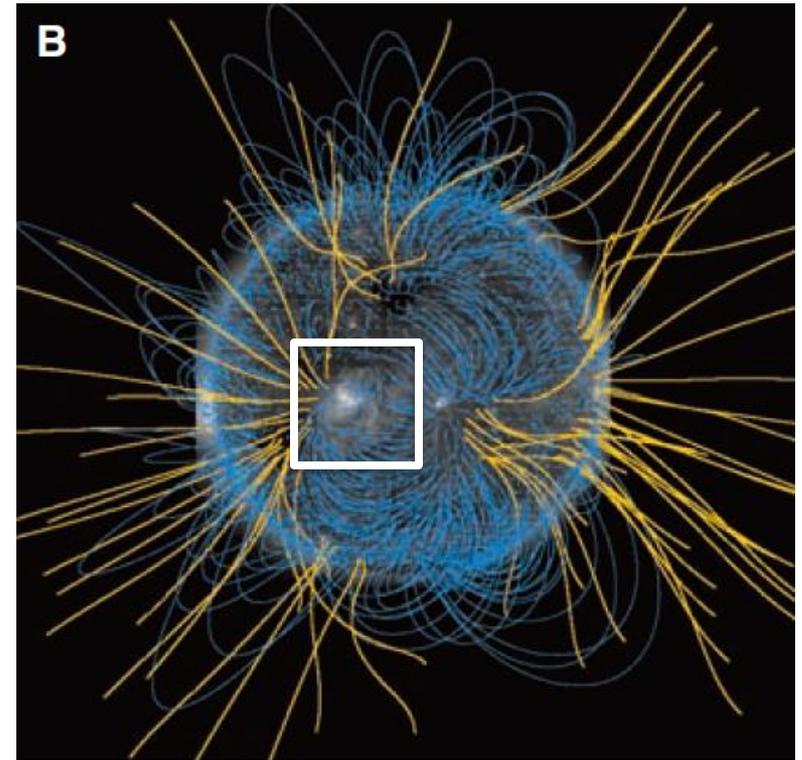


太陽の断面

# コロナホールと太陽風



ひのでX線（コロナ）画像



コロナの磁力線の様子

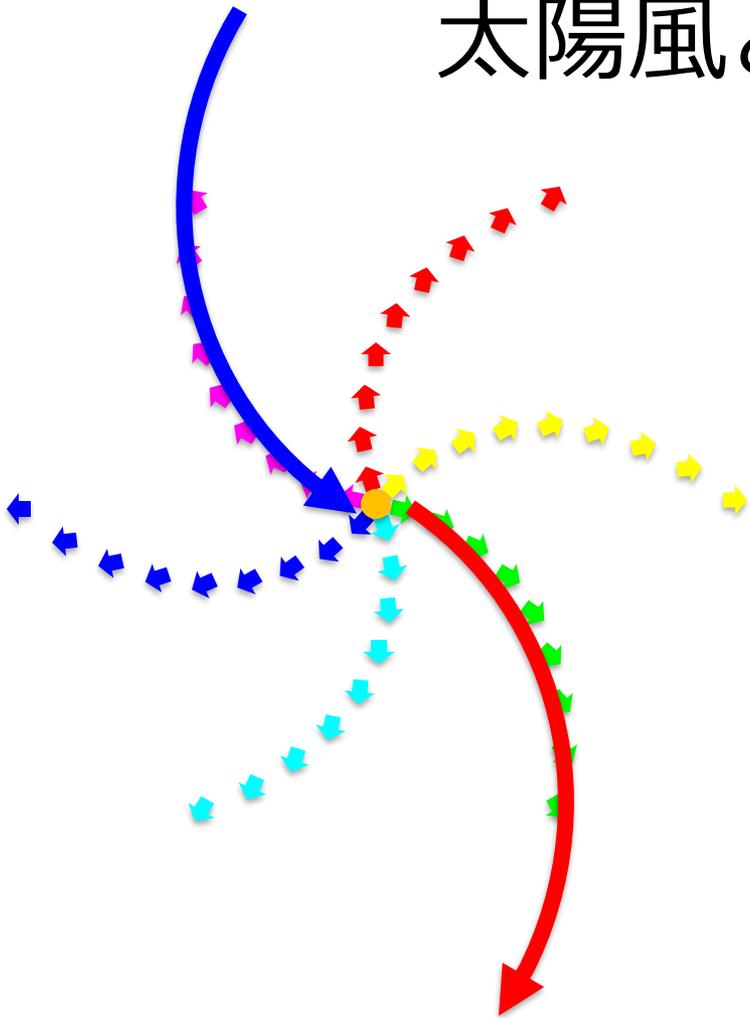
- コロナホールでは、コロナガスが高速で流出する様子が観測される。この常に太陽から流出するガスの流れを「太陽風」という。
- コロナホールは磁力線が太陽の外の空間につながる（黄色）領域。

# コロナグラフで見た太陽風



SOHO探査機 LASCO 観測装置：遮蔽版で太陽を隠した人工の日食観測。  
明るさ：コロナガス（プラズマ）の密度。白丸：太陽の位置

# 太陽風と惑星間磁場



## 太陽風の流れと磁力線

- 太陽風が流出した領域は太陽の自転によって西に移動。
- 同じ領域から流出した太陽風は同じ磁力線で繋がっている。
- 太陽から太陽風につながる磁力線は渦状の形状をなす。これをパーカースパイラルという。
- 太陽表面正極（N極）につながる磁力線： **away** 極性
- 太陽表面負極（S極）につながる磁力線： **toward** 極性

# 太陽風の“その場 (in situ)”定点観測



地球の前方150万kmのラグランジュ点にいる  
探査機DSCOVRによるin situ 観測

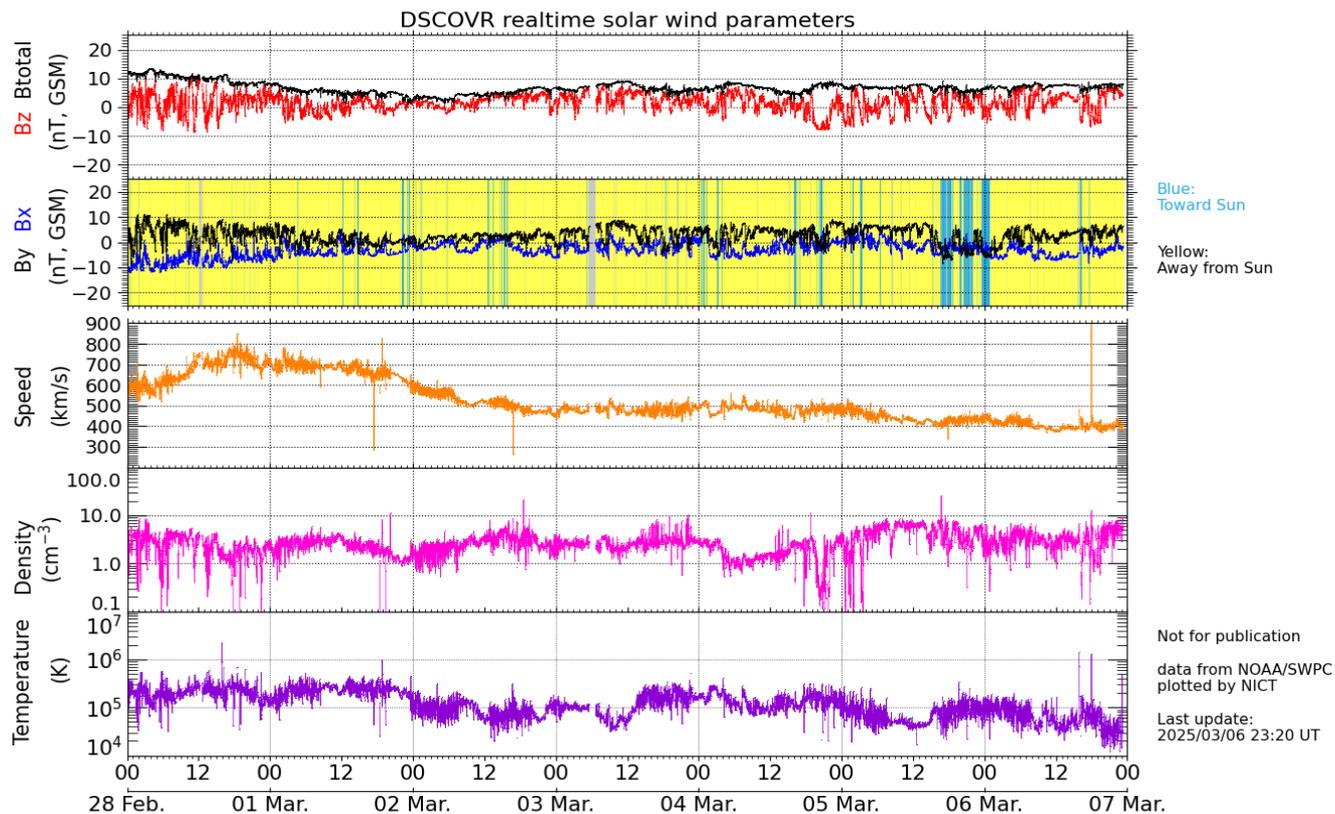
磁場  
南北成分

磁場  
方位角

速度

密度

温度



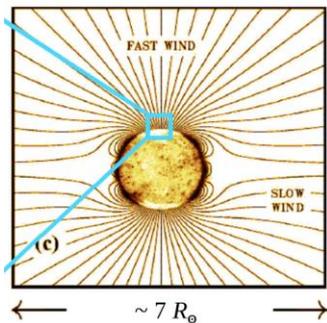
2025年2月26日 から1週間  
<https://swc.nict.go.jp/trend/solarwind.html>

# この三二講座の内容

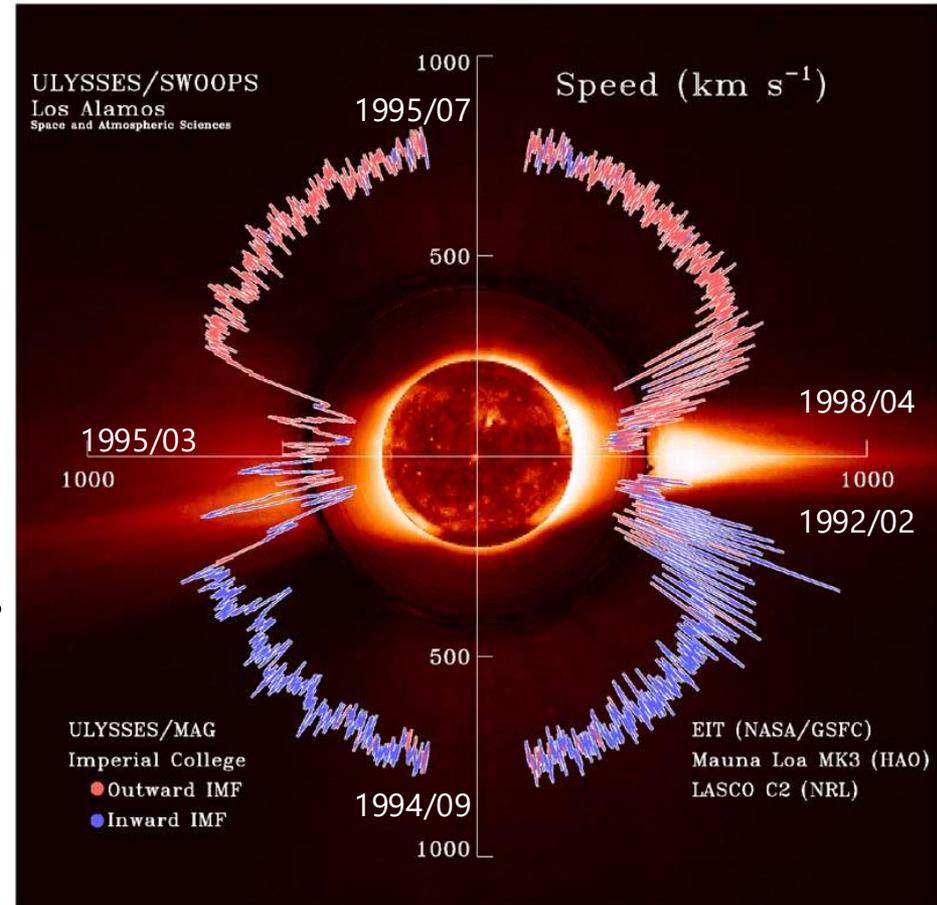
- 太陽コロナと太陽風・惑星間空間磁場
- 太陽の磁場と高速太陽風
- 太陽風とコロナ質量放出（CME）
- 太陽高エネルギー粒子（SEP）
- 2024年に発生した大規模太陽嵐のCMEとSEP

# 太陽コロナと太陽風速度

- Ulysses探査機でその場観測された太陽風の緯度分布（原点からの距離が太陽風速度、色が磁場の極性）
- 背景：コロナ画像
- 1995前後：太陽活動極小期
- 極域に大きなコロナホール。ここから高速太陽風が流出。
- 太陽風の加速メカニズムは未解明。



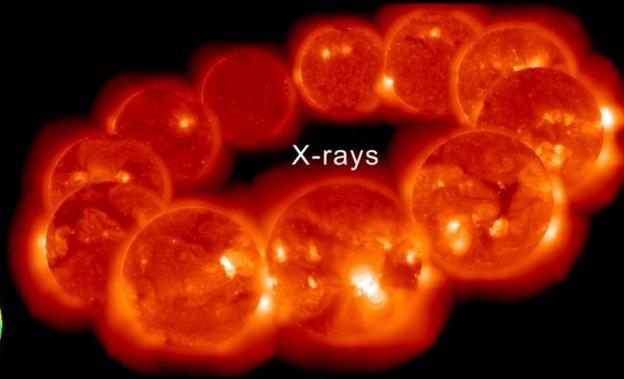
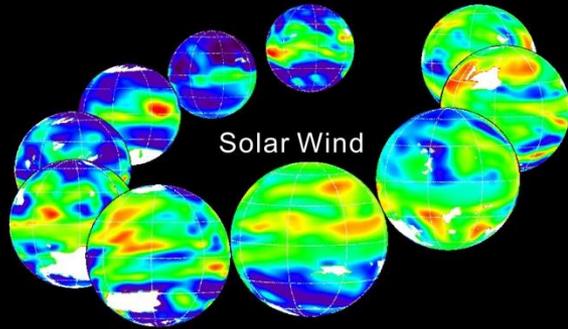
Cranmer & van Ballegooijen 2005



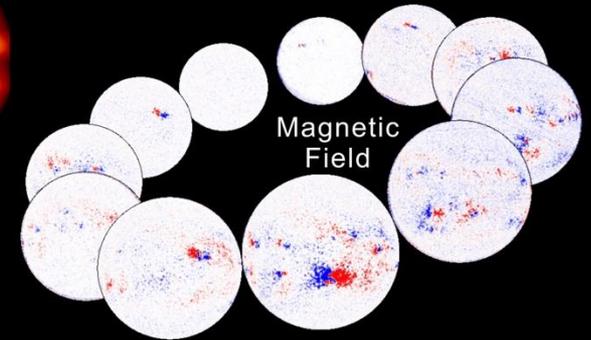
<https://solarscience.msfc.nasa.gov/people/suess/SolarProbe/Page3.htm>

# 太陽の磁場の長期変動

IPS観測  
太陽風速度



磁場

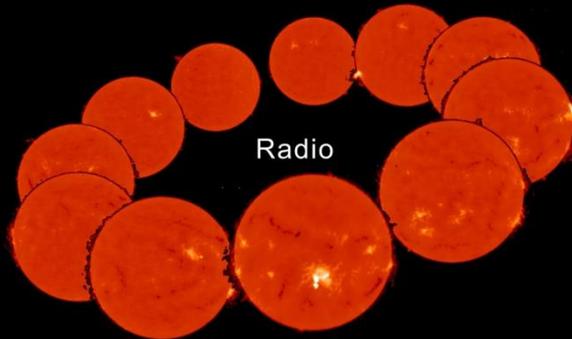


X線

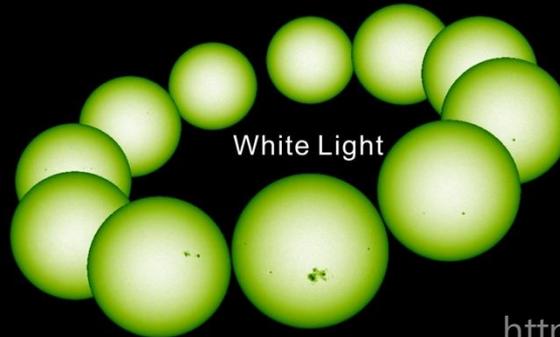


Solar Cycle 2009-2019

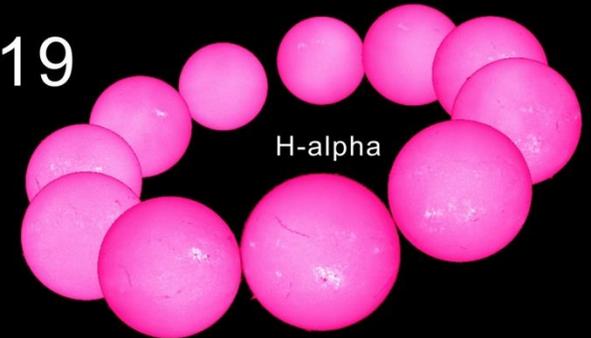
電波



可視光線



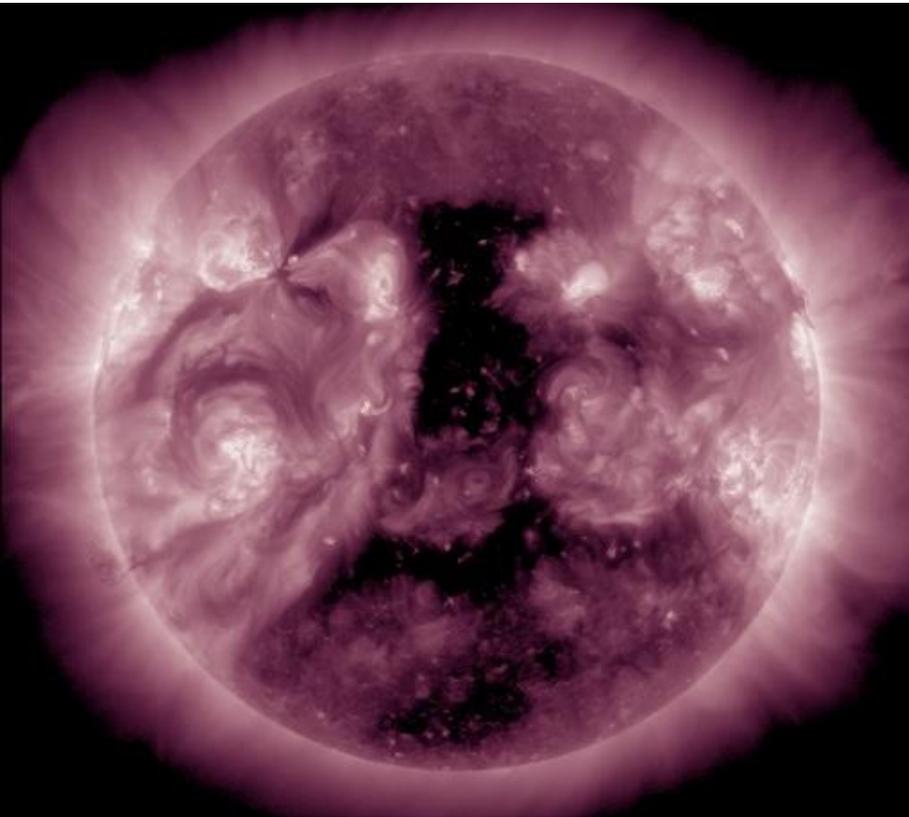
H-alpha



H $\alpha$ 線

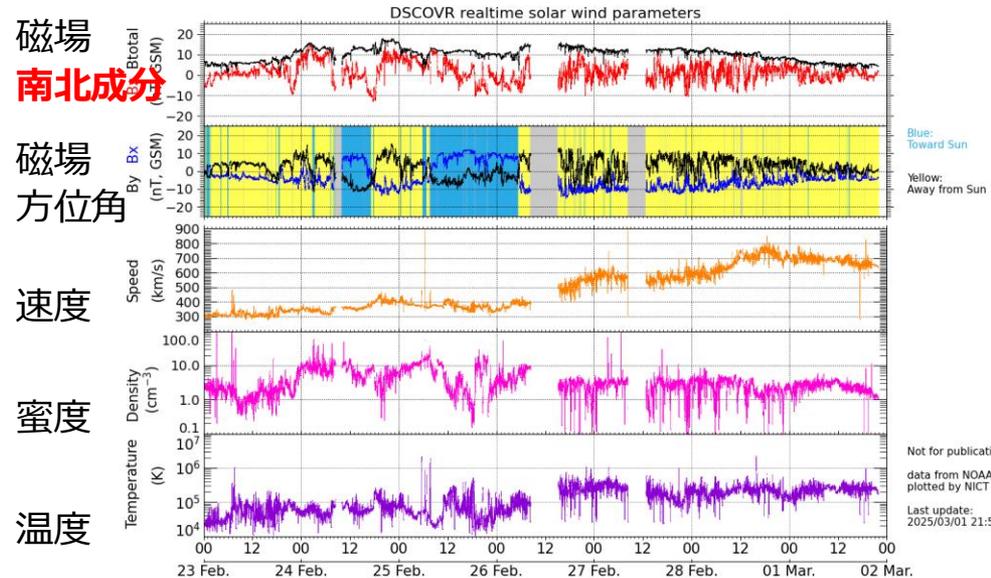
# 高速太陽風の到来とコロナホール

- 大きなコロナホールが低緯度帯に存在するとき、地球に高速太陽風が到来する可能性が生じる。



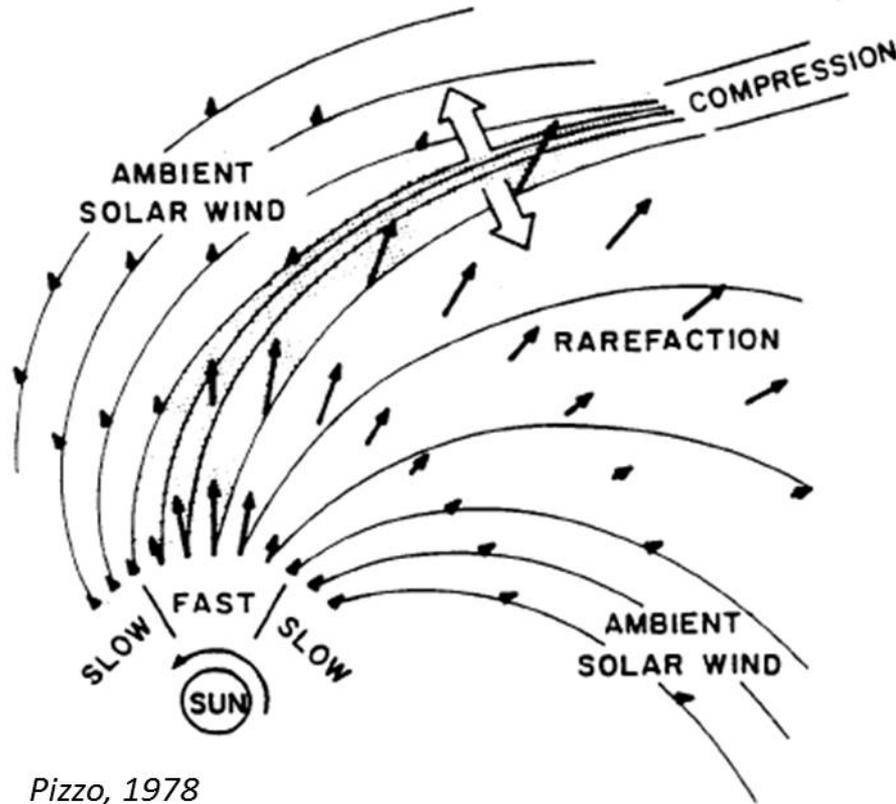
2025/02/26

2025/02/23-3/1

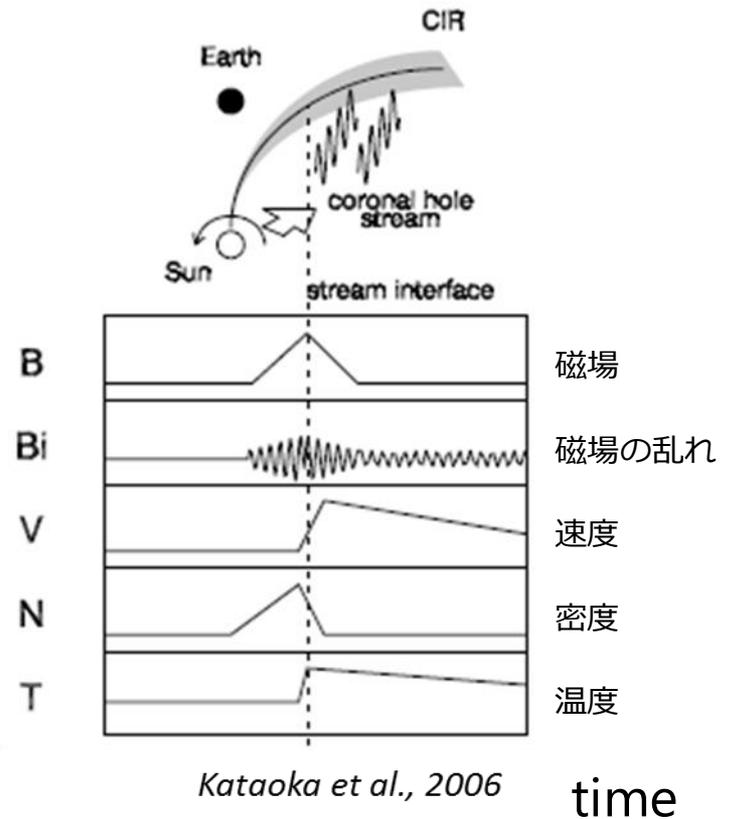


2/23 24 25 26 27 28 3/1

# 共回転相互作用領域 CIR (co-rotational interaction region)



Pizzo, 1978

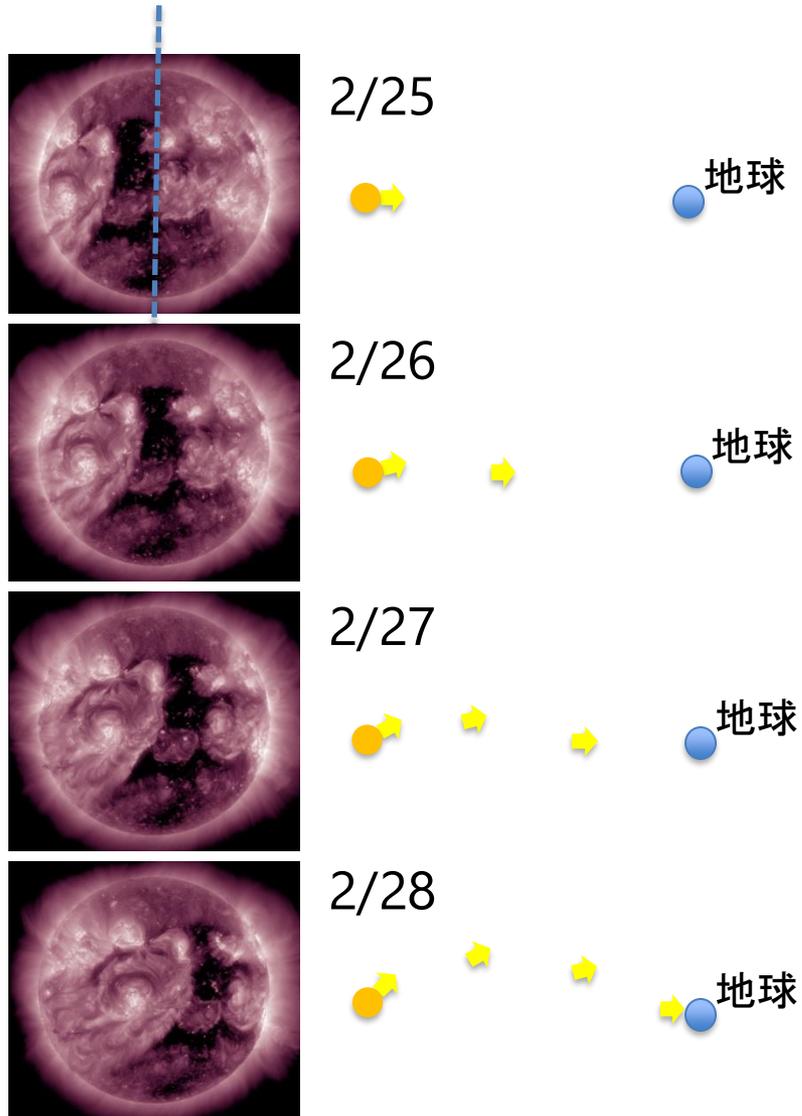


Kataoka et al., 2006

time

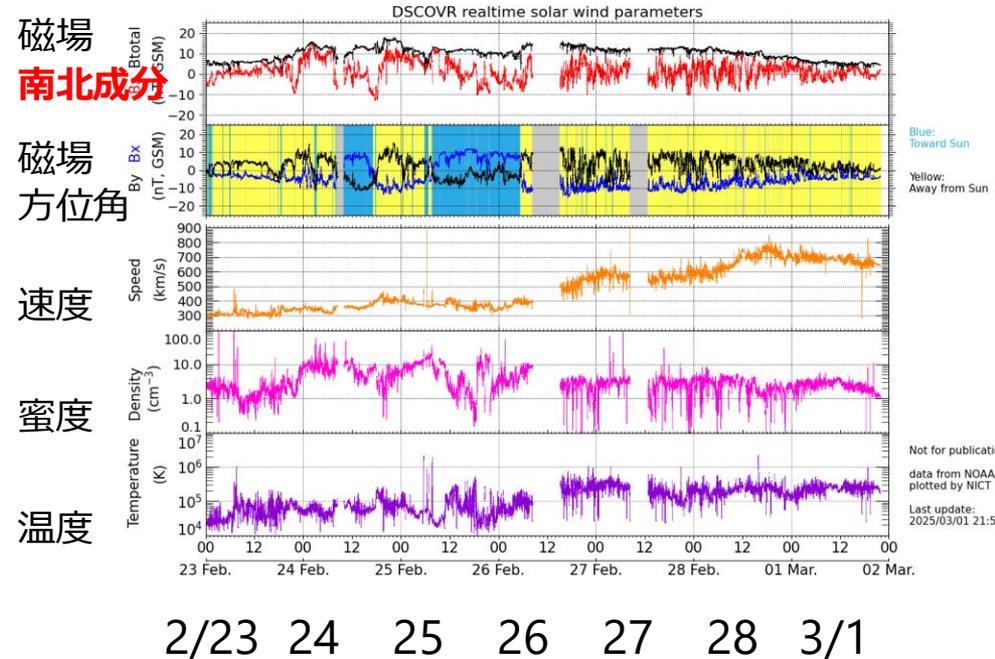
低速太陽風の後ろから高速太陽風が流れてくると、境界領域で圧縮等の相互作用の結果、特徴的な構造が形成される。この構造を共回転相互作用領域 (CIR) という。CIRは磁気圏の乱れの要因の一つ。

# 高速太陽風の到来とコロナホール



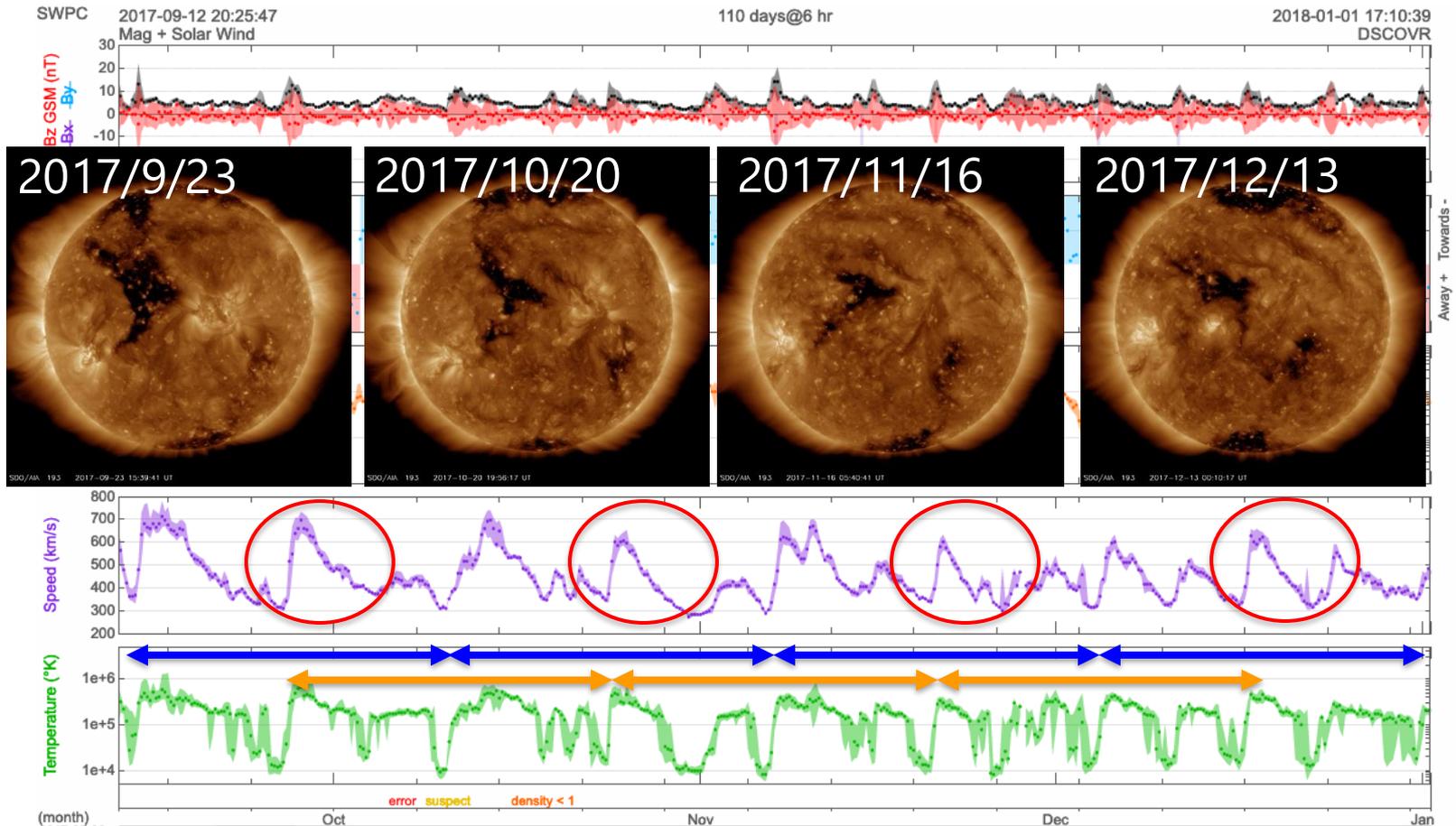
- 大きなコロナホールが低緯度帯に存在するとき、地球に高速太陽風が到来する可能性が生じる。

2025/02/23-3/1



# 回帰性高速太陽風による予測

## REAL TIME SOLAR WIND



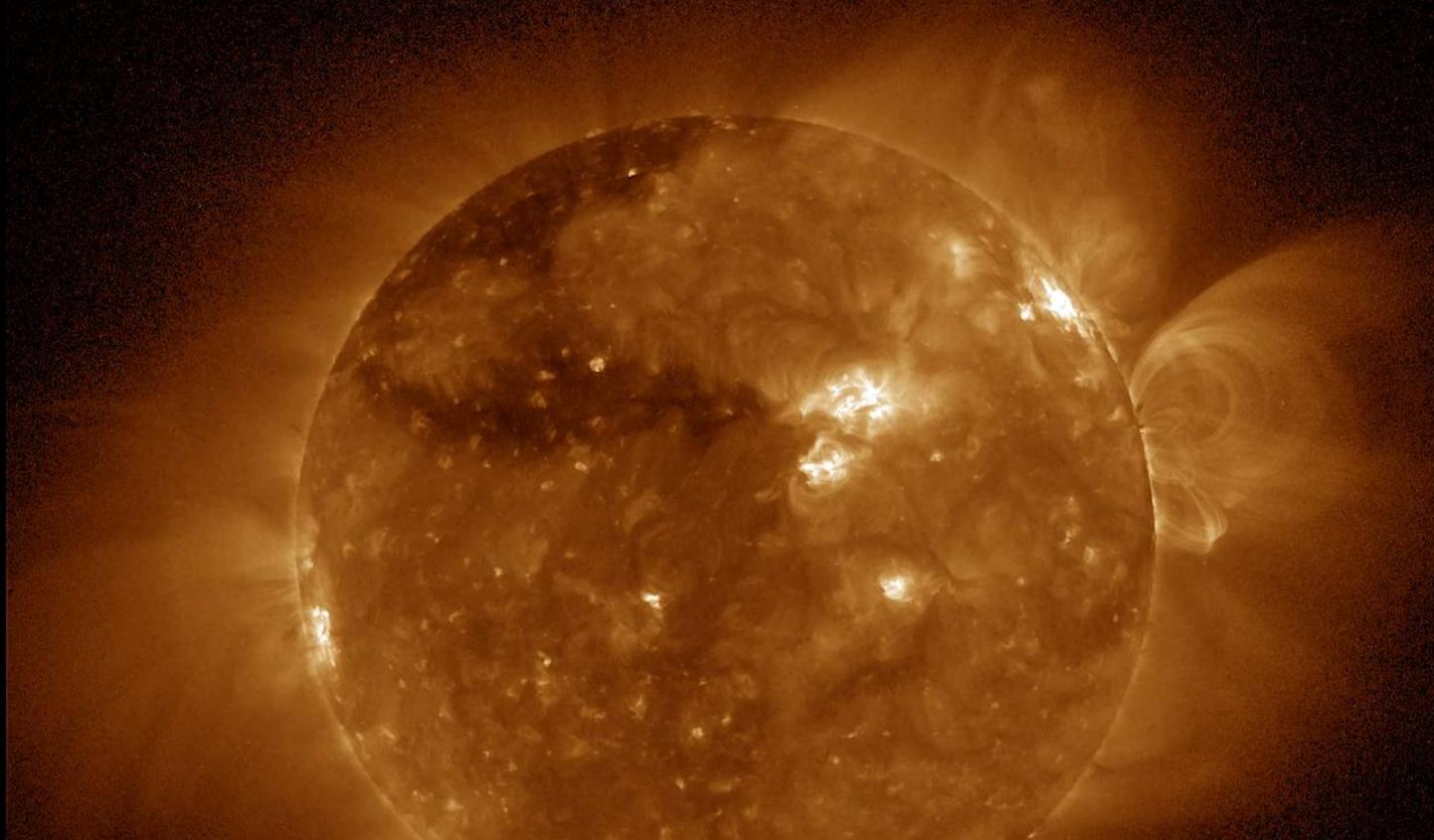
速度

低緯度コロナホールが長期間存在し続けると約27日毎に高速風が到来。  
前周期の太陽風観測に基づいて高速風の予測ができる

# この三二講座の内容

- 太陽コロナと太陽風・惑星間空間磁場
- 太陽の磁場と高速太陽風
- 太陽風とコロナ質量放出 (CME)
- 太陽高エネルギー粒子 (SEP)
- 2024年に発生した大規模太陽嵐のCMEとSEP

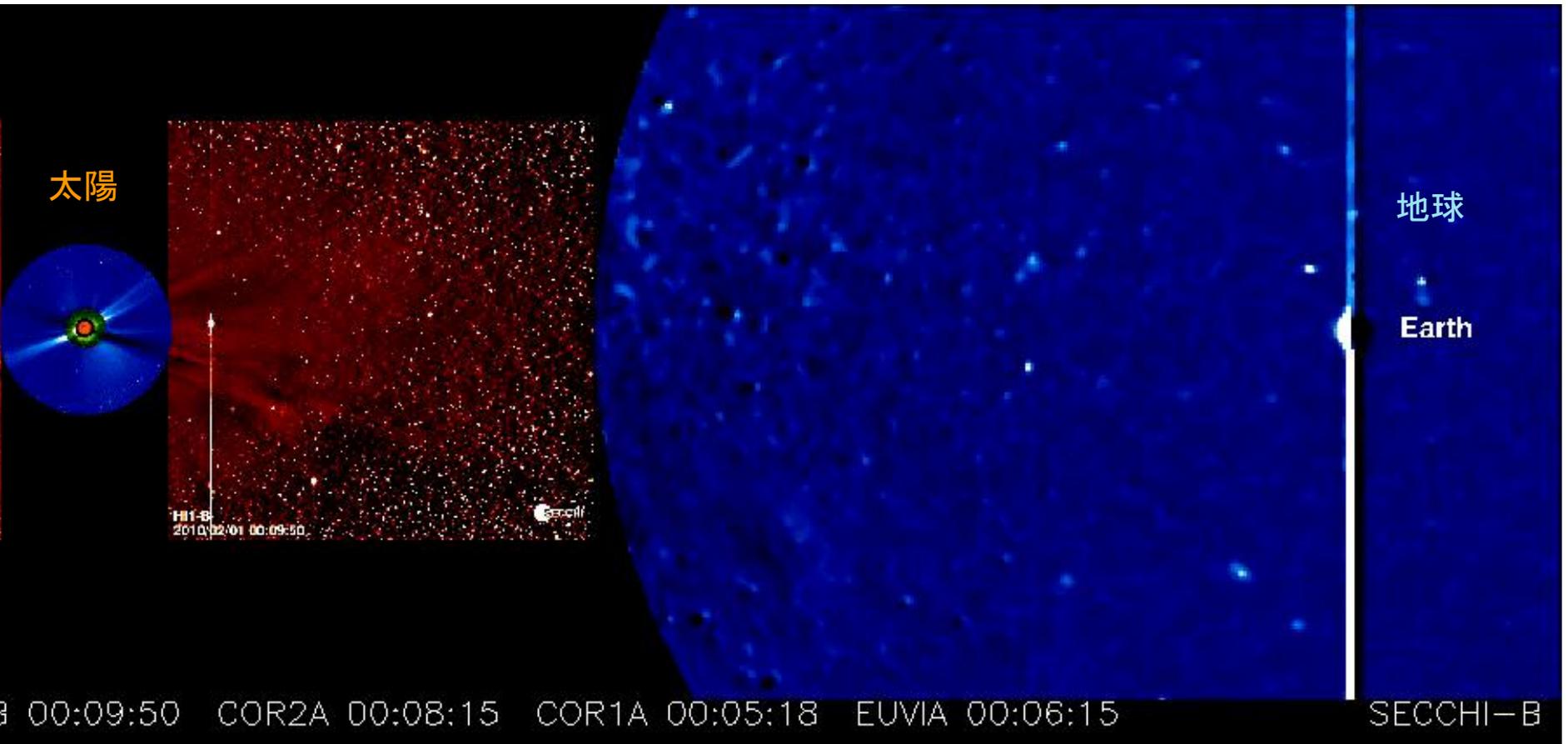
# 2017年9月10日のXクラスフレアとCME



大規模な太陽フレアにともなって、コロナガス(プラズマ)が太陽の外へ放出されるとき、これをコロナ質量放出(coronal mass ejection: CME)という。太陽フレアとCMEをまとめて「太陽嵐」と呼ぶ。

NOAA/GOES (極端紫外線:波長19.5nm, Seaton & Darnel 2018)

# 太陽と地球の間を伝搬するCMEを横から観測

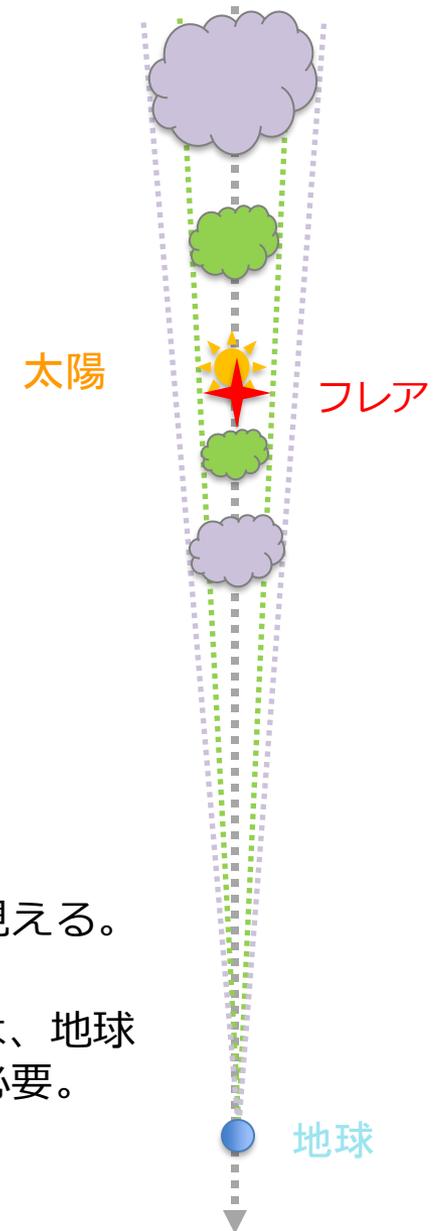
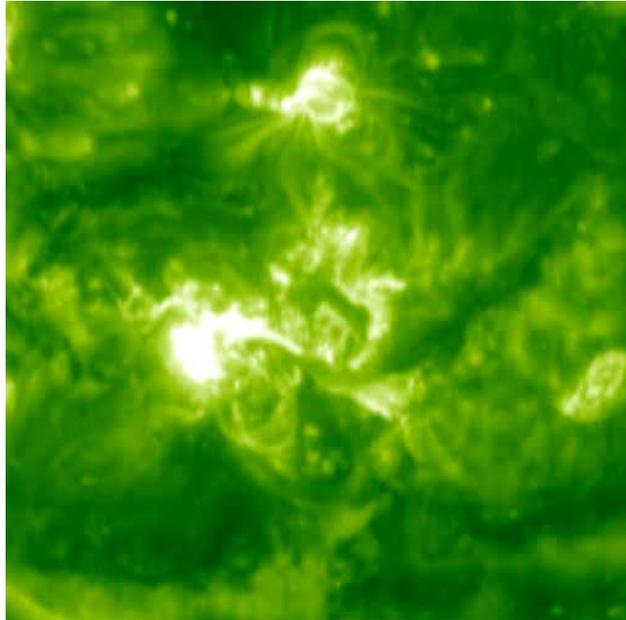


Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation (SECCHI)

NASA/STEREO

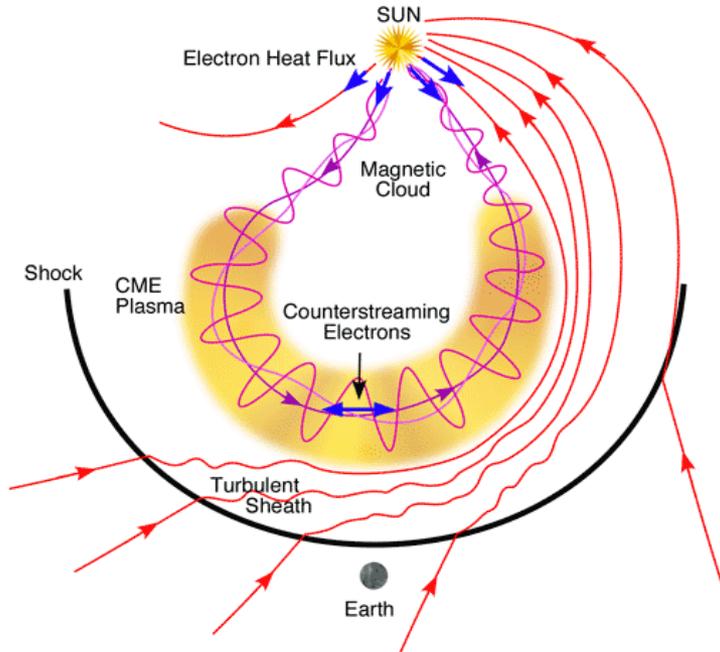
# ハロー-CME

2003年10月28日に発生したX20フレアおよびCME



- ハロー-CME : 全方向に広がっていく様子が観測されるCME
- 太陽と地球を結ぶ線に沿ってCMEが伝搬したときこのように見える。(コロナグラフは太陽の前後にあるガスが同じように見える)
- 太陽面の中央付近でフレア (コロナの擾乱) が発生した場合は、地球に向かう方向にCMEが放出された可能性が大きいので警戒が必要。
- LDEフレア (長時間フレア) : ほとんどの場合CMEを伴う。

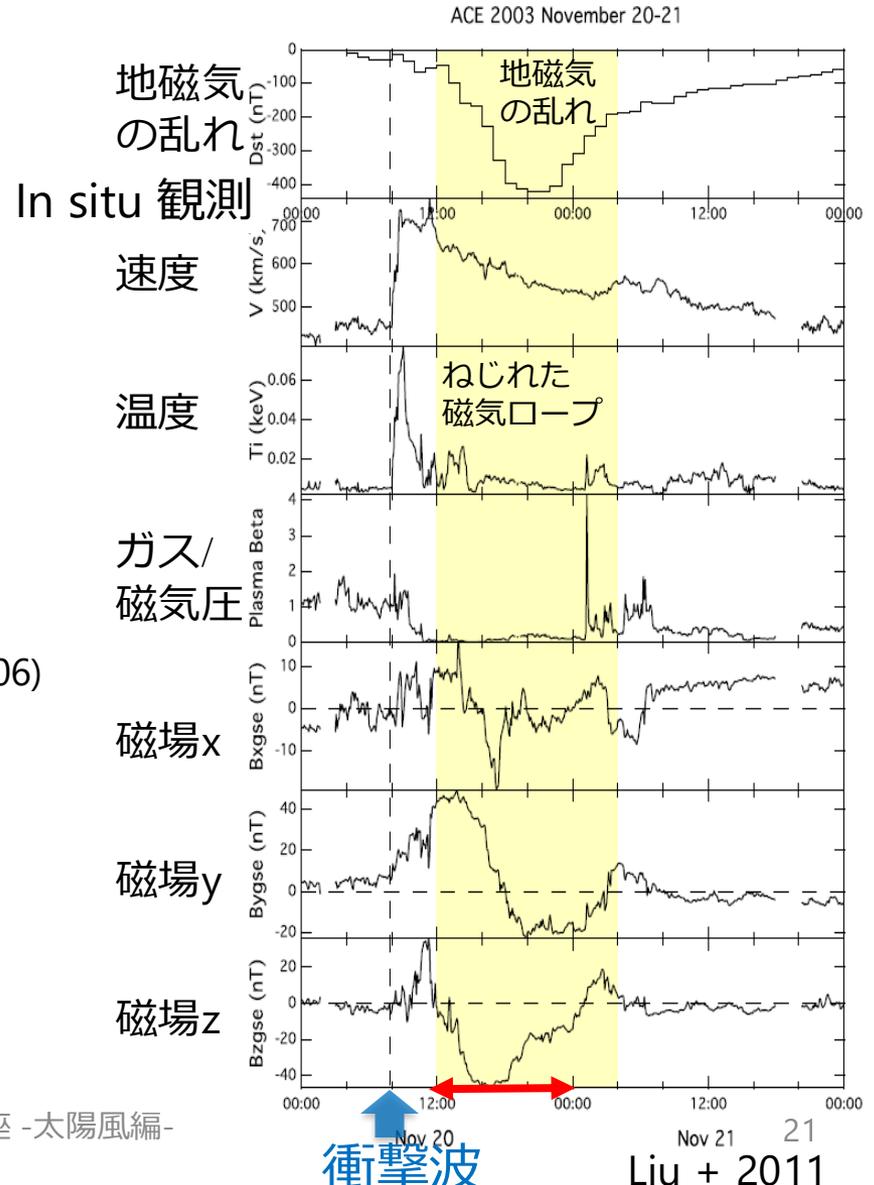
# 地球に到来するCME



(Zurbuchen & Richardson 2006)

- ねじれた磁気ロープが太陽風の中を高速で移動
- 太陽風ガスを押し集めて一体となって到来
- 背景の太陽風とCMEの間に衝撃波

- ねじれた磁気ロープが地球を通過
- 通過中に磁場の向きがゆっくり変化
- 南向きの磁場を持つとき → 磁気圏の乱れ



# この三二講座の内容

- 太陽コロナと太陽風・惑星間空間磁場
- 太陽の磁場と高速太陽風
- 太陽風とコロナ質量放出（CME）
- 太陽高エネルギー粒子（SEP）
- 2024年に発生した大規模太陽嵐のCMEとSEP

# 太陽高エネルギー粒子(SEP)

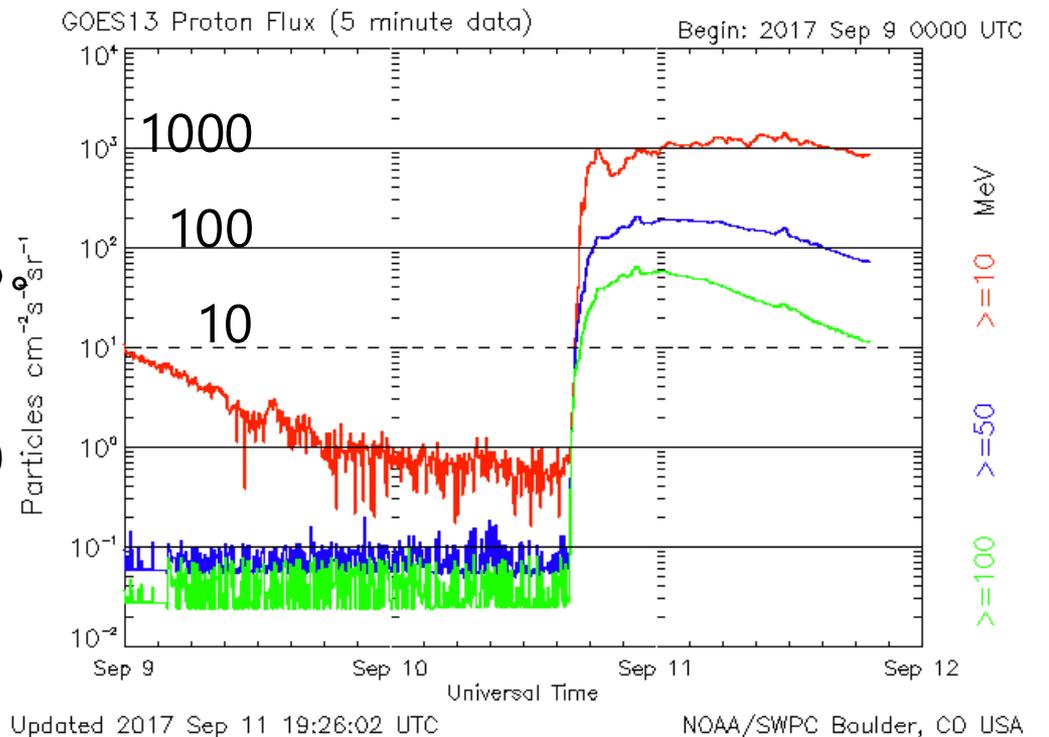
太陽高エネルギー粒子：

主成分はプロトン(陽子=水素原子核)と電子。

静止軌道の高エネルギープロトン、GOES衛星によって監視されているあるエネルギー帯(10 MeV以上)のプロトンの量(赤いグラフ)が、破線のレベル(10個  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1}$ )より高くなった時、**プロトン現象**発生とよぶ。

1000を超えると深刻な影響が出る可能性がある

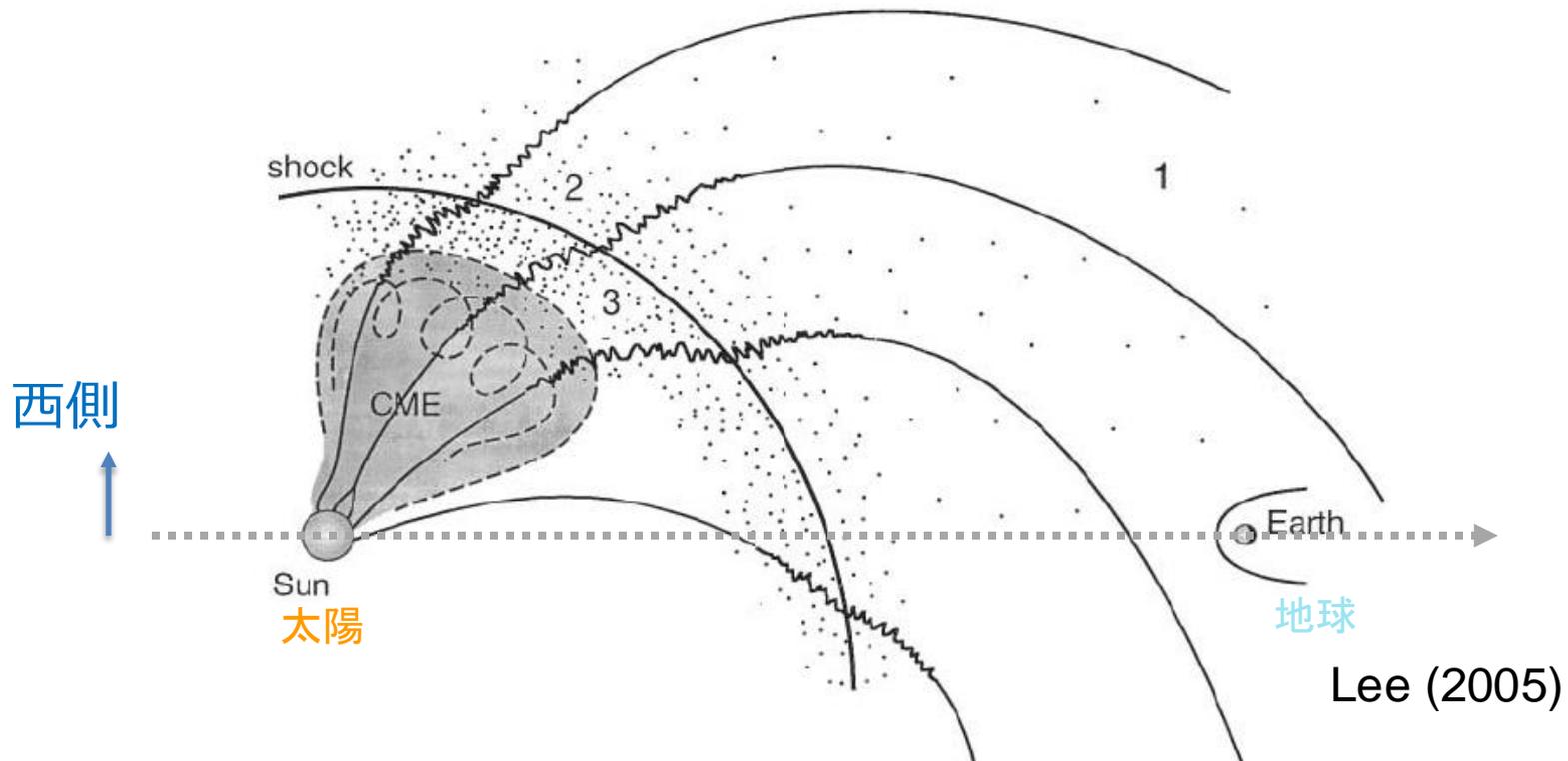
GOES衛星による高エネルギープロトン観測



高エネルギープロトンの増加 ⇒ { 宇宙飛行士被ばく  
短波通信途絶  
衛星誤作動

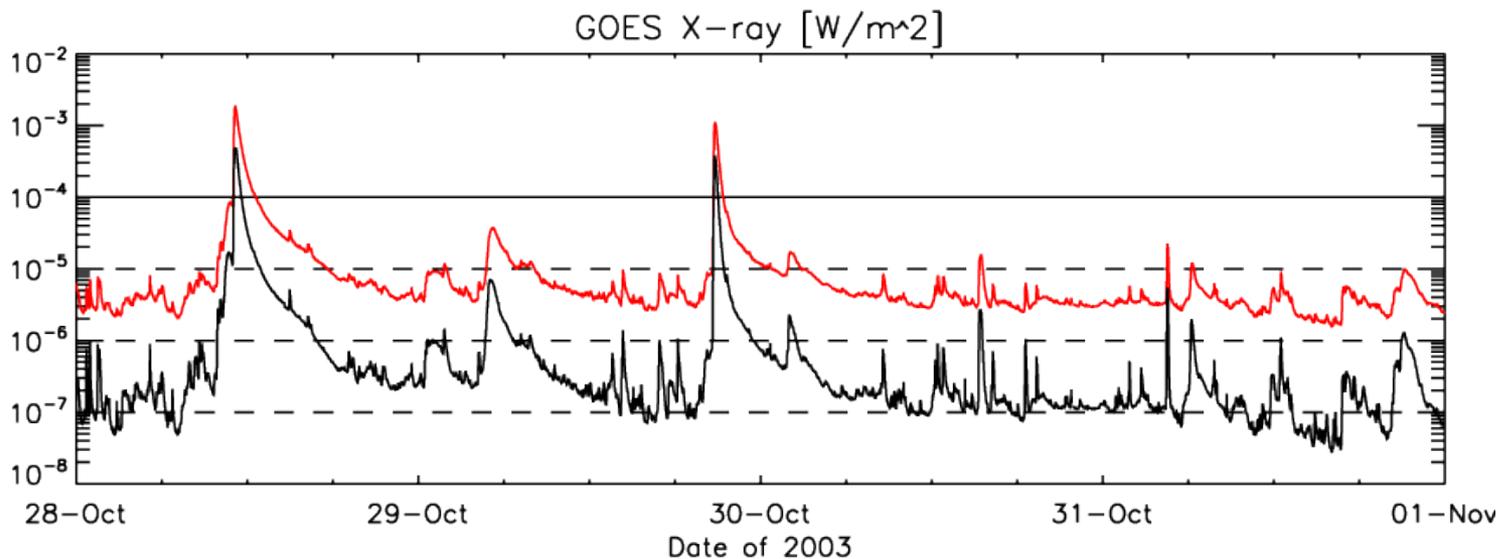
# 惑星間磁場・CME・SEP

- 太陽フレア・CMEに伴いSEPが発生
- CMEの前面に発生する衝撃波はSEPの加速領域の一つ。
- CMEから漏れ出てきたSEPが惑星間空間磁場にそって伝搬し、先に地球に到来。
- 惑星間空間磁場はパーカースパイラル構造をもつ。地球に対して西側でCMEが発生した時に、SEPが到来しやすくなる

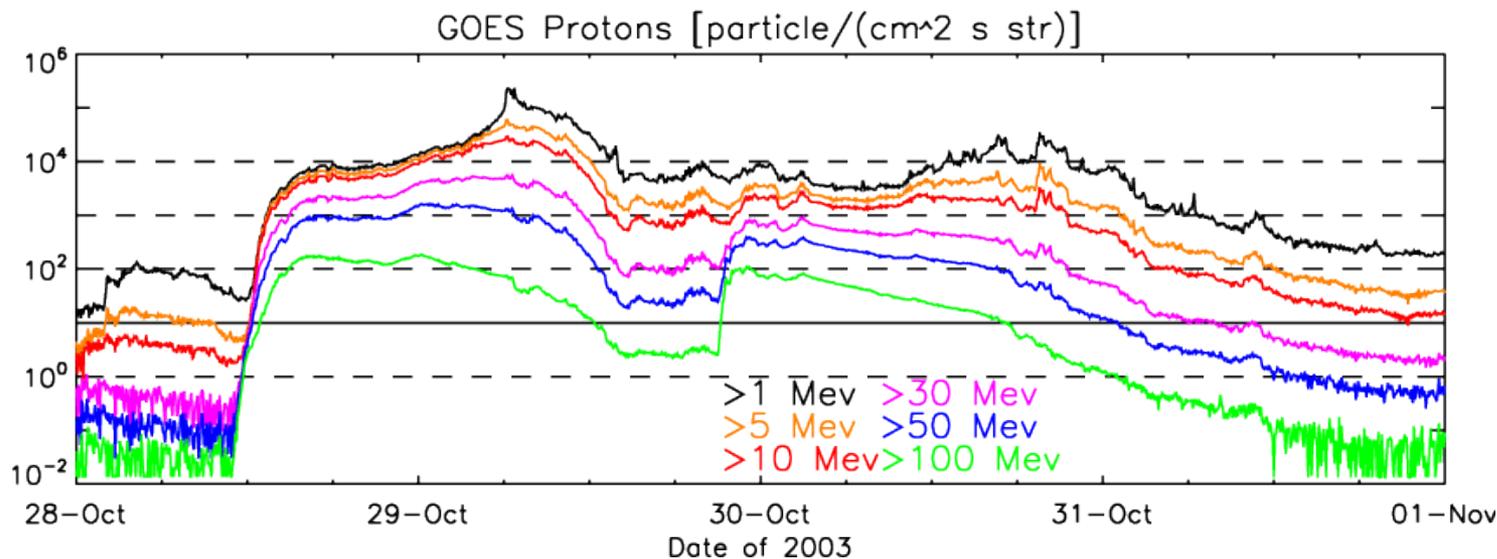


# 地球で観測した太陽フレア/CMEとSEP

GOES衛星  
太陽X線観測  
(太陽フレア)

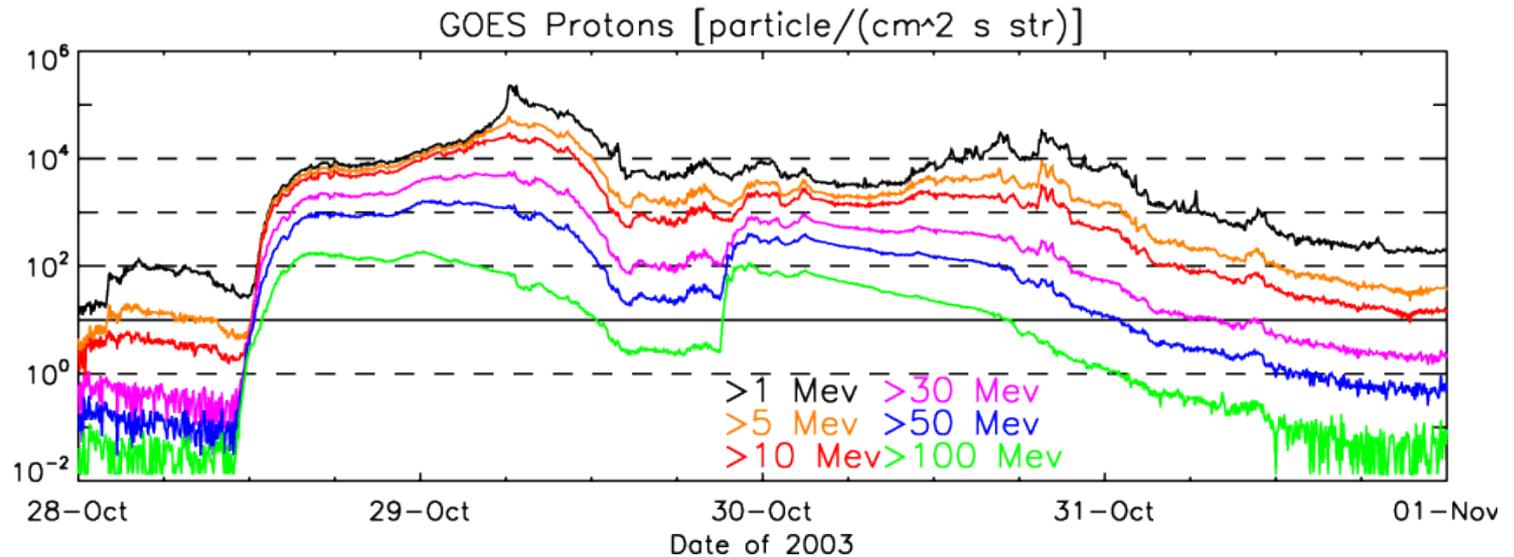


GOES衛星  
高エネルギー  
プロトン観測  
(SEP)

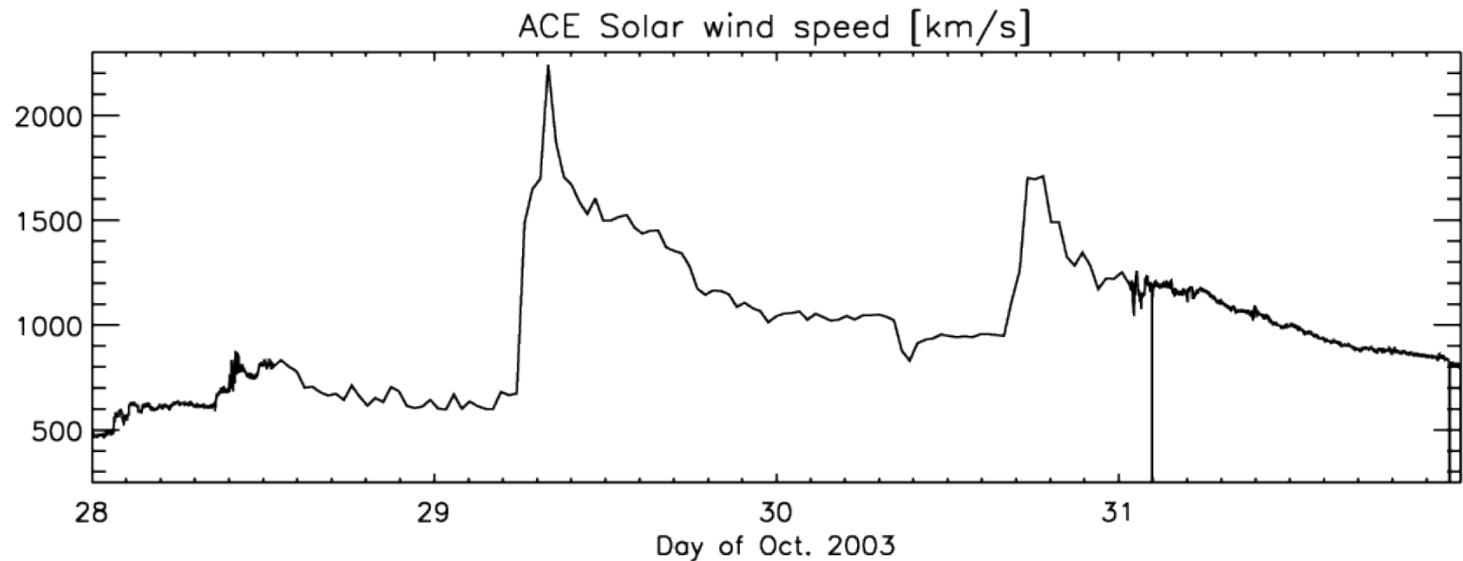


# 地球で観測した太陽フレア/CMEとSEP

GOES衛星  
高エネルギー  
プロトン観測  
(SEP)



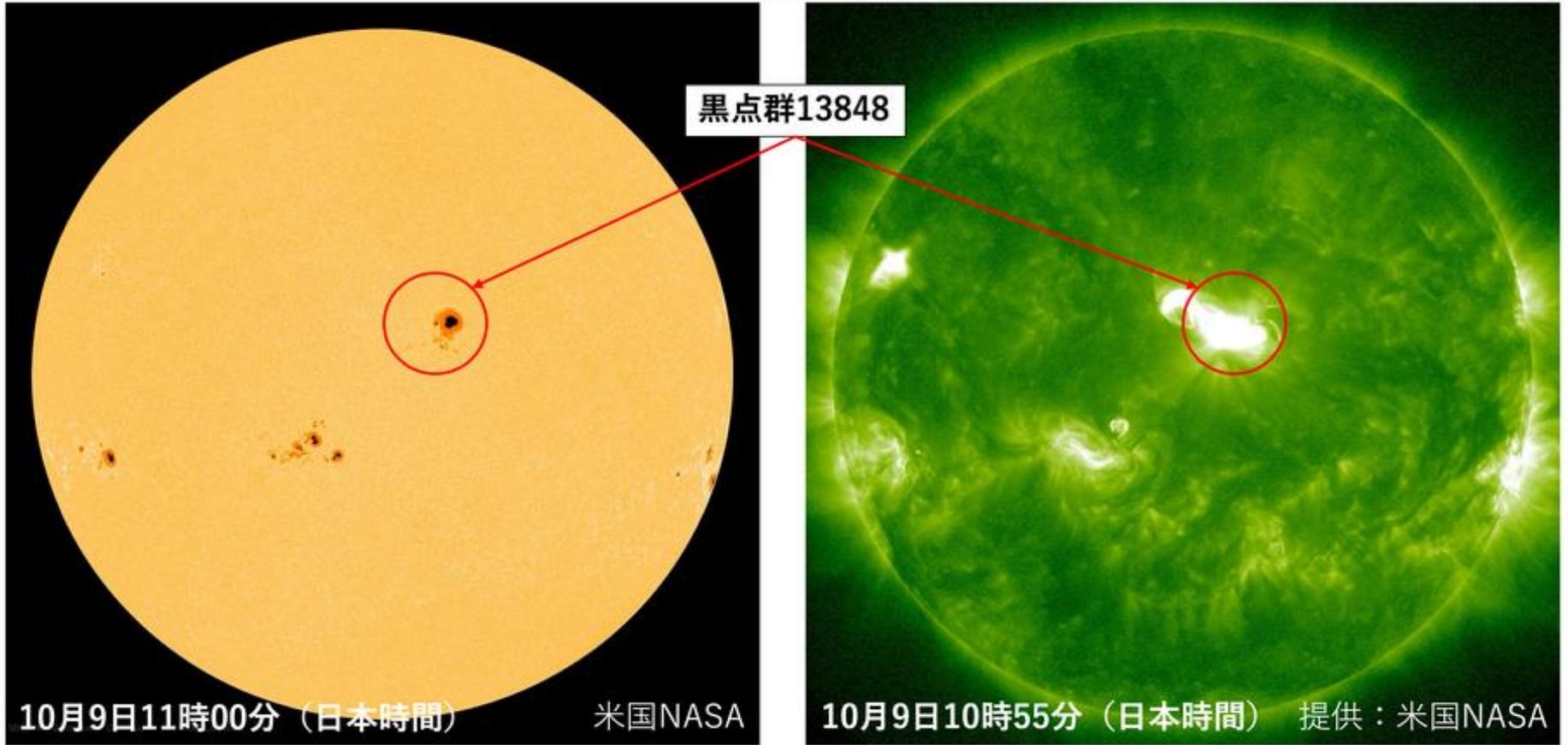
探査機ACE  
太陽風速度



# この三二講座の内容

- 太陽コロナと太陽風・惑星間空間磁場
- 太陽の磁場と高速太陽風
- 太陽風とコロナ質量放出（CME）
- 太陽高エネルギー粒子（SEP）
- 2024年に発生した大規模太陽嵐のCMEとSEP

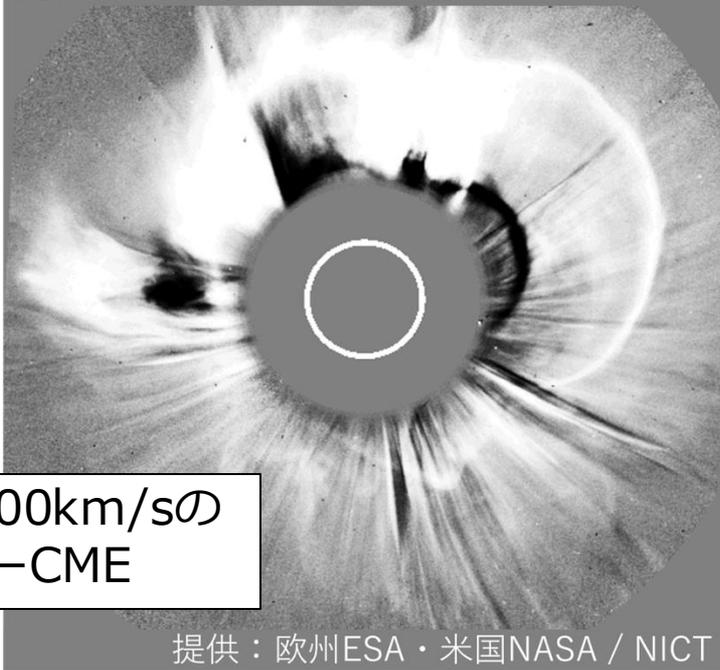
# 2024年10月の大規模太陽フレア



<https://swc.nict.go.jp/report/topics/202410091600.html>

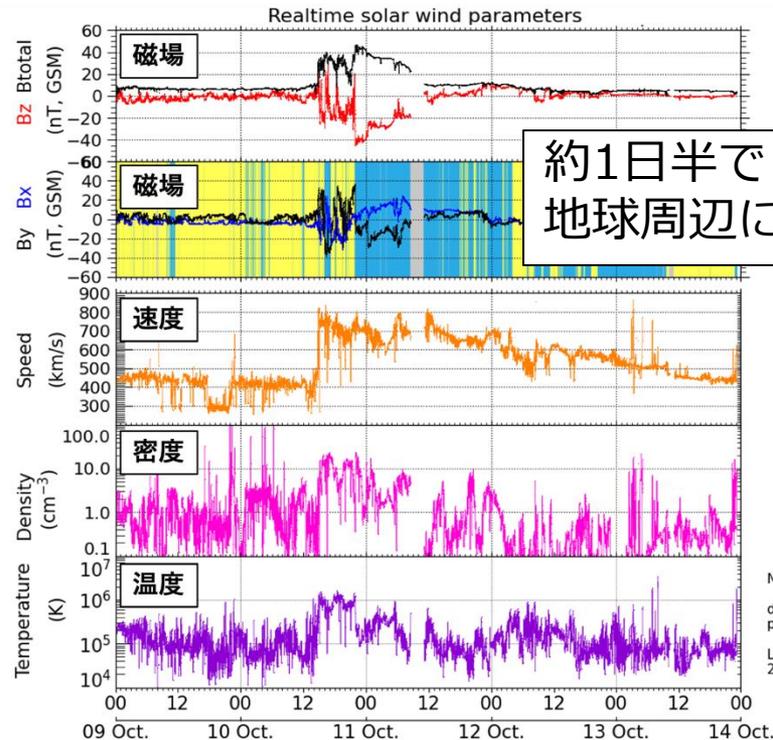
# 2024年10月の大規模太陽フレア

10月9日11時36分 (日本時間)



約1500km/sの  
ハロ-CME

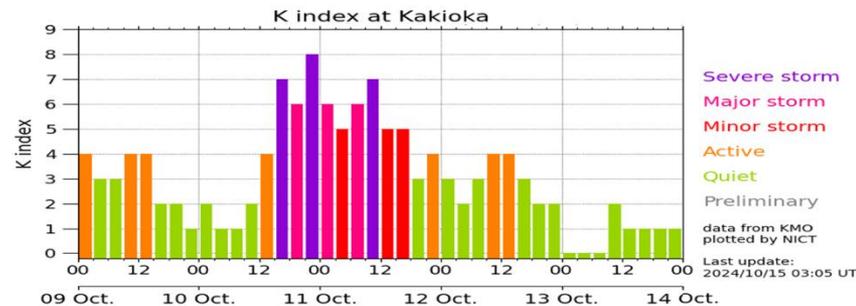
提供：欧州ESA・米国NASA / NICT



Not for publication  
data from NOAA/SWPC  
plotted by NICT  
Last update:  
2024/10/15 03:11 UT



Primary satellite  
GOES-18/137W  
>10 MeV proton  
>50 MeV proton  
>100 MeV proton  
data from NOAA/SWPC  
plotted by NICT  
Last update:  
2024/10/12 06:00 UT

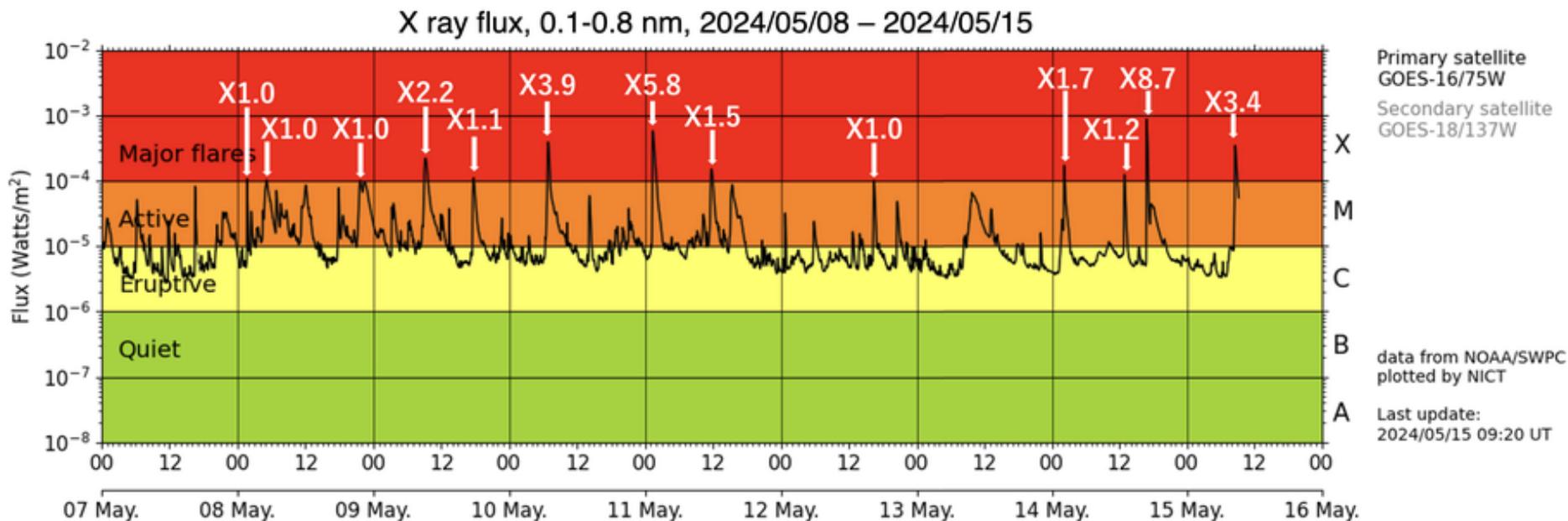


Severe storm  
Major storm  
Minor storm  
Active  
Quiet  
Preliminary  
data from KMO  
plotted by NICT  
Last update:  
2024/10/15 03:05 UT

<https://swc.nict.go.jp/report/topics/202410091600.html>

# 2024年5月の大規模太陽フレア

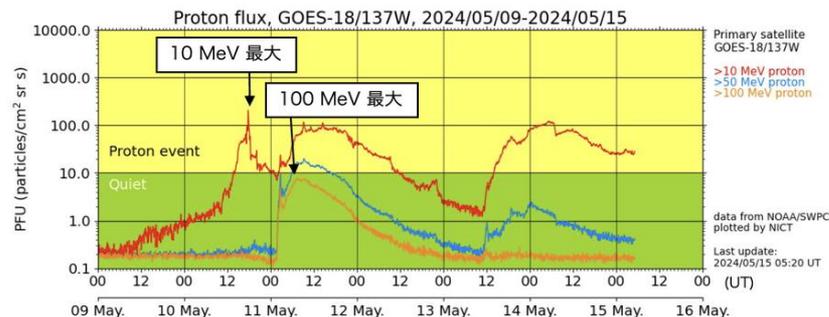
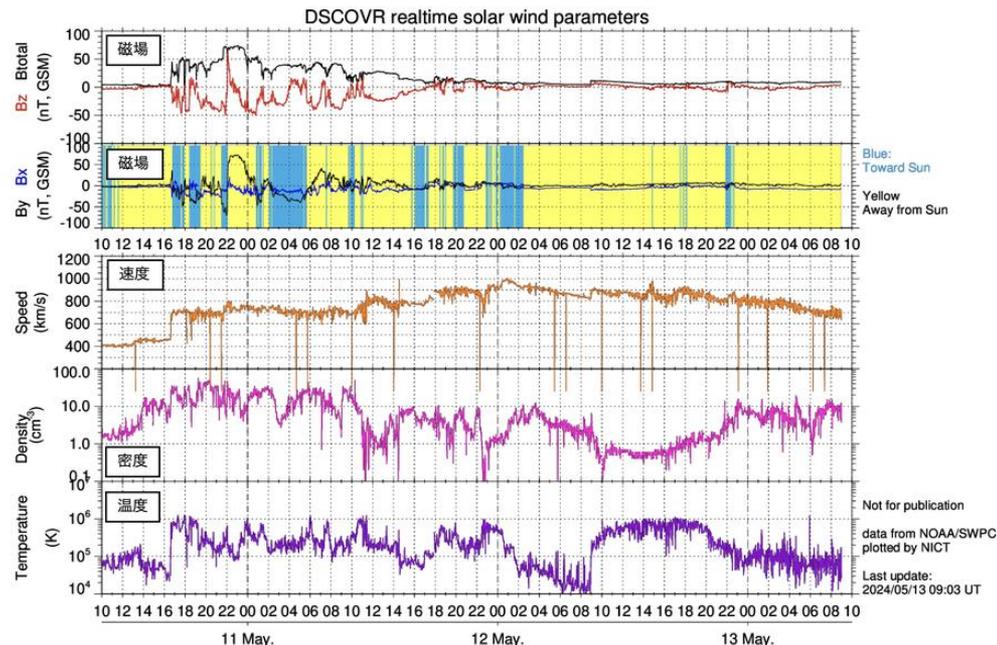
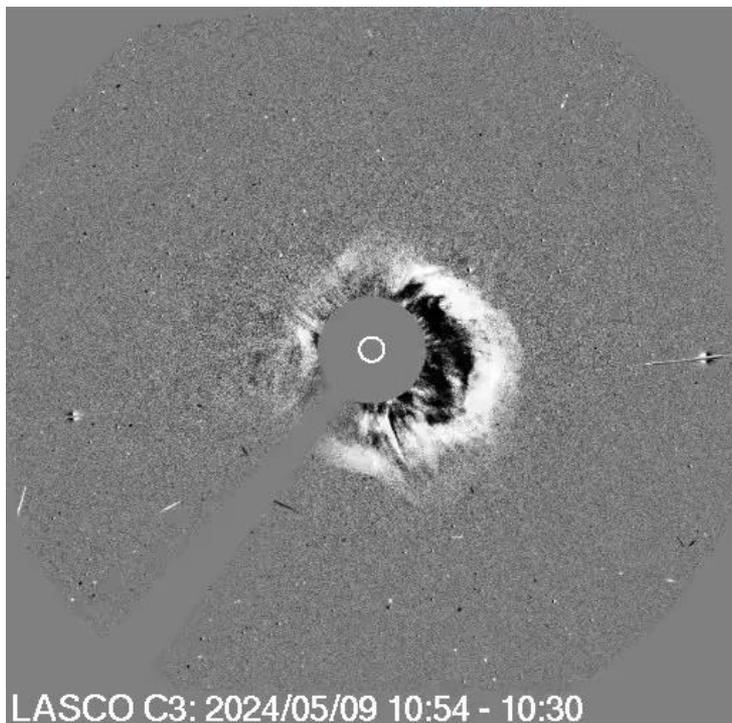
- 5/8-15にXクラスの太陽フレアが13回発生



<https://swc.nict.go.jp/spe/swc/report/topics/202405101630.html>

# 2024年5月の大規模太陽フレア

- 地球方向へのハローCMEが複数回観測

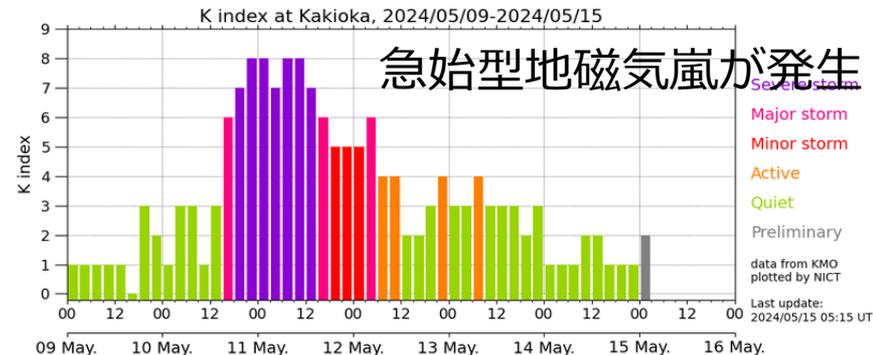
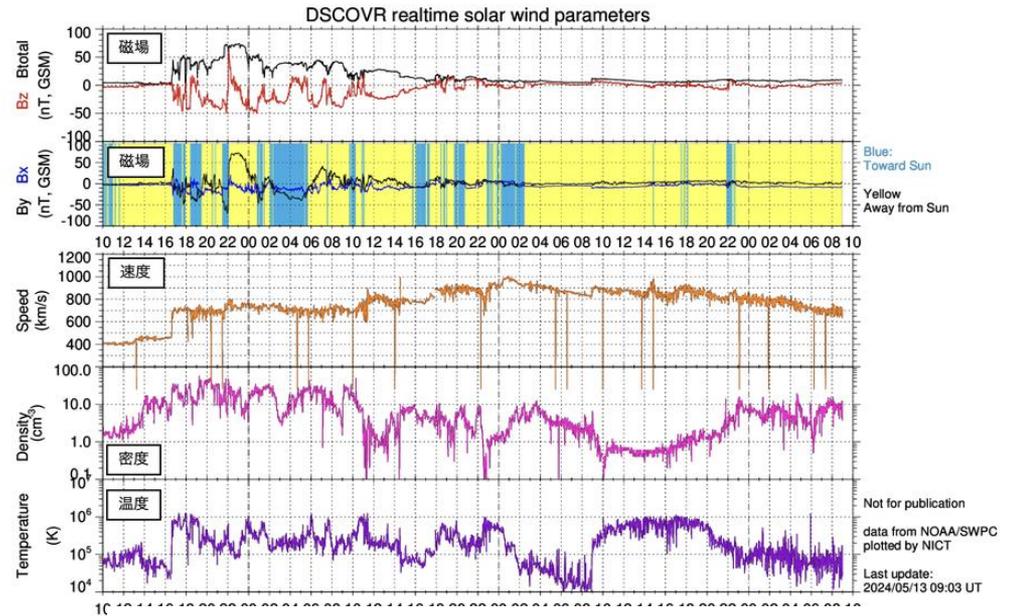
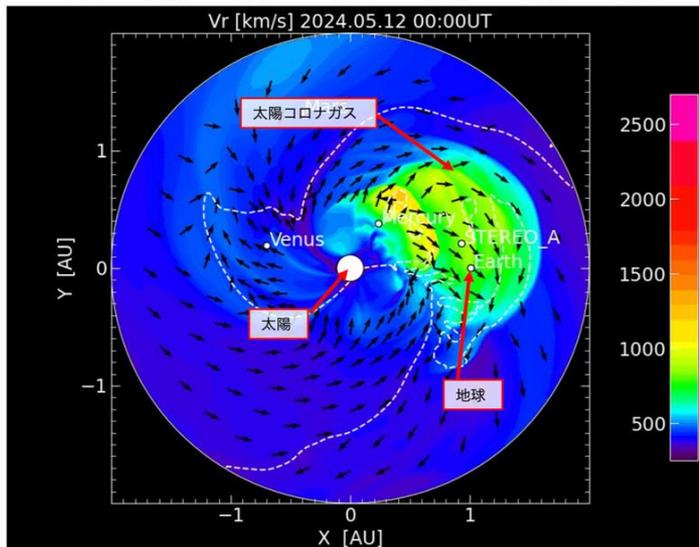
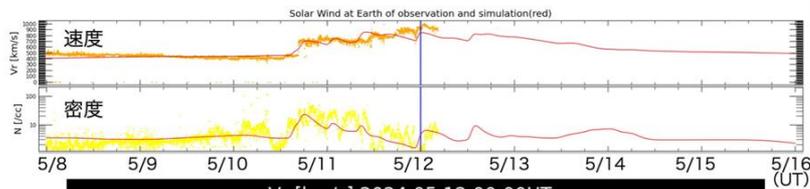


プロトン現象が観測

<https://swc.nict.go.jp/spe/swc/report/topics/202405101630.html>

# 2024年5月の大規模太陽フレア

- 地球方向へのハローCMEが複数回観測



日本を含む世界各地でオーロラが観測

<https://swc.nict.go.jp/spe/swc/report/topics/202405101630.html>

# まとめ

- 太陽風は惑星間空間に磁力線がつながる領域（コロナホール）から流れる。惑星間空間磁場はパーカースパイラルという渦状の構造を形成する。大きなコロナホールが低緯度帯に存在するとき、太陽面の中央を通過後、2～3日後に地球に**高速太陽風**が到来し、地磁気が乱れる可能性が生じる。
- 太陽フレア等に伴いコロナプラズマが放出される**CME**が発生する。CMEは惑星間空間の太陽風の中を相互作用をしながら伝搬する。CMEが地球に到来し、通過するときに地磁気が乱れる可能性がある。
- 太陽フレア・CMEに伴い**太陽高エネルギー粒子(SEP)**が増加する現象が発生することがあり、その現象はプロトンイベントと呼ばれる。SEPは惑星間空間磁場に沿って伝搬するため、地球から見て太陽の西側で現象が発生するとSEPが到来しやすく高くなる傾向がある。
- 2024年5月と10月に発生した大規模太陽フレアは宇宙環境を大きく乱した顕著な現象であり、それぞれ異なる特徴を持っていた。