



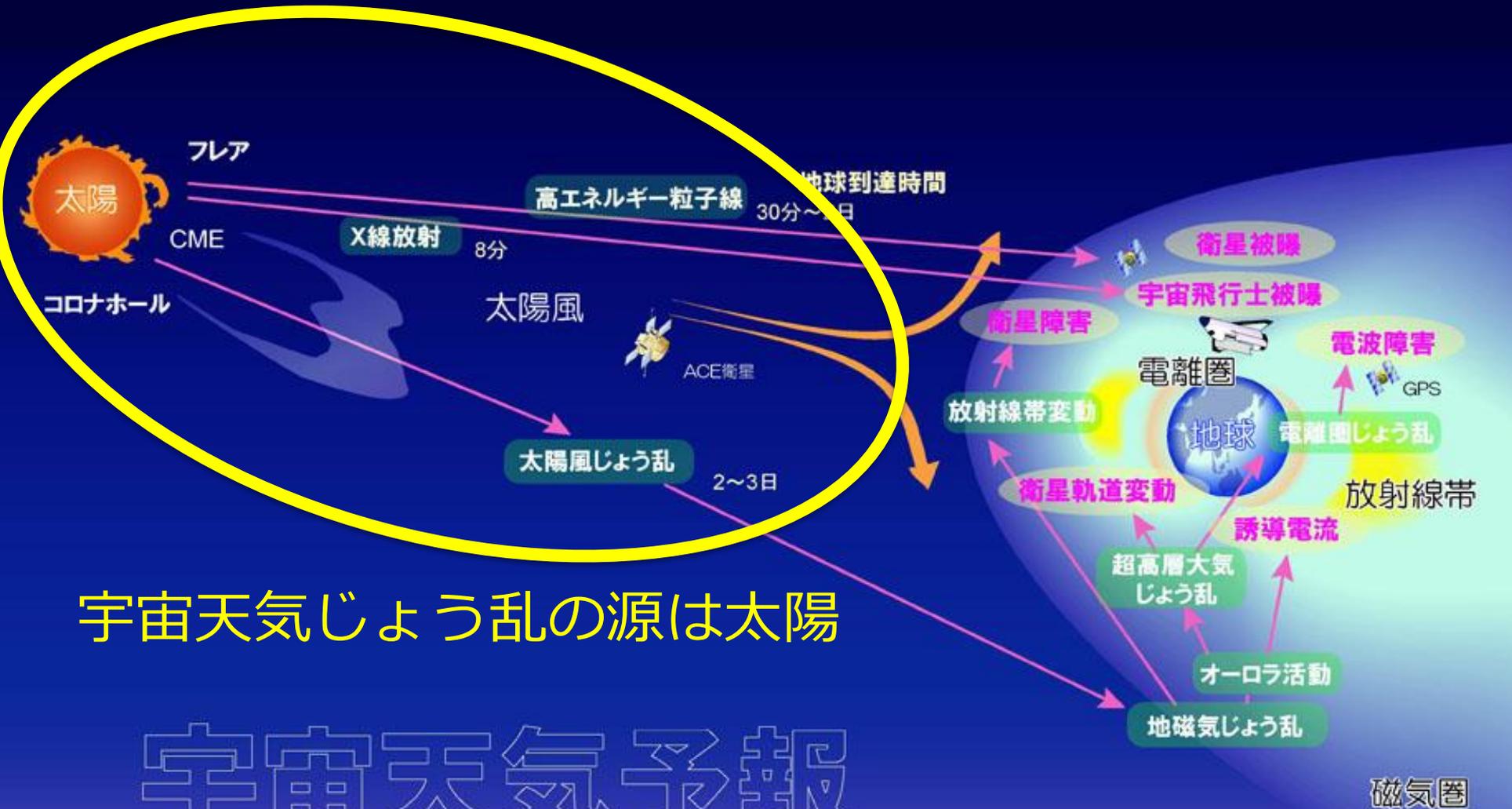
宇宙天気三二講座 -太陽編-

情報通信研究機構 電磁波研究所

宇宙環境研究室

塩田 大幸

宇宙天気と太陽



宇宙天気じょう乱の源は太陽

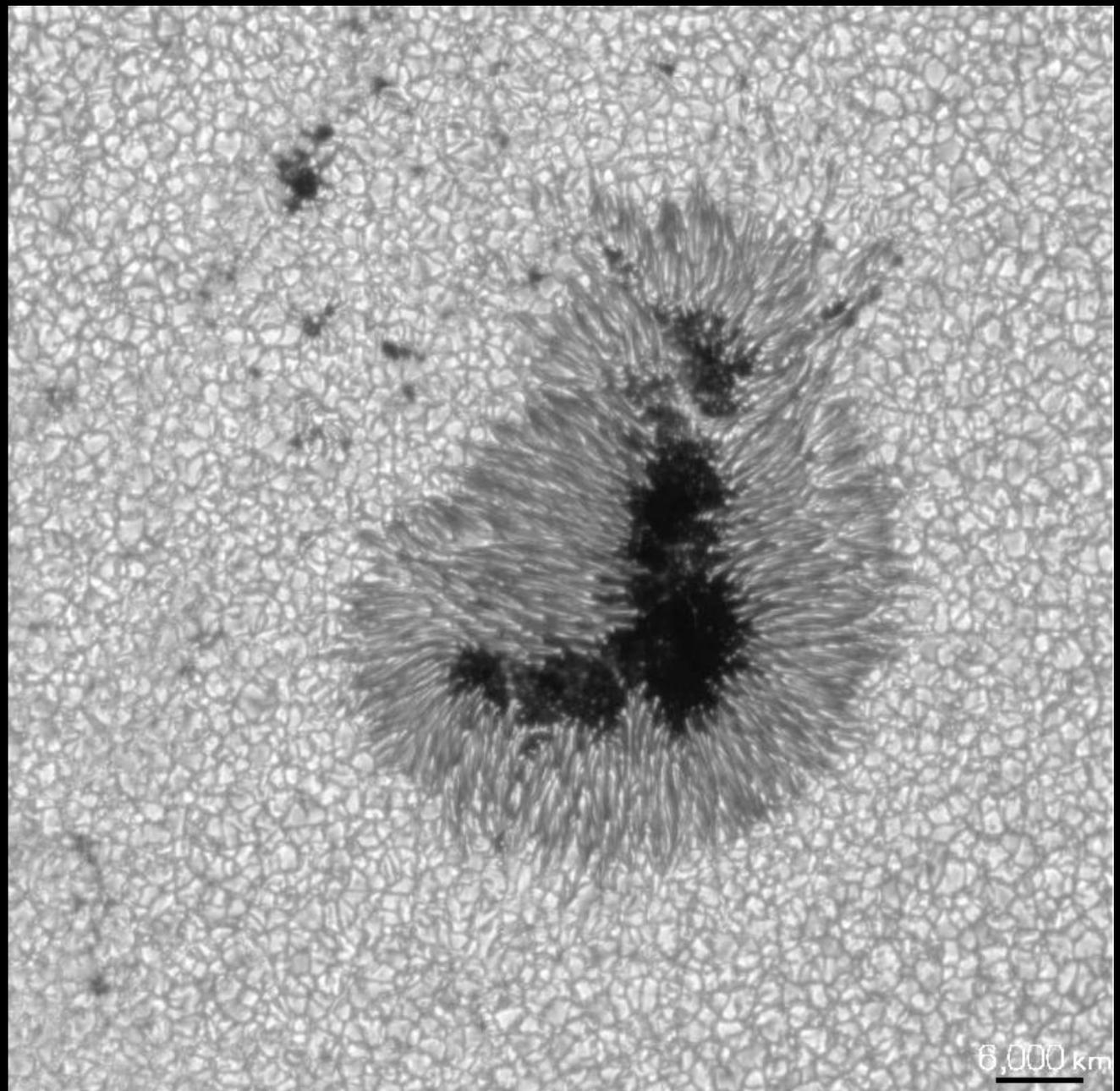
宇宙天気予報

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

- 太陽の観測と太陽の大気の構造
- 太陽の黒点と磁場
- 太陽の磁場と太陽風
- 太陽嵐
 - 太陽フレア
 - コロナガス放出 (CME)
 - 太陽高エネルギー粒子 (太陽宇宙線)

太陽の表面



2019年11月11日
提供：岡本文典 (国立天文台)

宇宙天気三二講座 太陽編

太陽の表面の上空

提供：勝川行雄(国立天文台)

20-Nov-2006
20:10:36 UT



2019年11月11日

宇宙天気二講座 太陽編

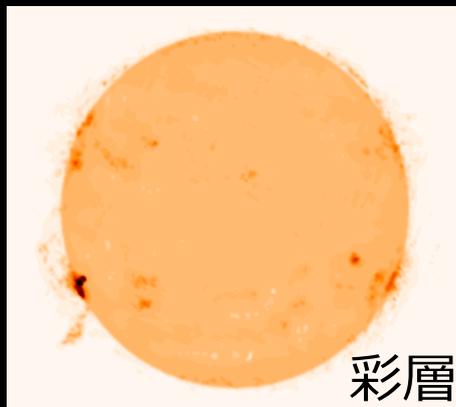
様々な波長の電磁波（光）で見る太陽



白色光

光球

171,000 km

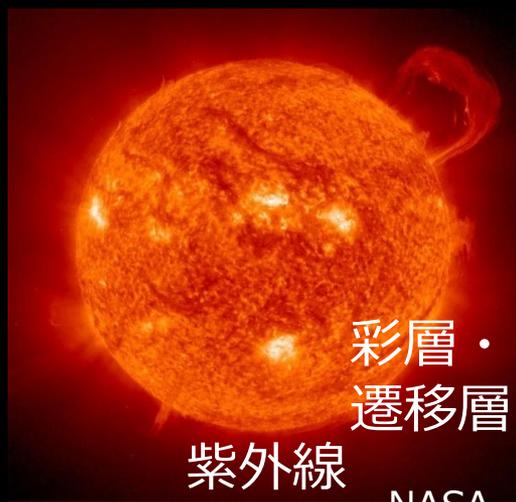


彩層

電波

国立天文台

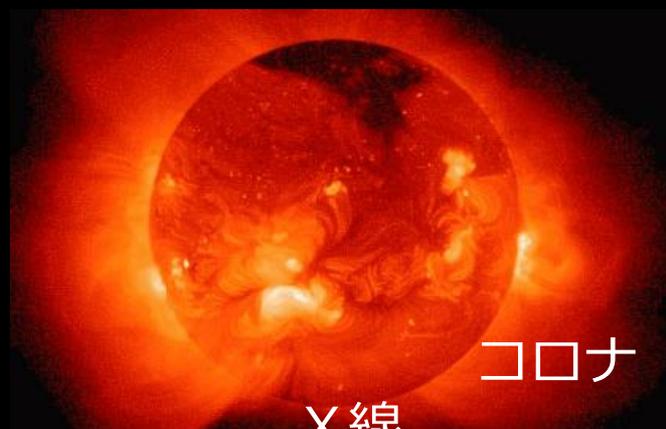
特定の波長の電磁波だけを通すフィルターで太陽を観測すると、、、太陽大気の中の高さや性質が異なる層を見ることができる。



彩層・遷移層

紫外線

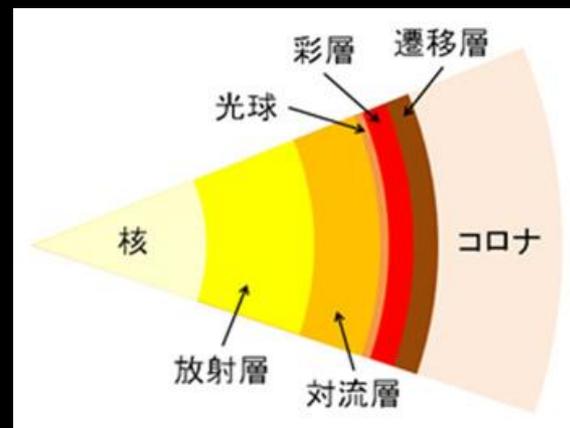
NASA



コロナ

X線

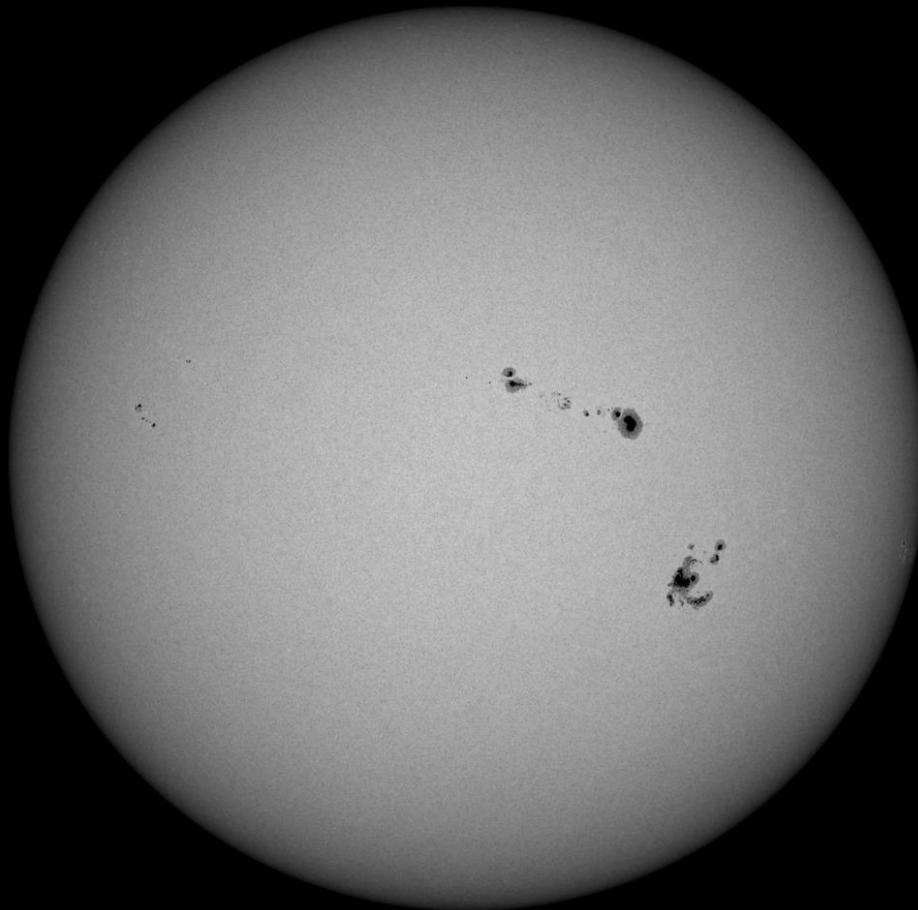
ISAS/JAXA



太陽の断面

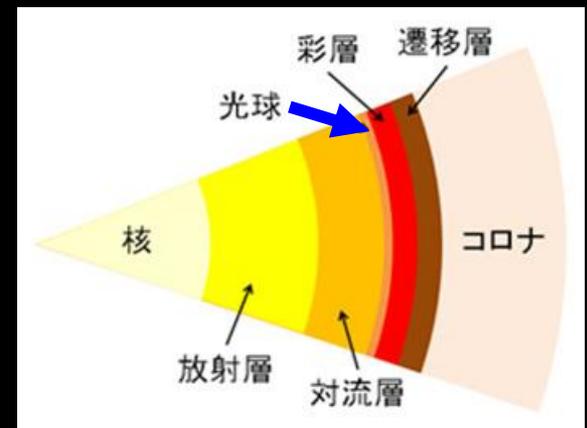
光球（白色光）

私たちが普段見る太陽
電磁波で見ることができ
る最も内側の大気
表面の対流運動の様子や
黒点が見える
温度は約6,000度



約70万km

<https://sdo.gsfc.nasa.gov/>



太陽の断面

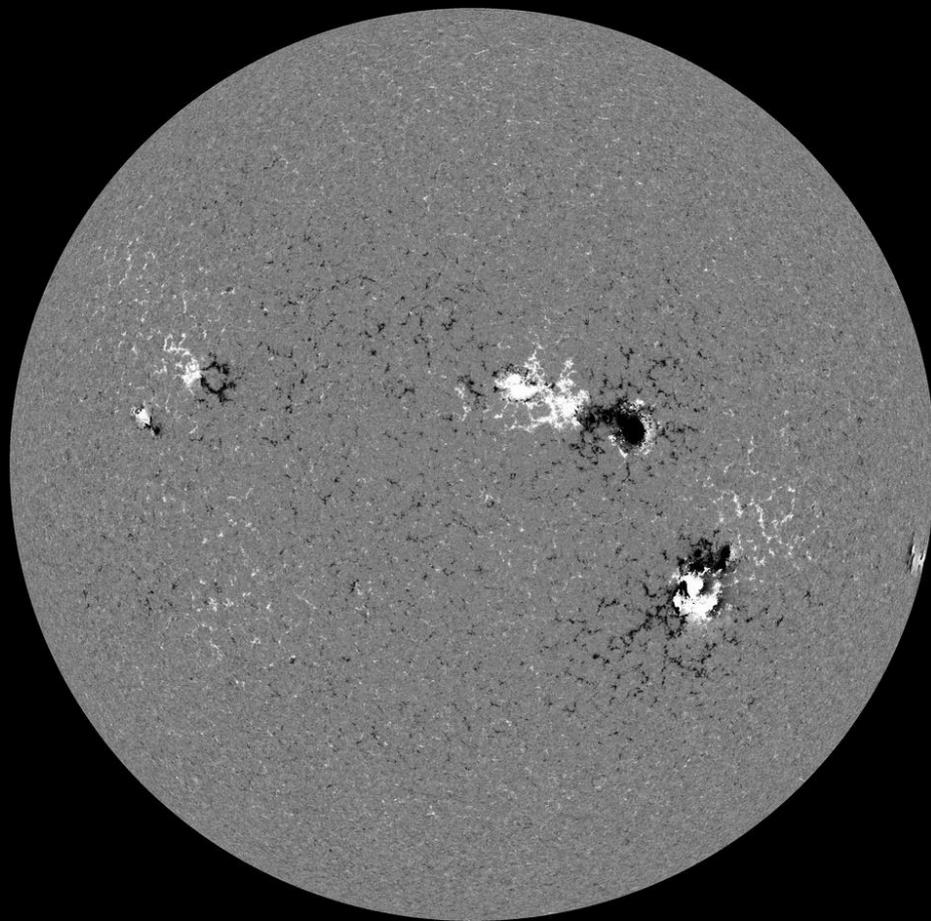
光球磁場（偏光観測）

磁場の強さと向きがわかる

白：N極（太陽の内部から外に向かう方向の磁場）

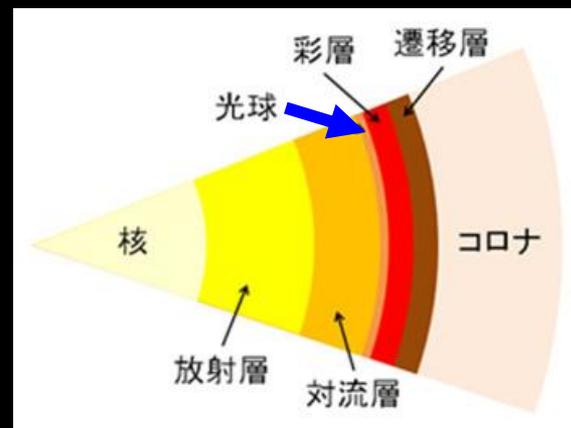
黒：S極（太陽の外から内部に向かう方向の磁場）

黒点は非常に強い磁場を持つ。
黒点以外にも磁場が存在する。



約70万km

<https://sdo.gsfc.nasa.gov/>



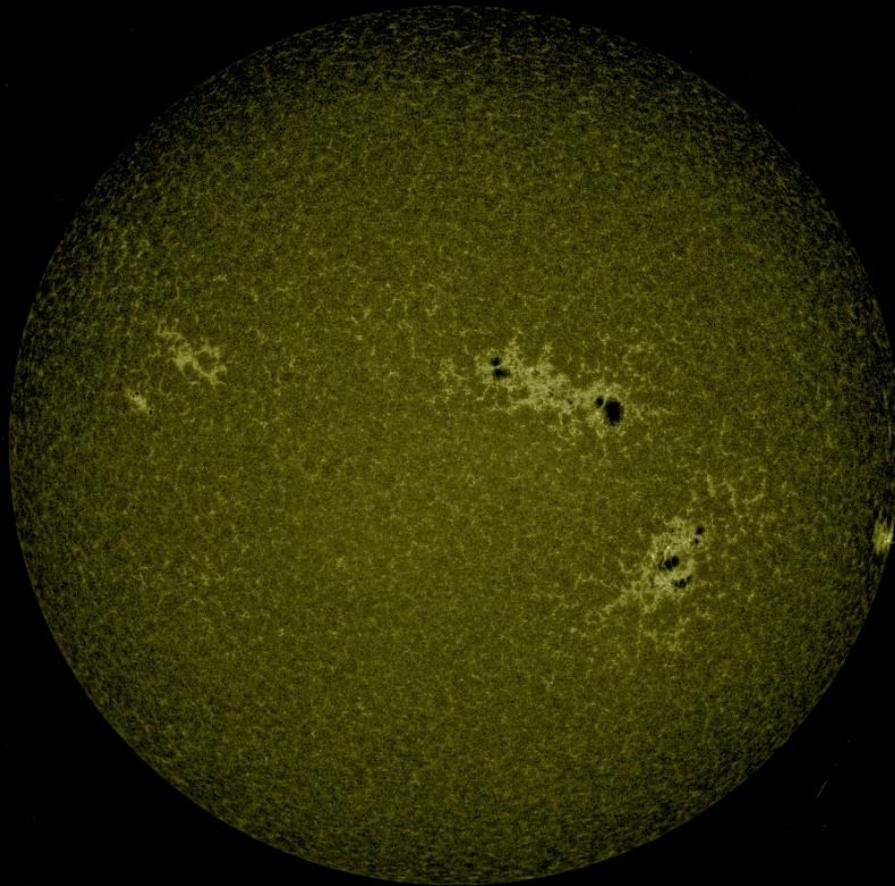
太陽の断面

光球上部・彩層（紫外線:波長160nm）

黒点の外側の磁場が強い領域が明るく見える。

活動度が高い領域では、小さな発光現象が発生する。

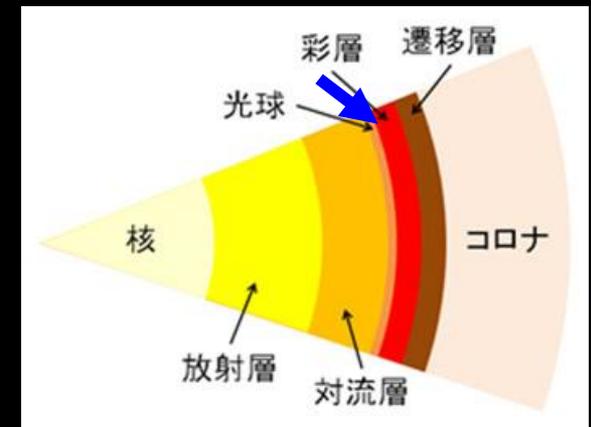
温度は 5,000 ~ 10,000度



約70万km

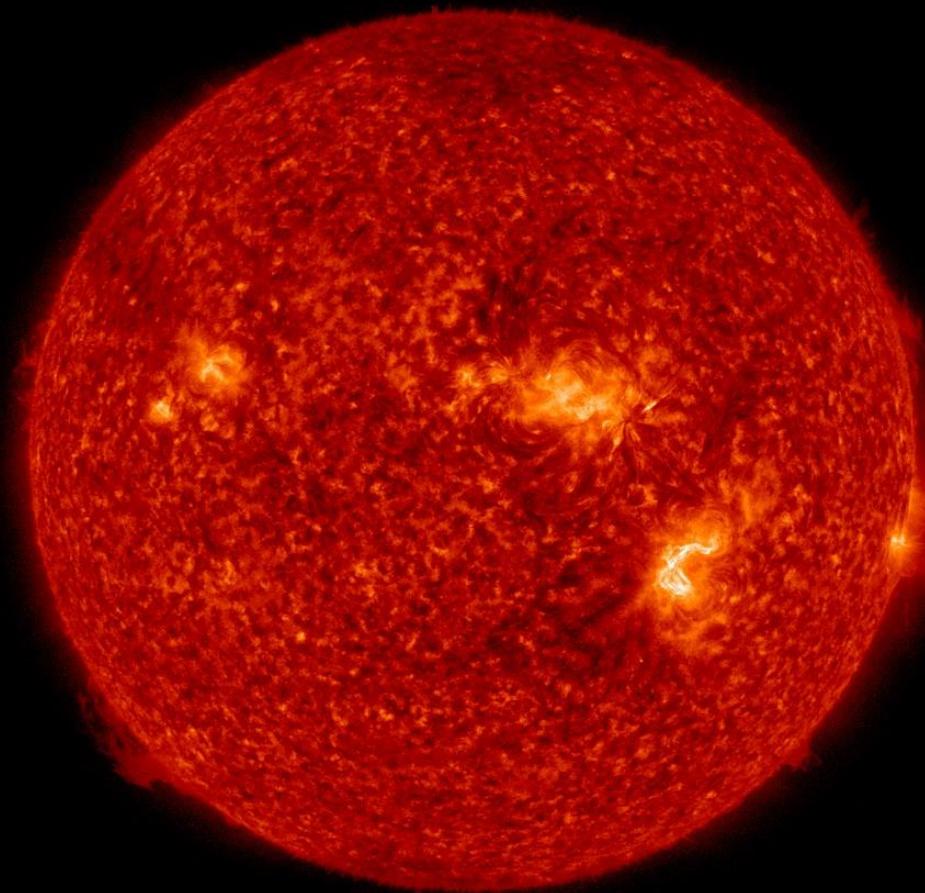
SDO/AIA 1600 2017-09-06 00:02:15 UT

<https://sdo.gsfc.nasa.gov/>



太陽の断面

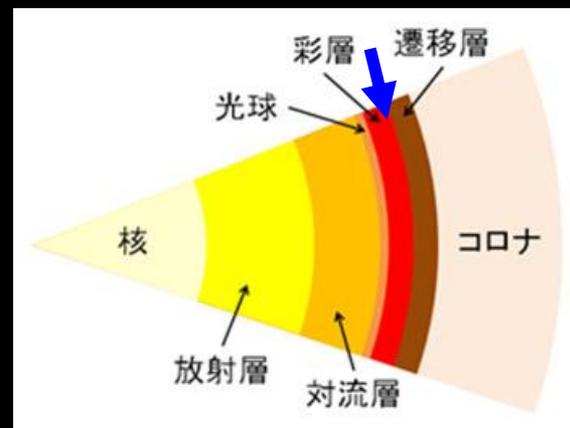
彩層・遷移層（極端紫外線:波長30.4nm）



コロナの中に雲のように浮いている濃いガスの塊
フィラメント（プロミネンス）が良く見える。

温度は約5万度

太陽フレアなどに伴って
フィラメントが放出されることがある。



太陽の断面

約70万km

SDO/AIA 304 2017-09-06 00:13:18 UT

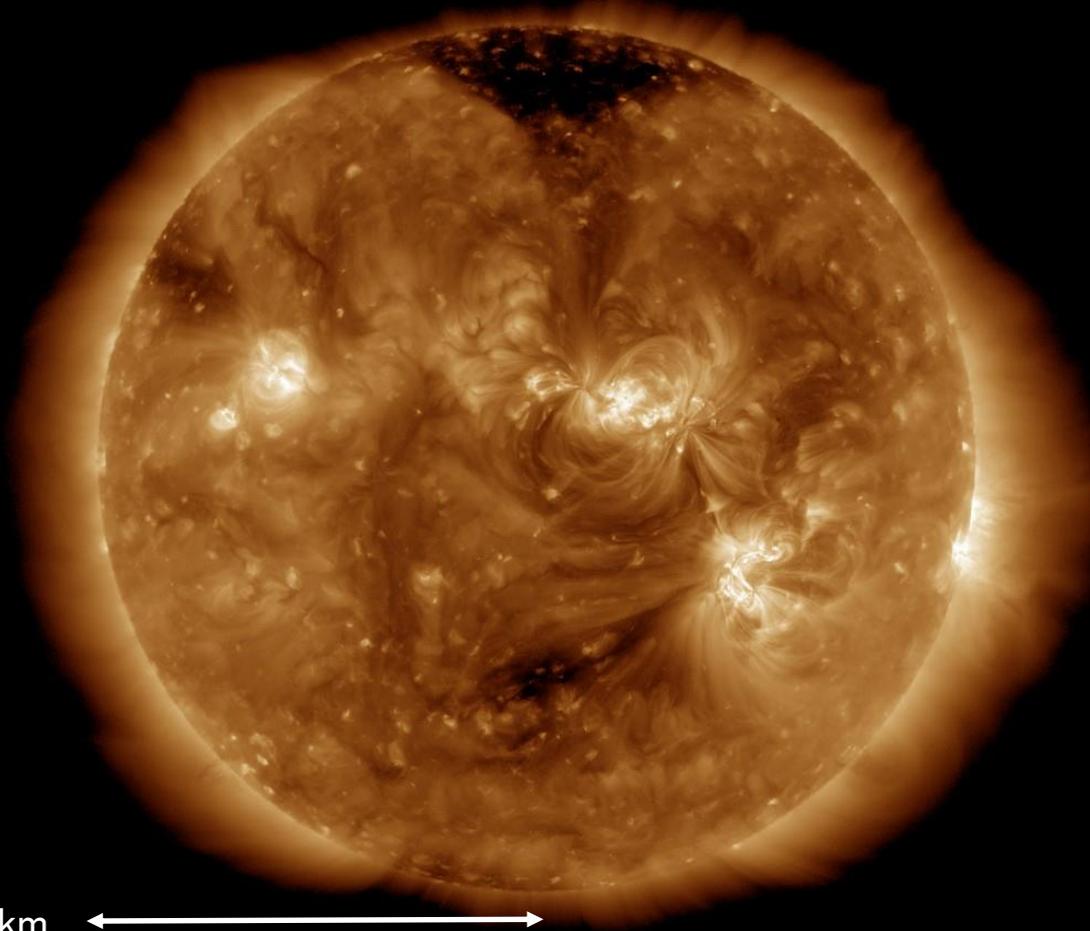
<https://sdo.gsfc.nasa.gov/>

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。

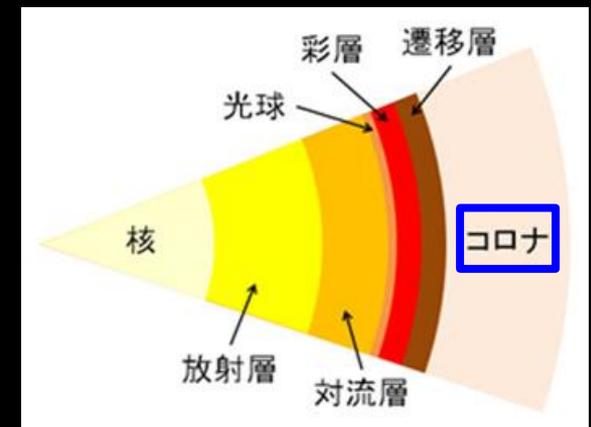
ガスが極端に少ない領域
コロナホールが見える。



約70万km

SDO/AIA 193 2017-09-06 00:11:05 UT

<https://sdo.gsfc.nasa.gov/>

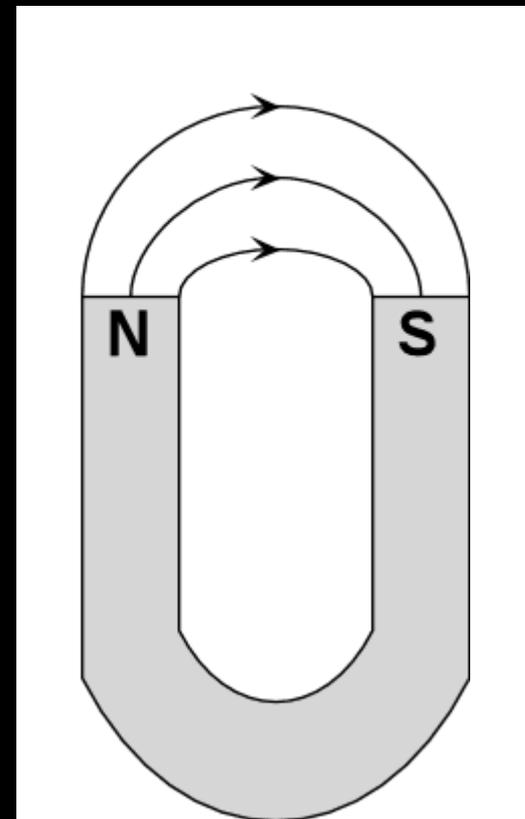


太陽の断面

太陽コロナガスと磁場

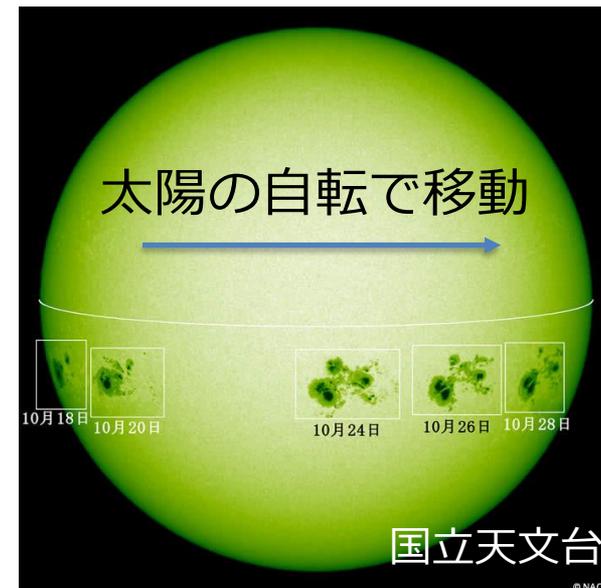
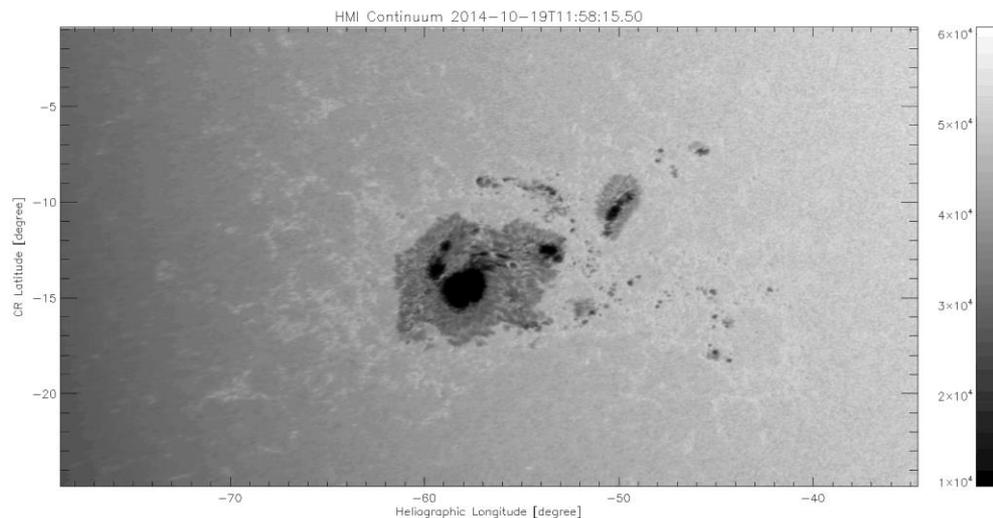
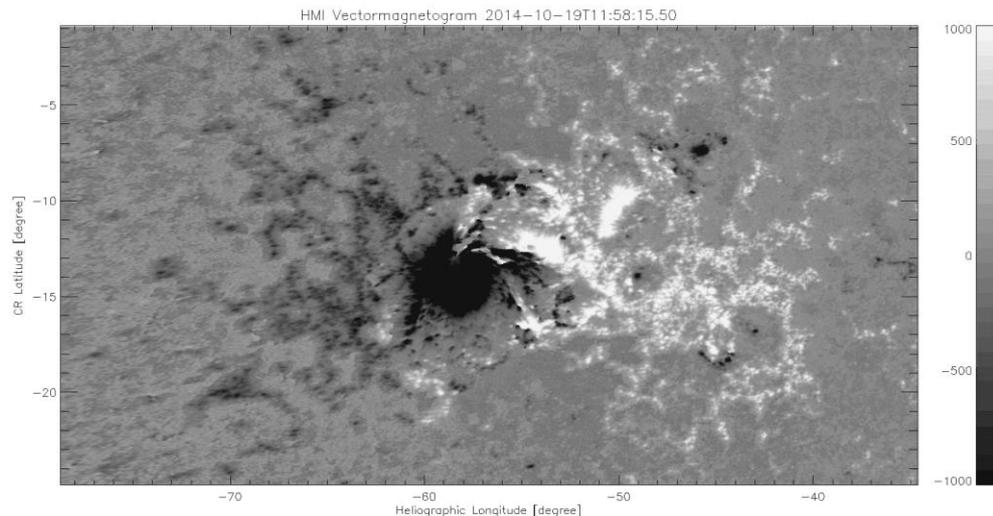


TRACE衛星で観測したコロナループ
<http://www.lmsal.com/TRACE/POD/NAS2002v2.html>



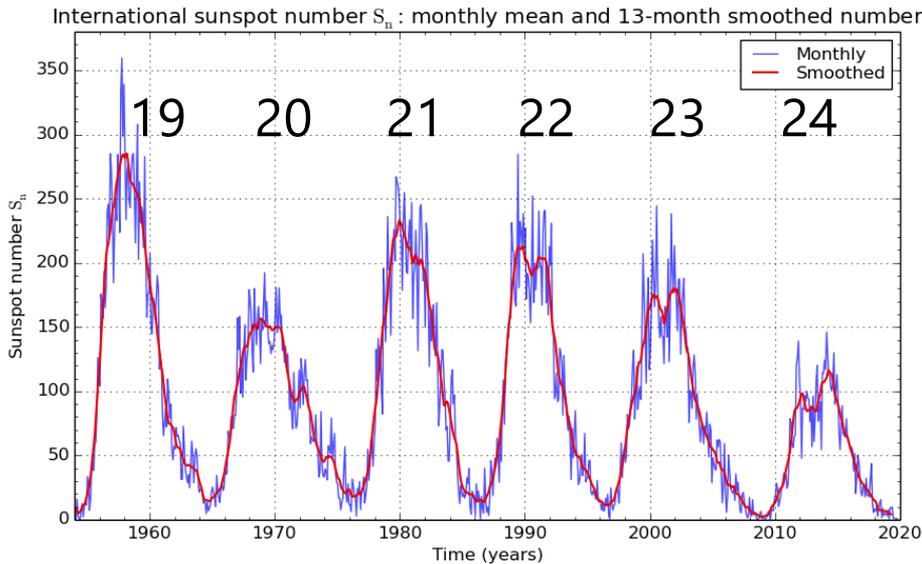
太陽の磁力線に沿って電離したガスが閉じ込められている

太陽の黒点・磁場は常に変化する



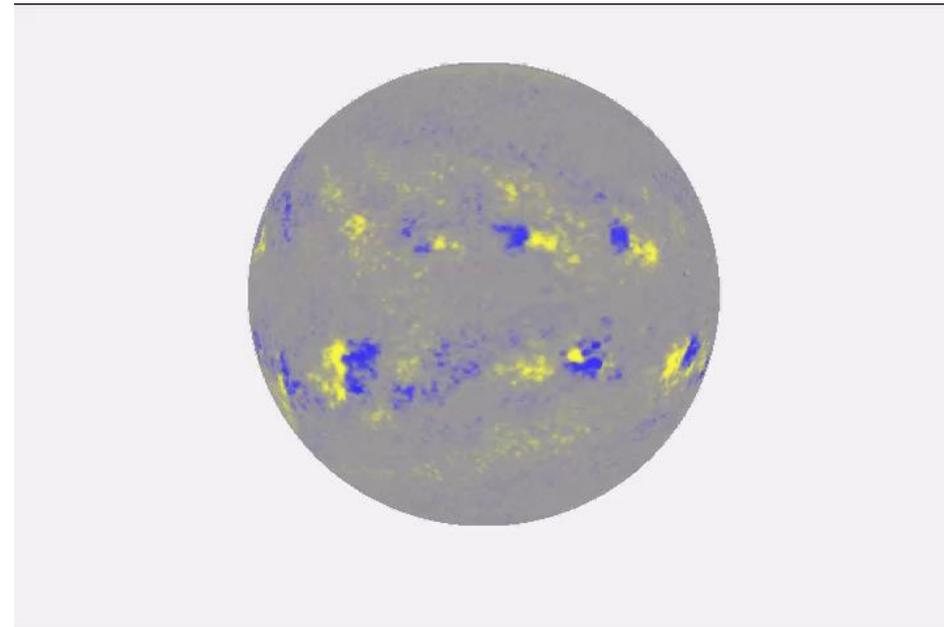
- 黒点群が自転によって左の端から右の端に移動する2週間の期間の黒点と磁場の変化
- 白：N極、黒：S極
- 黒点が現れる様子が見える。

黒点の出現数は約11年で増減 黒点の極性は周期ごとに入れ替わる



SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2019 November 1

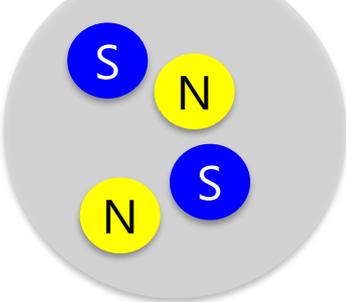
太陽表面の磁場分布の変化 (30年分)



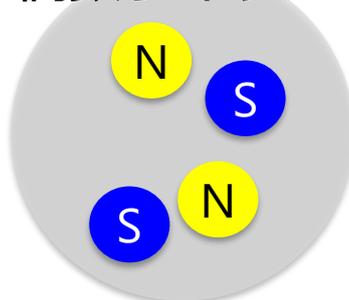
黄色：N極 青色：S極

<http://solarscience.msfc.nasa.gov/movies/HathawayMovie.avi>

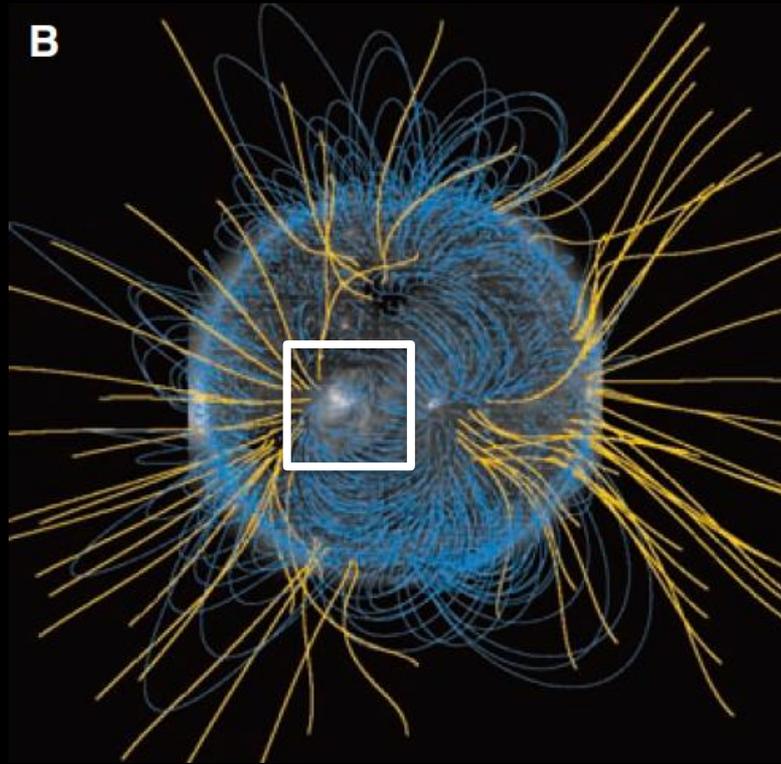
奇数サイクル



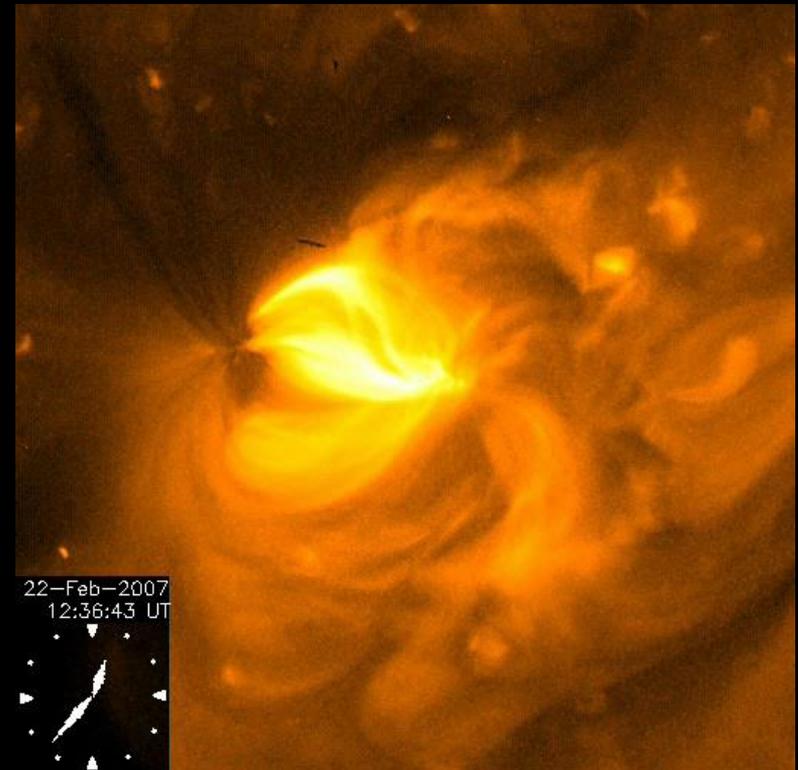
偶数サイクル



コロナホールと太陽風



コロナの磁力線の様子

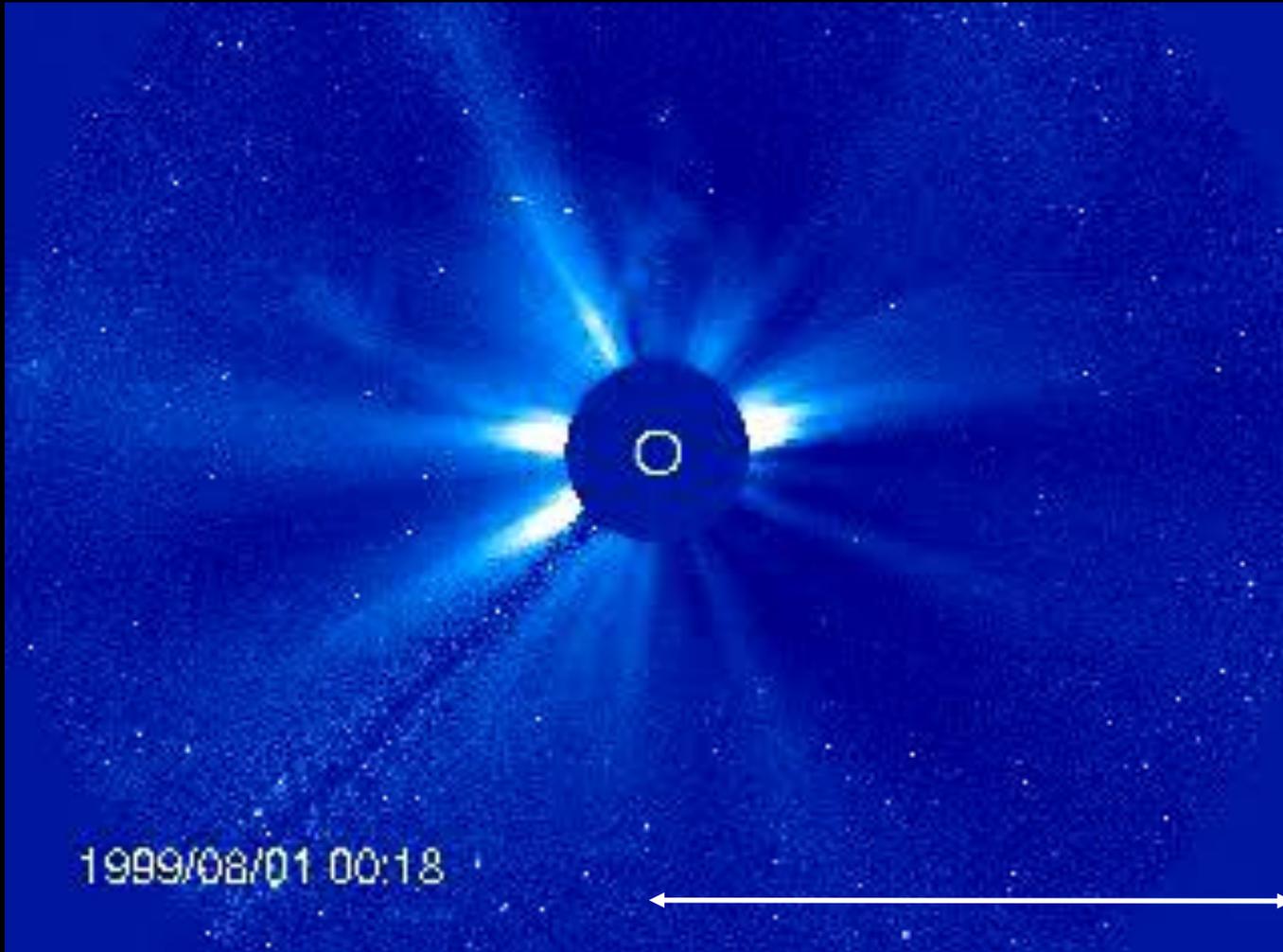


ひのでX線（コロナ）画像

- 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。

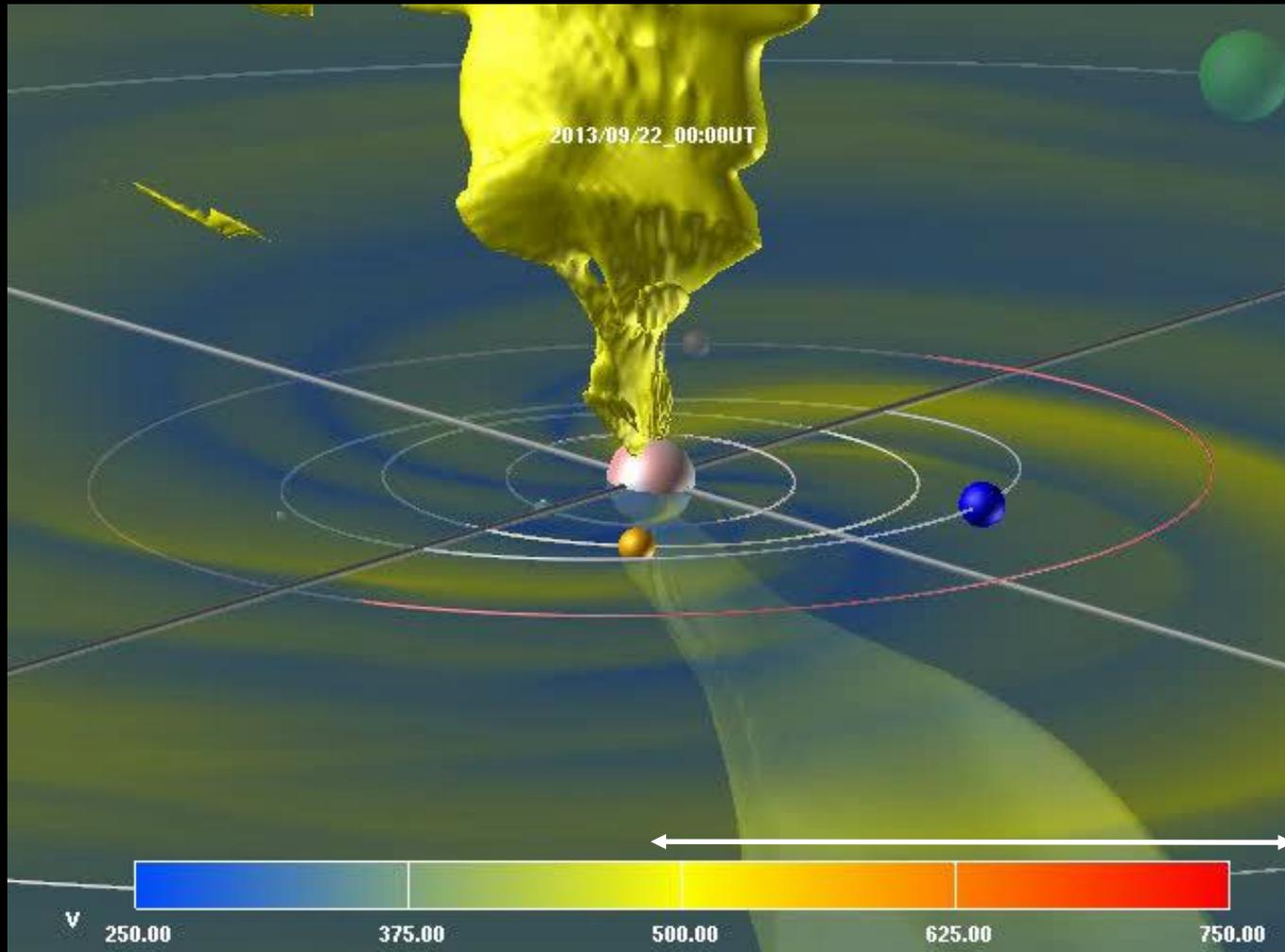
(Sakao+2007)

太陽風



NASA/ESA SOHO/LASCO コロナグラフ(人工的な日食)
明るさはガスの密度に比例。白丸の位置が太陽。

太陽風のシミュレーション



黄色で囲った領域：秒速500kmより速い速度でガスが流れる領域

太陽風の定点観測



REAL TIME SOLAR WIND

2018年8月23日から1週間

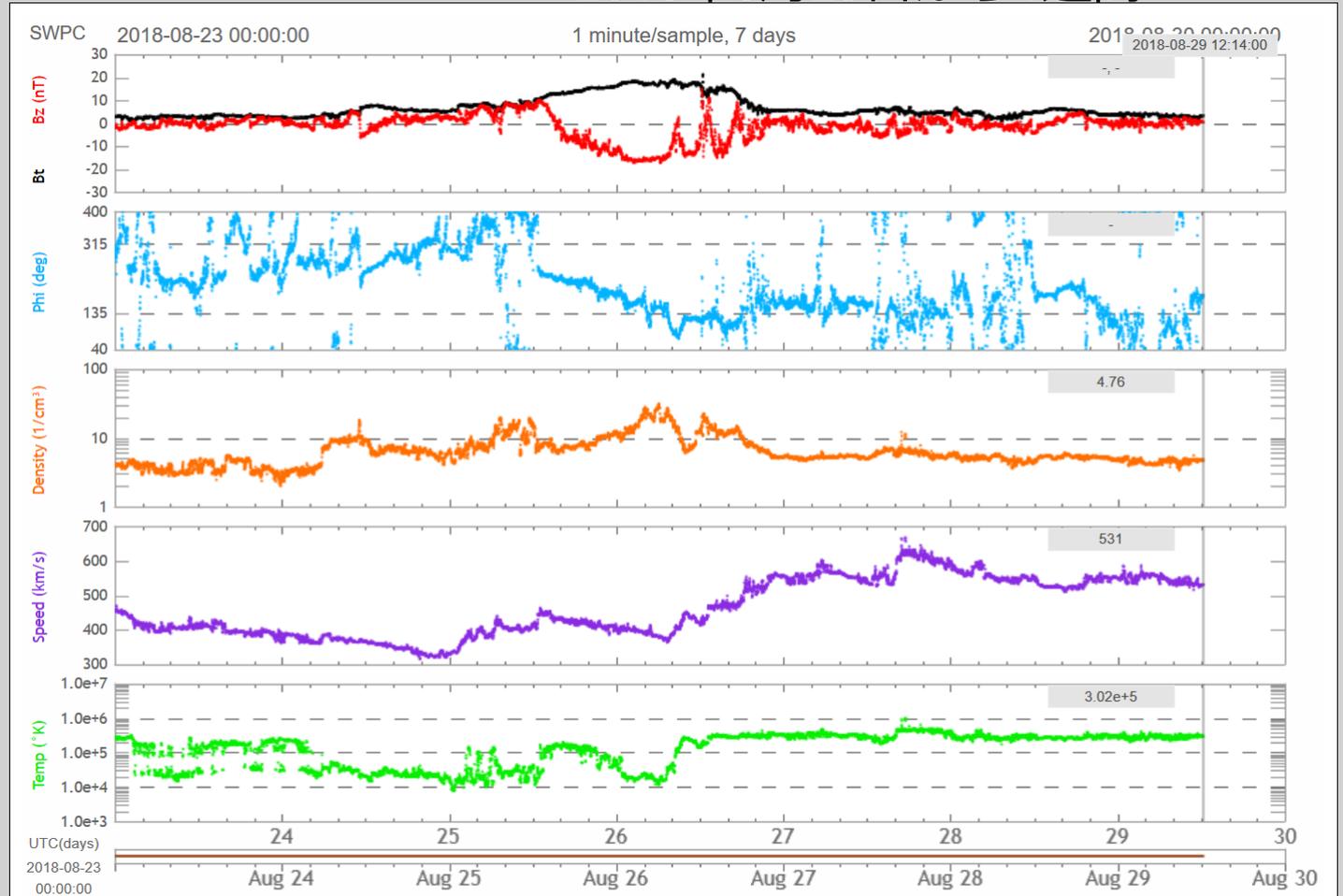
磁場
南北成分

磁場
方位角

密度

速度

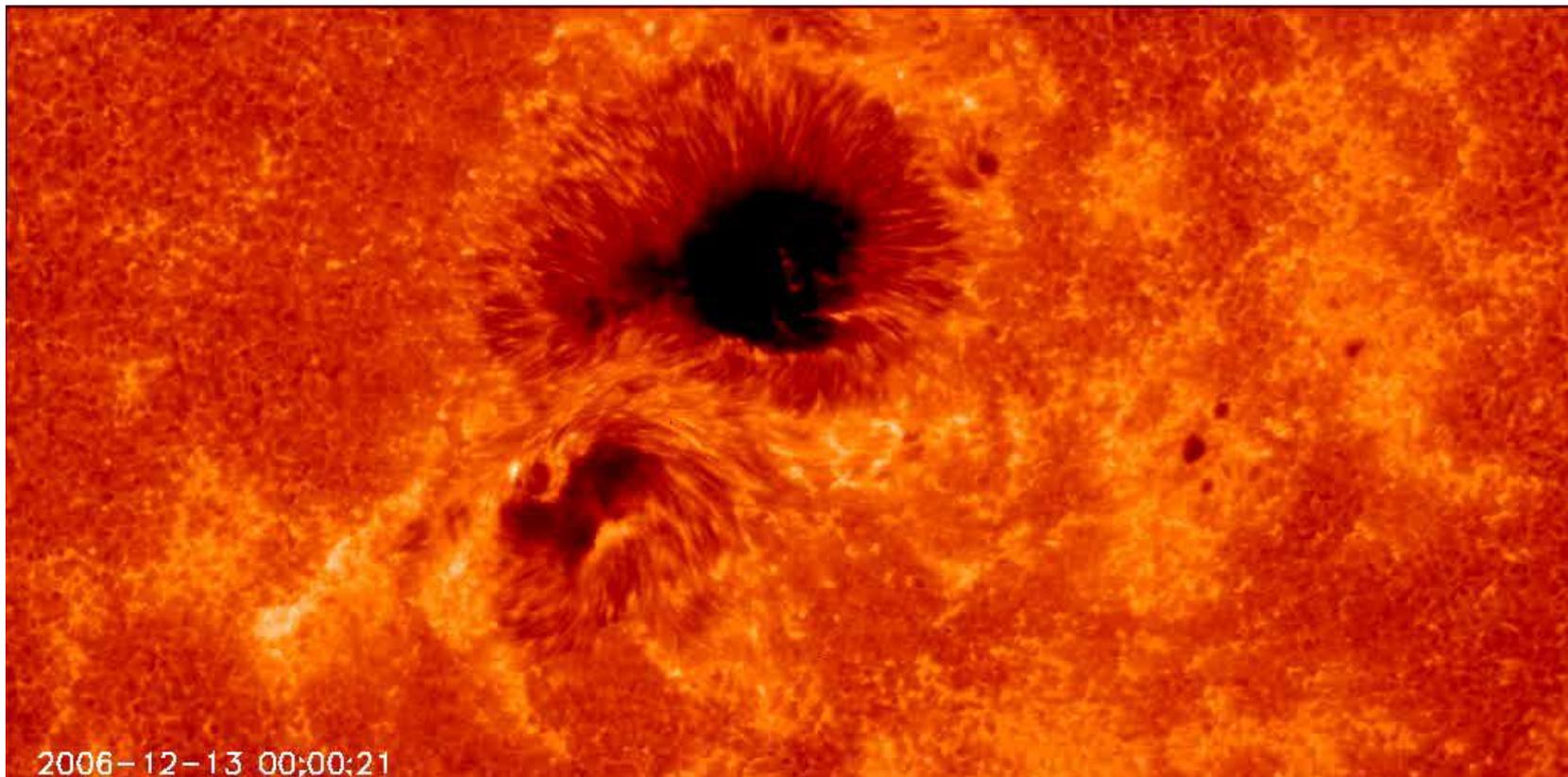
温度



地球の前方150万kmの宇宙空間で計測された太陽風の変動

太陽黒点と太陽面爆発（太陽フレア）

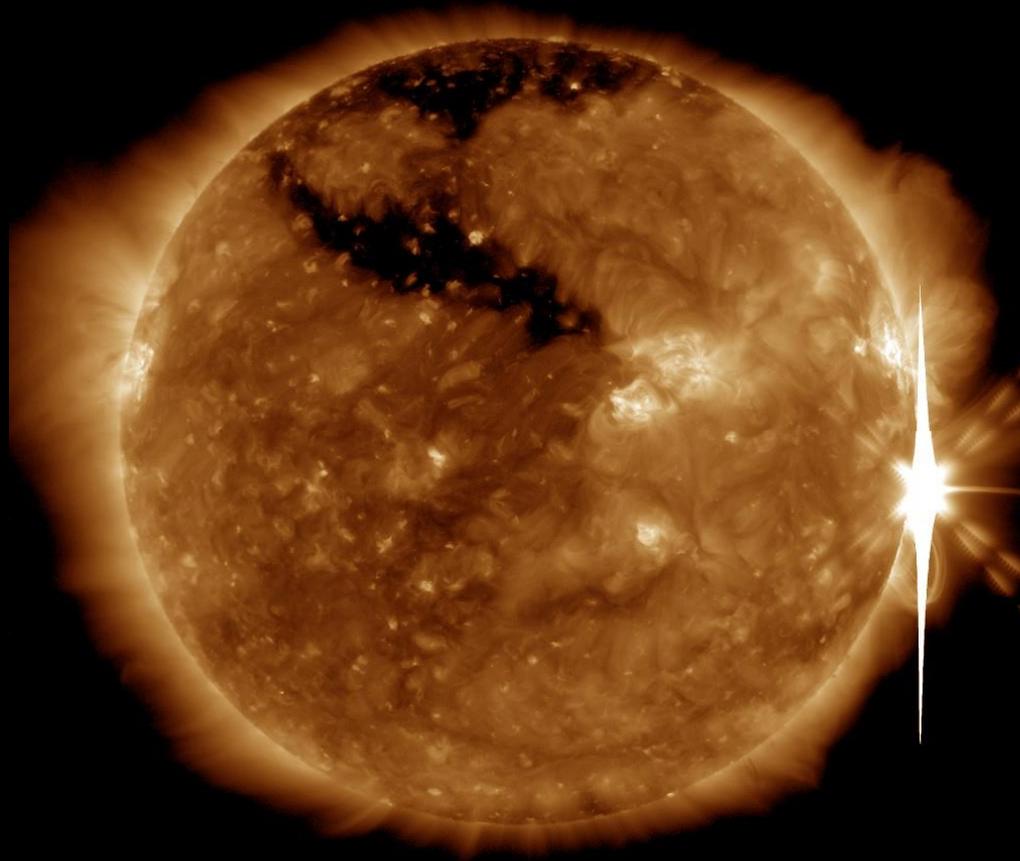
ひので衛星が観測した彩層の様子



国立天文台

磁力線のひずみがたまった領域で爆発現象「太陽フレア」が発生する。

2017年9月10日の太陽フレア



SDO/AIA 193 2017-09-10 16:11:05 UT

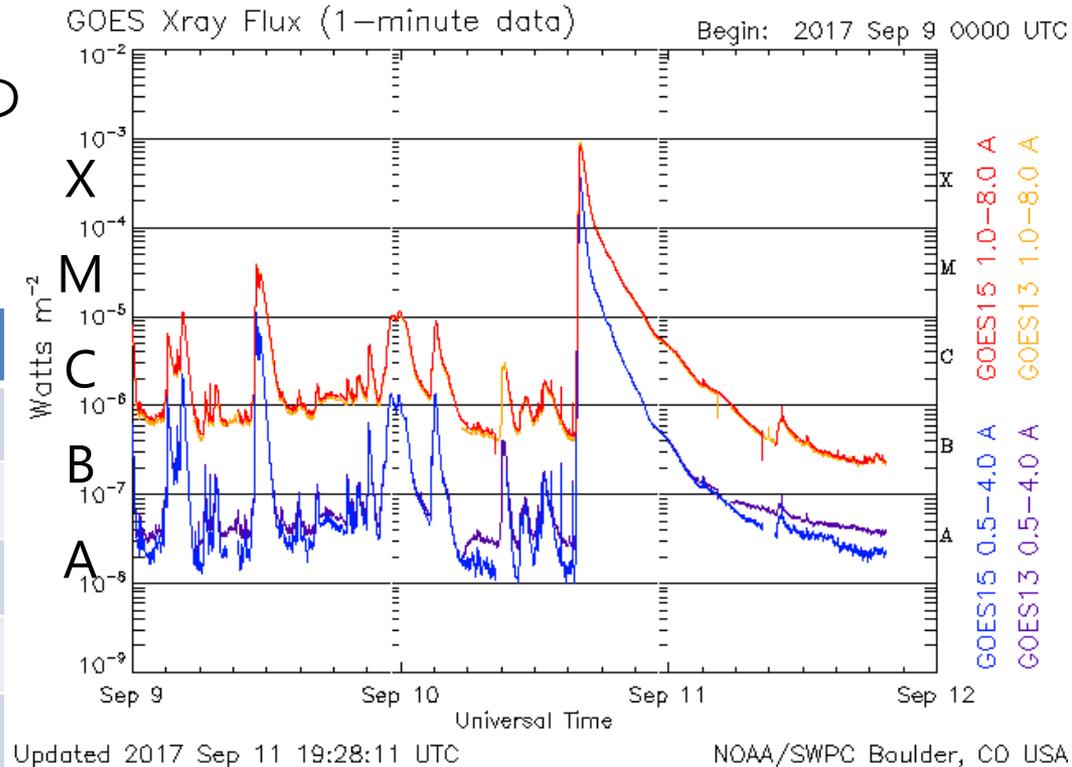
NASA/SDO (極端紫外線:波長19.3nm)

太陽フレア

X線、紫外線から電波までの広い波長域の電磁波の増光現象

太陽フレアの規模は、GOES衛星のX線（赤・黄のグラフ）のピーク値で決められる。

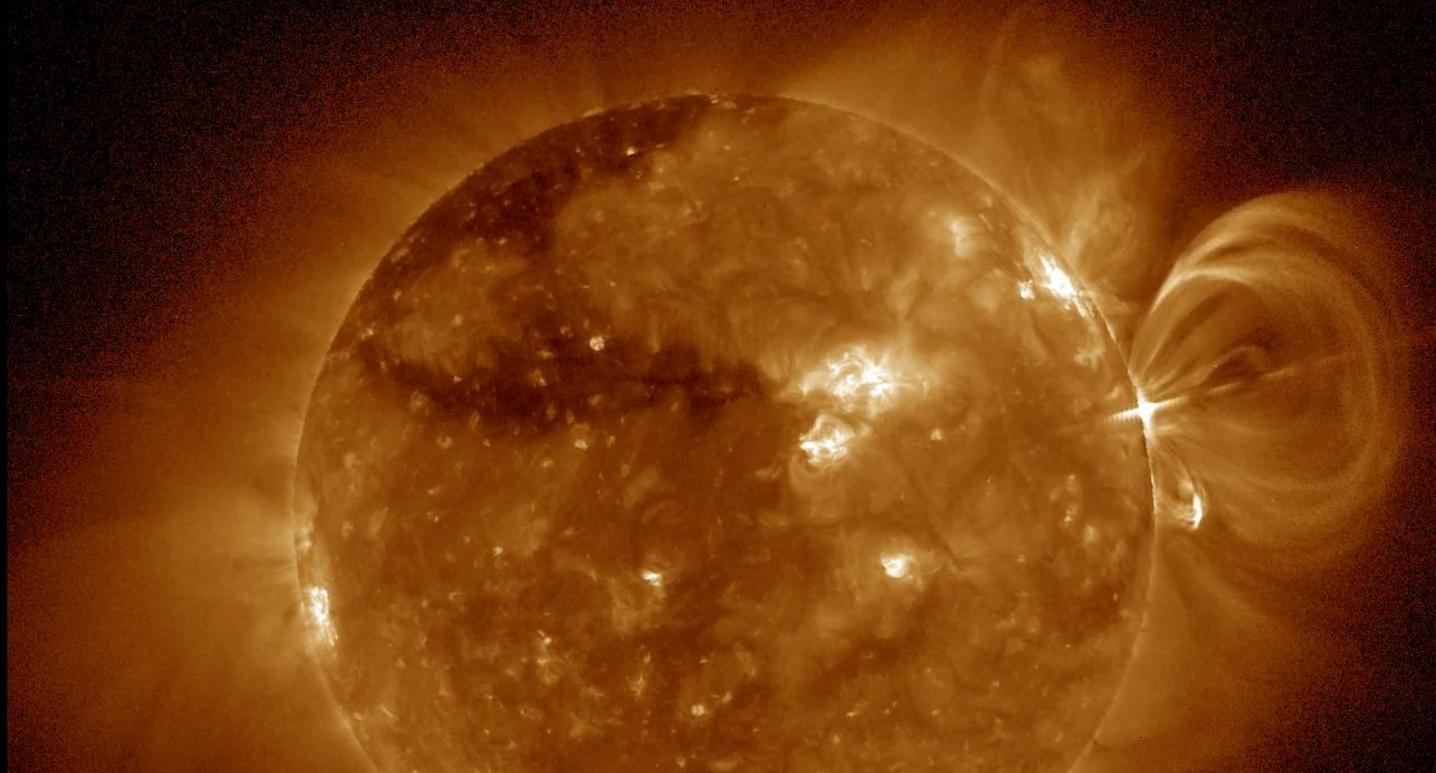
GOES衛星による太陽X線強度観測



<http://www.swpc.noaa.gov/>

X線・紫外線の増光 ⇒ 電離圏じょう乱（デリンジャー現象）

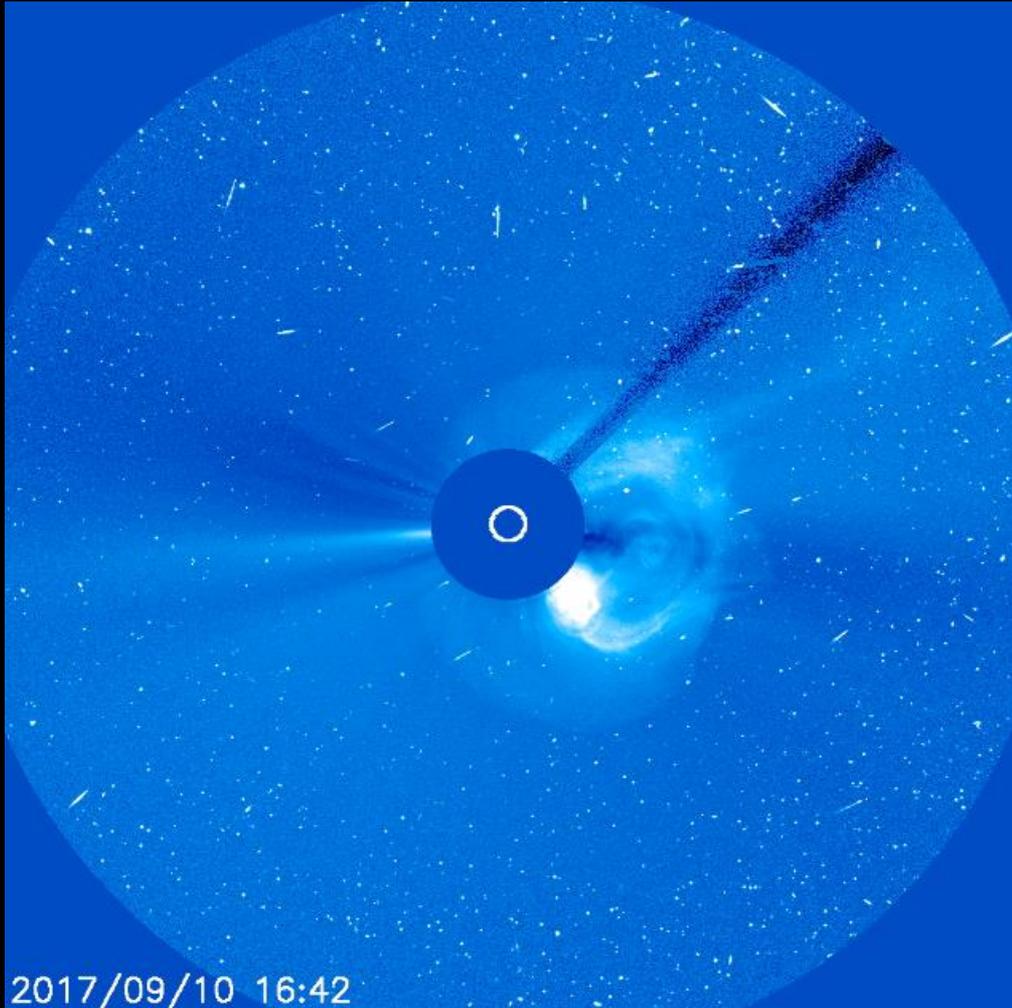
2017年9月10日のXクラスフレア



大規模な太陽フレアにともなって、コロナガスが太陽の外へ放出されるとき、これをコロナガス放出(CME)という。太陽フレアとコロナガス放出をまとめて「太陽嵐」と呼ぶ。

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

コロナガス放出



NASA/ESA SOHO/LASCO コロナグラフ(人工的な日食)
明るさはガスの密度に比例。白丸の位置が太陽。

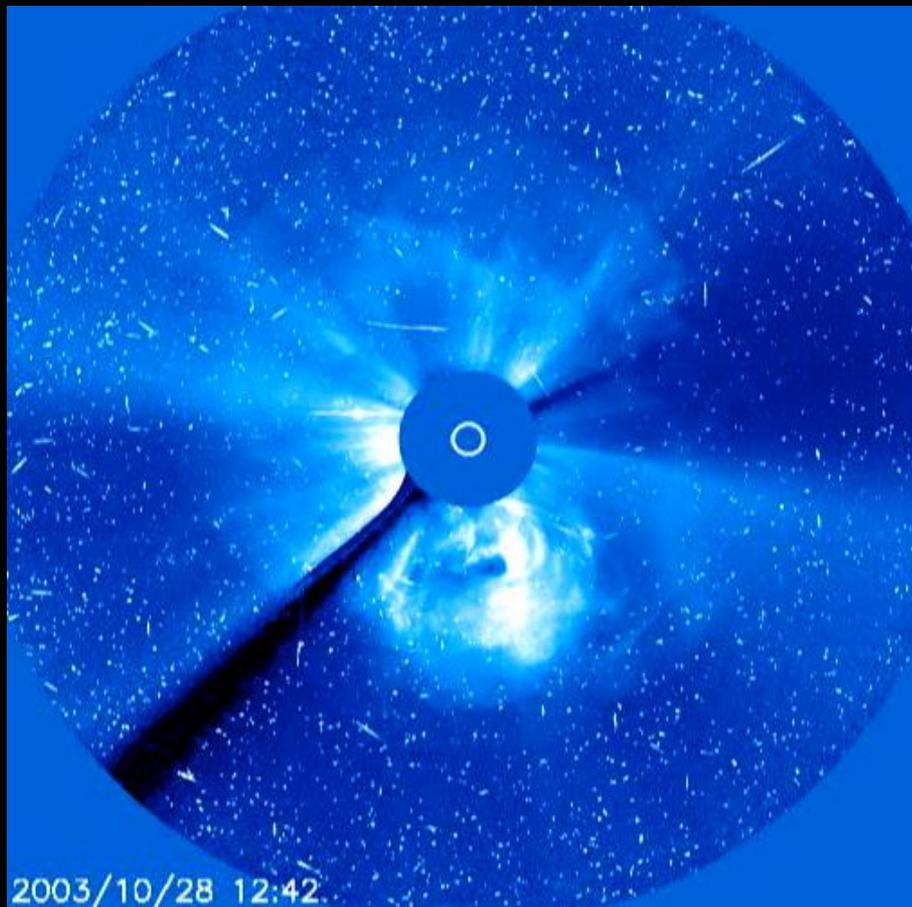
泡のように見える構造：
放出されたコロナガス
強い磁場とともに放出。

太陽風の流れる速度に比べて
放出されたガスの速度が速い
とき、太陽風のガスを押して
圧縮しながら、外に向かって
伝搬する。

ガスの塊が磁場とともに
地球に到来すると、太陽風の
速度・密度・磁場が急劇に
変化。

→ **磁気圏じょう乱**

コロナガス放出と太陽高エネルギー粒子



SoHO (NASA/ESA)

緑：極端紫外線（波長：19.5nm）

赤：コロナグラフ (SOHO/LASCO C2)

青：コロナグラフ (SOHO/LASCO C3)

2003/10/28に発生したHalloween stormの太陽嵐

泡のように見える構造：
放出されたコロナガス
地球に向かってきているため、
全方向に広がって見える

画面に現れる粒：
太陽高エネルギー粒子（放射線）
によってCCDカメラに生じたノイズ

太陽高エネルギー粒子(太陽宇宙線)

太陽高エネルギー粒子：

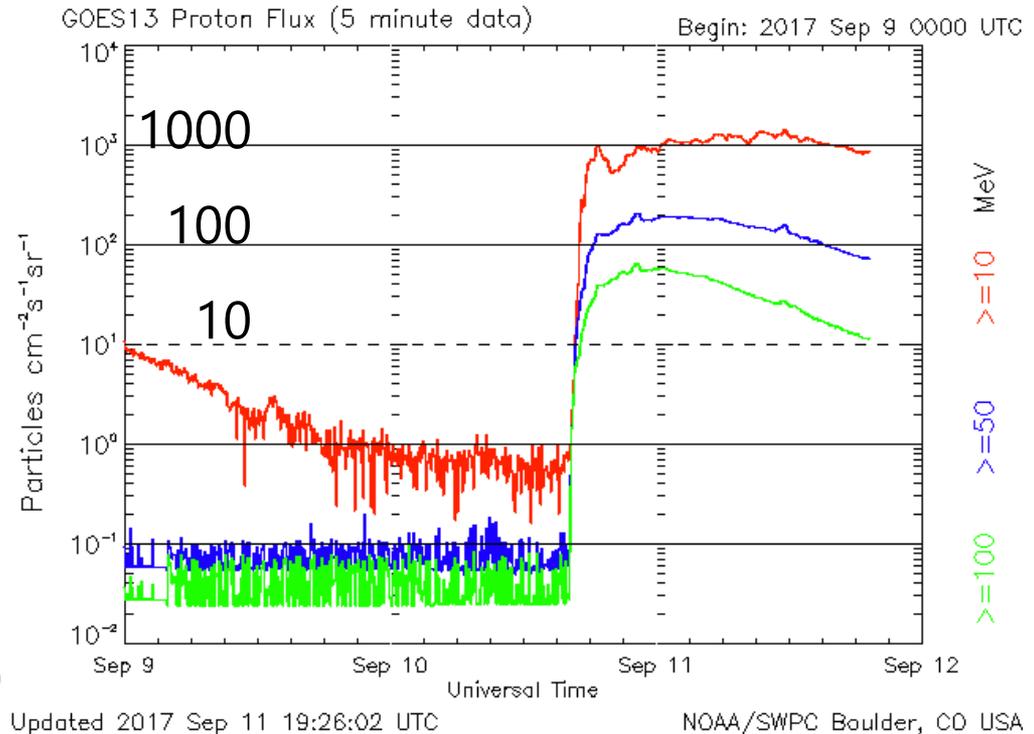
主成分はプロトン(陽子)と電子。
コロナガス粒子(電離した水素原子核=プロトン(陽子)と電子)の一部が、非常に高いエネルギーまで加速されたもの。

静止軌道における高エネルギープロトンの強度が、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**発生情報を発信している。

高エネルギープロトンの増加 ⇒

GOES衛星による高エネルギープロトン強度観測



- 宇宙飛行士被ばく
- 短波通信途絶
- 衛星誤作動
- 電離圏じょう乱

<http://www.swpc.noaa.gov/>

2017年9月1日-9月13日の宇宙天気

GOES衛星
太陽X線強度観測

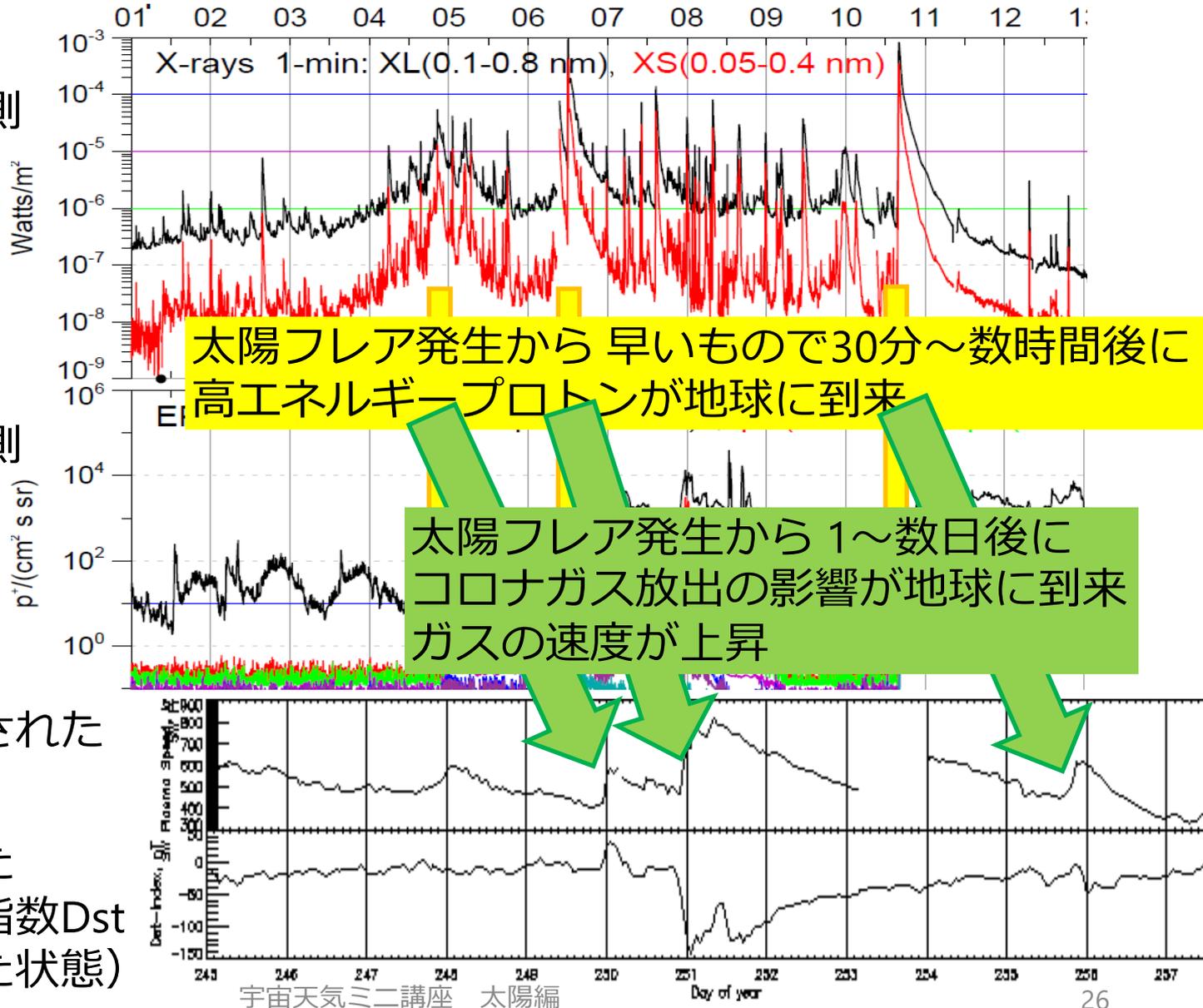
太陽から
約500秒で到来

GOES衛星
プロトン強度観測

地球前方で観測された
太陽風の速度

地上で観測された
地磁気じょう乱指数Dst
(低いほど荒れた状態)

2019年11月11日



まとめ

- 太陽からは以下の3種類の現象が異なる速度で地球に到来する。
 - 電磁波
 - 高エネルギー粒子（太陽宇宙線）
 - 電気を帯びたガス（太陽風とコロナガス放出）
- それぞれが異なる過程で宇宙天気じょう乱を引き起こし、社会に影響を及ぼす。

磁気圏編へつづく