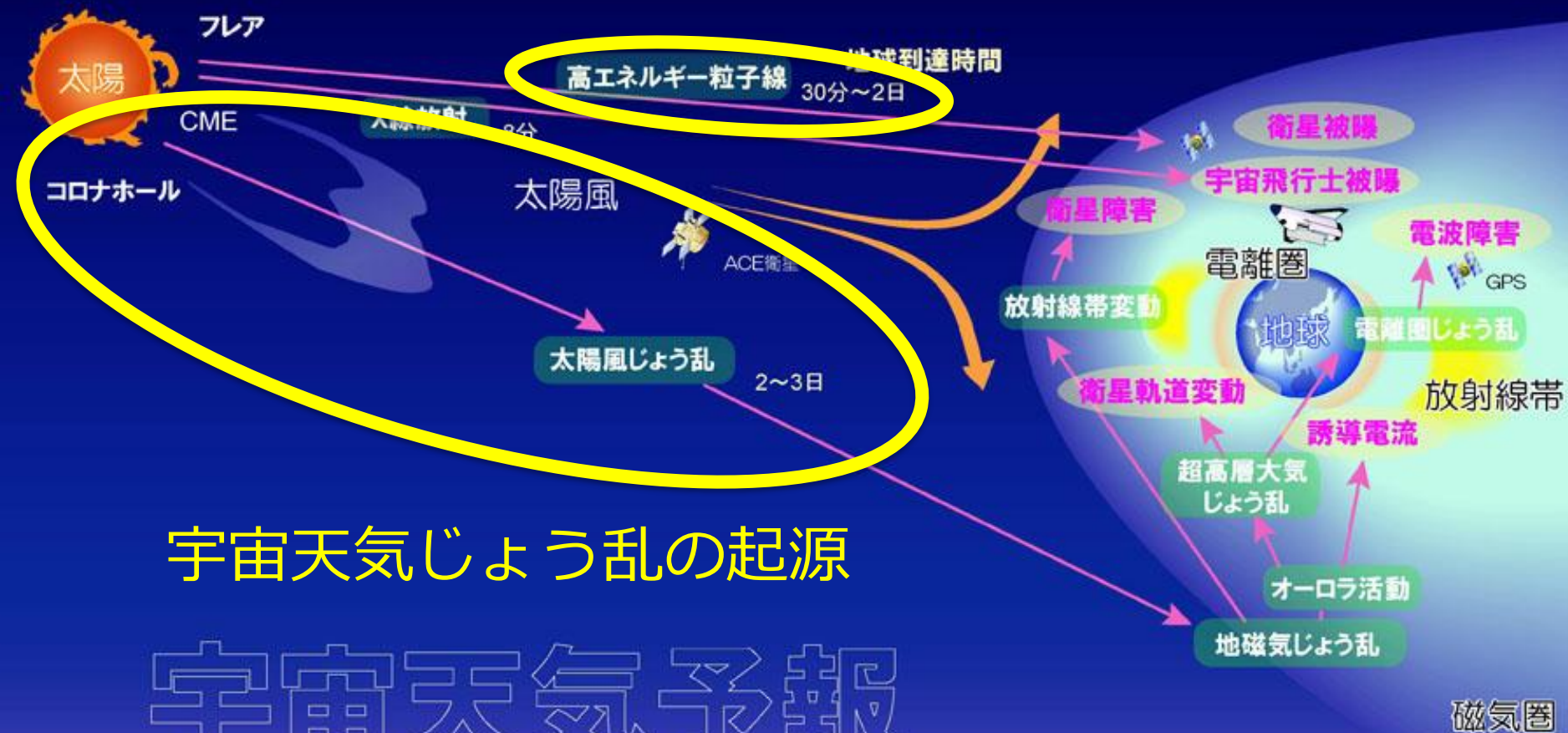


宇宙天気三二講座 -太陽風編-

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



宇宙天気じょう乱の起源

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

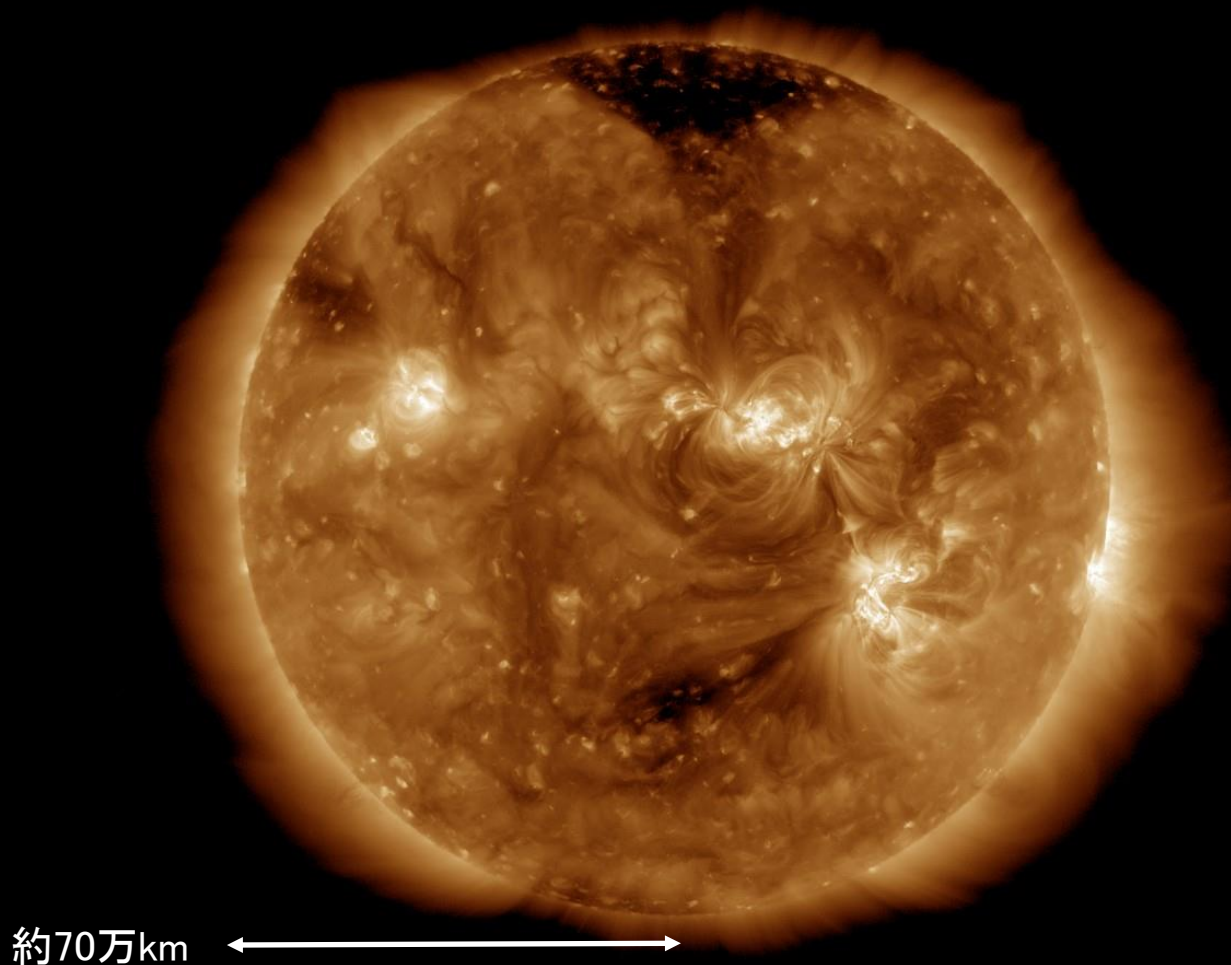
- 太陽コロナと太陽風・惑星間空間磁場
- 太陽の磁場と太陽風の変動
- 太陽風とコロナ質量放出（CME）
- 太陽高エネルギー粒子（SEP）

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。

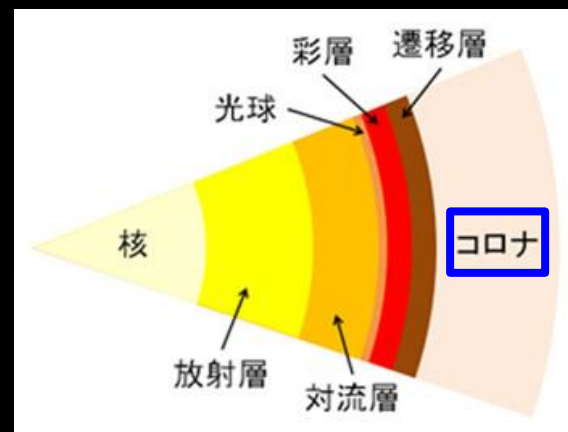
ガスが極端に少ない領域
コロナホールが見える。



約70万km

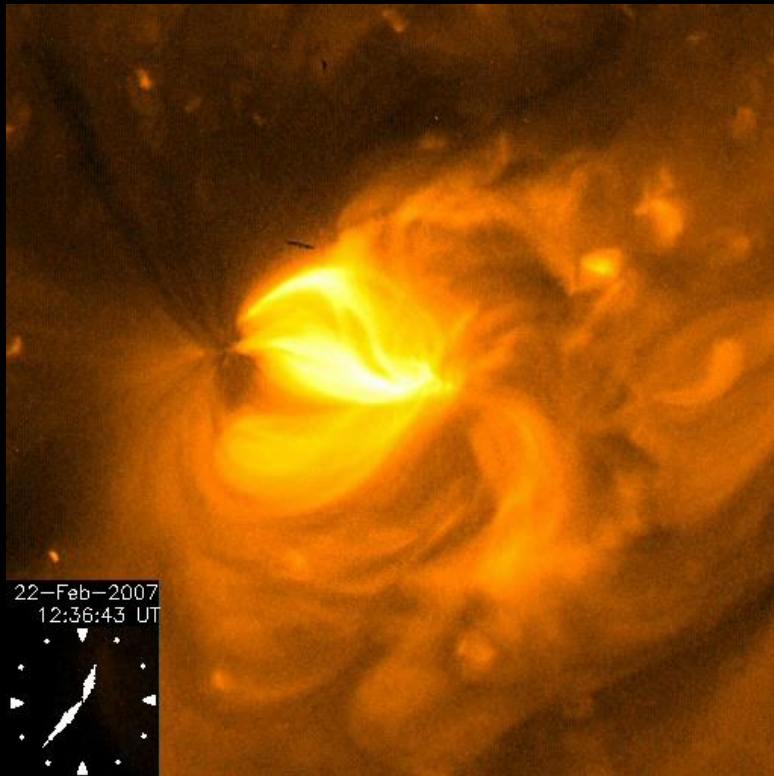
SDO/AIA 193 2017-09-06 00:11:05 UT

SDO衛星AIA観測装置
<https://sdo.gsfc.nasa.gov/>

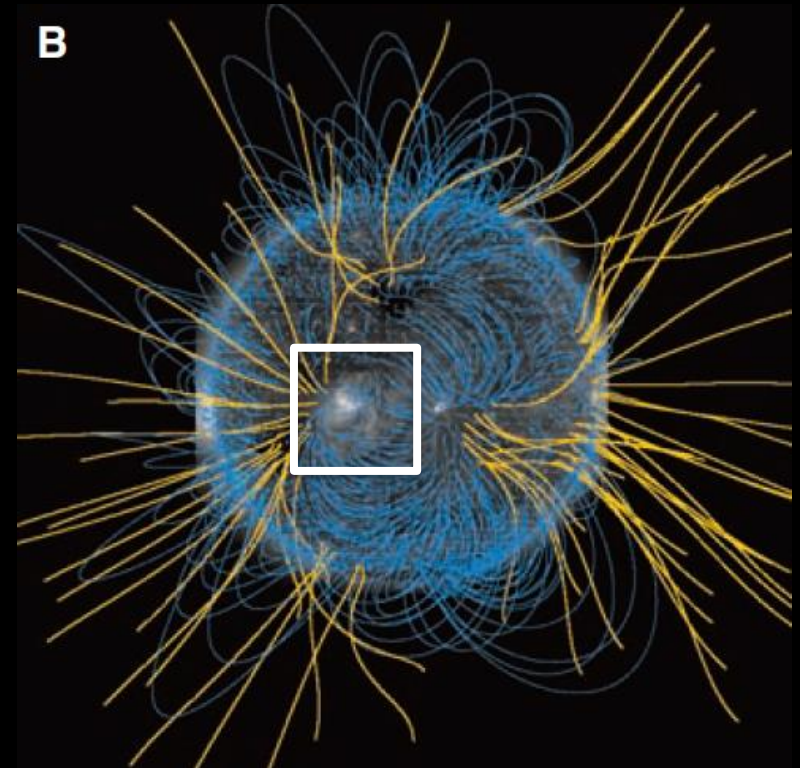


太陽の断面

コロナホールと太陽風



ひのでX線（コロナ）画像

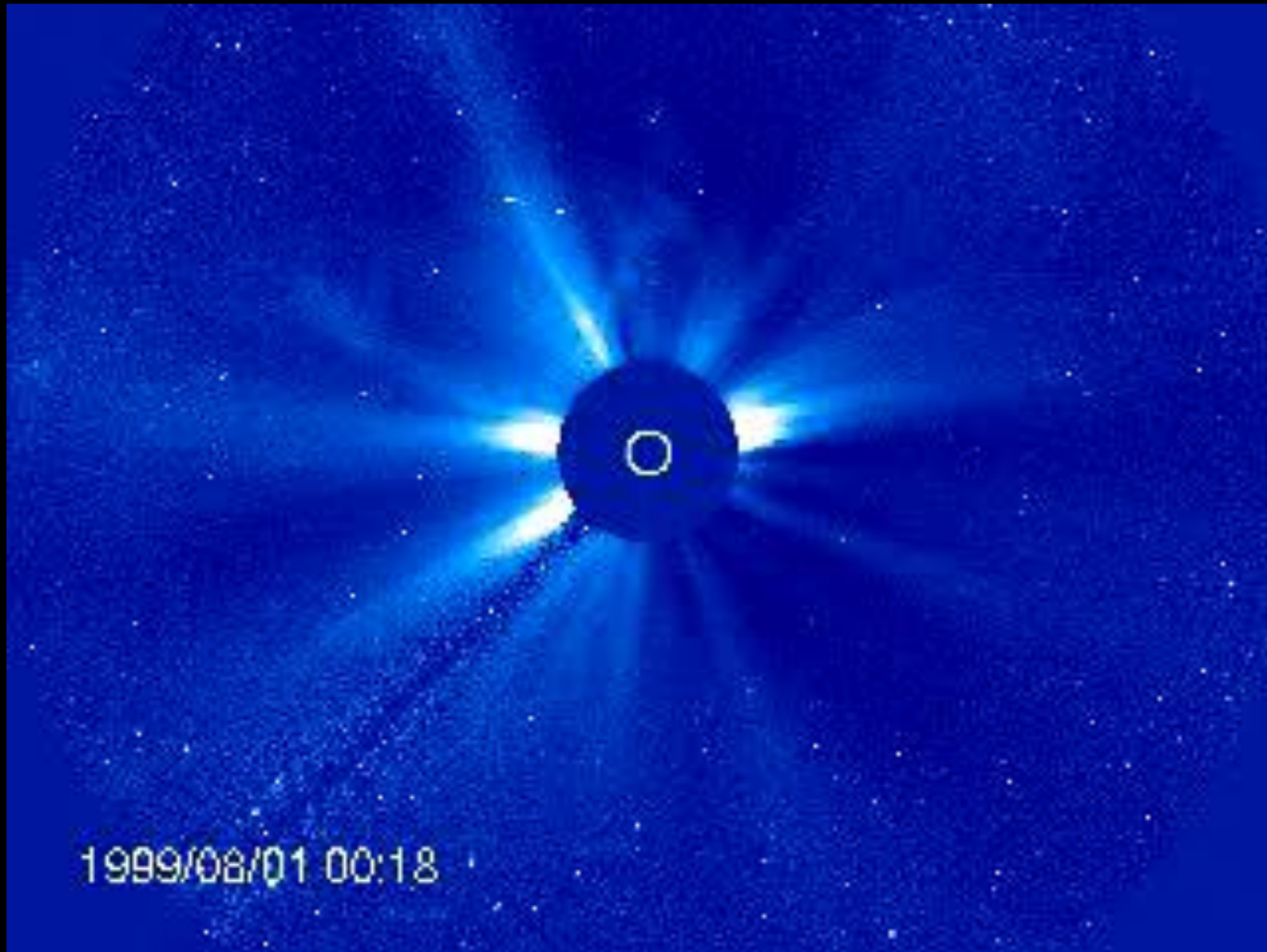


コロナの磁力線の様子

- 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。

(Sakao+2007)

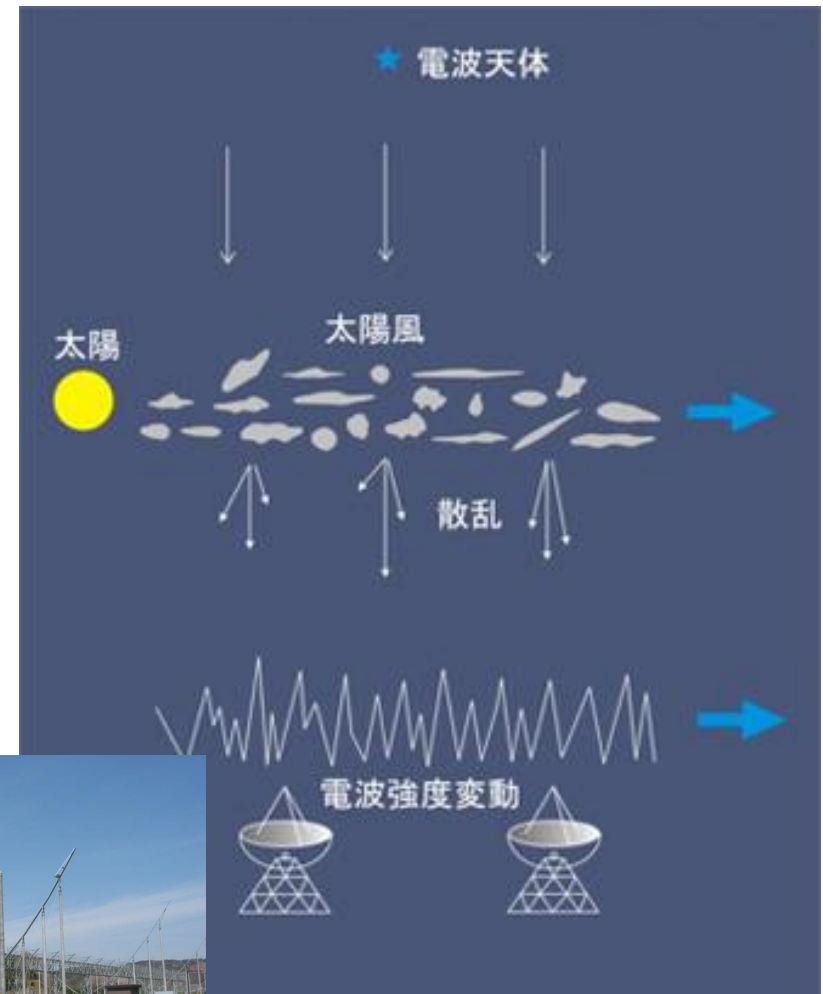
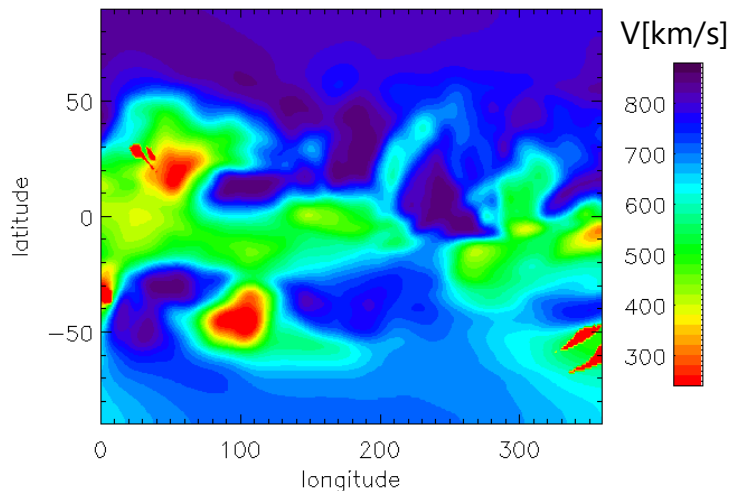
コロナグラフで見た太陽風



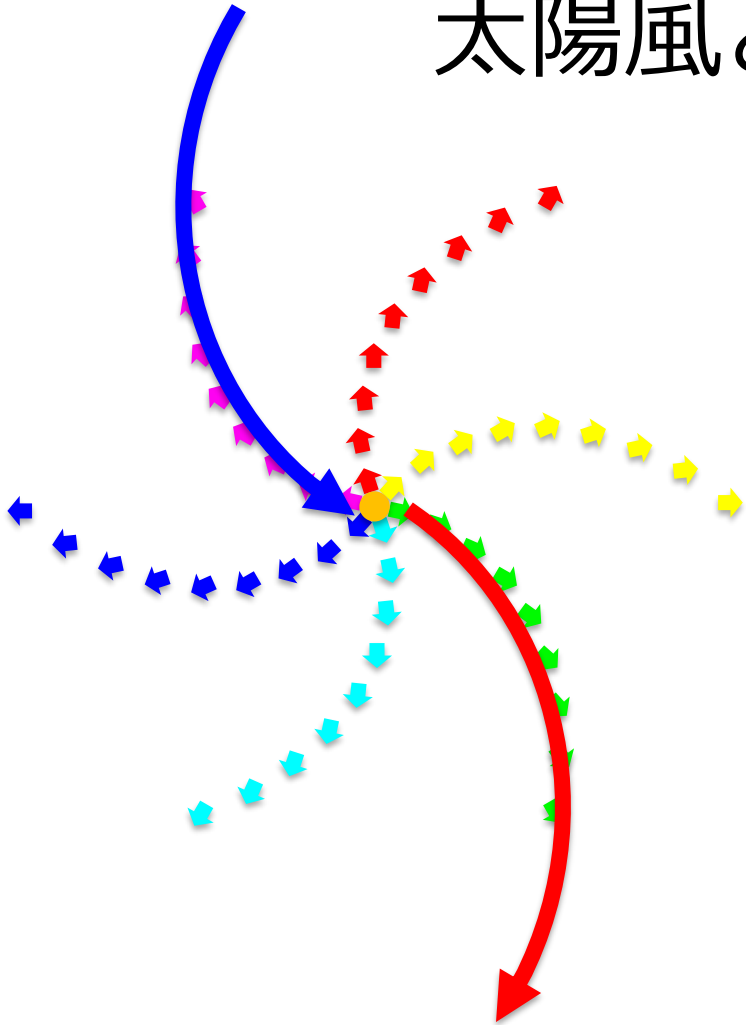
SOHO探査機 LASCO 観測装置：遮蔽版で太陽を隠した人工の日食観測。
明るさ：コロナガス（プラズマ）の密度。白丸：太陽の位置

惑星間空間シンチレーション(IPS)観測

- 名古屋大学宇宙地球環境研究所
<https://stsw1.isee.nagoya-u.ac.jp/>
- 遠くの電波天体からの電波の経路を横切る太陽風によって、電波シグナルが乱される（またたく）様子からその太陽風の状態を観測。
- 太陽が自転する1周分の観測をまとめて太陽風の緯度経度分布を得る。



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

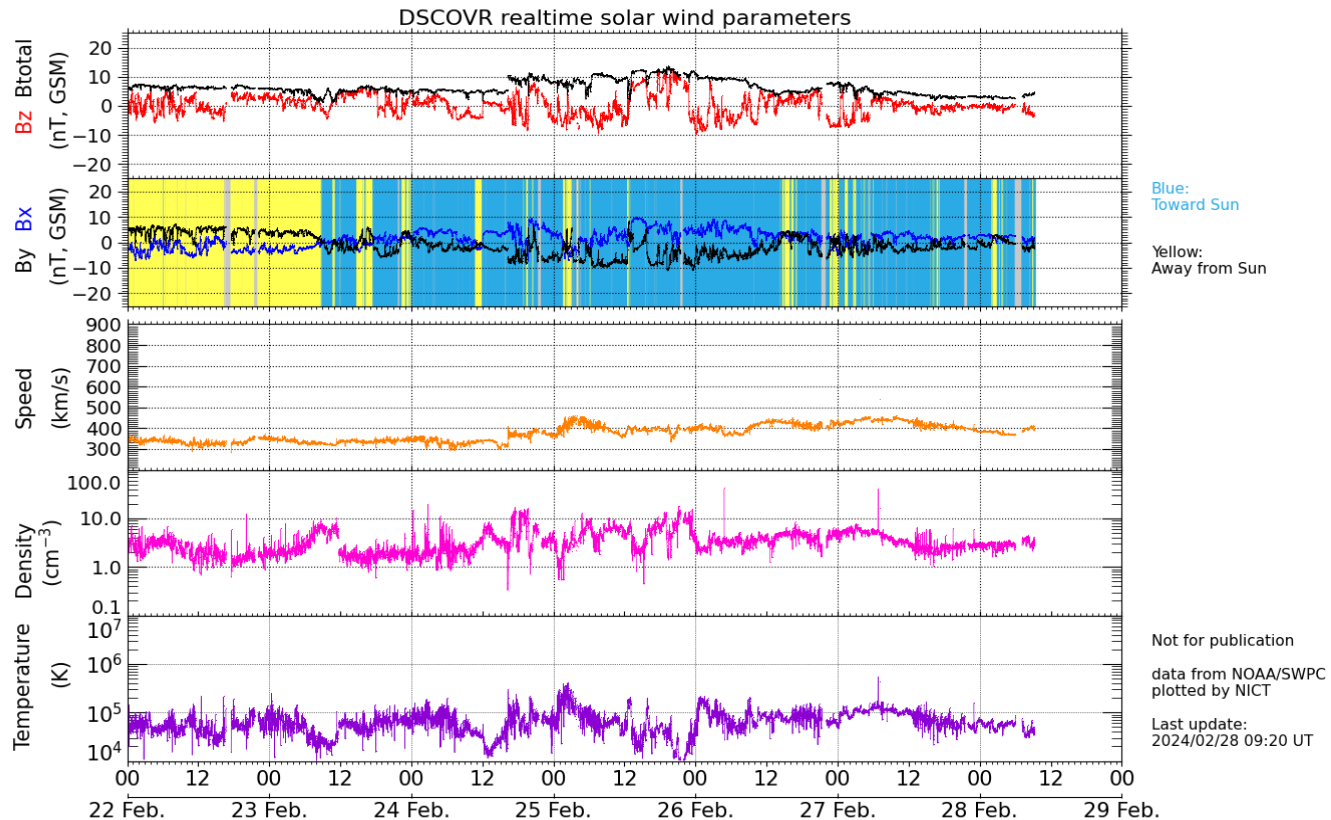
Diagram illustrating the distance from the Sun to Earth, labeled as 1億5千万km (1.5 billion km).

1億5千万km

距離

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

温度

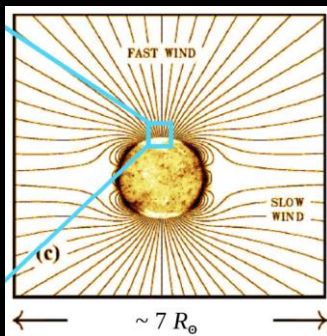


toward
away

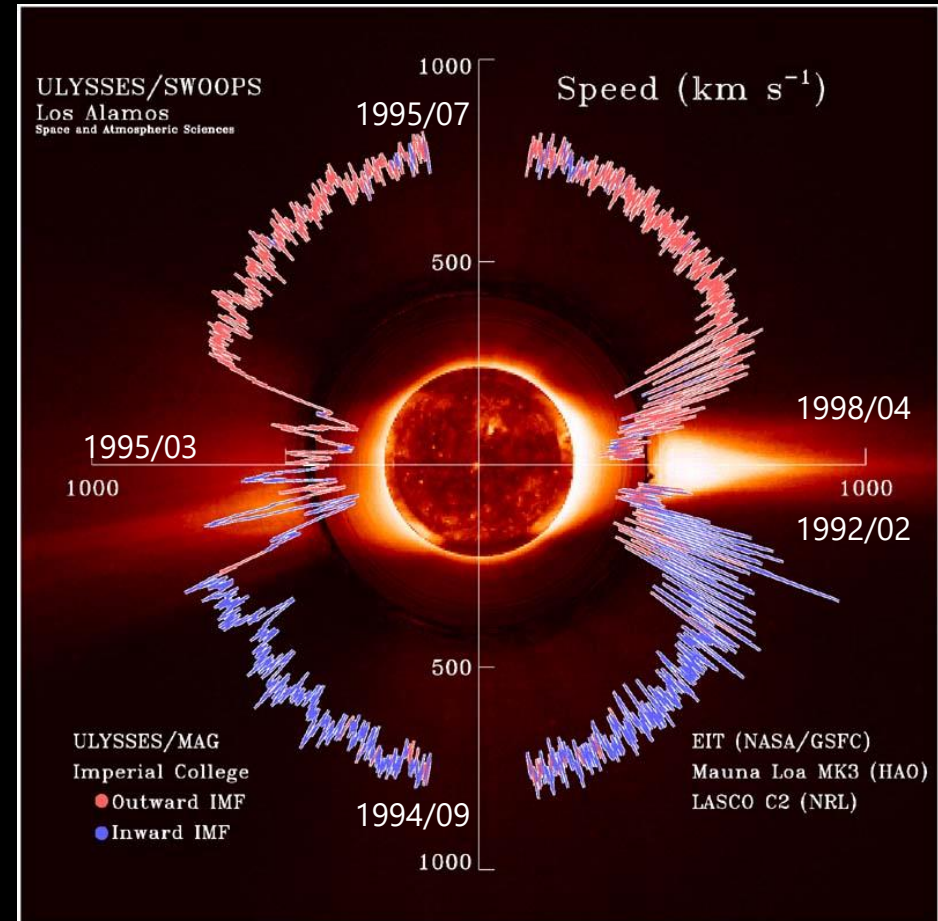
<https://swc.nict.go.jp/trend/solarwind.html>

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。
- コロナホールの大きさよりも高速風が流れる領域が広がっている。
- 低速風領域については不明瞭。
- 太陽風の加速メカニズムは未解明。

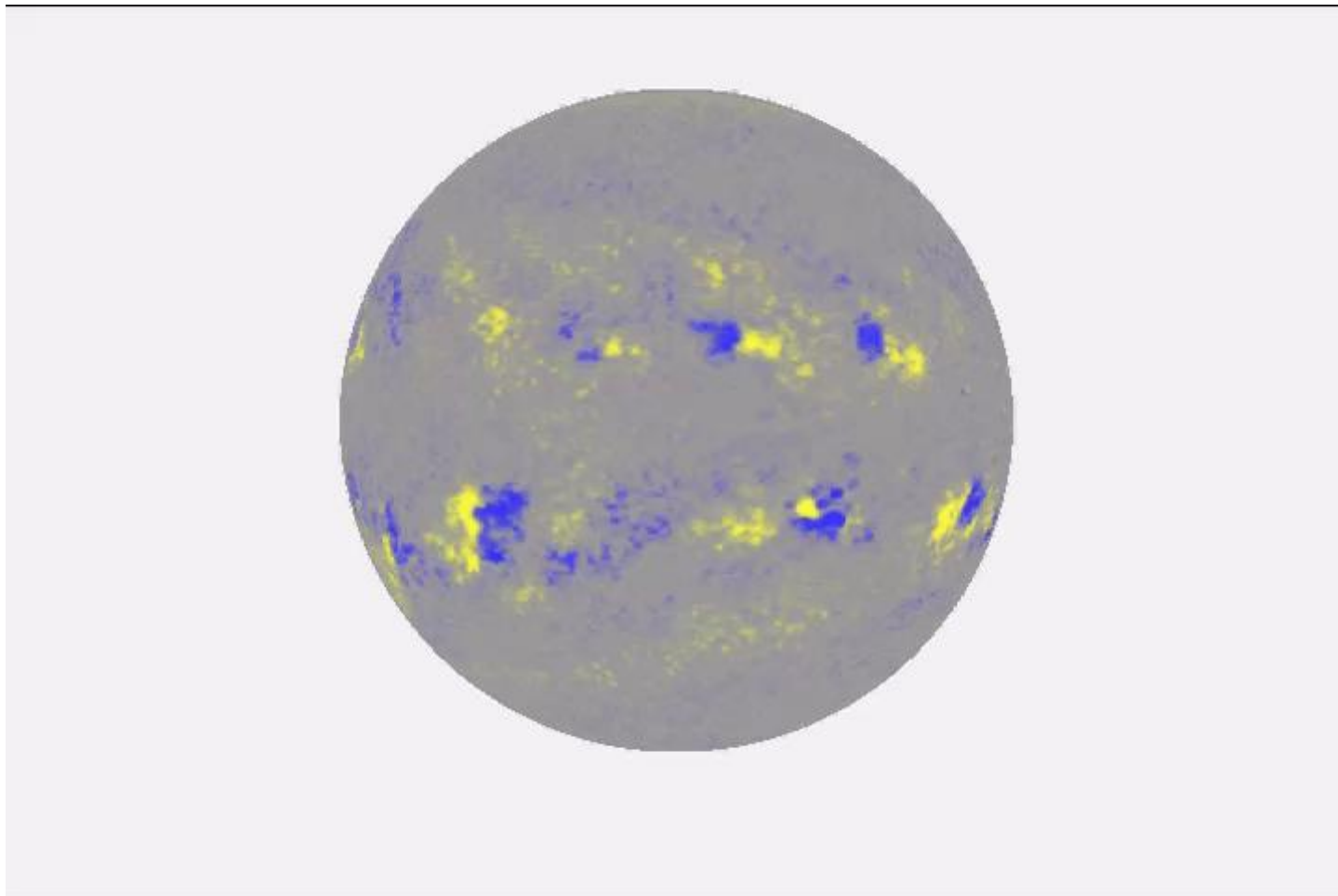


Cranmer & van Ballegooijen 2005



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

太陽の磁場の長期変動

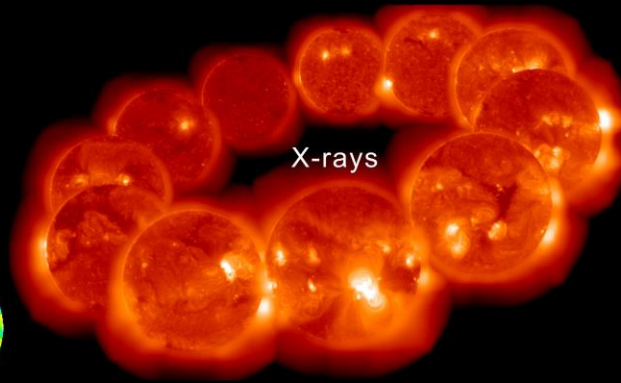
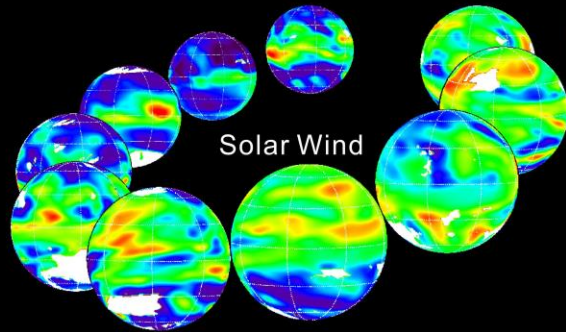


<http://solarscience.msfc.nasa.gov/movies/HathawayMovie.avi>

黄：正極（N極） 青：負極（S極）

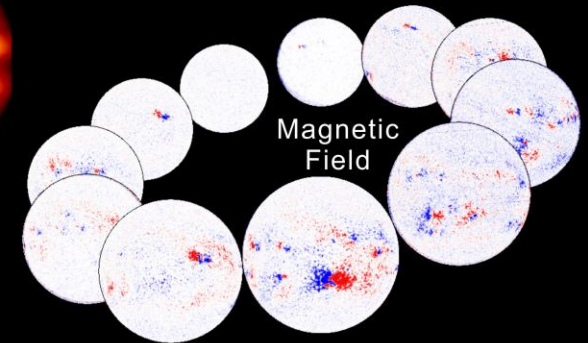
太陽の磁場の長期変動

IPS観測
太陽風速度



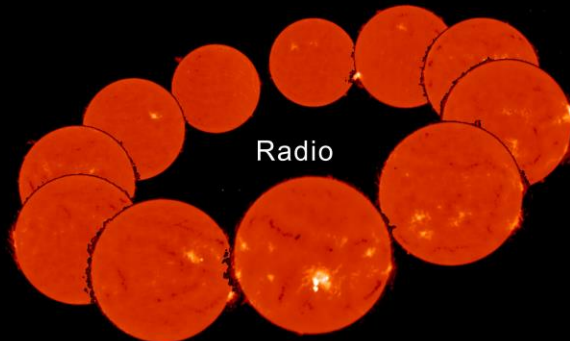
X線

磁場

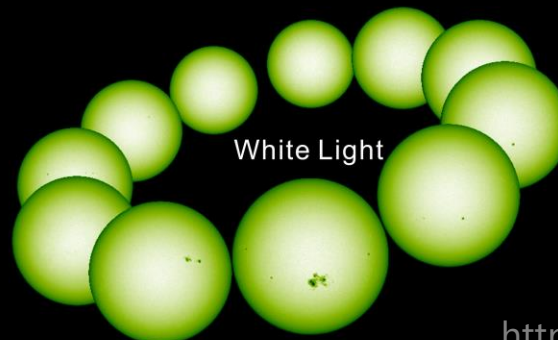


Solar Cycle 2009-2019

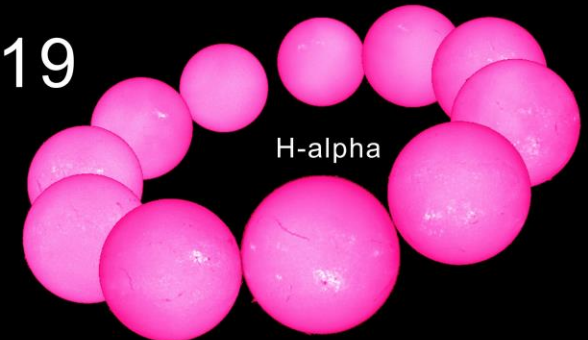
電波



可視光線



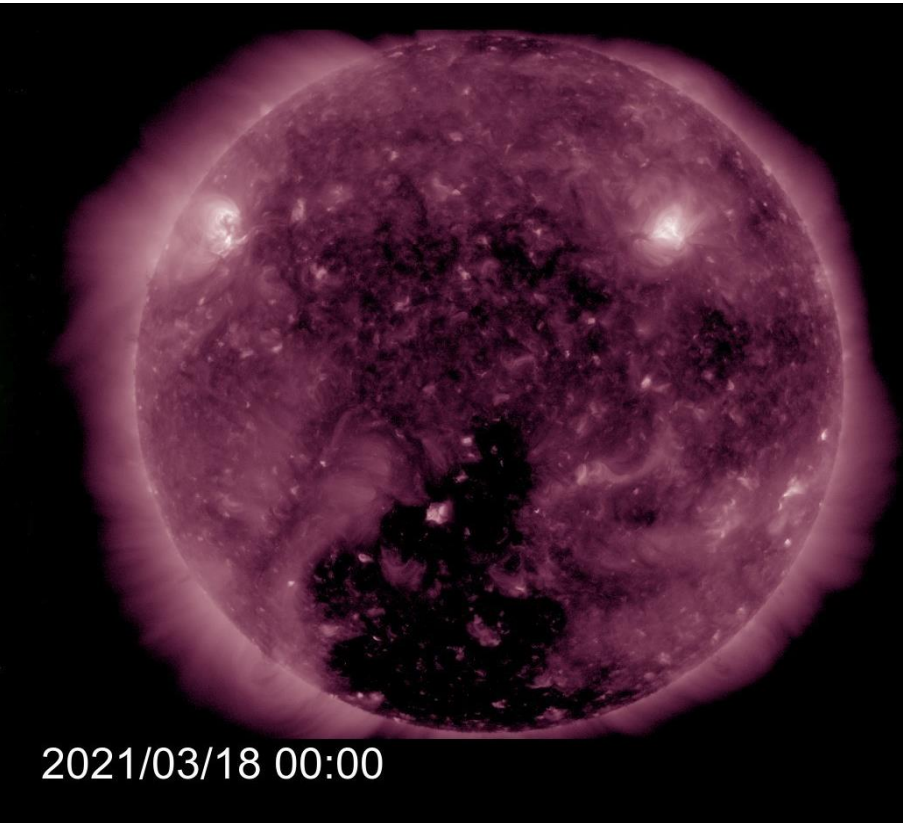
H-alpha



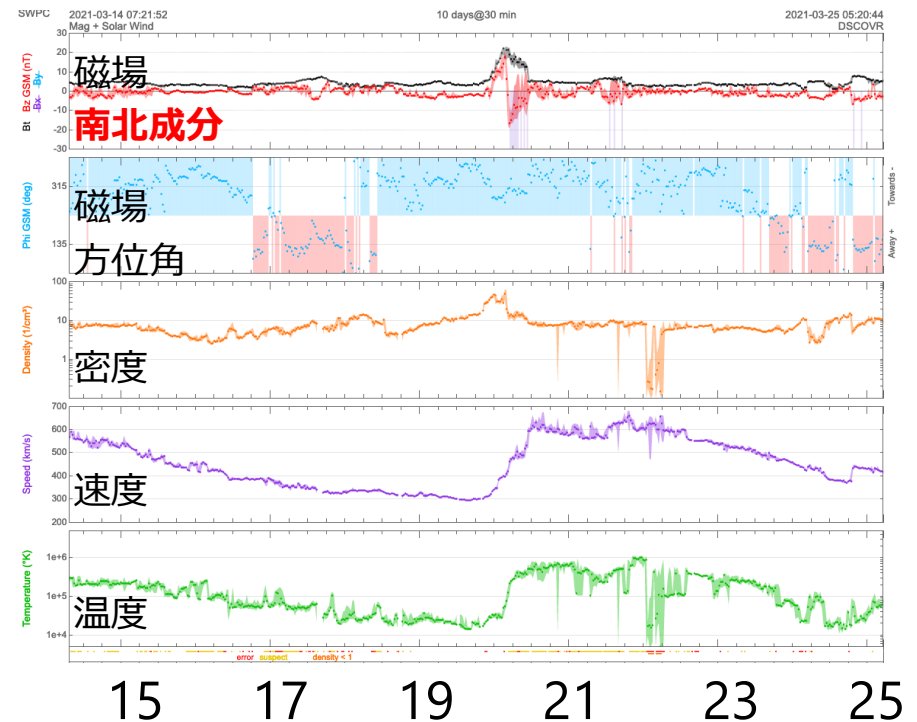
Hα線

高速太陽風の到来とコロナホール

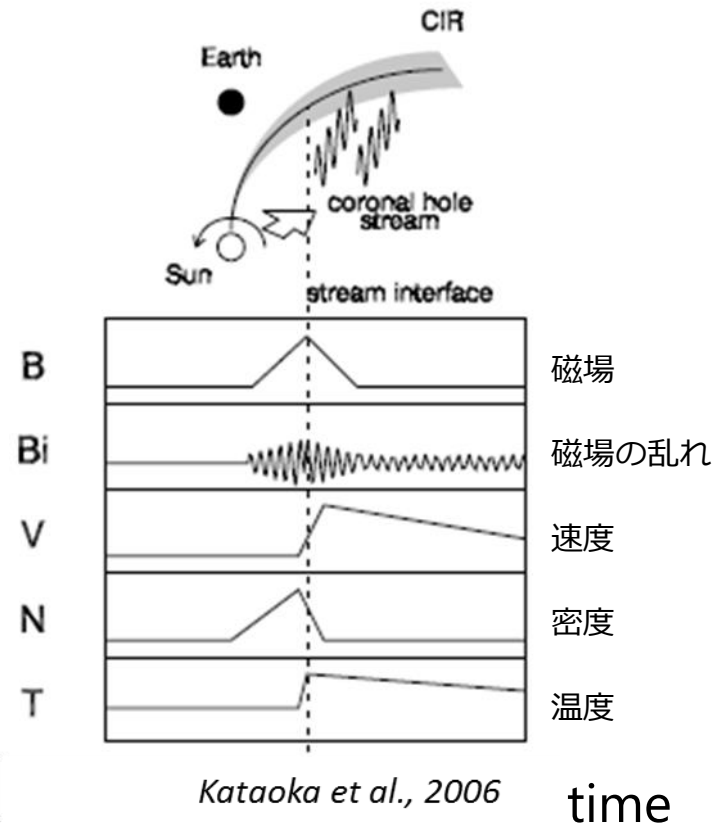
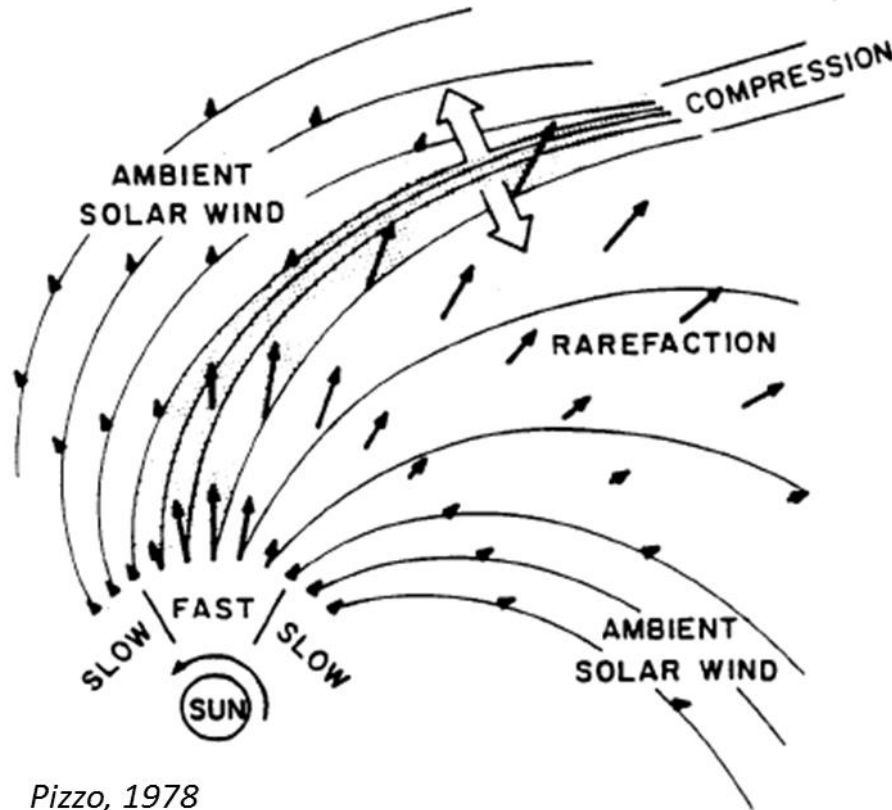
- 大きなコロナホールが低緯度帯に存在するとき、地球に高速太陽風が到来する可能性が生じる。



2021/03/14-25

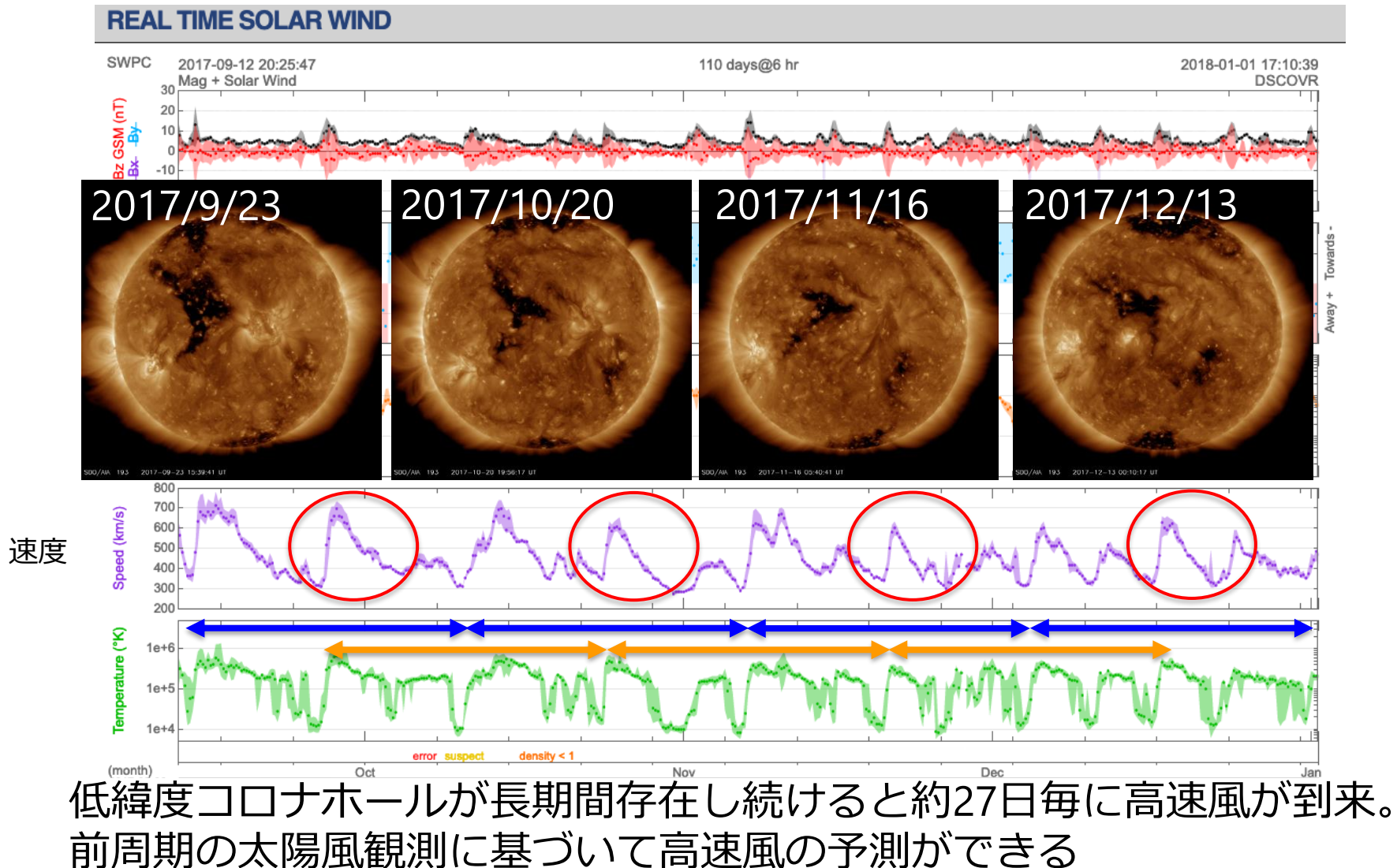


共回転相互作用領域 CIR (co-rotational interaction region)



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は磁気圏の乱れの一因の一つ。

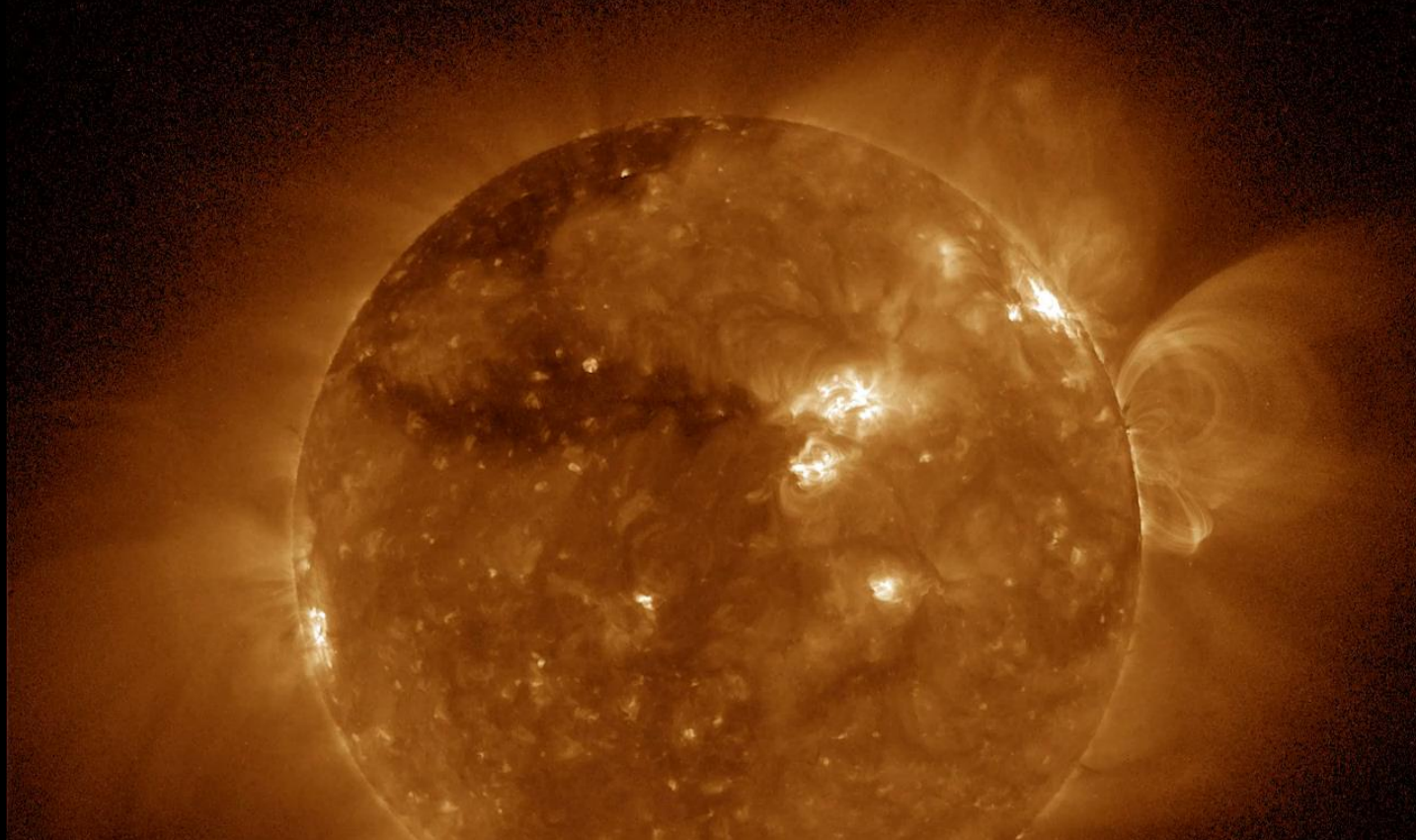
回帰性高速太陽風による予測



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
- 太陽の磁場と太陽風の変動
- 太陽風とコロナ質量放出 (CME)
- 太陽高エネルギー粒子 (SEP)

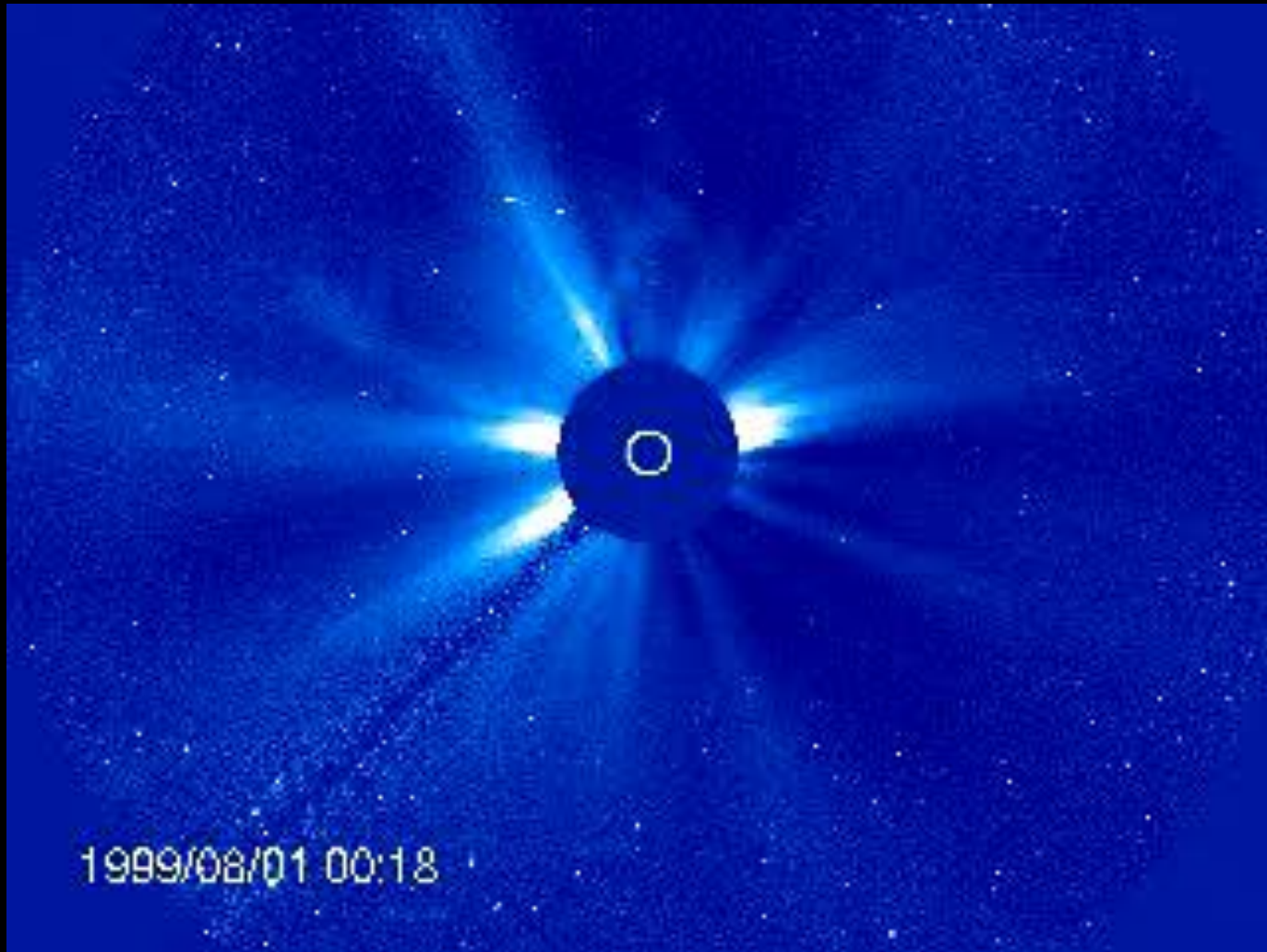
2017年9月10日のXクラスフレアとCME



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)

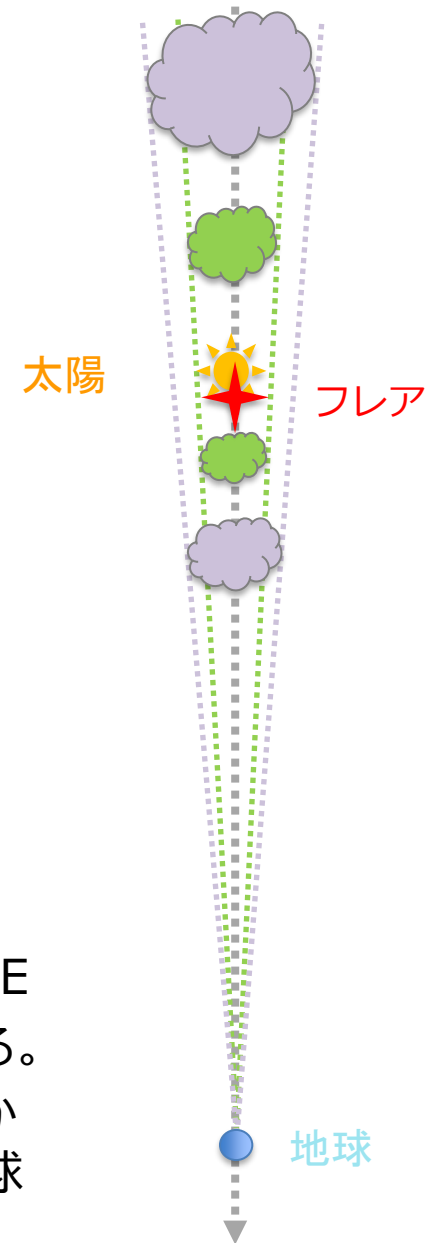
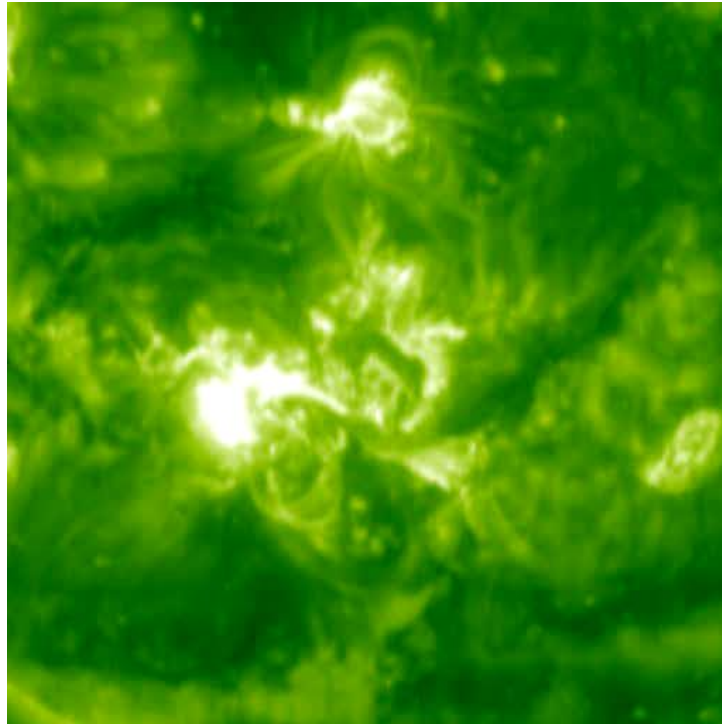
コロナグラフで見た太陽風とCME



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

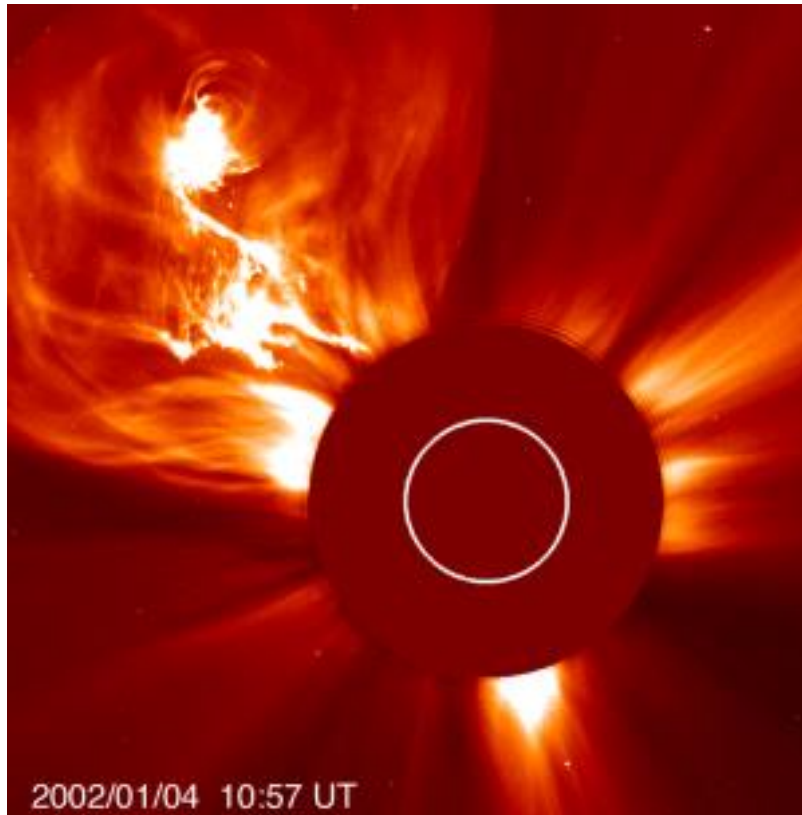
ハロー-CME

2003年10月28日に発生したX20フレアおよびCME

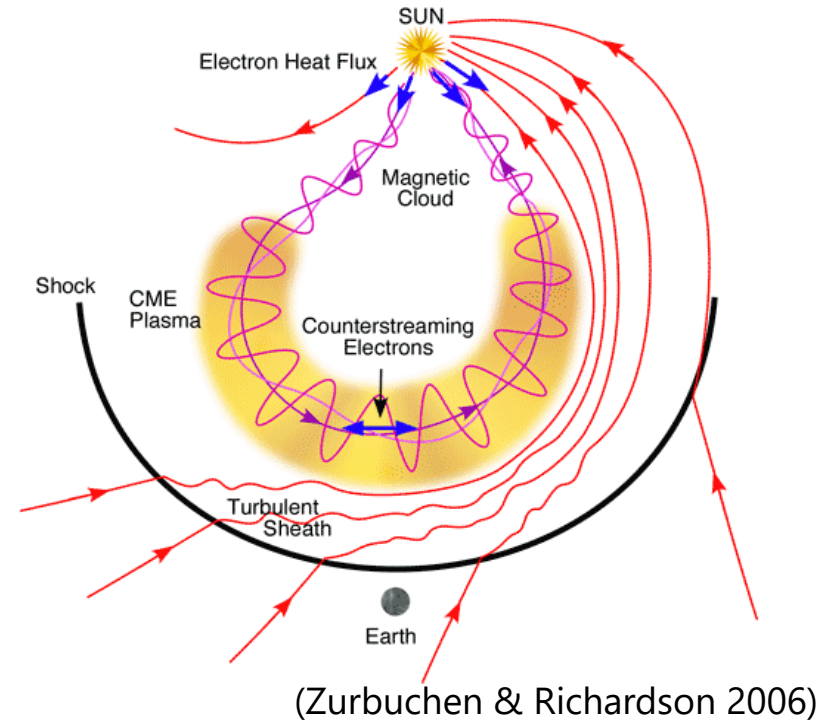


- ハロー-CME：全方向に広がっていく様子が観測されるCME
- コロナグラフは太陽の前後にあるガスが同じように見える。
- 対応するフレア（コロナの擾乱）がある場合は地球に向かう方向に放出されたCMEであり、フレアがない場合は地球とは逆方向に放出されたCME

CMEと内部の磁場構造

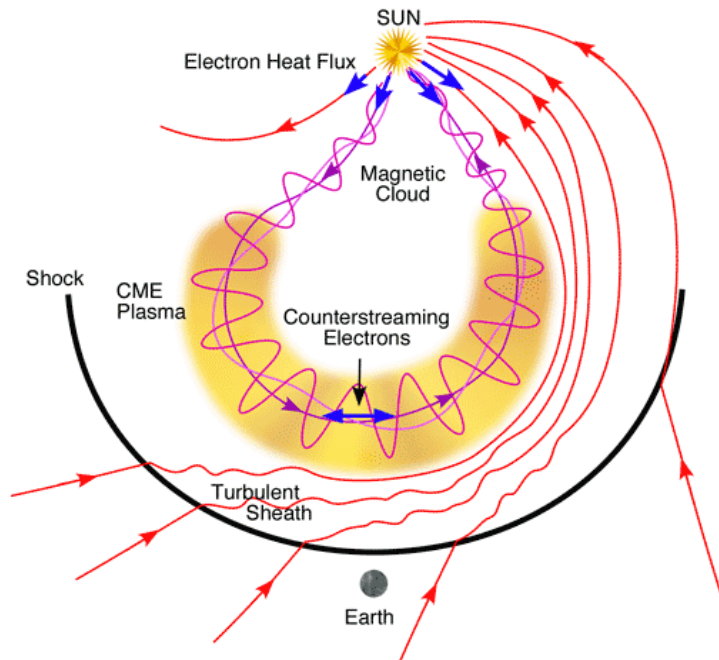


SOHO/LASCO コロナグラフ
CME中央にねじれたらせん状の
構造が見られる



CMEの正体は太陽コロナから放出されたねじれた磁気ロープ惑星間空間を流れる太陽風の中を相互作用をしながら伝搬

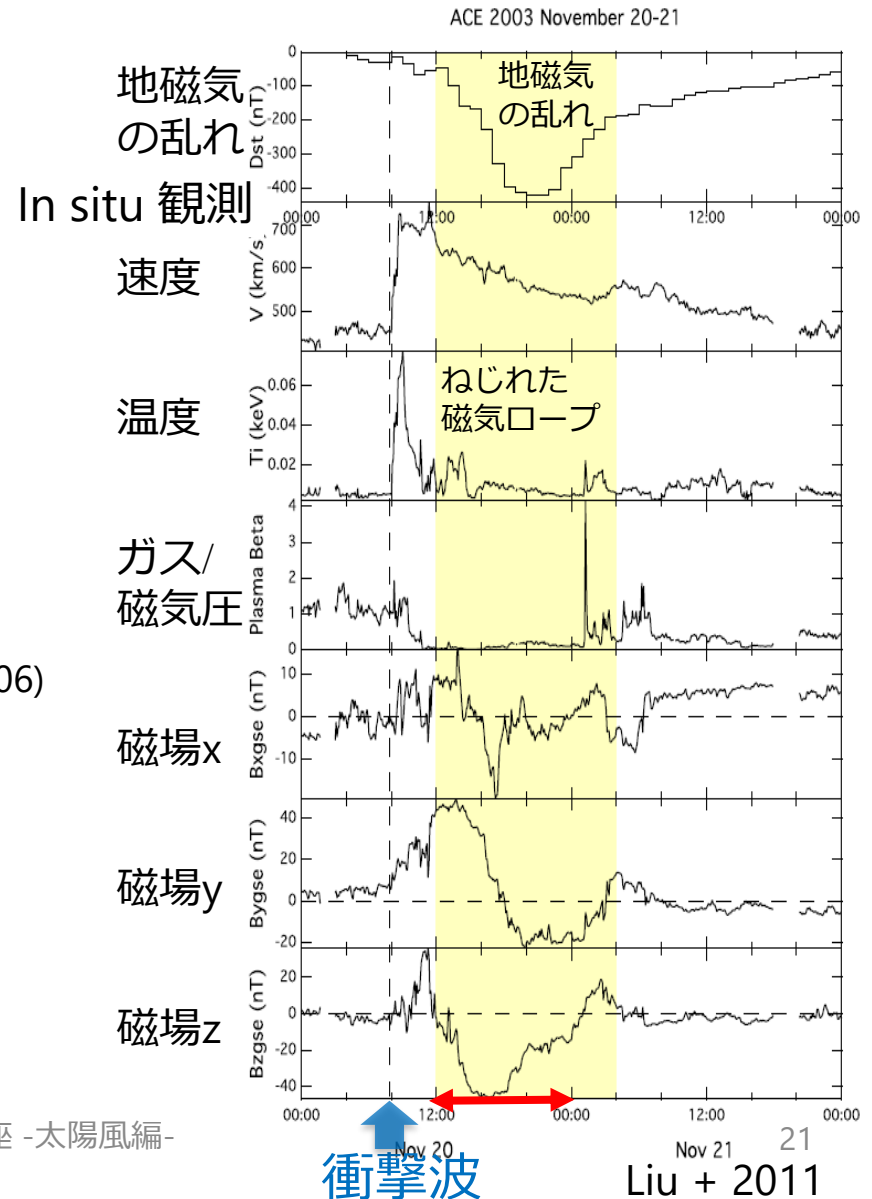
地球に到来するCME

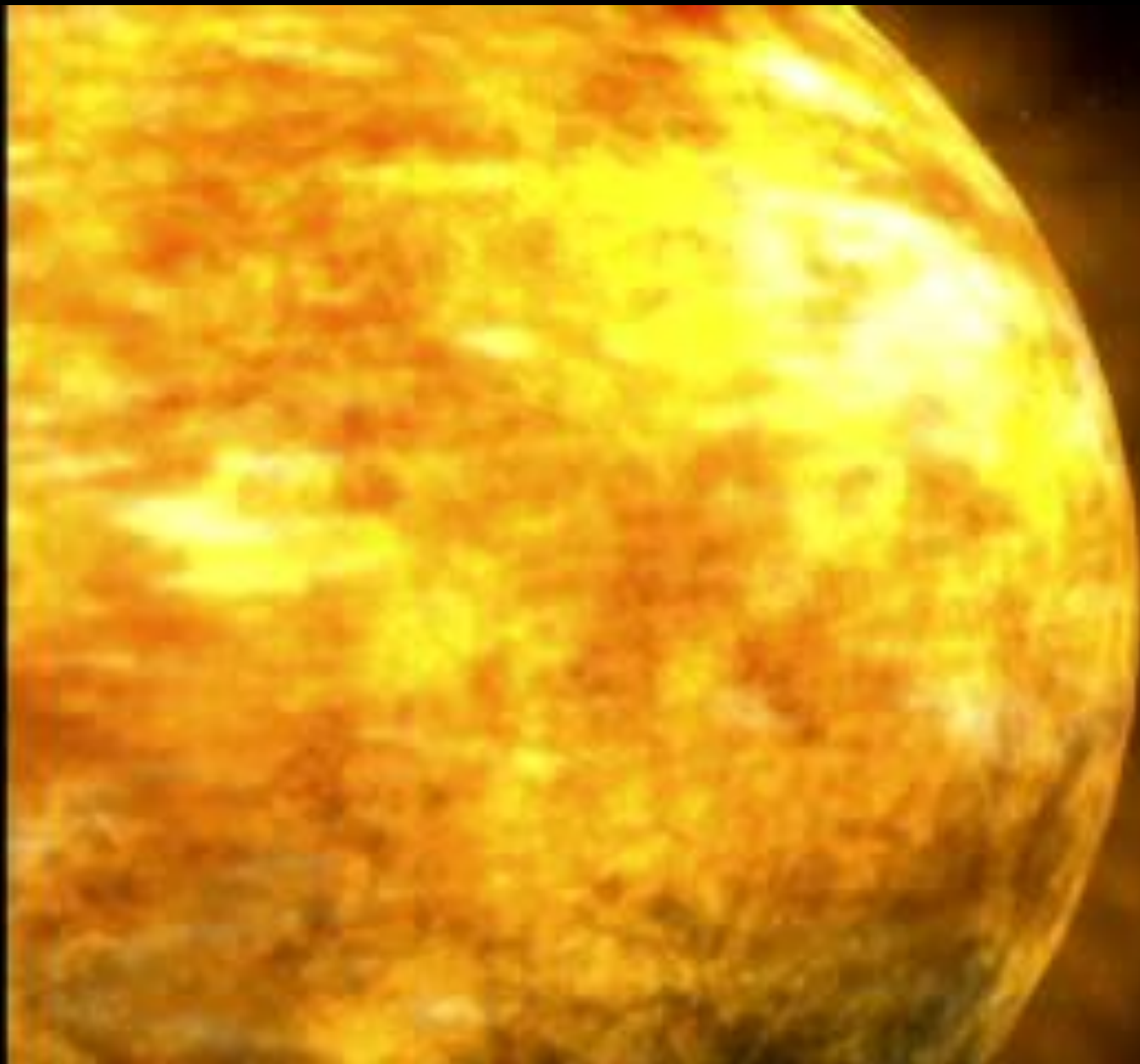


(Zurbuchen & Richardson 2006)

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





太陽高エネルギー粒子(SEP)

太陽高エネルギー粒子：

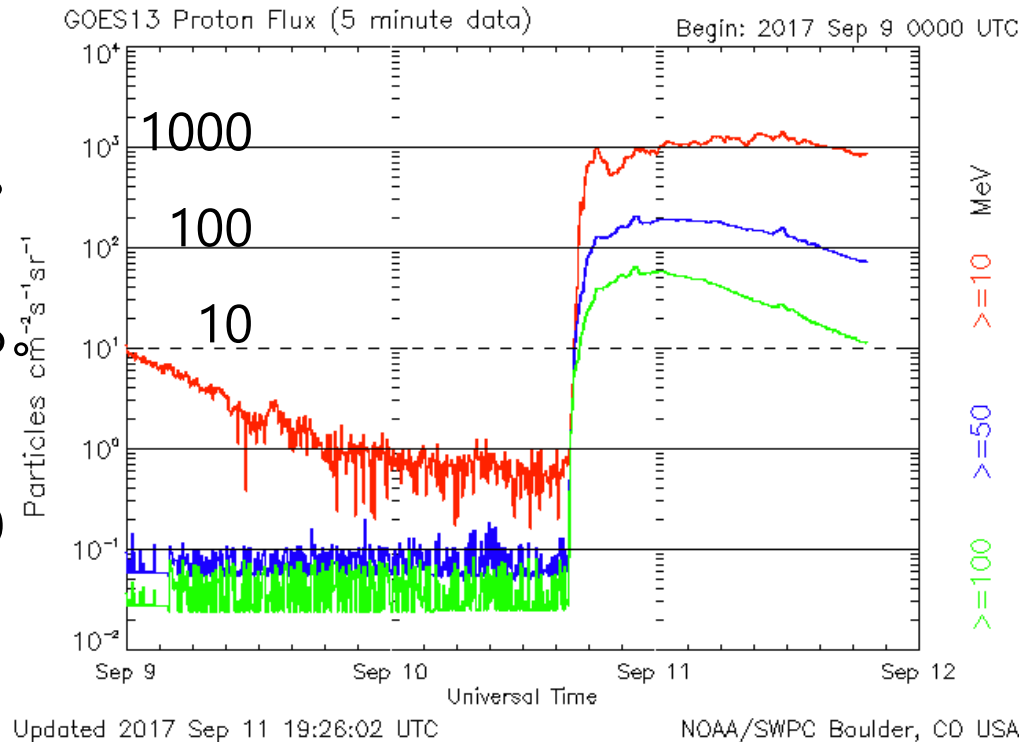
主成分はプロトン(陽子=水素原子核)と電子。

コロナプラズマの一部が、非常に高いエネルギーに加速されたもの。

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 ($10 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$)より高くなった時、**プロトン現象**発生としている。

太陽放射線と呼ぶこともある。

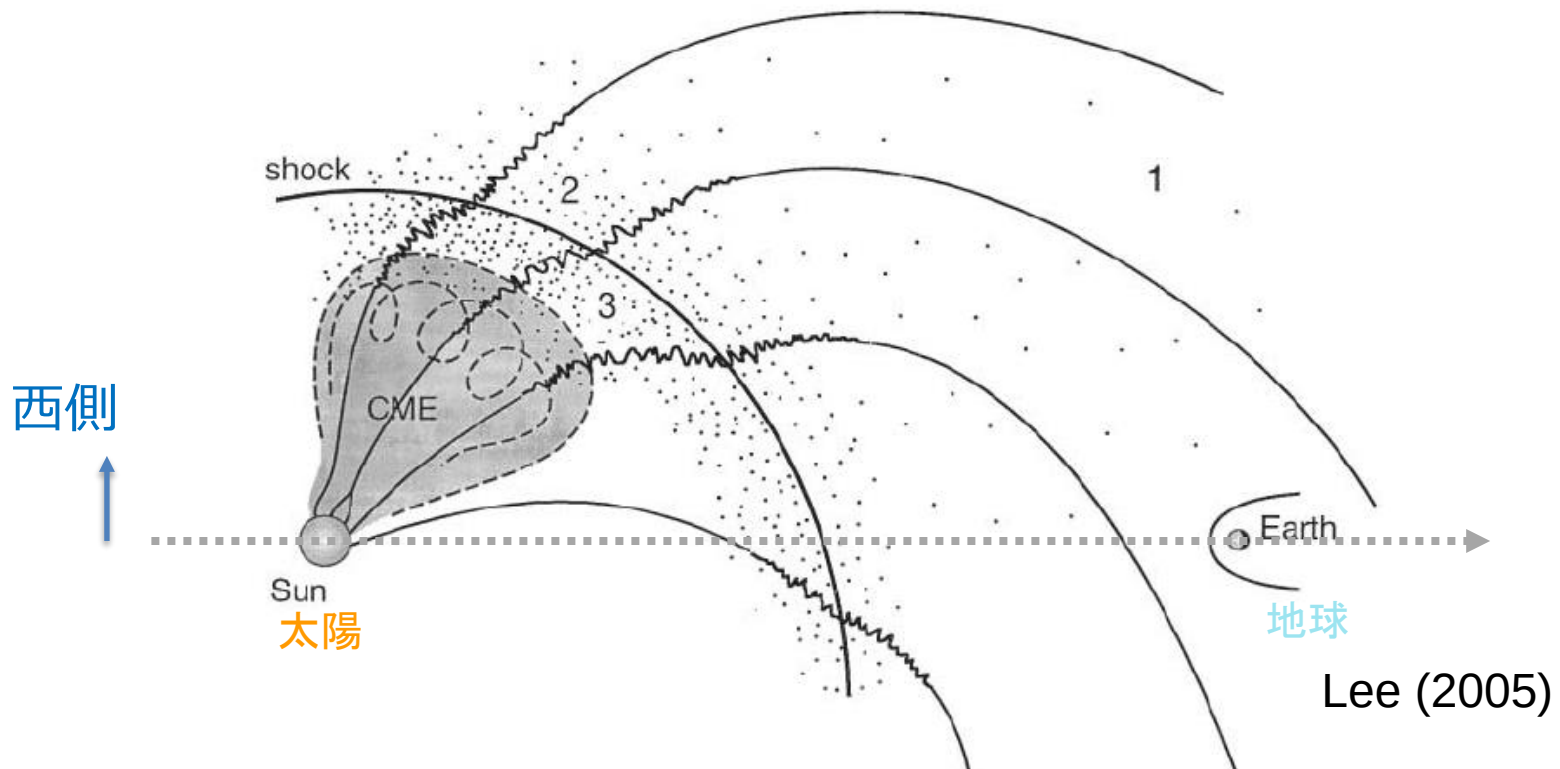
GOES衛星による高エネルギープロトン観測



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

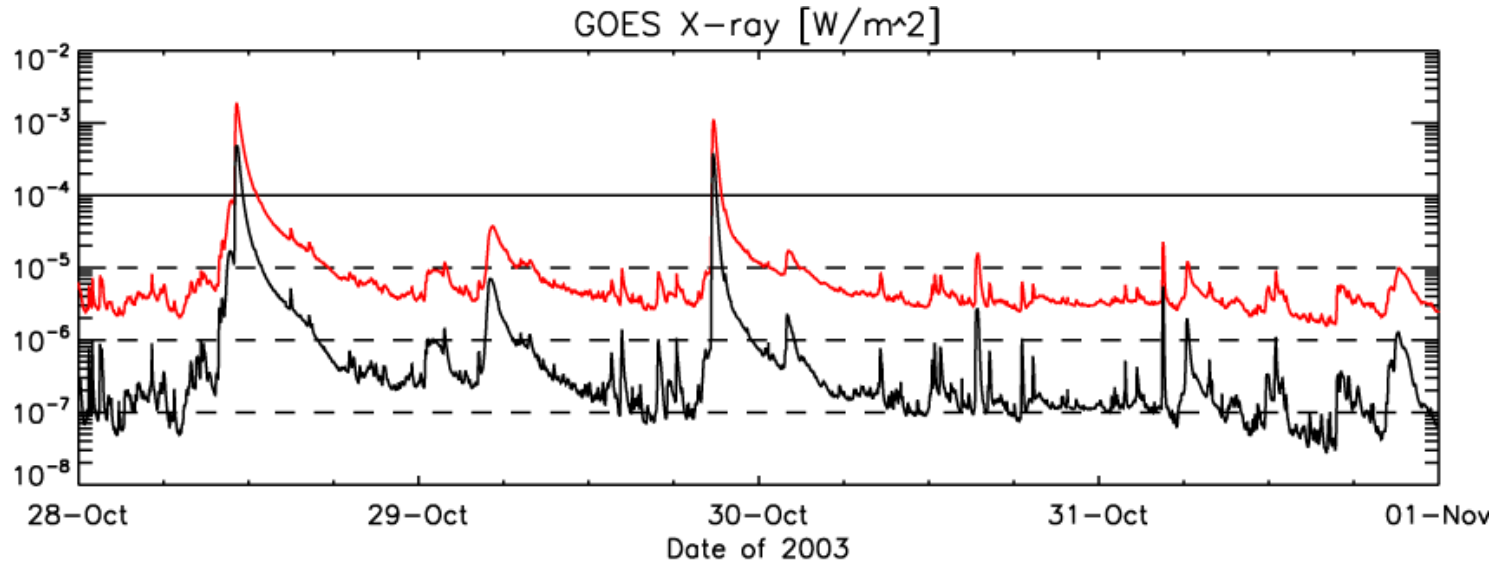
惑星間磁場・CME・SEP

- 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

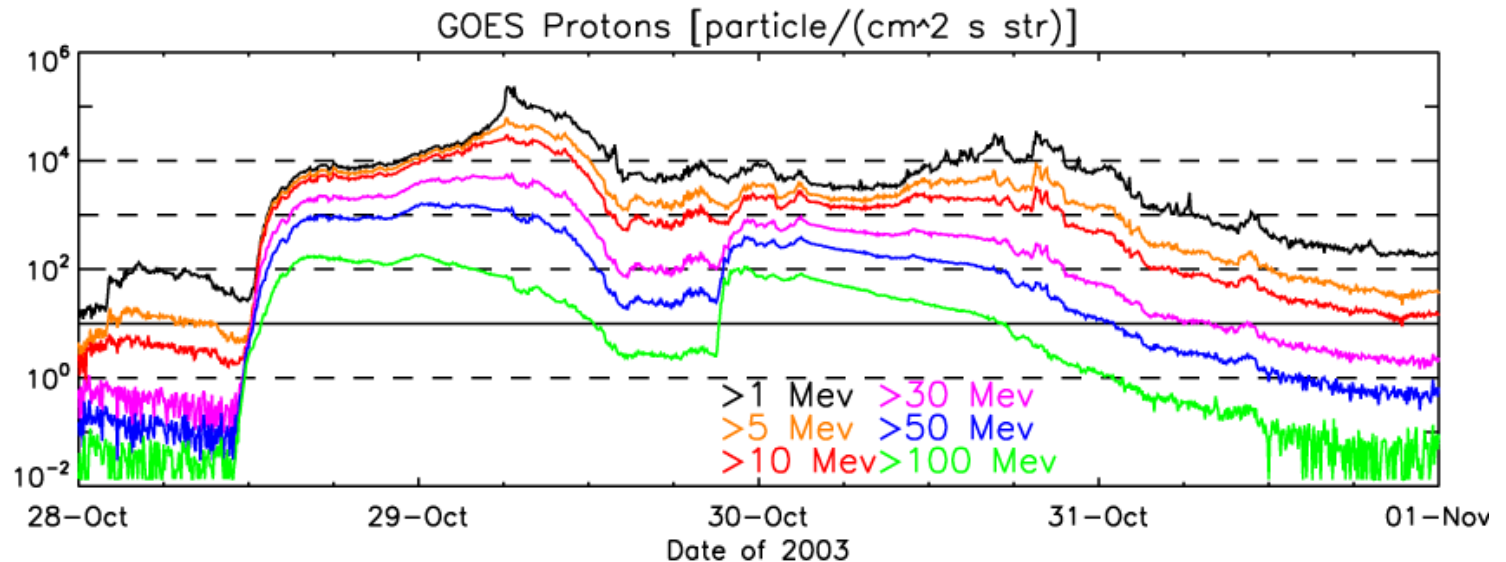


地球で観測した太陽フレア/CMEとSEP

GOES衛星
太陽X線観測
(太陽フレア)

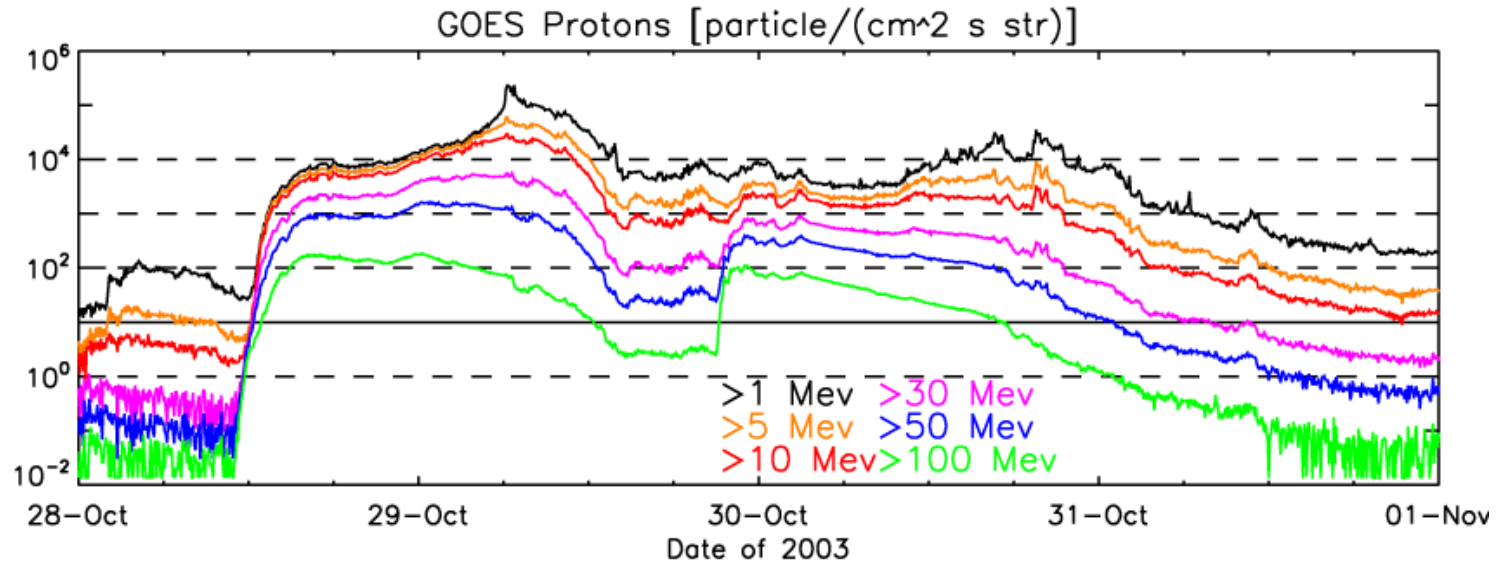


GOES衛星
高エネルギー
プロトン観測
(SEP)

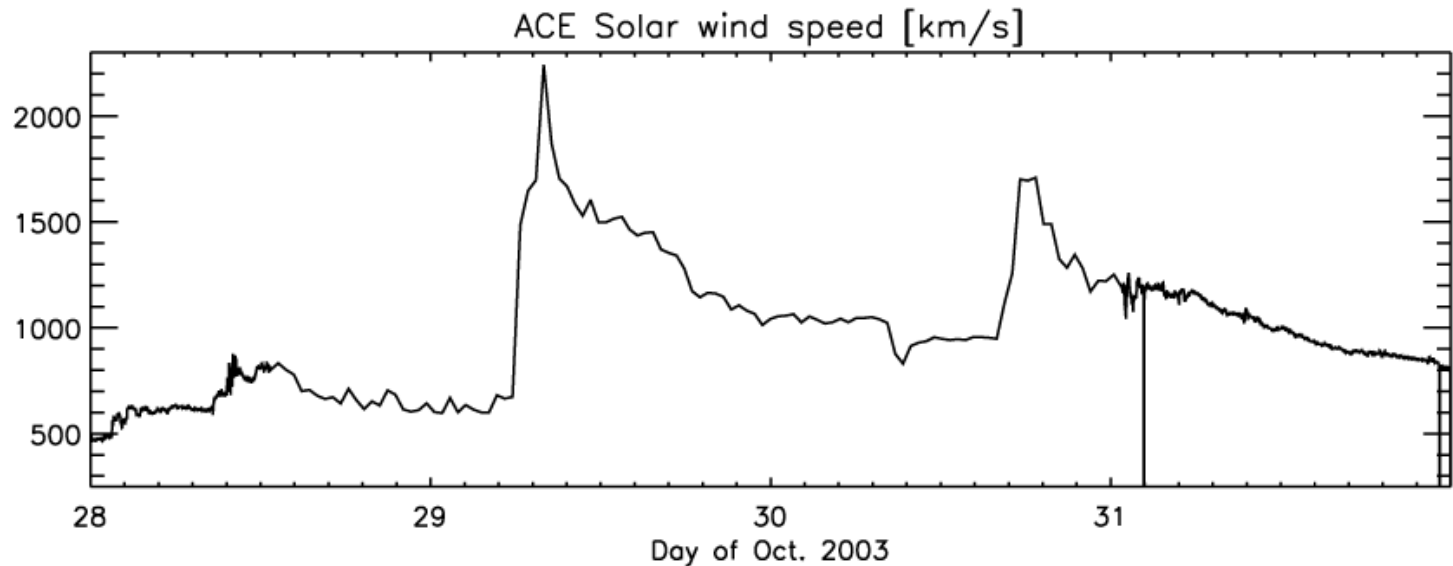


地球で観測した太陽フレア/CMEとSEP

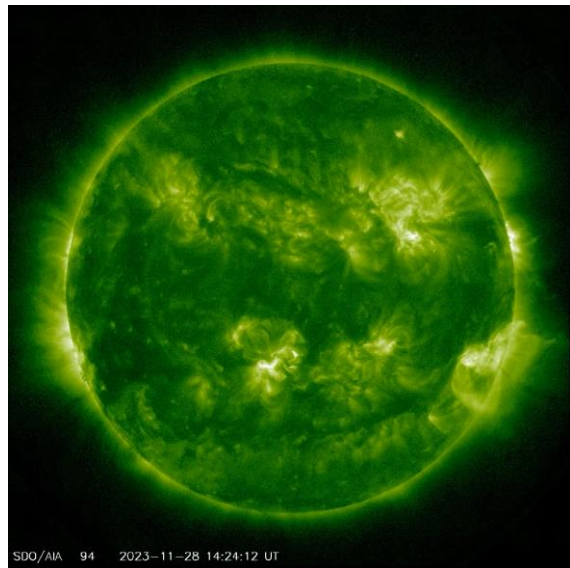
GOES衛星
高エネルギー
プロトン観測
(SEP)



探査機ACE
太陽風速度

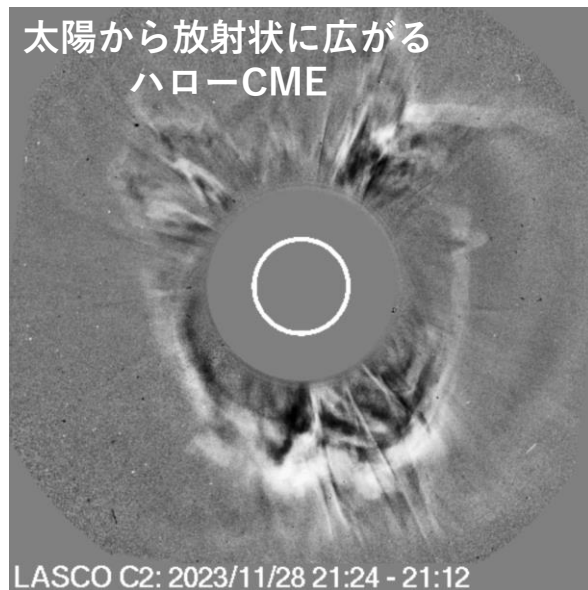


2023年11月28日のM9.8フレアと連続して到来したCME

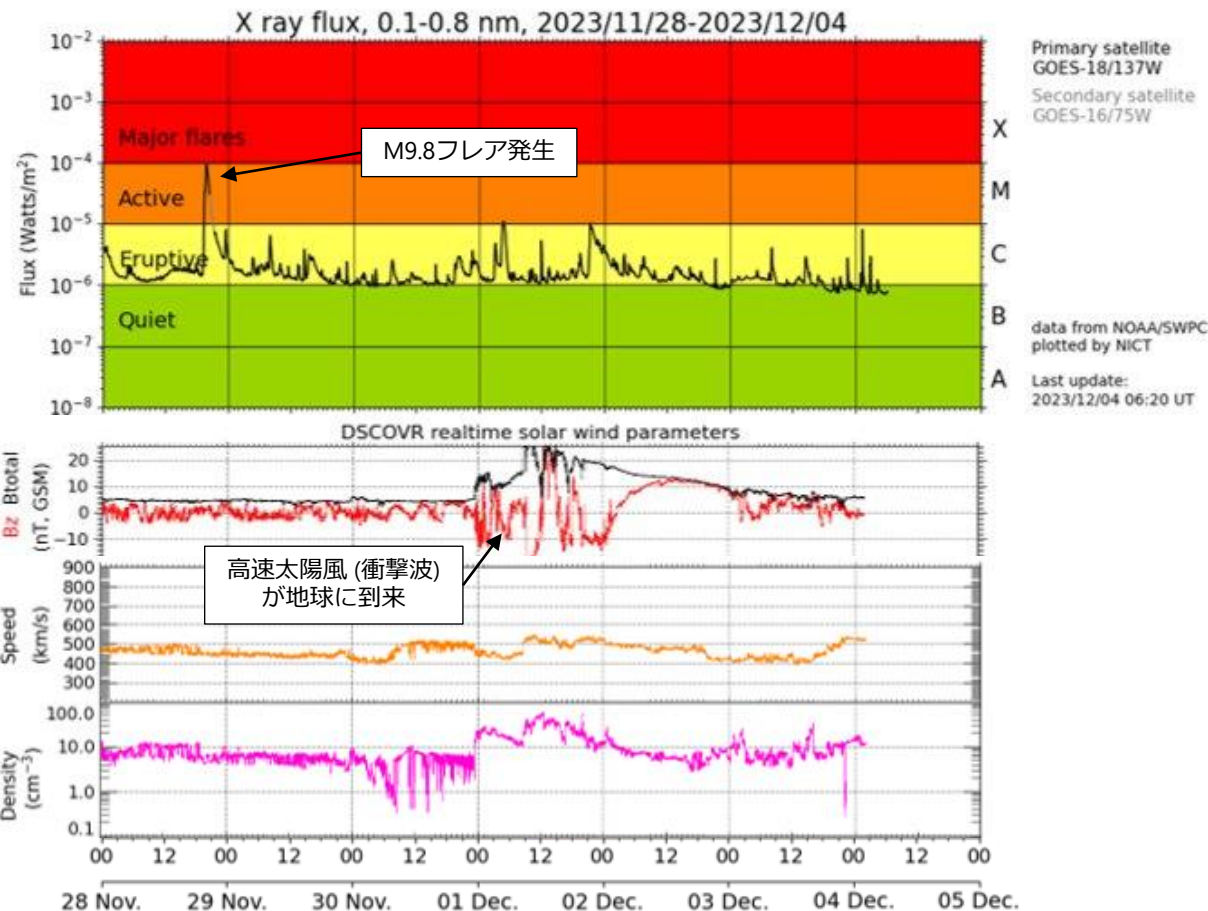


<https://sdo.gsfc.nasa.gov/>

太陽から放射状に広がる
ハローCME



2024年2月29日



- 11/28のM9.8フレア発生後、12/1-3にそのCMEと思われる衝撃波の到来による磁気圏の乱れが発生。
- SEPは全く上昇しなかった。
- 直前に発生していた先行CMEと一体となって到来？。

磁気圏への影響の詳細は次の「三二講座 磁気圏編」へ
宇宙天気三二講座 - 太陽風編 -

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。
- 黒点が浮上・拡散することで太陽の大局的な磁場が時間とともに変化。太陽全体の磁場構造と同時に太陽風の分布も変化する。大きなコロナホールが低緯度帯に広がるとき、地球に高速太陽風が到来する。高速太陽風前面の低速太陽風との境界には共回転相互作用領域（CIR）が形成される。
- 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。
- 太陽フレア・CMEに伴い太陽高エネルギー粒子(SEP)が増加する現象はプロトンイベントとも呼ばれる。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。
- 太陽から地球に到来するCIRやCMEやSEPは、地球の周りの宇宙天気を乱す原因になる。