

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



予報

2021/11/29 15:00 JST ~ 2021/11/30 14:59 JST

太陽フレア	プロトン現象	地磁気擾乱	放射線帯電子	電離圏嵐	デリッシャー現象	スプラッシュイグ層
やや活発	静穏	静穏	静穏	静穏	静穏	⚠️活発
Lv.2	Lv.1	Lv.1	Lv.1	Lv.1	Lv.1	Lv.3

この三二講座の内容

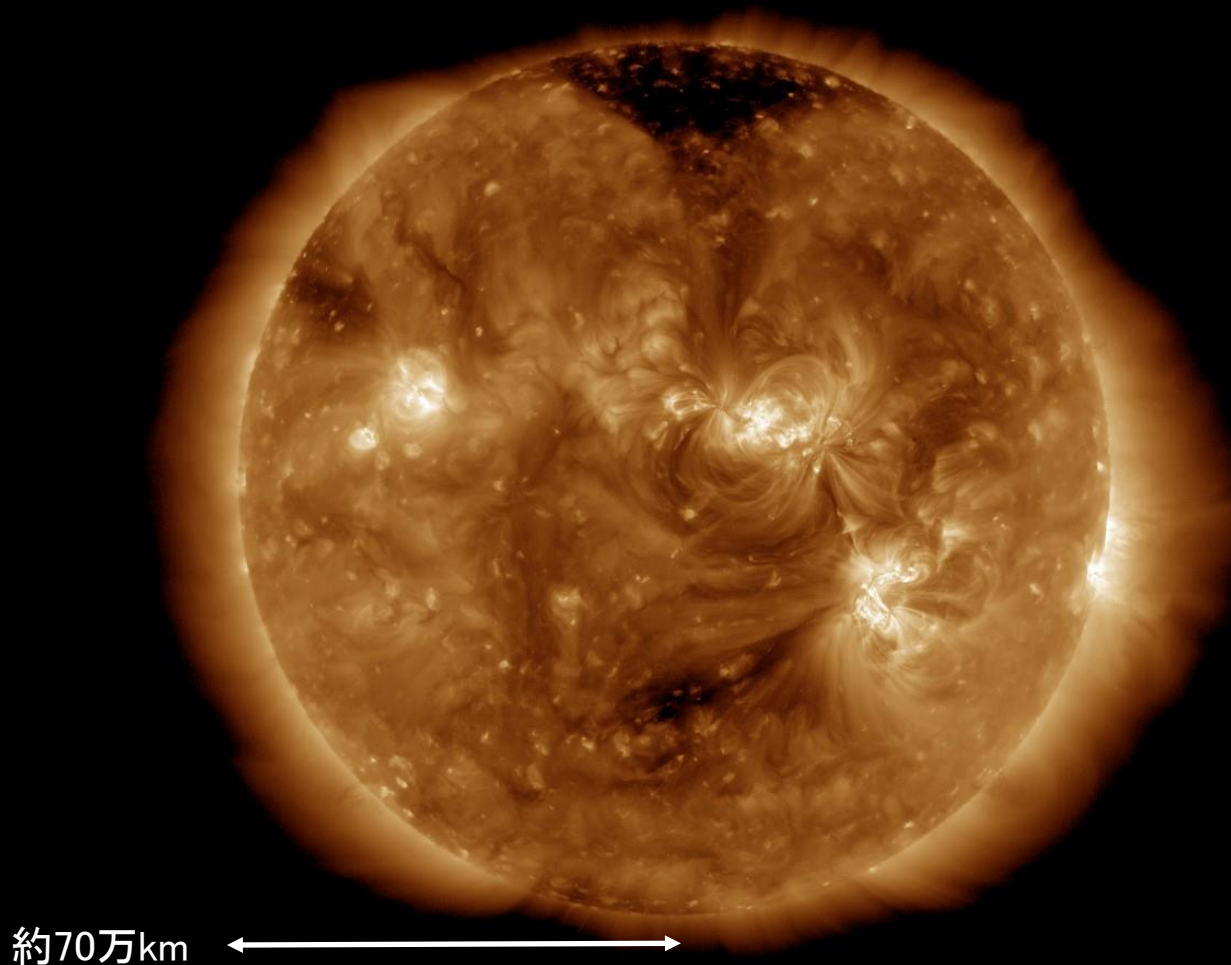
- 太陽コロナと太陽風・惑星間空間磁場
- 太陽の磁場と太陽風
- 太陽風とコロナ質量放出（CME）

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。

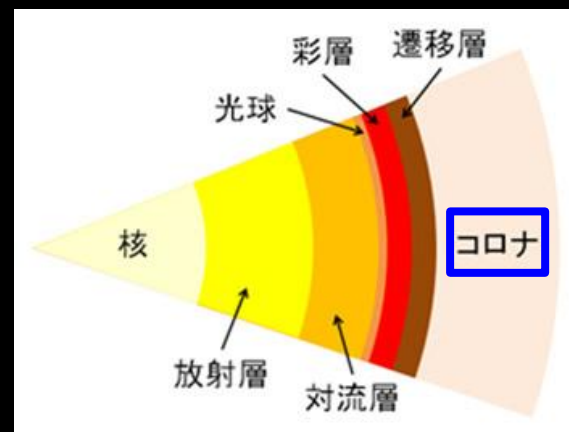
ガスが極端に少ない領域
コロナホールが見える。



約70万km

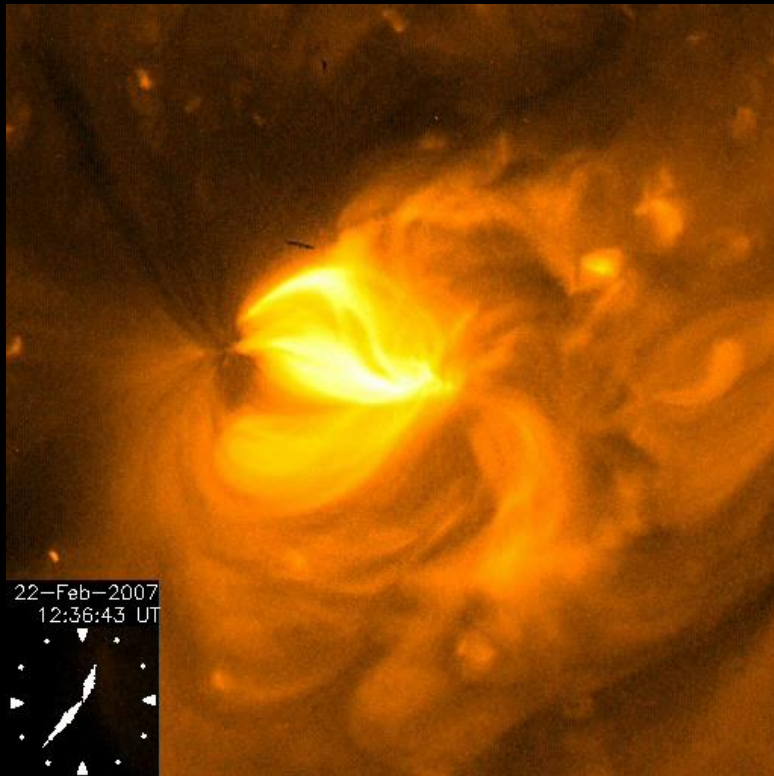
SDO/AIA 193 2017-09-06 00:11:05 UT

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

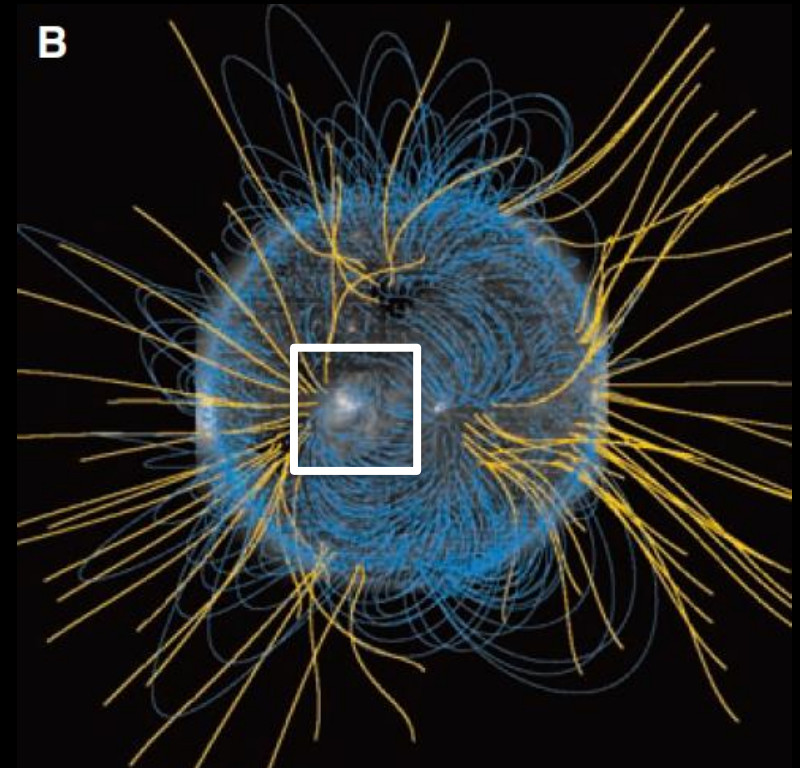


太陽の断面

コロナホールと太陽風



ひのでX線（コロナ）画像

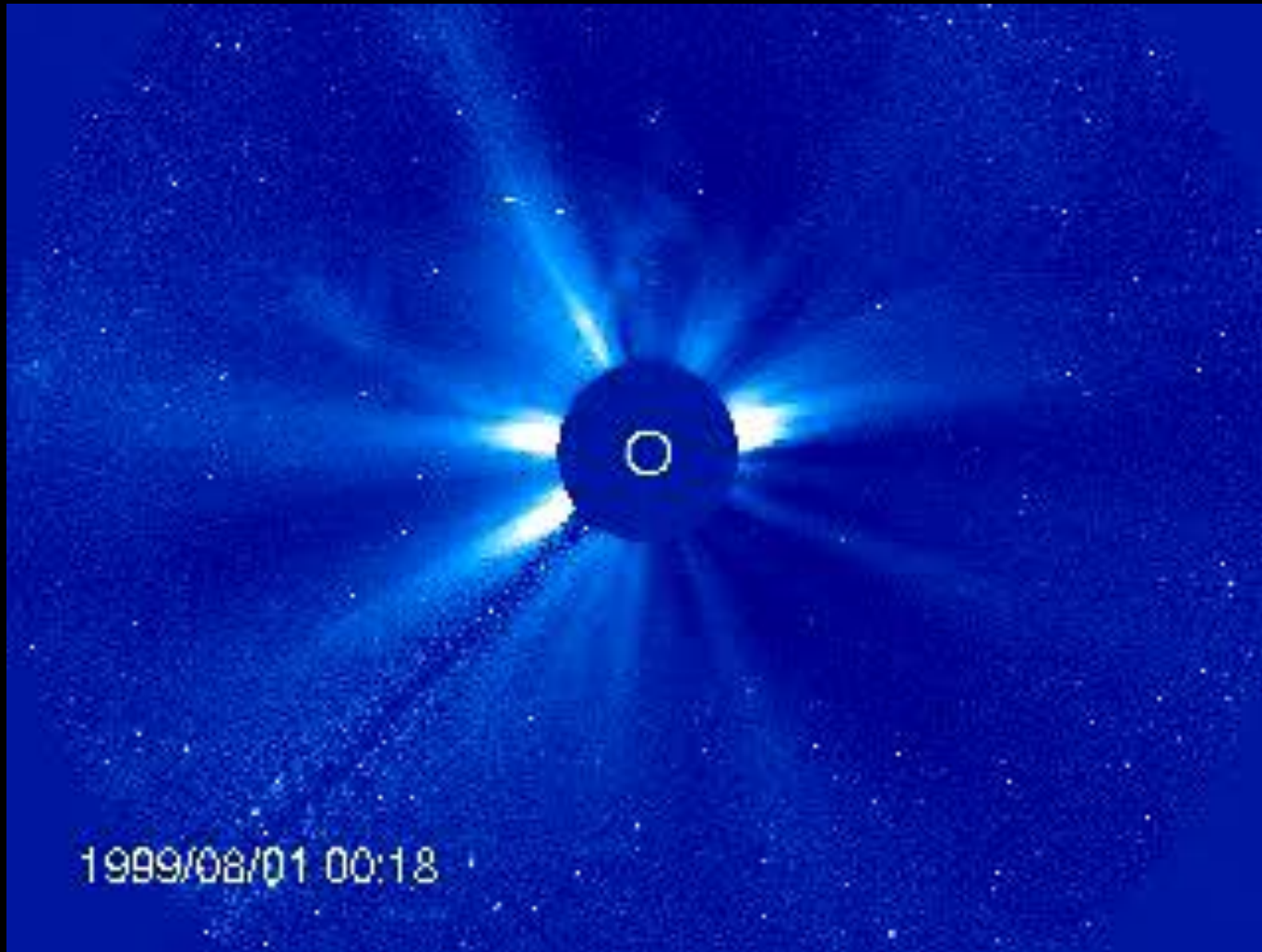


コロナの磁力線の様子

- 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)

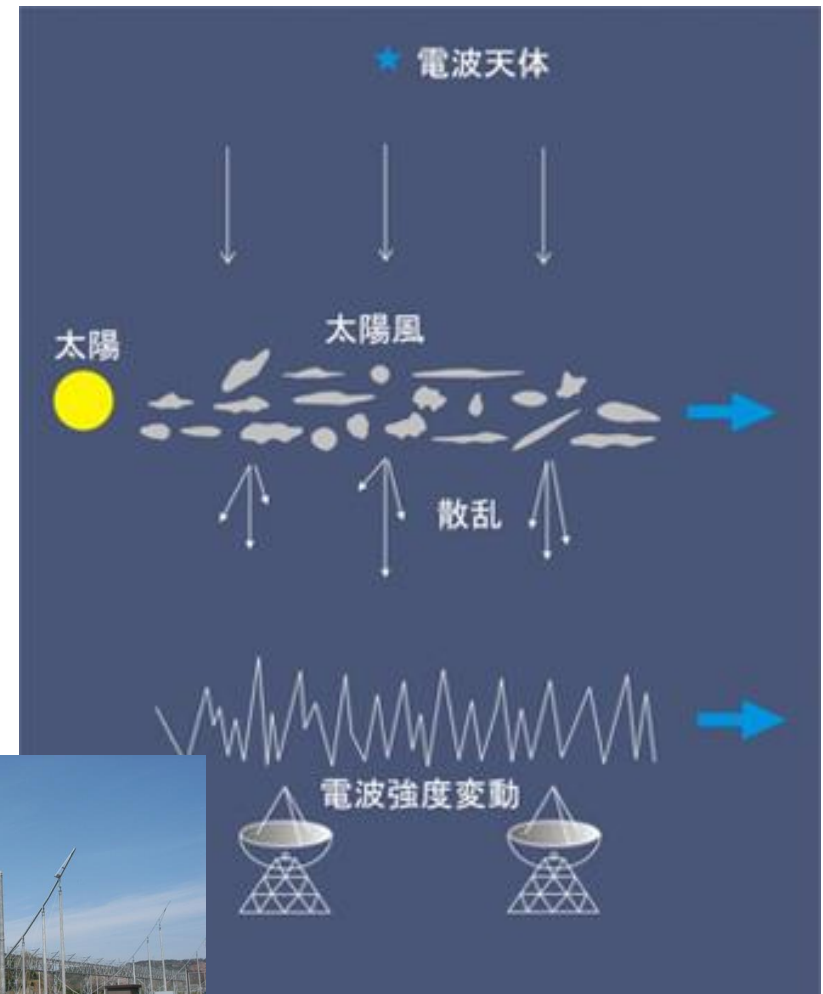
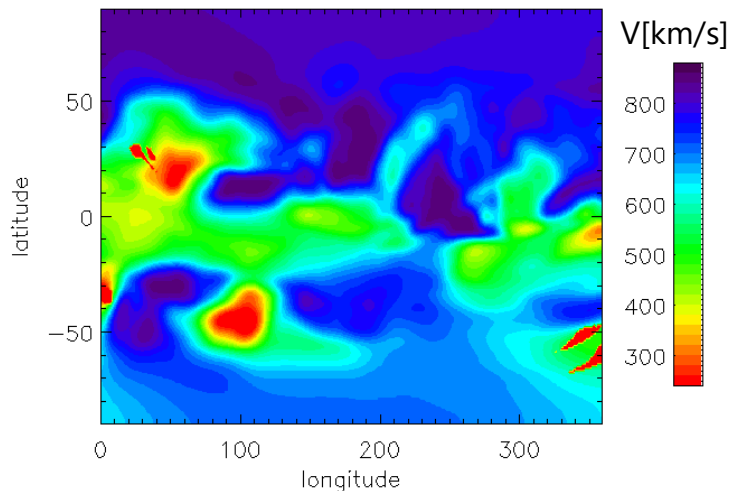
コロナグラフで見た太陽風



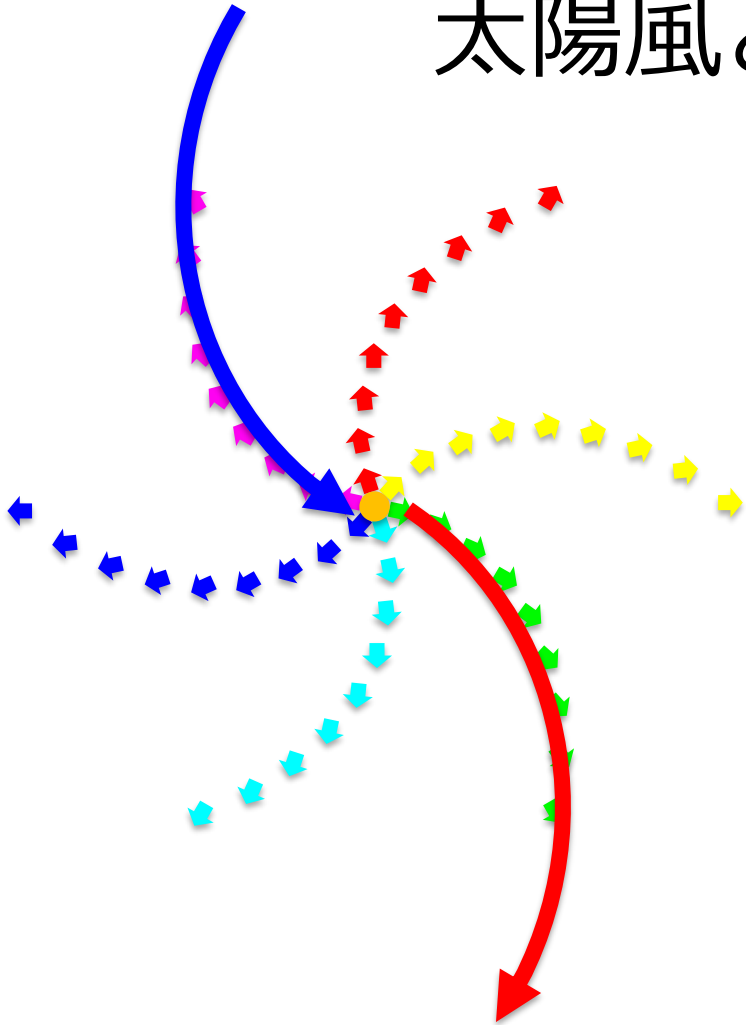
SOHO探査機 LASCO 観測装置：遮蔽版で太陽を隠した人工の日食観測。
明るさ：コロナガス（プラズマ）の密度。白丸：太陽の位置

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

太陽風の“その場 (in situ)”定点観測



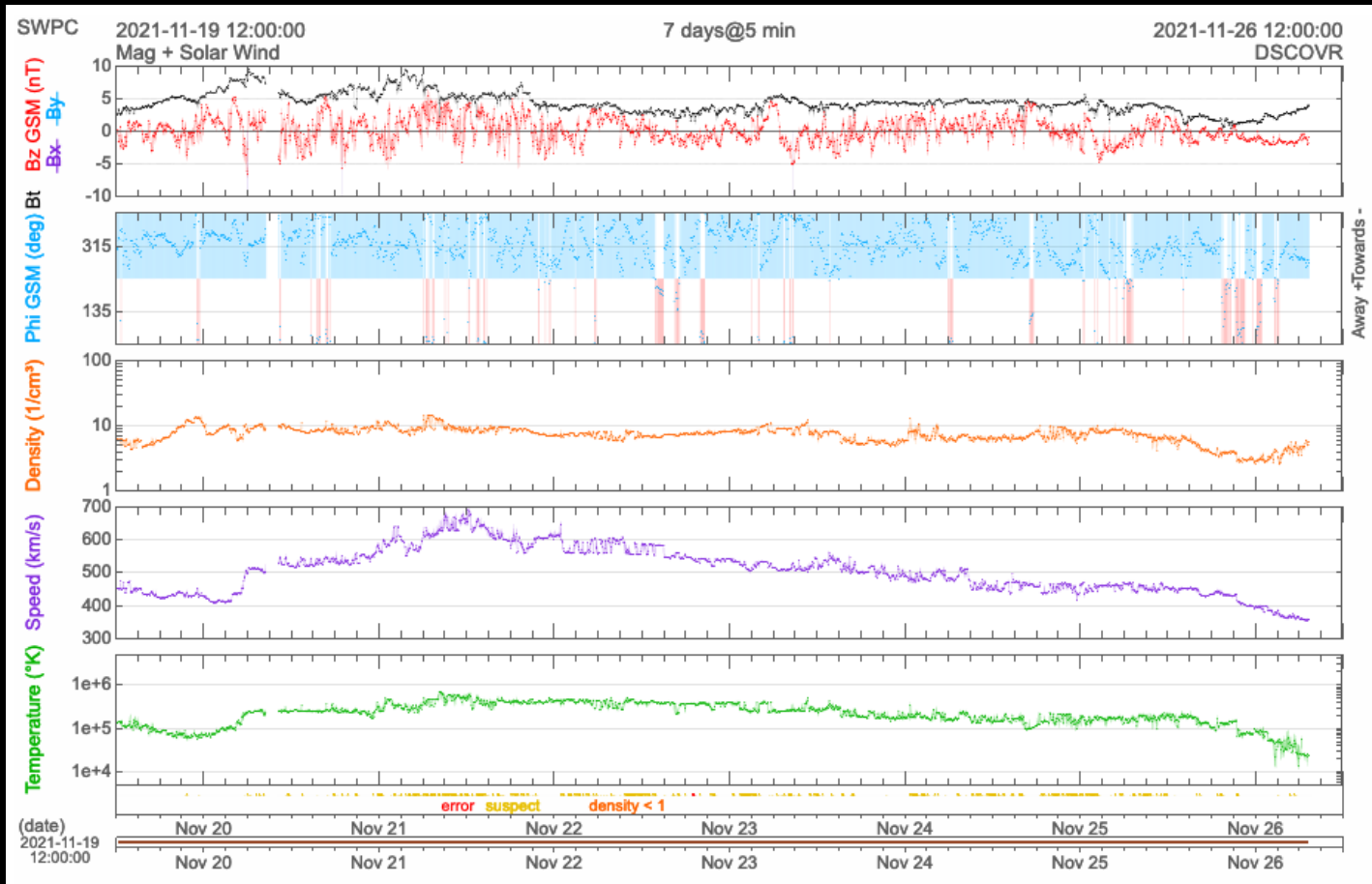
磁場
南北成分

磁場
方位角

密度

速度

温度



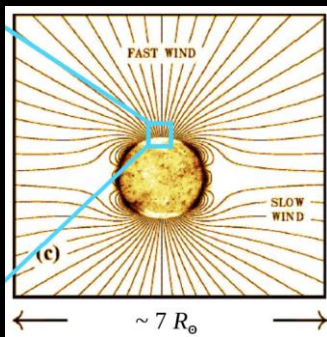
2021年11月19日 から1週間

この三二講座の内容

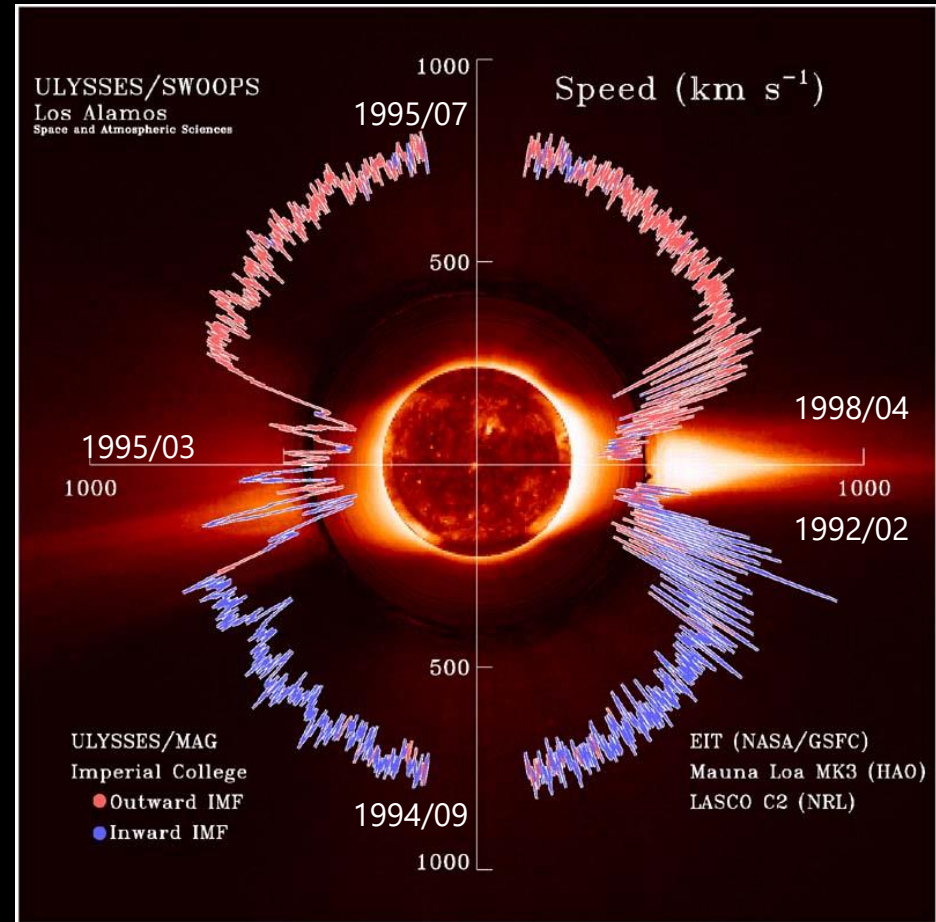
- 太陽コロナと太陽風・惑星間空間磁場
- 太陽の磁場と太陽風
- 太陽風とコロナ質量放出（CME）

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。

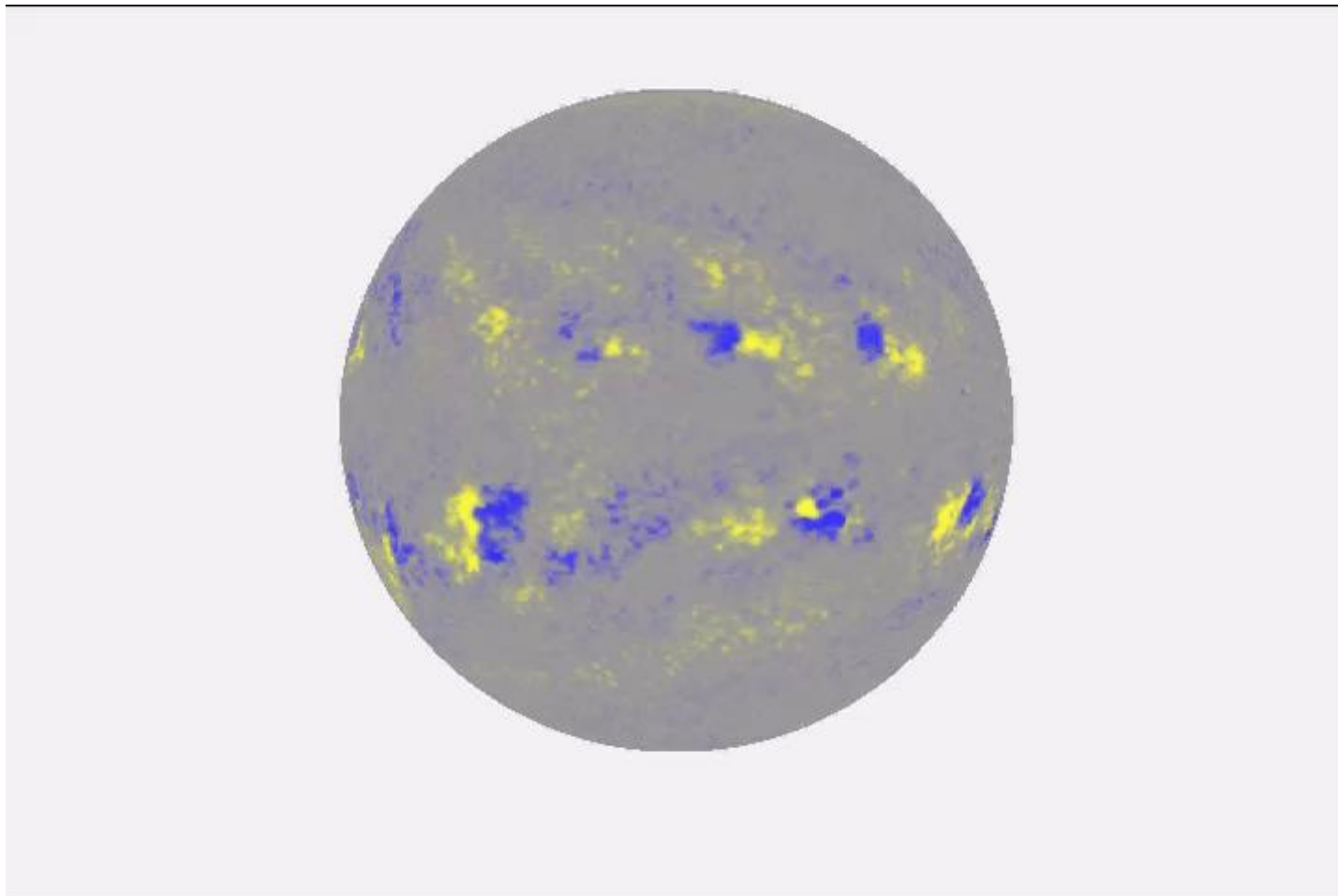


Cranmer & van Ballegooijen 2005



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

太陽の磁場の長期変動

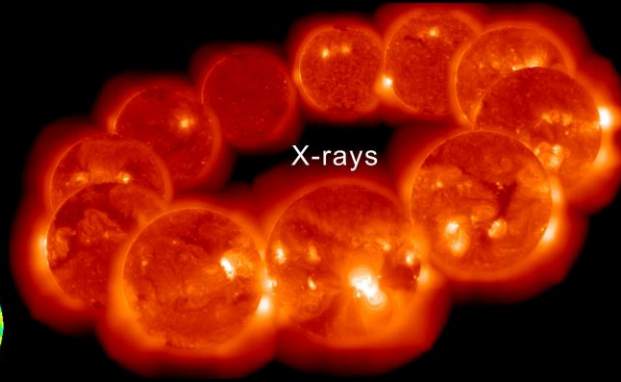
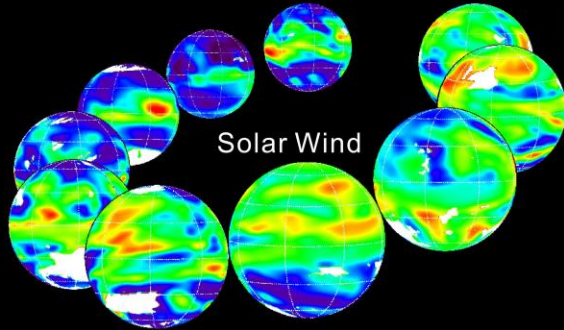


<http://solarscience.msfc.nasa.gov/movies/HathawayMovie.avi>

黄：正極（N極） 青：負極（S極）

太陽の磁場の長期変動

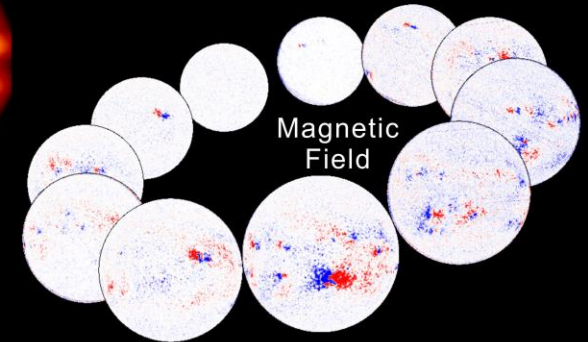
IPS観測
太陽風速度



X-rays

X線

磁場

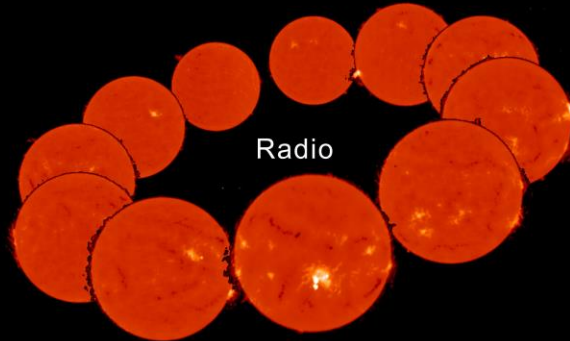


Magnetic
Field



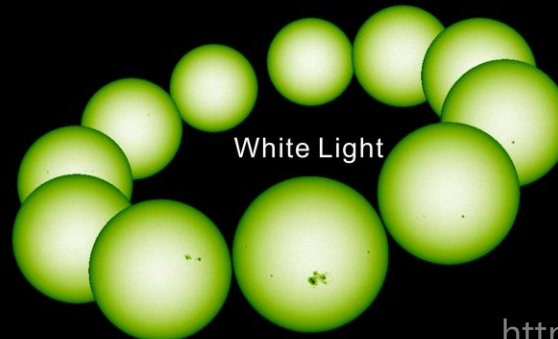
Solar Cycle 2009-2019

電波

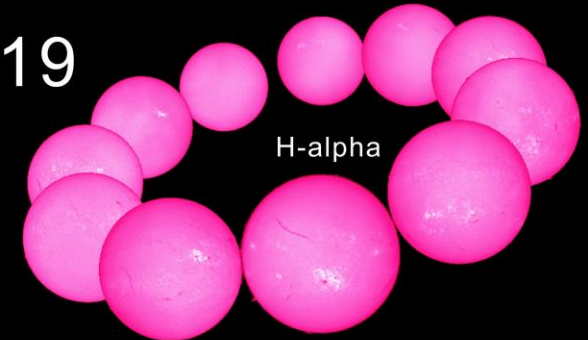


Radio

可視光線



White Light

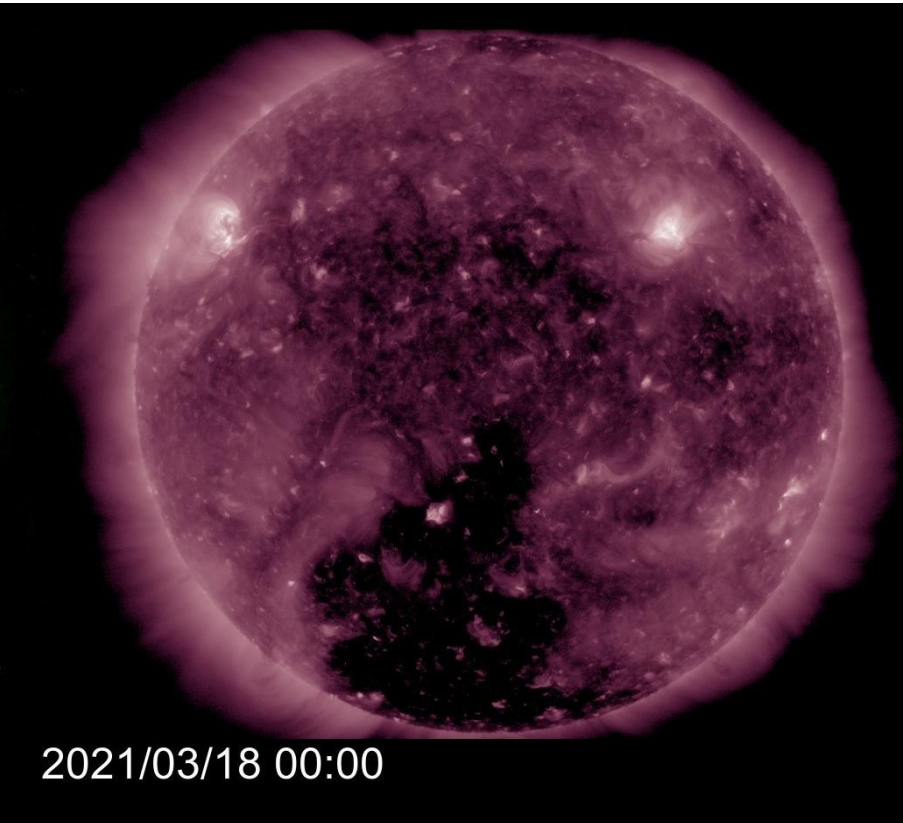


H-alpha

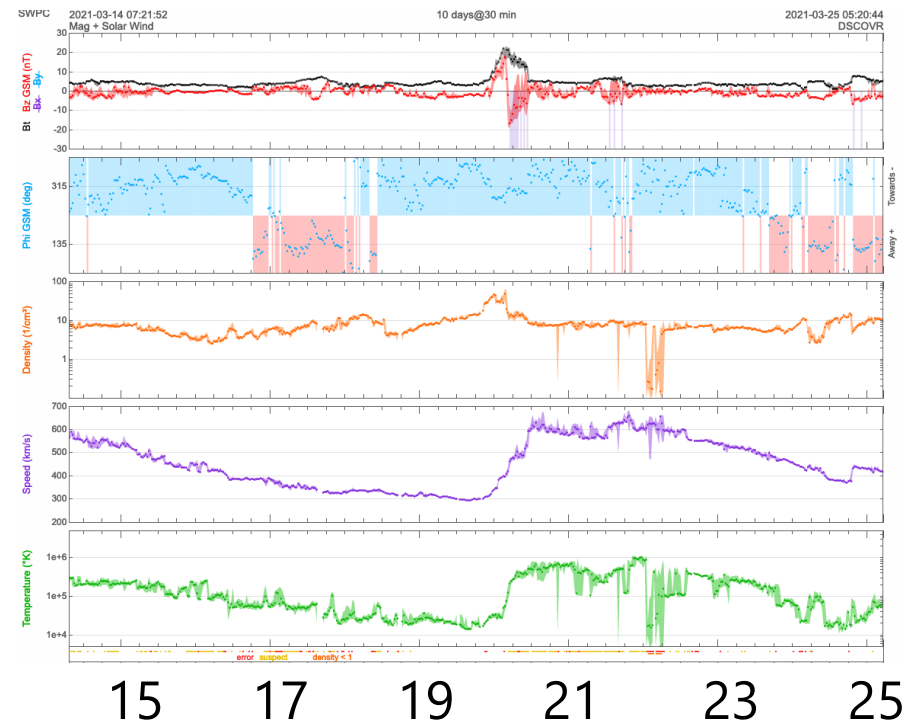
H α 線

高速太陽風の到来とコロナホール

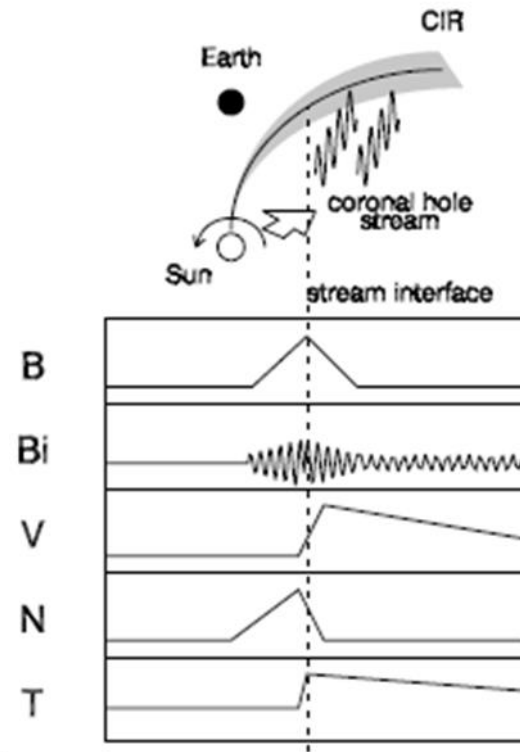
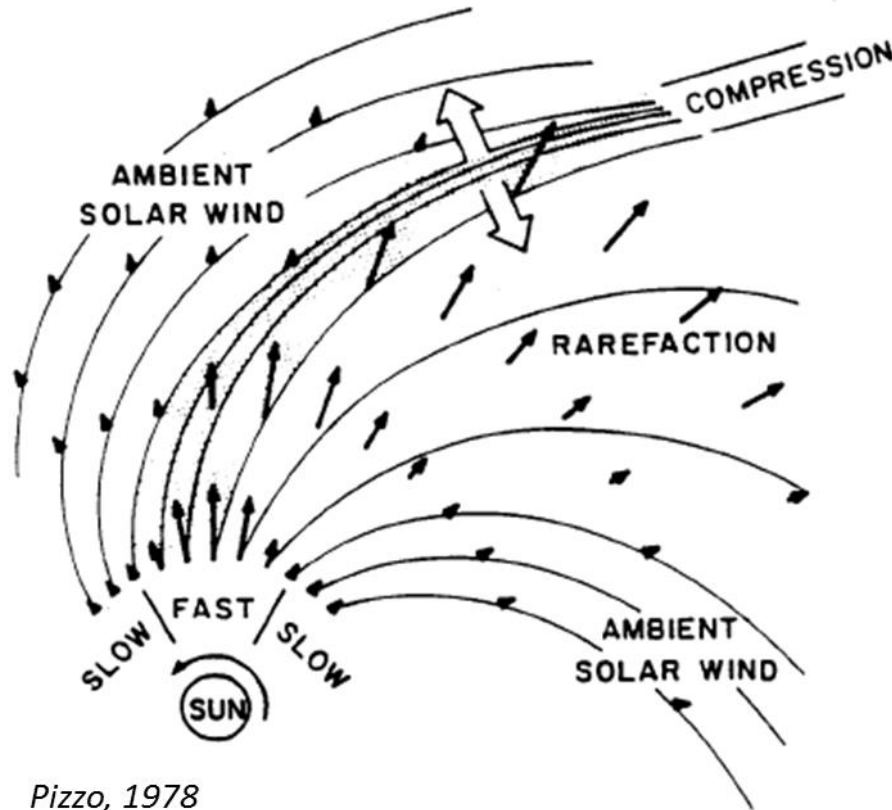
- 大きなコロナホールが低緯度帯に存在するとき、地球に高速太陽風が到来する可能性が生じる。



2021/03/14-25



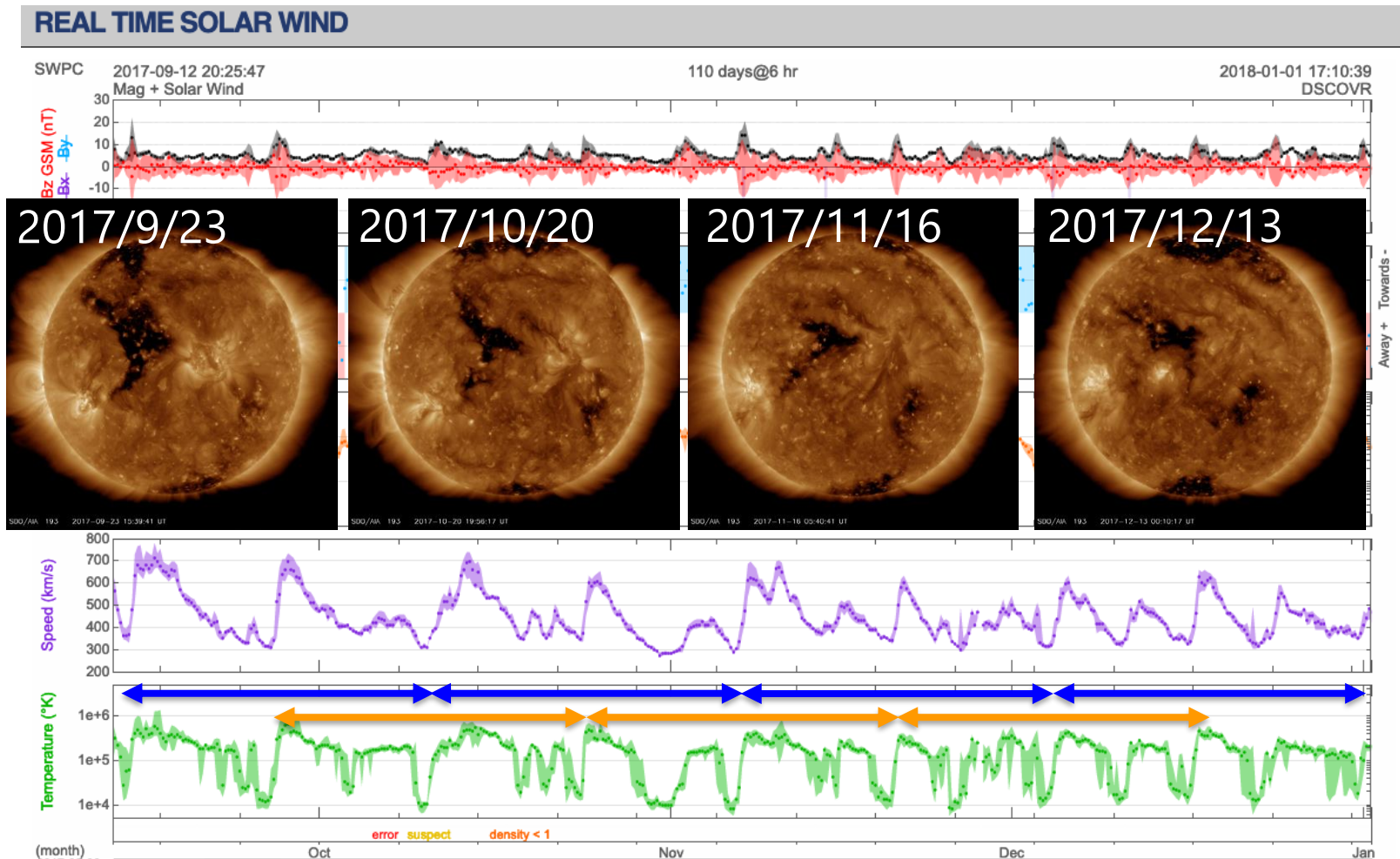
共回転相互作用領域 CIR (co-rotational interaction region)



time

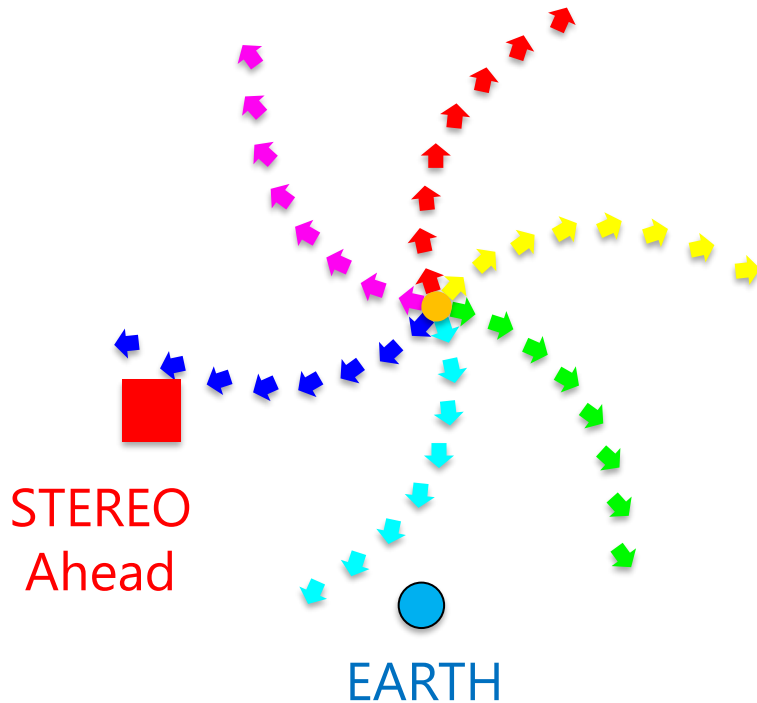
低速太陽風の後ろから高速太陽風が流れてくると境界領域で圧縮等の相互作用の結果の構造が形成される。この構造を共回転相互作用領域 (CIR) という。CIRは磁気圏の乱れの要因の一つ。

回帰性高速太陽風による予測



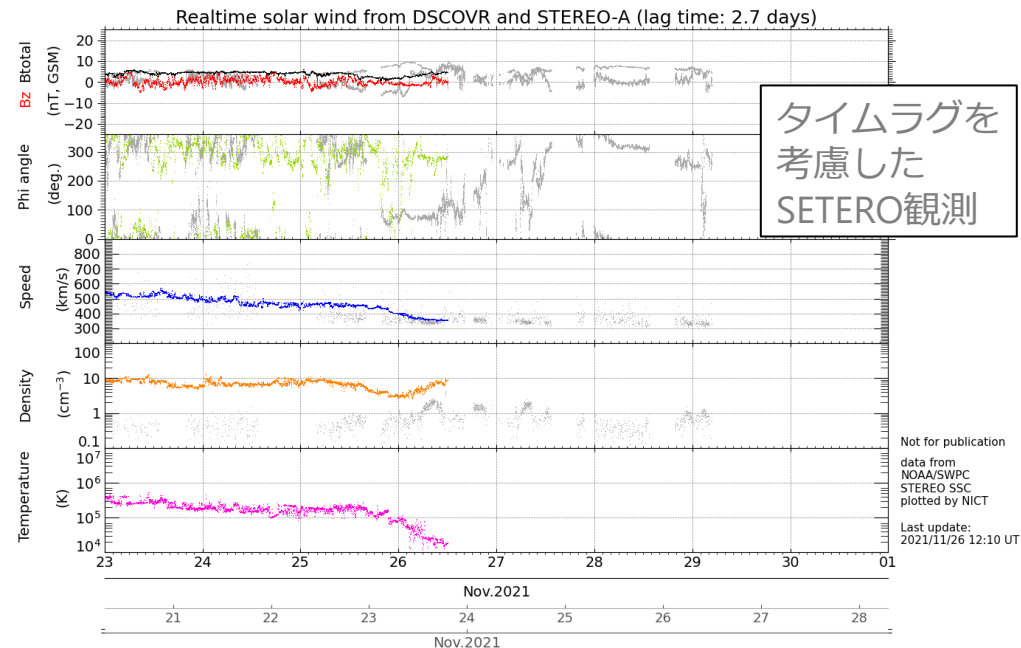
低緯度コロナホールが長期間存在し続けると約27日毎に高速風が到来。
前周期の太陽風観測に基づいて高速風の予測ができる

STEREO Ahead 観測に基づいた予測



厳密にはSTEREO aheadと地球の緯度差・時間変化があるため、同じ構造が来るとは限らない。CMEがSTEREOにのみ到来する場合も注意が必要。

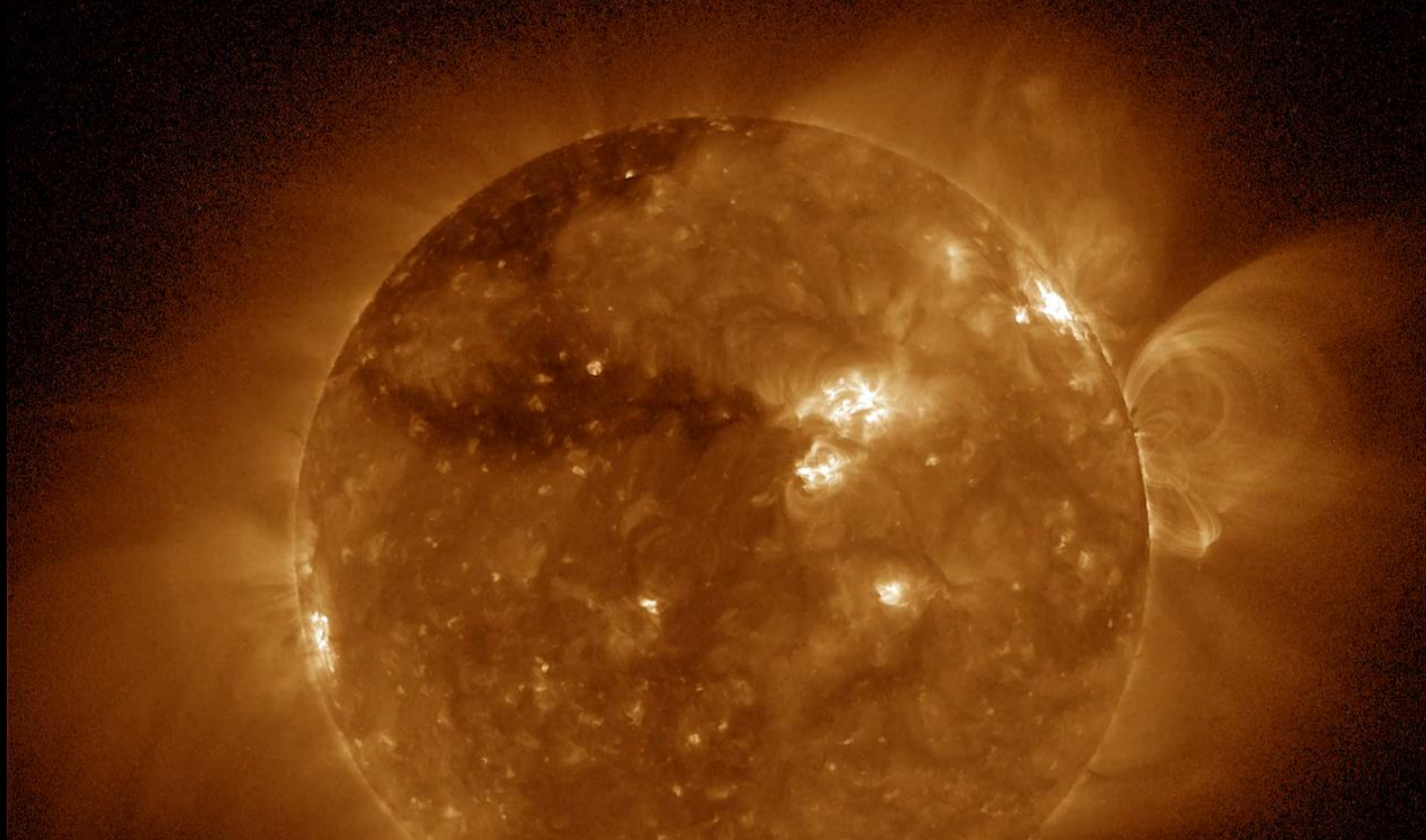
- STEREO ahead 地球の東側で太陽風観測
- コロナの様子の変化が少ない
= 太陽風の構造の変化が少ない
- STEREO aheadでその場観測された太陽風の構造がタイムラグのあと地球に到来する。



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
- 太陽の磁場と太陽風
- 太陽風とコロナ質量放出 (CME)

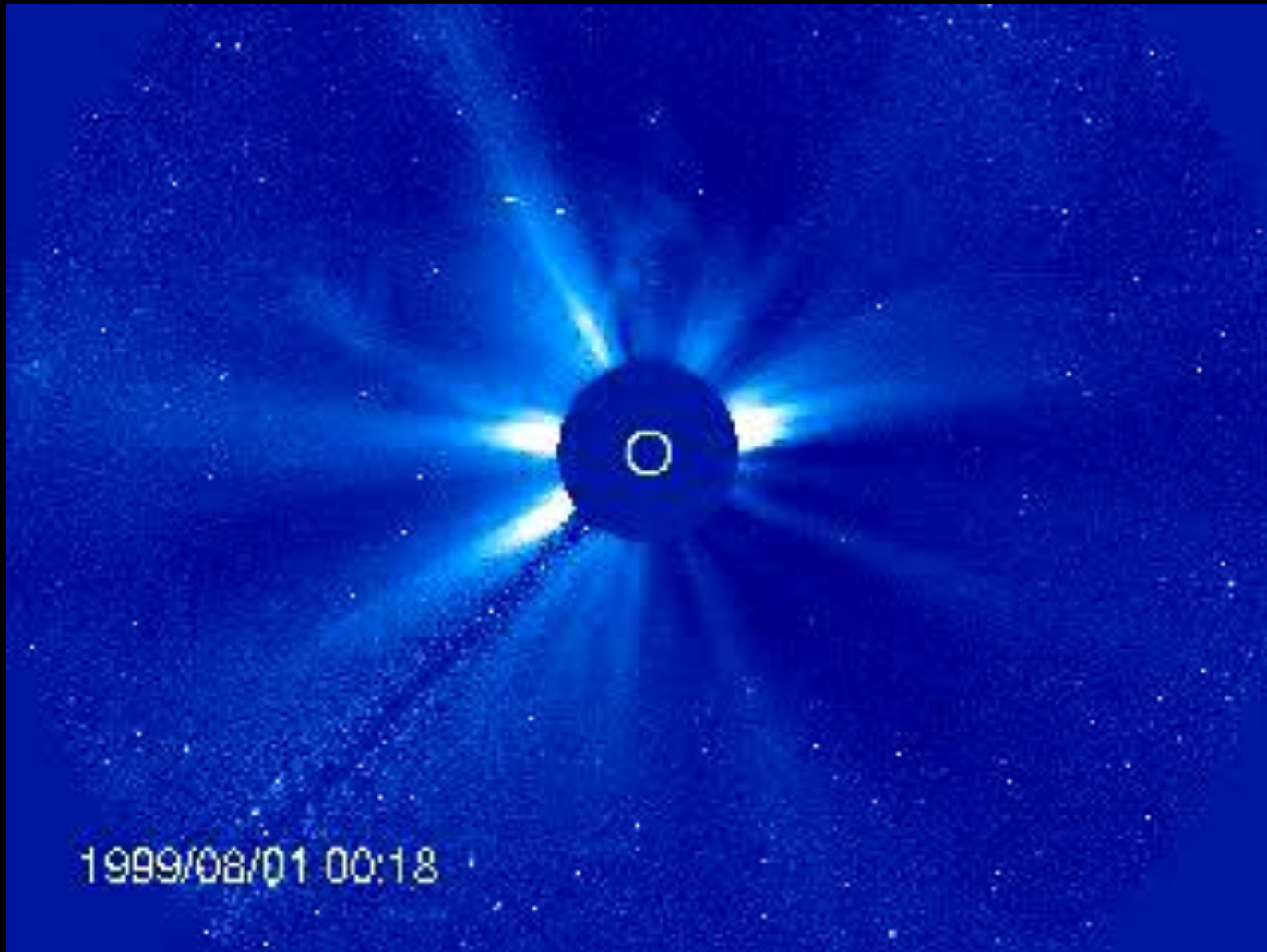
2017年9月10日のXクラスフレアとCME



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。太陽フレアとコロナ質量放出をまとめて「太陽嵐」と呼ぶ。

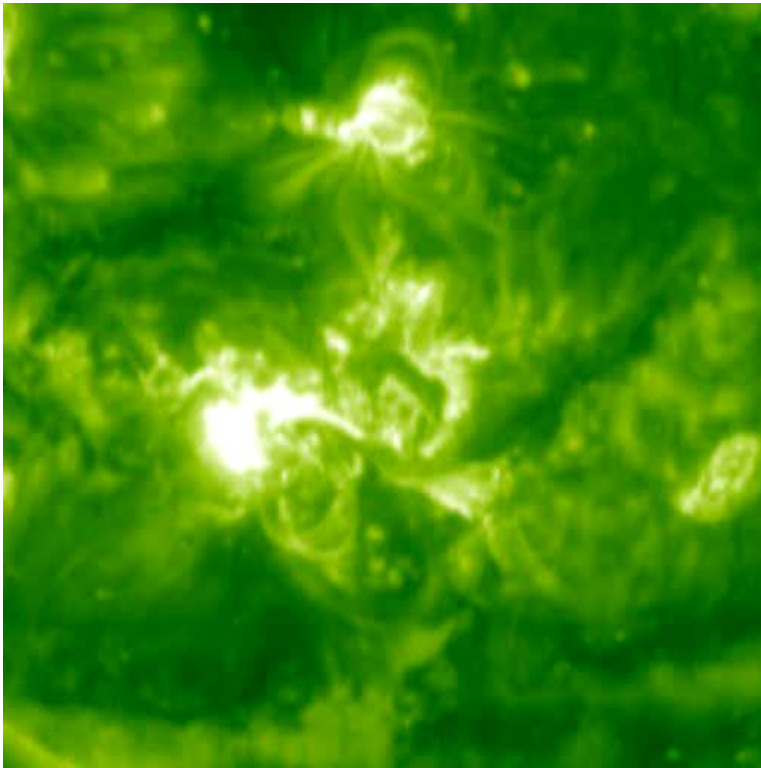
NOAA/GOES (極端紫外線:波長19.5nm, Seaton & Darnel 2018)

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

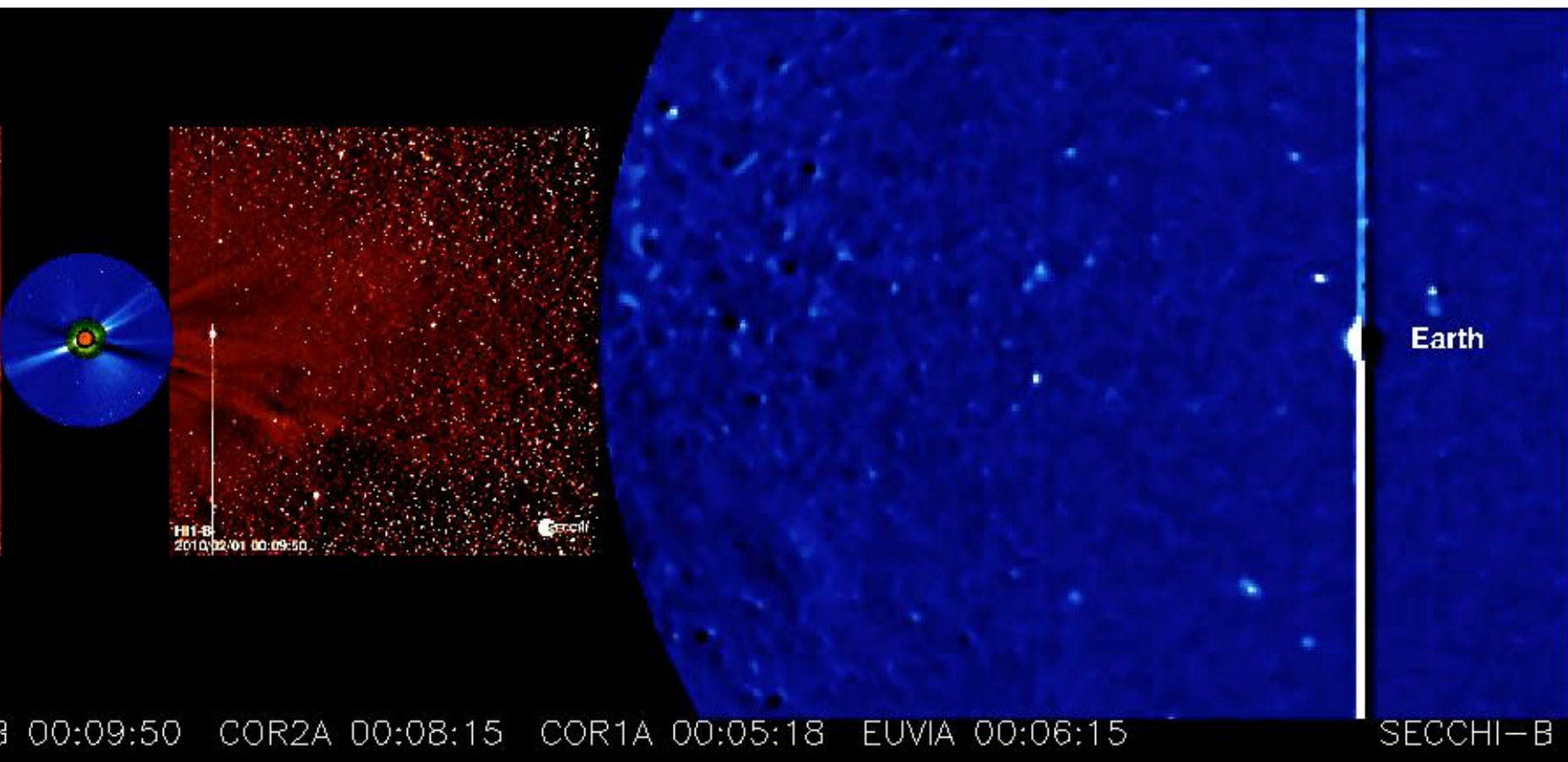
Halo CME



2003年10月28日に発生した
X20クラスフレアおよびCME

- コロナグラフで全方向に広がっていく様が観測されるCME
- 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、ない場合は地球とは逆方向に放出されたCME

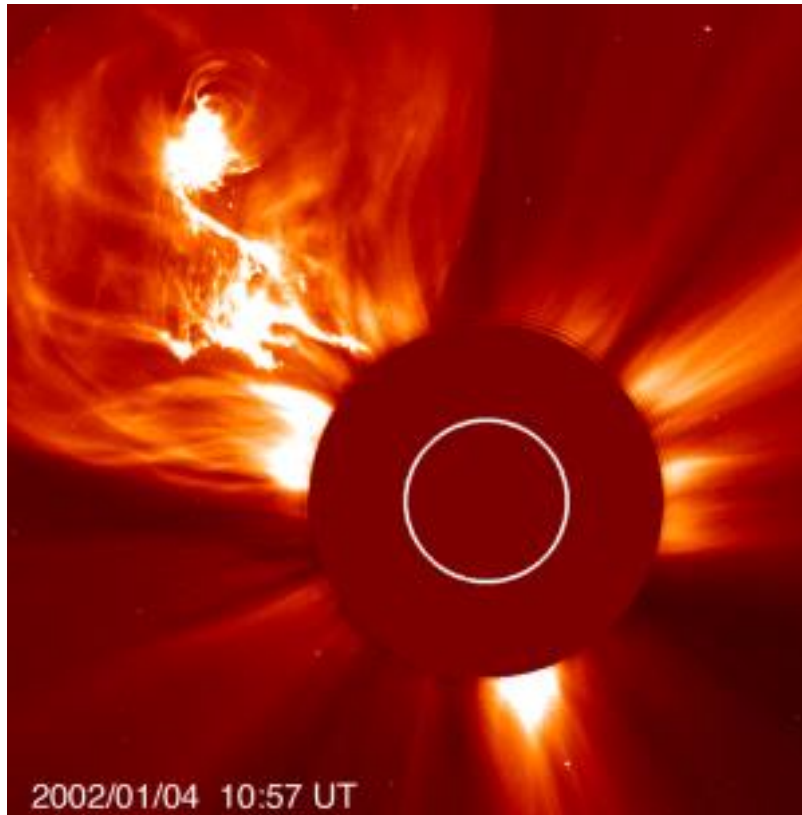
STEREOが観測したCME



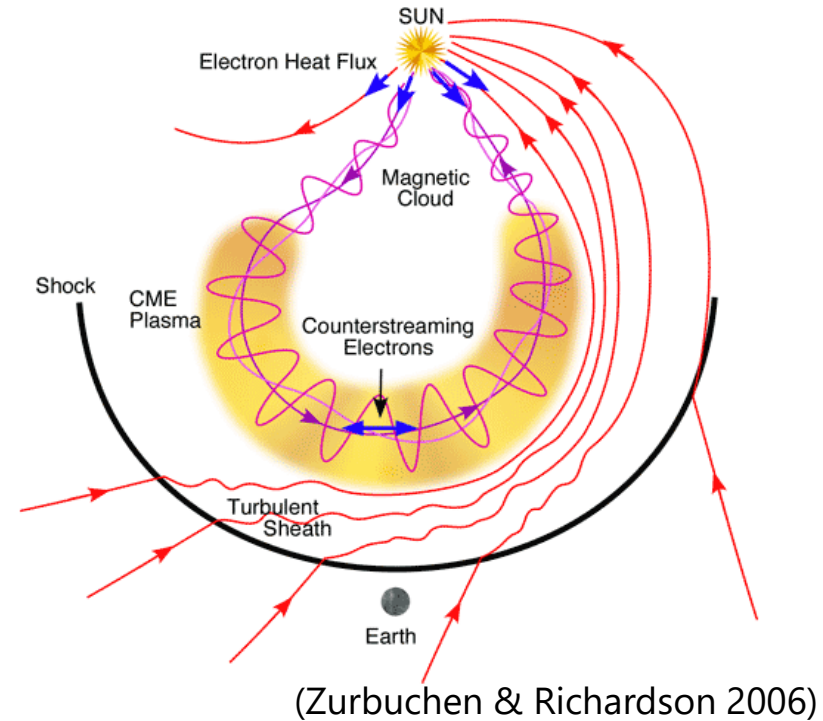
Sun Earth Connection Coronal and Heliospheric Investigation (SECCHI)

NASA/STEREO

CMEと内部の磁場構造

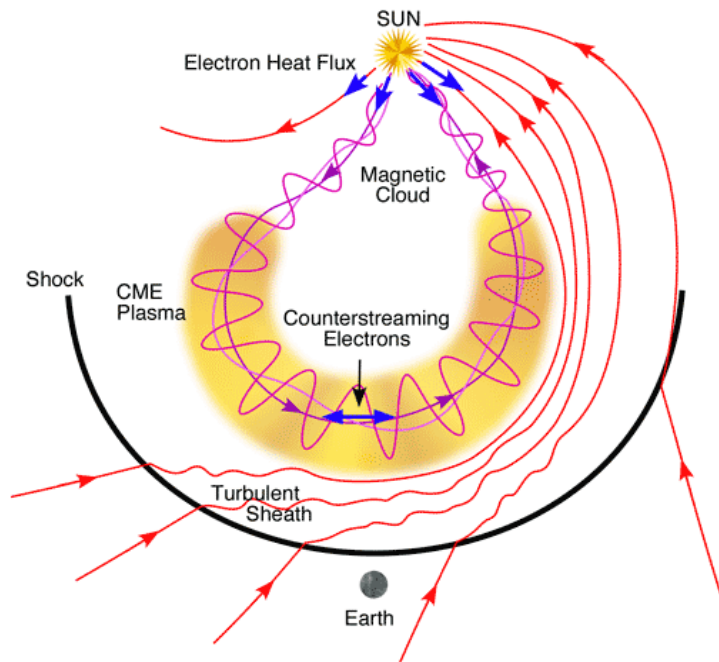


SOHO/LASCO コロナグラフ
CME中央にねじれたらせん状の
構造が見られる



CMEの正体は太陽コロナから放出
された**ねじれた磁束管**
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)

ねじれた磁束管が太陽風の中を高速で移動

→ 太陽風ガスを押してかき集めて一体となって到来
一体となった構造：CME

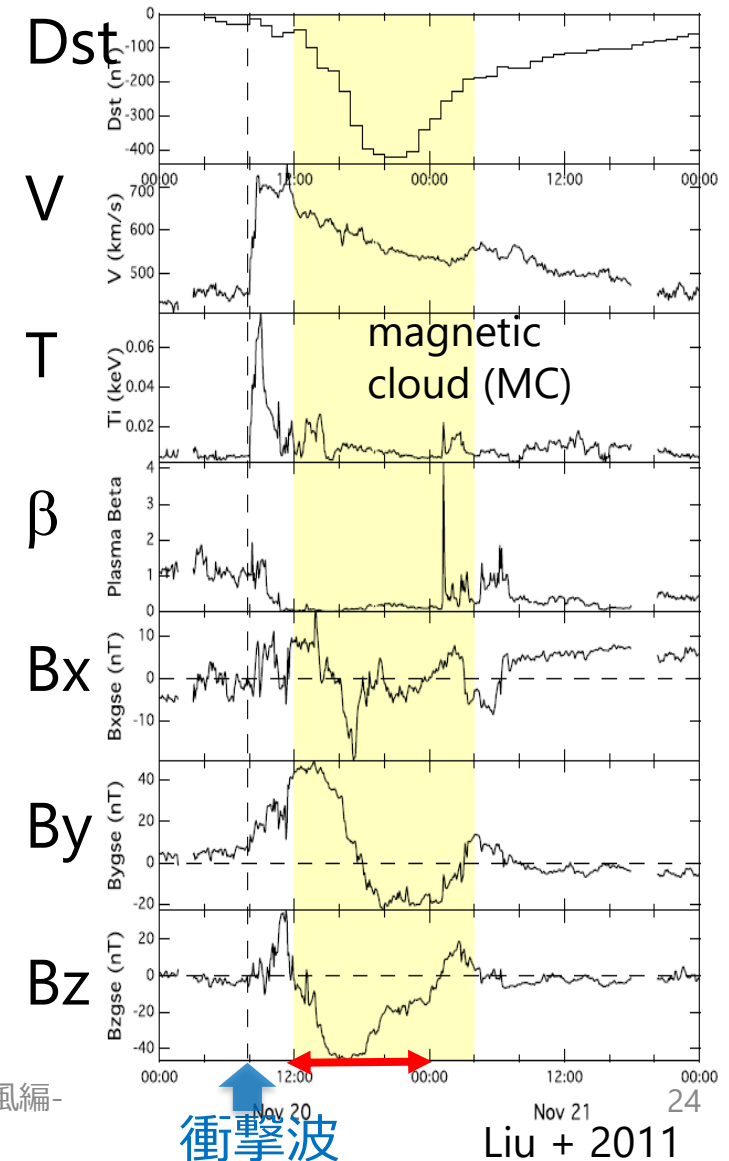
→ 背景の太陽風とCMEの間に衝撃波

ねじれた磁束管：磁気雲（magnetic cloud）

→ 南向きの磁場を持つとき→ 磁気圏じょう乱

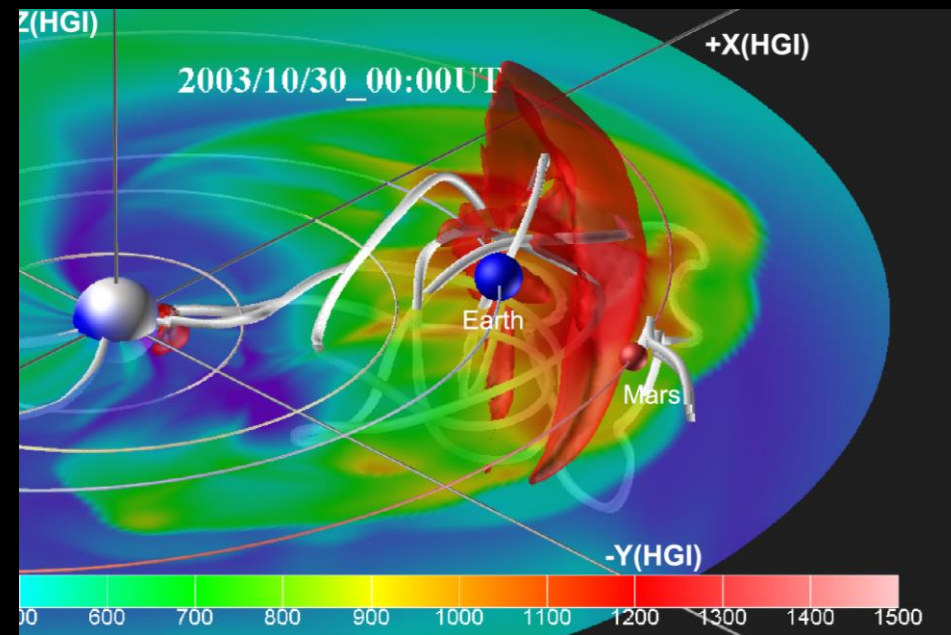
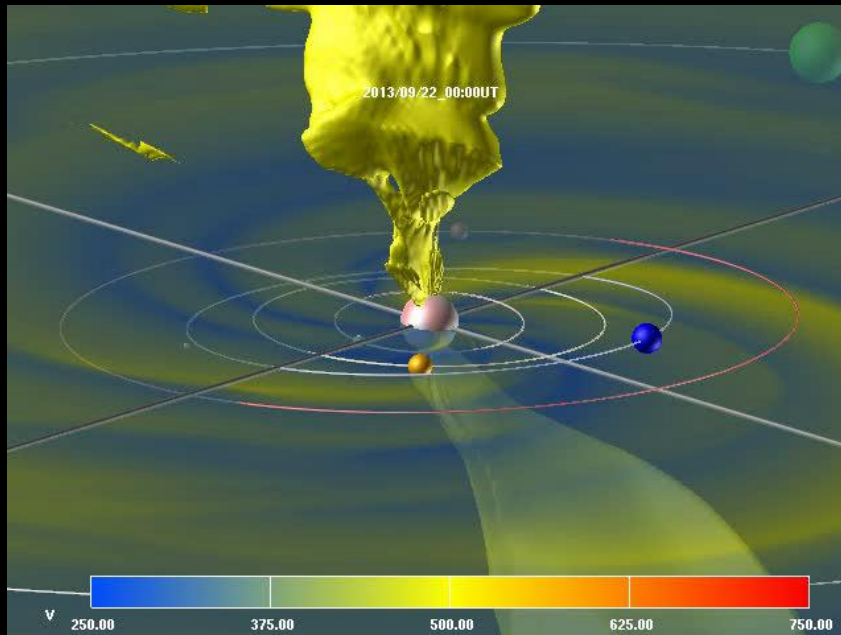
In situ 観測例

ACE 2003 November 20-21



太陽風・太陽嵐を予測する

- 太陽の観測画像から地球に到来する太陽風・CMEをコンピュータシミュレーションを用いて予測する仕組みを開発中。



球：水色：水星、橙：金星、青：地球、赤：火星、緑：木星
背景の色：ガスの速度、チューブ：磁力線

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拡がる時、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。太陽から地球に到来するCIRやCMEは、地球の周りの宇宙天気を乱す原因になる。コンピュータシミュレーションを用いた予測技術の開発が進められている。