



NICT 宇宙天気ユーザーズフォーラム  
2015年7月17日(金)

# 太陽嵐の予測について

草野 完也

名古屋大学太陽地球環境研究所

# 太陽嵐とその予測



フレア  
コロナ質量放出: CME  
フィラメント放出

太陽面爆発現象

太陽

太陽放射 (VIS, UV, EUV, X)

高エネルギー粒子

太陽風 (高温プラズマの高速流)

電離圏嵐

宇宙放射線

磁気嵐

地球

惑星間空間

# 太陽地球圏環境変動の社会影響

大フレア時に約100 mSvの被曝可能性

**宇宙放射線**

**粒子  
放射**



2014年1月宇宙放射線増加によりISSへの補給機打上延期

大フレア時に約4 mSvの被曝可能性

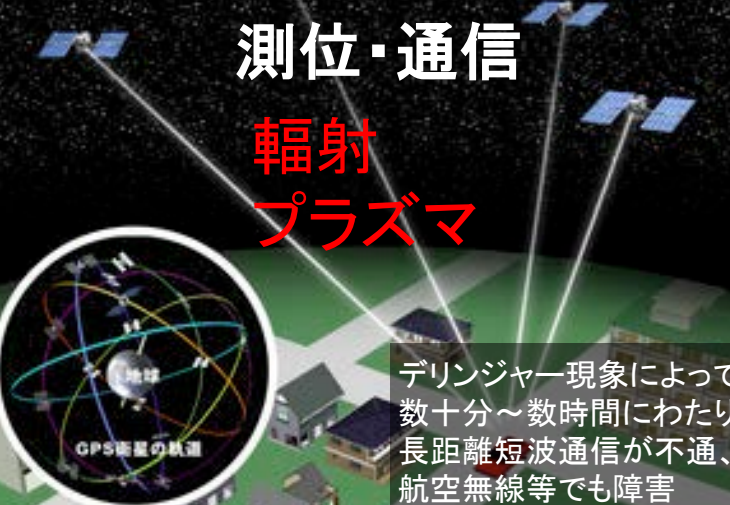
**粒子**



2012年1月アメリカ連邦航空局が極航路の変更を勧告

**測位・通信**

**放射  
プラズマ**



デリンジャー現象によって数十分～数時間にわたり長距離短波通信が不通、航空無線等でも障害


宇宙放射線による宇宙飛行士・航空機乗員の被曝

電離圏擾乱による測位・通信障害

**電力**

1989年3月の巨大磁気嵐によりケベック州で大停電が発生し、北アメリカ全体に影響が広がった。

**プラズマ**



ケベック大停電の際に焼けたトランス

**衛星**

X線天文衛星あすか：2000年7月の巨大太陽フレアの影響で姿勢制御不能となり、大気圏に突入した。

**粒子  
放射**



**気候影響**

**粒子  
放射  
プラズマ**



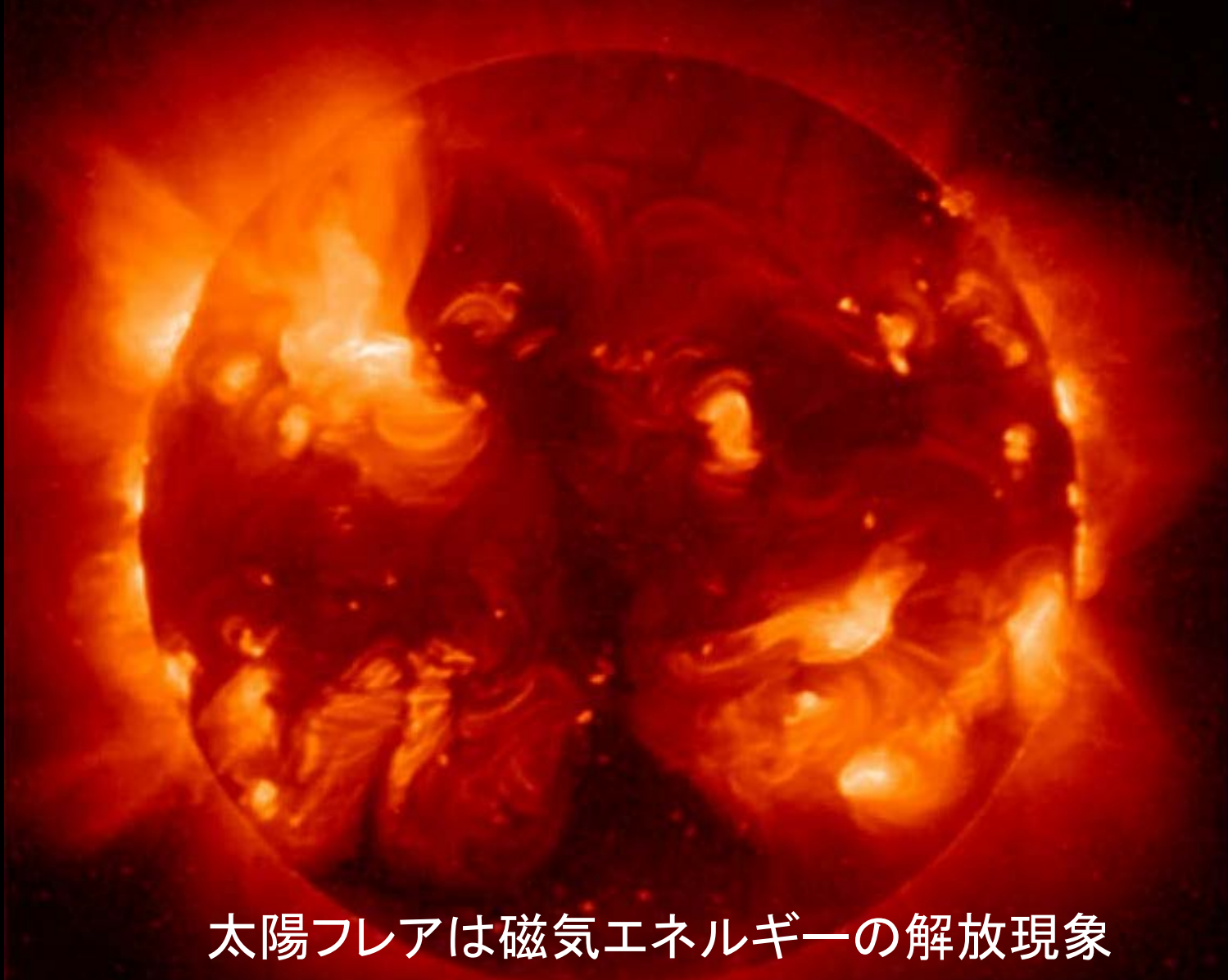
「凍るテムズ川 (1677)」  
[http://en.wikipedia.org/wiki/File:The\\_Frozen\\_Thames\\_1677.jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:The_Frozen_Thames_1677.jpg)

地磁気誘導電流による電力網障害と停電

衛星障害・軌道影響


太陽活動の大極小期(グランド・ミニマム)における小氷期の発生

# ようこうによる太陽コロナX線像



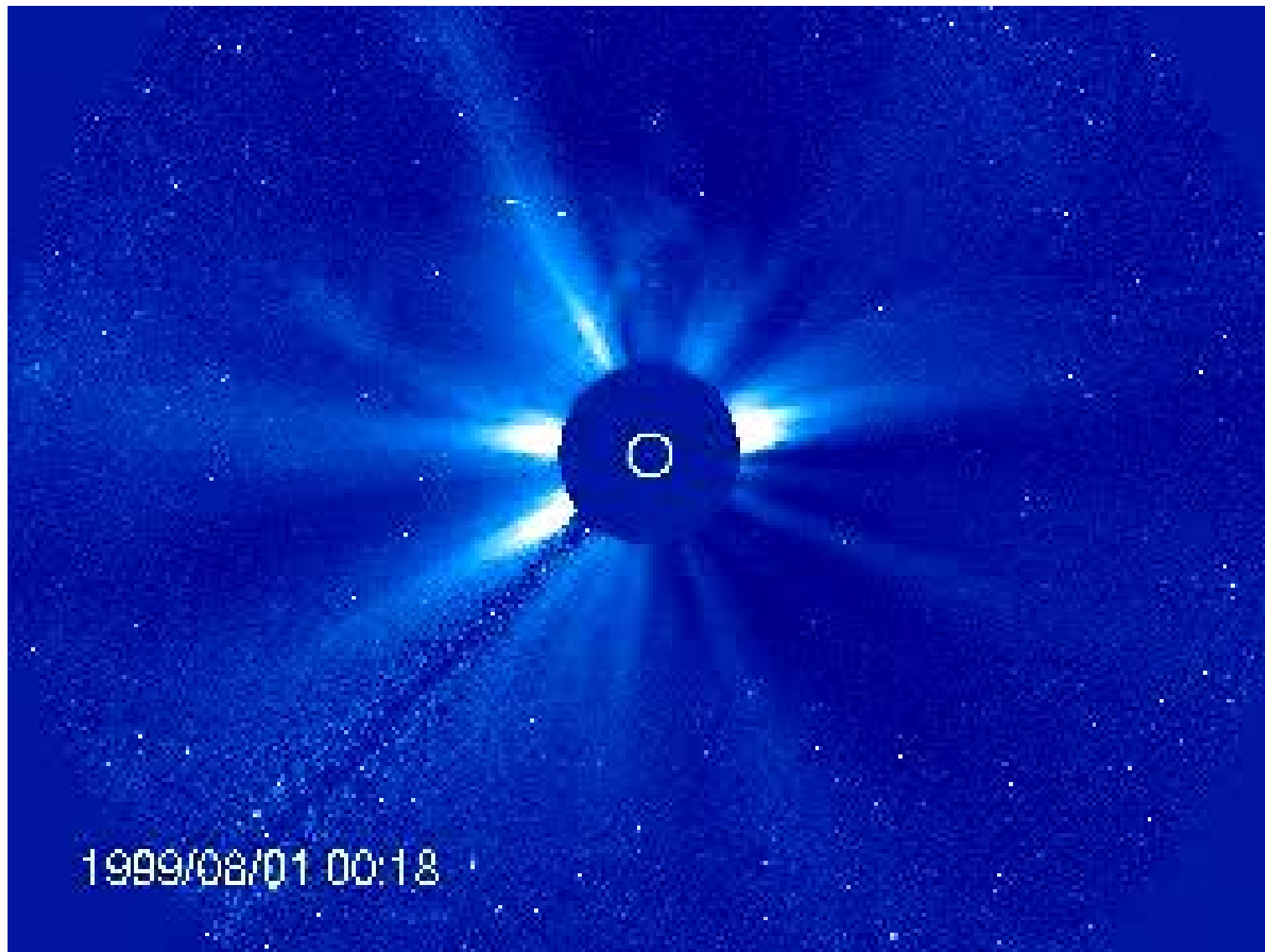
太陽フレアは磁気エネルギーの解放現象



The image shows a close-up view of the Sun's surface, characterized by a turbulent, granular texture of plasma. A prominent, bright, and somewhat irregularly shaped region of intense emission, likely a solar flare, is visible on the left side, extending towards the center. The colors range from deep red and orange to bright yellow and white, indicating high temperatures and energy release. The overall appearance is that of a highly active and dynamic stellar surface.

フレアに伴って発生するプラズマ放出現象

# 太陽風とコロナ質量放出(CME)



# 太陽嵐とその予測

## 何を予測するか

1. 爆発の発生予測
2. 地球軌道上におけるその影響の予測  
(惑星間空間の伝搬の予測)

太陽

太陽放射 (VIS, UV, EUV, X)

電離圏嵐

高エネルギー粒子

宇宙放射線

太陽風 (高温プラズマの高速流)

磁気嵐

地球

時間

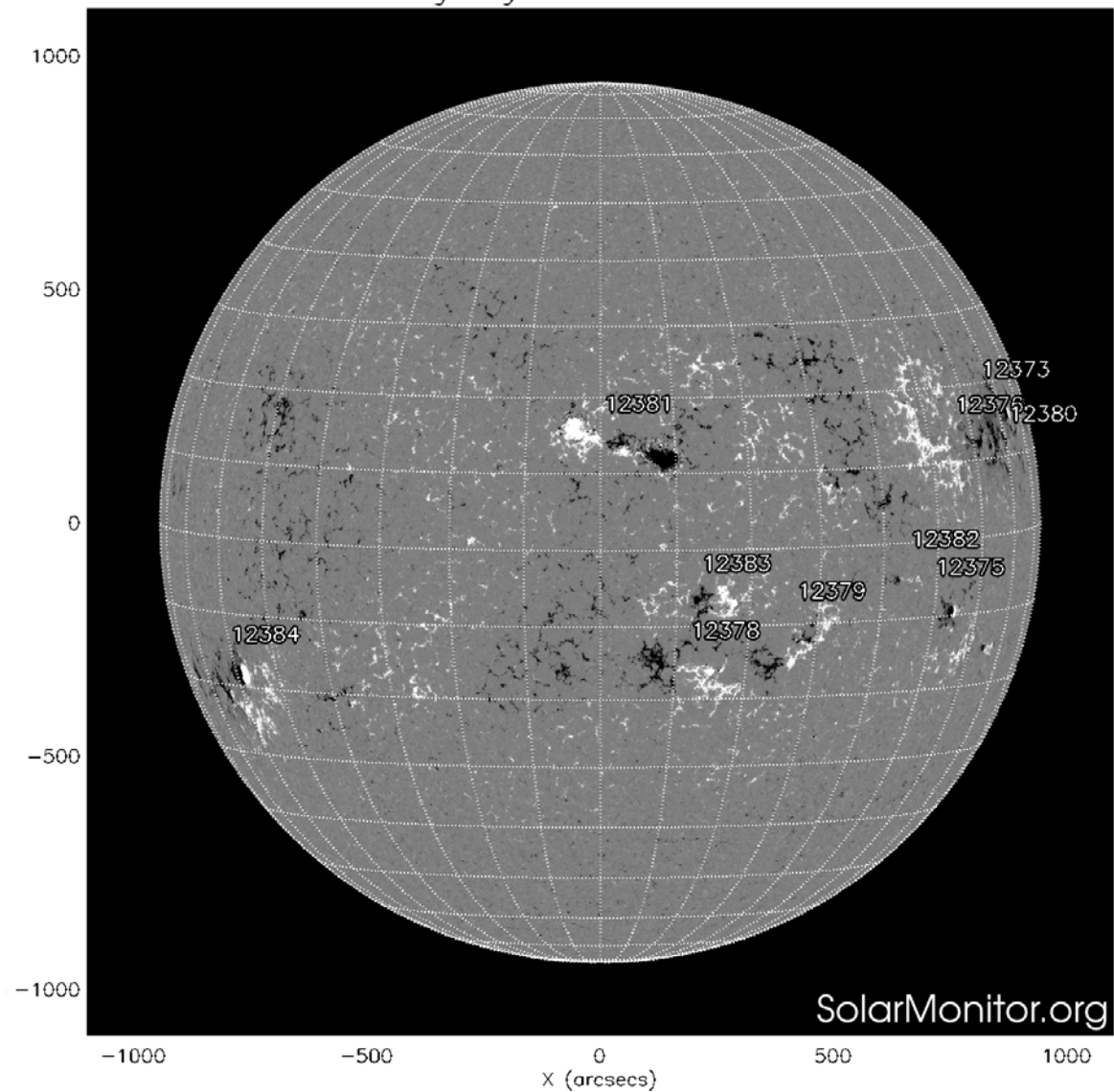
(発生と終息)

規模

(エネルギー、速度、質量、)

# 7月9日の太陽

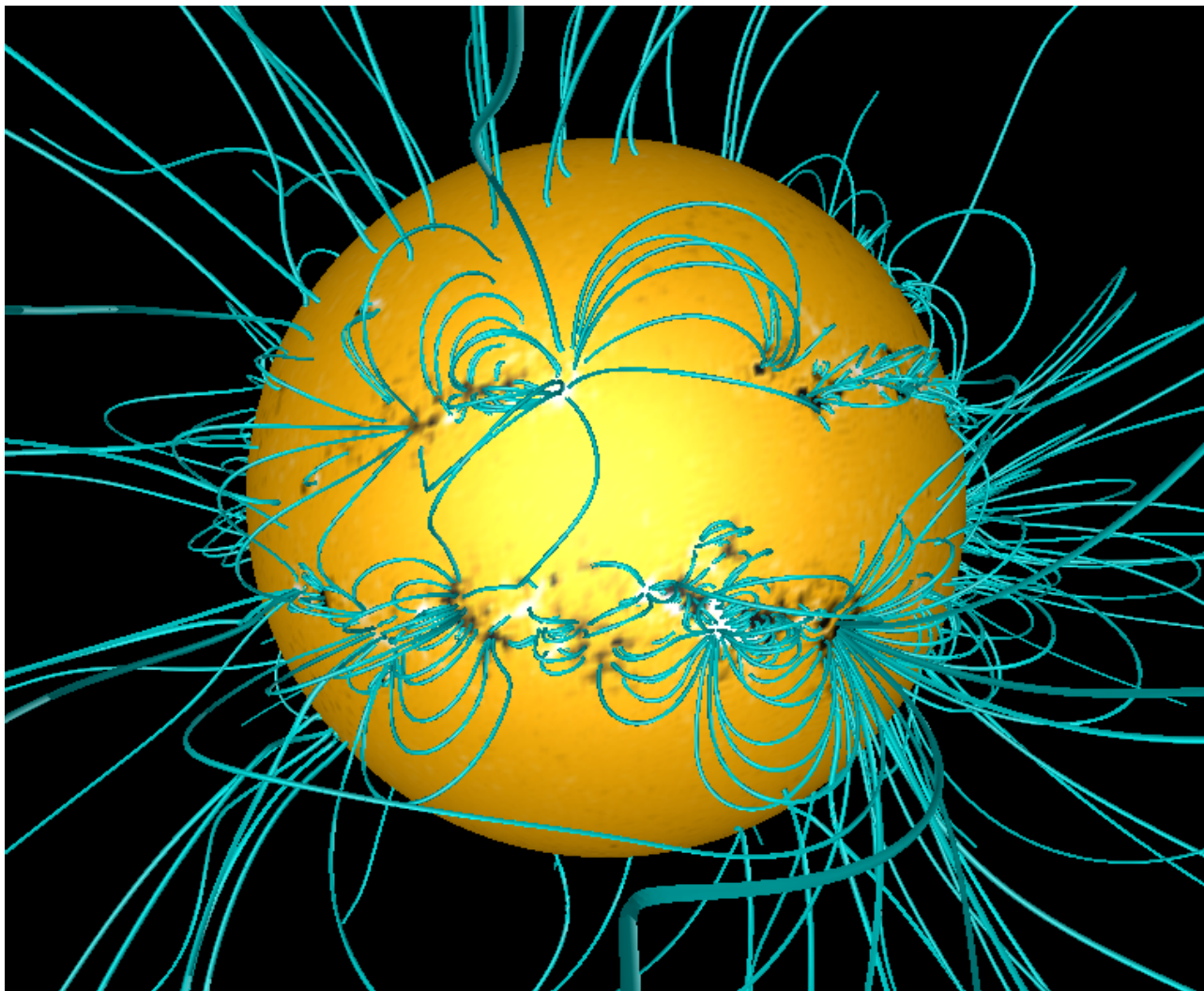
SDO HMI Magnetogram 9-Jul-2015 10:58:24.900





# 太陽黒点とコロナ磁場

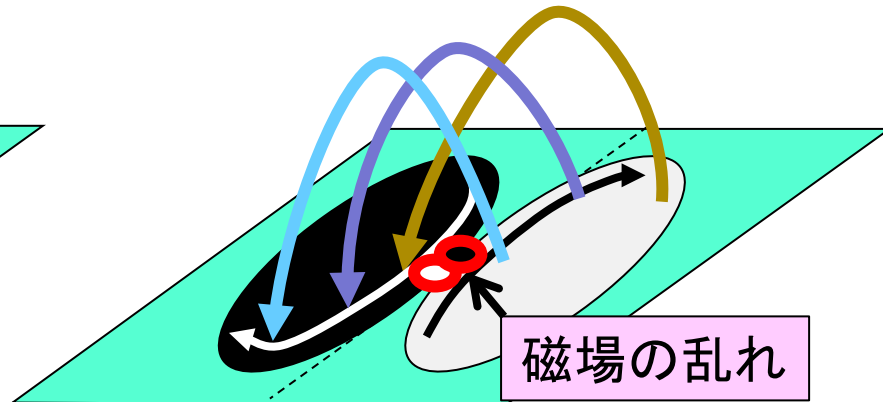
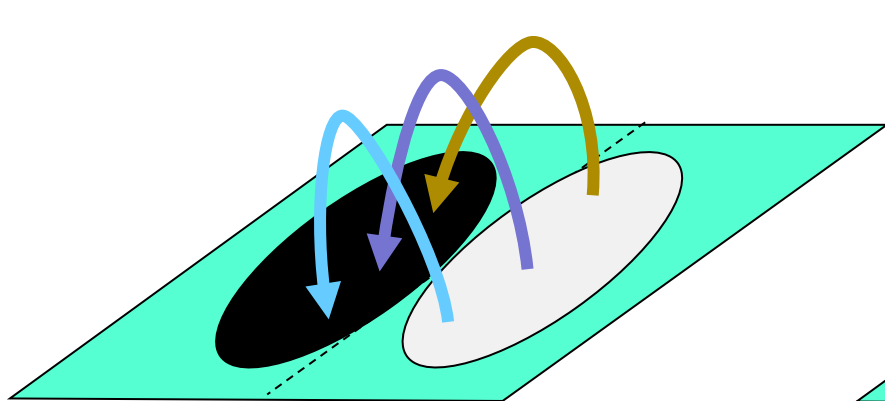
---



# 太陽フレアの発生メカニズム

①黒点(活動領域)の形成

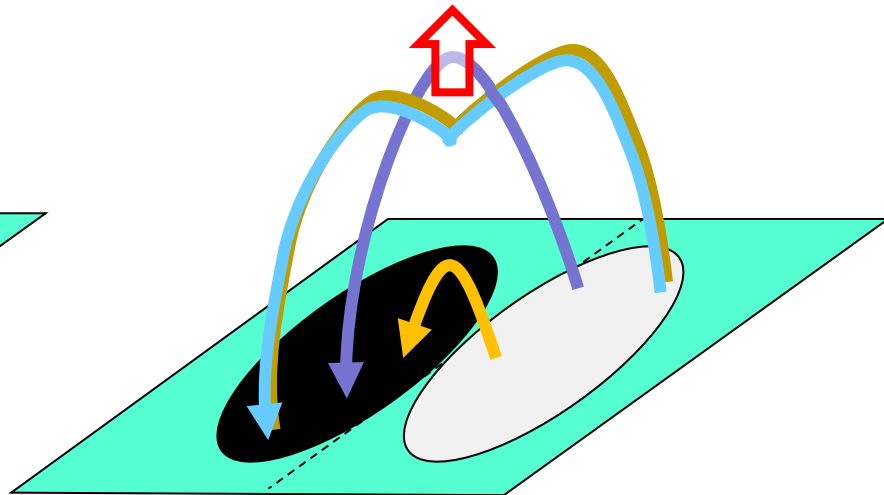
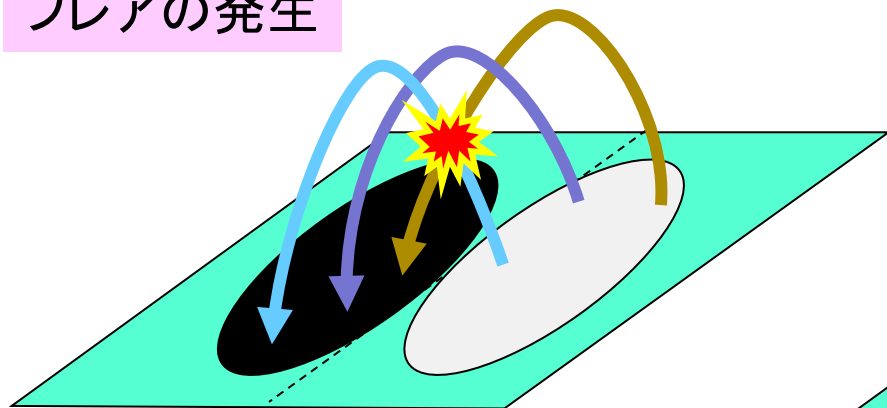
②磁力線の捻じれ(黒点の回転等による)



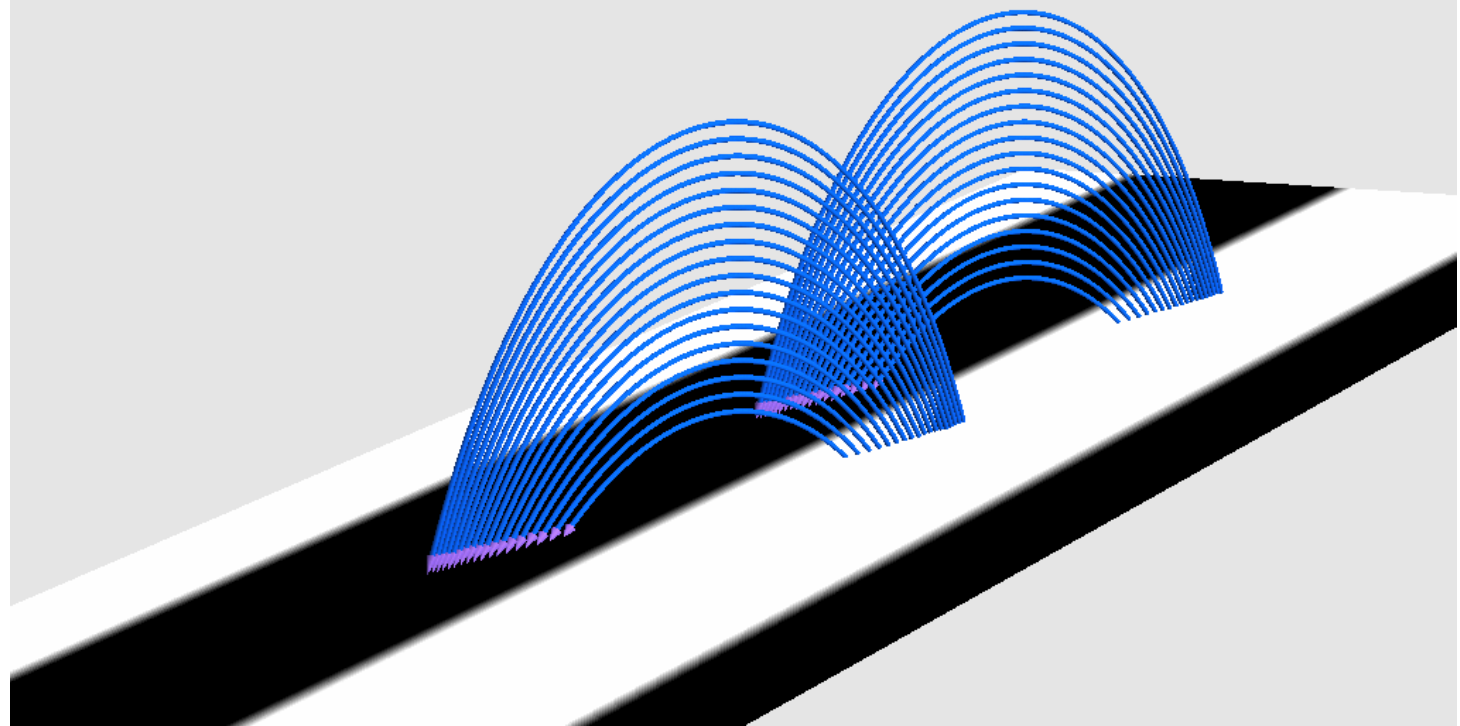
③磁力線のつなぎ替え(リコネクション)

④プラズマと磁場の噴出

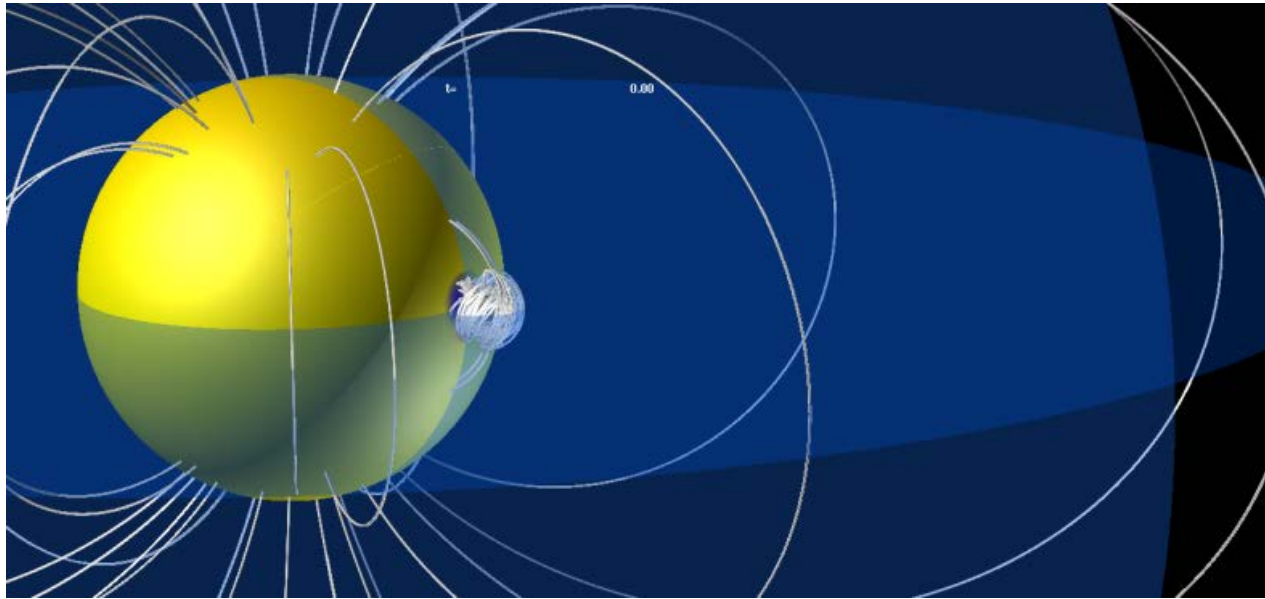
フレアの発生



# 太陽フレアのシミュレーション

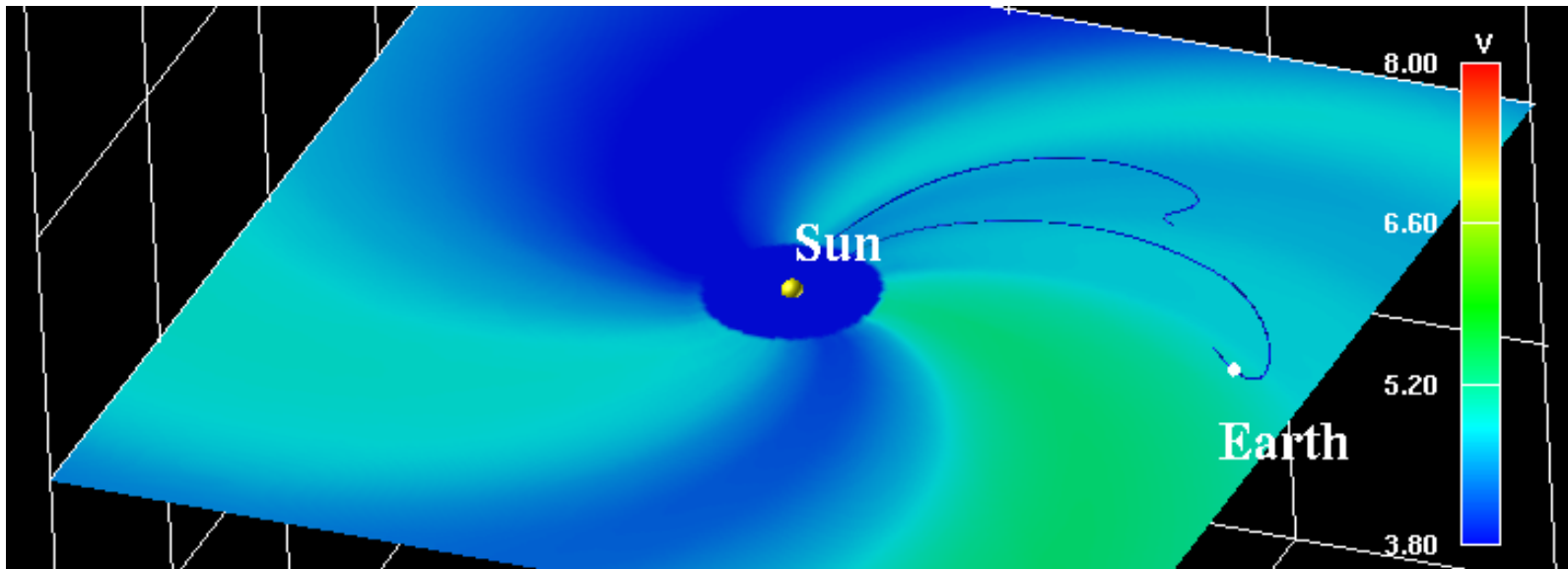


# コロナ質量放出のシミュレーション



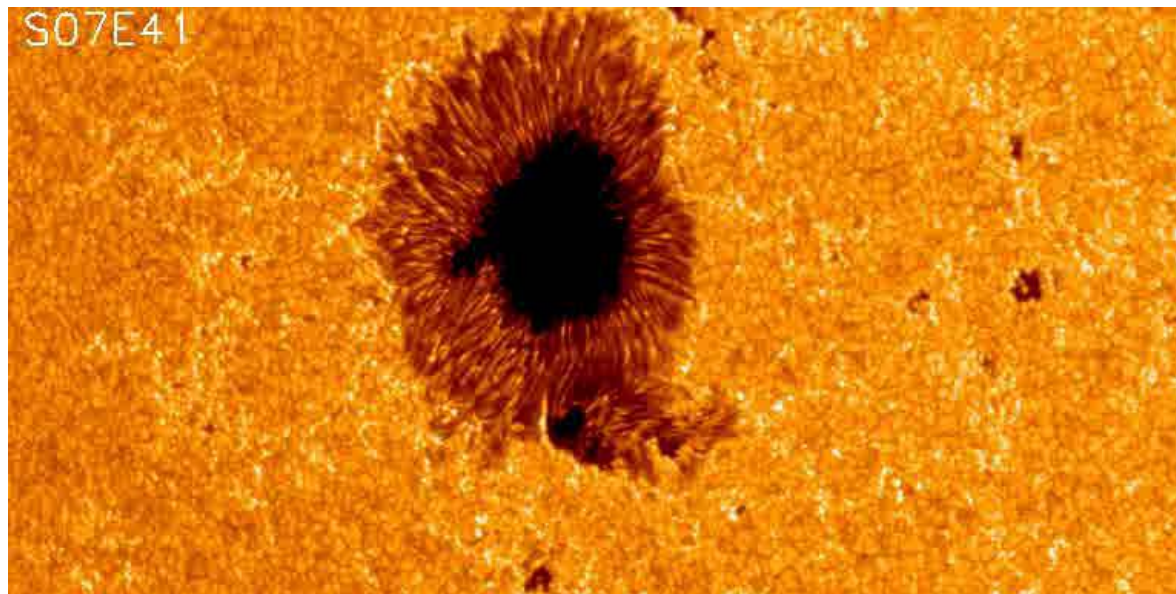
コロナ質量放出  
シミュレーション

惑星間空間コロナ質量  
放出シミュレーション

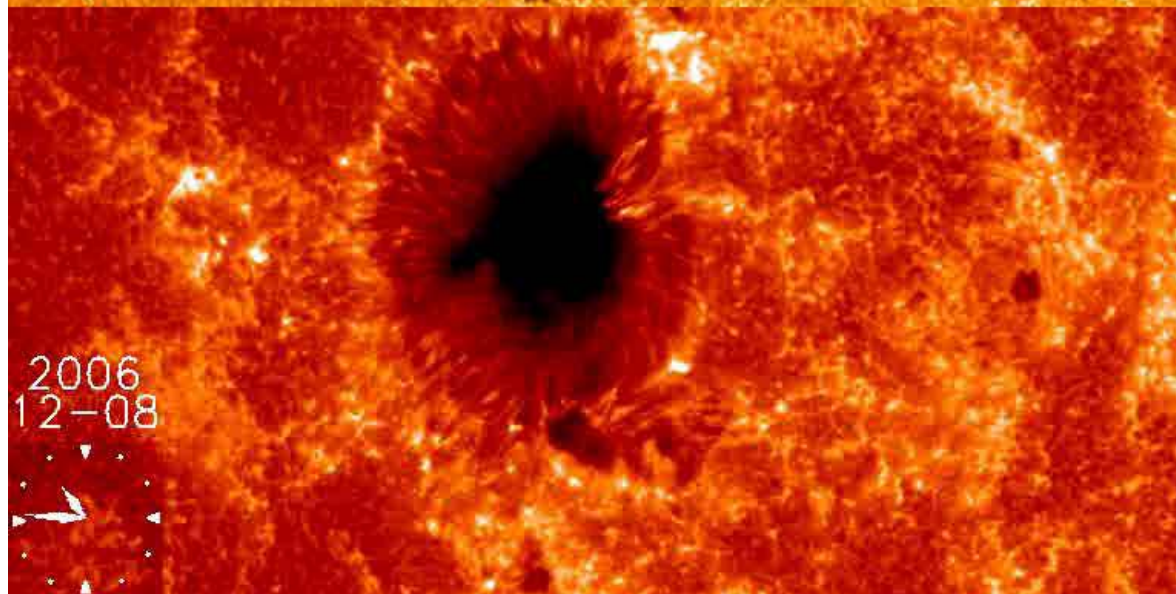




# 2006年12月13日の太陽フレア爆発



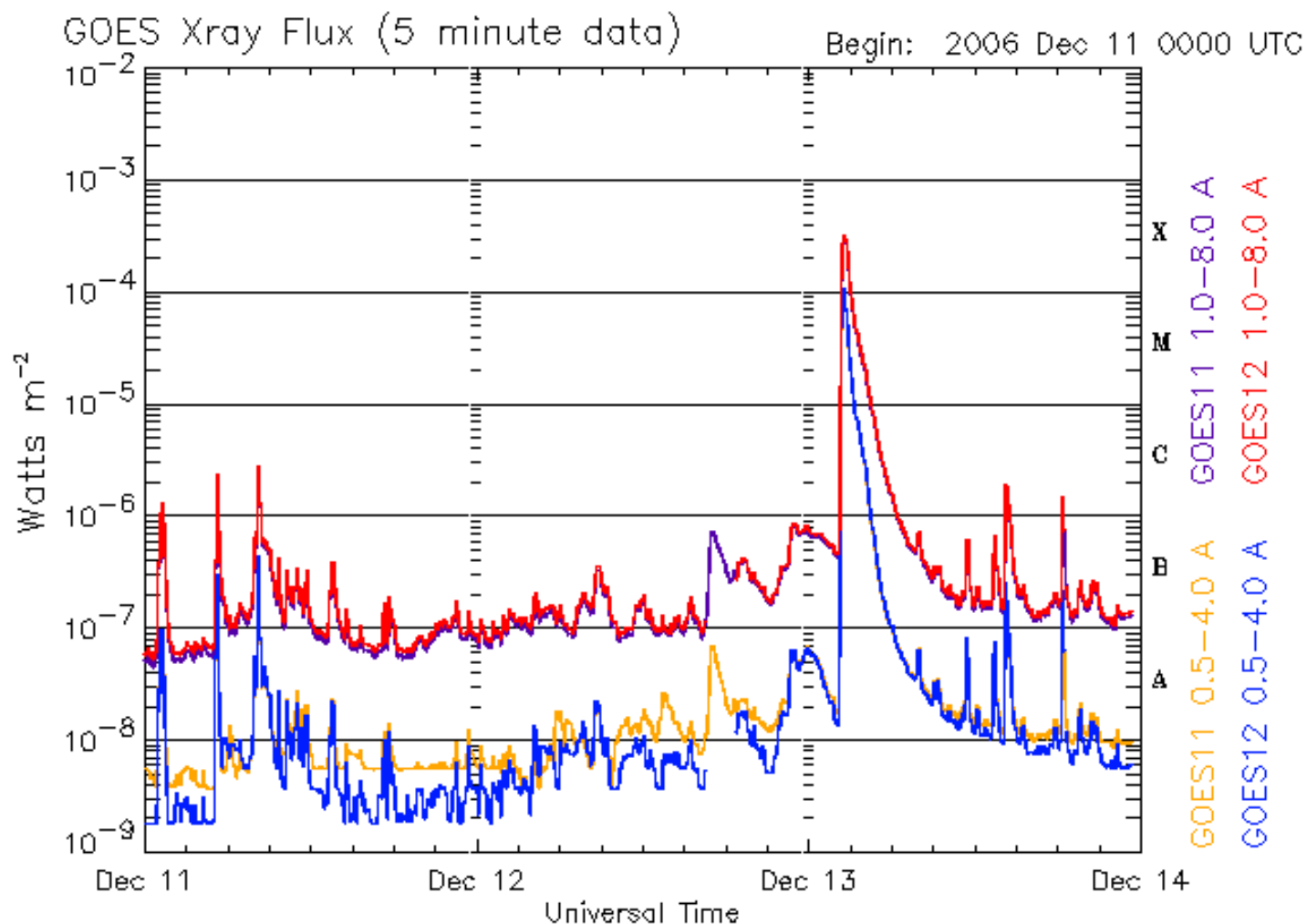
光球面



彩層

ひので可視光  
望遠鏡の観測

# 太陽フレアのX線流束変化



Updated 2006 Dec 13 23:31:05 UTC

NOAA/SEC Boulder, CO USA

# 激甚宇宙天気災害の可能性

## ■ 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。(米国NRC:被害総額~2兆ドルと試算)
- 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

Dst: 地球磁気圏に流れる軸対称な環電流の強さを表す地磁気活動度指数

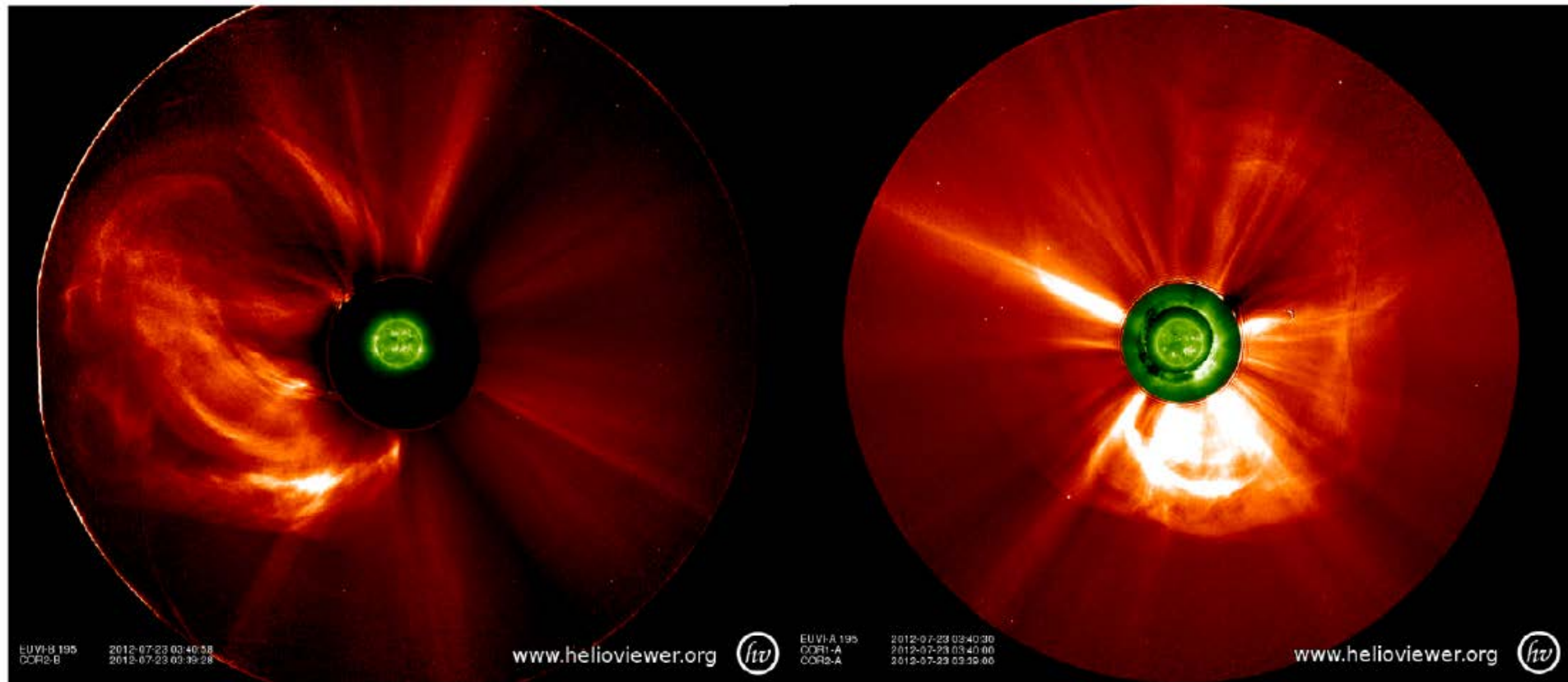
Dst (nT)

-2000

-1000

# 超高速CME (2012年7月23日)

- Baker et al. 2013 Defining Extreme Space Weather Scenarios



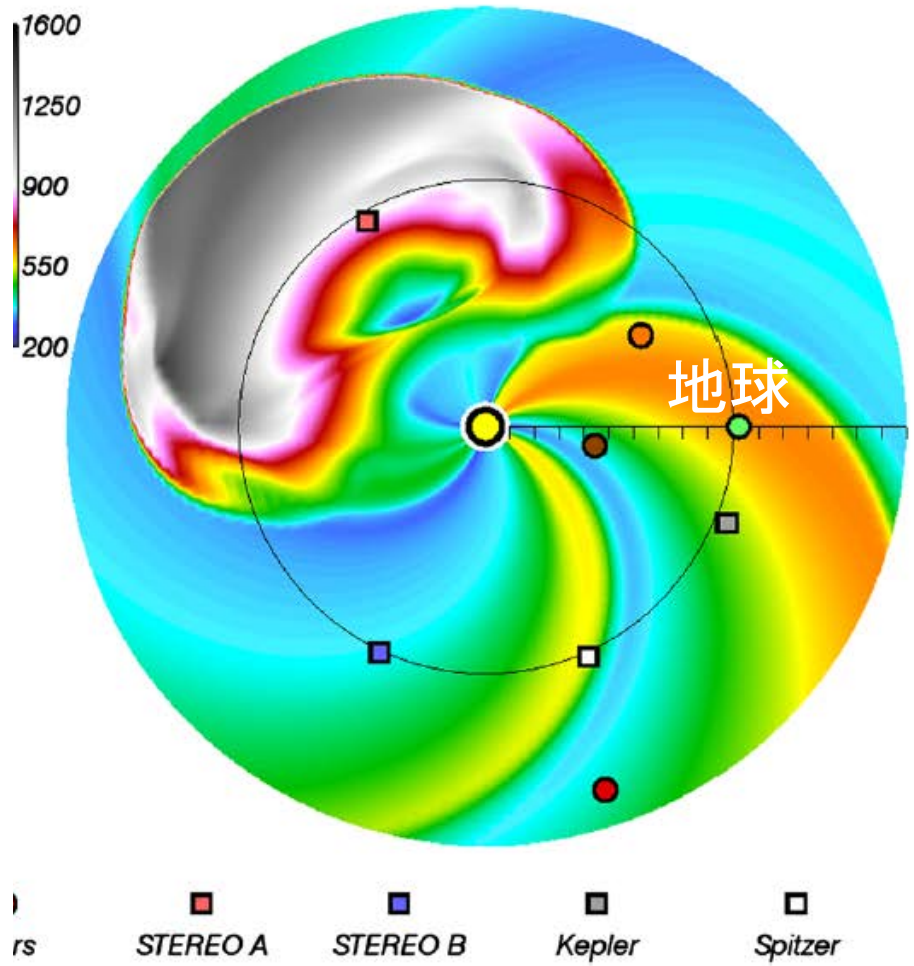
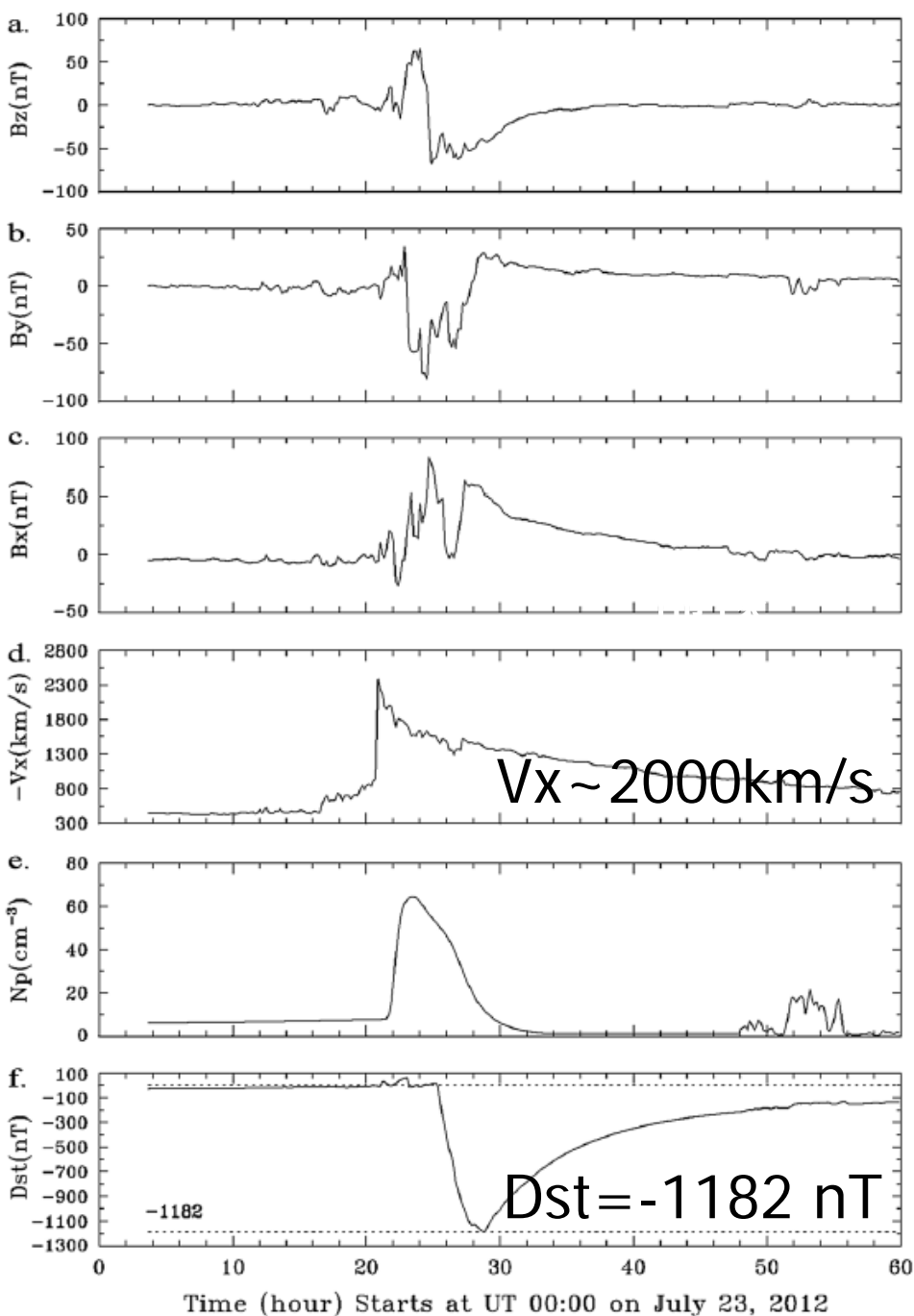
STEREO-B

STEREO-A



# ge-ENLILモデル

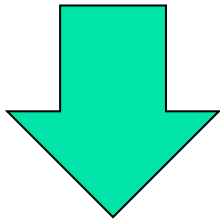
Baker et al. 2013



# 予測の方法

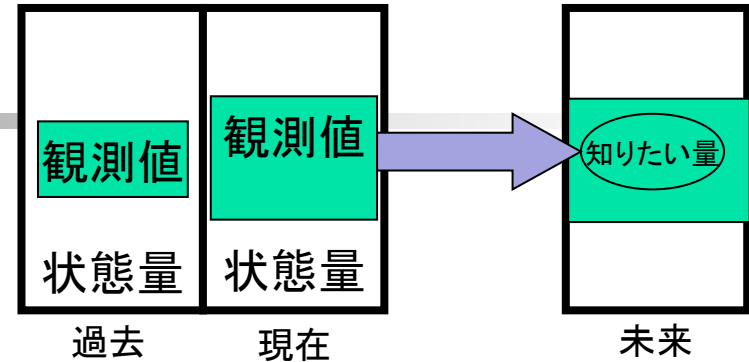
## ■ 経験モデルによる予測

- 周期性と相関性の発見
  - 古代天文学
- 前兆現象の発見
- 経験数値モデル
  - 機械学習アルゴリズム



## ■ 物理モデルによる予測

- 物理法則に基づく第1原理計算
  - 天体力学



## ■ 物理経験モデルによる予測

(GCMによる気象気候モデル)

- 物理法則  
+パラメタリゼーション  
:チューニング(最適化)
- 物理モデル+同化手法
- アンサンブル予測

# 黒点形態分類によるフレア確率

## ■ McIntosh classification

Gallagher, Moon, Wang 2002  
Sol. Phys.

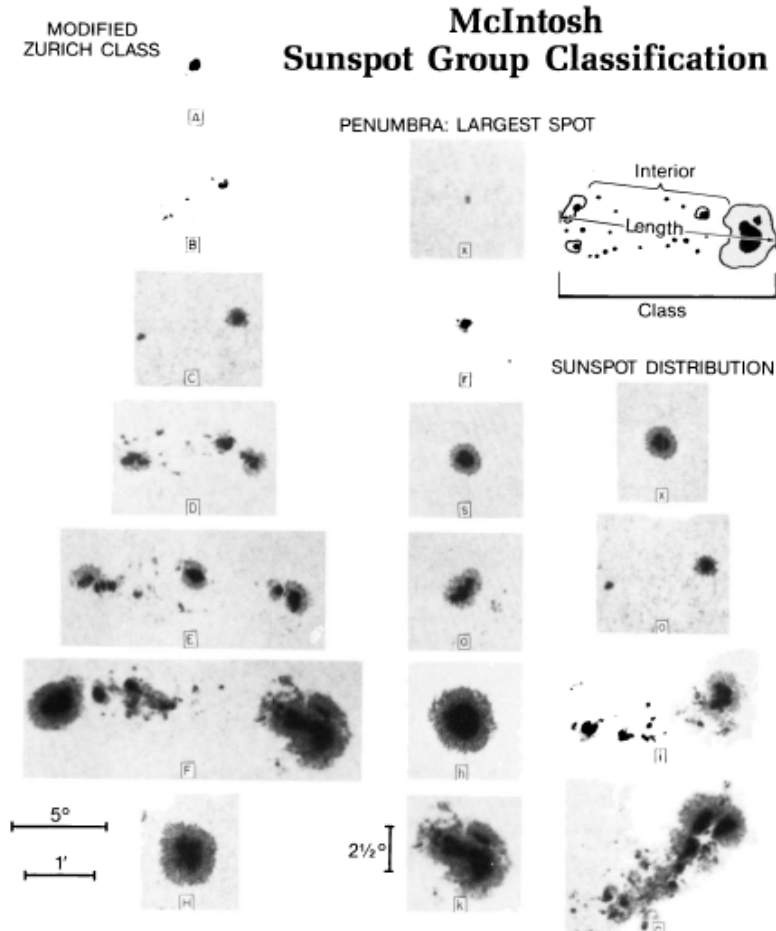


Fig. 1. The 3-component McIntosh classification, with examples of each category.

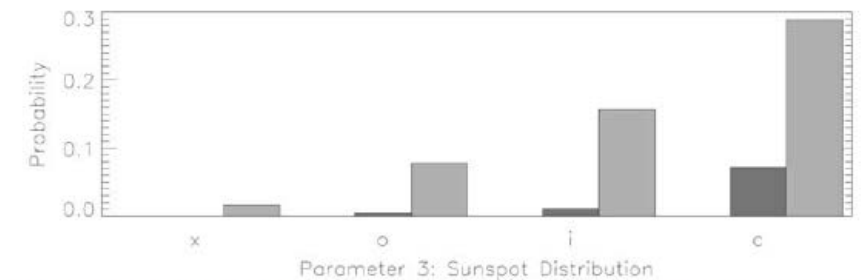
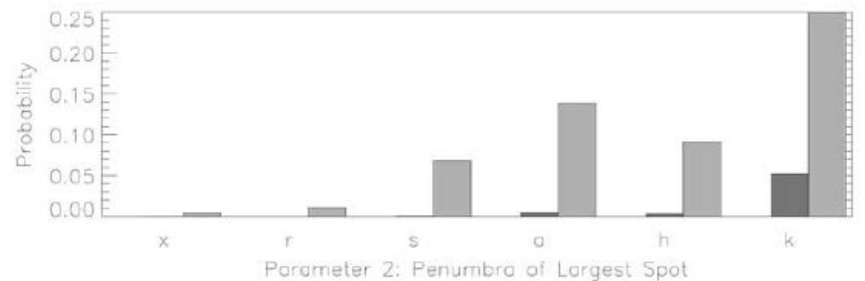
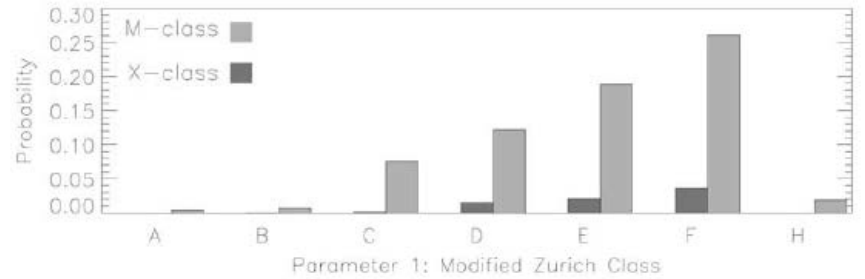


Figure 4. Derived 24-hour active-region flare probabilities for each of the three McIntosh classification parameters using Poisson statistics.

McIntosh 1990

# 米国NOAAのフレア予測結果

- Crown 2012 “Validation of NOAA/SWPC Flare Probabilities for Cycle 23”

Contingency Table for X-class Flares Prediction with the lead time of one-day

Forecast	Observation positive	Observation negative	hit rate
Yes	50 (a)	67 (b)	$a/(a+b)$ ~0.43
No	52 (c)	31315 (d)	

$a/(a+c)$   
~0.49  
precision

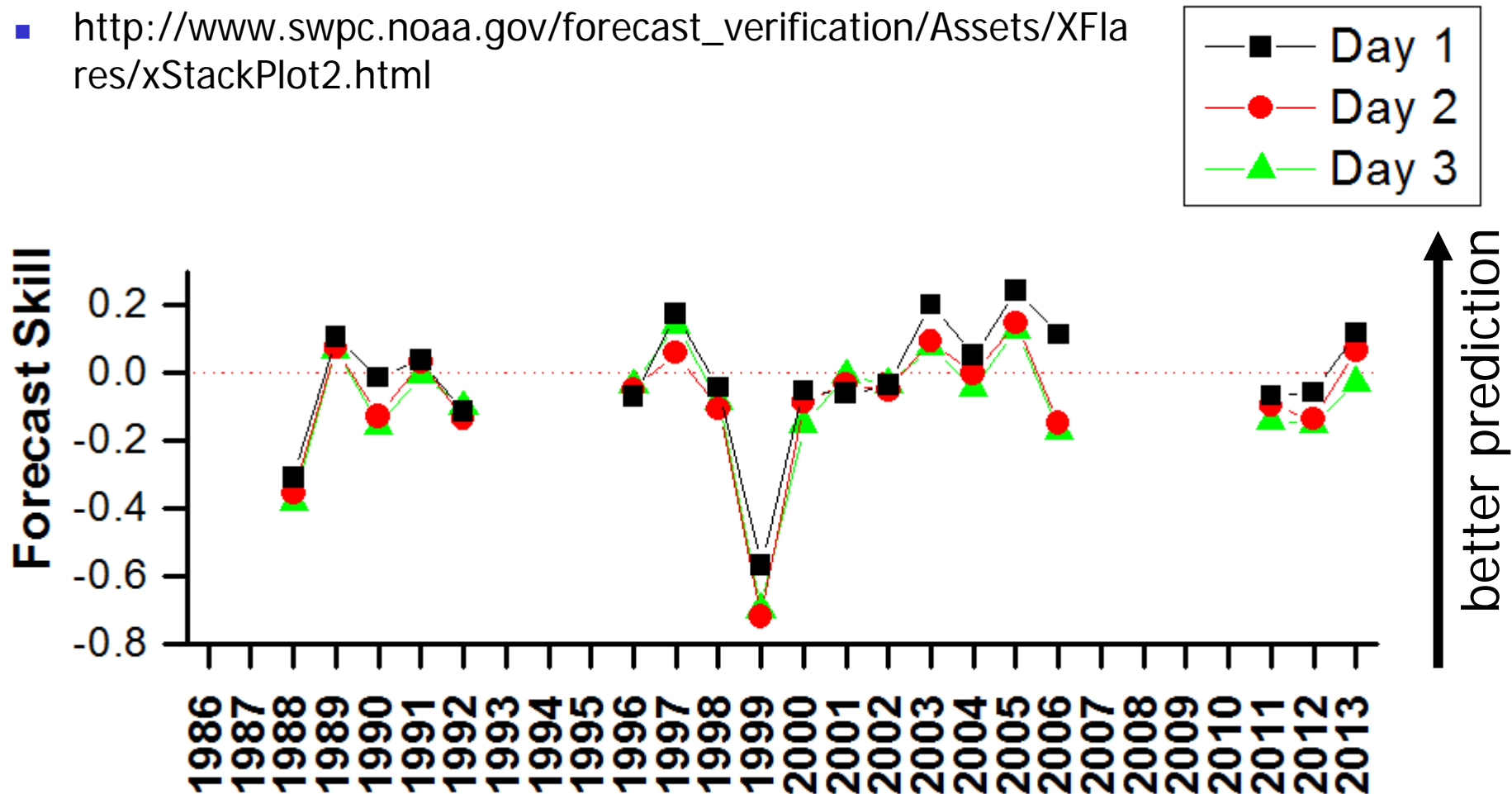
Skill Score =  $(a-b)/(a+c)$  ~ -0.17

True Skill Score (TSS)  
=  $a/(a+b) - c/(c+d)$  ~ 0.43



# フレア予測結果の推移

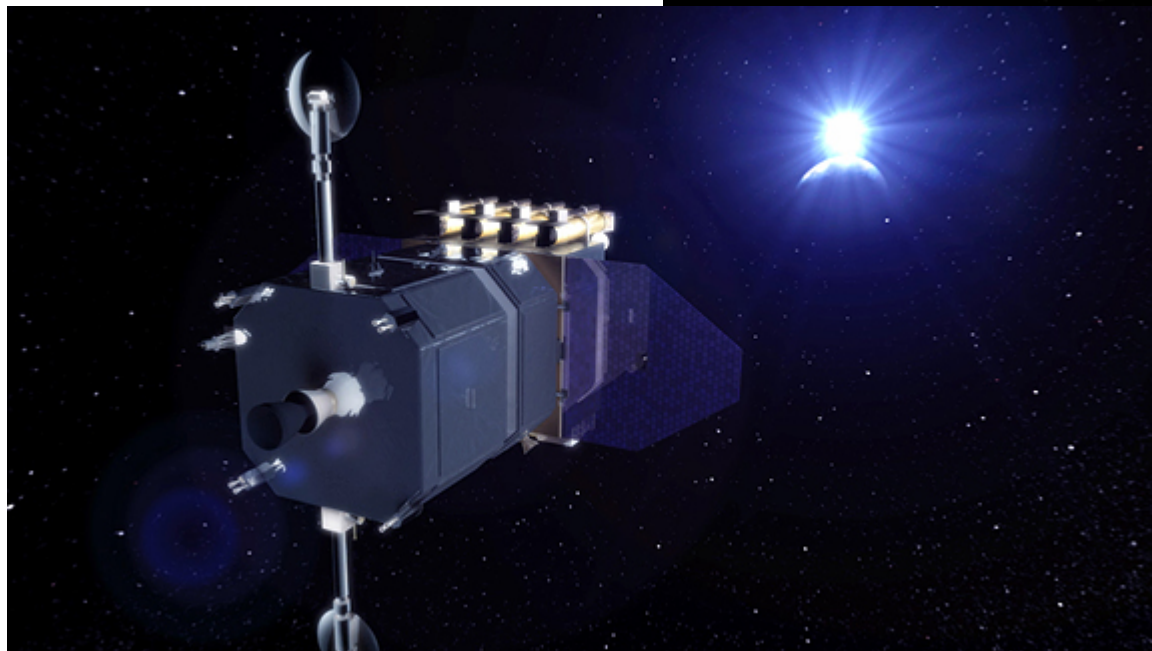
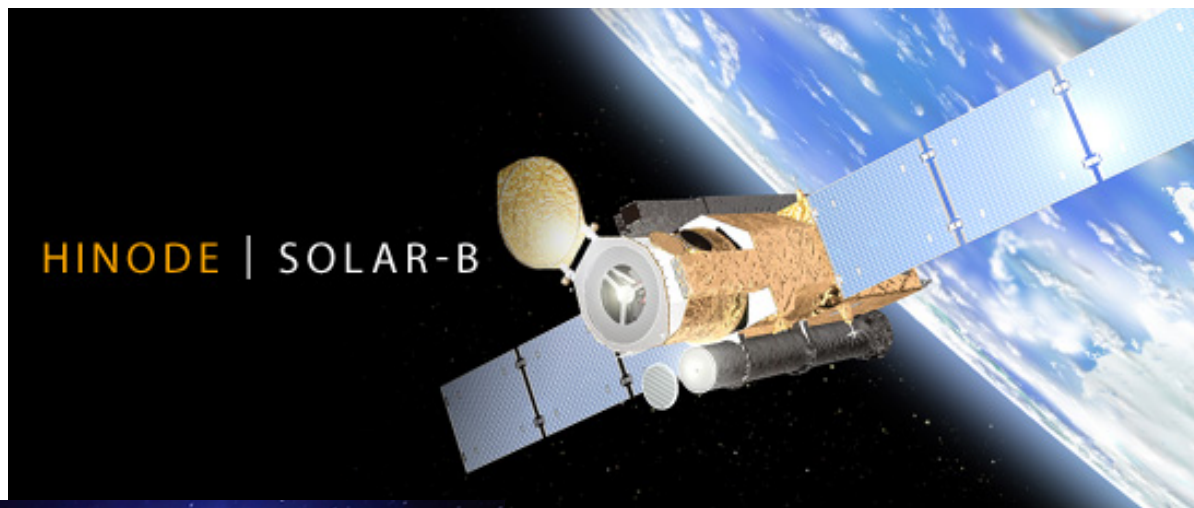
- [http://www.swpc.noaa.gov/forecast\\_verification/Assets/XFlares/xStackPlot2.html](http://www.swpc.noaa.gov/forecast_verification/Assets/XFlares/xStackPlot2.html)



2014, NOAA Space Weather Prediction Center, Boulder, CO, USA

# 新たな予測への取り組み

ひので衛星  
(日本)



SDO衛星  
(米国)

# ベクトル磁場データの利用

- Bobra and Couvidat 2014
- SDO衛星の活動領域ベクトル磁場データセット (SHARP)より様々な磁場パラメータを求め、機械学習アルゴリズム Support Vector Machine (SVM)を用いてM及びXクラスフレアの予測性能を評価

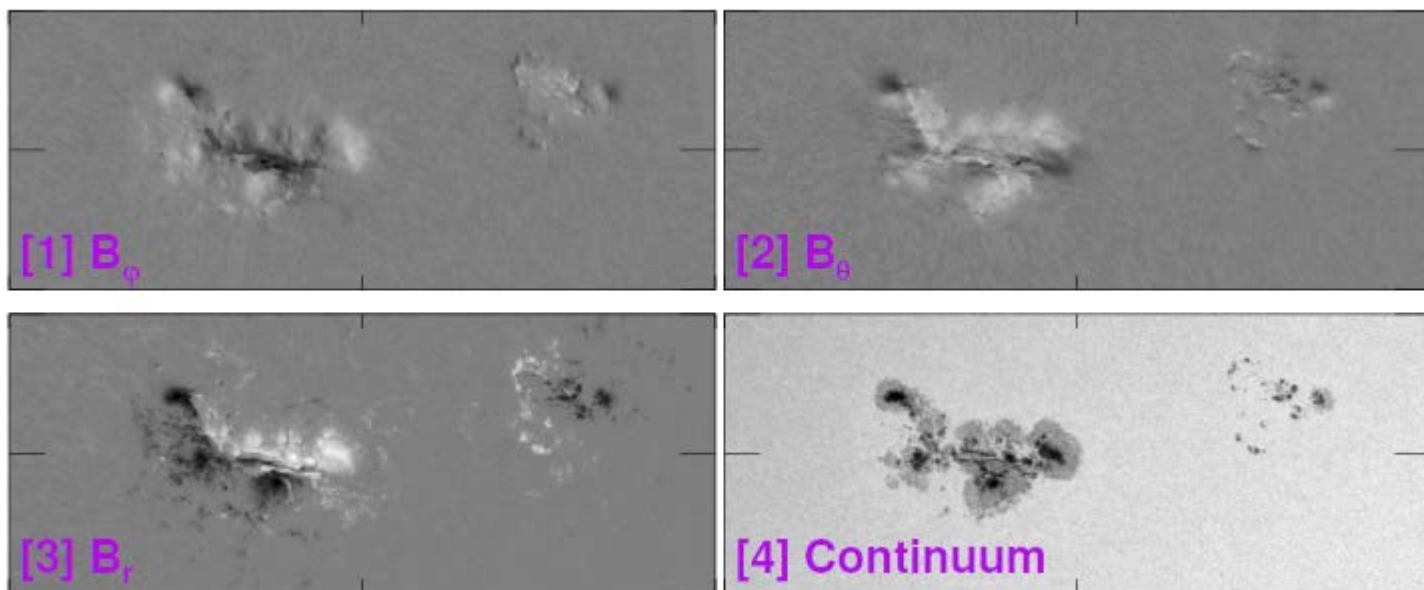


Table 1. SHARP active region parameter formulae.

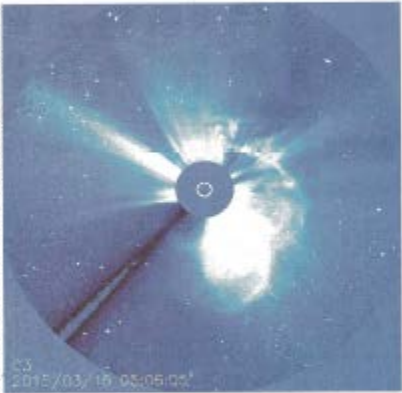
Keyword	Description	Formula	F-Score	Selection
TOTUSJH	Total unsigned current helicity	$H_{c_{total}} \propto \sum  B_z \cdot J_z $	3560	Included
TOTBSQ	Total magnitude of Lorentz force	$F \propto \sum B^2$	3051	Included
TOTPOT	Total photospheric magnetic free energy density	$\rho_{tot} \propto \sum (\vec{B}^{Obs} - \vec{B}^{Pot})^2 dA$	2996	Included
TOTUSJZ	Total unsigned vertical current	$J_{z_{total}} = \sum  J_z  dA$	2733	Included
ABSNJZH	Absolute value of the net current helicity	$H_{c_{abs}} \propto  \sum B_z \cdot J_z $	2618	Included
SAVNCPP	Sum of the modulus of the net current per polarity	$J_{z_{sum}} \propto \left  \sum^{B_z^+} J_z dA \right  + \left  \sum^{B_z^-} J_z dA \right $	2448	Included
USFLUX	Total unsigned flux	$\Phi = \sum  B_z  dA$	2437	Included
AREA_ACR	Area of strong field pixels in the active region	Area = $\sum$ Pixels	2047	Included
TOTFZ	Sum of z-component of Lorentz force	$F_z \propto \sum (B_x^2 + B_y^2 - B_z^2) dA$	1371	Included
MEANPOT	Mean photospheric magnetic free energy	$\bar{\rho} \propto \frac{1}{N} \sum (\vec{B}^{Obs} - \vec{B}^{Pot})^2$	1064	Included
R_VALUE	Sum of flux near polarity inversion line	$\Phi = \sum  B_{LoS}  dA$ within R mask	1057	Included
EPSZ	Sum of z-component of normalized Lorentz force	$\delta F_z \propto \frac{\sum (B_x^2 + B_y^2 - B_z^2)}{\sum B^2}$	864.1	Included
SHRGT45	Fraction of Area with Shear > 45°	Area with Shear > 45° / Total Area	740.8	Included
MEANSHR	Mean shear angle	$\bar{\Gamma} = \frac{1}{N} \sum \arccos \left( \frac{\vec{B}^{Obs} \cdot \vec{B}^{Pot}}{ \vec{B}^{Obs}   \vec{B}^{Pot} } \right)$	727.9	Discarded
MEANGAM	Mean angle of field from radial	$\bar{\gamma} = \frac{1}{N} \sum \arctan \left( \frac{B_h}{B_z} \right)$	573.3	Discarded
MEANGBT	Mean gradient of total field	$ \nabla B_{tot}  = \frac{1}{N} \sum \sqrt{\left( \frac{\partial B}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial B}{\partial y} \right)^2}$	192.3	Discarded
MEANGBZ	Mean gradient of vertical field	$ \nabla B_z  = \frac{1}{N} \sum \sqrt{\left( \frac{\partial B_z}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial B_z}{\partial y} \right)^2}$	88.40	Discarded
MEANGBH	Mean gradient of horizontal field	$ \nabla B_h  = \frac{1}{N} \sum \sqrt{\left( \frac{\partial B_h}{\partial x} \right)^2 + \left( \frac{\partial B_h}{\partial y} \right)^2}$	79.40	Discarded
MEANJZH	Mean current helicity ( $B_z$ contribution)	$\bar{H}_c \propto \frac{1}{N} \sum B_z \cdot J_z$	46.73	Discarded
TOTFY	Sum of y-component of Lorentz force	$F_y \propto \sum B_y B_z dA$	28.92	Discarded
MEANJZD	Mean vertical current density	$\bar{J}_z \propto \frac{1}{N} \sum \left( \frac{\partial B_y}{\partial x} - \frac{\partial B_x}{\partial y} \right)$	17.44	Discarded
MEANALP	Mean characteristic twist parameter, $\alpha$	$\alpha_{total} \propto \frac{\sum J_z \cdot B_z}{\sum B_z^2}$	10.41	Discarded
TOTFX	Sum of x-component of Lorentz force	$F_x \propto -\sum B_x B_z dA$	6.147	Discarded
EPSY	Sum of y-component of normalized Lorentz force	$\delta F_y \propto \frac{-\sum B_y B_z}{\sum B^2}$	0.647	Discarded
EPSX	Sum of x-component of normalized Lorentz force	$\delta F_x \propto \frac{\sum B_x B_z}{\sum B^2}$	0.366	Discarded



Metric	Segmented	Operational
Time interval (no flare)	48h	24h
class-imbalance ratio	16.5	16.5
Accuracy	$0.943 \pm 0.006$	$0.924 \pm 0.007$
Precision (positive)	$0.501 \pm 0.041$	$0.417 \pm 0.037$
Precision (negative)	$0.992 \pm 0.002$	$0.989 \pm 0.003$
Recall (positive)	$0.869 \pm 0.036$	$0.832 \pm 0.042$
Recall (negative)	$0.947 \pm 0.007$	$0.929 \pm 0.008$
f1 (positive)	$0.634 \pm 0.033$	$0.554 \pm 0.033$
f1 (negative)	$0.969 \pm 0.003$	$0.958 \pm 0.004$
HSS <sub>1</sub>	$-0.008 \pm 0.142$	$-0.348 \pm 0.183$
HSS <sub>2</sub>	$0.606 \pm 0.035$	$0.517 \pm 0.035$
Gilbert skill score	$0.436 \pm 0.036$	$0.350 \pm 0.032$
TSS	$0.817 \pm 0.034$	$0.761 \pm 0.039$

# 日本における新プロジェクト

## 「宇宙嵐」的中へ タッグ



宇宙嵐は、太陽フレアと呼ぶ、太陽から放出される高エネルギー粒子が地球に到達し、通信機などに障害が出る「宇宙嵐」の予報を強化するためのネットワークづくりを乗り出す。三月中旬に宇宙嵐が発生したが、世界五カ所の予報機関はいずれも予報を外した。こうした失敗を防ぐため、個別に活動している国内の関係機関に連携を呼び掛け、精度の高いシステム構築を目指す。

### 名大観測連携で影響防ぐ

宇宙嵐は、太陽フレアと呼ぶ、太陽から放出される高エネルギー粒子が地球に到達し、通信機などに障害が出る「宇宙嵐」の予報を強化するためのネットワークづくりを乗り出す。三月中旬に宇宙嵐が発生したが、世界五カ所の予報機関はいずれも予報を外した。こうした失敗を防ぐため、個別に活動している国内の関係機関に連携を呼び掛け、精度の高いシステム構築を目指す。

オーロラが観測されるのは、東京、シドニー、北京、ブリュッセル、ホルター(米中部)にある予報機関は軒並み、五段階の低い「普通」や「雷雨」のレベルで発表された。最新の予報は、最高レベルの「強烈な活動」が予想される。市市民生活に影響はなかったが、名大地球圏環境研究所は高精度の予報システムが必要と判断。観測機を投入すれば宇宙嵐の規模を予測できるシステムの開発を目指す。連携の役となって政府に予報要求を始めた。今日(21日)に研究者や予報担当者を集めた会議で、今後、今回の予報失敗の改善点を洗い出し、システム構築に打ち出す。名大地球圏環境研究所の笠野野史教授は「研究機関が持つ知見やノウハウを出し合っただけの新システムを構築し、予報精度を向上させる。予報精度を向上させる。予報精度を向上させる。予報精度を向上させる。」と話している。

読売新聞 2015年7月14日朝刊

(第三種郵便物認可)

# 巨大磁気嵐に備え

磁気嵐の発生を予測する高精度の手法と、地球規模で起きる被害のハザードマップの作成に、名古屋大や京都大、情報通信研究機構などのプロジェクトチームが着手する。マップ作りは世界初の試みで、2019年度までの公開を目指す。

強い磁気嵐が起きると、送電線に許容量を超える電流が流れて変電所などの設備が壊れたり、短波通信や航空無線、全球測位システム(GPS)などに重大な通信障害が出たりする。1989年には、カナダ・ケベック州で9時間におよぶ大停電が発生した。

## 「ハザードマップ」作成へ

### GPS障害 ■ 大規模停電

ハザードマップに図示される磁気嵐の主な災害



近い送電線ほど過電流が流れやすいなど、地域差がある。チームは、地域ごとの被害予想を磁気嵐の規模に応じて算出し、ハザードマップを作成することを決めた。大規模な停電を防ぐ対策や、航空機の航路を変更するなどの予防策を実施できる可能性があるという。

チームの代表を務める卒業生野史也・名大教授は「磁気嵐の規模や発生時間を、24時間前に予報する体制を整え、大規模な災害に備えたい」と話している。

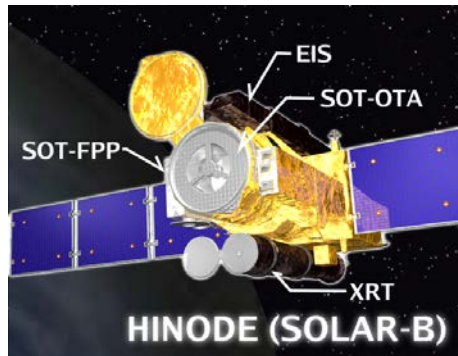
巨大な磁気嵐は1859年に観測され、オーロラが赤道付近で見られるなどの現象が起きた。現代で同規模の磁気嵐が起きたら、大規模な通信障害などが発生するとみられるが、具体的な被害想定はなく、対策が進んでいない。

文部科学省新学術領域研究  
「太陽地球圏環境予測：  
我々が生きる宇宙の理解と  
その変動に対応する社会基盤の形成。」

# シミュレーションによる2つの戦略

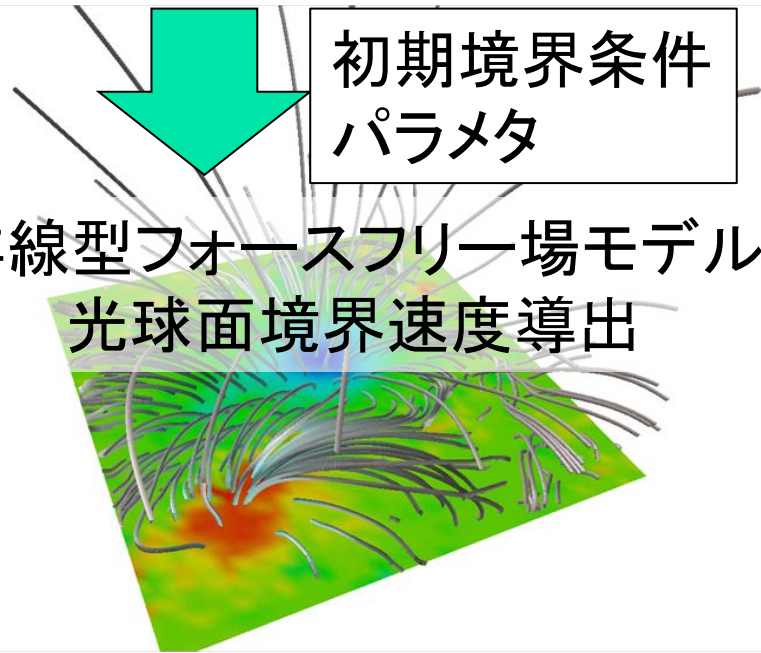
## 戦略①

### Data-driven Simulation



初期境界条件  
パラメタ

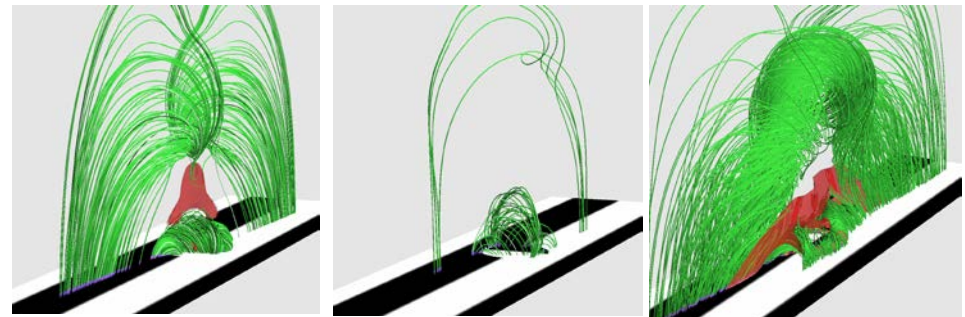
非線型フォースフリー場モデル  
光球面境界速度導出



## 戦略②

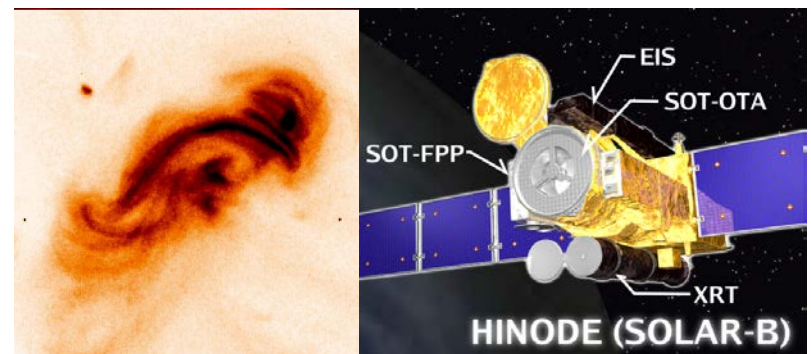
### Ensemble Simulation

様々な初期境界条件・パラメタ

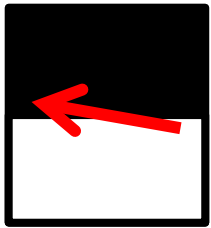
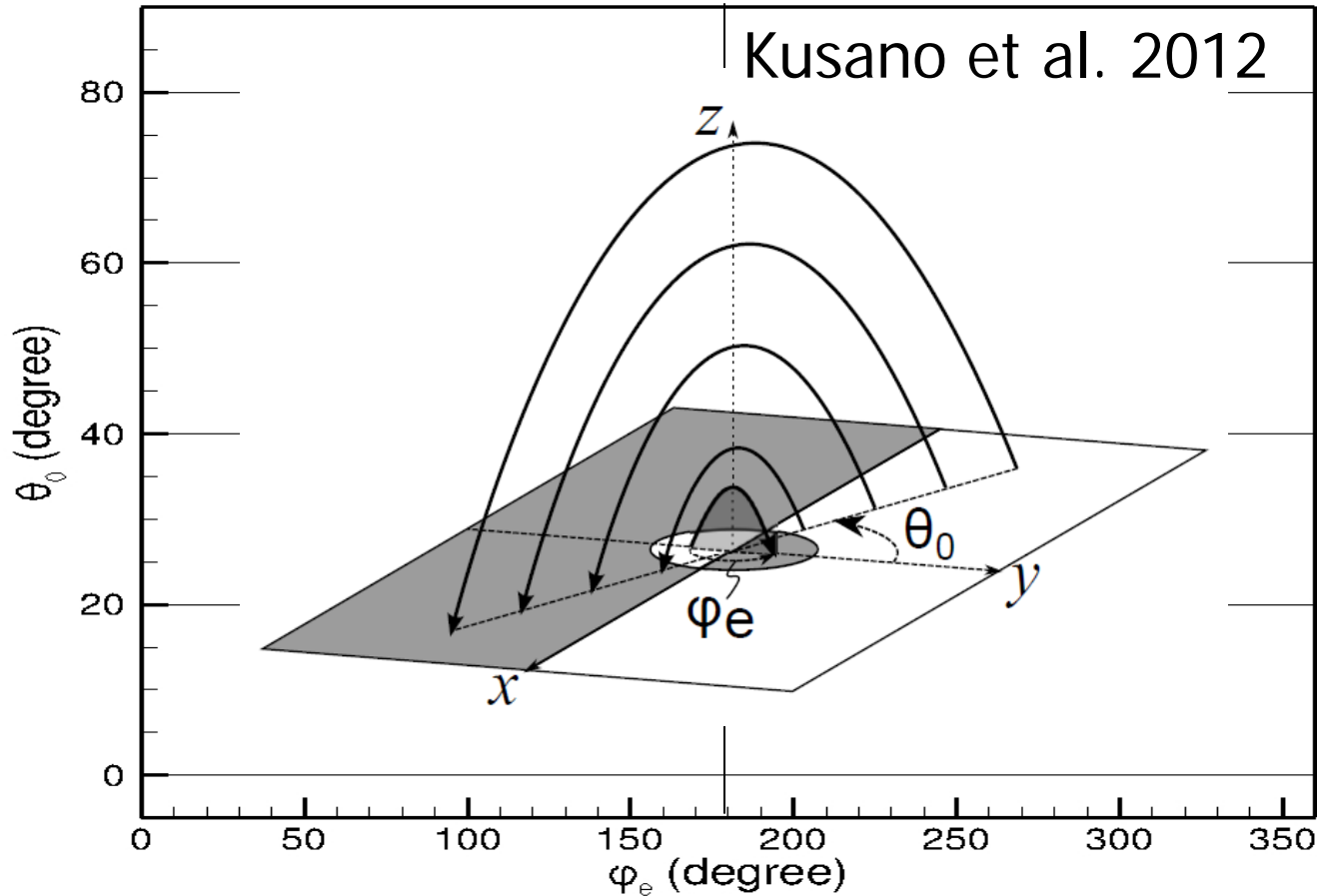


適切なパラメタ空間の抽出

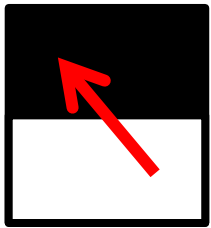
観測による検証



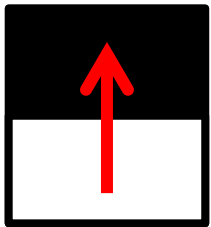
# Parameter Space: $\theta_0$ vs. $\varphi_e$



strong shear

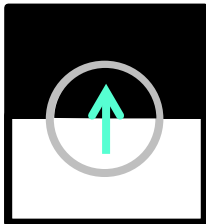


weak shear



potential field

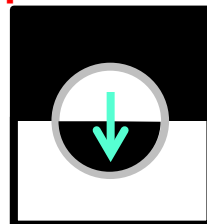
Right Polarity



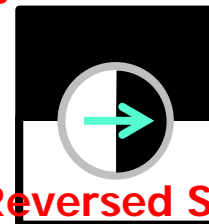
Opposite Polarity



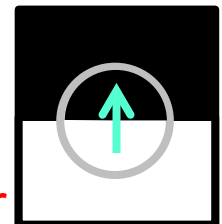
Normal Shear



Reversed Shear

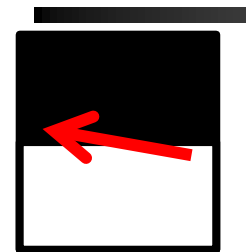
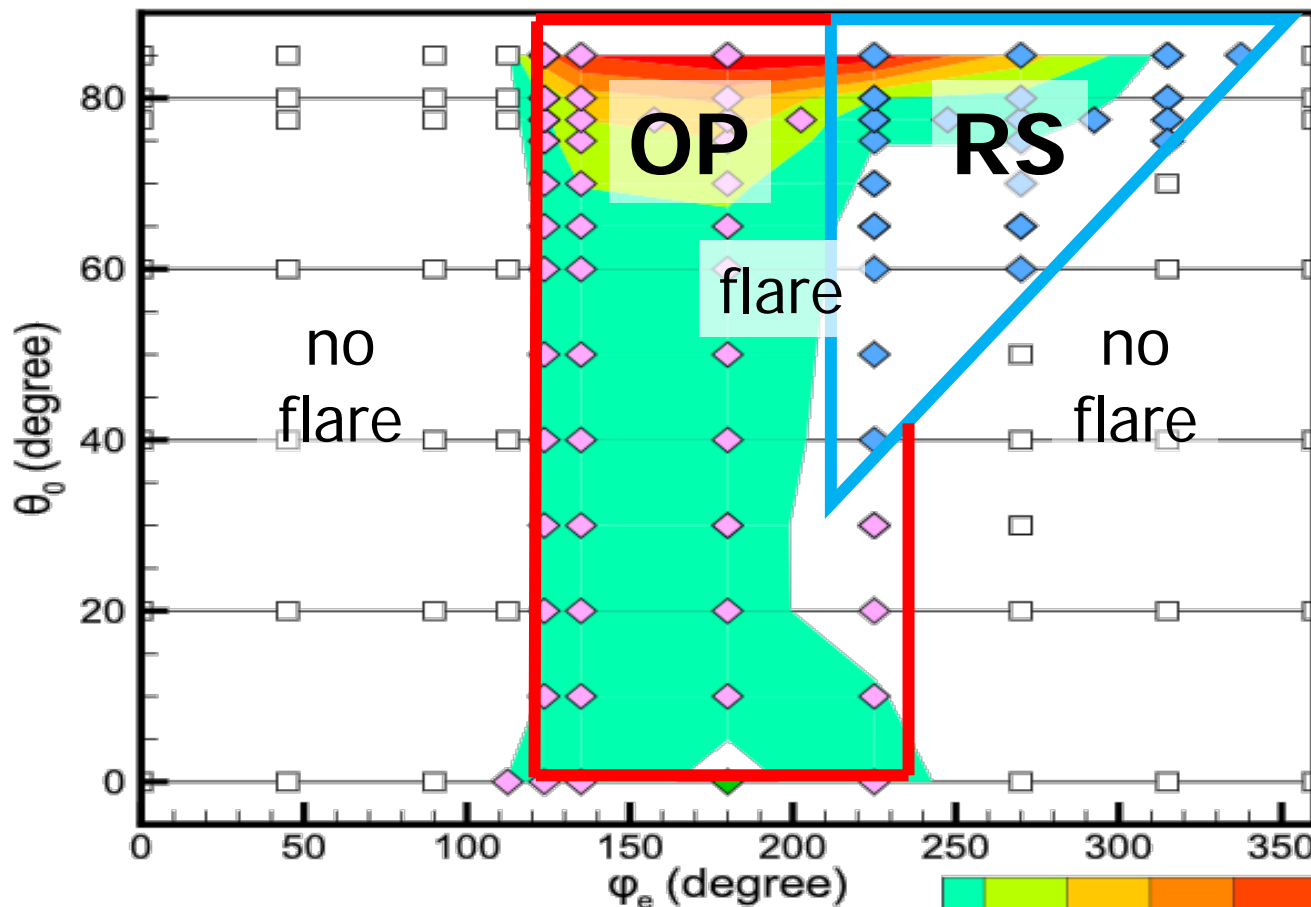


Right Polarity

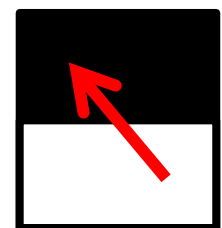




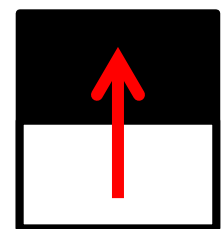
# Flare Phase Diagram



strong shear

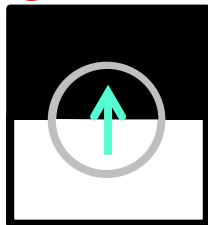


weak shear



potential field

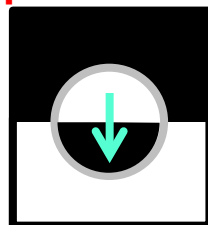
Right Polarity



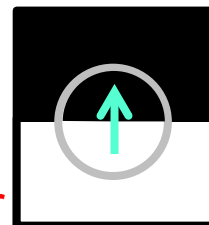
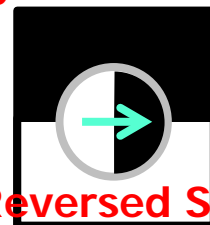
Opposite Polarity



Normal Shear



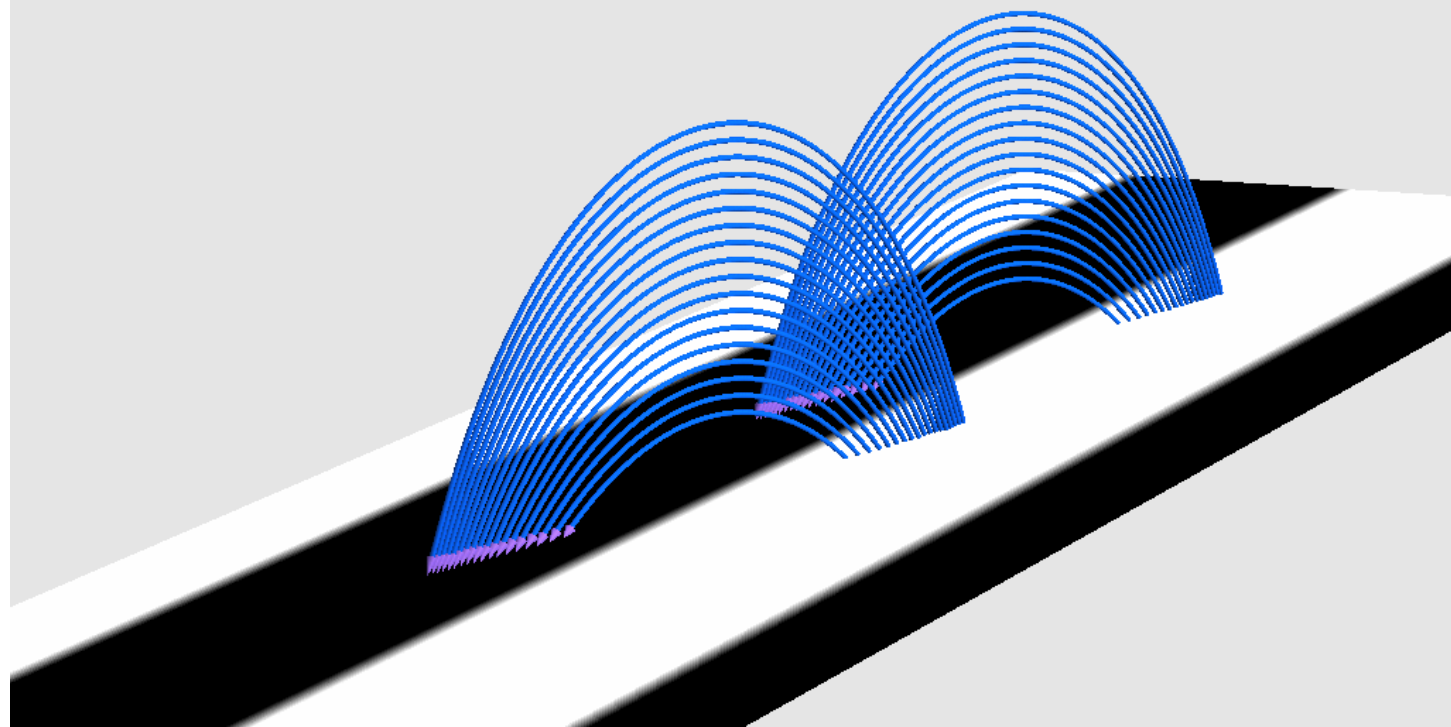
Reversed Shear



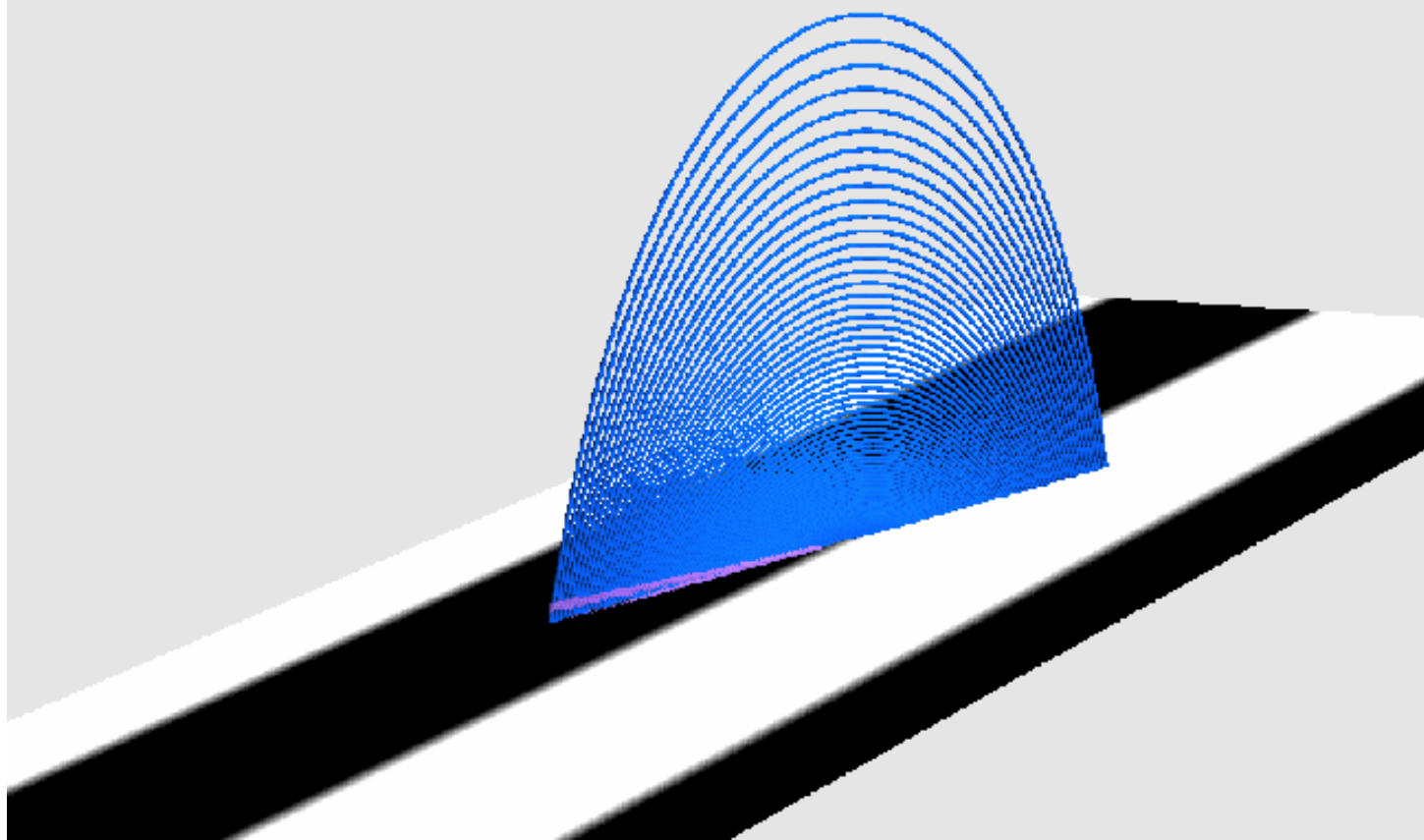
$E_k$  0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 ( $\times 10^{-2}$ )



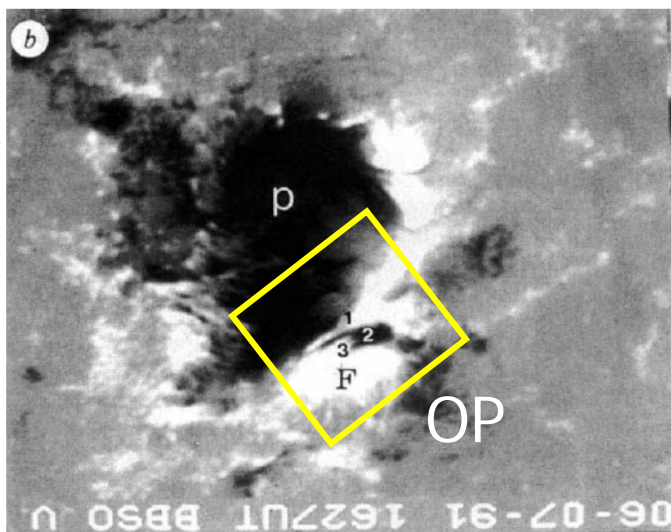
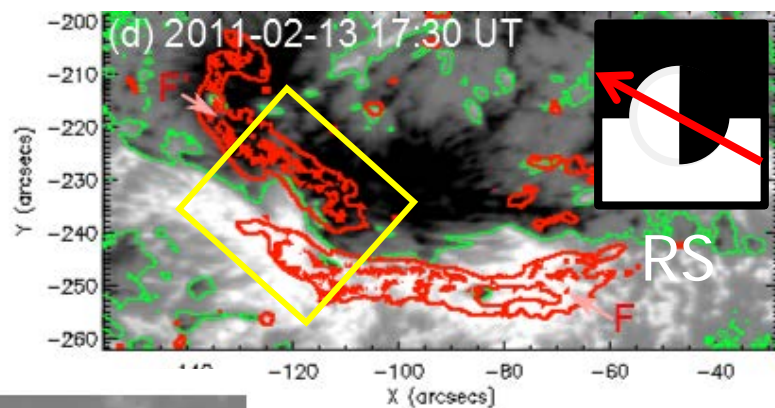
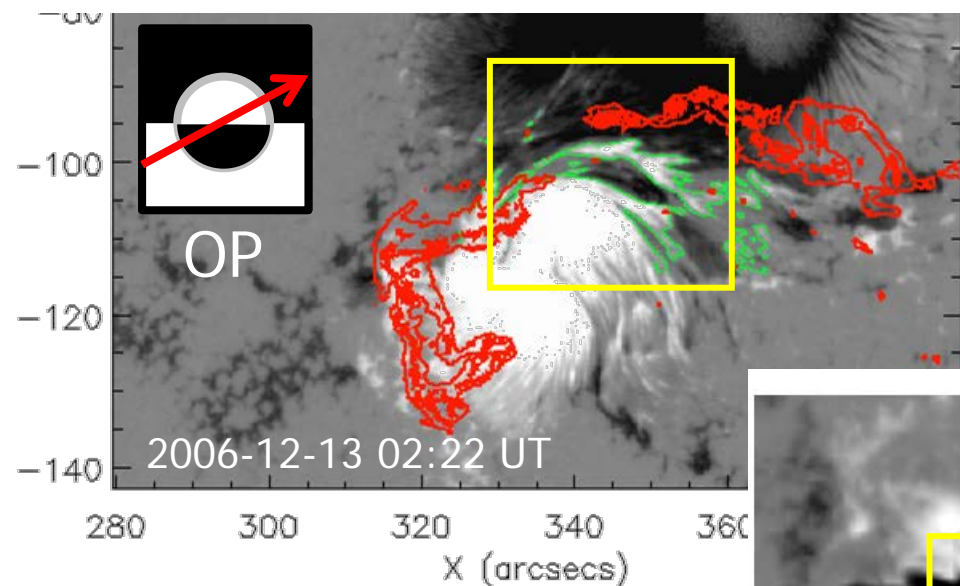
# 反極性型 (OP-type)



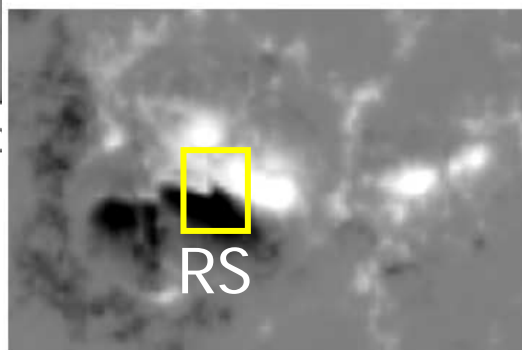
# 逆磁場型 (RS-type)



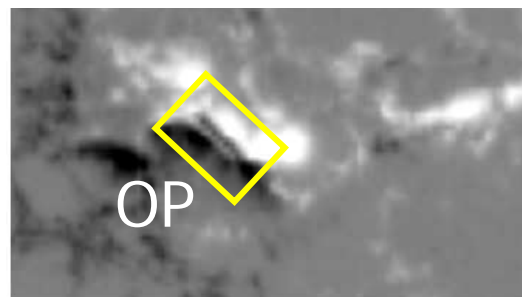
# 觀測的檢証



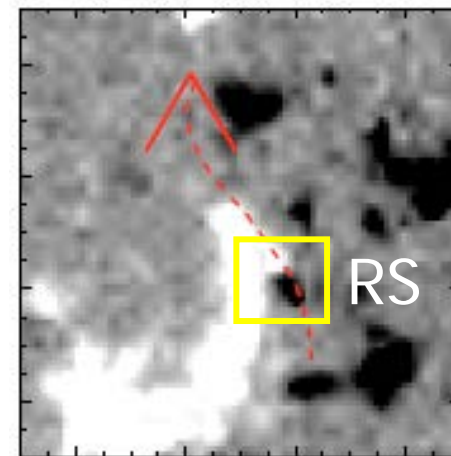
Zirin and Wang 1993



00-Jun-06 12:51:30

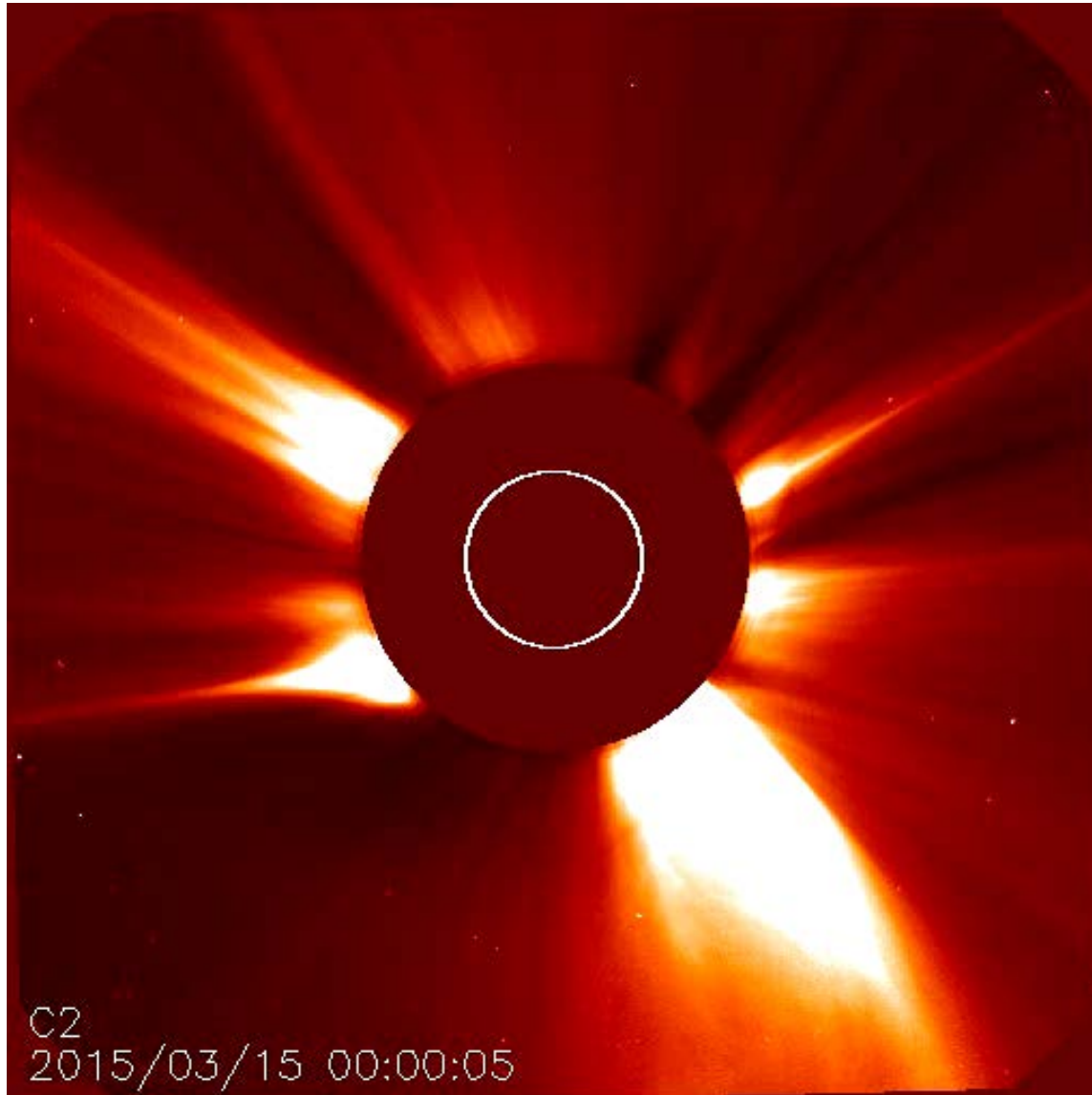


00-Jun-07 14:24:36  
Kurokawa, Wang & Ishii 2002



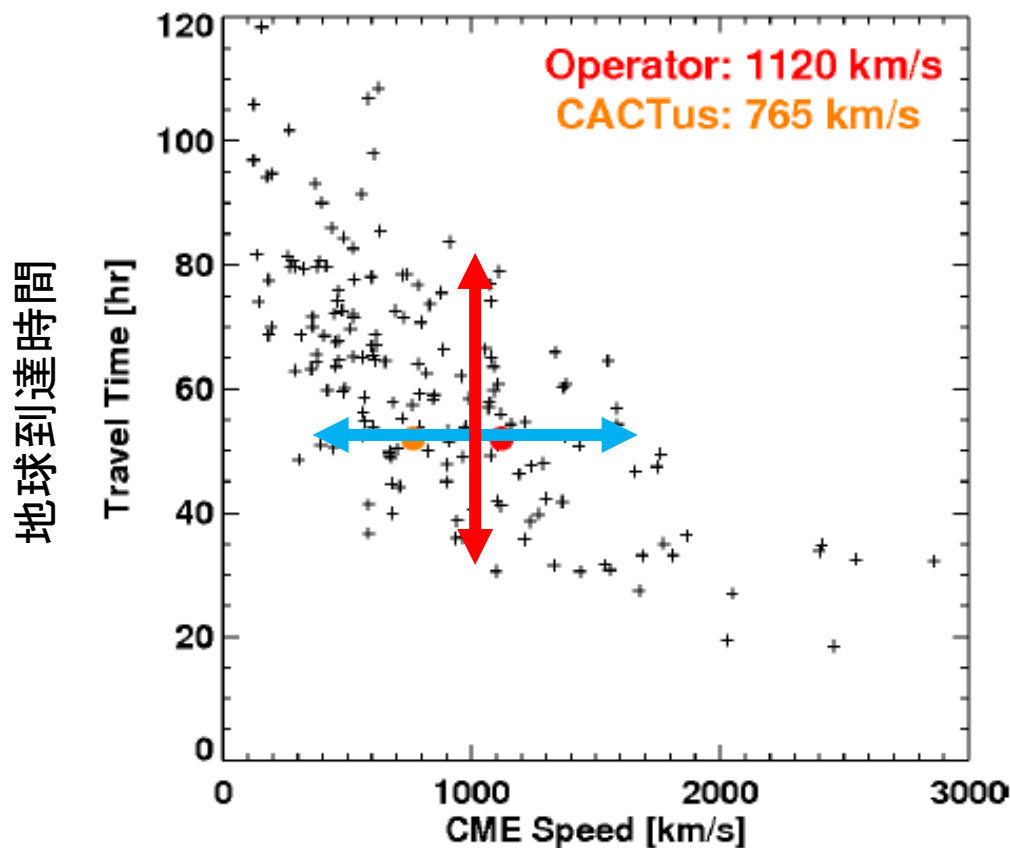
Green, Kliem & Wallace 2011

# コロナ質量放出の衛星観測



# CMEの初速度と地球到達時間

- CMEの地球到達時間の経験予測は±20時間の誤差を伴う。



コロナグラフから得られたCME速度の推定値



# CMEモデルの現状と課題

## 現状

- WSA - ENLIL + Cone model (速度パルス)  
@SWPC/NOAA

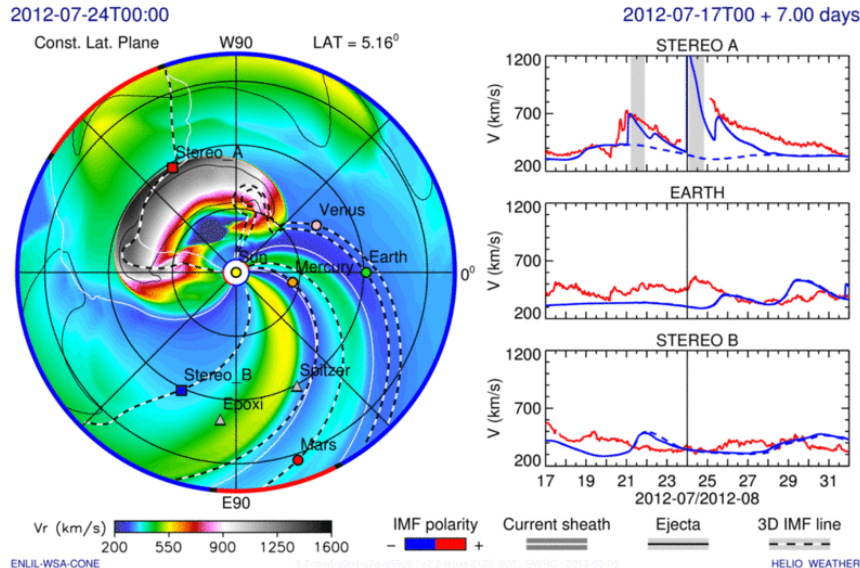
## 課題

- CMEに磁場が入っていない
- 太陽近傍を解いていない
- フレア・フィラメント放出との関係

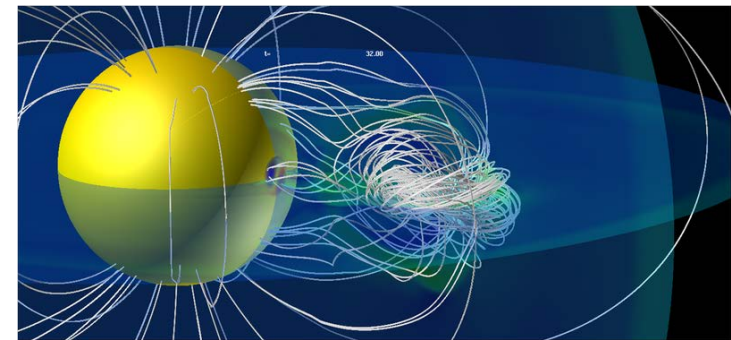
## 目標

- SUSANOO太陽風に磁束管込み  
CMEを入射するモデル開発中
- CME磁束管をコロナの観測から  
決める経験モデルの構築

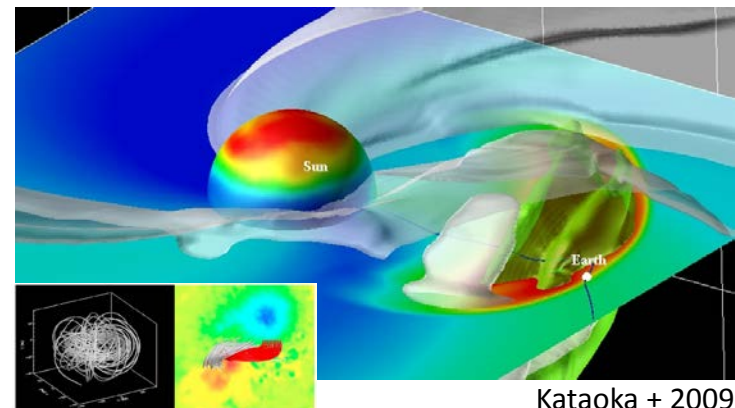
## WSA - ENLIL + Cone model



<http://www.swpc.noaa.gov/products/wsa-enlil-solar-wind-prediction>



Shiota + 2010



Kataoka + 2009

# 現状と展望

- フレアの基本メカニズムは解かれつつあるが、発現時間と規模の正確な予測は開発途上
  - 様々な経験的フレア予測が試されているが、いずれも成功率(Xクラス、1日予測)は0.5程度
  - ベクトル磁場に基づく最適パラメターの探索が始まりつつある。
- 複数の研究戦略を共に進める必要
  - **数値経験予測**
    - ビッグデータ解析から予測最適パラメターを探る
  - **アンサンブル・シミュレーション**
    - 数値シミュレーションによるパラメタ空間の探索
  - **データ駆動型シミュレーション予測**
    - 同化手法の開発: 3次元コロナ磁場(彩層磁場、フィラメント磁場の観測)、光球面運動(速度測定)

いずれも、今後5年間で急速な成長を期待できる。

・計算機  
・アルゴリズム  
・観測  
サイクル24極大期

新学術領域研究  
プロジェクトへの期待