

理系大学生のための
太陽研究最前線体験ツアー
2016年3月31日

宇宙天気と宇宙気候 太陽活動を予測する

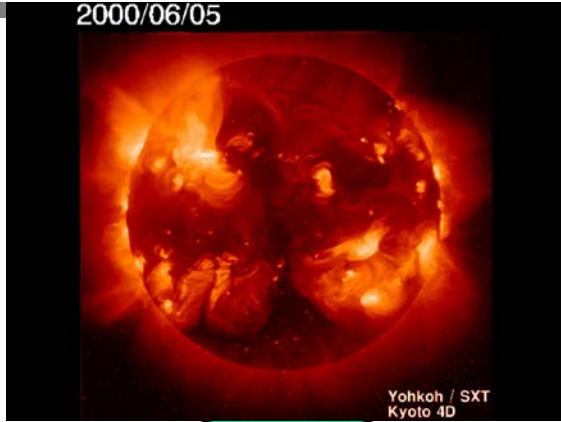
名古屋大学宇宙地球環境研究所
名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻
太陽宇宙環境物理学(SST)研究室

草野完也

包括的な太陽圏システムの変動

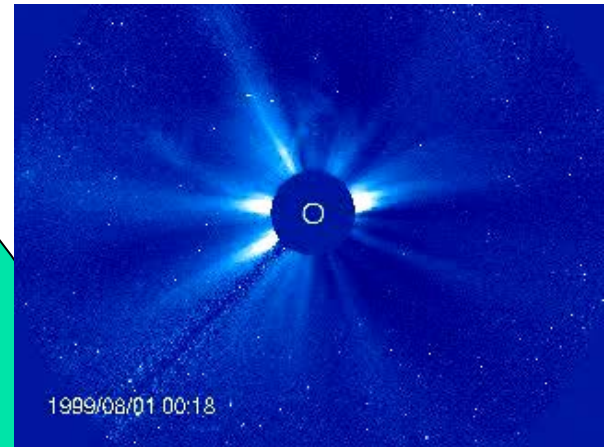
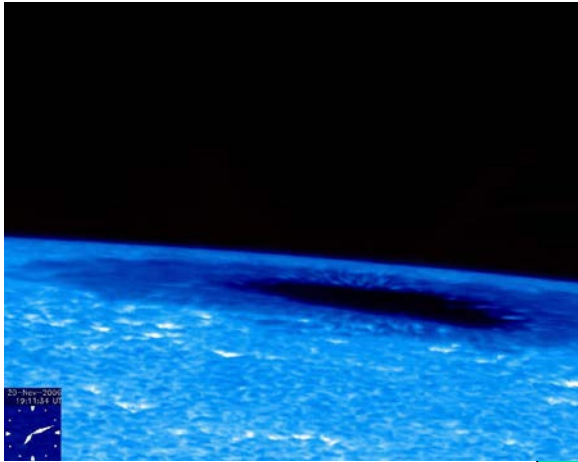
①宇宙天気研究
短期的な宇宙環境変動
数分～数十日

2000/06/05

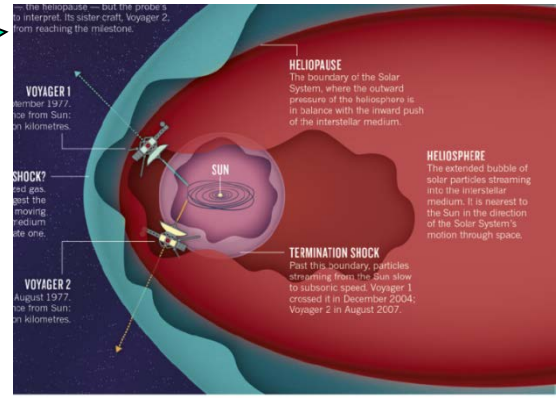
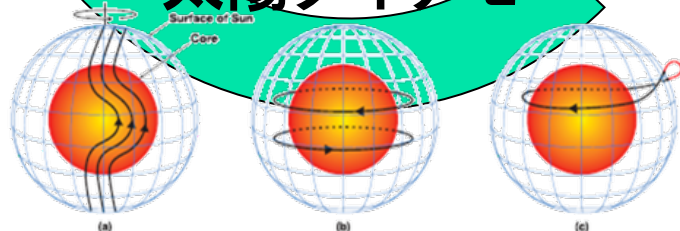
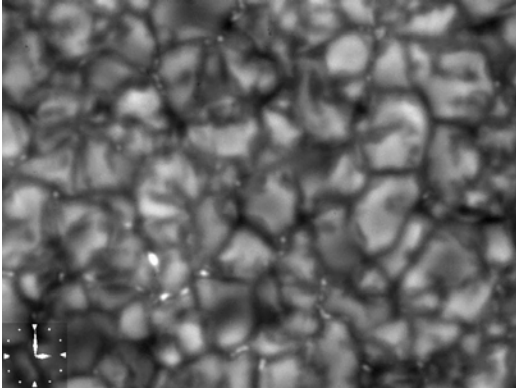
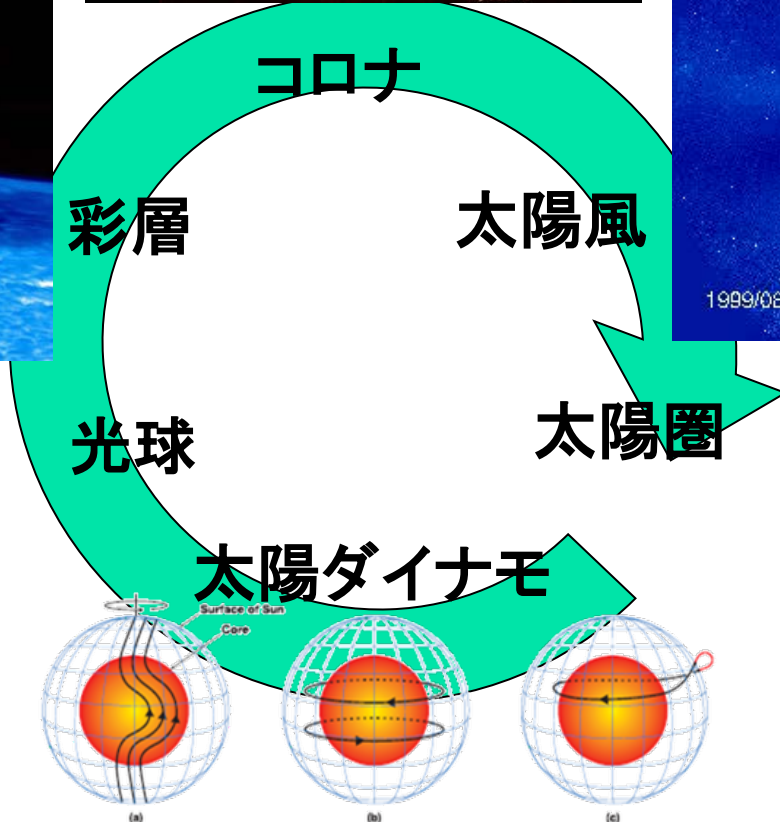


Yohkoh / SXT
Kyoto 4D

②宇宙気候研究
長期的な宇宙環境変動
数か月～数十億年



1999/08/01 00:18



宇宙天気と宇宙気候

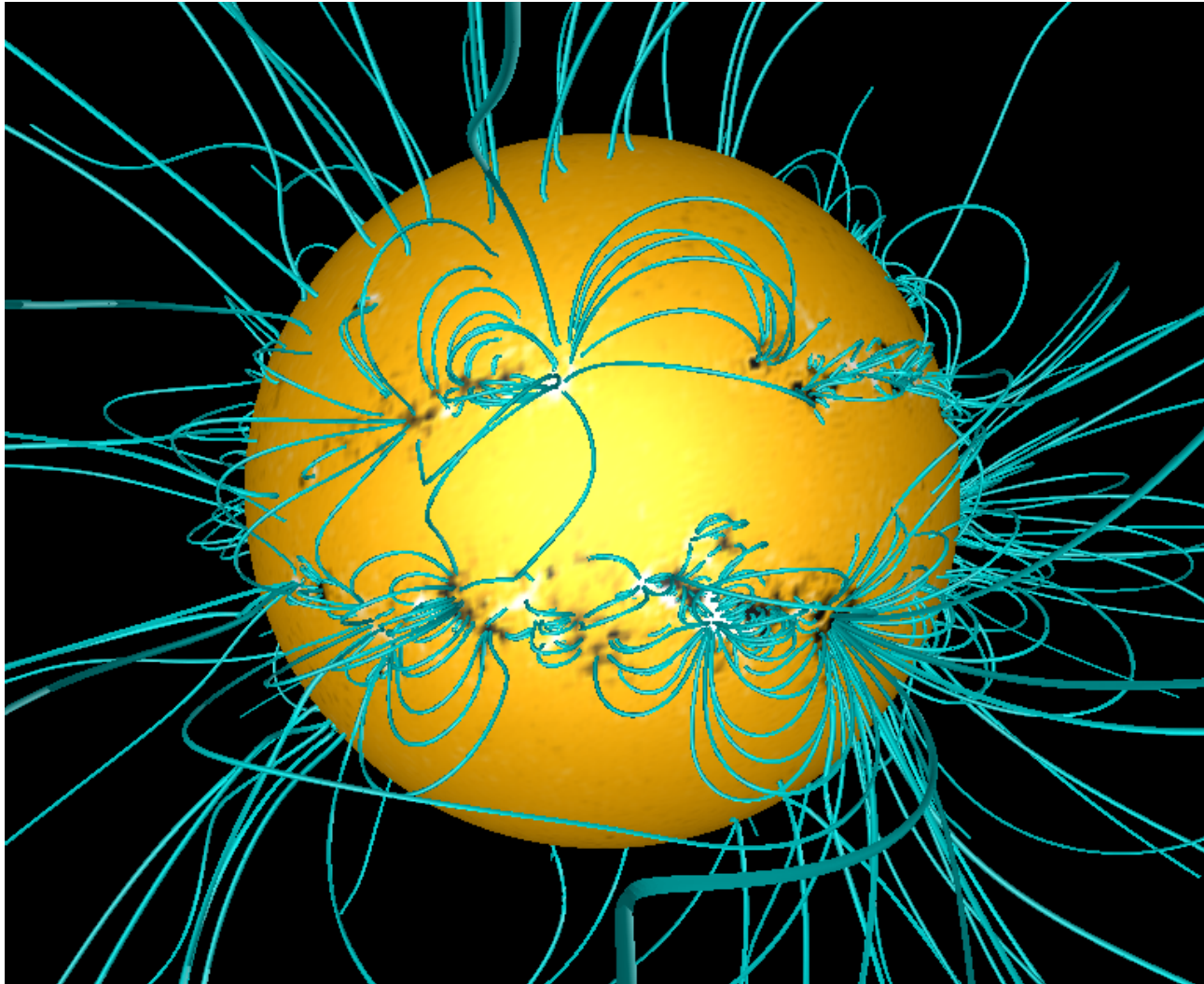
■ 宇宙天気 (Space Weather)

- 短期的な太陽活動(特に、フレア及びコロナ質量放出)に伴って発生する地球と地球周辺宇宙空間の環境変動
- オーロラ嵐、磁気嵐、デリンジャー現象、プロトンイベントなど

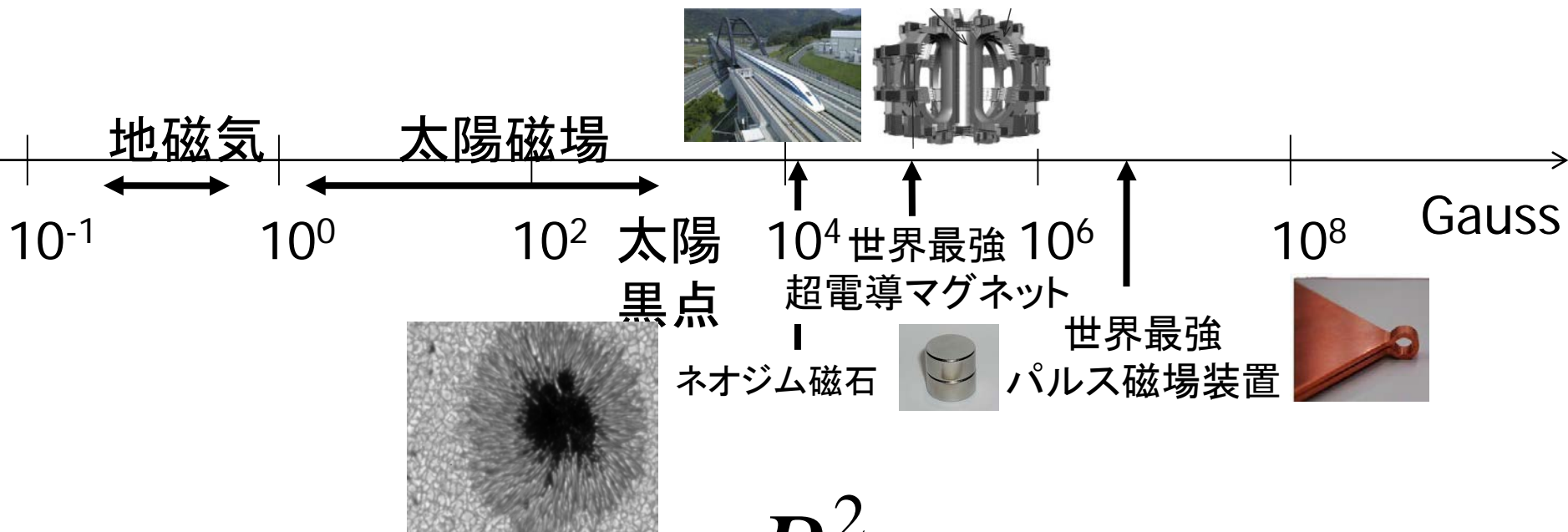
■ 宇宙気候 (Space Climate)

- 長期的な太陽活動の変化(黒点周期やその変動)に伴って発生する地球と地球周辺宇宙空間の環境変動
- 気候変動、大気成分変化、大気散逸など

太陽コロナ磁場



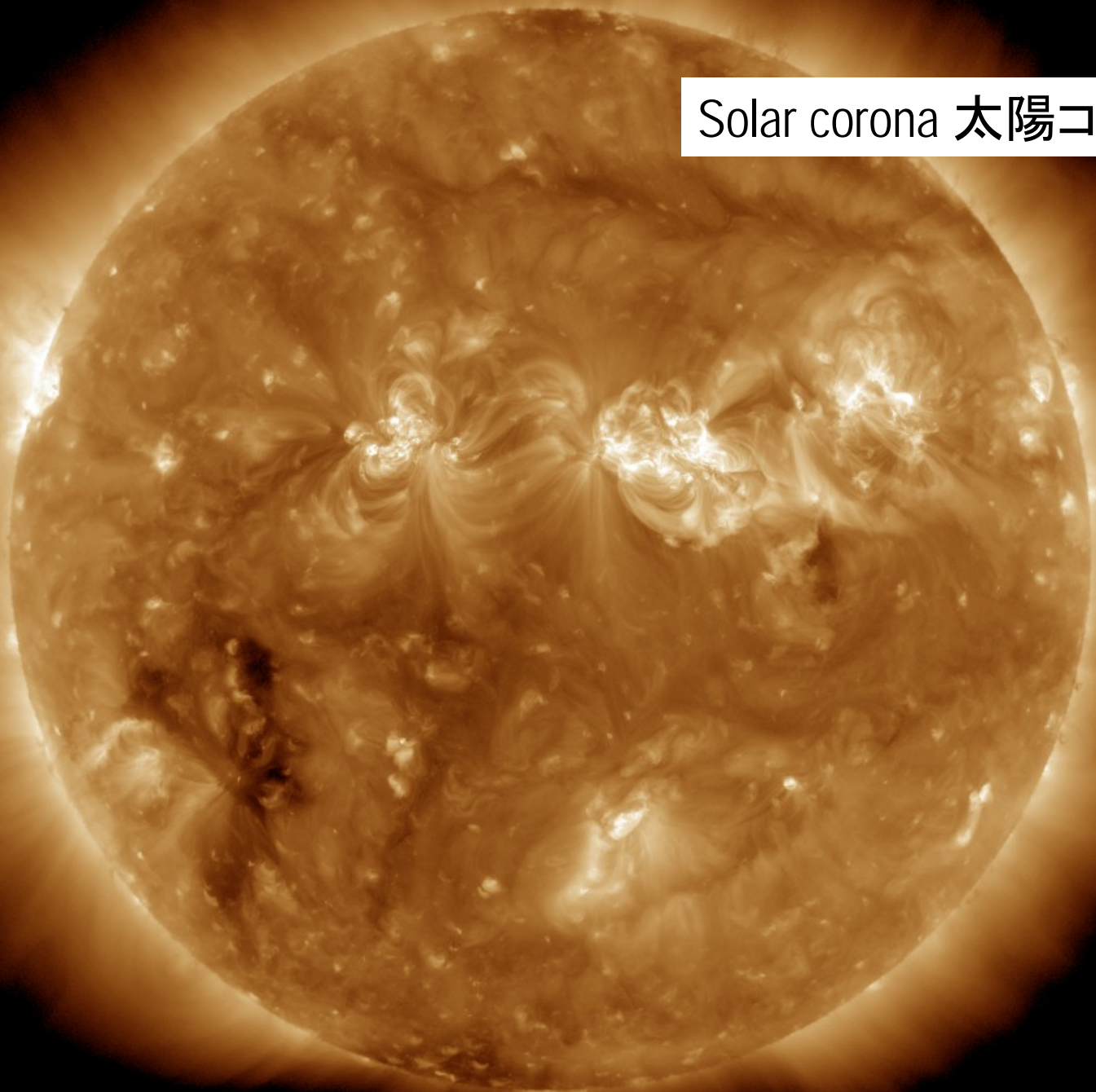
磁場の強度とエネルギー



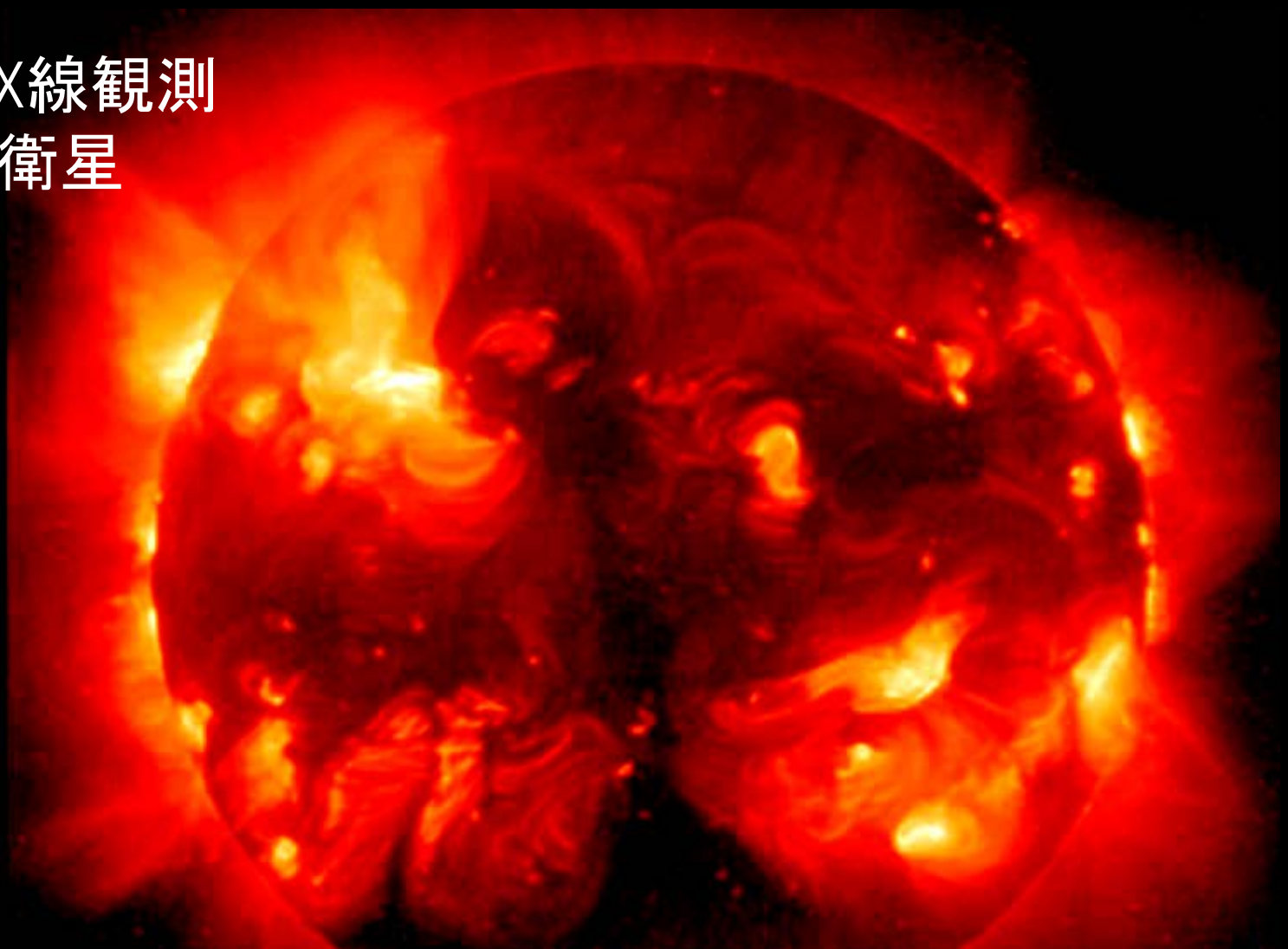
$$E = \frac{B^2}{2\mu_0} L^3$$

黒点磁場のエネルギー～10^{25~26}J

Solar corona 太陽コロナ

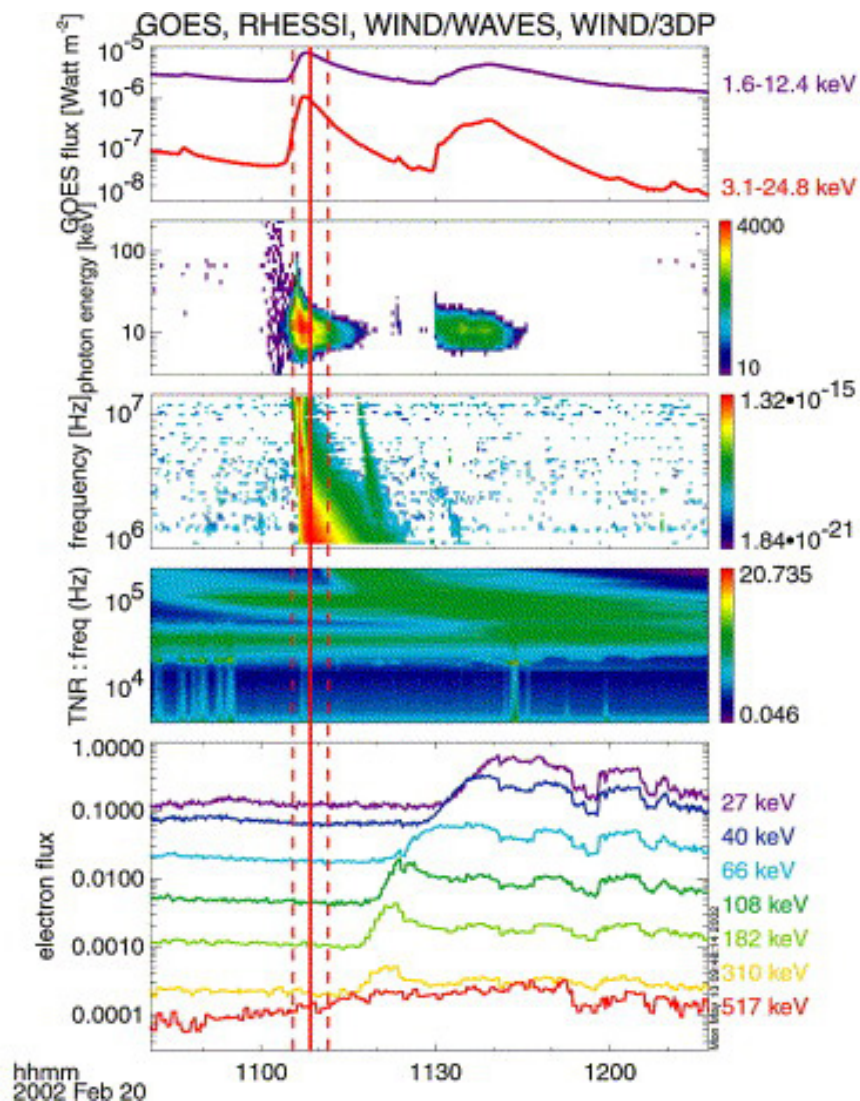


太陽のX線観測 ようこう衛星



太陽フレア: 太陽系最大の爆発現象
水爆(TNT換算1メガトン級)1億個分のエネルギー

フレアに伴うX線、電波、電子流束



太陽地球圏の環境変動

発生

伝播

影響

爆発現象

太陽

長期変動

高エネルギー粒子

太陽風(高速プラズマ流)

太陽放射(VIS, UV, EUV, X)

宇宙放射線

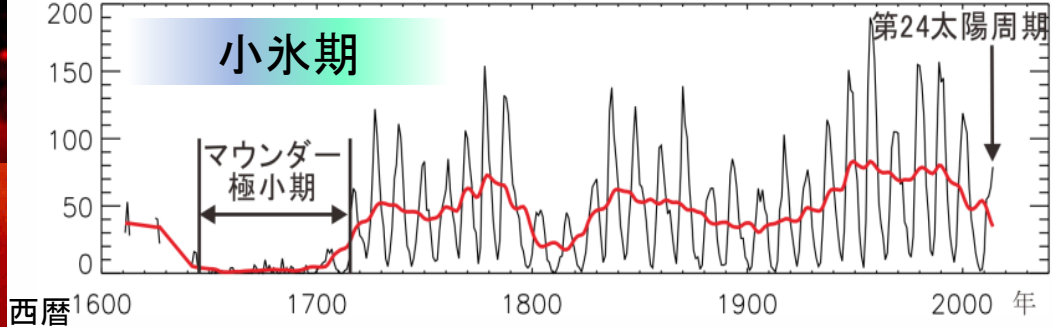
磁気嵐

地球

電離圏嵐

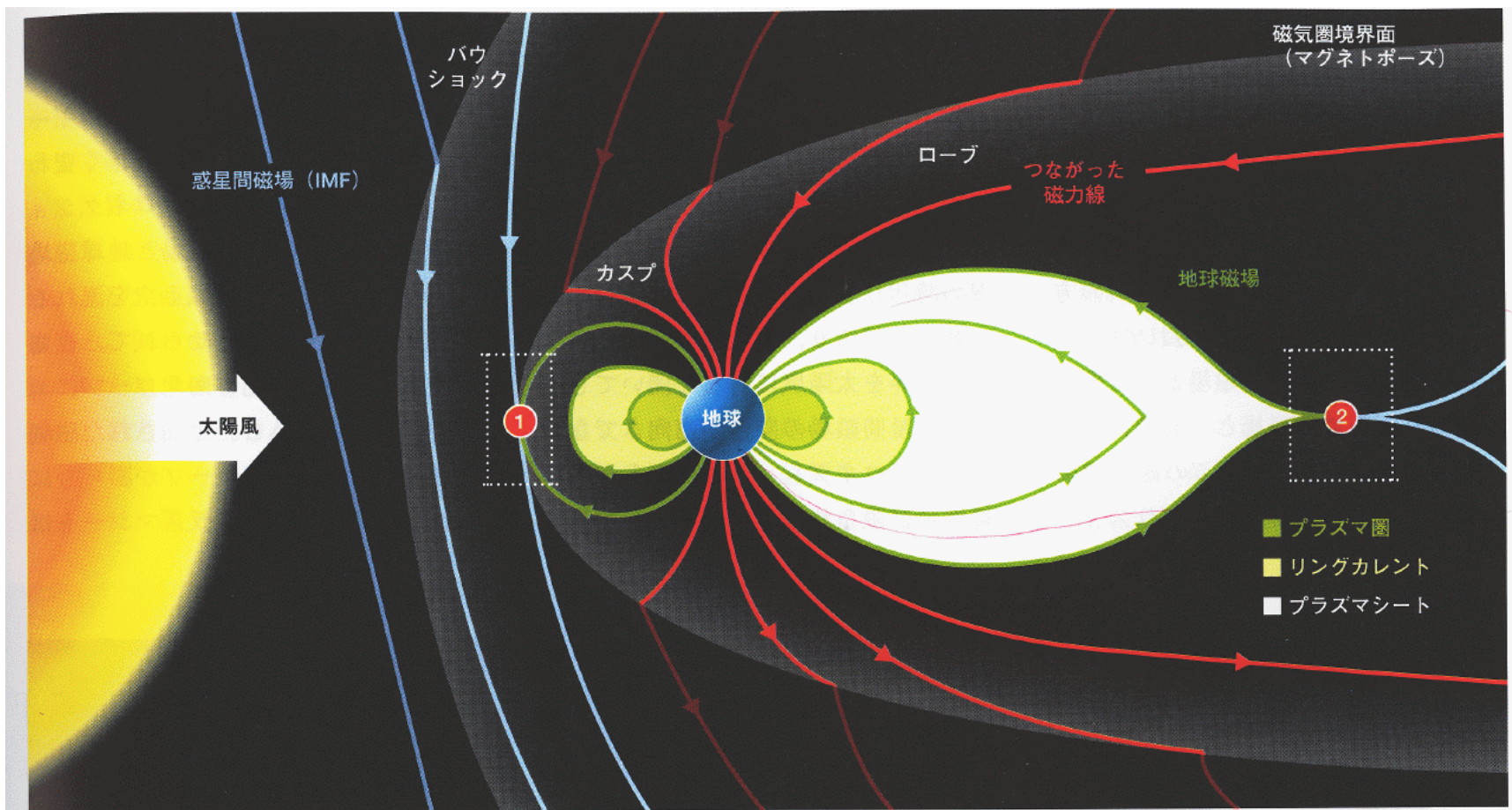
気候変動

黒点相対数 過去400年間の太陽黒点数変化



太陽コロナのX線観測
(ようこう衛星)

太陽地球結合系



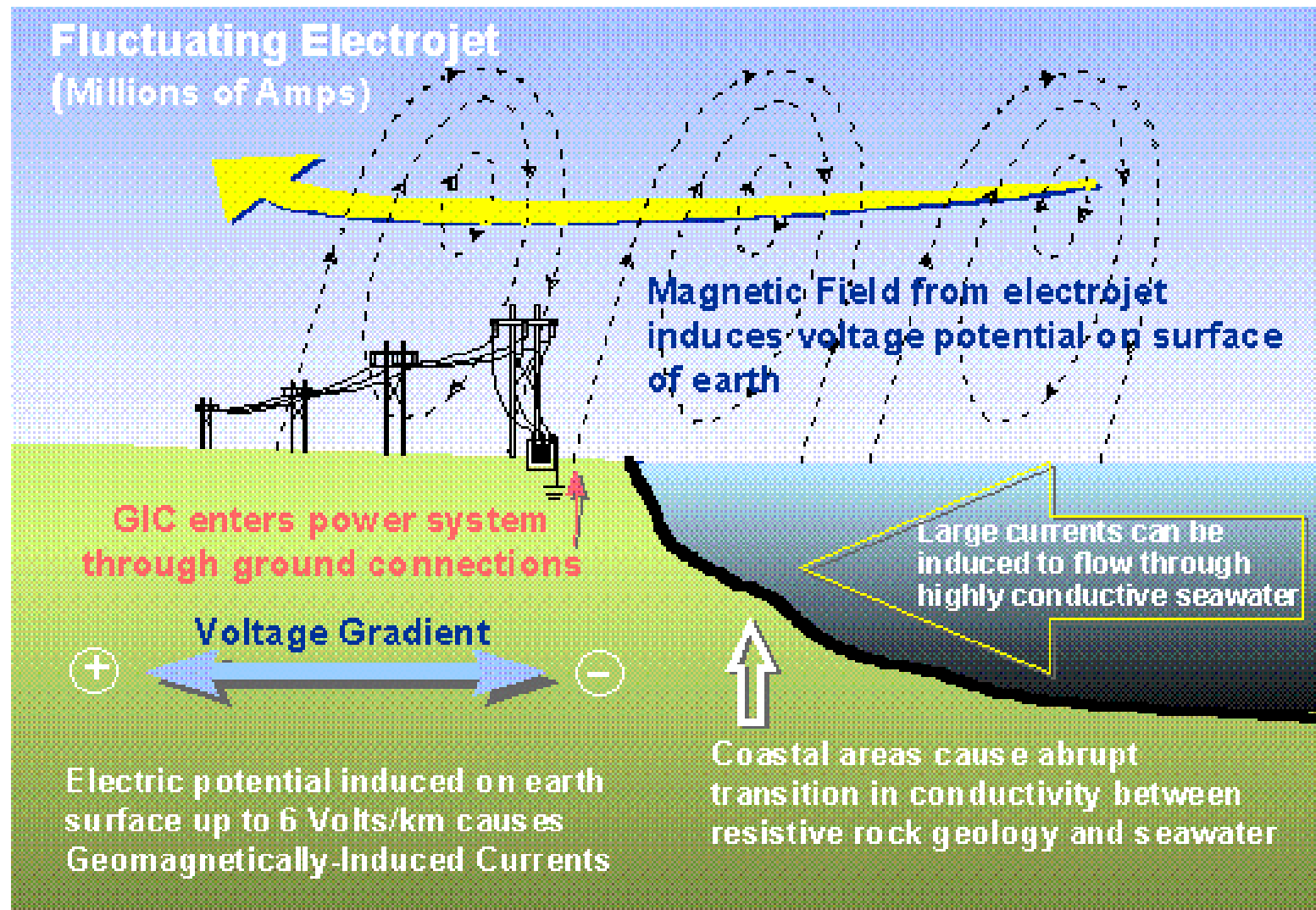
磁気圏の擾乱 太陽風に運ばれてきた惑星間磁場 (IMF) が南向きになると磁気圏の擾乱 (じょうらん) が起こる。磁気リコネクション (訳者ノート3) と呼ぶ過程で、惑星間磁場の磁力線は地球の昼側で北向きの地球磁場

とつながる (1)。太陽風のエネルギーと粒子は磁気圏に侵入し、南北ローブを拡大しプラズマシートを薄くする。その時、地球磁場の磁力線はそれ自体の間でリコネクションを起こし (2)、イオンと電子を地球方向に加速する。



<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Po>

Fluctuating Electrojet (Millions of Amps)



宇宙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

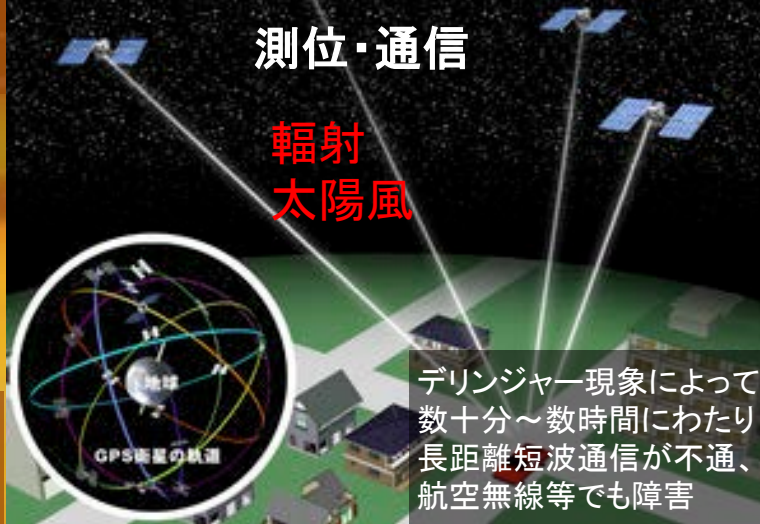
粒子



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
太陽風



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。

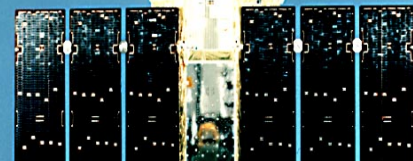
太陽風

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



衛星障害・軌道影響

気候影響

粒子
放射
太陽風



「凍るテムズ川 (1677)」

http://en.wikipedia.org/wiki/File:The_Frozen_Thames_1677.jpg

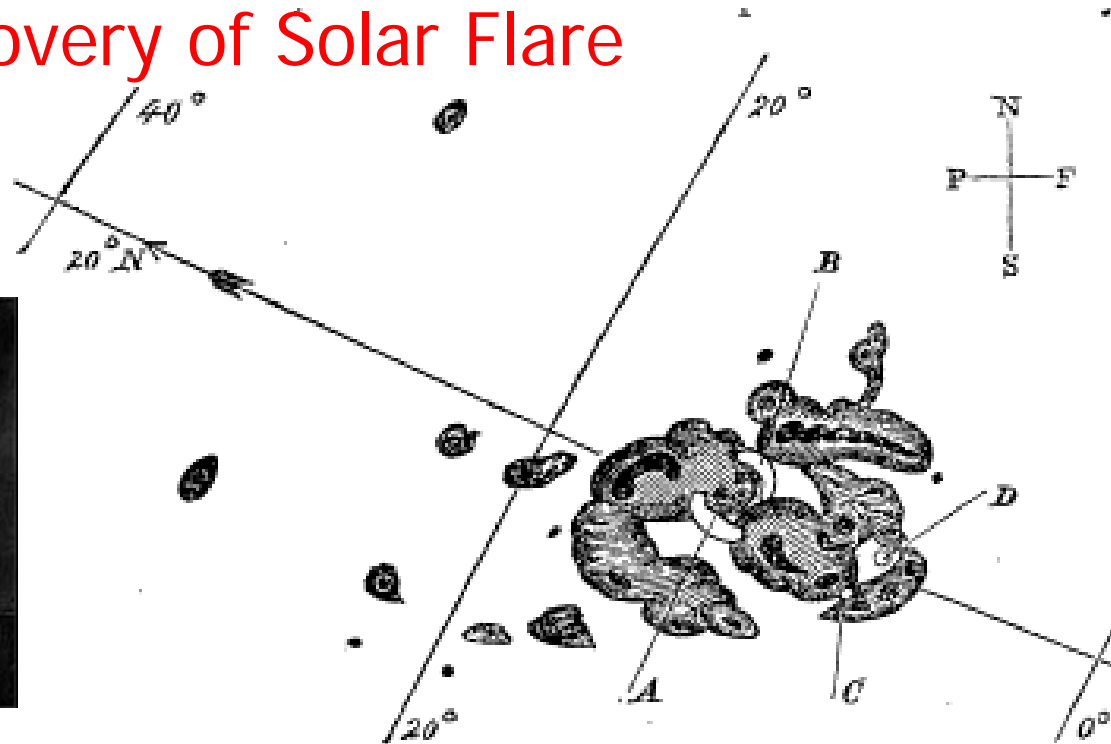
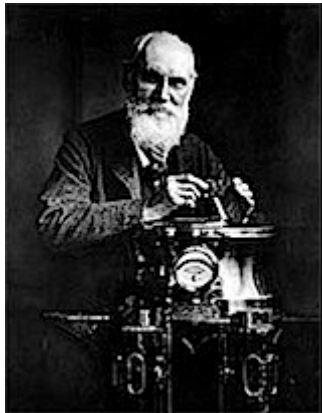
地磁気誘導電流による電力網障害と停電

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

Carrington's Flare (1859, Sep 1)

- Richard C. Carrington

Discovery of Solar Flare



first impression was that by some chance a ray of light had penetrated a hole in the screen attached to the object-glass, by

Carrington, R.C.: 1859, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 20, 13.

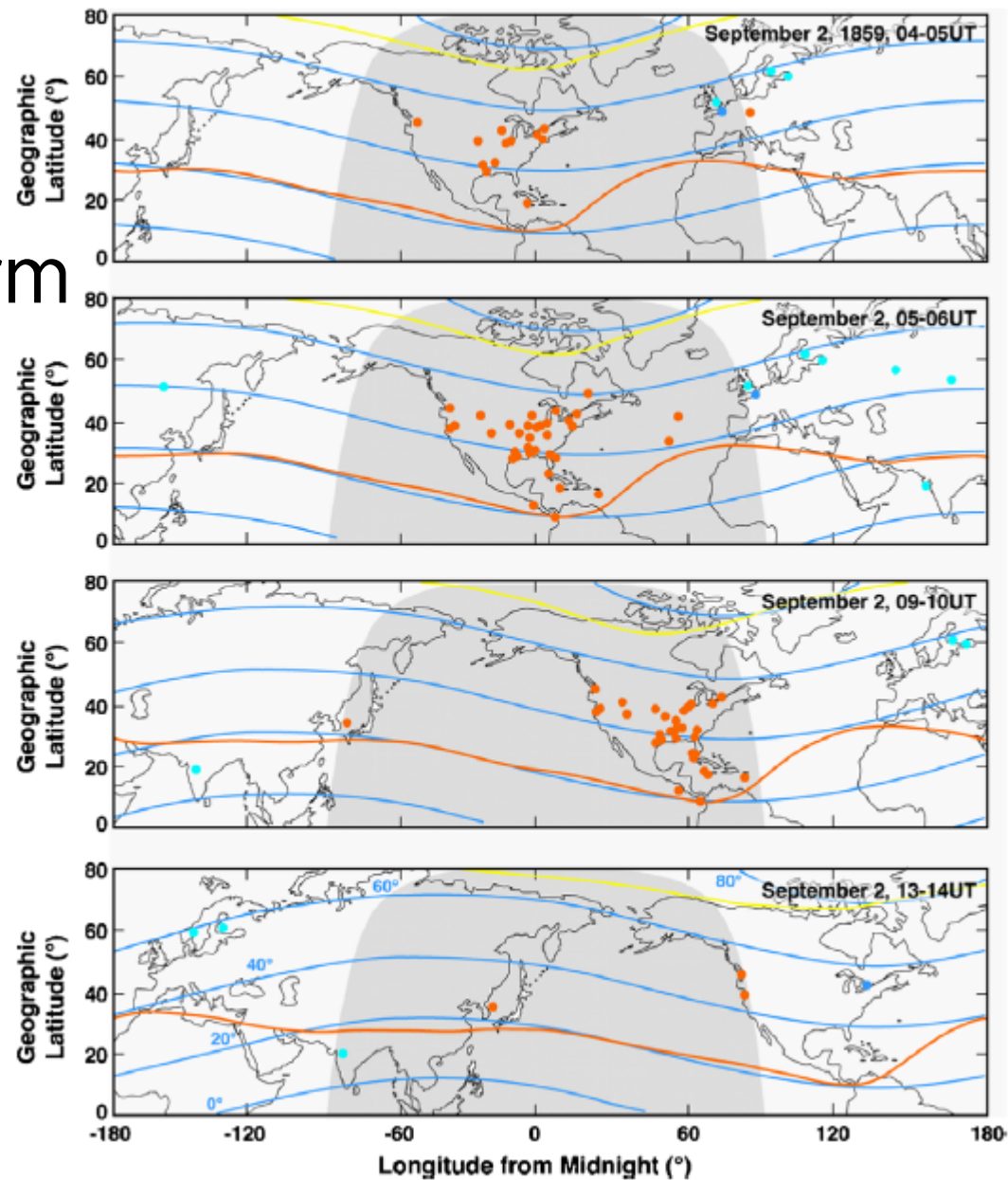
Carrington's Events

■ Giant magnetic storm

- active Aurora
- 磁気嵐の指数
Dst~1600nT

日本でも弘前(青森)、平鹿(秋田)、印南、新宮(和歌山)でオーロラが見えた記録がある。

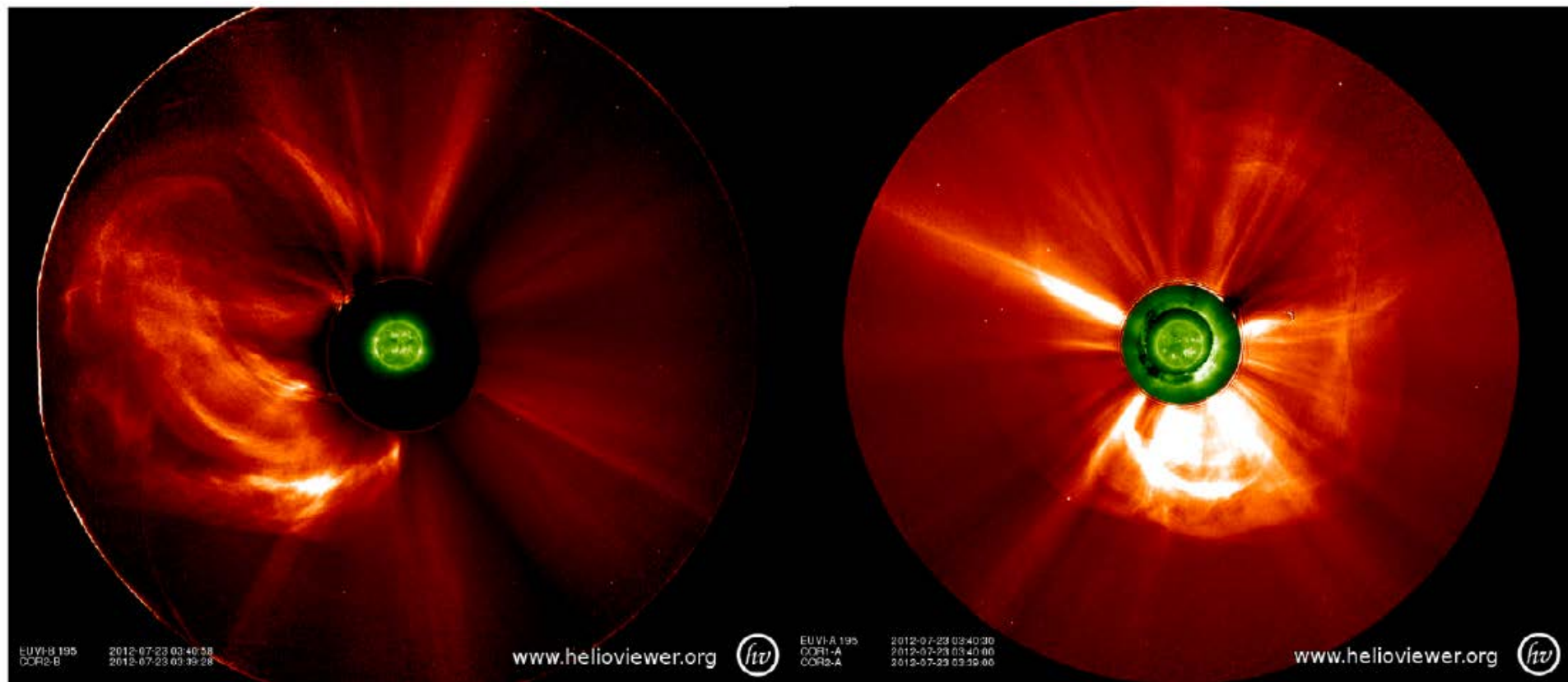
早川尚志(京都大学)



Green, J.L., Boardsen, S., Odenwald, S., Humble, J., and Pazamickas, K.A.: 2006, *Advances in Space Research* 38, 145. (Elsevierより、許可を得て転載)

Giant Coronal Mass Ejection (CME)

- Baker, D.N., Li, X., Pulkkinen, A., Ngwira, C.M., Mays, M.L., Galvin, A.B., and Simunac, K.D.C.: 2013, Space Weather, 11, 585.



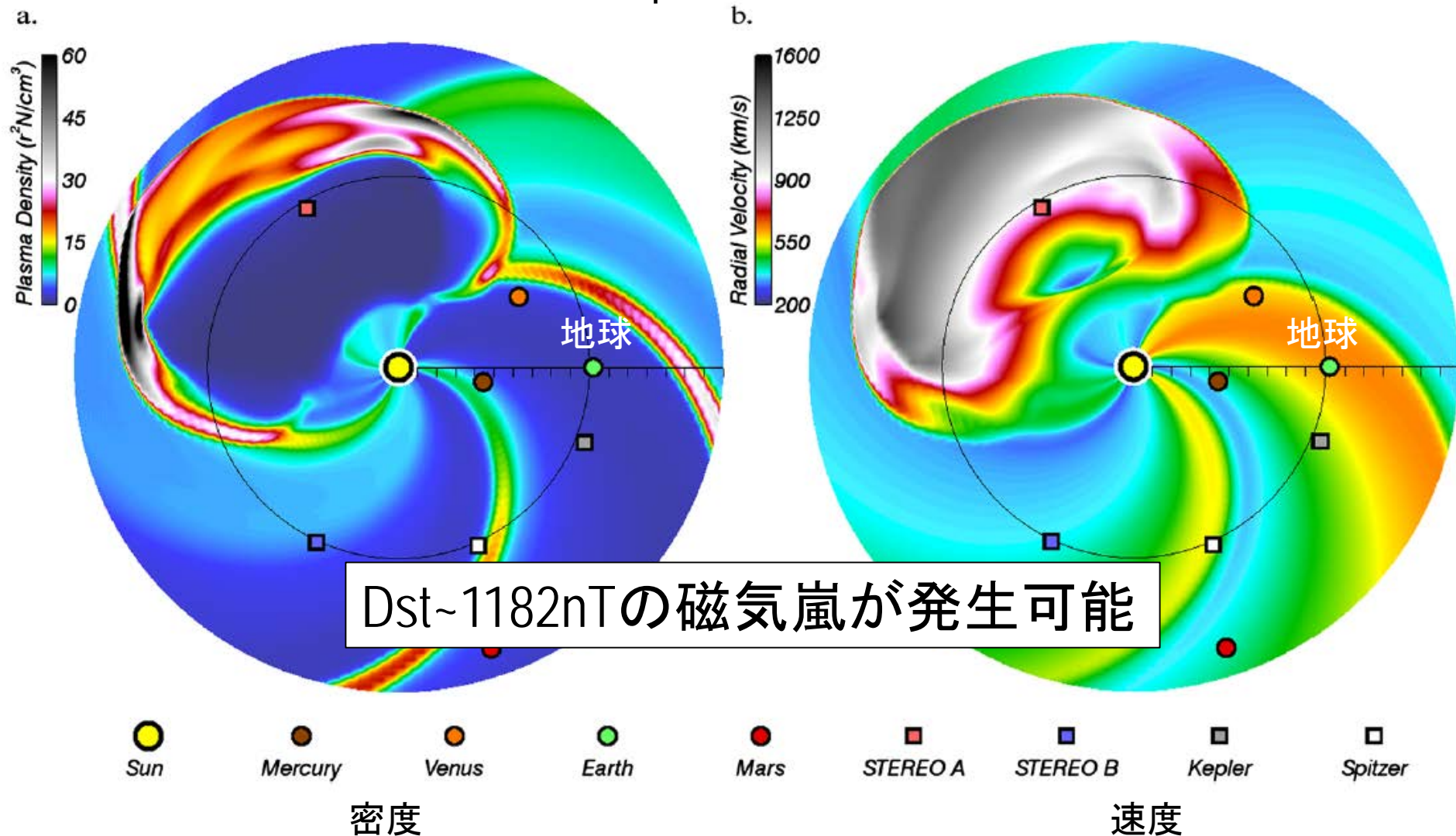
STEREO-B

STEREO-A

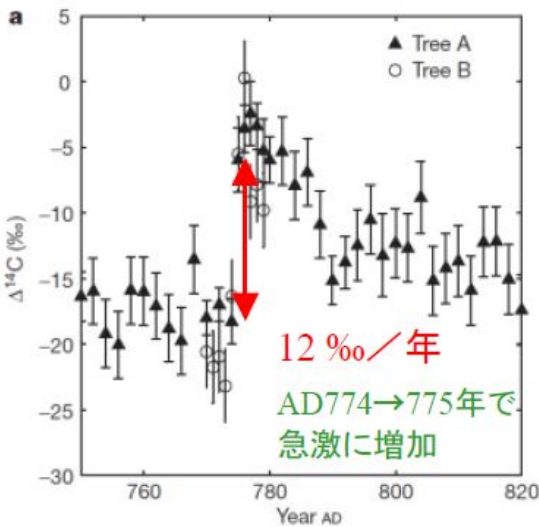
2012年7月23日に巨大CMEが太陽の裏側で発生

MHD Simulation

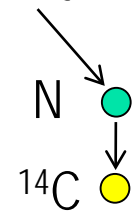
- Baker, D.N., Li, X., Pulkkinen, A., Ngwira, C.M., Mays, M.L., Galvin, A.B., and Simunac, K.D.C.: 2013, Space Weather, 11, 585.



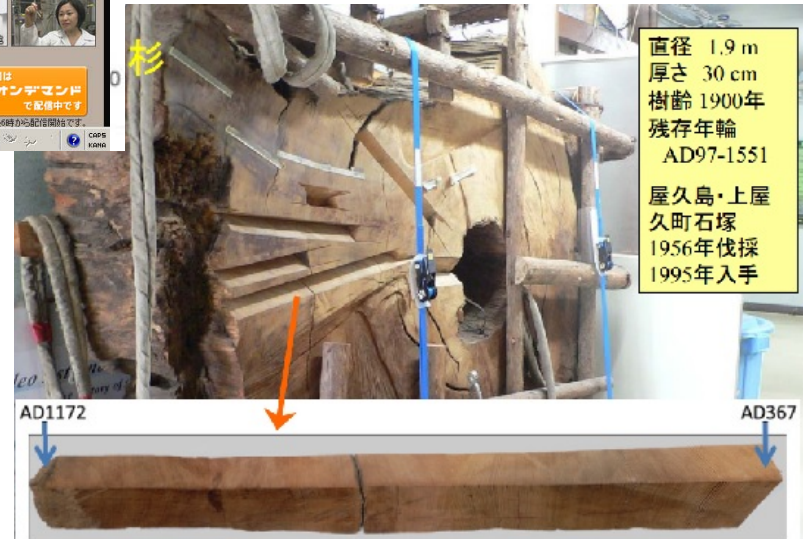
Paleo-cosmic ray study (古宇宙線学) using cosmogenic isotope in tree rings



Cosmic ray



炭素同位体
アイソトープ)



Fusa Miyake, et al., Nature, 486, 240-242 (14 June 2012) A signature of cosmic-ray increase in AD 774–775 from tree rings in Japan
Fusa Miyake, et al., Nature Communications, 4, id. 2747 (7 November 2013)

従来の予測方法 Classification

■ McIntosh classification

Gallagher, Moon, Wang 2002
Sol. Phys.

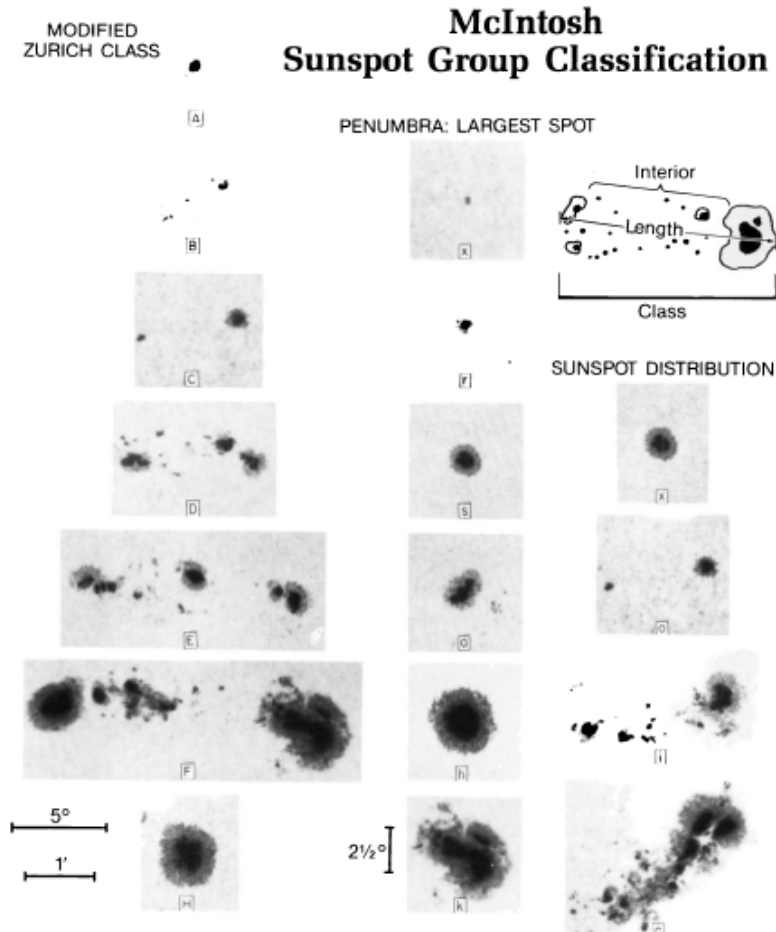


Fig. 1. The 3-component McIntosh classification, with examples of each category.

McIntosh 1990

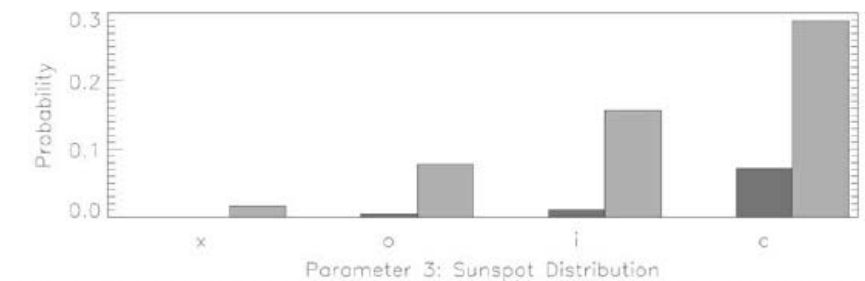
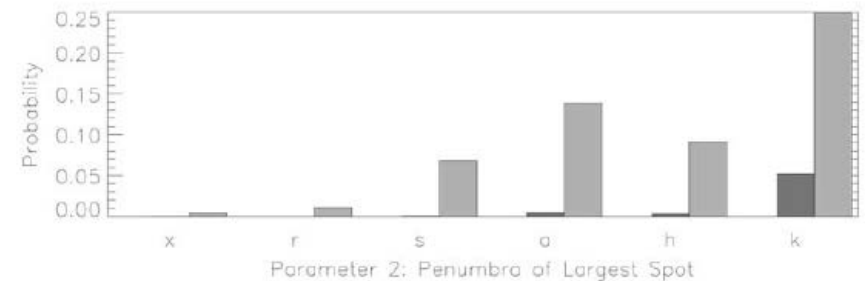
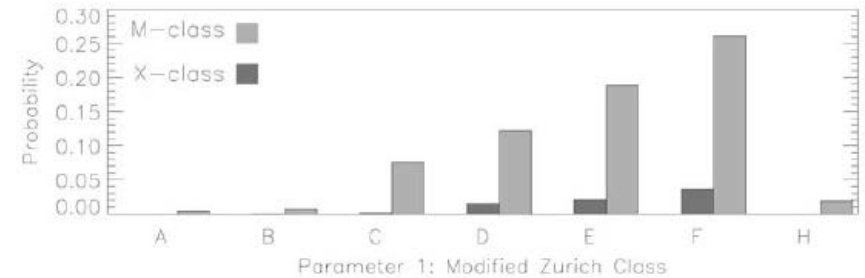
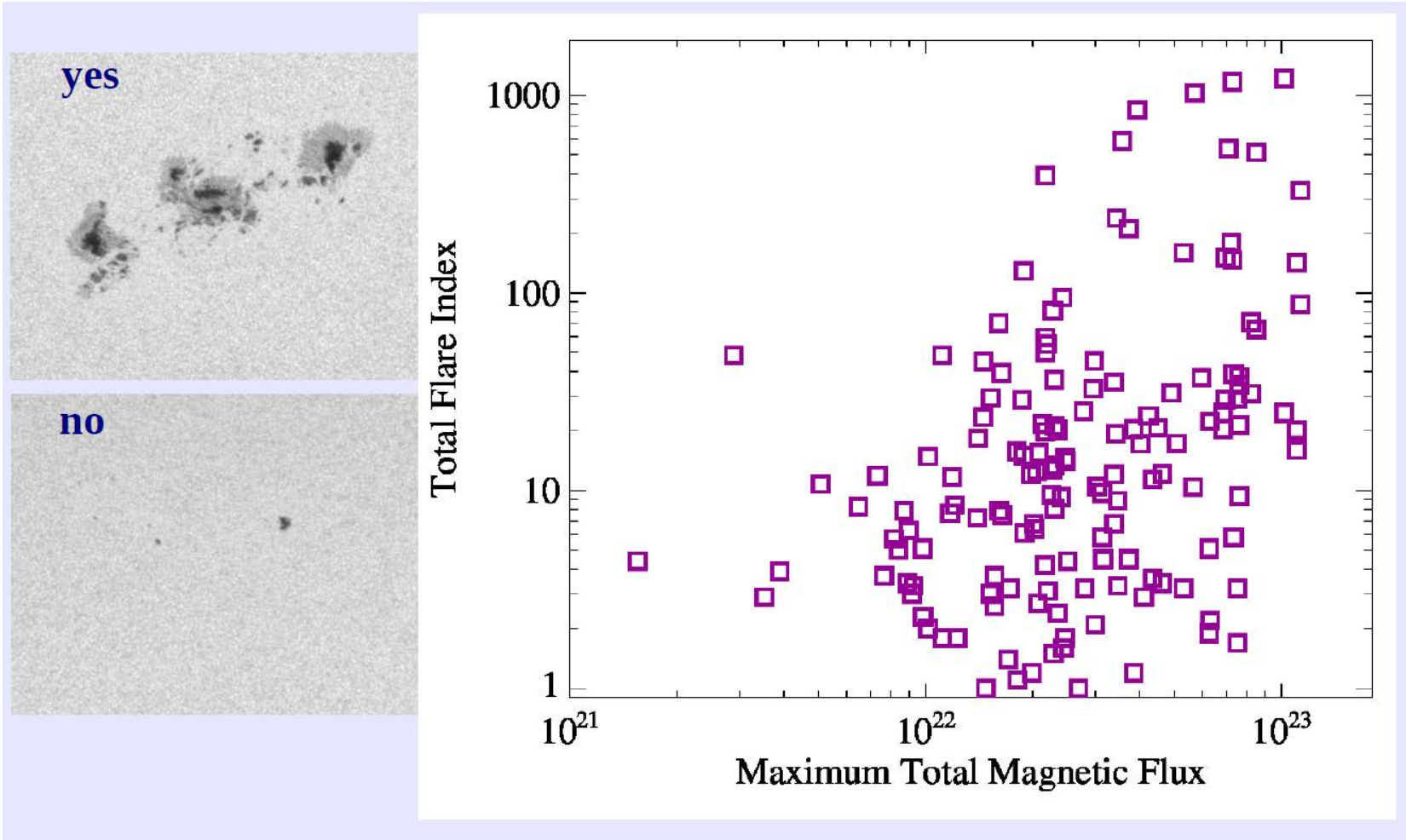


Figure 4. Derived 24-hour active-region flare probabilities for each of the three McIntosh classification parameters using Poisson statistics.

Leka's presentation in PSTEP-1



米国NOAAのフレア予測結果

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

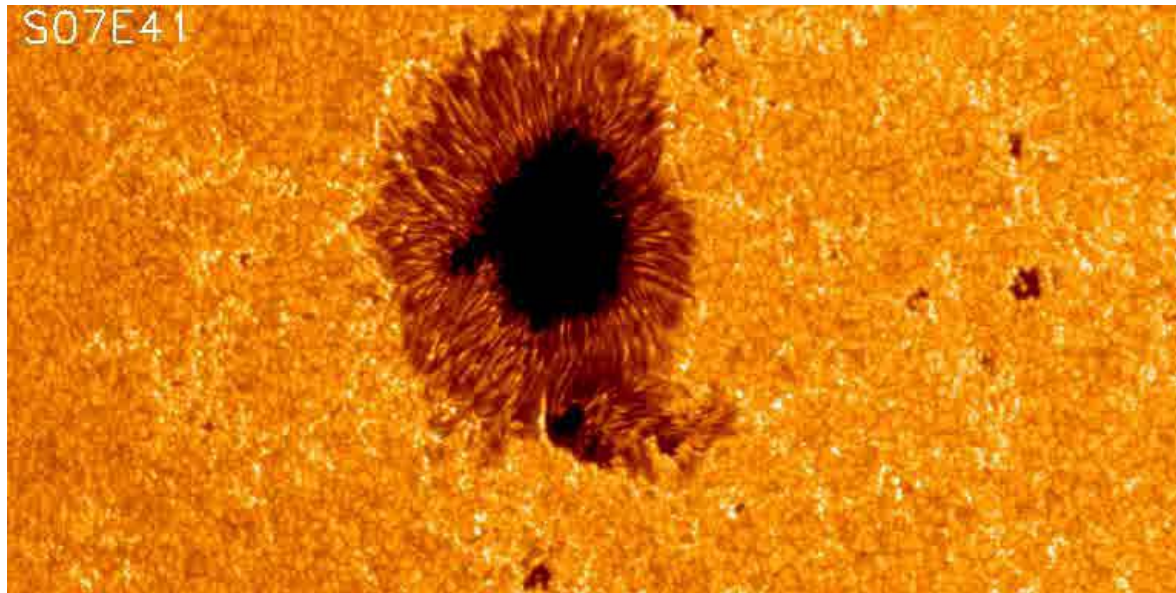
Contingency Table for X-class Flares Prediction with the lead time of one-day

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

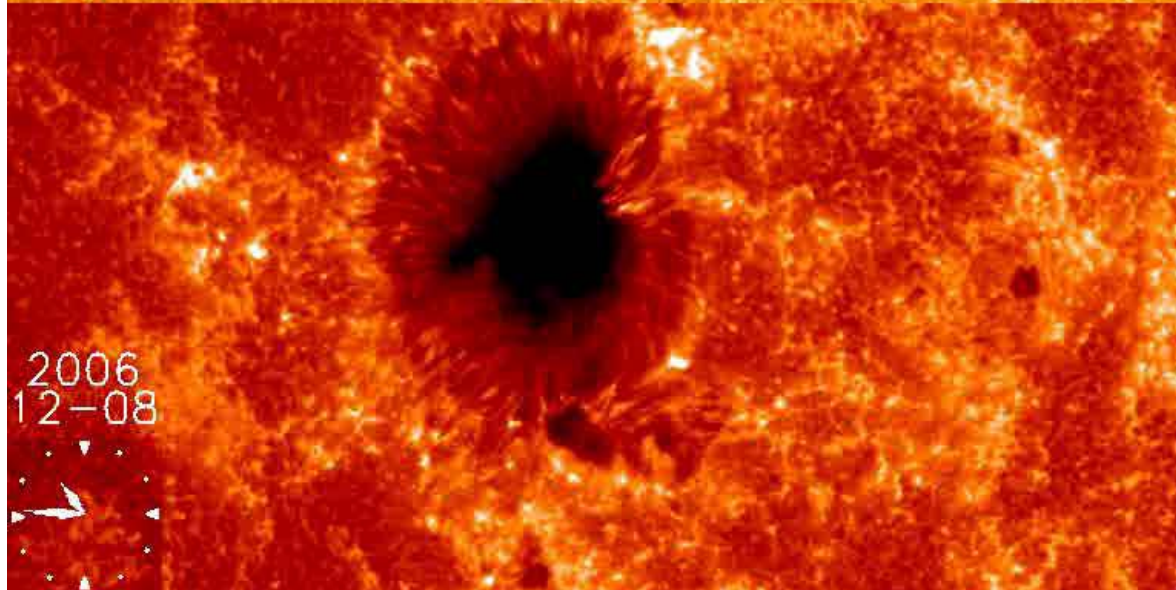
$a/(a+c)$ ~0.49	Skill Score = $(a-b)/(a+c)$ ~ -0.17
precision	True Skill Score (TSS) = $a/(a+b) - c/(c+d)$ ~ 0.43

フレア爆発のトリガ問題

いつ、どこで、なぜ、どうやって発生するか？



光球面



彩層

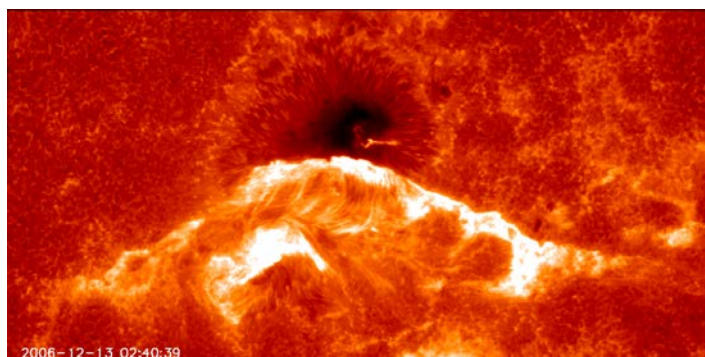
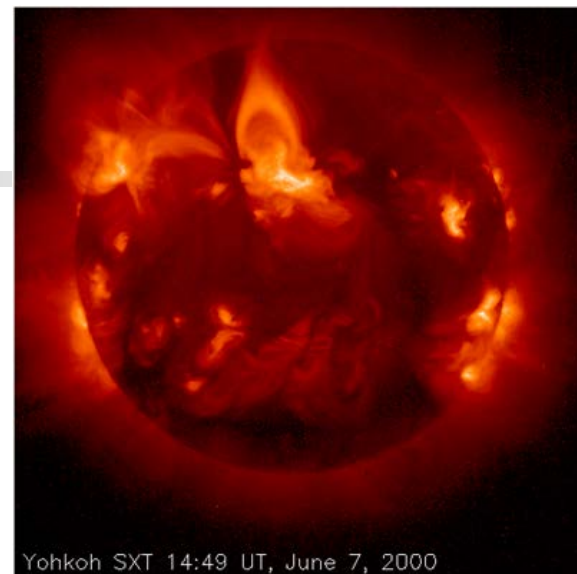
太陽フレアの特徴

黒点の近傍

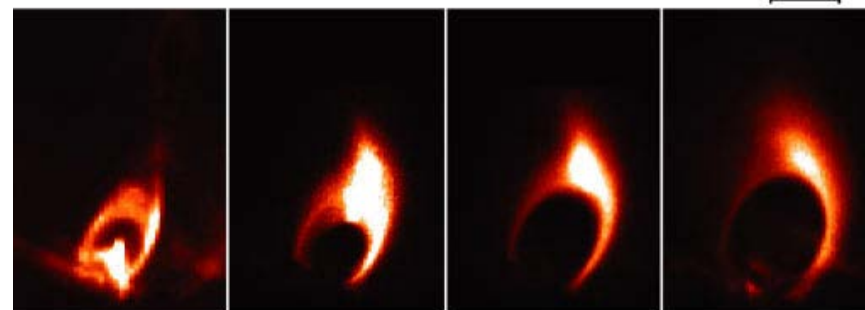
カस्प状ループ

2本のリボン

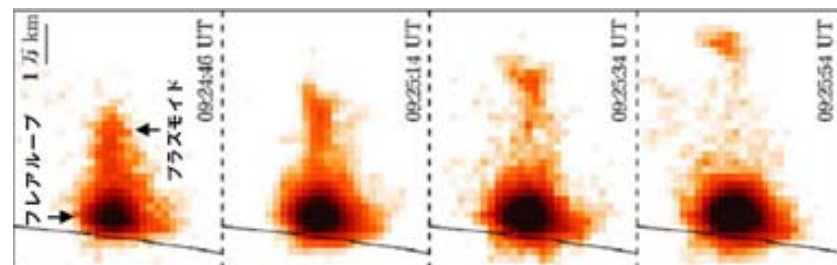
飛び出すプラズマ



5万 km

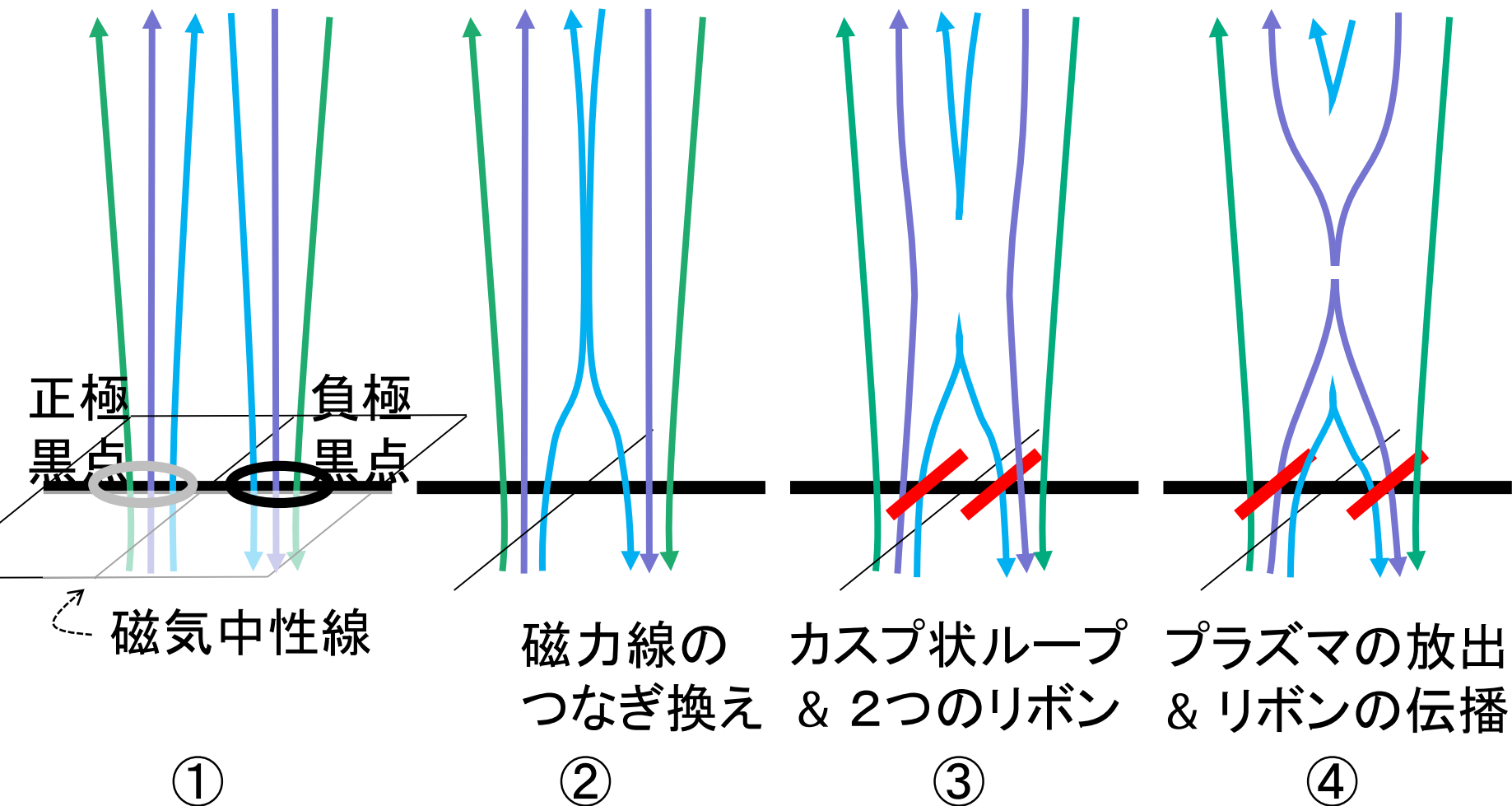


02:52:58 UT 04:45:58 UT 06:00:34 UT 09:06:42 UT



太陽フレアのメカニズムは？

■ 磁気リコネクション(Re-connection)



2011/02/12 10:02

太陽面爆発のトリガとなる磁場構造は何か？

複雑すぎてデータを見ているだけでは何が重要な構造なのか分からない。人間は注目したいものしか注目しない。



それ故、シミュレーションを利用すべき

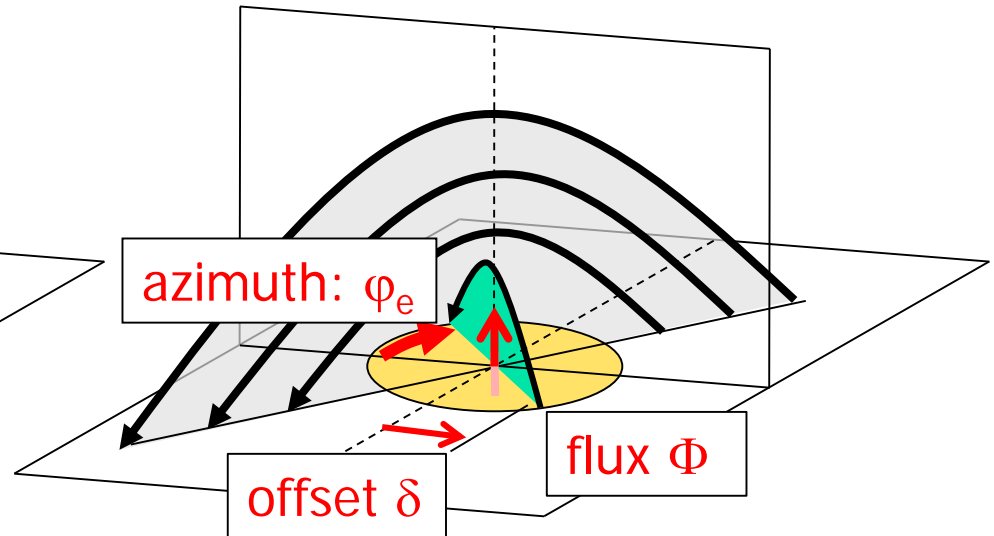
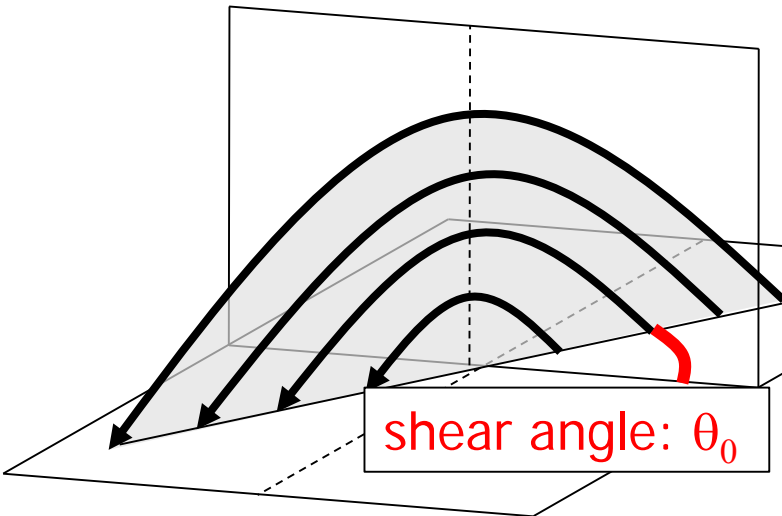
200 400 600 800 1000 1200

Parameters in Ensemble Simulation

Large field
(free energy)

&

Small field
(trigger)



Box: Rectangle including PIL
Initial condition: LFFF

161
cases

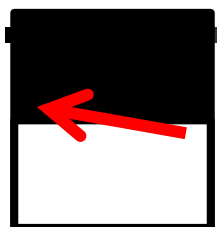
- 3D MHD
- 256x1024x512 grids
- output: 800 GB/run



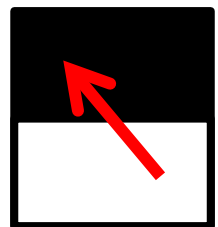
Earth Simulator (JAMSTEC)

Ensemble Simulation of Solar Flares

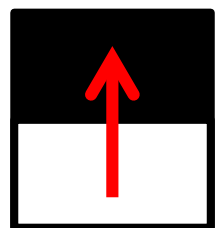
K. Kusano et al., MAGNETIC FIELD STRUCTURES TRIGGERING SOLAR FLARES AND CORONAL MASS EJECTIONS, ApJ, 760:31, 2012 November 20.



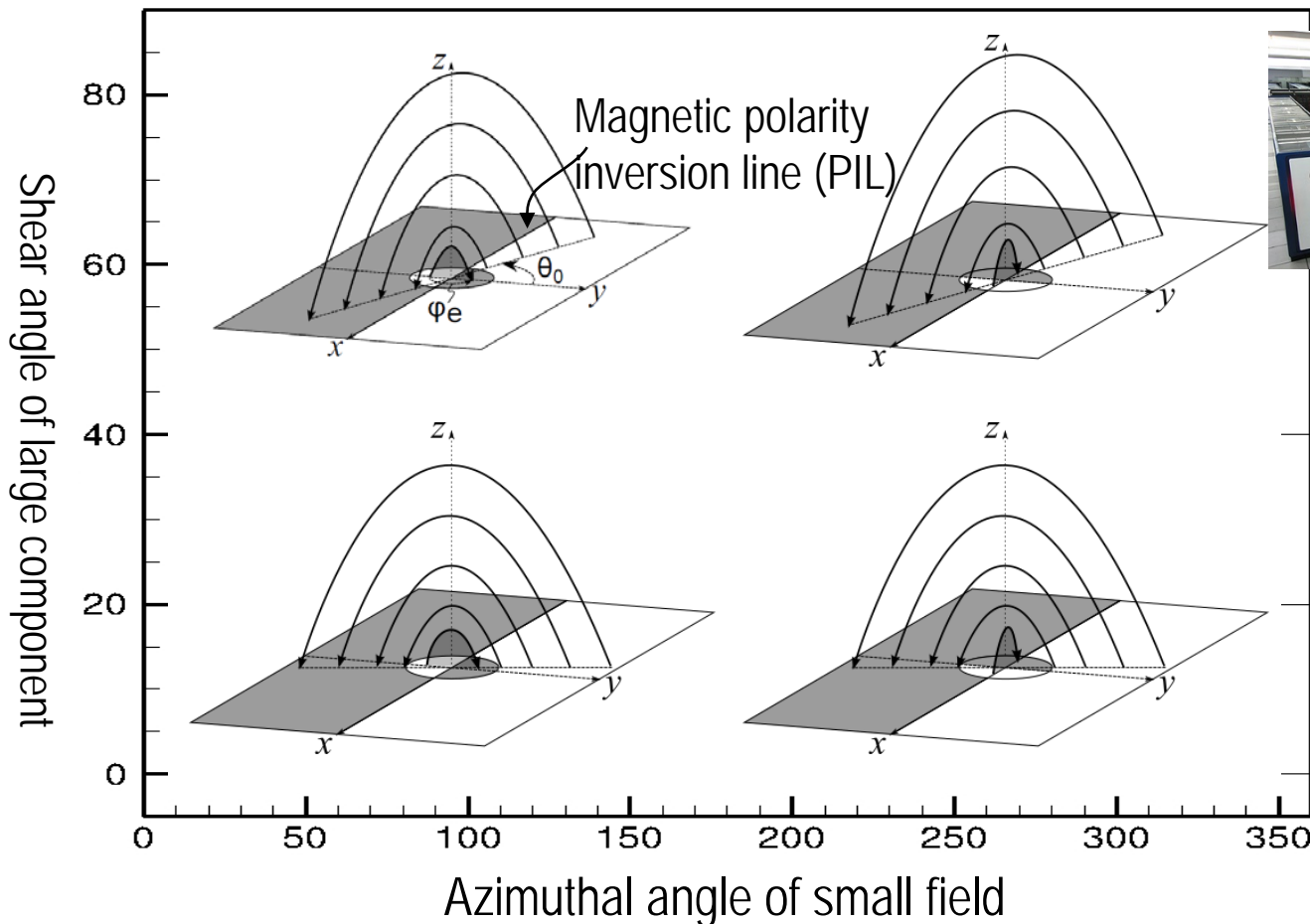
Strong shear



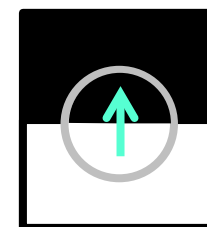
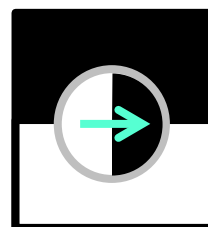
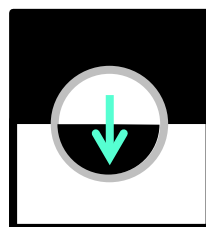
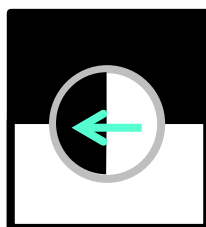
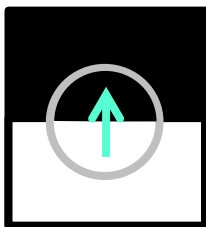
Weak shear



shear free
(potential field)

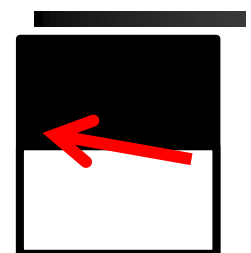
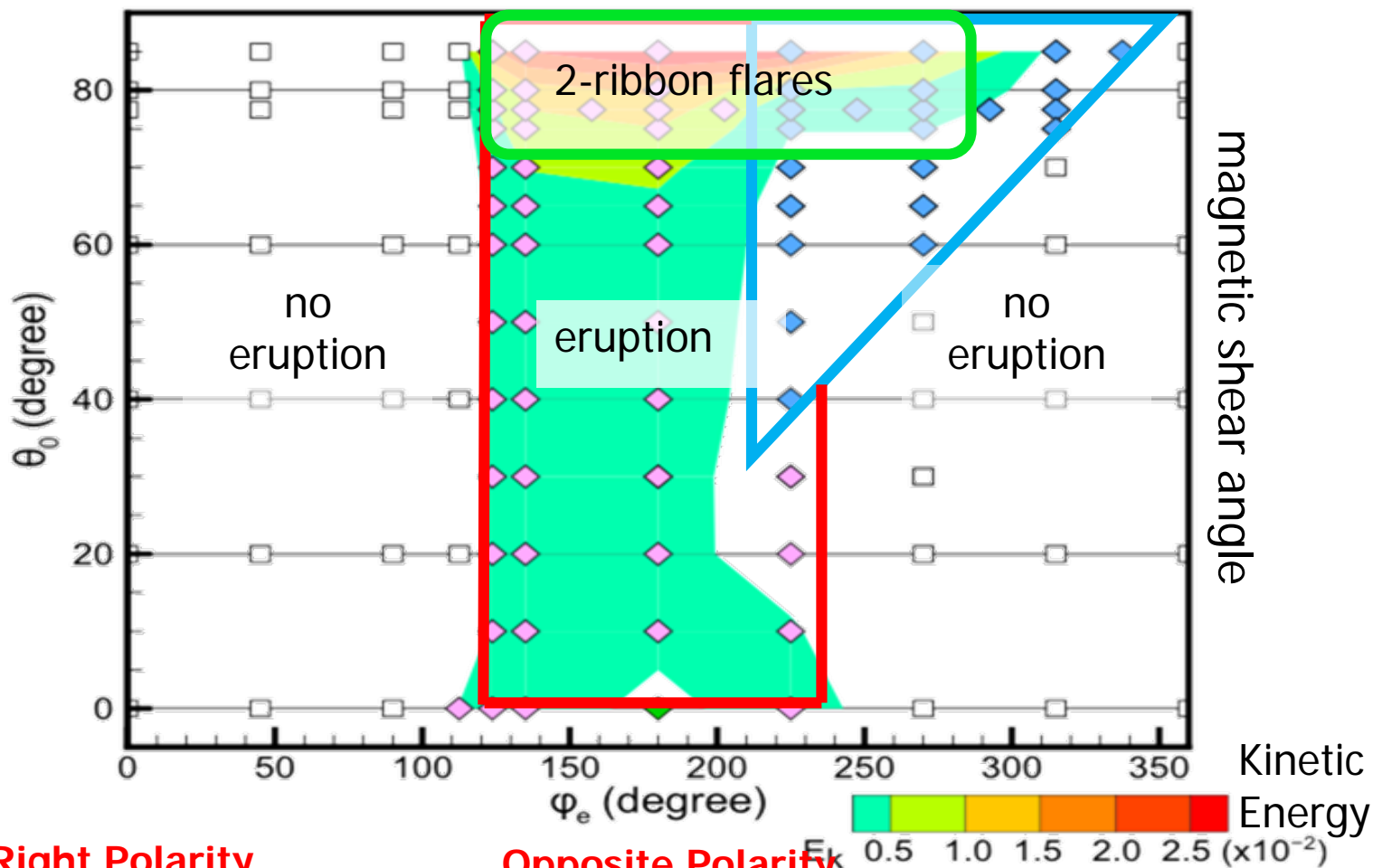


Right Pol (RP) Normal Shear (NS) Opposite Pol (OP) Rev Shear (RS) Right Pol (RP)

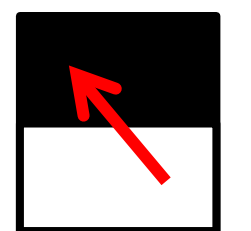


Ensemble Simulation Study

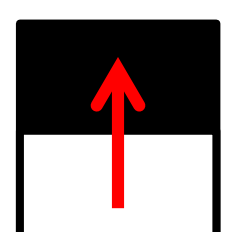
Flare phase diagram (Kusano et al. 2012)



strong shear

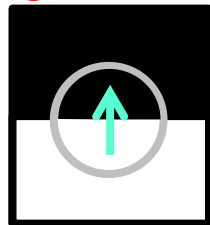


weak shear



potential field

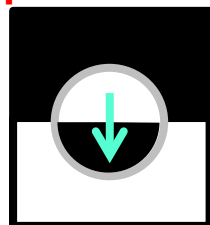
Right Polarity



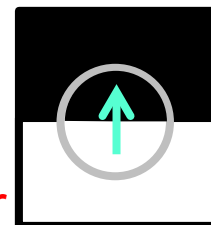
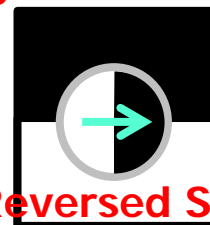
Opposite Polarity



Normal Shear

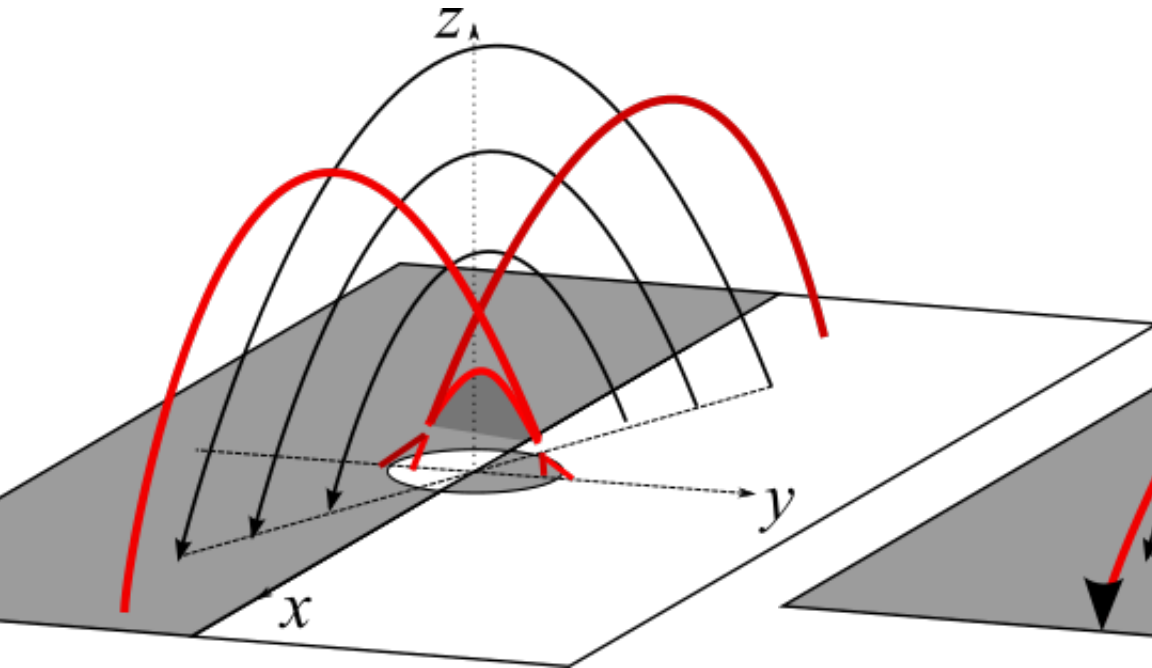


Reversed Shear



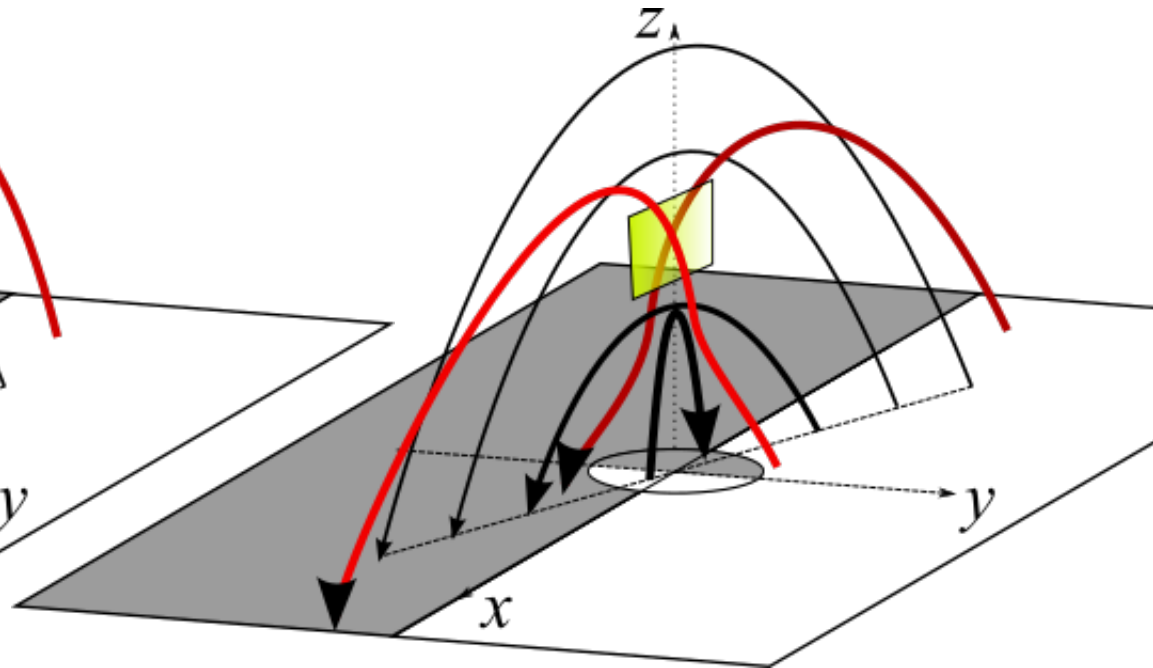
Two ways to trigger eruptions

sigmoid



Triggered by
Opposite Polarity (OP)
field

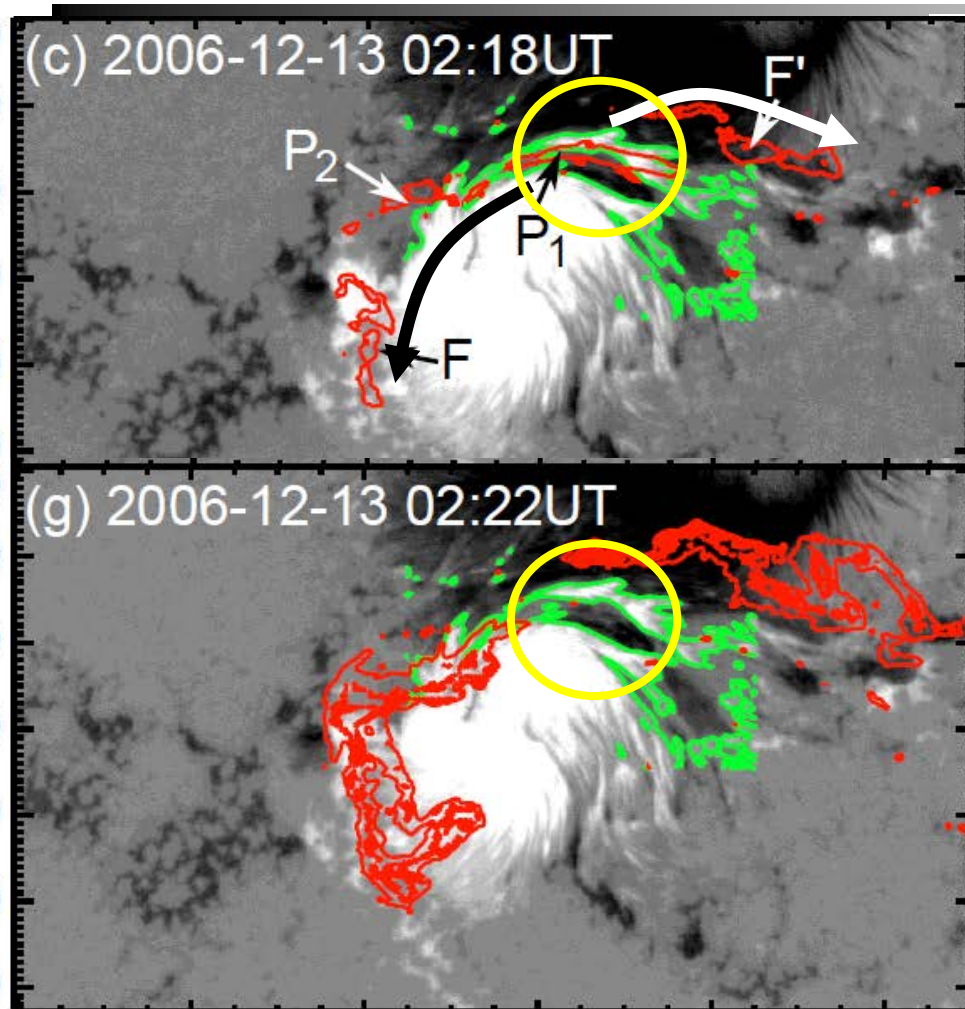
current sheet



Triggered by
Reversed Shear (RS)
field

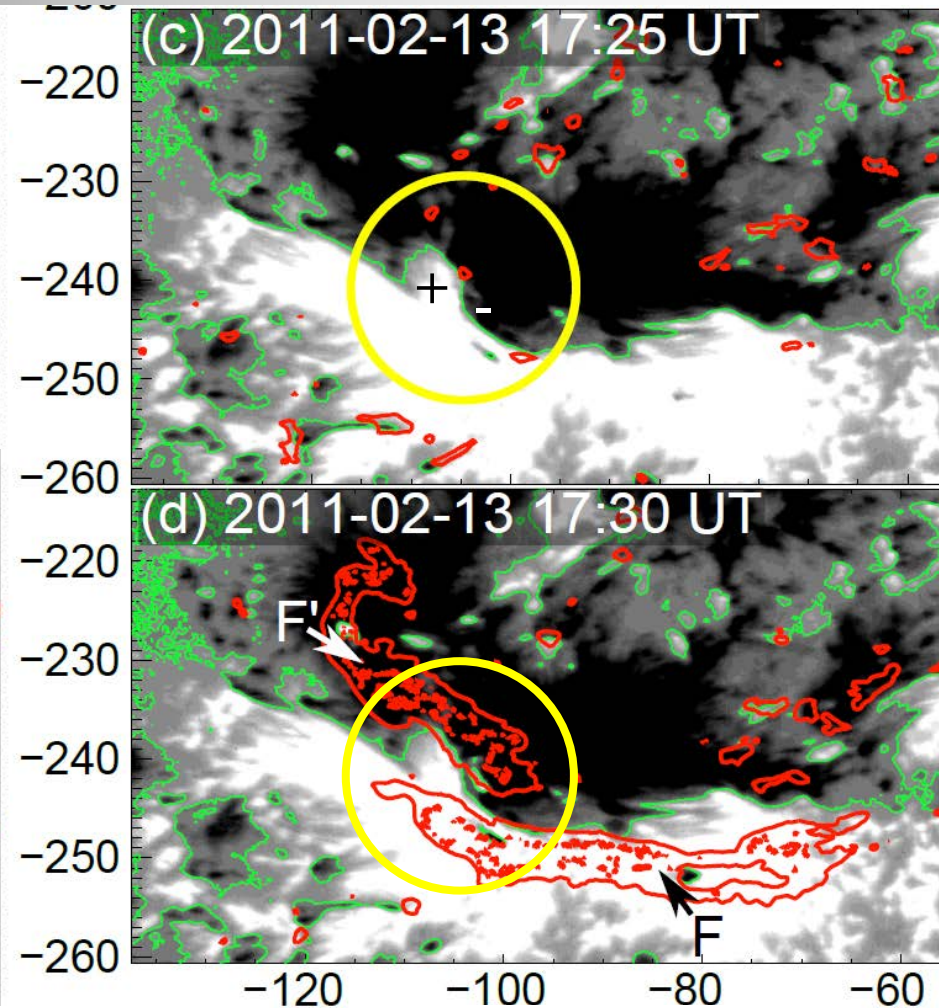
Observation by Hinode

Kusano et al. 2012
Bamba et al. 2013



AR 10930

Triggered by **OP**-field

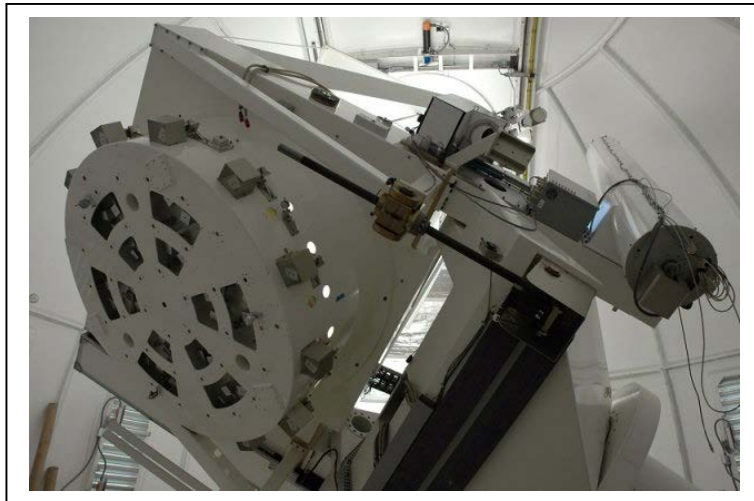


AR 11158

Triggered by **RS**-field

世界最大の太陽望遠鏡

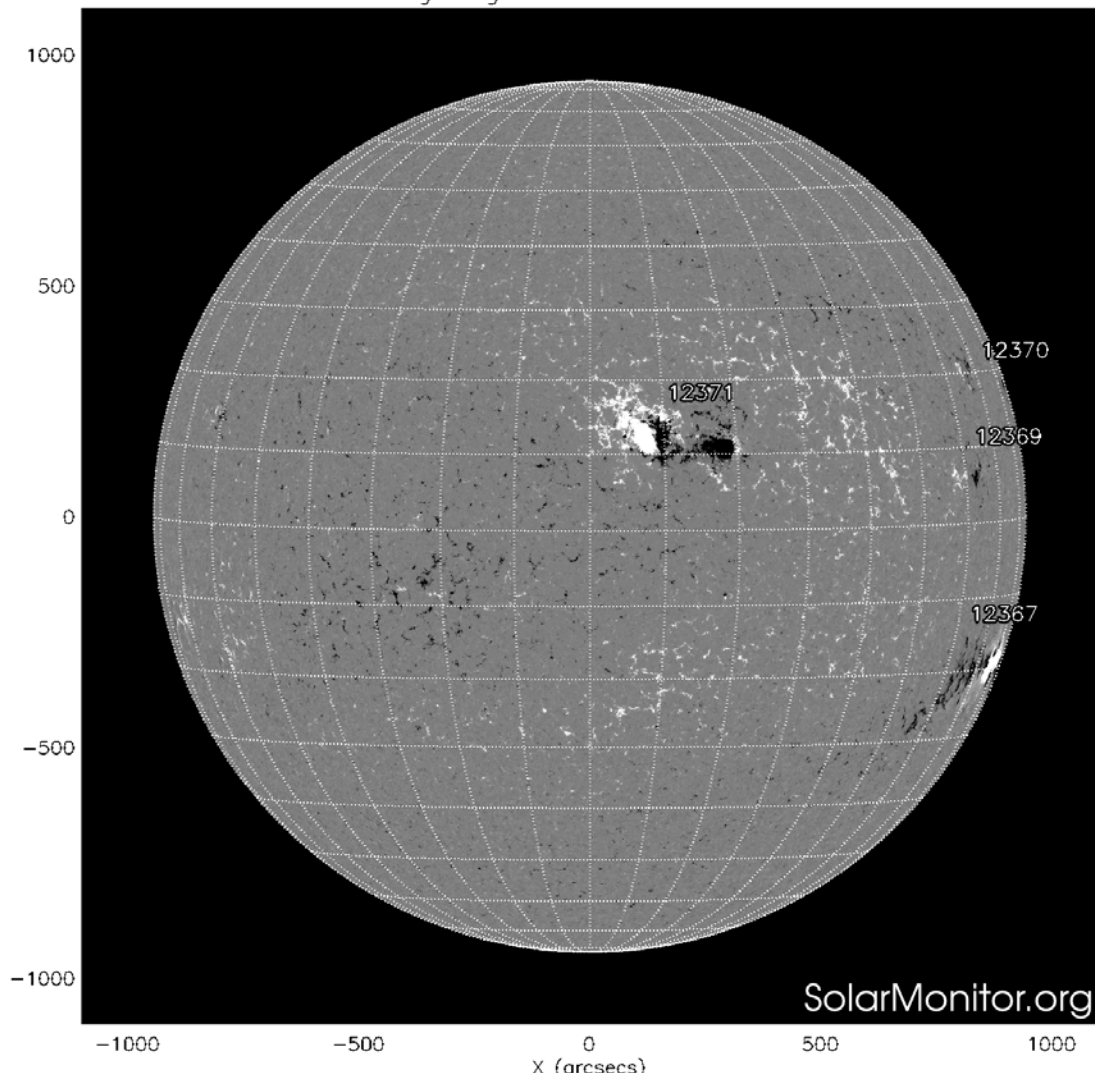
- ビッグベア天文台ニュー・ソーラー・テレスコープ
(New Solar Telescope) (口径1.6m)



観測された太陽黒点

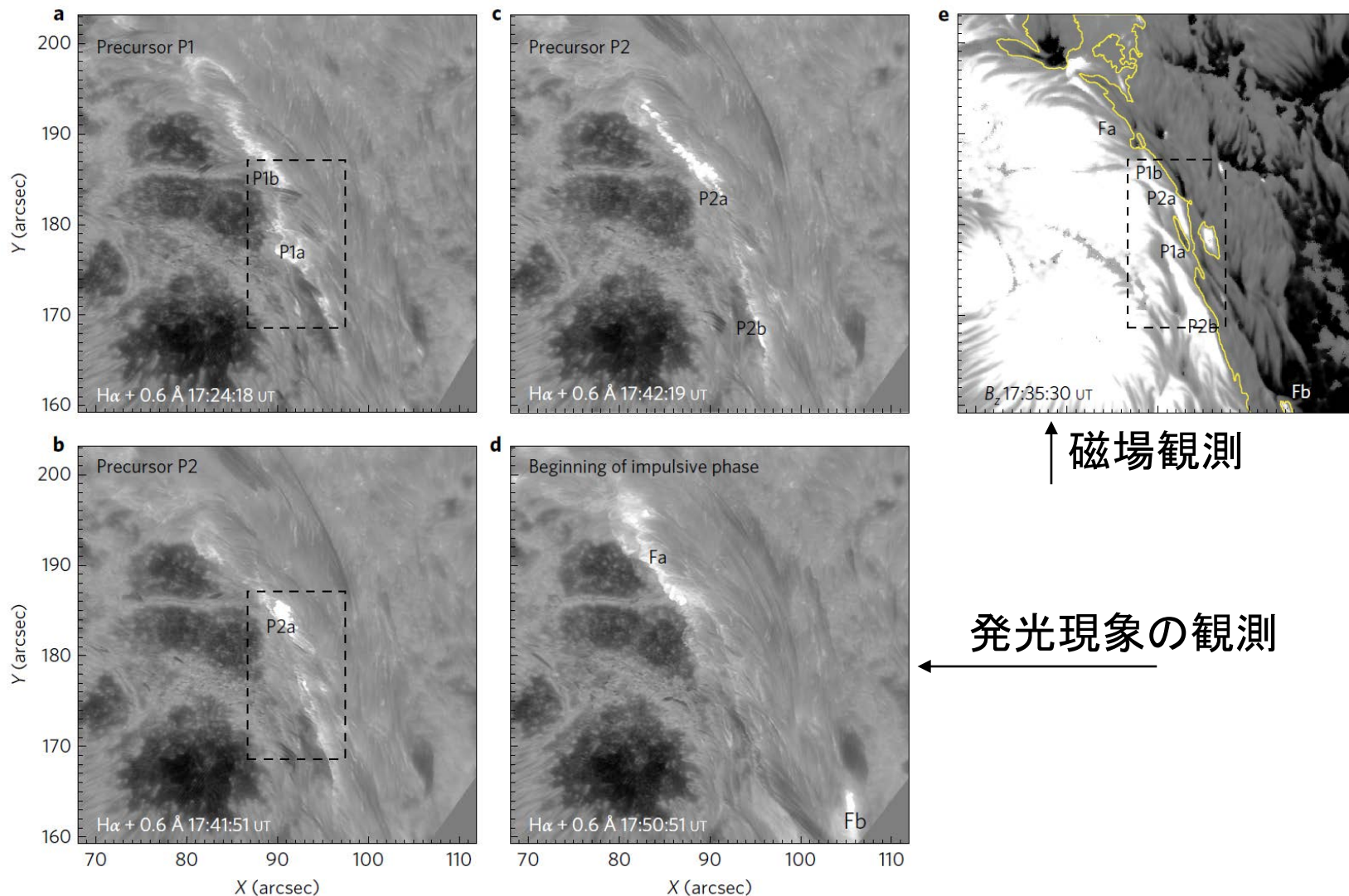
- 2015年6月22日17:51UT (世界標準時)

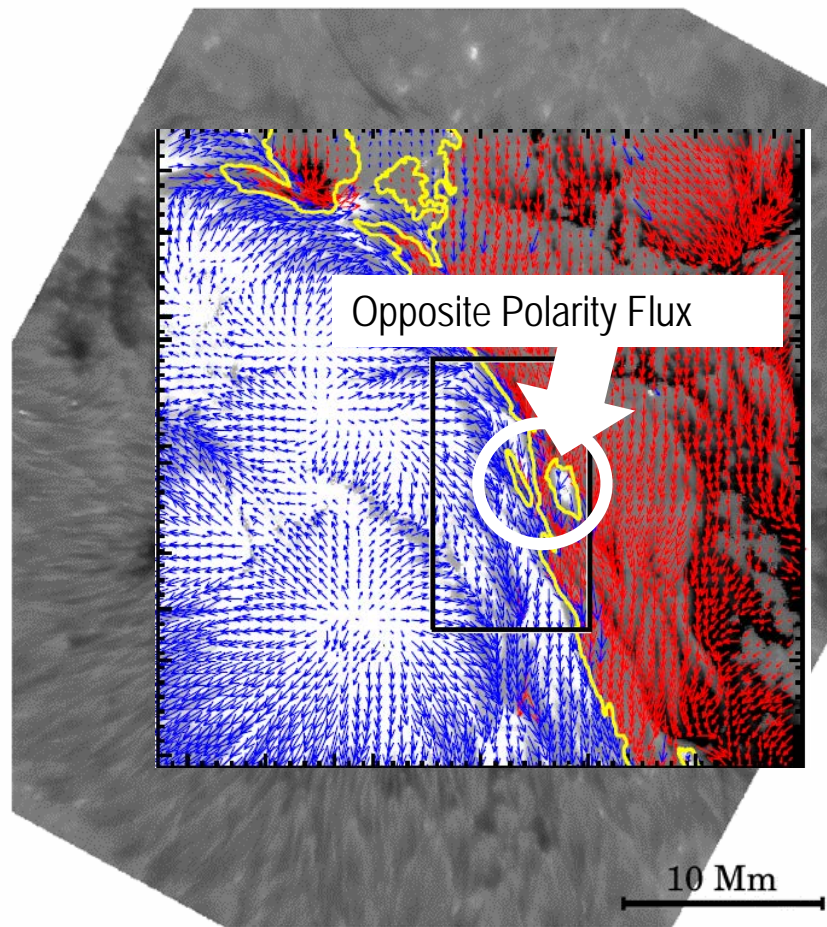
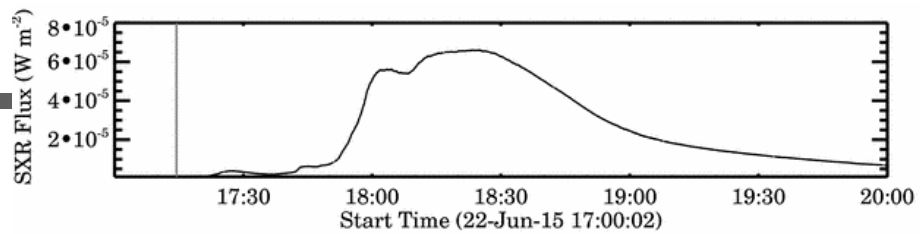
SDO HMI Magnetogram 22-Jun-2015 22:58:25.600



観測結果

■ プレ・フレアとフレアの太陽表面での発光





■ 中日新聞 2017年3月30日(木)

太陽フレア前兆 爆発予測へ解明

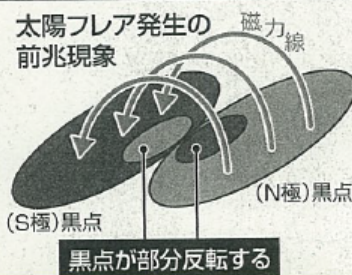
太陽表面の黒点付近で発生する爆発「太陽フレア」の前兆となるメカニズムを、名古屋大宇宙地球環境研究所の草野完也教授ら日米中の研究チームが突き止めた。地球に大きな被害を及ぼす恐れがある、大規模フレアの発生予測に役立つと期待される。研究成果は二十七日付の英天文学誌電子版に掲載された。

名大教授らチーム

太陽フレアは規模が大きければ水爆一億個分のエネルギーを放出する大爆発。エックス線やプラズマが地球に降り注ぎ、大規模停電や人工衛星の故障、航空機の乗客の放射線被ばくなどをもたらす可能性がある。

太陽表面には、磁石でいえば「N極」と「S極」にあたる二種類の黒点があり、両者の関係がフレア発生に影響を与えることが、これまでの研究で分かっていた。

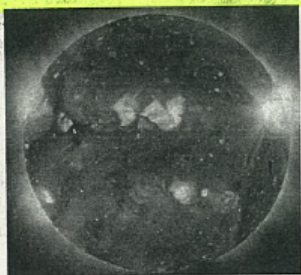
チームは二〇一五年六月、世界最大の太陽望遠鏡がある米国・ヒックペア天文台で、世界で初めて太陽



太陽フレア発生の前兆現象

フレアの精密観測に成功。発生直前、N極とS極それぞれ黒点内で極性の部分反転が起きていることをとらえた。この反転現象が引き金となって、N極とS極の黒点間の磁力線の組み替え現象が連鎖的に起こり、フレアが発生していると考えられるという。

反転現象は、フレア発生の一時間〜数時間前に起こるため、フレアの精密な予測技術の向上につながることを期待できる。草野教授は「大規模な太陽フレアは社会生活に大きな影響を与える。事前に発生が分かれば、効果的な対策も可能になる」と研究の意義を語った。



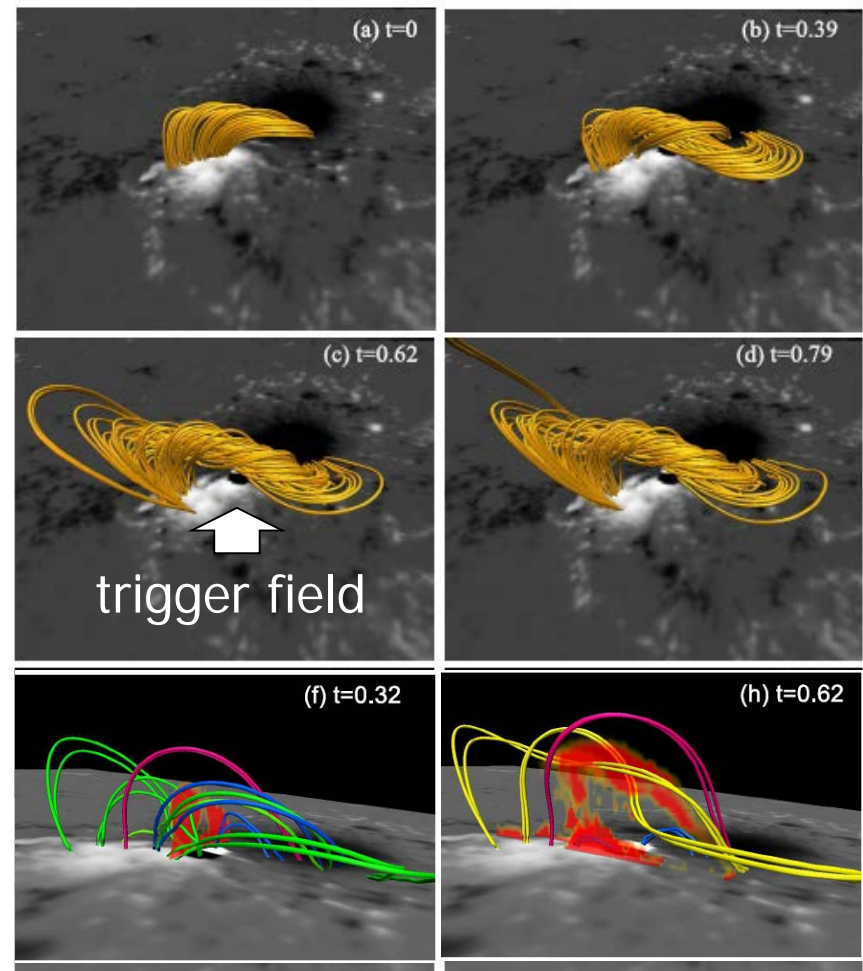
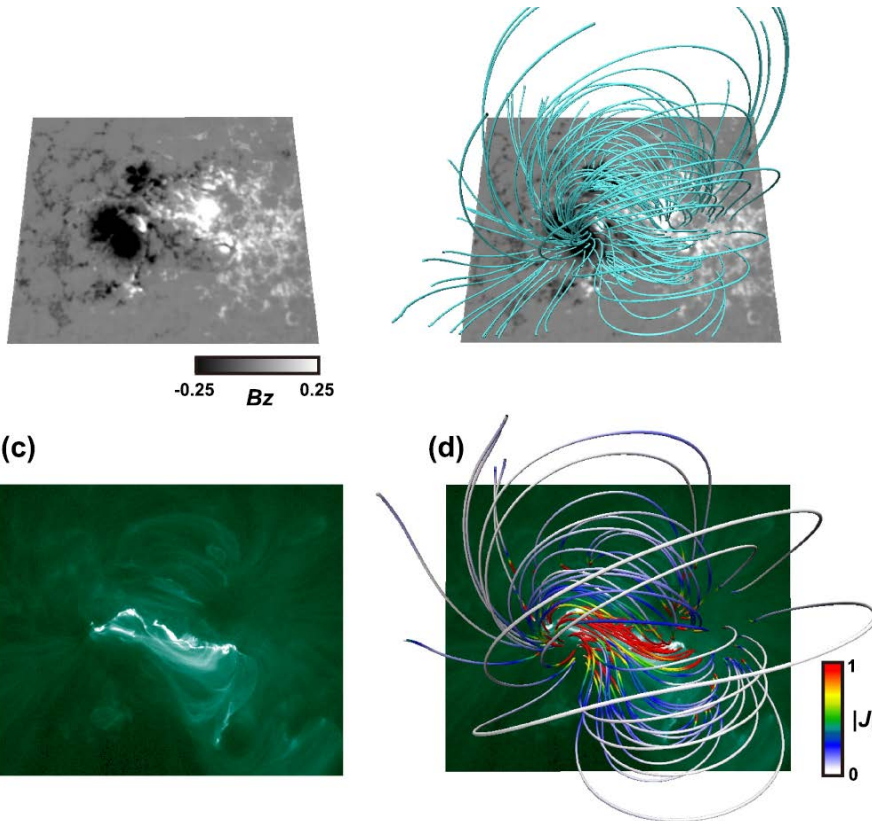
太陽フレアのX線画像②
〇一一年八月観測(国立天文台・JAXA提供)

Numerical Prediction

Muhamad & Kusano
(submitted)

- Nonlinear force-free field extrapolated from the vector magnetic field observation

$$\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B}$$





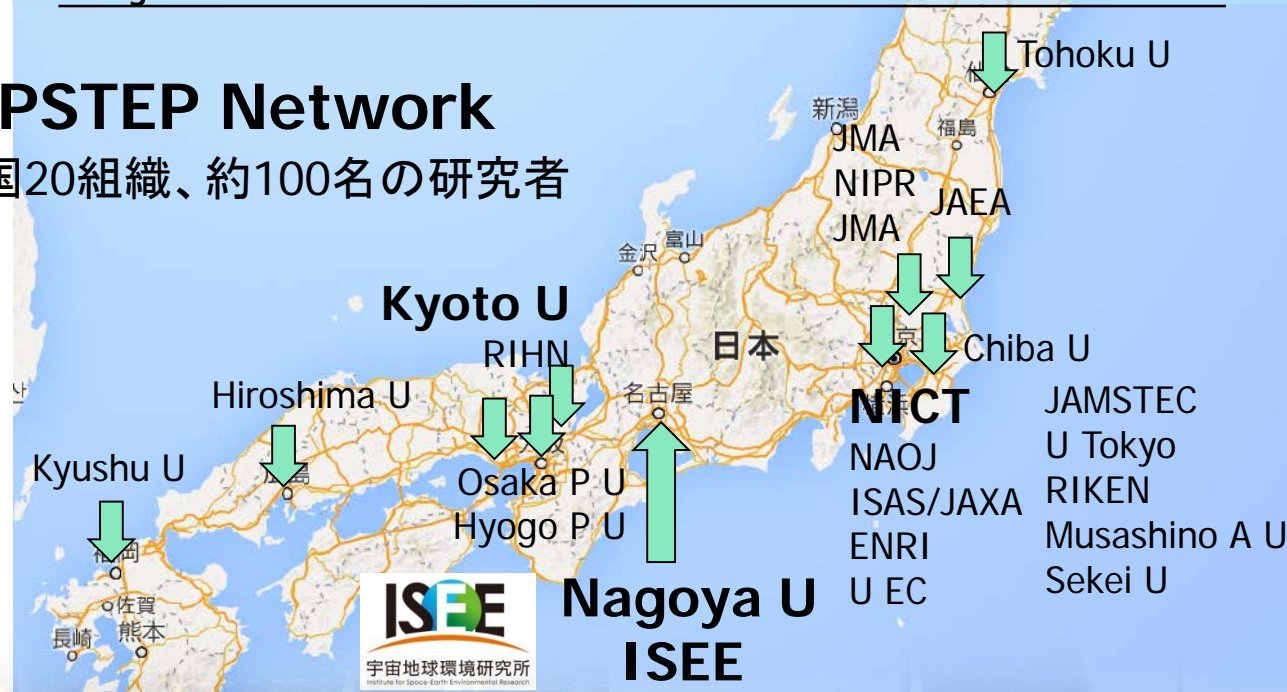
文部科学省 新学術領域研究(2015-2019)

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

Project for Solar-Terrestrial Environment Prediction

PSTEP Network

全国20組織、約100名の研究者



新学術領域“PSTEP”の組織構成と連携

国際連携拠点

総括班 (名大 草野)

社会経済活動



A01 予報システム班 (NICT 石井)

① 社会のニーズに応える予報システムの開発 モデルの統合⇒社会影響予測実験



A02 太陽嵐班 (京大 一本)

フレアモデル → フレア発生予測
太陽圏モデル → 太陽風擾乱予測

衛星観測(ひので、SDO) 光球磁場
地上観測 フィラメント磁場速度



A03 地球電磁気班 (名大 三好)

粒子加速モデル → 宇宙放射線予測
磁気圏モデル → 地磁気変動予測
大気電離圏モデル → 電離圏擾乱予測

衛星観測 (ERG)、地上観測



② 短期変動
(爆発現象)

A04 周期活動班 (京大 余田)

太陽観測(ひので衛星)
気候データアーカイブ

太陽周期活動モデル → 次期太陽周期予測
地球システムモデル → 太陽気候影響要素

③ 長期変動
(気候影響)



公募研究

① Forecast Operation Group

Socio-Economic System

assessment

evaluation

A01

Mamoru Ishii (NICT)

宇宙天気予報運用機関(NICT)と
大学・研究所・企業による
強力な産官学連携研究

- 情報通信研究機構(代表、連携2名)
- 電子航法研究所(分担1名)
- 原子力研究開発機構(分担1名)
- JAXA本部(連携1名、協力1名)
- 東京電力(協力1名)
- 電気通信大学(分担1名)
- 名古屋大学太陽地球環境研(連携1名)
- 自然災害影響調査の専門家

to build the base of next-generation space weather forecast

- Forecast systems to meet the needs of society,
- Assessment of severe space weather



prediction

feedback

Integration of Physics-based Models

integration ↑ ↓ evaluation

A02 Solar Storm
flare prediction model
CME prediction model

A03 Geomagnetism
Radiation prediction model
GIC prediction model
Ionosphere model

A04 Solar cycle
Solar cycle model
Earth system model

② Short-term prediction (Space Weather)

prediction

verification

A01 Operation Group

prediction

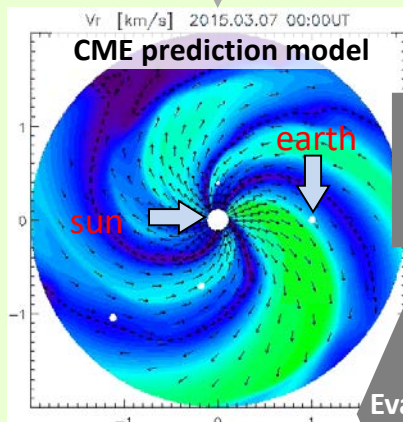
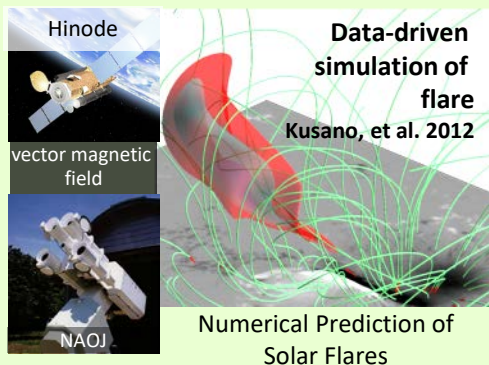
verification

A02 Solar Storm (PI: Ichimoto)

分担3名、連携4名 (Kyoto、Nagoya、JAXA、NAOJ、NICT、JAMSTEC)

Prediction of Solar Flare & CME

3D B model and data-driven simulation

B
V
predictEvaluation
at L1

A03 Geomagnetism (PI: Miyoshi)

分担7名、連携5名 (Ngoya、Tohoku、Kyusu、Kyoto、NICT、ISAS、MC)

Prediction of radioactivity in space

Short-term prediction of radiation belt and SEP



first measurement of wave-particle interaction

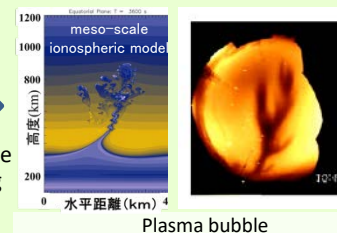
Physics-based
modeling

Radiation belt
model including
nonlinear
acceleration

Prediction of ionospheric disturbance

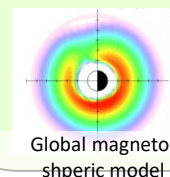
predicting meso-scale disturbance and propagation

Ionosphere-
Atmosphere global
connection model
(GAIA)

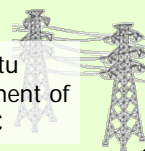
Inter-scale
coupling

Prediction of geomagnetically induced current

Local model of GIC taking into account of conductivity distribution

Multiscale
interactionGIC model
with ground
conductivity

validation

In Situ
measurement of
GIC

Long-variation

observation

A04 Solar Cycle Group

Long-variation

observation

③ Long-term prediction (space climate)

A01 Operation Group

prediction

requirement

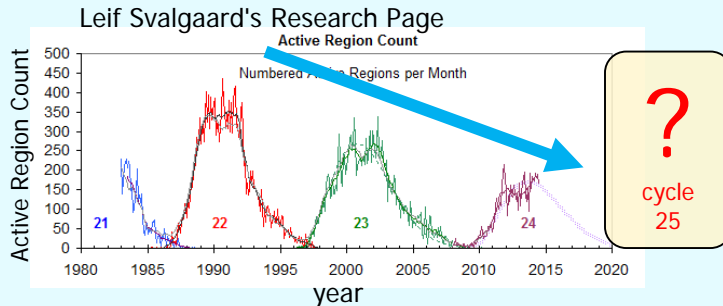
A02

A04班 PI Shigeo Yoden (Kyoto U)

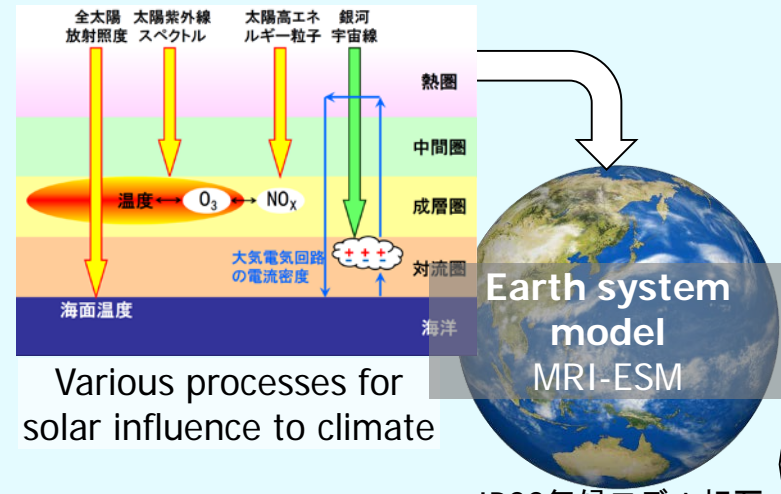
Kyoto, Nagoya, Musashino-art, Seikei, Hyogo-pref, MC, NAOJ, NICT)

A03

Prediction of Cycle 25



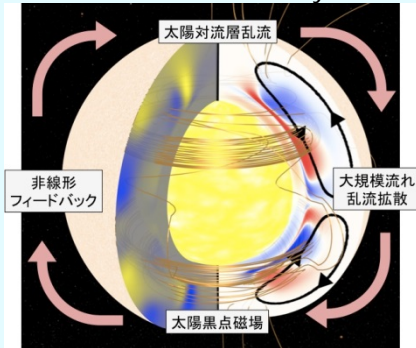
Mechanism of solar influence to climate



Various processes for solar influence to climate

IPCC気候モデル相互比較CMIP6に参加

3D MHD model + flux transport dynamo model



3D dynamo model Using K-comp

Evaluation of probability of Grand minimum and little ice age

→ 長期的な太陽地球圏環境変動を予測するための技術開発

Solar Storm

Geo-magnetism