

理系大学生のための  
太陽研究最前線体験ツアー  
2014年8月25日

# 宇宙天気と宇宙気候 太陽活動を予測する

名古屋大学太陽地球環境研究所  
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

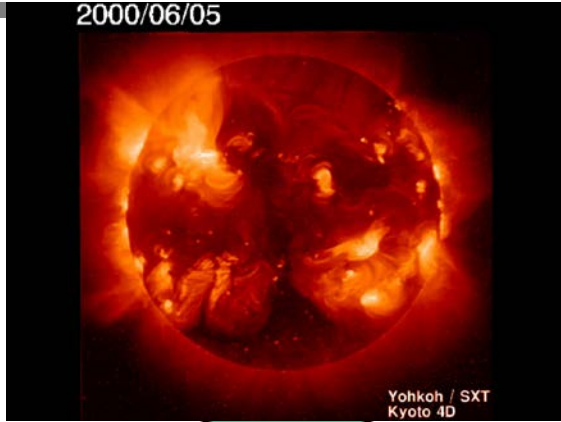
草野完也



# 包括的な太陽圏システムの変動

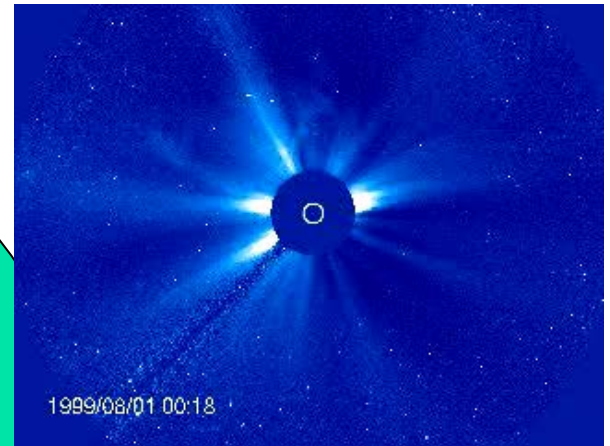
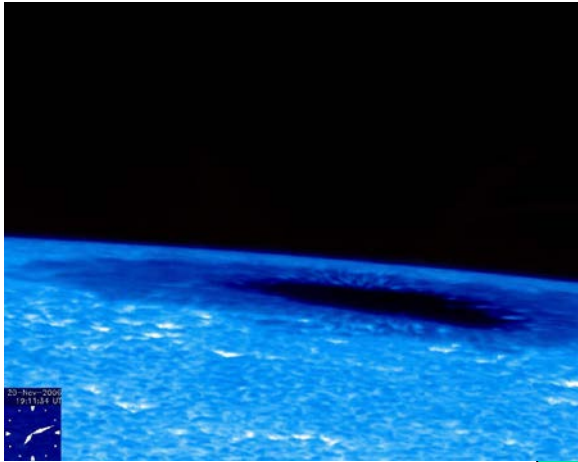
①宇宙天気研究  
短期的な宇宙環境変動  
数分～数十日

2000/06/05

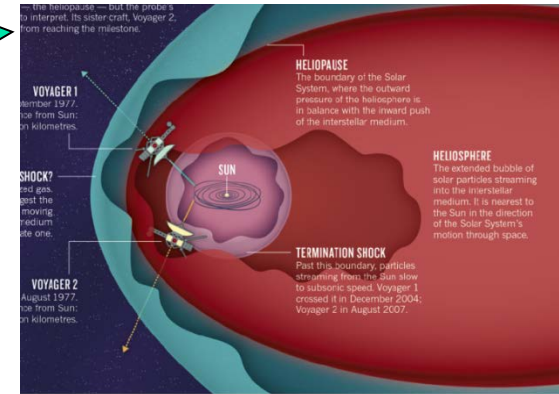
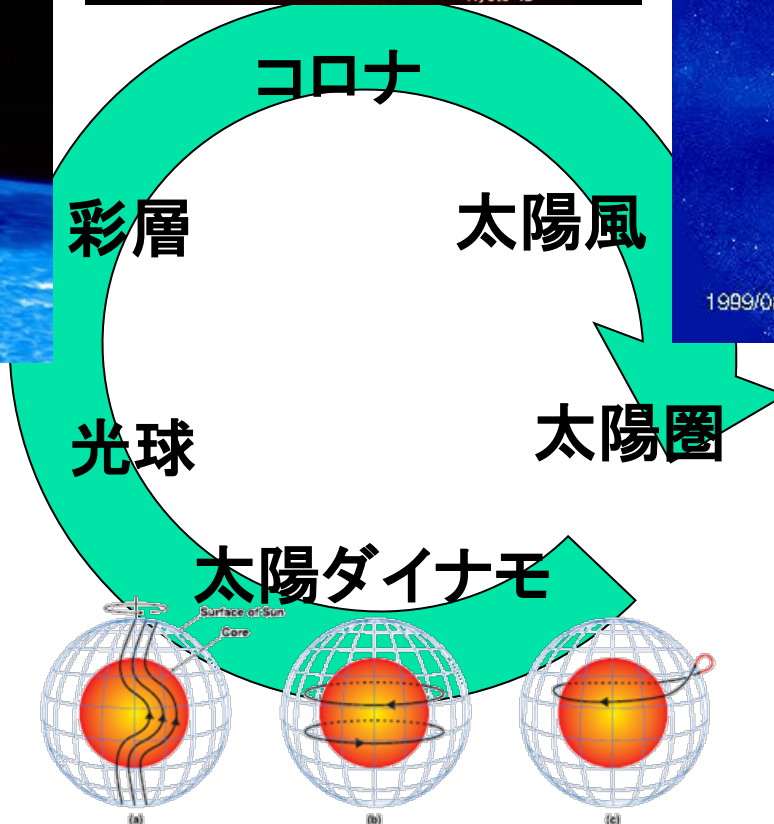


Yohkoh / SXT  
Kyoto 4D

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



2014/8/25

# 宇宙天気と宇宙気候

---

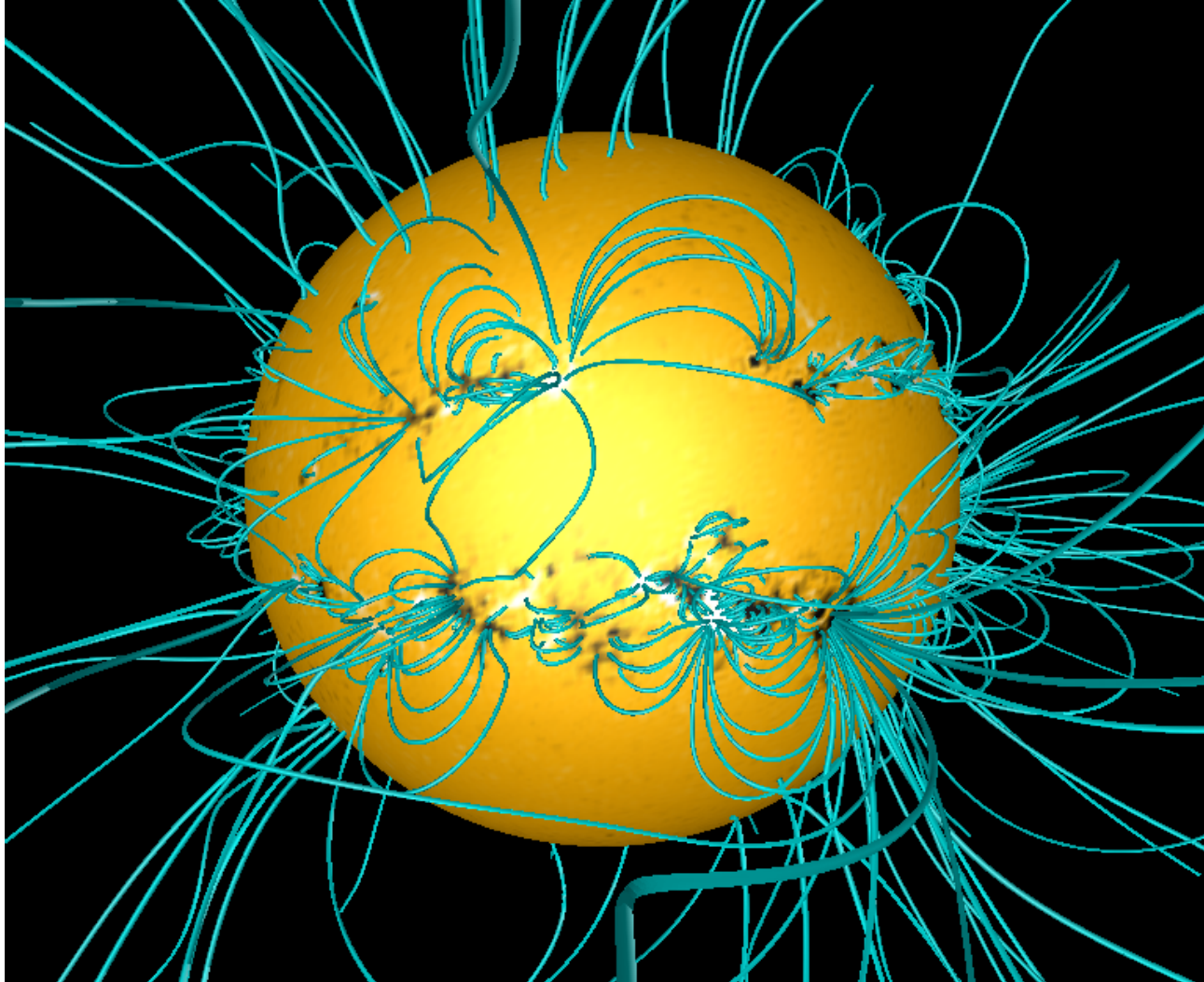
## ■ 宇宙天気 (Space Weather)

- 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

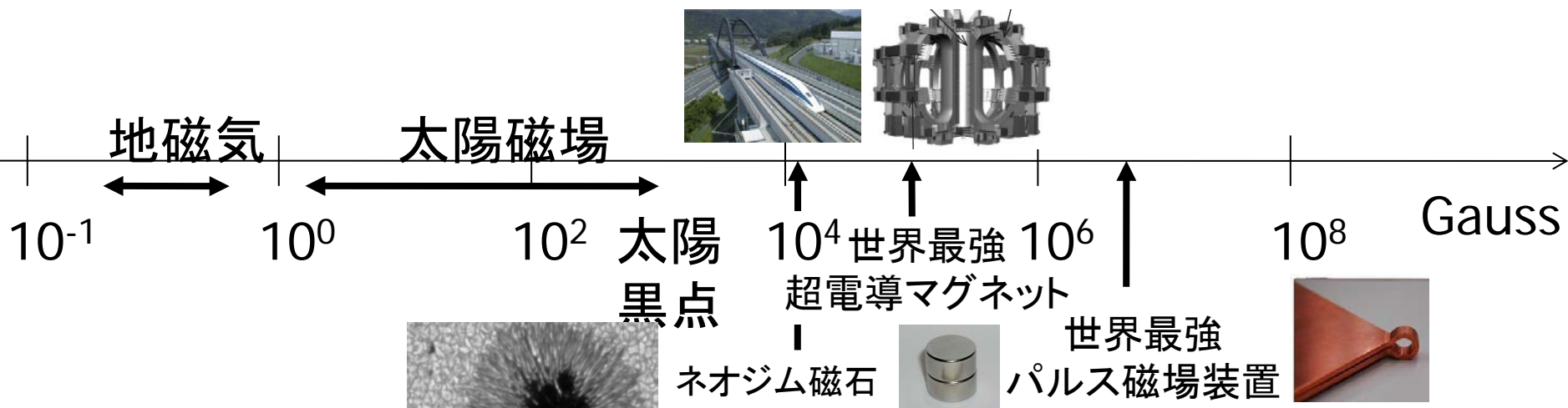
## ■ 宇宙気候 (Space Climate)

- 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

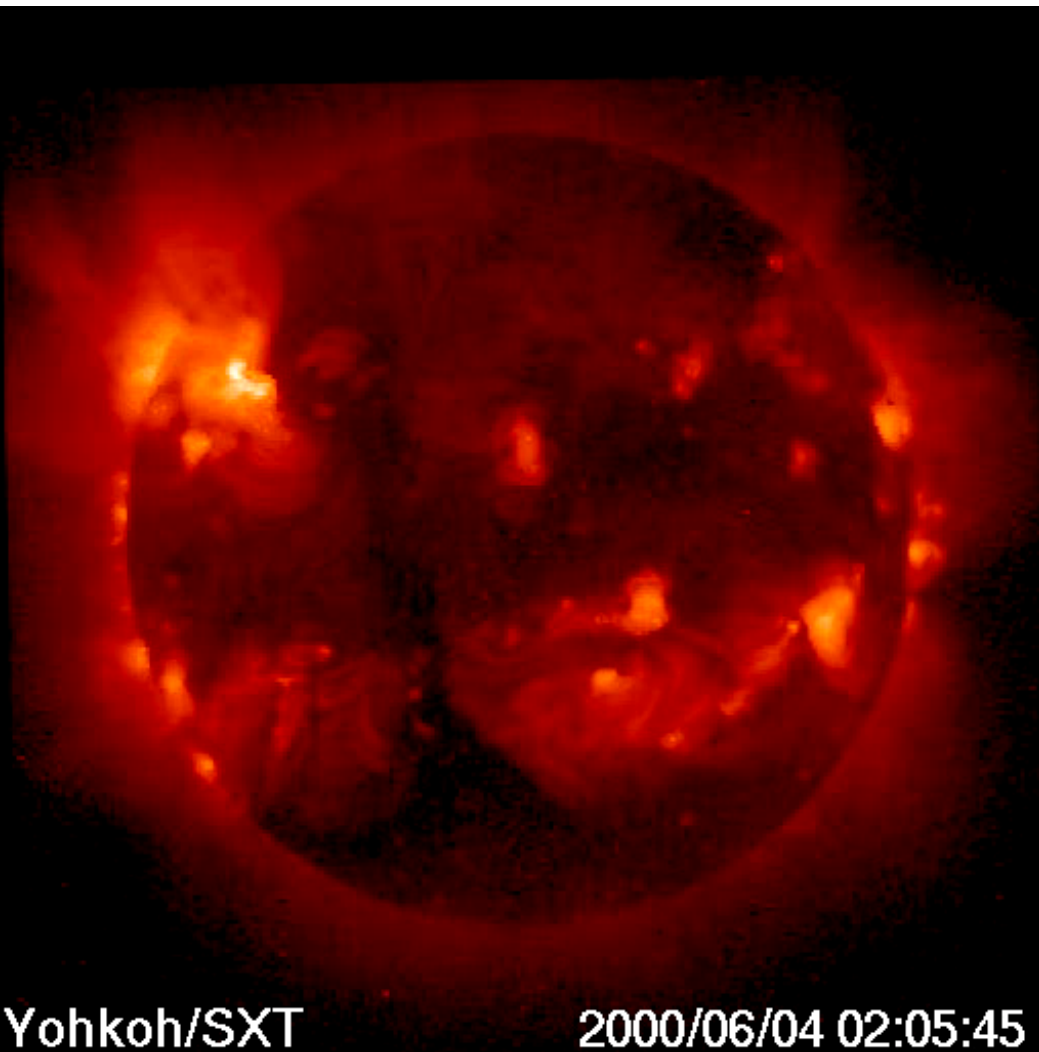


$$E = \frac{B^2}{2\mu_0} L^3$$

黒点磁場のエネルギー～10<sup>25~26</sup>J

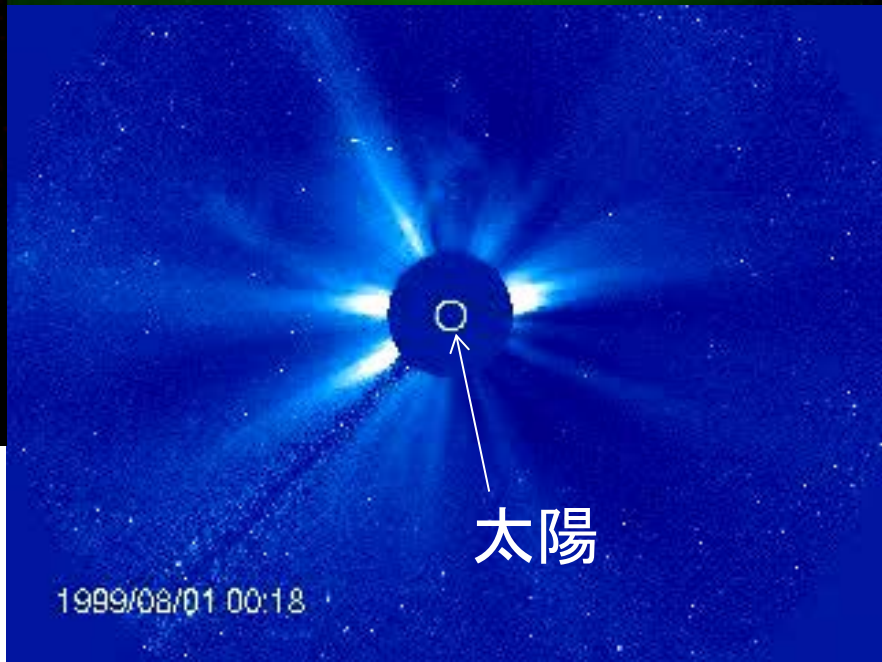
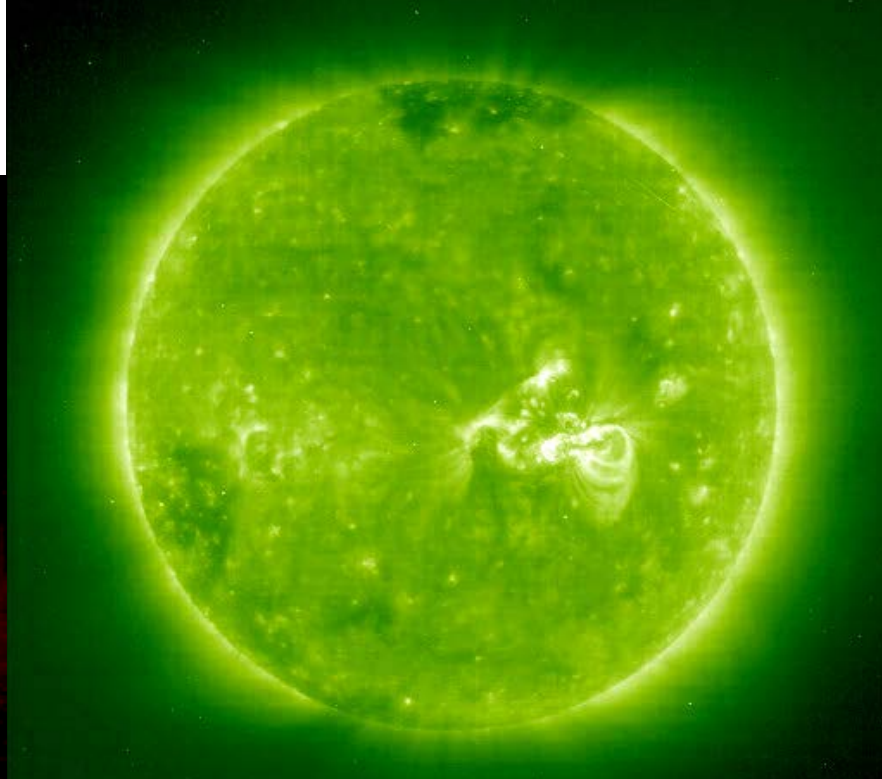
最大水爆 数10~100万個分 5

# 太陽フレア



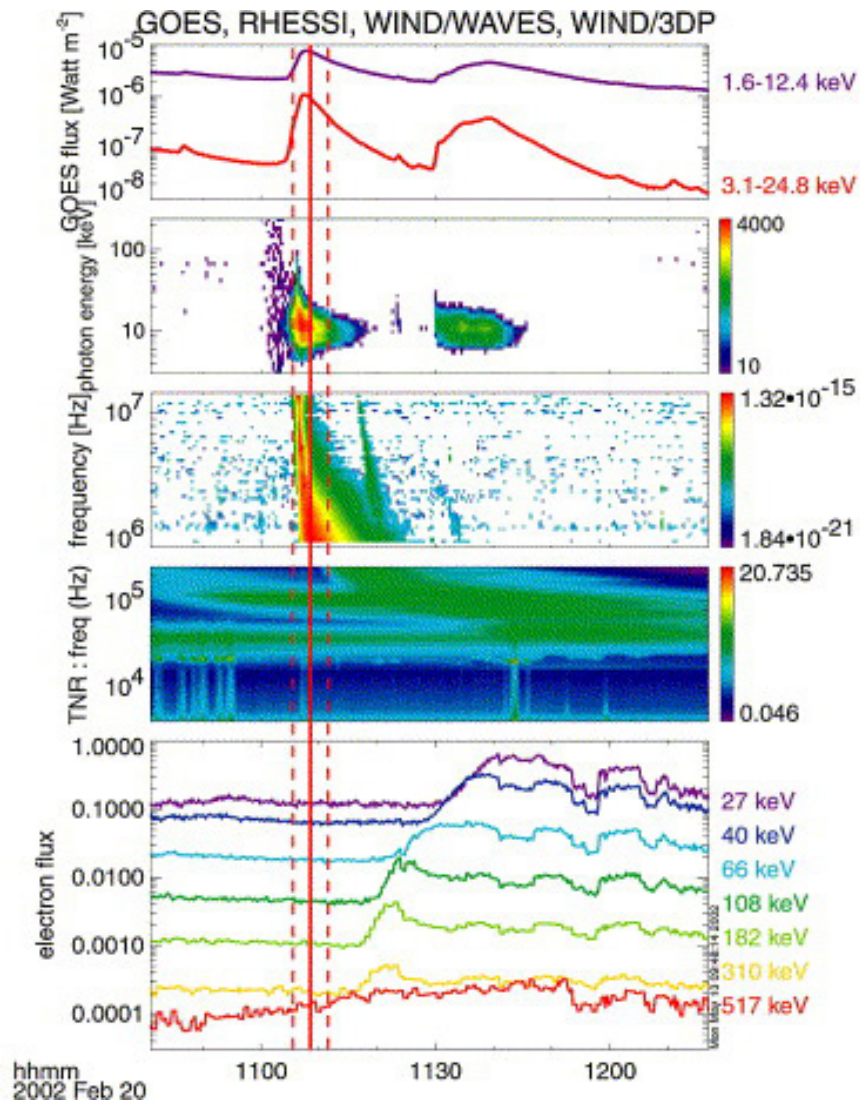
Yohkoh/SXT 2000/06/04 02:05:45

太陽黒点の磁場のエネルギー  
最大水爆100万個相当



1999/08/01 00:18

# フレアに伴うX線、電波、電子流束



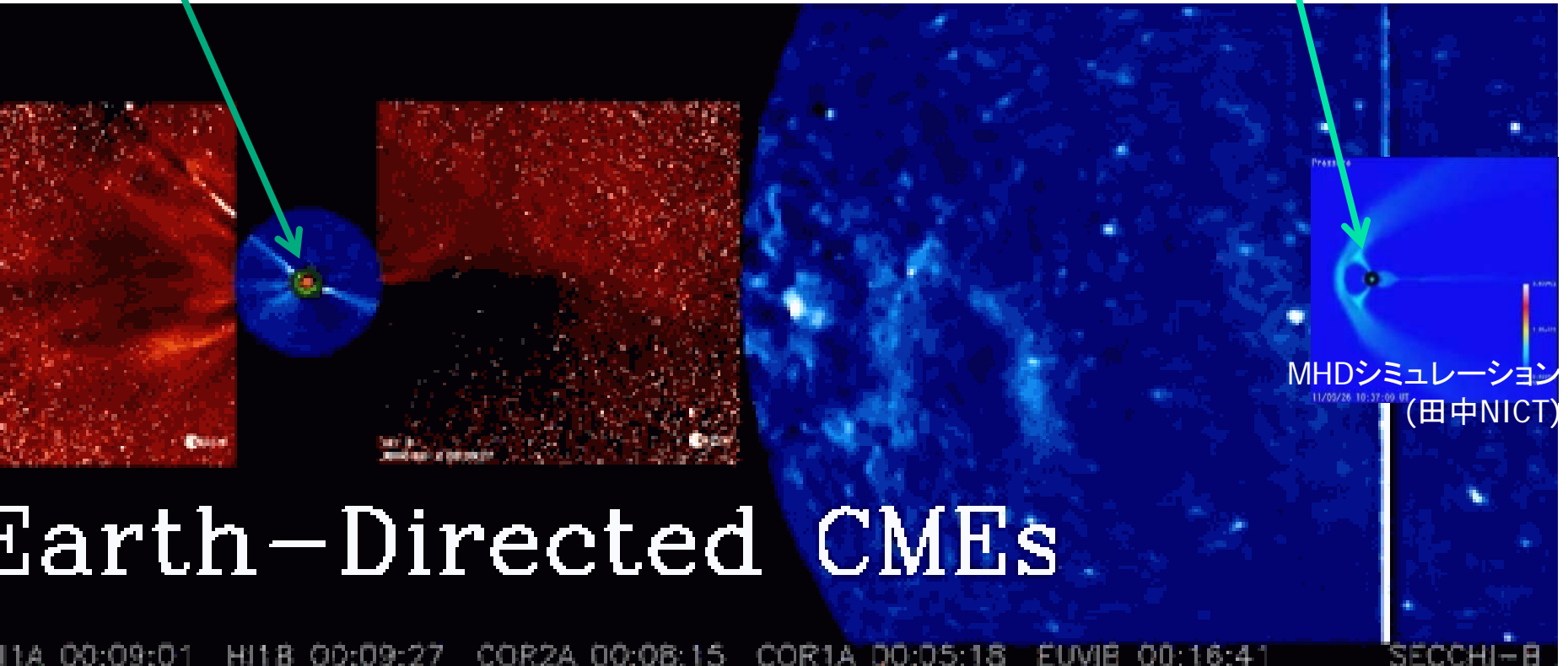




# 太陽地球結合システム

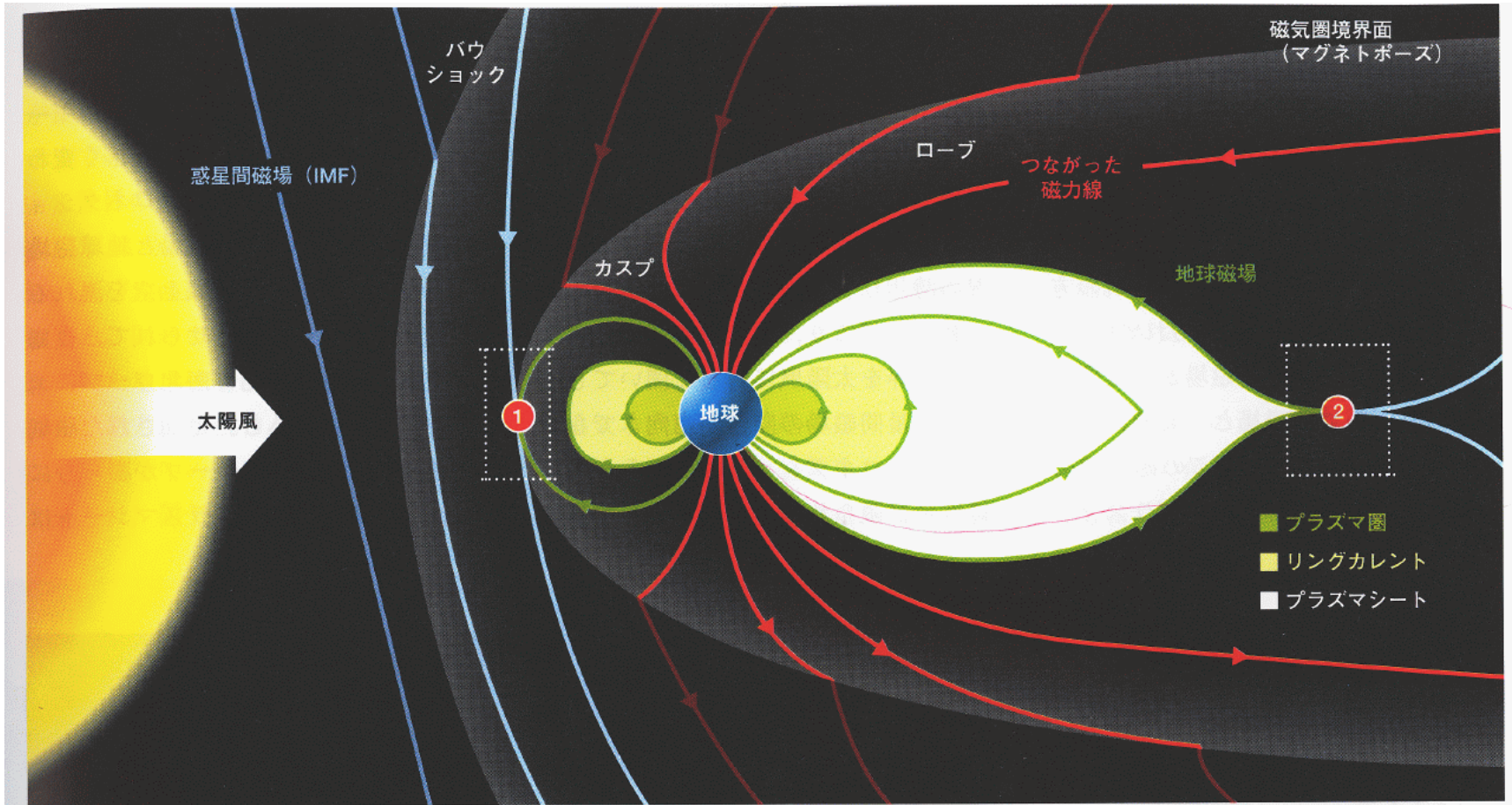
— 太陽

地球



太陽フレアから発生した衝撃波と巨大な高温ガス(プラズマ)が惑星間空間を伝播する。

# 太陽地球結合系



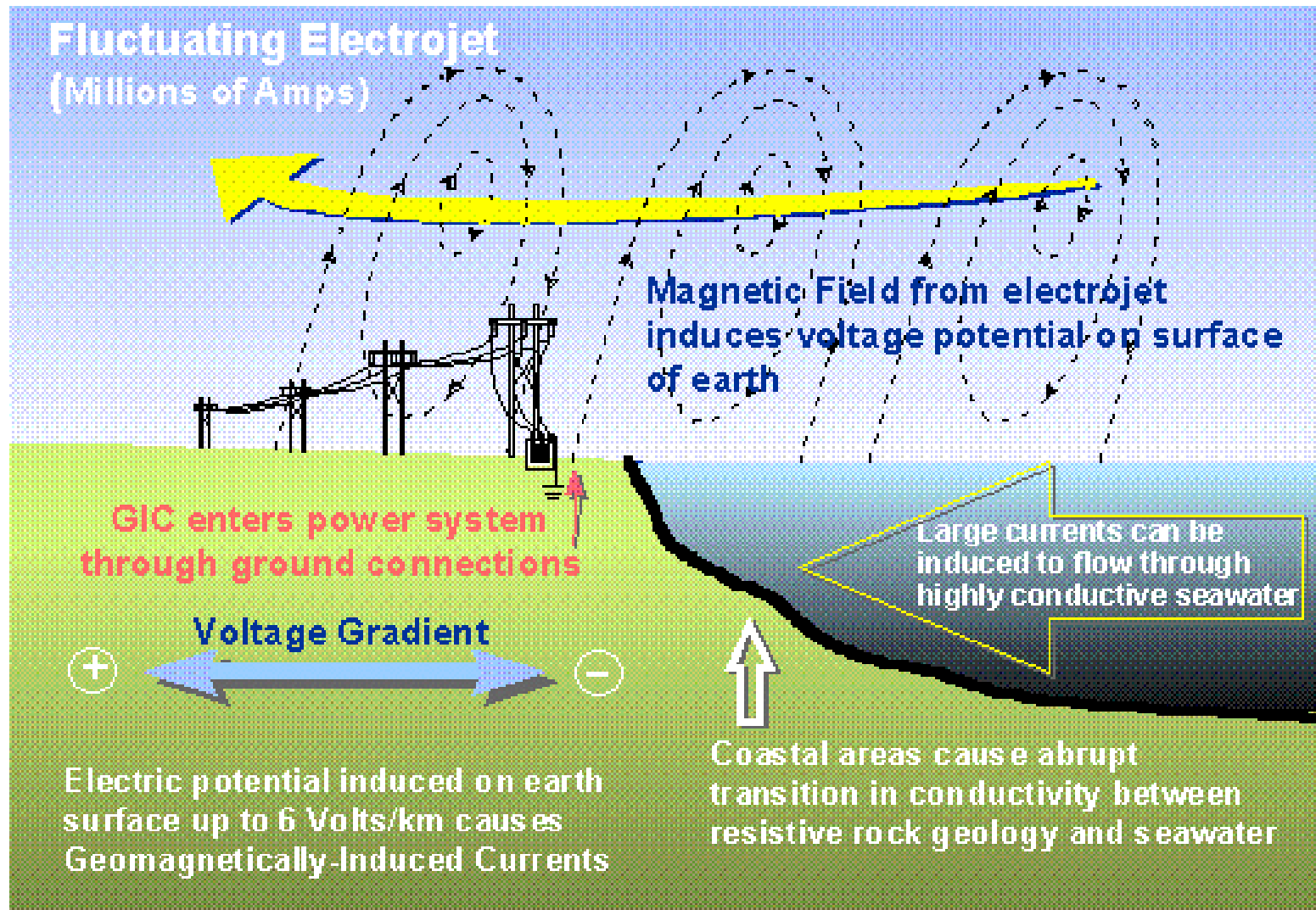
**磁気圏の擾乱** 太陽風に運ばれてきた惑星間磁場 (IMF) が南向きになると磁気圏の擾乱 (じょうらん) が起こる。磁気リコネクション (訳者ノート3) と呼ぶ過程で、惑星間磁場の磁力線は地球の昼側で北向きの地球磁場

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)

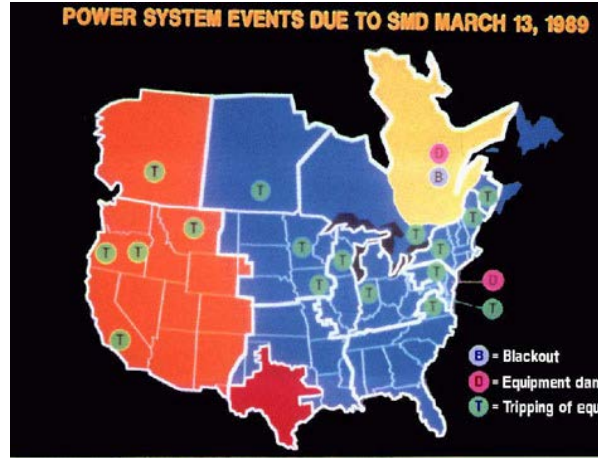


# 太陽嵐の影響（宇宙天気擾乱）

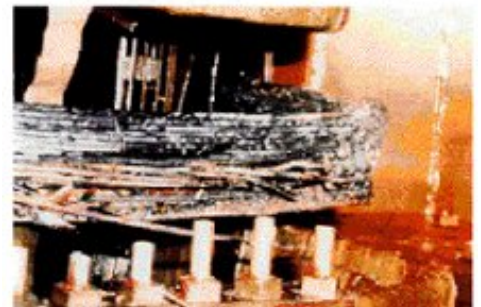
オーロラ



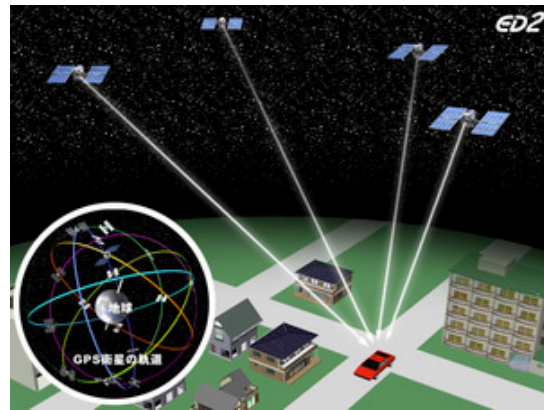
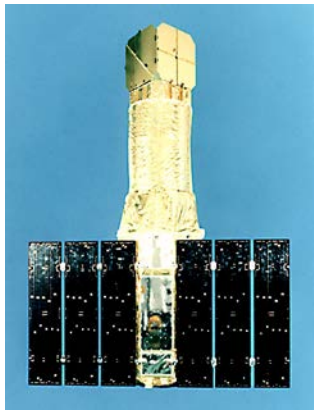
ケベック州大停電 (1989)



PJM Public Service  
Step Up Transformer  
Severe internal damage caused by  
the space storm of 13 March, 1989



衛星故障 GPS障害・通信障害 被曝



# 過去のフレアについて推定される線量の最大値

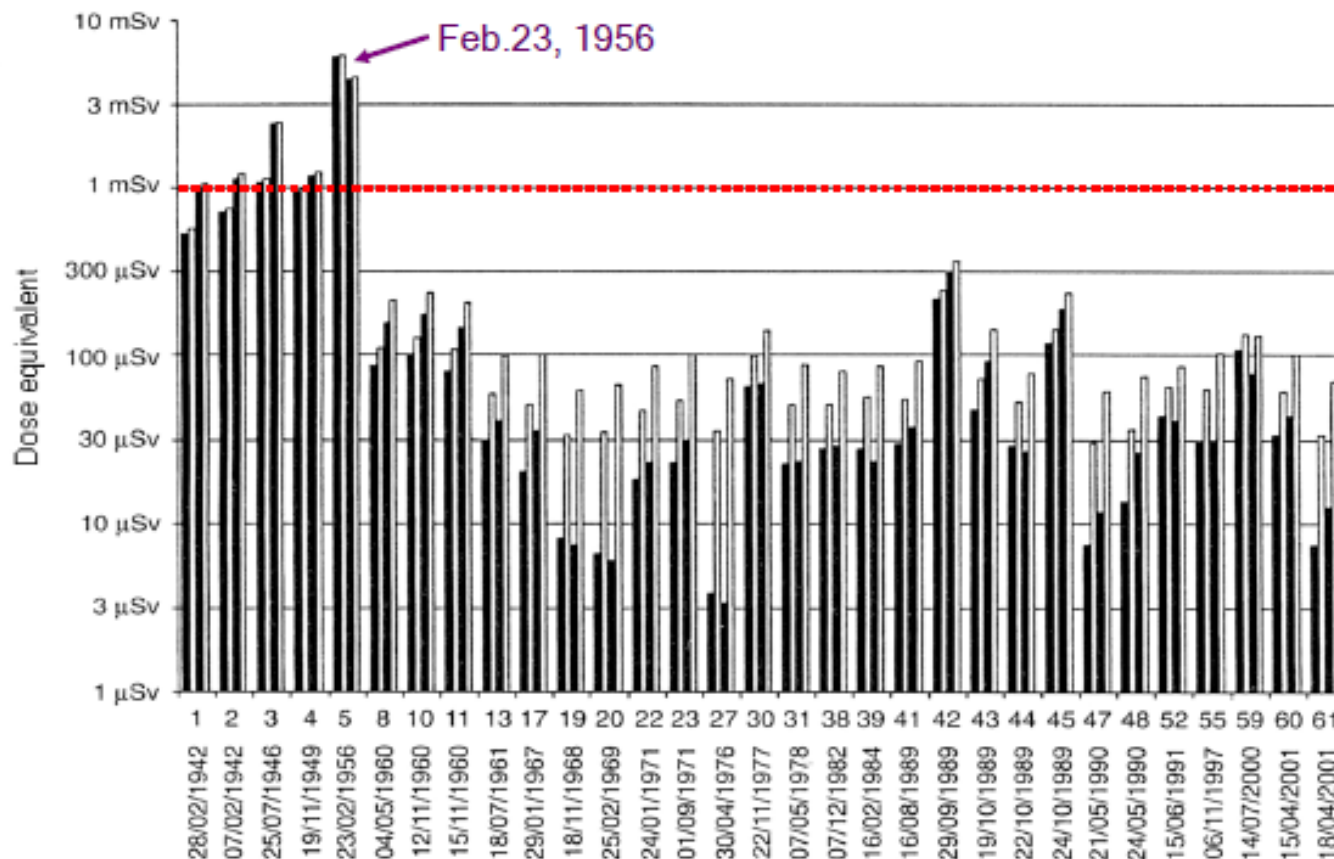
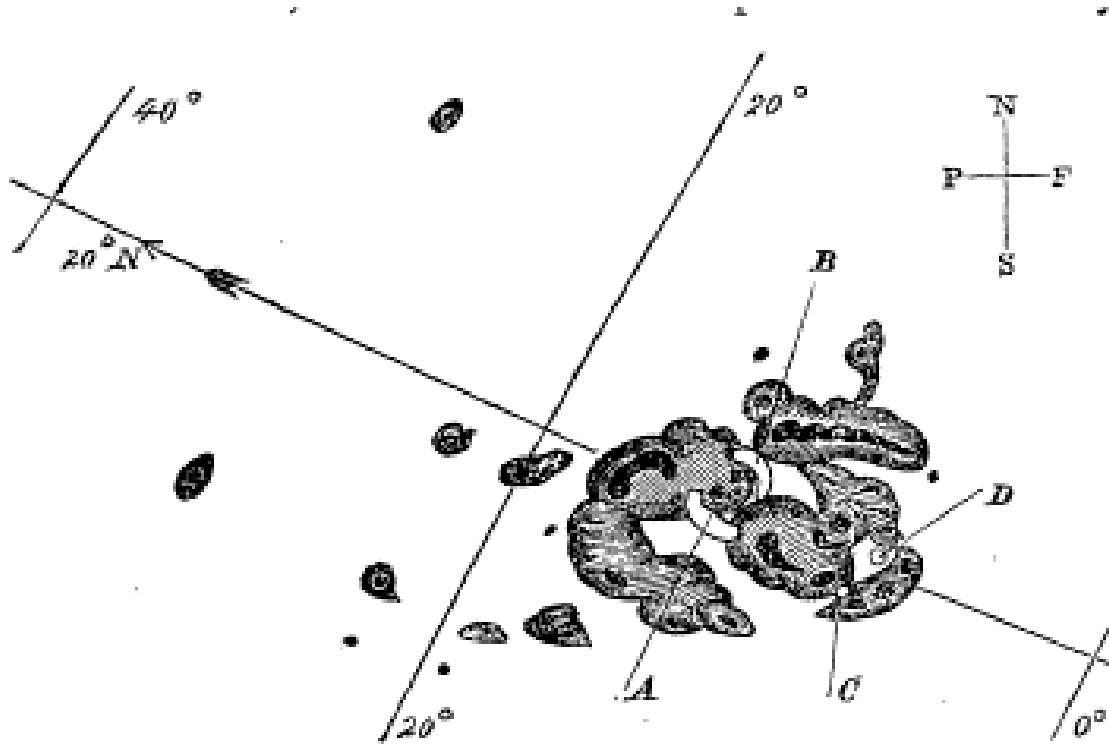


図7. 過去に地上での中性子の増加(Ground Level Event: GLE)が比較的大きく観測された太陽フレアについて、SiGLEモデルを用いてworst caseで計算された周辺線量当量の最大値. 黒いバーは太陽フレア粒子の寄与、白いバーは総線量を示し、左のペアはパリ～ニューヨーク間のコンコルドでの飛行(巡航高度17km、飛行時間3.5h)、右のペアはパリ～サンフランシスコ間のエアバスA340での飛行(巡航高度11km、飛行時間11.5h)での線量を示す(Lantos and Fuller, 2003). なお、1956年2月23日のフレアは1942年以降5番目に観測されたGLE事象に当たる。

# キャリントン・フレア (1859年9月1日)

## ■ Richard C. Carrington

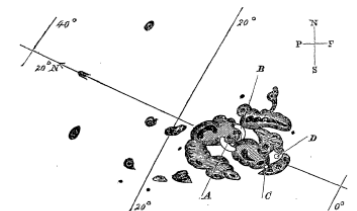
### ■ 太陽フレアの発見



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

*Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859. By R. C. Carrington, Esq.*

While engaged in the forenoon of Thursday, Sept. 1, in taking my customary observation of the forms and positions of the solar spots, an appearance was witnessed which I believe to be exceedingly rare. The image of the sun's disk was, as usual with me, projected on to a plate of glass coated with distemper of a pale straw colour, and at a distance and under a power which presented a picture of about 11 inches diameter. I had secured diagrams of all the groups and detached spots, and was engaged at the time in counting from a chronometer and recording the contacts of the spots with the cross-wires used in the observation, when within the area of the great north group (the size of which had previously excited general remark), two patches of intensely bright and white light broke out, in the positions indicated in the appended diagram by the letters A and B, and of the forms of the spaces left white. My



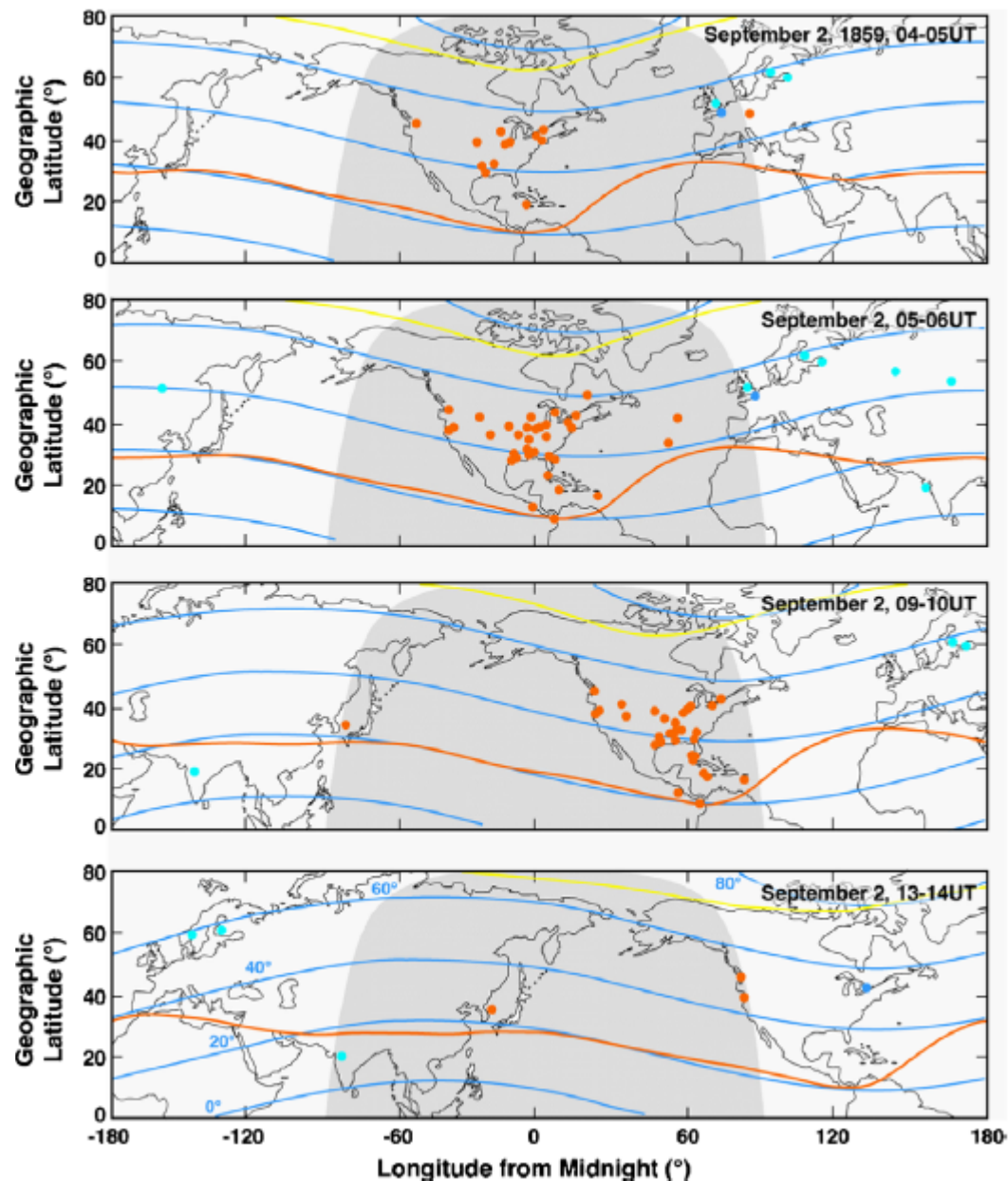
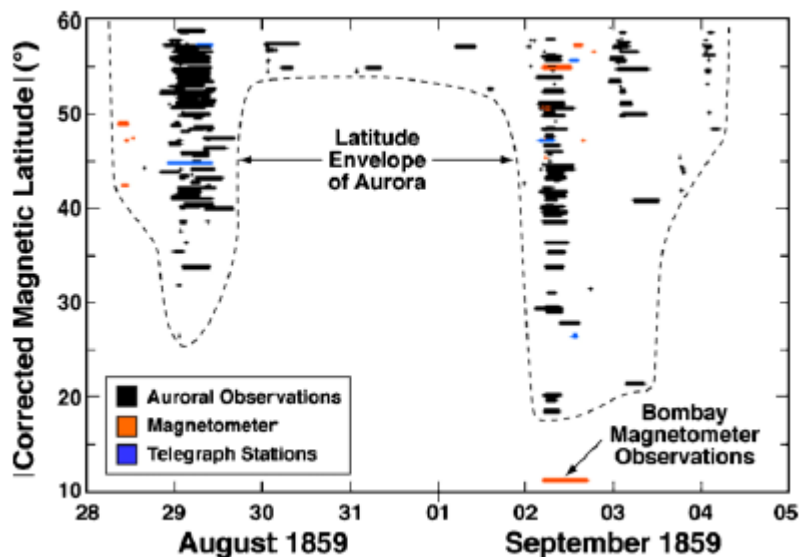
first impression was that by some chance a ray of light had penetrated a hole in the screen attached to the object-glass, by

which the general image is thrown into shade, for the brilliancy was fully equal to that of direct sun-light; but, by at once interrupting the current observation, and causing the image to move by turning the R.A. handle, I saw I was an unprepared witness of a very different affair. I thereupon noted down the time by the chronometer, and seeing the outburst to be very rapidly on the increase, and being somewhat flurried by the surprise, I hastily ran to call some one to witness the exhibition with me, and on returning within 60 seconds, was mortified to find that it was already much changed and enfeebled. Very shortly afterwards the last trace was gone, and although I maintained a strict watch for nearly an hour, no recurrence took place. The last traces were at C and D, the patches having travelled considerably from their first position and vanishing as two rapidly fading dots of white light. The instant of the first outburst was not 15 seconds different from 11<sup>h</sup> 18<sup>m</sup> Greenwich mean time, and 11<sup>h</sup> 23<sup>m</sup> was taken for the time of disappearance. In this lapse of 5 minutes, the two patches of light traversed a space of about 35,000 miles, as may be seen by the diagram, which is given exactly on a scale of 12 inches to the sun's diameter. On this scale the section of the earth will be very nearly equal in area to that of the detached spot situated most to the north in the diagram, and the section of *Jupiter* would about cover the area of the larger group, without including the outlying portions. It was impossible, on first witnessing an appearance so similar to a sudden conflagration, not to expect a considerable result in the way of alteration of the details of the group in which it occurred; and I was certainly surprised, on referring to the sketch which I had carefully and satisfactorily (and I may add fortunately) finished before the occurrence, at finding myself unable to recognise any change whatever as having taken place. The impression left upon me is, that the phenomenon took place at an elevation considerably above the general surface of the sun, and, accordingly, altogether above and over the great group in which it was seen projected. Both in figure and position the patches of light seemed entirely independent of the configuration of the great spot, and of its parts, whether nucleus or umbra. The customary observation was shortly resumed, and the diagram engraved, as well as the larger drawing exhibited at the Meeting on Nov. 11, was deduced from an exact reduction of the recorded times.

It has been very gratifying to me to learn that our friend Mr. Hodgson chanced to be observing the sun at his house at Highgate on the same day, and to hear that he was a witness of what he also considered a very remarkable phenomenon. I have carefully avoided exchanging any information with that gentleman, that any value which the accounts may possess may be increased by their entire independence.

# キャリントンイベント オーロラ

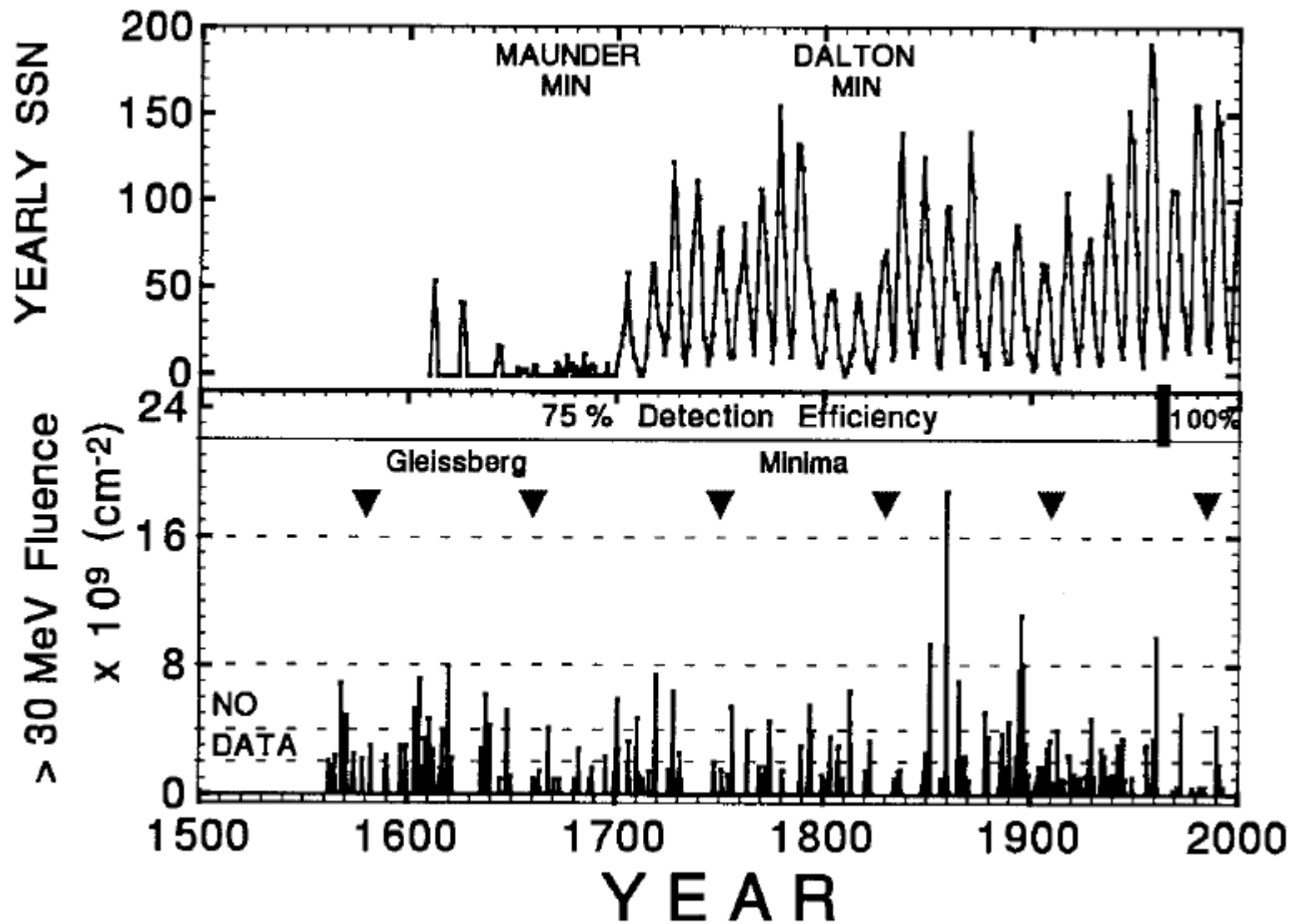
## ■ Green & Boardsen 2006 AdSR





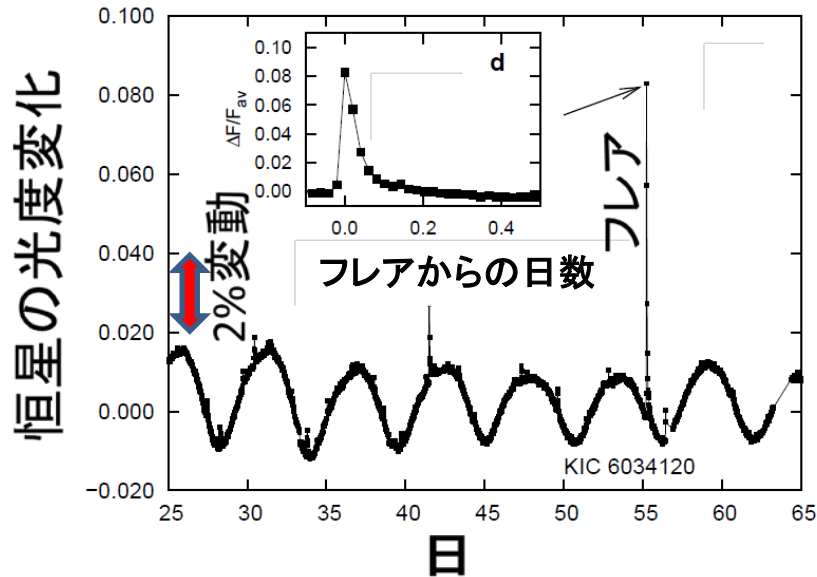
# 過去400年の太陽フレア

McCracken et al. 2001



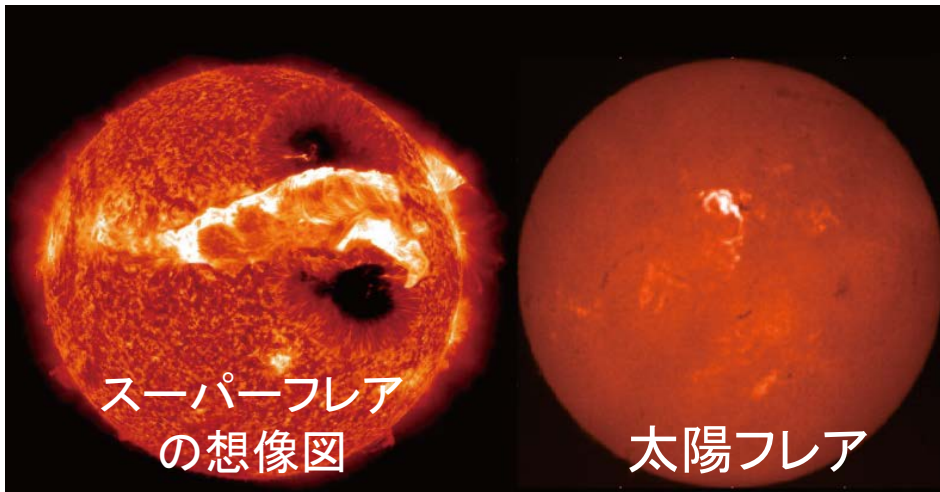
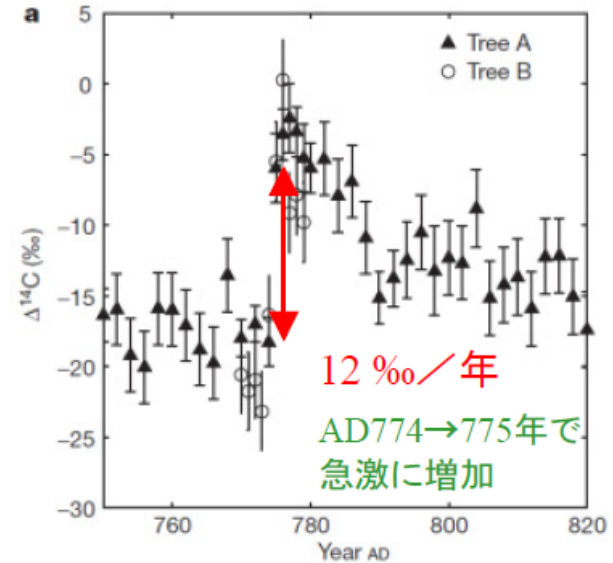
# 太陽型星の超巨大フレア

前原、柴山ら(京都大学)  
Nature 2012



# 西暦774/775年における 宇宙線増加の痕跡

三宅ら(名古屋大学)  
Nature 2012



◀ 前週の放送 2013年6月6日の放送 翌週の放送 ▶

「西暦775年のミステリー 宇宙 謎の大事件」

宇宙線の急増を発見したのは日本の女子学生

今から1200年以上前、世界の天文学者の注目を集める年がある。西暦774年から775年にかけての1

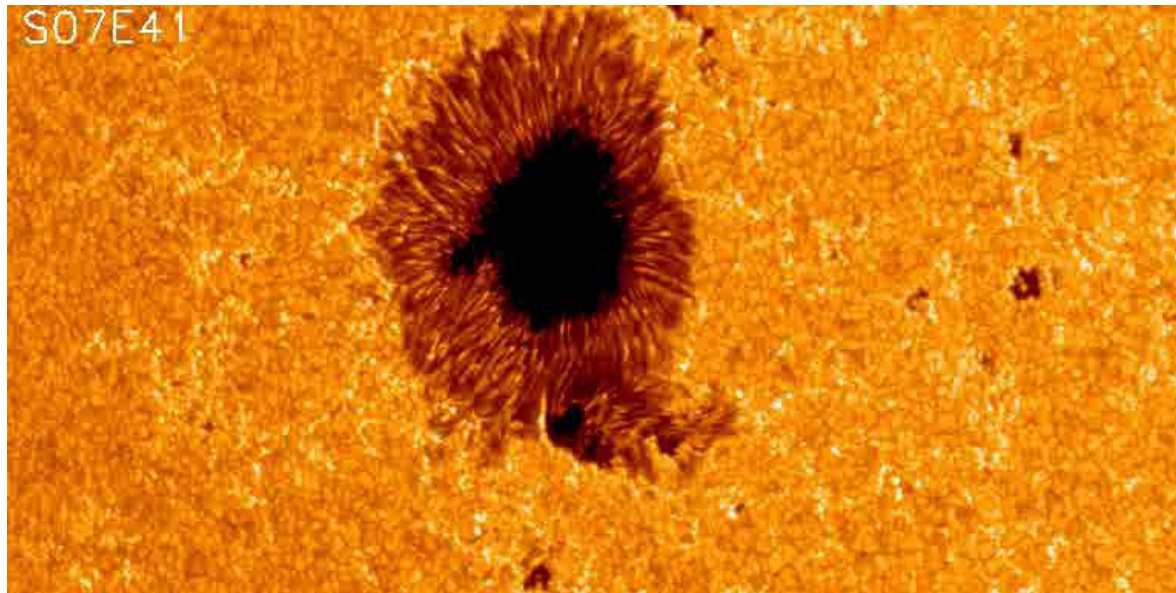
この放送回は

# 巨大フレアによる被害と影響

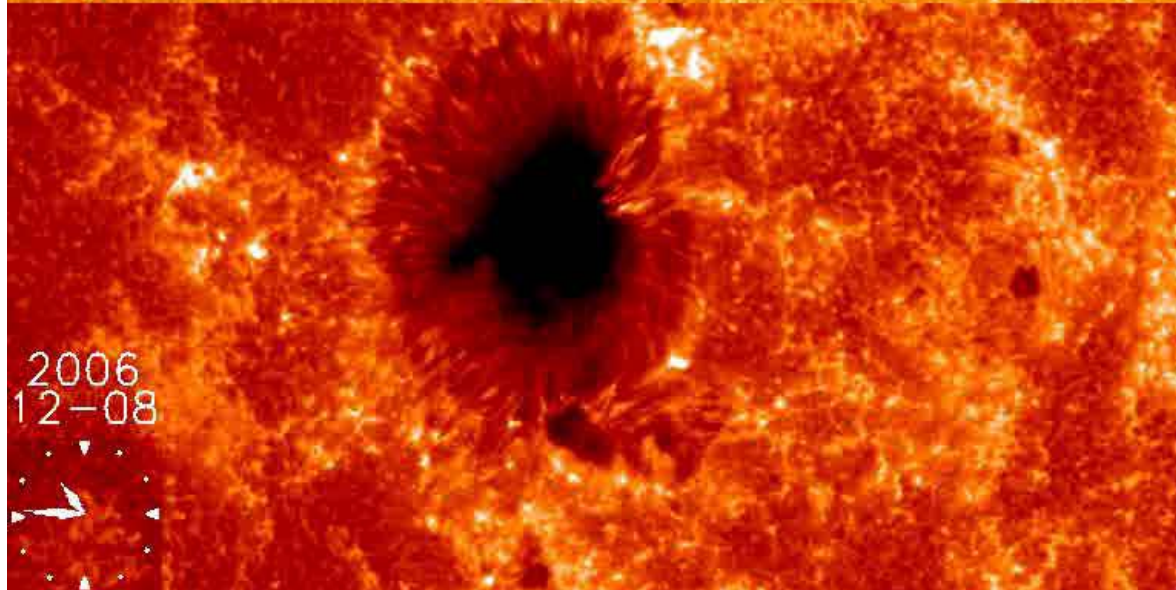
	巨大フレア (1989年3月13日)	キャリントン・フレア (1859年)	スーパー・フレア (巨大フレアの100~1000倍)
放射線 (航空機内の推定値)	4mSv	20mSv	400~ 4000mSv?
地磁気嵐	540nT (全米でオーロラ)	1760nT (赤道帯でオーロラ)	5000~ 15000nT?
社会への影響	ケベック州大停電 電波通信障害 気象衛星故障 衛星放送停止 (被害総額数100億円以上)	電信局の火事 >今起きたら 中高磁気緯度の <b>大停電</b> <b>多くの衛星の故障</b> <b>地球規模の通信障害</b> <b>GPS故障</b> (被害総額1兆~2兆ドル)	地球規模の <b>大停電</b> <b>オゾン層破壊</b> <b>全衛星の故障</b> <b>地球規模の通信障害</b> <b>全航空機飛行停止</b> <b>船舶運航停止</b> <b>GPS停止</b> <b>ITインフラの破壊</b>

# 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

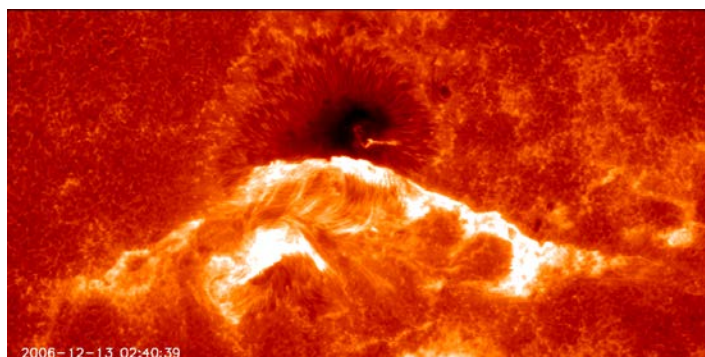
# 太陽フレアの特徴

黒点の近傍

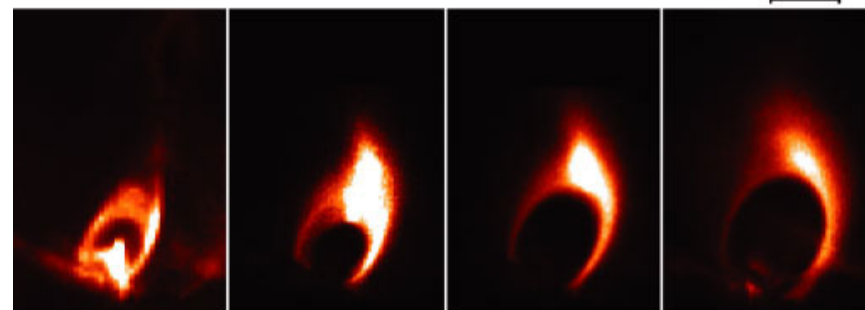
カस्प状ループ

2本のリボン

飛び出すプラズマ



5万 km

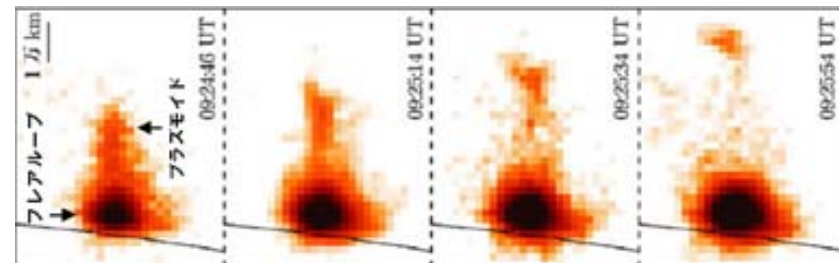


02:52:58 UT

04:45:58 UT

06:00:34 UT

09:06:42 UT



フレアループ

プラスモイド

08:24:46 UT

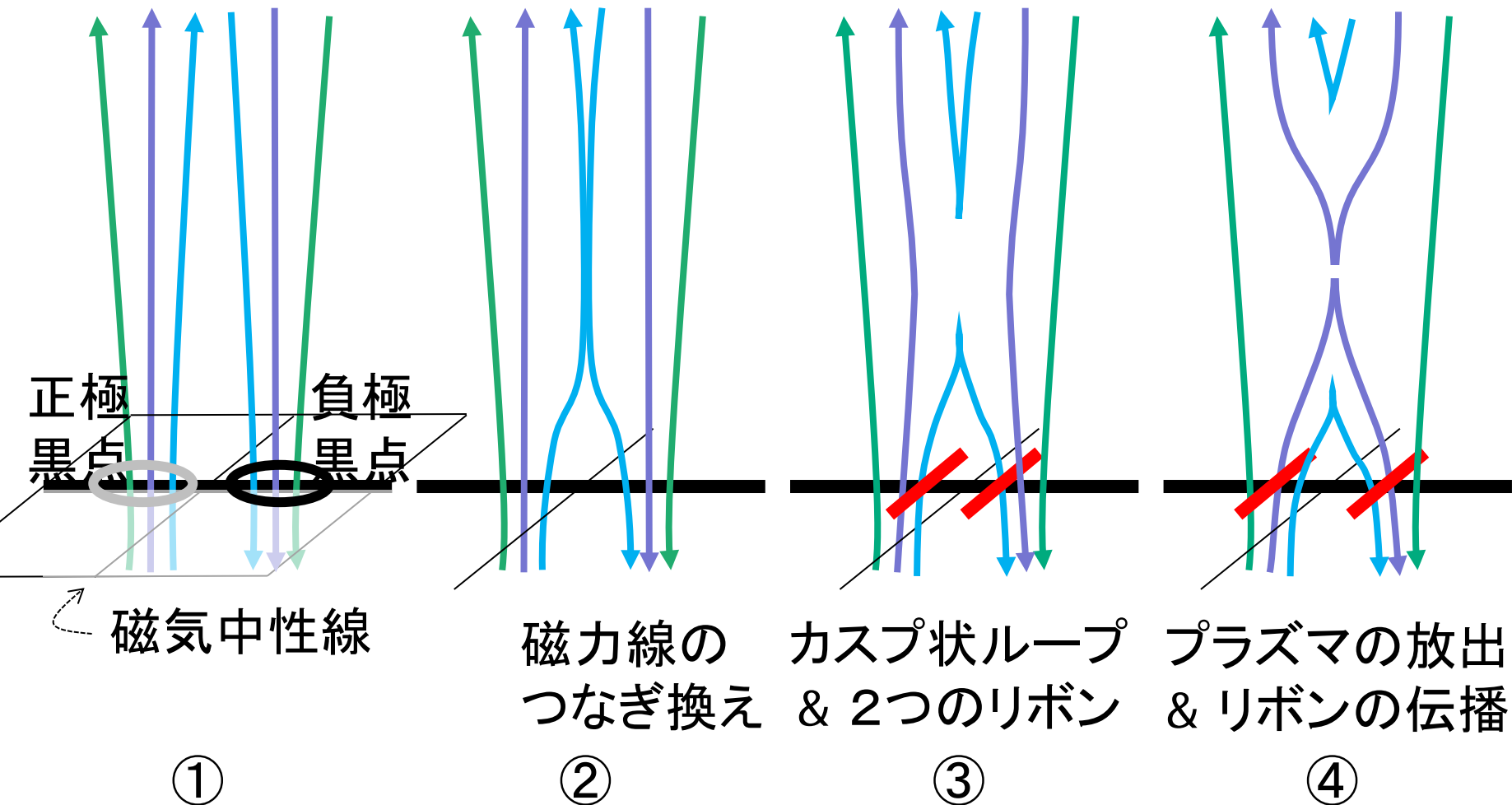
08:25:14 UT

08:25:34 UT

08:25:54 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

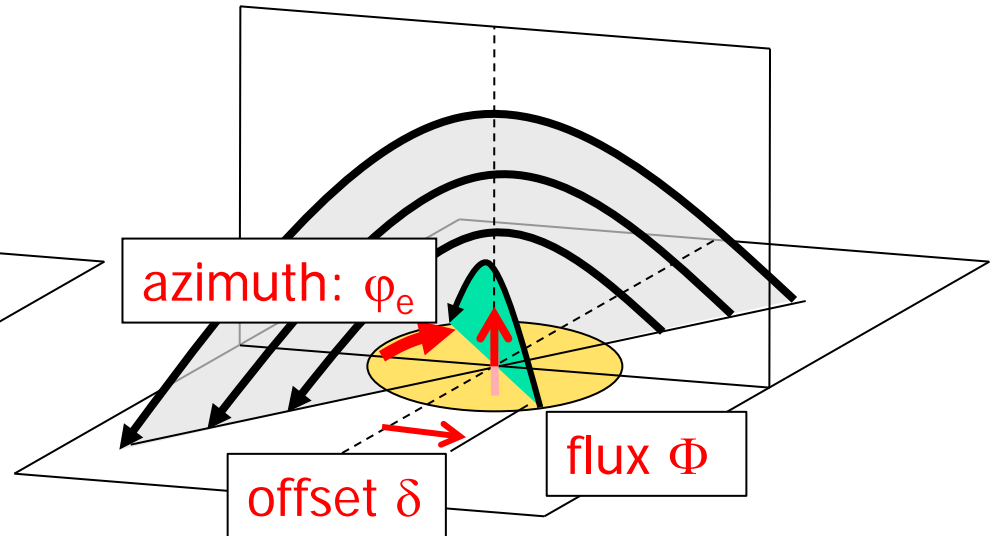
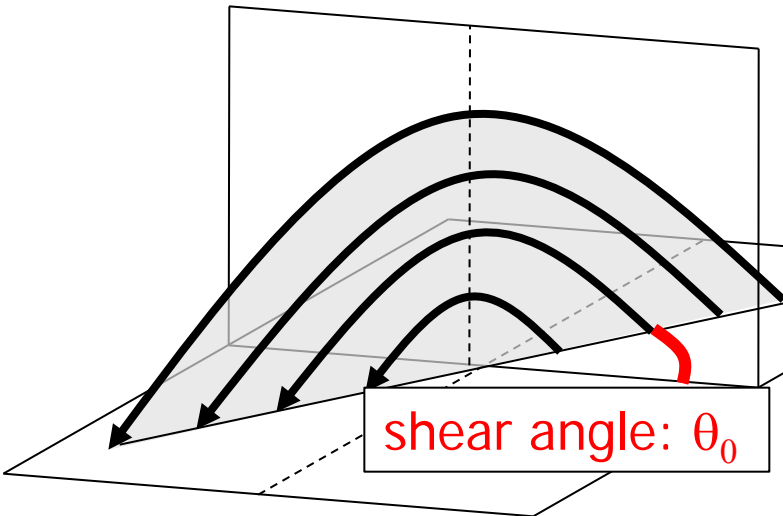
200 400 600 800 1000 1200

# Parameters in Ensemble Simulation

Large field  
(free energy)

&

Small field  
(trigger)



Box: Rectangle including PIL  
Initial condition: LFFF

161  
cases

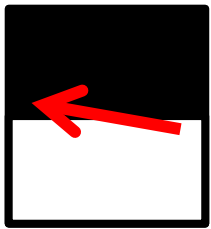
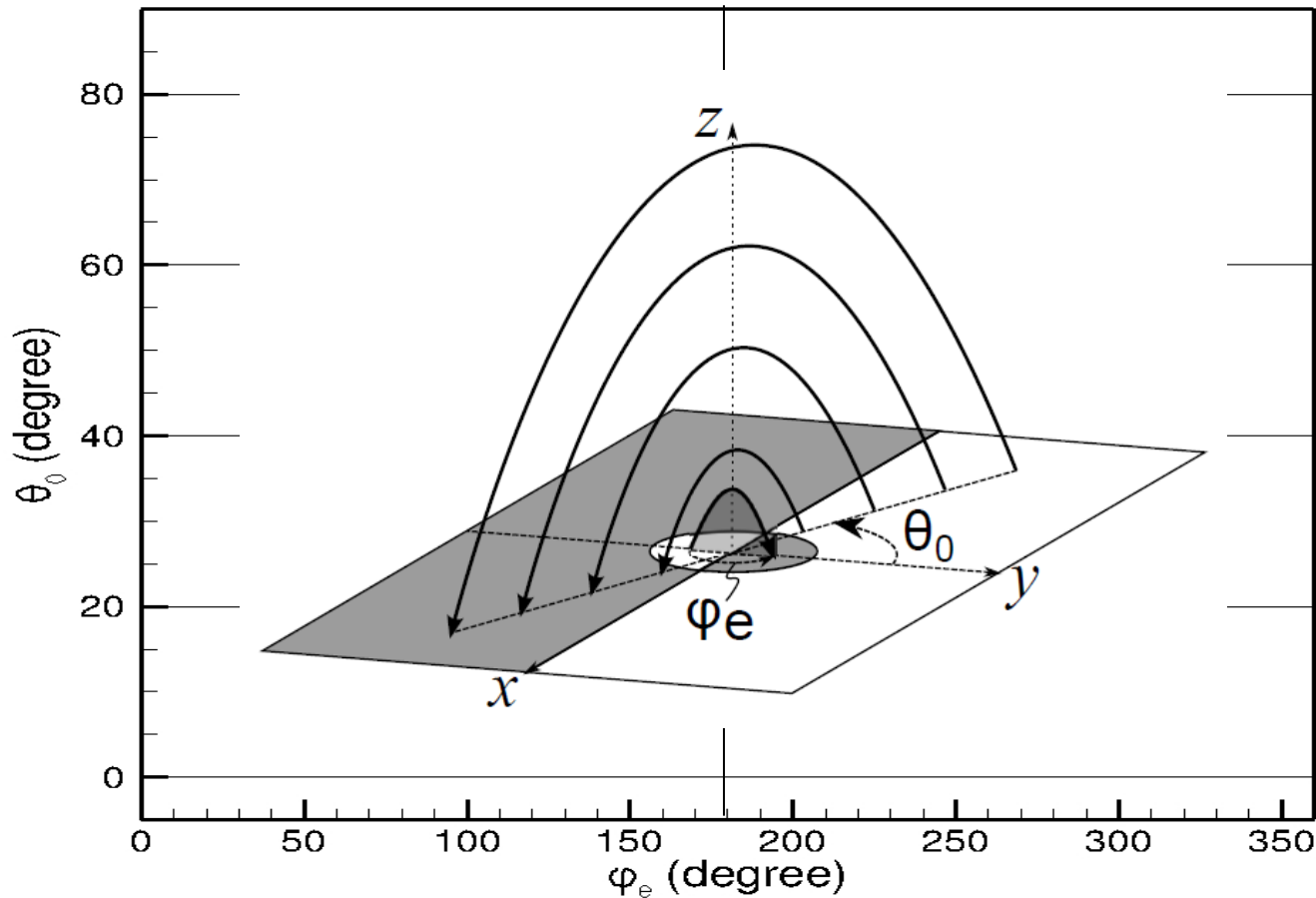
- 3D MHD
- 256x1024x512 grids
- output: 800 GB/run



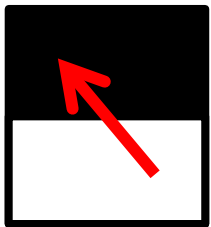
Earth Simulator (JAMSTEC)



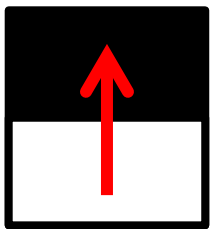
# Parameter Space: $\theta_0$ vs. $\varphi_e$



strong shear

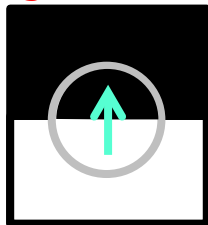


weak shear



potential field

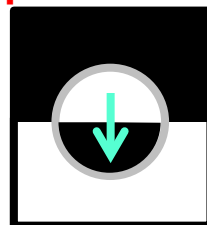
Right Polarity



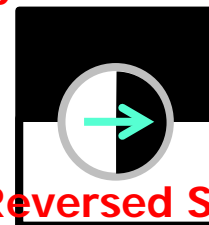
Opposite Polarity



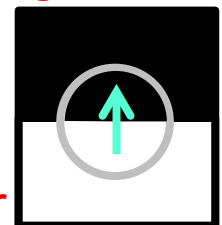
Normal Shear



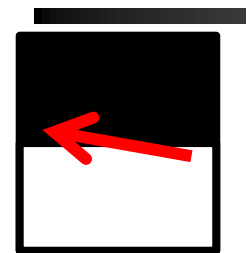
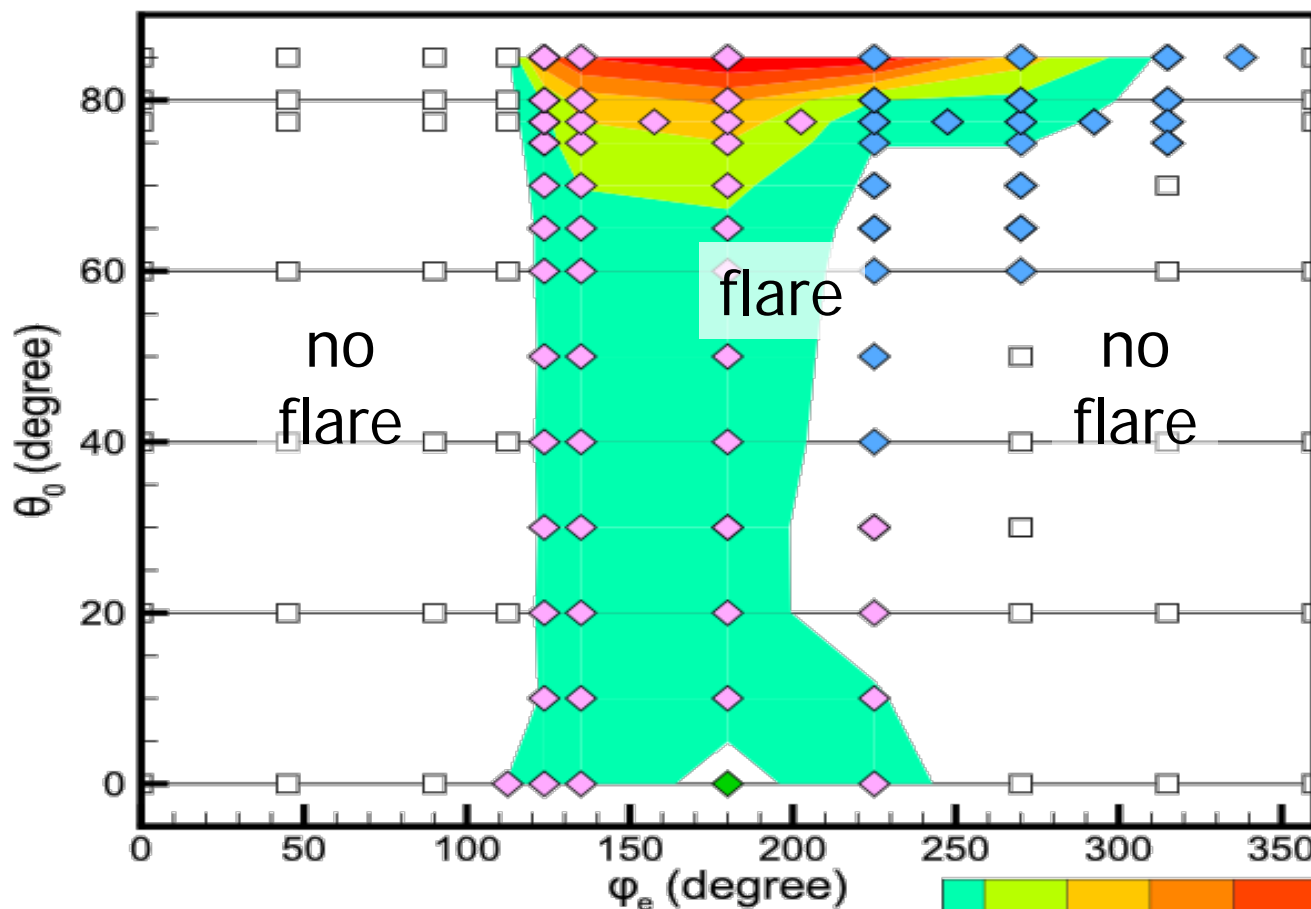
Reversed Shear



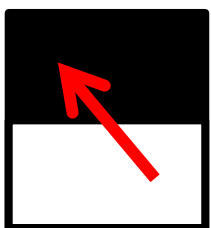
Right Polarity



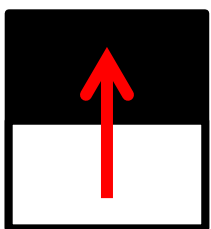
# シミュレーション結果



strong shear

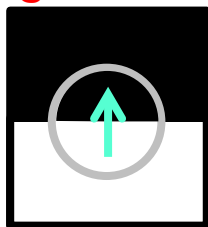


weak shear



potential field

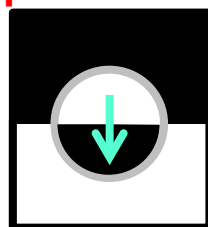
Right Polarity



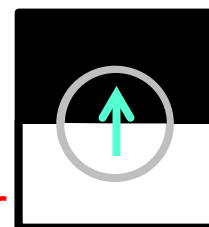
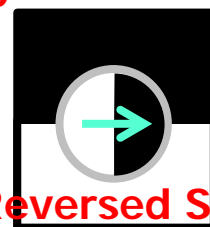
Opposite Polarity



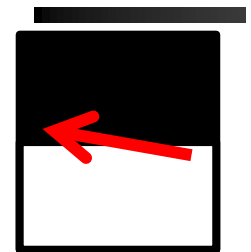
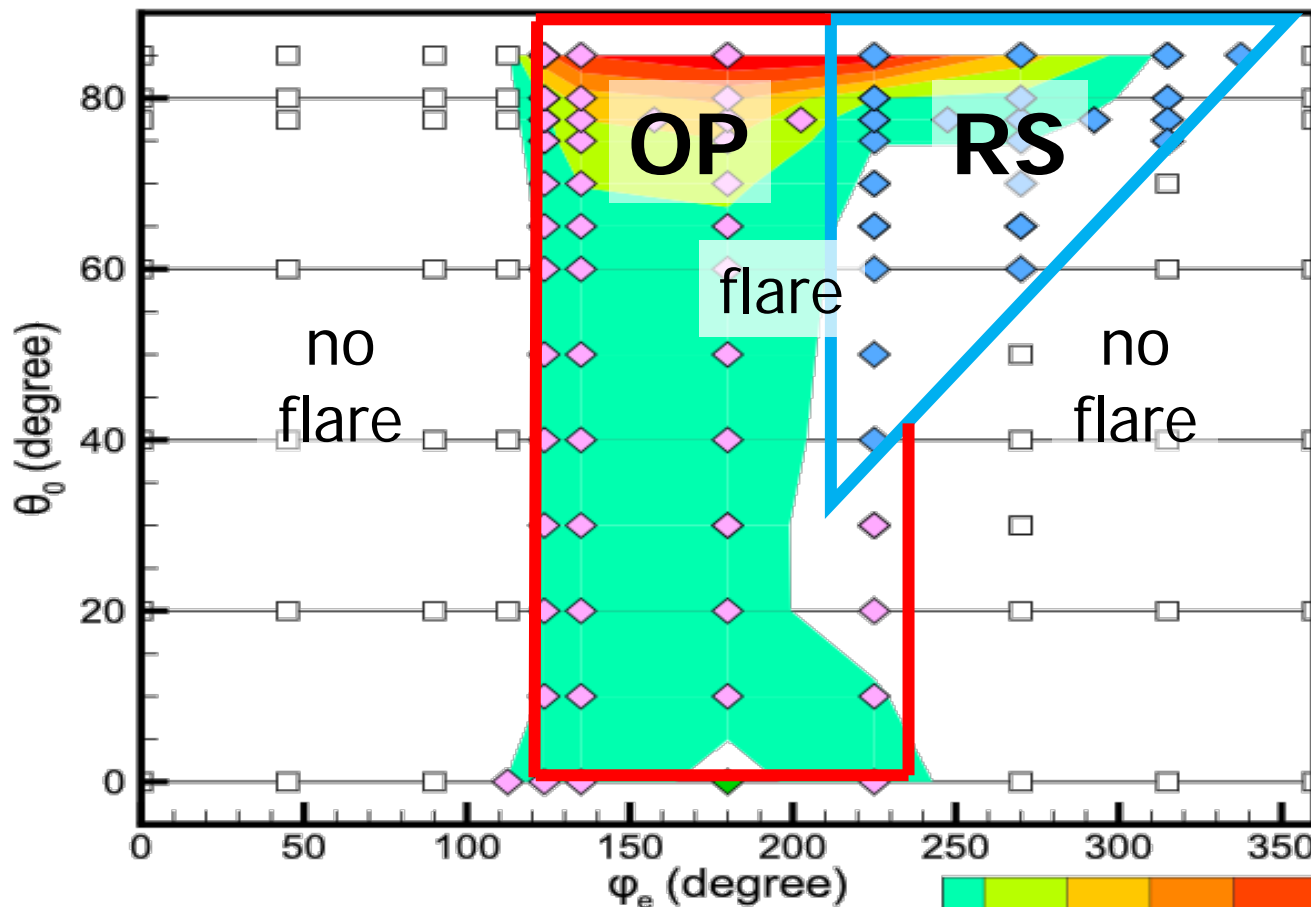
Normal Shear



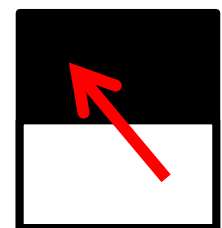
Reversed Shear



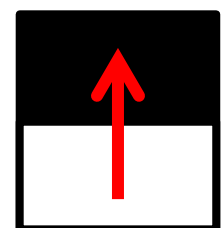
# Flare Phase Diagram



strong shear

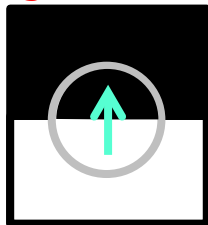


weak shear



potential field

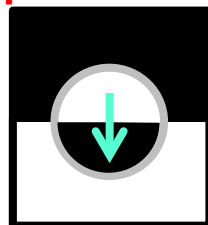
Right Polarity



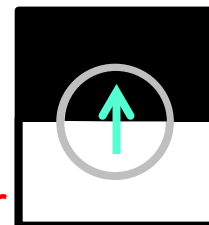
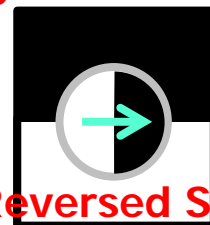
Opposite Polarity



Normal Shear

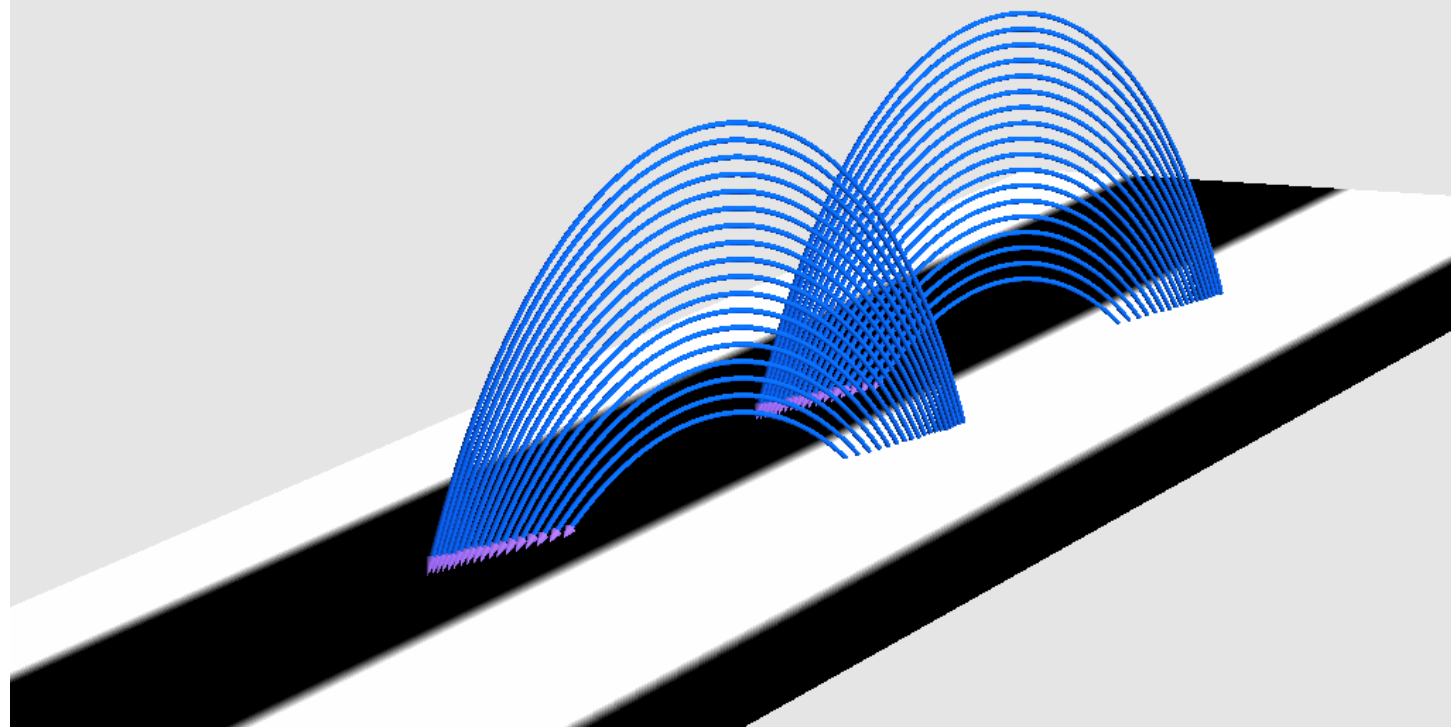


Reversed Shear

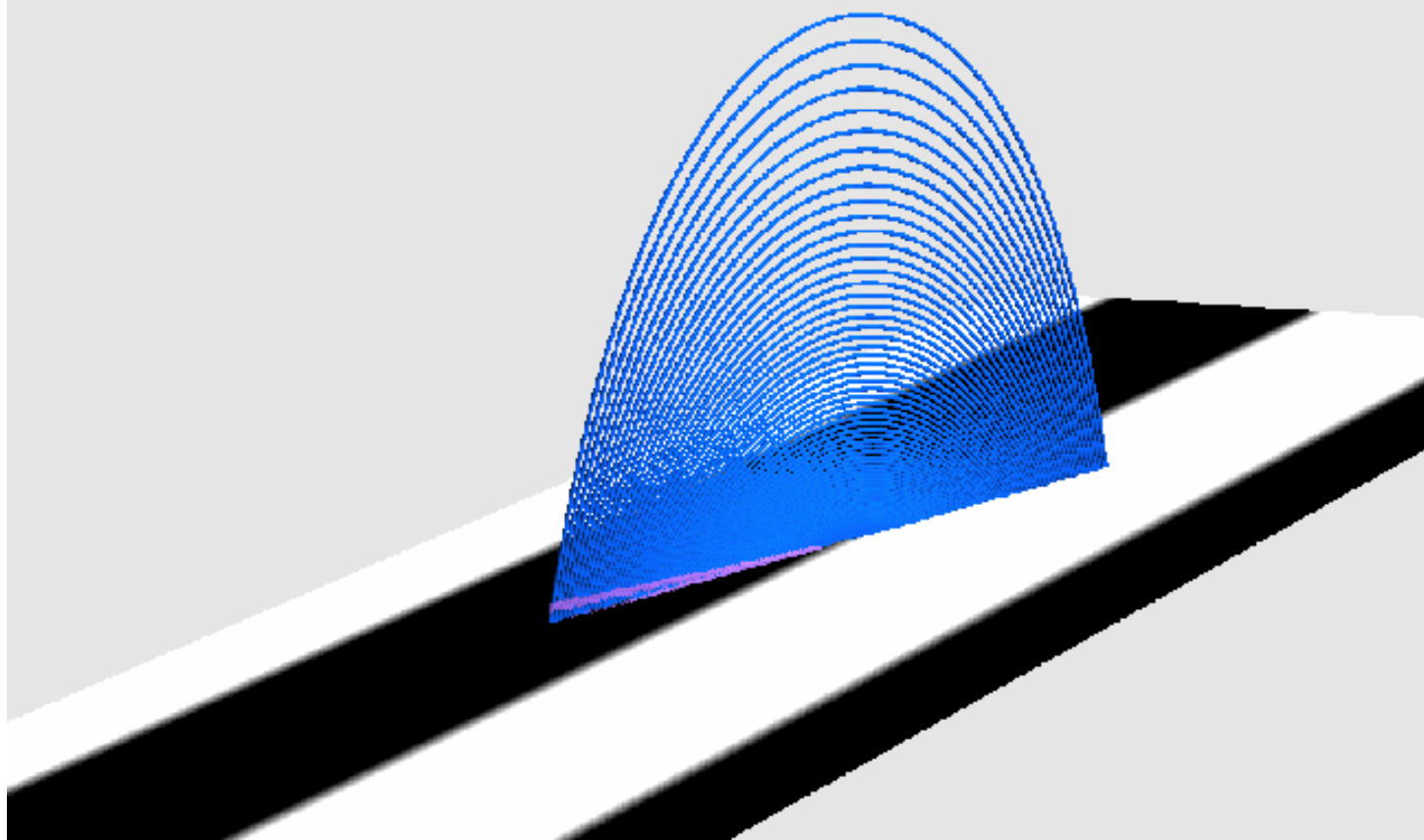


$E_k$  0.5 1.0 1.5 2.0 2.5 ( $\times 10^{-2}$ )

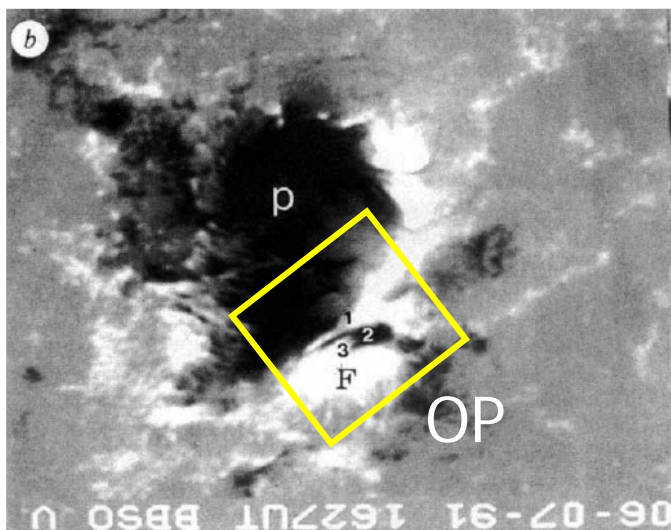
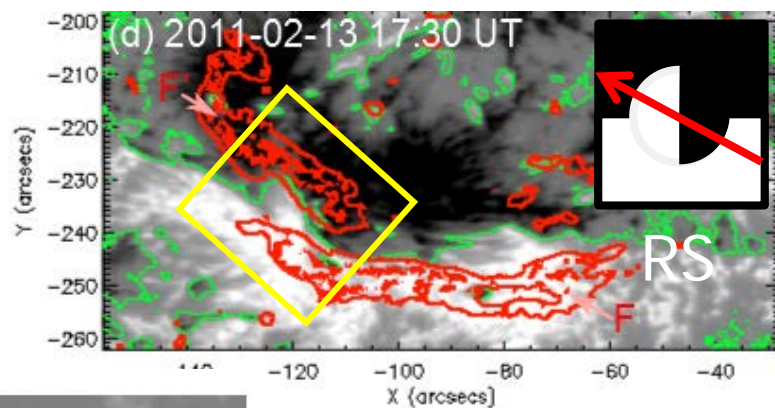
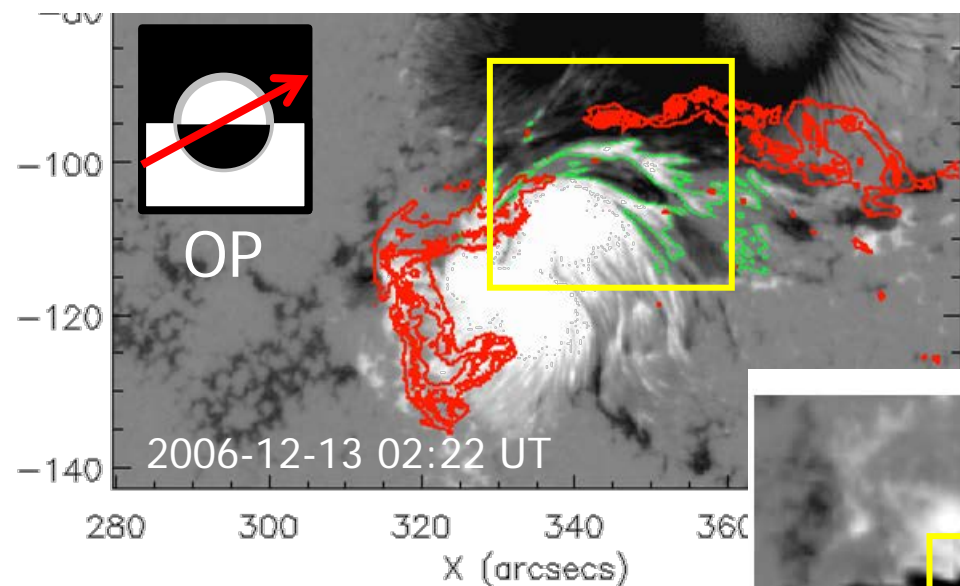
# 反極性型 (OP-type)



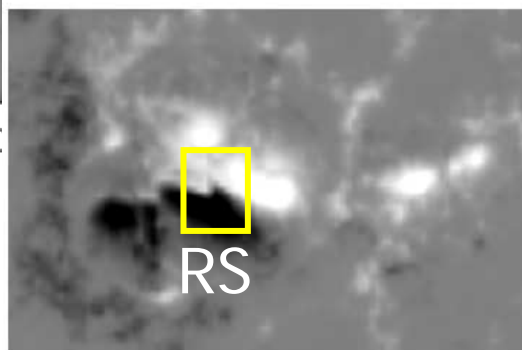
# 逆磁場型 (RS-type)



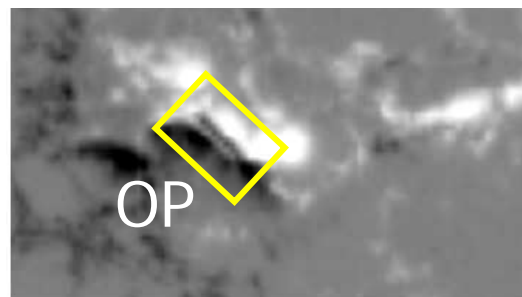
# 觀測的檢証



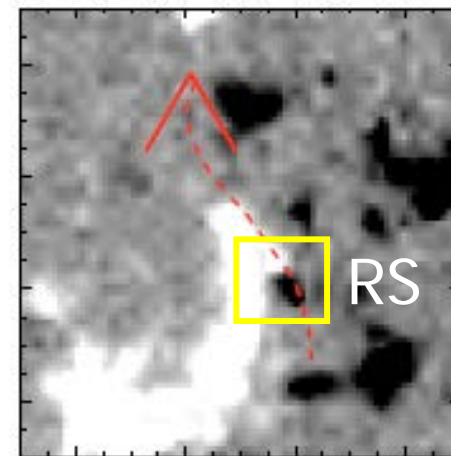
Zirin and Wang 1993



00-Jun-06 12:51:30



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



Green, Kliem & Wallace 2011

# News: Solar Flares are Predictable!

朝日新聞 2012年11月3日

## 太陽フレア 発生条件解明



2006年12月、太陽観測衛星がとらえた太陽フレア＝国立天文台、JAXA提供

太陽表面の爆発（フレア）は、どんな時に起こるのか。その発生条件を、名古屋大と東大、京大の研究チームが突きとめた。フレアで噴き出した大量の荷電粒子が地球に届けば、世界規模の停電や通信障害が起こりかねない。チームでは数年以内に「フレア予測」の実用化を目指す。

太陽フレアは、太陽の表面で起る爆発現象で、水素爆弾100万個にも匹敵するエネルギーを一瞬で放出する。太陽の黒点から出る磁力線が絡み合って起ると考えられていたが、詳しいメカニズムはわかっていなかった。

研究チームは、二つの黒点をつなぐ磁力線をねじり合わせるシミュレーションを繰り返し、爆発が起きるパターンを解析。二つの黒点の境界部分にねじれを打ち消す方向の磁力線を出すと、「ミニ磁場」が現れると、爆発することを突き止めた。

2006年と11年に実際

### 名大など

## 数年内に「予報」できるかも

に起きた大規模フレアの観測データを改めて解析したところ、「ミニ磁場」が現れた数時間後に爆発が起きていたことも分かった。

大規模な太陽フレアは地球に磁気嵐を引き起こす。人工衛星や地上のあらゆる通信機器が故障し、飛行機の乗客が被曝する恐れもある。80年のフレアでは、磁気嵐によってカナダで大規模な停電が起きた。

草野完也・名大教授は「数年内に数時間後に起こる太陽フレアを予測できるようにしたい」と話した。この研究成果は、米天文誌「アストロフィジカルジャーナル」電子版に発表された。

NATIONAL GEOGRAPHIC Inspiring People to Care About the Planet

検索 powered by Yahoo! JAPAN

トップ > ニュース > 科学 & 宇宙 > 太陽フレアの予測が可能に

トップ ニュース 写真 NEW 動画 宇宙 動物 環境と自然 国と人 太古の世界

ナショナルジオグラフィック ニュース  
 ニューストップ | 動物 | 古代の世界 | 環境 | 文化 | 科学 & 宇宙 | 風変わりニュース

太陽フレアの予測が可能に

ツイート B! P SN チェック いいね! 144 +1 6

サイエンスポータル  
November 7, 2012

2013年3月7日の放送

「地球を襲う太陽嵐」

この放送内容はNHKオンデマンドで配信可能です。放送翌日午後6時から配信開始です。

突然、都市に大規模な停電が起き、GPSが使えなくなり、人工衛星が失われる...そんなパニック映画のようなリスクが、そこに私たちの生活を脅かしている。原因は太陽の表面で起る爆発によって発生する「太陽嵐」だ。強い電磁波やプラスマで、1億5千万km離れた地球に降り注ぐのだ。次に太陽嵐が地球をむかえるのは今年の秋頃とも予想されている。IT化が進んだ現代社会で大規模な太陽嵐が地球を襲う場合は、停電に加え電子機器の異常動作や停電通信の障害など全世界が混乱に陥るおそれがあり、アメリカでの報道では損害は最大の北半球に上ると懸念されている。太陽嵐が地球の高層大気を加熱し膨張させることで、人工衛星が軌道を外れ墜落するケースもある。また、最近の研究では、過去に観測された最大級の太陽嵐を上回る規模の「スーパーフレア」が発生する可能性もあるとわかってきた。

番組では、近年明らかになってきた太陽嵐のメカニズムの最新情報や、産業・社会基盤などを支える「宇宙天気予報」の取り組みを紹介し、明日にも起こるかもしれない太陽嵐の脅威と備えの方策を探る。

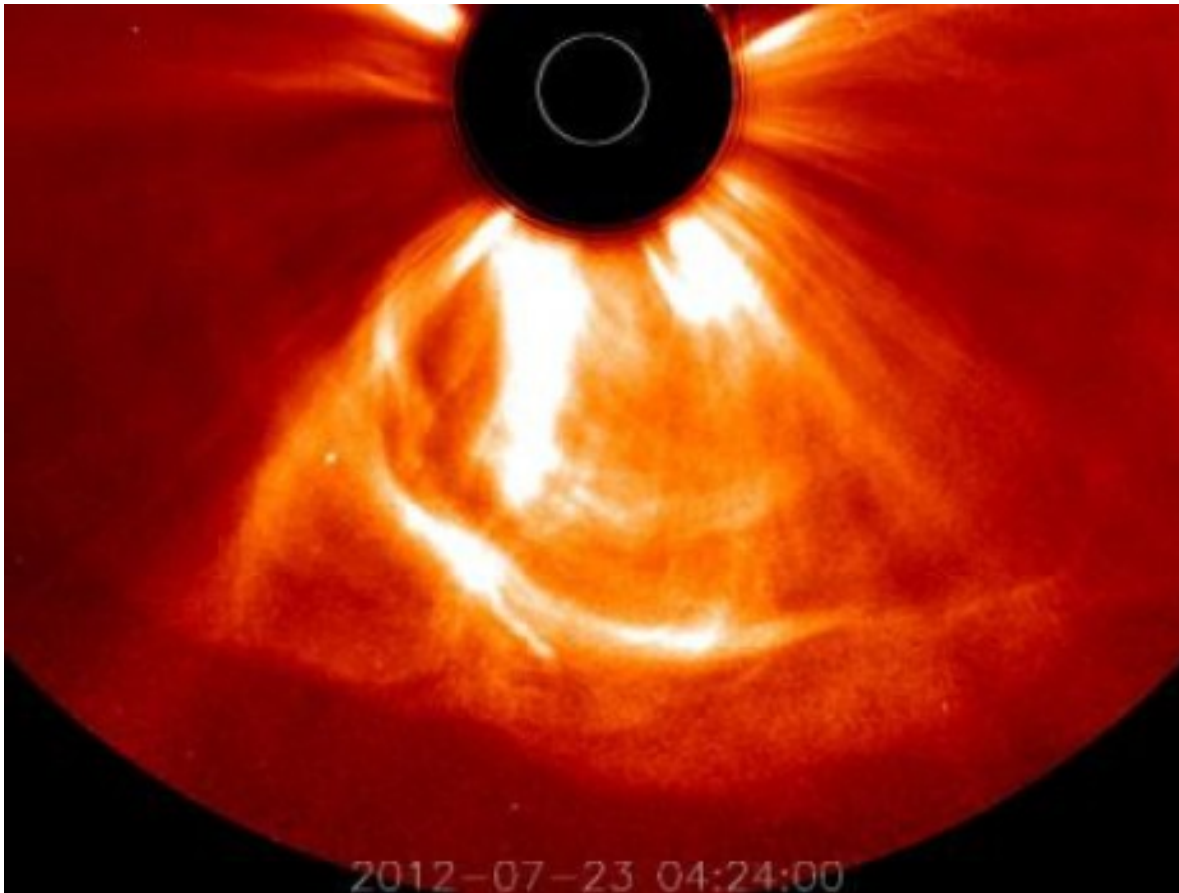
この放送はNHKオンデマンドで配信可能です。放送翌日午後6時から配信開始です。

記事全文 >

で配信された記事の転載です。

# Carrington-class event

- 2012, July 23 (2000km/sec)



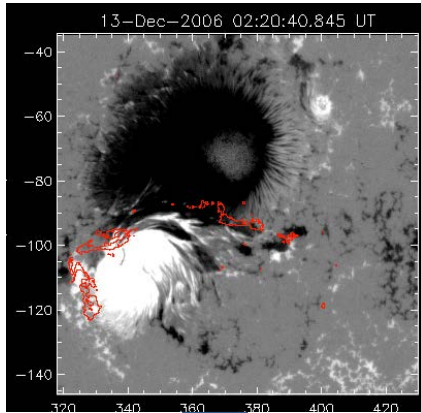
幸いにも太陽の裏側で発生したため、地球に影響しなかった。



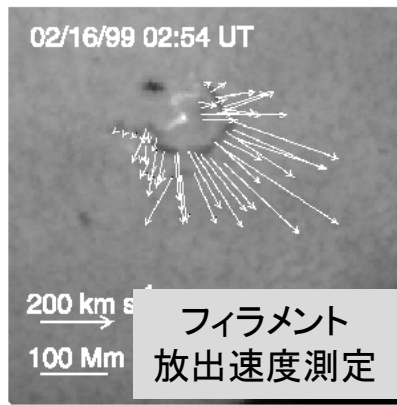
# 太陽嵐の予測と宇宙天気予報

## 衛星計画との積極的な連携研究

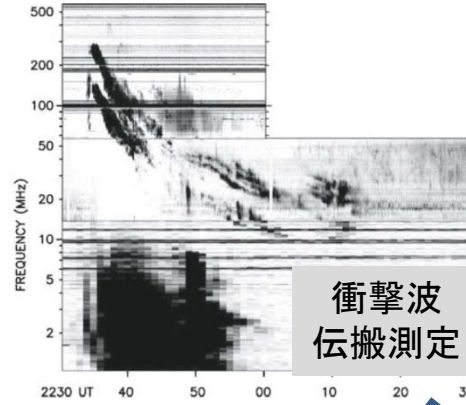
ひので、Solar-C  
精密磁場観測



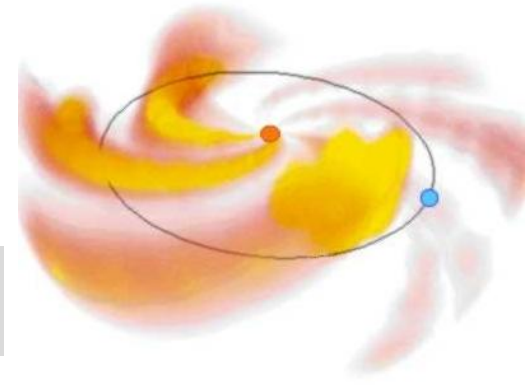
京大・NAOJ・茨城大  
H $\alpha$ ドップラー測定



東北大・NICT  
電波観測



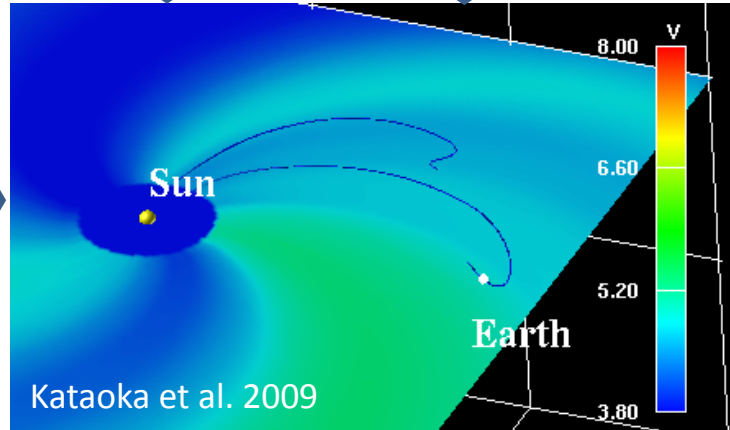
名大IPSシステム  
太陽風の3次元構造観測



Kusano et al. 2012

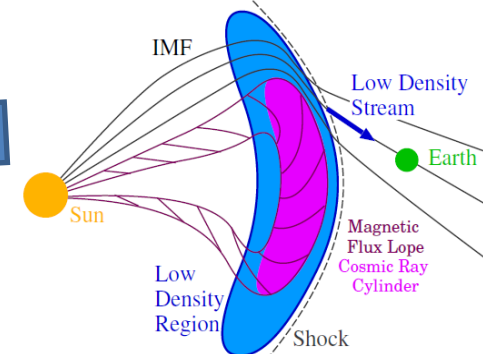


フレア予測計算



惑星間空間モデル

信州大ミュオン計測  
宇宙線前兆現象の測定



# SUSANOO: 実証型宇宙天気統合システム

Space weather Unified System Anchored by Numerical Operations and Observations



Space-weather-forecast-Usable System  
Anchored by Numerical Operations  
and Observations

SUSANOO

## SUSANOO Contents

- Top (Solar wind at Earth)
- Solar wind at Mercury
- Solar wind at Venus
- Solar wind at Mars
- Solar wind at Jupiter

## Members

## Notes

## Link

## Radiation Belt Models

- NOAA/SWPC
- NASA/GSFC
- UC/LASP
- NICT

## Space Weather Info

- NOAA/SWPC
- SpaceWeather.com
- SolarMonitor

## Space Wx Info Japan

- NICT1
- NICT2

## Real Time Data

- Hinode
- STEREO/IPS
- STEREO
- STEREO SW
- STEREO RT beacon
- SOHO
- SOHO/PM
- ACE
- GOES Particle
- GOES Mag
- Dst Index
- AE Index
- Pc5 Index

## Weekly Forecast of Radiation Belt

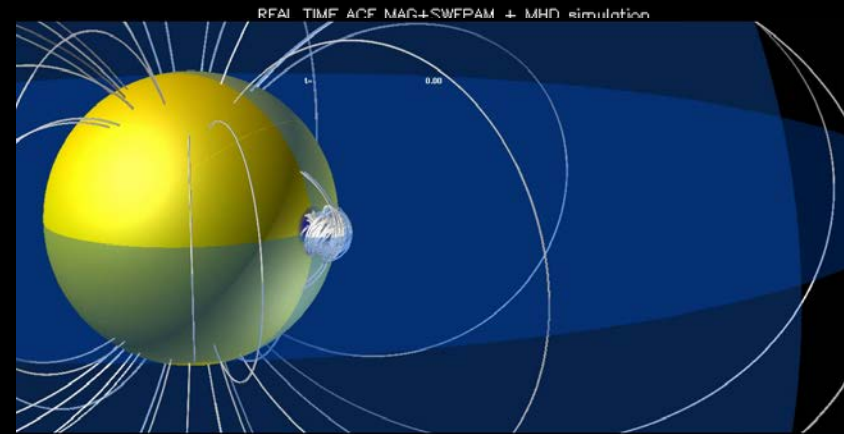
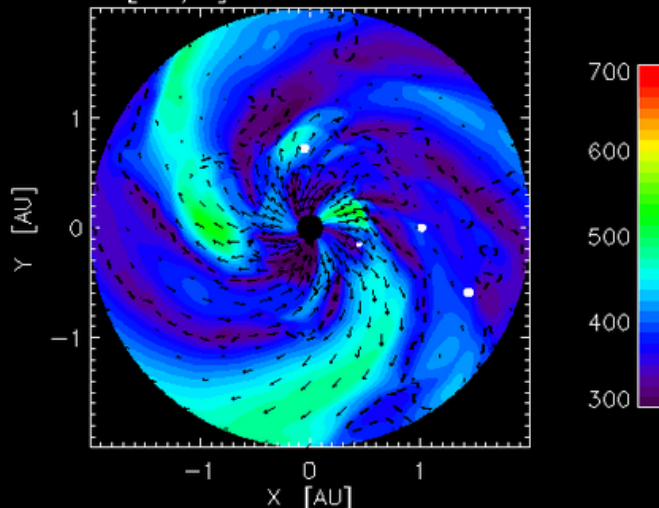
2014/06/10 0100 UT Ver1.0

06/10	06/11	06/12	06/13	06/14	06/15
30%	30%	30%	30%	30%	30%

The forecast is updated everyday by scientists at 01:00-02:00 UT. "Today" is

## Solar Wind Map Ver 1 Beta

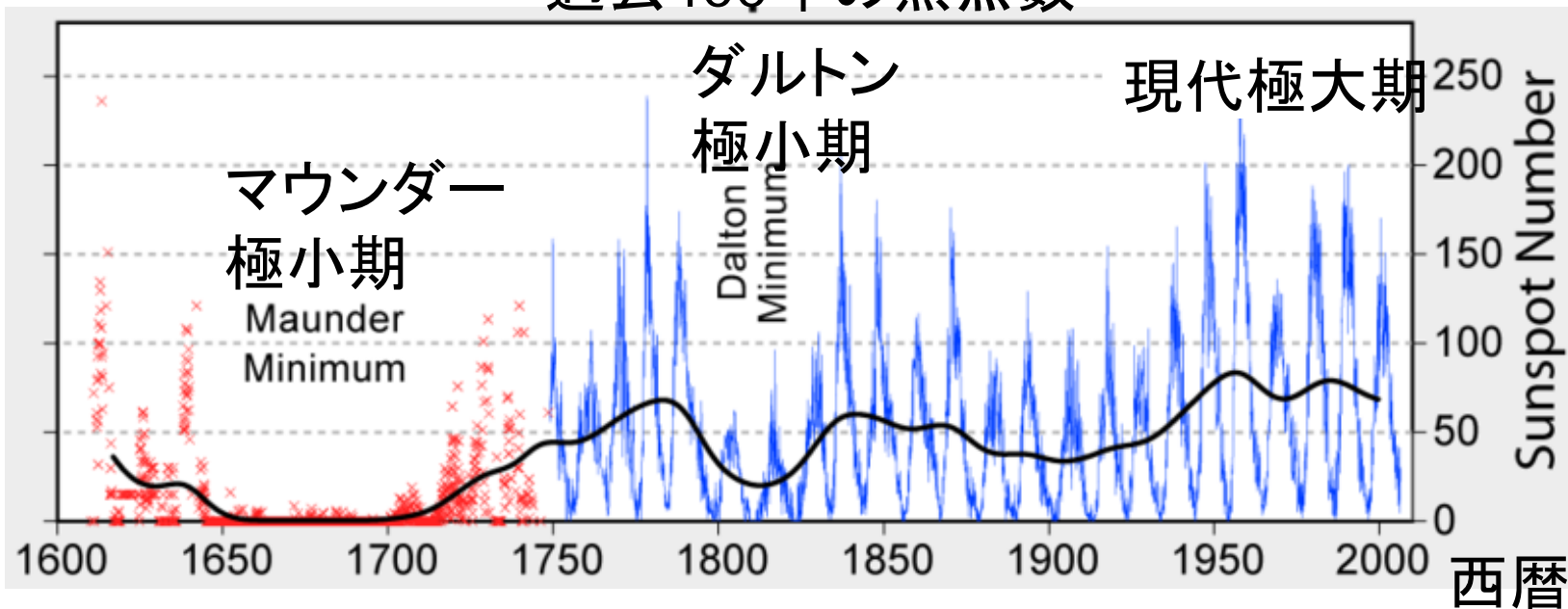
Vr [km/s] 2014.06.09 00:01UT



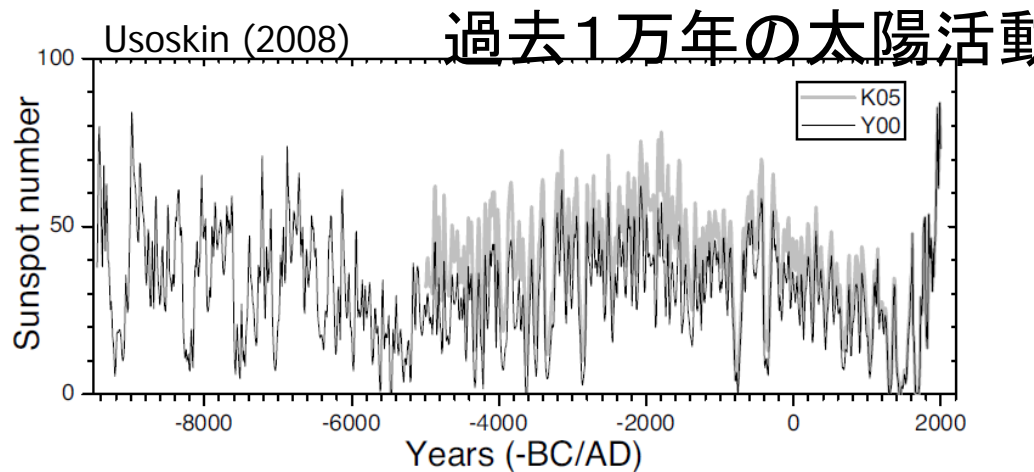
- 太陽風シミュレーションと放射線帯シミュレーションのコードカップリングシミュレーション。経験モデルによるオーロラ予報も実装。
- 2週間先までの太陽風と放射線変動の予測計算が可能(世界初)。
- データ同化を含めた、コードの改良を実施中。

# 黒点周期活動の謎

過去400年の黒点数

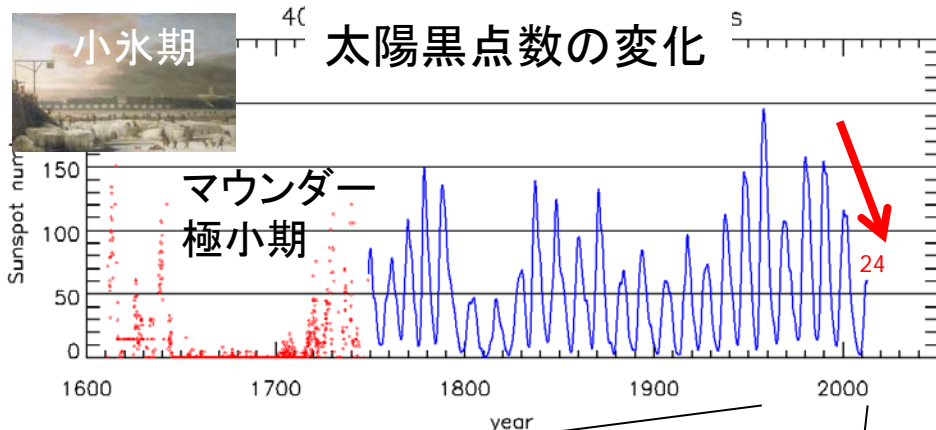


小氷期

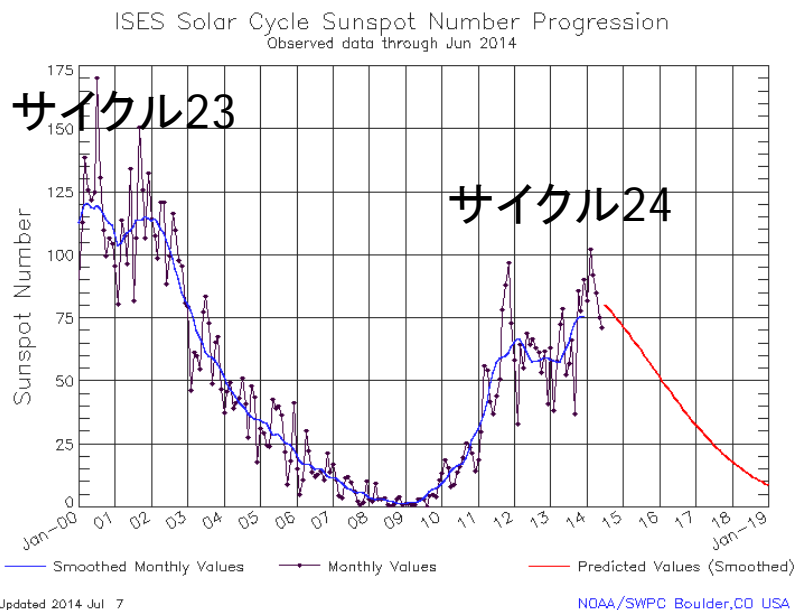
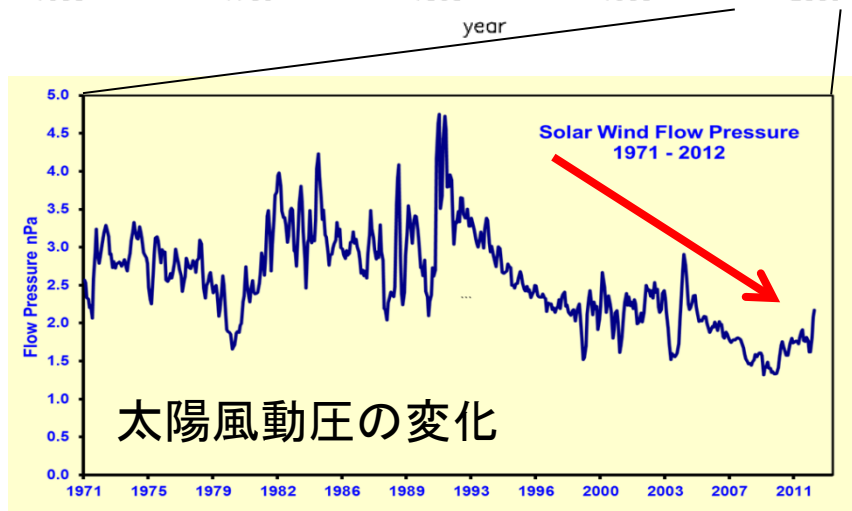


# 特異な太陽活動の兆候

- 現在極大期にあるサイクル24は100年ぶりの低活動
- 太陽風密度、動圧、磁場も過去20年間継続的に減少  
→ 太陽圏全体の収縮、銀河宇宙線の増加

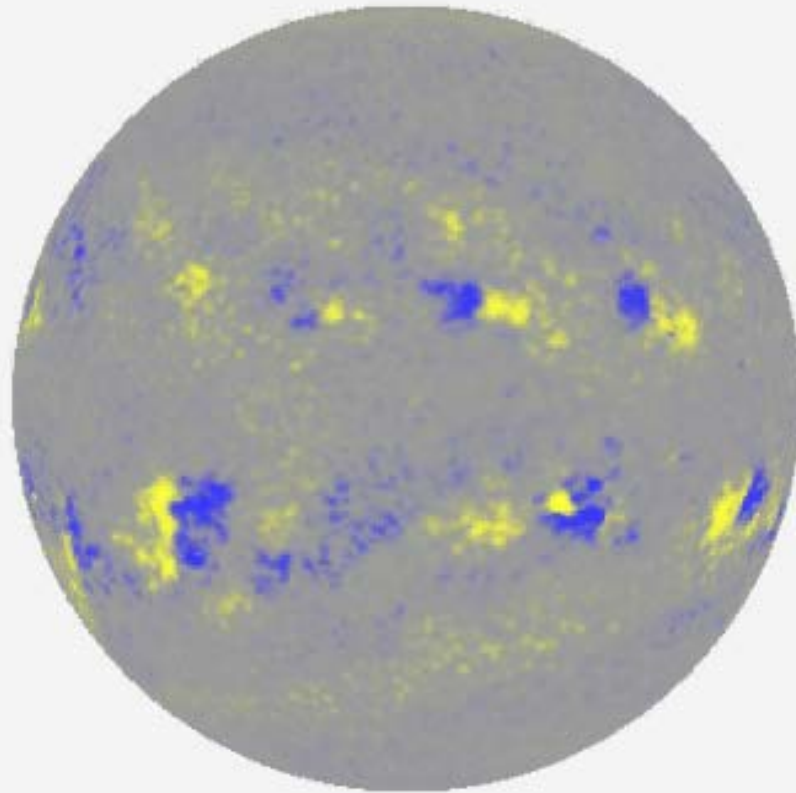


太陽活動の今後の変化は科学的にも社会的にも重要な課題

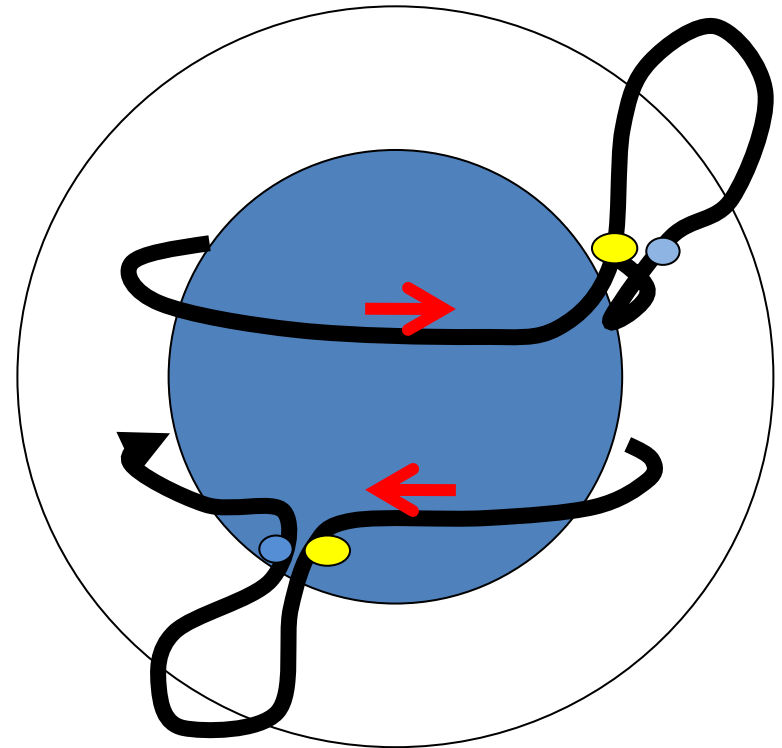
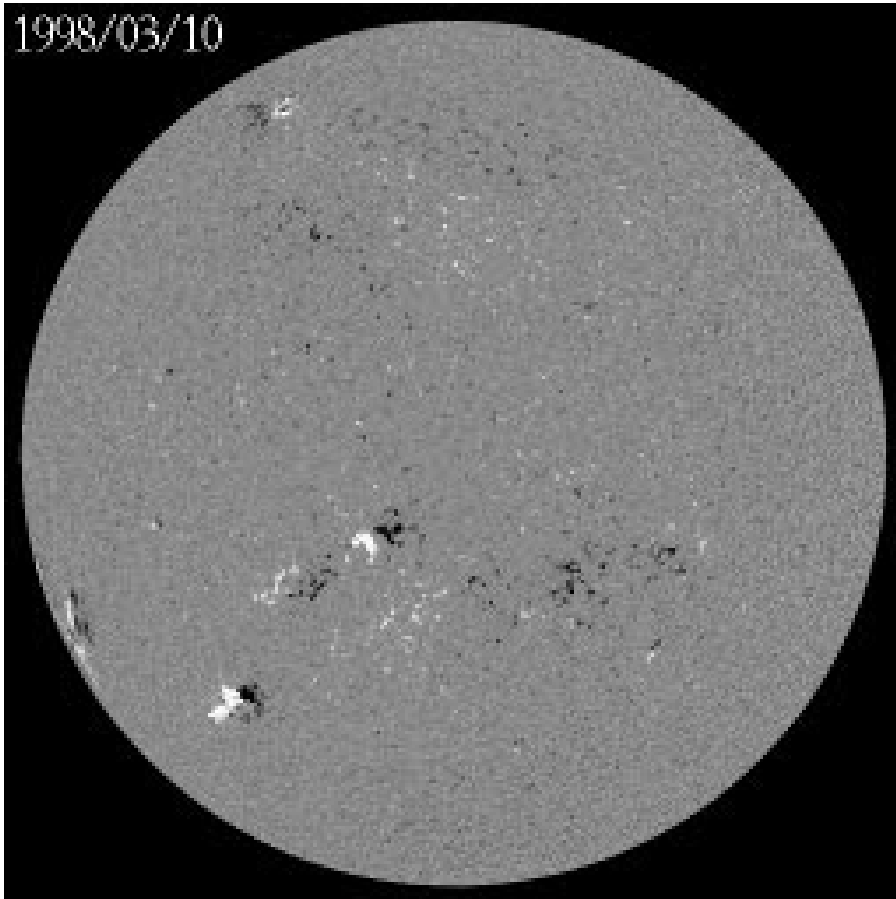


2000年以降の黒点数変化

# 過去30年の太陽磁場活動

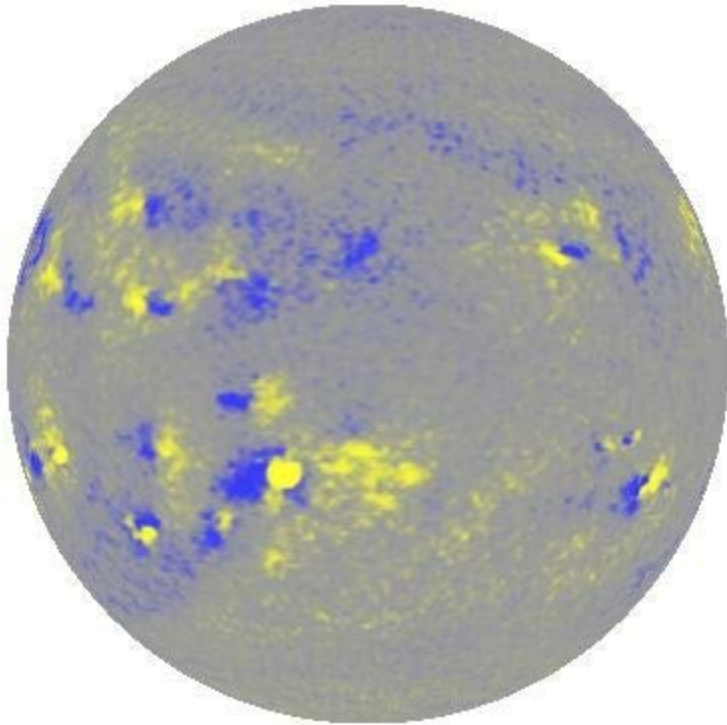


# 太陽黒点の形成

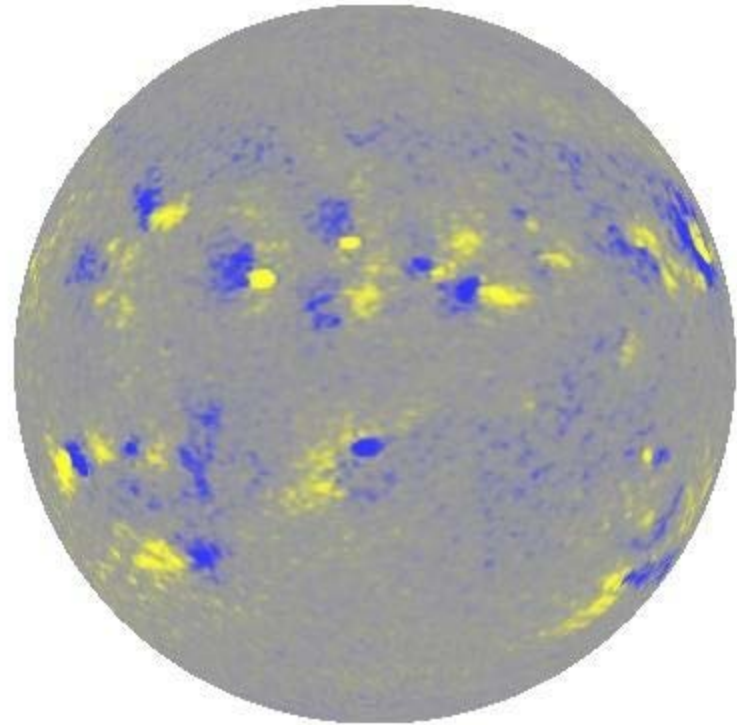


太陽黒点は太陽内部で生成された磁束管が表面に上昇してできる。

# 太陽磁場の反転法則



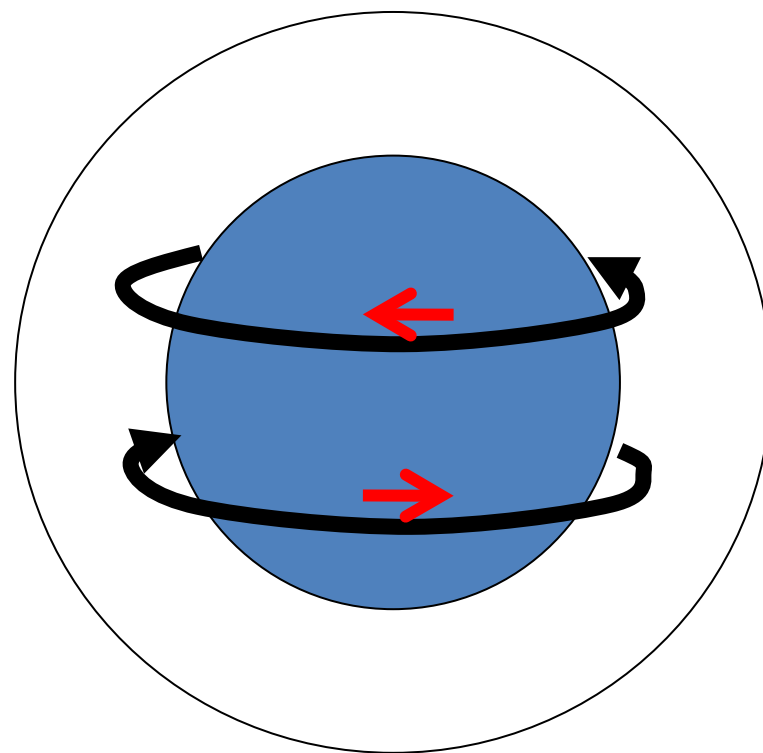
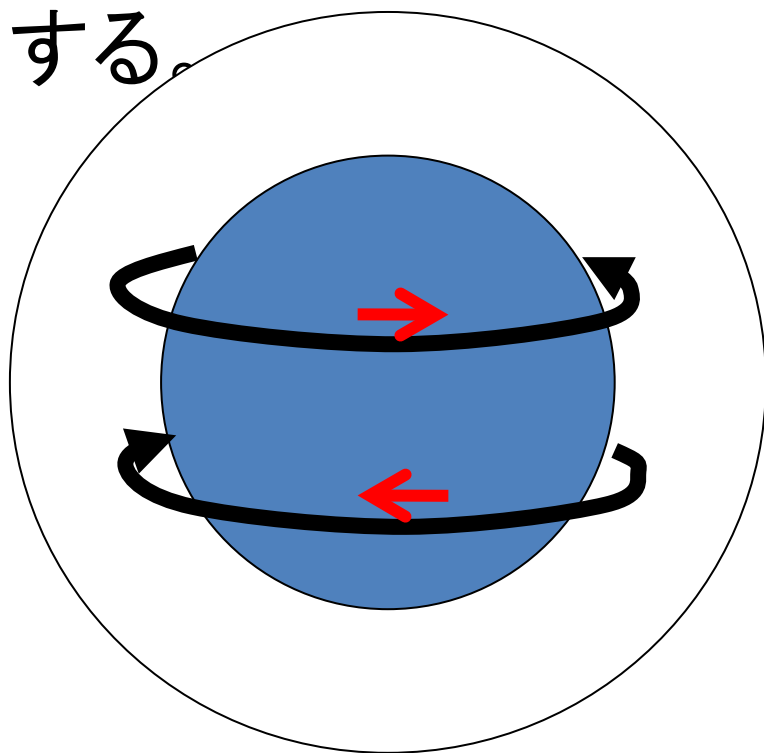
**Cycle 22**  
**1989 August 02**



**Cycle 23**  
**2000 June 26**

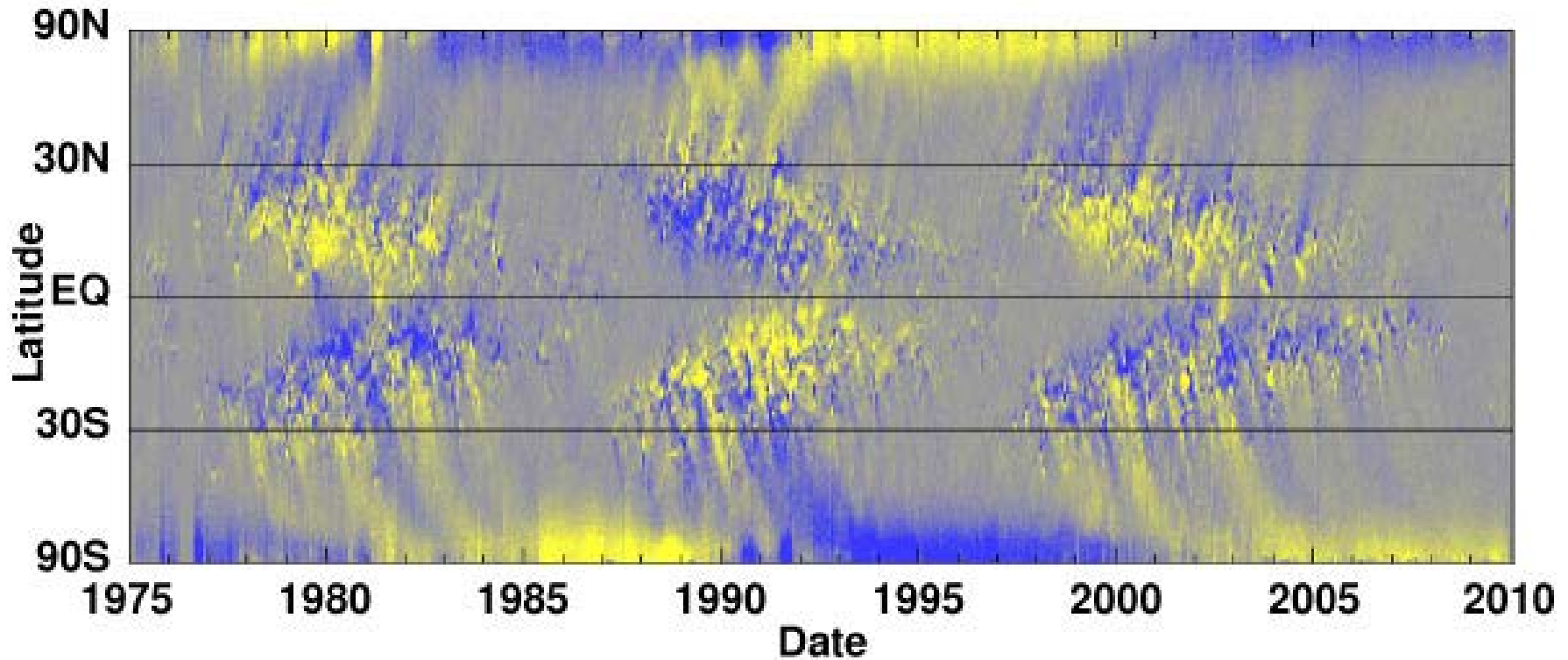
# 太陽ダイナモ

- 太陽内部のプラズマの運動が磁場を再生成する。





# 太陽磁場の構造と変化



西暦

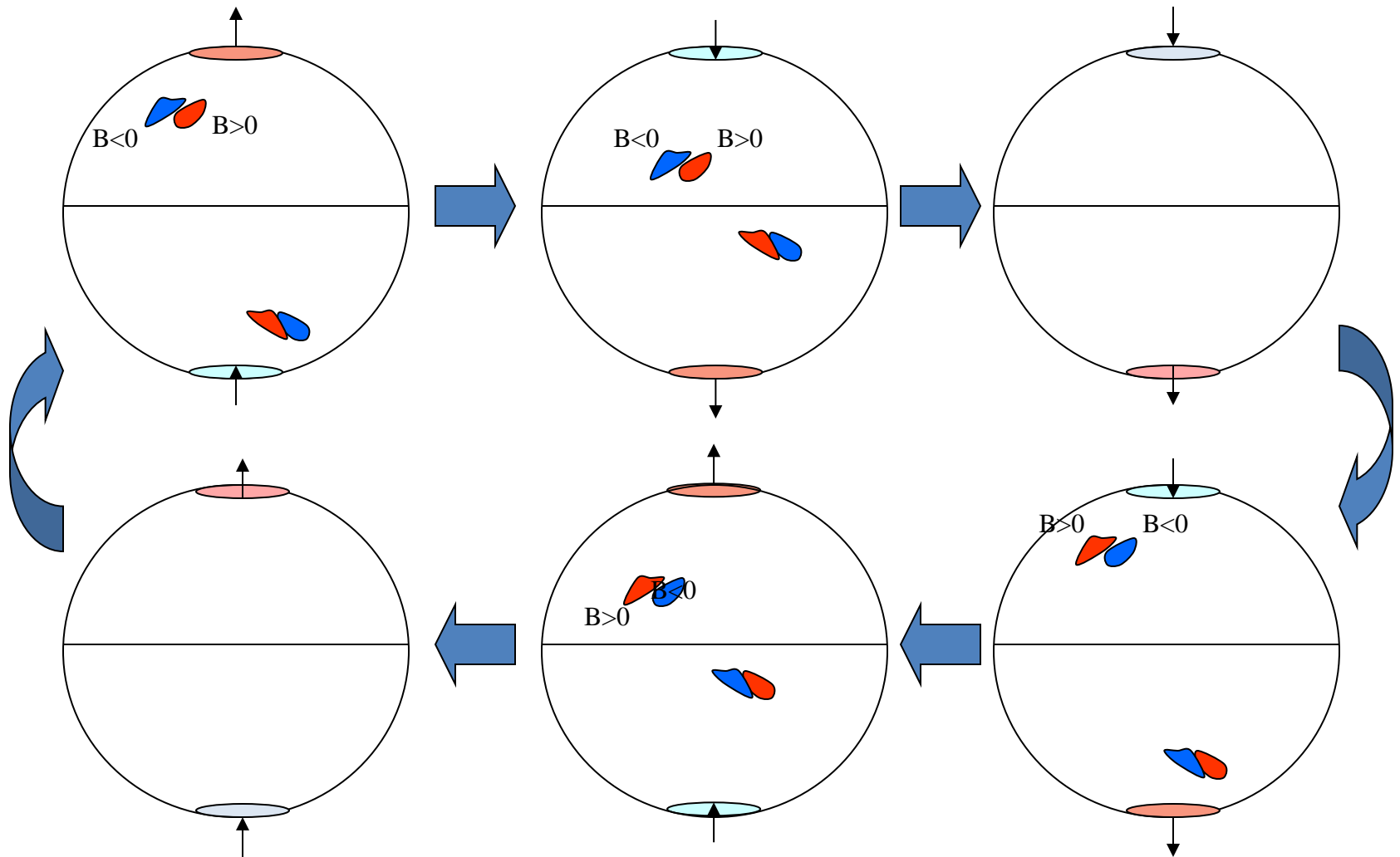
← 第21周期

← 第22周期

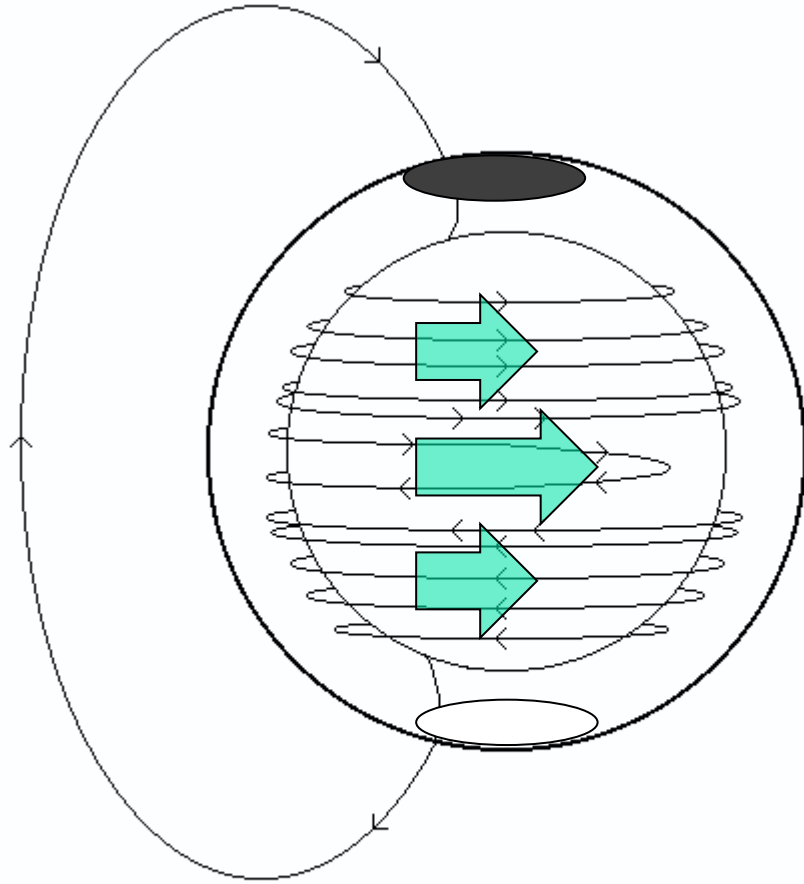
← 第23周期

太陽磁場のバタフライ図

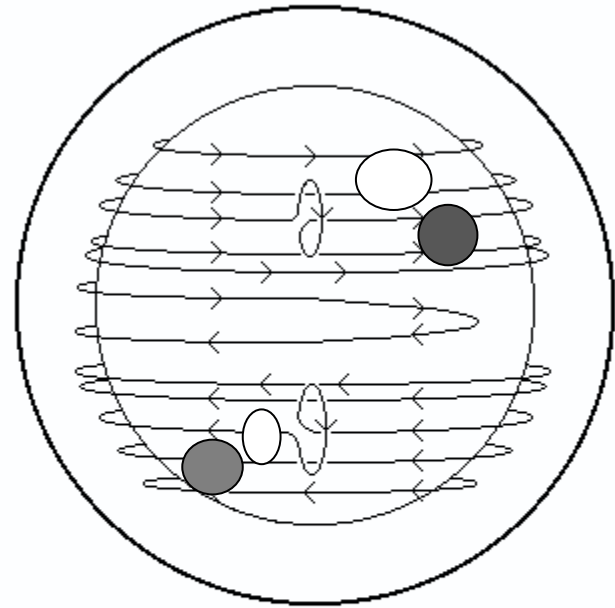
# 太陽黒点周期と磁場反転



# 太陽ダイナモのモデル

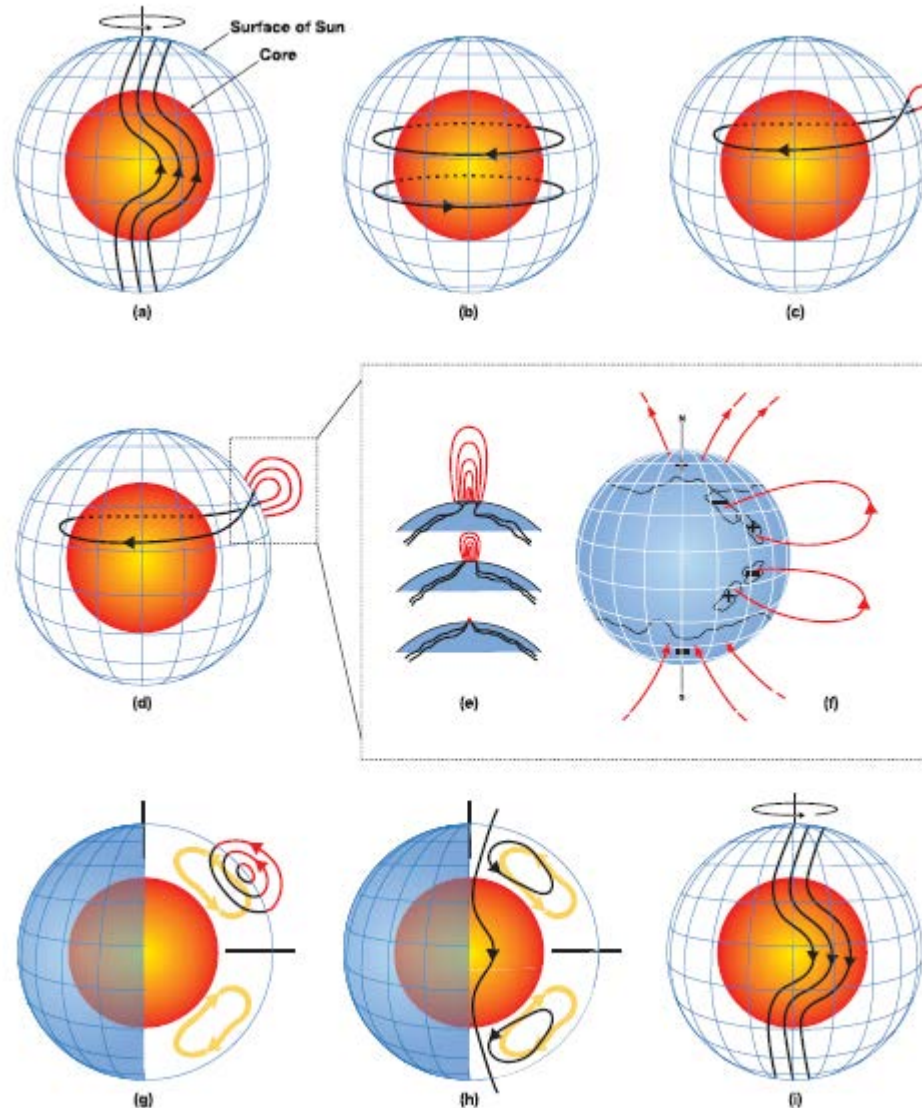


The  $\omega$ -effect



The  $\alpha$ -effect

# 磁束輸送ダイナモモデル(仮説)



# Predicting Cycle 24

## The Third Official Prediction Panel

D.A. Biesecker (NOAA/NWS/SWPC)

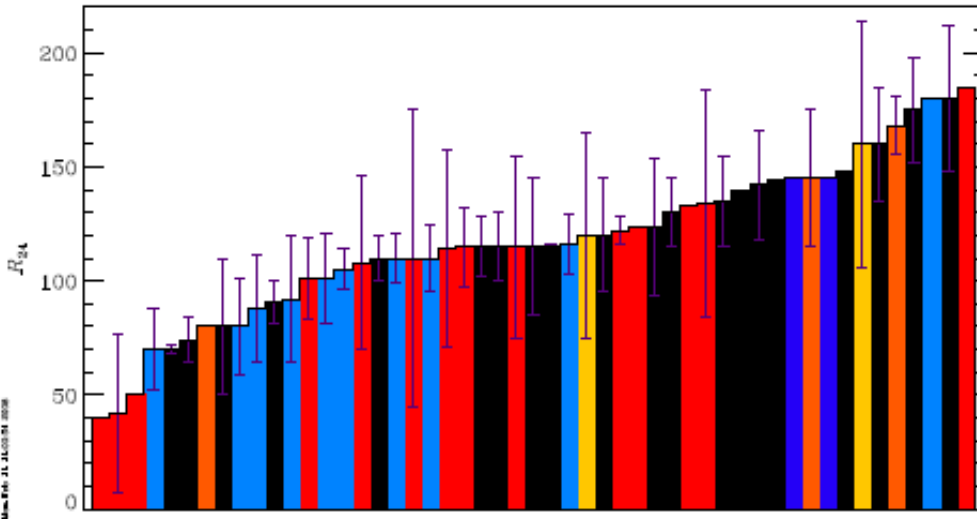
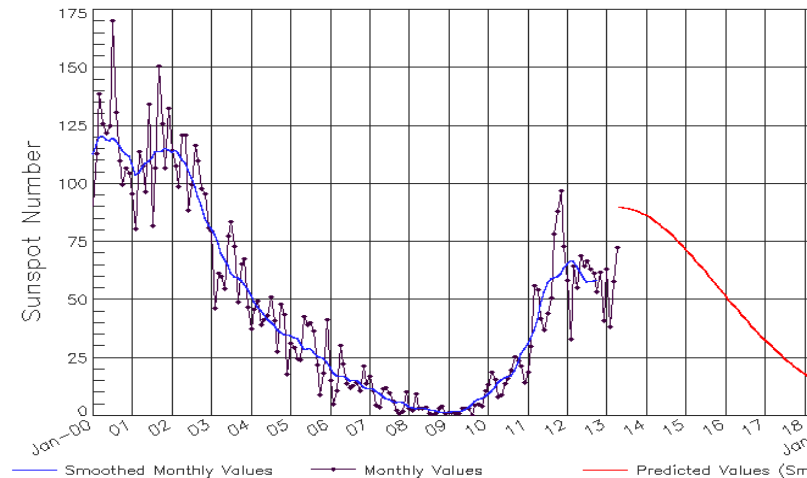


Table 2: Summary of Predictions for Solar Cycle 24

Category	Number	Average	Range
Combined	51	118 ± 34	40–185
Climatology (C)	14	107 ± 40	40–185
Recent Climatology (R)	2	140 ± 30	120–160
Physics-based Models (B)	3	131 ± 45	80–168
Spectral (S)	10	105 ± 30	70–180
Neural Network (N)	2	145	145–145
Precursor (P)	20	124 ± 30	70–180

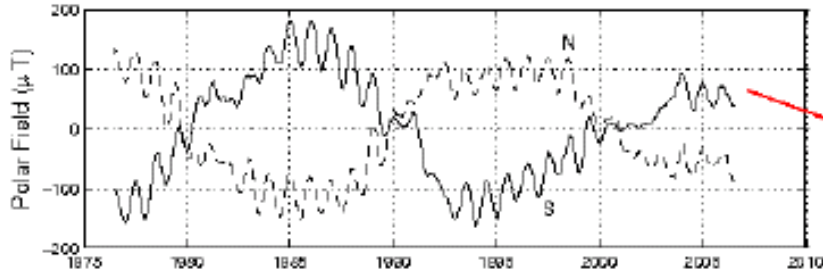
- Climatology and Recent Climatology
- Spectral and Neural Network
- Precursor
- Physics Based

ISES Solar Cycle Sunspot Number Progression  
Observed data through Apr 2013



# 太陽極域磁場と黒点

## 極域磁場

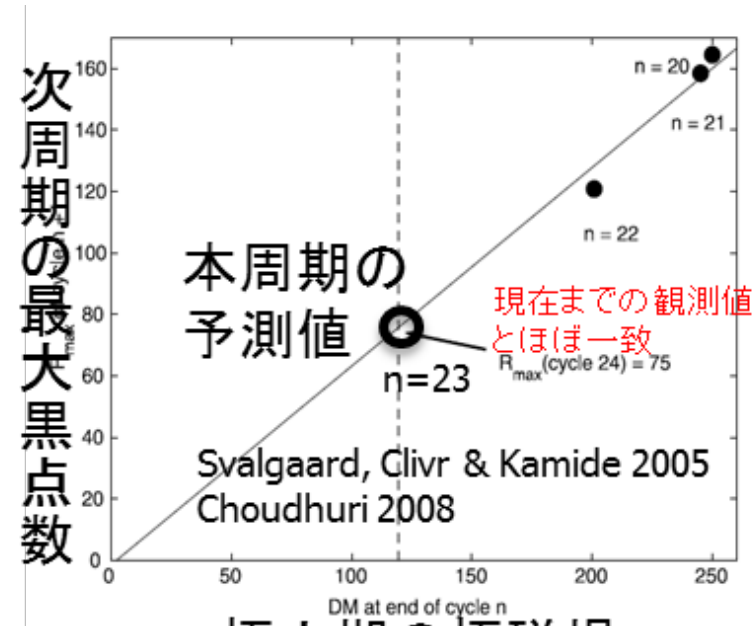
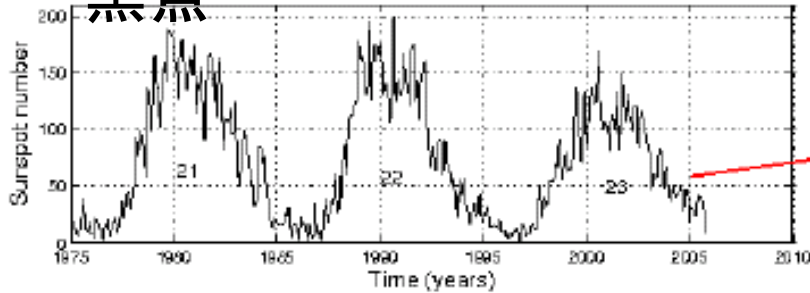


Poloidal Field



Toroidal Field

## 黒点



極小期の極磁場  
(双極子モーメント)

Prof. Choudhuri提供

# 太陽活動と気候変動

Kirkby 2007

## 北半球平均気温

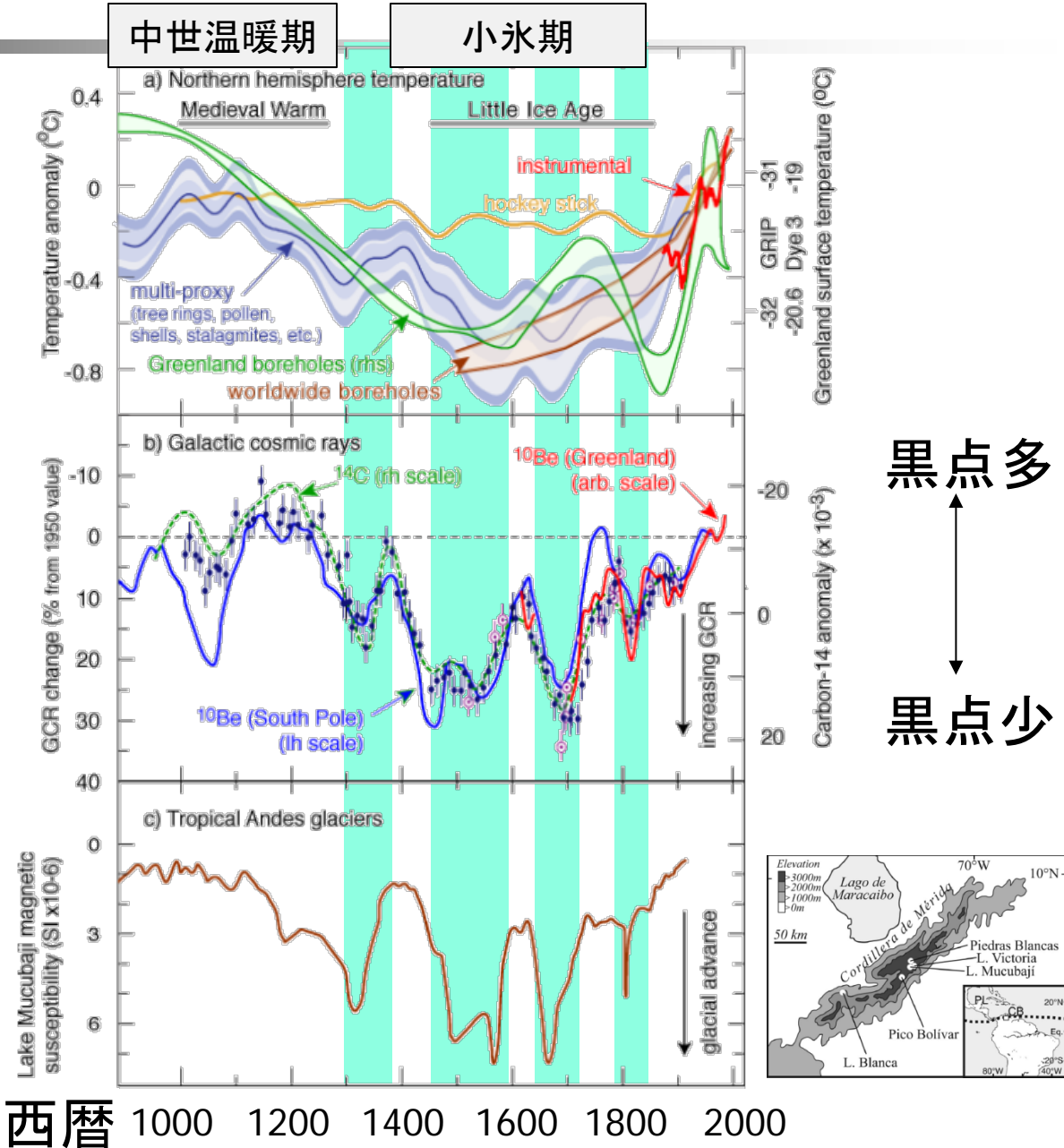
Mann et al. 1998, 1999  
 Moberg et al. 2005  
 Pollack & Smerdon 2004  
 Dahl-Jensen et al. 1998

## 宇宙線生成核種 $\Delta^{14}\text{C}$ (太陽活動指標)

Stuiver and Quay 1980  
 Klein et al. 1980  
 Raisbeck et al. 1990  
 Usoskin et al. 2002

## 熱帯アンデス氷河

Polissar et al. 2006



# 数千年スケールの太陽と気候

Neff et al. (2001)

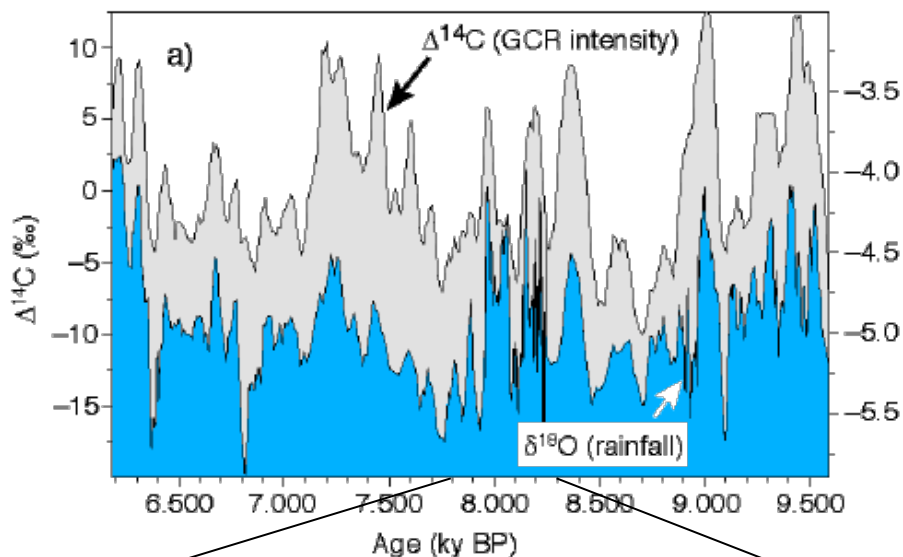
$\delta^{18}\text{O}$ : 降水活動の指標  
北オマーンの洞窟内石筍



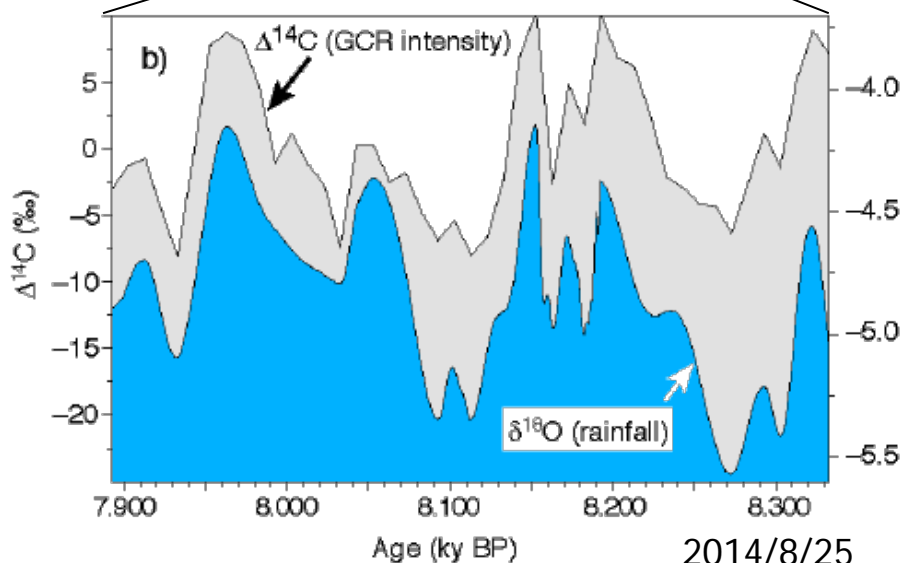
$\Delta^{14}\text{C}$ : カリフォルニアの  
年輪解析

数十年から千年規模まで  
の様々なスケールで強い  
相関

↑  
太陽黒点活動に伴う宇宙線流束変動  
↑  
increasing GCR



↑  
降水量減少

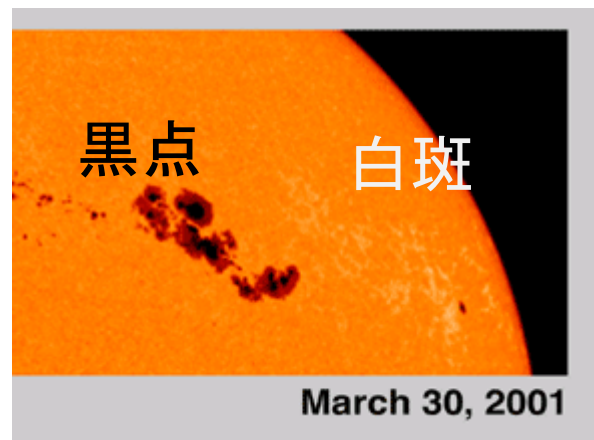
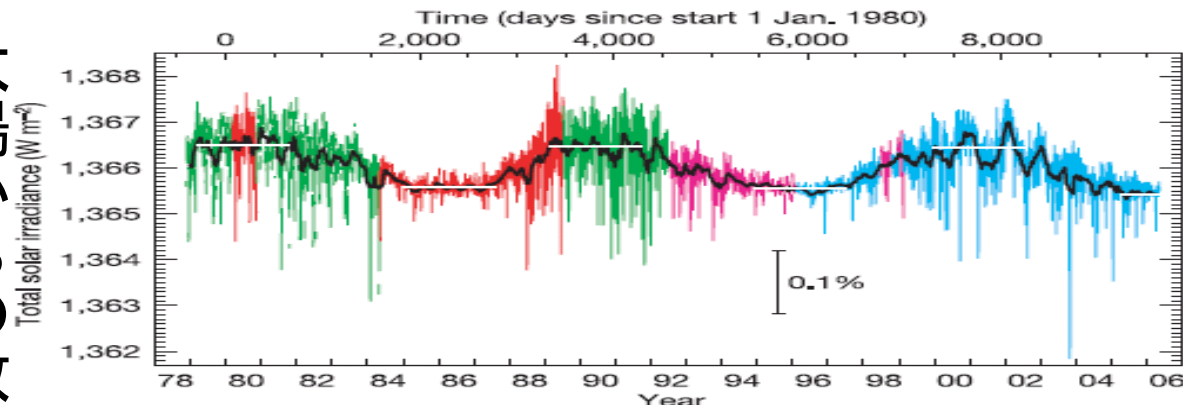


↑  
降水量減少

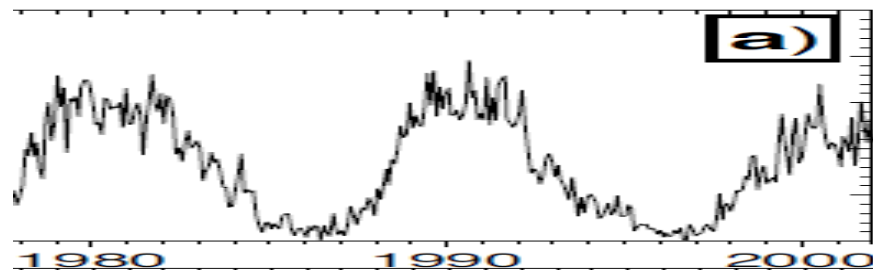


# 黒点活動に伴う様々な変化

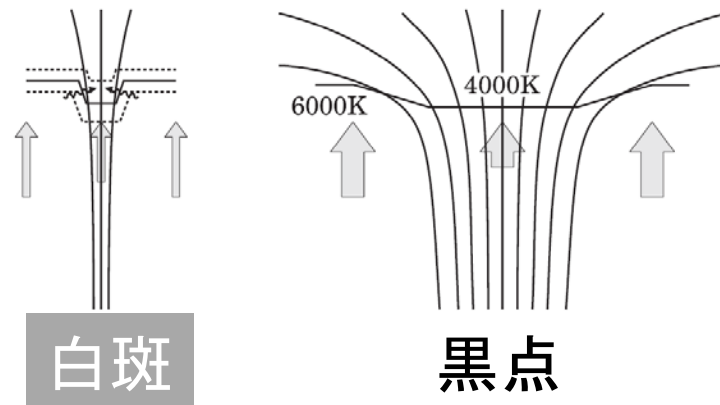
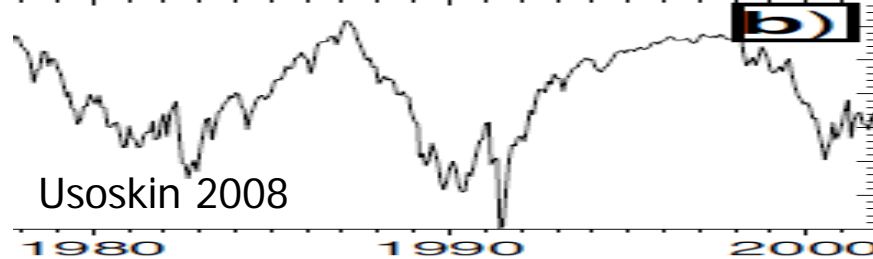
太陽からの放射



sunspot  
黒点



GCR  
銀河  
宇宙線



放射強度、磁場、宇宙線などはいずれも  
黒点活動と同期して変動する。

白斑と黒点の違い

# 太陽の気候影響メカニズムは？

太陽ダイナモ

黒点・磁場活動

放射強度 (TSI)  
放射スペクトル (SSI)

太陽風  
太陽圏磁場

太陽面爆発  
(フレア・CME)

高エネルギー粒子

銀河宇宙線  
太陽変調

それぞれの過程がどのように地球気候に影響しているのかはまだ良く分かっていない。

# 予測することの重要性

- 未来を予測することの重要性
- 科学的理解のための重要性



- 予測の方法
  - 経験的予測法
    - 周期性の発見、予兆現象の発見、相関現象の発見
  - 第1原理的予測法
    - 第1原理に基づく時間発展の結果として未来を予測する

# 予測と近代科学

## ■ ハレー彗星



エドモンド・ハレー(1656年10月29日 - 1742年1月14日)

### Wikipediaより

- 1682年に出現した彗星の観測データとニュートン力学から、この彗星が76年の周期を持つ楕円軌道を持つと結論(プリンキピア出版は1687年)
- 過去の記録から、1531年、1607年に出現した彗星が同一のものと推測
- 次回の回帰が1758年であると予測。
- 1758年12月25日、予測通り彗星が出現。