

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



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

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

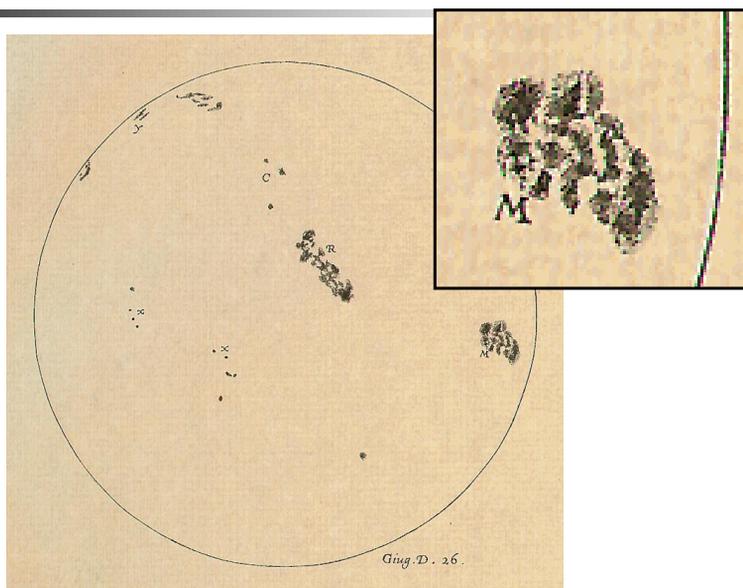
- 1682年に出現した彗星の観測データとニュートン力学から、この彗星が76年の周期を持つ楕円軌道を持つと結論(プリンキピア出版は1687年)
- 過去の記録から、1531年、1607年に出現した彗星が同一のものと推測
- 次回の回帰が1758年であると予測。
- 1758年12月25日、予測通り彗星が出現。

宇宙気候・宇宙天気の研究課題

- 太陽活動と気候変動の関係の理解と予測
 - 太陽黒点活動の理解と予測
 - 太陽黒点と気候変動の関係の解明
- 太陽フレアと宇宙天気の予測
 - 太陽フレアの機構解明と予測
 - 太陽フレアの影響の予測
 - フレアX線放射、コロナ質量放出と衝撃波、高エネルギー粒子
 - 地球磁気圏、地球磁気圏への影響の理解と予測

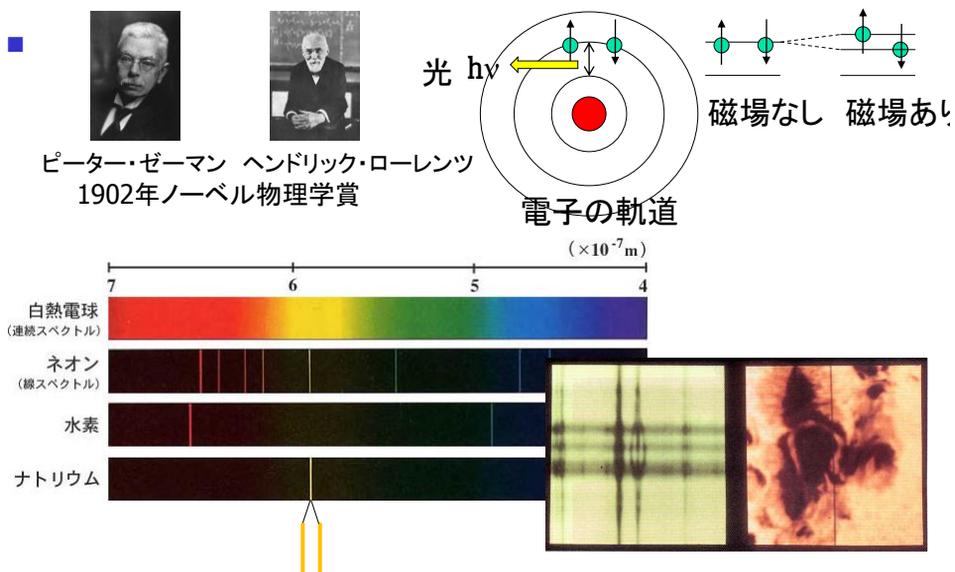
SST研の研究課題

ガリレオが描いた黒点スケッチ

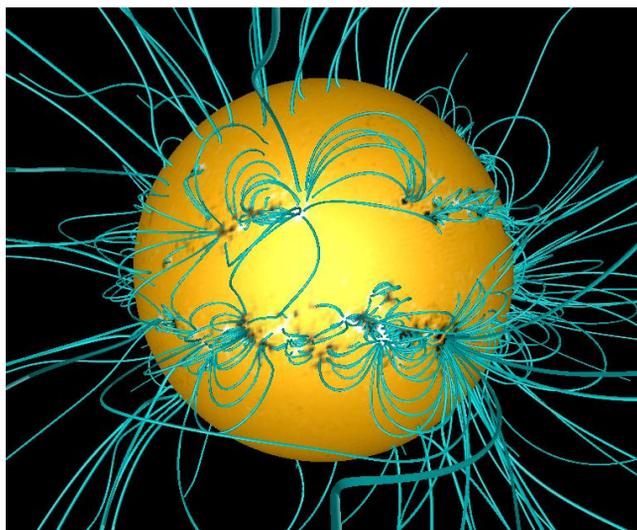


1613年6月～7月

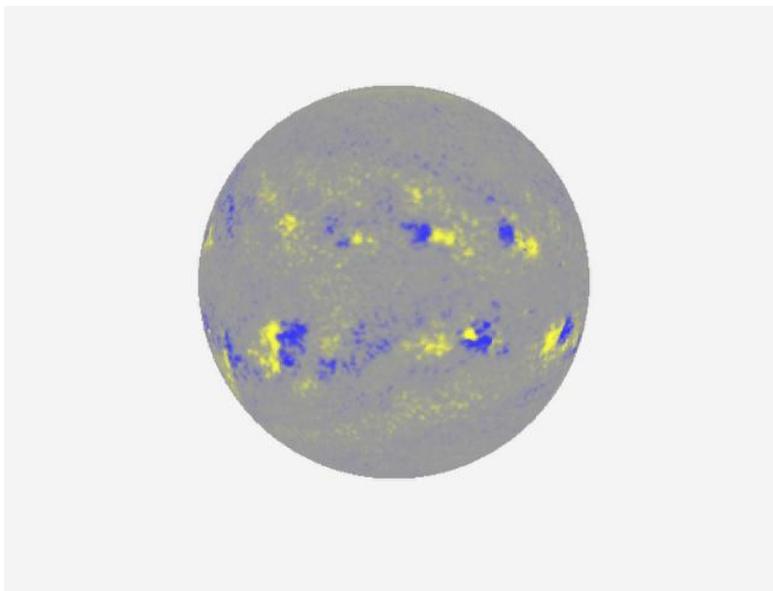
量子効果の助け ゼーマン効果



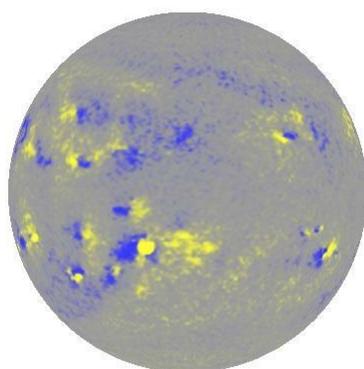
太陽は磁場の星



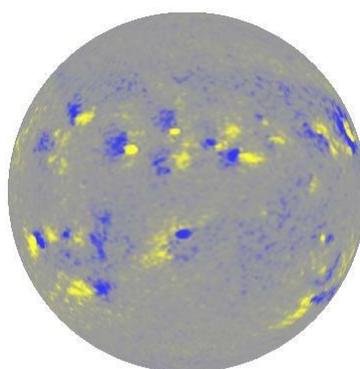
過去30年の太陽磁場活動



太陽磁場の反転法則

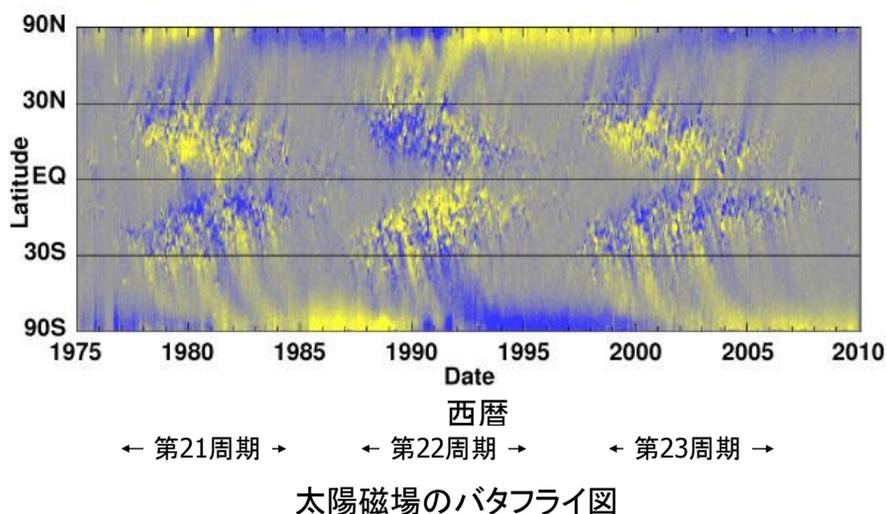


Cycle 22
1989 August 02

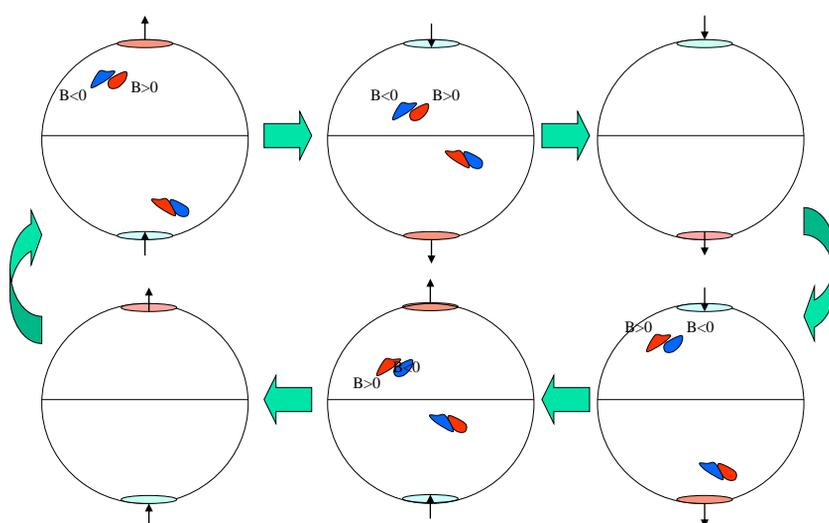


Cycle 23
2000 June 26

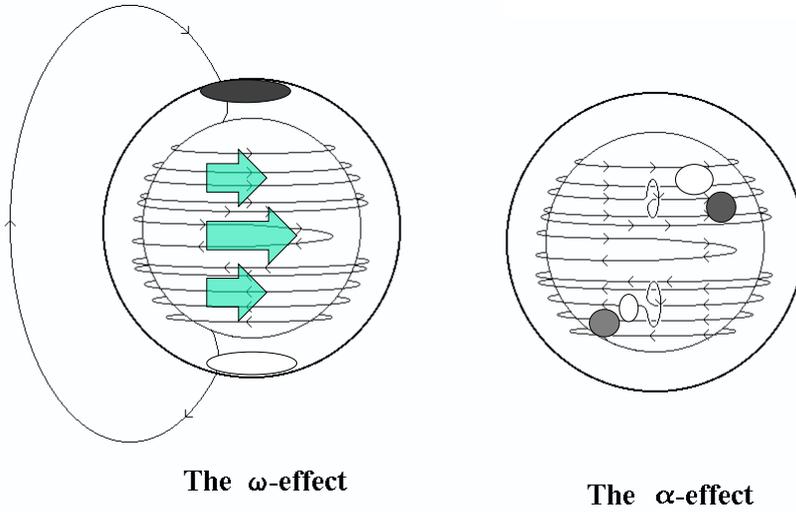
太陽磁場の構造と変化



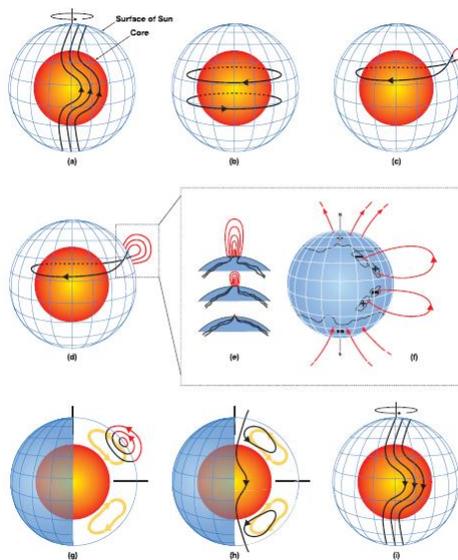
太陽黒点周期と磁場反転



太陽ダイナモのモデル

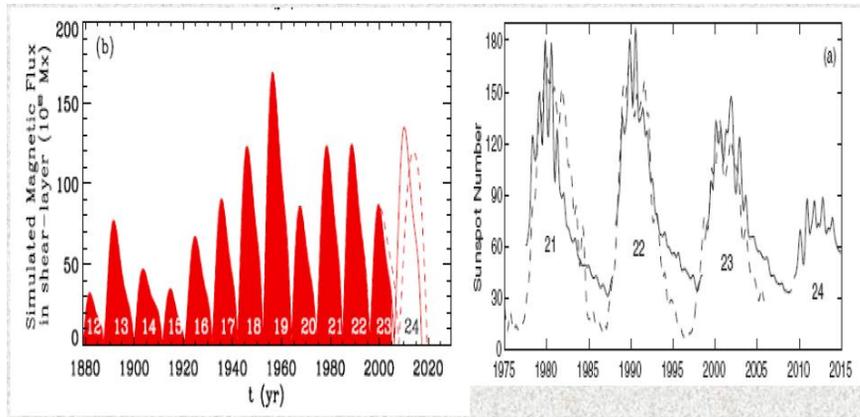


磁束輸送ダイナモモデル(仮説)



太陽活動の予測モデル

- 2つのほぼ同じ磁束輸送モデルは、過去の活動を共に再現するが、サイクル24(未来)の予測値は極端に異なる。

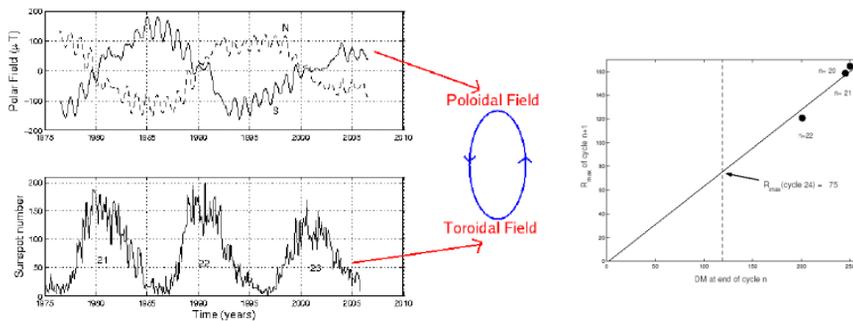


Dikpati et al. (2006)

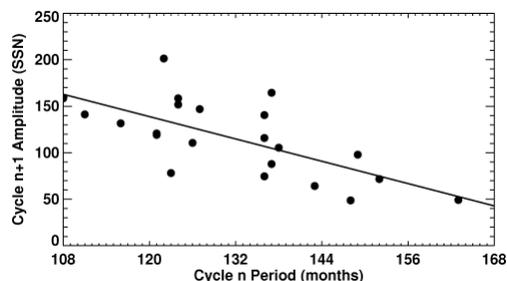
Choudhuri et al. (2007)

太陽極域磁場と黒点

- Prof. Choudhuri提供

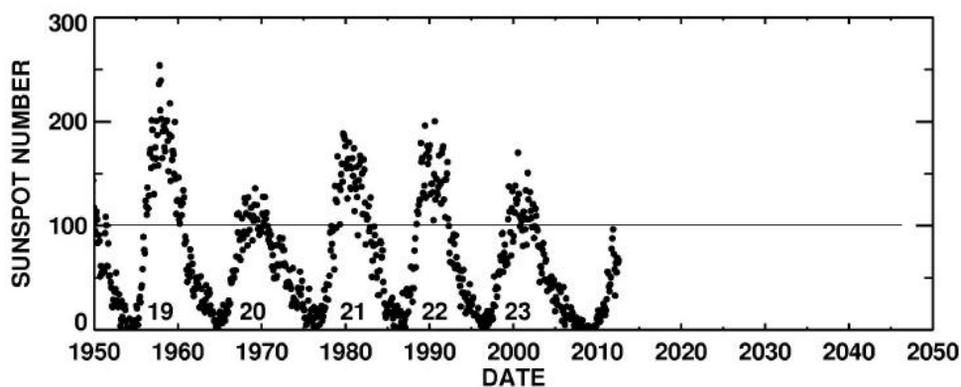


太陽周期と黒点活動の関係

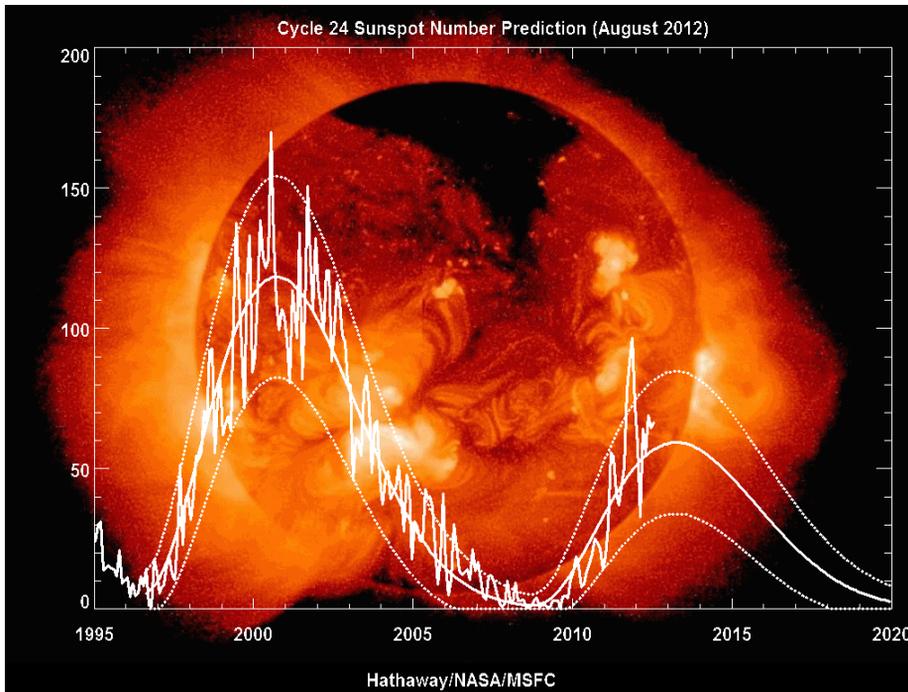


- Figure 27: The Amplitude–Period Effect. The period of a cycle (from minimum to minimum) plotted versus following cycle amplitude for International Sunspot Number data from cycles 1 to 22. This gives an inverse relationship between amplitude and period shown by the solid with $Amplitude(n+1) = 380 - 2 \times Period(n)$.

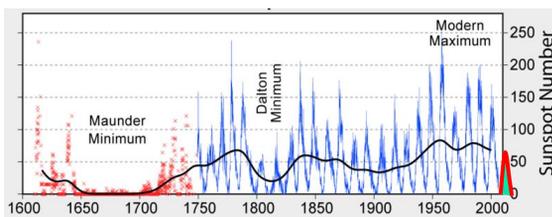
太陽黒点月平均数(観測値)



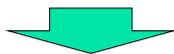
HATHAWAY/NASA/MSFC 2012/08



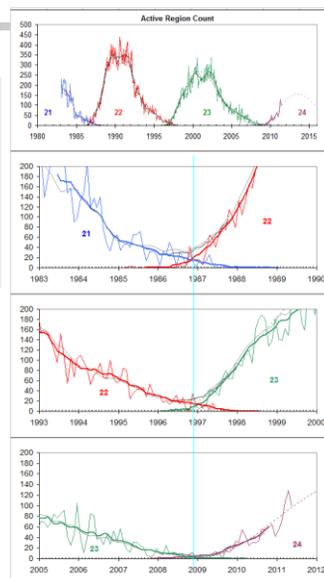
太陽周期24の異常



次期太陽極大は100~200年ぶりの低活動となるとの予測。



太陽活動の観測と監視が重要
太陽変動機構の解明
宇宙・地球環境に対する影響



Leif Svalgaard's Research Page
<http://www.leif.org/research/Active%20Region%20Count.png>

Predicting Cycle 24

The Third Official Prediction Panel

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

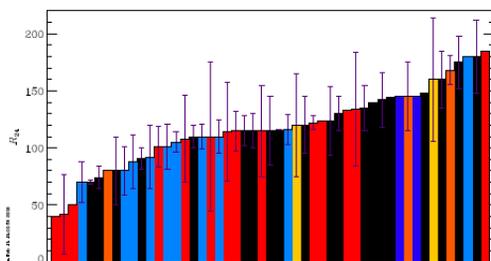
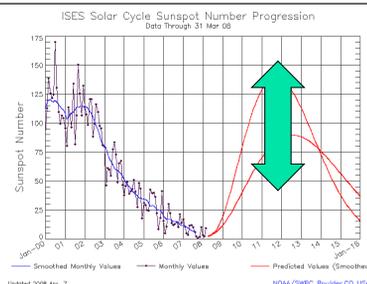


Table 2: Summary of Predictions for Solar Cycle 24

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



小氷期はまた来るのか？



2012年4月20日中日新聞

2010年3月19日朝日新聞

太陽 北極のみ磁場反転

太陽まもなく「冬眠」

複数の兆候を観測

長い周期磁場も最低

国立天文台の観測

日経サイエンス 2012.08

SCIENTIFIC AMERICAN 日本版 超光速ニュートリノ顔末

特集 **太陽異変**

活動低下で地球は寒冷化？

特集 **竜巻の脅威**

恐怖の記憶を消す薬
生物の色彩マジック
明日を拓く医療マシン
時を旅した生物画家

つくばで起きた大竜巻
早期警報目指す米国

From natureダイジェスト
マヤ顔古の天文表を発見!

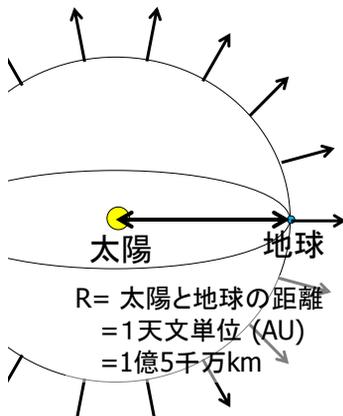
<http://www.nikkei-science.com/>

太陽定数

1km²

1366x(10³)²
 ~1.4x10⁹=140万kw

- 地球軌道上で単位面積(1m²)に単位時間(1秒)あたり入射する太陽の放射エネルギー量でI = 約1366W/m²



太陽が毎秒放出するエネルギー
 (太陽の全出力)

$$P = \text{太陽定数} \times \text{面積} = 4\pi R^2 I = 4 \times 10^{26} \text{ W}$$

全人類1年間の消費エネルギー = 4x10²⁰J

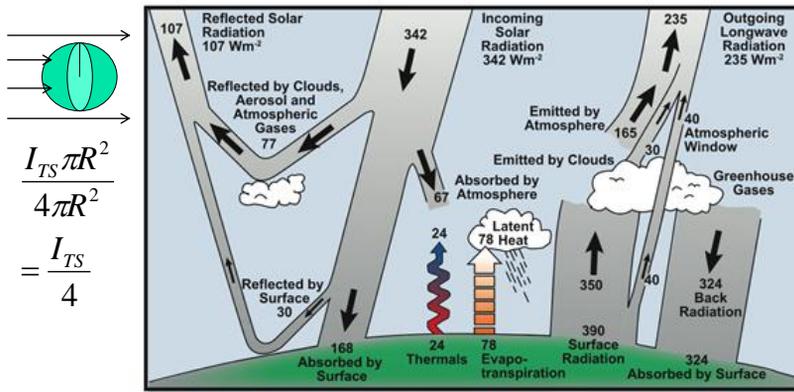
太陽は1秒で人類1年分のエネルギーの
100万倍を生産
 (未来文明のエネルギー源! ダイソン球殻)

太陽放射と地球の温度

- 地球表面温度 温室効果 全太陽放射 アルベド(約0.3)

$$\sigma T_S^4 = G + I_{TS} (1 - A) / 4$$

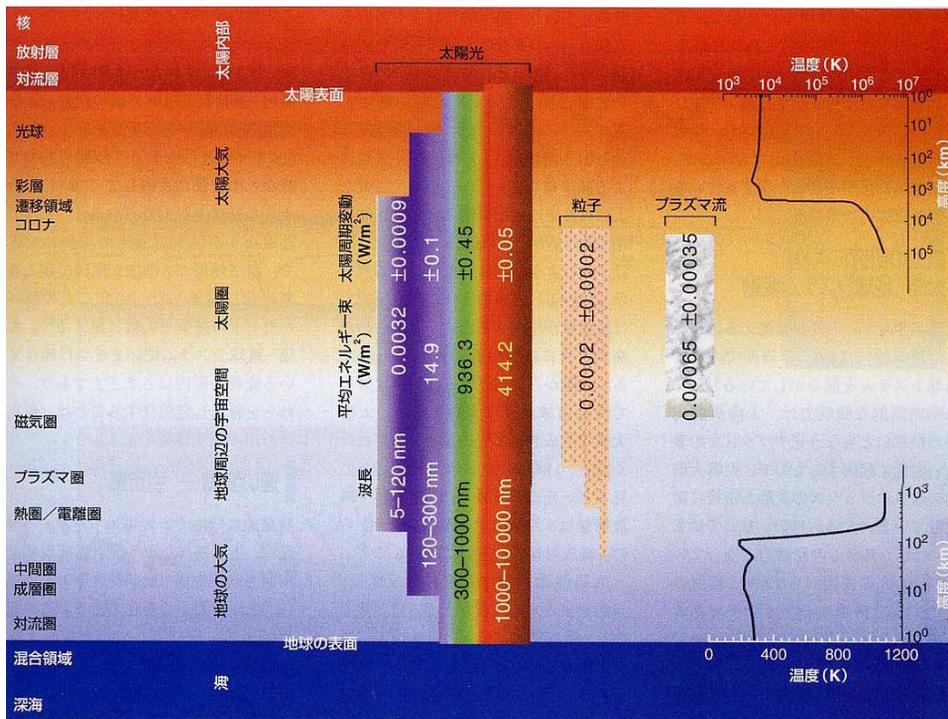
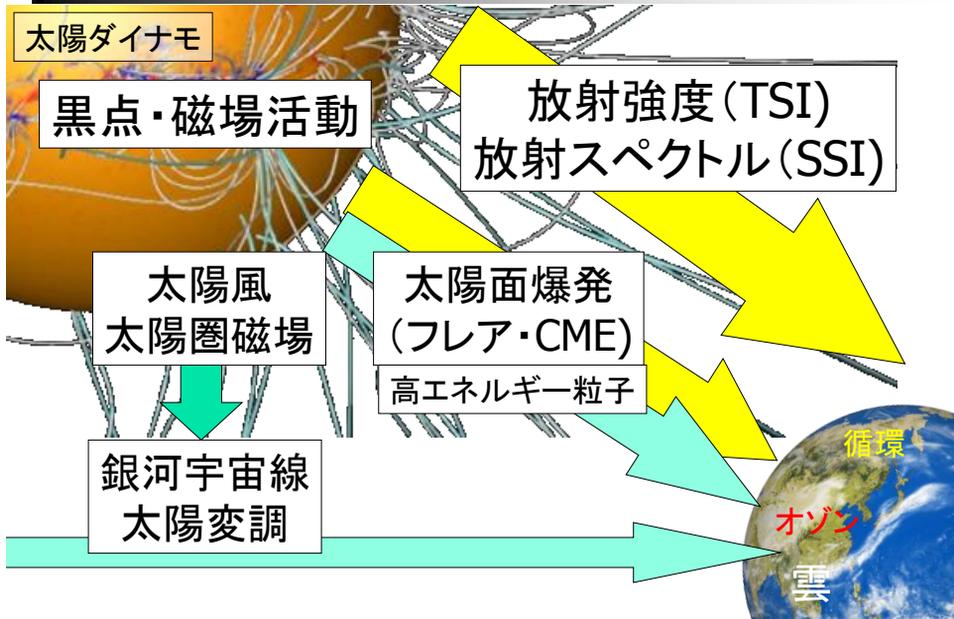
ステファン・ボルツマンの法則



IPCC2007

$$\frac{I_{TS} \pi R^2}{4\pi R^2} = \frac{I_{TS}}{4}$$

地球気候に対する太陽影響



大気から宇宙へ

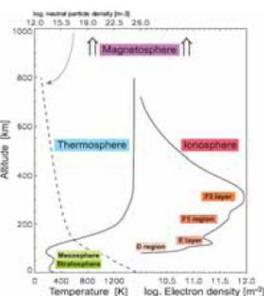
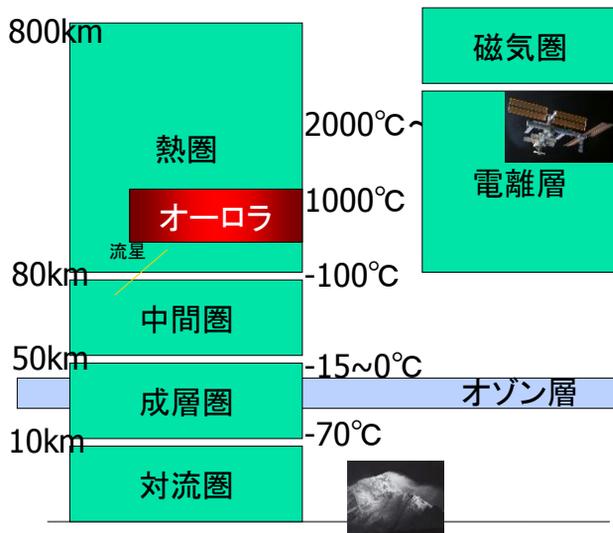
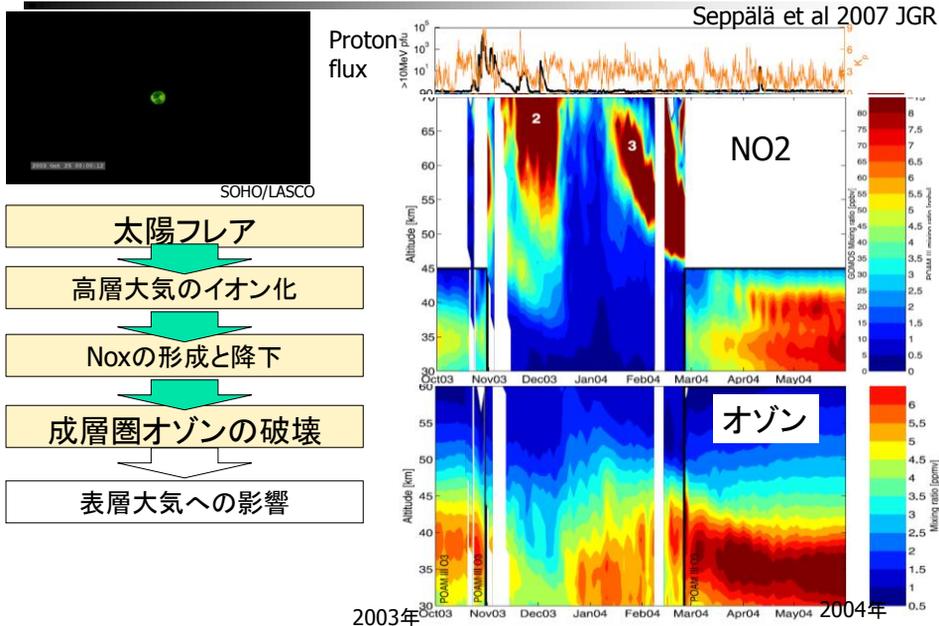


図 2: 地球大気と電離圏における温度(左の実線)、大気密度(破線)、電子密度(右の実線)の高度変化

元増哲郎(名大)

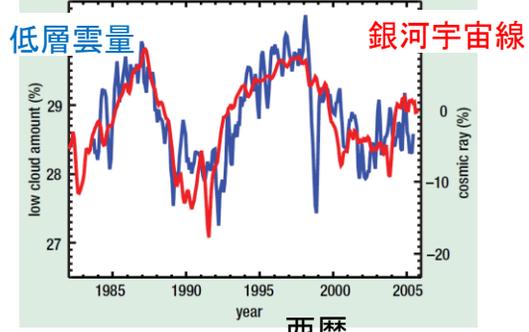
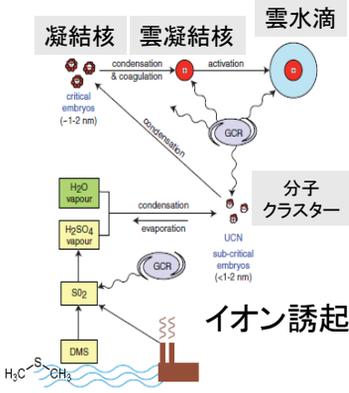
太陽フレアによる成層圏オゾン減少



2003年 2004年

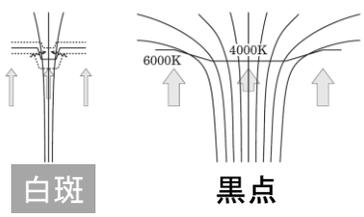
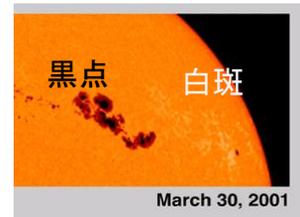
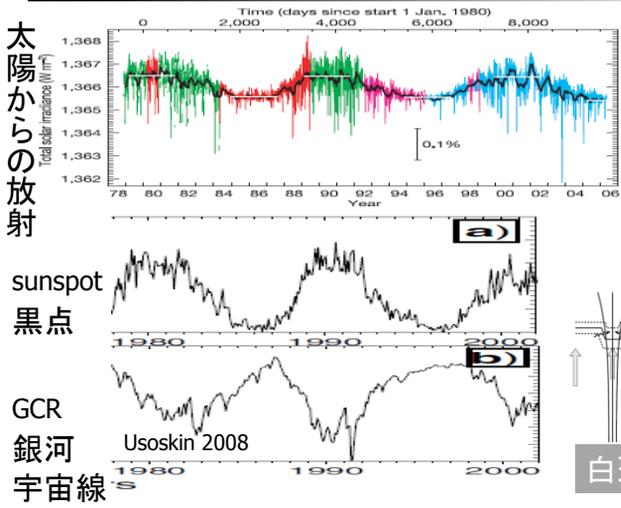
太陽活動による気候変動の可能性

Dickinson (1975)



イオン誘起核生成
 Svensmark 2008
 Svensmark, Friis-Christensen 1997
 Marsch, Svensmark 2000

黒点活動に伴う放射と宇宙線変動



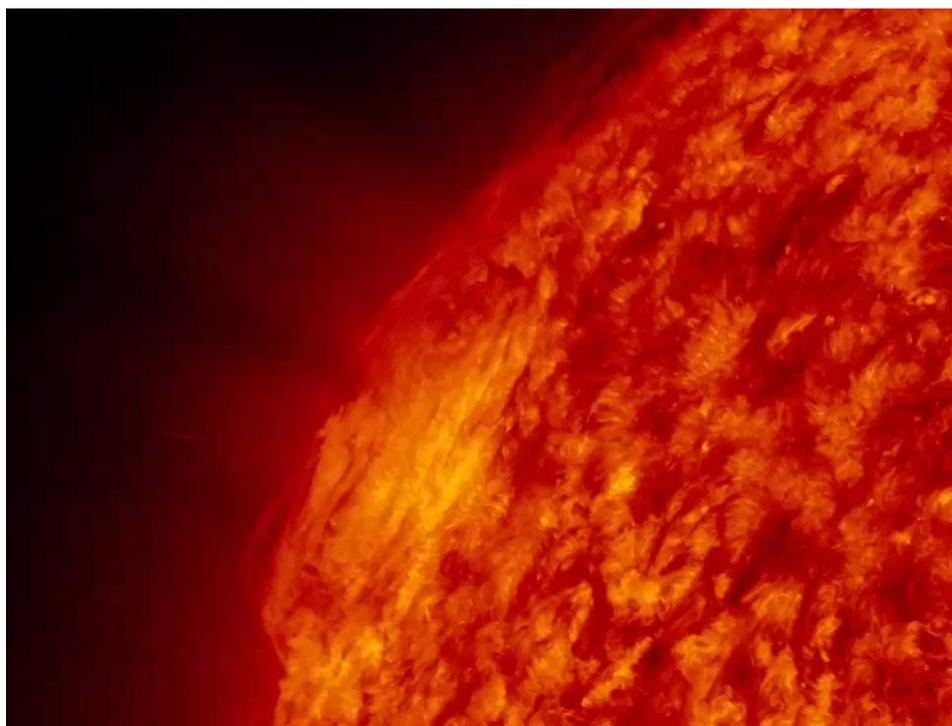
全てが黒点活動と同期して変動するので、
 何が重要な気候影響であるかを見極める研究が必要。
 白斑と黒点の違い

太陽フレア



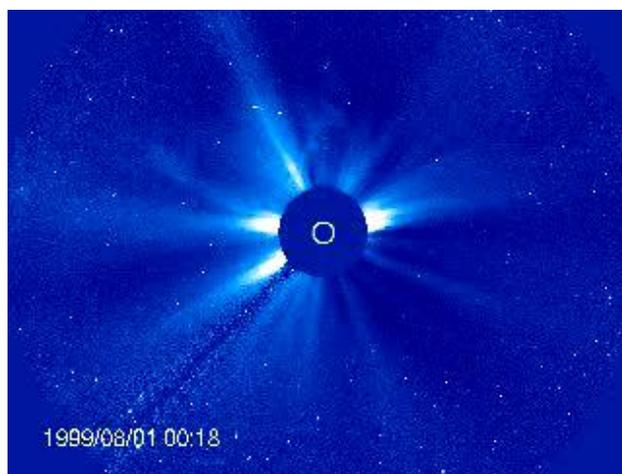
黒点磁場のエネルギー～ $10^{25}\sim 10^{26}\text{J}$

最大水爆 数10～100万個分



コロナ質量放出(CME)

* 太陽風の爆発的放出



問題

■ 太陽黒点の磁場の強さは約何
ガウスでしょう？

1. 0.1ガウス

2. 1000ガウス

3. 1000万ガウス

答え

ヒント

地球の磁場 約0.5ガウス

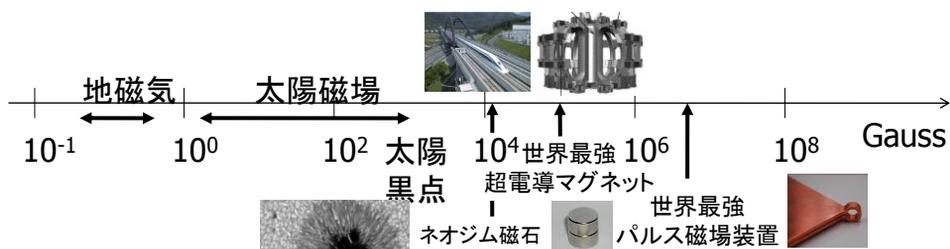
ピップエレキバン
約1000ガウス

リニヤーマーターカー超伝導
磁石 1万ガウス

世界最強パルス磁場装置
数100万ガウス



磁場の強度とエネルギー

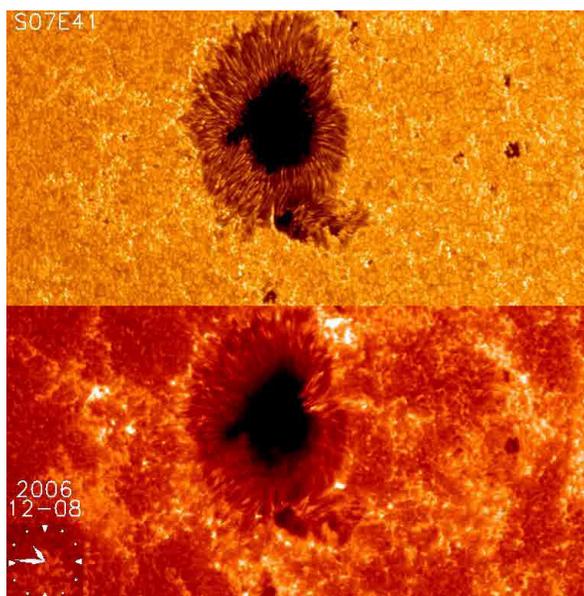


$$E = \frac{1}{4\pi} B^2 L^3$$

黒点磁場のエネルギー～10²⁵～10²⁶J

最大水爆 数10～100万個分

突発現象としての太陽フレア



光球面

彩層

ひので可視光望遠鏡の観測

Xクラスフレアの発生予測のスコア

■ Skill Score (SS) = $(n_{ff} + n_{qq} - n_q) / n_f$ for X-flare

1day	2day	3day	year (events)
0.112	-0.147	-0.171	2006 (4)
0.242	0.147	0.127	2005 (13)
0.052	-0.001	-0.044	2004 (9)
0.200	0.093	0.076	2003 (17)
-0.037	-0.050	-0.033	2002 (12)
-0.061	-0.034	-0.006	2001 (18)

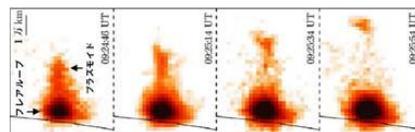
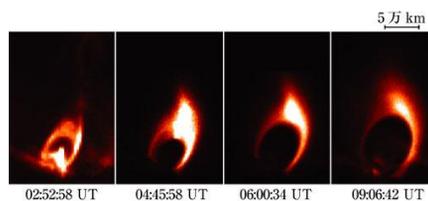
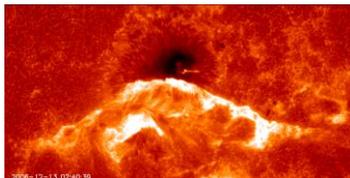
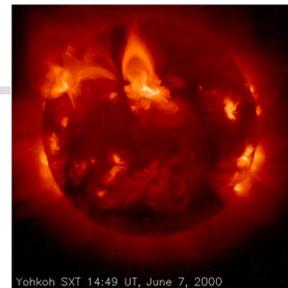
太陽フレアの特徴

黒点の近傍

カस्प状ループ

2本のリボン

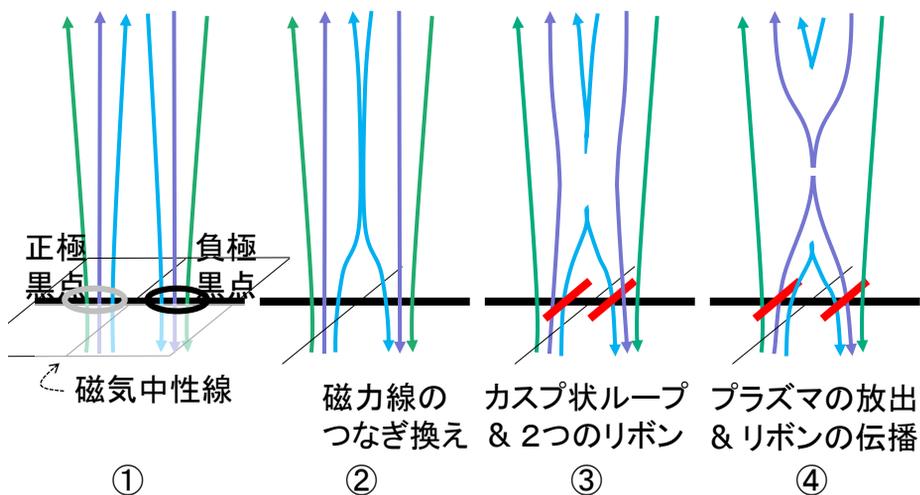
飛び出すプラズマ



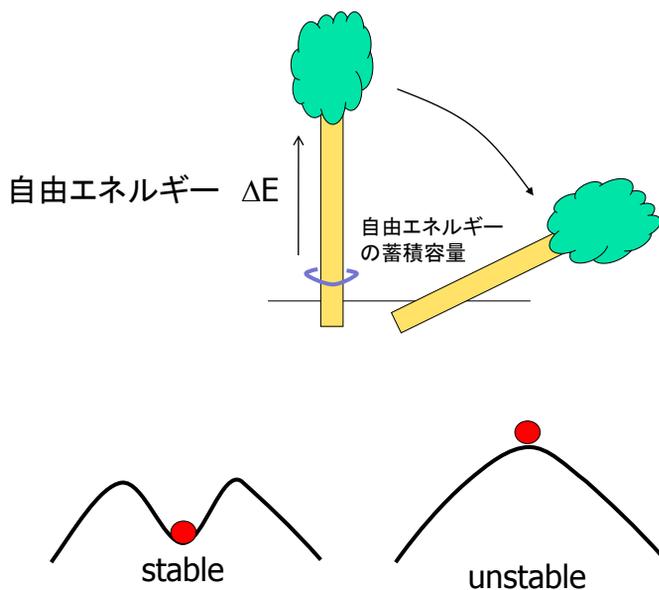
京都大学浅井博士提供

太陽フレアのメカニズムは？

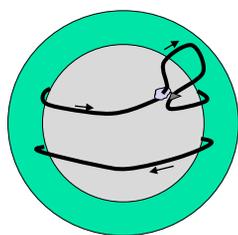
■ 磁気リコネクション(Re-connection)



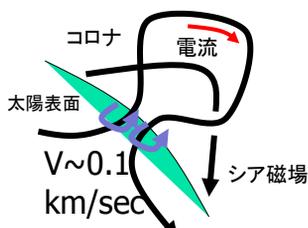
蓄積解放過程



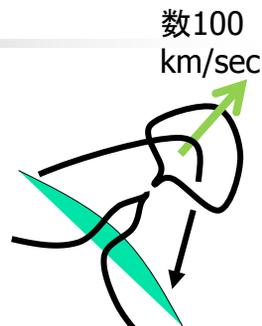
太陽面爆発のメカニズム



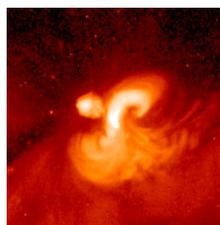
対流層における磁束再生成 (ダイナモ)とコロナへの上昇



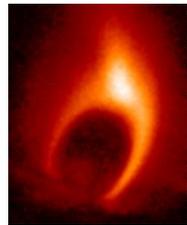
太陽表面運動によるコロナ磁場へのエネルギー注入



磁気リコネクションによる磁気エネルギーの解放

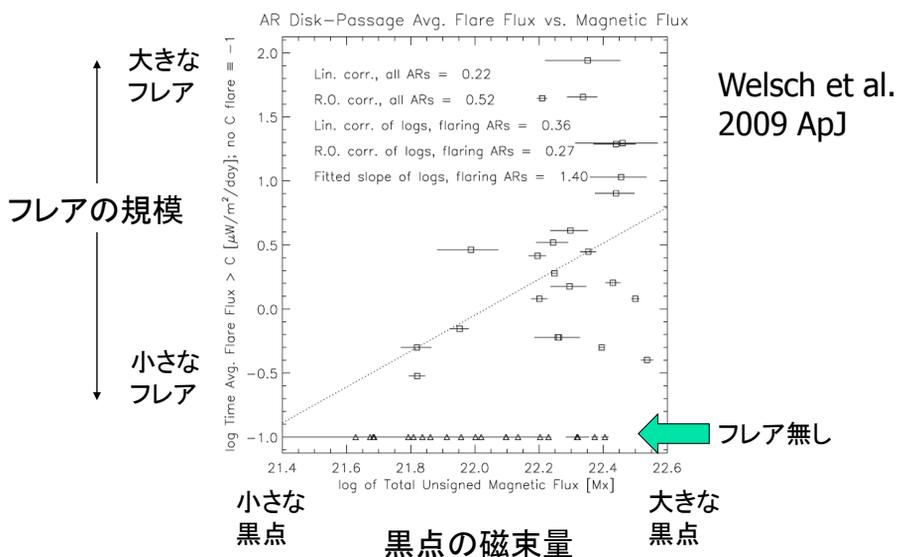


sigmoid

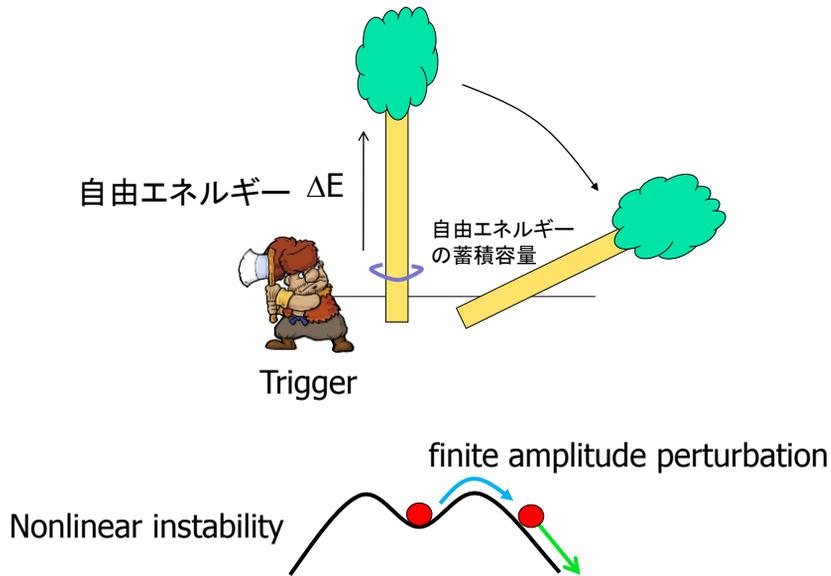


post-flare loop

黒点の大きさとフレアの規模

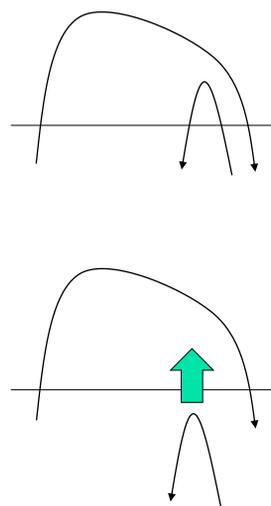
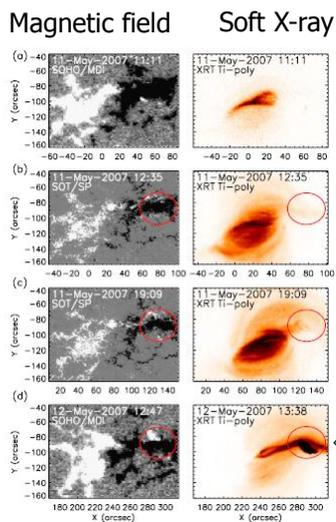


蓄積解放過程とトリガ過程

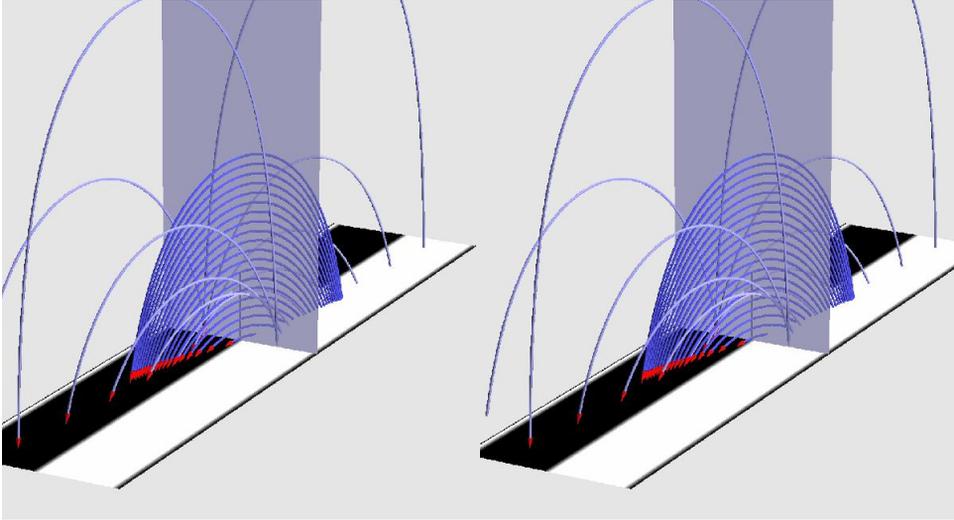


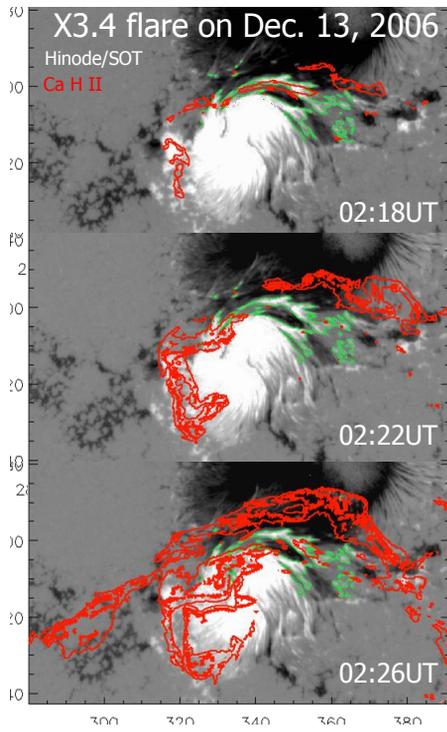
磁束の変動によるフレアのトリガ

Wallace, Harra et al. 2010 Sol. Phys.

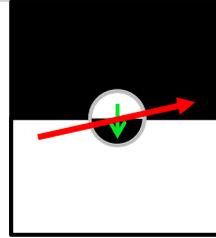


フレア爆発の計算機シミュレーション

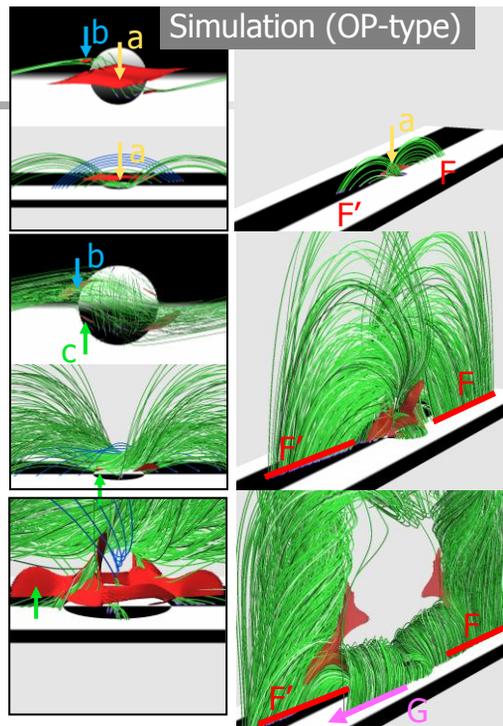
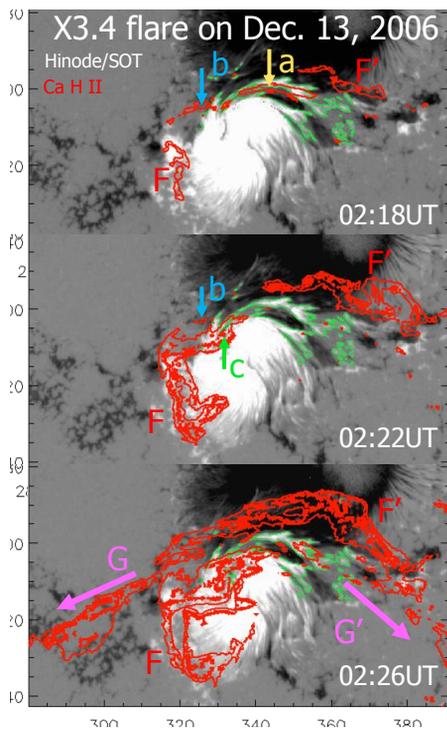
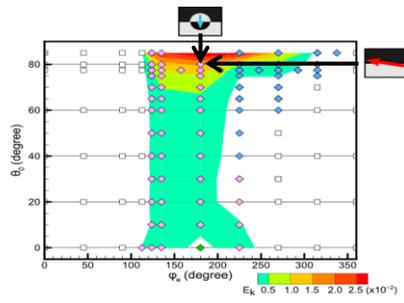




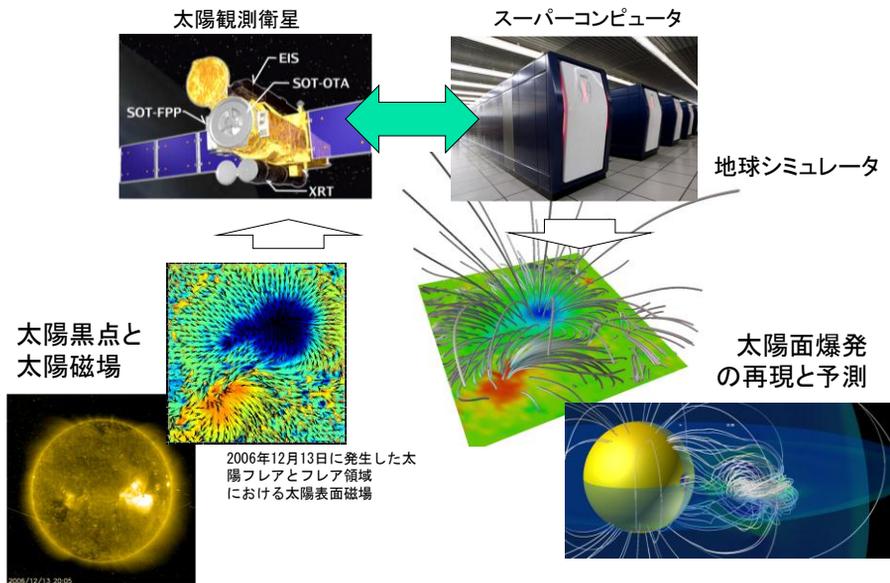
**strong shear in
large magnetic structure**



**small magnetic structure of
opposite polarity**



シミュレーションと観測の比較



進む「宇宙天気予報」

名大など成功

太陽活動や磁気嵐を把握

草野也名教授（太陽地球環境学）や梶田一成京大教授（太陽宇宙プラズマ物理学）らは、日本の太陽観測衛星「ひまわり」を使い、二〇〇六年十一月太陽表層に起きた巨大爆発（太陽フレア）の前後の磁気や向きなどを詳細に観測。このデータを基にスーパーコンピュータを使って三次元モデルを作り、磁力線のむねれ太陽表面の黒点やフレアが生じ、太陽風の激しい乱れが生じて地球に磁気嵐が起きるまでの一連の現象を再現することに成功した。現在は黒点活動が弱くなってきている時期で、一二年はヒックを迎えると思われるが、経路に達した大きな宇宙天気予報はできていない。草野教授らは、今後太陽フレアのメカニズムの解明や、物理法則に基づいた詳細な宇宙天気予報を目指したいと話している。

中日新聞2010年3月16日

太陽嵐 スパコンで再現

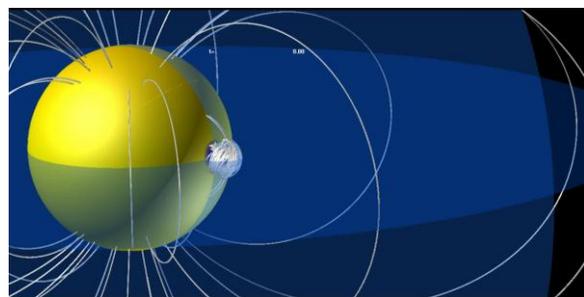
「宇宙天気予報」精度アップ期待 京大など

太陽表面の爆発（フレア）で、太陽の精度をアップする技術として期待されている。地球周辺の磁場を乱すまでの過程を、京都大、名古屋大の研究者らがスパコンで再現するに成功した。太陽嵐やその影響を測する「宇宙天気予報」の精度を上げる。人工衛星の機体損傷や、地上の電力網の方向や強度が変化した。無

草野也名教授（太陽地球環境学）や梶田一成京大教授（太陽宇宙プラズマ物理学）らは、日本の太陽観測衛星「ひまわり」を使い、二〇〇六年十一月太陽表層に起きた巨大爆発（太陽フレア）の前後の磁気や向きなどを詳細に観測。このデータを基にスーパーコンピュータを使って三次元モデルを作り、磁力線のむねれ太陽表面の黒点やフレアが生じ、太陽風の激しい乱れが生じて地球に磁気嵐が起きるまでの一連の現象を再現することに成功した。現在は黒点活動が弱くなってきている時期で、一二年はヒックを迎えると思われるが、経路に達した大きな宇宙天気予報はできていない。草野教授らは、今後太陽フレアのメカニズムの解明や、物理法則に基づいた詳細な宇宙天気予報を目指したいと話している。

朝日新聞2010年3月16日

宇宙嵐の再現 太陽から地球へ



コロナ質量放出
シミュレーション
(塩田大幸)

惑星間空間コロナ質量
放出シミュレーション
(片岡龍峰)

