

研究会「太陽物理学と恒星物理学の相互交流と将来的展望」
2011年12月28日東京大学理学部



太陽活動の地球影響

宇宙天気と宇宙気候

名古屋大学太陽地球環境研究所

草野完也



Outline

- 導入
- 宇宙天気
 - コロナ質量放出 (CME)
 - 太陽高エネルギー粒子 (SEP)
 - 輻射影響
 - 宇宙天気予報: 太陽フレア予測
- 宇宙気候
 - 小氷期と大極小期
 - 気候変動の可能なメカニズム

太陽活動の地球影響

■ 宇宙天気 (Space Weather)

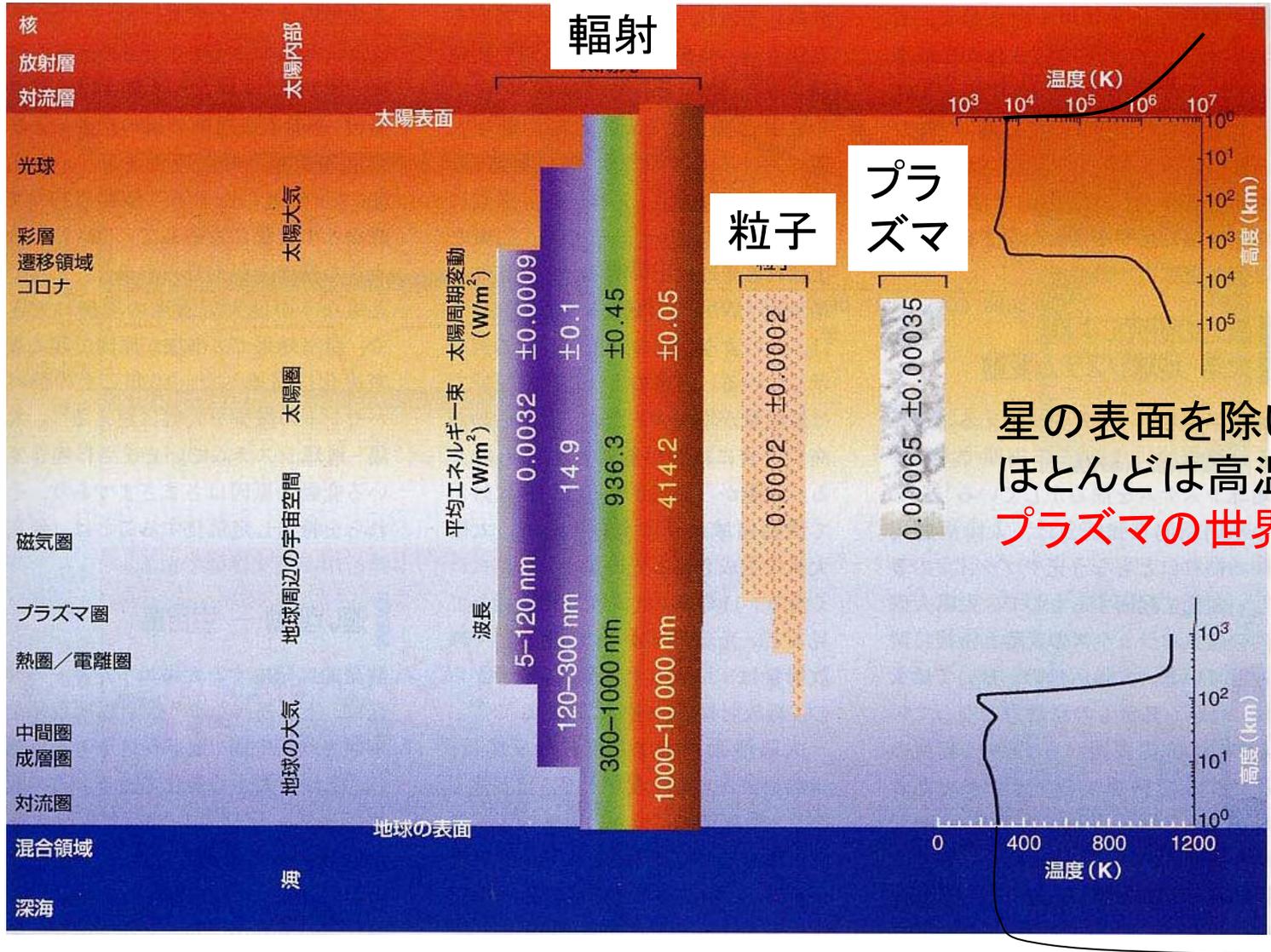
- 宇宙、特に太陽活動に伴う地球と地球周辺宇宙 (geo-space) 環境の短期的変動現象
- 主に、数日スケール以下、太陽面爆発に伴う現象など
- 衛星障害、通信障害、停電、被ばく、大気影響

■ 宇宙気候 (Space Climate)

- 宇宙、特に太陽活動に伴う地球と地球周辺宇宙 (geo-space) 環境の長期的変動現象
- 主に、年スケール以上、太陽周期活動に伴う現象など

太陽と地球をつなぐもの

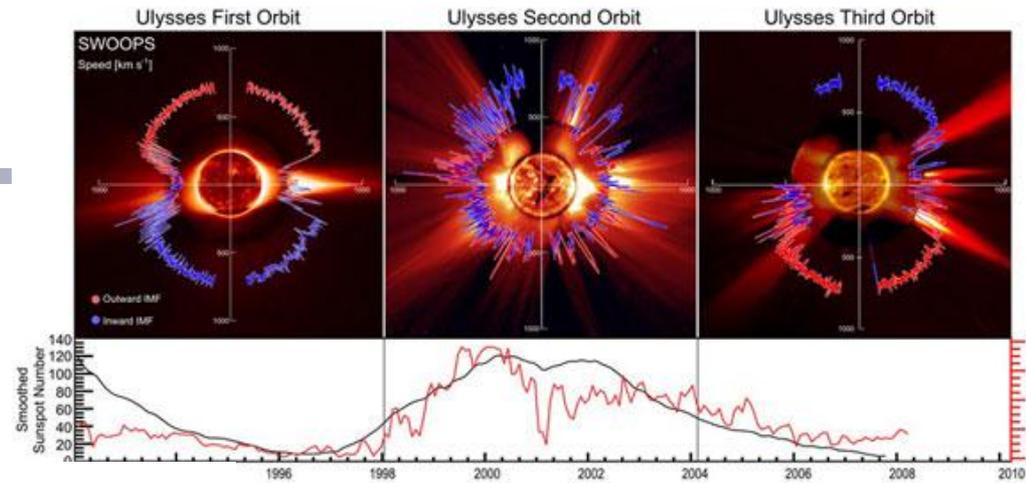
太陽



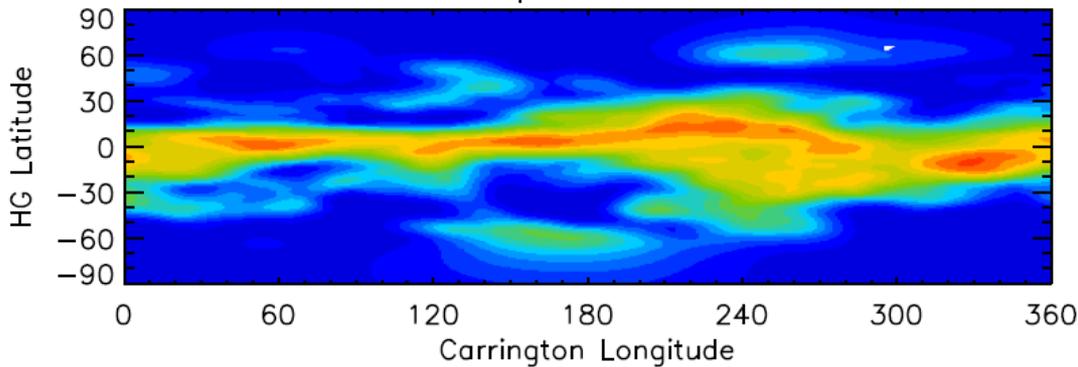
地球

太陽風構造

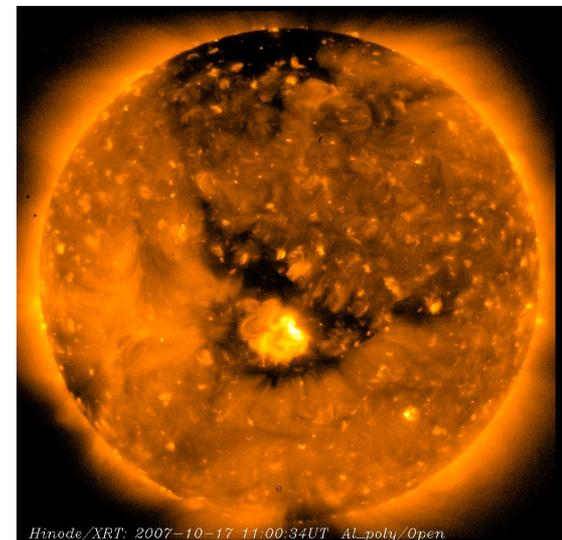
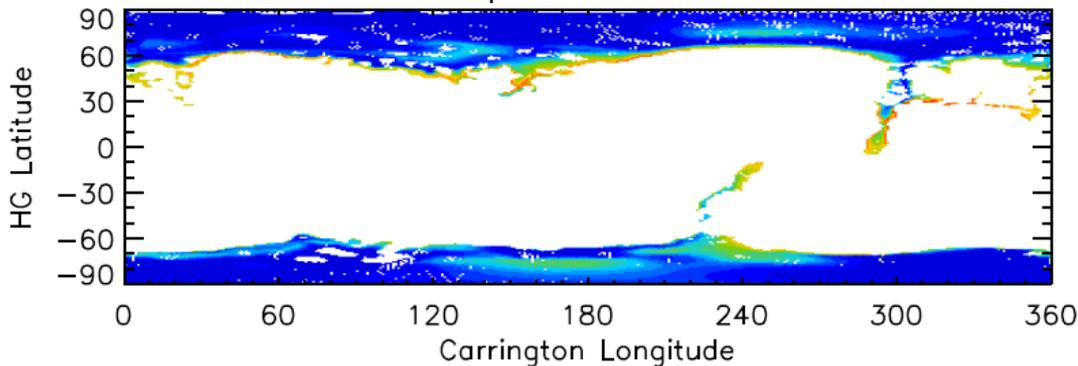
- 高速風と低速風
- コロナホール



Vmap: CR=1913

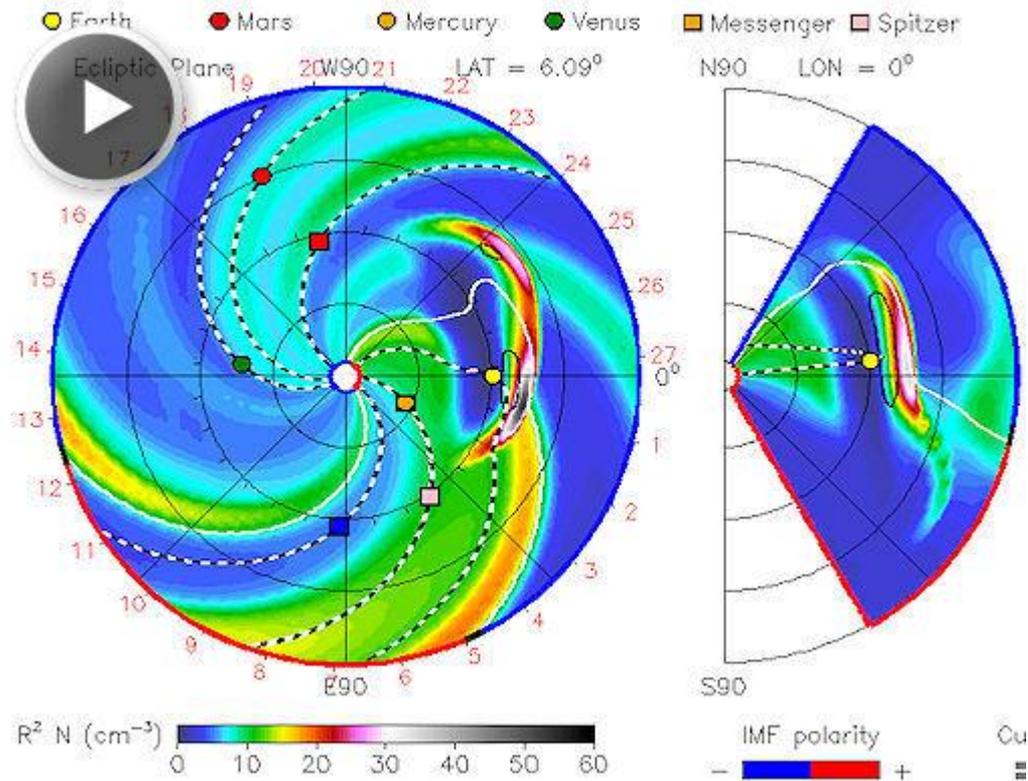


Photospheric distribution

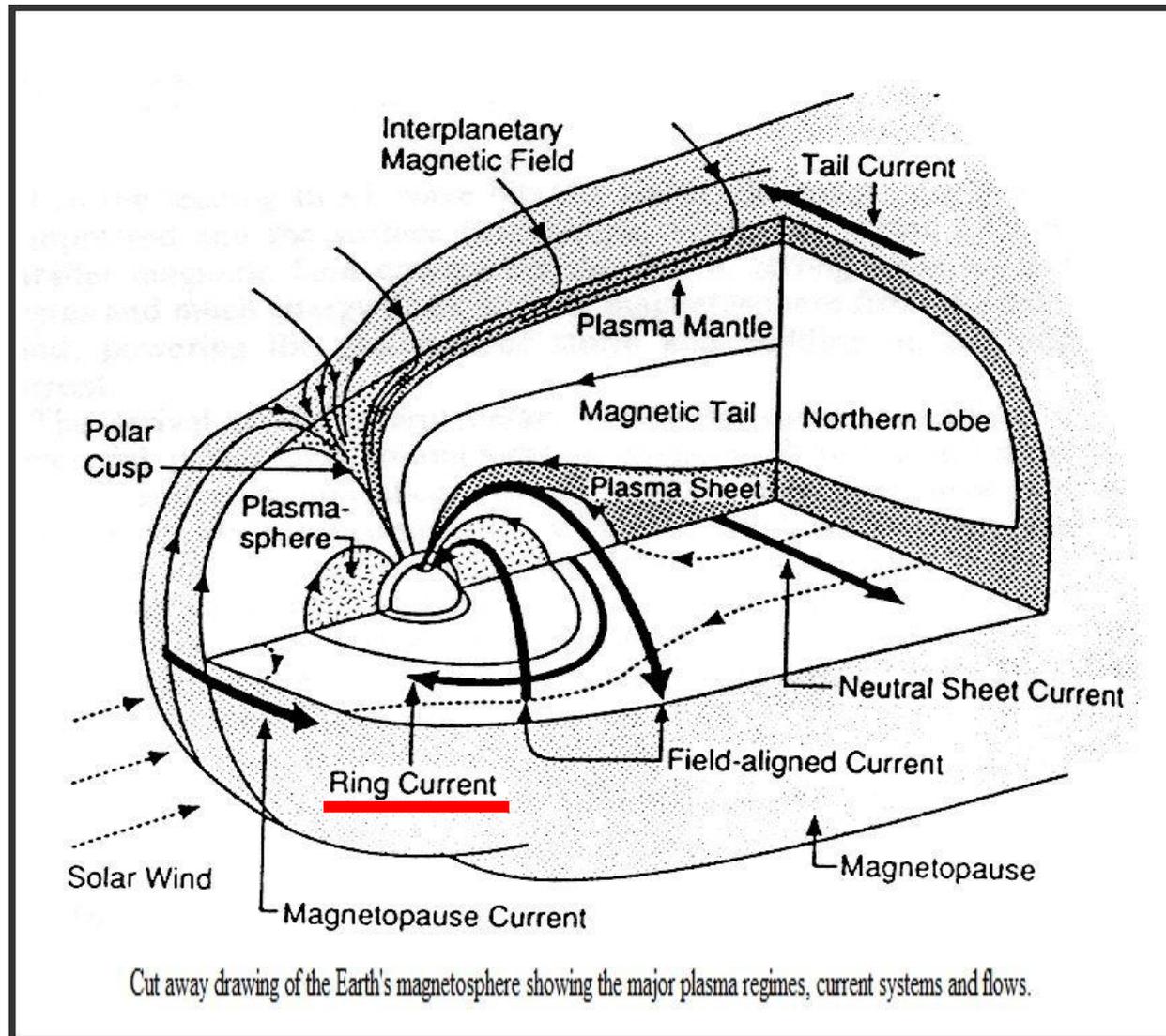


CIRとCME

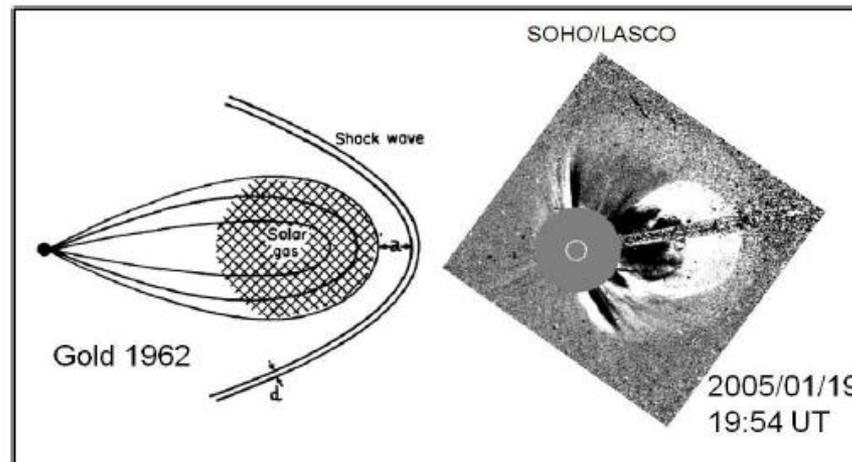
- CIR 共回転相互作用領域
- CME コロナ質量放出



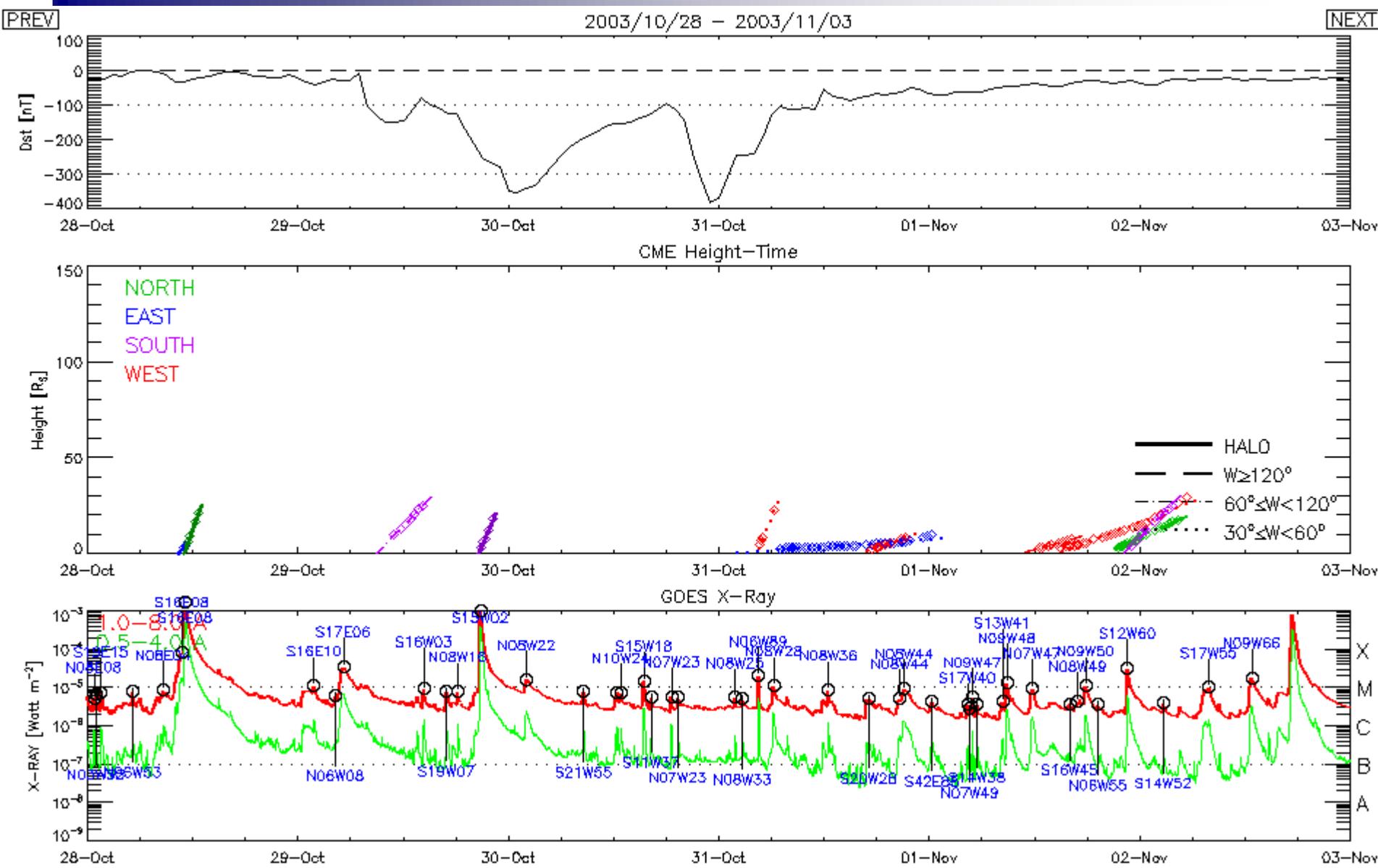
磁気圏と電流系



コロナ質量放出 (CME)



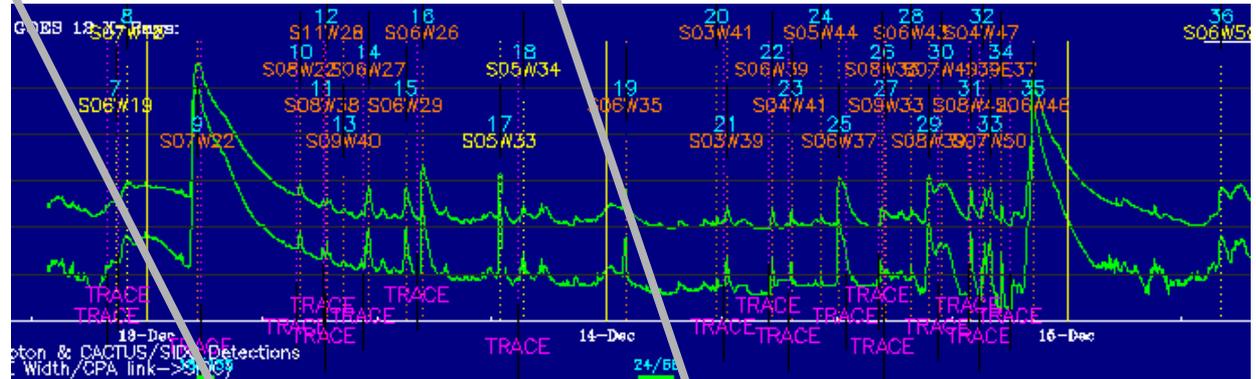
SOHO LASCO CME CATALOG



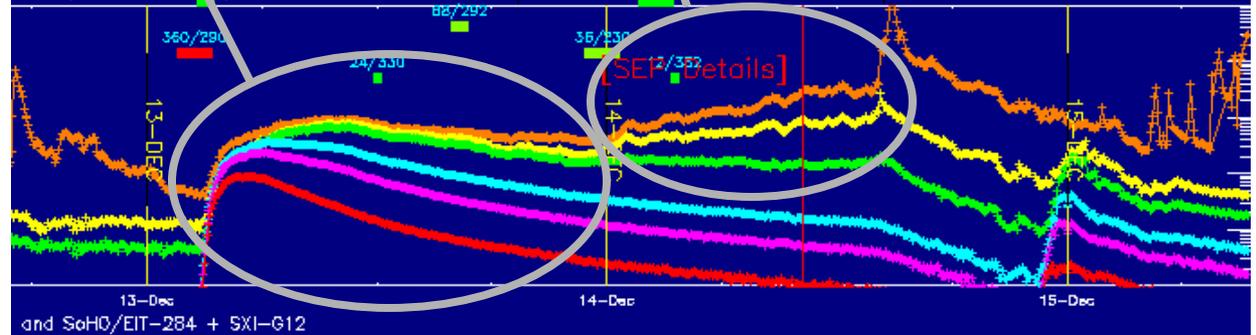
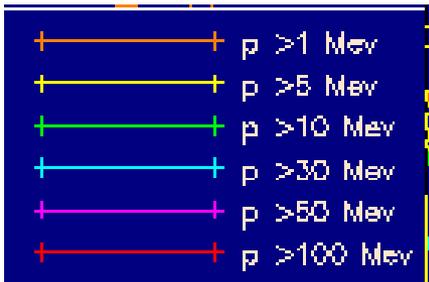
Solar Energetic Particle (SEP)

2006年12月13日のX class フレアで観測されたSEPの時間変化
 フレア後数時間で上昇する成分と低エネルギーのみでゆっくり上昇する成分

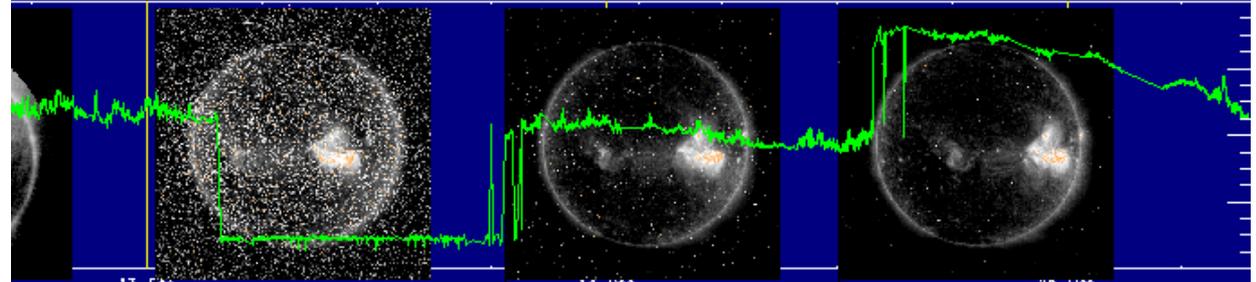
X-ray



SEP



Solar wind



過去のフレアについて推定される線量の最大値

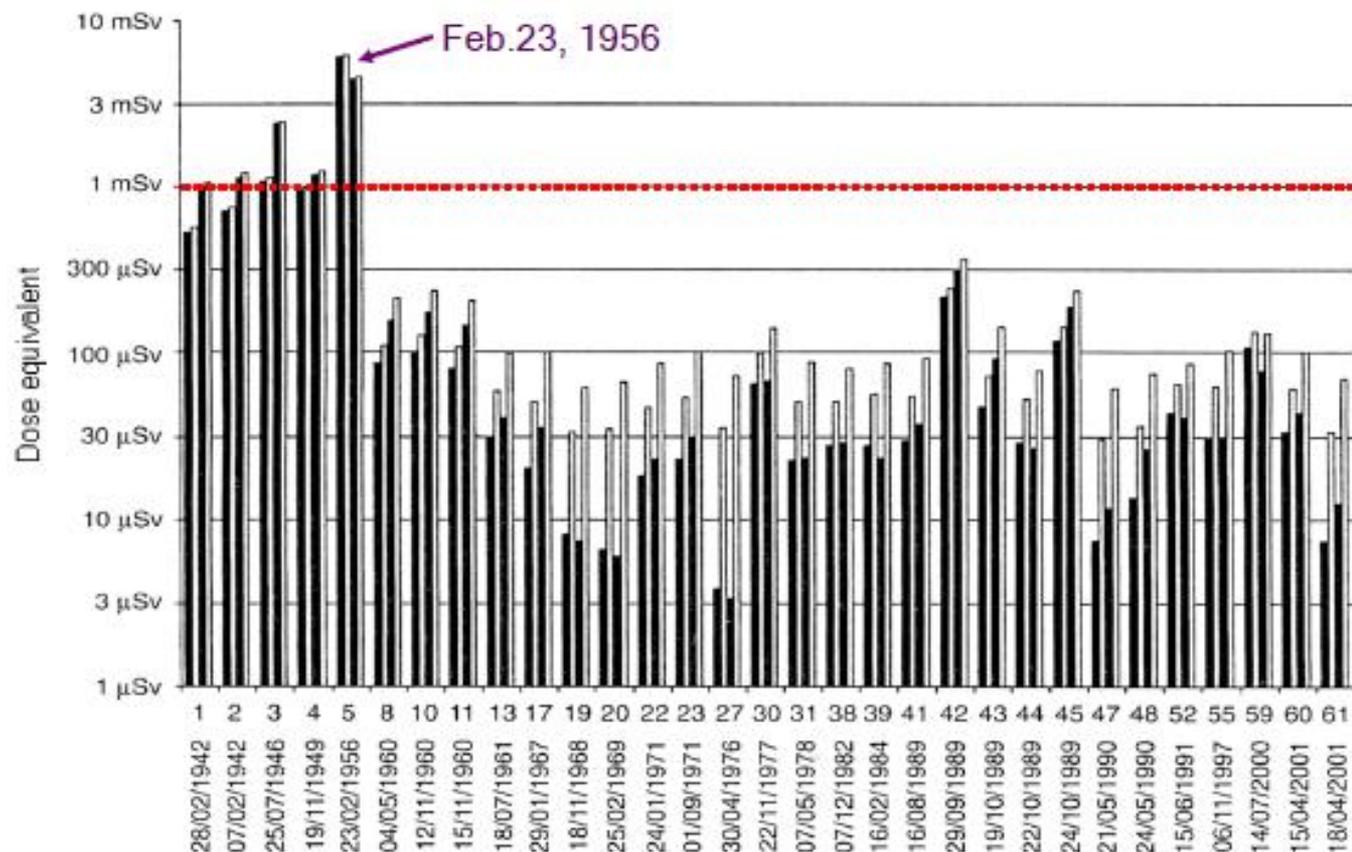


図7. 過去に地上での中性子の増加(Ground Level Event: GLE)が比較的大きく観測された太陽フレアについて、SiGLEモデルを用いてworst caseで計算された周辺線量当量の最大値. 黒いバーは太陽フレア粒子の寄与、白いバーは総線量を示し、左のペアはパリ～ニューヨーク間のコンコルドでの飛行(巡航高度17km、飛行時間3.5h)、右のペアはパリ～サンフランシスコ間のエアバスA340での飛行(巡航高度11km、飛行時間11.5h)での線量を示す(Lantos and Fuller, 2003). なお、1956年2月23日のフレアは1942年以降5番目に観測されたGLE事象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

太陽フレアによるオゾン減少



SOHO/LASCO

太陽フレアによる太陽嵐

(例 "ハロウィン" イベント 2003.10.28)

太陽高エネルギー粒子と
オーロラ粒子による上層
大気電離

NO_xの形成と降下

成層圏オゾンの破壊

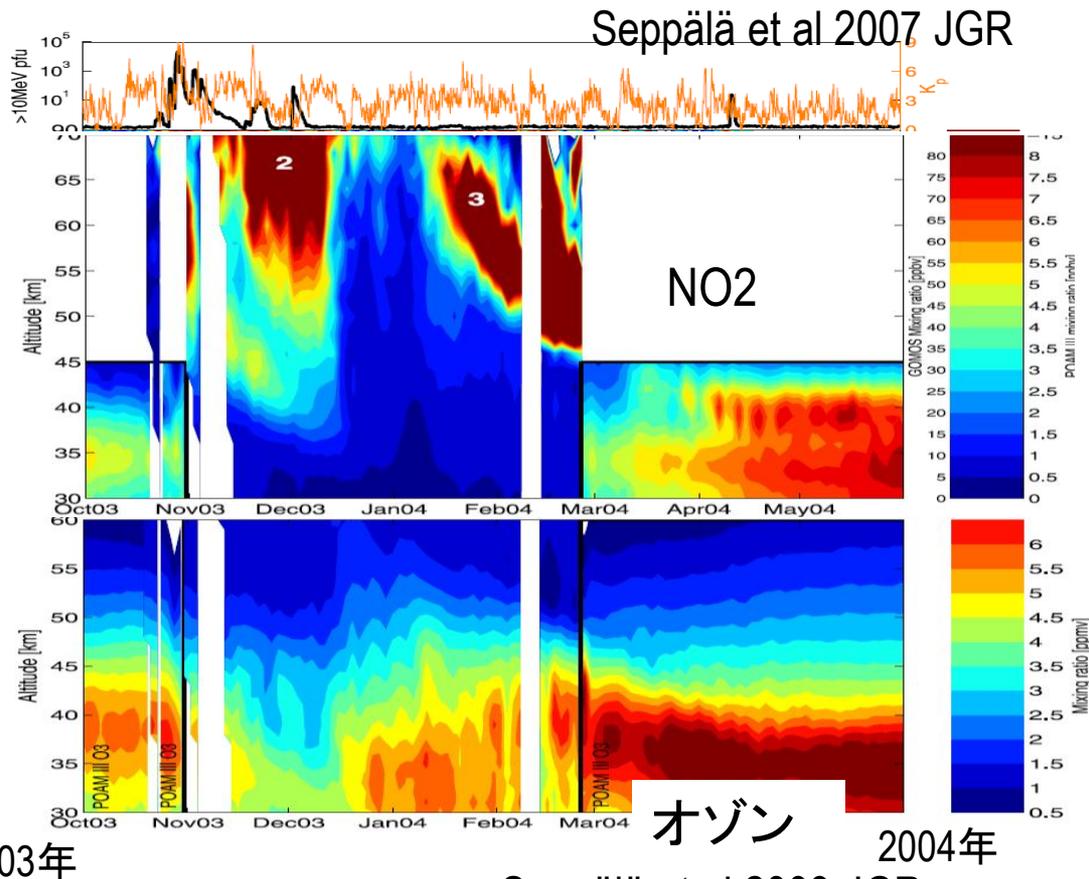
?

気候影響

陽子
流束

高度

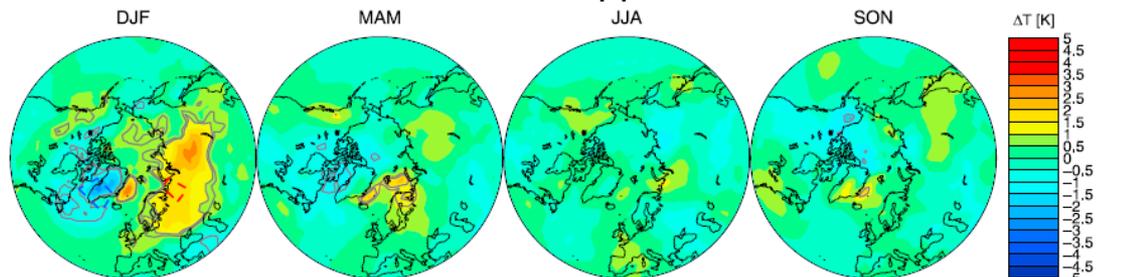
高度



2003年

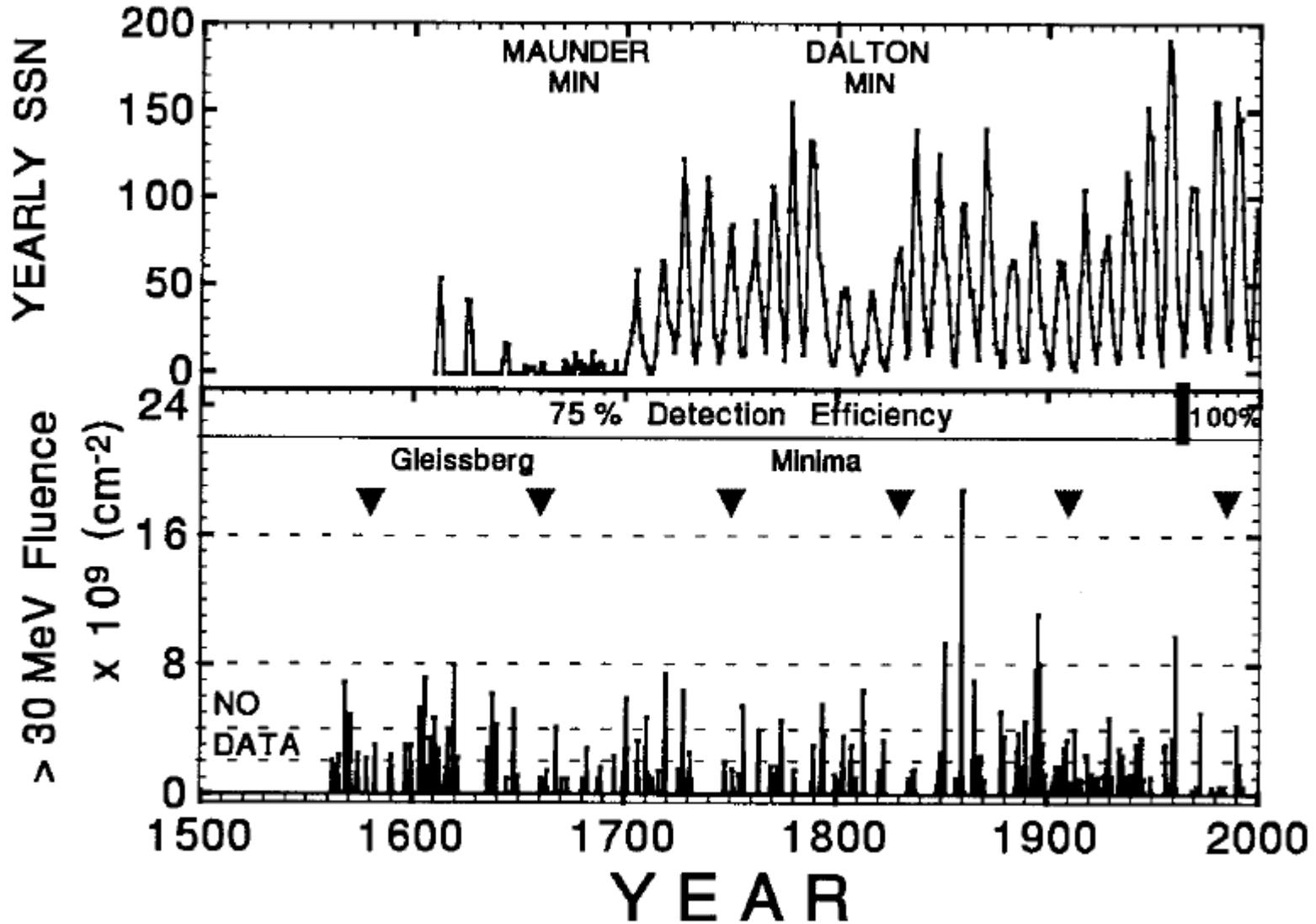
2004年

Seppälä et al 2009 JGR



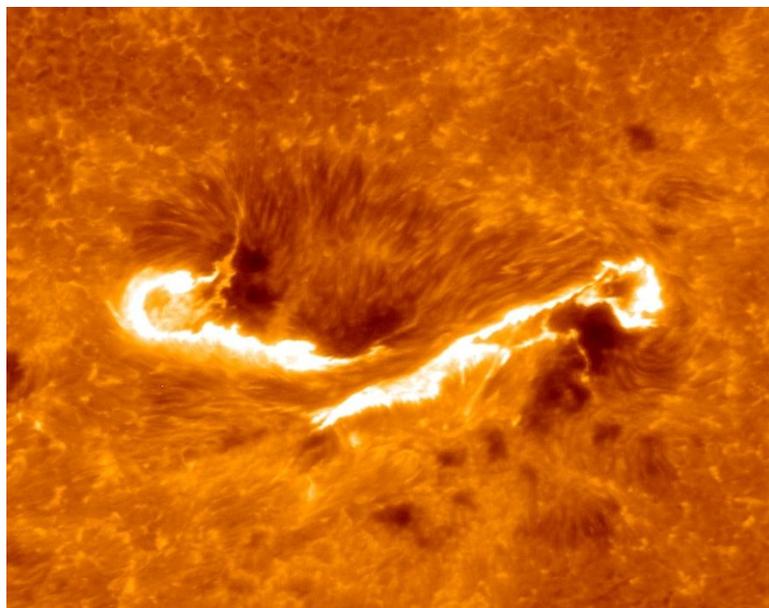
過去400年の太陽フレア

McCracken et al. 2001



デリンジャー現象

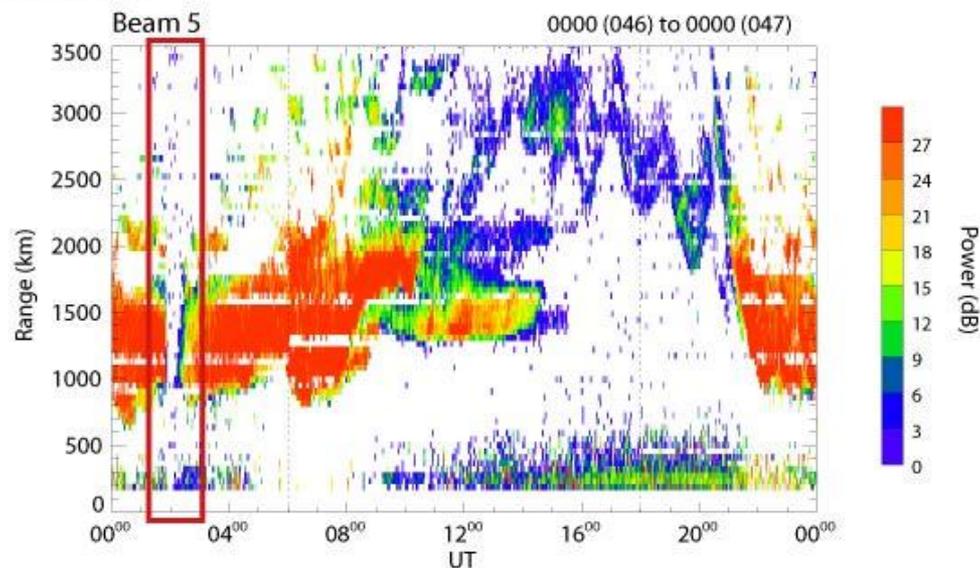
- フレア放射による一時的な電離層のプラズマ密度増加→D層における短波吸収



SUPERDARN PARAMETER PLOT
Hokkaido: pwr_l

15 Feb 2011 ⁰⁴⁰

fast normal (sw) scan mode (151)



2011年2月15日 午前10時44分(日本時間)にひ
のが観測した巨大フレア。

2011/12/30

2011年2月15日に北海道-陸別短波レーダーが観測した電離層か
らのエコー分布。赤い四角内でエコーが一時的に消失している
結果は、フレア爆発によるデリンジャー現象に対応する。

宇宙天気予報

- フレア発生予測(時間、場所、規模)
- 太陽風予測(速度、密度、磁場)
- CME予測(到達時間、速度、密度、磁場)
- SEP流束予測(流束、時間)
- 磁気嵐予測
- オーロラ予測
- 電離圏嵐予測

Skill Score of X-flare prediction

- e.g. perfect prediction
 $n_{ff}=n_f, n_{qq}=n_q \rightarrow SS=1$

$$SS = \frac{n_{ff} - (n_q - n_{qq})}{n_f}$$

■ Results

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)

経験的フレア予測

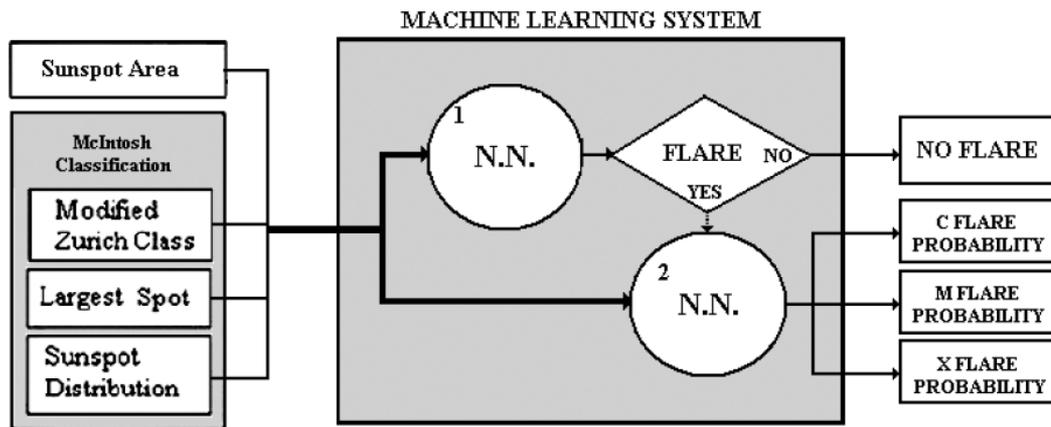


Figure 2. Machine-learning system for flare prediction.

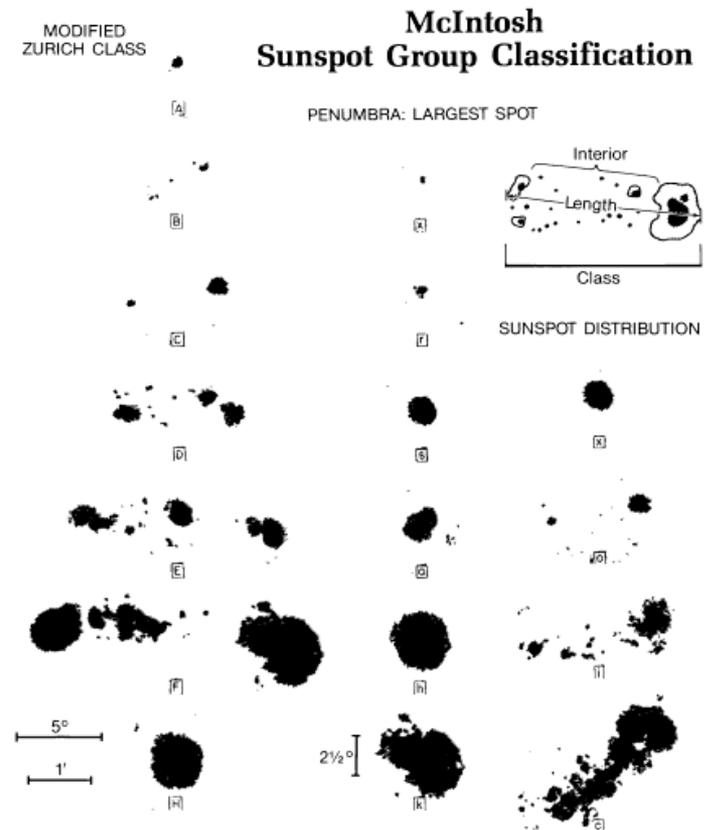


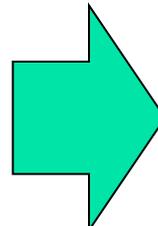
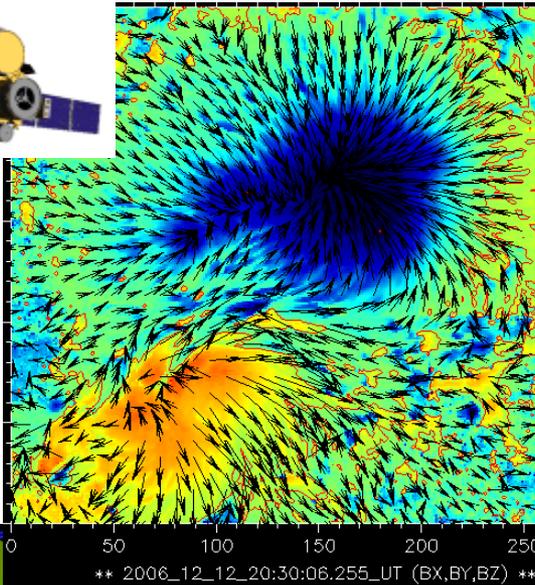
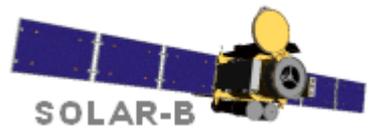
Fig. 1. The 3-component McIntosh classification, with examples of each category.

Nonlinear Force-Free Model

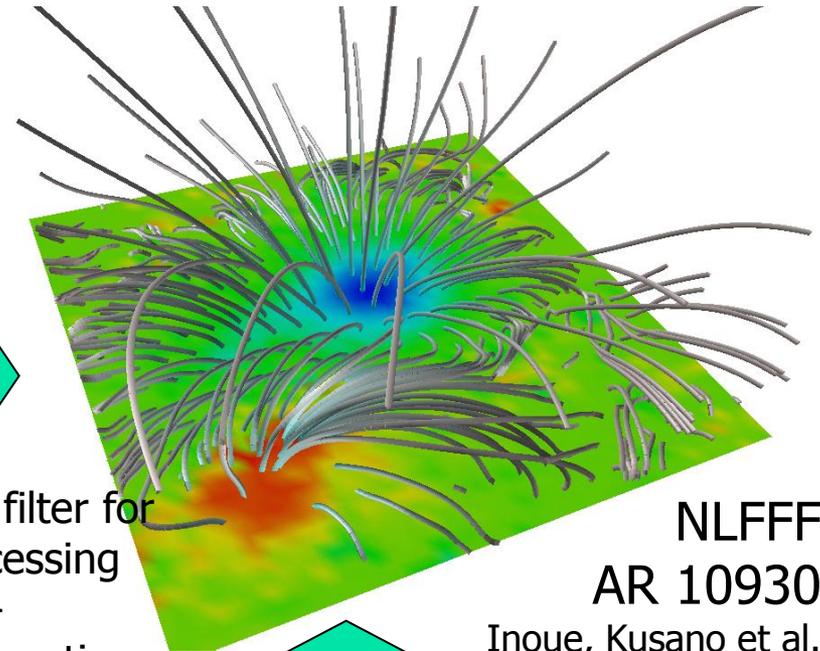
- The initial condition by Nonlinear Force-Free Field Model

$$\nabla \times \mathbf{B} = \alpha \mathbf{B} \quad (\mathbf{B} \cdot \nabla \alpha = 0)$$

vector magnetogram Hinode/SOT-SP



low-pass filter for
preprocessing
+
MHD relaxation



NLFFF

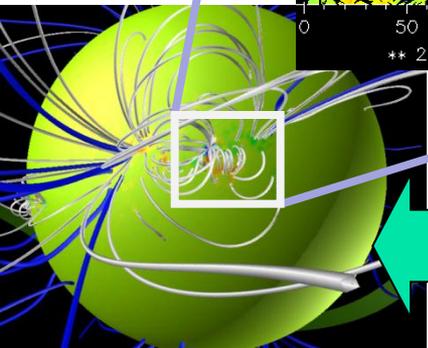
AR 10930

Inoue, Kusano et al.
Poster SH31A-1785

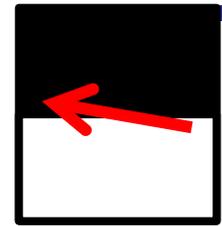
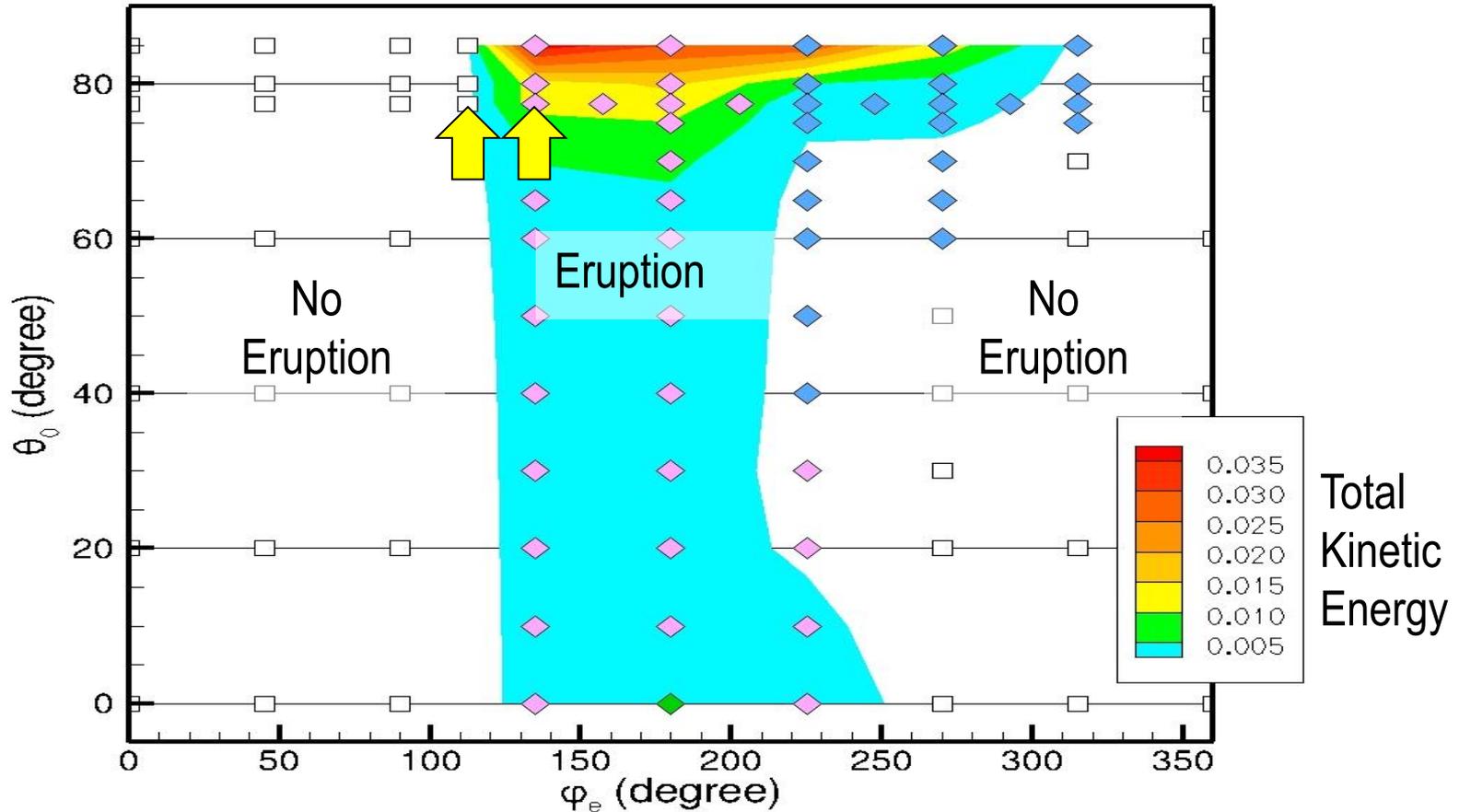


imposing photospheric dynamics
as the boundary condition
to trigger the flare

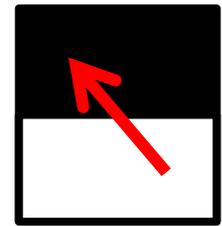
global potential field
SOHO/MDI
synoptic chart



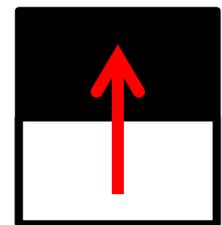
Simulation Results: flare diagram



strong shear

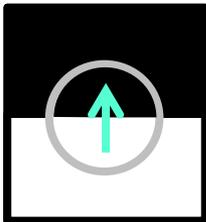


weak shear



potential field

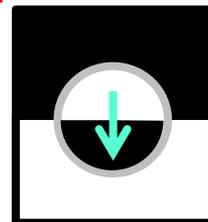
Right Polarity



Opposite Polarity

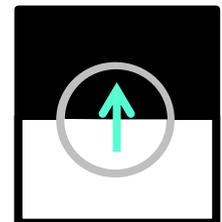


Normal Shear

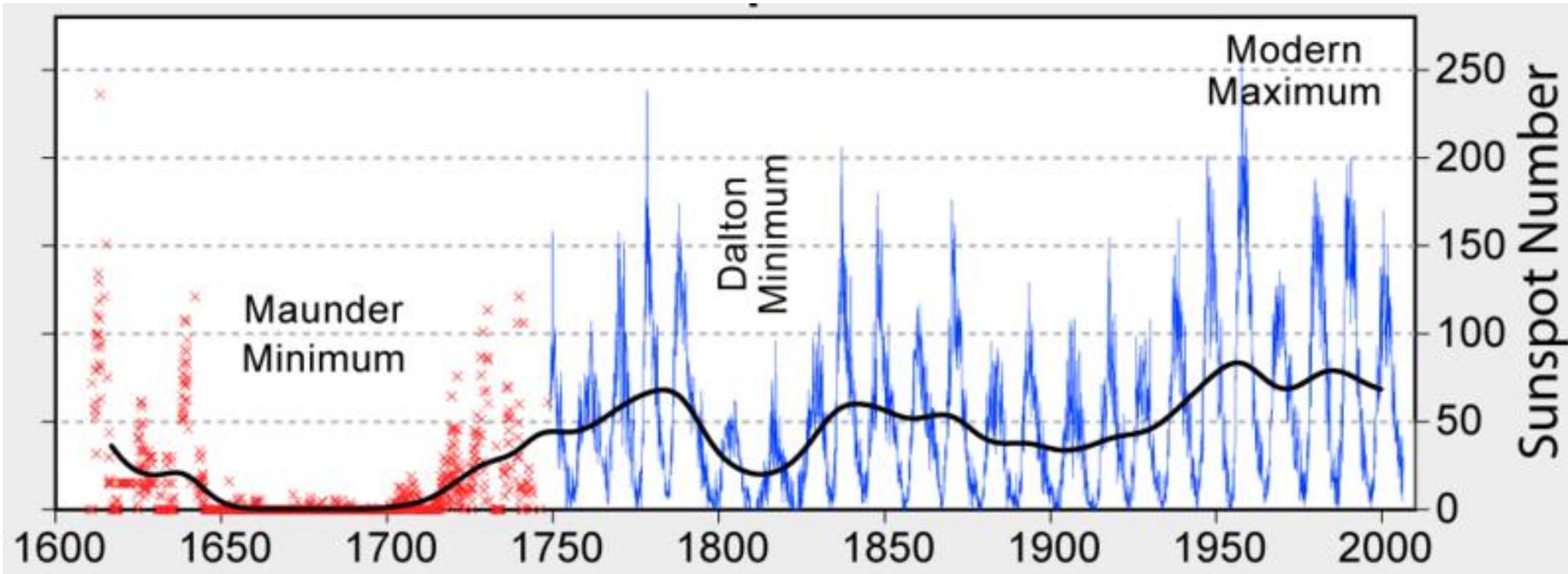


Reverse Shear

Right Polarity



黒点の長期変動



Solar cycle: Schwabe (1844)

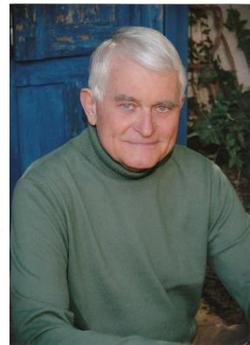
Maunder Minimum: Eddy (1976)



2010/4/8



Edward W. Maunder (1851–1928)



過去の太陽活動と気候変動



北半球平均気温

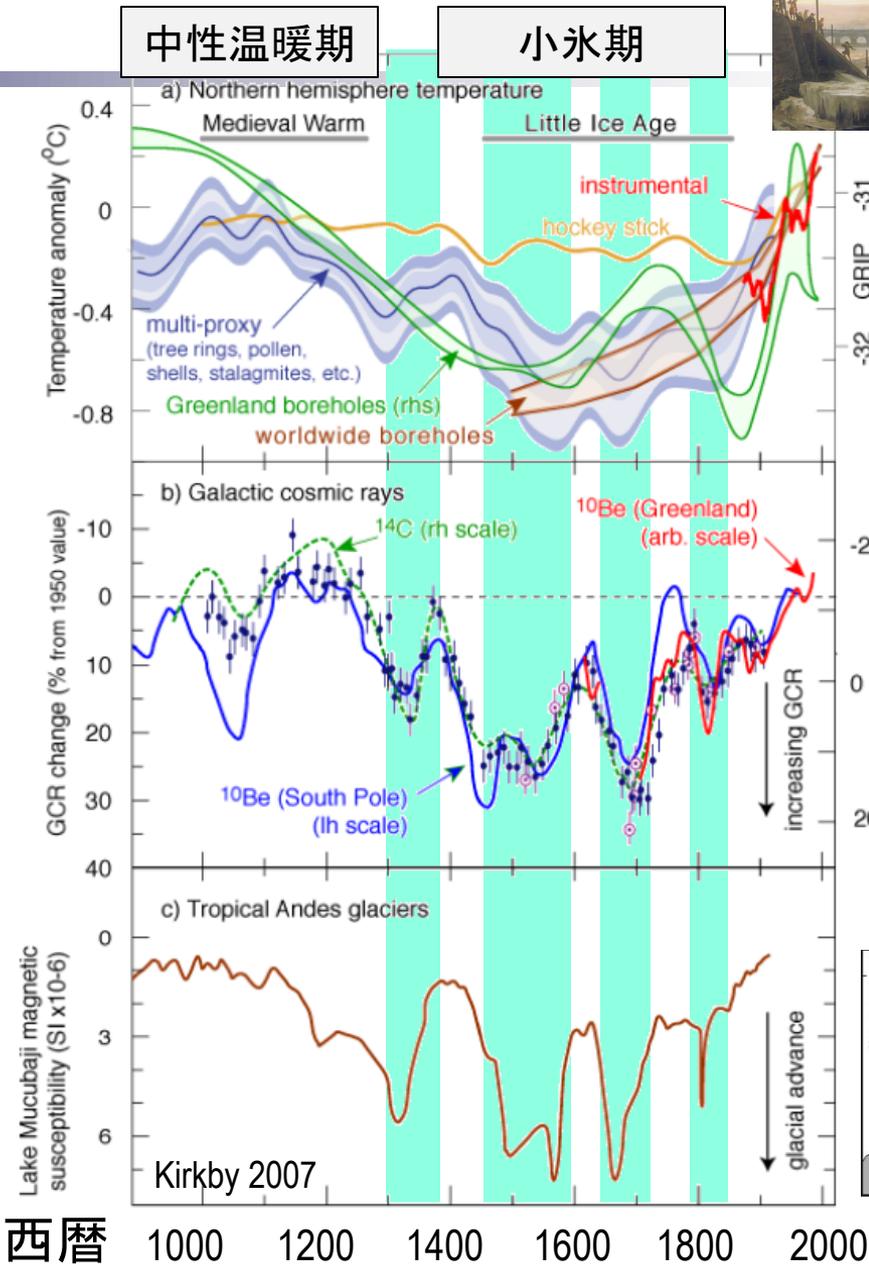
- Mann et al. 1998, 1999
- Moberg et al. 2005
- Pollack & Smerdon 2004
- Dahl-Jensen et al. 1998

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

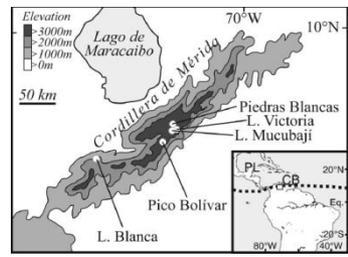
- Stuiver and Quay 1980 Klein et al. 1980
- Raisbeck et al. 1990
- Usoskin et al. 2002

熱帯アンデス氷河

- Polissar et al. 2006



黒点多い
 ↑
 ↓
 黒点少ない



西暦 1000 1200 1400 1600 1800 2000

太陽の気候影響 — 可能な要素 —

■ 輻射

- 太陽全放射変動
- 太陽スペクトル変動

■ プラズマ

- 太陽風変動

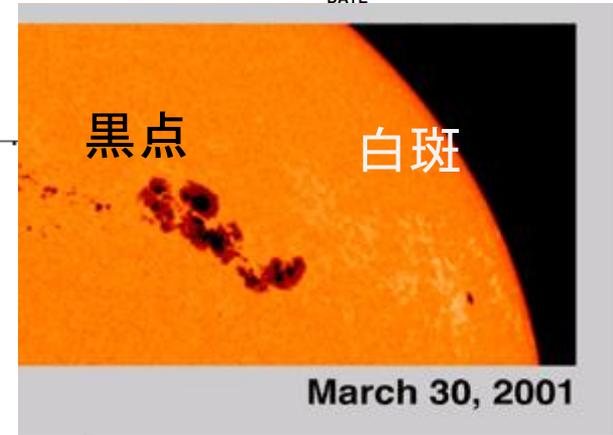
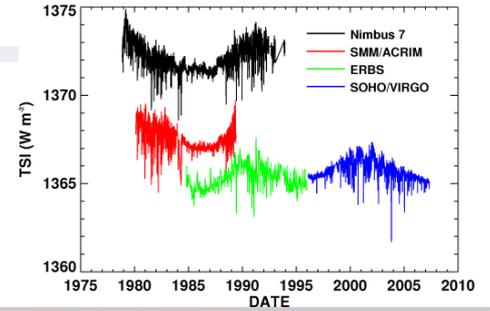
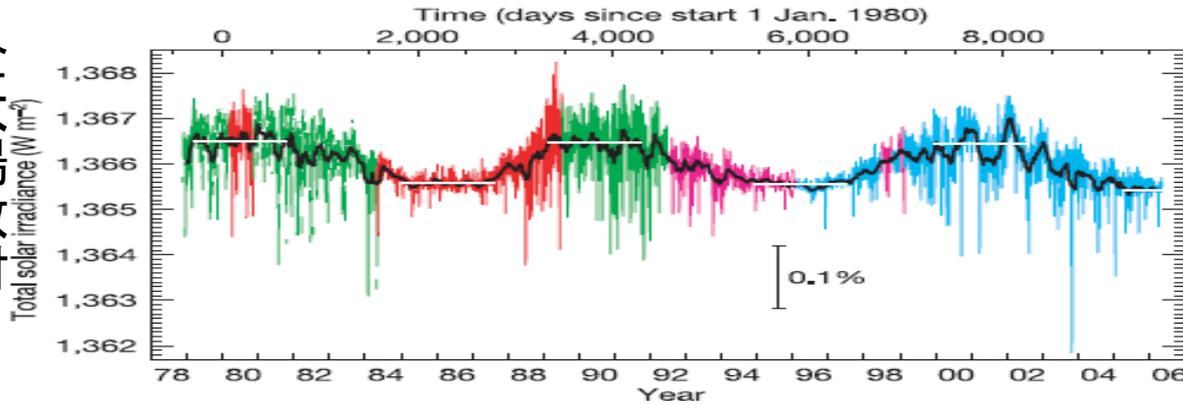
＞地磁気変動、極域粒子降りこみ、電離層影響

■ 高エネルギー粒子

- SEP (プロトンイベント)
- GCR (銀河宇宙線の太陽変調)

黒点活動に伴う放射と宇宙線変動

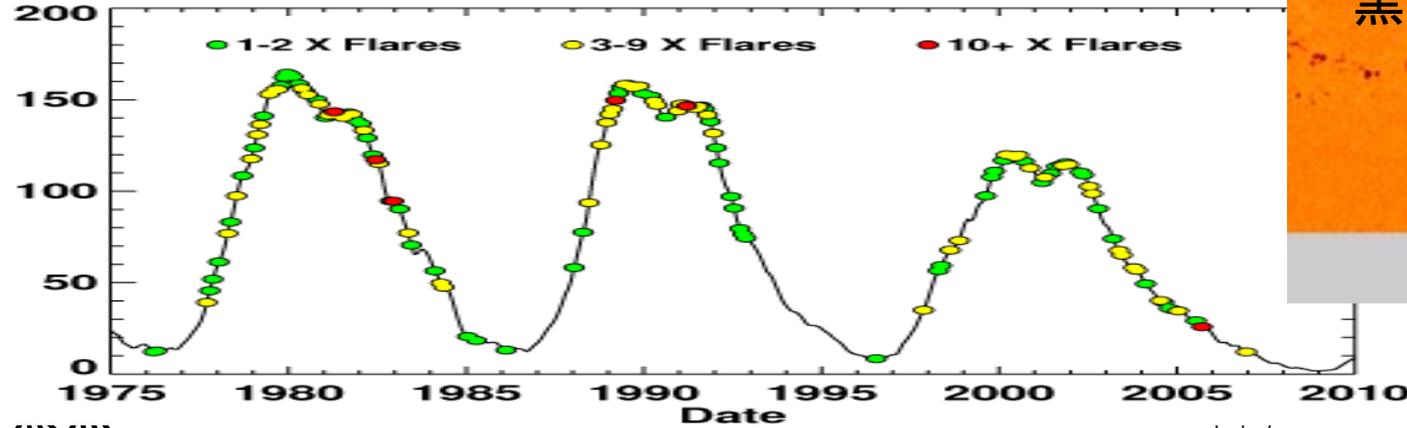
全太陽放射



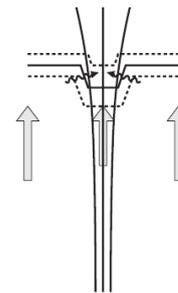
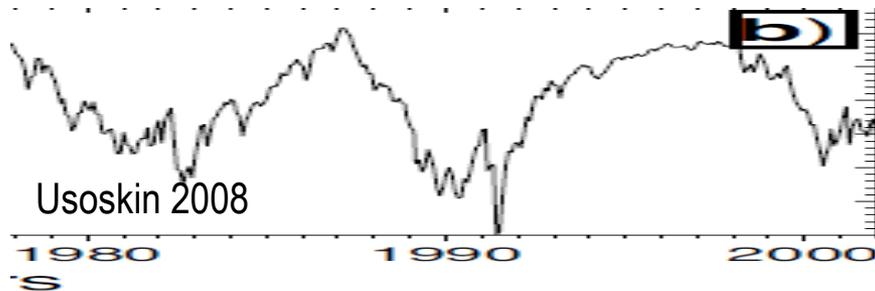
黒点

白斑

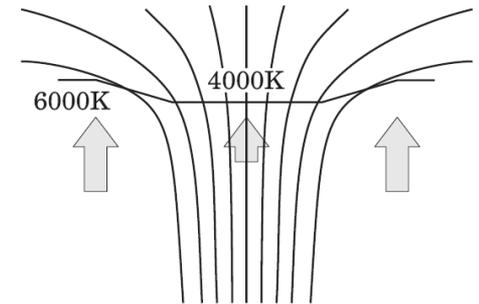
March 30, 2001



GCR
銀河
宇宙線



白斑



黒点

放射強制力

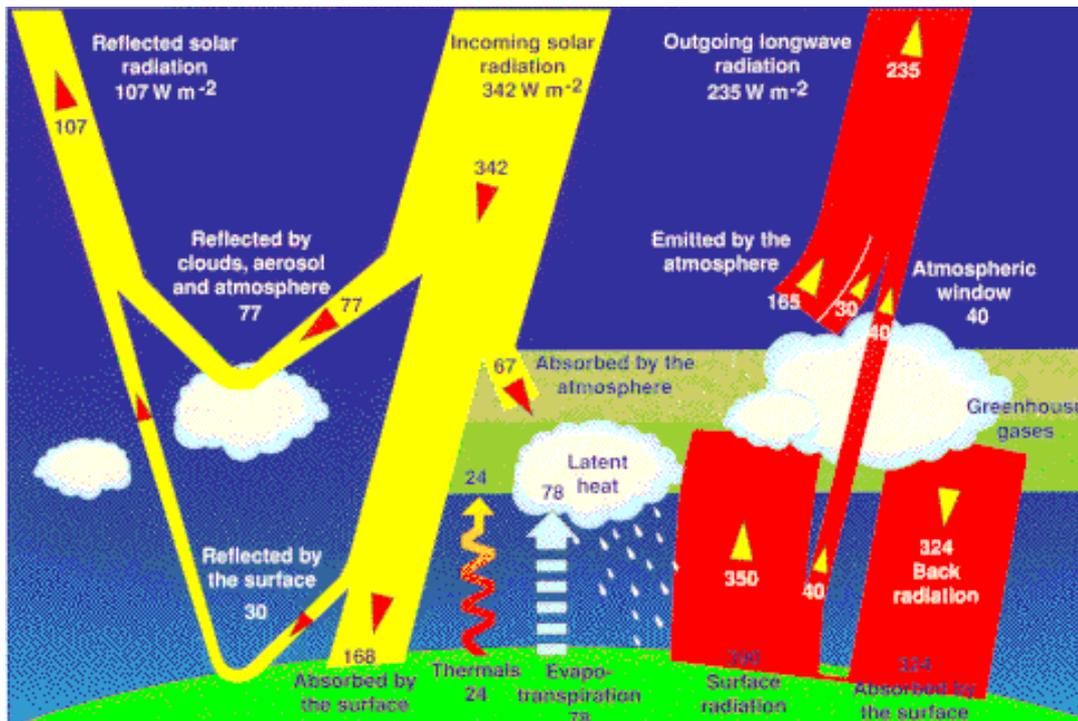
地球表面温度

温室効果

全太陽放射

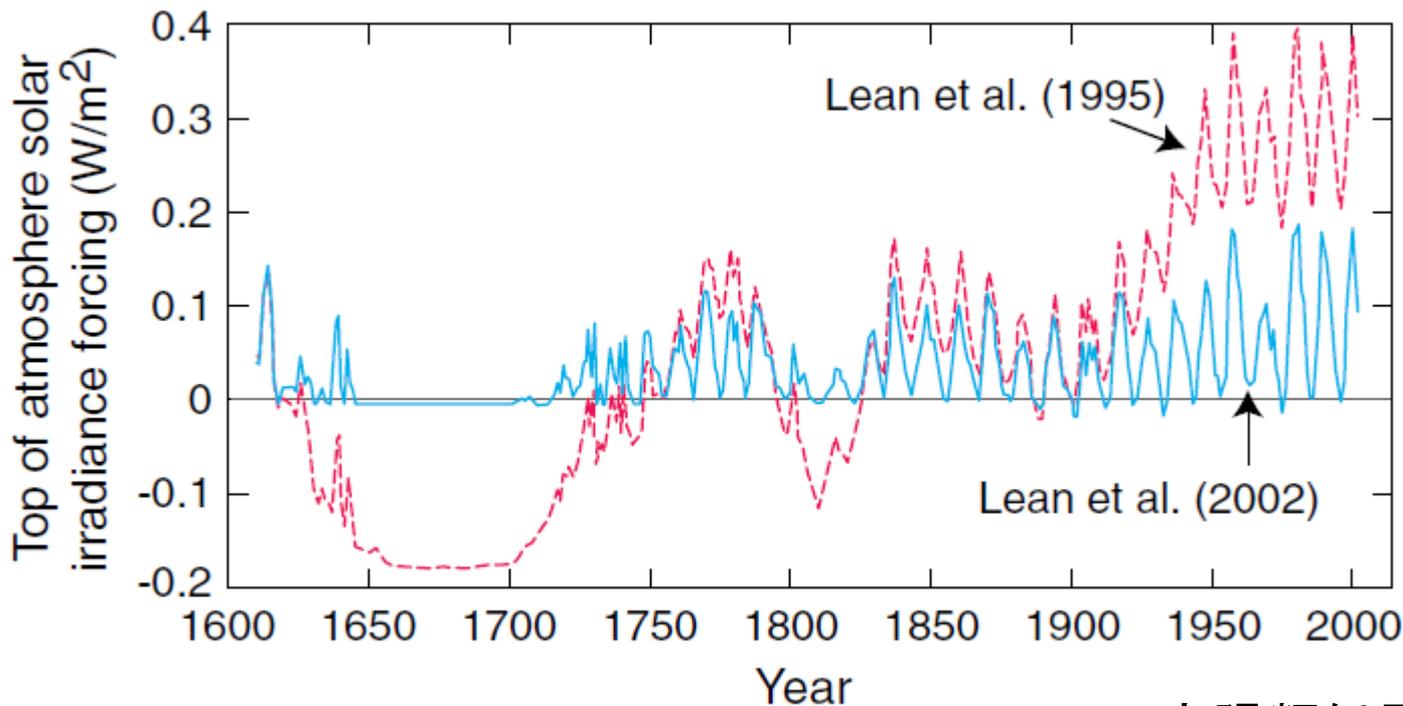
アルベド(約0.3)

$$\sigma T_s^4 = G + \frac{I_{TSI}}{4} \cdot (1 - A)$$



$$\begin{aligned} & \Delta I_{TSI} / 4 \times 0.7 \\ &= 1366 \times 10^{-3} / 4 \times 0.7 \\ &= 0.34 \times 0.7 \\ &= 0.24 [W / m^2] \end{aligned}$$

全太陽放射 (TSI) の再現



Lean et al. 1995

$$I_{\text{TSI}}(t) = I_{\text{cycl}} + I_{\text{flat}}$$

太陽類似星 (周期的星と準定常星) の統計解析



放射の系統の変動はほとんど認められない(らしい)。

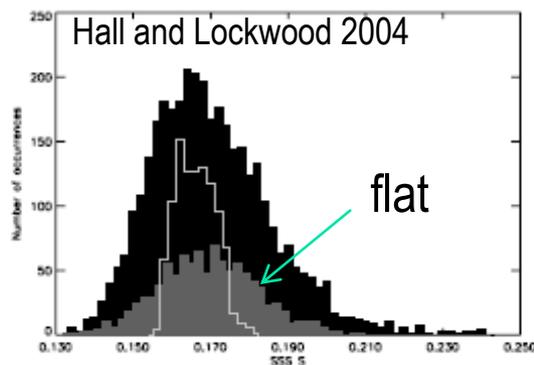
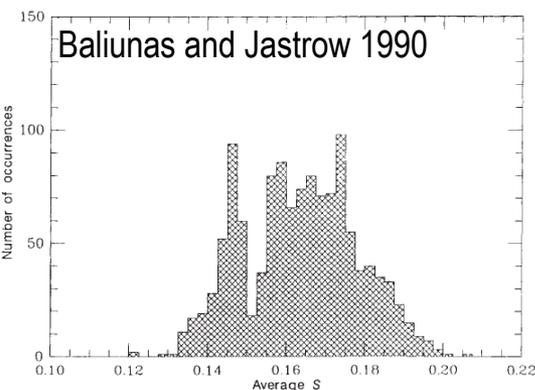


FIG. 2.—Distribution of chromospheric activity in 57 Sun-like stars. The black histogram shows 3709 individual observations for all the stars in the sample. The sunnier of stars histograms shows only those observations for

太陽スペクトル放射変動

$$\begin{array}{ccc} \text{波長} & \text{時間} & \text{面積} \\ \downarrow & \downarrow & \downarrow \\ F(\lambda, t) = & \alpha_q(t) F_q(\lambda) + & \\ & + \alpha_u(t) F_u(\lambda) + & \\ & + \alpha_p(t) F_p(\lambda) + & \\ & + (\alpha_f(t) + \alpha_n(t)) \cdot F_f(\lambda). & \end{array}$$

静穏領域
暗部
半暗部
白斑

太陽スペクトル放射変動

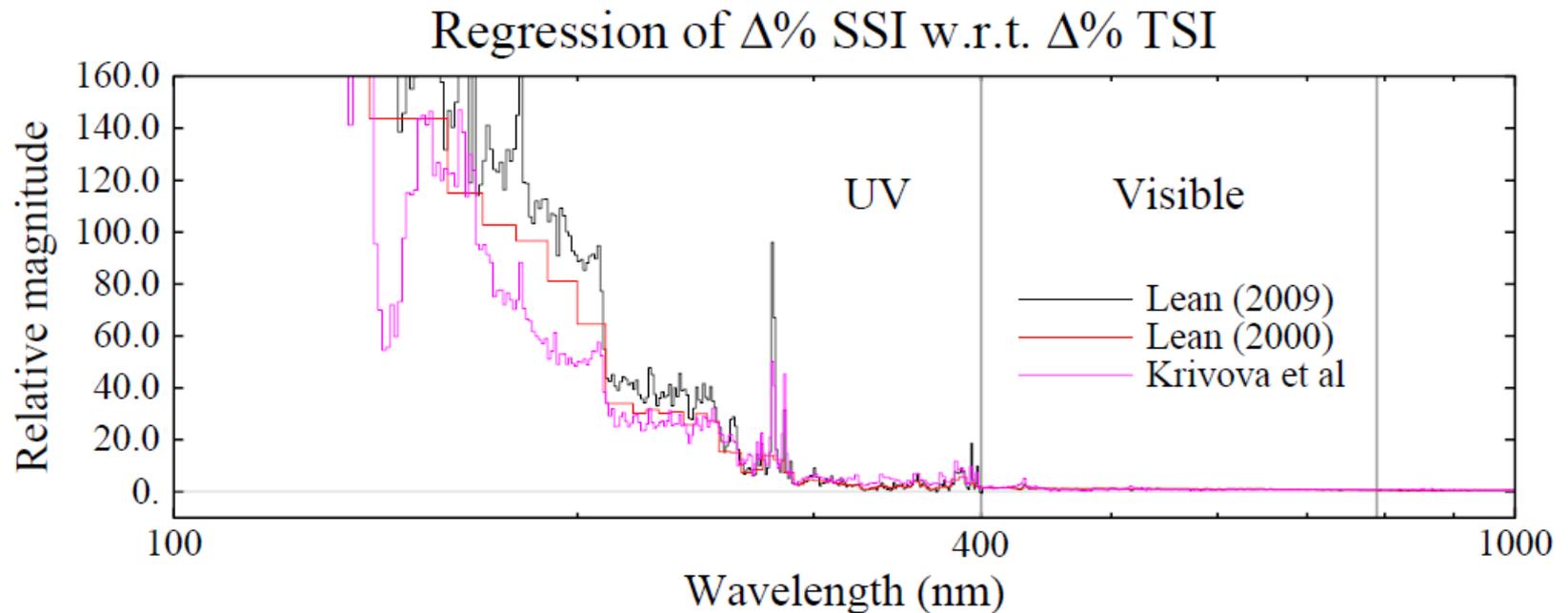


Fig. 7. Spectral variations of irradiance relative to the variation in TSI (regression of the % change in SSI at each wavelength to the % change in TSI). A relative magnitude of 20 implies that variations at that wavelength would be around 2% over a cycle, i.e. 20 \times the $\sim 0.1\%$ variation in TSI. The reference period used for the Lean (2009) and Krivova et al. (2010) curves are from the Maunder Minimum (1645–1715), while it is 1850 for Lean (2000). Note there are fewer wavelength bands in the older data.

Schmidt et al. 2010

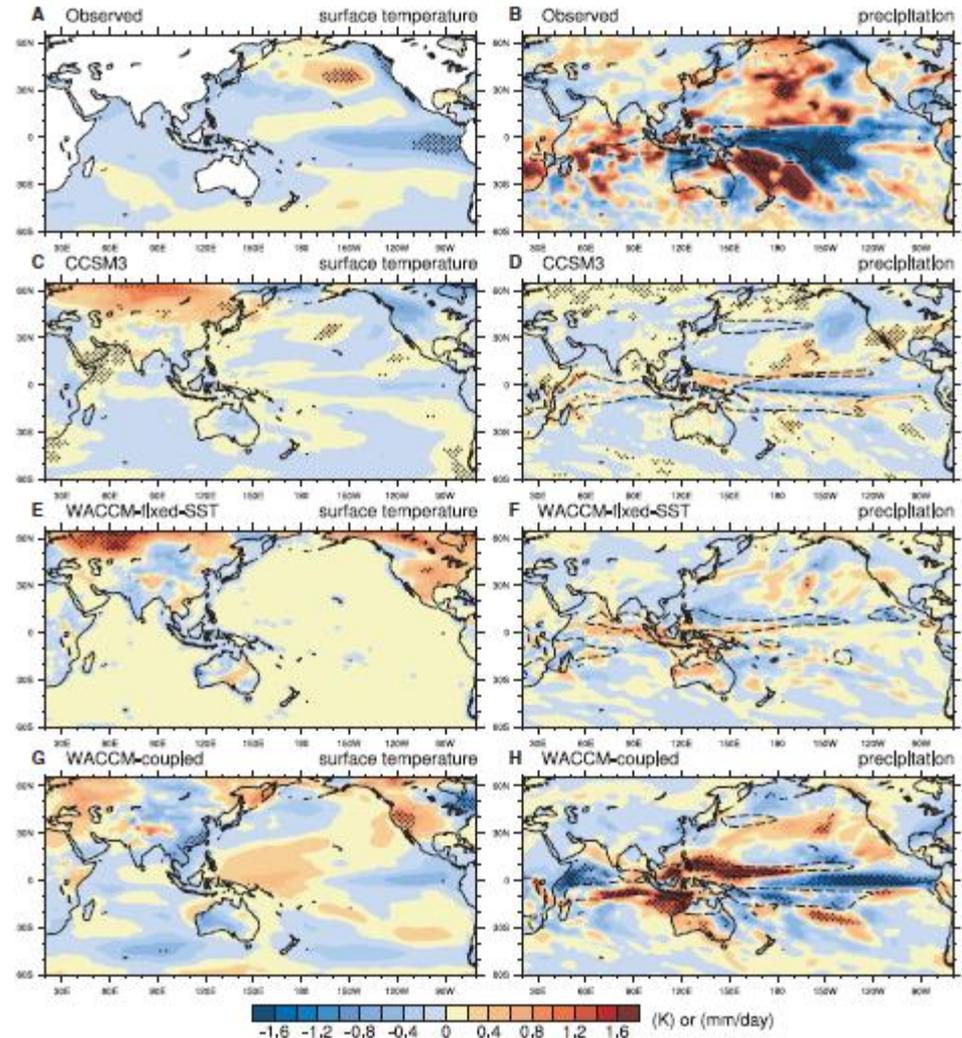
Amplifying the Pacific Climate System Response to a Small 11-Year Solar Cycle Forcing

28 AUGUST 2009 VOL 325 SCIENCE

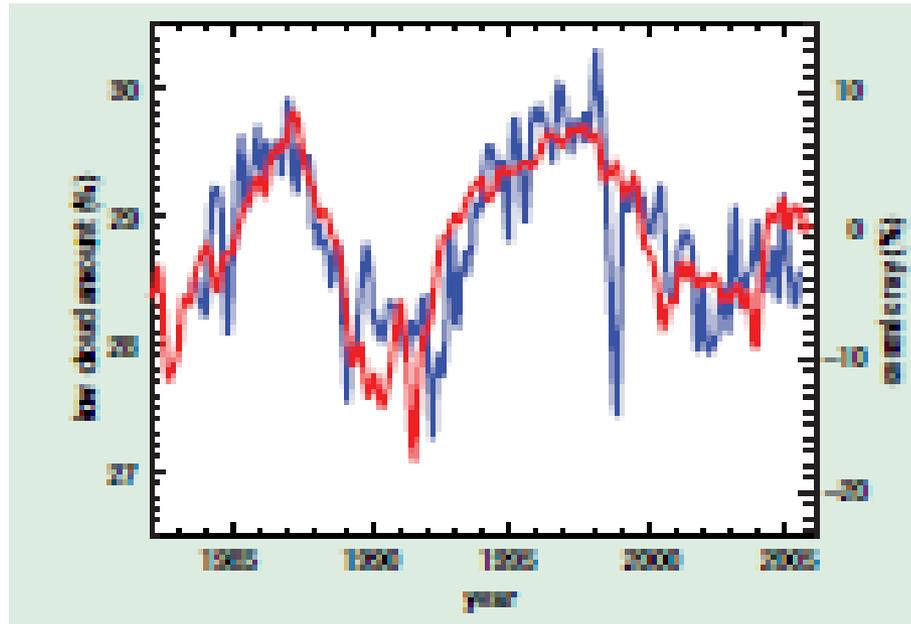
Gerald A. Meehl,^{1*} Julie M. Arblaster,^{1,2} Katja Matthes,^{3,4} Fabrizio Sassi,⁵ Harry van Loon^{1,6}

- 11年周期
 - 温度変動 0.1°C
 - 要求される放射変動 0.5W/m²
 - 観測される放射 0.1W/m²
-
- 成層圏変動による Top-down model
 - 海面温度変動による Bottom-up model

協調作用



宇宙線の太陽変調と雲量変化



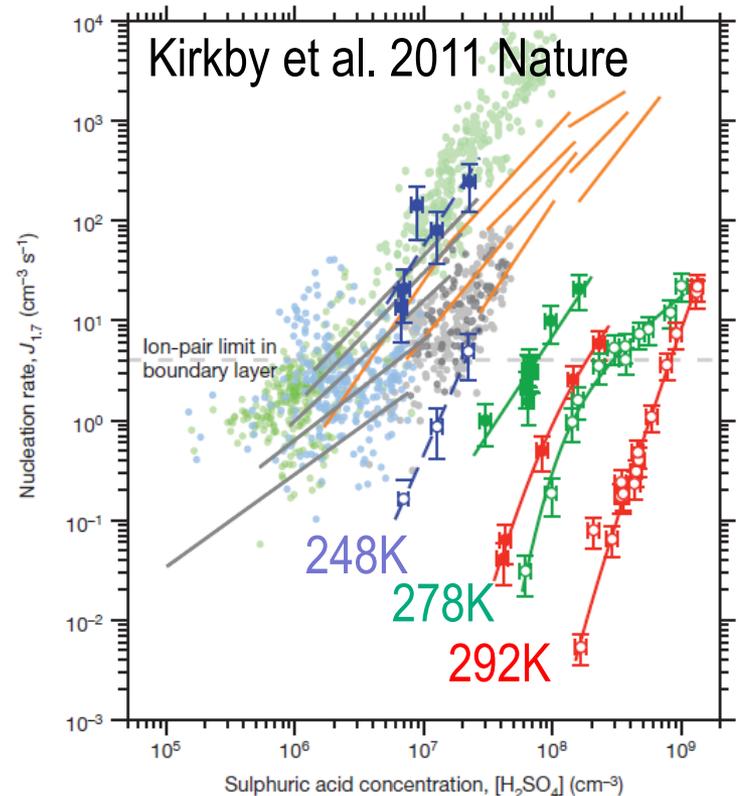
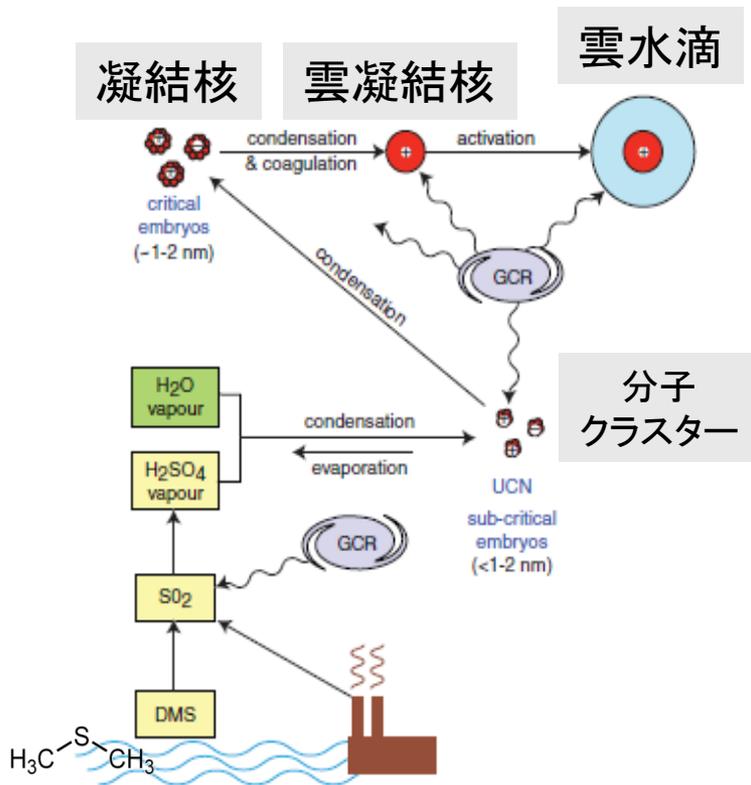
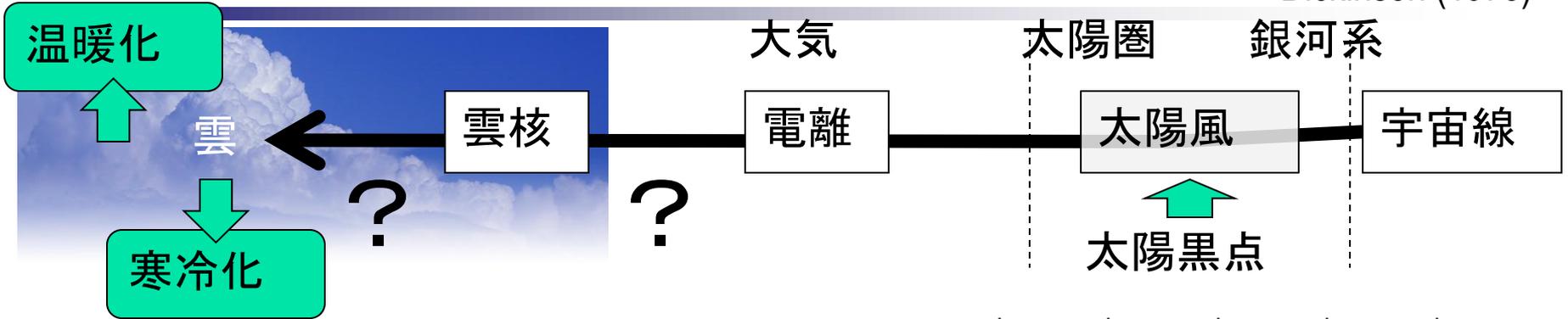
Svensmark 2008

Svensmark, Friis-Christensen 1997

Marsch, Svensmark 2000

イオン誘起核生成 仮説

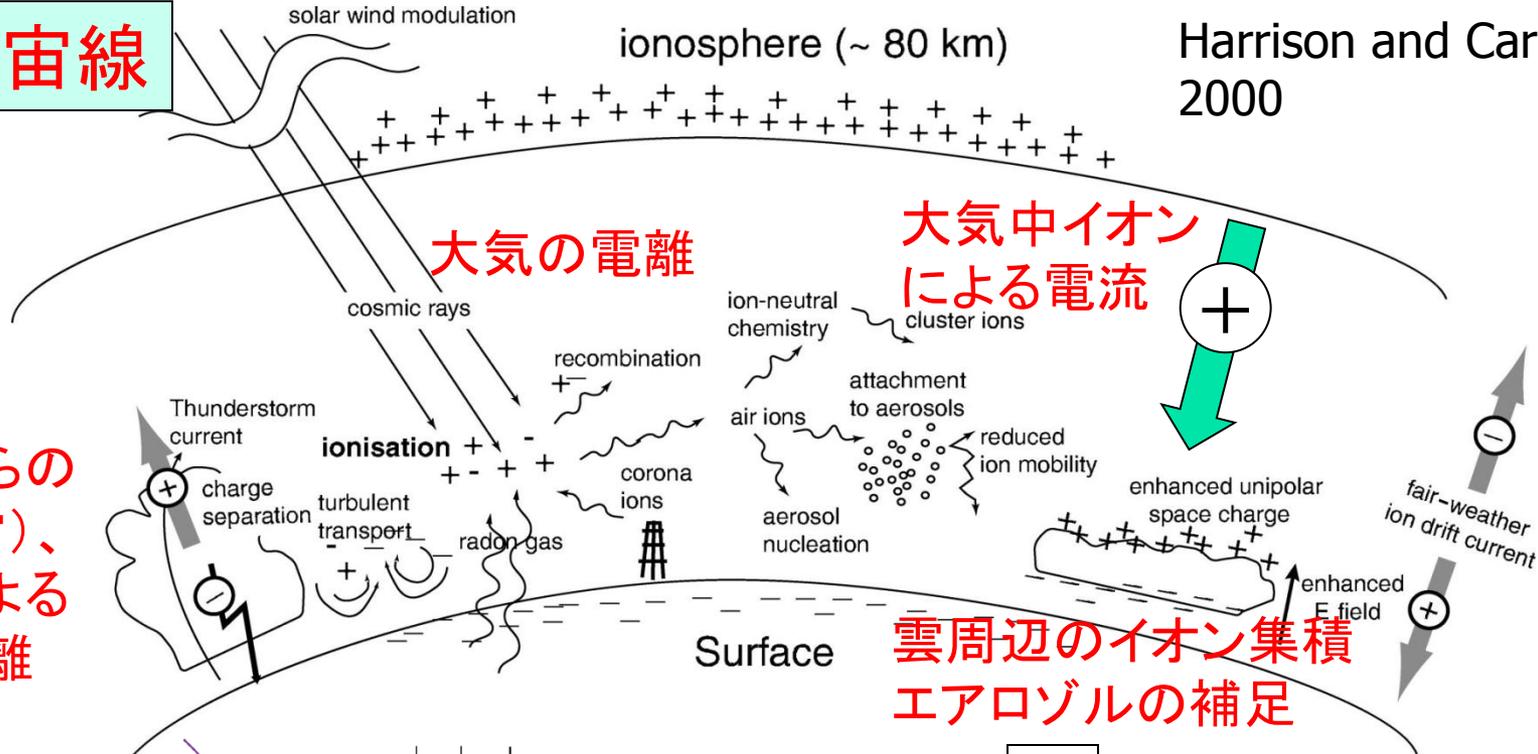
Dickinson (1975)



Ion-aerosol near-cloud mechanism

宇宙線

Harrison and Carslaw 2000

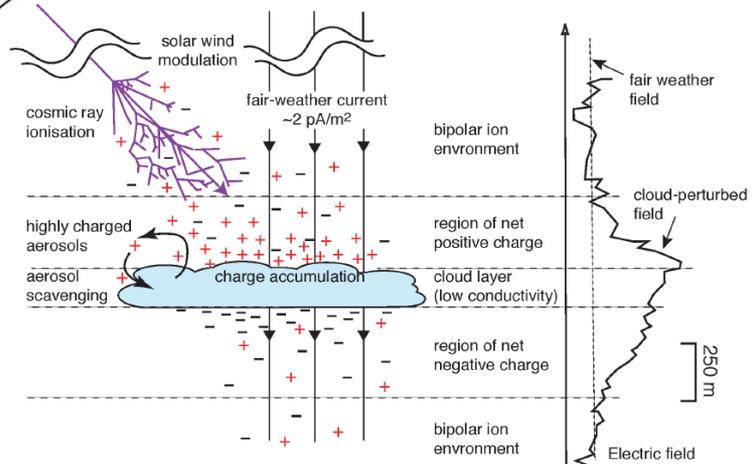


大気中の電離

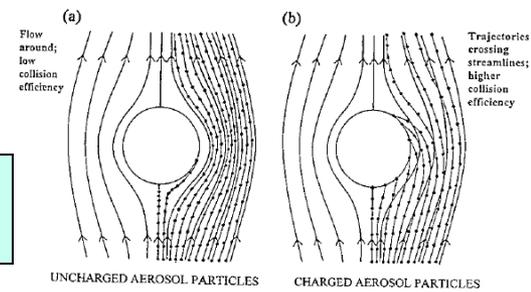
大気中イオンによる電流

雷雲からの放電(雷)、降雨による電荷分離

雲周辺のイオン集積
エアロゾルの補足



雲成長



Electro-scavenging (電気集塵効果)
Tinsley 2000

太陽の気候影響の理解

物理過程		変動の再現と理解	気候影響の理解
輻射	全太陽放射 (TSI)	? (ambiguous reconstruction)	○ } 協調作用? △ } (UV/オゾン層影響)
	太陽放射スペクトル (SSI)	??	
粒子	太陽風・地磁気	△ (aa-index 160y)	??? (相関解析)
	太陽フレア・プロトンイベント	○ (ice core)	?? (電離層影響・成層圏オゾン減少)
	銀河宇宙線 (GCR)	○ ($\Delta^{14}\text{C}$, ^{10}B)	? (電離核生成、大気電離雲成長)

刺激応答系としての包括的なモデルが必要