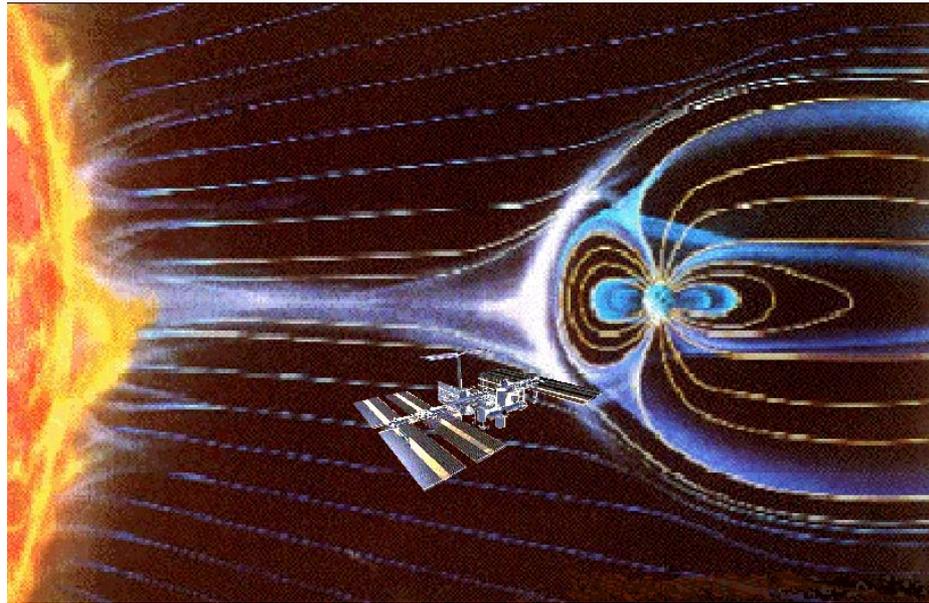


太陽研究最前線体験ツアー
於 飛騨天文台 2012年 8月 28日

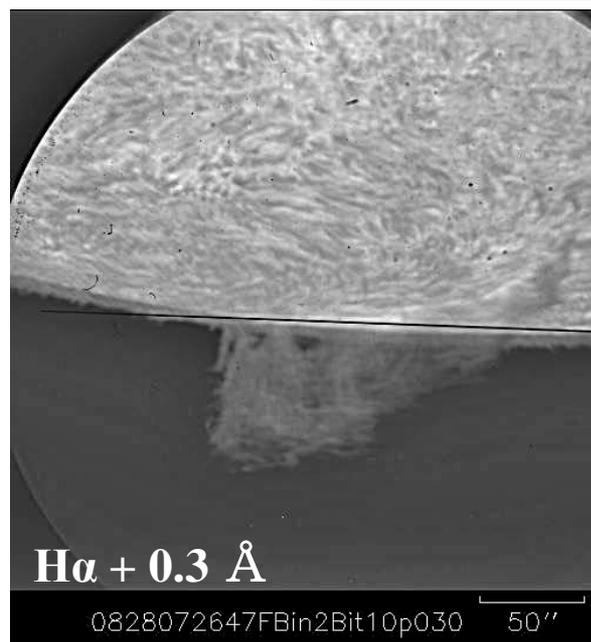
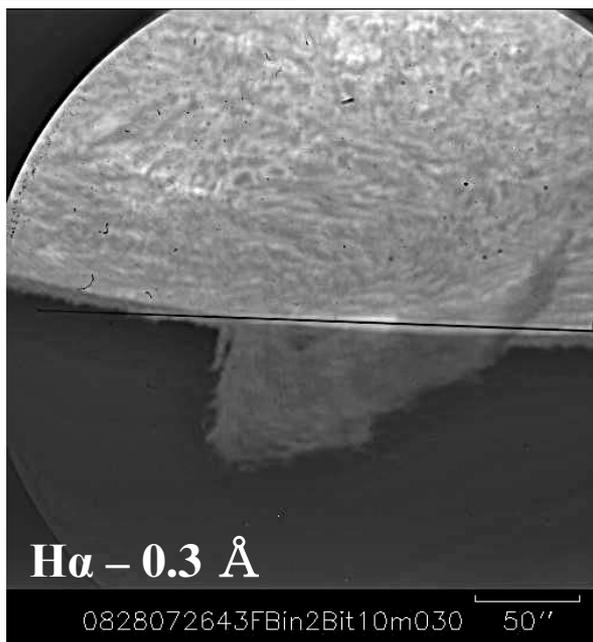
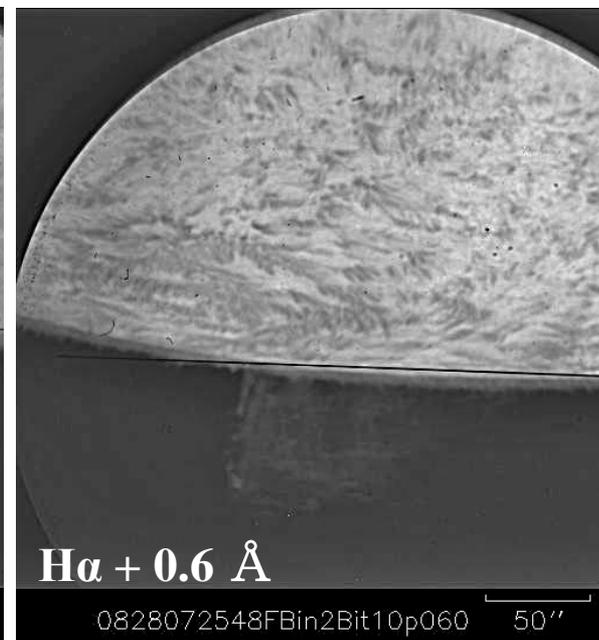
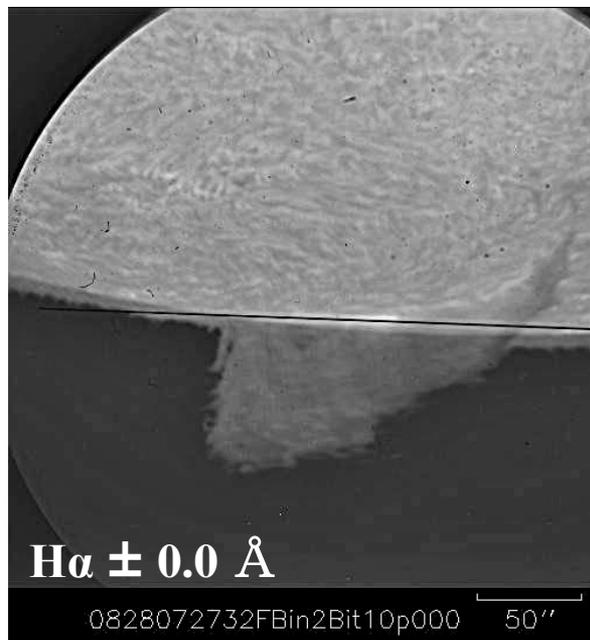
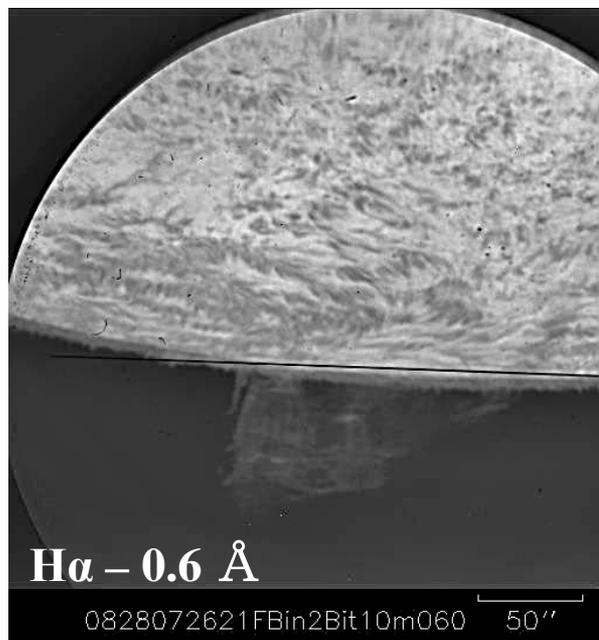
「太陽観測を通じた宇宙天気研究」



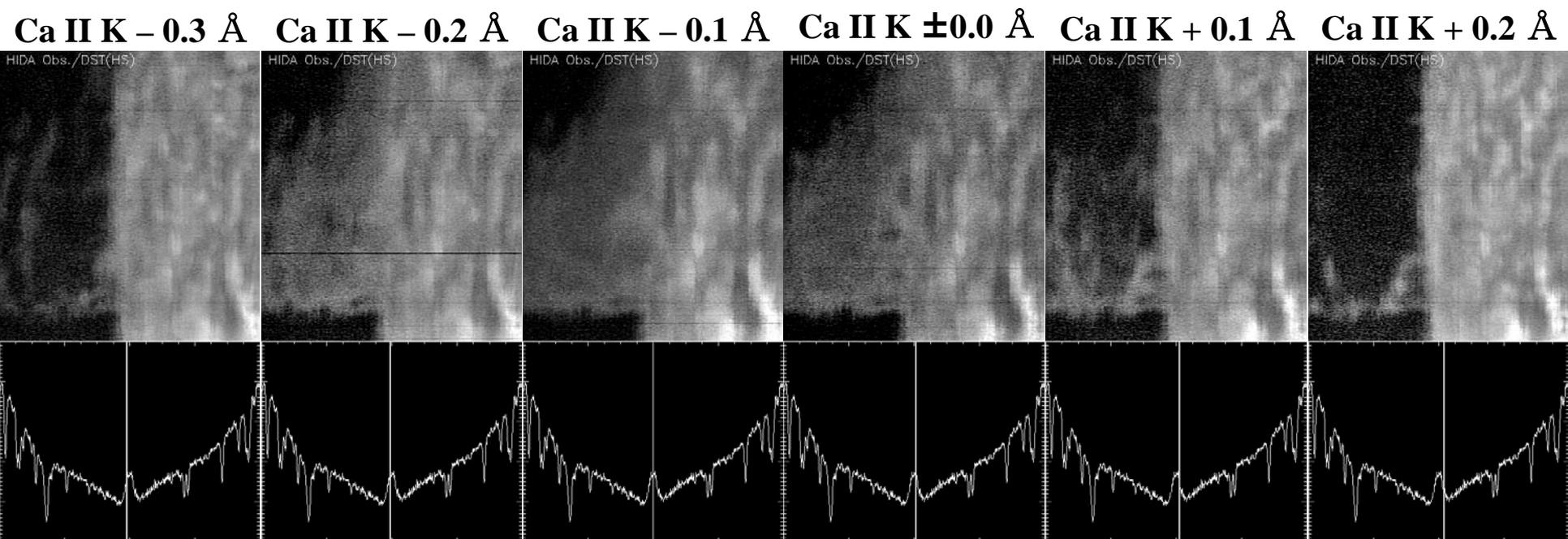
京都大学大学院理学研究科 附属天文台
(飛騨天文台)
助教 上野 悟

まずその前に、2012年度体験ツアー参加者の皆さんが8月28日にドームレス太陽望遠鏡で観測した東リム上のプロミネンスのクイックルック画像を紹介しておきます。

ー リオフィルタを用いたH α 線周辺のフィルタグラフによる画像例 ー



— 分光器を用いたCa II K線周辺のスペクトロヘリオグラフによる画像例 —

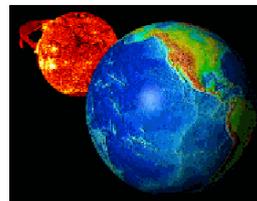


はじめに

太陽を観測・研究する大きな3つの意義

- 1) 恒星の一つとしての太陽の理解
- 2) プラズマ実験室としての太陽大気中の活動現象の理解
- 3) **宇宙天気**変動の源としての太陽活動の理解

はじめに



・過去、東西冷戦世界における宇宙開発競争のもと、地球近傍宇宙環境を調査する要求
→宇宙天気研究の始まり

・ポスト冷戦時代に移り「宇宙天気」、「太陽地球間環境」というテーマは、純粋に科学的研究対象として、さらに現代経済文明社会に影響を与える要因の一つとして、この二十年近くの間急速に普及し、発展をし続けている

- ・1990～1997；太陽地球系エネルギー国際協同研究計画 (STEP) by 国際学術連合会議／太陽地球系物理学科学委員会
- ・1998～2002；STEP理論解析国際共同研究(S-RAMP)
- ・2004～2008；宇宙天気国際共同研究プログラム(CAWSES)
- ・2009～2013；宇宙天気国際共同研究プログラム(CAWSES-II)

本日の講義の内容

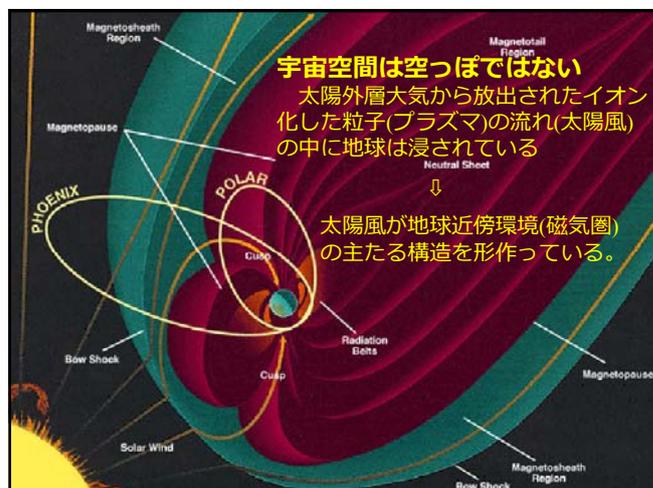
- (1) 宇宙天気の概要
- (2) 地球を取り巻く宇宙空間・超高層大気の構造
- (3) 宇宙天気に対する太陽・宇宙からの影響
- (4) 様々な宇宙天気現象
- (5) 宇宙天気現象の地球気候や人類社会への影響
- (6) 京都大学・理・附属天文台での研究例

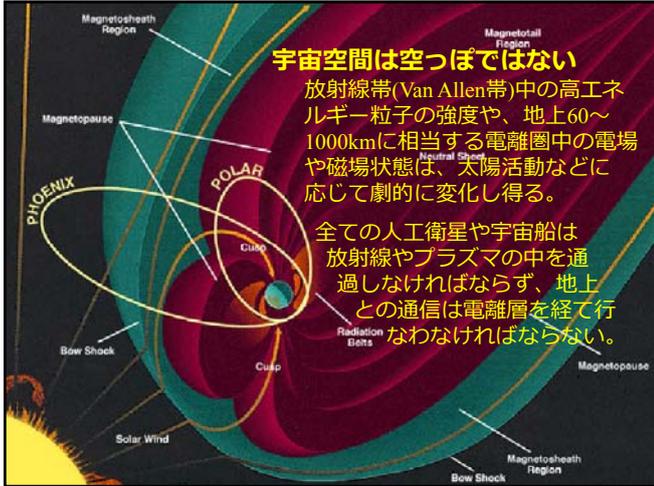
(1) 宇宙天気の概要

宇宙天気とは・・・

地球環境や地球上のテクノロジーに対し影響を与える、宇宙空間環境。

主に太陽活動の地球磁場や大気への作用、宇宙線、惑星間空間の微小天体やゴミ、などにより影響を受ける。

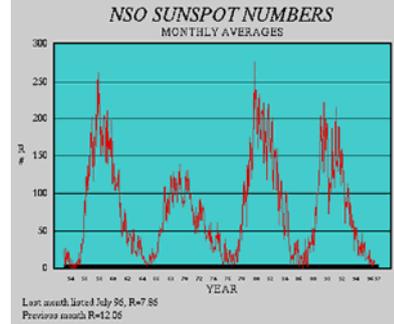




宇宙空間は常に変動し続けている

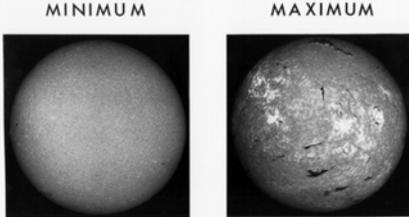
⇒なぜか？

⇒太陽が常に変動し続けているから

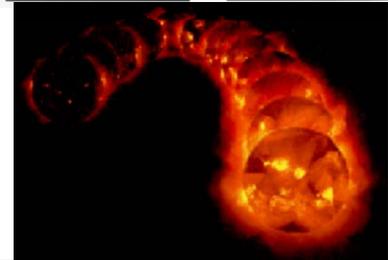


中・長期的変動

可視光で見た太陽彩層構造の変化



X線で見た太陽コロナ構造の変化

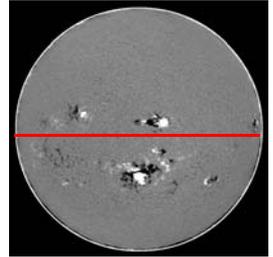
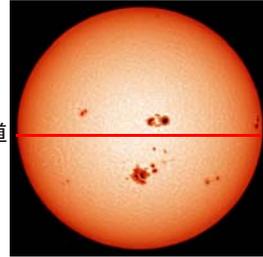


太陽活動の重要要素：磁場

太陽活動極大期近くの太陽白色光像、

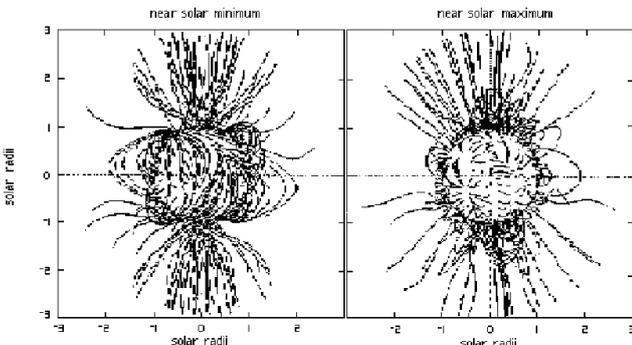
視線方向磁場分布

北半球
太陽赤道
南半球



飛騨天文台 SMART望遠鏡

太陽活動極小期の太陽磁場 太陽活動極大期の太陽磁場

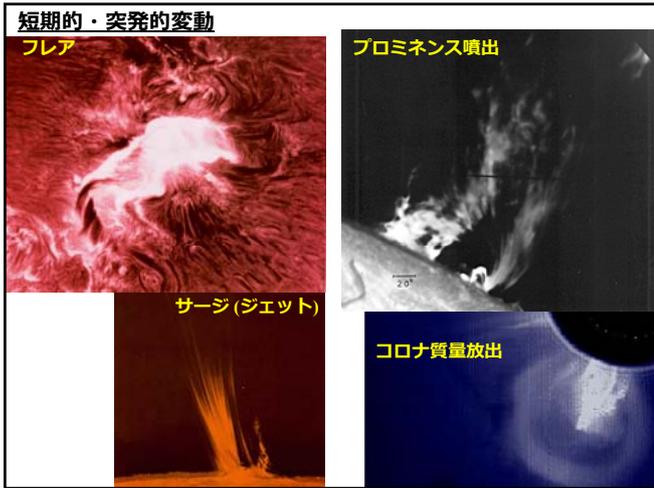


ただし、太陽磁場の極性は活動極大期付近で南北逆転する。

- ・ダイナモ機構
- ・太陽の自転
- ・地球上でも見られるコリオリカなどの効果
- ・対流などの乱流



太陽活動の周期性
(約11年 (22年))

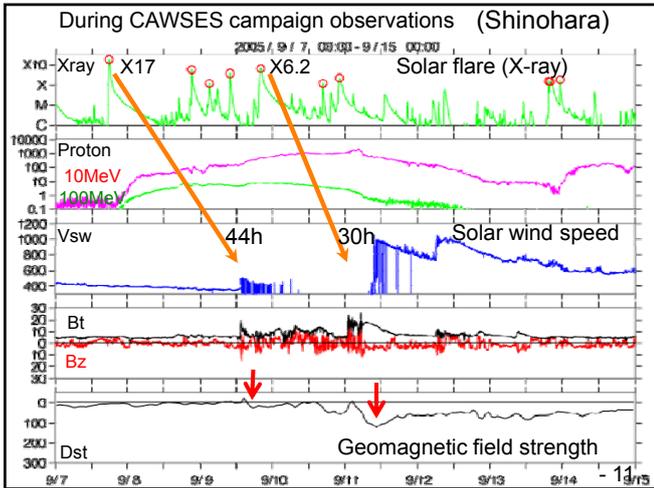


これらの激しい太陽活動現象
↓
惑星間空間中や、地球磁気圏内のプラズマ粒子の構成や電流分布などを劇的に変動させ得る。

しかし、太陽活動現象と宇宙天気現象が1対1で単純明解に対応付けられていないように見える事例が多数存在。

⇒ 宇宙天気研究の大きな課題

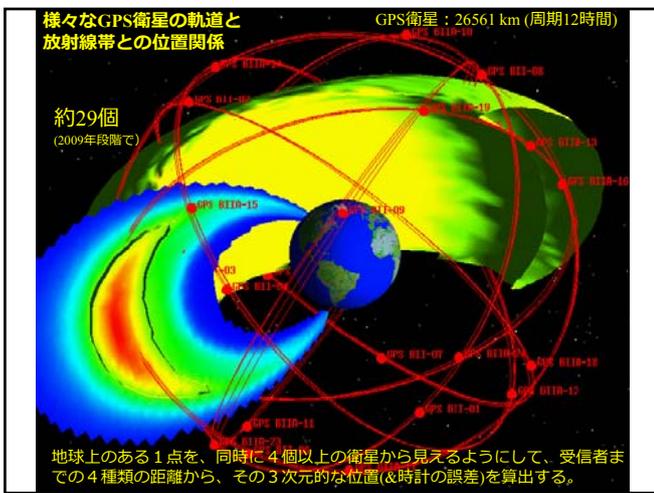
例) オーロラ
宇宙天気が乱された際に、地磁気嵐に伴って現れる現象として、最も分かりやすい現象のひとつ。
しかし、大きな太陽爆発現象が発生したからといって、必ず発生する訳ではない。

宇宙天気の現代社会への影響：

日常生活のほとんどにおいて、我々が宇宙天気を直接意識することは少ないかも知れないが、太陽からの宇宙環境への擾乱が大きくなった時、人類の科学技術には、宇宙空間、地上に関わらず影響を受けるものが多い。

宇宙空間：無数の人工衛星(科学、気象、GPS、放送、携帯電話、偵察等々)、宇宙ステーション、スペースシャトルなどの宇宙船
地上：変電所、石油パイプライン、電離層を利用した無線通信(ラジオ、TV、航空管制等々)



電波伝播経路の特性変動による誤差

GPS衛星からGPS受信機まで電波が達する経路では、電離圏や対流圏での電波特性の変化により、若干の電波伝播速度の遅延が生じる場合がある。これによって、計算で定めたはずの空間上の一点の信頼性が損なわれる。

一般的に受信機からみてGPS衛星が低仰角の場合、この誤差は増加する傾向がある。これは大気中を電波が伝播するときの遅延による影響が、高仰角(薄い大気を通過する)よりも低仰角(厚い大気を通過する)で大きいからである。またそもそも低仰角衛星からの信号は減衰が大きい。

ディファレンシャルGPS、Differential GPS、DGPS

このための補正手段として、正確な時計をもち座標のわかっている固定局を設置し、GPS受信データから計算した位置と固定局の位置の差から、精度を上げるなどの仕組み（**ディファレンシャルGPS、Differential GPS、DGPS**）の開発が行なわれてきている。DGPSの補正信号は、かつてFM放送の利用されていない帯域で送信するシステム(JFN系列の放送局で実施)があり、カーナビなどでの利用には有用であった(1997年5月～2008年3月)。また、WAASやMSAS (MTSATを利用した日本の運用)では、静止軌道の衛星からDGPSの補正信号を各受信機に送信している(WAAS/MSAS静止衛星自体もGPS衛星同様、測位にも使われる)。

人工衛星を利用した携帯電話サービス

- ・インマルサット(KDDIなど、静止軌道衛星 35786km 4個)
- ・ワイドスター (NTT Docomo、静止軌道衛星 2個)
日本国内で最も普及(?)
フェリー、航空機、高山地域などの公衆電話、孤島地域 など。
大規模災害時の公共用回線として多くの公共機関にも設置される
- ・Thuraya (アラブ首長国連邦所有の3台の静止軌道衛星)
- ・A C e S (エイセス; 東南アジア向け静止軌道衛星)
- ・I C O (高度10390kmの衛星10個使用)
- ・グローバルスター (高度1400kmの衛星48個使用)
- ・イリジウム(KDDI系、高度780kmの66個の衛星を使用)
- ・テレデシック(マイクロソフト系、288個もの衛星を使用)
(インターネット)

宇宙天気の地球自然環境に対する影響

(例)

- ・高層雲量の周期的変動
- ・気温の周期的変動 (樹木の年輪)
- ・海面温度の周期的変動
- ・地層や氷河中の放射性同位体含有量の周期性
- ・約20年周期の超高層大気の電気伝導度 (地磁気の日変動度) の変化と太陽紫外線量との関係(?)
- ・太陽活動周期の長さの変動と陸上大気温度変動

宇宙天気は予報できるのか？

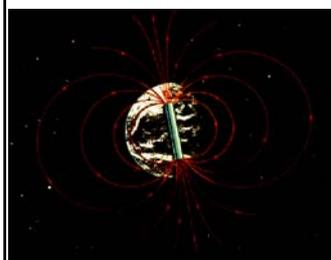
地球上の気象に対する「天気予報」は近年の気温、気圧、雲などの物理量の3次元的な分布の観測点の増加と、コンピュータによるシミュレーションの発達により、急速に精度が良くなって来た。

宇宙天気予報についても、**観測点の比較的多い地球磁気圏内においては、コンピュータシミュレーションと合わせることで、太陽からの擾乱の到達が人工衛星上で観測されるから地球の磁場に変動が観測されるまでの時間や、その変動の大きさを、ある程度予測可能になってきている。今後更に太陽付近や惑星間空間のリモート観測の拡充、太陽地球間観測衛星の増設、3次元シミュレーションの増強等により、少なくとも太陽面での活動現象の発生時点の情報から、地球上で起こりうる現象の規模や時刻が予報ができるようになる可能性は十分ある。**

(2) 地球を取り巻く宇宙空間・超高層大気の構造

- (a)地球磁気圏
- (b)放射線帯
- (c)超高層大気、電離圏・電離層

(a) 地球磁気圏



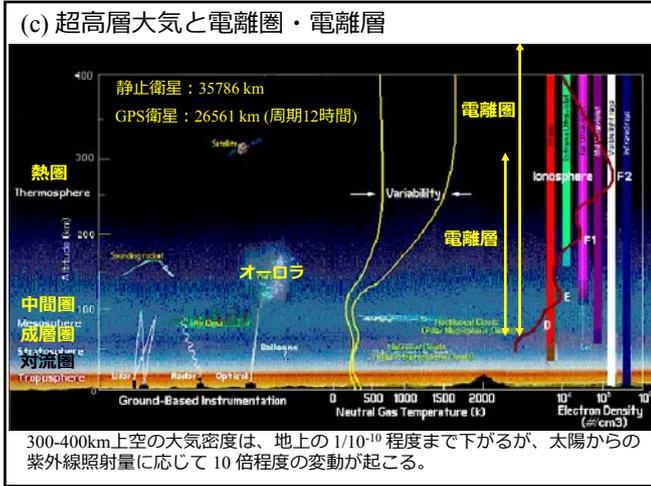
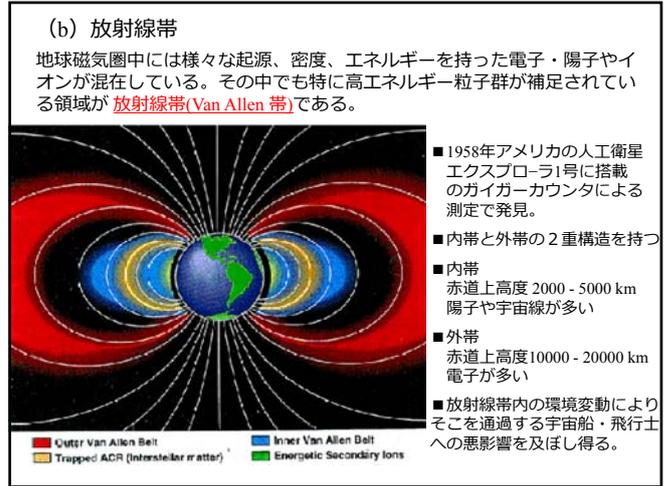
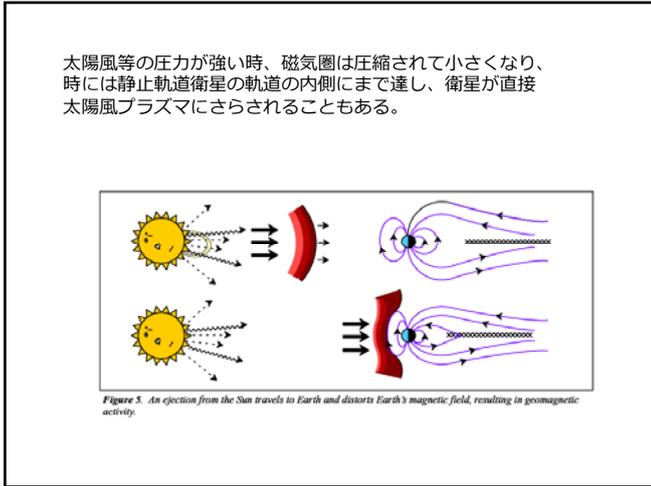
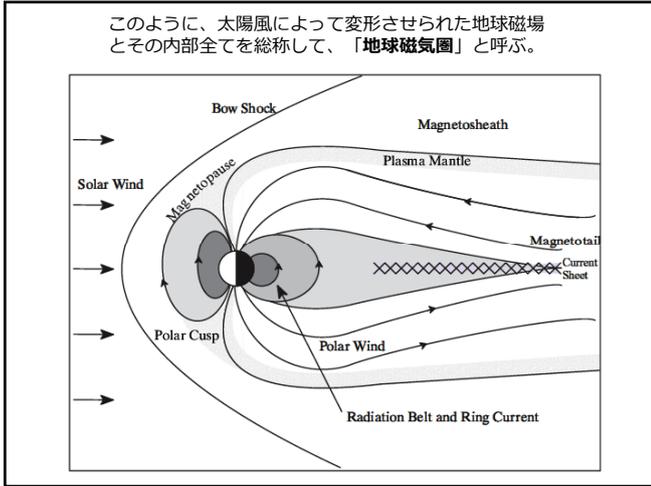
地球磁場は太陽風による圧力と磁気圧が釣り合うような形に変形され、太陽側で圧縮され、反対側では長い尾のような構造をもつようになる。

地球を取り囲む磁気圏の源は、液体状の地球内部コアの流動によって生成された双極子の地球磁場 (地磁気)

太陽風プラズマは電荷を持っているため、単純には地球磁場を透過することができない。

太陽風は地球磁場とぶつかり減速され、地球の上流側で「Bow Shock」と呼ばれる衝撃波面を形成する。(6~15地球半径上空)





電離層におけるイオンの生成消滅プロセス

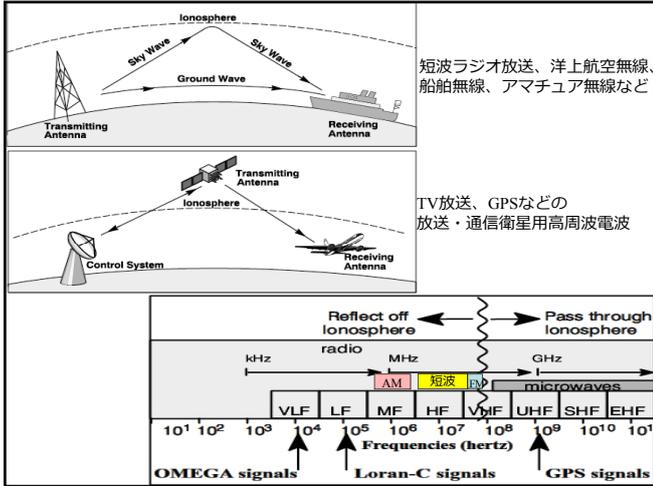
(太陽からの紫外線(宇宙線) + (地球大気原子 1) ⇒ (電子) + (イオン 1)
数分~数時間後
(イオン 1) + (地球大気原子 2) ⇒ (イオン 2) + (地球大気原子 1)

日中は太陽からの紫外線などの照射で電離層下面是高度約60~80kmまで下がって来るが、夜間はイオンが減少し、約100kmまで上昇する。

電離層下面での屈折率の変化が電磁波の内、短波電波(HF: 3 - 30 MHz)より長波長側で大きくなるため、これらの波長帯は電離層において屈折反射する。特に短波は、他の波長に比べて安定して高度約100kmで反射されるため、遠距離通信に適している。

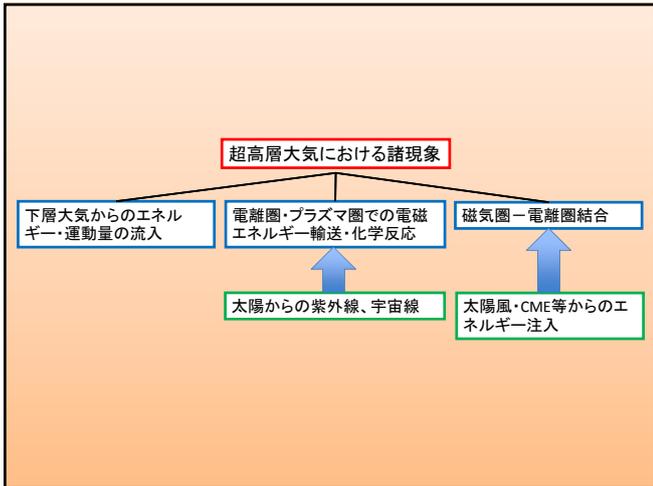
例：短波ラジオ放送、洋上航空無線、船舶無線、アマチュア無線など

一方、中波(AMなど)は昼間 80 - 100kmのイオン層で減衰してしまうが、夜間は100km辺りで反射する性質を持ち、夜間だけ遠方まで電波が届く現象が起こる。



(3) 宇宙天気に対する太陽・宇宙からの影響

- (a) 紫外線
- (b) 宇宙線
- (c) フレア、ジェット、CME
- (d) 太陽風



(a) 紫外線 (UltraViolet Ray)

◆黒体輻射◆

高温に熱せられた物質からは、広域な波長に渡る、連続したスペクトルが放射される。特に、放射とガスの温度が熱力学的平衡状態になっているときに放射されるスペクトルが、「黒体輻射」と呼ばれている。

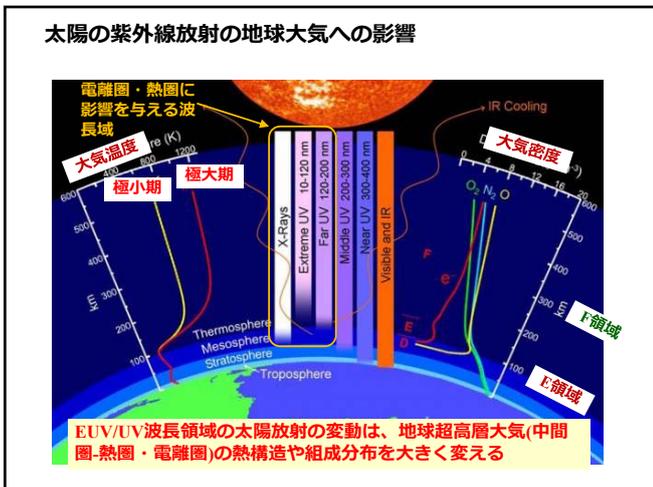
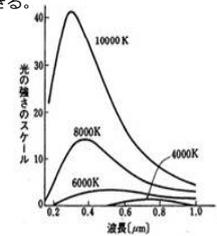
太陽大気中では、ガスと放射がほぼ熱力学的平衡状態になっており、太陽大気上層や宇宙空間、地球大気での吸収や散乱による変化を除けば、地上で観測される太陽光スペクトルは、ほぼ黒体輻射で近似できる。

■黒体輻射により 温度 T の物質から放射される、振動数 ν (波長 λ) の電磁波の放射エネルギー:

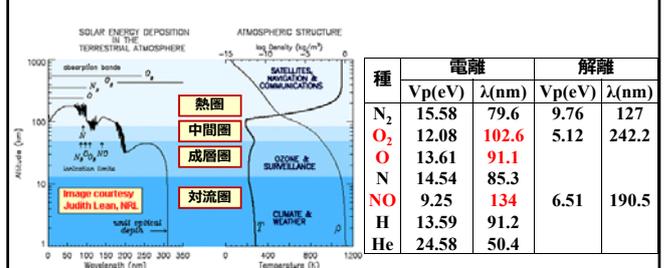
$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

(プランク分布)

■黒体輻射のピーク波長と温度の関係
 $\lambda_{max} \cdot T = 2.898 \times 10^7$
 (波長単位は \AA 、温度単位は K)
 (ウィーン の 法則)



熱圏・電離圏大気の変動に関する波長領域



E領域 : 90-150 nm (NO, O, O₂)
 F領域 : 100 nm以下(H, He, O)

各種の波長領域の太陽活動による変化の割合

TABLE 1. Coupling Between the Sun's Radiative Output and the Terrestrial Environment Lean, RG, 1991

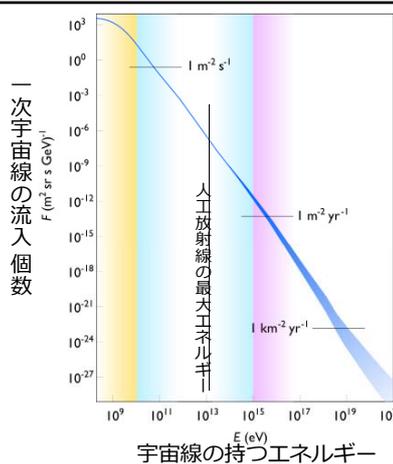
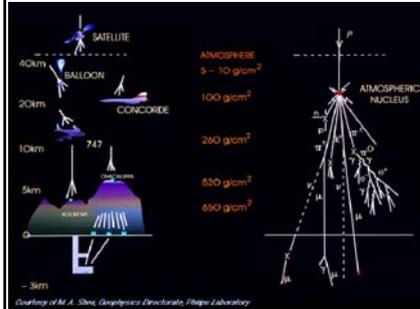
Spectral Band	Solar Source Region	11-Year Cycle Variation	Terrestrial Absorption Region	Absorbers
X rays, <10 nm	corona	10x to 1000x	mesosphere	O ₂ , N ₂ , O
10-120 nm	corona, transition region, chromosphere	2x to 10x	thermosphere, 150-300 km	O ₂ , N ₂ , O, N
Ly α, 121.6 nm	upper-middle chromosphere	2x	mesosphere, 60-100 km	O ₂ , H ₂ O, NO, CH ₄ , CO ₂
125-175 nm	chromosphere temperature minimum	50%	thermosphere, 100-160 km	O ₂ /SRB, H ₂ O, HCl
175-205 nm	upper photosphere	15%	stratosphere, 20-80 km	O ₂ , O ₃ , HCl, CFCs
205-250 nm	photosphere	4%	stratosphere	O ₂ , H ₂ O, NO ₂ , ClONO ₂
250-300 nm	photosphere	0.5%	stratosphere, troposphere	O ₂ , H ₂ O, HNO, HOCl, H ₂ O
300-400 nm	photosphere	0.1%	troposphere, 0-15 km	same as 250-300 nm band
Total: 48% at 400-800 nm	photosphere	0.08%	troposphere, surface, ocean	O ₂ , H ₂ O, CO ₂

120 nm以下の波長域: 太陽活動11年周期で2-10倍以上も変化
 125-175 nmの波長域: 太陽活動11年周期で50%程度の変化

(b) 宇宙線 (Cosmic Rays)

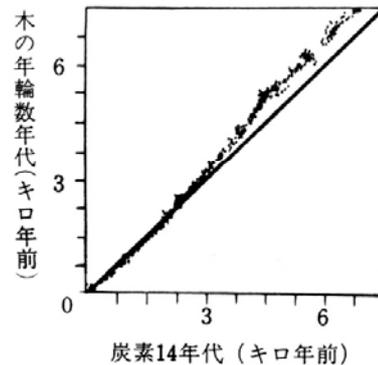
惑星間空間を飛んでくる高エネルギーの粒子。主に、銀河系内の他天体から太陽系に飛来するものと、太陽のフレア、衝撃波等の爆発的現象で発生するものから成る。

特に太陽から発生するものは Solar Energetic Particles (SEP) と呼ばれ、フレア発生から数時間~1日程度で地球に到達する。大部分の宇宙線は、地球磁場によってガードされるが、非常に高速のものは、特に極域において、高度 10 km ほどの低空にまで達することもあり、雲の帯電状態に影響を与えたり、あるいは直接地表まで到達しない宇宙線でも地球大気などの原子分子と作用し、2 次的なプラズマ粒子を生成させることがある。



二次宇宙線の個数はさらに多く、地表で人間の身体程度の面積には、1秒間あたり約100個の放射線粒子が通過していると考えられている。観測史上最大の太陽起源GeV陽子の流入イベントによる欧米間航空機乗務員の被曝線量は最大で4.5 mSvと見積もられている。(年間許容値は5.0 mSv)

宇宙線による ¹⁴C 量の時間変動による年代測定への誤差 (放射性同位体 N¹⁴->C¹⁴)

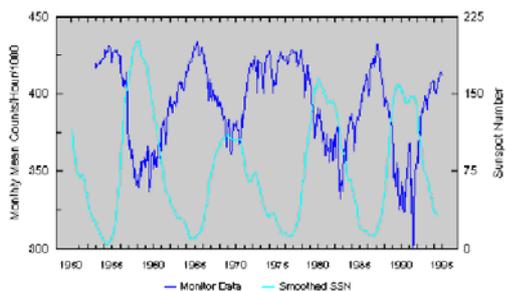


野崎義行「地球温暖化と海」1994より

地表にまで届く宇宙線の個数は、やはり太陽活動の変動に大きく影響を受けている。

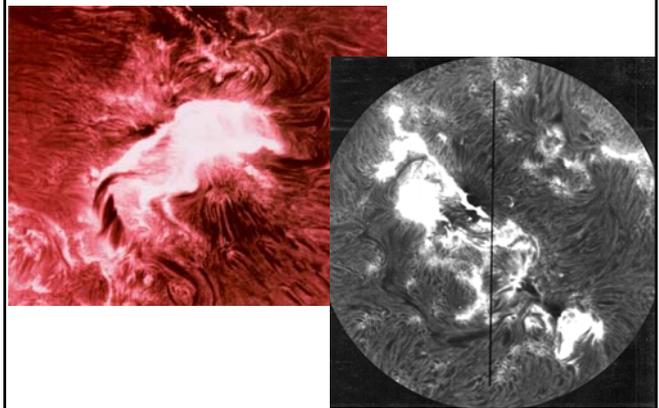
- ⇒ 太陽活動の活性とは逆相関の関係になる。
- ⇒ 極小期は太陽風の流れが静かだが、極大期にはその流れが大きく乱され、宇宙線が絡み取られて太陽系遠方まで掃き去られる効果と、11年毎に太陽系内の大規模な磁場構造が変化することによる。

Climax Corrected Neutron Monitor Values Smoothed Sunspot Numbers 1960-1994

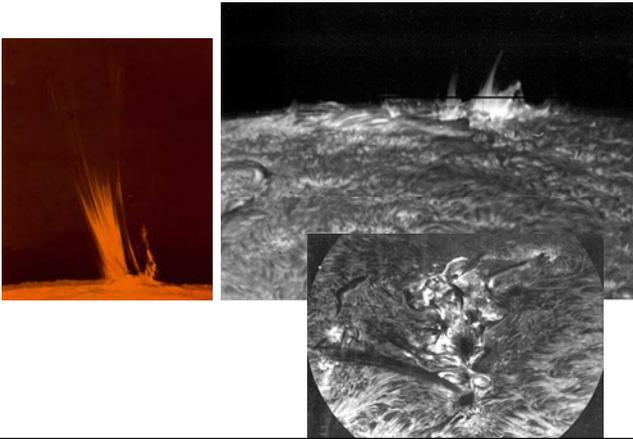


(c) フレア、ジェット、CME

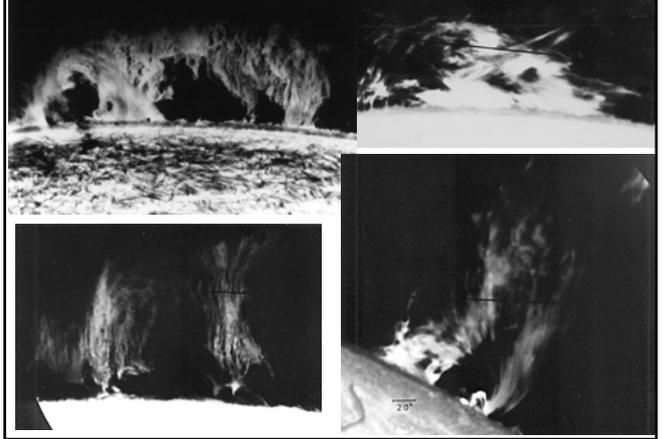
フレア (爆発現象)



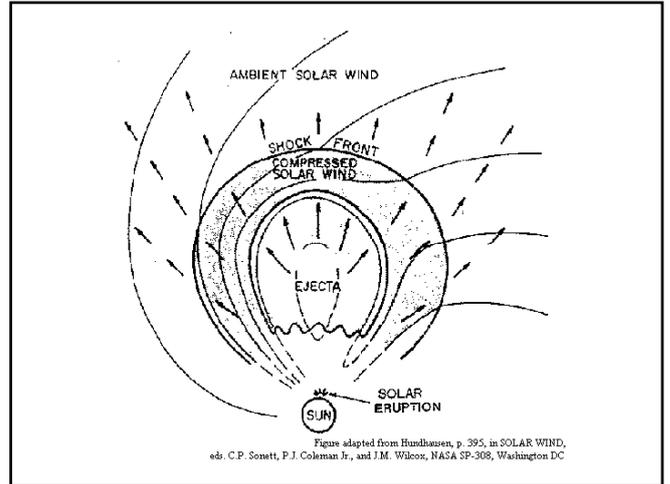
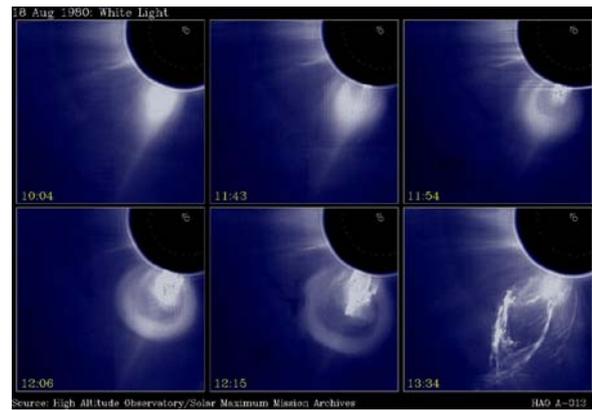
プラズマジェット (サージ、マクロスピキュール等)



プロミネンス (紅炎)



コロナ質量放出 Coronal Mass Ejection (CME)



(d) 太陽風 (Solar Wind)

コロナ中の高温電離ガス(プラズマ)が太陽から動径方向外向きに流れ出す現象。

典型的速度：400~800 km/s

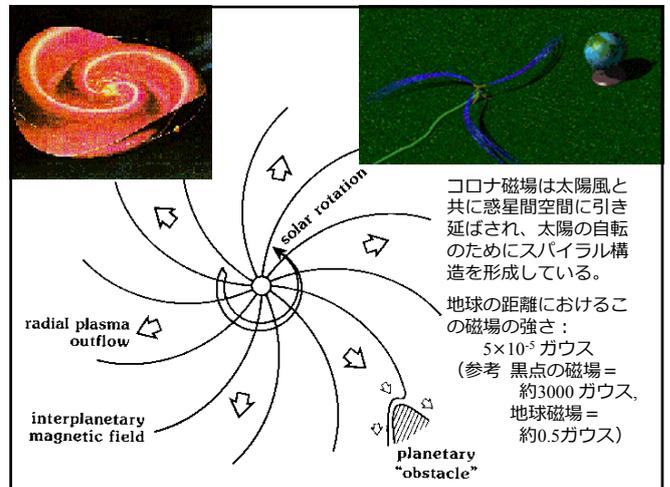
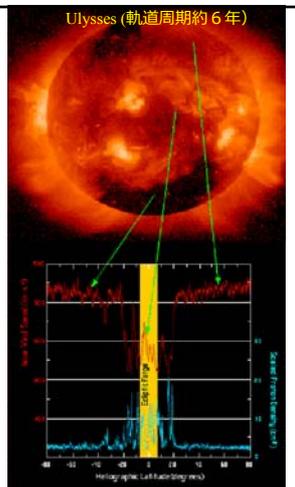
地球の距離での典型的密度：

中性子約 8 個/cm²

電子 約 8 個/cm²

& より少量のイオン(Heなど)

ただし、太陽面上からは非一様に流出していて、「コロナホール」と呼ばれる、コロナの低温低密度領域からは希薄な高速風が、黒点領域からは高密度の低速風の流出が確認されている。



(4) 様々な宇宙天気現象

- a) 地磁気嵐 (ストーム)
- b) オーロラ嵐 (サブストーム)
- c) オーロラ
- d) デリンジャー現象
- e) 放射線帯の汚染
- f) 太陽高エネルギー粒子の飛来
- g) 電波ノイズ放射

地磁気嵐 (ストーム)

地磁気嵐は赤道領域周辺で発生。
地球上最大規模のエネルギー現象。

磁気圏内部に太陽からCME等により大量のエネルギーが注入
→磁気圏内の対流が促進
→高エネルギー粒子が地球半径の2.5~3倍の高さ領域に閉じ込められてさらに加熱が進む。
→地球を取り囲むような電流系を発生させる
→地磁気の大規模な変動を誘発

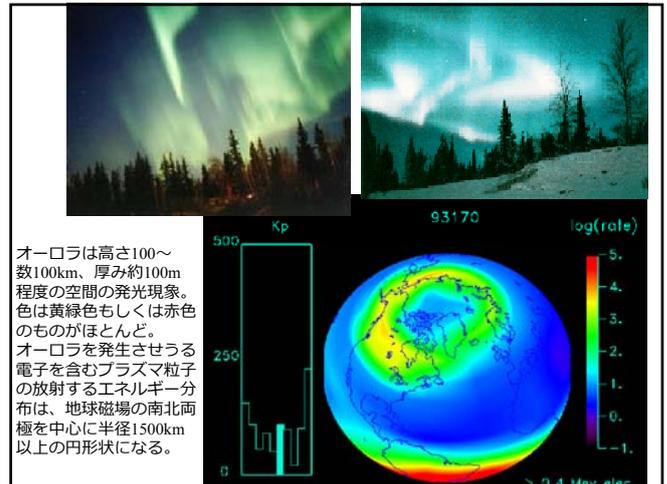
オーロラ嵐 (サブストーム)

オーロラ嵐は太陽風やCMEによって磁気圏プラズマシートに蓄えられたエネルギーが突如解放される(磁気リコネクション?) ことによる現象。

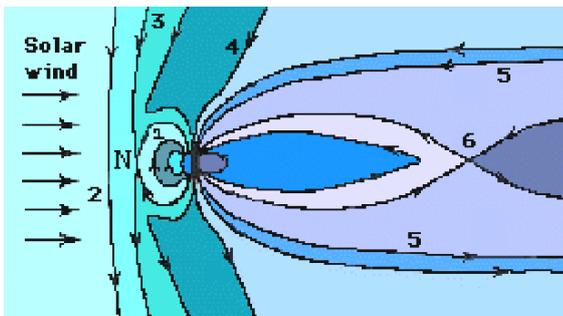
極域(磁気緯度65~75度付近)の主に夜側でオーロラを発生させる。

極域に加速された電子が降下してくる。

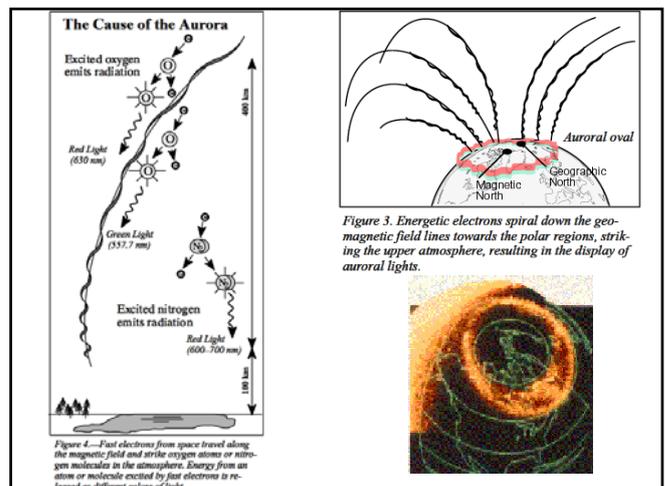
赤道域のプラズマシートは、地球に向かって低下し、静止軌道衛星の高さ(6.6地球半径)よりも低い5地球半径ほどまでに至り、衛星の帯電障害などを起こす原因にもなる。



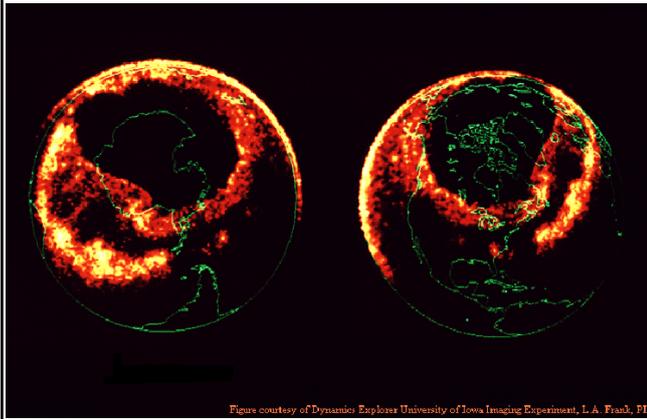
太陽側から南向きの惑星間空間磁場が流されて来た場合、太陽側の地球磁場との繋ぎ替わりが効率的に起こり、磁気圏内や電離層内への太陽風からのエネルギーや荷電粒子が侵入しやすい状態となる。



その結果が、地球極域のオーロラの発生につながる。



大規模磁気嵐の発生により中緯度にまで拡大したオーロラ帯



Flare courtesy of Dynamic Explorer University of Iowa Imaging Experiment, L.A. Frank, PI

デリンジャー現象(Dellinger Phenomenon)

(短波障害(SWF; Short Wave Fadeout) または突発性電離層擾乱(SID; Sudden Ionospheric Disturbance)とも呼ばれる)

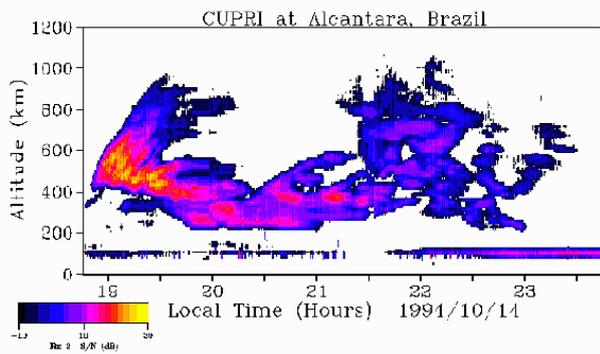
多くの場合、持続時間は数十分から数時間の程度。まれに数時間以上も続く場合もある。

太陽フレアが主な原因。
太陽フレアで発生したX線や紫外線が電離層に到達し、電離層のD層(60~100km)の電子密度が増加する。

通常、短波(3 - 30 MHz)は、D層を通過し、F層(100km)で反射されるが、この現象が発生すると電子密度が増大したD層で短波が吸収されるようになり、長距離通信が不能となってしまう。

その他の電離層の高さ変動による影響

電離層(F層)の擾乱による 3m電波信号が反射される高さの変動例



放射線帯汚染

地磁気嵐が起こると放射線帯中の高エネルギー電子はいったん消失した後、磁気嵐の回復に伴い、元々の量の数倍~数十倍まで増加する。

そのような状態で人工衛星が放射線帯を通過すると、表面や深部に帯電を発生させて、ダメージを起こし得る危険性が高まる。

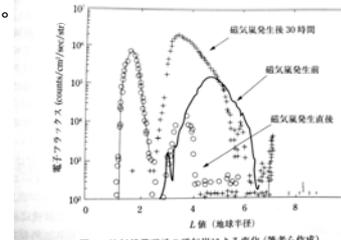
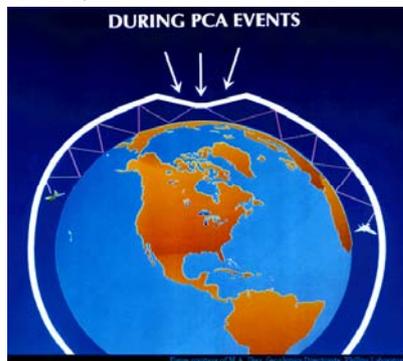


図5 放射線帯電子の磁気嵐による変化(筆者ら作成)

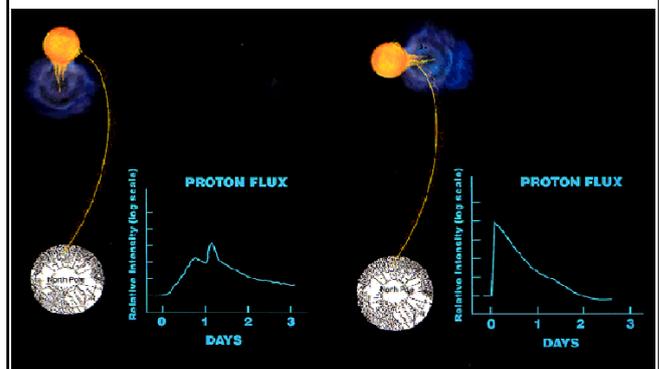
太陽高エネルギー粒子の飛来による電離層擾乱:

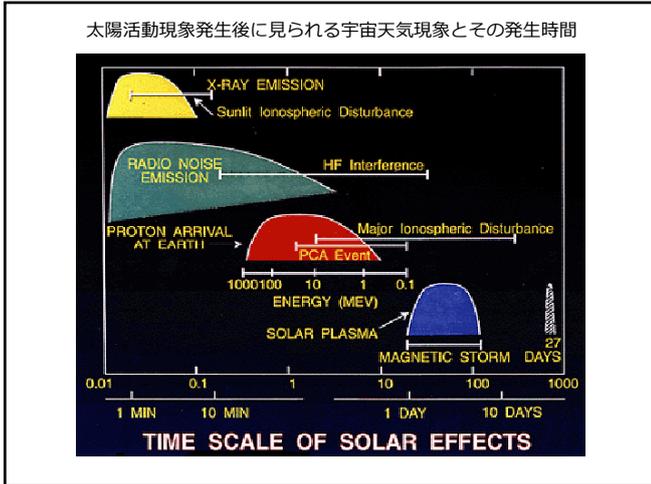
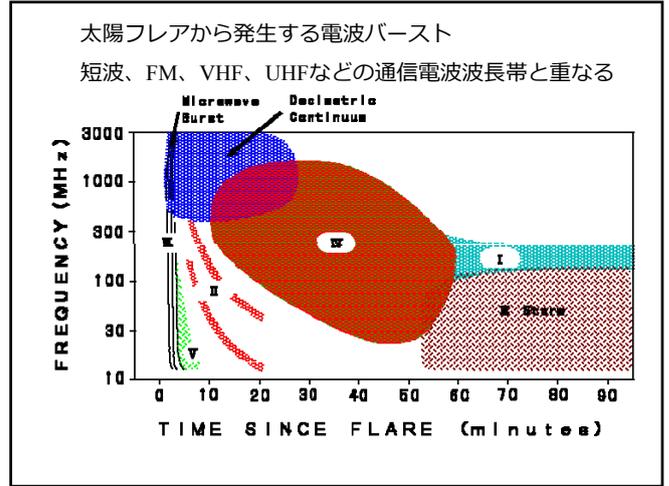
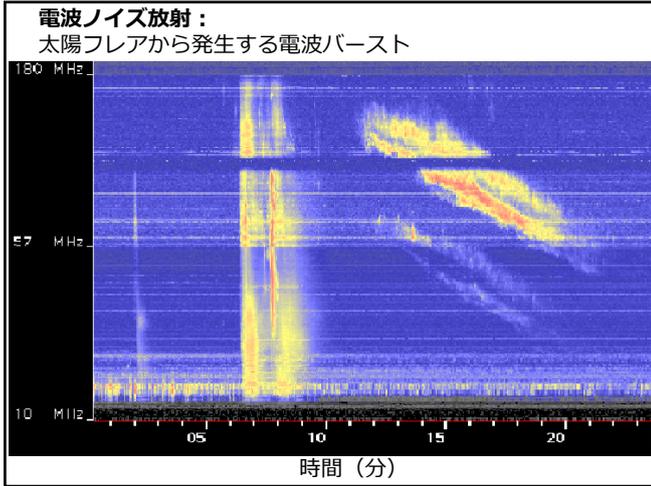
電離層の擾乱による電離層の反射を利用した無線通信への被害



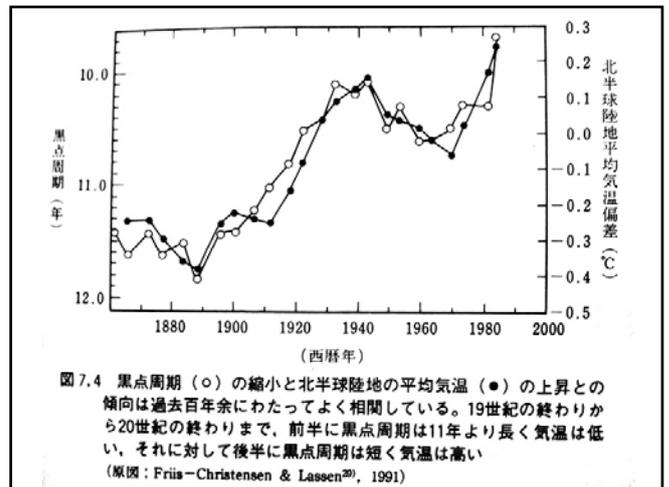
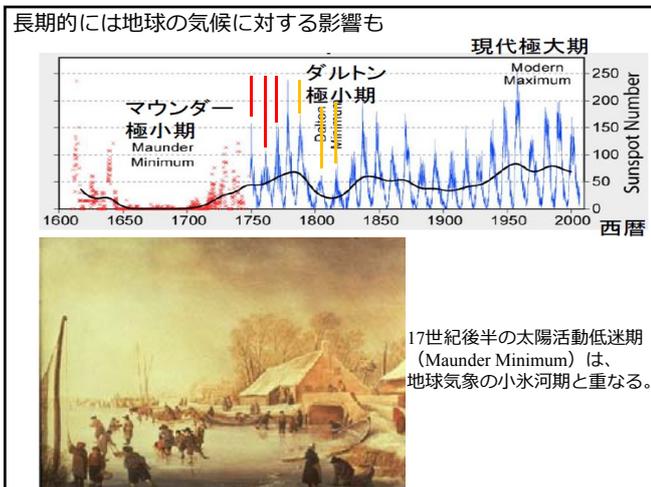
PCA = Polar Cap Absorption; 流入する紫外線、X線、高エネルギー粒子などによる極域での電離層の擾乱現象

フレアの発生位置による高速粒子流の時間変動の違い





(5) 宇宙天気変動の地球気候や人類社会への影響



**1億4千万年前の年輪幅に記録された
11年太陽黒点周期**



石川県手取産
珪化木化石

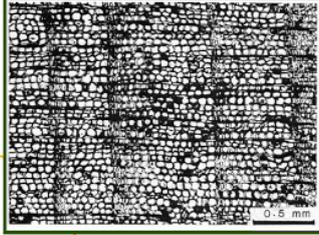
Fossil silicified
woods from
Tetori, Ishikawa,
Japan

**11-YEAR SUNSPOT CYCLE RECORDED IN
CRETACEOUS (140 myr ago) TREE RINGS**

京都大学 増田富士雄教授 提供

化石には細胞組織が残り、春材・秋材からなる年輪が見られる。
→ 季節があった！

Well-preserved cells form the early- and late-woods showing the existence of seasons and climatic zones.



← 成長



統計的に有意なレベル
統計的に有意でないレベル

年輪幅の変動には有意な11年周期が確認できる。
11-year sunspot cycle detected in the growth ring widths by auto-correlation analysis.

Masuda & Watanabe (1979)

京都大学 増田富士雄教授 提供

太陽活動の地球気候への影響のプロセス二大学説

◆紫外線の照射量の変動による気温への影響

太陽活動 極大期 ⇒ 紫外線 増
⇒ 超高層大気の温度 上昇
⇒ 下層大気の温度 上昇 (?)

◆宇宙線の流入量の変化による雲量への影響

太陽活動 極大期 ⇒ 宇宙線 減
⇒ 雲量 減 (?)
⇒ 気温 上昇

宇宙天気の影響(統計的事象)

- ◆太陽自転周期に近い変動現象(約27日)
 - ・高層雲量の周期的変動
- ◆太陽活動周期に近い変動現象(約11年)
 - ・気温の周期的変動(樹木の年輪)
 - ・海面温度の周期的変動
 - ・地層や氷河中の放射性同位体含有量の周期性
- ◆より長期的の変動現象
 - ・約20年周期の超高層大気の電気伝導度(地磁気の日変動度)の変化と太陽紫外線量との関係(?)
- ◆太陽活動周期の長さと陸上大気温度

現代社会とそのインフラへの影響

石油パイプライン



電波通信



船舶無線・ナビゲーション




変電所の故障 (1983年3月)



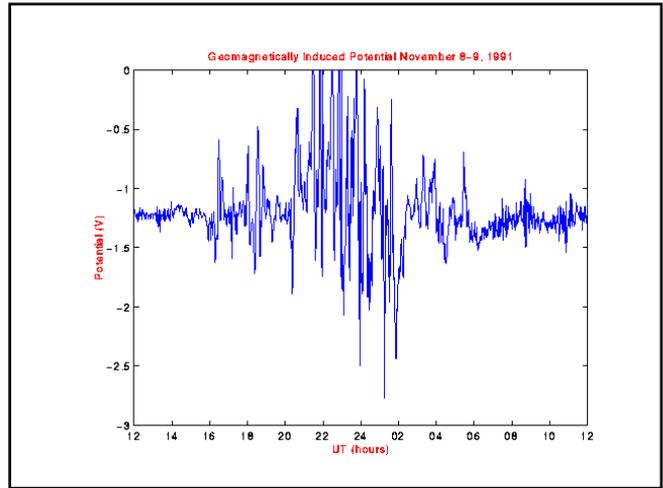
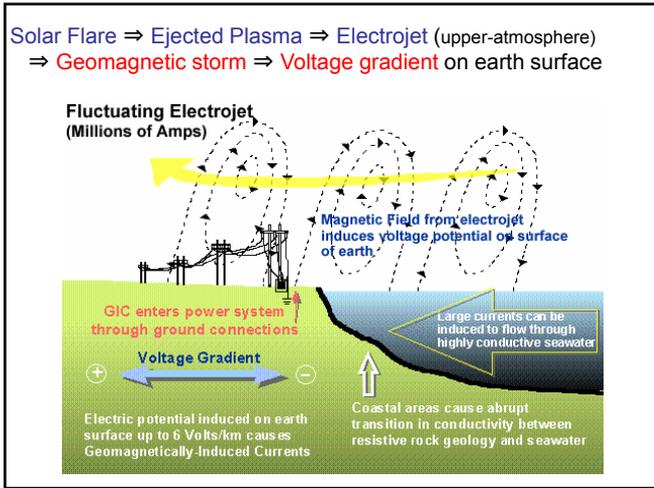
太陽の嵐、地球直撃

朝日新聞

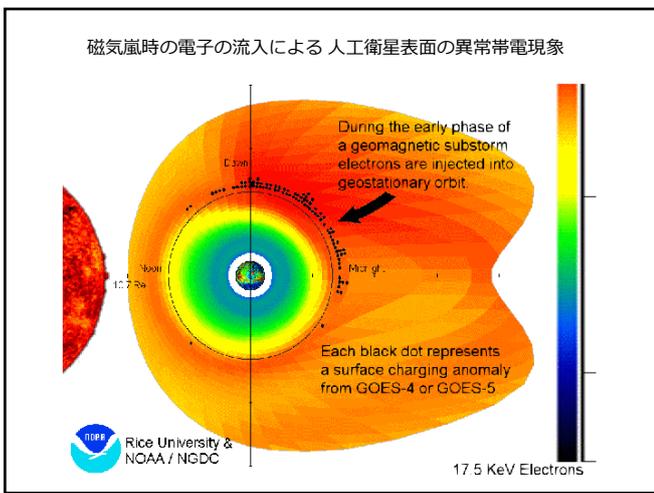
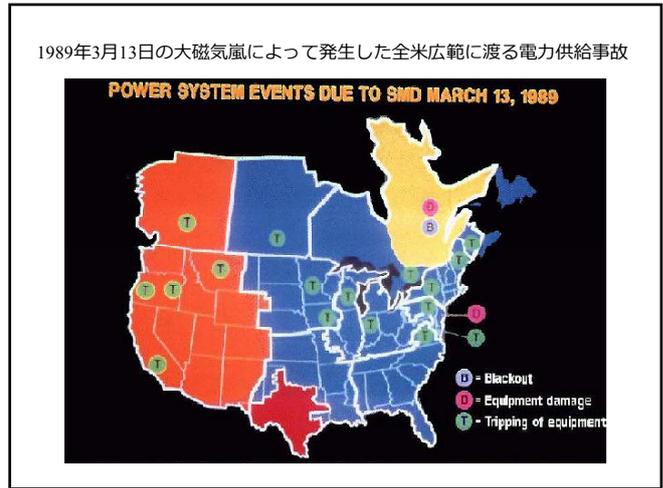
2003年9月14日 10月30日

大規模な微粒子、磁場乱す

テキサスでオーロラ



- Huge transformers can be damaged by geomagnetic storms
- Blackouts can be widespread



国際宇宙ステーション (ISS)
 アメリカ、ロシア、日本、カナダ、ESA
 地上約400km、周期約90分

国際宇宙ステーション(ISS)の軌道と放射線帯通過位置

この間は、宇宙飛行士への放射能被曝の危険性も高まる。

低軌道衛星のメモリーエラーが発生した地点の分布図

低軌道衛星の軌道面と放射線帯 (Van Allen 帯) が南米上空で交差している。

人類社会への影響のまとめの図

太陽活動の宇宙地球環境への影響

太陽フレア、太陽風、地球磁気嵐、高速太陽風

影響: ナビゲーション、無線通信への障害、電離層の乱れによる無線通信への障害、電波通信、人工衛星搭載機器の破損・障害、宇宙開発、宇宙飛行士の放射線被曝、電力供給、石油パイプライン、地磁気変動に伴う異常高電圧発生による変電所・パイプラインの破損

アメリカ海洋大気圏局による宇宙天気警報

noaa research NOAA Space Weather Scales

Category	Effects
Geomagnetic Storms G1-G5	Satellites, Power Grids, other
Solar Radiation Storms S1-S5	Biological, Satellites, other
Radio Blackouts R1-R5	Navigation, Radio

- Easy way to communicate conditions and forecasts
- Like the hurricane or earthquake scales
- Will be hearing these, seeing them in the news

(6) 京都大学・理・附属天文台での研究例

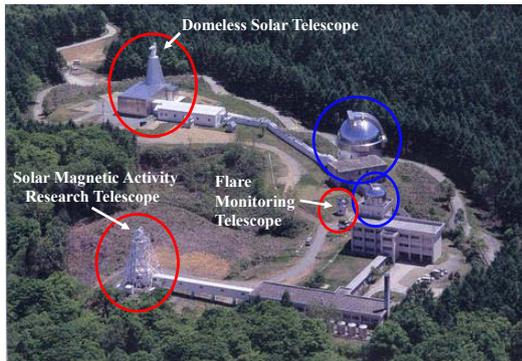
■ 太陽観測の宇宙天気研究における役割 ■

太陽面上での個々の爆発現象・衝撃波等の規模・速度・方向性・磁場の構造 など 様々なパラメータの把握

太陽面上構造物の現状から将来の活動状態を予測するための統計的確か性を高めるサンプルデータの蓄積

このような太陽の活動の起動力となるメカニズム自体の解明
⇒太陽内部からコロナに至るまでの運動状態・物理量の測定

*京都大学飛騨天文台の太陽望遠鏡

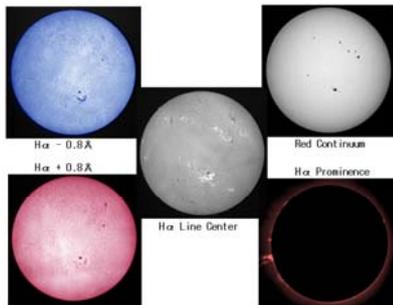


Hida observatory

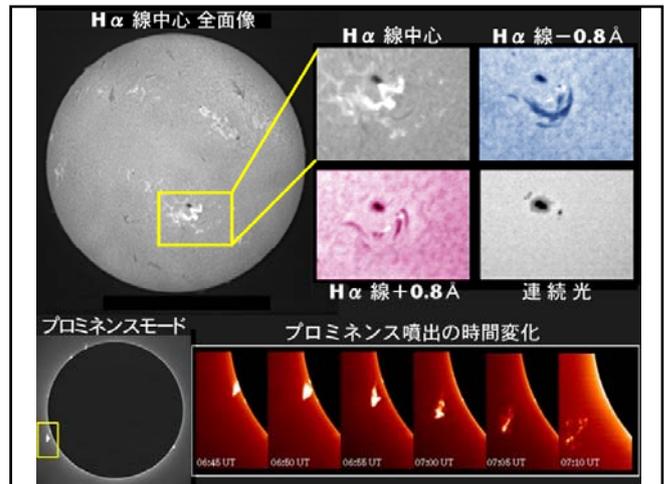
In our observatory, space weather researches have been done in **two complementary ways** with the three solar telescopes.

- ◆ Microscopic Observation
Detailed observations of solar events with high-resolution imaging and spectrum-measurement
=> Domeless Solar Telescope (DST)
- ◆ Macroscopic Observation
The solar full-disk observations
=> Solar Magnetic Activity Research Telescope (SMART)
=> Flare Monitoring Telescope (FMT)

飛騨天文台 フレア監視望遠鏡 Flare Monitor Telescope (FMT)



太陽地球系エネルギー国際協同研究: Solar Terrestrial Energy Program (STEP) 1990-1997 に参画するため1991年度に建設された5種類の太陽画像の同時観測望遠鏡



FMT Data を用いた研究例

フィラメント噴出現象のベクトル速度場の導出とそれらとコロナ質量放出(CME)との関係についての研究

=> T. Morimoto & H. Kurokawa (PASJ, 55, 505, 2003)

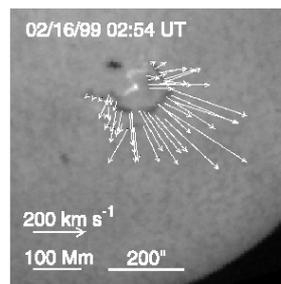
フレアに伴う彩層中の衝撃波 (Moreton Wave) の検出

=> N. Narukage et al. (ApJ, 572, L109, 2002)
Eto et al.

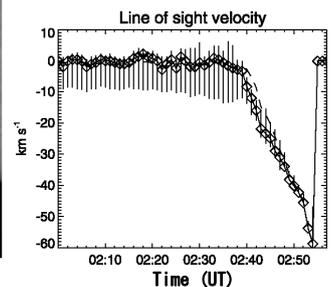


噴出フィラメントの3次元速度場の測定

天球面上の速度場成分

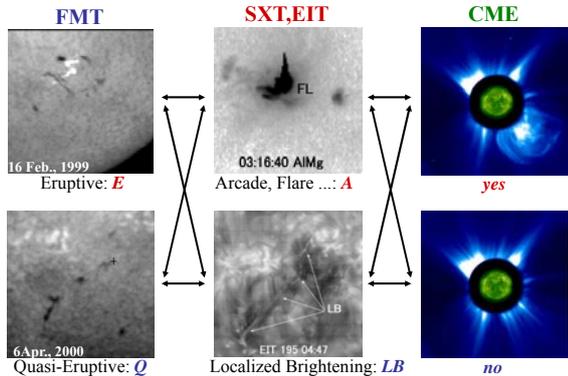


フィラメント中心の視線方向速度の時間変化



Morimoto & Kurokawa(2003 PASJ)

They distinguished whether each active filament really erupted or not by analyzing its time-variation of the radial upward velocity, and investigated the relation with coronal structure and CME.



As the result, all really erupting filaments correspond to appearances of "coronal arcade structures" and "CMEs".

No.	Time	Location/NOAA	Type (?)	SXT	EIT	GOES (min)	CME
1	11/05/92 00:15-02:15	S20W17/.....	E (43)	A		-	
26	10/27/98 23:34-36:39	N18E40/S369	Q (0)	-	LB	C1.6	no
27	01/30/99 00:00-01:50	S34E20	E (84)	A		B3.3	
28	02/09/99 03:07-05:22	S27W39/S453	E (13)	A	A/EW/D [†]	C2.3	yes
29	02/16/99 01:42-04:15	S27W18/S458	E (53)	A		M3.2	
30	06/01/99 06:29-07:08	S23E17/S557	Q (0)	LB		C6.2	no
31	01/19/00 00:28-01:47	N08W18/S829	E (36)	A	A/D	C1.4	yes
32	01/28/00 05:35-06:20	S28W20/S841	Q (0)	LB	LB	B4.4	no
33	04/06/00 03:48-05:48	S27W02/.....	Q (0)	LB		C1.4	no
34	04/25/00 01:05-01:47	N23W27/S972	E (51)	A	A/FE	C1.1	yes
35	05/08/00 04:19-07:40	S21W03	E (45)	A	A/FE/D	B6.8	yes

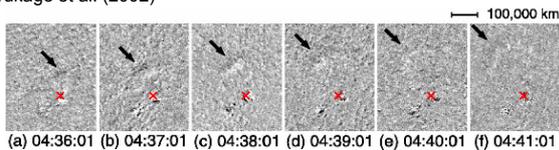
DB type	A	LB	Total
Eruptive	22 (71%)	0 (0%)	22
Quasi-eruptive	1 (3%)	8 (26%)	9
	23	8	31

DB type (SXT & EIT)	yes	no	Total
Eruptive(A)	8 (53%)	0 (0%)	8
Quasi-eruptive(LB)	0 (0%)	7 (47%)	7
	8	7	15

Morimoto & Kurokawa (2003: PASJ)

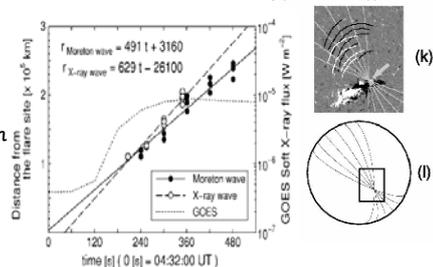
彩層で見える衝撃波の構造・特徴の研究

N. Narukage et al. (2002)



世界中で過去に検出された彩層の衝撃波伝播現象のうち、半数以上のものは、当天文台のFMTという望遠鏡が発見したことになる。

人工衛星によりX線で検出された、コロナ中の衝撃波との比較解析により、それらが太陽フレアにより発生した同一衝撃波の異なる高さの波面を表しているであろうことが明らかとなった。

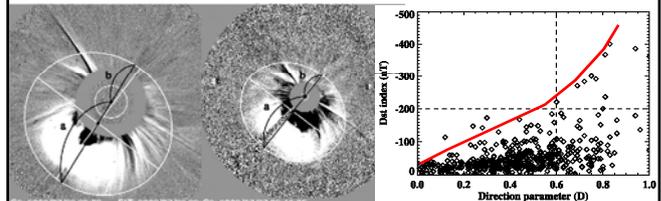


The Flare Monitoring Telescope (FMT)

As for the correlation between "the velocity strength and direction of the eruption" and "the strength of geoeffectiveness"

R.S. Kim et al. ApJ, 677, 1378 (2008 Apr.20)

"CME Earthward Direction as an Important Geoeffectiveness Indicator"



LASCOC2 (left) and C3 (right) images to illustrate how to estimate the direction parameter. The ratio of the shorter (b) to longer (a) distance of the CME front measured from the solar center along the line (b/a) is defined as the direction parameter, D. Note that the line passes both through the centers of the ellipse and the Sun.

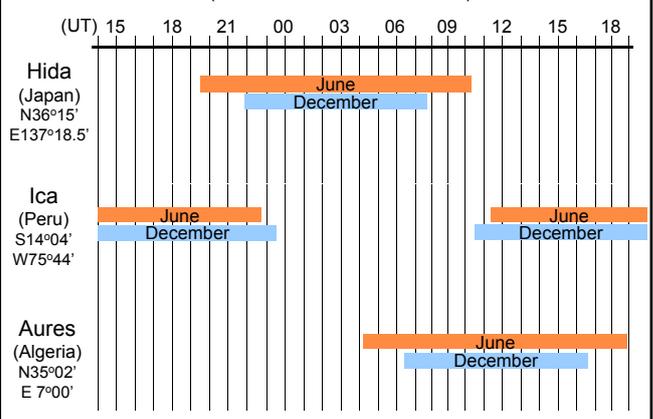
Direction parameter vs. Dst index for 486 frontside halo CMEs. The horizontal dashed line represents Dst = -200 nT, and the vertical dashed line indicates D=0.6.

Continuous H-alpha Imaging Network (CHAIN)



Daytime Period at Each Site

(between sunrise & sunset)



Plan of the FMT in PERU as a part of CHAIN-project

The 1st oversea FMT will be installed in Peru.

We visited candidate sites for installing the FMT in Peru in Jan. 2007. Then, we selected the campus of the National Ica Univ. as the best site.

National Ica University
 Latitude : - 15°
 Altitude : 400 m
 Rain : 0 mm/year
 Temperature : 10 - 27 °C
 Avrg. Humidity : 20 %



LIMA ICA

November 10th 2009:
 The FMT at Hida Obs. was dismantled.



ISWI Activities

March 13th 2010:
 The FMT and other instruments arrived at Ica University, Peru.



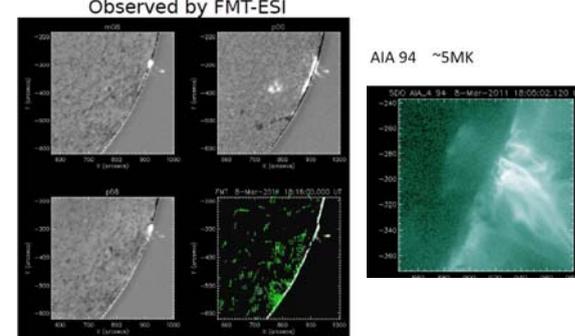
ISWI Activities

March 18th 2010:
 Installation of the FMT in the Solar Station (ESI) of ICA Univ. was completed.



ペルー移設後に観測された太陽活動現象例

EVENT M4.4
 (2011-03-08)
 Observed by FMT-ESI

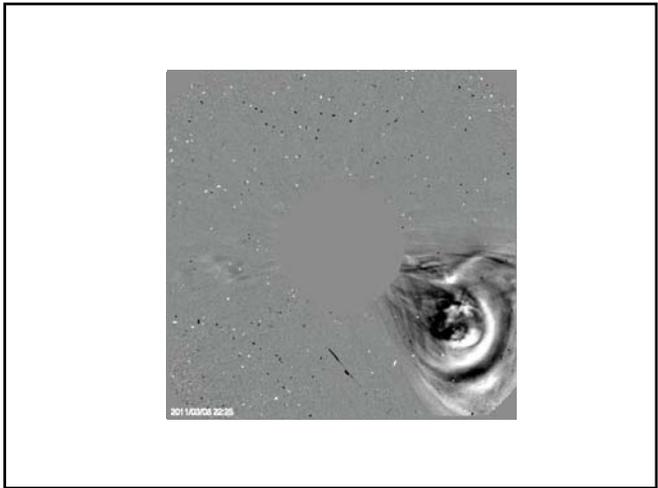


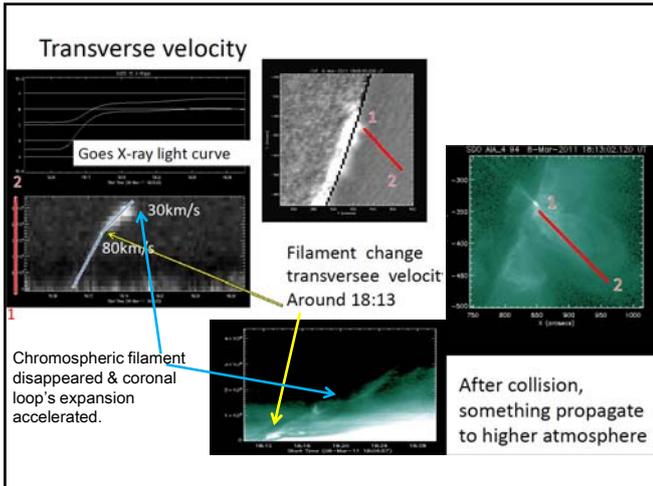
AIA 94 ~5MK

500 AIA 94 8-Mar-2011 18:05:02 130 UT

301 14304 2225

By Maria Victoria Gutierrez Escate





さらに、

- ・太陽フレア爆発の位置、大きさやタイミング
- ・噴出フィラメントの地磁気への影響の大きさ

の、より正確な予測をするためには、太陽面での爆発や噴出付近の、**磁場ベクトルの分布構造**の情報が不可欠となってくる。

【太陽磁場活動望遠鏡 (SMART)】

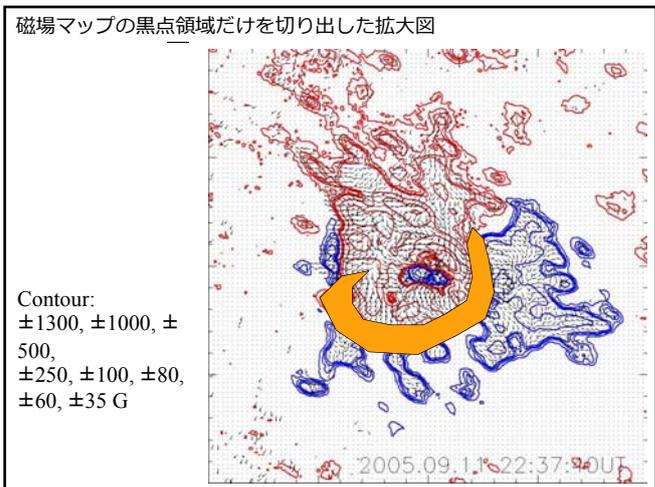
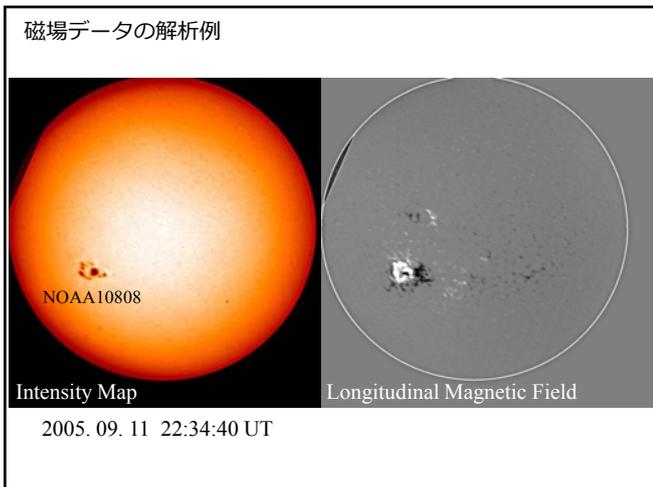
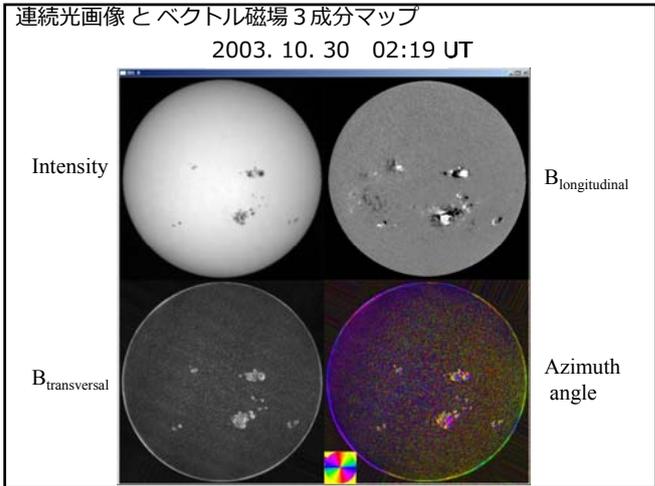
設置場所：京都大学飛騨天文台

主たる目的：

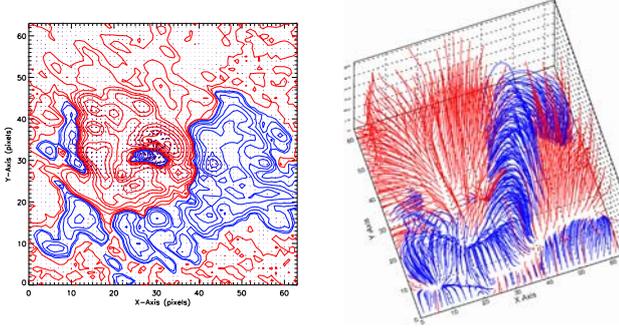
- ・太陽全面を対象としながらも空間分解能を保持しつつ高精度のベクトル磁場を定期的に測定する。
- ・太陽全面の全ての黒点領域、活動現象を高空間分解能を保持しつつ定期的に観測する。

↓

- ・噴出フィラメントが含んでいる磁場の構造を把握する。
- ・太陽フレアの発生予測に必要な条件を解明する。



計算機を用い、太陽表面の磁場マップから、上層の3次元的磁場構造を外挿して、フィラメントに絡んでいる磁場の構造を推定する。



協力：Dr. Han He (北京天文台)

Solar Magnetic Activity Research Telescope (SMART)

Investigation of necessary conditions for solar flare occurrence

Some Indices are compared with chromospheric brightness

Example of the index:

Distance from the chirality inversion line of the Twist α

Magnetic Twist α which are weighted by field strength:

Generally, $\nabla \times \mathbf{B} = \alpha(x, y)\mathbf{B}$ (Force-free field equation)

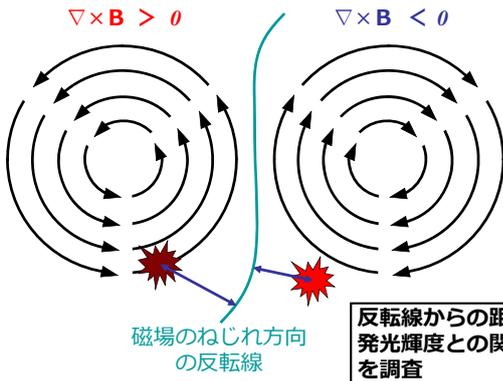
$$J_z(x, y) = \frac{1}{\mu_0} \left(\frac{dB_y}{dx} - \frac{dB_x}{dy} \right) \text{ Vertical current density}$$

$$\alpha_z(x, y) = \mu_0 \frac{J_z(x, y)}{B_z(x, y)} \text{ Vertical Twist parameter}$$

In this study,

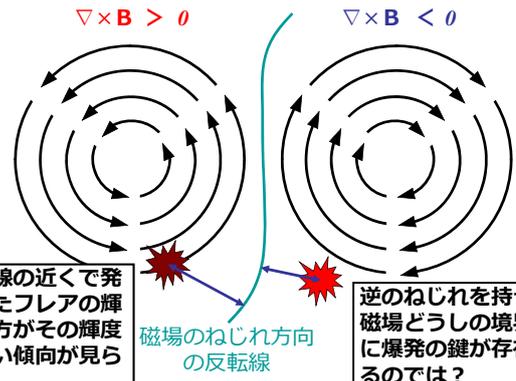
$$\alpha(x, y) = \left(|B_z(x, y)| / \sum |B_z| \right) \alpha_z(x, y)$$

磁場Bの分布



反転線からの距離と発光輝度との関係を調査

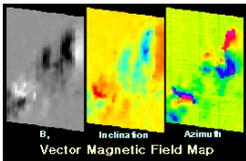
磁場Bの分布



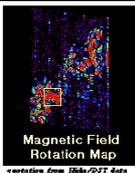
境界線の近くで発生したフレアの輝点の方がその輝度が強い傾向が見られる。

逆のねじれを持った磁場どうしの境界面に爆発の鍵が存在するのでは？

観測した磁場のマップからその揺れ度のマップを作成し、それを時間を追って監視する事で爆発が起こる予測を可能にしていく研究



磁場の揺れ度から何らかの指標を取り出し、その時間変化を見ることで、フレアの発生タイミングを予測できないか？



イメージ図

The Domeless Solar Telescope (DST)

H-alpha

大きな特徴:
 高空間分解能の画像撮影、
 高波長分解能のスペクトル観測、
 多波長域スペクトル同時観測

The Domeless Solar Telescope (DST)

From imaging data

■ Velocity field of photospheric gas motion

T. Magara and R. Kitai ApJ, 524, 469, 1999
 S. UeNo et al. AdSpR, 26, 1793, 2000
 H. Kozu et al. PASJ, 2005,2006 etc.

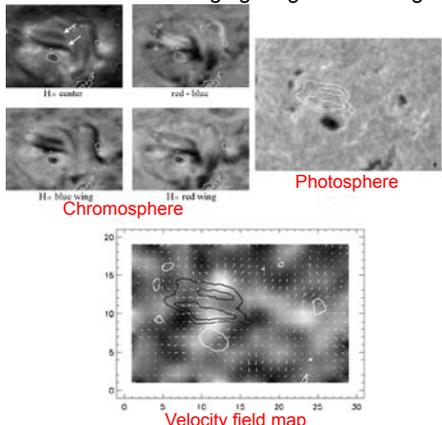
Investigations of relationship between velocity fields of photospheric gas and spacial distribution or time-evolutions of magnetic structures.



7 -

The Domeless Solar Telescope (DST)

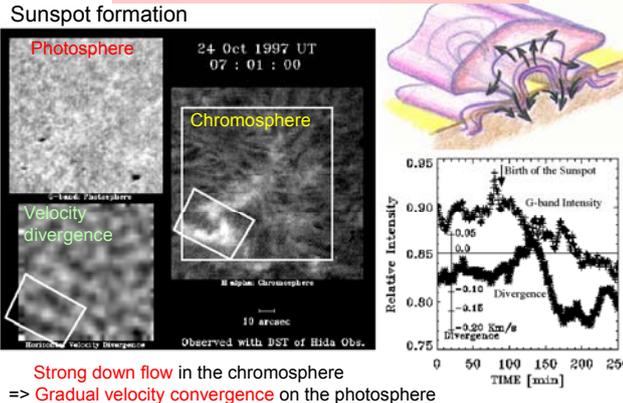
Characteristics of the emerging magnetic flux region



8 -

The Domeless Solar Telescope (DST)

Sunspot formation



24 Oct 1997 UT
07 : 01 : 00

Strong flow in the chromosphere
 => Gradual velocity convergence on the photosphere
 => Intensity darkening of the photosphere (Birth of the spot)
 => Rapid velocity convergence

9 -

The Domeless Solar Telescope (DST)

This spectro-heliograph can obtain 4-dimensional data:

- 2D spacial distribution
- wavelength information (physical values along the height)
- time evolution

↓

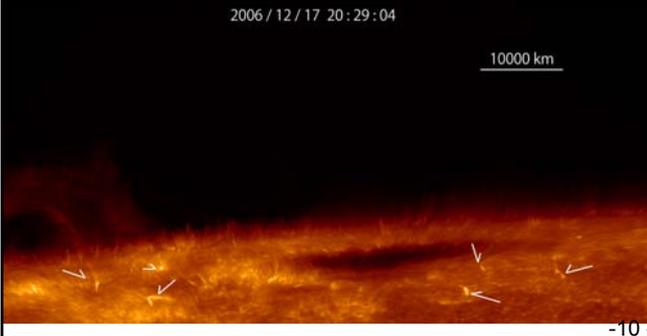
We can investigate 3D chromospheric structures and evolutions of solar active phenomena like jets and sources of the high-speed & low-speed solar wind.

13 -

The Domeless Solar Telescope (DST)

From spectroscopic data

The Ca II H filtergraph of the HINODE/SOT has revealed various chromospheric activities in detail.



2006 / 12 / 17 20 : 29 : 04

10000 km

10 -

The Domeless Solar Telescope (DST)

Spectroscopy at Ca II K, H Line

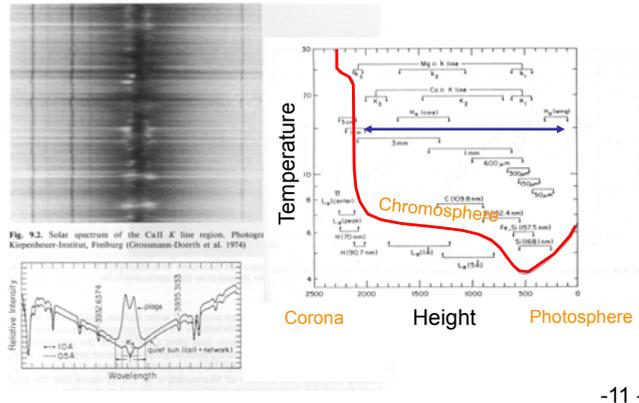


Fig. 9.2. Solar spectrum of the Ca II K line region. Photograph Kiepenheuer-Institut, Freiburg (Grossmann-Doerth et al. 1974)

Temperature

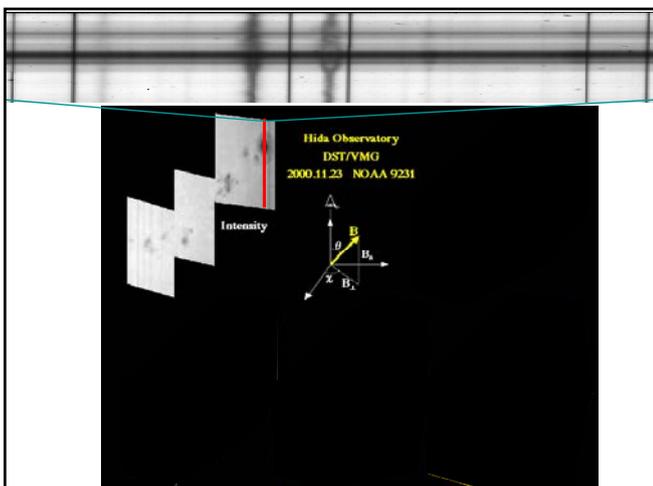
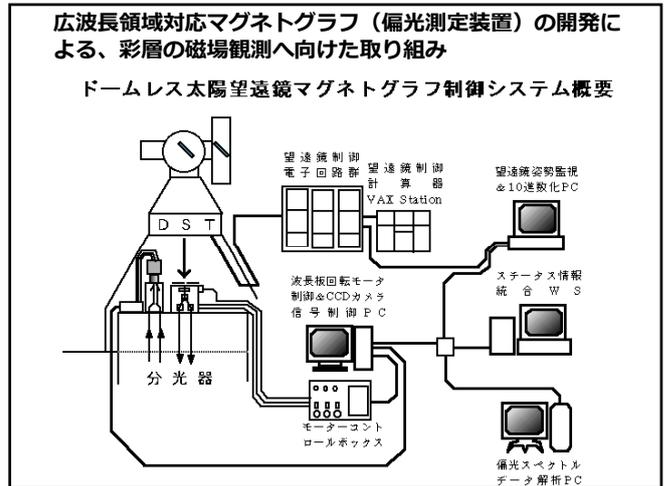
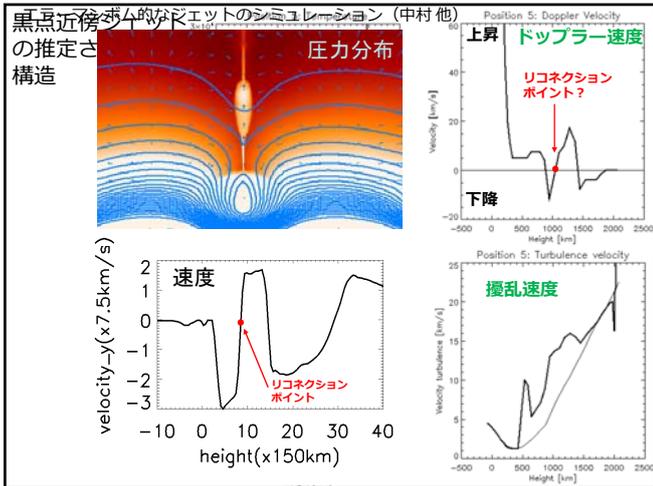
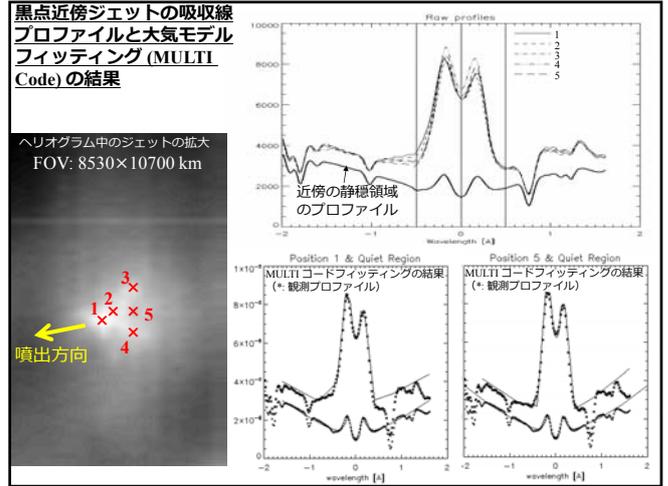
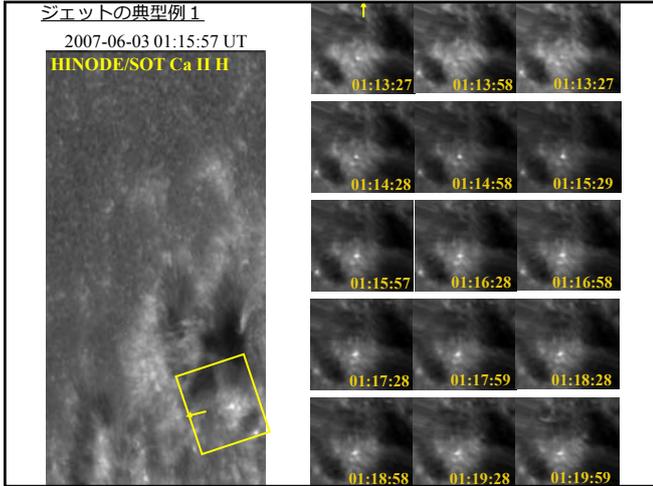
Corona

Chromosphere

Height

Photosphere

11 -

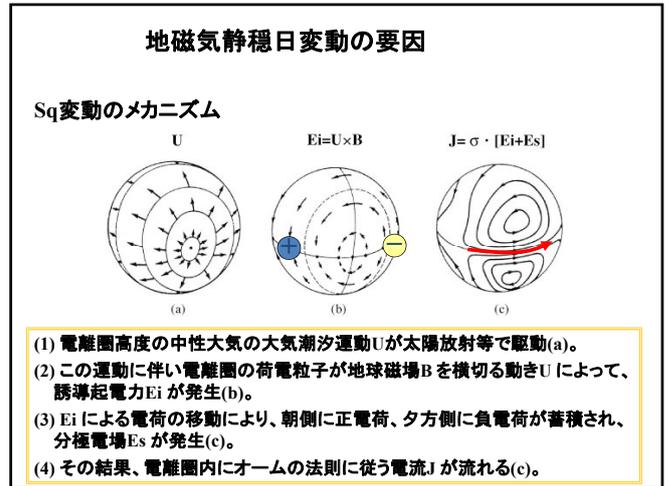
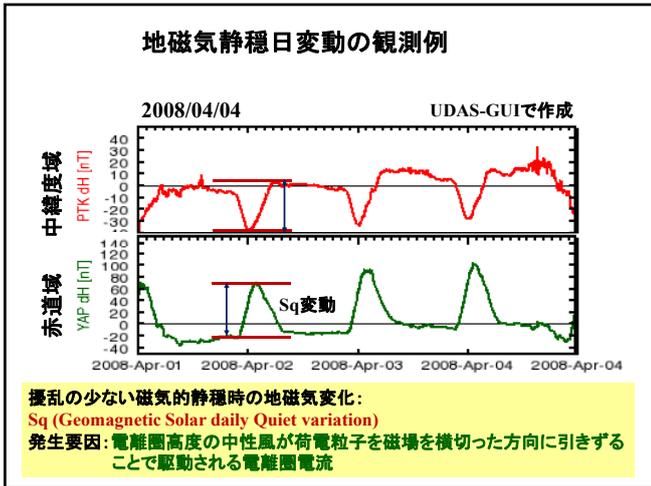
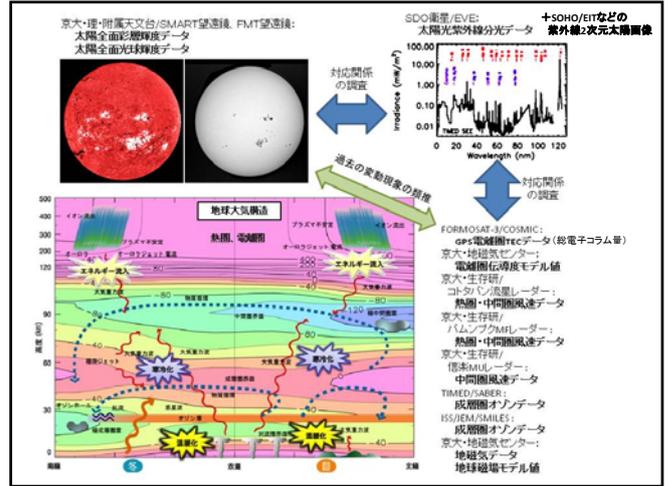
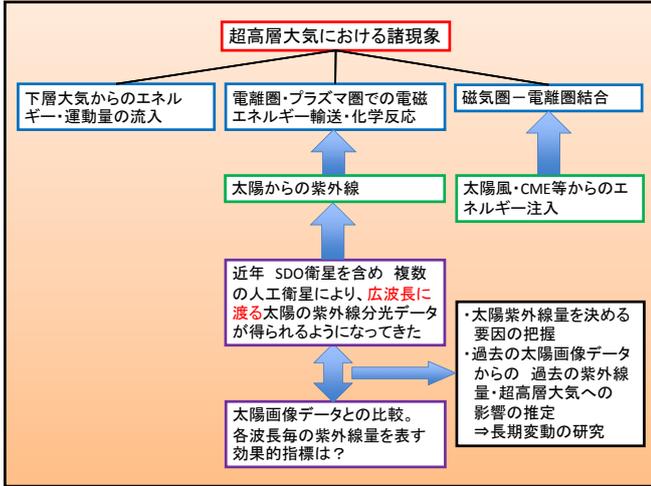


さらに長期的な地球環境・超高層大気の変動への影響
についての研究も・・・

『太陽物理学との連携による
超高層大気変動現象の研究』

○上野悟 (京大飛騨天文台)

新堀淳樹 (京大生存研)、磯部洋明、浅井歩 (京大宇宙ユニット)
横山正樹 (和歌山大)、林寛生 (京大生存研)



IUGONET **5. 考察**

5.1 今サイクルの極小期のSq振幅が小さい理由-1

○ Sq場の振幅 ← 電離圏電流の大きさ
 ← 電離圏電気伝導度 + 地球磁場強度 + 風速

$$J = \sum (E + U \times B)$$

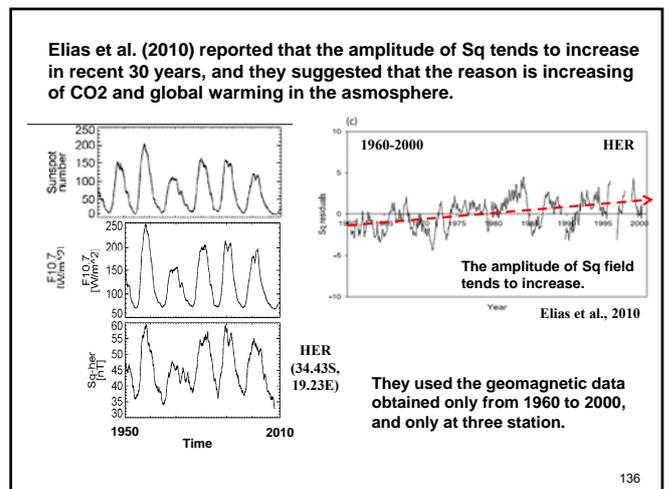
○ 電離圏電気伝導度 ← 地球磁場強度 + 太陽放射

$$\sum_p = \int_{h_1}^{h_2} \left[\frac{n_e}{m_e v_{ne}} \frac{V_{ne}^2}{V_{ne}^2 + \Omega_e^2} + \frac{n_i}{m_i v_{ni}} \frac{V_{ni}^2}{V_{ni}^2 + \Omega_i^2} \right] e^2 dh$$

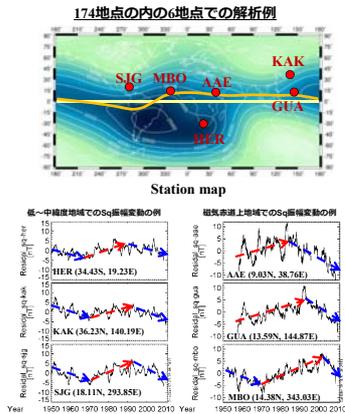
$$\sum_H = \int_{h_1}^{h_2} \left[\frac{n_e}{m_e v_{ne}} \frac{V_{ne} \Omega_e}{V_{ne}^2 + \Omega_e^2} + \frac{n_i}{m_i v_{ni}} \frac{V_{ni} \Omega_i}{V_{ni}^2 + \Omega_i^2} \right] e^2 dh$$

Ω ← 磁場強度に比例、イオン種に反比例
 v ← 中性大気密度に比例(スケールハイトに関係)
 n_e, n_i ← 太陽放射強度に比例

135



より長期・多地点の地磁気Sqデータを解析した結果



より長期・多地点の地磁気Sqデータを解析した結果

- 1) Sq変動振幅の単調増加現象は、もっと長期的なSq変動のごく一時期の傾向を見ているにすぎない。(地球全体のCO2の継続的増加に原因を押しつけるのは難しい。)
- 2) Sq変動振幅は、長期的に見ると、赤道地帯を除き、約20年毎に増加・減少のフェーズが転換しているようである。

【注意点】Sq変動振幅から太陽活動の成分を取り除く作業をする際、その指標として、現在太陽からのF10.7放射量変動データを用いている。

地上で観測できる波長域

電磁波は波長の長い方から、電波・赤外線・可視光線・紫外線・X線・γ線と名付けられている。

太陽から放射される電磁波自体は、これら全ての範囲を含んでいる。

しかしながら、長波長の電波は電離層によって宇宙空間に反射され、1μmから約1mmまでの近赤外線からミリ波電波領域は、地球大気上層の水蒸気や二酸化炭素分子によって、かなり吸収され、約3000Å以下の紫外線は地球大気のオゾン等の分子に吸収される。更にX線は地球大気中の原子に、γ線は分子の原子核に、各々吸収される。

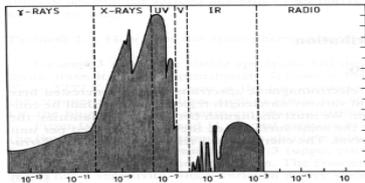


Fig. 1.2. Absorption in the Earth's atmosphere. The edge of the shaded area marks the height where the radiation is reduced to 1/2 of its original strength. UV, ultraviolet; V, visible; IR, infrared

よって、地上からの観測に適したスペクトル領域は、これら以外の、「大気の窓」を通り抜けた、可視光と電波の領域に限られて来る。

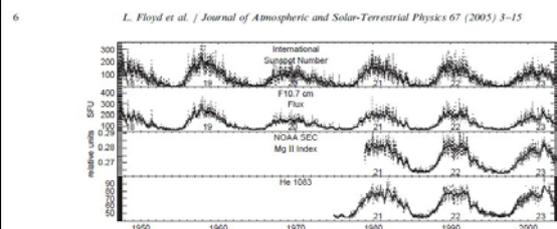


Fig. 1. Four solar activity index time series: International Sunspot Number, $F_{10.7}$, Mg II core-to-wing ratio, and the He 1083 Equivalent Width. The solid line represents an 81-day Gaussian FWHM filtered version of each.

different, these time series are very similar in behavior. The two dominant periodicities are that of the solar activity cycle (~11 year) and of solar rotation (~27 day). Both of these periodicities in the solar spectral irradiance are a result of the behavior of bright regions on the solar disk. These bright regions include faculae and plages in the photosphere and chromosphere, respectively, as well as smaller scale network elements. The number, size, and intensity of active regions containing sunspots, faculae, and plages roughly follow the 11-year sunspot cycle. As viewed from Earth, the sun's apparent rotation period of

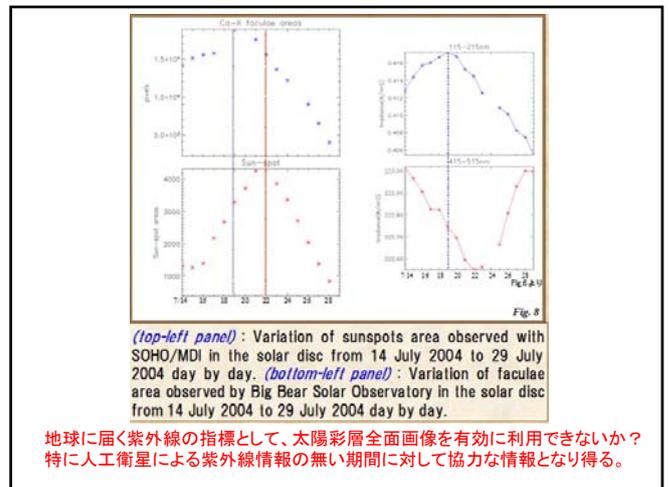
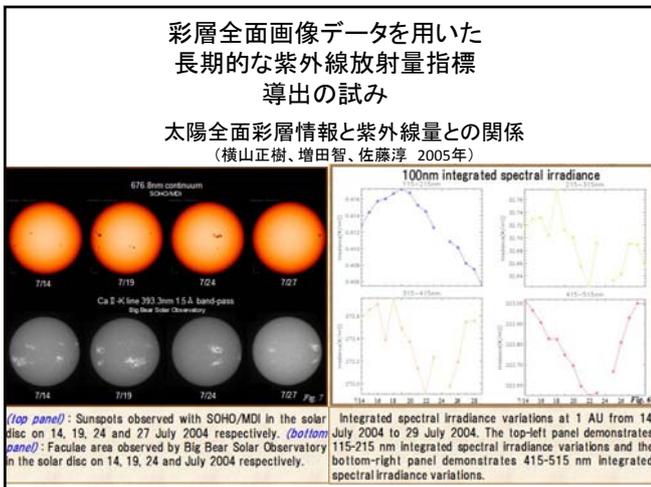
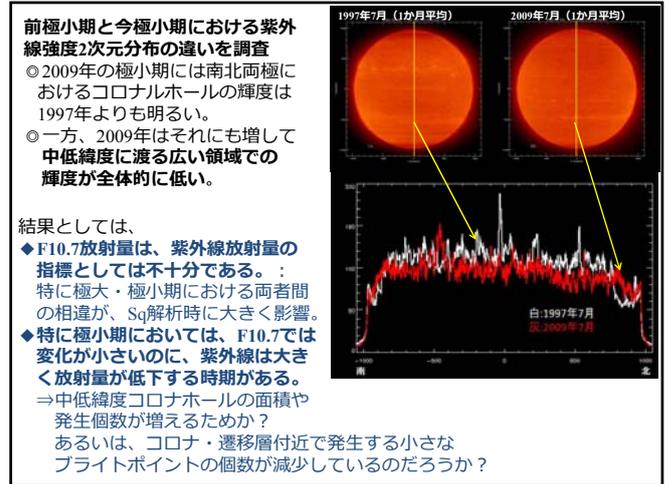
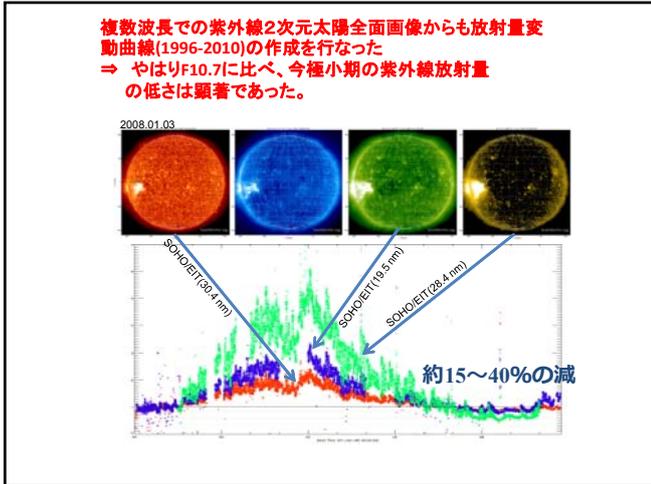
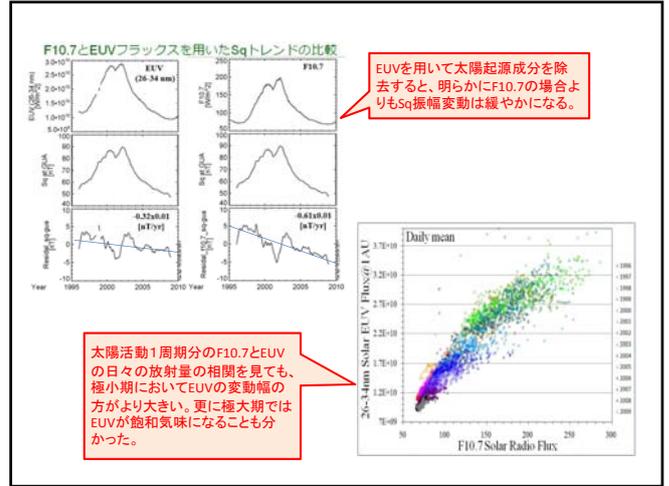
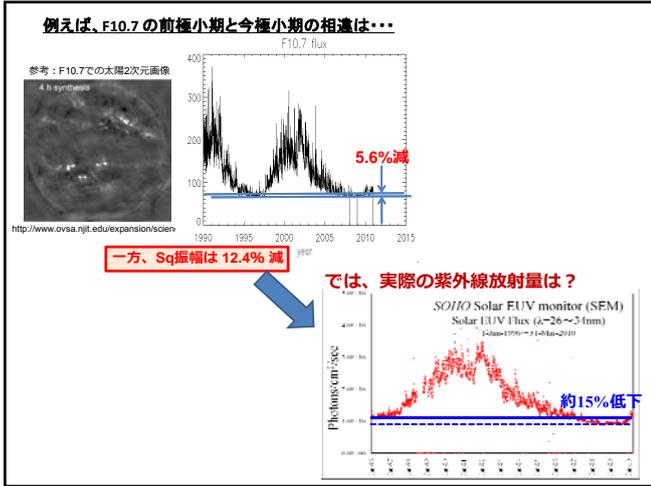
Index pair	Unfiltered	Long-term	Short-term
ISN $F_{10.7}$	0.940	0.983	0.804
ISN Mg II	0.913	0.978	0.701
ISN He 1083	0.880	0.954	0.630
$F_{10.7}$ Mg II	0.956	0.993	0.769
$F_{10.7}$ He 1083	0.927	0.975	0.674
Mg II He 1083	0.969	0.984	0.856

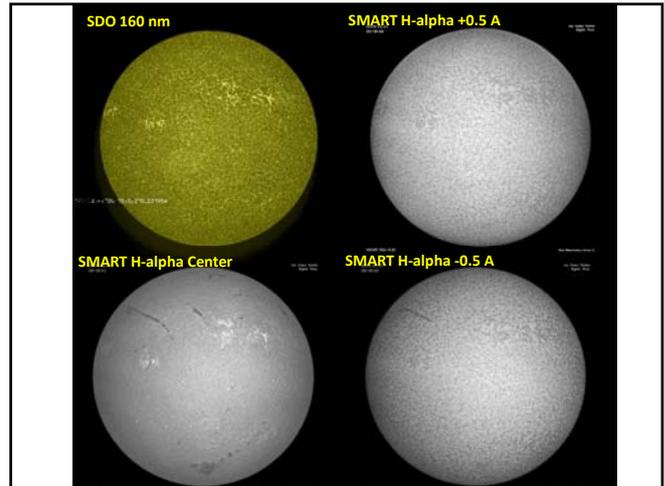
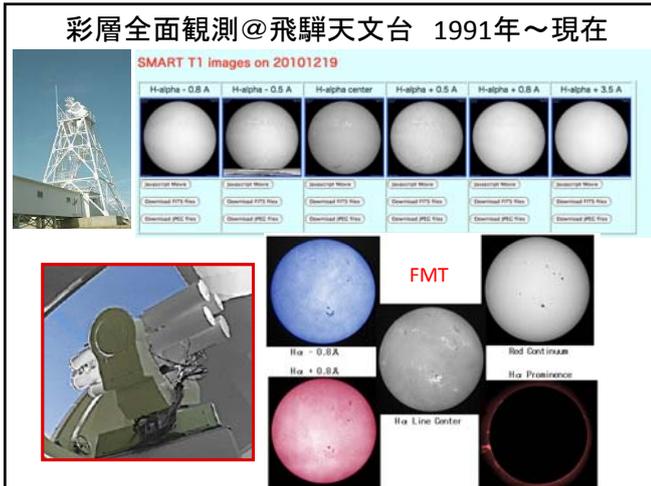
Sq振幅の長期的増減変動の2つの解釈

- A) F10.7放射量が超高層大気に影響を与えている紫外線量を適格に反映していると仮定すると、超高層大気自体、もしくは中低層大気からの影響の過程の中に、20年毎の変動を生み出すメカニズムが存在している事を示している？
- B) F10.7放射量変動が、実際は超高層大気に直接的に影響を与えている紫外線波長域(50~150nm)の放射量変動と必ずしも一致しておらず、Sq変動の太陽活動周期性分を過小評価している？

太陽研究者サイドの課題

- 果たして電波領域のF10.7の放射量が、どれほど紫外線量を適格に反映しているのか？
F10.7変動の特徴と紫外線変動の特徴との違いは？
F10.7は紫外線のどの波長域の情報を一番良く反映しているのか？
- そもそも、今注目すべき紫外線放射量は、太陽面上のどのような構造・場所からの放射の影響を反映しているのか？
- F10.7以上に、超高層大気変動と高い相関性を持った長期的な紫外線指標は無いのか？
(勿論、現在は衛星による紫外線分光データを直接使用すれば良いが、装置・衛星毎の絶対値の誤差が思った以上に大きいので要注意。さらに過去に遡って長期変動を調べる際には、より古くから存在する観測データから指標を取り出せるようにしておかなければならない。)





太陽彩層画像からの紫外線放射量推定インデックスのテスト(解析中)

太陽直径 約950秒角に対し、各地点を中心に30秒角四方の領域の平均値 $a(x,y)$ を算出し、それよりも輝度の高い地点だけを選び出して、輝度平均からのずれ値を積算

if $I(x,y) > a(x,y)$ then "Test Index" = $\iint (I(x,y) - a(x,y)) dx dy / \iint I(x,y) dx dy$

2006. 12. 02

最近、当天文台では、京大天文台にて1926～1929年、花山天文台にて1929～1941年、京大生駒山太陽観測所にて1941～1972年、の期間に各々観測されていた、**46年間に渡るCaK II線での太陽全面像**の写真乾板データが保管されていた事が分かり、デジタル化、データベース作成作業が始まりつつある。

今後は、このデータを用いて、この年代の太陽紫外線量と、超高度大気への影響の調査も進める。

参考文献

- "THE SUN AND SPACE WEATHER" by Arnold Hansmeier (Kluwer Academic Publishers), 2002
- 「宇宙と地球環境」 石田恵一 著 (成山堂書店) 2000年
- 「総説 宇宙天気」 柴田一成、上出洋介著 (京都大学学術出版会) 2011年
- "Space Weather -- A Research Perspective --" by the National Academy of Sciences, 1997
- "Solar Physics and Terrestrial Effects" by Roger P. Briggs, Robert J. Carlisle, Barbara B. Poppe (Space Environment Center), 1996
- NOAA Research Science Education HomePage, Space Environment TOPICS on WEB by Space Environment Laboratory, NOAA <http://www.sec.noaa.gov/>

おわり