

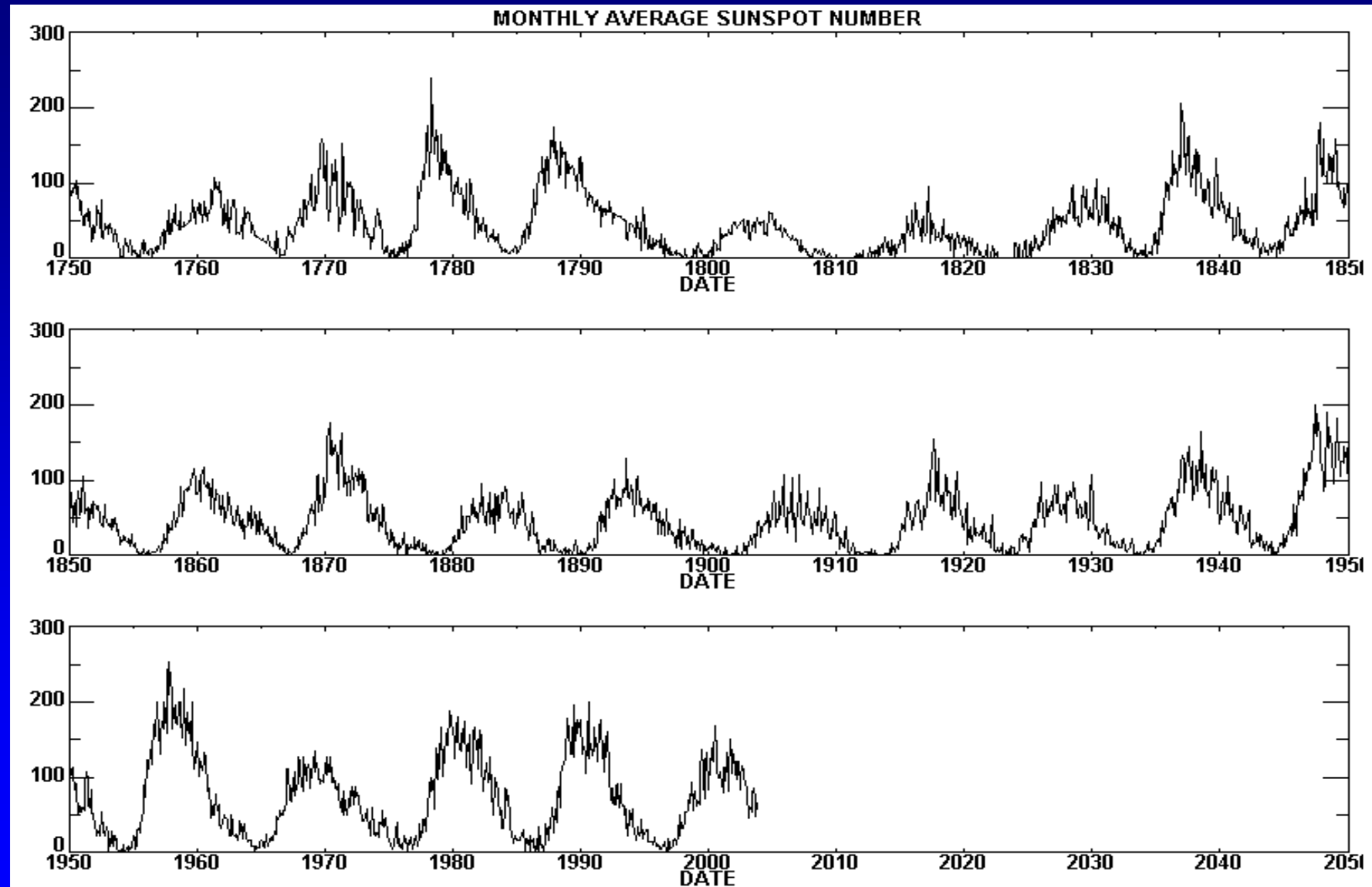
太陽フレア中に発生した 衛星障害例

五家 建夫、松本 晴久
(JAXA)

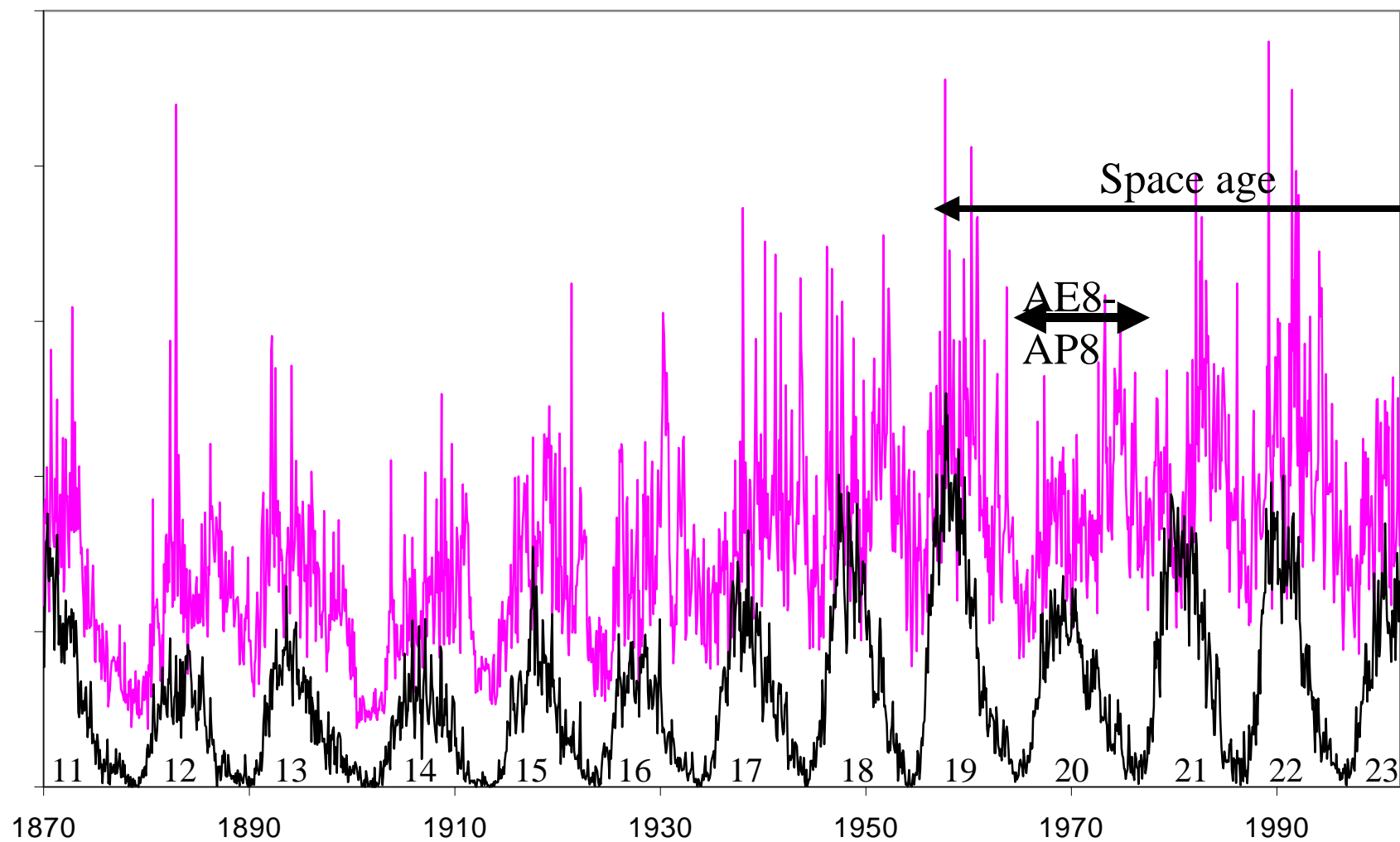
発表内容

- (1) 太陽活動のトレンド
- (2) 今期の太陽フレアの陽子実測値(DRTS)
- (3) 太陽フレアによる国内外の衛星障害例
- (4) 太陽フレアによる航空機・地上の障害例
- (5) まとめ

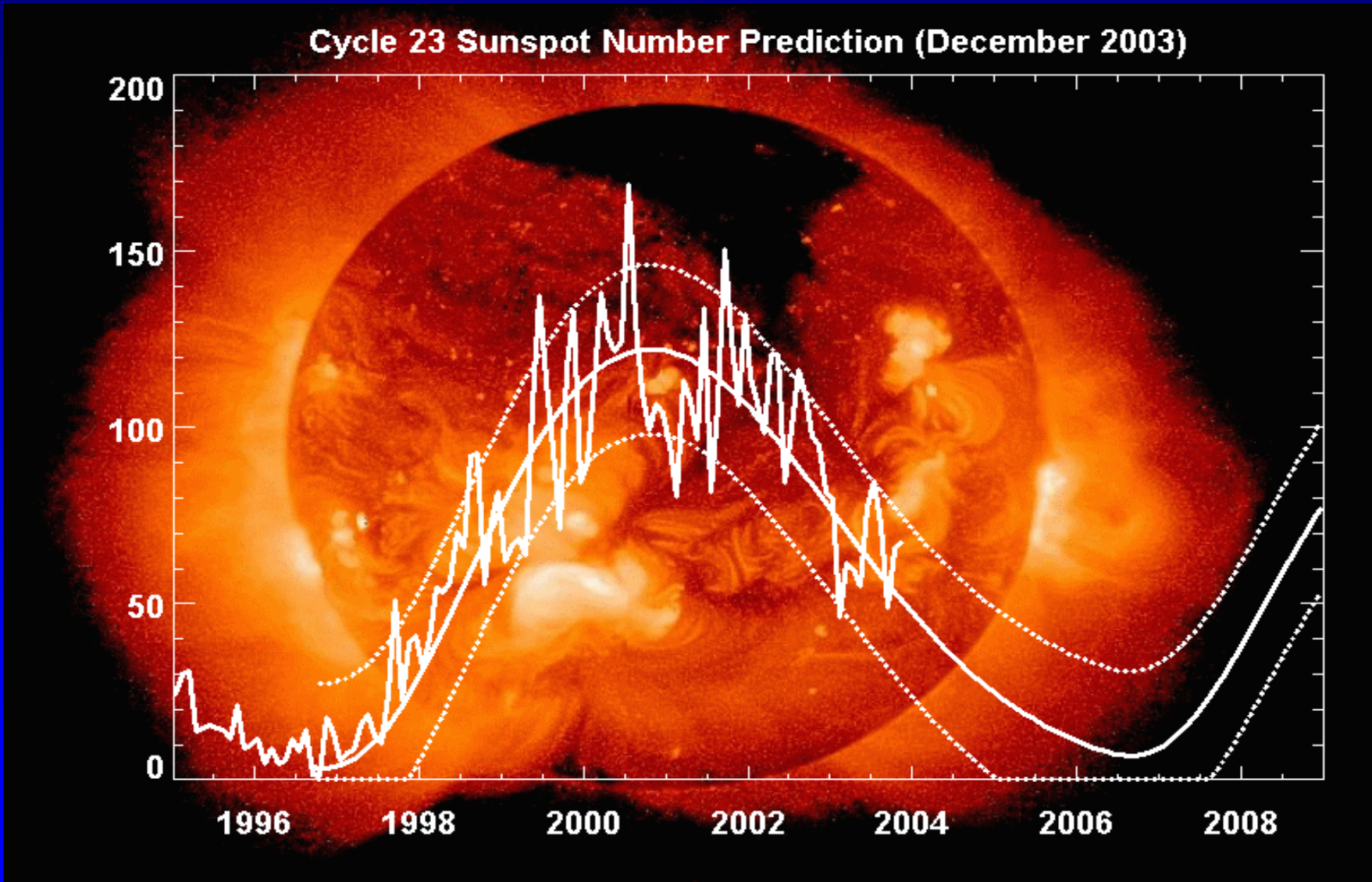
太陽黒点周期(過去250年間)



太陽黒点周期と磁気嵐 (過去130年間)



太陽黒点周期(23サイクル)



(NOAA)

太陽陽子フルエンスと極大期ピークの関係

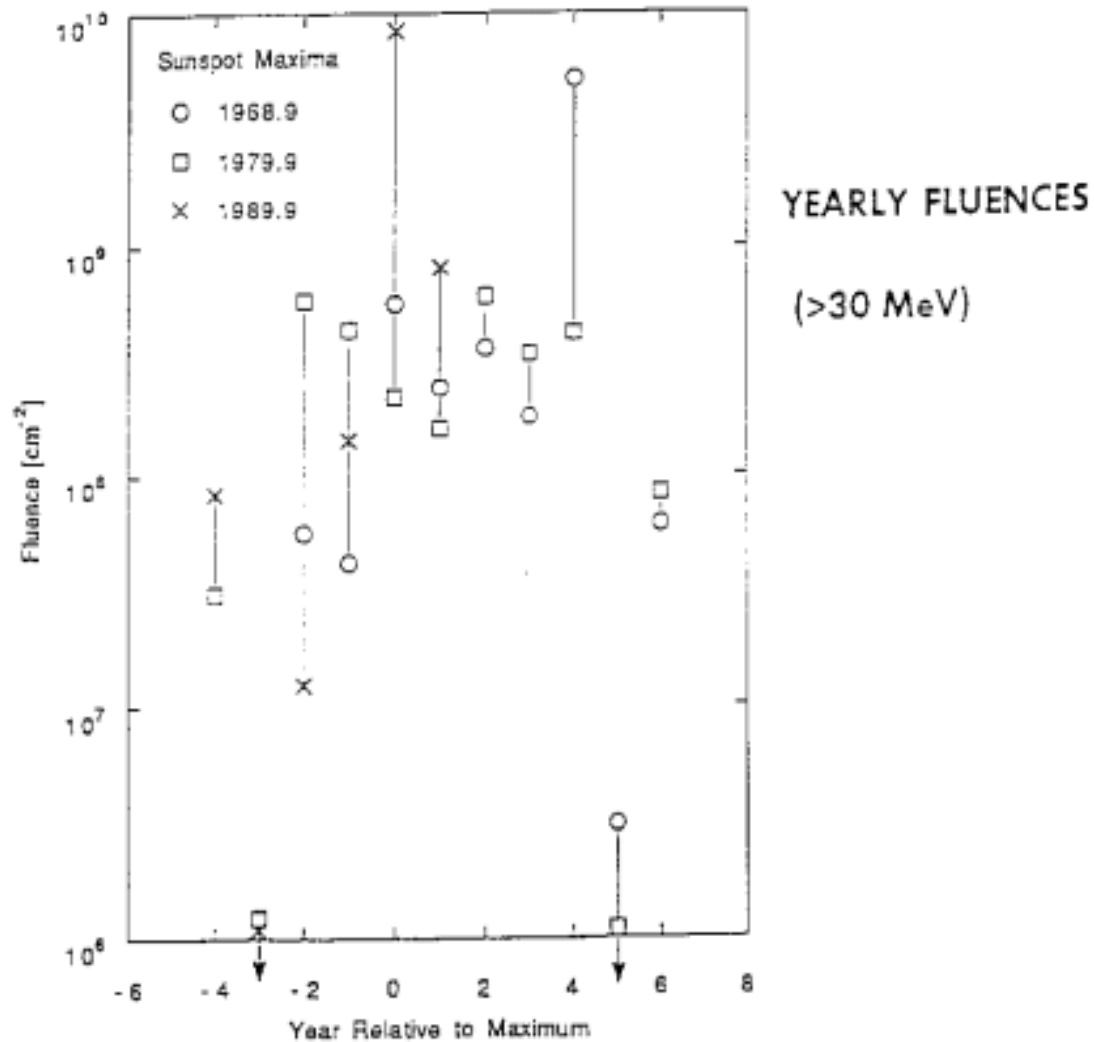
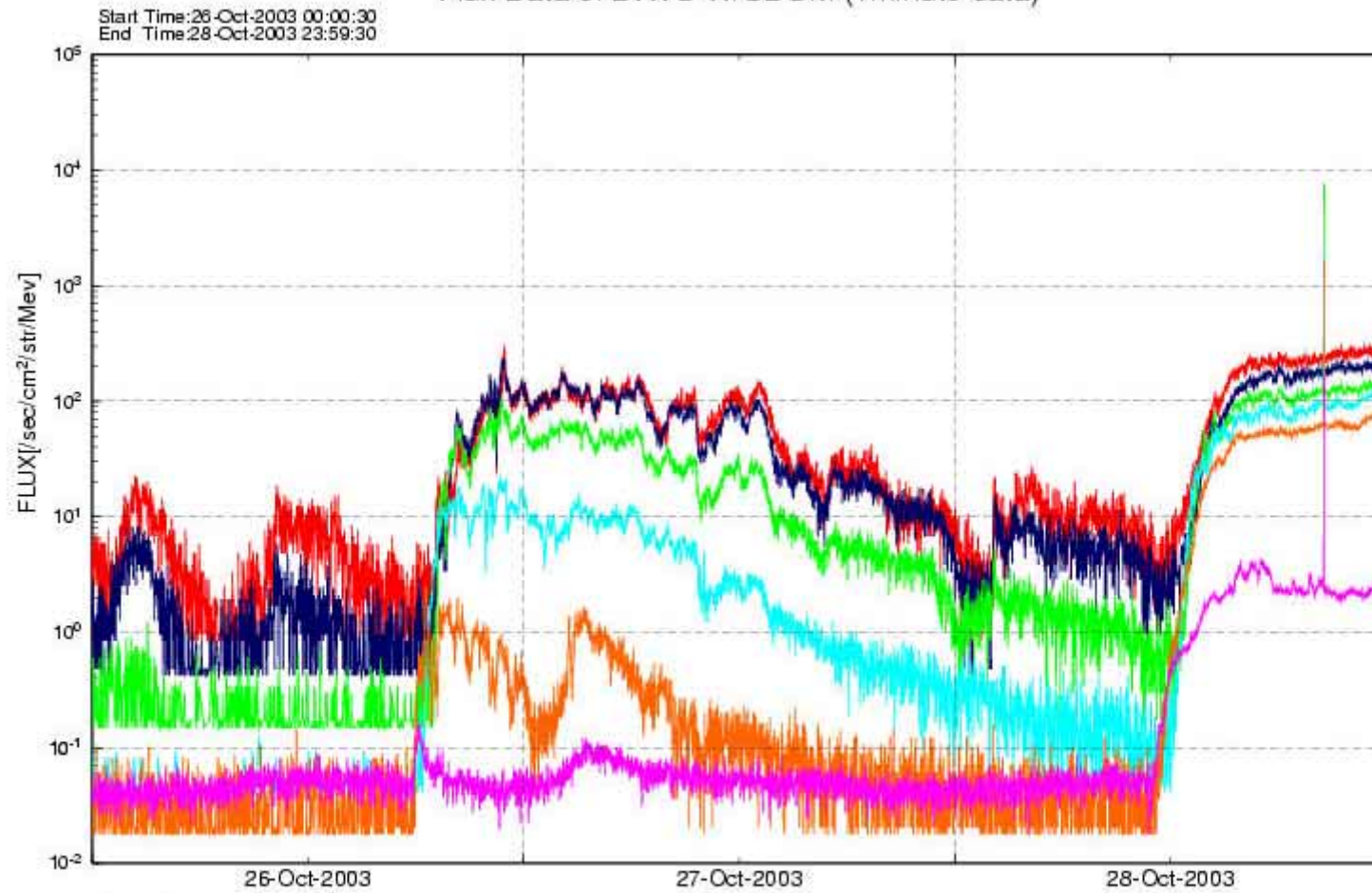


Fig. 7. The total integrated yearly fluence for 12 month periods (years relative to sunspot maximum) from 1956 through 1985.

(J. Feynmann,
STPW'96)

Flux Data of DRTS-W/SDOM (1minute data)

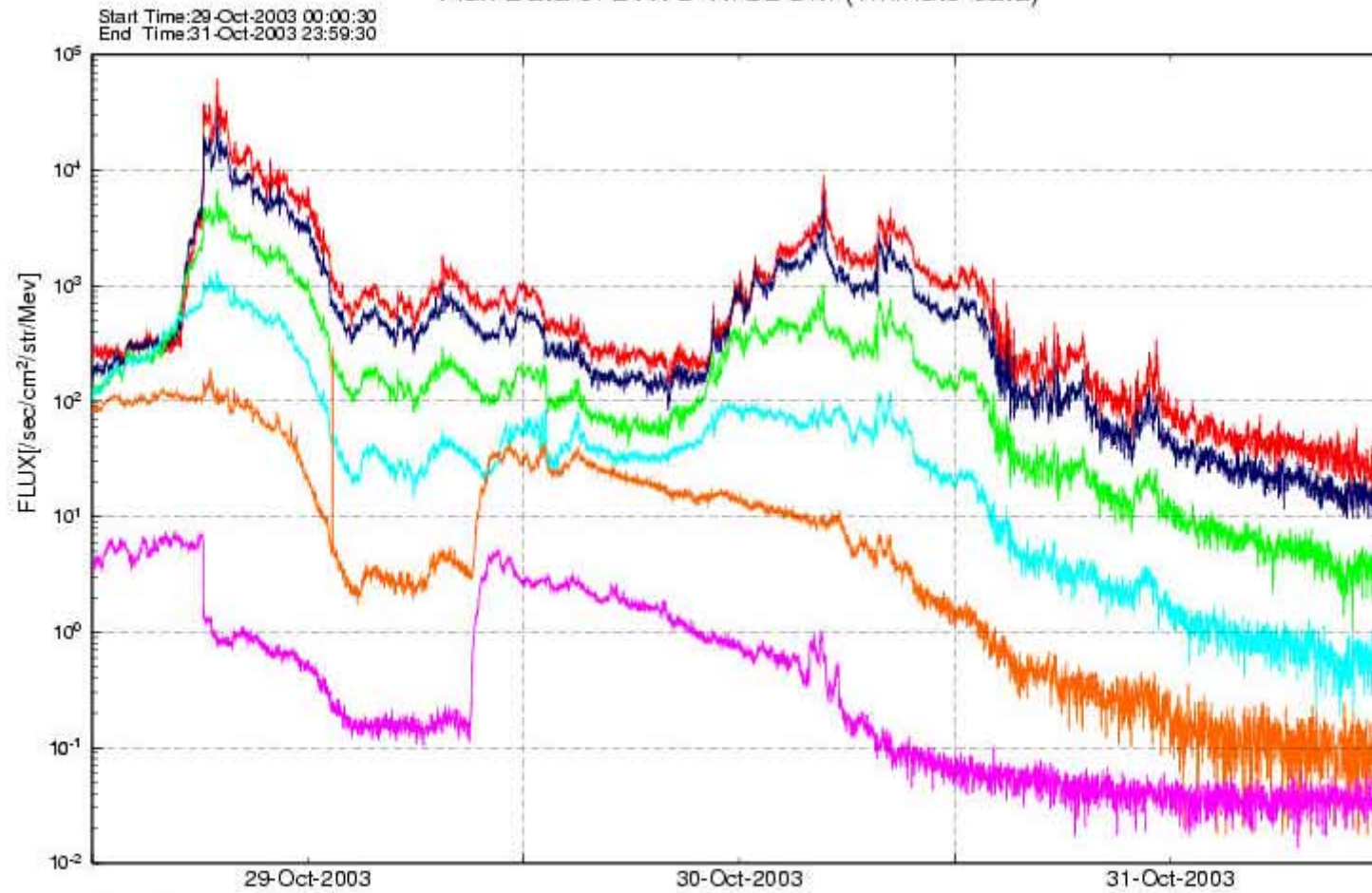


Legend

- | | | |
|------------------------------|--------------------------------|---------------------------------|
| Proton CH5 (1.84- 2.44) MeV | Proton CH9 (5.23- 7.13) MeV | Proton CH13 (22.29- 45.39) MeV |
| Proton CH7 (2.69- 3.82) MeV | Proton CH11 (8.02- 18.34) MeV | Proton CH15 (116.51-211.71) MeV |

(C)NASDA 2003

Flux Data of DRTS-W/SDOM (1minute data)

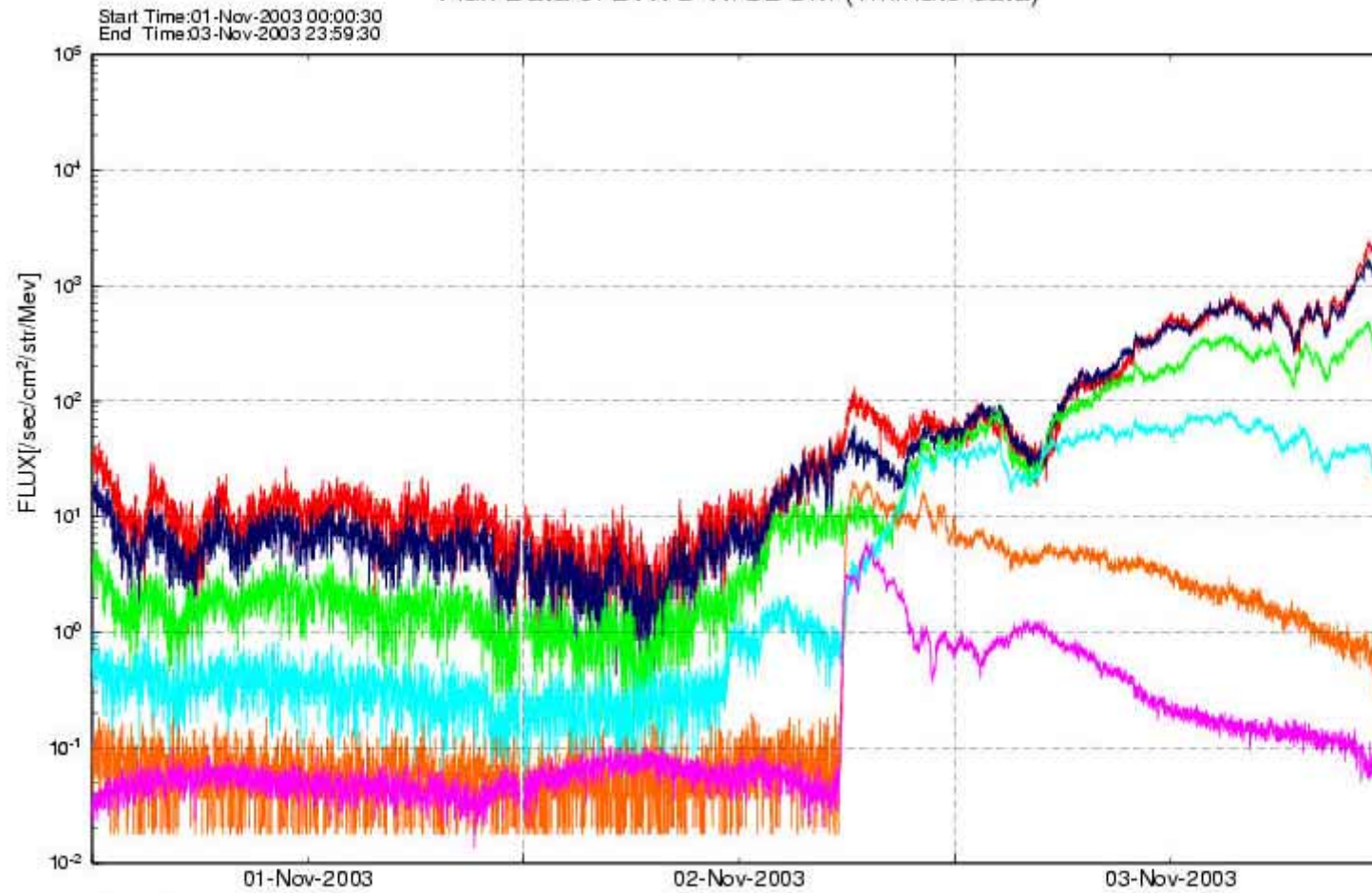


Legend

Proton CH5 (1.84- 2.44) MeV	Proton CH9 (5.23- 7.13) MeV	Proton CH13 (22.29- 45.39) MeV
Proton CH7 (2.69- 3.82) MeV	Proton CH11 (8.02- 18.34) MeV	Proton CH15 (116.51-211.71) MeV

(C)NASDA 2003

Flux Data of DRTS-W/SDOM (1minute data)

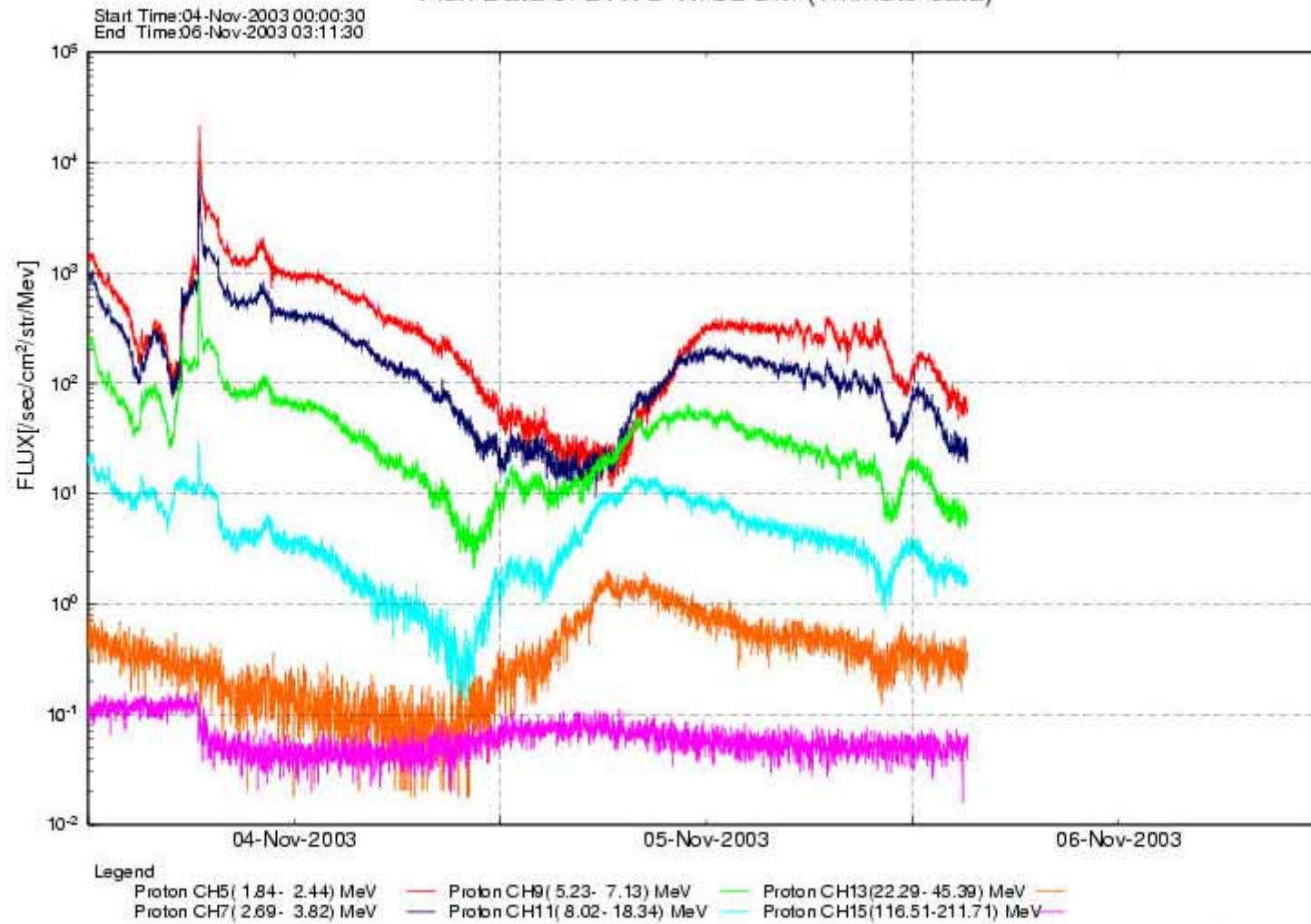


Legend

- | | | |
|-----------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Proton CH5(1.84- 2.44) MeV | Proton CH9(5.23- 7.13) MeV | Proton CH13(22.29- 45.39) MeV |
| Proton CH7(2.69- 3.82) MeV | Proton CH11(8.02- 18.34) MeV | Proton CH15(116.51-211.71) MeV |

(C)NASDA 2003

Flux Data of DRTS-W/SDOM (1minute data)



(C)NASDA 2003

1. 衛星障害：DRTSが安全モードへ移行

- 10月28日(UT)、データ中継技術衛星(DRTS)「こだま」が15時30分頃(UT)から、姿勢制御用装置の地球センサの信号に異常が発生した。
- 断続的に地球センサに異常信号が頻繁に発生した結果、故障検知機能が働き、18時42分頃(UT)に衛星は電力的に安全な太陽捕捉モードに移行した。
- その後、太陽フレアが沈静化したので、11月7日10:00UTに地球捕捉モードに移行開始、同日12時19分UT に三軸姿勢を確立した。その際、地球センサの検知レベルを変更した。

2. 今期の太陽フレアによる衛星障害例 国内外(DRTSを除く)

- 永久故障 4
- 安全モード又は運用を一時停止 30
- データ内容の「誤り」の増加
搭載コンピュータの誤動作 5

衛星障害:永久故障(1)

- 米国極軌道気象衛星NOAA-17の改良型マイクロ波観測装置AMSU-A1 (Advanced Microwave Sounding Unit) のスキャナーが永久故障した(10月27日)。
- 米国気象衛星GOES -8号のX線センサがOFFになり、復帰しなかった(10月27日)。

衛星障害:永久故障(2)

- ユーテルサット新通信衛星「e-bird」に不具合か。
関係者の話によると、9月にアリアン5で打ち上げられた「e-bird」に深刻な不具合が発生しているとのこと。

不具合は同衛星に搭載されている20本のトランスポンダ全てに影響を与えており、最悪のシナリオには衛星の全損も含まれるとのこと。

尚、ユーテルサット社は現在のところ、この件に関しコメントを出していない。

注:不具合種別など詳細は不明。
SPACENEWS オンライン版 (11月7日)

衛星障害：永久故障(3)

- 火星周回中の探査機「マーズ・オデッセイ (Mars Odyssey)」の観測機器:放射線観測装置「Martian Radiation Environment Experiment (MARIE)」が、太陽活動の影響により10月28日から適切に作動しなくなっていることをNASA/JPLが明らかにした。復旧作業は今後も継続される。同探査機のその他の観測機器については順調に作動している。

(11月26日、JPL Press Release)

衛星障害：安全モード、運用一時停止（1）

- 10月23日、太陽風観測衛星GENESIS衛星（L1定点）が安全モード（Safe mode）に入り、11月3日に復帰。
- 10月24日、彗星探査機STARDUST衛星が、書き込み内容の誤動作（read errors）で安全モードに入り、復帰した。書
- 10月24日、X線天文衛星CHANDRA衛星が高レベルの放射線を受け（13:34UT）、観測を一時停止、10月25日に復帰した。高

衛星障害：安全モード、運用一時停止(2)

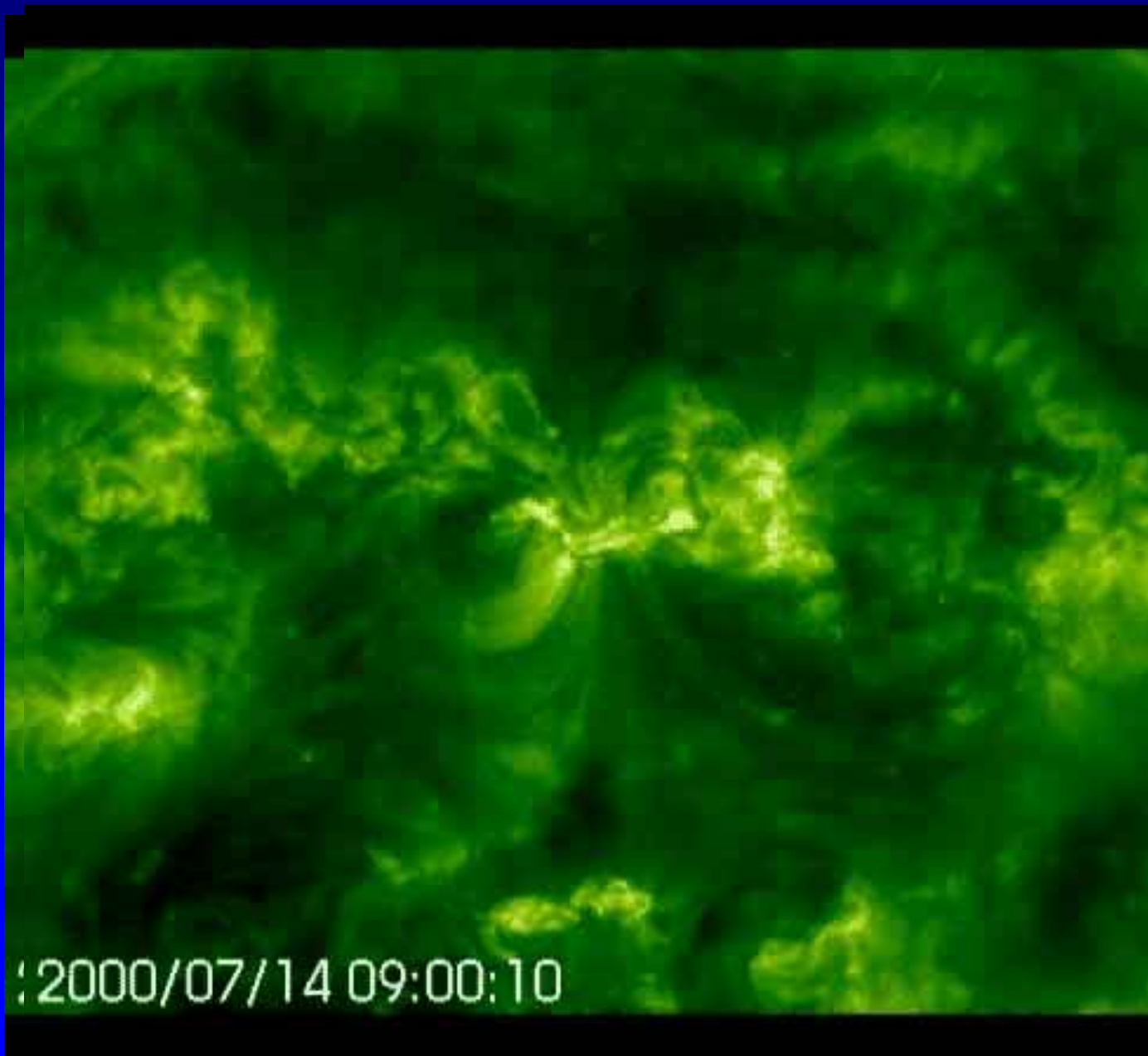
- 10月24日、ISSではZ1トラス上に2機あるPCU(Plasma Contactor Units)の内、1台が起動された模様(10/22発生CME、10/23発生のXフレアによる対策)。出典：ISS On-Orbit Status
その後、10月28日のフレア、さらにデータ蓄積のため11月7日まで運用してデータを取った模様。
- 10月24日、米国静止気象衛星GOES -12号の磁気トルカが、磁気嵐の擾乱を受け運用できなくなった。

衛星障害：安全モード、運用一時停止(3)

- 10月26日、月探査機SMART-1衛星が、9時23分(UT)、イオンエンジンが予定外の自動停止。
原因は放射線レベルが上昇したためと見られる。
次の予定着火時間には再スタートに成功。

ここ2週間程、スターセンサも放射線の影響、温度上昇等により不調をきたしている。これは検出器のCCDに太陽フレアの陽子と重イオンの白い軌跡ノイズの‘hot spots’ノイズを起こしているのが主原因。スターセンサの処理ソフトを修正して対応した。太陽電池発生電力は予測では1,850 Wだったが、放射線劣化が予想より多く、1日に1-1.5Wと劣化が増大していたが、10月20日以降にさらに急激な発生電力の劣化状態が続いている。(Last updated: 31 October 2003, 0100 UTC)(民間の衛星アノマリ・データベース(SAT-ND))

14 July 2000, Bastille day event (SOHO / EIT)



スターセンサが

太陽フレアで

誤動作した事例

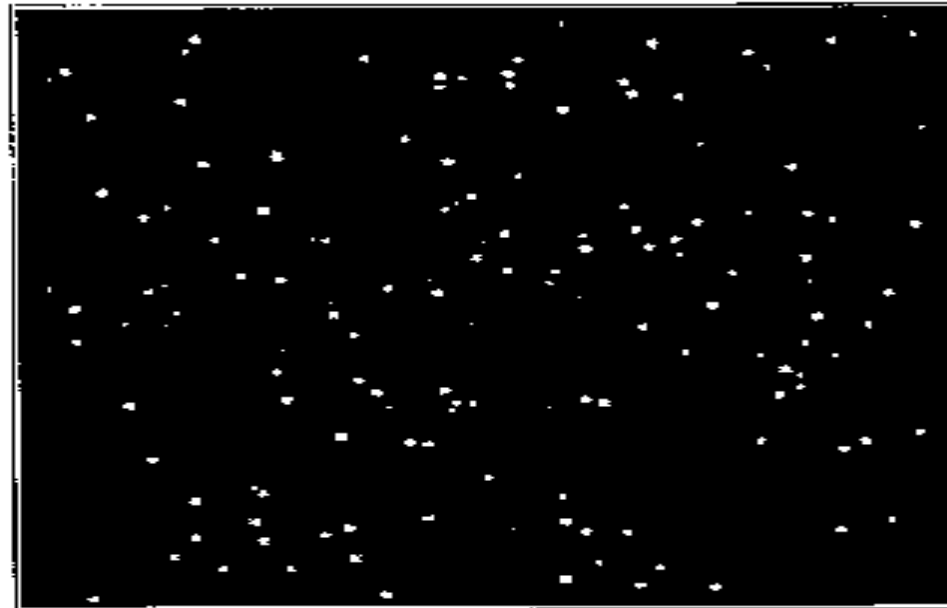
(2000年11月のフレア)

Stardust衛星

上図:安全モード

に移行直前に得られた最終画像

下図:フレアの数日後に完全に回復、全点像に星と惑星はすべて



Top: Last image taken before entering safe mode. View shows hundreds of proton hits as solar flare occurred. Bottom: Taken days after the solar flare subsided, the image shows many bright objects, all identified as stars or Saturn. The camera had completely recovered from the proton hits at this time. Photo: NASA/JPL

(SPCE
FLIGHT
NOW)

衛星障害：安全モード、運用一時停止（4）

- 10月26日、SMART-1の上記の障害と同じ時刻に、ESAのXMM衛星とINTEGRAL衛星の2つの衛星の搭載放射線検出器に太陽フレアと見られる非常に多くの放射線を検知した。（民間の衛星アノマリ・データベース（SAT-ND））
- 10月26日、INTEGRAL衛星は、放射線量上昇により安全モードに入った。（民間の衛星アノマリ・データベース（SAT-ND））

衛星障害：安全モード、運用一時停止（5）

- 10月26日、X線天文衛星CHANDRA衛星が高レベルの放射線を受け、再び観測を自動的に停止、その後に復帰した。
- 10月28日、ISSのクルーには“radiation contingency” (Flight Rule B14-7による) が通告された。クルーには放射線量の高い場所を通過する軌道パスの時間帯が通知され、放射線シールド効果の高い場所：ヴェズダ(ロシアSM)の後方と、デスティニ(USLab)のTeSS(Temporary Sleep Station)にいるよう指示された。

(出典：ISS On-Orbit Status)

衛星障害：安全モード、運用一時停止（6）

- 10月28日、NASAの地球科学ミッション・オフィスは、レベル5の磁気嵐予測に基づき、AQUA、LandSat、TERRA、TOMS、TRMMの5衛星に対し、安全状態にするよう指示を出した。
- 10月28日19時54分UT に上記の連絡を受け、AQUA搭載の日本の改良型高性能マイクロ波放射計AMSR-Eは、10月29日15時58分UTにCMDで安全モード（スリープモード：マイクロ波受信機電源OFF）にした。復帰は11月6日に行った。

衛星障害：安全モード、運用一時停止（7）

- 10月28日、米国軍用気象衛星DMSP衛星F-16号に搭載した電子・イオン観測装置SSIES (Special Sensor for Ions and Electrons) でデータが一時取れなくなった。11月3日にもデータ欠損あり。改良型マイクロ波観測装置AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit-A1) の発信器が永久故障したので、冗長系に切り替えた。
- 10月28日、太陽観測衛星SOHO衛星(L1定点)の搭載コロナ観測装置CDS (Coronal Diagnostic Spectrometer) を、コマンドで安全モードに切り替えた。そのため新しい太陽フレアによるコロナ質量放出(CME)現象の検出が困難な状態。(10月28日から30日の3日間)

衛星障害：安全モード、運用一時停止（8）

- 10月28日、火星探査機マース・オデッセイが安全モードに入った。また搭載した放射線観測装置MARIE (Martian Radiation Environment Experiment) の温度計で赤の異常警報となったので電源をOFFした。10月29日にダウンロード中にメモリエラーを生じたが、10月31日に再起動して修正した (cold reboot)。
- 10月28日、科学衛星Microwave Anisotropy Probe衛星は、スターセンサーがリセットされ、冗長系に切り替わった。その後主系に復帰。

衛星障害：安全モード、運用一時停止（9）

- 10月28日、赤外天文衛星SIRTF衛星は、高エネルギー陽子の到来に対し、科学ミッション機器の実験を停止し、地球指向モードにした。その後4日間運用を停止した。
- 10月29日、科学衛星CHIPS衛星の搭載コンピュータがオフラインになり、18時間、衛星と接触が取れなくなった。接触が取れた時、衛星の姿勢はタンブルしていた。オフライン後の27時間後に、復帰に成功した。

衛星障害：安全モード、運用一時停止(10)

- 10月30日、FedSat衛星のデータが極域付近を通過中に磁場が大きく変化したため、磁気センサーが誤作動して姿勢が90度傾く擾乱を受けた。
- 10月28日-30日、先端型組成探査機ACE衛星と太陽風観測衛星WINDS衛星(L1定点)のプラズマ計測が停止した。

衛星障害：安全モード、運用一時停止(11)

- 10月28日-30日、米国静止気象衛星 GOES衛星の電子計測値が飽和した。(これは大きなフレアでは毎回起こっている)
- 10月28日-30日、ISS は被害を受けやすいロボットアームも停止させた。

衛星障害：安全モード、運用一時停止(12)

- 10月29日、科学衛星X-ray Timing Explorer衛星は、搭載の放射線比例計数管(PCA)が高電圧を感知した。

全天スカイ・モニタ装置は自動的にシャットダウンした。10月30日に前述の2つの装置は復帰したが、PCAは再びシャットダウンした。PCAの再復帰は、11月に遅延する予定。

衛星障害：安全モード、運用一時停止(13)

- 10月28日-30日、科学衛星GALEX衛星に搭載した2つの紫外線実験装置の検出器が高電圧に帯電したため、電源OFFにした。その検出器は11月過ぎまでOFFのままにする。
- 10月28日-30日、プラズマ観測衛星POLAR衛星のデスパン・プラットフォームが3回ロックから外れた(out of lock).しかし、3回とも自動的に復帰した。

衛星障害：安全モード、運用一時停止(14)

- 10月30日、ISS：高エネルギーの太陽フレアにより、MSSはフライトルール(FR)に基づいて主系統がパワーダウンされ、冗長系のキープアライブ(KA)電力のみON状態にされることが要求された。しかし、FRではSSRMSとMBSの熱的な制約も規定しており、これの方が故障に直結するため優先されることになる。(すなわち、1系統のみのKAコンフィギュレーションでヒータが故障すれば、低温リミットを越え、損傷する可能性がある)このため、ISSが太陽プロトンの影響を受けない期間は2系統でKA電力を供給し、放射線レベルが高いエリアを周回する期間は1系統でKA電力を供給することになった。

(出典：ISS On-Orbit Status)

衛星障害：安全モード、運用一時停止(15)

- 10月30日、ISS：太陽活動の活発化により、ISSが受ける抵抗も増大し、軌道の降下量が増加している。
10/30は1日で150m高度が低下。
1週間前は95m/dayだったため、1.5倍に増大している。

(出典：ISS On-Orbit Status)

衛星障害：安全モード、運用一時停止(16)

- 10月28-30日、米国民間の放送衛星会社に聞いたところ、衛星管制センター職員は放送を維持するために太陽フレア関連の多くの問題点に直面している。特にそのうち2-3個の静止衛星で、地球磁気圏横断(magnetopause crossing)イベントによって、姿勢制御をマニュアル制御に切り替え、18時間から24時間の間隔で制御を行わざるを得ない状況にある。(J. Allenからの私信)
- 11月2日、X線天文衛星CHANDRA衛星が高レベルの放射線を受け、再び観測を自動的に停止、観測再開は数日間遅れる予定。

衛星障害：安全モード、運用一時停止(17)

- 11月4日、欧州宇宙機関(ESA)は月探査機スマート-1 (SMART-1)のステータスを発表し、同探査機がこれまでにイオンエンジンが8回自動停止したことを明らかにした。ESAは原因を調査中だが、ほとんどが遠地点付近を通過中に起こっており、太陽活動による放射線が電子ユニットに影響を与えたものと考えられている。

太陽活動の影響でメインコンピュータが数回リセットされ、バックアップコンピュータに切り替えられたり、スターセンサの光学ヘッド部分の温度が上昇するなどの異常があった。スマート1は現在78周目の地球周回軌道を周回中で、イオンエンジンは合計380時間以上燃焼を続け、約6kgのキセノン燃料を消費した。

衛星障害：安全モード、運用一時停止(18)

- 11月6日、POLAR衛星の搭載機器TIDE (Thermal Ion Dynamics Experiment) がリセットし、高電圧電源が供給不能になった。しかし、24時間以内に復帰した。
- 11月6日、火星探査機マース・オデッセイが安全モードから復帰した。

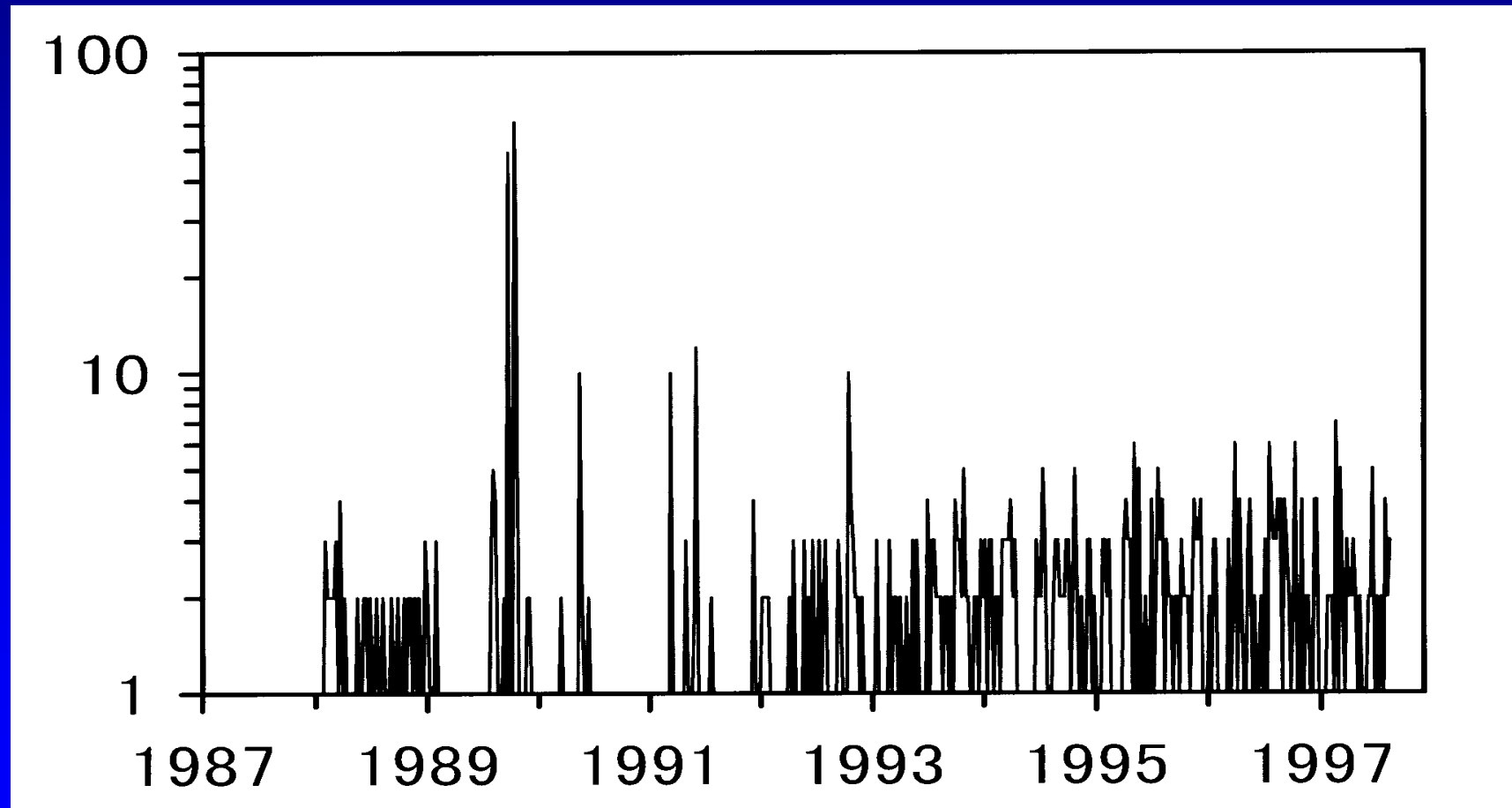
衛星障害：衛星誤動作(SEU)(1)

- 米国静止気象衛星GOES -9号とGOES-10号で、高い発生確率のシングルイベントによるビット反転(SEU:Single Event Upset)を生じた(10月24日)。
- 太陽観測衛星RHESSI衛星は、搭載コンピュータが自然に停止した(10月25日)。

衛星障害：衛星誤動作(SEU)(2)

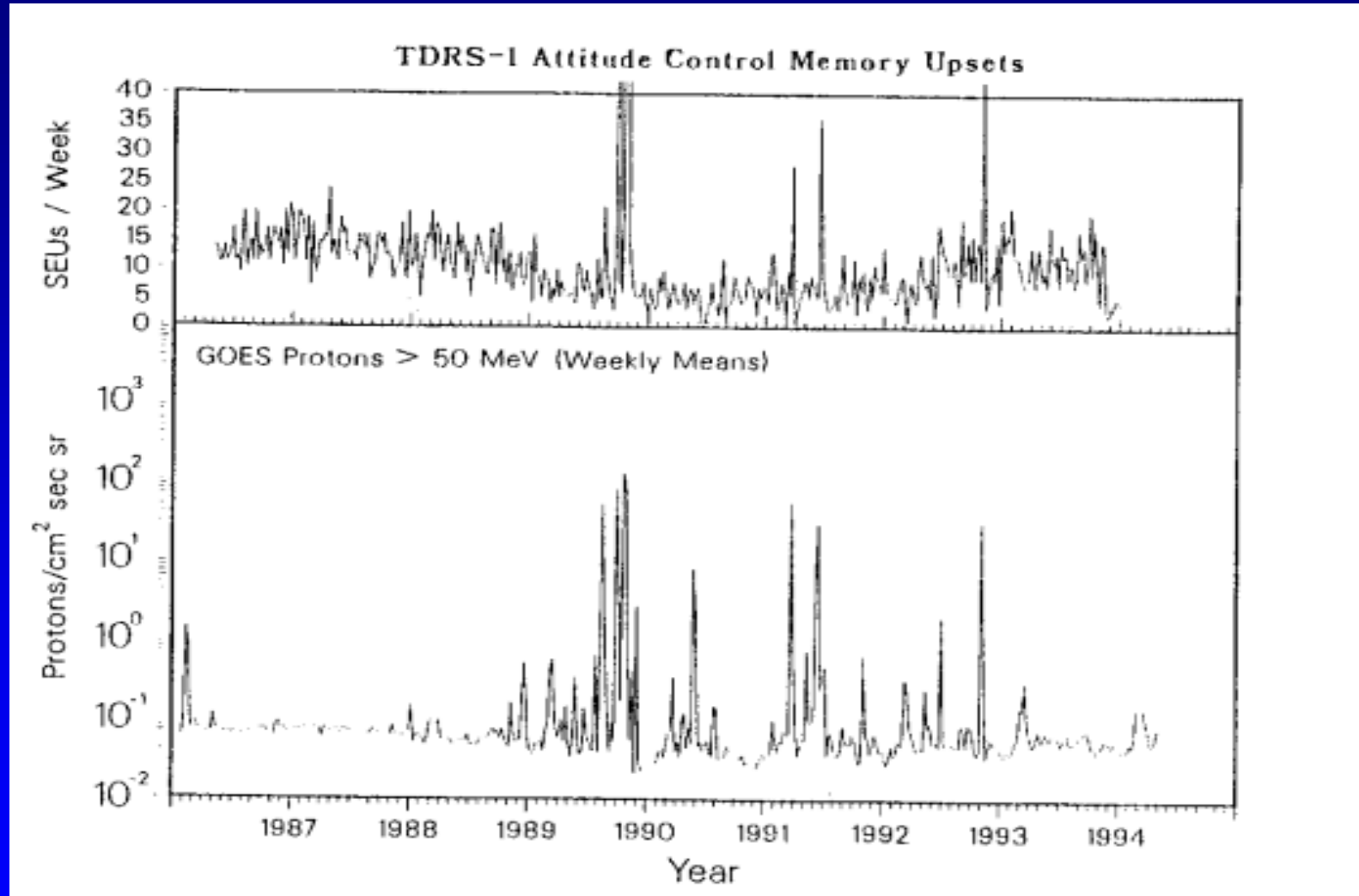
- 太陽観測衛星RHESSI衛星が搭載コンピュータの一時停止と回復(reset)が2回あった(17:40、03:32)(10月28日)。
- 科学衛星CLUSTER衛星4機のうち、いくつかは、搭載プロセッサ がリセットされたが、復帰した(10月28日-30日)。
- μ LabSat-1衛星で、通常の約4倍～6倍の発生頻度のSEUを発見(10月30日)。

Single Event Latchup count / week for 64-kbit SRAM (ETS-V、GEO)



(IEEE, 1991, 1998, T. Goka, et. al.)

SEU /week (TDRS-1) & Proton>50MeV (GOES)



(M.A. Shea & D.F. Smart, STPW' 96)

(参考) 航空機と地上の障害例(1)

- 10月24日、北極領域を通る航空機は、航路ルートを変更した。理由は磁気嵐によるHF/VHF帯の通信障害回避のため。
- 10月28日-30日、FAAは、初めて25kfeet以上の高度を飛行する航空機乗客が受ける放射線障害警報を発令した。(1989年9月29-30日の歴史的太陽フレアでは、コンコルドのみに警報が出た)
- 10月30日、スエーデンのMalmoで電力送電線の障害があった。

(参考) 航空機と地上の障害例(2)

- 10月28日-30日、ニューヨークとウィスコンシンで電力送電線に高電流が流れた。
- 10月28日-30日、航空機の北緯57度以上の航路ルートを禁止したので、航路変更した。いくつかの米国航空の路線はルート変更した。英国の大西洋航路は南に航路変更した。
- 10月30日、高緯度(主に北極圏)を航行中の航空機の無線に異常が報告されているが、この空域の民間機を管制するNav Canadaでは、「影響は全般的に航空管制上問題のない範囲」と述べている。

(参考) 航空機と地上の障害例(3)

- 10月28日-30日、CONUSのWAASサービスは中断された。高緯度地方のGPS レシーバは停電した。
- 10月28日-30日、軍用通信HF/UHF SATCOM,OTH,などが障害を受けた。
- 10月28日-30日、ニューファンドランド島のLoran C システムが磁気嵐の干渉を受けた。

Satellite Anomalies: 14-16 July 2000

Proton Event & Geomagnetic Storm, $A_p^* = 192$

- **ASCA (Advanced Satellite for Cosmology and Astrophysics) – lost attitude fix resulting in power loss, satellite lost**
- **SOHO (also YOHKOH & TRACE) – High energy protons obscure solar imagery**
- **GEO and LEO Satellites – S/C orientation problems during Solar proton event**
- **GEO Satellites lost ~0.1 amp output from solar arrays**

(J.H.Allen)

まとめ

- 太陽フレア時の衛星障害と相関があるのは、陽子のイベントであり、障害件数は陽子のフラックス量、フルエンس量にほぼ比例する
- 低エネルギー陽子は、太陽電池の劣化、太陽センサやスターセンサなどのノイズで障害を与える
- 高エネルギー陽子(>約50MeV)は、SEUを発生
- 今回・過去の多くの衛星の障害例が、1989年3月(X15)、8月(X2,X20)、9月(X9)、10月(X13)、2000年の7月(X5.7)、今回10月末(x17)などから、Xクラス以上で顕著。JAXAは、Xクラス以上で衛星運用警報を出している。