

ひのとり

—その概要と軟X線輝線観測について—

田中捷雄*

1. ひのとりの打上げ

1981年2月21日東京大学鹿児島宇宙空間観測所から太陽X線フレア観測衛星 ASTRO-A が M3S 型ロケット2号機によって打上げられ予定の軌道にのせられた。ASTRO-A は東京大学宇宙航空研究所(現在の宇宙科学研究所)が開発した第7号科学衛星で天文観測衛星としてははくちょうに続く第2番目のものである。ASTRO-A は実験班により「火の鳥」と命名され2月26日の高圧電源投入後順調にフレア観測を続けている。この衛星は1979年~81年の太陽活動極大期に多発するフレアの精密観測を目的として約7年前より開発が始められ東大宇宙研に於てプロトモデルフライトモデルの設計、製作、総合テストが実施され今年予定通り打上げられたものである。これらの作業は東大宇宙研, 東京天文台, 東大理, 東大宇宙線研, 立教大理, 理研, 東北大理, 阪大理, 名大理等の全国の広範な研究者の協力のもとに進められた。

現在の太陽活動極大期にそれまで主として米国に於て単発的になされていたスペースからのフレア観測を総合的に実施出来る強力な衛星を打上げようという企ては日本とアメリカで同時に始ったといつてよい。このために米国 NASA は SMM (Solar Maximum Mission) と呼ばれる重さ2トンの大型衛星を1980年2月に打上げた。SMM と一年後に打上げられる予定のひのとりとの日米協同観測の準備が進められ世界的に注目されていたのだが、SMM は打上げ後10ヶ月にして故障が生じ太陽の活動域に衛星を向けられなくなりごく一部を除いて観測不能になってしまった。ひのとりは SMM に比べて重量(188 kg)が格段に小さいにもかかわらず日本独自の方法をいくつか採用して機能に於て一部 SMM を凌いでおり現在国際的な太陽極大期観測プロジェクトに重要な役割を果たしている。

2. ひのとりによるフレア観測の概要

フレアは星のコロナで起る磁気プラズマの爆発現象として最も詳しく調べる事が出来るためその機構解明に大きな努力が払われてきた。太陽活動の源泉は太陽内部に於る磁場と自転, 対流などの流れの相互作用であるがエネルギーを注入された磁場は密度の高い太陽内部から低密度のコロナ中に出現した後突発的にフレアとしてエネ

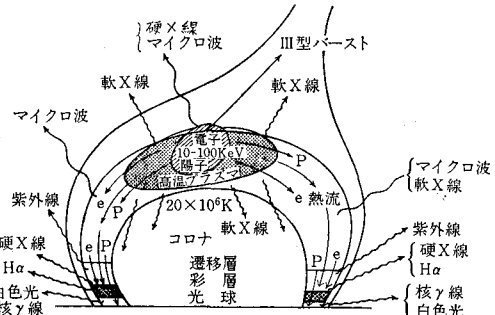


図1 現在提案されているフレアループ中でのエネルギー解放と放射の関連図

- ルギーを解放する。フレアでは数分~30分の間に最大 10^{32} エルグのエネルギーが高エネルギー電子, 陽子, 高温プラズマの形で解放されガンマ線, X線, 紫外線, 可視光, 電波と広範囲の電磁波や粒子流, 衝撃波として放射される。スカイラブ実験の軟X線太陽像撮影により明らかになったようにフレアの姿は磁力管を形どったループ状をしており H_{α} でみえるフレアはループの根元に当る。(現在提案されている解放エネルギーと放射の関連を図1に示す)。しかしこのフレアの姿はエネルギー解放後のもので初めにループのどこでどんな機構によりエネルギーが解放されるかといった基本的な問題は未解決に等しい。ひのとりはこの問題に挑戦するため次のような観測機器を搭載している。(カッコ内は略称と担当機関名)
- (A) フレアX線2次元像観測器 (SXT, 宇宙研, 東京天文台, 東大理, 阪大理)
 - (B) 軟X線輝線スペクトル観測器 (SOX, 東京天文台)
 - (C) 硬X線スペクトル観測器 (HXM, 宇宙研, 東京天文台, 東大理, 阪大理)
 - (D) 軟X線スペクトル観測器 (FLM, 宇宙研)
 - (E) ガンマ線観測器 (SGR, 東大宇宙線研, 立教大理)
 - (F) 粒子線観測器 (PXM, 理研)
 - (G) プラズマ電子密度測定器 (IMP, 東北大理)
 - (H) プラズマ電子温度測定器 (TEL, 宇宙研)

このうち純粋にフレア観測を旨とするのは (A)~(E) であり各機器の性能等の概略を表1にまとめた。ひのとりはいつも太陽全面をみているが SXT では回転すだれコーリメータの技術による像合成により真の硬X線領域で初めてフレア像を得る事が出来る。特に硬X線がフレアループの頂上当りから出るかループの両端のつけ根から発せられるかという重要な問題に答えを出す。SOX はいわゆる

* 東京天文台 Kaisuo Tanaka: Hinotori (ASTRO-A)

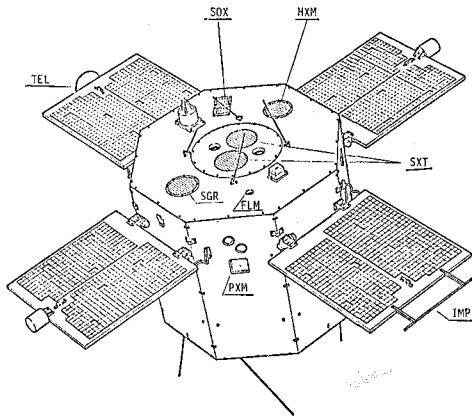


図2 ひの通りの概観図と観測機器の配置

る水晶スペクトロメータであるが衛星の回転を用いて波長走査を行うユニークな方法により時間、波長分解能を上げ高温プラズマから放射される高電離鉄イオンの輝線の精密観測を通じて加熱の過程をさぐる。HXMとFLMは軟X線から硬X線に見る広範囲のスペクトルの速い変化を同時に調べる事が出来る。SGRは高エネルギー陽子の加速に伴って発生するガンマ線を今までよりよい時間分解能でとらえる事が出来る。

ひのとりは図2に示すように対面距離92.8cm、高さ81.5cmの八角柱状をしており内部は2段デッキ構造をしており中央にはSXTが収められたスラストチューブが通っている。衛星は打上げ後一周目にヨーヨーデスピナと4枚の太陽電池パネルを展開しスピンを毎秒2.2回から毎分4.3回に低下させた。スピンの数とスピン軸方向の制御は内蔵した2つのコイルで作られる磁気モーメントと地磁気の間を生じるトルクを利用して行われ、衛星の方向は常に太陽中心から $1.2^\circ \pm 0.5^\circ$ 離れた所を向くように自動制御されている。このオフセット角はSXT, SOXの観測条件から決められた。衛星はデータレコーダの回転等により1分程度の振幅の首振運動を生じるがこれはシリコンオイルを封入した円環型ニュートンダンパーにより $20''$ 以下の振幅に減衰される。各機器からのフレアデータは衛星内の中央データ制御装置(DP)により処理編集され実時間データとしてテレメータ系へ送られ又記録データとしてデータレコーダに送られるようになっている。データレコーダは10メガビットの容量を有し低速モード(1024bps)の時には160分のデータを、又高速モード(8192bps)の時には20分のデータを記録出来る。DPの機能には色々あるが重要なものとしてフレアの自動判定がある。フレア判定には硬X線観測器(HXM)と軟X線フレアモニタ(FLM)、主として前者が使用され検出カウントが設定値以上になると自動的に低速から高速に記録スピードが変り約20分間のフレ

アデータを記録してデータレコーダは停止する。放射能帯に入るとフレアからのX線増加と区別がつかないカウントの増加が起るが、これを見分けるには太陽と直角の方向を監視している粒子線観測器(PXM)が使われる。PXMのカウントがHXMと同時に増大する時には放射能帯に入ったものと見なしてHXMから出されたフレアフラッグを解除するわけである。このような判定を正確に行うには設定レベルの組合せ(コマンドにより16通りに切り換えられる)が大事で打上後の2~3週間の経験から最適の組合せが求められた。衛星が内之浦でみえるような軌道を飛ぶ時は日本の丁度裏側のブラジル上空の放射能に必ずといってよい程突入し一周96分の内正味太陽をみる時間は40分程しかない。この時間に一個以上フレアが起る確率はわずかであるが衛星が日本から見えなくなる軌道をとる時間は1日に15時間ありその間にはいくつものフレアが起る可能性がある。データレコーダの容量は一個以上のフレアを記録するのは不十分であるので、大きなフレアを逃がさないために既にフレアが記録されている、大きなフレアに書き換え保存出来る機能をもっている。

ひのとりは7月20日までに地球を2000周し、その間200個以上のフレアを観測した。これらの約6割はフレア判定の網の目をくぐりぬけた小フレアで低速モードで記録されている。ひの通りのフレア取得率をみると、この期間に起きたすべてのフレアのほぼ8%になるが大きなフレアに限ってみるとX線のクラスでMクラス(1-8Åの帯域で $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{ Wm}^{-2}$)では20%、Xクラス(同じく 10^{-4} Wm^{-2} 以上)では60%を超える。重要度2以上のフレアも4ヶ月間に13個記録した。ひのとりは大きなフレアについては衛星の夜のフェーズや放射能帯に入る時を除いてほとんど取り逃がしてない事が分った。SMMと比べてみるとSMMではフレアを得るのに衛星を特定の活動域に向ける必要がありフレアの実取得率は大変おちる。3ヶ月間にひのとりが得たフレア数はSMMの得た全フレア数に匹敵するくらいである。フレアのデータは内之浦でただちに整理され、フレアリストに記入されたうえ図3のような時間変化プロットが作製される。このプロットは4つの硬、軟X線広帯域の1秒毎の強度変化を示すものでリストと共に全国の地上観測所に配布され電波等のデータと比較される。フレアハンティングやプロット等の初歩的な作業は内之浦のミニコンピュータ(U1500)で行われるが詳しい解析はMTをコピーして宇宙研(M180)や東京天文台(UNIVAC)等の大型計算機で実施される。衛星データ取得作業は2人一組で内之浦に出向きコマンド操作等を定期的に実施せねばならず大勢の人員が必要となるが衛星製作に直接関係のない多くの研究者や技術者の協力が衛星の運用に大

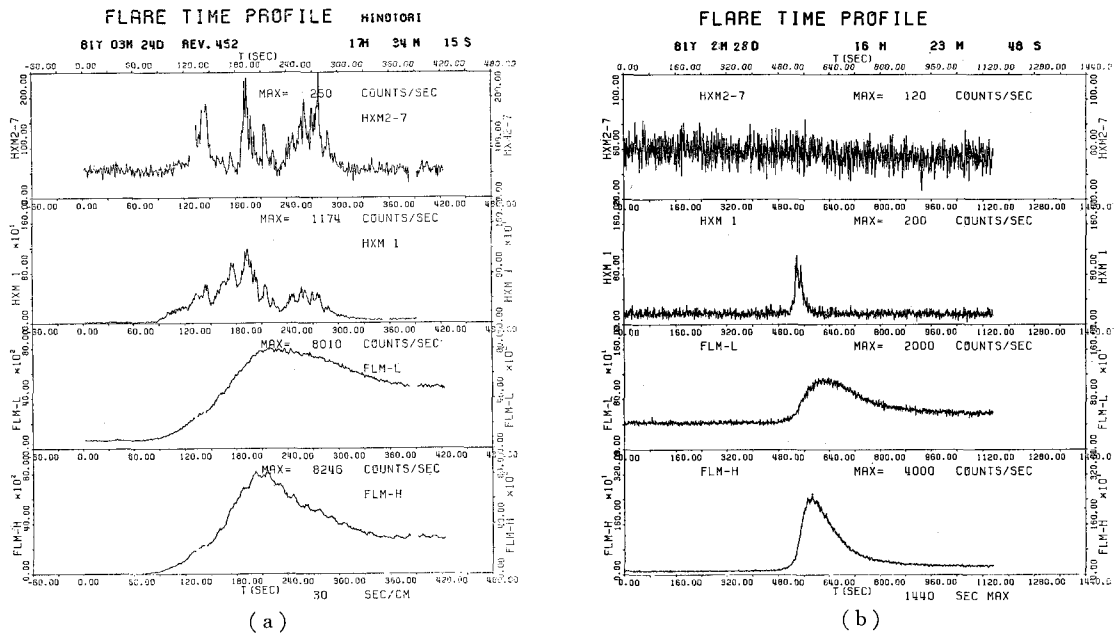


図 3 a, b フレアの時間変化プロット. 上から HXM 2-7 (40 keV 以上), HXM-1 (17-40 keV), FLML (1-5 keV), FLMH (5-12 keV)

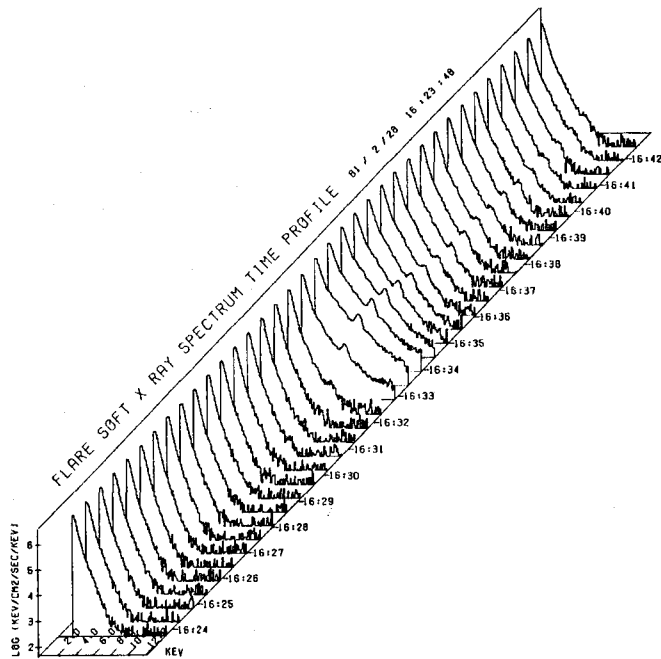


図 4 図 3 a のフレアにおける 1-12 keV 領域のエネルギースペクトルの時間変化 (FLM)

きな力添えとなっている。

こうして得られたフレアは規模、時間変化等千差万別である。図 3 a, 3 b は夫々単純なスパイク状のフレアと複雑な構造をみせるフレアの典型であるが、一般に硬 X 線では 1 秒程度の速い変化がゆっくりとした強度の増減に必ずと云って良い程のっているのに対し軟 X 線では速

い変化はめったにみられない。ゆるやかな成分の増大は軟 X 線でやや先行して見られるようである。図 3 a のフレアについて FLM で得られた 1-12 keV のスペクトルの時間変化を図 4 に示す。初めに 200 万度の熱的スペクトルを示していたのがフレアの強度の増加に従い勾配のゆるやかな高温のスペクトルに変わり又元に戻る様子が

歴然と分る。この温度の上昇に伴い 6.7 keV (1.85 Å) の鉄の輝線がはっきり盛り上るのが分る。FLM に使用された蛍光比例計数管は従来の比例計数管に比べて分解能が 2 倍以上秀れており鉄の他、硅素、アルゴン、カルシウム、チタン、ニッケルの水素様、ヘリウム様イオンの放射する輝線を分離するのに成功した。この他ガンマ線観測器は 6 月までに 6 個のフレアで最大 7 MeV までのガンマ線の増加を記録した。各機器の詳しい観測結果は後にゆずるとして次に軟 X 線輝線スペクトル観測器について詳述する。

3. 軟 X 線輝線スペクトルの観測

軟 X 線輝線スペクトル観測器 (SOX) は水晶板によるブラッグ反射を用いて 1.8 Å 付近の鉄イオンの放射する輝線スペクトルを精密に測定する分光装置で図 5 のような 2 組みの固定結晶板と検出器 (No. 1 シンチレーションカウンタ) からなる。結晶分光器による波長走査の原理はブラッグ反射の条件: $\lambda = 2d \sin \theta$ (d は結晶の格子間隔) を満たすように入射角 (反射角に等しい) θ を変化させる事にある。従来の衛星搭載の分光器はいわゆるゴニオメータ方式 (米国) といって結晶を機械的に動かして入射角を変化させる方法か又は衛星自体をふって入射角を変える方法 (ソ連) をとっていたが、これでは波長走査に時間がかかり数分に一回のスペクトルしか得られず速い変化を示すフレアの立ち上りをとらえるのに適さなかった。高温プラズマの加熱機構を明らかにするには数秒程度の時間分解能が必要とされる。現太陽極大期に向けて時間分解能の向上に新しい工夫がなされ SMM では彎曲型結晶 (Ge) と位置検出型比例計数管を組合わ

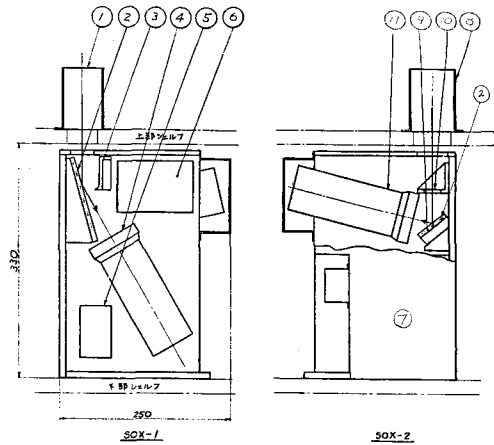


図 5 軟 X 線輝線スペクトル観測器
①, ⑧ フード, ② 分光結晶 (水晶), ④, ⑪ シンチレーション検出器, ⑤ プリアンプ, ⑥ 高圧電源, ⑦ 電気回路

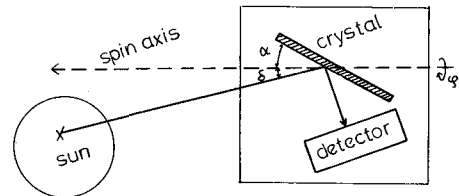


図 6 スピンによる波長走査の原理
 $\lambda = 2d \sin \theta = 2d(\sin \alpha \cos \delta + \sin \delta \cos \alpha \cos \varphi)$
 α は結晶固定角, φ はスピン回転角

せる事により結晶を動かさずにスペクトルを得る方法を採用した。一方ひのとりでは衛星のスムーズな自転を利用して走査する方法を考案した。衛星の自転軸を微小角

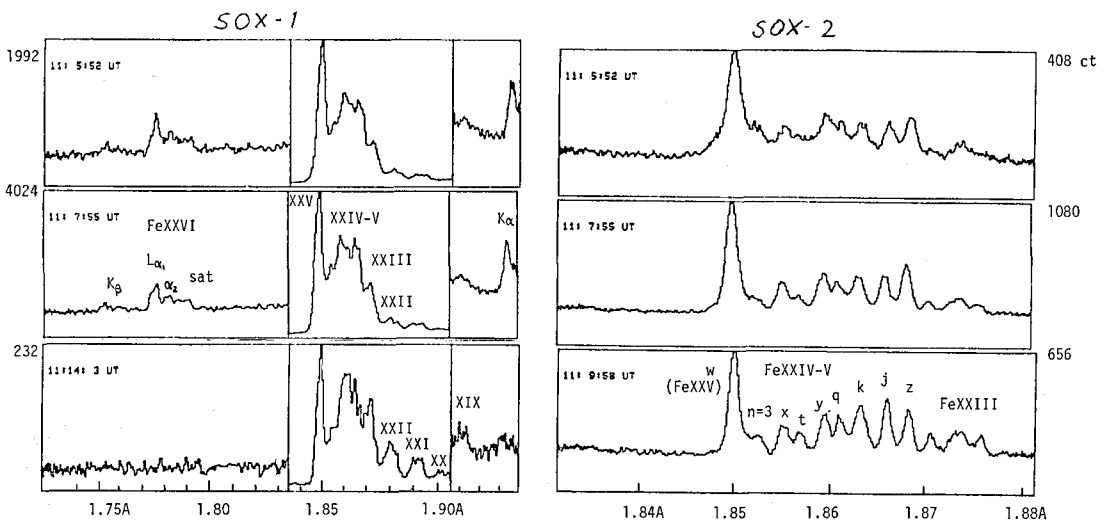


図 7 SOX-1 (左), SOX-2 (右) で観測されたスペクトル例
上からフレア初期, ピーク時, 末期のスペクトル

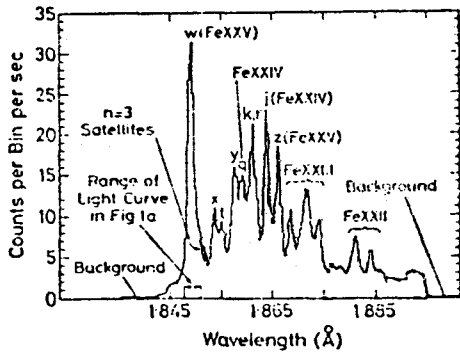


図 8 SMM-XRP (BCS) で得られたスペクトル例

(δ) 太陽方向からオフセットしておくでフレアからの X 線の固定結晶に対する入射角 (θ) は自転 (φ) に伴い周期的に変化する (図 6). 走査波長範囲は結晶の格子間隔とオフセット角で決り波長分解能は一定のサンプル時間間隔 (15.6 ms) に対応して決る. 衛星のスピンの間に互いに逆向きに 2 回波長走査が行われるので時間分解能はスピン周期の半分 (7~8 秒) になる. SMM の方法は時間分解能がサンプル間隔まで短縮出来る一方特定の波長については彎曲結晶のごく一部しか使わないため有効面積が小さくなり有効時間分解能は 10 秒程度となる. 更に彎曲させる際生じるひずみにより波長分解能に少し難がある. ひとりの方法は 1980 年 2 月に打上げられた試験衛星「たんせい 4 号」に積んだ LiF 結晶分光器によりテストされその有効性が確められている.

ひとりの SOX が観測したスペクトル例を図 7 に示す. 比較のため, SMM で得られたスペクトルを図 8 に示した. SOX-1 は 2~3 mA の分解能で 1.72~1.95 Å の広波長域を又 SOX-2 は 0.2 mA の分解能で 1.83~1.89 Å の狭波長域を走査する. この波長域には高電離鉄イオンの放射する輝線が多数 (理論的に 200 本以上) ほぼ電離度順に分布しており 1~5 千万度のプラズマの診断に最適である. この領域は核融合プラズマの分光診断にも近年使われるようになった. SOX-1 にみられるように 1.92 Å の Fe XIX (18 階電離) の輝線から順に短波長方向に次第に強い線が並び 1.85 Å の Fe XXV (ヘリウム様) の共鳴線でピークに達する. 更に短波長側の 1.78~1.80 Å には Fe XXVI (水素様) のライマン α 線とその衛星線 (satellites) がみられる. このうち Fe XIX~Fe XXIII はフレア末期の冷却期で次第に強くなる. 又 Fe XXVI は高温のフレアでのみみられる. 1.936, 1.940 Å には K_{α} 線が, 1.75 Å には K_{β} 線がみられるが, これらは低温で存在する鉄イオン特有の輝線である. これらが 1000 万度以上の高温でのみ放射される輝線と混在するのは一見不思議であるがフレアの高温部からの X 線が 1 万度の彩層を照らし光電効果により

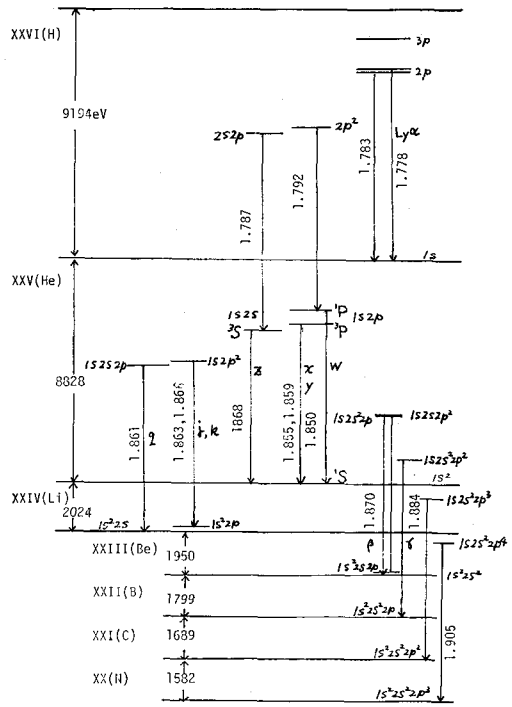


図 9 Fe XX-Fe XXVI のグロトリアン図

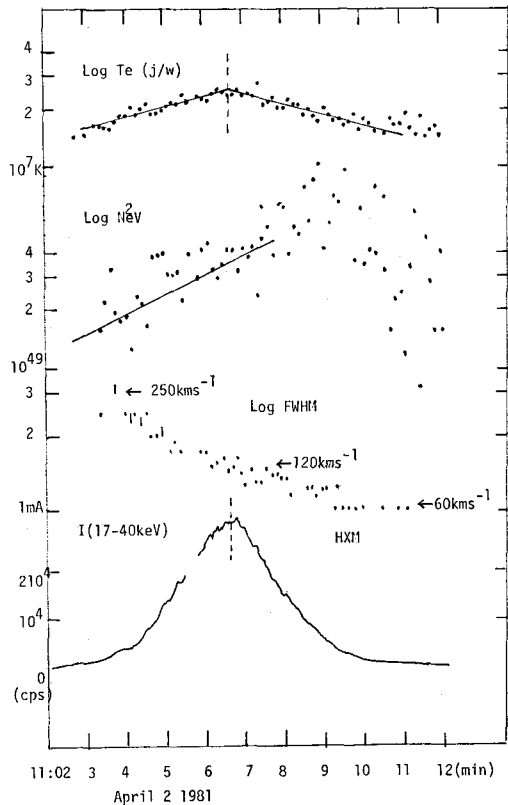


図 10 1981 年 4 月 2 日のフレアの時間変化
上から電子測度, エミッションメジャー, 輝線幅, 硬 X 線フラックス

81 YR04 MN02 DY SOX2 SPECTRUM AAP0611

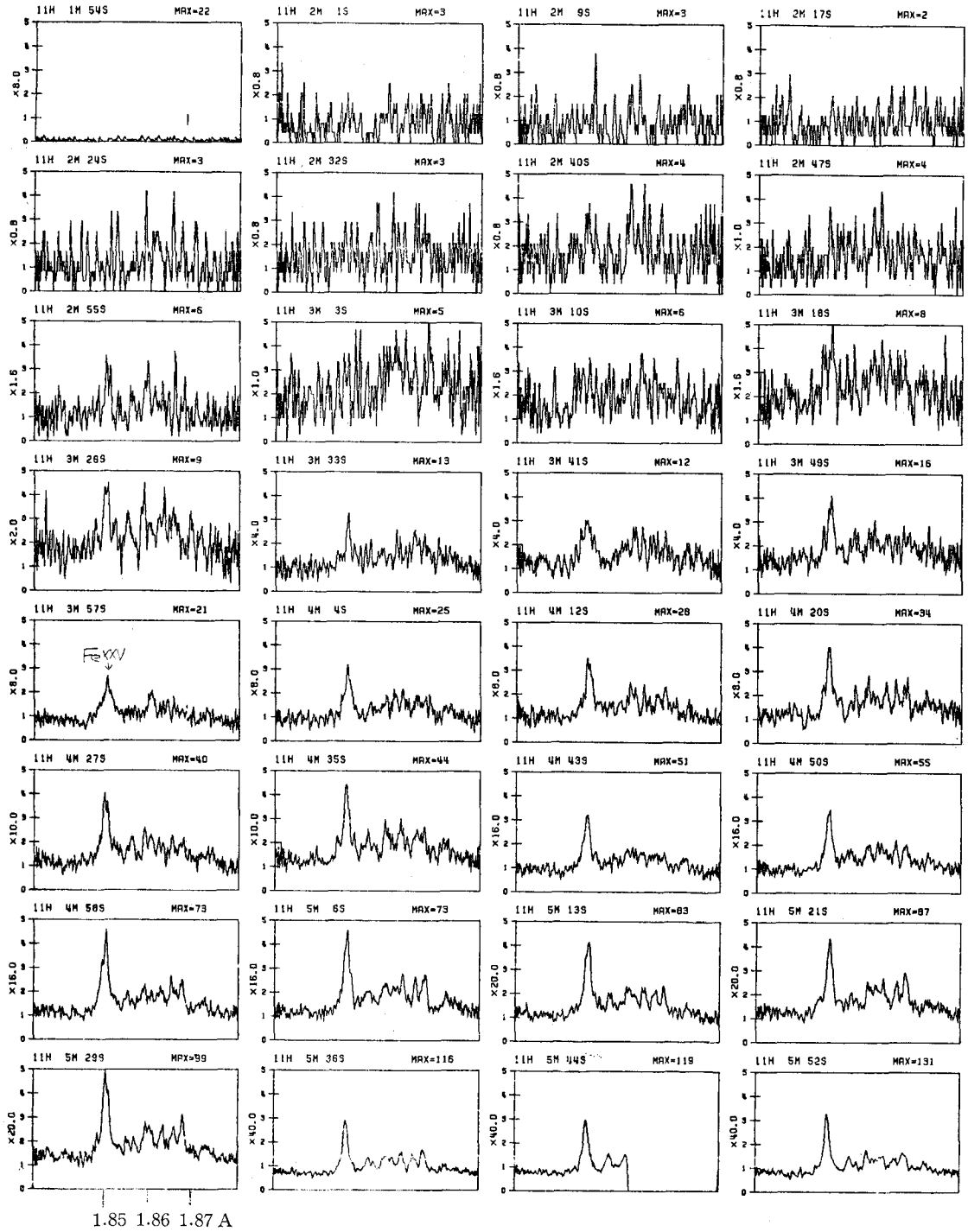
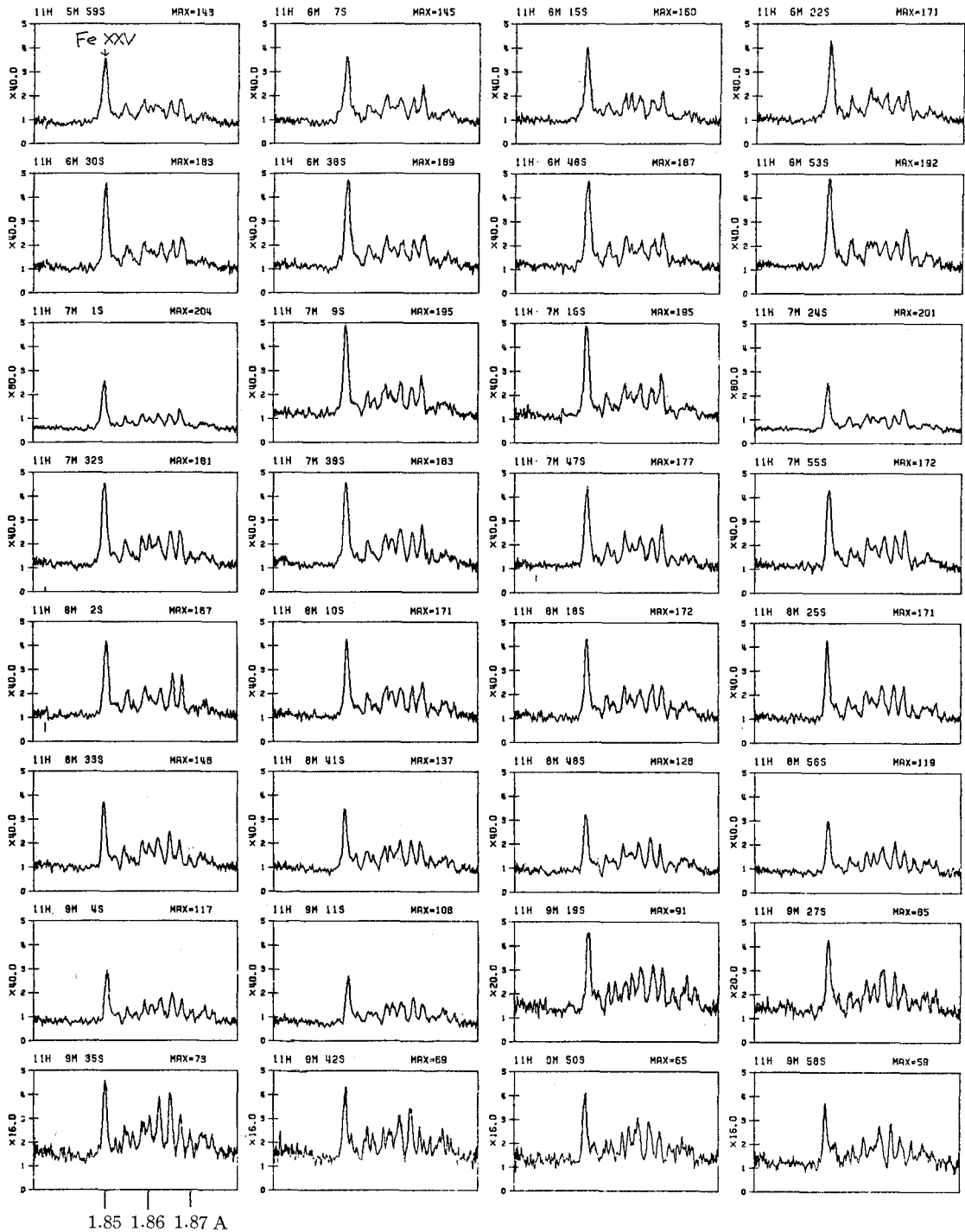


図 11 軟 X 線輝線スペクトル観測器 (SOX-2) で得られた 1.83-1.88 Å のスペクトルの時間変化。1981 年 4 月に太い。

81 YR04 MN02 DY

S0X2 SPECTRUM

ARP0611



2日 11:1:54 UT~11:09:58 UT のフレアの中の 8 秒毎のプロット、フレアの初期の輝線の幅 (Fe XXV) が異常

Fe II の K 殻の電離を起した結果放射されると考えると理解できる。太陽縁で起きたフレア（例えば 4 月 27 日）で $K_{\alpha, \beta}$ 線がみられない事はこの考えを支持している。SOX-2 では Fe XXII~XXV の領域だけをとり出して結晶分光器としては今までの最高の分解能で走査している。SMM のスペクトルと比較して 1.865 Å 付近の盛り上りが少なくブレンドが少い事が分る。1.85~1.87 Å の波長域に分解される各輝線はヘリウムと同じ電子構造をもつ 24 階電離イオンの共鳴線 (w) や禁制線 (z), inter-combination line (x, y) や衛星線でグロトリアン図 (図 9) の中の各遷移波長に同定される。衛星線というのはヘリウムより一つ外殻電子の多いリシウム様イオンの重励起状態 (doubly excited state) からの遷移で放射されるもので、この励起状態はその準位がリシウムの電離準位よりも高い事からヘリウム様イオンからの 2 電子再結合 (di-electronic recombination) により実現され易い。従って衛星線 (特に j 線) と共鳴線 (w) は同じヘリウム様イオンから発する事になりその強度化は電離とは無関係に電子温度を正確に決める事が出来る。一方衛星線の中には再結合率が小さくリシウム様イオンの内殻電子の衝突励起により重励起状態に持ち上げられてから放射されるものもある。 q 線はこの性質を持ち、その共鳴線との比は電離温度を与える。この 2 つの温度を比べればプラズマの電離が平衡状態からずれているかどうか判定出来る。このような各輝線の性質は現在英仏米ソで詳しい計算により調べられており 2000 万度のプラズマを 100

万度の精度で議論出来るまでになっている。

SOX の解析はまだ一部しか進んでいないが、次の 2 種類のスペクトルの変化がみつがっている。

(a) **速いスペクトルの変化** 短時間に急激な強度の上昇を示すフレア (例えば 4 月 4 日のフレアでは 30 秒間に 3 桁半のフラックスの上昇がみられた) のごく初期にはスペクトルが刻々と変るのがみつがった。図 10 のフレア (4 月 4 日) には 7 秒毎に 500 万度の温度の増減がみられる。この変化は SOX-1, 2 共通に検出され真の変化と考えられる。このように立ち上りの速いフレアでは一般に共鳴線の強度の時間増加率が硬 X 線の強度によく対応するという関係がある。これらの事は高温プラズマがゆっくり加熱されるのではなく硬 X 線を出す高エネルギー電子と一諸に数秒の間に作られ加算されていくという考えを支持するように思える。高エネルギー電子はすぐエネルギーを失うが、高温プラズマは仲々冷えないので加算的に増えていくわけである。水素様イオンの強い輝線 (1.792 Å) が鋭い硬 X 線のスパイクと呼応して一瞬だけ (7 秒間) 出現したという例もみつがっている。フレアの初期に輝線が強く偏光している兆候もあるが結論を出すには更に詳しい解析が必要である。

(b) **ゆっくりしたスペクトルの変化** 図 8 や図 11 にみられるように一般にフレアの初期にはスペクトル線の幅が異常に太く 2000 万度プラズマが 200~300 km/s の乱流状態の基に作られる事が分る。この時期には同じ速度のガスの上昇運動もみられる。乱流は輝線や硬 X 線

表 1 ひのとり搭載のフレア観測機器の性能

| 機器名 | 測定方法 (検出器) | エネルギー域 | エネルギー分解能 | 時間分解能 | 空間分解能 |
|-----|---|---|---|--------------------------------------|-------|
| SGR | (Cs I フォスウィッチシンチレーションカウンター) | 240-7000 keV | 10% (662 keV) | 2 s | 全面 |
| SXT | 回転すだれコリメーター (Na I シンチレーションカウンター) | 17- 60 keV and/or 8- 10 keV | — | 3-4 s | ~10" |
| HXM | (Na I シンチレーションカウンター) | 17- 340 keV | 7 チャネル | 7.8 ms (1 チャネル) 125 ms (2-7 チャネル) | 全面 |
| SOX | SiO ₂ 結晶 (Na I シンチレーションカウンター) | 1.83-1.89 Å 1.72-1.95 Å (7.2-6.4 keV) | 0.0002 Å (0.72 eV) 0.002 Å (7.24 eV) | 6-8 s | 全面 |
| FLM | (蛍光比例計数管) | 1.5-20 keV | 10% (6 keV) | 4 s | 全面 |
| PXM | (比例計数管) | 2- 20 keV (X-線) 2-200 keV (粒子線) | | 125 ms | 非太陽 |

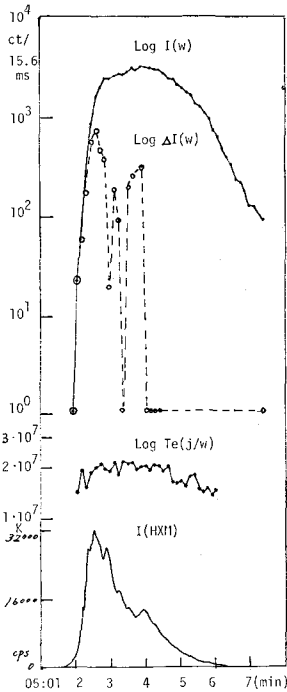


図 12 4月4日のフレアの時間変化
上から共鳴線 1.85 A の強度, 強度の増加率, 電子温度, 硬X線強度 (17-40 keV)

の強度の上昇と共に急激に低下してしまう。図 12 に示した4月2日のフレアでは乱流の減少時に数分かかって温度が1500万度から2500万度まで上昇している。この時期の温度変化率とエミッションメジャー ($n_e^2 V$) の変化率の比はほぼ 2/3 に等しく総質量一定とした時の断熱圧縮の関係に当てはまる。興味深いのはこの温度変化が一億度のプラズマの成分から放射されると考えられる17~40 keV (大木の項参照) の硬X線の強度変化とぴったり対応している事である。2000万度プラズマは一億度プラズマより桁も量が多いが、同じ磁力管の中で加熱される事を物語るかもしれない。このフレアの硬X線発生域の大きさはSXTの解析から7000 km以下とされており、これとエミッションメジャーから出した2000万度域の電子密度は $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 以上となり、フレア前に比べて(約 10^{10} cm^{-3} と推定)大幅に増えており圧縮説を支持するようにみえる。

以上のような一見矛盾する結果を系統的に説明する試みはこれからの課題であるが現在フレアやコロナの加熱機構として提案されている諸説(プラズマ乱流による異常抵抗ジュール加熱, 磁力管の断熱圧縮による加熱, 電子ビームの熱化等)の検定を行えるようなデータが集まりつつあるのは確かである。

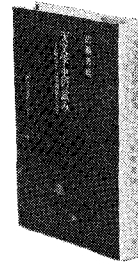
わが国唯一の天体観測雑誌

天文ガイド

定価380円(〒70円)'81-12月号・11月5日発売!

●12月号のおもな内容

- ★藤井旭さんの説明で、1982年の天文現象を紹介します。
- ★ポイジャー2号の土星探査もほぼ終了、大量の写真が届いています。そのなかから珍しい現象を撮影した写真を中心に、今回の2号の成果をご紹介します。解説は村山定男先生です。
- ★12月17日は金星が、よいの西の空で最大光輝に達します。このときには金星の光で、かすかに影ができるといわれています。本当に影ができるのか、写真にとれるのか...など、富田弘一郎先生の最大光輝の観測法。
- ★中野圭一さんの天文マイコン教室が始まります。
- ★ほかに、バンドンのIAO会議に出席して.....など



天文学史の試み 誕生から電波観測まで

長い天文学の歴史を、文化の流れとしてとらえようと試みたもの。個々の事項を網羅することを主眼とせず、天文学をすすめた天才たち、そして天文学をささえた研究者たちを選んで語った、きわめてオリジナリテイにあふれた読み物。

● 広瀬秀雄著 / 定価 2300円

誠文堂新光社 東京都千代田区神田錦町1-5
振替東京6294 電話03(292)1221