

X線天文衛星 “はくちょう”

小川 原 嘉 明*・松 岡 勝*

1. “はくちょう”の誕生

1979年2月21日、東京大学鹿児島宇宙空間観測所から、X線天文衛星“CORSA-6”が打上げられ、予定通りの軌道にのせられた。この衛星は、我国独自の技術で開発されたM(ミュー)ロケットによって打上げられた第6番目の科学衛星であり、天文観測衛星としては最初のものである。“CORSA-6”(宇宙放射線観測衛星の英語名の略)が、衛星軌道に乗ってからは慣例に従ってニックネームが募集され、“はくちょう”と名付けられた。これは、ブラックホールと考えられ我国のX線天文研究者が長年執拗に追いつづけてきた「白鳥座」のX線星にちなんだものである。衛星の計画、設計、製作は、東大宇宙研、東大宇宙線研、名大理、阪大理、立教大理、など全国の広範な研究者の協力によって行われた。

この衛星の計画がスタートしたのは、今から10年以上も前のことであった。当時、まだ本格的なX線観測衛星が一つも存在しなかった時、何とかして近い将来にX線観測衛星を持ちたいものと考え、衛星の設計製作を進めてきた。途中でいろいろな事情から、当初の予定より大幅に遅れたが、ようやく1976年2月、CORSAはMロケットによって、内之浦の実験場から発射された。しかしこの時は、不幸にも偶発的に生じたロケットの姿勢制御系の事故により、CORSAを軌道に乗せることができなかった。CORSAの2号機を実現させようという声は、一号機の失敗後直に関係者の間から広くわきあがった。そして、小田(東大)、早川(名大)を中心とした実験班は、その後2年で一号機に可能な限りの改良を加えた新しいCORSAを完成させることができた。新しいCORSAは、近年著しく発展してきたX線天文学の成果をふまえた、最新のテーマをとり入れることができたという点でまさに禍いを転じて福としたものであると云えよう。

2. X線天文学

X線は、光の1万倍以上のエネルギーをもっている。従ってX線で観測される天文現象は、非常に高いエネルギーあるいは高い温度と直接結びついたものであり、光や電波の観測から想像していたものとは、大きく異なる

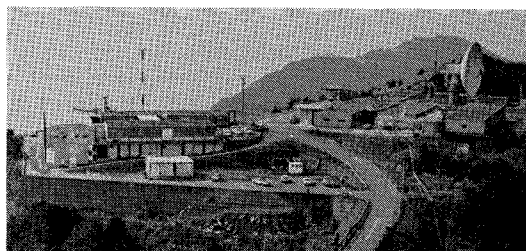


写真 東京大学鹿児島宇宙空間観測所の衛星追跡センター。右手にパラボラアンテナがみえる。

様相を呈している。X線天文学の創成期においては、X線を発する天体は極めて珍しい、宇宙における異端児と考えられた。しかしその後、X線天体が続々と発見され、それらの性質が詳しく調べられるにつれて、非常に広い階層の天体がX線を発生していることが明らかになってきた。こうしてX線は、光、電波等と並んで高エネルギー天文学のなかでしっかりした基礎を築いてきた。現在、500個をこえるX線天体が発見されている。それらのうちのあるものは、我々の銀河系内の天体であり、またあるものは我々の銀河系外の天体である。

我々の銀河系内のX線源の多くは、太陽のような普通の星が放射する全エネルギーの約1万倍のエネルギーをX線として放射している。この種のX線源のX線放射機構は、大体次の二つの種類があるものと考えられている。その一つは、超新星の残骸で、超新星の爆発時のエネルギーあるいは、爆発の際に生まれた中性子星の持っているエネルギーが徐々にX線として放出されているものである。これ以外の大多数のX線源は、白色矮星、中性子星、ブラックホールなどの高密度星と普通の星との近接連星系である。相手の星からあふれ出した物質が、高密度星にふりそそぐと、その半径が小さいことから、大量の重力エネルギーが解放される。1ケの陽子の持つエネルギーは中性子星の表面に達すると、100 MeVにもなる。X線はこのエネルギーが源になって発生すると考えられている。一般にこの種のX線源は非常に複雑な激しい強度変化をしており、そのスペクトルも多様である。X線のこのような性質は、高密度星やその周辺での、高温、強磁場、強重力場を直接反映しているものであり、X線での振舞を調べることにより、白色矮星、中性子星あるいはブラックホールといった特異な天体の正体を知ることができる。

銀河系外のX線天体も続々と発見されている。これま

* 東大宇宙研 Yoshiaki Ogawara and Masaru Matsukoka: The X-ray Astronomy Satellite “HAKUCHO”

でに観測された、特異な、激しい活動をしている天体はすべて強いX線源といってよい。セイファート銀河、強い電波を放射する銀河、QSO、BL Lac などである。これらの天体は 10^{44-47} erg/sec のエネルギーをX線で放射しており、最近では QSO の探索はX線で行なうのが最も有効であるとまでいわれている。多数の銀河が集まっている銀河集団もまた強いX線源である。この種のX線天体の観測は、宇宙論の研究にも重要な意味を持っている。

3. X線天文衛星

本格的なX線天文衛星の第一号は、1970 年の末に打上げられたアメリカの衛星“ウフル”である。それまで、ロケットや気球によって散発的に観測が行われてきたが、この衛星によってはじめて系統的に全天のX線源の探索と、個々のX線源の詳しい観測が行われた。その結果、339 個のX線源を収めたウフルカタログが完成した。このあと、1974~1976 年には、ウフルと同じ程度の規模ではあるが、それぞれ特徴をもった衛星が、アメリカ、イギリス、オランダなどによって作られ、アメリカのロケットによって打上げられた。これらの衛星は、ウフルの観測をひきつぐと共にその観測の幅を広げていった。ウフル以後、この時期までは、人工衛星によるX線天文学の歴史の上では第一期と考えてよい。

1977 年、X線天文学は次の世代に入った。この年初めて、大型のX線天文衛星 HEAO-1 (High Energy Astrophysical Observatory) が、アメリカにより打上げられ、広いエネルギー範囲にわたって、さらに高い感度と精度で、X線源の探索を行った。ひきつづいて 1978 年末には、HEAO-2 (アインシュタイン衛星) が軌道に上げられた。これは、数 keV 以下の軟X線の観測に集中したものであるが、初めての大型X線反射望遠鏡を持ち、狭い視野で個々の天体をとらえ、詳しい観測を行っている。アインシュタイン衛星の感度と精度はまさに画期的なものであり、すでに多くの注目すべき観測結果が発表されている。

“はくちょう”はこのようにX線天文衛星が第2世代に入った時に誕生したものであるが、衛星の規模から言えば、第1世代の衛星よりさらに一回り小型ともいえる。この衛星で、現在のX線天文学の最前線の一角を切開くこと、これが“はくちょう”を作った研究者の夢でもあり、また最大の難問でもあった。“はくちょう”は、いわば失敗した衛星のやりなおしである。その意味で歴史的ないきさつからくる多くの制約をかかえていたが、その制約下で、しかも最近のX線天文学の進歩をにらみながら最少限の改造で、最大限の改良をほどこした苦心の作である。

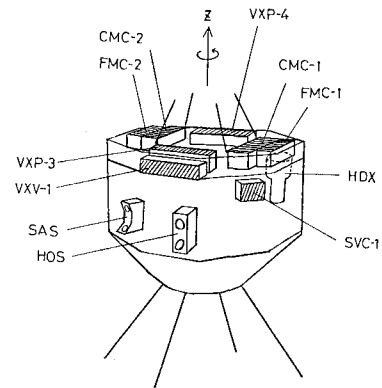


図1 “はくちょう”に搭載したX線検出器と姿勢計の配置。装置の記号については本文参照。スピンの軸に関して、VXP-1, SVC-1 と対称の位置にそれぞれ VXP-2, SVC-2 がある。

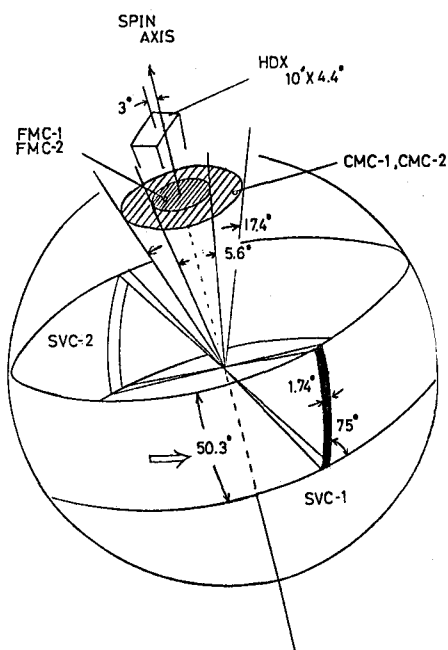
4. “はくちょう”の機能

“はくちょう”は、グラビアの写真に示すように、対角線 82 cm の八角柱に近い形をしており、総重量約 96 kg である。衛星は自転することにより、姿勢を安定化するいわゆるスピン安定型であり、自転周期は約 5~15 秒の範囲で任意に制御できる。制御には、自転軸に平行に配置した一対のコイルで軸に直交した磁気モーメントを作り、これと地磁気との間に生じるトルクで回転の加速、減速を行う方法がとられる。別に、自転軸に直交したコイルがあり、同様にして自転軸の向きを自由に変わることができる。これらの操作は、地上からの指令電波(コマンド)によって行われる。衛星のエネルギーは太陽電池によって得られる。日照時には、最大約 44 W の発電を行い、NiCd 電池を充電する。標準の観測モードでの消費電力は、衛星全体で約 22 W である。

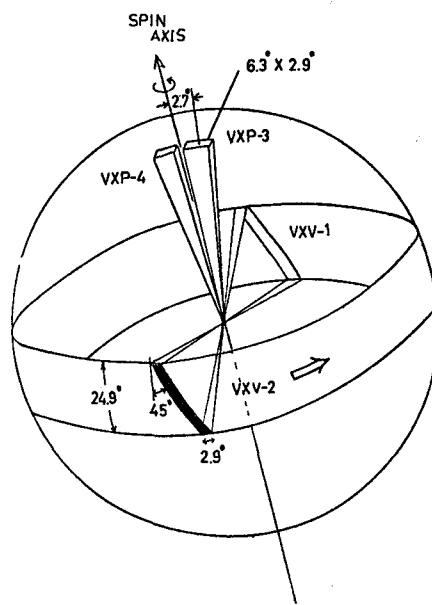
衛星の中のX線検出器と姿勢検出器、太陽センサー(SAS)と、地平線(赤外線)センサー(HOS)の配置を図1に示す。“はくちょう”には、エネルギー帯域で大きく分けて3種類のX線検出器が合計11個のせてあり、0.1 keV から 100 keV までの広い範囲のX線の観測ができる。超軟X線(0.1~2.5 keV)検出器は、X線の入射窓に1ミクロン厚の極めて薄いプラスチックの膜を使った比例計数管である。薄い膜を通じてカウンターガスが自然に流出するのを補うため、小型の高圧ガスボンベとガス圧の自動調整機構を備えている。軟X線(1.5~30 keV)検出器は、入射窓に約 50 ミクロン厚のベリリウム膜を用いた封入型のガス比例計数管である。硬X線(10~100 keV)検出器としては、NaI(Tl)のシンチレーションカウンターを用いた。衛星の上面には図1で示したように、2個の超軟X線検出器(VXP-3,

表1 X線検出器の規格

検出器	VXV-1, 2	VXP-3, 4	CMC-1, 2	FMC-1	FMC-2	SVC-1, 2	HDX
種類	ガスフロー型 比例計数管	ガスフロー型 比例計数管	比例計数管	比例計数管	比例計数管	比例計数管	シンチレーション カウンタ
エネルギー範囲 (keV)	0.1~2.5	0.1~2.5	1.5~30	1.5~30	1.5~30	1.5~30	10~100
有効面積 (cm ²)	77	78	69	40	83	32	45
視野 (FWHM)	2.9°×25° (斜交)	2.9°×6.3°	17.4°φ	5.6°φ	5.6°φ	1.7°×50.3° (斜交)	4.4°×10°
ガス, クリスタル	CH ₄ (190 Torr. 20°C)	Xe+N ₂ +CO ₂ (752+67+17 Torr. 20°C)					NaI (Tl)
入射窓	1 μm ポリプロピレン	50 μm Be					250 μm Be



(a) 軟X線および硬X線検出器



(b) 超軟X線検出器

図2 各X線検出器の視野の方向と広がり。

VXP-4) と4個の軟X線検出器 (CMC-1, CMC-2, FMC-1, FMC-2) および1個の硬X線検出器 (HDX) が、ほぼ自転軸方向に視野を持たせて搭載してある。このうち CMC-1, CMC-2, FMC-1 には2層のすだれコリメータ (モジュレーションコリメータ, MC) が備えられていて、衛星の自転とともに視野の中のX線源がすだれにより見えかくれる様子からそれらの位置が決められる。この他に自転軸に沿って傾いた細長い視野をもつ超軟X線と軟X線の検出器がそれぞれ2個づつ (VXV-1, VXV-2, SVC-1, SVC-2) あり、衛星の自転

により天空の広い領域を走査して、X線新星の出現や、定常X線源の監視をつづけている。これらのX線検出器の主な規格と、視野の方向をそれぞれ表1および図2に示した。

X線の観測には、X線源の強度およびその時間変化の観測を主眼とした計数モードと、X線源のエネルギースペクトルの観測を主眼としたスペクトルモードの2種類があり、目的に応じてコマンドで選択してモードを使い分けている。各検出器の観測エネルギー範囲も、それぞれ独立に、コマンドで数種類にわたって細かく調整でき

る。

観測されたX線データ、衛星の姿勢データ、衛星の各部の動作状態、温度等のハウスキーピングデータは、データ処理装置でまとめて一定のフォーマットに組立てられテレメータ送信機により地上に伝送される。衛星が内之浦の受信局からの可視範囲にある時には、直接リアルタイムデータとして取得されるが、それ以外の時間のデータは、衛星上で一度テープレコーダーに記録し、可視範囲に入った時に、コマンドにより高速で再生させる。テープレコーダーの記録時間は160分なので、次の可視時刻までの全てのデータを記録できない場合もある。そのため、必要な時間帯のデータだけを選択的に記録でき

るように、衛星の軌道周期に合わせて記録の開始と終了の時刻の組合せを幾通りか選べるようになっている。こうしてX線データは、リアルタイムで約10 m sec、テープレコーダーによる記録で約100 m secの時間分解能を持つ。

5. “はくちょう”による観測

このように、“はくちょう”は、小型X線衛星としては汎用の機能を備えており、一つの衛星で同時に、

- 1) 超軟X線から硬X線までの広いエネルギー帯にわたって個々のX線源を詳しく調べる。
- 2) 個々のX線源の時間変化を約10 m secの時間分

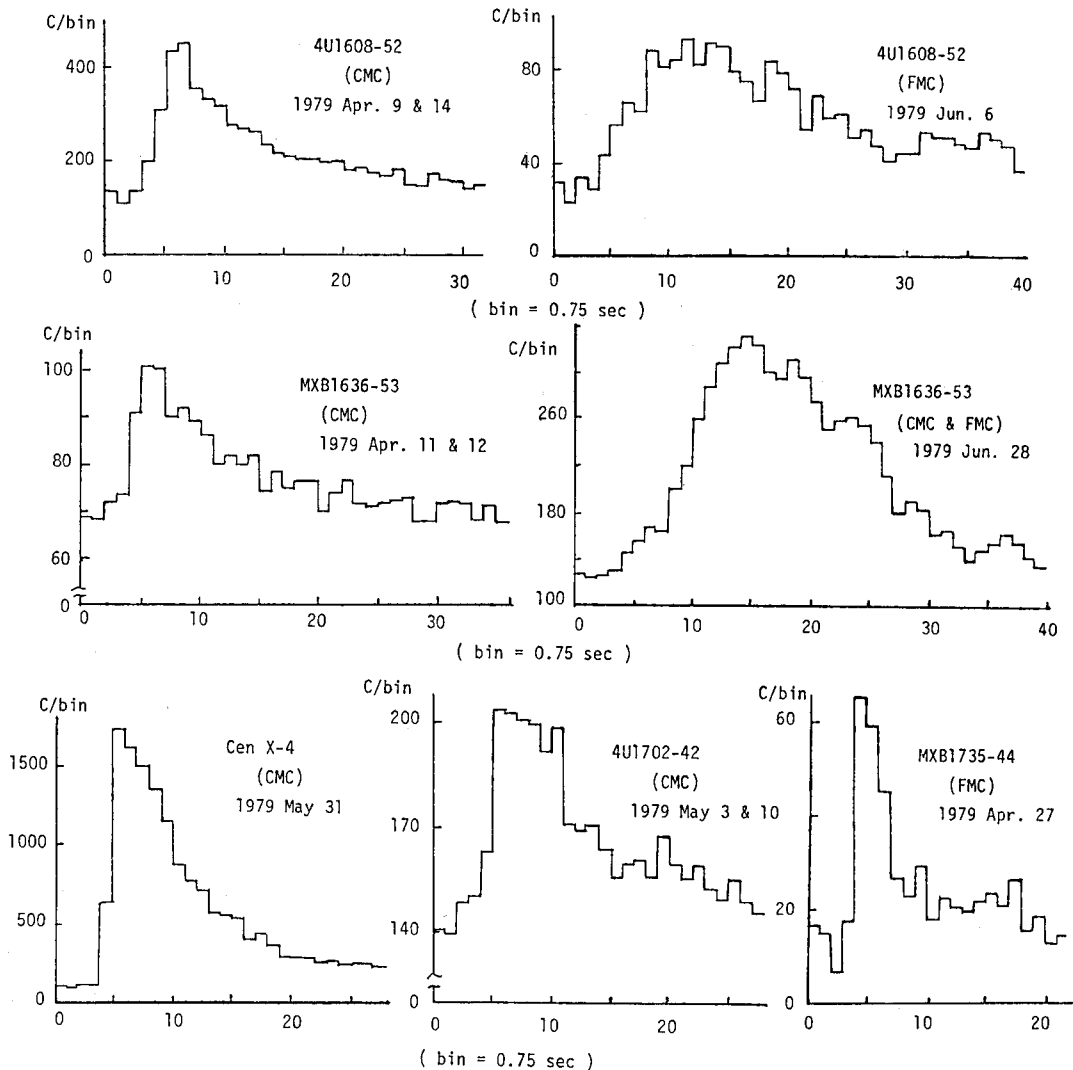


図3 “はくちょう”が観測したX線バーストの例。横軸に時間、縦軸にX線強度をとる。立上り時間や持続時間は、バースターによって異なる。また同じバースターでも個々のバーストで形状が異なることがある。

解能で調べる。

- 3) X線バーストやX線新星の出現を監視しており、これらが現れた時には、直ちにその位置、強度、エネルギースペクトルを決定する。
- 4) 超軟X線の天球上の強度分布を調べる。

等の観測を行うことが可能である。このなかでX線バーストの観測は、“はくちょう”が最も力を入れている重点目標である。

X線バーストは、1975年に発見されたもので、数秒～数10秒にわたって突然X線で明るく輝く現象である。“はくちょう”が観測したいくつかのバーストの例を第3図に示す。バーストするX線源(X線バースター)は、奇妙なことに、大半が銀河面に沿って銀河中心から30°ほどの範囲に集中している。これまでの観測から、バーストには大別して Type I と Type II の2種類があり、それぞれ次のような解釈が提出されているが正体はまだはっきりしていない。いずれも中性子星を含む近接連星系で、Type I では、中性子星に適度の速さで降り積もった物質が、十分な温度と密度になると瞬間的に熱核反応を起して爆発し(ヘリウムフラッシュ)、やがて熱輻射によって冷えてゆく。一方 Type II は、何らかの機構で、中性子星の周辺に蓄えられた物質が、間欠的に中性子星の表面に降りそそぎ、その時に解放される重力エネルギーがX線として放射されるという考えである。今のところ銀河中心近くにある1個のバースターだけが Type II と Type I の両方のバーストを起し、それ以外の約20個のバースターは全て Type I のバーストだけ

を起している。参考のために Type I と II のバーストの特徴を表2に示した。

これまでの衛星では狭い視野の中に特定のX線源を入れてじっと観測するか、あるいは広い天空を時間をかけてゆっくりと走査して新しい天体の探索を行ったり変動を観測するように設計してあったため、バーストのような突発的な短時間の現象を広い範囲にわたって系統的に観測することは困難であった。バースト観測に必要なことは、広い視野で常時監視していて、しかもバーストが起こったら直ちにその位置を高い精度で決め、同時に強度の時間変化やスペクトルが得られることである。この一見矛盾した要求は、小田(東大)の考案したすだれコリメータ(MC)を回転する(回転すだれコリメータ, RMC)ことによって実現できる。“はくちょう”はこの日本の御家芸ともいえるMCを2種類合計3個自転軸方向に向けて搭載し、バーストのハンティングを行っている。

RMCの原理を図4に示す。2枚のグリッドを通して天空を眺めると、一定の間隔で縞状に天空がすけて見える。このグリッドを天空に対して回転させると天空上の各点はそれぞれの位置に対応して独特の様子で見えかくれる。実際に観測されたX線の強度の変化と、視野内の各点に対する透過率の予想値との相関の大きさを図(Correlation map)に表わすと、X線源の位置に鋭いピークができる。ただしバーストは、それ自身が時間変化しているので、コリメータの透過率による変化を分離するためにバースト自身の変動を知る必要がある。そのた

表2 バーストの種類とその特徴

バーストの種類	Type I	Type II
バースト源	～20コ(主に銀河中心から30°以内)	RAPID BURSTER 1コ
立上り時間	≤1秒(たまに5～10秒のものあり)	≤1秒
持続時間	3～20秒	3秒～10分
ピークフラックス	0.5～5×Crab Nebula*	0.2～1×Crab Nebula*
バースト間隔	数時間～数日(準周期的なものもある)	10秒～30分
バースト当りの放出エネルギー	～10 ³⁹ erg	10 ³⁹ ～10 ⁴⁰ erg
定常X線に対するバーストX線のフラックスの時間平均	～1/100	～1
エネルギースペクトルの時間変化	次第にSoftになる	バーストの間ほぼ一定

* Crab Nebula(かに星雲)のX線強度を単位として表示。

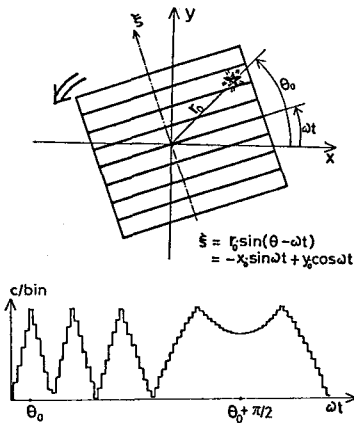


図 4 回転すだれコリメータの原理。
X 軸と Y 軸の交点を回転の中心とすると、
図に示した星の X 線強度は、下のグラフのよう
に変調を受ける。

めに CMC-1 と CMC-2 は見えかくれの位相を 180° ずらしてある。従ってこの二つのコリメータの出力の和は、コリメータによる変調を受けないバースト自身の変動を示し、差はコリメータによる変調とバーストの変動の重ね合わさったものになる。CMC-1 と CMC-2 は、約 0.5° の角分解能で直径約 $25^\circ \sim 30^\circ$ の広い範囲のバーストを見はり、FMC-1 は約 3 分角の角分解能で直径約 $5^\circ \sim 6^\circ$ の範囲内の X 線源の位置決めを精度よく行う。FMC-2 は、FMC-1 と同一の視野であるが、すだれコリメータを持たず、FMC-1 の透過関数の決定に使うと同時に、特定の X 線源を S/N よく長時間一定の条件で観測するのに用いる。図 5 に RMC で変調をうけたバーストの様子と、それを利用して位置決めを行った相関図の例を示す。バーストの位置は、バーストの出現する前後の観測データで求めた定常 X 線源の位置と比較して決められる。

“はくちょう”の自転軸の方向は、打上げられてから現在(11月初め)まで、ほぼ銀河面に沿って天球上を一周した。その間、X 線バーストについて数多くの興味深い観測結果が得られている。ここではこれらの結果のうちから二、三をとりあげてごく簡単に紹介する。

“はくちょう”が 1979 年 4 月から 5 月にかけて定規座附近のバースターの観測で新しいプロファイルのバーストや光と X 線の同時観測をしていた時 5 月中旬に、イギリスの衛星アリエル V によりケンタウルス座に X 線新星が発見された。“はくちょう”はこの X 線新星 Cen X

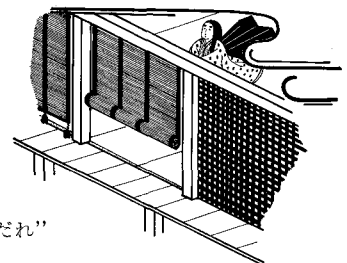
-4 を 5 月 28 日から 6 月 16 日まで追うことができた。この時、5 月 31 日に Cen X-4 からこれまでのうちで最大の Type I バーストを観測した。このことは X 線新星にも X 線バーストが起こることをみつけたわけで、中性子星に降り注ぐガスの量とバーストの関係を知らずで、重要なポイントをおさえることができた。

また国際協同観測により、光と X 線のバーストは 5 回にのぼる同時観測に成功して、光が X 線より少し遅れることなどを確認し、中性子星のまわりのディスクや連星系の状態を知る手がかりが得られた。ちなみに X 線バースターが連星系になっている直接的証拠は、いまだに得られていない。

もう一つ“はくちょう”のドラマティックな観測として、ラビッドバースター MXB 1730-335 から新しいモードの奇妙な Type II (?) バーストを観測したことがある。これは 1 秒以下で立ち上ったバーストが、そのピーク値のまま 0.5~10 分も継続する台形のバーストの発見である。(図 6) これが 1 時間に何発も繰返され、1 つのバーストが出す全エネルギーは 10^{40} erg にも達する。この発見により、Type II バーストは、従来のような比較的簡単なモデルでは説明が困難になってきた。

この他、超軟 X 線の観測でもいくつかの興味ある測定が行われ、所期の成果を上げている。これらの個々の観測結果については、順を追って別に詳しく報告されるであろう。

大艦巨砲の活躍している第 2 世代の衛星の時代に、“はくちょう”のような小型衛星が他の衛星ではできない興味ある観測結果を上げていることは、今後日本が独自の力でスペースアストロノミーをすすめていく上で、一つの方向を示唆しているものともいえよう。



X 線源は常に“すだれ”
を通してみる

(カットは宮路茂樹)

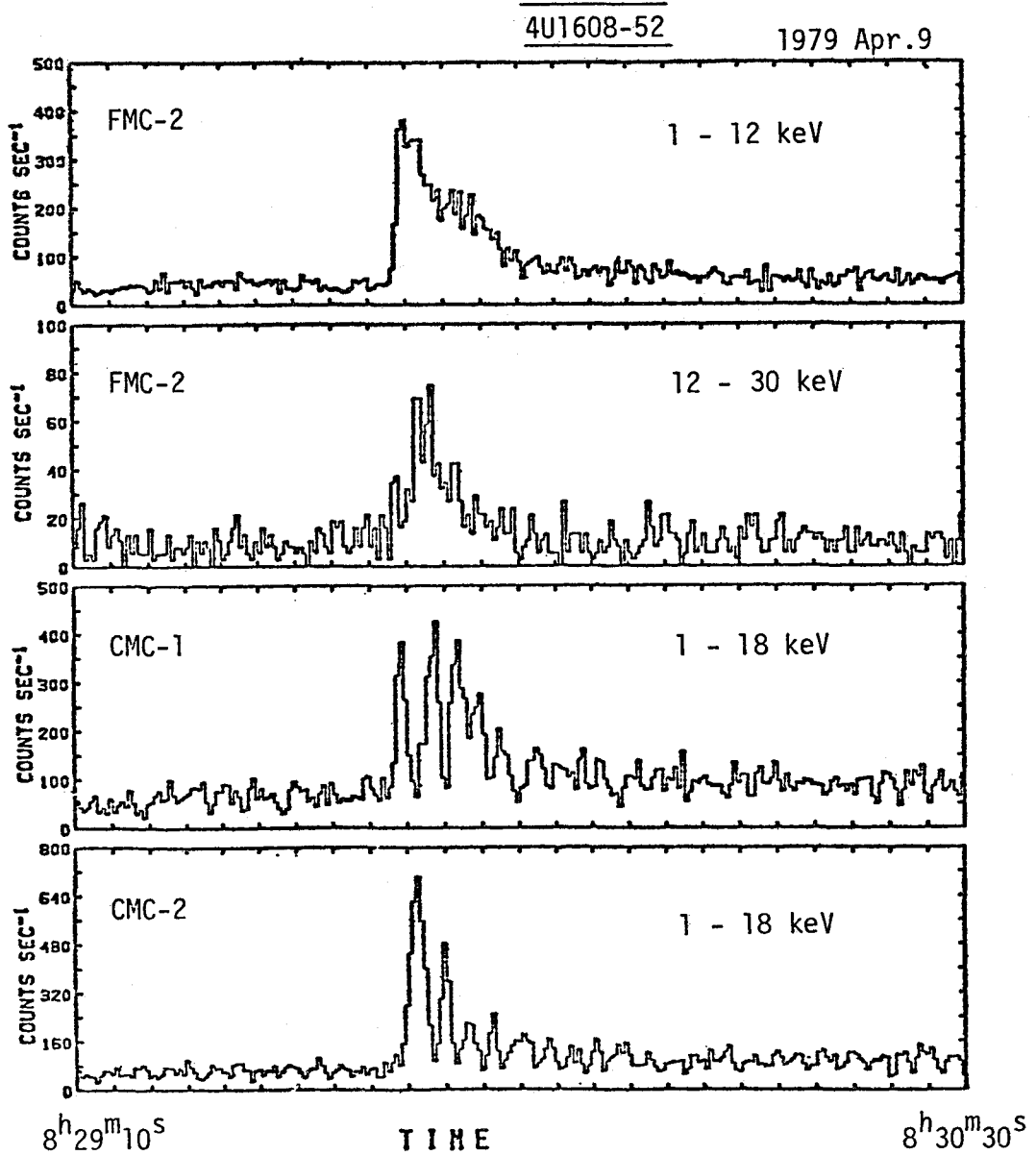


図 5(a) 1608-522 からのバースト. 上の二つのグラフは, FMC-2 で観測した強度変化を二つのエネルギー帯について示した. 下の二つのグラフは, 180° 位相の違う二つの回転すだれコリメータ (CMC-1, 2) による変調の様子を示した.

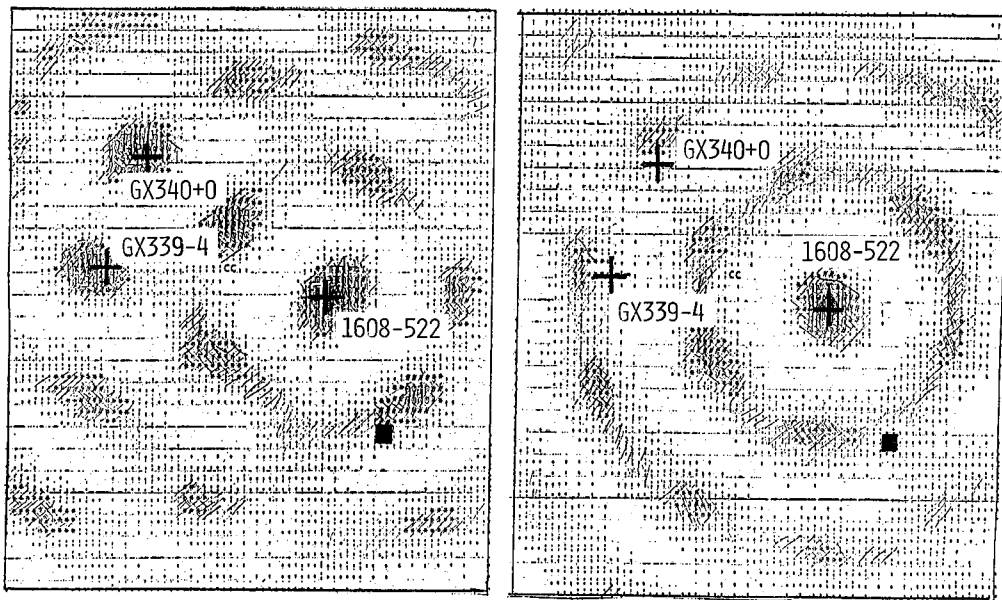


図 5(b) 左は、このバーストの前後の相関図。3 個の定常 X 線源が見える。右はバースト中の相関図から定常 X 線源の成分を差引いた相関図。1608-522 の位置にバーストがあったことがわかる。図中 ■ 印は、スピン軸の位置。

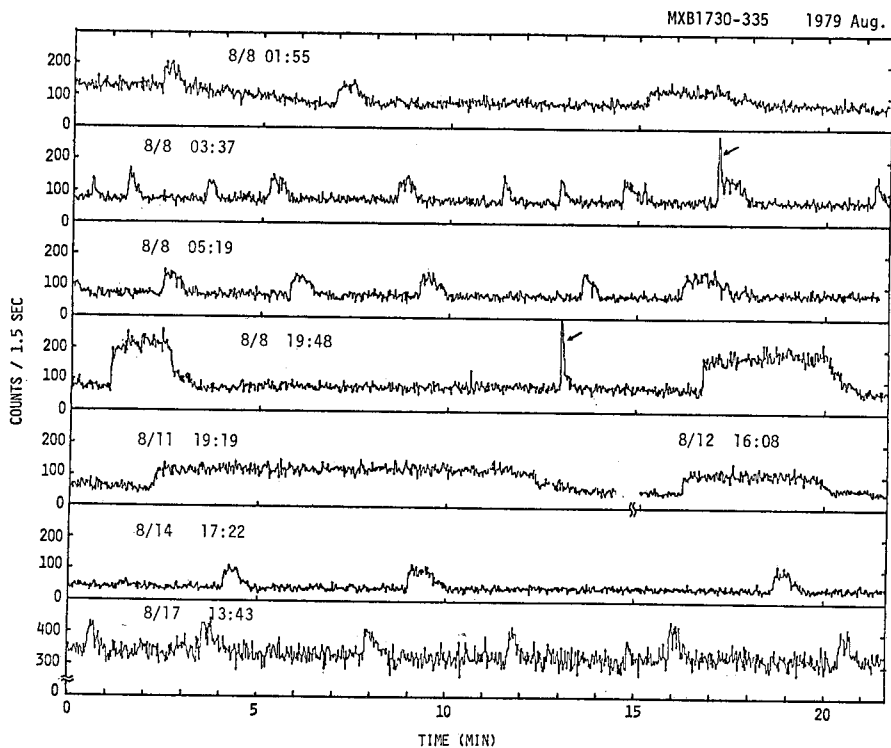


図 6 RAPID BURSTER の例。バーストの形状が時間と共に変わっており、異常に長い台形状バーストが現われている。矢印は、たまたま視野の中に入っていた別のバースターからの Type I バースト。