

# X 線 衛 星 「ぎんが」

牧 島 一 夫\*

## 1. 三 姉 妹

紅蓮の炎を吐いた宇宙科学研究所の M-3SII 型ロケット 3 号機は、澄み切った鹿児島島の青空を切り裂いて駆け昇った (図 1=表紙)。その頭部には 5 年間の汗と苦勞の結晶である、同研究所の X 線天文衛星 “アストロ C” が抱かれている。ときに 1987 年 2 月 5 日、日本時間 15 時 30 分。手に汗にぎる 10 分間がすぎ、無事に地球周回軌道 (周期 96 分) にのった衛星は「ぎんが」と名づけられた。

わが国の X 線天文学は、今から 8 年前に「はくちょう」衛星の実現で国際舞台に登り、続く「てんま」衛星では中性子星の物理を中心に大きな飛躍をとげた。「ぎんが」はこれら 2 機に続く 3 番目の妹である。表 1 や図 2 でわかるように、この妹はみごとにボリュームの持ち主だが、これは宇宙研の誇る新鋭個体ロケット M-3SII 型のすぐれた打ち上げ能力のおかげである。(同型ロケット 1, 2 号機はハレー探査機を打上げた。) さらに 2 人の姉妹が純血のヤマトナデシコだったのに対し、今回は積極的に英国・米国との国際協力を行ない (表 2), 「ぎんが」はグラマーなハーフ娘として誕生した。衛星計画のマネジャーは宇宙研の榎野文命教授が、また日英協力の総括は同じく田中靖郎教授が務められた。国際協りに踏み切った背景には、いろいろな事情に加え、1980 年代後半には X 線天文衛星が世界的に不足するとの見通しがあった。この傾向はチャレンジャー号の事故でとどめを刺され、稼働中の X 線衛星は「ぎんが」とソ連のクバ

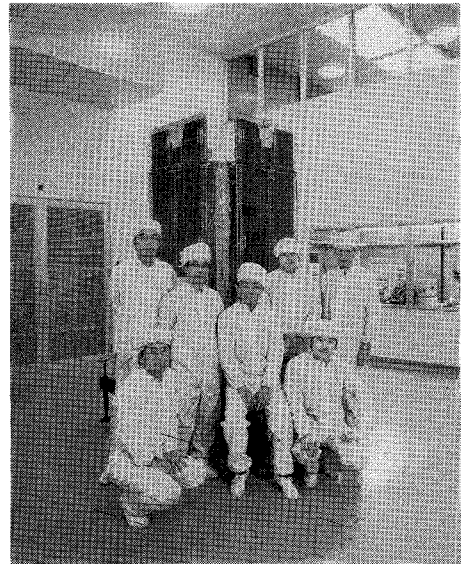


図 2 内之浦のロケット発射場で打ち上げを待つ「ぎんが」と、ぎんがチームの第 1 陣。中央はマネジャーの榎野文命教授、前列左・村上敏夫(宇宙研)、前列右・大橋隆哉(東大理)、後列左から常深博(阪大理)、小山勝二(宇宙研)、H. トーマス(レスター大)、K. スペンサー(ロスアラモス研)の各氏。

ントのみとなった。世界の熱い注目の中で「ぎんが」はいま、さまざまな X 線天体を観測している。観測の母体はこれまでは衛星計画に直接タッチした日・英・米のグループに限られていたが、10 月より公開のプロポーザル体制に移行し、広く外部から「ぎんが」の観測に参加で

表 1 「はくちょう」, 「てんま」, 「ぎんが」の比較

	「はくちょう」	「てんま」	「ぎんが」
打ち上げ	1979 2/21	1983 2/20	1987 2/5
ロケット	M-3C-4	M-3S-3	M-3SII-3
総重量 (kg)	96	217	420
観測器重量 (kg)	~30	~60	~120
寸法 (cm)	80φ, 70H	90φ, 80H	100□, 140H
最大発電量 (W)	~60	~140	~270
ビットレート (kb/s)	5, 0.63	8, 2	16, 2, 0.5
記録容量 (Mbit)	7	20	40
最大記録時間 (分)	160	160	1,280
主観測装置面積 (cm <sup>2</sup> )	~100	640	4,000
検出感度 (mCrab)	10~20	1~2	~0.2

\* 東大理 Kazuo Makishima: X-ray Astronomy Satellite "Ginga"

表 2 「ぎんが」の関連研究機関

衛星共通系	宇宙研, 東大・宇宙線研など
大面積比例計数管 (LAC)	宇宙研, 東大・理, 名大・理, 理研・宇宙線, レスター大 (英), ラザフォード・アップルトン研 (英)
X線全天モニタ (ASM)	阪大・理, 阪市大・理
ガンマ線バースト検出器 (GBD)	宇宙研, 東大・宇宙線研, 立教大・理, ロスアラモス研 (米)

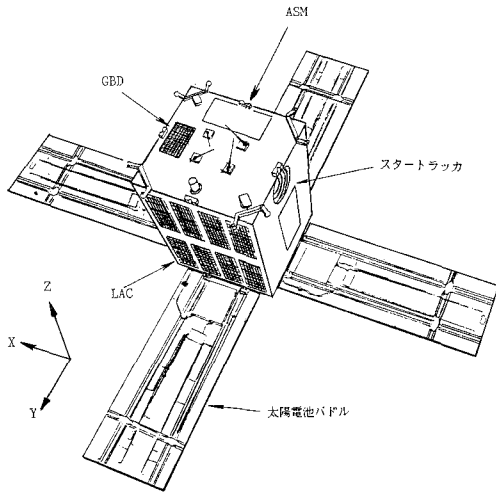


図 3 「ぎんが」衛星の模式図

きるようになる。そこでこの場をお借りして、「ぎんが」の概要や初期成果、今後の見通しなどを紹介したい。

## 2. 「ぎんが」の観測装置

「ぎんが」には、3種類の宇宙X線・ガンマ線観測装置がのっている。図3を参照しながら紹介しよう。

### 大面積比例計数管 (Large Area Counters: LAC)

反射・屈折を用いずに微弱な宇宙X線をとらえるには、大面積の検出器が必要である。このため「ぎんが」は主観測装置として、日英共同で開発された8台の大面積・低バックグラウンドの比例計数管 (LAC) をもつ。これらは 1.5~35 keV バンドに感度を有し、8台あわせて有効面積は 4,000 cm<sup>2</sup> におよぶ。このバンドで LAC は従来の世界のどのX線衛星にもまさる感度を持ち、汎用できわめて強力なX線観測装置である。近年X線の観測手段は全反射を用いた結像タイプに徐々に比重が移りつつあるが、LAC は非結像タイプのものとして“究極”の観測装置といえるかもしれない。観測の際は、姿勢制御によって観測対象を LAC の視野 (1°×2° で8台共通) の中に捕捉し、ポインティング状態で対象のX線強度やスペクトルを測定する。ただし検出器のバックグラ

ウンド (荷電粒子・大気ガンマ線などに起因する) を注意深く差し引かねばならず、これが観測の坎どころになっている。またスキャンモードでの観測も可能である。LAC の初期成果については、後述させて頂く。

### X線全天モニタ (All Sky Monitor: ASM)

X線でみる宇宙は激しく変動する。X線新星が現れ、明るいX線星が急に消え、また数年前の新星が再現したりする。定常的なX線源でもそこに数か月オーダーの長い周期性が隠されていたりする。この ASM 装置は、全天に散らばるこうした明るいX線源たちを長期にわたり同時に監視する目的をもち、大阪大学が中心になって製作した。これは6種類の細長いファンビーム型の視野を持った比例計数管で、衛星をスピン状態にしたうえで天空のスキャンを行なう。全天の約 70% を同時にカバーすることができ、>50 mCrab の X線源の強度・位置 (精度約 0.5°)・スペクトルを測定できる。(1 mCrab とは、かに星雲の 1/1000 の X線強度をいい、2~10 keV のバンドでほぼ 3・10<sup>-11</sup> erg/s/cm<sup>2</sup> のエネルギー流束にあたる。) 打ち上げまもなく ASM はX線新星をとらえた。その天球上の位置からこれは X1353-640 と名づけられ、光でも同定された。スペクトルの特徴からみて、これは低質量星とブラックホールとの連星かもしれない。また多数の明るいX線源について、ASM は着実にデータベースを蓄積しつつある。

### ガンマ線バースト検出器 (Gamma-Ray Burst Detectors: GBD)

ガンマ線で見た宇宙も変動が激しい。この GBD 装置は日本と米国ロスアラモス研究所との国際協力で、いまだ正体不明のガンマ線バーストの謎に挑む。小型の比例計数管と結晶シンチレータとを併用し、X線・ガンマ線の広帯域 (2~400 keV) にわたるバーストのスペクトル観測が目玉商品となっている。GBD は指向性が少ないので、単独でバーストの到来方向を決めることは難かしいが、外国の惑星間探査機との間で三角測量を行なえば、天球上でのバースト発生位置も精度よく決めることができる。打ち上げ以来、GBD は9月までに9個のガンマ線バーストを検出した。その数例のスペクトルには温度 2・10<sup>7</sup> K ぐらいの黒体放射とおぼしき成分が見られ、謎解きの鍵になると期待されている。

## 3. 「ぎんが」の運用

衛星と人間の赤ん坊はよく似ている。どちらも取り替えのきかない宝物。事故がおきたらおしまいなので、24時間いつも目が離せない。なかなかこっちの言うことを聞かない……。もちろん「ぎんが」嬢も例外ではなく、「ぎんがチーム」にかしずかれています。これは宇宙研の槇野教授や小山勝二助教授を中心に、全国 20 名ほどの

スタッフ研究者とほぼ同数の大学院生とから編成されている。チームのメンバーは基本デューティとして2名づつ2週間交代で鹿児島県内之浦にある宇宙研の観測所へ赴き、“鹿児島当番”と称して、メーカー技術者といっしょに衛星追跡・受信・指令・データのクイックルックなどを行なう。いっぽう東京・駒場の宇宙研キャンパスでは、宇宙研の研究者や院生に東大・理研・立大など近隣グループの若手を加えて、“駒場当番”が結成されており、衛星運用の総司令部としてほとんど不眠不休で機能している。名大、阪大、阪市大などからも随時、応援が駆けつけるが、それでも人員はひどく不足しており、とくに中枢である宇宙研には重い負担がかかっている。

天文衛星のつねで、衛星運用に大きな比重を占めるのが姿勢制御・姿勢決定作業である。「ぎんが」はZ軸(図3)回りの高速回転ホイールをもち、衛星の姿勢は大まかにはその角運動量で安定化されている。ホイール速度を変えるとその反作用で、衛星のZ軸回りのロール角を制御できる。また衛星上の電磁石(トルカと呼ぶ)と地磁気との相互作用を利用して、Z軸の向きを制御できる。慣性空間に対するこうした姿勢の変動は衛星の3軸ジャイロで刻々に計測され、衛星上のコンピュータを通じてホイールやトルカにフィードバックされるので、衛星は3軸安定制御の状態を保つことができる。さらに姿勢の絶対値を知るため、2台の星姿勢計もっている。このように「ぎんが」の姿勢制御/姿勢計測システムは、「はくちょう」の頃に比べると驚くほど高度で複雑になった。そのためデータの質は向上したが、運用は手数が増えた面も多い。なおLACの視野軸はZ軸に直交してい

るので、定常観測中は衛星を慣性空間に対して静止させるのが普通だが、ホイール機能を生かしてスキャンを行ったり二つの天体を交互に観測することもできる。いっぽうASMでの観測の際は、衛星をZ軸回りに1回転スピニングさせて全天スキャンを行なう。

LACのこれまでの観測プランは、科学的な面白さ、姿勢制御の効率、太陽角制限(対象と太陽のなす角は $45^{\circ}\sim 135^{\circ}$ に制限される)などを考慮して、チームの話し合いで決められてきた。1987年10月より、公開のプロポーザルにもとづいた運用に移行する予定である。

#### 4. LACの初期観測結果と今後の見通し

##### 大マゼラン雲の超新星

打ち上げ後3週間で衛星の基本性能の確認をほぼ済ませ、続いてかに星雲によるLACの較正試験を行なおうとしていたその時“大マゼラン雲(LMC)に超新星発生”のニュースが届いた。すぐに姿勢制御を行なってLMCのスキャンを実行したが、X線は検出されなかった。その後もほぼ10日おきに超新星を監視し、パルサー捜しも行っている。この原稿を書き出した7月時点では4mCrabという上限値のみ得られていたが、8月半ば以降、事態は急な進展を見た。これに関しては追記を参照されたい。図4はLMCをほぼ南から北へスキャンしたデータの一例である。超新星からわずか $0.6^{\circ}$ 離れた位置に明るいX線源LMC X-1があるため、超新星の観測にはやや邪魔である。それにしても図4は、さながらX線連星の見本市のようだ。LMC X-1とX-3はともにブラックホール候補でとても柔らかなスペクトルを

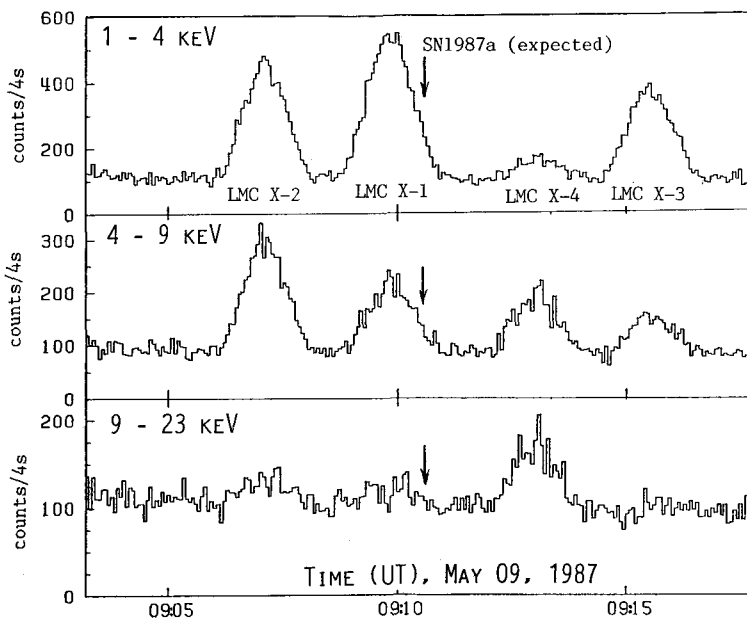


図4 LACによる大マゼラン雲のスキャンの一例を、X線エネルギーの3バンドにわけて示したものの、スペクトルの異なる4つの明るいX線源が、 $2\sim 3^{\circ}$ の間隔で並んでいる。三角山はLACの視野(半値幅 $1^{\circ}$ )に対応する。矢印は超新星の予想位置。

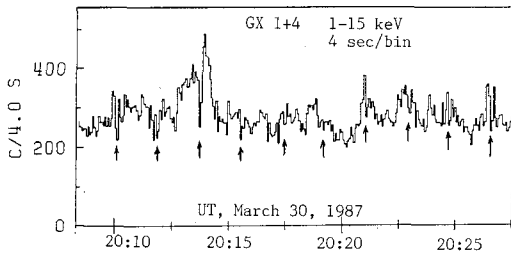


図 5 X線連星パルサー GX 1+4 の観測生データ。バックグラウンドは 180 c/4 s 程度。一見すると不規則な変動に見えるが、110 秒の周期性が隠されており、とくに矢印のフェーズでティップが繰返す。

示す (X1353-640 も類似)。X-2 は磁場の弱い中性子星と低質量星との連星、そして硬いスペクトルの X-4 は周期 13.5 秒のパルサーで、磁場の強い中性子星と大質量星との連星である。

**GX 1+4 とケプラーの超新星残骸**

3 月末には LAC の威力を示す印象的な二つの試験観測があった。ひとつは GX 1+4 という強度  $\sim 100$  mCrab の X線連星パルサーで、これは年間 2% という急速な自転の加速を示し注目されていたが、1983 年に EXOSAT 衛星が観測したところ、強度  $< 4$  mCrab で検出できなかった。「ぎんが」で観測したところ  $\sim 3$  mCrab という暗いレベルでちゃんとパルスが検出され (図 5)、パルス周期 (110.23 秒) は従来の加速傾向に反して 1981 年の観測値よりやや長くなっていて、長期にわたり何かの理由で質量降着が減少し、パルサーの自転加速が止まったらしい。またすぐ近くのケプラーの超新星残骸は、Cas-A やチコの超新星残骸に比べ X線ではずっと弱く、従来  $> 3$  keV では検出されていなかった。ところがわずか数時間の観測で、図 6 のみごとなスペクトルが得られたのである。強烈な鉄の輝線が見え、鉄族

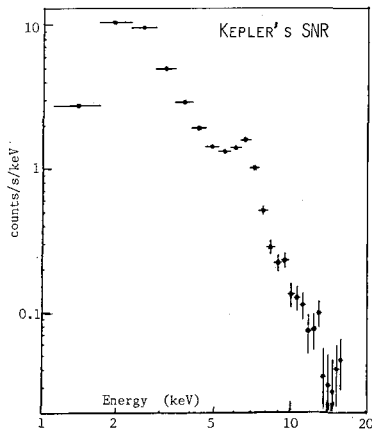


図 6 ケプラーの超新星残骸の X線スペクトル。このバンドでは初めての観測である。6.7 keV にヘリウム・ライクな鉄の出す強い輝線が見える。

元素が過剰生成されたことを物語っている。こうして、mCrab オーダーの X線源が詳細に観測可能であり、かつ LAC のエネルギー分解能が比例計数管としては十分に良いことが検証された。観測チームは大いに意を強くした次第である。

**活動銀河核の観測**

続く初期観測で LAC の威力が最大限に発揮された対象は、宇宙のはるか遠方の活動銀河核 (AGN; Active Galactic Nuclei) であろう。AGN については従来 HEAO-1 衛星により X線スペクトル観測が、アインシュタイン衛星により軟 X線領域で高感度のサーベイと画像観測が、EXOSAT 衛星により時間変動の研究が行われてきた。「ぎんが」では、小山勝二、M. ターナー、井上一、大橋隆哉ら各氏の強力なリーダーシップの下、4~9 月に 9 個のクエーサー (QSO)、4 個の I 型セイファート銀河、2 個の II 型セイファート銀河、そして 3 個の BL Lac 天体を観測した。その結果、LAC の AGN 検出感度はアインシュタイン衛星に比べ大きな遜色はなく、スペクトルや変動についての能力は過去の衛星を大幅に上回ることがわかった (図 7)。例えば  $\sim 0.3$  mCrab の微弱な QSO についてもスペクトルを推定することができ、QSO と X線宇宙背景との関係の定量的な検討が可能になった。数個の QSO からは、赤方偏位した鉄の蛍光 K-輝線と思われるスペクトルの構造が観測された (図 7 D)。これが本当ならば、X線独自で QSO を識別できることになる。また Mkn 348 からは大きな自己吸収が観測され (図 7 C)、II 型セイファートは濃い物質分布を通して中心核を見ているとする考えを支持した。激しく変動する I 型セイファート NGC 4051 は明るい時にスペクトルが柔化する傾向をもち (図 7 A)、AGN の放射機構のモデルにとって重要かもしれない。また I 型セイファート NGC 4051 や MCG 6-30-15 の強度変動は、200 秒という短い時間スケールにまで及んでいることがわかった。こうして「ぎんが」は AGN の X線観測の最前線を切り拓いてくれるであろう。

**その他の銀河系外天体**

AGN 以外にも M87 や M82 などの特異銀河、楕円銀河 M49、またわが隣人 M31 (アンドロメダ大星雲) について、2~30 keV の X線スペクトルが初めて測定された。これら系外銀河からの X線放射は、中心核からくる成分、個々の X線星が寄与する成分、そして銀河ガスなど広がった成分、の混合とみられる。LAC によるスペクトルや時間変動の特徴と、アインシュタインによる画像データを総合することで、これらの成分を個々の銀河につき分離できるかもしれない。銀河の構造とダイナミクスをさぐる新たな手段が開けようとしている。銀河団については、おもに装置較正の目的で、A2256、かみ

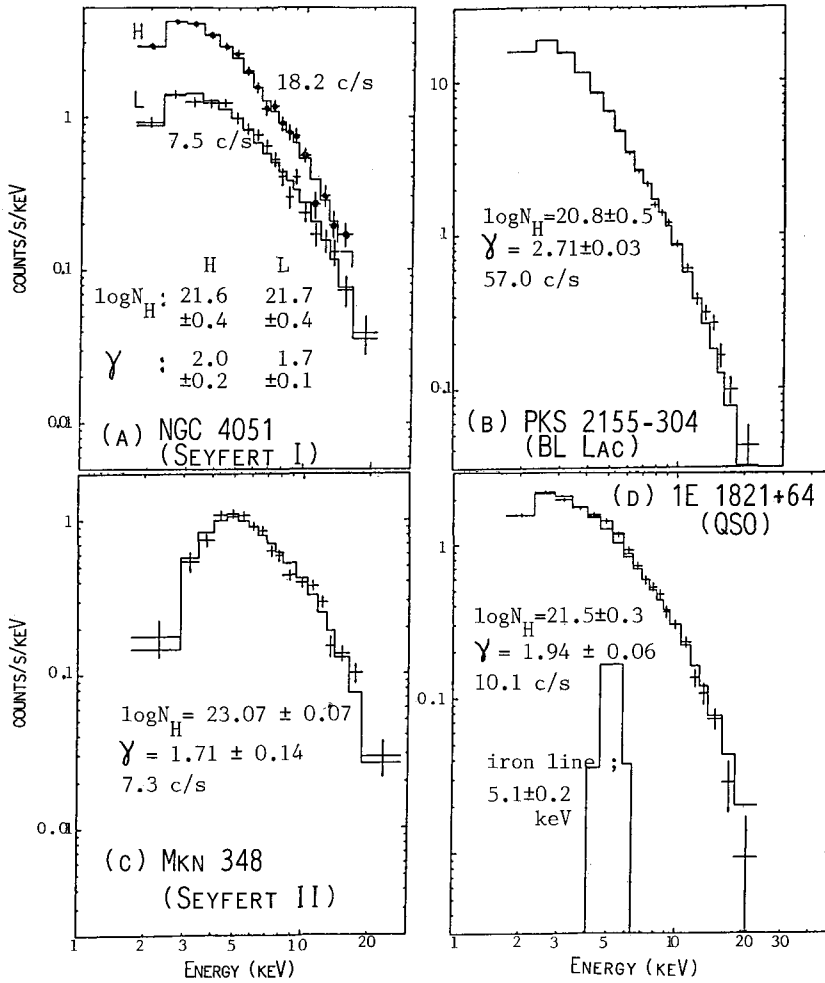


図7 4つのAGN(活動銀河核)からのX線スペクトル。N<sub>H</sub>は中性ガスの吸収の柱密度(cm<sup>-2</sup>)、γは光子数スペクトルのべき指数。Mkn 348(II型セイファート)は強い自己吸収を示し、1E 1821+64(クエーサー)のスペクトルには、赤方偏位した鉄の蛍光輝線とおぼしき構造が見られる。井上一氏の解析にもとづく。

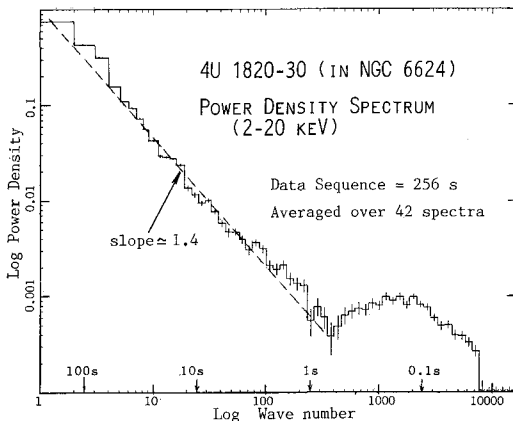


図8 球状星団NGC 6624中の低質量X線連星4U 1820-30に対するフーリエパワースペクトル。256秒のデータ長さで高速フーリエ変換を行ない、得られた42個のパワースペクトルをインコヒーレントに平均した。フラクタルな赤色雑音と、疑似周期現象が見える。

のけ座銀河団などが観測された。また、おとめ座銀河団では大きく広がったX線成分が検出され、表面輝度の低いX線放射に対して「ぎんが」はアイニシュタイン衛星をしのぐ感度をもちうることを実証した。

明るい銀河X線星の時間変動

中性子星連星やブラックホール候補などの明るい天体では、LACの大面积を利用して時間変動を精密に調べることができる。例えばLMXB(Low-Mass X-ray Binary; 磁場の弱い中性子星と低質量星の連星で、図4のLMC X-2はその例)の非周期的なX線変動は、中性子星近くのプラズマの物理状態をよく反映するとみられる。図8は球状星団NGC 6624中の、4U 1820-30というLMXBのパワースペクトルである。周期100秒から1秒にかけ、フラクタル(べき級数)構造をもつ赤色雑音のみられ、また0.1秒付近にはいわゆるQPO(Quasi Periodic Oscillation; 疑似周期現象)が見られる。LMXBの研究はフラクタル雑音もQPOも含め、

こうしたパワースペクトルの総体を説明できねばならない。まだその段階には至っていないが、満田和久・堂谷忠靖の両氏は精力的なデータ解析の結果、Cyg X-2 の QPO では硬い X 線が柔い X 線に対して 70 ms ほど遅れていることを見出した。ひとつの手懸かりになりそうである。また LMXB で中性子星の自転周期 (数ミリ秒?) を探す試みも続けられているが、まだ成功していない。また高感度の X 線バースト観測、そしてパルサーやブラックホール候補の X 線変動の詳しい観測も進行中である。

**いろいろな銀河系内の X 線天体**

銀河系内でも観測できる対象が飛躍的に増えた。電波超新星残骸、微弱なパルサー、白色わい星を含む連星、アルゴルや RS-CVn 型などの近接連星、T-Tauri 星や星形成領域、ウォルフ-レイエ星などである。これらの対象は X 線と他の波長域での観測をより近づけてくれるだろう。またこれらの天体の X 線放射は太陽フレアに似て、温度 ~ 数 keV の光学的に薄いプラズマからの熱放射となることが多い。そこには、重力・力学エネルギーが磁場エネルギーを介してプラズマ加熱を行ない X 線放射をひき起こす、という一般的図式があるように思える。この問題は、「てんま」で発見された熱的スペクトルをもつ銀河リッジ X 線放射の謎を解く上でも重要であろう。さらにリッジ X 線放射そのものの詳しいマッピングも、「ぎんが」の絶好の観測テーマである。また大面積と速い時間分解能 (最高 1 ms) を生かし、かに星雲型の超新星残骸でパルサー探しが行われている。

**5. むすび**

4 年前の本誌 (1983 年 6 月号) に「てんま」の紹介を書かれた小山勝二氏は、「大いに『てんま』を利用し可愛がって下さい」と結んでいる。そこで今回は、「皆さん大いに『ぎんが』を利用し可愛がって下さい」。

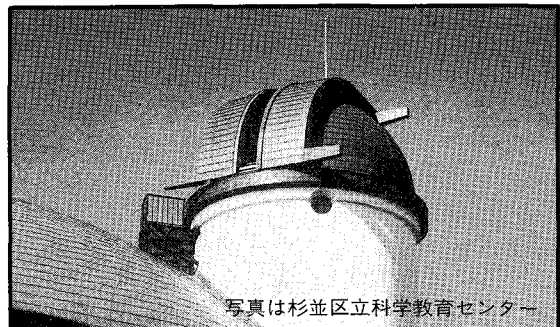
追記： 8 月半ばから 9 月にかけての観測で、LMC の超新星の付近から硬い X 線が出ていることが見出された。解析の結果、この硬 X 線は超新星を含む  $0.2^\circ \times 0.4^\circ$  ほどの領域から来ていること、その 10~30 keV のスペクトルは異常に硬く光子スペクトルで言ってほぼ平坦だが、低いエネルギーに向けては増加きみであることが判明した。このようなスペクトルを示す天体はいまだかつて知られていなかったことから、これが超新星そのものである可能性が極めて高いと思われる。低エネルギー側でスペクトルは少くとも 4~5 keV まで延びており、中性水素による吸収は予想よりもずっと少い。またスペクトルの形から、硬 X 線およびガンマ線の領域に強いフラ

ックスがあることが予想される。10~30 keV でのエネルギーフラックスは 9 月初めで  $5 \times 10^{-11}$  erg/s/cm<sup>2</sup> (55 kpc の距離では  $1.5 \times 10^{37}$  erg/s) くらいであり、8~9 月にかけて徐々に変化しているもようである。

(10月1日)

☆ ☆

☆ ☆ ☆



写真は杉並区立科学教育センター

◆ 営業 ASISD 品 目 ◆

**天体望遠鏡と双眼鏡  
ドームの設計と施工**

◆ 主な天体ドーム納入先 ◆

東京大学宇宙科学研究所 / 東京大学教養学部 / 東京学芸大学 / 埼玉大学 / 福島大学 / 川崎市青少年科学館 / 杉並区立科学教育センター / 駿台学園一心荘 (北軽井沢) 駿台学園高校 / 熊本東海大学 / 栃木県こども総合科学館 / 土佐市公民館 / 刈谷市中央児童館 / 日原天文台 / 大分総合コミュニティセンター / 宇美青少年育成センター (福岡) 等の他、日本全国に 100 余基の実績。

**ASTRO 光学工業株式会社**

東京都豊島区池袋本町2-38-15 ☎03(985)1321