

# 「ぎんが」による X 線パルサーの観測

牧島一夫\*・長瀬文昭\*\*・常深博\*\*\*・小山勝二\*\*\*\*

## 1. はじめに

X 線パルサー、すなわち強磁場の中性子星を含む近接連星系は、X 線天文学の初めから好んで観測されてきた<sup>1)2)</sup>。とくにパルスのドップラー効果を測ると連星系の軌道パラメータが推定できるので、中性子星の質量が決められる。これは、X 線バーストを用いた中性子星半径の測定とならんで、中性子星の研究を支える大きな柱となってきた。わが国では「はくちょう」によりパルサーのパルス周期の経年変化が、また「てんま」によりパルサー周辺物質分布が、詳しく調べられてきた<sup>3)</sup>。「ぎんが」はこうした従来の成果を発展させるだけでなく、サイクロトロン共鳴吸収スペクトルの観測など、質的にまったく新しい分野も拓きつつある。ここでは総花的になることを覚悟の上で、これまでの「ぎんが」によるパルサーの観測をまとめてみよう。

## 2. 新発見のパルサー

「ぎんが」は新たに 5 個の X 線パルサーを発見あるいは確認し(表 1)、X 線パルサーの総数は 30 個を越えた。(超新星残骸中の孤立パルサーについては「ぎんが」の新発見例はまだ無い。)常深(阪大・理)らは全天モニタ(ASM)により再帰トランジェント Cep X-4 のフレアを捉えパルサーであることを確立した。また小山・田原・山内・竹内ら名大グループは大面積比例計数管(LAC)を用いた銀河面スキャンにより、カタログに無い多くの X 線源を見つけた。その多くはトランジェント・パルサーと見られる<sup>3)4)</sup>。中でも 5 kpc 腕を見通す Scutum 領域(銀経 $\sim 30^\circ$ )では 7 個もの新しいトランジェント源が発見され、うち少なくとも 3 個はパルサーであるとわかった<sup>5)</sup>。X 線パルサーは若い種族の天体なので、銀河の渦巻き腕に強く集中していると考

えられるが、その様子が「ぎんが」の高感度サーベイで見え始めているのである。

## 3. 白色わい星連星

暗黒星雲 Lynds 1457 の中に変動する X 線源が見つかり、当初は原始星かと思われたが、高野(名大・理)らの解析で 206 秒のコヒーレントなパルスが発見された<sup>6)</sup>。これは中性子星ではなく白色わい星である可能性が高い。強磁場( $10^{6-7}$  G)をもつ白色わい星の連星は、X 線パルサーと似た性質をもつものの、X 線では 3 桁ほど暗い。LAC の高感度のおかげでこの例のように、白色わい星も X 線で詳しく観測できるようになった。X 線は、白色わい星の自由落下温度(kT $\sim$ 数十 keV)に近い温度の、熱制動放射になると予想される。石田(東大・理)らにより 10 個を越す白色わい星が観測されており、LAC の広帯域を活かして、10 keV を越す高温の放射温度が初めて精度よく決められつつある<sup>7)</sup>。この結果は、白色わい星の表面での重力ポテンシャル(質量と半径の比)の推定に役立つと期待される。

## 4. パルス周期の変化

おもな X 線パルサーの周期は LAC と ASM で追跡されている<sup>3)8)</sup>。なかでも銀河中心近くの周期 $\sim 110$  秒のパルサー GX 1+4 は、1970 年代には年間 5% の急激なスピンドアップを示していたが、1987 年には明るさが過去の $\sim 1/50$ で、しかも年間 1% のスピンドダウン状態になっていた<sup>9)10)</sup>。1989 年夏までにその X 線強度は過去の約 1/10 までに回復したが、一定なスピンドダウン状態は続いている(図 1)。この「相転移」のしくみは不明だが、銀河中心からの 511 keV 対消滅ガンマ線の強

表 1 「ぎんが」が新たに発見または確認した X 線パルサー

名前	赤経・赤緯(1950)	周期(秒)	備考
GS2137+57	(324.2, 56.8)	66.2	Cep X-4/4U2137+57
GS1843+00	(280.8, 0.9)	29.5	文献[5]
GS1722-36	(260.0, -36.4)	413	文献[4]
GS1843-02	(280.6, -2.4)	94.8	文献[5]
Sc X-1	(278.4, -7.7)	111	文献[5]

\* 東大理 Kazuo Makishima, \*\* 宇宙研 Fumiaki Nagase, \*\*\* 阪大理 Hiroshi Tsunemi, \*\*\*\* 名大理 Katsujii Koyama: Observations of X-ray Pulsars with *Ginga*

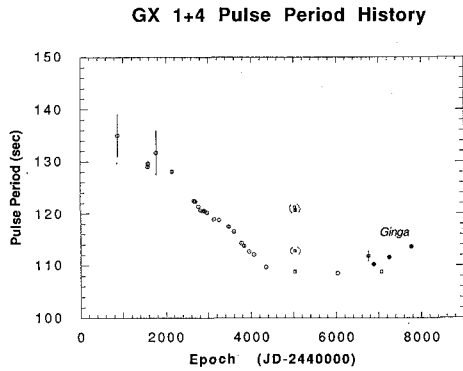


図1 GX 1+4 のパルス周期の長期変化. 黒丸が「ぎんが」のデータ点である.

度がこれと相関しているという説もある. また超新星残骸 G 109.1-1.0 の中にある 6.9 秒のパルサー X 2259+586 は, 連星の証拠がない, 光度が低い ( $\sim 10^{35}$  erg/s), スピンドアウンを続けている, スペクトルが柔らかいなど, 従来のパルサーの概念では捉えきれない特異な性質を示し, 注目される<sup>11)</sup>.

## 5. 非周期的な強度変動

X線パルサーでは周期的な変動(パルス)が強いため, 非周期的(ランダム)な時間変動は調べにくい, LACの面積によりこれが可能となった. 田代・牧島(東大・理)らは GX 301-2 など長い周期のパルサーを調べ, パルス周期よりずっと短い時間スケールでは, 変動のパワー密度が周波数の約  $-1.4$  乗に比例するという, 自己相似則を見出した. これは Low-Mass Binary, AGN などのランダム変動にみられる自己相似則と同じなので, 共通の物理がうかがわれる. 降着物質の乱流状態を反映したものかもしれない. 竹島・篠田・長瀬ら宇宙研グループは, 周期 4.8 秒の Cen X-3 から  $\sim 0.03$

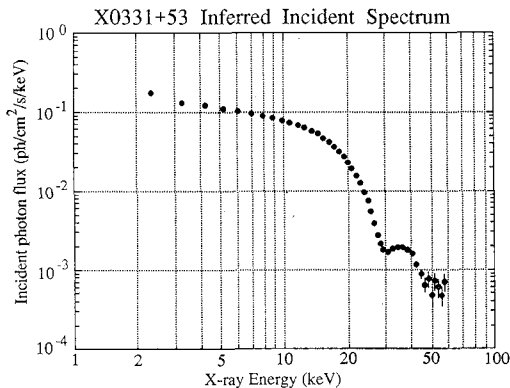


図2 LAC によって得られた X 0331+53 の X 線スペクトル<sup>16)</sup>. 光電吸収および検出器の特性は補正済である. 28 keV 付近にはっきりと吸収構造が見える.

Hz の, また周期 7.7 秒の 4U 1626-67 から  $\sim 0.04$  Hz の, QPO (Quasi-Periodic Oscillation) を発見した<sup>12)</sup>. ただしこれらが Low-Mass Binary の QPO と同質な現象かどうかも含め, その解釈はまだ明らかではない.

## 6. X線スペクトル

パルサーの X 線スペクトルについては, 鉄輝線分光を軸とした「てんま」の成果が, より高い感度で受け継がれている. 三原・大橋(東大・理)らは Her X-1 の low state のスペクトルを, 降着円盤からの反射などで説明した. MIT の Clark らは, パルサーのエクリプスを利用して早期型主星の大気構造を調べ, 星の半径の  $\sim 10\%$  におよぶスケールハイトをもつ, 指数関数型大気が存在することを示した. さらに LMC X-4, SMC X-1 などのスペクトルに見られる鉄の K 吸収端を用いると, マゼラン雲の鉄の存在比が精度よく推定できるかもしれない.

## 7. サイクロトロン共鳴構造

サイクロトロン吸収線はパルサーに関する大成果であり<sup>13)</sup>, 坂尾・三原・牧島(東大), 長瀬・村上・田中(宇宙研), 北本(阪大), 吉田・河合(理研)ら多くのメンバーが取り組んでいる. 中性子星の磁極でのサイクロトロン共鳴によるスペクトル構造は, 従来は Her X-1 と 4U 0115+63 の 2 例でのみ知られていた. 「ぎんが」は 4U 1538-52 のスペクトルに 21 keV の吸収線を発見し<sup>14)</sup>, ついで高圧を下げた観測では Her X-1 のサイクロトロン構造 ( $\sim 35$  keV の吸収線) を優れた精度で測定した<sup>15)</sup>. X 2259+586 のスペクトルにも, 6 keV 付近に吸収線の気配がある<sup>11)</sup>. さらに ASM が, 1989 年 9 月には X 0331+53, 翌 2 月には 4U 0115+63 と, 2 個のトランジェット・パルサーのフレアをとらえた. 前者からは 28 keV の吸収線が発見され<sup>16)</sup>(図 2), 後者では  $\sim 11.5$  keV (基本波) と  $\sim 23$  keV (第 2 高調波) の吸収線を再確認した. これらの成果は, 次のようにまとめられる. まずサイクロトロン吸収構造は, X 線パルサーに汎く見られる現象であること. 次に多くの X 線パルサーのスペクトルに見られる 10~20 keV での鋭い折れ曲りは, サイクロトロン共鳴吸収の結果と思われること. 従ってパルサーのスペクトルの折れ曲がる位置から, 中性子星の磁場の値が推定できること. そしてこうして推定された磁場の分布は,  $(1-4) \times 10^{12}$  G の範囲に集中していることである. ただし X 2259+586 のように, 磁場が  $5 \times 10^{11}$  G のオーダーと見られる例もあるので, 注意がいる. いずれにせよ, これまで情報のとぼしかった中性子星の磁場について, 強力な直接的な測定方法が得られたことになり, その意義は大きい.

## 参 考 文 献

- 1) F. Nagase, PASJ 41, 1 (1989).
- 2) F. Nagase et al., PASJ 36, 667 (1984).
- 3) K. Koyama et al., PASJ 41, 482 (1989).
- 4) Y. Tawara et al., PASJ 41, 473 (1989).
- 5) K. Koyama et al., Nature 343, 148 (1990).
- 6) S. Takano, K. Koyama and K. Makishima, PASJ 41, 651 (1989).
- 7) 石田 学, 科研費(総合A 宮本班)「ぎんが」研究会収録(伊豆, 1989), p. 34.
- 8) H. Tsunemi, PASJ 41, 453 (1989).
- 9) K. Makishima et al., Nature 333, 746 (1988).
- 10) T. Dotani et al., PASJ 41, 427 (1989).
- 11) K. Koyama et al., PASJ 41, 461 (1989).
- 12) K. Shinoda et al., PASJ Letters, submitted (1990).
- 13) 牧島一夫, 宇宙科学研究所報告, 印刷中(1990).
- 14) G. Clark, J. Woo, F. Nagase, K. Makishima and T. Sakao, Ap. J., in press.
- 15) T. Mihara et al., Nature, submitted (1990).
- 16) K. Makishima et al., Nature, submitted (1990).

## X 線新星とブラックホール候補

常 深 博\*・北 本 俊 二\*・井 上 一\*\*

X線全天モニター装置(ASM)は衛星の赤道面から45度までの領域をカバーする広い視野を持ち、毎日一回ではあるが全天の半分以上の領域のモニターをしている(H. Tsunemi et al., 1989, P.A.S.J. 41, 391)。検出限界は大面積比例計数管(LAC)に比べて観測時間の制約などから約二桁高いが、広い領域に散らばっている比較的明るいX線源の長期間に亙るモニターによりこれまでに幾つかの興味ある現象を発見している。これら、ASMの発見した重要な現象に、幾つかのX線源の起こしたフレアーがある。あるものはX線新星であり、あるものは再帰型フレアー星である。いずれも希な現象であるだけに、出来るだけ早く現象を見つけ、いろいろな波長で観測することが望ましい。従って、ASMのように異常を素早く見つける装置が必要になってくる。突発現象が見つかる、直ちに国立天文台を始めとする可視光の天文台に知らせる一方、LACで出来るだけ早く観測するようぎんが衛星の観測予定の見直しが始まる。こうして、場合によっては世界的な規模で探索や同時観測が行われる。ぎんがが軌道に乗ってから約3年経ったが、全部で約20例ほどの突発現象を捉えている。

打ち上げ直後(1987年2月)に見つけたのは、再帰型フレアー星4U 0115+63の増光で周期3.61秒のX線パルサーであった。これは、Be星と中性子星とが連星系をなすもので、軌道周期が約22日である。この種類のフレアーは継続期間が20~30日程度であり、磁場を持った中性子星にBe星の方から時折質量降着が起こるために生ずる。更に、この星はサイクロトロン吸収線のあるらしいことが以前の観測から言われており、その点でも興味深い。しかし、発見した時は既にフレアーも半ばを過ぎており、観測予定を見直すことも出来ないまま

LACによる観測は出来なかった。この星からのX線領域における過去の記録を途切れ途切れではあるが20年ほど遡って調べてみると、3年程度でフレアーを繰り返すらしいことが推定できた。事実それから3年経った今年(1990年)の2月、ASMは再びフレアーを発見した。直ちに観測予定の見直しを行い、LACによる詳細な観測を行った結果、12 keV付近と24 keV付近に非常に強い磁場に起因すると思われる線スペクトル構造を見だしている。このような再帰型X線パルサーは幾つか知られており、ASMはこれまでにA 0535+26, V 0331+53, Cep X-4などのフレアーを見つけ、LACによる詳細な観測に引き継いでいる。

1988年4月にASMはとんでもなく明るいX線新星GS 2000+25を発見した。この星は全天で一番明るいSco X-1の半分ほどの明るさになった。しかも、丁度増光し始めた時から最大強度に達するまでの約二日間に二桁ほど明るくなる現場を観測する好運にも恵まれた。発見直後直ちに(当時の)東京天文台を始め各地に連絡した。こうして世界的な規模で光学天体の搜索競争が起こったが、木曾のシュミットカメラで17等級の光学天体を最初に同定することが出来た(H. Tsunemi et al., 1989, Ap. J. 337, L81)。更に、ソビエトの衛星クワントも数百 keVに亙る領域で検出したし、間もなく、電波でも増光していることが確かめられる等、多くの波長領域で観測が行われることになった。その後、7月に一時増光したが、概ね20日程度の半減期で暗くなって行き、9月にはASMの検出限度を下回った。その間数回に亙ってLACによる詳細な観測を行った。

さて、そのX線スペクトルを調べてみると大変柔らかく、X線パルサーとは対照的である。強度の強い低エネルギー側(10 keV以下)は降着円盤からの黒体輻射で良く合い、その温度は約1 keV(1000万度)で強度は徐々

\* 阪大理 Hiroshi Tsunemi, Shunji Kitamoto, \*\* 宇宙研 Hajime Inoue: X-ray Novae and Blackhole Candidates