

X 線天文学の現状と将来の展望

榎野 文命・牧島 一夫*ほか・「ぎんが」チーム

(1987年12月25日受理)

Future Prospect of X-Ray Astronomy

By

F. MAKINO, K. MAKISHIMA and GINGA Team

Abstract: Present status of x-ray astronomy is overviewed basing on recent observational results obtained with Hakucho, Tenma and Ginga. The high sensitivity of Ginga revealed hard x-ray emission from various class of x-ray sources such as premain sequence stars, dark clouds, supernova remnant, diffuse Galactic component, galaxies and QSOs. The data with less Poissonian noise and improved method of analysis have been clarifying chaotic variations of x-ray intensity from Galactic and extra-galactic compact sources, in relation to structure of accretion disc.

Future project on spectroscopic x-ray observatory is briefly presented.

I. はじめに

「はくちょう」で衛星観測の時代にはいった日本の X 線天文学は、「てんま」による精密分光観測で大きく進展をとげ、「ぎんが」により新時代を迎えている。

「ぎんが」の第 1 の意義は、この半年間の試験観測で実証されたように、大面積比例計数管 (LAC) により 2-20 keV のバンドで、これまで最高の検出感度 (0.2 mCrab) が実現されたことである。このバンドは星間吸収に妨げられず、しかも光子フラックスをかき上げるので、X 線天文学の特色が最も発揮できる波長帯である。この結果、観測できる天体が大幅に増え、他の波長域の天文学との結びつきは一段と強まると期待される。また観測の精密化により多くの興味ある物理現象が論じられるようになり、物理学の他の分野との関連も深まるであろう。

* 東京大学理学部

「ぎんが」の第2の意義は、1980年代後半の世界のX線天文学を支える。ほとんど唯一の汎用X線衛星だという点である。現在、欧米の科学衛星計画は、不幸にも大きな停滞を余儀なくされている。この状況下で高エネルギー天文学の国際的な学問水準やアクティビティを維持することは、「ぎんが」に課せられた重大な責任である。

以上の状況のもとで、X線天文学の現状と展望を論じる。

II. 観測対象から見たX線天文学の現状

X線天文学の進歩により、ほとんどすべての天体がX線で検出されるようになった。～3 keV以下の軟X線領域では、1978年に打ち上げられた米国の大型X線衛星「アインシュタイン」が大きく貢献した。2-20 keVのエネルギー範囲では「ぎんが」の貢献が大きい。以下の表では、現時点で知られている宇宙X線源を、その種類別にまとめたものである。#印は、「はくちょう」、「てんま」などで有効に観測されてきたが、「ぎんが」でさらに進展が期待できるもの。*印は、「ぎんが」で新たに開拓されようとしている分野を示す。角カッコの中に、X線放射のエネルギー源を示した。

1. 銀河系内の天体

a. X線の点源

a-1 星

a-1-1 単独の星

星のコロナ[晩期型星では対流・微分回転→磁場, 早期型星では放射圧?]

原始星 (T-Tau 星など)[重力→ケプラ-運動→磁場?]*

ウォルフ・レイエ星, フレア星など[星風の運動エネルギー?]*

a-1-2 連星系[重力結合エネルギー→軌道運動→磁場?]

食連星 (W-Uma など)* ; RS-CVn 型連星*

a-2 高密度天体 (白色わい星, 中性子星, ブラックホール)

a-2-1 孤立した白色わい星[熱放射?]

a-2-2 白色わい星を含む連星系[重力エネルギー, 核エネルギー]

激変星, dwarf nova (磁場の弱いもの; SS-Cyg, U-Gem など)*

Intermediate Polar (磁場の強いもので自転と公転が不一致)*

Polar (磁場の強いもので自転と公転が一致)

a-2-3 孤立した中性子星

シンクロトロン・パルサー (かにパルサーなど)[自転エネルギー]#

パルスを示さないもの, 電波パルサー[熱放射?]

ガンマ線バースト源 (?)#

a-2-4 中性子星を含む連星系[重力エネルギー, 核エネルギー]

Population I 天体 (X線連星パルサーなど主に大質量X線連星)#

Population II 天体 (X線バースターなど主に低質量X線連星)#

a-2-5 ブラックホールを含む連星系[重力エネルギー]#

b. 広がった成分

b-1 超新星の残骸

シェル型のもの[超新星爆発→シエルの運動→ショック]#

かに星雲型, 複合型のもの[中心のパルサーの自転エネルギー]*

超新星爆発の複合で生じた, 高温の星間プラズマ

b-2 ジェット天体 (SS 433 など)*

b-3 銀河リッジ放射 (点源の集合か否かまだ不明)#; 銀河中心*

2. 銀河系外の天体

a. 銀河

a-1 活動銀河核[中心核の巨大ブラックホール(?)の重力エネルギー]

クエーサー*; BL-Lac 天体#

I型セイファート銀河#; II型セイファート銀河*

a-2 それ以外の銀河

渦巻き銀河 (とくにスターバースト銀河)*

楕円銀河とそのハロー*; 不規則銀河 (LMC, SMC を含む)*

特異銀河や強い電波銀河 (M 87, Cen-A など)#

b. 銀河クラスター[重力ポテンシャル+?]#

c. 宇宙の大域構造

超銀河クラスター (?)*; LogN-LogS 関係と宇宙背景放射*

III. 物理的過程から見た X 線天文学の現状

1. X 線観測から得られる情報

X 線観測から得られる情報は一般に, (i) 空間情報(X 線源の位置, 強度分布), (ii) 時間情報, および(iii) スペクトル情報の3つの次元にまたがる。このうち, (i)はアインシュタイン衛星などミラー衛星の独壇場といえる。また4番目の次元としての偏光観測は, 今後の技術開発を待たねばならない。

多くの X 線源は激しい強度変動を示すので, 時間情報は豊富である。長円軌道を持った ESA の EXOSAT 衛星は, $10^3 \sim 10^4$ 秒のタイムスケールで新しい成果を挙げた。より短い $10^{-3} \sim 10^3$ 秒では, 「ぎんが」LAC がその高い感度により, 研究の最前線を切り開く立場にある。1日~数年のタイムスケールでは, Vela 5 B の長期データバンクと「ぎんが」ASM の観測とを組み合わせる計画が進んでいる。

スペクトル情報は, X 線放射機構を直接に反映するので, 極めて重要である。酸素, イオウ, ケイ素の K 輝線を含む 0.5-3 keV バンドでは「アインシュタイン」SSS (半導体検出器) が, また 2-20 keV では鉄の K 輝線を中心に「てんま」SPC (蛍光比例計数管) がそれぞれ優れた成果を挙げた。

2. X 線の放射過程

X 線スペクトル情報は, ただちに X 線放射過程につながる。現状で知られている放射過程とその例を, 以下でまとめておく。

a. 非熱的な過程

- a-1. シンクロトロン放射または類似のプロセス
かに星雲型の超新星残骸；孤立パルサーからの X 線パルス；活動銀河核 (?)
- a-2. 低エネルギー光子の逆コンプトン散乱 (非熱的な電子による)活動銀河核 (?)
- a-3. ガンマ線のコンプトン散乱 (SN 1987 a からの X 線)
- a-4. 非熱的な制動放射
太陽フレアの硬 X 線；星のある種のフレア (?)
- b. 熱的な過程
 - b-1. Optically thin なプラズマからの熱的放射 (熱的制動放射)
星のコロナ；原始星と星形成領域；RS-CVn 型星，ウォルフ・レイエ星など；
白色わい星の硬 X 線成分；超新星残骸；熱い星間ガス；銀河リッジ放射；
宇宙ジェット；スターバースト銀河；楕円銀河のハロー；銀河クラスター
 - b-2. Optically thick な熱的放射 (黒体放射など)
低質量 X 線連星；X 線バースト；ブラックホール周囲の降着円盤 (High 状態)
 - b-3. コンプトン・逆コンプトン散乱 (熱的な電子による)
X 線連星パルサー；ブラックホール周囲の降着円盤 (Low 状態)；
降着円盤コロナ (?)；活動銀河核 (?)
 - b-4. 熱的サイクロトロン放射
X 線連星パルサー；ガンマ線バースト (?)

3. X 線放射のエネルギー源

X 線は量子エネルギーの高い放射であるから，X 線放射が起きるためには，良質の (エントロピーの低い) エネルギー源を必要とする。X 線は従って，高い自由エネルギーをもつ系の良い目印となる。その自由エネルギー源を以下で考察する。

a. 重力エネルギー

最も広く見られるエネルギー源であり，質量降着する高密度星や活動銀河核はその代表例である。原始星，RS-CVn 型星，蝕連星などでは，重力エネルギーがひとまずケプラー運動エネルギーに形を変え，さらに磁場エネルギーを経由して高温プラズマの生成につながる。またジェットや II 型超新星爆発は，いわば重力エネルギーがいったん並進運動エネルギーに形を変え，さらにショックを経由して X 線放射を引き起こすとも見られよう。

b. 原子核エネルギー

中性子星表面での X 線バースト，白色わい星の新星爆発，I 型超新星爆発などがこれに対応する。また星のコロナもある意味ではここに分類される。

c. 回転運動エネルギー

若いパルサーによる粒子加速とそれに伴うシンクロトロン放射が，好例である。晩期星のコロナも，星の微分回転を必要とする点では，この分類にも関係する。

4. 物理過程に関するトピックス

「ぎんが」の結果は多岐にわたるが，その中から興味ある物理的過程として浮かび上がりつつあるトピックスをいくつか拾ってみる。

a. 鉄の蛍光輝線

鉄の蛍光輝線は「てんま」で詳しく研究されたが、「ぎんが」でも進展を見せている。ひとつは、数個のクエーサーから赤方偏位した鉄輝線が初めて検出されたことである。これは将来の X 線観測において、光の助けを借りずにクエーサーを認識し、 z を決定できることを意味する。また II 型セイファート銀河 NGC 1068 からは強烈な鉄輝線が観測された。そのスペクトルは、「てんま」で X 線連星パルサー Vela X-1 のエクリプス中に得られたものと良く似ている。従って NGC 1068 の中心核は厚い物質に隠されており、散乱 X 線のみが観測にかかると考えられる。

b. X 線強度のカオスとフラクタルな変動

ある種の X 線源は、不規則な強度変動を示す。そのパワースペクトルは多くの場合、(パワー) \propto (周波数) $^{-k}$ というフラクタルな関係を示す。ブラックホール候補として有名な Crg X-1 では 1 秒～1 ミリ秒の範囲で k はほぼ 1, 低質量 X 線連星では 1000～0.1 秒付近で $k \sim 1.5$ でさらに 0.1-0.02 秒あたりに不思議な“疑似周期現象”が出没する。また活動銀河核では、 10^5 - 10^2 秒あたりで $k \sim 2$ となっている。こうしたパワースペクトル形成の説明はまだ無いが、降着物質のケプラー運動エネルギーが熱に転じる際には強い乱流状態を経由するはずであるから、観測されたフラクタル関係は乱流に伴うカオスと見るのが自然であろう。この方面からの研究が望まれる。

c. 高温プラズマの生成と加熱

「ぎんが」により、多くの天体から 3-10 keV という高い温度を持ったプラズマが検出された。RS CVn 型連星 UX Ari 暗黒星雲 Lynds 1457 (中心に原始星が隠れているらしい)、ウォルフ・レイエ星 HD 193793 などである。これらの場合、プラズマを加熱する機構は何か(磁場の再結合?)。例えば Lynds 1457 では原始星の重力ポテンシャルで決まる自由落下温度よりずっと高いプラズマ温度が実現されているが、なぜそれが可能なのか。また 3-10 keV 程度の温度が出現しやすい理由があるのか。こうしたプラズマと、「てんま」が発見した銀河面にそう高温プラズマの分布とは、どんな関係にあるのか。今後、総合的な研究が望まれる。さらに大マゼラン雲の超新星からの X 線にも高温プラズマが出すとみられる成分がみつかり、話題を呼んでいる。

d. 宇宙の暗黒物質

楕円銀河は温度 ~ 1 keV のハローをもつことが「アインシュタイン」により発見されたが、「ぎんが」による楕円銀河 M 49 の観測では、より高い温度(~ 3 keV)とずっと大きなフラックスが得られた。スターバースト銀河 M 82 でも同様な結果が得られている。Source confusion の可能性は否定しきれないが、銀河に今まで考えられていたものより高温で広がったハローがあると考えるのは、魅力的な仮説である。このような高温プラズマを、銀河の見かけの質量による重力で閉じ込めることはできず、見えない物質の存在を示唆している。これが確認されれば、暗黒物質の存在する証拠が、銀河クラスターのビリアル質量や銀河の回転曲線と独立に得られたことになる。

IV. これからの X 線天文学

今後の X 線観測の方向としては、source confusion を避けて感度を上げるため、ミラー

による観測が主流となろう。その場合のハードウェアの可能性を、下にまとめておく。*印は、ASTRO-Dへの搭載が検討されているものである。観測目的としては、上に述べた問題を含めて極めて多岐にわたるが、中でも最重点項目は、宇宙 X 線背景放射の正体を明らかにし宇宙の歴史の空白時代を埋める作業であろう。またこれとは別に、1 keV 以下の超軟 X 線領域と、20~100 keV の硬 X 線領域は、装置の改良を含めてミッションを検討するに値する。

a. X 線光学系

a-1 全反射ミラー；磨きミラー；レプリカミラー；多重フォイル軽量ミラー*など

a-2 ブラッグ反射ミラー；合成多層膜ミラー（直入射，斜入射）

b. 結像スペクトロメータ

b-1 ガス検出器；位置検出型蛍光比例計数管（ISPC）*；ペニング検出器など

b-2 半導体検出器*；CCD カメラ；PIN ダイオード・アレイなど

c. 高分解能スペクトロメータ

c-1 非分散系；マイクロカロリメータ（フォノンを利用）

c-2 分散系；透過型グレーティング；ブラック結晶分光器など

d. ポラリメータ；合成多層膜によるブラッグ反射型；トムソン散乱型など。まだ開発は進んでいない。