

進化するX線天文衛星

大橋 隆 哉

〈東京都立大学理学部 〒192-03 八王子市南大沢1-1〉

X線天文学の急速な進展は、とりも直さずX線天文衛星の進歩そのものを反映している。海外と日本でこれまでに打ち上げられた主なX線天文衛星をとりあげ、その成果を紹介する。新しい観測装置の登場により、新しい天体や天文現象が捉えられ、より深い知識が得られることで、学問分野が「進化」してくる様子を見ることができる。

1. はじめに

X線天文学というのは衛星が上らなければ成り立たない学問である。一方一つの衛星の活動期間はざっと5年というところである。したがってX線天文屋は追われるように新しい工夫を盛り込んだ衛星を作り、それを上げてきた。これがこの分野の急速な発展をもたらした原因である。しかし大型化は必然的に予算と時間を食うため、アメリカでは1978年のアインシュタイン以後、X線天文衛星が上らないという学問的飢餓状態が今だに続くことになる。これに対し、日本は比較的小型の衛星（しか作れないの）で特徴を持たせたものを5-6年間隔で上げてきた。X線による宇宙観測には、まだ伸ばす余地のあるベクトルがいろいろあるので、ある方面（たとえばカバーするエネルギー範囲や有効面積）だけなら、アメリカが15年の歳月を費やしてなお上らないあの10トン衛星AXAFの性能を、420kgの「あすか」がしのぐという離れ技が可能であった。こうして各国がそれぞれの工夫を盛り込んで上げてきたX線天文衛星の歩みとその成果を、ここでは駆け足で振り返ってみる。まずX線ミッションと呼ばれるものをまとめて表1に示しておく。なお文献についてはレビュー論文¹⁾を、最近の成果については名

Takaya Ohashi: X-Ray Astronomy Missions: Their Evolution

古屋シンポジウムの集録²⁾を参照願いたい。

2. Uhuru

1970年に世界で初めてX線天文専用の衛星があがり、スワヒリ語の自由という名(Uhuru)がつけられた(図1)。有効面積700cm²×2台の比例係数管は今でも十分仕事ができるほど大きい。また約10分でゆっくりスピンのことで大円上を観測し、スピン軸を変えながら全天のサーベイをするという方式はHEAO-1, ROSATに受け継がれている。大きさといい、姿勢制御の機能といい、最初に上げるにはもったいない程豪華な衛星だった。果たしてUhuruは全天のスキャンから339個のX線源を含むカタログを作り、これは今だにもっとも利用頻度の多いカタログのひとつである。またHer X-1, Cen X-3などのX線パルサーを発見し、その後長らく中性子星がX線天文学の主役の座に君臨するための、土台作りをすることになる。さらに時間変動という要素がX線天体の重要な側面であることを小田先生に気づかせたのもUhuruではなかったかと思われる。実際Cyg X-1の激しい変動がきっかけとなり、光での同定、そして得られた質量関数からX線天体はブラックホールらしいというドラマが進行する。一方でUhuruは、銀河団が一般に強いX線源であるという、X線天文学史上屈指の重要発見を行なっている。暗黒物質の量や分布宇宙や銀河の生い立ち、

表1 X線天文学のミッション

X線ミッション	活動期間	主な観測器 ^{*)}	特徴 (spin/point)	主な成果
OSO-3	1967-1968	H	S	X線背景放射
OSO-5	1969-1972	H	S	X線背景放射
Vela series	1969-1979	M	4台の衛星	X線バースト
Uhuru	1970-1973	M	S,サーベイ	近接連星, 銀河団
OSO-7	1971-1973	M,H	S,サーベイ	4色のカタログ
Copernicus	1972-1981	M,C	P,主にUV	SNR マッピング
ANS	1974-1976	L,M,C,B	P	X線バースト
Salyut-1	1974-1975	L,M	P	Cyg X-1, Her X-1
Ariel-5	1974-1980	M,B,Pol,SM,MC	S,サーベイ	AGN,トランジエント天体
Apollo-Soyuz	1975	L,M	P	SMC X-1パルス
SAS-3	1975-1979	L,M,MC,C	S,P	バースト, 位置決め
OSO-8	1975-1978	L,M,H,B,Pol	S,低雑音	鉄輝線
HEAO-1	1977-1979	L,M,H,MC	S,P,大面積	全天カタログ
Einstein	1978-1981	F,IPC,HRI B,SS,M,TG	P,X線撮像	銀河団, QSO's, SNR
Ariel-6	1979-1981	L,M,C	主に宇宙線	GX 1+4
はくちょう	1979-1984	L,M,MC,SM	S	バースト
Astron	1983-1988	M	P	Her X-1 減光
てんま	1983-1984	L,M,G,C,SM,MC	S,エネルギー分解能	鉄輝線
EXOSAT	1983-1986	L,M,G,F,TG,	P,4日の軌道	QPO
ぎんが	1987-1991	M,SM	P,大面積	SN1987A,AGN 等
Kvant/Mir	1987-	M,H,CM,G	宇宙ステーション	SN1987A
Granat	1989-	M,H,CM	P,4日の軌道	銀河中心撮像
ROSAT	1990-	F,IPC,HRI	P	軟X線全天サーベイ
Astro-1 (BBXRT)	1990	CF,SS	P,8日のミッション	エネルギースペクトル
あすか	1993	CF,CCD,G	P	スペクトル, 撮像

注) B: プラッグ結晶分光器
 C: X線集光鏡
 CF: コニカル撮像鏡
 CM: Coded Mask で撮像
 F: 本格撮像鏡
 G: ガス蛍光比例計数管
 H: 硬X線用シンチレーター (10~200keV)
 HRI: チャネルプレート検出器
 IPC: 撮像型比例計数管
 M: 中エネルギー比例計数管 (1~20keV)
 MC: ステグレコリメーター
 Pol: ポラリメーター
 SM: スカイモニター
 SS: 半導体検出器
 TG: 透過型回折格子
 P: ポインティング観測 (三軸安定)
 L: 軟X線用比例計数管 (0.1~1keV)
 S: スピン観測

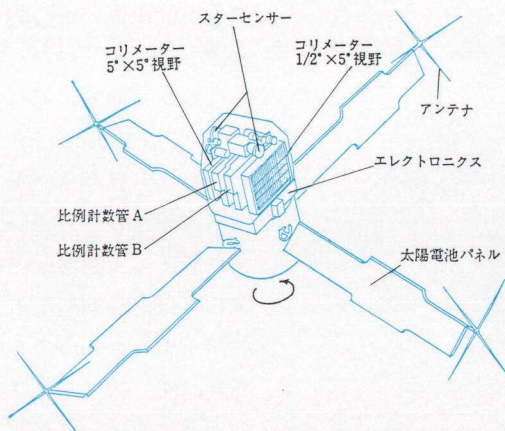


図1 Uhuru衛星

あるいは宇宙の基本パラメータを調べる上で、銀河団からのX線は実に多くの情報をもたらす。

3. Ariel-5-SAS-3-OSO-8

1974, 1975年に上げられたこれらの衛星は、それぞれ特徴のある観測を行った。面白いことにこれら第2期の衛星の観測装置はいずれもUhuruのものよりも小さくなっている。

Ariel-5は英国の衛星でやはり全天サーベイを行なった。カタログされたX線源の数は251個である。Ariel-5はX線ノバなど時折明るくなる天体の発見に名を残している。A 0620-00(ブラックホールの筆頭候補), A 0535+262 (110日周期で明るくなるパルサー)のAがそれである。サーベイ用検出器の視野がUhuruより広いためであろう。その他にもペルセウス銀河団からの鉄輝線の発見や、セイファート銀河の研究などの、シブイ成果も

Ariel-5の特徴である。

SAS-3は米国のMITが中心となって上げた衛星である(Small Astronomical Satellite-3)。ちなみにSAS-1はUhuru, SAS-2はガンマ線天文衛星である。SAS-3の成果は何と云っても、Lewin先生が強力に進めたX線バーストの観測である。バースト現象の発見こそANSとVela衛星に先を越されたが、ラピッドバーストを含む10個以上のバースト源の発見とそれらの詳細な観測によって、SAS-3はまさにバースト学を実質的に押し進めた衛星だと言って良いであろう。その後日本の「はくちょう」が見て、これぞ新発見と思った現象が、調べてみるとSAS-3によって観測済みだったと判明し、残念な思いをしたことが何度かあった。観測だけでなく、中性子星表面

での核フラッシュといったX線バーストのモデルの研究でもMITがリードしており、その後「はくちょう」で肩に力が入った日本の研究者たちと張り合うことになる。

OSO-8は太陽観測衛星ではあるが、小さいながらも低バックグラウンドでエネルギー分解能の良い比例計数管を積んでおり、宇宙X線のエネルギースペクトルの観測に特徴ある成果を上げた。銀河団のX線放射が熱的なものであること、鉄の輝線強度からその存在比が宇宙組成の約半分であるという重要な発見を行なった。またX線バーストのエネルギースペクトルが黒体放射に合うという、これも重要な発見を行なった。X線パルサーHer X-1などの鉄輝線の観測でも、非常に質の良いデータを出している。良いエネルギースペクトルをとることで、X線天文学を現象論から物理学の舞台へ引き上げたといったらほめ過ぎだろうか。

4. HEAO-1

米国としてはノンミラー衛星の最後を飾る(XTEが計画中だが)、重量3トンの大衛星である。軌道寿命は短く1977年に上がり1年半ほどで落ちたはずである。高感度の全天サーベイを行ない842個のソースのカタログを作ったが、ポイン

ティング観測をほとんど行なわなかったのも、個々の系外天体に関する成果はかなりを日本の「ぎんが」に譲った形になってしまう。それでもHEAO-1の特にA2という低バックグラウンドの比例計数管で出した結果は迫力がある。1 mCrab強度までの完全なlogN-logS関係、セイファート銀河のX線スペクトルが皆光子インデックスが1.6の中関数で表されること、X線背景放射(CXB)のスペクトルが40 keVの熱制動放射に良く合うこと、CXBの強度の一様性が数度のスケールでは全天で数%以内に入っていることなどの発見である。一方スグレコリメータを使いX線源の位置を精度良く求め、それらを光で同定する作業は現在も進行中である。X線で特に明るい種類の天体、BL Lac天体やキューサーがいくつか発見されている。

5. Einstein

X線天文学を天文学たらしめたのはEinstein衛星である(図2)。あらゆる階層の天体を捉え、最も遠方の宇宙を観測し、しかも像を撮ったという点においてEinsteinがもたらした功績は、それ以前の全ての衛星を合わせたよりも大きいとさえ言える。単に像を撮るだけでなく、透過型の回折

格子、プラグ結晶、半導体検出器といった、波長分解能の高い野心的な装置も搭載していた。ある分野を革命的に進めたという点でEinsteinのインパクトはハッブル宇宙望遠鏡よりも大きいとすら思える。銀河系内に関しては、晩期型星のX線が予想外に強いことの発見、クリスマスツリーのように違った星が明るくなる星生成領域の観

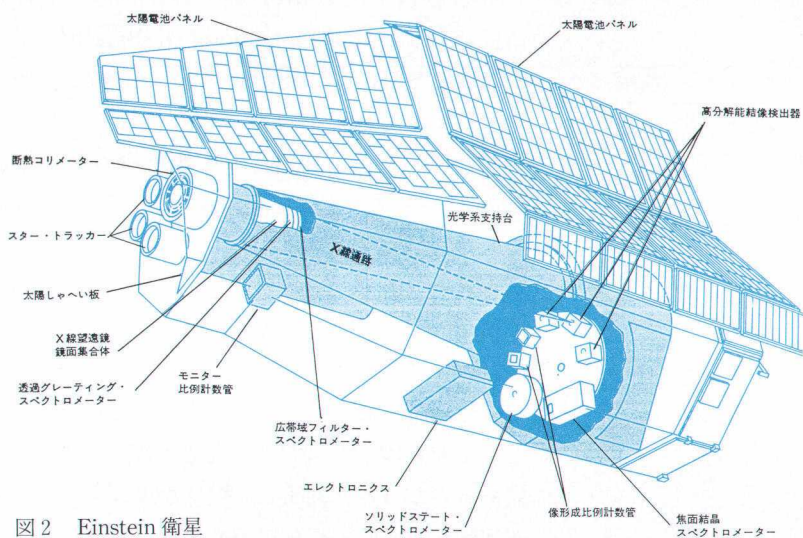


図2 Einstein衛星

測, 約 50 個の SNR の X 線像を捉え 10 個以上について中心にパルサーを発見したことなどが目だった成果である。系外天体に目を移すと成果が多過ぎて書けないほどある。アンドロメダ銀河の 100 個以上の X 線源の“発見”, 楕円銀河やスターバースト銀河のホットガスのハローの発見, 銀河団の X 線像とそれに基づいたホットガスの進化の研究, サーベイ観測による精度良い $\log N$ - $\log S$ 関係の作成, 活動銀河と銀河団の光度関数の宇宙論的進化, ディープサーベイから X 線背景放射に占めるクエーサーの割合の推定, 背景放射の揺らぎに基づく $\log N$ - $\log S$ 関係の折れ曲がりの予言, などなど圧倒されるほどである。Einstein 以後に計画されたミッションが軒なみ X 線ミラーを搭載しているのもむべなるかなである。中性子星とブラックホール“おたく”になりかけていた我々に, X 線天文学の世界はこんなに広がって面白いのだよということを, Einstein が気づかせてくれたように思う。

6. EXOSAT

1983 年に上がったヨーロッパの EXOSAT の売りものは遠地点 19 万 km が可能にする, 長時間連続観測である。但しこの軌道を選んだ本来の目的, 月の掩蔽観測による X 線源の精密位置決定, について触れる人はもう誰もいない。特に AGN については, EXOSAT によって初めて変動の全貌を見ることができた。その結果セイファート銀河の時間変動には特徴的な時間スケールがないことがわかった。セイファートについては多くのスペクトルを基に, 光子インデックスが 1.6 にそろふことや, 軟 X 線成分の超過が確認された。しかし EXOSAT の発見といえばやはり QPO が筆頭であろう。おもに低質量連星系の X 線光度がわずかに準周期的にゆらぐこの現象に関しては, いろいろ分類がなされいくつかのモデルが検討されたが, 結局 QPO が何なのかは今もってはっきりと理解できていない。QPO が重要な物理を含むのか

そうでないのかについてすら, しばしば意見が分かれるところである。

7. ROSAT

1990 年に上がったドイツの X 線ミラー衛星で, 観測できるエネルギーは 2 keV 以下に制限されるものの, 反射望遠鏡の結像性能が良いことと焦点面の位置検出型比例計数管のバックグラウンドが低いことで, Einstein 衛星を上回っている。実際, 点源に対する ROSAT の X 線像を見ると直径約 10 秒角の中に 90 % 以上のフラックスが入っている。Einstein では 25 % 以上の光が直径 30 秒角以上の範囲に広がったハローを作っていたことと比べると, 解像力の違いは歴然としている。さすがドイツである。ROSAT は最初の半年で全天サーベイを行なった。おそらく何万個という天体が発見されたであろうが, まだカタログは公表されていない。ROSAT の成果を議論するのは時期尚早だが, たとえばディープサーベイに基づいた多数のクエーサーの同定, $\log N$ - $\log S$ カーブが暗い限界で折れ曲がることの発見, 安定状態に達したと思われていた銀河団の中心がふたつ目玉構造で合体の最中であったことの発見などは, ROSAT の角分解能と感度を生かした重要な結果である。

8. 「はくちょう」

ここからは, 高度成長を遂げた日本のミッションを概観する。失敗を乗り越えて 1979 年に上がった「はくちょう」というこの日本初の X 線天文衛星は, 衛星の大きさや感度という面でも, 当時の X 線グループの自力という面でも, そして我々があの衛星を思い出すときの一種の郷愁も含めて表現すれば, まさに子どものような衛星だった (図 3)。重さは 95 kg, 通常の観測に用いた FMC 2 という比例計数管の有効面積はたったの 83 cm² (ちなみに「ぎんが」の大面積比例計数管が 4000 cm²)。こんな小さな衛星があつた 3 トンもあるアイ

ンシュタイン衛星の向うをはって、これほど成果をあげるとは、少なくとも私には予想できなかつた。もちろんバーストハンティングに賭けるといふ、小田先生の超人的な勘が正しかったことが最大の勝因だが、なまじ暗い天体が見えない分、限られた数の明るいものを徹底的にモニターしたということも大きい。その成果は、10個近くのバースト源の発見、銀河中心からエディントン限界を越えると思われる光度の観測、数分という短時間間隔のバーストの検出、さまざまな形のバースト

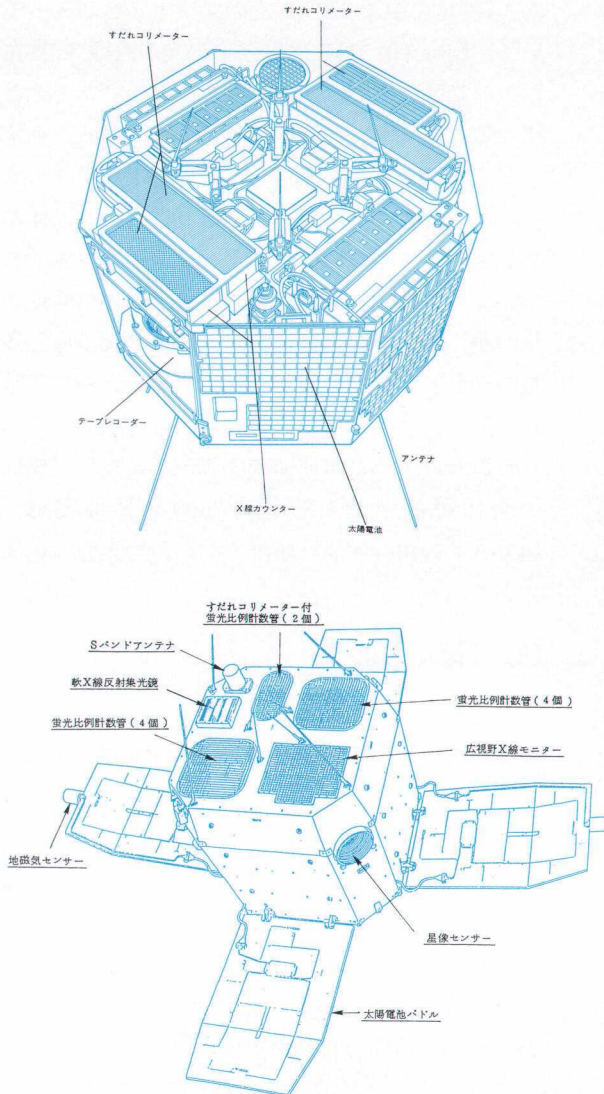
が同じ黒体半径を示すことの発見、ラピッドバースターの研究、一見、酔歩するかのような Vela X-1 のパルス周期の変化、再起新星からのバースト検出、バーストの光 X 線同時観測で光バーストの時間遅れの発見、などなど天体物理の面から意義のある結果を幾つも出している。

9. 「てんま」

鉄の輝線の検出に優れた新しい観測装置、蛍光比例計数管を搭載していたのだが、1983 年の打ち上げ後 1 年半足らずで電源関係に不調を来たしたことは残念である。「てんま」(図 4) の出したエネルギースペクトルは「あすか」以前では最高の質を誇る。X 線パルサーや活動銀河からの鉄の輝線は 6.4 keV、すなわち中性に近い原子からのもので、周囲の冷たい物質を連続 X 線が照らすことで発生していること、一方、超新星残骸や銀河団からは 6.7 keV の鉄輝線が出ており、全体が数千万度のプラズマからの熱放射である、といった区別がはっきりできるようになったのも、「てんま」の功績である。このほか、中性子星の重力場で赤方偏移したと思われる鉄の K 吸収線を X 線バーストから発見したこと、銀河面に沿って広がった鉄輝線の放射の発見、低質量の X 線連星の放射が中性子星表面からと降着円盤からの二成分からなることの証拠など、スペクトルの分解能を生かした興味深い結果を提出している。

10. 「ぎんが」

諸外国の X 線天文屋の目を開かせた衛星が Einstein だったとすれば、我々日本の研究者の視野を大きく広げたのが 1987 年打ち上げの「ぎんが」であった。まずハードウェアの段階での日英あるいは日米協力で、早くも国際化の波が押し寄せる。軌道に上がってからは、「てんま」に比べ 2 桁近い感度の向上で、



SN 1987 A を初め系外系内のありとあらゆる天体が観測対象となり、天文学の世界が大きく広がる。QPO などのタイミング観測、X線パルサーやγ線バーストのサイクロトロン線の観測、ブラックホール候補天体の発見、銀河中心の大量のホットガスの発見を初め、系外に目を移すと1型2型セイファート銀河の吸収・反射スペクトルの発見、活動銀河の時間変動の観測、鉄輝線などを用いた銀河・銀河団のホットガスの進化を探る観測、キューサーのエネルギースペクトル観測、X線背景放射のゆらぎの研究等など、きりが無いほどである。天体物理から銀河天文、宇宙論に迫るところまで、宣伝じみだが、「ぎんが」の出したのは本当におもしろいといえる結果ばかりである。ゲスト観測で諸外国から著名な研究者たちがぞくぞくと訪れるので、宇宙研では近年日本人同士の馬鹿話ばかりがやり辛くなってしまった。ちなみに論文誌に出た論文の数も170を超える。

11. そして、「あすか」

今年2月20日に打ち上げられた「あすか」はもっとも新しいX線天文衛星である。「あすか」のX線反射望遠鏡については、天文月報92年9月号に名大、国枝氏による詳しい解説がある。「あすか」の特徴は、望遠鏡衛星としてこれまでで最大の有効面積を持つこと、望遠鏡で初めて鉄のK輝線が見られること、これにマッチしたエネルギー分解能の良い2種類の焦点面検出器を持っていることである。検出限界は観測時間にもよるが、ざっと「ぎんが」の1/100程度まで達しそうである。つまり、「ぎんが」で得られた面白い結果を、約10倍遠い(従って対象の数が約1000倍多い)天体について、調べることができるというわけである。実際、「あすか」はROSATでは検出限界に近かった天体を、6時間の観測ではっきりと捉えることに成功している。幸い全ての機器は順調に動作しており、性能的にも期待通りのものが軌道上で実現している。10月からはハード、ソフトの製作担当

者の特権が無くなり、一般からのプロポーザルによって観測対象が決められる。また(これまでと違って)X線関係者でなくともデータ解析ができるような、使いやすいソフトウェアが日米の共同開発で準備される。「あすか」のデータは、質・量共にとてもX線グループだけで処理しきれものではない。ぜひ、多くの天文学者の人々に利用してもらいたい。X線と他の波長、あるいは観測と理論といった異なる畑の人々が「あすか」の結果を酒の肴として議論する中から、わが国のX線天文学が今後どの方向に進むべきかが、より良く見えてくるという効果も期待したい。

12. 最後に

Hale Bradt先生にそそのかされて、Annual Reviewの論文¹⁾の共著者に混ぜてもらったため、「あすか」打ち上げという最悪のタイミングで記事を書く羽目になってしまった。しかし考えてみるとX線天文学も、「始まったばかりの若い分野」などと言われつつ早30年を経過している。しばらくは「あすか」景気に沸く日本のX線グループも、世代交代も含めこれからの道は険しくなると予想される。こうした時期、少し落ちついて将来を考える上で、これまでのミッションを振り返ってみることに、それなりに意味があるかも知れない。また、拙文がX線以外の分野の方々の参考になれば望外の幸せである。

参考文献

- 1) Bradt, H. V., Ohashi, T., Pounds, K. A. 1992, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, **32**, 392.
- 2) Tanaka, Y., and Koyama, K. (ed.) 1992, *Frontiers of X-Ray Astronomy* (Universal Academy Press, Tokyo).