

# X線天文学の新時代：『あすか』最新の成果

堂 谷 忠 靖

〈宇宙科学研究所 〒229 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: dotani@astro.isas.ac.jp

我国4番目のX線天文衛星『あすか』が打ち上げられて、すでに1年になる。『あすか』は昨年10月に試験運用を終え、現在は日米を始めとする世界各国から公募された提案にもとづき観測が進められている。『あすか』がこれまでに取得したデータは現在も精力的に解析が進められているが、その成果はまさしくX線天文の新時代を開きつつあると言うにふさわしい。ここでは主に試験運用期間中に得られたデータをもとに、その成果のいくつかを解説する。

## 1. 初めに

学問の発展には波がある。特に天文学の場合、新しい波長の窓が開かれると疾風怒涛のごとく新発見が相次ぎ、戦後日本のように価値観が一変することも珍しくない。1970年代のX線天文学がそうであった。その後は発展のスピードが鈍り、精密化の時代がしばらく続く。X線天文学では1980年代がこれに相当するだろう。やがて観測機器の感度が飛躍的に向上すると、過去の理解をくつがえすような第二の疾風怒涛の時代が到来することになる。『あすか』がもたらしたのは、この第二の疾風怒涛の時代である。

『あすか』が試験運用期間中に観測したX線天体の数は150におよび、その種類も近くは月から果てはX線背景放射まで多岐にわたる。観測データは現在も精力的に解析が進められており、これまでに得られた成果は、専門知識の精密化に役立つものから何十年来の疑問に答えようとするものまで広範囲におよぶ。これら予備的な結果だけでも、襲ってこようとしている疾風怒涛の激しさを予感させるには十分である。大海に浮かぶ小島が実は水面下に大山脈を形作っているように、ここで触れる『あすか』の成果も大山脈のほんの頂上に過ぎない。みずから大山脈の峰々の間に分け入

ろうという人には、まもなくうってつけの本が出版されるだろう<sup>1)</sup>。

## 2. 『あすか』の性能

『あすか』には、4台のX線反射鏡が搭載されており、そのうちの2台の焦点面にはX線CCDカメラが、残り2台の焦点面には撮像型のガス蛍光比例係数管が使われている<sup>2)</sup>。X線反射鏡の角分解能は約1分角で、通常の視力の人の分解能と同程度である<sup>3)</sup>。一方視野の広さは約30分角で、これは満月の大きさに等しい。ただし、CCDカメラの視野はもう少し狭くて、22分角である。観測できるX線のエネルギー範囲は0.5 keV (キロ電子ボルト) から10 keV、波長にして1-20 Åである。特に4 keVより高いエネルギー範囲では反射鏡を用いた撮像観測は例がなく、未開拓の分野であった。また、CCDカメラのエネルギー分解能も特筆に値する。6 keVで2%という値は、過去最高だった『天馬』に比べても5倍も改善している。

## 3. ガンマ線バースト・リピータ

『あすか』の成果というと、ガンマ線バースト・リピータの超新星残骸との同定は欠かすことができない。しかし、これについては、アストロニュースに既に村上氏による解説記事が掲載されてい

るので、そちらを参照されたい<sup>4)</sup>。

#### 4. 超新星残骸

超新星残骸の研究には、X線による観測が不可欠である。超新星残骸を形作るのは、衝撃波で1千万度にも加熱された高温プラズマであり、このようなプラズマが放射するのは、もっぱらX線だからである。衝撃波で加熱されたプラズマ中には、かつて星の内部で合成された様々な元素が含まれている。これらの元素は加熱後ゆっくりと電離が進み、その電離状態に応じたエネルギーの特性X線を放射する。逆に特性X線のエネルギーと強度を精密に測定すれば、超新星残骸を形作るプラズマの状態が診断できることになる。このようなプラズマ診断には、空間分解能とエネルギー分解能の二つが同時に必要で、これは『あすか』で初めて可能となった。

図1に『あすか』で観測した超新星残骸 W 49 B のエネルギースペクトルを示す。数多くの輝線が見えるが、これらがきちんと分離できるのはX線 CCD カメラの高いエネルギー分解能のおかげである。これらの輝線の多くは、そのエネルギー値から電子が残り一つか二つになるまで電離が進んだ元素からの特性X線に同定でき、W 49 B は比較的電離の進んだ超新星残骸であることがわかる。図2に『あすか』で得られた W 49 B の像を示す。いろいろな元素の特性X線に相当するエネルギー範囲のデータを使って像を描くと、面白いことに鉄の特性X線はもっぱら中心から、ケイ素や硫黄は比較的外側から放射されていることがわかる。これは超新星爆発前の星の内部のたまねぎ構造を彷彿とさせるが、プラズマの温度分布や電離度の違いにより特性X線の強度は変化するので、本当に元素分布の違いを反映したものでかどうか、今後の詳細な解析の結果が待たれるところである。

CCD カメラの高いエネルギー分解能を使えば、超新星残骸の運動を調べることも可能である。動

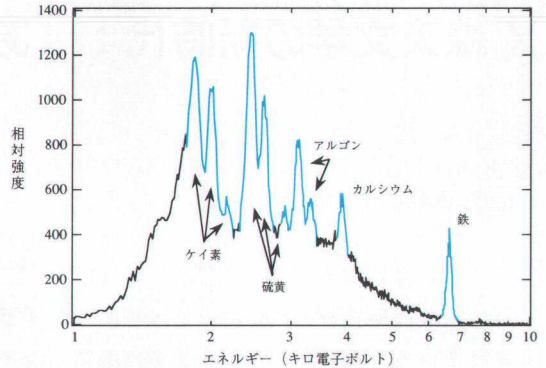


図1 『あすか』で観測した超新星残骸 W49B のエネルギースペクトル。さまざまな電離状態にある多くの元素からの特性X線(青色)が見られる。

いている物質から放射される輝線は、ドップラー効果のためそのエネルギーがずれてしまう。そこで、超新星残骸のいろいろな場所から放射される輝線のエネルギーのずれを精密に測定すれば、逆に放射体の(視線方向の)運動を知ることができ。このような解析をカシオペア A からのケイ素の輝線を使って行った結果を図3に示す。超新星残骸の北西の部分が我々から遠ざかり、南東の部分が近づいて来ていることがわかる。

#### 5. 銀河系中心

銀河系中心は、銀河系の他の場所とは異なった全く特異な場所である。太陽の100万倍の質量を持つ巨大ブラックホールが存在するとも、爆発的星形成が起きたとも言われている。いずれにせよ、活動銀河中心核のミニチュア版の現象が起きているに違いない<sup>5)</sup>。

銀河系の中心方向には星間ガスが集中しており、それにじゃまされず観測を行うには、透過力の強い高エネルギーのX線でしかも高い角分解能の観測を行う必要がある。図4に『あすか』で得られた銀河系中心付近の像を示す。従来、銀河系中心方向からは高電離の鉄輝線が観測されており、数千万度の高温プラズマが存在することが知られていた。今回の観測では、点源のほかにその

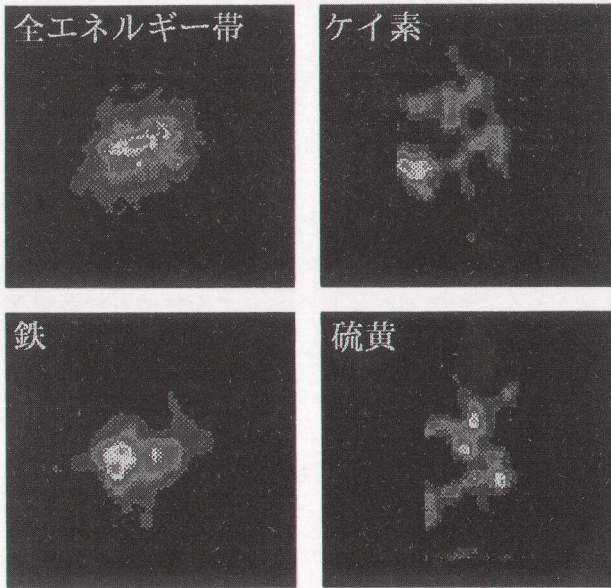


図2 『あすか』搭載 CCD カメラによる W49B の像。コンピュータ処理により、像のにじみを減少させてある。エネルギースペクトルの連続成分と特性 X 線を使って描いた像を比較することにより、超新星残骸のどの部分からどの元素に固有の X 線が放射されているかがわかる。

北東にかけて広がった輻射領域が存在することが明らかになった。しかも、この広がった輻射領域からは、低温の鉄からの特性 X 線が観測されたのである。このような低温の鉄からの特性 X 線は、低温の物質に X 線が照射する場合に見られ、後に述べる II 型セイファートと呼ばれる活動銀河中心核と瓜二つである。銀河系の中心付近には隠れたブラックホールが存在し、X 線を放射しているのではないかと考えられる。

## 6. SS 433

銀河系の中には 1000 億もの星があり、いくら珍しい天体でも同じ仲間が多数見つかるのが普通である。でも、中にはまれに唯一無二という星もあり、SS 433 もそのような星の一つである<sup>9)</sup>。SS 433 は通常の星と高密度星（中性子星かブラックホールかは不明）との近接連星系で、高密度星からは光速の 26% にもおよぶ速度で双極流ジェットが

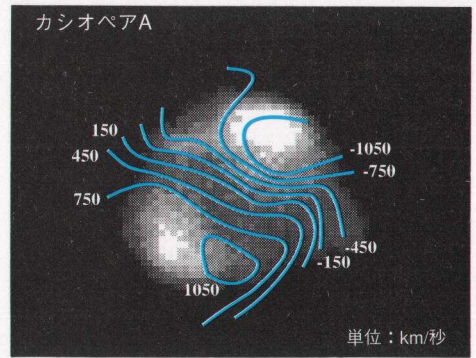


図3 超新星残骸カシオペア A の (CCD カメラで取った) 像の上に、プラズマの視線方向の速度分布を表わす等高線を重ね合せた図。速度分布は、ケイ素の特性 X 線のエネルギーのドップラー効果によるずれから求めた。

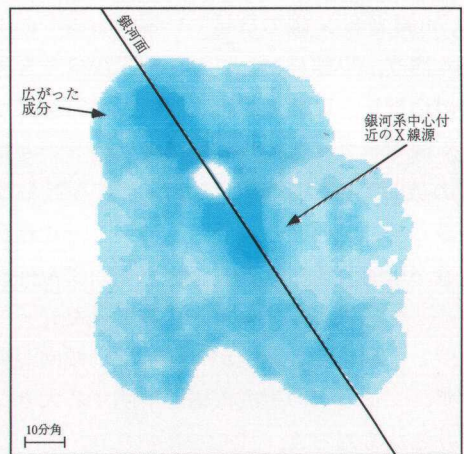


図4 『あすか』による銀河系中心の硬 X 線像。

噴射されている。ジェットはきわめて鋭く絞られていて、大雑把に言って地球程度の大きさの領域で作られていると考えられるにもかかわらず、太陽系と同程度の大きさまで伸びている。このような双極流ジェットは（規模が全く違うものの）電波銀河でも見られることから、同じ機構が働いているのではないかと推測されている。

『あすか』で観測した SS 433 のエネルギースペクトルを見てみよう(図5)。双極流ジェットにともない赤方変位と青方変位した特性 X 線がペア

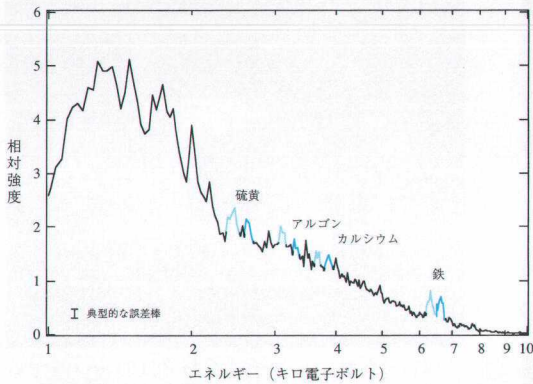


図5 SS433のエネルギースペクトル。いろいろな元素からの青方変位した特性X線（濃青）と、赤方変位した特性X線（薄青）が見られる。

になって観測されている。X線でこのようなペア輝線が観測されたのは初めてのことであり、ここで、可視光とX線では見ているジェットの場所が全く違う。X線はジェットの根元のほうを見ているのに対し、可視光ではむしろ先の方を見ている。X線でペア輝線が観測されたということは、輝線の放射領域が降着円盤で隠されることなく我々から見えているということであり、これは放射領域が以前考えられていたよりずいぶん外側にあることを意味する。また、X線で見たジェットの速度と可視光での速度が一致しない傾向が見えており、ジェットの生成機構を解明する大きな手がかりとなるだろう。

## 7. 超新星 SN 1993 J

日本のX線衛星は不思議と超新星にめぐまれている。『ぎんが』の例 (SN 1987 A) に続いて、『あすか』では打ち上げ後間もない3月28日に近傍銀河 M 81 から SN 1993 J が発見された。『あすか』はただちに SN 1993 J の観測を行い、爆発後10日の時点ですでに有意なX線が放射されていることを ROSAT と共に発見した。図6 (表紙) に『あすか』で取得した像を示す。

SN 1993 J はもと赤色巨星であった。赤色巨星は高密度で低速の星風を持つ。超新星爆発で飛散

したプラズマがこの星風にあぶつくと激しい衝撃波を作り、それによりプラズマが超高温に加熱される。SN 1993 J から観測されたX線は、この超高温プラズマからの熱放射と考えられる。一方、SN 1987 A では爆発したのは青色巨星であった。青色巨星の星風は低密度かつ高速で、このような中で超新星爆発が起きて飛散するプラズマはあぶつかる相手がなくなってしまうが衝撃波もできずX線が放射されることもない。結局 SN 1987 A から観測されたX線は<sup>56</sup>Coの崩壊にともなう核ガンマ線がコンプトン散乱でエネルギーを失ってX線領域に入ってきたものであった。ところで、SN 1993 J は最初見えていた水素の輝線がその後見えなくなったことから、問題の赤色巨星は水素を大量に含む外層を爆発前に失っていたものと推測される。おそらく SN 1993 J は連星系の一員になっていて、伴星に外層を奪われてしまったのだろう。SN 1993 J により中性子星が形成されたと考えられているので、SN 1993 J は100万年もたてば、今度はX線連星パルサーとして明るく輝くに違いない。

## 8. セイファート銀河 NGC 6552

銀河の中には、その中心核で銀河全体の十から千倍ものエネルギーを放出しているものがある。これらは総称して活動銀河中心核 (AGN) と呼ばれている。AGN は観測上いろいろに分類されるが、いずれも中心に巨大ブラックホールが存在しており、ガスを供給する降着円盤やトーラスがその周りを取り巻いているという統一モデルが考えられている。例えば、セイファート銀河の場合、このトーラスを横から眺めればII型になり、上(下)から眺めればI型になるという具合である。

『あすか』はその試験観測期間中に偶然視野に入ったII型セイファート NGC 6552 を観測し、図7に示すようなエネルギースペクトルを得た。エネルギースペクトルは輝線が卓越しており、セイファート銀河からこのようなスペクトルが得られた

のはこれが初めてである。NGC 6552 のような II 型セイファートの場合、中心の巨大ブラックホールはトーラスにより隠されていて直接見ることはできない。ブラックホール近傍から放射された X 線がまわりのガスで散乱され、その散乱 X 線が見えていると考えられる。実際、散乱 X 線のみが観測されるとき、そのエネルギースペクトルには強い輝線が見られることが知られており、まさしく NGC 6552 のスペクトルに一致する。

一方、このようなエネルギースペクトルを持つ AGN が存在することは、X 線背景放射の解明に大きな影響を持つ<sup>7)</sup>。X 線背景放射は全天から等方的にやってくる X 線放射で、大部分は多数の暗い点源からの X 線の重ね合せによるものと考えられている。しかし、アインシュタイン衛星や ROSAT が比較的低いエネルギー範囲で検出した暗い点源の数は、『ぎんが』が 2-10 keV での観測から推定した点源の数に比べて半分以下しかないことが知られている。さらに、X 線背景放射のエネルギースペクトルから既知の暗い点源の寄与を引いてやると、異常に平坦な形のスペクトルが残り、このようなスペクトルを説明し得る X 線源はこれまで知られていなかった。もし、この NGC 6552 のように強い吸収を受けた暗い X 線源が多数存在すれば、上記 2 点が同時に解決でき、X 線背景放射の解明に重要な手がかりが得られることになる。

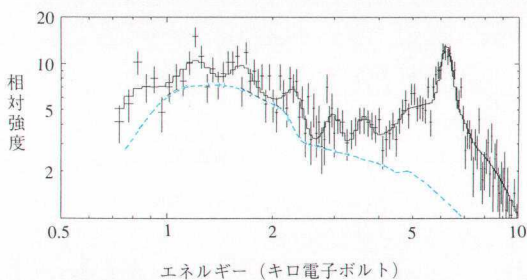


図7 II型セイファート銀河 NGC6552のエネルギースペクトル。十字がデータ、実線がモデル（青色は連続成分の寄与）を示す。

## 9. ケンタウルス座銀河団

およそ百から千の銀河からなる集団が銀河団である。銀河団は宇宙の大規模構造の基本であり、銀河団の起源と性質を調べることは宇宙そのものの進化を明らかにすることにつながる。銀河団は可視光で観測する限り確かに銀河の集団であるが、その実大部分の質量を担っているのは（不可思議なダークマターを除けば）銀河間ガスである。この意味では、銀河団を作っているのは銀河間ガスだといってもいいかもしれない。この銀河間ガスは数千万度の高温になっていて、X 線で明るく輝いて見える。つまり、X 線観測により、銀河間ガスひいては銀河団の構造や進化が明らかにできることになる。

『あすか』で観測したケンタウルス座銀河団の像を見てみよう（図8）。ケンタウルス座銀河団は、我々の近傍にある X 線で明るい銀河団である。鉄の輝線に相当するエネルギー範囲のデータを使って描いた像とその隣の連続成分を使った像とは、明らかに像の広がりや異なっている。これは、鉄が銀河団の中心付近に集中する傾向があることを示している。ところで、銀河間ガスに含まれる鉄の量は、鉄輝線の強度から推定できる。そこで、データを銀河団の中心からの距離によって分類し、各グループ毎にエネルギースペクトルを作って鉄の存在比を求めたのが図9である。鉄の中心



図8 ケンタウルス座銀河団の『あすか』による X 線像。鉄の特性 X 線でみた像のほうが、連続成分でみた像に比べて強く中心集中している。

集中がきれいに現われている。

銀河間ガスは銀河団が形成される時の始源ガスが元になっていて、本来鉄等の重元素はほとんど含まれていなかったと考えられる。重元素が作られるのは星の中、つまりは銀河の中で、それが宇宙空間にばらまかれるのは超新星爆発によってである。このような鉄の供給源として、銀河団の中心にある巨大楕円銀河 NGC 4696 が第一に考えられよう。一般に巨大楕円銀河は複数の銀河の合体でできた予想されており、そうすると鉄もその過程で銀河間空間にばらまかれたことになる。一方、合体の過程で銀河間ガスが十分攪拌され、鉄が銀河団全体に薄められてしまう可能性も考えられる。大多数の銀河団では、ケンタウルス座銀河団とは違って鉄の中心集中が見られないこととあわせて、今後詳細な検討が必要である。

## 10. 『あすか』から ASTRO-E へ

『あすか』によって幕を切って落とされた第二の疾風怒涛時代は、今後どのように展開して行くのであろうか。我々はすでに、この第二の疾風怒涛の時代のピークを担うべき次期 X 線天文衛星 ASTRO-E の検討に入っている。これまでの『あすか』のデータを見れば、ASTRO-E に要求される性能は自明であろう。より大きな有効面積、もっと

高い角分解能、もっと高いエネルギー分解能、さらに広いエネルギー帯である。これらの要求を満たすべく検討が進められている ASTRO-E は、新技術の導入も含めて画期的な X 線天文衛星になる予定である。日本の衛星が世界の X 線天文をリードする時代が当分続きそうである。

### 参 考 文 献

- 1) Makino F. (ed.), 1994, New Horizon of X-Ray Astronomy (Universal Academy Press, Tokyo), in press
- 2) 井上 一, 1992, 星の手帖, 56(春), 22
- 3) 国枝秀世, 1992, 天文月報, 85(9), 384
- 4) 村上敏夫, 1994, 天文月報, 87(4), 166
- 5) Blitz L., et al., 1993, Nat 361, 417
- 6) クラーク D. H. (福江純訳), SS 433 伝説 (恒星社厚生閣)
- 7) 林田 清, 1994, 天文月報, 87(3), 125

### New Era of X-ray Astronomy : First Results from ASCA

Tadayasu DOTANI

*Institute of Space and Astronautical Science*

Abstract : A year has passed since the launch of ASCA, the 4th Japanese X-ray astronomy satellite. X-ray detectors onboard ASCA cover 0.5-10 keV with high energy resolution (2% at 6 keV) and moderate angular resolution (1 arcmin). This high capability of the detectors has enabled us to open a new era of X-ray astronomy. The new results from ASCA, which cover wide range of heavenly bodies from binary stars to quasars, are overviewed.

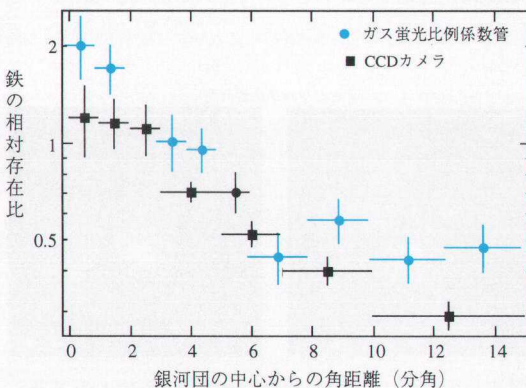


図9 ケンタウルス座銀河団の中心からの角距離による鉄の相対存在比の変化。