



## 日本のX線天文学の歩み

長瀬 文昭\*

### Progress of Japanese X-ray Astronomy

Fumiaki NAGASE\*

#### 1. はじめに

20 世紀半ばまでは可視光の天体望遠鏡を用いるのが遠方の宇宙・天体を観測する唯一の手段で、人類の遠方の宇宙を見る目は電磁波の中でもごく狭い可視光の領域に限られていた。ところが第2次世界大戦後 1950 年代には電波望遠鏡が宇宙の観測に利用されるようになった。そして 1960 年代には赤外線検出器の発達で赤外線望遠鏡により宇宙探査の目が格段と広がった。一方、X線は地球大気により吸収されるため本格的なX線観測は地球大気が十分薄くなる高度数100 km以上の大気圏外に行う必要があり、人工衛星を科学観測に用いることが可能となった1970年代まで待たねばならなかった。現在では光（可視光）、電波、赤外線、X線の4つの電磁波領域が天文観測の基礎となっている。特にX線観測は高温、高エネルギー、大重力場の極限状態で激しく活動する現象を観測する上で重要な手段となった。そしてこれらの全電磁波領域を駆使した観測を行うことで、冷たい宇宙から熱い宇宙まで、星の誕生から終焉まで、宇宙の進化の全過程を深く理解することができるようになった。

本稿ではX線天文学の幕開け以来、欧米に伍して研究の最前線を走り続ける日本のX線天文学の開発と研究の跡を追い、日本のX線天文衛星の成果を概観する。

#### 2. X線天文学の幕開け

米国マサチューセッツ工科大学のロッシ、ジャッコーニらは1962年にX線検出器を搭載したロケットを打ち上げ、そのロケットの姿勢制御の途上で偶然明るいX線天体を発見した<sup>(1)</sup>。幸運にもこのX線源は今でも全天で一番明るいX線源である“さそり座X-1”であった。これ

がX線天文学の幕開けである。

当時X線用の集光結像望遠鏡はまだ開発されていなかったもので、日本の小田稔らはすだれコリメーターという特殊な技術を用いて、気球観測によりこのX線天体の位置の高精度での決定を試みた。しかしその方向には可視光望遠鏡では際立った特徴のない暗く青白い星が見えるのみであった<sup>(2)</sup>。この不思議なX線星の発見は世界の天体物理学者を沸き立たせた。これに刺激された実験家たちは気球やロケットを用いて「白鳥座X-1」やおうし座の「かに星雲/かにパルサー」などX線を放射する第2、第3のX線天体を次々に発見した。一方、理論家たちはこの予想もしなかった強いX線放射を可能とする天体は中性子星やブラックホールを含む近接連星系（今ではこれをX線連星という）であることを明らかにした。こうして中性子星やブラックホールという、当時は理論的な可能性としてのみ議論されていた相対論的高密度星の観測的研究が可能となった。

ジャッコーニらはこのX線源発見の数年前（1957年）に成功していた人工衛星に注目し、いち早く衛星搭載用X線観測器を製作し、これを人工衛星に搭載して全天のX線天体を探査することを計画した。この計画は1970年12月にウフル衛星の打ち上げとなって実現した<sup>(3)</sup>。そしてウフル衛星はその後数年にわたり全天を隈なく走査し、330個以上のX線源を観測し、初めてX線天体カタログを作成した。ここにX線による宇宙・天体の観測的研究が天文学の一分野として本格的にスタートした。

#### 3. 日本のX線天文学

ちょうどこの頃名古屋大学の早川幸男は当時素粒子・宇宙線の理論的な研究の傍ら、新しい電磁波領域で天体物理学の分野を開拓することを模索していた。この頃早川はX線よりも、宇宙線と銀河面物質との相互作用で生

\*教授 物理学教室  
Professor, Institute of Physics

成されるガンマ線の方が観測の可能性が高いと考え、当時名古屋大学のグループでは宇宙ガンマ線の気球観測を始めていた。一方当時宇宙線共同研究のためマサチューセッツ工科大学に滞在していた小田稔は、最初のX線天体である「さそり座X-1」の発見の過程をつぶさに見聞していた。もともと研究仲間であった二人はこのX線星の発見が新しい天文学分野を開拓すると予見し、直ちに日本で観測的X線天文学の分野を開拓することを決意した。ちょうどその頃東京大学附置研究所として宇宙航空研究所（後の宇宙科学研究所）が設立されており、小田稔は帰国しその教授に着任し、研究グループを立ち上げると共に、宇宙X線天体の観測に着手した。ここに日本のX線研究グループが宇宙研と名古屋大学において発足した。当時両先生の周辺には、以後の日本のX線天文衛星計画を先導し、その製作・運用を支えた田中靖郎、宮本重徳、槇野文命、小川原嘉明、松岡勝、山下廣順ら、優秀な実験物理学者が参加していた。筆者もこのグループに所属していたが、現在日本のX線天文グループを主導している小山勝二、井上一、牧島一夫、国枝英世、常深博、大橋隆哉らは当時若手研究者、大学院生として実験研究に加わっていた。

日本最初のX線天文衛星「はくちょう」は「ウフル」に遅れること8年余の1979年2月に打ち上げられた<sup>(4)</sup>。この間はX線天文衛星打ち上げラッシュに沸く欧米を横目に、小グループで衛星開発と並行して気球やロケットの観測で科学的な成果を出して対抗していく苦しい時代が続いた。しかし、「はくちょう」の打ち上げに成功して以降は1983年の「てんま」、1987年の「ぎんが」、1993年の「あすか」、2005年の「すざく」と継続的にX線天文衛星を打ち上げることが出来た。日本のX線天文グループは、「はくちょう」ではすだれコリメーターを用いた中性子星X線連星/X線バースターの研究、「てんま」では蛍光比例計数管によるX線天体からの鉄輝線放射の研究<sup>(5)</sup>、「ぎんが」では大面積低ノイズ比例計数管による活動銀河核・銀河団の研究<sup>(6)</sup>、と衛星ごとに特徴のある観測で成果を挙げてきた。そしてX線集光結像鏡を搭載した汎用X線天文台「あすか」により日本のX線天文学はまさに世界の最前線に躍り出た<sup>(7)</sup>。このように衛星は小型ながらグループが自ら開発した新しい検出器を搭載した、特徴のある衛星を継続的に打ち上げていく日本のX線天文学研究グループの戦略はNASやESAからも称賛を受けた。ことに「ぎんが」、「あすか」衛星が活躍した、1980年代後半から1990年代にかけては、欧米の衛星計画が停滞する中であって、日本の衛星による観測が世界のX線天文学を支えた時期でもあった。

現在は「すざく」が日本の現役X線天文衛星として稼働中である<sup>(8)</sup>。この「すざく」衛星は2000年に米国NASAのChandra衛星、ヨーロッパESAのXMM-Newtonと競合して打ち上げられ、相補的な特徴で成果を競うはずであったが、ロケットの打ち上げ失敗で5年の遅延を生じた。また、この衛星を特徴づける究極的ともいえるエネルギー分解能を持つX線カロリメーターを冷却系の故障で失ったことは痛手であった。しかし、Chandra、XMM-Newtonという欧米の強力なライバルが稼働している中で、残った検出器（X線CCDカメラと高エネルギーX線検出器）を使って懸命に観測を続け、新たな成果も多数生み続けている。

これら5代にわたる日本のX線天文衛星の構造、特徴、主な成果を概観し、「あすか」、「すざく」など最近の日本の衛星によって得られた目新しい話題を2, 3紹介する。

### 3.1 初代X線天文衛星「はくちょう」

日本の最初の人工衛星「おおすみ」は1970年2月11日に鹿児島県内之浦町の実験場から打ち上げられた。「はくちょう」の前身であるCORSA-aは「しんせい」、「でんば」、「たいよう」に続く第4号科学衛星として1975年に打ち

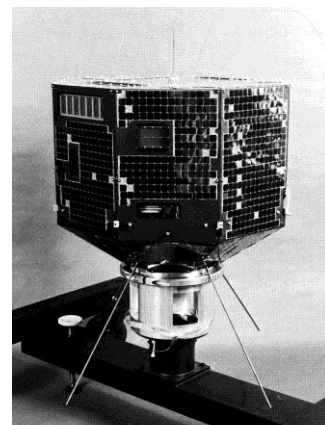


図1 日本初のX線天文衛星「はくちょう」の写真

上げられた。この時の打ち上げ実験はロケット制御に関するトラブルで衛星を軌道に乗せることに失敗した。急きょCORSA-bとして衛星の再製作を行い1979年2月21日に成功裏に打ち上げられ、「はくちょう」と命名された(図1)。これが日本初のX線天文衛星の誕生である<sup>(4)</sup>。

この衛星は直径82cm、総重量96kgと、日本でも大型化した最近の衛星に比べれば大変小さなものであった。この衛星に搭載された主要検出器は薄膜窓比例計数管の前面にモジュレーションコリメーターを取り付けたものであった。その考案者である小田稔はすだれ越しに庭を眺めていてこのアイデアを思い至ったとのことから、日本では「すだれコリメーター」と愛称した。このすだ

れコリメーターは米国の衛星にも搭載されたが、「はくちょう」打ち上げの翌年 1980 年に米国 NASA が打ち上げた本格的な反射型集光結像系をもつ X 線望遠鏡に対して、より高エネルギーの X 線を広い視野で観測し、良い精度で X 線源の位置を決定できることが特徴であった。当時日本ではまだ 3 軸姿勢制御システムが衛星搭載用としては完成しておらずスピン安定型の衛星であったが、「はくちょう」ではこれを逆に利用して、Rotational modulation Collimator として運用し、視野内の複数の X 線点源の位置をフーリエ逆変換の手法で一義的に決定できる特異な観測系を構成した。

「はくちょう」はその検出感度の限界から観測対象は主に銀河系内の X 線バースターや X 線パルサーであった。ことに X 線バースター（今では中性子星と低質量の伴星で構成される低質量 X 線連星に分類される）の観測が精力的に行われ、中性子星の特性とそこへ降着する物質の状態の解明に貢献した。

### 3.2 2 代目衛星「てんま」衛星

「てんま」衛星は「はくちょう」の寿命が尽きる直前を狙って 1983 年 2 月 20 日に打ち上げられた<sup>(5)</sup>。通常 500~600 km の高度の低い軌道に打ち上げられる天文衛星は 5~7 年の間に大気摩擦により徐々に高度を下げ、高度が 300 km 以下になるとその高度は急激に低下し地球大気に突入し、小型の衛星は大気中で燃え尽きる。「てんま」衛星は重量も 216 kg と「はくちょう」に比べ倍以上大型となった。形状は対面寸法 94 cm、高さ 90 cm のほぼ立方体で太陽電池を張ったソーラーパドルを四方に広げる形状であった（図 2）。

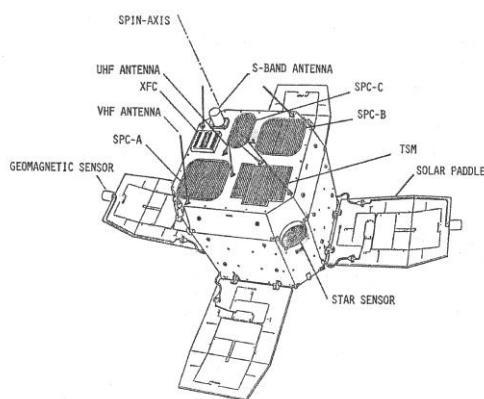


図 2 「てんま」衛星の構造モデル

この衛星には、それまでに田中靖郎らが開発し、ロケット実験で成果を挙げていたガス蛍光比例計数管（Gas

Scintillation Proportional Counter: GSPC）が主要検出器として搭載された。このガス蛍光比例計数管はそれ以前に衛星による X 線観測用として使われていた通常の比例計数管に比べ、エネルギー分解能が 2 倍向上していた。「てんま」以前の衛星による観測から X 線のスペクトルには連続成分のほかに鉄の輝線を顕著に放射する X 線源があることが分っていた。エネルギー分解能の 2 倍の改善により、「てんま」GSPC はこの鉄輝線を明確に観測できるばかりでなく、それが中性の鉄が高エネルギーの

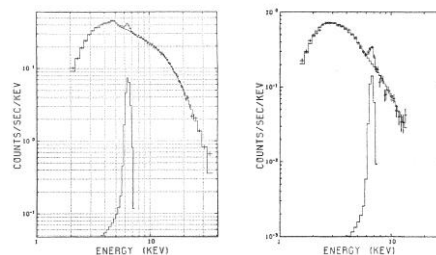


図 3 左は X 線パルサー Vela X-1 のスペクトルにみられる 6.4 keV 鉄輝線<sup>(9)</sup>。右は銀河中心方向の銀河面で発見された高温プラズマからの 6.7 keV 鉄輝線を伴う X 線放射<sup>(10)</sup>。

X 線に照射されて放出する 6.4 keV の蛍光鉄輝線なのか、高温プラズマ中でヘリウム様に電離した鉄が放出する 6.7 keV 鉄輝線かを分離することが可能となった（図 3 参照）。

「てんま」により、① X 線パルサーからの鉄輝線放射は低温ガス中の（つまり中性または低電離の）鉄が放射する 6.4 keV 蛍光鉄輝線であること<sup>(9)</sup>、② 磁場の弱い中性子星が構成する低質量 X 線連星からの X 線放射は中性子星表面と降着円盤の二つの領域から出ていること<sup>(10)</sup>、③ わが銀河系の銀河中心方向では銀河面に沿って数千万度の高温プラズマが存在すること<sup>(11)</sup>、などが発見された。このうち②は満田和久が田中靖郎、井上一らの指導を受けて完成した学位論文で、その発表論文 Mitsuda et al.<sup>(10)</sup> は今でも日本天文学会欧文誌の中でも屈指の引用率を誇る。また、小山勝二らによる③の発見が契機となり、以後銀河中心の X 線観測は小山が中心となって、後続の衛星「ぎんが」、「あすか」、「すざく」で重点的に観測されることとなり、日本の“お家芸”となった。

### 3.3 3 代目衛星「ぎんが」衛星

日本の 3 代目 X 線天文衛星 Astro-C は 1987 年 2 月 5 日鹿児島宇宙観測所（内之浦）より打ち上げられ、「ぎんが」と命名された<sup>(6)</sup>。この衛星の特徴は打ち上げロケットの

性能の向上に伴って、「はくちょう」、「てんま」に比べはるかに大型化された（構造は  $1\text{m} \times 1\text{m} \times 1.5\text{m}$  の直方体、重量は  $420\text{kg}$ ）こと（図4）と、日本のX線グループとしては初めて搭載検出器の開発・製作を欧米との共同実験として進めたことである。最初にこの衛星に搭載する検出器の国際協力による開発を提案されたとき、私を含めX線グループ若手研究者の中には逡巡する空気があったが、小田、早川、田中の強力な指導力でこの国際協力が推進された。以後日本の科学衛星の国際共同による製作・運用は常態として定着していった。

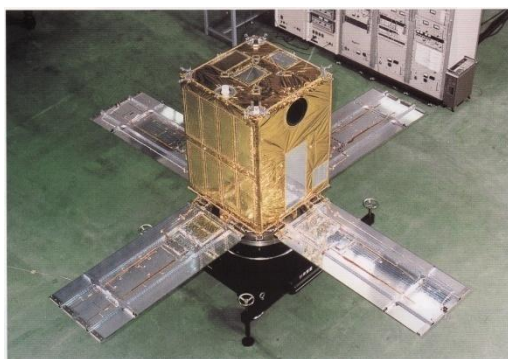


図4 打ち上げ前に太陽バドルを展開した状態で撮影された「ぎんが」衛星。左側面に大面積比例計数管が8台取り付けられた様子がわかる。

「ぎんが」衛星には主検出器として大面積比例計数管（LAC）、2次的検出器として全天ガンマ線バースト検出器（GBD）が搭載されたが、LACは英国レスター大学と、GBDは米国ロスアラモス大学との国際協力によって開発された。このうち大面積比例計数管は1本の有効受光面積が  $500\text{cm}^2$ 、8本の合計が  $4000\text{cm}^2$  と、当時のX線天文台としては世界最大のものであった<sup>(12)</sup>。この大面積比例計数管の開発<sup>(12)</sup>には英国レスター大学の M. Turner の貢献が大きかった。当時同じようなミッションを打ち上げる計画は米国にもあったが、諸般の事情で米国側の打ち上げは大幅に遅れ、1995年に打ち上げられることになり（RXTE）、はからずもこの種の計器での観測としては「ぎんが」の後を継ぐこととなった。さらにこの LAC では宇宙線などに起因する雑音（計数管のバックグラウンド）を極力軽減して高いS/N比を得る工夫がなされていた。こうして「ぎんが」衛星は大面積、高感度のX線天文台として、観測対象を銀河系内のX線天体から一挙に遠方の活動的銀河核や銀河団にまで広げた。米国 NASA が打ち上げたX線ミラーを搭載したアインシュタイン衛星が  $2\text{keV}$  以下超軟X線領域の観測しかできないのに比べ、「ぎんが」は画像の解像度はないものの

$30\text{keV}$  の高エネルギーまで広い帯域でX線観測ができるのが特徴であった。

「ぎんが」が打ち上げられた直後にこれを祝うように我が天の川銀河に近い小銀河である大マゼラン星雲において超新星爆発（SN1987A）が起こった。「ぎんが」はドイツの ROSAT 衛星と共にその観測を精力的に行った。超新星爆発に伴うX線放射をその発生直後から追跡したのはこれが最初であった。「ぎんが」の観測対象は銀河系内で中性子星やブラックホールを構成員とするX線連星、超新星爆発の残骸として広がる衝撃波面、銀河系中心部銀河面や銀河バルジなど銀河系内のX線天体の精密観測にとどまらず、銀河系外遠方の銀河、銀河団やセイファート銀河、クェーサーなどの活動的銀河核とほぼ宇宙の主要天体全般の観測が可能になった。小山勝二らは銀河中心の銀河面の高温プラズマからのX線放射を精力的に観測した。牧島一夫らはX線パルサースペクトルにみられる吸収線様のサイクロトロン共鳴散乱構造（CRSF）を高精度で観測し、10個以上の中性子星の表面磁場を決定した（図5左）。榎野文命らは多数の活動的銀河核を観測し、そのX線強度の時間変動とスペクトル（図5右）から、その中心に太陽の数千万倍にも及ぶ巨大ブラックホールの存在を明確にし、またその周辺を取り巻くガスの構造や状態を研究した。

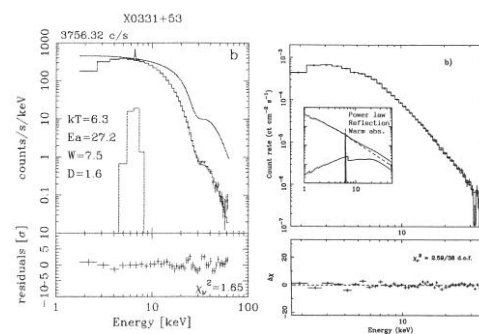


図5 左は「ぎんが」が発見したX線パルサーX0331+53のスペクトル<sup>(13)</sup>。30 keV付近にCRSF吸収線構造が見られる。右は冪関数型で高エネルギーまで伸びるセイファート銀河の典型的なスペクトルを示す<sup>(14)</sup>。

### 3.4 4代目衛星「あすか」衛星

4代目X線天文衛星 Astro-D は1993年2月20日に打ち上げられ、「あすか」と命名された<sup>(7)</sup>（図6）。「あすか」衛星は、日本では始めて斜入射型のX線望遠鏡を採用した汎用X線天文台である。この衛星では宇宙からのX線の画像を撮ると同時に、その画像中の個々の領域（または点源）のエネルギースペクトルを高い精度で測定する

事が可能であった。特に、世界ではじめて、宇宙の奥深くまでみることを可能にする 10 keV までの高エネルギー領域で宇宙 X 線源を撮像できる能力を実現したのが、「あすか」が従来得られなかった新しい成果を挙げた秘訣でもある。

「あすか」を特徴づけるのは、「多重薄膜鏡による軽量でかつ大面積の X 線ミラー」と「高いエネルギー分解能を持つ焦点面検出器」である。「あすか」は 4 台の X 線望遠鏡 (XRT) を搭載し、その焦点面に 2 種類のタイプの異なった検出器、X 線 CCD カメラ (SIS) と撮像型蛍光比例計数管 (GIS) が配置された。これら 2 つの検出器は、X 線分光と撮像を相補的に行う撮像センサである。「あすか」の 4 つの X 線望遠鏡のうち 2 つは SIS と組み合わせられ、他の 2 つは GIS と組み合わせられた。SIS と GIS はいつも同じ方向を向いているので、この二種類の検出器からのデータは組み合わせて使うことができた。

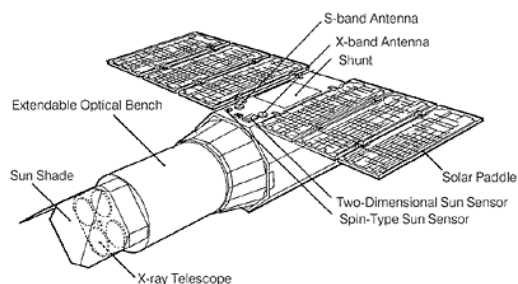


図 6 「あすか」衛星の構造モデル。左端に 4 台の XRT が見られる。検出器は右端内部に収められている。望遠鏡を搭載した光学台は衛星打ち上げ後伸展される。

「あすか」の X 線望遠鏡 (XRT) は、0.5 から 12 keV までの広いエネルギー範囲の X 線を効率よく集光する工夫がされていた。これまでの X 線天文衛星では、搭載された X 線望遠鏡の撮像能力がほぼ 4 keV 以下の X 線に限られていた。従って、「あすか」では多くの天体から始めて高エネルギー領域の X 線像が得られることになった。また、「あすか」によって初めて画像を得ることができるようになった 4 keV 以上の X 線は非常に透過力が強いのが特徴で、これまでは厚いガスに遮られて観測することができなかった天体も、「あすか」を使えば精密に観測することが可能となった。高エネルギーの X 線を全反射させるためには鏡面に対してきわめて斜めに ( $1^\circ$  以下) X 線を入射させなければならないが、その技術的困難を克服してかつ衛星搭載可能な軽量を確保したのがこの「あすか」の X 線ミラーの特徴である。「あすか」では非常に薄いアルミニウムの板を特別なめらかに成型しプラスチックのコーティングをした表面に金を蒸着した反

射鏡を沢山集積したものが使用された。この「多重薄板型 X 線ミラー」は、NASA/GSFC の P. Serlemitsos のグループと名古屋大学の山下廣順、国枝英世らとの共同開発で行われたが、これは画像解像度では Einstein や ROSAT 衛星に劣るものの、特に 6.4 keV の鉄輝線領域を含む高エネルギー ( $\sim 10$  keV) まで適用でき、また望遠鏡の大きさに比べ有効面積の割合が大きいことが特徴である<sup>(15)</sup>。

「あすか」の焦点面検出器の 1 つである X 線 CCD カメラは高分解能で撮像観測と分光観測が同時にできる優れた検出器である。この X 線 CCD カメラを人工衛星に搭載したのは「あすか」が始めてであった。X 線 CCD カメラを用いることで、SIS 検出器は 5.9 keV の X 線に対して半値幅 (FWHM) が約 2% という優れたエネルギー分解能 (波長分解能) を実現した。この「あすか」の成功により X 線 CCD カメラは以後の X 線天文衛星では基本検出器として使用されるようになった。

もう一方の焦点面検出器である撮像型蛍光比例計数管 (GIS) は、SIS に比べて、広い視野を一度にカバーし、かつ高い時間分解能で観測するために搭載されたものである。これは「てんま」衛星に搭載されたガス蛍光比例計数管を位置検出型に改良したもので、銀河団などの広がった天体を観測するのに欠かせない大きな検出面積を持つのが特徴で、特に 10 keV 以上にわたる高いエネルギー領域でも十分な検出能力を持っていた。この GIS 検出器は高い時間分解能をもっており、その周期の下限が数 10 ms に及ぶ高速回転 X 線パルサーの観測には欠かせないものであった。このように X 線観測において GIS は SIS と相補的な役割を果たした。

### 3.5 現在稼働中の「すざく」衛星

2005 年 7 月 10 日に打ち上げられた 5 代目 X 線天文衛星 Astro-E2 は「すざく」と命名され、現在稼働中である<sup>(8)</sup>。その開発コード名で予想されるように、これは 2000 年に打ち上げに失敗した Astro-E の後継機として急遽製作・打ち上げが行われたものである。「すざく」衛星 (図 7) では X 線望遠鏡システムの基本構造は、「あすか」衛星のシステムを継承している。異なる点は焦点面検出器として撮像型蛍光比例計数管 (GIS) の代わりに現在の技術の極限と考えられるエネルギー分解能を得られる X 線カロリメーター (XRS) を搭載したこと、X 線反射集光鏡では 10 keV 以上の X 線を観測できないので、それを補うために硬 X 線検出器 (HXD) を合わせて搭載したことである。

この 2005 年 7 月に打ち上げられた「すざく」衛星は地上からの高度約 550 km の略円軌道を航行している<sup>(8)</sup>。

その大きさは直径2.1 m全長6.5 m(軌道上で鏡筒伸展後)で、太陽パドルを広げると5.4 mの幅になる。衛星の重量は1.7トンであり、日本の科学衛星としては、これまでにない大型衛星といえる。そして「すざく」は今日現在も国際的に公募し、採択された天体・研究対象の観測を続けている<sup>(6)</sup>。

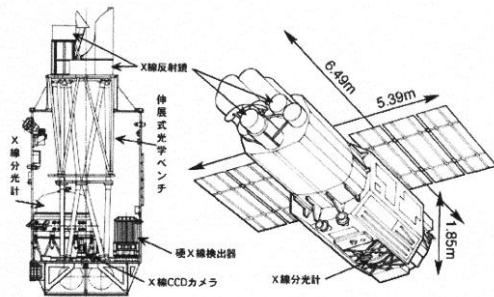


図7 「すざく」衛星の構造モデル。左は打ち上げ時にロケット頭胴部に収められている姿、右は打ち上げ後太陽パドルを展開し、XRTを搭載した光学ベンチを展開した姿を示す。

「すざく」のX線望遠鏡(XRT)は「あすか」のX線望遠鏡の有効面積と、結像性能をどちらも倍近く改善した、新しいX線望遠鏡(口径40 cm, 焦点距離4.5-4.75 m)で伸張式光学台(伸張長1.4 m)に5台搭載している。5台の望遠鏡のうちの1台は高分解能X線分光器(XRS)がその焦点面に備えられ、残りの4台の焦点面にはX線CCDカメラ(XIS)が搭載されました。

4台のX線望遠鏡の焦点面上に配置されたX線CCD(XIS)カメラは「あすか」のCCDカメラをさらに改良、発展させたもので、0.5 keVから12 keVのX線領域で、広い視野での撮像を行いながら精度の高い分光観測を連続的に行うことが可能である。4台の望遠鏡を合わせると、6 keV以上の高エネルギー領域のX線に対して、現在も世界最大の有効面積を持つ。

X線望遠鏡でカバーされるX線領域は10 keV以下であるが、それより高いエネルギーを持つ硬X線からガンマ線の領域を観測するため、硬X線検出器(HXD)が搭載されている。これはガドリニウム・シリケート結晶を用いた無機シンチレータ(GSO)とシリコン検出器を組み合わせたものである。このように高いエネルギーまで良い検出感度(S/N比)で観測できる装置が衛星に搭載されるのは日本では初めてである。筒状に伸びた井戸型シンチレータによって周りからの雑音ガンマ線を低減するなど様々な工夫により、このエネルギー領域ではこれまでに例のない高感度の観測を可能とする。

この「すざく」衛星の1台のX線望遠鏡の焦点面には、これまでのX線検出器に比べて一桁もエネルギー分解能の高いX線カロリメーターと呼ばれる高分解能X線分光器(XRS)が搭載された。この検出器の原理は、絶対温度約0.06度の極低温に検出素子を冷し、X線入射に伴う素子の微弱的な温度の上昇から入射X線のエネルギーを精度良く決めるものである。まさに1個1個のX線光子(フォトン)の温度を測るX線温度計といえる。このような検出器を衛星に搭載したのは「すざく」が初めてである。動作に必要な極低温を軌道上で実現するため、断熱消磁冷凍機と液体ヘリウム容器(絶対温度1.2度)と固体ネオン容器(絶対温度17度)を組み合わせた宇宙空間で使用可能な3段式冷却システムが新たに開発された。測定は0.5 keVから12 keVの範囲で行われ、エネルギー分解能は6-7 keVの鉄輝線領域で約10 eVとX線CCDカメラの10倍も優れたものである。このX線カロリメーター(XRS)は衛星打ち上げ後初期の試験運用時には、宇宙での運用においても地上試験で得られた所期のエネルギー分解能を達成した。しかし残念ながら、試験運用中に冷却用寒剤が容器から漏れる事故が生じ、実運用での天体観測にこれを供することができなくなり、この究極的な分解能をもつ検出器によるX線天体の観測は次世代の衛星に託すこととなった。

#### 4. 天の川銀河中心からのX線放射

我が銀河系(天の川銀河)は約2千億個の星の集まりで、その中に私たち太陽系がある。この銀河系には他にも星形成の原料となる冷たいガス(暗黒星雲または分子雲と呼ばれる)があり、また私たちの知らない未知の暗黒物質(ダークマター)がこの銀河系を取り巻いていることも知られている。この銀河系の中心には太陽の300万倍もの質量を持つ巨大ブラックホールが潜んでいることが、最近電波や赤外線を使った銀河中心の観測から明らかになってきた。前章で述べたように小山らは「てんま」によりこの銀河中心方向銀河面に沿って6.7 keVの鉄輝線を放射する高温のプラズマが広がっていることを発見した。「ぎんが」衛星でこの銀河中心から銀河面に沿ったスキャン観測を行った結果、6.7 keV鉄輝線は銀河バルジ領域で特に強く、さらに銀河面に沿って銀経が±60度まで広がっていることを明らかになった(図8参照)。



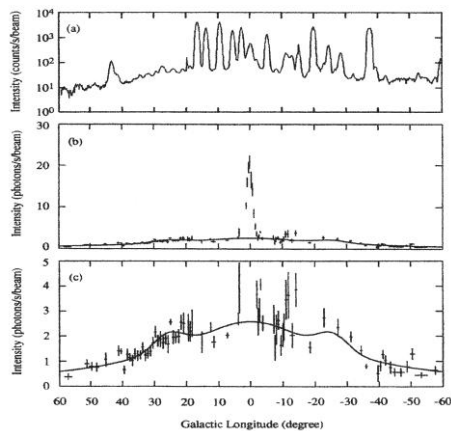


図 8 「ぎんが」で観測された銀河面に沿ったX線強度の分布。(a)は連続成分の分布で強いX線点源の影響が顕著である。(b)は 6.7 keV 鉄輝線の分布で、銀河中心のパルゼ領域で特に強いことがわかる。(c)は(b)の縦軸を拡大したもので、銀系±30度で特に強く、さらに銀系±60度まで広がっていることを示す (Yamauchi & Koyama 1993<sup>(49)</sup>)。

この銀河中心核付近に広がって見えるX線放射のスペクトルを「あすか」で調べると、電離が大きく進んだシリコン、硫黄、鉄からの輝線が見つかった(図9)。この事実は、中心核の周りが温度が1千万度にも達する希薄な超高温の電離プラズマ雲に覆われていることを示唆する。しかも、このプラズマのエネルギーは超新星爆発に換算すると約1,000発分にも及ぶとてつもなく大きなものだとなった(その起源は今もって謎に包まれている)。

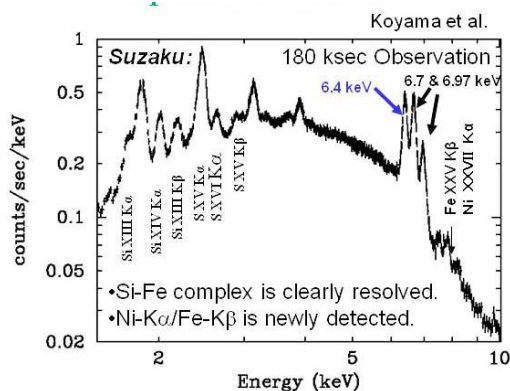


図 9 銀河中心方向に広がって存在する高温プラズマからの熱的X線放射 (Koyama et al. 2007) <sup>(47)</sup>。

もう一つ不思議なことに、この銀河中心から 300 光年ほど離れたところ (Sgr B2 領域) からは、電離のほとんど進んでいない低温のガス雲に起因する 6.4 keV 蛍光鉄輝線が卓越していることが発見された (図9には両者が同程度の強度で混在する領域のスペクトルを示す)。この蛍光鉄輝線は、低温ガス雲中の鉄原子が強いX線源からの照射を受けてその吸収と特性X線の再放出によるものと結論づけられる。しかし、「あすか」の像からはそのような強い放射場を作る照射X線源はこの蛍光鉄輝線放射領域の近傍には見当たらなかった。

蛍光鉄輝線を放射する低温ガス雲から銀河中心にある巨大ブラックホールまでの距離は約 300 光年である。一方、超高温プラズマを膨張速度で逆に 300 年前の過去にさかのぼっていくと、そのときのX線強度は蛍光X線を生成するに足るほど明るくなる。すなわち、ごく最近 (300 年前) には中心にある巨大ブラックホールに大量のガスが吸い込まれ、重力加速に伴う膨大なエネルギーがX線として放射され、そのなごりが電波で観測されている分子雲領域 (Sgr B2 領域) に達し、それとの衝突による蛍光輝線再放射を「あすか」が観測した可能性が高いようである。つまり最新の宇宙技術を搭載した「あすか」により、X線の光路差を利用することで、銀河系の中心核ブラックホールの歴史を、300 年 (つまり江戸時代まで) 遡って解くことができた。その後観測が続けられた Chandra, XMM-Newton, 「すざく」衛星の結果はこの推論を検証すると共に、その 6.4 keV 蛍光鉄輝線の強度の中心がその 10 年間に変動していることを明らかにした。これは被照射体である低温の分子雲 (Sgr B2) の形状によるものと思われる。

## 5. 活動的銀河中心核近傍から放射される鉄輝線

3章で述べたように「ぎんが」衛星は大面积検出器を有し、計測X線の統計制度も向上したので、遠方の活動的銀河核からのX線強度が非常に早い変動を示すことを明らかにした。10分間程度にX線強度が2倍も変化する活動銀河核も発見した。このことは、活動銀河核のX線を出している領域は光の速度で走って10分程度以下、つまり、太陽と地球間の距離程度の大きさということになる。X線放射領域がそれより大きければ、たとえば放射源に早い時間変動があっても、各領域のX線が地球に到達するまでの時間差でなまされるので、そのような早い変動は見られなくなる。こんな小さな1AU程度の領域から太陽の100億倍もの強度のエネルギーをX線領域で出しうる天体は、巨大ブラックホール以外には考えられないので、その活動的銀河核中心には太陽質量の1億

倍もの超巨大ブラックホールが存在し、これが強烈なエネルギーを放射する源となっていると類推される。

活動銀河核のX線スペクトルは一般に冪関数型の連続関数で表せる形をしている(図5参照)。しかし、「あすか」や「すざく」のような高精度のX線検出器で観測すると、連続スペクトルの上にさまざまな輝線や吸収端が見られる。これらは、中心のブラックホールからのX線が周囲の物質によって散乱吸収されたり、その物質が特性X線を再放出したりする結果生じた、いわば巨大ブラックホールを取り巻く周辺物質による刻印である。例えば宇宙に存在する割合の比較的大きい“鉄”元素の場合、それがあまり高温でなければ、そのX線照射によるK殻電離に伴って6.4 keVの蛍光X線を効率よく放出する。先代のX線天文衛星「ぎんが」は、多くの活動銀河で6.4 keVの輝線を観測し、活動銀河の周りに鉄が分布していることを明らかにしたが、「ぎんが」では輝線の形まで調べることはできなかった。

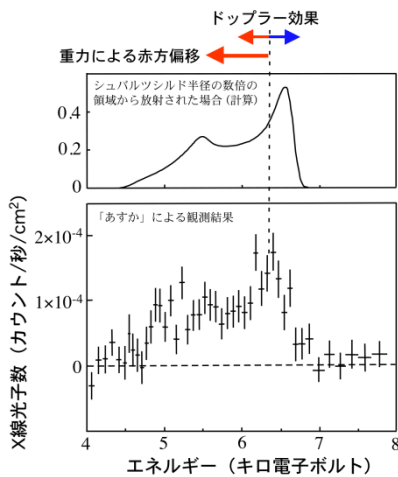


図10 「あすか」が活動銀河MCG-6-30-15のスペクトル解析から発見した低エネルギー側に広がった6.4 keV鉄輝線(下; Tanaka et al. 1995)<sup>(18)</sup>とその解釈モデル図(上)。

輝線の形は、輝線を出している物質の運動についての情報を与える。例えば運動している物質から出される輝線はドップラー効果により、近づいてくる場合には波長が短く(エネルギーが高く)なったように、遠ざかる場合には波長が長く(エネルギーが低く)なったように観測される。前者を青方偏移、後者を赤方偏移といい、波長(エネルギー)の変化は、物質が速く動いているほど大きくなる。田中靖郎、井上一、A. Fabianら<sup>(18)</sup>は「あすか」で観測した活動銀河MCG-6-30-15のスペクトル

ルを解析し、そのX線スペクトルに奇妙な鉄輝線構造を発見した(図10)。この、低エネルギー側に偏って広がった6.4 keV鉄輝線構造の解釈は次のようなものである。高速回転している降着円盤が中心核の光に照らされて鉄輝線が出てくると、降着円盤中のガスの回転運動により青方偏移と赤方偏移をうけた鉄輝線が重なり合い6.4 keVを中心に左右に対照的に広がった鉄輝線分布が見えるはずである。加えて、ブラックホール近傍の強い重力場から出てくる時に光はその重力効果でエネルギーが低い(波長が長い)方にずれることが期待される(重力赤方偏移)。実際にはこれらの効果が重畳した鉄輝線分布が観測されたわけである(図10)。このようなドップラー効果と重力赤方偏移の影響を考慮に入れて鉄輝線の形状をモデル計算して、データと比べることにより、「あすか」は活動銀河核の中心に巨大ブラックホールが存在することを説得力のある形で実証し、その巨大ブラックホールと周辺空間の物理的特性を明らかにした。

「すざく」では他にも多くの銀河がその中心に巨大ブラックホールをもつことを明らかにした。そしてその近傍から放射される6.4 keV鉄輝線の重力赤方偏移の形状には様々な種類があり、今後これを調べることにより中心の巨大ブラックホールが高速で回転しているか否かを判別できると期待されている。

## 6. 超新星残骸は宇宙線加速工場

銀河系では非常にエネルギーの高い荷電粒子(宇宙線)が生成され、ほとんど光速に近い速さで飛び交っている。その粒子強度はエネルギーの増加とともに冪関数形で減少するが、現在では最高エネルギーが $10^{20}$  eVの超高エネルギー宇宙線が観測されている。この1次宇宙線の起源、つまりどこでどのように加速されているのかは長年の謎となっていた。ただし理論家の間では宇宙線の起源は超新星残骸ではないか、つまり宇宙線は超新星残骸の外縁部で加速生成されているのではないかと推論があった。しかし宇宙線は、光やX線などの電磁波と異なり、荷電粒子であるため銀河系内を伝搬して地球に到達するまでに銀河系内磁場で曲げられてしまうため、その加速源を観測的に確定することができなかった。この宇宙線起源の謎に答えたのが、意外にもX線天文衛星「あすか」であった。

もともと超新星残骸は電波望遠鏡の観測によって発見されてきた。そして「あすか」以前の衛星(Einstein衛星、ROSAT衛星など)で超新星残骸のX線像が観測されるようになった。そのX線像は大質量星がその進化の終焉で大爆発(これを超新星爆発という)を起こし、その



際莫大なエネルギーをもって放出される高速物質が星間ガスと衝突し、このとき発生する衝撃波で星間ガスが加熱され、超新星爆発残骸の伝搬とともに高温ガスが蓄積され、その希薄高温プラズマからX線が放射されている（これを熱的X線放射という）ものと考えられていた。実際エネルギー分解能の高い「あすか」による観測から、希薄高温プラズマからの熱的X線放射の特徴である高電離した重元素からの輝線が観測され、「あすか」は上記の解釈の妥当性を証明した。

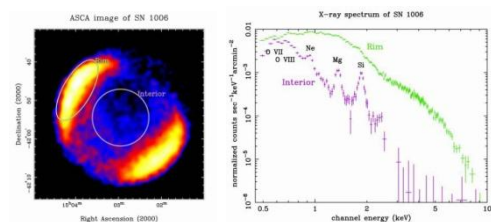


図 11 「あすか」が観測した超新星残骸 SN1006 のX線画像 (左) とX線スペクトル (右) . 超新星の中心部からは熱放射, 外縁部 (つまり衝撃波面) では非熱的放射が見られる (Koyama et al. 1995) <sup>(19)</sup>.

ところが、小山勝二、尾崎正伸らは超新星 SN1006 のスペクトルを解析して、この超新星残骸には他の超新星残骸同様に熱的X線放射を示す場所の他に、輝線を伴わず高いエネルギーまで冪関数型で伸びる、つまり非熱的X線放射のエネルギースペクトルを示す場所があることを発見した<sup>(19)</sup> (図 11 参照) . この非熱的なX線スペクトルはエネルギーが数兆電子ボルトにも及ぶ高エネルギー電子がシンクロトン放射で放出する電磁波と考えられる。つまりこの超新星残骸は荷電粒子をそのような高エネルギーまで加速する工場であることが証明された。馬場彩らはさらに「あすか」やChandra, 「すざく」衛星の超新星の残骸を解析し、①加速源の加速機構の考察とその物理量の推定、②他の超新星残骸からの非熱的X線放射の検証など、研究を進展させている。

内山泰伸らはROSAT 衛星により軟X線領域で発見された超新星残骸であり、その方向からは1兆電子ボルトに及ぶ超高エネルギーガンマ線放出が観測されている、さそり座にあるX線天体, RX J1713.7-3946 をChandra と「すざく」衛星で数年にわたり精力的に観測した<sup>(20)</sup>. その結果、この超新星残骸の「すざく」で観測したスペクトルは確かに非熱的なシンクロトン放射であるが、20 keV あたりに折れ曲がりがあること、X線強度の強い場所が1年程度の時間尺度で変動していることを発見した (図 12) . これらの結果はこの超新星残骸中で宇宙

線が生成されているが、その衝撃波加速に寄与している磁場の強さは従来の予想よりはるかに強いこと、超高エネルギーガンマ線は宇宙線陽子成分による中性 $\pi$ 中間子の生成とその崩壊によるものであることなどがわかった。

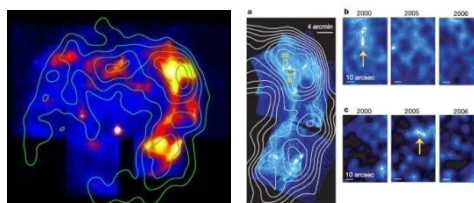


図 12 超新星残骸 RX J1713.7-3946 の「すざく」による撮像画像 (左) とその西側 (図の右側) 外縁中の局所的なホットスポットの年単位の変動 (右) を示す (Uchiyama et al. 2007) <sup>(19)</sup>.

## 7. 原始星や惑星状星雲もX線を放射する

星間ガスの濃い場所 (暗黒星雲とか分子雲) で原始星の形成が始まる。この原始星は自己重力で収縮し中心の密度と温度が次第に上昇する。クラス 0, クラス I, クラス II, クラス III 原始星と進化につれて原始星の中心の圧力と温度が上昇し、中心部ではついに水素の核融合反応の臨界温度に達し、水素の核融合でヘリウムを形成する原子核反応 (以後水素燃焼と呼ぶ) が始まる。そこで生成されるエネルギーは星の外部に伝わり、表面から星間空間に放射され、星は明るく輝き始め、主系列星の仲間入りをする。星の質量が太陽程度の場合は水素燃焼を継続しながら、更に重力収縮が進み、ついに中心に溜まったヘリウム芯が核融合反応を始め、このヘリウム燃焼の生成物として、炭素、酸素が星の中心に堆積し始める。水素燃焼が次第に星の外部に移行し、燃料が乏しくなると星の外縁部が大きく膨らみ始め、星は赤色巨星となる。そしてついに星の外縁部のガスはリング状、放射状、網目状等さまざまな形状をなして宇宙空間に広がっていく (惑星状星雲といわれる) . 一方燃えカスとして芯に残ったヘリウム、炭素、酸素は小さく萎縮した、暗い星として残る。これが白色矮星で、親の星の質量によってヘリウムが主成分の白色矮星と炭素、酸素が主成分の白色矮星とがある。

このように太陽程度の質量の星の一生の内、近傍にある主系列星のX線放射はEinstein 衛星, ROSAT 衛星のような高感度の撮像型X線望遠鏡では観測されるようになっていた。しかしまだ冷たいはずのクラス I 原始星や燃え尽きて終焉を迎えた惑星状星雲/白色矮星系からのX線放射は想像し難いことであった。ところが、濃い分子

雲の中で成長中のクラス I 原始星がむしろ高エネルギー (~10 keV) のX線を放射することを「あすか」が発見した<sup>(21)</sup>。一方、現在稼働中の米国のX線天文衛星 Chandra では明るい惑星状星雲約 10 個程度からX線が放射されていることを突き止めた。このうち可視光で1番明るい惑星状星雲、BD +30° 3639 は「すざく」でも観測された。「すざく」ではこの惑星状星雲の中心部からのX線放射のエネルギースペクトルを 0.5 keV 以下の超軟X線領域まで高い検出感度で観測し (図 13)、そのX線エネルギースペクトルに高電離炭素原子に起因する輝線を観測し、その強度が一般の宇宙組成比から推定される強度をはるかに超えることを発見した<sup>(22)</sup>。

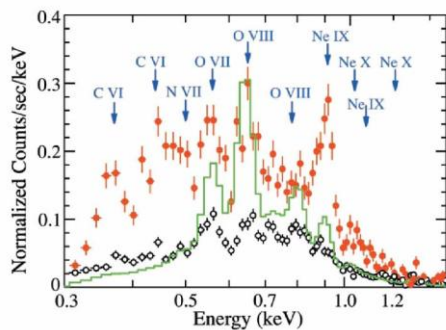


図 13 「すざく」が観測した惑星状星雲 BD +30° 3639 のX線 CCDによるスペクトル。通常の宇宙組成で期待されるものに比べ非常に強い炭素輝線が見られることが特徴 (Murashima et al. 2006) <sup>(22)</sup>。

この結果は、可視光領域で一番明るくガス温度が比較的低いと思われる惑星状星雲で、どのようにしてこのような強いX線を放射するのかを問うものである。現在、この系の中心部から高速星風が放出され、それが周りの惑星状星雲に衝突して衝撃波を形成し、そこでガスの温度がX線放射の可能な高温プラズマにまで加熱され、そこからX線が放射されるとの仮説が提案されている。この惑星状星雲、BD +30° 3639 の中心部はいずれ白色矮星として残るものと思われるが、「すざく」の観測によりこの惑星上星雲の中心部に炭素元素が豊富に存在することを検証したことは、宇宙における元素合成の理論的仮説を検証する上で大変重要な結果である。

## 8. 太陽風と地球磁気圏の相互作用で放射されるX線

「すざく」はX線天文衛星、つまり太陽系外遠方のX線天体を観測するのが主目的の軌道天文台である。観測対象はブラックホール、超新星残骸、活動銀河核、銀河団などが主流ですが、時には偶然とらえた現象が思

いがけない発見につながることもある。本項では、太陽風を起源とする地球近傍でのX線放射という、「すざく」が他の目的の観測中に偶然とらえた現象を紹介する。そして、このX線放射が太陽風中の高速粒子が地球周辺の中性元素と衝突する際に起こす「電荷交換」といわれる原子の相互作用に起因することを明かす。

「すざく」は 2005 年 9 月に、銀河系内に広がって存在する数百万度の温度を持つ高温プラズマハローから放射される銀河系内超軟X線放射の観測をするために、望遠鏡視野を黄道北極領域に向けていた。この観測中約 10 時間にわたってX線強度が起源不明の謎の増光を示した。この増光は特定の点源ではなく検出器の視野全体に広がっており、そのうえ短い時間で変動をしていた。調査の結果この増光の変化の様子は磁気圏観測衛星によって得られた太陽風陽子の強度変化に比例しており、「すざく」が偶然観測した「謎のX線増光」は太陽風と強く関連していることが判明した<sup>(23)</sup>。

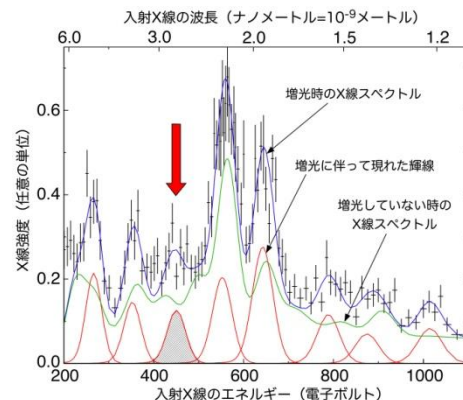


図 14 「すざく」は黄道北極方向の時間変動するはずのない広がった領域のX線放射を観測中に急激なX線増光を観測した。それから静穏成分を差し引いたものは高電離したイオンから発せられる輝線群であった (Fujimoto et al. 2007) <sup>(23)</sup>。

この増光時のX線スペクトルから静穏時のそれを差し引くとX線の増光分は高電離した炭素、酸素、ネオン、マグネシウム等のイオンが放射する輝線の群であることがわかった (図 14)。しかもその輝線 (特に炭素輝線) の強度は数百万度で熱平衡にある高温プラズマから予想される強度をはるかに超えていた。この強烈な輝線強度を説明するには、高速で飛来した太陽風炭素イオンが磁気圏内で水素原子と衝突して起こす電荷交換と呼ばれる相互作用によるものだとすると説明できる。つまり水素原子に付随していた束縛電子が衝突時に完全電離炭素イオ

ンに乗り移る。そしてこの電子が炭素原子束縛エネルギーの基底状態まで落ち込む時に 495 eV の超軟X線輝線を放出する。その増光の時間変動の解析からこの電荷交換は地球磁気軸方向で高度が6,000 kmのごく地球近傍で起きていることが判明した。この電荷交換過程そのものは磁気圏プラズマ観測衛星の研究などでも知られていたが、X線天文衛星でこの電荷交換過程から放射されるX線を捉えたのは「すざく」が初めてである。

## 9. むすび

日本のX線天文グループは現在「すざく」の運用と観測データ解析、論文の作成を進めるのと並行して、5年ほど前から次の衛星の開発計画を練り、搭載予定機器の基礎開発実験を繰り返している。この次世代X線望遠鏡計画(通称NeXT)は、現在宇宙航空研究開発機構(JAXA)において衛星プロジェクトとして認められるための審査が進んでおり、予定通り進めば2013年の打ち上げを目指して衛星製作が開始される。この衛星の検出器の1つは高分散X線分光系/X線マイクロカロリメータである。これは「すざく」で実観測に供することができなかった観測機器の再挑戦であり、世界中から注目された協力の申し出を受けている。他は80 keVまでの硬X線の反射結像を可能とするスーパーミラーとその硬X線領域で高エネルギー分解能での撮像を可能とするCdTe撮像素子を組み合わせた望遠鏡システムである。2010年代中期は世界のX線天文台打ち上げ計画が途絶える時期になるため、このNeXT衛星に対する世界の期待は大きい。

本稿では銀河、銀河団の研究に関するトピックスを取り上げなかったが、もちろんこの分野でも「ぎんが」、「あすか」、「すざく」による観測が多数行われ、多くの研究成果を挙げている。しかし、NeXT衛星ではこの分野、特に宇宙における銀河の大構造分布、宇宙の質量の圧倒的割合を占める未知の暗黒物質(ダークマター)の解明など、宇宙の形成と進化にかかわる重要な研究課題に取り組むと期待される。

## 参考文献

- (1) R. Giacconi, H. Gursky, F. R. Paolini & B. B. Rossi, *Phys. Rev. Lett.* 9, 439 (1962).
- (2) K. Ichimura, G. Ishida, J. Jyugaku, M. Oda, K. Osawa & M. Shimizu, *Publ. Astron. Soc. Japan* 18, 469 (1966).
- (3) R. Giacconi, E. Kellogg, P. Gorenstein, H. Gursky, H. Tananbaum, *Astrophys. J. Lett.* 165, L27 (1971).
- (4) I. Kondo, *et al.*, *Space Sci. Instr.* 5, 211 (1981).
- (5) Y. Tanaka, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* 36, 641 (1984).
- (6) F. Makino, *et al.*, *Astron. Lett. Commun.* 25, 223 (1987).
- (7) Y. Tanaka, H. Inoue & S. S. Holt, *Publ. Astron. Soc. Japan* 46, L37 (1994).
- (8) K. Mitsuda, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* 59, S1 (2007).
- (9) T. Ohashi, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* 36, 699 (1984).
- (10) K. Mitsuda, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* 36, 741 (1984).
- (11) K. Koyama, K. Makishima, Y. Tanaka & H. Tsunemi, *Publ. Astron. Soc. Japan* 38, 121 (1986).
- (12) M.J.L. Turner, *et al.*, *Pub. Astron. Soc. Japan* 41, 345 (1989).
- (13) K. Makishima, T. Mihara, F. Nagase & Y. Tanaka, *Astrophys. J.* 525, 978 (1999).
- (14) K. Nandra & K.A. Pounds, *Mon. Not. R. Astron. Soc.* 268, 405 (1994).
- (15) P. Serlemitsos, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* 47, 105 (1995).
- (16) S. Yamauchi & K. Koyama, *Astrophys. J.* 404, 620 (1993).
- (17) K. Koyama, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan* 59, S245 (2007).
- (18) Y. Tanaka, *et al.*, *Nature* 375, 659 (1995).
- (19) K. Koyama, *et al.*, *Nature* 378, 255 (1995).
- (20) Y. Uchiyama, F. A. Aharonian, T. Tanaka, T. Takahashi & Y. Maeda, *Nature* 449, 576 (2007).
- (21) Y. Kamata, K. Koyama, Y. Tsuboi & S. Yamauchi, *Publ. Astron. Soc. Japan* 49, 85 (1997).
- (22) M. Murashi, M. Kokubun, K. Makishima, *et al.*, *Astrophys. J.* 647, L131 (2006).
- (23) R. Fujimoto, *et al.*, *Publ. Astron. Soc. Japan*, 59S, 133 (2007).