

「日本の X 線天文衛星が明かした灼熱の宇宙」

—宇宙航空研究開発機構名誉教授・日本大学非常勤講師 長瀬文昭—

<目次>

- 0. はじめに
- 1. X 線天文学の幕開け
- 2. X 線観測の特徴と X 線放射の基礎課程
- 3. 日本の X 線天文学
- 4. 「あすか」・「すざく」衛星の概要
- 5. 「あすか」・「すざく」で迫った灼熱の宇宙
 - (1) 活動的銀河中心の巨大ブラックホールは X 線を歪める
 - (2) わが天の川銀河中心に潜むモンスターの尻尾をつかむ
 - (3) 大質量星爆発のなごりの超新星残骸は宇宙線加速工場
 - (4) 小質量星終焉のなごりの惑星状星雲も X 線を放射する
 - (5) 太陽を発し地球磁気圏を取りまく太陽風から X 線放射
- 6. 附録 (補足画像)

0. はじめに

星空を眺めて

人類は太古の昔より夜空を見上げ、神秘的な星空に魅了されたことでしょう。ギリシャ時代の哲学者で万学の祖と言われたアリストテレスは星空を眺め、恒星の織りなす星座の間を不思議な運行をする惑星を見つめ、天体の運動の法則を考えました。その後天文学においては何世紀にもわたって、地球が宇宙の中心で太陽など天体はこの地球を周回するのか(天動説)、逆に地球が太陽の周りを周回するのか(地動説) 論争の的でした。地動説への決着は 17 世紀に入ってガリレオ・ガリレイが天体望遠鏡により、確かな観測的根拠を得るのを待たねばなりませんでした。この望遠鏡の発明は人類の宇宙を見る目を広げ、宇宙の理解を深めました。

宇宙を見る目を広げて

名画モナ・リザを残した偉大な芸術家レオナルド・ダ・ヴィンチは医学・工学・理学にも精通した科学者でした。彼は小鳥のように空へ飛び立つことを夢見て空飛ぶ機械を考案しました。その設計図は今のヘリコプターのような構造でした。20 世紀に入るとロバート・H・ゴダード（アメリカ）らによってロケット技術の研究が飛躍的に発展し、遂に 1957 年にはソ連により世界最初の人工衛星スプートニク 1 号の成功に至りました。1969 年には米国の月探査計画が進み、ついに有人衛星アポロ 11 号（船長；アームストロング）により、人類は初めて地球に一番近い地球外の天体である月の表面に着陸することに成功しました。こうして人類は宇宙に出て宇宙を観測する眼を広げてきました。

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方法で、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ました。ところが 1930 年代には電波望遠鏡が開発され私たちは電波によって宇宙を見る新しい目を獲得しました。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る宇宙の探査が可能になりました。本格的な X 線観測は、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りませんでした。こうして現在では光（可視光）に加え、電波、赤外線、X 線が天文観測の 4 本柱となり、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できるようになりました。

1. X 線天文学の幕開け

米国マサチューセツ工科大学のロッシ、ジャッコーニらは 1962 年に別の観測目的で 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 線天体を発見しました。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 でした。これが感動的な X 線天文学の幕開けでした。

当時 X 線用の結像望遠鏡はまだ開発されていなかったため、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 線天体の位置を高精度で決定しました。しかしその方向には可視光望遠鏡では暗く青白い際立った特徴のない星が見えるのみでした。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ました。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などから X 線を放射する第 2、第 3 の X 線天体を次々に発見しました。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ました。ここに私たちは遂に、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を可能としたのです。

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線天体を探索することを計画しました。この計画は1970年12月のウフル衛星の打ち上げとなって実現しました。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ました。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のでした。

2. X線観測の特徴とX線放射の基礎課程

なぜ本格的なX線天文学は人工衛星の科学利用が可能になるまで待たなければならなかったのでしょうか？ この章はやや専門的になるかと思いますが、この講義をお聞きいただく方々向けにいくつかX線に関する予備知識をお話したいと思います。

まずX線は電磁波の仲間であるということです。電磁波を波長の長いほうから書けば、電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、ガンマ線となります。X線の典型的な波長は1-10オングストローム（または0.1-1ナノメートル）です。エネルギー単位で表せば1-10キロ電子ボルト（keV）となります。一般的にはもう少し拡大して0.1-100 keVをX線領域と定義します。ここでX線を波長で呼んだり、エネルギーで呼んだりするのは、現代の量子力学では電磁波は波動性と粒子性の両方の性質を兼ね備えると考えられているからです。そして、エネルギーの高い電磁波であるX線やガンマ線は粒子的な性質を強く表します。そこで私たちはX線を観測する際、その光子（photon）の数を計測する検出器を用いるのです。

前に本格的なX線観測は人工衛星の利用が可能になって以後に発展したと書きましたが、これはX線を観測するためには、地球大気の吸収を避けて上空で行う必要があるからです。一般に水素原子の電離ポテンシャル（13.6 eV または 91 ナノメートル[nm]）より波長の短い真空紫外線、X線、ガンマ線は地球大気による吸収を強く受けます。そのため典型的な波長領域でX線を地球大気に妨害されることなく観測するためには、宇宙（地上 100 km 以上の上空）に検出器または望遠鏡を打ち上げる必要があります。

次にどのようにしてX線が放射されるかですが、X線放射の基礎過程には①黒体放射、②熱制動放射、③シンクロトロン放射、④逆コンプトン放射、の4種類があります。太陽はヘルツスプルング・ラッセル図（HR 図）の主系列星中央に位置する典型的な恒星ですが、その表面温度は 6000 度であり、その黒体放射のピークはちょうど可視光領域となります。放射のピークがX線領域に来るためにはその黒体温度は 1000 万度～1億度という超高温にならなければなりません。このような高温のガスの密度が極端に薄くなり、高温希薄な電離プラズマとなると、熱制動放射でX線が放射されます。②の熱制動放射と③のシンクロトロン放射は基本的には高速で運動する自由電子に外力が働いて電子が減速する際に起こる電磁波放射です。②では周りのイオンによるクーロン力で減速されるのに対して、③では自由電子が磁場に捉えられて旋回（ジャイロ）運動する際に電磁波が放射されるのです。

シンクロトロン放射は電波領域の電磁波も放射しますが、エネルギーが非常に大きく相対論的な速度で運動をしている電子が非常に強い磁場の中やとてつもなく大規模な磁場領域でシンクロトロン放射を発するとそれはX線・ガンマ線領域での放射となります。④の逆コンプトン放射はもともと低エネルギーの光子が非常にエネルギーの高い相対論的な電子と衝突して、その電子のエネルギーをもらって高エネルギーのX線・ガンマ線に生まれ変わる現象です。

高温希薄な天体プラズマから放射される熱制動放射は連続的なスペクトルですが、このような高温プラズマ中では、完全には電離されていない重元素イオンが存在し、束縛電子の励起、再結合が繰り返されます。この時束縛電子のエネルギー準位は量子化された飛び飛びの値を取るため、そのエネルギー準位間の遷移は離散的になります。そのため高温希薄なプラズマからは、束縛電子の軌道準位間の遷移に伴ってさまざまな輝線や吸収線が見られます。これらはその天体の物理状態を知る貴重な手がかりとなります。また、宇宙・天体でガスを加熱してX線を放射するほどの高温のプラズマを作るためには、そのガスを中性子星やブラックホールのような強い重力を持った天体のごく近傍に近づくほどに加速し、その加速された運動エネルギーを熱エネルギーに変換しなければなりません。この高密度天体に吸い込まれるガスは渦巻状の運動をしながら円盤状になって落ち込んでいくのでこれを降着円盤と呼びます。

以上のようにX線放射の観測は非常に高温のプラズマ、極端に強い磁場や重力場、相対論的エネルギーを持つ電子など極限的な物理状態を探索する手段となるのです。そしてそのような状況にある場所は常に激しい変化を伴う活動的な宇宙です。従って、X線によって電波や赤外線とはまったく異なる「激しく活動する灼熱の宇宙」を見ることが出来るのです。なお、X線天文学の予備知識については JAXA 宇宙科学研究本部 (ISAS) の X線グループのホームページ (<http://www.astro.isas.jaxa.jp/xjapan/xrayinfo/>) も合わせて参照してください。

3. 日本のX線天文学

第2章で述べたX線星発見の頃日本には二人の偉大な天体物理学者がいました。名古屋大学の早川幸男教授は当時素粒子・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ました。小田稔博士は当時マサチューセツ工科大学に滞在し宇宙線の研究に参加しており、最初に発見された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おりました。もともと友人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ものと予感し、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ました。ちょうどその頃東京大学の付置研究所として宇宙航空研究所が設立された直後であり、小田先生は帰国しその教授に着任すると共に、宇宙X線天体の観測に着手しました。ここに日本のX線研究グループが発足しましたが、当時両先

生の周辺には、以後の日本のX線天文衛星計画を主導した田中靖郎、宮本重徳、槇野文命、小川原嘉明、松岡勝、山下公順ら、優秀な実験物理学者がメンバーとして参加しておりました。私もこのグループに所属していましたが、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、大学院生として加わっておりました。

日本最初のX線天文衛星「はくちょう」の打ち上げに成功したのは、「ウフル」に遅れること8年余の1979年2月でした。この間X線天文衛星打ち上げラッシュに沸く欧米を横目に、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きました。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ました。日本のX線天文グループ「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の研究、「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、と衛星ごとに特徴のある観測で成果を挙げてきました。そして「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ました。この「ぎんが」、「あすか」衛星による観測が続いた、1980年代後半から1990年代にかけては、欧米の衛星計画の停滞の中にあって、日本の衛星による観測データが世界のX線天文学を支えた時期でもありました。

現在「すざく」衛星が稼働中で日々観測を続けており、この衛星の成果が今日の私の話の主題でもあります。「すざく」衛星はその最重要検出器であるX線カロリメーターを冷却系の故障で失ったこと、Chandra, XMM-Newton という欧米の強力なライバルが稼働中であることと厳しい環境の中で奮闘しております。

4. 「あすか」・「すざく」衛星の概要

「あすか」衛星

「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X線天文衛星で、宇宙からのX線の画像を撮ると同時に、X線光子一つ一つのエネルギー（波長）を高い精度で測定する事ができます。普通の可視光と同様にX線にも波長の違い、つまり「色」があります。「あすか」衛星は、可視光の「赤」に相当する波長の長いX線から、可視光の「青」に相当する波長の短いX線までの色鮮やかなカラーの動画を撮ることができます。本講義でも多彩なX線画像をお見せしますが、これらはX線で観測されたデータの波長を可視光に対応するように変換して描いた擬似カラー画像です。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「青い」X線（2～10 keV）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ります。

「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線鏡」と「高い波長（エネルギー）分解能を持つ焦点面検出器」です。「あすか」は4台のX線望遠鏡（XRT）

を用い、その焦点面に2種類の異なったタイプの検出器、X線 CCD カメラ (SIS) と撮像型蛍光比例計数管 (GIS) が焦点面に配置されています。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す。「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と組み合わせられています。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ます。

「あすか」のX線望遠鏡は、0.5 から 12 キロ電子ボルトまでの広いエネルギー範囲のX線を効率よく集光します。これまでのX線衛星では、搭載されたX線望遠鏡の撮像能力がほぼ 4 keV 以下のX線に限られていました。従って、「あすか」では多くの天体からはじめて高いエネルギーのX線像が得られることになります。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す。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できると期待されます。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 (1° 以下) X線を入射させなければならないといった技術的困難がX線反射集光鏡にはあります。その困難を克服してかつ衛星搭載可能な軽量を確保するのがこの「あすか」のX線望遠鏡の特徴で、非常に薄いアルミニウムの板を特別なめらかな面に成型し金を精密にコーティングした反射鏡を沢山集積したものが使われています。この「多重薄板鏡」は、「あすか」の特徴である、「高いエネルギーのX線を観測する能力」のカギを握る技術であり、将来の宇宙X線光学技術の方向を決めるものです。

「あすか」の焦点面検出器の1つであるX線 CCD カメラは、一つ一つのX線光子のエネルギーを測ることができます。このような「フォトン・モード」でX線を観測できる CCD カメラを人工衛星に搭載して天体観測を行なったのは「あすか」が始めてです。X線 CCD 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%というすぐれたエネルギー分解能 (波長分解能) を実現しました。この性能を引き出すためには、検出器を -60°C に冷却することが必要です。「あすか」では放射冷却の技術を用いてこの冷却制御を実現しました。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りました。

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するために搭載されたもので、「てんま」衛星に搭載された装置を基にさらに改良を加えたものです。この装置は、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す。特に 10 keV の高いエネルギーでも十分な検出能力をもちます。この GIS 検出器はX線 CCD には及ばないまでも、比例計数管としては最高レベルのエネルギー分解能を持ち、さらにX線パルサーの観測には欠かせないすぐれた時間分解能を兼ね備えます。このようにGISはSISと相補的な役割を果たします。GIS 検出器は超薄型のベリリウム窓 (厚さ $10\ \mu\text{m}$ [ミクロン]) と8キロボルトという超高電圧を衛星環境で実現するという技術的難題を克服することによって開発に成功したものです。

「すざく」衛星

「すざく」衛星では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おります。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）を伸展式光学台（伸展長1.4 m）に5台搭載しております。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。硬X線検出器（HXD）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、硬X線からガンマ線の領域の観測の可能な検出器です。

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の略円軌道を運行しております。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の幅になります。衛星の重量は1.7トンにもなり、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ます。そして今日現在も国際的に公募され採択された天体・研究対象の観測を続けています。

5台の内、4台のX線望遠鏡の焦点面上に、X線CCD（XIS）カメラが搭載されます。このCCD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キロ電子ボルトから12キロ電子ボルトの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を連続的に行うことが可能です。これはX線領域で過去最高品質の色鮮やかな動画を撮る事に相当します。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、世界でも最大級の有効面積を持つことになります。

X線望遠鏡でカバーされるX線領域は10 keV以下ですが、その何10倍もの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）が搭載されております。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す。この検出器はガドリニウム・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す。筒状に伸びた井戸型シンチレーター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が可能になります。

この「すざく」衛星では5台の内1台のX線望遠鏡の焦点面に、これまでのX線検出器に比べて一桁も波長（エネルギー）分解能の高い高分解能X線分光器であるX線カロリメーター（XRS）が搭載されました。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な温度の上昇から入射X線のエネルギーを極めて精度良く決めるものです。まさに1個1個のX線光子（フォトン）の温度を測るX線温度計です。このような検出器が衛星に搭載されたの「すざく」が初めてです。動作に必

要な極低温を軌道上で実現するため、断熱消磁型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ました。観測は、0.5 キロ電子ボルトから 12 キロ電子ボルトの範囲で行われます。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波長（エネルギー）分解能を達成していることが確かめられました。しかし予想外の事故により、機器冷却用の寒剤の遺漏が生じ、天体観測の供することができなくなりました。

5 . 「あすか」・「すざく」で迫った灼熱の宇宙

これまでに第 1 章から第 4 章で述べた解説は私の講義を聞いていただく前に自宅で予習しておいていただく事項です（予習しなくても私の講義を楽しんでいただけますが）。いよいよ本題に入ります。ただし、「あすか」が成し遂げ、「すざく」が今進めている X 線望遠鏡を用いた宇宙・天体の観測研究は実に多義にわたります。時間の制約もあることから、本講義では「あすか」で発見された新たな宇宙・天体现象でその後「すざく」でさらに研究が発展している問題や「すざく」が新たに発見した思いがけない天体、宇宙空間からの X 線放射現象に関して、5 つのトピックスに限ってお話したいとおもいます。

（1） 活動的銀河中心の巨大ブラックホールは X 線を歪める

銀河と言えば、単なる星の集合体だと思われるかもしれませんが。しかし、わずか（銀河全体の 10 % くらい）ですが、銀河の中心が非常に明るく（通常の銀河の 1 万倍にも）輝いている銀河が存在します。この中心部分を「活動銀河核」と呼びます。セイファート銀河やクエーサーや BL Lac 天体といわれるものがこの仲間、宇宙の中で最も明るい天体の一種です。昔ウフルの時代から NGC4151 や 3C273 のような比較的私たちの住む銀河系に近いセイファート銀河やクエーサーからは、銀河系内では明るいと言われる中性子星やブラックホールを含む連星からの X 線放射の 1 兆倍にも及ぶ、膨大なエネルギーを X 線領域で放射されていることが分かりました。アインシュタイン衛星や ROSAT 衛星ではそのような X 線放射は活動的銀河核の一般的特性であることを明らかにしました。

一方「ぎんが」衛星のような大面積で検出感度もよく、計測 X 線の統計制度も向上した衛星では、この活動的銀河核からの X 線非常に早い変動を示すことがわかりました。たとえば 10 分間程度の間に X 線強度が 2 倍も変化することがあります。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、太陽と地球の距離より小さいことがわかります。X 線放射領域がそれより大きければ、たとえ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てしまい、そのような早い変動は見られなくなります。こんな小さな 1 AU 程度（太陽－地球間距離）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にくいのです。そして、銀河系内で降着円盤を持つブラックホールX線連星の類推から、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なければなりません。

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ます。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盛り上がり（輝線）やへこみ（吸収端）が見られます。これらは、中心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す。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（キロ電子ボルト）の蛍光X線を効率よく放出することわかっています。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ましたが、けれども「ぎんが」では輝線の形まで調べることはできませんでした。

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てくれます。例えば、救急車が通った時のサイレンの音を思い出してください。救急車が近づいてくるとき、音はだんだん高くなり、通りすぎると低くなったように聞こえます。このような変化を「ドップラー効果」といいます。運動している物質から出される輝線についても、同じ現象がみられ、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ます。可視光の場合、近づく物質からの波長は短くなるので色は青い方にずれるので、この変化を青方偏移といいます。遠ざかる場合は逆に赤い方にずれますから、赤方偏移といいます。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ります。

「あすか」で観測した活動銀河 MCG+6-30-15 からの鉄輝線のX線スペクトルは奇妙なものでした。光源が動いていなければ6.4 keVのエネルギーを持つ鉄輝線が、左右非対称に大きく広がっていました。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す。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エネルギーの一部を失い、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ます（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す。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」は活動的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ました。

「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ました。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、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できるようになりました。また「あすか」は太陽の百倍から千倍という、恒星質量ブラックホールと巨大ブラックホールの中間の質量を持つブラックホール（中質量ブラックホール）が存在することを明らかにしました。これは星程度のブラックホールが活動的銀河の中心核である巨大ブラックホールへ進化していく中間段階のブラックホールと考えられ、現在「すざく」で詳しく調べられています。

（２） わが天の川銀河中心に潜むモンスターの尻尾をつかむ

「天の川」の正体は約 2 千億個もの星が集まった「銀河系」で、その中に（といっても銀河中心からかなり離れた片田舎ですが）私たち太陽系があるのです。私たちの母なる太陽は今から約 50 億年前にこの天の川銀河の中で誕生しました。この私たちの銀河の中心に巨大なブラックホールが潜んでいるかどうか、昔から研究者の興味の的でした。最近電波や赤外線を使って銀河中心のごく近傍にある星の公転軌道が数年にわたって観測され、この銀河系の中心には太陽の 300 万倍もの重さを持つ巨大ブラックホールが潜んでいることがはっきりしてきました。その大変強力な重力で、近づくものはなんでも吸い込んでしまうのがブラックホールですから、そのまわりに漂うガスはブラックホールによって重力加速を受け渦巻状の降着円盤を形成しながらブラックホールに吸い込まれていきます。このときシュバルツシルド半径（この半径以内では光すらブラックホールから脱出できないので通常これをブラックホール半径という）の数倍のところまで吸い込まれたガスはその粘性摩擦で重力エネルギーが熱エネルギーに変換され、数百万度から一億度の高温プラズマとなり、莫大なエネルギーを X 線で放射されると考えられます。

このようにして放射される X 線を捕らえることができるのではと考え、京都大学の小山教授たちは「あすか」を銀河系中心方向に向けました。ところが私たちの予想に反し、中心にある巨大ブラックホール付近にはなにやら弱い広がった像があるだけで、ブラックホールからの X 線と思われる兆候は見当たりませんでした。どうやら、周りのガスが極めて希薄であるため、ブラックホールは現在その吸い込む能力をほとんど発揮していないようです。そのかわりに面白い事実がわかりました。一つは中心核付近に広がって見える像のスペクトルを調べると、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のです。この事実は、中心核の周りが 1 千万度にも達するが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します。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千発分にも及ぶとても大きなものとわかりました。もう一つ不思議なことに、この高温プラズマから左上方に離れたところから、電離のほとんど進んでいない低温のガス雲からの蛍光鉄輝線も同時に見つかりました。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放射する蛍光 X 線を出したものと結論づけられます。しかし、「あすか」の像からはそのような強い放射場を作る X 線源はこの蛍光鉄輝線放射領域の近傍には見当たりません。いったいその X 線源はどこに行ってしまったのでしょうか？

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 光年です。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ります。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、そのなごりが超高温プラズマや蛍光輝線として「あすか」にとらえられた可能性が高いようです。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) 遡ってひも解くことができたのです。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ました。これは被照射体である低温の分子雲 Sgr B の形状によるものと思われます。

(3) 大質量星爆発のなごりの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 (主に陽子や電子) が生成され、ほとんど光速に近い速さで飛び交っています。これを (一次) 宇宙線と言います。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しますが、現在では最高エネルギーが 10^{20} eV (つまり 1 個の荷電粒子が 1 兆電子ボルトの 100 億倍のエネルギーを持つ) の宇宙線が観測されています。このようなエネルギーの高い 1 次宇宙線が地球大気に突入すると空気中の元素と衝突し、その原子核反応で 2 次的な電子、 μ 中間子、 γ 線がカスケード状に増殖生成されます (これらを 2 次宇宙線と言います)。この現象を宇宙線の空気シャワーと言い、特に μ 中間子は地上でも観測されるので宇宙線空気シャワーは超高エネルギー宇宙線の観測手段となっております。そして X 線天文学が始まるはるか以前、まだ高エネルギー加速器がない戦後間もないころに、この 2 次宇宙線を使った素粒子の研究が物理の重要な実験手段としてもはやされたものです。

ところがその元となっている 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おりました。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はありました。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、その加速源が観測的に確定することができませんでした。この宇宙線の起源の謎に答えたのが、意外にも X 線天文衛星「あすか」でした。

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ました。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りました。そしてこの 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、超新星爆発残骸が伝搬する前面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) ものと考えられました。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ました。

ところが、京大の小山勝二教授の指導で超新星 SN1006 のスペクトルを解析していた尾崎正伸さん(現在宇宙研「ISAS/JAXA」助教)はこの超新星残骸には場所によって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ました。余談になりますが、この1006年に観測された超新星は、かの「新古今和歌集」の選者として知られる歌人藤原定家が、彼の残した日記「名月記」(これは国宝に指定されている)の中で、この年に突然火星のように明るい大客星が現れたと記録しています。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ロン放射で放出する電磁波と考えられます。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ました。同じ小山先生の学生で尾崎さんの後輩である馬場彩さん(現宇宙研「ISAS/JAXA」研究員)はさらに研究を進展させ、「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ます。

さらに、宇宙研(ISAS/JAXA)の内山泰伸研究員らは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が放出されているX線天体、RX J1713.7-3946(これはさそり座にある)をChandraと「すざく」衛星で数年にわたり精力的に観測しました。その結果、この超新星残骸の「すざく」領域でのスペクトルは確かに非熱的なシンクロトロン放射であるが、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ました。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 π 中間子の生成とその崩壊によるものであることがわかりました(この結果は最近英国科学誌Natureの今年10月4日号に掲載されました)。

(4) 小質量星終焉のなごりの惑星状星雲も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とか呼ばれます)で星の赤ちゃん、原始星が誕生します。この原始星—高密度の冷たいガスの塊—は自己重力で収縮し中心の密度と温度が次第に上昇します。その原始星の質量がある限界以上であると、中心の温度はいずれ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(以後水素燃焼と呼びます)が始まります。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ます。主系列星の仲間入りです。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ます。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、星は赤色巨星といわれるようになります。そしてついに星の外縁部はリング状、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きます。これが惑星状星雲といわれるものです。一方燃えカスとして中心に残ったヘリウム、炭素、酸素は小さく萎縮した、暗い星として残ります。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ります。

このように太陽程度の質量の星が一生を終えた最後の姿である惑星状星雲/白色矮星系から高エネルギーのX線が観測されるのは想像し難いことです。ところが、観測感度の高い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ました。このうち可視光で1番明るい惑星状星雲、BD +30° 3639 が「すざく」で観測されました。「すざく」でもこの惑星状星雲の中心部からX線が放射されていることを確認しました。さらに、「すざく」は 0.5 keV 以下の超軟X線領域まで高い検出感度を持つためそのX線エネルギースペクトルに水素様に電離した炭素原子に起因する輝線を観測することができました。

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す。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ます。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ますが、「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す。（この項は村島未生さんの研究「博士論文；平成 18 年、東京大学」に基づいております。）

（５） 太陽を殞し地球磁気圏を取りまく太陽風からX線放射

「すざく」はX線天文衛星、つまり太陽系外の遠方にあるX線天体を観測するための軌道天文台です。X線天体観測とえば、ブラックホール、超新星残骸、活動銀河核、銀河団などの研究が主流ですが、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があります。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します。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」言われる原子の相互作用に起因することを説明します。

私たちが見る太陽は静かに安定して輝き続け、そのエネルギーで地球を育み、そこに生命が宿ることを可能にする、太陽はその周りを周回する惑星たちにとってはまさに母なる恒星です。ところがX線で見る太陽はその表面で激しく活動し、上空遠方まで太陽コロナ

といわれる高温プラズマが広がっています。日本の太陽観測衛星「ひのとり」、「ようこう」がX線で見える激しく活動する太陽の様子を明らかにし、現在は「ひので」がその研究を引き継いでいます。この太陽コロナガスが数百 km/毎秒の高速で惑星空間に流れ出しているのが太陽風です。太陽表面には黒点といわれるものが観測されますが、これは太陽内部の磁場が捩れ出ている場所とされます。この黒点近傍ではしばしば太陽フレアと呼ばれるガスの大爆発現象が起こります。その太陽フレアに伴うガスの放出で太陽風の密度や速度は大きく変化しています。この太陽風が地球磁場と衝突して衝撃波面を形成し、太陽風はその内側に閉じ込められた地球磁気圏を取り巻いて後方に流れ去ります。そして地球の磁気軸（これは地球の回転軸とは23度ほど傾いている）上空にはカスプと呼ばれるガスの溜まり場ができこれが磁場に沿って磁気圏下部に落下してくる。磁気圏下流で加速された高エネルギー電子はこの磁力線に沿って磁気北極、南極付近に降下し、電離層の原子・イオンと衝突してオーロラ現象を発生させます。このような磁気圏構造の確立には日本の磁気圏観測衛星「きょっこう」、「おおぞら」、「じきけん」などが活躍しましたし、今も「あけぼの」、「ジオテール」が活躍しています。

一方「すざく」は2005年9月に、銀河系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ーローから放射される超軟X線背景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ました。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ました。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り、そのうえ短い時間で変動をしました。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」で偶然観測され「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ました。

この部分のX線スペクトルを解析するとX線の増光は高階電離した炭素、酸素、ネオン、マグネシウム等のイオンが放射する輝線の増光であることがわかりました。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おります。この卓越した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とする説明できます。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のです。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459電子ボルトの超軟X線輝線を放出するのです。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6千 kmのごく地球近傍で起こっていることが判明しました。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知られていましたが、X線天文衛星でこの現象の結果放射されるX線を捉えたのは「すざく」が初めてです。

6. 附録（補足画像）

講義では図や天体画像をお見せしながら説明しますが、その中でお見せするいくつかの代表的な図や画像を項目毎に数枚ずつ以下に掲載しておきます。最初に日本のX線天文衛星、特に今回の講義の主役であるX線天文衛星「すざく」の姿を紹介しておきます。

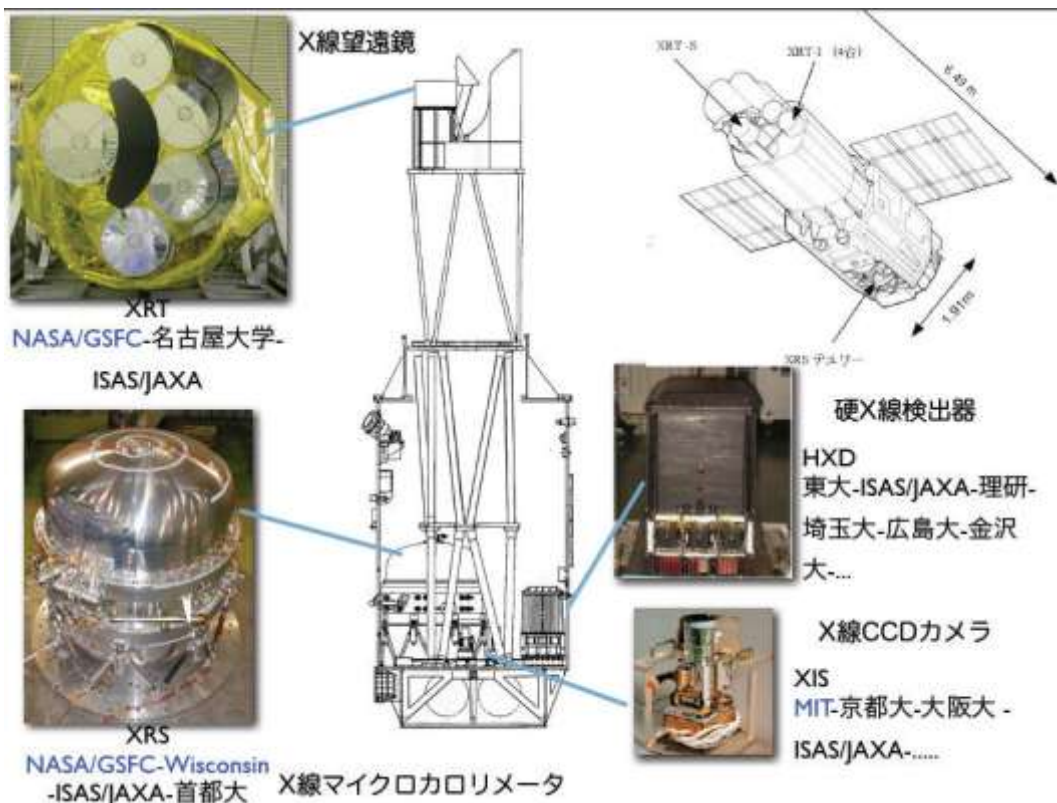


図 4: 日本のX線天文衛星。左から「はくちょう」(1979-1985)、「てんま」(1983-1985)、「ぎんが」(1987-1991)、「あすか」(1993-2000)、「すざく」(2005-)



(「すざく」が宇宙を飛翔している姿をイメージする想像図)

下図は「すざく」衛星の基本構造と主要搭載計器の写真。



(1) 活動的銀河中心の巨大ブラックホールはX線を歪める

——資料提供：国枝秀世、寺島雄一、栗木久光、他「すざく」チーム

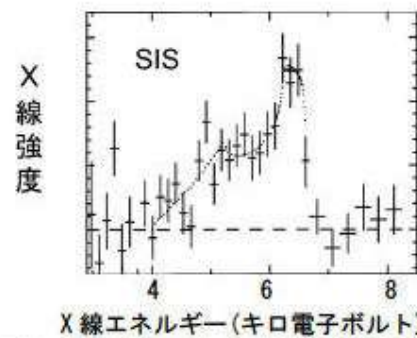
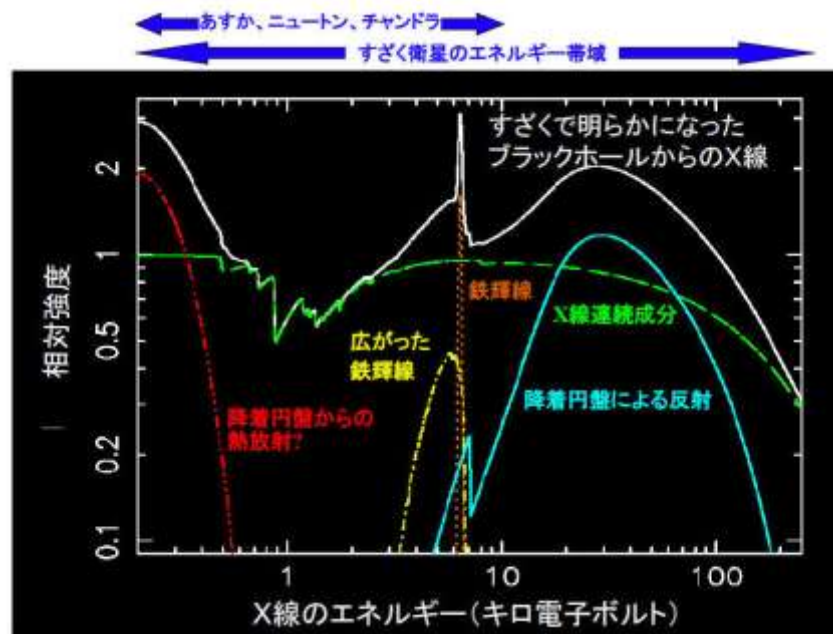


図1 「あすか」によるMCG-6-30-15の鉄輝線プロフィール



図の説明：多数のAGN（中心に巨大ブラックホールを持つ活動的銀河）を「あすか」、「すざく」で観測した結果に基づいて作成されたAGNから放射されるX線スペクトルの統一描像。

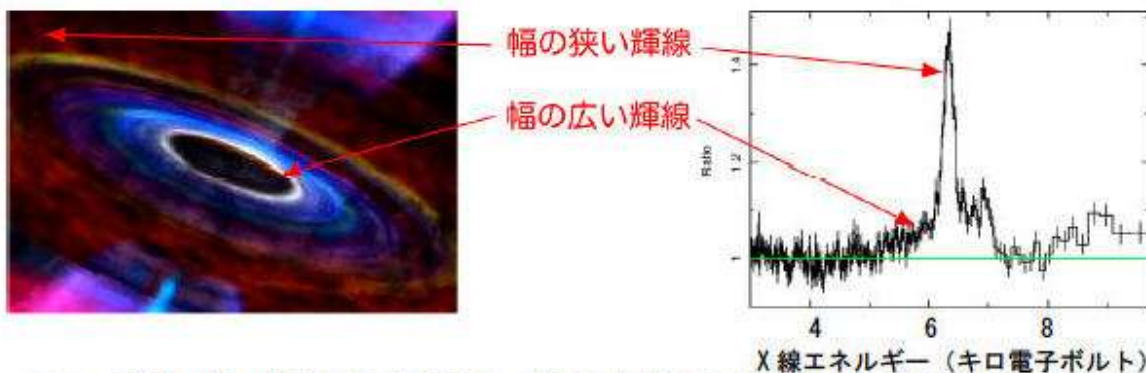


図3 降着円盤の模式図と「すざく」が捉えたMCG-5-23-16からの鉄輝線近傍のスペクトル
円盤の内側からの輝線は幅が広く、外側からの輝線は狭い

(2) わが天の川銀河中心に潜むモンスターの尻尾をつかむ

——資料提供：前田良知、小山勝二、他「すざく」チーム

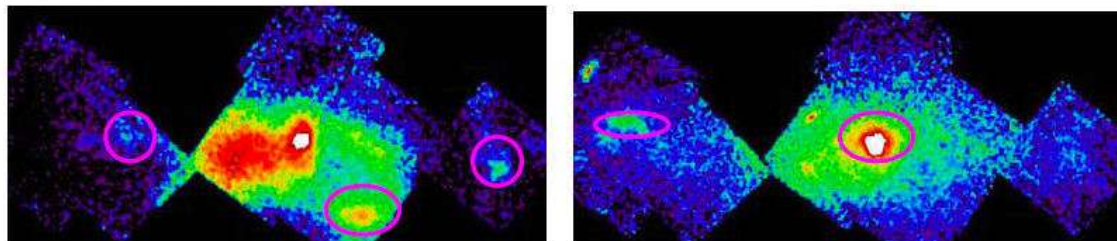
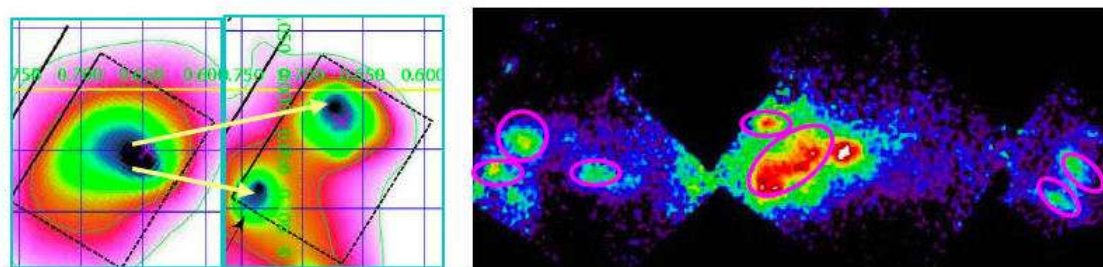
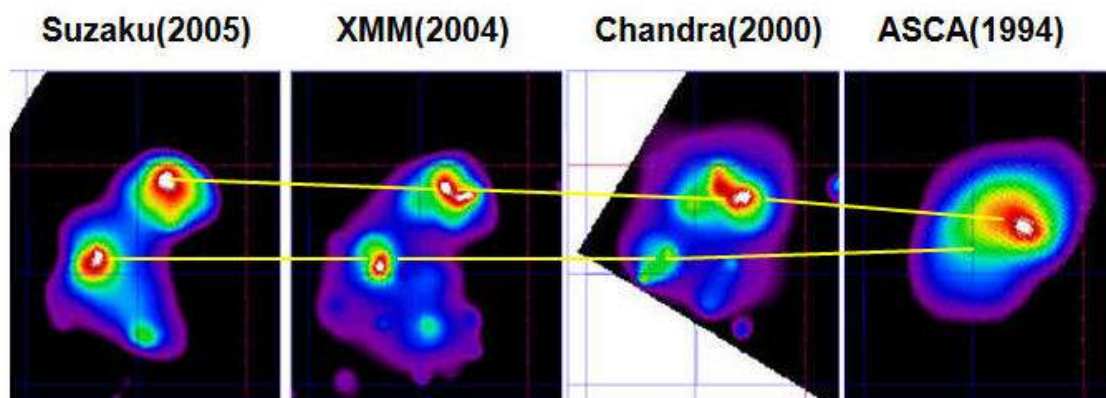


図1：銀河中心付近 500×100 光年の高電離硫黄（左）と鉄（右）の特性X線分布。所々にある赤、黄色の塊（ピンクの丸）が新たに発見された超新星残骸



「あすか」1994年 「すざく」2005年

図2：右図は銀河中心付近 500×100 光年の中性鉄 6.4keV X線の分布。所々にある赤、黄色の塊が銀河中心の過去のX線で照らされた低温分子雲である（銀河中心は現在は暗い）。このうち約半数は新発見である。左図はSgr B分子雲の1994年の姿、一つの塊が2005年には2つに分裂（黄の矢印）した（図中央）。

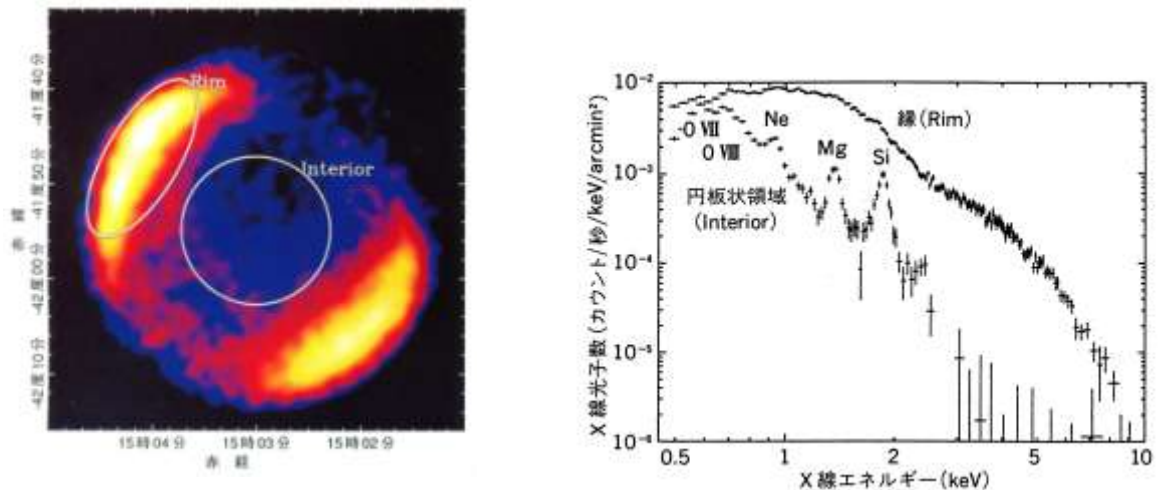


図の説明：これは強いX線放射に曝された Sgr B 分子雲中の中性の鉄が放射する 6.4 keV 蛍光輝線の最大強度部の変化を外国の衛星のデータも含めて示したものである。

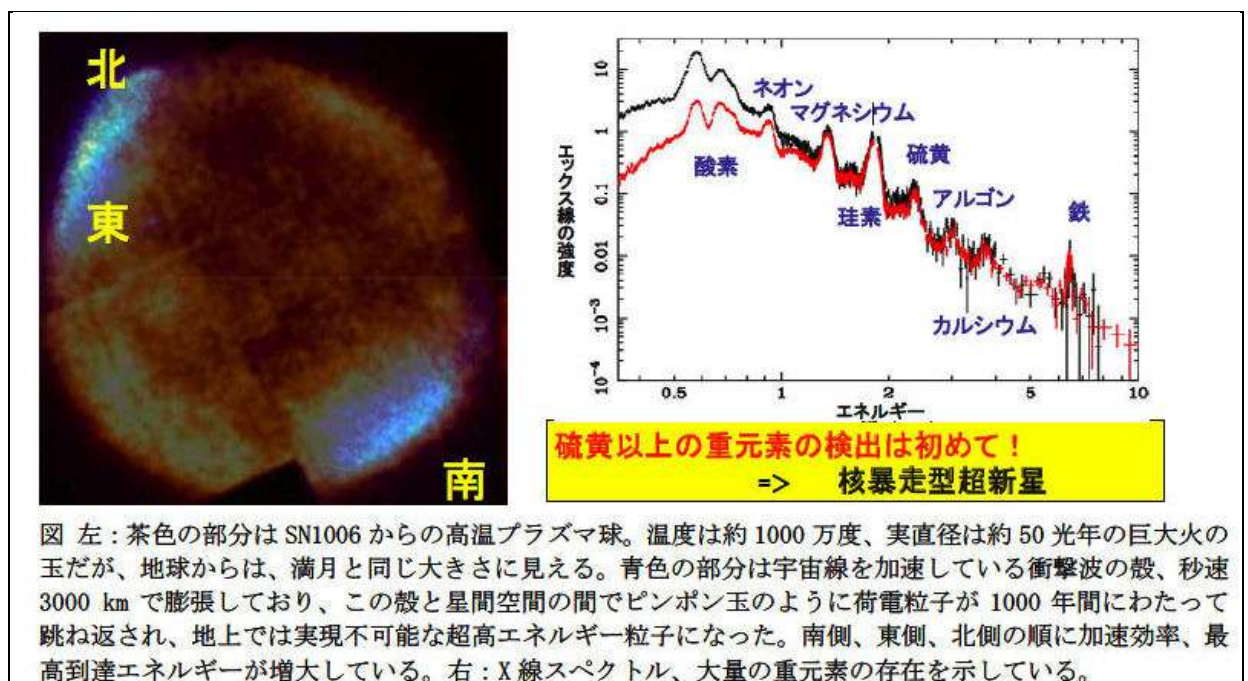
(3) 大質量星爆発のなごり超新星残骸は宇宙線加速工場

(a) SN1006からの非熱的X線放射の発見

——資料提供：馬場彩、尾崎正伸、小山勝二、他「すざく」チーム



図の説明：超新星残骸では通常希薄高温プラズマからの熱的X線放射が見られるが、上図は初めて超新星残骸、SN1006 から高エネルギー電子に起因する非熱的X線放射を発見した「あすか」のデータを示す。下図は「すざく」によるその後の研究の発展を示す。



(b) さそり座の超新星残骸—宇宙線加速の新たな現場

——資料提供：内山泰伸、高橋忠幸、他「すざく」チーム

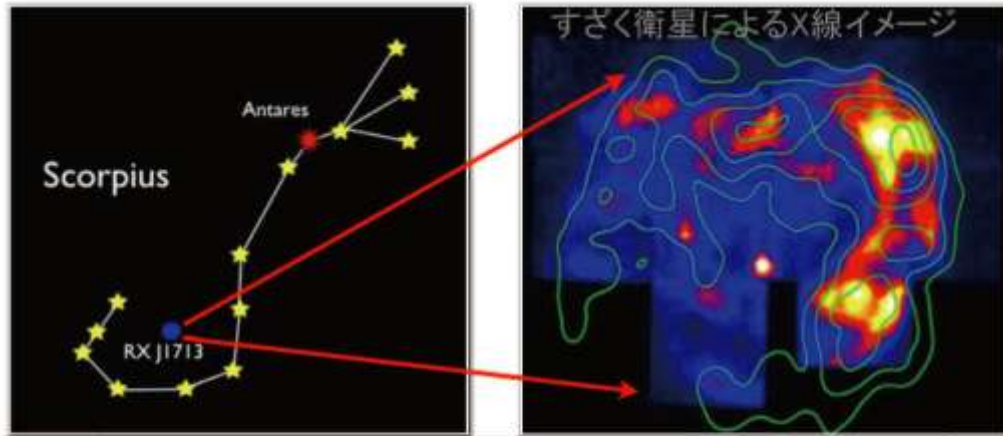


図1 (左)超新星残骸 RX J1713.7-3946 はさそり座の尾の中、銀河面(天の川)上に位置しています。(右)「すざく」衛星によって得られた RX J1713.7-3946 のX線像(田中孝明 博士論文 東京大学 2007年)。黄色や赤色はX線が強い部分を示します。大気チェレンコフ望遠鏡HESSで得られた超高エネルギーガンマ線像(Aharonian et al. Nature 432 p.75 2004)を等高線で重ねてあります。

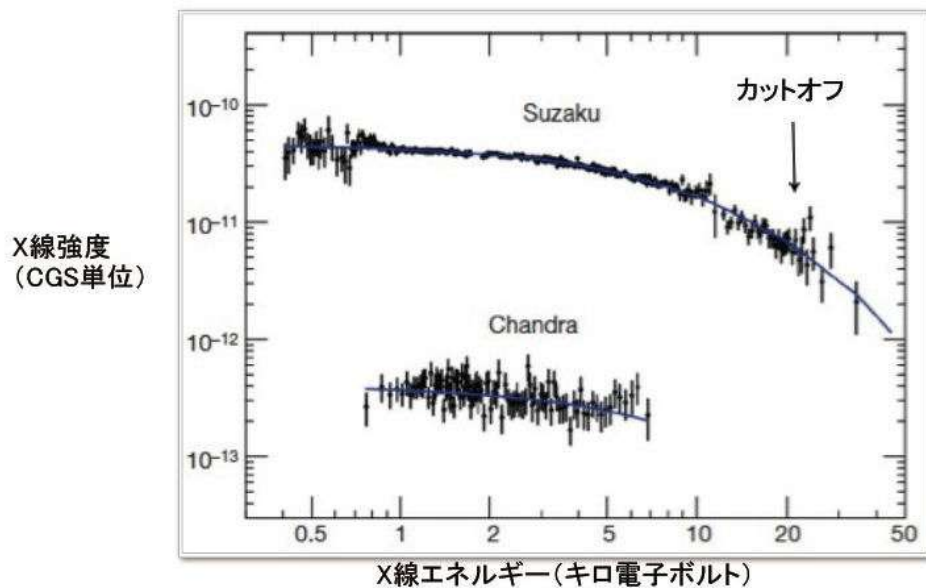


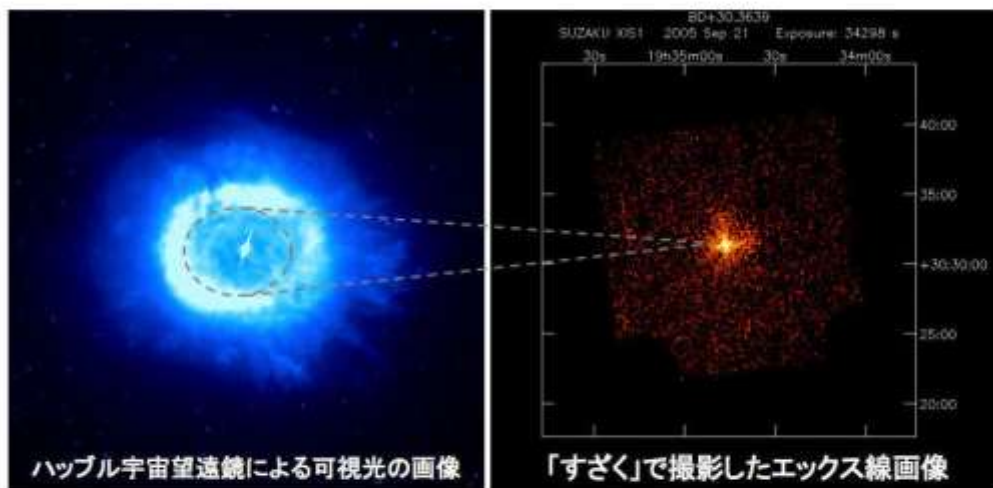
図3 Uchiyama et al. Nature 2007 より転載。
超新星残骸 RX J1713.7-3946 のX線スペクトル。「すざく」衛星の広い範囲でのX線スペクトルにより、X線強度が10キロ電子ボルト付近から急激に弱まることが明らかになりました。これは宇宙線加速の理論として提唱されている「衝撃波統計加速」による予測と符合し、加速が極めて効率よく行われていることを示します。

(4) 小質量星終焉のなごり惑星状星雲もX線を放射する

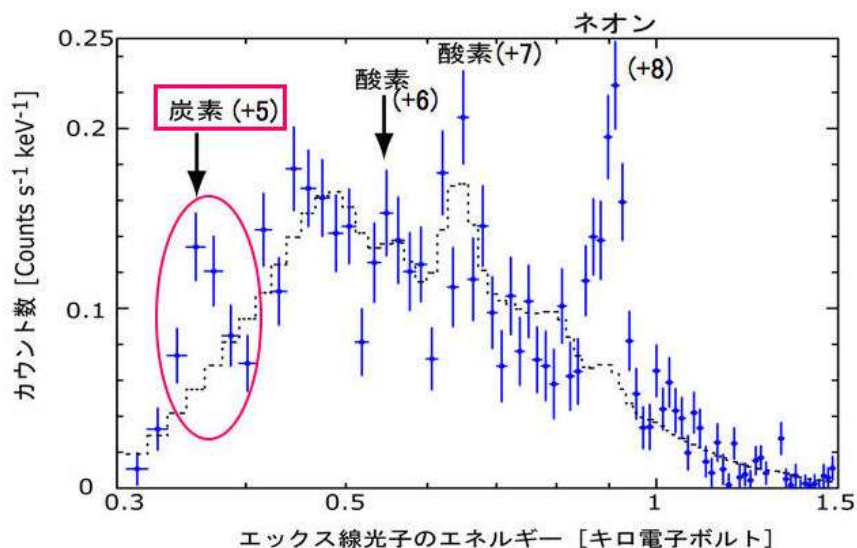
——資料提供：村島未生、国分紀秀、牧島一夫、他「すざく」チーム

「すざく」による BD +30° 3639 の観測

「すざく」は2005年9月21日、はくちょう座にある代表的な惑星状星雲の1つ、BD +30° 3639 を、およそ1日かけて観測しました。



X線は、可視光で見えるリング状星雲の内側（左図、点線）から放射されていることが知られていました。そのX線を、「すざく」のCCDカメラがとらえました（右図）。



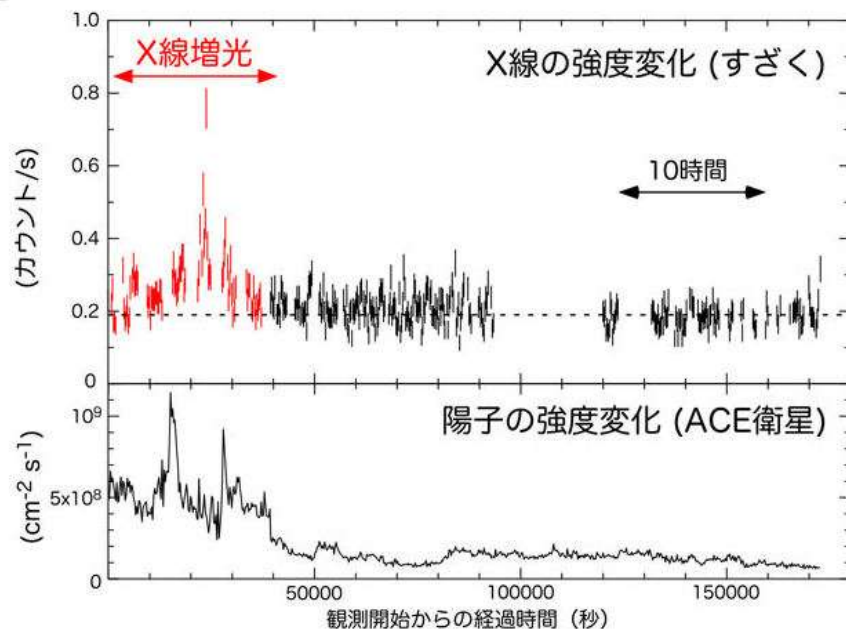
図の

説明：観測さ

れたX線のスペクトルを解析すると上図のように酸素やネオンの出す輝線の他、炭素型白色矮星の特徴である炭素イオンが出す輝線が予想を遥かに超える強さで見られる。

(5) 太陽を發し地球磁気圏を取りまく太陽風からのX線放射

——資料提供：藤本龍一、満田和久、他「すざく」チーム



図の説明：銀河ハーローに広がった希薄で高温プラズマを調べるため、強いX線点源のない銀河北極方向を観測中に、上図のように突然X線強度が増加することがあり、この現象はこれまで謎とされていた。「すざく」はその謎は太陽風に起因するものと解き明かした。

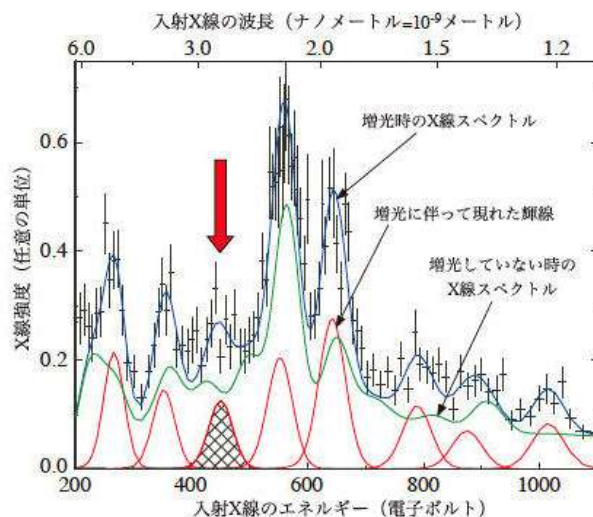


図1: 「すざく」によって得られたX線の増光に伴うスペクトル(X線の波長分布)の変化の様子。増光によってスペクトルは緑から青に変化し、赤で示した輝線が現れた。赤の矢印は、高い励起状態にある炭素イオンからの輝線で、電荷交換反応の証拠である。

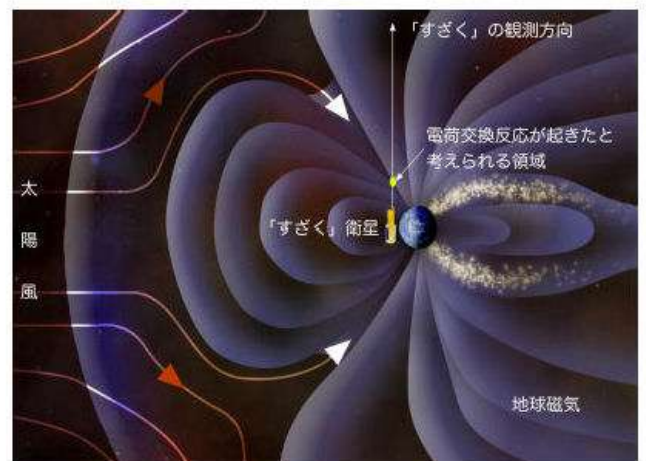


図2: 地球の磁場、太陽風の経路、「すざく」衛星の観測方向と電荷交換反応が起きたと考えられる領域の模式図。背景の絵は<http://chandra.harvard.edu/photo/>による。