

資料24-1

科学技術・学術審議会
研究計画・評価分科会
宇宙開発利用部会
(第24回)H27.11.5

X線天文衛星「すざく」の 科学的成果について

平成27(2015)年11月5日

宇宙航空研究開発機構

理事 常田佐久

宇宙科学研究所 すざくプロジェクトチーム

プロジェクトマネージャ 石田学

1. X線天文衛星「すざく」の概要

意義・目的

宇宙の高温プラズマの高精細な分光観測、および高感度・広帯域の測光・分光観測によりブラックホールの周りの物質の運動や銀河団の形成・進化の問題に新しい光を当てる。

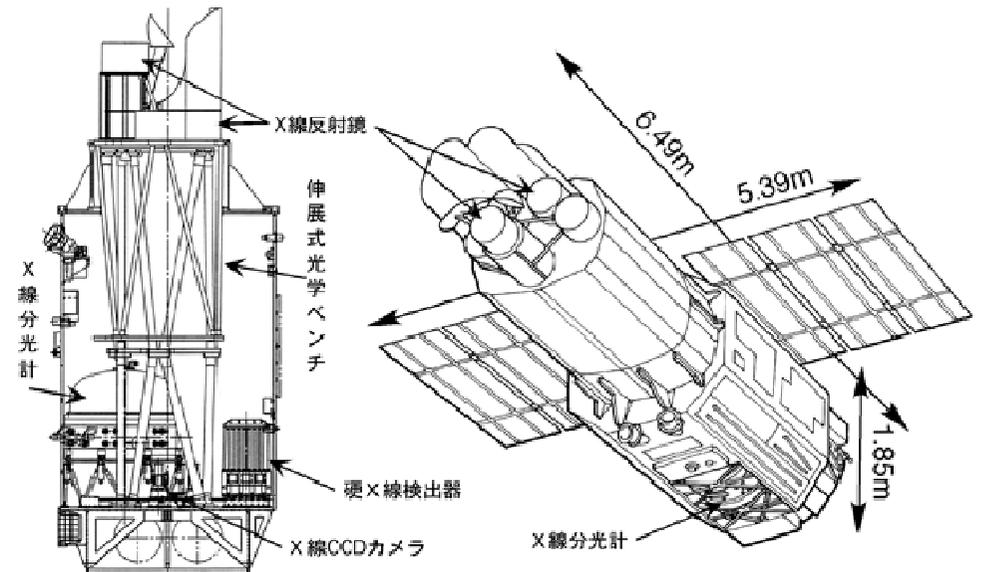
プロジェクトの経緯・特徴

平成 13(2001)年、旧宇宙研にて第23号科学衛星 (ASTRO-EII) の開発に着手。平成 17(2005)年7月10日、M-V ロケット6号機で打上げに成功、「すざく」と命名した。日本で5番目のX線天文衛星である【参考1】。日米国際協力により製作が進められた。観測天体は、全世界中から募った観測提案から公平な審査によって選ばれており、国際天文台として機能してきた。

※前の4つは「はくちょう(1979年)」「てんま(1983年)」、「ぎんが(1987年)」、「あすか(1993年)」。
 ※2000年2月、打ち上げロケットの不具合によって軌道投入できなかったASTRO-Eの再挑戦をかけたミッションである。

打上げ	平成17(2005)年7月10日(日本時間)
軌道	高度550km、傾斜角31度の円軌道 (軌道周期:約96分)
構造	質量:約1700kg 形状:6.5m×2.0m×1.9m(伸展式光学ベンチ伸展時) 折りたたみ(3つ折り)の太陽電池パドル2枚を備えた八角柱 太陽電池パドルの端から端まで5.4m
観測機器	X線望遠鏡(XRT) 高分解能X線分光器(XRS) X線CCDカメラ(XIS) 硬X線検出器(HXD)
目標寿命※	2年間

目標寿命(Interest Life): 科学衛星の場合、世界初の観測機器搭載等チャレンジ的な要素が多いため、所謂設計(保証)寿命何年、何年後の生存確率何%という形は採らず、耐放射線、耐紫外線、バッテリー充放電サイクル、温度サイクル、搭載燃料量、クリティカルな部分の冗長化等を考慮した設計により、ミッション達成のための寿命の目標値を設定している。



2. 「すざく」の成果

- 「すざく」は、目標寿命の2年を大幅に超える10年に亘って観測を続けたX線天文衛星である。国際天文台として世界中の研究者に観測の門戸を開き、平成26(2014)年12月末までに、査読付き論文762件、学位論文227件(うち、博士論文64件)を発表する等、多くの成果創出に貢献した。
- 広い波長域に亘って世界最高レベルの感度を達成するなど優れた観測能力を実証し、銀河団の合体等による宇宙の構造形成や、ブラックホール直近領域の探査(エネルギー解放や時空構造の解明)等に係る成果を挙げた。代表的なものは以下の通り。
 - 1) 銀河団の外縁部の観測に初めて成功し、銀河団が周辺のガスを取り込んで現在も成長を続けていることを直接検証した。また分光観測で鉄の特性X線の強度を測ることにより、宇宙における鉄の生成が100億年以上も前にほとんど終了していたことを発見した。
 - 2) 宇宙初期に多数存在していた塵やガスに深く埋もれたブラックホールを発見した。初期宇宙(今から100億年以上前)から、銀河中心のブラックホールがどのように成長してきたか、その母銀河の進化に与える影響はどのようなものか、また、硬X線背景放射の起源は何かという問に答えるための鍵となる発見である。
 - 3) 恒星質量ブラックホールに落ち込むガスが最後の瞬間に10億度以上に急加熱されることを発見。ブラックホールが存在することの新たな傍証を得た。

2-1. 銀河団外縁部の観測

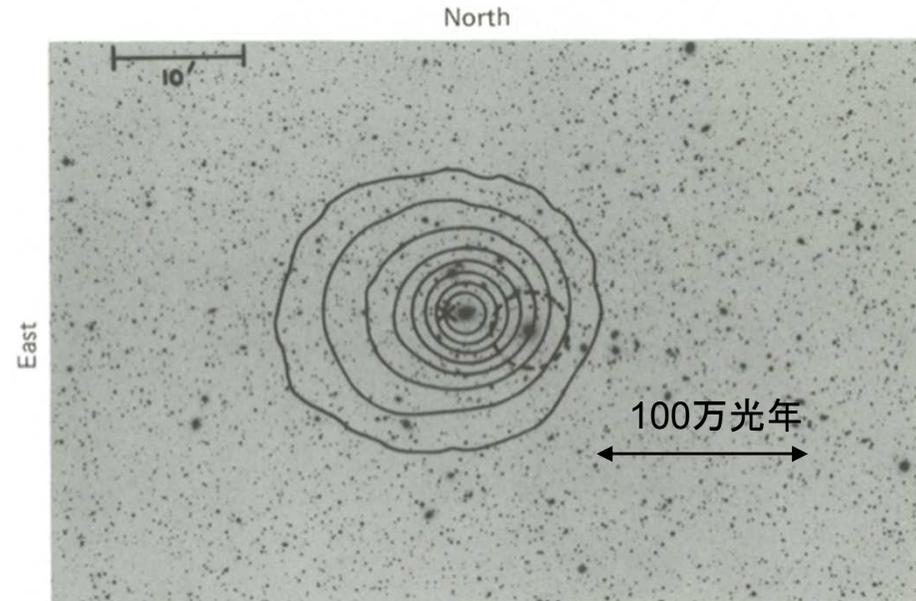
■ ペルセウス座銀河団をX線で観測し、外から落ち込んでくるガスが塊をなして銀河団に落下し、確かに理論予測の通りの位置で銀河団ガスとの衝突が起きていること、高温ガスに占める鉄の割合(対水素の存在比率)が銀河団の外縁部までどこでも一定であることを発見した。

- 外縁部のガスは、100億年前の組成を保っている。
- このことから鉄は、銀河団の形成が始まった100億年以上も前に、その大部分が生成されたことになる。
- 現在軌道上にある諸外国の衛星では、検出器のバックグラウンドが高いため、銀河団外縁部の観測はできない。「すざく」の高い検出感度を活かして初めて可能になった観測成果である。

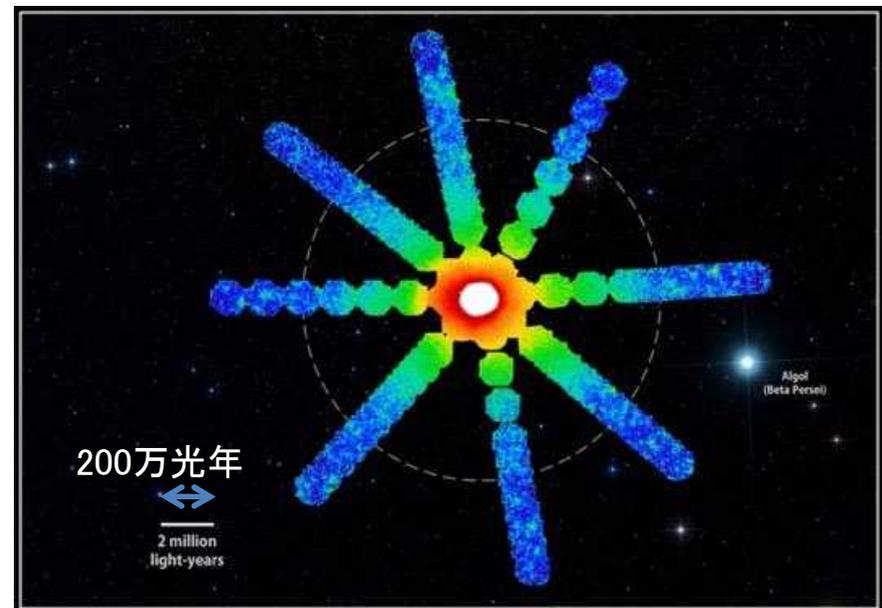
※銀河団：差し渡し数百万光年の空間に10~1000個程度の銀河が密集した宇宙最大規模の構造。

【観測から得られた銀河団の形成・進化の知見】

- ペルセウス座銀河団の外縁部の観測に初めて成功。
- 宇宙に漂う宇宙初期のガスが落ち込むことで銀河団が成長するという、銀河団の形成・成長のプロセスの理解が基本的に正しいことを初めて検証した。
- 一方で、銀河団に落下するガスが塊になっているという予想外の新しい知見が初めてもたらされた。
- 鉄の組成は、銀河団の中心から、今回観測された外縁部までほとんど一定であった。
- 「すざく」の後継衛星であるASTRO-Hでは、高精細な分光観測によって銀河団ガスの運動を明らかにすることができる。これによって宇宙の構造進化の理解が更に深まることが期待される。



ペルセウス座銀河団: ネガ画像は可視光で撮影した銀河、等高線はEinstein衛星の観測によるX線強度分布を表す。(Sarazin, 2009)



「すざく」の観測によるペルセウス座銀河団の表面輝度分布。銀河団が大きすぎるため、中心から8方向のみ複数視野で観測を実施。破線の円は、宇宙初源ガスが銀河団に飲み込まれている最前線。(Werner et al., 2013)

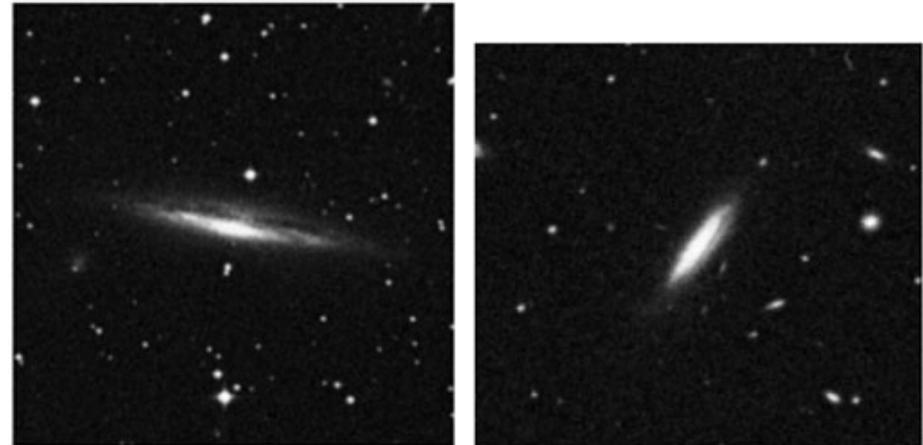
2-2. 新しいタイプのブラックホールの発見

■可視光で見ると一見普通の渦巻き銀河に見えるESO 005-G004、ESO 297-G018をX線で観測し、その中心に、極めて厚い塵やガスに埋もれたまったく新しいタイプの活動銀河核(AGN)が存在することを発見した。

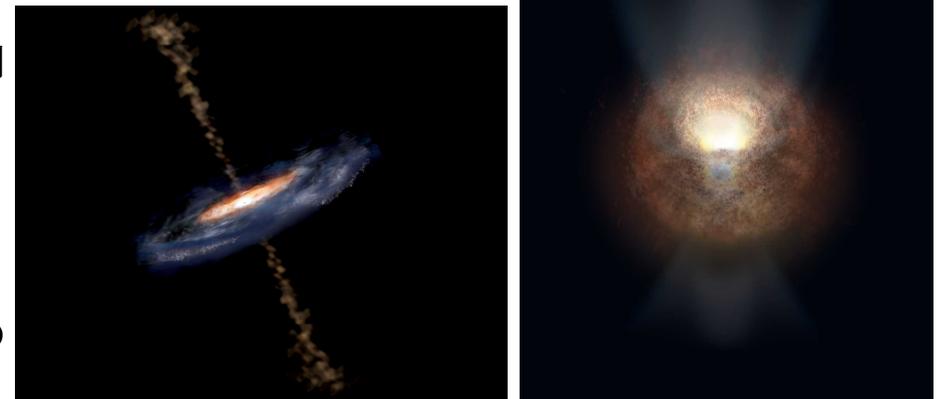
- 活動銀河核(AGN): 近傍銀河の数%の中心に存在する明るい中心核で、太陽系程度の大きさの領域から銀河1個分もの明るさの放射を出している。その正体は、太陽の100万倍から数十億倍の質量を持ち、周囲の空間からガスを吸い込んでいる巨大ブラックホールである。

【観測から得られたAGNの新たな知見】

- これまで知られていたAGNでは中心のブラックホールを取り囲むガスが薄い円盤形状をなしていると考えられていたが、今回発見されたAGNでは、周辺ガスで散乱されたX線の強度が極端に少ない。
- このことから、ガスは円盤状ではなく球対称に近い分布をなし、しかも非常に厚いため、可視光、紫外線、軟X線ではこれまで見逃されてきたと考えられる。
- 10キロ電子ボルト以上に高い感度を持つ「すざく」の観測で、こうしたAGNが宇宙に多量に潜んでいる可能性が初めて示された。
- 初期宇宙(今から100億年以上前)には、こうしたAGNが宇宙の至る所に存在していたと考えられている。
- 初期宇宙から、銀河中心のブラックホールがどのように成長してきたか、その母銀河の進化に与える影響はどのようなものか、また、硬X線背景放射の起源は何かという問いに答えるための鍵となる発見である。
- ASTRO-Hでは、このようなブラックホールを100億光年の彼方まで見通すことができ、硬X線背景放射の理解が飛躍的に進むものと期待される。



ESO 005-G004(左)とESO 297-G018(右)の可視光での画像。何れも、一見すると天の川銀河と同じ普通の渦巻き銀河で、特に中心に明るい中心核があるようには見えない。地球からの距離はそれぞれ8千万光年と3.5億光年。(Ueda et al. 2007)



これまで知られていた活動銀河核の想像図(左)と、今回「すざく」の観測で発見された新しいタイプの活動銀河核の想像図(右)。

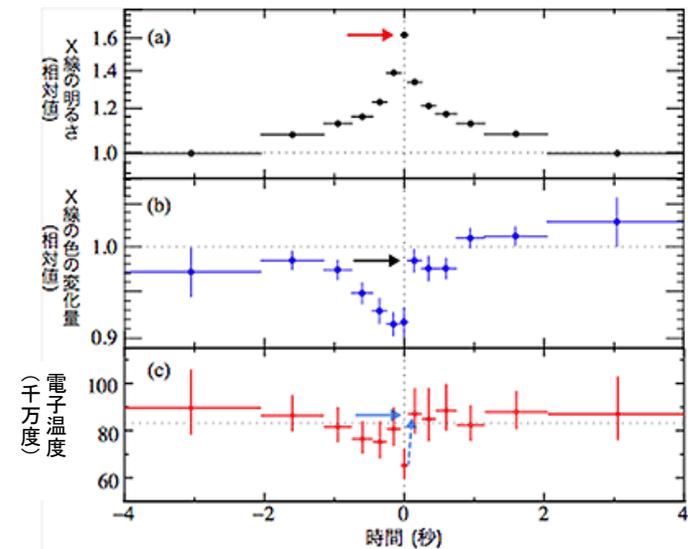
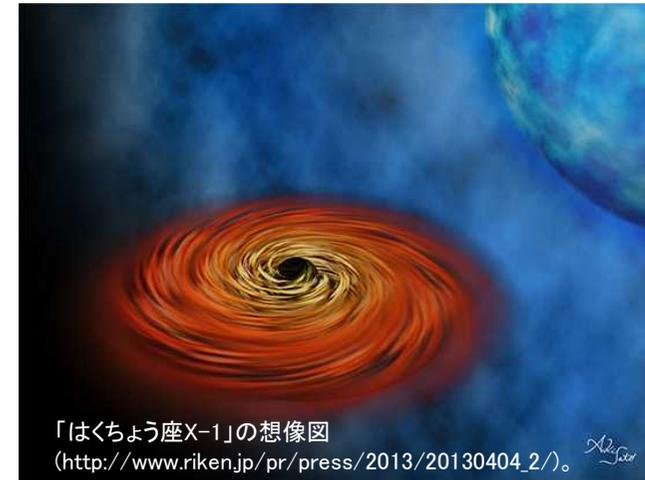
2-3. 連星系ブラックホール「はくちょう座X-1」

■「はくちょう座X-1」のブラックホールに伴星からガスが落ち込む際、そのガスが最後の100分の1秒程度の中に10億度以上にまで急激に加熱され、高エネルギーX線を出すことを突き止めた。

- ブラックホール: アインシュタインの一般相対性理論に基づき20世紀前半に理論的に予言された、強大な重力のために光さえその中から脱出できない天体。太陽質量の10倍程度のブラックホールと普通の恒星との連星は、天の川銀河に20個ほど知られている。
- こうしたブラックホール連星では、普通の恒星から流れ出したガスがブラックホールの周りに高温のガス円盤を形成する。この円盤からはブラックホール連星特有の色のX線が放射されるため、そのX線を検出することでブラックホール連星の存在を知ることができる。

【観測から得られた連星系ブラックホールの高温コロナの起源】

- 「すざく」ではくちょう座X-1を観測したところ、相手の星からのガスがブラックホールを取り巻く円盤上を塊になって落下し、ブラックホールに落ち込む瞬間(1/10秒以下の時間)に10億度を超える温度に加熱される現象が発見された。
- 「すざく」の高い時間分解能、高エネルギー帯域での高い検出感度を活かした観測成果である。
- 加熱機構は、太陽フレアに見られる「磁力線再結合」によると考えられているが、詳細は今後の研究課題。
- 塊となったガスがブラックホールに落ち込む際に急加熱され、その際に発生する音波により一部のガスが押し戻されて観測されるという、ブラックホール特有の現象。ブラックホール存在の新たな証拠。



(a) X線の明るさ、(b) X線の色、(c) ガス中の電子温度の時間変化。時刻0は、ガスがブラックホールに落ちる瞬間で、その際に温度の急上昇が見られる。

3. 学術論文等による成果発表

- 総観測数：約3200回（望遠鏡の指向方向変更回数）
- 査読つき学術論文：762件（2014年12月末まで）
 - ほぼ3～4日に一件、世界中のどこかで「すざく」のデータを使った論文が出版されている計算になる。
- 学位論文：227件（うち博士論文64件）
 - 海外で出た学位論文は含んでいない。
 - 「すざく」のデータで日本全国で毎年8人の博士が誕生。
- 「すざく」を主題とした国際研究会：5回
 - 京都（2006年12月）、San Diego（2007年12月）、小樽（2009年6月）、Stanford（2011年7月）、松山（2014年2月）。
- これら「すざく」の成果は、硬X線検出器（HXD）に使用された浜松ホトニクスの大面積シリコンPINダイオードや、日立化成の高純度GSO結晶を主とする国内企業の技術、およびNASAとの国際協力によって実現可能となりました。

※PINダイオード：P-intrinsic-Nの略。PN極間に半導体層をはさんだ、ダイオード（整流作用を持つ電子素子）の一種。
GSO結晶：ケイ酸ガドリニウム。X線検出のためのシンチレータ（放射線によって発光する蛍光物質）として使用。

4. 観測運用終了に至る経緯

- 平成17年の打上げ直後、搭載観測装置の一つ(高分解能X線分光器:XRS)に、液体ヘリウムの予想外の蒸発という不具合が発生し、宇宙X線源を観測することができなかった【参考2】。しかし他の観測機器によって、前述の通り、科学的成果を上げることができた。
- 近年、衛星搭載バッテリーの劣化が進み、観測継続のためにバッテリーの使用方法を工夫しながら科学観測を続けていた。【参考3】
 - 【太陽電池パドル発生電力の長期的低下】
 - 打上げ後6年間は安定しており、発生電力の低下は概ね50W/年程度。7年目に急激に300Wほど急激に低下。
 - 9年目の平成26(2014)年1月9日に、電力不足により自動節電モードに移行。これにより共通系と必要最小限の姿勢系の機器以外の電源がオフとなる。
 - 平成26(2014)年4月から7月にかけて大規模な電力低下(200W)が発生。
 - 【バッテリー容量の低下】
 - バッテリーの充放電は10年で約55,000回。経年劣化により、内部でセルショートが進み、電気容量が徐々に低下。
 - 平成26(2014)年8月に大規模なショートが発生。以降、慢性的な総電力不足と夜間電力不足に陥る。これ以降、基本的にXISのみで観測を実施。
- 平成27年6月1日に、衛星の動作状況を知らせる通信が間欠的にしか確立できない状態が確認され、科学観測運用を中断した。
 - 自転周期約3分、うち太陽電池パドルが太陽方向を向いている1分間だけ電力を回復。バッテリー温度はマイナス30℃以下。充放電不可。
- 通信不良は電力不足に起因すると推測されたことから、再立ち上げ運用として、衛星状況の把握に努めるとともに、復旧運用(衛星電源の確保と衛星姿勢の安定)を模索。衛星状態の把握を目指して運用を継続してきたが、2系統あるバッテリーの片方の容量が失われたと推測できる事象が観測されるなど、衛星状態の回復が見込めない状況が明らかになった。
- このため、平成27年8月26日に観測運用終了する旨、対外公表した。(前回の第23回宇宙開発利用部会(9月3日)で報告済み)

5. 今後の計画

- 現在は、運用終了に向けて、下記作業を実施中である。
 - JAXAのスペースデブリ発生防止標準に基づき、搭載の推進系燃料は排出済み。また、バッテリー切り離し運用を完了した(9月4日)
 - 電波の使用停止の観点から、送信電波の停波を行う。
 - ただし、衛星電源が不安定で、停波に必要な衛星機能(衛星送信機を制御する装置やコマンドデコーダ等)が低いため、ある確率でしか送信系の制御系への停波コマンドが通る状態にならない。
 - このため、長期に亘り運用を継続することで停波を実現する予定。
 - 停波確認後、速やかに、対外公表(プレスリリース)を行う。
 - 衛星の大気圏再突入は2020年代前半となる見込み。
- 「すざく」によって得た成果および知見は、平成27(2015)年度打上げ予定のASTRO-H【参考4】において、更なるX線天文学研究の発展につなげることができる。

以上

參考資料

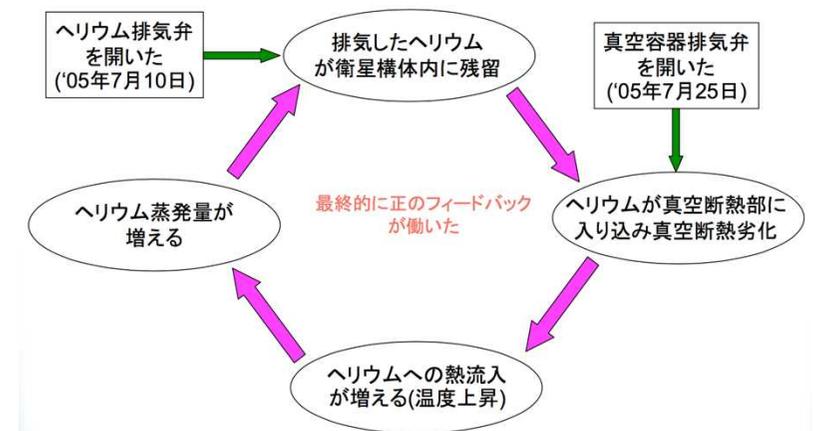
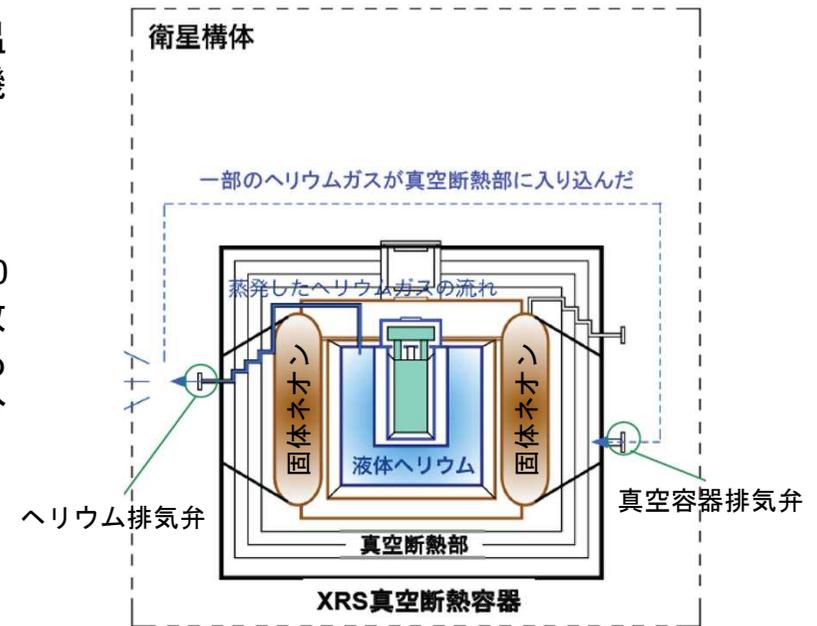
【参考1】日本が打上げた過去のX線天文衛星の観測実績

※論文数は、はくちょう・てんま・ぎんがは過去資料調べ。
あすか・すざくはトムソン・ロイター社“Web of Science”データベースを用いたISAS集計。

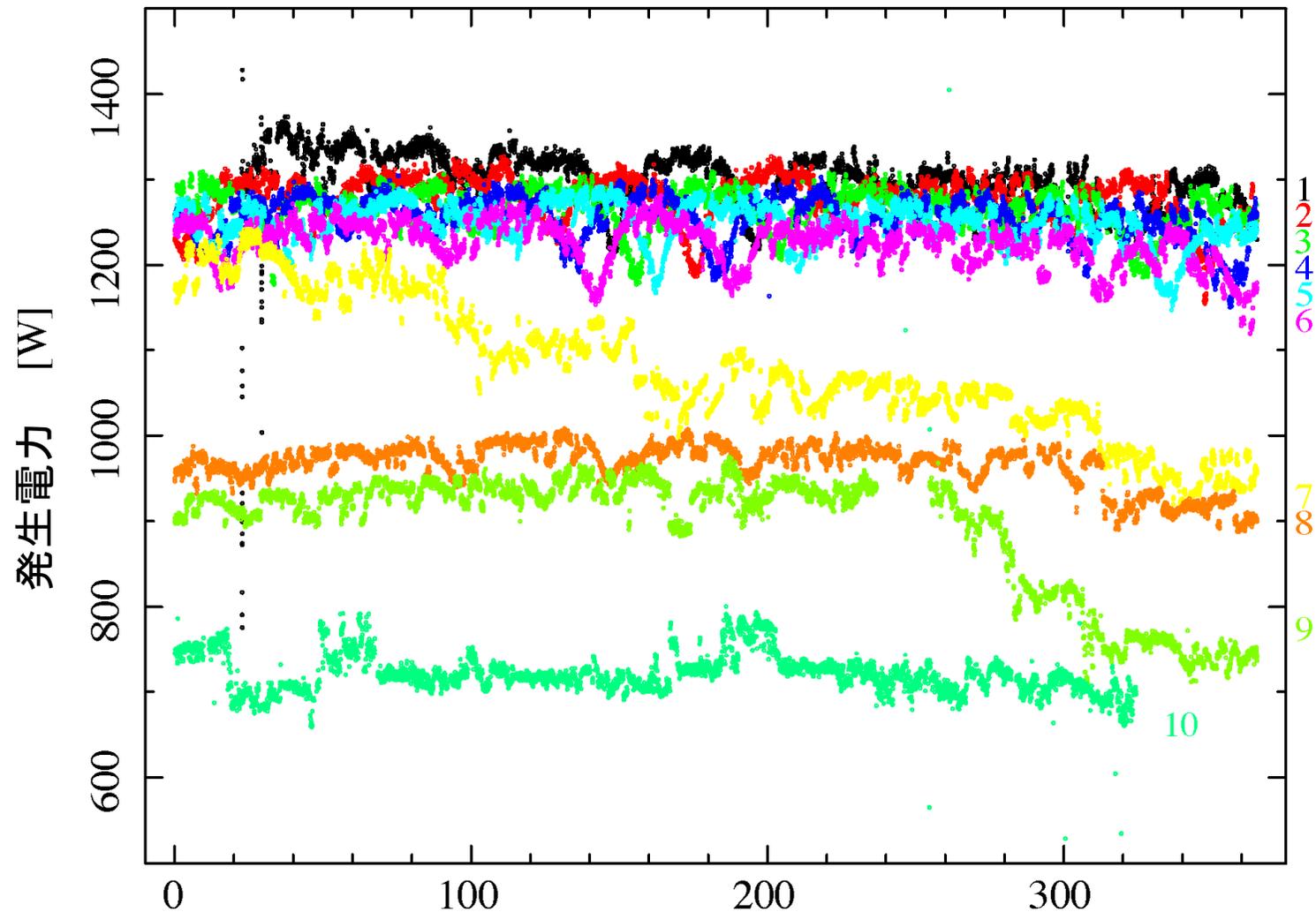
名称	打上げ・運用停止年	査読付論文数	主な観測成果
<p>はくちょう</p> 	<p>1979年(打上げ)</p> <p>1985年(運用停止)</p>	26	<p>ブラックホール天体「白鳥座X-1」にちなんで命名された、日本初のX線天文衛星。小田稔博士(前述の1971年ブラックホール論文の著者、後に宇宙研所長)が発明した「すだれコリメータ」の搭載により、X線天体の天空上の位置を高精度で決定できるようになった。これにより未知のX線バースト源を数多く発見して国際的に高い評価を受け、我が国のX線天文学を一気に世界トップレベルへと押し上げた。</p>
<p>てんま</p> 	<p>1983年(打上げ)</p> <p>1988年(運用停止)</p>	53	<p>新開発の観測装置によりエネルギー分解能を2倍以上に向上させて、X線天体源の本格的な分光観測の道を拓いた。主な成果は、我々の銀河系の銀河面に沿って存在する超高温プラズマからのX線放射(銀河リッジ放射)の発見など。この銀河X線放射の起源と正体の解明を目指して、後続衛星では必ず観測が行なわれるなど、現在まで続くX線天文学の重要研究課題の一つとなった。</p>
<p>ぎんが</p> 	<p>1987年(打上げ)</p> <p>1991年(運用停止)</p>	448	<p>当時最大級の面積を持ち高感度でX線天体を観測できる新たな観測装置を搭載。主な成果は、観測開始直後の超新星1987A※のX線検出成功や、多数のブラックホール候補天体の発見等である。この衛星から観測機器を海外研究者と共同開発するなど、国際協力が本格的にスタートした。 (※近傍銀河で4半世紀ぶりに発生した超新星だった。同じ超新星爆発を小柴昌俊博士が岐阜県のカミオカンデを用いてニュートリノを検出し、後にノーベル物理学賞を授与された。)</p>
<p>あすか</p> 	<p>1993年(打上げ)</p> <p>2001年(運用停止)</p>	2,287	<p>日本で初めての本格的X線望遠鏡や世界初のX線CCDカメラ等を搭載したことにより、感度を飛躍的に向上。主な成果は、活動銀河核から放射されたX線解析の結果、ブラックホールから放出されたものであることが強く示唆され、銀河中心部に超巨大ブラックホールが存在することを支持するものとなった。また国際公募観測も初めて開始した。全観測データは世界中の研究者に公開・利用されており、論文数が飛躍的に増えることとなった。</p>
<p>すざく</p> 	<p>2005年(打上げ)</p> <p>2015年(運用停止予定)</p>	762 (2014年12月末まで)	<p>「あすか」よりもさらに感度を高めたX線望遠鏡と観測装置等を搭載。主な成果は、宇宙空間に鉄が拡散した年代が、今から100億年以上も前であることを発見し、銀河団の形成・成長のプロセスの理解を初めて観測的に検証したことなど。</p>

【参考2】 打上げ(平成17年)直後に発生した 搭載観測装置の一つ(高分解能X線分光器(XRS))の不具合

- XRSはX線入射による検出器 (X線カロリメーター) の微小な温度上昇を検出してX線分光を行う観測機器であり、検出器を機械式冷凍機、固体ネオン、液体ヘリウム、断熱消磁冷凍機を用いて絶対温度60ミリ度 (-273.09℃) まで冷却させる必要がある。
- 当初冷却装置は順調に準備が行われ、平成17 (2005) 年7月10日にヘリウム排気弁を解放、7月25日に真空容器排気弁を解放したところ、7月27日には、検出器を世界で最も低い温度である60ミリ度に冷却することに成功し、予定したとおりのX線分光性能も確認された。
- その後、同年8月8日に液体ヘリウムが全て蒸発し、観測機能を喪失した。設計ではXRSは2~3年稼動する予定であった。
- 原因：ヘリウム蒸発の正のフィードバックが働いた(右図)。
- XRSの喪失で失われたサイエンス
 - ーブラックホールを始めとする高密度天体の周囲の物質の運動状態の解明。
 - ー銀河団の構造進化の研究。
 - イオン運動、乱流運動のエネルギーの測定
 - 活動銀河からのフィードバック
- 本件については、平成18(2006)年1月25日の宇宙開発委員会(当時)において、原因究明および再発防止策について報告を行った。

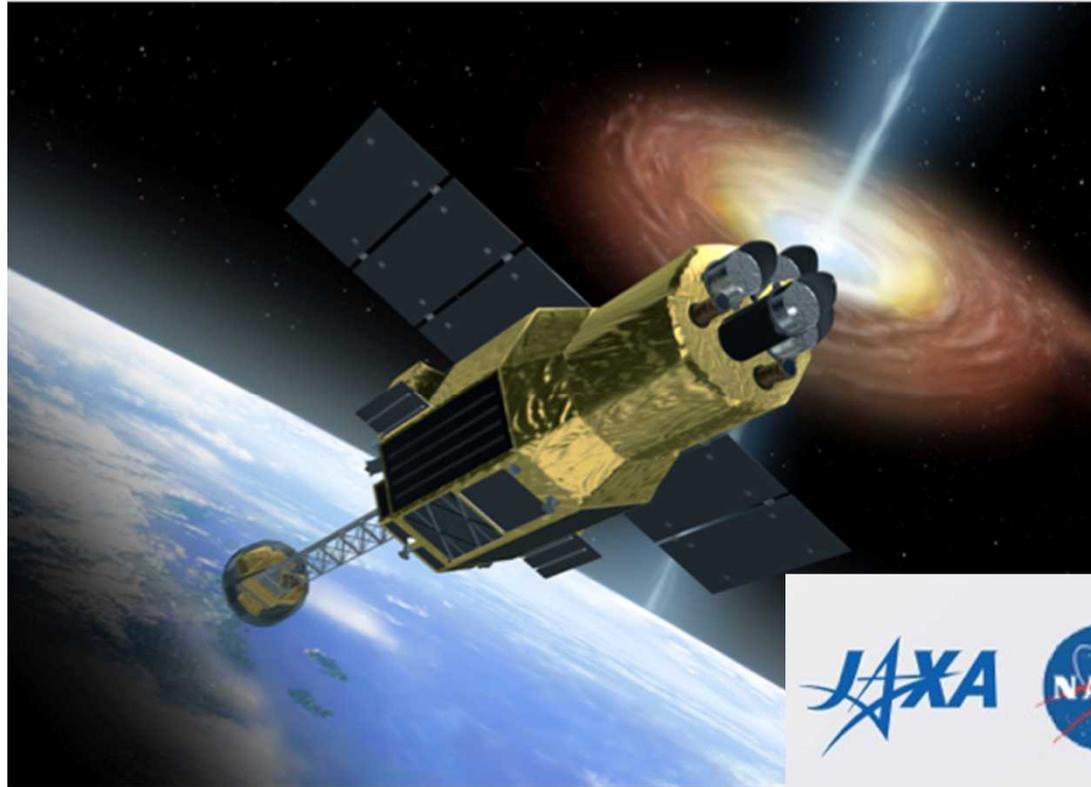


【参考3】「すざく」の太陽電池パドル発生電力の長期トレンド



「すざく」の太陽電池パドル(SAP)発生電力の長期トレンド。打ち上げの2005年7月10日を基点として、365日ごとに折りたたんである。

【参考4】X線天文衛星ASTRO-H (平成27年度打上げ予定)



- ASTRO-H衛星はブラックホール、超新星残骸、銀河団など、X線やガンマ線で観測される高温、高エネルギーの天体の研究を通じて、宇宙の構造とその進化の解明を行うX線天文衛星。
- ASTRO-H衛星は、「すざく」衛星の後継として開発され、JAXA、NASAをはじめ、国内外の大学、研究機関の200人を超える研究者が開発に参加する、次世代の世界のX線天文学の旗艦ミッションである。大規模な国際協力が開発された4種類の新型観測システムが搭載され、平成27(2015)年度内に打ち上げを予定。
- 「すざく」衛星にくらべて10倍から100倍も暗い天体の分光観測が可能。