

X線分光撮像衛星 XRISM の初期科学成果

山口 弘悦
Yamaguchi Hiroya

1. X線分光撮像衛星 XRISM

2023年9月7日、X線分光撮像衛星 XRISM（クリズム）が、H-IIA ロケット 47号機によって JAXA 種子島宇宙センターから打ち上げられた。同ロケットには、月面への着陸を果たした小型月着陸実証機 SLIM も同乗した。SLIM が月に到達するためには、射場と月の位置関係に厳しい条件が課されるため、打上げ可能な日時が大きく制限される。この季節の種子島は風が強く、雨も多い。天候不良による順延を繰り返し、台風も近づいていた。「このまま行くと、更に数か月の延期になるかも……」という不安に駆られる中、この日は奇跡的な快晴が訪れた。多くの仲間と観衆が見守る中、XRISM は無事に高度約 575 km の地球周回軌道に投入された。打上げ運用の詳細については、XRISM のプロジェクトマネージャである渡辺伸氏の本誌記事¹⁾を参照されたい。

XRISM は、その和名が示すとおり、X線帯域で天体の「分光」と「撮像」を行う衛星である²⁾。そのため XRISM は、主に分光を担う Resolve（リゾルブ）と、撮像を担う Xtend（エクステンド）の2台の観測装置を搭載する（図1）。いずれの装置も、X線を集光する特殊な望遠鏡（XMA）と、その焦点面でX線を検出するセンサー部から成る。

Resolve のセンサーは、X線マイクロカロリメータと呼ばれる半導体素子で、優れた分光性能を特長とする。入射するX線光子のエネルギーを熱に変換し、それに伴う素子の温度変化を測ることで、光子一つ一つのエネルギー（波長に反比例）を測定できる。ただし、1光子の吸収に伴う上昇温度は

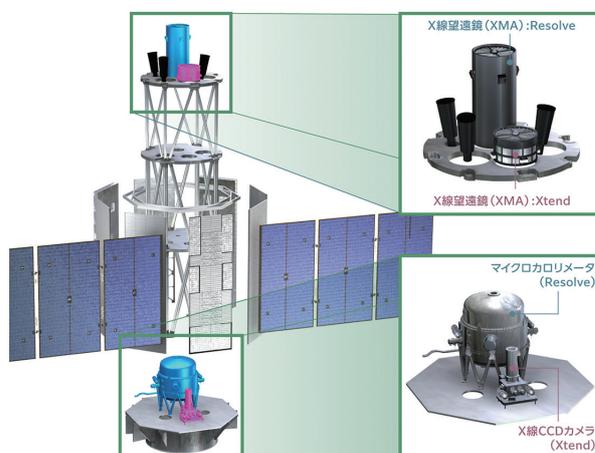


図1 XRISM の概観

X線分光撮像衛星 XRISM は、Resolve、Xtend の2台の観測装置を搭載する。X線望遠鏡（XMA）の焦点距離は 5.6 m（クレジット：JAXA）

1 mK 程度と極端に小さく、検知は容易ではない。そこで Resolve は、多段の機械式冷凍機と液体ヘリウム、更には断熱消磁冷凍機を駆使して、素子の温度を 50 mK（ $-273.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）にまで冷却する。Resolve のセンサー部分の外観が巨大な魔法瓶のような姿をしているのは、この極低温を維持するためである。センサーは鉄原子の K 殻遷移が検出される 6 keV 周辺での分光性能に最適化されており、このエネルギー帯で半値幅 4.5 eV という史上最高のエネルギー分解能を達成した³⁾。これにより、高階電離した鉄イオン（例えば Fe^{24+} や Fe^{25+} ）の特性 X線を、異なる量子遷移ごとに分離して検出できるようになった。また、6 keV の X線に対して $\pm 0.1\text{ eV}$ という高いエネルギー決定精度も達成した。これは、ドップラーシフトを用いた視線速度測定を、 $\pm 5\text{ km/s}$ の

精度で行えることに相当する。

もう一方の Xtend は、これまでの X 線衛星にも搭載された CCD 検出器である。分光性能は Resolve より低いものの、高い感度で天体の撮像を行える。4 枚の CCD チップを「田」の字状に配置することで、満月よりも大きい $38' \times 38'$ の視野を実現した。この広さを活かして、空間的に大きく広がった天体の画像を一気に取得できるだけでなく、観測中に偶然視野内で発生した突発天体现象（主に恒星フレア）を多数検出する等の成果を収めている。ただし本稿では、その詳細は割愛する。

2. X 線観測の意義と XRISM の科学目標

XRISM が観測する X 線は電磁波の一種であり、可視光と比べて 3~4 桁エネルギーが高い（波長が短い）。電磁波のエネルギーが高いということは、その放射源のエネルギーも高い、すなわち温度が高いことを意味する。具体的には、温度が約 100 万度を超えるプラズマ（電離気体）が、X 線を放射する。そのような高温プラズマは、恒星や中性子星、超新星残骸といった天の比較的近傍の天体から、系外銀河や活動銀河核、銀河団等の遠方天体まで、幅広い階層の天体において普遍的に存在する。更に、宇宙に存在する陽子や原子核の 9 割以上が、実は X 線帯域でしか観測できないプラズマ状態にあることが知られる。したがって、高温プラズマの X 線観測は、宇宙の本質を知るうえで不可欠なのである。

XRISM は、このような特徴を持つ X 線の精密分光観測を通して、宇宙の進化と様々な天体现象の解明を目指している。大きな科学目標として、(1) 宇宙の構造形成と銀河団の進化、(2) 宇宙の化学進化と物質循環、(3) 宇宙のエネルギー輸送、(4) 超高分解能 X 線分光による新しいサイエンスの開拓という 4 つの柱を掲げている。以下ではそれぞれの科学目標に関連した最新の観測成果を紹介する。

3. XRISM の初期科学成果

(1) 宇宙の構造形成と銀河団の進化

宇宙には、太陽と惑星の集まりである太陽系や、星の集まりである銀河系のような、天体の群れが無数に存在する。このような群れは、138 億年前に宇

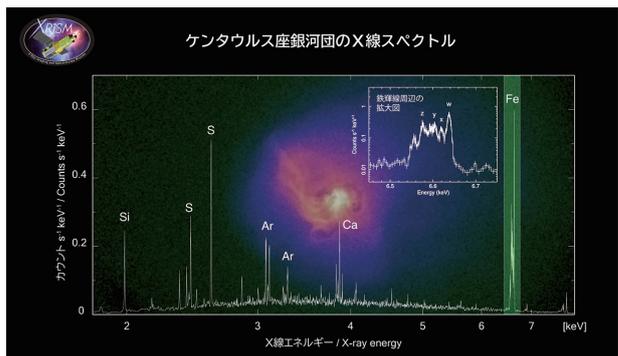


図2 XRISM/Resolve によるケンタウルス座銀河団中心部のスペクトル

図の中央やや右上の枠内は、6.6 keV 周辺の鉄輝線スペクトルの拡大図。背景はチャンドラ X 線天文衛星による画像データ（クレジット：JAXA）

宙が生まれたときから存在したわけではなく、物質同士の間で働く重力等の影響を受けて、徐々に形成された。その途中には、天体同士の衝突や合体のような、激しいイベントが何度も起こったと考えられる。このような過程を経て作られた宇宙最大規模の天体が「銀河団」である。典型的な銀河団のスケールは、差し渡し 1 千万光年にも及ぶ。

銀河団には、宇宙誕生直後の大イベントである「ビッグバン元素合成」によって作られた水素やヘリウムのガスも流れ込む。このガスは、銀河団の重力圏に落下した際の衝撃で、数千万度の高温プラズマとなる。1 つの銀河団に含まれるプラズマの質量は、銀河を構成する星の総質量よりもはるかに大きく、銀河団の力学的進化を語るうえで重要な存在である。高温プラズマは X 線を放射するので、それに伴う放射冷却によって次第に冷えていくことが予想される。しかしこれまでの観測から、銀河団のプラズマは予想に反して高温状態を維持し続けていることが知られていた。そのため、その温度維持機構を解明することが、銀河団の力学的進化の研究における重要課題に位置づけられてきた。

XRISM は、2023 年の年末から翌年始にかけて、地球から約 1 億光年の距離にあるケンタウルス座銀河団を観測した。この観測により得られた Resolve のスペクトルを図 2 に示す。6.6 keV 付近に見える鋭いピークが、ヘリウム状の鉄イオン (Fe^{24+}) による K 殻輝線だ。量子力学の言葉で言うと、2 つの束縛電子のうちの片方が励起した $1s2s$ 状態や $1s2p$ 状態から、基底状態 ($1s^2$) に遷移する際の発光である。この輝線のドップラーシフトを測定したところ、銀

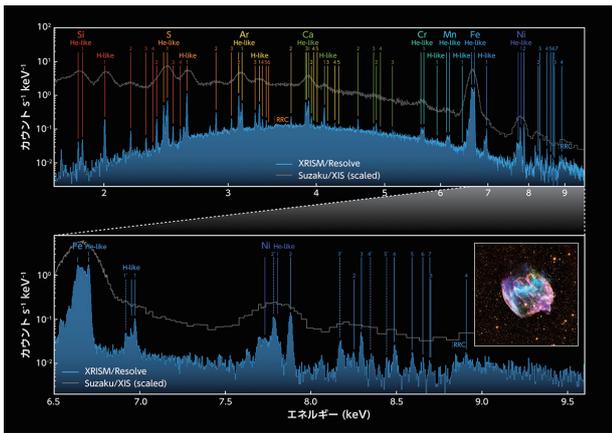


図3 XRISM/Resolveによる超新星残骸 W49B のスペクトル
 上が Resolve 全帯域 (1.7~10 keV) のスペクトル, 下が鉄輝線バンド (6.5~10 keV) の拡大図。下のグラフの右側枠内は、チャンドラ X線天文衛星等による多波長画像データ (クレジット: JAXA, 画像データは NASA/CXC/MIT/L.Lopez et al. および Palomar, NSF/NRAO/VLA)

河団中心部の高温プラズマが、130~310 km/s という速さで地球方向に流れていることが判明した⁴⁾。この流れによってプラズマが攪拌され、銀河団中心部の温度が高温に保たれていると考えられる。更に観測データと数値シミュレーションの比較を行ったところ、今回観測されたプラズマの動きが、過去の銀河団衝突・合体の影響で引き起こされた可能性が示唆された。事実であれば、銀河団が衝突・合体を通じて進化する過程を直接的に示す証拠を得たことになる。本観測は、長年の課題であった高温プラズマの加熱機構を明らかにしただけでなく、宇宙における最大規模の天体構造の形成と進化の理解を大きく前進させる成果となった。

(2) 宇宙の化学進化と物質循環

誕生直後の宇宙で起こった「ビッグバン元素合成」では、水素とヘリウム、リチウムの3種類の元素が作られたことが知られる。一方、銀河団のスペクトル(図2)には、鉄の他にもケイ素やカルシウム等の輝線が検出されている。これらの重元素は、いずれも宇宙誕生時ではなく、星の進化や超新星爆発に伴う核融合反応を経て、徐々にその数を増やしてきた。その重元素が、銀河団という巨大な天体の中に溜め込まれている。これほど大きな天体は他にないので、銀河団プラズマの重元素量は、その時代の全宇宙の化学組成を代表すると考えてよい。つまりXRISMが行う銀河団の観測は、宇宙の力学的な進

化だけでなく、化学的な進化も同時に解き明かす。

XRISMは、「元素を受け取る側」である銀河団だけでなく、「元素を供給する側」である星の痕跡、すなわち「超新星残骸」も多数観測している。例えば図3は、わし座の方向、地球から約3万3千光年の距離にある、W49Bという超新星残骸から得られたResolveのスペクトルである。ケイ素、硫黄、アルゴン、カルシウム、クロム、マンガン、鉄、ニッケルの輝線が見事に分離された。これにより、超新星爆発によって供給された重元素の種類と量を、極めて正確に測定できるようになった。また、Resolveの特長を活かした速度測定によって、鉄等の重元素が、超新星残骸の東西(図の左右)に向かって双極状に拡散している様子が初めて明らかになった⁵⁾。ジェットの放出を伴う激しい超新星爆発が起こった可能性が示唆される。このような形状の爆発はγ線バースト等でも確認されるが、今回XRISMが明らかにした重元素の組成は、γ線バーストの元素合成理論から予想されるものとは大きく異なっていた。つまり、W49Bが新種の超新星爆発の残骸である可能性も示唆される。今後XRISMによる様々な超新星残骸の観測によって、宇宙の化学進化を司る超新星爆発の理解が更に深まることが期待される。

(3) 宇宙のエネルギー輸送

私たちが暮らす天の川銀河を含む多くの銀河の中心には、太陽の百万倍以上の質量を持つ巨大ブラックホールが存在し、重い銀河ほど重いブラックホールを持つことが知られる。このことから、銀河と巨大ブラックホールは、互いに密接に関わり合いながら進化してきたと考えられている。しかし、両者は質量もサイズも大きく異なるため、具体的にどのような作用をもって影響を及ぼし合うのかは明らかになっていない。これを「銀河とブラックホールの共進化問題」といい、現代の宇宙物理学の大きな謎の1つとされる。

この謎を解く鍵とされるのが、ブラックホールから高速で吹き出す「アウトフロー」である。ブラックホールと聞くと、ひたすら物を吸い込み続けるイメージを持たれがちだが、実は吸い込みきれなかった大量の物質を外向きに吹き飛ばすことも知られており、この物質の流れ、すなわち「アウトフロー」が、銀河全体に莫大なエネルギーを与えて星生成を抑制

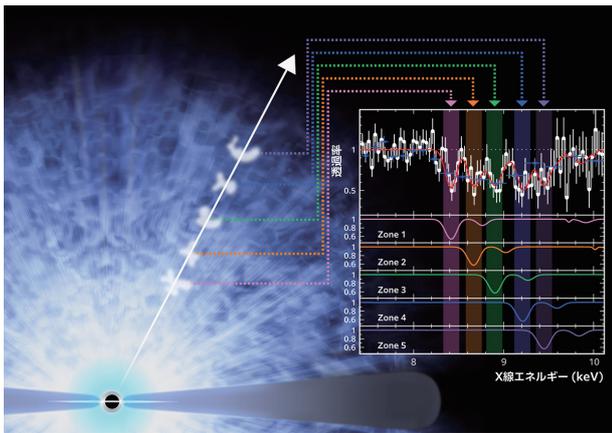


図4 XRISM/Resolveによる巨大ブラックホール（活動銀河核）PDS456のスペクトルと天体の想像図

一番上のグラフの白点が観測データ、赤線がベストフィットモデル。下の5つのグラフは、異なる速度成分の寄与を示す。各成分が、想像図中に示されたような弾丸状のアウトフローを起源に持つと解釈された（クレジット：JAXA）

する等、共進化に寄与すると考えられている。

XRISMは、へび座の方向、地球から約20億光年の距離にある「PDS 456」という巨大ブラックホール（活動銀河核）を観測した。Resolveのスペクトル（図4）には、複数の吸収線が検出されていることが分かる。これらは、 Fe^{24+} や Fe^{25+} の共鳴吸収によるものと考えられるが、本来観測されるべきエネルギー（静止系でそれぞれ6.7 keV、7.0 keV）と比べて高エネルギー側に大きくシフト（青方偏移）していることが分かる。この結果から、アウトフローの速度は、光速の20~30%（時速約2億~3億km）にも達していることが確認された。また、吸収線の構造から、アウトフローは少なくとも5種類の異なる速度成分からなり、その総エネルギーは従来の予想よりも1000倍以上も大きいことが明らかになった⁶⁾。この値は、銀河とブラックホールの共進化を説明するには大きすぎる。つまり、このようなアウトフローは間欠的に起こるものであり、現在たまたま活発な状態を見ているだけの可能性や、アウトフローが持つ全エネルギーのごく一部だけが、銀河に受け渡される可能性が示唆される。XRISMの観測は、銀河規模でのエネルギー輸送プロセスに関する従来の理解に、一石を投じるものとなった。今後の観測と理論研究により、銀河とブラックホールの共進化の謎が詳しく解き明かされることが期待される。

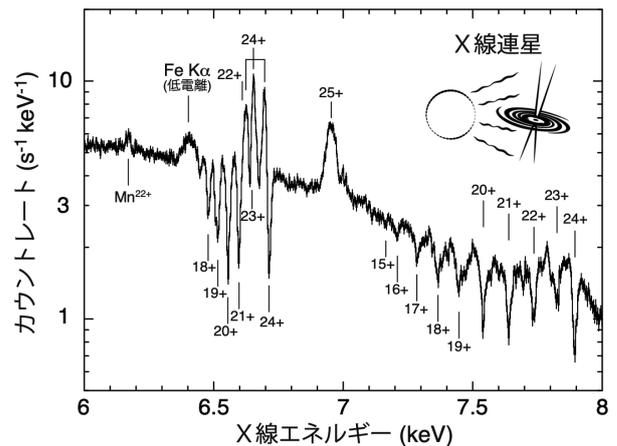


図5 XRISM/ResolveによるX線連星「はくちょう座X-3」のスペクトル

図中の数字は対応する鉄イオンの価数を示す。右上は一般的な大質量X線連星の概念図（クレジット：JAXA）

(4) 精密X線分光による新しいサイエンス

XRISM初期成果シリーズのラストに、筆者がこれまでで最も衝撃を受けた「はくちょう座X-3」の結果をご紹介します。この天体は、地球から約3万光年の距離にあるX線連星で、大質量の恒星とコンパクト星（ブラックホールもしくは中性子星）からなる。コンパクト星の近傍からは強烈なX線が放たれ、光電効果によって周囲の物質が電離する。これを「光電離プラズマ」と呼ぶ。

XRISMは2024年3月に、はくちょう座X-3が軟X線で特に増光したときを狙って観測した。Resolveが得た衝撃のスペクトルを図5に示す。従来のX線天文衛星の観測では分離できなかった、様々な価数の鉄イオンによる吸収線と輝線が多数検出された⁷⁾。この鉄イオンは大質量の恒星から吹き出す星風に含まれるので、スペクトルを詳しく分析することで星風の速度や質量放出率が分かる。それらは連星系の進化を知るうえで貴重な情報となる。一方、このスペクトルには、宇宙物理学だけでなく、基礎物理学としても重要な情報が含まれている。例えば、7.2~8.0 keVの帯域で検出された鉄K β 吸収線は、左右非対称で複雑な形状を示している。これは、各イオンの原子構造を反映するものと考えられる。つまりこのスペクトルは、多電子系イオンの量子力学に関する貴重な「実験データ」でもあるのだ。事実、この観測結果を受けて、天文学者と原子物理学者による連携研究も始まっている。XRISMの優れた性

能によって、新しいサイエンスが今まさに芽吹いている。

4. 今後の見通し

本稿では、XRISMによる初期観測の中から、ミッションの大目標にも直結する代表的な4つの科学成果を紹介した。これらの他にも、XRISMは既に100個以上の天体を観測しており、多くの画期的な成果が得られている。2025年9月には、日本天文学会の研究報告誌(PASJ)からXRISMの初期成果に関する特集号も刊行される(本記事執筆は2025年6月)。ご一読いただければ幸いです。

一方、XRISMはすべてが順調というわけではない。渡辺氏の記事¹⁾でも触れられているように、Resolveのセンサー上部に置かれた「ゲートバルブ」の開放が予定どおりに完了できず、2025年6月の時点で、閉じた状態での観測が続いている。ゲートバルブには、真空保護用の250 μ m厚ベリリウム膜が取り付けられているため、2 keV以下のX線に対する感度を失った状態にある。XRISMチームは、2025年9月に再度の開放運用を試みる予定である。もし成功すれば、現在観測可能な2~10 keVに加え

て、0.3~2 keVの軟X線への窓が開かれる。それにより、比較的小規模な銀河団に含まれる低温($\sim 10^6$ K)プラズマの観測や、窒素や酸素のような原子番号の小さい重元素の検出が可能となる。宇宙の力学進化や化学進化に関する研究が、飛躍的に進展するだろう。成功の可能性は決して高くないが、奇跡が起こってくれると信じたい。

謝辞

XRISMは、100名を超える科学者メンバーの他に、大学院生やエンジニアの努力により支えられている。本計画に関わったすべての皆様に、心から感謝を申し上げる。

参考文献

- 1) 渡辺伸, *Isotope News*, **796**, 13-17 (2024)
- 2) Tashiro., *et al.*, *PASJ.*, **77**, S1 (2025)
- 3) XRISM Collaboration, *PASJ.*, **76**, 1186 (2024)
- 4) XRISM Collaboration, *Nature.*, **638**, 365 (2025)
- 5) XRISM Collaboration, *ApJL.*, **77**, S1 (2025)
- 6) XRISM Collaboration, *Nature.*, **641**, 1132 (2025)
- 7) XRISM Collaboration, *ApJL.*, **977**, L34 (2024)

(宇宙航空研究開発機構 宇宙科学研究所)