

XRISMニュース (4)

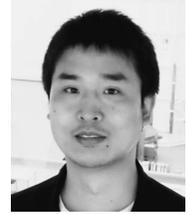
観測速報その3



藤田



佐藤



萩野

藤田 裕¹, 佐藤 浩介², 萩野 浩一³, XRISMチーム

〈¹ 東京都立大学大学院理学研究科 物理学専攻 〒192-0397 東京都八王子市南大沢 1-1〉

〈² 京都産業大学理学部 宇宙物理・気象学科 〒603-8555 京都府京都市北区上賀茂本山〉

〈³ 東京大学大学院理学研究科 物理学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

XRISMによるケンタウルス銀河団と活動銀河核PDS 456の観測成果が、科学雑誌Natureに掲載されました！観測直後、研究チームの間には大きな興奮と驚き、そして予想外の発見に対する戸惑いも広がりました。今回は、これらの観測成果を舞台裏の研究者たちのリアルな声も含めてお届けします。

ケンタウルス座銀河団—XRISMが捉えた「ガスの揺れ」—

ケンタウルス座銀河団は近傍の明るい銀河団である。X線天文研究者にとってはおなじみの天体で、これまで数多くの観測が行われてきた。しかし、XRISMの高分解能X線分光器Resolveが捉えた姿は、銀河団という天体の奥深さを示すものだった。

ケンタウルス座銀河団の観測は、2023年の年末から2024年の年始にかけて行われた。XRISMの性能検証期間中のことである。我々の主な興味は、銀河団中心部の高温ガス（銀河団ガス）の物理状態を、これまでにない高い分光能力で調べることにあった。

観測直後の初期解析（quick look）では、重元素の輝線が非常に細く観測されていることがわかった。これは銀河団ガスの乱流速度が予想以上に小さいことを示唆していた。「これは面白い結果になりそうだ」と期待が高まった。しかし、ここからが忍耐の始まりだった。XRISMの精密なデータ較正には予想以上に時間がかかり、詳細な解析に必要なデータの下処理がなかなか完了しない。毎日のようにデータの到着を待ちわびる日々が続いた。新しい衛星の初期運用期間特有の、もどかしい時間だった。

ようやくデータが届き、本格的な解析を開始すると、確かに乱流速度は小さいことが確認された。銀河団中心部でも120 km/s以下という値は、ひとみ衛星のペルセウス座銀河団の観測よりもかなり小さく、それだけでも重要な発見だった。しかし、さらに驚くべきことに、銀河団ガスの輝線がすべて青方偏移していたのである。しかも、その偏移量は一様ではなく、中心部では130 km/s、南西部では310 km/sと、明確な空間勾配を持っていた。これは銀河団ガス全体が回転しつつ地球に向かって運動していることを意味していた（図1）。この結果を見たとき、正直なところ困惑した。銀河団の中心付近では、ガスは銀河団の重力ポテンシャルの底でほぼ静止しているはず、というのが我々の先入観だったからである。「解析にミスがあるのではないか」と何度もチェックを重ねたが、結果は変わらなかった。

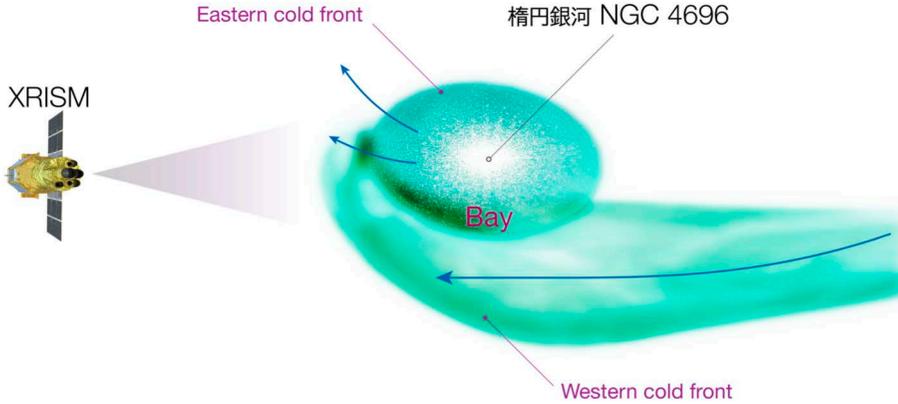


図1 観測された高温ガスの流れ。ケンタウルス座銀河団の中心に位置しているのがNGC 4696銀河。(クレジット: JAXA)

落ちていて結果を再検討すると、一つの可能性が浮かんだ。過去の銀河団衝突に伴うガスの振動運動、いわゆる「sloshing (スロッシング)」である。銀河団は宇宙の構造形成の中で、小さな銀河団同士が衝突・合体を繰り返して成長してきた。その過程で、銀河団ガスは重力ポテンシャルの中で複雑な振動運動を起こす。ちょうど、グラスの中の水を揺らすと水面が波打つように、銀河団ガスも「揺れる」のである。実際、ケンタウルス座銀河団は主成分 (Cen 30) と副成分 (Cen 45) から構成されており、完全に緩和した状態にはない。過去の衝突の記憶が、まだガスの運動として残っているのかもしれない。

我々の観測結果を既存のコンピューターシミュレーションと比較してみると、見事に一致することがわかった。sloshingによって生じるガス運動は、確かに我々が観測したような速度場を作り出すことができる。さらに興味深いことに、この大規模なガス運動は銀河団中心部の冷却問題を解決する一つの鍵となる可能性が見えてきた。中心の活動銀河核 (AGN) が放出したエネルギーを、sloshingによって効率的に周囲に運搬し、ガスの冷却を防いでいるのである。

一方で、予想外だったのはAGNの影響の小ささである。多くの研究者は、銀河団中心のAGNが強力なジェットを放出し、周囲のガスに激しい乱流を引き起こすと考えていた。しかし、我々の観測では、AGN近傍でも乱流速度に顕著な増加は見られなかった。どうやらケンタウルス座銀河団では、AGNよりもsloshingの方が銀河団ガスの熱的平衡により重要な役割を果たしているようである。これは従来の理論的予想とは異なる結果で、銀河団進化の理解に新たな視点をもたらすものだった。

結果を論文にまとめ、Nature誌に投稿することにした。銀河団に関するXRISMの最初の重要な科学成果として、できるだけ多くの人に知ってもらいたいと考えたからである。査読プロセスは予想以上にスムーズだった。3人のレフェリー全員が我々の結果に好意的で、建設的なコメントをくれた。観測データの質の高さと、解釈の妥当性が評価されたのだと思う。

論文[1]の受理後、記者会見を開催した。その結果、NHKの全国ニュースをはじめ、多くのメディアで報道された。「銀河団のガスが揺れている」という表現で紹介されることが多く、一般の方々にも関心を持っていただけたようである。この発見は、銀河団の動力学の新なる章の始まりかもしれない。XRISMの高い分光能力があってこそ可能になった観測であり、今後の銀河団研究の方向性に大きな影響を与えるものと期待している。今後もXRISMは多くの銀河団を観測し、宇宙の構造形成の謎に迫っていくだろう。次はどのような「予想外」が待っているのか、今から楽しみである。

活動銀河核 PDS 456—精密分光が明らかにした超高速アウトフローの予想外の姿—

2024年4月20日（土）の朝7時過ぎ、活動銀河核（AGN）“PDS 456”のXRISM観測データのパイプライン処理完了を告げるメールが送られてきた。私はすぐにデータのダウンロードと解析処理を走らせ、期待と不安を抱きながら結果の出力を待った。正直なところ不安の方が大きかった。PDS 456は強力な超高速アウトフロー（UFO）による約 $0.3c$ で青方偏移したFe XXV/XXVIの吸収線が約8 keV（AGN静止系では約9.5 keV）に明瞭に観測されるため、UFOの物理や銀河進化への影響を探る上で最適な天体である。一方で、 $z=0.184$ と比較的遠いため、NGC 4151など他の初期観測天体と比べると1桁近く暗い。当時はバックグラウンド推定用データベースもなく、バックグラウンドが想定よりも高ければPDS 456の吸収線がまともに観測できない可能性すらあった。

そんな不安を抱きながら、解析結果のX線スペクトルを見た第一印象は、「なんだこれは？」という困惑だった。8 keV付近に期待していたような強い吸収線は見られない。一方で、バックグラウンドの影響を強く受けたような顕著なスペクトルの歪みもない。困惑しながらも簡単なモデルで連続成分をフィットし、図2のようなUFOによる吸収成分のスペクトルを表示した段階で、ようやくXRISMの観測データが予想外の結果を示していることに気づいた。吸収線が見えないのではなく、今までは広がった1つの吸収線に見えていた構造の代わりに、いくつもの細い吸収線が見えていたのである。私は大急ぎで共同研究チームに第一報を流し、XRISMによる予想外の発見を共有した。その後のチームメンバーの反応は凄まじく、その興奮のままに多数のメンバーが怒涛の勢いで解析を進めていき、約3ヵ月後には膨大な量の解析結果を含むNature論文のドラフトができあがった。ちなみに、このNature論文の責任著者の一人である福岡教育大の水本岬希氏は、最初にこのスペクトルを見た瞬間に、興奮のあまり部屋の中を歩き回ったらしい。

XRISMが発見した複雑な吸収線構造は、UFOの物質分布が一様ではなく、非常に非一様なclumpy構造であることを示している。より詳細には、視線方向に少なくとも5つのclumpが存在し、輝線強度からこのようなclumpがほぼ全方向に吹き出していると示唆される。さらに、このclumpy構造を考慮すると、UFOの運動エネルギーは少なくともEddington限界以上の極めて大きな値となり、PDS 456の銀河規模のアウトフローと比べても1000倍以上も大きい。これは、従来の単純なエネルギー駆動型/運動量駆動型のアウトフローモデルのどちらも整合しない結果であり、新たな理論モデルが必要となる。今後のXRISMを用いた研究によって、UFOの物理の理解が飛躍的に深まり、UFOのエネルギーの行き先やUFOの銀河進化への影響なども明らかになってくるのではないかと期待している。

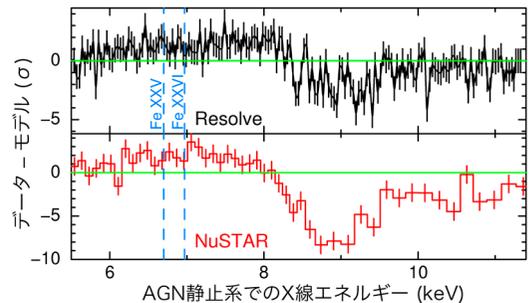


図2 XRISMの軟X線分光装置ResolveによるPDS 456の吸収線スペクトル（上）と、従来の観測装置（NuSTAR; 下）の同時観測結果との比較（[2]を一部改変）。

より詳細な観測結果については、以下の出版済論文[1, 2]にまとめられています。ご参照ください。

[1] XRISM collaboration, 2025, Nature, 638, 365

[2] XRISM collaboration, 2025, Nature, 641, 1132