

銀河団コア内のガスの 動力学の初解明

一戸 悠人¹, 上田 周太郎²

〈¹立教大学 〒171-8501 東京都豊島区西池袋 3-34-1〉

〈²中央研究院天文及天文物理研究所 台北市 10617 羅斯福路四段 1 號, 台湾〉

e-mail: ¹ichinohe@rikkyo.ac.jp, ²sueda@asiaa.sinica.edu.tw



一戸



上田

大小様々なスケールの銀河団ガスの運動を測定することが銀河団ガスの進化の解明において重要であることは、銀河団コアの高角度分解能観測や「すざく」による外縁部の観測によって長年指摘されてきた。「ひとみ」はX線天文学の悲願だったその実現を、ついに成し遂げた。100 km s⁻¹よりも高精度の測定を行えたため、銀河団ガスの複雑な速度場構造を捉えることができた。1つの銀河団のコア内100 kpcだけの結果であり、全貌の理解には程遠いが、銀河団研究における大きな節目となる結果である。

1. はじめに

銀河団ガスの進化を解明するには、その速度場の測定が不可欠であることに疑いの余地はない。銀河団は、より小さな銀河団同士の衝突・合体を経て進化してきたと考えられており、衝突現象はバルクなせん断流や衝撃波などにより最終的に乱流を生じさせる。一方、X線天文衛星 *Chandra* が取得したペルセウス座銀河団の高画質X線写真等から明らかのように、銀河団コアにおいても中心の活動銀河核 (AGN) と銀河団ガスの相互作用を示唆する構造、例えば周囲よりX線輝度の低いX線空洞などが多数存在する。ところが、大小様々な銀河団ガスの速度場は一部の幸運な例を除いて精度の良い測定が存在しない。「ひとみ」を使って世界で初めて系統的な測定を行えるのであれば、我々の手でそれを行いたいと思うのは自然ではないだろうか？ そして、その夢はまだ道半ばである。

「ひとみ」の最初の観測天体は、幸運にも、過去に無数の研究がなされてきたペルセウス座銀河団

であった。「ひとみ」搭載X線マイクロカロリメータ (SXS) は期待通りの性能を発揮し、高階電離した鉄イオンの輝線幅が、銀河団ガスの熱運動の成分よりも大きく広がっていることを明らかにした。この結果をもとに「ひとみ」最初の論文¹⁾が生まれた。その詳細は別記事²⁾を参照されたい。その後、SXSの特性の理解が大きく進み、最も初期の、最も校正の難しかった観測データが利用可能となった。またX線望遠鏡の点像分布関数の補正が重要であることが判明し、また「ひとみ」の角度分解能が大きいことを巧みに利用することで、観測視野外を含む広い領域の速度場の測定が可能であることに気づいた。これら全てを利用することで「ひとみ」ペルセウス座銀河団の速度論文の決定版が誕生した。

2. 銀河団コア内の速度場

銀河団ガスの速度場の測定においてまず考えられるのが、輝線のDoppler効果を利用した視線方向バルク速度の測定と、輝線幅に着目した視線方向速度分散である。観測される速度幅は、興味の

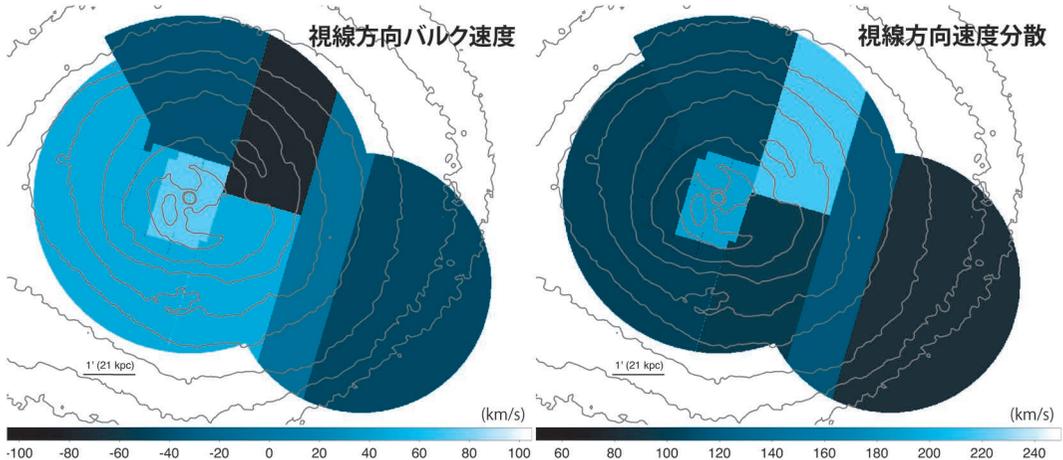


図1 ペルセウス座銀河団の中心から約100 kpc内の銀河団ガスの速度場。左図が視線方向バルク速度で、右図が視線方向速度分散になる。Chandraで取得したX線表面輝度分布のコントアを重ねてある。速度の算出方法などについては原論文^{1),3)}を参照されたい。なお、望遠鏡の点像分布関数の広がりやを考慮しているため、検出器画像とは異なる。

ある領域より外側からの漏れ込みによる混合で、天体由来の成分よりも広がってしまう。我々は点像分布関数とその広がりから各領域に対する漏れ込みの度合いを評価し、縮退を解くことに成功した。図1に、我々の測定によって初めて得られた、銀河団の中心から100 kpc内の銀河団ガスの視線バルク速度(左側)と視線方向速度分散(右側)を示す。視線方向速度分散は、AGNとそこから離れた位置にあるX線空洞の周辺のみで 200 km s^{-1} と極大値を取り、周りは一様に 100 km s^{-1} であることが判った。また、銀河団中心を原点とする 100 km s^{-1} の振幅を持つ視線方向バルク速度場を検出した。

バルク速度や視線方向速度分散はいわば輝線の形にガウス分布を仮定した上での速度の特性である。この仮定はプラズマの運動のスケールがスペクトル抽出の領域よりも十分に小さい時に妥当である。しかし領域の大きさと同程度以上の大きなスケールの運動がある時や、視線方向に複数の運動成分が存在する時、電子の確率分布がマクスウェル分布をしていない時などに正しくなる保証はない。「ひとみ」の新しいデータによって、そ

の仮定の妥当性を本格的に調査できるようになったのである。詳しい解説は原論文³⁾に譲るとして、結論だけ述べると、「ひとみ」が観測した輝線に、非ガウス性の兆候は発見されなかった。

ここまでは全てイオンと電子の流体力学的な運動に焦点を当ててきた。最後にイオンの熱的な運動、すなわちイオン温度についても少し触れる。電離したプラズマでの、熱平衡に到達するまでのタイムスケールは、イオン同士、電子同士、イオン・電子間で異なるため、イオンの温度がプラズマ分光で測定される電子温度と異なることはあり得る。質量の違う様々な元素の輝線幅を測定することによって、熱運動成分と流体運動成分を分離することでイオン温度を測定することができる。「ひとみ」で初めて測定されたイオン温度には、電子温度との違いは見られなかった。

3. 結果の解釈

本結果で最も気になるのが、視線方向速度分散の起源が乱流かどうか、であろう。残念ながら今回の観測で乱流だと断定することはできない。あくまで乱流の上限値と捉えるべきである。しかし

それでも、AGNやX線空洞のある領域で視線方向速度分散の極大値をとることは、AGNの活動と銀河団ガスが相互作用していることを示唆する。残りの一様な 100 km s^{-1} の成分の起源は、AGNとの相互作用・銀河団衝突由来などの様々な要因が考えられ、まさに銀河団ガスの進化と深く関連しているであろう。速度場からコア内のガスの非熱的圧力を10%程度以下と測定した。その他多数の議論を原論文で行っており、興味のある方はぜひそちらを御覧いただきたい。

謝 辞

本記事のもととなった論文³⁾において、北山哲氏、Brian McNamara氏、Norbert Werner氏の3名の優れたリーダーシップに大変お世話になりました。また、解析に携わった田中桂悟氏、藤本龍一氏、井上翔太氏にもこの場を借りて御礼申し上げます。

参考文献

- 1) Hitomi Collaboration, 2016, *Nature*, 535, 117
- 2) 大橋隆哉, 2019, *天文月報*, 112, 274
- 3) Hitomi Collaboration, 2018, *PASJ*, 70, 9

Atmospheric gas dynamics in the core of the Perseus cluster observed with *Hitomi* Yuto ICHINOHE¹, Shutaro UEDA²

¹ *Department of Physics, Rikkyo University, 3-34-1 Nishi-Ikebukuro, Toshima-ku, Tokyo 171-8501, Japan*

² *Academia Sinica Institute of Astronomy and Astrophysics (ASIAA), No. 1, Section 4, Roosevelt Road, Taipei 10617, Taiwan*

Abstract: We study the atmospheric gas motions within the central 100 kpc of the Perseus cluster using the X-ray data taken by the Hitomi observations. After taking the point spread function of the X-ray telescope into account, we find that the line-of-sight velocity dispersion of the hot gas is remarkably low and mostly uniform. This result is the first step to understand the nature of gas motion and its origin.