

# X線天文衛星ひとみによる ペルセウス座銀河団高温ガスの温度診断

中 島 真 也

〈理化学研究所 玉川高エネルギー宇宙物理研究室 〒351-0198 埼玉県和光市広沢 2-1〉

e-mail: shinya.nakashima@riken.jp



銀河団高温ガスの温度構造は、銀河団の形成過程を知る上で重要な指標である。われわれはX線天文衛星「ひとみ」に搭載されたX線マイクロカロリメータを用いて、ペルセウス座銀河団の中心部を観測した。初期運用特有の制限から観測エネルギー帯域が限られていたものの、これまでのX線検出器では縮退していた多数の輝線を分離・検出することに成功、それらの強度比を用いることで正確な温度診断が可能であることを実証した。「ひとみ」の後継機であるXRISM衛星はX線マイクロカロリメータの能力を完全に発揮し、より広い温度帯域の診断を、様々な天体に対して可能にしてくれるはずである。

銀河団の総質量は太陽の $10^{14}$ – $10^{15}$ 倍に達し、温度 $kT=1$ – $10$  keVの高温ガスが重力ポテンシャルに閉じ込められている。この高温ガスの温度分布は、銀河団の形成過程を知る上で重要な指標となる。例えば銀河団同士が衝突すると、衝撃波が起きてガスの温度が局所的に上昇するため、どこで衝突が起きたかを温度観測からトレースすることができる。また、衝突が起きていない緩和した銀河団の中心部においては、放射冷却によりガスが急激に冷えるはずだが、実際の観測ではそれほど温度が下がっておらず<sup>1)</sup>、なんらかの加熱機構が存在する事を示唆する。

今回ひとみが観測したペルセウス座銀河団は後者の緩和した銀河団に属しており、銀河団全域(約1 Mpcスケール)で見ると、X線放射は中心に集中した非常に滑らかな分布を示す。しかし、中心約100 kpcの領域を詳細に見ると、複雑な輝度分布が浮かび上がってくる(図1)。この領域では、温度分布も複雑であると推測するのが自然であろう。実際、過去のChandra衛星による観測では、この領域で支配的な $kT\sim 4$  keVの成分に加え

て、 $kT < 2$  keVの低温成分と $kT \sim 8$  keVの超高温成分が混在しているとの示唆が得られていた<sup>2)</sup>。

このような過去の観測(主にX線CCDによるもの)において、ガスの温度は主に、制動放射を起源とする連続波成分の形状と、一番強いFe輝線の強度で決定されている。この手法では代表的な温度を算出することはできるが、相対的に弱い別の温度帯からの信号が混ざっていた場合、それを分離する事が難しい。仮に十分な光子統計が確

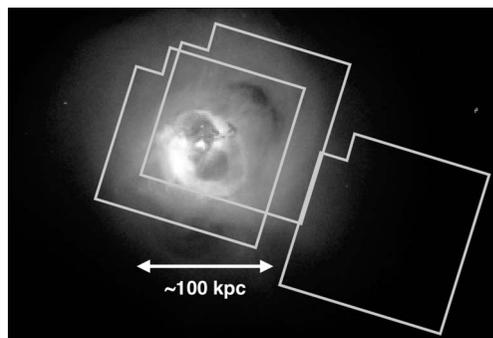


図1 Chandra衛星によるペルセウス座銀河団の中心部のX線イメージ。ひとみ/SXSの観測視野(計3箇所)も合わせて示してある。

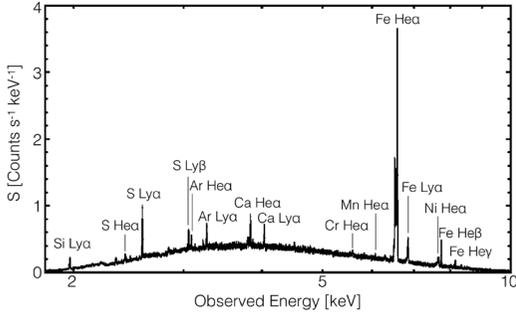


図2 ひとみ/SXSで観測したペルセウス座銀河団のX線スペクトル。He $\alpha$ 、He $\beta$ 、He $\gamma$ がヘリウム状イオンからの輝線、Ly $\alpha$ 、Ly $\beta$ が水素状イオンからの輝線。

保できたとしても、検出器の有効面積の測定精度が結果に大きな影響を与えることが分かっている<sup>3), 4)</sup>。検出器の系統誤差を抑えながら正確な温度を計測するには、さまざまな元素の輝線強度比を使った温度診断が最も確実である。異なる元素は異なる温度範囲に感度を持つので、スペクトルの中で縮退している温度構造を調べる事ができる。X線CCDの30倍のエネルギー分解能を持つひとみのX線マイクロカロリメータ(SXS)により、そのような測定が可能になった。

ひとみ/SXSで得たスペクトル(図1で示す、銀河中心を捉えた2視野の合計)を図2に示す。初期運用期間はX線入射口をBe窓で閉じて保護していたため、2 keV以上の高エネルギー帯域のデータしか得られなかったが(本来は0.3–10 keV)、Si, S, Ar, Ca, Cr, Mn, Fe, Niからの輝線をX線CCDと比べて圧倒的に高いS/N比で検出することに成功した。

温度の指標となる輝線強度比はいくつかあるが、今回われわれは、温度依存性が顕著な水素状イオンからの輝線とヘリウム状イオンからの輝線の強度比を用いた(図2中のCa Ly $\alpha$ /Ca He $\alpha$ 比など)。温度が高くなると電離が進むため、定性的にはこの強度比は温度に対して単調増加である。原子物理データ<sup>5)</sup>から定量的に温度依存性をモデル化し、それを観測された輝線強度比と比べる

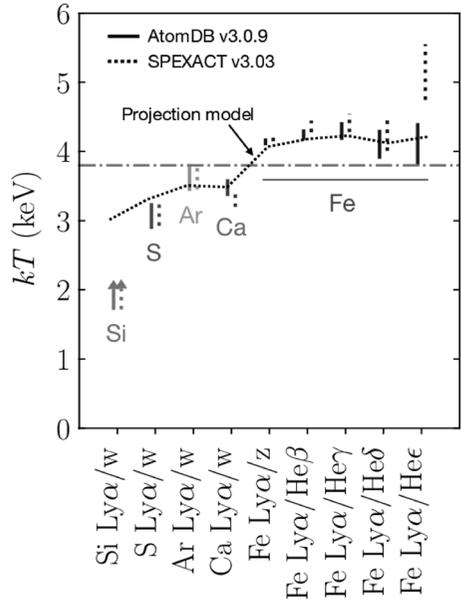


図3 各元素の輝線強度比から算出した温度。実線と破線は用いた原子物理データベースの違いを表す。折れ曲っている点線は既存の温度・密度分布モデルからの予測。水平点鎖線は単一温度を仮定してひとみ/SXSのスペクトルをフィットしたときの温度。横軸のw, zはそれぞれHe状イオンの共鳴線、禁制線を意味する。

事で温度を算出した。Si, S, Ar, Ca, Feの各輝線強度比から得た温度を図3に示している。もし単一温度からの放射であれば、すべての元素が同じ温度を示すはずであるが、観測された値は $kT=3-5$  keVと幅を持っている。すなわち異なる温度のガスからの放射が重ね合わさっていることを示している。

しかし、これが中心部の複雑な温度構造を反映していると解釈するのはまだ早い。過去の観測から、ペルセウス座銀河団の高温ガスは1 Mpcのスケールで、中心から外側に向かって、 $kT=3-6$  keVのなめらかな温度勾配が存在することが知られている<sup>6)</sup>。観測された放射は銀河団の中心から外側まで、奥行き方向に沿って積分したもので、その寄与を考慮しなくてはならない。そこで、既存の温度・密度勾配モデルから予測され

る輝線強度比を算出し (図3中の点線), それを観測結果と比較した. 図からわかる通り, ひとみの温度測定結果は, 既存の分布モデルからの予測と矛盾がなく, そこからずれるような, すなわち中心部に特有の温度構造は検出されなかった. Chandra衛星の観測で指摘されていたような,  $kT \sim 8$  keVの超高温成分もひとみでは検出されなかった. X線イメージで見られる複雑な空間構造にもかかわらず, 少なくとも  $kT > 3$  keVの温度構造はシンプルであることを示唆している.

今回のひとみの観測は, 初期運用特有の制限でエネルギー帯域が限られていたため,  $kT < 2$  keVのガスには感度がなかった. 冷えつつあるガスがどの程度存在するのかを調べるにはこの温度帯域の観測が鍵であり, それは2021年度末に打ち上げ予定のひとみ後継機XRISM<sup>7)</sup>により実現できるはずである.

また, 本稿で示した温度診断手法は銀河団に限らず, 個々の銀河から吹き出す高温ガス (銀河風) や, 天の川銀河内の超新星残骸など, 輝線を放出するあらゆる天体に適用できる. XRISM衛星で様々な天体を観測することで多くの発見があるものと期待している.

## 謝 辞

本稿の内容はPASJ特集号に掲載された「ひとみ」コラボレーションによる一連の投稿論文のうちの1つ<sup>8)</sup>に基づいているので, 詳細な内容はそちらをご覧ください. 本稿に対しては, 松下恭子, 馬場彩, 山田真也の各氏から有益なコメン

トをいただいた. 最後に, およそ10年という長期にわたって「ひとみ」を開発し, 画期的な観測を実現したみなさまに心から感謝を申し上げます.

## 参考文献

- 1) Makishima, K., et al., 2001, PASJ, 53, 401
- 2) Sanders, J. S., & Fabian, A. C., 2007, MNRAS, 381, 1381
- 3) Molendi, S., & Gastaldello, F., 2009, A&A, 493, 13
- 4) Schellenberger, G., et al. 2015, A&A, 575, 30
- 5) Foster, A. R., et al., 2012, ApJ, 756, 128
- 6) Churazov, E., et al., 2003, ApJ, 590, 225
- 7) Tashiro, M., et al., 2018, Proc. (SPIE), 10699, 1069922
- 8) Hitomi Collaboration, 2018, PASJ, 70, 11

## Temperature diagnostics of the hot gas in the Perseus cluster with the Hitomi X-ray observatory

Shinya NAKASHIMA

High Energy Astrophysics Laboratory, RIKEN, 2-1 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198, Japan

Abstract: A temperature structure in a cluster of galaxies is the key to understanding of the cluster's formation processes. We observed the Perseus cluster with an X-ray microcalorimeter onboard the Hitomi observatory. The microcalorimeter successfully detected many emission lines, which degenerate in past X-ray detectors, and enable us to perform precise temperature diagnostics.