論文内容の要旨

論文題目：X-ray Diagnostics of Thermal Condition of the Hot Plasmas in Clusters of Galaxies

（銀河団の高温プラズマの熱的状態に関するX線診断）

氏名　髙橋　勲

1　はじめに

銀河団は太陽の 10^{14} 倍もの質量を持つ宇宙で最大の自己重力系であり、星（銀河）、$\sim 10^8$ K の超高温プラズマ、および暗黒物質から構成されている。プラズマは 1 Mpc のスケールに渡って希薄に広がっており、その質量は星々の総質量の数倍にも達する。実際、銀河団プラズマは宇宙の既知バリオンの中で最も優勢な成分であり、過去の宇宙観測でも精力的にその研究がなされてきたが、それにもかかわらずその物理状態は未だ十分には解明されていない。

この高温プラズマはX線でのみ観測することができ、その温度が銀河団の中心部に向かって下がっていくように見えることが、多くの銀河団で観測されている。銀河団の中心ではプラズマ密度が高く、放射冷却のタイムスケールが宇宙年齢よりも短い。そのため、冷却によってプラズマ圧が下がり、これが外縁部からのプラズマ流入を誘発してさらに放射冷却が加速される、というクーリングフロー（冷却流）現象が起こっており、観測された低温プラズマはその産物である、と長らく信じられてきた。しかし、我が国の「あすか」衛星 (1993 年打ち上げ) が広帯域でエネルギー分解能の良い観測を行なった結果、クーリングフローでは説明できない現象が次々と明らかになった。さらに最近の *XMM-Newton* 衛星（欧）、*Chandra* 衛星（米、いずれも 1999 年打ち上げ）により温度が 1 keV より低いプラズマが中心部に存在しないことが示されるに至って、クーリングフロー仮説は破綻を迎えた。現在、この大量のバリオンがどのような熱的状態にあるのか、全く決着がついていない。特に問題なのは、起こるべき放射冷却が起

きていないので、強力な熱源が存在しなければならないが、それに伴う加熱機構は、観測されている低温成分を暖め過ぎてはならないことである。こうした条件を同時に満たすような熱源も加熱機構も、現在ほとんど特定できていない。

私は本論文で、銀河団プラズマの状態を明らかにするステップとして、中心部でプラズマがどのような熱的状態にあるかを観測的に明らかにすべく研究を行なった。作業仮説として、「銀河団プラズマは中心部に向けて徐々に温度が下がっているが、何らかの理由によりある温度以下には冷えない」という“single-phase” モデルと、我々が「あすか」衛星による観測を通して提唱してきた「高温・低温 2 成分のプラズマが共存しており (“two-phase”)、低温成分の割合が中心ほど多い」という二つの異なる描像を出発点とし、どちらがデータにより良く合うか、詳細に検証を行なった。

2 銀河団プラズマのＸ線診断

主観測対象としては、ケンタウルス銀河団を選んだ。これは、近くて (赤方偏移 0.0104) 明るく、詳しく研究されている銀河団の中では中心部の低温成分が最も顕著で、「あすか」衛星でも様々な成果を生んだ天体である。これを観測する手段としては、かつてない有効面積を誇り、空間分解能・エネルギー分解能でも「あすか」衛星に勝る *XMM-Newton* 衛星を用いた。この観測対象と観測手段は、本テーマにとって現時点で考えうる最高の組み合わせであり、データは日本からの観測提案にもとづき取得されたものである。

XMM-Newton 衛星は EPIC と RGS の二種の検出器を搭載している。まず私は、撮像・分光を同時に行なえる EPIC 検出器について、検出器バックグラウンドの性質を把握すべく約 100 個の観測データを系統的に解析し、その見積もり手法を確立した。次に、ケンタウルス銀河団を同心円状に分け、それぞれの領域からスペクトルを得た。観測では、必然的に銀河団を 2 次元に射影した情報しか得られないが、私は系の球対称性を仮定することで観測データから射影の効果を取り除き、3 次元的な薄いシェル領域からの一連のスペクトルを求めた。

これら一連のスペクトルを、光学的に薄いプラズマからの放射の理論モデルと詳しく比較した結果、半径 72 kpc($=6'$) よりも外側ではプラズマ温度は $kT\sim3.8$ keV で一定で、それより内側では温度が下がり始め、single-phase モデルを仮定すると半径 12 kpc で $kT\sim2$ keV にまで下がることが分かった。中心から 12 kpc 以内の狭い範囲では、これとは別に $kT\sim0.7$ keV のプラズマ放射が見つかったが、その 0.5–10 keV での光度は 3.9×10^{41} erg s^{-1} で、銀河団全体の 1 % 程度以下と小さいので以下では考えない。半径が 12–72 kpc の領域のスペクトルは、single-phase モデルに従って「プラズマ温度は ~3.8 keV から ~2.0 keV に連続的に下がっている」と考えても、あるいは two-phase モデルに従って「$kT\sim3.8$ keV と $kT\sim2.0$ keV の 2 成分が共存している」と考えても、観測データはほぼ同じ程度に良く再現され、一見して両者の区別は難しかった。そこで、個々の薄い 3 次元シェルからのスペクトルを再び足し合わせて広い 3 次元領域からのスペクトルを求め、統計を上げて比べたところ、two-phase モデルの方がより観測に合うことが明らかになった。さらに私は、中心部 (12–60 kpc) での 3 次元的なスペクトルから、single-phase で予想されるよりも温度の高い放射を検出することに成功した。これを表したのが図 1 であり、12–60 kpc での射影効果を取り除いたスペクトル（左）と、single-phase モデルからのシ

ミュレーション（右）を比べている。仮に両者に2成分プラズマ放射モデルをあてはめると、single-phase シミュレーションではこの領域に含まれるべき温度 ($kT = 2.1 \sim 3.3$ keV) によく一致する2つの温度 (2.34 keV と 3.28 keV) が得られるが、データからはそれよりも高温の成分 ($kT \sim 4$ keV) が見られ、中心部にも高温プラズマが存在することを表している。逆に、低温成分が外側の領域にも存在していることも示され、two-phase の描像の方が中心部のプラズマの状態をより正しく記述することが結論された。それぞれの 72 kpc 以内での光度 (0.5–10 keV) は、高温成分 ($kT \sim 3.8$ keV) が 2.8×10^{43} erg s^{-1}、低温成分 ($kT \sim 1.7$–2.0 keV) が 6.9×10^{42} erg s^{-1} であった。

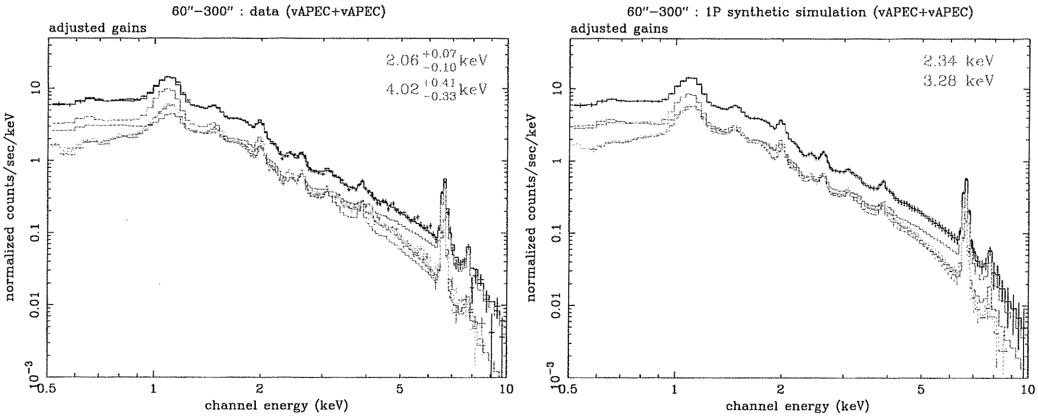

図 1: 半径 12–60 kpc の領域で射影の効果を取り除いたケンタウルス銀河団のスペクトル（左）と、single-phase モデルからのシミュレーション（右）。黒は EPIC-PN 検出器、赤と緑は EPIC-MOS 検出器のスペクトルを表す。2温度プラズマからの放射モデルでフィットした結果を示しており、青とピンクはそれぞれの成分の寄与を表している。

エネルギー分解能に特化した RGS 検出器では、鉄の L 輝線の構造を分解することで、温度の低いプラズマからの放射を精度良く評価することができる。その結果、ケンタウルス銀河団の中心部からの放射は、EPIC 検出器の測定結果と同様に、$kT \sim 0.8$ keV と ~ 1.7 keV の2温度でよく記述されることが分かった。さらに、他の温度の成分がどのくらい混ざっているかを検証したところ、図2に示すように、温度が 0.5 keV よりも低いプラズマからの放射は、有意には存在しないことが明らかとなった。また $kT \sim 1.7$ keV の成分を基準に考えると、クーリングフローの予言（黒線）より 0.5 keV 以下の低温成分の存在量の上限（赤）が一桁も低いことが示された。同じくクーリングフローが予言する冷たいガスによる超過吸収の存在も、EPIC 検出器のスペクトルからは有意に見られなかった。この領域では、プラズマ中の鉄や硅素の含有量が中心部で増加する一方で、酸素の分布はほぼ一様であることもわかり、この違いがこれまでに報告された見せかけの超過吸収の一因であるとの示唆を得た。以上のことから、ケンタウルス銀河団の中に見られる強い低温 (~ 2 keV) の放射成分は、クーリングフローの結果とは考えられないことが結論される。

本論文では、ケンタウルス銀河団の他に、やはり代表的な “クーリングフロー” 銀河団として知られる Abell 1795 銀河団のスペクトル解析を行ない、two-phase モデルで矛盾なく説明ができることを確認した。このように私は2つの銀河団を用い、「あすか」衛星が示唆した事柄を、明確に立証することに成功した。

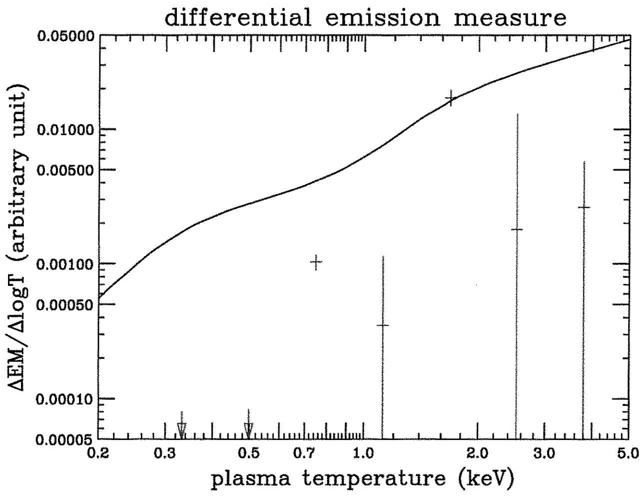

図 2: RGS 検出器のスペクトル解析から得られた、各温度のプラズマの emission measure ($\propto$ 密度 $^2\times$ 体積) を赤の縦線で示している。実線はクーリングフローが予言する分布（縦方向のスケールは任意)。

3　銀河団プラズマの物理状態に対する考察

銀河団の中心部では、温度の異なる 2 相のプラズマが存在していることが示され、一方で、クーリングフローが起きていないことから、何らかの加熱機構の存在が要請される。2 成分が混ざり合わないで安定に共存するためには、磁場によって両相が熱的および空間的に分離されていると解釈するのが自然である。そこでこの描像に基づき、そのような環境のもとで有効に機能するような加熱源および加熱機構について考察を行なった。銀河団外縁部からの熱伝導、あるいは中心銀河の活動銀河核からのエネルギー供給といった機構は、プラズマが two-phase になっていることも考慮すると、観測事項を充分に説明できないと考えられる。一方で牧島ら (2001) が提唱したように、磁気流体的な効果によってメンバー銀河の運動エネルギーがプラズマの熱エネルギーへと散逸するという機構ならば、妥当なエネルギー転換効率を仮定することで充分な加熱が可能であり、さらに加熱と冷却のバランスをとる機構も働きうるため、この問題の答となる可能性を持つと考えられる。

以上のように本研究では、世界最高の性能を持つ X 線装置により 2 つの代表的な銀河団のプラズマを診断した結果、銀河の運動が宇宙最大規模の高温プラズマを加熱し、放射冷却を阻止しているという、日本独自の描像を一段と強めることに成功した。