

論文内容の要旨

論文題目： Elongated X-ray Emission from Galaxies in Clusters

(銀河団に属する銀河からの延伸した X 線放射)

氏名 飯塚 亮

1 銀河団に属する銀河

X線観測は銀河団に付随する高温ガスを発見し、それが宇宙全体のバリオンの大部分を占めていること、つまり大量の重元素が銀河団にとじ込められていることを示した。この大量の重元素はどこからやってきたのか。重元素は星の核融合でしか生まれられないため、星の一生の最後に起こる超新星爆発により重元素は銀河に放出され、銀河から銀河団へ何らかの形で供給され、銀河団全体に広がる。超新星による重元素生成の理論モデルから、銀河団中の重元素の起源を解明する試みが今までなされてきた。しかし、そのモデルでは到底説明できない大量の重元素が、どのように銀河から銀河団へ供給され、銀河団全体へ広がっていくのか遅々として分かっていない。

このように、銀河は我々の宇宙の構造や化学進化を考える上で最も根本的な要素のひとつである。銀河内では星と星間物質の間の物質循環により重元素を生成・蓄積する。銀河団空間に重元素が存在していることは、少なくともその一部は銀河から銀河の外に放出されていることを示している。この現象には、温度数百万度の高温物質が、銀河内の物質循環と銀河団空間への物質の供給の一部を担っていると考えられているが、そのメカニズムには、様々な提案がされている。メンバー銀河同士の相互作用によるもの、超新星が継続的に爆発することによって発生する銀河風によるもの、銀河と銀河団ガスの相互作用によるものなどがある。

どのメカニズムがどのように影響を及ぼすか、現在も理論的、観測的双方から、様々な研究が進められている。銀河や銀河団の高温物質の典型的な温度は、 $10^6 - 10^8$ K であるので、その直接的観測には、X線を使うことが最も適当である。しかし、物質放出の現場を直接観測することは容易ではない。これまでは、観測の感度の不定性、とくに銀河団自身の放射によってメンバー銀河のみの成分を抽出することが困難であったため、このような研究は、近傍にあり銀河自身が明るいものに限られてきた。したがって、銀河一般からのガス供給は未知であり、その特徴を観測的、かつ系統的に明らかにできれば、宇宙の構造および化学進化における銀河の役割についての理解を大きく深めることができる。

これまでも ROSAT 衛星や ASCA 衛星によって様々な研究は行われているが、X線分光能力や空間分解能が十分でなく、観測上はっきりしたことは言えていない。これに対して、チャンドラ衛星は、高い空間分解能とそれを生かした点状のX線源に対する高い検出感度と 200 eV 程度の X 線エネルギー分解能を持つ。これにより、個々のX線源の寄与の影響は無視できる程度に小さくすることができ、かつ、暗く広がったX線も検出できると考えられる。また、放射温度や重元素量も中程度の感度で決定することが可能である。

我々はこの点に注目し、最も近傍の銀河団の1つである、おとめ座銀河団に属する銀河を解析したところ、一方向に延伸したX線放射が多数の銀河から発見された。我々は、近年様々な分野で注目されている、動圧によるはざとり効果が直接的に観測されたものと考えた。動圧によるはざとりは、銀河が銀河団ガス中を超音速で運動した際に起こるもので、理論的には彗星のように尾を引いた特徴的な構造を持つことが示唆されている。我々は、動圧によるはざとり効果に注目して系統的に解析をし、動圧がどのように銀河、および銀河団へ影響を与えるか検証した。さらに、おとめ座銀河とは環境が違う、他の銀河団に属するメンバー銀河にも注目し、動圧が銀河へ与える環境効果も調べた。

2 NGC 4388 から見つかった超巨大 X 線ガス

我々は、チャンドラ衛星による NGC 4388 銀河のデータから、北東方向に 30 kpc にも広がる X 線ガスを発見した。NGC 4388 はこれまでも、中心に存在する活動銀河核によって照らされて光っている 3 kpc 程度の広がりは今まで知られているが、このように大きく広がった構造が X 線で見つかったのは初めてである。

実際の解析としては、チャンドラ衛星による NGC 4388 の観測の高分解能イメージから点源を取り除き、標準バックグラウンドデータを精度良く差し引いたところ、広がった X 線放射が見られた。さらに、広がった放射を際立たせるために、2 種類のスムージングをかけた。最後に、広がった天体の優位性を調べるために、おとめ座銀河団の X 線放射と標準バックグラウンドの双方を考慮して、広がった X 線のみの優位性を調べた。図 1(左図)にあるような 4 つの領域で、 3σ 以上の優位性で検出した。すばる望遠鏡の画像からも 30 kpc にもわたって広がる $H\alpha$ ガスが発見されているが、それとチャンドラ衛星の画像を重ねると、ほとんど一致しているが、若干ピークがずれていることが分かった (図 1 右図参照)。

また、広がった 4 つの領域についてスペクトル解析を行った。その際、広がった X 線放射のみのスペクトルを作るために、おとめ座銀河団の放射も同時にバックグラウンドとして引いた。統計が乏しいため、スペクトルからは中心核によって照らされて光っているものか、自分自身で熱的に光っているものかは区別することはできなかった。しかし、銀河核によって照らされて光っているとすると、広がった X 線放射の明るさを説明するためには、 $\sim 10^6$ 倍も中心核の明るさが足りないことが分かった。これは中心核の時間変動を考慮しても考えにくいことから、広がった X 線放射は熱的起源である可能性が高い。それぞれの領域から物理量を求めると、どれも温度が ~ 0.5 keV と銀河本体のガスと同程度であることが分かった。密度は $5 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$ となり、おとめ座銀河団の放射よりも、4 倍程度冷たく、10 倍程度濃いガスであることが分かった。また、その質量は 10^8 太陽質量と、 $H\alpha$ で見つかったガスよりも 100 倍も大きいことが分かった。

さらに、南西方向の円盤の一部が、 $H\alpha$ 画像と比べると、中心方向に圧縮されているような形が見られる。我々は、これこそ銀河が銀河団ガスと相互作用した最前線である。以上から、北東方向に 30 kpc 広がった X 線放射が衝撃波面とはほぼ 180° 反対側に発生することは動圧によるはざとり効果から自然に解釈でき、理論的な描像ともよく一致する。つまり、我々は、NGC 4388 から動圧によってはざとられた X 線放射を直接的に検出した可能性が高い。

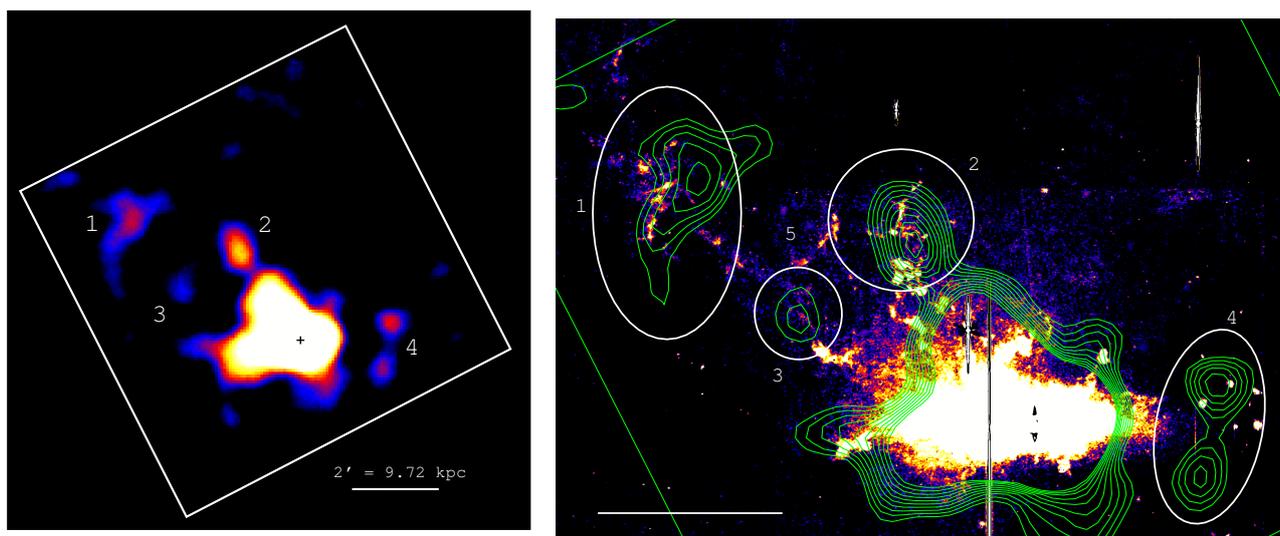


図 1: チャンドラ衛星による NGC 4388 の X 線画像 — (左図) X 線源を除去し、スムーシングした X 線画像 (0.3 – 2.5 keV)。 (右図) すばる望遠鏡の H α 画像に左図の X 線画像のコントアを重ねたもの。

3 おとめ座銀河団との相互作用

さらに我々は、動圧によるはぎとりが銀河団に属する銀河では一般的なのかどうかを調べるために、おとめ座銀河団のメンバー銀河について、チャンドラ衛星の公開データのすべて、27 天体 (渦巻銀河 17, 楕円銀河 10) を解析した。そのうち、NGC 4388 を含む 10 天体から延伸した構造や、圧縮された構造が発見された。我々はこの 10 天体 (渦巻銀河 2, 楕円銀河 8) について、NGC 4388 と同様の手法で詳細に画像解析を行った。

まず、延伸した X 線放射と衝撃波面が、銀河を中心としたとき、どの位置関係にあるかを調べた。中心角が 60° の扇形を方位角方向に回して、それぞれの表面輝度から X 線放射の広がり調べたところ、統計の良い 6 つの銀河で、延伸した X 線放射は圧縮されたような構造から 180° 反対側に位置することが分かった。これは銀河団ガスとの相互作用し、動圧によってこのような描像になるものと解釈するのが自然である。

また、延伸した X 線放射についてスペクトル解析したところ、温度は 0.3 – 1.0 keV と、NGC 4388 と同様に、銀河本体のガスと同程度であることが分かった。また、その圧力はおとめ座銀河団よりも数倍高いことが分かり、 $10^7 - 10^8$ 年程度で 10^8 太陽質量ものガスが銀河団空間へ拡散していくことが分かった。このように動圧によるはぎとり効果がメンバー銀河の半分程度から見られることが分かった。

4 環境効果

最後に、我々は、おとめ座銀河団よりも、温度や密度が違う環境下に置かれたメンバー銀河にはどのような影響を及ぼすか調べた。チャンドラ衛星のすべての銀河団の公開データ (200 天体程度) の画像から、銀河団放射の中にもはっきりと銀河成分が見えるものをサンプルとして選んだ。その結果、かみのけ座銀河団、ペルセウス銀河団、A1060, A1367, HCG42 など、1 – 10 keV にわたる温度のガスを持つ 12 個の銀河団から、25 天体ものメンバー銀河 (円盤銀河 7, 楕円銀河 18) を抽出した。しかし、おとめ座銀河団のように近傍にはないので、延伸したような構造は明確には見られなかった。

それぞれのメンバー銀河における環境効果を調べるために、メンバー銀河の周りの外圧 $n_{e,ICM}kT_{ICM}$

($n_{e,ICM}, kT_{ICM}$ はそれぞれメンバー銀河の周りの銀河団ガスの密度と温度を表す) を指標に、メンバー銀河のX線放射のサイズ (R_X)、明るさ (L_X)、質量 (M_X) について調べた。ただし、メンバー銀河それぞれの個性を考慮するために、 $R_X/R_e, L_X/L_B, M_X/L_B$ と規格化することにする。 R_e, L_B はそれぞれ、Bバンドで測定した有効半径と明るさを表す (RC3 カタログを参照)。また、渦巻銀河はばらつきが大きいので、今回のサンプルから除き、楕円銀河のみ議論を行う。例として、 R_e/R_X と M_X/L_B の環境効果による影響を図 2 に示す。4 桁にもわたる外圧の違いをサンプリングすることができている。

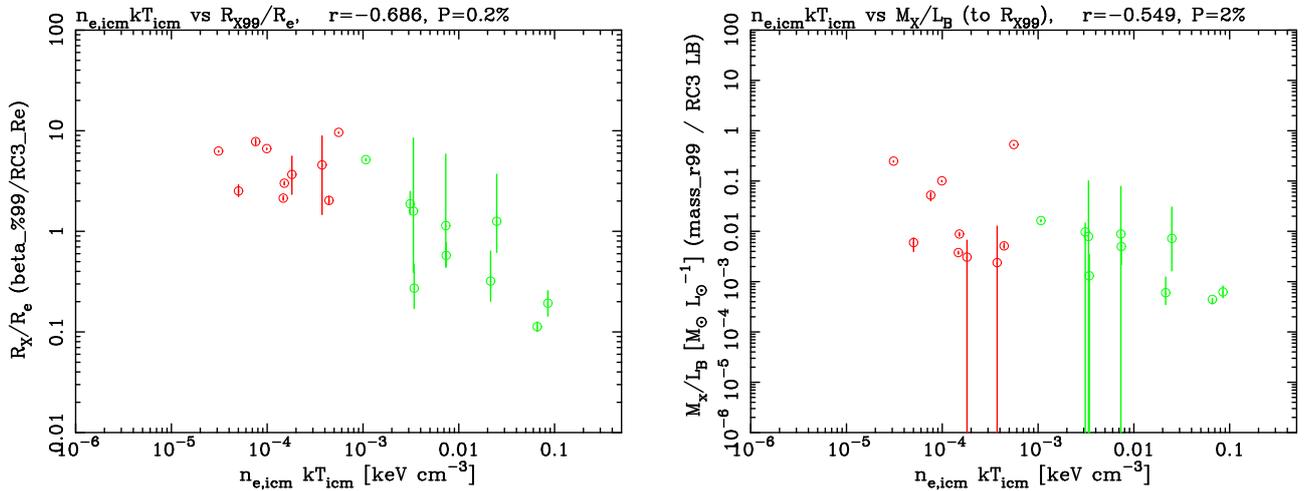


図 2: $n_{e,ICM}kT_{ICM}$ を指標とした時の銀河団ガスがメンバー銀河に与える環境効果 — (左図) 可視光の有効半径 (R_e) で規格化したときのX線ガスのサイズ (R_X)。 (右図) 可視光の明るさ L_B で規格化したときのX線ガスの質量 (M_X)。左図のデータ点が少ないのは、RC3 カタログに R_e 値が掲載されていないことによる。

図 2 によると、外圧が上がるにつれて、 R_X/R_e は 2 桁程度下がる傾向が見られる。そこで、外圧と圧力平衡になるようにメンバー銀河が圧縮されているとする作業仮説を立てた。この場合、X線ガスの密度が上がるため、明るさは上がり、質量は保存すると予想される。しかし、図 2 のように、観測結果は外圧が上がるにつれて質量、明るさも下がっているという矛盾するものとなった。外圧により銀河が圧縮されただけでなく、さらに周りの質量が剥ぎ取られたとしか考えられない。 kT_{ICM} は、そのメンバー銀河の速度分散 σ^2 に比例するので、はぎとりの原因は動圧であると考えられる。

銀河は銀河団内に存在する限り、銀河誕生以降その動圧によるはぎとりを受け続ける。そこで、同じく連続的に鉄元素を生成し続ける Type Ia 超新星爆発が、銀河団ガスへと供給される際、動圧のはぎとりがその輸送を担うのではないかと考え、考察を行なった。まず、銀河誕生以来現在までに星 (Type Ia 超新星爆発や星風) が銀河に供給した量が星の総質量に比例すると仮定して求めたところ、現在までに Virgo で六割ほど、Coma で九割以上のガスが銀河から失われ、銀河団へ供給されたとの示唆を得た。一方数例であるが、ひしゃげた銀河の延伸した部分から直接質量供給率を見積もれた。銀河がいままで失ったガスの質量を説明するのに、質量供給率が足りるか検証したところ、宇宙年齢程度の間、動圧はぎとりを受け続ければ説明できることがわかった。動圧はぎとりが星で作られた鉄元素は一旦銀河ガスへ供給されるが、その銀河ガスから銀河団へ供給する手段として主要な役割を果たしている可能性は否定できないことになる。

我々は、銀河団に属する銀河の解析を系統的に行い、その結果、動圧によるはぎとり効果が、銀河の形態に大きな影響を与えることが分かった。さらに銀河団ガスへの重元素供給のプロセスとして、無視できない可能性があることがわかった。