

すざく衛星によるケンタウルス座銀河団の重元素分布の決定

阿部 雄介 (東京理科大学大学院 理学研究科)

Abstract

すざく衛星によって観測されたデータを用いて、ケンタウルス座銀河団の約 0.48 ビリアル半径まで銀河団ガス中の元素分布を調べた。ケンタウルス座銀河団を 8 つの円環領域に区切って各元素の量の半径分布を描くと、0.1 ビリアル半径から中心に向かってケイ素、硫黄、アルゴン、カルシウム、鉄の元素の量は増加していて、酸素、マグネシウムは一定の値をとっている。0.1 ビリアル半径より外側の領域の元素の分布は、鉄を除いて 0.5 太陽組成に近づいていく傾向があった。各元素量と Fe の元素量との比をとり、超新星爆発の理論モデルと比較すると、0.04 ビリアル半径より内側では軽い星の寄与が大きく、0.04 ビリアル半径より外側では、太陽組成に近いという事が明らかとなった。

銀河団ガスに含まれる鉄質量と銀河光度の比から、現在の銀河団内の銀河の分布を調べ、他の銀河団との比較を行った。その結果、他の銀河団同様、鉄質量-銀河光度比は 0.2 ビリアル半径で最大となり外側に向かって連れて、なだらかになり、誤差の範囲で一定になった。このことから、ケンタウルス座銀河団の銀河の分布は、銀河団ガスに比べて、相対的に中心に集まってきている事がわかる。また、現在の超新星爆発発生率で銀河団が宇宙年齢をかけて鉄を合成してきたと仮定すると、解析結果の鉄質量に満たなかった。これは、過去に置ける超新星爆発発生率が高かったことを示唆している。

1 はじめに

我々の身の周りには鉄、酸素などの元素は恒星内部で合成され、恒星の超新星爆発によって宇宙空間にばらまかれ、銀河内だけでなく銀河外にまで広がっている。重力で束縛された宇宙最大の系である銀河団にはこれまで合成された元素が閉じ込められていると考えられているため、銀河団ガスの元素分布を調べることは宇宙の元素合成史を探る手がかりになっている。

銀河が数百から数千個集まったものが銀河団であり、その大きさは直径 10 Mpc で、質量は $10^{14} M_{\odot}$ (太陽質量) $\sim 10^{15} M_{\odot}$ である。銀河団は、質量の寄与の大きい順に、ダークマター、銀河団ガス、星という三つの要素でなりたっている。このうち銀河団ガスは高温のガスで、銀河の数倍の質量をしめており、約 7 割が水素、約 3 割がヘリウム、わずかな重元素で構成されている。

銀河団ガスは希薄なプラズマであり、そこから放射される X 線のスペクトルは熱制動放射と重元素からの輝線の組み合わせからなる。熱制動放射は電離した銀河団ガスによって電子の軌道が曲げられるこ

とによって連続な X 線放射をするものである。重元素からの輝線は電子のエネルギー準位間の遷移によって元素ごとに異なる波長の X 線を放射するものである。

水素、ヘリウム、リチウムは合成されるが、炭素より重い元素である重元素は合成されない。炭素、窒素、酸素などの重元素は星の内部で合成され、超新星爆発によって宇宙空間にばらまかれる。また、爆発時のエネルギーによっても新たな元素が合成される。超新星の光度の極大期に H のスペクトル線が見えないものを I 型といい、さらにケイ素のスペクトル線が見えないものを Ia 型と呼ぶ。水素のスペクトル線が見えるものを II 型と呼ぶ。Ia 型超新星爆発で合成される元素は主にケイ素、硫黄、鉄などで、II 型超新星爆発は酸素、マグネシウム、鉄などの元素が合成される。本研究ではハッブル定数として $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ を用いた。ビリアル半径は銀河団の平均密度が宇宙の臨界密度の 180 倍となる半径のことで、ケンタウルス座銀河団において 1 ビリアル半径 ($= 1.95 h_{100}^{-1} \sqrt{\langle kT \rangle} / 10 \text{ keV}$) (Markevitch et al. 1998) は 1.74 Mpc ($\langle kT \rangle = 3.88 \text{ keV}$) (Furusako et

al. 2001) である。ケンタウルス座銀河団までの距離は 44.4 Mpc である。元素分布は太陽の元素組成 (Lodders et al. 2003) を基準にしており、以後 solar を用い、水素を 1 としたときの元素個数比をアバダンスと呼ぶ。誤差は全て 90 % の統計誤差を引用する。

2 観測、解析方法

2.1 観測

ケンタウルス座銀河団のすざく衛星による観測は 2005 年 12 月に 3 回、2007 年 12 月に 1 回、2012 年 2 月に 1 回行われた。すざく衛星は日本で 5 番目の X 線天文衛星で、エネルギー分解能にすぐれ、低く安定したバックグラウンドが特徴である。CENTAURUS_CLUSTER は cD 銀河 NGC4696 を中心として観測された。Sakuma et al. 2011 では、ケンタウルス座銀河団の X 線強度中心から 0.17 ビリアル半径までの範囲で重元素量が調べられている。本研究は、CENCL.OFFSET2 よりさらに北に位置する CENTAURUS_CLUSTER_N と中心から CEN45 方向へ、さらに遠くにある銀河の観測 ESO_323-G032 を用いて解析を行っている。今回使用しているデータを用いて、0.48 ビリアル半径までの元素分布を調べた。解析には 4 つの X 線検出器 (XIS0、1、2、3) のデータを用い、XIS1 は背面照射型で、XIS0、2、3 は前面照射型である。しかし、2006 年 11 月以降の XIS2 は使えなくなってしまったので、CEN45、CENTAURUS_CLUSTER_N、ESO_323-G032 は XIS0、1、3 のデータを用いた。図 1 に 0.5-7.0keV における XIS3 の X 線画像を示す。

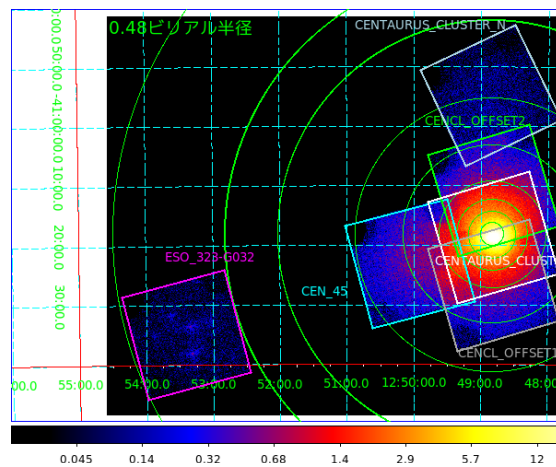


図 1: ケンタウルス座銀河団の XIS3 による X 線画像。エネルギー帯域は 0.5-7.0keV である。1 つの観測の視野は $17.8' \times 17.8'$ で、四角はそれぞれの観測を示す。円環のように領域をわけて解析を行った。

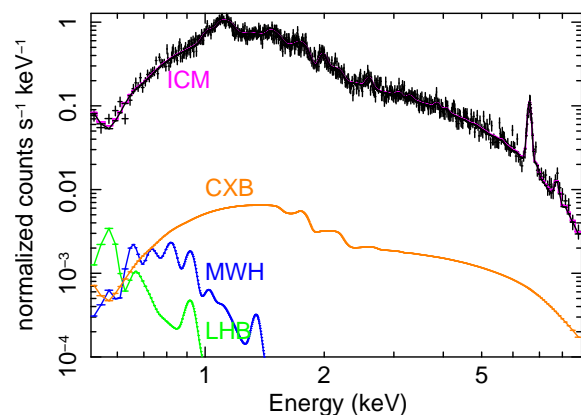


図 2: CENTAURUS_CLUSTER の XIS3 の 0.015 力学半径から 0.03 力学半径の円環領域におけるスペクトル図。エネルギー帯域は 0.5-9.0 keV。マゼンタ: 銀河団からの放射 (ICM)、オレンジ: 宇宙 X 線背景放射 (CXB)、青: 天の川銀河系からの放射 (MWH)、緑: 太陽系を覆う超新星残骸からの放射 (LHB)

2.2 解析方法

検出器に入射する X 線は銀河団ガスからの放射 (ICM) だけでなく、宇宙 X 線背景放射 (CXB)、天の川銀河からの放射 (MWH)、太陽系を覆う超新星残骸からの放射 (LHB) があるとして、スペクトルフィットを行った。図 2 は CENTAURUS_CLUSTER のスペクトルフィットの一部である。

3 解析結果

スペクトルフィットから得られた温度の半径分布 (図 3)、ケイ素、硫黄、アルゴン、カルシウム、鉄のアバダンスの半径分布 (図 4 上段)、酸素、マグネシウムのアバダンス (図 4 下段) の半径分布を示す。ケイ素、硫黄、アルゴン、カルシウム、鉄のアバダンスは 0.04 ビリアル半径から中心に向かって増加していて、酸素、マグネシウムアバダンスは一定の値をとっている。0.1 ビリアル半径より外側

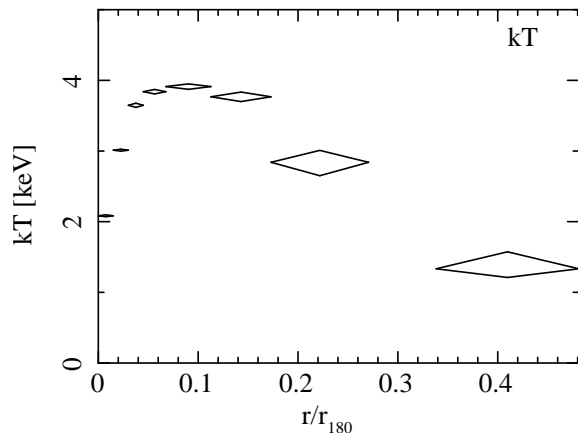


図 3: 温度の半径分布。中心で温度が下がっているのは、銀河団ガスの密度が中心部が高いために、多量の X 線放射をしてエネルギーを失っているからである。

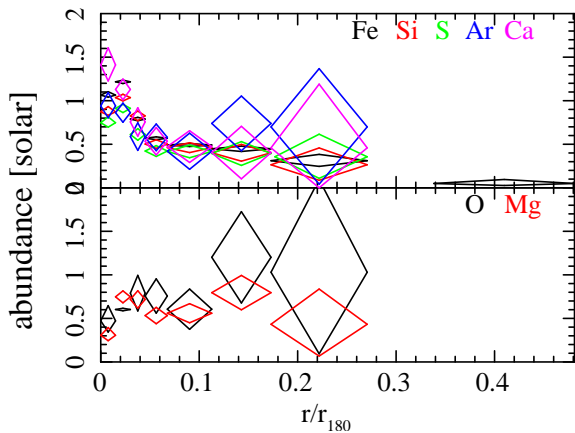


図 4: 各元素アバダンス半径分布。上段 (黒: 鉄、赤: ケイ素、緑: 硫黄、青: カルシウム)、下段 (黒: 酸素、赤: マグネシウム)

では各元素分布は、鉄を除いて 0.5 solar に近づいていく傾向があった。

4 議論

4.1 鉄アバダンス比

ケンタウルス座銀河団の鉄アバダンスと他元素とのアバダンス比を 3 つの領域 (r を銀河団中心からの距離として、 $r < 0.04$ ビリアル半径、 0.04 ビリアル半径 $< r < 0.11$ ビリアル半径、 0.11 ビリアル半径 $< r$) に分け、加重平均した値を算出すると以下の図 5 のような結果を得られる。縦軸は鉄アバダンス比

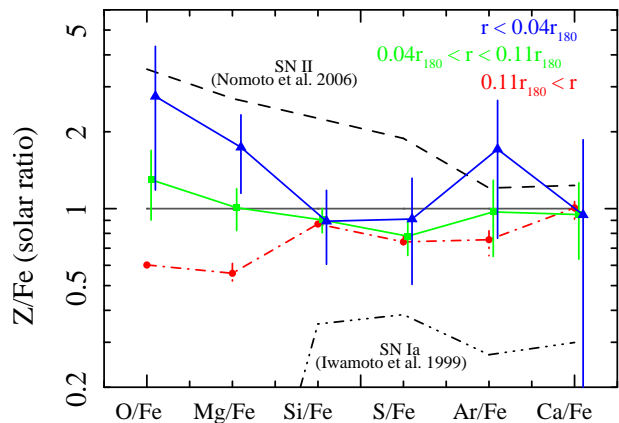


図 5: 各元素のアバダンスと鉄アバダンス比をとり、プロットした図。黒の破線は II 型超新星爆発 (Nomoto et al. 2006) で生成される Z/Fe 、黒の三点鎖線は Ia 型超新星爆発 (Iwamoto et al. 1999) で生成される Z/Fe の理論値を示す。灰の実線は太陽組成、青、緑、赤の線は円環領域 (中心からの距離を r として、それぞれ $r < 0.04 r_{180}$ 、 $0.04 r_{180} < r < 0.11 r_{180}$ 、 $0.11 r_{180} < r$) 内のケンタウルス座銀河団の Z/Fe を表している。

(太陽組成比)、横軸を各元素にとっている。図の超新星爆発のモデルは銀河団内の超新星爆発がすべて Ia 型 (Iwamoto et al. 1999) 及び II 型 (Nomoto et al. 2006) と仮定したときに得られる鉄アバダンス比を示す。ケンタウルス座銀河団は Ia、II 型超新星爆発の足し合わせでできていて、中心からの距離によって足し合わせの比率が異なっていることが分かる。0.04 ビリアル半径より内側の領域では Ia 型超新星爆発の寄与が大きく、0.04 ビリアル半径から 0.11 ビリアル半径の間では太陽組成に近くなり、0.11 ビリアル半径より外側では、内側に比べ II 型超新星爆発の寄与が相対的に増加している。

4.2 鉄質量と銀河光度

銀河団ガスの鉄質量 (M_{Fe}) と元素を供給する銀河 (恒星) の光度 (L_K) との比をとることで、銀河団の鉄元素と銀河の拡散史を調べることができる。近赤外線における楕円銀河の光度は銀河の質量とよい相関 (質量/光度 ~ 1) があることがわかっているので、光度を測定することで、銀河 (恒星) の質量が求まる。図 6 (上) はある半径以内でのガス質量 (黒線)、

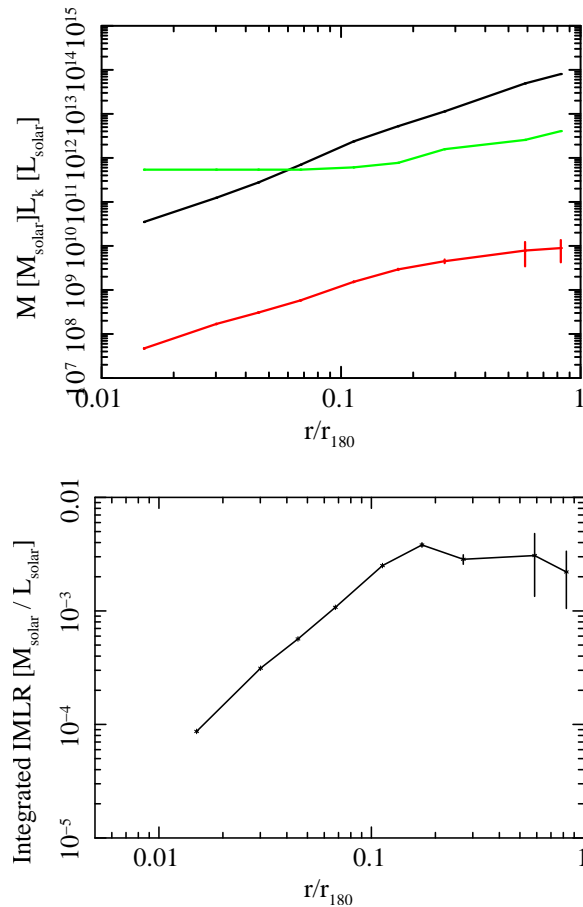


図 6: 上段:ある半径以内のガス質量(黒)、鉄質量(赤)、 L_K (緑)を足し合わせた図。下段:ある半径以内の鉄質量銀河光度比をプロットした図。0.2 ビリアル半径でピークを向かえ、それより外側ではなだらかになり、誤差の範囲で一定となった。

M_{Fe} (赤色)、 L_K (緑色)をまとめた図で、図 6(下)はケンタウルス座銀河団の鉄質量銀河光度比をプロットした図である。図 6(下)は、全ての銀河団が、中心から外側に向かうに連れて増加し、0.2 ビリアル半径より外側ではなだらかになり、誤差の範囲で一定となった。ていることを示している。仮に、銀河から銀河団ガスに供給された鉄が銀河の周りに存在しているならば、鉄の分布と銀河光度の分布が変わらないので、鉄質量銀河光度比は中心から外に向けて一定の値になるはずである。これは銀河団の進化過程で、銀河が銀河団ガスに鉄を供給した場所よりも相対的に銀河団中心に移動してきたことにより、銀河が銀河団ガスに比べて相対的に中心に集まった分

布ができたということを示唆している。また、図 6(下)の青破線は現在の Ia 型超新星爆発発生率 \times 一回の超新星爆発で生成される鉄の量 \times 宇宙年齢を仮定して計算したときに得られる値で、ケンタウルス座銀河団の外側領域で解析結果と 0.48 ビリアル半径で 70% 程度の差が生じている。これは現在の Ia 型超新星爆発発生率では現在の銀河団ガスの鉄の量まで生成することができない、すなわち、過去の Ia 型超新星爆発発生率が高かったということを示唆しているのである。

5 まとめ

ケンタウルス座銀河団の中心から 0.48 ビリアル半径までの元素分布を調べた。各元素アバundanceと鉄アバundanceとの比から Ia 型、II 型超新星爆発比率が中心からの距離によって変化することを確認した。鉄質量と銀河光度との比をとると、銀河団の中心から外側に向かうに連れて増加し、誤差の範囲で一定となった。これは銀河団形成の最中に銀河が銀河団の中心に落ちてきたことの証拠となる。また、2013 年 2 月に新たな観測データが公開された(銀河団中心から 0.94 ビリアル半径まで。)のでそれらを解析することでケンタウルス座銀河団のビリアル半径に迫る結果が得られるであろう。

Reference

- Iwamoto, K., Brachwitz, F., Nomoto, K., et al. 1999, , 125, 439
- Lodders, K. 2003, , 591, 1220
- Matsushita, K., Böhringer, H., Takahashi, I., & Ikebe, Y. 2007, , 462, 953
- Nomoto, K., Tominaga, N., Umeda, H., Kobayashi, C., & Maeda, K. 2006, Nuclear Physics A, 777, 424
- Ota, N., Fukazawa, Y., Fabian, A. C., et al. 2007, , 59, 351
- Sakuma, E., Ota, N., Sato, K., Sato, T., & Matsushita, K. 2011, , 63, 979