

# 「すざく」衛星がみた銀河団の重元素分布

松下 恭子

〈東京理科大学理学部 〒162-8601 東京都新宿区神楽坂 1-3〉

e-mail: matusita@rs.kagu.tus.ac.jp



銀河団には、大量の重元素が含まれている。重元素は銀河の星によって合成されるので、その起源を探ることは、銀河団の中の銀河の歴史を探ることでもある。「すざく」衛星によって銀河団ガスの酸素やマグネシウムなど、II型超新星によって合成される元素の量を調べるのが可能になった。ここでは、「すざく」衛星で観測された小銀河団、ろ座銀河団の観測結果を中心に、「すざく」衛星の結果を紹介する。

## 1. 重元素と宇宙の歴史

私たちの体を作っている元素や地球を作っている元素はいったいどのようにして合成されたのでしょうか？酸素、鉄のようなわれわれの身の回りにある元素のほとんどは、超新星爆発によって合成され、宇宙空間にまき散らされたものです。超新星爆発は、主に、太陽よりもずっと重い恒星が寿命を迎えたときに起こすII型超新星爆発と白色矮星の連星系が起こすIa型超新星爆発に分かれます。超新星爆発の種類により、合成する重元素が違うので、宇宙にどのような元素がどの程度存在するのかがわかれば、今までにどのような超新星がどれだけ起こったのか、つまり、どのような星がどれだけ生まれて死んでいったのかの手がかりを得ることができるのです。

重元素のうち、最も重要な元素の一つは酸素です。われわれは、「すざく」衛星を用いて、宇宙における酸素の量を調べようとしています。そもそも、水素、ヘリウム以外の重元素のほぼ半分は酸素なので、宇宙の化学進化とはほぼ酸素の合成史と言えます。酸素は、主に巨星に進化した段階での核融合によって合成され、II型超新星により星間空間に供給されます。したがって、酸素の量は

過去に形成されたII型超新星を起こすような重い星の数を反映します。つまり、宇宙の酸素の量を調べるとは、重い星の歴史を調べることになるのです。

## 2. 銀河団ガスの重元素

銀河が数百個から数千個集まった天体が銀河団です。しかし、銀河は銀河団のごく一部にすぎません。銀河と銀河の間を数千万度もの高温のガスが埋め尽くしており、その質量は銀河の質量の数倍にもなります<sup>1)</sup>。この高温ガスを銀河団ガスと呼びます。さらに、銀河団には、銀河団ガスの数倍の質量の大量の暗黒物質が存在することがわかっています。銀河団では普通の物質（バリオン）のほとんどは、星ではなく、銀河団ガスとして存在しているのです。このような大量のガスがかつて銀河の中に存在したとは考えられません。つまり、銀河団ガスのほとんどは、一度も星にも銀河にもなったことのない宇宙の始まりのときそのままの原始ガスなのです。

驚くべきことに、この銀河団ガスに大量の鉄が含まれていることが、20年以上も前からわかっていました<sup>1)</sup>。その量は、銀河団の全銀河の星に含まれる鉄の質量に匹敵します<sup>2)</sup>。このような大量

の鉄を合成することは簡単ではありません。しかも、銀河の中で超新星により合成された鉄の数割が、新たに生まれる星に取り込まれるのでもなく、銀河内に星間ガスとしてとどまるのでもなく、銀河のポテンシャルから、銀河間空間へと脱出したことになります。しかし、鉄は、II型超新星によってもIa型超新星によっても合成されるため、鉄の量だけでは、その起源を知ることができませんでした。あすか衛星により、ケイ素の量が初めて系統的に調べられるようになりました<sup>3)</sup>。鉄はIa型超新星により多く合成され、ケイ素は、II型超新星により多く合成されると考えられており、鉄とケイ素の比をもとに、元素の起源がIa型超新星なのかII型超新星なのか議論されてきました。

XMM-Newton衛星により初めて、明るい銀河団や銀河群のごく中心部、cD銀河の領域ではガスに含まれる酸素の量を求めることができるようになりました。この領域では、cD銀河の星が死んで白色矮星になる前に放出した外層部のガスと最近起こったIa型超新星によって、重元素を含むガスが供給されます。観測の結果、酸素と鉄の比が太陽の値の半分以下であること、またケイ素と鉄の比は太陽と同程度であることが発見されました<sup>4),5)</sup>。この元素組成比を説明するためには、Ia型超新星はケイ素もかなり大量に合成しなければなりません。II型超新星による重元素の合成史を調べるためには、ほとんどがII型超新星によって合成される酸素、ネオン、マグネシウムの量を調べることが不可欠であることとなります。しかし、銀河団ガスに含まれる酸素やマグネシウムの量についてはほとんどわかっていませんでした。

### 3. 「すざく」衛星の能力

「すざく」により、銀河団全体の酸素やマグネシウムの量を求めることがようやく可能になってきました。「すざく」は、他のX線天文衛星に比べ、酸素輝線のエネルギーでエネルギー分解能が優れ

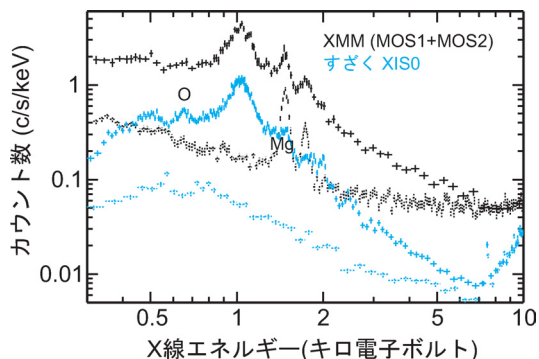


図1 「すざく」の裏面照射型 CCD で得られたる座銀河団のある領域の生の X 線スペクトル (青の実線) と明るい天体のない領域のスペクトル (青の点線). XMM-Newton 衛星搭載の CCD 検出器 MOS により得られた同じ領域のスペクトルは黒で表示.

ています。その結果、cD 銀河の領域より外の銀河団ガスの酸素の量を求めることができるようになりました。さらに、マグネシウムの輝線のエネルギーでバックグラウンドが低いという利点があります。マグネシウムの輝線の近くには検出器などに含まれるアルミニウムからの輝線が存在します。XMM-Newton 衛星の MOS 検出器では、図1のようにこのアルミニウムからの輝線が極めて強く、ひじょうに明るい少数の銀河団の中心部を除いては、マグネシウムの輝線を検出するのは不可能でした。それに比べ「すざく」では、銀河団全体のマグネシウムの輝線の強度を求めることができます。マグネシウムの輝線強度を求められるということは、銀河団の外縁領域の低輝度領域で特に重要です。というのは、われわれの銀河系にも数百万度ぐらいのプラズマが存在し、酸素の輝線を放射します。しかも、その強度は、天球上の場所によって違います。その結果、銀河団ガスの輝度が低くなると、われわれの銀河系起源の酸素の輝線と銀河団起源の酸素の輝線の分離が難しくなることがあります。そのときに、マグネシウムの輝線の強度がわかれば、II型超新星の重元素合成を調べることができます。

#### 4. 「すざく」衛星によるろ座銀河団の重元素分布

今回は、主に「すざく」により観測されたるろ座銀河団の酸素やマグネシウムの分布について紹介します<sup>6)</sup>。ろ座銀河団は、南天のろ座にある銀河団です。銀河団ガスの温度は1千数百万度と低く、最も小さい銀河団の一つです。図2は「すざく」で観測したろ座銀河団の画像です。中心の明るくなっているところが、cD銀河 NGC 1399、その南東のピークが楕円銀河 NGC 1404 です。

##### 4.1 観測結果

図3が「すざく」で観測したX線スペクトルです。cD銀河から遠く離れた銀河団ガスからも酸素、鉄、マグネシウム、ケイ素、硫黄からの輝線がくっきりと検出されています。図4は、求められた酸素、マグネシウム、ケイ素、硫黄、鉄の組成比の分布です。cD銀河周辺で組成比が増えているのは、cD銀河から現在も重元素が供給されていることを意味します。酸素と鉄の比は太陽の

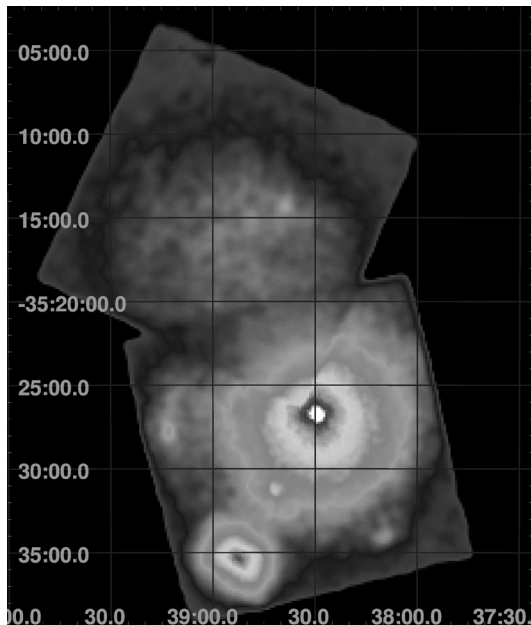


図2 「すざく」の CCD で観測したろ座銀河団の画像。

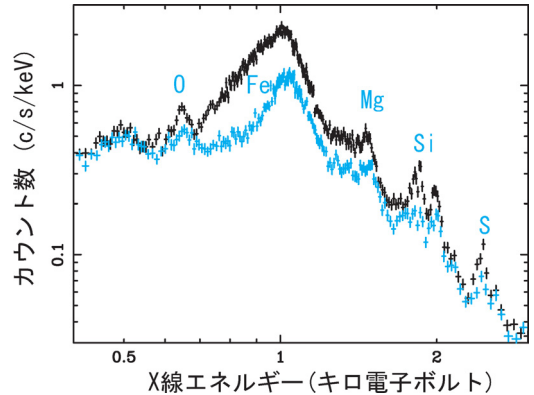


図3 「すざく」の裏面照射型 CCD で得られたろ座銀河団のバックグラウンドを差し引いた X線スペクトル。cD銀河周辺は黒、銀河団ガスの領域は青でプロットした。

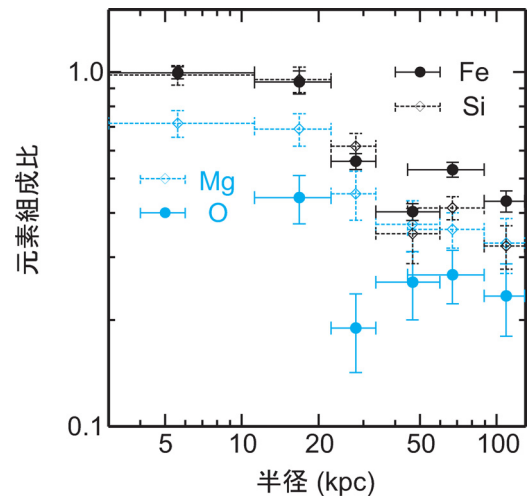


図4 ろ座銀河団の銀河団ガスの重元素の分布。横軸は中心にあるcD銀河からの距離（単位はkpc）。縦軸は元素の組成比（太陽組成を1とする）。

組成比の半分程度であるのに対し、ケイ素、鉄の比は太陽とほぼ同一です。cD銀河周辺でもcD銀河から離れた銀河団ガスでも、元素の組成比はあまりかわらないようにみえます。

##### 4.2 元素組成比と新しい太陽組成

「すざく」衛星により、ろ座銀河団のcD銀河 NGC 1399 の領域、銀河団ガス、楕円銀河 NGC

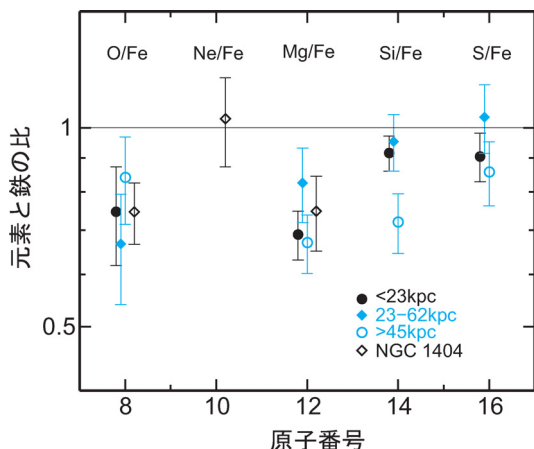


図5 ろ座銀河団の銀河団ガスと楕円銀河 NGC 1404 の重元素と鉄の比（太陽組成を1とする）。

1404 の酸素、ネオン、マグネシウム、鉄などの組成を求めることができました（図4, 5）。図5では23 kpc より内側が cD 銀河 NGC 1399 の領域に対応しています。「すざく」により孤立した楕円銀河 NGC 720 の元素組成比も求まりました<sup>7)</sup>。「すざく」衛星によって求められたこれらの元素組成比は、XMM-Newton 衛星によって求められた乙女座銀河団<sup>4)</sup>やケンタウルス座銀河団<sup>5)</sup>の cD 銀河領域の元素組成比によく似ています。この組成比を説明するために、われわれの銀河系に比べ、Ia 型超新星はケイ素を多く合成するのではないかと提案されていました。銀河団以外にも、恒星や銀河の X 線観測からは、酸素が太陽に比べ他の元素より低いという報告がありました。

近年、太陽の元素組成比がそもそも間違っていたのではないかと論文が発表されました<sup>8)</sup>。太陽表面からのスペクトルの新しいシミュレーションによると、太陽に含まれる炭素や酸素、ネオンの量がこれまで考えられていたよりも、1.6 倍も小さくなってしまうということでした。図4は実は、古い太陽組成比を使っています。図5は新しい太陽組成比を用いて、酸素、マグネシウム、ケイ素、硫黄の各元素と鉄の比を調べたもので

す。その結果ろ座銀河団の銀河団ガスの元素の組成比は、観測されたどの領域でも太陽とあまり変わりませんでした。つまり、銀河団中心部やろ座銀河団での重元素の起源は、われわれの太陽系、われわれの銀河系と大きな違いはないことになります。われわれの銀河系の星の観測から II 型超新星は酸素やマグネシウムと鉄の比が太陽の数倍とされています。よって、ろ座銀河団では cD 銀河から出てきたガスも銀河団ガスの領域でも鉄の多くは Ia 型超新星によって合成されたことになります。そして、この Ia 型超新星は、特にケイ素を多く合成する必要はなく、太陽の重元素を作った Ia 型超新星と同じぐらいケイ素を合成すれば十分ということになります。銀河団などの X 線観測で得られた酸素が少なかったのではなく、実は太陽に含まれていた酸素がそもそも今までに考えられていたよりも少なかったということなのかもしれません。

### 4.3 cD 銀河周辺部と楕円銀河の銀河間ガスの重元素組成

銀河団には楕円銀河が多いことが知られています。そして、銀河団ガスの重元素の起源は、主に楕円銀河と言われています<sup>9)</sup>。楕円銀河を X 線で観測することは、現在の楕円銀河から銀河団への重元素供給を調べるだけでなく、楕円銀河形成時の重元素合成を調べることであります。銀河団の楕円銀河の星の年齢は古く、長く星形成をほとんど起こしていません。楕円銀河の星が白色矮星になるときに、星間空間に放出された星の外層部が星の運動で加熱されて X 線を放射しています。さらに、楕円銀河で最近起こった Ia 型超新星爆発の合成物を含んでいます。よって、X 線観測から高温ガスの重元素組成を求めることにより、楕円銀河の星の組成と Ia 型超新星爆発率を調べることができます。

早期型銀河の星の重元素量は可視光のスペクトルにより研究されていますが、観測的制限から銀河の中心部だけに限られています。しかも、星の

年齢や重元素の組成比などさまざまな仮定をもとにしています。一方、X線の観測からは、銀河全体の星に含まれるさまざまな重元素の組成比を求めることができます。

「すざく」衛星により、この楕円銀河やcD銀河から出てきたガスの重元素の組成比を求めることができました<sup>6),7)</sup>。その結果、鉄の組成は、太陽程度、そのうち多くがIa型超新星爆発で合成されたことになりました。鉄の組成から、現在の楕円銀河でのIa型超新星爆発率、つまり、現在の楕円銀河での鉄の生産率を推定できることになりました。この生産率に宇宙年齢を掛けても、巨大銀河団に含まれている鉄の量には1桁以上足りません。

酸素、マグネシウムはほぼすべてII型超新星で合成されます。つまり、楕円銀河の酸素やマグネシウムの組成比は、星から放出されたガスの組成比と一致、つまり楕円銀河の星の組成比と一致するはずですが、楕円銀河の星にどのぐらい重元素が含まれているかは、星が形成される前に、何世代の超新星爆発が起こって重元素が合成され、星を形成したガスに取り込まれたかという情報を反映します。つまり、楕円銀河の星の重元素量を調べるとは、楕円銀河の星の歴史を研究することなのです。

#### 4.4 ろ座銀河団の酸素、鉄質量と銀河光度比

銀河団ガスに含まれる重元素の質量と銀河の光度の比は、銀河による重元素合成を探る重要な指標となります。「あすか」衛星により、小銀河団や銀河群ガスの銀河光度あたりの鉄の質量は、巨大銀河団に比べ数倍から1桁以上小さいということがわかっていました<sup>10)</sup>。しかし、鉄の起源がよくわかっていませんでしたので、Ia型超新星が合成した鉄が少ないのか、II型超新星が合成した鉄が少ないのか、両者共に少ないのかはよくわかっていませんでした。「すざく」衛星により、銀河光度に対する酸素の質量もわかるようになりました。これは、銀河光度に対する過去のII型超新星の

数を反映します。

その結果、ろ座銀河団では、鉄の質量と銀河光度の比だけでなく、酸素の質量と銀河光度の比も大きな銀河団に比べて1桁以上小さいということがわかりました。ろ座銀河団の銀河は、巨大銀河団と同じように古い楕円銀河が多いことがわかっています。つまり、銀河光度あたりの過去のII型超新星の量が巨大銀河団と1桁以上も違うことは考えにくいのです。実は、ガスの組成比は、巨大銀河団とあまり変わりません。これは、ガスの質量がそもそも少ないことを反映しています。小銀河団や銀河群では、ガスは銀河よりもずっと大きく広がっていることが知られています。つまり、過去、銀河から重元素が放出されたときに比べて、現在は、ガスが加熱されて銀河より広がったのか、銀河が中心集中したのかどちらかということになります。もちろん、銀河群同士の合体のような現象も関係しているでしょう。しかも、鉄のほとんどがIa型超新星から合成されたということは、Ia型超新星の重元素合成が起こった後に、ガスと銀河の分布が変化したということの意味します。つまり、重元素の分布は銀河群や銀河団の力学的な歴史を探る一つの鍵となるのです。

#### 5. 「すざく」衛星による他の銀河団、銀河群の観測

ろ座銀河団以外の銀河団からも、「すざく」は、酸素やマグネシウムの量をこれまでにない精度で決定することができています。例えば、中規模の銀河団であるA1060銀河団では、銀河団の中心領域では、cD銀河の領域や楕円銀河と似たような重元素の組成比を示していました。ところが、A1060はろ座銀河団よりもさらに銀河団周辺部までの観測が行われていて、その領域では酸素やマグネシウムと鉄の比が増えていることがわかりました<sup>11)</sup>。他の銀河団や銀河群も次々観測されています。銀河団中心領域では、太陽と同じような重元素比で、銀河団の外側で酸素やマグネシウム

と鉄の比が増加されている傾向がみえています。これは、銀河団中心部では、Ia型超新星の寄与が大きく、銀河団周辺部では、II型超新星の寄与が増えることを意味しています。銀河団全体としては、銀河団ガスの重元素を合成する超新星は、II型超新星の数がI型超新星の数の3倍であること、過去のII型超新星の数と現在の銀河光度の比は、フィールドの星形成史から推定したものと大きな違いがないということもわかってきました<sup>12)</sup>。今後も「すざく」での観測を続けることにより、銀河団の重元素の全体像が見えてくることでしょう。

### 参考文献

- 1) Sarazin C., 1988, X-ray emission from clusters of galaxies (Cambridge University Press, Cambridge)
- 2) Renzini A., et al., 1993, ApJ 419, 52
- 3) Fukazawa Y., et al., 1998, PASJ 50, 187
- 4) Matsushita K., Finoguenov A., Boehringer H., 2003, A&A 401, 443
- 6) Matsushita K., et al., 2007, A&A 462, 953
- 6) Matsushita K., et al., 2007, PASJ 59, S327
- 7) Tawara Y., et al., 2007, PASJ, in press
- 8) Asplund M., 2005, ARA&A 43, 481
- 9) Arnaud M., et al., 1992, A&A 254, 49
- 10) Makishima K., et al., 2001, PASJ 53, 401
- 11) Sato K., et al., 2007, PASJ 59, 299
- 12) Sato K., et al., 2007, ApJ, submitted

### Suzaku Observations of Metallicity Distributions in the Intracluster Medium

Kyoko MATSUSHITA and Suzaku Team

*Department of Physics, Tokyo University of Science, Kagurazaka, Shinjuku-ku, Tokyo 162-8601, Japan*

Abstract: The metal abundances in the intracluster medium provide important clues to understand the metal enrichment history and evolution of galaxies. Suzaku provided the means to measure O and Mg abundances in the intracluster medium. These elements can be used to infer the contribution from supernova II. In this paper, based on Suzaku observations, the abundances of O, Mg, Si, and Fe abundances of the intracluster medium in the Fornax cluster and those in other clusters and early-type galaxies are discussed.