

## 論文内容の要旨

論文題目: X-ray Study on the Spatial Distribution of  
Heavy Elements in Hot Plasmas  
Associated with Clusters of Galaxies

(銀河団プラズマ中の重元素の空間分布  
に関するX線を用いた研究)

氏名 川原田 円

銀河団は宇宙最大の自己重力系であり、暗黒物質、銀河、熱的な ( $10^7\text{-}8$  K) 高温プラズマ (Intra-Cluster Medium: ICM) から成る。銀河団の全質量のうち、ほとんど ( $\sim 85\%$ ) は暗黒物質が占めており、ICMの質量と銀河の質量をくらべると、ICMのほうが銀河よりも数倍ほど多い。ICM中には、高階に電離した鉄、ケイ素、硫黄、酸素といった重元素が含まれており、宇宙全体の重元素量のおよそ半分を占めている。しかし、いつ、どのようにして、重元素が星から広大な銀河間空間に輸送されたのか、まだ完全には理解されていない。

ICMの重元素アバundanceに関する研究は、銀河団のX線観測の主要課題のうちのひとつであり、重元素からの原子スペクトル線を使って測定される。日本の「ぎんが」衛星 (1987-1991) は、ICMの鉄のアバundanceが、典型的に0.3太陽組成であることを明らかにした。世界初の広帯域 (0.7-10 keV) での空間スペクトル能力を備えた、後続の「あすか」衛星 (1993-2001) は、鉄に加えてさらに

ケイ素の研究も可能にし、これらの元素がどのように空間分布しているかを解明した。「あすか」によって得られた証拠をまとめると、(1) いくつかの銀河団の周辺部において、鉄の質量密度分布は、銀河の光度分布に近い (Ezawa et al. 1997)。(2) いくつかの銀河団では、中心部にむかって、鉄の質量密度分布は銀河の光度に対して相対的に減少していく (Makishima et al. 2001)。(3) ところが、中心部にむかって、鉄のアバundanceは、 $\sim 1.0$  太陽組成に増加する (Fukazawa et al. 1994)。となる。この複雑な結果を理解するには、「あすか」の能力を越える衛星を用いた、さらなる研究が必要とされていた。

上記の動機に基づいて、本研究では、欧州のミッションであるニュートン衛星で観測された、12 のリラックスした、近傍の銀河団の公開データを解析した。ニュートン衛星は、「あすか」に比べて、優れた空間分解能と、巨大な有効面積を有している。また、銀河の分布に関しては、Two Micron All Sky Survey (2MASS) によって公開されている、近赤外のデータを用いた。我々の研究手段は、第一に、重元素 (鉄、ケイ素、硫黄、酸素) の空間分布を正確に測定する。次に、重元素の空間分布を、全質量、ICM、そして銀河の空間分布と比較する。そして最後に、得られた結果から、重元素がどのように ICM に輸送されたのかを矛盾なく説明できるシナリオを導き、銀河団に進化についての洞察を得る。これまでの研究で、重元素アバundanceと銀河の分布を比較したものはあったが、すべての銀河団のコンポーネントと詳細に比較を行なった研究は、今回がはじめてである。

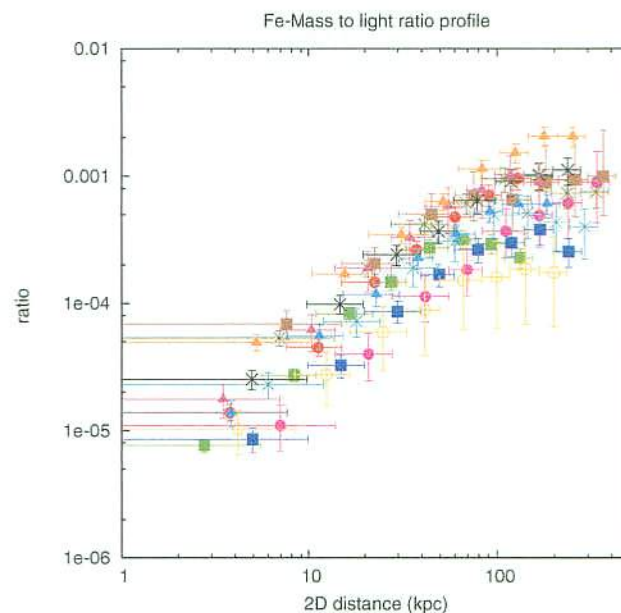


図 1: 鉄の積分プロファイル、 $K$  バンドの銀河光度の積分プロファイルで割ったもの。すなわち、鉄質量光度比プロファイル。色の違いは、天体の違いに対応している。

よく知られているように、ICM の空間分布は、全質量の空間分布よりも外側まで広がっている。本研究の 12 サンプルで、ICM の密度分布と全質量の密度分布を散布図にして直接に比較すると、

$\rho_{\text{ICM}} \propto \rho_{\text{tot}}^{0.70^{+0.06}_{-0.13}}$  となった。これは、 $\beta$  モデルにおける  $\beta \sim 0.7$  に相当する。ICM と鉄の分布を同様の手法で調べてみると、 $\rho_{\text{Fe}} \propto \rho_{\text{ICM}}^{1.35^{+0.13}_{-0.12}}$  となり、ICM は鉄と比べても外側まで広がった分布をしていることがわかった。これら 2 つの関係式から、おおよそ  $\rho_{\text{Fe}} \propto \rho_{\text{tot}}$  になるのではないかということが疑われる。実際に全質量と鉄の密度分布の散布図を作ると、 $\rho_{\text{Fe}} \propto \rho_{\text{tot}}^{0.99^{+0.12}_{-0.16}}$  となり、鉄の空間分布は、実は全質量の空間分布に近いということが明らかになった。ケイ素と硫黄の、全質量に対する空間分布を調べると、 $\rho_{\text{Si}} \propto \rho_{\text{tot}}^{0.95^{+0.11}_{-0.20}}$ 、 $\rho_{\text{S}} \propto \rho_{\text{tot}}^{0.94^{+0.27}_{-0.21}}$  のように、鉄の分布と同様に、全質量に近い空間分布をしていることがわかった。ところが酸素の空間分布は、ほかの重元素とは異なり、 $\rho_{\text{O}} \propto \rho_{\text{tot}}^{0.62^{+0.35}_{-0.29}}$ 、 $\rho_{\text{O}} \propto \rho_{\text{ICM}}^{0.94^{+0.56}_{-0.22}}$  のように、全質量よりはむしろ ICM の分布に近い傾向が見られた。

重元素と、その供給元である銀河の分布を比べるために、図 1 に示すように、鉄の質量分布を、銀河の  $K$  バンドの光度分布で割ったプロファイル (Iron Mass to Light Ratio: IMLR) を作製したところ、どの銀河団でも、 $\sim 100$  kpc よりも外側では一定になるが、それよりも内側では、中心にむかって 1 桁以上も減少していく。つまり、銀河団周辺においては銀河の分布に沿って鉄も分布しているが、中心では明るい銀河が存在するにも拘わらず、相対的に鉄の量が 1 桁も少くなっている。このことから、鉄が中心部から周辺部へと輸送されたか、銀河の光が、中心に集中してきたかいずれかの可能性が考えられる。鉄を重力ポテンシャルの底から外側に輸送する過程としては拡散や、ICM のアウトフローが考えられるが、ICM 中の鉄の拡散はハッブル時間でもたかだか  $\sim 10$  kpc 程度である。また、鉄を ICM と共に中心からアウトフローさせようとする、 $10^2 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  以上の、クーリングフローのちょうど逆向きの大きなレートが必要で、現実的ではない。そうすると、消去法によって銀河が中心集中してきたという説が生き残ることになるが、観測的にも、遠方と近傍の銀河団における銀河の分布を比べると、近傍のほうが中心に集中している兆候が得られつつある。

IMLR の系ごとの絶対値には、1 桁ほどばらつきがある。このばらつきは、鉄を ICM に供給するプロセスに、銀河以外の要因がからんでいる可能性を示唆する。そこで、IMLR の、ICM 質量、全質量、銀河の光度、ICM 温度に対する依存性を調べてみると、ICM 質量にもっともよく相関しており、しかも、IMLR と ICM 質量の関係はほぼニアであることがわかった。言い換えると、図 2 に示すように、鉄の質量は (銀河光度)  $\times$  (銀河団プラズマの質量) に比例する。このことは、鉄を銀河団プラズマに供給するとき、銀河だけではなく、銀河団プラズマも関与しているということを示唆している。最近、チャンドラ衛星などによって、プラズマの動圧で、銀河に付随するガスがはぎ取られている様子が観測されており、プラズマの動圧が効いて、重元素が銀河からはぎ取られてた結果を見ている可能性が高い。プラズマの銀河に対する動圧が効いているならば、銀河は徐々に減速されるので、銀河が中心に集中してきたというシナリオも矛盾なく説明できる。

以上を総合すると、重元素供給のプロセスを説明する、銀河団の進化は以下のようなになる。銀河団が形成された当時は、大質量星をおおく含む渦巻銀河の割合が高かったため、II 型超新星爆発が頻発

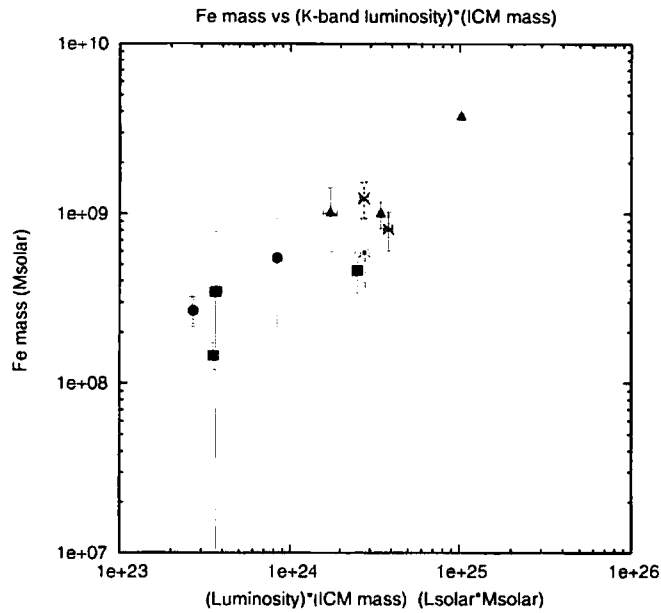


図 2: 鉄の質量 (もっとも外側の観測領域まで積分した量) を、その領域内の (銀河光度) × (ICM の質量) に対して、天体ごとにプロットした図。色の違いは、図 1 と同じ。

し、酸素が ICM に供給された。このとき銀河の分布が、プラズマの分布と近かったために、酸素の分布が、プラズマの分布と近くなったのであろう。銀河団が進化し、楕円銀河が多くなってくると、Ia 型超新星爆発が主役になる。この時期は、銀河は暗黒物質の分布に従い、銀河から供給される鉄、ケイ素、硫黄も、同じ分布になる。また、プラズマの動圧によって銀河が減速され、銀河の光が中心に集中していった。銀河団中心にしばしば存在する巨大銀河は、こうした中心集中の末に、銀河合体を通じて作られたものと考えられる。