

早期型銀河からのX線放射

— 数百万度の高温星間ガスの性質 —

松下 恭子

〈東京都立大学理学部物理学教室 〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1〉
e-mail: matusita@phys.metro-u.ac.jp

楕円銀河やS0銀河などの早期型銀河には、X線を放射する高温の星間ガスが存在する。この高温ガスに含まれる重元素量は銀河の化学進化の記録であり、また星間ガスの分布から、銀河の重力質量分布を求めることができる。我々は、「あすか」衛星の観測により、X線で明るい銀河は銀河群スケールのポテンシャルの中心に位置していることを発見した。このポテンシャルの有無によって、星間ガスの重元素量やX線強度が説明できる。

1. はじめに

多くの早期型銀河（楕円銀河，S0銀河）は強いX線を放射している¹⁾。このX線はおもに、温度が数百万度から一千万度の高温の星間ガスから放射されている。また、我々の銀河系に見られるような、低質量X線連星系などのX線源からの高エネルギーのX線も観測されている²⁾。高温ガスの量は星の質量の数%にもおよぶ。このガスは、晩期型星からの質量放出によって供給されると考えられている。そして、星がもともと持っていた速度エネルギーがガスの熱エネルギーに変換され、さらにI型超新星により加熱される³⁾。ガスはほぼ静水圧平衡にあるため、ガスの温度分布と密度分布、すなわちガスの圧力分布から、暗黒物質を含む系の全重力質量を直接求めることができる。また、星間ガスの化学組成は、星の化学組成にI型超新星爆発による重元素汚染の寄与が加わったものとなり、したがって、星の化学組成とI型超新星爆発率を反映していることになる。この両者はともに銀河の化学進化を考える上で基本的な量の貴重な記録である。

一方、銀河団には、銀河の数倍もの質量の銀河間ガスが存在し、銀河から放出された大量の重元素を含んでいる。この重元素は主に早期型銀河に

おいて作られたと考えられている。そのため、重元素の放出元である早期型銀河の星間ガスの重元素量を調べることは、銀河団の化学進化を研究する上でも重要である。

このように早期型銀河をX線で観測することは、暗黒物質および銀河の進化という、現代天文学における2つの重要な問題に対する、新しい強力な研究方法となる。

近年、日本のX線天文衛星「あすか」が打ち上げられ、その優れたエネルギー分解能、空間分解能、および高い感度により、この高温ガスの研究に大きな進展がみられた。

2. 「あすか」で観測された X線スペクトル

我々は、「あすか」により観測された早期型銀河のデータを用い、そのエネルギースペクトルと空間的な分布を調べた。観測された銀河のほとんどは、巨大銀河と呼ばれる、可視光でかなり明るいものである。図1に「あすか」衛星により得られた早期型銀河のスペクトルを示す。強い鉄のL輝線、マグネシウム、硅素のK輝線など、温度が数百万度の光学的に薄いプラズマに特徴的な輝線がみられ

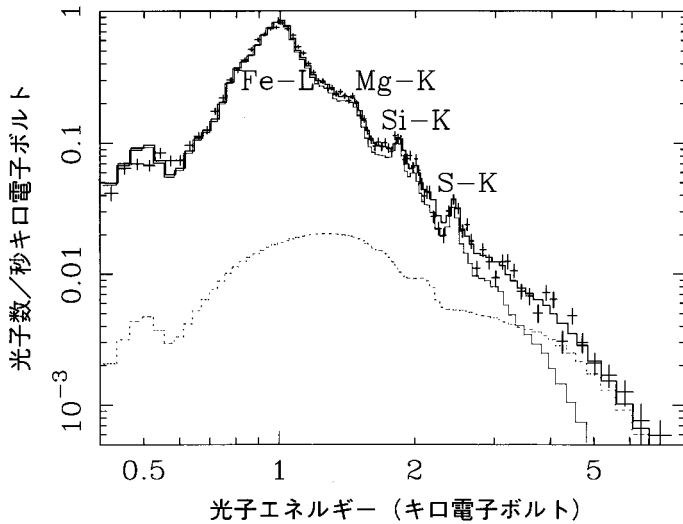
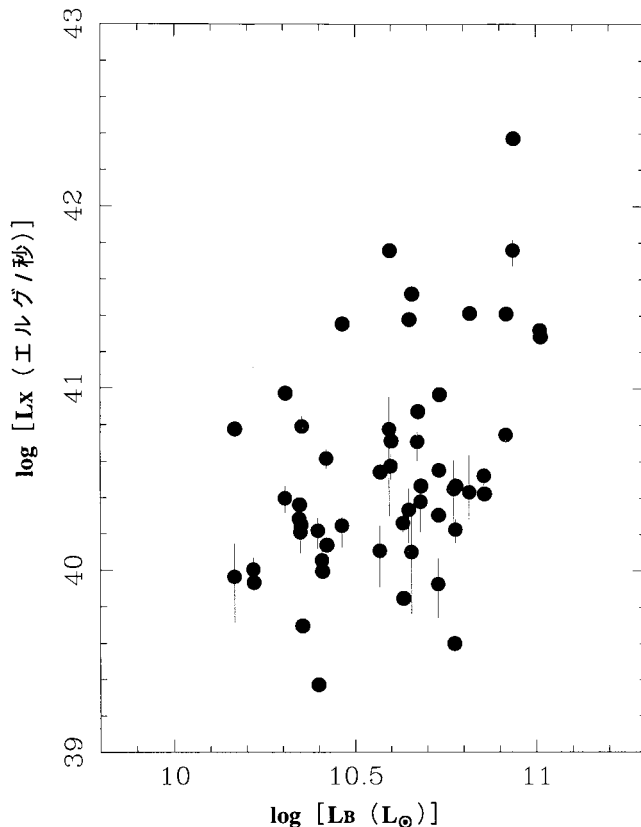


図1 「あすか」に搭載された CCD 検出器 (SIS) により観測された、楕円銀河 NGC 4472 のスペクトル。+ は、観測されたデータ。黒の実線は、一温度のプラズマモデル (青の実線) と 10 温度 10 キロ電子ボルト (約 1 億度) の熱制動放射 (青の点線; 低質量 X 線連星系からの放射に対応) を足し合わせたスペクトルモデル。



ソフト成分 (黒) とハード成分 (青) の X 線光度 L_x (0.5-10.0 キロ電子ボルト) vs. B バンドでの光度 L_b 。

る。スペクトルは星間ガスに対応するスペクトル (ソフト成分) と、より硬いスペクトルを持つ熱制動放射 (ハード成分) の和でほぼ説明することができる。

3. X 線強度の分散

早期型銀河の X 線強度を定量的に調べるために、銀河の中心から有効半径 (銀河の半分の光が放射される領域の半径) の 4 倍以内から放射される X 線光度を調べた (図 2)。このような半径で積分すると、どの銀河でもその銀河の全光度に対して同じ割合の星の光度が入る半径で X 線も積分できる。ハード成分の強度は少数の例外を除き、ほぼ B バンド

での光度に比例している。強度とその硬いスペクトルから、ハード成分は銀河に存在する個々の低質量連星系からの X 線放射の総和をみていると考えてよい。なお、少数の銀河がこの関係よりハード成分の強度が強い。これは、活動銀河核からの寄与が存在するためだと考えられる。一方、星間ガスに対応するソフト成分の強度は、B バンドでの同じ光度を持つ銀河に対して二桁以上もばらついている。可視光の観測によれば、早期型銀河は力学的に極めて一様な系であるが、なぜ X 線の光度のみがこれほど大きくばらつくのだろうか？

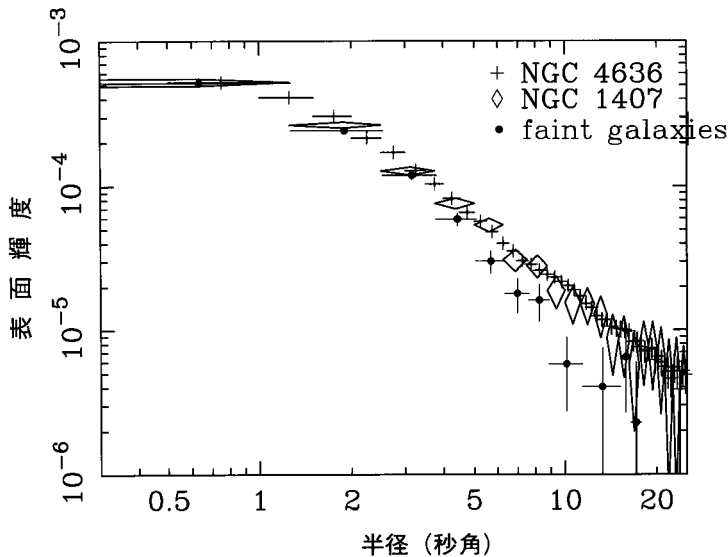


図3 「あすか」に搭載された撮像型蛍光比例計数管 (GIS) により観測された早期型銀河の輝度分布の半径依存性. 中心での値を NGC 4636 と同一にしている.

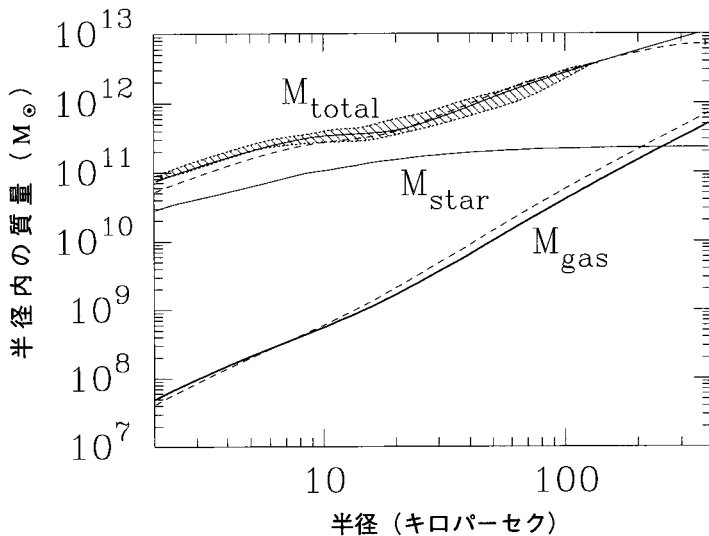


図4 NGC 4636 の積分質量分布 (全質量、星の質量、ガスの質量). 実線は、温度、アバダンスを一定と仮定したもの. 点線は、温度、アバダンス分布を考慮したもの. 青の領域は、実線のモデルに対する全質量分布の許される領域.

4. X線放射の空間分布

ガスの X 線輝度分布は、可視光で見える銀河の半径あたりまでは、X 線光度にかかわらず、ほぼ星の輝度分布と一致している。X 線で暗い銀河では、X 線の広がりもほぼ可視光と一致する。これに対して観測されたすべての X 線で明るい銀河では、銀河に比べてはるかに広がった X 線放射が存在することを発見した (図 3)。

特に、NGC 4636 の表面輝度では、その様子が顕著である⁴⁾。NGC 4636 は乙女座銀河団の南端に存在する銀河であり、X 線でもっとも明るい楕円銀河の一つである。「あすか」衛星により、長時間の観測が行われ、極めて統計のよいデータが得られている。このデータから重力ポテンシャルの半径分布を求めると、半径数 10 キロパーセク まで広がった銀河固有のポテンシャルと、そのまわりの大きなスケールのポテンシャルという、明らかな階層構造が見出された (図 4)。これは NGC 4636 がある種の銀河群ポテンシャルの中心にあることを意味する。

ガスの分布について定量的に調べるために、銀河の中心部 (半径 10 キロパーセク以内) での平均ガス密度を求めた。すると、それらは 2 つの値に集中し、それぞれ、X 線で明るく、広がった X 線放射を持つ銀河と、X

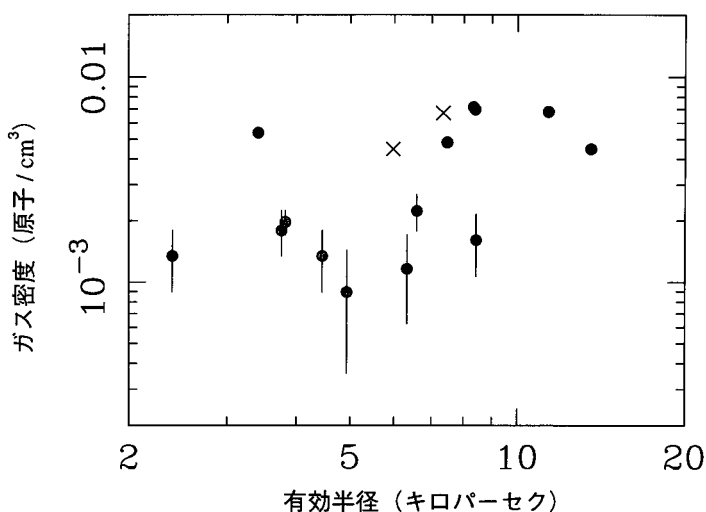


図5 銀河の中心から半径10キロパーセク以内での平均ガス密度を、銀河の有効半径に対してプロットしたもの。黒丸はX線で大きく広がった放射を持つもの。青丸はX線でコンパクトなもの。×は、乙女座銀河団の銀河でどちらか区別がつかないもの。

線で暗く、その分布が銀河の星の分布とほぼ同じ銀河に対応していた(図5)。したがって、早期型銀河をX線で大きく広がった放射の有無によって二つのグループに分けると、中心部の平均ガス密度の分散はかなり小さい。そして、この二つのグループの銀河をすべて混ぜてみているためにX線強度の分散は大きい。二つのグループに分けると、平均ガス密度では極めて一様な値をとることを発見した。

X線で明るい銀河は、銀河群もしくはサブ銀河団のポテンシャル中心に位置する銀河であり、この大スケールのポテンシャル障壁や、まわりの広がったガスの圧力に閉じ込められることにより、ガスを大量に蓄めるに至ったと考えられる。

5. アバundance問題

星間ガスが星から放出されたものに、I型超新星による重元素汚染が加わったものだとすると、星間ガスのアバundance(重元素の組成比)は星のアバundanceにI型超新星爆発の寄与を加えたもの

となる。例えば、星の鉄のアバundanceはほぼ太陽と同程度⁵⁾であり、I型超新星からの寄与は少なくとも太陽組成程度とされる^{6), 7)}。したがって星間ガスの鉄のアバundanceは少なくとも太陽組成の2倍はあると予想されていた。ところが、単純なモデルによるスペクトルフィットから求められたガスのアバundanceが太陽組成の半分以下と、予想に比べてずっと低いということが問題となっていた^{5), 8), 9)}。

しかも、ガスのアバundanceが星のアバundanceよりも低いということはその起源に疑問を投げかけるものである。この事実は銀河の化学進化のモデルに

厳しい制限を与えるだけでなく、銀河団の重力ポテンシャルに閉じ込められた銀河団ガスに大量の重元素が含まれているという観測事実とも相容れない。そこで、我々は、X線のスペクトルフィットにおけるさまざまな不定性を評価することにより、実は、ガスのアバundanceはもっと高くても許されることを示した。

6. ガスのアバundanceの不定性

星間ガスのアバundanceは、おもに鉄のL輝線のスペクトルをプラズマ放射モデルでフィットすることにより求められる。しかし、このX線スペクトルは、さまざまな元素からの輝線が検出器の特性によりまざりあうため、非常に複雑である(図6)。特に鉄のL輝線は、数百本の輝線からなる。さらに、同じエネルギー領域に酸素やネオンのK輝線が重なっており、これらの元素のK輝線が、あたかも鉄のL輝線に対する連続成分のようにふるまう。さらに、フリーバウンド放射が連続成分に大きく寄与するため、さまざまな元素のアバundance

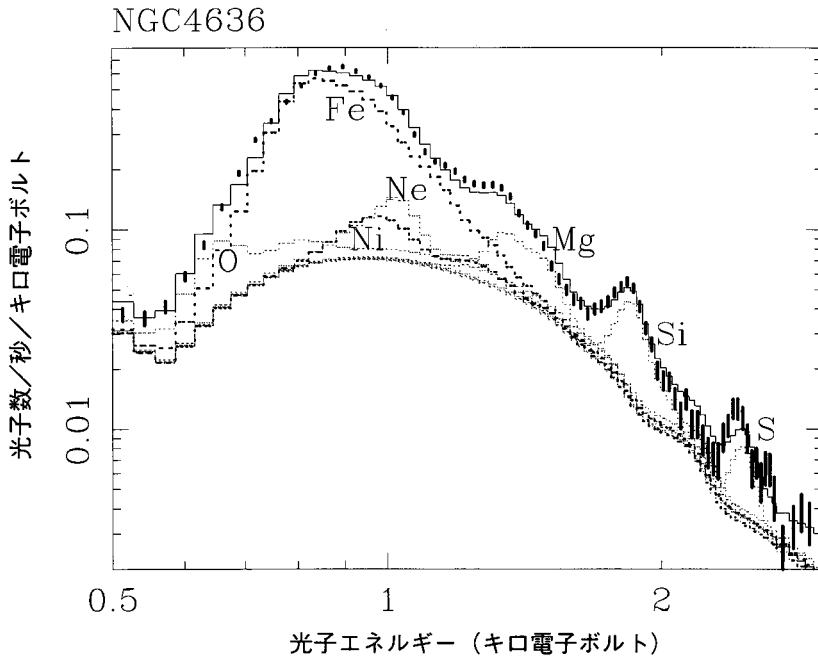
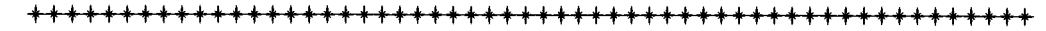


図6 SISで観測されたNGC 4636のスペクトルとそのスペクトルに占める各重元素の寄与.

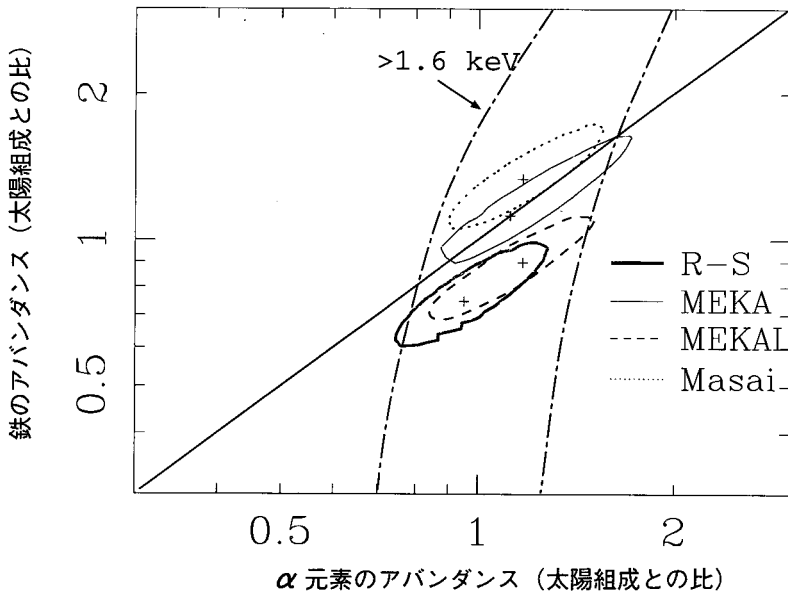


図7 NGC 4636の星間ガスにおける鉄と α 元素のアバダンスの信頼区間. 一点破線は、1.6キロ電子ボルト以上のスペクトルデータのみを用いて求められた、すなわち、酸素と硫黄の強度から求められた領域である. 楕円は鉄のL輝線の領域に20%の系統誤差を強制的に加えた場合の信頼区間.

がお互いに相関することになる。

鉄のL輝線のモデルの不定性がさらに問題を複雑にしている。プラズマからのX線放射を計算するモデルはいくつか存在するが^{10), 11), 12), 13)}、主に、鉄のL輝線の扱いが異なる。その結果、同じスペクトルをフィットしても、プラズマ放射コードにより得られたアバンダンスは2-4倍異なる。これは、鉄のL輝線の構造がプラズマ放射コードにより微妙に異なるために、 α 元素である酸素、ネオンの強度と鉄の強度の比が最適になるようにフィッティングしているためである。一方、 α 元素のアバンダンスを固定してフィットすると、どの銀河でも鉄のアバンダンスはプラズマ放射コードにほとんどよらず、20-30%以下で一致する。すなわち、鉄のL輝線の構造には、プラズマ放射モデルにより細かい差が存在するが、鉄のL輝線の全体的な強度の不定性は20-30%程度であると考えられる。

7. NGC 4636 のアバンダンスの決定

以上から、 α 元素のアバンダンスを決めることができれば、鉄のアバンダンスをも精度よく求めることができることがわかる。このためには、硅素や硫黄の輝線の強度を精度よく求めることが必要である。そこで、我々は、最も統計のいいデータが得られたNGC 4636のスペクトルを用いて、次のようにして、星間ガスのアバンダンスを決定した¹⁴⁾。まず、マグネシウムと硅素のアバンダンスの比が、太陽組成比と同じであることを確かめた。酸素、ネオンおよびマグネシウムは同じ元素の合成過程に従うから、この事実は、硅素、マグネシウム、ネオン、および酸素のアバンダンスが、太陽と同じ比率になっていることを意味する。これによりX線で明るい銀河では、硅素の輝線の強度から α 元素のアバンダンスを決めることができ、それはほぼ太陽組成と同程度であることがわかった(図7)。さらに鉄のL輝線の領域における元素間のカップリングをさけるために、0.7-1.4キロ電子ボルトのエネルギー範囲に系統誤差をいれ、スペクトルをフィットし

た。すると、 α 元素のアバンダンスは、鉄のL輝線の領域ではなく、硅素と硫黄の輝線の強度から求まることになる。その結果フィットは改善され、X線で明るい銀河ではプラズマ放射モデルの違いによらず、鉄も α 元素もほぼ太陽組成と同程度のアバンダンスをもつことがわかった(図7)。この結果、少なくとも、NGC 4636については、I型超新星爆発の寄与は可視光からの観測からの予測に比べまだ少ないものの、ガスのアバンダンスが星のアバンダンスよりも低いという大きな矛盾はなくなったといえる。

8. アバンダンスとX線強度の相関

残念ながら、NGC 4636以外の銀河では、もっともX線で明るいものでも、Siの強度には3倍程度の誤差が存在する。そのため、鉄のアバンダンスにも大きな不定性が残ってしまう。

X線強度とアバンダンスの関係について調べるために、図8に、NGC 4636と、NGC 4636と同じガス温度を持つ5つのX線で暗い銀河のアバンダンスについて比べた。これは、さまざまな系統誤差を最小にするためである。図8から、両者は違うアバンダンスを持つことがわかる。X線で暗い銀河のアバンダンスの信頼区間はI型超新星爆発による鉄のアバンダンスの寄与が一定となる線にほぼ沿っている。これは、II型超新星爆発を起源とする鉄のアバンダンスの不定性は大きいものの、I型超新星爆発の鉄のアバンダンスに対する寄与には強い制限をつけることができるということを意味する。すなわち、これらのX線で暗い銀河ではNGC 4636に比べ、星間ガスのアバンダンスに占めるI型超新星爆発の寄与が低いということがわかる。

他の銀河についても調べるために、図9に、銀河の中心部での平均ガス密度に対し、 α 元素のアバンダンスが太陽組成と仮定したときの、ガスの鉄のアバンダンスをプロットした。すると、X線で広がった放射を持つ銀河はすべて、ガスの鉄のアバンダンスは太陽組成程度なのに対し、X線で

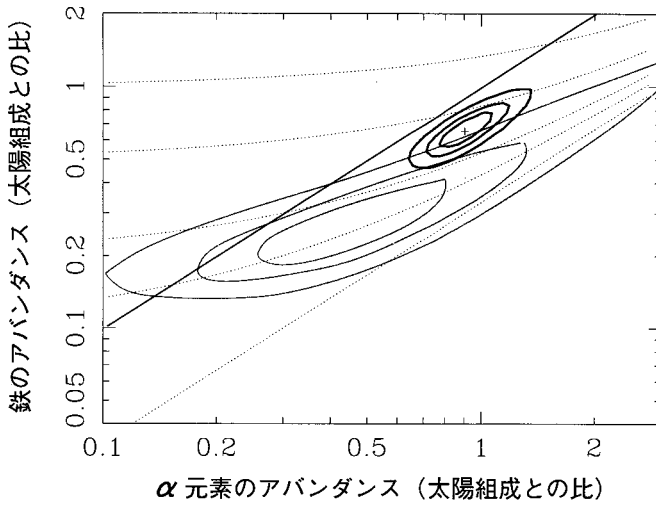


図8 NGC 4636 の星間ガスにおける鉄と α 元素のアバダンスの信頼区間 (黒; プラズマコードは R-S モデル). 青の領域は NGC 4636 と同じ温度を持つ 5 つの早期型銀河の平均的な信頼区間. 点線は, I 型超新星爆発からの鉄のアバダンスへの寄与が一定である線.

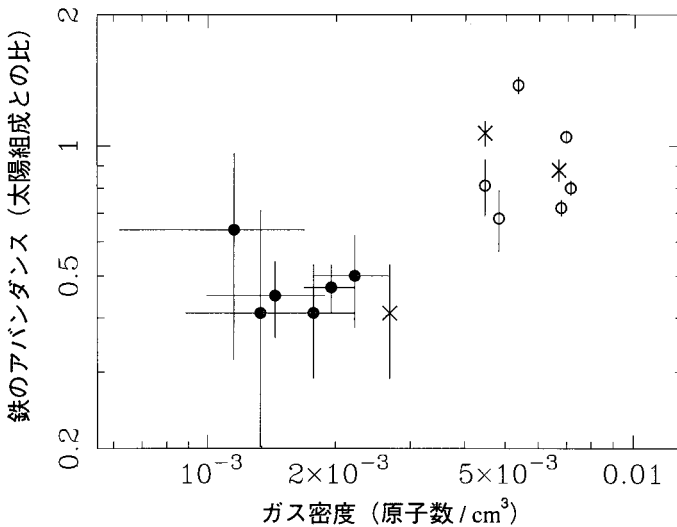


図9 α 元素のアバダンスが太陽組成と仮定したときの鉄のアバダンスを半径 10 kpc での平均ガス密度に対してプロットした. 黒丸は X 線で大きく広がった放射を持つもの. 青丸は X 線でコンパクトなもの. × は, 乙女座銀河団の銀河でどちらか区別がつかないもの.

暗い銀河はすべて, その半分程度のアバダンスとなる. 上に述べたように, II 型超新星を起源とする起源の鉄の不定性は大きいので, この差は I 型超新星爆発を起源とする鉄のアバダンスの差を反映していることになる.

9. 結論

「あすか」の観測により, 早期型銀河はその X 線の特徴に応じ, 表に示す二種類に分類されることが発見された. さらに同じカテゴリーに属する銀河は, ひじょうに良く揃った性質を示すことがわかった.

X 線で明るい銀河は, 銀河群スケールのポテンシャルの中心に位置する銀河であり, そのポテンシャルや, まわりの広がったガスの圧力に閉じ込められることにより, ガスを大量に蓄め, X 線で明るくなると考えられる.

星間ガスの性質は, 現在の星からの質量放出を反映したものであると考えられ, 両者の間に見られたアバダンスの矛盾は, ほほ解消された. しかし, I 型超新星がそこそこの頻度で発生していると考えると, ガスのアバダンスは, まだまだ有意に低すぎる.

この謎を解く鍵は, X 線でコンパクトな銀河と X 線で広がった銀河での I 型超新星を起源とする鉄のアバダンスの差にあると考えられる. この両者の差は, 周囲のポテンシャルによる閉じ込め方の違いである. すなわち, X 線で広

表

	X線で広がったもの	X線でコンパクトなもの
星間ガスのX線強度	明るい	暗い
表面輝度分布	広がったX線放射が存在 階層構造	星の分布とほぼ一致
中心ガス密度	高い	低い
アバンダンス	ほぼ太陽組成	I型超新星から寄与が低い

がった銀河では、I型超新星からの重元素が銀河内部に閉じ込められるのに対し、X線でコンパクトな銀河ではI型超新星の生成物が速やかに銀河から逃げ出していると考え、両者のアバンダンスの差を説明することができる。また、これにより、銀河団ガス中に含まれる大量の重元素などが、無理なく説明できることになる。すなわち、X線で明るい銀河と暗い銀河の間に見られるI型超新星の寄与の差は、周囲の大きなポテンシャルの効果まで含めた、ガスの閉じ込め効率の差を反映していると考えられるのが自然であろう。

参考文献

- 1) Fabbiano G., 1989, ARA&A 27, 87
- 2) Matsushita K., et al., 1994, ApJ 436, L41
- 3) Ciotti L., et al., 1991, ApJ 376, 380
- 4) Matsushita K., et al., 1998 499, L13
- 5) Arimoto N., Matsushita K., Ishimaru Y., Ohashi T., Renzini A., 1997, ApJ 477, 128
- 6) Loewenstein M., Mathews W.G., 1991, ApJ 373, 445
- 7) Renzini A., 1994, in *Panchromatic View of Galaxies*, ed. Hensler G., et al. (Edition Frontières, Gif-sur-Yvette) p. 155
- 8) Awaki H., et al., 1994, PASJ 46, L65

- 9) Matsumoto H., Koyama K., Awaki H., Tsuru T., Loewenstein M., Matsushita K., 1997, ApJ 482, 133
- 10) Raymond J.C., Smith B.W., 1977, ApJS 35, 419
- 11) Masai K., 1984, Ap&SS 98, 367
- 12) Mewe R., Gronenschild E.H.B.M., van den Oord G.H.J. 1985, A&AS 62, 197
- 13) Liedahl D.A., Osterheld A.L., Goldstein W.H., 1995, ApJ 438, L115
- 14) Matsushita K., et al., 1997, ApJ 488, L125

X-ray Study of Hot Interstellar Medium in Early-Type Galaxies

Kyoko Matsushita

Department of Physics, Tokyo Metropolitan University, 1-1 Minami Ohsawa Hachioji, Tokyo 192-0397

Abstract: Early-type galaxies are luminous X-ray sources. The X-rays are mainly come from hot interstellar medium in these galaxies. We have discovered that the X-ray luminous ellipticals are central galaxies of some larger-scale potential structures. We show that presence/absence of such a larger-scale potential can consistently account for several unsolved problems with the ISM.