「あすか」による楕円銀河、銀河団の観測

鶴 剛 (京都大学理学部物理第 2 教室宇宙線研究室)

1 事の起こり (Tsuru D 論)

本稿では、「あすか」による楕円銀河、銀河団の観測結果についてのレビューを行なう。全ての結果を示す余裕はないので、日本で出された博士論文の中から私の興味に従ってピックアップする。

銀河団には、重力的に閉じ込められ、 $k_{\rm B}T = 1 \sim 10$keV の温度を持ち、高温プラズマ状態の Intra Cluster Medium (ICM) が存在する。質量はメンバー銀河の総和かそれより大きく、鉄などの重元素輝線が検出される所から、過去もしくは現在メンバー銀河の星で作られたガスが供給されたと考えられている。

図 1 は「ぎんが」によって得られた、メンバー銀河質量総和と ICM 中の鉄の質量の相関である (この絵が「ぎんが」以降の研究の 1 つの方向を決めた)。現在の銀河団における ICM への重元素供給源は、楕円銀河中の Stellar Mass Loss と 1a 型超新星爆発である。 Stellar Mass Loss の重金属組成が太陽組成であると仮定し、光学的に測定されている Stellar Mass Loss と 1a 型超新星爆発レートを使うことで、現在のそれぞれの鉄の放出量を求めることができる。それぞれのレートが宇宙年齢中で一定であった場合の総供給量を直線で示してあるが、観測値に比べ 1/10 程度に過ぎない。これは過去に現在より重元素供給レートが高い時期があったことを示している。

銀河団では両者がほぼ比例していることから、メンバー銀河中で生産され ICM に放出されたガスは銀河団からは失われていないことを示している (後で示す「あすか」の結果でこれは修正される)。楕円銀河ではその相関から遥かに下方に外れており、自分が作ったガスの大半を失い、 ICM に供給したことが分かる。

現在の楕円銀河中で生産放出されている重金属量は、楕円銀河の ISM の X 線観測から直接求めることができる。「ぎんが」の M49(NGC4472) のスペクトル観測から得られたアッパーリミットは 2solar であった。理論的には Stellar Mass Loss と 1a 型超新星爆発から予測することができる (先ほどの図 1 の直線はこれを基にしている)。その値は 3 solar であり、観測量と矛盾する。この結果は、楕円銀河中の重金属放出について我々が見逃していることがあることを示している。

2 銀河団

2.1 重力ポテンシャル構造 (池辺 D 論)

図 2 は、「あすか」で得られた Fornax/NGC1399 銀河団の輝度分布である。この銀河団は、「あすか」の観測から場所による温度の差がほとんど無いことが分かったので、精度良く重力ポテンシャルの構造を求めることができる。こうして求められた重力ポテンシャルから得られる重力質量分布を、星の質量分布 (すなわちメンバー銀河の質量分布)、高温プラズマの質量分布と共に図 3 に示す。明らかに重力質量にも銀河と銀河団という階層構造が見られる。これは銀河団全体と NGC1399 の X 線輝度分布のそれぞれの中心がずれていることからも明らかである。

2.2 温度、重金属組成比構造

2.2.1 Centaurus 銀河団 (池辺 D 論)

しばしば cD 銀河団は X 線輝度分布が中心で鋭いピークを持つことが観測されている。これは、 cD 銀河中心の ICM の密度が高く、クーリングタイムが宇宙年齢よりも短いため中心部へ落ち込むガスの流れが形成されているため、と考えられてきた。この流れは「クーリングフロー」と呼ばれる。

Centaurus 銀河団の「あすか」による観測から、中心部は周囲に比べ X 線スペクトルがソフトになり、輝線強度が強くなることが明らかにされた。中心から半径 40 分までを同心円の 9 つのリング状の領域に分け、それぞれのスペクトル作り、その全てのスペクトルと、 ROSAT 衛星で得られたイメージデータの両方を満足させるように、図 4 で示されるクーリングフローモデルでフィットさせた。その結果、データとモデルの差が大きく、典型的なクーリングフローモデルではデータを説明できないことが分かった。さらに、中心部のガスは周囲のガスが中心部に落ち込むだけであり、成分が変わるわけではないので、単純なクーリングフローモデル

では重金属組成比の空間的勾配を説明することは難しい。モデルとデータの残差から、データは中心部分でも高温の成分を要求することがわかった。

そこで、単一成分で徐々に温度を変えていく上記のクーリングフローモデルに変えて、図5で示される、2成分モデルをフィットさせた所、きれいにデータを説明できることが分かった。低温成分は空間的に有意に広がっている。このモデルの特徴は、周辺部は $k_{\rm B}T\sim$ 4keV の高温の単一成分であるが、中心部は高温成分と $k_{\rm B}T\sim$ 1keV の低温と2成分が共存していることと、重金属組成比の空間的勾配の存在である。低温成分の質量はcD銀河の5%程度、温度は $k_{\rm B}T\sim$ 1keV であり、ちょうど楕円銀河のISMとして非常にうまく説明できる。楕円銀河から重金属組成比の高いガスが供給されたと考えると、重金属組成比の空間的勾配の存在も自然に説明できる。

一方、熱伝導により高温と低温プラズマは $\sim 10^6$yr 程度で単一温度になってしまう。これを妨げるメカニズムとして磁場を考えた場合、その強度は $\sim$ μG 程度必要である ([1])。幾つかのcD銀河では電波のファラデーローテーションから $\gtrsim 30\mu$G の磁場が存在することが観測されているので、この可能性は十分にある ([2])。本稿では詳しくは触れないが、「あすか」とBeppoSAXによる非熱的X線放射成分の検出されつつある。これは、高エネルギー粒子による宇宙背景放射のコンプトン散乱の可能性がある。今後、磁場と高エネルギー粒子の存在と加速について調べていく必要がある。

2.2.2 M87/Virgo、AWM7、Coma (松本D論、江澤D論、本多D論)

最も近い銀河団であるM87/Virgo銀河団の「あすか」による観測から重金属元素毎の組成比の空間的構造が得られている (図6)。酸素の組成比は半径に対し一定であり空間的構造が見られない一方で、他の元素では空間的勾配がはっきり見られている。酸素のほとんどが2型超新星爆発で合成されることを考えると、2型超新星爆発起源のガスは空間的によくかき混ぜられているのに対し、主に1a型超新星爆発起源のガスは、かき混ぜが進んでいないことを示している。

Centaurus銀河団、M87/Virgo銀河団で観測された重金属組成比の空間的勾配は、そのサイズからcD銀河の近傍のみの現象と考えられる。それに対し、AWM7銀河団では銀河団スケールに拡がった鉄の組成比勾配が検出された。この鉄の組成比勾配はコアサイズ $\sim$ 115pc、$beta $\sim$ 0.8 の β モデルでよく表現される。これは、AWM7銀河団のメンバー銀河の質量分布と良く合うので、AWM7銀河団の場合は鉄が放出されてからガスのかき混ぜが進んでいないことが分かる。

しかし、全ての銀河団で重金属組成比の空間的勾配が検出された訳ではない。Coma銀河団を詳細に調べたところ、重金属組成比はほぼ一定であった。マージングによって作られたと考えられる温度構造が見つかっているので、最初は重金属組成比の空間的勾配があったとしても、マージングにより壊された可能性がある。

2.3 銀河団からのガス流失 (深沢D論)

図7は、ICMに含まれる鉄及び珪素の質量とメンバー銀河の総質量の比とICMの温度の相関を取ったものである。$k_{\rm B}T\sim$ 4keV を境に比が変化しており、$k_{\rm B}T \lesssim$ 4keV ではICMの温度が下がるにつれ鉄及び珪素の質量が減ってきている。超新星爆発の数がメンバー銀河の総質量に比例することを仮定すれば、生産された重金属を含むガスが失われたことを示す。

ICMの温度を重力ポテンシャルと読みかえると以下の解釈が成り立つであろう。超新星爆発は、ICMへの重金属供給源であると共に、大きなエネルギー供給源でもあり得る。重力ポテンシャルの浅い銀河団の場合は、一旦ICMが重力収縮した後、超新星爆発による加熱によりICMが銀河団から流れ出たと解釈できる。もしくは、追加エネルギーのためにICMの重力収縮の時期が遅れていると解釈することも可能である。

鉄と珪素を比較した場合、珪素の方が失われた比が大きい。鉄が主に1a型超新星爆発で生産され、珪素は2型の寄与が十分にあり、楕円銀河の進化の上で2つの型の超新星爆発の時期がずれていることを考えると、2型超新星爆発が寄与している時期にガス流失が起こったと考えることができる。

この結果は、前のセクションで述べたM87/Virgoの重金属組成比の空間的勾配と結果と合わせて考える必要があるだろう。酸素と珪素の違いはあるが、両者の結果は軽い元素すなわち2型超新星爆発的な元素は、銀河団進化の初期に放出されたことを示している。

3　楕円銀河 (松下 D 論)

3.1　2 種類の楕円銀河

「あすか」による X 線輝度分布の観測から楕円銀河は “X-ray Extended” と “X-ray Compact” の 2 種類に分類されることが分かった。前者は ISM の X 線輝度分布が空間的に中心成分と拡がった成分の 2 段構造になっている。一方、“X-ray Compact” は 1 段のみの構造であり、これは “X-ray Extended” の中心成分に相当すると考えられる。X 線光度は “X-ray Extended” は $L_{\mathrm{X}} \gtrsim 10^{41}\mathrm{ergs\ s^{-1}}$ と高いのに対し、“X-ray Compact” は $L_{\mathrm{X}} \lesssim 10^{41}\mathrm{ergs\ s^{-1}}$ と低い。図 8 は、それぞれの種類の楕円銀河の典型的な質量分布である。

前述した NGC1399/Fornax 銀河団の質量分布と比較すると、“X-ray Extended” の拡がった成分は、銀河群スケールのポテンシャルに相当することが分かる。“X-ray Extended” と “X-ray Compact” の X 線光度の差は、この銀河群スケールのポテンシャルに溜っている高温プラズマの存在の有無によると考えられる。先に “X-ray Compact” は重力ポテンシャルは 1 段構造と述べたが、この表現は正確ではない。拡がった重力ポテンシャルは存在するが、高温プラズマが溜って居ないため観測されなかった可能性もある。よって “X-ray Compact” 楕円銀河に付随する拡がった重力ポテンシャルの存在の有無については、この観測からは制限をつけることはできない。

3.2　ISM/ICM への重元素供給問題

酸素、ネオン、マグネシウム、珪素、硫黄の α 元素を同じ組成比として、“X-ray Extended” の ISM の重金属組成比を求めたところ、$A_{\alpha}(\mathrm{ISM}) \sim 1\mathrm{solar}$、$A_{\mathrm{Fe}}(\mathrm{ISM}) \sim 1\mathrm{solar}$ が得られた。前に述べた通り、この結果から超新星爆発頻度と重金属生産レートに制限をつけることができる。ISM のクーリングタイムで決まる寿命は $\sim 10^{6}\mathrm{yr}$ と短く、ISM の起源は、現在放出されている Stellar Mass Loss と 1a 型超新星爆発のみであると考えられる。Stellar Mass Loss Rate、その Stellar Mass Loss に含まれる鉄による ISM への単位時間あたりの鉄の供給量、星に含まれる平均的な鉄の組成比、1 つの 1a 型超新星爆発で合成される鉄の質量と 1a 型超新星爆発の頻度から得られる単位時間あたりの鉄供給質量をそれぞれ、$\dot{M}(\mathrm{ML})$、$\dot{M}_{\mathrm{Fe}}(\mathrm{ML})$、$A_{\mathrm{Fe}}(\mathrm{ML})$、$\dot{M}_{\mathrm{Fe}}(\mathrm{SN1a})$、とおくと、以下の式が得られる (1a 型超新星爆発から放出されるガスはほとんど重金属のみなので、ガス質量全体にはほとんど寄与しない)。

$$A_{\mathrm{Fe}}(\mathrm{ISM}) = \frac{\dot{M}_{\mathrm{Fe}}(\mathrm{ML}) + \dot{M}_{\mathrm{Fe}}(\mathrm{SN1a})}{\dot{M}(\mathrm{ML})} = A_{\mathrm{Fe}}(\mathrm{ML}) + \frac{\dot{M}_{\mathrm{Fe}}(\mathrm{SN1a})}{\dot{M}(\mathrm{ML})}$$

楕円銀河全体で平均した星に含まれる鉄の組成比は、光学スペクトル観測で得られる Mg_2 インデックスから、$A_{\mathrm{Fe}}(\mathrm{Star}) sim 0.75 - 1\mathrm{solar}$ と求められている ([3])。$A_{\mathrm{Fe}}(\mathrm{ML}) = A_{\mathrm{Fe}}(\mathrm{Star})$ であるので、結局

$$A_{\mathrm{Fe}}(\mathrm{ISM}) = A_{\mathrm{Fe}}(\mathrm{ML}) + \frac{\dot{M}_{\mathrm{Fe}}(\mathrm{SN1a})}{\dot{M}(\mathrm{ML})}$$

が得られる。先に述べた $A_{\mathrm{Fe}}(\mathrm{Star})$ と $A_{\mathrm{Fe}}(\mathrm{ISM})$ の値を用いると

$$\frac{\dot{M}_{\mathrm{Fe}}(\mathrm{SN1a})}{\dot{M}(\mathrm{ML})} \lesssim 0.25\mathrm{solar}$$

となる。一方、光学光度曲線から求まる 1a 型超新星爆発の鉄の生産量と、光学的に実際に数えた 1a 型超新星爆発の頻度からは、$\dot{M}_{\mathrm{Fe}}(\mathrm{SN1a})/\dot{M}(\mathrm{ML}) \sim 1 - 2\mathrm{solar}$ となり、大きく食い違う。光学的に 1a 型超新星爆発は起こり、鉄を生産していることは間違いのない事実なので、以上を全て満足させるには、超新星爆発で生産される鉄を ISM に与えないで何らかの方法で隠してしまうか、より大量の鉄を保持する ICM に与えてしまうかのメカニズムが必要になる ([4]、[5])。また、ここでは詳細には述べないが、共鳴散乱による輝線強度の空間的分布の変化も同時に考えるべき問題になり得る ([6])。

4　遠方銀河団

図 9 は、「あすか」によって観測された近傍から遠方までの銀河団について、ICM 温度をパラメーターに 3 つの物理量 – 重力質量、ICM 中の鉄の質量、ICM の質量 – を示したものである ([7])。$z < 0.1$、$0.1 <$

$z < 0.6$、 $0.6 < z$ の 3 つに時期に分け比較してある。 $z < 0.1$ と $0.1 < z < 0.6$ に関しては、いずれの物理量についても違いはなく、 $z < 0.6$ で明らかな進化は見られない。 $0.6 < z$ に関しては現在までに、 2 例の銀河団から「あすか」で有意なデータが得られている。 $z = 0.83$ の MS1054 − 0321 は、いずれの物理量に関しても $z < 0.6$ の銀河団と違うところはない。 $z = 1.0$ の AXJ2019 + 1127 は半径 0.5Mpc まで X 線放射が観測されているが、他の銀河団との比較のため半径 1.0Mpc まで外挿した値も示してある。この銀河団は、重力質量、 ICM 中の鉄の質量は、積分半径の大きさの不定性を考慮すると他の銀河団と違うところは見られない。しかし、 ICM の質量は同じ温度を持つ近傍の銀河団に比べ 1/2 ∼ 1/5 しか存在しないことがわかった (すなわち ICM 中の鉄組成比が非常に高いことが観測されている訳である)。

わずか一例にも関わらず一般論に拡張すると、以下のように解釈できる。 $z \sim 1$ の時点で、重力ポテンシャルは既に十分深くなっており、さらに大部分の鉄は生産を終了している。しかし、 ICM はまだ収縮もしくは加熱中であり、存在するはずの大部分のガスは X 線で放射する温度に達していない。その進化も $z \sim 0.8$ では終了し、以降は X 線で見る限り大きな変化は起こっていない。

5 ASTRO-E

重金属を中心に「あすか」で得られた結果をオーバービューした。この問題についてですら、「あすか」で解かれた問題もあれば、ますます混迷を深め、今後に持ち越されたものもある。ここで詳しく紹介できなかったが、「あすか」は他にも新しい物理を切り開いた。これらに関しては、各投稿論文や博士論文を参照して欲しい。参考のために、 Refference で「あすか」による銀河団とその周辺の観測をネタに書かれ、現在一般に手に入る博士論文の一覧を挙げておく。

さて、この状況で「あすか」に続く次期 X 線天文衛星 ASTRO-E が来年 2000 年 2 月に打ち上げられる予定である。 (毎度の事であるが) この画期的な衛星は、 X-Ray Spectrometer (XRS)、 X-ray Imaging Spectrometer (XIS)、 Hard X-ray Detector (HXD) の 3 種類の X 線検出器が搭載しており、その内 XRS と XIS はそれぞれ X-Ray Telescope (XRT) の焦点面に置かれている。

μ カロリメーターである XRS は ASTRO-E の目玉の検出器である。 He 温度下に置かれた X 線吸収体に入射 X 線が与えるエネルギーによって起こる温度上昇を測定することで、 12eV @ 6keV のエネルギー分解能を達成する。これまでの最高のエネルギー分解能が「あすか」SIS の 120eV @ 6keV であることを考えれば、実に 1 桁の性能向上である。 12eV はドップラー速度で 610 km sec−1 に相当するので、これ以上の速度を持つランダム運動を検出することが可能である。輝線中心のエネルギー決定精度はこれより十分良いので、例えば ∼ 50 km sec−1 程度のバルクモーションを検出できるであろう。銀河団内での銀河の運動速度や ICM の音速が幾らであるかを思い出せば、この XRS で「銀河団中の ICM の運動」という、これまで全く観測不能であった軸で物理を打ち出せることは自明である。この XRS で何が出来るか新しいアイディアをお持ちの方は、是非御意見をお聞かせ願いたい。

HXD は Si 半導体検出器とシンチレーションカウンターの組合わせの検出器で、 10 ∼ 700 keV のエネルギーレンジを持つ。「あすか」、 BeppoSAX の観測で可能性の出てきた銀河団からの非熱的放射について詳細な観測が可能になるだろう。

XIS は CCD カメラであり、空間分解能、時間分解能、エネルギー分解能のバランスの取れた汎用の X 線観測装置である。「あすか」の経験を元に様々な点を改良し X 線 CCD カメラとして完成度の高い検出器となった。大きな有効面積を備え近傍銀河団の撮像分光として、また遠方銀河団の探査として活躍するであろう。

参考文献

[1] Makishima K. 1997, in X-Ray Imaging and Spectroscopy of Cosmic Hot Plasmas (Universal Academy Press) p137.

[2] Kronberg P.P. 1994, Rep. Prog. Phys. **325**

[3] Arimoto N. *et al.* , 1997, *Astrophys. J.*, **477**, 128

[4] Fujita Y. *et al.* , 1996, *Astrophys. J.*, **470**, 762

[5] Fujita Y. *et al.* , 1997, *Astrophys. J.*, **488**, 585

[6] Shigeyama T. 1998, *Astrophys. J.*, **497**, 587

[7] Tsuru T.G. *et al.* 1999, in preparetion.

[8] Furuzawa A. Doctor Thesis, Nagoya Univ. 1997, 宇宙科学研究所 Research Note **615**

[9] Ikebe Y. Doctor Thesis, Univ. of Tokyo 1996, 理化学研究所 **CR-87**

[10] Fukazawa Y. Doctor Thesis, Univ. of Tokyo 1997, 宇宙科学研究所 Research Note **664**

[11] Matsushita K. Doctor Thesis, Univ. of Tokyo 1997, 宇宙科学研究所 Research Note **640**

[12] Matsumoto H. Doctor Thesis, Kyoto Univ. 1998, 宇宙科学研究所 Research Note **665**

[13] Tsuru T. Doctor Thesis, Univ. of Tokyo 1992, 宇宙科学研究所 Research Note **528**

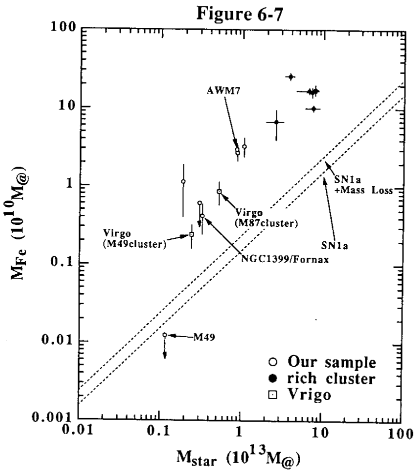

図 1: 「ぎんが」で得られた銀河団中のメンバー銀河の総質量と ICM 中の鉄の質量の相関 (鶴 D 論)。

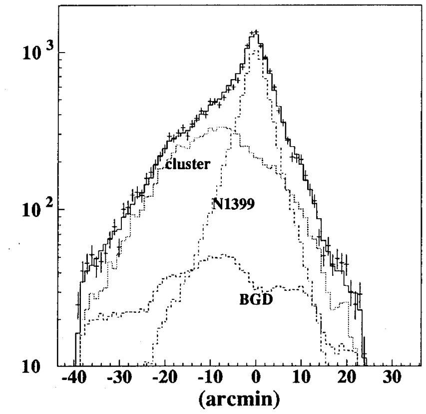

図 2: 「あすか」で得られた Fornax Cluster/NGC1399 の X 線輝度分布 (池辺 D 論)。

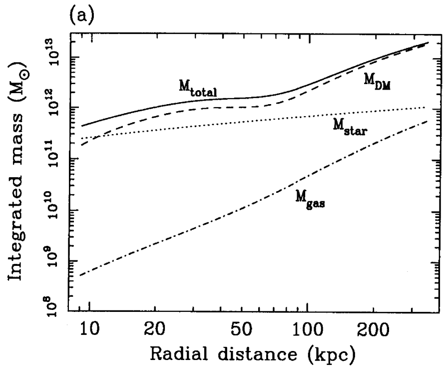

図 3: Fornax Cluster/NGC1399 の質量分布。「あすか」の観測から決まる重力質量分布と ICM の質量分布に加え、星すなわち銀河の質量分布を示している (池辺 D 論)。

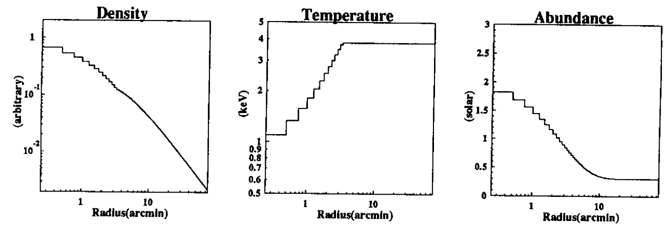

図 4: Centaurus 銀河団のクーリングフローモデル。左から、密度、温度、重金属組成比の半径依存性を示している。このモデルはデータをうまく再現しない (池辺 D 論)。

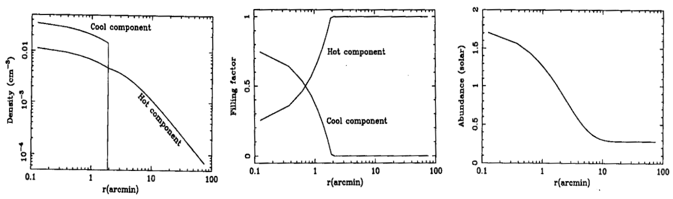

図 5: Centaurus 銀河団の 2 成分モデル。左から、密度、温度、重金属組成比の半径依存性を示している。このモデルはデータをうまく再現する。周辺部は高温成分のみであるが、中心部は低温成分と高温成分が共存している (池辺 D 論)。

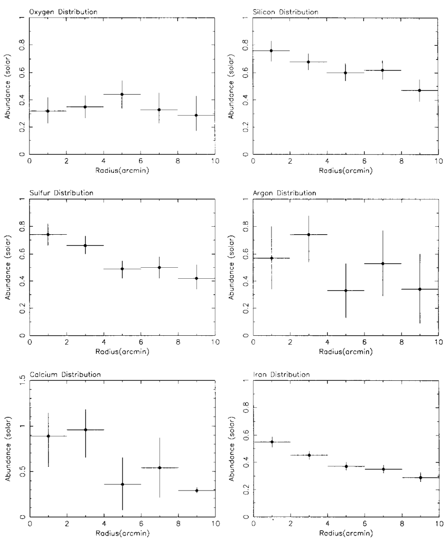

図 6: M87/Virgo 銀河団の重金属組成比の空間的構造。酸素では空間的に一定である一方で、他の元素では空間的な勾配が観測されている (松本 D 論)。

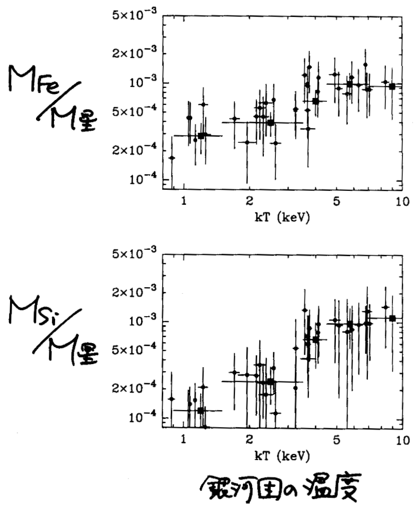

図 7: メンバー銀河の総質量に対する ICM に含まれる鉄、珪素の比と ICM の温度の相関。 ICM の温度はそれぞれの銀河団の重力ポテンシャルの深さを示している (深沢 D 論)。

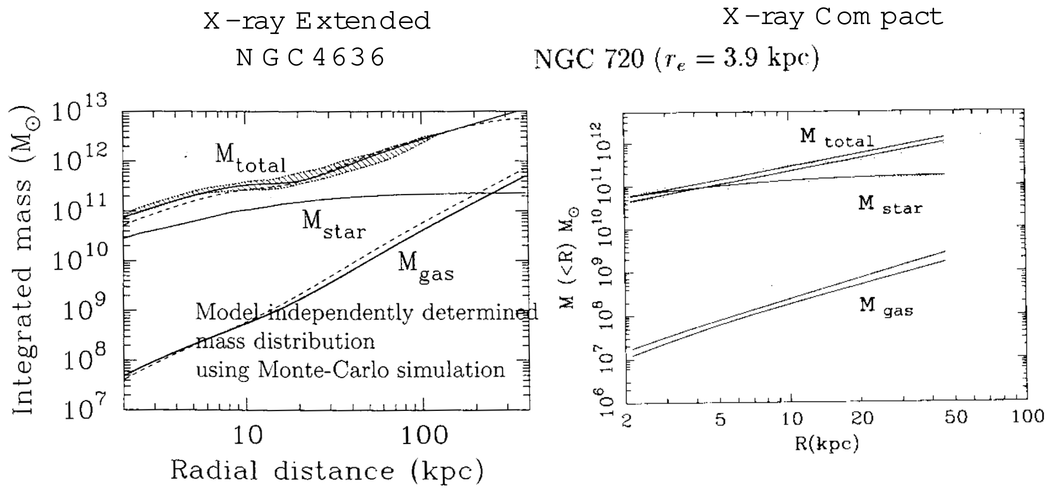

図 8: 2 種類の楕円銀河の典型的な質量分布。左の “X-ray Extende” では重力質量の 2 段構造が見られる。一方、右の “X-ray Compact” では 1 段のみである (松下 D 論)。

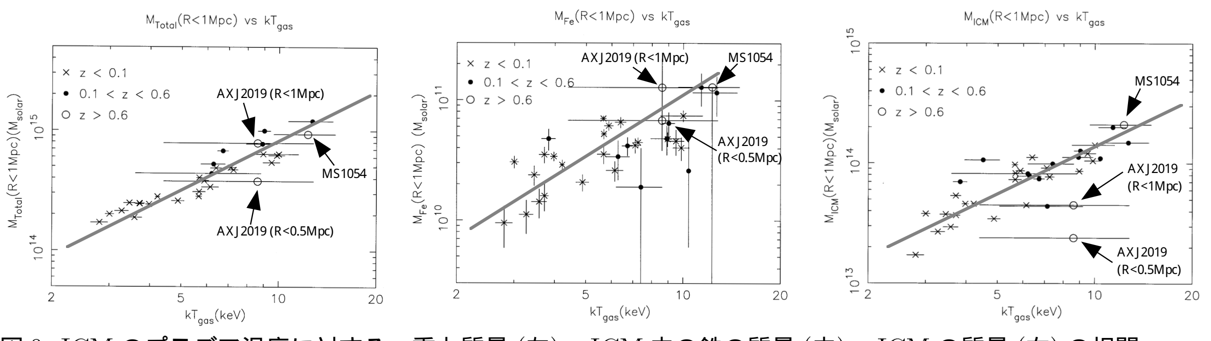

図 9: ICM のプラズマ温度に対する、重力質量 (左)、 ICM 中の鉄の質量 (中)、 ICM の質量 (右) の相関。 $z < 0.1$、 $0.1 < z < 0.6$、 $0.6 < z$ の 3 つに時期に分け比較してある。