

『ぎんが』による銀河団の観測*

廿日出 勇**・山下 廣順**

(1989年1月10日受理)

X-ray Spectra of Five Clusters of Galaxies Observed by Ginga

By

Isamu HATSUKADE and Koujun YAMASHITA

Abstract: Five clusters of galaxies (A 644, A 1413, A 1656, A 2218, A 2256) were observed with the large area proportional counters on board the Ginga satellite in the energy range 1-17 keV. X-ray spectra were well fitted with an optically thin isothermal plasma model. The plasma temperatures and iron abundances of these clusters were in the range of 6 keV~9 keV and 0.19~0.33 times the cosmic value ($n(\text{Fe})/n(\text{H}) = 4.0 \times 10^{-5}$), respectively. The fits show a negative correlation between plasma temperatures and iron abundances. Iron abundances become smaller with increasing plasma temperatures, which probably indicates some evidence of the existence of the cooling flow component in the central core region.

概 要

X線天文衛星『ぎんが』に搭載された大面積比例計数管によって5つの銀河団(A 644, A 1413, A 1656, A 2218, A 2256)の観測を行い1~17 keVのX線スペクトルを得た。X線スペクトルは単一温度の光学的に薄いプラズマからの熱輻射のモデルでよくあい、プラズマの温度は6~9 keV、鉄の宇宙組成($n(\text{Fe})/n(\text{H}) = 4.0 \times 10^{-5}$)に対する比は0.19~0.33に分布している。プラズマの温度と鉄の存在比

* 宇宙研特別事業費による研究論文

** 大阪大学理学部.

の間には負の相関があり、温度が高くなるほど、鉄の存在比は低くなっている。この相関は銀河団の中心部にある cooling flow 成分による影響であると思われる。

序

銀河団は銀河系外の X線源の中では最も数の多い天体である。X線源が広がっていること、X線スペクトルに高階電離した鉄の輝線が見られることから、X線の大部分は銀河団を満たす光学的に薄い高温プラズマ (10^8 K) からの熱的な輻射であると考えられている。可視領域で主に銀河が観測されるのに対して X線領域では主に銀河間ガス (intracluster gas) が観測される。その質量は銀河の質量の総和に匹敵しており、銀河と同じ重力場のなかに束縛されていることから、銀河団の X線の観測と可視の観測は相補的な関係にある。X線領域の観測からは、銀河間ガスの量、温度、重元素の存在量、それらの 2次元分布等が得られる。可視領域の観測からは銀河の形状、分布、速度分布、赤方偏移等が得られ、これらのパラメータ間の相関が調べられている [1-3]。

鉄輝線が存在することから銀河間ガスは原始ガスに銀河から放出されたガスが混合したものと考えられている。鉄のような重元素は Big Bang の時には生成されず星の中の核反応によって生成されるからである。従ってガスの温度や量とともに鉄の存在比は銀河団の起源と進化、そして銀河間ガスの成因を考える上で重要な手がかりになる。HEAO-1 の観測で、鉄の存在比はほとんどの銀河団で宇宙組成 [4] の 0.44 倍程度であることが知られているが、いくつかの明るい銀河団を除くとよい精度では決定されていない [5]。

銀河団は遠方にあるため観測される X線強度は弱く、鉄の存在比を決定するためには有効面積の大きい検出器が必要である。X線天文衛星『ぎんが』に搭載された大面積比例計数管 (LAC) を使って 5 つの銀河団の観測を行ない、これまでになかった統計のよい X線スペクトルを得ることができたので、この結果を報告する。

観 測

A 2256, A 1656 (Coma cluster), A 2218, A 644, A 1413 の 5 つの銀河団の観測を行った。A 2256, A 1656 は Rood-Sastry の形態分類で B 型、A 2218, A 644, A 1413 は cD 型である。どちらの型も力学的進化のすすんだ明るい銀河団である。B 型は中心部に 2 つの明るい銀河が存在し比較的等温であるのに対して、cD 型では中心部に巨大な楕円銀河が存在し cooling flow を伴っている場合もあり必ずしも等温ではないと考えられている。また、これらの銀河団は EINSTEIN によって観測されており、X線の強度分布が得られている [1]。

観測には X線天文衛星『ぎんが』に搭載された大面積比例計数管 (LAC) を用いた。LAC は 8 本の比例計数管で構成されており、総有効面積は 4000 cm^2 、視野は $1^\circ \times 2^\circ$ (FWHM) である。1~37 keV の X線に感度があり、6 keV におけるエネルギー分解能は約 18% (FWHM) である。データは各カウンターのレイヤー別に 48 チャンネルの波高分布として

表1 Clusters of Galaxies Observed by GINGA

Name	Rood-Sastry type	Z	Obs. Time	Obs. Time (sec)	Intensity (counts/sec/LAC)
A2256	B	0.0601	87/04/27-28	13000	35.2
A1656 (Coma)	B	0.0232	87/07/01	18000	168.6
A2218	cD	0.1710	87/11/12-13	7000	4.0
A644	cD	0.0704	88/04/21-22	19000	23.5
A1413	cD	0.1427	88/05/07-09	22000	10.0

集積される。『ぎんが』及びLACについては[6, 7]に詳しく述べられている。

銀河団のように暗いX線源の解析にはバックグラウンドの評価が重要である。バックグラウンドはX線によるものと荷電粒子によるものがある。荷電粒子によるバックグラウンドは衛星の軌道に関係した37日周期の変動があるので銀河団を観測した前後の日にバックグラウンドを取得するようにした。X線のバックグラウンドには場所によるゆらぎがあるのでそれを避けるために銀河団から2~3°離れ、他のX線源がLACの視野内に入らないような所を選んだ。A 1413, A 644を観測したときには銀河団の周りのX線バックグラウンドの様子を調べるためにスキャンによる観測も行い未知の弱いX線源が混入しないようにした。

観測した銀河団の赤方偏移、Rood-Sastry分類による型、観測日、観測時間、X線強度を表1にまとめた。またこの論文を通してハッブル定数 H_0 は50(km/sec/Mpc)を用いることにする。

解 析

上記のように取得したバックグラウンドをX線源上にポインティングしたときのデータから差引き各々の銀河団について1~17 keVのX線スペクトルを得た(図-1 a~e)。これらのデータを用いスペクトルフィッティングを行った。最初に単一温度の熱制動輻射と鉄輝線に星間吸収を入れたモデルを用いた。このとき、熱制動輻射のガウント係数は[8]に述べられている係数を用いた。また、鉄輝線の線幅はカウンターのエネルギー分解能に比べて十分に細いとした。星間吸収は[9]に述べられているモデルを用い、中性水素のコラム数密度は21 cmの電波観測から求められた値[10]に固定した。熱制動輻射の温度、強度、鉄輝線の中心エネルギー、強度をフリーパラメータにし、フィッティングを行った。この結果を表2にまとめた。どの銀河団にも赤方偏移を受けた鉄輝線があることがわかった。可視領域で求められた赤方偏移量[11]で補正すると中心エネルギーはいずれも6.85 keVくらいになる。連続成分の温度(6~9 keV)から期待される鉄の $K\alpha$ 輝線の中心エネルギーは6.75 keVくらいであり、観測された値は少し高めになっている。これは鉄の $K\beta$ 線、ニッケルの $K\alpha$ 線の影響である。

鉄の存在比を求めるために、もっと現実的な単一温度の電離平衡にあるプラズマからの

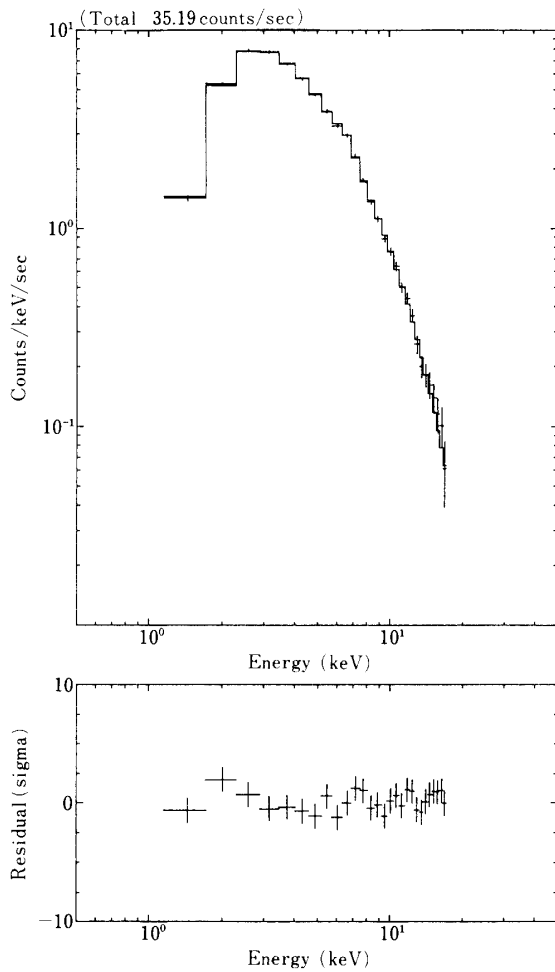


図 1-a A 2256

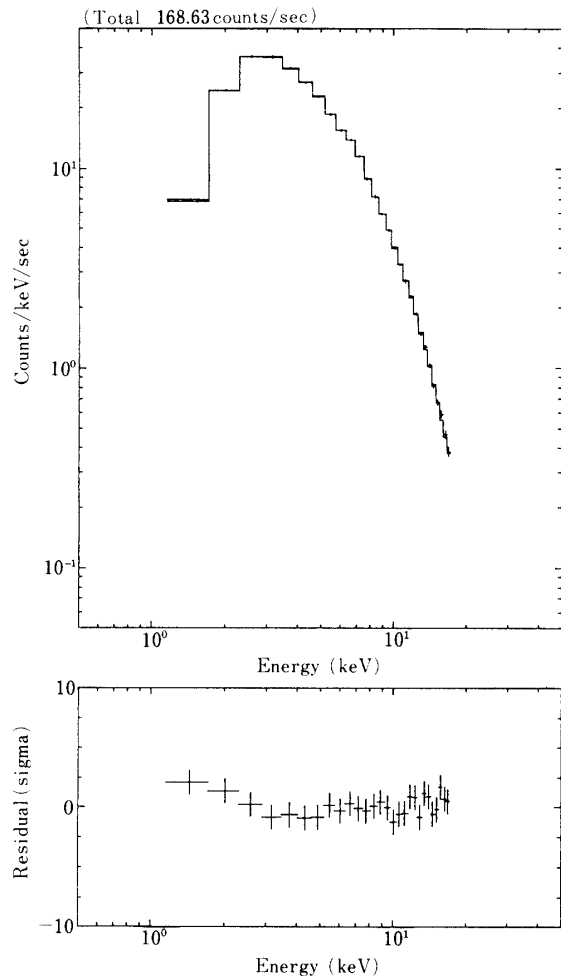


図 1-b A 1656

図 1 上図は『ぎんが』による観測で得られた A 2256, A 1656, A 2218, A 644, A 1413 の X 線スペクトル。図中の + 記号は観測値を示し、その誤差の大きさは $\pm 1\sigma$ である。図中の実線はスペクトルフィットの等温プラズマモデルである。下図は観測値とモデルとの差を示している。

熱輻射に星間吸収を入れたモデルを用いた。プラズマからの熱輻射のモデルは[12]に述べられているものを使った。星間吸収については最初のフィッティングと同様にした。フリーパラメータはプラズマの Emission Integral, 温度, 珪素からニッケルまでの元素の宇宙組成[4]に対する比率である。この比率は各元素一律に変化させているが主に鉄の存在比を反映しているので、今後この値を鉄の存在比とする。今回のフィッティングではモデルに赤方偏移 z による補正を入れている。赤方偏移の大きさは[11]に述べられている値に固定した。この結果は表 3 にまとめた。

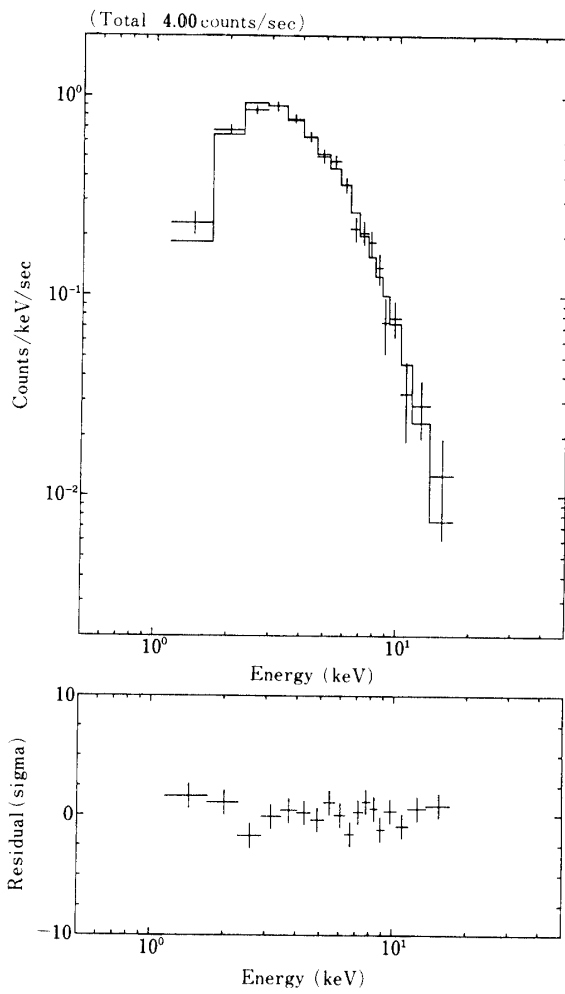


図 1-c A 2218

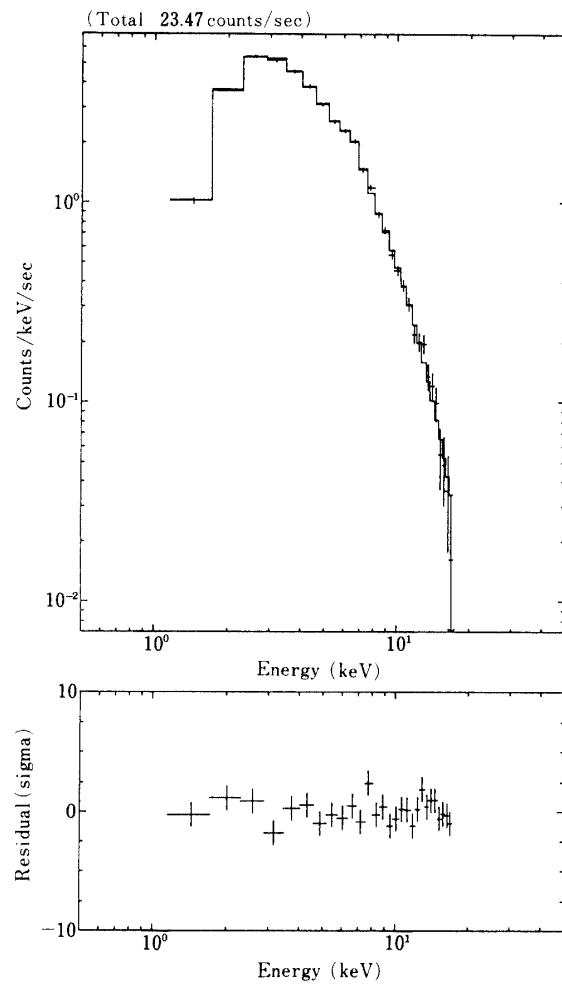


図 1-d A 644

表 2 Model : Thermal Bremsstrung + one emission line

Name	Temperature (keV)	Iron Line Intensity (10^{-4} photons/sec/cm 2)	Energy (keV)	*1 Corrected Energy (keV)	*2 Interstellar Absorption N_H (10^{20} cm $^{-2}$)	Reduced χ^2	Degree of Freedom
A2256	7.32 ± 0.18	1.9 ± 0.4	6.56 ± 0.09	6.95 ± 0.10	6.0	0.80	24
A1656 (Coma)	8.15 ± 0.08	6.8 ± 0.7	6.70 ± 0.07	6.85 ± 0.07	2.8	1.18	24
A2218	5.93 ± 0.78	0.25 ± 0.17	5.50 ± 0.52	6.44 ± 0.60	2.8	0.88	14
A644	6.43 ± 0.16	1.6 ± 0.3	6.39 ± 0.09	6.84 ± 0.09	7.2	1.33	24
A1413	7.95 ± 0.46	0.36 ± 0.20	5.92 ± 0.34	6.76 ± 0.40	2.8	0.51	19

*1 赤方偏移 [11] による補正をした鉄の中心エネルギー。

*2 星間ガスによる吸収の量は21cmの電波観測から求められた値に固定した [10]。

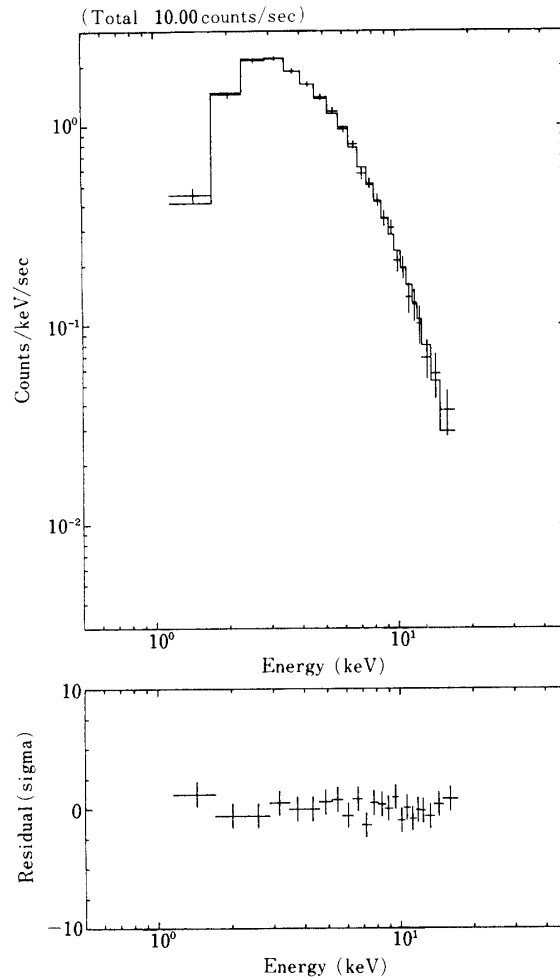


図 1-e A 1413

表 3 Model : Isothermal Plasma Model

Name	Temperature (keV)	*1 Fe Abundance	Emission Integral (10^{67}cm^{-3})	*2 Interstellar Absorption $N_{\text{H}} (10^{20} \text{cm}^{-2})$	* 3 Red Shift Z	Reduced χ^2	Degree of Freedom
A2256	7.51 ± 0.19	0.28 ± 0.05	11.5	6.0	0.0601	0.77	25
A1656(Coma)	8.11 ± 0.08	0.22 ± 0.03	8.00	2.8	0.0232	0.78	25
A2218	6.79 ± 0.96	0.19 ± 0.23	12.7	2.8	0.1710	0.93	15
A644	6.60 ± 0.17	0.33 ± 0.05	11.5	7.2	0.0704	0.98	25
A1413	8.85 ± 0.51	0.19 ± 0.11	19.3	2.8	0.1427	0.51	20

*1 宇宙組成 ($n(\text{Fe})/n(\text{H}) = 4.0 \times 10^{-5}$)

*2 星間ガスによる吸収の量は21cmの電波観測から求められた値に固定した [10]。

*3 赤方偏移の大きさは光学領域で決められた値に固定した [11]。

結果及び議論

(1) A 1656 (Coma cluster)

Coma cluster はこれまでに観測的にも理論的にも最もよく研究されている rich cluster である。HEAO-1 による観測から Henriksen and Mushotzky [13] は X 線スペクトルが等温プラズマのモデルではうまくあわず, intracluster gas に温度分布があることを示した。しかし、『てんま』の SPC による観測では等温プラズマのモデルで良くあった。『ぎんが』のデータも等温プラズマモデルで良くあう。『てんま』の観測によると温度は 7.5 ± 0.2 keV, 鉄の存在比は 0.21 ± 0.03 であり [14, 15], 『ぎんが』では温度は 8.1 ± 0.1 keV, 鉄の存在比は 0.22 ± 0.03 である。鉄の存在比は『てんま』の値によく一致しているが温度は『てんま』の結果より若干高い値になった。この違いは検出器の視野の広さによるのか統計精度によるのかは今後詰めなければならないが, 視野の違いであるとすれば銀河団の周りに広がった低温度の成分があることを示している。

(2) A 2256, A 644

A 2256 は OSO-8 による観測で温度が $7.0 (+3.0, -2.0)$ keV, 鉄輝線の等価幅が $0.19 (+0.68, -0.19)$ keV と求められている [1]. 『ぎんが』による観測によると A 2256 は, 温度は 7.5 ± 0.2 keV, 鉄の存在比は 0.28 ± 0.05 である。A 644 は, 温度は 6.6 ± 0.2 keV, 鉄の存在比は 0.33 ± 0.05 である。『ぎんが』の観測結果は以前の観測の誤差の範囲内であり, 更により精度でこれらの値を決定した。

(3) A 2218, A 1413

これらの銀河団は赤方偏移が大きい ($Z > 0.1$) 銀河団である。EINSTEIN 以前の観測では強度が弱いために温度, 鉄の存在比はわかっていない。EINSTEIN の観測から intracluster gas の温度は, A 2218: $10.1 (+\infty, -4.3)$ keV, A 1413: $8.1 (+3.6, -2.1)$ keV と求められている [16]。しかし EINSTEIN の結果は 4 keV 以下のエネルギー範囲で IPC, HRI で決定されたもので精度が良くない。『ぎんが』による観測で, 温度は A 2218: 6.8 ± 1.0 keV, A 1413: 8.9 ± 0.5 keV 鉄の存在比は A 2218: 0.19 ± 0.23 , A 1413: 0.19 ± 0.11 と求められた。今回の観測からは z の大きい銀河団と z の小さい銀河団のあいだで温度, 鉄の存在比に大きな違いは見つからなかった。銀河団の進化による効果を調べるためには更に遠方の銀河団の観測が必要である。

観測した 5 つの銀河団はいずれも単一温度の電離平衡にある光学的に薄いプラズマからの熱的なスペクトルでよく表わされた。Virgo cluster [17] に見られるような high energy tail は見られなかった。また, 銀河団の中心付近に cooling flow が存在するとその低温成分のために soft excess が観測されることが期待されるが, そのような soft excess は見られなかった。LAC のようにイメージングのできない検出器では銀河団全体を平均したスペクトルを観測していることになり, 銀河間ガスの温度分布に対してあまり感度が良くない。観測した銀河団の温度は比較的高く ($T > 6$ keV) cooling flow はないか, あっても小さいと考えられており, このことは観測と矛盾しない。

HEAO-1 の観測から鉄の存在比は銀河団によらず一定で平均の存在比は宇宙組成の

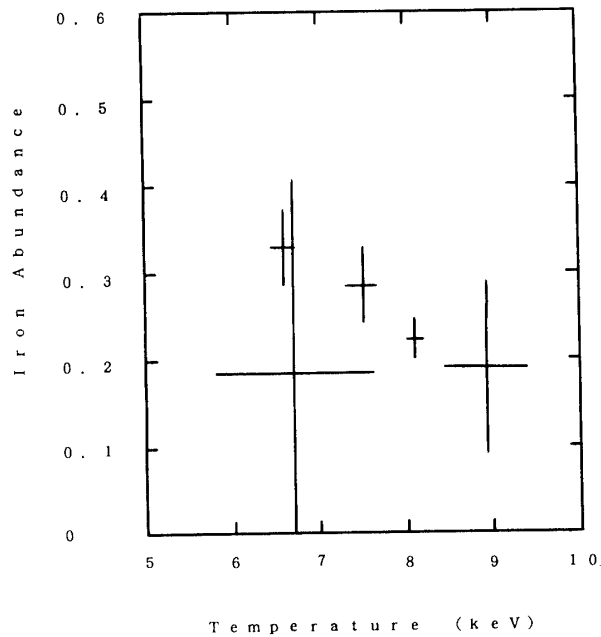


図2 銀河団の温度と鉄の存在比の関係をしめす。(表3参照)

0.44倍である。鉄の存在比と温度、X線の明るさ、赤方偏移の大きさの間にはほとんど相関がないと思われている[5]。今回観測した銀河団の鉄の存在比は宇宙組成の0.20~0.35倍程度のところに分布しており、いずれも今までにいわれている値よりも小さい。これとは反対に Virgo cluster の鉄の存在比は0.58と平均的な値よりも大きいことが知られている[18]。鉄の存在比はいままでいわれているように一定なのではなく銀河団によって違いがあるようである。観測した銀河団の温度と鉄の存在比の関係を図2に示す。温度が高くなるほど鉄の存在比が小さくなる傾向が見られる。この関係は銀河団中心部の cooling flow の影響だと考えるとうまく説明することができる。鉄輝線の等価幅はプラズマの温度が2 keV 付近で最大になり、それより温度が高くなると徐々に低くなる。2 keV 付近に低温な成分が存在すると見かけの鉄の存在比は大きくなり、温度は低くなる。低温成分へ鉄が集中しているとすればこの傾向がさらに強くでる。この説明で正しいかどうか、EINSTEIN で得られたX線の強度分布との比較を行なって今後詰めていかななくてはならない。また、観測した銀河団の温度は6~9 keV の範囲であるので、温度と鉄の存在比の関係をはっきりさせるために、低い温度の銀河団の観測が必要である。サンプルが5つしかないので他のX線領域、可視領域のパラメータとの相関は議論しないが、今後サンプルが増えてくればそのような議論ができるようになるだろう。

ま と め

5つの銀河団(A 644, A 1413, A 1656, A 2218, A 2256)のX線スペクトル(1~17 keV)は単一温度の光学的に薄いプラズマからの熱輻射でよくあい、温度は6~9 keV、鉄の存在比は宇宙組成の0.19~0.33倍に分布している。鉄の存在比は温度が高くなると低くなる傾向がみられる。この傾向は銀河間ガスに低温成分(cooling flow)があることを示している。『ぎんが』によって暗い銀河団まで観測が可能になったので、鉄の存在比と温度の関係がはっきりさせるためにも、もっといろいろな銀河団についてX線観測が必要である。

謝 辞

『ぎんが』の製作、打ち上げに関わった方々、『ぎんが』の運用をされている方々、データ解析のプログラムを開発された方々に心から感謝いたします。

参 考 文 献

- [1] Mushotzky, R. F., Serlemitsos, P. J., Smith, B. W., Blodt, E. A. and Holt, S. S.: *Astrtrphys. J.* 225 (1978), 21.
- [2] Abramopoulos, F., and Ku, W. H. M.: *Astrtrphys. J.* 271 (1983), 446.
- [3] Kowalski, M. P., Ulmer, M. P., Cruddace, R. G. and Wood, K. S.: *Astrtrphys. J. Suppl.* 56 (1984), 403.
- [4] Allen, C. W.: 1973 *Astrophysical Quantities* (The Athlone Press, London).
- [5] Mushotzky, R. F.: *Phys. Scrip.*, T 7 (1984), 157
- [6] Makino, F., and the ASTRO-C team: *Astrophys. Lett. Communications*, 25 (1987), 223.
- [7] Turner, M. J. L., et al.: submitted to *Publ. Astron. Soc. Japan.* (1988).
- [8] Gould, R. J.: *Astrophys. J.* 238 (1980), 1026.
- [9] Morrison, R. and McCammon, D.: *Astrtrphys. J.* 270 (1983), 119.
- [10] Heiles, C.: *Astron. Astrophys. Suppl.* 20 (1975), 37.
- [11] Struble, M. F. and Rood, H. J.: *Astrtrphys. J. Suppl.* 63 (1987), 543.
- [12] Masai, K.: *Astrophys. Space Sci.*, 98 (1984), 367.
- [13] Henriksen, M. J. and Mushotzky, R. F.: *Astrtrphys. J.* 302 (1986), 287.
- [14] Okumura, Y., Tsunemi, H., Yamashita, K., Matsuoka, M., Koyama, K., Hayakawa, S., Masai, K. and Hughes, J. P.: *Publ. Astron. Soc. Japan.* 40 (1988), 639.
- [15] Hughes, J. P., Yamashita, K., Okumura, Y., Tsunemi, H. and Matsuoka, M.: *Astrtrphys. J.* 327 (1988), 615.
- [16] Perrenod, S. C. and Henry, J. P.: *Astrtrphys. J. letter* 247 (1981), L 1.
- [17] Lea, S. M., Reichert, G., Mushotzky, R. F., Baity, W. A., Gruber, D. E., Rothschild, R. and Primini, F. A. *Astrtrphys. J.* 246 (1981), 369.
- [18] Smith, A. and Stewart, G.: *Space Science Reviews* 40 (1985), 661.