

銀河団と宇宙大局構造

山下 廣順*・小山 勝二**

1. はじめに

銀河団は宇宙で最も大きな重力的に閉じた銀河と銀河間ガス (ICM) の集合体であり, その質量は $10^{13} \sim 10^{15} M_{\odot}$, 大きさは $0.1 \sim 1 \text{ Mpc}$ である. 光学観測では主に銀河のみを観測し, 銀河の空間分布による形態, 速度分散, 赤方偏移 (z) を知ることができ, 全天でこれまでに 4073 個の銀河団がカタログにまとめられている (Abell *et al.*, 1989). 銀河団の形成と進化, 銀河間ガスの起源あるいはミッシング質量の問題を解明するためには X 線観測が重要な役割を担っている.

銀河団は銀河系外で最も多く, 非常に明るい広がった X 線源であり ($10^{43} \sim 10^{45} \text{ ergs/s}$), その X 線放射は希薄で高温な銀河間ガス ($kT=2 \sim 10 \text{ keV}$) からの熱放射であると考えられている. エネルギースペクトルには高階電離した鉄の強い輝線が存在する. 鉄の存在比は温度, 密度及びそれらの分布と共に銀河間ガスの起源を知る上で大きな指標になるし, そのエネルギーとプラズマ温度から赤方偏移も求めることが出来る.

今までに X 線で観測された銀河団の数は 400 個程になり, 最も遠方のもので $z=0.84$ である. そのうちの 200 個程がインシュタイン衛星によって $0.5 \sim 4 \text{ keV}$ のエネルギー領域での X 線の表面輝度分布が観測され, その形状が規則的かあるいは cD 銀河が中心にあるかないかによって大きく 4 つに分類されている. $2 \sim 20 \text{ keV}$ のエネルギー領域で詳しいスペクトルが観測されたものは 40 個程度でその大部分は z が 0.1 以下である. そのうち 30 個の銀河団で鉄の輝線が観測され, 鉄の平均の存在比は宇宙組成 ($n(\text{Fe})/n(\text{H})=4.0 \times 10^{-5}$) の 0.44 倍となる. これは原始ガスに銀河の中で生成された重元素が混合したものと考えられる. しかし, 「てんま」に搭載された, 従来の比例計数管に比べてエネルギー分解能が 2 倍優れた蛍光比例計数管によって 5 個の明るい銀河団についてより詳しいスペクトルが観測され, 鉄の輝線が初めて $K\alpha$ と $K\beta$ に分離された. 赤方偏移したそのエネルギーが精度良く求められ, 鉄の組成比の決定精度も向上した.

ここでは「ぎんが」の観測によって得られた結果を基に銀河団の X 線スペクトル, 超銀河団の X 線表面輝度分

布と宇宙の大局構造及び宇宙論の問題について述べる.

2. 銀河団の X 線スペクトル

「ぎんが」に搭載された大面積比例計数管によって表 1 に示すように今までに 30 個の銀河団の X 線スペクトルが $1 \sim 17 \text{ keV}$ のエネルギー領域で観測された. その中には z が 0.1 以上の遠方の銀河団が 12 個含まれている. ポインティングによるスペクトル観測の他に, 未知の X 線源の混入を知るためにそれぞれの銀河団の近傍 6 度の範囲のスキャン観測を行った. これによっていくつかの未知の X 線源が見つげられた.

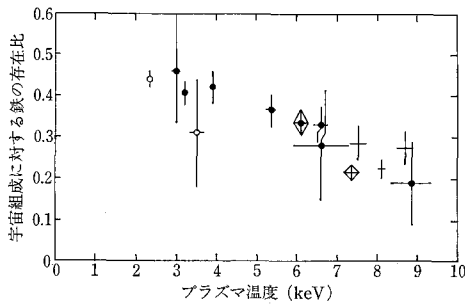
表 1 「ぎんが」で観測された銀河団

名 称	位 置		赤 方 偏 移	形 態 分 類	強 度 (C/S)
	赤 経	赤 緯			
CL 0016+16	4.00	16.15	0.545	cD	<1
A 33	6.15	-19.79	0.28	F	<1
A 401	44.05	13.38	0.0748	cD	30
A 426 (Per)	48.84	41.34	0.0183	L	127.6
A 478	62.67	10.33	0.0900	cD	35.8
A 483	63.42	-11.66	0.280	F	2.5
A 496	67.82	-13.36	0.0316	cD	33.1
A 644	123.75	-7.36	0.0781	cD	23.5
A 665	126.54	66.06	0.1816	F	7.5
Hyd A	138.92	-11.88	0.0522	cD	15
A 963	153.54	39.28	0.207	B	3
A 1060	158.62	-27.27	0.0114	C	30.5
A 1367	175.48	20.12	0.0215	F	23.2
A 1413	178.20	23.66	0.1427	cD	10.0
Vir (M 87)	187.08	12.67	0.0038	I	173.7
Cen Cl	191.51	-41.04	0.0107	—	65.6
A 1656 (Coma)	194.35	28.25	0.0235	B	168.6
A 1689	197.26	-1.08	0.1747	C	9.3
WP 23	198.18	-16.13	0.0087	—	7.4
A 1795	206.67	26.84	0.0621	cD	31.7
A 2009	224.50	21.57	0.1530	cD	7.3
MKW 3s	229.85	7.88	0.0434	cD	12.6
A 2063	230.15	8.82	0.0337	cD	14.8
A 2142	239.06	27.37	0.0904	B	40.0
A 2163	243.23	-6.02	0.1698	C	12.6
A 2218	248.94	66.33	0.1710	cD	4.0
A 2256	256.65	78.78	0.0601	B	35.2
SC 2246-647	341.50	-64.70	0.2	—	6.4
A 2507	343.55	5.24	0.193	I	4.4
A 2634	354.00	26.75	0.0322	cD	11

* 阪大理 Koujun Yamashita, ** 名大理 Katsuji Koyama:
Clusters of Galaxies and Large Scale Structure of Universe

観測されたスペクトルに衝突電離平衡にある光学的に薄い高温プラズマからの熱放射スペクトルを適合させ、プラズマ温度と鉄の存在比を求めた。12 個の銀河団について解析を終えたが、その大部分は等温プラズマからの熱放射として説明できる。プラズマ温度は 2~9 keV、鉄の宇宙組成に対する存在比は 0.2~0.45 となり、鉄の存在比は温度が高くなるにしたがって小さくなる (図 1)。特にこの傾向は cD 銀河を中心部を持つ銀河団 (XD) で顕著であり、それを持たない銀河団 (nXD) は温度が高く (8 keV) 鉄の存在比が小さい (0.25) ところに分布している。

この事実は次のように説明することができる。XD 型銀河団では中心部ではガス密度が高く、放射冷却が大きくなり、圧力が下がり、外から内へのガスの流れ (cooling flow) が形成される。即ち、中心部には低温、高密度のプラズマがあり、高温、低密度のプラズマがそれを



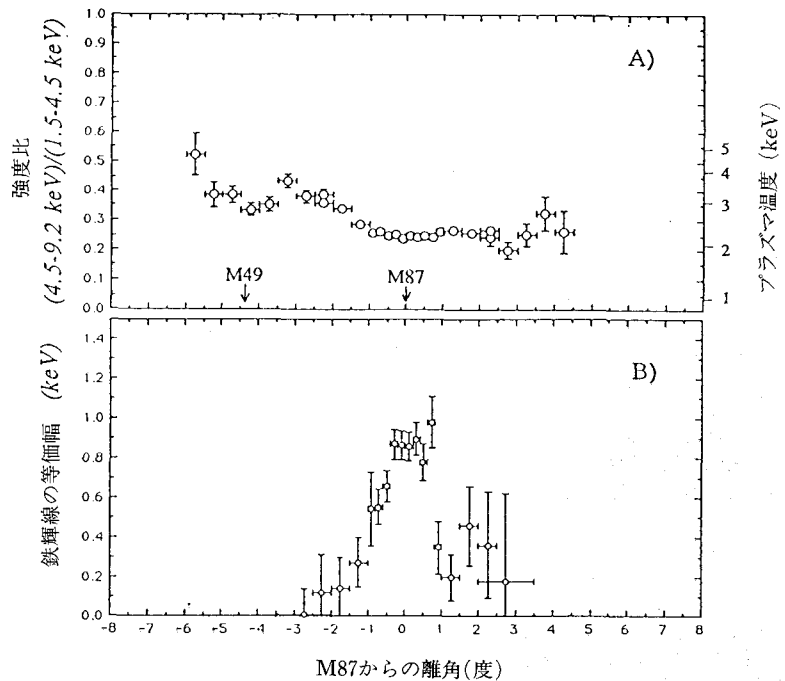
▲ 図 1 「ぎんが」で観測された銀河団のプラズマ温度と鉄の存在比との関係。
 ● は XD 型銀河団, ○ は nXD 型銀河団, ◇ は不規則型銀河団, ○ は「てんま」による観測値

取りまいている。「ぎんが」の観測では識別できないが温度勾配が存在していることを示唆している。一方、nXD 型銀河団では銀河の運動による加熱と放射冷却が釣り合っており、低温、高密度の領域が形成されていない。このことはアインシュタイン衛星による撮像観測の結果とも合致している。温度が低いほど鉄の存在比が大きくなる傾向は低温成分の鉄の存在比が高温成分のそれより大きくなっていることを示している。XD 型の高温成分を nXD 型の温度と同じであるとすると、低温成分の温度は 3~5 keV、鉄の存在比は 0.5 程度になる。これは銀河団の進化の様子を反映していると考えられる。nXD 型の鉄の存在比が銀河団の形成以前か以後かはその赤方偏移依存性を見れば明らかになるであろう。

3. 宇宙の大局構造

「ぎんが」は結像機能を持っていないために銀河団の詳しい構造を観測することはできないが、スキャン観測によって 1 度以上に広がった構造については知ることが出来る。そこで近い銀河団の広がりあるいは超銀河団の構造を調べるために、乙女座銀河団を含む 90 平方度の領域及び Coma/A 1367 超銀河団 (80 平方度) を 1 度/2 分のスキャン速度で観測した。検出限界は弱い X 線源による揺らぎによって決まり、1.8 c/s (3σ) となる。このような観測ではいくつかの未知の弱い X 線源が見つかり、宇宙 X 線背景放射の成因を探る上でも重要である。

乙女座銀河団近傍の観測結果として、M 87 からの離



▶ 図 2 「ぎんが」で観測された乙女座銀河団のプラズマ温度 (A) と鉄輝線の等価幅 (B) の M 87 からの離角に対する分布。

角に対するプラズマ温度及び鉄輝線の等価幅の分布を図2に示す。等価幅の明かな中心集中がみられ、中心での鉄の存在比は宇宙組成の0.5倍となる。Coma/A 1367超銀河団の観測では超銀河団に伴うX線での構造は有意に検出できなかったが、4個の未知のX線源が見つかり、この領域からの超過分の 3σ 上限値として 0.73 c/s ($3.2 \times 10^{-9}\text{ erg s}^{-1}\text{ cm}^{-2}\text{ sr}^{-1}$)を得た。この値は今までの値の1/2となり、宇宙X線背景放射の強度の5%に相当する。

超銀河団/ボイドによる宇宙の大局構造はX線ではまだ確認できていないが、「ぎんが」による観測はその検出限界を著しく向上させ、宇宙X線背景放射の問題をも絡めて一歩前進したといえる。

4. 宇宙論的問題

銀河団のX線観測によって宇宙論的問題を解明するために、プラズマ温度(T_x)の z 依存性から臨界密度(Ω)を求めることが試みられている。Perrenod (1980)によれば $\langle T_x(z) \rangle = (1 + \Omega^{2/3} z)^{-2} \langle T_x(0) \rangle$ と表わされる。アインシュタイン衛星で観測された $z < 0.545$ の18個の銀河団では銀河団の進化を考慮した $\Omega = 1$ のモデルとよく合うとしている。ただし、温度は $0.5 \sim 4.5\text{ keV}$ のエネルギー領域での2つの帯域の強度の比から求められた。「ぎんが」ではX線スペクトルから詳しく温度が求められ、それらの銀河団についても同様な解析をしたが z が0.3以下の範囲では温度は z によらず一定となる。このような解析をするには個々の銀河団の属性をよく調べ、同

種のものを選び出さねばならない。まだ例数が少ないためどれほど有意かは今後の観測を待たねばならない。

銀河団の高温プラズマによるコンプトン散乱のために 2.7 K の宇宙背景放射の減少(dT/T)が電波で観測されている(Sunyaev-Zel'dovich effect)。X線観測によってそのプラズマ温度と表面輝度分布が得られ、従来の方法とは独立にハッブル定数(H_0)は $H_0 = C(dT/T)^{-2} T_x^{5/2} \times \theta_0^{-1}$ (ただし、 C : 定数, θ_0 : 中心核の半径)の関係式から求めることが出来る。現在までに3つの銀河団、A 665 ($z=0.1816$), A 2218 ($z=0.171$), CL 0016+16 ($z=0.545$)について 2.7 K の減少がその中心においてそれぞれ $-0.694 \pm 0.098\text{ mK}$, $-0.69 \pm 0.0\text{ mK}$, $-1.402 \pm 0.172\text{ mK}$ と観測されている(Birkinshaw et al., 1984)。A 2218について、アインシュタイン衛星で観測された表面輝度分布と「ぎんが」で得られたプラズマ温度を用いてハッブル定数を求めると $24 (+13, -10)\text{ km/s/Mpc}$ となり、従来の値に比べてかなり小さくなる。

鉄の輝線のエネルギーから赤方偏移を求めることが、「てんま」及び「ぎんが」の観測結果をもとに試みられた。決定精度は悪いが光学観測の値とよく一致している。これらの問題は統計精度あるいは観測器の性能がまだ十分でないため今後の課題として残されている。

参考文献

- Abell, G. O. et al., 1989, *Ap. J. Suppl.*, **70**, 1.
 Birkinshaw, M. et al., 1984, *Nature*, **304**, 34.
 Perrenod, S. C., 1980, *Ap. J.*, **236**, 373.

新刊紹介

「中国天文学文摘」

—Chinese Astronomy Abstracts—

中国・北京天文台から標記の抄録集が届けられた。本抄録集は1987年創刊で、中国国内での限定版であったのが今回より国外にも販布されるようになったらしい。

筆者の手元に届けられたのは、1990年第4巻第1期(Vol. 4, No. 1)で本文92頁、内容は天文学、天文観測設備と観測資料、天体測量学(Astrometry)、天体物理学、天体物理学、恒星天文学・星系天文学・宇宙学、太陽系、時間・暦法に分類されていて、中国で発行された天文関係の刊物及び主要な外国雑誌に発表された論文が、著者名と共に抄録されている。目次とタイトルだけが英文で併記されているだけなのが、いささか残念であるが、漢字圏の者としては、何とか意味を知ることができるのは幸いである。主編集人に李啓斌(Li Qibin)北京天文台長、以下14名の委員が抄録を執筆している。季刊であり、年4回発行されることになっていて、年額32米ドル(航空郵便料金を含む)で北京天文台より購入することが可能である。

注文先は: Editorial Board of the Chinese Astronomical Abstracts, Beijing Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Zhongguancun, Beijing, 100080, People's Republic of China.

尚、内容については筆者の友人李元氏よりの便りによった。また同氏によると、北京天文台に建設中であった2.16m望遠鏡が1989年11月に開設された由である。(香西洋樹)

お知らせ

東京学芸大学教育学部地学教室教官公募結果

本誌第83巻第2号(1990)に掲載されました当教室の教官公募について、下記のとおり決定しましたので、御報告致します。

職名	助手
氏名	泉浦秀行
旧所属	東京大学大学院博士課程・日本学術振興会特別研究員(DC)
着任時期	1990年4月1日

東京学芸大学教育学部地学教室

主任 下田真弘