

クーリングフロー学説の終焉

牧島 一夫

〈東京大学理学系研究科物理学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

〈理化学研究所宇宙放射線研究室 〒351-0198 和光市広沢 2-1〉

e-mail: maxima@phys.s.u-tokyo.ac.jp

池辺 靖

〈NASA/Goddard Space Flight Center, Code 661, Greenbelt Rd., Greenbelt, MD 20771, USA〉

〈Joint Center for Astrophysics, University of Maryland, Baltimore County, 1000 Hilltop Circle, Baltimore, MD 21250, USA〉

e-mail: ikebe@milkyway.gsfc.nasa.gov

銀河団におけるクーリングフロー学説は、「定説」として広く研究者の間で受け入れられ、ほとんど神話と化していたが、最近になってこの学説は完全否定という形で消え去ろうとしている。本稿では、この学説の歴史と、神話崩壊の先鞭をつけた我々の「あすか」衛星の結果、そしてとどめとなった最近の XMM ニュートンおよびチャンドラの結果を述べ、新しい神話作りの試みを紹介する。

1. 銀河団—神話の舞台

銀河団とは、数十から数千個の銀河が重力で互いに束縛された、宇宙最大の階層の天体である。メンバー銀河の運動から銀河団の全質量を見積ると、それは銀河を集めた質量を大きく超えることが、1930年代から知られていた¹⁾。これは後に X 線や重力レンズを用いた観測で検証され、暗黒物質が銀河団の質量の大部分を占めることが、広く認められるに至っている。

銀河団にはまた、X 線を放射するプラズマ、すなわち ICM (intra-cluster medium) が閉じ込められている。ICM の温度は数千万度に達し、またその質量は銀河の質量を数倍も上回る。この驚くべき発見は、1960年代のロケット観測²⁾に加え、1971年にウフル衛星³⁾が、おとめ座、かみのけ座、ペルセウス座という銀河団の「御三家」から、広がった強い X 線を検出したこと^{4)~6)}に端を発する。当時この X 線は、活動銀河が吐き出した大量の宇宙線が、宇宙マイクロ波背景放射を逆コンプ

トン散乱した結果だとする解釈が有力だった⁶⁾。なぜなら、高温プラズマは X 線以外の手段では検出が難しく、また銀河団という直径 1 Mpc を超す巨大な空間に、大量の高温プラズマが満ちているという描像は、当時の想像を大きく超えていたからである。しかし 1970 年代の半ば、銀河団の X 線スペクトルの中に、高電離した鉄イオンの出す特性輝線 (エネルギー 6.7 keV) が検出されるに及び⁷⁾、X 線は熱的に放射されていることが確実となり、宇宙のバリオンの最も優勢な形態は高温プラズマであるという、驚くべき描像が確立した。

現在の理解では、銀河団の質量の内訳は暗黒物質が 80~90%、バリオンが 10~20% で、後者のざっと 60~80% が ICM と考えられる⁸⁾。数千万度という ICM の高い温度は、暗黒物質が重力収縮して銀河団サイズのハローを形成したとき、解放された重力エネルギーが受け渡された結果である。ちなみに WMAP⁹⁾ などの観測で決められた宇宙の質量密度パラメータ $\Omega_m \sim 0.27$ とビッグバ

ン元素合成のシナリオから導かれるバリオン密度パラメータ $\Omega_b \sim 0.046$ を組み合わせると、宇宙全体のバリオン比は $\Omega_b/\Omega_m \sim 0.17$ 程度となる。これは銀河団で得られる値と大差ないので、銀河団は宇宙全体の性質をよく反映する、きわめて重要な研究対象であると見なされている。

2. クーリングフロー学説 —神話の誕生

本稿の主題であるクーリングフロー (cooling flow; 以下 CF と略す) とは、ICM が X 線放射により冷えるという単純明解な考えを基礎として展開された学説である。それは、銀河団からの X 線が発見された直後に提唱され、さまざまな理論的考察や観測的な状況証拠を巻き込んで、ごく最近まで 30 年の長きにわたり、壮大で精緻な「定説」として多くの研究者に受け入れられてきた。その提唱者の一人であり、布教の先頭に立ってきたのは、英国ケンブリッジ大学の Andy Fabian である。CF 学説に対する反論は跡を絶たなかったにもかかわらず、Fabian の巧妙かつパワフルな論陣の前に、それらはすべてかき消されてしまっていた。こうして CF 学説はいわば神話の域に達していたのだが、その牙城がついに崩落する日を迎えた。そのストーリーをここで語りたいと思う。

2.1 学説の起こり

はじめに、CF 学説のあらましを紹介しよう。ICM は X 線放射により熱エネルギーを失い冷えるはずであり、プラズマ密度が高いほど放射冷却時間 τ は短くなる。そこで初期の X 線データから見積もると、銀河団の周辺部では τ は宇宙年齢よりずっと長い、銀河団の中心部では ICM の密度が高い ($\sim 1 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$) ため、 τ は宇宙年齢よりかなり短くなることが発見された。とすると銀河団の中心部では、ICM は冷えつつあるに違いない。ICM は地球の大気と同様、自分の圧力で自分より外側の部分の重みを支えているわけだから、中心部が冷えて圧力が下がれば、周囲から

ICM が流れ込んで密度が上がり、圧力の釣り合いを回復するはずである。しかし冷却に伴う ICM の密度上昇は、 τ をさらに短くするという不安定性が発生し、プラズマは宇宙年齢の数十分の 1 という短時間で、どんどん冷えるだろう。よって銀河団の ICM は外側から中心に向け、緩やかだが大規模に、流れ (flow) を形成するに違いない。これが CF の概念である^{10), 11)}。

2.2 観測的な証拠

1979 年に打上げられたアインシュタイン衛星¹²⁾は、初めて X 線の撮像集光鏡を搭載し、0.5~3 keV の軟 X 線バンドで多くの銀河団を撮像することに成功した。Jones と Forman¹³⁾ は得られた X 線の輝度分布をもとに、銀河団を 2 種類に分類できることを発見した。一方は輝度分布が β モデルで表現できるもの、他方は β モデルに比べ中心で X 線の表面輝度が著しく超過するものである。 β モデルとは、等温分布した暗黒物質の作る重力ポテンシャル内に、等温のホットプラズマが満ちているときに予測される X 線輝度分布をいう。個数でいうと、 β モデルに合う銀河団が約 3 割で、かみのけ座銀河団がその代表である。残る約 7 割の銀河団は β モデルより表面輝度が超過するか、あるいはコア半径が小さく中心集中度が高いタイプで、それらの中心には、1 個の巨大楕円銀河 (cD 銀河) が見られることが多い^{13)~15)}。代表例は、おとめ座銀河団やペルセウス座銀河団で、それぞれの中心には cD 銀河として M87 と NGC1275 とが君臨する。これら X 線輝度の超過を示す銀河団は、中心で CF が発生しているため、ICM の温度低下と密度上昇が起き、結果として X 線輝度が増加していると考えられた。

1990 年、軟 X 線領域でアインシュタイン衛星より良い分光能力をもつドイツのローサット衛星¹⁶⁾が登場すると、 β モデルで説明できる銀河団では ICM がほぼ等温である¹⁷⁾のに対し、中心で輝度超過を示す銀河団では、ICM の温度が中心

に向け低下している¹⁸⁾ことが確かめられた。これらの結果は、大多数の銀河団で実際に CF が進行している証拠と解釈され、 β モデルで説明できる等温の銀河団は、銀河団どうしの合体などで CF がいったん壊されたものなどと解釈された。このように、中心での X 線輝度分布の集中と、中心での ICM 温度の低下が、CF 学説を支える二つの大きな観測的証拠となった。

2.3 学説に対する反論

軟 X 線での観測結果は CF 学説できれいに説明できていたが、同時にさまざまな矛盾点も指摘されていた。とくに重大なのは、冷えて X 線を出さなくなったプラズマはどこへいったのかという問題である。強い CF をもつ銀河団では、1 年で太陽質量 (M_{\odot}) の数十～数百倍のプラズマが、冷えて中心に向かって流れていくとされる。その CF に伴うガス流入率が宇宙年齢の間に変化しなければ、現在までに冷えて降り積もったプラズマの総量は実に $10^{11}\sim 10^{13} M_{\odot}$ という、巨大銀河の 1 個に匹敵する値に達する。とすれば、何らかの形で大量の冷たいガスが存在しているはずである。実際、銀河団の中心部では、 $H\alpha$ 輝線を放つフィラメント構造や¹⁹⁾、分子雲が観測されているが、それらの質量はせいぜい $10^9\sim 10^{11.5} M_{\odot}$ ²⁰⁾ で、CF の予測よりもずっと小さい。では冷えたプラズマが星になったかということ、銀河団の中心で CF に見合う星形成活動が起きている証拠もない。これらは CF 学説の致命的な欠陥と思われたが、その信奉者たちは、冷えたガスは観測にかからない形態で隠れて存在すると主張したり^{21), 22)}、そうした環境で形成される星は特殊な初期質量関数を持ち、暗い低質量の星ばかりが形成されるので、通常の星形成活動としては見えない²³⁾といった論法で、学説を巧みに擁護してきた。

学説の信奉者たちはまた、ローサット衛星を用い、いくつかの銀河団の中心部には、X 線を光電吸収する冷たいガスが存在する証拠を見つけたと報じた²⁴⁾。これぞ CF のなれの果ての姿である、

と考えられたのである。

3. 「あすか」の挑戦

3.1 「あすか」の登場

CF の実体に観測から大きく光を当てたのが、1993 年に打ち上げられた「あすか」衛星²⁵⁾である。「あすか」は世界で初めて、0.5～10 keV の広いエネルギー帯での撮像能力と、従来を大きく上回る X 線の分光能力を併せ持ち、広帯域で高いエネルギー分解能の分光撮像観測を可能にした。我々も、大橋隆哉(東大、現・東京都立大)をリーダーに、撮像型ガス蛍光比例計数管 (GIS)²⁶⁾ の開発に心血を注いで携わった。「あすか」衛星の詳細と成果については、繰り返し天文月報で報告があるので、そちらを参照していただきたい。

Fabian は「あすか」の国際アドバイザーの一人であり、衛星の打ち上げ後は 1 年近く日本に滞在し、日本の「あすか」チームと一緒にデータ解析を進め、多くの共著論文を書き、懇切丁寧に理論

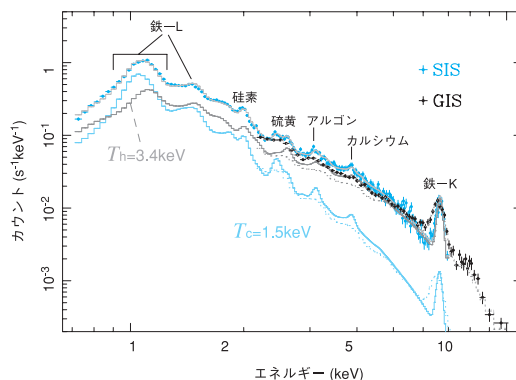


図 1 「あすか」によって得られた、ケンタウルス座銀河団の中心部からの X 線エネルギースペクトル。●がデータ点(青: SIS, 黒: GIS)。こぶのような構造は ICM に含まれるさまざまな重元素からの特性 X 線(示しているのは主な元素のみ)。ヒストグラムはデータを最もよく再現する 2 温度重ね合わせモデル(実線と破線はそれぞれ SIS と GIS とをフィットするモデル)で、低温成分(1.5 keV, 水色)と、高温成分(3.4 keV, 灰色)とからなっている。

的な指導をしてくれた。その時点で筆者らは不勉強のため、CF 説の神髄をよく理解しておらず、とり立てて疑念も賛意も持っていなかった。そして我々は CF 神話の最初の洗礼を、教祖からじきじきに受けるはめになった。神話の予言によれば、強い CF を持つ銀河団の中心付近には、外側での ICM 温度 T_h より低温な各種の温度のプラズマが混在し、かつ冷えた大量の冷たいガスも共存する。ちなみに大きな銀河団では $T_h \sim 10$ keV (12×10^7 K)、小さいものでは $T_h \sim 2$ keV (2.5×10^7 K) である。そこで中心部からの X 線スペクトルは、 T_h より低温なさまざまなプラズマ放射の重ね合わせとなり、さらに冷えたガスによる強い光電吸収が見られるはずである。

世界最高の分光能力を誇る「あすか」でそうした銀河団を観測してみると、確かに中心部では図 1 のように、鉄の L 殻電子による輝線を放射する温度 $T_c = 0.7 \sim 1.5$ keV [$(0.8 \sim 1.8) \times 10^7$ K] 程度の放射が、ペルセウス、ケンタウルス、Abell 1795 など、有名どころの銀河団 から次々と検出された。彼らは「ついに CF がスペクトルで直接に確認できた」と喜んだ²⁷⁾。

3.2 低温成分が足りない

こうした洗礼を受けて、なるほど美しく構築された学説だと感心はしたものの、我々は従来から「定説はまず疑ってかかれ」「基礎物理学は信じてでも理論屋のモデルは信じるな」「自分の作った装置の言い分に虚心坦懐に耳を傾けよ」をモットーとしてきた実験屋である。データを前にした我々の頭脳には、教祖の神話ではなく、全く違った物語が聞こえてきたのである。

まず第 1 に、低温成分の X 線光度が神話の予言よりずっと低く、それを CF による質量流入量に換算してみると、過去に報告された数百 M_\odot /年といった巨大な値は、どの銀河団からも観測されない^{28)~30)}。この様子を図 2 に示す³¹⁾。第 2 に、冷たい物質による吸収も、かろうじて有意といった程度に過ぎない^{29), 30)}。そして第 3 に、CF 説に

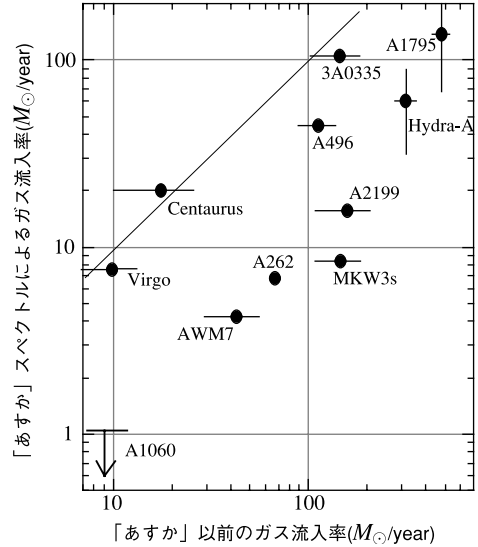


図 2 「あすか」の X 線スペクトルから得られた CF に伴うガス流入率と、「あすか」以前の軟 X 線イメージから見積もられたガス流入率の比較 (文献 31 より転載)。ほとんどの銀河団において、「あすか」の値は以前の値よりも大きく下回っている。

もとづき多温度を重ねた「CF モデル」と呼ばれる放射モデルよりも、単純に T_h と T_c という二つの温度を重ねることで、「あすか」のスペクトルがよりよく説明できてしまうことがわかった (図 1)。たとえば松本浩典 (京都大) らや、深沢泰司 (東京大, 現・広島大) らが示したように、おとめ座銀河団では $T_h \sim 3.0$ keV と $T_c \sim 1.3$ keV の 2 成分³²⁾、ケンタウルス座銀河団では、 $T_h \sim 4$ keV と $T_c \sim 1.5$ keV の 2 成分しか見えない³³⁾。しかも第 4 に、一つの銀河団の異なる領域を比べると、 T_h と T_c の値は大差なく、単に中心に近づくにつれ低温成分の割合が増えるのである^{32), 33)}。第 5 には、銀河団の 3 次元的な中心部にも、堂々と高温成分が存在し、そこが全体として冷えているという気配がない^{29), 30), 33)}。そして最後に、CF ではもっと低い温度のプラズマまで存在するはずなのに、それが検出されないのである。

打ち上げの 1 年後の 1994 年 3 月に都立大で開催された最初の「あすか」国際会議のさい、牧島

は立ち話で、Fabian や Claud Canizares (マサチューセッツ工科大) に向け、こうした事実を述べ、CF 説への疑問を投げかけた記憶がある。もちろん、軽くかわされてしまった。彼らは、多温度プラズマからの X 線放射は存在するが、冷えたガスによりそれが吸収されているため観測しにくいのだといった論理や、鉄の L 輝線を扱う理論モデルが不完全であるといった論理で、したたかに矛盾を解消しようとしたのである。

一方その頃、高エネルギー実験物理学の釜江常好・東大教授 (現・スタンフォード大教授) の率いるグループが「あすか」チームに合流し、門下生である高橋忠幸 (現・宇宙研) らが中心となって、「あすか」X 線反射鏡の複雑な応答を扱う、強力なシミュレータを開発してくれた。おかげで精密な定量解析が可能になり、池辺はそれを用いて博士論文^{34), 30)}で徹底した解析を行い、やはり CF 説ではデータが説明しきれないことを示した。この時点で、我々の疑念は確信に変わったのである。

3.3 重力ポテンシャルのトリック

我々は続いて、ろ座 (Fornax) 銀河団の観測を通じて重要な発見をした。この銀河団は、アインシュタイン衛星が観測し、その中心 cD 銀河 (NGC1399) に伴う広がった X 線放射が知られていた³⁵⁾が、我々が過去に、より感度の高い「ぎんが」衛星を用いて観測したところ、この銀河団から放射される光度は、アインシュタイン衛星の検出した光度よりも 5 倍ほど大きかった³⁶⁾。そこで我々は、アインシュタインが見逃していた、低輝度で大きく広がった X 線放射が存在すると考え、それを検証するため「あすか」を用いて観測を行った。GIS 装置の性能をフルに活かした結果、ろ座銀河団の ICM はほぼ等温 (1.2 keV) で、X 線の輝度分布は 2 成分の「入れ子」構造を持ち、大きな方は予想どおり銀河団の全体を覆い、小さい方は cD 銀河 NGC1399 の周辺 50 kpc 以内に局在することを発見した³⁷⁾。これにより当初の目

的を達成できただけでなく、思いがけず二つの宝物を拾った。

その一つは暗黒物質が、cD 銀河と銀河団という二つの特徴的な空間スケールを持つ、階層的分布を示すという発見である。同じころ Navarro ら³⁸⁾は、冷たい暗黒物質の N 体シミュレーションを行い、銀河団中心部での物質分布は、それまで標準的に使われてきた平らなコアを持つ等温分布よりも強く中心に集中することを示した。有名な NFW 分布の提唱である。我々の発見は、等温分布に比べて中心で重力ポテンシャルが深いという点では NFW と定性的に合うが、二つの特徴的な空間スケールを持つという点では異なっている。本稿の主題と離れるので深入りしないが、階層的分布と NFW 分布のどちらがより真実に近いか、まだ決着が着いていない。最近の分解能の高い N 体シミュレーションでは、さまざまなスケールでのサブ構造もできることが確認されている^{39), 40)}が、冷たい暗黒物質だけで、観測されているような二つの代表的な空間スケールが出現するのかどうかはまだ疑問の余地が多い。現実にはバリオンの効果がかなり効いているのかもしれない。

もう一つの宝物は、「なんだ、cD 銀河の周囲で X 線輝度がピークを示す現象は、結局 CF のせいではなく、重力ポテンシャルが入れ子構造を持つ結果じゃないか」と気づいたことである。まさに目から鱗が落ちたようだった。しかし、ろ座銀河団は銀河群といってもよい小規模な系なので、とても一般論としては使えない。かといってケンタウルス座、おとめ座、ペルセウス座などの銀河団では、中心の低温成分が強すぎて輝度分布の解析が難しく、かみのけ座銀河団は、もともと CF を持たないとされる。そこで選んだのが、CF に伴うガス流入率が大きいとされているが、低温成分があまり強くない、Abell 1795 である。

折よく中国の上海交通大学から留学生の徐海光 (Xu Haiguang) が到着したので、彼に Abell 1795 の「あすか」データを解析してもらった。すると

果たせるかな、X線の輝度分布は、3 keV以下の軟X線でも3~10 keVの硬X線でも大差なく、どちらも中心の約100 kpc以内では、周辺で決めた β モデルを大きく超過することがわかった。つまり、重力質量の分布は、等温モデルよりも中心で深くなっており、そのようなポテンシャルに捕えられたICMが、X線輝度の超過を作っていたのである。「あすか」以前では、これをICMが冷えた結果と見誤ったため、~600 M_{\odot}/yr という巨大なガス流入率が得られたのだった。「あすか」のスペクトルから推定するとガス流入率はせいぜい~100 M_{\odot}/yr で、この値は「あすか」データを用いたFabianらの論文²⁷⁾でも報告されているから、我々の一方的な思い過ごしではない。この解析結果は、手強いレフェリー（Fabian自身かもしれない）との論戦の末に無事に出版された²⁹⁾。

3.4 重元素は語る

銀河団や楕円銀河のプラズマに含まれる重元素の特性輝線を空間分解して測定し、重元素組成を場所ごとに推定することを世界で初めて可能にしたのも「あすか」である。名古屋大の山下広順や田原譲、都立大の大橋、京都大の鶴剛らの主導で多くの観測がなされ、「あすか」は、「てんま」や「ぎんが」で得られた結果^{41)~43)}を大きく拡張することに成功した。これらの結果は、実はCFと深い関係を持つので、以下でそれらをかいつまんで紹介したい。

粟木久光（京大、現・愛媛大）、松本浩典、松下恭子（東大、現・東京理科大）らは、「ぎんが」衛星で粟木らが得た結果を受け、銀河団に含まれる代表的な楕円銀河を「あすか」で観測し、その熱い星間ガスの重元素組成がたかだか(0.5~1)太陽組成であることを示した^{46)~50)} (Matsushita, et al., 2000は2002年度の日本天文学会欧文報告論文賞を受賞)。よって楕円銀河で生成された重元素は、星の内部に取り込まれるほかは、大部分が広大な銀河団の空間にまき散らされてしまい、銀河内の星間空間に留まるものは微量であることが

明確になった。これは銀河の化学進化のモデリングに大きな影響を持つはずである。

深沢らは多くの銀河団のデータを解析し、X線の低温成分が見られる中心部分を除くと、鉄の組成はほぼ太陽組成の0.3倍の値でそろっているのに対し、シリコンの組成は大規模な銀河団ほど高くなることを発見した^{51), 52)} (Fukazawa, et al., 1998は、2000年度の日本天文学会欧文報告論文賞を受賞)。シリコンはおもに銀河団の形成初期に、II型超新星の連鎖による銀河風でまき散らされ、鉄はその後にIa型超新星が大きく寄与したと考えられる。小さい系はポテンシャルが浅いため、銀河風で運ばれるII型超新星の生成物を十分に閉じ込めることができなかったと考えられ、深沢らの結果が説明できる。

CFの舞台である銀河団の中心部では、また異なる様相が明らかになった。すでに「ぎんが」の時代から、おとめ座銀河団では、鉄の組成が中心で増えることが発見されていた⁴⁴⁾。「あすか」ではそれが再確認され³²⁾、また同様な現象がケンタウルス座銀河団³³⁾、Hydra-A銀河団²⁸⁾、AWM7^{53), 54)}、Abell 4059⁵⁵⁾などから次々に検出された。これはCF学説への大きな反証となった。なぜならCF学説の言うように、本当にプラズマが外側から中心に向かって流れているなら、重元素分布はもっと平坦で、観測されたような強く中心集中した分布は残らないはずだからである^{56), 57)}。

cD銀河の周辺では、鉄だけでなくシリコンも増加しており、そこでの鉄とシリコンの組成比は、ほぼ太陽組成比に一致することも発見された⁵⁸⁾。大規模な銀河団の場合、これはシリコンが多い外側での組成比とは異なっている。よってcD銀河の周辺に見られる過剰な重元素は、外側のICMが冷えたとしては説明ができず、cD銀河のIa型超新星が大きく寄与したと考えざるをえない。最近、「あすか」より低エネルギーまで感度のあるXMMニュートンやチャンドラが登場し、酸素の輝線が観測できるようになった結果、cD

銀河の周辺でも酸素の組成比は全く増加していないことが判明した⁵⁹⁾。酸素はシリコン以上に II 型超新星に特有な生成物だから、我々の考えがさらに確実になったといえる。

4. 神話の崩壊

こうした「あすか」の新しい観測事実をもとに、我々は 1995 年ごろには「CF は存在しない」と結論づけ、国際学会のたび、放射冷却を抑える物理的な機構があるはずだと主張し続けてきた。Fabian に喧嘩を売るような講演を行ったことも少なくない。国内の研究会や学会でも、CF 神話に対して反論を繰り返す牧島を、半ばあきれ半ば苦笑しつつご覧になった方もおられるかと思う。しかし敵もさるもの、あの手この手で防戦に努めたため、我々の繰り出すパンチはなかなか有効打にならず、膠着状態が続いた。日本ではもともと CF 神話はさほど流布していなかったので問題なかったが、諸外国の研究者は大部分が CF 神話を信じ切っており、「あすか」がここまで事実を明らかにしたにもかかわらず、我々の主張に真剣に耳を貸そうという動きは見られなかった。

論戦に決着をつけるのは多くの場合、新しい実験事実である。当時、我々も敵陣もおそらく同じことを考えていたと思われる。すなわち 2000 年に打ち上げ予定の日本の ASTRO-E 衛星には、「あすか」の CCD をさらに 1 桁も上回るエネルギー分解能を持つ、非分散型の X 線分光計 (XRS) が搭載される。それを wield すれば勝負が着くはずだ、と。しかし 2000 年 2 月 10 日、ASTRO-E を搭載した宇宙研の M-V ロケットは、第 1 段の燃焼中にノズルに損傷をきたし、20 秒間ほど飛行姿勢を乱してしまった結果、衛星は寸手のところで地球周回軌道に乗らず、焼失してしまった。まことに痛恨の極みであった⁶⁰⁾。

ASTRO-E は軌道に乗らなかったが、それに先立ち、アメリカのチャンドラとヨーロッパの XMM ニュートン⁶¹⁾という新世代の衛星が、1999

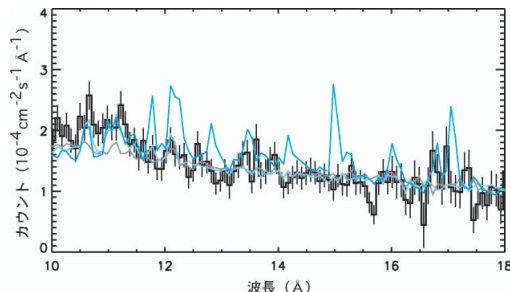


図 3 XMM-Newton/RGS によって得られた Abell 1835 銀河団中心部からの X 線スペクトル (文献 62 より転載)。誤差棒付きのヒストグラムがデータ。青の実線が CF モデルの予言するスペクトルモデル。CF が起きているなら見られるはずの、鉄の特性 X 線が、データには全く見られないことがわかる。灰色の実線は 8.2 keV の等温モデル。水色の実線は CF モデルから 2.7 keV 以下の成分を除いたもので、データを最もよく説明する。

年に相次いで打ち上げられた。両衛星の X 線分光計は、ASTRO-E の XRS とは違って回折格子を用いた分散型なので、原理的に広がった天体には向かないが、銀河団の明るい中心部に限ると、従来よりも桁違いに優れたエネルギー分解能が得られる。それにより事態が大きく動いた。図 3 は、XMM ニュートン衛星に搭載された反射型回折分光計 (Reflection Grating Spectrometer) によって得られた、Abell 1835 銀河団の中心部のスペクトルである⁶²⁾。さまざまな電離度の鉄原子からの L 特性 X 線が 1 本 1 本、初めて分解して検出できるようになり、プラズマ温度の測定が、かつてない精度で行えるようになった。CF が存在するなら、あらゆる電離度の鉄原子からの特性 X 線が観測されるはずで、特に原子配置の安定な鉄の FeXVII, FeXII, FeXXIV からの輝線が強く検出されると期待される。しかしデータの中に、それらのラインは全く見られなかった。過剰な光電吸収の徴候もなく、CF 学説の予言するような特徴は何一つ見られなかったのである。CF があるとされた多くの銀河団について、こうした報告が相次いだ^{63)~65)}。

詳しい解析によると、個々の銀河団で ICM には温度の下限値が存在しているようで、Abell 1835 では 3 keV 以下の成分が、また Abell 1795 では 2 keV 以下の成分が、ほとんど見られないことがわかった。CF モデルで XMM のスペクトルを説明しようとする、ガス流入率は従来の言値よりも 1 桁以上小さくなり、数百 M_{\odot}/yr といったような大規模 CF の存在は、完全に否定されることになった。「あすか」をベースにした我々の主張が検証されたのである。この作業で大きな活躍をしたのが、「あすか」で育ちオランダスペースリサーチ機構 (SRON) でポストドクの職にあった田村隆幸 (東大, 現・宇宙研) であった。

これを受けて池辺らは多くの銀河団からの「あすか」スペクトルを統一的に 2 温度モデルで解析したところ、興味深い発見に行き着いた。低温成分だけを取り出し、その温度と X 線光度をプロットして見ると、銀河団の全体が示す温度と光度の相関の上に、きれいに乗るのである。つまり低温成分は、あたかも銀河団の中心にはまり込んだ、別の銀河群が作り出しているように見える⁶⁶⁾。さらに低温成分の温度は常に高温成分の温度のちょうど半分から 1/3 くらいにそろっていることも発見された^{66), 67)}。

Fabian らは、このような新しい観測事実を前にしてなお、「CF は見えていないだけで実際には起きている」と主張し、“あるはずの CF”が見えなくなる仕組みを作ろうと躍起になっていた。しかし他の多くの研究者は、ようやく CF 学説を根本から見直す必要性に気づき、CF を止めるための加熱機構を一斉に考え始めた。CF 神話の崩壊は、すでに誰の目にも明らかになり、それに代わる新しい神話を求めて、研究者たちは知恵を絞りはじめたのである。

5. 新しい神話の創成に向けて

5.1 記念すべき国際学会

このような状況のなか、“The Riddle of Cooling

Flows in Galaxies and Clusters of Galaxies”と題する国際学会が 2003 年の 5 月末、3 日半の日程でアメリカ・バージニア州にて開催された⁶⁸⁾。世界の CF 研究者が一同に会するこの機会に、我々も招待を受けて参加した。会議の冒頭で教祖 Fabian が基調講演を行ったが、その中ではこれまでの「CF の存在」という主張が、「CF 問題の存在」という主張へ大きく変化していた。つづいて観測結果を概観するセッションでは、XMM ニュートン (J. Peterson)、チャンドラ (M. Wise)、そして「あすか」(牧島)の結果をまとめる発表がなされ、従来の CF の描像は大幅な変更が必要であるということが確認された。この点は Fabian ですら認め、存在するはずの CF は隠されているだけなのだという議論は控えられた。「大規模 CF は存在しない」というコンセンサスが研究者の間で確立した、記念すべき会議といってよいだろう。

これを受け、「ICM の放射冷却に打ち勝つ加熱機構はいかなるものか」が、会議の焦点となった。すぐに思いつくのは、超新星による加熱であるが、これでは $10^{42.5\sim 43.5}$ erg/s に達する X 線放射を賄うには、1 桁も不足してしまう。ではほかに、どんな加熱機構が考えられるのだろうか。

5.2 ジェット説、熱伝導説、音波説

最も多くの研究者の取り上げた加熱モデルは、cD 銀河の巨大ブラックホールを利用するものである。CF の特徴を示す銀河団の中心には、必ず cD 銀河が存在し、そのほとんどは電波放射を伴う活動銀河である。よって、そこには巨大ブラックホールが存在する。この巨大ブラックホールに冷えたガスが降り注ぐと、ジェットが発生し、降着物質の質量エネルギーの 10% 程度が銀河間空間に還元されると期待される。それが熱源となるというものである。実際、チャンドラによって銀河団中心部で次々にプラズマ密度の低い「泡」状の構造が発見されている^{69)~72)}。それらはジェットがホットプラズマと衝突してできた痕跡と考えられ、そこで ICM の加熱が行われているかもし

れない⁷³⁾。

このモデルの魅力的な点は、自己フィードバック機構が働くところである^{74), 75)}。銀河団中心部で ICM の冷却が進むとプラズマの密度が上昇し、ブラックホールへの降着量が増えて加熱も大きくなる。逆に加熱が進むと ICM の密度は下がり、ブラックホールへの物質の供給も止まる。つまり冷却に釣り合う加熱を安定に働かせることができる。しかし、泡の周辺ではプラズマの温度はむしろ低くなっていることが観測されており、また中心集中している鉄の空間分布がなぜ壊されないか、などの疑問が残る。

もう一つ盛んに議論されたのは、外からの熱伝導によって中心部の ICM の冷却を抑えるモデルである。熱源は銀河団の全体を満たすプラズマの熱エネルギーで、これは大量である。しかしながらすでに四半世紀前に高原・池内⁷⁶⁾が示したように、熱伝導率が古典的な Spitzer の値である場合、熱の流入は X 線放射による冷却を上回り、銀河団中心部の冷たいガスは瞬く間に蒸発して周りの ICM と混ざって均一化される。したがって熱伝導が効いている限り、観測されているような温度勾配も存在しえないことがわかっている⁷⁷⁾。そこで、磁場があるため熱伝導率が低くなっているという論法が登場する。実際に、銀河団の ICM には、数 μG の磁場が存在することが知られている。しかしその場合でも、多くの人が指摘するように、観測される温度勾配を残しつつ加熱と冷却を安定に釣り合わせるには、熱伝導をきわめて精密に微調する必要がある。

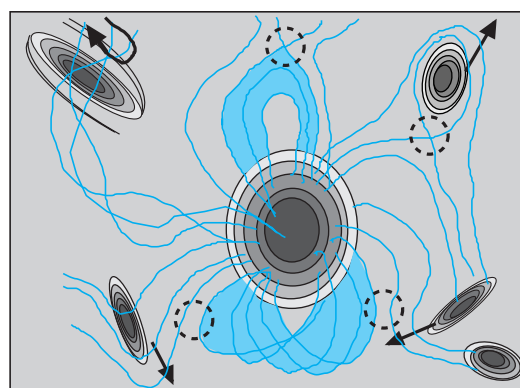
今回の学会でも、平均的な熱伝導率を、Spitzer の値の何パーセントにすべきか議論されていた。しかしながら、わずかでも磁化したプラズマにおいては、熱伝導率はきわめて異方性の強い物理量となるから、平均的な熱伝導率などいくら論じても無意味である。すなわち磁力線に沿っては熱伝導率はほぼ Spitzer の値でよく、磁力線に直交方向ではほぼ 0 と考えるべきである。

今回の会議において、そのほかに提案されていたのは、藤田裕 (国立天文台) らによる音波加熱モデルと、Peter Thomas による熱伝導と構造形成とをからめた warming flow シナリオ、そして次節で述べる牧島の提唱するモデルのみで、諸外国の研究者は想像力がきわめて貧困であるとの印象を受けた。藤田のモデルは、暗黒物質の塊が運動することで、プラズマ中に大振幅の音波が発生すると考える。音波は振幅が大きい場合、波の部分によって進行速度が違う効果が働くので、やがて波面は急峻になり、そこでエネルギーが散逸してプラズマを加熱するという興味深いものである⁸¹⁾。

5.3 日本生まれの神話

我々は CF 神話に反論を続けてきたが、壊すだけで新しいものを作らなければ、某国の某政権と同じになってしまう。そこで牧島は 1995 年ごろから、太陽コロナとの類推を用いて、図 4 に示すような「cD コロナ説」を提唱してきた^{31), 82)}。

このモデルは、ICM が磁化していて磁気圧がプラズマ圧の 1/10 程度になっていることと、メンバー銀河は ICM の中を運動するさい、十分に



■ 高温成分 ■ 低温成分 — 磁力線
 ← 銀河の並進および回転運動
 ○ 磁気リコネクションが起こる場所

図 4 cD コロナの模式図。中心に位置する cD 銀河と、その周りで運動するメンバー銀河の作る磁気圏とプラズマの様子を表している。

強く ICM と磁気流体的に相互作用することを仮定する。すると ICM の強い動圧により、銀河の磁気圏は大きく歪められつぶされる一方で、cD 銀河だけは静止しているので、磁気圏を十分に発達させることが可能と期待される。実際 cD 銀河の周りにだけ余分な重元素が大量に検出されている (§ 3.4) ことは、ICM の動圧が銀河に強い影響を及ぼすことの証しでもある。cD 銀河の磁力線のうち閉じたループの部分には、cD 銀河に起源を持つ低温で重元素の多いプラズマが捕捉され、低温相を形成するであろう (図 4)。一方、磁場が外に開いた領域 (コロナの穴に相当) は、銀河団全体を満たす高温の ICM で満たされる。磁場を横切る熱伝導は無視できるから、低温と高温のプラズマが共存し、「あすか」で観測された 2 温度構造が作られる。高温相は、磁力線に沿った熱伝導で常に周囲から加熱されるから、冷える心配はない。

閉じたループを満たす低温相にも、有効な加熱機構が働くことが期待される。cD 銀河以外の銀河はポテンシャルの中を動き回るさい、磁気流体的な相互作用により、ICM の中に磁気乱流を生成し続けるだろう。乱流に貯えられたエネルギーは、磁気リコネクションにより ICM の加熱に費やされ、低温相が冷えるのを防ぐであろう。簡単な計算から、銀河の持つ全運動エネルギーは、CF を止めるために十分な熱浴を提供できること、また銀河と ICM の相互作用の半径が 10 kpc ぐらいあれば、エネルギー転換の効率も CF を止めるのに十分であることが示される。純粋に銀河中の「星」が担う質量は、ICM 質量の数分の 1 に過ぎないが、銀河は (藤田のモデルでも考えられているように) それに附随する暗黒物質のハローも抱えて運動しているだろうから、それを考慮すると銀河の運動エネルギーは、ICM の熱エネルギーに比べ無視できないと思われる。この「銀河の運動に伴う摩擦」という考えは、実は古くから加熱機構の候補として考えられてはいたが、非常に効率が

悪いとして却下されていた。過去の計算はすべて流体力学の立場でなされ、磁気流体効果が忘れられていたことが原因と思われる。

問題は、低温相が熱的に安定かどうかであるが、この点はすでに太陽コロナの研究を通じて答が得られていて、Rosner-Tucker-Vaiana⁸³⁾ が示したように、磁気ループに閉じ込められたプラズマでは、加熱と冷却が安定に釣合うのである⁸⁴⁾。実際、磁気ループ内部のプラズマは外から加熱されつつ、放射とループに沿った熱伝導で冷えると考えられる。もし低温相の冷却が進み過ぎると、内部の圧力が下がり、高温相に押されてループは細くなる。その結果、伝導による冷却が下がって、新たな釣り合いを回復するのである。今回の会議でオランダの Jelle Kaastra は、XMM ニュートンのデータの中に、太陽コロナとよく似た多温度構造を発見したと報告した。これは我々のモデルを支持する結果として注目される。

こうした相互作用を通じ、当然銀河は ICM から抵抗 (動的摩擦) を受け、その運動エネルギーを徐々に失い、ポテンシャルの中心へと落下していくはずである。これは、ICM は暗黒物質より大きく広がって分布するのに対し、銀河はずっと中心に集中しているという既知の事実を、よく説明できる。銀河の落下を示唆するさらに強い証拠として、ICM に存在する鉄の質量を星の可視光度で割った「iron mass to light ratio」を観測データから求めて見ると、中心では明らかに比が低下しており、それは中心で重元素の強い集中を示すケンタウルス座銀河団でさえ顕著である^{30), 31)}。これは銀河たちが鉄を放出しつつ、宇宙年令をかけて中心に落下してきたと考えれば、見事に説明できる。cD 銀河は、こうして落下する銀河を呑み込みつつ成長してきたのかもしれない。ハッブル望遠鏡で発見されたように、 $z \sim 0.5$ の銀河団には、青く形の歪んだ矮小な渦巻き銀河が数多く見られるのに対し、近傍の銀河団では楕円銀河が多い⁸⁵⁾。これも、銀河と ICM の間に強い相互作用が働い

た結果と考えられる。

この cD コロナモデルは、プラズマ物理学の立場ではきわめて自然で無理のない考えであって、CF の謎を含め、観測された銀河団の性質をたいへんよく説明できる。にもかかわらず、同じ発想を持つグループはほとんど見当たらない。おそらく銀河団の研究者の多くが、プラズマに対する正しい知識を持っていないことが原因であろう。ICM は理想的な完全電離プラズマで、その中を動き回る銀河は電気の良導体だから、プラズマ物理学をきちんと考えない限り、正しい理解は得られないことを強調したい。

6. おわりに

こうして長らく定説として信じられてきた CF 学説は、全面否定という形で終焉を迎え、無謀とも思えた我々の挑戦は、正しい方向を向いていたことが明らかになった。しかし会議に出席して我々は、大きな危機感を禁じえなかった。CF と矛盾する観測データを最初に系統的に導いたのは「あすか」であり、XMM ニュートンやチャンドラはその結果をより高い精度で追認したに過ぎないのに、参加者の大多数は「あすか」の先見的な成果を認識していなかったのである。危惧していた以上に事態は深刻だった。

そこで牧島は会議の間を通して、招待講演では「あすか」の成果をどぎつく強調し、質疑応答では大声を挙げ続け、コーヒーブレークでは別刷を片手に参加者の間を走り回って、事態の打開に努めた。十分に手応えがあったとは言い切れないものの、何とか「あすか」の名前は人々の記憶に蘇ったのではなかろうか。放っておけば「あすか」による長年の努力はほとんど人々の記憶から消し去られていた可能性があると思うと、背筋が寒い。やはり世界の僻地に住む我々が、成果を国際的に認めてもらうには、「きちんと論文を書くこと」、「まめに国際学会に出席して発表すること」、「よい外国人の友人を作って理解してもらうこと」と

いった努力を必死で行う必要があることを、改めて認識させられる結果となった。

攻撃は最大の防御と考え、今後は我々の cD コロナ説を、新しい神話として確立していくことが大切であろう。その点で、ASTRO-E の再挑戦機として同じ装置を搭載して 2005 年 2 月に打ち上げ予定の ASTRO-E2 衛星には、特に大きな期待がかかる。§4 で述べた XRS 装置は、0.1% に達するエネルギー分解能を誇るのだから、さまざまな温度のプラズマを高い精度で分離でき、さらにコロナ説で予言されるような ICM の乱流があれば、輝線の広がりが初めて検出できると期待される。XMM ニュートンやチャンドラの分光計は分散型だから、放射源が空間的に広がっているとそれだけで輝線が幅広になってしまい、乱流の測定はできないのである。ASTRO-E2 には、牧島が開発に参加している硬 X 線検出器 (HXD) も搭載される。撮像能力はないものの、HXD は 10~600 keV の広帯域で従来にない優れた感度を持ち、銀河団から断片的に検出が報告されている非熱的な硬 X 線を、徹底的に調べ上げることができるであろう。磁気乱流によりプラズマ加熱が起きていれば、それに附随して粒子加速も起き、硬 X 線が発生していると期待されるので、硬 X 線の検出はコロナ説を強化してくれると考えられる。

X 線だけでなく光学観測も重要である。もし我々の描像が正しければ、進化につれて銀河は銀河団ポテンシャルの中心へと沈み込み、そのエネルギーを受けて ICM はより広がるはずである。とすれば、「X 線に比べ可視光が中心に強く集中する」というよく知られた傾向は、遠方の銀河団では進化が進んでいないので弱く、近傍の銀河団になるほど強まるはずである。チャンドラの登場で、 $z > 0.5$ の銀河団についても X 線の空間分布は精度よく測定できるようになり、公開データも豊富になってきた。しかし遠方銀河団ではメンバー銀河の判定が難しいので、むしろ光データの方がネックになっている。「すばる」Suprime Cam を用

い、多色測光で赤方偏移を推定するなどの方法が必要であり、ぜひ光観測のエキスパートのお力を拝借したいと思っている。理論的には、銀河が ICM 中を運動するさい、どんな効率でその運動エネルギーが散逸するかが鍵となる。直感的にはアルペーン時間より1桁ぐらい長いと想定されるが、正しいであろうか。これはぜひ磁気流体シミュレーションの研究者に挑戦していただきたい課題である。閉じた箱の中に一樣な磁気プラズマを入れ、その中で適当な大きさの1個の電気電導球を運動させてみれば、感触はつかめるのではなからうか。

最後にひとこと。我々は決して **Andy Fabian** を仇敵のごとく思っているわけではない。彼は才気煥発で、多くの弟子を育てている優れた研究者であり、彼との会話は(学説の違いは別にして)たいへん楽しい。我々にとって、あっぱれよきライバルであり、**Andy, Yasushi, Max** と呼び合う仲間もある。**CF** という神話に身のほども知らずに立ち向かった「あすか」の成果を、国外で最もよく認識してくれているのは、他ならぬ彼自身であろう。

参考文献

- 1) Zwicky F., 1933, *Helv. Phys. Acta* 6, 110
- 2) Boldt E., McDonald F. B., Riegler G., Serlemitsos P., 1966, *Phys. Rev. Lett.* 17, 447
- 3) Giacconi R., et al., 1971, *ApJ* 165, L27
- 4) Gursky H., et al., 1971, *ApJ* 167, L81
- 5) Kellogg E., et al., 1971, *ApJ* 165, L49
- 6) Forman W., et al., 1972, *ApJ* 178, 309
- 7) Mitchell R. J., 1976, *MNRAS* 175, 29
- 8) David L., Jones C., Forman W., 1995, *ApJ* 445, 578
- 9) Bennett C. L., et al., 2003, *ApJS* 148, 1
- 10) Cowie L. L., Binney J., 1977, *ApJ* 215, 723
- 11) Fabian A. C., Nulsen P. E. J., 1977, *MNRAS* 180, 479
- 12) Giacconi R., et al., 1979, *ApJ* 230, 540
- 13) Jones C, Forman W., 1984, *ApJ* 276, 38
- 14) Mohr J. J., Mathiesen B., Evrard A. E., 1999, *ApJ* 517, 627
- 15) Ota N., Mitsuda K., 2002, *ApJ* 567, L23
- 16) Truemper J., 1993, *Science* 260, 1769
- 17) Henry J. P., Briel U. G., Nulsen P. E. J., 1993, *A&A* 271, 413
- 18) Allen S. W., Fabian A. C., 1994, *MNRAS* 269, 409
- 19) Crawford C. S., Fabian A. C., 1992, *MNRAS* 259, 265
- 20) Edge A. C., 2001, *MNRAS* 328, 762
- 21) Fabian A. C., 1994, *ARA&A* 32, 277
- 22) Daines S. J., Fabian A. C., Thomas P. A., 1994, *MNRAS* 268, 1060
- 23) Sarazin C. L., Oconnell R. W., 1983, *ApJ* 268, 552
- 24) Sanders J. S., Fabian A. C., Allen S. W., 2000, *MNRAS* 318, 733
- 25) Tanaka Y., Inoue H., Holt S. S., 1994, *PASJ* 46, L37
- 26) Ohashi T., et al., 1996, *PASJ* 48, 157
- 27) Fabian A. C., Arnaud K. A., Bautz M. W., Tawara Y., 1994, *ApJ* 436, L63
- 28) Ikebe Y., et al., 1997, *ApJ* 481, 660
- 29) Xu H., et al., 1998, *ApJ* 500, 738
- 30) Ikebe Y., et al., 1999, *ApJ* 525, 58
- 31) Makishima K., et al., 2001, *PASJ* 53, 401
- 32) Matsumoto H., et al., 1996, *PASJ* 48, 201
- 33) Fukazawa Y., et al., 1994, *PASJ* 46, L55
- 34) Ikebe Y., 1995, Ph.D. Thesis, The University of Tokyo
- 35) Killeen N. E. B., Bicknell, G. V., 1988, *ApJ* 325, 165
- 36) Ikebe Y., et al., 1992, *ApJ* 384, L5
- 37) Ikebe Y., et al., 1996, *Nature* 379, 427
- 38) Navarro J. F., Frenk C. S., White S. D. M., 1996, *ApJ* 462, 563
- 39) Okamoto T., Habe A., 2000, *PASJ* 52, 457
- 40) Ghigna S., et al., 2000, *ApJ* 544, 616
- 41) Okumura Y., et al., 1988, *PASJ* 40, 639
- 42) Hatsukade I., 1989, Ph.D. Thesis, The University of Osaka
- 43) Awaki H., et al., 1991, *ApJ* 366, 88
- 44) Koyama K., Takano S., Tawara Y., 1991, *Nature* 350, 135
- 45) Tsuru T., 1992, Ph.D. Thesis, University of Tokyo
- 46) Awaki H., et al., 1994, *PASJ* 46, L65
- 47) Matsumoto H., et al., 1997, *ApJ* 482, 133
- 48) Matsushita K., 1997, Ph.D. Thesis, The University of Tokyo
- 49) Matsushita K., et al., 1997, *ApJ* 488, L125
- 50) Matsushita K., Ohashi T., Makishima, K., 2000, *PASJ* 52, 685
- 51) Fukazawa Y., 1997, Ph.D. Thesis, The University of Tokyo
- 52) Fukazawa Y., et al., 1998, *PASJ* 50, 187
- 53) Xu H., et al., 1997, *PASJ* 49, 9
- 54) Ezawa H., et al., 1997, *ApJ* 490, L33

- 55) Kikuchi K., et al., 1999, PASJ 51, 301
 56) Fujita Y., Kodama H., 1995, ApJ 452, 177
 57) Reisenegger A., Miralda-Escude J., Waxman E., 1996, ApJ 457, L11
 58) Fukazawa Y., et al., 2000, MNRAS 313, 21
 59) Matsushita K., Finoguenov A., Böhringer H., 2003, A & A 401, 443
 60) 牧島一夫 2001, 「科学」(岩波書店) 70, 8月号, p. 642
 61) Jansen F., et al., 2001, A & A 365, L1
 62) Peterson J. R., et al., 2001, A & A 365, L104
 63) Tamura T., et al., 2001, A & A 365, L87
 64) Kaastra J. S., et al., 2001, A & A 365, L99
 65) Sakelliou I., et al. 2002, A & A 391, 903
 66) Ikebe Y., 2001, astro-ph/0112132
 67) Allen S. W., Schmidt R. W., Fabian, A. C., 2001, MNRAS 328, L37
 68) <http://www.astro.virginia.edu/coolflow/> ほぼすべてのプレゼンテーション, および収録が見られます.
 69) Fabian A. C., et al., 2000, MNRAS 318, L65
 70) McNamara B. R., et al., 2000, ApJ 534, L135
 71) Blanton E. L., et al., 2001, ApJ 558, L15
 72) Mazzotta P., et al., 2002, ApJ 567, L37
 73) 藤田 裕, 2002, 天文月報 95, 418
 74) Churazov E., et al., 2001, ApJ, 554, 261
 75) Boehringer H., et al., 2002, A & A 382, 804
 76) Takahara F., Ikeuchi S., 1977, Prog. Theor. Phys. 58, 1728
 77) Bregman J. N., David L. P., 1988, ApJ 326, 639
 78) Fabian A. C., Voigt L. M., Morris R. G., 2002, MNRAS 335, L71
 79) Voigt L. M., et al., 2002, MNRAS 335, L7
 80) Soker N., 2003, MNRAS 342, 463
 81) Fujita Y., Suzuki T. K., Wada K., 2003, ApJ, in press (astro-ph/0309808)
 82) Makishima K., 1995, in AIP Proc. No. 336, Dark Matter, ed. S. S. Holt, C. Bennet, 172
 83) Rosner R., Tucker W. H., Vaiana G. S., 1978, ApJ 220, 643
 84) Kano R., Tsuneta S., 1995, ApJ 454, 934
 85) Dressler A., et al., 1994, ApJ 435, L23

The End of the Cooling Flow Paradigm

Kazuo MAKISHIMA

*Department of Physics, The University of Tokyo,
 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033
 Institute of Physical and Chemical Research, 2-1
 Hirosawa, Wako, Saitama 351-0198*

Yasushi IKEBE

*Code 661, NASA/Goddard Space Flight Center,
 Greenbelt Rd., Greenbelt, MD 20771, USA
 Joint Center for Astrophysics, University of Mary-
 land, Baltimore County, 1000 Hilltop Circle, Balti-
 more, MD 21250, USA*

Abstract: The cooling flow paradigm in clusters of galaxies, which has been extensively accepted among the astrophysics community and was almost a “mythology,” is being denied completely and fading away. In this paper, we describe the history of the paradigm, our ASCA results that gave the first observational clue to attack the “castle,” and recent XMM-Newton and Chandra results giving the knock-out blow. Some efforts to create a new “mythology” are also introduced.