

誰も気づけなかった銀河と プラズマの相互作用

牧島 一夫

〈東京大学理学系研究科物理学専攻 〒113-1133 東京都文京区本郷7-3-1〉

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

顧 力 意 (Gu Liyi)

〈東京大学理学系研究科ビッグバン宇宙国際研究センター 〒113-1133 東京都文京区本郷7-3-1〉

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

稲田 直久

〈奈良工業高等専門学校 〒639-1080 奈良県大和郡山市矢田町22〉

e-mail: inada@libe.nara-k.ac.jp



牧島



顧



稲田

銀河団のメンバー銀河は、X線を放射する高温プラズマ (ICM: Intra Cluster Medium) の中を運動し続けるので、ICMと電磁流体的に相互作用するであろう。すると銀河はICMからの抵抗により、宇宙年齢をかけて銀河団の中心に落下し、その力学的エネルギーをICMに受け渡すだろう。牧島らは2001年、この描像により、ICMが冷えない謎、銀河とICMの広がりとの差、銀河団の中心で見られるICMの温度低下の正体など、多くの謎が一挙に解決できると提唱した。われわれは最近、 $z=0.1-0.9$ の34個の銀河団サンプルを用い、ICMと銀河の相対的な空間分布を測定し、この銀河落下の予言を観測的に立証することに成功した。この単純だが誰も気づけなかった宇宙の進化は、銀河団と銀河の研究に、プラズマ物理学に立脚した新しいパラダイムを導入すると期待される。

1. はじめに

銀河団は宇宙の階層のトップに君臨する天体で、1個の銀河団は、数百の銀河、X線を放つ高温プラズマ (ICM: Intra Cluster Medium)、暗黒物質という三つの主要成分からなる。星をしのぐ質量をもつICMは、重力ポテンシャル (おもに暗黒物質が作る) に静水圧平衡の状態に閉じ込められ、数keV (1 keVは約1千万度) という高温により重力に抗している。他方、中心のcD銀河を除く銀河たちは、ポテンシャル中を300-1,000 km s⁻¹の速度で運動することで、重力に対抗している。これらICMの温度や銀河の運動速

度は、ともに重力ポテンシャルの深さに対応し、銀河の運動はICMに対し遷音速である。

話が飛ぶが、宇宙X線の観測には、地上～500 kmの高度を飛行する科学衛星が用いられる。そこでの残留大気は $\sim 10^{-11}$ 気圧 (10^{-6} Pa)で、実験室の「超高真空」に該当するが、それでも衛星は大気から抵抗を受け、徐々に落下する。では銀河がICM中を運動する際も同様ではないだろうか。そう問いかけると多くの天文学者は、「銀河からガスは抜けるかもしれないが、銀河の中の星たちは、ICMと相互作用するはずはない」と答えるのだった。本当にそうだろうか？

本稿は、月報2004年1月号に書いた「クーリ

ングフロー学説の終焉¹⁾の続編として、上記の「天文学の常識」に新たな光を当てるものである。

2. 銀河団のいくつかの謎

暗黒エネルギーの支配する宇宙で、「冷たい暗黒物質」が自己の重力で集まり、網目状の大規模構造を形成するさい、その最も高密度の部分が銀河団となったと考えられている。バリオンも、暗黒物質が作る重力場をなぞる形で分布し、銀河団に相当する位置では深い重力ポテンシャルのため、断熱圧縮されて高温プラズマになり、その一部は強く凝集し、放射冷却が効いて銀河と星ができたと考えられる。またICMは太陽組成の ~ 0.3 倍の重元素アバundanceをもち、メンバー銀河で合成された重元素が、高い効率で銀河間空間に放出されたこともうかがえる。こうした理解は大筋はよいとしても、銀河団に関しては以下のように多くの謎が残り、われわれの挑戦を促してきた。

謎1: 広がったICMと集中する銀河たち

近傍の銀河団では暗黒物質に比べ、ICMはより大きく広がり、他方メンバー銀河たちはより中心に集中する²⁾。この事実、アインシュタイン衛星により銀河団のX線画像が得られるようになった1980年代の前半以来、広く認識されていたが、なぜ三つの成分の空間分布がこのように異なるかは不明である。とくに、なぜ銀河(星)が他の成分よりずっと強く中心に集中するか、という単純な問いに、答えは得られていなかった。

謎2: 放射冷却しないICM

ICMの密度が高い($\sim 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$)銀河団の中心部では、宇宙年齢の間にICMはX線放射で冷え減圧する。すると周囲のICMが流入し、それによる密度上昇が放射冷却をさらに加速する。この熱的不安定性のため、銀河団の中心では $\sim 10^3 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ (M_{\odot} は太陽質量)という大量のICMが冷え集積すると考えられた。クーリングフロー(CF)³⁾と呼ばれるこの描像は、1990年頃には一世を風靡し、「CFを語らば銀河団研究者

にあらざ」という状況でさえあった。

そんななか、1993年2月に名機「あすか」⁴⁾が、わが国4機目のX線衛星として打ち上げられた。心血注いだ撮像型ガス蛍光比例計数管のデータを見ると、確かに多くの銀河団の中心でICMの温度は低下するが、 $\sim 1 \text{ keV}$ で下げ止まっており、CF学説の予言する大量の低温($< 0.5 \text{ keV}$)ICMは、どこにも見られない。紆余曲折を経て、7名の博士論文を集大成する形で、CF学説を全面否定する論文を出版することができ⁵⁾、2006年度の日本天文学会欧文報告論文賞をいただいた。和文解説¹⁾もご覧いただきたい。この成果は後続のXMM-Newton X線観測衛星などで追認⁶⁾された結果、CF学説は否定され、ICMには放射冷却に拮抗する加熱も働いていることが判明した。しかしその加熱機構の正体はまだ謎で、銀河で発生する超新星のエネルギーでは、1桁も不足する。

謎3: 中心に向けたICMの温度低下の正体

CF描像は否定されたが、従来その証拠と見なされてきた、銀河団の中心部でのICMの温度低下は、中心にcD銀河を擁する「cD銀河団」ではほぼ必ず見られる事実である。では、その温度勾配はどうやって安定に維持されているのだろうか。

温度の異なるプラズマは電子熱伝導で短時間に等温になるはずである。磁場により熱伝導が阻止されたとしても、プラズマ中に高温部分と低温部分があり、それらが圧力平衡にあれば、低温部はより高密度でなければならない。温度 T 、密度 n のプラズマの単位体積当たりの放射率は、ほぼ $n^2 T^{1/2}$ に比例する一方、その単位体積当たりの加熱率は多くの場合、 n に比例するであろう。よって加熱源があっても、低温部では放射冷却が加熱に勝ち、暴走的に冷えるはずである。なぜ温度勾配が安定に保たれるのか?

3. 仮説の提示

2001年の論文⁵⁾は単にCF学説を否定するだけでなく、上記三つの謎に統一的に答える仮説まで

含んでいた。それは、「ICMは理想的な古典的プラズマであり、流体描像や平均場近似が完全に正当化され、無衝突で、しかも重力場の中に安定に閉じ込められている」⁷⁾、「銀河は自分のプラズマや磁場をもつので、ICMが星間空間を自由に吹き抜けることはない」^{1), 5)}との認識に基づく。cD銀河団を念頭に、この考えを端的に表したのが図1である。これは、(故)内田豊博士、常田佐久氏など、太陽プラズマ物理学者との交流に源をもつもので、太陽コロナの類推から、「cDコロナ描像」と呼んでいる。以下がその骨子である。

- 1) 中心部の磁力線は、cD銀河に両端をもつ「閉じた磁力線」と、他端が外に延びる「開いた磁力線」の2種類に分類できる。
- 2) 太陽で「コロナの穴」に対応する開いた磁力線部分は、ICMの高温成分で満たされ、電子熱伝導で等温になる。
- 3) 閉じた磁力線の内部は磁気圏（太陽ではコロナ）となり、外界から熱的に遮断され、そこにICMの低温成分が閉じ込められる。
- 4) 運動する銀河は、ICMや磁力線を押しつけるなど相互作用を行い、ICMに磁気乱流やリコネクションを引き起こし加熱する。

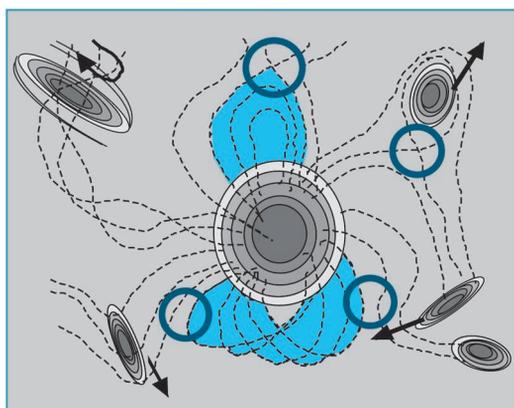


図1 「cDコロナ」の描像。中心にあるのがcD銀河、点線は磁力線で、水色部分がICMの低温成分、灰色が高温成分。矢印は銀河の運動、青丸はリコネクションの場所。前著¹⁾の図4を再掲。

- 5) 太陽コロナの磁気ループに働くRosner-Tucker-Vaianaの自己制御機構⁸⁾により、低温成分は熱的に安定化される。
- 6) 運動する銀河たちは、ICMに力学的エネルギーを受け渡すことで抵抗を受け、徐々に重力ポテンシャルの底へ落下する。

4. 三つの前哨戦

図1は突飛な着想のためか、天文学者からは、なべて懐疑的なまなざしを受けたが、柴田一成氏、松元亮治氏、常田佐久氏など、プラズマ天体物理学者からは異口同音に「とても自然で面白い考えだ」と激励をもらい、それに力を得て何とかこの仮説を立証しようと決心した。それには、銀河が宇宙年齢かけて落下してきたこと、つまり上記の6)を示すことが決定打だが、それに先立ちわれわれは、いくつかの前哨戦を通じ仮説の強化を試みた。

4.1 2温度構造

図1によればICMの温度 $T(R)$ は、同じ3次元半径 R に低温と高温が共存し、 $R \rightarrow 0$ につれ低温成分が卓越する2温度構造(2T)になるはずで、 $T(R)$ が R の一価関数として $R \rightarrow 0$ に向け下がるという、1温度構造(1T)ではないだろう。しかしX線データでは、射影により異なる $T(R)$ が混じり合い、1Tと2Tの区別が難しい。日本では「あすか」の初期から2Tを仮定する場合が多かったが^{2), 9)}、これはその角分解能が $\sim 2'$ と限られていたための方便という色あいが強く、1T描像は十分には排除されていなかった⁵⁾。

高橋 勲らは、角分解能のよいXMM-Newtonによるケンタウルス銀河団の公開データを用い、この問題に挑戦した。彼らはデータから逆射影により、 $R=1'-5'$ (14-70 kpc)の「厚い3次元シェル」のスペクトルを導き、それを1Tと2Tの理論モデルでフィットしたところ、図2のように、温度 $T_c \sim 1.8$ keVと $T_h \sim 4.0$ keVからなる2Tモデルのほうが、データをよく再現できた¹⁰⁾。これは

$r < 70$ kpcの中心領域にも高温成分が存在することを意味し、図1を支持する。

4.2 低温成分の高い重元素量

2008年より、上海交通大学の大学院生だった、著者のGu(顧)が研究に加わった。彼の指導教員であるXu Haiguan(徐海光)教授は、「あすか」の時代に日本に滞在し、リッチで緩和したcD銀河団の代表としてAbell 1796銀河団を研究して、重力ポテンシャルの階層構造を発見し¹¹⁾、2001年の論文⁵⁾を支える「7編の博士論文」の著者の一人となっていた。Guらは稼働中の「すぎく」のデータを、角分解能のよいChandra X線観測衛星やXMM-Newtonのデータと組み合わせ、師の後を受けてAbell 1795の研究を行い、ケンタウルス座銀河団と同様、 $T_c \sim 2.1$ keVと $T_h \sim 5.3$ keVの2T構造があることを明らかにした¹²⁾。

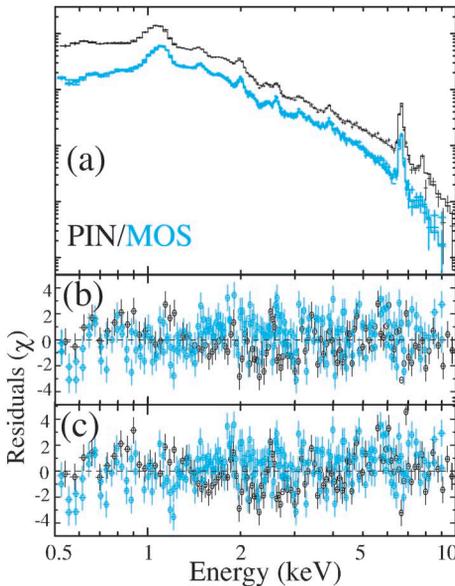


図2 (a) XMM-Newtonで観測した、ケンタウルス座銀河団のスペクトル¹⁰⁾。逆射影して $R=1'-5'$ の3次元シェルでデータを集積し、 $T_c \sim 1.8$ keVと $T_h \sim 4.0$ keVの2Tモデルでフィットした。(b)その残差で、 $\chi^2_\nu = 381/278$ 。(c)射影した1Tモデルでフィットしたときの残差で、 $\chi^2_\nu = 418/378$ 。高エネルギーで正の残差が見える。黒はP/V検出器、青はMOS検出器スペクトル。

GuらはまたAbell 1795で、温度と重元素の空間的相関を調べ、低温成分が強い場所では重元素のアバンドンスが増加していること、よってこの銀河団の中心領域で見られるアバンドンスの増加は、低温成分に付随することを初めて明らかにした¹²⁾(それ以前は便宜上、低温成分と高温成分は各半径で、同じアバンドンスをもつと仮定されていた)。これは図1で、cD銀河のIa型超新星により生成された重元素が磁気閉ループの中に選択的に蓄積されたと考えると、自然に説明できる。

Guらは、Rosner-Tucker-Vaianaのスケーリング則⁸⁾を発展させた理論モデルも展開し、低温成分が熱的に安定化されることも示した¹²⁾。こうして4.1節と4.2節の成果により、3章の「謎3」がcDコロナ描像でほぼ説明できたと言える。

4.3 ICM重元素は銀河より大きく広がる

残るは「謎1」と「謎2」である。たとえば銀河の集中は、宇宙初期に銀河団の中心部分ほど効率よく銀河が形成された結果かもしれない。こうした考えの当否を探るには、ICMに含まれる重元素の空間分布を調べるのが有効である。なぜなら、銀河と星が形成された後、星内部や超新星爆発で重元素が合成され、それらがICM中に放出されたと考えられるからである。なかでも重要なのが鉄で、その高階電離したイオンは、6.7-6.9 keVに $K\alpha$ 輝線を放射し、重要な手掛かりとなる。

こうした意識の下、日本では早くからX線を用いたICMの元素分析が進められ、「てんま」¹³⁾や「ぎんが」¹⁴⁾により、ICM中の鉄に関して多くの進展が得られていた。さらに「あすか」では全反射X線光学系の導入と検出器のエネルギー分解能の向上により、Feに加え、SiやSの空間分布が測定可能になった⁹⁾。こうした進展は稼働中の「すぎく」(2005年7月に打ち上げ)に受け継がれ、Mg, Ne, Oを含め多くの成果が得られている¹⁵⁾。

その一環として、川原田 円らはXMM-Newtonや「すぎく」を用い、新たな発見を行った。

彼らは近傍銀河団のICMに含まれる鉄の質量を、2次元の半径 r 以内の積分値 $M_{\text{Fe}}(r)$ として測定し、それを文献から求めた近赤外光(K バンド)の2次元積分した表面輝度 $L(r)$ と比べ、いわゆるIron-Mass-to-Light Ratio (IMLR), つまり M_{Fe}/L を計算したのである(L を3次元に逆射影することが難しいため、3次元半径 R ではなく2次元半径 r を用いた)。すると図3のように、近傍銀河団では常に中心でIMLRが顕著に低下することが判明した¹⁶⁾。鉄の代わりにシリコンや酸素を用いても、大勢は同じであった。ICM中の大量の重元素は、その生産現場であるメンバー銀河よりずっと周辺部まで分布していたのである。

このIMLRの挙動は、「銀河たちは形成当初から中心部に集中しており、それらの出す重元素の多いガスはポテンシャル勾配に逆らって周辺にまで運ばれた」か、「銀河たちが重元素をICM中に放出しつつ、徐々に銀河団の中心に落下してきた」かのどちらかを意味する。前者はCFと逆の過程なので、それが起きるにはCFを止めるのに必要なと同程度のエネルギーが必要となる。仮に銀河形成の初期にII型超新星の連鎖により想像以上に強い銀河風が吹いたとしても、酸素は鉄より大きく広がるはずで、観測結果と矛盾する。

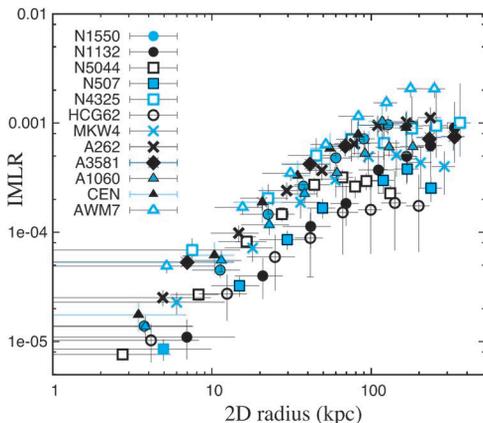


図3 近傍の14個の小規模銀河団(もしくは銀河群)におけるIMLRの2次元半径分布¹⁷⁾。いずれも $r < 100$ kpcで中心に向け急激に減少する。

よって「銀河が落下してきた」ことが示唆され、研究は核心に近づいたと実感したのである。

5. いよいよ本丸へ

5.1 方法論

残る「本丸」を攻めるには、宇宙年齢かけてメンバー銀河がポテンシャルの底へ落下してきたことを実証する必要がある。それには赤方偏移の異なる銀河団を可視光とX線で観測し、2次元で積分した表面輝度 $L(r)$ を、同様に積分したICMの質量 $M_{\text{ICM}}(r)$ で割って、Galaxy-Light-to-ICM-Mass Ratio (GLIMR)と呼ぶべき量 L/M_{ICM} を求め、その進化を調べればよい。 L を M_{ICM} で割るのは、ICMと銀河の分布の相対関係に注目するため、また R ではなく r を用いるのは、4.3節のIMLRと同様な理由からである。

X線データは多数が公開されており、その解析手順も確立している。輪切りスペクトル群からバックグラウンドを差し引き、逆射影して3次元での放射率を求め、そこから3次元のICM密度(ほぼ放射率の平方根)を出し、それを2次元に射影して中心から積分すれば $M_{\text{ICM}}(r)$ となる。

難しいのは $L(r)$ だった。X線と違い、前景・背景の銀河の寄与が多めで、それらを除去し、メンバー銀河を同定しないと行けない。ところが文献には、なかなかメンバーシップ情報がない。光学観測の専門家に相談しても、「そんなデータベースはないし、分光観測で赤方偏移を測らないとメンバー同定は難しい」との返事が返ってくる。

5.2 新しい光学データ

そんななか、北口貴雄らが苦心の末、遠方銀河団CL 1358+6245 ($z=0.33$)の文献データを用い、研究の最初のステップを刻んでくれた¹⁸⁾。次いでこの研究に興味を示し参加してくれたのが、スローンデジタルスカイサーベイ(SDSS)データで重力レンズ探査を専門とする共著者の稲田(当時は理研基礎科学特別研究員)であった。

相談の結果、まず自分たちで可視光の「公開データ」を解析することを考えた。もちろん、分光観測の公開データがあればそれを利用することが理想的ではあるが、十分に利用できるものがなかったため、多色測光データから前景・背景を統計的に差し引き、メンバーを推定する方法を採るべきことも方針として採用された。しかしSDSSや2ミクロン全天サーベイ (2MASS) のデータでは遠方の銀河団に対して観測が浅すぎるため、われわれの目的に合致したデータを、独自に獲得することが必要と結論された。

そこで新たに、光学測光観測を提案することにした。われわれの発想はなかなか関係者に理解されず難航したが、幸い2009年11月以降、ハワイ大学88インチ望遠鏡 (UH88) への観測提案が2度にわたり採択され、X線から選んだ34個の銀河団の多色測光観測が、2010年の2月、3月、および8月に、全6夜かけて行われる運びとなった。ここでもレフェリー (観測採択委員会) はわれわれの提案を「大誤解」したようだが、稲田がUH88を使って多くの実績を残していたことが、提案採択への後押しをしてくれたのかもしれない。

2月と8月のUH88観測は、Tek2K CCDカメラによりB, R, Iの3バンドで行われ、3月の観測では、広視野グリズム分光器 (WFGS2) をg, r, iバンドの撮像モードで用いた。日本からは稲田と前述の川原田に加え、東京理科大/理研の大学院生 (当時) であった小波さおり、および理研基礎科学特別研究員であった高橋労太が参加した。各銀河団の露光は500-1,200秒、最も深いもので限界等級は約24.0等だった。これらの観測では前景・背景の情報を得るため、銀河団の中心部分の撮像に加え、中心から1.5-5.1 Mpc離れた領域もほぼ同じ深さで観測した。

5.3 ついに進化が見えた

いよいよUH88のデータの解析を本格的に始めようとしたとき、稲田は奈良高専に職を得て、こ

の作業から離れざるをえなくなった。しかし幸い、Guが上海で学位を得て、学術振興会外国人特別研究員として2011年5月に東大に来日し、東日本大震災の余波さめやらぬ中で、稲田から引き継いだ光学データの解析を開始できた。

UH88の画像から銀河を一つずつ同定し、測光する。前景と背景の銀河を除去するには、図4(a), (b)のように、銀河団中心とオフセット領域での表面輝度 $L(r)$ を、統一的にKingモデルに一樣なバックグラウンドを加えフィットする方法と、検出された光学天体に色-等級フィルターを掛けてメンバーを抽出する方法の二つを用いたところ、誤差の範囲内でよく一致する結果を得た。Guはまた、XMM-NewtonやChandraの公開X線データから、短時間で図4(c), (d)のようなICMの質量プロファイル $M_{\text{ICM}}(r)$ を導いた。

図4(e), (f)は、2個の代表銀河団について、こうして求めたIバンドの $L(r)$ を $M_{\text{ICM}}(r)$ に重ねて描いたもので、横軸は距離の違いを補正するため、 R_{500} で規格化してある (R_{500} とは、銀河団の質量密度がその赤方偏移における宇宙の臨界密度の500倍になる半径)。このように、遠いRX J0030+2618では、 L も M_{ICM} もほぼ同じ傾きで $r \sim 0.7R_{500}$ まで延びるのに対し、近いRX J1044-0704では、 $r > 0.3R_{500}$ で L が頭打ちになっている。つまりメンバー銀河は、前者ではプラズマ球の端まで分布するのにに対し、後者ではより中心部に局在していることになる。

こうして全34個の銀河団それぞれに対しGLIMRを求め、その結果を $z=0.11-0.22$ の9天体 (サブサンプルL)、 $z=0.22-0.45$ の16天体 (同M)、 $z=0.45-0.89$ の9天体 (同H) に分けてアンサンブル平均をとったものが図5である。三つのサブサンプルのGLIMRカーブは、図4から示唆されるのと同じ進化を示している。また統計誤差に宇宙大構造に起因するバックグラウンドの揺らぎを加えて評価しても、GLIMRの進化は有意であった¹⁹⁾。まさに予言どおりの効果がはっ

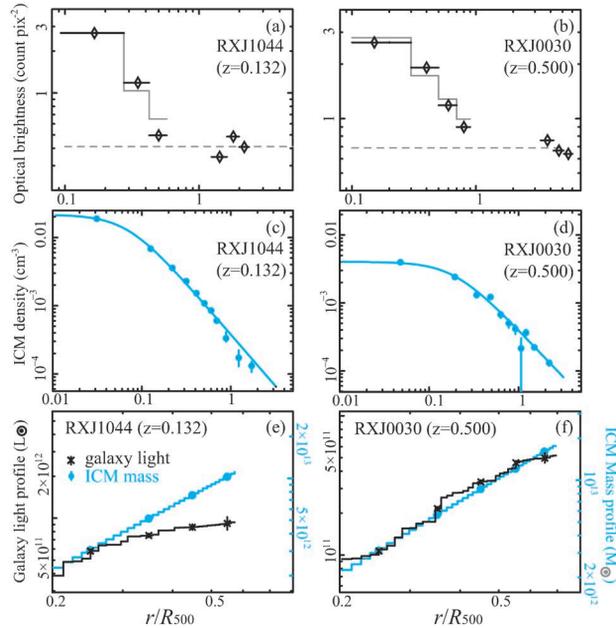


図4 34個の銀河団サンプルのうち、2個の代表例の解析結果. 左列はRX J1044-0704 ($z=0.132$), 右列はRX J0030+2618 ($z=0.500$) のもの. 上段はバックグラウンドを含むIバンドの表面輝度分布, 中段はバックグラウンドを引いたICM電子の柱密度分布. 下段は、2次元で積分した表面輝度(黒)と、ICM質量(青)の分布¹⁹⁾. 横軸は半径を R_{500} で規格化したもので、中段は3次元、あとは2次元.

きり見えてきた瞬間であった.

可視光の表面輝度の代わりに銀河の個数を用いても、本質的に同じ結果が得られた. またICMの質量の代わりに、ICMの静水圧平衡を仮定して求めた全重力質量で $L(r)$ を割っても、三つのサブサンプル間で顕著な進化が見られた.

5.4 誤差を慎重に評価

図5でGLIMの進化が見えたが、これが選択効果や観測のバイアスであってはぬか喜びに終わってしまう. 実際、遠方ほどよりリッチな銀河団を選びやすく、絶対等級の明るいメンバーを選んでおり、より青い静止系波長で観測している. われわれはこうしたバイアスの一つずつ評価し、いずれも結果に影響しないことを確認した. 一例として、これまですべてIバンドを用いていたのに対し、対象の z に応じ、バンドを B, R, I と変え、ほぼ同じ静止系波長を見るようにしても、結果は影響されなかった. このあたりは銀河の光学観測の

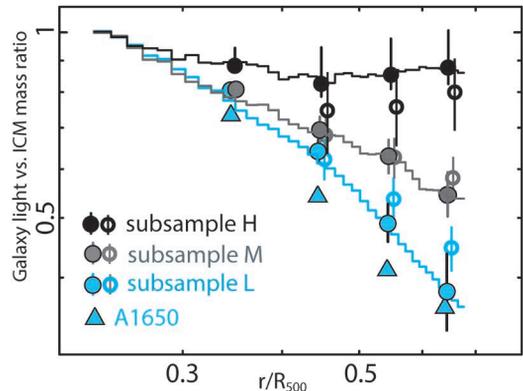


図5 銀河団の中心から積分した可視光表面輝度 $L(r)$ を、同様に積分したICMの柱質量密度 $M_{\text{ICM}}(r)$ で割った比 (GLIMR) を赤方変移の異なる三つのサブサンプルで平均した結果¹⁹⁾. 白抜きは、色等級フィルター法、ベタは、バックグラウンド差し引き法の結果. 青い三角は、分光的にメンバーが同定された近傍銀河 Abell 1650 ($z=0.083$) に対する結果.

専門家である児玉忠恭および嶋作一大のお二人にアドバイスをもらい、得られた成果に十分に納得してもらったうえで、論文の共著者に加わっていただいた。ありがたいことである。

こうしてGLMRの進化は本物であると確認できたが、その原因としてまず思い浮かぶのは、重力による動的摩擦(dynamical friction)だろう。これが働けば、大質量の銀河ほど有効にその運動のエネルギーや角運動量を小質量の銀河に受け渡し、ポテンシャル中心へと沈んでいく。そこでUH88のデータから、質量 $<1 \times 10^{11} M_{\odot}$ の小質量銀河のみを抽出して同じ解析を行ったが、結果は変わらなかった。よってGLMRの進化には、動的摩擦「以外」の効果が強く働いている必要がある。ここまでくれば、「銀河とICMの磁気流体的な相互作用」は、現実味を帯びてきたと言える。ICMは、銀河の星間空間を素通りしないと考えざるをえない。

6. 今後の展望

このようにわれわれは、銀河団のメンバー銀河が、宇宙年齢かけてポテンシャル中心へと落下してきたことを、観測データに基づき統計的に明らかにすることに成功した。もちろん、これでcDコロナ画像が完全に立証できたとは思っておらず、また銀河落下の原動力が磁気流体的な相互作用であるか否かも、議論の余地は残る。しかし、「あすか」の観測から生まれた新画像が、十余年かけ格段に強められたことは、特筆に値しよう。

今後は次の三つの研究により、この新画像のさらなる確立を図りたい。一つは銀河団サンプルを大幅に増やすことで、すでにGuが中国の研究者の協力を得て作業を進めている。第二は銀河とICMの相互作用の詳細を特定することである。ICMはまず銀河のガス成分に動圧を与え、それらをはぎ取ると考えられる。そこでわれわれは八木雅文らと協力し、「すばる」などを用い、渦巻銀河NGC 4388が「おとめ座」銀河団のICM中

を運動しつつ中性ガスを落としていく様子を、HI輝線、H α 輝線、低温のX線成分などで明らかにしつつある。三つ目は、運動する銀河がICMを「引きずる」現場を見ることである。これは2015年に「すざく」後継機として打ち上げ予定のASTRO-H衛星²⁰⁾に搭載されるX線マイクロカロリメーターを用い、ICMの出す鉄輝線のドップラーシフトを計測することで実証できるだろう。

われわれのパラダイムは多彩な波及効果をもたらす。たとえば1970年代から「環境効果」と呼ばれる現象が広く知られていた。銀河団の中心に近づくほど渦巻銀河が減り楕円銀河が増えること、また遠方の若い銀河団には青い渦巻銀河が多く、近傍のものでは矮小楕円銀河が多いことなどを指し、多くの読者方々には、釈迦に説法であろう。これは通常、星形成率が環境によりどのように影響されるかを現象論的にモデリングすることで「説明」されている。しかし一步踏み込んで「では星形成率を左右する要因は何か」と尋ねても答えは返ってこない。何か考え落としがあるように見える。銀河がICMから受ける動圧が、環境効果の重要な要因ではなからうか。

さらに想像力をたくましくしてみよう。一部の銀河団は相対論的電子がシンクロトン機構で出す電波を放射しており、粒子加速が起きている証拠となる。加速された電子は宇宙マイクロ波背景放射を逆コンプトン散乱し、硬X線を作ると期待される。「あすか」はICMの乏しい小規模な銀河団から、非熱的な硬X線の兆候を得たが²¹⁾、よりリッチは銀河団からは、高い感度と広いエネルギー帯域を誇る「すざく」硬X線検出器を用いても非熱的硬X線は検出されなかった²²⁾。ICM中を運動する銀河がプラズマ加熱だけでなく粒子加速も引き起こしており、銀河質量に比べICM質量の乏しい小規模系では、その効果が見えやすいと考えると説明できるかもしれない。ここでもASTRO-Hで大きな進展が期待される。

研究を進めるには、放射冷却と非等方的な熱伝

導を含めた磁気流体力学的な数値シミュレーションも重要であろう。すでに浅井直樹, 松元亮治らの諸氏が優れた初期結果を導いており²³⁾, 今後、観測とのより詳細な比較が期待される。

7. おわりに

われわれの研究の大きな特色は、発想そのものは極めて単純で、気づきさえすればX線と可視光の公開データを用い、誰でも実行しようと思えばできたことである。なぜこの着想に誰も気づかなかったかを考えると、一つはX線と可視光という異なる波長の狭間に大きなギャップが開いていたこと、もう一つは、天文学におけるプラズマ物理学的な視点が、まだ不十分なためと考えている。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、多くの方々に力添えをいただいた。X線の観測では、川原田 円, 北口貴雄, 中澤知洋, 国分紀秀, 高橋 勲, Xu Haiguangなどの皆さん, 可視光の観測や解釈では、嶋作一大, 児玉忠恭, 高橋芳太, 小波さおり, Poshak Gandhi, 八木雅文らの方々, 理論的解釈では、柴田一成, 松元亮治, 常田佐久, 藤田 裕らの諸氏などである。この場を拝借して、御礼を申し上げたい。

参考文献

- 1) 牧島一夫, 池辺 靖, 2004, 天文月報97, 6
- 2) たとえばIkebe Y., et al., 1999, ApJ 525, 58
- 3) Fabian A. C., 1994, ARA&Ap 32, 277
- 4) Tanaka Y., Inoue H., Holt S. S., 1994, PASJ 46, L37
- 5) Makishima K., et al., 2001, PASJ 53, 401
- 6) たとえばTamura T., et al., 2001, A&Ap 365, L87
- 7) 牧島一夫, 2008, 日本物理学会誌56, 595
- 8) Rosner R., Tucker W. H., Vaiana, G. S., 1978, ApJ 220, 643
- 9) たとえばFukazawa Y., et al., 1998, PASJ 50, 187
- 10) Takahashi I., et al., 2009, ApJ 701, 377

- 11) Xu H., et al., 1998, ApJ 500, 738
- 12) Gu L., et al., 2012, ApJ 749, 186
- 13) たとえばOkumura Y. et al., 1988, PASJ 40, 639
- 14) たとえばKoyama K. et al., 1991, Nature 350, 135
- 15) たとえばMatsushita K., et al., 2007, PASJ 59, S327
- 16) Kawaharada M., et al., 2009, ApJ 691, 971
- 17) 川原田 円, 2006, 博士学位論文, 東京大学理学系研究科, 3月
- 18) 北口貴雄ほか, 日本天文学会2004年秋季年会, T17a
- 19) Gu L., et al., 2013, ApJ 767, id 157
- 20) Takahashi T., et al., 2010, SPIE 7732, id. 77320Z
- 21) Nakazawa K., et al., 2007, PSAJ 59, 167
- 22) Nakazawa K., et al., 2009, PASJ 61, 339
- 23) Asai N., Fukuda N., Matsumoto R., 2006, AN 327, 605

Interactions between Galaxies and Cluster Plasmas That Nobody Has Noticed

Kazuo MAKISHIMA,¹⁾ Liyi Gu²⁾ and Naohisa INADA³⁾

¹⁾Department of Physics, Graduate School of Science, The University of Tokyo

²⁾Research Center for the Early Universe, Graduate School of Science, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan

³⁾Nara National College of Technology, 22 Yatacho, Yamatokoriyama-shi, Nara 639-1080, Japan

Abstract: Member galaxies in clusters of galaxies are moving through X-ray emitting hot plasmas called Intra Cluster Medium (ICM). In 2001, we proposed that plasma-physical interactions between these galaxies and the ICM can solve many puzzles with galaxy clusters. Recently, we successfully demonstrated this conjecture, by observationally showing that galaxies have indeed been falling, over the Hubble time, towards the cluster centers. This was accomplished by measuring X-ray and optical extents of a sample of 34 clusters from $z=0.1$ to 0.9 .