

宇宙論的な銀河の落下現象：その発見、プラズマ物理学的な意味、および ASTRO-H 衛星を用いた検証 Effects of cosmological infall of galaxies: its discovery, plasma physical implications, and verification with ASTRO-H

牧島 一夫^{1*}
MAKISHIMA, Kazuo^{1*}

¹ 東京大学理学系研究科物理学専攻
¹Department of Physics, University of Tokyo

星々の集団である銀河は、数百個が重力的に集まり「銀河団」を構成する。それら銀河団は天体の階層構造の頂点をなす存在だが、それらは単なる銀河の集団ではなく、いずれの銀河団でも質量の約 85% は暗黒物質で、星々の質量はわずか数% に過ぎない。残る約 10% は X 線を放射するプラズマ (以下 ICM = Intra Cluster Medium) である。ICM は宇宙の既知のバリオンの最大の成分であり、密度は 10^3 m^{-3} 程度、温度は数千万度から 1 億度で、広がった強い熱的 X 線を放射する。この温度は暗黒物質の作る重力ポテンシャルの深さに対応するので、ICM は宇宙の構造形成のさい、断熱圧縮され高温になったと考えられる。ICM は高温で低密度なため、平均粒子間隔は $\sim 0.1 \text{ m}$ 、デバイ長は $\sim 10 \text{ km}$ 、電子平均自由行程は $\sim 10^{18} \text{ m}$ と、理想的な古典的プラズマである。そこには $\sim 10^{-10} \text{ T}$ の磁場が存在し、プラズマ β は 100 のオーダーとなる。実験室プラズマには無い顕著な特徴として、ICM は暗黒物質の重力により安定に閉じ込められている。

銀河団の中心部では ICM の密度が高いため、宇宙年齢の間には ICM が X 線放射で冷え、圧力低下をきたすと計算される。すると周辺から ICM が重力により落下し、中心部で ICM の密度が上がってさらに冷却が進むであろう。その結果、ICM 中には「cooling flow」と呼ばれる暴走的な冷却が生じると考えられ、実際 1980 年代から、それを支持すると考えられる X 線の観測結果が続々と報告されてきた。

我々は X 線で銀河団の観測を続け、1993 年には自ら開発製作したガス蛍光比例計数管を日本 4 機目の X 線衛星「あすか」に載せて銀河団の観測を行った。その結果、銀河団の中心に向け ICM は温度低下を示すが、決して暴走的に冷えておらず、未知の加熱源があることを発見した。それを説明するため我々は、(1) 中心の巨大楕円銀河は閉じた磁気圏と開いた磁力線領域をもち、低温プラズマは磁気圏内部に閉じ込められ、(2) 銀河団空間を飛び回る銀河たち (中心銀河を除く) は ICM から抵抗を受けて ICM 中に磁気乱流を作り出し、(3) そのエネルギーが磁気波動や磁気リコネクションで低温プラズマを加熱し、(4) 二相のプラズマは太陽コロナと同じく Rosner-Tucker-Vaiana 機構で熱的に安定化され、(5) 銀河たちはエネルギーを失いポテンシャル中心に目がけ徐々に落下するはず、というプラズマ物理学的な描像を提示した (Makishima et al., Publ. Astro. Soc. Japan 53, 401, 2001)。この描像はその後、様々な形で強化され、たとえば 2009~2012 年には (1) の確証が得られた。

さらに昨年、(5) を決定づける観測結果が得られた。すなわち近傍銀河から赤方偏移 0.9 までの 34 個の銀河団を、X 線と可視光で観測した結果、近傍銀河では X 線放射 ICM に比べて銀河が中心に集中するのに対し、遠方 (つまり若い) 銀河団では、銀河が ICM 球の周辺まで分布していることが検証できたのである (Gu et al., Astrophys. J. 767, id 157, 2013)。この「宇宙論的な銀河落下現象」の発見は、単に ICM の加熱源を説明できるだけでなく、「銀河が ICM 中を運動しても両者の間には相互作用は無い」とする従来の通説を覆すインパクトをもち、さらにこれまで認識されなかった、宇宙で最大級のエネルギーの流れを発見したことを意味する。加えて、近傍の銀河団では暗黒物質よりも銀河たちは中心に強く集中し、ICM がやや広がるという既知の事実を自然に説明でき、ICM の中に太陽組成の 1/3 ほどの重元素を含むという事実も、銀河が ICM と強く相互作用することで説明できる。さらに銀河天文学で長らく謎だった「環境効果」、つまり過去より現在ほど、また銀河団の中心にゆくほど、渦巻き銀河が減り楕円銀河が増えることも、ICM との相互作用に起源を求めることができそうである。

我々は現在、2015 年の打ち上げに向け、X 線衛星 ASTRO-H を全世界的な協力で開発中である。同衛星が軌道に乗った暁には、従来より 1 桁よいエネルギー分解能を誇る軟 X 線精密分光計で、運動する銀河が ICM を局所的にひきずるドップラー効果を検出できると期待され、我々の描像がさらに決定的になると期待される。さらに我々が開発に貢献している硬 X 線イメージャーや軟ガンマ線検出器を用いることで、銀河が失った力学的エネルギーが、プラズマ加熱だけでなく粒子加速をも引き起こす可能性を、本格的に探査できるようになり、宇宙 X 線の研究領域大きく拡大すると期待される。

キーワード: 銀河と銀河団, 銀河団プラズマ, X 線放射, 磁気プラズマ過程, ASTRO-H 衛星

Keywords: galaxies and their clusters, intra-cluster medium, X-ray emission, magnetoplasma effects, ASTRO-H satellite