

論文の内容の要旨

論文題目

X-ray substructure in clusters of galaxies and its implications for the physics of the intergalactic plasma

(銀河団内のX線構造の研究と銀河間プラズマ物理への示唆)

氏名 一戸悠人

宇宙のバリオンの殆どは、銀河間ガス (intergalactic medium; IGM) として存在する。IGM が宇宙最大の重力束縛系である銀河団に引き集められると、重力や衝撃波により加熱され、銀河団ガス (intracluster medium; ICM) と呼ばれる高温 X 線プラズマとなる。ICM は現在観測可能なバリオンの大半を占めるが、その基本的な物理、特にその運動やエネルギー輸送を支配する、粘性・磁場・乱流といったミクロな物性パラメータは未だ謎に包まれている。

ICM は高温・希薄な電磁流体でありモデル化が難しく、実験室での再現も不可能である。従って、ICM の物性の研究は、観測的にのみ可能である。

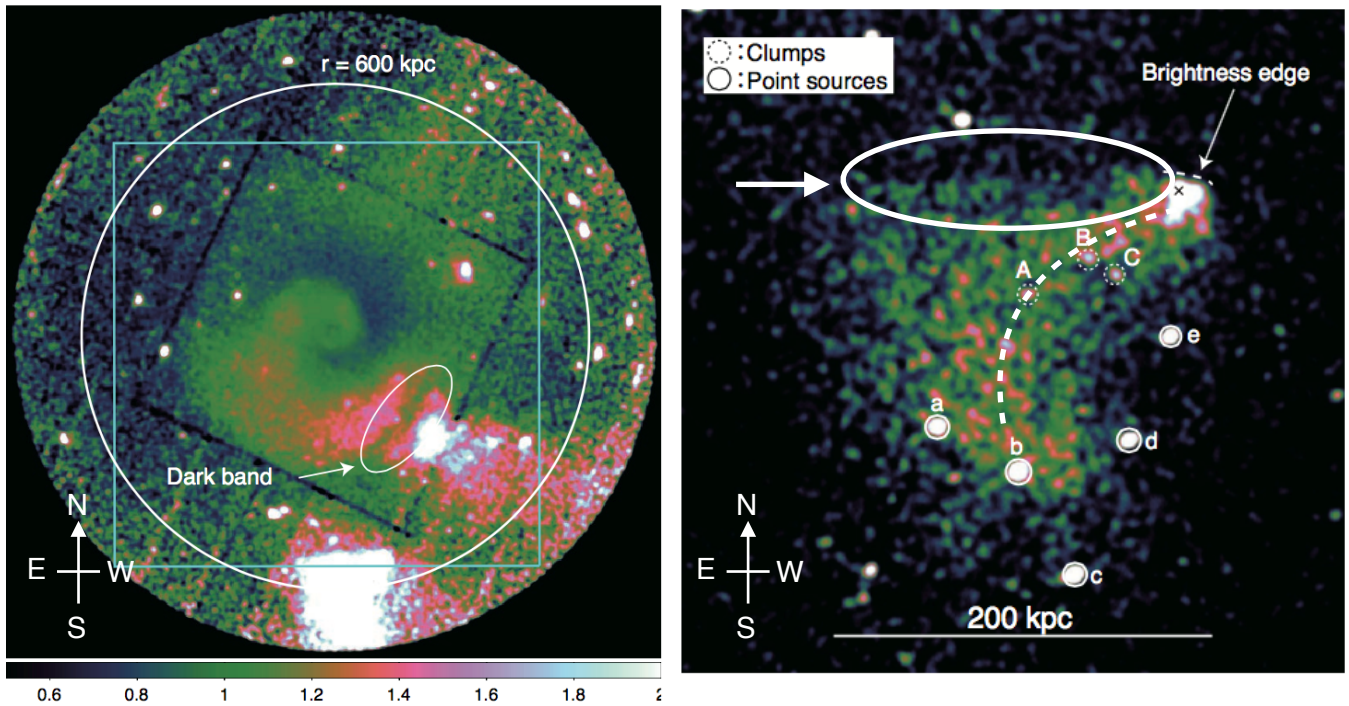
力学的・熱力学的な擾乱が ICM に加わると、X 線で輝く ICM に、ミクロな物性を反映した様々な構造が現れる。ICM の物理を観測的に研究するため、我々はこのような銀河団内の X 線構造、特に、cold front (CF) と呼ばれる温度・密度の違う 2 つのガスの接触面に着目した。本論文で我々は、これまであまり注目されてこなかった構造同士の関係や構造中の構造という観点から X 線構造を研究し、ICM のミクロな物性にこれまでにない示唆を与えることを試みた。そのためのターゲットとしては、X 線構造が顕著な明るい銀河団、Abell 85、ペルセウス座銀河団、Abell 3667 を選択した。

1. Abell 85

Abell 85 では構造間関係という観点から、Chandra・XMM-Newton・すざくという三つの X 線衛星を用いた包括的な解析を行った。我々は、主銀河団中に巨大な渦構造が存在することと (図1)、南の副銀河団ガスが折れ曲がったような特異な形態を持つことを発見した (図2)。更に、この副銀河団ガスと主銀河団ガスの接触面が、北側のみで滑らかであることを発見した (図2)。北側の接触面 (~ 10 kpc) はクーロン平均自由行程 (~ 30 kpc) よりも薄く、輸送過程が抑制されていることを示す。

巨大渦構造は gas sloshing (ガスが重力ポテンシャル中で揺れる現象) を示唆する。我々は実際に、gas sloshing である場合に予言される、渦構造に対応した温度の反相関を発見した。この他にも、磁気流体計算 (Ascasibar & Markevitch, 2006 など) によってガスの速度場と磁場が共に渦に沿って整列することが予言されていたが、観測されたことはない。

我々は、Abell 85 中で gas sloshing が起きていると考えることで、巨大渦構造と副銀河団の特異な形態を一貫して説明できることを指摘した。すなわち、主銀河団中の gas sloshing による整列した磁場によって副銀河団の北のエッジで輸送過程が抑制される一方で、渦に沿った流れを受けて西のエッジが曲がる。これは、gas sloshing によって同時に整列した磁場と速度場を初めて観測的に示唆する結果であるとともに、天球面での磁場と速度場の向きを観測的に推察した結果である。銀河団は衝突で成長するため、このような ICM の構造同士の相互作用は普遍的な現象と考えられるが、これまで見過ごされていた視点である。



左：図1, 対称成分を差し引いた Abell 85 の X 線画像。gas sloshing を示唆する巨大渦構造が存在する。
 右：図2, 南の副銀河団の X 線画像。滑らかな北側のガス接触面を楕円と矢印で、副銀河団ガスの折れ曲がったような特異な形態を点線で、それぞれ示す。

2. ペルセウス座銀河団

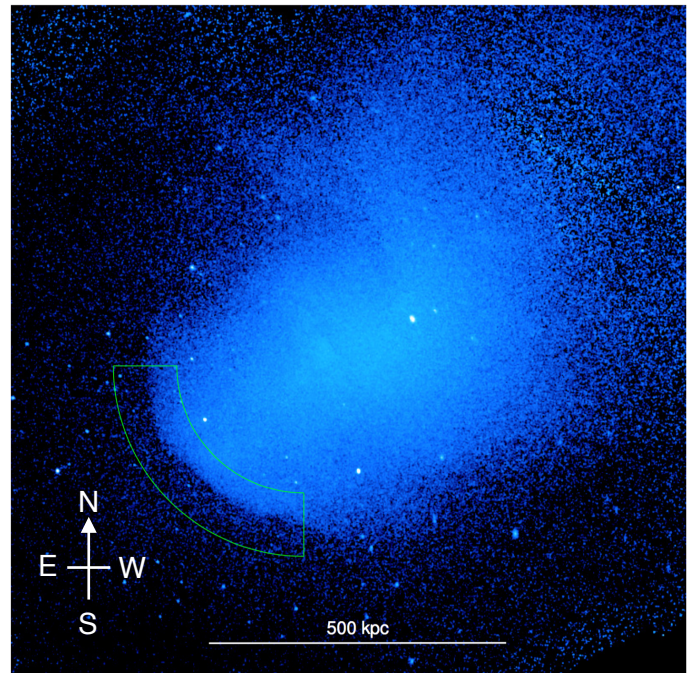
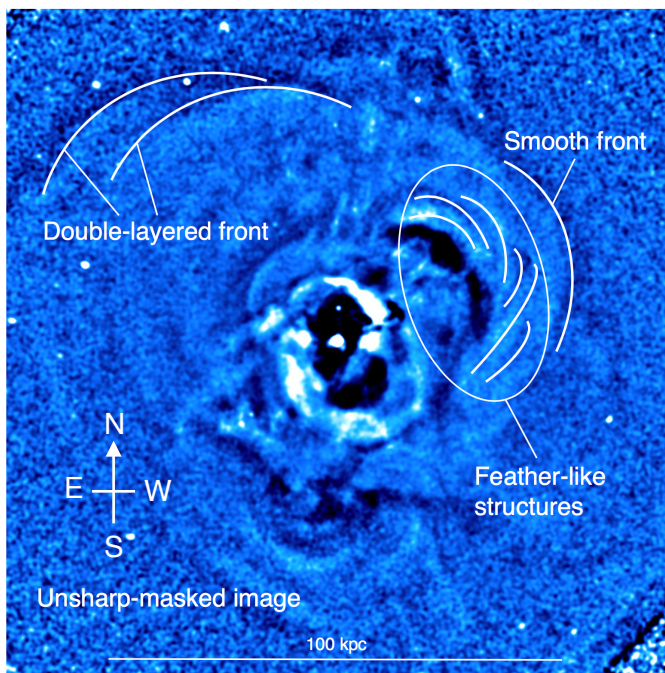
現状で最高品質の Chandra 銀河団データを用いることで、我々は、ペルセウス座銀河団の sloshing CF が非一様であること、つまり、西部は単調に滑らかである一方で、東部では二重になっていることを初めて指摘した (図3)。

我々は、東部の二重構造を横切る表面輝度プロファイル中に有意な二箇所のエッジを実際に検出し、エッジ間の距離が構造のスケールの数分の一程度であることを発見した。また、二つのエッジを横切る熱力学プロファイルが、内側のエッジでは連続的である一方で、外側のエッジでは急激に変化することを発見した。更に、この構造からの放射が二温度プラズマモデルでよく表されることを発見した。

さらに我々は、上記の非一様な CF 構造が、gas sloshing の流体計算結果 (Roediger et al., 2013a) と定性的に類似していることを指摘した。流体計算によって、多重の CF が Kelvin-Helmholtz 不安定性 (KHI) の発現を示すこと、KHI が発達している CF 上では複数の輝度エッジが存在し、そのエッジ間距離は KHI のスケールの数分の一程度となることが予言されていた。また、二温度プラズマの高温成分の温度は CF の外側のガスの温度と一致し、同天体外縁部の温度とも無矛盾であることに加え、低温成分の温度が構造内で一定であることから、外縁部の高温ガスとコア付近の低温ガスが視線方向に射影されたものを観測していると解釈できることを発見した。

我々は、この二重構造が sloshing CF 上で発達する KHI だと解釈すれば観測結果を無矛盾に説明できることを指摘した。これまで KHI の存在は見た目から定性的に判断されていた中で、候補となる構造を熱力学的に定量的に研究したことは初めてであり、従来より強く KHI の存在を示唆する結果となった。

KHI シナリオに基づき、KHI 層のガス圧が周囲より低いことを指摘した。圧力の不足を KHI の崩壊による乱流圧が支えていると考え、KHI が熱として散逸する場合の ICM に対する乱流加熱効率を初めて $\sim 3e-26$ erg/cm³/s と見積もった。我々はこの値がこの位置での ICM の冷却効率に匹敵することと、全く別の手法で独立に見積もられたこの半径での乱流加熱効率 (Zhuravleva et al., 2014) と匹敵することを発見した。これは ICM の冷却問題に対する乱流加熱の重要性を示唆する。またこの結果を受け、我々は CF 上の KHI による乱流も ICM の乱流源として寄与しているという、あまり考えられてこなかった可能性を指摘した。



左：図3, エッジを強調したペルセウス座銀河団のコア周辺部の X 線画像。sloshing cold front の西側は滑らか (smooth front) であるが、東側は二重構造をもつ (double-layered front)。また、西の front の下には暗く細い構造 (feather-like structures) が見られる。

右：図4, Abell 3667 の X 線画像。緑の扇型が merger cold front を示す。

また、CF の西部に、暗く細い構造を発見した (図3)。sloshing CF の磁気流体計算によって、増幅された磁場の磁気圧でガスが押し出され、同様の構造が発生することが予言されている (Werner et al., 2016 など)。我々は、このシナリオで観測結果を説明できることを示した。そして、このシナリオに基づき、この場所での ICM の環境磁場強度を $\sim 30 \mu\text{G}$ と見積もった。X 線構造から熱力学的に ICM の環境磁場を直接見積もったのは初めてである。

3. Abell 3667

Abell 3667 の merger CF (図4) は、高品質の Chandra データが存在するにも関わらず十分に研究されていなかった。我々は CF を角度方向に分割して表面輝度プロファイルを抽出し、CF の動径位置が変動していることを発見した (図5)。これまでこの事実は見過ごされていた。

最も輝度減少が顕著な二つの方向では、表面輝度プロファイル中に有意な輝度エッジが複数存在し、それらのエッジ間の距離が CF の動径位置の変化スケールの数分の一であることを発見した (図6)。さらに、そのうち一つの方向で、エッジを横切る熱力学プロファイルが、上記のペルセウス座銀河団の二重構造における熱力学プロファイルと定性的に類似していることを発見した。

我々は、この CF 上で KHI が発達していると解釈すれば、観測結果を無矛盾に説明できることを指摘した。これは merger CF 上で発達している KHI の存在を示唆する初めての結果である。

KHI シナリオに基づき、動径位置の変動スケールを発達可能な KHI のスケールの下限とみなし、ICM の実効粘性を初めて観測的に $\sim 100 \text{ g/cm/s}$ と見積もった。この値は同温度の Spitzer 粘性に比べて 1-2 桁程度小さく、磁場が原因と考えられる。

このような実効粘性の抑制は近年の観測や数値計算によっても示唆されている (Werner et al., 2016 など)。また、この値は過去に見積もられた上限値や下限値とも無矛盾である (Schuecker et al., 2004 など)。これらの事実を受け、温度や磁場に依存するために必ずしも普遍的である必要のない ICM の粘性が、実際は普遍的な値をとっている可能性を指摘した。

4. まとめと本研究の意義

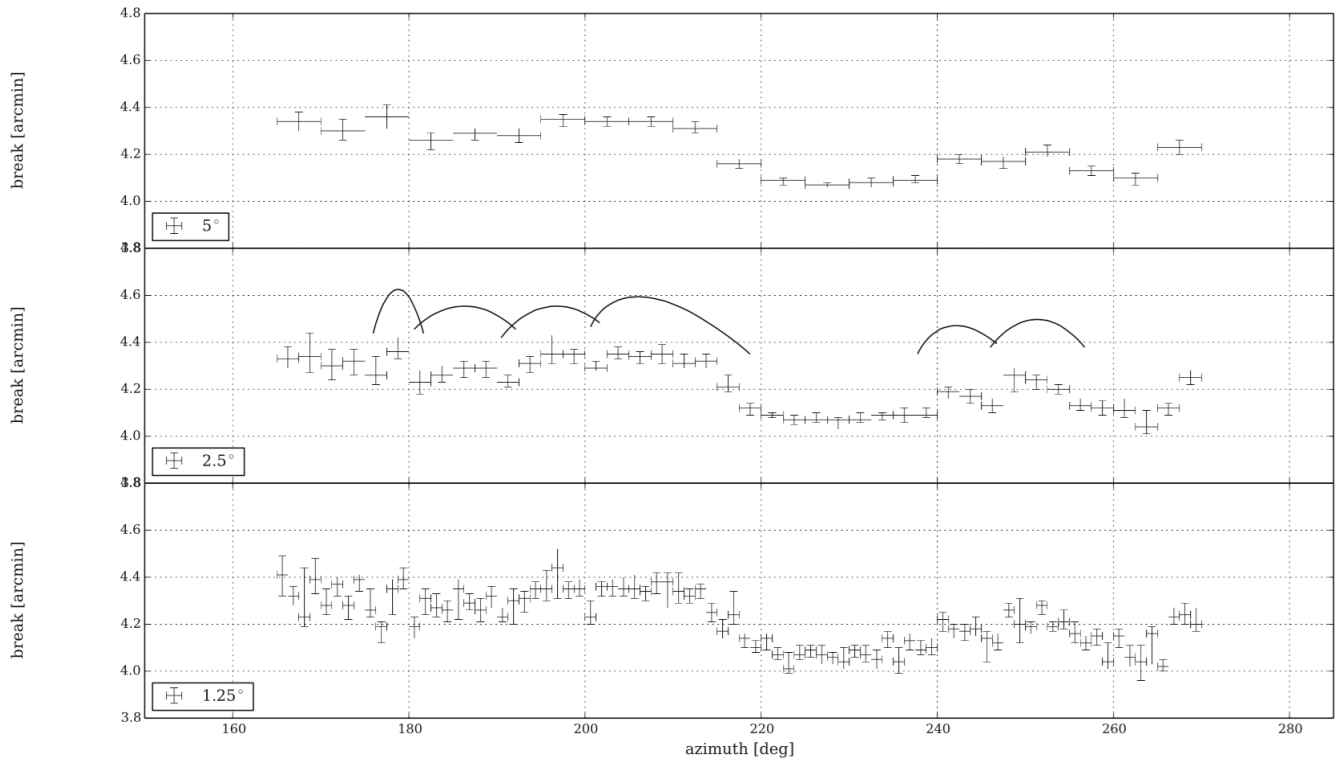


図5, Abell 3667 の merger cold front の動径位置 (break) の角度依存性。上から順に角度分解能 5°、2.5°、1.25°でのプロファイル。

本研究で我々は、構造同士の相互作用という見過ごされていた現象に着目し、磁場や速度場の方向を推察した。また、sloshing CF に伴う KHI の存在を初めて熱力学的な定量的考察から示唆した他に、merger CF 上での KHI の存在を初めて示唆した。そして構造内の構造という観点から、実効粘性や KHI の乱流加熱効率、環境磁場などの ICM の基本的な物理量を初めて、あるいは新しい手法で求め、その普遍性などの新たな可能性を提示した。

本研究で我々が、これまで求められたことのない物理量や示唆を実際に得たことは、十分なデータさえあれば他の天体においても同様の研究ができることを示唆する。ICM の物理を定量的に理解するためには、広く行われてきた数値計算に基づく定性的な研究では不十分で、本研究で導入した観点から観測的に研究することが本質的に重要であると我々は考える。

銀河団衝突の際に解放される宇宙最大の重力エネルギーは、熱や乱流、粒子加速などへ散逸する。しかし、このエネルギーがどのように輸送・散逸されるかという基本的な問題は、粘性や熱伝導率などの ICM のミクロな物性によって決定されるため、未解決である。銀河団の X 線観測によって構築できる質量関数は、宇宙論モデルへの制限手法として有力である。しかし、電子・イオン非平衡、非熱的圧力、ガスの非一様性といった ICM のミクロな物性状態によるバイアスが、質量推定値を不確かにする。本研究は、宇宙の支配的なバリオンの物理を理解するためのみならず、これら宇宙物理や宇宙論の問題を解決する上でも重要である。

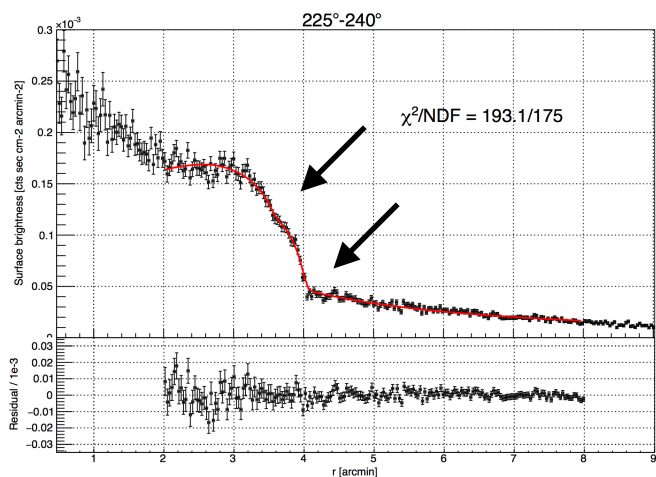


図6, Abell 3667 の cold front の表面輝度プロファイル中に存在する二つ有意なエッジ (矢印)。