



Title	Non-Equilibrium Plasma in Galaxy Clusters
Author(s)	井上, 翔太
Citation	大阪大学, 2018, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/69379
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (井上 翔太)	
論文題名	Non-Equilibrium Plasma in Galaxy Clusters (銀河団における非平衡プラズマ)
論文内容の要旨	
銀河団は数10-数1000の銀河の集団であり、宇宙最大の自己重力系である。銀河団中の空間は、数千万度 ($kT \sim$ 数keV) の高温プラズマ (Intracluster Medium; ICM) で満たされている。銀河団は衝突・合体によって成長する。ICMや銀河の分布から衝突中とみなせる銀河団も多く知られているが、近年、X線および電波の観測により、衝突銀河団のICM中で衝撃波が発見されるケースが増えており、衝突の物理を解明する研究が盛んにすすめられている。 プラズマが加熱されると電離がさらに進行するが、その進行度は電子密度 n_e と加熱からの時間 t の積、電離パラメータ $n_e t$ で表せる。これまで、銀河団ICMは電離平衡状態 ($n_e t > 10^{13} \text{ s cm}^{-3}$) であると仮定されてきた。この仮定は銀河団全体でみると妥当であるが、衝突銀河団の衝撃波付近に着目すれば、衝撃波加熱に起因する電離非平衡状態が短期間存在する可能性がある。X線スペクトル観測から電離パラメータを見積もり、それが非平衡状態であれば、加熱からの経過時間を推定できる。本研究の目的は、銀河団ICM中で電離非平衡状態を検出し、衝撃波による加熱の履歴を調べ、これまでにない視点から銀河団進化を議論することである。 まず、衝突銀河団Abell 754をSuzaku衛星を用いて観測した。X線スペクトル解析の結果、一部の高温領域 ($kT=13 \pm 1 \text{ keV}$) で、電離パラメータを $0.01\text{--}1.37 (10^{12} \text{ s cm}^{-3})$ と評価した。これは銀河団ICM中で電離非平衡状態を示す初めての発見である。さらに、XMM-Newton衛星のデータを解析し、この領域付近にマッハ数1.17の衝撃波を発見した。衝撃波がこの領域を通過する時間は、電離パラメータから算出した加熱からの経過時間(36-7600万年)と矛盾ない。衝撃波加熱によりICM中で電離非平衡が生じたというシナリオが示唆される。 続いて、衝突銀河団Cygnus AのX線データを解析し、衝突する2つのサブ銀河団間で、高温領域 ($9.3 \pm 0.4 \text{ keV}$) を発見した。電離パラメータは非平衡状態を有意に示すものではなかったものの、サブ銀河団の間で、視線方向にICMの速度差があることを発見した。これと温度分布から得られる衝撃波速度を用いて、Cygnus Aの衝突は、インパクトパラメータをもったオフセット衝突であるとわかった。X線スペクトルから、衝突のジオメトリを制限した初めての例である。 最後に、イオン、電子の運動速度から決まるイオン温度、電子温度の非平衡についても調査した。ひとみ衛星のX線マイクロカロリメータを用いて、ペルセウス座銀河団中心部のICMを観測し、イオン温度を $7 \pm 5 \text{ keV}$ と制限した。ペルセウス座銀河団の中心部分ではイオン温度は、電子温度 ($\sim 4 \text{ keV}$) と上記の精度内で一致し、イオン-電子の間では、熱平衡状態で矛盾ないことが確認できた。ICM中のイオン温度の初めての制限である。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (井 上 翔 太)				
論文審査担当者	(職)		氏 名	
	主 査	教 授	松 本	浩 典
	副 査	教 授	芝 井	広
	副 査	教 授	長 峯	健太郎
	副 査	准教授	林 田	清
	副 査	准教授	藤 田	裕

論文審査の結果の要旨

銀河団は数十～数百個の銀河の集団であり、宇宙最大の自己重力系である。銀河団は、温度数千万度の高温プラズマ (Intracluster Medium; ICM) で満たされており、X 線で観測出来る。ICM は銀河団中の星の質量よりも多く、銀河団中のバリオンの主成分である。ICM や銀河の分布から、衝突中とわかる銀河団が多く知られており、それらは衝突・合体による銀河団成長の現場と考えられている。しかし、衝突合体が ICM の物理状態、例えば温度、密度、エントロピーなどにどのような影響を与えるのかは、観測的にはまだよくわかっていない。銀河団の成長を解明するには、その主成分である ICM の物理状態の進化の解明が必要である。

近年、X 線および電波の観測により、いくつかの衝突銀河団の ICM 中で衝撃波が発見されている。従来、ICM は、電子とイオンの熱的運動で決まる電子温度・イオン温度、イオンの電離度で決まる電離温度が全て等しい熱平衡状態にあると仮定されてきた。銀河団全体としては、この仮定は妥当であることが観測的にもわかっている。しかし衝撃波により局所的に ICM の急激な加熱が進むと、ICM の電子温度、電離温度、イオン温度が平衡状態から外れる可能性がある。衝突合体が ICM の物理状態に及ぼす影響の解明のためには、どのような非平衡状態を生じ得るのかを知らなければならない。また、非平衡プラズマは、緩和時間の極めて速い地上実験で観測することは難しく、それ自体が物理的に興味深い観測対象ともいえる。

申請者は、衝突銀河団 Abell 754 をすざく衛星で観測し、その X 線スペクトルを解析することにより、ある領域の ICM 温度が高温 ($kT = 13 \pm 1$ keV) であり、しかも電子温度が電離温度より高い電離非平衡状態にあることを発見した。これは ICM が電離非平衡状態にあることを示す初めての発見である。申請者はさらに、XMM-Newton 衛星の X 線データから、この領域付近にマッハ数 1.17 の衝撃波を発見した。衝撃波がこの領域を通過する時間は、電離非平衡度から算出した加熱からの経過時間 (36-7600 万年) と矛盾しない。衝撃波加熱により ICM 中で電離非平衡が生じたというシナリオが示唆される。

申請者は続いて、衝突銀河団 Cygnus A の X 線データを解析し、衝突する 2 つのサブ銀河団間で、高温領域 ($kT = 9.3 \pm 0.4$ keV) を発見した。電離度に平衡状態からの有意なずれは見られなかったが、鉄の特性 X 線のドップラーシフトの測定から、サブ銀河団の ICM には視線方向に速度差があることを発見した。この速度差と、温度分布から推定される衝撃波速度を用いて、衝突のジオメトリに制限をつけた。

申請者はまた、ひとみ衛星の X 線マイクロカロリメーターによる、ペルセウス銀河団中心部の精密分光観測データを解析し、種々のイオンの特性 X 線の広がりから、イオン温度を $kT = 7 \pm 5$ keV と制限した。これは、ICM 中のイオン温度の初めての制限である。一方、ペルセウス座銀河団の中心部分では電子温度は $kT \sim 4$ keV であり、イオン運動と電子運動は熱平衡状態にあることがわかった。

申請者の研究結果は、銀河団 ICM の物理状態が熱的非平衡状態にあり得ることを示す新しいものであり、宇宙の構造形成の物理過程に重要な知見を与えるものである。従って申請者の研究は高い価値を有し、博士 (理学) の学位を授与するにふさわしいと判断する。