

論文内容要旨 (和文)

平成27年度入学 大学院博士後期課程

地球共生圏科学専攻 物理学分野

氏 名 板花 まどか



論文題目 Research on particle acceleration processes in radio relics of the galaxy clusters 1RXS J0603.3+4214 and RXC J1053.7+5453 with X-ray and radio observations
(X線、電波観測による銀河団 1RXS J0603.3+4214とRXC J1053.7+5453に付随する電波レリック周辺領域での粒子加速過程に関する研究)

銀河団は小さな銀河団やグループとの衝突合体を経て巨大な銀河団へ成長して行くと考えられている。銀河団同士の衝突は宇宙において最大のエネルギー解放現象であり、衝突過程にある銀河団を衝突銀河団と呼ぶ。衝突銀河団はタイムスケールの長さ、系の巨大さが特徴的な粒子加速天体である。また、数値シミュレーションにより、銀河団衝突時にはマッハ数 $M = 2\sim 3$ 程度の衝撃波が発生することが示唆されている。銀河団にはX線を放射する数千万K(数keV)程度の熱的なガスとGeV程度の非熱的な高エネルギー電子の存在が確認されている。非熱的な高エネルギー電子が存在する直接的な証拠として、広がった非熱的電波放射領域が挙げられる。これは、GeV程度の非熱的な高エネルギー電子が μG 程度の磁場との相互作用によるシンクロトロン放射であると考えられており、それらの電波放射領域は存在している位置と形状により電波ハロー、ミニハロー、電波レリックの3つに分類されている。電波ハローは、銀河団中心部に数Mpc程度、ミニハローは500 kpc程度に広がる電波放射領域である。一方で、電波レリックは銀河団外縁部に細長く広がっており、円弧状の形状を示している。電波レリックは、その位置と形状により銀河団衝突時に発生した衝撃波と関連しており、衝撃波は電波レリックの外縁に位置していると考えられている。実際、いくつかの電波レリックにおいてX線観測から得られた温度、密度プロファイルは電波レリック外縁でジャンプを示しており、これは、衝撃波が存在する直接的な証拠である。衝撃波のマッハ数は電波、X線の両観測から独立に算出することが可能である。電波観測では得られたスペクトル指数にDiffusive Shock Acceleration (DSA)理論の中でも最も単純な理論を仮定することでマッハ数を算出できる。X線観測では衝撃波前後の高温プラズマの物理量(温度、密度)の差から算出可能である。もし単純なDSA理論が成り立つ場合、両者から得られたマッハ数は一致すると考えられる。また、電波レリックにある高エネルギー電子が宇宙マイクロ波背景放射光子を逆コンプトン散乱で叩き上げることにより非熱的なX線を放射すると考えられており、シンクロトロン電波との比較から磁場強度を見積もることが原理的には可能である。

本研究では、電波、X線の両観測から得られる衝撃波のマッハ数を比較することで、電波レリックでの粒子加速過程に迫る。しかし、両観測共に観測例が少ないのが現状であり、明確な結論は得られていない。そこで、日本のX線天文衛星Suzakuを用いて銀河団1RXS J0603.3+4214とRXC J1053.7+5453の電波レリック周辺を観測し、電波レリック周辺での物理量の測定を行った。

銀河団1RXS J0603.3+4214は北側に直線に近い形状の電波レリックがあることから、Toothbrushという愛称で知られている。電波観測から電波レリック外縁でのマッハ数は $M_{\text{radio, Tooth}} \sim 4$ と算出されており、銀河団中の衝撃波としては高いマッハ数である。我々は、Suzaku衛星を用いてToothbrushレリック周辺を観測し、衝撃波候補周辺領域のスペクトル解析を行った。得られた結果から算出したToothbrushレリック外縁でのマッ

ハ数は $M_{X,Tooth} \sim 1.5$ であり、電波観測による結果と明確に食い違う結果が得られた。これは、電波観測において仮定したDSA理論が成り立たないことを示唆している。銀河団RXC J1053.7+5453は電波レリックを持つ銀河団であり、X線表面輝度から温度は $kT \sim 3$ keVと推定されている。この銀河団において、中心領域も含め温度は測定されていなかった。我々は、Suzaku衛星を用いて電波レリック周辺を観測し、銀河団中心から電波レリック方向の温度分布を見積もった。得られた結果から、電波レリック外縁においてマッハ数 $M_{X,1053} \sim 1.4$ が得られた。また、銀河団中心付近のスペクトル解析を行った結果、中心部の温度は $kT \sim 1.3$ keVが得られた。これは、推定されている温度($kT \sim 3$ keV)よりも50%以上低い結果であり、この銀河団が衝突後の断熱膨張過程であると考えられる。さらに、銀河団1RXS J0603.3+4214, RXC J1053.7+5453のそれぞれの電波レリックにおいて非熱的X線の探査を行い、磁場強度を見積もった。本論文では、銀河団1RXS J0603.3+4214, RXC J1053.7+5453において、得られた物理量から電波レリックでの粒子加速過程と物理状態、銀河団の衝突過程について議論する。

学位論文の審査及び最終試験の結果の要旨

平成30年2月9日

理工学研究科長 殿

課程博士論文審査委員会

主査 滝沢 元和



副査 柴田 晋平



副査 柳澤 文孝



副査

印

副査

印

学位論文の審査及び最終試験の結果を下記のとおり報告します。

記

論文申請者	地球共生圏科学専攻・物理学分野		氏名	板花 まどか
論文題目	Research on particle acceleration processes in radio relics of the galaxy clusters 1RXS J0603.3+4214 and RXC J1053.7+5453 with X-ray and radio observations (X線、電波観測による銀河団 1RXS J0603.3+4214 と RXC J1053.7+5453 に付随する電波レリッック周辺領域での粒子加速過程に関する研究)			
学位論文審査結果	合格	論文審査年月日	平成30年1月29日～ 平成30年2月2日	
論文公聴会	平成30年2月2日	場 所	理学部13番教室	
最終試験結果	合格	最終試験年月日	平成30年2月2日	

学位論文の審査結果の要旨 (1,000字程度)

銀河団は宇宙で最大の天体であり、衝突合体を繰り返しながら巨大な銀河団へと成長していく。銀河団にはX線を放射する数千万度(数keV)程度の熱的な高温ガスが存在するが、一部の銀河団からはそれに加えてGeV程度のエネルギーを持った非熱的な相対論的高エネルギー電子が存在する。非熱的高エネルギー電子の直接的証拠として、電波ハローや電波レリッックのような広がった非熱的シンクロトロン電波放射領域がある。このうち、電波レリッックは銀河団外縁部に存在して細長いアーク状の形状をしていることから銀河団衝突時にもなる衝撃波と関連していると考えられている。しかし、粒子加速過程や磁場増幅過程など不明な点が多い。

本論文では電波レリッックを持った銀河団 RXC J1053.7+5453 と 1RXS J0603.3+4214 について、X線観測データの解析および電波観測データとの比較検討を行っている。RXC J1053.7+5453 では、X線観測と電波観測からそれぞれ独立な手法で求めた電波レリッック外縁部の衝撃波のマッハ数に統計誤差や系統誤差を考慮に入れても食い違いが生じることを明らかとした。この結果は、粒子加速過程について、これまで考えられていたような比較的単純な衝撃波統計加速理論では説明のつかないことを示唆するものである。一方、1RXS J0603.3+4214 では、ガス温度、X線光度、および構成銀河の視線方向速度分散を比較することで系の力学状態について議論し、衝突後期の断熱膨張過程の可能性が高いことを明らかにした。さらに、新たに接触不連続面の可能性が高い構造を発見した。なお、両天体に対して、宇宙マイクロ波背景放射との逆コンプトン散乱による非熱的X線放射の上限値と磁場の下限値を求めている。これにより、電波レリッック領域の物理状態に制限を与えることが可能となった。さらに、両天体の結果に加えて先行研究のデータも加えて電波レリッック一般での粒子加速過程について不十分ながらも議論を試みている。

最後の電波レリッック一般の議論の部分には改善の余地はあるものの、個別天体の結果および議論は丁寧に行われていて高く評価できる。以上の成果は、学術的に十分に意義が高く、新規性を多数ふくんでおり、博士学位論文として十分な水準にあると判断し、合格とした。なお、本論文について、研究倫理又は利益相反等に係る学内規則に基づく手続きは必要ない。

最終試験の結果の要旨

最終試験では、論文内容およびそれに関連する宇宙物理学の基礎的な知識について、審査員および一般の聴衆による公開での質疑応答を口頭でおこなった。一部の質疑に対する返答が不十分ではあったものの、全体としては十分な水準を満たしていると判断し、合格とした。