

## 学位論文の要旨

氏名	小澤武揚
学位論文題目	センチ波偏波観測に基づく銀河団磁場の研究

本論文は銀河団磁場の構造を偏波観測結果に基づいた偏波解消モデル及びファラデートモグラフィーを使って明らかにすることを目的としている。

第1章では銀河団の広がった電波放射, 銀河団磁場の測定方法, 銀河団磁場の現状について述べる。銀河団磁場は銀河団中の宇宙線粒子と銀河団内ガスを結びつけており, 銀河団衝突のエネルギーを宇宙線粒子へ受け渡す役割を果たしている。加速された宇宙線電子は電波ハローや電波レリックと呼ばれる数Mpc規模に広がったシンクロトロン放射を銀河団に発生させる。ゆえに銀河団衝突の物理過程を理解する上で銀河団磁場は極めて重要である。銀河団磁場の測定には銀河団の内部・背後にある偏波源の偏波が銀河団中で受けるファラデー回転を利用する方法が有用である。また偏波解消モデルとファラデートモグラフィーは視線上の磁場分布を推測することを可能にする。我々はファラデー回転測定 (RM) から銀河団内磁場の強度を求めるとともに, 偏波解消モデルとファラデートモグラフィーを使って衝突銀河団Abell 2256の電波レリック方向の視線上の磁場構造を推定した。

第2章では衝突銀河団Abell 2256の特徴, 過去の観測等について述べる。Abell 2256は銀河団を構成する銀河が3つの速度集団を成すことから衝突中の銀河団であると考えられている (Berrington + 2002)。VLA等の電波観測から (Clarke & Ensslin 2006) 複数の電波銀河と電波ハロー, 電波レリックの存在が確認されている。これら電波銀河, 電波レリックは偏波を放射しており銀河団のファラデー回転測度を測定, 偏波解消モデルの適用, ファラデートモグラフィーの実行が可能である。

第3章では, Abell 2256の観測情報とデータ整約・解析方法について述べる。我々は the Karl G. Jansky Very Large Array, Cアレイ配置のS帯 (2051-3947 MHz) とX帯 (8051-9947 MHz) でAbell 2256の両偏波観測を行った。本観測は1帯域につき128 MHzに分けられた16のspectral windowsがあり, S帯とX帯とを合わせて32周波数の多周波偏波観測である。またRMの決定精度を高めるためにVLA C, Dアレイ配置のL帯 (1369-1703 MHz)のアーカイブデータの整約も行った。整約にはCASAとAIPSを使い, Stokes I, Q, Uのイメージを得た。得られたイメージからRM, 偏波率等の計算を行った。

第4章ではJVLAデータの整約・解析の結果について述べる。整約・解析の結果、JVLA 2 GHzでは電波レリックと2つの銀河団内偏波源 (Source A, B) から偏波を検出した。銀河団内偏波源の偏波率が2-4 GHz, 8-10 GHzの間で共に一定の値を維持していたのに対し、電波レリックの偏波率は3.5 GHz から 3 GHzでは35%から20%に低下、3 GHzから1.37 GHz では20%を維持していた。The Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT)の観測から0.35 GHzでの偏波率は1%以下と見積もられており、したがって1.37 GHzから0.35 GHzでは20%から1%以下にまで低下していることになる。このような階段状の偏波率の変化は偏波解消の解析的な式であるBurn則で表すことはできず、我々は電波レリック方向に複数の偏波解消成分があると予測した。電波レリックの放射領域内のRMの標準偏差は7 rad/m<sup>2</sup>であり、過去の研究結果 (Clarke & Ensslin 2006) と矛盾していない。また電波レリックで観測された表面輝度が2 GHz以上の周波数で過去の観測から求められたスペクトル指数 $\alpha=0.8$ から外挿される値よりも小さくなっていることを発見した。

第5章では、1. 電波レリックで見つかったミッシングフラックスについて、2. 電波レリックの磁場強度について、3. 銀河団内空間の磁場強度について、4. 天の川銀河の磁場のRMへの寄与について、5. 偏波解消モデル及びファラデートモグラフィを用いた電波レリック方向の磁場構造推定についてそれぞれ述べている。

1. 電波レリックの長軸長が1014''であるのに対して1.5 GHzと3.0 GHzの最大角度スケールはそれぞれ970''と490''であり、電波レリックの広がった成分を検出できていない可能性がある。

2. 電波レリックの輝度から磁場と宇宙線粒子のエネルギー等分配を仮定して磁場強度を求めた。その結果電波レリックの磁場強度は1.8~5.0 microG程度である事がわかった。

3. 観測された銀河団内偏波源のRMの標準偏差から銀河団内空間の磁場強度を求めた。その結果銀河団内空間の磁場強度は0.1~1.2 microG程度であることがわかった。

4. 観測されたRMの平均値は銀河団内偏波源、電波レリックともに-30 rad/m<sup>2</sup>程度であった。乱流磁場があった場合RMの平均値は0 rad/m<sup>2</sup>になること、Abell 2256の半径3度以内にある28の偏波源のRMが-30 rad/m<sup>2</sup> +/- 16.7 rad/m<sup>2</sup>であることから、観測されたRMには-30 rad/m<sup>2</sup>の銀河系の寄与があると考えられる。

5. 電波レリックで観測された階段状の偏波率の変化は偏波解消の解析的な式であるBurn則で表すことができない。階段状の変化が視線上の2つの偏波解消成分によって起きたという仮説を立て、我々は視線上に2つの偏波解消成分がある場合の偏波率の変化の数値計算を行った。その結果2つの偏波解消成分の内、観測者側の偏波解消成分のRMの標準偏差が奥側のRMの標準偏差よりも小さい場合観測された電波レリックの階段状の偏波率の変化を再現できることを発見した。2つの偏波解消成分はそれぞれ銀河団或いは銀河系と、電波レリックの磁化プラズマであると予測される。

またファラデートモグラフィ (QU fitting) を行った結果、ファラデースペクトルが1成分のモデルよりも2成分あるモデルの方が観測された電波レリックの偏波強度の周波数方向の変化をよく再現することができた。したがって偏波解消モデルとファラデートモグラフィという2つの異なる方法から視線上に2つの偏波解消成分があることが示唆された。

第6章では、本論文の結果、議論内容等をまとめている。

## Summary of Doctoral Dissertation

Title of Doctoral Dissertation: Investigation of Magnetic Fields in the Cluster of Galaxies based on the Centimeter Wave Polarimetry

Name: Ozawa Takeaki

This thesis mainly aims at obtaining nature of cluster magnetic fields from the centimeter wave polarimetry. Depolarization and Faraday tomography are very useful technics, which enable us to measure the structure of the cluster magnetic fields along the line of sight. In order to reveal the magnetic field structure of merging cluster of galaxies, we carried out the multi-frequency polarization observations and analyses with the both technics.

In Chapter 1, we introduce the radio emission from a cluster of galaxies, measurement methods of the magnetic fields, and the magnetic fields in the cluster of galaxies. The cluster magnetic fields play an important role in the cluster of galaxies. They connect the cosmic-ray particles with the intracluster medium, and convert the gravitational energy of the merging events into the kinetic energy of the cosmic-ray particles. Accelerated cosmic-ray particles within the cluster magnetic fields carry out the synchrotron emission, called diffuse and extended radio emission, in the whole region of the cluster. Hence, the cluster magnetic fields are a key to understand the physical process of the cluster merger.

Chapter 2 is devoted to the details and previous observation results of Abell 2256. Abell 2256 is considered to be a merging cluster because member galaxies of Abell 2256 consist of three velocity components (Berrington+ 2002). Previous observations revealed the existence of the radio halo, radio relic, and individual radio sources. Since these sources are polarized, we can estimate the magnetic fields using the depolarization and Faraday tomography.

In Chapter 3, we describe the observations with the Karl G. Jansky Very Large Array (JVLA), and data reduction procedure for our JVLA data. The JVLA observations were done with multiple frequency polarimetry at S and X bands, which have 16 spectral windows in a band. In order to obtain the accurate values of the rotation measure, we also reduced the archival data obtained with the VLA.

Chapter 4 comprises our result of the data analysis for the JVLA observation. We detected the significant polarized radio emission from the radio relic and two polarized radio sources embedded in Abell 2256. We found that the fractional polarization of the radio relic decreases from  $\sim 35\%$  to  $\sim 20\%$  as frequency decreases from  $\sim 3.5$  GHz to  $\sim 3$  GHz, and the fractional polarization is nearly constant between 3 GHz and 1.37 GHz. Since the fractional polarization of the brightest part of the radio relic observed with WSRT at 350 MHz is less than 1% (Brentjens 2008), the fractional polarization of the radio relic shows the step-like variations.

In Chapter 5, we mainly discuss the step-like variations of the fractional polarization in the radio relic. Using depolarization models, we found that there are two magneto-ionic plasma components along the line of sight toward the radio relic. This result can also be confirmed from Faraday tomography. We considered that components of two magneto-ionic plasmas correspond the magnetic fields associated with the radio relic and intra-cluster space.