

氏名 大前 陸人

学位(専攻分野) 博士(学術)

学位記番号 総研大甲第 2478 号

学位授与の日付 2024 年 3 月 22 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Probing the Magnetic Fields of Distant Galaxies to Unravel
the Evolution of Galactic Magnetic Fields

論文審査委員 主査 廿日出 文洋
天文科学コース 准教授
伊王野 大介
天文科学コース 准教授
中島 王彦
天文科学コース 助教
滝沢 元和
山形大学 理学部 教授
高橋 龍一
弘前大学 理工学研究科 准教授

博士論文の要旨

氏 名：大前陸人

論文題目：Probing the Magnetic Fields of Distant Galaxies to Unravel the Evolution of Galactic Magnetic Fields

Galactic Magnetic fields play important roles in various astrophysical processes. There are unresolved problems about Galactic magnetic fields. One of the problems is that the cosmological evolution of galactic magnetic field is largely unknown. To solve this problem, we need to observe magnetic fields of distant galaxies.

First, Observation of the magnetic fields of distant galaxies can be achieved by observing intervening galaxies. External galaxies often intervene in front of background radio sources such as quasars and radio galaxies. Linear polarization of the background emission is depolarized by Faraday rotation of inhomogeneous magnetized plasma of the intervening galaxies. Exploring the depolarizing intervening galaxies (DINGs) can be a powerful tool to investigate the cosmological evolution of the galactic magnetic field. In this thesis, we focus on the global disk magnetic field, a primary component of galactic magnetic fields, and investigate the effects of DINGs on background radio emission using a simple model. We find that the degree of depolarization significantly depends on the inclination angle and the impact parameter of the DING. We found that the larger the standard deviation, the more likely it is that depolarization will occur. When the DING is close to an edge-on view, depending on the angular size of the background source relative to the DING, the polarization fraction converges, behaving like oscillations at low frequencies. The Faraday dispersion function (FDF) represents the RM structure within the beam. The FDF exhibits multi components due mainly to the RM structure within the beam and the fraction of the DING that covers the background emission (the filling factor). The peak Faraday depth of the FDF is different from the beam-averaged RM of the DING. The Monte-Carlo simulations indicate that DING's contribution to the standard deviation of observed RMs follows $\sigma_{\text{RM}} \propto 1/(1+z)^k$ with $k \sim 2.7$ and exhibits a steeper redshift dependence than the wavelength squared. DINGs will have a significant impact on RM catalogs created by future survey projects such as the SKA and SKA Precursor/Pathfinder.

Next, the applying the gravitational lensing effect has been considered as an observation of the magnetic field of distant galaxies. Mao et al. (2017) used Faraday tomography to determine the magnetic field from the difference in Faraday depths at which the emission of the background source passes through different positions of the intervening galaxy due to the gravitational lensing effect. In the future, it is expected

to find many polarization sources affected by gravitational lensing effects. All-sky polarization surveys using the SKA predecessor have now begun. We focus on the "Polarisation Sky Survey of the Universe's Magnetism" (POSSUM) with the Australian SKA Pathfinder (ASKAP). However, POSSUM may not be able to spatially resolve gravitational lensing sources. Previously, we have shown that Faraday spectrum represents the RM structure within the beam, even when they are unresolved.

We investigate whether the RM structure of lensing galaxies can be extracted from the spectra. We used a model fitting method that fits Stokes Q and U spectra to extract the RM structure of lensing galaxies. At first, we consider the simple case that the RM structure is uniform on each path. In this case, using the model which has 2 components of RM, we can get the mean and variance of the RMs experienced by each path and these values are the same as given RM structures, even if they were not spatially resolved. Next, we consider the case of the existence of RM structure within the beam (complex case). In this case, using the model which has multi components of RM, comparing the observed spectrum with the model spectrum, we found a good match. However, we found physically strange values in the parameters. In particular, the polarization angle of the background polarization source is different from given angle. To solve this problem, we propose reducing the polarization angle of the background polarization source as the parameter. In the case of gravitational lensing objects, we can impose the requirement that the polarization angle of the background polarization source is the same. We can reduce one parameter. In the case of imposing this requirement, we found the model which has multi components of RM is the best fitting model. The polarization angle of the background polarization source is the same as given angle and we resolve uncertainty about the polarization angle. We could separate complex RM structure of unsolved source. It does not matter whether the radio image is spatially resolved or not and we will attempt to resolve the lensed components.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 大前 陸人

Title
論文題目 Probing the Magnetic Fields of Distant Galaxies to Unravel the Evolution of Galactic Magnetic Fields

銀河磁場は、宇宙線の加速や分子ガス雲の形成、星形成活動といったさまざまな天体物理学的プロセスにおいて重要な役割を果たしており、銀河進化にも大きな影響を与えると考えられている。これまで天の川銀河や近傍銀河において磁場の観測が行われており、大局的な磁場や乱流磁場が存在することが分かっている。しかし、遠方銀河では観測が進んでおらず、宇宙のいつの時代から銀河の大局的な磁場が存在し、その構造や強度がどのように進化してきたのかは未解明である。遠方銀河の磁場を観測する方法として、背景銀河を偏波源とし、視線上の手前の銀河（介在銀河）の磁場による影響を偏波観測により測定するというものがある。近年この方法を用いた観測結果が報告され、遠方銀河の磁場の研究が進みつつある。Square Kilometre Array (SKA) などの次世代電波望遠鏡が稼働すると、大規模な偏波天体サンプルが取得され、研究が大きく進展すると期待されており、それに向けた準備研究が急務である。

出願者は、遠方銀河の磁場観測の可能性を検証するため、二つの手法による研究を行った。まず一つ目として、遠方銀河の偏光観測において、介在銀河の磁場が背景銀河の回転量度 (rotation measure; RM) に対してどのような影響を与えるのかを検証した。その結果、介在銀河による消偏波 (depolarization) は、介在銀河の傾斜角に強く依存し、edge-on に近いほど RM が大きくなり depolarization が強くなることが分かった。また、観測ビーム内で介在銀河が占める割合が小さくなると、介在銀河と背景銀河が重ならない領域の割合が増えるため、RM は小さく depolarization は弱くなることも分かった。ファラデースペクトルのシミュレーションからは、観測ビーム内の RM の構造や、視線上の介在銀河の数の情報を引き出せることを見出した。これは、既存の観測的研究では実現できておらず、今後の研究に対し重要な道筋を示した。さらに、モンテカルロシミュレーションを用いることにより、観測される RM の分散は、その距離（赤方偏移）に依存することも示した。

二つ目として、背景の偏波源が重力レンズ効果を受けて観測された場合、重力レンズ天体の RM 構造がどのような影響を与えるかを探った。ここでは SKA の先行機である Australian SKA Pathfinder (ASKAP) が現在進めているサーベイ Polarisation Sky Survey of the Universe's Magnetism (POSSUM) を想定している。このサーベイでは、空間分解能が限られているため、重力レンズ像が空間的に分解されていない。本論文では、そのような条件においても、ファラデースペクトルから RM の構造を引き出せるかを検証した。その結果、空間的に分解されていない場合でも、異なる経路を通った信号が異なる

ファラデー深度として抽出でき、それぞれの経路における **RM** の平均値と分散を取得できることを示した。観測ビーム内に **RM** の構造があることを想定した場合には、複数コンポーネントの **RM** のモデルを用い、また背景偏波源の偏光角が二つの異なる経路でも同じであるという制限をつけることで、モデルフィットにより情報を引き出せることを示した。

本論文で出願者は、現在行われている観測や、次世代望遠鏡を用いた大規模観測において、遠方銀河における **RM** の構造についての情報を引き出せることを発見した。特に、空間的に分解されていない場合での研究例はこれまで行われておらず、今後の遠方銀河における磁場研究の分野に新たな知見をもたらした。本論文の一連のシミュレーションや解析、議論、論文執筆において、出願者は主体となって取り組んでいる。以上の理由により、審査委員会は、本論文が学位の授与に値すると判断した。