

令和 3 年 6 月 5 日現在

機関番号：17401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H05999

研究課題名(和文) 広帯域電波観測による銀河の3次元構造の解明と宇宙論的磁場の検出

研究課題名(英文) Study of 3-dimensional structure of galaxies and cosmological magnetic fields with large low-frequency polarization survey

研究代表者

高橋 慶太郎 (Takahashi, Keitaro)

熊本大学・大学院先端科学研究部(理)・准教授

研究者番号：80547547

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 16,800,000円

研究成果の概要(和文)：広帯域の偏波観測データの解析手法で宇宙電波の解明に役立つと期待されるファラデートモグラフィについての研究を行った。まずこれまで開発してきたRM CLEANやQU-fitなどのソフトウェアの性能評価をするために、シミュレーションによって擬似データを作成し、模擬的なデータ解析を行った。また乱流磁場と一様磁場を組み合わせた銀河磁場モデル、そして熱的電子や宇宙線電子の分布の簡単なモデルを用いて銀河のファラデー分散関数を予言した。そしてスパースモデリングの手法を取り入れたファラデートモグラフィの新たなアルゴリズムの開発を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電波望遠鏡の広帯域化が進んでいく中で、ファラデートモグラフィは今後の偏波解析のスタンダードになっていくと考えられる。本研究で開発したソフトウェアや蓄積したノウハウは宇宙磁場研究にブレイクスルーをもたらす、そのまま将来の大型電波望遠鏡SKAや他の広帯域電波望遠鏡にも適用可能で、本研究は今後10年スケールの長期的な将来性がある。またソフトウェアの開発には多くの大学院生が関わっており、国際的に活躍できる電波天文学者を育成し国際研究者ネットワークを構築するのに非常に効果的なプロジェクトであった。

研究成果の概要(英文)：We studied Faraday tomography, which is a method to analyze wide-band polarimetry data and can probe cosmic magnetism. First, we tested the performance of the RM CLEAN and QU-fit softwares we developed so far, using simulated data. Second, we predicted Faraday dispersion function of galaxies with a model of turbulent and coherent magnetic fields, thermal electron distribution and cosmic-ray electron distribution. Finally, we developed a new algorithm of Faraday tomography, introducing the concept of sparse modeling.

研究分野：電波天文学

キーワード：宇宙磁場 電波天文学 銀河 SKA ファラデートモグラフィ

## 1. 研究開始当初の背景

銀河や銀河団は固有の磁場を持っており、磁場はこれらの天体でダイナモ機構によって増幅・維持されている。銀河系については観測データが豊富である程度のモデル化に成功しているが、系外銀河では情報が極端に少ないため銀河磁場や磁化プラズマの一般的性質や3次元構造、進化など未解決問題が多い。一方、天体に付随せずボイド領域にも広がる宇宙論的磁場は、理論的には存在が予言されているが観測的な検証は長い間不可能であった。これはボイド領域では天体活動が抑制されており、磁場が存在するとしても微弱でシンクロトロンやファラデー回転といった従来の磁場観測法が使えなかったためである。理論的には宇宙論的磁場は初期宇宙や初代天体形成などの様々な過程で生成される可能性があり、この原始磁場がその後銀河や銀河団の種磁場になったと考えられている。

報告者は高エネルギー天体からの線を利用した新しい方法によって、活動銀河核 Mrk421 と銀河系の間に広がる広大なボイドに磁場が存在することを示した。これは Fermi 衛星の線観測データの解析から得た  $10^{-20}$  Gauss という下限であり、ボイド磁場、おそらくは宇宙初期に生成された原始磁場の存在を初めて示した点で画期的であった。従来の方法による上限  $10^{-9}$  Gauss と合わせ、宇宙論的磁場の強さは約 10 桁の範囲で制限されている。しかしこれでは磁場生成機構を特定するまでには至らず、銀河の種磁場の性質も明らかにならない。そこで申請者はさらに制限を強くして検出するために、広帯域電波観測に注目している。

宇宙磁場の観測手段として従来用いられてきたファラデー回転法は近年大きな進化を遂げつつある。それは広帯域電波観測技術の進歩によるもので、その究極は 2018 年建設開始、2020 年観測開始予定の Square Kilometre Array (SKA) であり、50MHz - 10GHz という超広帯域と圧倒的感度を持つ。オーストラリアに建設された SKA のパスファインダー-ASKAP (700-1800MHz)、MWA (80-300MHz) も従来の電波望遠鏡に比べて格段に広い観測帯域を持つ。

従来のファラデー回転法ではターゲット天体の背後にある偏波源を観測し、偏波角の波長依存性から回転度 (rotation measure) を得てターゲットの磁場を測っていた。しかしこの方法では視線方向の磁場の積分値が得られるだけで、その分布・構造の情報は得られない。また従来の望遠鏡の感度では1つのターゲットに対する背景天体の数は限られていた。このような理由でこれまで系外銀河磁場の系統的研究や宇宙論的磁場の検出は非常に困難であった。

偏波輝度の視線方向分布と偏波スペクトルは数学的にはフーリエ変換の関係にあり、観測された偏波スペクトルから偏波輝度分布の情報を得ることができる (ファラデートモグラフィ)。この偏波輝度分布には磁場だけでなくシンクロトロン放射を担う宇宙線電子やファラデー回転を引き起こす電離ガスの情報も織り込まれており、天体を理解する上で重要なこれらの要素の3次元的な構造を明らかにすることができる。この原理は昔から知られていたがフーリエ変換の性質上、狭帯域の観測では全く有効ではなく SKA やそのパスファインダーの登場で急速に注目されるようになった。また感度も大幅に向上するため観測できる天体数も飛躍的に増え、次世代の宇宙磁場研究法として期待されている。

## 2. 研究の目的

本研究では相補的な帯域を持つ ASKAP (1GHz 帯)・MWA (100MHz 帯)の偏波観測データを結合して SKA に匹敵する超広帯域のファラデートモグラフィを実現し、銀河の諸物理量の3次元構造解明と宇宙論的磁場の観測を行う。まずは観測した系外銀河の中でも特に偏波で明るいものを10例程度選び、手動で解析をしながらソフトウェアをチューニングする。そして銀河磁場のグローバルな形状、磁場と電離ガスの乱流の性質、宇宙線電子の広がりなどを精密に計測する。また、系外銀河の背後にある電波天体を観測して視線方向の磁場の分布を得ることにより、宇宙論的磁場 (ボイド磁場) の測定を行う。

チューニングによってソフトウェアの信頼性と動作の安定性を確保することができたら対象天体を順次増やし、自動的に解析できるようにする。これによって銀河磁場のハッブル分類との相関や赤方偏移依存性などの統計的性質を探り、銀河ダイナモや銀河磁場の起源に関する知見を得る。

## 3. 研究の方法

ファラデートモグラフィを利用して銀河の3次元構造を明らかにし、銀河間空間に存在する宇宙論的磁場を検出するために、ファラデートモグラフィソフトウェアの開発やその性能評価を行う。そしてSKAのパスファインダーのASKAPとMWAに参加して偏波観測のデータを獲得し、ファラデートモグラフィを試行する。ASKAPにはすでに実装しているソフトウェアを観測データに適用して明るい銀河の3次元構造を探るとともにソフトウェアのチューニングをする。そして解析を100万天体に拡大し自動処理して銀河磁場の進化や構造に関する統計的研究を行う。またASKAPのソフトウェアをより低周波帯に適用できるように調整してMWAに実装する。最終的にASKAPとMWAのデータを結合し、超広帯域データで精密なファラデートモグラフィを行い、理論モデルとの比較や宇宙論的磁場の検出を行う。

#### 4. 研究成果

##### (1) データ解析シミュレーション

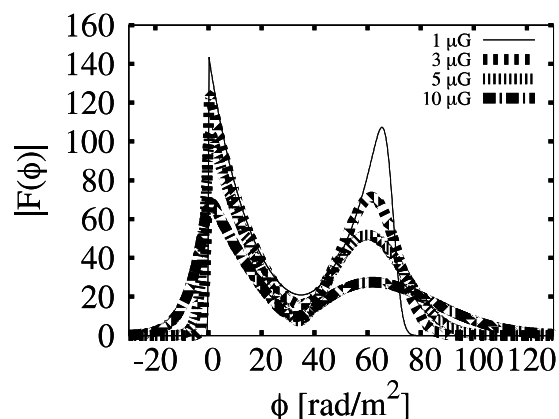
これまで開発してきたRM CLEANやQU-fitなどのファラデートモグラフィソフトウェアの性能評価をするために、シミュレーションによって擬似データを作成し、模擬的なデータ解析を行った。これらはファラデートモグラフィの基本的なアルゴリズムであるが、電波源が視線内に1つまたは2つしか存在しない場合にはそのファラデー深度や電波源の数などを正確に評価できることが示された。しかし2つの電波源の干渉の程度によっては分離が困難になることも示され、その条件を詳細に調べた[文献1,2]。これらの知見はファラデートモグラフィのソフトウェア・アルゴリズムの今後の改良に活かすことができる。

また、銀河間空間に宇宙論的磁場が存在する状況についてもシミュレーションを行い、どのような周波数帯で観測を行えば宇宙論的磁場を検出することができるかを調べた。この時、銀河間空間の磁場は2つの銀河のファラデー分散関数の間にできるギャップとして検出することを想定してシミュレーションを行った。また、人工電波の存在も実際の観測データに基づいて考慮し、人工電波が比較的強い帯域の観測データを捨てても宇宙論的磁場を検出できる可能性と条件が示された[文献3]。

##### (2) 銀河モデル構築

ファラデートモグラフィにより観測データからファラデー分散関数が得られるが、銀河の3次元構造を解明するためにはファラデー分散関数が天体のどのような物理量を反映しているかを理解しておく必要がある。そこで乱流磁場と一様磁場を組み合わせた銀河磁場モデル、そして熱的電子や宇宙線電子の分布の簡単なモデルを用いて銀河のファラデー分散関数を予言した。計算には乱流をランダムに再現する数値シミュレーションとともに、簡便な解析的モデルの構築にも成功した(図1)。これにより銀河の様々な物理的パラメータがファラデー分散関数にどのように反映されるのかを理解することができ、今後、偏波観測の物理的解釈を行う上で有用な知見を得ることができた[文献4,5]。銀河モデルにはまだ改良の余地があり、今後銀河磁場のグローバルな形状や熱的電子・宇宙線電子のより現実的な分布を考慮して、ファラデー分散関数の見積もりを精密にしていくことを考えている。

図1：銀河のファラデー分散関数。横軸はファラデー深度、縦軸は偏波の明るさを表している。乱流磁場の強さが異なるいくつかの場合を比較しており、2つのピークの高さの比や幅などが異なっていることがわかる。文献5より。



##### (3) 新アルゴリズム開発

RM CLEANやQU-fitといった、これまでに広く世界で使われてきたファラデートモグラフィのアルゴリズムには、状況によっては適切に機能しないという弱点を克服するため、新たなアルゴリズムの開発を行った。具体的にはファラデー分散関数のスパース性を仮定したスパースモデリングを組み込んだファラデートモグラフィアルゴリズムを考案した[文献6,7]。これにより、従来では再現できなかった、ファラデー分散関数の微細な構造を再現できるようになり、偏波観測データから銀河の乱流の発達状態などより多くの物理的情報を得られる可能性が示された。今後はこのアルゴリズムをもとに解析ソフトウェアを開発し、実際の観測データに適用していく予定である。

<引用文献>

- 1, Yoshimitsu Miyashita, Shinsuke Ideguchi and Keitaro Takahashi,  
“Performance test of RM CLEAN and its evaluation with chi-square value”  
PASJ 68 (2016) 44, 06/2016
- 2, Yoshimitsu Miyashita, Shinsuke Ideguchi, Shouta Nakagawa, Takuya Akahori, Keitaro Takahashi,  
“Performance test of QU-fitting in cosmic magnetism study”  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 482 (2019) 2739-2749, 01/2019
- 3, Takuya Akahori, Shinsuke Ideguchi, Takahiro Aoki, Kazuhiro Takefuji, Hideki Ujihara, Keitaro Takahashi,  
“Optimum Frequency of Faraday Tomography to Explore the Inter-Galactic Magnetic Field in Filaments of Galaxies”  
PASJ 70 (2018) 115, 12/2018
- 4, Shinsuke Ideguchi, Yuichi Tashiro, Takuya Akahori, Keitaro Takahashi, Dongsu Ryu,  
“Study of Vertical Magnetic Field in Face-on Galaxies using Faraday Tomography”  
Astrophys. J. 843 (2017) 146, 07/2017
- 5, Haruya Eguchi, Masaki Suzuki, Yoshimitsu Miyashita, Shinsuke Ideguchi, Keitaro Takahashi,  
“Faraday dispersion function of disk galaxies with axisymmetric global magnetic fields I”  
Astrophys. J. 899 (2020) id.122, 08/2020
- 6, Kazunori Akiyama, Takuya Akahori, Yoshimitsu Miyashita, Shinsuke Ideguchi, Ryosuke Yamaguchi, Shiro Ikeda and Keitaro Takahashi,  
“Faraday Tomography with Sparse Modeling”  
arXiv:1811.10610,投稿中
- 7, Suchetha Cooray, Tsutomu T. Takeuchi, Takuya Akahori, Yoshimitsu Miyashita, Shinsuke Ideguchi, Keitaro Takahashi and Kiyotomo Ichiki, “An Iterative Reconstruction Algorithm for Faraday Tomography”  
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 500 (2021) 5129-5141, 01/2021

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計19件（うち査読付論文 19件 / うち国際共著 8件 / うちオープンアクセス 14件）

1. 著者名 Akahori Takuya, Ideguchi Shinsuke, Aoki Takahiro, Takefuji Kazuhiro, Ujihara Hideki, Takahashi Keitaro	4. 巻 70
2. 論文標題 Optimum frequency of Faraday tomography to explore the intergalactic magnetic field in filaments of galaxies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 115
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy124	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 Miyashita Yoshimitsu, Ideguchi Shinsuke, Nakagawa Shouta, Akahori Takuya, Takahashi Keitaro	4. 巻 482
2. 論文標題 Performance test of QU-fitting in cosmic magnetism study	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 2739 ~ 2749
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/sty2862	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -
1. 著者名 O' Sullivan S. P., et al.	4. 巻 622
2. 論文標題 The intergalactic magnetic field probed by a giant radio galaxy	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A16 ~ A16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201833832	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する
1. 著者名 S. Ideguchi, Y. Tashiro, T. Akahori, K. Takahashi, D. Ryu	4. 巻 843
2. 論文標題 Study of the Vertical Magnetic Field in Face-on Galaxies Using Faraday Tomography	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa79a1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Yoshimitsu Miyashita, Shinsuke Ideguchi and Keitaro Takahashi	4. 巻 68
2. 論文標題 Performance test of RM CLEAN and its evaluation with chi-square value	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 44
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psw039	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Eguchi, Haruya; Suzuki, Masaki; Miyashita, Yoshimitsu; Ideguchi, Shinsuke; Takahashi, Keitaro	4. 巻 899
2. 論文標題 Faraday Dispersion Function of Disk Galaxies with Axisymmetric Global Magnetic Fields. I.	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 122
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab9f9e	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 高橋慶太郎
2. 発表標題 「次世代低周波電波望遠鏡Square Kilometre Array」
3. 学会等名 電子情報通信学会アンテナ・伝搬研究会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋慶太郎
2. 発表標題 「SKAとVLBIによるパルサー研究の未来」
3. 学会等名 VLBI懇談会シンポジウム (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 高橋慶太郎
2. 発表標題 「機械学習によるパルサーサーチ」
3. 学会等名 宇宙電波懇談会シンポジウム
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Keitaro Takahashi
2. 発表標題 「Pulsar studies in SKA Japan」
3. 学会等名 Asia SKA Initiative On NS Meeting (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keitaro Takahashi
2. 発表標題 「Toward the Detection of Cosmological HI 21cm Line Emission」
3. 学会等名 「加速宇宙」シンポジウム (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keitaro Takahashi
2. 発表標題 「Pulsar Timing Array」
3. 学会等名 RESCEU workshop on Space Gravitational Wave Detection (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Keitaro Takahashi
2. 発表標題 Scientific activities in the Japanese consortium
3. 学会等名 MWA Project Meeting (イタリア・パドヴァ) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋慶太郎
2. 発表標題 中性水素21cm線で探る初代天体と宇宙再電離
3. 学会等名 日本物理学会シンポジウム (宇都宮大学) (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋慶太郎
2. 発表標題 次世代電波望遠鏡SKAによるパルサー研究の将来
3. 学会等名 中性子星の観測と理論～研究活性化ワークショップ2017 (国立天文台) (招待講演)
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件



8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
オーストラリア	CSIRO	メルボルン大学	カーティン大学	
ドイツ	ハンブルグ大学			