

令和 5 年 6 月 26 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19K03916

研究課題名（和文）銀河渦状腕形成に対する磁場の寄与の解明と観測的可視化

研究課題名（英文）The importance of the magnetic field for a spiral arm formation in spiral galaxies and its visualization of the pseudo-observation

研究代表者

町田 真美 (Machida, Mami)

国立天文台・科学研究部・准教授

研究者番号：50455200

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：銀河磁場は、平均で数から数十マイクロガウスの強度を持ち、また、銀河の圧力や宇宙線圧と同程度のエネルギーを持っている。そのため、星形成領域の形成や、銀河風の生成、宇宙線粒子の加速や軌道を曲げるなど、様々な役割を担っている。また、宇宙背景放射の偏光を同定するためには、天の川銀河の磁場構造の詳細を知る必要がある。そこで、天の川銀河を含む渦状銀河の磁場構造、どのように観測されるかを明らかにする目的で数値計算及び、数値計算結果を使った擬似観測を行った。その結果、天球面上に射影された偏波データから推測される渦状磁場構造は、空間的につながりが無い場合があることを指摘し、空間的に分離する新たな手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銀河ガス円盤の3次元磁気流体数値実験に基づいた擬似観測を行い、天球面上に射影された観測結果は、実際の3次元分布の中でどの領域の寄与が重要かなどを明らかにした。また、センチ波からメートル波帯の複数のバンドの観測結果、偏波強度分布から視線方向に積分された観測量から3次元構造を分離する新しい手法を提案した。現在、センチ波・メートル波の新しい電波干渉計が稼働を始めており、また、2020年代後半にはさらに大型な Square Kilometre Array phase 1 (SKA1) が稼働を開始する。これらの観測結果が実際に排出される前に、データ解釈の理論的な補強を行った。

研究成果の概要（英文）：Galactic magnetic fields have average strengths of several to several tens of microgauss and have energies comparable to the pressure of galaxies and cosmic ray pressure. As such, they play various roles in the formation of star forming regions, the generation of galactic winds, and the acceleration and orbital bending of cosmic ray particles. To identify the polarization of the cosmic background radiation, it is necessary to know the details of the magnetic field structure of the Milky Way Galaxy. Therefore, we performed numerical simulations and pseudo-observations using the numerical results to reveal the magnetic field structure and how it is observed in spiral magnetic fields of galaxies, including the Milky Way. As a result, we found that the spiral magnetic field structures inferred from the polarization data projected onto the celestial plane are sometimes not spatially connected, and we developed a new method to separate them for separate them.

研究分野：宇宙物理

キーワード：銀河磁場 磁気流体シミュレーション 電波観測

## 1. 研究開始当初の背景

渦状銀河は、平均で数十マイクロガウスの磁場を持ち、磁気エネルギーは、熱エネルギーや宇宙線のエネルギーと同程度であると考えられている。荷電粒子は磁力線に沿った方向に軌道を変え、同時にシンクロトロン放射を放出する。そのため、超新星爆発や活動銀河で加速された高エネルギー宇宙線は、天の川銀河の磁場によってその到来方向が変化し、宇宙線の発生源と観測時の到来方向に相関が無いこともある。つまり、実際の宇宙線の発生源を知るためには天の川銀河の磁場構造を知る必要がある。また、観測される放射は、実際の経路上の視線方向磁場と電子分布、積分距離に依存するため、経路上のどの位置からの放射が寄与しているかなどの情報を得るのは難しい。

2020年代に稼働予定の square kilometer array (SKA)の先行機である Australia SKA precursor (ASKAP)や Low frequency Array (LOFAR)、MeerKATなどが観測を開始する。これまでよりも高感度なデータが多数得られる見込みである。そのため、観測される構造が物理的にどの領域にあるか、放射領域はどこかなど理論的な予測が求められている。

## 2. 研究の目的

天の川銀河磁場の大局的な構造及び、乱流構造も含む、全体的な銀河磁場構造を明らかにすることを目的としている。天の川銀河磁場は、観測点为天体内部にあるため、視線方向に積分して天球面上に射影される放射が、空間のどの領域から来たかを把握するのは難しい。そこで、本研究では、系外銀河磁場構造に焦点を当てた研究を行う。具体的には、渦状銀河ガス円盤の3次元磁気流体数値計算で得られるガス密度分布、磁場分布を使って、数値計算結果から100MHz - 10GHzの電波放射と偏波放射の空間分布を求める。擬似観測結果と物理データを比較することで、2次元の天球面に射影された状態で観測される放射分布の3次元構造を明らかにし、放射が優勢になる領域などを調べる。

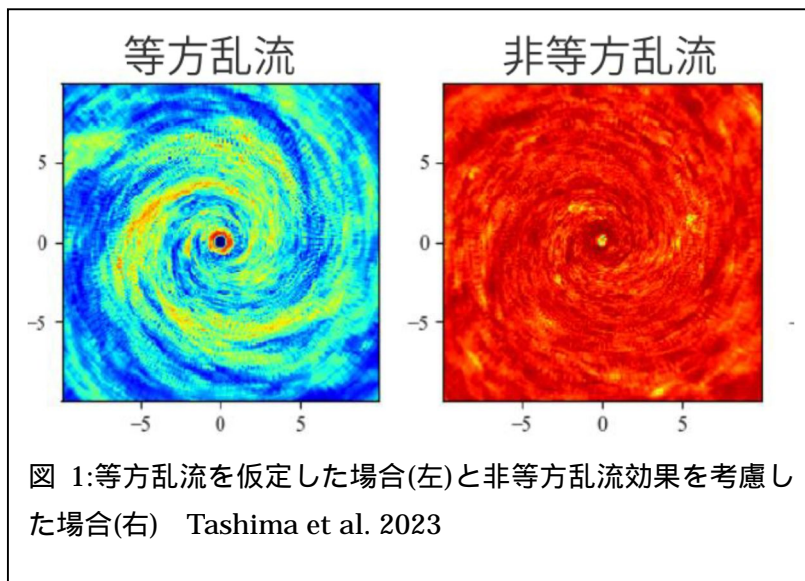
## 3. 研究の方法

銀河ガス円盤の3次元磁気流体数値実験(Machida et al. 2013)のガス密度分布、磁場分布から、銀河自身の放射も考慮した輻射輸送方程式を解き、ストークスパラメータ、I, Q, Uを導出する。ここでは、円偏波項に対応するストークスVは無視している。放射強度は波長が長くなると強くなるが、同時に視線上のそれぞれの位置での偏波の向きが異なる事によって生じる偏波解消も強くなる。偏波解消は偏波源から観測点までの間の視線上の要因による外部 Faraday 偏波解消と、放射源自身の構造などによって生じる内部 Faraday 偏波解消に分けられる。本研究では、外部 Faraday 偏波解消を無視し、内部 Faraday 偏波解消の効果と波長に依存しない磁場の乱流構造に依存した波長非依存型偏波解消を検証している。

## 4. 研究成果

### (1) 波長非依存型偏波解消

視線に垂直な磁場によって引き起こされる波長非依存型偏波解消の効果を検証する。ある放射領域を考えた場合、局所的に完全に乱流になっている状態を等方乱流と呼ぶ。この場合、シンクロトロン放射は、磁場に垂直な方向に放射されるため、偏波角はランダムになり、偏波解消が起きる。一方、完全にそろった磁場の場合は、偏波解消はその領域内では生じない。乱流構造が非等方乱流になっている場合に



は、偏波角は比較的揃った向きの成分とランダムな成分の重ね合わせになる(Sokoloff et al. 1998)。本課題では、銀河ガス円盤の磁場構造が等方乱流であると考えた場合(Machida et al. 2018)と、非等方乱流の効果を取り入れた場合(Tashima et al. 2023)に関して検証を行った。図1はそれぞれの場合の結果を示しており、等方乱流を仮定した波長非依存型偏波解消は、効果を過大評価していることが分かった。これは、計算領域の中で一番大きな磁場の分散の値が、計算領域全体で一様であると仮定したためであったことがわかった。銀河ガス円盤の磁場の場合、銀河回転の方向に沿った大局的な磁場構造に乱流磁場が付随している構造であることに起因している。

### (2) 内部 Faraday 偏波解消

Faraday 偏波解消は、視線に平行な磁場の向きがランダムな場合に生じる。放射領域が有限の長さがある場合、局所的な放射領域中で生じる偏波解消と、放射領域中を伝搬する際に受ける Faraday 回転の効果による偏波解消の二つに分けることができる。後者は、外部 Faraday 偏波解消と同じ機構である。Machida et al. (2019)は、内部消偏波の効果調べており、銀河を上から見込む face-on の場合には、銀河面近傍の乱流が卓越した領域で、強く偏波放射が生じ、それがハロー中にある磁場によって Faraday 回転を受けている事がわかる。

一方、銀河を横から観測する edge-on の場合には、銀河面内に卓越している揃った方位角方向磁場による Faraday 回転効果の影響が強くなることなどがわかった。Tashima et al. (2013)は、face-on の場合の内部 Faraday 回転の効果をより詳細に調べている。

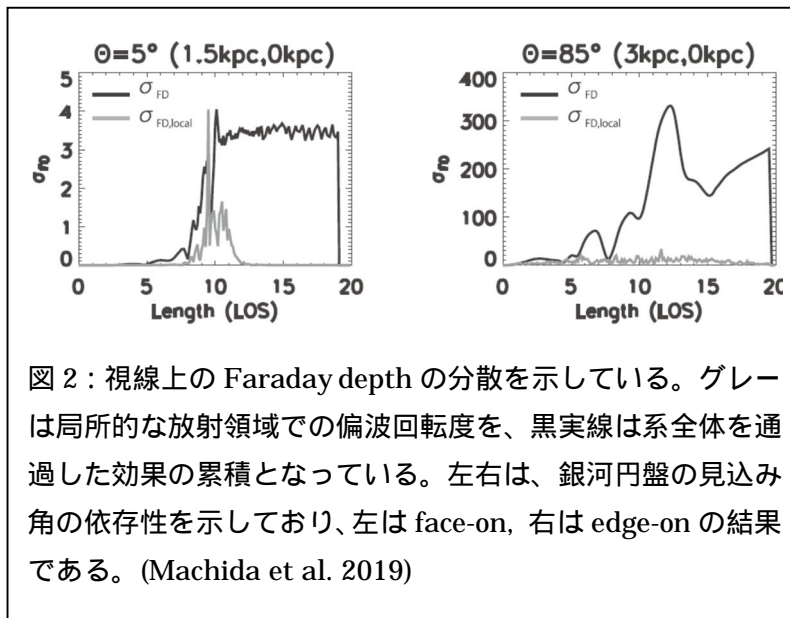


図2：視線上の Faraday depth の分散を示している。グレーは局所的な放射領域での偏波回転度を、黒実線は系全体を通過した効果の累積となっている。左右は、銀河円盤の見込み角の依存性を示しており、左は face-on, 右は edge-on の結果である。(Machida et al. 2019)

### (3) 多周波数を用いた放射領域推定法

シンクロトロン放射は、波長の2乗に比例して放射強度が強くなり、偏波解消が効きだす波長をピークに急激に減衰する(Alshakian & Beck 2021)。偏波解消は回転量度(RM)の分散と密度に比例して強くなるため偏波放射分布の特徴を知るために、偏波放射強度がピークとなる周波数の分布を図3(a)に示した。その結果、中心から半径4-5kpcにある渦状の構造は、波長が長い、つまり偏波解消が効きにくい状態になっていることがわかる。図3(b)は、視線上で最も偏波放射強度が強い領域の赤道面からの高さを示した図である。この図から、図3(a)でピーク波長が長く数kpc続く構造は、赤道面の上空2kpc程度、視線手前和にあることがわかる。

つまり、揃った磁気フィラメントがハロー中に噴出していることがわかる。逆に、ピーク波長は長めだが、渦状構造に沿って波長が変動する腕は、赤道面近傍に広がっていることもわかった。

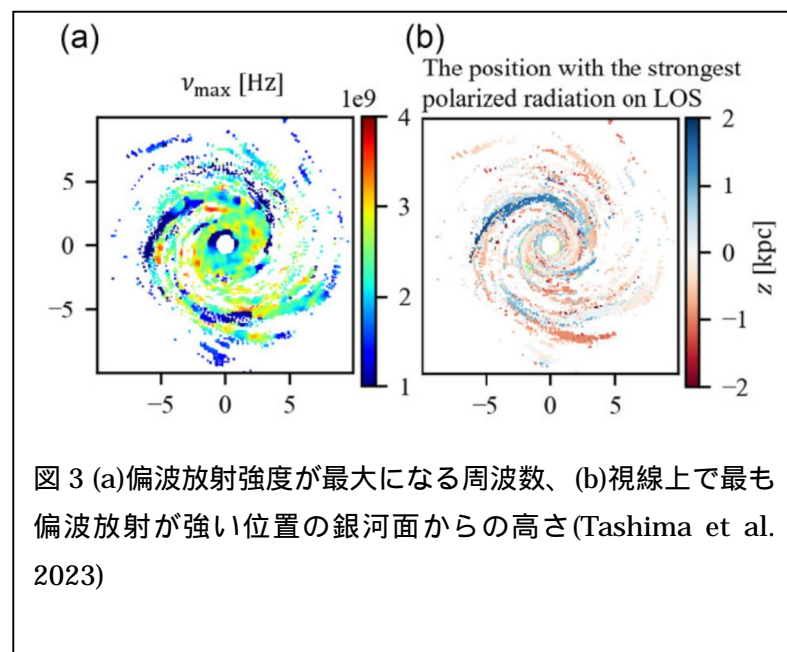


図3 (a)偏波放射強度が最大になる周波数、(b)視線上で最も偏波放射が強い位置の銀河面からの高さ(Tashima et al. 2023)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ohmura T., Ono K., Sakemi H., Tashima Y., Omae R., Machida M.	4. 巻 910
2. 論文標題 Continuous Jets and Backflow Models for the Formation of W50/SS 433 in Magnetohydrodynamics Simulations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 149 ~ 149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abe5a1	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 Chibueze James O., Sakemi Haruka, Ohmura Takumi, Machida Mami, Akamatsu Hiroki, Akahori Takuya, Nakanishi Hiroyuki, Parekh Viral, van Rooyen Ruby, Takeuchi Tsutomu T.	4. 巻 593
2. 論文標題 Jets from MRC 0600-399 bent by magnetic fields in the cluster Abell 3376	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nature	6. 最初と最後の頁 47 ~ 50
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41586-021-03434-1	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 -

1. 著者名 Hayakawa Ryota, Yamada Shinya, Suda Hirotaka, Ichinohe Yuto, Higurashi Ryota, Sakemi Haruka, Machida Mami, Ohmura Takumi, Katsuda Satoru, Uchiyama Hideki, Sato Toshiki, Akamatsu Hiroki, Axelsson Magnus	4. 巻 -
2. 論文標題 X-ray hot spots in the eastern ear of the supernova remnant W50 and the microquasar SS433 system	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac011	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 Chibueze James O, Akamatsu Hiroki, Parekh Viral, Sakemi Haruka, Ohmura Takumi, van Rooyen Ruby, Akahori Takuya, Nakanishi Hiroyuki, Machida Mami, Takeuchi Tsutomu T, Smirnov Oleg, Kleiner Dane, Maccagni Filippo M	4. 巻 -
2. 論文標題 MeerKAT 's view of double radio relic galaxy cluster Abell 3376	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac009	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 Sakemi Haruka, Omae Rikuto, Ohmura Takumi, Machida Mami	4. 巻 73
2. 論文標題 Energy estimation of high-energy particles associated with the SS433/W50 system through radio observation at 1.4GHz	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 530 ~ 544
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psab018	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 -

1. 著者名 Ohmura T., Ono K., Sakemi H., Tashima Y., Omae R., Machida M.	4. 巻 910
2. 論文標題 Continuous Jets and Backflow Models for the Formation of W50/SS 433 in Magnetohydrodynamics Simulations	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 149 ~ 149
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abe5a1	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 -

1. 著者名 Kato Shoji, Machida Mami	4. 巻 72
2. 論文標題 A possible origin of kilohertz quasi-periodic oscillations in low-mass X-ray binaries	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 38-1 ~ 38-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psaa019	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 -

1. 著者名 Ohmura Takumi, Machida Mami, Nakamura Kenji, Kudoh Yuki, Matsumoto Ryoji	4. 巻 493
2. 論文標題 Two-temperature magnetohydrodynamic simulations for sub-relativistic active galactic nucleus jets: dependence on the fraction of the electron heating	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 5761 ~ 5772
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa632	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 -

〔学会発表〕 計23件（うち招待講演 4件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 町田真美
2. 発表標題 Magnetic fields of spiral galaxies via numerical simulations
3. 学会等名 Linking the Science of Large Interferometer in the 2030s (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 町田真美
2. 発表標題 ブラックホール天体の活動性の起源としてのプラズマの諸性質
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会 シンポジウム「プラズマサイエンスの新展開」(招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大村匠、James O. Chibueze、酒見はる香、町田真美、赤松弘規、赤堀卓也、中西裕之、Vira Parekh、Ruby van Rooyen、竹内努
2. 発表標題 銀河団磁場と衝突するジェットの高次元磁気流体シミュレーション
3. 学会等名 2021年度国立天文台CfCAユーザーズミーティング
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Ohmura, T., Ono, K., Sakemi, H., Tashima, Y., Omae, R., Machida, M.
2. 発表標題 Magnetohydrodynamics modeling of W 50/SS 433: Continuous jets and backflow model
3. 学会等名 9th microquasar workshop: celebrating over 50 years of discovery
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Ohmura, T., Chibueze, James O., Sakemi, H., Machida, M., Akamatsu, H., Akahori, T., Nakanishi, H., Parekh, V., van Rooyen, R., Takeuchi, T. T.
2. 発表標題 Magnetohydrodynamic simulations of the interaction between the jet and the intra-cluster magnetic field
3. 学会等名 9th microquasar workshop: celebrating over 50 years of discovery
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 田嶋裕太、大村匠、町田真美
2. 発表標題 偏波解消の周波数依存性から探る渦状銀河の磁場分散推定
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 大前陸人、赤堀卓也、町田真美
2. 発表標題 重力レンズ効果を用いた銀河磁場観測のシミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田嶋裕太、大村匠、町田真美
2. 発表標題 3次元磁気流体数値実験に基づく渦状銀河電波放射領域の同定
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大前陸人、赤堀卓也、町田真美
2. 発表標題 介在銀河による偏波解消の数値シミュレーションII
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大村匠 町田真美
2. 発表標題 磁気流体数値実験によるAGNジェットの電子加熱領域の調査
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 町田真美 川島朋尚 工藤祐己 松本洋介 松元亮治
2. 発表標題 MHDシミュレーションによる降着円盤の渦状高エントロピー構造の形成
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大前陸人 赤堀卓也 町田真美
2. 発表標題 介在銀河による偏波解消の数値シミュレーション
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 田嶋裕太 大村匠 町田真美
2. 発表標題 渦状銀河の擬似観測における非等方乱流磁場の効果
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大村匠 町田真美 松本洋介
2. 発表標題 CANS+によるAGNジェット伝搬の高空間分解能MHD数値実験
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大村匠 酒見はる香 田嶋裕太 大前陸人 町田真美
2. 発表標題 W50/SS433の構造形成に関する磁気流体計算IV
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 酒見はる香 大前陸人 大村匠 町田真美
2. 発表標題 SS433ジェット先端領域における宇宙線粒子加速の可能性
3. 学会等名 日本天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 町田真美 川島朋尚 工藤祐己 松本洋介 松元亮治
2. 発表標題 3D MHD Simulation to reveal angular momentum transport in an accretion disk
3. 学会等名 Black hole astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大村匠 町田真美
2. 発表標題 Two-temperature MHD simulations of extragalactic jets
3. 学会等名 Black hole astrophysics with VLBI: Multi-Wavelength and Multi-Messenger Era (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 町田真美
2. 発表標題 ブラックホール周辺のプラズマのダイナミクス
3. 学会等名 プラズマ・核融合学会・九州・沖縄・山口支部第24回支部大会 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 田嶋裕太、大村匠、町田真美
2. 発表標題 シンクロトロン自己吸収を考慮した銀河円盤の電波帯疑似観測
3. 学会等名 日本SKAサイエンス会議「宇宙磁場」2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 田嶋裕太、大村匠、町田真美
2. 発表標題 輻射輸送計算による銀河円盤の電波帯疑似観測
3. 学会等名 日本天文学会2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Machida M., Akahori T., Nakamura K. E., Nakanishi H., Haverkorn M.
2. 発表標題 Observational Visualizations for spiral Galaxies
3. 学会等名 SKA General Science& Meeting and Key Science Program (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Machida M., Akahori T., Nakamura K. E., Nakanishi H., Haverkorn M.
2. 発表標題 The effect of Faraday Depolarization at Low Frequency verified by the observational visualization of spiral galaxies
3. 学会等名 LOFAR MKSP Annual Meeting and Busy Days (国際学会)
4. 発表年 2019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			
オランダ	Radboud University	SRON		
オーストラリア	University of Sydney	CSIRO		