

令和 5 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2022

課題番号：18K13577

研究課題名（和文）高赤方偏移クェーサーの分子化学組成研究

研究課題名（英文）Study on chemical composition of high-redshift quasars

研究代表者

西村 優里（Nishimura, Yuri）

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・特任研究員

研究者番号：90816191

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：大型望遠鏡で観測できる様々な分子のスペクトル線は、銀河の構造や力学、温度や密度といった物理パラメータを調べる手がかりになる。宇宙年齢25億年に相当する遠方にあり、重力レンズ効果によって明るく見えるCloverleafクェーサーに対してALMA望遠鏡による高感度・高空間分解観測を行うことで、この銀河における主要な分子の空間分布が明らかになった。また、銀河の中心核付近に局在して特徴的な組成の領域があること、ガスの豊富な回転構造があることも示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銀河の観測的研究では、遠くのものほど小さく暗く見えるため、遠方にある銀河はどうしても近傍にある銀河と比べて詳細を調べることがより困難になる。近年の望遠鏡の技術的な進歩、とりわけALMA望遠鏡の高感度・高空間分解能は、遠方天体での分子スペクトル線の観測可能性を大きく切り拓いた。この状況の下、銀河の分子化学組成とそれを構造や力学と対応づける研究は黎明期を迎えている。この研究では、宇宙の歴史を通じて最も著しく星形成が行われる時代の代表的な銀河について、かつてない高感度観測で分子化学組成を明らかにした。この結果は、今後より多数の銀河に研究が拡張される際のベンチマークとして役立てられる。

研究成果の概要（英文）：Molecular lines observed with radio telescopes offer us insights into physical and chemical properties of the interstellar medium of galaxies. Using Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), we conducted a high-sensitivity and high-resolution observation toward a gravitationally-lensed quasar, the Cloverleaf, at $z=2.56$ (corresponding to 2.5 billion years after Big Bang). The observation successfully revealed the distribution of key molecular species in the Cloverleaf for the first time. We found the presence of chemically-differentiated regions near the nucleus and a rotating structure with a considerably high gas fraction.

研究分野：電波天文学

キーワード：銀河進化 星間化学 クェーサー 高赤方偏移銀河 電波天文学

1. 研究開始当初の背景

星間空間にどのような分子がどれほど存在するか(分子化学組成)は、分子の放つスペクトル線を電波や赤外線望遠鏡で捉えることで調べられる。様々な天体の分子化学組成は、宇宙を物質的に理解する上でそれ自体が重要な研究対象であるとともに、物理状態を調べるためのツールとしても活用できる。天体の構造や運動といった物理状態と分子化学組成を結びつける研究は星間化学と呼ばれ、大型望遠鏡を用いた観測と、実験室での分子分光や化学モデル計算などとともに発展してきた。分子の生成・破壊プロセスは、星間ダスト(固体微粒子)の存在量や紫外線輻射場の強さ、衝撃波の有無、温度や密度といった物理状態、さらに経過時間に応じて変化する。そのため、他の惑星で地球とは異なる物質が見られるように、他の銀河ではそれぞれその環境に応じた分子化学組成が見られると考えられる。

宇宙年齢 20-30 億年に相当する時代は、宇宙の歴史を通じて最も活発に星形成が起こった時期として知られており、この時代の大質量銀河には現在の宇宙では見られないレベルの極めて活発な星形成活動(爆発的星形成)や、銀河の中心にある大質量ブラックホールの急激な成長(活動銀河核)を起こしているものがある。このような銀河は遠方にあるため、近傍のものとは比べるとより暗く小さく見えるが、近年の大型望遠鏡の性能の向上によって微弱な分子スペクトル線の観測可能性が切り拓かれた。

2. 研究の目的

銀河進化研究において宇宙年齢 20-30 億年頃の銀河の物理・化学状態を理解する必要性と、星間化学研究において爆発的星形成や活動銀河核などの苛烈な環境での分子化学組成を調べる重要性を踏まえ、宇宙年齢 20-30 億年頃の代表的な銀河を対象にした分子スペクトル線の高感度・高空間分解観測は双方の分野の発展に資すると考えられる。本研究の目的は、宇宙年齢 25 億年に相当する遠方にあるキューサー(活動銀河核を擁した銀河の一種)である Cloverleaf(クローバーリーフ)に対して、世界最高クラスの感度と空間分解能を備えた大型電波干渉計のひとつである ALMA 望遠鏡を用いたラインサーベイ観測を行い、分子化学組成とそれが由来する銀河の物理状態を明らかにすることである。

3. 研究の方法

まず Cloverleaf キューサーに対し、ALMA 望遠鏡による 350 GHz 帯のラインサーベイ観測を行う。高感度かつ高空間分解の観測により、星間分子のうち特に豊富に存在し、明るく観測されることが知られている CO(一酸化炭素)のほか、近傍の銀河でよく見られる主要な分子種のスペクトル線を捉え、銀河の内部でのそれらの空間分布を調べる。まとまった周波数領域を隙間なく観測することで、先入観に捉われず実際の分子化学組成を捉えることができる。

Cloverleaf キューサーは重力レンズ効果(視線方向に2つの天体が重なることで、手前の天体の作る重力場がレンズとして働き、奥の天体が明るく拡大されて見える効果)を受けており、微弱なスペクトル線のわずかな空間分解の違いを調べるには適しているが、望遠鏡で捉えられる像はこの効果によって歪んでいるため、銀河の本来の形を知るためには重力レンズ効果を差し引く復元作業が必要になる。望遠鏡で観測された像をもとにこの作業を行う。

得られた様々な分子の空間分布が何を意味するか解釈するには、他の銀河との比較が欠かせない。Cloverleaf キューサーと類似した性質を持つと考えられている、近傍にある高光度赤外線銀河は特に重要な比較対象である。他の銀河との比較を通じて Cloverleaf キューサーの分子化学組成を特徴づけ、銀河の構造や力学など物理状態と対応づけてまとめる。

4. 研究成果

先に述べた研究の方法に従い、(1) Cloverleaf キューサーの分子化学組成とその物理的由来を明らかにすることができた。また、研究を進める過程で、(2) 近傍にある高光度赤外線銀河の高空間分解観測データの解析にも取り組み、Cloverleaf キューサーの分子の空間分布を解釈する上で重要な示唆も得られた。本研究の発展として ALMA 望遠鏡での新しい観測の提案も行き、新規データを獲得することもできた。これについて(3) 今後の展望として言及する。

(1) Cloverleaf キューサーの分子化学組成とその物理的由来

ALMA 望遠鏡による観測の結果、明るい CO のほか、近傍銀河でも検出されることの多い主要分子種である CN、HCN、 HCO^+ 、さらに Cloverleaf キューサーに対して初検出となる CCH、HNC のスペクトル線を検出できた(図1)。重力レンズ効果を差し引く解析によって、この天体も近傍の高光度赤外線銀河と類似したガスの豊富な回転円盤構造を持っていることも明らかになった。CO や HCO^+ の強度分布が可視光と同じ位置でピークを示す一方、HCN や CN の分布はこれらと異なり X 線の最も明るい位置でピークを示したことから、中心核付近に特異な組成を持つ領域があることも見出された(図2)。近傍の高光度赤外線銀河では HCN や CN の増加

がアウトフローによる衝撃波領域で見られる（次節で詳述）ことから、この HCN や CN の空間分布は Cloverleaf クェーサーにおけるアウトフローの存在を示している可能性が示唆された。

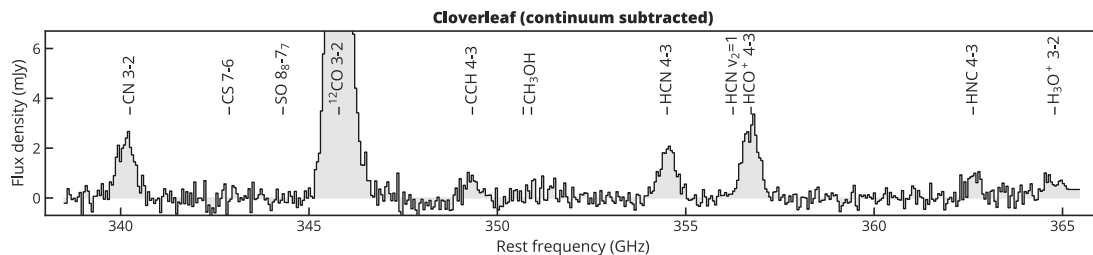


図 1 : Cloverleaf クェーサー全体から抽出したスペクトル。

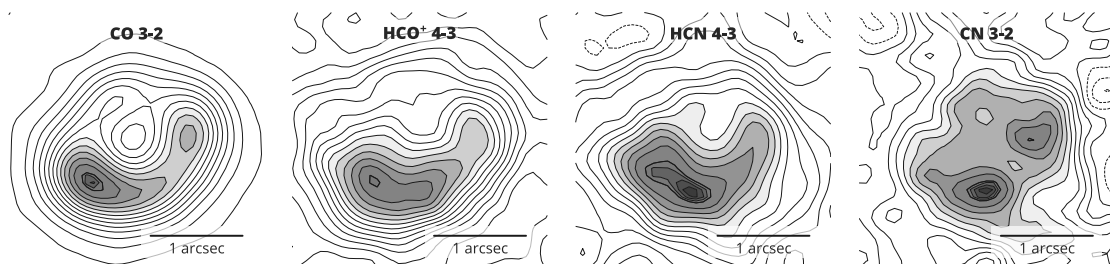


図 2 : 左から順に CO、HCO⁺、HCN、CN のスペクトル線強度の空間分布。重力レンズ効果により拡大され、分子種ごとに強度ピーク位置に差が見られる。

(2) 近傍高光度赤外線銀河のアウトフローと輝線強度比

高光度赤外線銀河は爆発的星形成や活動銀河核によって星間ダストが温められ、赤外線で特に明るく輝く銀河である。近傍の高光度赤外線銀河 23 天体を ALMA 望遠鏡により高感度・高空間分解観測し、HCN と HCO⁺ の輝線強度比がどのように振る舞うか調べた。中間赤外線により評価した活動銀河核のエネルギーと、この比の間にははっきりとした相関が見られなかった一方、CO 輝線や OH 吸収線の観測によりアウトフロー（ガスが中心核から高速で押し出される現象）が起きていることが知られている銀河については、HCN/HCO⁺ 輝線強度比がその領域で他の領域よりも高まることを見出した（例として図 3）。これはアウトフローで生じた衝撃波領域で高温状態が作られ、HCN の生成が促進されることに由来すると考えられる。アウトフローの有無やその形状を調べるには通常、力学モデルが必要になるが、この比は形状を観測から直接調べる方法として役立つ。

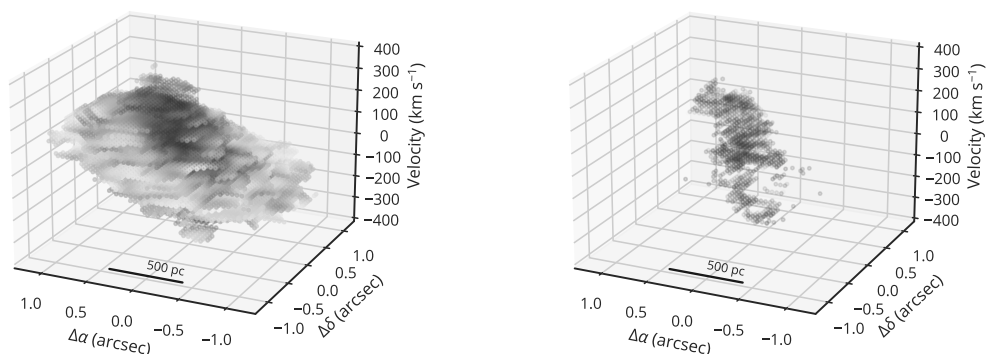


図 3 : 高光度赤外線銀河で観測された HCN/HCO⁺ 輝線強度比を位置と速度の 3 次元空間で示したものの一例。濃い色ほど比の高い場所を示している。左右とも同一の銀河だが、左は銀河全体、右は銀河の中で最も比が高い 10% の領域のみを抜き出すことでアウトフローの形状を描いた。

(3) 今後の展望

以上のような Cloverleaf クェーサーの分子化学組成とその背景にある物理状態の解明、近傍の高光度赤外線銀河から得られる有用な示唆を受け、今後取り組むべき課題としては、Cloverleaf クェーサーと同時代にあるが異なる活動タイプの銀河の分子化学組成を調べる観測や、近傍の高光度赤外線銀河をより詳細に調べる観測が挙げられる。ALMA 望遠鏡でこうした観測を行う提案を提出し、新規データを取得、現在はその解析を進めている。Cloverleaf クェーサーをベンチマークとし、分子化学組成を鍵に遠方銀河の理解が深まっていくことが今後期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件／うち国際共著 7件／うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Saito Toshiki, Takano Shuro, Harada Nanase, Nakajima Taku, Schinnerer Eva, Liu Daizhong, Taniguchi Akio, Izumi Takuma, Watanabe Yumi, Bamba Kazuharu, Herbst Eric, Kohno Kotaro, Nishimura Yuri, Stuber Sophia, Tamura Yoichi, Tosaki Tomoka	4. 巻 927
2. 論文標題 The Kiloparsec-scale Neutral Atomic Carbon Outflow in the Nearby Type 2 Seyfert Galaxy NGC 1068: Evidence for Negative AGN Feedback	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L32 ~ L32
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac59ae	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 Sato M. T., Aalto S., Kohno K., Koenig S., Harada N., Viti S., Izumi T., Nishimura Y., Gorski M.	4. 巻 660
2. 論文標題 APEX and NOEMA observations of H ₂ S in nearby luminous galaxies and the ULIRG Mrk 231	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Astronomy and Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A82 ~ A82
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202141260	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 Martin S. et al.	4. 巻 656
2. 論文標題 ALCHEMI, an ALMA Comprehensive High-resolution Extragalactic Molecular Inventory	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy and Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A46 ~ A46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202141567	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 Harada Nanase et al.	4. 巻 923
2. 論文標題 Starburst Energy Feedback Seen through HCO ⁺ /HOC ⁺ Emission in NGC 253 from ALCHEMI	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 24 ~ 24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac26b8	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 Falstad, Aalto, Koenig, Onishi, Muller, Gorski, Sato, Stanley, Combes, Gonzalez-Alfonso, Mangum, Evans, Barcos-Munoz, Privon, Linden, Diaz-Santos, Martin, Sakamoto, Harada, Fuller, Gallagher, van der Werf, Viti, Greve, Garcia-Burillo, Henkel, Imanishi, Izumi, Nishimura, Ricci, Muehle	4. 巻 -
2. 論文標題 CON-quest: Searching for the most obscured galaxy nuclei	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Astronomy and Astrophysics	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) なし	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 Barnes A T, Kauffmann J, Bigiel F, Brinkmann N, Colombo D, Guzman A E, Kim W J, Szucs L, Wakelam V, Aalto S, Albertsson T, Evans N J, Glover S C O, Goldsmith P F, Kramer C, Menten K, Nishimura Y, Viti S, Watanabe Y, Weiss A, Wienen M, Wiesemeyer H, Wyrowski F	4. 巻 497
2. 論文標題 LEGO II. A 3mm molecular line study covering 100pc of one of the most actively star-forming portions within the Milky Way disc	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 1972 ~ 2001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa1814	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 Nishimura Yuri, Watanabe Yoshimasa, Harada Nanase, Kohno Kotaro, Yamamoto Satoshi	4. 巻 879
2. 論文標題 Molecular Gas Density Measured with H2CO and CS toward a Spiral Arm of M51	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 65 ~ 65
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab24d3	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 Shimonishi Takashi, Das Ankan, Sakai Nami, Tanaka Kei E. I., Aikawa Yuri, Onaka Takashi, Watanabe Yoshimasa, Nishimura Yuri	4. 巻 891
2. 論文標題 Chemistry and Physics of a Low-metallicity Hot Core in the Large Magellanic Cloud	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 164 ~ 164
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab6e6b	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 Watanabe Yoshimasa, Nishimura Yuri, Sorai Kazuo, Sakai Nami, Kuno Nario, Yamamoto Satoshi	4. 巻 242
2. 論文標題 A 3 mm Spectral Line Survey toward the Barred Spiral Galaxy NGC 3627	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 26 ~ 26
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ab1d63	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 Harada Nanase, Nishimura Yuri, Watanabe Yoshimasa, Yamamoto Satoshi, Aikawa Yuri, Sakai Nami, Shimonishi Takashi	4. 巻 871
2. 論文標題 Molecular-cloud-scale Chemical Composition. III. Constraints of Average Physical Properties through Chemical Models	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 238 ~ 238
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaf72a	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18件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 9件)

1. 発表者名 Yuri Nishimura
2. 発表標題 Spatially and Spectrally resolved HCN/HCO+ ratio in U/LIRGs from the CONquest sample
3. 学会等名 Astrochemical Frontiers 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村優里
2. 発表標題 Spatially and Spectrally resolved HCN/HCO+ ratio in U/LIRGs from the CONquest sample
3. 学会等名 第5回 FORCE研究会「埋もれたAGNの宇宙論的進化」
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 西村優里
2. 発表標題 Spatially and Spectrally resolved HCN/HCO+ ratio in U/LIRGs: Mechanisms to elevate the line ratio
3. 学会等名 ALMA Grant Fellow Symposium 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuri Nishimura
2. 発表標題 Spatially and Spectrally resolved HCN/HCO+ ratio in the CON-quest galaxies
3. 学会等名 CON-quest workshop 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yuri Nishimura
2. 発表標題 Spatially and spectrally resolved HCN/HCO+ ratios in ultraluminous and luminous infrared galaxies from the CON-quest sample
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 Yuri Nishimura
2. 発表標題 重力レンズクエーサーCloverleafにおける350 GHz帯分子輝線サーベイ
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 Yuri Nishimura
2. 発表標題 Spatially and spectrally resolved HCN/HCO+ ratio in luminous infrared galaxies from the CON-quest sample
3. 学会等名 ALMA Grant Fellow Symposium 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuri Nishimura
2. 発表標題 Spatially and spectrally resolved HCN/HCO+ ratios in the CONquest galaxies
3. 学会等名 CON-quest workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuri Nishimura
2. 発表標題 Molecular-cloud-scale multi-line mapping toward the Galactic molecular cloud W3(OH) in the 3 mm and 0.8 mm band
3. 学会等名 Linking the Milky Way and Nearby Galaxies (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuri Nishimura
2. 発表標題 Molecular-Cloud-Scale Multi-Line Imaging Toward W3(OH) in the 3 mm and 0.8 mm Bands
3. 学会等名 Behind the Curtain of Dust III (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 西村優里
2. 発表標題 分子輝線から銀河を理解するための”分子雲”の星間化学
3. 学会等名 第49回 天文・天体物理若手 夏の学校（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuri Nishimura
2. 発表標題 Molecular-Cloud-Scale Chemical Composition: Observations of Nearby Galaxies and Galactic Clouds
3. 学会等名 ALMA Grant Fellow Symposium 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yuri Nishimura
2. 発表標題 Multi-line spectroscopy to assess molecular cloud properties
3. 学会等名 East-Asian ALMA science workshop（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuri Nishimura
2. 発表標題 ALMA rest-frame 0.8 mm-band line survey in the Cloverleaf
3. 学会等名 ALMA workshop “The blind search for hidden galaxies in an abundant line of sight”（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yuri Nishimura
2. 発表標題 Molecular composition of local dwarf galaxies: Astrochemistry in low-metallicity environments
3. 学会等名 IAU Symposium 344 - Dwarf Galaxies: From the Deep Universe to the Present (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuri Nishimura
2. 発表標題 Molecular ISM of galaxies from local dwarfs to high-redshifts
3. 学会等名 Hendrik van de Hulst Centennial Symposium - The Interstellar Medium of Galaxies: Status and Future Perspectives (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuri Nishimura
2. 発表標題 Galactic diffuse molecular gas detected in absorption toward ALMA calibrator sources
3. 学会等名 Cosmic Shadow 2018 ~クエーサー吸収線系でみる宇宙~
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 西村優里、渡邊祥正、原田ななせ、吉村勇紀、河野孝太郎、山本智
2. 発表標題 Molecular-cloud-scale multi-line imaging toward W3(OH) in the 0.8 mm band
3. 学会等名 日本天文学会2019年春季年会
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
---------	---------