

令和 3 年 6 月 16 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K03712

研究課題名(和文) 電波銀河の分子ガストラス探査と磁場計測

研究課題名(英文) Molecular torus survey and magnetic field measurement in radio galaxies

研究代表者

亀野 誠二 (Kameno, Seiji)

国立天文台・チリ観測所・教授

研究者番号：20270449

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、活動銀河核のエネルギー源である降着物質が中心核に集積する分子ガストラスを観測し、密度や温度や組成、角運動量輸送の鍵となる磁場を測ることである。電波銀河NGC 1052および4261で多種の分子ガス吸収線を検出し、中心核を囲む高密度分子ガスから成るトラスの存在を明らかにした。偏波による磁場計測を試みた結果、トラスでは偏波率が検出限界以下で、ファラデー回転による消偏波が示唆された。SO吸収線のゼーマン効果は検出限界以下で0.3 Gの上限值を得た。SO吸収線から、トラスの温度が約500 Kと求まり、ダスト表面で生成した硫化物が昇華して発生したことが示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

活動銀河核は大質量ブラックホールに降着する物質の重力エネルギーで輝く宇宙で最も高効率かつ大規模なエンジンであり、燃料となる降着物質の起源と組成および降着機構(角運動量輸送機構)が未解明であった。本研究では分子ガストラスを吸収線で観測することにより、高密度分子ガスとプラズマが非一様に混在するトラスの構成を解明でき、ミリ波・サブミリ波帯電波干渉計高解像度観測のトラス調査有効性を示した。トラスのダスト温度が約500 Kと高温であり、中心核の放射では足りないことから、トラス内の回転が磁場を介して乱流を生じ、プラズマを生成するまでに加熱する機構が示唆された。

研究成果の概要(英文)：We have observed molecular tori in active galactic nuclei to investigate mass accretion process by measuring physical properties and magnetic fields. We discovered rich molecular absorption species in radio galaxies NGC 1052 and 4261 to identify the molecular tori. Non-detection of polarization indicates Faraday depolarization through the tori. The 0.3-G upper limit of the magnetic field is obtained via Zeeman effect of SO absorption lines. Boltzmann diagram of the SO absorptions indicate that the torus is as hot as 500 K where sulfides sublime from dusts.

研究分野：電波天文学

キーワード：活動銀河核 電波銀河 偏波観測 分子ガストラス 電波干渉計

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 活動銀河核は  $10^{33-40}$  W のパワーを生成する宇宙最大規模かつ高効率のエンジンであり、そのエネルギー源は銀河中心の大質量ブラックホールに降着する物質の重力エネルギーと考えられている。大質量ブラックホールの存在は直接撮像などにより観測的な証拠が得られていたが、降着物質の起源や物質構成および質量降着過程(角運動量輸送機構)については未解明である。降着物質はエネルギー源となる「燃料」であるとともに、ブラックホール成長を担う「材料」でもあるので、質量降着機構の解明は活動銀河核の形成と活動性のメカニズムを知る上で欠かせない。

(2) 我々はすでに近傍の活動銀河核において、降着物質が中心数 pc の領域に集積したトーラスを同定し、プラズマによる自由-自由吸収と高密度分子ガスによる水蒸気メーザーが混在していることを発見していた。水蒸気メーザーは励起条件が特殊なので一般化が難しいが、トーラス内の分子ガスによる吸収線を探索すれば、より一般的なトーラスの探索および物理状態の計測ができると期待されていた。

(3) トーラスに集積した降着物質の質量降着過程として、磁場による角運動量輸送機構が有力視されていた。トーラスの磁場は観測的に不明だったが、偏波観測によるファラデー回転の計測、あるいは分子ガス吸収線のゼーマン効果による磁場計測が手法として考えられる。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、活動銀河核への質量降着過程を解明するために、降着物質の集積領域である分子ガストーラスを探索し、角運動量輸送機構の候補である磁場計測を試みるものである。磁場計測には、偏波観測によるファラデー回転と、SO (一酸化硫黄) 分子吸収線のゼーマン効果の、2つの手法を併用する。どちらも計測できれば世界初であり、高いインパクトが期待できる。

### 3. 研究の方法

(1) ALMA 望遠鏡および NOEMA 望遠鏡を用いて、近傍の電波銀河における分子ガス吸収線を探索し、トーラスを持つ天体を見つける。

(2) 分子ガス吸収線が見つかった電波銀河を KVN(Korea VLBI Network)で観測し、吸収線の空間分布を調べてトーラスの構造を明らかにする。

(3) トーラスを持つ電波銀河を ALMA 望遠鏡で偏波観測し、ファラデー回転と SO 吸収線のゼーマン効果により磁場を計測する。

(4) 以上の観測結果に基づいて、トーラスのサイズ・質量・構造・組成・温度・運動・磁場を推定し、角運動量輸送機構を解明する。

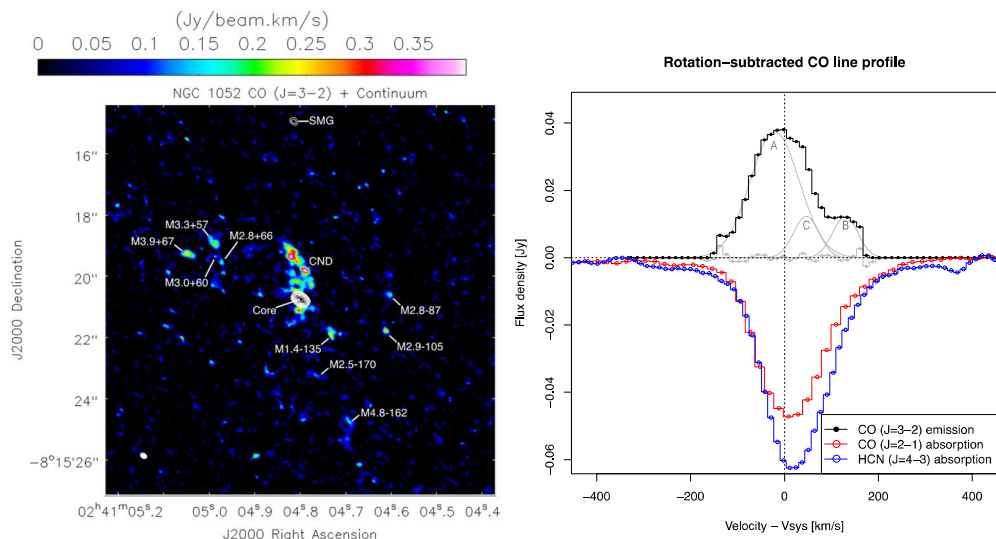
### 4. 研究成果

(1) ALMA 望遠鏡と NOEMA 望遠鏡によって、電波銀河 NGC 1052, NGC 4261, Cygnus A, 3C 75, NGC 6428, IC 1459 の分子ガス吸収線を探索した結果、ジェットがコンパクトで若いと NGC 1052, NGC 4261, NGC 6328, IC 1459 では CO (一酸化炭素) に加え HCN, HCO<sup>+</sup>などの吸収線が見られ、中心核を囲む高密度分子ガスから成るトーラスの存在が示唆された。

(2) KVN (Korea VLBI Network) によって電波銀河 NGC 1052 を観測した結果、HCN および HCO<sup>+</sup> 分子の吸収線を検出し、その空間分布からジェットに垂直なトーラス状に高密度分子ガスが存在し、回転に加え中心へ降着していることを明らかにした。

(3) ALMA 電波望遠鏡を用いて電波銀河 NGC 1052 を観測した結果、半径 153 pc の核周円盤 (Circum-Nuclear Disk: CND) は分子ガス総量が  $5.3 \times 10^5$  太陽質量程度しか存在せず星形成を起こすには不十分である一方で、中心 2.4 pc 内のトーラスには  $1.3 \times 10^7$  太陽質量もの分子ガスが集中していることが明らかになった。これはセイファート銀河等で提唱されている「CND での星形成が質量降着を促進する」というモデルとは異なり、電波銀河では CND からのガス供給

無しに pc スケールのトーラスだけで AGN の活動性を維持している例と見られる。



(左) NGC 1052 の CND における分子ガス (CO J=3-2 輝線) の分布 (右) CO (J=3-2) 輝線と吸収線 CO (J=2-1) および吸収線 HCN (J=4-3) の速度プロファイル

(4) ALMA 望遠鏡を用いて電波銀河 NGC 1052 および NGC 4261 の偏波観測を行い磁場計測を試みた結果、トーラスでは偏波率が検出限界と低く、ファラデー回転による磁場測定には到らなかった。しかしトーラスより外側ではジェットの流出方向に沿った偏波が検出できていることから、トーラスでファラデー回転が  $10^7 \text{ rad/m}^2$  以上と大きくファラデー消偏波が起きていることが示唆される。さらに SO (一酸化硫黄) 吸収線のゼーマン効果による磁場計測も試みたが、ゼーマン効果は検出限界以下で 0.3 G の上限値を得るに留まった。

(5) SO の複数のエネルギーレベルにおける吸収の比較から、トーラスの温度が約 500 K と求まり、ダスト表面で生成した硫化物が昇華して発生したことが示唆された。

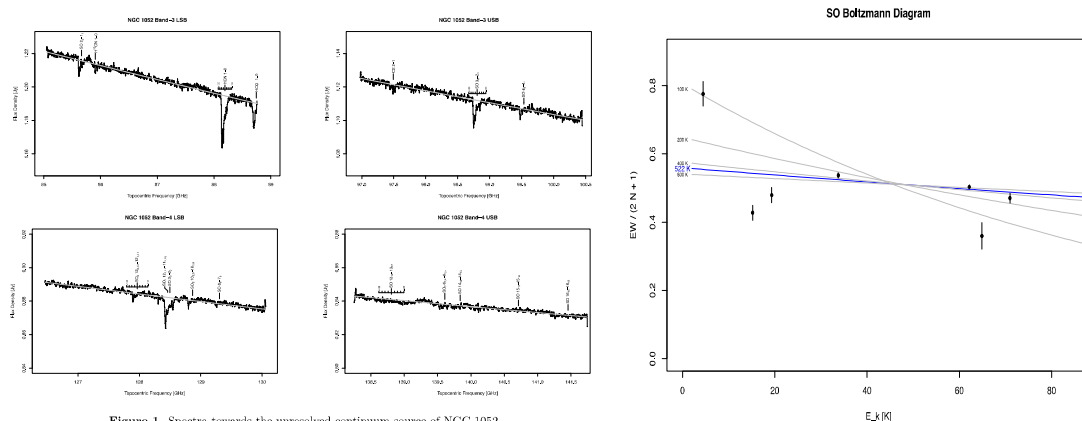


Figure 1. Spectra towards the unresolved continuum source of NGC 1052

(左) NGC 1052 の SO 吸収線プロファイル (右) 複数の SO 吸収線から求めたトーラスの温度

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 9件 / うち国際共著 10件 / うちオープンアクセス 13件）

1. 著者名 Kameno, S., et al.	4. 巻 11572
2. 論文標題 3C 279: ALMA detection of radio flare in total and polarized flux densities	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astronomer's Telegram	6. 最初と最後の頁 1
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 無
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 Dobashi Kazuhito, Shimoikura Tomomi, Nakamura Fumitaka, Kameno Seiji, Mizuno Izumi, Taniguchi Kotomi	4. 巻 864
2. 論文標題 Spectral Tomography for the Line-of-sight Structures of the Taurus Molecular Cloud 1	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id.82, 12 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aad62f	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 Sawada-Satoh Satoko, Byun Do-Young, Lee Sang-Sung, Oh Se-Jin, Roh Duk-Gyoo, Kameno Seiji, Yeom Jae-Hwan, Jung Dong-Kyu, Oh Chungsik, Kim Hyo-Ryoung, Hwang Ju-Yeon	4. 巻 872
2. 論文標題 A Broad HCO+ Absorption Line Associated with the Circumnuclear Torus of NGC 1052	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 id. L21, 6 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab0425	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 Dobashi Kazuhito, Shimoikura Tomomi, Ochiai Tetsu, Nakamura Fumitaka, Kameno Seiji, Mizuno Izumi, Taniguchi Kotomi	4. 巻 879
2. 論文標題 Discovery of CCS Velocity-coherent Substructures in the Taurus Molecular Cloud 1	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id.88, 8 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab25f0	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 Nakamura Fumitaka, Kamenno Seiji, Kusune Takayoshi, Mizuno Izumi, Dobashi Kazuhito, Shimoikura Tomomi, Taniguchi Kotomi	4. 巻 71
2. 論文標題 First clear detection of the CCS Zeeman splitting toward the pre-stellar core, Taurus Molecular Cloud 1	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 id.117, 23 pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz102	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 Lopez-Rodriguez Enrique, Alonso-Herrero Almudena, Garcia-Burillo Santiago, Gordon Michael S., Ichikawa Kohei, Imanishi Masatoshi, Kamenno Seiji, Levenson Nancy A., Nikutta Robert, Packham Chris	4. 巻 52
2. 論文標題 The magnetic field of the torus of NGC1068 as seen by ALMA polarimetry	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Bulletin of the American Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 id. 146.0
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 無
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 Nakahara Satomi, Doi Akihiro, Murata Yasuhiro, Nakamura Masanori, Hada Kazuhiro, Asada Keiichi, Sawada-Satoh Satoko, Kamenno Seiji	4. 巻 159
2. 論文標題 The Two-sided Jet Structures of NGC 1052 at Scales from 300 to $4 \times 10^7$ Schwarzschild Radii	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 id.14 8pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-3881/ab465b	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 Asada Keiichi, Inoue Makoto, Nagai Hiroshi, Kamenno Seiji	4. 巻 342
2. 論文標題 Expanding Radio Lobe associated with 3C 84	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 From Black Hole to Cluster Outskirts, Proceedings of the International Astronomical Union	6. 最初と最後の頁 220 ~ 221
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1017/S1743921318008475	査読の有無 無
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 Lopez-Rodriguez Enrique, Alonso-Herrero Almudena, Garcia-Burillo Santiago, Gordon Michael S., Ichikawa Kohei, Imanishi Masatoshi, Kamen Seiji, Levenson Nancy A., Nikutta Robert, Packham Chris	4. 巻 893
2. 論文標題 ALMA Polarimetry Measures Magnetically Aligned Dust Grains in the Torus of NGC 1068	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id.33 17pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab8013	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 Kamen Seiji, Sawada-Satoh Satoko, Impellizzeri C. M. Violette, Espada Daniel, Nakai Naomasa, Sugai Hajime, Terashima Yuichi, Kohno Kotaro, Lee Minju, Martin Sergio	4. 巻 895
2. 論文標題 A Massive Molecular Torus inside a Gas-poor Circumnuclear Disk in the Radio Galaxy NGC 1052 Discovered with ALMA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 id.73 20pp.
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab8bd6	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 Hull Charles L. H., Cortes Paulo C., Gouellec Valentin J. M. Le, Girart Josep M., Nagai Hiroshi, Nakanishi Kouichiro, Kamen Seiji, Fomalont Edward B., Brogan Crystal L., Moellenbrock George A., Paladino Rosita, Villard Eric	4. 巻 132
2. 論文標題 Characterizing the Accuracy of ALMA Linear-polarization Mosaics	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of the Pacific	6. 最初と最後の頁 id.094501 19pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1538-3873/ab99cd	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 Okada Nozomi, Seiji Kamen, et al.	4. 巻 11453
2. 論文標題 Development of the multi-band simultaneous observation system of the Nobeyama 45-m Telescope in HINOTORI (Hybrid Installation project in Nobeyama, Triple-band ORiented)	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Conference Series	6. 最初と最後の頁 id.1145349 11pp
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1117/12.2562137	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 Kameno, S. et al.	4. 巻 14385
2. 論文標題 3C 279: ALMA detection of polarization flare with an EVPA jump	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astronomer's Telegram	6. 最初と最後の頁 1
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 無
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

〔学会発表〕 計2件 (うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Seiji Kameno
2. 発表標題 A radio absorption study of AGN tori
3. 学会等名 TORUS 2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 亀野誠二
2. 発表標題 ALMA Polarization Monitoring of Extragalactic Radio Sources
3. 学会等名 日本天文学会2020年秋季年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 中井直正、坪井昌人、福井康夫、小川英夫、亀野誠二、神代暁、小嶋崇文、齋藤正雄、徂徠和夫、前澤裕之、松尾宏、水野亮、百瀬宗武	4. 発行年 2020年
2. 出版社 日本評論社	5. 総ページ数 392
3. 書名 宇宙の観測II	

〔産業財産権〕

〔その他〕

ALMAによる偏波モニター計測公開サイト  
<http://www.alma.ci/~skameno/AMAPOLA/>

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
---------	---------