

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：62616
研究種目：若手研究(B)
研究期間：2017～2019
課題番号：17K14247
研究課題名(和文) 高空間分解能ミリ波サブミリ波帯ガス輝線観測で探る活動銀河核トーラスの物理的起源
研究課題名(英文) The physical origin of active galactic nucleus torus probed by high resolution mm/submm emission lines
研究代表者
泉 拓磨 (IZUMI, TAKUMA)
国立天文台・ハワイ観測所・特任助教
研究者番号：40792932
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：活動銀河核(AGN)とは、銀河中心に存在する質量降着を伴う超巨大ブラックホールである。AGNの周囲にはドーナツ状の「トーラス」という構造があると考えられており、AGNの性質やブラックホールの宇宙論的進化を論じる上で重要である。その一方、30年以上前に提唱されたこのトーラス構造の物理的起源は謎のままであった。本研究では、トーラスの実体は多相星間物質がAGNの強力な輻射を浴びて織りなす多層力学構造であるというモデルを、最新の電波干渉計ALMAを用いた高解像度な分子・原子ガス観測で検証した。観測結果は理論予測と見事に整合しており、長らく謎であったトーラスの起源を示した重要な成果を得ることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

活動銀河核トーラスは、宇宙の古今にわたる活動銀河核、すなわち超巨大ブラックホールの周辺構造の中でも根幹をなす重要構造である。その一方で、提唱から30年以上にわたってその物理的な形成過程は不明なままで、いわゆる「ドーナツ型」モデルが便宜的に利用されてきた。本研究では、そのトーラスの物理的起源を「輻射駆動されたガスの噴水構造」にあるとし、ALMAを用いた最新の高解像度観測からその検証を行なった。観測結果は理論予測と非常によく整合しており、輻射駆動噴水モデルの妥当性を示している。これにより、トーラスは決して静的な構造ではなく、多相ガスが織りなす非常にダイナミックな構造であることが明らかとなった。

研究成果の概要(英文)：Active galactic nucleus (AGN) is an actively mass-accreting super massive black hole at the heart of galaxies. It has been long thought that there is a donut-like dusty/gaseous structure around an AGN, which is called as "AGN torus": this is a key structure to discuss AGN physical properties and its cosmological evolution. However, since the advent of the torus paradigm, its physical origin has been unclear for 30 yrs. In this study, we considered a new model for the origin of the torus, namely "radiation-driven fountain torus model", in which multi-phase gas dynamics driven by the AGN radiation naturally forms a geometrically thick donut-like structure. We tested this model by high resolution submm molecular and atomic gas observations with ALMA. We successfully obtained very consistent results to the model predictions, which surely supports the validity of this fountain model as the physical origin of the torus, a long-lasting mystery of modern astronomy.

研究分野：天文学

キーワード：活動銀河核 AGN トーラス サブミリ波 ALMA 輻射駆動噴水モデル ガス輝線

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

超巨大ブラックホールへの降着物質から解放された重力エネルギーで輝く活動銀河核 (Active Galactic Nucleus = AGN) には、輝線幅が数千から 1 万 km/s にも及ぶ中心部の広輝線領域が観測されるもの (1 型) と、それが見えずに線幅 < 1 千 km/s 程度の狭輝線領域しか観測されないもの (2 型) の 2 種類が存在する。これらを統一的に理解するために、AGN を取り囲む大きさ数 pc から数十 pc 程度のガスやダストで構成されたドーナツ状の構造体 = AGN トーラスが提唱された [1]。すなわち、AGN の型の違いをドーナツの穴を見込む角度の違いで説明するアイデアである。この説は様々な AGN の性質を見事に説明する一方で、あくまで現象論的なものであり、トーラスの物理的起源は提唱以来 30 年以上にわたって不明なままであった。

2. 研究の目的

AGN トーラスの物理的起源として、「輻射駆動噴水モデル」 [2] が有力視されている。このモデルでは、AGN 周囲のガスは AGN からの強力な輻射 (X 線や紫外線) を受けて、その物理化学状態が大きく影響される。また、輻射圧を受けることでガスのアウトフローも駆動される。端的には、高密度分子ガスは AGN 周囲に存在するガス円盤の中心面に、原子ガスはガス円盤の上空やアウトフロー中に、電離ガスは AGN 直近やアウトフロー中に存在する。AGN 活動を維持するガス供給は、円盤中心面を通過して行なわれる。一方、アウトフロー成分の一部は、円盤と中心ブラックホールの重力により再び円盤に落下してくる。つまり、AGN 周囲では、(i) ガスの流入 (インフロー)、(ii) アウトフロー、(iii) アウトフローの一部の落下 (バックフロー) の 3 種類のガスの流れがあり、これらは自然と幾何学的に厚い構造を作る。これが、AGN トーラスの実体であるというのが輻射駆動噴水モデルの重要な点である。このモデルはドーナツ状のトーラスをアприオリに仮定することなく、物理的に自然にトーラス的な幾何学的に厚い構造が出来上がる点が特徴的かつ重要である。本研究では、このモデルの検証を目的とした。

3. 研究の方法

輻射駆動噴水モデルでは、異なる相 (電離ガス、原子ガス、分子ガス) のガスはそれぞれ異なる運動状態を示す。そこで、最新の電波干渉計である Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) を用いた原子ガスと高密度分子ガスの高解像度観測を行なった。観測対象は最も近傍の AGN を持つ Circinus 銀河である (距離の近さゆえに物理スケールで高い解像度を得ることができる)。この天体は中心核近傍に電離ガスアウトフローが存在することが、過去の観測から判明している。観測輝線は一酸化炭素分子 CO の回転遷移 $J = 3-2$ 輝線と、炭素原子輝線 [CI] (1-0) 輝線である。前者は高密度ガス円盤を、後者はガス円盤に加えてアウトフロー成分もトレースすることを期待している。特に [CI] (1-0) 輝線については静止周波数が高く地上観測が困難なこともあり、まだまだ高解像度観測例が少ない貴重な観測データを提供できる。

得られた輝線データを元に、各相のガスの空間分布や、運動状態を計測して違いの有無を調べる。また、結果は輻射駆動トーラスモデルの予測と比較する。この際、モデルは Circinus 銀河用に AGN の基本パラメータ (ブラックホール質量や AGN 光度) を設定した流体計算モデルを作成する。観測と直接比較できるように、流体計算モデルにポストプロセスで輻射輸送計算を施したのも本研究の特徴である。観測データから力学状態を計測する際には、観測領域を多数の同心円に区切り、ガスの銀河回転や速度分散といった各種力学パラメータをフィッティングから得る tilted-ring モデルを採用した。

4. 研究成果

研究代表者が PI として、ALMA Cycle 4 において Circinus 銀河を観測した。CO (3-2) と [CI] (1-0) の両輝線データ共に、 ~ 10 pc という高い空間分解能を達成できたのみならず、データの品質も極めて高く様々なモデル化に有用であった。この観測から、以下の点が明らかになった。

- (1) 空間分布: 銀河中心部の < 100 pc 領域にガス放射の多くが集中していることが分かった。これは核周円盤 (circumnuclear disk = CND) と呼ばれる構造で、他の AGN 天体でも見られる [3]。輻射駆動トーラスモデルは AGN へのガス供給源として CND の存在を必要とするので、この結果はモデル予測と整合する。
- (2) 輝線プロファイル: AGN 直近の直径 15pc 程度の領域で CO (3-2) と [CI] (1-0) の輝線プロファイル (輪郭) を測定したところ、全く異なる形状を示すことが分かった。まず、CO は単一の Gaussian プロファイルを示す。これは回転する CND でよく観測される形状で、高密度分子ガスは円盤中心面 (回転している) に存在するというモデル予測と整合する。一方で [CI] (1-0) 輝線は 3 個の Gaussian プロファイルの合成プロファイルを示した。これは、CO と同様の回転成分 1 つ + 高速アウトフロー (銀河静止系に対しては、より高速な成分と低速な成分として出現) 成分 2 つの合成になっていると理解でき、原子ガスがアウトフローをトレースするというモデル予測とよく整合する。
- (3) 力学構造のモデル化: tilted-ring 法を使った観測データ (速度場) のモデル化から、CO (3-2) よりも [CI] (1-0) の方が、速度分散成分が大きいことが分かった。速度分散 (ランダム運動 = 乱流成分) が大きいことは、円盤構造下ではそのガス成分がより幾何学

- 的に厚い状態になっていることを意味する。つまり、分子ガスよりも原子ガスの方が、円盤上空にまでより広がった構造をとっている。これもモデル予測と整合する。
- (4) 輻射駆動モデルとの直接比較：上記の項目をより定量的に検証するために、Circinus 銀河に対して構築した輻射駆動モデルを使って、理論的に CO(3-2)輝線と [CI] (1-0)輝線の分布や運動状態を予測した。この結果は、やはり観測結果と整合するもの（特に [CI] (1-0)のアウトフロー構造 = 3 個の Gaussian プロファイルを再現）であった。

以上のことから、少なくとも Circinus 銀河においては、輻射駆動噴水モデルがガス力学を含む観測結果を非常によく説明できることが分かった。これは、30 年以上にわたり謎であった「AGN トーラスの物理的起源」に対し、「トーラスはかつて想像されていたような静的なドーナツ構造ではなく、多相星間物質が織りなす多層的ダイナミック構造である」という裏付けを与えた形であり、本分野のパラダイムシフトにつながる重要な成果だと認識している。

これらの結果から導かれるトーラスの模式図を図 1 に示す。この成果は査読論文として出版された[4]。既に多くの文献で引用されたり、国際会議の招待講演を依頼される等、AGN 分野で非常に注目される成果となっている。一方で、本研究はあくまで Circinus 銀河 1 つに対して行なったものである点には注意が必要だろう。これまでの研究で、AGN トーラスの形状は中心 AGN の特性（光度等）に応じて変化すると分かっている。今後はこの Circinus 銀河における研究を、様々なパラメータの AGN に対して拡張していくことが重要である。

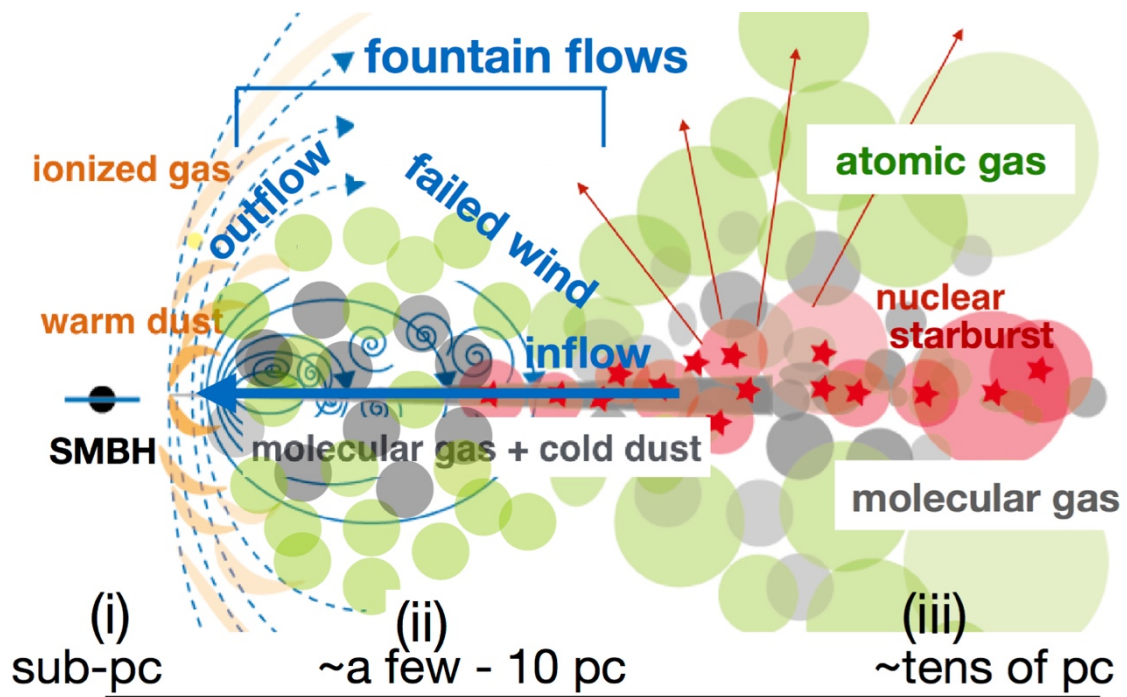


図 1. Circinus 銀河の観測と輻射駆動トーラスモデルに基づく新しい AGN トーラスの描像[2, 4]。高密度分子ガス（灰色）が円盤中心面を流れて AGN に燃料供給する一方、AGN 輻射をあびて AGN 直近のガスは電離（オレンジ）、ないしは解離されて原子状態（緑）となる。電離・原子ガスは AGN 輻射の圧力でアウトフローを生じるが、その一部は円盤に落下する。こうして、ガスの流入 → アウトフロー → 円盤への落下のサイクルができることで、幾何学的に厚い多相ガスの多層構造が維持される。これが AGN トーラスの実体と考えた。

<引用文献>

[1] Antonucci, R. 1993, ARA&A, 31, 473 [2] Wada, K. 2012, ApJ, 758, 66 [3] Izumi, T., et al. 2016, ApJ, 827, 81 [4] Izumi, T., et al. 2018, ApJ, 867, 48

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 8件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Izumi, Takuma; Wada, Keiichi; Fukushige, Ryosuke; Hamamura, Sota; Kohno, Kotaro	4. 巻 867
2. 論文標題 Circumnuclear Multiphase Gas in the Circinus Galaxy. II. The Molecular and Atomic Obscuring Structures Revealed with ALMA	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 48-67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aae20b	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 Izumi T., Kohno K., Fathi K., Hatziminaoglou E., Davies R. I., Mart?n S., Matsushita S., Schinnerer E., Espada D., Aalto S., Onishi K., Turner J. L., Imanishi M., Nakanishi K., Meier D. S., Wada K., Kawakatu N., Nakajima T.	4. 巻 845
2. 論文標題 On the Disappearance of a Cold Molecular Torus around the Low-luminosity Active Galactic Nucleus of NGC 1097	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L5 ~ L5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aa808f	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 Izumi, T	4. 巻 印刷中
2. 論文標題 Supermassive black holes with higher Eddington ratios preferentially form in gas-rich galaxies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Publication of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 印刷中
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) -	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 Tosaki Tomoka, Kohno Kotaro, Harada Nanase, Tanaka Kunihiro, Egusa Fumi, Izumi Takuma, Takano Shuro, Nakajima Taku, Taniguchi Akio, Tamura Yoichi	4. 巻 69
2. 論文標題 A statistical study of giant molecular clouds traced by ¹³ CO, C ¹⁸ O, CS, and CH ³ OH in the disk of NGC1068 based on ALMA observations	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Publication 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/psw122	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 Espada D., Matsushita S., Miura R. E., Israel F. P., Neumayer N., Martin S., Henkel C., Izumi T., Iono D., Aalto S., Ott J., Peck A. B., Quillen A. C., Kohno K.	4. 巻 843
2. 論文標題 Disentangling the Circumnuclear Environs of Centaurus A. III. An Inner Molecular Ring, Nuclear Shocks, and the CO to Warm H ₂ Interface	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 136 ~ 136
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa78a9	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 Yamaguchi Yuki, Kohno Kotaro, Tamura Yoichi, Oguri Masamune, Ezawa Hajime, Hayatsu Natsuki H., Kitayama Tetsu, Matsuda Yuichi, Matsuo Hiroshi, Oshima Tai, Ota Naomi, Izumi Takuma, Umehata Hideki	4. 巻 845
2. 論文標題 Blind Millimeter Line Emitter Search using ALMA Data Toward Gravitational Lensing Clusters	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 108 ~ 108
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa80e0	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 Imanishi Masatoshi, Nakanishi Kouichiro, Izumi Takuma	4. 巻 849
2. 論文標題 ALMA Multiple-transition Molecular Line Observations of the Ultraluminous Infrared Galaxy IRAS 20551-4250: Different HCN, HCO ⁺ , and HNC Excitation, and Implications for Infrared Radiative Pumping	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 29 ~ 29
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa7ff9	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 Ando Ryo, Nakanishi Kouichiro, Kohno Kotaro, Izumi Takuma, Martin Sergio, Harada Nanase, Takano Shuro, Kuno Nario, Nakai Naomasa, Sugai Hajime, Sorai Kazuo, Tosaki Tomoka, Matsubayashi Kazuya, Nakajima Taku, Nishimura Yuri, Tamura Yoichi	4. 巻 849
2. 論文標題 Diverse Nuclear Star-forming Activities in the Heart of NGC 253 Resolved with 10-pc-scale ALMA Images	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 81 ~ 81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa8fd4	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 Wada Keiichi、Fukushige Ryosuke、Izumi Takuma、Tomisaka Kohji	4. 巻 852
2. 論文標題 Circumnuclear Multi-phase Gas in the Circinus Galaxy. I. Non-LTE Calculations of CO Lines	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 88 ~ 88
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aa9e53	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 Imanishi Masatoshi、Nakanishi Kouichiro、Izumi Takuma、Wada Keiichi	4. 巻 853
2. 論文標題 ALMA Reveals an Inhomogeneous Compact Rotating Dense Molecular Torus at the NGC 1068 Nucleus	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L25 ~ L25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/aaa8df	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

〔学会発表〕 計27件 (うち招待講演 16件 / うち国際学会 13件)

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 The Circumnuclear Multi-phase Torus in the Circinus Galaxy Revealed by ALMA
3. 学会等名 銀河進化ワークショップ
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 ALMA高解像度観測で調べるAGNトーラスの構造と物理的起源
3. 学会等名 京都大学宇宙物理学教室談話会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuma Izumi
2. 発表標題 ALMA Reveals the Molecular and Atomic Obscuring Structures in the Circinus Galaxy
3. 学会等名 Astrophysical Frontiers in the next Decade and Beyond (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 ミリ波サブミリ波観測で挑む活動銀河中心核サイエンスの最前線
3. 学会等名 天文・天体物理若手夏の学校 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 AGN輻射駆動噴水モデルIII: Circinus銀河におけるALMA観測との比較
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuma Izumi
2. 発表標題 ALMA gives a nobel view on the physical origin of an AGN "torus"
3. 学会等名 Observatorio de Madrid Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takuma Izumi
2. 発表標題 Circumnuclear Multi-phase Gas in the Circinus Galaxy Revealed with ALMA
3. 学会等名 Torus 2018 workshop (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 多波長観測・理論との協働で進めるAGN・QSO研究
3. 学会等名 宇宙電波懇談会シンポジウム2018 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 ALMAによる高解像度観測で調べるAGNトラスの物理的起源
3. 学会等名 国立天文台談話会 (招待講演)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuma Izumi
2. 発表標題 My collaboration in Kagoshima: to understand the multi-phase obscuring nature of AGNs
3. 学会等名 AGARC Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Takuma Izumi
2. 発表標題 Circumnuclear Molecular and Atomic Obscuring Structure in the Circinus Galaxy Revealed by ALMA
3. 学会等名 East-Asia AGN Workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 SHELLQs-ALMA: submm properties of galaxies hosting less-luminous quasars at $z > 6$
3. 学会等名 第4回銀河進化研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 MM/submm energy diagnostic in the ALMA era
3. 学会等名 Elusive AGN in the next era (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 Do Circumnuclear Dense Gas Disks Drive the Growth of SMBHs?
3. 学会等名 Behind the Curtain of Dust II (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 Feeding, feedback, and evolution of active galactic nuclei revealed by ALMA
3. 学会等名 ALMA-J seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 SHELLQs-ALMA: submm properties of galaxies hosting less-luminous quasars at $z > 6$
3. 学会等名 天体形成論研究会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 Ultra-high resolution study of AGN dusty/molecular tori and the surrounding environments
3. 学会等名 ALMA Long Baseline Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 ALMA observations of cold ISM toward AGN-host galaxies near and far
3. 学会等名 北海道大・宇宙物理教室速報セミナー (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 ALMA observations of cold ISM toward AGN-host galaxies near and far
3. 学会等名 ISAS Seminar (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 ミリ波サブミリ波観測から期待する埋もれたAGN探査
3. 学会等名 第1回missing black holeワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 On the disappearance of a cold molecular torus around the low-luminosity active galactic nucleus of NGC 1097
3. 学会等名 East-Asia ALMA Science Workshop 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 Early SMBH-galaxy co-evolution probed by SPICA
3. 学会等名 SPICA国内ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 SHELLQs-ALMA: submm properties of galaxies hosting less-luminous quasars at $z > 6$
3. 学会等名 Distant Galaxies from the Far South (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 SHELLQs-ALMA: submm properties of galaxies hosting less-luminous quasars at $z > 6$
3. 学会等名 East-Asia AGN Workshop 2017 (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 ミリ波サブミリ波観測で挑む超巨大ブラックホール進化
3. 学会等名 超巨大ブラックホール研究推進連絡会 第5回ワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 ミリ波サブミリ波帯観測で探る活動銀河中心核
3. 学会等名 宇宙進化研究センター談話会 (招待講演)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 泉拓磨
2. 発表標題 高感度・高分解能テラヘルツ帯観測で探るAGN周辺環境
3. 学会等名 南極30m級テラヘルツ望遠鏡計画 - 高赤方偏移銀河・AGNの観測（招待講演）
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Takuma Izumi	4. 発行年 2018年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 145
3. 書名 Millimeter and Submillimeter Studies on the Active Trinity of Gas, Stars, and Black Holes in Seyfert Galaxies	

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>超巨大ブラックホールを取り巻くドーナツ構造の正体を暴く https://alma-telescope.jp/news/press/agn-201811</p>

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
研究協力者	和田 桂一 (WADA Keiichi)		