

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：32702

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K14768

研究課題名（和文）高速度分子雲に着目した銀河系中心領域に潜む中間質量ブラックホールの探査

研究課題名（英文）Probing Intermediate-mass Black Holes in the Galactic Center with the Observations of High-Velocity Compact Clouds

研究代表者

竹川 俊也（Takekawa, Shunya）

神奈川大学・工学部・助教

研究者番号：10827851

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：銀河系中心核近傍の特異分子雲「高速度コンパクト雲」に対して、ALMA望遠鏡による高解像度の分子スペクトル線観測を実施し、詳細な内部運動や物理状態を明らかにした。その結果、非活動的な中間質量ブラックホールが潜んでいる可能性の高い有望な候補地を新たに複数発見した。また、野辺山45m鏡による銀河系中心領域の広域サーベイ観測を実施し、広範にわたる衝撃波領域を検出し、高速度コンパクト雲のサンプルを拡充することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、中間質量ブラックホール候補を新たに複数発見し、銀河中心核である超大質量ブラックホールの起源解明や成長過程の理解に重要な手がかりを提供し得るものである。天の川銀河の中心核近傍で中間質量ブラックホールの潜伏候補地を見出せたことは、将来の探査研究において非常に有益である。また、野辺山45m電波望遠鏡による広域サーベイ観測により、私たちの住む銀河の中心環境について新しい知見を得ることができた。

研究成果の概要（英文）：We have conducted high-resolution spectral line observations of high-velocity compact clouds (HVCCs) in the Galactic center with ALMA, revealing their detailed internal kinematics and physical conditions. As a result, we have successfully discovered several promising candidate sites where inactive intermediate-mass black holes may be lurking. In addition, we have carried out large-scale survey observations of the Galactic center region using the Nobeyama 45-m radio telescope to identify shocked molecular gas, allowing us to increase the sample of HVCCs.

研究分野：天文学

キーワード：銀河系中心 中間質量ブラックホール 分子雲 電波望遠鏡

## 1. 研究開始当初の背景

大部分の銀河はその中心に、 $10^6$  太陽質量以上の超大質量ブラックホール (SMBH) を有すると考えられているが、その形成・成長過程は天文学における重要な未解決問題である。形成過程の一説として、初期宇宙において  $10^2$ – $10^5$  太陽質量の中間質量ブラックホール (IMBH) が形成され、それらを種として、IMBH 同士の合体や周囲からの質量降着を繰り返すことで SMBH が形成されるというシナリオがある。全ての IMBH が SMBH へと成長し切るとは考えにくく、近傍中においても IMBH は存在していると考えられる。しかし、これまで IMBH 候補天体の発見は、矮小銀河および球状星団の中心核や超高輝度 X 線源など複数報告例があるものの、いずれの結果に対しても異を唱える報告があり、IMBH の存在は未だ確定的ではない。

太陽系の属する銀河系の中心核 Sgr A\* は  $4 \times 10^6$  太陽質量の SMBH と認識されており、そこから半径約 200 pc の領域には大量の分子ガスが密集している。この領域には、空間的にコンパクト ( $d \lesssim 5$  pc) かつ速度幅が極めて広い ( $V \gtrsim 50$  km s<sup>-1</sup>) 特異分子雲「高速度コンパクト雲 (HVCC)」がこれまでに多数発見されている。これら HVCC はいずれも大きな内部運動エネルギーを有する一方で、多くはそのエネルギー源と考えられるような対応天体を他波長に持たず、その起源は解明されていない。HVCC の起源としてはこれまで、「(1) 超新星爆発と分子ガスの相互作用」、「(2) 分子雲同士の衝突」、「(3) 重いコンパクト天体による分子ガスの重力散乱」などが考えられており、その解明は、埋もれた大質量星団や非活動的な IMBH の発見に繋がる可能性がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、我々が発見した HVCC に着目して分子スペクトル線観測を主軸として IMBH の存在確認を目指す。加えて、銀河系中心領域の大規模サーベイ観測に基づいて、同種の HVCC のサンプルの拡充を試みる。

## 3. 研究の方法

### (1) ALMA 望遠鏡による HVCC の詳細観測

銀河系中心核近傍に我々が発見した 2 つの HVCC (HCN–0.009–0.044 および HCN–0.085–0.094) に対して、ALMA によるサブミリ波帯分子スペクトル線観測を実施し、これら HVCC のより詳細な内部構造や運動、物理状態を調べた。

### (2) 野辺山 45m 望遠鏡による銀河系中心領域の広域サーベイ観測

銀河系中心の分子ガス密集領域 Central Molecular Zone (CMZ) に対して、衝撃波トレーサーで在る SiO  $J=2-1$  輝線をはじめとする複数の分子輝線を用いて、無バイアスな広範なイメージング観測を実施した。

### (3) HVCC 対応天体の探査

MeerKAT で取得された 1.28 GHz 電波連続波イメージをはじめとした様々な波長の広域イメージを精査することにより、他波長対応天体が付随する HVCC の探査を行った。

## 4. 研究成果

### (1) HCN–0.085–0.094 に内包される $10^4$ 太陽質量の IMBH の存在示唆

ALMA により HCN–0.085–0.094 は大きさが 0.2 pc 程度の 3 つの高密度クランプから構成されることが判明し、各々の詳細な空間-速度構造が明らかになった。特にその内の 1 つ (T1) は異常に広い速度幅を有し、リング上の空間構造と急峻な速度勾配を持つ。詳細な運動解析の結果、T1 リングの運動は  $10^4$  太陽質量の点質量周りのケプラー運動で再現できることがわかった (図 1)。同方向に他波長対応天体が検出されないことから、ここに非活動的な中間質量ブラックホールが潜んでいる可能性がある (Takekawa et al. 2020, ApJ, 890, 167)。この成果は、高速度コンパクト雲の起源解明に迫るだけでなく、銀河系中心核近傍に中間質量ブラックホールの候補天体を 1 つ加えたという点で極めて重要である。

### (2) Ultra-compact clump (UCC) の発見および $\sim 10^3$ 太陽質量の IMBH の存在示唆

ALMA で観測された HVCC のデータを精査したところ、同視野内に空間分解能 1 秒角では分解されないほど小型であるにも関わらず速度幅が広い ( $V \sim 50$  km s<sup>-1</sup>) 超小型 HVCC (UCC) を 2 つ検出した。これらの空間分解を目的として、ALMA を使用した約 0.3 秒角分解能のサブミリ波帯スペクトル線観測を実施した。その結果、0.01 pc を切る高分解能観測にも関わらず、これ

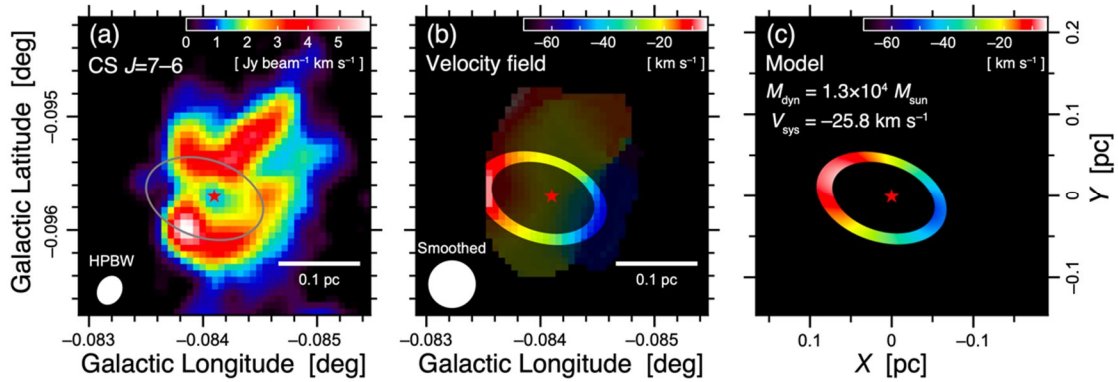


図 1 (a) ALMA により取得した T1 リングの CS  $J=7-6$  輝線積分強度図。(b) T1 リングの平均速度場 (moment-1)。(c)  $1.3 \times 10^4$  太陽質量を焦点としたケプラー軌道モデルで再現された速度場。赤い星印は点重力源の位置を示す。

ら UCC は空間分解されず、極めて小さな構造と異常な速度幅が浮き彫りとなった (図 2)。空間分解はされていないものの、非常に急峻な速度勾配が見られる。この速度勾配は分子雲の回転運動に起因する可能性があり、その場合 UCC1 と UCC2 にはそれぞれ  $\sim 5 \times 10^2$  太陽質量と  $\sim 1 \times 10^3$  太陽質量の見えない質量が潜んでいることになる。同方向には他波長域に対応天体が検出されないことから、ここにも暗い IMBH が潜んでいる可能性がある。今回示唆された質量は、これまでに報告例のない質量範囲にあり、UCC1 および UCC2 は更なる高分解能観測をすべき重要なターゲットである。

### (3) 野辺山 45m 望遠鏡による銀河系中心領域の広域サーベイ観測

CMZ ほぼ全域について、複数の分子輝線による大規模イメージング観測を実施した。観測範囲は銀経  $-1.5^\circ \sim +2.0^\circ$ 、銀緯  $-0.25^\circ \sim +0.25^\circ$  の領域であり、観測輝線は SiO  $J=2-1$ 、CS  $J=2-1$ 、HCN  $J=1-0$  などである。その結果、CMZ 内の衝撃波領域をかつてないスケールで詳細に描き出すことができ、フィラメント状構造やシェル状構造、1-2 pc 程度の小型クランプなど特徴的な分子ガス構造が新たに多数発見された。これら構造は、埋もれた星形成領域や超新星残骸など、銀河系中心領域での物質循環を担う重要な存在であると考えられる。また、中心核から対称的に CMZ の端にゆくにつれ SiO 輝線強度比が増加する特徴的な傾向を発見した。この SiO 比の傾向は、過去 10 万年以内に起きた爆発的な中心核活動の痕跡である可能性があり、銀河系中心の活動史を探る重要な手がかりとなるかもしれない。

### (4) 点状電波源を内包する HVCC の発見

様々なアーカイブデータを精査したところ、MeerKAT 1.28 GHz 連続波イメージで検出された点状電波源が視線に重なる HVCC を 2 つ発見した。そのうちの 1 つはスペクトル指数から非熱的な放射源であることが判明している。現時点ではこれら電波源の正体は不明であるが、電波以外では検出されないことから、radio-loud なブラックホール天体である可能性がある。電波源回りの分子ガスの高速度分散の原因としては、ブラックホール天体からのジェットとの相互作用や、もしくは IMBH による重力加速に起因している可能性がある。点状電波源を対応天体として持つ HVCC の存在は極めて稀であり、更なる観測研究の展開が期待される。

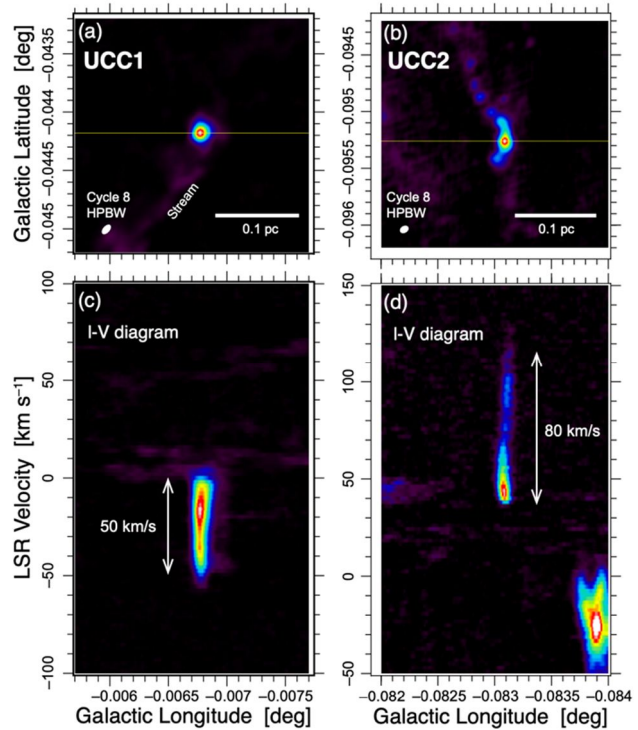


図 2 (a, b) 2 つの UCC (UCC1 および UCC2) の HCN  $J=4-3$  輝線積分強度図。(c, d) パネル(a)および(b)における黄色線に沿って描いた銀経-速度図。

## 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 1件 / うちオープンアクセス 6件）

1. 著者名 Iwata Yuhei, Oka Tomoharu, Takekawa Shunya, Tsujimoto Shiho, Enokiya Rei	4. 巻 950
2. 論文標題 ALMA View of the High-velocity-dispersion Compact Cloud CO 0.02?0.02 at the Galactic Center	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 25 ~ 25
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/acc9b0	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 de la Fuente E., Toledano-Ju?rez I., Kawata K., Trinidad M. A., Yamagishi M., Takekawa S., Tafoya D., Ohnishi M., Nishimura A., Kato S., Sako T., Takita M., Sano H., Yadav R. K.	4. 巻 675
2. 論文標題 Evidence for a gamma-ray molecular target in the enigmatic PeVatron candidate LHAASO J2108+5157	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	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) 10.1051/0004-6361/202346681	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 Shimajiri Yoshito, Kawanishi Yasutomo, Fujita Shinji, Miyamoto Yusuke, Ito Atsushi M, Arzoumanian Doris, Andr? Philippe, Nishimura Atsushi, Tokuda Kazuki, Kaneko Hiroyuki, Takekawa Shunya, Ueda Shota, Onishi Toshikazu, Inoue Tsuyoshi, Nishimoto Shimpei, Yoneda Ryuki	4. 巻 526
2. 論文標題 Predicting reliable H2 column density maps from molecular line data using machine learning	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Monthly Notices of the Royal Astronomical Society	6. 最初と最後の頁 966 ~ 981
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/stad2715	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 Kaneko Miyuki, Oka Tomoharu, Yokozuka Hiroki, Enokiya Rei, Takekawa Shunya, Iwata Yuhei, Tsujimoto Shiho	4. 巻 942
2. 論文標題 Discovery of the Tadpole Molecular Cloud near the Galactic Nucleus	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 46 ~ 46
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aca66a	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 Tsujiimoto Shiho, Oka Tomoharu, Takekawa Shunya, Iwata Yuhei, Uruno Asaka, Yokozuka Hiroki, Nakagawara Ryosuke, Watanabe Yuto, Kawakami Akira, Nishiyama Sonomi, Kaneko Miyuki, Kanno Shoko, Ogawa Takuma	4. 巻 910
2. 論文標題 New Look at the Molecular Superbubble Candidate in the Galactic Center	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 61 ~ 61
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abe61e	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 Yokozuka Hiroki, Oka Tomoharu, Takekawa Shunya, Iwata Yuhei, Tsujimoto Shiho	4. 巻 908
2. 論文標題 Broad-velocity-width Molecular Features in the Galactic Plane	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 246 ~ 246
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abd556	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 Iwata Yuhei, Oka Tomoharu, Tsuboi Masato, Miyoshi Makoto, Takekawa Shunya	4. 巻 892
2. 論文標題 Time Variations in the Flux Density of Sgr A* at 230 GHz Detected with ALMA	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L30 ~ L30
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab800d	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 Takekawa Shunya, Oka Tomoharu, Iwata Yuhei, Tsujimoto Shiho, Nomura Mariko	4. 巻 890
2. 論文標題 The Fifth Candidate for an Intermediate-mass Black Hole in the Galactic Center	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 167 ~ 172
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab6f6f	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 Takekawa Shunya, Oka Tomoharu, Tokuyama Sekito, Tanabe Kyosuke, Iwata Yuhei, Tsujimoto Shiho, Nomura Mariko, Shibuya Yukihiro	4. 巻 71
2. 論文標題 An energetic high-velocity compact cloud: CO-0.31+0.11	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 S21
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psz027	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 Tokuyama Sekito, Oka Tomoharu, Takekawa Shunya, Iwata Yuhei, Tsujimoto Shiho, Yamada Masaya, Furusawa Maiko, Nomura Mariko	4. 巻 71
2. 論文標題 High-resolution CO images of the Galactic central molecular zone	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 S19
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psy150	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21件 (うち招待講演 14件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 竹川俊也、辻本志保、横塚弘樹、岡 朋治、金子美由起、原田ななせ、岩田悠平、榎谷玲依
2. 発表標題 野辺山45m鏡による銀河系中心衝撃波領域の広域探査
3. 学会等名 銀河系中心研究会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹川俊也、辻本志保、横塚弘樹、岡 朋治、金子美由起、原田ななせ、岩田悠平、榎谷玲依
2. 発表標題 Central Molecular Zoneに刻まれた爆発的中心核活動の痕跡
3. 学会等名 天の川銀河研究会2024
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 竹川俊也
2. 発表標題 銀河系中心の分子雲あれこれ
3. 学会等名 坪井先生退官記念 銀河系中心研究会2024 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 竹川俊也、辻本志保、横塚弘樹、金子美由起、岡 朋治、榎谷玲依、岩田悠平
2. 発表標題 野辺山45m鏡による銀河系中心衝撃波領域の広域イメージング観測
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季節年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 銀河系中心核近傍の超小型高速度コンパクト雲
2. 発表標題 竹川俊也、岡 朋治、岩田悠平
3. 学会等名 日本天文学会2022年秋季節年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Shunya Takekawa, Tomoharu Oka, Miyuki Kaneko, Yuhei Iwata
2. 発表標題 Ultra-compact clumps with extremely broad velocity widths in the Galactic center
3. 学会等名 宇宙電波懇談会シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹川俊也
2. 発表標題 銀河系中心核近傍の超小型高速度コンパクト雲
3. 学会等名 ngVLA合同サイエンスワークショップ (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 竹川俊也、岡 朋治、辻本志保、横塚弘樹、金子美由起、岩田悠平
2. 発表標題 高速度分子雲による中間質量ブラックホール探査の可能性
3. 学会等名 JASMINE Consortium Meeting 2021 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 竹川俊也、岡 朋治、辻本志保、横塚弘樹、金子美由起、岩田悠平
2. 発表標題 次世代単一鏡による高速度コンパクト雲の研究
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 Shiho Tsujimoto, Tomoharu Oka, Hiroki Yokozuka, Miyuki Kaneko, Yuto Watanabe Ryosuke Nakagawara, Asaka Uruno, Sonomi Nishiyama, Rei Enokiya, Yuhei Iwata
2. 発表標題 Nobeyama Large Program Report II: Galactic Center
3. 学会等名 ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 竹川俊也
2. 発表標題 銀河系中心領域における中間質量ブラックホール探査の可能性
3. 学会等名 宇宙電波懇談会シンポジウム2021 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 竹川俊也
2. 発表標題 銀河系中心領域の特異分子雲
3. 学会等名 (サブ)ミリ波単一鏡の革新で挑む, 天文学の未解決問題 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shunya Takekawa
2. 発表標題 Report of a 45m Large program
3. 学会等名 ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2020 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹川俊也, 辻元志保, 岡 朋治, 岩田悠平, 横塚弘樹, 渡邊裕人, 中川原峻介, 宇留野麻香, 西山苑実, 金子美由起
2. 発表標題 野辺山45m鏡による銀河系中心分子層の全面イメージング観測
3. 学会等名 Nobeyama Science Workshop 2020 (招待講演)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹川俊也、岡 朋治、岩田悠平、辻本志保、野村真理子
2. 発表標題 ALMA views of high-velocity compact clouds in the Galactic center
3. 学会等名 East-Asian ALMA Science Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹川俊也
2. 発表標題 High frequency studies of the Galactic center
3. 学会等名 East-Asian ALMA Development Workshop 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹川俊也、辻本志保、岡 朋治、岩田悠平、渡邊裕人、中川原峻介、横塚弘樹、宇留野麻香、長谷川哲夫、鳥居和史、坪井昌人
2. 発表標題 Report from Large program 2: Galactic Center
3. 学会等名 ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹川俊也、岡 朋治、岩田悠平、辻本志保、野村真理子
2. 発表標題 Intermediate-mass black hole candidates in the Galactic center
3. 学会等名 Galactic Center Workshop 2019: New Horizons in Galactic Center Astronomy and Beyond (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹川俊也、辻本志保、岡 朋治、岩田悠平、渡邊裕人、中川原峻介、横塚弘樹、宇留野麻香、長谷川哲夫、鳥居和史、坪井昌人
2. 発表標題 High-velocity Compact Clouds in the Galactic Center
3. 学会等名 Nobeyama Science Workshop 令和元年（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹川俊也
2. 発表標題 The Galactic Central Molecular Zone with ASTE
3. 学会等名 Sub-mm Spectroscopy and Large Scale Science with ASTE（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹川俊也
2. 発表標題 銀河系中心領域に発見された中間質量ブラックホールの痕跡
3. 学会等名 東京大学天文学教室談話会（招待講演）
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>天の川銀河中心核近傍で「おたまじゃくし」分子雲を発見 - ブラックホールと戯れ中? -  <a href="https://www.kanagawa-u.ac.jp/cr_att/0011/26307_00.pdf">https://www.kanagawa-u.ac.jp/cr_att/0011/26307_00.pdf</a></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
--	---------------------------	-----------------------	----

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