

平成30年 5月30日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03643

研究課題名(和文) 分子スペクトル線観測に基づく銀河系中心部における中質量ブラックホールの探査

研究課題名(英文) Search for Intermediate-mass Black Holes in the Galactic Center Based on Molecular Line Observations

研究代表者

岡 朋治 (Oka, Tomoharu)

慶應義塾大学・理工学部(矢上)・教授

研究者番号：10291056

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では、大型の電波望遠鏡を駆使して、我々のグループによって銀河系中心領域に発見された「高速度コンパクト雲」の観測研究を強力に推進することにより、同領域に潜む中質量ブラックホールおよび未確認巨大星団の探査を行い、中心核超巨大ブラックホールの形成・進化過程の普遍的描像に迫る事を目的とするものである。3年間の重点的な研究によって、一つの有力な中質量ブラックホール候補天体と、二つの巨大星団候補を発見した。それらに加えて、複数の「見えない」孤立ブラックホール候補天体を、銀河系中心と銀河系円盤部において確認した。これらは、中心核超巨大ブラックホールの形成・成長に寄与する天体群であると考えられる。

研究成果の概要(英文)：This project aims to search intermediate-mass black holes (IMBHs) and unidentified super star clusters (SSCs) which may be embedded in the central molecular zone of our Galaxy. Intensive observations of "high-velocity compact clouds", which have been found by our group, with large millimeter and submillimeter-wave telescopes were performed. During the three years project period, we succeeded to found a promising candidate of IMBH and two SSC candidates. In addition, we detected several candidates for invisible, isolated black holes in the CMZ as well as in the Galactic disk. These might be essential ingredients of galaxies which may contribute to the formation and evolution of supermassive black holes in galactic nuclei.

研究分野：電波天文学

キーワード：電波天文学 銀河中心核 超巨大ブラックホール 中質量ブラックホール 爆発的星形成 巨大星団

1. 研究開始当初の背景

近年の研究から、殆ど全ての銀河は中心に 10^6 - 10^{10} 太陽質量もの超巨大ブラックホール (SMBH) を有する事実が明らかになってきている。中心核 SMBH の形成過程については、銀河中心近傍で起きた爆発的星形成活動によって大量に生じた高密度星団において中質量ブラックホール (IMBH) が誕生し、それらが銀河中心で合体することにより SMBH へと成長する、という階層的形成・成長シナリオが提唱されているが、観測的事実の裏付けに乏しいのが現状である。

大量のガスと塵によって深く覆い隠された我々の銀河系の中心部には、現在3つの巨大星団が一般に認識されている。このうちの一つである中心核星団のほぼ中心、電波源 Sgr A* の位置には約 400 万太陽質量の SMBH があり、星団中の副星団 IRS13E 中には (1-3) 千太陽質量の IMBH が存在する可能性が指摘されている。

このような状況の中で我々のグループは、野辺山 45m 望遠鏡および ASTE 10m 望遠鏡を使用して、銀河系中心領域に対する CO 回転遷移スペクトル線の広域サーベイ観測を展開してきた。これらのサーベイの結果から、空間的にコンパクト ($d < 5$ pc) で極めて速度幅の広い ($\Delta V > 50$ km s⁻¹) 分子雲、「高速度コンパクト雲」(HVCC) を同領域に約 100 個発見した。これらの運動エネルギーは 10^{48} - 10^{52} erg にも上り、多くは高い CO $J=3-2/J=1-0$ 強度比を呈する。この事は、各 HVCC の位置において何らかの局所的なエネルギー注入が為された事を示している。

我々が発見した HVCC のうち、特にエネルギー規模の大きなものについては、早い時期から個別の観測研究が進められた。うち銀河系中心核 Sgr A* に最も近い CO 0.02-0.02 については、明瞭なシェル構造とその内部に点状赤外線源集団が見られる(図 1)ことから、ここに潜む超巨大星団中で起きた多重の超新星爆発がエネルギー源であることが推察された。また、中心核から 60 pc 程度離れた位置にある CO-0.40-0.22 については、点状重力源による散乱運動に特有な急峻な速度勾配が見られることから、内部に 10^5 太陽質量程度の「見えない」点状天体の存在が示唆された。これは、この HVCC CO-0.40-0.22 中に潜む IMBH を間接的に検出した可能性がある。

2. 研究の目的

銀河系の中心領域という近隣に、未確認の巨大星団および IMBH が多数存在することは、同領域における巨大星団の形成・進化過程をつぶさに観察する機会を与えるのみならず、星団中の IMBH 形成、さらには中心核 SMBH の階層的形成・成長シナリオの妥当性を検討する為の絶好の機会を提供するものであり、綿密な計画に基づいた迅速な観測研究の展開が求められている。

本研究課題では、ミリ波サブミリ波帯の分

子スペクトル線による銀河系中心 HVCC の観測研究を強力に推進することにより、同領域の未確認巨大星団および IMBH の理解を深め、中心核 SMBH の形成・進化過程の普遍的描像に迫る事を目的とする。

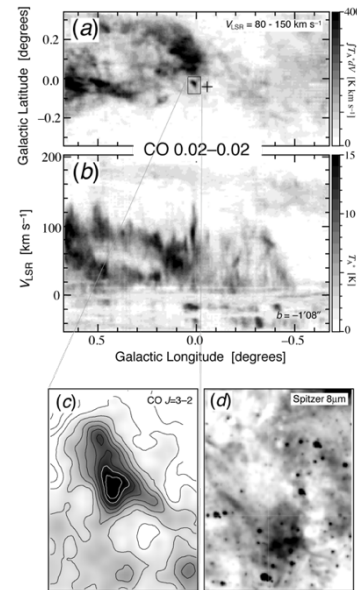


図 1) 銀河系中心核 Sgr A* 近傍の (a) CO $J=1-0$ 輝線速度チャンネル図と (b) 銀経-速度図。CO 0.02-0.02 周辺の (c) CO $J=3-2$ 輝線の積分強度図、および (d) Spitzer 8 μm イメージ。

3. 研究の方法

研究期間内における具体的な獲得目標は、以下の 2 点に集約される。それぞれについて、研究方法とともに記す。

■高速度コンパクト雲(HVCC)の起源解明

単一鏡を駆使したミリ波サブミリ波帯分子スペクトル線広域サーベイ観測により、銀河系中心領域にある高速度ガスの分布を完全に把握する。これによって HVCC の完全なサンプルを取得し、それらの分類および統計的解析から、同領域における高速度ガス生成の起源を解明する。

■中質量ブラックホール(IMBH)存在の確認

膨張シェルを伴わない孤立型 HVCC 方向について、ミリ波サブミリ波干渉計を駆使する事により内部のガス分布・運動を詳細に調べる。これから、これらの内部に巨大な「見えない質量」が潜んでいるという仮説を検証し、その質量分布を正確に把握する事により IMBH の存在を確認する。

4. 研究成果

3 年にわたる研究によって、ほぼ計画通り膨大かつ高品質なデータを取得し、研究計画に沿って数多くの成果を得た。以下にそれらを列挙する。

(1) ミリ波サブミリ波帯 CO 輝線サーベイ

(雑誌論文 1,9; 学会発表 5,8,18,19,28,36,37)

野辺山宇宙電波観測所 45 m 望遠鏡を使用した ^{13}CO , C^{18}O $J=1-0$ 輝線、および James Clerk

Maxwell Telescope (JCMT)を使用した CO $J=3-2$, HCN $J=4-3$ 輝線による高空間分解能・広域サーベイ観測はほぼ完了し、既存の単一鏡によって入手可能なミリ波サブミリ波帯 CO 輝線データは全て十分なクオリティで取得できた。

(2) 高速度コンパクト雲の同定

(雑誌論文 9; 学会発表 23)

取得した大規模 CO データの中から、高速度コンパクト雲(HVCC)を自動的に同定するアルゴリズムを開発した。これを野辺山 45 m 望遠鏡で取得した CO $J=1-0$ データに適用し、約 100 個の HVCC 候補を同定し、その統計的性質を調べた。

(3) 中質量ブラックホール候補天体の発見

(雑誌論文 2,4,6,8,13,14; 学会発表 1,4,8,14,24,27,30,31; 報道発表 2,5)

野辺山 45 m 望遠鏡、ASTE 10 m 望遠鏡、ALMA を使用して、著しく広い速度幅を有する孤立 HVCC CO-0.40-0.22 の詳細観測を進めた。その形態・運動の詳細な解析から、内部に 10^5 太陽質量の「見えない質量」がある可能性を指摘した。さらに ALMA データの詳細な解析から、当該分子雲の中心付近に一つの点状連続波電波源を発見した(図2)。これは CO-0.40-0.22 の駆動源である中質量ブラックホール本体である可能性がある。

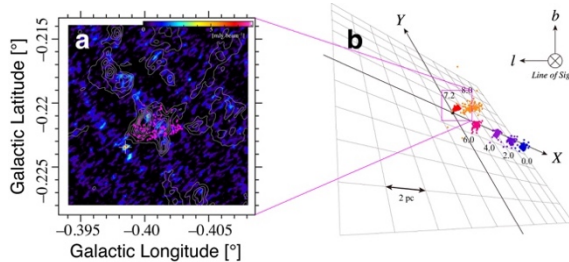


図2 (a) ALMA による 266 GHz 連続波(カラー)および HCN $J=3-2$ 輝線イメージ(等高線)。(b) 重力多体シミュレーションの結果。各時間ステップの粒子分布が色分けして表示しており、時間の単位は 10 万年。

(4) シェル型 HVCC の詳細研究

(雑誌論文 1; 学会発表 8,11,12; 報道発表 1)

野辺山 45 m 望遠鏡、ASTE 10 m 望遠鏡を使用して、明瞭な膨張シェル構造を有する $L=-1.2^\circ$ 領域の観測を進めた。その結果、同領域は少なくとも 5 つの膨張シェルを内包し、その年齢が東から西に向かって増加していることが見出された。この事は、ここに 10^{5-6} 太陽質量の巨大星団が潜んでおり、周囲の分子ガスに対して東向きに 200 km s^{-1} 程度の相対速度で運動していることを意味している。

(5) 小型 HVCC の発見

(雑誌論文 3; 学会発表 8,13,25.; 報道発表 3)

JCMT を使用した観測から、銀河系中心核 Sgr A* から数 pc 離れた位置に、二つの非常に小型の HVCC (HCN-0.009-0.044 および HCN-0.085-0.094) を検出した。これらの形態・運動と運動エネルギーから、それぞれ 10 太陽質量以上のブラックホールが 100 km s^{-1} 以上

の速度で分子雲に突入した結果生じた構造という解釈に至った。この事は、同領域に多数の孤立ブラックホールが高速で飛び交っていることを示唆する結果である。

(6) 中心核円盤と分子雲の物理的接触の発見

(雑誌論文 7,11,17,18; 学会発表 29,35,38)

野辺山 45 m 望遠鏡、ASTE 10 m 望遠鏡による観測データから、銀河系中心の核周円盤(Circumnuclear disk; CND)と隣接する巨大分子雲 M-0.13-0.08 が物理的に接触している証拠を発見した。このような接触により、分子雲が角運動量を失い、中心核への質量供給が促進される可能性がある。

(7) 円盤部での超高速分子ガス成分の発見

(雑誌論文 8,10; 学会発表 3,22; 報道発表 4)

野辺山 45 m 望遠鏡、ASTE 10 m 望遠鏡を使用した観測によって、超新星残骸 W44 に付随する分子雲内で、速度幅 120 km s^{-1} 以上にも及ぶ超小型な分子ガス成分“bullet”を発見した(図3)。これは、位置速度図上で特徴的な“Y”字の形態を呈し、その運動エネルギーは超新星爆発によってこの立体角に分配されるエネルギー量と比較して 2 桁近く高い。明確な対応天体が見られないこと等から、30 太陽質量以上のブラックホールが分子雲中の超新星残骸膨張シェルに高速突入した結果この bullet が生じたという仮説を提唱した。

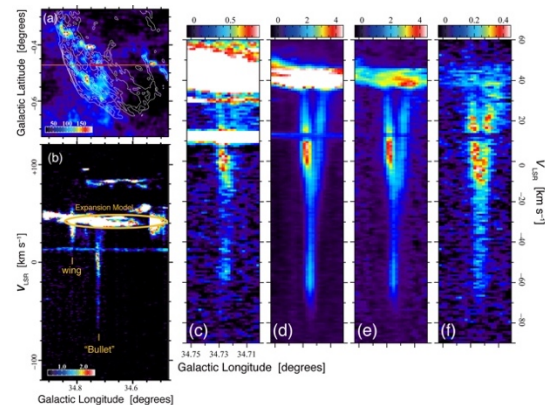


図3 (a) 超新星残骸 W44 方向の CO $J=3-2$ 輝線強度(カラー)と 1.4 GHz 連続波強度イメージ(等高線)。(b) 銀緯 -0.472° における CO $J=3-2$ 輝線銀緯-速度図。(c-f) Bullet 部分の銀緯-速度拡大図。左から順に CO $J=1-0$, CO $J=3-2$, CO $J=4-3$, HCO+ $J=1-0$ 。

(8) ブラックホール突入分子雲の磁気流体力学シミュレーション

(学会発表 2,15,20)

分子雲に高速で突入するブラックホールの磁気流体力学(MHD)シミュレーションを行い、先の bullet および小型 HVCC の形態・運動の再現を試みた。その結果、理性的なパラメータ範囲内で、観測事実がよく再現できることが分かった。

(9) 銀河系中心核 Sgr A*電波強度変動の検出

(雑誌論文 5; 学会発表 7,21,34)

超長基線干渉計(Very Long Baseline Array; VLBA)によって取得された Sgr A* の 43 GHz 連続波データを詳細に解析し、強度変動およ

びその周期性に有無を検討した。その結果、有意な 10.2, 14.6, 32.1 分の周期性を検出した。これを、円盤の準周期的振動モデルと比較し他結果、中心核ブラックホール質量を 430 万質量と仮定した場合、そのスピンパラメータが 0.56 と評価された。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 20 件)

1. "Detection of Another Molecular Bubble in the Galactic Center", S. Tsujimoto, T. Oka, S. Takekawa, M. Yamada, S. Tokuyama, Y. Iwata, & J. A. Roll, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 856 巻, 91-95 (2018)
2. "Millimetre-wave emission from an intermediate-mass black hole candidate in the Milky Way", T. Oka, S. Tsujimoto, Y. Iwata, M. Nomura, & S. Takekawa, *Nature Astronomy*, 査読有, 1 巻, 709-721 (2017)
3. "Discovery of Two Small High-velocity Compact Clouds in the Central 10 pc of Our Galaxy", S. Takekawa, T. Oka, Y. Iwata, S. Tokuyama, & M. Nomura, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有, 843 巻, L11-L15 (2017)
4. "Distance to the Low-velocity Cloud in the Direction of the High-velocity Compact Cloud CO-0.40-0.22", Y. Iwata, H. Kato, D. Sakai, & T. Oka, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 840 巻, 18-21 (2017)
5. "Possible Detection of Quasi-Periodic Oscillations from Sgr A* at 43 GHz", Y. Iwata, T. Oka, & M. Miyoshi, "The Multi-Messenger Astrophysics of the Galactic Centre, Proc. IAUS, 査読無, 322 巻, 50-51 (2017)
6. "Signature of an Intermediate-Mass Black Hole in the Central Molecular Zone of Our Galaxy", T. Oka, R. Mizuno, K. Miura, & S. Takekawa, "The Multi-Messenger Astrophysics of the Galactic Centre, Proc. IAUS, 査読無, 322 巻, 119-122 (2017)
7. "Physical Contact between the +20 km s⁻¹ Cloud and the Galactic Circumnuclear Disk", S. Takekawa, T. Oka, & K. Tanaka, "The Multi-Messenger Astrophysics of the Galactic Centre, Proc. IAUS, 査読無, 322 巻, 145-146 (2017)
8. "Kinematics of the Ultra-High-Velocity Gas in the Expanding Molecular Shell Adjacent to the W44 Supernova Remnant", M. Yamada, T. Oka, K. Tanaka, M. Nomura, S. Takekawa, Y. Iwata, S. Tokuyama, K. Tanabe, S. Tsujimoto, & M. Furusawa, "The Multi-Messenger Astrophysics of the Galactic Centre, Proc. IAUS, 査読無, 322 巻, 151-153 (2017)
9. "Statistical Study of High-Velocity Compact Clouds Based on the Complete CO Imagings of the Central Molecular Zone", S. Tokuyama, T. Oka, S. Takekawa, M. Yamada, Y. Iwata, & S. Tsujimoto, "The Multi-Messenger Astrophysics of the Galactic Centre, Proc. IAUS, 査読無, 322 巻, 154-155 (2017)
10. "Kinematics of Ultra-high-velocity Gas in the Expanding Molecular Shell Adjacent to the W44 Supernova Remnant", M. Yamada, T. Oka, S. Takekawa, Y. Iwata, S. Tsujimoto, S. Tokuyama, M. Furusawa, K. Tanabe, & M. Nomura, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有, 834 巻, L3(6pp) (2017)
11. "Physical Contact between the +20 km s⁻¹ Cloud and the Galactic Circumnuclear Disk", S. Takekawa, T. Oka, & K. Tanaka, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 834 巻, 121-130
12. "Caravan-Submm, Black Hole Imager in the Andes", M. Miyoshi, T. Kasuga, J. K. Ishitsuka Iba, T. Oka, M. Sekido, K. Takefuji, M. Takahashi, H. Saida, & R. Takahashi, *Advances in Astronomy*, 査読有, 8306494 巻, 1-11 (2016)
13. "銀河系中心のもう一つのブラックホール", 岡 朋治, パリティ, 査読無, 32 巻, 58-60 (2016)
14. "Signature of an Intermediate-mass Black Hole in the Central Molecular Zone of Our Galaxy", T. Oka, R. Mizuno, K. Miura, & S. Takekawa, *The Astrophysical Journal Letters*, 査読有, 816 巻, L7(5pp) (2016)
15. "Caravan-Submm, Black Hole Imager in the Andes", M. Miyoshi, T. Kasuga, J. K. Ishitsuka Iba, T. Oka, M. Sekido, K. Takefuji, M. Takahashi, H. Saida, & R. Takahashi, *Advances in Astronomy*, 査読有, 2016 巻, 830649 (2016)
16. "Spectral Line Survey and Mapping Observations toward the HVCC CO-0.40-0.22", T. Oka, R. Mizuno, K. Miura, S. Takekawa, & K. Tanaka, "Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year", ASPC, 査読無, 499 巻, 175-175 (2015)
17. "Millimeter-wave Spectral Line Surveys Toward the Galactic Circumnuclear Disk and Sgr A*", S. Takekawa, T. Oka, K. Tanaka, S. Matsumura, K. Miura, & D. Sakai, "Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year", ASPC, 査読無, 499 巻, 173-173 (2015)
18. "Deep Mapping Observations of the Galactic Circumnuclear Disk with Two Single-dish Telescopes", S. Takekawa, T. Oka, K. Tanaka, S. Matsumura, K. Miura, & D. Sakai, "Revolution in Astronomy with ALMA: The Third Year", ASPC, 査読無, 499 巻, 171-171 (2015)
19. "CO-0.30-0.07: A Peculiar Molecular Clump with an Extremely Broad Velocity Width in the Central Molecular Zone of the Milky Way", K. Tanaka, M. Nagai, K. Kamegai, & T. Oka, *The Astrophysical Journal*, 査読有, 806 巻, 130(13pp) (2015)
20. "Giant Molecular Clouds with High Abundance of Atomic Carbon and Cyano Radical in the Milky Way's Central Molecular Zone", K. Tanaka, T. Oka, & K. Kamegai, IAU General Assembly, Meeting #29, 査読無, 2231774 (2015)

[学会発表] (計 40 件)

1. 「高速度コンパクト雲 CO-0.40-0.22 中に発見された点状電波源の観測的研究」、岩田悠平, 岡 朋治, 杉本知穂, 竹川俊也, 田邊恭介, 三好真, 日本天文学会 2018 年春季年会、千葉大学(千葉県千葉市)、2018 年 3 月 15 日
2. 「超新星残骸 W44 超高速分子雲の起源 II:磁気流体シミュレーション」、野村真理子, 岡 朋治, 山田真也, 竹川俊也, 大須賀 健、

- 高橋博之、朝比奈雄太、日本天文学会 2018 年春季年会、千葉大学(千葉県千葉市)、2018 年 3 月 15 日
3. 「超新星残骸 W44 超高速度分子雲の起源 I; ALMA による詳細観測」、田邊恭介、岡 朋治、野村真理子、竹川俊也、山田真也、高倉隼人、日本天文学会 2018 年春季年会、千葉大学(千葉県千葉市)、2018 年 3 月 15 日
 4. 「分子雲観測による銀河系中心領域における中間質量ブラックホールの発見」、岡 朋治、第一回 missing black hole ワークショップ、京都大学(京都府京都市)、2017 年 11 月 7 日 (招待講演)
 5. 「銀河の中心に潜むもの」、岡 朋治、関西学院大学理工学部講演会、関西学院大学(兵庫県三田市)、2017 年 10 月 21 日 (招待講演)
 6. "Galactic Center Studies with ALMA Long Baselines", Tomoharu Oka, ALMA Long Baseline Workshop, Kyoto (Japan), 3-5 October 2017 (招待講演)
 7. 「銀河系中心大質量ブラックホール SgrA* の 350 GHz 帯短期強度変動」、三好真、朝木義晴、坪井昌人、上原顕太、加藤成晃、松元亮治、岡 朋治、岩田悠平、高橋真聡、日本天文学会 2017 年秋季年会、北海道大学(北海道札幌市)、2017 年 9 月 12 日
 8. "Signature of Past Star Forming Activity in the Central Molecular Zone of Our Galaxy", Tomoharu Oka, SFDE17: from Local Clouds to Distant Galaxies, Quy Nhon (Vietnam), 7-11 August 2017 (招待講演)
 9. 「電波観測による銀河系内大中小ブラックホール探査」、岡 朋治、ブラックホール地平面勉強会 <銀河系中心と JASMINE>、慶應義塾大学日吉キャンパス(神奈川県横浜市)、2017 年 7 月 20 日 (招待講演)
 10. 「銀河系内のブラックホール候補天体」、岡 朋治、慶應科学講演会シリーズ、慶應義塾大学日吉キャンパス(神奈川県横浜市)、2017 年 4 月 21 日 (招待講演)
 11. 「CO 多輝線観測による Proto-superbubble 候補天体 $L=-1.2^\circ$ 領域の詳細研究」、辻本志保、岡 朋治、竹川俊也、山田真也、岩田悠平、徳山碩斗、日本天文学会 2017 年春季年会、九州大学伊都キャンパス(福岡県福岡市)、2017 年 3 月 17 日
 12. 「最新の分子輝線データに基づく高速度コンパクト雲 CO 0.02-0.02 の新解釈」、岩田悠平、岡 朋治、竹川俊也、徳山碩斗、辻本志保、日本天文学会 2017 年春季年会、九州大学伊都キャンパス(福岡県福岡市)、2017 年 3 月 17 日
 13. 「銀河系核周円盤近傍における複数の小型高速度コンパクト雲の発見」、竹川俊也、岡 朋治、野村真理子、岩田悠平、徳山碩斗、辻本志保、日本天文学会 2017 年春季年会、九州大学伊都キャンパス(福岡県福岡市)、2017 年 3 月 17 日
 14. 「高速度コンパクト雲 CO-0.40-0.22 中における点状電波源の発見」、岡 朋治、岩田悠平、野村真理子、竹川俊也、山田真也、徳山碩斗、日本天文学会 2017 年春季年会、九州大学伊都キャンパス(福岡県福岡市)、2017 年 3 月 16 日
 15. 「超新星残骸 W44 超高速度成分の磁気流体シミュレーション」、野村真理子、岡 朋治、山田真也、竹川俊也、大須賀 健、高橋博之、朝比奈雄太、日本天文学会 2017 年春季年会、九州大学伊都キャンパス(福岡県福岡市)、2017 年 3 月 16 日
 16. 「銀河面サブミリ波輝線サーベイ観測で探すコンパクト天体」、岡 朋治、南極で切り開くテラヘルツ天文学、国立極地研究所(東京都立川市)、2017 年 3 月 3 日 (招待講演)
 17. 「銀中研究に関する僕の本音」、岡 朋治、宇宙電波懇談会シンポジウム、国立天文台(東京都三鷹市)、2017 年 2 月 22 日 (招待講演)
 18. 「銀河系の辺縁から中心を見る」、岡 朋治、公開講座『地方の力と「再生」』、慶應義塾大学日吉キャンパス(神奈川県横浜市)、2016 年 10 月 29 日 (招待講演)
 19. 「天の川銀河の中心では何が起きているか?」、岡 朋治、朝日カルチャーセンター「銀河研究の最前線」、朝日カルチャーセンター横浜教室(神奈川県横浜市)、2016 年 9 月 17 日 (招待講演)
 20. 「超新星残骸 W44 分子雲中に発見された超高速度成分の数値流体計算」、野村真理子、岡 朋治、山田真也、竹川俊也、日本天文学会 2016 年秋季年会、愛媛大学城北キャンパス(愛媛県松山市)、2016 年 9 月 15 日
 21. 「銀河系中心核 Sgr A* の 43 GHz 帯における光度曲線の周期性解析」、岩田悠平、岡 朋治、三好 真、日本天文学会 2016 年秋季年会、愛媛大学城北キャンパス(愛媛県松山市)、2016 年 9 月 15 日
 22. 「CO, HCO⁺ 回転遷移輝線による SNR W44 超高速度成分の観測的研究 (II)」、山田真也、岡 朋治、野村真理子、竹川俊也、岩田悠平、田鍋圭介、辻本志保、徳山碩斗、古澤舞子、日本天文学会 2016 年秋季年会、愛媛大学城北キャンパス(愛媛県松山市)、2016 年 9 月 15 日
 23. 「高速度コンパクト雲自動同定アルゴリズムの開発と統計的解析」、徳山碩斗、岡 朋治、竹川俊也、山田真也、岩田悠平、辻本志保、古澤舞子、日本天文学会 2016 年秋季年会、愛媛大学城北キャンパス(愛媛県松山市)、2016 年 9 月 14 日
 24. 「ALMA による高速度コンパクト雲 CO-0.40-0.22 の高分解能イメージング」、岡 朋治、竹川俊也、山田真也、岩田悠平、徳山碩斗、日本天文学会 2016 年秋季年会、愛媛大学城北キャンパス(愛媛県松山市)、2016 年 9 月 14 日
 25. 「銀河系核周円盤周辺の HCN サブミリ波輝線イメージング」、竹川俊也、岡 朋治、岩田悠平、徳山碩斗、田中邦彦、日本天文学会 2016 年秋季年会、愛媛大学城北キャン

- パス(愛媛県松山市)、2016年9月14日
26. 「銀河の中心に潜むもの」、岡 朋治、野辺山宇宙電波観測所 特別公開 2016 特別講演会「ブラックホールを探す旅に出かけよう」、国立天文台野辺山(長野県南佐久郡)、2016年8月27日(招待講演)
 27. "Signature of an Intermediate-Mass Black Hole in the Central Molecular Zone of Our Galaxy", Tomoharu Oka, IAUS 322: The Multi-Messenger Astrophysics of the Galactic Centre, Palm Cove (Australia), 18-22 July 2016
 28. 「銀河の中心に潜むもの」、岡 朋治、慶應科学講演会シリーズ、慶應義塾大学日吉キャンパス(神奈川県横浜市)、2016年4月25日(招待講演)
 29. 「銀河系核周円盤と M-0.13-0.08 との物理的接触の発見」、竹川俊也、岡 朋治、田中邦彦、日本天文学会 2016 年春季年会、首都大学東京(東京都八王子市)、2016年3月14日
 30. 「銀河系中心領域に発見された中質量ブラックホール候補天体」、岡 朋治、国立天文台談話会、国立天文台(東京都三鷹市)、2016年2月26日(招待講演)
 31. 「銀河系中心領域に発見された中質量ブラックホール候補天体」、岡 朋治、Nano-JASMINE & 小型 JASMINE 合同サイエンスワークショップ、国立天文台(東京都三鷹市)、2016年1月27日(招待講演)
 32. "Galactic Center Studies in the ALMA Era", Tomoharu Oka, East Asian ALMA Science Workshop 2015, I-site Namba (Osaka, Japan), 8-11 November 2015 (招待講演)
 33. 「南極と THz と銀中」、岡 朋治、南極で切り拓くテラヘルツ天文学、国立天文台(東京都三鷹市)、2015年11月19日(招待講演)
 34. 「三好 VLBI データを用いた QPO 探査」、岩田悠平、岡 朋治、他、「第 29 回ブラックホール地平面勉強会」研究会、慶應義塾大学日吉キャンパス(神奈川県横浜市)、2015年9月14日(招待講演)
 35. 「+20 km/s 雲から CND への質量供給」、竹川俊也、岡 朋治、他、「第 29 回ブラックホール地平面勉強会」研究会、慶應義塾大学日吉キャンパス(神奈川県横浜市)、2015年9月14日(招待講演)
 36. 「慶應大学の銀河中心研究成果報告」、岡 朋治、「第 29 回ブラックホール地平面勉強会」研究会、慶應義塾大学日吉キャンパス(神奈川県横浜市)、2015年9月14日(招待講演)
 37. 「銀河の中心に潜むもの」、岡 朋治、第 27 回理工学部技術系職員研修発表会、慶應義塾大学矢上キャンパス(神奈川県横浜市)、2015年9月2日(招待講演)
 38. "Mass Feeding toward the Galactic Nucleus Probed by Molecular Lines", S. Takekawa, T. Oka, et al., NRO-ALMA Science/Development Workshop 2015, Nobeyama Radio Observatory (Japan), 28-30 July 2015
 39. "The Galactic Center - Recent Progress and

Future Perspectives - ", Tomoharu Oka, NRO-ALMA Science/Development Workshop 2015, Nobeyama Radio Observatory (Japan), 28-30 July 2015

40. 『銀河系中心「高速度コンパクト雲」研究の新展開』、岡 朋治、九州天文ゼミ 土曜日セミナー、JR 博多シティ(福岡県福岡市)、2015年5月30日(招待講演)

[図書] (計 1 件)

1. 「銀河の中心に潜むもの ブラックホールと重力波の謎にいどむ」、岡 朋治、慶應義塾大学出版会 (2018)

[報道発表] (計 5 件)

1. 「天の川銀河の中心領域に過去の大爆発の証拠 -もうひとつの超巨大星団か?-」、辻本志保、岡 朋治 (2018年3月29日; 慶應義塾大学)、URL: <https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/2018/3/29/28-43280/>
2. 「天の川銀河で中質量ブラックホール候補の実体を初めて確認」、岡 朋治 (2017年9月5日; 慶應義塾大学、国立天文台)、URL: <https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/2017/9/5/28-23915/>、<https://www.nao.ac.jp/news/science/2017/20170905-alma.html>
3. 「天の川銀河中心部で新たに 2 つの「野良ブラックホール」候補を発見」、竹川俊也、岡 朋治 (2018年7月18日; 慶應義塾大学)、URL: <https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/2017/7/18/28-21984/>
4. 「天の川を撃ち抜く超音速の『弾丸』を発見 - 正体は「野良ブラックホール」か?-」、山田真也、岡 朋治 (2017年1月16日; 慶應義塾大学、国立天文台)、URL: <https://www.keio.ac.jp/ja/press-releases/2017/1/16/28-19413/>、<https://www.nao.ac.jp/news/science/2017/20170116-aste.html>
5. 「天の川銀河の中で二番目に大きなブラックホールを発見」、岡 朋治、(2016年1月15日; 慶應義塾大学、国立天文台)、URL: https://www.keio.ac.jp/ja/press_release/2015/osa3qr000001bq8l.html、<https://www.nao.ac.jp/news/science/2016/20160115-nro.html>

[その他]

ホームページ等

1. 慶應義塾大学理工学部物理学科岡研究室 web ページ、URL: <http://aysheaia.phys.keio.ac.jp/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡 朋治 (OKA TOMOHARU)

慶應義塾大学・理工学部・教授
研究者番号: 10291056

(2) 研究分担者

該当なし

(3) 連携研究者

該当なし