

令和 6 年 6 月 18 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2023

課題番号：18K03709

研究課題名（和文）銀河団からブラックホールに至る冷たいガスの流れとAGNの活動性の研究

研究課題名（英文）Cold Accretion from the Core of Galaxy Clusters to Super Massive Black Holes and Its Relation with AGN Activity

研究代表者

永井 洋 (Nagai, Hiroshi)

国立天文台・アルマプロジェクト・准教授

研究者番号：00455198

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究は、銀河団中心銀河における質量降着機構を、銀河スケールから活動銀河核の核周領域にわたって観測的に調べたものである。本研究では、アルマ望遠鏡を使ったNGC 1275の観測により、銀河スケールから核周領域に向かう低温分子ガスのフィラメントの存在と、核周領域に低温分子ガスの核周円盤が形成されていることを発見した。さらに、核周円盤で発生する超新星爆発が引き起こす乱流により、中心へのさらなる分子ガス降着が発生している可能性を明らかにした。銀河団中心銀河では、高温プラズマが球対称降着することで活動銀河核への質量供給が行われていると従来は考えられていたが、我々の研究はその予想を覆す結果となった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銀河とブラックホールの共進化において、活動銀河核（AGN）からのエネルギーフィードバックは不可欠な要素である。銀河団の中心銀河では、AGNジェットがその役割を担っていると考えられる。一方で、ジェットによるフィードバックと、AGNの活動を継続するための質量降着をどのように両立するかは未解明である。我々の研究は、ジェットによるフィードバックがある環境下でも大量の冷たい分子ガスが存在しうること、そして、その分子ガスがAGNの活動に本質的な役割を果たしている可能性を示した。

研究成果の概要（英文）：Using the data from Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), we revealed the circumnuclear disk of cold molecular gas with a radius of 100 pc and surrounding cold gas filaments at kpc scale in NGC 1275, which is the nearby representative of the central galaxies in galaxy clusters. Such molecular gas structures are consistent with recent numerical simulations that demonstrate cold gas inflow as a dominant role of mass fueling to supermassive black holes in the central galaxy systems. We also detected synchrotron emission probably due to the ensemble of supernova remnants in the circumnuclear disk. With the aid of supernova-driven turbulence model, we conclude that such supernovas can drive gas turbulence that leads to cold gas accretion onto the further inner region.

研究分野：電波天文学

キーワード：活動銀河核 巨大質量ブラックホール ブラックホール降着流 銀河団 電波観測 アルマ望遠鏡 VLB

(1) 研究開始当初の背景

巨大質量ブラックホールへの質量降着によって活動がトリガーされる活動銀河核 (AGN) は、降着円盤からの強い放射圧によって引き起こされるアウトフロー、相対論的な高エネルギープラズマの流れ「ジェット」等、様々な形態で周辺環境に大量のエネルギー・質量を供給する。この現象は AGN フィードバックとして知られ、銀河・銀河団を構成する物質に影響を与えることから、銀河の巨大化を抑制する有力なメカニズムとして考えられている。また、この過程は、大量に星を形成するガスリッチな銀河から、星形成が不活発な楕円銀河への進化や、銀河とブラックホールの共進化を生む要因にもなっていると考えられている。

銀河団中心のような比較的密度が高い環境では、X線制動放射による放射冷却のタイムスケールが宇宙年齢よりも短く、銀河団中心に向かう冷たいガスの流れ「クーリングフロー」が形成されると、かつては考えられていた。しかし、理論的に予想される 100[太陽質量/年] を超えるクーリングフローの痕跡は、ほとんど観測されていない (e.g., Makishima et al. 2001)。近年では、AGN フィードバックがクーリングフローを止める役割として機能していると、多くの研究者が考えている。銀河団の中心に存在する巨大楕円銀河は、しばしば強い相対論的ジェットを噴出する。ジェット・ローブと銀河団ガスの相互作用によって生じる音波・衝撃波が銀河団ガスを温め、銀河団中心のガスの冷却を抑制しているという説が有力候補の一つとして考えられている。一方で、ジェット現象を含めた AGN 活動を持続させるためには、ブラックホールへの質量降着を一定期間継続させなければいけない。つまり、銀河・銀河団へと供給されたがエネルギーの一部が再びブラックホールへと向かう、フィードバックループが形成される必要がある。しかし、フィードバックループがどのような形で実現されるのかという点は、ほとんどわかっていなかった。

研究開始当初、アルマ望遠鏡の観測により、複数の銀河団中心で、予想外に大量の分子ガスの存在が明らかになってきていた。また数値実験からも、かつて予言されていたクーリングフローほどではないが、銀河団ガス中の乱流によって引き起こされる熱的不安定性によって、分子ガスが形成され、中心銀河に向けた低温ガス降着流 (Chaotic Cold Accretion: CCA) が発生することが示唆されていた (e.g., Gaspari et al. 2013)。こうした分子ガスが中心銀河やその AGN に降着することで、AGN の活動に本質的な影響を与えることが議論され始めていた。しかし、当時、ほとんどの観測はキロパーセクスケールの分子ガスの分布や運動までしか明らかになっておらず、より AGN に近い領域の観測が望まれていた。

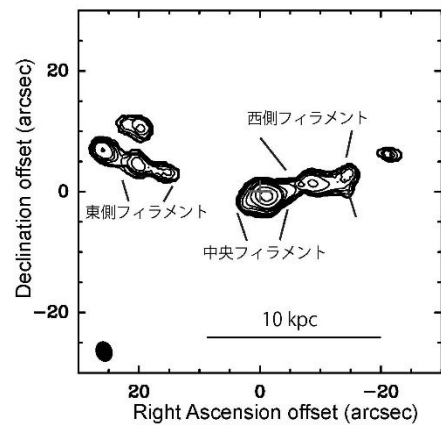


図 1: SMA によって観測された NGC-1275 の CO 輝線強度分布 (Lim et al. 2008, Nagai et al. 2019 の図を一部改変)。図中の原点は、AGN の位置に相当し、左下の楕円はビームサイズを表す。

(2) 研究の目的

銀河団中心銀河において、銀河スケールの分子ガスがどのように AGN へ降着していくかを明らかにするのが本研究の目的である。この研究のためには、なるべく近傍の天体を選択するのが得策だ。そこで我々は最近傍の銀河団の一つであるペルセウス座銀河団の中心銀河 NGC 1275 の着目し、研究を行うことにした。他の中心銀河と同様、これまでの観測ではキロパーセクスケールに $10^{10} M_{\odot}$ もの分子ガスの存在が知られていたが、従来の望遠鏡では分解能不足により、さらに内側の領域は全くわかっていなかった (図 1)。未だ明らかになっていない低温ガス降着流の実体を、アルマによる低温分子ガス観測から探り、銀河団か

らブラックホール近傍(中心 1 パーセクスケール)に至るフィードバックループの存在を明らかにするのが、本研究の最終ゴールである。NGC 1275 の巨大質量ブラックホールの重力的影響が及ぶ範囲(Bondi 半径)が約 10 パーセクであることを考慮すると、1 パーセクスケールにおける低温分子ガスの存在を明確にすることが、AGN の活動性との関係を明らかにする決定打となる。本研究は、i) 100 パーセクスケール、ii) 10 パーセクスケール、iii) 1 パーセクスケールと、大きく分けて 3 段階のステップを踏み、適切な観測手法を見極める。本申請では、i)、ii)までを完了し、将来アルマが最高分解能を達成した際()に、iii)に取り組む。

)提案時点では最高分解能は達成されていなかった

(3) 研究の方法

アルマの共同利用観測サイクル5で、一酸化炭素輝線 CO(2-1)、シアン化水素輝線 HCN(3-2)、ホルミルイオン輝線 HCO+(3-2)の3つの分子輝線の観測を行った。観測の分解能は約 30 パーセクを達成した。これらの分子輝線の輝線強度分布から、分子ガスの空間構造を測定するとともに、輝線のドップラー効果を用いて、視線方向のガスの運動を測定した。CCA を再現した数値実験によると、中心 1 キロパーセク以内では強い放射冷却によって、降着流は熱的に不安定になり、低温ガスがフィラメントやプロップ状の構造を形成し、極めて非一様になるとされている。こうした数値実験からの予言を、アルマの観測データを用いて検証を行った。以下、アルマデータの解析から得られた成果と、当初は予想していなかった研究の発展について述べる。

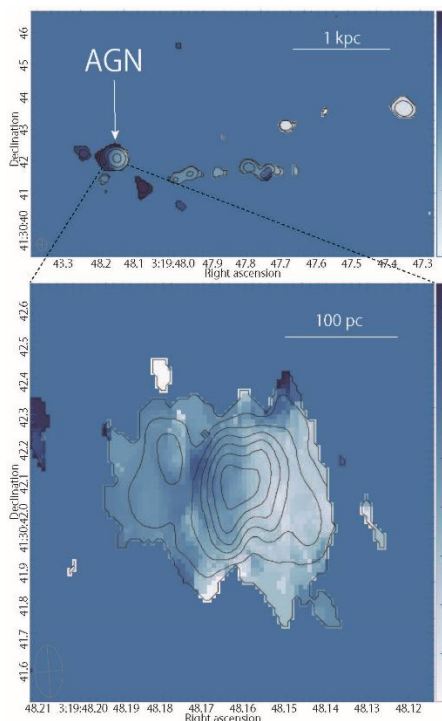


図2：等高線はCO(2-1)輝線の積分強度図，カラーは速度分布(単位 km s^{-1})を表す。上図は、干渉計の短基線データに重みをかけてイメージングした画像で、kpc スケールの構造を示したもの。図1で示した中央フィラメントの領域に相当する。ビームサイズは $0.4'' \times 0.3''$ 。AGN の位置から主に西側に複数のフィラメント・クランプ状のガス雲が見て取れる。下図はAGN 付近の核周領域のみに着目した画像。ビームは $0.14'' \times 0.08''$ 。北東から南西にかけて方位角 70° に速度勾配が観測され、回転円盤を示唆する。

(4) 研究成果

フィラメント構造と核周円盤の発見

図2にアルマ観測で得たCO輝線の積分強度分布・速度分布を示す。図2の上図では、フィラメントのほとんどは過分解され、全貌を見ることができないが、図1で示したSMA観測で1本のフィラメントのように見えていた領域は、一直線上にないいくつかの副構造(サ

ブフィラメント) からなり、しかもそれぞれの副構造が異なる速度成分を持つことがわかった (Nagai et al. 2019)。CCA の数値実験でも、このような構造が形成されることが示唆されていて、kpc スケールの分子ガスが CCA 由来であることを支持している。一番の発見だったのは、中心 100 パーセク以内に、円盤状のガスの分布が見られたことである (図 2 下図)。方位角 70 度の方向に速度分布の勾配が見られ、回転するガス円盤であることを示唆する。以降、この分子ガス円盤を核周円盤と呼ぶ。CO 輝線強度から見積もられる核周円盤全体の分子ガス質量は約 $10^8 M_{\odot}$ になる。楕円銀河は一般的にガスが少ないと言われるが、 $10^8 M_{\odot}$ は近傍宇宙で見られる星形成銀河の核周領域の分子ガス質量と遜色がなく、NGC 1275 の核周領域に大量の分子ガスが存在することが明らかになった。CCA によって落ちてきたガスの角運動量が卓越し、このような円盤を形成したのかもかもしれない。そのような描像も実際に数値実験によって確認されている (Gaspari et al. 2015)。

核周円盤は幾何学的に薄く、運動学的粘性によって円盤内のガスの角運動量輸送が行われていると仮定した場合、ガス降着のタイムスケール (τ) は $\tau = r / c_s \sim r / v$ と見積もることができる。ここで、 r は円盤半径、 ν は粘性係数、 c_s は円盤ガス中の音速、 v はガスの速度分散である。この τ を用いて、円盤ガスの質量降着率は $\dot{M} \sim M / \tau$ と見積もることができる。CO 輝線強度から分子ガス質量への変換の際に使用する変換係数の値にも依存するが、 $\dot{M} \sim 1-10 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ となる。NGC 1275 の AGN 光度は $10^{44} \text{ erg s}^{-1}$ で、放射効率 0.1 を仮定した場合に必要な質量降着率は $0.1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ であることから、AGN 光度を説明するのに十分な質量降着率であることがわかる。

興味深いことに、核周円盤の速度勾配から示唆される回転軸と、VLBI で観測されているジェットの噴出方向 (Nagai et al. 2014) がほぼ一致する。ジェットはブラックホールの事象の地平線スケールに存在する降着円盤の回転軸方に噴出すると考えられる。10-100 パーセクスケールにおける核周円盤と事象の地平線スケール ($\ll 1$ パーセク) の降着円盤という、空間スケールが大きく異なる二つの円盤の回転軸がほぼ一致するということは、核周円盤が降着円盤の角運動量を決定していることを示唆する。このことから、核周領域の分子ガスが AGN の活動を特徴づける重要な役割を果たしていると考えられる。

吸収線から探る AGN 近傍のガス分布

高密度ガスのトレーサーである HCN(3-2)、 $\text{HCO}^+(3-2)$ 輝線の観測では、CO 輝線では見られなかった吸収線を検出することに成功した。NGC 1275 には、明るい連続波電波源 3C 84 が存在する。そして、電波連続波の 90% 以上を、2005 年頃から噴出が始まったジェットからの放射が担っている。このジェットの全長は、アルマ望遠鏡の観測時点で約 1 パーセクであった。これほどコンパクトな背景光に対して吸収線が観測されるには、母銀河スケールの分子雲ではなく、背景光付近に存在する分子雲が吸収を担っていると考えるのが妥当である。しかも、この吸収線は、NGC 1275 の系の速度に対して $300-600 \text{ km s}^{-1}$ で青方偏移していることから、観測者に向かって飛んでいることになる。この状況を説明するもっともなシナリオは、ブラックホールから 1 パーセク付近にある分子雲がジェットと衝突した結果、観測者の方向に飛んでいると考えると都合がよい。ジェットの進行方向、すなわち、核周円盤の赤道面から垂直な方向にそのような分子雲がなぜ存在しているのかは定かではないが、CCA によって供給された分子ガスという可能性が考えられる。あるいは、AGN からの輻射圧によって核周円盤のガスの一部が赤道面から垂直方向に吹き上げられたものかもしれない。いずれにしても、分子ガスが 1 パーセクの領域にまで及んでいることは確実に考えられる。

超新星爆発による角運動量輸送

アルマ望遠鏡による観測によって、核周領域に大量の分子ガスが存在すること、さらに

その一部は少なくとも 1 pc スケールにまで及んでいることを明らかにした。しかし、これらはあくまで分子ガスが存在することを示したにとどまっており、どのような機構でガスを降着させるかには迫っていない。分子ガスは粘性が極めて小さいため、核周円盤中の角運動量を抜くためには、別の粘性が必要となる。核周円盤における星形成によって大質量星が作られている場合、超新星爆発によって乱流が形成され、ガスの降着を促す要因となることが理論的に予想されている (Kawakatu & Wada 2008; Kawakatu et al. 2020)。核周円盤からは、HCN(3-2)、 $\text{HCO}^+(3-2)$ のような高密度ガストレーサーも検出されていることから、実際に星形成が行われている可能性が高い。超新星爆発が発生すると非熱的電子が供給されるため、核周円盤に付随したシンクロトロン放射が観測されるはずである。

この推論を確かめるために、330 MHz という非常に低い周波数で観測した VLBI データを解析したところ、予想通り、円盤に付随するシンクロトロン放射を検出することに成功した (図 3、Nagai & Kawakatu 2021)。シンクロトロン放射の光度から見積もられる星形成率は $3 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ となった。SN 乱流モデルと見積もられた星形成率を用いて、超新星爆発によって作られる乱流速度を見積もることが可能である。川勝等 (Kawakatu et al. 2008, Kawakatu et al. 2020) のモデルをもとにすると、乱流速度は 24 km s^{-1} であることがわかった。この乱流速度は、アルマ望遠鏡で観測された分子ガスの速度分散 (25 km s^{-1}) と非常によく一致する。つまり、超新星爆発によって駆動される乱流によって角運動量輸送が起こっていると考えて矛盾しない。この研究は当初は予定していなかったが、分子ガスの空間構造・速度構造以外の観点からも、冷たいガスの降着と AGN の活動の関係をさらに深める研究へと発展させることができた。

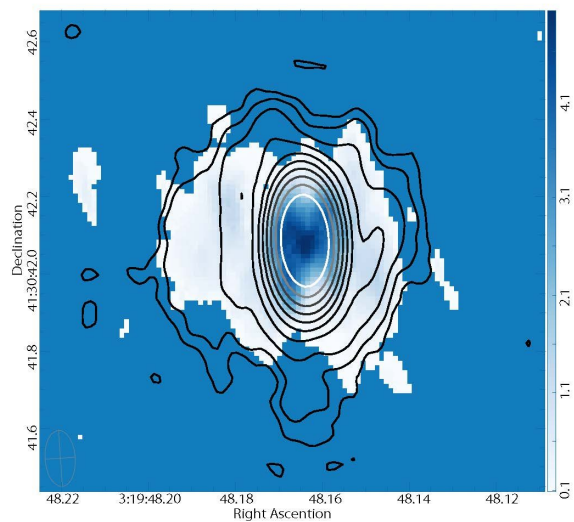


図 3: カラーは CO 積分強度 (単位 $\text{Jy beam}^{-1} \text{ km s}^{-1}$) と等高線は 330-MHz 連続波強度分布を表す。CO 積分強度は図 2(下) と同一。核周円盤にわたって超新星爆発起源と考えられる連続波放射 (シンクロトロン放射) が検出された。

文献

- Makishima et al. 2001, PASJ, 53, 401
- Gaspari et al. 2013, MNRAS, 432, 3401
- Lim et al. 2008, ApJ, 672, 252
- Nagai et al. 2019, ApJ, 883, 193
- Gaspari et al. 2015, A&A, 579, 62
- Nagai et al. 2014, ApJ, 785, 53
- Kawakatu & Wada 2008, ApJ, 681, 73
- Kawakatu et al. 2020, ApJ, 889, 84
- Nagai & Kawakatu 2021, ApJ, 914, L11

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計25件（うち査読付論文 25件／うち国際共著 22件／うちオープンアクセス 13件）

1. 著者名 Okino Hiroki, Akiyama Kazunori, Asada Keiichi, Gomez Jose L., Hada Kazuhiro, Honma Mareki, Krichbaum Thomas P., Kino Motoki, Nagai Hiroshi, Bach Uwe, Blackburn Lindy, Bouman Katherine L., et al.	4. 巻 940
2. 論文標題 Collimation of the Relativistic Jet in the Quasar 3C 273	5. 発行年 2022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/ac97e5	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 Fujita Yutaka, Kawakatu Nozomu, Nagai Hiroshi	4. 巻 924
2. 論文標題 Massive Molecular Gas as a Fuel Tank for Active Galactic Nuclei Feedback In Central Cluster Galaxies	5. 発行年 2022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/ac31a6	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 Kino Motoki, Niinuma Kotaro, Kawakatu Nozomu, Nagai Hiroshi, Giovannini Gabriele, Orienti Monica, Wajima Kiyooki, D' Ammando Filippo, Hada Kazuhiro, Giroletti Marcello, Gurwell Mark	4. 巻 920
2. 論文標題 Morphological Transition of the Compact Radio Lobe in 3C 84 via the Strong Jet-Cloud Collision	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L24 ~ L24
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac24fa	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 Nagai H., Kawakatu N.	4. 巻 914
2. 論文標題 Diffuse Synchrotron Emission Associated with the Starburst in the Circumnuclear Disk of NGC 1275	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L11 ~ L11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ac03ba	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 Akiyama Kazunori et al. including Hiroshi Nagai	4. 巻 910
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. VII. Polarization of the Ring	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L12~L12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/abe71d	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 Cortes Paulo C., Le Gouellec Valentin J. M., Hull Charles L. H., Girart Josep M., Louvet Fabien, Fomalont Edward B., Kamenoi Seiji, Moellenbrock George A., Nagai Hiroshi, Nakanishi Kouichiro, Villard Eric	4. 巻 907
2. 論文標題 The Explosion in Orion-KL as Seen by Mosaicking the Magnetic Field with ALMA	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 94~94
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abcafb	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 Psaltis Dimitrios et al. including Hiroshi Nagai	4. 巻 125
2. 論文標題 Gravitational Test beyond the First Post-Newtonian Order with the Shadow of the M87 Black Hole	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 141104-141113
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.125.141104	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 Fujita Yutaka, Nagai Hiroshi, Akahori Takuya, Kawachi Akiko, Okazaki Atsuo T	4. 巻 72
2. 論文標題 ALMA observations of PSR B1259-63/LS 2883 in an inactive period: Variable circumstellar disk?	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 L9-L14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psaa067	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 Hull Charles L. H., Cortes Paulo C., Gouellec Valentin J. M. Le, Girart Josep M., Nagai Hiroshi, Nakanishi Kouichiro, Kameno 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 094501 ~ 094501
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 Wielgus Maciek et al. including Hiroshi Nagai	4. 巻 901
2. 論文標題 Monitoring the Morphology of M87* in 2009-2017 with the Event Horizon Telescope	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 67 ~ 67
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abac0d	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 Isobe Naoki, Sunada Yuji, Kino Motoki, Koyama Shoko, Tashiro Makoto, Nagai Hiroshi, Pearson Chris	4. 巻 899
2. 論文標題 Herschel SPIRE Discovery of Far-infrared Excess Synchrotron Emission from the West Hot Spot of the Radio Galaxy Pictor A	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 17 ~ 17
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab9d1c	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 Kim Jae-Young et al. including Hiroshi Nagai	4. 巻 640
2. 論文標題 Event Horizon Telescope imaging of the archetypal blazar 3C 279 at an extreme 20 microarcsecond resolution	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A69 ~ A69
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/202037493	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 Gold Roman et al. including Hiroshi Nagai	4. 巻 897
2. 論文標題 Verification of Radiative Transfer Schemes for the EHT	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 148 ~ 148
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab96c6	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 Broderick Avery E. et al. including Hiroshi Nagai	4. 巻 897
2. 論文標題 THEMIS: A Parameter Estimation Framework for the Event Horizon Telescope	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 139 ~ 139
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab91a4	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 Orienti M, Migliori G, Brunetti G, Nagai H, D'Ammando F, Mack K-H, Prieto M A	4. 巻 494
2. 論文標題 Jansky VLA observations of synchrotron emitting optical hotspots of 3C 227 and 3C 445 radio galaxies	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 2244 ~ 2253
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/mnras/staa777	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 Roelofs F. et al. including Hiroshi Nagai	4. 巻 636
2. 論文標題 SYMBA: An end-to-end VLBI synthetic data generation pipeline	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astronomy & Astrophysics	6. 最初と最後の頁 A5 ~ A5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1051/0004-6361/201936622	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 Nagai H., Onishi K., Kawakatu N., Fujita Y., Kino M., Fukazawa Y., Lim J., Forman W., Vrtilik J., Nakanishi K., Noda H., Asada K., Wajima K., Ohyama Y., David L., Daikuhara K.	4. 巻 883
2. 論文標題 The ALMA Discovery of the Rotating Disk and Fast Outflow of Cold Molecular Gas in NGC 1275	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 193 ~ 193
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab3e6e	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 The Event Horizon Telescope Collaboration	4. 巻 875
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L1 ~ L1
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab0ec7	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 The Event Horizon Telescope Collaboration	4. 巻 875
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. II. Array and Instrumentation	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L2 ~ L2
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab0c96	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 The Event Horizon Telescope Collaboration	4. 巻 875
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. IV. Imaging the Central Supermassive Black Hole	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L4 ~ L4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab0e85	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 The Event Horizon Telescope Collaboration	4. 巻 875
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. III. Data Processing and Calibration	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L3~L3
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab0c57	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 The Event Horizon Telescope Collaboration	4. 巻 875
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. V. Physical Origin of the Asymmetric Ring	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	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/ab0f43	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 The Event Horizon Telescope Collaboration	4. 巻 875
2. 論文標題 First M87 Event Horizon Telescope Results. VI. The Shadow and Mass of the Central Black Hole	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 L6~L6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ab1141	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 Punsly Brian, Marziani Paola, Bennert Vardha N., Nagai Hiroshi, Gurwell Mark A.	4. 巻 869
2. 論文標題 Revealing the Broad Line Region of NGC 1275: The Relationship to Jet Power	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 143~143
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaec75	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 Nakamura Masanori, Asada Keiichi, Hada Kazuhiro, Pu Hung-Yi, Noble Scott, Tseng Chihyin, Toma Kenji, Kino Motoki, Nagai Hiroshi, et al.	4. 巻 868
2. 論文標題 Parabolic Jets from the Spinning Black Hole in M87	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 146 ~ 146
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aaeb2d	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9件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 永井洋, 川勝望, 大西響子, 土居明広, 泉拓磨, 紀基樹, 磯部直樹, 中西康一郎, 笹田真人, Monica Orienti
2. 発表標題 2型セイファート銀河NGC 5506におけるAGNアウトフローからの非熱的放射の検出
3. 学会等名 日本天文学会2022秋季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroshi Nagai
2. 発表標題 Radio View of Circumnuclear Region from Centimeter to Millimeter
3. 学会等名 Black hole astrophysics with VLBI 2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroshi Nagai, Nozomu Kawakatu
2. 発表標題 Imaging Diffuse Synchrotron Emission Associated with Supernova Explosions in the Circumnuclear Disk of NGC 1275
3. 学会等名 East Asia AGN Workshop 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 永井 洋、川勝 望
2. 発表標題 NGC 1275核周円盤における超新星爆発起源の電波放射の発見
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Hiroshi Nagai
2. 発表標題 ALMA Sees the Heart of Perseus
3. 学会等名 East Asia ALMA Science WS 2019 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 永井 洋
2. 発表標題 ALMAによるNGC1275 の分子ガス核周円盤と高速アウトフローの発見
3. 学会等名 日本天文学会秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Hiroshi Nagai
2. 発表標題 Inflow and Outflow (Jets) in NGC 1275
3. 学会等名 IAU Symposium 342, Perseus in Sicily: from black hole to cluster outskirts (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Nagai
2. 発表標題 Review of AGN Observations with ALMA
3. 学会等名 East-Asia AGN Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi Nagai
2. 発表標題 Cold vs. Hot Accretion in BCG System?: Cold Gas Properties within 100-pc Circumnuclear Region of NGC 1275
3. 学会等名 East-Asia ALMA Science Workshop (国際学会)
4. 発表年 2018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			
スウェーデン	Chalmers University of Technology			
中国	The University of Hong Kong			
米国	Harvard-Smithsonian CfA			
韓国	KASI			
その他の国・地域：台湾	ASIAA			