

令和 2 年 6 月 10 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2019

課題番号：15K05030

研究課題名(和文)(サブ)ミリ波による合体銀河中の塵に埋もれたエネルギー源診断法の確立

研究課題名(英文) Establishing a (sub)millimeter energy diagnostic method of deeply buried energy sources in merging galaxies

研究代表者

今西 昌俊 (IMANISHI, MASATOSHI)

国立天文台・ハワイ観測所・助教

研究者番号：00311176

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：ガスをたくさん持つ銀河同士の衝突/合体は宇宙で頻繁に起こっている現象であり、その際に多くの星が作られ、加えて、銀河の中心に元々存在していた超巨大ブラックホールに物質が盛んに落ち込み、質量が急激に増加すると考えられている。空間的に広がった星生成活動は調べやすいものの、物を飲み込んでいる活動的な超巨大ブラックホールはサイズの小さいため、すぐに物質の奥深くに埋もれてしまい、観測的に見つけることが難しいという大きな問題が存在していた。我々は物質による吸収の影響が小さな(サブ)ミリ波で、星生成と活動的な超巨大ブラックホールが周囲の物質に与える影響の違いを見出し、両者を識別する世界独自の手法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

超巨大ブラックホールは、2019年4月に影の撮影の成果がマスメディアを通じて大々的に社会にリリースされ、多くの国民が知る存在となった。しかし、その大きな質量(太陽の1000万倍以上)をどのように作り出すかという問題は未解決のまま残っている。ガスを豊富に持つ銀河同士の合体の最中に、超巨大ブラックホールに大量に物が落ち込んで質量が大きく成長するという理論が広く提唱されているが、その現場は物質の奥深くに埋もれていて観測が難しいという大きな問題が存在していた。本研究では、物質による吸収の影響が小さな(サブ)ミリ波で、これまでの問題を解決する世界でも独自の手法を開発したという点で意義が大きい。

研究成果の概要(英文)：Merging of gas-rich galaxies is common in our universe. During such galaxy merger process, it is expected that not only many stars are formed, but also material accretes onto a pre-existing supermassive black hole (SMBH) and such a SMBH (1) becomes active, (2) emits strong radiation from the surrounding accretion disk, and (3) grows in mass rapidly. Although star-formation activity can be observationally probed easily, compact active SMBHs in gas-rich merging galaxy nuclei are very difficult to detect, because they are hidden behind a large amount of material. We established a powerful method to differentiate star-formation and active SMBHs, through their different feedback to the surrounding molecular gas, at the almost-dust-extinction-free (sub)millimeter wavelength.

研究分野：天文学・宇宙物理学

キーワード：超巨大ブラックホール サブミリ波 赤外線銀河 分子ガス 活動銀河中心核 星生成 合体銀河 化学組成

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

4. 研究開始当初の背景

太陽の 1000 億倍以上もの光度を赤外線で放射している赤外線銀河は、強力なエネルギー源が塵の向こう側に隠されて存在する天体である。エネルギー源としては、星生成活動（活発に生成される星内部で起こる核融合反応によるエネルギー生成）、及び、活動銀河中心核（AGN）活動（超巨大ブラックホールへ物質が落ち込む際の重力エネルギーを放射に変換して明るく輝く活動）が考えられる。赤外線銀河は、赤方偏移が 1 を超える遠方宇宙（現在から 75 億年以上前の宇宙）では、宇宙全体からの赤外線放射を支配していることがわかっており、赤外線銀河という種族の塵に隠されたエネルギー源の正体を明らかにすることは、宇宙全体の塵に隠された側での星生成史、超巨大ブラックホール質量の成長の歴史の解明と密接に関係する。しかしながら、赤外線銀河では、サイズの小さな AGN（質量降着している超巨大ブラックホール）が塵の奥深くにすぐに埋もれてしまい、きちんと見つけ出すことが困難になるという大きな問題が存在していた。

2. 研究の目的

本研究では、塵吸収の影響の小さな(サブ)ミリ波に基づく観測から、見つけるのが難しい埋もれた AGN のエネルギー的役割を、星生成活動ときちんと区別して正しく見積もる独自の手法を確立させることを目標とした。そのような AGN の存在、活動性を確認することができれば、超巨大ブラックホールが激しく質量成長中であることを意味するからである。

3. 研究の方法

AGN は星生成活動に比べて X 線放射が強く、加えて、高温の塵も大量に作られる。これらの性質の違いにより、周囲の分子ガスへの物理的/化学的影響が異なり、従って、その分子ガスが放射する様々な輝線の強度比も異なることが期待される。(サブ)ミリ波には多くの代表的な分子の回転遷移の輝線が存在し、しかも塵による吸収の影響が極めて小さいことから、合体銀河の奥深くに埋もれた、質量成長中の超巨大ブラックホールを正しく検出し、その役割、影響を見積もる目的に有効だと期待される。我々は、ALMA 干渉計を用いて、合体銀河の中心核に大量に存在すると考えられている高密度分子ガスの(サブ)ミリ波での輝線を用いた観測から、本目的に迫った。

4. 研究成果

我々は 5 年間の研究から、主に以下の研究成果を得て、8 編の主著査読論文(Imanishi et al.)として世界に公表した。他に、活動的な超巨大ブラックホールの研究テーマに関する 63 編の共著査読論文も出版した。

(1). 合体銀河の中心核は、高密度の分子ガスが質量を支配していると考えられているが、そのような分子ガスを正しく調べることができるシアン化水素(HCN)とホルミルイオン(HCO⁺)の(サブ)ミリ波での複数の回転遷移の輝線を用い、活動的な超巨大ブラックホールでは前者の輝線が系統的に強いことを、ALMA 望遠鏡による観測から確認した。その物理的理由として、HCN の組成比が大きくなっていること、高温かつ高密度の分子ガスによる励起が充分効いていることを明らかにした。一部の研究者が提唱している赤外線放射励起の寄与は小さいことも定量的な計算から示した(参考文献: Imanishi et al. 2016 ApJ 825 44; Imanishi et al. 2016 AJ 152 218; Imanishi et al. 2017 ApJ 849 29; Imanishi et al. ApJ 856 143)。

(2). ALMA 望遠鏡を用いた高い空間分解能の高密度分子ガス輝線の観測から、合体銀河の中心核で特に HCN 輝線が強くなっていることを明らかにした。塵に隠された活動的な超巨大ブラックホールによる影響だと解釈した。重要な点は、赤外線などの他の波長で、活動的な超巨大ブラックホールの存在が確認されていた銀河だけでなく、全く兆候のなかった合体銀河でもその傾向を見つけており、吸収の影響が極めて小さな(サブ)ミリ波で初めて見つかった、塵の非常に奥深くに埋もれた活動的な超巨大ブラックホールであると解釈される。(サブ)ミリ波観測が最も強力な手法になり得ることを示した(参考文献: Imanishi et al. 2019 ApJS 241 19)。

(3). 銀河合体の直後や周囲の塵の量が比較的少ない場合は、中心の超巨大ブラックホールが全方向完全に隠されるのではなく、ドーナツ状の塵に囲まれていると考えられている。このような構造体があれば、様々な観測事実を自然に説明できるために存在するはずだと、30 年以上前から提唱されてきたが、サイズの非常に小さくて観測的確認は困難であった。我々は ALMA 望遠鏡を用いた近傍の活動的な超巨大ブラックホールの非常に高空間分解能の高密度分子ガス輝線の観測から、回転しているドーナツ状の構造を世界で初めて鮮明に描き出すことに成功した。ALMA 望遠鏡のホームページに研究成果が紹介された (<https://alma-telescope.jp/news/press/m77-201802>)。 (参考文献: Imanishi et al. 2016 ApJL 822 L10; Imanishi et al. 2018 ApJL 853 L25)。

(4). すばる望遠鏡を用いた赤外線の高空間分解能の撮像観測から、複数の活動的な超巨大ブラックホールが存在する合体銀河をいくつか見つけた。銀河合体の数値計算で予言されていたように、質量の大きな超巨大ブラックホールほど、軽いものに比べて、物を激しく飲み込んで質量を急激に成長させていることを定量的に明らかにした。しかし、合体銀河中の複数の活動的な超巨大ブラックホールの検出率は、塵吸収の影響の比較的小さな赤外線でも、理論予想に比べてまだ小さい。ALMA 望遠鏡による(サブ)ミリ波観測データとの比較から、塵の非常に奥深くに埋もれた活動的な超巨大ブラックホールは、赤外線観測でも見落としているケースがあることを明らかにした。吸収の影響が赤外線よりもさらに小さな(サブ)ミリ波での観測の重要性をさらに支持する結果を得た(参考文献: Imanishi et al. 2020 ApJ 891 140)。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計71件（うち査読付論文 71件 / うち国際共著 55件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Imanishi Masatoshi、Nakanishi Kouichiro、Izumi Takuma	4. 巻 856
2. 論文標題 ALMA Multiple-transition Observations of High-density Molecular Tracers in Ultraluminous Infrared Galaxies	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 143 (55pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/aab42f	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 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 (33pp)
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 -

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 (7pp)
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 -

1. 著者名 Imanishi Masatoshi、Nakanishi Kouichiro、Izumi Takuma	4. 巻 822
2. 論文標題 ALMA 0.1-0.2 arcsec Resolution Imaging of the NGC 1068 Nucleus: Compact Dense Molecular Gas Emission at the Putative AGN Location	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L10 (7pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8205/822/1/L10	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 Imanishi Masatoshi、Nakanishi Kouichiro、Izumi Takuma	4. 巻 825
2. 論文標題 ALMA Investigation of Vibrationally Excited HCN/HCO+/HNC Emission Lines in the AGN-Hosting Ultraluminous Infrared Galaxy IRAS 20551-4250	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 44 (20pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-637X/825/1/44	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 Imanishi Masatoshi、Nakanishi Kouichiro、Izumi Takuma	4. 巻 152
2. 論文標題 ALMA HCN and HCO+ J=3-2 Observations of Optical Seyfert and Luminous Infrared Galaxies: Confirmation of Elevated HCN-to-HCO+ Flux Ratios in AGNs	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 The Astronomical Journal	6. 最初と最後の頁 218 (39pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/0004-6256/152/6/218	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 Imanishi Masatoshi、Nakanishi Kouichiro、Izumi Takuma	4. 巻 241
2. 論文標題 ALMA Spatially Resolved Dense Molecular Gas Survey of Nearby Ultraluminous Infrared Galaxies	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Supplement Series	6. 最初と最後の頁 19 (34pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4365/ab05b9	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 Imanishi Masatoshi、Kawamuro Taiki、Kikuta Satoshi、Nakano Suzuka、Saito Yuriko	4. 巻 891
2. 論文標題 Subaru Infrared Adaptive Optics-assisted High-spatial-resolution Imaging Search for Luminous Dual Active Galactic Nuclei in Nearby Ultraluminous Infrared Galaxies	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 140 (16pp)
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab733e	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35件（うち招待講演 3件 / うち国際学会 13件）

1. 発表者名 Imanishi, Masatoshi
2. 発表標題 ALMA reveals a rotating dense molecular torus in NGC 1068
3. 学会等名 TORUS 2018 The many faces of the AGN obscuration (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Imanishi, Masatoshi
2. 発表標題 ALMA reveals a rotating dense molecular torus in NGC 1068
3. 学会等名 East-Asia AGN Workshop 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今西昌俊, 中西康一郎, 泉拓磨, 和田桂一
2. 発表標題 NGC1068におけるAGN周囲の回転高密度分子ガストーラスの発見
3. 学会等名 日本天文学会 2018年秋季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今西昌俊, 中西康一郎, 泉拓磨
2. 発表標題 ALMAによる超高光度赤外線銀河の空間分解した高密度分子ガス観測
3. 学会等名 日本天文学会 2019年春季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Masatoshi Imanishi
2. 発表標題 ALMA molecular line observations as a tool to scrutinize elusive deeply buried AGNs in luminous infrared galaxies
3. 学会等名 Elusive AGNs in the next era (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Masatoshi Imanishi
2. 発表標題 ALMA molecular gas observations of luminous infrared galaxies as a tool to scrutinize elusive deeply buried AGNs
3. 学会等名 Behind the Curtain of Dust II - The molecular and multi-wavelength view of activity in (U)LIRGs (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今西昌俊、中西康一郎、泉拓磨
2. 発表標題 ALMAによる近傍赤外線銀河の高密度分子ガス観測、及び、エネルギー源診断
3. 学会等名 日本天文学会 2017年秋季年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今西昌俊、中西康一郎、泉拓磨
2. 発表標題 ALMAによる赤外線銀河IRAS20551 - 4250の系統的高密度分子ガス観測
3. 学会等名 日本天文学会 2018年春季年会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 今西昌俊、中西康一郎、泉拓磨
2. 発表標題 ALMAによる近傍AGN NGC1068のトールスに付随する分子ガスの検出
3. 学会等名 日本天文学会 2016年秋季年会
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masatoshi Imanishi
2. 発表標題 ALMA Molecular Line Observations of the Nuclei of Ultraluminous Infrared Galaxies and Optical Seyfert Galaxies
3. 学会等名 Half a Decade of ALMA: Cosmic Dawns Transformed (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masatoshi Imanishi
2. 発表標題 ALMA molecular gas observations of luminous infrared galaxies as a tool to scrutinize elusive deeply buried AGNs
3. 学会等名 Hidden Monsters : Obscured AGN and Connections to Galaxy Evolution (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Masatoshi Imanishi
2. 発表標題 ALMA Molecular Gas Observations of Luminous Infrared Galaxies as a Tool to Scrutinize Elusive Deeply-Buried AGNs
3. 学会等名 Molecular Gas in Galactic Environments (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 今西昌俊、中西康一郎、泉拓磨
2. 発表標題 ALMAによる赤外線銀河IRAS20551-4250の赤外線放射励起の研究
3. 学会等名 日本天文学会 2015年秋季年会
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Masatoshi Imanishi
2. 発表標題 ALMA observations of molecular gas in the close vicinity of AGNs
3. 学会等名 Torus 2015 The unification scheme after 30 years (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Masatoshi Imanishi
2. 発表標題 Optically-elusive buried dual AGN population in infrared-luminous gas/dust-rich galaxy mergers and implication for feedback to galaxies
3. 学会等名 Demographics and environment of AGN from multi-wavelength surveys (国際学会)
4. 発表年 2015年

1. 発表者名 Imanishi Masatoshi
2. 発表標題 ALMA spatially-resolved dense molecular line observations of nearby ultraluminous infrared galaxies
3. 学会等名 Behind the Curtain of Dust III - The Multi-Wavelength View of the Dust Enshrouded Evolution of Galaxies (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Imanishi Masatoshi
2. 発表標題 ALMA dense molecular gas survey of nearby ultraluminous infrared galaxies
3. 学会等名 Views on the ISM in galaxies in the ALMA era (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Imanishi Masatoshi
2. 発表標題 Molecular gas around actively mass-accreting supermassive black holes
3. 学会等名 next generation VLA workshop (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Imanishi Masatoshi
2. 発表標題 Luminous buried AGNs in merging ultraluminous infrared galaxies revealed with Subaru and ALMA
3. 学会等名 SUBARU TELESCOPE 20TH ANNIVERSARY — Optical & Infrared Astronomy for the Next Decade — (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今西昌俊、川室太希、菊田智史、中野すずか、清藤祐理子
2. 発表標題 すばる望遠鏡赤外線多色撮像観測による合体銀河中の複数AGNの探査
3. 学会等名 日本天文学会 2020年春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 吉岡岳洋、渥美直也、宇野孔起、杣津萌、松田有輝、齋藤駿也、品川玲央、丹羽綾子、松井瀬奈、水越翔一郎、松野允郁、今西昌俊、川室太希、美濃和陽典
2. 発表標題 Gaia DR2 と分光観測による高速度星の運動の解析
3. 学会等名 日本天文学会 2020年春季年会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>活動的な超巨大ブラックホールを取り巻くガスと塵のドーナツ https://alma-telescope.jp/news/press/m77-201802 Rotating Dusty Gaseous Donut around an Active SMBH https://alma-telescope.jp/en/news/press/m77-201802</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