

令和 6 年 5 月 30 日現在

機関番号：30107

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2023

課題番号：20K14526

研究課題名（和文）アルマ望遠鏡で解剖するサブミリ波銀河の内部構造

研究課題名（英文）Spatially Resolving Submillimeter galaxies with ALMA

研究代表者

但木 謙一（Tadaki, Ken-ichi）

北海学園大学・工学部・准教授

研究者番号：30726435

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では大質量銀河がどのようにして楕円銀河へと進化するのかを解き明かすため、アルマ望遠鏡を用いて遠方宇宙にある楕円銀河の祖先となるような銀河の観測を行った。観測対象は大きく分けて2種類で、赤方偏移2にある複数の大質量銀河と赤方偏移6にある1天体の大質量銀河である。異なる時代の楕円銀河の祖先において、銀河中心部のバルジを形成している過程を観測的に明らかにした。またジェームズウェッブ宇宙望遠鏡の打ち上げに先駆けて、銀河中の重元素量の測定に成功した。

途中COVID-19によるアルマ望遠鏡の運用停止などがあったものの、研究期間を通じて筆頭著者として3本の査読論文を発表することができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

筆頭著者として発表した3本の論文のうち1つについては、アルマ望遠鏡のホームページでプレスリリースを行った。現在私たちの身の回りに当たり前のように存在している窒素や酸素といった元素は宇宙誕生時には存在しておらず、宇宙の歴史と共にこれらの重元素が増えてきたことを多くの人に知ってもらうことができた。

研究成果の概要（英文）：In this research project, we used the ALMA telescope to observe galaxies that could be precursors of elliptical galaxies in the distant Universe, in order to unravel how massive galaxies evolve into elliptical galaxies. The targets are broadly divided into two galaxy populations: multiple massive galaxies at $z=2$ and a single massive galaxy at $z=6$. We have observed the formation process of a bulge in the central regions of elliptical galaxy ancestors from different epochs. We also successfully measured the abundance of heavy elements in galaxies in preparation for the launch of the James Webb Space Telescope.

Despite challenges such as the interruption of ALMA telescope operations due to COVID-19, I managed to publish three peer-reviewed papers as lead author during the research period.

研究分野：天文学

キーワード：銀河天文学

1. 研究開始当初の背景

銀河はその形態によって『円盤形』と『楕円形』の2つに大きく部類することができ、ハッブル系列と呼ばれる。円盤銀河では新たな星が次々と作られている一方で、楕円銀河は古い星から構成されているという特徴が知られている。現在の宇宙に存在する巨大楕円銀河も宇宙における星形成活動が最も盛んであった赤方偏移 $z=2-4$ (100-120 億年前) の時代には、円盤形で活発に星々を作っていたと考えられている。『過去の星形成銀河がどのような物理過程を経て、楕円銀河へと進化したのか?』という疑問に答えることができれば、銀河進化の全容を解明したと言える。

2. 研究の目的

サブミリ波で明るく輝くサブミリ波銀河は、星形成率が天の川銀河の数百から数千倍と非常に高く、その爆発的な星形成活動の大部分は中心 1-2 キロパーセクのコンパクトな領域で起きていることがわかってきた。そのため遠方宇宙に存在するサブミリ波銀河は、赤方偏移 $z=1-2$ の時代で発見されているコンパクトで星形成活動を止めた大質量銀河 (現在の宇宙では巨大楕円銀河になっていると考えられている) の祖先の最有力候補天体だと考えられている。本研究ではコンパクトな大質量銀河へ至る過程を解き明かし、楕円銀河の形成史をさらに遡って理解することを目指す。

3. 研究の方法

アルマ望遠鏡を用いて遠方宇宙にあるサブミリ波銀河 ($870\ \mu\text{m}$ で 1 ミリジャンスキー程度の銀河も含む) の観測を行う。具体的な観測対象は赤方偏移 $z=2$ の時代 (110 億年前) のサブミリ波銀河 (下記研究成果(1)と(2)) と、赤方偏移 $z=6$ の時代 (130 億年前) の重力レンズ効果によって電磁波が増幅されているサブミリ波銀河 (下記研究成果(3)) である。観測する放射はダスト連続光放射、一酸化炭素分子輝線放射、酸素・窒素の微細構造線などである。銀河を点源として観測するのではなく、高い空間分解能の観測によって銀河を空間分解する。いずれの観測においても、研究代表者が PI としてアルマ望遠鏡の観測時間を獲得した。

4. 研究成果

(1) 赤方偏移 $z=2$ の銀河のダストの連続光放射の観測

CANDELS/3D-HST の UDS および GOODS-S 領域において、110 億年前の宇宙に存在する星質量が太陽の 1000 億倍以上の 62 個の巨大星形成銀河において、静止系遠赤外線 (観測系で $870\ \mu\text{m}$) 放射の空間的な広がり (有効半径) が静止系可視光 (観測系で $1.6\ \mu\text{m}$) 放射の空間的な広がり比べて約 2.3 倍小さく、星質量の空間分布に比べても約 1.9 倍小さいことが分かりました (図 1)。静止系遠赤外線放射 (ダストからの熱放射) の空間分布は現在星形成活動が活発な領域を反映しており、観測されているようなコンパクトな星形成活動が持続すれば、同じ時代の星形成を止めた銀河の星質量-有効半径関係に 3 億年以内に達することを示しています。この結果は、銀河の外側領域にあるガスが内側領域に運ばれ、銀河の中心部で激しい星形成活動が起こり、大質量銀河のコアを形成したシナリオを支持しています。

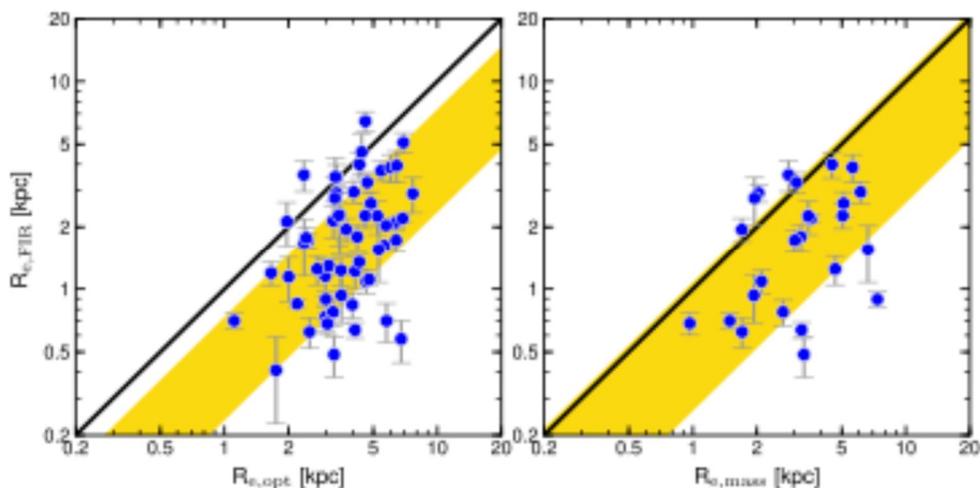


図 1 : (左) 110 億年前の大質量星形成銀河における、静止系可視光放射の有効半径 (空間的な広がり) と静止系遠赤外放射の有効半径の比較。(右) 星質量の空間分布に基づいた有効半径と静止系遠赤外放射の有効半径の比較。静止系遠赤外放射がコンパクトな領域に集中していることを示している。(Tadaki et al. 2020, ApJ, 901, 74)

(2) 赤方偏移 $z = 2$ の銀河の一酸化炭素分子輝線放射の観測

(1)で静止系遠赤外線放射を観測した110億年前の銀河に対して、一酸化炭素分子(CO J=3-2)輝線放射を空間分解して検出することに成功した(図2)。これらの銀河の位置する天域ではジェームズウェーブ宇宙望遠鏡による観測が行われており、静止系近赤外線(観測系で $4.4\mu\text{m}$)放射の空間的な広がりを明らかにした。この波長帯はハッブル宇宙望遠鏡での観測波長の3倍に当たり、ダストによる減光の影響を受けにくいと、正確な星質量の空間分布を反映している。これらの観測から、すでにある星の質量、現在作られている星の質量(星形成率)、星の材料である分子ガスの質量という、銀河を特徴づける3つの基本的要素の空間的な広がりの比較を行った。銀河の中心部では星質量当たりの星形成率が高く、かつガス消費時間が短いことが分かり、中心部での星形成活動がより活発であることがわかった。このことは巨大銀河が中心部からコアを形成し、外側へ星形成が広がっていく可能性を示唆している。また分子ガス質量の割合は銀河の中心部から外側まで高いままであり、星形成がまだ停止していないことがわかった。中心部のガスの消費時間が外側よりも短いことから、中心部から星形成が停止し、その後外側に広がると予測される。これらの結果は、銀河の形成と進化に関する理解を深め、特に高赤方偏移での巨大星形成銀河がどのようにして中心集中したコアを形成し、最終的に静止銀河に移行するかに関する重要な手がかりを提供している。

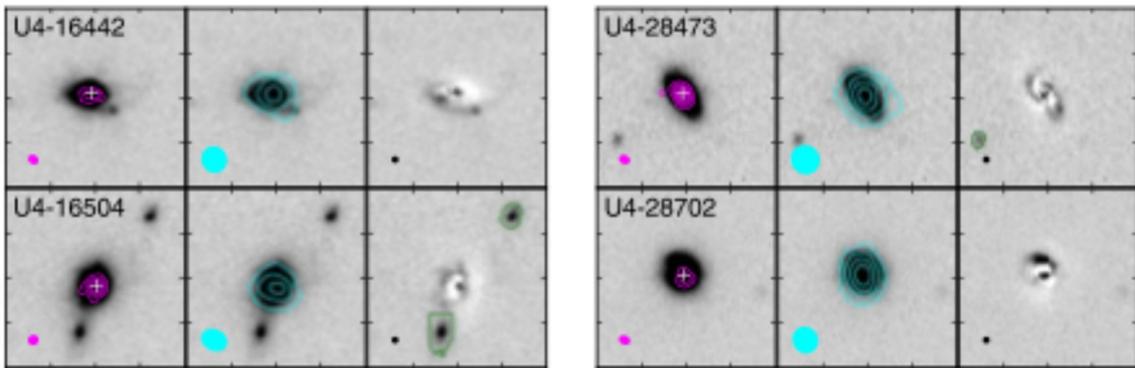


図2：110億年前の大質量星形成銀河のダストの連続光放射(マゼンタの等高線)と一酸化炭素分子輝線放射(シアンの等高線)の空間分布。背景の画像はジェームズウェーブ宇宙望遠鏡による静止系近赤外線放射の観測画像。(Tadaki et al. 2023, ApJ, 957, 15)

(3) 赤方偏移 $z = 6$ の銀河の酸素・窒素輝線放射の観測

アルマ望遠鏡と重力レンズと呼ばれる自然の増幅効果を利用することで、130億年前の宇宙に存在している1つの銀河から、酸素と窒素、そして一酸化炭素と塵の電波も捉えることに成功した。アルマ望遠鏡の画像では、手前にある銀河の重力の影響を受けて2つのアーク状の天体に分かれて見えるが、これらは共に130億年前の1つの銀河である(図3)。酸素に対する窒素の電波強度が大きければ、それは星の誕生と死のサイクルを繰り返し、重元素が豊富に存在していることを意味している。現在の宇宙にある銀河での経験則が130億年前の宇宙でも成り立つとすれば、観測された窒素と酸素の電波強度比は、太陽系での存在比率の50-70%ほどの重元素が130億年前の銀河にすでに存在していることを示唆しています。現在ジェームズウェーブ宇宙望遠鏡では同じ時代のより質量の小さい銀河からの酸素や窒素の光を検出されており、これらのサンプルも含めた包括的な研究をしていくことが今度の課題である。

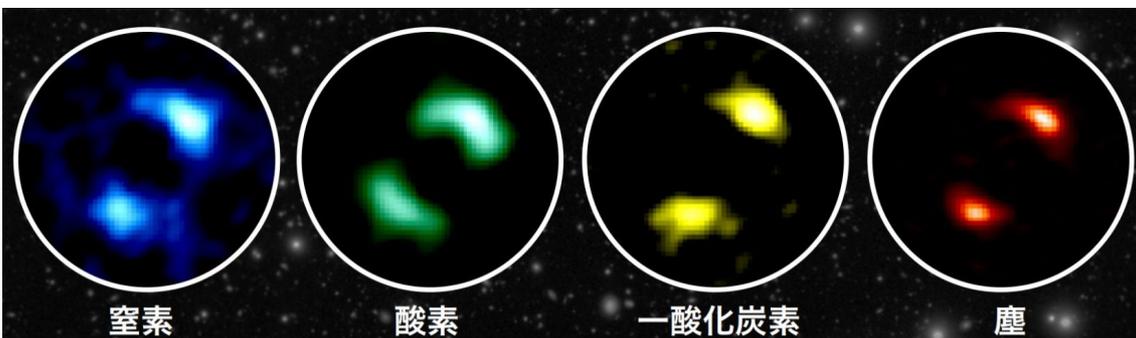


図3：130億年前のG09.83808と呼ばれる銀河のアルマ望遠鏡の観測画像。手前の銀河の重力によって、2つのアーク状の天体として観測されています。Credit: ALMA (ESO/NAOJ/NRAO), HSC-SSP, 但木謙一/国立天文台

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Tsujiata Akiyoshi, Tadaki Ken-ichi, Kohno Kotaro, Hatsukade Bunyo, Egusa Fumi, Tamura Yoichi, Nishimura Yuri, Zavala Jorge, Saito Toshiki, Umehata Hideki, Lee Minju M	4. 巻 74
2. 論文標題 Central concentration of warm and dense molecular gas in a strongly lensed submillimeter galaxy at $z = 6$	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1429 ~ 1440
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac082	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 Zavala Jorge A., Casey Caitlin M., Spilker Justin, Tadaki Ken-ichi, Tsujita Akiyoshi, Champagne Jaclyn, Iono Daisuke, Kohno Kotaro, Manning Sinclair, Montana Alfredo	4. 巻 933
2. 論文標題 Probing Cold Gas in a Massive, Compact Star-forming Galaxy at $z = 6$	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 242 ~ 242
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ac7560	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 Tadaki Ken-ichi, Tsujita Akiyoshi, Tamura Yoichi, Kohno Kotaro, Hatsukade Bunyo, Iono Daisuke, Lee Minju M, Matsuda Yuichi, Michiyama Tomonari, Nagao Tooru, Nakanishi Kouichiro, Nishimura Yuri, Saito Toshiki, Umehata Hideki, Zavala Jorge	4. 巻 74
2. 論文標題 Detection of nitrogen and oxygen in a galaxy at the end of reionization	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 L9 ~ L16
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1093/pasj/psac018	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 Tadaki Ken-ichi, Belli Sirio, Burkert Andreas, Dekel Avishai, Foerster Schreiber Natascha M., Genzel Reinhard, Hayashi Masao, Herrera-Camus Rodrigo, Kodama Tadayuki, Kohno Kotaro, Koyama Yusei, Lee Minju M., Lutz Dieter, Mowla Lamiya, Nelson Erica J., Renzini Alvio, Suzuki Tomoko L. et al.	4. 巻 901
2. 論文標題 Structural Evolution in Massive Galaxies at $z \sim 2$	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 74 ~ 74
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/abaf4a	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 Tadaki Ken-ichi, Kodama Tadayuki, Koyama Yusei, Suzuki Tomoko L., Mitsuhashi Ikki, Ikeda Ryota	4. 巻 957
2. 論文標題 Spatial Extent of Molecular Gas, Dust, and Stars in Massive Galaxies at $z=2.2-2.5$ Determined with ALMA and JWST	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal Letters	6. 最初と最後の頁 L15 ~ L15
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/2041-8213/ad03f2	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 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 6件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 Ken-ichi Tadaki, Akiyoshi Tsujita, Yoichi Tamura, Kotaro Kohno, Yuri Nishimura, Bunyo Hatsukade, Hideki Umehata, Daisuke Iono, Jorge Zavala, Kouichiro Nakanishi, Yuichi Matsuda, Minju Lee, Tomonari Michiyama, Tohru Nagao, Toshiki Saito
2. 発表標題 ALMA observations of a submillimeter galaxy at $z = 6.1$: Detection of nitrogen
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenichi Tadaki
2. 発表標題 Formation and evolution of massive galaxies
3. 学会等名 East Asia ALMA Science Workshop 2022 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kenichi Tadaki
2. 発表標題 Redshifted CO line emission with ngVLA and SKA
3. 学会等名 Linking the Science of Large Interferometer in the 2030s (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 但木謙一
2. 発表標題 広視野サブミリ波探査で解き明かす巨大銀河の形成
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kenichi Tadaki
2. 発表標題 ALMA science IV: ALMA+Subaru observations of high-redshift cluster galaxies
3. 学会等名 ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2021（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 但木謙一
2. 発表標題 サブミリ波銀河の中心に超巨大ブラックホールはあるのか？
3. 学会等名 超巨大ブラックホール研究会（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 但木謙一
2. 発表標題 アルマとハッブル宇宙望遠鏡の協調観測で探る銀河の形態進化
3. 学会等名 天文学会2021年春季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 但木謙一
2. 発表標題 アルマ望遠鏡による遠方銀河観測
3. 学会等名 初代星・初代銀河研究会2023 (招待講演)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

アルマ望遠鏡、129億年前の銀河から窒素と酸素の電波をとらえる
https://alma-telescope.jp/news/nitrogenandooxygen_202202

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