

令和元年6月5日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05035

研究課題名(和文)新しい星形成活動指標で探る爆発的星形成の核心

研究課題名(英文)A study of nuclear starburst with the use of new star-formation rate estimator

研究代表者

中西 康一郎(Nakanishi, Kouichiro)

国立天文台・アルマプロジェクト・特任准教授

研究者番号：60399277

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円

研究成果の概要(和文)：スターバーストの規模や分布、環境を詳細かつ精確に測定し、その特徴を高い信頼度で把握することを目的として、ALMA望遠鏡を用いてスターバースト銀河に対する観測を行った。新しい星形成活動の指標であるミリ波サブミリ波水素再結合線の検出に成功し、星形成活動の規模とその空間分布の精確な定量に有用であることを実証できた。同時に星間ダスト・分子ガスの分布をかつてない高い空間分解能でとらえ、スターバースト銀河中心部に多様な性質ひいては多様な進化段階を持つ星形成領域が混在していることを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の望遠鏡による観測では難しかったスターバースト銀河の中心部での星形成活動の分布や星間物質の性質を細かく詳しく調べることが、新しい望遠鏡による観測によって可能であることを実証した点に本研究の意義がある。本研究で得られた成果は、スターバースト銀河の中心部が一様ではなく複雑で多様性に富む場所であること、その多様性の正体や起源を解き明かすことがスターバーストの発生メカニズム解明の手がかりになるであろうことを示唆しており、スターバースト研究にひとつの新しい局面を開いた点にも意義がある。

研究成果の概要(英文)：The aim of this observation study was characterize intensity, spatial structure, and environment of starburst region in the center of galaxies. ALMA observations toward nearby starburst galaxies successfully detected millimeter and sub-millimeter radio recombination lines and demonstrated that the lines were powerful tool to capture star-formation activity. Dust continuum emission and molecular gas emission lines were observed simultaneously in unprecedented spatial resolution. The observations uncovered star-forming clumps having diverse nature and diverse evolutionary phases in the heart of starburst galaxies.

研究分野：天文学

キーワード：爆発的星形成 銀河 電波

## 1. 研究開始当初の背景

スターバースト(爆発的星形成)は銀河の形成と進化をひきおこす素過程である。爆発的星形成の理解無しに銀河の形成と進化の解明は成し得ない。ところが「どのような環境あるいはどのような条件の下であれば爆発的星形成が発現するのか」という根本的な疑問に対する明快かつ決定的な回答は今日まで得られていない。この疑問に答えるためのアプローチとして、まずは「爆発的星形成と通常の星形成の性質の違い」を探る多くの研究がなされており、その成果として現象論的な差異、例えば爆発的星形成においては星形成の効率が低いことなどが明らかになっている一方で、その背景となるプロセスを説明する物理に基づいたシナリオを観測から突きとめるには至っていない。

## 2. 研究の目的

爆発的星形成の発現要因や特徴的な性質の起源の解明が不十分なままである原因のひとつは、星形成の規模や空間分布を測定する際に、従来の観測手段では星間減光の大きな影響あるいは空間分解能の不足による重大な不定性が生じることであった。この問題の解決を目指して、近年利用可能になった大型電波望遠鏡を用いた星形成規模の新しい指標の観測を行うと同時に星間物質の観測も行う。星形成活動と星間物質の分布を高い空間分解能で描き出し、これらの相互作用を明らかにすることによって、爆発的星形成の発現と特異性の解明に有効な手がかりが与えられると期待される。

## 3. 研究の方法

アタカマリ波サブミリ波干渉計(ALMA 望遠鏡)を用いて、爆発的星形成を伴う近傍銀河の電波観測を行う。星形成活動の指標としてミリ波サブミリ波帯の電波水素再結合線、星間物質のプロープとして星間ダストが放射する連続波や分子ガスが放射するスペクトル線を用いる。ALMA 望遠鏡がもたらす高空間分解能と高感度によって、信頼度の高い星形成と星間物質の分布が得られると期待される。

## 4. 研究成果

1) 近傍星形成銀河 NGC253 の高感度高空間分解能観測  
近傍星形成銀河 NGC253 の中心 200 パーセク(1 パーセクは約 3.3 光年)の領域に対して、ALMA 望遠鏡を用いて先行研究よりも 5 倍以上高い空間分解能(0.3 秒角; 5 パーセク相当)で観測を行った。星間ダストが放射する連続波画像は、10 pc スケールの星間物質の「塊」8 個が 2 本の平行な列状に分布する姿を初めて描き出した(図 1 右下)。これらの「塊」からはいずれも電波水素再結合線(H26 $\alpha$ )を検出することに成功した。「塊」に含まれる若い大質量星の数は 100 から数 100 個程度であり、すなわちこれらはいずれも星間ダストに覆われた活発な星形成領域であることが確かめられた。各々の「塊」からは CS(一硫化炭素)、HCN(シアン化水素)等の主要分子に加え、H3O+(ヒドロニウムイオン)や H2CO(ホルムアルデヒド)など合計 19 種類の分子・原子の 37 本の輝線を検出した。わずか 10 パーセク程度の間隔で隣り合う「塊」だが、検出された分子輝線の数や分子輝線同志の強度比には明瞭な個体差があった。ある「塊」では多くの分子輝線がスペクトルを埋め尽くす「分子の密林」とも言える状態になっていた(図 1 左上)。この「塊」では星間物質が星形成の影響で高温状態にあり、その結果複雑な有機分子を含む多様な分子が存在する環境になっていることを見出した。これに対して別の「塊」では一部の分子の輝線だけが検出され(図 1 左下)、全く異なる状態にあることが分かった。これらの結果は、NGC253 中心部の「塊」(星形成領域)が持つ個性を反映しており、個々の「塊」の性質は進化段階の違いや銀河系内とは異なる進化過程に起因すると考えられる。  
この研究成果は Ando, Nakanishi, Kohno, et al. 2017 (雑誌論文 4)として出版公表された。また、東京大学、国立天文台からウェブリリースとして一般向けにも発表された(図 1)。

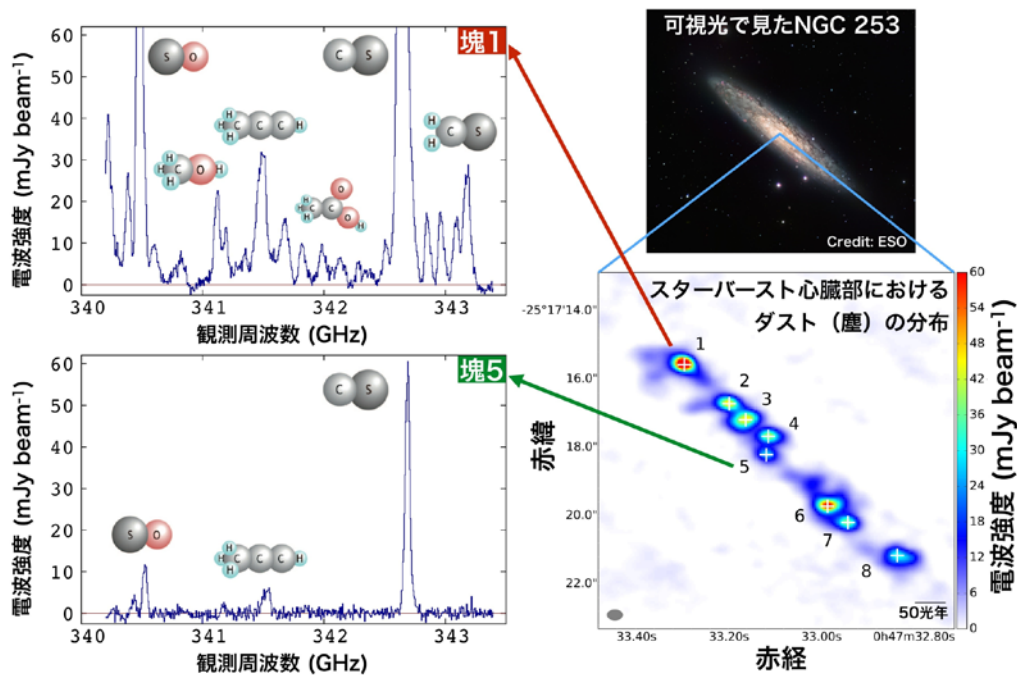


図 1: スターバースト銀河 NGC 253 心臓部の ALMA 望遠鏡による電波強度画像 (右下) とスペクトル (左) (NGC 253 の可視光画像 (右上): ESO)。ALMA 望遠鏡によって星間物質の分布が高い空間分解能で描き出され、いずれも活発な星形成活動をおこなっている星間物質の「塊」が 8 個並んでいることが明らかになった。これらの星間物質の塊の個々の電波スペクトルを調べると、塊 1(左上)では多種の分子からの輝線がスペクトルを隙間なく埋め尽くす「分子の密林」となっている一方、塊 5(左下)では見つかった分子の種類は少なく、塊 1 とは全く異なる状態にあることが明らかになった。 Credit: ESO, 安藤亮 (東京大学), ALMA (ESO/NAOJ/NRAO) (図の出典は 5. [その他] ホームページ等を参照)

## 2) 近傍爆発的星形成銀河 NGC 5253 に対する水素再結合線観測

近傍爆発的星形成銀河のひとつである NGC 5253 の中心部に対して ALMA 望遠鏡を用いて電波水素再結合線の観測を行った。水素再結合線の検出に成功し、星形成率は 0.087 太陽質量/年と求めることができた。この結果から中間赤外線光度や遠赤外線光度を用いた従来の星形成率の推定値はそれぞれ過大ないしは過小評価されていたことが明らかになった。これに対して可視光域の水素再結合線(星間減光補正済)から求めた星形成率とは概ね一致をみた。可視光・近赤外線にある再結合線も星間吸収を慎重に補正すれば、信頼できる星形成率の指標として利用可能ではある。対して、電波水素再結合線は星間吸収の補正をせずとも信頼度の高い星形成率を与えられることが明らかになった。すなわち本研究の前提が正しかったことが立証されると共に、電波水素再結合線の観測が有効かつ強力な手段であることを実証することができた。これら成果は Bendo et al. 2017 (雑誌論文 3)として出版公表された。

## 3) 近傍にある活動銀河に対する水素再結合線探査

近傍の代表的な活動銀河中心核を持つ銀河である NGC1068 に対して水素再結合線の観測を ALMA 望遠鏡を用いて行ったが、輝線の検出には至らなかった。検討の結果、水素再結合線を放射する領域の光学的厚みが非常に大きいことが非検出の原因であると推定された。この研究結果は Izumi, Nakanishi, Imanishi, Kohno 2016 (雑誌論文 5)として出版公表された。近傍の高光度赤外線銀河に対する水素再結合線の探査も ALMA 望遠鏡を用いた観測データを通して行ったが、輝線の検出には至らなかった。この結果は 2 本の査読論文(雑誌論文 1,2)として出版公表された。

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 5 件) ※いずれも査読付・英文雑誌

- 1) Imanishi, M., Nakanishi, K., & Izumi, T. 2019, "ALMA Spatially Resolved Dense Molecular Gas Survey of Nearby Ultraluminous Infrared Galaxies", *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 241, 19. DOI: 10.3847/1538-4365/ab05b9
- 2) Imanishi, M., Nakanishi, K., & Izumi, T. 2018, "ALMA Multiple-transition Observations of High-density Molecular Tracers in Ultraluminous Infrared Galaxies",

The Astrophysical Journal, 856, 143. DOI: 10.3847/1538-4357/aab42f

3) Bendo, G. J., Miura, R. E., Espada, D., Nakanishi, K., Beswick, R. J., D'Cruze, M. J., Dickinson, C., & Fuller, G. A. 2017, "Tests of star formation metrics in the low-metallicity galaxy NGC 5253 using ALMA observations of H30 line emission", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 472, 1239. DOI: 10.1093/mnras/stx1837

4) Ando, R., Nakanishi, K., Kohno, K., Izumi, T., Martín, S., Harada, N., Takano, S., Kuno, N., Nakai, N., Sugai, H., Sorai, K., Tosaki, T., Matsubayashi, K., Nakajima, T., Nishimura, Y., & Tamura, Y. 2017, "Diverse Nuclear Star-forming Activities in the Heart of NGC 253 Resolved with 10-pc-scale ALMA Images", The Astrophysical Journal, 849, 81. DOI: 10.3847/1538-4357/aa8fd4

5) Izumi, T., Nakanishi, K., Imanishi, M., & Kohno, K. 2016, "ALMA observations of the submillimetre hydrogen recombination line from the type 2 active nucleus of NGC 1068", Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 459, 3629. DOI: 10.1093/mnras/stw324

[学会発表] (計 13 件)

1) Kouichiro Nakanishi, "High spatial resolution imaging of the NGC 253 nuclear starburst", East Asian ALMA Science Workshop 2018 (国際学会), 2018年12月17~19日, 大阪府立大学 I-Site なんば(大阪府大阪市)

2) Ando, R., Nakanishi, K., Kohno, K., Izumi, T., Martín, S., Harada, N., Takano, S., Kuno, N., Nakai, N., Sugai, H., Sorai, K., Tosaki, T., Matsubayashi, K., Nakajima, T., Nishimura, Y., & Tamura, Y., "Diverse nuclear star-forming activities in the heart of NGC 253 resolved with 10-pc-scale ALMA images", The origin of galaxies, stars, and planets in the era of ALMA (国際学会), 2017年11月29日~12月1日, California Institute of Technology (Pasadena, California, USA)

3) K.Nakanishi, R.Ando, K.Kohno, K.Sorai, N.Nakai, N.Kuno, K.Matsubayashi, H.Sugai, T.Izumi, S.Martin, N.Harada, S.Takano, T.Tosaki, T.Nakajima, Y.Nishimura, Y.Tamura, "ALMA imaging of NGC 253 nuclear starburst and anticipation of future high resolution observations", ALMA Long Baseline Workshop (国際学会), 2017年10月3日~5日, メルパルク京都(京都府京都市)

4) 安藤亮, 中西康一郎, 河野孝太郎, 泉拓磨, Sergio Martín, 原田ななせ, 高野秀路, 久野成夫, 中井直正, 菅井肇, 徂徠和夫, 濤崎智佳, 松林和也, 中島拓, 田村陽一, 西村優里, "5pc 分解能で見た近傍星形成銀河 NGC 253 中心部の星形成活動の多様性(2)", 日本天文学会 2017 年秋季年会, 2017 年 9 月 11~13 日, 北海道大学(北海道札幌市)

5) 中西康一郎, 松林和也, 徂徠和夫, 中井直正, 久野成夫, 河野孝太郎, 安藤亮, 菅井肇, "High angular resolution and high sensitivity millimeter-wave continuum imaging toward the NGC 253 starburst nucleus", 日本天文学会 2017 年秋季年会, 2017 年 9 月 11~13 日, 北海道大学(北海道札幌市)

6) K.Nakanishi, N.Nakai, N.Kuno, K.Kohno, R.Ando, K.Sorai, K.Matsubayashi, H.Sugai, "Dense ionized gas embedded with infant massive stellar clusters in the NGC 253 nuclear starburst", Measuring Star Formation in the Radio, Millimetre, and Submillimetre (国際学会), 2017 年 7 月 24 日, Manchester University (Manchester, United Kingdom)

7) Ryo Ando, Kotaro Kohno, Youichi Tamura, Takuma Izumi, Akio Taniguchi, Kouichiro Nakanishi, 他 8 名, "Five Parsec View of the Diverse Starburst Activities in the Heart of NGC 253", Half of Decade of ALMA: Cosmic Dawns Transformed (国際学会), 2016 年 9 月 20 日~23 日, Renaissance Indian Wells Resort & Spa (Indian Wells, California, USA)

8) Kouichiro Nakanishi, Kazuo Sorai, Naomasa Nakai, Nario Kuno, Kazuya Matsubayashi, Hajime Sugai, Ryo Ando, and Kotaro Kohno, "Dense ionized gas embedded with infant massive stellar clusters in the NGC 253 nuclear starburst" (国際学会), Half of Decade of ALMA: Cosmic Dawns Transformed, 2016 年 9 月 20 日~23 日, Renaissance Indian Wells Resort & Spa (Indian Wells, California, USA)

9) 安藤亮, 河野孝太郎, 田村陽一, 泉拓磨, 谷口暁星, 中西康一郎, 他 8 名, "5pc 分解能で見た近傍星形成銀河 NGC253 中心部の星形成活動の多様性", 日本天文学会 2016 年秋季年会, 2016 年 9 月 14 日, 愛媛大学(愛媛県松山市)

10) 中西康一郎, 中井直正, 久野成夫, 河野孝太郎, 安藤亮, 徂徠和夫, 松林和也, 菅井肇, "Ionized gas properties in the starburst region of NGC 253 uncovered by ALMA high spatial resolution millimeter observations", 日本天文学会 2016 年秋季年会, 2016 年 9 月 14 日, 愛媛大学(愛媛県松山市)

11) 泉拓磨, 河野孝太郎, 中西康一郎, 今西昌俊, "ALMA を用いたサブミリ波帯水素再結合線観測による活動銀河核広輝線領域の探査可能性の検討", 日本天文学会 2016 年秋季年会, 2016

年 9 月 14 日, 愛媛大学(愛媛県松山市)

12) Ryo Ando, Kotaro Kohno, Kouichiro Nakanishi, Yoichi Tamura, Takuma Izumi, “Molecular Absorption and Emission Lines as the Powerful Probes of Heating Mechanisms of Interstellar Gases: From Diffuse Gases to Starbursts”, Molecular Gas in Galactic Environments (国際学会), 2016 年 4 月 4 日~7 日, Omni Charlottesville Hotel (Charlottesville, Virginia, USA)

13) Kouichiro Nakanishi, “Millimeter/sub-millimeter Hydrogen Recombination Line in the Center of NGC 253”, East Asian ALMA Science Workshop 2015 (国際学会), 2015 年 12 月 9 日, 大阪府立大学 I-Site なんば(大阪府大阪市)

〔その他〕

ホームページ等

<https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2017/5614/>

<https://alma-telescope.jp/news/press/ngc253-201711>

「スターバースト心臓部で見えてきた熱い“分子の密林”」  
雑誌論文 2(Ando et al. 2017)に係るウェブリリース

## 6. 研究組織

### (1)研究分担者

(該当無し)

### (2)研究協力者

研究協力者氏名：安藤 亮

ローマ字氏名： Ryo Ando

研究協力者氏名：河野 孝太郎

ローマ字氏名： Kotaro Kohno

研究協力者氏名：泉 拓磨

ローマ字氏名： Takuma Izumi

研究協力者氏名：今西 昌俊

ローマ字氏名： Masatoshi Imanishi

研究協力者氏名：斉藤 俊貴

ローマ字氏名： Toshiki Saito

研究協力者氏名：三浦 理絵

ローマ字氏名： Rie E. Miura

研究協力者氏名：George Bendo

ローマ字氏名： George Bendo

※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。