

令和元年5月31日現在

機関番号：32665

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15K05031

研究課題名(和文) イメージング・ラインサーベイ観測による活動的銀河の分子組成と分布の解明

研究課題名(英文) Molecular abundance and distribution of the active galaxy with imaging line survey observations

研究代表者

高野 秀路 (Takano, Shuro)

日本大学・工学部・教授

研究者番号：00222084

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,600,000円

研究成果の概要(和文)： 星間空間では、約200種類の分子が検出されている。これまで、周波数方向に網羅的に分子輝線を捉える「ラインサーベイ観測」が行われており、これは星間物質の物理的・化学的性質を明らかにする強力な手法である。今回、活動的銀河中心核(AGN)を持つ銀河を調べるため、アルマ望遠鏡を用いて、この手法を銀河NGC 1068に適用した。

その結果、AGNを取り巻くガス領域(CND)と、重い星が多数形成しているガス領域について比較したところ、CNDでスペクトル強度の卓越する分子(HCN等)が見出された。これらは、CNDがAGNからのX線放射の影響を受け、また衝撃波の影響によって高温である可能性を示唆する。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、銀河でしばしばみられるAGNを取り巻くガス領域(CND)と、重い星が多数形成しているガス領域について、それらを網羅的に、かつ空間的に完全に分解し、区別して観測した。その結果、両者の分子組成には、異なる面があることを示した。AGNは一般にダストに深く埋もれ、観測が難しい。今回、分子組成を調べることにより、AGNの存在を電波観測で調べる手がかりを得た。このことは、銀河の性質や進化の研究、また、銀河での星間物質の組成や反応の研究に役立つ。

以上のことを通して、宇宙を構成する重要な要素である銀河の理解が進み、社会的にも関心が高い宇宙やその進化の研究に、微力ながら寄与していると考えられる。

研究成果の概要(英文)： About 200 molecular species have been detected in interstellar space. So far "line survey observations" have been carried out to observe molecular lines in unbiased way along the frequency axis. This is a powerful method to study physical and chemical conditions of interstellar matter. Here we applied this method to the galaxy NGC 1068 with the ALMA telescope to study the galaxy with an active galactic nucleus (AGN).

As a result, we found molecules with enhanced intensity (HCN etc.) in the gas around the AGN (CND), by comparing gas in the CND and in regions where many high-mass stars are formed. These results suggest that the CND is affected by X-ray radiation from the AGN, and/or that the CND is in high-temperature owing to shock wave.

研究分野：銀河、星間化学、電波天文学、分子分光学

キーワード：銀河 活動的銀河中心核 爆発的星形成 セイファート銀河 電波天文学 電波干渉計 アルマ(ALMA) 望遠鏡 星間分子

## 1. 研究開始当初の背景

星間・星周物質中には、少なくとも 175 の分子種が、主に電波望遠鏡を用いた回転スペクトルの観測により、検出されていた(ケルン大のデータベース CDMS より)。それまで、天の川銀河中にあるいくつかの領域に対して、周波数方向に網羅的に分子輝線を捉える「ラインサーベイ観測」が多く行われていた(例えば大質量星形成領域 Sgr B2, Ori-KL, 冷たい分子雲 TMC-1、晩期型星 IRC+10216 など)。このような無バイアスのラインサーベイは、星間物質の物理的・化学的性質を明らかにする強力な手段である。

一方、系外銀河で検出された分子種は、およそ 56 であった。系外銀河は、近傍のものであっても受信される分子輝線の強度が弱いので、観測が容易ではない。しかし、検出器の高感度化や分光器の広帯域化が急速に進んだここ数年、系外銀河のラインサーベイの報告は増加してきた。これだけの種類の分子が系外銀河で見つかったことで、そこでの分子組成及び化学反応の研究が可能となってきた。異なる環境を持つ種々の銀河(例えば銀河に含まれるガスの量の違い、スターバースト銀河か否か、活動的銀河中心核の有無など)がどのような分子組成の違いを持つのか、そしてそれが星間物質のどのような物理状態と関係しているのか、についての系統的な研究は、まさにスタートしたばかりの状態であった。

これまでに研究代表者らは、活動的銀河中心核(Active Galactic Nucleus、以下 AGN)を持つ銀河の物理状態と分子組成を明らかにすることを目的として、2009~2011 年にかけて、国立天文台野辺山宇宙電波観測所にある 45m ミリ波望遠鏡を用いて、最も近傍の AGN の一つである NGC 1068 のラインサーベイを実施した。45m 望遠鏡の空間分解能は 15 秒角程度あるため、中心核周囲の構造のみ(～4 秒角程度)を十分に選択的に明らかにすることはできないが、高い感度を生かして 85~116 GHz に渡って多くの分子輝線を捉えることができた。

また、AGN を含む NGC 1068 の分子組成と比較するため、典型的なスターバースト銀河である NGC 253 及び IC 342 も合わせて観測した。これらのスペクトルから、理論的に X 線のトレーサーの可能性が考えられている CN、さらに HCN の各銀河内での相対強度が、NGC 1068 で卓越していることがわかった。一方、炭素を含む基本的な分子である  $C_2H$  や cyclic- $C_3H_2$  の存在度は、スターバースト銀河と大きな差は無いことが明らかになった。

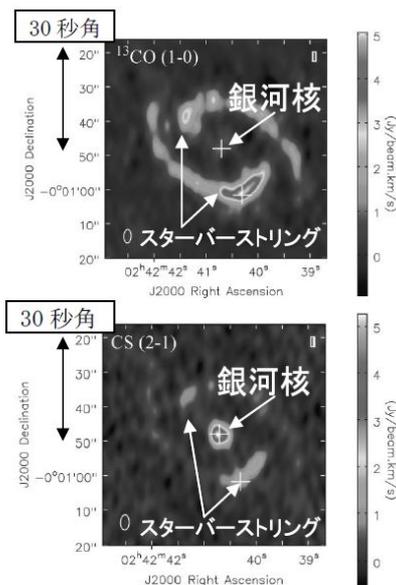
さらに、アルマ大型電波干渉計(以下 ALMA)の初期科学運用(cycle-0)では、45m 望遠鏡で観測した分子のうち、ダストやショックに関連した分子など( $^{13}CO$ ,  $C^{18}O$ ,  $^{13}CN$ , CS, SO, HNC,  $HC_3N$ ,  $CH_3OH$ ,  $CH_3CN$ )で、NGC 1068 での高空間分解能のイメージングに成功した。この観測では右図のように、銀河中心核の周囲とその外側にリング状に存在するスターバースト領域(スターバースtring)での分子の分布が、分子ごとに明確に異なることが、描き出された。従って研究代表者らは、ALMA を用いて、高い空間分解能及び高い感度で観測を行うことが、本質的に重要であると改めて認識した。

## 2. 研究の目的

これまでの研究から、45m 望遠鏡などの単一鏡を用いたラインサーベイによって、銀河の大局的な分子組成は明らかにできた。しかし単一鏡による観測では、銀河の棒状構造(バー)や腕構造(アーム)のガス成分も広い視野の中に含まれてしまうため、観測できた分子が本当に AGN の影響(例えば強い X 線放射)によって増大あるいは減少しているのかが明らかではなく、反応モデル計算との比較も困難である。やはり AGN 周囲での分子の分布を明らかにし、AGN の影響だけを見ることが不可欠である。そのような研究が ALMA を用いて可能となってきた。そこで本研究では、ALMA を本格的に用いて、以下のことを明らかにする。

- (1) 様々な分子について二次元の強度マップを得ることで、AGN からの距離と対応させて分子の存在量の分布を明らかにする。
- (2) 化学的に比較的安定と思われる CS や CO を基準として存在量比を調べ、分子ごとの増加・減少の影響を二次元的に明らかにする。
- (3) AGN 周囲とスターバースト領域の 2 つの異なる物理環境間での様々な分子の存在量を比較し、AGN による星間物質への影響の特徴を明らかにする。
- (4) 観測的に得られた物理環境及び分子の存在量の情報を、AGN 周囲の反応モデル計算にフィードバックすることで、AGN を持つ銀河に広く適用できる反応モデルを構築する。
- (5) 将来的に行われるダストに埋もれた遠方銀河の熱源診断や分子組成の研究のため、有用な分子輝線や輝線強度比に関する知見を得る。

## 3. 研究の方法



南米チリに設置された ALMA を用いて、世界で初めて NGC 1068 に対する 100 GHz (波長 3 mm) 帯でのイメージング・ラインサーベイ観測を実施した。本観測によって、85.1~108.7 GHz のスペクトル及びスペクトル線の分布が得られた。これを我々が行った先行研究 (96.4~111.4 GHz; Takano et al. 2014, Nakajima et al. 2015) 先行研究 (98.6~113.9 GHz; Takano et al. in prep.) で取得済みのデータと組み合わせることによって、85.1~113.9 GHz に渡って網羅的に分子スペクトルを得ることができた。

回転温度や存在量を得るため、いわゆる回転ダイアグラム法を用い、局所的熱平衡などを仮定して解析を行った。

#### <引用文献>

Takano et al. 2014, Publ. Astron. Soc. Japan, 66, 75, DOI: 10.1093/pasj/psu052

Nakajima et al. 2015, Publ. Astron. Soc. Japan, 67, 8, DOI: 10.1093/pasj/psu136

#### 4. 研究成果

本研究によって得られた成果は、以下の通りである。

- (1) 観測は 2015 年 9 月 4 日~20 日に実施され、口径 12 m の電波望遠鏡 (アンテナ) 約 35 台によって取得されたデータはトータルで 450 GB であり、膨大な情報が取得できた。
- (2) 我々が 45m 望遠鏡 (単一鏡) で行った NGC 1068 の中心核方向一点のラインサーベイ観測 (Nakajima et al. 2018, Takano et al. 2019) で検出した約 20 種の分子について、その二次元分布を高い空間分解能で書き出すことを本観測の目標としていたが、観測周波数帯全体では角度分解能 5 秒角 (NGC 1068 の距離での実スケールは約 350 パーセク) 特に主要な分子輝線を含む周波数帯では 0.9 秒角 (同 60 パーセク) という、これまでにない高分解能なイメージングを行うことに成功した。
- (3) 本イメージング・ラインサーベイによって、NGC 1068 の中心核に存在すると考えられる超巨大ブラックホールによる AGN 周辺領域の核周円盤 (circumnuclear disk: CND) と、それを取りまく爆発的星生成領域 (circumnuclear starburst ring) における 20 種類以上の分子の分布を世界で初めて明らかにした。これは、AGN における物理状態と化学状態 (分子組成) を関連付ける重要かつ基礎的なテンプレートである。
- (4) 主な分子の二次元分布図 (積分強度図) を調べることにより、CND にその分布が顕著に集中している分子として、HCN、 $H^{13}CN$ 、 $HC_3N$ 、SiO、 $CH_3CN$ 、SO が見出された。  
HCN は AGN における輝線強度が starburst 銀河と比較して卓越していることが知られているが、より光学的に薄い同位体種である  $H^{13}CN$  にも同様の傾向が見られることが分かった。  
SiO や SO はショック・トレーサーとして知られており、このことは CND 領域が何らかの衝撃波メカニズムの影響を受けていることを示唆する。超巨大ブラックホールの活動と関連する AGN ジェットやアウトフローとの相互作用 (AGN フィードバック) の可能性がありえる。  
HCN、 $HC_3N$ 、 $CH_3CN$  などは、hot core chemistry として高温領域をトレースする分子として知られている。このことは CND 領域では、AGN からの放射や、前項の衝撃波に由来する mechanical heating による加熱が効いていることを示唆している。
- (5) 一方で、CND では強度が弱く starburst ring では強度が強い分子として  $^{13}CO$  と  $C^{18}O$  が確認された。このような臨界密度の小さな分子種が AGN 近傍で弱い強度を持つことは、この領域が非常に高い温度状態にあることを示唆している。
- (6) さらに、CND と starburst ring の両方に分布する分子は、CS や  $C_2H$ 、 $HCO^+$ 、 $HNCO$  であった。これらの分子は、AGN の影響を受けにくい分子である可能性がある。我々は、以前、単一鏡での AGN と starburst 銀河 (NGC253 や IC342) の中心方向の比較観測によって、 $C_2H$  がこのような分子であることを推測していたが (Nakajima et al, 2011) 初めて二次元分布として確認できたことを意味しており、重要な結果である。
- (7) AGN、CND、starburst ring それぞれの代表点での輝線強度を調べ、化学的に安定な分子として知られている CS の強度で規格化して、その定量的な比較を行った。その結果、CND で輝線強度が顕著に高い分子として、HCN、 $H^{13}CN$ 、SiO が確認された。このことは、結果(4) と基本的に同様の理由であると考えられる。しかし、我々の当初の予想に反して、X 線トレーサーとして知られている CN は、starburst ring でも (領域によるが) 強度比が高くなっており、CND や AGN での卓越は確認できなかった。
- (8) 一方、starburst ring でのみ卓越する分子として、単一鏡観測では検出されていなかった  $H_2CS$  が初めて見出された。また、二次元分布としては、CND に多くみられる  $HC_3N$  や  $CH_3CN$  も starburst ring の一部の領域では強度比が高くなることが確かめられた。starburst ring とされる領域であっても、爆発的星形成現象に伴って引き起こされるその物理状態には、領域ごとに顕著な差があることが予想される。

データが大変多く、取りまとめに時間を要しているが、以上の結果を現在論文に取りまとめている。本研究は、近傍で AGN を持つ NGC 1068 について、波長 3 mm 帯で初めてイメージング・

ラインサーベイ観測のデータを取得して解析したものである。この観測から多くの知見が得られたが、この結果をさらに生かし発展させていくためには、電波での他の波長帯のデータが有用である。今後は、そのようなデータの取得も目指し、同じ分子の複数輝線のデータをそろえ、物理的な条件をさらに明らかにするとともに、新しい分子種でのイメージング・ラインサーベイも目指していく。

<引用文献>

Nakajima et al, 2011, Astrophysical Journal, 728, L38, DOI: 10.1088/2041-8205/728/2/L38

Nakajima et al. 2018, Publ. Astron. Soc. Japan, 70, 7, DOI: 10.1093/pasj/psx153

Takano et al. 2019, Publ. Astron. Soc. Japan, accepted (Electric version: Published: 30 March 2019), DOI: 10.1093/pasj/psz020

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計0件)

[学会発表](計8件)

"The Molecular Abundance of the Circumnuclear Disk Surrounding an Active Galactic Nucleus in the Seyfert 2 Galaxy NGC 1068",  
T. Nakajima, S. Takano, T. Tosaki, K. Kohno, N. Harada, E. Herbst, Y. Tamura, T. Izumi, A. Taniguchi,  
East Asian ALMA Science Workshop 2018, 2018

"The Molecular Abundance of the Circumnuclear Disk Surrounding an Active Galactic Nucleus in the Seyfert 2 Galaxy NGC 1068",  
T. Nakajima, S. Takano, T. Tosaki, K. Kohno, N. Harada, E. Herbst, Y. Tamura, T. Izumi, A. Taniguchi,  
Workshop on Interstellar Matter 2018, 2018

"Molecular abundances in nearby galaxies",  
Shuro Takano  
化学系学協会東北大会/Joint Meeting of the Tohoku Area Chemistry Societies, 2018

"Investigation of molecular abundance toward the circumnuclear disk in Seyfert 2 Galaxy NGC 1068 with the IRAM 30-m, NRO 45-m, and ALMA",  
T. Nakajima, S. Takano, K. Kohno,  
NOEMA/30m Workshop, 2018

"A Complete Imaging Line Survey Observation in the 3-mm Band toward NGC 1068"  
T. Nakajima, S. Takano, K. Kohno, N. Harada, and E. Herbst  
ALMA/45m/ASTE Users Meeting 2017, 2017

"NRO Legacy project: Molecular Line Survey toward External Galaxies"  
中島 拓、高野 秀路、河野 孝太郎、原田ななせ, Herbst, Eric  
NRO45m/ASTE Single Dish Science Workshop 2017, 2017

"Molecular Abundance of the Circumnuclear Disk in Seyfert 2 Galaxy NGC 1068"  
T. Nakajima, S. Takano, K. Kohno, N. Harada, and E. Herbst  
Symposium "Evolution of Molecules in Space", 2017

"野辺山 45-m 鏡と ALMA による近傍 銀河に対するラインサーベイ観測"  
中島拓、高野秀路、河野孝太郎、田村陽一、泉拓磨、谷口暁星、安藤亮、濤崎智佳、原田ななせ、Eric Herbst  
日本天文学会 春季年会, 2017

[図書](計0件)

[産業財産権]

出願状況(計0件)

名称:

発明者:

権利者：  
種類：  
番号：  
出願年：  
国内外の別：

取得状況（計0件）

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年：  
国内外の別：

〔その他〕  
ホームページ等

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：中島 拓  
ローマ字氏名：(NAKAJIMA, Taku)  
所属研究機関名：名古屋大学  
部局名：宇宙地球環境研究所  
職名：助教  
研究者番号（8桁）：90570359

### (2) 研究協力者

研究協力者氏名：河野 孝太郎  
ローマ字氏名：(KOHNO, Kotaro)

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。