

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：16301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2013～2016

課題番号：25707010

研究課題名(和文) 遠赤外線・サブミリ波スペクトル観測で暴く、塵に隠された銀河化学進化

研究課題名(英文) Exploring the obscured chemical evolution of galaxies through far-infrared and sub-millimetric spectroscopic observations

研究代表者

長尾 透 (Nagao, Tohru)

愛媛大学・宇宙進化研究センター・教授

研究者番号：00508450

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,200,000円

研究成果の概要(和文)：多様な元素に富む現在の物質世界の成り立ちを理解するには銀河における化学進化を把握する必要があるが、進化初期段階にある銀河は塵に覆われているため、そうした銀河の物理化学状態を診断することはこれまで困難だった。本研究では、すばる望遠鏡のHyper Suprime Camなどを活用することで、塵に覆われた進化初期段階の銀河を系統的に探査し、そうした進化初期の銀河の中心核部分で巨大ブラックホールが活動性を示している事などを統計的に明らかにした。またアルマ望遠鏡のサブミリ波スペクトル観測により、そうした銀河における化学進化が初期宇宙で短期間に進行したことを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Studying the chemical evolution of galaxies is crucial to understand the evolutionary history of the current metal-rich Universe. However it has been difficult to diagnose the physical and chemical properties of young galaxies observationally, since actively star-forming young galaxies tend to be enshrouded by heavy dust. We carried out systematic surveys for young dusty galaxies by utilizing brand-new instruments such as Subaru Hyper Suprime Cam, and found that such galaxies tend to possess an active supermassive black hole in their nucleus in a growing-up phase. Our sub-millimetric spectroscopy with ALMA revealed that the chemical evolution of galaxies had occurred in a very short timescale in the early Universe.

研究分野：光学赤外線天文学

キーワード：光学赤外線天文学 電波天文学 宇宙物理 銀河進化

1. 研究開始当初の背景

(1) 水素とヘリウムがガスとして存在していただきの開闢直後の宇宙から多様な元素に富む現在の宇宙にかけての化学進化のプロセスは、今なお全貌が明らかになっていない。化学進化は恒星内部における核融合反応による元素合成が担っているため、宇宙全体の化学進化を理解するためには恒星の集合であり宇宙の基本構成要素である銀河の化学進化を正しく理解する必要がある。しかし、銀河化学進化を考える上で最も重要な進化初期段階における銀河は深い塵に隠されているため、そうした進化初期段階にある銀河を可視光線や近赤外線だけを用いた従来の観測で詳細に調査することはこれまで困難だった。

(2) こうした状況の中、日米欧の国際プロジェクトとして建設されたアルマ望遠鏡が運用を開始し、塵の影響をほとんど受けない静止系遠赤外線・サブミリ波のスペクトル観測によって遠方宇宙における塵に覆われた銀河を詳細に観測することが可能になってきた。また、国立天文台すばる望遠鏡の超広視野可視光撮像カメラである Hyper Suprime Cam (HSC) が完成し、塵の影響により可視光帯で非常に暗くなっている銀河をも効率的に探査することが可能になってきた。このように、塵に覆われた進化初期段階の銀河の系統的探査や詳細調査が可能になってきたことを受け、そうした進化初期段階の銀河についてその性質を明らかにするため、本研究を開始した。

2. 研究の目的

(1) 前述の通り、進化初期段階にあり塵に覆われた銀河は、激しく星質量や重元素量を増加させている途中段階にある銀河として重要である。また、この種の銀河の中心核部分では巨大ブラックホールも同時に急成長を遂げつつあると推測されている。こうした塵に覆われた銀河の実態は十分に理解されていないため、本研究により包括的理解を目指すこととした。

(2) 具体的な目的として、まずは遠方宇宙(昔の宇宙)にある塵に覆われた銀河を系統的に探査してその統計的性質を観測的に明らかにすること、そしてこの探査により得られたサンプルおよび過去の研究で既に知られているサンプルに対して詳細なスペクトル観測を行い、塵に覆われた銀河の物理化学状態や力学状態を観測的に明らかにすること、の2点を設定した。なおこの後者の詳細観測については、比較検討の観点から、塵に覆われていない銀河に対しても観測を進めることにした。

(3) 更に、本研究内容は我が国の天文学分野における大型将来宇宙望遠鏡計画である次

世代赤外線天文衛星 SPICA が目指す超高感度遠赤外線スペクトル観測と密接に関係するため、この SPICA を用いて塵に覆われた銀河の究極的な実態解明を将来的に推進するための基礎的検討を進めることも目的の一つとして設定した。

3. 研究の方法

(1) 塵に覆われた遠方銀河の探査方法はこれまで様々なものが提案されてきているが、本計画では特に可視光線と中間赤外線の明るさの比を用いて赤方偏移 2 (今から 100 億年以上前、宇宙年齢が約 30 億年だった頃の宇宙) における塵に覆われた銀河 (この選択基準で選ばれる銀河種族は Dust Obscured Galaxies; DOGs と呼ばれる) を探査することにした。塵に覆われた銀河の探査がこれまで困難だった大きな理由は、天体の暗さと個数密度の低さの2点であり、これを同時に克服するためには広さと深さを兼ね備えた多波長での撮像サーベイデータを組み合わせる必要がある。本研究では、中間赤外線データとしては NASA により運用されたワイズ中間赤外線宇宙望遠鏡の全天サーベイ観測のデータを用いた。また可視光データとしては、既に観測が終了し全てのデータが公開されているスローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) のデータおよびすばる望遠鏡 HSC を用いて新たに取得した SDSS よりも 1 桁深いデータの2種類を用いた。また、DOGs と異なる選択手法による探査方法も試すため、後述する微細構造輝線を用いて塵に覆われた遠方銀河の探査を試みた。

(2) 塵に覆われた遠方銀河の物理化学状態や力学状態を診断するには、塵の影響を受けない中間赤外線・遠赤外線スペクトルに見られる微細構造輝線を用いるのが効果的である。この微細構造輝線を用いた銀河の物理化学状態の診断方法については、既に研究代表者らが行った詳細な光電離モデル計算により提案されていて (引用文献①)、アルマ望遠鏡の初期観測により遠方の塵に覆われた銀河への応用も既に試されている (引用文献②)。そこで本研究でもこの方法を用いることとした。ただし微細構造輝線を用いた銀河の診断は新しい研究手法であり、まだ完全に確立したものではなく、物理化学状態や力学状態の診断以外にも様々な科学的応用の方向性が考えられるため、国内の関連研究者による勉強会を開催して微細構造輝線の活用方法について多角的に検討できる場面を設定した。

(3) 塵に覆われた銀河の徹底解明を SPICA による観測で将来的にどう進めるか、その観測戦略の立案およびサイエンス検討の結果の SPICA 仕様策定への反映を行うため、我が国の可視光赤外線天文学分野の研究者組織である光学赤外線天文連絡会 (光赤天連) の下

に設置された“光赤天連 SPICA タスクフォース”を議論の場面として活用した。研究代表者はこの光赤天連 SPICA タスクフォースの委員長となり、国内の関連研究者 8 名からなる委員会における議論を進め、またより広い研究者からアイデアを募るためのワークショップを開催した。

4. 研究成果

(1) 2014 年春に大規模サーベイ観測を開始した HSC の初期データ(約 9 平方度)を用いて、DOG_s を 48 天体発見した。これらの天体について可視光から中間赤外線にかけてのスペクトルエネルギー分布を調べた結果、発見された DOG_s のうち大多数で中心核部に急成長中の巨大ブラックホールが存在することが示唆された。また、得られたサンプルから光度関数を作成したところ、(塵に覆われていないような)星形成銀河に見られるシェヒター関数ではなく、巨大ブラックホールの活動性が卓越したクェーサーのような天体で見られるダブルパワーロー関数で光度関数が記述されることが分かった。この光度関数からも、DOG_s の中心核部分において急成長中の巨大ブラックホールが活動性を示していることが示唆され、スペクトルエネルギー分布からの示唆とも合致する知見が得られた (Toba, Nagao, et al. 2015)。なおこの結果については、国立天文台からプレスリリースを行った。

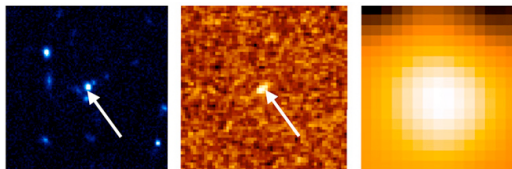


図 1 発見した DOG_s の一例。左から、すばる望遠鏡 HSC で取得した可視光画像、欧州南天天文台ピスタ望遠鏡で取得した近赤外線画像、NASA ワイズ宇宙望遠鏡で取得した中間赤外線画像 (Toba, Nagao, et al. 2015)。

(2) 更に広い天域に対して DOG_s を探査するため、SDSS データとワイズのデータを組み合わせた DOG_s 探査を行った。SDSS データは HSC データに比べると 1 桁ほど感度が悪いが、約 14,000 平方度という圧倒的に広い天域を探査することにより、67 天体の極めて明るい DOG_s を発見した。これらの天体については SDSS の分光データベースを参照することにより正確な距離が分かるため、赤外線光度を導出することができる。そこで得られたサンプルの赤外線光度分布を調査したところ、67 天体中 24 天体の赤外線光度が太陽高度の 10 兆倍を上回る事が分かった。太陽高度の 10 兆倍を上回る赤外線光度を持つ銀河は極超高光度赤外線銀河 (HyLIRGs) と呼ばれ、銀河と巨大ブラックホールの進化が最も激しく進行中である銀河種族だと考えられているが、これまで発見例は非常に少なく、今回の系統的な探査により HyLIRGs を複数発見した

ことによってこの種族の銀河の宇宙における個数密度の導出を行うことができた (Toba and Nagao 2016)。

(3) 一方、塵に覆われた遠方銀河として DOG_s 以外の天体も探査することを目的とし、塵の影響を受けない微細構造輝線の一つである [CII]158 輝線に注目した天体探査を行った。アルマ望遠鏡の初期観測(サイクル 0)アーカイブデータに基づいて [CII]158 輝線を放射する天体の探索を行ったが、新たな遠方天体の発見には至らなかった。しかし赤方偏移 4.5 (今から約 123 億年前、宇宙年齢が約 15 億年だった頃)の宇宙における [CII]158 輝線天体の個数密度の上限値を得て、今後のアルマ望遠鏡の観測による [CII]158 輝線天体探査の可能性について検討したところ、数年間の観測の蓄積が進めば [CII]158 輝線天体を捉えられる可能性が示唆された (Matsuda, Nagao, et al. 2015)。

(4) 赤方偏移 5 (今から約 126 億年前、宇宙年齢が約 12 億年だった頃)の塵に覆われた銀河に着目し、アルマ望遠鏡で観測した [CII]158 輝線と [NII]205 輝線を組み合わせ、この銀河の金属量を測定した。同じ天体に対する微細構造輝線を用いた金属量測定は既に研究代表者らにより過去に行われているが (引用文献②)、その際は [NII]205 輝線だけがアルマ望遠鏡で観測したものであり、[CII]158 輝線は集光力が低いエイペックス望遠鏡で観測したものをしていた。本研究では必要な両輝線をいずれもアルマ望遠鏡で観測して比較したところ、引用文献②で見られていた輝線間での速度プロファイルの不可解な差異は完全に解消した。また、この天体の金属量は引用文献②で示唆されていたよりも若干高く、太陽金属量と同程度であることが分かった。赤方偏移 5 という初期宇宙において既にこのような高い金属量を持つ銀河が存在するという事は、宇宙初期の短期間の間に一気に化学進化が進んだことを意味するため、宇宙化学進化を考える上で非常に興味深い結果だといえる (De Breuck et al. 2014)。

(5) 赤方偏移 4.7 にあり、塵に覆われた銀河が合体しつつあるようなシステムについて、アルマ望遠鏡を用いて [CII]158 輝線の高空間分解能観測を行い、塵の影響を受けずにこのシステムの力学状態を精密に計測した。その結果、星形成の材料供給の観点で重要なガス円盤が、あまり擾乱を受けずに存在していることが明らかになった (Carniani et al. 2013)。上記 (4) で見た銀河の [CII]158 輝線でもガス円盤が捉えられていることを踏まえると、遠方の塵に覆われた銀河ではガス円盤が重要な役割を担っていることが推測される。

(6) 塵に覆われた銀河の徹底解明を SPICA による中間赤外線・遠赤外線での高感度観測によって推進するための戦略立案を、光赤天連 SPICA タスクフォースおよび別途企画したワークショップにて進めた。その結果、これまで想定されていた中間赤外線および遠赤外線での分光サーベイだけでなく、広視野の中間赤外線撮像サーベイを併用したプログラムにより遠方の塵に覆われた銀河の系統的観測を進めることが有効であることを明らかにした。この結果は答申としてまとめ、光赤天連を通して広く日本の光学赤外線天文学の研究者コミュニティに報告した。

<引用文献>

- ① T. Nagao, R. Maiolino, A. Marconi, H. Matsuhara, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 526, A149 (2011)
- ② T. Nagao, R. Maiolino, C. De Breuck, P. Caselli, B. Hatsukade, K. Saigo, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 542, L34 (2012)

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 31 件)

- ① Y. Toba, T. Nagao, “Search for Hyper Infrared-Luminous Dust Obscured Galaxies Selected with WISE and SDSS”, *The Astrophysical Journal* (査読有), Vol. 820, 46 (2016)
DOI: 10.3847/0004-637X/820/1/46
- ② Y. Toba, T. Nagao, et al. (著者数 34 名中 2 番目), “Hyper-luminous Dust Obscured Galaxies discovered by the Hyper Suprime-Cam on Subaru and WISE”, *Publications of the Astronomical Society of Japan* (査読有), Vol. 67, 86 (2015)
DOI: 10.1093/pasj/psv057
- ③ Y. Matsuda, T. Nagao, et al. (著者数 8 名中 2 番目), “The ALMA Patchy Deep Survey: A Blind Search for [CII] Emitters at $z \sim 4.5$ ”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* (査読有), Vol. 451, 5660 (2015)
DOI: 10.1093/mnras/stv1044
- ④ C. De Breuck, et al. (著者数 12 名中 8 番目), “ALMA resolves turbulent, rotating [CII] emission in a young starburst galaxy at $z=4.8$ ”, *Astronomy and Astrophysics* (査読有), Vol. 565, A59 (2014)
DOI: 10.1051/0004-6361/201323331

- ⑤ C. Ly, M. Malkan, T. Nagao, et al. (著者数 6 名中 3 番目), “Direct Gas-phase Metallicities, Stellar Properties, and Local Environments of Emission-line Galaxies at Redshifts below 0.90”, *The Astrophysical Journal* (査読有), Vol. 780, 122 (2014)
DOI: 10.1088/0004-637X/780/2/122
- ⑥ T. Nagao, et al. (著者 6 名中 1 番目), “FIR-Submm Metallicity Diagnostics for High- z Galaxies”, *ASP Conference Series* (査読無), Vol. 476, 29 (2013)
<http://aspbooks.org/custom/publications/paper/476-0029.html>
- ⑦ S. Carniani, et al., (著者 13 名中 11 番目), “Strongly star-forming rotating disks in a complex merging system at $z=4.7$ as revealed by ALMA”, *Astronomy and Astrophysics* (査読有), Vol. 559, A29 (2013)
DOI: 10.1051/0004-6361/201322320

[学会発表] (計 44 件)

- ① T. Nagao, “Synergetic studies with Subaru and SPICA”, Subaru Users Meeting FW2015, 2016 年 1 月 21 日, KKR ホテル熱海(静岡県熱海市),
- ② 長尾透, “Optical views of dense gas clouds at the circumnuclear region in AGNs” (招待講演), 国立天文台 ALMA ワークショップ “AGN 銀河の中心 1kpc→1pc スケールでの質量降着機構の理解に向けて”, 2015 年 12 月 22 日, 国立天文台三鷹(東京都三鷹市)
- ③ T. Nagao, “Fine-structure lines of studying the evolution of galaxies and SMBHs at high redshift” (招待講演), Far-infrared fine-structure line workshop, 2015 年 6 月 10 日, ハイデルベルク(ドイツ)
- ④ 長尾透, “Low-metallicity active galactic nuclei: Challenges toward identifying young SMBHs” (招待講演), 初代星初代銀河研究会 2015, 2015 年 1 月 21 日, 東北大学(宮城県仙台市)
- ⑤ T. Nagao, “Observational studies of the quasar evolution” (招待講演), China-Subaru collaboration workshop 2014, 2014 年 11 月 29 日, 上海(中国)
- ⑥ T. Nagao, “Extragalactic studies with ALMA archival data” (招待講演), East-Asia ALMA Science Workshop, 2014

年7月14日, 濟州島(韓国)

- ⑦ T. Nagao, “SPICA, for revealing the obscured chemical evolution of galaxies” (招待講演), SPICIA Science Workshop, 2014年5月23日, ライデン(オランダ)
- ⑧ 長尾透, “Extragalactic studies with ALMA archival data” (招待講演), 日本天文学会2014年春季年会ALMA特別セッション, 2014年3月19日, 国際基督教大学(東京都三鷹市)
- ⑨ T. Nagao, “Sub-mm views of high-z AGN hosts: their chemical evolution”, East-Asia AGN Workshop 2013, 2013年8月21日, ホテルブルーウェーブイン札幌(北海道札幌市)
- ⑩ T. Nagao, “Chemical properties of active galactic nuclei” (招待講演), Seeking the leading actor on the cosmic stage, 2013年6月25日, シチリア(イタリア)
- ⑪ T. Nagao, “Probing the evolution of the physical and chemical properties of star-forming galaxies using SPICA/MCS”, From exoplanets to distant galaxies: SPICA’s new window on the cool Universe, 2013年6月18日, 東京大学(東京都文京区)

[図書] (計0件)

[産業財産権]

○出願状況 (計0件)

○取得状況 (計0件)

[その他]

ホームページ等

すばる望遠鏡HSCを用いた塵に覆われた進化途上の銀河の発見に関するプレスリリース

https://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2015/08/26/j_index.html

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長尾 透 (NAGAO, Tohru)

愛媛大学・宇宙進化研究センター・教授

研究者番号: 00508450