

遠方銀河と宇宙再電離の研究

研究代表者 井上 昭雄
(先進理工学部 物理学科 教授)

1. 研究課題

宇宙の基本構成要素である銀河が、どのように誕生し、どのように進化し、現在私たちが棲む銀河系のようになるかを解明する学問分野—銀河形成進化論—は、現代の宇宙物理学・天文学のフロンティアの一つとなっている。中でも、宇宙年齢 10 億年未満の時代の銀河探査は、宇宙で最初の銀河—初代銀河—の形成に関する直接的な観測データを提供する意義がある。また、初代銀河の形成と並行して起こった超巨大ブラックホールの形成と、それらの銀河進化への影響を理解することも重要な課題となっている。さらに、その時代に起こった宇宙全体の相変化である宇宙再電離現象は、その後の銀河の形成や進化に多大な影響を与えた重要性がある。宇宙再電離現象には初代銀河や超巨大ブラックホールが深く関わっているはずであるが、未解明な点が多い。本研究では、(1)アルマ望遠鏡、(2)すばる望遠鏡など(他の大型可視近赤外線望遠鏡を含む)、(3)NASA James Webb Space Telescope (JWST)を用いた遠方銀河の観測研究を行なう。さらに、(4)次世代の宇宙望遠鏡計画の立案と推進も行なう。これらの研究により、初代銀河形成と宇宙再電離の理解を目指す。

2. 主な研究成果

2.1 アルマ望遠鏡による遠方銀河の観測

遠方宇宙の銀河からのさまざまなイオンや分子による輝線および吸収線を用いた星間物理学研究を推進し多数の成果が得られた。まず、宇宙再電離期の銀河の一酸化炭素分子輝線を観測し、未検出であったものの、これまでより強い上限値を与えることに成功した。これは若い銀河の星間物質中の元素量が少なく、水素分子ガスに比べて一酸化炭素分子の量が比較的少ないことを示唆する[1]。また、別の銀河の 2 階電離酸素イオンの輝線をより高い空間分解能で観測し、電離ガス、宇宙塵、若い星団の分布に空間的なズレがあることを初めて見出した[2]。さらに別の銀河の 1 階電離炭素イオンの輝線を観測し、銀河から銀河外へと電離ガスが噴き出している可能性を見出した[3]。関連して、超大質量ブラックホールがエンジンとなるクェーサー天体の水酸基分子吸収線を観測することで、クェーサーの母銀河から分子ガスが流出していることを突き止めた。これは、クェーサー活動による星形成活動の抑制効果を具体的に示す重要な成果であり、プレスリリースを出してメディアに取り上げられた[4]。他に、宇宙全体の星形成活動やクェーサー活動のピークとされる時代の電波銀河を研究した。アルマ望遠鏡による一酸化炭素分子の高解像観測データや米国の VLA という電波干渉計のデータを総合した研究である。この銀河は 2 個の円盤銀河が合体途中であり、その一方の銀河に超大質量ブラックホールがある。そこから噴き出したジェットが明るい電波放射を出している。このジェットの起源や銀河の星間媒質との相互作用、および、円盤銀河の回転などを調査した。また、分子ガスの噴き出しがあることも見出した。なお、これらの成果は大学院生によるものである[5, 6]。

2.2 すばる望遠鏡などによる遠方銀河の観測

すばる望遠鏡に搭載された超主焦点カメラ (Hyper Suprime-Cam; HSC) は世界の 8-10m 級光学望遠鏡で最大の観測視野を誇り、満月 7 個分の面積を一度に観測できる。HSC を用いて銀河間ガスの広域探査を実施した。同じ大規模構造に属する銀河の分布とガスの分布を相互比較することで、コズミックウェブと呼ばれる大規模構造の中で銀河がどのように形成進化しているのか解明できる。将来的にはすばる望遠鏡の次世代旗艦装置である主焦点分光器 (Prime-Focus Spectrograph; PFS) による大規模分光探査による研究へと発展していく [7]。

2.3 JWST による遠方銀河の観測

ジェームズウェッブ宇宙望遠鏡 (JWST) はその登場以来 1 年半が経過し、初期宇宙の銀河形成に対するこれまでの研究を大幅に塗り替える革命的な成果を出し続けている。その興味深い発見の一つとして、超大質量ブラックホールを擁する活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) が予想より多く見つかったことが挙げられる。一方、そのスペクトルを調べてみると、すばる望遠鏡などによる広視野探査によってすでに見つかった AGN 種族—ブルドッグ—によく似ていることを見出した [8]。つまり、すばる望遠鏡などで見つかった AGN を一桁ほどスケールダウンした AGN が JWST による高感度の観測で見えてきたことを意味している。この種の AGN の銀河とブラックホール進化における位置づけなどを議論した。この成果はプレスリリースを出しメディアに取り上げられた。

2.4 次世代宇宙望遠鏡計画の推進

ポスト JWST を見据え、日本独自の宇宙望遠鏡を開発し、世界の天文学をリードしようとする計画 GREX-PLUS (Galaxy and Reionization EXplorer and PLanetary Universe Spectrometer) を推進した。GREX-PLUS は、JAXA 宇宙科学研究所が戦略的に実施する中型計画 (予算規模 400 億円、このクラスが JAXA の宇宙科学ミッションで最大規模) の 2030 年代前半の打上枠を目指す候補 3 計画の一つである。JAXA 宇宙科学研究所の執行部や理学委員会との対話により、より良いミッションへと磨き上げ、来年度に一つの候補へと絞り込まれる予定である。今年度は数千万円の予算を受け、科学衛星・望遠鏡メーカーと概念検討を進めた。また、日本学術会議が募集した未来の学術振興構想にも提案し、掲載された (No. 168)。

3. 研究業績

3.1 学術論文

主な成果で言及した 8 本。他 9 本の査読付き論文を出版

[1] Big Three Dragons: Molecular Gas in a Bright Lyman-break Galaxy at $z=7.15$

Hashimoto, T., **Inoue, A. K.**, Sugahara, Y., Fudamoto, Y., et al.

2023, The Astrophysical Journal, Vol.952, id.48, 10 pp.

[2] The 300 pc Resolution Imaging of a $z=8.31$ Galaxy: Turbulent Ionized Gas and Potential Stellar Feedback 600 Million Years after the Big Bang

Tamura, Y., Bakx, T. J. L. C., **Inoue, A. K.**, Hashimoto, T., Tokuoka, T., et al.

2023, The Astrophysical Journal, Vol.952, id.9 14 pp.

[3] The Extended [C II] under Construction? Observation of the Brightest High- z Lensed

Star-forming Galaxy at $z=6.2$

Fudamoto, Y., **Inoue, A. K.**, Coe, D., Welch, B., Acebron, A., et al.

2024, The Astrophysical Journal, Vol.961, id.71, 9 pp.

[4] Molecular Outflow in the Reionization-epoch Quasar J2054-0005 Revealed by OH 119 μm Observations

Salak, D., Hashimoto, T., **Inoue, A. K.**, Bakx, T. J. L. C., Donovski, D., et al.

2024, The Astrophysical Journal, Vol.962, id.1, 15 pp.

[5] Revisiting the Dragonfly galaxy - I. High-resolution ALMA and VLA observations of the radio hotspots in a hyper-luminous infrared galaxy at $z=1.92$

Zhong, Y., **Inoue, A. K.**, Sugahara, Y., Morokuma-Matsui, K., Komugi, S., et al.

2023, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.522, pp.6123-6136

[6] Revisiting the Dragonfly galaxy II. Young, radiatively efficient radio-loud AGN drives massive molecular outflow in a starburst merger at $z=1.92$

Zhong, Y., **Inoue, A. K.**, Sugahara, Y., Morokuma-Matsui, K., Komugi, S., et al.

2024, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.529, pp.4531-4553

[7] Photometric IGM tomography with Subaru/HSC: the large-scale structure of Ly α emitters and IGM transmission in the COSMOS field at $z\sim 5$

Kakiichi, K., Hennawi, J. F., Ono, Y., **Inoue, A. K.**, Ouchi, M., Ellis, R. S., et al.

2023, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.523, pp.1772-1798

[8] Similarity between Compact Extremely Red Objects Discovered with JWST in Cosmic Dawn and Blue-excess Dust-obscured Galaxies Known in Cosmic Noon

Noboriguchi, A., **Inoue, A. K.**, Nagao, T., Toba, Y., Misawa, T.

2023, The Astrophysical Journal Letters, Vol.959, id.L14, 7pp.

3.2 総説・著書

該当なし

3.3 招待講演

[1] 「JWST による銀河進化論 革命のはじまり？」青山学院大学山崎了研究室セミナートーク
2023 年 4 月 21 日

[2] “HSC MB survey for galaxy evolution and future space mission GREX-PLUS” HSC Medium-band filter Nagoya workshop 2023 年 9 月 1 日

[3] 「銀河形成・惑星系形成観測ミッション」第 67 回宇宙科学技術連合講演会 JAXA 宇宙科学研究所タウンホールミーティング 2023 年 10 月 19 日

[4] 「銀河進化・惑星系形成観測ミッション (GREX-PLUS) WG」第 24 回宇宙科学シンポジウム 2024 年 1 月 5 日

3.4 受賞・表彰

該当なし

3.5 学会および社会的活動

- [1] 日本天文学会早川幸男基金選考委員会 委員長
- [2] 光学赤外線天文連絡会 将来計画検討専門委員会 委員
- [3] 国際天文学連合(IAU) Commission J3 “Galaxies at the Epoch of Reionization”
Organizing Committee Member
- [4] 宇宙科学研究所宇宙理学会 委員
- [5] 宇宙科学研究所宇宙理学委員会 銀河進化・惑星系形成観測ミッション時限 WG 主査
- [6] Resolving the Extragalactic Universe with ALMA & JWST SOC/LOC Chair
- [7] NECO school: Science and methods for wide-field photometric and spectroscopic
extragalactic and cosmological surveys, SOC

4. 研究活動の課題と展望

2023 年度で本重点研究課題は終了し、2024 年度からは新たに第二期として、「革新的望遠鏡群を駆使した銀河形成進化論研究」と題した課題をスタートさせる。具体的には、JWST はもとより、2023 年 7 月に打上成功した欧州の Euclid 衛星の超広視野撮像データを活用した銀河進化研究を推進する。また、アルマ望遠鏡やすばる望遠鏡による観測データも豊富に利用可能であり、これらを組み合わせた銀河進化研究を推進する。さらに、わが国独自の宇宙望遠鏡計画 GREX-PLUS も推進する。