

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

遠方銀河が放射する波長 88 ミクロンの二階電離酸素輝線や波長 158 ミクロンの一階電離炭素輝線による星間物理学研究で多数の成果が上がった。2018 年当時の最遠方天体であった赤方偏移 9.1(宇宙年齢 5.5 億年)の銀河の酸素輝線について、アルマ望遠鏡で追観測を行なった結果を論文発表した[1]。このデータは、アルマ望遠鏡のアンテナ配置を広げ、空間解像度を高めたデータとなっている。これにより、最遠方銀河の内部構造を初めて解析した。観測データは回転の兆候を見せており、詳しいモデル解析の結果、宇宙最遠方の回転円盤であると突き止めた。この成果はプレスリリースを行ない多数のメディアにも取り上げられた。また、赤方偏移 7.2 の銀河の酸素輝線と炭素輝線のデータを解析した研究では、酸素輝線分布が複雑な構造を示し、少なくとも 2 つの成分に分かれていることが分かった[2]。これは電離したガスが銀河から噴き出している可能性と、銀河合体の可能性の 2 通りが考えられる。次いで、遠方銀河の酸素輝線と炭素輝線の強度比は後の時代の銀河より高いことが知られている。この起源を調べるため、近傍から遠方宇宙にわたる銀河の電離輝線観測を網羅し、電離ガスの物理状態が宇宙史に沿って変化していることを明らかにした[3]。すなわち、遠方宇宙の若い銀河ほどガスの電離状態が高く、そのために、2 階電離した酸素輝線強度が 1 階電離の炭素輝線強度より高くなる。

2.2 すばる望遠鏡などによる遠方銀河の観測

すばる望遠鏡の超広域撮像サーベイで発見された、近傍宇宙に存在するが初期宇宙の銀河と似た性質を持つ一群の矮小銀河がある。酸素や炭素といった天文学的な意味での「金属元素」が太陽組成に比べると著しく乏しく、極低金属銀河 Extremely Metal-Poor Galaxy (EMPG) と呼ばれている。これらを詳しく分光観測する大規模観測プロジェクト EMPRESS に参加している。今年度の大きな成果として、宇宙開闢時のビッグバン元素合成でできたヘリウム量について新しい制限を得た[4]。この結果は従来のビッグバン元素合成理論の予想やプランク衛星による宇宙マイクロ波背景放射の観測結果とは少し齟齬がある。仮に標準モデルを超えて、レプトン非対称性を導入すれば解消することが分かった。

2.3 JWST による遠方銀河の観測

2022年7月に JWST のデータが公開されるやいなや、天文学のあらゆる分野に革命的な成果がもたらされ始めた。わたしたちは JWST の赤外線観測性能、特に、高空間解像度にいち早く着目し、遠方宇宙では珍しい渦巻構造を持つ銀河を調べた[5]。JWST で初めて公開された深宇宙撮像画像の中で見かけ上「赤い」渦巻銀河を詳しく調べ、それらはこれまで知られていた中で最遠方の渦巻銀河であること、また、現在の宇宙では珍しい、星形成が非活発な渦巻き銀河であることを明らかにした。この成果はプレスリリースを行ない、多数のメディアに取り上げられた。また、JWST の画像データから超巨大ブラックホールの起源に関しても興味深い成果を得た[6]。これまで見つかった超巨大ブラックホールは太陽質量の10億倍程度のものであったが、その100分の1程度の質量の「軽い」巨大ブラックホールを擁する銀河を発見した。JWST は超遠方宇宙の探査でも革命的な結果を出している。これまで考えられてきたよりも明るい銀河の個数密度が高い可能性が見えてきた。もしかすると宇宙構造形成の標準シナリオのほころびかもしれない。ただし、初期宇宙で星形成の効率が高いと仮定すれば、標準シナリオの範囲で観測結果を説明できることが分かった[7]。

2.4 次世代宇宙望遠鏡計画の推進

JWST のようなすばらしい観測装置の登場により天文学に革命が起こっている中、わたしたちは早くもポスト JWST を見据え、日本が主導する新しい宇宙望遠鏡計画を推進している。2022年度に、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)の新しい選定プロセスが始まり、その候補の一つとして、わたしたちが提案する GREX-PLUS (Galaxy Reionization EXplorer and PLANetary Science Spectrometer) をベースとした計画が選ばれた。12月に宇宙科学研究所公式の「銀河形成・惑星系形成観測ミッション時限WG」となり、数千万円規模の予算を得て衛星システム検討を開始した。並行して、30名の執筆者による GREX-PLUS Science Book を編纂し、公開した[8]。

3. 研究業績

3.1 学術論文

主な成果で言及した7本。他7本の査読付き論文を出版

[1] Tokuoka, T., Inoue, A. K., Hashimoto, T., 他13名

“Possible Systematic Rotation in the Mature Stellar Population of a $z = 9.1$ Galaxy”
The Astrophysical Journal Letters, Vol. 933, id. L19, 7 pp. (2022)

- [2] Ren, Y. W., Fudamoto, Y., **Inoue, A. K.**, 他 13 名
“Updated Measurements of [O III] 88 μm , [C II] 158 μm , and Dust Continuum Emission from a $z = 7.2$ Galaxy”
The Astrophysical Journal, Vol.927, id.32, 16 pp. (2021)
- [3] Sugahara, Y., **Inoue, A. K.**, Fudamoto, Y., Hashimoto, T., Harikane, Y., Yamanaka, S.
“Bridging Optical and Far-infrared Emission-line Diagrams of Galaxies from Local to the Epoch of Reionization: Characteristic High [O III] 88 μm /SFR at $z > 6$ ”
The Astrophysical Journal, Vol.935, id.119, 19 pp. (2022)
- [4] Matsumoto, A., Ouchi, M., Nakajima, K., 他 42 名 (**Inoue, A. K.** 含む)
“EMPRESS. VIII. A New Determination of Primordial He Abundance with Extremely Metal-poor Galaxies: A Suggestion of the Lepton Asymmetry and Implications for the Hubble Tension”
The Astrophysical Journal, Vol.941, id.167, 14 pp. (2022)
- [5] Fudamoto, Y., **Inoue, A. K.**, Sugahara, Y.
“Red Spiral Galaxies at Cosmic Noon Unveiled in the First JWST Image”
The Astrophysical Journal Letters, Vol.938, id.L24, 6 pp. (2022)
- [6] Onoue, M., Inayoshi, K., Ding, X., Li, W., Li, Z., Molina, J., **Inoue, A. K.**, 他 2 名
“A Candidate for the Least-massive Black Hole in the First 1.1 Billion Years of the Universe”
The Astrophysical Journal Letters, Vol.942, id.L17, 9 pp. (2023)
- [7] Inayoshi, K., Harikane, Y., **Inoue, A. K.**, Li, W., Ho, L. C.
“A Lower Bound of Star Formation Activity in Ultra-high-redshift Galaxies Detected with JWST: Implications for Stellar Populations and Radiation Sources”
The Astrophysical Journal Letters, Vol.938, id.L10, 6 pp. (2022)

3.2 総説・著書

JAXA 宇宙科学研究所が戦略的に実施する中型計画 GREX-PLUS 宇宙望遠鏡による科学を取りまとめた文書を arXiv にて公開

- [8] GREX-PLUS Science Team: **Inoue, A. K.**, et al., “GREX-PLUS Science Book”
arXiv:2304.08104

3.3 招待講演

- [1] 遠方銀河観測レビュー2022 : JWST と ALMA の成果
初代星・初代銀河研究会 2022, 徳島大学, 2022 年 11 月 11 日

3.4 受賞・表彰

3.5 学会および社会的活動

- [1] 国立天文台すばる観測時間割当委員会 委員長
- [2] 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
- [3] 日本天文学会早川幸男基金選考委員会 委員
- [4] 光学赤外線天文連絡会 将来計画検討専門委員会 委員
- [5] 国際天文学連合 (IAU) Commission J3 “Galaxies at the Epoch of Reionization” Organizing Committee Member

4. 研究活動の課題と展望

アルマ望遠鏡の新しい観測データも大量に届いており、2023年度は引き続き、大学院生の協力も得つつ解析し、論文成果を発表していく。また、JWSTのデータは公開サーベイデータも豊富にあり、それらを使うだけでもすばらしい科学成果を上げることができる。加えて、わたしたち独自のJWSTデータも多く届き始め、鋭意解析中である。大学院生や博士研究員の力を借りて、成果を出していく。JAXA宇宙科学研究所の時限WGとして、GREX-PLUSのシステム検討を引き続き進める。2023年度末にはミッション提案書の提出が求められている。その後の選考により、ミッション採択となれば、さらに大きな予算規模でプロジェクトを推進することになる。