

革新的望遠鏡群を駆使した銀河形成進化論研究

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。特に、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。本研究では、(1) ジェームズウェーブ宇宙望遠鏡 (JWST)、(2) アルマ望遠鏡、(3) すばる望遠鏡など(他の大型可視近赤外線望遠鏡を含む)、(4) 欧州の Euclid 衛星と米国の Roman 衛星を駆使した遠方銀河の観測研究を行なう。さらに、(5) 日本の次世代宇宙望遠鏡計画 GREX-PLUS を推進する。これらの研究により、銀河形成進化論の包括的理解を目指す。

2. 主な研究成果

2.1 JWST による観測研究

ジェームズウェーブ宇宙望遠鏡 (JWST) による観測で、初期宇宙に存在した、非常にサイズが小さく恒星密度が極めて高い星団を 5 つ発見し、Nature 誌に論文を出版した[1]。これらの星団は銀河系内にある球状星団の祖先と考えられる。また、地上望遠鏡で得られた画像データから、赤方偏移 13 辺りの超遠方銀河候補を 2022 年に発見し、それらを JWST で分光観測した。結果として、実は赤方偏移は 4 程度であることが分かった[2]。このように超遠方銀河候補の中には低赤方偏移の銀河の混入がある。特に明るい銀河候補にそのような混入が多い傾向がある。そこで、分光確認された銀河のみで個数密度を測定し、宇宙の星形成率密度を議論した[3]。これまでにアルマ望遠鏡で 1 階電離炭素と 2 階電離酸素が観測された遠方銀河について JWST で詳細に分光観測し、その銀河の内部構造を詳しく議論した[4]。

2.2 アルマ望遠鏡による遠方銀河の観測

1 階電離炭素が検出されている遠方銀河 13 個について、2 階電離酸素のアルマ望遠鏡観測を実施したところ、1 つの銀河からしか検出できなかった。これまでに観測されてきた紫外線で明るい銀河では、酸素輝線の方が炭素輝線より明るい例が多かったことと正反対の結果であった[5]。この結果により、酸素と炭素の輝線比は非常にバリエーションに富んでいることが分かった。また、遠方銀河の星間塵の観測結果を収集し、包括的な研究を実施した[6]。

2.3 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 に複数の狭帯域フィルターを搭載して得られた 24 平方度の広域かつ高感度な撮像データを収集し、水素ライマン α 輝線を強く放つ銀河の大規模探査を実施した[7]。これにより、現代天文学のフロンティアの一つである宇宙再電離の時期や電離史について議論した。

2.4 Euclid 衛星や Roman 衛星による観測研究

2023 年に打ち上げられた Euclid 衛星は、可視光から近赤外線帯 2 ミクロンまでの掃天観測を進めている。Euclid 衛星と相補的な波長帯をカバーする地上望遠鏡群や Spitzer 衛星の画像データと組み合わせた大規模な撮像探査に参加した[8]。

2.5 日本の次世代宇宙望遠鏡計画 GREX-PLUS の推進

日本独自の宇宙望遠鏡計画 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である。当初は 2024 年度に一つの候補に絞り込まれる予定であったが、宇宙科学研究所側の事情により、3 年後に延期となった。また、天文学関連の観測装置、計画に関する最大規模の国際会議において、GREX-PLUS の概念検討報告を行なった[9]。

3. 研究業績

3.1 学術論文

主な成果で言及した 9 本を含む、14 本の査読付き論文を出版した。

[1] Bound star clusters observed in a lensed galaxy 460 Myr after the Big Bang

Adamo, A., Bradley, L. D., Vanzella, E., Claeysens, A., Welsh, B., Diego, J. M., Mahler, G., Oguri, M., Sharon, K., Abdurro'uf, Hsiao, T. Y.-Y., Xu, X., Messa, M., Lassen, A. E., Zackrisson, E., Brammer, G., Coe, D., Kokorev, V., Ricotti, M., Zitrin, A., Fujimoto, S., **Inoue, A. K.**, Resseguier, T., Rigby, J. R., Jiménez-Teja, Y., Windhorst, R. A., Hashimoto, T., Tamura, Y.

2024, Nature, Vol.632, pp.513-516

[2] JWST/NIRSpec spectroscopy of intermediate-mass quiescent galaxies at $z \sim 3-4$

Sato, R. A., **Inoue, A. K.**, Harikane, Y., Shimakawa, R., Sugahara, Y., Tamura, Y., Hashimoto, T., Ito, K., Yamanaka, S., Mawatari, K., Fudamoto, Y., Ren, Y. W.

2024, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.534, pp.3552-3564

[3] JWST, ALMA, and Keck Spectroscopic Constraints on the UV Luminosity Functions at $z \sim 7-14$: Clumpiness and Compactness of the Brightest Galaxies in the Early Universe

Harikane, Y., **Inoue, A. K.**, Ellis, R. S., Ouchi, M., Nakazato, Y., Yoshida, N., Ono, Y., Sun, F., Sato, R. A., Ferrami, G., Fujimoto, S., Kashikawa, N., McLeod, D., Pérez-González, P. G., Sawicki, M., Sugahara, Y., Xu, Y., Yamanaka, S., Carnall, A. C., Cullen, F., Dunlop, J. S., Egami, E., Grogin, N., Isobe, Y., Koekemoer, A. M., Laporte, N., Lee, C.-H., Magee, D., Matsuo, H., Matsuoka, Y., Mawatari, K., Nakajima, K., Nakane, M., Tamura, Y., Umeda, H., Yanagisawa, H.

2025, The Astrophysical Journal, Vol.980, id.138, 26 pp.

- [4] RIOJA. Complex Dusty Starbursts in a Major Merger B14-65666 at $z = 7.15$
 Sugahara, Y., Álvarez-Márquez, J., Hashimoto, T., Colina, L., **Inoue, A. K.**, Costantin, L., Fudamoto, Y., Mawatari, K., Ren, Y. W., Arribas, S., Bakx, T. J. L. C., Blanco-Prieto, C., Ceverino, D., Crespo Gómez, A., Hagimoto, M., Hashigaya, T., Marques-Chaves, R., Matsuo, H., Nakazato, Y., Pereira-Santaella, M., Tamura, Y., Usui, M., Yoshida, N.
 2025, *The Astrophysical Journal*, Vol.981, id.135, 18 pp.
- [5] Gas conditions of a star-formation selected sample in the first billion years
 Bakx, T. J. L. C., Algera, H., Venemans, B., Sommovigo, L., Fujimoto, S., Carniani, S., Hagimoto, M., Hashimoto, T., **Inoue, A. K.**, Salak, D. Serjeant, S., Vallini, L., Eales, S., Ferrara, A., Fudamoto, Y., Imamura, C., Inoue, S., Knudsen, K. K., Matsuo, H., Sugahara, Y., Tamura, Y., Taniguchi, A., Yamanaka, S.
 2024, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, Vol.532, pp.2270-2288
- [6] SERENADE. II. An ALMA Multiband Dust Continuum Analysis of 28 Galaxies at $5 < z < 8$ and the Physical Origin of the Dust Temperature Evolution
 Mitsuhashi, I., Harikane, Y., Bauer, F. E., Bakx, T. J. L. C., Ferrara, A., Fujimoto, S., Hashimoto, T., **Inoue, A. K.**, Iwasawa, K., Nishimura, Y., Imanishi, M., Ono, Y., Saito, T., Sugahara, Y., Umehata, H., Vallini, L., Wang, T., Zavala, J. A.
 2024, *The Astrophysical Journal*, Vol.971, id.161, 18 pp.
- [7] SILVERRUSH. XIV. Ly α Luminosity Functions and Angular Correlation Functions from 20,000 Ly α Emitters at $z \sim 2.2-7.3$ from up to 24 deg² HSC-SSP and CHORUS Surveys: Linking the Postreionization Epoch to the Heart of Reionization
 Umeda, H., Ouchi, M., Kikuta, S., Harikane, Y., Ono, Y., Shibuya, T., **Inoue, A. K.**, Shimasaku, K., Liang, Y., Matsumoto, A., Saito, S., Kusakabe, H., Kageura, Y., Nakane, M.
 2025, *The Astrophysical Journal Supplement Series*, Vol.277, id.37, 24 pp.
- [8] Euclid preparation: LXIV. The Cosmic Dawn Survey (DAWN) of the Euclid Deep and Auxiliary Fields
 Euclid Collaboration; McPartland, C. J. R., et al. (including **Inoue, A. K.** as 26th author among 292 authors)
 2025, *Astronomy & Astrophysics*, Vol.695, id.A259, 15 pp.
- [9] Concept study of GREX-PLUS: Galaxy Reionization EXplorer and PLanetary Universe Spectrometer
Inoue, A. K., Yamamura, I., Suzuki, T., Nakagawa, T., Kaneda, H., Nomura, H., Kodama, T., Wada, T., Iwamuro, F., Motohara, K., Komiyama, Y., Oyabu, S., Harikane, Y., Moriya, T., Ouchi, M., Yamada, T., Notsu, S.
 2024, *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, Volume 13092, id.130920Y 17 pp.

3.2 総説・著書

該当なし

3.3 招待講演

- [1] 「GREX-PLUS と JASMINE のシナジー」 JASMINE Consortium Meeting 2024, 2024年8月6日
- [2] “An introduction to GREX-PLUS and its WFC survey” Early Universe Revealed by JWST and Future Prospects for Wide Field Surveys with GREX-PLUS, Belgium Brussels, 2025年2月11日
- [3] “High-z LAE search and GREX-PLUS” Korea-ULTIMATE kick-off meeting, Seoul National University, 2025年2月20日
- [4] 「南極 12m テラヘルツ望遠鏡と GREX-PLUS で拓く未来の超広視野天文学」 南極 12m テラヘルツ望遠鏡で明らかにする銀河とブラックホールの形成と進化, 国立極地研究所, 2025年3月13日
- [5] Roman-Subaru Synergistic Observations and ULTIMATE NB imaging of LyA emitters SPR+ILR joint workshop on extragalactic science, 東京大学天文学教育研究センター, 2025年3月14日

3.4 受賞・表彰

該当なし

3.5 学会および社会的活動

- [1] 日本天文学会代議員
- [2] 日本天文学会早川幸男基金選考委員会 委員長
- [3] 光学赤外線天文連絡会 将来計画検討専門委員会 委員
- [4] 国際天文学連合 (IAU) Commission J3 “Galaxies at the Epoch of Reionization” Organizing Committee Member
- [5] 国立天文台 すばる科学諮問委員会 委員
- [6] 宇宙科学研究所宇宙理学会 委員
- [7] 宇宙科学研究所宇宙理学会 銀河進化・惑星系形成観測ミッション時限 WG 主査

4. 研究活動の課題と展望

本研究課題は 2024 年度から第二期として新たにスタートした。JWST の高感度かつ精細なデータ、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。