

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

アルマ望遠鏡は、コロナ禍による 2020 年 3 月から 1 年間にもおよんだ観測中断期間を経て観測が再開された。その後は大きなトラブルはなく、順調に観測が進捗している。現在、新しい観測データも続々と届きつつあり、次年度に向けた成果発表を準備しているところである。さて、今年度の成果として、中断前に取得したデータの出版がほぼ完了した。中でも 2 本の論文成果をここで取り上げる。一つ目は、観測史上最遠方天体候補を発見し、その銀河の二階電離酸素イオン輝線の観測をした結果を報告した[1]。宇宙年齢 3 億年の時代(赤方偏移 13)に見つかった銀河候補をアルマ望遠鏡で観測したところ、非常に微弱ではあるものの、酸素イオン輝線の兆候を見出した。信号の有意性がまだ不十分で、追観測による確認が必要であるが、この銀河が本物であれば、観測史上最遠方となる。また、これまで想定されていたよりも明るいこともあり、アルマ望遠鏡を含め、世界最先端の望遠鏡による今後の追観測が非常に興味深い。この成果は今年 4 月 7 日にプレスリリースを行ない、同日の夜 9 時台の NHK 全国ニュースで約 5 分間にわたり取り上げられた。それを皮切りに多数のメディアに掲載され、このような研究への国民や社会の非常に高い関心を改めて認識した。もう一つの成果は、少し時代が下った宇宙年齢 8 億年頃にある、二つの銀河が合体しつつあり、激しい星形成活動を行なう銀河の 1 階電離窒素イオン輝線を観測したものである。残念ながら窒素イオンは検出されなかったが、そのため逆に、初期の宇宙には酸素や炭素に比べて窒素は極めて少ないことが明らかとなった。窒素の起源や宇宙の元素組成進化を紐解く重要な成果と言える[7]。最後に、二つ目の成果で

扱った合体銀河について、アルマ望遠鏡による酸素と炭素の輝線観測を最初に報告した 2019 年の私たちの論文に対して、日本天文学会の欧文研究報告論文賞が授与された。

2.2 すばる望遠鏡などによる遠方銀河の観測

すばる望遠鏡の主焦点カメラ Hyper Suprime Cam (HSC) に特製の狭帯域フィルターセットを搭載して深宇宙の撮像データを取得し宇宙再電離について研究する、すばるインテンシブプログラム CHORUS (Cosmic HydrOgen Reionization Unveiled with Subaru) の成果として、これまでで最大スケールにわたる宇宙再電離期の中性水素分布の観測結果を報告した[2]。また、HSC による大規模撮像データで検出された大量の銀河の中から「アノマリー」を持つ特殊な銀河を探知する人工知能を開発し、初期成果を報告した[3]。さらに、HSC データを利用した銀河の電離光子放射率の観測報告[4]に加え、研究室の学生を指導した研究成果も出た。一つは低光度活動銀河核を持つ銀河の形態の特徴をハッブル宇宙望遠鏡の画像をもとに議論した成果[5]、もう一つはすばる望遠鏡の分光器 FOCAS で近傍宇宙の矮小銀河の観測を行ない、酸素存在量の動径分布を明らかにした成果[6]である。

2.3 JWST による遠方銀河の観測

2021 年 12 月 25 日に打ち上げが成功した James Webb Space Telescope (JWST) を用いた観測がいよいよ開始される。初年度の観測計画はすでにスケジュールが決まりつつあり、私たちのプログラムも今年 8 月から最初の観測が実施される。アルマ望遠鏡で観測した最遠方銀河候補もターゲットになっており、観測結果が届くのが非常に楽しみである。

2.4 次世代宇宙望遠鏡計画の推進

JAXA 宇宙科学研究所宇宙理学委員会の下に設置された初代銀河探査機 Research Group (RG) を代表している。今年度は、初代銀河の探査を主目的とする近中間赤外線広視野カメラに加え、惑星科学を主目的とする中間赤外線高分散分光器を搭載する口径 1.2m 級冷却宇宙望遠鏡 GREX-PLUS (Galaxy Reionization EXplorer and PLANetary Universe Spectrometer) へと計画を発展させ、その概念検討を進めた。日本学術会議物理学委員会天文学・宇宙物理学分科会が開催した将来の大型計画シンポジウムでの講演を始め、光学赤外線天文学連絡会シンポジウムでの招待講演を 2 回行なった。また、ヨーロッパで開催された赤外線宇宙望遠鏡計画に関する会議でも招待講演を行なった。宇宙科学研究所に対しては、GREX-PLUS Working Group (WG) 提案書を 10 月に提出するなど、計画の具体化に向けた活動を行なった。

3. 研究業績

3.1 学術論文

主な成果で言及した 7 本。他 8 本の査読付き論文を出版

[1] Harikane, Y., **Inoue, A. K.**, Mawatari, K., 他 11 名
“A Search for H-Dropout Lyman Break Galaxies at $z \sim 12-16$ ”

The Astrophysical Journal, Vol.929, id.1, 15 pp. (2022)

[2] Yoshioka, T., Kashikawa, N., **Inoue, A. K.**, 他 11 名

“CHORUS. IV. Mapping the Spatially Inhomogeneous Cosmic Reionization with Subaru HSC”
The Astrophysical Journal, Vol.927, id.32, 16 pp. (2021)

[3] Tanaka, T. S., Shimakawa, R., Shimasaku, K., Toba, Y., Kashikawa, N., Tanaka, M., **Inoue, A. K.**

“Where’s Swimmy?: Mining unique color features buried in galaxies by deep anomaly detection using Subaru Hyper Suprime-Cam data”

Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.74, pp.1-23 (2022)

[4] Zhong, Y., **Inoue, A. K.**, Yamanaka, S., Yamada, T.

“A Morphological Study of Galaxies Hosting Optical Variability-selected AGNs in the COSMOS Field”

The Astrophysical Journal, Vol.925, id.157, 17 pp. (2022)

[5] Iwata, I., Sawicki, M., **Inoue, A. K.**, 他 8 名

“Ionizing radiation from AGNs at $z > 3.3$ with the Subaru Hyper Suprime-Cam Survey and the CFHT Large Area U-band Deep Survey (CLAUDS)”

Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol.509, pp.1820-1836 (2022)

[6] Kashiwagi, Y., **Inoue, A. K.**, Isobe, Y., 他 6 名

“Subaru/FOCAS IFU revealed the metallicity gradient of a local extremely metal-poor galaxy”

Publications of the Astronomical Society of Japan, Vol.73, pp.1631-1637 (2021)

[7] Sugahara, Y., **Inoue, A. K.**, Hashimoto, T., 他 6 名

“Big Three Dragons: A [N II] 122 μ m Constraint and New Dust-continuum Detection of a $z = 7.15$ Bright Lyman-break Galaxy with ALMA”

The Astrophysical Journal, Vol.923, id.5, 14 pp. (2021)

3.2 総説・著書

[1] 『日経サイエンス』 2021 年 10 月号

特集：宇宙の夜明けを見る 最初の星を探せ 日本発の宇宙望遠鏡計画

井上昭雄、谷口義明

[2] 『力学演習基礎』 学術図書出版社 2021 年 12 月 10 日発行

共著

3.3 招待講演

[1] 「GREX-PLUS」

2021 年度光赤天連シンポジウム「2030 年代の戦略的中型をどうするのか」, 2022 年 2 月 21 日～22 日, オンライン

[2] “GREX-PLUS”

The next generation mid/far-IR space missions — Formulating a European perspective, Jan. 19-21, 2022, Online

[3] “Galaxy formation with large interferometers and synergies with optical/IR telescopes”

Linking the science of large interferometers in the 2030s, Nov. 30-Dec.1, 2021, Online

[4] 「金属欠乏宇宙：最遠方天体とダスト化学進化の視点から」

金属欠乏宇宙 2021, 2021 年 9 月 27 日-30 日 オンライン

[5] 「GREX-PLUS」

2021 年度光赤天連シンポジウム「国際大型計画との関わり方を考える」，2021 年 9 月 6 日～9 日， オンライン

3.4 受賞・表彰

日本天文学会 2021 年度（第 26 回）欧文研究報告論文賞

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] 国立天文台 ALMA 科学諮問委員会 委員

[3] 宇宙科学研究所宇宙理学委員会 初代銀河探査機検討 RG 主査

4. 研究活動の課題と展望

観測再開したアルマ望遠鏡の新しいデータも届いており、研究室の博士研究員や大学院生が精力的に解析を進めている。また、昨年夏に実施した米国の口径 10m Keck 望遠鏡を用いた遠方銀河の観測も成功し、大学院生が解析を進めている。今年の夏には JWST のデータも届く予定であり、どんな宇宙の姿を見せてくれるのか非常に楽しみである。GREX-PLUS の実現に向けた概念検討や研究コミュニティからの幅広い支持の獲得を目指した活動にも力を注いでいく。