

氏 名 池田 遼太

学位(専攻分野) 博士(学術)

学位記番号 総研大甲第 2638 号

学位授与の日付 2026 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 A Census of Spatially Resolved Star-forming Galaxies in the
Distant Universe

論文審査委員 主 査 亀野 誠二

天文科学コース 教授

美濃和 陽典

天文科学コース 准教授

今西 昌俊

天文科学コース 助教

岡本 崇

北海道大学 大学院理学研究院 教授

吉田 直紀

東京大学 大学院理学系研究科 教授

博士論文の要旨

氏 名：池田 遼太

論文題目：A Census of Spatially Resolved Star-forming Galaxies in the Distant Universe

Formation and evolution of massive galaxies that we see in the present Universe is a consequence of complex phenomena with a mixture of galaxy mergers, environmental effects, and various star formation histories. Thus, understanding how and when massive galaxies acquired their stellar structures across cosmic time remains as a fundamental question in modern astronomy. Spatially resolved information on the interstellar medium (ISM) in distant star-forming galaxies (SFGs), a direct progenitor of nearby massive galaxies, is crucial for addressing this conundrum. This thesis presents the spatially resolved studies on SFGs at kiloparsec (kpc) to sub-kiloparsec (sub-kpc) resolutions throughout the active phase of cosmic star formation history, from the cosmic dawn ($z \sim 6$) to the end of the cosmic noon ($z \sim 1$).

First, I present the morphological and kinematical studies of two galaxy clusters at cosmic noon ($1 < z < 1.5$) and show that star formation activity in the cluster SFGs, traced by either dust continuum or Pa α line emission, is more compact than the distributions of stellar or molecular gas, indicating that they are in the active phase of bulge formation. Kinematical analysis shows that the majority of cluster SFGs are rotation-dominated and exhibit a flat rotation curve from 1 kpc to 5 kpc radius, indicating a dense mass distribution at the center. Second, I conduct the joint analyses on sub-kpc resolution Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) and James Webb Space Telescope (JWST) images of three luminous submillimeter galaxies (SMGs) at $3 < z < 4.5$. Given the heterogeneous and incoherent morphologies among various wavelengths and sources, I identify multiple pathways to trigger active star formation in SMGs: secular instability in gas disks in addition to possible minor mergers, and a combination of the efficient gas supply to the central core induced by a gas-rich major merger and the reformation of cold gas disk. Finally, I investigate the spatial extent of the [CII] line emission in 34 SFGs on the star-forming main sequence at $4 < z < 6$ through the interferometric visibility analyses. I find that [CII] line emission is in general more extended than rest-frame UV and FIR continua but can be well-characterized by a single exponential disk component. These results suggest that the spatial extent of [CII] line emission can primarily be explained by photodissociation regions associated with star formation activity, while the contribution from diffuse neutral medium (atomic gas) may further expand the [CII] line distributions, causing their variations among our sample.

In summary, these findings suggest that SFGs form their stellar structure in diverse ways across cosmic time, and that the origins of their intense star formation vary among the sample. However, due to the spatial variation among the ISM tracers, the use of single ISM tracer can potentially lead to misinterpretations of their structural formation. Future studies should scrutinize individual galaxies by observing multiple tracers (CO/[CI]/[CII]/dust continuum) and conduct statistical surveys at sub-kpc resolution to comprehend the prevalence of each evolutionary pathway.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 池田 遼太

Title
論文題目 A Census of Spatially Resolved Star-forming Galaxies in the Distant Universe

本研究は宇宙史における銀河形成の過程を解明するために、宇宙初期から星形成の最盛期 (cosmic noon)を含む赤方偏移 $z \sim 6$ から 1 までの広い範囲で、形成中の多数の銀河をキロパーセク (kpc)より細かく空間分解し構造を調べたものである。

第 1 章のイントロダクションでは銀河の形態分類として知られるハッブル系列がいつどのように生じたか、大質量の銀河はどのように形成されたか、銀河間相互作用が銀河の星形成に与える影響などの未解明問題を提示し、kpc より細かく構造を調べる必要性を述べた。第 2 章では赤方偏移 $z \sim 1.5$ の cosmic noon 期における銀河団環境下での星形成を調査したものであり、XMMXCS J2215.9-1738 銀河団と La Pequeña 銀河団の観測結果に基づいて分子ガスの分布よりコンパクトな kpc 領域で星形成が中心集中していることを明らかにし、1 kpc 以下の半径で鋭く立ち上る回転曲線も示して、バルジの起源とみられる示唆を得た。第 3 章では $z > 4$ のサブミリ波銀河で sub-kpc の星形成構造について述べ、major-merger 起源・ガス円盤の重力不安定性起源・および両者の混成を示唆する 3 天体の詳細な解析に加えて 55 天体のダスト連続波マップを示して星形成の多様性をより強固に示した。第 4 章は $z=4-6$ の星形成銀河で [C II] 輝線によりガスの広がりを 34 天体で調査し、[C II] 輝線の広がりが平均で大質量星形成を示す紫外線より 2.9 倍、ダスト連続波より 1.53 倍大きいことを示した。半数の [C II] 輝線は星形成に伴う光解離領域として解釈できるものの、残りは未知の [C II] 励起エネルギー源を要するという問題を提起した。第 5 章は 2-4 章の結論を総括し、未解明問題への取り組みを提起している。

宇宙史における銀河の星形成という大きなテーマは本論文だけで解明できる簡単なものではないが、本論文の研究成果は高品質で大規模な観測結果を提供し、新たに取り組むべき方向性を示唆するなど分野に重要な貢献をしている。星形成活動の構造を調べる上で、電波干渉計の特性を活かしビジビリティで領域のサイズや渦状腕構造の有無を判定し、輝線の速度場から銀河間相互作用や回転曲線を調べるなど解析方法にも工夫がされており、博士論文としての水準に達している。

本論文の内容は、国際プロジェクトの一員として出願者がデータ解析を担当したものであり、出願者の寄与が十分であることも確認された。出願論文は全て英語で記述され、国際的な学術誌に査読論文を筆頭著者として 4 報、共著者として 18 報出版済みという実績もあり、外国語による研究成果発表能力も十分備わっていると判断された。以上の根拠に基づき、審査委員全員一致で学位の授与に値すると判断した。