

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 15 日現在

機関番号：82645

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26400217

研究課題名(和文) 超広視野観測に基づく銀河形成研究

研究課題名(英文) Studying Galaxy Formation by very Wide-Field Observations

研究代表者

山田 亨 (YAMADA, TORU)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号：90271519

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は密度環境によって銀河形成の偏りが大きい宇宙年齢10億年～30億年の初期の時代に注目し広視野の観測データに基づいて初期の銀河形成過程の解明を目指すものである。代表的な高赤方偏移の大規模構造である $z=3.1$ のSSA22領域に注目し、多色素行解析、輝線強度分布解析、広視野分光観測による銀河間ガス吸収の研究、大質量銀河形成領域のすばる補償光学観測やALMA望遠鏡による詳細研究を行った。また、さらにより高赤方偏移での星形成と密度環境との関連を調べるため、銀河多色スペクトルの解析に基づく $z=4$ の時代の星形成銀河研究を進めた。研究成果は、15編の学術論文、8件の学会発表などで報告した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to investigate the galaxy formation process in the early universe with the age of 1-3Gyr when the galaxy formation was strongly biased to the large scale high density regions, based on the wide field observational data obtained by the Subaru telescope. We focused on a $z=3.1$ SSA22 high density region with a protocluster and studied the distribution of the LyAlpha emission line strength as well as unveiled the presence of large-scale neutral hydrogen inter-galactic gas associated with the structure. We also studied the detailed properties of the progenitors of massive cluster galaxies with Subaru adaptive optics observations as well as ALMA data. We also studied the star-formation properties of the galaxies at $z=4$ base on the analysis of their rest-frame ultraviolet spectra. We found apparently red and faint Lyman Break galaxies are indeed dust-obscured very intense star-forming galaxies. 15 papers and 8 reports for meetings have been published.

研究分野：天文学

キーワード：銀河形成 銀河進化 原始銀河団 すばる望遠鏡 広視野

1. 研究開始当初の背景

銀河の形成過程は、膨張宇宙における密度ゆらぎの重力不安定成長とガスの冷却・加熱過程の帰結として理解される。1990年代以降、観測的には130億年の宇宙史の全般に跨って銀河形成を解明する研究が進められており、その宇宙史的な俯瞰的描像とともに、楕円銀河や円盤銀河の形成過程そのものについても観測的・理論的な理解が進んでいる。とりわけ、日本のすばる望遠鏡、および、主焦点可視光広視野カメラ Suprime Cam や、申請者も制作者の一員である近赤外線撮像分光装置 MOIRCS などを用いた観測的な研究においては、これまでにない広視野での深宇宙観測に大きく貢献し、世界をリードするユニークな研究成果を挙げている。

遠方・初期宇宙において、銀河の形成はその密度環境によってたいへん大きな偏りを示すことが理論的にも認識されており (Biased Galaxy Formation)、実際、観測される高赤方偏移銀河の空間分布が非常に強いクラスターリングを示すことから、高赤方偏移における銀河の分布は予測される宇宙の質量分布に対して大きなバイアスを持っていることが確かめられている (e.g., Adelberger et al. 1999)。たとえば、赤方偏移 $z=3$ における典型的な星形成銀河の観測される数密度の揺らぎは、冷たい暗黒物質モデルで予測される全質量の分布に比べると、線形バイアス因子 $b (= \text{gal}/\text{mass}_\odot)$ は密度揺らぎの分散の値として、 $b=2-3$ の値を持つことが広く知られている。同時に、 $z=3$ における宇宙の平均星質量密度は現在の宇宙の数%であること (e.g., Kajisawa et al. 2010) を併せて考えると、すなわち、宇宙年齢約20億年の時代では、形成されつつある銀河は大局的な高密度領域に多く分布しており、低密度環境では、相対的に銀河の形成が進んでいないと考えられる。このような銀河形成のバイアスは、冷たい暗黒物質モデルにおいてランダムな位相分布を持つ密度揺らぎに対して自然に期待されるものであり、基本的には宇宙の各年代で重力収縮により個別天体となった質量塊 (ハロー) の空間分布に生じるバイアスとして理解されている (e.g., Weinberg et al. 2004)。宇宙論的な構造形成シミュレーションによると、典型的な質量の銀河に対して、赤方偏移 $z=1$ 程度までこのようなバイアスは顕著である一方、現在の宇宙では $b=1$ 程度となり、銀河の分布は質量分布に概ね一致していると考えられている。したがって、バイアスが顕著である高赤方偏移において、観測される銀河の様々な密度環境においてその性質を調べることで、初期の銀河形成の様々な段階についての現象を解明し、理解することが期待できる。たとえば、高密度領域では、より化学進化が進んだ環境で大質量銀河が形成される過程を観測し、一方で、低密度環境では、低金属度で始原状態により近い環境での非常に若い年

齢 (初期) の銀河形成過程を調べることができらる。これまで、申請者を中心としたグループでは、すばる望遠鏡主焦点カメラを用いて、赤方偏移 $z=3.1$ の原始銀河団を含む共動座標でさしわたし 200Mpc におよぶ領域について、ライマン輝線銀河 (LAE) の分布と性質を調べる研究を進めてきた (例えば、Yamada et al. 2012)。さらに、申請者等は、原始銀河団中心領域において、近赤外線装置 MOIRCS を用いて、LAE とは相補的なサンプルとなる、より大質量の銀河についても解明を進めていた (Kubo et al. 2013)。

2. 研究の目的

本研究では、宇宙年齢 10-30 億年 ($z=5$ to $z=2.5$) の銀河形成バイアスが顕著な時代に注目し、低密度環境での銀河形成が実際に始原的環境に近いのか、すなわち、若く・金属量が小さい銀河が多く分布し、一方で、大質量の銀河は高密度領域に集中しているかを検証し、さらにその赤方偏移進化を解明することを目指した。

この研究では、まず高赤方偏移宇宙の密度環境による銀河形成を解明する手がかりとして大変貴重な SSA22 $z=3.1$ 原始銀河団領域に着目する。我々はこれまでの研究で、SSA22 $z=3.1$ 構造における LAE の大規模分布を明らかにしてきた (Yamada et al. 2012)。その成果のひとつとして、高密度領域である原始銀河団構造を同定するとともに、共動座標で 20-30 Mpc にわたって LAE の非常に低密度な領域を明確に検出することにも成功している。高密度領域から、低密度領域で銀河の形成がどこまで、どのように進んでいるかを解明することが非常に重要な研究課題である。とくに、静止系紫外線波長の観測から始原的環境に近い形成期の銀河を同定し、その性質を解明することは、最初期宇宙の第1世代の銀河形成や再電離現象の解明にも大きな手がかりとなることが期待される。これらの天体は (恒星が形成された) 銀河天体としてだけでなく、中性水素銀河間ガスの分布・性質にも反映されるだろう。

また、一方では、これまでこの領域内で最も密度が高い原始銀河団中心部に限られていた、銀河の星質量を基準とするサンプルを用いて LAE や若い星形成銀河に限らない様々な形成段階の銀河の分布や性質を調べる研究 (Kubo et al. 2013) を、発展させ、大規模構造の様々な密度環境についてどのような大質量銀河が形成されているかを解明する。広視野での深い多色データを効率よく取得し、高赤方偏移での非常に大きな銀河分布構造と銀河形成の関係をパノラマ的に解き明かす、世界的にもユニークかつ重要な研究成果を得ることができる。

申請者も参加するすばる望遠鏡戦略的プログラム HSC 戦略枠サーベイプロジェクトでは、これまでにない広い天域と深い検出限界の組み合わせで銀河の深宇宙探査を行

う。我々は、上記 SSA22 領域の研究をケーススタディとして銀河形成と密度環境の関係の解明を目指すものである。

3. 研究の方法

すばる望遠鏡により広視野観測データおよびこれに基づく広視野分光観測や、補償光学装置などによる詳細観測、また、ALMA 望遠鏡で得られたデータを総合するなどして、銀河の形成進化過程を解明する研究を進める。とくに、高密度から低密度までの領域で特に高赤方偏移でどのように構造形成・銀河形成が進むのかを解明するため、まず、現在知られている最も大規模な高赤方偏移密度超過領域であり、また、研究代表者らのこれまでの研究により、その優位性が広視野データに基づいて確立している領域として、赤方偏移 $z=3.1$ の SSA22 高密度領域、あるいは原始銀河団領域に着目して、他波長観測を用いた研究を進める。すばる望遠鏡 HSC を含むデータ解析のため、ワークステーションを含むデータ解析システムを構築し研究を進めた。また、すばる望遠鏡、Keck 望遠鏡などを用いた観測を現地で行うための渡航を行った。

4. 研究成果

(SSA22 $z=3.1$ 原始銀河団についての研究)

すばる望遠鏡による広視野データ、すなわち、HSC 戦略枠観測データおよび公募観測で取得した HSCg-band 画像を用いて、SSA22 原始銀河団領域における新しい広視野銀河サンプルの構築を進めるとともに、すばる望遠鏡装置 MOIRCS を用いた多天体分光観測を行って、原始銀河団中心領域における近赤外線分光による力学構造解明研究とともに、新たにすばる望遠鏡補償光学装置を用いて、とくに興味深い天体である非常に密集した銀河群の銀河についての高解像度撮像観測を行うとともに、ALMA 望遠鏡で得られたデータを併せて銀河の性質を研究した。また、原始銀河団に付随する中性ガスを検出しその性質を調べるためのすばる望遠鏡狭帯域撮像データの解析および Keck 望遠鏡による広視野分光観測を行った。

研究成果として、まず、 $z=3.1$ 原始銀河団の中心部の銀河速度分散を測定し、銀河団としての力学構造とその特徴を明確に求めることに成功した(Kubo et al. 2015 として論文発表)が、さらに大質量銀河の形成領域として考えられるサブミリ波現に付随する銀河群 AzTEC14 天体や、Lyman B10bs No.1, 2 などの領域の銀河の赤方偏移を測定し、これらが物理的に付随してまさに合体進化を経て現在の宇宙で観測される銀河団中の大質量銀河の形成に直接つながる天体であることを明らかにした(Kubo et al. 2016 として論文発表)。さらにすばる望遠鏡補償光学観測、および ALMA 望遠鏡観測結果から、この大質量銀河形成領域に含まれる 8 個の

銀河のうち、2 天体はすでに太陽質量の 1 千億倍程度の星質量を形成し、また現在活発な星形成はすでに終息し、形態的にはコンパクトで中心集中度が高いいわゆる巨大楕円銀河前駆体であること、さらにその他の天体はダスト吸収を強く受けた星形成銀河であり、構造としてはより広がったディフューズな構造を持つこと、また ALMA のみで検出されている天体も含め、現在の星形成率が非常に高い天体であることなども明らかにした。巨大銀河の形成現場をまさに分解して観測していることに相当し、非常に有意義な研究成果と考える(Kubo et al. 2017 で論文発表)。HSC データを含む可視光の広視野観測研究からは、とくに原始銀河団を含むさらに広視野での Ly 輝線銀河の輝線等価幅の分布の解析を行い、密度環境による等価幅分布の違いなどを明らかにする研究を行った(東北大学・代表者が指導する新岡耕平の修士論文として成果のとりまとめ)。原始銀河団中心部では、等価幅が 200 を超える強い輝線銀河の密度が有意に超過しているという結果を得た。すばる望遠鏡、Keck 望遠鏡による銀河間ガス研究では、狭帯域撮像データから、原始銀河団に付随する中性水素銀河間ガスの町家が検出されるという成果(Mawatari et al. 2016, 2017 で論文発表)を得るとともに分光観測と分光データの解析を行った。分光データからは、より詳細な銀河間ガスの 2 時限的な空間分布が明らかにできると期待される。

(赤方偏移 $z=4$ の星形成銀河研究)

深宇宙探査の標準領域である SXDS 天域において利用可能な UKIRT 望遠鏡、CFHT 望遠鏡、Spitzer 衛星の紫外線および赤外線観測データをあわせて、広視野の多色測光カタログの作成を行い、銀河紫外線スペクトルの統計的な性質とその密度環境依存性の研究を進めた。特にすばる望遠鏡 SXDS 観測領域のサーベイデータを用いて、銀河の色セレクション、検出限界、スペクトル解析におけるサンプルの完全性を評価し、よりバイアスなく密度環境依存性を調べるための手法の開発を進めるとともに、その評価を行った。解析結果からは、紫外線で比較的赤いスペクトルを示す天体が、強いダスト吸収を受けており、実際には非常に活発な星形成銀河であることを明らかにした。赤方偏移 4 以前の宇宙での強いダスト吸収を伴う大質量銀河の形成過程は、近年の ALMA などによる研究の大きな課題となっているが、これに対して、新たな知見を示した研究結果と言える(山中他、学会発表、山中郷史博士論文として成果発表)。

このほかにも、本課題研究を通じて、すばる HSC 広視野データに基づく高赤方偏移の活動銀河核の偏光観測探査や、広視野宇宙観測による宇宙初期の銀河形成解明を目指す宇宙望遠鏡 WISH 計画や NASA が進める WFIRST 計画により期待される研究成果の創

出などの活動も行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 15 件)

"Imaging of diffuse H I absorption structure in the SSA22 protocluster region at $z = 3.1$ ", Mawatari, K., Yamada, T. (9人中3番目), et al., 2017, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 467, 3951-3962, DOI:10.1093/mnras/stx038, 査読有

"Bimodal morphologies of massive galaxies at the core of a protocluster at $z=3.09$ and the strong size growth of a brightest cluster galaxy", Kubo, M., Yamada, T. (7人中2番目), Ichikawa, T., Kajisawa, M., Matsuda, Y., Tanaka, I., Umehata, H., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2017, in press, arXiv:1704.05962, 査読有

"Searching for candidates of Lyman continuum sources - revisiting the SSA22 field", Micheva, G., Iwata, I., Inoue, A. K., Matsuda, Y., Yamada, T. (6人中5番目), Hayashino, T., 2017, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 465, 316-336, DOI:10.1093/mnras/stw2700, 査読有

"ALMA Observations of LyAlpha Blob 1: Halo Substructure Illuminated from Within", Geach, J. E., Yamada, T. (29人中29番目), et al., 2016, The Astrophysical Journal, 832, 37, DOI:10.3847/0004-637X/832/1/37, 査読有

"Herschel protocluster survey: a search for dusty star-forming galaxies in protoclusters at $z = 2-3$ ", Kato, Y., Yamada, T. (18人中17番目), et al., 2016, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 460, 3861-3872, DOI:10.1093/mnras/stw1237, 査読有

"Possible identification of massive and evolved galaxies at $z = 5$ ", Mawatari, K., Yamada, T. (5人中2番目), Fazio, G.G., Huang, J.-S., Ashby, M.L.N., 2016, Publications of the Astronomical Society of Japan, 68, 46, DOI:10.1093/pasj/psw041, 査読有

"A New Constraint on the Ly α Fraction of UV Very Bright Galaxies at Redshift 7", Furusawa, H., Yamada, T. (18人中15番目), et al., 2016, The Astrophysical Journal, 822, 46, DOI:10.3847/0004-637X/822/1/46, 査読有

"Discovery of a Damped Ly α Absorber at $z = 3.3$ along a Galaxy Sight-line in the SSA22 Field", Mawatari, K., Yamada, T. (7人中2番目), et al., 2016, The Astrophysical Journal, 817, 161, DOI: 10.3847/0004-637X/817/2/161, 査読有

"An extremely dense group of massive galaxies at the centre of the protocluster at $z = 3.09$ in the SSA22 field", Kubo, M., Yamada, T. (7人中2番目), Ichikawa, T., Kajisawa, M., Matsuda, Y., Tanaka, I., Umehata, H., 2016, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 455, 3333-3344, DOI:10.1093/mnras/stv2392, 査読有

"ALMA Deep Field in SSA22: A Concentration of Dusty Starbursts in a $z = 3.09$ Protocluster Core", Umehata, H., Yamada, T. (23人中21番目), et al., 2015, The Astrophysical Journal, 815, L8, DOI: 10.1088/2041-8205/815/1/L8, 査読有

"WISH: Wide-field Imaging Duvrayor for High-redshift", Yamada, T., 2015, IAU General Assembly, 22, 2232520, <http://ads.nao.ac.jp/abs/2015IAUGA..2232520Y> 査読無

"Wide-Field Infrared Survey Telescope-Astrophysics Focused Telescope Assets WFIRST-AFTA 2015 Report", Spergel, D., Yamada, T. (60人中27番目), et al., 2015, ArXiv e-prints, arXiv:1503.03757, <http://ads.nao.ac.jp/abs/2015arXiv150303757S> 査読無

"NIR Spectroscopic Observation of Massive Galaxies in the Protocluster at $z = 3.09$ ", Kubo, M., Yamada, T. (6人中2番目), Ichikawa, T., Kajisawa, M., Matsuda, Y., Tanaka, I., 2015, The Astrophysical Journal, 799, 38, DOI:10.1088/0004-637X/799/1/38, 査読有

"Probing intergalactic neutral

hydrogen by the Lyman alpha red damping wing of gamma-ray burst 130606A afterglow spectrum at $z = 5.913$, Totani, T., Yamada, T. (10人中10番目), et al., 2014, Publications of the Astronomical Society of Japan, 66, 63, DOI:10.1093/pasj/psu032, 査読有

"AzTEC/ASTE 1.1-mm survey of SSA22: Counterpart identification and photometric redshift survey of submillimetre galaxies", Umehata, H., Yamada, T. (25人中7番目), et al., 2014, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 440, 3462-3478, DOI:10.1093/mnras/stu447、査読有

[学会発表](計 8 件)

Toru Yamada, "Massive Galaxy Formation in the Protocluster at $z=3$ ", From Stellar Evolution to Galaxy Formation (国際学会、招待講演), 2016年3月、長野

木村勇貴、山田亨、他 「AGNの光度変光と母銀河の色選択による高赤方偏移・小質量SMBHサンプルの獲得」日本天文学会春期年会, 2016年3月, 首都大学東京

大塚拓也、山田亨、他 「SSA22領域におけるLarge EW(Ly α) LAEのstaller component」日本天文学会秋期年会, 2015年9月, 山形大学

馬渡健、山田亨、他 「Lyman Break 銀河スペクトル中に発見された赤方偏移3.3のDamped Ly α system」日本天文学会秋期年会, 2015年9月, 甲南大学

Toru Yamada WISH: Wide Field Imaging Surveyor for High-redshift, IAU XXIX GENERAL ASSEMBLY SYMPOSIA 319 Galaxies at High Redshift and Their Evolution Over Cosmic Time, 2015年8月、ホノルル

久保真理子、山田亨、他「 $z=3.09$ の非常に高密度な銀河群の発見」日本天文学会春期年会, 2015年3月, 大阪大学

大塚拓也、山田亨、他、「SSA22領域におけるLy α 輝線のEWが大きいLAEs」日本天文学会秋期年会, 2014年9月, 山形大学

山中郷史、山田亨、他「赤方偏移4の星

形成銀河のスペクトルスロープと空間相関」日本天文学会秋期年会, 2014年9月, 山形大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山田 亨 (TORU, YAMADA)

国立研究開発法人宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所・教授

研究者番号: 90271519