

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25800117

研究課題名(和文)すばるレーザーガイド星補償光学系で探る星形成銀河の質量集積過程

研究課題名(英文) Probing the mass-assembly history of star-forming galaxies using Subaru laser guide star adaptive optics system

研究代表者

美濃和 陽典 (Minowa, Yosuke)

国立天文台・ハワイ観測所・助教

研究者番号：60450194

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、約100億年前(赤方偏移 $z \sim 2$)の遠方銀河を、高解像度で観測する事により、その内部における星形成領域の高精度なマッピングを行い、銀河進化過程の解明において、未解決の問題の一つである質量集積過程を明らかにする事である。この目的のために、我々は $z \sim 2$ の銀河からのH α 輝線の波長に合わせた狭帯域フィルターを製作し、すばる望遠鏡の補償光学システム、及び近赤外線撮像装置を用いて観測を行った。その結果、 $z \sim 2$ の銀河の星形成領域を約0.2秒角の解像度で空間分解し、銀河内部の恒星種族の年齢分布、星形成活動の分布が得られ、銀河の中心部より外側のクランプで星形成が活発である様子が明らかになった。

研究成果の概要(英文)：The main purpose of this research is to shed new light on the histories of galaxy assembly by obtaining spatially-resolved mapping of star-formation activities within distant galaxies at redshift ~ 2 , which corresponds to about 10 billion years ago. For this specific purpose, we developed new infrared narrow-band filters whose central wavelength are adjusted to include H α emission lines from star-forming galaxies at redshift ~ 2 and conducted high-resolution imaging observation using the adaptive optics system and infrared imager onboard the Subaru telescope. We have successfully spatially-resolve the star-forming region and obtained the maps of the stellar age and star-forming activities within the galaxies at redshift ~ 2 . Our preliminary results show that the star-formation is more active at the outer clump rather than the central region in the star-forming galaxy.

研究分野：銀河天文学

キーワード：銀河進化 銀河形成 補償光学 光赤外線天文学

1. 研究開始当初の背景

我々の宇宙では、今から約140億年前に最初の銀河形成が行われたとされているが、それらがどのような進化の過程を経て、現在ある銀河の姿になったのかは、様々な説はあるものの、観測的には未だ解明されていない。

銀河進化の歴史の中で、今から約100億年前(赤方偏移 $z \sim 2$)は、宇宙全体において星形成活動が最も活発に行われた時期であり、この時期に進化がもっとも激しく進んだと考えられている。そのため、銀河進化の過程を解明する上で、 $z \sim 2$ の銀河の観測は非常に重要である。これまでの観測により、 $z \sim 2$ では、星形成を激しく行っている青いディスク状の銀河(星形成銀河)と、星形成が終了し古い恒星種族からなる赤いコンパクトな銀河(受動的銀河)の2つのタイプの銀河がある事が分かっている。また、星形成銀河については、星形成活動を行うのに必要なガスが多く含まれているものが観測されており、その多くで星形成が活発なクランプ状の構造がある事が明らかにされている。これらの銀河の進化の系列としては、青い星形成銀河が星形成を終了し、赤いコンパクトな受動的銀河になると考えられる。その進化の過程では、星形成を激しく行い一気にガスを消費する事で、星形成活動を終える必要があるが、その方法としてガスを多く含んだ星形成銀河同士の合体や、銀河間空間におけるフィラメント状の冷たいガスの銀河内部への降着といったモデルが提案されている。しかし、これらのモデルで提唱されているプロセスが、銀河の進化過程において、いつどのような場所で、どの程度効いているかは観測的に明らかにされていない。この主な原因としては、これまでの観測では星形成率や星質量といった銀河の基本的な物理量が、銀河全体の積分量で求められており、銀河のどの場所でいつ星形成活動が行われたかという情報が失われている事である。例えば、銀河進化がフィラメントからの冷たいガスの降着で行われた場合、主に銀河の中心部分において冷たいガスの供給が行われ、星形成が活発になる事が予測されており、中心部で星形成率が高く若い恒星種族が多くなり、外縁部では星形成率が低く古い恒星種族が多くなると考えられるが、このような情報は銀河を空間分解しなければ得られない。したがって、 $z \sim 2$ における銀河を空間分解し、その内部の恒星種族、星形成率の分布を調べる事は、銀河進化における主要なプロセスを峻別する上で非常に重要である。

2. 研究の目的

本研究は、 $z \sim 2$ の遠方銀河を空間分解し、観測することで、その内部における星形成領域の空間分布の高精度なマッピングを行うことを目的としている。これにより、遠方銀河の研究で最大の問題となる星形成に伴うダストと恒星種族の年齢の縮退を解き、銀河

内部においていつどこで星形成活動が行われたかを明らかにすることができる。このような銀河の星形成領域、恒星種族の内部分布を、星質量毎に比較することで、銀河進化の過程において、個々の銀河がどのようにして質量を集積し、現在ある銀河の形を作ったかを明らかにし、どのようなプロセスが宇宙における銀河進化の中で主要な役割を果たしたかを明らかにすることができる。

3. 研究の方法

$z \sim 2$ における銀河の典型的なサイズは、星形成銀河で2-3kpc、受動的銀河では1kpc程度であり、見かけの大きさにしてそれぞれ0.25-0.35秒角、0.13秒角に相当する。すばる望遠鏡などの地上望遠鏡で得られる空間分解能は通常0.5秒角程度であり、これらの銀河を空間分解する事はできない。ハッブル宇宙望遠鏡(HST)では、可視光、近赤外線において、0.08-0.18秒角の空間分解能が得られるため、 $z \sim 2$ の銀河を空間分解した観測が可能である。図1は $z=2.2$ の星形成銀河のHSTにより得られた可視、近赤外線の画像と、その色分布、及び恒星質量の分布を表している。この銀河は、青い色、赤い色をした2つのクランプ状の構造に分かれており、それぞれ別の恒星種族から成り立っていることが示唆されている。しかし、この色の違いが星形成に伴うダストによるものか、古い恒星種族固有の色によるものなのかを区別する事はできず、このデータからはクランプの年齢を見積もることは難しい。このような年齢とダストの縮退を解くには、星形成率の空間情報を得る必要がある。しかし、HSTによる観測は広帯域フィルターにより連続光の情報を得るものであり、そこから正確な星形成率を得る事は難しく、 $z \sim 2$ の銀河での星形成率の空間分布の情報はこれまでほとんど得られていないのが現状である。

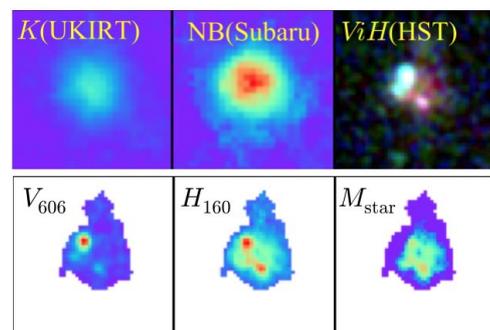


図1: 赤方偏移 2.2 の星形成銀河の画像。HSTによる可視(V)、近赤外線(H)の画像では、クランプ構造がはっきりと見えており、その色の違いから恒星質量の分布が求められている。補償光学を用いていない地上望遠鏡(すばる、UKIRT)による近赤外線(K)、H 輝線に合わせた狭帯域フィルター (NB)の画像ではクランプ構造は分解できていない。

銀河の星形成率の測定には、星形成領域の電離ガスから出る水素のバルマー系列の H α 輝線の強度が良く用いられる。この輝線は波長 6563 の可視域に出るため、紫外域にある水素のライマン 輝線といったその他の星形成率の指標に比べて、ダストの影響を受けにくく、星形成率を正確に見積もる事ができる。z \sim 2 の銀河からの H α 輝線は、近赤外線観測する事ができる。すばる望遠鏡では、2011 年度よりレーザーガイド星補償光学系 (AO188) が本格的に観測を開始している。この装置では、天空上の任意の場所にレーザーにより人工星を作り、その人工星の光を参照し地球大気の揺らぎをリアルタイムに測定し、補正することで、近赤外線波長域で 0.1 秒角の空間分解能を得る事ができる。そこで、本研究では AO188 を用いた近赤外線カメラである IRCS 用に赤方偏移した H α 輝線の波長に合わせた狭帯域フィルターを製作した。図 2 は本研究で製作した近赤外線狭帯域フィルターの一つ (NB2070) である。本研究では、この様な近赤外線狭帯域フィルターを、合計 4 枚製作し、既存の狭帯域フィルターと合わせて、世界で初めて z \sim 2 の銀河内部の星形成率の空間分布についての系統的な観測を行った。

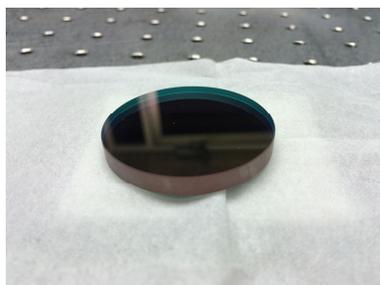


図 2 : 本研究で製作した、近赤外線狭帯域フィルター NB2070。中心波長 2.070 μm 、帯域幅 0.033 μm であり、赤方偏移 2.15 の銀河からの H 輝線を検出することができる。

4. 研究成果

本研究では、広視野近赤外線カメラであるすばる望遠鏡の MOIRCS、および UKIRT 望遠鏡の WFCAM を用いて行われた大規模な H 輝線銀河サーベイで検出された z \sim 2 の星形成銀河の高解像度観測を、すばる望遠鏡の AO188+IRCS を用いて行った。図 3 に、本研究のターゲットである、z \sim 2 の星形成銀河の星質量と星形成率の関係を示す。H 輝線に基づく銀河のサンプルは、通常行われる広帯域撮像に基づくサンプルとは異なり、銀河の星質量によるバイアスが少なく、図 3 に示す通り、 10^9 - $10^{12} M_{\odot}$ という広い範囲の星質量のサンプルを得ることができるという特徴がある。また、これらのサーベイ検出された星形成銀河に加え、本研究では z \sim 2 の原始銀河団領域にある星形成銀河についても同様の観測を行い、銀河の周辺環境による銀河の内部構造の違いという新しい観点での研究も進

めつつある。

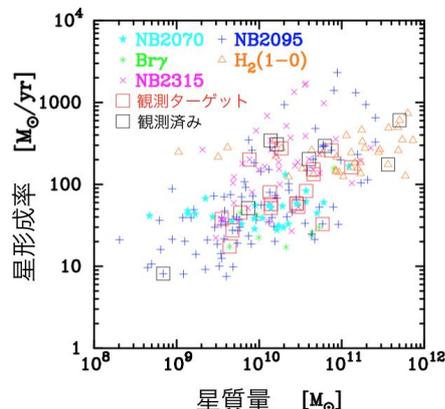


図 3 : 本研究のターゲットである z \sim 2 の星形成銀河の星質量、及び星形成率の分布。

本研究では、これまですばる望遠鏡の共同利用に応募し、合計 13 晩の観測時間を得ることができた。不幸にも、悪天候により割り当てられた観測時間の 8 割程度を失ってしまったが、これまでに 8 天体の星形成銀河の観測を行うことができた。現在もこのプロジェクトは継続中であり、原始銀河団領域も含めて合計 100 天体程度の星形成銀河のサンプルを取得することを目指している。

図 4 は、これまでの観測で得られた、星形成銀河内部の星形成率、及び恒星の空間分布を示している。また、恒星種族の年齢と良い相関のある H 輝線の等価幅の空間分布も示している。これまでの補償光学を用いていない狭帯域撮像では見られなかった、銀河内部の星形成領域の空間構造が、本研究での観測により明らかになった。恒星の分布がスムー

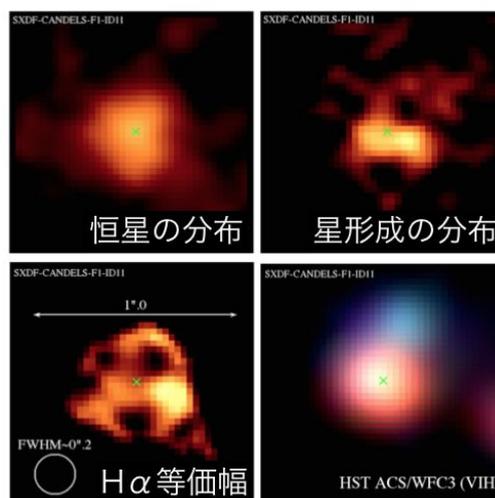


図 4 : 本研究により得られた z \sim 2 の星形成銀河内部の星質量 (左上)、星形成率 (右上)、恒星の年齢と良い相関のある H 輝線の等価幅 (左下) の空間分布。HST 画像 (右下) と比べて遜色のない解像度が得られている。

ズであるのに対し、星形成の分布は主に2つのクランプ上の構造がある事が分かる。H等価幅の分布を見ると、銀河の中心よりも外側の一部で大きくなっているため、星形成が銀河の中心部分ではなく、外側で強く行われ、中心領域では古い恒星種族が多くなっている事が分かる。この事は、銀河内部において、恒星、ガスが円盤上で形成された星形成クランプを通して中心に落ち込んでいく事でバルジが形成されるというシナリオを示唆している。

本研究でこれまで得られている $z \sim 2$ の星形成銀河のサンプルはまだ少ないが、今後サンプル数を増やしていく事で、星形成銀河における質量集積過程の星質量、及び周辺環境に対する依存性を得る事ができると考えている。また、本研究で観測した星形成銀河を、サブミリ波干渉計 ALMA を用いてフォローアップする事で、星形成率、恒星質量に加えて、CO 輝線でトレースされる分子ガスの空間分布を得る事ができる。これにより、銀河の進化過程を定量化する上で重要な物理量を全て抑える事ができる。

<引用文献>

Hopkins et al. 2004, ApJ, 614, 209
Kriek et al. 2009, ApJ, 705, 71
Genzel et al. 2011, ApJ, 733, 101
Hopkins et al. 2006, ApJ, 691, 1424
Dekel et al. 2009, ApJ, 703, 785
Tadaki et al. 2013, ApJ, 780, 77
Sobral et al. 2013, MNRAS, 428, 1128
Ceverino et al. 2010, MNRAS, 404, 215

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 7 件)

Saito, Y., Imanishi, M., Minowa, Y., Morokuma, T., Kawaguchi, T., Sameshima, H., Minezaki, T., Oi, N., Nagao, T., Kawakatsu, N., and Matsuoka, K., “Near-infrared spectroscopy of quasars at $z \sim 3$ and estimates of their supermassive black hole masses”, Publication of the Astronomical Society of Japan, 査読有, Vol. 68, 2016, pp.1-19
DOI: 10.1093/pasj/psv102
Suzuki, T., Kodama, T., Tadaki, K., Hayashi, M., Koyama, Y., Tanaka, I., Minowa, Y., Shimakawa, R., and Yamamoto, M., “Galaxy Formation at $z > 3$ Revealed by Narrowband-selected [OIII] Emission Line Galaxies”, The Astrophysical Journal, 査読有, Vol. 806, 2015, 208 (10pp)
DOI: 10.1088/0004-637X/806/2/208

[学会発表](計 2 件)

美濃和陽典、「すばる GLAO 計画について」、円盤銀河の形成と進化研究会 2013, 2013 年 9 月 26-28 日、国立天文台(東京都三鷹市)
美濃和陽典、「高解像度 Pa α 撮像で分解する合体途上銀河の星形成活動」、日本天文学会春季年会、2016 年 3 月 14-17 日、首都大学東京(東京都八王子市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

美濃和 陽典 (Minowa, Yosuke)
国立天文台・ハワイ観測所・助教
研究者番号: 60450194