

平成 30 年 5 月 30 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2017

課題番号：26800107

研究課題名(和文) ミクロな視点で解き明かす銀河団銀河の形成史

研究課題名(英文) Microscopic views of cluster galaxy formation

研究代表者

小山 佑世 (KOYAMA, Yusei)

国立天文台・ハワイ観測所・助教

研究者番号：40724662

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、銀河進化のピーク期(約100億年前の宇宙)における銀河団領域に着目し、そのなかで急速に進化する銀河の内部構造および星形成活動の詳細を、多波長・高解像度の観測で解き明かすものである。研究代表者は、8メートル級望遠鏡を用いた遠方銀河団の面分光観測や補償光学を用いたシャープな撮像観測を推進し、遠方宇宙の銀河団環境における銀河の内部的性質について新しい知見が得られた。本研究に関連する内容で、研究代表者を筆頭著者とする査読付論文が三本出版されている。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is to perform a multi-wavelength, high-resolution study on the internal structures of galaxies in distant cluster environments at the peak epoch of the cosmic star formation history (~10-Gyrs ago). We carried out integral field unit spectroscopy (3-D spectroscopy) as well as sharp imaging observations assisted by adaptive optics with 8m-class telescopes, and unveiled the internal geometry of star-forming activity within young cluster galaxies. We published three refereed papers related to this project during the supported research period.

研究分野：銀河天文学

キーワード：光赤外線天文学 銀河進化 銀河形成 銀河団

1. 研究開始当初の背景

銀河の性質(形態・質量・色など)は決してランダムに振り分けられたものではなく、その銀河が存在する場所(銀河環境)と強く関係していることが知られている。たとえば、銀河団のような高密度環境には星形成を終えた(赤い)楕円銀河やS0銀河が多いが、一般フィールドとよばれる低密度環境には星形成を活発に行う(青い)渦巻銀河や不規則銀河が多い。このような傾向は、100億年以上におよぶ銀河の集団化の歴史(すなわち宇宙の構造形成史)と、銀河の進化史の間に密接な関係があり、過去の宇宙で銀河団や銀河群という環境が銀河進化に重要なインパクトを与えたことを物語っているが、実際にこれらの環境下において銀河進化を促す物理プロセス(いわゆる環境効果)は特定されておらず、現代の銀河天文学において解決すべき重要な研究テーマの一つとなっている。

現在の宇宙の銀河団に存在する銀河は非常に古い星種族で構成されていることから、その形成期の姿を知るためには赤方偏移2を超える宇宙(100億年以上前の宇宙)へと遡る必要がある。遠方宇宙の銀河団とは、過去の宇宙で銀河が群れ集まる現場であり、銀河団銀河の進化史を紐解くうえで貴重な「実験室」である。研究代表者はこれまで、すばる望遠鏡の狭帯域フィルター群を用いて、遠方銀河団領域のH α 輝線銀河探査を推進し、遠方銀河団中の星形成銀河が、同時代の一般フィールド銀河に比べて大きな星質量、かつ大きな星形成率をもつことを示してきた。これは銀河団という環境において銀河進化が加速的に進んでいることを示す重要な証拠であるが、それでは「なぜ」原始銀河団環境で銀河の進化が促進されるのか?本研究では、初期宇宙の銀河団環境にある各銀河の内部を徹底的に「解剖」し、銀河環境の違いが引き起こす銀河の活動性の違いや銀河形態へのインパクトを解き明かしたいと考えた。

2. 研究の目的

本研究は、銀河進化のピーク期を中心に遠方宇宙の銀河団領域に着目し、そのなかで急速に進化する銀河の内部構造および星形成活動の詳細を、多波長・高解像度の観測によって徹底的に調査することを目的としている。具体的には、(1)面分光観測から円盤回転や銀河合体(マージャー)の兆候を掴むこと、(2)すばる望遠鏡の補償光学を用いたシャープなイメージング観測から真の銀河形態と星形成領域の性質を理解すること、そして(3)ALMA望遠鏡の観測からダストに深く埋もれた星形成領域をあぶり出し、さらに星の材料となる分子ガスの性質を理解すること、を三本の柱として、遠方宇宙の銀河団という環境が銀河の内部運動と形態進化に与える影響を解明していく。これに加えて、本研究に

直結する幅広い環境レンジにわたる遠方銀河サンプルの構築・充実、また本研究を含めて銀河進化研究の基礎となる銀河の星形成やダストについて理解を深めることも本研究の重要な目的である。

3. 研究の方法

(1)面分光を用いた銀河団銀河の内部構造と運動状態の調査:面分光とは、通常のスリット分光と異なり、天体上のそれぞれの位置(各ピクセル)から分光情報が得られるユニークな観測手法であり、銀河内部における輝線強度分布や速度場の情報などを抽出することができる。これによって、銀河内部のどこで星が作られているのか(輝線強度分布)、ディスクの回転速度、銀河合体の兆候などを見極めると同時に、銀河中心の活動銀河核成分と周囲のディスク成分を分離して議論することが可能になる。この手法を、研究代表者が構築した遠方銀河団の銀河サンプルに適用し、その内部構造を描き出す。

(2)補償光学を用いたシャープな撮像観測:遠方銀河は見かけの大きさがわずか1秒角程度と小さいため、地上観測ではシーイングの制限から、遠方宇宙の銀河団環境における銀河の形態を直接探査する試みはほとんど行われていない。しかし近年、すばる望遠鏡をはじめとする8メートル望遠鏡に補償光学が搭載され、0.1秒角の解像度(赤方偏移2の銀河の物理スケールでおおよそ1キロパーセクに対応)で銀河を空間的に分解してその内部を調べることができるようになった。本研究では、近赤外線域の広帯域フィルター(星質量の分布を捉える)と狭帯域フィルター(赤方偏移したH α 輝線を捉える)を組み合わせ、補償光学を最大限に生かす観測で、遠方銀河団銀河の内部にある星形成領域を分解・調査する。

(3)ALMAによる分子ガスとダストの探査:ALMA望遠鏡は、その圧倒的な感度と分解能で、遠方銀河内部の分子ガスやダストの質量・分布・運動状態等を明らかにすることを可能にする。原始銀河団中の活発な星形成銀河は大量のダストを伴い、星形成領域の大部分がダストに隠されていることが予想されるため、銀河内部での真の活動性を明らかにするためには可視光・近赤外線の観測に加えて、ダスト放射を直接捉えるサブミリ波帯での観測が特に有効である。本研究では、遠方銀河団の大質量星形成銀河について、ALMA望遠鏡による高解像度のサブミリ波観測を実施し、遠方銀河団中の銀河がその内部のどこで星を作っているのか、どの領域の光がダストで隠されているのかを明らかにする。

これらに加えて、本研究課題の実施期間中にデータリリースが予定されているすばる望

遠鏡の Hyper-Suprime Cam による超広視野サーベイのデータを活用した、遠方銀河団における星形成銀河の選択を進めるとともに、上記研究を遂行するための観測データの取得が予定どおり進まない場合も想定し、既存のアーカイブデータを用いた銀河の星形成活動とダストに関する基礎的な研究も進める。

4. 研究成果

(1) 面分光による遠方銀河団銀河の研究は、Gemini 望遠鏡の GMOS を用いた赤方偏移 0.4 の銀河団銀河についての観測データの解析を中心に進め、重要な結果が得られている。対象としたのは、銀河団の周辺環境に存在する「赤い星形成銀河」という種族で、一見星形成活動が不活発と思われる色を示しながら、 $H\alpha$ 輝線で明るく輝く天体である。上記の Gemini 望遠鏡による面分光観測で、5 天体について $H\alpha$ 輝線と [NII] 輝線を空間的に分解し、銀河内部におけるガスの動力学状態、星形成活動の分布、金属量の分布を明らかにすることに成功した。

赤い星形成銀河はダストによる減光を強く受けた銀河であると考えられるため、その物理的要因として銀河合体の兆候が見られるのではないかと期待された。しかし実際には観測したほぼすべての天体が、ごく一般的なディスク回転運動を示していた。また、星形成活動が銀河中心部に集中しているのではないかと予想していたが、 $H\alpha$ 輝線はディスク全体に分布していることが明らかになった。そして [NII]/ $H\alpha$ 輝線のフラックス比の分布は、銀河中心から外側に向かってほぼフラットで、銀河中心からの距離にほとんど依存しないことも分かった。

輝線強度の情報に加えて、連続光の情報を波長方向にスタックすることで、各点における星質量密度が計算できる。観測データから得られた星形成率密度と星質量密度を比較したところ、両者には正の相関があり、銀河スケールで成り立つ星質量-星形成率関係(いわゆる星形成銀河の主系列)は銀河を分解しても成り立っていることが分かった。

上記の Gemini 望遠鏡の観測結果は、5 天体についてのみパイロット的な研究であるが、これを発展させるため、研究期間中にデータが公開されたすばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam (HSC) のサーベイデータを利用して、同じく赤方偏移 0.4 の $H\alpha$ 輝線銀河のサンプル構築を進めた。その HSC の大規模サーベイ領域の中に、研究代表者らはかつてない規模で広がる超銀河団構造を発見し、こちらも関連する重要な成果として研究代表者を筆頭著者として論文を出版している(以下の発表論文①)。同様に、すばる望遠鏡を用いた赤方偏移 1.5 の銀河団領域の $H\alpha$ 輝線銀河探索も行い、本研究でターゲットとすべきサンプルの充実をはかることができた(以下の発表論文⑧)。

さらに本研究期間中には、研究代表者を中心に、欧州の南天天文台 (ESO) の大型望遠鏡 (VLT) の KMOS を用いた赤方偏移 2 の原始銀河団領域の銀河を狙った多天体面分光観測も行った。こちらはデータ解析を進めているところであり、科学的成果の創出には至っていないが、Gemini 望遠鏡の観測で行った上記の研究をより遠方宇宙で、より多くの天体で行うことができると期待される。

(2) 補償光学を用いた遠方銀河団の撮像観測については、2014 年~2015 年にかけて研究代表者らを中心とするすばる望遠鏡 (IRCS+A0188) への観測提案が採択され、赤方偏移 2 の宇宙の銀河団領域と一般フィールド領域での広帯域フィルターと $H\alpha$ 輝線に対応する狭帯域フィルターでの観測に成功している。データ解析も完了し、銀河の星成分と星形成領域の分布を 0.2 秒角(銀河の物理スケールで約 1.5 キロパーセクに対応)のスケールで分解することができた。その結果、星成分(古い星の分布)のほうは銀河の中心に集中しており、星形成成分(若い星の分布)のほうは広がっていることが分かった。この結果は銀河団銀河とフィールド銀河で共通の傾向であり、この時代の星形成銀河の素性はその銀河の存在する環境にあまり影響を受けていないということが示された。これは星形成銀河の星形成率-星質量関係などに環境依存性がないという過去の研究結果とも類似の傾向である。

本研究は補償光学+狭帯域フィルターでの撮像観測によって視野内のすべての銀河についてその $H\alpha$ 輝線を分解するという新しい試みに基づく先駆的な研究であり、実際に銀河団領域では 10 天体以上を同時に観測できることから、きわめて効率のよい観測が実現できることを実証した。一方で、遠方銀河の広がった淡い輝線を空間的に分解するには十分に S/N の高いデータが必要であり、すばる望遠鏡の次世代補償光学開発プロジェクトである ULTIMATE-Subaru 計画や、TMT 時代のサイエンスへの布石となる研究を実際に行ったことも本研究の重要な成果と言えるであろう。

(3) 赤方偏移 2 の原始銀河団の大質量星形成銀河のサブミリ波放射を高い空間解像度で分解する ALMA 望遠鏡の観測提案が、2015 年(サイクル 3)および 2016 年(サイクル 4)で採択されていたが、残念ながらいずれも天候等の条件により観測が実施されなかったため、こちらについては研究期間中に成果が挙げられていない。同領域の観測は引き続き ALMA 望遠鏡に提案していく予定である。なお本研究期間中、銀河環境効果に着目したサブミリ波・電波の観測は、JCMT 望遠鏡や野辺山 45m 電波望遠鏡でも進めてきた。これらは ALMA 望遠鏡のような高い空間解像度が得られるわけではないが、たとえば発表論文②な

ど近傍銀河を狙った観測で成果を挙げている。

これらに加えて、 $H\alpha$ 輝線を基本として銀河の星形成活動を調査する本研究のような場合において基礎的な情報となる、銀河のダスト減光について一つ重要な成果が挙げられた。これは遠方銀河の星形成活動を $H\alpha$ 輝線で調査する際、静止系紫外線～可視光のデータしか手元にない場合に、どのようにダスト減光量を見積もるか、という動機でアーカイブデータ (SDSS, GALEX, AKARI) を用いてダスト減光量見積りの経験則を構築したものである。本研究によって、 $H\alpha$ 輝線と静止系紫外線の測光データがあれば、ある一定の精度でダスト減光量を推定できることが示された。また、銀河の星質量の情報を加えることでさらに現実的なダスト減光量の見積りが可能になることも示した。さらに、一般に銀河のダスト減光量は星からの光と星形成領域から放たれるガス輝線の光で異なることが知られているが、本研究の解析によって、この「星とガス輝線の減光量の違い」が銀河の星質量や星形成率と強く関係していることを示した。本研究成果は発表論文⑤としてまとめられている。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 10 件)

以下、研究期間中に研究代表者が筆頭著者として出版した論文、および本研究に関連する内容で研究代表者が著者リストの二番目または三番目として出版した論文を掲載する。

- ① Yusei Koyama; Masao Hayashi; Masayuki Tanaka; Tadayuki Kodama; Rhythm Shimakawa; Moegi Yamamoto; Fumiaki Nakata; Ichi Tanaka; Tomoko Suzuki; Ken-ichi Tadaki; Atsushi J. Nishizawa; Kiyoto Yabe; Yoshiki Toba; Lihwai Lin; Hung-Yu Jian; Yutaka Komiyama, “The nature of $H\alpha$ -selected galaxies along the large-scale structure at $z = 0.4$ revealed by Subaru Hyper Suprime-Cam survey”, Publications of the Astronomical Society of Japan, Volume, 70, Issue SP1, id.S21, (2018) (査読有)
DoI: 10.1093/pasj/psx078
- ② Shuhei Koyama; Yusei Koyama; Takuji Yamashita; Kana Morokuma-Matsui; Hideo Matsuhara; Takao Nakagawa; Masao Hayashi; Tadayuki Kodama; Rhythm Shimakawa; Tomoko L. Suzuki; Ken-ichi Tadaki; Ichi Tanaka; Moegi Yamamoto, “A Universal Correlation between Star Formation Activity and Molecular Gas Properties Across Environments”, The Astrophysical Journal, 847, Issue 2, article id. 137, 10 pp., (2017) (査読有)
- ③ Yasuhiro Matsuki; Yusei Koyama; Takao Nakagawa; Satoshi Takita, “Environmental impacts on dust temperature of star-forming galaxies in the local Universe”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 466, 2517-2528, (2017) (査読有)
DoI: 10.1093/mnras/stw2929
- ④ David Sobral; Andra Stroe; Yusei Koyama; Behnam Darvish; Joao Calhau; Ana Afonso; Tadayuki Kodama; Fumiaki Nakata, “The nature of $H\alpha$ star-forming galaxies at $z \sim 0.4$ in and around C10939+4713: the environment matters”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 458, 3443-3454, (2016) (査読有)
DoI: 10.1093/mnras/stw534
- ⑤ Yusei Koyama; Tadayuki Kodama; Masao Hayashi; Rhythm Shimakawa; Issei Yamamura; Fumi Egusa; Nagisa Oi; Ichi Tanaka; Ken-ichi Tadaki; Satoshi Takita; Sin’itirou Makiuti, “Predicting dust extinction properties of star-forming galaxies from $H\alpha$ /UV ratio”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 453, 879-892 (2015) (査読有)
DoI: 10.1093/mnras/stv1599
- ⑥ Kazumi Murata; Yusei Koyama; Masayuki Tanaka; Hideo Matsuhara; Tadayuki Kodama; “Environmental dependence of polycyclic aromatic hydrocarbon emission at $z \sim 0.8$. Investigation by observing the RXJ0152.7-1357 with AKARI”, Astronomy & Astrophysics, 581, 114-120 (2015) (査読有)
DoI: 10.1051/0004-6361/201526276
- ⑦ Masafumi Yagi; Liyi Gu; Yusei Koyama; Fumiaki Nakata; Tadayuki Kodama, Takashi Hattori; Michitoshi Yoshida, “Discovery of nine extended ionized gas clouds in a $z=0.4$ cluster”, The Astronomical Journal, 149, 36-47, (2015) (査読有)
DoI: 10.1088/0004-6256/149/2/36
- ⑧ Yusei Koyama; Tadayuki Kodama; Ken-ichi Tadaki; Masao Hayashi; Ichi Tanaka; Rhythm Shimakawa, “The environmental impacts on the star formation main sequence: An $H\alpha$ study of the newly discovered rich cluster at $z=1.52$ ”, The Astrophysical Journal, 789, 18-32, (2014) (査読有)
DoI: 10.1088/0004-637X/789/1/18

- ⑨ C. Gonzalo Diaz; Yusei Koyama; Emma V. Ryan-Weber; Jeff Cooke; Masami Ouchi; Kazuhiro Shimasaku; Fumiaki Nakata, “arge-scale environment of $z \sim 5.7$ CIV absorption systems - I. Projected distribution of galaxies”, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 442, 946-978, (2014) (査読有) DoI: 10.1093/mnras/stu914
- ⑩ Masao Hayashi; Tadayuki Kodama; Yusei Koyama; Ken-ichi Tadaki; Ichi Tanaka; Rhythm Shimakawa; Yuichi Matsuda; David Sobral; Philip N. Best; Ian Smail, “Mapping the large-scale structure around a $z = 1.46$ galaxy cluster in 3D using two adjacent narrow-band filters, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 439, 2571-2583, (2014) (査読有) DoI: 10.1093/mnras/stu115

[学会発表] (計 8 件)

以下、研究期間中に研究代表者が筆頭講演者として行った講演 37 件のうち、招待講演のみを掲載する。

- ① Yusei Koyama, “An overview of galaxy cluster/environment science with Subaru”, Subaru international partnership science & instrumentation workshop, 2017/3/22-24, NAOJ (Mitaka), Tokyo, Japan (招待講演)
- ② Yusei Koyama, “Unveiling the environmental effects on internal star/gas/dust properties in galaxies across cosmic time”, ALMA-WS “Extensive CO survey of nearby galaxies”, 2016/12/7-9, NAOJ (Mitaka), Tokyo, Japan (招待講演)
- ③ 小山佑世, 「Environmental Impacts on the Molecular Gas & Dust Content in Galaxies across Cosmic Time」, 近傍銀河の分子ガスの大規模撮像観測が拓く星間物質と星生成の研究に関する新展開, 2016/11/17-18, 国立天文台(三鷹) (招待講演)
- ④ 小山佑世, 「『あかり』データを用いた銀河進化研究のこれから」, 星・銀河形成の研究に新しい視点を加える「あかり」サイエンスワークショップ, 2016/11/7, 国立天文台(三鷹) (招待講演)
- ⑤ Yusei Koyama, “Environmental Impacts on Various Galaxy Properties across Cosmic Time’’, In Situ View of Galaxy Formation, 2016/10/30-11/5, Ringberg Castle, Bavaria, Germany (招待講演)
- ⑥ Yusei Koyama, “From MAHALO-Subaru to the New World: Environmental impacts on various properties of galaxies across cosmic time”, High redshift (proto-)clusters : anecdotal or important phase? Paris 2016 Workshop, 2016/10/5-7, Observatoire de Paris, Paris, France (招待講演)
- ⑦ Yusei Koyama, “Galaxy evolution in growing clusters: panoramic observations of distant (proto-) clusters with Subaru’’, China-Subaru Workshop, 2014/11/29-12/1, SHAO, Shanghai, China (招待講演)
- ⑧ 小山佑世, 「Microscopic views of galaxy formation and environmental effects with ULTIMATE-Subaru」, Subaru GLAO Science workshop 2014, 2014/7/28-29, 国立天文台(三鷹) (招待講演)

[その他]

ホームページ等

<https://www.naoj.org/staff/koyama/homepage/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小山 佑世 (KOYAMA, Yusei)

国立天文台・ハワイ観測所・助教

研究者番号：40724662