

令和 4 年 5 月 26 日現在

機関番号：16301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2017～2021

課題番号：17K05386

研究課題名（和文）強輝線天体の大規模探査による大質量銀河の星形成終焉の物理メカニズムの解明

研究課題名（英文）probing mechanism of quenching of star formation in massive galaxies with a large survey for strong emission-line emitters

研究代表者

鍛冶澤 賢 (Kajisawa, Masaru)

愛媛大学・理工学研究科（理学系）・准教授

研究者番号：60535334

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：COSMOS領域においてすばる望遠鏡主焦点カメラおよび中帯域フィルターセットを用いた銀河のスペクトルエネルギー分布の解析を行い、星形成が急激に減衰している銀河のサンプルを構築し、ハッブル宇宙望遠鏡のデータを組み合わせてその形態を調査した。その結果、赤方偏移が0.2-1.0の時代では薄い円盤から厚い回転楕円体への形態移行は通常の星形成銀河の比星形成率（主系列）から1桁程度星形成率が減少したところで起きていることがわかった。また、これらの銀河は表面輝度分布の非対称成分の高い中心集中を示すことを明らかにした。また、赤方偏移3の星形成を終えつつある大質量ライマン 輝線天体の分光観測を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

銀河の星形成の終焉という銀河の規模の上限を決める銀河進化における重要な過程について、銀河の中心付近で起こる力学的擾乱が密接に関係していることを明らかにした。これは中心における爆発的星形成に伴う超新星爆発や活動銀河中心核などの影響によって星の材料であるガスを銀河から吹き飛ばしたり加熱することで、銀河の星形成が止まる可能性を示唆している。また、このような星形成の減衰に伴って、円盤形状から楕円体形状への銀河の基本的な形態の変化が起きていることも明らかにした。

研究成果の概要（英文）：Using Subaru/Prime-Cam intermediate-bands data set, we carried out SED analysis and constructed a large sample of galaxies whose star formation was rapidly declining. We investigated their morphology with HST/ACS data, and found that morphological transition from thin disk to thick spheroidal shape occurs at specific SFR  $\sim 1$  dex lower than the typical values of normal star-forming galaxies, i.e., main sequence. We also found that those galaxies whose SFR was rapidly declining show a systematically high central concentration of asymmetric components in their surface brightness distribution. We carried out optical spectroscopic observations of massive strong Ly $\alpha$  emitters at  $z\sim 3$  whose SFR already declined.

研究分野：銀河天文学

キーワード：銀河進化 銀河の星形成史 銀河形態

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙の中で恒星は銀河という集団を成して形成される。一般に銀河は大きく分けて新たに星を作り続ける星形成銀河と星を作らなくなったパッシブ銀河に二分されるが、こういった仕組みで星形成銀河が星を作るのを止めてパッシブ銀河に移行するののかについてはよくわかっていない。特に星の集団としての銀河の規模の上限を決めている意味でもこの銀河における星形成の終焉の原因を明らかにすることは重要である。

### 2. 研究の目的

銀河における星形成の終焉の仕組みを理解するために、星形成が急激に減衰したばかりの銀河をピックアップし、それらの銀河の性質を調べて星形成銀河およびパッシブ銀河と比較することで、こういった要因で銀河の星形成の急減衰が引き起こされるのかを明らかにする。

### 3. 研究の方法

COSMOS 領域におけるすばる望遠鏡主焦点カメラおよび中帯域フィルターセットの撮像データを用いて、急激に星形成が減衰している兆候を示す SED の銀河をピックアップする。特にこれらのデータが星の年齢をよく反映する Balmer/4000 ブレークから近紫外線をカバーする  $z=0.2-1.0$  の時代において、SED 解析によって星形成が急減衰している銀河のサンプルを構築し、ハッブル宇宙望遠鏡のデータと組み合わせ、星質量、サイズ、形態等のその統計的性質を調べる。また、同じデータセットを用いて、赤方偏移 3 の星形成が終わりつつある大質量ライマン輝線銀河について可視分光観測からガスの力学状態を調べる。さらに、高赤方偏移の原始銀河団における大質量銀河の SED 解析を行い、大質量銀河における星形成の減衰と環境との関係についても調査する。

### 4. 研究成果

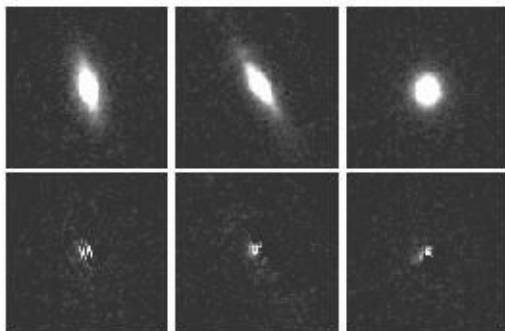
COSMOS 領域の  $z=0.2-1.0$  の銀河について、すばる望遠鏡主焦点カメラおよび中帯域フィルターセットに加えて、紫外線から中間赤外線測光データを含めた SED 解析から推定された星形成史の情報と、ハッブル宇宙望遠鏡 Advanced Camera for Surveys (HST/ACS) のデータを使って調べた天球面上での銀河の輝度分布の軸比の情報を組み合わせ、銀河の 3 次元形状と星形成の減衰の関係について調べたところ、通常の星形成銀河の比星形成率(星形成銀河の主系列)から 1 桁程度比星形成率が低下したところで薄い円盤状から厚い楕円体への移行が見られることがわかった。また、星を生まなくなったパッシブ銀河において薄い円盤形状を持つ天体の割合が  $z\sim 0.8$  から  $z\sim 0.4$  まで時間とともに増加することがわかった。さらに、星質量が 1000 億太陽質量より小さい範囲では、星質量が大きい銀河ほどこの薄い銀河の割合の増加の度合いが大きいこと、また星形成銀河において星質量が大きいほどより薄い形状の円盤を持つことが新たにわかり、これらの結果は星形成銀河があまり大きくその形状を変えずに星形成を止めてパッシブ銀河に移行する過程を考えることで説明できることがわかった。これらの結果は論文 Satou et al. 2019 として出版した。

同じデータセットを使った SED 解析により、急激に星形成が減衰している銀河のサンプルを構築し、これらの銀河の形態を上記の HST/ACS データを用いて詳細に解析した。その結果、 $z\sim 0.8$  の時代の星形成が急激に減衰している銀河において、表面輝度分布の非対称成分の中心集中度が通常の星形成銀河やパッシブ銀河と比べて有意に高いことを発見した。これらの銀河の表面輝度分布全体における非対称性は比較的低いものの、銀河中心付近に顕著な非対称性を示しており(図 1 参照)これは銀河中心付近の力学的擾乱と銀河の星形成の急激な減衰の間に密接な関係があることを示唆している。また、これらの中心付近に顕著な非対称性を示す銀河は星質量の割にサイズが比較的小さく、(特に中心付近の)表面星質量密度が高い天体であることがわかった。これらは中心における爆発的星形成に伴う超新星爆発や活動銀河中心核によるフィードバックが星形成の急激な減衰につながった可能性を示唆しているかもしれない。現在これらの結果をまとめた論文を準備中である。

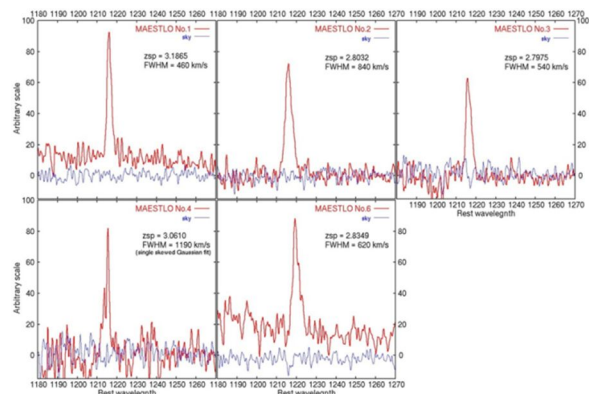
赤方偏移 2.4 の電波銀河 53W002 とその周囲のライマン輝線天体の密度超過として発見された 53W002 原始銀河団領域の可視光近赤外線撮像観測データを用いて、この領域における大質量銀河探査とその SED 解析を行った。その結果、特に  $J-K>2$  の赤い近赤外線カラーを示す大質量銀河の顕著な密度超過を発見した。SED 解析によるとこれらの銀河は 1000 億太陽質量を超えた星質量を持ち、かつ星形成活動は減衰中ではあるもののまだ完全に止まっているわけではないことがわかった。また、それらよりはやや小さい 500-1000 億太陽質量の星質量を持つ星形成を

止めたパッシブ銀河の密度超過があることもわかった。興味深いことに、星形成がまだ完全に止まっていない大質量銀河は天球面上でライマン 輝線天体がなす構造に沿って分布しているのに対して、500-1000 億太陽質量のパッシブ銀河はライマン 輝線銀河の構造からはやや外れた領域に分布することがわかった。これらの結果は原始銀河団の中でもその場所ごとに銀河の成長段階や星形成活動に系統的な違いがある可能性を示唆している。これらの結果は学術雑誌に投稿して受理され、Yonekura et al. 2022 として出版された。

上記の COSMOS 領域の中帯域フィルターセットを使って選出した赤方偏移 3 の星形成を終えつつある大質量ライマン 輝線銀河 5 天体について、Keck 望遠鏡 DEIMOS を用いて可視分光観測を実施した。いずれの天体についても非常に強いライマン 輝線を検出してその赤方偏移を確認するとともに、これらの輝線が通常のライマン 輝線銀河よりも系統的に大きい速度幅を持つことがわかった(図 2)。また、ライマン 輝線プロファイルにおいて複数のピークを示す天体もあった。これらの銀河ではガスの物理状態が通常のライマン 輝線銀河とは異なっている可能性がある。現在、さらにモデルを使った詳細な輝線プロファイル解析を進めている。



**図 1** : 星形成を急減衰させている銀河がその中心で顕著な非対称性を示す例。上段が各銀河の HST/ACS F814W バンド画像で、下段が 180 度回転した画像をもとの画像から引いた非対称成分の画像。3 天体ともに回転中心は非対称成分が最小になるように選んでいるが、非対称成分は中心付近に集中して見られる。



**図 2** : Keck 望遠鏡による赤方偏移 3 の大質量ライマン 輝線銀河のライマン 輝線分光観測。中帯域フィルターのフラックス超過から期待される強いライマン 輝線が 500-1200 km/s と比較的広い速度幅を示している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sato Yuki K., Kajisawa Masaru, Himoto Kazuharu G.	4. 巻 885
2. 論文標題 Evolution of the Three-dimensional Shape of Passively Evolving and Star-forming Galaxies at $z < 1$	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 81 ~ 81
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3847/1538-4357/ab464f	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Naoki Yonekura, Masaru Kajisawa, Erika Hamaguchi, Ken Mawatari, Toru Yamada	4. 巻 in press
2. 論文標題 A Search for Massive Galaxy Population in a Protocluster of LAEs at $z=2.39$ near the Radio Galaxy 53W002	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 The Astrophysical Journal	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 Naoki Yonekura, Masaru Kajisawa, Ken Mawatari, Toru Yamada
2. 発表標題 Star formation activity of massive galaxies in the protocluster near 53W002 at $z = 2.4$
3. 学会等名 Galaxy Evolution Workshop 2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 米倉直紀、鍛冶澤賢、馬渡健、山田亨
2. 発表標題 $z=2.4$ 53W002 原始銀河団における大質量銀河の星形成の調査
3. 学会等名 日本天文学会2019年秋季年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐藤佑樹、鍛冶澤賢、樋本一晴
2. 発表標題 z<1における銀河の3次元形状の比星形成率および星質量依存性とその進化
3. 学会等名 日本天文学会2020春季年会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 米倉直紀、鍛冶澤賢、馬渡健、山田亨
2. 発表標題 z=2.4 53W002 原始銀河団における大質量銀河のSED解析
3. 学会等名 日本天文学会2021年秋季年会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 樋本一晴、鍛冶澤賢
2. 発表標題 COSMOS領域におけるz=0.7-0.9の銀河の星形成活動の急激な変化の起源
3. 学会等名 日本天文学会2022年春季年会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計1件

国際研究集会 COSMOS Team Meeting 2017	開催年 2017年～2017年
------------------------------------	--------------------

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------