

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 8 日現在

機関番号：62616

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26800101

研究課題名(和文) 可視光面分光観測で探る近傍極矮小銀河の星形成

研究課題名(英文) Uncovering Starbursts in Nearby Dwarf Galaxies with Integral Field Spectroscopy in Optical

研究代表者

松林 和也 (Matsubayashi, Kazuya)

国立天文台・岡山天体物理観測所・特任研究員

研究者番号：60622454

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、近傍宇宙の星質量が小さく、激しい星形成を行っている銀河をサーベイデータから探し、その銀河に対して広視野面分光観測を行って、矮小銀河の星形成の様子を明らかにすることである。我々はスローンデジタルスカイサーベイのアーカイブデータから、天体までの距離が200 Mpc以内、H輝線等価幅が200 Å以上で、複数のクランプが見られるものを2天体選出し、国立天文台岡山天体物理観測所188 cm望遠鏡とファイバー型可視光面分光装置KOOLS-IFUを接続して観測を行った。その結果、各銀河の中心部だけでなく、その他の領域も低金属量の星形成領域であり、激しいガスの運動の兆候は見られなかった。

研究成果の概要(英文)：This research project aims at searching for low-mass nearby starburst galaxies from present survey data, and at revealing starbursts in dwarf galaxies with wide-field integral-field spectroscopy for them. From spectroscopic archive data of Sloan Digital Sky Survey, we selected two galaxies with the following conditions: (1) the distance is within 200 Mpc, (2) the H-beta equivalent width is larger than 200 Å, and (3) there are more than two clumps. We observed them with the Okayama 188-cm reflector telescope and fiber-type optical integral-field spectrograph KOOLS-IFU. The observed line ratios at clumps indicates that not only the brightest clump but also others are low-metal starburst regions. We could not find any evidence of shocked gas nor dynamically disturbed gas.

研究分野：銀河物理学

キーワード：矮小銀河 スターバースト 銀河進化 可視光 面分光

## 1. 研究開始当初の背景

現在多く見られる星質量の大きい銀河は、たくさんの小さい銀河(矮小銀河)が合体・衝突を繰り返してできたものと考えられている。合体する銀河の質量比が大きい場合は、大きい銀河が小さい銀河を飲み込むことになる。星質量が同程度の銀河同士の合体・衝突では、短時間に大量の星が作られる、スターバースト現象が起こることがある。よって、現在見られる矮小銀河は銀河の一生の初期段階の性質を持ち続けている銀河だと考えられる。

誕生直後の宇宙にある銀河は、星質量が小さく、また重元素がほとんどないと考えられる。このような状況では、星形成の様子が近傍宇宙で見られるものと異なり、例えば重い星がより多く作られる可能性が指摘されている。ところが、宇宙初期の銀河は非常に遠くにあるため、詳しく観測することは非常に困難である。まず、銀河の見かけの明るさが暗くなるため、精度の良い観測データを得るには長い観測時間が必要になる。また、銀河の見かけのサイズも小さくなり、銀河の空間構造を捉えることが難しい、または不可能となってしまう。

近傍の銀河であれば暗くて小さい銀河も詳細まで観測ができる。近年の大規模サーベイ観測により、近傍宇宙にも初期宇宙に存在したであろう、星質量が小さく重元素がほとんどない銀河が見つかった。スローンデジタルスカイサーベイ(SDSS)で分光観測された銀河の中には、星質量が $10^8 M_{\odot}$ 以下のものや、金属量が $0.2 Z_{\odot}$ 以下の銀河が数十天体程度発見された。過去の研究ではこれらの銀河の統計的性質が調べられてきたが、見かけのサイズが $10''$ - $20''$ 程度に広がっており、空間構造も捉えることができる。近傍の矮小銀河は宇宙初期にある銀河の星形成の様子を探る良い実験室であり、詳細研究によって銀河の一生の初期段階を詳しく知る手がかりを得ることができる。

通常のスリット分光装置で空間2次元に広がった天体全体のスペクトルを得るためには、スリットスキャン観測を行う必要がある。しかし今回の観測対象の全面を観測するためには1天体あたり5ヶ所以上観測しなければならず、観測の効率が悪い。二次元の視野を同時に分光する観測手法である面分光であれば、広がった天体を効率よく観測できる。面分光装置の視野は数秒角と非常に狭いものが多かったが、近年では視野 $30''$ 以上の広視野面分光装置が開発されてきた。日本国内でも広視野面分光装置が完成する予定である。この装置を使えば、矮小銀河の観測を効率よく進めて、矮小銀河の星形成の様子を詳しく研究できると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、近傍にある星質量が非常に小さい、激しい星形成を行っている銀河(以下、

スターバースト極矮小銀河)を空間分解した観測を行い、星形成の様子を調査する。スターバースト極矮小銀河は(単一の星集団を仮定した場合)星集団の年齢が若く、星質量が非常に小さいことから、初期宇宙の銀河と近い性質を持っていると考えられる。

### (1) 観測ターゲット選定

観測する銀河を矮小銀河カタログまたはSDSSのアーカイブデータから十天体ほど選出する。古い星成分が少ない銀河が望ましいため、輝線等価幅が大きい、つまり連続光に対して輝線が非常に明るい銀河を選ぶ。見かけの明るさとサイズの面で有利な、地球から近い天体を選択する。

### (2) 可視光面分光観測

近傍のスターバースト極矮小銀河を可視光面分光観測して電離ガスの物理状態を調べ、星形成の様子を調べる。可視光波長帯は電離ガスからの輝線が数多くあり、電離ガスの物理量を推定するのに適していると言える。面分光観測データから輝線強度マップ、輝線強度比マップを作成し、以下の4項目を中心に調べる。電離ガスの主な励起源: 大質量星からの電離光子か? 銀河風と星間ガスの衝突によって起こった、衝撃波による励起の成分が存在するか? 星形成領域のサイズと形状と空間分布を、星質量の大きい銀河のものと比較する。金属量の空間分布: 星形成は銀河の中心でより早く進むのか? 電離ガスの電子密度、電子温度、Ionization parameter から、星集団の初期質量関数(IMF)に対する制限が付けられる可能性がある。

## 3. 研究の方法

### (1) サーベイデータからスターバースト極矮小銀河の選出

近傍宇宙にあるスターバースト極矮小銀河をサーベイデータから約10天体選出する。できるだけ小星質量( $M < 10^8 M_{\odot}$ )・低金属量( $Z < 0.2 Z_{\odot}$ )の銀河を選ぶために、サーベイ面積が約10000平方度と広いスローンデジタルスカイサーベイ(SDSS)のアーカイブデータから対象天体を探す。

SDSSのスペクトルを使って、輝線等価幅が非常に大きい銀河を選出する。等価幅が非常に大きい銀河は小星質量・低金属量である傾向があることが分かっている。輝線強度が強く、星形成の指標となり、かつ金属量の影響を受けにくい輝線である、H またはH $\beta$ の等価幅を使う。予備実験として、(等価幅が正のとき輝線として)H $\beta$ 等価幅が $500 \text{ \AA}$ 以上を条件にすると、約60万天体中約40天体を選出された。単一年齢の星集団の場合、H $\beta$ 等価幅が $500 \text{ \AA}$ 以上であれば年齢は500万年以下となる。

### (2) スターバースト極矮小銀河の可視光広視野面分光観測

研究の方法(1)で選んだ銀河を、可視光広視野面分光装置で観測し、スターバースト

極矮小銀河で起こっている激しい星形成の様子を探る。使用する望遠鏡は国内最大級の国立天文台 岡山天体物理観測所 188 cm 望遠鏡、観測装置は既存の可視光低分散分光装置 KOOLS である。KOOLS に研究代表者が開発中の面分光ユニットを組み込み、面分光観測を行う。得られた面分光データから様々な輝線の強度マップを作成し、輝線強度や強度比マップから電離ガスの物理状態を推定し、スターバースト極矮小銀河で起こっている星形成の様子を明らかにする。

輝線強度比マップから、電離ガスの励起源の空間分布が分かる。スターバースト銀河は多くの領域で大質量星からの電離光子により星間ガスは電離・励起されている。一方、激しい星形成によって大量の超新星爆発に伴う銀河風が起き、周囲のガスと衝突して衝撃波が起きることがある。衝撃波によって星間ガスが掃き集められ高密度になり、それがトリガーとなり星形成が起こることがある。スターバースト極矮小銀河でこのプロセスによる星形成が起きているかどうか調べる。

大質量星による電離ガスであれば、H 輝線強度マップから星形成領域のサイズや形状、空間分布が分かる。星形成領域は銀河全体に広がっているか、それとも銀河中心部に集中しているか等を調べる。

輝線強度比マップから、金属量分布が分かる。一般的な銀河では中心部ほど金属量が大きい、つまり中心部から星形成が行われたと考えられる。極矮小銀河でも同じことが起きているか確かめる。

輝線強度比マップから、基本的な物理量である電離ガスの電子密度や電子温度の空間分布が分かる。また、輝線強度比マップから電離光子の ionization parameter を導き、星集団の初期質量関数 (IMF) に対する制限が付けられる可能性がある。低金属量の環境では IMF が異なっているという意見もあり、IMF に観測的制限を付ける意義は非常に大きい。

#### 4. 研究成果

(1) SDSS データから、詳細観測するスターバースト極矮小銀河を 2 天体選出した。元サンプルは SDSS Data Release 10 のスペクトルアーカイブで、天体数は銀河や星など全て合わせて約 300 万天体である。その中から、以下の条件で詳細観測を行う天体を選んだ。

H の輝線等価幅が 200 以上のもの。  
SDSS 画像上で空間的広がりが見え、複数のクランプが見えるもの。この条件により、地球から近い天体が選出される。 [OIII] 4363 輝線強度が大きいもの。この輝線を強く出しているほど、銀河の金属量が小さい傾向がある。岡山から観測できるもの。広視野面分光観測を岡山から観測するために、この条件を付与した。以上の条件から、スターバースト極矮小銀河 UGC 993 と CGCG 007-025 を選出した (図 1)。

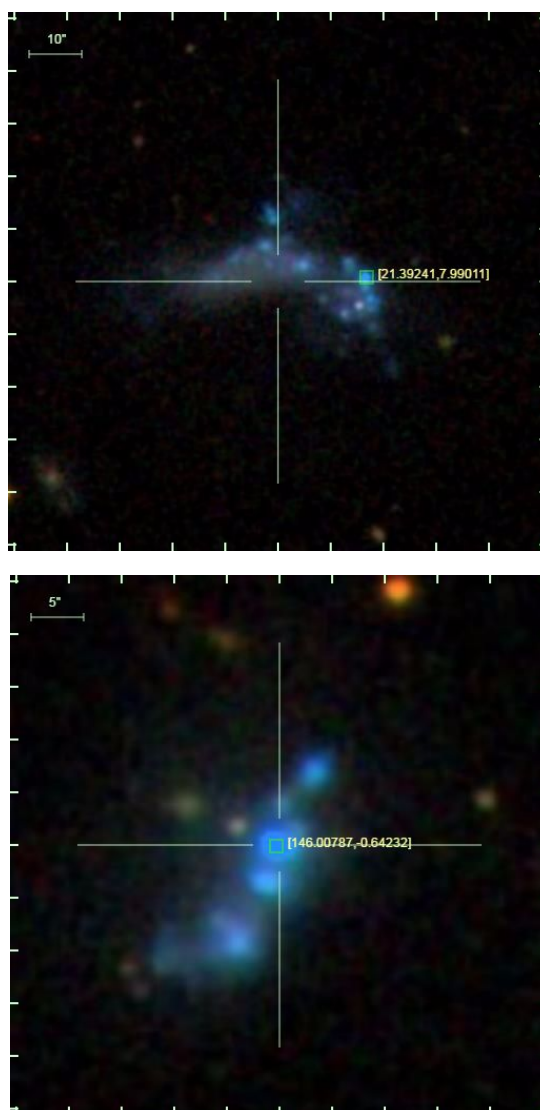


図 1 詳細観測ターゲットとして選出された、(上図) UGC 993 と (下図) CGCG 007-025 の SDSS 画像。緑色の四角は SDSS スペクトルが撮られた場所を表している。

選出された銀河のスペクトルを見ると、連続光に対して輝線の強度が非常に大きく、スペクトルが撮られた領域に関しては激しい星形成を行っていることが分かる。天体までの距離はそれぞれ 41 Mpc と 18 Mpc と非常に近い。天体の明るさから各銀河の星質量を大雑把に見積もると  $10^8 M_{\odot}$  程度となり、一般的な銀河よりも圧倒的に軽い銀河であることが分かった。

(2) 選出した銀河の広視野面分光観測を行った。使用した望遠鏡は国立天文台 岡山天体物理観測所 188 cm 望遠鏡で、使用した観測装置は我々が開発したファイバー型可視光面分光装置 KOOLS-IFU である。KOOLS-IFU は 1 ファイバーあたりの視野が約 2"、全ファイバーの視野が約 30" と、面分光装置としては広い視野を持った装置である。観測は 2015 年 12 月 25-27 日に行い、天気は全体を通して晴れ時々曇りであった。データ解析には主に天体データ解析ソフトウェア IRAF を

用い、観測装置特有の処理が必要な部分については独自に開発したスクリプトを使った。複数フレームの足し上げに関しては、Drizzle方式を用いた(引用文献)。

(3) 図2がKOOLS-IFUによって得られた、UGC 993とCGCG 007-025の各輝線強度比などのマップである。どちらの銀河からもH、H、[OIII] 5007、[NII] 6583、[SII] 6716,6731などの多くの輝線が、SDSSで観測された領域だけでなく、他のクランプ領域でも検出された。クランプごとに輝線強度比は多少異なるものの、[NII]/H = 0.01-0.1、[OIII]/H = 2.5-6程度で、星形成領域の大質量星によって電離・励起されていると考えられる。ガスの衝突などによる衝撃波によって放射された輝線が支配的な領域は検出されなかった。[NII]/H から金属量を見積もると、 $12 + \log(O/H) = 7.8-8.3$  (0.1-0.4  $Z_{\odot}$ )程度と低金属量であることが分かった。H/H = 3.5-5と小さいながら、赤化が無い場合の理論的な値2.86より有意に大きく、ダストによる赤化が起きていると考えられる。一般的に金属量が小さい環境ではダストは形成されにくいと考えられており、やや矛盾する結果となっている。

今回の2天体は、どの領域も低金属量のガスによってできた大質量星からの電離光子で光っているが、これが一般的な描像であるかサンプル数を増やして検証する必要がある。また、これらの銀河は低金属量環境ながらダストが形成されている可能性があり、他波長による観測や理論モデルとの比較が待たれる。

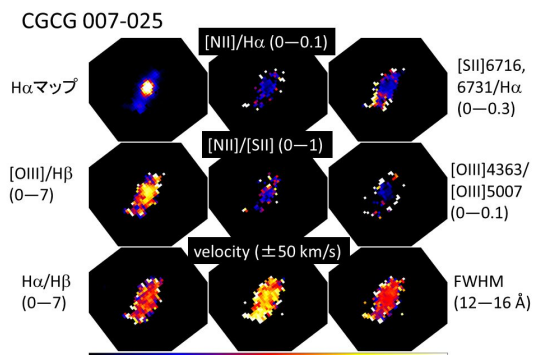
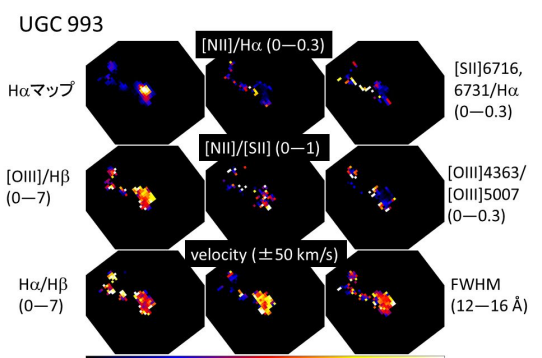


図2 KOOLS-IFUの観測データから再合成された(上9図) UGC 993と(下9図) CGCG 007-025の輝線強度、輝線強度比、速度場、速度分散のマップ。カッコ内の数字は各図のカラーバーの範囲を表している。

#### <引用文献>

Fruchter A. S., Hook R. N., Drizzle: A Method for the Linear Reconstruction of Undersampled Images, Publications of the Astronomical Society of Pacific, Volume 114, 2002年, pp 144-152

#### 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1件)

Matsubayashi, K., Sugai, H., Shimono, A., Akita, A., Hattori, T., Hayano, Y., Minowa, Y., Takeyama, N., Adaptive Optics at Optical Wavelengths: Test Observations of Kyoto 3DII Connected to Subaru Telescope A0188, Publications of the Astronomical Society of Pacific, 査読あり, Volume 128, Issue 967, 2016年, pp. 095003, DOI:10.1088/1538-3873/128/967/095003

##### [学会発表](計3件)

松林 和也、太田 耕司、長尾 透、嘉数 悠子、極端に輝線等価幅の大きい近傍矮小銀河の可視光面分光観測、日本天文学会 2017年春季年会、2017年3月15-18日、九州大学伊都キャンパス(福岡県・福岡市)

Kazuya Matsubayashi, Optical Integral Field Spectroscopy for Nearby Galaxies, ALMA WS "Extensive CO survey of nearby galaxies with ACA", 2016年12月7-9日、国立天文台 三鷹キャンパス 輪講室(東京都・三鷹市)

松林 和也、激しく星形成を行っている近傍矮小銀河の可視光面分光観測、2016年度岡山(光赤外)ユーザーズミーティング、2016年9月7-8日、国立天文台 三鷹キャンパス すばる棟大セミナー室(東京都・三鷹市)

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

松林 和也 (MATSUBAYASHI, Kazuya)  
国立天文台・岡山天体物理観測所・  
特任研究員  
研究者番号: 60622454

##### (4) 研究協力者

太田 耕司 (OHTA Kouji)  
京都大学・理学研究科・教授

研究者番号：5 0 2 2 1 8 2 5  
長尾 透 (NAGAO Tohru)  
愛媛大学・宇宙進化研究センター・教授  
研究者番号：0 0 5 0 8 4 5 0  
嘉数 悠子 (KAKAZU Yuko)  
国立天文台・ハワイ観測所・  
Subaru Public Outreach Specialist