

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和元年6月6日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K17659

研究課題名(和文)大規模撮像分光データを用いた銀河化学進化の環境依存性の解明

研究課題名(英文) Environmental effect on the chemical evolution of galaxies revealed with large photometric and spectroscopic data

研究代表者

矢部 清人 (YABE, Kiyoto)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任研究員

研究者番号：60749480

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：我々はすばる望遠鏡FMOSで得られた大規模近赤外分光サンプル(約4000天体)を用い、赤方偏移1.4付近における銀河の金属量と環境の関係を調べた。銀河の局所個数密度の大小および3つの星質量ビンでサンプルを分割し、各ビンにおいてスペクトルのスタッキング解析を行った。得られた合成スペクトルからは水素、窒素、硫黄の輝線が有意に検出され、これらの輝線フラックスの比からガス金属量を導出した。その結果、同じ星質量で見た場合、高密度領域における銀河は金属量が高い傾向があることが分かった。高密度領域における化学進化が進んだ銀河間ガスの降着など、いくつかの原因が考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により銀河の化学的性質と銀河環境との間に密接な関係がある可能性が示された。これらの研究成果は、現在開発中のすばる望遠鏡広視野ファイバー多天体分光器 Prime Focus Spectrograph (PFS)によって、今後さらに発展するものと思われる。本研究は、今後PFSを用いて得られる超大規模分光サンプルによる銀河の化学進化と環境の統計的な研究に先駆けて、重要な知見を得たものとして高い学術的意義を持つ。

研究成果の概要(英文)：We investigate the relation between the chemical properties of galaxies and their environment by using a large NIR spectroscopic sample with Subaru/FMOS. We divide our sample into several groups using the stellar mass and the local density, and we apply a spectral stacking analysis in each group. In the obtained combined spectra, Hydrogen, Nitrogen, and Sulfur emission lines are significantly detected. From the ratio of the emission line fluxes, we measure the gas-phase metallicity. We find that the metallicity of galaxies in the higher density region is higher than that in the lower density region at a fixed stellar mass. This may be due to the accretion of the enriched inter-galactic gas that enhances the galaxy metallicity in the high density region.

研究分野：天文学

キーワード：銀河進化 化学進化 環境効果 光赤外天文学

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

銀河は宇宙の大規模構造の中で特徴的な構成要素のひとつであり、その銀河がどのように形成され進化してきたかは宇宙全体の進化と密接に関係する。従って、銀河の形成・進化を明らかにすることは、宇宙全体の理解に大きな手助けとなる。

星内部での元素合成により出来た重元素は星間ガス中へと放出されるため、銀河の星間ガス中の金属量(以下単に金属量とする)は、星質量と同様に過去の星形成活動の情報を蓄積すると考えられる。従って、金属量を調べる事は星質量とは違った側面から銀河の星形成史に迫る事を意味する。近年、Sloan Digital Sky Survey (SDSS) などにより、近傍宇宙において星質量と金属量の相関関係(例えば Tremonti et al. 2004, ApJ, 613, 898; 以下 MZ 関係)や MZ 関係と他のパラメータ(特に星形成率)の依存性(いわゆる Fundamental Metallicity Relation; Mannucci et al. 2010, MN, 408, 2115; 以下 FM 関係)が統計的に調べられているが、この起源に関しては未だ多くの議論がある。高赤方偏移での MZ 関係や FM 関係についても、近年の研究により次第に明らかになりつつある。

一方で、銀河の性質とその銀河がいる環境の違いには密接な関係がある事が古くから知られている。赤方偏移 0.1 付近においては、高密度環境の銀河は同じ星質量で見た場合、わずかに金属量が高い傾向が見られている(例えば Ellison et al. 2009, MN, 396, 1257)。宇宙論的銀河進化モデルにおいても同様の結果が予想されている(例えば Dave et al. 2011, MN, 416, 1354)。しかし、高赤方偏移における MZ 関係(あるいは FM 関係)と銀河環境との関係は、大規模構造をトレースするために大きな体積のサンプルが必要であり、依然として不明である。

2. 研究の目的

上述の背景を踏まえ、本研究では、金属量を中心とした銀河の性質と銀河環境との関係を(1)高赤方偏移および(2)低赤方偏移において調査する。

(1) すばる望遠鏡 FMOS による近赤外分光データを用いた赤方偏移 1.4 付近での調査

すばる望遠鏡 近赤外多天体分光器 Fibre Multi Object Spectrograph (FMOS) 戦略枠観測 (FastSound) では、Canada-France-Hawaii-Telescope Legacy Survey (CFHTLS) wide 領域の約 20 平方度において、FMOS を用いた宇宙論的赤方偏移サーベイを行ない、赤方偏移 1.4 付近にある約 4000 個の銀河の近赤外スペクトルが得られている(Yabe et al. 2015, PASJ, 67, 102)。この赤方偏移において、かつてない体積と銀河個数のこのサンプルは、銀河環境と金属量などの銀河の性質を調べる上で有用だと考えられる。本研究では、このサンプルを用いて、赤方偏移 1.4 付近の銀河の環境を局所個数密度などで定義した上で、これらの違いで金属量(特に MZ 関係や FM 関係)などの物理的性質がどう異なるかを調べる。

(2) すばる望遠鏡 HSC および SDSS によるデータを用いたより低赤方偏移での調査

より低赤方偏移において、SDSS-III/BOSS の大規模分光サンプルと Hyper Suprime-Cam (HSC) 戦略枠観測 wide 領域の広く深い撮像データを用いて、よりコンパクトに局所個数密度を定義できる。BOSS サーベイでは $z \sim 0.7$ までの約 150 万天体のスペクトルが約 10,000 平方度にわたり取得されており、金属量など化学的性質の調査が可能である。HSC データの深いデータを用いることで、より暗い銀河を含めて局所密度を計算する事が可能である。この局所密度を環境の指標として、高赤方偏移の場合と同様に金属量と環境との関係を明らかにする。

金属量と環境の関係を異なった赤方偏移において調べる事で、銀河間ガスにおける重元素汚染、あるいは大規模構造からのガス降着のプロセスなどが、時間とともにどう進化するかに対して新たな知見が与えられると期待される。

3. 研究の方法

(1) すばる望遠鏡 FMOS による近赤外分光データを用いた赤方偏移 1.4 付近での調査

とある銀河から k 番目に近い天体までの距離を半径とし 面積を計算し、個数 (k) をその面積で割ったものを環境密度(局所個数密度)とする方法 (k -th nearest neighbor 法)を用い銀河の環境を定義する。この他にもいくつかの手法で局所密度の定義を行い、結果がどう変わるかも調査する。

まず、FastSound で得られた FMOS による近赤外分光サンプルについて、上記の方法を用いて、局所個数密度を計算する。この際に、CFHTL の撮像データも用いて統計を向上させる。次に、サンプルを局所個数密度毎に幾つかのビンに分け、スタッキング解析により、高品質のスペク

トルを求める。このスペクトルから、金属量を求めるが、この際に、Pettini & Pagel (2004, MN, 348, L59; 以下 PP04) による窒素水素輝線比 ($[\text{Ni}]/\text{H}\alpha$) と金属量の関係式を用いる。また、窒素硫黄輝線比 ($[\text{Ni}]/[\text{Sii}]$) から窒素酸素比 (N/O) などの化学的性質を調べる。

(2) すばる望遠鏡 HSC および SDSS によるデータを用いたより低赤方偏移での調査

より低赤方偏移 $z \sim 0.3$ 付近での金属量と環境との関係の調査には SDSS/BOSS による大規模分光データを用いる。BOSS サーベイの一部の領域 (約 1400 平方度) において、HSC による多色撮像データが $r \sim 26$ 等 (AB) の深さまで取得される予定である。SDSS 自体では得られない深い撮像データにより、これまでの研究に比べ、よりコンパクトに局所個数密度が測定できると期待される。上記と同様に局所個数密度毎にサンプルを分割し、金属量などの違いを議論する。BOS 分光データは比較的高品質が期待され、FMOS データの様にスタッキング解析をする必要はないと想定されるが、必要に応じて行なう。広視野撮像データの特長により銀河群・銀河団のような高密度領域もトレースできるだろう。

以上のように、赤方偏移 1.4 付近および 0.3 付近において金属量と銀河環境の関係を調査することで、環境効果の赤方偏移進化を調べる。銀河間ガスにおける重元素汚染、大規模構造からのガスの降着などのプロセスとその進化に対し新たな知見を得られると期待される。

4. 研究成果

(1) すばる望遠鏡 FMOS による近赤外分光データを用いた赤方偏移 1.4 付近での調査

まず、サンプルを $\Delta z=0.025$ のビンで分け、それぞれのビンについて以下の 3 通りの方法、① 20 Mpc のスケールでスムージングをかけ、各グリッドにおける個数密度分布を求める、② 10th nearest neighbor 法を用いて密度を求める、③ Voronoi 分割法を用いて密度を求める、を用いて銀河の局所個数密度を求めた (図 1)。

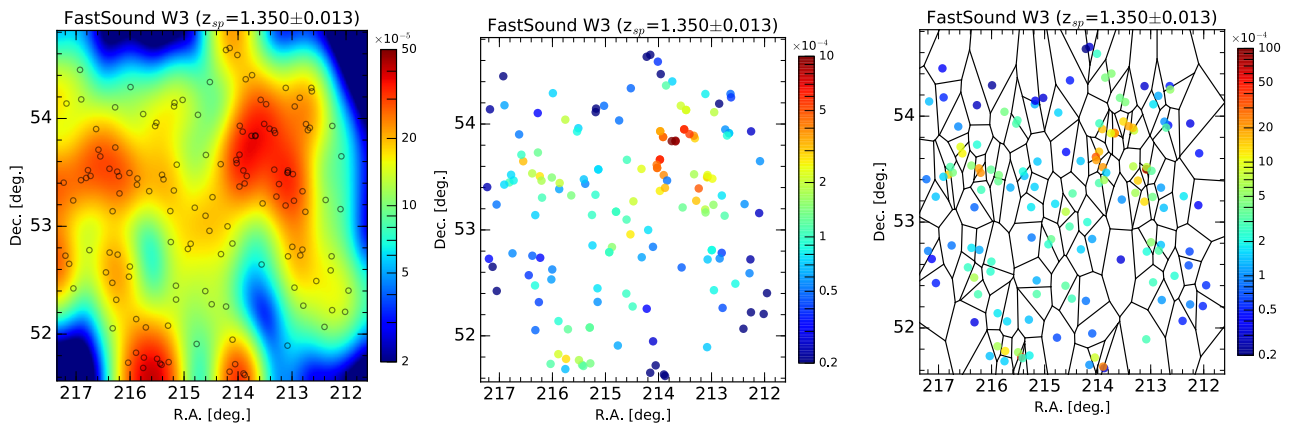


図 1. 赤方偏移 1.35 付近のサンプルの空間分布。色はそれぞれの方法(左:スムージング法、中央: 10th nearest neighbor 法、右:Voronoi 分割法)で求めた局所個数密度を表す。

次に全体のサンプルを、局所密度の大小および 3 つの星質量ビンに分割し、各グループのサンプルのスペクトルを重ね合わせるスタッキング解析を行った。解析の手法は、これまでに我々が行ってきたものと同様の手法を用いている。FastSound サンプルは on-source 積分時間が 30 分程度と短いため、個別のスペクトルの SN 比は高くないが、スタッキング解析を行うことで、より SN 比の高いスペクトルが各グループの代表的なものとして得られる。得られたスペクトルでは、 $\text{H}\alpha$, $[\text{Ni}]$, 及び $[\text{Sii}]$ の輝線が有意に検出されている。これらの輝線比を用いて、各グループにおいて金属量を求めた。輝線比と金属量との関係(金属量指標)は PP04 と Dopita et al. (2016; 以下 D16) の 2 通りを用いた。

得られた金属量を用いて、MZ 関係を局所密度の大小で調査したところ、同じ星質量で見した場合、局所密度が大きい銀河 (つまりは高密度にいる銀河) ほど金属量が高いということが分かった (図 2)。この結果は、異なる局所密度の導出方法や金属量指標を用いても、同様の傾向を示すことが分かった。考えられるメカニズムとしては、① 銀河の外層にある低金属量ガスのラム圧による剥ぎ取り効果、② 重元素を含むガスの outflow の閉じ込め効果、③ 重元素汚染が進んだ銀河間ガスの inflow、などが考えられる。

これらの結果を、宇宙論的シミュレーション (Illustris simulation; Vogelsberger et al. 2014, MNRAS, 444, 1518) による予測と比較した。我々と同様の星質量範囲のサンプルを選択し、

星形成で重み付けされた金属量を用いた。また、銀河環境を上述の方法を用いて求めた。比較の結果、高密度領域にある銀河ほど金属量が高いことが分かった。ただし、我々のサンプルと同じ密度超過の範囲で見た場合、有意な差がないことが分かった。現在、より新しく体積の大きいシミュレーション (Illustris TNG; Pillepich et al. 2018, MNRAS, 473, 4077) との比較を行っている。これらの成果は現在査読論文として投稿準備中である。

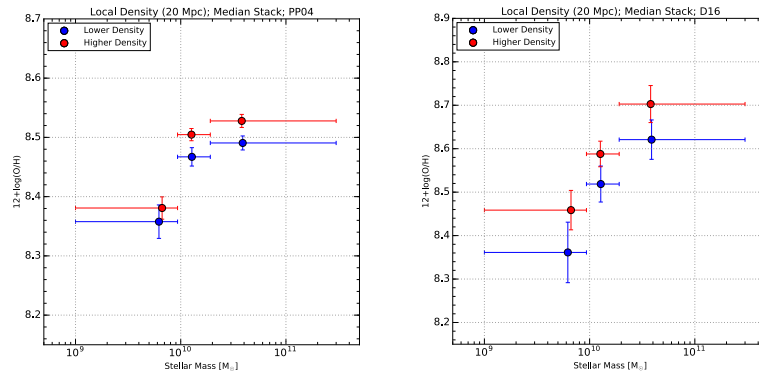


図 2. MZ 関係と局所密度との関係。金属量指標は PP04 (左) と D16 (右) の 2 通りを用いた。

(2) すばる望遠鏡 HSC および SDSS によるデータを用いたより低赤方偏移での調査

まず、SDSS の分光データを用いて、(1) と同様の解析を行った。その結果、局所密度による有意な違いは見られないことが分かった。また、Chen et al. 2016 (MNRAS, 461, 3896) のデータを用いて、filament 構造、交差点、field 領域毎にサンプルに分け、MZ 関係の違いを調査したが、有意な差は見られなかった。これは、銀河の金属量と銀河環境の関係が、赤方偏移進化している可能性を示しているが、様々な系統的な要因が考えられ、現時点では結論は出せない。

また、すばる望遠鏡 HSC による深い撮像データを用いて、SDSS の分光サンプルの局所個数密度を導出し、MZ 関係の環境依存を調べたが、有意な違いは見られなかった。ただし、HSC サンプルを用いる際に、測光的赤方偏移により近傍にある銀河を予め選択してはいるものの、より精度の高い赤方偏移決定は望めないため、局所密度を定義する際には投影されたものとして計算している。従って、着目する銀河の赤方偏移から非常に離れたような銀河も計算する際に考慮することになり、正確な密度の決定ができていない可能性もある。測光的赤方偏移の確率分布も考慮して、局所密度の推定を行う方法を現在考えているところである。また、HSC サーベイは現在進行中であり、利用可能なサンプルは依然として多くない、今後新たな観測データが追加されることで、統計の改善が期待される。

これらの研究結果は、今後、すばる望遠鏡広視野ファイバー多天体分光器 Prime Focus Spectrograph (PFS) によってさらに発展するものと思われる。本研究における知見を活かし、PFS を用いてどのような観測をすれば、銀河の化学進化と環境との関係にさらなる知見が得られるかを現在検討中である。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 7 件)

(1) Kubo Mariko, Tanaka Masayuki, Yabe Kiyoto, Toft Sune, Stockmann Mikkel, Gomez-Guijarro Carlos, “The Rest-frame Optical Sizes of Massive Galaxies with Suppressed Star Formation at $z \sim 4$ ”, The Astrophysical Journal, 査読有, 867 巻, 2018, id. 1, 11 pp. DOI: 10.3847/1538-4357/aae3e8

(2) Tamura, Naoyuki; Takato, Naruhisa; Shimono, Atsushi; Moritani, Yuki; Yabe, Kiyoto; Ishizuka, Yuki; Kamata, Yukiko; Ueda, Akitoshi; Aghazarian, Hrand; Arnouts, Stéphane, 他 102 名, “Prime Focus Spectrograph (PFS) for the Subaru telescope: ongoing integration and future plans”, Proceedings of the SPIE, 査読無, 10702 巻, 2018, id. 107021C 12 pp. DOI: 10.1117/12.2311871

(3) Hayashi Masao, Tanaka Masayuki, Shimakawa Rhythm, Furusawa Hisanori, Momose Rieko, Koyama Yusei, Silverman John D, Kodama Tadayuki, Komiyama Yutaka, Leauthaud Alexie, Lin Yen-Ting, Miyazaki Satoshi, Nagao Tohru, Nishizawa Atsushi J, Ouchi Masami, Shibuya Takatoshi, Tadaki Ken-ichi, Yabe Kiyoto, “A 16 deg² survey of emission-line galaxies at $z < 1.5$ in HSC-SSP Public Data Release 1”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 70 巻, 2018, id. S17

DOI: 10.1093/pasj/psx088

(4) Aihara Hiroaki, Arimoto Nobuo, Armstrong Robert, Arnouts Stephane, Bahcall Neta A, Bickerton Steven, Bosch James, Bundy Kevin, Capak Peter L, Chan James HH, 他 134 名, “The Hyper Suprime-Cam SSP Survey: Overview and survey design”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 70 巻, 2018, id.S4

DOI: 10.1093/pasj/psx066

(5) Tamura, Naoyuki; Takato, Naruhisa; Shimono, Atsushi; Moritani, Yuki; Yabe, Kiyoto; Ishizuka, Yuki; Ueda, Akitoshi; Kamata, Yukiko; Aghazarian, Hrand; Arnouts, Stéphane, 他 90 名, “Prime Focus Spectrograph (PFS) for the Subaru telescope: overview, recent progress, and future perspectives”, Proceedings of the SPIE, 査読無, 9908 巻, 2016, id. 99081M 17 pp.

DOI: 10.1117/12.2232103

(6) Akifumi Seko, Kouji Ohta, Kiyoto Yabe, Bunyo Hatsukade, Masayuki Akiyama, Naoyuki Tamura, Fumihide Iwamuro, and Gavin Dalton, “Constraint on the Inflow/outflow Rates in Star-forming Galaxies at $z \sim 1.4$ from Molecular Gas Observations”, The Astrophysical Journal, 査読有, 833 巻, 2016, 53

DOI: 10.3847/1538-4357/833/1/53

(7) Akifumi Seko, Kouji Ohta, Kiyoto Yabe, Bunyo Hatsukade, Yuya Aono, and Daisuke Iono, “Gas-to-dust ratios in massive star-forming galaxies at $z \sim 1.4$ ”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 査読有, 68 巻, 2016, id.62

DOI: 10.1093/pasj/psw060

[学会発表] (計 7 件)

(1) Kiyoto Yabe, “The current status of PFS project”, Panchromatic Panoramic Studies of Galaxy Clusters: from HSC to PFS and ULTIMATE (招待講演) (国際学会), 2019 年 3 月 11 日~2019 年 3 月 13 日, 台湾中央研究院, (台湾)

(2) Kiyoto Yabe, “PFS”, Subaru-EAO High-z Galaxy Workshop (招待講演) (国際学会), 2019 年 1 月 31 日~2019 年 2 月 1 日, 国立天文台三鷹キャンパス (東京都三鷹市)

(3) 矢部清人, “SuMIRe-PFS[12];サーベイ計画の現状とサーベイシミュレーターの開発”, 日本天文学会 2018 年秋季年会, 2018 年 9 月 18 日~2018 年 9 月 21 日, 兵庫県立大学姫路工学キャンパス (兵庫県姫路市)

(4) 矢部清人, “PFS 予想される装置性能”, 日本天文学会 2018 年春季年会, 2018 年 3 月 14 日~2018 年 3 月 17 日, 千葉大学西千葉キャンパス (千葉県千葉市)

(5) 矢部清人, 太田耕司, 秋山正幸, 田村直之, 岩室史英, 戸谷友則, 他 FastSound チーム, “大規模近赤外分光サンプルで明らかにする銀河環境とガス金属量との関係”, 日本天文学会 2017 年春季年会, 2017 年 03 月 15 日~2017 年 03 月 18 日, 九州大学 伊都キャンパス (福岡県福岡市)

(6) Kiyoto Yabe, “The chemical properties of star-forming galaxies at $z \sim 1.4$ revealed with Subaru/FMOS”, The 6th Subaru International Conference (国際学会), 2016 年 11 月 28 日~2016 年 12 月 02 日, 広島国際会議場 (広島県広島市)

(7) Kiyoto Yabe, “mass-metallicity relation revealed with Subaru/FMOS”, In Situ View of Galaxy Formation (招待講演) (国際学会), 2016 年 10 月 31 日~2016 年 11 月 04 日, Schloss Ringberg, Bavaria (Germany)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称:

発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年：
国内外の別：

○取得状況（計 0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。