

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2011～2014

課題番号：23224005

研究課題名(和文) 広視野多天体分光・面分光で探る銀河形態の起源

研究課題名(英文) The Origin of Morphologies of Galaxies : Explorations with Multi-Object and Integral-Field Spectroscopic Observations

研究代表者

有本 信雄 (Arimoto, Nobuo)

国立天文台・ハワイ観測所・教授

研究者番号：60242096

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 165,600,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙における星形成活動はビッグバンから20-30億年を経た頃に最盛期を迎え、その後徐々に活動性が低下しながら渦巻き銀河や楕円銀河など、秩序ある形態が発現した。この過程を進めたのは何か。この問いに答えるため、すばる望遠鏡の近赤外線観測装置MOIRCSの機能向上を図るとともに、遠方から現在に至る銀河を詳しく調べる観測的研究を進めた。その結果、宇宙年齢20億年頃のガスを豊富に持つ銀河が活発な星形成を行い、星質量を増大させながら、宇宙年齢30億年頃までに星形成活動を終了し、静的に進化して現在の楕円銀河に至る過程を鮮やかに描き出すなど、銀河進化過程の理解に重要な知見を得ることに成功した。

研究成果の概要(英文)：The cosmic star-formation activity is known to have its peak around 2-3 billion years after the Big Bang. Orderly morphologies such as spirals and ellipticals then emerge. What is the primary driver of such evolution? In order to answer this fundamental question, we initiated the upgrade of MOIRCS, near-infrared instrument for Subaru Telescope. We also conducted intensive observations of distant and nearby galaxies. We obtained some critically important insights of galaxy evolution. We found the star-forming galaxies at $z \sim 2.5$ with abundant molecular gas generated their stellar content rapidly, and terminated their activity around $z \sim 1.5$. Then such galaxies evolved passively and became giant elliptical galaxies in the present universe.

研究分野：光赤外線天文学

キーワード：光赤外線天文学 銀河天文学

1 研究開始当初の背景

近赤外線では、遠方銀河の赤方偏移した可視光を観測することができる。すなわち、これまで可視光で研究されていた現在の宇宙の銀河と、遠方銀河を同じスペクトル領域で比較することが可能である。すばる望遠鏡の MOIRCS や FMOS といった近赤外線観測装置によって、従来可視光での情報が中心であった遠方銀河の探査が、近傍宇宙の銀河と同じスペクトル範囲で可能になり、赤方偏移 2-3 (宇宙年齢 20-30 億年) の宇宙で最も星形成が盛んであった時代の銀河の様子が徐々に明らかになってきた。星形成銀河は、現在の宇宙における銀河よりも星質量は小さいものが多く、サイズはコンパクトで、高い星形成量をもっている。一方この時代にも既にかなり成長し、星形成活動を終了した、現在の楕円銀河によく似たものも存在することが見出された。銀河形成の最盛期に既に多様な銀河形態が存在していたことが伺われる。その後宇宙全体の星形成活動は徐々に低下し、同時に渦巻き銀河、楕円銀河といった形態が発現してきたことが分かっている。

だが、**形成期から現在の秩序ある銀河形態にいかにして至ったか、特に、何が銀河の進化経路を決定づける要因であるか**については、確固たる答えが得られていない。これを理解するためには、より多くの銀河サンプルに基づいて、近赤外線観測を基盤にして銀河の物理的パラメータ (質量、年齢、金属量など) を調べることで、また、これまで点として観測されてきた遠方銀河の内部を分解し、銀河内部のガス運動や、銀河内の領域ごとの星形成史の違いを調べることが必要である。

2 研究の目的

遠方の活発な星形成期から現在に至る銀河の進化過程において、活動性の変化、形態の出現は何によって引き起こされたのか? この問いにこたえるために、これまで知られている赤方偏移 2-3 だけでなく、より現在に近い探査が不十分な 0.5-2 の時代の銀河サンプルを構築し、**多天体分光による系統的な星形成量・金属量探査、さらには面分光による内部構造を分解した分光観測による徹底的な調査でその謎を解明することが本研究の目的である。**

3 研究の方法

(1) MOIRCS はすばる望遠鏡の近赤外線撮像・多天体分光装置であり、近赤外線観測装置としてはトップクラスの広い視野と強力な多天体分光機能をもつ。本研究では、銀河進化過程の研究、特に星形成銀河から楕円銀河へと至る銀河形態の発現過程を探るため、**(a) 検出器の交換による感度向上、(b) 面分光ユニットの新設**の二つを中心とした機能向上を図った。

(2) また、観測的には、 $z = 0.5-3$ の時代、すなわち銀河における**星形成活動のピークから銀河形態が発現する時代の銀河サンプルに基づき、近赤外撮像・分光観測を展開する**。対象となる銀河は星形成銀河だけでなく、既に星形成活動を終了し静的な進化に移行した銀河も捉えることで、銀河進化の全体像に迫る。

4 研究成果

4.1 MOIRCS 機能向上の成果

(1) 検出器アップグレード

MOIRCS は 2048×2048 画素の近赤外線アレイ検出器を 2 個搭載している。従来の Hawaii-2 アレイに対して、Teledyne 社の H2RG アレイは、(a) 信号読出しノイズ、クロストークの低減、(b) reference pixels の搭載による一様性の向上、(c) 信号読出し時間の大幅な短縮、などの多くの改良が施されている。本研究ではこの H2RG と専用の低温読出しエレクトロニクス (SIDE CAR-ASIC) を MOIRCS に搭載すべく開発を行った。

① 新検出器の性能評価

Teledyne 社から納品された H2RG アレイ、および駆動・読出しエレクトロニクスに対して、(a) 電圧設定の調整による読出しの最適化 (b) ゲインや読出しノイズレベルの確認 (c) 信号線形性の確認 などを実施した。試験は、ハワイ観測所山麓施設のラボに後述する面分光ユニットを納める Wing Box をデューワーとして設置し、その中に H2RG および SIDE CAR ASIC を納めて真空引き、冷却を行って実施した。

調整の結果、1 回読出しの CDS で 17e-程度と、期待されるノイズレベルが達成されることを確認した。複数回の (Fowler sampling) 非破壊読出しを行うことで、10e-を下回るノイズレベルが達成できる。また、信号線形性については、fullwell の 50% 程度の信号レベルで 5% 程度の変形性と、十分小さいことが確認できた。これらを通じて、**検出器および読出しエレクトロニクスが求めている性能を持っていることを確認した。**

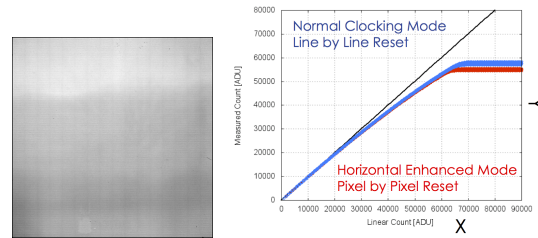


Figure 1: 左: H2RG アレイ 2k × 2k の 読出し信号。右: 応答の線形性試験。入力 (横軸) と読出された信号 (縦軸) の関係を示している。Teledyne 社のレポートの結果と一致した線形性が確認された。

② 検出器モジュールの製作、交換作業と試験観測、科学観測

H2RG と読出しエレクトロニクスに合わせて、装置焦点面の配置の再設計を行い、二つの**検出器モジュール**を製作した。MOIRCS はすばる望遠鏡の主力観測装置の一つとして共同利用観測に供されている。観測所の運用スケジュールとの兼ね合いから、検出器の交換作業は 2015 年 5 月から実施することとなった。本報告書執筆時点で、MOIRCS はマウナケア山頂からヒロの山麓施設に移送され、検出器交換作業を開始している。検出器組み込み作業を 6-7 月に行い、山麓施設での冷却試験ののち、マウナケアに輸送、10 月に試験観測を実施して性能を確認してから、科学観測に提供される予定となっている。

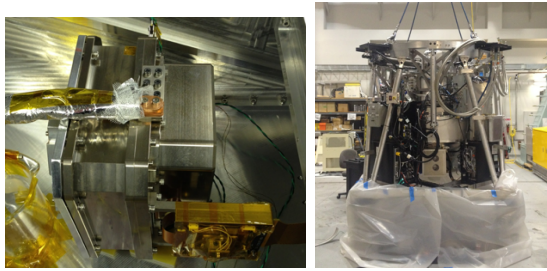


Figure 2: 左: H2RG アレイと SIDECAR ASIC を搭載する検出器モジュール。右: 検出器交換作業のためハワイ山麓施設に移送された MOIRCS。

(2) 面分光ユニットの開発

MOIRCS のカセグレン焦点面部分に新たなスペースを設け、光路上に出し入れ可能な面分光ユニットを設置する。面分光ユニットは従来の MOIRCS ではできなかった、空間と分光の三次元情報を得ることを可能にし、銀河の内部構造を分解してその進化過程に迫る観測を可能にする。

① 望遠鏡焦点面部分の設計と製作

MOIRCS に面分光機能を追加するために、望遠鏡焦点部分に面分光ユニットを収納する 'Wing Box' を開発した。このユニットは独立してデューワーとして機能するように設計され、H2RG 検出器の性能試験に使用されたほか、面分光ユニットの試験にあたっては MOIRCS 本体の運用を中断することなく実施することができる。

② ファイバー式面分光ユニットの設計

面分光ユニットとして、まず、ファイバーを用いたシステムを検討した。この方式では、視野内の任意の場所の位置にファイバーバンドルを配置して面分光を行うことができる。熱放射が支配的にならない J , H バンドではファイバーを用いた観測装置が多く存在するが、冷却が必要な K バンドまでカバーしたファイバー分光器は技術的な挑戦である。F 変換や迷光の対策、機械的設計との整合性など、多くの検討を要したが、ループ状にファイバーを配置して変形を抑制した設計を行い、視野選択アームと組合せたデザインを完成させた。

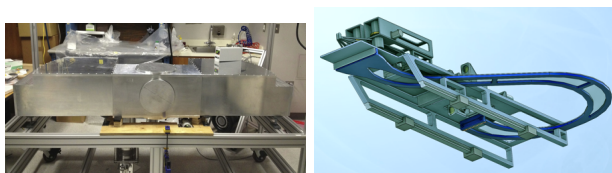


Figure 3: (左) 面分光ユニットを搭載する Wing Box。(右) ファイバーを用いた面分光ユニットの全体図。

③ マイクロレンズ式面分光ユニット

ファイバー式面分光ユニットと平行して、マイクロレンズアレイ (MLA) を用いた面分光光学系を MOIRCS に組み込むため、研究協力者の石垣剛 岩手大准教授の協力のもと新規設計した。MLA 面分光ユニットでは、望遠鏡焦点位置にピックオフミラーを配置し、拡大光学系を通した天体像を MLA に入射させ、micro pupil 像を MOIRCS の分光器光学系に入れる (Fig. 4)。科学目的に照らし合わせ、0.2 秒角のサンプリングで 9×31 の素子を持つ MLA の仕様を決定し、光学性能の評価を行って、光学系の構成を調整・最適化した。

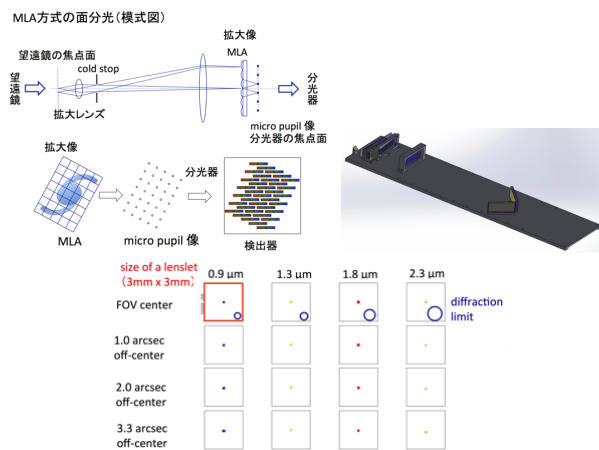


Figure 4: 上: MLA 面分光ユニット光学系概念図とレイアウト。下: スポットダイアグラム。マイクロレンズのサイズに対し十分高い結像性能を達成している。

得られた設計に基づき MLA をはじめとする光学コンポーネントを製作した。MOIRCS 用面分光ユニットは約 80K の極低温環境で使用されるため、冷却環境で光学コンポーネントを破壊せず、かつ位置ズレが発生しないように保持するためのホルダーを設計・製作した。個々のコンポーネントについて冷却試験を行って、期待される光学性能を保持したまま冷却できることを確認した。

現在 MLA 面分光ユニットは全体の常温での組み上げを行い、MLA で生成される micro pupil 像が設計通りのサイズで得られることを確認している。その後、光学系全体の冷却試験を行い、光学性能を確認した上でハワイに移送し、MLA 面分光ユニットの出し入れを行う部分と組み合わせ、MOIRCS 本体の望遠鏡焦点部に搭載する。MOIRCS への搭載は、2016 年度に実施できる見込みである。

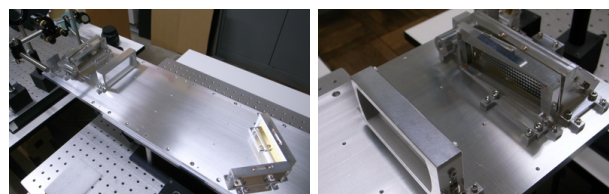


Figure 5: MLA 面分光ユニットの光学系 (左: 全体、右: MLA 部分)

4.2 観測的研究の成果

(1) 遠方宇宙で静的に進化する銀河の性質

① 赤方偏移 1.4 から 2.5 の範囲の銀河は、そのスペクトルエネルギー分布の特徴を使って、 B , z , K のフィルターの組み合わせで効率良く選択できる。既に星形成を終了して静的に進化している銀河を pBzK 銀河、星形成をまだ行っている銀河を sBzK 銀河という。

本研究では、まず、COSMOS 領域と呼ばれる天域で pBzK 銀河の分布を調べ、pBzK 銀河の密集する領域を三つ選び出して Subaru/MOIRCS でこれらのうち 34 天体の近赤外分光観測を行い、18 銀河についてスペクトルを得た。

ハッブル宇宙望遠鏡の撮像データの解析から得たこれらの銀河の表面輝度分布は近傍の楕円銀河に近い。つまり、形態としては楕円銀河であると言える。しかしながら、近傍

の楕円銀河の同質量のもの比べて有効半径が全体に小さく、なかには有効半径が楕円銀河の 1/3 しかない非常にコンパクトな銀河もあることが分かった。とは言え、このサンプルの 30% 強は近傍の楕円銀河の質量-有効半径関係に従っており、いわゆる通常の楕円銀河と同じである。本研究で対象とした pBzK 銀河は、近傍宇宙の楕円銀河の祖先であろうと考えられる。楕円銀河の祖先は非常にコンパクトで速度分散が著しく大きいという観測的な先行研究があるが、この時期の宇宙にはコンパクトな銀河と普通の大きさの銀河とが混在していることを本研究は明らかにしたと言える。また、 $z = 1.82$ にある最も明るい銀河について星の速度分散を見積もったところ、 $\sigma = 270 \pm 105 \text{ km/s}$ という値を得た。その星質量、有効半径とも近傍の楕円銀河とほとんど同じ銀河であることが分かる。本研究では、**このような遠方宇宙でもその質量、構造、力学的性質が楕円銀河とよく似ている銀河が既に存在する**ことを示したと言えよう (Onodera et al. 2012)。

② 次に、これらの静的に進化する銀河の性質をより詳しく調べるために、明るい銀河を 14 個抽出し、それに新たに Subaru/MOIRCS による近赤外分光観測データ 10 個を追加して、合計 24 個の銀河サンプルを構築した。これらの銀河の赤方偏移は $1.25 < z < 2.09$ に分布しており、平均の赤方偏移は $\langle z \rangle = 1.6$ 、平均の星質量は銀河系の約 2.5 倍である。本研究では 24 銀河のスペクトルを重ね合わせて一つとし、高品質のスペクトルを達成して銀河全体の平均の星の種族の性質を炙り出すアプローチを取っている。各々の銀河の露出時間は 6-9 時間であり、合成されたスペクトルは Subaru/MOIRCS の ~ 200 時間に相当する。

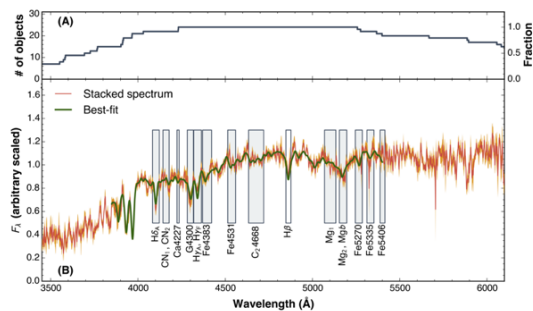


Figure 6: 24 個の pBzK 銀河の重ね合わせスペクトル。赤は観測値、緑はモデル。ボックスは Lick インデックスを表す。

本研究で得られたスペクトルは、近傍の楕円銀河の星の種族解析で使用される吸収線のほぼ全てが測定可能である。星の種族を解析することで、これらの**静的に進化する銀河がどのような星生成の歴史を辿ったかを世界で初めて明らかにすることができる**。

合成されたスペクトルから得られた銀河の星の種族について、平均の星年齢は ~ 11 億年、金属量は $[Z/H] = 0.24 (+0.2, -0.14)$ 、 α 元素と鉄の存在量比は $[\alpha/Fe] = 0.31 (\pm 0.12)$ 、星の速度分散は $\sigma = 330 (\pm 41) \text{ km/s}$ 、と求められた。注目に値するのは、 $\langle z \rangle = 1.6$ の宇宙で静的に進化する銀河の金属量 $[Z/H]$ と $[\alpha/Fe]$ 比はともに、同じ速度分散を持つ近傍の楕円銀河と非常によく似ているということである。また、年齢も、これらの銀河がこのまま静的に進化して、新たな星形成を引き起こさないとすると、近傍宇宙の楕円銀河と同じ年齢となる。即ち、銀河の星の種族構造は、これらの銀河が近傍の楕円銀河へと進化する可能性が

大きいことを示している。

星の平均年齢が ~ 11 億年であるということは大部分の星が赤方偏移 $z \sim 2.3$ で誕生したことを示す。この時期の銀河は既に大質量で活発に星形成を行っており、その質量が成長している銀河である。従って、質量の成長に伴って、星形成が終了したことを示唆する。 α 元素と鉄との比は Ia 型超新星と II 型超新星の元素合成への関与の割合を示す。 $[\alpha/Fe] = 0.31$ という値は、これらの銀河の星の化学組成には Ia 型超新星の影響が見られない、すなわち、Ia 型超新星が爆発する 10 億年よりも短い時間で星形成が終了したことを意味する。また、この間に銀河系の約 2.5 倍という平均の星質量を達成するには、少なくとも ~ 200 /年程度の星形成率で星が作られなくてはならない。この星形成率は $z \sim 2.3$ の星形成銀河 (主系列銀河) の典型的な値である。以上の考察から $z \sim 1.6$ にある静的に進化する銀河 (pBzK 銀河) は近傍の楕円銀河の祖先であり、pBzK 銀河の祖先は $z \sim 2.3$ にある星形成主系列銀河であると、結論した (Onodera et al. 2015)。本研究によって、 $z \sim 2.3$ から 1.6 という期間に**活発な星形成が終了し楕円銀河が出現する様子を、高品質のスペクトルによって鮮やかに描き出すことに成功した**。

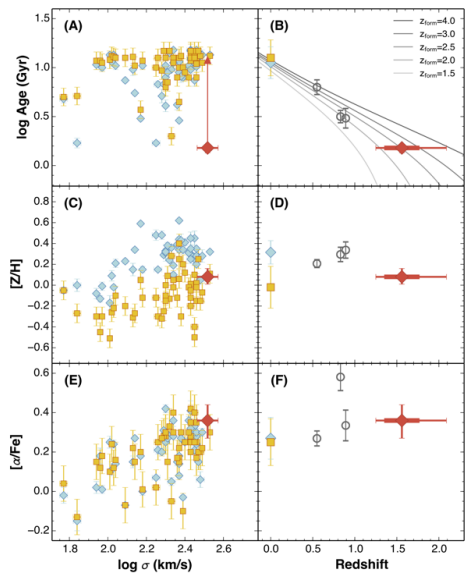


Figure 7: 静的に進化する銀河の性質。速度分散と星の年齢 (A)、金属量 (C)、 $[\alpha/Fe]$ 比 (E) の関係、および赤方偏移と星の年齢 (B)、金属量 (D)、 $[\alpha/Fe]$ 比 (F) の関係。赤が $z \sim 1.6$ 銀河を表す。オレンジと青は近傍の楕円銀河の中心値と有効半径内部で平均した値を示す。

(2) 遠方宇宙の星形成銀河 (sBzK 銀河) の性質

① 遠方宇宙には静的に進化する銀河とともに、活発に星形成を行っている銀河も多数存在する。本研究では、赤方偏移 $z \sim 1.6$ の宇宙に存在する星形成銀河 (主系列銀河) の性質を明らかにする。まず、すばる望遠鏡に搭載された近赤外多天体分光器 FMOS を用い、COSMOS 領域にある赤方偏移が $1.4 < z < 1.7$ にある 271 個の星形成銀河 (sBzK 銀河) の $H\alpha$ 、 $H\beta$ 、 $[NII]$ 、 $[OIII]$ 輝線強度を測定し、それぞれの銀河の赤方偏移、ダスト量、星形成率を求めた。

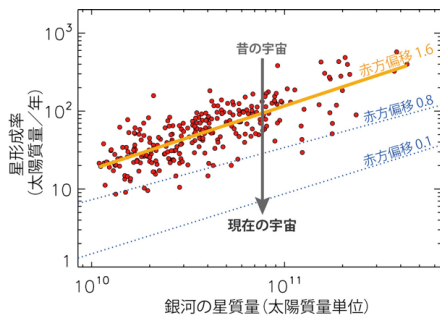


Figure 8: 銀河の星質量と星形成率の関係。宇宙の年齢とともに、星形成率が全体的に低下する様子が示されている。

銀河星質量とともに星形成率が高くなるという関係は、従来近傍宇宙でしか知られていなかったが、本研究では $z \sim 1.6$ の遠方宇宙でも星形成率は銀河の質量に伴って増加していること、星形成率は現在よりも 20 倍以上高かったことを示した。近傍の星形成銀河の測定と同様な $H\alpha$ 輝線の直接観測によって、宇宙における星形成率の変化の一貫性のある議論が可能となったと言える (Kashino et al. 2013)。

② 本研究ではさらに、これらのうち約 160 個についてガス内の重元素量を見積り、近傍と同様に銀河の星質量と金属量に強い相関があること、大質量の銀河では金属量が現在の銀河に匹敵するのに対し、低質量の銀河では金属量が少ないこと、を見出した。大質量の星形成銀河はほどなく星形成を終了して静的な進化をすることが予想される (Zahid et al. 2014)。

(3) 最遠方銀河団の赤方偏移測定とその銀河の性質

① 最遠方銀河団 Cl J1449+0856 は銀河団は研究代表者等が発見したものであり (Gobat et al. 2011, A&A 526, 133), 国立天文台編纂の理科年表にも最遠方銀河団として記載されている。本研究では、ハッブル宇宙望遠鏡に搭載された WFC3 によるグリズム分光観測で、銀河団の中心領域にある 140 個の銀河の赤方偏移を求め、銀河団本体の赤方偏移を $z \sim 2.00$ と決定し、背後に $z \sim 2.07$ の銀河がシート状に分布する構造を明らかにした。また、グリズム分光で得られた静的に進化する銀河のスペクトルを重ねて吸収線の強さを元に星種族の年齢を求めたところ、 ~ 10 億年という値が得られた。

② 次に、多波長撮像データをもとに、銀河団の構造と銀河の形態を調べた。この銀河団は空間的に明らかな集中がみられ、静的に進化する銀河が存在するが、同時に、ダストに覆われた大質量の星形成銀河が多数存在する。これは近傍の銀河団の中心領域が楕円/S0 銀河などの静的な銀河で占められているのと著しく異なっている一方、他の $z > 1.5$ の銀河団でも中心部に星形成銀河の存在が報告されており、銀河団銀河が $z \sim 2$ 以降に星形成を終了することを示唆している (Strazzullo et al. 2013)。

③ さらに、この銀河団の 76 個の星形成銀河の分光観測を Subaru/MOIRCS で行い、ほぼ同じ赤方偏移にあるフィールド銀河との比較を行った。輝線比から重元素量を推定したところ、銀河団銀河の重元素量の方が $\sim 0.09-0.25$ dex フィールド銀河よりも低いという予想外の結果を得た。興味深いことには、星形成率は逆に銀河団銀河の方が 2.5 倍高い。これは銀河団銀河の低いガス重元素量が高い星形成率と何らかの繋がりを持っていることを強く示唆する。この銀河団銀河のガス重元素量が低いのは、重元素量の低いガスが銀

河に降着しているためかも知れない。ガスの降着によって星形成率が上昇するとともに、重元素量が薄められているのかもしれない。このような低いガス重元素量がこの時代の銀河団に普遍的なものかを知るためには、さらに多くの銀河団を調べる必要がある (Valentino et al. 2015)。

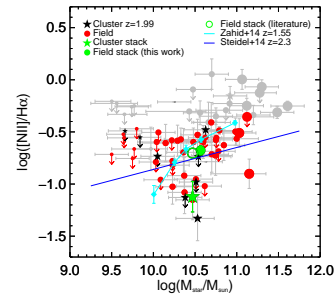


Figure 9: 銀河団銀河とフィールド銀河の重元素量指標の比較。縦軸は $[NII]/H\alpha$ 比、横軸は銀河の星総質量。

(4) 銀河形成における環境効果

原始的な銀河団環境における銀河の進化については、連携研究者の児玉忠恭氏を PI とする「MAHALO-Subaru プロジェクト」が系統的な観測を推進している。以下ではその最近の成果の一部を紹介する。

① このプロジェクトでは、MOIRCS に狭帯域フィルターを装着して、赤方偏移した $H\alpha$ 輝線をとらえ、 $z = 2.16$ の電波銀河 PKS1138 の周囲に存在する星形成銀河の集団を発見した。中心部では「明るく赤い」輝線銀河が集中するのに対し、周縁部では「暗く青い」銀河が多い。銀河環境が銀河の性質に影響を与えていることが示唆されるが、一方星形成の活動性はフィールドとの大きな違いがなかった。この領域の銀河のハッブル宇宙望遠鏡での画像を解析し、形態と色や明るさとの関係を調べた (Fig. 11)。暗い銀河は非常にクランピーであったり、銀河合体を示唆する形態を示すが、赤くて重い銀河はコンパクトな傾向が見えている。これらの銀河は進化し続け現在に至るまでには、ほとんどが「早期型銀河」に進化すると考えられるが、早期型銀河の発現が垣間見えていると言えるだろう。

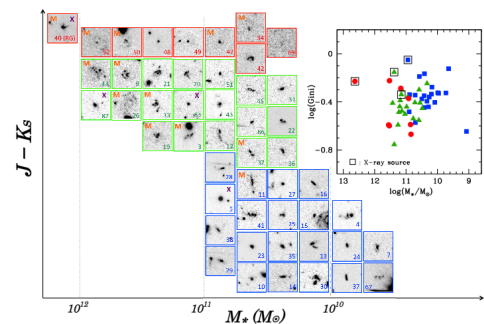


Figure 10: PKS1138 銀河団における銀河形態 (Koyama et al. 2013)。

② さらに、分光データを使った研究で、銀河団環境でフィールド銀河並に銀河団のガスが活発な星形成で高い励起状態にあること (Fig.11: 左)、さらに星形成の結果である銀河の重元素量が銀河団では優位に高い、つまり進化が進んでいることが示唆された (Fig.11: 右)。

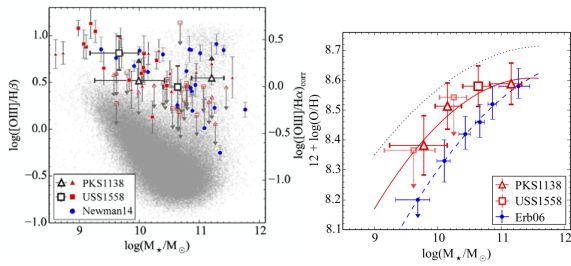


Figure 11: 遠方銀河団の銀河(赤)とフィールド銀河(青)におけるガスの励起状態と重元素量 (Shimakawa et al. 2015)。

現在、本研究では MOIRCS だけでなく Keck の MOS-FIRE による高感度分光観測や、補償光学を用いた高解像度観測を進めている。さらに、ALMA による分子ガス探査なども加え、総合的な情報から、遠方銀河から現在に至る進化の道筋を明らかにする予定である。

5 主な発表論文等

[雑誌論文]: (計 49 件)

- ① Onodera, M., Carollo, C. M., Renzini, A., Cappellari, M., Mancini, C., Arimoto, N., Daddi, E., Gobat, R., Strazzullo, V., Tacchella, S., Yamada, Y., ‘The ages, metallicities and element abundance ratios of massive quenched galaxies at $z \sim 1.6$ ’, 2015, ApJ in press. (査読有)
- ② Shimakawa, R., Kodama, T., Tadaki, K., Hayashi, M., Koyama, Y., Tanaka, I., ‘An early phase of environmental effects on galaxy properties unveiled by near-infrared spectroscopy of protocluster galaxies at $z > 2$ ’, 2015, MNRAS 448, 666 (査読有) DOI: 10.1093/mnras/stv051
- ③ Valentino, F., Daddi, E., Strazzullo, V., Arimoto, N. (11 人中 9 番目), et al., ‘Metal Deficiency in Cluster Star-Forming Galaxies at $z = 2$ ’, 2015, ApJ 801, id 132 (査読有) DOI: 10.1088/0004-637X/801/2/132
- ④ Zahid, H. J., Kashino, D., Silverman, J. D., Arimoto, N. (31 人中 9 番目), et al., ‘The FMOS-COSMOS Survey of Star-forming Galaxies at $z \sim 1.6$ II. The Mass-Metallicity Relation and the Dependence on Star Formation Rate and Dust Extinction’, 2014, ApJ 792, id 75 (査読有) DOI: 10.1088/0004-637X/792/1/75
- ⑤ Kashino, D., Silverman, J. D., Rodighiero, G., Renzini, A., Arimoto, N., et al. (30 人), ‘The FMOS-COSMOS Survey of Star-forming Galaxies at $z \sim 1.6$. I. H α -based Star Formation Rates and Dust Extinction’, 2013, ApJ 777, id L8 (査読有) DOI: 10.1088/2041-8205/777/1/L8
- ⑥ Gobat, R., Strazzullo, V., Daddi, E., Arimoto, N. (10 人中 10 番目), et al., ‘WFC3 GRISM Confirmation of the Distant Cluster Cl J1449+0856 at $\langle z \rangle = 2.00$: Quiescent

and Star-forming Galaxy Populations’, 2013, ApJ 776, id 9 (査読有) DOI: 10.1088/0004-637X/776/1/9

⑦ Strazzullo, V., Gobat, R., Daddi, E., Arimoto, N. (11 人中 8 番目), et al., ‘Galaxy Evolution in Overdense Environments at High Redshift: Passive Early-type Galaxies in a Cluster at $z \sim 2$ ’, 2013, ApJ 772, id 118 (査読有) DOI: 10.1088/0004-637X/772/2/118

⑧ Koyama, Y., Kodama, T., Tadaki, K., Hayashi, M., Tanaka, M., Smail, I., Tanaka, I., Kurk, J., ‘Massive starburst galaxies in a $z = 2.16$ proto-cluster unveiled by panoramic H α mapping’, 2013, MNRAS 428, 1551 (査読有) DOI: 10.1093/mnras/sts133

⑨ Onodera, M., Renzini, A., Carollo, M., Arimoto, N. (24 人中 8 番目), et al., ‘Deep Near-infrared Spectroscopy of Passively Evolving Galaxies at $z \gtrsim 1.4$ ’, 2012, ApJ 755, id26. (査読有) DOI: 10.1088/0004-637X/755/1/26

6 研究組織

(1) 研究代表者

有本 信雄 (ARIMOTO, Nobuo)
国立天文台ハワイ観測所 教授
研究者番号: 60242096

(2) 研究分担者

西村 徹郎 (NISHIMURA, Tetsuo)
国立天文台ハワイ観測所 名誉教授
研究者番号: 90260017

岩田 生 (IWATA, Ikuru)
国立天文台ハワイ観測所 准教授
研究者番号: 40399275

田中 壱 (TANAKA, Makoto)
国立天文台ハワイ観測所 RCUH 職員
研究者番号: 70374890

(3) 連携研究者

兒玉 忠恭 (KODAMA, Tadayuki)
国立天文台ハワイ観測所 准教授
研究者番号: 80343101

白田 知史 (USUDA, Tomonori)
国立天文台 TMT 推進室 教授
研究者番号: 10311177

大屋 真 (OYA, Shin)
国立天文台ハワイ観測所 RCUH 職員
研究者番号: 80399287

(4) 研究協力者

石垣 剛 (ISHIGAKI, Tsuyoshi): 岩手大学 人文社会科学部 准教授

Anna Ferré-Mateu: 国立天文台ハワイ観測所 RCUH 職員
小野寺 仁人 (ONODERA, Masato): ETH Zurich 研究員