

MOIRCS Spectroscopy: Scrutinizing over 70 Galaxies in Two Proto Cluster at $z > 2$

嶋川里澄 (ハワイ観測所/総研大天文科学専攻)

Abstract

Local cluster galaxies have characteristic properties represented by color-magnitude relation and density-morphology relation for example. In proto-clusters at $z \geq 2$, however, such relations break down because the galaxies are just forming. Therefore those proto-clusters are the unique laboratories to directly investigate the origin of environmental dependency seen in the local universe. With this motivation, we have conducted a spectroscopy of 2 rich proto-clusters, PKS1138-262 ($z = 2.16$) and USS1558-003 ($z = 2.53$) with Subaru/MOIRCS in S13A. We target about 100 star-forming galaxies of selected by our previous narrow-band imaging surveys, and we have newly identified over 72 galaxies as cluster members. In this poster, we will show velocity structures of the 2 proto-clusters, and characteristics of PKS1138 which we have found by line flux and ratio. In PKS1138, the galaxies that locate at intermediate density regions show significantly higher star-formation rates compared to the main sequence. It suggests that they are key populations under the influence of the environmental effects.

1 Introduction

近傍銀河団において、それに付随する赤い大質量銀河は等級によってある一定の色に分布し、Red sequence と呼ばれるはっきりとした色 - 等級関係を持っている (Kodama and Bower 2001)。また、これら赤い銀河はバルジが支配的な形態をして、かつ銀河の数密度が高い領域で顕著に存在している事が知られている (形態 - 密度関係、Dressler et al. 1997)。このような銀河団・原始銀河団で見られる色 - 形態 - 密度の特異な関係を、総じて銀河進化の環境依存性と呼び、銀河天文学における重要課題の一つである。Kodama et al. 2007 ではこの色 - 等級関係が赤方偏移 2 を超える原始銀河団あたりから崩れていくことを示した。これは $z \geq 2$ 以前の原始銀河団が近傍で見られる諸処の特徴を形成し始めている状態にあると同時に、銀河団銀河そのものが形成途上にある事を示唆している。このような背景を受けて我々は「MAHALO プロジェクト」(Kodama et al. in prep.) という激動期 ($1.5 \leq z \leq 2.5$) にある原始銀河団探査を行っている。すばるに搭載されている近赤外装置 MOIRCS を用いて特定の赤方偏移にある任意の輝線

にあった狭帯域フィルターを作成し、その時代にある星形成銀河を網羅的に発掘し、密度超過を調べて原始銀河団を見つけるというサイエンスプロジェクトである。この独創的な観測手法によって全 10 天体に及ぶ大規模な遠方銀河団・原始銀河団を発見し、それに付随する星形成銀河を同定する事に成功した。中でも $z = 2.16$ にある原始銀河団 PKS1138-262 と $z = 2.53$ の USS1558-003 は、これまで見られなかった非常に特徴的な性質を持っている。PKS1138 では近傍で見られる特徴的關係を持った赤い銀河と未だ形成途上にある青い銀河の両者が混在している。これはこの原始銀河団が正に形成途上にあることを暗示している (Koyama et al. 2013)。そして構造の少し外側である中間密度領域で同じ星形成銀河でも赤い特徴を持った天体が多数見つかった。これは中間密度領域で何らかの環境効果が働きダスティな星形成を行っている事が示唆される。その一方で USS1558-003 ($z = 2.53$) ではこれまでの原始銀河団とは違った、若い星形成銀河が非常に濃密に群れているという特徴を持っている。高密度領域は赤い銀河が支配的であったこれまでの結果とは一線を画す結果である (Hayashi et al. 2012)。このことから

この原始銀河団は銀河団銀河形成のまっただ中であり、銀河団形成の初期状態を知るために非常に良い実験台となると思われる。

2 Methods/Instruments and Observations

我々はこのような背景を受けて、今年の 4 月末に近赤外多天体分光装置 MOIRCS を用いて先程述べた 2 つの原始銀河団 PKS1138 ($z=2.16$)、USS1558 ($z=2.53$) の分光観測を行った。銀河団の形成・進化の最盛期にあたる $z \geq 2$ の原始銀河団における星形成銀河を大規模に分光観測する事は初めての試みであり、波長帯は近傍銀河でよく校正された銀河の星形成率、金属量等を知る上での有力な指標である $H\alpha$ 、 $[\text{NII}]$ 、 $[\text{OIII}]$ 、 $H\beta$ といった重要な輝線を全てカバーしている。本観測では表 1 に示す様に各 3 つ、計 6 つのマスクを用いて原始銀河団メンバー候補である星形成銀河をトータルで 98 天体観測した。これらのメンバー候補は MAHALO プロジェクトの狭帯域観測で見つかった $H\alpha$ 輝線天体である。各マスクそれぞれおよそ 20 のスリットを切り、2 時間以上積分した (5 晩観測、内 1 晩は天候不良)。またマスクの内一つは今期から使用可能の高分散グリズム (VPH-K) を使用した。

PKS1138-262 ($z = 2.16$)				
grism ¹	R ($0''8$ slit)	wavelength coverage	exp. time	target
HK500	513	1.3–2.5 μm	2.0 h	23
HK500	513	1.3–2.5 μm	2.7 h	19
VPH-K	1675	1.95–2.25 μm	3.8 h	18
USS1558-003 ($z = 2.53$)				
HK500	513	1.3–2.5 μm	3.0 h	25
HK500	513	1.3–2.5 μm	4.6 h	19
HK500	513	1.3–2.5 μm	2.9 h	15

表 1: MOIRCS 分光の基本情報

3 Results

結果、本分光観測によって銀河団メンバー候補の 98 天体のうち 72 天体について 1 本以上の輝線を受

ける事に成功した。この数は赤方偏移 1 を超えるこれまでの分光観測の結果と比較しても非常に高い達成度を誇り、かつこれまでの 10 天体を超える大規模な分光観測の中でも最遠方である (表 2)。そして何より本観測では、原始銀河団の銀河形成・進化を知るために必要不可欠である $H\alpha$ 、 $[\text{NII}]$ 、 $[\text{OIII}]$ 、 $H\beta$ といった有望な輝線を狙ったことを強調しておく。図 1 は今回観測した各原始銀河団 (左: PKS1138、右: USS1558) で、各赤方偏移周辺で輝線の受かったメンバー銀河団をプロットしてある。また、それぞれ過去に MOIRCS で撮られた 4000\AA ブレイクを挟む J, K バンドを用いた色で青から赤まで色別し (青 ≤ 0.8 緑 ≤ 1.38 赤 ≥ 1.38)、specific star-formation rate (sSFR) でマーカーサイズの大きさを変えている。左図では MIPS ソース、右図では $[\text{OIII}]$ line の高い銀河 (後述) を四角で囲ってある。ダスト補正は行っておらず、MIPS ソースが総じて sSFR が小さく見える事に注意して欲しい。

USS1558 において右下の星性銀河が非常に多く群れている領域では明らかに $[\text{OIII}]$ の大きい天体が多数見つかった。またこれらの天体は $[\text{NII}]$ が受かっていないか非常に小さく、HII 領域が光電離されている事が示唆される。 $[\text{NII}]$ が小さい事から AGN である可能性はなく、これらは低金属であるために冷却が効かず、OB 型星の影響で高温になったと考えられる。

次に各原始銀河団において赤方偏移および固有速度に対して電波銀河からの空間方向の距離をプロットした (図 2)。マーカーの色は先ほどと同様に定義している。

4 Discussion

本学会では先に研究結果として投稿予定の PKS1138 を集中的に紹介する。この原始銀河団は広範囲に渡って大規模な構造を持っており、今回図 2 (右) のように空間方向と視線速度方向で立体的に 3 つの密度環境 (main, outskirts, field) に分類した。これによって形成途上にある原始銀河団において 3 つの異なる密度環境、つまりは銀河団形成の進化を段階的に比較する事が出来る。そして本分光観測によって天球上の分布に加えて視線方向の情報が加わった事により奥行きが不定性が制限され、より正確な

¹http://subarutelescope.org/Observing/Instruments/MOIRCS/spec_sensitivity.html

表 2: 先行研究との比較

Cluster Name (z)	Author	Confirmed	Instrument
USS1558-003 ($z = 2.53$)	Shimakawa in prep.	35	MOIRCS
PKS1138-262 ($z = 2.16$)	Shimakawa in prep.	37	MOIRCS
Cl J1449+0856 ($z = 2.00$)	Gobat et al. arXiv	27	WFC3, FORS2, ...
CIG J0218.3-0510 ($z = 1.62$)	Tadaki et al. 2012	24, 18	FMOS, MOIRCS
XMM J2215.9-1738 ($z = 1.46$)	Hayashi et al. 2011	16	MOIRCS
7C 1756+6520 ($z = 1.42$)	Galametz et al. 2010	21	DEIMOS
Lynx supercluster ($z = 1.26$)	Mei et al. 2012	41, 25	LRIS, DEIMOS
RDCS J1252.9-2927 ($z = 1.24$)	Demarco et al. 2007	38	FORS1, FORS2
RDCS J0910+54 at ($z = 1.10$)	Tanaka et al. 2008	20	LRIS, FOCAS

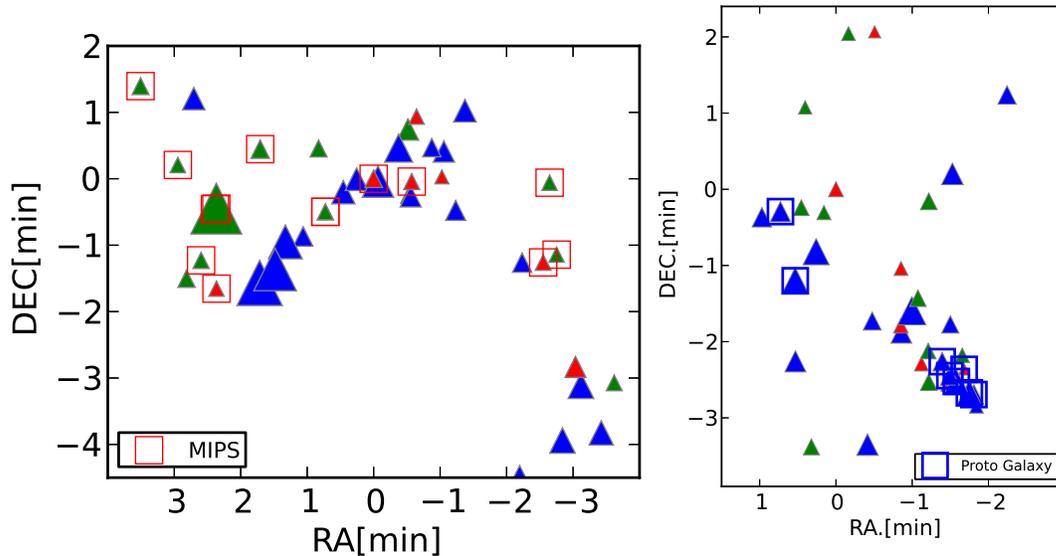


図 1: 空間分布 - 左が PKS1138、右が USS1558。赤: $J-K(AB) \geq 1.38$ 、緑: $0.8 \leq J-K \leq 1.38$ 、青: $J-K \leq 0.8$ 、マーカーの大きさは specific SFR でスケール化してあるが、ダスト補正は行っていない。赤四角は Spitzer の MIPS ソースを指し、青四角は [OIII] line が顕著に高い天体を原始銀河と定義し印してある。

環境比較を行っている。図 3 は Koyama et al. 2013 を元にこれらの星質量 - 星形成率を密度環境ごとにプロットしたものである。

通常の星形成銀河において星質量 - 星形成率とで相関関係がある事が知られている (Daddi et al. 2007, Main sequence)。PKS1138 原始銀河団においても同様にタイトな相関関係が見られる事が分かる。しかし、outskirt と定義した銀河団中心から少し離れた中間密度領域で Field と定義した外側の領域に対

して約 1.5 倍も分散が大きい事が分かった。図 3 の半透明で塗りつぶされた部分はそれぞれの環境にある星形成銀河の分散 $\pm 1\sigma$ を示している。よく見ると全体に対して有位に星形成率の高い銀河が幾つか存在し、しかもこれらのほとんどが中間密度領域に存在する銀河だという事が分かる。星形成率は質量によってダスト補正してあるため (Garn and Best 2010)、今後 UV 帯を用いてより正確な星形成率の同定が必要だが、この結果は中間密度領域で銀河の星形成活

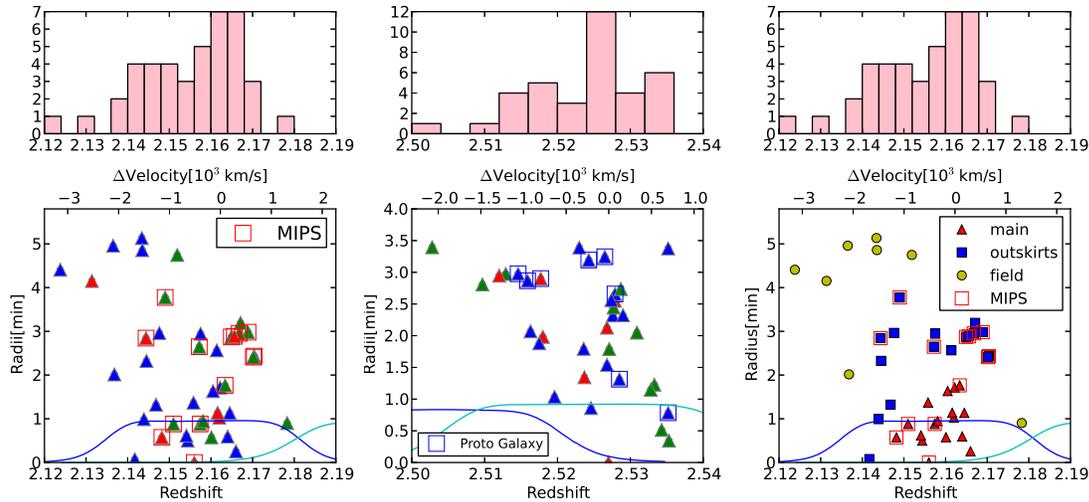


図 2: 赤方偏移 (固有速度) vs 半径 – 左が PKS1138、真ん中が USS1558。色は図 1 と同様。USS1558 の方が狭い赤方偏移レンジに固まった構造をしている事が分かる。また右の図で PKS1138 を分布が最も集中している $z = 2.156$ から固有速度と半径で中心 (main)、外側 (outskirts)、フィールド (field) と 3 つに領域を区分けして色分けした。

動に何らかの影響が起きており、環境効果によって何らかの誘発作用が働いている事が示唆される。

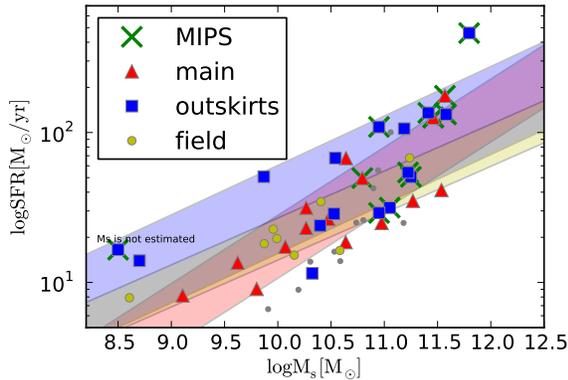


図 3: Stellar mass vs SFR in PKS1138-262

5 Conclusion

本研究では狭帯域フィルターを用いた輝線銀河サーベイによって見つかった赤方偏移 2 を超える原始銀河団の分光から原始銀河団銀河の形成・進化過程、金属量、AGN の割合が高密度環境ではどうなっているのか、および銀河団のダイナミクスを調べる事である。今回のポスター発表ではその研究経過を報告し、

特に 2 つの原始銀河団のダイナミクスについて触れる。本研究では 2 つの原始銀河団合わせて 70 を超える輝線データを所得する事に成功し、これはかつて無い非常に大規模なデータであり今後 ALMA を用いた高空間分解能の電波観測や KECK/MOSFIRE による追観測に向けて大きな追い風となる。先行結果としては高密度環境におけ星形成銀河の特性として Discussion で示した様に中間密度領域に置いて銀河の星形成活動が誘発される事がわかり、これは我々がこれまで主張してきた理論にコンシステントな結果である。今後は輝線比を用いて金属量や AGN の割合を調べる事で今まで未開拓であった遠方銀河団銀河の性質を探る予定である。

6 References

1. Kodama T., Bower R. G., 2001, MNRAS, 321, 18
2. Dressler A., et al., 1997, ApJ, 490, 577
3. Koyama Y., et al., 2013, MNRAS, 428, 1551
4. Hayashi M., et al., 2012, ApJ, 757, 15
5. Daddi E., et al., 2007, ApJ, 670, 156
6. Garn T. and Best P. N., 2010, MNRAS, 409, 421