

# Measuring galaxy environment at $z \sim 1.6$ with Subaru's FMOS

柏野 大地 (名古屋大学大学院 理学研究科)

## Abstract

本発表では、すばる望遠鏡に搭載されたファイバー多天体分光器 (FMOS) による近赤外分光観測 (FMOS-COSMOS サーベイ) の最新の成果を発表する。我々はこれまでに 2000 個を超える  $z \sim 1.6$  の星形成銀河を観測し、約 1000 個について  $H\alpha$ ,  $H\beta$ ,  $[NII]$ , 及び  $[OIII]$  輝線を検出し、赤方偏移や輝線フラックスを測定した。これに基づき、高赤方偏移星形成銀河のダスト減光の性質、星形成主系列と呼ばれる星質量-星形成関係、星質量-金属量関係などを定量的に求めた。また、FMOS で測定した赤方偏移を用いて、静止波長系では紫外線に相当する可視分光スペクトルをスタックすることで、紫外線領域の吸収線を高い  $S/N$  で検出した。これらの吸収線の多くは、本来の波長よりも短波長側にシフトしており、これは強いアウトフローの存在を示している。星質量、星形成率などで銀河をビン分けしてスタッキング解析を行い、アウトフロー速度がこれらの性質に依存することを示す結果を得た。また、FMOS サーベイで得られた高密度な 3 次元銀河地図を用いて銀河分布の統計的な性質を調べた。二点相関関数を用いたクラスタリング解析を行った結果、サブ Mpc スケールでのクラスタリングシグナルを高い  $S/N$  で検出した。

## 1 Introduction

宇宙論的時間スケールでの銀河の形成と進化に対する我々の理解は日に日に深まっている。こうした発展の背景には、観測技術の進歩や宇宙・地上両方からの多波長観測による膨大なデータが不可欠である。日々蓄積させる観測データによって、我々は  $z \sim 2$  (あるいはそれ以上) という非常に遠方の銀河分布を調べたり、膨大な数の銀河について星形成率 (SFR)、銀河年齢、あるいは重元素量といった銀河の内的な性質を高い精度で測定することができる。これにより、多くの銀河がはじめ星形成を活発に行い、その成長とともに passive なモードに進化し、宇宙全体での星形成活動は  $z \sim 1-3$  をピークに、現在まで徐々に下がってきていることがわかってきた。多くの星形成銀河は  $M_*$ -SFR 平面上に帯状に分布し、非常にタイトなシーケンスを示す。これは星形成主系列と呼ばれ銀河進化研究における重要な研究対象のひとつとなっている (e.g., Noeske et al. 2007, Elbaz et al. 2007, Daddi et al. 2007, Wuyts et al. 2011)。一方で、恐らく銀河衝突などによって引き起こされるスターバースト中の銀河などは主系列よりも高い SFR 側に離れたところに緩やかなグループを作り、passive モードに移行中と思われる銀河が主系列よりも低 SFR 側に

存在する (図 1)。多くの研究者により星形成主系列や星形成銀河の割合、あるいは質量関数が赤方偏移とともにどのように進化するかといったことが調べられている。さらに高赤方偏移でも多くの銀河サンプルが得られるようになったことで、環境効果、すなわち銀河の性質や進化が周囲の環境にどのように影響を受けるのかといったことについても多くの研究成果が発表されている (e.g., Peng et al. 2010, 2012, Koyama et al. 2014)。

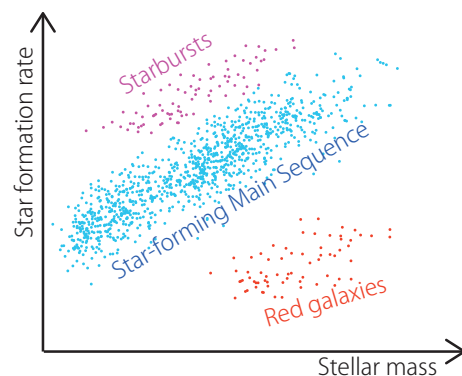


図 1: SFR- $M_*$  関係のイメージ。

銀河の進化の歴史は、銀河の星形成の歴史でもある。星形成活動のメカニズム・時間進化を理解する

ことは銀河進化を理解する上で非常に重要なことである。恒星内部の核融合反応によって作られる重元素の存在量（金属量）は星形成の歴史を反映する代表的な物理量である。同時に、星形成率はガス金属量に依存する。一方で、星形成活動のフィードバック現象と考えられるガスの流出入は銀河の化学進化に重要な影響を与える。近年、高赤方偏移でも精密測定が可能になりつつあり、ガスの流出入と化学進化の影響やダイナミクスに関する研究も活発に行われている (e.g., Harikane et al. 2014).

このように、昨今、銀河進化研究は非常に盛り上がり、我々もこれまですばる望遠鏡 FMOS 及び多波長の撮像データに基づき、星形成史のピーク期における星形成主系列やダスト減光の性質、金属量等の諸性質の理解において大きな貢献を果たしてきた (Kashino et al. 2013, Zahid et al. 2013, 2014, Rodighiero et al. 2014, Silverman et al. in prep). 本発表では、FMOS のデータと zCOSMOS プロジェクト (Lilly et al. 2007) のデータを合わせて行った、アウトフローの速度と銀河の性質の関係、及び銀河分布の統計的性質についての研究の初期成果を報告する。

## 2 Observations

COSMOS 領域の中心部分、約 1 平方度の領域をすばる望遠鏡ファイバー多天体分光器 (FMOS) の高分散モードで観測した。観測波長帯は  $H$ -long (1.6–1.8  $\mu\text{m}$ ) および  $J$ -long (1.11–1.35  $\mu\text{m}$ ) で、波長分解能はそれぞれ  $R \sim 2600$ ,  $R \sim 1900$  である。これは近接した  $H\alpha$  と  $[\text{NII}]\lambda 6583$  輝線を十分に分離できる分解能である。

2012 年 3 月から 2014 年 2 月まで、インテンシブ・プログラム (PI: J. Silverman) 及び UH 時間 (PI: D. Sanders) を用いて、 $H$ -long で 14 夜、 $H$ -short で 1 夜、 $J$ -long で 7 夜分の観測を行った。

## 3 Target Selection

ターゲットサンプルは COSMOS 測光カタログ (McCracken et al. 2010; Ilbert et al. 2013) から、

$M_* > 10^{9.8} M_\odot$ ,  $1.4 \lesssim z_{\text{phot}} \lesssim 1.7$  の星形成銀河を BzK カラーを用いた方法と SED フィッティングによりセレクトした。

## 4 Spectral Analysis

### 4.1 FMOS spectral analysis

全てのデータは FMOS 標準パイプラインである FIBRE-pac (Iwamuro et al. 2012) を用いてリダクションを行った。リダクション後に得られる 2 次元スペクトルに基づき、輝線 ( $H\alpha$ ,  $H\beta$ ,  $[\text{NII}]$ , 及び  $[\text{OIII}]$ ) の有無を確認した。次に、その輝線の中心波長、強度を測定するために輝線フィッティングを行った。この際、 $H\alpha$  と  $[\text{NII}]$  及び  $H\beta$  と  $[\text{OIII}]$  の輝線幅は固定した。また OH 夜光の影響を受けたピクセルは除き、その他の部分についてはノイズ推定量で重みを付けを行った。スペクトル解析について、詳しくは Kashino et al. (2013) を参照されたい。

### 4.2 zCOSMOS stacking analysis

$z \sim 1.6$  の銀河では、紫外線領域が可視光帯に赤方偏移する。紫外線領域には、重元素による強い吸収線が多数存在し、銀河の化学組成やダイナミクスを知る上で非常に重要な手がかりとなる。COSMOS 領域では zCOSMOS-deep (Lilly et al. 2007) と呼ばれる可視分光サーベイが行われており、多数のスペクトルデータが存在する。しかし、個々の銀河は非常に暗いため吸収線が有意に検出されているものはほとんどない。そこで、FMOS 観測によって輝線が検出され赤方偏移を測定できたもののうち、zCOSMOS の可視光スペクトルデータがある約 170 個の銀河について、スタッキング解析を行った (図 2)。5 個の鉄吸収線 ( $\text{FeII}$ -2344, 2374, 2382, 2586, 2600; 図 3) についてガウス関数でフィットし、中心波長を測定した。

### 4.3 Clustering analysis

FMOS 及び zCOSMOS で赤方偏移が測定されている  $1.43 < z < 1.74$  の銀河分布の統計的な性質を調べるために、2 点相関関数を用いたクラスタリング解

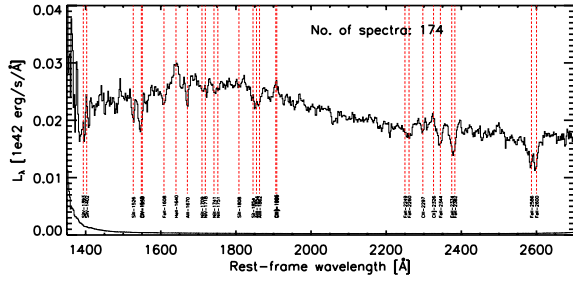


図 2: スタックした紫外線スペクトル. 多くの吸収線が高い S/N で検出されていることがわかる. 赤の破線は吸収線の静止波長を示している.

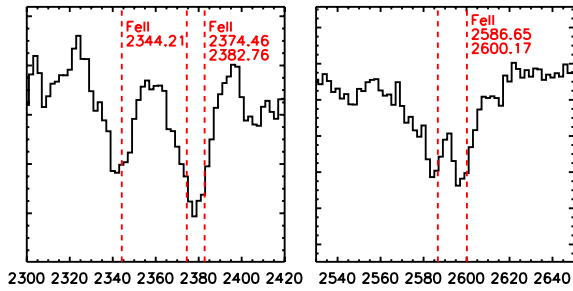


図 3: FeII 吸収線.

析を行った. 実際の観測状況や OH 夜光マスクによる赤方偏移分布に対する影響を考慮し, 銀河数 20 倍のランダムマップ (図 4) を作成し, Landy & Szalay (1993) の方法,

$$\xi(r) = \frac{DD - 2DR + RR}{RR} \quad (1)$$

を用いて, 2 点相関関数を計算した.

## 5 Results

### 5.1 Outflow properties

星質量, 星形成率, 比星形成率 (sSFR) 及び減光  $E(B-V)$  で 2 つのビンに分けて, スタッキング解析を行い, FeII 吸収線の速度シフトを測定した. 典型的なアウトフロー速度は  $v \sim 200\text{--}300 \text{ km s}^{-1}$  であり, 図 5 が示すように, 特に星質量及び星形成率とアウトフロー速度の間に有意な相関があることがわかった. 一方で, sSFR とアウトフロー速度の間には有意な相関はない.

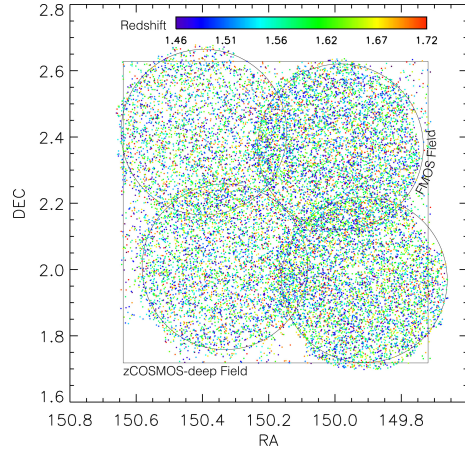


図 4: ランダムマップ.

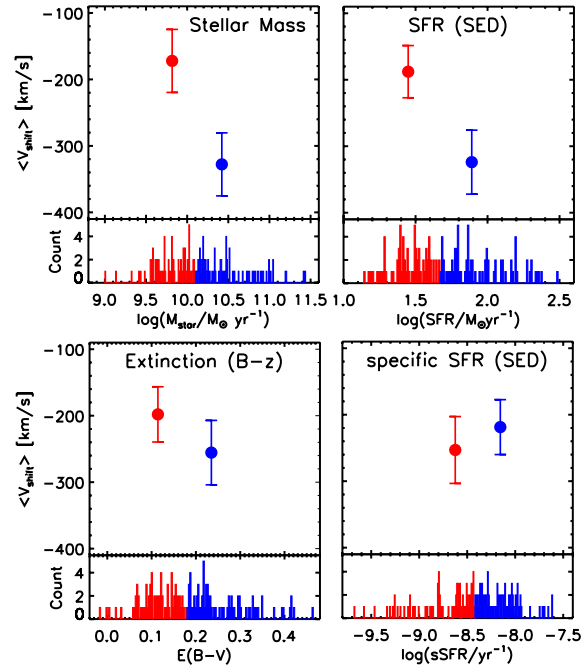


図 5: アウトフロー速度と銀河の内的物理量との関係. 色はビン分けを示す.

### 5.2 Galaxy distribution

図 6 は FMOS で赤方偏移を測定した銀河 724 個と zCOSMOS-deep サンプル 198 個の計 922 個の  $1.43 < z < 1.74$  の星形成銀河の 3 次元分布を示している. この内, 特に信頼度が高い 667 個 (FMOS 462 個 + zCOSMOS 243 個) を用いて, 式 (1) を用いて計算した 2 点相関関数を図 7 に示した.  $0.5 \lesssim r/\text{Mpc} \lesssim 30$

の範囲で、クスタリングシグナルを良い  $S/N$  で検出した。誤差の小さい左から 3-9 番目のデータ点に対して、ベキ関数  $\xi(r) = (r/r_0)^{-\gamma}$  でフィットすると、相関長  $r_0 = 3.6$  Mpc, ベキ  $\gamma = 1.54$  が得られた。また、数値計算により求めたマター相関関数と比較すると、銀河バイアス  $b_g \sim 1.8$  となり、サンプル銀河の典型的なハロー質量は  $M_{\text{halo}} \sim 10^{12} M_{\odot}$  となることがわかった。

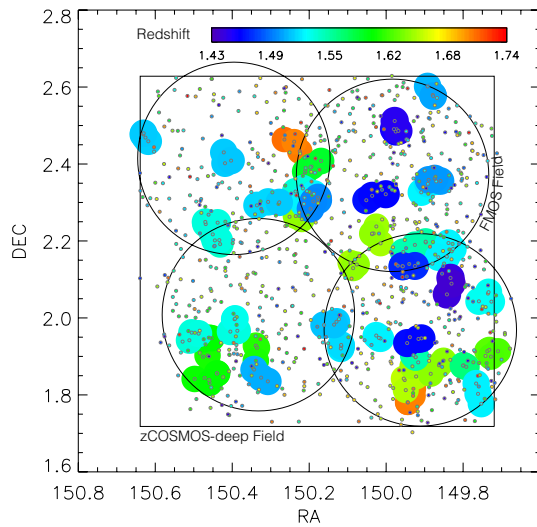


図 6: 銀河の 3 次元分布. マークした場所は  $N_{\text{gal}}/N_{\text{random}} > 5$  の密度超過領域を示す.

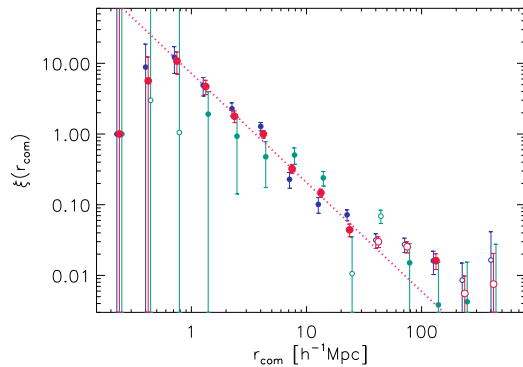


図 7: 銀河の 2 点相関関数. 横軸は共動距離, 青が FMOS 銀河 462 個, 緑が zCOSMOS 銀河 243 個, 赤が両方のサンプルを用いた場合の相関関数を示している. 点線は  $\xi = (r/3.59)^{-1.54}$  で表される関係を示している. 白丸は負数であることを示している.

## Acknowledgement

本研究は日本学術振興会より助成を受けています.

## Reference

- Daddi et al. 2007, ApJ, 670, 156
- Elbaz et al. 2007, A&A, 468, 33
- Harikane et al. 2014, ArXiv e-print
- Ilbert et al. 2013, A&A, 556, A55
- Iwamuro et al. 2012, PASJ, 64, 59
- Kashino et al. 2013, ApJ, 777, L8
- Koyama et al. 2014, ApJ, 789, 18
- Landy & Szalay 1993, ApJ, 412, 64
- Lilly et al. 2007, ApJS, 172, 70
- McCracken et al. 2010, ApJ, 708, 202
- Noeske et al. 2007, ApJ, 660, L43
- Peng et al. 2010, ApJ, 721, 193
- Rodighiero et al. 2014, MNRAS, 443, 19
- Silverman et al. 2014, in preparation
- Wuyts et al. 2011, ApJ, 742, 96
- Zahid et al. 2013, ArXiv e-print
- Zahid et al. 2014, ArXiv e-print