Exploring the clustering of star-forming galaxies at $z \sim 1.6$ in COSMOS

柏野 大地 (名古屋大学大学院 理学研究科)

Abstract

本発表では近赤外分光観測で得られた $z \sim 1.6$ の星形成銀河サンプルに対するクラスタリング解析の手法及び結果について紹介する．我々はすばる望遠鏡に搭載された多天体ファイバー分光器 FMOS を用いて, COSMOS 領域の中心部約 1 平方度を観測し, 約 1000 個の $1.4 \lesssim z \lesssim 1.7$ の星形成銀河について, Hα を始めとする輝線を検出し赤方偏移を決定した．本研究では SED フィッティングにより選択されたサンプルのうち, 輝線検出の信頼度が高い 516 個を用いて射影相関関数 $w_{\rm p}(r_{\rm p})$ を測定した．射影距離 $r_{\rm p} \sim 0.1$–$20\ h^{-1}$Mpc に於いて優位なクラスタリングを検出し, 相関長 $r_0 = 5.0 \pm 0.5\ h^{-1}$Mpc を得た．また, Halo Occupation Distribution (HOD) モデルによる平均ハロー質量, 有効銀河バイアスなどの制限を行った．クラスタリング解析に於いては, 近赤外線域のファイバー分光に特有の種々の観測バイアスの補正を行い, これらの妥当性はモックサンプルにより検証した．なお, 本稿に掲載のすべての結果は学術論文としては未発表のものであり, 予備段階のものである．

1 Introduction

銀河はダークマターが重力的に崩壊してできるハローと呼ばれる構造の中で形成されると考えられている．どのようなハローでどのような銀河が形成されるのかを明らかにすることは銀河形成・進化の理解のみならず, 銀河の大規模観測から宇宙論を制限する場面に於いても重要な問題である．銀河の 2 点相関関数は宇宙論モデルから予言されるダークマターの密度分布（あるいはハローの分布）と銀河の分布を結びつける強力なプローブである．近傍宇宙では Sloan Digital Sky Survey を始めとした大規模分光サーベイによる大サンプルを用いて精密な研究が行われており, 銀河の集団化と銀河の様々な性質（光度, 星質量, 色など）との関係が明らかにされてきた (e.g., Zehavi et al. 2005, 2011)．このように銀河の性質と銀河クラスタリングの関係を高赤方偏移まで精密に探ることは銀河形成史を理解する上で重要である．しかし、遠方銀河の分光観測はフラックスが弱くなることや重要な輝線が近赤外–赤外線領域に赤方偏移してしまうなどの困難があり, 十分な理解が進んでいない．特に赤方偏移 $z \sim 1$–3 は宇宙の星形成史におけるピーク期であり, 宇宙全体で銀河の星形成率が現在の 20–100 倍程度もあった．すなわち, 現在の宇宙に存在する銀河が, その星質量の大部分をこの時期に獲得したということであり, 銀河形成・進化において非常に重要な時代である．本研究のモチベーションは, この銀河形成の激動期にどのような環境で効率的に星形成が起こっていたのかを探ることである．そのため, 我々は FMOS-COSMOS サーベイ (Kashino et al. 2013; Silverman et al. 2014) で得られた星形成銀河サンプルを用いて, 2 点相関関数を用いたクラスタリング解析を行った．

2 Data

我々はすばる望遠鏡に搭載された近赤外ファイバー多天体分光装置 FMOS を用いて, COSMOS 領域の赤方偏移 $z \sim 1.6$ の星形成銀河を主ターゲットとした FMOS-COSMOS サーベイを行っている．観測波長帯は高分散モードの H-long (1.6-1.8 μm; $R \sim 3000$) と J-long (1.11-1.35 μm; $R \sim 2200$) である．本研究で用いたサンプルは, 2012 年 3 月から 2014 年 2 月にかけて行った観測で得られたデータセットの一部からなり, COSMOS 測光カタログ (McCracken et al. 2010; Ilbert et al. 2013) に登録された $K_{\rm s} < 23.5$ の銀河か

ら, SED フィッティングにより推定した測光赤方偏移 ($1.46 \leq z_{\rm phot} \leq 1.72$), 星質量 ($M_* \geq 10^{9.8}\ M_\odot$; Salpeter IMF), H$\alpha$ フラックス予想値 ($f_{\rm H\alpha}^{\rm pre} \geq 1 \times 10^{-16}$ erg s^{-1} cm^{-2}) に基づいて構築されたものである．このような基準で抽出された FMOS 観測範囲内の銀河は 2319 個 (親サンプル) あり, そのうち 1182 個を実際に観測した (観測サンプル)．このうち, $S/N > 3$ 以上の輝線 (ほとんどは Hα 輝線) により赤方偏移が測定された 516 個を分光赤方偏移サンプルとして, これらに対してクラスタリング解析を行った.

図 2 に FMOS の観測範囲とサンプル銀河の天球面上での座標, 図 1 にサンプル銀河の星形成率を星質量の関数として示した. Hα フラックスによるセレクションのため, $M_* \lesssim 10^{11}\ M_\odot$ では高い星形成率側へのバイアスが見られるが, 比較的広い星質量・星形成率範囲で星形成主系列をトレースしていることがわかる．また, 親サンプルに対する, 観測サンプル・分光赤方偏移サンプルのバイアスはほとんどないことがわかる.

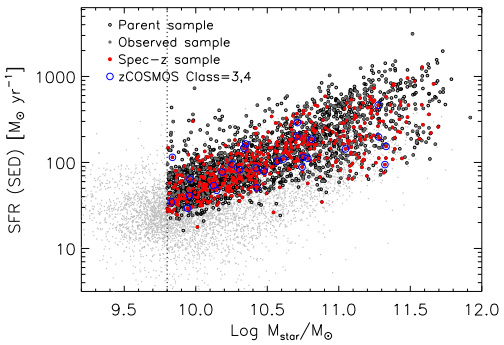

図 1: 星質量–星形成率関係．グレーは $K_{\rm s} < 23.5$, $1.46 \leq z_{\rm phot} \leq 1.72$ の全ての銀河．他は凡例の通り。

3 Clustering measurement

516 個の分光赤方偏移サンプルに対して, 2 点相関関数を計算した. 2 点相関関数とは, 銀河のペアを見つける確率がランダム分布に対してどの程度超過しているかを, その銀河同士の距離の関数として測定したものである．実際の観測領域と同様の幾何学的特

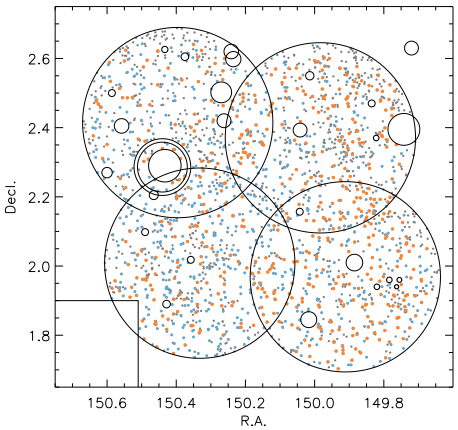

図 2: サンプル銀河の天球面上での座標．グレーは親サンプル, 青は観測サンプル, オレンジは分光赤方偏移サンプルを表す. 4 個の大きな円は FMOS の観測視野, その他の線はマスク領域を表す.

徴をもつランダムサンプルと比較して, 以下の関係式からよく推定できることが知られている (Landy & Szalay 1993).

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

本研究では銀河の固有運動の効果を打ち消すため, 視線方向に $\pm 40\ h^{-1}$Mpc の範囲で積分した射影相関関数 $w_{\rm p}(r_{\rm p})$ を求めた．クラスタリング解析を行う上で FMOS 観測特有の問題点として, OH 夜光マスクによる動径方向のセレクション効果, ファイバーの割り当て機構による天球面上分布へのバイアス効果があげられる.

OH 夜光は地球の大気から放射される無数の輝線であり近赤外線領域で卓越している．FMOS ではこれを抑制するマスク機構が備えられているが, マスクの位置では銀河からの光も遮断されノイズレベルも大きいため, マスク位置周辺では輝線の検出効率が落ちてしまう．我々はランダムノイズを加えた輝線モデルを再検出できるかを評価するモンテカルロシミュレーションにより, 検出効率を赤方偏移の関数として求めた. 図 3 に示すように, OH 夜光マスクの周辺では検出効率が著しく下がっている．またイメージセンサーの両端ではノイズレベルが高いことが検出効率の減少として現れている．この検出効率関数

をランダムサンプルの赤方偏移分布に適用した.

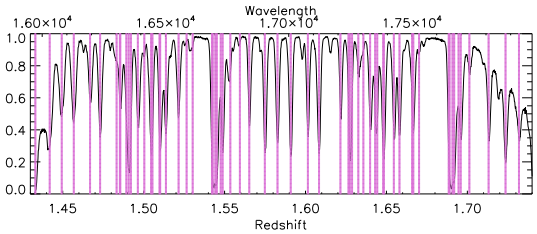

図 3: モンテカルロシミュレーションにより評価した, 各赤方偏移での輝線の検出効率. マゼンタのストライプは OH 夜光マスクを示す.

ファイバー割り当て機構によるバイアスとは, ファイバーの数に限りがあり, またファイバー自身は均等に配置されているため, 天球面上での距離が近い銀河ペアのサンプリングレートが、十分に離れたペアに対して抑制される効果である。これにより $r_{\rm p} \lesssim 2\ h^{-1}$Mpc の小スケールにおいて観測される $w_{\rm p}(r_{\rm p})$ の強度が過小評価される. このバイアスは, 天球面上での分離角度ごとの親サンプルに含まれるペアの数と実際にファイバーが割り当てられた観測サンプルに含まれるペアの数の比を用いて補正できる. 補正関数は角度相関関数を用いて以下のように表される.

$$f(\theta) = \frac{1+\omega_{\rm par}(\theta)}{1+\omega_{\rm tar}(\theta)} \tag{2}$$

ここで $\omega_{\rm par}(\theta)$ と $\omega_{\rm tar}(\theta)$ は, それぞれ親サンプルと観測サンプルの角度相関関数である. この補正関数を用いて, 分離角度に応じて 1 式の DD 項を重み付けした. 統計誤差の少ない補正関数を求めるため, new numerical Galaxy Catalog の Rockstar ハローカタログ (ν^2GC-M; Ishiyama et al. 2015) から構築した 64 個のモックサンプルを用いた. また, モックサンプルを使って, 補正方法の妥当性を検証し, 有効であることを確認した.

4 Model constraints

測定された $w_{\rm p}(r_{\rm p})$ に対して, 冪乗則, バイアスドダークマターモデル, Halo Occupation Distribution (HOD) モデルによるフィッティングを行った. Markov Chain Monte Carlo (MCMC) 法により各モデルパラメータに制限を与えた. このとき, 輝線の誤同定の割合もプライア付きパラメータとして含めた (zCOSMOS-deep サーベイとの比較から 6%–20%程度と予想される).

5 Results

図 4 に FMOS サンプルに対する相関関数 $w_{\rm p}(r_{\rm p})$ を示す. 銀河の相関関数は冪乗則 $\xi(r) = (r/r_0)^{-\gamma}$ でよく表されることが知られている. ここで, r_0 は相関長と呼ばれ, クラスタリング強度を示すパラメータである. 観測値に対して $r_0 = 5 \pm 0.5\ h^{-1}$Mpc という制限が得られた. また, 銀河はダークマターの密度ゆらぎのピーク領域で形成されるため, 銀河とダークマターの相関関数は銀河バイアス b を用いて, $\xi_{\rm gg}(r) = b^2 \xi_{\rm DM}(r)$ と関係付けられる. 観測値に対して $b = 2.3 \pm 0.3$ という制限が得られた.

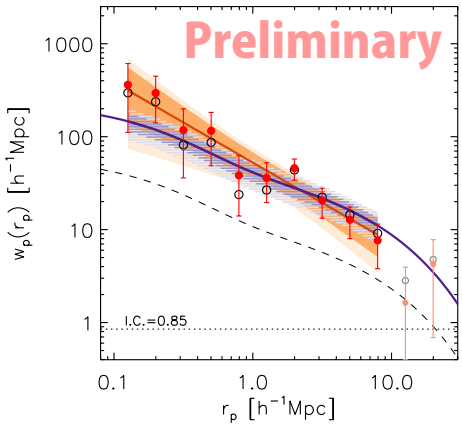

図 4: FMOS 分光赤方偏移サンプルに対する相関関数（●はファイバー割り当て機構によるバイスを補正したもの, ○は補正なし）. 橙と紫の領域は, それぞれ冪乗則とバイアスドダークマターモデルによる制限を示す.

銀河の相関関数（あるいはパワースペクトル）はハローモデルによってよく説明できることが知られている. ハローモデルでは同一ハロー内の銀河同士による相関 (1 ハロー項) と異なるハローに存在する銀河同士の相関 (2 ハロー項) からの寄与に分けられる. 特に, 1 個のハローに含まれる銀河を 1 個のセントラル銀河とそれ以外のサテライト銀河にわけ, ダー

クハローの質量と銀河の個数を対応付けした Halo Occupation Distribution (HOD) モデルが観測をよく説明し, 物理的な描像を与えてくれる. 本研究では質量 M のハローが含むセントラル銀河とサテライト銀河の平均個数を以下のようにモデル化し, パラメータの制限を行った (e.g., Zheng et al. 2005).

$$\langle N_{\rm cen}|M\rangle = \frac{1}{2}\left[1+{\rm erf}\left(\frac{\log M - \log M_{\rm min}}{\sigma_{\log M}}\right)\right] \quad (3)$$

$$\langle N_{\rm sat}|M\rangle = \frac{1}{2}\left[1+{\rm erf}\left(\frac{\log(M/M_{\rm min})}{\sigma_{\log M}}\right)\right]\left(\frac{M}{M_1}\right)^{\alpha}. \quad (4)$$

本研究では $\alpha = 1$ とし, $M_{\rm min}$, $\sigma_{\log M}$ (Prior; 0.17±0.3), M_1 を制限した. 図 5 に HOD モデルで表される相関関数を制限を示した.

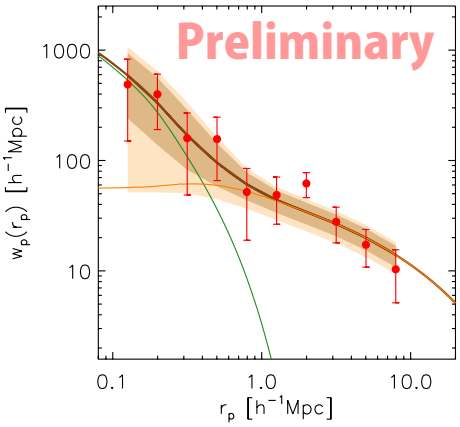

図 5: FMOS 分光赤方偏移サンプルに対する相関関数と HOD モデルから計算される $w_{\rm p}(r_{\rm p})$ の制限. 緑の実線が 1 ハロー項, 橙の実線が 2 ハロー項の寄与を示している.

(本稿ではパラメータの制限値及びそれらから導かれる物理量については掲載を控えさせていただきます.)

6 Summary

我々はすばる望遠鏡 FMOS で観測した 516 個の Hα 輝線同定銀河サンプル ($1.43 \leq z \leq 1.74$) に対して, 2 点相関関数を測定した. 測定においては, FMOS 観測 (あるいは近赤外分光観測) に特有の問題点の取り扱いを慎重に行い, N 体重力シミュレーションによるハローカタログから構築したモックサンプルを用いて妥当性の検証を行った. 種々のバイアスを補正した射影相関関数は射影距離 $r_{\rm p} \sim 0.1$–$20\ h^{-1}$Mpc に於いて優位な強度を示し, 相関長 $r_0 \sim 5\ h^{-1}$Mpc を得た. また, HOD モデルの制限を行い, 優位な 1 ハロー項を検出し, 各モデルパラメータの制限を行った.

Acknowledgement

基礎物理学研究所 (研究会番号：YITP-W-15-04) 及び国立天文台からのご支援に感謝いたします. 本研究は日本学術振興会 (JSPS) 科研費から助成を受けています (No. 26-3216).

Reference

Ilbert, O., McCracken, H. J., Le Fèvre, O., et al. 2013, A&A, 556, A55

Ishiyama, T., Enoki, M., Kobayashi, M. A. R., et al. 2015 PASJ, 00 (0), 1-16

Kashino, D., Silverman, J. D., Rodighiero, G., et al. 2013, ApJL, 777, L8

Landy, S. D. & Szalay, A. S. 1993, ApJ, 412, 64

McCracken, H. J., Capak, P., Salvato, M., et al. 2010, ApJ, 708, 202

Silverman, J. D, Kashino, D., Arimoto, N., et al., 2014, arXiv:1409.0447 (ApJS submitted)

Zehavi, I., Zheng, Z., Weinberg, D. H., et al. 2005, ApJ, 630, 1

Zehavi, I., Zheng, Z., Weinberg, D. H., et al. 2011, ApJ, 736, 59

Zheng, Z., Berlind, A. A., Weinberg, D. H., et al. 2005, ApJ, 633, 791