

UltraVISTA を用いた赤方偏移 $z \sim 2$ における銀河の星質量関数

市川 あき江 (愛媛大学大学院 理工学研究科)

Abstract

本研究では、広視野で深い近赤外線波長域のデータである UltraVISTA の Data Release 2 (DR2) データと、すばる望遠鏡 Suprime-Cam による非常に深い z' バンドデータを用いることで、COSMOS 天域における $z = 1.5 - 2.0$ の銀河の星質量関数を低質量側まで求めた。色選択法 ($z' - J$ vs. $J - K_s$) を用いて、 $z = 1.5 - 2.0$ の star-forming 銀河 (11146 天体)、passive 銀河 (840 天体)、星形成が終わったばかりで A 型星からの光が卓越している post-starburst 銀河 (406 天体) をそれぞれ選び出し、各々の星質量関数を求めた。得られた $z \sim 2$ の passive 銀河の星質量関数は、現在のそれとは異なり低質量側は星質量が軽くなるにつれて銀河の個数密度が減少するが、star-forming 銀河の星質量関数は、現在と同様に低質量ほど個数密度は増加することが分かった。一方、本研究により初めて明らかとなった post-starburst 銀河の星質量関数は、低質量側では銀河の個数密度が星質量に依らずほぼ一定である。従って post-starburst 銀河が時代と共に passive 銀河に加わると考えると、 $z \sim 2$ の時代以降低質量の passive 銀河の個数密度は急速に増え始めようとしていることが示唆された。

1 Introduction

宇宙の基本的な構成要素である銀河の形成・進化を理解することは、宇宙の進化を理解する上で重要な課題である。銀河は大まかに、星形成活動が活発な star-forming 銀河と、星形成が終わり古い星で構成される passive 銀河とに分けることができる。Star-forming 銀河がどのように星形成を止めて passive 銀河へ進化するのか、銀河の星形成史を理解することは大変重要である。従って、銀河の進化を理解する上で、クエンチングメカニズムの解明が重要となる。クエンチングメカニズムは近傍銀河の研究から、大きく 2 つのメカニズムが考えられている (Peng et al. 2010)。星質量が重いほど星形成が止まりやすい質量クエンチング と、銀河の数密度が多いほど星形成が止まりやすい環境クエンチングである。

銀河の星形成史を理解するためにも、各時代でどれ程の銀河が星形成活動を止めたのかを探る必要がある。そのため銀河の星質量関数 (各星質量ごとの銀河の個数密度) が研究されてきた。現在の passive 銀河の個数密度は星質量により異なることが分かっている。さらに passive 銀河の星質量関数の進化を調べることで、大質量 ($\sim 10^{11} M_\odot$) の passive 銀河は $z \sim 2$ から 1 にかけて銀河の数が急速に増加したこと

が分かってきた (eg. Kajisawa et al. 2011, Ilbert et al. 2010)。しかし、遠方で低質量の銀河ほど観測されにくいと、高赤方偏移における低質量側の星質量関数は明らかになっていない。そこで、本研究では、まだ低質量側の星質量関数が明らかでない $z \sim 2$ の、star-forming 銀河、passive 銀河及び星形成が終わったばかりの post-starburst 銀河の星質量関数を求めることで、この時代にどれくらいの星質量をもつ銀河が、どの程度星形成活動を止めたのか解明することを目的とした。

遠方銀河の観測となるため、暗い銀河を検出しなければならない。また、この時代の平均的な銀河の性質を調べるためには、広視野に渡り観測し、議論する必要がある。しかし、従来の観測では広視野の観測で暗い天体まで検出できなかった。特に遠方銀河のスペクトルは、赤方偏移されて観測されるため、星質量を推定するために重要な $4000 \text{ \AA}$ 付近の光は、近赤外線領域の光として観測される。従って、本研究を行うには、近赤外線領域で深い (暗い銀河まで観測できる) 広視野の撮像データが必要不可欠となる。そこで本研究では、これらの条件を満たした、近赤外線領域の広視野撮像サーベイプロジェクトである UltraVISTA のデータを用いた。このデータは COSMOS 天域 (Scoville

et al. 2007) を、 z 、 Y 、 J 、 H 、 K_s 、 $NB118$ バンドを用いて、1.5 平方度にわたり深く観測したものである (McCracken et al. 2012)。

本研究では、UltraVISTA DR2 データを用いて、 $z = 1.5 - 2.0$ の銀河の星質量関数を、低質量側まで求めた。また、 $z' - J$ vs. $J - K_s$ のカラーセレクションを用いて、star-forming、post-starburst、passive の 3 種族を選択した。そして、種族ごとの星質量関数を求め、星質量関数の進化やクエンチングメカニズムについて考察する。

2 Data & Methods

2.1 データ & SED fitting

本研究では、UltraVISTA DR2 の Y 、 J 、 H 、 K_s バンドデータの ultra-deep stripes 部分を用いている。また、 $z \sim 2$ における銀河のパルマー/4000 Å ブレークを見つけるため Subaru/Suprime-Cam の非常に深い z' バンドデータを用いた。解析する領域は、UltraVISTA ultra-deep stripes 部分と z' のデータが重なる 0.40 平方度で、限界等級は、 $z' = 26.8$ 、 $Y = 25.8$ 、 $J = 25.3$ 、 $H = 25.0$ 、 $K_s = 25.1$ AB 等級 (5 σ 、1.8" aperture) である。

検出した銀河について、赤方偏移を推定し、絶対等級、星質量等を求めるために、SED fitting を行う。本研究では、Bruzual & Charlot (2003) model を用いて SED fitting を行った。どの赤方偏移のモデルで観測された銀河の SED がよく再現されるかを調べることで、その銀河の赤方偏移を推定できる (photometric redshift)。銀河の赤方偏移の情報は、銀河までの距離から絶対等級を計算するために必要であり、また高い信頼性で個数密度を計算するために、サンプルの赤方偏移の範囲 (サンプルが含まれている体積) を設定するためにも重要である。本研究では、COSMOS 天域を 0.9" PSF FWHM 以下で観測している U 、 B 、 r 、 I 、 $IA484$ 、 $IA624$ 、 $IA738$ 、 z' 、 Y 、 J 、 H 、 K_s バンドデータを用いた SED fitting から photometric redshift を求めた。Initial Mass Function (IMF) は Chabrier IMF (Chabrier 2003) を仮定した。

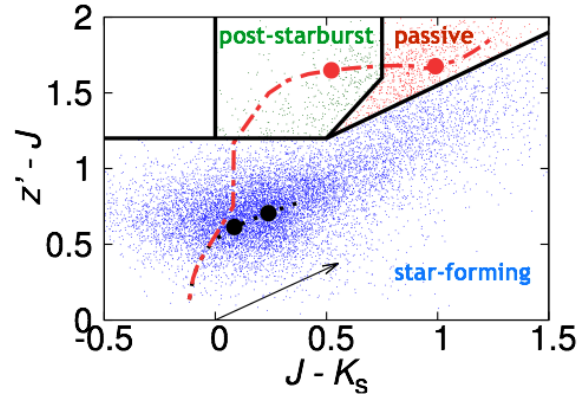


図 1: 黒の実線は色選択の領域を示し、青の点は star-forming、緑は post-starburst、赤は passive 銀河を示す。各破線は赤方偏移 $z = 1.8$ におけるモデル銀河の、年齢によるカラートラックを示しており、銀河の年齢が 1, 2Gyr の時のカラーを丸いポイントで示した。モデル銀河は、赤が single 0.5 Gyr burst モデル、黒がコンスタントモデルである。矢印は $A_V = 1$ (Calzetti et al. 2000) の時のダスト減光を示している。

2.2 カラー選択

本研究では、先行研究でよく用いられる star-forming、passive 銀河に加え、post-starburst 銀河も色選択した。Post-starburst 銀河は、銀河の年齢が 1 Gyr 程度であり、すでに星形成が止まっていると考えられるため、時間の経過とともに passive 銀河になっていくことが期待される。そのため、これらの銀河は passive 銀河の星質量関数の進化を議論する上で重要である。Post-starburst 銀河は主に A 型星からの強い寄与によって、その SED に顕著なパルマー/4000 Å ブレークが表れるため、passive 銀河と同様の色選択で選び出すことができる。本研究では、 $z' - J$ 、 $J - K_s$ カラーを用いて、パルマー/4000 Å ブレークを利用することで $z \sim 2$ における post-starburst、passive 銀河を選択した。図 1 の黒い実線は、選択領域を示している。選択された銀河の天体数は、 $z = 1.5 - 2.0$ において、star-forming 銀河が 11146 天体、passive 銀河が 840 天体、post-starburst 銀河が 406 天体となった。

2.3 コンプリートネス

星質量関数を求めるために、 $z = 1.5 - 2.0$ の各種族の銀河のうち、実際にはどれだけの割合の銀河を色選択によって選択できているかを推定する必要がある。このコンプリートネスの情報は、星質量関数を求める際に色選択で見逃した銀河についての補正を行うために用いる。計算方法は、ある赤方偏移、絶対等級、および年齢を持つ銀河のモデルスペクトルを最初に仮定し、これに観測データの深さに応じた測光誤差が加わったときに色選択条件を満たすかどうかをモンテカルロ・シミュレーションで調べ、色選択で選ばれる確率を求めるというものである。コンプリートネスの低いもの ($\sim 10^9 M_\odot$ 以下の極めて低質量のもの) は、星質量関数から除いて議論する。

3 Results

観測された銀河の星質量ごとの個数と、セクション 2.3 で求めたコンプリートネス の効果を加味した $z = 1.5 - 2.0$ の共動体積から、星質量関数を計算した。図 2 は赤方偏移 $z \sim 2$ における、種族ごとの銀河の星質量関数を示している。表 1 に Schechter 関数でフィッティングした値を示した。

得られた $z \sim 2$ の passive 銀河の星質量関数は、現在の passive 銀河の星質量関数とは異なり、大質量側では星質量が軽くなるにつれて個数密度は増加するが、低質量側は星質量が軽くなるにつれて銀河の個数密度が減少することが分かった。一方、star-forming 銀河の星質量関数は、現在と同様に低質量ほど個数密度は増加する。そして本研究により初めて明らかとなった post-starburst 銀河の星質量関数は、低質量側では銀河の個数密度が星質量に依らずほぼ一定である。Schechter 関数フィッティングの結果、個数密度の値を示す ϕ_* は、post-starburst 銀河は passive 銀河の $1/5$ 程度である。興味深いことに、post-starburst 銀河の星質量関数の低質量側の傾きは star-forming 銀河や passive 銀河とは明らかに異なり、傾きを示す α の値が star-forming 銀河と passive 銀河の中間的な値を示すことが分かった。

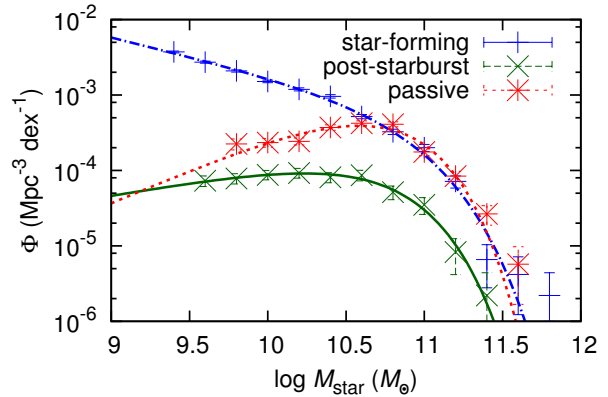


図 2: 青は star-forming、緑は post-starburst、赤は passive 銀河の星質量関数を示す。各線は Schechter 関数フィッティングの結果を示す。

4 Discussion

本研究では、COSMOS 天域を観測した UltraVISTA DR2 の撮像データを用いて z' 、 J 、 K_s の色選択で、 $z = 1.5 - 2.0$ の star-forming (11146 天体)、post-starburst (406 天体)、passive (840 天体) の銀河を選択し、各々の星質量関数を調べた。

まず、本研究の結果について、同じ赤方偏移の星質量関数を調べた先行研究と比較する。赤方偏移 $z \sim 2$ における star-forming 銀河と passive 銀河の星質量関数を調べた研究には、UltraVISTA DR1 データを用いて、統計的な優位性を持って大質量側の星質量関数の進化について調べた Ilbert et al. (2013) や Muzzin et al. (2013)、The FourStar Galaxy Evolution Survey (ZFOURGE) を用いて、狭い領域であるが低質量側まで星質量関数を求めた Tomczak et al. (2014) がある。Passive 銀河の Schechter 関数フィッティングの結果は、先行研究と同程度であるが、star-forming 銀河の結果は、Ilbert et al. (2013)、Muzzin et al. (2013) とは異なる。解析領域が狭いが深く観測している Tomczak et al. (2014) とは本研究の結果と誤差の範囲内で一致することが分かった。

しかし、これらの先行研究では、本研究よりデータが浅く、また狭いため、低質量側の星質量関数が統計的な優位性を持って明らかにされていない。本研究では UltraVISTA DR2 の広く深い観測データ

表 1: Schechter 関数フィッティングの結果

population	$\Phi_*(10^{-4} \text{ Mpc}^{-3})$	$\text{Log}M_*(M_\odot)$	α	χ^2
Star-forming	2.81 ± 0.43	10.90 ± 0.05	-1.50 ± 0.04	2.28
Post-starburst	0.82 ± 0.06	10.68 ± 0.03	-0.64 ± 0.05	0.24
Passive	4.57 ± 0.44	10.64 ± 0.07	-0.11 ± 0.18	3.12

を用いて、passive 銀河については $9.8 \times 10^9 M_\odot$ から $9.8 \times 10^{11} M_\odot$ の星質量関数を、0.40 平方度と広い観測領域で調べることができた。今まで発見されていなかった低質量の暗い passive 銀河まで検出することができ、初めて passive 銀河や post-starburst 銀河の星質量関数を低質量まで高い精度で決定することができた。

Schechter 関数フィッティングの結果、passive 銀河と post-starburst 銀河の α の値から、低質量側の傾きが優位に異なることが分かった。これは、passive 銀河よりも post-starburst 銀河の方が、低質量ほど個数密度が増加していることを示す。Post-starburst 銀河は、約 1Gyr 以内に passive 銀河に進化するため、この時代以降、低質量の passive 銀河の個数密度は急速に増えることが示唆された。さらに クエンチングメカニズム について考察すると、passive 銀河の個数密度が低質量ほど低くなっていることから、 $z \sim 2$ までは星質量に依存する質量クエンチングが支配的である。一方、post-starburst 銀河の低質量側は massive な銀河の個数密度と同程度であることから、星質量に依存しない環境クエンチングが効き始めていることが推測できる。

5 Conclusion

本研究では、UltraVISTA DR2 データと、すばる望遠鏡 Suprime-Cam による z' バンドデータを用いることで、COSMOS 天域における $z = 1.5 - 2.0$ の銀河の星質量関数を低質量側まで求めた。得られた $z \sim 2$ の passive 銀河の星質量関数は、低質量側は星質量が軽くなるにつれて銀河の個数密度が減少する。一方、post-starburst 銀河の星質量関数は、低質量側では銀河の個数密度が星質量に依らずほぼ一定である。従って post-starburst 銀河が時代と共に

passive 銀河に加わると考えると、 $z \sim 2$ の時代以降低質量の passive 銀河は急速に増え始めようとしていることが示唆された。

Acknowledgement

本研究の解析に当たり、国立天文台天文データセンター (ADC) のデータ解析システムを利用させて頂きました。また、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ご支援頂き、感謝申し上げます。

Reference

- Bruzual, G., & Charlot, S. 2003, MNRAS, 344, 1000
- Calzetti, D., Armus, L., Bohlin, R. C., et al. 2000, ApJ, 533, 682
- Chabrier, G. 2003, PASP, 115, 763
- Ilbert, O., Salvato, M., Le Floc'h, E., et al. 2010, ApJ, 709, 644
- Ilbert, O., McCracken, H. J., Le Fèvre, O., et al. 2013, A&A, 556, A55
- Kajisawa, M., Ichikawa, T., Yoshikawa, T., et al. 2011, PASJ, 63, 403
- McCracken, H. J., Milvang-Jensen, B., Dunlop, J., et al. 2012, A&A, 544, A156
- Muzzin, A., Marchesini, D., Stefanon, M., et al. 2013, ApJ, 777, 18
- Peng, Y.-j., Lilly, S. J., Kovač, K., et al. 2010, ApJ, 721, 193
- Scoville, N., Aussel, H., Brusa, M., et al. 2007, ApJS, 172, 1
- Tomczak, A. R., Quadri, R. F., Tran, K.-V. H., et al. 2014, ApJ, 783, 85