

Scientific Prospects of the SWIMS-18 survey on Subaru and TAO

山元 萌黄 (総合研究大学院大学 物理科学研究科 天文科学専攻)

Abstract

我々のグループでは現在 SWIMS-18 サーベイというプロジェクトを計画し推進している。これはチリに建設する TAO 望遠鏡に載せる SWIMS という近赤外線撮像分光装置を 2015 後半-2017 年の間すばる望遠鏡に搭載し、 $1.5 < z < 5$ という銀河形成の最盛期を時間と環境軸で網羅し、合計 18 枚のフィルターを駆使して超多色の大規模銀河サーベイを行おうというものである。今回は主に現在マゼラン望遠鏡で行われている同種の ZFOURGE プロジェクトについての論文である ADAM R. Tomczak et al.2014(APJ..783..85T) のレビューと、SWIMS-18 プロジェクトのユニークな特長やそれによって拓けるサイエンスの展望を述べる。以下に論文の概要を示す。

ZFOURGE による観測結果から、 $0.2 < z < 3$ において最も精度の高い銀河の星質量関数 (SMF) が得られた。ZFOURGE では、 $1-2\mu\text{m}$ の波長帯で medium-band filter を用いることで、 $1 < z < 3.5$ の約 30000 個もの銀河の photo- z を 1-2% の精度で求めることが可能になった。さらに CANDELS の HST imaging を合わせ、星形成を終えた銀河 (赤) と星形成中の銀河 (青) のどちらにおいても、 $z=2.5$ までかつ星質量が $10^{9.5}$ 太陽質量ほどの低質量銀河まで有用な SMR を得ることができ、今回初めて低質量の星形成活動を終えた銀河の急速な増加 (成長) の様子を確認できた。その結果、宇宙における銀河の星質量密度の $z=2.5$ から現在までの進化は、星形成銀河については約 2.2 倍の増加となっているが、星形成を終えた銀河については約 12 倍もの大きな増加を示すことが分かった。

1 Introduction

銀河の形成やその進化は、ダークハローの形成とそれ中のバリオンの進化に依存している。宇宙初期のかすかな密度揺らぎが自己重力で次第にコントラストを上げ、小さなダークマターハローができる。そしてそれらが集合・合体し、大きい構造になる。ダークマターハローが出来た時には最初ダークマターとバリオンが電離した電離ガスが存在し、やがて電離ガスは電磁波放射で運動エネルギーを失い冷えていく。そしてハロー中心に冷たいガス雲ができ、星形成が起きる。これらの過程は銀河の星質量の成長と関係が見られるため、星質量の分布関数である Stellar Mass Function(SMF) を調べることは、このような feedback を決める上で主となる方法である。SMF の研究は最近何年かで盛んに行われており、また近赤外帯の深いサーベイの発展もあり、より遠方の、より星質量の軽い暗い銀河まで観測が可能になってきてい

る (Moustakas et al.2013, Muzzin et al.2013)。そして、SMF は星質量 $10^{10} M_{sun}$ 以下における傾きにより、1 成分のシェヒター関数で表せないことがわかっている。しかしこれまでは $z \sim 1$ を超える遠方の銀河の低質量側の SMF を正確に決められるほど十分に深く広いサーベイは行われなかった。そしてこの論文では、ZFOURGE(Fourstar Galaxy Evolution survey) のデータを用いることで、 $0.2 < z < 3$ の範囲で研究されていた SMF を、さらに 1/10 小さい星質量の銀河まで拡張して調べ、低質量側の SMF まで決定している。さらに、SMF を星形成銀河と星形成を終えた銀河それぞれにおいて決定した。

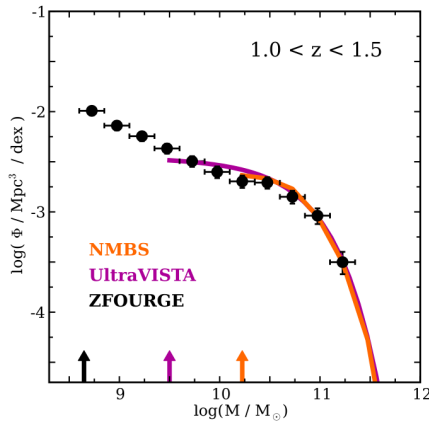


図 1: ZFOURGE, UltraVISTA, NMBS のデータによる $1 < z < 1.5$ の SMF

2 ZFOURGE and Observations

今回 ZFOURGE の深い近赤外撮像データを使用した。ZFOURGE は Magellan Baade 6.5m 望遠鏡で行われているサーベイであり、Fourstar 近赤外カメラと 1-1.8 μ m 帯で 5 つの medium-band filter(J1,J2,J3,Hshort,Hlong) を使用することで、broad-band 単体よりも $1 \leq z \leq 4$ の銀河のバルマーブレイクを細かく捉えられ、天体の正確な photometric redshift(photo-z) を求める事が可能となる。CDFs, COSMOS, UDS の 3 つの legacy field を対象とし、各 field で 11' \times 11' pointing で観測を行っている。この独立した 3 つの pointing のおかげで、cosmic variance により error が 1 pointing のものより小さくなっている。ZFOURGE の field は他にも CANDELS の HST 撮像を利用しており、地上望遠鏡で medium-band を利用した場合よりもかなり深い (~ 26.5 等) H_{160} band と J_{125} band の撮像データを用いている。高い S/N 比により精度の高い photo-z を得る事ができる。また、 H_{160} のデータは detection image としても利用している。しかし、 H_{160} のデータで最も暗いものは地上望遠鏡では検出できず、SED を決めるのも難しいため、この研究では $SNR_{160} > 10$ ($H_{160} \sim 25.9$ 等) を満たす天体のみを対象としている。

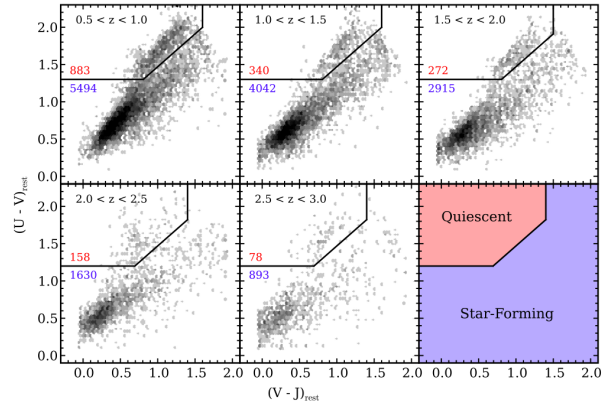


図 2: 静止系の UVJ color diagram による銀河の分類

3 Sample selection and color-color diagram

data の mass-completeness limit を理解する事は非常に重要である (Marchecini et al. 2009)。今回は SNR の limit を $H_{160} \sim 25.9$ とし、星質量で銀河を狭いビンに分け、ビンの中で limit を超えている銀河の割合を計算した。この割合が 80% であるところを mass-completeness limit とし、これ以上の割合を持つビンの銀河をサンプルとした。図 1 にそれぞれ ZFOURGE, UltraVISTA (Muzzin et al. 2013), NMBS (Brammer et al. 2013) のデータによる $1 \leq z \leq 1.5$ の SMF を示した。下の矢印はそれぞれの mass-completeness limit を表しており、エラーバーは 1σ である。今回のデータでより低質量側の SMF の傾きを確認する事ができた。この論文では銀河のサンプルを星形成銀河 (star-forming) と星形成を終えた銀河 (quiescent) に分けている。手段として静止系の U-V vs. V-J color-color diagram を利用しており、 $z \sim 3$ 付近の銀河では色の二峰性が見られる事が分かっている。星形成を終えた銀河では SED に強いバルマーブレイクが見られるため、静止系の U-V が大きく (赤く) なる。逆に星形成銀河は U-V が小さく (青く) なるが、dust の濃い銀河の場合、dust 減光により静止系の V-J の波長帯における SED の減少がゆるやかになることで V-J が大きくなる。図 2 は ZFOURGE によるサンプルの color-color diagram であり、図中の線によりサンプルを分類している。こ

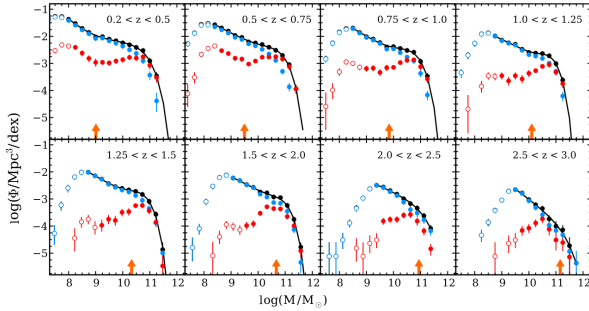


図 3: 各銀河、各 redshift における SMF

の方法の強みは、dust 減光がある場合、おおむね境界の傾きに沿って移動するので dust 減光が銀河の分類にほぼ影響しないということである。これにより dust の多い星形成銀河と典型的な星形成を辞めた銀河の混同を防ぐ事が出来る。

4 Results and discussion

SMF(Φ) は

$$\Phi(M) = \frac{1}{\Delta M} \sum_{i=1}^N \frac{1}{V_c} \quad (1)$$

で計算した。 $M = \text{Log}(M/M_{sun})$, ΔM は星質量のピン幅、 N はピン中の銀河の個数、 V_c は comoving volume を示す。図 3 はサンプルすべての銀河 (黒)、星形成銀河 (青)、星形成を終えた銀河 (赤) それぞれの SMF である。オレンジの矢印は mass-completeness limit を示している。すべての銀河の SMF はシェヒター関数によりフィッティングされている。 $z \geq 2$ においては $\text{Log}(M/M_{sun}) < 10$ において SMF に急な slope が見られる。また、星形成を終えた銀河は、星形成銀河に比べて $z \sim 2$ から現在まで SMF に大きな進化が見られ、星質量が $10^{10} M_{sun}$ 以上では 6 倍、 $10^{10} M_{sun}$ 以下では 15-30 倍にも進化している様子が見られる。この急速な進化により、低質量の星形成を終えた銀河の割合は $z \sim 2$ から現在までで 7% から 34% に増加した。

図 4 は各 SMF と 1 成分、2 成分のシェヒター関数とのフィッティングの残差を表している。1 成分のシェヒター関数では $z < 2$ の低質量側の slope をフィット

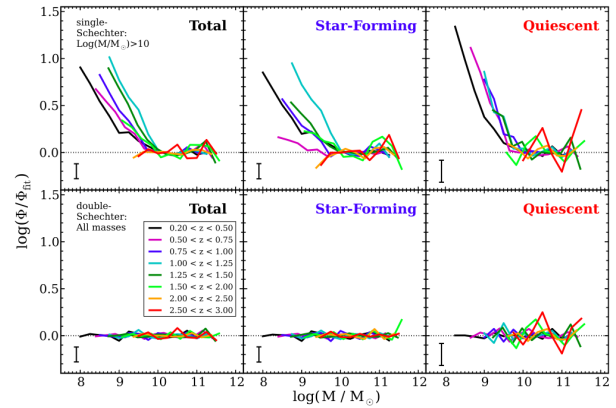


図 4: 各銀河、各 redshift における SMF を 1 成分、2 成分のシェヒター関数でフィッティングした時の残差

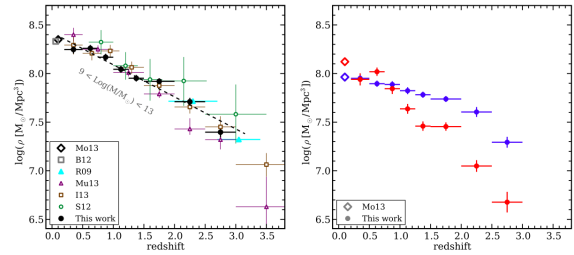


図 5: redshift に対する cosmic stellar mass density
左:すべての銀河 右:星形成銀河 (青) と星形成を終えた銀河 (赤)

できず、2 成分ならフィット出来る事がわかる。また、 $z < 3$ の SMF を $10 < \text{Log}(M/M_{sun}) < 13$ で積分し、cosmic stellar mass density ρ を計算した。図 5 の左はすべての銀河の結果であり、点線はフィットしたシェヒター関数である。ベストフィットは $\text{Log}(\rho) = -0.33(1+z) + 8.75$ となった。この結果を ZFOURGE より広いが浅いサーベイである UltraVISTA の結果 (Ilbert et al.2013; Muzzin et al.2013)、また同等の深さであるが領域が 1/10 程度のサーベイの結果 (Santini et al. 2012) と比較したところ、ほぼ結果は一致した。右は星形成中の銀河と星形成を終えた銀河の結果であるが、cosmic stellar mass density においても星形成を終えた銀河が急速な成長を見せている事がわかる。

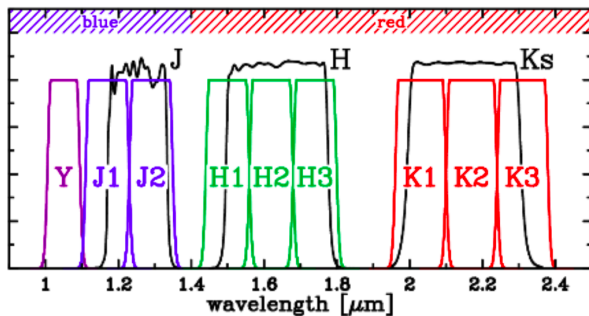


図 6: SWIMS-18 の medium-band filter

5 Science prospects of the SWIMS-18 survey

我々のグループではこれまで $0.4 < z < 2.5$ の銀河形成最盛期において、銀河団とフィールドの両方を狙い、星形成やブラックホールの成長、フィードバック、形態獲得がどのように起きてきたのか突き詰めてきた。しかしフィールド銀河では約 200 平方分領域の $z \sim 2$ の 150 個の $H\alpha$ エミッターサンプルに限られ、また銀河団領域は電波銀河周りの特に立派な原子銀河団に限られており、サンプルに偏りが見られる。そこで、1 平方度規模の無バイアスなサーベイが必要になってくる。そこで現在 SWIMS-18 サーベイというプロジェクトを計画し推進している。これはチリに建設する TAO 望遠鏡に載せる SWIMS という近赤外線撮像分光装置を 2015 後半-2017 年の間すばる望遠鏡に搭載し、大規模な銀河サーベイを行うというものである。ZFOURGE の medium-band filter が 5 枚だったのに対し、こちらはさらに H-band を三分割に、Ks-band まで 3 分割した 9 枚の filter を用いる事で、特に $z > 3$ での精度の高い photo- z 探査 ($\Delta z / (1+z) < 0.02$)、また $z \sim 5$ までの銀河のバルマーブレイクを捉える事が可能になる (図 6)。今回のレビュー論文と同様低星質量の銀河のサンプルを集め、その進化の研究をすることに適している。他には 6 枚の narrow-band filter も搭載し、こちらはペアで一組になっており、 $z=0.9, 1.5, 2.5, 3.3$ の銀河の星形成領域の電離ガスの輝線である $H\alpha$ 輝線と [OIII] 輝線を捉え、各 redshift において極力無バイアスに星形成銀河のサンプルを集める事が可能にな

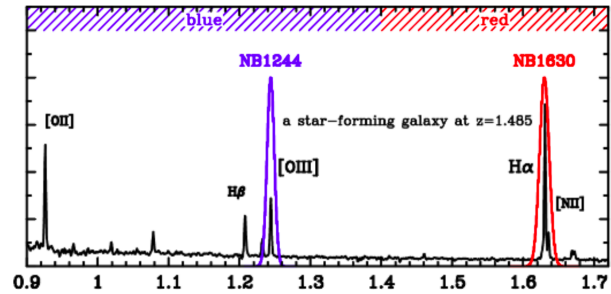


図 7: SWIMS-18 の narrow-band filter

る (図 7)。輝線の強度比を見る事で、星形成領域の電離状態を得る事も出来る。また、波長が 1.4μ 以上と以下の 2 バンドを同時に観測する事が可能であり、サーベイ効率が倍になる。そのため限られた時間でも広い領域のサーベイが可能になる。このプロジェクトにより、更なる銀河の形成・進化の解明が期待出来る。

Reference

ADAM R. Tomczak et al.2014(APJ..783..85T)