

$z \sim 1$ 星形成銀河内部の星形成領域の分解

増田 貴大 (東北大学大学院 理学研究科)

Abstract

$z \sim 1$ の宇宙における星形成率密度は、現在の宇宙に比べて一桁ほど高い値であった事が分かっている (Hopkins&Beacon(2006) など)。また、この時代に激しく星形成を行なっているような銀河は、その実に 90% が massive で disk-like な形態を持っていた事が示されている (Konishi et al. 2009)。しかし、このような銀河の星形成領域を数 kpc スケールで調べた仕事はほとんどなく、この時代の銀河の星形成活動が銀河内部のどの領域のどのようなモードで起こっているかはまだ議論の余地が残っている。よって、この時代の星形成を担っていた銀河がその内部のどのような場所で星形成を行なっていたのかを調べることは、銀河の進化を考える上で重要である。この研究では、HST による CANDELS 計画によって得られた $0.8 < z < 1.8$ の比較的 massive な銀河 ($M_* > 3 \times 10^{10} M_\odot$) の画像に対し、各ピクセルごとに SED fitting をする事で銀河内部の星形成領域の分布を空間分解して捉えた。まず最初に、HST によって得られた GOODS-South 領域の合計 8 バンドの画像を用いて、約 2kpc の分解能で星質量、年齢、E(B-V)、SFR などの map を作成した。次にこの map を元に、銀河中心から 3kpc を境にして銀河の中心部と外縁部での星質量と星形成率を足し合わせることで星形成率密度および星質量密度を計算し、その時間発展を調べた。星形成率密度を見たところ、外縁部は中心部に比べ数倍高い星形成率密度を持っているものの、この redshift の間での時間発展は中心部・外縁部ともにほとんど無かった。一方で星質量密度については、時間とともに中心部・外縁部ともに増加する傾向が見られた。特に星質量密度の増加は銀河の中心部で大きく、その増加量は星形成率密度で説明される質量増加よりも大きいという結果が得られた。講演ではこの結果を踏まえ、この時代の銀河で星質量分布が確立する過程について議論する。

1 Introduction

これまでの研究から、 $z \sim 1$ の宇宙における星形成率密度は、現在の宇宙に比べて一桁ほど高い値であった事が分かっている (Hopkins&Beacon(2006) など)。この研究では、その時代に星形成が銀河内部のどのような場所で起こっていたのかを調べる。研究に用いるサンプルの redshift range は $0.8 < z < 1.3$ (near- z) と $1.3 < z < 1.8$ (far- z) の 2 つの redshift bin を用意し、その中でも $M_* > 3 \times 10^{10} M_\odot$ の比較的 massive な銀河のみで議論する。

2 Data

2.1 CANDELS

CANDELS(Cosmic Assembly Near-infrared Deep Extragalactic Legacy Survey) とは、HST に搭載さ

れた近赤外カメラ WFC3(Wide Field Camera 3) を用いた大規模な Survey 計画のことである。今回の研究では、CANDELS 計画で新たに得られた GOODS-South 領域の近赤外画像を用いた。CANDELS の観測では WFC3 に加え ACS でも観測もっており、GOODS-South で利用できるのは WFC3 の Y(F105W)、J(F125W)、H(F160W) と ACS の I(F814W) の 4 バンドである。

2.2 GOODS

GOODS(The Great Observatories Origins Deep Survey) とは、NASA の宇宙望遠鏡および地上望遠鏡を用いた多波長の深探査計画である。今回の研究では、HST の ACS による GOODS-South 領域の観測データ (ACS v2.0 data products) を用いた。GOODS-South で利用できるのは、ACS に搭載され

た B(F435W)、V(F606W)、i'(F775W)、z'(F850LP) の 4 バンドである。

2.3 Catalog

今回は GOODS-South 領域の天体を使うにあたり、天体の redshift や赤外での等級などの情報を既存のカタログから引用した。使用したカタログは、GOODS-MUSIC catalog v2(Santini et al.2009) および MUSYC Subaru V1.0 catalog(Cardamone et al.2010) の 2 つである。

3 Methods

3.1 SED templates

SED fitting を行う前に、星種族合成モデルを用いて銀河の SED template を作成した。星種族合成モデルの計算には GALAXEV(Bruzual & Charlot 2003) のパッケージを利用した。SED template を作成するにあたり、星の IMF は Salpeter IMF、星形成史は e-folding timescale τ で定義される exponentially declining star formation history を仮定し、ISM による減光は SMC の観測から作られた extinction curve(Pei 1992) を用いた。

3.2 pixel to pixel SED fitting

HST による 8 つのフィルターの画像に対し 3.1 で作成した SED template を fitting することで、銀河の各ピクセルでの物理量を推定する。用意した SED template の中からある一つの SED を選んだとすると、その SED と銀河のあるピクセル (x,y) における 8 つのバンドでの観測値から χ^2 value を以下の式で計算できる。

$$\chi^2(x, y) = \sum_i \frac{C_{obs,i} - sC_{model,i}}{\sigma_i} \quad (1)$$

ただし、

$$s = \sum_i \frac{C_{obs,i}C_{model,i}}{\sigma_i^2} \bigg/ \sum_i \frac{C_{model,i}^2}{\sigma_i^2} \quad (2)$$

この計算を用意した全てのテンプレートに対して行い、最小の χ^2 を持つ SED を best-fit SED として選び出す。各 SED は Age(星形成が始まってからの時間)、e-folding timescale τ 、E(B-V)、 M^* の計 4 つのパラメータを持っているので、best-fit SED が決まればそれらのパラメータの best value が決まることになる。

3.3 Photometry

それぞれの銀河に属するピクセルの best value を足し合わせることで、銀河全体でのパラメータ値を求めることができる (e.g. 銀河の質量、より長波長側のバンド (K_s , IRAC, etc...) での等級)。銀河に属するピクセルを選んだ Photometry mask は SExtractor で天体検出する際に出力される Segmentation map を使い、天体の検出には H バンド (F160W) の画像を用いた。

4 Results

4.1 Ks-mass relation

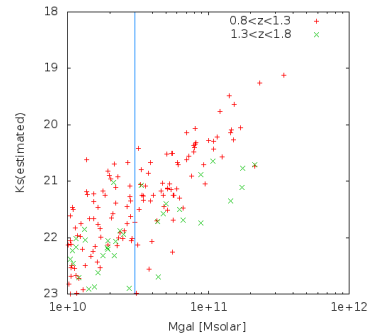


図 1: 推定した Ks 等級と銀河の Mass の関係

図 1 は、3.3 で決めた各銀河の Photometry mask 内のピクセルの値から推定した Ks 等級 (ABmag) の値と銀河の mass の値の関係である。長波長側のバンドでの等級は mass の良い indicator であることが期待され、それは図 1 から見ることもできる。near-z の redshift bin に対して far-z の redshift bin は 1 等ほど暗い側に shift しているが、これは遠くの銀河

ほど波長が伸びるために暗くなる効果とほぼ同等である。

4.2 SFR-mass relation

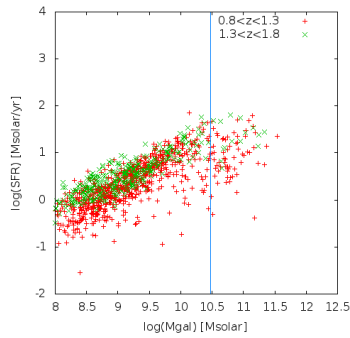


図 2: 銀河全体の SFR と銀河の Mass の関係

図 2 は、先程と同様に各銀河の Photometry mask 内のピクセルの値から推定した、銀河の SFR と mass の値の関係である。星形成をしている銀河に対してこのような図を作ると、星形成銀河の Main sequence と呼ばれる分布が得られることが知られている (Wuyts et al.(2011) など) が、今回の結果を見ても Main sequence の分布が見えている。

これ以降は、図 1 および図 2 中の縦線で表される $M_* = 3 \times 10^{10} M_\odot$ よりも massive な銀河のみを用いて議論する。この時代に星形成を行っていた銀河は massive かつ disk like な銀河であったことが過去の研究から示唆されているので (Konishi et al.2011)、この mass range で切り出した銀河は disk like な星形成銀河が選び出されていると考えられる。

4.3 inside/outside mass growth

これまで用いてきた Photometry mask を更に 2 つの領域に分ける。一つは、H バンドの画像から決めた銀河の中心から半径 3kpc の領域 (inside) で、もうひとつはその半径 3kpc より外側でかつ Photometry mask 内の領域 (outside) である。これら 2 つの領域で、mass と SFR の時間進化を考える。

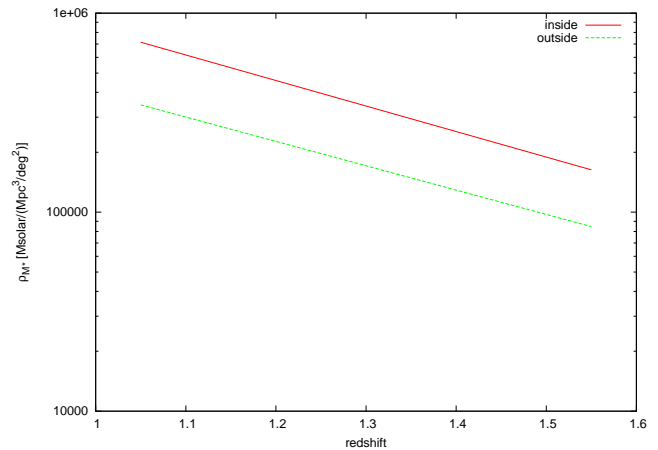


図 3: inside/outside での mass の進化

図 3 は、領域ごとの mass の進化を見たものである。横軸は redshift になっており、near-z と far-z の 2 つのプロット点が存在する。また、縦軸は各 redshift bin での mass の値を bin に含まれる全銀河で足したものを redshift bin の cosmic volume で割った値になっており、各 bin での mass density を表している。プロットを見ると、どちらの時代でも inside の方が質量が重くなっていることが分かる。また、z 1.5-1.0 は時間にすると 1.5Gyr ほどであるが、その間でも mass の増加が見られている。

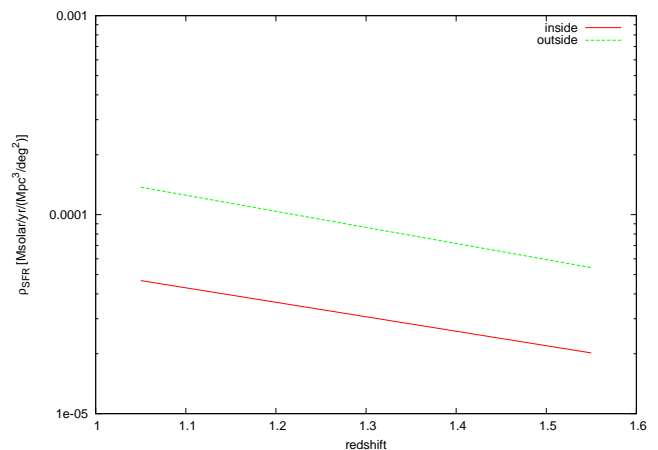


図 4: inside/outside での SFR の進化

図 4 は、先程と同様の計算を SFR map に対して行ったものである。これを見ると、SFR density は銀河の外側の方が高く、内側の方が低くなっている。

これは、円盤銀河の星形成が銀河の disk で起きているという近傍での描像に当てはまっている。さらに、redshift bin 間での SFR density の進化はそれほど大きくないことが分かる。

5 Discussion

図 3 における mass の進化と図 4 における星形成率が consistent かどうかを確認する。まず、図 4 からこの redshift 間での平均星形成率密度 $\overline{\rho_{SFR}}$ を計算すると、

$$\overline{\rho_{SFR,inside}} = 3.3 \times 10^{-5} [M_{\odot}/yr / (Mpc^3/deg^2)] \quad (3)$$

$$\overline{\rho_{SFR,outside}} = 9.6 \times 10^{-5} [M_{\odot}/yr / (Mpc^3/deg^2)] \quad (4)$$

となる。これらに redshift bin 間の時間経過を掛けて星質量の増加分を見積もると、以下のようになる。

$$\Delta\rho_{M*,inside} = 4.8 \times 10^4 [M_{\odot} / (Mpc^3/deg^2)] \quad (5)$$

$$\Delta\rho_{M*,outside} = 1.4 \times 10^5 [M_{\odot} / (Mpc^3/deg^2)] \quad (6)$$

一方、図 3 による mass の進化からも $\Delta\rho_{M*}$ を計算でき、それらは

$$\Delta\rho_{M*,inside} = 3.9 \times 10^5 [M_{\odot} / (Mpc^3/deg^2)] \quad (7)$$

$$\Delta\rho_{M*,outside} = 1.7 \times 10^5 [M_{\odot} / (Mpc^3/deg^2)] \quad (8)$$

となっている。

これらの値を比較すると、outside の領域においては SED fitting から推定される SFR で銀河の質量増加が説明できるが、inside の領域では SFR から推定されるよりも多くの質量増加が見積もられていることが分かる。このことから、銀河の中心部と外縁部では質量増加に関して異なるモードが存在しており、その事が上記の違いを生んでいると考えられる。しかし、この結果には redshift の違いによる SED fitting の精度の違いや、銀河外縁部の low-S/N 領域の扱いなど様々な要素が影響しうると考えているので、今後それらの部分をきちんと確認していく必要がある。

6 Conclusion

この研究では、 $0.8 < z < 1.8$ の massive ($M_* > 3 \times 10^{10} M_{\odot}$) な銀河に対して各ピクセルごとの SED fitting をすることで、銀河内部の星形成領域を kpc スケールで分解して捉えた。用いた画像は、HST の画像のうち CANDELS 計画で得られたもの 4 枚 (Y,J,H(WFC3) & I(ACS)) と GOODS で得られた画像 4 枚 (B,V,i',z'(ACS)) の計 8 枚の画像である。銀河の中心から 3kpc を境にして内側と外側で mass と SFR の進化をしらべた所、中心部の mass は星形成率から期待されるよりも多く増加しており、一方で外縁部は星形成率の予想とほぼ同じ mass の増加が見られた。このことから、銀河の中心部と外縁部で異なる質量増加のモードが存在すると思われるが、用いた手法の redshift での精度の違いなどの確認すべき課題がまだあるため、この結果だけから断言することは出来なかった。

7 参考文献

- Konishi et al. 2011 PASJ 63,363
Wuyts et al. 2012 ApJ 753,114

Acknowledgement

今回の研究を進めるにあたって、指導教官である秋山准教授から多くのアドバイス・コメントを頂いたことに御礼申し上げます。また、研究発表の場を与えて下さった夏の学校運営の学生の方々、資金面で援助していただいた企業・団体の皆様には大変感謝しております。再びこのような素晴らしい研究会が開催されるよう、引き続き援助をよろしく願いいたします。