

# Abundance Matching による $z\sim 7$ の銀河の性質と進化の研究

川俣 良太 (東京大学大学院 理学系研究科)

## Abstract

近年、観測技術が向上してきたことにより、 $z\sim 7$  から 8 の銀河の性質が明らかになってきた。大きさが測られている銀河の中で、最遠方のは  $z\sim 7$  の銀河である。これらの銀河は、非常にコンパクトで星生成が活発であることが分かっている。この研究では、その大きさが測られた  $z\sim 7$  の銀河についてより詳細な性質を調べていく。この研究で用いる Abundance Matching と呼ばれる手法は、銀河の明るさとそのダークマターハローの質量の間の対応関係を求めるものである。これにより  $z\sim 7$  の銀河のハロー質量を求め、星生成率やハロー半径と組み合わせることによって、この銀河の性質を明らかにした。すると、この銀河は近傍の銀河に比べ、材料となるガスの多くがまだ星となっていないことが分かった。さらに  $\Lambda$ CDM モデルによってハローを進化させることにより、このハローが現在の宇宙で銀河団スケールに成長していることも明らかになった。

## 1 Introduction

ハッブル宇宙望遠鏡やすばる望遠鏡などにより、 $z\sim 7$  から 8 の銀河の性質が明らかになってきている。この研究では、それら観測されている銀河の中で、大きさが分かっている最遠方のものについて詳細な性質を調べていく。今回は、Oesch, P.A., et al. (2010) の論文からデータを引用する。観測からこれらの銀河に対しては、UV 光度と大きさ、そして測光から求めた赤方偏移が分かっている。

銀河は、我々から見えている星やガスからなる部分と、見えないダークマターからなるダークハローとに大きく分けることができる。銀河の質量の大半はダークハローが担っており、銀河形成の観点から、銀河に付随するダークマターハローの質量を求めることは非常に重要となる。理想的には、第一原理からダークマター質量を測ることが望ましいが、現在の段階ではそれは厳しいのが実状である。

そこで、この研究では Abundance Matching と呼ばれる手法を導入する。これは、宇宙に存在する銀河のうち、 $N$  番目に明るいものが  $N$  番目に重いダークハローに含まれていると仮定して、ハロー質量を推定するものである。銀河を明るい順に並べる際には観測から求まるその赤方偏移での光度関数を用い、ハローを重い順に並べる際には理論から求まるハローの質量関数を用いる。

Oesch et al. 2010 の論文では、 $z\sim 7$  の銀河を 16 個観測しその大きさを求めているが、今回はその中から、UV で -21 等、半光度半径 1.2kpc のものを選んで、その性質を詳しく調べる。この銀河を選択した理由は、Abundance Matching を用いてそのハロー質量を求めると、銀河系のそれと近い値になり比較がしやすいからである。また、 $n=1.5$  という Sersic profile の指数は、この銀河が円盤銀河であるということを示唆している。

## 2 Physical Quantities of the Galaxy

上で述べたように、この研究では UV(波長  $\sim 1500\text{\AA}$ ) で -21 等、半光度半径 1.2kpc のものを選んで性質を詳しく調べる。この銀河について分かっているものは、等級、半径、そして測光から求めた赤方偏移である。この章では、まずそれらの物理量から経験的に分かる星生成率、ガス質量、そして星質量を求め、さらに Abundance Matching から得られる情報を追加する。

## 2.1 Star Formation Rate /Star Formation Rate Density

UV 等級が分かると、以下の式からその銀河の星生成率を求めることができる (Robert C. Kennicutt, Jr. (1998)).

$$SFR(M_{\odot}\text{year}^{-1}) = 1.4 \times 10^{-28} L_{\nu}(\text{ergs s}^{-1}\text{Hz}^{-1})$$

この式を用いると、求めたい銀河の星生成率は、 $SFR = 15 M_{\odot}\text{year}^{-1}$  と得ることができる。さらに半径がわかっているので、単位面積あたりの星生成率である星生成率密度は、 $\Sigma_{\text{SFR}} = 3.4 M_{\odot}\text{year}^{-1}\text{kpc}^{-2}$  と求まる。

銀河系の星生成率密度は、 $\Sigma_{\text{SFR,our}} = 0.0077 M_{\odot}\text{year}^{-1}\text{kpc}^{-2}$  であるので、この  $z \sim 7$  の銀河の星生成は非常に活発であり、約 440 倍も生成率密度が大きいことが分かる。このように一般的に高赤方偏移の銀河はコンパクトであり、星生成が活発である傾向があることが明らかになっている。

## 2.2 Gas Mass

星生成率密度が求まると、星生成率密度とガス質量密度の関係である Schmidt Law(Kennicutt, R. C. Jr. & Evans N. J. II (2012)) から、ガス質量密度を求めることができる。これより、ガス質量密度が  $\Sigma_{\text{gas}} = 1.5 \times 10^3 M_{\odot}\text{pc}^{-2}$  と求められる。半径の情報を用いると、銀河全体のガス質量が  $M_{\text{gas}} = 1.4 \times 10^{10} M_{\odot}$  と求まる。

ただし、ここで星生成率とガス質量を求める際に用いた関係式は、 $z=0$  の銀河に対して得られたものである。しかし、遠方の銀河においても基本的な物理過程は同様であると仮定すると、この関係式を遠方の銀河に用いることができる。

銀河系のガス質量密度は、 $\Sigma_{\text{gas,our}} = 20 M_{\odot}\text{pc}^{-2}$  であるので、この  $z \sim 7$  の銀河のガス質量密度は銀河系に比べ約 80 倍と、これも非常に高くなっている。

## 2.3 Stellar Mass

$z=4-7$  の銀河の星質量と UV 光度の間には、以下のような経験式が知られている (Gonzalez.V., et al.

(2011)).

$$\log_{10} \left( \frac{M}{M_{\odot}} \right) = -39.6 + 1.7 \times \log_{10} \left( \frac{L_{1500}}{\text{erg s}^{-1} \text{Hz}^{-1}} \right)$$

この式を用いると、星質量  $M_{\text{star}} = 6.1 \times 10^9 M_{\odot}$  と求まる。

## 2.4 Halo Mass

続いて、銀河に付随するハローの質量を求める。このとき用いるのが Abundance Matching である。Abundance Matching とは、N 番目に明るい銀河が N 番目に重いダークハローに含まれていると仮定して、星質量とハロー質量の関係を求めるものである。このとき、各ハローにはそれぞれ 1 個ずつの銀河が含まれていることを仮定している。銀河を明るい順、ハローを重い順に並べる際には、それぞれ光度関数とハローの質量関数を用いる。光度関数を、明るい側からある光度まで積分すると、その光度以上の銀河の数密度を求めることができる。次に、ハロー質量関数を重い側からその数密度になる質量まで積分すると、その質量以上のハローは先程の数密度存在するということになる。つまり、銀河の光度とハローの質量を対応させることができるのである。

光度関数は Press-Schechter function を用い、パラメーターは観測から求めた Bouwens.R.J., et al. (2011) のものを引用した (図 1)。ハロー質量関数は、 $\Lambda\text{CDM}$  モデルを仮定して理論的に求められ、今回は Mo.H.J.&White.S.D.M. (2002) の式を用いてコーディングした (図 2)。

光度関数を調べたい銀河の等級  $M = -21$  まで積分し、同じ数密度になるまで質量関数を積分した。結果、対応するハローの質量は  $M_{\text{dh}} = 6.6 \times 10^{11} M_{\odot}$  と求められた。参考として銀河系のハローの質量は  $M_{\text{dh,our}} = 1.0 \times 10^{12} M_{\odot}$  であり、ハロー質量は似ているといえる。

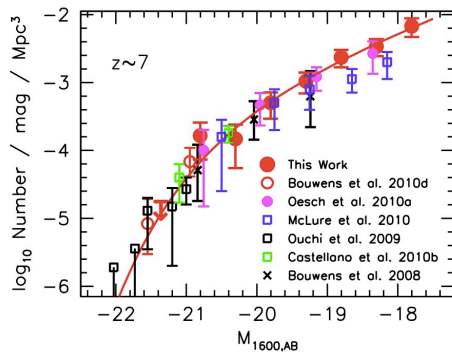


図 1:  $z \sim 7$  での光度関数

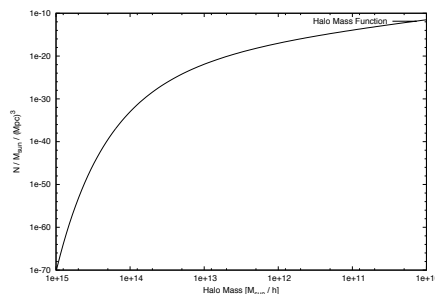


図 2:  $z \sim 7$  でのハロー質量関数

## 2.5 Baryon Mass

ハローの質量が求まると、その銀河の組成と宇宙全体の組成とが同じであると仮定して、その銀河のバリオン質量を求めることができる。現在分かっている宇宙論パラメーターからバリオンと物質の質量比は、 $M_b/M_m \simeq 1/6$  である。よって  $M_b = 1.1 \times 10^{11} M_\odot$  である。

## 2.6 Halo Radius

ハローはダークマターがビリアル系をなしているものであるので、ハロー質量が求まると以下の式によってビリアル定理からハローの半径を求めることができる。

$$r_{200} = \left[ \frac{GM}{100\Omega_m(z)H(z)^2} \right]^{1/3}$$

この銀河のハローのビリアル半径は、 $r_{200} = 34 \text{ kpc}$  と求められる。一方、銀河系のハローのビリアル半径は  $r_{200} = 310 \text{ kpc}$  であるので、ハロー質量比が  $2/3$  であることを考慮しても、この銀河の半径は小さくコンパクトである。

## 3 Discussion

以上で求めた結果から、 $z \sim 7$  の銀河の性質について探る。

$z \sim 7$  の銀河と銀河系に対して、ディスク半径/ハロー半径の比にはあまり違いがないことが分かった。しかし、バリオンの質量に対する星質量の比は、約 7 倍異なることが分かる。つまり、銀河系に対して  $z \sim 7$  の銀河では、星の材料となるバリオンの多くがまだ星となっていないことが分かる (図 3)。

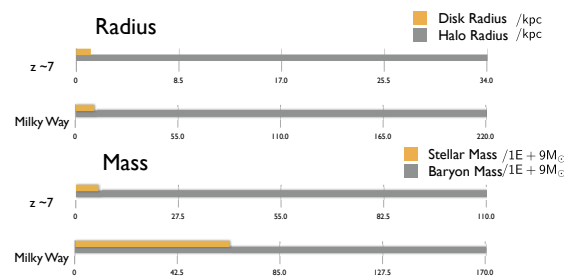


図 3: 2 つの半径の比と 2 つの質量の比

また、 $z \sim 7$  の銀河を銀河系と比較した結果、星生成の性質が大きく異なることが分かった。そこで、この銀河は  $z=0$  でのどのような銀河と星生成の様子が似ているのかを調べた (図 4: Kennicutt, R. C. Jr. & Evans N. J. II (2012) の図にプロット)。すると、Circumnuclear 銀河のリングの部分と似ていることが分かった。Circumnuclear 銀河とは、中心核の周囲に星生成をしているリングをもつ、棒渦巻銀河のことである。このように  $z=0$  で完全に似ている銀河は珍しく、Circumnuclear 銀河の星生成が活発な一部を取ってきたものと近いことが分かる。

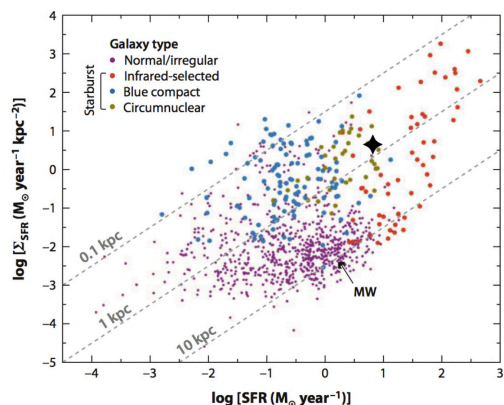


図 4: 銀河の星生成率と星生成率密度

さらに、この研究で  $z \sim 7$  の銀河のハロー質量が求められた。 $\Lambda$ CDM モデルによれば、時間が経つにしたがってハロー質量がどのように変化していくかを確率的に追うことができる。これを計算すると、 $z=0$  まで進化すると、 $1\sigma$  の範囲で  $1.0 \sim 7.7 \times 10^{13} M_{\odot}$  となり、中央値は  $2.6 \times 10^{13} M_{\odot}$  となった。Local group の質量は  $4 \times 10^{12} M_{\odot}$  なので、 $z \sim 7$  の銀河のハローは、銀河群、または小規模な銀河団の規模に進化することが分かった。すなわち、今回調べた  $z \sim 7$  銀河は、銀河群か小規模な銀河団のメンバー銀河に進化すると予想される。

## Reference

- Oesch.P.A., et al.2010, ApJ, 709, L21
- Kennicutt. R. C. Jr. & EvansN. J. II Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2012. 50:531
- V.Springel et al. 2005, nature, 435, 629
- Bouwens.R.J., et al. 2011, ApJ, 739, 90
- Gonzalez.V., et al.2011, ApJ, 735, L34
- Mo.H.J.&White.S.D.M.2002, Mon.Not.R.Astron.Soc., 336, 112
- Robert C. Kennicutt, Jr. 1998 ApJ 498 541