

High Redshift における銀河の環境依存性

加藤 裕太 (東京大学大学院 理学系研究科)

Abstract

Spectroscopic identification of a protocluster at $z = 2.300$: environmental dependence of galaxy properties at high redshift (Steidel et al. 2005) をレビューする。以下に概要を示す。自身との研究の関わりについては最後の節で示した。本論文では、まず $z = 2.72$ の QSO HS 1700+643 フィールドにおいて赤方偏移 $z = 2.3 \pm 0.4$ の範囲で星形成銀河を探索するために行われた赤方偏移サーベイから、 $z = 2.300 \pm 0.015$ に銀河の高密度領域を発見した。分光観測から同定されたこの高密度領域の銀河を含むトータル 72 の銀河の遠紫外線から近赤外線までの詳細な SED モデリングの結果と、我々が得た K_s バンドのデータと *Spitzer*/IRAC 測光観測データを用いた結果、この領域は $z \sim 0$ で質量 $\simeq 1.4 \times 10^{15} M_{\text{sun}}$ のビリアライズされたリッチ銀河クラスターになるという結論を得た。またこの高密度領域にある銀河は、高密度領域の外にある銀河と比べて、星の質量と年齢が ~ 2 倍大きいということが分かった。この結果は高赤方偏移において銀河の性質をラージスケールの環境の関数として初めて直接的に比較したものである。今回の結果はラージスケール (> 10 Mpc) において見られる高密度領域における構造形成の加速というシンプルな理論的予測に一致している。この原始銀河団は、 $z = 2.30$ までに $> 10^{11} M_{\text{sun}}$ を持つような古い星が支配的な銀河を多数含んでいると考えられる。

1 Introduction

銀河形成の過程はラージスケールの環境に強く依存する。たとえばラージスケールの中でも最も高密度な領域は最も早い銀河形成をすると期待される。銀河クラスターの統計的な観測が数多く行われ、より赤く、星質量が大きい銀河は、より強くクラスタリングしているということが示されてきた。近傍宇宙における早期型銀河やクラスターの性質や、中間赤方偏移における”フィールド”(高密度領域ではない領域)に注目することで、これらの銀河の銀河形成の時期や違いを環境の関数として調べようという試みが過去 30 年間続けられてきた。これらの研究は事実上、早期型銀河はそのほとんどの星を $z > 2$ で作り上げ、その後は穏やかな進化をしているということを示したが、銀河形成の環境依存性という点に着目した結果はあまり得られなかった。

本研究では、rest-UV で選ばれた (Steidel et al. 2003, 2004) 分光サンプルが $z \simeq 2$ において、環境の関数として銀河プロパティを直接比較できる程度数扱っている。(Adelberger et al. 2004) では、クラスタリングプロパティと個数密度に基づき、この

$z \sim 2-3$ の rest-UV で選ばれた銀河が環境とは関係なくいわゆる $z \sim 1$ の”赤い”銀河、及び $z \sim 0.2$ までの早期型銀河の一般的な祖先であることを示した。これに加えて、*Spitzer*/IRAC を使用することで $z \sim 2-3$ の rest-frame における近赤外線測光観測が可能になり、この観測結果からそれぞれの銀河において比較的信頼できる恒星種族パラメータと星質量を得ることができる。宇宙論的パラメータは、 $\Omega_m = 0.3, \Omega_\Lambda = 0.7, h = 0.7$ として考える。

2 Observations and the galaxy sample

測光観測の結果も含めた最終的なサンプルの観測結果は (Shapley et al. 2005) で記載されている。QSO HS 1700+643 の赤方偏移は $z = 2.72$ である。測光水準を $z \simeq 2 - 2.75$ の銀河に対して適用し、具体的には (Adelberger et al. 2004; $z = 2.20 \pm 0.32$) による”BX” criteria と、(Steidel et al. 2003; $z = 2.73 \pm 0.27$) による”MD” criteria を使用した。 $R = 25.5$ に対する BX と MD 候補天体における分光によつ

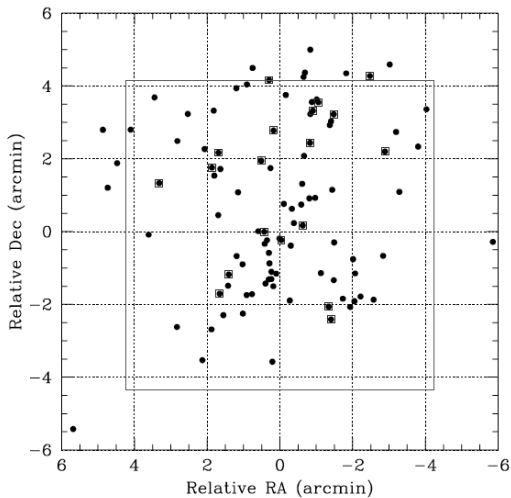


図 1: QSO 1700+643 を中心としたマップ。四角で囲われている部分は K_s バンドの観測が、その中の大部分においても IRAC の観測が行われている。四角で囲われている点は $z = 2.300 \pm 0.015$ (スパイク) にある銀河を示している。

て同定された数の比は 4.5:1 となり、BX, MD 候補天体における赤方偏移分布は $\langle z \rangle = 2.26 \pm 0.35$ となった。このフィールドでは全部で 100 個の銀河が $1.48 \leq z \leq 2.89$ となり、 $\langle z \rangle = 2.28 \pm 0.32$ となったため、BX/MD 候補天体とよい一致を見せている。 $R = 25.5$ に対して 1711 の BX+MD 候補天体が $15' \times 15'$ の領域に存在している。このうち近赤外線 K_s バンドが検出されたのは分光観測で同定された候補天体中 $\sim 24\%$ (92/389, うち 79 が $z > 1.4$) であった。この中からさらに、 $z > 1.4$ のサンプルについて K_s バンドのデータと少なくとも 1 つの IRAC バンドのデータがある 72 のサンプルについて焦点をあてる。このサンプルの赤方偏移の分布は図 2 のヒストグラムの前面に示されている。

3 Results

3.1 Quantifying the Overdensity

図 2 から、HS 1700+643 フィールドの $z \simeq 2.30$ に明らかな集まりがあることが分かる。これは 72 個の K_s と IRAC データのある銀河サンプルにおいても、

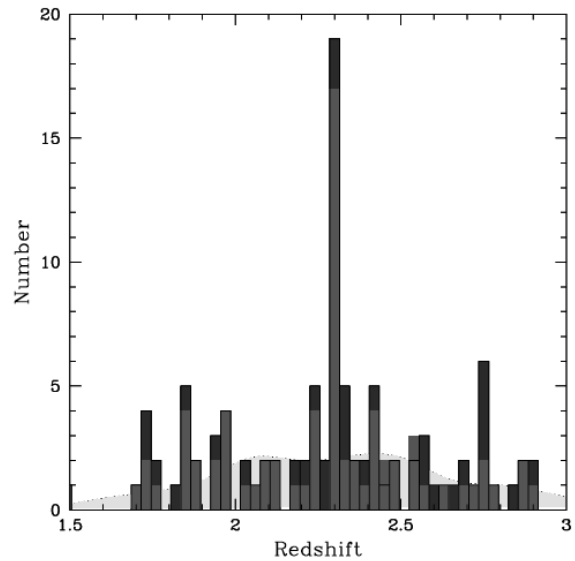


図 2: 72 個の銀河のサンプル (前面) と 100 個の銀河 (後面) の赤方偏移の分布のヒストグラムと、BX+MD candidates (観測された個数比 4.5:1 を使用) から期待される赤方偏移の分布。

100 個のサンプルにおいても言える。我々は (Steidel et al. 1998) の方法を用いて、この”スパイク”の統計的有意性を見積もった。サンプルの中から銀河を 2 つ選び出し、その 2 つの赤方偏移の差を計算するというのを全ての組について行い、その差の関数として銀河の数を数える。銀河が密集している領域は差の間隔の値が小さくなるはずである。そのような領域についてクラスターの可能性があると思なし、このスパイクの差程度の分布になる頻度を計算した結果、28/50000 となった。これによって我々はこのスパイクが、99% 以上の確率でランダムで現れた分布ではないということを結論した。図 2 にもあるように我々の選択関数は、このスパイクの赤方偏移間では平均して 1.9 個の銀河が期待できることを示している。よって我々が観測した 17 個の銀河があるという結果は、銀河の高密度領域だと考えることができる。

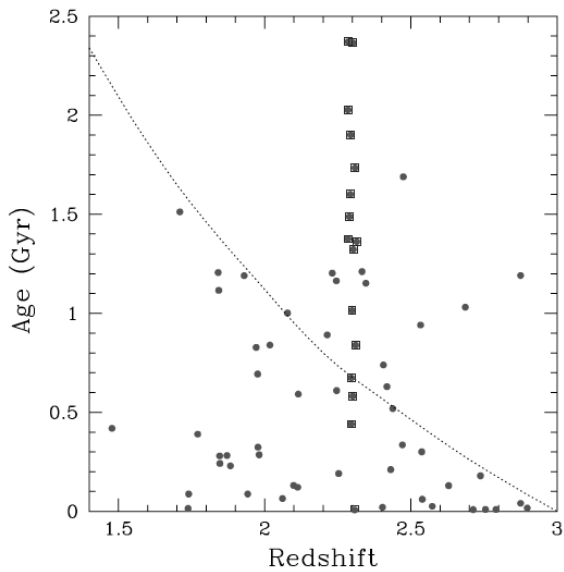


図 3: 横軸:72 個の銀河サンプルの赤方偏移。縦軸:CSF モデルによって推定された星の年齢 (Gyr)。点線は $z = 3.0$ に銀河の星が生成された場合の進化の関数。

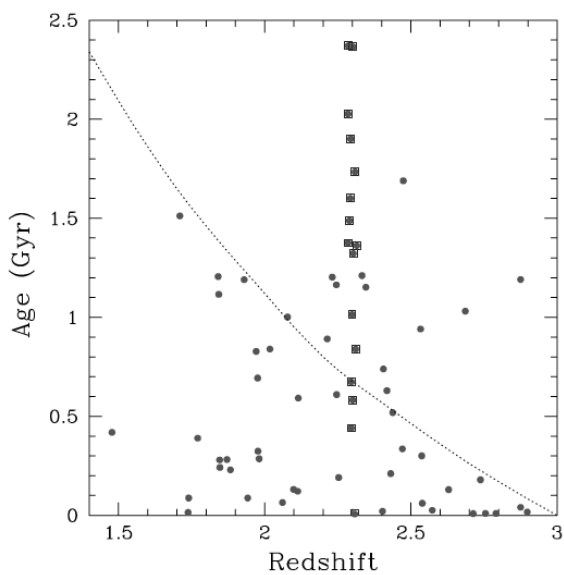


図 4: 横軸:72 個の銀河サンプルの赤方偏移。縦軸:CSF モデルによって推定された星の総質量の対数。

3.2 Environmental Dependence of Galaxy Properties

(Shapley et al. 2005) において、72 個の銀河の SED 合成モデルが rest-frame 遠紫外線 - 近赤外線ま

で行われた。我々は 2 つのモデルに基づき銀河の年齢と星の総質量を見積もった。図 3 及び図 4 は constant star formation (CSF) models による計算の結果を示している。銀河に含まれる星の年齢 (Gyr) においても、銀河に含まれる星の総質量においても、 $z = 2.300 \pm 0.015$ の高密度な領域でスパイクが目立つ。このモデルではスパイク中の銀河は 1400 ± 180 Myr、フィールドの銀河 55 個では 720 ± 103 Myr という結果を得た。この結果は銀河形成が始まった赤方偏移を z_f と表せばそれぞれ、 $z_f = 4.3$, $z_f = 3.0$ を示している。CSF モデルにおける内側/外側の銀河の年齢の分布を 2 つの標本だと考えて、2 標本 KS 検定を行った結果、2 つの標本が一致する確率は 1×10^{-4} となった。もう 1 つのモデルは e -folding time τ を導入する best-fit τ model を用いて計算する。それぞれの銀河について適用し計算したところスパイク中の銀河で 790 ± 180 Myr、フィールドの銀河に対しては 440 ± 90 Myr となった。この場合の 2 標本 KS 検定の結果は、 7.3×10^{-3} であった。銀河の星形成はモデルで仮定するよりも複雑であり個々の銀河の年齢は不定性が残るが、原始銀河団の銀河の星年齢とフィールドの銀河の年齢には明確な違いがあることが分かる。

また銀河の年齢に違いがあるということは、銀河における星の質量にも差を生むということが考えられる。図 4 は横軸に 72 個の銀河サンプルの赤方偏移、縦軸に CSF モデルによって推定された星の総質量の対数を示している。スパイクの内側の銀河は外側の銀河に比べて平均して 2 倍星の質量が高いということが分かる。

理論的な計算からは、上記の結果とは対称的に、スパイクの内側/外側の銀河の総質量は $\sim 16\%$ しか変わらなかった。この結果により我々は、スパイクの内側の銀河は外側の銀河より多くの割合のバリオンを星に変換する、そしてこれはおそらくそれが可能な時間も長いからであると結論できる。

次にこのスパイク中の銀河が $z \sim 0$ までにどのような進化をするかに着目する。観測結果から得られる密度パラメータと (Steidel et al. 1998) の方法を用いたところ、このスパイクは $z \sim 0$ までにビリアルサイズされ、質量 $1.4 \times 10^{15} M_{\text{sun}}$ を持つ大質量クラスターへ進化することが分かった。すなわち我々の

観測結果は、少なくともいくつかのクラスターは $z \sim 2.3$ までに星質量の大きい既に進化した銀河を含んでいるということを示している、これは近傍宇宙の早期型銀河やクラスターの結果とも一致している。

4 Summary and discussion

我々は QSO HS 1700+643 フィールドにおける $z = 2.30 \pm 0.015$ に高密度領域を持っていることを示した。この領域は $z \sim 0$ までに $\sim 1.4 \times 10^{15} M_{\text{sun}}$ を持つリッチクラスターになることが分かった。原始銀河団中にある銀河の平均した星質量はフィールドと比べて 2 倍高く、星の年齢においても 2 倍高いことを示した。

高赤方偏移と近傍の銀河との比較の観点では、 $z = 2.30$ では我々がフィールドと呼んでいるような環境にある銀河であっても、 $z \sim 0$ でのその末裔は、相対的に高密度な環境にあるということに注意しなければならない。高赤方偏移との観測結果と帳尻を合わせるためには、 $z \sim 2.3$ の銀河を近傍宇宙との末裔と繋げて考える必要がある。

少なくとも $z \geq 2$ においては、リッチクラスターになることが運命付けられているかなりの割合の銀河が星形成段階の途中である。 $z = 2.30$ における HS 1700+643 フィールド中の原始銀河団のような構造は、クラスター環境下にある銀河形成の物理を理解することを目的とするフォローアップ観測に焦点を当てた場合、多くの機会を提供してくれる。特に、 $z = 2.300$ という高赤方偏移は、narrowband Ly α は観測フレームで 4012Å、H α は観測フレームで 2.166 μm という波長で、これらは地上からの観測が比較的容易である。rest-frame 可視光域と rest-frame 遠紫外線による分光観測は力学、化学、前原始銀河団中の銀河クラスターの恒星種族に対して多大な情報をもたらしてくれる。proto-intracluster medium もおそらく観測されるだろう。このような継続的なフォローアップスタディが今後提案されるだろう。

以下、研究との関係を述べる。本論文の結果からも高密度領域において星形成が促進され、その後抑制されているということは示されてきた。しかしながら、星形成が具体的に加速されているメカニズム

というのは未だ不明瞭である。可能性の一つとして、高密度領域で衝突や相互作用の頻度が上がり、銀河中心での星形成が活発化され楕円銀河バルジを形成するというものがある (Kauffmann, 1996)。もしこのような可能性と SMBH の進化と関係があれば、原始銀河団の AGN の出現率も上がるはずである。実際、Digby - North et al. 2010 による *Chandra*/ACIS-I 200ks の観測で、フィールドに比べて AGN のエンハンスメントが報告されている。また、大質量銀河の進化におけるキーププロセス段階と考えられている Ly α blobs (LABs) 6 つによるフィラメンタリーなラージスケール構造が Erb et al. 2011 によって明らかになった。

これらの情報と比較しながら、*Herschel*/SPIRE による 250, 350, 500 μm によるマッピングデータを現在解析中である。これらの波長帯は $z \sim 2$ においてダスト温度 $T_d \sim 20\text{-}40$ K に値する。今後、この領域に対しては 6 つの LABs に対するフラックスからダスト温度を求めることで LABs の L_{IR} を求め、これをラージスケールの環境の関数として調べたり、 $z > 2$ の他の原始銀河団/フィールドとを上記項目に注目しながら比較する、などを行う予定である。この論文はこの領域において、初めてラージスケールの環境として高密度領域とフィールドとの銀河年齢と星質量を比較したという点で重要である。

Reference

- Steidel et al. 2005. THE ASTROPYYSICAL JOURNAL, 626:44-50, 2005 June 10
- Dokkum et al. 2000. THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 541 : 95E111, 2000 September 20
- Adelberger et al. 2004. The Astrophysical Journal, 607:226-240, 2004 May 20
- Shapley et al. 2005. The Astrophysical Journal, 626:698-722, 2005 June 20
- Steidel et al. 2004. The Astrophysical Journal, 604:534-550, 2004 April 1
- Steidel et al. 1998. THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 492:428E438, 1998 January 10