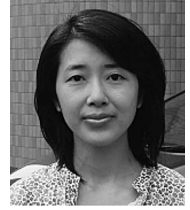


MOIRCS で探る赤方偏移 3.1 原始銀河団

—大質量銀河の誕生



内 一 由 夏・山 田 亨

〈東北大学大学院理学研究科 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉〉

e-mail: uchimoto@astr.tohoku.ac.jp

本稿では、すばる望遠鏡+MOIRCS を用いて SSA22 天域にある赤方偏移 $z=3.1$ 原始銀河団を観測した結果を示す。近赤外線広視野撮像データから銀河の星質量に基づいた調査を行った結果、原始銀河団内での大質量銀河の分布が明らかになった。また、SSA22 天域に多く存在する巨大ライマン α 輝線ガス雲 (LAB) の中で、まさに大質量銀河形成が進行中である様子が示された。約 115 億年前の SSA22 原始銀河団では大質量銀河が誕生しつつあり、やがて近傍で見られるような銀河団へと成長していくことが期待される。

1. はじめに

近年の 8–10 m 級望遠鏡を用いた広視野観測から、赤方偏移が 2 を超える遠方宇宙において、やがて銀河団へと進化していくと期待される大規模な星形成銀河の集団が見つかっている。これらは「原始銀河団」と呼ばれ、銀河の形成過程を探る上で非常に貴重なターゲットである。原始銀河団を発見する最も有効な方法には可視光観測によるライマンブレイク銀河 (LBG) やライマン α 輝線銀河 (LAE) の検出が挙げられる。例えば、すばる望遠鏡+主焦点カメラ Suprime-Cam の活躍により、これまでにいくつかの遠方銀河の高密度領域が発見されてきた^{1),2)}。しかし、発見された原始銀河団の数はまだ限られており、その形成史は明らかでない。

銀河の形成史は銀河の質量増加の歴史として理解することができる。観測量としては過去の星形成活動の結果できあがった星の総量 (すなわち星質量) が良い指標となる。しかし、可視光観測では遠方銀河の紫外線を見ているため、その時代に進行中の星形成活動を捉えることしかできない。

大部分の星をすでに作り終えた質量の大きい銀河は紫外線をあまり出していないからである。星質量を調べるためには近赤外線の観測が必要である。加えて、近赤外線ならば、遠方に多く存在すると期待されるダストに深く覆われた星形成中の銀河も検出することができる。このような銀河は大規模な星形成活動の末に大質量銀河へ育っていくと考えられる。ところが、従来の近赤外線装置では視野が狭いため、大きく広がった構造を持つ原始銀河団を観測することは困難であった。

東北大学と国立天文台ハワイ観測所が開発した近赤外線多天体分光撮像装置 MOIRCS は、広視野 (28 平方分角) かつ高解像度 (0.117 秒角/ピクセル) で、近赤外線 K バンド (2.2 ミクロン) が観測可能な高性能近赤外線カメラである。われわれ MOIRCS チームでは、MOIRCS Deep Survey (MODS) と併せて、SSA22 天域にある赤方偏移 3.1 原始銀河団を重点的に観測してきた^{3),4)}。すばる望遠鏡+MOIRCS を用いれば、原始銀河団を近赤外線広視野にわたってカバーすることができる。本研究では、近赤外線データを基に求めた銀河の星質量を軸として、原始銀河団における大

質量銀河の形成を読み解くことを目的としている。

2. SSA22 原始銀河団

SSA22 天域は、赤方偏移 $z=3.1$ にライマンブレイク銀河 (LBG) とライマン α 輝線銀河 (LAE) の密度超過が発見された領域である^{5),6)}。この銀河集団の高密度構造は 60 メガパーセクにも広がっていて、これまでに見つかっている原始銀河団の中では、銀河の数密度や大きさにおいて、最も規模が大きい。LAE と LBG はどちらも紫外線を出している星形成銀河で、前者は非常に若い段階にあり、後者はある程度進化した段階にある銀河だと考えられている。最近の研究からは、1.4 平方度にあたる広大な LAE 探査を行った結果でも、SSA22 天域が非常に卓越した密度超過を示すことが分かっている⁷⁾。

この天域には巨大ライマン α 輝線ガス雲 (ライマン α ブロップ; 以下, LAB と呼ぶ) も 35 個発見されている⁸⁾。LAB はライマン α 輝線ガス雲が数十キロパーセクにも広がっている巨大な天体であり、光度は $10^{43} \text{ erg s}^{-1}$ 以上に及ぶ。その多くは原始銀河団のような銀河の高密度集団の中で見つかり、若い銀河の姿を見ていると考えられている。これだけの数の LAB が密集している領域は他に例がない。加えて、この天域にある二つの LAB (LAB1, LAB2) はこれまで発見された中で最も巨大である。

さらに、近年の観測からは SSA22 天域でサブミリ銀河の密度超過が発見されており、大規模な星形成が示唆されている⁹⁾。このように、SSA22 天域は初期銀河形成の現場を直接見ることができる非常に興味深いターゲットである。しかし、赤方偏移や星質量を決めるうえで鍵となる近赤外域での「深く」「広い」データは得られていなかった。

3. MOIRCS による観測

MOIRCS による近赤外線撮像観測は、2005 年から 2008 年にかけて行われた。観測領域を図 1 に示す。図 1 の等高線は、これまでの Suprime-Cam による可視狭帯域フィルター観測によって得られた LAE の数密度分布である^{6),8)}。最も密度の高いところを \times で示した。図 1 には LAB も示してある。MOIRCS で観測したのはその中の 6 視野で、それぞれが四角 (点線) で示してあり、SSA22-M1-M6 と呼ぶ^{*1}。観測視野全体は 104 平方分角で、MODS とほぼ同じ広さである。シーイングは全体を通して 0.4-0.7 秒角であり、K バンドの最終合成画像は 0.5 秒角という非常に高解像度になった。到達した限界等級は $J=24.6$, $H=24.3$, $K=24.4$ (AB 等級, M1 領域, 5σ , 1 秒角アパーチャ) であり、 3×10^9 太陽質量程度までの低質量の LBG も検出することができるほど深い

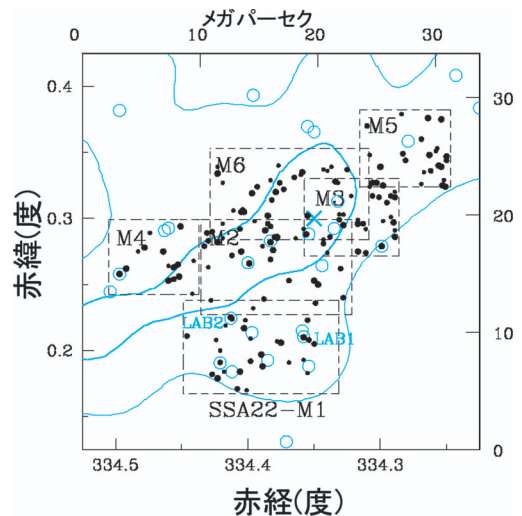


図 1 MOIRCS による観測領域 M1-M6 (点線)。等高線は LAE の数密度 (1σ と 2σ) を示す。 \times は LAE の数密度ピーク、青丸は LAB である。黒丸は DRG かつ photo- $z=2.6-3.6$ の銀河である。

*1 SSA22-M3, M4, M5 を観測した 2007 年は、二つある HAWAII-2 検出器のうちの一つに不具合があったので、MOIRCS 本来の視野の半分の大きさになっている。

データが得られた。

本研究では、MOIRCSによる近赤外線データに加えて、すばる望遠鏡+Suprime-Camによる可視*BVRi'z'*バンドと、CFHT+MegaCamによる紫外線*u**バンドのデータも用いている^{6),8)}。紫外線と可視光ではシーイングが1.0秒角と大きいため、多色測光を行う場合には近赤外線画像を可視画像のPSFに合わせてスムージングし、測光した。

4. 原始銀河団メンバーの選択

本研究では、近赤外線*K*バンド(2.2ミクロン)で検出された銀河の中から、赤方偏移3.1原始銀河団のメンバー銀河の候補を抽出する。*K*バンドは赤方偏移 $z \sim 3$ では可視*V*バンドに相当し、その光度は星質量にほぼ対応する。メンバー銀河の選択には1) Photometric Redshift法と、2) 近赤外線の色($J-K > 1.4$; DRG)を用いる。

4.1 Photometric Redshift法による選択

Photometric Redshift法(photo-z)は、撮像観測で得られた複数バンド(多色)の測光データから、さまざまな赤方偏移を持つ銀河のスペクトル(SED)をフィッティングし、最小2乗法で赤方偏移を決定する。本研究ではphoto-zフィッティングのために開発され一般に公開されているhyperzコードを用いて計算した¹⁰⁾。なお、計算の際には赤方偏移、銀河のスペクトル型¹¹⁾、星形成のタイムスケール、星の年齢、ダスト吸収量をフリーパラメータとしている。

Photo-zは、銀河のスペクトルを特徴づけるライマンブレイクとバルマー/4000Åブレイクがおさえられれば、赤方偏移を高い精度で推定することができる。本研究でターゲットにしている赤方偏移3.1の銀河については、紫外・可視データによって前者が、近赤外線データによって後者がカバーできる。

Photo-zは $z=3$ の銀河については $\Delta z \sim 0.5$ の誤差があるため、 $z_{\text{phot}} = 2.6-3.6$ を原始銀河団メン

バー候補とした。分光輝線による赤方偏移決定に比べると精度は悪いが、分光観測が不可能な暗い銀河まで赤方偏移を推定し、原始銀河団銀河の候補を抽出する強力な手段である。

4.2 近赤外線の色による選択 (DRG)

Photo-zは赤方偏移を推定するのに非常に有効な方法であるが、赤外線が明るくても可視光が非常に暗い銀河では間違えてしまうし、可視のシーイングに合わせて近赤外線画像のPSFを大きくなますため、測光誤差が大きくなる。そこで、本研究では、photo-zと相補的なサンプルとして、近赤外線の色のみを用いた選択方法でもサンプルを作った。

$J-K > 1.4$ をもつ銀河はDistant Red Galaxies (DRG)と呼ばれ、赤方偏移2から4の銀河がその多くを占める¹²⁾。進化した銀河を特徴づけるバルマー/4000Åブレイクは、 $z=2-4$ では赤方偏移して*J*バンドと*K*バンドの間に来る。よって、成長して質量の重くなった銀河は*J-K*が大き(赤く)なる。加えて、ダストに覆われて短波長の光が吸収された $z=2-4$ の星形成銀河も*J-K*が赤くなり、この色選択の中に入る。DRGの年齢は1-3 Gyr程度で、LBGよりもより成長した段階にあると言える。これらの銀河は原始銀河団のメンバーを含む重要なサンプルである。図1にはDRGのうち $z_{\text{phot}} = 2.6-3.6$ であった銀河の分布がプロットしてある。

また、DRGのサブサンプルとして、 $J-K > 2.1$ という非常に赤い色を持つHEROがある¹³⁾。現在の楕円銀河はほとんど星形成をしていないが、HEROはまだ星を活発に作っている段階にある楕円銀河の祖先と考えられていて、近赤外線で極端に赤い理由はダストに深く覆われているためである。推定される赤方偏移は3付近であるため、有力な原始銀河団のメンバー候補である。

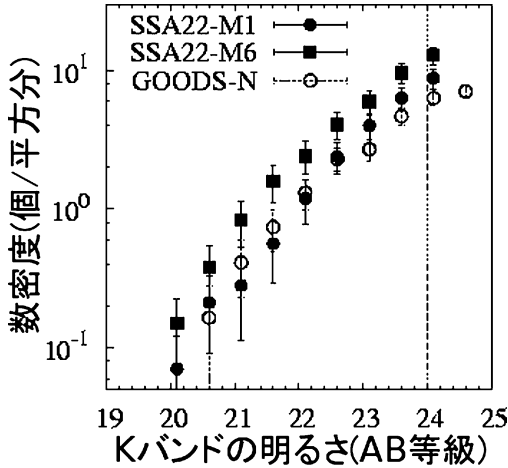


図2 DRGの数密度。横軸はKバンドの明るさ、縦軸はその明るさまでDRGを積算したときの数密度を示す。黒丸がSSA22-M1領域、黒四角がM6領域の結果である。白丸はGOODS-NでのDRGの数密度を比較のためにプロットした。

5. 原始銀河団の中の大質量銀河の分布

5.1 Kバンドで検出された銀河の数密度

赤方偏移3.1(約115億年前)の原始銀河団には大質量銀河の密度超過があるのだろうか。図2にDRGの数密度(ナンバーカウント)を示す。観測した6領域中、DRGの数密度が最も多かったのはM6領域であり、最も少なかったのはM1領域であった。比較のために一般天域の代表例として、MODSで得られたGOODS-N天域のDRG数密度も示した¹⁴⁾。M6領域ではDRGの密度超過がGOODS-Nの2倍になる。たいへん面白いことにこの領域はLAEの密度ピークに近い。また、DRGの中で非常に赤いJ-Kを示すHEROがGOODS-Nよりも7倍多く、特にM6領域に最も多く存在していることも分かった。

DRGとLABの空間分布の相関を調べると、LABの周辺0.1分角($z=3.1$ では50kpcに相当)でDRGの数密度が高くなることが分かった。つまり、LABにDRGが多く付随しているというこ

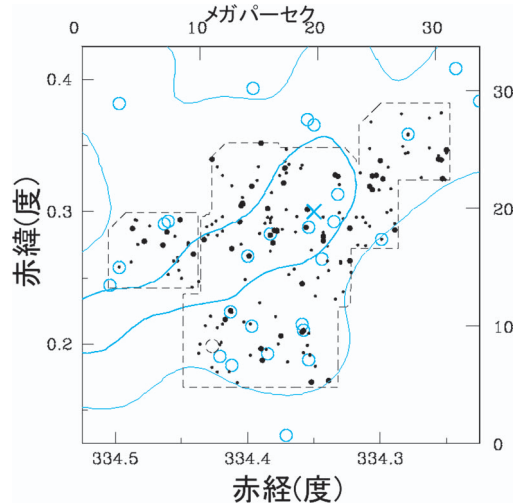


図3 photo-z選択銀河のうち $10^{10.5}$ 太陽質量以上の星質量をもつ銀河(黒丸)。黒丸(小)が $10^{10.5}$ 太陽質量以上、黒丸(大)が $10^{11.0}$ 太陽質量以上を示す。等高線はLAEの数密度(1σ と 2σ)を示す。×はLAEの数密度ピーク、青丸はLABである。

とである。最も多いのはLAB1とLAB2で、DRGが2個ずつ付随している。DRGの赤方偏移の幅は広いので、偶然違う赤方偏移にある天体がLABと重なった可能性もある。そこでランダムに座標を決めてDRGとの相関が出るかどうかをテストしたところ、同じような分布を得る確率は6%しかなかった。DRGの数密度の超過やLABとの相関は、photo-z選択銀河についても同様の傾向を示した。この結果は、これらのサンプルが原始銀河団に付随している可能性が高いことを示唆する。

5.2 原始銀河団の星質量分布

SSA22原始銀河団では、大質量銀河はどの程度形成されているのだろうか。Kバンドで24.0AB等級までのphoto-z選択銀河について、星質量を求めた結果が図3である。星質量は銀河のSEDと質量光度比から見積もった。SEDの計算に使う赤方偏移はphoto-zを用いた。なお、分光されているLBGについては分光赤方偏移を用い、LABに付随しているものは赤方偏移を3.1とした。

MODS で得られた GOODS-N フィールドの結果についても同様の基準 ($z_{\text{phot}}=2.6-3.6$ かつ $K < 24.0$) で銀河を選択して比較した¹⁴⁾。

その結果, SSA22 の 10^{11} 太陽質量以上の銀河の数は GOODS-N の 3 倍であることが分かった。領域別にみると, DRG と同様に M6 で最も多く, 最も少ない M1 に比べて 2 倍であることが分かった。DRG の結果とも併せて考えると, M6 領域には星形成が進みダストに覆われた大質量銀河が多く存在していると言える。この領域では, 将来的には大質量銀河の形成がより進み, やがて銀河団のコアになっていくのかもしれない。

5.3 近傍銀河団との比較

SSA22 原始銀河団は, 現在みられるような銀河団と比較してどの程度の銀河がすでにできているのだろうか。銀河団は密度や構造の個性が大きいので, 原始銀河団がやがてどのような規模の銀河団に成長するのかを予測するのは難しい。不定性の大きい議論だが, 一つの目安として以下のように見積もってみる。

近傍銀河団の例として, かみのけ座銀河団を取り上げる。かみのけ座銀河団中心部の光度関数¹⁵⁾を星質量に換算し, $z=3.1$ の空間密度に変換する。すると, SSA22-M6 領域での $10^{10.5}$ 太陽質量以上の銀河の数はかみのけ座銀河団の 10% に相当することになる。ここで, 近傍の銀河団は高赤方偏移では空間的に大きく広がっていたと考えられる。高密度領域での密度ゆらぎの成長を球対称だと考えた場合, 近傍で見られるような銀河団は収縮を始めた頃 (turn-around) には 2 倍の半径だったと予想される。表面密度にして 1/4 だったことになる。Turn-around より前だった場合には表面密度はもう少し高い。非常に単純な想定だが, 例えばかみのけ座銀河団の表面密度が 115 億年前には現在の 1/3 だったと考えると, かみのけ座銀河団における $10^{10.5}$ 太陽質量以上の銀河の 30% 相当が SSA22 原始銀河団ですでにみられると言える。

6. LAB の中で成長する大質量銀河

6.1 LAB に付随する近赤外銀河

水素ライマン α 輝線探査から, SSA22 天域に LAB の密度超過が発見されたことは 2 章で述べた。SSA22-M1-M6 領域の中には, このうちの 20 個の LAB が存在している (図 1)。LAB の水素ライマン α 輝線ハローの中に DRG または photo-z 選択銀河があったのは 20 個中 15 個であった。75% の LAB について, K バンドの対応天体があったことになる。図 4 に代表的な LAB を示す。図 4 から分かるように, 一つの LAB に複数の K バンド対応天体が含まれている例もある。最も対応天体の数が多いのは LAB1 と LAB2 である。15 個の LAB に付随する K バンド対応天体の総数は 35 個であった。なお, LAB には LBG が付随しているものが 9 個あり, これらは可視分光赤方偏移から LAB に付随することが分光的にも分かっている。残りの K バンド対応天体は分光赤方偏移が分からないが, DRG や photo-z 選択天体は単独に面積で平均するとライマン α ハローの中にそれぞれ 0.03 個しかない計算になる。このように 20 個中 15 個もの LAB に対応天体が存在して, しかも複数個対応天体が確認できるものもあるということは, これらが確かに LAB に付随しているということを裏付ける。複数の K バンド対応天体が検出された LAB は, 階層的構造形成に予想されるような銀河の衝突合体前の姿を見ているのかもしれない。これらはやがて合体して, 一つの大質量銀河へと進化していくと予想される。

一方で, K バンドの対応天体がない LAB も 5 個あった。これらはまだ星形成が進んでいない天体だと考えられる。銀河のもととなる水素ガスが収縮して, 小さな銀河ができつつあるのかもしれない。

6.2 LAB の星質量

LAB に付随する photo-z 選択銀河の星質量を求めてみる。なお, 前節で述べたようにこれらの

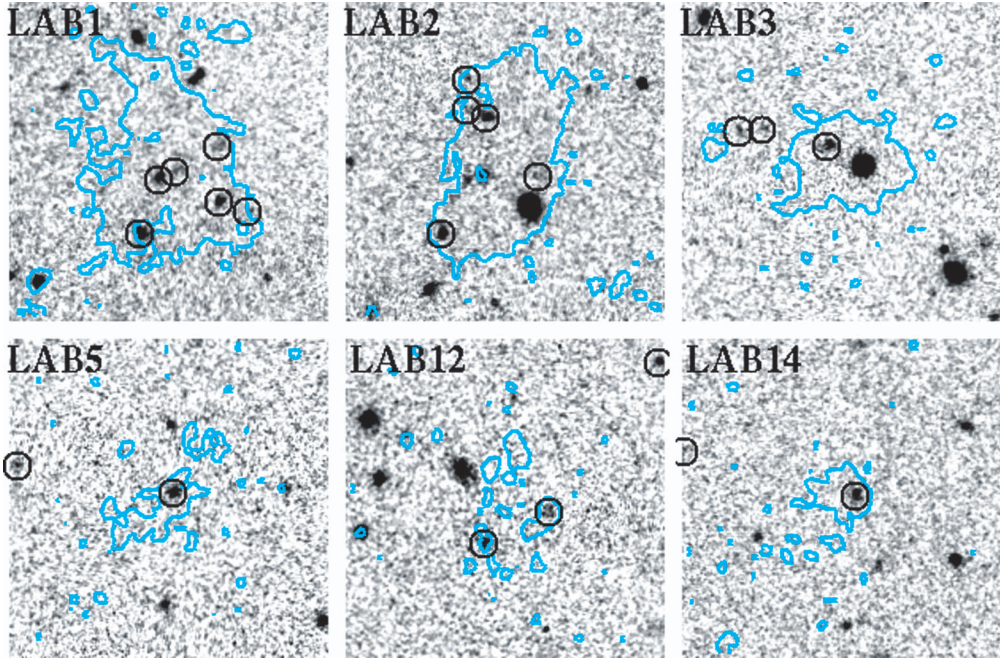


図4 LAB周辺のKバンド検出銀河. 黒丸が $z_{\text{phot}}=2.6-3.6$ の銀河であり, LABの近赤外対応天体候補である. 各パネルの大きさは23秒角(赤方偏移3.1で180kpcに相当)である. 水色のコントアはライマン α ハローの広がりを示す.

天体はLABに付随している可能性が高いと考えて, 赤方偏移はすべて3.1に固定した. その結果, LABの中にある銀河の星質量は 4×10^9 太陽質量から 2×10^{11} 太陽質量までの範囲に分布していて, 15個の中央値は 3×10^{10} 太陽質量であった. LABの星質量からは, この天体がすでにある程度の量の星を作り終えている段階にあるということが示された.

図5はLABの星質量と, ライマン α ハローの広がり(上), ライマン α 輝線の速度幅(下)を比較した図である. 上図からは, 広がりの大きいLABには星質量がかなり大きいものがあることが分かる(LAB1, 2, 3, 5). 一方で, 星質量が大きいのにライマン α ハローはそれほど大きくないものもある(LAB12, 14). 光度と広がりには相関があるので, 同時にライマン α 光度も低い. LAB1を除く最も重い4個のLAB(LAB2, 3, 12, 14)はX線で検出されており, AGNの存在が示唆さ

れる. LAB12, LAB14のライマン α 輝線はダストに吸収されてしまっているのかもしれない.

図5下図からは, 星質量が大きいほどライマン α 輝線の速度幅が大きいことが分かる. LABの正体を特定するのは難しく, これまでも多くの観測事実が明らかにされたが, 決定的なシナリオは描けていない. LABの明るく広がったライマン α 輝線の起源はいくつか提唱されている⁸⁾. 代表的なのは, 1) ガスの冷却収縮¹⁶⁾, 2) 隠された星形成もしくはAGNによる光電離¹⁷⁾, 3) 銀河風による衝突励起¹⁸⁾である. ここでは, 1)のライマン α 輝線ガスが重力的に結びついている場合について考えてみる.

銀河の形成過程では, 重力により集まってきたガスが放射冷却で収縮していき, その中で星が作られていくと考えられる. この場合にはライマン α 輝線ガスの速度幅と広がりから力学質量を推定することができる. 速度幅と広がりが大きいほど

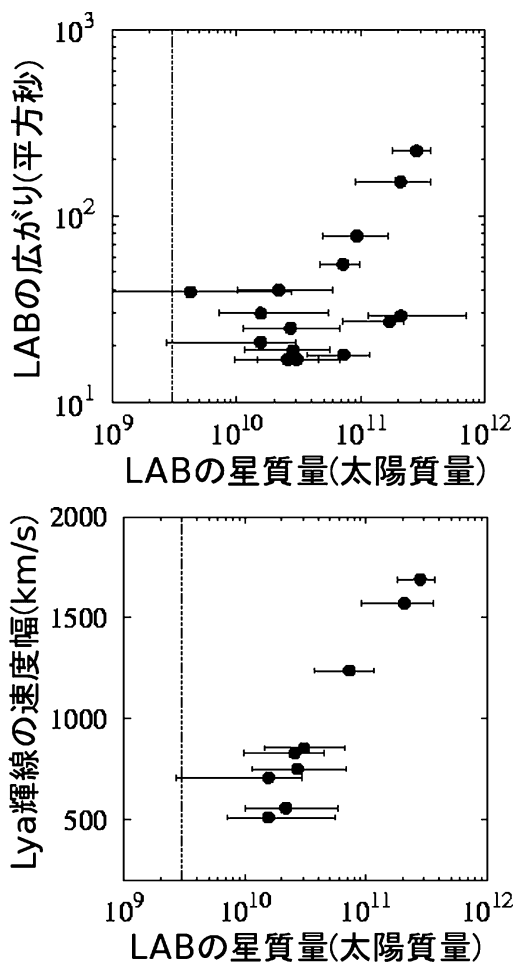


図5 (上) LABの星質量 対 ライマン α 輝線の広がり。(下) LABの星質量 対 ライマン α 輝線の速度幅。

力学質量は大きくなるので、われわれの結果は銀河の力学質量が大きいほど星質量も大きいという相関を示すことになる。近傍の楕円銀河の力学質量は星質量と相関していることが分かっていて、その比は数倍から十倍程度である。一方で、LABの速度幅から推定される力学質量は 10^{11} – 10^{13} 太陽質量で、LABの星質量の数十倍になる。星質量が力学質量よりかなり小さい。LABの中では星が形成途中で、これから大質量銀河に成長して近傍のような関係が成り立つのだと想像することができる。

もちろん、この議論には限界があって、LABはまだピリアライズしているとは言えない天体であるし、力学質量を見積もるために有効半径をハローの大きさに置き換えている点も問題があるだろう。しかしそういう不定性があるにもかかわらず、2者に相関があることはたいへん興味深い結果と言える。

7. まとめと今後の展望

本研究では、MOIRCSのデータを基に、銀河の星質量を指標として、赤方偏移3.1原始銀河団の中での銀河の形成過程を調べてきた。近赤外線Kバンドで検出された銀河サンプルの中から、photo-zとDRGで選んだ銀河を原始銀河団メンバーの候補とし、その分布を明らかにした。その結果からは、原始銀河団内ではDRGと大質量銀河の数密度が一般的な天域より2–3倍高い領域があることが分かった。この領域はやがて銀河団のコアに成長していくだろうと期待される。面白いことにこの領域はLAEの密度ピークと近い。また、観測天域に存在する20個のLABのうち15個にKバンドでの対応天体が存在することが分かり、その星質量は 4×10^9 から 2×10^{11} 太陽質量の範囲に分布していた。LABの中では複数の銀河が誕生しており、それらがやがて衝突合体して大質量銀河に成長していくと考えられる。

今後必要だと思われるのは、本研究で見つかったKバンド検出天体の分光赤方偏移や、速度分布だろう。このようなデータを得るのにもMOIRCSは威力を発揮する。検出された全部の銀河についてより詳細なデータを得るのには、すばる望遠鏡+MOIRCSでは感度が足りなくなるので、将来的にはTMT(30m望遠鏡)などより口径の大きい望遠鏡が必要となるだろう。

本稿で紹介した研究は、鍛冶澤賢(愛媛大)、久保真理子、市川隆(東北大)、松田有一(ダラム大)、秋山正幸、林野友紀(東北大)、小西真広(東大)、小俣孝司、西村徹郎、鈴木竜二、田中

壺 (国立天文台), 東谷千比呂 (カリフォルニア大), 吉川智裕 (京産大) との共同研究に基づくものです.

謝 辞

MOIRCS の開発や観測にあたり, チームを支えてくださった皆様に深く感謝申し上げます. また, データ解析を行っていた出産前後には, 職場や共同研究者の皆様の多大なご理解とご協力をいただきました. 誠に有難うございました. そして, 本稿執筆までの間には東日本大震災がありました. 研究継続にあたり, 多くの方々のお力添えをいただきました. この場を借りて, 心よりお礼申し上げます.

参 考 文 献

- 1) Ouchi M., et al., 2005, ApJ 620, L1; 天文月報, 2004 年 11 月号, 646
- 2) Shimasaku K., et al., 2003, ApJ 586, L111
- 3) Uchimoto Y. K., et al., 2008, PASJ 60, 683
- 4) Uchimoto Y. K., et al., 2011, submitted
- 5) Steidel C. C., et al., 2000, ApJ 532, 170
- 6) Hayashino T., et al., 2004, AJ 128, 2073
- 7) Matsuda Y., et al., 2011, MNRAS 410, L13
- 8) Matsuda Y., et al., 2004, AJ 128, 569; 天文月報, 2004 年 11 月号, 628
- 9) Tamura Y., et al., 2009, Nature 459, 61
- 10) Bolzonella M., et al., 2000, A&A 363, 476
- 11) Bruzual G., Charlot S., 2003, MNRAS 344, 1000
- 12) Franx M., et al., 2003, ApJ 587, L79
- 13) Totani T., et al., 2001, ApJ 558, L87
- 14) Kajisawa M., et al., 2011, PASJ 63, 379
- 15) de Propris R., et al., 1998, ApJ 503, L45
- 16) Goerdt T., et al., 2010, MNRAS 407, 613
- 17) Geach J., et al., 2009, ApJ 700, 1
- 18) Mori M., Umemura M., 2006, Nature 440, 644

Massive Galaxies in the SSA22 protocluster at $z=3.09$

Yuka K. UCHIMOTO, Toru YAMADA

Astronomical Institute, Tohoku University, Aoba, Aramaki, Sendai 980-8578, Japan

Abstract: We present the results of wide-field deep near-infrared imaging of the $z=3.1$ protocluster region in the SSA22 field taken by Subaru/MOIRCS. The observed area is characterized by the number excess of Lyman alpha emitters and Lyman alpha blobs. Based on the K -selected sample, we report the stellar mass distribution in the protocluster.