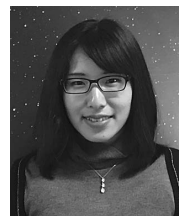


# すばる望遠鏡で探る銀河の星形成最盛期の Ly $\alpha$ 輝線銀河



日下部 晴香

〈ジュネーブ大学(ジュネーブ天文台) 51 chemin de Pégase, CH-1290 Versoix Suisse〉

e-mail: haruka.kusakabe@unige.ch

昔の宇宙の若くて軽い銀河は進化段階の途中にあると考えられ、その星形成活動は、銀河進化を調べる上で鍵となる。Ly $\alpha$ 輝線銀河はそのような若くて軽い銀河と考えられていたが、その暗さゆえに星形成活動の様子は明らかにされていなかった。本稿では、宇宙の歴史の中で銀河の星形成が最も活発な約100億年前の時代に着目し、すばる望遠鏡の得意とする広視野深探査で検出したLy $\alpha$ 輝線銀河の星形成活動を、2つの指標をもとにして調べた研究について紹介する。星質量に対する星形成の活発さを調べると、Ly $\alpha$ 輝線銀河のそれは同じ時代の大多数の銀河と同程度であることが明らかになった。その一方で、ダークマターハローの質量に対する星質量の比については、Ly $\alpha$ 輝線銀河は大多数の銀河から予想されるものよりも高い値をもつことがわかった。これらの結果は、Ly $\alpha$ 輝線銀河が100億年前は穏やかな星形成をしているものの、それよりも過去には効率よく星を形成していたことを示唆している。また、得られたダークマターハローの質量から、これらのLy $\alpha$ 輝線銀河は、現在の宇宙では大マゼラン銀河程度の質量の銀河へと進化すると予想される。

## 1. はじめに

宇宙の約140億年の歴史において、銀河という天体は宇宙の基本的な構成要素の1つである(図1参照)。輝く星々によって彩られたその美しい姿は、暗黒物質の塊(dark matter halo, ダークマターハロー)の中に集まった星、ガス、塵によって形作られている。銀河は長い年月をかけてガスから星を生み出し、他の銀河と衝突合体をし、現在の宇宙でみられるような美しい姿へと成長をとげていく。このような銀河形成・進化の仕組みや歴史を明らかにするには、現在の宇宙の成長した銀河を調べるのみならず、過去の宇宙の若くて軽い銀河の研究が欠かせない。とくに、昔の宇宙の若い銀河たちは、どのように成長をしてきたのか? 穏やかに星の質量を獲得していったの

か、激しい星形成で急激な成長をとげたのか? このような問いに答えるべく、銀河の星形成活動の活発さを調べることで、銀河の進化の足跡を時代ごとに結びつけることができる。長い宇宙の歴史の中でも、今からおよそ100億年ほど前は、銀河の星形成活動が最も活発なコズミックヌーン(cosmic noon)と呼ばれる時期であり<sup>1)</sup>、銀河進化において重要な時代である。さらに、この時代は多波長の観測データが豊富にあることから、星形成銀河の諸性質を調べたり、星形成銀河の成長の仕組みを調べるのに最適な時代でもある。本稿では、約100億年前の宇宙の若くて軽い銀河の星形成活動について、すばる望遠鏡のデータを最大限に活かして調べた我々の研究について紹介したい。

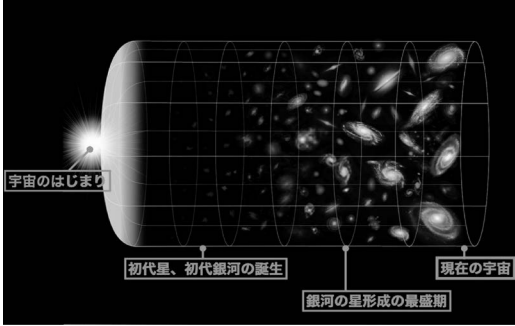


図1 宇宙の140億年の歴史と銀河の進化。昔の宇宙(図の左側)で生まれた銀河は、星形成や銀河同士の衝突合体を通して成長し、現代の宇宙(図の右側)でみられるような多様な姿へと進化する(東京大学天文学教室嶋作研究室の研究紹介より改変)。

## 2. 銀河の星形成活動

星形成は銀河の成長を担う重要な物理機構である。星形成活動では、銀河の星の質量(星質量)、1年あたりに形成する星の質量(星形成率)、ダークマターハローの質量という3つの物理量が重要となる(図2(a)参照)。銀河の星形成活動は、これらを用いた以下の2つの指標を用いて評価することができる。

### 2.1 星形成モード

現在の宇宙から過去の宇宙まで、星形成銀河の星質量と星形成率の間に正の相関があることが広く知られている。この相関は、星形成主系列(star formation main sequence)と呼ばれ、多くの星形成銀河はこの相関関係の周囲に分布し、その分散は非常に小さい<sup>2)</sup>。そのため、図2(b)のような星質量と星形成率のプロットを用いることで、銀河の星形成の活発さを、普通の星形成モード(星形成主系列にのっているもの)と爆発的な星形成モード(星形成主系列よりも上側に分布しているもの)<sup>3)</sup>に分類することができる。

### 2.2 ダークマターハローの質量に対する星質量の比 (SHMR)

銀河はダークマターハローに包み込まれてお

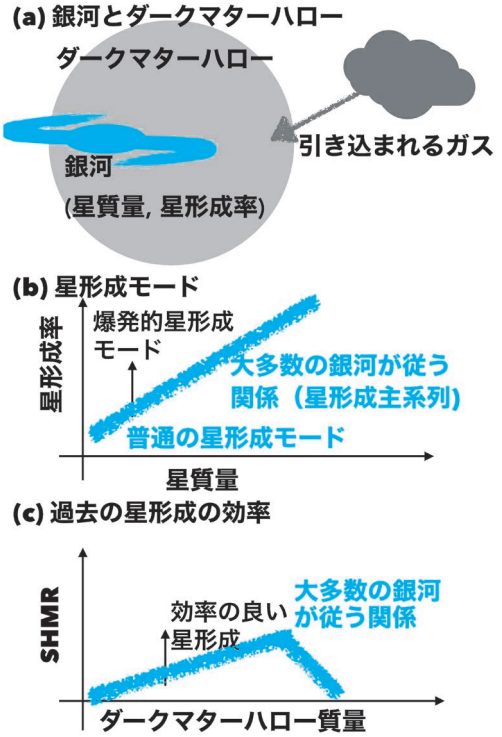


図2 (a) 銀河とダークマターハローのイメージ図, (b) 星形成モードの診断図, (c) 過去の星形成の効率の診断図。

り、ダークマターやガスはダークマターハローに重力で引き込まれる。ダークマターハローの質量はこれまでに降り積もったダークマターの総和である。星の材料となるガスも、ダークマターに対しておおよそ一定の割合で銀河に降り積もり、星質量はこれまでにガスから形成された星の質量の総和と考えられる。そのため、図2(c)の縦軸にあたるダークマターハローの質量に対する星質量の比(stellar to halo mass ratio, 以下SHMR)は、銀河の観測時点までの星形成の効率と解釈できる。これまでの明るい銀河の観測から、銀河の星質量とダークマターハローの質量の間には、図2(c)に示したような関係があることがわかっている<sup>4)</sup>。図の左のダークマターハローの質量が軽い側では、星形成に伴う超新星爆発がガスを暖めて吹き飛ばす星形成の負のフィードバック(nega-

tive feedback) を引き起こし、星形成を抑制していると考えられている。一方、図の右のダークマターハローの質量が重い側では、活動銀河核がガスを暖めて吹き飛ばして星形成を抑制している(負のフィードバック)と考えられている。大多数の星形成銀河はこの関係の周囲に分布するので、対象とする銀河をこの関係と比較することで、過去の星形成の効率がよかったかどうかを判断することができる。

### 3. 過去の宇宙の若くて軽い銀河: Ly $\alpha$ 輝線銀河

#### 3.1 Ly $\alpha$ 輝線銀河とは

過去の宇宙で最もよく発見されてきた若くて軽い銀河種族といえば、Ly $\alpha$  (ライマンアルファ)輝線銀河 (Ly $\alpha$  emitters) があげられる<sup>5)</sup>。この銀河種族名は、銀河を検出するときにLy $\alpha$ 輝線が用いられたという非常に単純なことに由来する。他の銀河種族についてもあてはまることだが、物理的な性質や測定量を直接反映した銀河種族の分類ではないことは頭の片隅に置いておく必要がある。

このLy $\alpha$ 輝線 (静止系波長1,216 Å) は、若くて重い星からの紫外線放射によって電離したガスから放射される。減光を受けなければ星形成銀河の輝線の中で最も明るい輝線であり、赤方偏移の大きな過去の宇宙でも地上望遠鏡で観測ができる。そのため、過去の宇宙の銀河探査を効率よく行うのに便利な輝線としてこれまで多くの観測が行われてきた<sup>6),7)</sup>。また、Ly $\alpha$ 輝線は中性水素ガスにより共鳴散乱を受けるといった性質をもち、中性水素ガスや塵の多い銀河では減光の影響を強く受けてLy $\alpha$ 輝線はみられなくなる。そのため、Ly $\alpha$ 輝線によって検出される銀河は、塵やガスが比較的少ないであろう若くて軽い天体が多い傾向がある。しかし、この複雑な輻射輸送の機構と軽いゆえの暗さから、Ly $\alpha$ 輝線で検出された銀河の素性を理解するのは非常に難しい。

#### 3.2 星形成活動を調べる際の広視野深探査の強み

これまでの研究で、Ly $\alpha$ 輝線銀河は今までよく観測されてきた同時代の明るい (すなわち重い) 銀河種族と比べると、若く、軽く、塵や重元素量が少ない傾向があることが明らかになってきた<sup>8),9)</sup>。しかし、Ly $\alpha$ 輝線銀河は、軽いものの大多数の星形成銀河と同様な活発さ (活動性) をもつ星形成銀河なのかどうかは議論が分かれている<sup>10)</sup>。Ly $\alpha$ 輝線銀河の星形成活動を調べるためには、星質量、星形成率、ダークマターハロー質量を同じサンプルについて正確に測るの必要があり、これが非常に難しいからである。

図2(b) に示した1つ目の指標である星形成モードの診断では、銀河の星形成率と星質量を正確に測ることが重要である。銀河の中で生まれたばかりの若くて重い星は紫外線放射を出す。この放射の一部は銀河内の塵に吸収され、塵から赤外線として再放射される。したがって、星形成率を正確に測るためには、静止系紫外線と赤外線の両方の観測データが必要となる。しかし残念ながら、約100億年前の若くて軽い銀河からの塵の放射は暗く、その観測は容易ではない。そのため過去の研究では、赤外線のデータを使わずに、塵の減光曲線 (attenuation curve) を仮定して、紫外線データから星形成率を推定していた<sup>10)</sup>。しかし、この減光曲線が適切かどうか検証できていないため、星形成率を一桁以上見誤る可能性もあった。この状況を打開するには、非常に深い赤外線データのある領域に、多くの銀河からなるサンプルを構築し、スタッキング解析 (stacking analysis) を行う必要がある。図3に示すように、スタッキング解析では画像のピクセルごとにサンプルの信号の中央値をとる。スタック後の画像ではノイズの信号は打ち消しあって低減し、天体からの信号は代表的な値と解釈ができる。データの質がサンプル数の平方根に比例して改善するので、暗い天体を検出することができる。つまり、多くのLy $\alpha$ 輝線銀河の赤外線画像をスタックすること

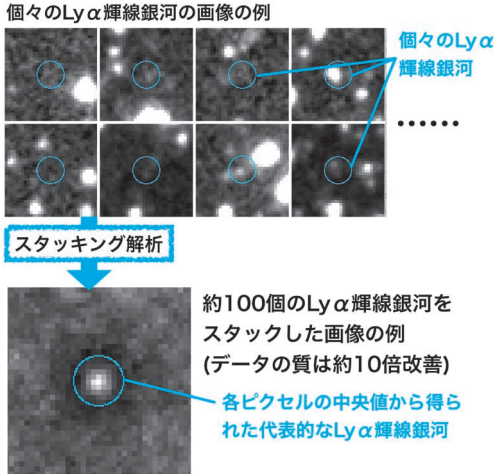
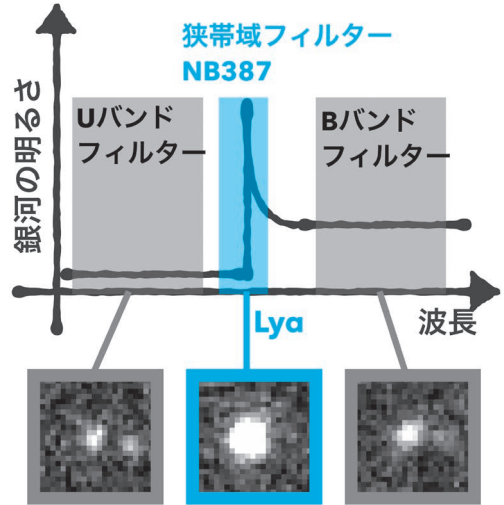


図3 約100天体のLy $\alpha$ 輝線銀河を用いたスタッキング解析の例。画像は星質量を求める際に重要なスピッツァー望遠鏡のIRAC 3.6  $\mu$ mのもの。

でサンプルの平均的な赤外線のもろさを求め、星形成率を精度よく求めることが可能となる。さらに、この天体数の大きなサンプルのスタッキングは、軽くて暗い銀河の星質量を精度よく求める際にも役に立つ (図3参照)。

2つ目の指標である SHMR (図2(c)) については、ダークマターハローの質量の正確な推定がとても難しい。過去の宇宙のダークマターハローの質量は、銀河の空間的な群れ具合から統計的に求めるのが一般的である (clustering analysis, クラスタリング解析)。重いダークマターハローほどより強く群れているため、撮像データ上の銀河の分布もお互いに群れているものとなる。クラスタリング解析で対象とする銀河種族の分布を得るには、広視野の撮像データが必要となる。しかし、これまでの研究では、探査領域が不十分で不定性が大きかった<sup>11)</sup>。

これらのことから、星質量、星形成率、ダークマターハロー質量を同一のLy $\alpha$ 輝線銀河サンプルについて求めるには、広い領域に大きなサンプルを構築することが重要である。これは視野の広いカメラのついたすばる望遠鏡が得意とすることである。



Ly $\alpha$ 輝線銀河の各フィルターの画像

図4 狭帯域フィルターを用いたLy $\alpha$ 輝線銀河の観測のイメージ図。上段: Ly $\alpha$ 輝線銀河の明るさと波長の関係 (スペクトル) と狭帯域フィルター (NB387) と広帯域のフィルター (UバンドとBバンド) の観測波長範囲。下段: 実際の各フィルターのLy $\alpha$ 輝線銀河の画像。赤方偏移が  $2.18 \pm 0.04$  のLy $\alpha$ 輝線銀河は、広帯域のフィルターの画像よりもLy $\alpha$ 輝線が入っている狭帯域フィルターの画像に明るく写る。

#### 4. すばる望遠鏡による Ly $\alpha$ 輝線銀河の観測

望遠鏡の撮像観測によって銀河の輝線を捉えるときに有用なのが狭帯域 (narrow band) フィルターという特殊なフィルターである。図4のように、狭帯域フィルターは透過波長幅が狭く、その透過波長範囲内に輝線が入っている場合のみその撮像画像が明るくなる。このときに、透過波長幅の広い広帯域フィルターよりも狭帯域フィルターの撮像画像が明るくなるので、特定の輝線の強い銀河を効率よく検出することが可能となる。また、この手法を用いれば、測光データだけから赤方偏移が精度よく決まるという利点もある。

本研究では、すばる望遠鏡の視野の広いカメラであるシュプリームカム (Suprime-Cam)<sup>12)</sup> と狭

帯域フィルター NB387を用いて取得したデータをもとに<sup>9)</sup>、約100億年前(赤方偏移が2.18±0.04)の宇宙のLy $\alpha$ 輝線を捉えた。図4に示したように、Ly $\alpha$ 輝線の入るNB387よりも波長の短いUバンドと波長の長いBバンドのデータを用いて、それぞれの明るさを計測する。明るいLy $\alpha$ 輝線の選定の基準は、銀河のスペクトルのモデルを用いて、観測の不定性も考慮して決める。こうして選ばれた銀河のサンプルの中には、異なる時代の異なる輝線をもつ銀河や活動銀河核が混ざっているため、銀河の分光カタログやX線や紫外線、電波のデータを用いて、対象外の天体をのぞいていく。

このような操作を4つの独立した領域であるSXDS領域、COSMOS領域、GOODS-S領域、HDFN領域について行った。これらの領域には、世界中の望遠鏡の様々な波長の深い探索データがある。これらのうち最終的に特にデータの質のよい約1平方度を用いて、合計1,248個のLy $\alpha$ 輝線銀河を今回のサンプルとした。これは同時代の過去の研究のサンプルと比べて<sup>11)</sup>、サンプル数は5倍、領域サイズは3倍に相当する。また、このサンプルのうち213個は、全天で最も深い赤外線観測のデータがある領域にあり、塵の放射をこれまでの研究よりも10倍以上精度よく測ることができる。このような広視野深探索による大きなサンプルの構築はすばる望遠鏡の強みを最大限に活かしており、既に引退したシュプリームカムの後継機であり、視野が8倍広いハイパーシュプリームカム(Hyper Suprime-Cam)が現在は広視野探索で活躍している<sup>13)</sup>。

## 5. Ly $\alpha$ 輝線銀河の星形成活動

本研究の概要は以下の通りである。まずはじめに、Ly $\alpha$ 輝線銀河の赤外線画像をスタックして(3.2節参照)塵からの赤外線放射を測り、塵の減光曲線を調べる。その減光曲線を用いて、静止系紫外線から近赤外線の観測データとモデルスペク

トルの比較を行うことで、Ly $\alpha$ 輝線銀河の星形成率と星質量が正確に求まる<sup>14)</sup>、次に、Ly $\alpha$ 輝線銀河のダークマターハロー質量をクラスタリング解析(3.2節参照)から推定する<sup>15)</sup>。最後に星形成率と星質量から星形成モードを、星質量とダークマターハロー質量からそれらの比を求め、過去の星形成の効率を調べる。

### 5.1 星形成率と星質量

約100億年前の銀河の塵からの赤外線放射は、スピッツァー望遠鏡(Spitzer Space Telescope)のMIPS 24  $\mu\text{m}$ 、ハーシェル望遠鏡(Herschel Space Observatory)のPACS 70  $\mu\text{m}$ 、100  $\mu\text{m}$ 、160  $\mu\text{m}$ で観測することができる。Ly $\alpha$ 輝線銀河のサンプルのうち213個は、全天で最も深いMIPSとPACSの公開データのある領域にある。この213天体についてこれらの撮像データをスタックし、データの質を10倍以上あげた。完成したスタック画像を確認すると……なんと非検出であった。これはLy $\alpha$ 輝線銀河の塵からの放射はスタック画像にも写らないほど極めて暗いということである。実際、この結果から得られた塵の赤外線放射の $3\sigma$ の上限値は、およそ $10^{10}$ 太陽光度で、過去に得られていた制限<sup>16)</sup>を一桁も改善することができた。余談ではあるが、この解析が初めての研究だった筆者は、非検出という結果に当初はショックを受け、自分を励ますという名目でケーキを沢山食べざるを得なかった。お目当の天体を検出できるほうが嬉しいものの、検出できなくても成果は出せるということ、またそのようなバックアップのある研究計画を立てる方がよい、ということ学んだ印象深い経験であった。

本題に戻るが、この赤外線放射と紫外線のスペクトルの傾きの関係からLy $\alpha$ 輝線銀河に合う塵の減光曲線は、一般的に用いられているカルゼッティの減光曲線(Calzetti law、またはlocal starburst attenuation curve)<sup>17)</sup>ではなく、小マゼラン銀河の減光曲線<sup>18)</sup>であることがわかった。次に、1,248個のLy $\alpha$ 輝線銀河を観測領域ごとに分け、

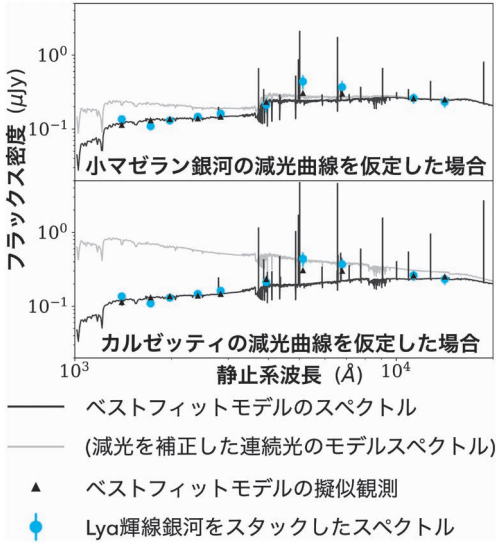


図5 Ly $\alpha$ 輝線銀河のスペクトルの例 (HDFN領域). スタックしたLy $\alpha$ 輝線銀河の測光データは丸で表されており, それを銀河のスペクトルモデルでフィットした. ベストフィットモデルは濃い実線 (減光を補正したものは薄い実線) で, そのモデルの擬似測光値は三角で表している. Ly $\alpha$ 輝線のフラックス密度は複雑な輻射輸送の影響を受けるため, 銀河のスペクトルモデルをフィットするにはLy $\alpha$ 輝線を含めないことが一般的である.

静止系紫外線から近赤外線の画像を各波長でスタックした. その測光データを, 図5上に示すように小マゼラン銀河の減光曲線を用いて, 銀河のモデルスペクトルでフィットをした. その結果, 4領域で得られた値の平均をとると, 星形成率は  $3.4 \pm 0.4$  太陽質量/年, 星質量は  $(10.2 \pm 1.8) \times 10^8$  太陽質量と求まった. この星質量は今までよく観測されてきた同時代の明るい (すなわち重い) 銀河の1%程度で, 実際にLy $\alpha$ 輝線銀河が非常に軽い銀河種族であることが確認された. また, 仮に, ここでカルゼッティの減光曲線を仮定すると星形成率を4倍程度過大評価することもわかった (図5下). 大きなサンプルについて塵からの赤外線放射のデータのスタックを実現したことで初めてLy $\alpha$ 輝線銀河の星形成率を正確に測定

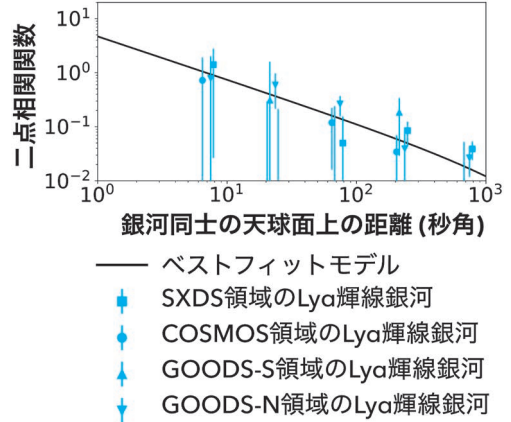


図6 クラスタリング強度の図. 横軸は天球面上での銀河同士の距離 (秒角), 縦軸はその距離での群れ具合の指数である二点相関関数を表す. それぞれの領域のLy $\alpha$ 輝線銀河の測定結果 (SXDS領域, COSMOS領域, GOODS-S領域, GOODS-N領域) は異なるシンボル (四角, 丸, 三角, 逆三角) で示してある. これらの測定結果のベストフィットのモデルは黒実線で表している.

することができた.

### 5.2 ダークマターハローの質量

銀河を包み込むダークマターハローの質量は, 銀河の空間的な群れ具合をクラスタリング解析で評価することによって得られる. 図6に群れ具合の指標であるクラスタリング強度 (angular correlation function, 二点相関関数) を示した. もし銀河がランダムに分布していて群れていない場合, この縦軸はゼロになる. 今回のLy $\alpha$ 輝線銀河は, 縦軸の値が小さく, 非常に弱く群れていてダークマターハローの質量は平均的に軽いことがわかる. ダークマターハローの質量をクラスタリング強度から計算すると,  $4.0_{-2.9}^{+5.1} \times 10^{10}$  太陽質量であった. これは, これまでの研究で本研究の1/3の探査領域から求めた  $3.2_{-3.2}^{+4.7} \times 10^{11}$  太陽質量<sup>11)</sup> よりも軽いものである. この違いは, 探査領域が小さいことによる系統的な測定誤差が後者の不定性に含まれていないからだと説明できる. このような推定値の差は, SHMRをもとに過去

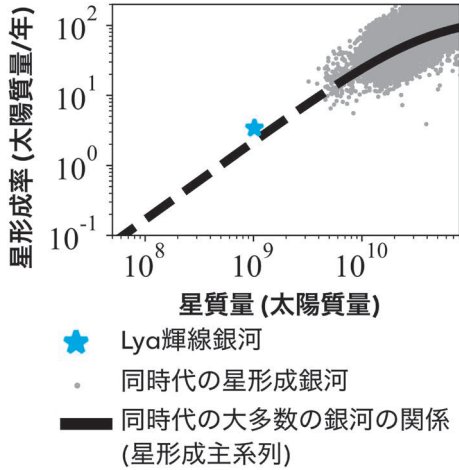


図7 星形成モードの診断図 (星形成率と星質量). 約100億年前の宇宙の大多数の銀河の関係 (星形成主系列)を実線<sup>19)</sup>, その外挿を破線, 実際のその時代の星形成銀河<sup>3)</sup>をドット, 本研究のスタックしたLy $\alpha$ 輝線銀河を星印で表す.

の星形成の効率を解釈したり, これらのLy $\alpha$ 輝線銀河が現在の宇宙ではどのような銀河に進化をするのか調べる際に, 大きな影響を及ぼす. 本研究では, シュプリームカムの広域探査データのおかげで, 系統的な測定誤差の影響を小さく抑えることができた.

### 5.3 星形成モード

上で求めた星質量と星形成率を用いて, 図7の診断図でLy $\alpha$ 輝線銀河の平均的な星形成モードを調べた. 図の黒線が同時代の大多数の銀河の星形成率と星質量の関係<sup>19)</sup>で, 星印で表した平均的なLy $\alpha$ 輝線銀河は, この関係の外挿上に分布することがわかった. これは, 約100億年前の宇宙のLy $\alpha$ 輝線銀河が平均的には普通の星形成モードをもっていたことを意味する.

### 5.4 ダークマターハローの質量に対する星質量の比 (SHMR)

先に述べたように, ダークマターも星の材料となるガスも一定の割合で時間とともに銀河に降り積もり, ガスから星が生まれる. 星質量はこれまでに生まれた星の量を表し, ダークマターハロー

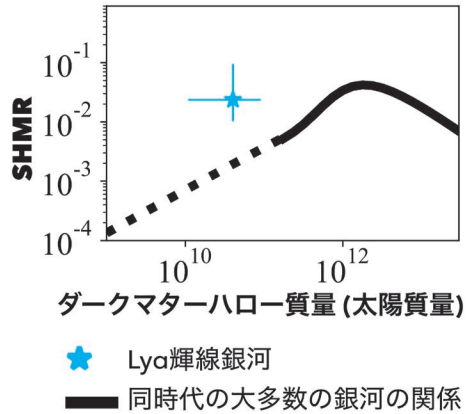


図8 過去の星形成の効率の診断図 (SHMRとダークマターハローの質量の関係). 約100億年前の宇宙の大多数の銀河の関係を実線<sup>4)</sup>, その外挿を点線, 本研究のスタックしたLy $\alpha$ 輝線銀河を星印で表す.

質量はこれまでに降り積もったダークマターの量を表す. これらの比は銀河の過去の星形成の効率と解釈できる. 図8は, 横軸がダークマターハロー質量, 縦軸がSHMRを表している. 星印で表したLy $\alpha$ 輝線銀河の質量比は $0.02^{+0.07}_{-0.01}$ で, 黒線で表した同じ時代の似たようなダークマターハロー質量をもつ銀河の平均的な関係<sup>4)</sup>と比べると高いところに位置している. つまり, Ly $\alpha$ 輝線銀河は同程度のダークマターハロー質量をもつ他の銀河よりも効率よくガスを星へと変換した銀河種族であると予想される.

## 6. Ly $\alpha$ 輝線銀河の正体

今回の研究成果から, 約100億年前の宇宙のLy $\alpha$ 輝線銀河は, それよりも過去の宇宙で大多数の銀河よりも効率よくガスを星へと変換して星質量を獲得したのち, 観測時点の約100億年前では普通の星形成モードを持っていたと推定できる. では, 銀河が実際にこのような進化をすることは可能なのか, どのような物理的なメカニズムが必要なのか. これらを考察するために, 宇宙論的な銀河形成・進化の理論モデル<sup>20)</sup>と比較を行った.

この理論モデルでは、Ly $\alpha$ 輝線銀河に比較的近いダークマターハローの質量をもつ銀河も含めて、銀河の性質や星形成メカニズムの違いごとに星形成モードを調べている。このモデルによると、平均よりやや高い星形成効率が長期間続くような銀河であれば、約100億年前の宇宙で高いSHMRと普通程度の星形成モードをもつことができる。仮に星形成の効率が高すぎる場合、ガスを一気に使い切ってしまう、短期間に爆発的な星形成モードをもったのちに星形成が止まってしまう。星形成を保てる程度の高い効率であれば、星形成をしながら星質量を獲得していくので、星質量と星形成率の関係を保ちつつも、ダークマターハローの質量の割に高い星質量をもつことができる。例えば、モデル銀河の中ではダークマターハローの回転 (spin, スピン) が弱い銀河や、超新星爆発による星形成への負のフィードバックが比較的弱い銀河が相当する。これらの理論モデルからの示唆が正しいかどうかまでは本研究では検証することはできない。しかし、観測から推定されたLy $\alpha$ 輝線銀河の星形成活動を理論モデルの中の一部の銀河が再現できると確認できたことは大きい。

理論モデルとの比較でこのような星形成活動の物理起源の候補をあげることはできたが、次に疑問として浮かぶのは、このような星形成活動をしていた銀河からLy $\alpha$ 輝線を観測できることは妥当なのかどうか、ということである。高いSHMRをもつということは、銀河に降り積もったガスを効率よく星に変換したため、残っているガスがダークマターハロー質量の割には少ないと考えられる。3.1節で説明したように、Ly $\alpha$ 輝線は中性水素ガスによって共鳴散乱し塵による減光を受ける頻度が高くなってしまうために、もともとの明るさよりも暗く観測される。このようなガスが比較的少ない銀河では、共鳴散乱が起りづらく、結果としてLy $\alpha$ 輝線があまり暗くならず済むと考え、Ly $\alpha$ 輝線銀河のSHMRが高いことにも頷ける。

ここまで、約100億年前のLy $\alpha$ 輝線銀河の過去と観測時点での星形成活動について述べたが、今回の結果をもとにこのLy $\alpha$ 輝線銀河の未来についても考察することができる。銀河を包み込むダークマターハロー質量の進化は、拡張プレス・シェヒターモデル (extended Press-Schechter)<sup>21), 22)</sup> というよく確立された理論モデルから調べることができる。今回得られた $4.0^{+5.1}_{-2.9} \times 10^{10}$ 太陽質量のダークマターハローは、現在の宇宙では約 $10^{11}$ 太陽質量に成長する。これは、私たちの住んでいる天の川銀河の衛星銀河である大マゼラン銀河という小さい銀河のダークマターハロー質量に近い。これまでの研究<sup>11)</sup> では、Ly $\alpha$ 輝線銀河は現在の宇宙では天の川銀河のようになるという説があったが、実際はもっと小さな銀河に成長する可能性のほうが高いということである。

## 7. まとめと今後の展望

本稿では、筆者たちがこれまでに行ってきた約100億年前の宇宙の、若くて軽い銀河であるLy $\alpha$ 輝線銀河の星形成活動の研究について紹介をした。今回星形成活動の指標として用いたのは、星質量と星形成率から求まる観測時点での星形成モードと、それよりも過去の星形成の効率を意味するSHMRの2つである。これらを調べるには天体数の大きなサンプルが不可欠であり、広視野深探査を得意とするすばる望遠鏡のデータを用いて約1平方度の領域に1,248個のLy $\alpha$ 輝線銀河のサンプルを構築した。Ly $\alpha$ 輝線銀河の星の質量に対する星形成の活発さは、同じ時代の大多数の銀河と同程度であることが明らかになった。その一方で、SHMRについては、大多数の銀河から予想されるものよりも高い値となることがわかった。これらの結果は、Ly $\alpha$ 輝線銀河が、観測時点では穏やかな星形成をしているものの、過去に効率よく星を形成していたことを示唆している。さらに、今回の研究から、この時代のLy $\alpha$ 輝線銀河は現在の宇宙では大マゼラン銀河程度の質量の銀



河に進化すると予想することもできた。

現在のすばる望遠鏡では、シュプリームカムの後継機であるハイパーシュプリームカムが、約1.7平方度もある視野を活かして広視野探査を推し進めている<sup>13)</sup>。近い将来、約100億年前の宇宙のLy $\alpha$ 輝線銀河のより広い領域でのサンプルを用いて本稿の研究を発展させ、より精度のよい議論ができる予定である。

## 謝 辞

本稿の内容は、筆者らがこれまでに投稿した論文<sup>14), 15)</sup>および筆者の博士論文<sup>23)</sup>に基づいています。研究を進めるにあたり指導をいただいた嶋作一大氏、多くの有益なコメントをいただいた大内正巳氏、初版のカタログをご提供いただきその後のサンプルの改訂でも多大なご協力をいただいた中島王彦氏をはじめ、議論をしていただいた共同研究者の方々に深く感謝いたします。大学院生活の5年間、和気藹々とした雰囲気の中で研究に集中した学生生活を送ることができたのは、研究熱心で愉快的な東京大学天文学教室の皆さん、いつもサポートをしてくださった事務の皆さんのおかげです。大変感謝しております。本研究の成果はすばる望遠鏡なくしては得られませんでした。この場をお借りしてすばる望遠鏡、マウナケア山、ハワイの文化と住民の方々に敬意を表すとともに、すばる望遠鏡が今後も末長く活躍することを切に願います。最後に、本稿を執筆する機会を与えてくださった小宮山裕氏に感謝申し上げます。なお、本稿で紹介した研究の一部は日本学術振興会特別研究員(DC1)として行ったものです。

## 参考文献

- 1) Madau, P., & Dickinson, M., 2014, ARA&A, 52, 415
- 2) Elbaz, D., et al., 2007, A&A, 468, 33
- 3) Rodighiero, G., et al., 2011, ApJ, 739, L40
- 4) Behroozi, P. S., et al., 2013, ApJ, 770, 57
- 5) Malhotra, S., & Rhoads, J. E., 2002, ApJ, 565, L71
- 6) Blanc, G. A., et al., 2011, ApJ, 736, 31
- 7) Ouchi, M., et al., 2018, PASJ, 70, S13

- 8) Ono, Y., et al., 2010, ApJ, 724, 1524
- 9) Nakajima, K., et al., 2012, ApJ, 745, 12
- 10) Hagen, A., et al., 2014, ApJ, 786, 59
- 11) Guaita, L., et al., 2010, ApJ, 714, 255
- 12) Miyazaki, S., et al., 2018, PASJ, 70, S1
- 13) Aihara, H., et al., 2018, PASJ, 70, S4
- 14) Kusakabe, H., et al., 2015, ApJ, 800, L29
- 15) Kusakabe, H., et al., 2018, PASJ, 70, 1
- 16) Wardlow, J. L., et al., 2014, ApJ, 787, 9
- 17) Calzetti, D., et al., 2000, ApJ, 533, 682
- 18) Gordon, K. D., et al., 2003, ApJ, 594, 279
- 19) Tomczak, A. R., et al., 2016, ApJ, 817, 118
- 20) Dutton, A. A., et al., 2010, MNRAS, 405, 1690
- 21) Press, W. H., & Schechter, P., 1974, ApJ, 187, 425
- 22) Bond, J. R., et al., 1991, ApJ, 379, 440
- 23) 日下部晴香, 2019, 博士論文(東京大学)

## The Nature of Ly $\alpha$ Emitters at Cosmic Noon Probed by the Subaru Telescope

Haruka KUSAKABE

University of Geneva, 51 chemin de Pégase, CH-1290 Versoix Suisse

Abstract: Low-mass galaxies in the past Universe play a key role in understanding galaxy formation and evolution. One of the most representative high- $z$  low-mass galaxies is Ly $\alpha$  emitters. However, the star forming activity of Ly $\alpha$  emitters has not been revealed due to their faintness. In this article, we introduce the star formation mode and stellar to halo mass ratio (SHMR) of Ly $\alpha$  emitters at the cosmic noon, about 10 billion years ago, which is the most active period of star formation in the Universe. We use the sample of Ly $\alpha$  emitters obtained by the Subaru Telescope and find that the Ly $\alpha$  emitters have a moderate star formation mode, lying on a lower-mass extrapolation of the average relation between stellar mass and star formation rate of star forming galaxies. On the other hand, their SHMR is found to be higher than a lower-mass extrapolation of the average relation between SHMR and dark matter halo mass. These results suggest that the Ly $\alpha$  emitters have formed stars more efficiently than average galaxies in the past but form stars moderately similar to average galaxies at the observed epoch. Moreover, the derived dark matter halo mass implies that Ly $\alpha$  emitters would evolve into galaxies whose mass is similar to that of the Large Magellanic Cloud in the present Universe.