

銀河の星形成史

—ライマンブレイク銀河の観測から—

岩 田 生

〈国立天文台光赤外研究部／ハワイ観測所 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: iwata@optik.mtk.nao.ac.jp

太 田 耕 司

〈京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉

e-mail: ohta@kusastro.kyoto-u.ac.jp

ライマンブレイク法は遠方宇宙の星形成銀河を系統的に探査する強力な手段である。これまで主に赤方偏移 3 (宇宙の始まりから約 21 億年) 付近の銀河が精力的に観測されてきたが、我々はすばる望遠鏡を用いてさらに遠方、赤方偏移 5 (宇宙の始まりから約 12 億年) の銀河の系統的探査に成功した。本稿では我々の観測結果を中心に、これまでに行われてきた観測について概観し、これらの結果から少しずつ見えてきた、銀河の進化過程や宇宙における星形成の歴史について述べる。

1. はじめに

現在の宇宙に見られる、多様な形態、大きさ、質量をもった銀河たち。これらはいつどのように形成され、どのような歴史をたどって現在見られるような姿に至ったのだろうか。銀河天文学が答えるべき問いかけの中で、この問いは最も基本的かつ根源的なものであろう。天文学では、遠方宇宙の観測によって、過去の時代の銀河を「直接」観測することができる。さまざまな距離 (= 時代) の銀河の観測を通じて得られる情報を組み合わせ、銀河の進化過程に迫っていこう、というのが筆者らの進めている遠方銀河探査の主たる目標である。

銀河の進化過程を理解するうえで、最も大切な

情報の一つに「星形成量」がある。ガスから星への変換すなわち星形成が、いつ頃、どれくらいの割合で行われてきたのか、という個々の銀河の星形成史、そして現在に至る各時代での宇宙全体としての星形成量の変遷、すなわち宇宙の星形成史を明らかにすることは、銀河の成長過程を理解するうえで欠かせない課題である。銀河は星やガスの集団であるという見方をすれば、この歴史が銀河の成長史そのものであると言ってもよいくらいであろう。

本稿では、ライマンブレイク法という手法を用いて検出される、遠方の星形成銀河の観測成果について紹介し、それらの銀河の姿を通して垣間見えてきた形成初期の銀河進化過程について述べたい^{*1}。

*1 本稿では特に記した場合を除き、AB 等級を使用する。宇宙論パラメータは $\Omega_M=0.3$, $\Omega_\Lambda=0.7$, $H_0=70$ km/s/Mpc を用いる。この場合、現在の宇宙年齢は約 135 億年となる。

2. ライマンブレイク銀河とは

赤方偏移 3 以上, すなわち宇宙年齢約 20 億年以下のいわば「宇宙の幼年時代」の銀河の系統的な探査が, 1990 年代後半から盛んに行われるようになってきた. 望遠鏡, 観測装置の技術的な進展と併せ, このような観測を可能にしたのが, 観測手法の洗練化であり, ライマンブレイク法はその代表的な手法である. 赤方偏移したライマンリミット (912 オングストローム (Å)) およびライマン α (1,216 Å) より短波長側の連続光は, 銀河間ガス等によって激しく吸収され, その結果スペクトル分布に不連続ができる. この不連続を, 広帯域フィルターによる多色撮像によって検出するという手法である. 図 1 に, 赤方偏移 5 に存在する星形成銀河を想定した例を示す. 図のスペクトルは星形成銀河のモデル紫外スペクトルが銀河間吸収等を受けた場合に予想される観測スペクトルである. 7,300 Å 付近に激しい不連続が見られるが, ここが赤方偏移してきたライマン α 線に対応しており, これより短波長側で大きな吸収を受けている. また, 5,500 Å より短波長側では天体からの放射強度はほぼゼロである. ここは, 赤方偏移したライマンリミットに相当する. これに, V, I, z' バンドフィルターの透過曲線を重ねて示した. このような銀河は, V バンドでは極めて暗く, I と z' バンドでは比較的明るく見えることが予測される. 実際にそのような銀河は存在し, スペクトルの下の図で, その実例を我々の観測データから示した. このような手法で検出された銀河を「ライマンブレイク銀河」と呼んでいる.

この方法で実際に宇宙初期の銀河の系統的な探査を開始したのがカルテクの Steidel らである. 彼らは, 赤方偏移 3 付近の銀河を選択的に選び出せるバンドの組合せ (U バンドで暗くなる天体を選ぶ) を用いて, 4~5 m 望遠鏡による撮像データからライマンブレイク銀河 (以下 LBG) の候補を選び出した^{1), 2)}. ケック望遠鏡などによってそれ

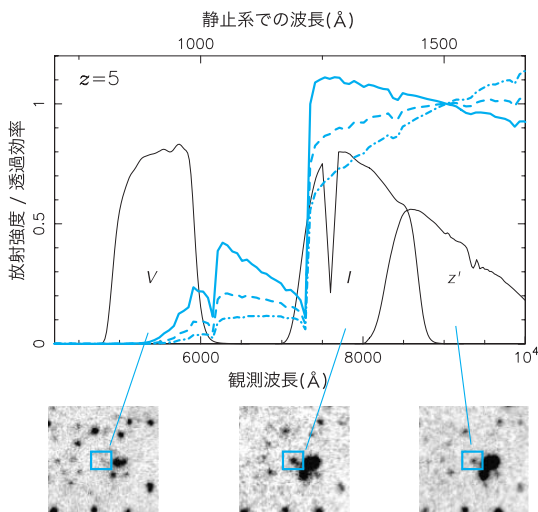


図 1 星の種族合成モデルを用いて計算した赤方偏移 5 に位置する星形成銀河のスペクトルと, V, I, z' バンドの透過曲線. 星形成銀河のスペクトルはダスト吸収のない場合 (青実線), ある場合 (青の破線, 一点破線) を示し, 静止系 1,500 Å で規格化した. 図下部には我々の探査で確認された赤方偏移 4.86 の銀河の各バンドでの姿を示した (中央の四角で囲まれた天体).

らの候補天体を分光すると, 確かに多くの場合赤方偏移 3 付近の銀河であった³⁾. これまでに彼らは 900 個以上の銀河を分光的に確認しており, ライマンブレイク法が高赤方偏移の銀河の探査を非常に効率的に進めることのできる方法であることを実証した⁴⁾.

3. 赤方偏移 3 のライマンブレイク銀河

赤方偏移 3 の時代 (宇宙年齢約 20 億年) の LBG については多くの探査が行われ, その性質がさまざまな角度から調べられてきた. これらの銀河における星形成に注目すると, 観測される可視域での明るさは静止系での紫外線の明るさであり, それはすなわち星形成活動で生まれた大質量星の量を反映していると考えられるので, 明るさから個々の銀河の星形成量を推定することができる. 明るい LBG では, 1 年当たり数十から 100 太

陽質量程度の星が生まれるという、たいへん活発な星形成活動が起こっていると考えられる。(もしこのままの調子で星を作っていけば、10億年もすれば我々の銀河位の立派な銀河に育つ勘定になるほどの量である。)さらに、静止系紫外線の光度関数(単位体積当たり、単位等級当たりが存在する銀河の個数)を積分することで、この時代の宇宙の単位体積当たりの星形成の密度を推定したところ、現在の宇宙での星形成密度の10倍程度となり、当時は現在よりもはるかに活発な星形成活動が宇宙全体で起こっていたことが明らかになった^{5)~7)}。

さらに、個々の銀河に対して比較的単純な星形成史を仮定し、さまざまな年齢、金属量、ダストによる吸収量をパラメーターとして、予想される銀河のスペクトル分布を星の種族合成モデルを用いて計算し、これらと可視から近赤外域の多バンドでの測光データとの比較が行われた。その結果、赤方偏移3付近のLBGの典型的な星質量は 10^{10} 太陽質量程度で、我々の銀河系のような現在の大型の銀河のおよそ1/10程度であること、ダスト吸収量はあまり大きくないこと、星形成開始からの経過時間が1,000万~1億年程度と比較的短いこと、などがわかった^{8)~10)}*2。また、輝線強度比から求めたガスの金属量は、太陽程度かそれ以下であることもわかってきている¹¹⁾。

これらのLBGは現在の銀河とどのような関係にあるのだろうか? LBGの形態は、ハッブル宇宙望遠鏡によって詳しく調べられている。多くはコンパクトで小さく、面輝度分布は楕円銀河のそれと似ているが¹²⁾、明るさとしては、現在の宇宙で見られる同じ大きさの楕円銀河に比べるとずっと明るい。このことから、現在の宇宙に見られる小さい楕円銀河や円盤銀河の中心に存在するバルジの先祖ではないかという見方がある。一方で、合体を繰り返してより大きな銀河へと成長してい

く途上の銀河であるという見方もある。最近では、LBGの天球上での分布の相関(群れ具合)が近傍宇宙の楕円銀河のそれと類似していることから、やがては銀河群や銀河団の中の銀河になるのではないかという議論もある¹³⁾。

4. より遠くの銀河を求めて —すばる望遠鏡での観測—

このような赤方偏移3付近のLBG探査の結果を受けて、より遠方、より宇宙の始まりに近い時代の銀河を見てみたいと考えるのは自然なことである。先述したように、赤方偏移3付近のLBGの星形成のタイムスケールは、数億年程度より短いものが多く、10億年以上の時間スケールの星形成を起こしていたと推定されるものは全体の2割程度と見積もられている。この結果から単純に考えると、赤方偏移5(赤方偏移3の約10億年前)にさかのぼると、LBGの数は2割程度に減少している可能性も考えられる。宇宙全体としての星形成密度は、宇宙の始まりに近づくにつれて減少していきだろうから、そういう傾向を見ることができるともかもしれない。

赤方偏移3を超える宇宙の探査は決して容易ではない。それは一つには、銀河までの距離が大きくなるため、本来の明るさがたとえ同じでも、見目の明るさはどんどん暗くなっていくせいである。このため同程度の深さの観測を行っても、単位立体角当たりに検出される銀河数の期待値は急激に減少する。さらに、赤方偏移が大きくなり、ライマンブレイクを検出するために用いる波長域が地球大気の大気夜光が卓越しS/Nが悪くなる領域にさしかかってくることも観測を困難にする。大集光力だけでなく、広視野探査という通常は相矛盾する能力が要求されるのである。しかし、すばる望遠鏡の登場によって、このような系統的探査が現実的なものになった。すばるは、8.2 m とい

*2 観測されているのは静止系の可視域までであるため、過去に形成された質量光度比の低い低質量星の寄与を過小評価しているおそれはある。

う大口径と、1回の撮像で約30分角×30分角もの視野を撮像することのできる広視野の主焦点カメラ (Suprime-Cam¹⁴) を搭載しているという、

ユニークな機能を併せ持つ。この組み合わせは、表面数密度の小さい、遠方のかすかな光を放つ銀河を探索するのにまさにうってつけである。我々

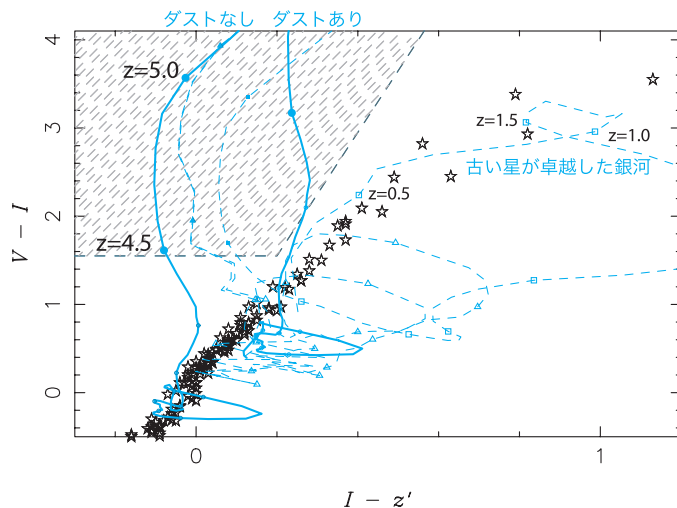


図2(a) $V-I, I-z'$ の二色図。星形成銀河のモデルの赤方偏移による色の变化 (青実線)、ダストによる吸収がない場合とある場合を示した。近傍の楕円銀河、渦巻き銀河のスペクトルから計算した色の变化 (青破線)、銀河系内の星の色 (☆) も併せて示す。赤方偏移5付近の銀河を選択するための基準を満たすのは破線領域。

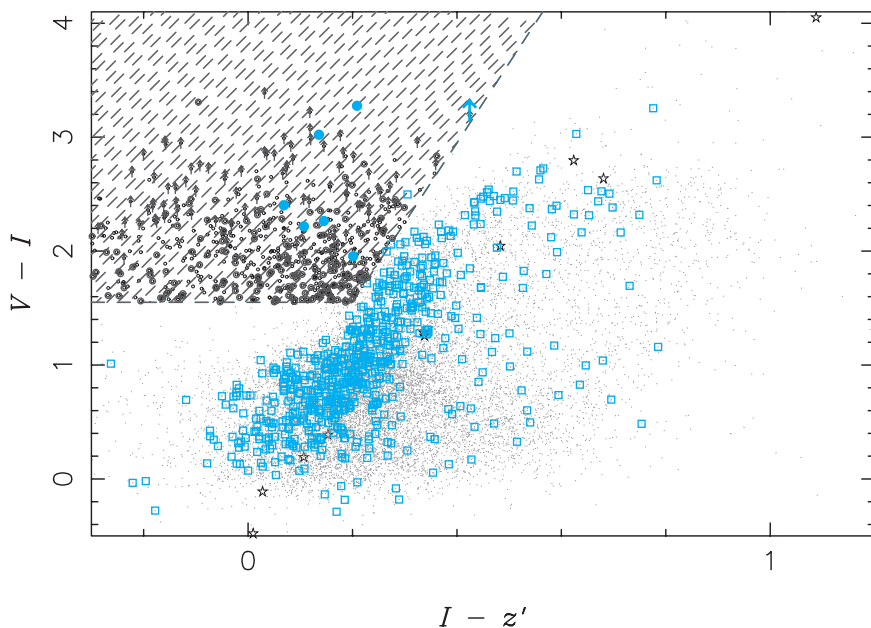


図2(b) 撮像データから検出された天体の二色図。Iバンドで24.5等より明るい天体 (黒い点)、ハッブルディープフィールド内の分光的に赤方偏移が4.5より小さいと知られている銀河の色 (青い□)、および LBG 候補 (破線領域内の○印と上向きの矢印)。矢印はVバンドで検出されていない天体。我々の分光観測で赤方偏移4.5以上と確認された LBG は青い●と↑で示してある。

のチームは、すばる望遠鏡の共同利用観測開始後間もない2001年2月に、赤方偏移5のLBG探査を開始した。赤方偏移5付近は、標準的なフィルターを用いた可視CCDによる三色撮像によってライマンブレイク法による探査ができる赤方偏移としては最も遠方になる。

観測した天域には、ハッブル宇宙望遠鏡による非常に深い可視撮像が行われたハッブルディープフィールド(以下HDF-N)¹⁵⁾が含まれている。HDF-Nの観測視野は約5平方分と非常に狭いが、深い撮像に基づく多数の銀河のカタログが作成されており、過去の精力的な分光観測によって900個以上の銀河の赤方偏移が測定されている(ただし、赤方偏移4を超えるものは17個に過ぎない)。これらのより低赤方偏移の銀河は、赤方偏移5の銀河候補を選定するうえで大いに役立つ。LBG候補を天体の色を使って選び出す手順を少し詳しく見てみよう。

図1で説明したように、 V で暗く、 I と z' で明るければ赤方偏移が5位と考えられるのであるが、実際に、 $V-I$ と $I-z'$ の二色図上で赤方偏移5付近の銀河がどこにくるか予想してみる。図2(a)に、星の種族合成モデルを用いて計算した星形成銀河のモデルスペクトルを用いて、これをいろいろな赤方偏移においた場合に予想される色の経路を何本かの線で示した。モデルのパラメーターのとり方にはあまりよらずに、赤方偏移が4.5から5.5付近までの銀河は、図の左上の部分にきて、赤方偏移が4.5以下の銀河(前景の銀河)とは区別できそうである。一方、古い星種族が卓越した(現在の宇宙の楕円銀河のような)銀河は、4,000Å付近に金属吸収線によるスペクトルの不連続があるので、赤方偏移1前後にそのような銀河が存在すると、赤方偏移5付近のLBGと同じくらい $V-I$ の色が赤くなることもわかる。図2(b)には、過去の分光観測で赤方偏移が決定されている銀河を我々の撮像データ上で同定し、その二色図上で分布を示している(青い□印)。この図から

わかるように、 $V-I$ の色が赤い、というだけでは多くの前景の銀河が混入してしまう。そこで、 $I-z'$ の色が比較的青い、という条件を付け加え、なるべく混入が少なくなるように色基準を決定したのが、図2の左上の破線部である。こうして、破線部に入った銀河だけを選ぶことによって、圧倒的にたくさん存在する前景銀河や星の混入を避け、信頼性の高い候補を選ぶことができるのである。

この選択基準によって、 I バンドで25.5等(ヴェガ等級)より明るい310個の赤方偏移5付近の銀河候補を検出することができた。その後さらに、アーカイブ(SMOKA¹⁶⁾)に公開されたデータの追加による画像データの質の向上を図った。ハワイ大学のCowieらのグループによる、我々と同じく主焦点カメラを用いたHDF-N周辺領域の撮像データを加えることで、特に z' バンドの質を向上することに成功した。この新しい画像データから、明るい星の周辺等を除いた実質面積およそ500平方分の中に、 I バンドで26.5等(AB等級)より明るい668個の候補天体を検出した。これは、赤方偏移5付近の銀河サンプルとして世界最大規模である。これから紹介する結果は、この更新された画像データに基づいているが、これらの結果はより浅いデータに基づいて得た以前の結果¹⁷⁾とよく一致している。

5. 赤方偏移5の星形成銀河の性質

まず、これらのLBG候補の姿を見てみよう。我々の撮像した天域の一部では、Great Observatory Origins Deep Survey (GOODS) という、X線(チャンドラ衛星)、可視(ハッブル宇宙望遠鏡)、赤外線(スピッツァー宇宙望遠鏡)をはじめとする多波長での深い探査が行われている。図3に、この天域内のLBG候補の一部について、ハッブル宇宙望遠鏡による高解像度の i バンド画像を示した。コンパクトで表面輝度の高い銀河が比較的多い一方で、いくつかの小さい固まりが最も明る

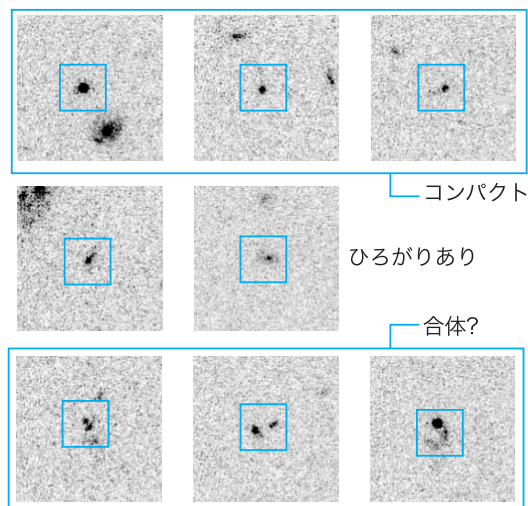


図3 赤方偏移5付近の銀河候補の、ハッブル宇宙望遠鏡によるIバンドでの姿。一辺の長さはおよそ5秒角。表面輝度の高いコンパクトな形状の銀河、広がった成分が見えるもの、いくつかの小さい塊が見えているもの、の3種類に分けて示した。

い成分の周りで見えているものも少なからず存在する。小さめの銀河が合体している姿か、または一つの天体の中でも大きな星形成領域が複数存在しているのが見えているのではないかと考えられる。

このサンプルから赤方偏移5での紫外線光度関数を求めた結果が図4である。この光度関数を求めるにあたっては、測光誤差などによって若干混入していると考えられる低赤方偏移銀河や銀河系内の低温度星の割合、そして限界等級に近い淡い銀河では多くなると予想される検出漏れを、シミュレーションによって推定し、補正している。この図には、Steidelらによって得られた赤方偏移3付近のLBGについての紫外線光度関数¹⁸⁾、および比較的現在に近い赤方偏移0.3での光度関数¹⁹⁾も示している。赤方偏移0.3での紫外線光度関数と比べると赤方偏移3と5でははるかに数密度が大きく、これらの時代では活発な星形成を起こす銀河が現在よりもはるかに多かったことがわかる。赤方偏移3と5の光度関数を比較すると、

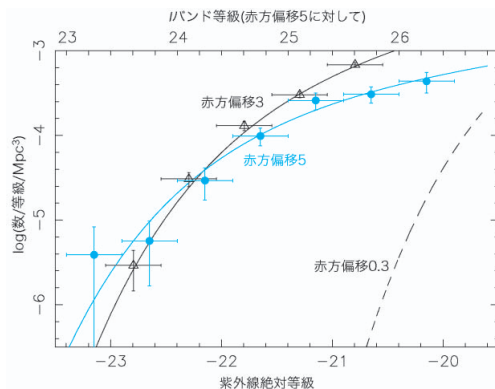


図4 赤方偏移5のライマンブレイク銀河の紫外線光度関数(青線)。比較のため、赤方偏移3での光度関数(黒実線¹⁸⁾)、赤方偏移0.3での光度関数(黒破線¹⁹⁾)も示した。

明るい銀河については数密度に大きな違いがない。一方、暗い銀河では赤方偏移5の方が若干数密度が減少しているようである。なお、赤方偏移5での我々の結果をすばるディープフィールドでの結果²⁰⁾と比較すると、特に明るいところでの数密度に大きな違いがある。使用しているフィルターに若干の違いはあるものの、これほどの違いは説明しにくい。銀河分布の非一様性が原因である可能性もあるので、他の天域での探査も現在進めている。また、明るい銀河については、分光観測によってその赤方偏移を確かめるなどして、今後この不一致の原因を調べていく必要があるだろう。

紫外線光度関数の変化から、宇宙の各時代での星形成密度の変遷を探ってみよう。図5にはいくつかの手法を用いて、これまでの研究で得られた宇宙の時代ごとの星形成密度の推定値を示した。これまでの観測から、現在から赤方偏移1~2付近までは急激に星形成密度が上昇し、そこから赤方偏移4付近まではほぼ一定であることがわかってきた。我々の探査による結果では、赤方偏移5付近での推定値は、赤方偏移3の $58 \pm 20\%$ 程度となった。この減少は、特に暗い銀河の数密度が赤方偏移3よりも少なくなっていることに起因し

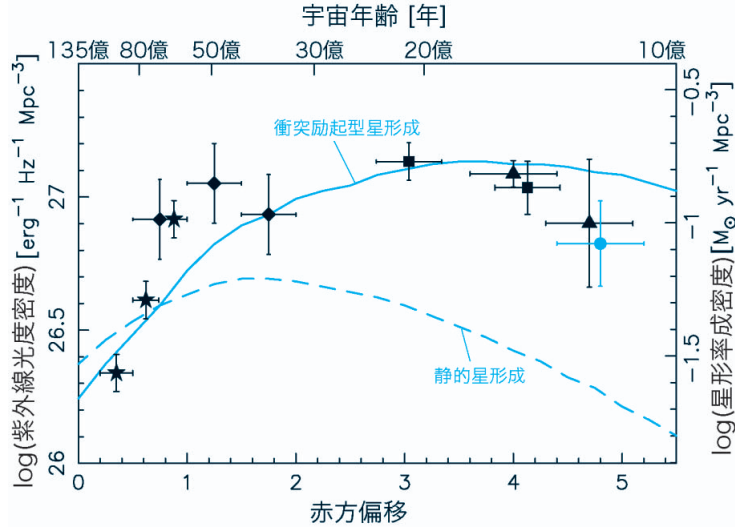


図 5 紫外線光度関数を足し合わせて得た宇宙の各時代での紫外線光度密度. 紫外線光度から星形成率への変換率を仮定して推定した星形成率密度を右側に記した. 光度関数は関数フィットした結果を利用して光度ゼロまで積分している. また, 銀河内のダストによる紫外線の吸収を一定と仮定して一律に補正してある. 青色の●が我々の観測による結果, ▲はすばるディープフィールドの結果²⁰⁾, ■は Steidel らの結果⁷⁾, ★は Connolly ら²¹⁾, ◆は Lilly ら²²⁾による結果. 2本の線は, Somerville らによる準解析的銀河進化モデルによる星形成密度の計算値²⁴⁾を示す. 破線は銀河内での連続的, 静的な星形成のみを考慮したモデル, 実線はそれに加え, 銀河同士の衝突に起因する爆発的星形成を考慮したモデル.

ている. 現在の宇宙に比べれば星形成活動ははるかに活発であるが, 赤方偏移3からおよそ10億年さかのぼり, 銀河形成の始まりにより近づいたことで, 星形成密度が減少しているのが見え始めているのかもしれない. (銀河からの紫外線光度密度は, 宇宙空間にただようガスの再電離の起源が何であるかという問題と直接かかわる大問題であるが, ここでは触れないことにする.)

我々の結果から, 赤方偏移3から5の間の紫外線光度関数には, 若干の変化が見られるものの, さほど大きなものではないことがわかった. 少なくとも, 先述した, 赤方偏移3の LBG の星形成のタイムスケールから予想されるような LBG の数密度の急激な減少は起きていないようだ. この結果が意味することは何だろうか. 一つの考え方は, 赤方偏移3と5という二つの時代で観測される LBG が異なる銀河である, というものである. 赤方偏移5での LBG が星形成を速やかに終了

し, 後は星の進化だけの静的進化を行っていけば, 静止系紫外域では暗くなるため, 赤方偏移3では LBG としては観測されなくなるだろう. 赤方偏移3で LBG として見えているものは, その直前に活発な星形成を開始した実際に「若い」銀河である, と考えることになる. つまり, 星形成銀河として明るく輝くのは, 銀河の形成期にあたるわずかな期間だけということになる. もう一つの考え方は, 銀河の進化が短い時間スケールの星形成を繰り返して進んでいく, という描像である. この考え方では, 赤方偏移3と5の LBG が異なる天体である必要はない. 宇宙論的なスケールでの銀河進化の数値シミュレーションや準解析的な銀河進化モデルにおいても, 銀河同士の衝突などで励起される爆発的で短い時間スケールでの星形成が重要であるという示唆がされている^{19)~21)}. 図5には, 観測結果に加え, 準解析的モデルに基づいた星形成密度の推移を示している. 銀河内の

ガス質量に比例して星形成が進むという、単純で連続的、静的な星形成モデルでは、高赤方偏移の星形成密度が再現できないのに対し、銀河同士の合体に伴って起こる爆発的な星形成を考慮したモデル（図の衝突励起型星形成）では、比較的観測結果と一致した推定値が得られている。

赤方偏移3の LBG と5の LBG は別の種族なのか、あるいは星形成が不連続で散発的なのか、これらの考え方のどちらが正しいのかは、現在手にしている情報だけでははっきりしない。それぞれの時代の星形成をしていない銀河も含めた数密度や銀河の星質量関数を調べることなどで明らかにできるであろう。

暗い銀河の数密度の観測的不定性に加えて、ここで示した「宇宙の星形成史」の解釈において注意すべきことがある。それは、紫外線光度として観測されない「隠された」星形成の存在の可能性である。紫外線の色勾配等から LBG には一定量のダストが存在すると考えられており、星形成量の推定のためには、このダストによる吸収・散乱で見えなくなっている紫外線に対する補正が必要である。図5での星形成密度は、ダストによる吸収によって75%の紫外線(1,500 Åに換算した場合)が時代によらず隠されている、という仮定の下に補正を行っている。このような補正が紫外線光度から推定される星形成密度の増減に大きく影響しているのは確かである。また、LBG として観測されないような強いダスト吸収を受けた天体は全く考慮できていない。この意味で、図5の星形成密度は各時代での下限値に近いものと考えた方がよいだろう。

6. 紫外スペクトルと LBG の進化過程？

このように、可視域の撮像データだけからも赤方偏移5付近の星形成銀河の様子についてさまざまな知見が得られたわけだが、LBG という種族全体の統計的性質の調査から一歩踏み込み、個々

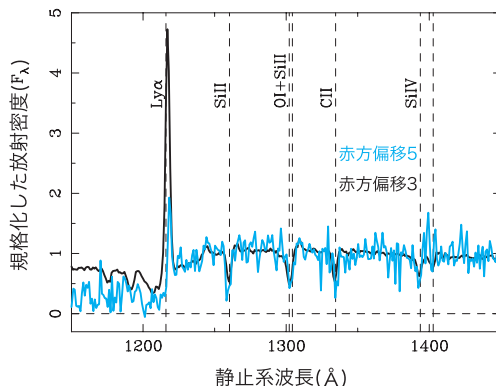


図6 LBGの紫外線スペクトル。赤方偏移3の LBG (黒線) は Shapley ら²⁸⁾による800個あまりの LBG のスペクトルを合成したもの。赤方偏移5の LBG (青線) は我々が同定した7個の LBG のスペクトルを合成したもの。

の銀河をより詳しく調べたいとなると、正確な赤方偏移を調べるのが欠かせなくなる。また、色選択基準が正しく機能しているかどうかを確認するためにも、分光観測によって個々の銀河の赤方偏移を調べることは重要である。もちろん、スペクトルからいろいろな物理量を求め、そこから進化の兆候を見いだす意味でも、分光観測は重要である。そこで我々はすばる望遠鏡の可視多天体分光機能をもつ FOCAS²⁶⁾でのフォローアップ観測を進めている。ここでは2003年2月の観測に基づく結果²⁷⁾を紹介する。

主焦点カメラによる探査を行った天域の中で、FOCASの直径6分角の視野内に比較的明るい LBG 候補の数密度が高い領域三つを選び、それぞれ5.0~5.5時間の積分時間をかけて分光した。この結果、赤方偏移4.5から5.2の LBG を七つ同定することができた。分光したIバンドで25等より明るい LBG 候補のうち残りの9個については、スペクトルの S/N が悪く、赤方偏移を特定できる輝線や吸収線を同定できなかったが、この結果から、我々が用いた色選択基準は妥当なものであったと考えられる。

同定された七つの LBG のスペクトルには、興味深い特徴が見られた。これらのいずれについて

も、ライマン α が弱い輝線、もしくは吸収線として見られたのである。平均したライマン α の静止系での等価幅（輝線の強度を連続光の強度で規格化した値）は 2.5 \AA で、赤方偏移3付近のLBGでは約 $2/3$ が 10 \AA 以上の等価幅をもつ²⁸⁾ことに比べるとかなり小さい。図6に赤方偏移5と3のLBGそれぞれについて得られた平均スペクトルを示した。図からも赤方偏移5のLBGにおけるライマン α 輝線が弱いことがよくわかる。また、ライマン α 輝線より短波長側での強度が弱いのは、銀河間に存在する中性水素ガスの量が増えていることを示している。さらに、SiII等の星間ガス起源の低電離金属吸収線が強く見えることもみてとれる。しかも驚くべきことに、その強度は赤方偏移3における平均的な値と同じ位かむしろ若干強い傾向である。図からは読み取りにくいだが、星間吸収線の赤方偏移は、ライマン α 輝線のピークのそれとはわずかにずれており、速度に換算すると 600 km/s ほどの違いがある。これは、赤方偏移3付近のLBGでも見られる現象で、通常ガスのアウトフローであると考えられている。

ライマン α 輝線が弱い原因としてまず考えられるのは、ダストによる吸収がより強い、という可能性である。金属吸収線の強さと考え合わせると、より高赤方偏移の銀河の方が、ダストや金属量が大きく化学進化が進んでいるという、一見逆に思えることを示唆しているようだ。これは何を意味しているのであろうか？我々のサンプル数はまだ非常に少なく、さらにサンプルを増やす必要があるが、我々は赤方偏移5から3にかけての何らかの進化の兆候を見ているのかもしれない。いくつかの可能性が考えられるが、ここでは一つの可能性について触れてみたい。

宇宙初期には微小であった物質の密度ゆらぎが重力不安定によって成長し、銀河や大規模構造が形成されたとする宇宙の構造形成理論の最近の考え方に基けば、赤方偏移5での明るいLBGは、宇宙空間の中でも物質密度の高い、比較的まれな

領域で激しく星形成活動を行っているものと推測される。赤方偏移5の紫外線光度関数を赤方偏移3のそれと比較したとき、明るい側にはあまり変化がなく、暗い銀河は数密度が減少している、という我々の結果は、大規模な星形成を起こす銀河が、より密度の高い領域で、より早い段階から形成を開始するという選択的（バイアスのかかった）銀河形成シナリオを考えると説明できそうである。そうだとすると、分光観測を行えるような特に明るいLBGは、かなり早くから星形成を行っており、赤方偏移5付近でさえ赤方偏移3付近の「平均的」なLBGよりも化学進化が進んでいる、ということもありうるかもしれない。また、我々のサンプルについて空間分布の相関を調べると、分布は一様ではなく明瞭な相関をもった分布になっており、角度相関から推定した空間分布の相関長は、赤方偏移3付近の同程度の明るさのLBGよりもやや大きくなっているようである。このことも、赤方偏移5のLBGが宇宙空間の中でまれな高密度領域で選択的に形成されている、という描像を支持している。まだ定性的な説明であり、他のシナリオも排除できないだろうが、形成初期の銀河の進化過程を示すこれらの兆候はたいへん興味深いものである。

7. 今後の展望

現在我々は、これまで紹介してきたHDF-N領域でのLBGについて、すばる望遠鏡の近赤外装置CISCO²⁹⁾による K' バンド($2.1 \mu\text{m}$)での撮像を進めている。なるべく長い波長での観測からスペクトル分布を抑えることで、個々の銀河の星形成史を探ることを目標としている。先に触れたGOODSプロジェクトではスピッツァー宇宙望遠鏡での中間赤外線撮像が進められており、我々の深い近赤外撮像データと組み合わせることで、赤方偏移5付近のLBGの星質量の成長過程や星形成史がわかってくるだろう。赤方偏移3のLBGとの違いがより明確になってくると期待してい

る。

さらに遠方の LBG 探査についてはどうだろうか？ 我々の観測以後、さらに遠方の赤方偏移 6 の銀河を調べる研究の成果が出てきている^{30)~33)}。それらの結果によると、赤方偏移 6 では LBG の数密度や紫外線光度密度の減少が顕著になってきているようである。高赤方偏移クエーサーのスペクトルに見られるライマン α 輝線より短波長側の光子の吸収の様子から、宇宙空間の中性水素の再電離が赤方偏移 6 付近までに完了したと考えられている。再電離前の「暗黒時代」に近づいてきた LBG 探査では、数密度の著しい変化が検出されつつあるのかもしれない。ただし、注意すべきなのは、これらの赤方偏移 6 の銀河の探査は、3 バンドの撮像で二色図を作り、候補を選び出す一般的なライマンブレイク法とは異なり、 $i-z$ の一色から候補を選び出している研究がほとんどであることである。一色だけでの候補天体の選択では、銀河系内の低温度星やより小さい赤方偏移の銀河の混入割合の評価が難しい。これまでの探査は非常に狭い視野だけに限られているためサンプル数も数十個と少なく、光度関数や星形成率密度の推定には大きな不定性が伴っている。今後、広視野の近赤外撮像装置が立ち上がってくことで、さらに赤方偏移 6 の LBG の信頼性の高い探査が進められることが期待される。

もっと遠方、赤方偏移 6 を超える LBG 探査はどうだろうか？ K バンドまでの近赤外撮像によって、赤方偏移 10 までの LBG 探査は原理的には可能である。広視野近赤外撮像装置の登場によって、少しずつサンプルは増えていくだろうが、それらの装置をもってしても期待される検出数は残念ながらあまり多くない。統計的に精緻な議論を可能にするためには、次世代のスペース望遠鏡や超大型望遠鏡が是非とも必要となってくるであろう。

冒頭で述べたように、我々の最大の目標は、現在の宇宙に見られる銀河が、どのような過程を経

て形成されたかを明らかにすることである。この目標にたどり着くためには、実は LBG だけを探すのではなく、宇宙の各時代に存在するいろいろな天体を研究し、その相互の関係を探ることが欠かせない。例えば、ライマンブレイク法では静止系の紫外線である程度平坦なスペクトルをもたないと検出されないため、ダストによる吸収が激しい星形成銀河がいたとしても見逃してしまう。

実際、最近、赤方偏移 2 から 3 の時代については、近赤外撮像によるサンプルから、ライマンブレイク法では検出できないような「赤い」色をもった銀河が少なからぬ数存在している可能性が報告されてきている^{34), 35)}。これらの天体は可視域では著しく暗いため現状では分光観測が困難で、赤方偏移や数密度、星形成をほとんど行わず静的進化過程に入っている銀河なのか、あるいはダストに包まれた星形成銀河なのか、といった基本的性質についてもまだ研究が始まったばかりである。近い将来に続々と立ち上がってくる広視野近赤外観測装置がこれらの銀河の性質を明らかにする強力な道具になるだろう。

おそらく、我々が現在観測している LBG は「氷山の一角」にすぎない。星形成量のより小さい銀河、ダストにつつまれた銀河、そして活動銀河核など、すでに観測的に見え始めているものだけでも実に多様な銀河がさまざまな時代に存在している。これらの天体の情報をジグソーパズルのように組み合わせ、つなぎ合わせて銀河形成・進化の全貌に迫っていきたいが、私たちが手にしているピースはまだまだごくわずかなのだ。

本稿で紹介した研究は、田村直之（英国ダーラム大学）、秋山正幸、青木賢太郎（ハワイ観測所）、安東正隆（京大宇宙物理）、その他の諸氏との共同研究に基づくものです。すばる望遠鏡およびその観測装置の開発に携わった皆さん、ハワイ観測所スタッフの皆さんに改めて感謝の意を表したいと思います。

参考文献

- 1) Steidel C. C., Hamilton D., 1992, AJ 104, 941
- 2) Steidel C. C., Hamilton D., 1993, AJ 105, 2017
- 3) Steidel C. C., et al., 1996, AJ 462, L17
- 4) Steidel C. C., et al., 2003, ApJ 592, 728
- 5) Madau P., et al., 1996, MNRAS 283, 1388
- 6) Madau P., et al., 1998, ApJ 498, 106
- 7) Steidel C. C., et al., 1999, ApJ 519, 1
- 8) Sawicki M., Yee H. K. C., 1998, AJ 115, 1329
- 9) Papovich C., et al., 2001, ApJ 559, 620
- 10) Shapley A. E., et al., 2001, ApJ 562, 95
- 11) Pettini M., et al., 2001, ApJ 554, 981
- 12) Giavalisco M., Steidel C. C., Macchetto F. D., 1996, ApJ 470, 189
- 13) Giavalisco M., et al., 1998, ApJ 503, 543
- 14) Miyazaki S., et al., 2002, PASJ 54, 833
- 15) Williams, R. E., et al., 1996, AJ 112, 1335}
- 16) URL: <http://smoka.nao.ac.jp/>
- 17) Iwata I., et al., 2003, PASJ 55, 415
- 18) Adelberger K., Steidel C. C., 2000, ApJ 544, 218
- 19) Gabasch A., et al., 2004, A&A 421, 41
- 20) Ouchi M., et al., 2004, ApJ 610, 660
- 21) Connolly A. J., et al., 1997, ApJ 486, L1
- 22) Lilly S. J., et al., 1996, ApJ 460, L1
- 23) Nagamine K., 2002, ApJ 564, 73
- 24) Somerville R. S., Primack J. R., Faber S. M., 2001, MNRAS 320, 504
- 25) Menci N., et al., 2004, ApJ 604, 12
- 26) Kashikawa N., et al., 2002, PASJ 54, 819
- 27) Ando M., et al., 2004, ApJ 610, 635
- 28) Shapley A. E., et al., 2003, ApJ 588, 65
- 29) Motohara K., et al., 2002, PASJ 54, 315
- 30) Bouwens R. J., et al., 2003, ApJ 595, 589
- 31) Stanway E. R., et al., 2004, ApJ 607, 704
- 32) Bowens R. J., et al., 2004, ApJ 606, L25
- 33) Bunker A. J., et al., 2004, MNRAS, in press (astro-ph/0403223)
- 34) Franx M., et al., 2003, ApJ 587, L79
- 35) Van Dokkum P. G., et al., 2004, ApJ 611, 703

Star Formation History of Galaxies Inferred from Observations of Lyman Break Galaxies

Ikuru IWATA

Subaru Mitaka Office, National Astronomical Observatory of Japan

Kouji OHTA

Department of Astronomy, Kyoto University

Abstract: Lyman break galaxies (LBGs) are distant star-forming galaxies selected by broad-band colors. They have been extensively studied as a probe of galaxies in the early universe. Here we briefly summarize the knowledge on their properties obtained so far, and report the results of our survey for LBGs at redshift around five (about 1.2 Gyr after the Big bang). Using results such as UV luminosity function, star formation density and spectroscopic properties, we discuss the evolution of LBGs and their connection with today's galaxies.