

## 早期宇宙の銀河地図を読み解く

嶋 作 一 大

〈東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 〒113-0033 東京都文京区本郷 7-3-1〉

e-mail: shimasaku@astron.s.u-tokyo.ac.jp

大 内 正 己

〈Space Telescope Science Institute, 3700 San Martin Drive, Baltimore, MD 21218, USA〉

e-mail: ouchi@stsci.edu

銀河の空間分布—銀河地図—を読み解くことで、宇宙を重力的に支配している暗黒物質と銀河の関係をあぶり出すことができる。我々は、すばるの広視野カメラを用いて、赤方偏移が4から5という早期の宇宙の銀河地図を初めて描いた。我々のデータは、 $z=4\sim 5$ の銀河も、現在の宇宙の銀河と同様に強く群れていることを示す。 $z=5$ の観測では大規模構造も発見した。これらのデータをもとに、暗黒物質の自己重力系であるダークハローと銀河の関係を考察した。

### 1. 銀河の進化と空間分布

#### 1.1 銀河は群れている

大がかりな銀河探査で明らかになっているように、現在の宇宙では、銀河は特徴的なパターンで宇宙空間に分布している。銀河の3次元分布を見ると、大規模構造と呼ばれる数十 Mpc<sup>\*1</sup> 規模のムラがあることがわかる。大規模構造は、銀河の集中したひもや膜のような領域と、銀河のあまり見つかからない空洞のような領域で特徴づけられる。銀河の群れ具合が空間スケールによってどう変わるかは、二体相関関数などで定量化できる。

後で述べるように、銀河の空間分布を調べることで、銀河が宇宙のどういう場所で生まれ、どう進化してきたかを探ることができる。具体的には、銀河の形成と進化を、宇宙を重力的に支配している暗黒物質の空間分布の進化を土台にして考

察できる。

ここでは、すばる望遠鏡を用いた、赤方偏移が4から5という非常に若い宇宙での銀河の空間分布の観測を紹介する。赤方偏移 ( $z$ ) と宇宙年齢には1対1の対応がある。現在の宇宙の年齢を137億歳とすると、赤方偏移が $z=4$ の宇宙の年齢は15億歳、 $z=5$ では12億歳である。我々の観測は、進化初期の若い銀河が宇宙のどういう場所にいるのか、また、それらの銀河が将来どういう銀河に進化するのかを教えてくれる。

遠方銀河の空間分布の観測は、我々が2000年にすばるで観測を始める前は、 $z=3$ 程度が限界だった<sup>1),2)</sup>。しかも、観測天域の広さも十分ではなかった。なぜなら、若い宇宙の銀河(すなわち遠くの銀河)を検出できる大望遠鏡は、一般に視野が非常に狭く、数十 Mpc スケールの空間分布を調べるには膨大な時間がかかるためである。す

\*1 Mpc (メガパーセク) とは 100 万パーセクのこと。1 パーセクは 3.26 光年。参考までに、我々の属する天の川銀河の直径は約 3 万パーセク、天の川銀河からアンドロメダ銀河までの距離は約 0.7 Mpc である。

ばる望遠鏡の視野は大望遠鏡の中で桁違いに広い  
ため、他の望遠鏡で何カ月もかかる観測をわずか  
数日で行える。

蛇足になるが、銀河進化は宇宙自身の進化と密  
接に関係している。宇宙は膨張によって刻一刻と  
状態を変えており、銀河にとって二度と同じ環境  
は現れない。 $z=5$ の宇宙に生まれた銀河と、現在  
の宇宙に生まれた銀河(もしあれば)は、仮に質  
量などが同じでも全く別の進化をするだろう。い  
つ生まれても大体同じ進化をする恒星とは、この  
点で事情が異なる。銀河の理解には遠方宇宙の観  
測は欠かせない。

## 1.2 銀河とダークハロー

現在最も信頼されている銀河進化モデルによる  
と、銀河の形成と進化を陰で支配しているのは暗  
黒物質である。宇宙の質量の約8~9割は、バリ  
オンとは異なる正体不明の物質—電磁波を出さな  
いので暗黒物質と呼ばれる—が担っているらしい。  
いろいろな観測から、暗黒物質は、速度分散の小  
さい「冷たい暗黒物質」であると考えられている。

冷たい暗黒物質を仮定したモデルによると、  
ビッグバンの直後に発生したわずかな振幅の密度  
ゆらぎが、時間とともに自己重力で成長し、密度  
の超過した場所は周囲から物質を集めてしだいに  
重い系になった。暗黒物質が集合してできた自己  
重力系をダークハローと呼ぶ。恒星の集合体であ  
る球状星団と同様に、ダークハローも、中心部ほ  
ど密度が高い。やがて、ダークハローの中でガス  
が冷えて星が誕生した。ダークハローは衝突合体  
を繰り返して成長し、現在の銀河宇宙を作った<sup>3)</sup>。

ダークハローは、銀河系などよりずっと軽いも  
のから、銀河団ぐらいの質量のものまで存在し  
うる。軽いダークハローほど数が多い。銀河とダ  
ークハローの対応は1対1とは限らない。軽過ぎて  
銀河の生まれにくいダークハローもあるかもしれ

い。一方で、銀河団は、 $10^3$ 個の銀河を含んだ1個  
のダークハローである。1個の銀河しか含まない  
ダークハローは、たとえて言えば桃の実(種が銀  
河で、果肉が暗黒物質のハロー)、たくさんの銀河  
を含むダークハローは西瓜(種が個々の銀河で、  
果肉が暗黒物質のハロー)のようなものである。

ダークハローの個数や空間分布はモデルで正確  
に計算できる<sup>4)</sup>。しかし、ダークハローの中で、星  
とガスの系としての「目に見える」銀河がいつ誕  
生し、どう進化して現在の姿になったかは、まだ  
わかっていない。ダークハローの進化は重力だけ  
の過程だが、ガスの冷却・加熱、星形成、銀河同  
士の合体などは複雑で未解明の過程である。

若い宇宙で、銀河とダークハローの対応につ  
いて観測から情報を得ることができれば、銀河の誕  
生と進化を解明するための貴重な情報となる<sup>\*2</sup>。  
これが、銀河の空間分布の観測の大きな目的であ  
る。次の章では、遠方宇宙の主な銀河種族である  
ライマンブレイク銀河について、ダークハローと  
の対応を探ってみる。

## 2. ライマンブレイク銀河の分布と ダークハロー

### 2.1 すばるによる $z=4\sim 5$ のライマンブレイク 銀河の観測

$z=4\sim 5$ の銀河から届く光は赤方偏移によって  
本来の波長が5~6倍に伸びている。例えば、銀河  
から出た紫外光は可視光として観測される。すば  
るの広視野カメラ(Suprime-Cam<sup>5)</sup>)は可視専用な  
ので、我々が調べた銀河は静止系の紫外光で明る  
いものに限られる。紫外光の光度は星形成率に比  
例するので、小さな銀河でも、たまたま星形成率  
が高ければ紫外光で明るくなる。銀河の質量と良  
い相関をもつ、静止系の可視あるいは赤外での光  
度を基準としてサンプルを作るのが理想だが、現

\*2 もし、観測された銀河の空間分布のパターンが、モデルから予想されるダークハローの空間分布のパターンと似ても  
似つかぬものだったとすると、銀河が暗黒物質の密度ゆらぎから生まれるという考え方自体を疑わなければいけな  
くなる。

在はまだ難しい。

さまざまな赤方偏移の銀河が写っている撮像データから特定の赤方偏移の範囲の遠方銀河（紫外線で明るいものに限る）を選び出す代表的方法は二つある。一つはライマンブレイク法<sup>6)</sup>といって、遠方銀河の紫外の連続スペクトルに共通に見られる段差を捕らえるもので、三つの広帯域バンドを使う。もう一つは、赤方偏移したライマン $\alpha$  ( $\text{Ly}\alpha$ ) 輝線を狭帯域フィルターを使って探すもので、3章で述べる。

ライマンブレイク法は、赤方偏移の範囲が $\pm 0.5$ 程度にあって、紫外連続光がある一定値より明るい銀河をすべて選び出せる<sup>\*3</sup>。その意味で、比較的性質の良いサンプルを作れる。この方法で検出した銀河をライマンブレイク銀河 (LBG) という。我々の観測の最初の対象はこれらの銀河である。LBGは、遠方宇宙では最もありふれた銀河種族の一つで、最もよく研究されている。

図1は、我々が、遠方銀河の探査に理想的な「すばるディープフィールド」という天域<sup>7), \*4</sup>で、ライマンブレイク法を使って検出した $z=4.0 \pm 0.5$ のLBG (1,438個)と $z=4.7 \pm 0.5$ のLBG (246個)の天球分布である<sup>8), 9)</sup>。後者のLBGを、便宜上 $z=5$ のLBGと呼ぶことにする。天域の広さは、観測に使ったすばるの広視野カメラ (Suprime-Cam) の1視野分に当たる $22' \times 32'$ で<sup>\*5</sup>、

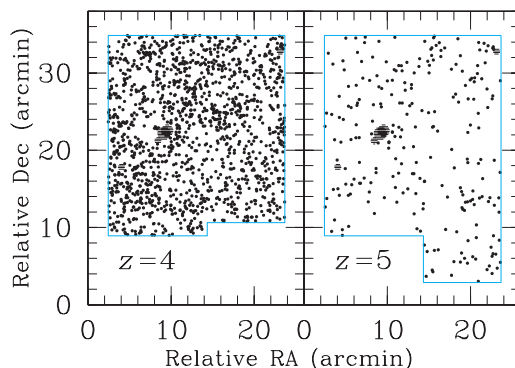


図1 すばるディープフィールドにおける (a)  $z=4.0 \pm 0.5$  と (b)  $z=4.7 \pm 0.5$  の LBG の天球分布。青枠内がデータのある領域である。斜線は銀河系の明るい星があるため LBG の検出ができなかった場所を示す。

これは  $z=4$  では  $46 \text{ Mpc} \times 67 \text{ Mpc}$ ,  $z=4.7$  では  $49 \text{ Mpc} \times 71 \text{ Mpc}$  に相当する<sup>\*6</sup> ( $\Omega=0.3$ ,  $\lambda=0.7$ ,  $H_0=70 \text{ km/s/Mpc}$ )。

$z=4$  の LBG は  $B, R, i$  バンドの組合せ,  $z=5$  の LBG は  $V, i, z$  バンドの組合せで選び出した。データは、2001年の Suprime-Cam の試験観測時に得たものである。 $z=4, 5$  の LBG のサンプルとしては過去最大である。 $z=5$  のほうが検出が難しいためサンプルは小さい。光度関数を作ったことがわかったことだが、実際の数密度も  $z=5$  のほうが低いようだ。

この図を見ると、LBG の天球分布にはランダ

\*3 正確には、ダスト吸収を免れて出てくる紫外連続光が一定値以上の銀河である。真の紫外連続光は強いが、ダスト吸収のために見かけが暗い銀河は、この方法では検出できない。

\*4 「すばるディープフィールド」は北銀極付近にあるブランクフィールドである。我々は「すばる/XMM-Newton ディープフィールド」という秋の天域でも同様の観測を行ったが、得られた結果は「すばるディープフィールド」とあまり変わらなかった。この天域のデータは「すばるディープフィールド」よりも質が悪いので、結果はここでは紹介しない。なお、両フィールドは、2002年から始まったすばるの観測所大プロジェクトによって新しいデータが取られている<sup>10), 11)</sup>。

\*5 Suprime-Cam の正確な視野は  $27' \times 34'$  である。

\*6 これらの長さは、宇宙膨張とともに目盛りの間隔も広がる座標系、すなわち共動座標系で測った長さである。共動座標系は  $z=0$  で物理的座標系と一致するように定義されている。したがって、共動座標系での  $46 \text{ Mpc}$  は、 $z=4$  当時の物理的長さに換算すると  $46/(1+z)=9.2 \text{ Mpc}$  となる。銀河の空間分布をの進化を調べるような場合は共動座標系がよく用いられる。

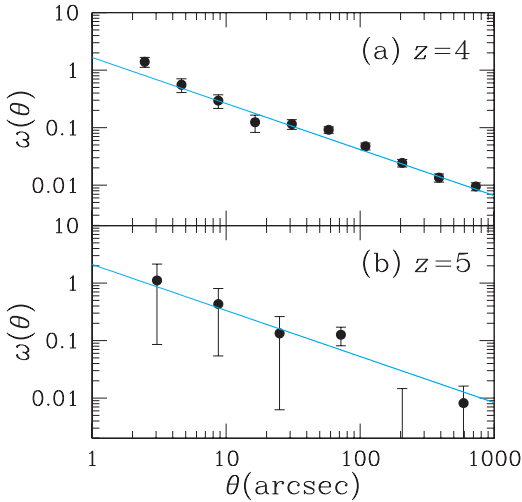


図 2 (a)  $z=4.0 \pm 0.5$  と (b)  $z=4.7 \pm 0.5$  の LBG の角度二体相関関数. 実線はべき関数のフィットの結果.

ム分布で生じ得る以上に大きなムがあるように見える. この直観を定量的に確認したのが図 2 の角度二体相関関数  $\omega(\theta)$  で, 横軸は銀河ペアの距離 (天球上の角度  $\theta$ . 赤方偏移の範囲が限られているので, 角度と投影された実間隔はほぼ 1 対 1 に対応する), 縦軸は, ランダムな場合に比べてその角度にペアが余計に見つかる確率である<sup>9)</sup>. これを見ると,  $z=4$  と  $5$  の LBG のいずれも, 一様分布からはっきりとずれた,  $\omega \propto \theta^{-0.8}$  で近似されるべき乗の相関をもつことがわかる. これは,  $z=0$  の宇宙の銀河の二体相関関数と同じ形である. LBG の赤方偏移分布を仮定して角度相関関数から実空間 (3 次元) の二体相関関数  $\xi = (r/r_0)^{-1.8}$  を求めると, 共動座標系で測った  $r_0$  の値として,  $z=4$  では  $r_0 = 4.1^{+0.2}_{-0.2}$  Mpc,  $z=5$  では  $r_0 = 5.9^{+1.3}_{-1.7}$  Mpc が得られる<sup>9)</sup>, \*7).  $r_0$  は相関長と呼ばれる量で,  $r_0$  が大きいほど銀河は強く群れている.

$z=4$  と  $5$  の LBG で得られた相関長の値は, 現

在の宇宙の銀河の相関長に匹敵する. したがって,  $z=4 \sim 5$  と現在の銀河では, 空間分布のパターンも群れの強度もほぼ同じということになる. これは暗黒物質のゆらぎの成長の観点からは自明な結果ではない.  $z=4 \sim 5$  という若い宇宙では暗黒物質のゆらぎはまだあまり成長しておらず, その分布のムらもごく弱い. 上の結果は, 銀河は暗黒物質よりもずっと強く群れていることを意味する.

LBG と暗黒物質の分布のずれは, ダークハローを考慮することで理解できる. ダークハローの成長モデルによると, 重いダークハローの分布は, 暗黒物質全体の分布に比べてムらが大きいと予想される. 言い換えれば, ダークハローの位置に印を付けると, 暗黒物質全体の分布がかなり滑らかであるにもかかわらず, 印の分布には大きなムらができる. したがって, LBG が重いダークハローの位置を示す目印だと考えれば, 観測結果を説明できる. 次の章では, この仮定を武器に, LBG とダークハローの対応を探ってみる.

## 2.2 ライマンブレイク銀河とダークハローの対応

ダークハローの成長モデルは, ダークハローの個数と群れの度合いを質量の関数として予想する<sup>4)</sup>. 例えば,  $z=4$  で,  $10^{12} M_{\odot}$  の質量のダークハローがいくつあり, それらの相関長がどれだけかが予想できる\*8). これを, LBG の個数および相関長と比較することで, LBG とダークハローの対応関係がわかる. ただし, すべての LBG はどれかのダークハローの中にある, という仮定をおく.

それにはまず, LBG と同じ相関長をもつダークハローの質量をモデルから計算する. LBG は典型的にはその質量のダークハローの中にあることになる (ダークハローの物理的広がりには LBG

\*7) ここでは  $H_0 = 100$  km/s/Mpc を仮定している.

\*8) モデルは, 重いダークハローほど数が少なく, かつ強く群れると予想する.

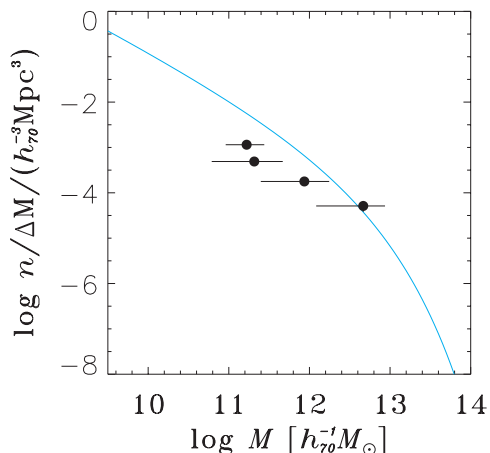


図3  $z=4.0\pm 0.5$  の LBG が属するダークハローの質量および数密度と、LBG の数密度の関係。四つのデータ点は、LBG を明るさ別に 4 群に分けた結果で、右のデータ点ほど明るい。実線は、モデルが予想する  $z=4$  でのダークハローの質量関数（数密度を質量の関数として表したもの）。データ点が実線より下にある場合は、平均して各ダークハローに 1 個未満の LBG しか存在しないことを意味する。

よりもずっと大きいと考えられている)。また、その質量のダークハローの数密度をモデルから計算する。もし、その値が LBG の数密度より小さい場合は、一つのダークハローが複数の LBG を抱え込んでいることになる<sup>\*9</sup>。

この作業を  $z=4$  の LBG で行った結果を図 3 に示す<sup>9)</sup>。横軸はダークハローの質量、縦軸は LBG の数密度である。データ点が四つあるのは、LBG を光度別に 4 群に分け、それぞれについて相関長、数密度、ダークハローの質量を見積もったためである。実線は、モデルが予想する  $z=4$  でのダークハローの数密度である。この図からまず、 $z=4$  の LBG は  $10^{11} < M < 10^{13} M_{\odot}$  のダーク

ハローに属しており、しかも、明るい LBG ほど重いダークハローの中にあるということがわかかる。なお、LBG の明るさから推定される星の総質量は、ダークハローの質量よりずっと小さい。また、重いダークハローほど、相対的に多くの LBG を抱え込む傾向にあることがわかる。ただ、データ点が実線の上側にはないことから、一つのダークハローは平均 1 個以下の LBG しか含んでいない。つまり LBG のないダークハローも存在する。もちろん、観測限界以下の暗い LBG も含めると、ダークハロー当たりの LBG の数は増えるかもしれない。

図からは、明るい LBG のダークハローは  $z=4$  の時点ですでに現在の銀河系のダークハロー並みに重いこともわかる。ダークハローは時間とともに太っていく。 $z=4$  で  $10^{11}\sim 10^{13} M_{\odot}$  のダークハローが現在まで成長すると、銀河群から銀河団並みの質量 ( $10^{14} M_{\odot}$  前後) になるだろう。したがって、LBG の現在の子孫は一個別の銀河として生き残っているか、あるいは合体してより大きな銀河になっているかはわからないが—銀河群や銀河団の中に見つかると予想される<sup>\*10</sup>。ここでは示さなかったが、 $z=5$  の LBG についても同様の結果が得られている。

### 2.3 ダークハローに基づく遠方銀河の統一的理解

数密度と相関長さえわかれば、LBG 以外の銀河も同じように議論できる。図 4 は、 $z=3$  で見つかったさまざまな種類の銀河についての結果である<sup>9)</sup>。 $z=3$  ではいろいろな波長のサーベイが進んでおり、LBG 以外にもさまざまな種類の銀河が見つかった。しかし、それらの銀河の関連はまだよくわかっていない。

<sup>\*9</sup> 一般に、天体の数密度と群れの強さは、測定量としては独立である。 $r_0$  は同じでも数密度は違うという分布はありうる。ダークハローは数密度と  $r_0$  の間に 1 対 1 の関係があるが、これは、密度ゆらぎの成長という共通の背景があるからである。なお、LBG の質量を星の内部運動などから直接測るのはたいへん難しい。 $r_0$  からダークハローのモデルを介して質量を推定する方法は、間接的ではあるが有力な方法といえる。

<sup>\*10</sup> ダークハロー同士が合体しても、中の銀河まで合体するとは限らない。

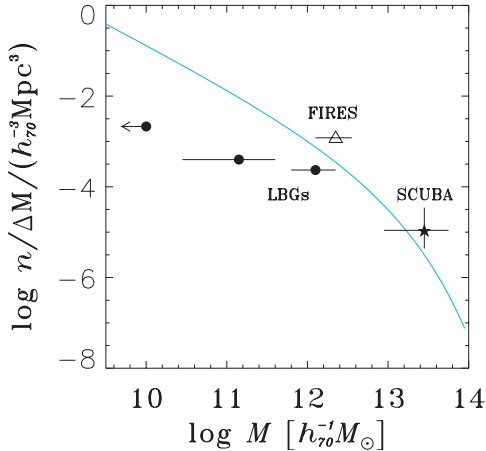


図4  $z \sim 3$ の3種類の銀河についての、図3と同様の図。●はLBG、△は近赤外観測で見つかった銀河、★はサブミリ波観測で見つかった銀河。

図4の△は、近赤外の観測で見つかった銀河である<sup>12)</sup>。これらの銀河の多くは紫外光が非常に弱く、ライマンブレイク法では見つからない。しかしかなり大きな星質量をもつため、近赤外で明るい。LBGに比べて古い星の比率が高いのだろう。図から、これらの銀河は、LBG(●)と同程度の質量のダークハローに属しているが、1個のダークハローに数個程度含まれていることがわかる。一方でLBGは1個以下である。この結果から、ダークハローにはかなりの星質量の銀河が常に数個存在し、それらが時々星形成活動を起こすとLBGとして観測される、という描像が考えられる。

★は、電波の一種であるサブミリ波の観測で見つかった、星形成率の非常に高いモンスター銀河である(SCUBAという名前の観測装置が使われたのでSCUBA天体と呼ばれる<sup>13)</sup>)。星からの強い紫外光は銀河自身の大量のダストに隠されてしまっている。その代わりサブミリ波で明るく光っている。図から、この銀河は非常に重いダークハローをもつことが唆される。将来は銀河団中心の巨大楕円銀河になるのかもしれない。

図4の銀河(LBG, 近赤外銀河, サブミリ波銀河)のダークハローの質量と、ハローの成長モデルから、これらの銀河は、現在の宇宙では銀河群から銀河団程度の重いダークハローに取り込まれていることが予想される。言い換えれば、見つかった遠方銀河のほとんどが、現在の銀河群や銀河団のメンバー銀河の祖先であるらしい。しかし、現在の宇宙ではこういった重い銀河集団に属していない銀河がむしろ多数派である。それらの銀河の祖先が早期宇宙のどこに隠れているのか(あるいはまだ生まれていないのか)は面白い問題である。

なお、ここで使用した近赤外銀河とサブミリ波銀河の空間分布と数密度のデータは、LBGに比べて極めて不定性が大きい。その理由は、LBGに比べて圧倒的に小さなサンプル、狭い探査天域、大きな赤方偏移の不定性である。新しいデータによっては、上記の議論が変わる可能性もある。

### 3. ライマン $\alpha$ 輝線銀河の奇妙な空間分布

#### 3.1 ライマン $\alpha$ 輝線銀河とは

早期宇宙には、Ly $\alpha$ 輝線で強く光っている銀河(Ly $\alpha$ 輝線銀河と呼ばれている)が多数存在する。Ly $\alpha$ で光っているので、この銀河もLBGと同様に星形成銀河であるが、観測された両者の性質は大きく異なる。Ly $\alpha$ 輝線銀河は、紫外連続光が弱くても、Ly $\alpha$ 輝線さえ強ければ見つかる。一方で、LBGは、ある程度強い連続光を出していないと検出されない。そのため、これまでに見つかったLy $\alpha$ 輝線銀河は、LBGに比べて紫外連続光が弱く、Ly $\alpha$ 輝線が相対的に強い傾向がある。

LBGは、相当量の星質量をもつ、ある程度進化した銀河であることがわかっている<sup>14), 15)</sup>。しかし、Ly $\alpha$ 輝線銀河の理解はあまり進んでいない。上記の特徴などから、Ly $\alpha$ 輝線銀河は小質量の非常に若い銀河ではないかと考える研究者もいる<sup>16), 17)</sup>が、確定的ではない。いずれにしても、

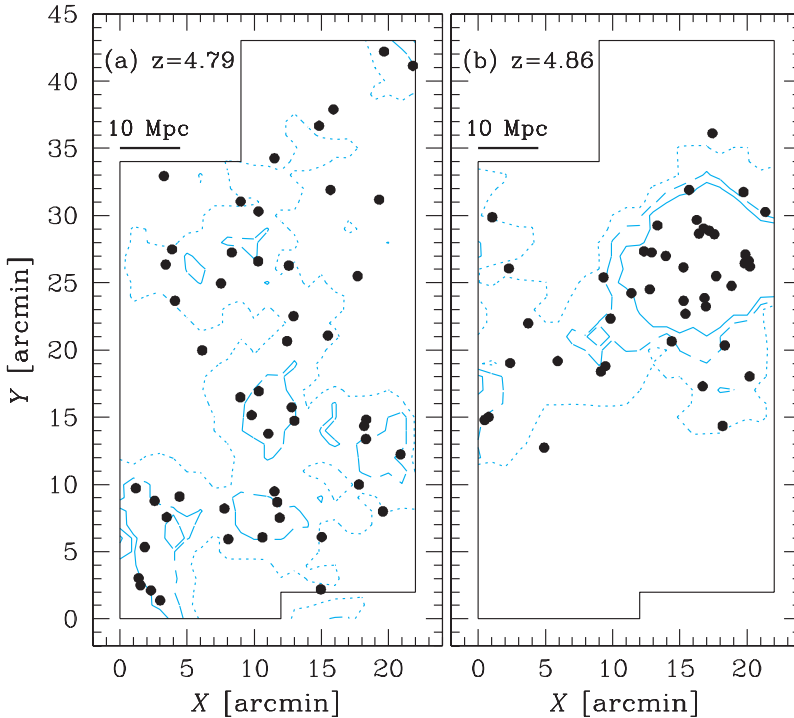


図 5 すばるディープフィールドにおける  $\text{Ly}\alpha$  輝線銀河の天球分布. (a) は  $z=4.79 \pm 0.04$  にある銀河, (b) は  $z=4.86 \pm 0.03$  にある銀河. 等高線は銀河の面密度超過  $\Delta n/n$  を表し, 点線が面密度超過が 0 (すなわち面密度は平均値), 破線は 1, 実線は 2 である.

LBG と同等以上の数密度で早期宇宙に存在することから,  $\text{Ly}\alpha$  輝線銀河は, 銀河の進化に重要な役割を果たしているはずである.

$\text{Ly}\alpha$  輝線銀河は狭帯域フィルターと広帯域フィルターを組み合わせることで検出できる. 例えば,  $z=5$  の  $\text{Ly}\alpha$  輝線の観測波長は  $1,216(1+z) = 7,296 \text{ \AA}$  なので, ある天域を,  $7,296 \text{ \AA}$  付近だけに感度をもつ狭帯域フィルターと適当な広帯域フィルターで撮影し, 両者の画像を比較する. 広帯域フィルターの画像に比べて狭帯域フィルターの画像が飛び抜けて明るい天体が,  $z=5$  の  $\text{Ly}\alpha$  輝線天体である.

### 3.2 すばるによる $z \sim 5$ の $\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河の観測

$\text{Ly}\alpha$  輝線銀河の正体をその空間分布から探るために, 我々は  $z \sim 5$  の  $\text{Ly}\alpha$  輝線銀河の探査を行った. 図 5 がその結果である. 二つのパネルはいずれも「すばるディープフィールド」の同一天域

( $25' \times 45'$ ) で, (a) は  $z=4.79 \pm 0.04$  の範囲にある銀河, (b) は  $z=4.86 \pm 0.03$  の銀河である. (a), (b) で, 中心波長のわずかに異なる 2 枚の特注の狭帯域フィルター (NB704 と NB711) が使われている. 切り取ってきた二つの 3 次元領域は視線方向に接している. 図の天球面上のサイズは, 共動座標系で, 縦が約 100 Mpc, 横が約 50 Mpc あり, 大規模構造の有無を調べられる広さである. データは, (a) は 2003 年の共同利用観測, (b) は 2001 年の試験観測と 2002 年の共同利用観測で得られたデータである<sup>18)~20)</sup>.

LBG に比べて  $\text{Ly}\alpha$  輝線銀河は取り出せる赤方偏移の幅がずっと狭いので, 宇宙を奥行き方向と垂直にスライスすることができ, 大規模構造の探査に適する. つまり, 我々の観測は,  $\text{Ly}\alpha$  輝線銀河の正体を探る観測であると同時に, 宇宙の大規模構造の歴史を探る観測でもあった. 大規模構造

の探査は、それまでは  $z \sim 1$  程度までしか届いていなかった。

図を見ると、(b) の領域の銀河分布が印象的である。すなわち、銀河は中央付近の  $20 \text{ Mpc} \times 50 \text{ Mpc}$  の横長の帯状領域に集中しており、それ以外の場所にはほとんど見当たらない。この帯状領域および上下の空洞領域は、現在の宇宙に見られる大規模構造に匹敵する大きさである。対照的に、(a) の領域の銀河の分布はほとんど一様である。

二つの領域のうち一つで大規模構造が見つかったということは、 $z \sim 5$  という非常に若い宇宙で、大規模構造がすでにありふれた存在になっていることを示唆する。暗黒物質の密度ゆらぎの成長モデルによると、 $z \sim 5$  での密度ゆらぎの絶対値は現在の  $1/5$  程度しかない。したがって、見つかった大規模構造を説明するには、 $10 \text{ Mpc}$  以上のスケールにわたって、何らかの原因で、 $\text{Ly}\alpha$  輝線銀河が暗黒物質よりもずっと強く群れている（つまり、分布に大きなムラがある）と考えなければいけない。2章で LBG について同様の考察を行ったが、LBG のサンプルは赤方偏移の幅が 1 程度もあるため、視線方向の銀河分布が重なり合ってしまう、大規模構造が検出できなかった。 $\text{Ly}\alpha$  輝線銀河を使うことで、大規模構造のスケールで銀河の分布を調べることができたのである。

$\text{Ly}\alpha$  輝線銀河が強く群れている原因としてすぐに思い浮かぶのは、 $\text{Ly}\alpha$  輝線銀河も重いダークハローに属しているということである。もし  $\text{Ly}\alpha$  輝線銀河が  $10^{12} M_{\odot}$  程度以上のダークハローに属しているとすれば、観測されたバイアスを説明できる。ただ、LBG の場合とは異なり、この説明にはいくつか問題がある。

まず、(b) の領域の銀河分布のパターン（二体相関関数）が、モデルが予想するダークハローの分布のパターンと大きくずれているという点である<sup>21)</sup>。LBG とは異なり、ダークハローの中に  $\text{Ly}\alpha$  輝線銀河が行儀良く収まっているという描像はう

まくいかない。次に、(a) と (b) で銀河の分布が大きく異なっているという点である。(a) の領域の銀河分布はランダム分布と有意には違わない。領域間でこれほど分布の様子が違うという結果を、単純なダークハローモデルは再現できるだろうか。また、そもそも (a) と (b) のどちらが平均的な宇宙の姿なのだろうか。最後に、 $\text{Ly}\alpha$  輝線銀河は星質量の小さい銀河だと思われているが、ここで推定したダークハローの質量は LBG のハロー並に大きい。つまり、同じ質量のダークハローなのに、中の銀河の性質が大きく違っているということになる。

そもそも、 $\text{Ly}\alpha$  輝線銀河は重いダークハローと対応していない銀河なのかもしれない。例えば、重いダークハローに落ち込みつつある小さな銀河が、何かの拍子に星形成を始め、一時的に強い  $\text{Ly}\alpha$  輝線を出しているのかもしれない。あるいは、元々の暗黒物質の分布が数十  $\text{Mpc}$  スケールで予想以上に大きくゆらいでおり、 $\text{Ly}\alpha$  輝線銀河の分布はそのゆらぎを正直に反映しているだけである可能性も、完全には否定できない。これは密度ゆらぎそのものに関わる問題である。

赤方偏移の選択幅が非常に狭いために、1回の  $\text{Ly}\alpha$  輝線銀河の探査の体積は LBG の場合の  $1/10$  程度しかない。そのため、図 5 の (a)、(b) のように、探査した領域によって分布の様子ががらりと変わる。 $\text{Ly}\alpha$  輝線銀河の分布について安定した議論をするには、探査する体積を 1 桁ぐらい増やす必要がある。

ここで紹介したのは、銀河とダークハローの関係や、異なる銀河種族の関係が「そもそもどうなっているか」という研究である。この研究を進展させつつ、今後は、「どうして」そうなっているのかも考えていかなければいけない。

すばる望遠鏡の観測の際は、ハワイ観測所の方々にたいへんお世話になりました。この場を借



りてお礼申し上げます。ページ数の関係で全員のお名前を記すことはできませんが、ここで紹介した研究は、岡村定矩氏、宮崎 聡氏をはじめとした **Suprime-Cam** の開発グループ、小平桂一氏、谷口義明氏、林野友紀氏をはじめとした狭帯域バンドの観測チーム、そして柏川伸成氏をはじめとした **FOCAS** チームの方々との共同研究です。なお、紹介した内容のうち、**LBG** に関するすべてと **Lya** 輝線銀河についての一部は、大内正己によって博士論文にまとめられています。

### 参考文献

- 1) Giavalisco M., et al., 1998, ApJ 503, 543
- 2) Giavalisco M., Dickinson M., 2001, ApJ 550, 177
- 3) 日本語の解説の例として、長島雅裕, 2002, 天文月報, 5月号, 211
- 4) Mo H. J., White S. D. M., 2002, MNRAS 336, 112
- 5) Miyazaki S., et al., 2002, PASJ 54, 833
- 6) Steidel C. C., et al., 1996, ApJ 462, L17
- 7) Maihara T., et al., 2001, PASJ 53, 25
- 8) Ouchi M., et al., 2004a, ApJ 611, 660
- 9) Ouchi M., et al., 2004b, ApJ 611, 685
- 10) Kashikawa N., et al., 2004, PASJ, in press
- 11) Sekiguchi K., et al., 2004, in preparation
- 12) Daddi E., et al., 2003, ApJ 588, 50
- 13) Webb T. M., et al., 2003, ApJ 582, 6
- 14) Papovich C., Dickinson M., Ferguson H. C., 2001, ApJ 559, 620
- 15) Shapley A. E., et al., 2001, ApJ 562, 95
- 16) Pascarella S. M., et al., 1996, Nature 383, 45
- 17) Malhotra S., Rhoads J. E., 2002, ApJ 565, L71
- 18) Ouchi M., et al., 2003, ApJ 582, 60
- 19) Shimasaku K., et al., 2003, ApJ 586, L111
- 20) Shimasaku K., et al., 2004, ApJ 605, L93
- 21) Hamana T., Ouchi M., Shimasaku K., Kayo I., Suto Y., 2004, MNRAS 347, 813

### Mapping the Early Universe

**Kazuhiro SHIMASAKU**

*Department of Astronomy, University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033*

**Masami OUCHI**

*Space Telescope Science Institute, 3700 San Martin Drive, Baltimore, MD 21218, USA*

Abstract: The clustering properties of distant galaxies tell us how galaxies formed and evolved in the dark-matter dominated universe. We report a clustering analysis of star-forming galaxies at  $z=4$  and 5 detected in deep Suprime-Cam data.