

すばるで探る遠方宇宙/初期宇宙

柏川 伸成
嶋作 一大

〈国立天文台 181-8588 三鷹市大沢 2-21-1 e-mail: kashik@zone.mtk.nao.ac.jp〉

〈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〉

遠方宇宙はすばるがこれまで最も成果を上げた研究分野の一つである。その背景には、他の大型望遠鏡にはない広視野撮像という観測手法を最大限に活かすことができるという強みがある。すばるを用いた遠方宇宙の研究成果を総括する。

はじめに

「この宇宙には何があるのか？」—人類が400年前に直径5 cmの最初の天体望遠鏡を覗いたとき、こんな素朴な好奇心を抱いていたのかもしれない。以来人類は望遠鏡を巨大化させることによって、地球が太陽の周りを回っていること、天の川は太陽と似たような星の集まりであること、天の川のような銀河がこの宇宙には無数に存在し、膨張する宇宙の中で銀河同士が大規模構造と呼ばれる巨大なネットワークを作っていることを発見してきた。少なくともわれわれに近い宇宙には「何があるのか」が明らかになった現在、口径8-10 mの巨大望遠鏡を手にし、望遠鏡を宇宙に飛ばすようになった人類は、「ではこの宇宙はどのようにできあがったのか」という新しい好奇心を抱いて、遠方の宇宙を調べ始めている。本稿ではすばる望遠鏡を用いた遠方宇宙の研究^{*1}の成果を紹介する。

遠方天体を調べることの意義

宇宙には無数の銀河が存在する。これらの銀河の観測から、宇宙が膨張していること、そして長い宇宙の歴史の中で銀河が進化^{*2}してきたことがわかっている。光速は有限なので、遠方の銀河を観測することは昔の銀河を観測することに対応する。非常に遠方の銀河からの光は、形成されたばかりの銀河の情報を運んできている。形成されたばかりの銀河、すなわち進化の「始まり」としての銀河を観測することは、銀河の進化を理解する上で非常に重要である。

銀河や大規模構造の起源は、宇宙初期に発生した物質の密度揺らぎである。この揺らぎはWMAP¹⁾によって 10^{-5} 程度のCMB (Cosmic Microwave Background=宇宙マイクロ波背景放射)の温度揺らぎとして観測されている。遠方銀河の観測によって、この初期密度揺らぎから現在の銀河に至る進化の道筋をたどることができる。また、宇宙の大規模構造の形成史を明らかにすることも、遠方銀河の観測

の大きな目的の一つである。

宇宙と同程度の年齢を持つ銀河の進化、そしてその銀河の形作る大規模構造の進化を解明することによって、これらの進化に大きな影響を及ぼしたダークマター^{*3}、ひいては宇宙膨張を支配するダークエネルギー²⁾、^{*4}についても理解が進むであろう。^{*5} 銀河進化は銀河同士の衝突・合体で促進されてきたと考えるのが現代天文学の主流であるが、重力相互作用のみならず、銀河内における星形成史、周囲の銀河あるいは銀河間ガスとの輻射相互作用、銀河中心部におけるブラックホールの形成、星間空間におけるダストの形成、超新星爆発による重元素汚染^{*6}、磁場、など種々の物理過程が銀河進化を複雑に決定している。これらの過程を一つひとつ明らかにしていくためにも初期条件としての形成直後の銀河を観測することに意義があることは想像に難くない。

また後述するように銀河間空間の電離化状態も宇宙の「始まり」の頃^{*7}と現在とは大きく異なっていたと考えられている。遠方銀河の観測は今やこの宇宙空間の状態変化を明らかにするという新たな課題を背負うことになった。

遠方天体の探査方法

多くの物理実験では基本的にこちらから対象にアクションを加えそれに対する反応を見ることで物事の本質を見ようとする。これに対し、対象にアクションを加えることが到底できない宇宙観測はやや受動的な「観察」手法のように感じるかもしれない。しかしこの広大な宇宙に対して、アイデアが全くないままちっぽけな8 m望遠鏡を向けても、物事の本質は決して見えてこない。

地球からの距離の並びがそのまま時系列に相当する遠方銀河の観測研究で大きな鍵となるのは、無数に写っている

*1 ここでは「遠方宇宙」として赤方偏移 $z=3$ 以上(宇宙誕生から20億年後まで)の宇宙に着目する。赤方偏移とは、天体からの光の波長が宇宙膨張のために長波長側にずれるそのずれ量。一般に z と書き表す。本来の波長を λ 、ずれを $\Delta\lambda$ として、 $z=\Delta\lambda/\lambda$ で定義される。宇宙論的には z が大きい天体ほど遠方にある天体=過去の宇宙の天体である。図1に赤方偏移とわれわれからの距離の関係を示す。

*2 天体の明るさ、色、質量、金属量などの物理的諸性質が時間に応じて変化することを天文学では「進化」と呼ぶ。

*3 宇宙の質量のうち、水素やヘリウムなどわれわれのよく知っている物質(バリオン)はわずか15%程度であり、残りは暗黒物質(ダークマター)が占めている。ダークマターは電磁波を出さないため直接観測することはできないが、銀河の運動や重力レンズ現象を通して存在が確認されている。宮崎氏の記事参照。

*4 遠方超新星の観測などから判明している宇宙の加速膨張は、ダークエネルギーによって引き起こされていると考えられている。正体がわからないこの仮想物理量が導入された背景とわれわれの実際の問題意識については文献2を参照。

*5 あるいは根本的な理論修正を迫られるかもしれない。

*6 星内部の核反応で生成された重元素は超新星爆発によって周囲の星間空間に放出され、しだいに宇宙の重元素量は増加していく。

*7 この頃の初期宇宙を暗黒時代(ダークエイジ)と呼んでいる。

銀河からいかにして目的の距離にある銀河を選び出すかということである。分光観測をすれば距離は求まるが、それには長い観測時間がかかる。^{*8} しかも、写っている銀河のうち、われわれが興味のある遠方銀河はごく一部なので、銀河をしらみつぶしに分光しても遠方銀河に出会える可能性は低い。そこで、遠方銀河を撮像観測だけからある程度の信頼性で選び出す方法がいくつか考案されている。その代表的な二つの方法を以下に紹介する。

1) ライマンブレイク法—遠方天体からの光は、その経路上にある銀河や銀河間物質に多く含まれる中性水素ガスによってライマン α 遷移(波長 λ 121.6 nm)にちょうど合致する波長で吸収を受ける。この経路上の天体・物質は当然ながら対象の遠方銀河より小さい赤方偏移を持つために、遠方銀河のライマン α 線より短波長側の光はこうした天体・物質によってほぼ連続的に吸収され、観測されるスペクトルにはライマン α 線の前後で大きな段差=ブレイクが生じる。この段差をライマンブレイク^{*9}と呼び、この手法で検出される遠方にある銀河種族はライマンブレイク銀河(Lyman Break Galaxy=LBG)と称されている。ライマンブレイクの生じる観測波長から、その銀河の赤方偏移すなわち距離が推定できる。この手法は遠方銀河に限らずQSO(クエーサー)、GRB(ガンマ線バースト)など他の遠方天体にも応用されている。しかし銀河の連続光が弱すぎるとこのブレイクはノイズに埋もれて見えなくなってしまう。

2) ライマン α 輝線法—そこで遠方銀河のライマン α 輝線を直接観測するという手法が二つめの方法として挙げられる。形成初期の銀河は活発な星形成を起していると考えられるが、銀河中の塵(ダスト)が少ない場合には、若い星からの光によって電離された水素ガスが再結合する際に発するライマン α 輝線を観測で検出できる。このライマ

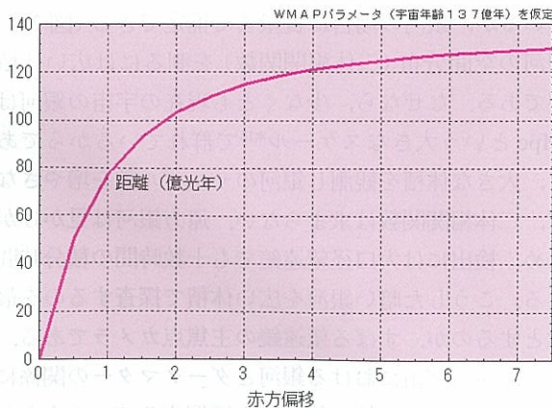


図1 赤方偏移 (z) と地球からの距離との関係。

^{*8} 例えば、後述するすばる主焦点カメラが10時間撮像観測することによって検出できる約10万個の天体をすべて分光観測するためには、現在の最先端の観測技術をもってしても約1,000時間かかる。

^{*9} 実際にはライマン α より高励起のライマン系列すべてがこのブレイクに寄与する。また、91.2 nm のライマン吸収端による連続光吸収も寄与する。

α 輝線が検出された遠方銀河のことをライマン α 輝線銀河(Lyman- α emitter=LAE)と呼んでいる。この輝線だけを効率よく検出するためには、ある狭い波長幅の光だけを透過する狭帯域フィルターと呼ばれる特殊なフィルターを用いる。このフィルターの透過波長範囲内にライマン α 輝線が存在すれば他の波長域に比べて明るく観測されるはずである。しかしこの方法にも難点がある。地上から観測する場合、可視光(300-1,000 nm)の長波長域では地球大気中の原子・分子からの輝線が卓越し、どの波長でも効率よく観測できるというわけにはいかない。暗い遠方のライマン α 輝線が検出できるような、大気の輝線の弱い波長域=赤方偏移範囲は限られている。

以上見てきたように、LBGとLAEは検出手法が異なる遠方銀河であるが、LAEがLBGよりも質量や年齢が小さいという観測や、LAEがいずれはLBGに進化することを示唆する観測なども得られており、両者の進化上・物理上のつながりは強いと考えられている。今後の観測によって両者の関係がもっとはっきりすることが期待される。これら二つの手法^{*10}はそれぞれ難点を抱えつつもこの10年間における遠方銀河探査において大きな成功を収め、今や $z=3-7$ にかけての遠方宇宙における銀河はほとんどこれらの手法で発見されたものとなっている。

遠方宇宙研究におけるすばるの役割

さて、これらの手法はすばる望遠鏡における遠方宇宙研究にももちろん活用されているが、すばるの場合にはもう一つ特筆すべきアクションがある。それは「広視野」観測—宇宙の広い範囲にある天体を一度に検出することができる観測—である。広視野観測の遠方銀河研究におけるメリットは絶大である。

より遠い銀河からの光は弱くなり、検出がより難しくなる。例えば、8 m望遠鏡で検出できる全銀河のうち、 $z=4$ 前後の銀河の割合は4%、 $z=6.5$ の銀河に至っては0.1%以下しかない。このように非常に個数密度の低い天体に対して統計的に意味のある考察をするには、当然広い天域を探索しなければいけない。

この広視野撮像の機能を持っているのは大型望遠鏡の中ですばるだけである。すばるの主焦点カメラは他の大型望遠鏡の視野の20-30倍に相当する $34' \times 27'$ (満月1個分の大きさ)の視野を誇る(林氏の記事参照)。非常に稀な遠方銀河を探査する際はこの視野の広さがそのまま検出効率につながる。もちろん狭い視野しかない他の大型望遠鏡を用いても、幸運にもこうした遠方銀河が検出されることがある。しかし天文学における多くの研究分野について言えることだが、一つの天体・現象を見てもそこから宇宙に普遍的な規則性・法則性を見つけ出すのが難しい場合が多い。遠方銀河と一言で言っても、明るさ、質量、年齢などに大

^{*10} 実際には、これら二つの手法によって候補天体を探した後に、分光観測によって赤方偏移が決定されると確実に遠方銀河だと言える。

きな幅があるため、少数の銀河を調べても銀河進化の全体像は見えてこない。この意味で、幸運に頼る遠方宇宙研究には限界がある。

さらに、後述するように、銀河の空間分布（クラスタリング）を調べるには、銀河の典型的なクラスタリングスケールを超える広い天域を探索する必要がある。この意味においても広視野観測は不可欠だと言える。特に、大規模構造の進化を調べるには、遠方宇宙においても、現在見られる 50 Mpc^{*11}スケールの大規模構造を凌駕するスケールで観測を行わなければいけない。このようにすばるにおける遠方宇宙研究は、主に広視野観測を適用するというアクションを最大限に活かし、銀河を効率よく選択する二つのアクションと様々な新しいアイデアを駆使し、空間分解能に秀でた宇宙望遠鏡、電波・赤外線・X線などの多波長観測と相補的に研究を続けている。

すばる望遠鏡による遠方宇宙研究の成果

では、すばる望遠鏡による遠方銀河の観測の成果を紹介しよう。まずは、背景知識として、銀河の形成と進化のシナリオをスケッチしよう。銀河は、星や惑星の生まれる舞台として、また、銀河団や大規模構造を構成する要素として重要な天体である。

現在標準的とされている銀河形成モデル（以下、標準モデルと呼ぶ）によると、銀河やその集団は、宇宙初期に量子的に発生した微小な密度揺らぎが自己重力によって成長してできた。この際、宇宙の物質質量の8割以上を占めるダークマターの揺らぎの成長を考えなければならない。標準モデルにおいては、コールドダークマター（CDM）という速度分散の小さい未知の物質を仮定する。様々な観測から、ダークマターが実際に CDM の性質を持つことは確実である。^{*12}

ダークマターは重力相互作用しにくい粒子なので、宇宙の歴史の中で、いつ、どれくらいの質量の重力束縛系ができるかは正確に予想することができる。この束縛系は、ダークマターの重力に支配されていることからダークハローと呼ばれる。^{*13} われわれが実際に目にする銀河、すなわち星とガスの系は、ダークハローの中でガスが冷えて星が生まれることでできると考えられる。

銀河の形成と進化を解明するには、ガスの冷却と星の形成、超新星爆発によるガスの再加熱、星で作られた金属によるガスの汚染、銀河中心の巨大ブラックホール活動、銀河と銀河間物質との相互作用、銀河同士の相互作用などのバリオンの物理を理解しなければいけない。いずれも大変複雑な過程である。見過ごされている過程もあるに違いな

い。このような複雑な過程を伴っている上に、遠方銀河の観測の歴史もまだ浅いため、銀河の形成と進化の理論は完成にはほど遠い。しかし、新しいデータやアイデアをもとに、銀河に対するわれわれの理解が急速に深まっているのも事実である。以下に見るように、すばるはわずか数年の観測で、遠方銀河の知識を飛躍的に増大させた。

(1) 遠方銀河の空間分布—銀河はどこで生まれるか—

銀河がダークハローの中で成長するとすれば、ダークハローの質量は銀河にとって非常に重要なパラメータといえる。遠方銀河はどんな質量のダークハローの中に存在するのだろうか。そもそも、銀河がダークハローの中で生まれるという仮説は正しいのだろうか。ダークハローの質量は、内部の物質（星やガス）の運動から原理的には測定できる。しかし現在の、つまりわれわれの近くにある銀河についてさえ、ダークハローの質量を測定するのは難しい。銀河の内部運動を、星やガスがほとんど存在しないようなハロー外縁部まで調べる必要があるからである。まして遠方銀河のダークハローの質量をこのような方法で測ることはまだできない。しかし全く手段がないわけではなく、銀河の空間分布の強度からダークハローの質量を「推定」することができる。

ダークハローの形成モデルは、重いダークハローほど強く群れる、すなわち寄り集まる傾向が強いことを予想する。群れ具合（クラスタリング）の定量的指標としては二体相関関数がよく用いられる。二体相関関数とは、ある距離だけ離れた二つの場所に銀河が存在する確率（の、ランダム分布の場合の期待値からのずれ）を距離の関数として表したものである。銀河の二体相関関数から、その銀河の属するダークハローの群れ具合がわかり、ダークハローの質量を推定することができる。^{*14} 見えないダークハローを、銀河の分布を通して「見る」わけである。夜の地球の衛星画像から光の分布を手掛かりに都市の場所を推定するのと似ているが、銀河の場合は質量まで推定できる（図2）。

銀河の空間分布（二体相関関数）を測るには広い体積が必要である。なぜなら、少なくとも現在の宇宙の銀河は数十 Mpc という大きなスケール^{*15}で群れているからである。また、大きな体積を観測し銀河のサンプル数を増やさなければ、二体相関関数は求まらない。遠方銀河は見かけが暗いため、検出には大口径望遠鏡でも十数時間の積分時間を要する。こうした暗い銀河を広い体積で探査するのが最も得意とするのが、すばる望遠鏡の主焦点カメラである。すばるは、遠方宇宙における銀河とダークマターの関係について、質・量ともに他の望遠鏡を圧倒するデータをもたらした。

図2はSXDF（すばるXMMディープフィールド）という

*11 1 pc（パーセク）=約3.26光年。

*12 ダークマターの正体は、地上の実験で直接検出するまでわからないかもしれない。

*13 ハロー（halo）とは暈（かさ）のことである。いわゆる銀河と呼ばれる、光っている天体を包み込むように、暗黒物質の大きな量が存在する、とイメージしていただきたい。

*14 もちろん、内部運動などから直接測る場合に比べて、質量の決定精度は相当落ちる。

*15 現在の宇宙では銀河の二体相関関数は約10 Mpc、銀河団の二体相関関数は数十Mpcの距離までほぼべき関数に従うことが知られている。

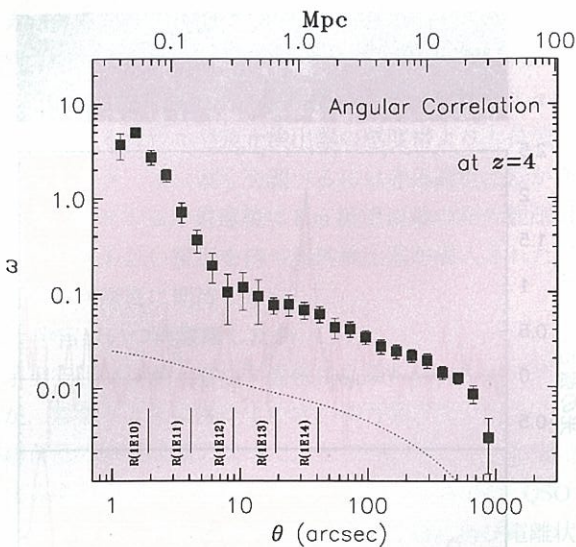


図2 $z=4$ の遠方銀河 LBG の二体相関関数。横軸は見かけの銀河同士の角度距離 (下横軸, arcsec は角度秒), あるいは $z=4$ での実距離 (上横軸), 縦軸は群れ具合の強さを表す。点線は CDM モデルより予想されるダークマターの二体相関関数。ダークマターに対して銀河のほうがより強く群れていることが分かる。R() は () 内の質量 (単位は太陽質量) に相当するダークハローの半径 [文献 3 より改変]。

1.3 平方度の天域で見つかった $z\sim 4$ の銀河の二体相関関数である。³⁾ まず, 10秒角以上のスケールにおける二体相関関数はダークハロー同士の相関を反映している。図から, ダークハローが現在の銀河系並みに重い質量を持っている ($10^{11}\sim 10^{12}$ 太陽質量) ことがわかる。

さらに, 約10秒角を境に二体相関関数が折れ曲がっていることが分かる。10秒角という角度スケールは約 300 kpc という実スケールに対応し, これは CDM を仮定した場合の $z=4$ における $10^{11}\sim 10^{12}$ 太陽質量の質量を持つダークハローの大きさにぴったり一致する。折れ曲がりの10秒角以下の部分は, 一つのダークハロー内での複数の銀河同士の相関を反映する。すなわち図2で小スケールでの二体相関関数が盛り上がっているのは, 一つのダークハローの中に複数の銀河が存在していることを意味する。

このすばるの観測は, 重いダークハローの中で複数の遠方銀河が成長していることを初めて明確に示した。これらの銀河は, 現在の宇宙に数多く見られる楕円銀河のような明るい銀河の祖先だと予想できる。

しかし, 銀河とダークハローの関係は常に単純なわけではない。ライマン α 輝線の強い比較的若いと考えられている遠方銀河 (LAE) の $z=5$ における空間分布を調べた結果, 図3に示すように数十 Mpc という大きなスケールの個数密度の濃淡があることが分かった。⁴⁾ これは現在の宇宙の大規模構造に匹敵する。このような大スケールの構造が早くも $z=5$ という宇宙初期に形成されていることは驚きであり, しかも, その分布は, CDM を仮定するダークハローの分布では容易に再現できない。同じく $z=3$ においても, さらに広範囲 (~ 50 Mpc) に及ぶ LAE の大規模構造がすばるによって発見されており, やはり CDM モデルでは

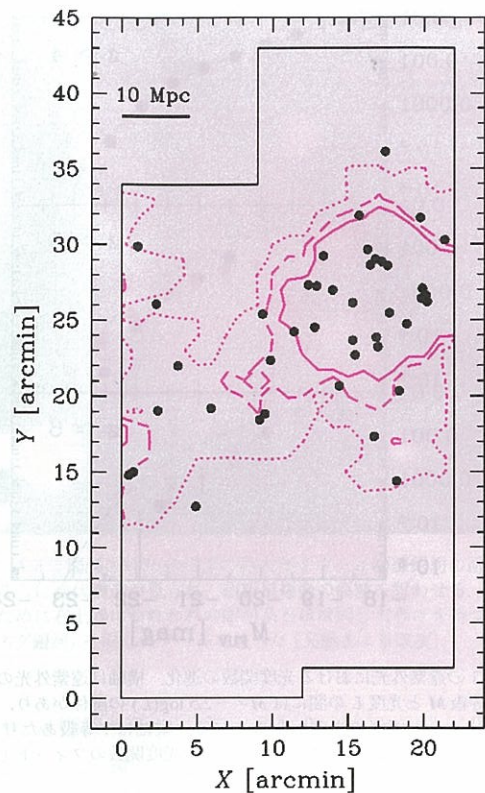


図3 $z=4.86$ で発見された遠方銀河 LAE の初期大規模構造。図の右上で強く群れて分布していることが分かる。縦軸横軸は角度距離で LAE の天球上分布と見てよい。実距離 10 Mpc に相当する長さを横棒で示す [文献 4 より改変]。

単純に説明することができていない。⁵⁾ この予想外の発見は, 銀河が生まれ育つ場所について新たな謎を投げかける。

(2) 遠方銀河の光度関数—銀河はいつ星を作ったのか—

遠方銀河から届く光は赤方偏移のために $1+z$ 倍に波長が長くなっている。したがって, 可視光で遠方銀河を観測する場合, その光は銀河自身にとっては遠紫外域 (10–200 nm) で放射された光である。遠紫外光は重い (すなわち寿命の短い) 星からの寄与が卓越するため, 遠紫外光の強度からその銀河の星形成率 (1年当りに生まれる星の総質量) を評価することができる。すばる望遠鏡は, $z>4$ の銀河を多数検出し, その光度関数^{*16}を求めることで, 銀河の星形成活動の時間変化を調べた。この観測でもすばるの広視野が活かされている。

図4は, $z=4, 5, 6$ における LBG の光度関数を示す。黒丸と赤丸がすばる望遠鏡の結果である。^{6,7)} 参考として, $z=6$ には, ハッブル望遠鏡で得られた最新の結果も示す⁸⁾ (ただし, すばるのデータを含め, $z=6$ の銀河は $z=4, 5$ に比べて分光同定が進んでいないため信頼性が劣る)。この図を見ると, $z=5$ の値には多少の食い違いが残っているものの, 全体の傾向として, 過去ほど銀河の星形成活動が低下していることが分かる。星形成活動が高い大質量銀河は, $z=6$ から $z=4$ にかけて宇宙に現れたと言えそうである。

*16 光度 (単位時間あたりに天体から放出される全エネルギー量) に対する分布関数。天文学においては最も基本的な統計量の一つ。

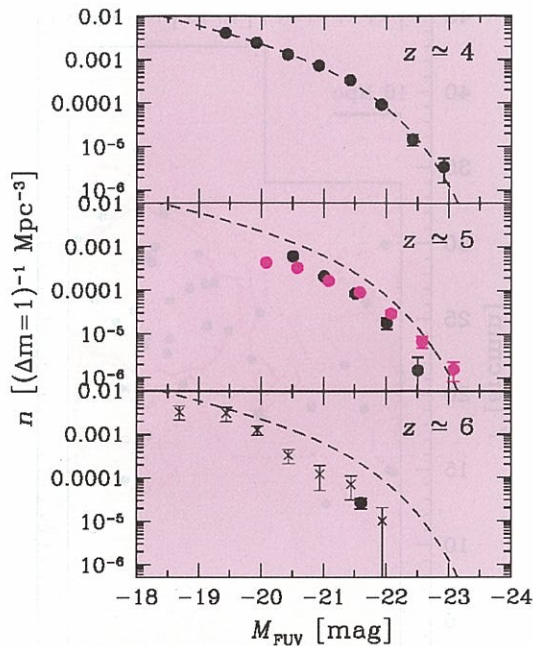


図4 LBGの遠紫外光における光度関数の進化。横軸は遠紫外光の絶対等級。絶対等級 M と光度 L の間には $M \propto -2.5 \log(L)$ の関係があり、この図の右側へいくほど銀河の光度が明るくなる。縦軸は1等級あたり 1 Mpc^3 あたりの銀河個数密度。点線は $z \sim 4$ の場合の光度関数のフィット [文献6-8より改変]。

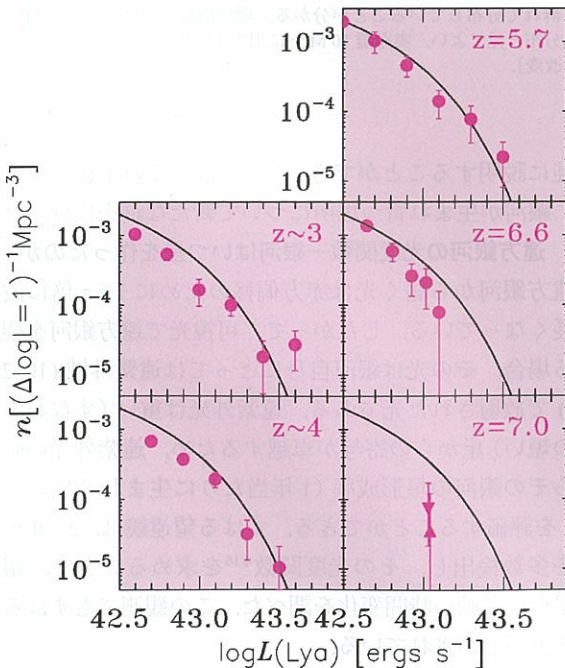


図5 LAEのライマン α 輝線光度における光度関数の進化。横軸はライマン α 輝線光度。縦軸は1等級あたり 1 Mpc^3 あたりの銀河個数密度。曲線は $z = 5.7$ の光度関数のフィット。 $z = 6.6, 7.0$ については文献9, 10より、 $z = 3.0-5.7$ については大内氏よりデータ提供。

一方、図5は、ライマン α 輝線の強い銀河(LAE)に限定して、 $z = 3$ から7までのライマン α 輝線光度の光度関数を描いたものである。これを見ると、過去にいくに従って星形成銀河の個数の減少が見られた図4とは異なり、 $z = 3$ から $z = 5.7$ までは光度関数はほぼ一定である。ライマン α 輝線は進化の進んでいない若い星形成銀河から出やすいこと

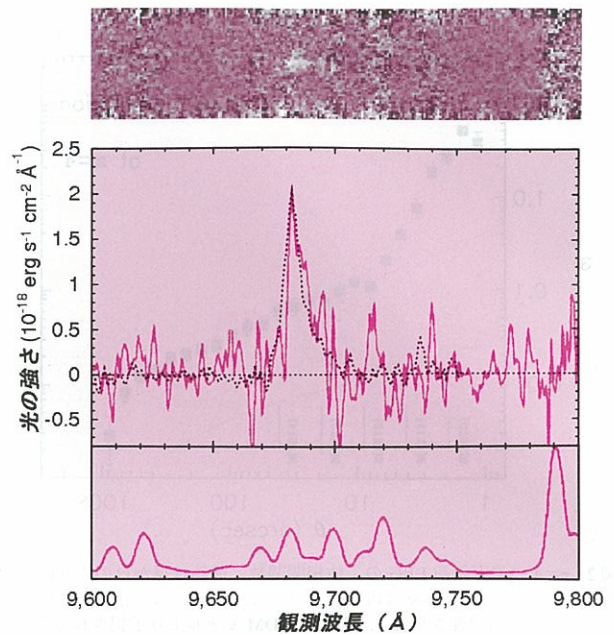


図6 すばるによって $z = 6.96$ に発見された銀河のライマン α 輝線スペクトル。上の図は実際に取得されたスペクトル画像で、下の図はスペクトルを1次元プロットしたもの。遠方銀河のライマン α 輝線に特徴的な左右非対称な輝線プロファイルが見える。この銀河は現在分光同定された最遠方の天体である。最下段の図はノイズとなる地球大気のスpectrum [文献10より改変]。

を考えると、この結果は、過去にいくにつれて若い銀河の比率が高まっていることを示唆する。

図5のもう一つの特徴は、ライマン α 輝線が明るい銀河の数が、 $z > 5.7$ で減少していることである。後述^{*17}するように、この減少は、銀河自身の進化ではなく、宇宙の再電離現象を反映している可能性がある。⁹⁾

(3) 最も遠い銀河を探す—銀河はいつ生まれたのか—

これは、銀河形成の現場を直接見るという分かりやすい課題であるとともに、宇宙の再電離を探る上でも重要である。分光観測で赤方偏移の確定している銀河のうち、現在最も遠くにあるのは、SDF(すばるディープフィールド)という天域で発見された $z = 6.96$ の銀河である。¹⁰⁾これは、すばる望遠鏡を使って2006年に発見された。^{*18}この銀河は、先に述べた(2)ライマン α 輝線を使う方法によって検出された。 $z = 7$ 付近、すなわち970 nm付近に赤方偏移したライマン α 輝線を専用の狭帯域フィルターで捕らえ、分光観測をして赤方偏移を確定する。

分光観測で得られた $z = 6.96$ の銀河のスペクトルを図6に示す。 $z = 7$ 付近の銀河は広い主焦点カメラの視野にこの1個だけしか見つからなかった。これは予想外に少ない数である。

銀河探査は赤方偏移が7の辺りから急に難しくなるようだ。これは $z = 7$ の時代にはまだ銀河の形成が進んでいないか、あるいは宇宙の再電離がまだ完了していないためだと

*17 詳細は文献4を参照。

*18 なお、分光同定された $z > 6$ の銀河の大部分はすばるで発見されたものである。

考えられる。

残念ながら、すばるの主焦点カメラで探査できるのは $z=7.5$ 付近が限界である。これを超えるとライマン α 輝線の観測される波長が可視光検出器の感度帯よりも長波長になってしまう。より遠くを調べるには赤外線検出器が必要である。最近すばる望遠鏡に8 m級望遠鏡の赤外線観測装置の中では最も広い視野を持つ赤外検出器が導入された。その遠方銀河探査に期待したい。

(4) 宇宙はいつ再電離したか

宇宙空間は、ビッグバン直後は高温のプラズマ状態だったが、膨張とともに冷えていき、40万歳の頃に陽子と電子が結合して中性状態になった。ところが現在の宇宙空間はほぼ完全に電離した状態である。宇宙背景放射やQSOの観測によると、宇宙は $z\sim 10$ から $z\sim 6$ の間に再び電離状態になったらしい。これを宇宙の再電離という。¹¹⁾ 再電離に必要な電離紫外光は初代天体から放射されたと考えられる。再電離が始まることによって、宇宙は天体の存在しない暗黒時代(ダークエイジ)に終わりを告げることになる。初期宇宙の飛躍的な宇宙空間の変化である再電離過程は非常におおまかには以上のように考えられているのだが、いつ、どのように、何によってこの現象が引き起こされたのかは、まだほとんどわかっていない。

宇宙空間の電離状態を探る方法の一つに、ライマン α 輝線銀河を使う方法がある。ライマン α 輝線は水素原子に散乱されてしまうため、中性状態の宇宙からやってくる銀河のライマン α 輝線は弱くなる。実は、図5で、ライマン α 輝線の光度関数が $z>5.7$ で減少し、特に $z=7$ では主焦点カメラの視野に1個しか見つかっていないのは、その時代には宇宙空間がまだ十分に電離していなかったからかもしれない。もしこれが事実なら、再電離過程の時代の天体を発見したことになり、宇宙の進化を考察する上で非常に大きな意義を持つが、銀河の数がそもそも $z>6.5$ で少なかった可能性や、再電離過程の空間的非一様性の可能性など、議論の余地は残されている。なお、すばる望遠鏡によって、 $z=6.3$ のGRBのスペクトルに現れた中性の銀河間物質による減衰翼からも当時の宇宙の電離度が見積もられ、ほぼ同様な値が得られている。¹⁰⁾ いずれにしても、いよいよ銀河の観測は宇宙再電離時代に足を踏み入れようとしている。

(5) 原始銀河を探す—銀河はどのように生まれるのか—

銀河が生まれる瞬間を見た者はまだいない。おそらく、冷えたガスから最初にまとまった量の星が生まれたら、銀河が誕生したといえるのだろう。 $z=7$ に銀河が見つかったからといって、すべての銀河が $z=7$ 以前に生まれたとは限らない。実際、銀河は幅広い時代に生まれ得ると考えられている。しかし、生まれたての銀河(ここでは原始銀河と呼ぶ)と言える期間は非常に短い(典型的に 10^6 年以下)ため、稀にしか存在しないと予想される。したがって、ここでも、広視野・大口径が発見に有利になる。

原始銀河は、ガスの降着などによって空間的に広がった

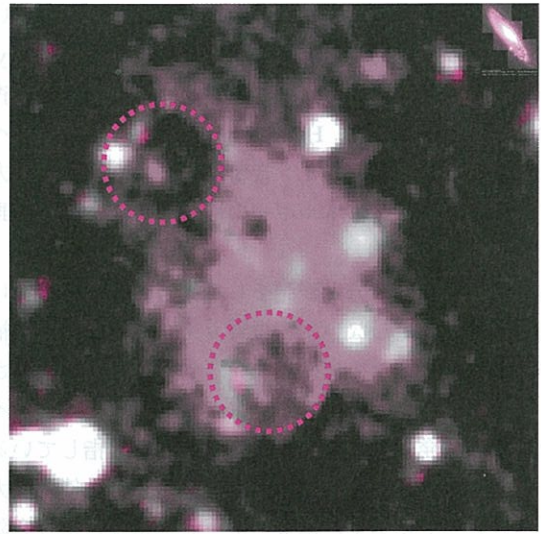


図7 すばるで観測された $z=3.1$ の巨大ライマン α 輝線銀河の画像。赤い丸のところに泡状構造が見られ、超新星爆発の痕跡を思わせる。大きさの比較のために右上隅にわれわれの銀河系とほぼ同じ大きさを持つM31(アンドロメダ銀河)を同じスケールで並べた[文献5より改変]。

ライマン α 輝線を出すと考えられる。また、星が非常に若い場合や、金属量がゼロに近い場合は、ライマン α 輝線が非常に強くなる。したがって、こうした特徴を持つ天体の中に原始銀河が隠れている可能性がある。

すばるはこうした銀河の探査を初めて大規模に行い、 $z=3-5$ の宇宙で、原始銀河の候補を多数見つけた。その中から、巨大なライマン α 輝線銀河の画像を図7に示す。この銀河はすでに知られていた銀河だが、すばるによってその内部構造が明らかになった。⁴⁾ この銀河はわれわれの銀河系の数倍の大きさがあり、所々に泡のような構造が見える。これは初期の激しい星形成活動に伴うたくさんの超新星爆発によってできたのかもしれない。

すばるはこのような原始銀河の候補を多数見つけたが、その性質を詳細に調べるには、赤外や電波など多波長での深い追観測が必要であり、これは今後の課題である。すばるの見つけた銀河は明るいものが多いため追観測に向いている。また金属量がゼロに近いガスから生まれる最初の星は、我々が知っている星とは随分違うと考えられているため、恒星物理の点からも興味深い。

今後の観測

すばる望遠鏡は遠方宇宙の知識を大きく広げた。今後は、これまでの成果を土台にして、銀河の新しいパラメータ空間を開拓していかなければならない。例えば、銀河の性質のどこまでがダークハローの質量で決まり、どの性質が他の要因で決まるのか、宇宙再電離の時代にはどのような性質の銀河が存在するのか、原始銀河内ではどのような星が生まれているのか等、興味深い課題が多い。もちろんこれらの課題はすばる望遠鏡だけで解決するわけではないが、すばるも新しい観測装置を用意して次の観測に備えている。最後にこれら次期観測装置のいくつかを紹介したい。

まず、主焦点カメラのグレードアップが計画されている。現在のカメラの視野を約10倍にするというもので、Hyper Suprime-Camと呼ばれる。z>7の銀河や原始銀河の探査に威力を発揮するだろう。Hyper Suprime-Camと次に述べるFMOSなどを用いてバリオン音響振動という現象を遠方宇宙で検出し、ダークエネルギーの性質を探ろうという野心的な計画もある。

遠方銀河の候補は分光観測をして赤方偏移を決めなければ遠方銀河と確定しない。広視野カメラで見つかる候補を効率よく分光するためには、分光器にも広視野が要求される。すばるは、FMOSという主焦点広視野多天体ファイバ一分光器を開発中であり、2008年の稼働を目指している。

レーザー光による人工星を空に作り、それを使って大気の揺らぎをリアルタイムにモニターして星像の歪みを防ぐ、補償光学も運用される予定である(家氏の記事参照)。ハッブル宇宙望遠鏡を上回る解像度が実現され、遠方天体に対する感度も飛躍的に向上する。形成期の銀河の姿を目の当たりにする日も近いかもしれない。

本稿にコメントをくださった青木和光氏、図5を快く作成してくださった大内正己氏に感謝の意を表したい。

参考文献

- 1) 小松英一郎: 日本物理学会誌 62 (2007) 583.
- 2) 須藤 靖, 他: 日本物理学会誌 62 (2007) 83.
- 3) M. Ouchi, *et al.*: *Astrophys. J.* 635 (2005) L117.
- 4) K. Shimasaku, *et al.*: *Astrophys. J.* 586 (2003) L111.
- 5) Y. Matsuda, *et al.*: *Astron. J.* 128 (2004) 569.

- 6) M. Yoshida, *et al.*: *Astrophys. J.* 653 (2006) 988.
- 7) I. Iwata, *et al.*: *MNRAS* 376 (2007) 1557.
- 8) R. Bouwens, *et al.*: *Astrophys. J.* 653(2006) 53.
- 9) N. Kashikawa, *et al.*: *Astrophys. J.* 648 (2006) 7.
- 10) M. Iye, *et al.*: *Nature* 443 (2006) 186.
- 11) 戸谷友則: 日本物理学会誌 62 (2007) 23.
- 12) T. Totani, *et al.*: *PASJ* 58 (2006) 485.
- 13) Y. Matsuda, *et al.*: *Astron. J.* 128 (2004) 569.

著者紹介



柏川伸成氏: 銀河の形成や進化についての観測的な研究が専門。最近では銀河と銀河間ガスの関係に焦点をあてている。



嶋作一大氏: 専門は銀河天文学。主に可視と赤外線を用いて銀河を研究している。最近では形成初期の銀河に興味がある。

(2007年8月10日原稿受付)

The Early Universe Probed with Subaru

Nobunari Kashikawa and Kazuhiro Shimasaku

abstract: Subaru has obtained many important results in the study of the distant universe. It is primarily because Subaru has a unique capability of wide-field imaging observation, which is an essentially powerful tool for studies of high-redshift galaxies. This article summarizes a series of scientific milestones.

すばるで観測する宇宙の暗黒成分

宮崎 聡

〈国立天文台先端技術センター Advanced Technology Center/Subaru Telescope, National Astronomical Observatory of Japan, 650 N A'ohoku Place, Hilo, HI 96720, USA e-mail: satoshi@subaru.naoj.org〉

宇宙には、光を発しない暗黒物質が、通常の物質の10倍以上存在することは、1930年代から指摘されていた。一方近年、超新星の観測により宇宙は加速膨張しているということが指摘されるようになった。この観測結果を現在の宇宙論で説明しようとする、暗黒物質(エネルギー換算で)2-3倍の量の暗黒エネルギーで宇宙が満ちている必要がある。これら宇宙の暗黒成分の存在は、3度K背景放射の精密観測により確定的になった。存在を議論する時代はすでに終わり、我々はその正体を解明することを目指さなければならない。本稿ではすばる望遠鏡によるこれまでの観測成果を概観し、将来計画について議論する。

1. イントロダクション

ダークマターとは自ら光(電磁波)を発しないため、直接観測することが困難な物質の総称である。弾丸銀河団(Bullet cluster)と呼ばれる銀河団がある(図1)。これは二つの銀河団が過去に衝突を経験して、互いに離れ去りつつある状況を観測していると考えられている。図中で点線で囲んだところは、銀河が密集している領域を示し、中央の実線で囲まれた領域はX線で観測した高温プラズマを示す。衝突の際、銀河同士は無衝突系であると考えられるので、

ほとんどがそのまますり抜ける、一方、互いに相互作用する衝突系であるプラズマは、衝突時にお互いに圧力(ラム圧)を受けるため、少し遅れる。これが、銀河分布とプラズマ分布がずれている理由である。一方、外側の実線で囲まれたところは、重力レンズ効果(第2.1章を参照)から計測した(ダークマターの)質量集中が見られる領域であるが、これは銀河の分布とほぼ一致している。これは、ダークマターが通常物質(バリオン)ではなく、無衝突系の粒子であるという、直接的な証拠となっている。一方、銀河