

銀河宇宙の進化を俯瞰する

— 銀河，銀河団のアセンブリーと星形成 —

児玉 忠 恭

〈国立天文台 〒181-8588 三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: kodama@th.nao.ac.uk

すばる望遠鏡は現在 8 m 級で他に類を見ない 30 分角の広視野を誇る可視光撮像カメラ (Suprime-Cam) を持ち、数年後には、近赤外の広視野撮像分光装置 (MOIRCS や FMOS) も続々と登場します。これによって、我々が今までハッブル宇宙望遠鏡 (HST) などにより竹筒を通して垣間見ていた遠方宇宙を、魚眼レンズでもって俯瞰することができるようになったのです。本稿では、これらのユニークな広視野観測装置を用いて、様々な時代の銀河宇宙を俯瞰し、銀河・銀河団スケールの形成・進化の様子を実証的に描写してゆく戦略を概説します。

1. はじめに

我々の周りに無限に広がる銀河宇宙……これがいつどのような過程を経て形作られてきたのかを明らかにすることは、銀河天文学者の究極の目標です。今日の標準宇宙モデル (冷たい暗黒物質 CDM に満ちた宇宙モデル) では、初め質量の小さなスケールの密度揺らぎが成長して崩落し、その中でガスが収縮し星が生まれます。そしてそれら銀河片が重力的に寄せ集まって次第に銀河、銀河団といったより大きなシステムが順次形成されてきたと考えられています¹⁾。では実際の宇宙では、どのようなになっているのでしょうか？ 我々は現在、地上大望遠鏡時代に突入り、このような理論を観測によって直接検証することができるようになってきました。本稿では、そのような取り組みの例をご紹介します。また今後どのように発展させていくべきかを述べたいと思います。

銀河、銀河団の形成・進化を記述する二つの基本的なプロセスは、「星形成」と「アセンブリー」であると言えるでしょう。星形成とは、言うまでもなく、密度の高い冷えたガスから星が生まれるという、いわゆる「銀河」としてのアイデンティテ

ィーを獲得することを意味し、その後もガスがある限り星は作られ続けてでしょう。一方アセンブリーとは、上で言ったように、銀河片や銀河が集合、合体しながら、より大きな銀河、銀河団へと進化していくという、いわゆる階層的構造形成を意味します。

この両者のプロセスは、互いに区別されるべきものですが、密接な関係にもあります。例えば、銀河片が合体して銀河になる時には激しい星形成を誘起するかもしれません²⁾、銀河が集団化して銀河団になっていく過程では、銀河-銀河相互作用や、銀河ガス-銀河団ガス相互作用などのいわゆる外的環境効果が働く可能性もあるからです^{3), 4)}。したがって、銀河、銀河団の星形成とアセンブリーの歴史を、観測によって紐解いてゆくには、両者のプロセスを独立に見るのではなく、互いに関連付けて見るのが重要です。

それではまず、銀河団のアセンブリーの様子から見てみることにしましょう。

2. 銀河団のアセンブリー

図 1 に示したのは、N 体計算によるダークマターの構造形成のシミュレーション⁵⁾で、現在立派な

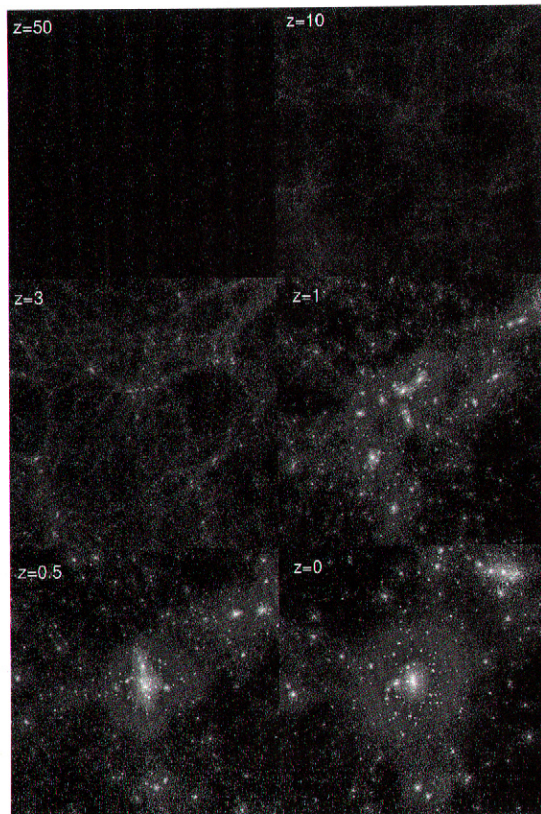


図1 銀河団の構造形成の様子を示す多体計算シミュレーション⁵⁾。SCDM($\Omega=1$)の場合。それぞれのパネルの一辺の長さは $10h_{50}^{-1}$ Mpc (共動座標)。

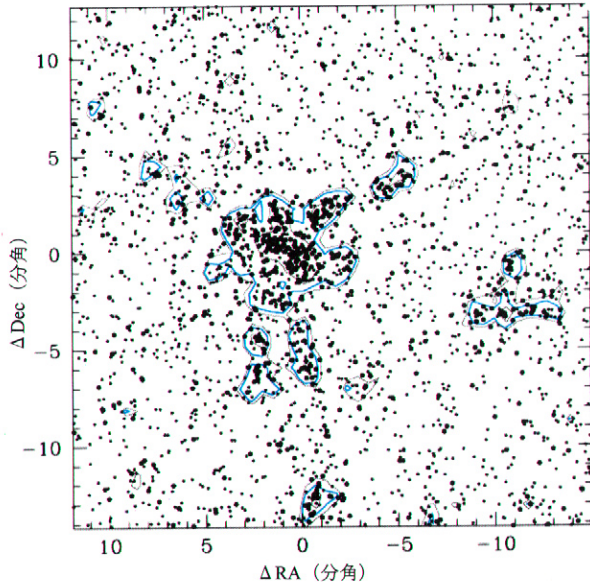


図2 A851 銀河団 ($z=0.41$) の広視野マップ (一辺 $11h_{50}^{-1}$ Mpc)⁶⁾。点は photometric redshift によって選ばれたメンバー銀河。大きい点と小さい点は、ある色境界でわけた赤い銀河と青い銀河。コントアはメンバー銀河の個数面密度を表す。銀河団コアの周りに、多数の銀河群がフィラメント状に存在する。

銀河団の領域を時間を遡って眺めたものです。小さな構造が先に成長し、それらが寄せ集まって次第に大きな構造へと進化してゆく様子がよく判ります。現在では一つの大きな銀河団が、昔はフィラメントやクランプによって特徴付けられる複雑な構造をしていたことが予想されます。

では実際の宇宙ではどうでしょうか？

これには我がすばる望遠鏡が大きな威力を発揮します。すばるは、8 m 級望遠鏡では他に例を見ない広視野のカメラを持つからです。このカメラは、たとえば $z=0.4$ にある遠方銀河団に向ければ、実に $11h_{50}^{-1}$ Mpc 四方もの広い領域を一望のもとに見渡すことができます。これに、photometric redshift という銀河のスペクトルエネルギー分布から赤方偏移

を推定する手法を用いて、前景背景にある銀河を効率よく除去してやると、銀河団広域マップがぐっつきりと浮かび上がります (図2)⁶⁾。銀河団の中心部から四方八方に伸びる多数のフィラメント構造がはっきりと確認できます。これはまさに、多数の銀河集団が、フィラメントに沿って銀河団に引きずり込まれてゆくアセンブリーの現場を見ているものと考えられます。シミュレーションの同時代の絵と酷似しています。

より遠方に行くとうどうでしょうか？

図3は、同様な手法で、 $z=1.3$ にある超銀河団領域を眺めたものです⁷⁾。今度は多数のクランプが群れており、遠方銀河団のアセンブリーの激しさを物語っております。これもシミュレーションの予測とよく似ています。このように、すばるの到来によっ

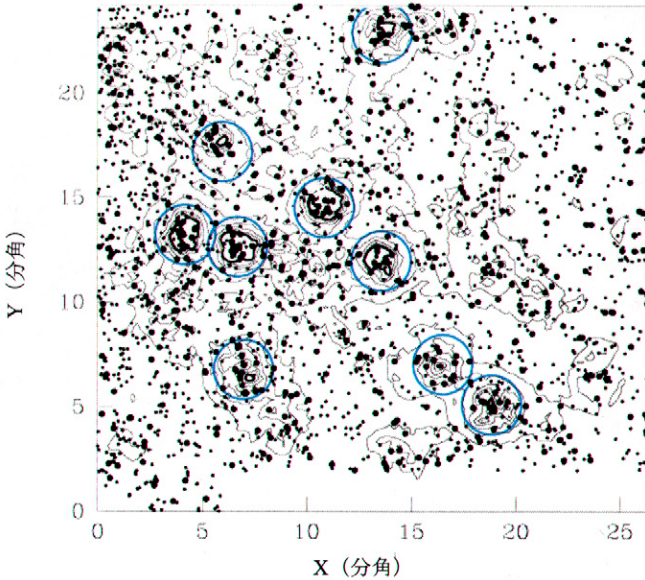


図3 Lynx 超銀河団 ($z=1.3$) の広視野マップ (一辺 $18h_{50}^{-1}\text{Mpc}$)⁷⁾. 点は photometric redshift によって選ばれたメンバー銀河. 大きい点と小さい点は, ある色境界でわけた赤い銀河と青い銀河. コントアは赤いメンバー銀河の個数面密度を表す. 多数の銀河団/銀河群によってクランピーな構造を示す.

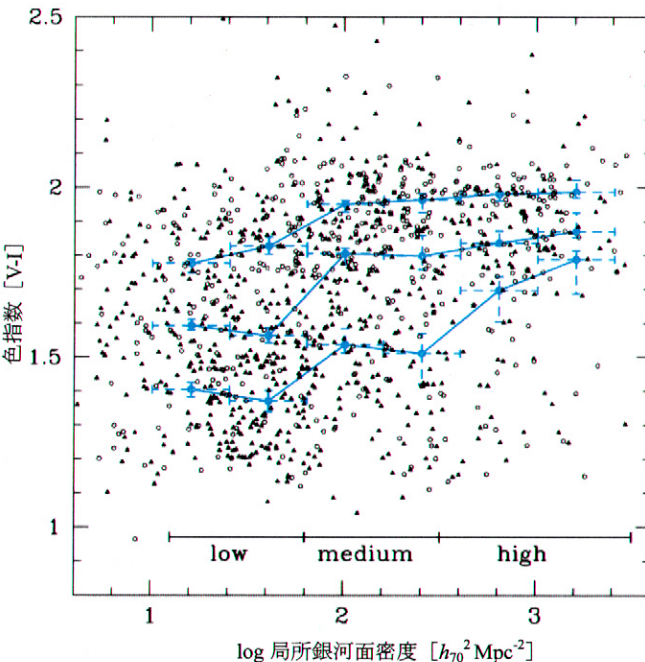


図4 A851 銀河団 ($z=0.41$) のメンバー銀河の色と局所銀河面密度との相関⁶⁾. 3本の線は色分布の25%, 50%, 75%パーセンタイルの点の軌跡. ある臨界密度を境に急激に色に変化する.

て, 遠方宇宙での構造形成の様子を直接とらえられるようになったのは, 実に革命的なことです.

3. 銀河進化への環境効果

さて, このような銀河団のアセンブリーの中で, 個々の銀河はどのように進化するのでしょうか? 銀河団は周囲から銀河グループやフィールド銀河のみをみながら常に成長を続けています. 落ちてくる銀河達はこのアセンブリーの過程で, 環境の変化に伴って影響を受けながら進化して行くでしょう. 銀河密度が高くなれば, 銀河間の相互作用や合体が起こり易くなるでしょう³⁾, また銀河団ガスの中に高速で突っ込めば, 動圧によって銀河ガスが剥ぎ取られてしまうようなことも起るでしょう⁴⁾. 従ってこのような広視野観測によって, 銀河の特性がどのような環境でどのような変化を起こしているのかを見極めてやるのが重要です.

そこで, 先ほどの $z=0.4$ の銀河団で銀河の色が環境と共にどのように変るのかを調べたのが図4です⁶⁾. 銀河の色を局所銀河面密度に対して表示したものです. すると, ある密度を境にして銀河の色分布が急激に赤くなることが判ります. この臨界密度は図2の青いコントアに相当します. 驚くことに, この臨界密度が銀河団コアから遠く離れたフィラメントやサブクランプで既に達成されています. これは大変面白い発見で, 銀河が銀河団へとアセンブリーしてゆく過程で, 動圧が卓越する銀河団コアへ到達する以前に,



既にサブクランプ程度の密度になった環境で大きな環境効果を受け、星形成率が一桁程度も減衰することを物語っているのです。

一方で、銀河には、密度が高い所ほど早期型銀河の割合が高く、密度が低い所ほど晚期型銀河の割合が高いという、形態密度関係の存在がよく知られています⁸⁾。従って、我々がここで見ている急激な色の変化は、銀河形態の変化と関係している可能性が強いと言えます。このような銀河の集団化に伴う環境効果が、引いては銀河のハッブル系列形成の起源と関係があるとも考えられます。

では、このような銀河群の環境で一体なにが起っているのでしょうか？ 一つの候補は、銀河同士の相互作用です。ちょうど銀河が寄せ集まって銀河団が形成されるように、銀河のスケールでも銀河片が集団化したり銀河同士が合体をしたりして、より大きな銀河へと成長していくと考えられます。事実、 $z = 0.8$ 銀河団の HST モザイク観測により、銀河団の比較的外側に合体中と思われる銀河が 10 組以上見つかったという報告もあります⁹⁾。これらがまさに銀河団に崩落する途中の合体銀河なのかもしれません。

4. すばる PISCES プロジェクト

このように、銀河の形成・進化は、もっと大きなスケールの構造形成との関わりの中で考えることが極めて重要です。そしてそのためには、銀河団の周りに広がるフィラメントや銀河群そして一般フィールドへと至る様々な環境を包含した広大な視野の観測が不可欠です。

日本は今やすばる望遠鏡と広視野カメラというすばらしい武器を手にしています。ところが、すばるのこれまでの風潮を見ますと、人間の当然の欲求ではあるものの、とにかく遠方の未知の世界を見たいという風に突っ走ってしまっているように思えます。しかしもう少し近場でも、環境軸方向に抜けた観測というもの、広視野を持つすばるの使命であると思います。

そこで私が PI となって、全国の銀河銀河団研究者に広く呼び掛け、すばる PISCES プロジェクトを立ち上げつつあります（申請中）。これは Panoramic Imaging Survey of Cluster Evolution with Subaru の略で、 $z = 1.3$ までの様々な赤方偏移にある有名な銀河団 12 個を 10-15Mpc という広大なスケールで観測するというもので、X 線（銀河団ガス）や電波（SZ 効果）、HST（銀河形態、重力レンズ効果）などとの国際的連携も計っています。

このプロジェクトは、いわば銀河団を遠方宇宙の大規模構造のランドマークとして利用し、 $z = 1.3$ までの時間軸、環境軸を全て網羅したデータを取得して、宇宙の年齢が現在の 1/3 の時代から今日に至るまでの銀河宇宙の進化の総合的な描像を構築しようという壮大なものです。サイエンスの柱は既に強調しているように、「大規模構造の形成・進化」とその中での「銀河の形成・進化」です。そしてこの両者を結び付けるのがこのプロジェクトの重要な視点です。

宇宙はダークマター、ルミナスマターつまり銀河、そしてバリオンガスという三大要素からなりますが、これら各々の構造は、それぞれ別の手法を用いて得ることができます。ダークマターは重力レンズ効果¹⁰⁾によって、ルミナスマターは photometric redshift によって、ガスは X 線観測ないし電波でのスニャエフ・ゼルドビッチ効果（銀河団高温プラズマによる宇宙背景放射光子の散乱現象）によってという具合です。ここで、ダークマターと銀河の分布の比較は大変意義深く、銀河がダークマターに対してどれだけ偏って生まれるかといういわゆる「バイアス」¹¹⁾を観測から直接導くことができるでしょう。バイアスの最も極端な表象である、「暗黒銀河団/群」¹¹⁾という銀河の無いダークマターの塊といった新種の天体の発見に繋るかも知れません。大規模構造があることを暗に知っている銀河団周辺を多くの領域について観測するのでから、その確率も高いでしょう。このようにして得られた大規模構造は、時系列比較からその進化を探

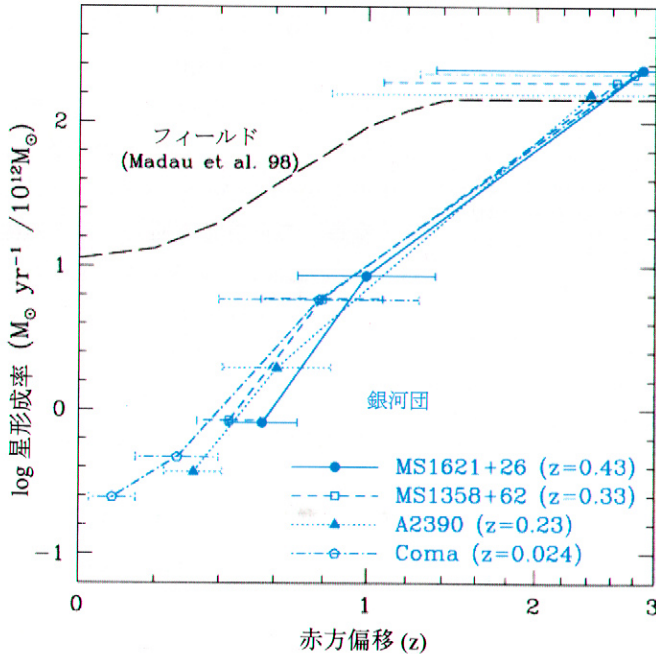


図5 銀河団中心部 ($<1h_{50}^{-1}\text{Mpc}$) の大局的星形成史¹²⁾. フィールドのマダウカーブ¹³⁾と比較してある.

することができますし、同時に個々の銀河の環境を詳細に定義することができます。

次に銀河の方ですが、基本的な方針は銀河の特性を「時間」と上で定義される「環境」の関数として詳細に比較することです。ここで銀河特性とは星形成、質量アセンブリー、そして銀河形態の三つの側面に分けられます。例えば、それぞれの環境で銀河の色分布、光度分布の時系列比較を行い、それらが時系列として整合的につながるべきである、という制約からは、銀河団銀河の星形成史に制限を与えることができます。事実、 $z < 0.43$ で銀河団中心部の銀河の時系列比較を行ない、銀河団銀河の大局的星形成史を導いたのが図5です¹²⁾。これはフィールドでいわゆるマダウプロット¹³⁾と呼ばれるものの、銀河団版に相当するものです。PISCESでは、これをより遠方に拡張するだけでなく、銀河団の中心部はもとより、銀河団の外側領域や周囲の銀河群についても同様のプロットを書

くことができ、宇宙のグローバルな星形成史を環境別に導くことが出来ます。これにより、銀河が銀河団へとアセンブリーしてくる過程で、星形成がいつどこでどのように行われてきたのかを描き出すことができます。これを残り二つの特性、すなわち銀河の質量関数と形態分布の環境依存性と比較することによって、星形成の減衰が銀河スケールのアセンブリーと関係するか、また形態変化が同じ物理過程によって引き起こされるのかなど、環境効果の本質に迫ることができます。これによって銀河進化の全体像を再構築できるでしょう。

最後に、銀河特性の質量依存性について述べます。先に、銀河団のような質量の大きなシステムではより昔に星形成が起こり、銀河群のような質量の小さなシステムではより最近まで

星形成活動が起こることを見ました(図4)。このような星形成のダウンサイジングは、もしかすると銀河のスケールにも全く相似的に反映されているのではないのでしょうか？つまり、質量の大きい銀河ほど昔に星形成を終え、質量の小さい銀河ほど比較的最近まで星形成活動を続けるという仮説です¹²⁾。これは銀河の色分散が低質量側で大きくなることから予想されています¹²⁾。PISCESではより遠方の銀河団へと時代を遡るので、徐々により質量の大きな銀河の色分散が大きくなっていく、つまりそれらの星形成の現場に近づくのを観測できるかも知れません。

5. 近赤外広視野観測

数年後、銀河天文学の世界では「近赤外での広視野観測」が大きな注目を集めているでしょう。なぜなら、すばるのMOIRCS(6分角)やFMOS(30分角)、宇宙研の赤外線天文観測衛星ASTRO-F

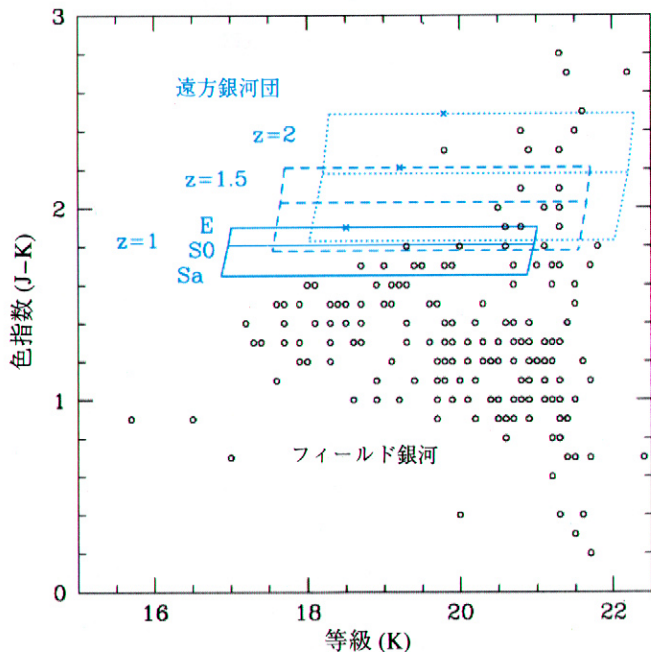


図6 遠方銀河団サーベイに用いる色-等級図。遠方銀河団の赤い銀河系列はフィールド銀河とはっきり区別される。

の IRC (10分角)といった広視野の赤外観測装置が続々と立ち上がるからです。英国赤外望遠鏡 (UKIRT) の WFCAM (30分角) も立ち上がります。これまでの可視光での $z < 1.3$ までの PISCES を、 $z > 1$ のより初期宇宙へと拡張するには、静止座標での可視光を捕える近赤外線バンドでの観測が不可欠です。しかしこれまでは、近赤外観測はその視野の狭さによって大きく制限されていたので、このような広視野カメラの到来は遠方宇宙の研究に大きな革命をもたらすことは確実です。これによって開けるサイエンスは多岐にわたりますが、ここでは PISCES の延長として注目していることを二点だけ述べたいと思います。

5.1. 遠方銀河団探査

まず一つ目は、近赤外バンドでの色を用いた、 $z > 1$ の銀河団、銀河群サーベイです。これは銀河団進化の初期状態を探る上で非常に重要です。図6に示したように、 $J-K$ の色 (J バンド: $1.2 \mu\text{m}$, K バンド: $2.2 \mu\text{m}$) は星形成の影響を余り受けず、赤方偏移とともに単調に赤くなります。従って遠方銀河団はこの色-等級図上で、フィールド銀河とのコントラストが大きい、くっきりと赤い銀河系列として観測される筈です。このことは既知の遠方銀河団で既に検証済みです¹⁴⁾。従って画像の中の赤い銀河の密集地を探すことによって、非常に有効に遠方宇宙の高密度領域 (銀河団) を同定することができます。そしてこれらがランドマークとなって、その周りの大規模構造もトレースすることができるでしょう。

L , M , N バンド (それぞれ $3.5 \mu\text{m}$,

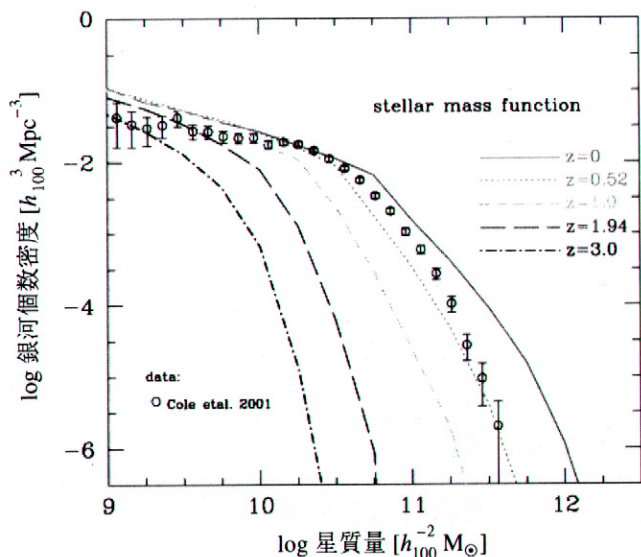


図7 準解析的な階層的銀河形成モデルの予想する銀河の星質量関数の進化¹⁵⁾。遠方で重い銀河が激減する。

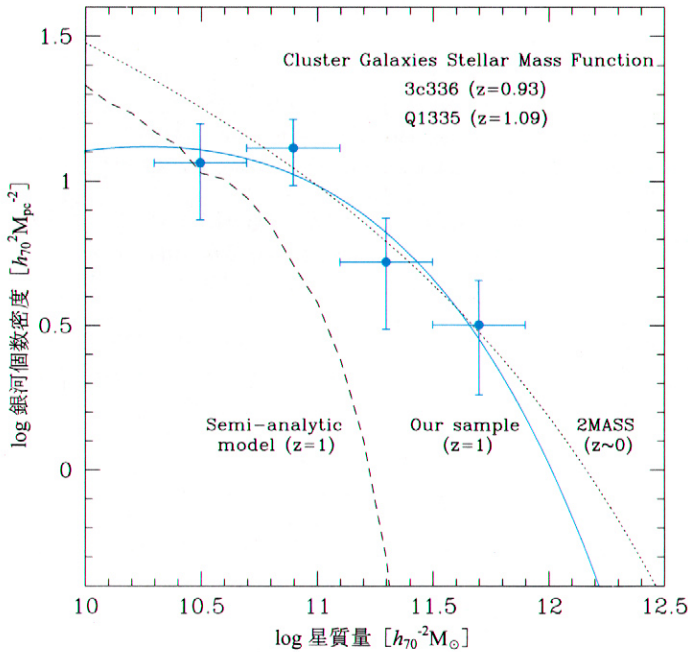


図8 二つの $z \sim 1$ 銀河団を合成した、銀河団銀河の星質量関数¹⁴⁾ (青点と青実線)。点線は近傍銀河団銀河の星質量関数¹⁷⁾。破線は準解析的な階層的銀河形成モデル¹⁸⁾の予想。重い銀河も $z \sim 1$ で既にアセンブリーを終えており、準解析的モデルと合わない。

4.7 μm , 7~9 μm) といった更に長いバンドに行けば、遠方銀河団の赤い銀河系列のコントラストは更に強くなります。星形成にも殆んど依らなくなるので、 $z = 2$ までは *KLM*, $z = 5$ までは *LMN* のみの情報から赤方偏移も比較的正確に求めることができます。これは分光が大変になるこのような遠方では非常に有力な方法です。ところが地上からは *LMN* バンドは熱背景光が強殆んど観測が不可能です。そこでスペースに上がる *ASTRO-F* ではこれらのバンドを用いて、地上ではできない非常にユニークな遠方宇宙探査が可能になります。口径がたった 67cm の小望遠鏡にもかかわらず、これらのバンドでは口径 8 m のすばるを大きく凌ぎ、たった 8 分ほどの積分で $z = 3-4$ の *L** 銀河までも見通すことができます。赤外スペース観測の驚

異的な威力です。今後超 4m 級のスペース大型望遠鏡 (NGST) 時代に突入すれば、宇宙初期 ($z > 3$) の building blocks ($10^{8-9} M_{\odot}$) も容易に検出できるようになるでしょう。

5.2. 銀河の質量アセンブリー

もう一つの近赤外広視野観測の鍵は、銀河のアセンブリー史を導くことです。比較的遠方でも星形成の影響が小さい近赤外の等級は、銀河の質量を比較的忠実に反映します。従って、近赤外光度関数の進化を調べることによって、銀河の質量が成長していく様子、つまりアセンブリーの歴史を追跡することが出来ます。

図7は CDM ベースの準解析的な階層的銀河形成モデルが予測する、銀河の星質量関数の進化の様子を示したものです¹⁵⁾。銀河は合体を繰り返しながら時間とともに質量が増大してゆくの、遠方では重い銀河の割合が激減します。これに対して、銀河は孤立系として進化し、質量の増減や個数進化を伴わないという、いわゆる受動的進化モデルでは、銀河の質量関数に変化は見られない筈です。このように、銀河の質量関数の進化は、ボトムアップという CDM の本質を検証するのに優れた手法です¹⁶⁾。

その先駆けとして、我々は、銀河団環境での銀河アセンブリー史を探るべく、 $z \sim 1$ の遠方銀河団二つを *WHT* (ウィリアム・ハーシェル望遠鏡、口径 4.2 m) の近赤外カメラ (4 分角) で撮像観測し、 $z = 1$ の銀河団銀河の *K* バンド光度関数を求め、それに色から得られる質量光度比の値を用いて銀河の星質量関数を求めました (図8)¹⁴⁾。その結果、非常に重い $10^{12} M_{\odot}$ 程度の銀河から、それより二桁も小さい $10^{10} M_{\odot}$ 程度まで、近傍銀河団と変わらない典型的な質量分布をしていることが判りました。つまり、銀河団中心部 (<1Mpc) では、銀河

の質量アセンブリーは $z=1$ までに大方終了していたのです。銀河団環境では、星形成のみならず銀河の質量アセンブリーも非常に早くに行われたと言えます。これは階層的銀河形成モデルに強い制限を与えるでしょう。事実、準解析的モデル¹⁸⁾の予想とは合いません(図8)。

しかし、銀河同士の合体は、銀河が高速で飛び回る銀河団中心部よりは、その周りの銀河群のような環境で顕著に見られる現象と考えられます⁹⁾。したがって、様々な環境を含んだ、広視野の観測を行うことによって、銀河質量関数を環境の関数としても比較することが大変重要です。広視野近赤外カメラの出現によって可能になるでしょう。

6. まとめ

以上述べてきましたように、現在の可視、近未来の赤外と、そのユニークな広視野を生かした観測を行い、宇宙大規模構造とそれに連動した銀河の形成・進化の研究を精力的に発展させていきたいと考えています。

謝辞：本稿は主に、去る2002年3月に水戸で行われた日本天文学会春季年会において受賞した日本天文学会研究奨励賞の記念講演の内容を纏めたものです。本受賞に対し、日本天文学会会員の皆様に心より感謝します。また、本研究の一部に対して頂いた大和エイドリアン賞に感謝します。さらに、本稿で紹介した研究の共著者である、岡村定矩氏、有本信雄氏、仲田史明氏、Richard Bower氏、Ian Smail氏に感謝します。最後に、図8で使った準解析的モデル予想を提供して下さった長島雅裕氏に感謝します。

参考文献

- 1) Cen R., Ostriker J., 1993, ApJ, 417, 415
- 2) Couch W., Sharples R., 1987, MNRAS, 229, 423
- 3) Lavery R., Henry J., 1986, ApJ, 304, L5
- 4) Abadi M. G., et al., 1999, MNRAS, 308, 947
- 5) B Moore 氏より提供
- 6) Kodama T., et al., 2001, ApJ, 562, L9
- 7) Nakata F., Kodama T., et al., 2002, in prep.
- 8) Dressler A., et al., 1997, ApJ, 490, 577
- 9) van Dokkum P. G., et al., 1998, ApJ, 504, L17
- 10) Kaiser N., Squires G., 1993, ApJ, 404, 441
- 11) Umetsu K., Futamase T., 2000, ApJ, 539, L5
- 12) Kodama T., Bower R., 2001, MNRAS, 321, 18
- 13) Madau P., et al., 1998, ApJ, 498, 106
- 14) Kodama T., Bower R. G., 2002, in prep.
- 15) Baugh C. M., et al., 2002, astro-ph/0203015
- 16) Kauffmann G., Charlot C., 1998, MNRAS, 297, L23
- 17) Balogh M. L., et al., 2001, ApJ, 557, 117
- 18) Nagashima M., et al., 2002, ApJ, in press

The History of Mass Assembly and Star Formation in Galaxies and Clusters of Galaxies

Tadayuki KODAMA

National Astronomical Observatory, 2-21-1 Osawa,
Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: The advent of the wide-field instruments (30') on the Subaru Telescope has (will have) led us to a new era where we can look into the distant Universe with panoramic views, unlike the Hubble Space Telescope with a very limited field of view (3'). Taking this unique advantage, we map out the large scale structures around distant clusters and their evolution over a long period of time. We also investigate the evolution of galaxies that is strongly linked to the hierarchical assembly process from a galaxy to a group and towards a cluster through the environmental effects.