

すばるで見渡す遠方宇宙 —大規模データからの結論



大内正己

〈The Observatories of the Carnegie Institution of Washington, 813 Santa Barbara St., Pasadena, CA 91101, USA〉

e-mail: ouchi@ociw.edu

研究奨励賞受賞理由となった、すばる望遠鏡による遠方宇宙の研究を紹介する。この研究では、すばる望遠鏡の広視野観測能力を生かして、遠方銀河の進化を大統計から明らかにするとともに、遠方大規模構造や銀河形成が冷たい暗黒物質の中で行われている形跡を発見した。これらの研究結果が得られるまでの過程に始まり、その意味するところ、さらには私が研究を通じて学んだことを記したい。私の経験が将来研究者を志す大学院生にとって参考になれば幸いである。

1. 研究への道のり

私が大学院に入学した1999年、すばる望遠鏡はファーストライトを迎えた。当時の光赤外天文学は、1990年初頭に運用が始まったハッブル宇宙望遠鏡、さらにはケック10m望遠鏡などの大型望遠鏡での研究が成熟期に入りつつあった。それらの望遠鏡は、ずば抜けて高い感度によって遠方宇宙探査をリードしていた。ハッブルディープフィールドに代表される深宇宙探査¹⁾は、それまでにあった赤方偏移1の壁をやすやすと崩した。赤方偏移3にある数十個の銀河がケックLRISにより分光同定され²⁾、さらには赤方偏移5.7の銀河まで発見されていた³⁾。これらの大望遠鏡の観測は赤方偏移0から5.7をカバーし、人類は宇宙史の90%強を見通すことができるようになっていた。

また、可視・近赤外線だけにとどまらず、JCMT望遠鏡のサブミリ波観測装置SCUBAの登場により、赤方偏移2-3の銀河の多波長観測への道が開かれた⁴⁾。先進の欧米研究者たちは大型望遠鏡の恩恵を享受し、赤方偏移1を超える未知の宇宙を開拓することに熱狂していた。すばる望遠鏡のファーストライトと私の大学院入学はまさに

このようなときに訪れた。

当時、日本の光赤外線コミュニティでは、新鋭の8mすばる望遠鏡でどのようなサイエンスを行うかという議論が活発だった。すばるは確かに最新鋭の優れた望遠鏡だが、ハッブル宇宙望遠鏡、10mケック望遠鏡ではすでに相当の観測が行われ、華々しい観測成果が上げられていた。地上8mすばるの角分解能もしくは感度では、これら先発の望遠鏡に敵わないうえ、時間的にも数年のリードを許している。さらに、ヨーロッパ南天天文台の8mVLT望遠鏡が4台、欧米を中心とした8mGemini望遠鏡が2台建設され、すばるとほぼ同時期にファーストライトを迎えている。このような状況だったため、「今さらすばる1台で何をやるのか？」と悲観的に考える研究者もいた。

私は大学院で岡村定矩先生の研究室に所属した。岡村研究室ではすばるの主焦点カメラ(Suprime-Cam)⁵⁾を製作していた(図1)。Suprime-Camは可視撮像装置であり、8m級望遠鏡では初めてとなる広視野カメラである。すばる望遠鏡が他の8m望遠鏡と最も異なる点が、Suprime-Camによる広視野撮像の能力であることは当時から多

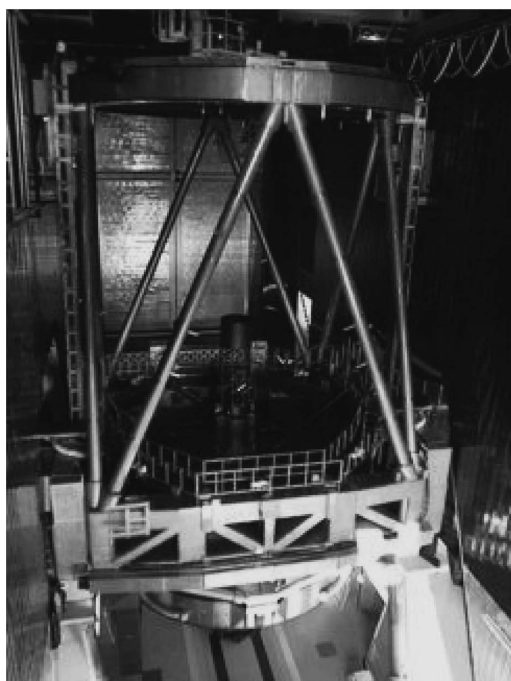
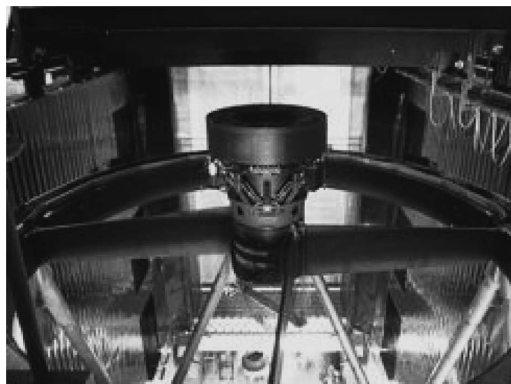


図1 主焦点に取り付けられた Suprime-Cam (上段) とすばる望遠鏡の全体像 (下段)。上図中央に見える円筒形の構造が主焦点ユニットであり、Suprime-Cam はこの中にすっぽり入っている (試験観測時に撮影)。

くの人が認識するところであった。しかし、今でこそすばるの花形装置と考えられている Suprime-Cam だが、当時はその有用性に関して根強い懐疑論があった。「すばるの感度で広視野の観測をすれば検出天体数を増やせるが、それで何か新しいことが分かるようになるには思えない。」といったものだった。ある日、大学院の授業を終え

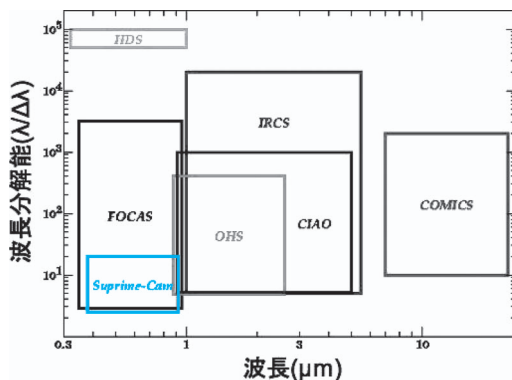


図2 1999年当時、すばるのウェブに載っていた第一期観測装置の性能を示した図。(当時の図の上に日本語で軸の意味を補足した。またわかりやすいように Suprime-Cam の部分を青色で示した。提供: 国立天文台。)

友人らとすばるのウェブページ見ていたとき、一つの図に皆の目が止まった(図2に転載)。これにはすばる各装置がカバーする波長と波長分解能が示されていた。Suprime-Cam がカバーする範囲は狭いうえ、FOCAS の範囲の一部でしかない。Suprime-Cam には長所が全くないように見える。同期のO君は、ニヤニヤしながらこの図を指して、からかうように言った。「すばるには FOCAS, IRCS, COMICS とかがあれば十分じゃない?」大内、研究室選び間違っただけじゃないの?」もちろん、この図には Suprime-Cam の特色が出せる「視野の広さ」の軸がなく、Suprime-Cam にとっては不利が出る。私はそのことを指摘して反論したが、内心心細かった。さらに同じ頃、研究室のメンバーからは追い打ちをかけるように告げられた。「すばる 8 m の広視野がユニークといっても、4 m 望遠鏡には広視野カメラがあるからね。4 m 望遠鏡でも時間を 4 倍かければ Suprime-Cam と同じ深さまでいける。8 m のすばるより 4 m 望遠鏡のほうが時間をとりやすい分、有利なんだよ。」さすがにこれには言い返せなかった。後発のすばる望遠鏡、それもたった 1 台。これだけでも不利な状況なのに、私が研究に使うことになる Suprime-Cam は 4 m 望遠鏡の装置と比べてもメリット

はなさそうである。限りなく絶望的な状況にも思えた。しかし、感傷的になっている暇はなかった。その頃から、論文を読みあさりながら、ほかでは真似のできない研究はないか、と考えるのが日課になっていった。

2. 研究の方針

Suprime-Cam を用いる以上、その高感度広視野を生かせる研究をするしかない。高感度を必要とするのは、見かけ上暗い天体、つまり遠方銀河だろう。これを研究対象にするのは悪くない。近傍の矮小銀河も暗いが、同じ暗いのなら未知の天体と言えるような遠方銀河を研究したい^{*1}。一方で、広視野を生かすためには遠方銀河の統計、光度関数などを求めるのが良いだろうと考えた^{*2}。また、広い領域に分布する天体が研究できるので遠方銀河の大規模構造、つまり空間相関関数を求めるべきだと思った。原理的には4 m 望遠鏡の広視野カメラでもできそうな課題だが、当時はなぜかそのような研究はほとんど行われていなかった。このため、Suprime-Cam での遠方銀河の研究は、われわれにとってまたとない機会となった。

問題は、遠方の大規模構造を調べる方法である。普通の分光探査では、観測時間がかかりすぎるため遠方銀河の大規模構造を見つけることはできない。一方で、そのころ盛んに議論されていた測光的赤方偏移 (photometric redshift) では、銀河の赤方偏移 (z) の決定精度が悪く、遠方宇宙 ($z > 3$) では $\Delta z \sim 0.3-0.5$ 程度の誤差が出る。このため、視線方向に存在する複数の構造が重なり合っ、大規模構造は検出できない。そこで、遠方の大規模構造を調べるには Ly α emitter (LAE^{*3}) が

有効かもしれない、と思いついた。LAE は Ly α 輝線を出す遠方の星形成銀河である。赤方偏移した Ly α 輝線を狭帯域フィルターで検出することで、多数の前景 (+背景) 銀河の中から LAE を選り出すことができる。狭帯域フィルターのバンド幅は 100 Å 前後しかないの、ここに入り込む Ly α 輝線の赤方偏移の幅は $\Delta z \sim 0.1$ 弱である。そのため、遠方宇宙の薄いスライスの中にある銀河だけを探し出すことができるのだ。狭帯域フィルターを Suprime-Cam に取り付ければ、その広い視野を生かして数十~100 Mpc スケールの大規模構造を検出できるかもしれない。従来のケック望遠鏡を使った Cowie と Hu ら⁶⁾ の LAE 研究では、赤方偏移 3 で 9 Mpc \times 13 Mpc の広さでしか観測されておらず、大規模構造を検出するというレベルではなかった。「LAE を使った大規模構造の研究は相当な威力を発揮するに違いない。これはいける！」この考えに至ったのは、1999 年に代々木オリンピックセンターで行われた天文天体物理若手の会夏の学校であった。夏の学校から帰ると、真っ先に研究室の嶋作一大先生の部屋へ向かい、私は興奮冷めやらぬまま早口でこのアイディア、そしてケックによる観測の現状をまくしたてた。嶋作先生はそれは面白いかもしれないねと肯定的に受け止めてくれた^{*4}。このようにして、私の研究目標は遠方宇宙の光度関数と相関関数を測ることと LAE を用いて遠方の大規模構造を観測的に明らかにすること、の二つに焦点が定められていった。もちろん、大学院 1 年目でこれらの方針を明確に打ち出せたわけではない。大学院卒業後にまで及んで、試行錯誤と修正を繰り返しながら組み立てていった研究方針であった。

*1 学部生の頃、山田 亨先生、太田耕司先生に勧められて書いた論文⁷⁾は、赤方偏移 3 のライマンブレイク銀河に関するものだった。そのため遠方銀河には強い関心をもっていたという事情もある。

*2 私が強い感銘を受けていたライマンブレイク銀河の統計の論文²⁾の影響もあった。

*3 現在では一般的になっている LAE という略語は、すばるによる $z=5$ LAE 論文⁸⁾で初めて使われた。日本人が作ったすばる発の略語である。

*4 このように何かアイディアがあると嶋作先生のオフィスを訪れては議論に付き合っていたいただいた。取るに足らないアイディアは星の数ほどあったに違いないが、常に丁寧に話を聞いて、アドバイスをしてくださった。

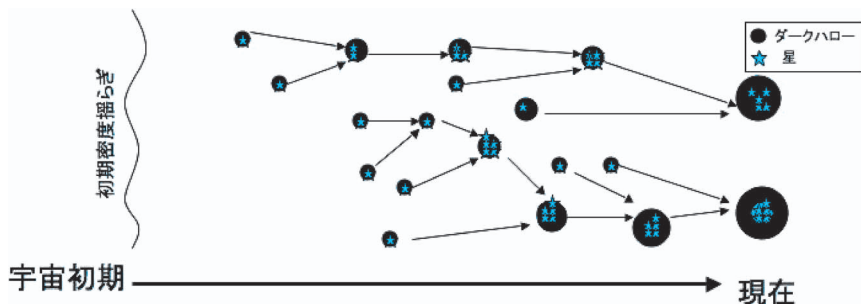


図3 CDM モデルにおける銀河形成の概念図。

3. 銀河構造形成の理論予想

銀河、さらには銀河がなす大規模構造はどのようにできたと考えられているのか？ここでは理論予想を見てみよう。銀河・構造形成の一般的な理論モデルとして冷たい暗黒物質 (Cold Dark Matter; CDM) モデルがある。CDM モデルはボトムアップ的なシナリオである。重力以外に相互作用をしない暗黒物質が、宇宙初期の密度揺らぎから単純な重力法則に従い、現在の物質構造 (銀河・大規模構造) を作る (図3)。暗黒物質は重力崩壊し、ビリアル平衡に達した塊を作る。この暗黒物質の塊はダークハローと呼ばれ、その中心にガスが落ち込んで、集められたガスから星が生まれて銀河となる。この意味でダークハローは銀河の土台であり、非常に大雑把に言えば銀河=ダークハローである。このようにしてできた銀河は、図3のように合体集合を繰り返して現在見られるような大きな銀河へと成長していくのである。純粋な CDM モデルは、重力以外に相互作用が無い暗黒物質粒子だけを仮定しているため、非常にシンプルである。それゆえ、純粋な CDM モデルの計算はどのグループが行っても結果が大きく変わることはない⁹⁾。一方で、CDM モデルに、バリオンや星形成を入れ、銀河形成まで直接予想するモデル (準解析的モデルや流体力学シミュレーション) ではさまざまな仮定が入り込む。そのため、結果が仮定によって違ってくる。このような理由から以下では、銀河形成を直接予想するモデルで

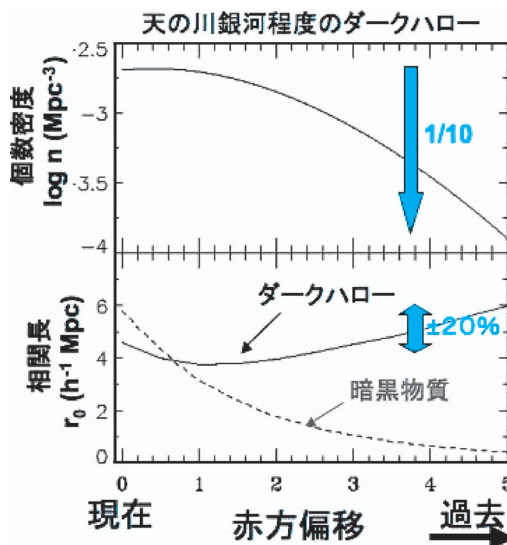


図4 CDM モデルが予測する天の川銀河程度のダークハロー (10^{12} 太陽質量) の個数密度と相関長の進化 (実線)。下段の図の鎖線は暗黒物質の相関長を示す。(WMAP 衛星プロジェクトが求めたラムダ入りの宇宙論パラメーターを仮定。)

はなく、純粋な CDM モデルについてのみ考えたい。

CDM モデルの予言から、ある質量をもつダークハローの個数密度と相関強度 (= 分布の疎密) が各時代 (= 赤方偏移) に対して与えられる。図4は、 10^{12} 太陽質量 (現在の天の川銀河と同程度) のダークハローについて、Sheth-Tormen の CDM モデル¹⁰⁾ に基づいて計算した結果である。図4の上段を見ると現在から過去に向けてダークハローの個数密度が減少していることがわかる。図4の

下段は予想される相関長である。相関長とは相関関数が1になる距離に対応し、この数が大きいほど分布にムラが大きいことを意味する。暗黒物質の相関長(図4下段の鎖線)は過去ほど小さくなっており、過去にはあまり大きな物質構造がなかったことを意味している。これは、CDMモデルがボトムアップシナリオと呼ばれる事と関係している。一方で、図4はダークハロー同士の相関長が現在から過去まで大きく変わっていないことを示している(下段の実線)。暗黒物質の振舞いと違うので不思議に思えるかもしれないが、これには理由がある。ダークハローは暗黒物質が臨界密度に達し、重力崩壊して作られると考えられている。ただし、過去の宇宙において、臨界密度に達するほど暗黒物質が集まる領域は非常に限られている。したがって、限られた領域にだけダークハローが集中的にできる(バイアスと呼ばれる効果)。その結果、過去にさかのぼってもダークハローの分布の疎密は大きく、 10^{12} 太陽質量のハローダークの場合では、赤方偏移5から現在まで相関長は大きく変わらない。

上に述べたように、ダークハロー=銀河として大雑把に傾向を見ると、天の川銀河程度に大きい銀河は、過去ほど少なくなっている。一方で、このような銀河の相関長(つまり銀河分布の疎密)はあまり変わらないため、過去の宇宙にも現在と同じような大規模構造が見られてもおかしくはない。このことから、過去(遠方)の銀河の個数密度(つまり光度関数)と相関関数はCDMモデルとの比較で重要な意味をもつ。このように、私が目標にした遠方銀河の光度関数および相関関数は、CDMモデルの予言の根幹に極めて近いため銀河形成に強い制限が与えられる。元々Suprime-Camの高感度広視野撮像能力を生かせる研究を、と考えて立てた目標であったが、実はCDMモデルと比較できる物理量が出てくる研究だったので

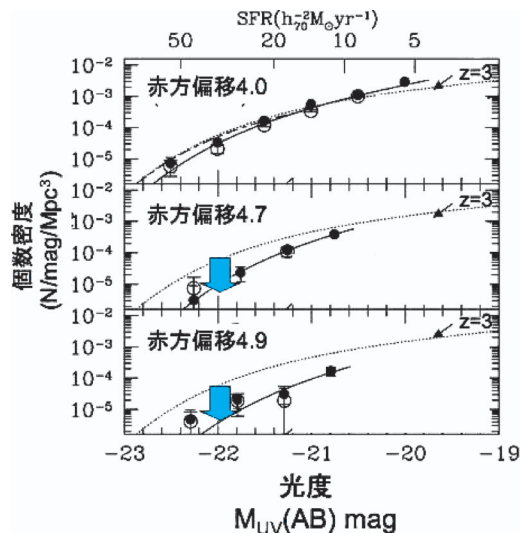


図5 赤方偏移4.0から4.9までの光度関数の進化。赤方偏移4から遠方に向かうにつれ明るい銀河の個数密度が減少している。文献11の図に日本語で注釈を加えたもの。

ある。

4. 結果

われわれは、銀極方向にあるかみのけ座のすばるディープフィールド(SDF)、とくじら座のすばるXMMニュートンディープサーベイ(SXDS)領域に対してSuprime-Camで深い撮像観測を行った。試験観測に加え、ハワイ観測所プロジェクトSDFとSXDS、さらには私自身が獲得した共同利用観測のデータを合わせた結果、赤方偏移3-7にあるライマンブレイク銀河(LBG)20,000個、LAE1,000個を取得した。従来の100-1,000倍の検出個数^{*5}にもなり、すばるSuprime-Camの威力が遺憾なく発揮された。これらの巨大な遠方銀河サンプルからはさまざまな結果が得られたが、紙面の都合もあるのでここでは以下の三つに絞って紹介したい。

4.1 個数密度の進化

図5はわれわれが得た光度関数とその進化を示

*5 同時期、他研究と比べても10-100倍の個数。

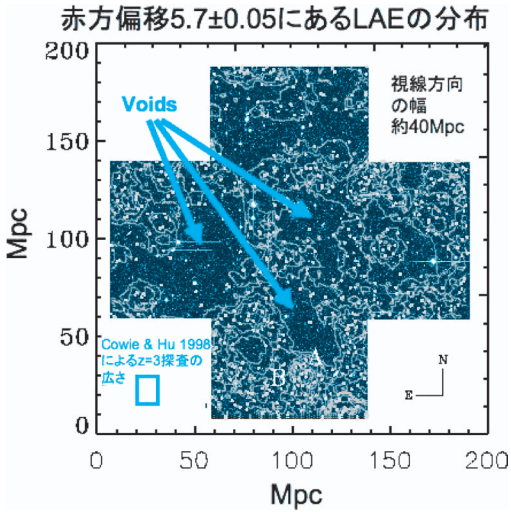


図6 赤方偏移 5.7 の銀河 (LAE) がなす大規模構造 (文献 14 より改変). Suprime-Cam による画像の上に LAE の位置を点で示した. 等高線は LAE の天球密度である. 比較のため, Cowie と Hu がケック望遠鏡で行った赤方偏移 3 の LAE 探査の広さ⁶⁾ を図の左下に描いた. なお, 図の下側にある LAE の高密度領域が図 7 の原始銀河団に対応する.

している. これによると銀河の個数密度は赤方偏移 3 から 4 までは変わらないが (上段), 赤方偏移 5 に向かって明るい銀河が減っていくことがわかる¹¹⁾ (中下段). 観測された紫外線光度が質量と正の相関をもち光度進化が無視できる場合, 赤方偏移 4 から過去に向かって大きな銀河の個数密度が少なくなることを意味している. これは CDM の予言と同じ傾向にある.

われわれはこの減少を抜群の精度で発見した⁶⁾. 後続の研究により明るい銀河の減少傾向は赤方偏移 4 から 5 にとどまらず 6-7 まで続いていることが見ついている (例えば, 文献 12, 13). 光度関数が減少に転じることを世界に先駆けて検

出した点は特筆すべきだろう.

4.2 赤方偏移 6 の遠方大規模構造と原始銀河団

図 6 は赤方偏移 5.7 において, $\text{Ly}\alpha$ 輝線を出す銀河つまり LAE の天球分布である¹⁴⁾. 天球分布といっても銀河の分布の奥行き方向の幅は $\Delta z = 0.1$ なので, 距離にして約 40 Mpc しかない. したがって, この天球分布図は赤方偏移 5.7 の 40 Mpc 幅のスライスの中にある LAE の分布に対応する. 図 6 を見てすぐに気づくのは, LAE が数十-100 Mpc 程度のフィラメント構造を作っていること, 50 Mpc 程度の空洞 (ボイド) があることだろう. このような分布は CfA サーベイや SDSS サーベイなどで見ついている近傍銀河の大規模構造と定性的に似ている¹⁵⁾. 銀河が作るフィラメント状の大規模構造は, 赤方偏移 5.7 の時代つまり宇宙誕生 10 億年後 (現在の宇宙年齢の 7%) にはすでに存在していたのである. この分布図を初めて見たとき, 私は特に驚かなかった. CDM モデルの予言どおりだったので, 「やっぱり大規模構造があったか」という思いであった. また, LAE の分布から得られたクラスタリングの強度は bias という指標⁷⁾ で 3.4 ± 1.8 であり, CDM モデルのダークハローで十分説明ができるレベルだった¹⁴⁾. 大規模構造の全体像よりも気になったのは, 探査領域の南側 (図 6 の下側) に銀河が異常に集まっていることだった. この辺りだけデータがおかしくなっているのかと思い徹底的に調べたが, 怪しいものは見つからなかった.

その頃, SXDS プロジェクトの分光探査が行われていたので, 秋山正幸さん (当時ハワイ観測所) に協力していただき, この密度超過領域にある LAE を分光した. その結果, 図 7 のような 3 次元分布が得られた¹⁴⁾. この図から, 赤方偏移 ~ 5.69

*6 これは後で気づいたことだが, われわれよりわずかに早く VLT のグループがこの減少傾向を報告していた²¹⁾ ただし, 41 平方分という狭い範囲で検出された 18 個の銀河に基づいた結果である. このため, 遠方銀河の空間分布の粗密 (field variance) から生じる不定性や, 統計的な有意性などの問題は未解決のままであった.

*7 bias とは, 暗黒物質の分布に対する相対的な相関の強さに対応する. 銀河の bias が 1 より大きいと暗黒物質より銀河の分布の疎密が大きいことを示す.

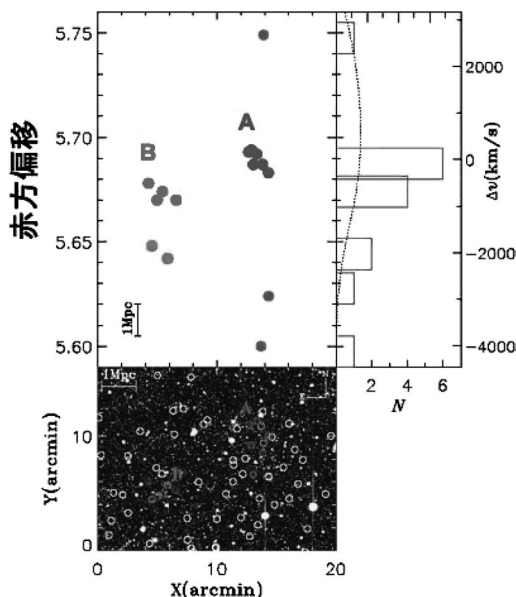


図7 赤方偏移 5.7 で見つかった LAE の高密度領域 (文献 14 より改変). 下のパネルは LAE の天球分布で, x 軸が東西方向, y 軸が南北方向に対応する. 上のパネルは分光で赤方偏移が得られた LAE の赤方偏移方向と東西方向の分布. 右側のパネルは赤方偏移方向の LAE の個数分布をヒストグラムで示したものの.

(A) と ~ 5.67 (B) にそれぞれ 6 個, 4 個の LAE の集団があることがわかった. 集団は, およそ 1 Physical Mpc 程度の大きさであり, 3 次元の密度超過を計算すると, 不定性はかなりあるが 80 程度とわかった. 現在の銀河団の密度超過 100-200 に近いため, これらの集団は原始銀河団と呼ばれるべきものだろう. 仮にこの原始銀河団がビリアル平衡に達しているとする, 大きさと速度分散から質量が $0.8-1 \times 10^{13}$ 太陽質量くらいと出てくる. これらの原始銀河団は, われわれが探査した共動体積 10^6 Mpc^3 の中で最も高い密度超過を示している. 現在の宇宙では共動体積 10^6 Mpc^3 の中に平均で 1-2 個くらいの銀河団 (2×10^{14} 太陽質量程度) がある. もし, 赤方偏移 5.7 の銀河の最高密度領域が現在の宇宙での最高密度領域に対応しているなら, われわれが見つけた原始銀河団は

2×10^{14} 太陽質量程度の銀河団の祖先かもしれない.

このようにして遠方銀河の大規模構造を見つけるとともに, 予想していなかった原始銀河団も発見した. 銀河だけではなく, より大きい構造である銀河団の形成を赤方偏移 6 という過去にまでさかのぼって調べられた. これは他に類を見ない研究であったため, 大きなインパクトがあった. 一方で, このような遠方銀河の分布が定量的に構造形成および銀河形成への制限にならないだろうか? 次に紹介する結果は, この疑問に答えるものである.

4.3 ダークハロー内で起こる銀河形成の証拠

この発見は, 意図したというより偶然訪れた. 2004 年秋, アメリカボルティモアの Space Telescope Science Institute でポスドク 1 年生だった私は約 70 万個もの天体が写っている SXDS データと格闘していた. 12 月にスタンフォードで開催される Texas Symposium で結果を紹介するためだった. Texas Symposium では招待講演を頼まれていた. 私のような駆け出しの青二才がなぜ Texas Symposium のような権威ある会議に呼ばれたのか全く理解できないくらい, 他の招待講演者はそうそうたるものだった. なかには私が学部生の頃から論文や集録を読んで尊敬していた研究者も含まれていた. その彼はハッブル宇宙望遠鏡で行っている多波長撮像の大サーベイ GOODS の話をする予定になっていた. 私も個人研究レベルのちまちました話ではなく, 大サーベイの結果を出さなくてはならないという気持ちが高まっていた. 2004 年当時, すばるから出された最新の SXDS データは, GOODS サーベイの画像と同程度の深さがありながら探査領域はその 10 倍にも及んだ. もし, このデータから赤方偏移 3-6 の遠方銀河をすべて取り出して解析すれば見劣りしない結果になるだろう. ハワイ観測所の古澤久徳さんが解析をされた SXDS 画像から, 赤方偏移 3-6 の銀河を探した. これには画像のおかしな部分

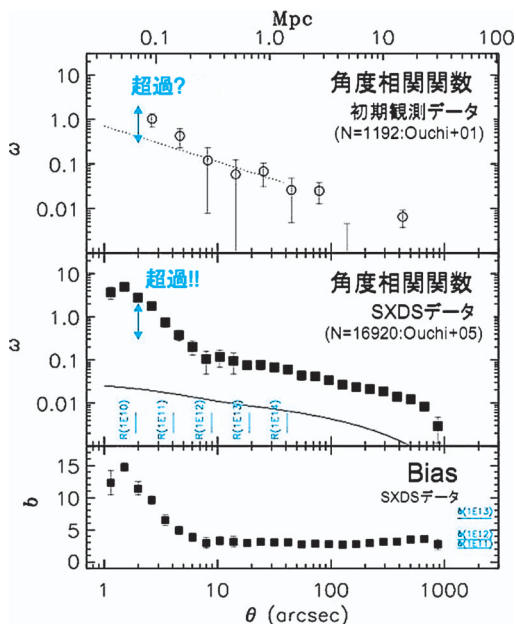


図8 赤方偏移4にある銀河の2体角度相関関数（上段と中段）とバイアス（下段）（文献17, 18の図より改変）。上段のパネルは、Suprime-Camの初期観測データから得られた結果¹⁷⁾。中段と下段のパネルはSXDSの1万7千個の銀河から得られたもの¹⁸⁾。CDMモデルが予言する 10^{10} – 10^{14} 太陽質量のダークハローの半径は、中段パネルのR(1E10)…R(1E14)に対応する。同様に 10^{11} – 10^{13} 太陽質量のダークハローのbiasは下段パネルのb(1E11)…b(1E13)で示されている。

（明るい星のサチュレーションや画像の端など）を1個1個マスクするといった地道な手作業が多い。一日中画像を見つめ続けるのでドライアイで涙が出てくる。Texas Symposiumまで時間がなかったので昼夜土日も関係なく、ひたすらデータと戦い続けた。解析を初めて3-4週間経ったある日、2万個を超える遠方銀河サンプルが完成した¹⁶⁾。

比較的近場にある赤方偏移4の銀河だけを取り出すと合計1万7千個にもなった。それをもとに2体角度相関関数を得た（図8）。その相関関数にはこれまで見てきたものとは比べものにならないくらい小さいエラーバーしか付いていない。その

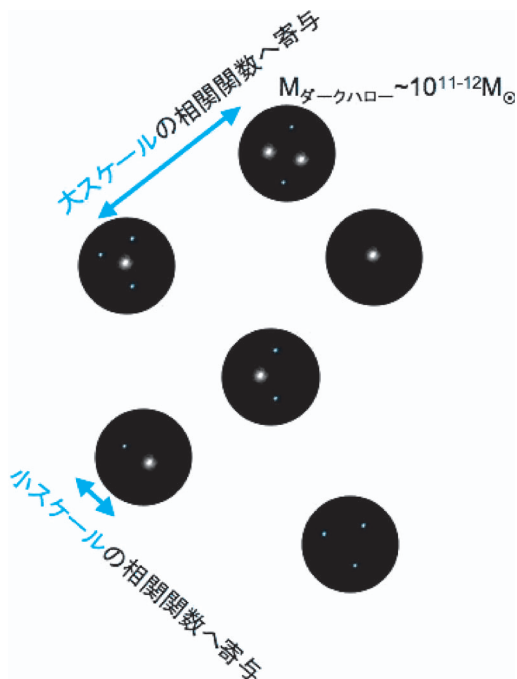


図9 ダークハロー内にある複数の銀河が示す小スケールと大スケールの相関の概念図。

うえ、7秒角より小さい角度スケールで相関関数に超過が見られる。これまでのサンプルによる相関関数（図8上段）は、データ点がエラーによってばらつくようなものだった。そのうえ、相関関数の超過らしきものは見えていたが、 3σ 前後の精度だったため、この超過が有意なシグナルかどうかははっきりしなかった¹⁷⁾。しかし、1万7千個の新しいサンプルから求めた相関関数（図8中段）はエラーバーが小さいばかりでなく複数個の計測点が連続的に連なり超過の形をはっきりと示していた¹⁸⁾。これまで、苦労してもエラーまみれの相関関数しか出てこなかった^{17), 19)} ことを知っている者にとっては信じられない光景である。初めてこの図をディスプレイに表示させたとき、全身に鳥肌がたった。これが今まで見てきた相関関数の本当の姿なのか！

小さい角度スケールでの相関関数の超過は、物理的にどのような意味をもつのだろうか？ ある研究会で図8の結果を見せたとき、「CDMモデル

が間違っている証拠ではないか？」とコメントした研究者もいたが、そうではないだろう。ここでは相関関数の二つの観測量に注目していただきたい。

(a) 小さい角度スケール（小スケール）で超過が見られる7秒角という角度は、赤方偏移4における大きさを約0.2 Mpc（共動距離）に相当する。この大きさは、CDMモデルが予言する 10^{11} – 10^{12} 太陽質量のダークハローの半径に対応している（図8中段）。

(b) 大きい角度スケール（大スケール；およそ200秒角）における相関の強さは、biasにして3程度である。これは、CDMモデルが予言する 10^{11} – 10^{12} 太陽質量のダークハローのbiasと同程度である（図8下段）。

これら(a)(b)二つの独立な観測量は、遠方銀河の大半が複数個ずつ 10^{11} – 10^{12} 太陽質量のダークハローの中に含まれているとすれば同時にかつ自然に説明できる。つまり、図9のように小スケールの相関の超過が同じダークハロー内の複数個の銀河によって作られ、大スケールの相関が異なるダークハローに属する銀河の間で与えられるというものである。CDMモデルの予言（図3）ではダークハローの中で星形成が起り銀河形成が行われるものとしている。しかし、この描像は必ずしも自明ではない。われわれの発見は、過去の宇宙に存在する若い銀河がダークハローの中で形成されつつあることを観測的にとらえた。CDMモデルに基づく銀河形成理論を強く支持する結果となった。さらにこの観測結果を国立天文台の浜名 崇さんらが作った詳細な理論モデル²⁰⁾と比べると相関関数の形が非常にうまく説明されることがわかった。われわれの結論は疑いないものになった。

5. 研究を通じて学んだこと

すばる Suprime-Cam の卓越した能力を活かして行われた研究は、個数密度と銀河分布の進化を

明らかにした。これらの結果は、CDMモデルの予想などもあったため、さして驚くものではなかった。一方で、探査を始めた頃には予想していなかった重要な結果（原始銀河団の発見とダークハローで起こる銀河形成の証拠）も得られた。これらの結果は観測データが得られる前に予測されていたものではなかった。むしろ「これまであまり調べられていない事柄（＝遠方銀河）」に対し「ユニークな装置と手法でデータを取得」した末に出てきたものであった。帰納的なアプローチによる産物だったと思う。

系外銀河や宇宙膨張の発見など輝かしい業績を残した天文学の巨人エドウィンハッブルも、実は帰納的手法によりこのような発見を行っていたことは特筆すべきだろう。ハッブルの弟子に当たる Alan Sandage 氏は次のように述べている。

“Hubble’s methods were largely inductive—nearly pure Baconian. His usual procedure was to assemble massive data sets from which he generalized to reach conclusions of wide scope

……

the method used in his most important papers—those papers that convincingly changed a field—was that of nearly pure Baconian induction.²²⁾”

（邦訳：ハッブルのとった手法は非常に帰納的である—ほとんど純粋な帰納法である。彼は常に大量のデータを集め、結果を一般化し、より広い視点での結論に達していた。

…（中略）…

天文学に革命をもたらした最も重要な論文に用いられた手法はほとんど純粋な帰納法であった。

今、私が居るカリフォルニア州パサディナの Carnegie Institution of Washington (CIW) は、ウィルソン山天文台の運営母体だった。ハッブルは1953年に他界するその日までこのCIWで研究を行っていたそうである。ハッブルが使ってい

た部屋は私のオフィスの階下にある。彼はその部屋でどのような思いを抱き 100 インチフッカー望遠鏡のデータと向き合っていたのだろうか。かつてこの建物で大量の観測データと格闘していたハッブルに思いを馳せながら筆を置くことにする。

謝 辞

指導教官の東京大学教授の岡村定矩先生には本研究を進めるにあたりたいへんお世話になりました。岡村先生は私の性格を見抜き温かいフォローやサポートしてくださいました。また東京大学准教授の嶋作一大先生は長い時間と多くの労力を費やして、私のブレンストーミング的なアイデアさらにはサイエンスの議論に付き合ってくださいました。さらに他にも多くの人たちに支えられました。特にすばる望遠鏡プロジェクトチームおよび **Suprime-Cam** 製作チームの皆様、大学院時代の先輩後輩方にはたいへんお世話になりました。紙面の都合上全員の名前は挙げられませんが、この場を借りて感謝の意を表したいと思いません。

参考文献

- 1) Williams R. E., et al., 1996, AJ 112, 1335
- 2) Steidel C. C., Adelberger K. L., Giavalisco M., Dickinson M., Pettini M., 1999, ApJ 519, 1
- 3) Hu E. M., McMahon R. G., Cowie L. L., 1999, ApJ 522, L9
- 4) Hughes D. H., et al., 1998, Nature 394, 241
- 5) Miyazaki S., et al., 2002, PASJ 54, 833
- 6) Cowie L. L., Hu E. M., 1998, AJ 115, 1319
- 7) Ouchi M., Yamada T., Kawai H., Ohta K., 1999, ApJ 517, L19
- 8) Ouchi M., et al., 2002, arXiv: astro-ph/0202204
- 9) Springel V., et al., 2005, Nature 435, 629
- 10) Sheth R. K., Tormen G., 1999, MNRAS 308, 119

- 11) Ouchi M., et al., 2004, ApJ 611, 660
- 12) Shimasaku K., Ouchi M., Furusawa H., Yoshida M., Kashikawa N., Okamura S., 2005, PASJ 57, 447
- 13) Bouwens R. J., Illingworth G. D., Franx M., Ford H., 2007, ApJ 670, 928
- 14) Ouchi M., et al., 2005, ApJ 620, L1
- 15) Gott J. R. III., Jurić M., Schlegel D., Hoyle F., Vogeley M., Tegmark M., Bahcall N., Brinkmann J., 2005, ApJ 624, 463
- 16) Ouchi M., 2004, Proceedings of the 22nd Texas Symposium on Relativistic Astrophysics at Stanford, Stanford, California, December 13–17, 2004, ed. by Pisin Chen, Elliott Bloom, Greg Madejski (SLAC), Vahe Patrosian (Stanford Univ.), p. 14
- 17) Ouchi M., et al., 2001, ApJ 558, L83
- 18) Ouchi M., et al., 2005, ApJ 635, L117
- 19) Ouchi M., et al., 2004, ApJ 611, 685
- 20) Hamana T., Ouchi M., Shimasaku K., Kayo I., Suto Y., 2004, MNRAS 347, 813
- 21) Lehnert M. D., Bremer M., 2003, ApJ 593, 630
- 22) Sandage A., 1989, JRASC 83, 351

Large Area Survey for the High Redshift Universe with Subaru —Conclusions from our Massive Data

Masami OUCHI

The Observatories of the Carnegie Institution of Washington, 813 Santa Barbara St., Pasadena, CA91101, USA

Abstract: I introduce our studies of high- z galaxies with Subaru for which the Astronomical Society of Japan presented me with the ASJ Young Astronomer Award in 2008. These studies have revealed evolution of luminosity function, high- z large-scale structures, signatures of galaxy formation in dark halos. I show the process of our studies, meanings of our findings, and things that I have learned through my research activities. I hope that my experiences are useful for young astronomy major students.