

論文内容の要旨

論文題目 Properties of Galaxies in the Early Universe from Multiwavelength Observation

(多波長観測に基づく宇宙初期の銀河の性質)

氏名 吉田 真希子

銀河がいつどのようにして形成されどのように進化してきたかという問題を明らかにするために、高赤方偏移銀河を直接観測しその性質を調べることが不可欠である。我々は広視野で非常に深い多波長観測データに基づき、赤方偏移 $z \sim 3-5$ における Lyman-break 銀河 (LBGs) の詳細な研究を行った。観測領域は、2つのブランクフィールド、Subaru Deep Field (SDF) と Subaru/*XMM-Newton* Deep Field (SXDF) である。これらの2つのフィールドは、国立天文台ハワイ観測所の「観測所プロジェクト」、Subaru Deep Field プロジェクトと Subaru/*XMM-Newton* Deep Survey プロジェクトの観測領域として選ばれており、すばる望遠鏡/Suprime-Cam を初めとした多くの望遠鏡と観測装置によって、広い波長範囲に渡り精力的な観測がなされている。現在検出されている高赤方偏移銀河は、観測する波長や手法によっていくつかに分類されている。その一つである LBGs は、可視光帯に赤方偏移された静止系紫外光スペクトルの特徴 (ライマン端の前後での連続光のフラックスの落ち込み) を手がかりに見つけられる、若い星形成銀河である。LBGs は今日最もよいサンプルが得られる高赤方偏移銀河であり、現在の宇宙に見られる銀河と同程度に数多く存在することから、高赤方偏移宇宙における最も主要な種族の一つと考えられる。本研究では、銀河の形成の歴史を背後にあるダークマターハローと関連づけながら明らかにするために、LBGs の測光的性質とクラスタリングの性質を調べた。

SDF (875 arcmin^2 , $i' \leq 26.85$, $z' \leq 26.05$) において $z \sim 4$ と $z \sim 5$ の LBG サンプル、SXDF (740 arcmin^2 , $z' \leq 25.5$) において $z \sim 3$ の LBG サンプルを構築した。 $z \sim 3$ の LBGs (*U-drop*

LBGs) は $U-V$ versus $V-z'$ ダイアグラム、 $z \sim 4$ の LBGs (B -drop LBGs) は $B-R$ versus $R-i'$ ダイアグラムを使って選び出した。 $z \sim 5$ LBGs については 2 種類の 2 色図、 $V-i'$ versus $i'-z'$ ダイアグラム、 $R-i'$ versus $i'-z'$ ダイアグラムを使用した (それぞれ、 V -drop LBGs、 R -drop LBGs)。検出された LBGs の数は、962 (U -drop LBGs)、3,808 (B -drop LBGs)、539 (V -drop LBGs)、240 (R -drop LBGs) である。分光観測によって赤方偏移が求められている天体の 2 色図上での分布を調べた結果、採用した選択基準の信頼性は高いことが確かめられた。モンテカルロシミュレーションを実施してこれらのサンプルのコンプライトネスとコンタミネーションを推定した。シミュレーションによって得られたサンプルの赤方偏移分布は、分光観測によって求められた分布とよく一致した。サンプルのコンタミネーションは V -drop LBG サンプルを除いてすべての等級で 5 % と非常に小さく、また V -drop LBG サンプルについてもせいぜい 20 % であった。

まず、これらのサンプルを用いて $z \sim 3-5$ の LBGs の静止系紫外光光度関数を導出した。SDF の非常に深いデータによって、 $z \sim 4$ と $z \sim 5$ の光度関数を非常に暗いところまで求めることができ ($z \sim 4$ で $M_{UV} = -19.2$ 、 $z \sim 5$ で $M_{UV} = -20.3$)、光度関数の進化を広い等級範囲に渡って調べることが可能になった。また、 $z \sim 4$ と $z \sim 5$ について、光度関数を積分して得られる紫外光光度密度から宇宙の星形成率密度を求めた。さらに、観測された星形成率密度と標準的な宇宙の構造形成理論であるコールドダークマターモデルを基に、ダークハロー内の単位バリオン質量当たりの宇宙の星形成率 (スピーシフィック星形成率) を計算した。これらの結果と先行の研究結果を合わせて、以下の結論を得た。

1. 光度関数は $z \sim 4$ から $z \sim 3$ ではすべての等級範囲で顕著な変化は見られない一方、 $z \sim 4$ よりも高赤方偏移において明らかな進化が見られた (図 1)。さらに、 $0 \leq z \leq 6$ での光度関数の進化は銀河の特徴的な明るさ (M^*) の変化で説明できることが分かった。 M^* は $z \geq 4$ において時間とともに急激に明るくなり、 $z \sim 4$ から $z \sim 3$ では変化せず、その後現在までに次第に暗くなっている。
2. 光度関数を非常に暗いところまで求めたことで $z \sim 4$ と $z \sim 5$ での宇宙の星形成率密度の測定精度は大幅に改善された。これにより、宇宙の星形成率密度の進化がより強く制限された。宇宙の星形成率密度は $z \sim 3$ から $z \sim 4$ においては減少はなく、 $z \sim 4$ から $z \sim 5$ においても減少はもしあったとしても 5 倍程度以内である。
3. 宇宙の星形成率密度の進化の様子は、それを担う銀河の明るさごとで大きく違っていることが示された (図 2)。明るい銀河からの寄与ほど時間とともに急激に変化し、また暗い銀河からの寄与ほどピークは早い時期にあったことが分かった。明るい銀河からの寄与は、 $z \sim 3-4$ までに急速に増え、その後現在までに減少してきている。
4. ダークハロー内の単位バリオン質量当たりの宇宙の星形成率は、 $z \sim 4$ までは赤方偏移とともに $(1+z)^3$ に比例して大きくなることが分かった。 $z \geq 4$ では減少の様子が見られた。

本研究で明らかになった宇宙の星形成率密度の進化の明るさ依存性は光度関数の進化の様子を反映しており、宇宙全体の星形成率に寄与している銀河のポピュレーションは時間とともに変化し、初

期ほど暗い銀河が優勢であったことを示唆している。宇宙の星形成率の進化の様子から、星形成の効率は $z \sim 4$ まではダークハロー内の冷却効率に比例して過去ほど高かったことが示唆される。

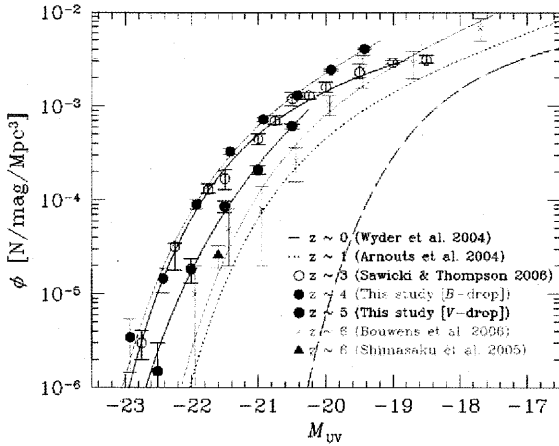


図 1: 静止系紫外光光度関数の進化。緑、赤のデータがそれぞれこの研究による $z \sim 4$ と $z \sim 5$ の光度関数である。黒破線、黒点線、青、水色は、それぞれ文献による $z \sim 0$ 、1、3、6 の光度関数である。

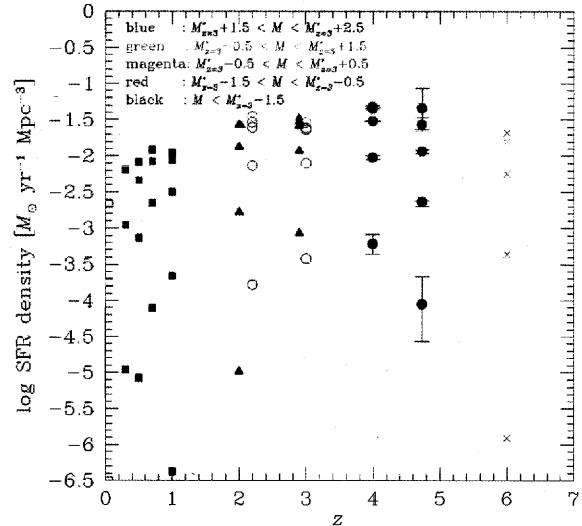


図 2: 宇宙の星形成率密度の進化。色の違いは銀河の明るさの違いを意味する。青、緑、ピンク、赤、黒の順に暗い銀河が担う星形成率密度から明るい銀河が担う星形成率密度を表す。

次に、 $z \sim 3 - 5$ の LBGs のクラスタリングを定量的に表す二体相関関数を測定し、コールドダークマターモデルを基に、それらが属するダークハローの質量を見積もった。多波長データを活用して、クラスタリング強度の静止系紫外光光度 (星形成率の指標となる) と静止系可視光度 (星質量の指標となる) への依存性を調べ、以下の結論を得た。

5. すべての赤方偏移で、クラスタリング強度には紫外光光度だけでなく可視光光度にも強い依存性が見られ、明るい銀河ほどより強くクラスタリングしていることが分かった (図 3)。 $z \sim 3$ LBG サンプルでは K (静止系可視光) 等級と $(z' - K)$ カラーに相関があったが、クラスタリング強度には $(z' - K)$ カラーへの依存性も見られた。
6. $z \sim 3$ でのクラスタリング強度については、紫外光光度と可視光光度の組合せへの興味深い依存性が示された (図 4)。可視光光度が明るい銀河は紫外光光度に依らずクラスタリング強度は大きい一方、可視光光度が暗い銀河は紫外光光度が暗くなるにつれてクラスタリング強度は小さくなることが分かった。

クラスタリング強度の上記の依存性は、星形成率が高い銀河ほど、また星質量が大きい銀河ほどより大きなダークハローに属していることを示唆している。さらにそれだけでなく、ダークハローの

質量は星形成率と星質量の組合せに、つまり銀河の星形成活動史に依存していると考えられる。すでに多くの星質量を蓄積した銀河にはその時点での星形成率には様々なものがあるが、それらは常に大きなダークハローに属している。しかし一方、星質量の小さい銀河は、星形成率の小さいものだけが小さなダークハローに属している。換言すれば、大きなハローの中には星質量の大きいものから小さいものまでどのような星質量の銀河も存在できるが、小さなハローの中には星質量の小さい銀河しか存在しない。このことは、ダークハローの質量がその中に存在する銀河の星質量の最大値を決めていることを示唆している。また、大きなハローの中の銀河には星質量に関わらず様々な星形成率のものがあるが、小さなハローの中の銀河はどれも星質量は小さく星形成率も小さい。ダークハローの質量は、それまでの星形成だけでなくその時点での星形成活動をも制御していることを示唆している。

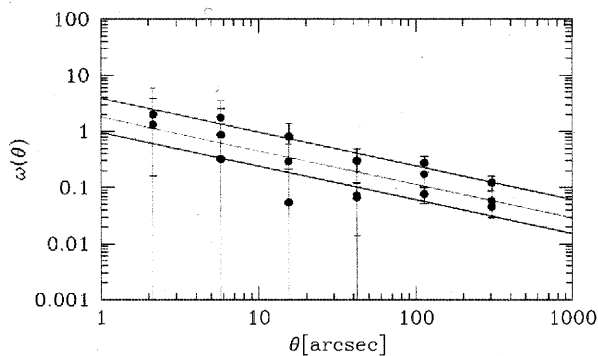


図 3: $z \sim 3$ における角度二体相関関数。可視光光度で分けた 3 つのサンプルについてのもので、赤、緑、青の順に明るいものから暗いものを表す。

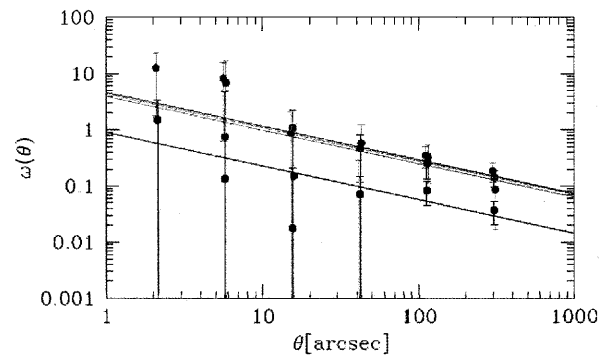


図 4: $z \sim 3$ における角度二体相関関数。紫外光光度と可視光光度の組合せによって分けた 4 つのサンプルについてのもので、各色は次のようになっている。赤は紫外光光度と可視光光度ともに明るいもの、緑は紫外光光度が暗く可視光光度は明るいもの、水色は紫外光光度は明るく可視光光度が暗いもの、青は紫外光光度と可視光光度ともに暗いもの。