

論文内容の要旨

論文題目

Assembly of Giant Galaxies in the Final Stage of the Cosmic Structure Formation

(宇宙の構造形成最終期における巨大銀河の発達)

氏名

松岡 良樹

現在の宇宙に見られる大質量（星質量 $M_* > 10^{11} M_\odot$ ）銀河の形成・進化過程を明らかにすることは、宇宙物理学に残された大きな課題の1つである。これら大質量銀河の多くは巨大な早期型銀河であり、年老いた星の放射する赤い光が支配的であることが観測的に知られている。冷たい暗黒物質（Cold Dark Matter）と宇宙項 Λ が優勢な宇宙においては、大規模な物質構造は暗黒物質の重力収縮によって作られ、階層的様相を呈することが示されている。その構造の中でバリオンがエネルギーを散逸、収縮し、光で観測される銀河を形成すると予測されているが、その具体的な過程は未だ観測的に明らかにはされていない。特に大質量銀河が宇宙構造形成のどの段階で形成され、どのような進化を辿ったのかを明らかにすることは銀河形成理論に重要な制約を与えると期待されているが、多くの観測的傍証（銀河の光度関数、色-等級関係、色-形態関係、衝突頻度、星形成率など）が報告されているものの、決定的な観測的証拠は得られていない。本論文は先行研究をはるかに上回る超広視野の観測を基に、宇宙年齢の半分に当たる赤方偏移 $z \sim 1$ から現在に至る大質量銀河の数密度進化を精度良く測定することで、銀河形成過程を解き明かす鍵となる観測事実を提示するものである。

本論文では、近赤外線領域の広域測光サーベイである UKIRT Infrared Deep Sky Survey (UKIDSS)、可視光の広域測光サーベイ Sloan Digital Sky Survey (SDSS) II Supernova Survey、および VIMOS VLT Deep Survey (VVDS)、DEEP2 Redshift Survey という2つの分光サーベイを組み合わせることにより、大規模な銀河サンプルを構築する。測光データの観測・初期解析以降のデータ処理を独自に行うことで、 $z \sim 1$ までに存在する星質量 $M_* > 10^{11} M_\odot$ の銀河を約 50 平方度 に渡ってほぼ完全に検出できるデータ精度が達成された。利用可能な測光バンドは u (中心波長 $0.35 \mu\text{m}$), g ($0.47 \mu\text{m}$), r ($0.62 \mu\text{m}$), i ($0.75 \mu\text{m}$), z ($0.89 \mu\text{m}$), Y ($1.03 \mu\text{m}$), J ($1.25 \mu\text{m}$), H ($1.63 \mu\text{m}$), および K ($2.20 \mu\text{m}$)、50%の検出限界は K バンドで 17.9 等である。検出された天体は r , z , K バンド等級を基に星と銀河に分類され、その結果およそ 22,000 個の銀河が同定された。各銀河の赤方偏移 z は、VVDS と DEEP2 の分光サンプルを用いて最適化された photometric redshift 法を用いて推定された。その

誤差は $\sigma_{\Delta z/(1+z_{\text{spec}})} \sim 0.04$ 程度である。また stellar population synthesis モデルに基づき、それぞれの銀河からの放射を担う星質量を測定した。

検出された銀河の K バンド計数はより深い観測と限界等級 $K = 17.9$ 等までよく一致することが示され、これはサンプル構築が精度良く行なわれたことを支持している。また銀河の角度分布を目視により確認したところ、銀河団やボイド構造の候補となる多くのクラスタリング構造が確認されたのに対し、(観測領域端などでの) 不自然な分布構造は見られなかった。

図 1 に、測定された大質量銀河の数密度を示す。近傍宇宙 ($z = 0.05$) の結果は Two Micron All Sky Survey (2MASS) と 2dF Galaxy Redshift Survey のデータを基に測定されたものである。誤差の評価には、photometric redshift の測定誤差に伴う計数誤差、限界等級よりも暗い銀河の寄与、および星質量の推定誤差に伴う計数誤差 (Eddington bias) が含まれている。先行研究の多くで最大の誤差要因であった cosmic variance (銀河の非一様な空間分布に伴う「平均的な空間密度」の測定誤差) は、本研究では他の誤差に比べて十分小さいことが示されている。

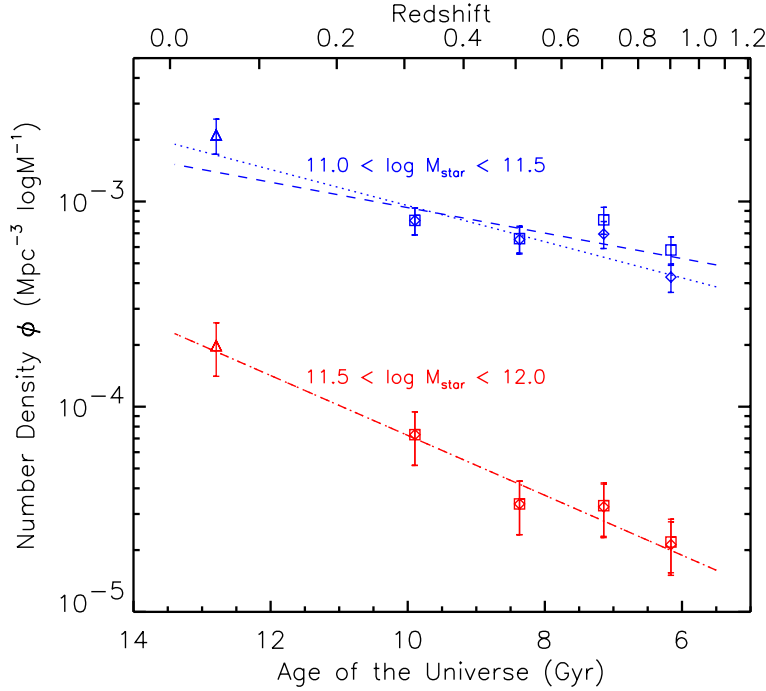


図 1: 大質量銀河の数密度進化。星質量 $10^{11.0}M_{\odot} < M_{\star} < 10^{11.5}M_{\odot}$ および $10^{11.5}M_{\odot} < M_{\star} < 10^{12.0}M_{\odot}$ の銀河がそれぞれ青と赤のシンボルで示されている。菱形 / 正方形は天体検出率補正前 / 後の本研究の結果、三角は近傍宇宙での結果である。点線 / 波線は天体検出率補正前 / 後の測定値にフィットされた簡単な指数関数的進化モデルを表す。

驚いたことに、星質量が $M_{\star} = 10^{11}M_{\odot}$ を越える大質量銀河は $z \sim 1$ から現在にかけて著しい数密度進化を見せている。 $10^{11.0}M_{\odot} < M_{\star} < 10^{11.5}M_{\odot}$ の銀河の数密度増加は数倍、さらに重いクラス ($10^{11.5}M_{\odot} < M_{\star} < 10^{12.0}M_{\odot}$) の銀河の数密度増加は 1 桁近くにも及ぶ。このような発見を行うに足る十分な数のサンプルを十分広い天域で得たのは、本研究が初めてである。

本結果と直接比較が可能な唯一の先行研究は、Conselice et al. (2007, MNRAS, 381, 962) による DEEP2 領域の研究である。彼らは本研究よりはるかに狭いながら約 1.5 平方度の領域で大質量銀河の数密度進化を測定し、 $M_{\star} > 10^{11}M_{\odot}$ の銀河の数密度は現在から $z \sim 1$ までほぼ一定であるという報告をしている。しかしこの測定は $z = 1$ 付近の大きな密度超過 (cosmic variance と考えられる) から深刻な影響を被っており、強いクラスタリングを示す大質量銀河の測定においては 1 平方度の観測でも cosmic variance の影響が決定的であることが本研究によって改めて確認されたと言える。

発見された大質量銀河の強い数密度進化の原因を探るため、図 2 には観測された銀河の静止系での色 $U - V$ と絶対等級 M_B との関係を示す。これら静止系等級は、観測された *griz* バンドでの等級に stellar population synthesis モデルに基づいた *k*-correction を行なうことで得られたものである。以下では $U - V = 1.0$ を境に銀河を赤い種族と青い種族に分類する。図から、 $10^{11.0}M_{\odot} < M_{\star} < 10^{11.5}M_{\odot}$ の銀河の半数程度 ($\sim 60\%$) が $z \sim 1$ では青い種族であり、内部で星形成活動が進行中であることが示唆される。実際に前出の Conselice et al. は、 $0.4 < z < 1.4$ に存在する彼らの $M_{\star} > 10^{11}M_{\odot}$ 銀河のうち半数程度が Spitzer Space Telescope/MIPS 24 μm バンドで検出され、その平均的な星形成率は $\sim 50M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ に達すると報告している。これはおよそ 2 Gyr の間に星質量 $M_{\star} = 10^{11}M_{\odot}$ を作り出すだけの星形成活動に対応し、観測された大質量銀河の数密度成長を説明できる可能性がある。図が示すようにこの星形成活動は $z = 0$ に向かって次第に減少し、これら銀河の多くを赤い種族へ変化させている。一方でより重い $10^{11.5}M_{\odot} < M_{\star} < 10^{12.0}M_{\odot}$ の銀河は $z \sim 1$ ですでに多数が赤い種族に属しており、これは星形成の down-sizing の傾向を示すものである。

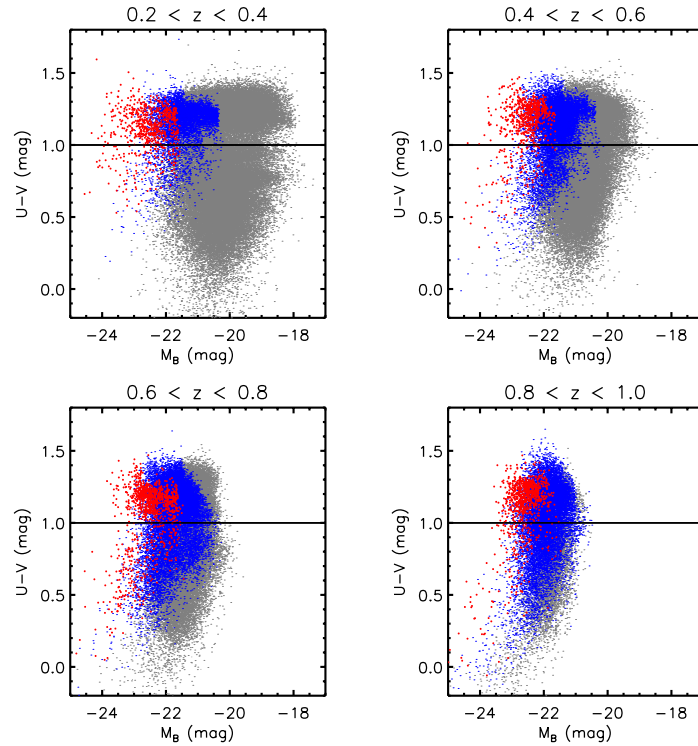


図 2: 異なる赤方偏移における、観測された銀河の静止系の色 $U - V$ と絶対等級 M_B の関係。灰、青、赤色の点はそれぞれ星質量 $M_{\star} < 10^{11.0}M_{\odot}$, $10^{11.0}M_{\odot} < M_{\star} < 10^{11.5}M_{\odot}$, および $10^{11.5}M_{\odot} < M_{\star} < 10^{12.0}M_{\odot}$ の銀河を表す。水平線は本研究で用いられる青い種族と赤い種族の分類基準である。

最後に、これら大質量銀河のクラスタリング測定の結果を図 3 に示す。いずれの質量クラスでも強いクラスタリングが検出されている。特に $10^{11.5}M_{\odot} < M_{\star} < 10^{12.0}M_{\odot}$ の銀河では空間相関長が $r_0 \sim 14$ Mpc に達し、これは近傍宇宙の非常に明るい銀河や $z > 1$ に存在する extremely red object (ERO) と呼ばれる種族の明るい天体と同等である。このことから、 $10^{11.5}M_{\odot} < M_{\star} < 10^{12.0}M_{\odot}$ の銀河はこれら 2 つの種族を直接関係づける天体であると考えられる。一方で $10^{11.0}M_{\odot} < M_{\star} < 10^{11.5}M_{\odot}$ の銀河はより弱いクラスタリングを示し、近傍の $L \sim L^*$ (光度関数の典型的光度) 銀河へ進化すると見られる。空間相関長は $0.2 < z < 1.0$ でほぼ一定であり、これら銀河の背後にある物質構造が共動座標にほぼ固定され、宇宙とともに膨張していることが示唆される。

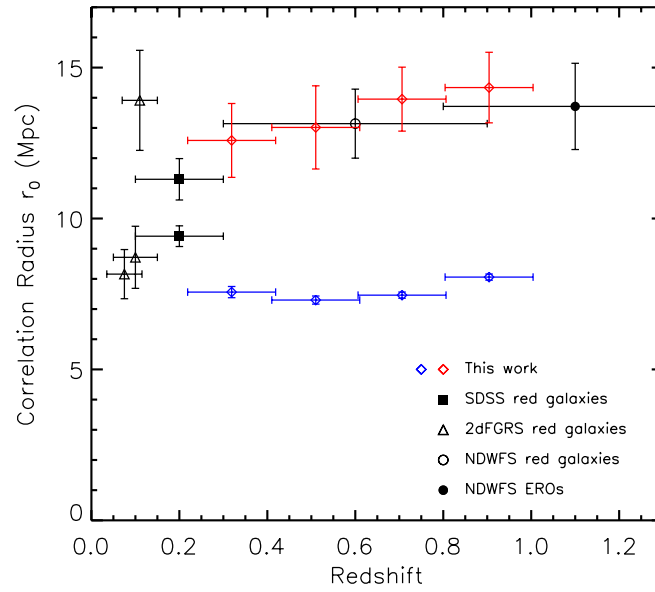


図 3: 本研究の大質量銀河および他の銀河種族で測定された空間相関長。青と赤の菱形は本研究で観測された星質量 $10^{11.0}M_{\odot} < M_{*} < 10^{11.5}M_{\odot}$ および $10^{11.5}M_{\odot} < M_{*} < 10^{12.0}M_{\odot}$ の銀河を表す。一方、正方形と三角は SDSS と 2dF Galaxy Redshift Survey で観測された近傍宇宙の赤い銀河 (複数のシンボルは $L \sim L^{*} - 4L^{*}$ の異なる光度クラスを表す)、白丸と黒丸は NOAO Deep Wide-Field Survey で観測された赤く明るい銀河と明るい EROs 種族をそれぞれ表す。