

論文内容の要旨

論文題目: Mass-assembly and star-formation history of galaxies
at $z > 1$ through wide-area surveys
from optical to mid-infrared wavelengths

「可視光線から中間赤外線にわたる広域サーベイによる
遠方 ($z > 1$) 銀河の星質量と星形成率の研究」

氏名: 藤代尚文

銀河の形成と進化は、宇宙物理学に残された大きな課題の一つである。WMAP 衛星の観測は、宇宙論的パラメータとともに冷たい暗黒物質 (Cold Dark Matter; CDM) のゆらぎのパワースペクトルを精度良く決定した。この CDM ゆらぎからは、まず小さな CDM ハローが形成され、それらが合体してより大きなハローに成長してきたと考えられ、これらの個々のハローに個々の銀河を対応させて捉える単純な階層的銀河進化シナリオに従うと、大きな銀河は小さな銀河よりも後に形成されたと期待できる。

ところが、このシナリオの予想に反し、ビッグバンから 30 億年たらずしか経ていない赤方偏移 2 付近の宇宙においても、太陽質量の 10^{11} 倍以上の星質量をもつ大質量銀河が見つかり、むしろ、大きな銀河から先に星形成が終了してきたという「ダウンサイジング」シナリオが観測的に支持されるようになっている。しかしながら、肝心の銀河の星形成が終わった時期については、赤方偏移 1 付近、もしくはそれより高赤方偏移であると示唆する研究結果 (例: Kodama et al. 2004) がある一方で、赤方偏移 1 未満でも完了していないとする研究結果 (例: Drory et al. 2004) もあり、統一的な見解を得るには至っていない。このように、「大質量銀河の形成はいつ完了したか？」は、理論的にも観測的にも重要な問題である。

そこで、本研究では、大質量銀河の個数密度のみならず、星形成活動もあわせて調べることにより、大質量銀河の形成が完了した時期の確定を試みた。

近傍宇宙においても 1Mpc^3 あたり $\sim 10^{-3}$ 個と数が希少である大質量銀河を統計的に調べるためには、銀河分布の非一様性の影響を避けるため、できる限り広い領域の観測が必要である。さらに、各々の銀河の測光学的赤方偏移、星質量、および、星形成率を推定するためには、多波長にわたる撮像データも必要である。そこで本研究では、視野が 100 平方分以上と広く、かつ、可視光線から近赤外線までの波長をカバーした、すばる XMM ニュートンディープフィールド (SXDF と呼ぶ) のカタログ、および、我々のグループの観測による北黄極 (NEP) 付近の二領域 (NEP NE および NEP SE と呼ぶ) のカタログを用いることにした。使用したカタログの概要を、表 1 に示す。いずれのカタログも、 K_s バンドで検出された天体をもとに作成された。

測光学的赤方偏移、星質量、および、星形成率の推定は、銀河スペクトル進化モデルとの比較により行った。この比較と誤差評価を高速で行うためのアルゴリズムの開発を行い、かつ、モデル銀河を用いたモンテカルロシミュレーションにより、この方法の信頼性を評価した。本研究で

領域略称	フィルターセット	K_s バンド限界等級 (AB 等級)	視野 (平方分)	天体数
SXDF	$B, V, R, i', z', J, H, K_s$ <i>Spitzer</i> /IRAC 3.6, 4.5 μ m	22.1 (5σ)	114	1140
NEP NE	B, V, R, i', z', J, K_s	21.1 (80% completeness)	234	1327
NEP SE	B, V, R, i', z', J, K_s	21.3 (80% completeness)	306	2093

表 1: 本研究で使用した銀河カタログの概要

興味のある赤方偏移 0.5 から 2.0 にある銀河については、測光学的赤方偏移と星質量に関しては、SXDF と NEP のどちらのカタログのフィルターセットでも、堅牢な結果が得られることを示した。一方、星形成率の推定については、NEP のカタログのフィルターセットではその信頼性が低い、*Spitzer* 宇宙望遠鏡による波長 3 ミクロン以上の長波長のデータが追加された SXDF のフィルターセットでは、堅牢な結果が得られることを示した。この結果を受けて、星形成率についての調査は、堅牢な結果が得られる SXDF の天体のみに行うことにした。

上述した、観測データと銀河スペクトル進化モデルとの比較の結果、赤方偏移 0.5 以上にあり、かつ、その星質量が $10^{11} M_{\odot}$ 以上と推定される大質量銀河を、164 個 (SXDF)、197 個 (NEP NE)、272 個 (NEP SE) を検出した。尚、 K_s バンドの限界等級から、赤方偏移 2 (SXDF), 1.3 (NEP NE), 1.5 (NEP SE) までならば、80%以上のコンプリートネスをもって大質量銀河が検出されていることもあわせて示した。赤方偏移 2 までの大質量銀河を調査した先行研究では、Fontana et al. (2004) では 60 個、Grazebrook et al. (2004) では 33 個にすぎなかった。

図 1 に、赤方偏移の関数とした、単位共動体積あたりの大質量銀河の個数を示す。SXDF と NEP の二領域ともに、赤方偏移 1 以上においては現在に向かって個数密度の増加が見られるが、赤方偏移 1 未満においてはほぼ一定で推移しているものと考えられる。この結果は、Kodama et al. (2004) 等で示唆されたものと一致する。一方、約 1000 平方分の観測データから、赤方偏移 1.1 までの大質量銀河の進化を調べた Drory et al.(2004) では、赤方偏移 0.5 まで個数密度に増加が見られており、この結果とは一致しないものとなった。

次に、星形成率についても堅牢な推定が可能である SXDF の大質量銀河について、銀河のサイズによらない星形成の活発さを示す時間尺度 (=星質量 ÷ 星形成率) を、赤方偏移の関数として調査した。この時間尺度が短いほど、星形成が活発であることを示す。この結果を図 2(左) に示す。赤方偏移 1 以上で数多く見られた、星形成の時間尺度が宇宙年齢を下回るような大質量銀河が、赤方偏移 1 を境に急速に見られなくなった。さらに赤方偏移を幅 0.2 または 0.4 のビンごとに区切り、そのビンの中での大質量銀河の星形成の時間尺度のヒストグラムを調べた (図 2(右))。星形成の時間尺度のメディアンは、赤方偏移 1.2 以上の瓶では 10-25Gyr でほぼ一定で推移するが、赤方偏移 1.1 の瓶では 100Gyr、赤方偏移 0.9 の瓶では約 500Gyr に達した。以上の結果は、SXDF 領域における大質量銀河の形成が、赤方偏移 1.0 付近において終了したことを、明確に示すものである。以上のような手法により、世界で初めて大質量銀河の形成が終了した年代を特定した。

ところで、赤方偏移 1 以上での銀河進化の様子をより詳細に調べるために、赤方偏移の関数として、銀河の星質量関数を計算した。この計算結果を図 3 (左) に示す。SXDF の結果に注目すると、赤方偏移 1 から 2 において、星質量関数の傾きが変化するあたりの星質量は約 40%しか変化していない。一方、星質量関数をシェヒター関数でフィットしたときの規格化定数の値は約 6 倍変化している。この事実は、赤方偏移 1 から 2 の銀河進化は、主に密度進化が行われていたを示してい

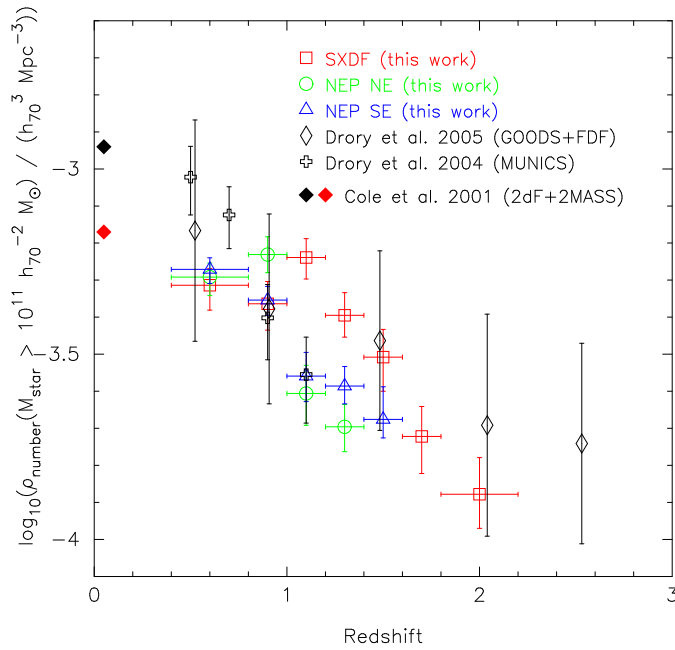


図 1: 北黄極近傍の二つの領域 (NEP NE, NEP SE)、および、SXDF における、 $10^{11}M_{\odot}$ 以上の星質量をもつ大質量銀河の、単位共動体積あたりの個数。黒い菱形は、Cole et al. (2001) による近傍宇宙の結果。赤い菱形は、Cole et al. (2001) の結果を、本研究の星質量の推定法で行った場合に補正した結果。白い菱形、Drory et al. (2005) による、Great Observatories Origins Deep Survey-South (GOODS) および FORS Deep Field (FDF) における結果。白い十字は、Drory et al. (2004) による、Munich Near-Infrared Cluster Survey (MUNICS) における結果。

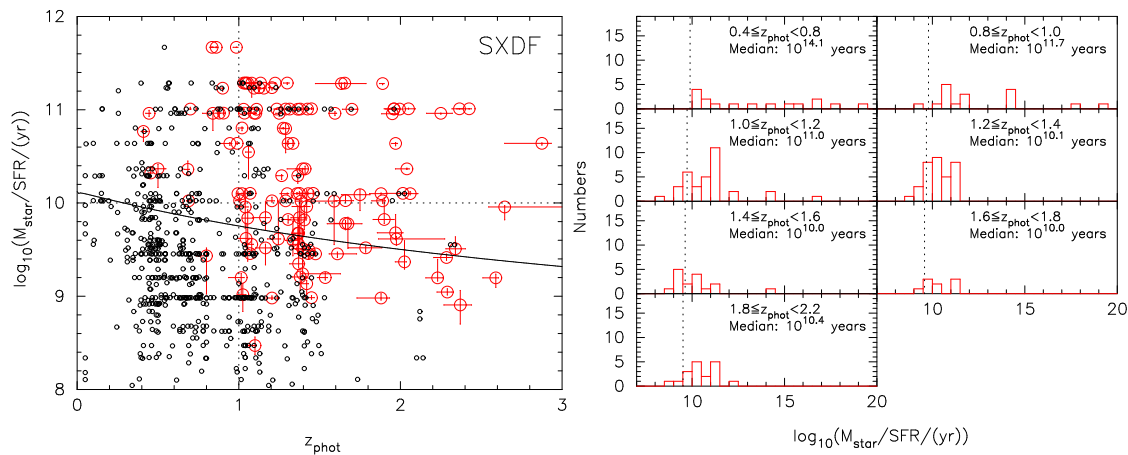


図 2: (左)SXDF における、赤方偏移の関数とした、個々の銀河の星形成の時間尺度 (=星質量 ÷ 星形成率)。赤い大きな丸は、 $10^{11}M_{\odot}$ 以上の星質量をもつ大質量銀河を示す。小さい丸は、 $10^{11}M_{\odot}$ 未満の星質量をもつ銀河を示す。密集を防ぐため、誤差棒は大質量銀河のみ示した。実線は、ある赤方偏移に対する宇宙年齢。(右) 赤方偏移の瓶別の、大質量銀河の星形成の時間尺度のヒストグラム。点線は、赤方偏移のピンの中心における宇宙年齢。

る。この結果は、SXDF の半分程度の観測領域による Fontana et al.(2004) の結果と一致する。

一方、SXDF と NEP の二領域の質量関数を、同じ赤方偏移において比較すると、赤方偏移 1.1 付近では 2 倍程度の違いが見られた。この結果は、赤方偏移 1.1 付近において最大約 3 倍のばらつきが銀河分布にあることを示した Drory et al. (2004) の観測結果と、一致するものである。銀河進化に関して統一した見解を得るためには、より広い領域の観測が必要であることが、改めて示された。

最後に、図 3(右) に、銀河の星質量関数にベストフィットしたシェヒター関数を積分することにより計算した、宇宙の星質量密度を示す。ただし、この計算に用いた赤方偏移 0.8 以上のシェヒター関数については、低質量側の傾きを、赤方偏移 0.4-0.8 と同じものを仮定した。これにより、SXDF では赤方偏移 2.0 において、現在の宇宙の 20% の星質量が形成されていたことが示唆された。

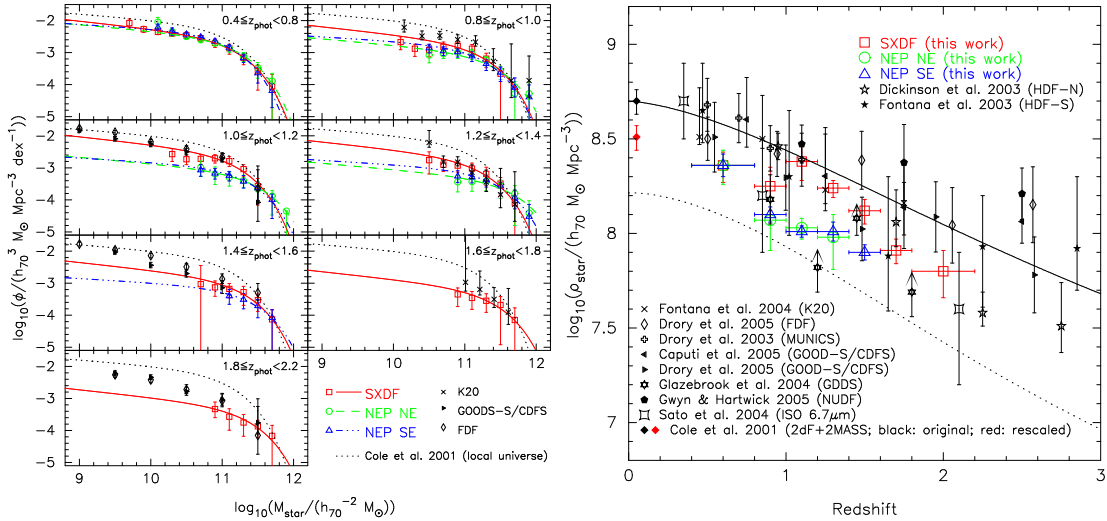


図 3: (左) 赤方偏移の関数とした、星質量関数 (赤: SXDF, 緑: NEP NE, 青: NEP SE)。実線は、コンプリートネス補正を行った星質量関数にベストフィットしたシェヒター関数。シェヒター関数の低質量側の傾きは、赤方偏移 0.4-0.8 のものに固定した。比較として、K20 サーベイ、GOODS、FDF、および、Cole et al. (2001) の近傍宇宙の観測結果も示した。(右) 赤方偏移の関数とした、単位共動体積あたりの銀河の星質量。左図で求めたシェヒター関数を積分することによって導出した。