

すばるで見たハッブル深撮像領域

鍛冶澤 賢, 山田 亨

〈自然科学研究機構国立天文台光赤外研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: kajisawa@optik.mtk.nao.ac.jp

e-mail: yamada@optik.mtk.nao.ac.jp

私たちは、銀河がどのように形成され成長して、現在の宇宙で見られるような姿になったのかを調べるため、すばる望遠鏡および近赤外線カメラ (CISCO) を用いて、ハッブル深撮像領域の近赤外撮像観測を行いました。ハッブル宇宙望遠鏡とすばる望遠鏡のデータを組み合わせることで、銀河の星の年齢をよく反映する色や銀河の形態の進化が、銀河の質量とどのような関係になっているのかを調べてみたところ、ある質量を境に重い銀河と軽い銀河ではその色の進化の様子に違いがあり、銀河の星形成の歴史は銀河の質量と密接に関係していることが分かってきました。

1. はじめに

現在の宇宙で見られる銀河は、さまざまな姿、形をしていて、その色や明るさ、大きさ、重さなどもいろいろです。姿、形 (形態) では、のっぺりとした楕円体をした楕円銀河や円盤状の渦巻き模様をもつ渦巻銀河、非対称で一定の形をとらない不規則銀河などがあります。明るさや質量で言えば、われわれの天の川銀河のような比較的明るく立派な銀河もあれば、質量にしてその1万分の1、10万分の1といった小規模な銀河まであります。銀河の色を見ても、非常に古い星 (例えば、50億歳とか100億歳) ばかりからなる銀河は非常に赤い色をしていますし、生まれたての若い星がたくさんいて青い色をしている銀河もいます。さらに、例えば楕円銀河は赤い色をしていて、渦巻銀河や不規則銀河は青い色をもっているなど、銀河の形、明るさ、色などのそれぞれの性質の間には関係があることが知られていて¹⁾、どのようにしてこのような多種多様な銀河ができたのか、またなぜそれぞれの性質の間に相関関係があるのかを調べることはたいへん面白いことだと思います。

一方で天文学では、光がわれわれに届くまでにかかる時間が大きくなってしまふような遠方の天体を観測することで過去の時代の天体の様子を見ることができます。つまりいろいろな距離の銀河を観測することで、各時代における銀河の様子から銀河がどのように進化、成長したのかを調べることができます。今回、私たちは銀河の質量 (ここでは銀河を構成している星の総質量である恒星質量) と銀河の色、形態の間関係に着目して、遠方の銀河を観測してその性質を明らかにすることで、いろいろな重さの銀河がどのように進化してきたのかを調べてみました。

2. 銀河の恒星質量

具体的な結果の話の前に少し銀河の恒星質量について説明します。

銀河の恒星質量は一般に、その重さが太陽程度か、それ以下の星からの寄与が支配的であると考えられています。これは星が形成されるときに質量の小さい星ほどたくさん作られることと、質量の小さい星ほど寿命が長いことによっています。また、その寿命の長さは宇宙年齢と同程度なほど

なので、銀河の恒星質量は大雑把に言って時間に対して単調増加しているものと考えられます。つまり銀河の恒星質量はその銀河が生まれてから作ってきた星の総量を表していると言えます。

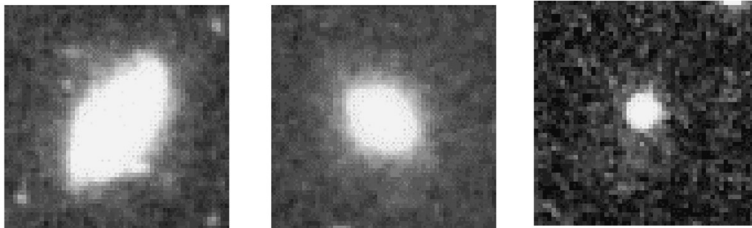
一方、銀河の色はその銀河にある星の年齢構成（または金属量やダストの影響なども）をよく反映します。また、銀河の形態はその力学的進化と関係していて、銀河のアセンブリがどのように進んだかを表していると考えられます。各恒星質量

の銀河の色、形態の分布の進化を調べることは、生まれてからどのくらいの量の星を作ってきた銀河が、どういう星の年齢構成をしていて、どのような力学状態にあるかということをお各時代において調べるということなのです。

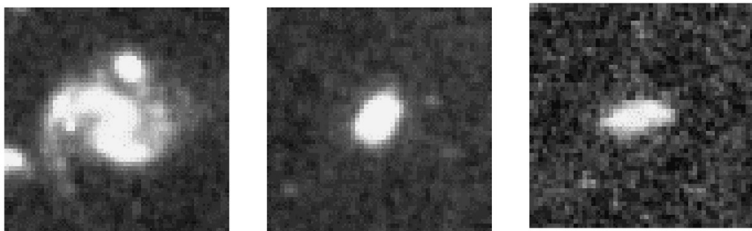
3. すばるでのハッブル深撮像領域の観測

銀河の進化を大昔までさかのぼって調べるためには、非常に遠くの銀河を観測しなくてはなりま

楕円銀河



円盤銀河



不規則銀河

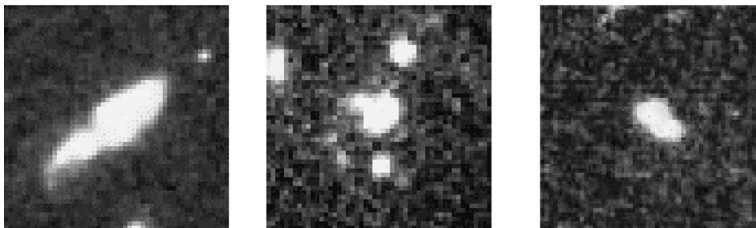


図1 ハッブル深撮像領域の銀河を HST の画像データを使って形態分類した例

せん。さらに、質量が大きい銀河から軽くて小規模な銀河まで調べようと思うと、ただでさえもともと暗めの小規模な銀河を非常に遠方において観測する必要があります。そこで私たちはハッブル宇宙望遠鏡 (HST) によって当時最も暗い天体まで観測したハッブル深撮像領域のデータをこの研究に使うことにしました。この領域では U-バンドから H-バンド (波長 300 nm から 1,600 nm まで) の 6 バンドで HST の深い撮像データが撮られ^{2), 3)}, そこに写っている多くの銀河について分光観測がなされ赤方偏移 (距離) が調べられました⁴⁾⁻⁶⁾。

私たちはこの領域をすばる望遠鏡および CISCO を用いて、K'-バンド (2,130 nm) で正味

10 時間にわたって撮像観測しました。K'-バンドでの観測データは、各銀河の恒星質量を精度よく見積もるのに役立ちます。先にも述べたように銀河の恒星質量は小質量の星からの寄与が大きいのですが、これらの星が強く光っている波長域が近赤外域で、この波長域での明るさから恒星質量を見積もることができます。特に非常に遠方の銀河の光は宇宙膨張により強く赤方偏移されるので、これらの銀河の質量の見積もりには、より長波長側の明るさを測ることができる K'-バンドのデータが重要になるのです。

4. 銀河の質量、色、形態を調べる

HST のデータとすばるのデータを組合せるこ

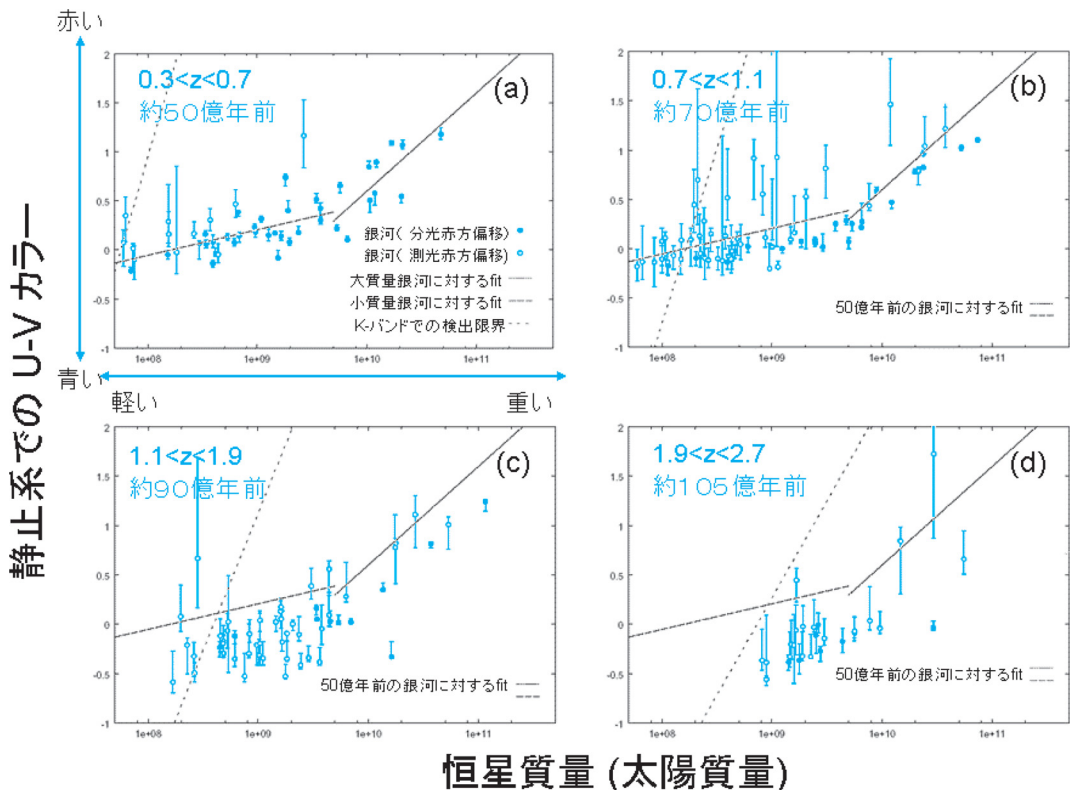


図2 ハッブル深撮像領域の銀河の恒星質量に対する静止系での U-V カラーの分布。●は赤方偏移が分光観測によって求められた銀河、○は測光赤方偏移法を用いた銀河を表す。(a)は赤方偏移が0.3-0.7、(b)は赤方偏移が0.7-1.1、(c)は1.1-1.9、(d)は1.9-2.7の銀河をそれぞれプロットしている。図中の破線、点線はそれぞれの恒星質量の範囲において、赤方偏移が0.3-0.7の銀河(つまり(a)の図において)に対して直線フィットした結果を示している。

とで、私たちは写っている各々の銀河について、近紫外域から近赤外域までの各波長域での明るさを測ることができます。さらにほかの文献からの各銀河の赤方偏移の情報を使ったり、各波長域での明るさから推定される赤方偏移（測光赤方偏移）を使って、各銀河までの距離を求めます。距離が分かると見た目の明るさから絶対等級が計算でき、近赤外域の光度と、各波長域での明るさから推定される銀河のスペクトルの形から銀河の恒星質量を見積もることができます。また、銀河のスペクトルの形を使って銀河の静止系での色（銀河の光が宇宙膨張によって赤方偏移される効果を補正した色、ここではU-Vカラーを用いる）を計算しました。HSTの高解像度の画像を使うことで、図1の例に示したように遠方銀河の形態も調べました。赤方偏移があまりに大きくなると、K-バンドから恒星質量を精度良く求めることが難しくなる、また見た目に暗くなって形態を調べることも難しいなどの条件から本研究では約110億年前までの銀河をサンプルし、その恒星質量と色、形態の関係を調べました。以下ではその結果を説明します。

5. 銀河の恒星質量と色の関係

図2にハッブル深撮像領域の銀河の恒星質量と静止系でのU-Vカラーの分布を各時代別（距離別）に示しました。

まず、およそ50億年前の銀河を集めてプロットした(a)を見ると、おおまかに言って軽い銀河は比較的青い色をしていて、重い方の銀河の色は赤くなっている傾向が見られます。詳しく見ていくと、図の左半分では銀河の色はU-Vカラーで0から0.5の間に分布しているのに対して、図右側のほうにいくにつれより赤い色を示す銀河がいます。試しに銀河を恒星質量が $5 \times 10^9 M_{\odot}$ のところで二つのグループに分けて、それぞれ恒星質量（正確にはその対数）とU-Vカラーの関係を直線でフィットした結果が図2に破線と点線で示され

ています。軽い方では破線の傾きは小さく、それほど質量によらずに皆青い色をしているのに比べ、重い方では質量が大きくなるにつれ銀河の色が赤くなっていく強い傾向が見られます。SDSSなどの近傍銀河の大規模サーベイ結果から恒星質量が $10^{10} M_{\odot}$ あたりを境に銀河の色や星の平均年齢の分布が異なっていることが知られており^{7),8)}、図2(a)の50億年前の銀河で見られる傾向はそれらの現在の宇宙における銀河の結果とよく合致しています。

次に、もう少し昔にさかのぼって約70億年前（現在の宇宙の年齢が約137億年なので、その約半分）の銀河をプロットした図2(b)を見ると、同じように恒星質量と色との関係がありそうで

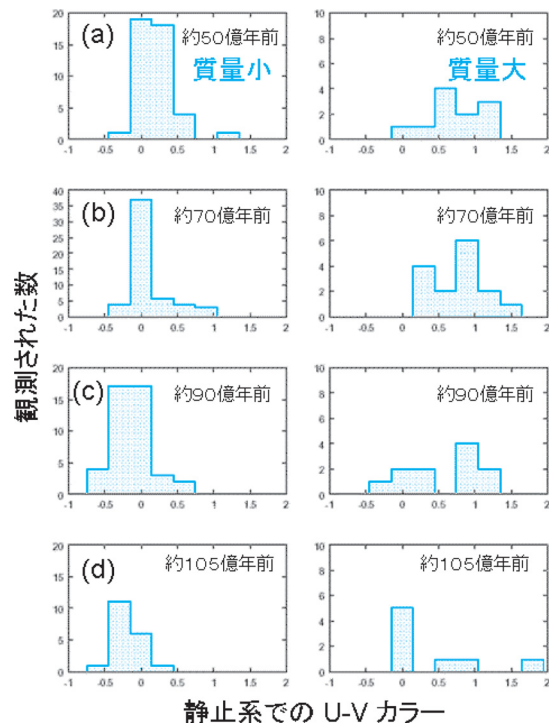


図3 各時代において、銀河を恒星質量が $5 \times 10^9 M_{\odot}$ より大きいものと小さいものに分けたときのそれぞれの静止系でのU-Vカラーのヒストグラム。左が恒星質量が小さい方の銀河、右が質量が大きい銀河に対する図。(a), (b), (c), (d)は図2と同様。

す。図 2(b) では、質量が小さいほうにも赤い銀河がいくつか存在していますが、図 3 に示した恒星質量が $5 \times 10^9 M_{\odot}$ より大きい銀河と小さい銀河の U-V カラーのヒストグラムを見れば分かるように、質量が小さい方では青色 (U-V が 0 あたり) をもつ銀河の数が圧倒的に多くなっています。また、質量が $5 \times 10^9 M_{\odot}$ あたりを超えると、質量とともに銀河の色が赤くなっていく傾向も図 2(a) で見られたものと同様です。約 90 億年前までさかのぼった図 2(c) でも、同じように質量が小さいところでは大部分の銀河が青色を示していて、あるところから質量の増加とともに急に色が赤くなっていく様子が見られます。100 億年以上さかのぼった図 2(d) では、観測された重い銀河の数が少なすぎて、同様な傾向の有無は確認できませんでしたが、少なくとも現在から宇宙年齢の半分以上の 90 億年ほど前までさかのぼっても同じような形の恒星質量に対する U-V カラーの分布が見られ、銀河の恒星質量と色は長い時代にわたって非常に密接に関係しているということが分かりました。先に少し述べたように、銀河の色はその銀河の星の年齢構成と関係していて、新たに星を作らず高齢化を迎えている銀河は赤くなり、星を産み出し続けている銀河は青色をしているので、今回観測された恒星質量と色との間の関係は、「その銀河がどのくらい新たに星を作っているかはそのときの銀河の恒星質量と関係している」と言い換えられるかもしれません。

6. 銀河の色の進化と恒星質量

次に、銀河の色が時代を遡るにつれ、どのくらい変化しているのか (色の進化) に着目します。各時代における静止系での U-V カラーを直接比較するために、図 2 の (b), (c), (d) の図には、約 50 億年前の (a) の図においてフィットした結果の破線、点線と同じものを示してあります。図 2 (b), (c), (d) でこれらの破線、点線と観測された銀河の分布とを比べると、質量が $5 \times 10^9 M_{\odot}$ よ

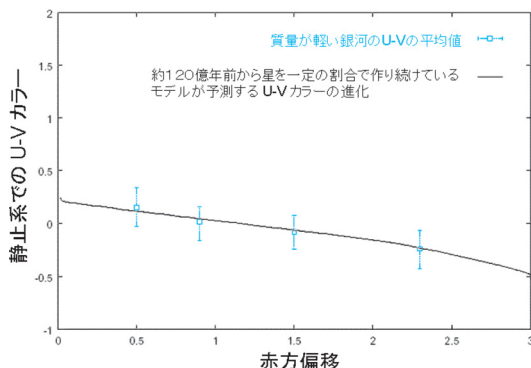


図 4 恒星質量が $5 \times 10^9 M_{\odot}$ より小さい銀河の静止系での U-V カラーの平均値の進化. 実線は約 120 億年前から一定の割合で星形成を続けている種族合成モデルの U-V カラーの予測値.

り大きいところでは比較的点線に沿って銀河が分布している (進化が小さい) のに対して、質量が小さいところでは、昔にさかのぼっていくにつれ破線と比べてどんどんより青い方へ銀河の分布がずれていっていることが分かります。銀河の色が青くなっていくことから、銀河の星の平均年齢が若くなっていることが推測されます。

一方でこれらの質量が小さい銀河は、図 2(a) の図の時点でも活発に新たに星を形成していると考えられるほど十分に青色をしていて、より昔ではさらに青色をしているので、常に星形成活動を行っているというようなことも推測されます。そこで単純に時間に対して一定の割合で星形成を続けている種族合成モデル⁹⁾が予測する U-V カラーと、これらの質量の小さい銀河の色進化を比較してみました。図 4 には約 120 億年前から一定の割合で星形成を続けているモデルの予測値と、恒星質量が $5 \times 10^9 M_{\odot}$ より小さい銀河の U-V カラーの各時代での平均値が示してあります。図 2 を見ても分かるように各時代で同じ質量でも銀河ごとに色のばらつきはあるものの、その平均値の進化はモデルの予測と合っていて、これらの質量の小さな銀河は大雑把に言って、おおよ

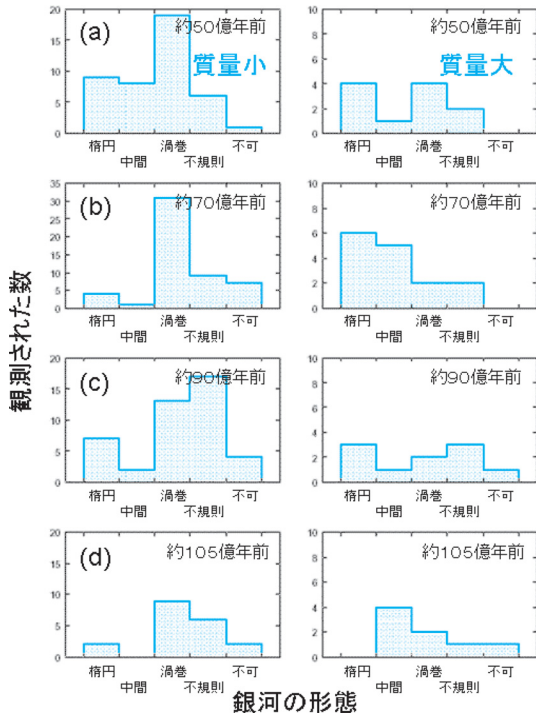


図5 銀河を恒星質量が $5 \times 10^9 M_{\odot}$ より大きいものと小さいものに分けたときの、各時代における銀河の形態分布のヒストグラム。左が質量が小さい銀河、右が質量が大きい銀河に対応している。(a), (b), (c), (d) は図2と同様。形態はそれぞれ楕円銀河、楕円銀河と円盤銀河の間、円盤銀河、不規則銀河、暗く形態分類が不可能な銀河を表している。

そ 120 億年前くらいから同じような割合で星を作り続けて成長してきていると言うことができそうです。ただ、これらの銀河の中には、観測された静止系での紫外線光度から予測される星形成率が恒星質量と比べて大きく、一定の星形成率の仮定と合わない銀河もかなりの数おり、それらの銀河では星形成が間欠的に起こっていて、比較的短い時間スケールで（あまり星を作らない期間が長くなると観測と合わなくなるほど赤くなってしまう）星を作ったり作らなかったりを繰り返しながら成長してきたのかもしれない。

7. 銀河の恒星質量と形態の関係

図5には、図3と同様に銀河を恒星質量が $5 \times 10^9 M_{\odot}$ より大きいと小さいかで分けたときの、銀河の形態の分布を示しました。図5(a), (b)を見ると、質量が小さい方では大部分が円盤銀河なのに対し、質量が大きいところではより早期型の形態の割合も増えていることが分かり、現在の宇宙で見られる傾向⁷⁾とも合致しています。約90億前の図5(c)の時代までさかのぼると不規則銀河の割合が増加していて、この特徴もこれまでの観測の結果^{10), 11)}と合致していますが、そのことを除けば、やはり質量が小さいところでは円盤銀河が多く、それに比べると質量が大きいところでは早期型の形態の割合が増えているという傾向自体は時間をさかのぼってもそれほど大きく変わってはいないようです。色で見られた傾向に比べると形態の分布は割りとばらつきが大きく、質量との関係をより詳しく調べるためには、質量が大きいところでの銀河のサンプル数をより大きくする必要があります。

8. まとめ

今回、私たちはハッブル深撮像領域のHSTのデータとすばる望遠鏡での観測データを使って、銀河の恒星質量と色、形態の関係の進化を調べました。その結果、現在から約90億年前までの間では、恒星質量が $5 \times 10^9 M_{\odot}$ より小さい銀河は活発に星を作り続けていて青色をしているのに対し、それより大きい質量では質量の増加とともにより赤い色を示すという結果を得ました。より赤い色を示すということは星形成が弱まって星がより高齢化している（またはよりダストによって強く覆われているのかもしれない）と考えることができるので、この結果は各時代において、銀河が「どれだけ新たに星を作ろうとしているか」ということと「そのときまでにどれだけ量の星を作ったか」ということの間密接な関係があるこ

とを示唆していて興味深いものだと思います。

ただ、今回の研究はハッブル深撮像領域という非常に暗い天体まで調べることができる代償としてかなり狭い視野（4平方分以下）に限定された領域の研究となっていて、（特に質量の大きい方の銀河の）サンプル数が少なく誤差が大きくなってしまふという問題があります。

比較的質量の大きい銀河に関しては、恒星質量と星形成活動の関係の進化に関する研究がほかにいくつか進んできていて¹²⁾⁻¹⁶⁾、およそ70-100億年前までさかのぼっても、やはり恒星質量が大きい銀河ほど、その質量のわりに星形成活動が弱くなっていて星の平均年齢が高くなっているという結果が得られているようです。

現在私たちは、より広視野で今回と同様の深い観測を行うことで、恒星質量の大きいものから小さいものまでより数多くの銀河をサンプルして、今回の恒星質量と色、形態の関係に加えて、質量ごとの数密度の進化（質量関数の進化）を組み合わせることで、銀河がどのようにして現在の宇宙で見られる姿になったのかということへの答えに近づけるのではないかと考えています。

参考文献

- 1) Roberts M. S., Haynes M. P., 1994, ARA&A 32, 115
- 2) Williams R. E., et al., 1996, AJ 112, 1335
- 3) Dickinson M., et al., 2000, ApJ 531, 624
- 4) Cohen J. G., et al., 2000, ApJ 538, 29
- 5) Wirth G. D., et al., 2004, AJ 127, 3121

- 6) Cowie L. L., et al., 2004, AJ 127, 3137
- 7) Kauffmann G., et al., 2003, MNRAS 341, 54
- 8) Heavens A., et al., 2004, Nature 428, 625
- 9) Bruzual G., Charlot S., 2003, MNRAS 344, 1000
- 10) Brinchmann J., et al., 1998, ApJ 499, 112
- 11) Conselice C. J., et al., 2005, ApJ 620, 564
- 12) Brinchmann J., Ellis R. S., 2000, ApJ 536, L77
- 13) Fontana A., et al., 2003, ApJ 594, L9
- 14) Bauer A. E., et al., 2005, ApJ 621, L89
- 15) Feulner G., et al., 2005, MNRAS 358, L1
- 16) Juneau S., et al., 2005, ApJ 619, L135

Stellar Mass Dependence of Evolution of Color and Morphology of Galaxies in HDF-N

Masaru KAJISAWA and Toru YAMADA
*Division of Optical and Infrared Astronomy,
National Astronomical Observatory of Japan,
2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

Abstract: Using very deep Subaru K'-band imaging and archival Hubble Space Telescope data of the HDF-N, we investigate the evolution of stellar mass, color and morphology of galaxies to $z \sim 3$. We mainly examined the rest-frame U-V color distribution of galaxies as a function of stellar mass, and found that galaxies with stellar mass smaller than $\sim 5 \times 10^9 M_{\odot}$ are likely to have a relatively long star formation timescale, while the star formation seems to be suppressed in more massive galaxies at $0 < z < 2$.