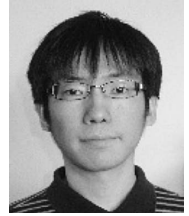


# MOIRCS Deep Survey で探る激動期における銀河の星質量成長



鍛冶澤 賢

〈愛媛大学大学院理工学研究科 〒790-8577 愛媛県松山市文京町 2-5〉

e-mail: kajisawa@cosmos.phys.sci.ehime-u.ac.jp

これまでの研究から、およそ 120 億年前から 80 億年前の間に宇宙全体で急速に星の量が増加したことがわかってきました。この時代は、銀河の中で活発に星が生まれ、銀河が急速に成長を遂げた「銀河進化の激動期」と考えられるようになってきています。本稿では、この時代の銀河の進化の解明を目指して行われた、すばる望遠鏡および広視野赤外線カメラ MOIRCS による深宇宙探査 MOIRCS Deep Survey (MODS) について紹介します。また、この時代の銀河の星質量成長の詳細を明らかにするために、MODS で得られた非常に深い近赤外線データに基づいて銀河の星質量分布の進化を調べた研究についてその結果を報告します。

## 1. はじめに

宇宙の中で星はばらばらに散在しているのではなく、「銀河」という集団を成して存在しています。銀河は数百万の星から構成される小さなものから数千億の星からなる大規模なものまでさまざまですが、現在の宇宙には数千億個ものたくさんの銀河が存在していると考えられています。これらの銀河がいつどのようにして形成され、またどのような進化を遂げて現在の宇宙で観測されるような姿になったのかを解明することは、現代天文学における大きな問題の一つとなっており、世界中で活発に研究がなされてきています。

過去 10-15 年にわたる観測的研究から、120 億年前から 80 億年前までの時代に、宇宙の中で非常に活発に星が生まれて、急速に星の量が増えたことがわかってきました<sup>1)</sup>。宇宙が始まってから現在までの 137 億年のうち、このおよそ 40 億年の間に現在の宇宙に存在する星の半分程度が作られたことがこれまでの研究から示唆されています<sup>2)</sup>。星は銀河の中で作られますから、この 120

億年前から 80 億年前の時代は、銀河が星をどんどん増やして急成長を遂げた「銀河進化の激動期」と考えられるようになり、この時代に銀河が具体的にどのように成長したのかを調べることが、現在の宇宙で見られる銀河がどう作られたかを解明するうえで重要になってきました。

本稿では、この時代の銀河進化の解明を目指して行われた、すばる望遠鏡および MOIRCS による深宇宙探査 MOIRCS Deep Survey と、そのデータに基づいた銀河の星質量成長についての研究成果を紹介します。

## 2. 近赤外線観測の重要性

MOIRCS (Multi-Object InfraRed Camera and Spectrograph) は近赤外線波長域において撮像および多天体分光を行うことができる、すばる望遠鏡第 2 期観測装置です<sup>3), 4)</sup>。MOIRCS を用いた具体的な観測の話に入る前に、この近赤外線（光の波長で 1-2.5  $\mu\text{m}$ ）の観測が、120 億年前から 80 億年前の銀河進化を調べるうえで非常に重要な役割を担っていることを説明します。

この時代の銀河の様子を直接調べるためには、80 億光年から 120 億光年の距離にある銀河を観測する必要があります。これらの距離は宇宙膨張による赤方偏移（遠くの銀河から出た光の波長が伸びてわれわれに観測される効果）にすると、 $z \sim 1-4$ （波長がおおよそ 2-5 倍に伸びる）に相当しています。したがって、これらの銀河から放出される、おおよそ  $0.3-1 \mu\text{m}$  の波長の光が近赤外線波長域の観測によってとらえられることになります。この波長帯での明るさや色の情報から、その銀河がどれくらいの量の星からできているのか、また銀河を構成する星の年齢分布がどのようになっているかを調べることができます。また、近赤外線の観測には、1) 近赤外線の光は可視光と比べて星間塵（ダスト）による減光の影響を受けにくい、2) ハワイなどの観測条件の良い場所では比較的高い空間解像度の観測が可能、3) 中間-遠赤外線観測などと比べて暗い天体まで観測しやすい、といった利点があり、「いろいろな性質をもつ遠方銀河を偏りなく見つけ出す」ことにおいて重要な役割を果たしています。その中でも特に、すばる望遠鏡/MOIRCS は、8 m 望遠鏡の大きな集光力、望遠鏡および観測装置による高い結像性能、8 m 級望遠鏡の近赤外線装置としては非常に広い視野、といった特徴をもっており、遠方銀河探査において非常に強力な手段となっています。

### 3. MOIRCS Deep Survey (MODS)

上で述べた MOIRCS の特徴を活かして「激動期」における銀河の進化を解明するために、MOIRCS 開発チームを中心とした研究グループが結成され、近赤外線波長域での非常に深い（暗い天体まで検出できる）撮像探査 MOIRCS Deep Survey (MODS) が行われました<sup>5)</sup>。探査天域は、GOODS-North と呼ばれる、ハッブル、スピッツァー、チャンドラといった宇宙望遠鏡によって可視光、中間赤外線、X 線の波長域で非常に深い観測が行われている領域です。この領域では、ほ

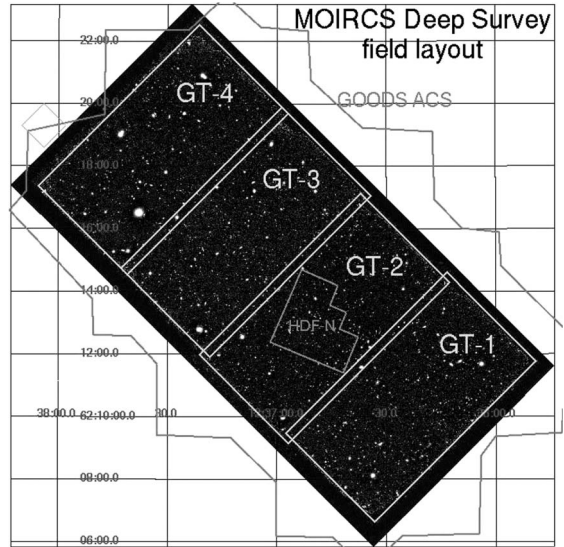


図1 MOIRCS Deep Survey で取得された近赤外線画像とその視野のレイアウト。上が北で左が東の向き。「GOODS ACS」はハッブル宇宙望遠鏡による可視光データの視野を示す。

かにも世界中の地上望遠鏡によるいろいろな波長域での観測がこれまでにに行われていて、これらの多波長データと組み合わせることによって、MOIRCS による近赤外線データを最大限に活用することができます。

MOIRCS は一度に 4 分角  $\times$  7 分角の面積を観測することができますが、MODS では 4 視野にわたる観測を行って、GOODS-North 領域のうち、15 分角  $\times$  7 分角の 100 平方分強の面積をカバーしました（図1）。各視野において、J バンド ( $1.25 \mu\text{m}$ )、H バンド ( $1.65 \mu\text{m}$ )、K<sub>s</sub> バンド ( $2.15 \mu\text{m}$ ) の三つの波長帯で、それぞれ 6-8 時間、2.5-4 時間、8-10 時間にわたる観測を行いました。また、四つの視野のうちの一つ（図1の GT-2 と名づけられた領域）では、さらに暗い天体まで検出するために、J、H、K<sub>s</sub> バンドでそれぞれ、28 時間、6 時間、28 時間と非常に長い時間をかけて観測しました。2006 年春から、2007 年春、2008 年春と 3 シーズンにわたる合計 24 晩（悪天候で観測できなかった日も入れるとさらに多くの晩数になりま

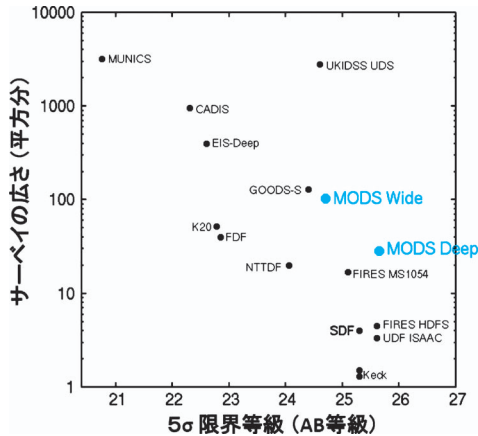


図2 現在までに行われた  $K$  バンド撮像サーベイの広さと深さの比較. 上にいくほど広い面積をカバーしており, 右にいくほどより暗い天体まで検出できることを示す. MODS 全視野分を「MODS Wide」, そのうち 28 平方分の深いデータの領域を「MODS Deep」として示してある.

すが) に及ぶ観測の結果, およそ 100 平方分の領域に渡って 25AB 等級の明るさの天体を検出できる観測データが, またそのうち 28 平方分の領域ではさらに 1 等級暗い 26AB 等級の天体まで検出できるデータが得られました. 図2は, これまでに  $K$  バンドの波長帯で行われた近赤外線撮像サーベイを, 1) どれだけの広さ(面積)にわたって, 2) どこまで暗い天体まで検出できるか, という二つの観点から比較したものです. MODS は, これまでのサーベイと比べて, かなり暗い天体まで検出できる点が特徴です. 特に, 長時間観測を行った 28 平方分の領域(図2における MODS Deep)は, この波長帯でこれまで取得されたものの中で最も暗い天体まで検出できるデータになっていて, また同程度の検出限界の他のサーベイと比べて 5 倍以上の広さをもっています.

遠くの銀河を観測してその進化を調べる場合, 異なる距離にある銀河を観測することで, いろいろな時代の銀河の姿を見ることができます. しかし, 「異なる距離にある」銀河同士は異なる場所に

存在する別々の銀河ですので, ある特定の銀河について時間変化を直接見ることができるわけではありません. そこで, 各距離(時代)にある銀河をたくさん集めてきて, 各時代の銀河の平均的な性質を把握して, その平均的な性質が時間とともにどのように変化していくかを調べていくこととなります. そのような研究においては, 各時代の宇宙をよく代表する「平均」を得るために, なるべく広い領域にわたって多くの銀河を観測することが必要不可欠となります. こうした理由により, サーベイの広さは, 銀河の進化の研究を行ううえで非常に重要な要素の一つとなっています.

#### 4. 激動期における銀河の星質量成長

以下では, MODS の非常に深くて広い近赤外線データを用いた, 「激動期」における銀河の星質量成長についての研究<sup>6), 7)</sup>について紹介します.

##### 銀河の星質量関数の進化

銀河の星質量とは, ある銀河を構成している星の総質量のことで, その銀河がどれだけの量の星からできているかを示す物理量です. 宇宙の中で急速に星の量が増加した 120 億年前から 80 億年前の時代に, 個々の銀河がどのように星を増やして成長していったのかを調べるために, 各星質量をもつ銀河がそれぞれの時代においてどれだけの数存在していたのかを調べました. これを行うために, この領域でこれまで行われてきた分光観測サーベイの結果や可視光から中間赤外線に及ぶ多波長測光データを使って, 各銀河までの距離と星質量を求めます. 上で述べたように, 星質量の推定においては近赤外線のデータが重要な役割を果たします. また, MODS の非常に深い近赤外線データを使うことによって, 100 億光年を超える遠方の比較的小規模な銀河まで逃さず検出して, その星質量を推定することができるようになりました.

図3は各星質量をもつ銀河の個数密度を各時代で調べた結果を示しています. 昔の時代ほど星質

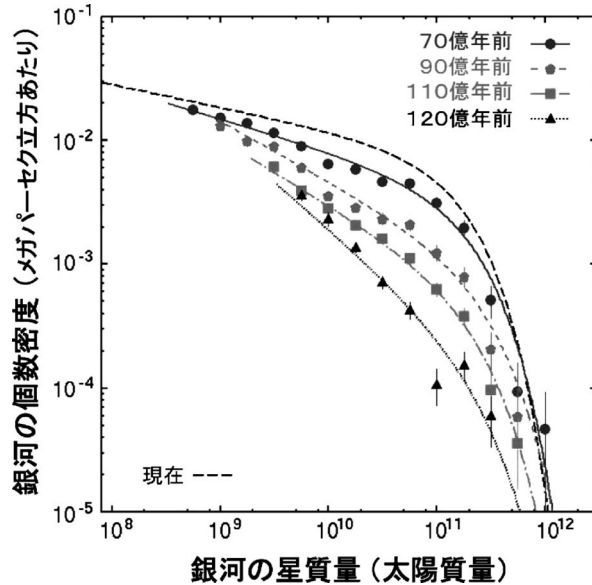


図3 銀河の星質量関数の進化。各星質量をもつ銀河の単位体積当たりの個数が、120億年前から70億年前までの各時代ごとにプロットされている。一番上の破線は現在の宇宙での星質量関数を比較のため示してある。

量がより大きいところまでしかデータ点がないのは、より遠く（より昔）の銀河ほど暗く見えるために、あまりに質量が小さい銀河は検出できなくなっているからです。

この図を見ると、120億年前から70億年までの間に時間とともに、銀河の数が全体的に（どの星質量においても）増加していったことがわかります。図3には比較として現在の宇宙での銀河の数も示してありますが、70億年前から現在までの期間における銀河の数の増加と比べると、「激動期」には銀河の数がより急激に増加したことが見て取れます。

さらに、今回 MODS の非常に深いデータを用いて比較的星質量の小さい銀河までその進化を調べたことで、激動期における銀河の数の増加の度合いが銀河の星質量ごとに異なっていることが新たにわかりました。10<sup>11</sup>太陽質量（=太陽の1千億倍の質量）程度の銀河の数が120億年前から70億年前までの間に約10倍に増加しているのに対して、1-2桁質量の小さい10<sup>9</sup>-10<sup>10</sup>太陽質量の銀河の数の増加は3倍程度になっています。10<sup>12</sup>太

陽質量程度の非常に大きな星質量の銀河については、今回のサーベイで観測された数が非常に少なく、その進化について意味のある制限を加えることはできませんが、少なくとも10<sup>11</sup>太陽質量程度の銀河の数が、より小さい星質量の銀河に比べて、この時代により急激に増加したことは確かなようです。これまでの研究では、遠方の小さい質量の銀河を検出することが困難だったため、その進化を詳しく調べることはできていませんでしたが<sup>8)</sup>、今回幅広い星質量にわたって個数密度の進化を調べたことで、銀河の星質量成長についての手がかりが見えてきました。

#### 星が生まれ続ける銀河と生まれなくなった銀河

銀河がどのように星を増やしていくかを考えると、大雑把に言って二つの要素に分けることができます。一つは個々の銀河において新たに星が生まれること（星形成活動）によって星質量が増加する、もう一つは銀河同士が合体することによってより大きな星質量の銀河ができるというものです。特に今回の研究では、宇宙全体で星の量が急速に増えた時代に注目していますので、この時代

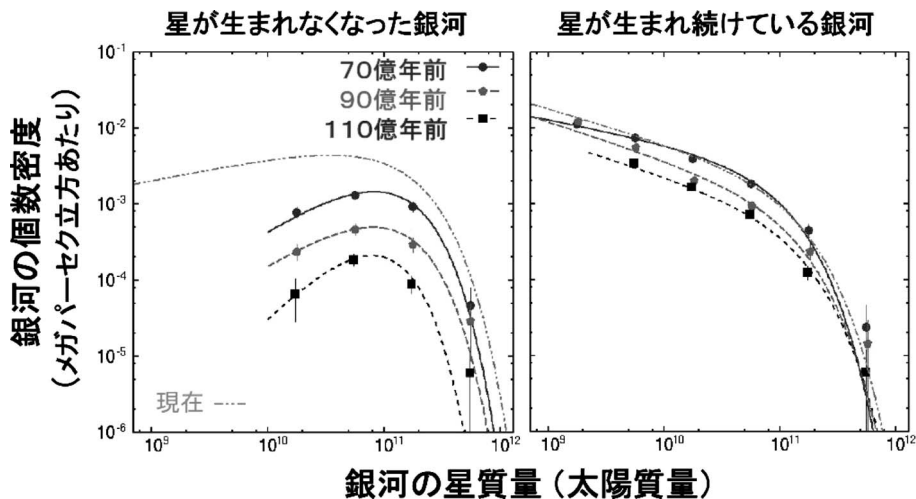


図4 星が生まれなくなった銀河（左）と新たに星が生まれ続けている銀河（右）に分けたときの銀河の星質量関数の進化. 二つのグループの間で、星質量関数の形（星質量が小さいところで銀河の数が相対的に多いのか少ないのか）と、時間とともに数が増加する度合い、の2点が異なっている。

には活発な星形成活動によって新たに星が生まれて、その結果星質量を増やしている銀河がたくさんいることが期待されます。そこで、銀河の星質量成長の解明への次のステップとして、星が生まれなくなっている銀河と活発に星が生まれている銀河、それぞれについて星質量の分布がどのように進化しているのかを調べることにしました。例えば、星形成活動によって星質量が増加する割合が星が生まれ続けているどの銀河でもおおよそ変わらないという単純な場合を考えると、すべての銀河が全体的にある割合で星質量を増加させていくので、図3に示されているような星質量関数は時間とともに質量の大きなほう（図の右の方向）へシフトしていくはずですが、また、ある時期に多くの銀河において星形成活動が止まるようなことが起きると、それは星が生まれなくなった銀河の数の増加として観測されることが期待されます。

可視光から中間赤外線領域にわたる多波長測光データを使って、各波長での明るさとその形（スペクトルエネルギー分布）を調べることで、この時代の個々の銀河を構成している星のおおまかな年齢分布を推定することができます。これを

使って、若い星が少なく古い星ばかりになっている、星が生まれなくなった銀河と、若い星が豊富で活発に星が生まれている銀河、二つのグループに銀河を分類して、それぞれについて各星質量をもつ銀河の個数密度を各時代で調べました。

図4がその結果を示しています。星が生まれなくなった銀河のほうが星質量の大きいところまでしかデータがないのは、これらの銀河は比較的古い星から構成されているために、同じ星質量の銀河で比較しても、星が生まれ続けている銀河よりも暗く、質量が小さい銀河の検出が難しいことが原因です。このように比較的古い星からなる銀河については、その暗さのために100億光年を超えるような遠方においては、星質量の大きい銀河しか観測することができていませんでしたが、非常に深いMODSデータによって星質量の比較的小さい銀河まで調べることができるようになりました。しかし、120億光年まで遠方になると、これらの星が生まれなくなった銀河については質量の大きめの銀河までしか検出できないこと、また星の年齢分布の推定があいまいになってくることから、図4では110億年前から70億年前までの結

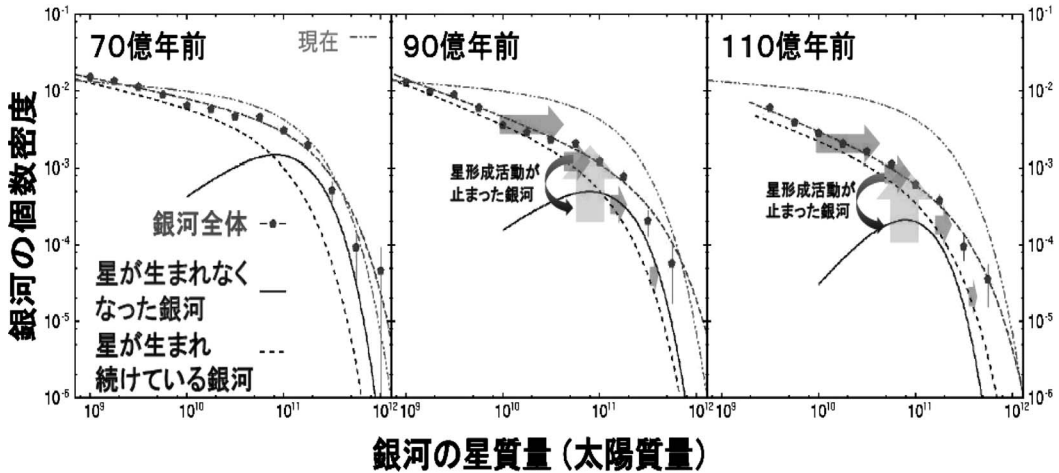


図5 銀河全体の星質量関数の進化における、星が生まれなくなった銀河（実線）と星が生まれ続けている銀河（破線）の寄与。左から右のパネルに進むにつれて、より昔の時代を示している。星が生まれ続けている銀河は生まれた星の分だけ時間とともに星質量が増えていく（右方向へシフトしていく）が、質量が $10^{11}$ 太陽質量あたりを超えると星形成活動が弱まっていき（右向き矢印）、ついには星が新たに生まれなくなる（星形成が止まった銀河）。その結果、 $10^{11}$ 太陽質量あたりを中心に星が生まれなくなった銀河の数が増えていく（上向き矢印）。

果を示してあります。

図を見ると、星が生まれなくなった銀河と星が生まれている銀河で、星質量の分布の形とその進化の度合いが異なっていることがわかります。星が生まれ続けている銀河は、星質量が小さくなるにつれて、どんどん銀河の個数密度が大きくなっていくのに比べて、星が生まれなくなった銀河は、 $10^{11}$ 太陽質量あたりに銀河の数のピークがある、山なりの星質量分布を示していて、星質量が小さいところでは数が減っています。時間とともに銀河の数が増えていく度合いについて見てみると、銀河全体の星質量分布（図3）とは異なり、それぞれのグループにおいて、どの星質量でも個数密度の進化の度合いはそれほど変わらないようです。ただ、その進化の度合いは、二つのグループの間では明らかに異なっています。星が生まれ続けている銀河は、110億年前から70億年前までの間に、どの星質量でもおよそ3倍程度数が増加していますが、星が生まれなくなった銀河の数は同じ期間でおよそ10倍の増加を示しています。

図5は、星が生まれなくなった銀河と活発に星が生まれている銀河、それぞれのグループが銀河全体の星質量関数にどれくらい寄与しているかを時代別に表しています。この図から、これら二つのグループ間の星質量関数の形の違いと、時間とともに数が増えていく度合いの違いの組み合わせによって、図3で見られた、銀河全体では $10^{11}$ 太陽質量程度の銀河の数が、より小さい星質量の銀河に比べてより急激に増加したことを説明することができそうです。110億年前の時代には、活発に星が生まれている銀河が数のうえで支配的でした。そこから70億年前までの間に星が生まれている銀河は全体的に3倍程度まで数が増えていくのですが、その間に $10^{11}$ 太陽質量あたりをピークとした星質量分布をもつ、星が生まれなくなった銀河の数がより急激に増加してきて、70億年前の時代には $10^{11}$ 太陽質量より大きい銀河のうちの大部分を「星が生まれなくなった銀河」が占めるようになっていきます。一方で、 $10^9$ - $10^{10}$ 太陽質量の銀河においては、依然として多くが「星が生ま

れ続けている銀河」のままです。つまり、星が生まれなくなった銀河が急激に増えた分だけ、質量のより小さい銀河に比べて余分に数が増加した結果、 $10^{11}$  太陽質量程度の星質量をもつ銀河の数の増加の割合が特に大きくなったと言えます。

それでは、この結果は銀河の星質量成長に関して、どのようなことを示唆しているのでしょうか。まず、110 億年前から 70 億年前までの間に、星が生まれなくなった銀河の数が 10 倍に増加したことから、この時代にそれだけの数の銀河において星形成活動が弱まったり止まったりしたと考えられます。この「激動期」は宇宙全体で急速に星が増えた時代で、多くの銀河の中で活発に星が作られた時代と言えますが、同じ時期に星形成活動が何らかの理由で止まってしまった銀河の数も急速に増加したようです。星が生まれなくなった銀河は  $10^{11}$  太陽質量あたりにピークをもつ山なりの星質量分布の形のまま個数密度が増加しているので、星質量が  $10^{11}$  太陽質量あたりの銀河において特に星形成活動が止まるが多かったと推測されます。各時代における星が生まれなくなった銀河の増加数とその時代に存在した星が生まれ続けている銀河の数を比較すると、 $10^{11}$ – $10^{11.5}$  太陽質量の銀河では、110 億年前から 90 億年前までの間に活発に星が生まれていた銀河のうちのおよそ 30% において星が生まれなくなり、90 億年前から 70 億年前までの間にはおよそ 40% の銀河で星形成活動が止まったこととなります。それに対して、星質量が小さい  $10^{10}$ – $10^{10.5}$  太陽質量の銀河では、それぞれの時期に星形成活動が止まった銀河の割合は 10% 程度にすぎません。同様のことは、星が活発に生まれている銀河の星質量関数の進化 (図 4 右) の結果からも推測されます。上で述べたように、星形成活動による星質量の成長率がどの銀河もだいたい同じ場合、星質量関数は時間の経過とともに全体的に図の右のほうへシフトしていきはざす。一方で星質量関数の形は、小

さい質量のほうから  $10^{11}$  太陽質量程度までは質量とともに緩やかに減っていき、 $10^{11}$  太陽質量を超えたあたりから急激に減少していく形をしていますので、全体的に右へシフトする場合には星質量の大きいところで個数密度がより大きく増加します。ところが、実際に観測されている進化は、 $10^{11}$  太陽質量を超えた銀河でも数の増加の割合は小さい星質量の銀河とほとんど変わっていません (図 4 右)。このことから、 $10^{11}$  太陽質量以上の星質量をもつ、星が生まれている銀河では、星形成活動が弱まって星質量の成長が小さくなっており (図 5 の右向きの矢印)、さらに星形成活動が止まった銀河は「星が生まれなくなった銀河」のグループのほうへ移っていったと推測されます。その結果、 $10^{11}$  太陽質量あたりの星質量をもつ、星が生まれなくなった銀河がどんどんたまっていく (図 5 の上向きの矢印) というわけです。

## 5. 今後の展望

このように、MODS の非常に深い近赤外線データを使って「激動期」の銀河の星質量分布を調べることによって、この時代では多くの銀河が活発な星形成によって星質量を成長させ、幅広い星質量にわたって銀河の数が増加していった一方で、ある程度大きな星質量まで成長した銀河では比較的高い確率で星形成活動が止まって、その結果として特に  $10^{11}$  太陽質量程度の銀河の数が大きく増えた、という描像が見えてきました。これからの課題としては、まず、より広い領域にわたる観測によって、今回見られた銀河の進化が宇宙で普遍的に起きているのかを検証することが挙げられます。特に、本当に星質量が  $10^{11}$  太陽質量あたりまで成長するとともに星形成活動が弱まっていくのだとすると、非常に星質量の大きい  $10^{12}$  太陽質量程度の銀河はこの時代にあまり作られずに、数の増加も比較的小さいかもしれません。個数密度が小さいこのような大質量銀河の進化を調べるには、より広い領域にわたる観測が重要にな

ります。また、どうして銀河の星質量が  $10^{11}$  太陽質量程度まで成長すると星形成活動が弱まっているのかの理由はいまのところよくわかっていません。活動銀河核による影響などいくつか星形成活動を抑制する要因として議論されているものがありますが<sup>9), 10)</sup>、これを解明するためには、星が生まれなくなった銀河と星を生み続けている銀河の物理的性質をより詳細に調べて両者を比較することなどが必要になると思います。それから、星が生まれている銀河について、どれくらいの星が新たに作られているのかを正確に測定して、星形成活動による個々の銀河の星質量の成長率を高い精度で求めることも、銀河の星質量成長の詳細を明らかにしていくうえで重要なステップになると考えています。

#### 参考文献

- 1) Hopkins A. M., Beacom J. F., 2006, ApJ 651, 142
- 2) Wilkins S. M., Trentham N., Hopkins A. M., 2008, MNRAS 385, 687
- 3) Ichikawa T., et al., 2006, SPIE 6269, 38
- 4) Suzuki R., et al., 2008, PASJ 60, 1347
- 5) Kajisawa M., et al., 2011, PASJ 63, S379
- 6) Kajisawa M., et al., 2009, ApJ 702, 1393
- 7) Kajisawa M., et al., 2011, PASJ 63, S403
- 8) Fontana A., et al., 2006, A&A 459, 745
- 9) Bundy K., et al., 2008, ApJ 681, 931
- 10) Dekel A., Sari R., Ceverino D., 2009, ApJ 703, 785

### MOIRCS Deep Survey and Stellar Mass Growth of Galaxies at $z \sim 1-3$

Masaru KAJISAWA

*Research Center for Space and Cosmic Evolution,  
Ehime University, 2-5 Bunkyo-cho, Matsuyama,  
Ehime 790-8577, Japan*

**Abstract:** We performed a very deep NIR imaging survey with Subaru and MOIRCS in the GOODS-North field, namely MOIRCS Deep Survey. We used the deep NIR data obtained in the survey to investigate the evolution of the stellar mass function of galaxies at  $1 < z < 3$ . We found a mass-dependent number density evolution, which is caused by a rapid growth of the number of quiescent galaxies with the stellar mass of  $\sim 10^{11} M_{\odot}$ .