

MOIRCS 近赤外線分光で探る 激進化期銀河の星形成



吉川 智裕

〈京都産業大学 〒603-8555 京都市北区上賀茂本山〉

e-mail: tomohiro@cc.kyoto-su.ac.jp

約 100 億年前の宇宙は、「銀河の激進化期」とも呼ばれ、多くの星質量が作られた時代と考えられています。この時期にどのような銀河がどのように星を作ったかを調べることは、現在の宇宙がどのようにしてできたかを知るうえでたいへん重要です。本研究では、MOIRCS Deep Survey の近赤外線カタログから星質量に基づいて $z \sim 2$ の星形成銀河を選び、星形成率の指標の中でも信頼性が高い $H\alpha$ 輝線の観測を MOIRCS の近赤外線分光機能を用いて行いました。この結果、星質量当たりの星形成率が高い、すなわち急速に星を作って激進化するとみられる銀河が見つかりました。MOIRCS で見えてきた、宇宙の激進化期の銀河について紹介します。

1. はじめに

宇宙は約 137 億年前に始まり、今日のような姿へと進化してきたと考えられています。それでは、夜空に輝く星たちは、宇宙の歴史の中でどのように作られてきたのでしょうか？ 太陽を含め、私たちが空に見ることのできる星のほとんどすべては、「天の川銀河」と呼ばれる約 1,000 億個の星の集団の一員です。天の川銀河の外の、遠くの宇宙を見ると、宇宙にはさらに多くの銀河たちがあることがわかります。これらの銀河たちの多くは、すばる望遠鏡を使っても、もはや一つ一つの星を見ることが難しく、「銀河」というひとかたまりで見ることしかできません。一方、遠くの銀河から私たちのところに届く光は、有限の速さでやってきます。したがって、遠くの銀河を観測することによって、昔の宇宙ではどのように星ができたのか（星形成）を調べることができるのです。

近年、すばる望遠鏡をはじめとする大型望遠鏡の活躍によって、このように宇宙の歴史をさかのぼって星形成を調べる研究を、世界中の天文学者

が進めてきました。とりわけ、約 100 億年前の宇宙は「銀河の激進化期」とも呼ばれ、活発に星や銀河が作られた時期であることが知られています。例えば、現在の宇宙にある星の質量の半分近くは約 77 億年以上昔の宇宙で作られたと言われています¹⁾。また、銀河の中で星が作られる速さもこれ以前の時期にピークがあったと考えられています²⁾。このような時期の銀河を偏りなく選ぶことには、MOIRCS のように近赤外線宇宙を観測することができる装置が適しています。MOIRCS Deep Survey (MODS) チームでは、MOIRCS を開発し、このような宇宙の激進化期の銀河がどのように作られたのかを調べる研究を進めてきました。特に本稿では、MOIRCS の多天体分光機能を使用して近赤外線分光を行い、激進化期の銀河がどのように星を作っているのかについて調べた研究を紹介します。

2. 近赤外線分光で探る銀河の進化

2.1 銀河の星質量と星形成率

銀河がどのように星を作っているのかを表す特

微的な物理量が、「星質量」と「星形成率」です。星質量は、その銀河がもっている星の総質量で、太陽の質量を単位に表されます。一方、星形成率とは、銀河がどれくらいの速さで星を作っているかを表す量で、1年当たりに作られる星の質量で表されます。銀河の中で、星質量の大半を占める質量が比較的小さな星は、その寿命が数十億年から100億年を超えます。私たちの太陽も、寿命は100億年程度であり、あと50億年は輝き続けると考えられています。これらの星の寿命は宇宙の年齢にも近いため、過去に作られた星のほとんどはその銀河に残っていると考えられます。そのため、銀河の星質量はその銀河で過去に行われた星形成を足し合わせた量とも見ることができます。

現在の宇宙にある銀河の研究から、それぞれの銀河の星形成の歴史は星質量に依存していることが指摘されています。例えば、重い銀河は赤い色をしており、現在の星形成率は低いですが、軽い銀河は青い色をしており、現在も星を作り続けています³⁾。このことから、重い銀河の中にある星ほど昔の宇宙でできている、ということが推測されます。遠方、すなわち過去の銀河までさかのぼって調べた研究でも、この傾向は100億年前まで続いていることが指摘されています⁴⁾。一方、星形成が活発な時期の銀河（星形成銀河）の星質量と星形成率を比べた場合、星形成率は単純に星質量に比例していることが示されています。宇宙の歴史をさかのぼるにつれて、星形成率が全体的に増加していくものの、星形成率が星質量に比例する傾向は100億年前まで続くことが最近の研究から指摘されています^{5),6)}。このような星形成が活発な時期を経験した銀河が、どのように現在宇宙で見られるような銀河へと進化していくのかについては、さまざまな議論が行われています。

2.2 遠方銀河のH α 観測

このように、銀河の星形成率と星質量の関係をみることは銀河の中でどのように星が作られてきているのかを調べるうえで重要です。銀河の星形

成率を求める方法はさまざまありますが、特に、遠方（＝昔）の宇宙の銀河の星形成率を求めるためにこれまで使われている方法は不定性が大きかったために、この傾向についてははっきりとしたことはまだよくわかっていません。銀河の星形成率は、寿命が比較的短い（数百万年～数千万年程度）の星の量から見積もることができます。最近、たくさんの星を作っている銀河では、寿命が短い星がたくさん残っていますが、あまり星が作られていない銀河では、そのような星はすでにいなくなっています。寿命が短い星は温度が高く、紫外線を多く放射します。特に波長が短い（91.2 nm以下の；1 nmは 10^{-9} m）紫外線は、水素原子から電子を切り離し（電離）、その電子が再び水素原子と結合する（再結合）ときにいくつかの決まった波長の光（輝線）を放射します。特に、波長の長い可視光の範囲で見られるH α （656 nm）の輝線は、明るく、銀河の中にある塵によって弱められにくいので、その光度が星形成率の指標として使われます。

銀河から放射される可視光の大半は星からのものです。撮像観測では、ある程度広い幅の波長の光を一度に測るので、電離されたガスから放射されるH α の光度を測ることは一般に難しいです。そのため、H α の光度を測るためには光を虹に分け、波長の関数として測定（分光）し、星からの光とは分ける必要があります。また、遠方の宇宙の銀河から放射される光は宇宙の膨張によって波長が伸びてしまいます（赤方偏移）。100億年前の宇宙は赤方偏移 $z\sim 2$ で、波長が3倍に伸び、H α の輝線は約 $2\mu\text{m}$ （ $1\mu\text{m}$ は1,000 nm）、つまり、近赤外線の波長になります。そのため、MOIRCSのように近赤外線の波長で分光を行う観測装置を使わなければなりません。

H α 輝線を観測することによって、観測されたH α 輝線の波長から、銀河の正確な赤方偏移を測ることができるという利点があります。観測された光の強さから天体の光度を測るためには、天体

までの距離がわからなければなりません。天体の赤方偏移がわかれば、宇宙論のモデルを用いて赤方偏移から距離（光度距離）を求めることができます。遠方の銀河でも観測可能な輝線はそれほど多くないため、特に、宇宙の激進化期と考えられる時期にも対応する赤方偏移 $1.4 < z < 2.5$ の範囲にある銀河は可視の分光装置で何らかの輝線を受けることは難しいです。そこで、この赤方偏移は「赤方偏移砂漠」とも呼ばれ、分光的に赤方偏移を決めるためには、近赤外線分光装置が必要でした。

2.3 MOIRCS による近赤外線多天体分光

MOIRCS は、一度に多くの天体を近赤外線分光観測することができる機能（多天体分光）をもっています。近赤外線の波長での多天体分光装置は、口径 8 m クラスの大望遠鏡では、世界に先駆けてすばる望遠鏡が実現しました。これによって、遠方の銀河からの微かな光をすばる望遠鏡で集め、視野内にある 30 個程度の銀河を一度に観測することができます。すばる望遠鏡での観測は時間が限られているので、たくさんの銀河のサンプルを集めたい場合には、一晩で多くの銀河が観測できることは大きな利点です。

また、近赤外線の波長には、宇宙からの電磁波が大気によって吸収されてしまう波長や、大気からの放射で観測できない波長があります。目標の $H\alpha$ 輝線がその波長にくるような赤方偏移の銀河は、観測しても光度を測ることができません。銀河の正確な赤方偏移があらかじめわかっているならば、それらを避けて観測対象を選ぶことができますが、赤方偏移砂漠の銀河ですので、それも難しいのです。このように、観測時間を無駄にしないためにも一度に多くの銀河を観測できることは大きな利点なのです。

3. MODS (MOIRCS Deep Survey) 領域での $H\alpha$ 輝線銀河観測

今回、観測した銀河は、MOIRCS Deep Survey

によって得られた銀河のカタログに基づいて選びました。近赤外線銀河を検出したカタログを使うことによって、さまざまな銀河を偏りなく選ぶことができます。長い波長ほど、銀河の中にある星間塵によって電磁波が吸収される影響を受けにくいため、塵が多い銀河も少ない銀河も選ぶことができます。また、長い波長での放射は、銀河の星質量の大半を占める質量が小さい星が支配的であるため、銀河の年齢や星形成率などにはよらずにある星質量までの銀河を選び出すことができます。

今回の観測を実施した 2007 年春の時点では、まだ MODS 領域全域にわたっての近赤外線カタログが完成していませんでした。そこで、 B, z, K バンドの 3 バンドを使った 2 色図から $1.4 < z < 2.5$ の星形成銀河を選択する手法 (sBzK⁷⁾) を用いました。 K バンドは MODS のデータを、 B バンドと z バンドはハッブル宇宙望遠鏡・Advanced Camera for Survey (ACS) の公開データ⁸⁾を使用しました。 $H\alpha$ 輝線は、大質量星によって電離された水素以外にも、ブラックホール(活動銀河核)によって電離された水素からも放射されます。今回の研究は、銀河の星形成を調べるのが目的ですので、活動銀河核をもつ候補になる、Chandra 宇宙望遠鏡で検出された X 線銀河⁹⁾は候補からはずしました。この結果、観測される天体の候補は MODS 領域には 2,139 個あり、この中から 37 個の銀河を選びました。その約半分 (18 個) については、特に星形成が激しい銀河を選ぶことができるように、スピッツァー宇宙望遠鏡の MIPS によって波長 $24 \mu\text{m}$ で強い中間赤外線が検出された銀河 (以下 MIPS 銀河) を選びました。

観測は 2007 年 3 月 24 日から 27 日の 4 日間、共同研究者である秋山正幸さんが観測する天体のすき間に、本研究のサンプルを入れていただいて実施しました。すき間とはいえ、1 晩に 1 視野を観測し、たったの 4 晩で 37 個の銀河を観測できたのですから、MOIRCS の多天体分光機能の力

は絶大です。

データを解析した結果、37 個中 23 個の銀河から $H\alpha$ 輝線が検出され、そのうち約半分 (11 個) が MIPS 銀河でした。星形成銀河をなるべく選ぶように MIPS 銀河を優先的に選んだわけですが、結果的には、MIPS 銀河もそうでない銀河も、 $H\alpha$ 輝線の検出率は同程度だったこととなります。

4. MOIRCS で見えた 100 億年前の激進化銀河たち

4.1 星質量と $H\alpha$ 光度による星形成率

$H\alpha$ 光度から星形成率を求めるときには、各銀河の中で塵によって隠された分 (吸収量) を補正する必要があります。 $H\alpha$ 光度の吸収量は、MODS の近赤外線カタログ (UBViz と Spitzer/IRAC の $3.6 \mu\text{m}$, $4.5 \mu\text{m}$ バンドを含む) の測光データを用い、銀河のモデルスペクトルから求めました。

図 1 に、検出された $H\alpha$ 輝線光度と赤方偏移の分布を示しています。赤方偏移 $z \sim 2$ 前後に銀河が無いのは、 $1.9 \mu\text{m}$ 付近には地球の大気による吸収によって、宇宙からの近赤外線を観測できない波長があり、赤方偏移 $z \sim 2$ の銀河の $H\alpha$ 輝線が観測される波長がちょうどこの辺りになってしま

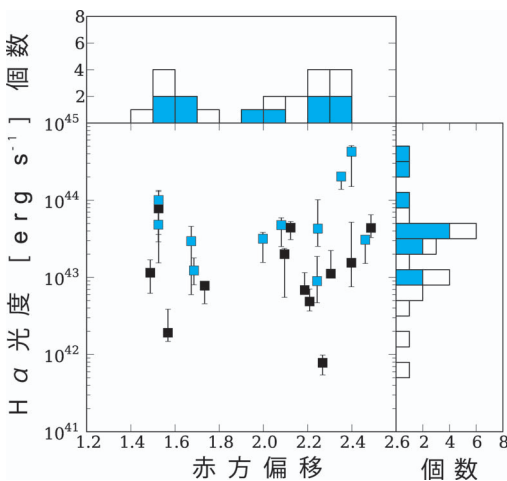


図 1 検出された $H\alpha$ 輝線の光度と赤方偏移の分布。青は MIPS 銀河。

うためです。 $H\alpha$ の輝線光度は約 3 桁の範囲に広がっていて、期待どおり、MIPS 銀河のほうが $H\alpha$ の輝線光度が高い、すなわち星形成率が高い傾向にあることがわかります。

図 2 に、今回の観測で測定された輝線銀河の星形成率と星質量の関係を示しています。星質量も、吸収量と同様に近赤外線カタログと銀河のモデルスペクトルから求めています。図 2 を見てまず言えることは、星質量と星形成率の間には相関が見られないということです。これは、星形成銀河がもつと言われている相関関係に反していることとなります。赤方偏移 $z \sim 2$ の銀河の星質量と星形成率の関係は、Daddi らによる sBzK の方法で選んだ銀河のもの⁵⁾がよく知られています。これを図 2 に実線で示しました。今回の輝線銀河は、一部の銀河はこの線の上にきますが、そこから左上に広がっていることがわかります。なお、星形成が活発な銀河を選ぶために MIPS 銀河を選びましたが、これらの銀河は星形成率、星質量とも大きな側に分布しているので、今回の傾向とは関係がないこともわかります。

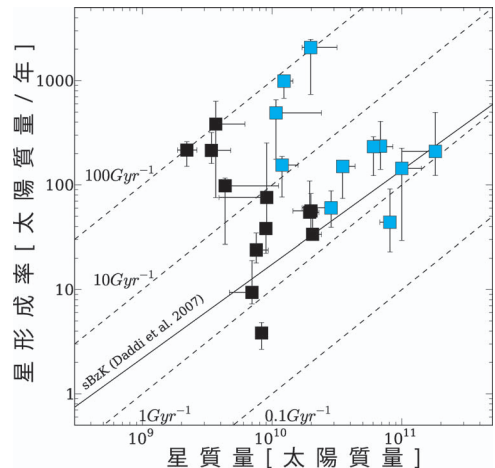


図 2 星質量と星形成率。青は MIPS 銀河。点線は単位質量当たりの星形成率 (SSFR) を表す。実線は過去の研究で知られる $z \sim 2$ の星質量-星形成率相関。

この図には、星形成率を星質量で割った値 (Specific Star Formation Rate; SSFR) を点線でプロットしています。過去の研究で知られていた相関は、 $\text{SSFR} \sim 1 \text{ Gyr}^{-1}$ でほぼ一定であることがわかります。一方、今回観測されている銀河の一部は、 $\text{SSFR} \sim 100 \text{ Gyr}^{-1}$ に近い大きな値を取っており、約 1/3 が $\text{SSFR} \sim 10 \text{ Gyr}^{-1}$ を超えています。このような SSFR が高い銀河は、そうでないものに比べると全体に星質量は小さめようです。また MIPS 銀河かどうかには関係なく SSFR の高い銀河が存在していることがわかります。

SSFR が高いということは、どういうことを意味するのでしょうか。銀河の星質量は、その銀河がそれまでに行ってきた星形成率を足し合わせたものと見るができます。したがって、SSFR の逆数をとると、観測された時点の星形成率が続いた場合、その時点での星質量を作るのに必要な時間となることがわかります。銀河の星形成率は誕生から原料となるガスの減少とともに単調に減少すると考えると、銀河の年齢の上限値ということになります。今回の観測で見つかった SSFR が高い銀河は、その逆数を取ると 1,000 万年となり

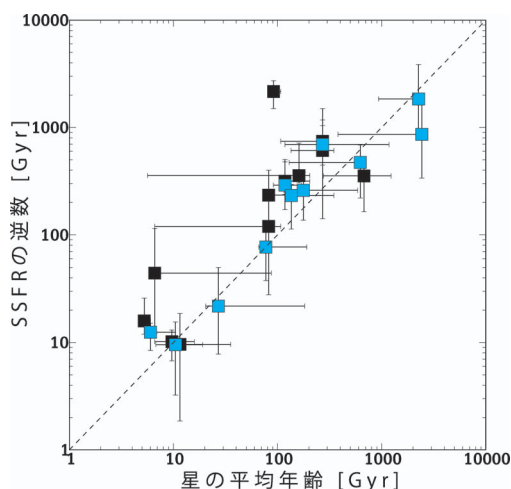


図3 星の平均年齢と SSFR の逆数. 青は MIPS 銀河.

ます。これは、極めて短い時間で星が作られていることを示しています。

そこで、図3に、SSFR の逆数と銀河のモデルから求めた銀河の星の平均年齢を比較しました。星形成率は分光観測から、銀河の年齢は測光観測から、それぞれ独立に得られたデータに基づいているので、この比較は、今回求めた星形成率が妥当であるかの確認ともいえます。まず、どの銀河も SSFR の逆数が誤差 (信頼度 68%) の範囲内で星の平均年齢以下になっていて、星形成率の見積もりが妥当であると考えられます。SSFR が高い銀河についても、SSFR の逆数と星の平均年齢はほぼ一致しており、これらの銀河が非常に若い星でできていることがわかります。

以上の議論から、 $\text{H}\alpha$ 輝線の観測をすることによって見つかった SSFR が過去の研究よりも高い銀河は、非常に短時間で星質量を作れるほどの星形成率をもち、実際に星の年齢も若いことがわかりました。この時期の銀河には、このように非常に速いペースで星を作る銀河が多くいるのではないかと考えられます。本稿では、このような銀河を「激進化銀河」と呼ぶことにしましょう。

4.2 電離ガス中の重元素量

ガス中の重元素量もまた、銀河の過去の星形成の履歴を表します。ここで重元素とは、ヘリウムよりも重い元素を指します。重元素は恒星内部の核融合によって生成され、星の死後に星間空間にばらまかれます。ばらまかれた重元素が銀河の中にとどまっていると考えると、過去に多くの星を作った銀河ほど、ガス中の重元素が多くなります (重元素汚染されます)。ただし、恒星が作った重元素が超新星爆発などで銀河間ガスへと流れ出す場合は、星間ガスの重元素汚染が進みません。近傍の銀河の研究から、銀河の星質量と重元素量の間に関連がある (星質量-重元素量相関) ことが指摘されています¹⁰⁾。これは、星質量が大きな銀河の方が重力のポテンシャルが深く、銀河間ガスへの流出が少ないためと考えられています。重元素

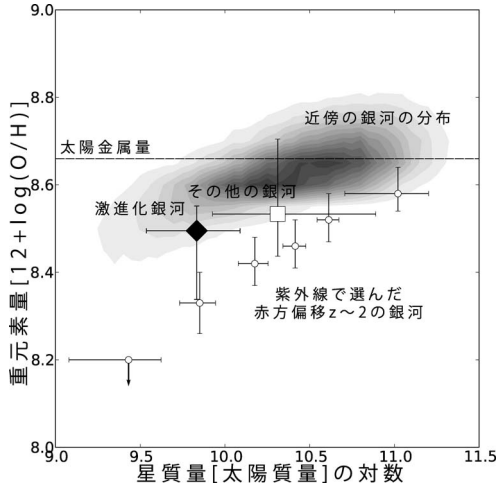


図4 星質量と重元素量.

量は、重元素を代表して酸素と水素の比を使い、 $12 + \log(\text{O}/\text{H})$ で表されることが多いです。太陽の重元素量は $12 + \log(\text{O}/\text{H}) = 8.66$ です¹¹⁾。

窒素の輝線 ($[\text{NII}]\lambda 6583$; 波長 $\lambda = 658 \text{ nm}$) と $\text{H}\alpha$ の輝線比を使って、電離ガス中の重元素量を見積もることができることが知られています^{12), 13)}。この方法は、 $[\text{NII}]$ の波長が $\text{H}\alpha$ のすぐそばで、 $\text{H}\alpha$ と一緒に検出しやすいことから遠方の銀河の重元素量を求めるのにしばしば使われます。今回観測された銀河についても、この方法を使って電離ガス中の金属量を測定しました。とはいえ、 $[\text{NII}]$ 輝線の強度は弱いので、個別の銀河で $[\text{NII}]$ 輝線フラックスを求めることは難しいです。そこで、複数の銀河のスペクトルを足し合わせ、 $[\text{NII}]$ 輝線の S/N 比を上げました。図4に、激進化銀河 ($\text{SSFR} > 10 \text{ Gyr}^{-1}$) とそれ以外の銀河 ($\text{SSFR} < 10 \text{ Gyr}^{-1}$) に分けて足し合わせた場合の結果をプロットしています。

赤方偏移 $z \sim 2$ の宇宙の銀河の星質量-重元素量相関については、これまでに Erb らが紫外線で選んだ星形成銀河を使って調べています¹⁴⁾。この結果によると、現在の宇宙の銀河 (SDSS DR4) に見られる星質量-重元素量相関と比べて重元素量が小さい側にシフトした傾向が示されています。こ

れは、昔の宇宙ではガスの流出が大きいためであると考えられています。図4にはこれらの結果も示しています。

今回の $\text{H}\alpha$ 輝線銀河のプロットと比べて見ると、特に激進化銀河は Erb らの星質量-重元素量相関に比べて高い重元素量を示しています。これは何を示すのでしょうか。これらの銀河は星形成率が高いとはいえ非常に若く、重元素汚染が近傍の銀河並みに進んでいるとすると、驚きです。星形成率が高いことから、ガスの流出も大きいと考えられ、重元素汚染が進むことをさらに難しくします。激しい星形成によって重元素汚染されたガスの流出を見ていると考えられるかもしれません。一方で、AGN や超新星爆発による衝撃波などの紫外線によって電離されている場合、 $[\text{NII}]$ で求めた金属量を実際よりも大きく見積もってしまうことが知られています¹⁵⁾。これらをより詳しく調べるためには、サンプル数を増やして他のパラメーターと金属量の比較をしてやる必要があります。

5. 今後の展望

今回の研究では、銀河の激進化期とも呼ばれる赤方偏移 $z \sim 2$ (約 100 億年前) の銀河を選び、近赤外線分光によって $\text{H}\alpha$ 輝線の観測を行いました。この中から、短い時間で一気に星を作ったと考えられる、まさに「激進化銀河」ともいべき銀河が見つかりました。これらの銀河は期待どおり若いのですが、なぜか比較的高い重元素量もっています。同様の激進化銀河は、MODS カタログの遠方銀河に対して中間赤外線を使って星形成率を求めてもやはり多く存在することが確認されています¹⁶⁾。しかし、重元素量のような分光的な性質を詳しく調べていくには、MOIRCS や、共同利用での運用が始まった FMOS などの近赤外線多天体分光装置を用いてさらにサンプルを増やし、研究を進める必要があります。

また、今回のような激進化銀河が、宇宙の星形

成の中でどのような役割を果たし、どのような銀河へと進化していくのでしょうか。例えば、アタカマサブミリ波干渉計による観測を行えば、銀河の中で星の材料となるガスの量がどれくらいあるのかがわかります。そこから、銀河がどれくらい星を作り続けることができるのか、どれくらいの効率で星を作っているのかを調べることができると考えられます。それによって、この銀河がどのような銀河へと進化するのかを議論することもできるようになるでしょう。

謝 辞

本稿は、筆者の博士論文（東北大学大学院理学研究科天文学専攻）、および共著論文¹⁷⁾に基づいてまとめ直したものです。大学院在学中は、国立天文台ハワイ観測所、東北大学天文学教室の関係する皆様にはさまざまな面でご指導いただきました。心より感謝いたします。本稿の執筆の機会をくださった浜名 崇氏、天文月報編集委員会の皆様に感謝いたします。

本研究で筆者が開発し、使用した MOIRCS の分光データ整約パイプライン MCSMDP は、国立天文台ハワイ観測所 Web サイト (<http://www.naoj.org/Observing/DataReduction>) からダウンロードできます。

参 考 文 献

- 1) Kajisawa M., et al., 2009, ApJ 702, 1393
- 2) Hopkins A. M., Beacom J. F., 2006, ApJ 651, 142
- 3) Heavens A., et al., 2004, Nature 428, 625
- 4) Juneau S., et al., 2005, ApJ 619, L135
- 5) Daddi E., et al., 2007, ApJ 670, 156
- 6) Elbaz D., et al., 2007, A&A 468, 33
- 7) Daddi E., et al., 2004, ApJ 617, 746
- 8) Giavalisco M., et al., 2004, ApJ 600, L93
- 9) Alexander D. M., et al., 2003, AJ 126, 539
- 10) Tremonti C. A., et al., 2004, ApJ 613, 898
- 11) Asplund M., et al., 2004, A&A 417, 751
- 12) Storch-Bergmann T., Calzetti D., Kinney A. L., 1994, ApJ 429, 572
- 13) Pettini M., Pagel B. E. J., 2004, MNRAS 348, L59
- 14) Erb D. K., et al., 2006, ApJ 644, 813
- 15) Kewley L. J., Dopita M. A., 2002, ApJS 142, 35
- 16) Kajisawa M., et al., 2010, ApJ 723, 129
- 17) Yoshikawa Y., et al., 2010, ApJ 718, 112

High Specific Star Formation Rate Galaxies at $z \sim 2$

Tomohiro YOSHIKAWA

Kyoto Sangyo University, Motoyama, Kamigamo, Kita-ku, Kyoto 603-8555, Japan

Abstract: We present the results of near-infrared multi-object spectroscopic observations for mass-selected star-forming galaxies at $z \sim 2$ conducted with MOIRCS. We derived star formation rates (SFRs) from extinction corrected $H\alpha$ luminosities. We found that a part of lower-mass galaxies have remarkably high specific SFR (SSFR). The high-SSFR galaxies are young and have higher metallicity. The large SFR implies the possibility that these galaxies play an important role in the star formation of the universe at $z \sim 2$.