

銀河進化と宇宙再電離の観測的研究

小野 宜 昭

〈東京大学宇宙線研究所 〒277-8582 千葉県柏市柏の葉 5-1-5〉

e-mail: ono@icrr.u-tokyo.ac.jp

すばる望遠鏡などを用いた深宇宙観測により、当時最遠方であった赤方偏移 $z=7$ を超える銀河の近赤外分光同定に成功した。さらに、 $z=6$ から7にかけて、星形成銀河のうち強いLy α 輝線を放射するものの割合（Ly α 割合）が有意に小さくなっていることを発見した。このことから、 $z=6$ から7にかけて宇宙の中性度が大きくなったことが示唆される。さらに、Ly α 割合の減少幅に紫外光度依存性があることを発見した。これは、再電離過程のinside-outシナリオを支持する結果である。

1. はじめに

宇宙再電離（以下、再電離と略記する）は、赤方偏移 $z\sim 1,100$ で宇宙を満たす水素ガスがほとんど中性化した後、それらが再び電離された現象のことである。再電離が起こるには大量の電離光子が必要であり、その電離光子は銀河や活動銀河核（AGN）といった天体から放射されたと考えられている。再電離は早期宇宙における天体形成と密接にかかわっており、その過程を理解することは天文学的に重要な課題とされている。

宇宙マイクロ波背景放射の観測から、再電離で生じた自由電子による Thomson 散乱の光学的厚み τ_e を見積もることができる。 τ_e の値が大きいほど自由電子の散乱の影響が大きいことを意味している。ただ、 τ_e は時間方向に積分された量であるため、それをもとに再電離時期を見積もるためには、再電離がどのように進んだかを仮定する必要がある。たとえば、再電離が短時間のうちに起きたと仮定すると、その赤方偏移は $z=9$ となる¹⁾。一方で、クエーサーのスペクトルに見られる中性水素ガスによる吸収量から、 $z=5$ から6にかけて銀河間物質（IGM）の中性度 $x_{\text{H I}}$ が徐々に増大していることが知られている²⁾。しかし、クエー

サーの観測では、水素のLy α 光子に対する散乱断面積が大きいいため、 $x_{\text{H I}}\sim 10^{-4}$ 程度でLy α 吸収線が飽和してしまう。そのため、クエーサー吸収線による測定は、再電離の最終段階である $z=6$ に限られてしまう。

$x_{\text{H I}}\sim 10^{-4}$ を超えるような中性度をさまざまな赤方偏移で測定できる手法に、中性水素によるLy α damping wing（減衰翼）吸収を用いるものがある。これは、不確定性原理によるスペクトル線の広がり部分での吸収である。IGMの中性度が大きいとき、非常に強いLy α 吸収線において、スペクトル線中心から離れた減衰翼での吸収が重要になる³⁾。ガンマ線バースト（GRB）のスペクトルに生じるLy α 減衰翼吸収から、 $z=6.3$ などで $x_{\text{H I}}$ への制限が得られている⁴⁾。ただ、再電離期を調べられるほど高赤方偏移で検出されたGRBの個数は少ない。より個数密度の大きい銀河を使うこともできる。中性度が大きくなると、減衰翼吸収によって銀河からのLy α 輝線は暗くなる。そのため、Ly α 輝線の強い銀河（LAE）をさまざまな赤方偏移で探査すると、中性度の増加に伴ってその個数密度は減少すると考えられる。そして、個数密度の観測結果を理論モデルと比較することで、 $x_{\text{H I}}$ に制限を与えることができる^{5),6)}。ただ、

狭帯域フィルターで選択されるLAEは、探査できる領域の赤方偏移幅が狭いため、探査体積が比較的小さい。そのため、視線方向の違いによる影響を受けやすいという問題がある⁷⁾。

そこで提案されたのが、星形成銀河(LBG)の中でLy α 輝線の強い銀河の割合(Ly α 割合)を使う方法である⁸⁾。LBGは広帯域フィルターを使って選択されるため、同じ面積のデータで比べた場合LAEより幅広い赤方偏移で探査することができ、視線方向の違いによる影響を受けにくい。ただ、LBGのLy α 輝線フラックスは分光して求める必要があるが、再電離期の銀河からのLy α 輝線は観測の難しい近赤外の波長帯へと赤方偏移してしまう。分光観測によってLy α 輝線を検出するためには十分に明るいLBGを探査する必要がある。本稿で紹介する研究は、広領域深撮像探査で見つかった明るい $z=7$ 銀河を分光観測して、 $z=7$ でのLy α 割合を調べたものである。

2. $z=7$ 銀河候補の分光

本研究に取り組むきっかけは2010年、当時アメリカでポスドクをされていた大内正己さんにハワイでの観測へ誘っていただいたことである。そ

の観測は、すばる望遠鏡のSuprime-Camで発見した $z=7$ 銀河候補⁹⁾をKeck望遠鏡の可視分光装置DEIMOSで分光するものであった。この観測参加をきっかけに、2010年末からこのDEIMOSデータの解析に本格的に取り組むようになった。

データのリダクションには、DEIMOSを用いた低赤方偏移銀河分光サーベイのチームにより開発されたソフトウェアを使用した¹⁰⁾。このソフトウェアは、開発チームがターゲットとしていた可視の波長帯に最適化されていた。しかし、われわれの観測は $z \geq 6.5$ Ly α をターゲットにしたもので、観測の中心波長は9,000 Åとかなり長波長であったため、公開されているソフトウェアのままではうまくリダクションすることができなかった。そこで、ソフトウェアの開発者に何度も問い合わせた上で波長較正に関する部分などを修正し、何とかリダクションすることに成功した。

リダクションした分光データを確認したところ、2天体から輝線が検出されていることがわかった(図1)。一般に、Ly α は中性水素による吸収を受けやすいため、その輝線プロファイルは手前にある中性水素によって輝線中心より短波長側が削られて、長波長側に尾を引くようなものになる。これ

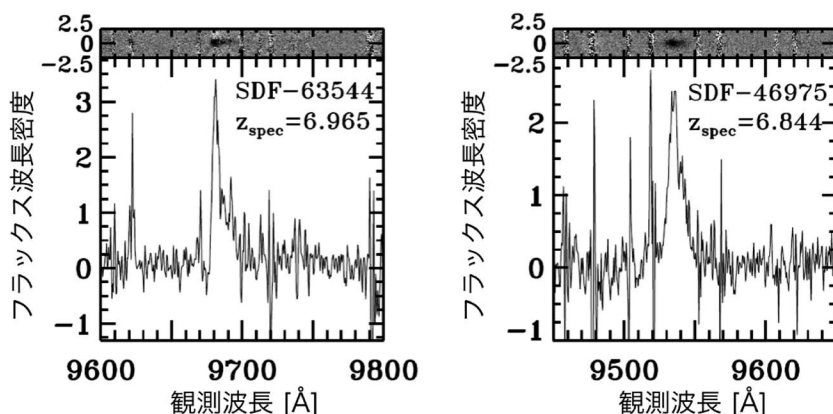


図1 分光同定された $z=7$ 銀河のスペクトル。左図は $z=6.965$ 銀河SDF-63544であり、右図は $z=6.844$ 銀河SDF-46975である。上図は2次元スペクトルであり、図の空間方向の大きさは5秒角である。明るいほど黒く表示している。下図には1次元スペクトルが示されている。左図の天体はIye et al.で報告¹¹⁾されていたIOK-1である。Ono et al.¹⁸⁾のFig. 1を改変。

ら2天体の輝線も、長波長側に尾を引いていることがわかった。また、もしこれらが [O III] λ 5007 など、Ly α とは別の輝線である場合、得られたスペクトル中でH β などもカバーされるため、複数の輝線が検出されると期待される。しかし、スペクトル中で対応する波長範囲を確認したところ、ほかの輝線は検出されていないことがわかった。以上より、今回検出した輝線は赤方偏移したLy α 輝線であると結論づけられた。これらのうちの一方は、すでに過去の研究で分光同定されていた IOK-1 であった¹¹⁾。今回 DEIMOS によって、より高い波長分解能で分光することで、輝線がたしかに非対称性をもつことが確認された。

3. Ly α 割合の見積もり

分光同定を受けて、この結果をどのような論文にまとめるかを考え始めた。当時、すでに $z=7$ 銀河は4天体分光同定されていた¹¹⁾⁻¹³⁾、*1。そして今回分光同定された2天体のうち、1天体はすでに過去の研究で報告されていたため、新たに報告できるのは1天体しかなかった。このため、分光同定の報告だけで論文をまとめてしまうと、ほとんど注目されずに埋もれてしまうことが予想された。

そこで着目したのがLy α 割合である。1章でも触れたように、Ly α 割合は星形成銀河のうち強いLy α 輝線を放射しているものの割合のことで、星形成銀河からのLy α 輝線の出やすさを表す。Ly α はダストや中性水素によって吸収されるので、Ly α 割合は、銀河のダスト量やガス量、ガスの速度場などといった銀河の性質を反映していると考えられる。ちょうどその頃、 $z=4$ から6にかけて多数の銀河を分光してLy α 割合の進化を調べた論

文が出版されたところであった¹⁵⁾。その結果によると、赤方偏移が高くなるにつれてLy α 割合は増加する傾向が示されていた。 $z=4-6$ ではIGMはほぼ電離されているので、この傾向は、銀河のダスト量が高赤方偏移ほど少ないなど、銀河自体の性質の進化によるものと考えられる。そして、そうした銀河進化の影響が低赤方偏移からの外挿で予測できるとした場合、 $z=7$ でのLy α 割合が低赤方偏移からの外挿で合う値になるのか、それともそれより小さな値になるのかは、興味深いトピックであった。もし、 $z=7$ でのLy α 割合が低赤方偏移からの外挿より小さい場合、それは銀河進化以外の要因、つまりIGMの中性度の増加を示唆すると考えられたためである。

そこでわれわれは、今回のデータから $z=7$ でのLy α 割合を見積もることにした。ただ、 $z=7$ 銀河を地上から分光するうえで厄介なのがOH夜光*2である。 $z=7$ 銀河のLy α 輝線が観測される $\geq 0.9 \mu\text{m}$ では多数のOH夜光があり、それらのある波長帯ではノイズが高くなってしまう。そのため、Ly α 輝線がOH夜光にかかってしまった場合、検出が難しくなると考えられる。Ly α 割合をちゃんと見積もるためには、そのような夜光の影響を考慮する必要があった。われわれは、夜光の影響を考慮するため、実際のスペクトルにいろいろな等価幅をもつ輝線をランダムに埋め込んで擬似スペクトルを作成した。そして、実際の輝線を同定したときと同様に擬似スペクトルを調べ、埋め込んだ輝線が検出される割合を波長と等価幅の関数として見積もった。これにより、Ly α 割合の分母にくる観測した銀河の個数には、夜光の影響を考慮した実効的な銀河の個数を使えるようになった。

*1 ただし、それらのうちFontana et al.¹²⁾で9,691.5 Åに輝線が検出されたと報告された天体G2_1408は、その後VLT/FORS2で追観測されたが、52時間積分した分光データでも輝線が検出されなかった¹⁴⁾。スペクトルエネルギー分布(SED)は高赤方偏移銀河でよく説明できるようであるが、輝線フラックスは以前報告されていたものより暗いようである。

*2 上層大気で紫外線などによって励起されたOH基(ヒドロキシ基)から放射される輝線。近赤外線の波長帯に多い。

4. $z=7.2$ 銀河の発見

Lya割合の結果も出て、論文執筆に取り掛かっていたある日、 $z=7$ 銀河候補の発見論文で共著だった Bahram Mobasher さんから相談があった。それは、次の彼らの DEIMOS 観測で $z=7$ 銀河候補も分光しないか、というものであった。ただ、こちらではすでに2天体分光同定して論文を準備中だったため、難しい話にならないことを願っていた。ありがたいことに、われわれがこちらの状況を伝えたところ、Mobasher さんからは、新しく取るデータは準備中の論文で使うべきである、という反応が返ってきた。さらに、その論文の共著に自分たちを入れる必要はない、とまで言ってきて、とても気前の良い人だなと思ったのを覚えている。実際にはデータ取得後、準備中の論文の共著に加わっていただいた。

彼らの観測後、われわれのグループと彼らのグループは、両者のデータを完全に共有することになった。上のやり取りはあったものの、彼らが先に新しいデータから何らかの発見をした場合、その発見報告は彼らに主導されてしまう可能性があった。つまり、われわれと彼らは共同研究者の間柄ではあるが、実質的には同じ土俵で競争をしているような状況になった。そこでわれわれは、急いで新しいデータをリダクションしてスペクトルを確認した。われわれにとって幸運だったのは、2章で述べたようにリダクション用ソフトウェアを修正していたことである。波長較正の部分を修正したことは述べたが、実はほかにも修正した箇所があった。それは、リダクションできる波長範囲をより長波長側へと延ばしたことであった。

元のソフトウェアでは、リダクションされたスペクトルは $1\mu\text{m}$ のやや手前で切れてしまっていた。これは、ソフトウェアの開発チームにとって、それほど長波長のデータは重要ではなかったためである。われわれの場合、ターゲットは赤方偏移した Lya 輝線であるが、スペクトルが $1\mu\text{m}$ まで

ということは、 $z\approx 7.2$ まで調べられることを意味する。ところで、今回分光した $z=7$ 銀河は、Suprime-Cam の $z-y$ というカラーで Lya ブレックを捉えることで選択された天体であり、高赤方偏移銀河の典型的な SED を用いることで、選択される $z=7$ 銀河サンプルの赤方偏移分布を予測することができる。その予測によると、 $z\geq 7.2$ である確率は極めて低いものであった (図2)。それほど高赤方偏移では、 y バンドでさえ紫外連続光を捉えるのが難しくなってしまうためである。この予測から、元のソフトウェアのままで十分なものにも思われた。しかし、確率は低いがゼロではなかったため、われわれは開発者とやり取りをして、観測データの存在する $1.05\mu\text{m}$ までリダクションできるように修正していた。

そうして得られたスペクトルを丁寧にチェックしていると、 $9,980\text{Å}$ 辺りに輝線らしきものがあることに気がついた (図3, 観測2の2次元スペクトル)。その波長は、元のソフトウェアによるリダクションでは長波長側の終端付近に相当する。われわれは、より長い波長まで扱えるよう修正していたおかげで、この輝線を見つけることができた。そしてその輝線は、最初に解析していたデータでも確認できた (図3, 観測1の2次元スペクトル)。さらに、積分時間の短い別のマスク

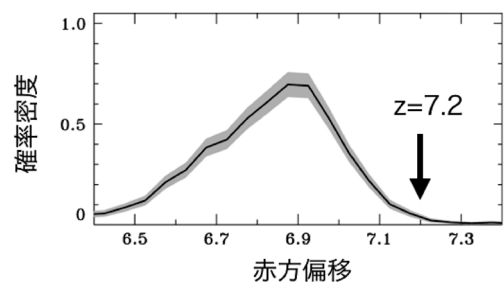


図2 $z=7$ 銀河の選択基準から予測される $z=7$ 銀河の赤方偏移分布。実線は、等級ごとの赤方偏移分布を個数密度で重み付けして平均を取ったものである。灰色の領域はモンテカルロ法で求めた 1σ 範囲を表している。矢印は $z=7.2$ を指している。Ouchi et al.⁹⁾ の Fig. 6 を改変。

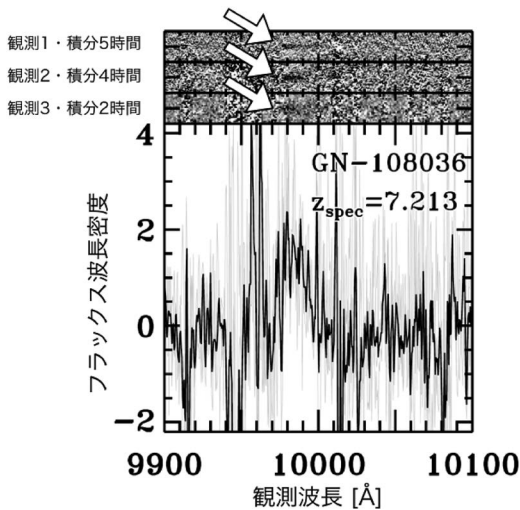


図3 $z=7.213$ 銀河GN-108036のスペクトル. 上の3枚の図は、異なる3回の観測で得られた2次元スペクトルである. 明るいほど黒く表示している. 図の空間方向の大きさは5秒角である. 観測3は積分時間が短いため 2×2 ピクセルでスムージングしている. 白矢印で指している $9,980 \text{ \AA}$ 付近に輝線が検出されている. 下図は1次元スペクトルである. 灰色の実線はそれぞれの観測で得られた1次元スペクトルであり, 黒色の実線がそれらを重ねた1次元スペクトルを表している. Ono et al.¹⁸⁾ のFig. 2を改変.

のデータでも、同じ波長にぼんやりとした輝線を確認することができた(図3, 観測3の2次元スペクトル). 独立した複数の観測それぞれで確認できたことから、その輝線は本物である可能性が高いと考えられる.

ここで、この発見をMobasherさんたちに報告したところ、向こうではまだ見つけられていないことがわかった. また、共同研究者のMark Dickinsonさんたちは、同じデータを独自にリダクションしてくれて、輝線が確認できたことを教えてくれた. Dickinsonさんとはそれまで面識がなかったこともあり、そのようにして全く同じデータをあまり知らない方に独立に追解析される

ことは正直なところ気持ちの良いものではなかったが、その一方で、確認してもらえたことで安心もした.

3回の観測で取得されたスペクトルをスタックして得たのが図3の下図に示している1次元スペクトルである. 輝線が長波長側に尾を引いているように見えることは、それが赤方偏移した $\text{Ly}\alpha$ 輝線であることを示している. また、より広い波長範囲でスペクトルを調べたところほかの輝線は検出されていなかったことから、この輝線が低赤方偏移にある天体からの $[\text{O III}]$ などの別の輝線である可能性は棄却された. こうしてこの天体は $z=7.2$ であると結論づけることになり、われわれが準備している論文と一緒に報告できる流れとなった.

5. 他チームの論文

準備していた論文がまとまりかけていたある日、arXiv^{*3}を眺めていると2本の論文が目にとまった^{16), 17)}. いずれも $z=7$ 銀河の分光結果を報告しており、 $\text{Ly}\alpha$ 割合を求めたものであった. 準備中の論文と同じような内容の論文が2本も投稿されてしまったのである. 落胆する気持ちを振り切って、われわれの論文を急いで仕上げてすぐに投稿するという手もあった. しかし、それではこれらの論文と同程度のことしか報告できないため、いまいちのように思われた.

そこで共同研究者の方々とは議論した結果、 $\text{Ly}\alpha$ 割合の計算でその2本の論文の結果もまとめてしまい、より高い精度で $\text{Ly}\alpha$ 割合を求めよう、という方針に決まった. もともと準備していた論文では、われわれ独自のサンプルに加えて、過去の論文で報告されていた $z=7$ 銀河の分光結果も使っていた. そこに、新しく出てきた二つの研究結果を加えることで、サンプル規模を約2倍にすることができた. この大きくなったサンプルに基づい

*3 天文学や物理学、数学などの分野の出版前の論文などが保存され、公開されているウェブサイト.

てLy α 割合を計算した。

6. Ly α 割合の結果と考察

図4にLy α 割合の結果を示す¹⁸⁾。過去の研究から、明るい銀河のLy α 割合は $z=4$ と比べて $z=5-6$ で増加する傾向にあることが示されていた。われわれの結果から、 $z=7$ でのLy α 割合は、より低赤方偏移の結果を外挿した値と比べて小さいことがわかった。また、暗い銀河についてもLy α 割合を求めたところ、こちらのほうが $z=7$ で顕著に小さくなることがわかった。低赤方偏移からの外挿が銀河進化の影響を反映していると考え、Ly α 割合が外挿と比べて小さくなることは、当時の銀河からのLy α が銀河進化以外の要因で吸収されやすくなったことを示しており、IGMの中性度が大きくなったことを示唆している。

さらにわれわれは、暗い銀河のLy α 割合のほうが減少幅が大きいことに着目した。中性度が大きくなると、Ly α 割合は定性的には小さくなると考えられる。減少幅の大きさが中性度の変化量に対応しているとする、 $z=7$ では暗い銀河の周囲のほうが中性度が大きいと考えられる。このことは、明るい銀河の周囲のほうが先に再電離した、とも捉えることができる。ところで、階層的な構

造形成シナリオによると、小さな天体がしだいに集まって大きな天体が形成される。このため大きな天体ほど、より群がって存在している。実際、明るい天体ほど強く群がって存在しているという観測結果がある^{19), 20)}。つまり、明るい天体ほど、密度のより高い領域に存在していると考えられる。われわれの観測結果からは、 $z=7$ では、明るい銀河の周囲より暗い銀河の周囲のほうが中性度が大きいという示唆が得られた。これら二つの観測事実を組み合わせると、 $z=7$ では、密度の高い領域より、密度の低い領域のほうが中性度が大きいと考えられる。これは理論的に予言されていた、再電離が密度の高い領域から低い領域へ進んだとするinside-outシナリオ^{21), 22)}と矛盾しない。

以上により、この研究は、 $z=7$ でのLy α 割合を精度良く求めて進化していることを発見し、さらにLy α 割合進化の紫外光度依存性を初めて指摘するものとなった。これらの成果は、先ほどの2本の論文から約1週間後に投稿された。

7. 最後 に

月並みな内容かもしれないが、この研究を通して学んだことを最後にまとめる。一つは、観測データと泥臭く向き合うことの重要性である。今

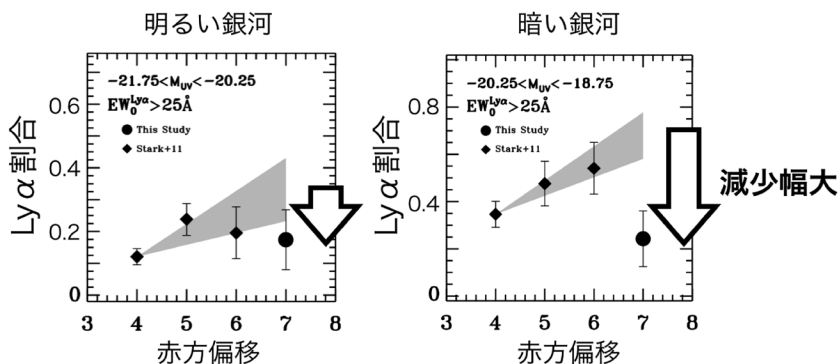


図4 Ly α 割合の進化。縦軸は星形成銀河のうち静止系でのLy α 輝線の等価幅が25 Åより大きいものの割合を示している。左図は紫外絶対等級が -21.75 から -20.25 magまでの明るい銀河について、右図は -20.25 から -18.75 magまでの暗い銀河について表している。黒丸がわれわれの結果で、黒ダイヤがStark et al.¹⁵⁾の結果である。灰色の領域は低赤方偏移での傾向を外挿したものである。Ono et al.¹⁸⁾のFig. 8を改変。

回の銀河サンプルに $z=7.2$ という高赤方偏移の銀河が含まれている確率は低かった。そこで、それほど高赤方偏移の銀河は見つからないだろうと考えて効率を重視し、ソフトウェアを修正していません。いま解析を続けていたら、この発見を逃していた可能性が高い。偏見をもたずに観測データを調べ上げることは重要であると痛感した。もう一つは、一歩引いて冷静になることの重要性である。論文投稿間近になって、似たような結果を報告する論文が先にarXivに出てしまった。これに焦ってしまい、慌ててわれわれの論文をそのまま出していた場合、ほかの論文の二番煎じとみなされ、埋もれてしまっていたかもしれない。しかし、それらを組み合わせることで、新たな発見をすることができた。ただ先を急ぐのではなく、信頼できる共同研究者と議論し、落ち着いて考えようとする姿勢を意識してもらいたいと思う。

謝 辞

本稿は、日本天文学会研究奨励賞の受賞理由となった研究の一部をまとめたものです。このような名誉ある賞をいただくことができたのは、これまでお世話になった共同研究者の方々や所属先で親しくしていただいた方々のおかげだと思っています。特に、本研究だけでなく、さまざまな場面で議論を交わしていただいた大内正己准教授と、大学院時代からたくさんのご指導や助言などをくださった嶋作一大准教授・岡村定矩教授には心から感謝しております。本稿は当時のメールなどを確認しつつ記述いたしましたが、もし誤認などありましたら何卒ご容赦いただければと思います。

参考文献

- 1) Planck Collaboration, 2016, A&A 594, A13
- 2) Fan et al., 2006, AJ 132, 117
- 3) Santos et al., 2004, MNRAS 349, 1137
- 4) Totani et al., 2006, PASJ 58, 485
- 5) Kashikawa et al., 2006, ApJ 648, 7
- 6) Ouchi et al., 2010, ApJ 723, 869
- 7) Nakamura et al., 2011, MNRAS 412, 2579
- 8) Stark et al., 2010, MNRAS 408, 1628
- 9) Ouchi et al., 2009, ApJ 706, 1136
- 10) Newman et al., 2013, ApJS 208, 5
- 11) Iye et al., 2006, Nature 443, 186
- 12) Fontana et al., 2010, ApJL 725, L205
- 13) Vanzella et al., 2011, ApJL 730, L35
- 14) Vanzella et al., 2014, A&A 569, A78
- 15) Stark et al., 2011, ApJL 728, L2
- 16) Pentericci et al., 2011, ApJ 743, 132
- 17) Schenker et al., 2012, ApJ 744, 179
- 18) Ono et al., 2012, ApJ 744, 83
- 19) Ouchi et al., 2004, ApJ 611, 685
- 20) Lee et al., 2006, ApJ 642, 63
- 21) Sokasian et al., 2002, MNRAS 332, 601
- 22) Iliev et al., 2006, MNRAS 369, 1625

Observational Studies of Galaxy Evolution and Cosmic Reionization

Yoshiaki Ono

Institute for Cosmic Ray Research, The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwa-no-Ha, Kashiwa, Chiba 277-8582, Japan

Abstract: We spectroscopically identify three $z\sim 7$ galaxies based on deep survey data taken with the Subaru and Keck telescopes. We find that the fraction of Ly α -emitting galaxies drops from $z=6$ to 7 and that the amplitude of the drop is larger for faint galaxies than for bright galaxies. These two pieces of evidence would indicate that the neutral hydrogen fraction of the intergalactic medium increases from $z=6$ to 7 and that the reionization proceeds from high- to low-density environments, as suggested by an inside-out reionization model.