

$z \gtrsim 7$ での $\text{Ly}\alpha$ 光度関数の加速的進化とその物理的描像

今野彰 (東京大学宇宙線研究所 博士課程 1 年)

Abstract

我々は、独自の狭帯域フィルター *NB101* を搭載したすばる望遠鏡を用いて、総積分時間 106 時間の $z = 7.3$ $\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河 (LAE) 深撮像探査を行った。この観測で我々は、過去のすばる望遠鏡を用いた $z \sim 7.3$ LAE 探査の ~ 4 倍深く、かつ過去の $z = 3 - 6$ LAE 探査と同等の深さである、 $L(\text{Ly}\alpha) = 2.4 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ の限界光度まで達し、 $z = 7.3$ $\text{Ly}\alpha$ 光度関数 (LF) をこれまでに無く高い精度で求めることを可能にした。我々は $z = 7.3$ LAE を合計 7 天体検出し、これを基に $z = 6.6 - 7.3$ で $\text{Ly}\alpha$ LF は $> 90\%$ の信頼性で有意に進化していると結論づけた。さらに我々は、 $z \gtrsim 7$ の $\text{Ly}\alpha$ LF の加速的進化を初めて明らかにした。宇宙の星形成率の指標となる紫外線連続光の LF は $z \sim 7$ で急速な減少が見られない。従って我々は、 $\text{Ly}\alpha$ LF の加速的進化は星形成率の進化とは異なるメカニズムで生じている可能性を示した。また我々は、単純な理論モデルを基に $z = 7.3$ での銀河間物質中の中性水素割合 x_{HI} を推定したが、 $\text{Ly}\alpha$ LF の加速的進化が x_{HI} の急激な増加によるものだとすると、宇宙背景放射のトムソン散乱の光学的厚みを説明できない可能性を示した。この矛盾を説明する物理的描像として、近年の理論研究で提唱されているような、クランプ状の中性水素ガス雲の存在、より早い時期での宇宙再電離、LAE の電離光子脱出率の増加が挙げられる。なお本研究は、Konno et al. (2014) として発表されている。

1 Introduction

$\text{Ly}\alpha$ 輝線銀河 (LAE) とは $\text{Ly}\alpha$ 輝線を放射する星形成銀河である。LAE の統計的性質を探る手段として $\text{Ly}\alpha$ 光度関数 (LF) がある。過去の研究では、 $\text{Ly}\alpha$ LF は $z = 3.1 - 5.7$ では進化せず、 $z = 5.7 - 6.6$ で減少していることが明らかになっている (e.g., Ouchi et al. 2008; Kashikawa et al. 2011)。近年では $z \sim 7.3$ LAE の狭帯域撮像探査が行われている。しかし、 $z = 6.6$ と $z \sim 7.3$ の間で $\text{Ly}\alpha$ LF は無進化であるという主張 (e.g., Hibon et al. 2010) と、減少しているという主張 (Clément et al. 2012) があり、 $z = 6.6$ と $z \sim 7.3$ の間での $\text{Ly}\alpha$ LF の進化の有無は論争中であつた。すばる望遠鏡でも $z \sim 7.3$ LAE 探査が行われた (e.g., Shibuya et al. 2012)。しかしこれらの探査では、その浅さのため、 $z \sim 7.3$ の $\text{Ly}\alpha$ LF の明るい側しか調べることができず、 $z = 6.6 - 7.3$ での $\text{Ly}\alpha$ LF の進化を明確に結論づけることができなかつた。 $\text{Ly}\alpha$ LF を高い精度で求めるには、より広い $\text{Ly}\alpha$ 光度範囲に渡って LAE を多数検出する必要がある。

$\text{Ly}\alpha$ LF の進化は宇宙再電離と関係する。LAE の周囲に存在する銀河間物質 (IGM) 中の中性水素の

$\text{Ly}\alpha$ 減衰翼によって LAE から放射された $\text{Ly}\alpha$ 光子は吸収散乱を受けるため、 $\text{Ly}\alpha$ LF は変化する。従って $\text{Ly}\alpha$ LF の進化から、IGM 中の中性水素割合 x_{HI} に制限を与えることができる。宇宙再電離がいつ起きたかを調べた他の観測的研究として、宇宙背景放射 (CMB) を用いる方法がある。CMB のトムソン散乱の光学的厚み τ_{el} を測定することで、宇宙再電離が起きた赤方偏移 z_{reion} が求められる。CMB 観測衛星 *Planck* の結果から、宇宙再電離が瞬時に起こつたと仮定すると、 $z_{\text{reion}} = 11.1 \pm 1.1$ が得られている (Planck Collaboration et al. 2013)。

宇宙再電離の観測的研究は多く行われているが、宇宙再電離史に強い制限を与えられていないのが現状である。そこで本研究では $z = 7.3$ LAE を深撮像探査した。この $z = 7.3$ という赤方偏移は、深撮像探査を得意とするすばる望遠鏡にとって最遠方であり、かつ宇宙再電離の最中である。 $z = 7.3$ での $\text{Ly}\alpha$ LF をこれまでに無く高い精度で求めることで、 $z = 6.6 - 7.3$ で $\text{Ly}\alpha$ LF が進化しているかどうかという問題を解明し、さらに $z = 7.3$ での x_{HI} を推定することで、宇宙再電離史に強い制限を与えることにした。

2 Observations and $z = 7.3$ LAE Sample

$z \gtrsim 7$ での $\text{Ly}\alpha$ LF の進化を調べるには、 $z \leq 6.6$ LAE サンプルと同等の $\text{Ly}\alpha$ 限界光度まで達するような狭帯域深撮像観測が必要である。そこで我々は独自の狭帯域フィルター *NB101* を開発した。*NB101* の大きな特長は、過去のすばる望遠鏡による $z \sim 7.3$ LAE 探査で用いられた狭帯域フィルター (例えば Shibuya et al. 2012 の *NB1006*) と比べて透過率曲線の FWHM が狭く、輝線に対する感度が高いという点である。我々はこの *NB101* をすばる望遠鏡の Suprime-Cam に搭載し、SXDS 領域と COSMOS 領域 (計 $\sim 0.5 \text{ deg}^2$) に対して合計 106 時間の積分を行った。このような独自の狭帯域フィルターを用いた深撮像探査により我々は、 $\text{Ly}\alpha$ 限界光度が $2.4 \times 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ まで達するデータを得ることができた。この限界光度は、過去のすばる望遠鏡を用いた $z = 3 - 6$ LAE サーベイと同等の深さである。

この *NB101* 深撮像データと公開されている広帯域フィルター撮像データを基に、我々は $z = 7.3$ LAE を SXDS 領域から 3 天体、COSMOS 領域から 4 天体検出した。

3 Results

2 章で得られた $z = 7.3$ LAE サンプルを基に $\text{Ly}\alpha$ LF を求めたのが図 1(赤丸)である。図 1 では、過去の $z \sim 7.3$ LAE 探査の結果も同時にプロット (シアンと橙、黒線) している。図 1 より、我々の結果は、過去の 8m 望遠鏡による結果 (e.g., Shibuya et al. 2012; Clément et al. 2012) と一致するが、4m 望遠鏡による結果 (e.g., Hiben et al. 2010) とは不一致であることが分かった。

4 Discussion

3 章で我々は、8m 望遠鏡による結果 (我々の結果を含む) と 4m 望遠鏡によるそれとの間に矛盾が存在することを示した。4m 望遠鏡による結果の方が個数密度が高いところに位置しているが、この原因

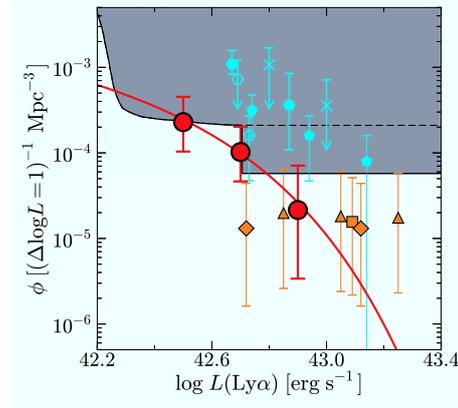


図 1: 本研究で得られた $z = 7.3$ $\text{Ly}\alpha$ LF (赤丸)。シアンは 4m 望遠鏡による過去の研究結果 (e.g., Hiben et al. 2010)、橙は過去のすばる望遠鏡による結果 (e.g., Shibuya et al. 2012)、黒線と影の領域は VLT による結果で $\text{Ly}\alpha$ LF の上限を表す (Clément et al. 2012)。

としてコンタミネーションの存在が考えられる。実際、4m 望遠鏡で得られた $z \sim 7.3$ LAE を分光したところ、 $\text{Ly}\alpha$ 輝線が非検出であったという報告がある (e.g. Clément et al. 2012)。一方、8m 望遠鏡で得られた LAE は分光同定されている (e.g., Shibuya et al. 2012)。また、我々の $z = 7.3$ LAE サンプルのうち 1 天体が分光観測の対象となったが、この天体から $\text{Ly}\alpha$ 輝線が検出されている (Ouchi et al. in prep.)。以上より、我々の $\text{Ly}\alpha$ LF は過去の 8m 望遠鏡による結果を支持すると結論づけた。

次に、過去の研究で得られた $z = 5.7$ と 6.6 の $\text{Ly}\alpha$ LF と本研究の $z = 7.3$ のそれと比較して、 $\text{Ly}\alpha$ LF の進化を議論する。ここで、もし $\text{Ly}\alpha$ LF が $z = 6.6 - 7.3$ で無進化である場合、2 章の観測で得られる $z = 7.3$ LAE は ~ 65 天体と予想される。一方 2 章において、我々は $z = 7.3$ LAE を計 7 天体検出した。このことから、 $\text{Ly}\alpha$ LF は $z = 6.6 - 7.3$ で進化していると考えられる。 $z = 5.7 - 7.3$ での $\text{Ly}\alpha$ LF の進化を表したのが図 2 である。我々は、 $z = 6.6 - 7.3$ で $\text{Ly}\alpha$ LF が $> 90\%$ の信頼性で有意に進化していると結論づけた。

さらに図 2 から、 $z = 6.6 - 7.3$ での $\text{Ly}\alpha$ LF の減少量は $z = 5.7 - 6.6$ でのそれと比べて大きいことが分かる。これはすなわち、 $\text{Ly}\alpha$ LF が $z \sim 7$ で急速に

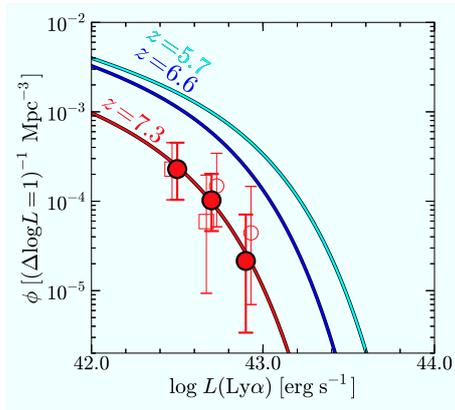


図 2: $z = 5.7 - 7.3$ での $\text{Ly}\alpha$ LF の進化。赤丸と赤曲線が本研究の $z = 7.3$ $\text{Ly}\alpha$ LF を示す。シアンと青の曲線がそれぞれ $z = 5.7$ と 6.6 $\text{Ly}\alpha$ LF を表す (Ouchi et al. 2008, 2010)。

減少していることを意味する。これを定量的に示すために、我々は $\text{Ly}\alpha$ 光度密度を計算した。その進化を図示したのが図 3 である。我々は、 $z \gtrsim 7$ で $\text{Ly}\alpha$ LF が加速的に進化していることを初めて明らかにした。一方図 3 で、紫外線連続光 (UV) 光度密度の進化も同時にプロットしている。宇宙の星形成率の指標となる UV LF は $z \sim 7$ で急速な減少が見られない。従って我々は、 $\text{Ly}\alpha$ LF の加速的進化は星形成率の進化とは異なるメカニズムで生じている可能性を示した。

$\text{Ly}\alpha$ LF の加速的進化の原因として、まず単純に宇宙再電離を考える。シンプルな理論モデルを基に $z = 7.3$ での x_{HI} を見積もったところ、我々は $x_{\text{HI}} = 0.3 - 0.8$ と推定した。本研究と過去の研究で得られた x_{HI} の進化を図 4 に示した。図 4 から、本研究で得られた $z = 7.3$ での x_{HI} の値は、過去の研究で得られた $z \sim 7$ での推定値と一致している。また、我々は $z \gtrsim 7$ での $\text{Ly}\alpha$ LF の急激な減少を示したが、このことは図 4 の青菱形 ($z = 6.6$) と本研究の赤丸 ($z = 7.3$) との比較からも見てとれる。従って、 $z \sim 7$ での IGM 中の中性水素の急激な増加が示唆される。

次に、本研究で得られた $z = 7.3$ での x_{HI} 推定値が、CMB のトムソン散乱の光学的厚み τ_{el} の観測値と矛盾しないか確認する。本研究結果を説明する宇宙再電離史に対する τ_{el} を見積もるために Choudhury et al.

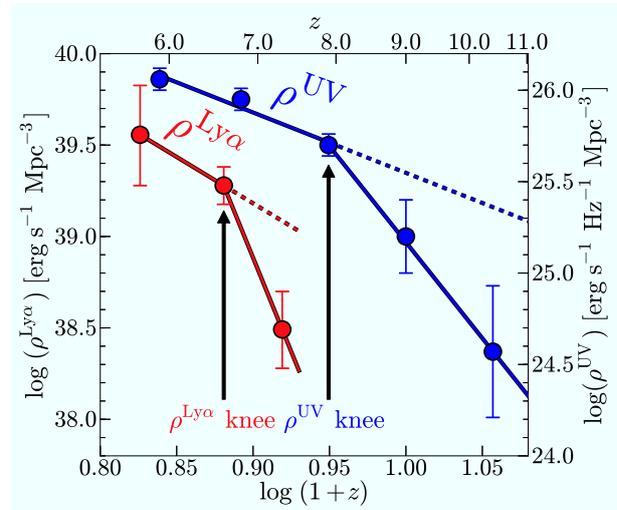


図 3: $\text{Ly}\alpha$ (赤) と UV (青) の光度密度進化。 $z = 7.3$ $\text{Ly}\alpha$ 光度密度は本研究で得られた $\text{Ly}\alpha$ LF から計算した。 $z = 7.3$ 以外の $\text{Ly}\alpha$ 光度密度は Ouchi et al. (2008, 2010) から、UV 光度密度は Bouwens et al. (2014) から引用した。

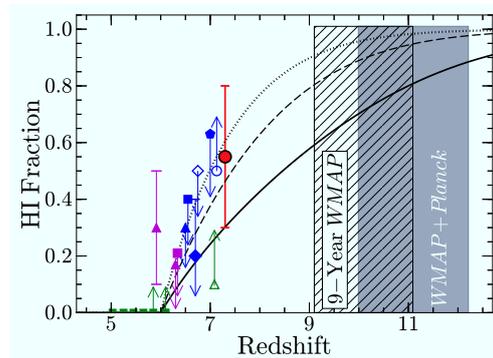


図 4: 赤方偏移ごとの x_{HI} の値とその理論予想。赤丸が本研究で得られた $z = 7.3$ での x_{HI} 推定値、緑とマゼンタ、青のプロットがそれぞれクエーサーとガンマ線バースト、LAE を用いて推定された x_{HI} の値である。斜線 (または影) の領域は CMB を用いた場合である。点線と破線、実線は Choudhury et al. (2008) による理論予想を表す。

(2008) の理論モデルを用いることにする。Choudhury et al. (2008) では、仮定する再電離源の最小ハロー質量を変えた場合の 3 つのモデルを考えている。赤方偏移 6 での質量がそれぞれ 10^9 及び 10^8 、 $5 \times 10^5 M_{\odot}$

より大きいハローが再電離源になると仮定した場合のモデル A と B、C について、 x_{HI} と赤方偏移の関係を図 4 に示す。点線と破線、実線がそれぞれモデル A と B、C を表す。同様に、図 5 ではこれらのモデルで予想される τ_{el} と赤方偏移の関係を示す。図 4 で本研究結果を良く説明する A や B のモデルでは、図 5 において CMB 観測値と大きく異なる。モデル C のみが CMB 観測値と誤差の範囲で一致する (図 5) が、本研究の推定値 $x_{\text{HI}} = 0.3 - 0.8$ の方がモデル C より 1σ 程度高い値となっている (図 4)。従って、我々は本研究から得られた $z = 7.3$ での x_{HI} と CMB 観測値との間に矛盾が存在する可能性を示した。

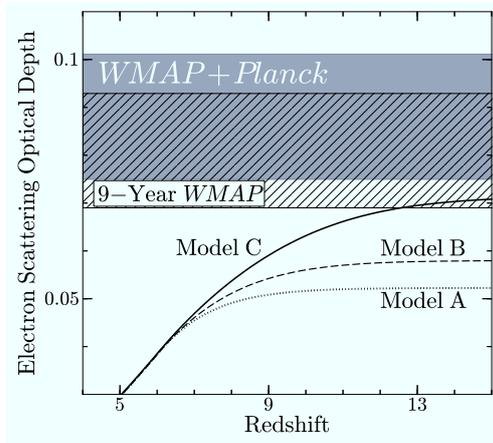


図 5: τ_{el} の進化。斜線 (または影) の領域が観測値を示し、点線と破線、実線は Choudhury et al. (2008) による理論予想である。

この矛盾を説明する物理的描像として、電離バブル内のクランプ状の中性水素ガス雲の存在 (e.g., Bolton & Haehnelt 2013) や、より早い時期での宇宙再電離 (e.g., Cen 2003)、そして LAE の電離光子脱出率の増加 (Dijkstra et al. 2014) のような、近年の理論研究で提唱されているメカニズムが考えられる。しかし上述の矛盾が本当に存在するかは、本研究で得られた x_{HI} 推定値の誤差が大きいため、明らかでない。 x_{HI} の誤差は今のところ $\text{Ly}\alpha$ LF の統計誤差によるため、すばる望遠鏡超広視野主焦点カメラ Hyper Suprime-Cam による大規模 LAE 探査で、この矛盾の存在を確認できるだろう。

5 Conclusion

我々は、独自の狭帯域フィルター *NB101* を搭載した Suprime-Cam を用いて、106 時間にも及ぶ $z = 7.3$ LAE 深撮像探査を行った。その結果、我々は $z \gtrsim 7$ での $\text{Ly}\alpha$ LF の急激な減少を初めて明らかにした。この $\text{Ly}\alpha$ LF の加速的な進化の原因が IGM 中の中性水素の急速な増加によるものだとすると、CMB の観測値を説明できない可能性を示した。 $\text{Ly}\alpha$ LF の加速的な進化の物理的描像として、近年の理論研究で提唱されているような、クランプ状の中性水素ガス雲の存在や、より早い時期での宇宙再電離、LAE の電離光子脱出率の増加が考えられる。

Reference

- Bouwens et al. 2014, arXiv:1403.4295
- Bolton & Haehnelt 2013, MNRAS, 429, 1695
- Cen 2003, ApJ, 591, 12
- Choudhury et al. 2008, MNRAS, 385, L58
- Clément et al. 2012, A&A, 538, A66
- Dijkstra et al. 2014, MNRAS, 440, 3309
- Hibon et al. 2010, A&A, 515, A97
- Kashikawa et al. 2011, ApJ, 734, 119
- Konno et al. 2014, arXiv:1404.6066
- Ouchi et al. 2008, ApJS, 176, 301
- Ouchi et al. 2010, ApJ, 723, 869
- Planck Collaboration et al. 2013, arXiv:1303.5076
- Shibuya et al. 2012, ApJ, 752, 114