

Lyman Alpha Emitter の Ly α /UV 光度関数で探る宇宙の再電離

東京大学 天文学専攻 修士課程 1 年 今野彰

1 Abstract

宇宙 137 億年の歴史の大イベントの一つとして「宇宙の再電離」が挙げられる。宇宙はビッグバンにより誕生し、膨張により宇宙の温度が下がり、そして赤方偏移 $z \sim 1100$ の頃に宇宙にある陽子と電子が再結合したと考えられている。一方クエーサーのスペクトルの観測によると、 $z \sim 5$ 付近の銀河間物質 (IGM) はほとんど電離していることが知られている。すなわち $z \sim 5 - 1100$ の間で、再結合した陽子と電子が再び電離したことになる。これが宇宙の再電離である。最近の観測によると $z \sim 6 - 15$ の間に再電離が起こったと考えられているが、まだまだ謎が多く、再電離がどのように時間進化していったか、空間的にどのように広がっていったか、さらには再電離源が何であるかすらもはっきりとは分かっていない。そんな再電離を調べる方法としては、遠方にある銀河を観測することが挙げられるが、特に Lyman Alpha Emitter(LAE) の探査が有用であると考えられている。本講演では LAE の Ly α /UV continuum の光度関数 (LF) と等価幅 (EW) 分布を示し、それが宇宙の再電離の解明にどう関わってくるかを説明する。さらに将来的にはどのように研究を進めていくのかについても説明する。

2 Introduction

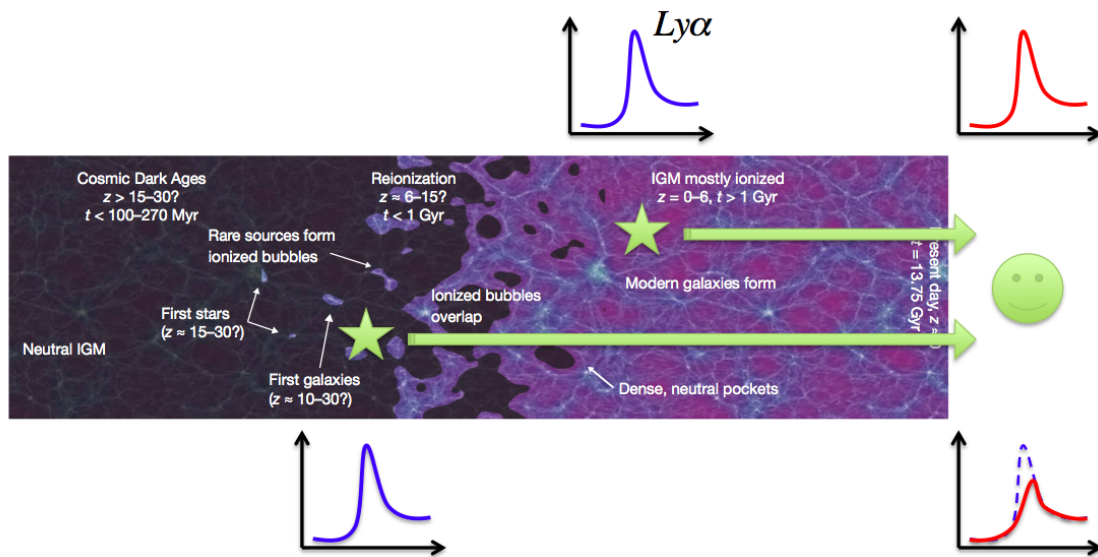


Fig. 1 宇宙の再電離を調べる方法。宇宙の再電離が終わった時期の LAE から放射される Ly α 輝線を観測した場合、Ly α 輝線の強度は宇宙空間を伝播する間に変化しないが、宇宙の再電離の最中にある LAE から放射される Ly α 輝線を観測した場合、IGM による吸収で Ly α 輝線の強度は弱くなる。(宇宙の再電離の模式図は Robertson et al. 2010 から引用。)

2.1 宇宙の再電離の謎

宇宙の再電離に関しては §1 で述べた通りだが、ここでは宇宙の再電離の謎について詳しく述べる。

§1 で述べた通り、宇宙の再電離は $z \sim 6 - 15$ の間で起こったと考えられている。しかし今の所これ以上詳しく分かってなく、その間に宇宙の再電離は一瞬で起こったのか、それとも長い期間を経て起こったのかよく分かっていない。このような宇宙の再電離の「時間的進化」がまず 1 つ目の謎である。また宇宙の再電離が何によって引き起こされているかについてもよく分かっていない。というのも、宇宙の再電離は初代星や初代銀河から放射される電離光子によって引き起こ

されていると考えられているが、それだけでは宇宙を電離することができないのではないかと指摘されている。このような宇宙の再電離の「再電離源」が2つ目の謎である。そして、宇宙の再電離は IGM の高密度領域から始まりポイド領域に広がっていくのか、それともその逆であるのかというような、宇宙の再電離の「空間的進化」が3つ目の謎である。今回の発表で関わってくる謎は、1つ目の「時間的進化」の方である。

2.2 宇宙の再電離の解明

宇宙の再電離の時間的進化を調べるには、Lyman Alpha Emitter(LAE) の Ly α の光度関数 (LF) の時間進化の様子を調べればよい (LAE とは高赤方偏移到普遍的に存在する天体で、Ly α で強く輝く天体である。LF とは単位 luminosity あたりの個数密度を表す関数であり、Schechter function と呼ばれる関数でフィッティングできることが知られている)。これについて模式的に表した図が Fig. 1 である。

$z = 0$ に我々観測者がいる。ここで様々な赤方偏移 z に存在する LAE を観測するとすることを考える。ある z での LAE を観測して、もしそれが宇宙の再電離が終わった時期に存在する場合、LAE から放射される Ly α 輝線は IGM による吸収を受けないため、LAE から放射される元々の Ly α 輝線と我々が観測するそれとの間では輝線強度はほとんど変わらないと予想される。一方、宇宙の再電離の最中にある LAE を観測する場合、中性状態にある IGM が存在するために途中で Ly α 輝線はその中性 IGM による吸収を受けてしまい、LAE から出てくる本来の Ly α 輝線の強度よりも、我々が観測するそれの方が弱くなると予想される。

このように、様々な z の LAE について、Ly α 輝線の強度がどのように変化していくかを統計的に調べれば宇宙の再電離の時間的進化を追うことができる。

3 Current Observational Result I

LAE の Ly α の LF の進化を観測的に求めた論文の一つに Ouchi et al. 2010 がある (Fig. 2)。Fig. 2 は $z = 3.1$ (シアン), $z = 5.7$ (青), $z = 6.6$ (赤) の LAE の Ly α の LF を表していて、横軸が Ly α の luminosity、縦軸が単位 luminosity あたりの個数密度を表している。ここで LF は Schechter 関数:

$$\phi(L)dL = \phi^*(L/L^*)^\alpha \exp(-L/L^*)d(L/L^*)$$

とよばれる関数でフィッティングされている。この図から、 $z = 6.6$ の LF は $z = 5.7$ のそれと比べて 30% 暗い側へ進化していると求められている。これはつまり $z = 5.7$ と $z = 6.6$ の間で Ly α 輝線強度が弱くなっているということを表している。

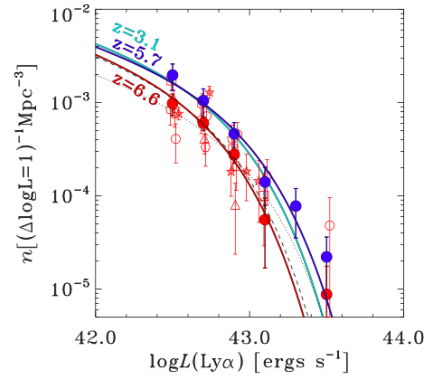


Fig. 2 $z = 3.1, 5.7, 6.6$ の LAE の Ly α の LF(Ouchi et al. 2010)。

4 宇宙の再電離と見なせるか?

§3 で $z = 5.7$ と $z = 6.6$ の間で Ly α 輝線強度が弱くなっていると述べたが、このことから、この間に宇宙の再電離が起きていると考えてよいのだろうか? もう一度 Fig. 1 を見てみる。ここで問題なのが、宇宙の再電離が終わった時期に存在する LAE と宇宙の再電離の最中にある LAE との間で Ly α 輝線の強度が同じであると考えていることである。もし宇宙の再電離の最中にある LAE の Ly α 輝線の強度が、宇宙の再電離が終わった時期に存在する LAE のそれよりも本質的に弱かったとすると、2つの間で観測された Ly α 輝線の強度が弱くなったとしても、それが中性状態にある IGM の吸収によるものなのか、それとも元々 Ly α 輝線が弱かったという銀河進化によるものなのか分からないという事態になる。

ではこれを解決するにはどうすれば良いか? それには Ly α 輝線の波長 (1216Å) より長い波長領域の UV continuum に着目すれば良い。この UV continuum は中性状態にある IGM による吸収の影響をほとんど受けないため、UV continuum の明るさの変化の様子は、そのまま銀河進化の様子を反映することになる。故に UV continuum に関しても、Ly α の場合と同じように、各 z ごとに LF を観測的に求めて、LAE 自体の明るさがどのように変化していくかを調べればよい。

5 Current Observational Result II

LAE の UV continuum の LF の進化を観測的に求めた論文の一つに Kashikawa et al. 2011 がある (Fig. 3)。Fig. 3 の左は $z = 5.7$ (青) と $z = 6.5$ (赤) の LAE の UV continuum の LF を表していて、Fig. 3 の右が Ly α 輝線の等価幅 (EW) 分布で、横軸が LAE 静止系での EW、縦軸が、上のパネルではその EW を持った LAE の割合を、下のパネルではある値以上の EW を持った LAE の割合を表す。この図から、 $z = 5.7$ と $z = 6.5$ の間で、UV continuum については変わらず、EW 分布については $z = 6.5$ の方が EW が小さくなっていると考えられている。先ほどの Ly α の輝線強度が

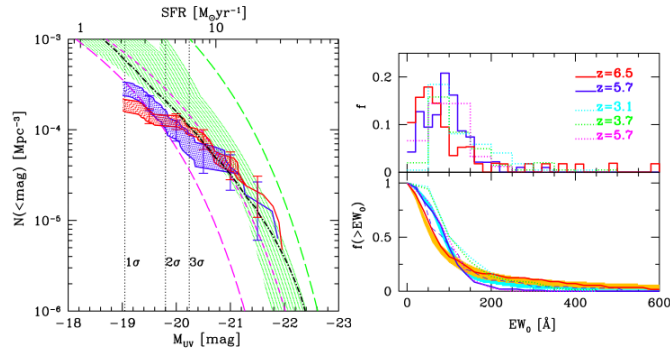


Fig. 3 $z = 5.7, 6.5$ の LAE の UV continuum の LF と Ly α 輝線の EW 分布 (Kashikawa et al. 2011).

弱くなっているということも Kashikawa et al. 2011 でも調べられているため、以上のことから $z \sim 6$ と $z \sim 7$ の間で宇宙の再電離が起きているとこの論文では考えられている。

6 The Problems

Kashikawa et al. 2011 では $z \sim 6$ と $z \sim 7$ の間で宇宙の再電離が起きていると考えられていると §5 述べたが、この論文では 2 つの問題点が存在する。1 つ目が UV continuum の LF に不定性が大きいという点である。Fig. 3(左) から分かるようにエラーバーが大きい。これは LAE のサンプル数が少ないのが原因である。

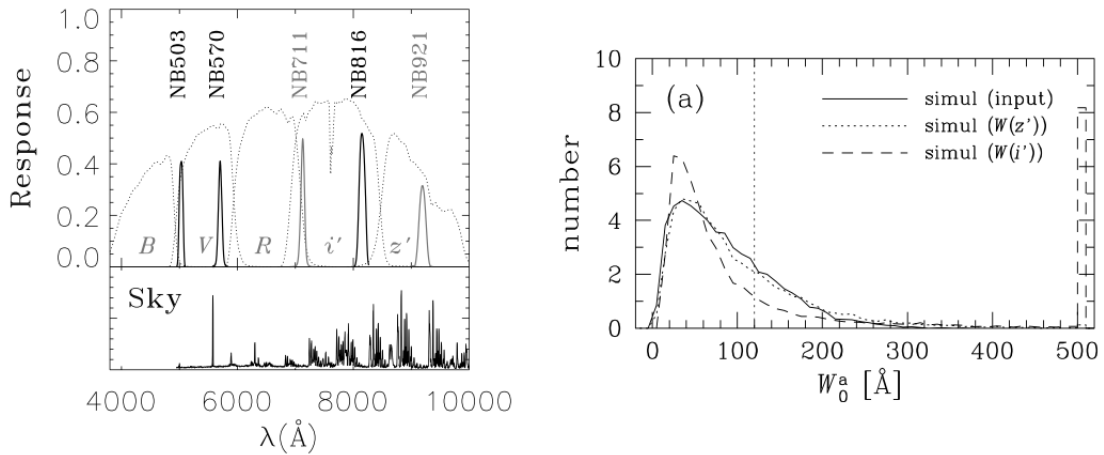


Fig. 4 (左) 広帯域フィルターと狭帯域フィルターの関係 (Ouchi et al. 2008)。 (右) $z = 5.7$ の LAE の EW 分布のシミュレーション結果 (Shimasaku et al. 2006)。

2 つ目が EW 分布の求め方に問題があるという点である。Fig. 4 の左は広帯域フィルターと狭帯域フィルターの関係を表したものである。また Fig. 4 の右は $z = 5.7$ の LAE の EW 分布のシミュレーション結果で、ある EW 分布を仮定して (Fig. 4(右) の実線の simul(input) に対応)、それを z' バンドと NB816 を用いて観測して EW 分布を求めた場合 (Fig. 4(右) の点線の simul($W(z')$) に対応) と、 i' バンドと NB816 を用いて観測して EW 分布を求めた場合 (Fig. 4(右) の破線の simul($W(i')$) に対応) を比較したものである。この図から明らかなように、 $z = 5.7$ の LAE の EW 分布を求めるときは、 i' バンドと NB816 のようなフィルターの波長域が重なっていない組み合わせを使った方が正しく EW 分布を求められるということが分かる (フィルターの重なり具合については Fig. 4(左) を参照)。一方 Kashikawa et al. 2011 では、 $z = 6.5$ の LAE の EW 分布を求めるとき、 z' バンドと NB921 を使って求めている。先ほどのシミュレーション結果 (Fig. 4(右)) から、この求め方だと、 z' バンドと NB921 という組み合わせではフィルターの波長域が重なっているため、正しく EW 分布を評価しているとは言えないと考えられる。

7 Future Work

Future Work として私は上で述べた問題点を克服し、宇宙の再電離に関して正しく評価したいと考えている。具体的には、1つ目の問題点である UV continuum の LF の不定性については、Hyper-Suprime Cam を用いた大規模サーベイによってサンプル数を増やすことが重要であると考えている。2つ目の問題点である EW 分布の求め方については、すばる望遠鏡の y バンドや、ハッブル宇宙望遠鏡の CANDELS プロジェクトの J バンドや H バンドを用いて正しく評価することが重要だと考えている (y, J, H バンドは NB921 より長波長側のフィルターであるため正しく EW 分布を求められる)。

8 Summary

宇宙の再電離がどのように時間進化していくかを調べるには、LAE の Ly α /UV continuum の LF や EW 分布が各赤方偏移でどのように進化していくかを調べればよい。Kashikawa et al. 2011 ではこれらの進化を調べて、 $z \sim 6$ と $z \sim 7$ の間で宇宙の再電離が起きていると考えているが、この議論には問題点 (UV continuum の LF の不定性、EW 分布の評価方法) が存在する。今後の研究方針として、これらの問題点を克服して宇宙の再電離について正しく制限をかけていきたいと考えている。

9 Reference

- Kashikawa et al. 2011, ApJ, 734, 119
- Ouchi et al. 2010, ApJ, 723, 869
- Shimasaku et al. 2006, PASJ, 58, 313
- Ouchi et al. 2008, ApJS, 176, 301
- Robertson et al. 2010, Nature, 468, 49