

すばるでとらえた宇宙ルネッサンスの黎明

柏川 伸成

〈国立天文台光赤外研究部 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: kashik@zone.mtk.nao.ac.jp

宇宙再電離は間違いなく初期宇宙の一大イベントだったにもかかわらず、いつ、何が、どのように引き起こしたもののなのか全くわかっていない。すばる望遠鏡を用いた $z=6.5$ の超遠方銀河の系統的な観測研究によって、諸説飛び交うこの分野に貴重な観測的制限を与える試みを本稿で紹介する。

1. 闇の宇宙と光の宇宙

われわれは光の時代に生きている。

その昔、宇宙は闇に包まれていたという。その暗闇を払いのけ、この世界を光に満ちあふれた世界に変えた天体の物語を今回は紹介しよう。まずは闇と光の戦いの物語から。

まずは闇の宇宙の話。ビッグバンから誕生した宇宙は膨張を続け、火の玉状態からどんどん冷えていく。その頃まだ銀河も星もない宇宙では重元素は存在せず、最も簡単な元素である水素によってこの宇宙はほとんど満たされていた。当初温度の高かった宇宙においては水素も電離していたが、宇宙が十分冷え切ったころには中性水素の状態が存在していた。このような時代のことを「宇宙の暗黒時代」と呼んでいる。やがて時代が進み、宇宙で最初の天体が誕生する。この中性水素に満ちあふれた宇宙においては、たとえそこでもし天体が生まれたとしても、その天体から発せられる光は、直ちに周囲の中性水素に吸収されてしまい、ある範囲から逃げることができない。したがって、もしそこに天体があったとしてもその光がわれわれのもとに届くことはない、まさに闇の世界である(図1左)。この時代に生まれた天体の周りにはほぼ電離された水素が取り巻く、「宇宙

論的 HII 領域」という光芒が形成される。しかしまだまだ宇宙全体の中性水素の量は多く、この HII 領域の牢獄に囚われた光は決してその外に逃げ出すことはできない。

次に光の宇宙の話。しかし、やがて宇宙のあちこちで天体が誕生する(宇宙の再電離¹⁾)。一つの天体だけではそのごく近傍しか電離することができなかったのだが、一つ一つの天体の周りに形成されていた宇宙論的 HII 領域はやがてお互いに重なり合っていく、闇の宇宙を光の宇宙にどんどん変えていく(図1中)。一つの HII 領域に閉じ込められていた光は、この重なりによってやがてその行動できる範囲を次々と拡大していく。天体が数多く密集しているような場所では、こうした重なりが効率的に行われるであろう。やがてこうした光芒が宇宙を占拠するようになり(宇宙の再電離の完了; 図1右)、光子がこの広い宇宙全体を自由に行き来できるような現在の宇宙になったと言われている。闇の宇宙から光の宇宙へと変えたこの宇宙再電離は間違いなく初期宇宙の一大イベントであり、その大転換はしばしばルネッサンスにたとえられる。この宇宙再電離以降自由となった光子を通して、われわれはめくるめく大宇宙の豪華絢爛たる天体・現象を享受することができているのである。

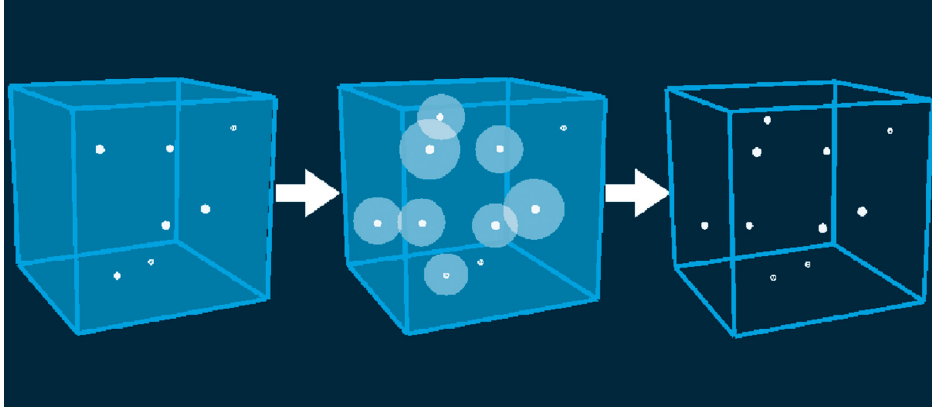


図1 宇宙再電離の様子. 中性水素ガス (青色) に満ちた宇宙の中で最初の天体生まれる (左図). やがて各々の天体の周りに宇宙論的 HII 領域が形成され重なり合っていく (中図). このイオン化された領域が支配的になると再電離の完了となる (右図).

ここまで述べた話はすべて天文学者・物理学者が頭の中で考えた闇と光の戦いの物語. 誰も実際のところがどうだったのかその様子を詳しく知る者はまだいない. いったい宇宙の再電離はいつ起きたのか, それに貢献した天体はどんな天体だったのか. 闇の世界は単純に光の世界に負けたのではなく, 一度世界を再支配したと考える者もいれば, 広い宇宙の中では, 同じ時代でも光が闇に勝っている場所があればまだ闇が支配していた場所もあった, と考える者もあり, 一見単純そうな物語の端々には天文学者・物理学者の興味をそそる複雑な物理プロセスがたくさん隠されている. かくして物語は物語ゆえに, 豊かなわれわれの想像力によって, 千差万別な逸話を産み出している.

かつて数式の上でしか表現されず, その数式の生みの親さえも欺いた宇宙膨張という「伝説」が観測によって「事実」となったように, 今この宇宙再電離の伝説にも, より詳細な観測の目が向けられる時代が来つつある. ルネッサンス期の天才で, 中世的な偏見を排除し徹底的に実証的な手法で真理を見つけようとした近代科学の先駆者レオナルド・ダ・ビンチの言葉. 「知識は実験の娘である. 実験から開始して, それによって理論を検

証せよ.」

2. ライマン α 輝線銀河で探る宇宙再電離

観測で宇宙再電離の実際を探る手法についてはさまざまな方法が提言されている. この中で超遠方天体の一つである「ライマン α 輝線銀河」(Lyman α emitter; LAE²⁾) を用いる方法については大きく分けて二つある. ライマン α 輝線 (Ly α 輝線) という水素に特有のスペクトル線は中性水素の中を通過すると大きく減衰される (図2参照). よって, この天体の手前にもし中性水素ガスがあれば, 1) その光は弱まり, 観測される LAE の数は減る, 2) その輝線プロファイルは通過してきた空間の光学的厚みのよい指標となり, 宇宙論的 HII 領域の大きさや, その内部密度分布までを推し量ることができる, という現象が期待される. この2点が最も有力な LAE を用いた再電離を読み解く鍵である. 実際のところはこうした LAE にも個性があるので, 宇宙再電離期の LAE を多数個集めて統計的議論をすることが重要になってくる³⁾. 再電離を引き起こした天体としては, 明るい QSO に比べて圧倒的に数が多いと思われる LAE をはじめとするこの時代の星形成銀

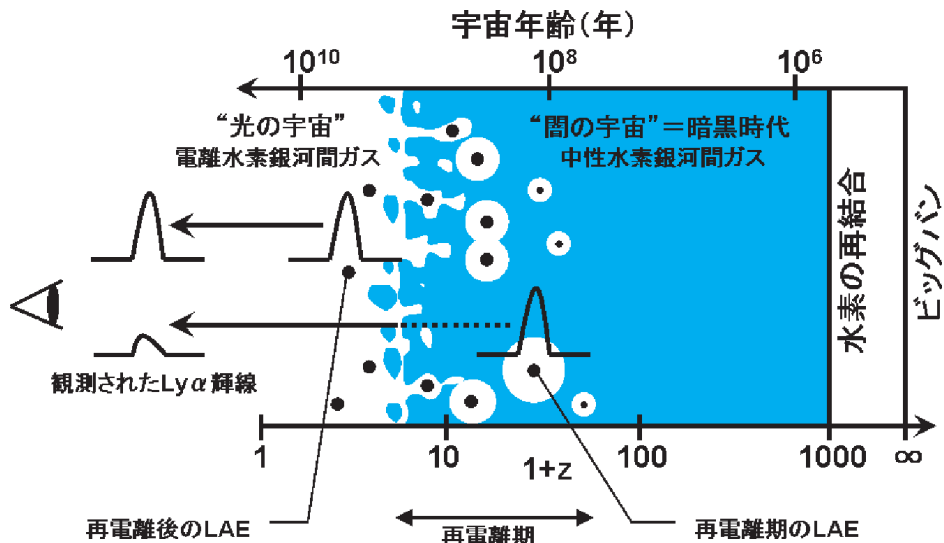


図2 光の時代と闇の時代での Ly α 輝線の見え方の違い。青い部分が中性水素ガスで覆われていた闇の時代（暗黒時代）。この時代からの Ly α 輝線は手前にある中性水素の吸収によって減衰され、輝線プロファイルも変化する。この Ly α 輝線の減衰の大きさ（観測される LAE の個数の減少度）を見れば、宇宙再電離の時期やその時代の平均中性化比率がわかる。

河が最有力視されている。しかしながら、こうした超遠方天体を見つける作業は最新の観測技術をもってしても容易なものではない。現在分光観測で確認されている最も遠い銀河は赤方偏移 6.5（われわれからの距離 128 億光年）にある。宇宙再電離の時期に近いと考えられているこの時代の銀河はこれまでたかだか数個しか見つかっていなかった。宇宙の果てからやってくるかすかな光は、10 m 級の地上大望遠鏡を長時間駆使してやっと捕まえることができるもので、そう簡単にはたくさん見つからないのだ。

そこで広い視野をもつすばる望遠鏡の登場となる。われわれはすばる望遠鏡の2年間に及ぶプロジェクトで、すばるディープフィールド (Subaru Deep Field; SDF⁴⁾) における $z=6.5$ の LAE を多数発見した⁵⁾。現在のところ 58 個の測光サンプルの中から 17 個の分光サンプルが得られている。われわれは同時に、この時代から少し手前にあたる赤方偏移 5.7 (127 億光年) の LAE も多数 (89 個の測光サンプルと 34 個の分光サンプル) 捕ま

えた⁶⁾。この近接する二つの時代の LAE の性質の違いを統計的に見ることで、もしこの時期に銀河間ガスの電離状態に大きな変化があったとすれば、宇宙再電離の様子がわかるはずだ。これらの LAE サンプル数はこれまでの研究を圧倒的に陵駕しているだけでなく、同じフィールド、同じサーベイ体積、同じ測光データに基づいた均質なデータであることに着目いただきたい。さらに精緻な比較をするために、われわれは各種の観測誤差や選択的バイアスを注意深く考慮し、この二つの時代の LAE をほぼ同じ条件で選び出した。

3. $z=6.5$ の LAE の数が減っている！

図 3⁷⁾ を見ていただこう。これは $z=5.7$ と 6.5 の時代の LAE の光度関数を比較したもので、どれだけの Ly α 光度をもつ LAE がどれだけたくさんあるかを示したものである。 $z=5.7$ の LAE に比べて $z=6.5$ の時代の LAE の個数が明いところで明らかに減っていることがおわかりいただけ

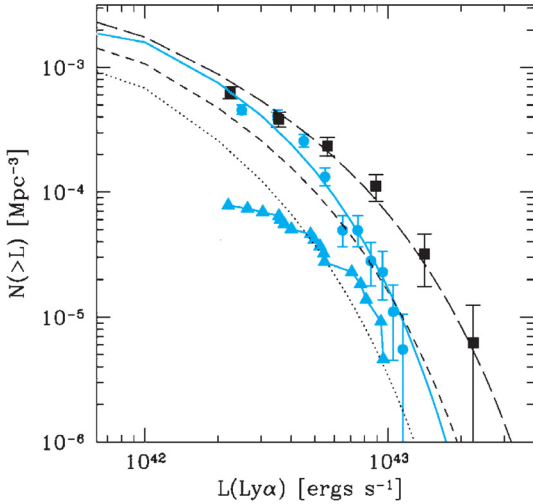


図3 SDFにおける $z=6.5$ (青シンボル) と 5.7 (黒シンボル) の LAE の累積的 $\text{Ly}\alpha$ 光度関数の比較. 青三角は分光サンプル 17 個に基づいたもので、これは暗い側でのサンプルの完全性補正を無視している. 光度関数の下限値だと思っていただければよい. 青丸は分光サンプルと測光サンプルから求めた現在のわれわれの光度関数の最適評価でサンプルの完全性補正も行っている. 青いシンボルは黒四角に比べて明らかに明るい側で数が少ないことがわかる. 短いダッシュ線と点線は、 $z=5.7$ の時代に銀河間ガスが完全電離 (長いダッシュ線、中性化比率 $x_{\text{HI}}=0.0$) と仮定した場合に予想される、 $x_{\text{HI}}=0.4$ と 0.6 の場合の $\text{Ly}\alpha$ 光度関数.

るであろう. この図を描くためにはいくつかの補正を行っているが、少なくとも明るいほうではこうした補正による誤差は圧倒的に小さい. また、分光観測というものはその効率上、明るい天体から優先的に進めていくのが常であるのだが、われわれの明るいサンプルはすでにほぼ分光し尽されており、これらの $\text{Ly}\alpha$ 光度は確定されたものである. 実際、われわれ以外の独立したサーベイ観測によって $z=6.5$ の LAE はこれまでに 3 個見つかったのであるが、これらの $\text{Ly}\alpha$ 光度はすべてわれわれの最も明るいものと一致する. すなわち、 $z=5.7$ の時代で分光的に見ついている非常

に高い $\text{Ly}\alpha$ 光度をもつような LAE は $z=6.5$ の時代でいまだ一つも見つかっていないのである. この光度関数の差異は統計的に見ても 3σ の有意性がある. ただ一つ大きな不定性を考えるとすれば、コスミックバリエーション (宇宙の大規模構造によって本来的に内在する観測視野ごとの天体の統計的性質の違い) であるがこれを考慮してもわれわれの光度関数の差異は 2σ の有意性をもっている.

この光度関数の差異は何を意味するのであろうか? もちろん、LAE 自身が $z=5.7$ から 6.5 の間に劇的な進化を起こしたとも考えられる. しかし、これまでの研究によって LAE の光度関数は $z=3$ (113 億光年) から $z=5.7$ (127 億光年) にかけての長い間ほとんど無進化であることが確かめられている. その可能性は完全に否定できないものの、 $z=5.7$ から 6.5 にかけての短期間にだけ進化したというのは考えにくい. われわれはこの $\text{Ly}\alpha$ 光度関数のほかに、UV 連続光 ($9,500 \text{ \AA}$, 静止系で $1,255 \text{ \AA}$) での光度関数も比較してみたが、有意な差は見られず、i バンドドロップアウト法と呼ばれる UV 連続光を直接検出する方法によって得られた $z\sim 6$ の光度関数⁸⁾とも一致した. この UV 連続光は $\text{Ly}\alpha$ 輝線と異なり、中性水素による吸収を受けない. したがって、もし LAE 自身に劇的な進化があったとしても $\text{Ly}\alpha$ 輝線の等価幅だけが著しく進化したと考えねばならない.

このように考えると、 $z=6.5$ における光度関数の減少は、LAE の周囲に存在する中性水素の銀河間ガスによって吸収を受けたと考えるのが自然である. すなわち、 $z=6.5$ の時代にはまだ宇宙再電離は完全には完了しなかった、という結論が導かれる. われわれの評価では $z=5.7$ と 6.5 の時代の光度関数における典型的な $\text{Ly}\alpha$ 光度の差は $L^*\sim 0.75 \text{ mag}$ である. ある再電離モデルを用いるとこの光度差から、 $z=5.7$ の時代に銀河間ガスが完全電離 (中性化比率 $x_{\text{HI}}=0$) されていたと仮定した場合に、 $z=6.5$ の時代の銀河間ガスの中性

化比率 x_{HI} は 0.45 であることが推測される。しかし Ly α 光子の銀河内部および周囲の銀河間ガス中の伝播過程は非常に複雑で、この中性化比率の予想値は強くモデルに依存することを注意しておきたい。宇宙再電離の時期については WMAP による観測⁹⁾、および QSO のスペクトルに現れる完全ガン・ピーターソン吸収の観測¹⁰⁾からそれぞれ制限が得られているが、それとは独立した観測によって宇宙の中性化比率に制限がつけられたことは重要である。

4. 無法地帯に秩序を

光度関数の明るい側だけで LAE の個数密度が減少するというこの観測結果は、実は多くの理論シミュレーションとは合致しない。理論モデルの多くでは、再電離期に逆に明るい天体が見えやすくなるという予想がされている。現在標準的とされているバイアス CDM モデル、すなわち物質密度の高いところだけ選択的に銀河が誕生したと考える銀河形成モデルに立てば、より重くて明るい天体は周囲に多くの銀河がたくさんある場所に生まれたはずである。このような高密度領域では宇宙論的 HII 領域の重なりが頻繁に生じることが期待され、結果として、水素の再結合に比べて再電離のタイムスケールが短くなり、再電離がより効率的に進み、電離化された大きな泡の中にいる明るい天体はより観測されやすいことになる。今回の観測結果を再電離の結果と解釈すれば、この予想とは正反対である。ただし、観測のほうはまだ十分に暗いサンプルについての分光観測が行われておらず、今後明るい側以上に減少が認められる可能性を残している。一方、理論モデルのほうもこうした高密度領域で「闇」が勝つか「光」が勝つかは、銀河間ガスの密度とその空間的ばらつき、あるいは銀河のクラスタリングの強さ・UV 輻射量・年齢などに大きく依存するので今後改善が求められることになるのかもしれない。

今回の観測成果をどこまで信用するかは、別の

同様な観測など今後の推移を待たねばならない面もあるが、理論家たちのよく言えば百花綾乱、悪く言えば言いたい放題の無法地帯のこの分野に観測的示唆、しかも多くの理論モデルを否定しかねない示唆を投げかけることができたのはまさに観測研究の醍醐味といえよう。

5. 今後の課題

われわれは同じこの観測サンプルから、 $z=6.5$ の LAE の空間分布が非常に一様であることも結論した。より近い宇宙での LAE はどちらかというと、大規模構造をトレースしていたり、銀河団を形成していたりと、非一様な空間分布をもっているケースが多く見受けられている²⁾。 $z=6.5$ における LAE の一様な空間分布はこれと対比されるべきものである。ただし、コスミックバリアンスの不定性は依然として残されているので、さらに広視野での観測が待たれる。また、Ly α 輝線プロフィールについてもわれわれは調べてみたが、こちらは再電離期に特徴的なプロフィールモデルと銀河風が存在したときに特徴的なプロフィールモデルの区別ができなかった。これについても将来的にさらに大口径の望遠鏡で波長分解能を上げた分光観測が必要となるであろう。

今後の研究の行方としては、さらに分光サンプルの数を増やすことによって、果たして光度関数の暗い側でも LAE の数に有意な差異があるのかどうかを確かめ、この LAE という種族がこの時代に放った全光子数を見積もることによって宇宙再電離に対してどれだけの貢献をしたのか、宇宙ルネッサンスの立役者だったのは誰だったのかという大問題を突き止める必要がある。また、長波長における追観測によってこれら超遠方 LAE 種族の星質量を求めてやることは非常に重要かつ興味深い。さらに、言うまでもなく非常にチャレンジングな観測になるが、より遠方の LAE について数密度が評価できれば、時代をさかのぼるにつれて宇宙の中性化比率が徐々に大きくなっていく

様子を連続的に追うことができるかもしれない。

今回紹介した LAE の観測のみならず、すばるでは超遠方 γ 線バースト天体のスペクトル上に残された吸収プロファイルから中性化比率を決定しようというユニークな研究¹¹⁾も行われている。すばるがこの最遠方宇宙の分野で活躍する日々はまだ続く。最後に、ルネッサンス期のもう一人の巨匠ミケランジェロの言葉。「私は叡知に導かれて、石の中にひそむ芸術作品を取り出しているに過ぎない。」

謝 辞

この研究にあたっては共同研究者（紙面の関係上 18 名全員のお名前を記すことができないことをご容赦ください。）のみなさんの絶大な貢献なくしてはありえませんでした。また本研究のおおもととなった「すばるディープフィールド」の撮像データはすばる望遠鏡建設に携わったみなさんの観測時間を使って取得されたものです。この場を借りてお礼申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Fan X., Carilli C. L., Keating B., 2006, ARA&A 44, 415
- 2) 松田有一, 山田 亨, 林野友紀, 2004, 天文月報 97, 628; 嶋作一大, 大内正己, 2004, 天文月報 97, 646
- 3) この手法に先駆的に取り組んだのは, Malhotra S., Rhoads J. E., 2004, ApJ 617, L5
- 4) 公開データは, <http://soaps.naoj.org/sdf/>
- 5) 谷口義明, 2004, 天文月報 97, 621
- 6) Shimasaku, K., et al., 2006, PASJ 58, 313
- 7) Kashikawa, N., et al., 2006, ApJ, 648, 7
- 8) Bouwens R., et al., 2006, astro-ph/0509641
- 9) Page L., et al., 2006, astro-ph/0603450
- 10) 例えば Fan, X., et al., 2006, AJ 132, 117
- 11) Totani. T., et al., 2006, PASJ 58, 485

The Dawn of the Cosmic Renaissance Probed by Subaru

Nobunari KASHIKAWA

National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: The cosmic reionization is undoubtedly one of the major historical turning points of the early universe, though there are disputes over when and how the reionization has taken place, and what objects are responsible for it. We report here on our recent study to put an observational constraint on the reionization picture through the Subaru systematic survey of very distant galaxies at $z=6.5$.