

謎の天体ライマン α 輝線銀河のヴェールをはがす—階層的構造形成の枠組みにおける理論モデルの構築—



小林 正和

〈京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室（独）日本学術振興会特別研究員 DC2）

〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

e-mail: kobayasi@kusastro.kyoto-u.ac.jp

赤方偏移したライマン α 輝線をとらえる手法は、高赤方偏移銀河を効率よく探す手法として確立されてきた。検出されたライマン α 輝線銀河 (LAE) の数はこの10年で大きく増えてきたが、いまだに「LAEとは何か？」に対する答は出ていないのが現状である。本稿では、LAEの正体に迫るために筆者らが構築した理論モデルについて紹介する。

1. はじめに

生まれたての銀河はライマン α (Ly α ; 静止波長1,216 Å) 輝線で明るく輝いているだろう、という40年前の理論的予測¹⁾に基づき、実際にLy α 輝線銀河 (Lyman Alpha Emitter; LAE)²⁾ が観測されるようになって10余年。LAEは、ライマンブレイク銀河 (LBG)³⁾ と並んで、高赤方偏移銀河を効率的に探す手法で見つけられるために、中・大口径望遠鏡によるサーベイ観測が盛んに行われ、多くのLAEサンプルが検出されてきた⁴⁾⁷⁾。しかし、LAEは連続光が非常に暗いため、銀河を特徴づける星質量や重元素量、属するダークハローの質量などにはほとんど制限が得られていない。「LAEとは一体どんな銀河か？」という問いは、発見から十余年が経過した今もなお、確定した答は得られていない。

こんなときこそ理論家の出番のはずである。現在標準的とされている階層的構造形成理論の枠組みで、LAE理論モデルを構築し、既存の観測データを再現できるかどうかを検証することが重要と

なる。しかし、階層的構造形成理論に基づいたLAE理論モデルは、これまでダーラム大学のグループによるもののみだった^{8),9)}。LAE理論モデル構築の際に最も重要な要素である、「銀河内で作られたLy α が、銀河外にどれだけ逃げ出すか (Ly α 離脱率)」を適切に評価するのが困難だからだ。ダーラム大学のモデルでは、「どの赤方偏移におけるどんな銀河からも、Ly α 離脱率は一定」と仮定することで、この困難さを回避した。だが、この仮定は、物理的に単純化しすぎている。Ly α が水素の共鳴線の一つであることから理論的に予測される性質も、近傍の星形成銀河が見せるLy α 輝線のさまざまな特徴（これらは2章で詳しく述べる）も、全く考慮されていないからだ。

近年では、Ly α 輝線が銀河間物質 (IGM) の中性水素によって減光される効果を用いて、宇宙の再電離過程を探る研究も行われている¹⁰⁾。すなわち、LAEを理解することは、銀河の形成・進化のみならず、宇宙の構造形成史の観点でも非常に重要なのである。本稿では、筆者らが考案したLy α 離脱率の現象論的モデルと、それを組み込んで構

築した新しい LAE 理論モデルについて紹介する。

2. Ly α 光子の性質

Ly α は、水素の基底準位と一つ上の準位との間の遷移によって放射・吸収される共鳴線である。そのため、吸収・散乱断面積は非常に大きく ($\sim 10^{-14} \text{ cm}^2$)、星間空間中の中性水素に多数回共鳴散乱を受けて、酔っ払いのようにジグザグに進む。銀河から外に逃げ出すまでに、銀河のサイズよりもずっと長い距離を進むことになる。また、Ly α は紫外光のため、ダストによって吸収されやすい。共鳴散乱の結果ジグザグに進んでいく Ly α は、まっすぐ進んでいく連続光に比べて星間空間ダストによる吸収を大きく受けることになる¹¹⁾。

これだけで済めば話は単純なのだが、Ly α 離脱率の評価が実際はもっと厄介であるということ、二つの状況を考えることで紹介しよう。第一に、ダストが分子雲のようなガスの中だけに分布しており、ガス塊間の星間空間にはほとんど存在しない状況、そして第二に、銀河スケールでアウトフローが吹いている(銀河風)状況である。第一の状況下では、Ly α は共鳴散乱によって分子雲表面で反射されるため、分子雲内部にあるダストの吸収を受けない。一方、連続光は分子雲の中を突っ切っていくため、ダストの吸収を強く受ける。すなわち、このような状況では、Ly α は連続光よりも吸収が弱くなる^{12), 13)}。第二の状況下では、Ly α 放射領域(H II 領域)と、共鳴散乱を起こす中性水素ガスとの間には、大きな相対速度($\sim 1,000 \text{ km/s}$)が生じる。そのため、そもそも共鳴散乱が起こりにくくなり、ダストが存在していてもそれほど吸収を受けずに Ly α は離脱できることが期待できる¹³⁾。

これらの性質から言えることは、Ly α 離脱率を正確に評価するためには、各銀河において、星間物質の密度分布や速度場、ダストの量と分布を正

確に再現し、その中の Ly α 光子の輸送問題を解くことが必要である、ということだ。しかし、それには莫大な時間がかかってしまう。そのため、これまでの LAE 理論モデルでは、Ly α 離脱率を単純に一定としたものしかなかったのである。

この問題を解決するためのヒントが、近傍の星形成銀河の観測にあった。前述した Ly α 光子の性質からの理論的予測は、近傍の星形成銀河の観測からの示唆と一致しているのだ。すなわち、重元素量(ダスト量とよい相関を示す)が少ない銀河や、銀河風が吹いている銀河ほど、Ly α が逃げ出しやすいという傾向が示唆されていた¹⁴⁾⁻¹⁶⁾。さらに、高赤方偏移の LBG のうち Ly α 輝線を放つものからも、同じ傾向が示唆されている¹⁷⁾⁻¹⁹⁾。これら観測結果や理論的考察から言えることは、一定な Ly α 離脱率は明らかに単純化しすぎであり、より現実的な Ly α 離脱率を与えた LAE 理論モデルを構築する価値は非常に高い、ということである。

3. Ly α 離脱率に対する現象論的モデルと LAE 理論モデル

ここで、Ly α 離脱率の現象論的モデルを紹介する前に、新しい LAE 理論モデルの基盤となる、階層的構造形成に基づいた銀河形成の準解析的モデルを簡単に紹介する。

準解析銀河形成モデルは、銀河形成の理論と N 体シミュレーションの結果を組み込んだモデルである^{20), 21)}。銀河は、暗黒物質の塊(ダークハロー)と、星やその元となるガスからできている。ダークハローの集積・合体史は N 体シミュレーションの結果を再現する解析的な関数が得られているため、それを元に解く。一方で、ガスに関する星形成などの解明されていない物理過程に対しては、簡単にモデル化して取り入れている。この星形成などの現象論的モデルには、いくつかのフリーパラメーターが含まれているが、この値は、

近傍銀河の光度関数や質量光度比を再現するように選ばれる*1。

準解析的銀河形成モデルからは、任意の赤方偏移における銀河の星形成史、光度、重元素量などの性質が、スーパーコンピューターを用いることなく、通常の性能の計算機で計算できる。そのため、LAEのように、対応天体が明確でない天体の性質を探るには、まさにうってつけの銀河形成モデルであろう。実際、1章で触れたダーラム大学のグループによる先行研究^{8),9)}でも、この準解析的銀河形成モデルの一つが用いられていた。

われわれは、最新の準解析的銀河形成モデルの一つ、「三鷹モデル」²²⁾を用いた*2。このモデルは近傍銀河の種々の観測量を再現するだけでなく、 $z=4,5$ のLBGのUV光度関数および角度相関関数ともよい一致を示す²³⁾。近傍銀河の観測データを再現するためにすでに選ばれていた三鷹モデルのフリーパラメーターの値は全く変えずに、新たに導入した $\text{Ly}\alpha$ 離脱率における二つのフリーパラメーターのみで、いくつかの赤方偏移におけるLAEの $\text{Ly}\alpha$ 光度関数の観測データとの比較を行った。

さて、 $\text{Ly}\alpha$ 離脱率に話を戻そう。前章で紹介した $\text{Ly}\alpha$ の性質から、 $\text{Ly}\alpha$ 離脱率に組み込むべき効果は、以下の二つである。

- ダスト量が多い銀河ほど $\text{Ly}\alpha$ は離脱しにくい。
- 銀河風が吹いている状態の銀河からは、ダスト量に関係なく $\text{Ly}\alpha$ は離脱する。

ダストの効果を組み込む際には、ダスト量だけでなく、星間空間でのダスト分布も考慮しなければならない。同じダスト量でも、分布の仕方によって、吸収の度合いが異なるからだ。そこで、離脱率の解析解が得られている分布で、互いに両極端なスクリーン状と、スラブ状の分布の二つを考えた(図1)。スクリーン状の分布では、 $\text{Ly}\alpha$ は銀河外に離脱する際に必ずダスト吸収体の領域を通るが、スラブ状の分布では、表面に近いHII領域からは吸収を受けずに離脱できる。結果として、同じダスト量の状況下では、スラブ状の分布の方が離脱しやすい。各銀河のダスト量は、三鷹モデルから計算される値を用いた。

一方、銀河風の効果は取り入れるのが、やや複雑である。銀河風がどのような状況で吹くかを判断するのが難しいからである。われわれは、三鷹モデルで得られていた星形成効率*3を用いて、これを評価した。星形成効率は、ダークハローの質量の関数となっており*4、超新星爆発による星間ガスへのフィードバックの強さは質量の軽い銀河(=ダークハローの質量小)ほど強くなっている。この星形成効率を用いて、星形成の始まりから、銀河風が吹くまでの時間 t_{wind} を評価した。重い銀河ほど銀河風が吹くまでに時間がかかることになり、爆発的星形成銀河における銀河風に対する古典的な描像と一致する²⁴⁾。また、アウトフローが吹き始めてからガスが吹き飛んでしまうまでの時間 t_{esc} は、銀河のサイズとダークハローの回転速度から評価した。この t_{wind} 、 t_{esc} と、三鷹モデルか

*1 フリーパラメーターの数が多いため、「準解析的銀河形成モデルには物理がない」と言われることもしばしばである。個人的な見解になるが、解明されていない物理に対して現象論的モデルを導入し、既存の観測データを解釈しようとする準解析的銀河形成モデルのアプローチ自体は、「物の理を明らかにする」という意味で、立派に物理であると考えている。

*2 正確には、文献22の三鷹モデルから、わずかにアップデートされたモデルを用いている。

*3 ある時間内に、星の材料となるガスの何割を実際に星形成に使うか、を表す効率のこと。超新星爆発など、ガスを暖める効果をもたらす現象を考慮すると、星形成効率は下がる。

*4 実際には、銀河がダークハローの中心銀河とみなされていたときの、ダークハローの回転速度の関数である。サテライト銀河の場合、現在属しているダークハローの回転速度ではなく、過去に中心銀河だったときのダークハローの回転速度を用いて、星形成効率は評価される。

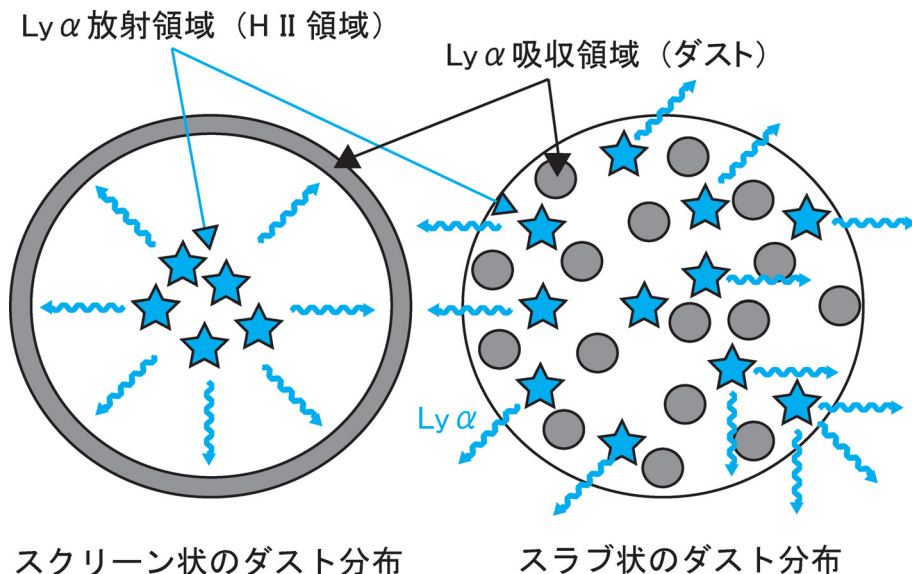


図1 Ly α 離脱率のダストモデルにおけるダスト分布の模式図. 放射領域を吸収領域がスクリーン状に取り囲むスクリーンダストモデルに対し、スラブダストモデルでは、これらが銀河全体に一様に分布する.

ら得られる星形成の始まりからの経過時間 t との大きさを比較することによって、アウトフローが吹いている段階および、その前後の段階の銀河を判別できる。Ly α 離脱率は、アウトフローの前段階にある銀河ではスクリーン状のダスト分布を仮定して評価し、アウトフロー段階にある銀河では、ダスト量にかかわらず一定とした。また、アウトフローが吹き終わった銀河では、中性水素ガスがなく、例え大質量星があったとしても、水素電離光子が星間空間で吸収されないため、Ly α は作れないと仮定した。

これら Ly α 離脱率の現象論的モデルでは、それぞれ二つのフリーパラメーターによって、Ly α 離脱率の値が決定される。一つは、重元素量が 0 の極限の銀河から Ly α が離脱する割合を決定する。残る一つは、Ly α に対するダスト吸収の強さを決めるパラメーターである。三鷹モデルでは、連続光に対するダストの吸収強度を決めるパラ

メーターがあるが、2章で触れたように、Ly α は連続光とはダスト吸収強度が異なる可能性がある。そのため、あえて三鷹モデルのパラメーターを用いずに、新たにフリーパラメーターを設定することにした。

これら二つのフリーパラメーターの値は、現段階において最も信頼度が高いと思われた、すばるディープフィールドにおける $z=5.7$ LAE サンプル⁷⁾ の Ly α 光度関数^{*5} との χ^2 検定を行い、観測データを最もよく再現できる値を採用した。こうして得られたパラメーターの値は、Ly α の物理的性質を反映したものであると考えられるため、赤方偏移に対して変化しない一定の値とした。すなわち、いくつかの赤方偏移における数々の LAE Ly α 光度関数^{*6} の観測データに対して、フリーパラメーターの値はたかだか二つである。

*5 サーベイ領域の広さ、サンプル数の多さ、狭帯域フィルターの透過曲線による選択効果を他の LAE 論文と異なり詳細に評価している点が、信頼度が高いと判断した理由である。

*6 以下では、Ly α 光度関数を指して、単に「光度関数」と呼ぶ。

4. LAE 光度関数の観測データとの比較

4.1 $z < 6$ LAE の光度関数

図2がわれわれの理論モデルから得られた $z < 6$ の LAE 光度関数の計算結果である*7。上から順に、 $z=3.6, 4.5, 5.7$ の光度関数であり、各パネル中には既存の LAE 観測データをプロットしてある。比較のために、先行研究同様、 $\text{Ly}\alpha$ 離脱率一定のモデルからの結果（点線）も載せた*8。どの赤方偏移においても、 $\text{Ly}\alpha$ 離脱率一定のモデルは、光度関数の明るい側をかなり過大評価していることがわかる。詳しい解析の結果、これら $\text{Ly}\alpha$ で非常に明るい銀河は、ガスやダストを非常に多くもった銀河であることがわかった。そのため、ダストによる減光の効果を考慮したダストモデルやアウトフロー+ダストモデルでは、これらの銀河からの寄与が消え、観測データとより合うようになることが期待される。

実際、ダストモデル（スクリーン：黒実線，スラブ：破線）やアウトフロー+ダストモデル（青太線）では、明るい LAE の個数密度が減少したのを見て取れる。しかし、ダストモデルでは、この星間ダストによる減光の効果が強すぎ、明るい側で観測データよりも急激に LAE 個数密度が減少してしまう。一方、アウトフロー+ダストモデルでは、アウトフロー段階にある銀河からの寄与（青細線）によって、全光度範囲にわたって観測結果をよく再現できた。

また、アウトフロー+ダストモデルにおける $\text{Ly}\alpha$ で明るい銀河は、銀河風が吹く、 $\text{Ly}\alpha$ 離脱率がほぼ 1 に近いような銀河であると予言された。これらは最近の観測的な示唆²⁵⁾とも一致してお

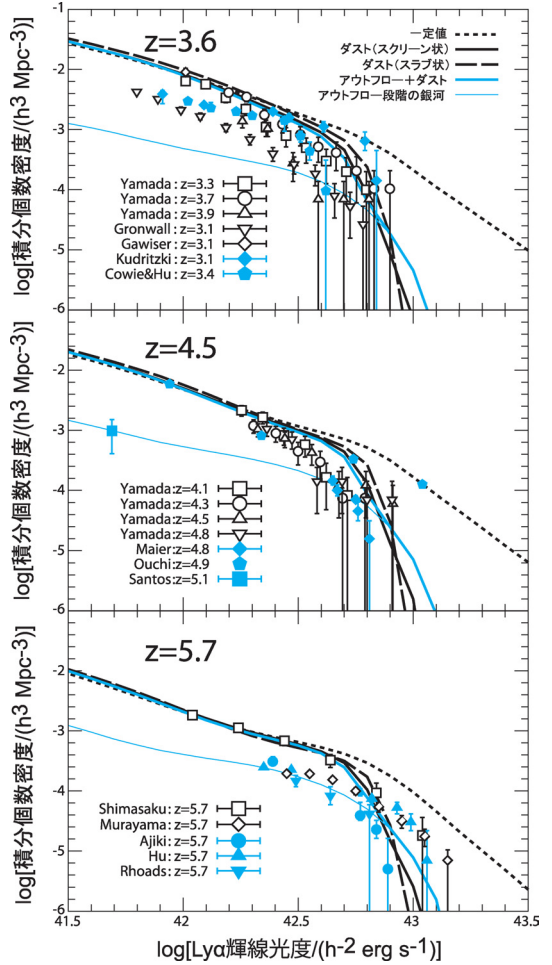


図2 $z < 6$ の LAE 光度関数（縦軸は $\text{Ly}\alpha$ で明るい側からの積分個数密度）の観測データとの比較。上から順に、 $z=3.6, 4.5, 5.7$ 。データ点+エラーバーが観測データ（青色が先行研究で比較されていたもの、白色はそれ以降に出版された新しい観測データ）、各線は図中に記してある $\text{Ly}\alpha$ 離脱率のモデルからの計算結果である。

*7 ここでは $\text{Ly}\alpha$ に対する IGM の透過度 100% を仮定している。すなわち、銀河から離脱した $\text{Ly}\alpha$ は、途中の IGM で吸収を受けることなく、すべて観測者のもとに到達する、と考えた。 $z < 6$ の IGM は完全に電離しているため、この仮定はよい近似で成り立つと考えられる。

*8 ただし、これもまた三鷹モデルをベースとした結果であり、別の準解析的銀河形成モデルを用いた先行研究^{8), 9)}の結果とは、厳密には異なる。

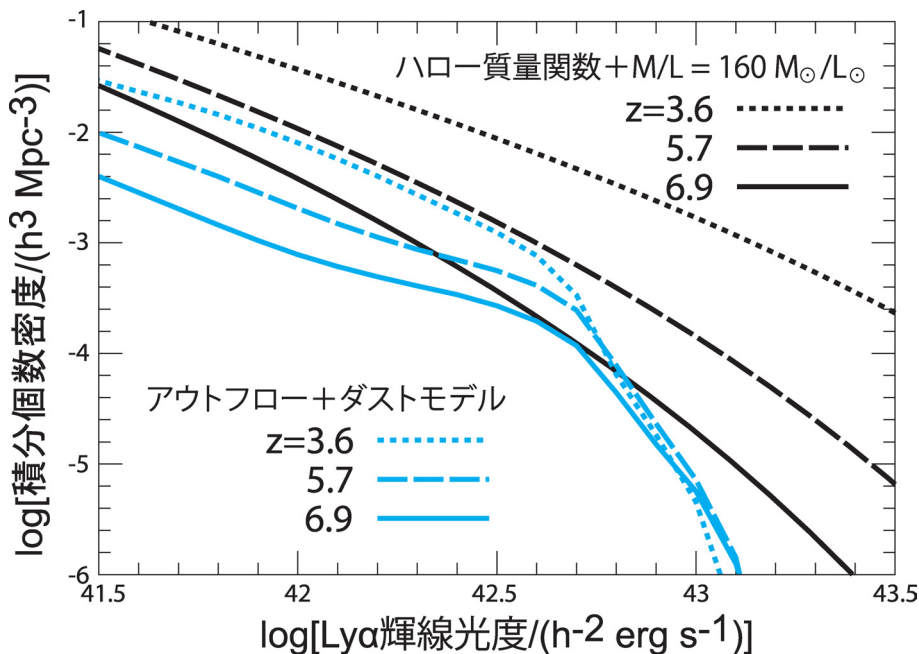


図3 光度関数の赤方偏移に対する進化の予言. 青線がアウトフロー+ダストモデルからの結果であり, 黒線はダークハロー質量関数に, 単純に一定のダークハロー質量・Ly α 光度比を仮定して得られた結果である. それぞれ点線, 破線, 実線が $z = 3.6, 5.7, 6.9$ の光度関数である.

り, 先行研究^{8), 9)}では再現できなかった結果である点を強調したい^{*9}.

4.2 LAE 光度関数の赤方偏移進化

図3は, アウトフロー+ダストモデルから予言される LAE 光度関数の赤方偏移進化 (青線) を描いたものである. 筆者らのモデルからは, ダークハロー質量関数の進化 (黒線) に比べて, 光度関数の明るい側がほとんど進化しない結果が得られた. これもまた, 観測からの示唆と一致する結果である.

各銀河で生成される Ly α 光度の数は, 大まかには銀河の質量に比例する. そのため, 先行研究のような一定の Ly α 離脱率では, 光度関数の無進化は再現できなかった. 一方, 図2で見た結果からわかるように, アウトロー+ダストモデルで

は, ある質量よりも重い銀河は, 多量ダストによる減光と銀河風を妨げる深い重力ポテンシャルの効果によって, LAE となることはできない. すなわち, 階層的構造形成の結果, 赤方偏移が小さくなるにつれて質量の大きな銀河は増えていくが, Ly α 離脱率の効果で, 赤方偏移に関わらずほぼ同じ質量の銀河が光度関数の明るい側を占めることになる. この理論的解釈の成否は, 近い将来の観測によって明らかにされるだろう.

4.3 $z > 6$ LAE の光度関数

図4の一番上のパネルが, すばるディープフィールドにおける $z = 6.56$ LAE 光度関数の観測データ²⁶⁾と, 筆者らのモデルの計算結果とを比較した図である. □が測光サンプルから得られた光度関数で, ○は分光サンプルから得られたもの

*9) どの赤方偏移の, どんな銀河からも Ly α 離脱率一定値とした先行研究では, 観測結果を再現する Ly α 離脱率は 0.02 と, 1 よりも非常に小さい値であった.

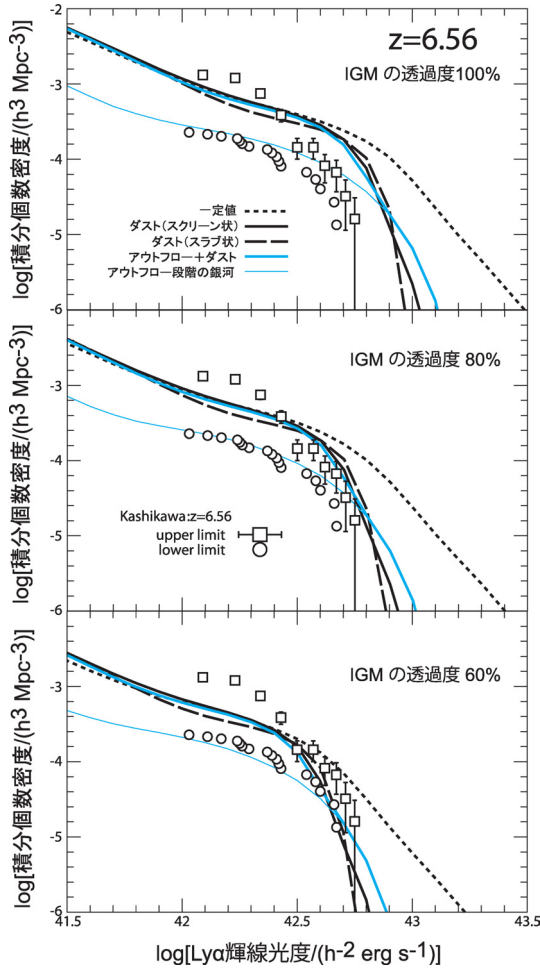


図4 $z = 6.56$ の LAE 光度関数の観測データとの比較。上から順に、 $\text{Ly}\alpha$ に対する IGM の透過度が 100%, 80%, 60% だった場合の光度関数の計算結果が示してある。

である。つまり、それぞれ光度関数の上限値、下限値と考えられる。この観測から得られた制限に対し、どの $\text{Ly}\alpha$ 離脱率のモデルも、 $\text{Ly}\alpha$ で明るい側で、かなり数を過大評価してしまっている。

しかし、この観測結果に対する過大評価も、自然な解釈を加えることによって解決できる。われわれの宇宙は誕生後約 40 万年で中性化したのが、現在の宇宙の IGM は完全に電離していることが

知られている²⁷⁾。つまり、現在に至るまでに IGM は再度電離されたことになる。これは、宇宙の再電離と呼ばれる現象である¹⁰⁾。いつ、何が、どのように再電離を引き起こしたか、全くわかっておらず、宇宙の構造形成史における最大の謎の一つである。これまでの、クエーサー (QSO) の吸収線系やガンマ線バースト (GRB) の残光などの観測によって、赤方偏移 6 を超える初期宇宙では、再電離が完了しておらず、IGM がまだある程度中性であるという観測結果が得られている^{27), 28)}。 $\text{Ly}\alpha$ は中性な IGM 中を通る際に減光されるため、赤方偏移 6 を超える LAE から放射された $\text{Ly}\alpha$ 輝線の IGM 透過率は、100% よりも小さくなるのが自然に期待される。図 4 の上のパネルは、 $z < 6$ での仮定と同様、 $\text{Ly}\alpha$ が 100% IGM を透過する場合であり、中央・下はそれぞれ 80%, 60% が透過する場合である*¹⁰⁾。IGM の透過度を $z < 6$ の透過度よりも下げることで、われわれのモデルは $z > 6$ の観測結果も再現できることがわかった。この結果の再電離史に対する示唆は次章で述べる。

5. 宇宙再電離への示唆

筆者らが構築した新しい LAE 理論モデルでは、 $\text{Ly}\alpha$ 離脱率を決定するたかだか二つのフリーパラメーターを導入することで、 $z < 6$ の LAE 光度関数を再現することができた。ここでは、IGM の $\text{Ly}\alpha$ に対する透過度を 100% と仮定していた。しかし、 $z > 6$ の LAE に対しては、観測結果を再現するためには、 $\text{Ly}\alpha$ に対する IGM の透過度が 100% より小さいことが必要となる。このことは、 $z \sim 6$ を境にして、 $\text{Ly}\alpha$ に対する IGM の透明度が急激に変化したことを示唆している。すなわち、IGM の中性度 (=IGM の水素の中性度, x_{HI}) が $z > 6$ で急激に上がっていることを示唆している。これは QSO の吸収線系²⁷⁾や GRB 残光²⁸⁾の観測

*¹⁰⁾ ここでは単純に、 $\text{Ly}\alpha$ 光度に依存しない IGM 透過度を仮定した。

結果と、定性的に一致する。

$z=6.56$ の LAE の観測結果と筆者らの理論モデルとの比較から、 $z=6.56$ における IGM 透過度が評価できる。この IGM 透過度からは、モデルによる不定性は大きい^{*11}が、LAE 周りの x_{HI} を評価することができる。 x_{HI} を具体的に評価することで、宇宙の再電離がどのように進んでいったかについて、貴重なデータを得ることができる。ここでは、Santos²⁹⁾ の IGM モデルを例にとり、 x_{HI} を評価する。彼のモデルに基づく、IGM 透過度 60–80% は $x_{\text{HI}}=0.25\text{--}0.35$ に対応する。この結果は、先に挙げた QSO 吸収線系からの結果 ($x_{\text{HI}} > 10^{-3}$) および GRB050904 の残光の分光観測の結果 ($x_{\text{HI}} < 0.6$) と、定量的に一致する。

筆者らの LAE 理論モデルが、 $z < 6$ で非常によく観測結果を再現していたものの、 $z > 6$ では過大評価になるという結果は、 $z \sim 6$ で IGM の中性度が大きく変わって、ほぼ 1 のオーダーになるという積極的な証拠となっている。このような積極的な証拠が得られたのは、階層的構造形成の枠組みで構築された理論モデルでは初であることを強調したい。

6. まとめと今後の課題

筆者らは、星間空間ダストによる吸収や、銀河スケールアウトフローの効果を取り入れた $\text{Ly}\alpha$ 離脱率の現象論的モデルを考案し、これを階層的構造形成理論に基づいた銀河形成の準解析的モデル（三鷹モデル）と組み合わせることで、新しい LAE 理論モデルを構築した。これらの $\text{Ly}\alpha$ 離脱率に対する効果を取り入れるため、二つの新しいパラメーターを導入したのみで、近傍銀河の観測量を再現するように選ばれた三鷹モデルのパラメーター値は変えなかった。

この理論モデルは、 $z < 6$ の LAE 光度関数の観

測データを、IGM が完全電離している（= $\text{Ly}\alpha$ に対する透過度 100%）という仮定の下で非常によく再現した。特に、観測から示唆されている、 $z \sim 3\text{--}6$ における LAE 光度関数の無進化を自然に再現できた。LAE 光度関数の明るい側は、銀河風を伴う爆発的星形成銀河で占められており、このような銀河における $\text{Ly}\alpha$ 離脱率はほぼ 1 となる。これらの傾向は、近年得られてきた観測からの示唆と一致し、先行研究では再現できなかった結果である。

一方で、 $z > 6$ の LAE 光度関数は観測データに対して過大評価する結果となり、観測データを再現するためには、IGM における $\text{Ly}\alpha$ の減光の効果を考慮するのが最も自然であった。観測データを再現する IGM 透過度は、60–80% と評価された。この結果から IGM 中性度を評価するのは非常に困難だが、 $z \sim 6$ で $\text{Ly}\alpha$ に対する IGM 透過度が急激に変化する、すなわち、 $z < 6$ では $x_{\text{HI}} \ll 1$ であったが、 $z > 6$ で急激に $x_{\text{HI}} \sim 1$ になることが強く示唆された。この結果は、QSO 吸収線系や GRB 残光の結果とも一致する。

筆者らの考案した LAE 光度関数に関する新しい理論モデルは、LAE サーベイ計画の立案や、より高赤方偏移の LAE 光度関数の観測データを解釈する際の手助けとなるだろう。

本稿で紹介した筆者らの研究では、LAE の観測量のうち、 $\text{Ly}\alpha$ 光度関数との比較を行った。LAE にはほかに、UV 光度関数や角度相関関数などの観測量がある。今後、それらとの比較を行い、モデルの信頼性を吟味したうえで、いまだ謎とされている、「LAE とは一体どんな銀河か？」に対する答を探っていく研究を、継続して行っていく予定である。

^{*11} 主な不定性としては、銀河の赤方偏移に対する $\text{Ly}\alpha$ 輝線の中心波長のずれ、 $\text{Ly}\alpha$ 輝線幅、銀河周りの IGM の運動・電離状態などである²⁹⁾。

謝 辞

本稿は、京大の戸谷友則准教授と、長崎大の長島雅裕准教授との共同研究³⁰⁾をもとにしています。また、京都大学の太田耕司教授や、松田有一さん、安東正隆さんには、本研究を進めるうえで有益なコメントをいただきました。この場を借りて、お礼申し上げます。本研究は、日本学術振興会の援助を受けています。最後に、本稿を執筆する機会を与えていただいた戸谷友則氏に感謝いたします。

参考文献

- 1) Partridge R. B., Peebles P. J. E., 1967, ApJ 147, 868
- 2) 谷口義明, 2004, 天文月報 97, 621; 嶋作一大, 大内正己, 2004, 天文月報 97, 646
- 3) 岩田 生, 太田耕司, 2004, 天文月報 97, 635
- 4) Cowie L. L., Hu E. M., 1998, AJ 115, 1319
- 5) Rhoads J. E., et al., 2003, AJ 125, 1006
- 6) Taniguchi Y., et al., 2005, PASJ 57, 165
- 7) Shimasaku K., et al., 2006, PASJ 58, 313
- 8) Le Delliou M., et al., 2005, MNRAS 357, L11
- 9) Le Delliou M., et al., 2006, MNRAS 365, 712
- 10) 柏川伸成, 2006, 天文月報 99, 562
- 11) Neufeld D. A., 1990, ApJ 350, 216
- 12) Neufeld D. A., 1991, ApJ 370, L85
- 13) Hansen M., Oh S. P., 2006, MNRAS 367, 979
- 14) Charlot S., Fall S. M., 1993, ApJ 415, 580
- 15) Kunth D., et al., 1998, A&A 334, 11
- 16) Mas-Hesse J. M., et al., 2003, ApJ 598, 858
- 17) Shapley A. E., et al., 2003, ApJ 588, 65
- 18) Frye B. L., et al., 2007, ApJ 665, 921
- 19) Tapken C., et al., 2007, A&A 467, 63

- 20) 郷田直輝, 2000, 天文月報 93, 60
- 21) 長島雅裕, 2002, 天文月報 95, 211
- 22) Nagashima M., Yoshii Y., 2004, ApJ 610, 23
- 23) Kashikawa N., et al., 2006, ApJ 637, 631
- 24) Arimoto N., Yoshii Y., 1987, A&A 173, 23
- 25) Gawiser E., et al., 2006, ApJ 642, L13
- 26) Kashikawa N., et al., 2006, ApJ 648, 7
- 27) Fan X., et al., 2006, ARA&A 44, 415
- 28) Totani T., et al., 2006, PASJ 58, 485
- 29) Santos M. R., 2004, MNRAS 349, 1137
- 30) Kobayashi A. R. M., Totani T., Nagashima M., 2007, ApJ, 670, 919

Unveiling the Physical Properties of Lyman Alpha Emitters-Constructing a Theoretical Model in the Hierarchically Clustering Galaxy Formation

Masakazu KOBAYASHI

Department of Astronomy, Kyoto University (JSPS Fellowship DC2), Kitashirakawa-Oiwake-cho, Sakyo-ku, Kyoto 606-8502, Japan

Abstract: Detecting redshifted Lyman α emissions is a promising way to seek for high- z galaxies nowadays. While the number of Lyman α emitting galaxies (LAEs) has been increasing over the past decade, the question of what type of galaxies is observed as the LAEs remains open. We report here a theoretical model for the LAE constructed by us to unveil its physical properties.