

論文の内容の要旨

Galaxy Evolution and Cosmic Reionization History Studied by Subaru Lyman α Emitter Surveys

(すばる望遠鏡ライマンアルファ輝線天体探査による
銀河進化と宇宙再電離史の研究)

氏名 今野 彰

ライマンアルファ輝線天体(LAE)のライマンアルファ光度関数(Ly α LF)は、銀河進化と宇宙再電離を調べる一つの指標である。LAEは、幅広い赤方偏移(z)範囲で見られる、Ly α 輝線を放射する天体である。Ly α LFはあるLy α 光度をもった銀河の個数密度の関数であり、典型的なLy α 光度 L^* と個数密度 ϕ^* 、暗い側での傾き α の3つをパラメータとするシェヒター関数でフィッティングされる。これまでの研究では、 $z \sim 0-8$ でのLy α LFの形や進化を基に、LAEの性質や銀河進化、宇宙再電離について調べられてきたが、その詳細は明確には理解されていなかった。例えば、何の仮定も置かずにLy α LFの暗い側の傾き α を決定した過去の研究は無く、またLy α LFの明るい側でもLAEの存在量は高い精度で調べられていない。Ly α LFの進化についても、 $z=2-3$ において進化があるかどうか結論づけられてなく、これはLAEの星間物質(ISM)の物理状態の進化とも関係する。さらに宇宙再電離期である $z > 6$ では、銀河間物質(IGM)中の中性水素がもたらすLy α 減衰翼吸収の影響を受けることから、Ly α LFの進化はIGMの中性水素割合 $x(\text{HI})$ の推定にも用いられる。しかし $z > 6$ でのLy α LFは高い精度で求められていないため、宇宙再電離史に強い制限を与えるまでには至っていない。これらの問題を解決するには、幅広いLy α 光度に渡ってLAEを多数検出する必要がある。

そこで我々は、広領域深撮像データを用いることで、 $z=2.2$ と5.7、6.6、7.3のLAEを多数検出し、これらの赤方偏移でのLy α LFを高い精度で求めた。 $z=2.2$ と7.3のLAEは、我々が独自に開発した狭帯域フィルターNB387とNB101を用いて、すばる望遠鏡Suprime-Camで ~ 1 平方度の天域を観測する

ことで同定された。同様に $z=5.7$ と 6.6 の LAE は、狭帯域フィルター NB816 と NB921 を搭載したすばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam(HSC) による、 $\sim 10\text{-}20$ 平方度の広領域撮像データから検出された。これらの狭帯域撮像データを用いることで、我々は $z=2.2$ と 5.7 、 6.6 、 7.3 LAE をそれぞれ 3137、1081、1273、7 天体検出した。これらの LAE サンプルは過去の研究より数から数百倍ほど大きく、 $\text{Ly}\alpha$ 光度範囲も $\log L(\text{Ly}\alpha)$ [erg s^{-1}] $\sim 42\text{-}44$ と幅広い。これらの大規模かつ幅広い $\text{Ly}\alpha$ 光度範囲をもつ LAE サンプルを用いて $\text{Ly}\alpha$ LF を求めることで、我々は銀河進化と宇宙再電離について詳細に調べることができた。

まず銀河進化については以下の結果が得られた。 $z=2.2$ $\text{Ly}\alpha$ LF を何の仮定も置かずにシェヒター関数でフィットすることで、 $L^*=5.29(+1.67)(-1.13)\times 10^{42}$ erg s^{-1} 、 $\phi^*=6.32(+3.08)(-2.31)\times 10^{-4}$ Mpc^{-3} 、 $\alpha=-1.75(+0.10)(-0.09)$ が得られ、この α の値から $\text{Ly}\alpha$ LF の暗い側の傾きは急であることが分かった。さらに $\text{Ly}\alpha$ LF の明るい側では、このシェヒター関数からの有意な個数密度超過が見られた。これを形作っている LAE は X 線や電波を含む多波長データで検出されていることから、個数密度超過は AGN によるものだと分かった。さらにこの個数密度超過を引き起こしている LAE について紫外線連続光の光度関数(UV LF)を求めたところ、過去の研究の AGN UV LF と暗い側で一致した。このことから $\text{Ly}\alpha$ で明るい LAE は UV で暗い AGN であることが分かった。我々の $z=2.2$ $\text{Ly}\alpha$ LF から、 $z=2\text{-}3$ で $\text{Ly}\alpha$ LF は有意に進化していると結論づけられた。これより $\text{Ly}\alpha$ LF は、 $z=0\text{-}3$ で急激に増加し、 $z=3\text{-}6$ でほぼ無進化であることが確かめられた。この $\text{Ly}\alpha$ LF の進化は UV LF のそれとは大きく異なる。この物理的メカニズムを探るため、 $\text{Ly}\alpha$ と UV LF を基に $\text{Ly}\alpha$ 脱出率を計算した。その結果、 $\text{Ly}\alpha$ 脱出率は $z=0$ から 6 にかけて 2 桁程度大きく増加していることが確認できた。この大きな進化は銀河種族やアウトフローでは説明できない。我々の膨張シェルモデルによると、この $\text{Ly}\alpha$ 脱出率の進化を説明するためには、ダストを含んだ ISM 中の中性水素柱密度が $z=0$ から 6 にかけて $N(\text{HI})=7\times 10^{19}$ から 1×10^{18} cm^{-2} まで減少する必要があることが示唆された。すなわち、 $z=0\text{-}6$ での $\text{Ly}\alpha$ 脱出率の進化は、ISM 中の中性水素による $\text{Ly}\alpha$ 光子の共鳴散乱効果を考慮に入れたダスト吸収で説明できる可能性があることが分かった。

次に宇宙再電離については以下の結果が得られた。HSC を基に得られた $z=5.7$ と 6.6 の $\text{Ly}\alpha$ LF をシェヒター関数でフィットした。このとき暗い側の傾きは、上で得られた $z=2.2$ の結果である $\alpha=-1.8$ に固定した。その結果 $z=5.7$ で $L^*=8.92(+0.99)(-0.89)\times 10^{42}$ erg s^{-1} 、 $\phi^*=2.21(+0.68)(-0.50)\times 10^{-4}$ Mpc^{-3} 、 $z=6.6$ で $L^*=6.42(+0.74)(-0.59)\times 10^{42}$ erg s^{-1} 、 $\phi^*=2.51(+0.83)(-0.68)\times 10^{-4}$

Mpc^{-3} が得られた。このシェヒター関数と $\text{Ly}\alpha$ LF を比べたところ、 $z=5.7$ ではよく一致しているのに対し、 $z=6.6$ では明るい側でシェヒター関数からの有意な個数密度超過が見られた。この原因として2つの可能性が考えられる。1つ目がAGNの存在である。実際に、個数密度超過を形作っている明るいLAEをAGNとみなし、そのUV LFを計算したところ、過去の研究による $z\sim 6$ でのAGN UV LFと一致していることが分かった。2つ目が、明るいLAE周りに巨大電離バブルが形成されている可能性である。理論モデルを用いることで、明るいLAEの周りで30 Mpcより大きな電離バブルが形成されれば、個数密度超過を引き起こす可能性を示した。これらの2つの可能性によって $z=6.6$ で $\text{Ly}\alpha$ LFの明るい側で個数密度の超過が引き起こされたと考えられる。同様に我々の $z=7.3$ $\text{Ly}\alpha$ LFをシェヒター関数でフィットしたところ、 $L^*=3.23(+25.0)(-1.63)\times 10^{42}$ erg s $^{-1}$, $\phi^*=1.97(+12.3)(-1.89)\times 10^{-4}$ Mpc^{-3} が得られた。また $\text{Ly}\alpha$ LFは $z=5.7-6.6$ と $z=6.6-7.3$ で有意に減少していることが確認できたが、これらの減少量を比較すると、 $z=5.7-6.6$ での減少量より $z=6.6-7.3$ でのそのの方が大きいことが分かった。これはすなわち $z\sim 7$ で $\text{Ly}\alpha$ LFが加速的に進化していることを意味する。この $\text{Ly}\alpha$ LFの急激な減少が宇宙再電離で説明できるかを調べるため、 $z=6.6$ と 7.3 での $x(\text{HI})$ を推定した。単純な理論モデルを利用することで我々は $z=6.6$ で $x(\text{HI})=0.0-0.3$, $z=7.3$ で $x(\text{HI})=0.3-0.8$ という値が得られた。この $x(\text{HI})$ の進化は、宇宙背景放射観測衛星 *Planck* の最新のデータから得られたトムソン散乱光学的厚みの値を説明できることが分かった。このことから $z\sim 7$ での $\text{Ly}\alpha$ LFの加速的進化は $x(\text{HI})$ の急激な増加で説明できる可能性が示された。