

論文の内容の要旨

Outflows in Distant Star Forming Galaxies Probed by Lyman Alpha Spectra

(Ly α スペクトルで探る遠方星形成銀河のアウトフロー)

橋本 拓也

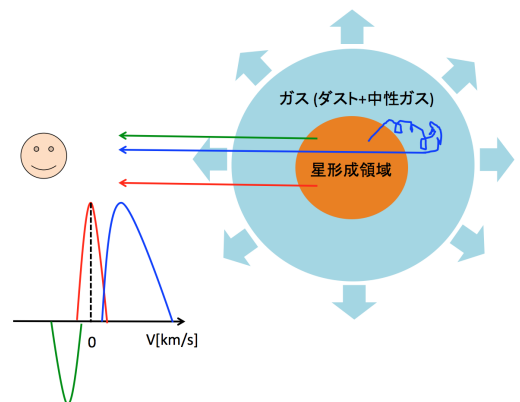
銀河と銀河間空間とのガスのやり取り (アウトフローなど) は、銀河進化史を探る上で重要である。アウトフローは、近傍銀河や赤方偏移 (z) 2–3 といった遠方の Ly α が弱く連続光で明るい (つまり重い) ライマンブレイク銀河 (LBG) において、系統的に調べられている。これらの研究は、H α などの星雲輝線によって決まる後退速度に比べ、手前側のガスで形成された金属吸収線が、アウトフロー速度分だけ青方偏移することを調べている (Figure 1)。遠方小質量銀河におけるアウトフローの存在は、星質量-金属量関係という近傍および遠方大質量銀河で確立した関係を理解する上でも重要である。しかしこのような天体は暗いため、金属吸収線の検出例はなく、アウトフローの有無が分からなかった。

アウトフローは、中性水素によって共鳴散乱を受ける Ly α 輝線を利用することでも調べられる。理論研究 (Verhamme et al. 2006) によれば、銀河がアウトフローしてる場合、Ly α 輝線は銀河の後退速度に比べ赤方偏移 (この量を $\Delta v_{\text{Ly}\alpha, r}$ と呼ぶ) し、長波長側で緩やか・短波長側で急な非対称プロファイルとなる (Figure 1)。しかし、後退速度の決定に必要な静止系可視域の星雲輝線は、 $z \sim 2-3$ において近赤外域へ移動し、夜光の影響で観測が難しい。実際に、遠方小質量銀河でこの手法が利用できた天体は、Hashimoto et al. (2013) 以前でわずか 4 天体 (McLinden et al. 2011, Finkelstein et al. 2011) であった。

近年、Nakajima et al. (2012, 2013) により世界最大の $z \sim 2$ Ly α 輝線銀河 (LAE) 測光サンプル (約 4000 天体) が構築された。LAE は強い Ly α 輝線を目印に選択され、連続光で暗い (つまり軽い) 銀河であることが分かっている。我々はこのサンプルに対し複数の分光追観測を行い、遠方小質量銀河の代表である LAE のアウトフローを調べた。

本論文では、Magellan/MagE (波長分解能 $R \sim 4000$) および Keck/LRIS ($R \sim 1100$) によって高波長分解能の Ly α 輝線が検出され、Magellan/MMIRS、Keck/NIRSPEC、Subaru/FMOS によって星雲輝線が検出

1



された LAE 12 天体を使った。12 天体中 4 (6) 天体の Ly α 輝線が MagE (LRIS) によって取得され、2 天体が両装置で取得された。

星雲輝線から後退速度を決定し、MagE スペクトル 4 つを足し合わせ S/N を上げたところ、LAE で初めて金属吸収線を検出した。加えて LRIS スペクトルでは、3 天体で個別に金属吸収線が検出された (Shibuya et al. 2014b)。これらは $100 - 200 \text{ km s}^{-1}$ 青方偏移していることが分かった。

次に Ly α 輝線については、どの天体も後退速度に比べ長波長側にメインピークを持ち、12 天体中 5 天体が青方偏移した弱い第二ピーク (blue bump) を持つことを発見した。プロファイルの非対称性を定量的に調べたところ、12 天体中 9 天体が上述した非対称プロファイルを持っていた。加えて、12 天体中 7 (5) 天体が 3σ 以上 ($1 - 3\sigma$) で正の $\Delta v_{\text{Ly}\alpha, \text{r}}$ を持つことが分かった (Figure 2)。

これらの結果から、LAE でアウトフローがあることを大サンプルかつ複数の手法で確実に示した。

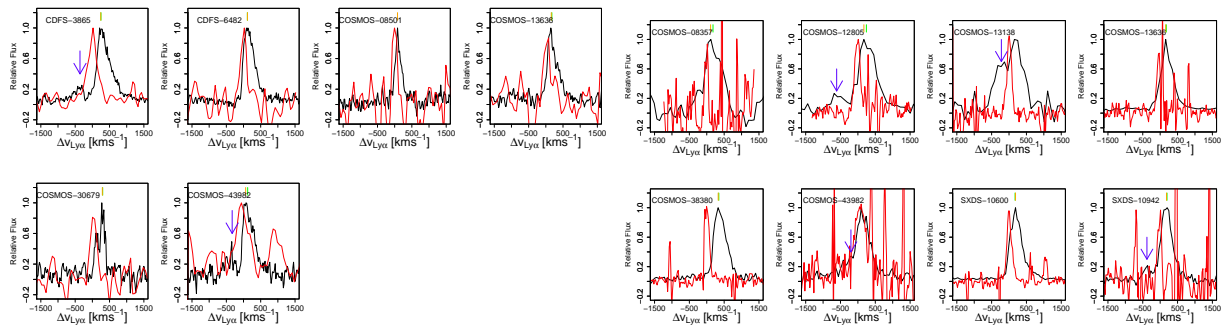


Figure 2: 星雲輝線 (赤色) を原点とした速度空間における、Ly α 輝線 (黒色) の速度構造。後退速度に比べ長波長側にあるメインピークに加え、短波長側にある blue bump を青矢印で示した。全ての天体で、Ly α 輝線は正の $\Delta v_{\text{Ly}\alpha, \text{r}}$ を持つ。

我々は、以下の関連した観測結果も得た。まず、星雲輝線の半値幅が $\text{FWHM}(\text{neb}) = 129 \pm 55 \text{ km s}^{-1}$ であり、LBG が持つ平均的な値 $\text{FWHM}(\text{neb}) = 200 - 250 \text{ km s}^{-1}$ (Kulas et al. 2012) よりも小さく、LAE が LBG に比べ小さな力学質量を持つことを発見した。次に、我々のサンプルに加え、過去の研究で高波長分解能 Ly α データを持つ結果 (McLinden et al. 2011, Kulas et al. 2012, Chonis et al. 2013) を組み合わせ、LAE と LBG の Ly α 速度構造を統計的に比較した。この結果、LAE の平均的な $\Delta v_{\text{Ly}\alpha, \text{r}}$ は $174 \pm 19 \text{ km s}^{-1}$ であり、LBG の持つ平均値 $\sim 400 \text{ km s}^{-1}$ (Kulas et al. 2012) の半分程度であることを発見した。これに加えて、LAE の blue bump の平均青方偏移量 $\Delta v_{\text{Ly}\alpha, \text{b}} = -316 \pm 45 \text{ km s}^{-1}$ は LBG の持つ平均値 $-367 \pm 46 \text{ km s}^{-1}$ と同程度であり、結果として LAE の 2 つのピークの平均速度差 $\Delta v_{\text{peak}} = 500 \pm 56 \text{ km s}^{-1}$ は LBG ($801 \pm 41 \text{ km s}^{-1}$) よりも有意に小さいことも示した。これらの結果から、LAE と LBG の決定的な速度構造の違いは $\Delta v_{\text{Ly}\alpha, \text{r}}$ にあることが分かった。

LAE でアウトフローの存在が明らかになったことは、Ly α 脱出メカニズムを理解する上でも重要である。これを理解するために、これまで多くの理論研究が Ly α の輻射輸送を計算した。それらによると、Ly α 強度やプロファイルは銀河のアウトフロー速度やダスト量、中性水素柱密度などに依存することが

分かっている。Ly α 脱出メカニズムを理解するためには、輻射輸送モデルと観測プロファイルの詳細な比較が重要である。近年の LAE における Ly α 輝線と星雲輝線の同時分光検出は、LBG (Verhamme et al. 2008, Kulas et al. 2012) だけでなく LAE (Chonis et al. 2013) においても、上記の比較を行う研究を拓いた。これら過去の研究で利用したモデルは、一様球対称なシェル状のアウトフローガス (ISM) の中心に、Ly α 放射源があるという仮定を置いている。結果としては、Verhamme et al. (2008) はモデルが観測プロファイルを再現できると主張している一方で、Kulas et al. (2012)、Chonis et al. (2013) は上手く再現できないと主張しており、見解が異なる。また、過去の研究は様々な問題を抱えている。まず Verhamme et al. (2008) は目視でフィッティングを行っている。次に Kulas et al. (2012) は 12 天体のスペクトルをスタックしてモデルを適用した。スタック法は、個々の天体の性質を消し仮想的な天体を作り出しているため、モデルが問題なのかスタック法が問題なのか分からない。最後に、Chonis et al. (2013) は個別の 3 天体にモデルを適用したが、どの天体も同じような Ly α プロファイルおよび Ly α 光度を持つ。このため、モデルが何をどこまで上手く説明するのか分からなかった。

本論文では、Verhamme et al. (2006) によって構築された輻射輸送モデルを、我々の 12 天体 14 スペクトルに個別に適用した。我々の天体は様々なプロファイルや Ly α 光度を持つ。さらに観測から様々な物理量が分かっており、モデルパラメータとの定量的な比較が可能である。まず我々は、モデルの妥当性を検証し、次に上述した面白い結果 - LAE における小さな $\Delta v_{\text{Ly}\alpha, \text{r}}$ - をモデルを通して解釈を試み、これによって LAE における Ly α 脱出メカニズムに迫る。

結果として、全ての Ly α プロファイルが上手く再現され (Figure 3)、blue bump を持たない天体については、アウトフロー速度・ダスト量・散乱を受ける前の Ly α FWHM といったパラメータが、観測量と無矛盾な結果であった。一方で、blue bump を持つ天体については、系統的に Ly α FWHM が星雲輝線の FWHM よりも大きくなるという結果になった。この原因は特定できていないが、もし blue bump 天体の Ly α が、光電離由来のものに加え、外部ガスが落ち込む際の衝突励起により生じたものも含んでいれば、大きな FWHM や強い blue bump を再現できるかもしれない。このようにして、少なくとも blue bump を持たない天体については、モデルは妥当なものであることを示した。

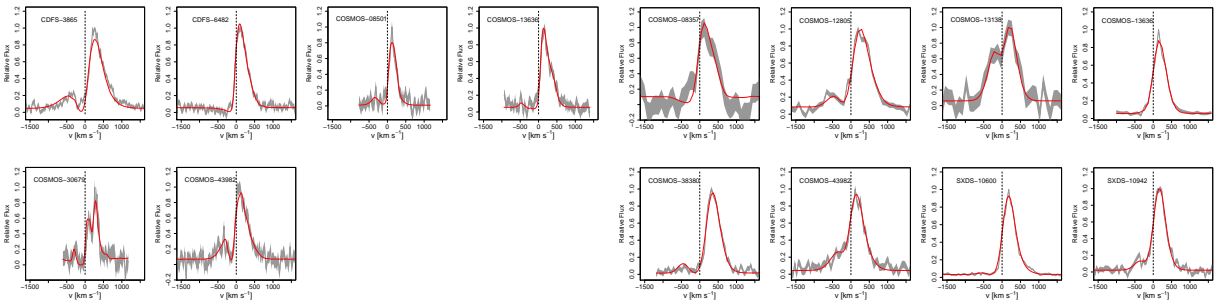


Figure 3: 観測された Ly α データおよびそのエラー範囲 (灰色) とアウトフローシェルモデルによって再現された Ly α プロファイル (赤色)。全天体で上手く再現されていることが分かる。

我々は、LAE が小さな $\Delta v_{\text{Ly}\alpha, \text{r}}$ を持つ原因として、理論研究から予想される以下の 4 つの仮説を検証した: (1) 高速のアウトフローがあり、Ly α 光子が散乱されず $\Delta v_{\text{Ly}\alpha, \text{r}}$ が小さくなる (2) ISM が特殊な状況で、被覆率 $CF = 1$ ・非常にダスト量が多く・ほとんど静止している (Duval et al. 2014) (3) ISM に穴が空いており ($CF < 1$)、一部の Ly α 光子が散乱されずに脱出し $\Delta v_{\text{Ly}\alpha, \text{r}}$ が小さくなる (4) 銀河の中性水素柱密度 (N_{HI}) が低く、Ly α 光子の散乱回数が少なく $\Delta v_{\text{Ly}\alpha, \text{r}}$ が小さくなる。我々は、この中で最も適切な仮説は (4) であることを示した (Figure 4 参照)。LAE が低い N_{HI} を持つことは、以下の 3 つの最新観測結果と無矛盾である: LAE は (i) Ly α の強い天体は HI ガス質量が小さい (Pardy et al. 2014) (ii) ガスの電離度が高い (Nakajima & Ouchi 2014) (iii) フェースオンになっている傾向に

ある (Shibuya et al. 2014a)。

本論文では、最後に、得られた結果が宇宙再電離研究に与える知見を述べた。再電離時代推定には様々な仮定を置くが、不定性の1つが $\Delta v_{\text{Ly}\alpha, r}$ である。もし我々が $z \sim 2$ LAE で発見した小さな $\Delta v_{\text{Ly}\alpha, r}$ が、再電離期の銀河でも同程度であれば、再電離が完了したのはこれまで推定されていたよりも過去になる。また、 $\text{Ly}\alpha$ 等価幅の大きな天体が小さな $\Delta v_{\text{Ly}\alpha, r}$ を持つ傾向 (Hashimoto et al. 2013) と、電離光子放射天体の $\Delta v_{\text{Ly}\alpha, r}$ は小さいという予想 (Verhamme et al. 2014) を組み合わせると、大きな $\text{Ly}\alpha$ 等価幅を持つ天体は電離光子放射天体の良い候補である可能性が高い。

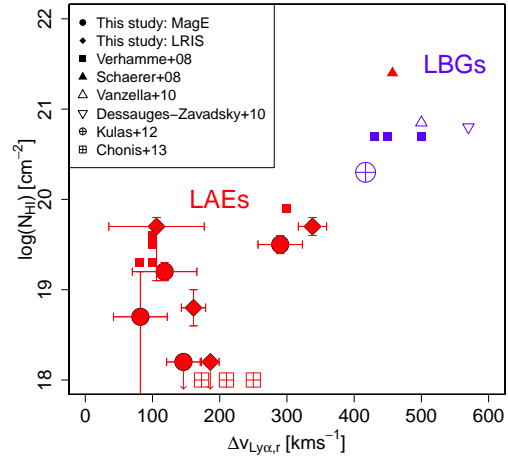


Figure 4: 本研究および過去の $\text{Ly}\alpha$ 輝線比較研究の結果をまとめたもの。ここでは便宜的に、 $\text{Ly}\alpha$ 等価幅が 30\AA 以上のものを LAE (赤色)、それ以下のものを LBG(青色) としている。