

# 巨大ライマンアルファ輝線ガス天体

松田 有 一

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

〈東北大学大学院理学研究科 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉〉

e-mail: matsuda@awa.tohoku.ac.jp

山 田 亨

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: yamada@optik.mtk.nao.ac.jp

林 野 友 紀

〈東北大学大学院理学研究科 〒980-8578 仙台市青葉区荒巻字青葉〉

e-mail: haya@awa.tohoku.ac.jp

今回ここで紹介するのは高赤方偏移における世界で初めての系統的な巨大ライマンアルファ輝線ガス天体の探索についてである。我々は赤方偏移  $z=3.1$  の輝線銀河の大規模構造の中にたくさんの巨大ライマンアルファ輝線ガス天体を発見した。この天体は輝線ガスの物理的な拡がりから 30 から 200 キロパーセクもある巨大な天体である。この巨大ガス天体の中にはまだガスが収縮している段階の原始銀河が含まれているのではないかと期待されている。

## 1. 巨大ライマンアルファ輝線ガス天体

もし形成中の銀河のガスを観測することができたら一体どのような姿が見えてくるのだろうか。銀河はもともと密度が周りよりも高い場所で重力により物質が集まって作られていくと考えられている。集まってきた物質のうち、暗黒物質はある決まった密度になると重力と速度分散が釣り合い収縮が止まるが、ガスは放射でエネルギーを失いながら（放射冷却）さらに収縮を続けていく<sup>1)</sup>。このとき、ガスの冷却に効くのは主にヘリウム原子、水素原子、水素分子からの放射である。特にガスの温度が1万度くらいのときには水素原子のライマンアルファ輝線の放射により冷却が行われるため、ガス収縮中の数十キロパーセク（1キロ

パーセク=3万光年）に拡がった原始銀河がライマンアルファ輝線で観測できると考えられている<sup>2)</sup>。その後、収縮したガスの中では次々と多くの星が作られていく。星ができてくるとガスは重い星から大量に放射される紫外光により電離されるようになる（光電離）。この段階になると重い星の周りで輝線を放射するガスが観測できるようになる。さらに多くの星が一度に作られると重い星は寿命が短いため次々と超新星爆発を起こすことになる。超新星爆発で放出されたエネルギーは銀河の中にたまっていく。このたまったエネルギーが銀河の重力の束縛エネルギーを超えるとガスとともに銀河の外側へ出ていき、銀河風と呼ばれる現象が起きる<sup>3)</sup>。銀河風ではまず膨張するガスの巨大な泡が作られ、その後この泡が破裂して銀河の外側へガスが放出される。このときガスは高速

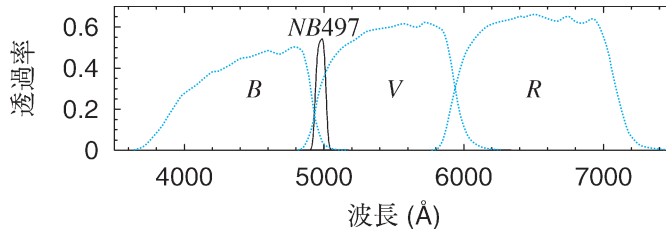


図 1 観測に使用したフィルターの透過曲線

で運動するため衝撃波による加熱で電離される。銀河風では泡状に膨張するガス、あるいは銀河の外に吹き出るガスが輝線で観測できる。

最近、高赤方偏移天体の観測から巨大ライマンアルファ輝線ガス天体（以下、巨大ガス天体と呼ぶ）が  $z=2$  から 3 付近で見つかってきている<sup>4)~6)</sup>。この天体の輝線ガスの拡がりは数十キロパーセクもあり、これは我々の銀河系やアンドロメダ銀河をも上回る大きさである。この巨大ガス天体に特徴的なのは、そのライマンアルファ輝線の強度が星あるいは活動銀河核からの紫外線による光電離の場合に推定される値を大きく超えていることである。このため、巨大ガス天体はガスの光電離だけではなく、ガス収縮段階の原始銀河、あるいは銀河風が関係しているのではないかと考えられている<sup>2), 7), 8)</sup>。

巨大ガス天体はもしかしたら形成中の大質量銀河なのかもしれない。これまでの観測では巨大ガス天体はすべて原始銀河団と呼ばれる銀河の高密度領域で見ついている。特に高赤方偏移では質量の大きな銀河ほど小さな銀河に比べて固まって分布しやすいと考えられている。さらにこの巨大ガス天体の中にはサブミリ波源が見ついているものもある<sup>9), 10)</sup>。このサブミリ波の放射は大規模な星形成の証拠と考えられている。

巨大ガス天体は銀河形成過程を観測的に探っていくうえで非常に重要な天体である。しかしながら、この天体は表面輝度が暗く観測が難しいため、これまでに知られているものは数例だけであった。

## 2. 原始銀河団の観測

SSA22 天域、赤方偏移  $z=3.1$  の原始銀河団はこれまでの高赤方偏移の観測で見つかった中で、最も銀河数密度の高い領域である<sup>5)</sup>。この原始銀河団では視野  $9' \times 9'$  の観測により平均密度の 6 倍ものライマンブレイク銀河とライマンアルファ輝線銀河、および二つの巨大ガス天体が見ついている。我々はこの原始銀河団の銀河高密度領域が周りにどのようなにびているのか、また別の巨大ガス天体が周りにもあるのかを調べるために、この原始銀河団に対して広視野 ( $31' \times 23'$ ) でさらに深い撮像観測をすばる望遠鏡の主焦点カメラを用いて行った<sup>11), 12)</sup>。

この観測では  $z=3.1$  のライマンアルファ輝線をとらえるための狭帯域フィルター (NB497, 中心波長  $4,977 \text{ \AA}$ , バンド幅  $77 \text{ \AA}$ ) と連続光を見るための広帯域フィルター (B バンド, V バンド, R バンド) を用いた (図 1)。我々は NB497 に対応する波長での連続光として、B バンドと V バンドを合成した BV 画像を作った。また輝線だけを取り出すために、NB497 から BV を引いた NBc 画像も作った。

我々は巨大ガス天体検出を輝線だけの画像である NBc 画像で行った。検出ではある表面輝度（ここでは 1 平方秒角当たりの空の明るさのゆらぎの標準偏差の 2 倍）よりも明るい領域を線で囲み、その領域の面積が 0.8 平方秒角以上あるものをまず天体候補として選んだ。そしてこの表面輝度一定の線で囲まれた領域の NB497 画像での明るさ（輝線 + 連続光）が BV 画像での明るさ（連続光）

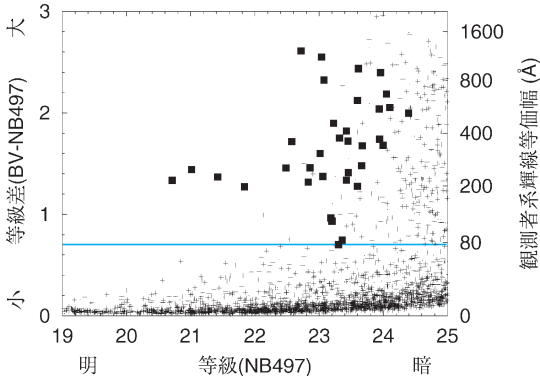


図2 検出した天体の色等級図。青線（NB497等級がBV等級の2倍の明るさ）よりも上側にある天体を輝線天体として選んだ。四角は35個の巨大ライマンアルファ輝線ガス天体。

輝線フラックス (ergs s<sup>-1</sup> cm<sup>-2</sup>)  
 $1.0 \times 10^{-15}$        $1.0 \times 10^{-16}$

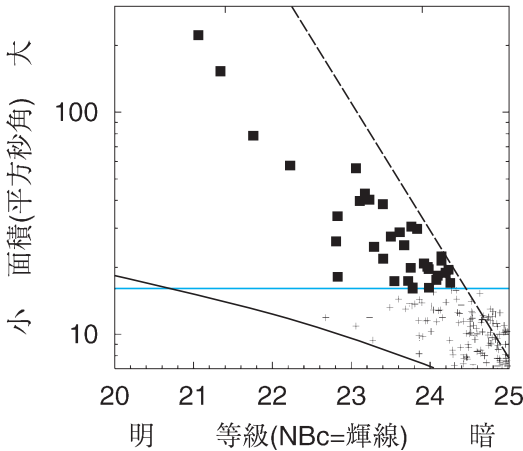


図3 輝線天体の面積と明るさ分布。青線（サイズが16平方秒角）よりも上側にある天体を巨大ライマンアルファ輝線ガス天体として選んだ。実線は大気により広がった点源が天体検出と同じ表面輝度一定の線で囲まれる領域の面積を表している。破線は空の明るさのゆらぎの標準偏差の8倍を表している。

の2倍以上であり（図2）、しかもこの表面輝度一定の線で囲まれた領域の面積が16平方秒角以上あること（図3）という条件により35個の巨大ガス天体を検出した<sup>12)</sup>。16平方秒角は $z=3.1$ で900平方キロパーセク（固有座標系）である。つまりこれは物理的距離がさしわたし30キロパーセク

よりも大きな輝線ガス天体を選んできたことに相当する。

まずこの観測から最初にわかったことはすでに知られていた二つの巨大ガス天体は35個のサンプルの中で最も明るく大きな天体であるということである。図3を見てみるとこの二つの巨大ガス天体を筆頭に面積が大きいほうから小さいほうへ分布が連続的になっている様子がわかる。分布は連続的であるためどれくらい大きな面積をもつ天体を巨大ガス天体として選べば良いかは自明ではないが、どこかで条件を決める必要がある。例えば星のような点源でも大気のゆらぎにより像がある決まった関数形で広がるのがわかっている。このため、もとは点源であっても天体検出と同じ表面輝度一定の線で囲んだ場合、この囲まれる領域はある程度の面積をもつことになる。16平方秒角という値はこの大気により広がった点源がもつ面積よりも十分に大きい値になっている。

また我々が選んできた巨大ガス天体はすべてNBc等級が空の明るさのゆらぎの標準偏差の8倍以上になっており、ゆらぎを偽の天体として検出してしまっている確率は極めて小さい。偽の天体がサンプルに混じっていないことは正と負を裏返した画像を使って同じ条件で天体が検出されないことで確かめている。

図4（=表紙）は検出した巨大ガス天体の画像の例である。最も明るく大きな左上の二つがすでに知られていた巨大ガス天体である。画像をよく見ると巨大ガス天体の形態や表面輝度は非常に多種多様であることもわかる。淡く広がっており、しかも連続光が暗い天体はガス収縮中の原始銀河の非常に良い候補である。また泡状、あるいは円錐状構造をもつ天体もあり、このような構造は銀河風の証拠であると考えられる。

図5には面積と平均表面輝度の分布を示した。この図からも巨大ガス天体の表面輝度にはかなりの幅があることがわかる。また図の右上は検出限界よりも明るい側にもかかわらず天体がない。

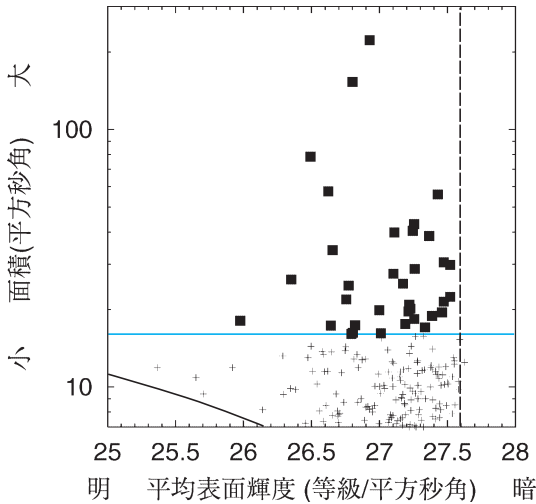


図5 輝線天体の面積と平均表面輝度分布. 青線は16平方秒角のサイズ, 実線は大気により広がった点源がもつ面積を示す. 破線は今回の検出で得られる天体の平均表面輝度の限界を示している.

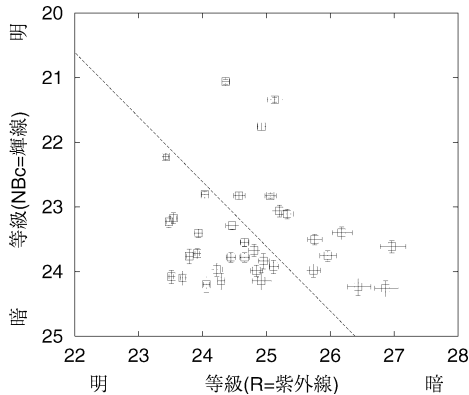


図6 ライマンアルファ輝線と紫外線連続光の強度の比較. 破線は星の紫外線による光電離を考えた場合のライマンアルファ輝線強度の推定値.

これは巨大ガス天体の中でもすでに知られていた二つのように100キロパーセク以上の拡がりをもつ天体はまれであるということを表しているのかもしれない。

これまでに知られていた巨大ガス天体ではライマンアルファ輝線と紫外線連続光の強度比が光電離で説明可能な値を大きく超えていた。では今回見つけた35個の巨大ガス天体ではどうである

うか？ この35個のサンプルのライマンアルファ輝線と紫外線連続光の強度比を示したのが図6である。縦軸はNBcの等級でライマンアルファ輝線の強度を表している。横軸は巨大ガスに付随すると考えられる連続光源のRバンドの等級であり、紫外線の強度を表している。破線は星による光電離を考えた場合に紫外線の強度から推定されるライマンアルファ輝線の強度である。つまりこの推定値よりもライマンアルファ輝線の強度が大きい天体（破線よりも上側の天体）は星による光電離だけで説明することは難しいと言える。実際にこの推定値を超えるライマンアルファ輝線の強度をもつ天体は35個中14個で全体の約3分の1であった。

我々は同じ観測で比較的小さなライマンアルファ輝線天体も283個検出することに成功している<sup>11)</sup>。この小さなライマンアルファ輝線天体の空間分布を見てみるとその高密度領域が60メガパーセク（共動座標系、その時代の物理的距離ではなく現在まで宇宙が膨張した場合の距離）以上にわたって帯状に伸びていることがわかった。この分布と巨大ガス天体の空間分布とを比較してみたところ、巨大ガス天体の9割がこのライマンアルファ輝線天体の高密度領域の中に位置していることがわかった（図7）。これにより、巨大ガス天体は銀河高密度領域と深いかかわりをもっていることがより明らかになった。

### 3. 銀河形成過程の観測的実証に向けて

すばる望遠鏡の高い集光能力と主焦点カメラの広視野を活かし、高赤方偏移の原始銀河団の観測を行い世界で初めて大きくて系統的な巨大ガス天体のサンプルの獲得に成功した。しかしながら、巨大ガス天体の正体についてはまだほとんどわかっていない。今後、この巨大ガス天体の正体を明らかにし、銀河形成とどのように関係しているのかを調べていくにはどうしたら良いであろう

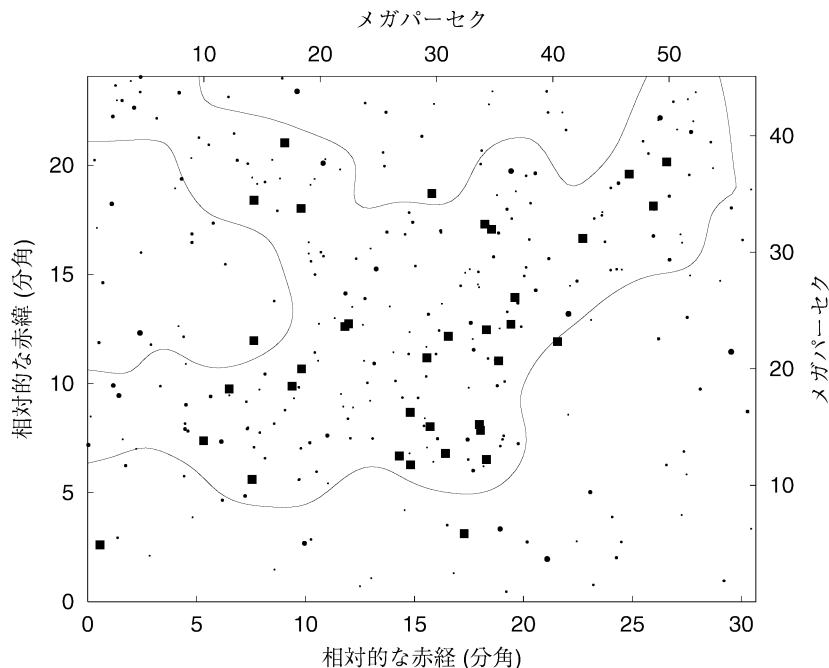


図 7 35 個の巨大ガス天体の空間分布 (四角). 黒丸は 283 個のライマンアルファ輝線天体を, 実線はその高密度領域を表している.

か?

まず巨大ガス天体の正体に迫っていくには今回の観測で得られた情報である形態, 表面輝度, 輝線と連続光の強度比のほかに, ガスの運動, 重元素汚染, 星の情報, 活動銀河核の有無, 塵に隠された星形成, 分子ガスなどについていろいろな方向から調べていく必要がある.

巨大ガス天体の輝線の拡がり全体の可視分光観測を行えばライマンアルファ輝線を使ってガスの運動を調べることができる. 例えば, 35 個のうちの以前から知られていた最も大きく明るい天体 (SSA22 LAB1) についてはすでにいくつかの分光観測がなされており, 複雑な速度構造があることがわかってきている<sup>13), 14)</sup>. しかし残念ながら, 今のところ輝線の拡がり全体に対して十分な深さの観測は行われていないため, 詳細な運動構造はまだよくわかっていない. 我々の深い撮像観測により巨大ガス天体の中には泡状あるいは円錐状構造をもつものがあることがわかってきたが, もしこ

れらの構造に沿って, 秒速数百キロメートルの速度差が見つかれば, それは銀河風の大きな証拠になる. さらにこの分光観測では窒素原子や炭素原子の輝線を使って拡がったガスの重元素汚染も調べることができる. ガス収縮で光る原始銀河であれば, 重元素汚染はまだ進んでおらず, 窒素原子や炭素原子の輝線は見つからないであろう. 一方, 銀河風であれば, 超新星爆発で放出された重元素がガス全体に拡がっている様子が見えるはずである.

近赤外の撮像観測を行えば, 巨大ガス天体の中にある星について新しいものが多いのか, あるいは古いものが多いのか, また星の質量は全部でどれくらいかなどを推定することができる. これにより巨大ガス天体が星形成の観点でどのような段階にいるのかを調べることができる. また X 線による観測からは活動銀河核の有無を調べることができるし, サブミリ波では塵に隠された大規模な星形成を調べることができる. さらに電波によ

る観測では分子ガスの有無やその運動を調べることができる。

さらにこの巨大ガス天体と銀河形成との関係を明らかにしていくためには、いつどのような場所に巨大ガス天体が存在していたのかを調べていく必要がある。

これまでの観測では巨大ガス天体が見つかった赤方偏移は  $z=2$  から 3 付近である。ではなぜ特定の赤方偏移にだけこのような天体が見つかったのでしょうか。一つめの可能性は実はもっと大きな赤方偏移でも巨大ガス天体は存在するのだが、遠くにいけばいくほど見かけ上天体は暗くなるため、単純に観測が難しく見つからないだけかもしれないということである。もし巨大ガス天体がガス収縮中の原始銀河であれば、もっと大きな赤方偏移でも存在しても良いはずである。このため、例えばすばる望遠鏡で見つけた  $z=4.9$  の原始銀河団などでさらに深い探索を行えばもっと大きな赤方偏移でも巨大ガス天体が見えてくるのかもしれない<sup>15)</sup>。

もう一つは巨大ガス天体が赤方偏移  $z=2$  から 3 に多く存在する特別な理由があるかもしれないということである。赤方偏移  $z=2$  から 3 という時期はちょうど明るい活動銀河核の数密度のピークにあたる<sup>16)</sup>。ガスの供給を受けて活動銀河核が明るく輝き出す時期と巨大ガス天体には何か関係があるのだろうか？電波銀河は明るい活動銀河核をもっており、昔から高赤方偏移の電波銀河の周りには 100 キロパーセクスケールの広がった輝線領域があることが知られていた。この電波銀河の広がった輝線領域の広がりはおそらく電波ジェットと関係があるのではないかと考えられている。しかしながら巨大ガス天体からは強い電波源は見つかっておらず、電波銀河の周りの広がった輝線領域と巨大ガス天体とは物理的な起源が違ふと考えられている。これまでに見つかった巨大ガス天体のうちのいくつかは活動銀河核をもってることが知られているが、活動銀河核の

証拠を全くもたないものもある。今のところ活動銀河核と巨大ガス天体がどういう関係になっているのかはわかっていないが X 線や電波の観測と比較することによりだんだん明らかになってくるはずである。

また赤方偏移  $z=2$  から 3 という時期はサブミリ波源をもつ銀河が多く見つかった時期とも一致している<sup>17)</sup>。サブミリ波源をもつ銀河は塵を多く含む大規模な星形成を行っている形成中の大質量銀河ではないかと考えられている。これまでに見つかった巨大ガス天体の中にはサブミリ波源が見つかった天体もある。今回見つかった巨大ガス天体についてもサブミリ波の観測を行うことで巨大ガス天体と大質量銀河の形成の関係を調べていくことができるであろう。

今回の観測も含めこれまでに巨大ガス天体が見つかったのはすべて銀河の高密度領域である。では本当に銀河の高密度領域に選択的に存在しているのだろうか？これについてもきちんと確かめるには銀河の高密度領域でない場所での深い探索がたくさん必要である。しかしながら、一般天域ではこれまで全く見つからないことを考えるとおそらく銀河の高密度領域に存在しやすいことは確かであろう。では巨大ガス天体が銀河の高密度領域に選択的に存在する理由は一体何だろうか？まず高赤方偏移の銀河の高密度領域は銀河形成が選択的に起こりやすい場所であると考えられている<sup>18)</sup>。そうであれば当然ガスがライマンアルファ輝線で光る段階の銀河も多く存在するはずである。また質量の大きい銀河ほどより固まって分布する傾向を持つと考えられており、巨大ガス天体は形成中の大質量銀河なのかもしれない。さらに高赤方偏移の銀河高密度領域には中性水素も多く存在していることが観測からわかってきている<sup>19)</sup>。このため銀河の周りにも中性水素の雲が多くあり、これらが電離や散乱により広がって見えやすいということも考えられる。

巨大ガス天体の観測を通じて我々はライマンア

ルファ輝線で放射冷却しながらガス収縮する原始銀河や、銀河風が銀河間空間へ及ぼす影響などを空間的に分解して調べていくことができるはずである。また巨大ガス天体が銀河形成シナリオの中でどのような位置づけになっているのかを明らかにすることで銀河形成の統一的理解に少しずつ近づいていくことができると考えている。

### 参考文献

- 1) White S. D. M., Rees M. J., 1978, MNRAS 183, 341
- 2) Haiman Z., Spaans M., Quataert E., 2000, ApJ 537, L5
- 3) Heckman T. M., Armus L., Miley G. K., 1990, ApJS 74, 833
- 4) Keel W. C., Cohen S. H., Windhorst, R. A., Waddington I., 1999, AJ 118, 2547
- 5) Steidel C. C., et al., 2000, ApJ 532, 170
- 6) Francis P. J., et al., 2001, ApJ 554, 1001
- 7) Fardal M. A., et al., 2001, ApJ 562, 605
- 8) Taniguchi Y., Shioya Y., 2000, ApJ 532, L13
- 9) Smail I., et al., 2003, ApJ 583, 551
- 10) Chapman S. C., et al., 2001, ApJ 548, L17
- 11) Hayashino T., et al., 2004, AJ, in press
- 12) Matsuda Y., et al., 2004, AJ 128, 569
- 13) Ohyama Y., et al., 2003, ApJ 591, L9
- 14) Bower R. G., et al., 2004, MNRAS 351, 63
- 15) Shimasaku K., et al., 2003, ApJ 586, L111
- 16) Fan X., et al., 2001, AJ 121, 54
- 17) Chapman S. C., Blain A. W., Ivison R. J., Smail I. R., 2003, Nature 422, 695
- 18) Governato F., et al., 1998, Nature 392, 359
- 19) Adelberger K. L., et al., 2003, ApJ 584, 45

### Lyman Alpha Blobs

**Yuichi MATSUDA**

*National Astronomical Observatory of Japan,  
Osawa 2-21-1, Mitaka, Tokyo 181-8588 and  
Tohoku University, Aoba-ku, Sendai 980-8578*

**Toru YAMADA**

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

**Tomoki HAYASHINO**

*Tohoku University, Aoba-ku, Sendai 980-8578*

Abstract: We report the result of first systematic search for Lyman alpha blobs (LABs), giant emission-line gas clouds at high redshift. In the large-scale structure of emission-line galaxies at  $z=3.1$ , we discovered more than 30 LABs each of which extends 30–200 kpc in physical scale. LABs at high-redshift may contain proto-galaxies in their gas cooling phase.