

0. Abstract

本研究では、53W002 領域のすばる/Suprime-Cam による撮像 (B バンド、NB413 狭帯域バンド) データの解析から、同領域中の赤方偏移 2.4 ($z = 2.4$) の Ly α 輝線銀河 (LAE) の空間分布や輝線等価幅 (EW) 分布などの諸性質を調べた。今回用いたデータは先行研究のそれよりも広視野 ($31' \times 24'$) かつ深い (NB413 で 5σ 限界等級 ~ 25.6 ABmag) ものであり、解析の結果、LAE を 204 天体を検出した。これにより LAE 数密度の疎密からなる大規模構造がはっきりと確認されたが、今回、その中で最も高密な約 $5' \times 4'$ ($z = 2.4$ における physical スケールで 3Mpc 程度) の領域を 53W002F-HDR と名付けた。私は 53W002F-HDR の LAE 数密度超過から Probability Distribution Function (PDF) を用いて、その $z = 2.4$ の宇宙における存在確率 (rareness probability) を求め、 $0.9^{+2.4}_{-0.62}$ % という同領域の rareness を示す定量的な値を得た。また使った画像の視野の広さを生かして、53W002 領域中の LAE の性質 (EW 分布、Ly α 光度分布) に環境依存性がないかを調べたが、そうした傾向は認められなかった。 $z = 3.1$ の他領域で同様の解析を行っても同じ結論が得られたので、Ly α 光子の放射機構に 10Mpc スケールの環境依存性がないというのは LAE という種族全般に言える性質であると思われる。

I. Introduction

銀河がどのように形成・進化してきたか解明する事は、現代天文学に残された大きな課題の一つである。1990 年代以降の大型地上望遠鏡と宇宙望遠鏡の登場は遠方銀河観測を飛躍的に発展させ、我々はこれまでに宇宙年齢 137 億年のうちの 120 億年前 ($z \sim 6$) の銀河まで直接的に観測できるようになった。それに伴い、多くの研究者が各赤方偏移毎の銀河の平均物理量を求め、銀河が宇宙の歴史の中でどのように進化してきたかを解明してきた (例えば、Madau plot : 星形成史など)。しかしそれらは時代毎の平均量を見ているため、なぜそのような進化してきたかの物理的理解には踏み込めずにいた。今後の遠方宇宙観測の課題はそうした俯瞰から物理的な理解へ踏み込む事であろう。銀河進化を物理的に理解するためのアプローチの一つとして環境依存性の探査があると私は考える。環境依存性とは、銀河の性質が密度環境毎に異なる現象であり、近傍宇宙では奇麗な環境依存性があることが観測的に知られている (銀河団環境では、星形成が不活発な/赤い/楕円銀河が多いなど)。遠方宇宙で環境により形成途中の銀河の性質がどのように違うか、銀河種族毎に環境依存性は同じか異なるか、また近傍で見られるような環境依存性はいつの時代に完成したか、といったことを調べることでどのような物理が銀河の形成・進化に効いているかを議論することができると考えられる。

高赤方偏移 (high- z) で環境依存性を調べるにあたって重要な点が 3 点ある。一つ目は広視野観測である。環境依存性を調べる際にまず、そもそも観測している領域がどのような環境なのか、即ち、宇宙の大規模構造の中で高密度領域なのか低密度領域なのかを判断しなければならない。よって大規模構造スケールの広視野観測が望ましい。二つ目は原始銀河団領域の観測である。最終的には高密度領域も低密度領域もまんべんなく観測しなければならないのだが、原始銀河団のような特別な高密度領域はボイド領域に比べて非常に稀である。なので観測効率を考えると原始銀河団を優先的に観測し、その周辺で広視野観測を行うことで低密度環境もカバーするというのが望ましい。三つ目は赤方偏移がよく決まっている銀河の大量サンプルが必要ということである。環境をトレースするものは銀河密度 (数または質量) であるため、投影効果による偽の高密度領域検出を避けるためにも、なるべく良質な 3 次元密度を得る必要がある。そのため赤方偏移決定精度が重要になる。SDSS のような大規模な分光サーベイが理想的であるが、現在の望遠鏡の能力・マンパワーの観点から言って効率的ではない。それよりは狭帯域フィルタを用いた Ly α 輝線銀河 (LAE) 撮像観測の方が効率・赤方偏移決定精度の兼ね合い的に良いと言える。この方法だと一度に視野内にある特定の赤方偏移の天体を検出可能な上に、赤方偏移決定精度も非常に良い (図 1 参照)。

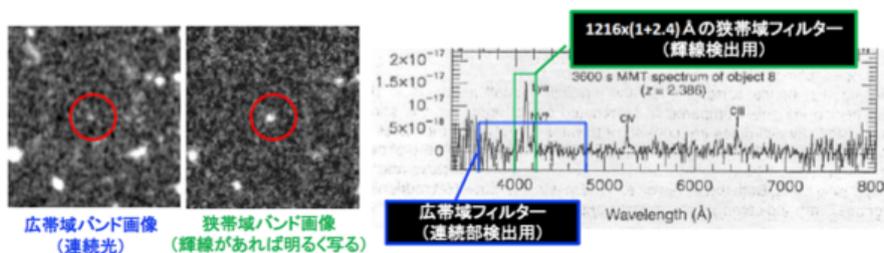


Figure 1: LAE の狭帯域撮像 (左) とスペクトラム (右) の対応関係

II. Data

2009 年 5 月 22 - 23 日 (UT) の 2 日間にかけて、すばる望遠鏡/Suprime-Cam を用いて 53W002 領域の撮像観測 (中心座標: $\alpha = 17^h 14^m 15^s.2$, $\delta = +50^\circ 15' 49''$) を行った。Suprime-Cam は一視野が非常に広い ($34' \times 27''$) ことが特徴であり、今回の LAE 探査に使える領域は先行研究 (Pascarelle et al. 1996b, Keel et al. 1999) のそれよりもはるかに広い。使用したフィルタは狭帯域フィルタ NB413 (中心波長: 4140 \AA , バンド幅 (FWHM): 83 \AA) と B バンドフィルタの 2 種類である。NB413 フィルタは $z = 2.37 - 2.44$ の Ly α 輝線をつかまえるために独自に制作されたフィルタである。 B バンドは LAE の連続光フラックスを推定する用途である。図 2 に NB413 と B バンドフィルタの透過曲線を載せた。またそれぞれのバンドにおける積分時間は NB413 で 3.5 時間、 B で 1 時間である。最終的

処理済みの NB413、B バンド画像は、視野=31.3' × 23.7' (有効面積 707.1arcmin²)、PSF=0.86''(FWHM)、検出限界=25.95mag(AB,5σ,2''-aperture,NB413), 26.7mag(AB,5σ,2''-aperture,B) になった。

NB413 画像において天体検出を行い、検出された天体に対して以下の3つのクライテリアを課す事で $z = 2.4$ の LAE を選び出した。

(i) $B - NB413 \geq 0.68$

(ii) $18 \leq NB413 \leq 25.95$

(iii) $B - NB413 \geq 4\sigma$ color error

それぞれ説明すると、まず (i) で $B - NB413 = 0.68$ というカラーは $z = 2.4$ の Ly α 輝線に対してレストフレームでの輝線等価幅 (EW_0) = 25Å に相当する。この EW_0 の計算については、観測者から天体までの視線上の銀河間物質 (Inter Galactic Medium: IGM) による減光効果を見逃した簡単な計算を行っており、その場合、 EW_0 と $B - NB413$ は一対一の対応を示す。(ii) のクライテリアはサチるくらい明るかったり、逆に検出限界を下回るほど暗い天体を排除するためのものである。(iii) は輝線無天体のコンタミネーションを防ぐためのクライテリアである。本来ならば輝線無天体は $B - NB413 \sim 0$ に分布するが、NB413 で暗い方へいくと測光誤差起因のカラー誤差が大きくなるため (i) のクライテリアを満たしてしまう可能性がある。そこで「輝線無天体のカラー系列 (今回は $B - NB413 = -0.2$ とした) に対する 4σ エラー以上」というこのクライテリアを課した。この3つのクライテリアを満たす天体は 213 天体であったが、それらの画像を1つ1つ目で確認することにより更に9天体 (サチっている星や1つの Ly α blob(LAB) を複数天体としてカウントしているもの) を除外した。図3は色等級図で、上記の LAE セレクションと残った 204 天体がプロットされている。

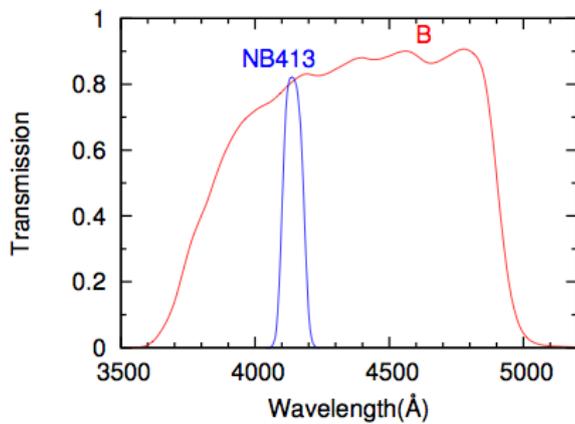


Figure 2: NB413 と B バンドのフィルタ透過曲線

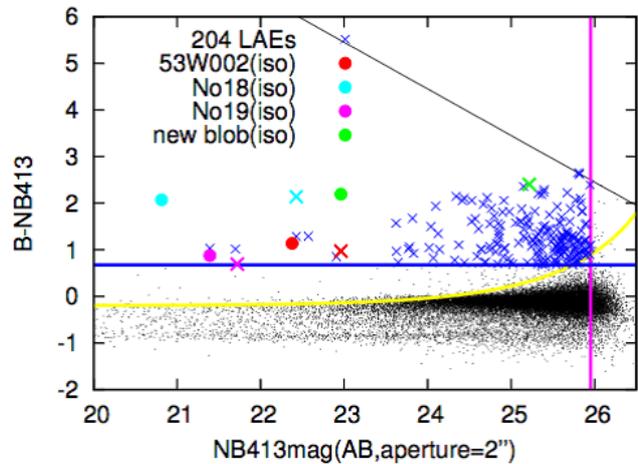


Figure 3: $B - NB413$ 対 $NB413$ 色等級図: 色付きの実線は LAE セレクションに用いたクライテリアで、 $B - NB413 = 0.68$ (青)、 $NB413 = 25.95$ (マゼンダ)、 4σ カラー誤差 (黄) を表示している。黒実線は B バンドにおける 1σ 検出限界等級である。青クロスが今回検出された LAE204 天体である。

III. Result

解析の結果見つかった LAE204 天体の天球面上での分布は図4の通りである。プロットのサイズは各 LAE の Ly α 輝線等価幅 (aperture 測光) を表しており、大サイズ: $EW_0 \geq 200 \text{ \AA}$ 、中サイズ: $70 \text{ \AA} \leq EW_0 \leq 200 \text{ \AA}$ 、小サイズ: $25 \text{ \AA} \leq EW_0 \leq 70 \text{ \AA}$ となっている。

図4からこの領域における LAE 分布が一様でなく疎密がはっきりしていることが見てとれるが、中でも最も局所数密度が高い、つまり LAE が密集している領域は、 $(\alpha, \delta) = (17^h 14^m 10^s, +50^\circ 17' 30'')$ 周辺である。今回、この密度ピークを中心とした $4.7' \times 4.1'$ の領域 (図4のオレンジ長方形) を高密度領域と同定し、以後、53W002F-HDR と呼んでいく。53W002F-HDR は共動スケールで 4850 Mpc^3 の体積を持ち、21 個の LAE を含む。53W002F-HDR 内の LAE 平均密度は領域全体の平均密度の約4倍である。53W002 やその近くの2つの LAB(No.18, No.19) はこの53W002F-HDR に含まれ、中心付近の QSO と合わせて計4天体の特殊な天体がこの体積的には狭い高密度領域内に存在している。これは他領域では滅多に見られない珍しいことで、特筆すべき53W002F-HDR の特徴と言える。

IV. Discussion

この章では、LAE でトレースされる宇宙の構造 (環境) についての議論を行いたい。具体的には今回の観測結果を使って、53W002F-HDR が $z = 2.4$ の宇宙においてどの程度稀有な構造なのか? や EW や $L_{Ly\alpha}$ などの LAE の性質に環境依存性があるか? といったことを考える。こうした議論の際に、これまでのほとんどの研究は銀河数密度もしくはその質量密度を局所的な環境として考えてきた。もちろん、この取扱いは近傍宇宙もしくはある特定の時代の中でのみ議論したい場合には正しいだろう。しかし、異なる時代の構造を比較したり環境効果の時間変化 (進化) を定量的に議論したい場合には、密度というパラメータは適しているとは考えにくい。というのも、宇宙における構造形成は時々刻々進んでおり、ある時代のある密度の構造 (環境) は同じ密度を持った他の時代の構造 (環境) と決して等価ではないからである。今回観測したデータは $z = 2.4$ のものだけなので特にこうしたことを考える必要はないかもしれないが、今後の研究の発展を考えて、密度以外の環境を表すパラメータを模索した。以下では、“rareness probability” と名付けられた

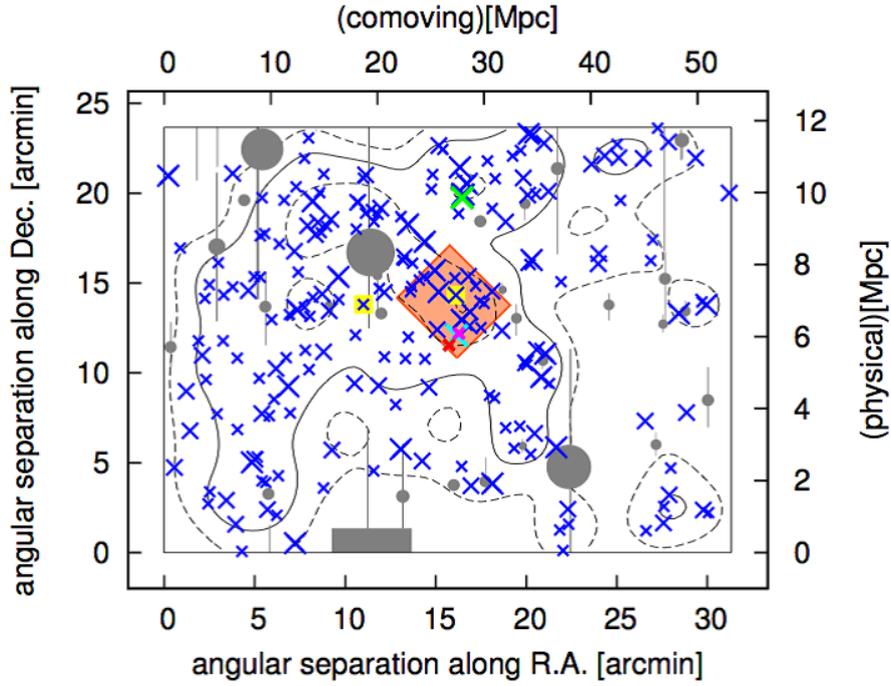


Figure 4: 53W002 領域中の $z=2.4$ LAE の空間分布：青クロスが LAE、赤クロスが 53W002、シアンクロスが No18、マゼンダクロスが No19、緑クロスが NEW、黄四角が QSO ([?]) に対応している。左が東、上が北である。灰色に塗りつぶされた領域はマスクがけした部分である。黒実線は LAE 数密度の等高線でそれぞれ、領域平均数密度（破線）、 $0.5 \times$ 平均、 $2 \times$ 平均、 $2.85 \times$ 平均の等高線になっている。オレンジに塗りつぶされた長方形の領域は、今回の観測視野の中で最も LAE が密集している領域で、53W002F-HDR と呼ばれる。

大規模構造形成の効果を近似的に組み込んだ新しいパラメータを用いて、53W002 領域中の構造の rareness や環境依存性について議論していく。

$z = 2.4$ の特定の構造の rareness を評価するためには、まず同時代の平均的な銀河分布の密度ゆらぎを定量化しそれをリファレンスとする必要があるだろう。ここでは、確率分布関数 (Probability Distribution Function: PDF) というものを導入する。PDF の定義は以下の通りである。

「十分に広い空間からある半径 (R) の球をランダムにサンプリングした時に、その宇宙全体の平均からの密度超過 ($\delta = (\rho - \bar{\rho})/\bar{\rho}$) が ($\delta, \delta + d\delta$) の範囲に存在する確率の分布」

今、リファレンスとして本来ならば $z = 2.4$ 宇宙の平均的な LAE 分布に対する PDF を観測的に作りたいが、今回は観測の都合 (天候) で一般領域のデータがとれなかったため、それは難しい。ここでは質量密度ゆらぎの PDF (mass PDF) を理論的に構築することにした。質量密度ゆらぎは銀河数密度ゆらぎの下敷きになっていると考えられ、両者はバイアスパラメータ (b) で関係しあっている。CDM 宇宙論の枠組みの中では、スケール R での構造形成が非線形な段階に進んだ時に mass PDF は以下のような lognormal の形で良く近似できる、ということが多くの数値シミュレーションから示されている。

$$f_R(\delta) = \frac{(2\pi\omega_R^2)^{-1/2}}{1+\delta} \exp\left[-\frac{\{\ln(1+\delta) + \omega_R^2/2\}^2}{2\omega_R^2}\right], \quad (1)$$

$$\omega_R^2 = \ln(1 + \sigma_R^2).$$

この近似は近傍宇宙の小スケールのような構造形成の非線形度が著しくなった時には精度が悪くなってしまいが、本研究のように high- z で $R \sim 10$ Mpc (共動スケール) 程度を見る場合には問題ないと思われる。図 5 に異なる赤方偏移、スケールでの mass PDF の例を示す。

上記の PDF を使って、まず最初に 53W002F-HDR の構造の rareness を定量化する。53W002 領域の視野全体の LAE 数密度が $z = 2.4$ における宇宙全体の平均数密度と等しいと考える ($\bar{n} = 1.16 \times 10^{-3} \text{ Mpc}^{-3}$) と、53W002F-HDR の LAE 密度超過は、

$$\delta_{LAE,HDR} = \frac{n_{HDR} - \bar{n}}{\bar{n}} = 2.7 \pm 0.8 \quad (2)$$

となる。この値は LAE 数密度超過であるが、これ以降では数密度超過と質量密度超過 ($(\rho_{HDR} - \bar{\rho})/\bar{\rho}$) が等しいとみなして議論を進めていく。更にこの LAE 密度超過を線形バイアスを用いてダークマター質量密度超過 (以後、単に質量密度超過と呼ぶ) へ焼き直す。

$$\delta_{mass,HDR} = \frac{\delta_{LAE,HDR}}{b_{LAE}} = 1.5 \pm 0.5 \quad (3)$$

ここでは、Guaita et al. (2010) の $b_{LAE} = 1.8 \pm 0.3$ というバイアス値を適用した。次に $z = 2.4$ 、 $R = 10.5$ Mpc の mass-PDF を作る。このスケールは共動スケールで 53W002F-HDR と同じ体積を持つ球の半径に相当する。この

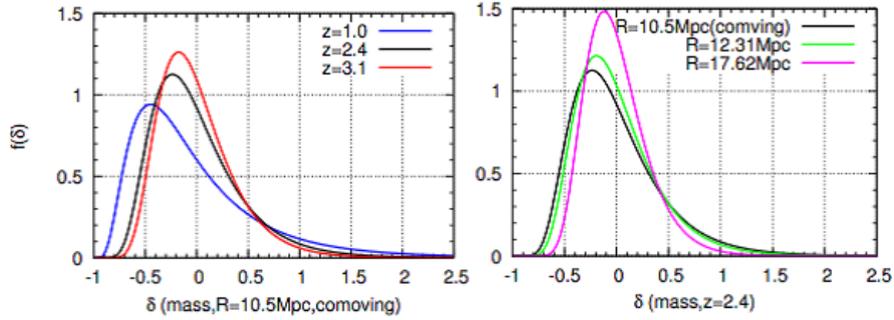


Figure 5: mass-PDF の例。左パネル：スケールは固定 ($R = 10.5$ Mpc) して赤方偏移を変化させた場合。右パネル：赤方偏移は固定 ($z = 2.4$) してスケールを変化させた場合。

mass-PDF から $\delta_{mass} \geq \delta_{mass,HDR}$ となる確率が計算でき、それは $0.9^{+2.4}_{-0.62}$ %であった。このことは、 $z = 2.4$ の宇宙において $R = 10.5$ Mpc のスケールで構造の探索を行った時に 53W002F-HDR が 0.9 %の確率でしか見つからないような rich な構造であることを意味している。これ以後の節では、こうして求められる確率を “rareness probability” と呼び、構造の rareness の指標にしていく。

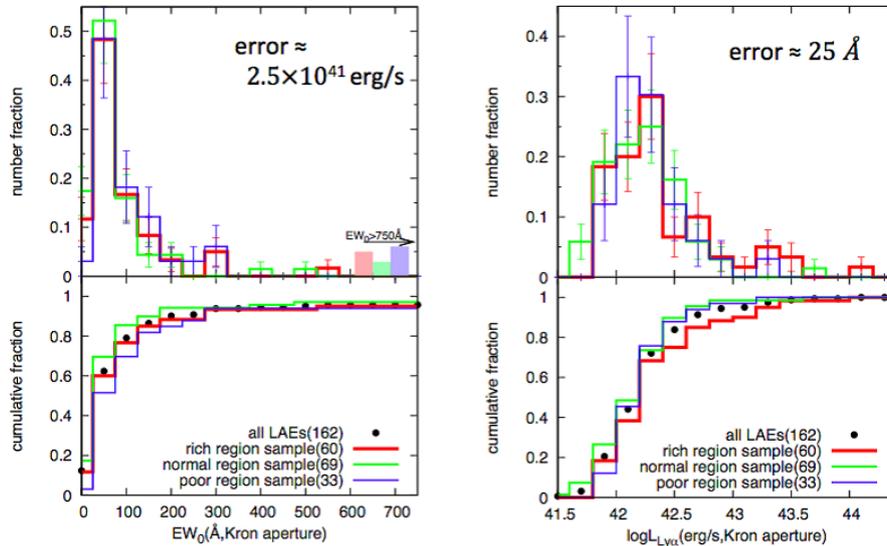


Figure 6: サンプル毎の $L_{Ly\alpha}$ 分布：differential (左上)、cumulative (左下)、 EW_0 分布：differential (右上)、cumulative (右下)

またこの rareness probability を使えば、環境依存性の議論をよりクリアなものにする事もできる。今度は個々の LAE を中心とした半径 $2.3'$ (共動スケールで 3.9 Mpc) の領域の rareness probability を計算し、それを環境を表すパラメータとして使った。rareness probability が小さい領域ほど高密領域と考えることが出来る。ここで天球面上での半径 $2.3'$ の円というのは、体積で換算すると半径 10Mpc の球に対応する。よって rareness probability 計算のリファレンスとなる mass PDF も $R = 10$ Mpc のものを使った。また画像のへりに近い LAE に対してこの作業を行うと $2.3'$ 円内密度 (ひいては rareness probability) を過小評価してしまうので、へりから $2.3'$ 以上内側の計 162 天体のみを以下の議論では使用した。まず最初に 162 天体を rareness probability により 3つのサブサンプルに分けた。サンプル分けは次の通りである。

- **rich region sample** : rareness probability $\leq 12\%$ 、60 天体
- **normal region sample** : $12\% \leq$ rareness probability $\leq 50\%$ 、69 天体
- **poor region sample** : rareness probability $\geq 50\%$ 、33 天体

ここでサンプルのしきい値になっている 12% と 50% という rareness probability の値は LAE 密度超過 (δ_{LAE}) 0.94 と -0.17 にそれぞれ対応する。このサンプル毎に $L_{Ly\alpha}$ 光度 ($L_{Ly\alpha}$) や輝線等価幅 (EW_0) の分布に違いがないか、即ち密度環境依存がないかを調べた。図 6 にサンプル毎の $L_{Ly\alpha}$ と EW_0 分布を示す。両分布ともにエラーバーの範囲でサンプル毎の違いは存在しないように見える。あらゆる 2 分布に対して KS テストも行ったが、全て 30%以上となり、有意な分布の違いは検出されなかった。更に $z = 3.1$ の LAE サンプル (SDF 領域と SXDS 領域、Yamada et al. 2012 から) に対しても同様の解析を行ったが、やはり環境毎の $L_{Ly\alpha}$, EW_0 分布の違いは検出されなかった。これらの結果は、 $z =$

2 - 3 で 10Mpc スケールでは普遍的に LAE の Ly α 放射機構に環境依存性は存在しない、という事を支持している。この事はそれ自体一つの発見であるが、新たな問題を提示する予想外の結果であった。他研究から LAE の EW 分布は $z = 1 - 5$ で進化がある (low- z ほど EW が小さい LAE が多い) 事が知られており、その原因として銀河内ダスト量が low- z ほど多くなるからだとする説明と矛盾するからである。もしダスト量の進化により EW 分布の時間変化が引き起こされるならば、そうした変化は高密度領域ほど優先的に起きる (dust-enrichment は銀河形成が速い場所ほど優先的に進む) はずなので環境依存性として観測されるはずなのである。この問題は将来よりサンプルを増やして議論したいと考えている。

V. Summary and Future work

本研究では 53W002 領域における広視野かつ深い $z = 2.4$ の LAE 探査を行い、以下の結果を得た。

- $EW_0 \geq 20 \text{ \AA}$ の LAE を 240 天体検出、同領域の大規模構造を明確化。
- 高密度領域 53W002F-HDR の同定
- PDF を用いる新手法により、53W002F-HDR の significance を定量化 (rareness probability = 0.9%)
- LAE の Ly α 放射機構に環境依存性なし (10Mpc スケール)

今後の研究課題としては

- シミュレーションを用いた PDF 解析新手法の精度の検証と向上
- 53W002F-HDR 内の LAE の多天体分光
- 他波長フォローアップ観測

が挙げられる。特に (iii) については近赤外撮像&分光観測の計画を夏の学校で知り合った相田氏 (愛媛大) および鍛冶澤氏と進行中である。

また本研究のような解析を様々な赤方偏移、様々な原始銀河団に対して行う事が重要であり、私はサンプル数を増やす事により最終的に銀河進化の問題を赤方偏移、環境、銀河の物理量で張られる 3次元空間で議論していこうと考えている (図 7 参照)。

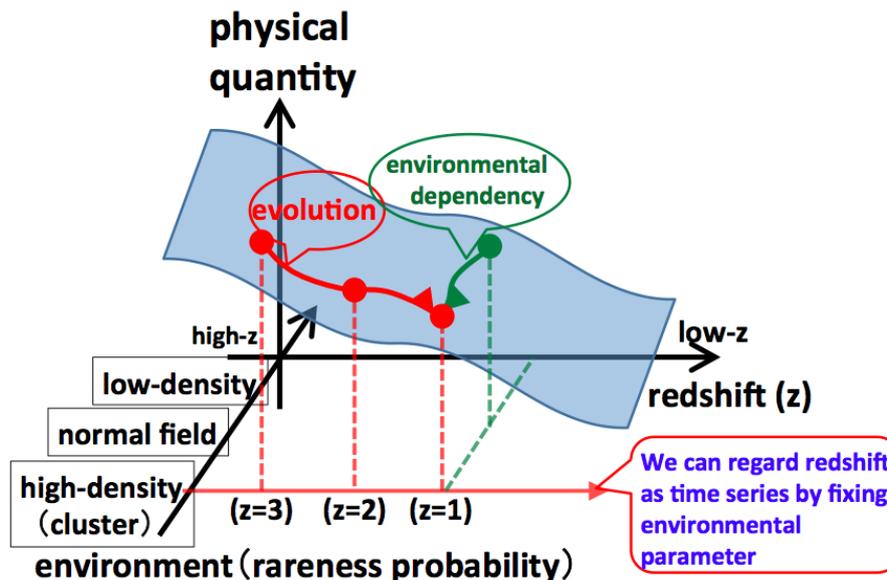


Figure 7: 銀河進化と環境依存性の概念図

Reference

- Mawatari et al., 2012, ApJ, accepted (arXiv:1209.1253)
 Pascarella et al., 1996b, Nature, 383, 45
 Keel et al., 1999, AJ, 118, 2547