

Size evolution of star-forming galaxies with

2<z<4.5 in the VIMOS Ultra-Deep Survey

Ribeiro+16 , arXiv:1602.01840v1

ABSTRACT

Context. The size of a galaxy encapsulates the signature of the different physical processes driving its evolution. The distribution of galaxy sizes in the universe as a function of cosmic time is therefore a key to understand galaxy evolution.

Aims. We aim to measure the average sizes and size distributions of galaxies as they are assembling before the peak in the comoving star formation rate density of the universe to better understand the evolution of galaxies across cosmic time.

Methods. We use a sample of ~ 1200 galaxies with confirmed spectroscopic redshifts $2 \leq z_{spec} \leq 4.5$ in the VIMOS Ultra Deep Survey (VUDS), representative of star-forming galaxies with $i_{AB} \leq 25$. We first derive galaxy sizes applying a classical parametric profile fitting method using GALFIT. We then measure the total pixel area covered by a galaxy above a given surface brightness threshold, which overcomes the difficulty of measuring sizes of galaxies with irregular shapes. We then compare the results obtained for the equivalent circularized radius enclosing 100% of the measured galaxy light r_T^{100} to those obtained with the effective radius $r_{e,circ}$ measured with GALFIT.

Results. We find that the sizes of galaxies computed with our non-parametric approach span a large range but remain roughly constant on average with a median value $r_T^{100} \sim 2.2$ kpc for galaxies with $2 < z < 4.5$. This is in stark contrast with the strong downward evolution of r_e with increasing redshift, down to sizes of < 1 kpc at $z \sim 4.5$. We analyze the difference and find that parametric fitting of complex, asymmetric, multi-component galaxies is severely underestimating their sizes. By comparing r_T^{100} with physical parameters obtained through SED fitting we find that the star-forming galaxies that are the largest at any redshift are, on average, more massive and more star-forming. We discover that galaxies present more concentrated light profiles as we move towards higher redshifts. We interpret these results as the signature of several, possibly different, evolutionary paths of galaxies in their early stages of assembly, including major and minor merging or star-formation in multiple bright regions.

Key words. high redshift universe – galaxy morphology – galaxy evolution – galaxy formation

Abstract

- VIMOS Ultra Deep Survey (VUDS) で得られた $2 < z_{spec} < 4.5$ の star forming 銀河 1200 個について、パラメトリックサイズ(r_e)、ノンパラメトリック(r_T^{100})にサイズを測定した
- High-z に行くほど小さくなる r_e に比べ、ノンパラメトリックな方法で測定したサイズは赤方偏移による進化がほとんど見られなかった
- light profile の中心集中度は high-z で高くなっている、inside-out の描像と合っている

1. Introduction

- M_\star などと同様に銀河サイズは銀河の進化過程を調べる上で重要な要素の一つ
- 銀河のサイズには様々な定義の仕方がある
 - light profile を仮定(sersic profile など)。x2 fitting を行い、fitting のパラメータとして有効半径を求める
 - 全光度の半分が含まれる円や楕円の半径とする
 - 銀河に属するピクセルの個数を数える(Law+07)
- 銀河サイズは high-z に行くに従って小さくなるということは広く知られている。しかしサイズの測り方を変えると変化しないことを示唆する研究(Law+07)もある

- 本研究では spec-z の存在する 1200 個の銀河について従来の fitting によるサイズ測定に加え、ノンパラメトリックな方法でサイズ測定を行い赤方偏移による進化を調べた。また light profile の中心集中度や、 M_\star などの物理量とサイズの関係も調べた。

2.Data and sample selection

- COSMOS field において VUDS と CANDELS survey からスペクトルと rest-UV の画像を得る
- VUDS からスペクトル($3650\text{ \AA} < \lambda < 9350\text{ \AA}$)得る
 - $2.0 < z_{\text{spec}} < 4.5$ の銀河を選択
 - SED fitting で SFR, M_\star などのパラメータを求める(GOSSIP+) (Thomas et al.)
- F814W, F125W, F160W の画像を CANDELS から得る
 - Rest-UV でサイズを測定
- $\log_{10}(M_\star / M_\odot) > -0.204(z-4.5) + 9.35$ でカットし、1242 銀河について調べる(Fig.1, Fig2)
 - $z \sim 4.5$ で $\log_{10}(M_\star / M_\odot) > 9.35$ で VUDS の sampling に漏れが無い
 - stellar mass function evolution(Illert+13)によって他の z にも適用

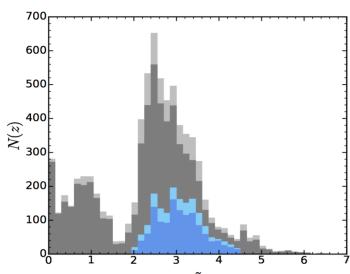


Fig. 1. The $N(z)$ for the entire VUDS sample considering all galaxies with a redshift measurement in light grey and those with a redshift reliability flag corresponding to a $> 75\%$ certainty in dark grey. In blue colors we present the distribution for the COSMOS+ECDFS, stellar mass selected and $2 < z < 4.5$ sample (all flags in light blue and reliable flags in darker blue).

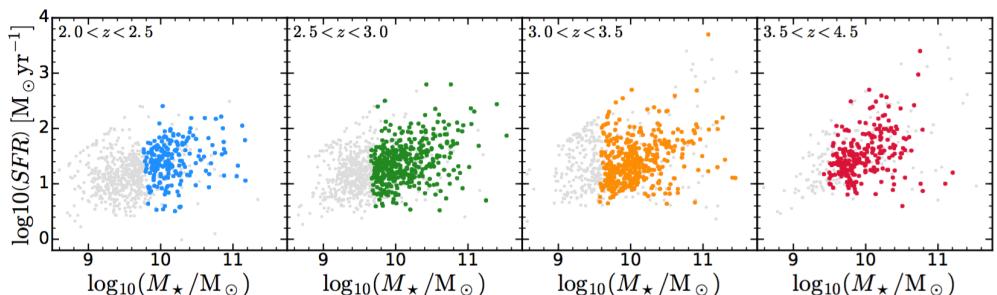


Fig. 2. Range in stellar masses and SFRs for the sample studied here. In each panel, the light gray points refer to the entire VUDS sample in each redshift bin. The colored points are the galaxies in the selected stellar mass range and with reliable spectroscopic flags (correct redshift probability of $> 75\%$, see text for more details).

3.Size measurements

3.1 Parametric size measurements

- sersic profile を使って銀河の表面輝度を fitting する方法が銀河のサイズを測定する際によく使われている
 - sersic profile : $I(r) = I_e \exp[-\kappa(r/r_e)^{1/n} + \kappa]$
 - n: sersic index ($n < 4$: disk galaxy, $n > 4$: elliptical galaxy)
 - SExtractor のパラメータを初期値として GALFIT を使って fitting
 - r_e を求め、その後 circularized radius ($r_{e,\text{circ}}$)に変換する
 - $r_{e,\text{circ}} = r_e \sqrt{q}$ ($q = b/a$, a : 楕円の長軸の長さ, b : 短軸の長さ)
 - 楕円と等しい面積を持つ円の半径に変換している

- バンドの違いによるサイズの影響
 - サイズは rest frame で同じ波長で測定できるのが理想
 - rest-frame の波長によるサイズの影響を見るため様々なバンドで $r_{e,\text{circ}}$ を測定(Fig.5)
 - rest-frame の波長による影響は小さい
 - ✧ 基本的に F814W でサイズ測定を行う
- Cosmological dimming の影響
 - シミュレーションの結果パラメトリックな fitting では cosmological dimming の影響はない
- $r_{e,\text{circ}}$ は high-z に行くに従って単調に減少(Fig.7)
 - 先行研究の傾向と一致

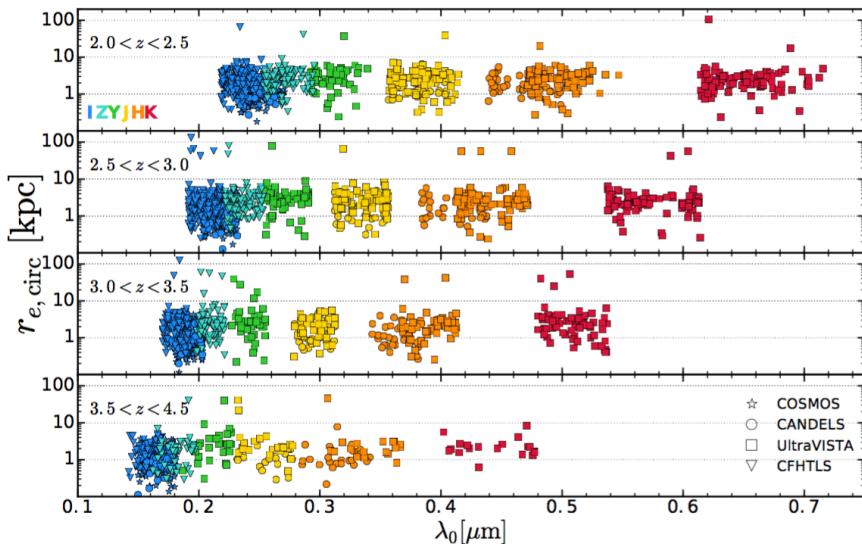


Fig. 5. Measured Sizes as a function of wavelength for galaxies with $\log_{10}(M_*) > 9.5$ at $2 < z < 4.5$ in the COSMOS field. Different symbols correspond to different surveys (symbol coding on the bottom panel) and different colors to different observed bands (color coding in the top panel). Each point represents the size of a given galaxy at the rest-frame wavelength of the pivot of the filter.

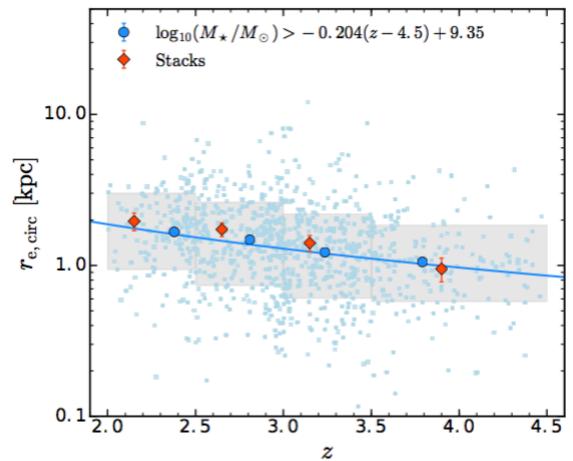


Fig. 7. Size evolution with redshift. Each galaxy with a good size measurement is plotted with a small blue point (squares for redshift confidence 2 and 9, circles for 3 and 4). The median values (in redshift and size for each bin) and respective error (σ / \sqrt{N}) per redshift bin are shown by the large blue points with the error bars. The shaded region delimits the 16th and 84th percentiles including 68% of the sample in each redshift bin. The red diamonds are the effective radii of stacked images computed from the method described in section 5 and are plotted at the center of the redshift bin.

3.2 Parametric size measurements

- local の対称的な形を銀河に比べ、high-z の銀河では不規則な形の銀河が多くなる
 - $z \sim 1$ で 52% が irregular shape (Delgado-Serrano+10)
 - $z \sim 3$ で massive galaxy($\log M_\star > 10$) の 65% (Mortlock+13)
 - GALFIT での fitting では無理のある銀河が多くなる
- surface brightness がある threshold を超えたピクセルの面積を銀河サイズとするノンパラ

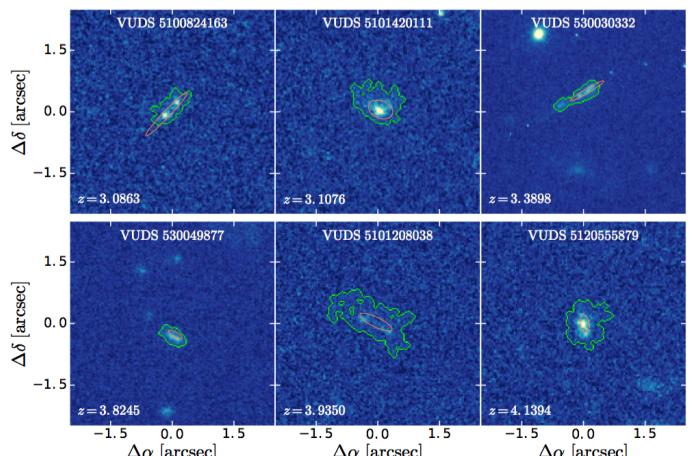


Fig. 8. F814W imaging in COSMOS (Koekemoer et al. 2007) and CANDELS (when available, Koekemoer et al. 2011) of the measured sizes for three galaxies in each redshift bin of our sample. The green contours show the segmentation map of the galaxy at the defined threshold which translates to T_{100} from equation 6 measured at $k_p = 1.0$. The red ellipse are constructed from the values of r_e , b/a and θ_{PA} derived from GALFIT

メトリックな方法を使う

- 銀河の形の影響を受けない
- 初期パラメータの影響がない
- fitting しないのでパラメータの値が収束しないという心配がない
- threshold の決め方に大きく左右される

● サイズ r_T^x の定義

- ある threshold 以上のピクセルが繋がった領域を銀河とみなし、total flux を計算する
- 明るいピクセルから順番に total flux の $x\%$ になるまで積分する
- その時のピクセルの個数を N_x , ピクセルサイズを $L(\text{arcsec/pixel})$, D_A を角形距離とすると、総面積 T_x は
- $T_x = N_x L^2 (2 \times 10^{-11}) D_A^2$
- これを等しい面積を持つ円の半径 r_T^x に直すと $r_T^x = \sqrt{T_x / \pi}$

● Cosmological dimming, Luminosity 進化の影響

- ある redshift で threshold 上の銀河が自然に redshift 進化するとその redshift でも threshold 上に来るようになりたい
- パラメトリックな fitting と違いこのサイズ測定では cosmological dimming の影響がある
- $F \propto (1+z)^{-4}$ なので
観測者での光子数は $N_{photos,o} \propto (1+z)^{-3}$ (cf. p10)
count と光子数は比例するので光子数が N 倍になると sky に対する σ も N 倍になる
- Luminosity の進化は次の式に従うとする
 $\diamond L(z) = 10^{-0.4(-0.36z)} (z < 3), 2.25 \times 10^{-0.4(-0.07z)} (z > 3)$
- 2つの影響を考慮すると、ある z での threshold(k [in units of σ])の取り方は z_p での threshold(k_p [in units of σ])に対して

$$k = k_p \left(\frac{1+z}{1+z_p} \right)^{-3} \times \frac{L(z)}{L(z_p)}$$

となる (Fig.10)

● $r^{100}_{T,\text{corr}}$ は z に対して flat (Fig.13)

$$\log(r) = \beta_\lambda + \alpha_\lambda \log(\lambda_0) \quad (5)$$

を用いて z 進化を fitting(table.3)

- 明るい領域ほど進化が早い

● high-z に行くに従って $r_{e,\text{circ}}$ と

$r^{100}_{T,\text{corr}}$ のサイズは乖離

- $r_{e,\text{circ}}$ は high-z で過小評価になっている可能性がある

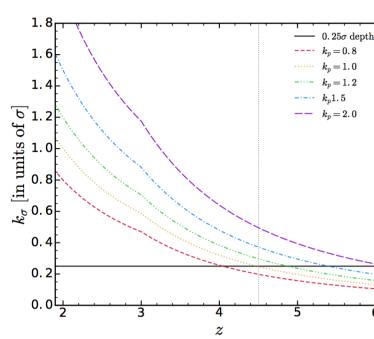


Fig. 10. Value of k as a function of redshift for different choices of k_p . The vertical dotted line shows the upper redshift limit we assume in this paper. The black solid line shows the depth limit above which the noise correction is larger than 100 pixels.

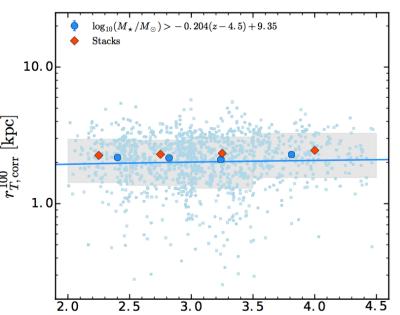


Fig. 13. Total size evolution with redshift. Each galaxy is plotted with a small blue point (squares for redshift confidence 2 and 9, circles for 3 and 4). The median values and respective error (σ/\sqrt{N}) per redshift bin are shown by the large blue points with the error bars. The shaded region delimits the 16th and 84th percentiles including 68% of the sample in each redshift bin. The red diamonds are from the stacked images computed from the method described in section 5.

Size estimate	F814W		F160W	
	α_r	β_r	α_r	β_r
r_e	-1.29 ± 0.18	0.89 ± 0.11	-1.40 ± 0.34	1.01 ± 0.20
$r_{T,corr}^{10}$	-0.44 ± 0.09	-0.12 ± 0.06	-0.44 ± 0.09	-0.12 ± 0.06
$r_{T,corr}^{20}$	-0.40 ± 0.10	0.02 ± 0.06	-0.18 ± 0.22	-0.04 ± 0.13
$r_{T,corr}^{30}$	-0.36 ± 0.10	0.12 ± 0.06	-0.09 ± 0.23	-0.01 ± 0.14
$r_{T,corr}^{40}$	-0.29 ± 0.11	0.17 ± 0.06	0.03 ± 0.26	-0.01 ± 0.16
$r_{T,corr}^{50}$	-0.21 ± 0.10	0.19 ± 0.06	0.13 ± 0.20	0.01 ± 0.13
$r_{T,corr}^{60}$	-0.11 ± 0.10	0.20 ± 0.06	0.24 ± 0.22	-0.02 ± 0.14
$r_{T,corr}^{70}$	-0.01 ± 0.10	0.20 ± 0.06	0.41 ± 0.25	-0.08 ± 0.15
$r_{T,corr}^{80}$	0.11 ± 0.10	0.18 ± 0.06	0.56 ± 0.27	-0.14 ± 0.17
$r_{T,corr}^{90}$	0.25 ± 0.10	0.15 ± 0.06	0.67 ± 0.28	-0.19 ± 0.17
$r_{T,corr}^{100}$	0.38 ± 0.11	0.11 ± 0.07	0.34 ± 0.28	0.07 ± 0.17
$r_{T,corr}^{100}$	0.13 ± 0.12	0.23 ± 0.07	0.02 ± 0.24	0.24 ± 0.14

Table 3. Best fit slope and normalization factor for equation $\log(r) = \alpha_r \log(1+z) + \beta_r$ for the different size estimates used throughout the paper. Values for both F814W and F160W, valid for $2 < z < 4.5$, are given here.

4. Light concentration

- 各 redshift で銀河を stack して light profile を求める(Fig.15)
- また中心集中度を C_T で定義する
 - $C_T = 5 \times \log_{10}(r_{80}^T / r_{20}^T)$
 - C_T が大きいほど中心集中度が高い(Fig.16)

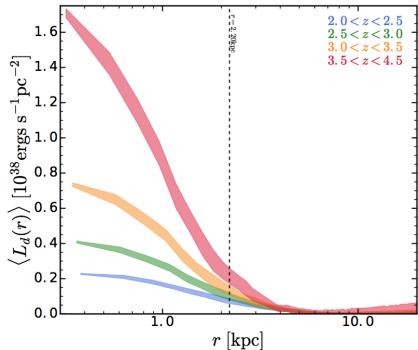


Fig. 15. Surface luminosity profiles of the median stacked F814W band images of galaxies in our sample at four different redshift bins. The black dashed line is the median $r_{T,corr}^{100}$ of our sample. The width of each profile encodes the surface luminosity error.

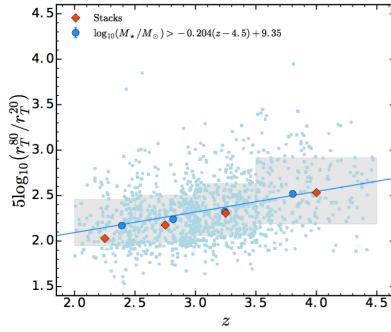


Fig. 16. Evolution of light concentration in galaxies computed from the ratio of the non-parametric radii enclosing 80% and 20% of the total flux, as defined in Section 4. The solid line is a linear fit to all the small blue points. Each galaxy is plotted with a small blue point (squares for redshift confidence 2 and 9, circles for 3 and 4). The median values and respective error (σ / \sqrt{N}) per redshift bin are shown as large blue points with error bars. The shaded region delimits the 16th and 84th percentiles including 68% of the sample in each redshift bin. The orange diamonds are the values obtained from the stacked images computed from the method described in section 5.

5. Size relations with physical parameter

- VIMOS のスペクトルを SED fitting し、様々な物理量を求めサイズと比較した(Fig.18)
 - M_\star との関係を見るとどちらのサイズの定義でも同じような相関
 - M_\star が大きくなると $r_{e,\text{cric}}$ は減少
 - $r_{e,\text{cric}}$ では大質量銀河の複雑な構造を無視している可能性
 - $r_{T,corr}^{100}$ と SFR に相関、 $r_{e,\text{cric}}$ では相関はほぼ見られない

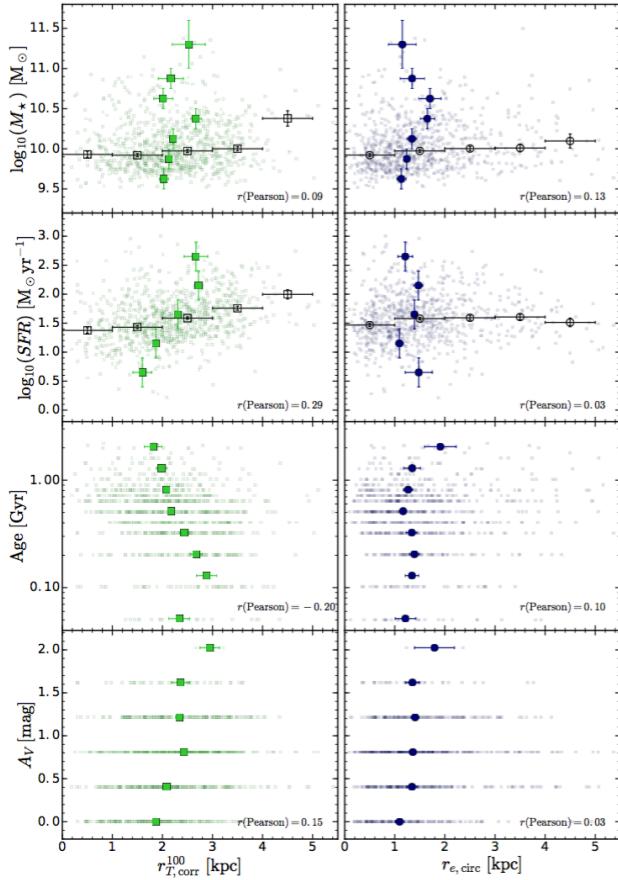


Fig. 18. Correlation of the measured galaxy sizes with parameters derived from GOSSIP+ SED fitting for our stellar mass selected sample (using the stellar masses derived with GOSSIP+ and equation 1). Only galaxies with good and excellent spectrophotometric fits are included. From top to bottom we have the stellar mass, SFR, age and dust extinction. On the right panels we show the results for GALFIT derived $r_{e,\text{circ}}$ and in the left panels we show the results for our value of $r_{T,\text{corr}}^{100}$. The solid colored symbols represent the median values in bins of the physical parameter in question. The error bar in the y-direction shows the bin size and in the x-direction shows the error on the median (σ/\sqrt{N}). The open black symbols represent the median values in bins of radii. In this case, error bars have the same meaning as before, in the inverted directions. Small points represent individual measurements.

Article number, page 17 of 22

6. Discussion

- ダークマターハローの階層構造形成モデルでは銀河の disk の半径はダークマターのビリアル半径と比例する
 - また以下の式が成り立つ
- $$R_{vir} = \left[\frac{GM_{vir}}{100H(z)} \right]^{1/3} = \frac{V_{vir}}{10H(z)}$$
- そのため fixed mass について $a_r = -1$, fixed vircular velocity において $a_r = -1.5$ が成り立つ
 - 今回 $r_{e,\text{cric}}$ に対して求めた $a_r = -1.29 \pm 0.18$ はこの 2 つ仮説の間の値を取っているが、 $r^{100}_{T,\text{corr}}$ に対して求めた $a_r = 0.13 \pm 0.12$ は 2 つの仮説のどちらとも合わない
 - $r^{100}_{T,\text{corr}}$ は disk のサイズを測っているわけではないので合わないのは当然だが、 $r^{100}_{T,\text{corr}}$ のサイズ進化をダークマターハローと結びつけて考えるにはより複雑な解析モデルが必要
 - light concentration の進化に関してはコンパクトなクランプが merger することで smooth な profile になっている可能性がある

- inside-out quenching(Wuyts+11, Tacchella+15) のモデルと合う

7. Conclusion

- VUDS による $2 < z_{\text{spec}} < 4.5$ の~1200 個の銀河についてサイズ進化を従来のパラメトリックな方法とノンパラメトリックな方法で調べた
- ノンパラメトリックな方法では $2 < z_{\text{spec}} < 4.5$ において $r^{100} \tau_{\text{corr}} \sim 2.2$ でほぼ一定であり、パラメトリックな方法と進化が大きく異なっていた
- パラメトリックな方法では複雑な銀河の構造を無視している可能性がある
- light concentration は high-z の方が集中しており、low-z に行くに従って flat になっている