

Evolution in the properties of Lyman- α emitters from redshift $z \sim 3$ to $z \sim 2$

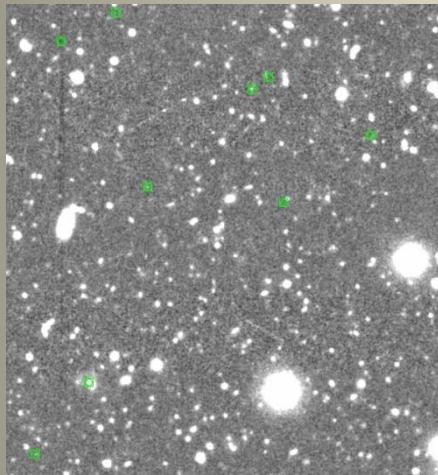
Nilsson, K.K. et al
[2009A&A...498...13N](#)

みさゼミ 2010/7/14

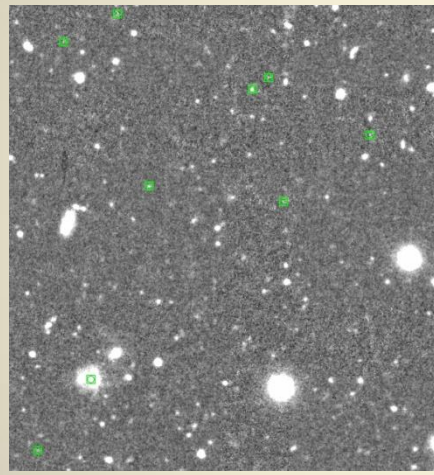
修士1年 馬渡健

事前知識: Lyman α emitter (LAE) とは？

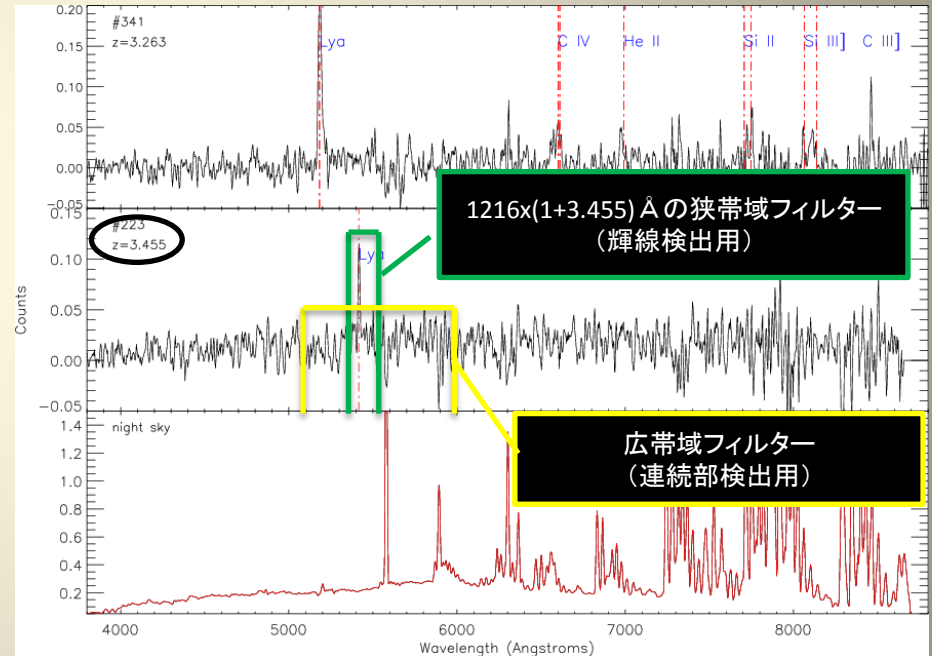
- ・定義: 狭帯域フィルター(中心波長= $1216 \times (1+z)$ Å)で撮像した際に、Ly α 輝線により明るく写る天体
⇔ 赤方偏移 z の、Ly α 輝線放射が強い銀河



広帯域バンド画像
(連続光)



狭帯域バンド画像
(輝線があれば明るく写る)



- ・・・基本的には「dust-freeな若い星形成銀河」と考えられているが、物理的性質で定義しているわけではないのでそれ以外の天体も含まれる (AGN, dust-richなど)
⇒ 物理性質の解明、更なる分類の必要性

本論文の研究の目的

- 背景:

$z=3\sim 6$ のLAEサンプルは大分増えてきた(分光により確認されたものだけで~数百)

しかし、

物理性質いまだ不明

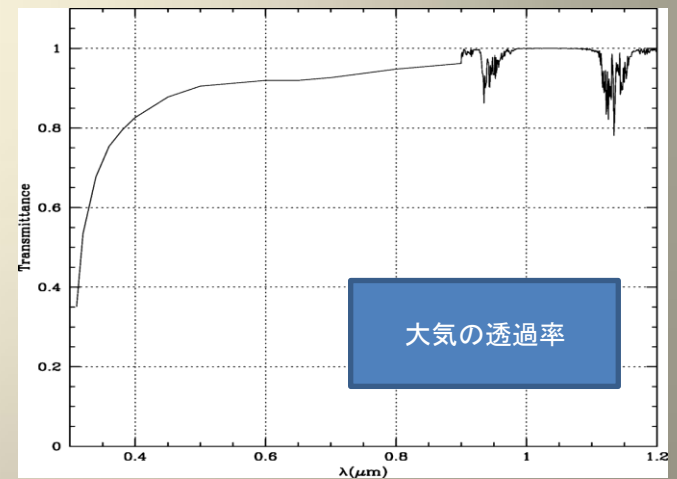
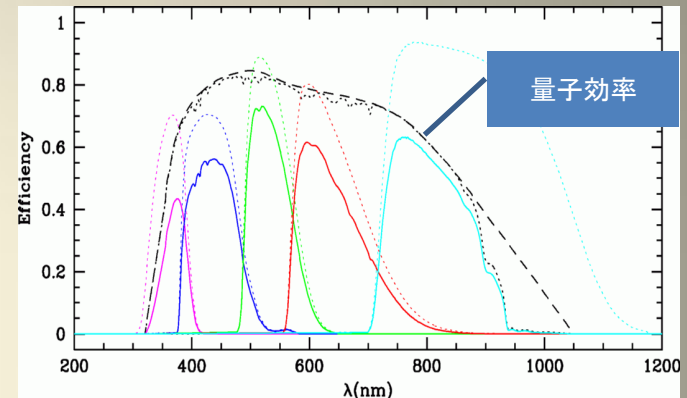
$z=1.6\sim 3$ のサンプル数少ない

$\lambda=3161\sim 4864 \text{ \AA}$ の観測波長に対応

⇒大気の透過率、CCDの量子効率的に厳しい

$z=2.25$ 領域(COSMOS field)のLAEの性質を調べ、 $z>3$ の議論を $z\sim 2$ まで拡張

⇒LAEの物理性質の詳細説明



本研究の目的

本論文の研究の目的

- 3<z<6における議論(LAEの性質)

=「high z程 青い/若い/小さい」 :あくまで大まかな傾向

	4<z<5.7 (Pirzkal et al,2007)	z~3
Mass (M_sun)	10 ⁶ ~10 ⁸	a few x 10 ⁸ (Gawiser,2006)
Age (Myr)	a few	100 (Gawiser,2006) 制限つかない(Nilsson,2007)
Dust (extinction)	dust-free	no dust (Gawiser,2006)

z=2では
より
massive?
older??
dusty???
(赤い)



例外も...

- Lai et al(2008) : z~3のLAEでold,massiveなものある⇒一意に「青い/若い/小さい」でない
- Finkelstein et al(2008) : z=4.5. very dusty, ~10¹⁰M_sunのLAEあり
⇒LAEに二つの種族? 「若い/青い」と「老いた/赤い(dusty)」

観測

- 日時

2007/3/10~3/23

- 観測機器

MPG/ESO 2.2m望遠鏡@チリ、WFI(カセグレン焦点、視野34'x33')

- 観測領域

COSMOS field: $(\alpha, \delta) = (10\text{h}00\text{m}27\text{s}, 02\text{d}12\text{m}22.7\text{s})$

- 使用フィルター

N396 narrow band filter

⇒ 受かる輝線候補: $z=2.206\sim 2.312$ の Ly α (1216 Å)

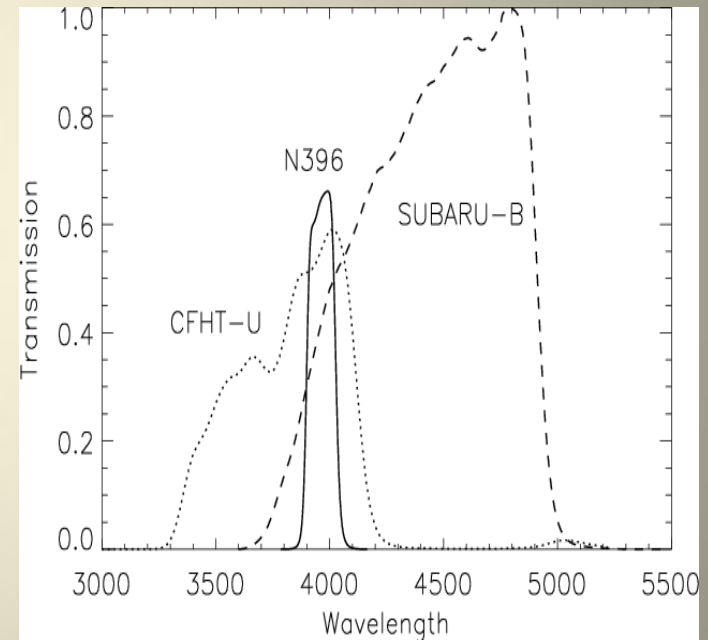
$z=0.046\sim 0.081$ の [O II] (~3227 Å)

$z=1.52\sim 1.59$ の C IV (~1550 Å)

- 積分時間

29回に分けて撮像

⇒ 合計の積分時間 = 22.7時間



観測(一次処理)

- MPIAphotoパイプライン(WFIデータ専用のパイプライン)使用

- (i)MIDASフォーマットへの変換、BIAS引き

- (ii)ダメpixelをランプ画像使って補正

- (iii)skyフラットを作成→flat-fielding

- (iv)歪み補正(いちいちSDSSカタログと画像内天体を照合させて行う)

- (v)29枚分の位置合わせ→足し合わせ

- (vi)sky引きしきれてない分を再度引きなおし(IRAFタスクのimsurfit用いて)

- (vii)flux補正、zero点決め:

- N396バンドで受かった天体の内、LAEではないもの使う⇔flatスペクトル,EW=0

↓

- CFHT-u*,Subaru-Bバンドデータ(カタログとして公開)のフラックスから
着目天体のN396におけるフラックス(F_{N396})→等級(m_{N396})推定

↓

- 観測countと対応する等級 m_{N396} からzero点決定: $m_{N396}=-2.5\log(\text{count}/\text{sec})+\text{zero点}$

- 処理後の画像における検出限界

- 5- σ detectionで25.3mag ⇒ 対応するLy α 光度: $\log L=42.36(\text{erg}/\text{s})$

LAEの選び出し

N396バンド画像から検出された天体の全てがLAEではない。連続光に比べて輝線が強い天体だけ選びたい。



等価幅EWの計算

$$EW = \int_{3963-\Delta}^{3963+\Delta} \frac{f_{\lambda,em} - f_{\lambda,c}}{f_{\lambda,c}} d\lambda \Rightarrow \frac{F_{N396}(-F_c)}{f_{\lambda,c}}$$

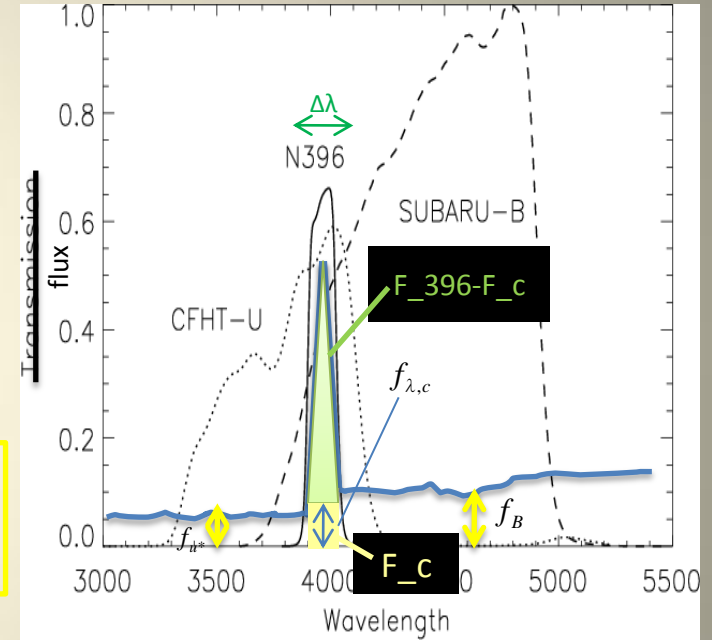
$$\propto \frac{\text{flux}(erg / s / cm^2)}{\text{flux-density}(erg / s / cm^2 / \text{\AA})} \propto \frac{(1+z)^{-2}}{(1+z)^{-3}} \propto 1+z$$

※ F_{N396} : N396バンドでのフラックス($erg / s / cm^2$) ← 観測値

$f_{\lambda,c}$: continuumのフラックス密度($erg / s / cm^2 / \text{\AA}$)

F_c : continuumのフラックス($erg / s / cm^2$) = $f_{\lambda,c} \times \Delta \lambda$

既存カタログ
(Capak, 2007)のu*, B
バンドフラックスから
推定(内挿)



(イメージ図)

例:

輝線がないフラットスペクトルの天体 ($F_{N396} = F_c$) \Rightarrow EW=0

輝線が強い天体 ($F_{N396} \gg F_c$) \Rightarrow EW \gg 0

LAEの選り出し

選出基準

EW > 65 Å (⇔ rest frame EW > 20 Å に相当)

+

EW > 2.3σ

(σ: EW < 65 Å サンプルだけの分布の標準偏差)

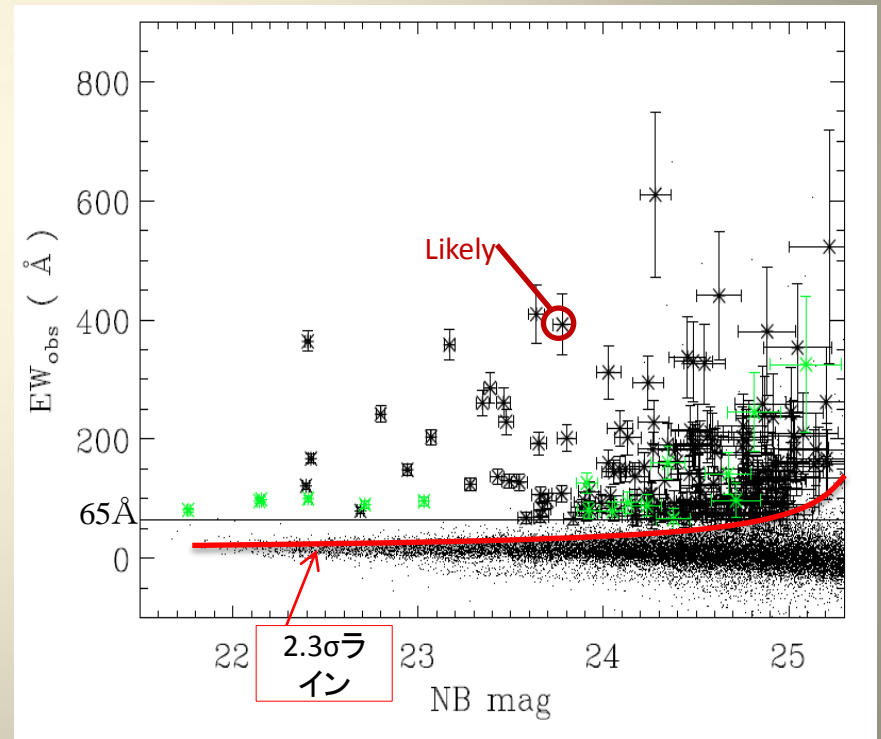


386天体



目で一つ一つチェックして更なる分類

- Rejected: 星周辺や人工衛星による偽物 (131個)
- Unlikely: 明らかな理由はないが偽物っぽい (61個)
- Likely: 本物 (187個)



LAEの選び出し

- [O II] emitterやCIV emitterの混入

187天体のうちLAE以外([O II]やCIV)はどの程度あるか？また特定はできるか？

⇒特定はできないが、混入数の概算、確からしいLAEの選出は可能！

- [O II] emitter

Ly et al(2007): $z=0.07\sim 1.47$ でH α と[O II]光度のLF、およびその関係作成

→今回の観測([O II], $z=0.06$, survey volume=820Mpc³, 検出限界 $\log(L)=38.7$)
に適用

⇒今回のsurvey volume中に160個の[O II] emitter

その内、EW>65 Åのものは2%(Hogg et al, 1998)=3個

- CIV emitter

EW>65 ÅもあるのはAGNしか考えられない

→ $z=1.56$ におけるAGNのLF(Bongiorno et al, 2007)を、今回の観測(CIV, $z=1.56$, survey volume=225000Mpc³, 検出限界 $\log(L)=42.0$)と組み合わせる

⇒検出される可能性のあるCIV emitter数=2個

→ CIVの混入は無視できる

LAEの選び出し

- GALEX-detected or non-GALEX-detected

紫外線衛星GALEXのCOSMOS fieldデータを使えば、[O II] emitterを確実に除外可能

LAE・・・Ly α 輝線より短波長側は視線方向手前の中性水素により吸収されてること多い(Ly forest absorption)

[O II] emitter・・・輝線より短波長側でも吸収されない
(flat continuum)



GALEX観測の深さ考慮すれば

[O II] emitterは必ずGALEXで検出されてるはず！



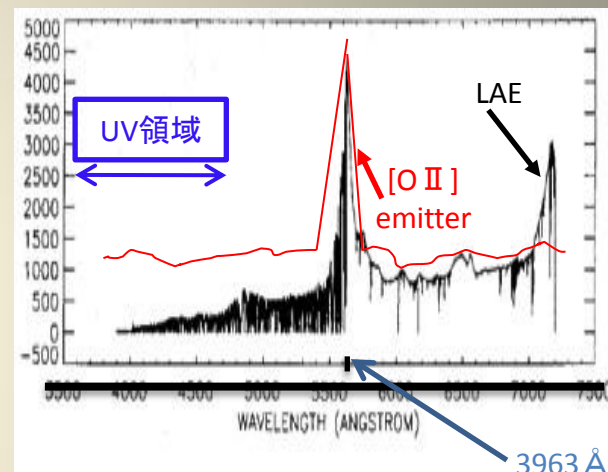
Likely天体(187個)を更に分類

non-GALEX-detected : 確実にLAE。170個

⇒一つ一つのLAE性質調べる時にはこのサンプルだけ使う

GALEX-detected : 17個。[O II] emitter混入してる可能性あるが、LAEの方が多

⇒数密度求める時はこのサンプルも加えた187個を使う



検出されたLAEの性質：測光

今回の観測で選ばれたLAE天体(non-GALEX-detected)の広帯域バンドでの明るさから「色」の議論したい。

COSMOSカタログ(Capak et al,2007): COSMOS fieldのu*,B,V,r+,i+,z+,Kバンド画像

LAE天体の座標で測光(aperture=3")

Table 3. COSMOS broad-bands used.

Band	Observatory	CWL (Å)	FWHM (Å)	Depth
u*	CFHT	3798	720	26.4
B _j	SUBARU	4460	897	27.3
g ⁺	SUBARU	4780	1265	27.0
V _j	SUBARU	5484	946	26.6
r ⁺	SUBARU	6295	1382	26.8
i ⁺	SUBARU	7641	1497	26.2
z ⁺	SUBARU	9037	856	25.2
K _s	KPNO	21500	3200	21.6

The depths are 5σ AB magnitudes as measured in 3" apertures (Capak et al. 2007).

- UV spectral index (β)

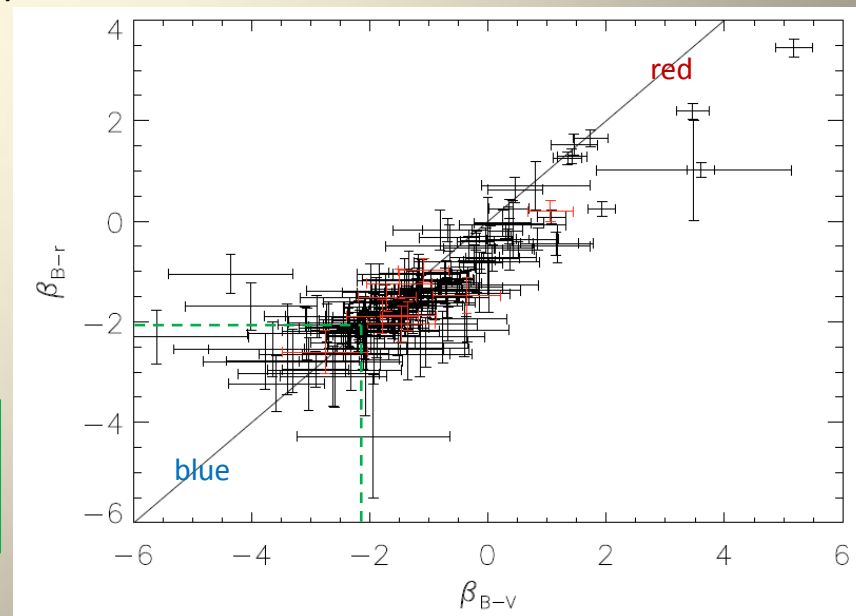
... $f_\lambda \propto \lambda^\beta$ でスペクトルをフィッティングした時のβ

(Meurer et al,1997やHathi et al,2008によると)

$$\begin{cases} \beta_{B_j-V_j} = 4.456 \times (B_j - V_j) - 2 \\ \beta_{B_j-r^+} = 2.673 \times (B_j - r^+) - 2 \end{cases}$$

と計算できる ⇒

※β=-2 : $f_\lambda \propto \lambda^{-2} \Leftrightarrow f_\nu \propto \nu^0 \Leftrightarrow$ カラー0 (AB mag)
赤い/青い の指標



検出されたLAEの性質：測光

• 二色図

- 118個/170が $V_j - i^+ > 0$

- 多くのサンプルは $\text{age} = 10^6 \sim 10^8 \text{ yr}$ のモデル (GALEXシミュレーション、single stellar populationモデル) で説明できる

- ダスト量 (reddening: E) はバラバラ

- $V_j - i^+$ 大 \wedge $B_j - V_j$ 小 :

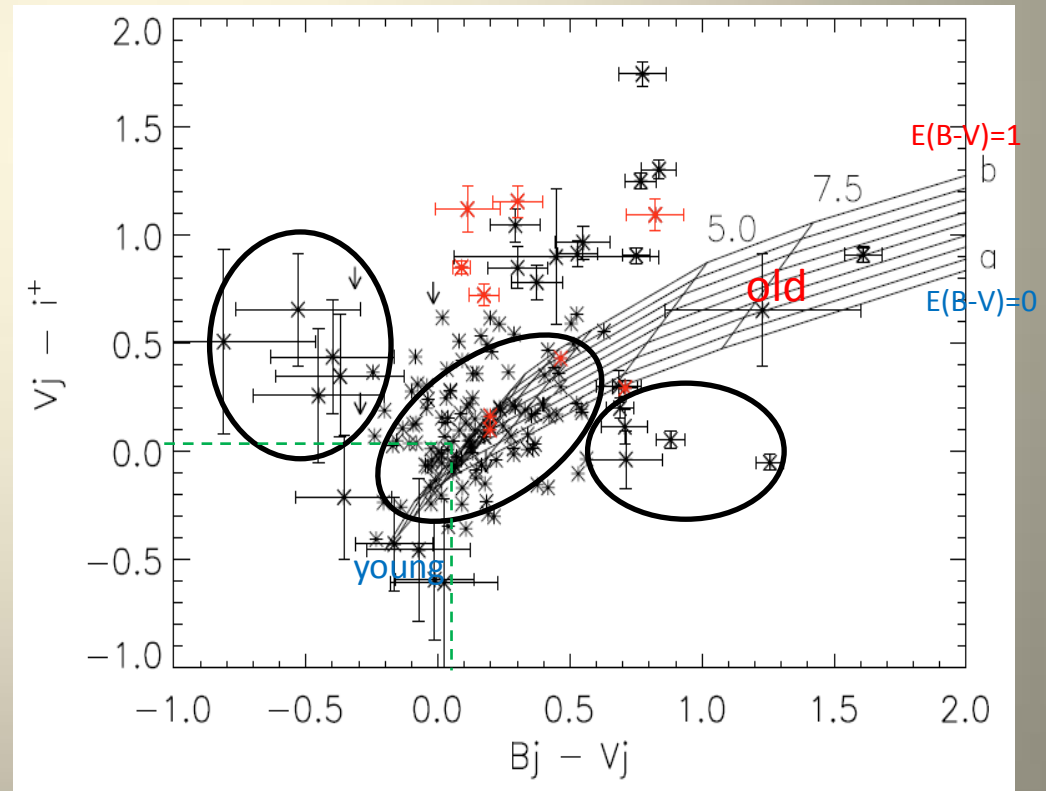
説明不可

モデルより複雑なSF history

- $B_j - V_j$ 大 \wedge $V_j - i^+$ 小 :

十分進化してるのに dust-poor??

測光の際にLAEと無関係の天体が混入した可能性



検出されたLAEの性質：測光

- SED

多数あるサンプルを重ね合わせて(stacking)してサンプルの平均的SEDを議論
サンプルの分類

Ks-detected: Ksバンドで天体が受かっているもの。検出限界の悪さ(21.6mag)から、受
かったものは相当、赤いor明るい。12個/170 \diamond

total: Ks-detected以外。144個/170 \times

red: totalの内 $V_j - i^+ > 0$ のもの。96個 \times

blue: totalの内 $V_j - i^+ < 0$ のもの。48個 \times

- red, total

⇒ stackingによりKsで受かるようになった

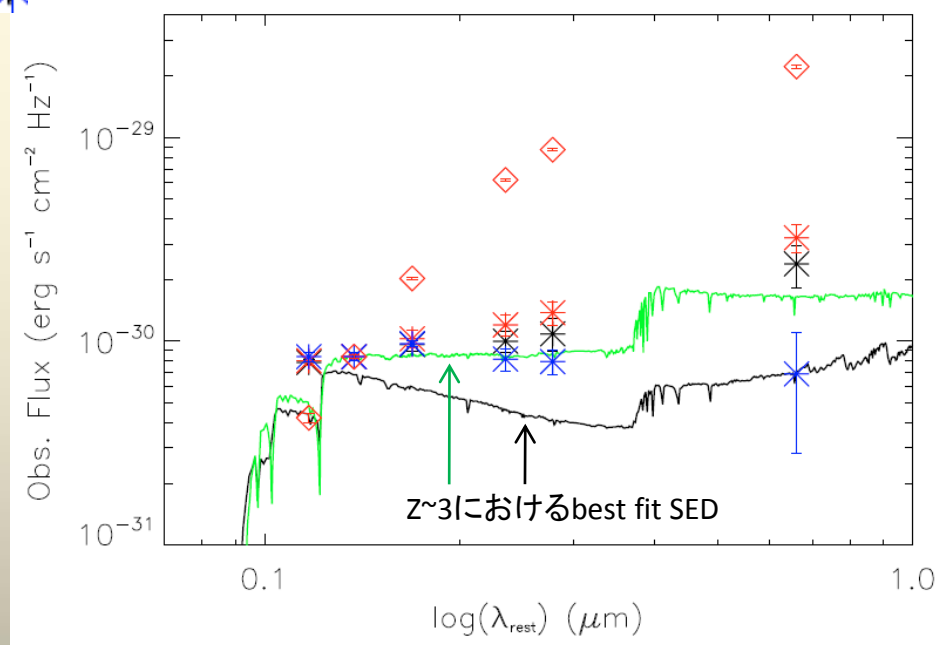
$z \sim 3$ LAEのSEDより赤い

- blue

⇒ $z \sim 3$ のSEDと調和

→ 96+12/170 $\sim 2/3$ が $z \sim 3$ より

「赤い」



検出されたLAEの性質: AGNの割合

contaminationとしてのAGN

- X線及び電波検出によるAGNの特定

XMM衛星とVLAデータからLAEサンプルと同一と思われる(aperture=8")AGNを探す

※弱点・・・X線検出限界が浅め→AGNを全て拾いきれない

- X線の硬さを表す量

$$HR1 = \frac{S_{2.0-4.5} - S_{0.5-2.0}}{S_{2.0-4.5} + S_{0.5-2.0}}$$

$$HR2 = \frac{S_{4.5-10.0} - S_{2.0-4.5}}{S_{4.5-10.0} + S_{2.0-4.5}}$$

(大体HR1>0かつHR2<0)

→検出されたのは2型AGN

- Offset

LAEサンプルからの位置ずれ

5"以上ズレてるのは無関係

(たぶん)

LAE candidates									
LAE_#	$S_{0.5-2.0}$ ($\times 10^{-15} \text{ erg / s / cm}^2$)	$S_{2.0-4.5}$	$S_{4.5-10.0}$	HR1	HR2	$\log(L_{0.5-2.0})$	Offset(X-ray) (")	$S_{1.4\text{GHz}}$ (μJy)	Offset(Radio) (")
25	129.0 ± 1.87	191.0 ± 5.63	133.0 ± 7.03	0.19 ± 0.01	-0.18 ± 0.03	45.67 ± 0.02	11.06	—	—
36	—	—	—	—	—	—	—	140 ± 27	0.10
57	—	—	—	—	—	—	—	47 ± 10	6.17
82	1.25 ± 1.97	—	—	<0.52	—	43.66 ± 0.41	1.07	—	—
101	—	—	—	—	—	—	—	137 ± 27	0.06
113	1.21 ± 4.10	9.58 ± 29.1	—	0.78 ± 0.61	<0.01	43.64 ± 0.64	10.55	—	—
115	7.20 ± 6.00	16.2 ± 21.5	—	0.38 ± 0.59	<-0.25	44.42 ± 0.78	0.17	—	—
119	0.92 ± 0.26	—	—	<0.63	—	43.55 ± 0.14	2.67	—	—
121	17.6 ± 0.73	31.0 ± 2.54	18.3 ± 3.52	0.28 ± 0.04	0.26 ± 0.11	44.81 ± 0.03	6.36	—	—
129	1.10 ± 0.27	—	—	<0.57	—	43.60 ± 0.12	1.95	—	—
132	—	—	—	—	—	—	—	47 ± 10	9.83
140	17.5 ± 0.72	46.3 ± 2.97	44.9 ± 4.73	0.45 ± 0.03	-0.02 ± 0.06	44.80 ± 0.02	0.74	—	—
150	2.6 ± 0.30	8.3 ± 1.48	—	0.52 ± 0.07	<0.08	43.98 ± 0.05	0.62	107 ± 30	0.21
161	2.42 ± 0.33	—	—	<0.25	—	43.95 ± 0.06	0.21	—	—
GALEX-detected candidates									
42	4.9 ± 2.92	—	—	<-0.10	—	40.6 ± 0.39	0.55	—	—
108	8.3 ± 0.60	16.9 ± 2.14	—	0.34 ± 0.06	<-0.27	40.83 ± 0.03	1.01	—	—
126	7.9 ± 0.50	12.0 ± 1.79	—	0.38 ± 0.59	<-0.11	40.81 ± 0.03	0.45	—	—
155	3.0 ± 0.34	5.6 ± 1.21	—	0.30 ± 0.10	<0.27	40.39 ± 0.06	1.57	—	—
173	—	—	—	—	—	—	—	110 ± 25	9.44

検出されたLAEの性質: AGNの割合

- AGN ratioとhigh-zとの比較

non-GALEX-detectedサンプルだけで議論すると

AGNの割合=9個/170~5%

↳ ただし下限値(Xで検出されていないAGNの存在)

	AGN 割合
$z \sim 4.5$	< 1% (Wang et al,2004)
$z \sim 3$	1% (Gawiser et al,2007)
$z \sim 2$	>5% (今回の観測) ~10% (Ouchi et al,2008)

検出されたLAEの性質：数密度

- 今回の観測領域($z=2.25$, COSMOS field)における密度

non-GALEX-detected + GALEX-detectedの計187サンプル使う



使う領域しぼる(S/N比の良いところだけ、星にはマスク)



288arcmin²の領域中(全視野の28%)、54個のLAE



$0.19/\text{arcmin}^2/\Delta z \Leftrightarrow 1.91/\text{arcmin}^2/z \Leftrightarrow 0.00062/\text{Mpc}^3$

: $z > 3$ の大体の他サーベイで求めたLAE密度より小さい

しかし

密度の議論を行うにはサーベイ領域の数が十分多くない...

⇒一意に結論出せない問題

検出されたLAEの性質：サイズ

- N396-imageとr+バンド-imageのFWHMを比較

- N396 imageの方が全体的に広がってる
: Ly α 光子が母銀河内で散乱・拡散してる
(\rightarrow LAEである証拠)

- non-GALEX-detectedだけでも上記と同じ
 \rightarrow [O II] emitterの混入は少ない
: 先の議論と一致

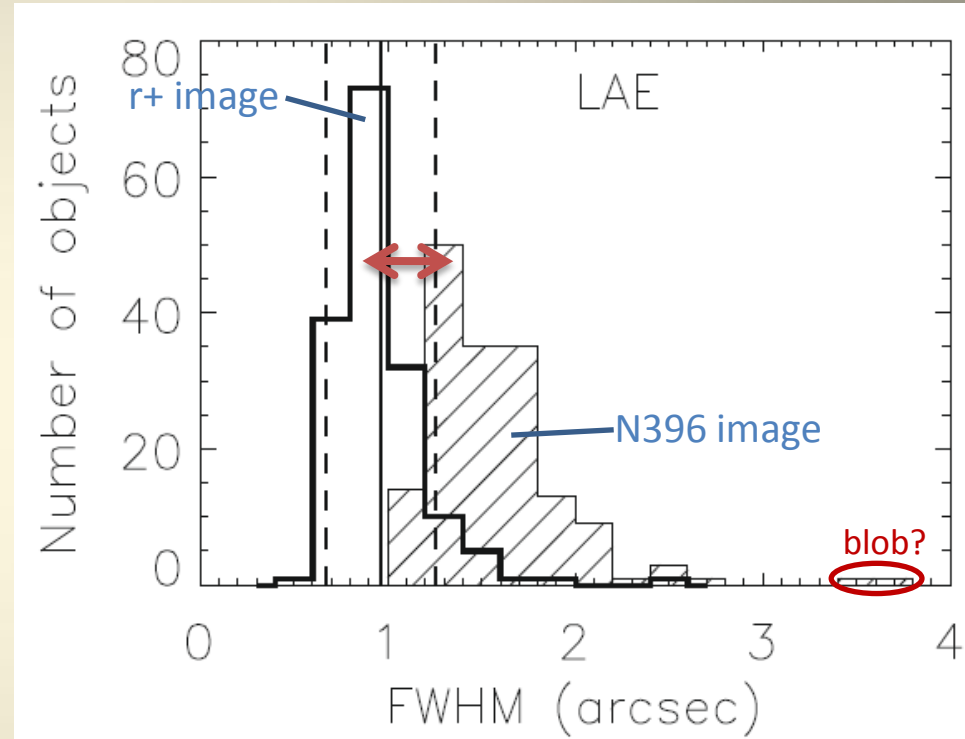
- N396でのサイズが大きい2つ
 \rightarrow Ly α -blob??

(: narrow band imageが広がってるLAE)

r+バンドで見ても広がってる \rightarrow 単に大きなLAE

- blobが0個

\rightarrow 観測領域は特別に高密度というわけではない
: 数密度の議論と調和



Matsuda et al(2004)
blobは高密度領域に存在

検出されたLAEの性質 : SFR

• SFRの算出方法

(i) UV光から計算 : Kennicutt (1998)

$$SFR_{UV} = \frac{f_{1500\text{\AA}} \times 4\pi d_L^2 \times 1.4 \times 10^{-28}}{1+z} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

$f_{1500\text{\AA}}$: rest1500Å での flux - density
(erg / s / cm² / Hz)

※(1+z)は”単位周波数あたり”の補正

$\frac{f_{1500\text{\AA}} \times 4\pi d_L^2}{1+z}$ で1500 ÅにおけるLuminosity-density

(ii) Ly α -fluxから計算 : Brocklehurst(1971)

$$SFR_{Ly\alpha} = \frac{F_{Ly\alpha} \times 4\pi d_L^2}{8.7 \times 1.12 \times 10^{41}} M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$$

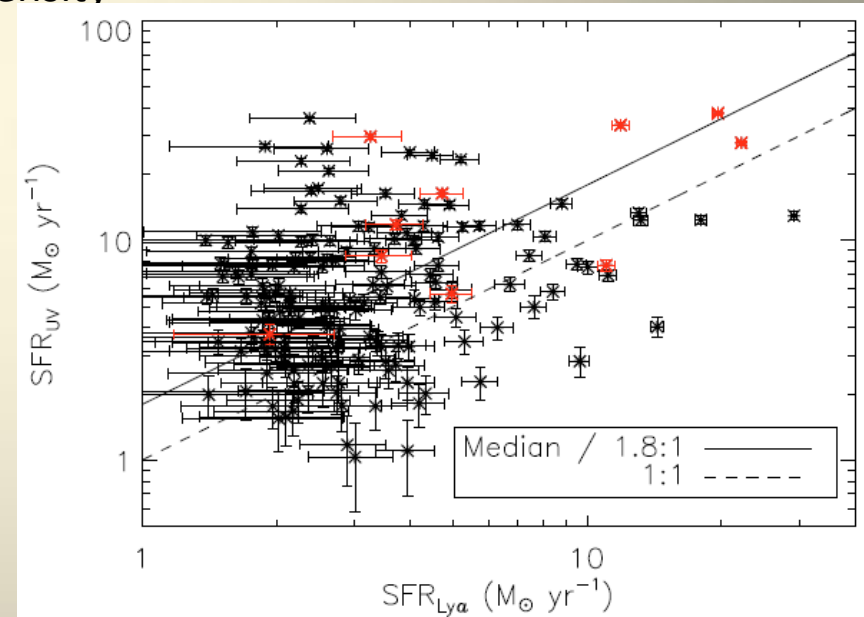
• 比

dustがなければ $\frac{SFR_{UV}}{SFR_{Ly\alpha}} = 1$

dustあるとLy α 光子吸収 $\rightarrow >1$

今回のサンプルでは ~ 1.8

z=3.1では 1.0~1.2 (Ouchi,2008、Gronwall,2007) \Rightarrow z~3よりz=2.25の方がdusty



検出されたLAEの性質: EW分布

- z~3との比較

分布のfitting関数形: $N = C \times e^{-EW/w_0}$

- z=3.1の分布より,狭い分布

: 個々のLAEのEWが時間とともに小さくなってる?

→single star burstモデルでは上手く再現できず

constant SFモデルの方がまし

- 色別サンプル間の比較

blue,red,totalサンプルの比較

- redサンプルの分布の方がblueより狭い

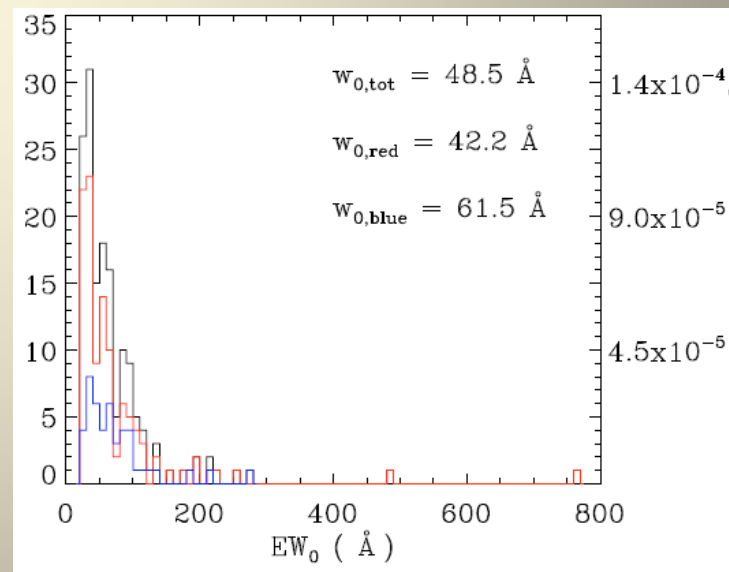
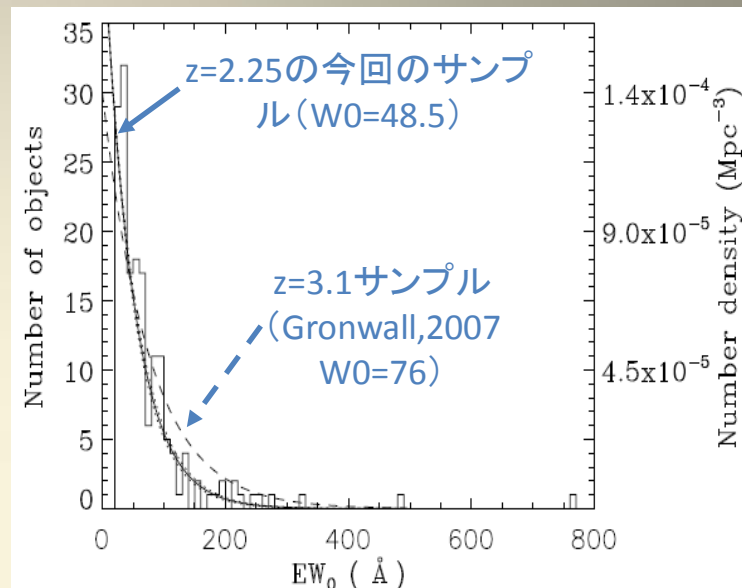
: redサンプルの方がdusty(Ly α 吸収されてる)



z=3→2にかけてよりdustyになった

(EW分布の進化は単純なモデルでは

説明しきれないが...)



総括(物理性質の $z \sim 3 \rightarrow 2$ にかけての進化)

- SED : 最も顕著な進化。全体の2/3が「赤い」SED示す
 \Leftrightarrow dusty, massive LAE
 LAEの古典的描像とのズレ
- AGN fraction : $>5\%$ \rightarrow low- z 程, AGNの割合増えてる?
- SFR ratio : $\frac{SFR_{UV}}{SFR_{Ly\alpha}} \sim 1.0 \rightarrow 1.8$ (for $z = 2 \rightarrow 3$)
 ↓
- EW分布 : low- z 程、narrower \rightarrow dustの影響がより大きい