

Detection of Lyman Continuum from star-forming galaxies at $z \sim 3$ through SUBARU/Suprime-Cam narrow-band imaging

Iwata, I et al
2009ApJ...692.1287I

みさゼミ 2010/11/9
修士1年 馬渡健

事前知識：よく出てくる用語

(i) Lyman α emitter (LAE)

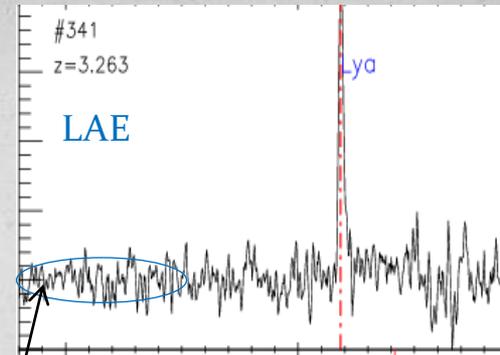
Ly α 輝線放射が卓越した銀河

若い星形成銀河と考えることが多い

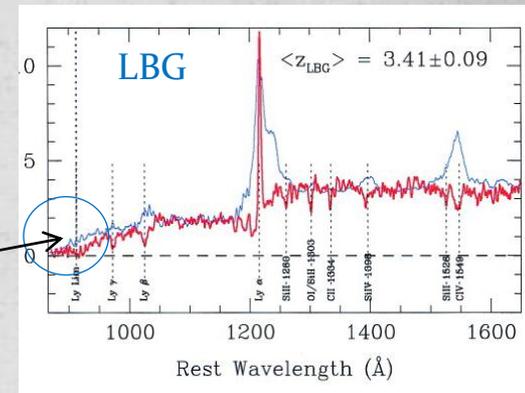
(ii) Lyman break galaxy (LBG)

3色用いたLyman-break法により同定

high-zにおける普通の星形成銀河



LyC



(iii) Lyman Continuum (LyC / ionizing UV / f900)

rest-frameでLyman limit(912 \AA)より短波長側の連続光

\Leftrightarrow ionizing photon

少しでもHI gas(as ISM/IGM)があると吸収されてしまう

Introduction：なぜLyCを見たいか？

⇔”宇宙再電離源の謎を解きたいから” (LAE or popIII??)

若い星形成銀河(主にLAE)からどれくらい電離photonが抜け出してくるか(=“escape fraction”)を正確に見積もり、それが宇宙を再電離するのに十分なレベルであったかを議論したい！

(最終的には)



再電離期銀河の電離photon=LyCを観測すれば良い

が・・・

Introduction : LyC観測の困難性

⇔LyCは視線上手前のHI雲(IGM)によりすぐに吸収される



- (f900)obsからIGM吸収分を補正して正確に $f_{esc} = \frac{f_{900,esc}}{f_{900,int}}$ を推定するのは難しい
- そもそも $z > 4$ の銀河に対してはLyCが全て吸収され観測不可

⇒ $z \sim 3$ (IGM optical depth ~ 1) がLyCを観測し f_{esc} を推定できる限界
(後は $z=3$ の銀河を再電離期にtraceして議論するしかない?)

Introduction : これまでの観測と今回

先行研究でLyCが受かった銀河は2天体のみ

⇒Shapley et al(2006)

: SSA22 field中の14個のLBGを分光観測 →→→

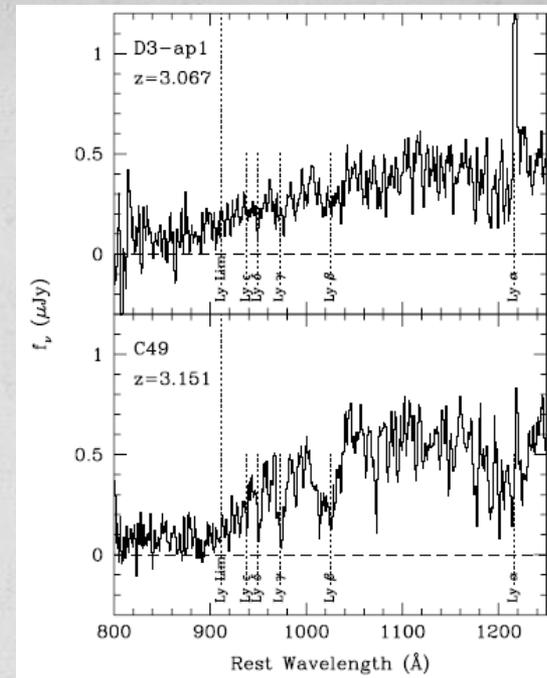
検出数が少なすぎる + 分光だとfaintになりすぎる



本観測 : LyCに対応するnarrow band filterによる撮像

メリット

- 一度に大量の銀河調べられる
- 光量を分光よりかせげる
- 分光と違ってslit位置に悩む必要がない

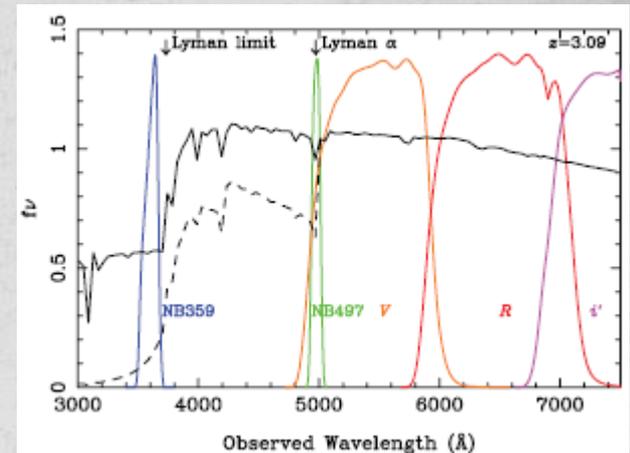


Observation & Data reduction

- target : SSA22 field, (22h17m26s, +00d16' 11"), $z \sim 3.1$
- date : 2007/9/10~14
- condition : ほぼphotometric, seeing=0.5" ~ 0.9"
- instruments : Subaru/S-Cam

NB359 filter

⇒ 中心波長=3590 Å の狭帯域filter
(rest 880 Å at $z=3.1$ に対応)
 $z=3.1$ の LyC 見るのにうってつけ



- reduction : SDFRED 使用

⇒ total exposure=1800s × 45shots=22.5h

PSF=0.8" , 3σ limiting mag=27.3mag (for 1.2" aperture)

以下、NB359-flux=rest LyC (900 Å)

R-flux=rest non ionizing UV (1500 Å) と考えていく

Results : 検出

- サンプル : 198個の $z=3.1$ と思われるLAE (125個) 又はLBG (73個)
(分光はしたが $z=3.1$ の確証はない)

- 検出 : **LyC**と思われる17天体を検出

(NB359画像においてaperture=1.2" で探した)

- 6 天体 . . . LBGs ; $>3\sigma$ -detection
- 1 天体 . . . LBG ; 2.95σ -detection, Shapley2006で報告されたC49
- 10 天体 . . . LAEs ; $>3\sigma$ -detection

※Shapley2006で受かったもう一つのLyC=D3は受からなかった . . .

- ノイズを拾ってないかどうかのチェック

(i)重ね合わせる前の45frameの半分を使って2つmosaic画像つくる

→両方の画像で17天体は受かった ($\sim 2\sigma$)

(ii) negative画像使った検出テスト

→ 3σ でノイズが天体検出に引っかかる可能性=0.4% : 微小!

Results : images(i); HSTデータもある 9 個

rest2000 Å

●: LBG

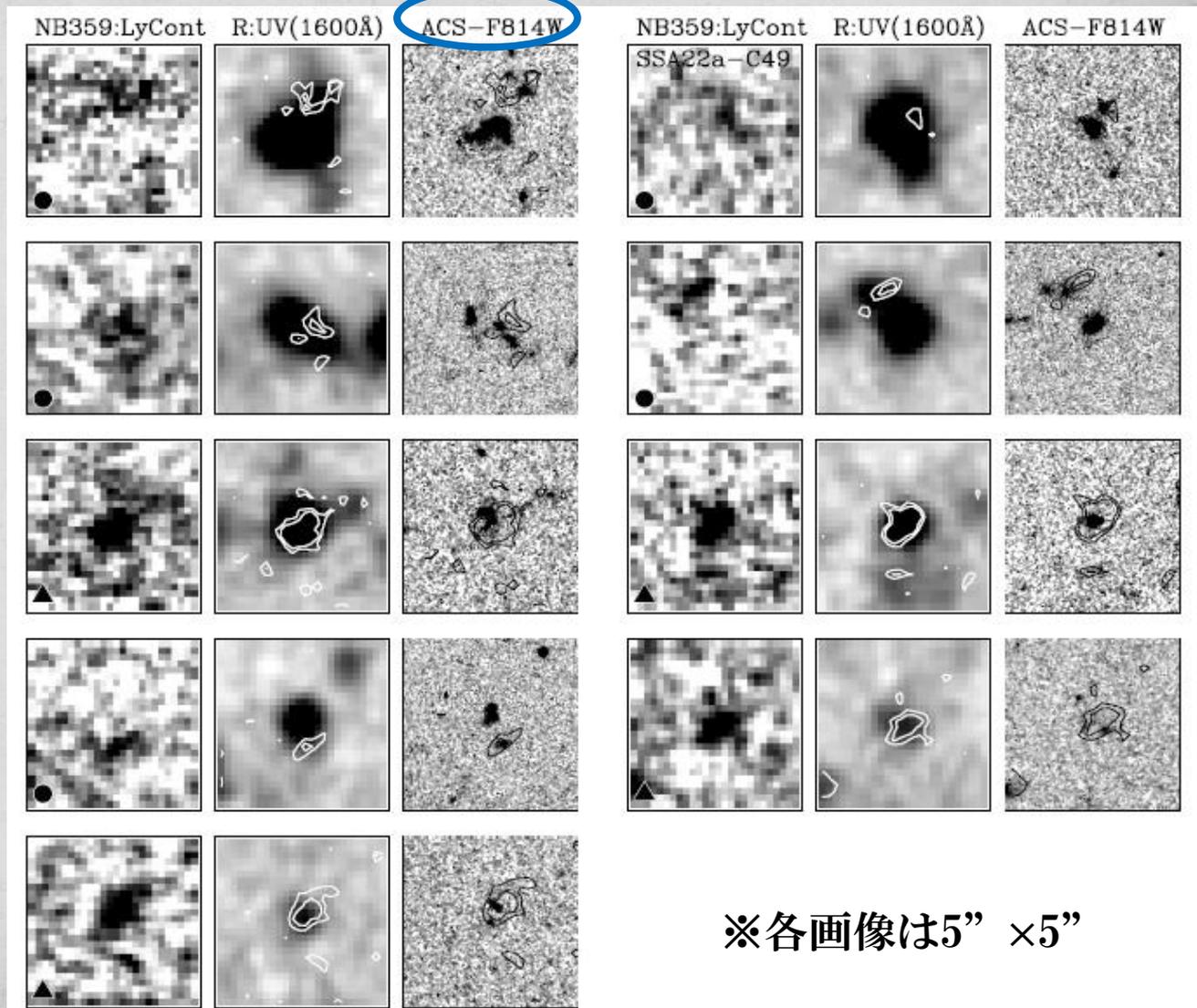
▲: blue LAE

■: red LAE

contourはNB359画像
の $2, 3\sigma$ -contour

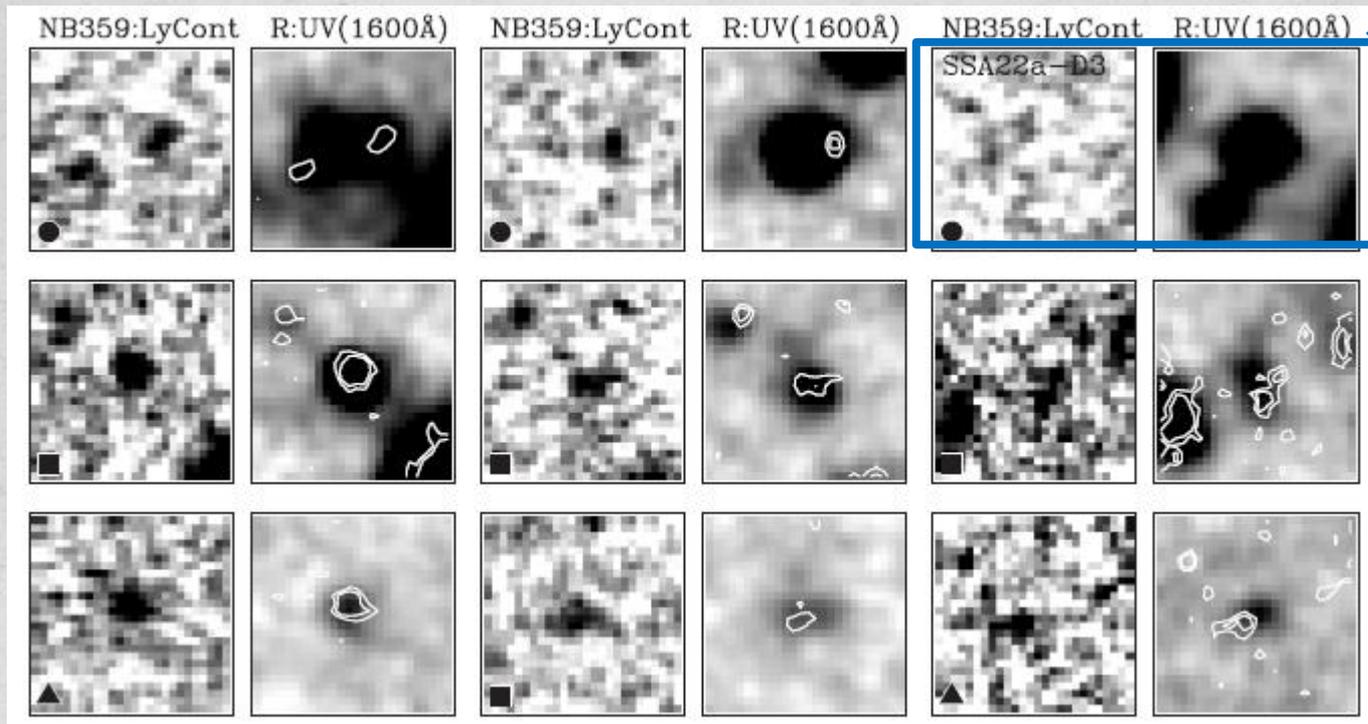
• いくつかのLBGで、
NB359とR画像間に
位置や形のズレあり
(offset)

• LyCは母銀河のknot
構造と関連ありそう



Results : image(ii); HSTデータないLyC +1個

Shapley2006ではLyC受かったのに
本観測では受からなかったD3



Results : LyCでない可能性(contamination)

- 10個のLAEは本当に $z=3.1$ のLAEか？

$z=3.1$ のLy α のコンタミとなりうる輝線銀河

| | |
|----------------------------|----------|
| [OII] emitter ($z=0.33$) | ←doublet |
| CIV emitter ($z=2.21$) | AGN起因 |
| [CIII] emitter ($z=1.6$) | |
| MgII emitter ($z=0.78$) | |

⇒以前の分光は波長域が狭かった(その代わり高分散)ため、
[OII]emitterでないことは確かだが、AGNの可能性は捨てきれない

- foreground銀河がNB359に引っかかってないか？

2つの銀河が重なっていて、長波長(NB497やR)では $z=3.1$ のLAE/LBGが十分明るい、3590Åではlow- z の別銀河の方が明るい可能性もある。

⇒Siana et al (2007)と同様なやり方でその可能性を見積もった所、
2,3天体はコンタミになる可能性あり。が、17天体全てではない！

Discussion : imageの位置offset

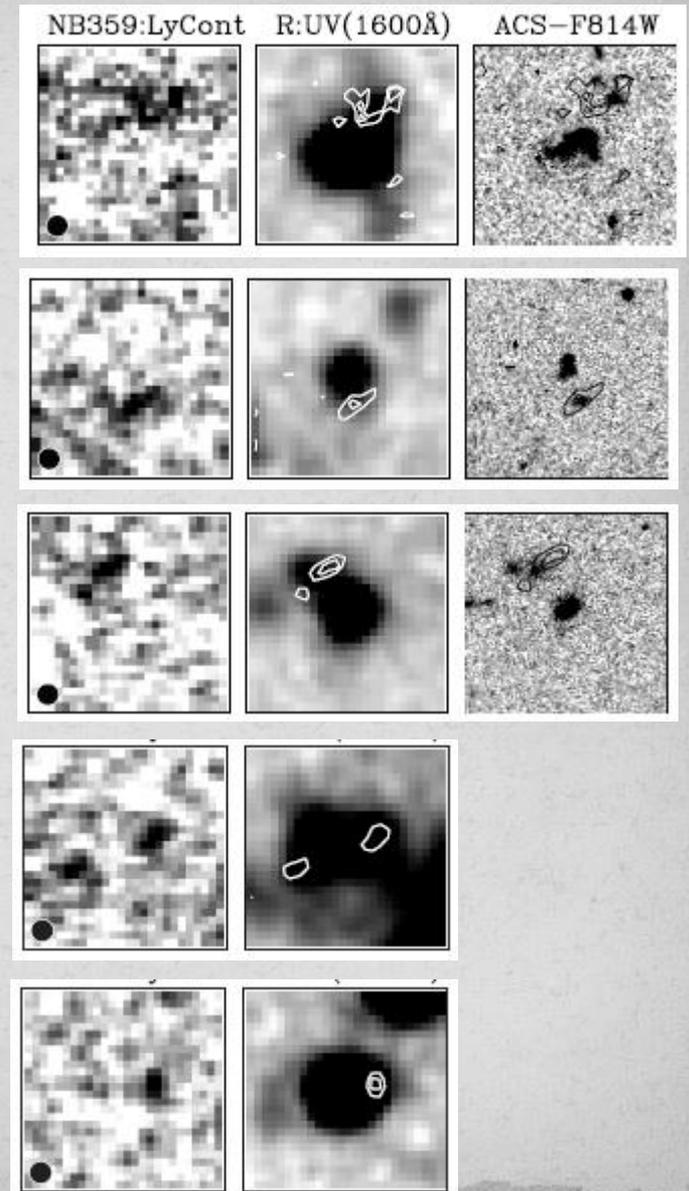
17天体中4個 (?) のLBGで、NB359画像とR画像
の間でoffsetが確認される。

- 4つの平均offset=0.97" =7.4kpc
- LyCの出てる部分は、HST/ACS画像でsub-structureに見える部分と関連ありそう



可能性1: 銀河内ISM中の限られた構造からしかLyCが抜け出てこれない

可能性2: そもそもnon-ionizing-UVのsourceとLyCのsourceの種族が異なり、その空間分布も異なる

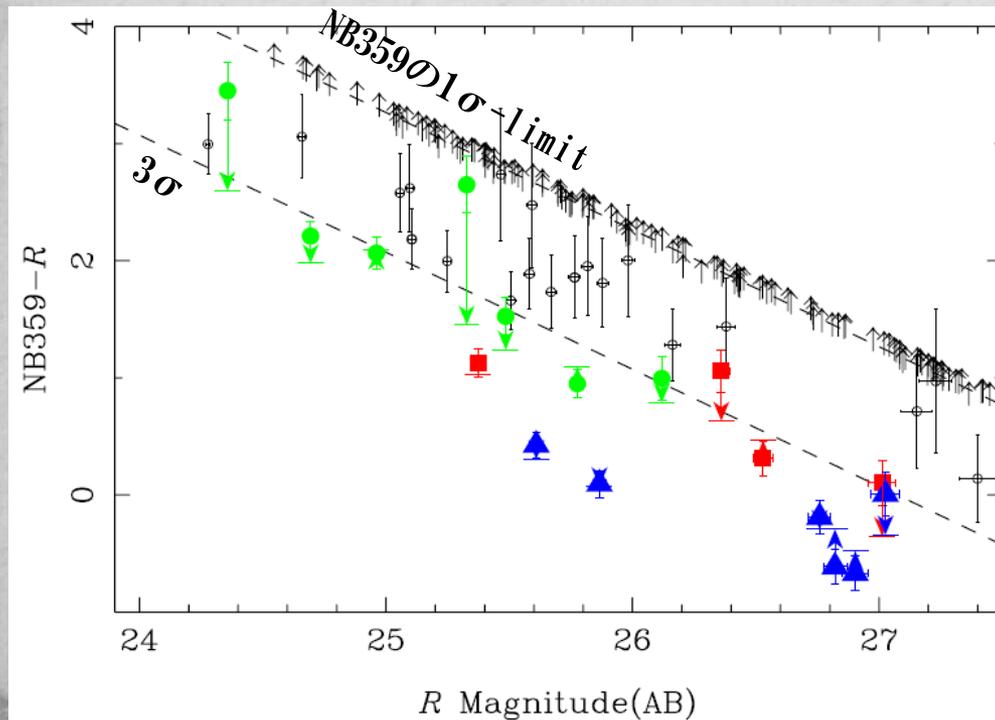


Discussion : 測光 → color

offsetの存在 → color求めるにあたり、NB359,R両方のimageに対して同じ aperture直径をとるのは上手くない



R-imageのpeakを中心に最適なapertureを、天体のNB359,R-imageそれぞれに対して設定した (total fluxは含むが近傍天体が入らないように)



●:LBG ■:red LAE ▲:blue LAE

- 明るいLBGの方が赤い?
⇔massive LBGの方がescape-fraction小さい?
: 先行研究(Gnedin 2008)とは逆の描像

but

数の少なさ,測光の仕方から
なんとも言えない・・・

Discussion : LyC天体SEDとモデルの比較

- Hayashino 2004よりSSA22領域の多色データ取って来て
今回のLyC天体17個のSED作成



LBG 7個 : UV域でのspectral slopeが割とflat ($0 < V-i < 0.35$)

LAE 10個 : $V-i$ により、blue ($-0.5 \sim 0$) とred ($0.4 \sim 0.8$) に分かれた

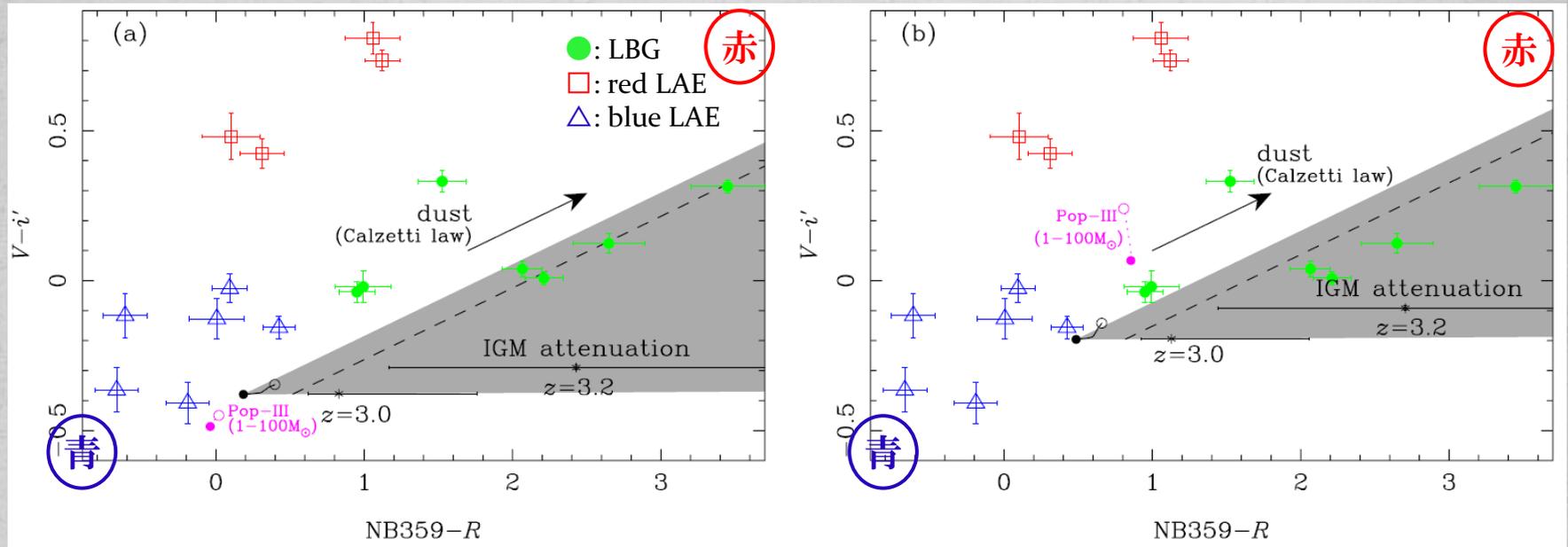
blue LAEは NB359-R で見ても極めて青い

LBGは NB359-R が相対的に赤い

色等級図から明らか

Discussion : LyC天体SEDとモデルの比較

- 2色図 (V-i', NB359-R) → 3つの種族の違いははっきり



● : $z=3, 3.3$ で最も青いSEDもつモデル銀河 = zero-age-gal + $Z=4 \times 10^{-4}$, no dust/IGM

影 : モデルの取りうる範囲

モデルに+ageした時の2色図上での移動 = 「↗」

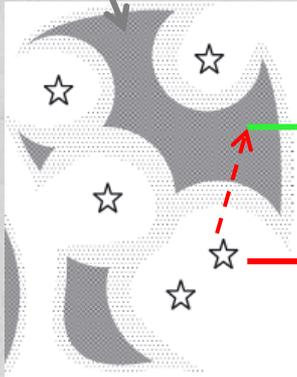
+dust減光 = 「↗」

+IGM吸収 = 「→」 (NB359しか吸収しないから)

(a) : nebular-continuumなしモデル (b) : nebular-continuumありモデル

補足：nebular-continuumについて

- 電離/中性ISM中の星からの放射

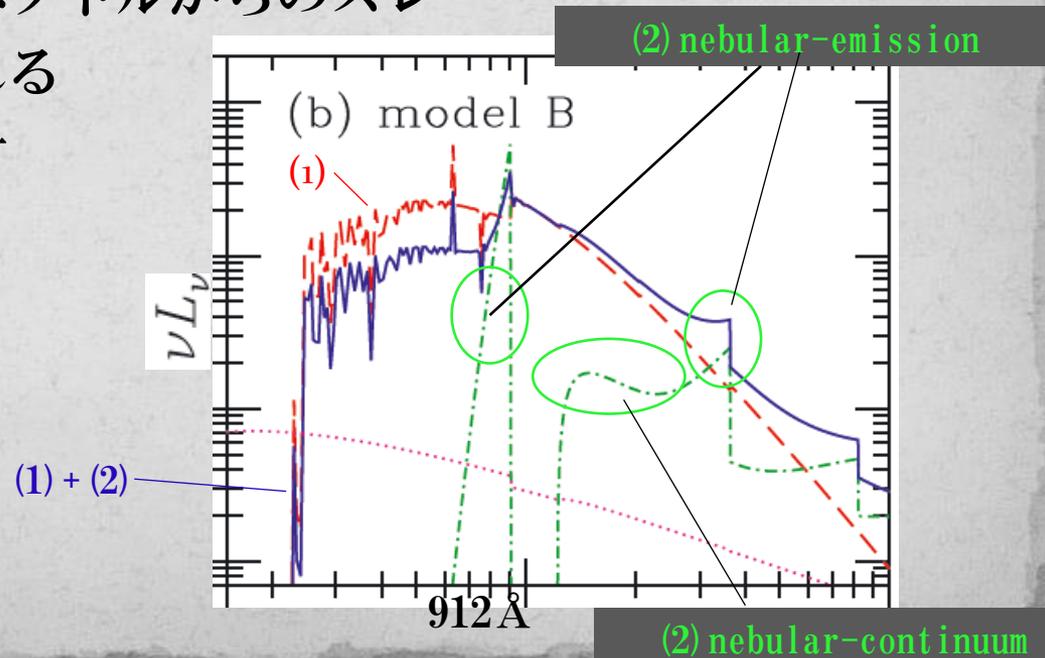


- (2) 星からの電離光を吸収したnebularからの放射
= "nebular-continuum/emission"
- (1) 星からの直接光

- (2) を考慮した際の本来のスペクトルからのズレ
短波長側：nebularに吸収される
長波長側：nebularからの放射

⇒ nebular-continuum考えると
スペクトル赤くなる

(Inoue, 2010, MNRAS 401, 1325)



発展補足：Inoue モデル

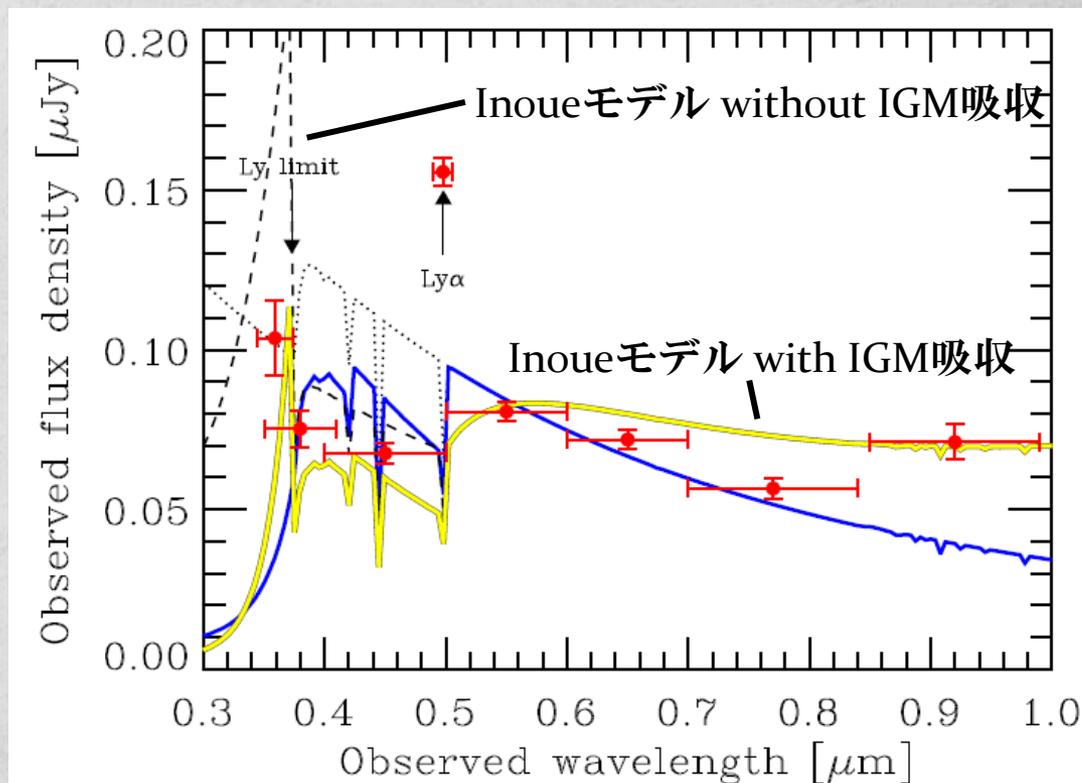
(Inoue, 2010, MNRAS 401, 1325)



- nebular-emissionが極端なモデルならNB359-Rを極端に青くできる！

nebular-emissionがあると
Lyman-limitの所に”bump”
ができる

NB359-filterがそのbump
を捕まえてるとすれば
NB359-Rは極端に青くなる！



(from Iwata et al: S10B0044N, Keck/LRIS proposal)

Discussion : LyC天体SEDとモデルの比較

• 2色図上のLBGについて

赤い方の4個はモデルで説明できる

:(a)だと少しでもIGM吸収あるとダメだが
nebular-continuumこみモデル (b)ならばIGMが
ある程度あっても大丈夫!

青い方の3個は説明不可能

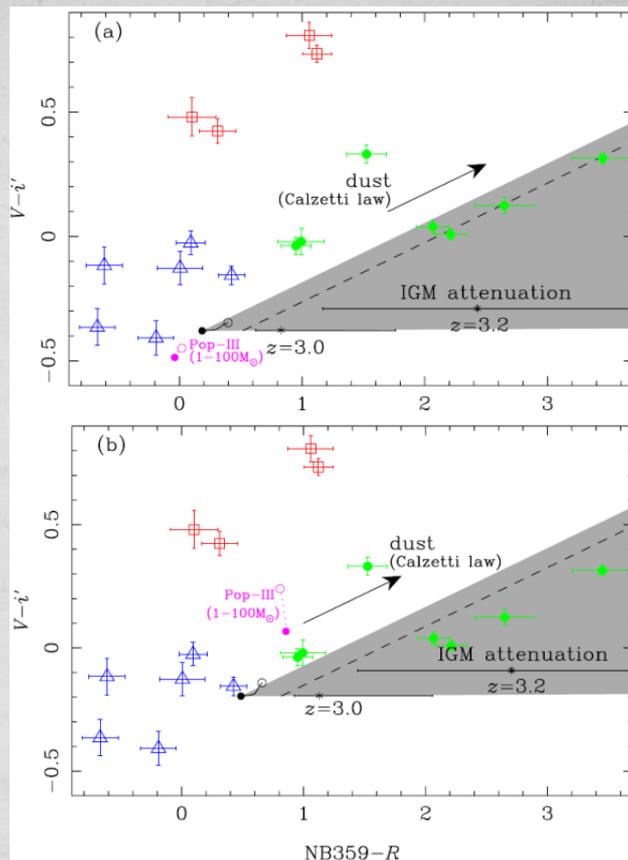


可能性(1): QSOならば説明できるモデルもあり

AGNカタログには載ってないけど...

可能性(2): モデルが間違ってる

top heavy IMF, pop III star cluste, (Inoueモデル) 仮定したり
dust減光則などを変えれば、説明できるかも



Discussion : LyC天体SEDとモデルの比較

- 2色図上のLAEについて

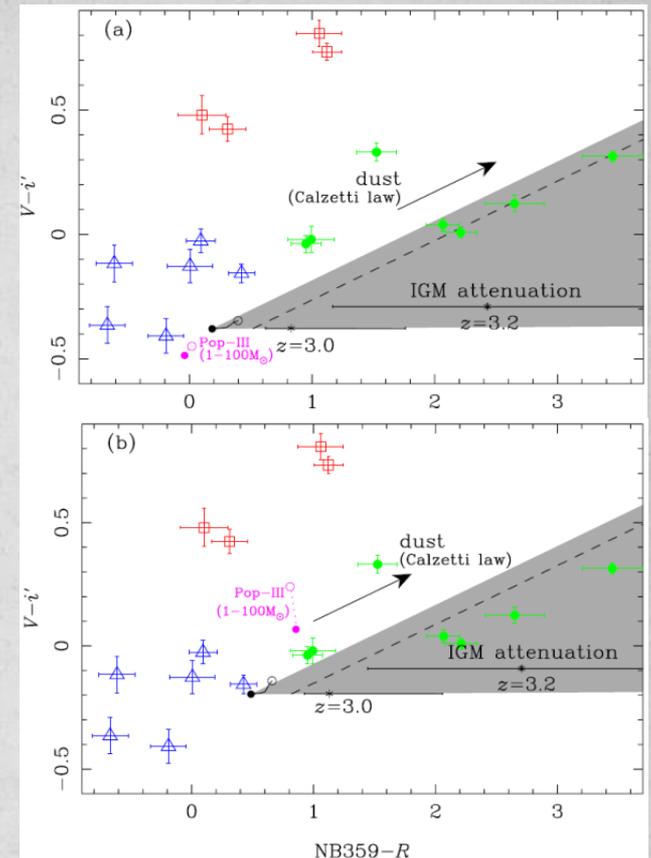
LBG以上に説明困難

IMFのcut offを重く ($50M_{sun} \sim 500 M_{sun}$) 設定

+ popIII cluster + no dust

という非現実的なモデルですら

NB359-R=-0.5までしかいけない



(LAEに関しては分光追観測待ち→ひょっとしたらInoueモデル的なものが見えるかも)

Discussion : escape fraction (LBG7天体のみで考える)

intrinsicなLyCに対する母銀河外に抜け出したLyCの割合： $(f_{900})^{esc} / (f_{900})^{int}$

・ 定義式

$$f_{esc,rel} = \frac{(f_{1500}/f_{900})_{int}}{(f_{1500}/f_{900})_{obs}} \times \exp(\tau_{IGM,900}) \cap f_{esc} = 10^{-0.4A_{1500}} \times f_{esc,rel}$$

$f_{esc,rel}$: 1500 Å (non-ionizing-UV) のescape fractionを基準にした
escape fraction

IGM吸収分は $\tau_{IGM,900}$ (900 Å LyCに対するoptical depth) で補正

⇒基準となる1500 Å UV光は母銀河中のdust減光しか受けないので、
dust減光量 A_{1500} 使って補正して、 f_{esc} 求まる

Discussion : escape fraction

・パラメータの設定

$\left(\frac{f_{1500}}{f_{900}}\right)_{obs}$: 観測値. V-flux&R-flux as $(f_{1500})_{obs}$, NB359-flux as $(f_{900})_{obs}$

$\left(\frac{f_{1500}}{f_{900}}\right)_{int}$: 先行研究と合わせるなら3.

前の議論反映させるなら最も青いモデルSEDの値=1.07

τ_{IGM} : 0 (IGMがない or 透明なIGM??)

0.59 ($z=3$ のLyCに対するmedian opacity)

A_{1500} : $E(B-V)=0.15$ のdustを考える

↑

LBGのV-iの色を説明できる程度

Discussion : escape fraction

Compilation of Observed UV to LC Flux Ratios $(f_{1500}/f_{900})_{\text{obs}}$ and Escape Fractions of LBGs at $z \sim 3$

| Reference | Sample | $(f_{1500}/f_{900})_{\text{obs}}$ | $(f_{1500}/f_{900})_{\text{int}}^{\text{a}}$ | $f_{\text{esc,rel}}$ | f_{esc} |
|-----------------------|------------------|-----------------------------------|--|----------------------|-------------------|
| Steidel et al. (2001) | 29 LBGs, Average | 17.7 ± 3.8 | 3.0 | 0.31 | |
| Shapley et al. (2006) | 2 LBGs, Direct | $12.7 \pm 1.8, 7.5 \pm 1.0$ | 3.0 | 0.43, 0.72 | |
| Shapley et al. (2006) | 14 LBGs, Average | 58 ± 25 | 3.0 | 0.094 | |
| This work | 7 LBGs, Direct | 6.6 (median) | 3.0 | 0.46 ^b | 0.11 ^c |
| This work | 7 LBGs, Direct | 6.6 (median) | 3.0 | 0.83 ^d | 0.20 ^c |
| This work | 7 LBGs, Direct | 6.6 (median) | 1.07 | 0.16 ^b | 0.04 ^c |
| This work | 7 LBGs, Direct | 6.6 (median) | 1.07 | 0.30 ^d | 0.07 ^c |

← $\tau = 0$
 ← $\tau = 0.59$
 ← $\tau = 0$
 ← $\tau = 0.59$

Notes.

^a $(f_{1500}/f_{900})_{\text{int}}$ is an assumed intrinsic flux ratio used to derive $f_{\text{esc,rel}}$ and f_{esc} from the observed UV to LC flux ratio. $(f_{1500}/f_{900})_{\text{int}} = 3.0$ has been assumed in the previous studies shown here, and the case $(f_{1500}/f_{900})_{\text{int}} = 1.07$ corresponds to the bluest model galaxy SED generated with the Starburst 99 code.

^b No IGM attenuation is assumed.

^c $E(B - V) = 0.15$ is assumed.

^d A median opacity at $z = 3.0$ through the NB359 filter $\tau_{\text{IGM}} = 0.59$ is assumed.

- どの $f_{\text{esc,rel}}$ も $z=1.3$ の普通銀河から求められた上限値=0.08 (Siana et al, 2007) よりかなり大きい (当たり前? そうした銀河だけを検出したはず・・・)

疑問提起：そもそも SSA22 のような特殊領域だけ見て、一般的な議論できるか？

⇒ blank-field を広く掃くのが理想