銀河からの電離光子の直接検出

岩田 生[1], 井上 昭雄[2], 松田 有一[1], 古澤 久徳[1],
林野 友紀[3], 香西克樹[3], 秋山 正幸[3], 山田 亨[3],
D. Burgarella[4], J.-M. Deharveng[4]

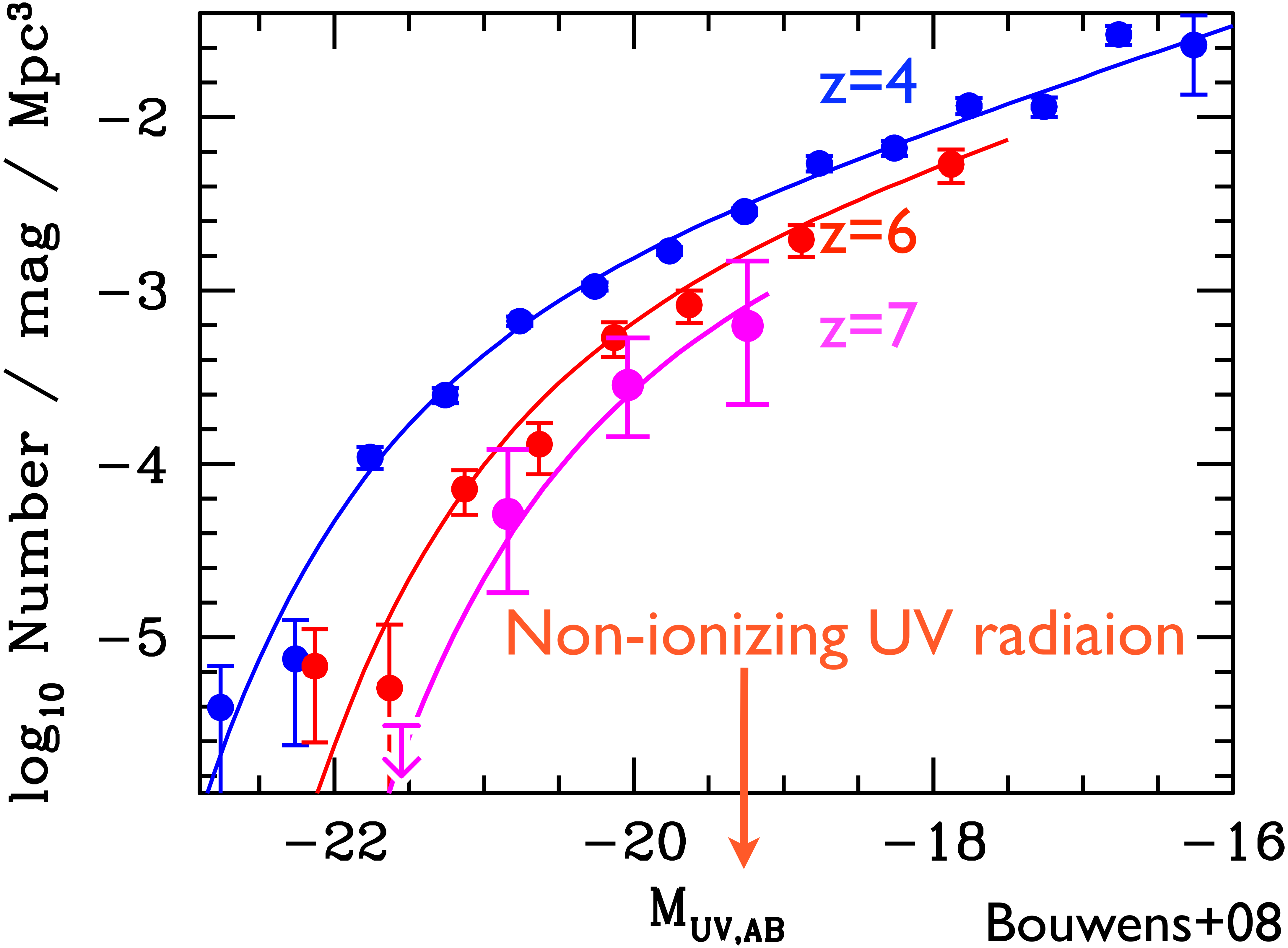
1: 国立天文台 2: 大阪産業大 3: 東北大 4: LAM, France

arXiv:0805.4012 (ApJ submitted)

銀河からの電離光子

- 星形成に伴う電離光子 (λ<912Å) の放射
- 宇宙再電離において主要な役割を果たしたと考えられる

観測されたUV光度関数



電離光子の観測

- 電離光子脱出率:

f_{esc} ≡ (銀河から脱出する光子数) / (生産される電離光子数)

- 観測の困難さから、電離光子脱出率はほとんど分かっていない

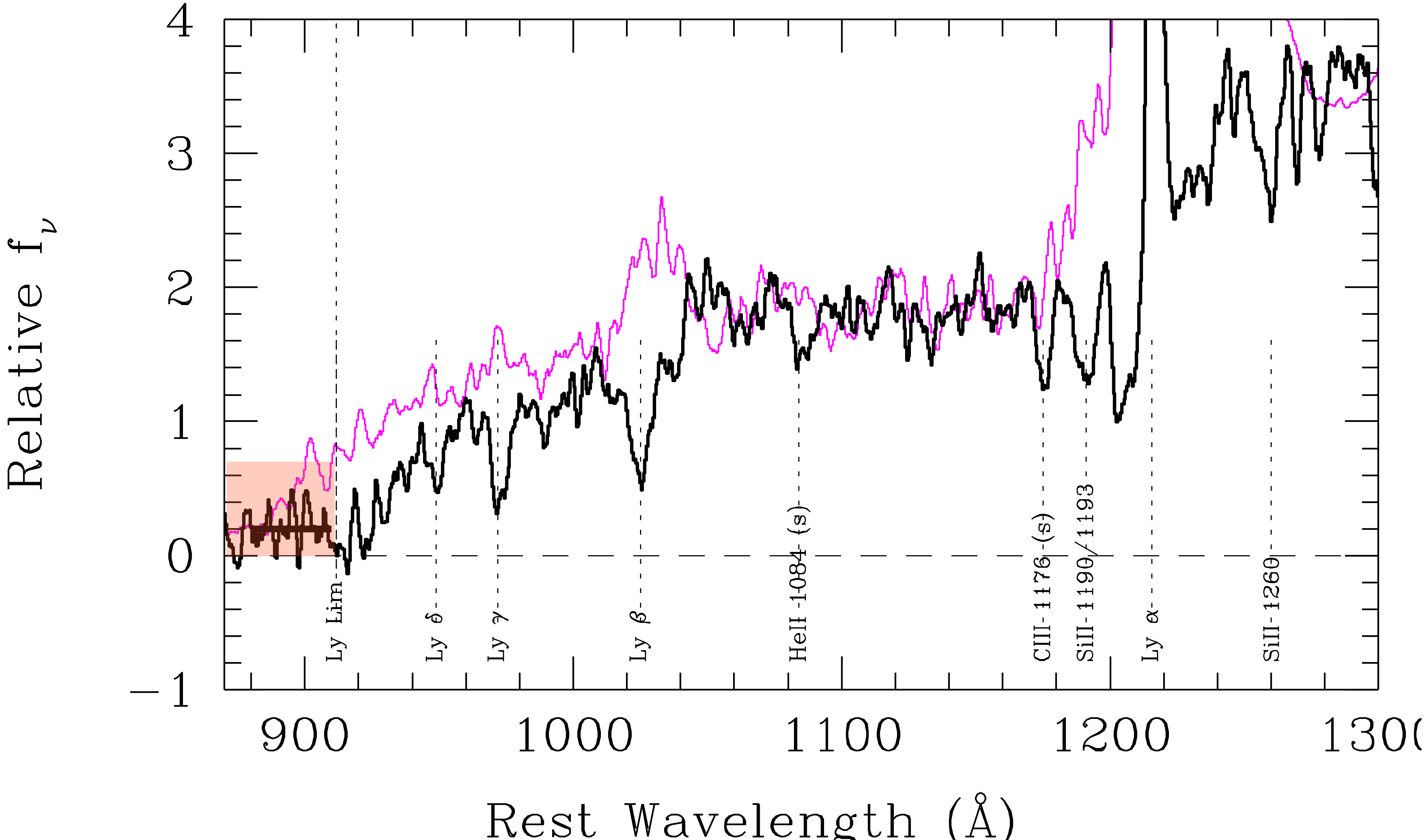
電離光子の観測

- 電離光子は銀河内および銀河間空間の中性水素 (Ly-α Clouds) により容易に吸収される

$$F_{obs} = F_{int} \times f_{esc} \times e^{-\tau(IGM)}$$

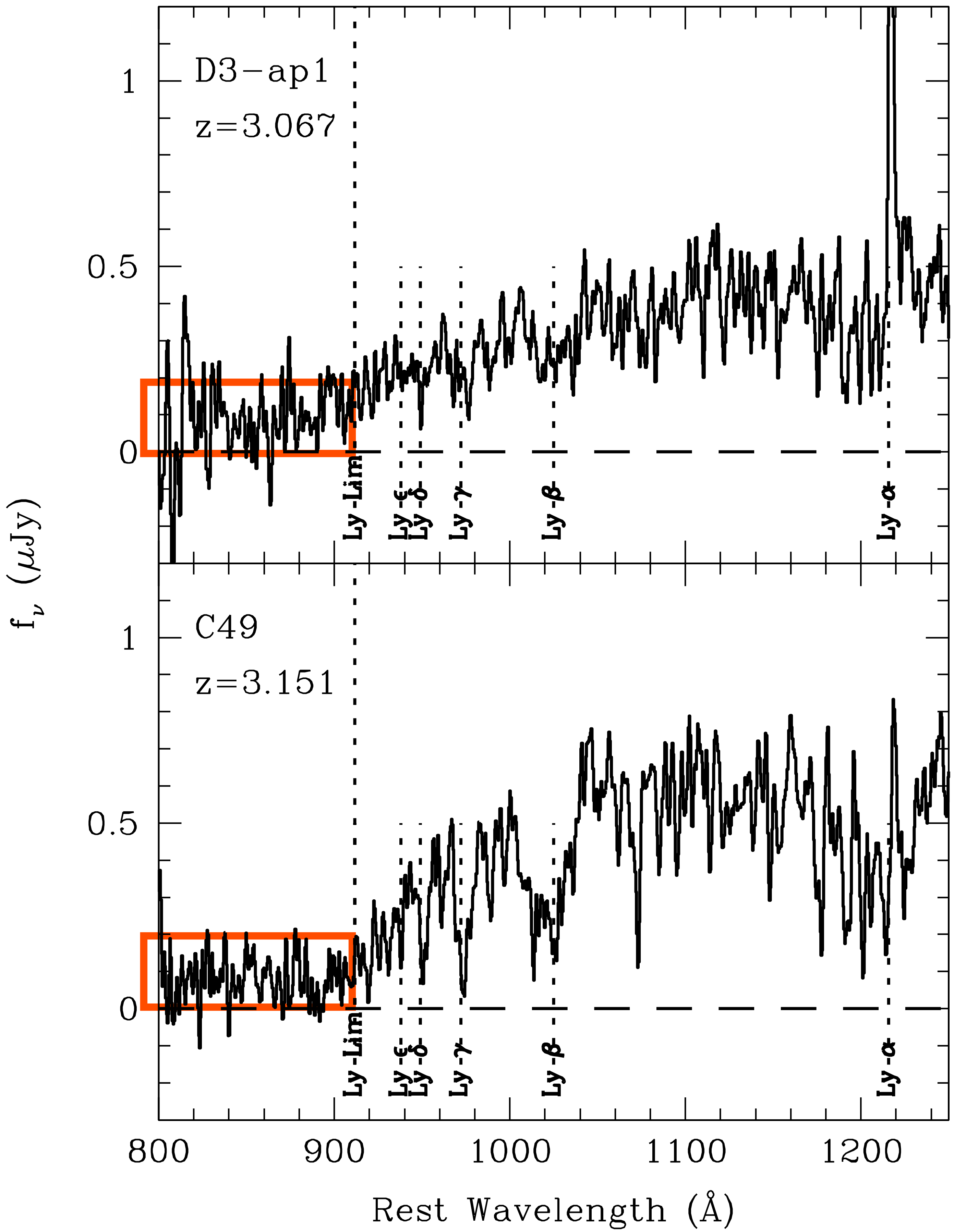
- Local Universe:
  - Leitherer+1995, Deharveng+2001,Bergvall+2006
- High-z (z≥1):
  - Steidel+2001, Malkan+2001, Giallongo+2002, Inoue +2005, Shapley+2006, Siana+2007

Steidel+2001: A First Report



29 LBGs composite

15 QSOs composite



Shapley+ 2006

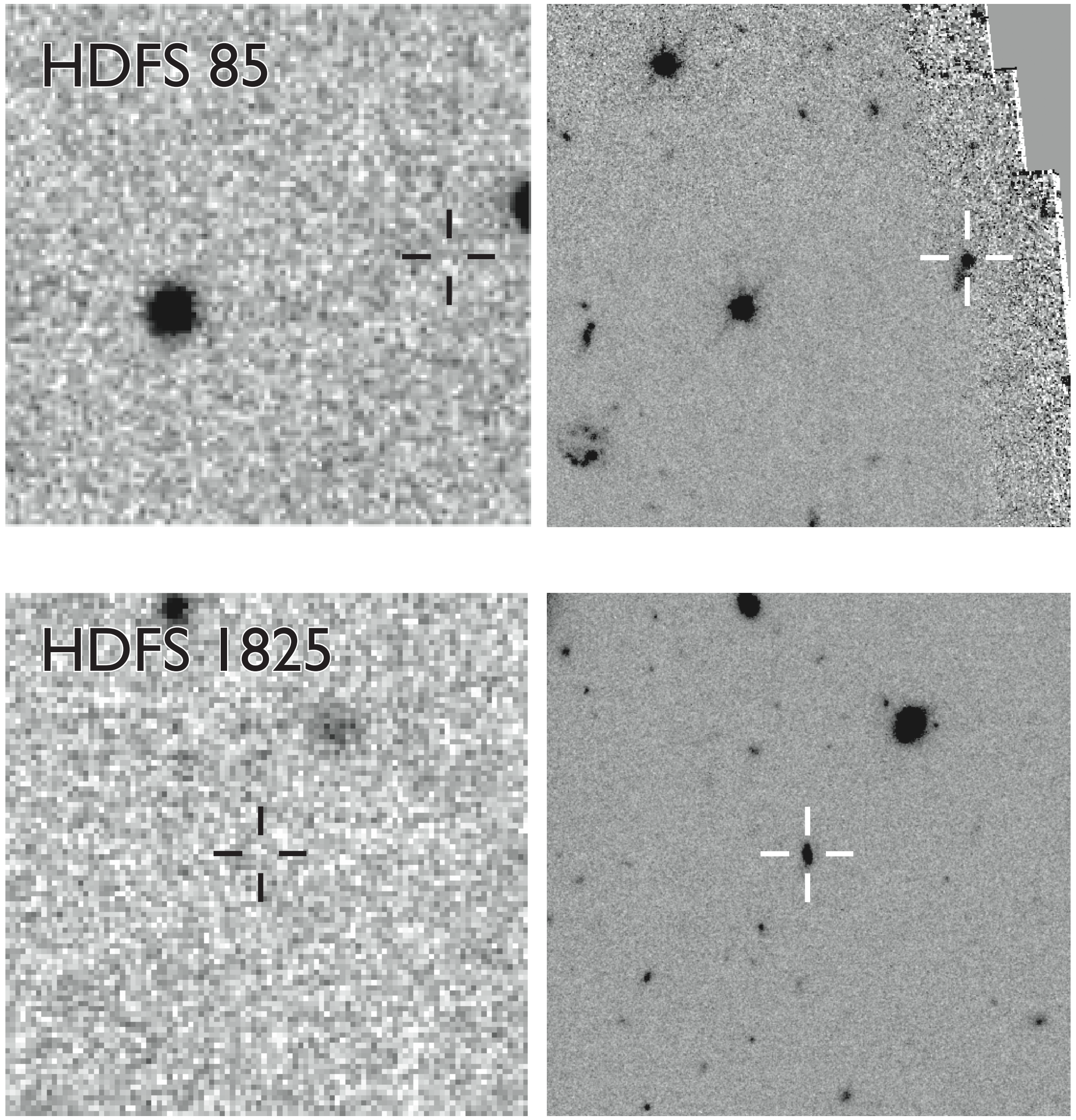
- Detected ionizing radiation from two z~3 LBGs (L>L*), among 14 spectroscopically observed.
- Average escape fraction was suggested to be less than 10%

電離光子脱出率への観測からの制限

- High-zで直接検出が報告されているのはわずか二例
- 知りたいこと:
  - 平均的な電離光子脱出率 (宇宙再電離への寄与を推定するのに必須)
  - どのような銀河が高い電離光子脱出率を持つのか?
- いかにして電離光子は脱出するのか?
  - 銀河内でのISMと大質量星の分布、Viewing Angle

Our Past Trials

- VLT/FORS:
  - z~3 @ HDF-S (Inoue, Iwata et al. 2005)
  - z~3 for Ly-α Emitters (On-going)
  - Narrow FoV (46 arcmin^2)
- Trial using LAEs (on-going)



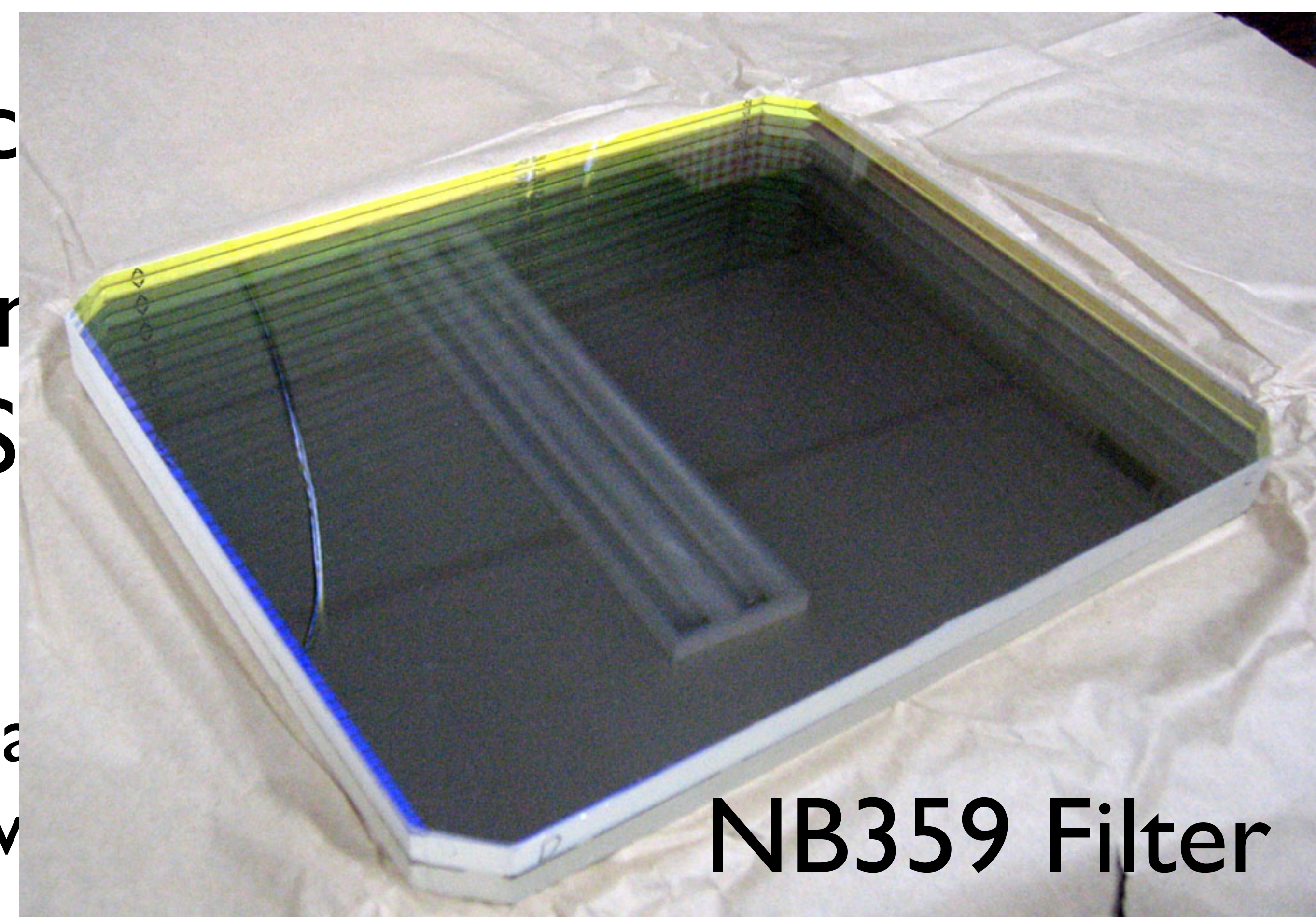
Inoue+ 2005

Narrow-Band Imagingによる電離光子探査

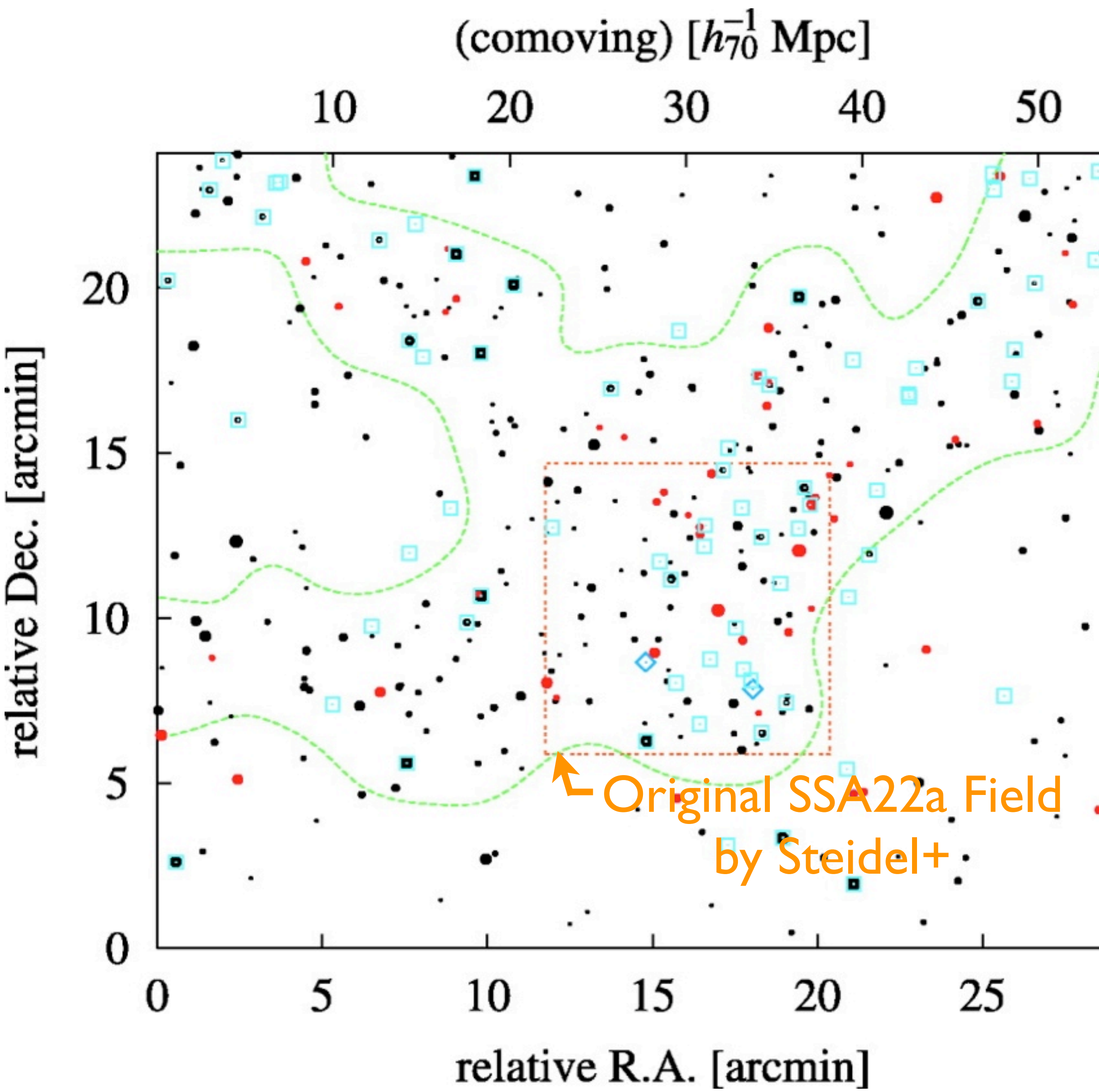
- 利点:
  - スリットによるロスがない: 高いS/Nを期待できる
  - UV光から空間的にオフセットした電離光子を捉えることができる
- 欠点:
  - 特定の赤方偏移の銀河しか測定できない

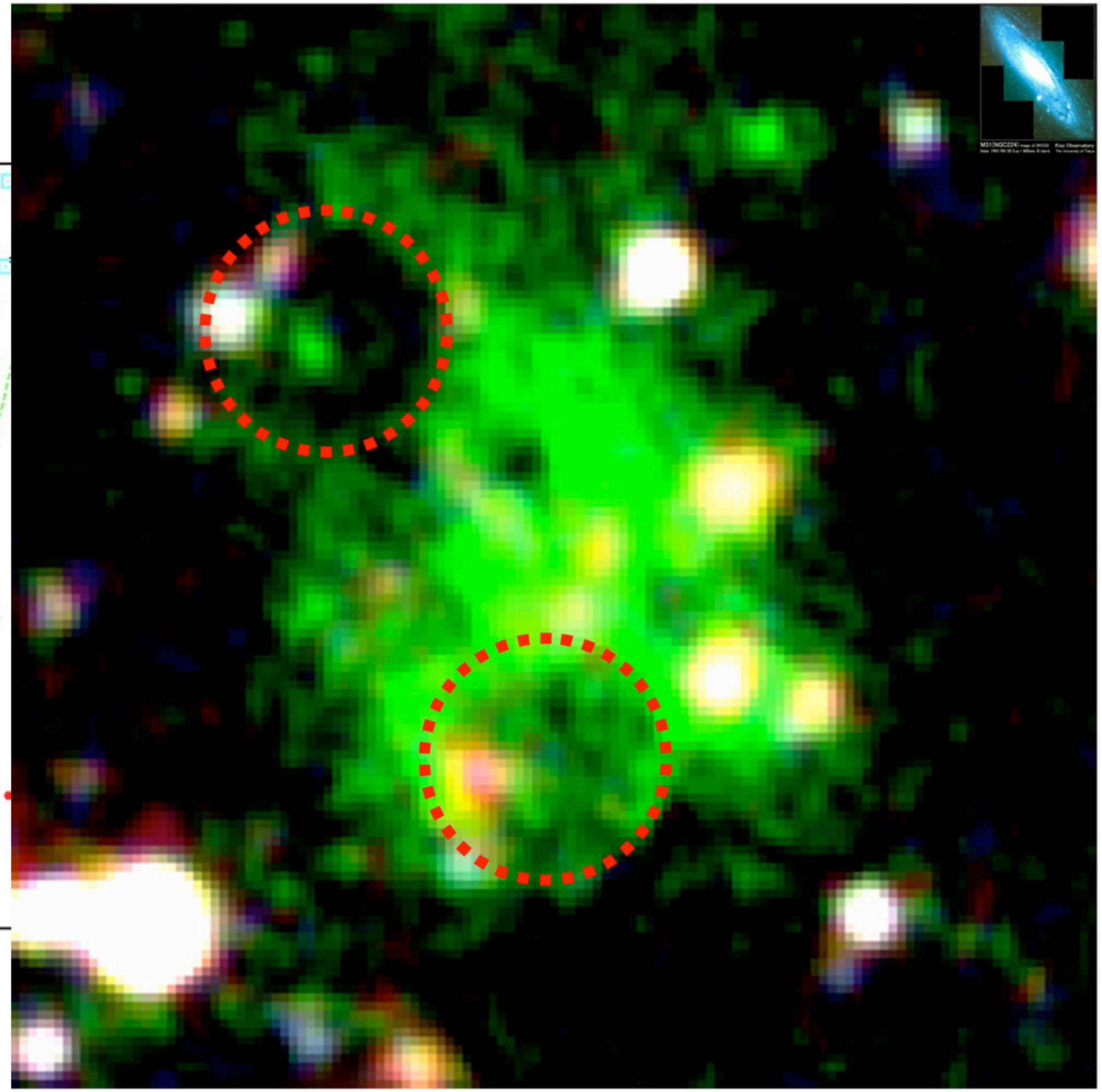
A New Trial with Subaru

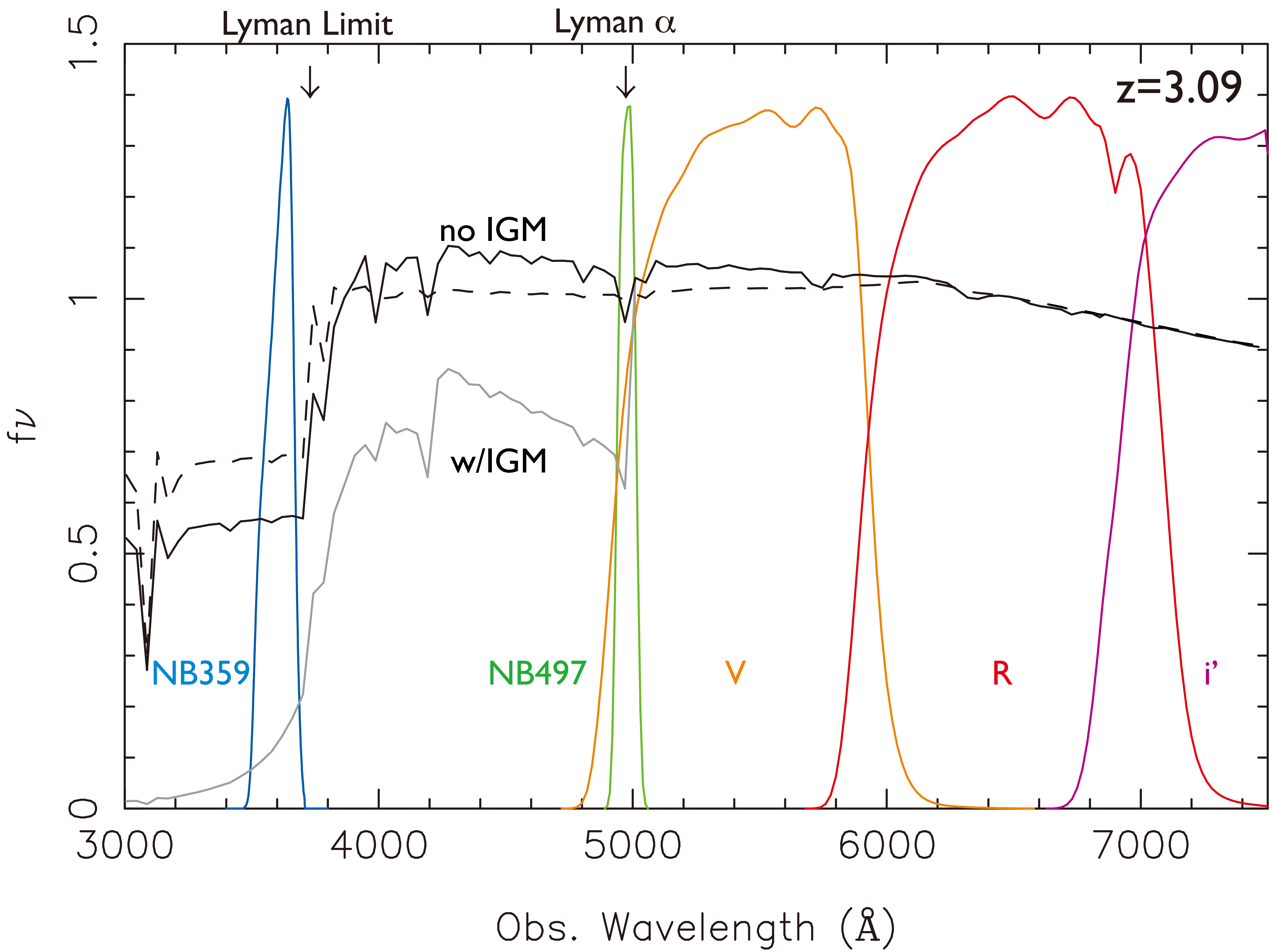
- Special NB Filter for Suprime-Cam
  - z=3.09 Proto-Cluster @ SSA22
  - 800 LAEs, 100 LBGs
  - To find typical esc
  - Relations between properties (size, S mass etc.)
- Inoue, Iwata, Hayashino, Ma Yamada, Akiyama, Furusaw



SSA22: Proto-Cluster at z=3.09

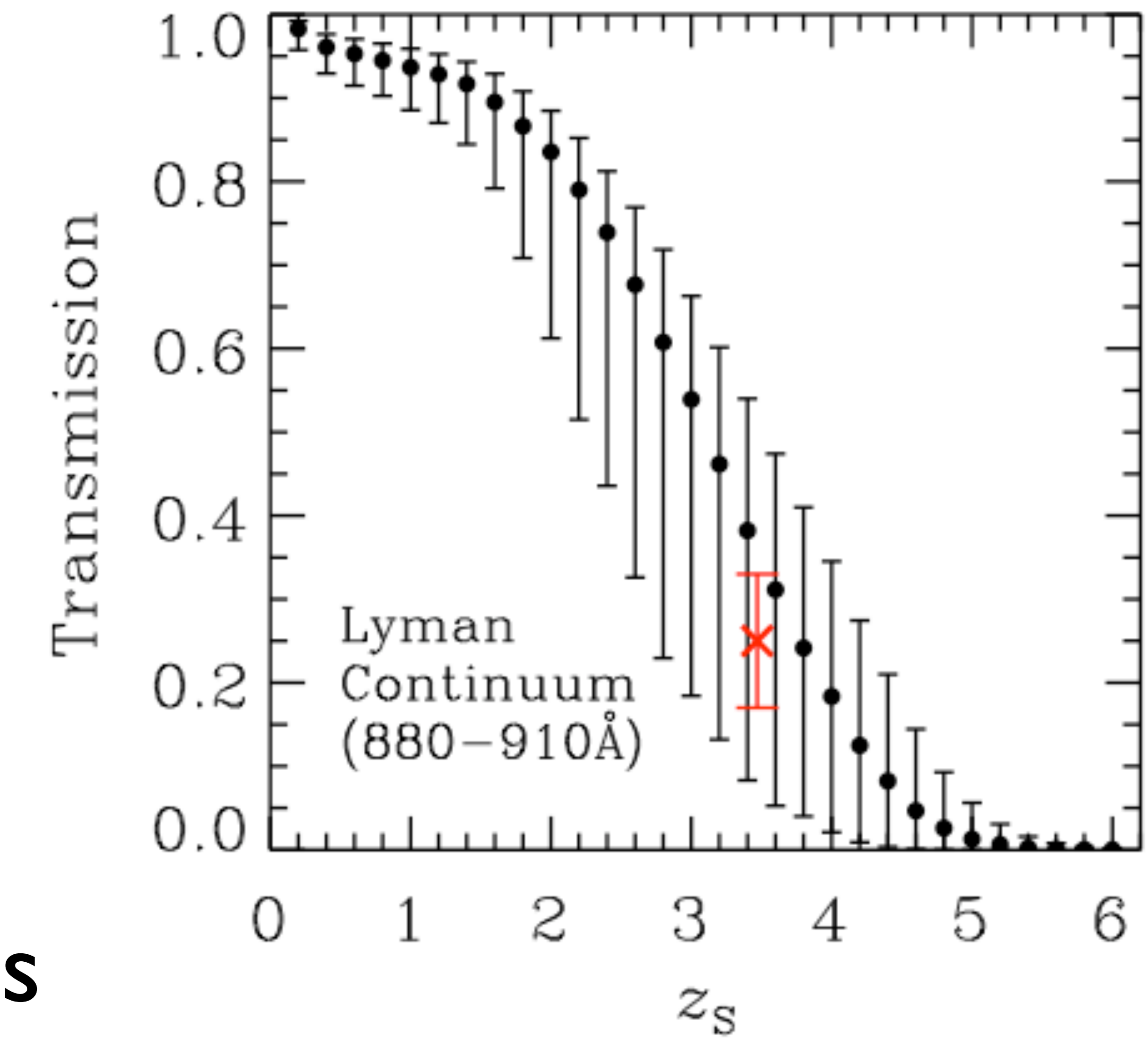





Lyman Limit
Lyman α
z=3.09
no IGM
w/IGM
NB359
NB497
V
R
i'
1.5
1
0.5
0
3000
4000
5000
6000
7000
fν
Obs. Wavelength (Å)

Why z~3?

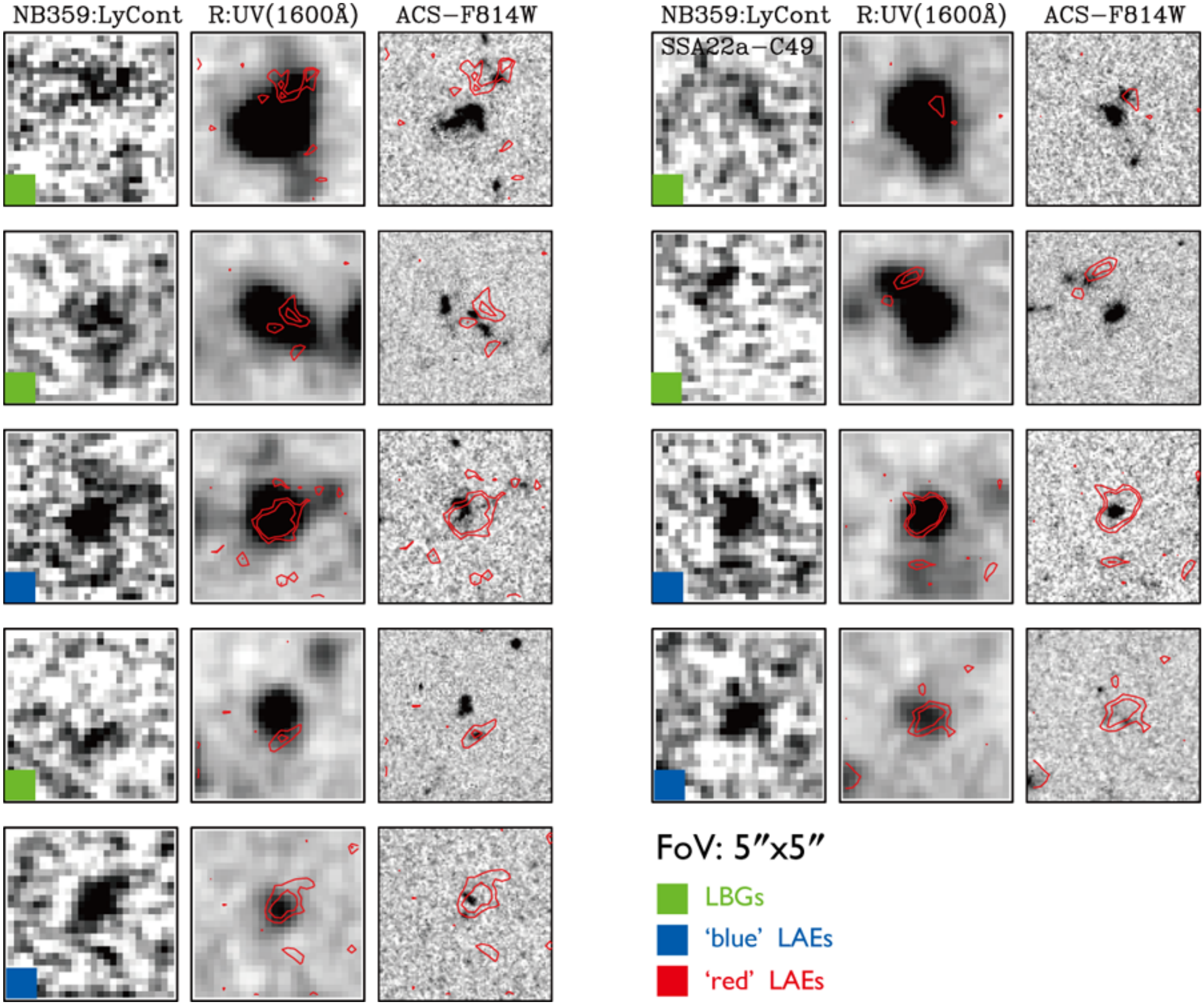
- IGM Opacity Rapidly Increase at z>4
  - Ionizing Radiation are Almost Invisible from Us
- Large Variation for Different Sightlines:
  - Ionizing Photons would be Detectable for Some Cases at z~4



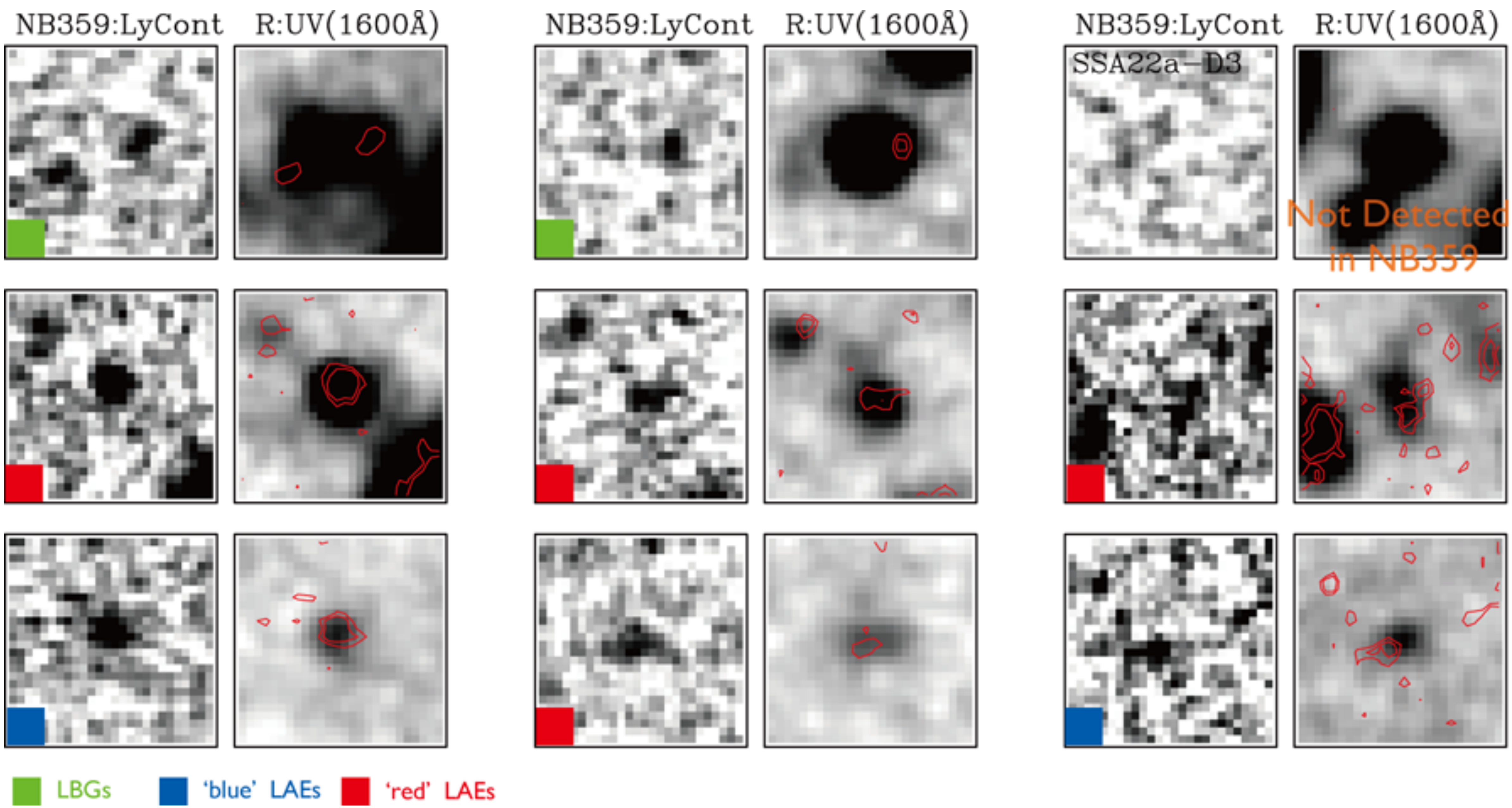
Redshift Dependence of Ly-Cont Transmission, from Monte-Carlo Simulations (Inoue & Iwata 2008)

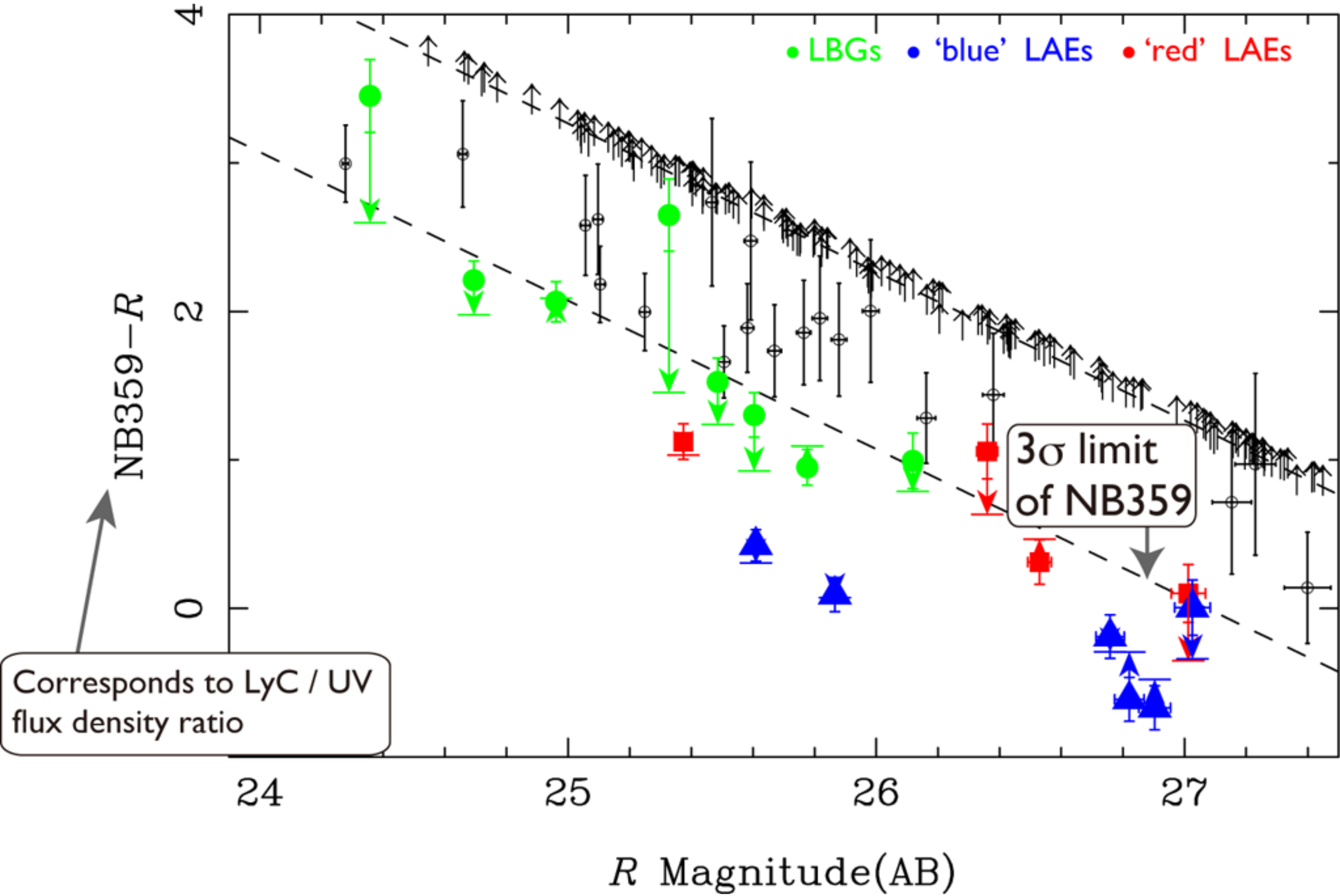
LyCont Observation for SSA22

- Subaru Telescope / Suprime-Cam with NB359 filter
- On-source exposure time: ~23 hours
- Excellent seeing (0.6-0.8” at 359nm)
- 分光同定された198個の銀河のうち、
  - 7 LBGs, 10 LAEsから電離光子を検出

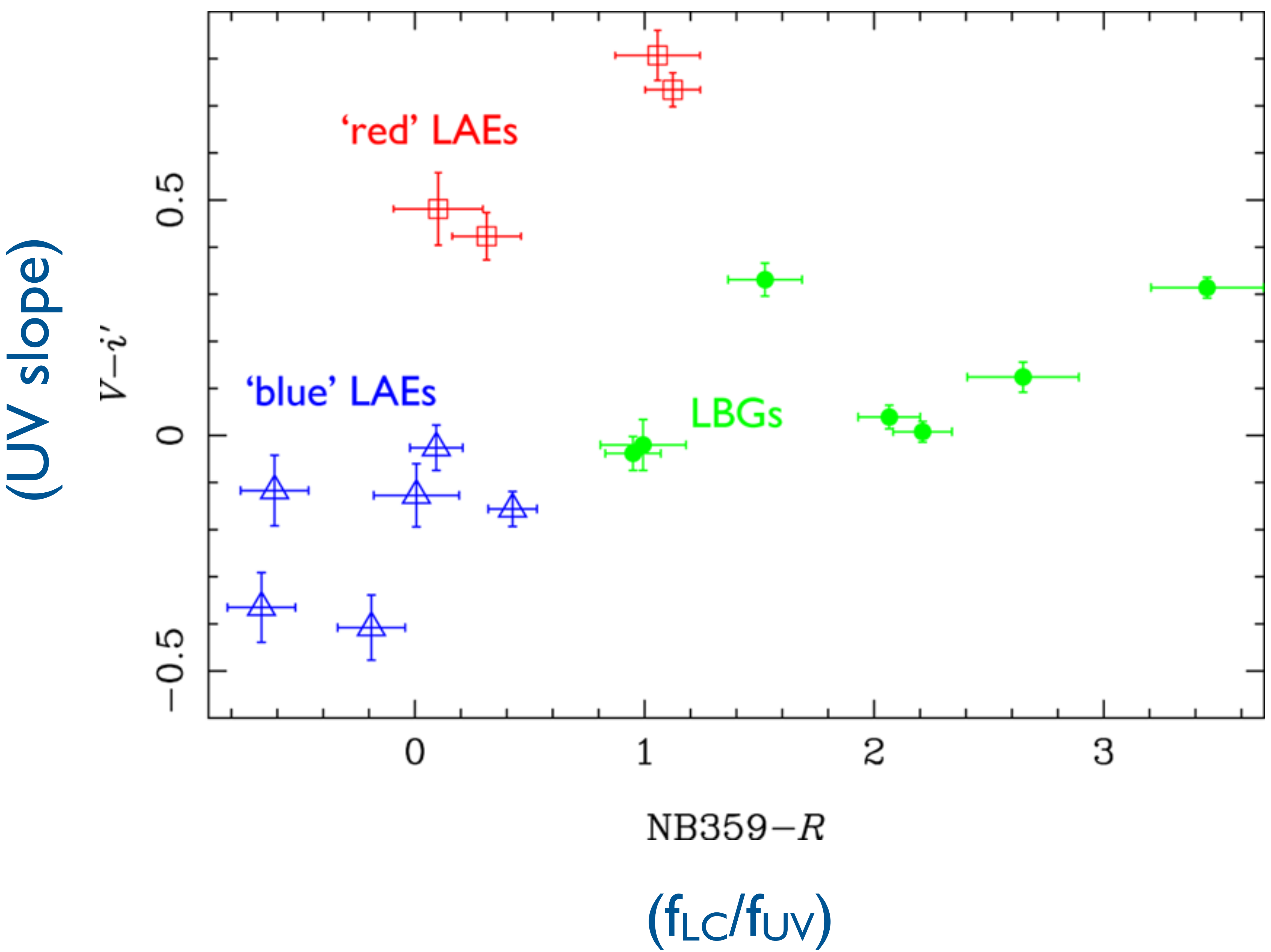


NB359:LyCont
R:UV(1600Å)
ACS−F814W
NB359:LyCont
R:UV(1600Å)
ACS−F814W
SSA22a−C49
FoV: 5″x5″
LBGs
'blue' LAEs
'red' LAEs

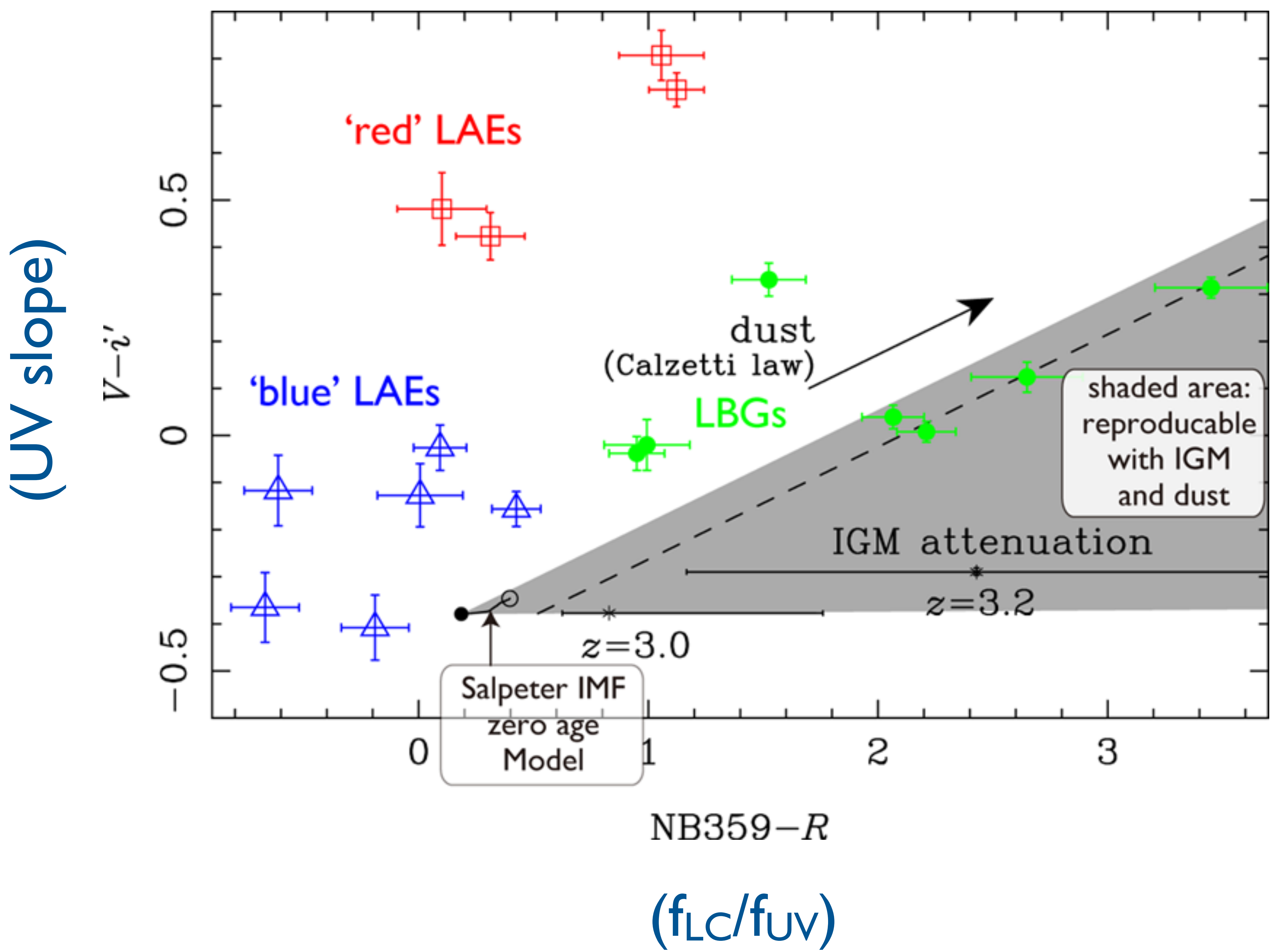

NB359:LyCont
R:UV(1600Å)
NB359:LyCont
R:UV(1600Å)
NB359:LyCont
R:UV(1600Å)
SSA22a−D3
Not Detected in NB359
LBGs
'blue' LAEs
'red' LAEs

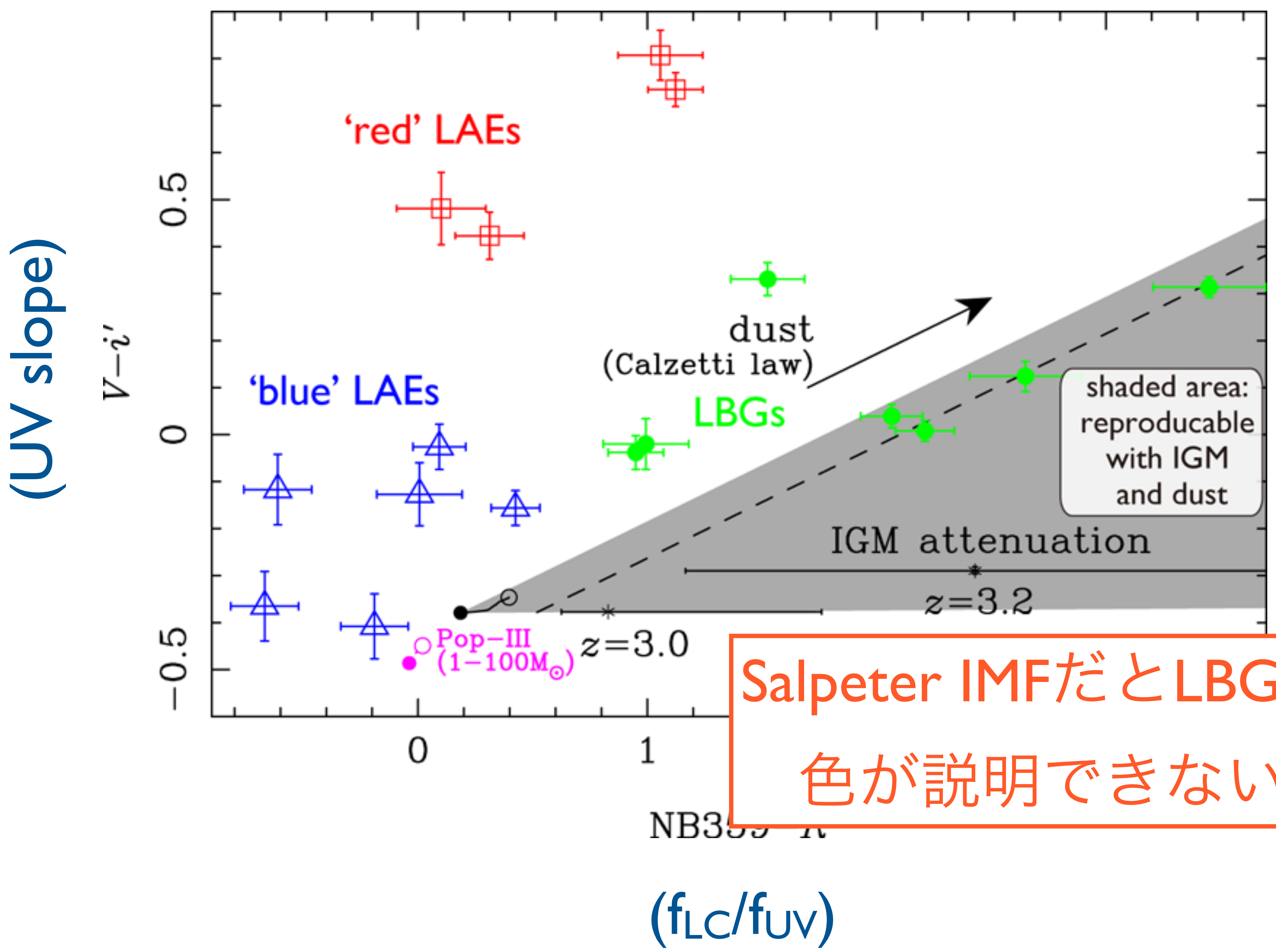


LBGs
'blue' LAEs
'red' LAEs
NB359−R
R Magnitude(AB)
3σ limit of NB359
Corresponds to LyC / UV flux density ratio
4
2
0
24
25
26
27



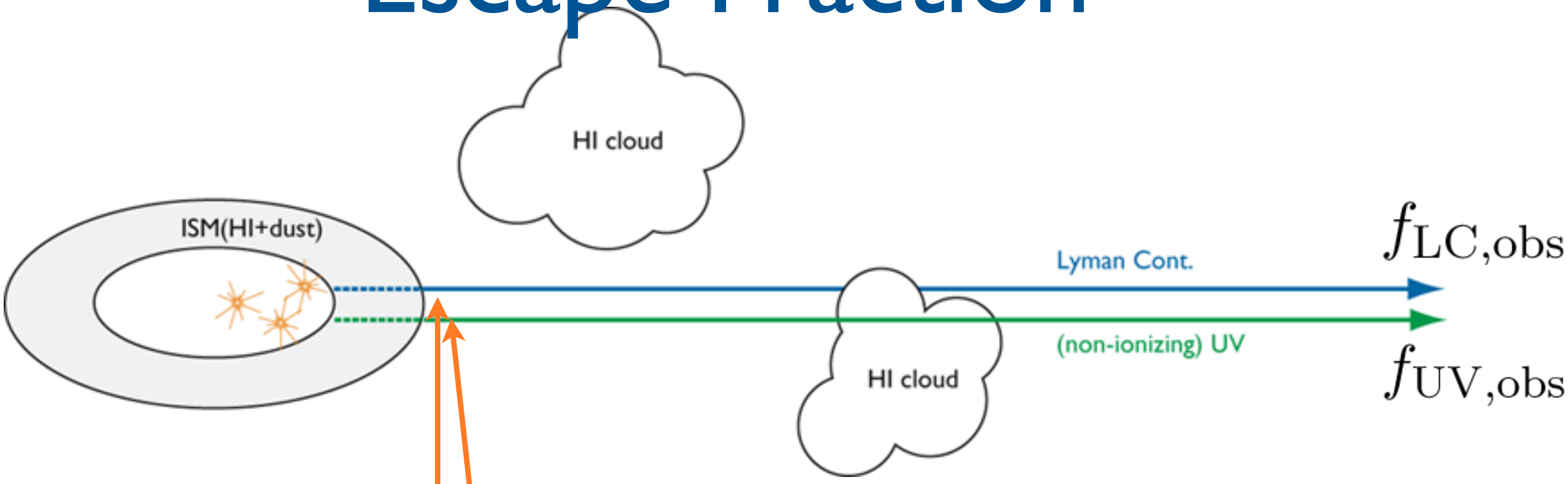
(UV slope)
V−i′
0.5
0
−0.5
'red' LAEs
'blue' LAEs
LBGs
0
1
2
3
NB359−R
(fLC/fUV)


(UV slope)
V−i′
'red' LAEs
'blue' LAEs
LBGs
dust
(Calzetti law)
shaded area: reproducible with IGM and dust
IGM attenuation
z=3.2
z=3.0
Salpeter IMF zero age Model
0.5
0
−0.5
0
1
2
3
NB359−R
(fLC/fUV)



Salpeter IMFだとLBGの色が説明できない

Escape Fraction



$$f_{\mathrm{esc}} = L_{\mathrm{LC,out}}/L_{\mathrm{LC,int}}$$

$$\boxed{f_{\mathrm{esc}} = 10^{-0.4A_{\mathrm{UV}}} f_{\mathrm{esc,rel}}}$$

$$f_{\mathrm{esc,rel}} = \frac{(L_{\mathrm{LC,out}}/L_{\mathrm{LC,int}})}{(L_{\mathrm{UV,out}}/L_{\mathrm{UV,int}})}$$

$$= \frac{(L_{\mathrm{UV}}/L_{\mathrm{LC}})_{\mathrm{int}}}{\boxed{(f_{\mathrm{UV}}/f_{\mathrm{LC}})_{\mathrm{obs}}}} \exp(\tau_{\mathrm{IGM,LC}})$$

Escape Fraction

- For 7 LBGs, average $(f_{UV}/f_{LC})_{obs}=4.6$
- If we assume $(f_{UV}/f_{LC})_{int}=3.0$ and no IGM attenuation, $f_{esc,rel} = 0.65$: lower limit of $f_{esc,rel}$
- $E(B-V)=0.15 \rightarrow f_{esc} = 0.16$

Uncertainties:

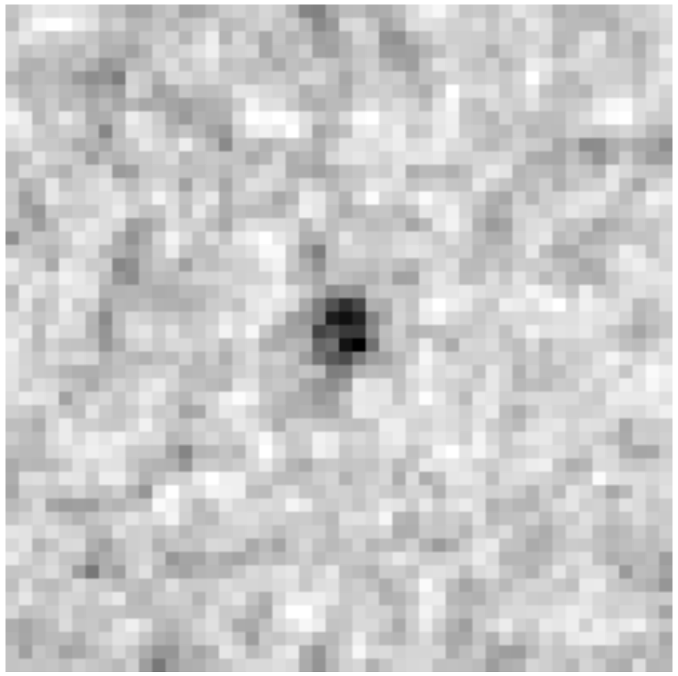
- IGM opacity: if we take median, $f_{esc}=0.28$
- $(f_{UV}/f_{LC})_{int}$: if 1.07, $f_{esc,rel}=0.23$ and $f_{esc}=0.06$

UV-to-LC flux ratios of LBGS at z~3

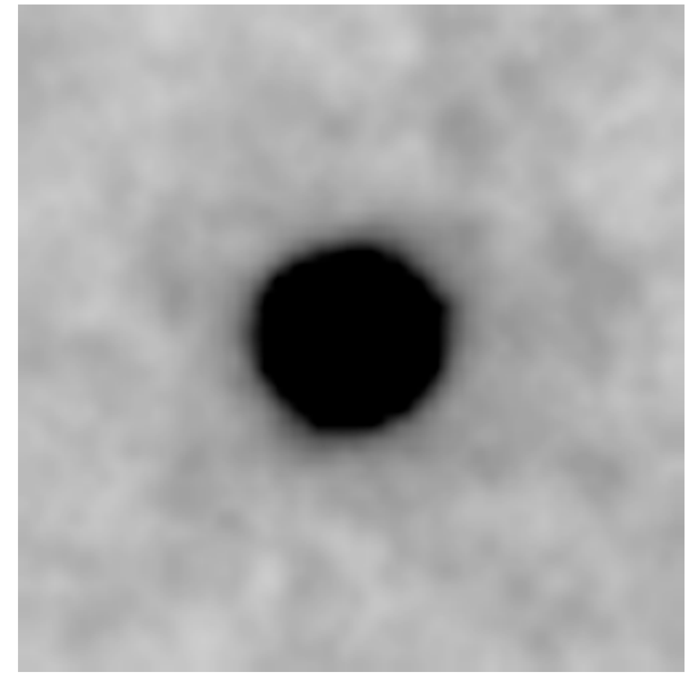
	Steidel+01	Shapley+06	Shapley+06	Iwata+08
	29 average	2 direct	14 average	7 direct
f_{UV}/f_{LC}	17.7	12.7, 7.5	58	4.6

Composite Image

Preliminary



NB359,
all 471 galaxies
at 3.06<z<3.2

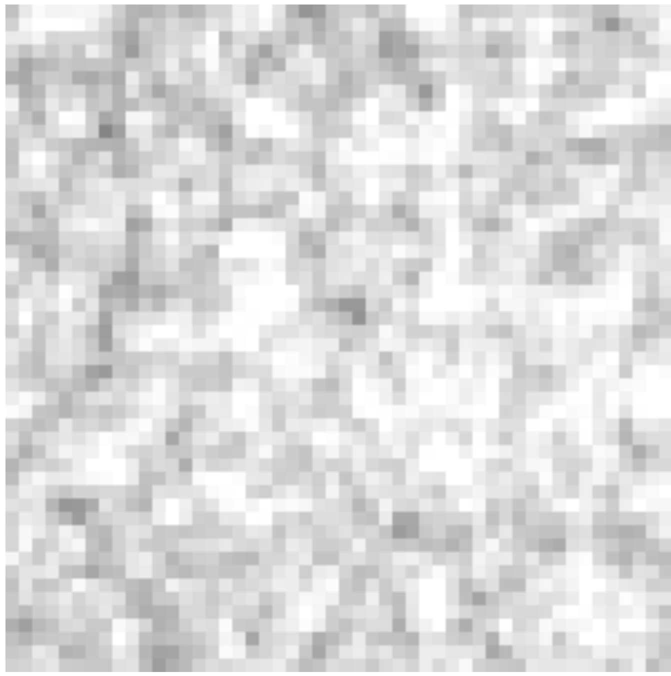


R-band

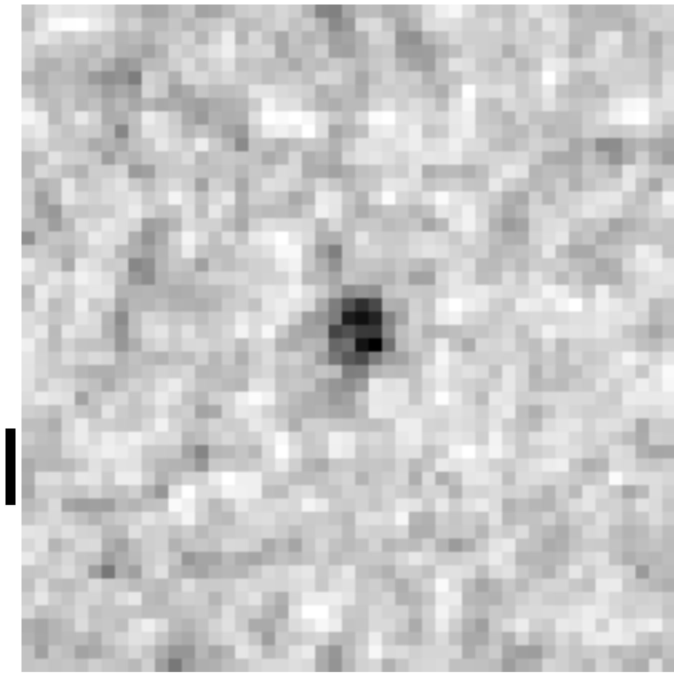
- $(f_{UV}/f_{LC})obs=8.8$
- If $(f_{UV}/f_{LC})int=3.0$ and average IGM attenuation at z=3 (Inoue and Iwata, 2008) are assumed, fesc,rel=0.60

Composite Image

Preliminary



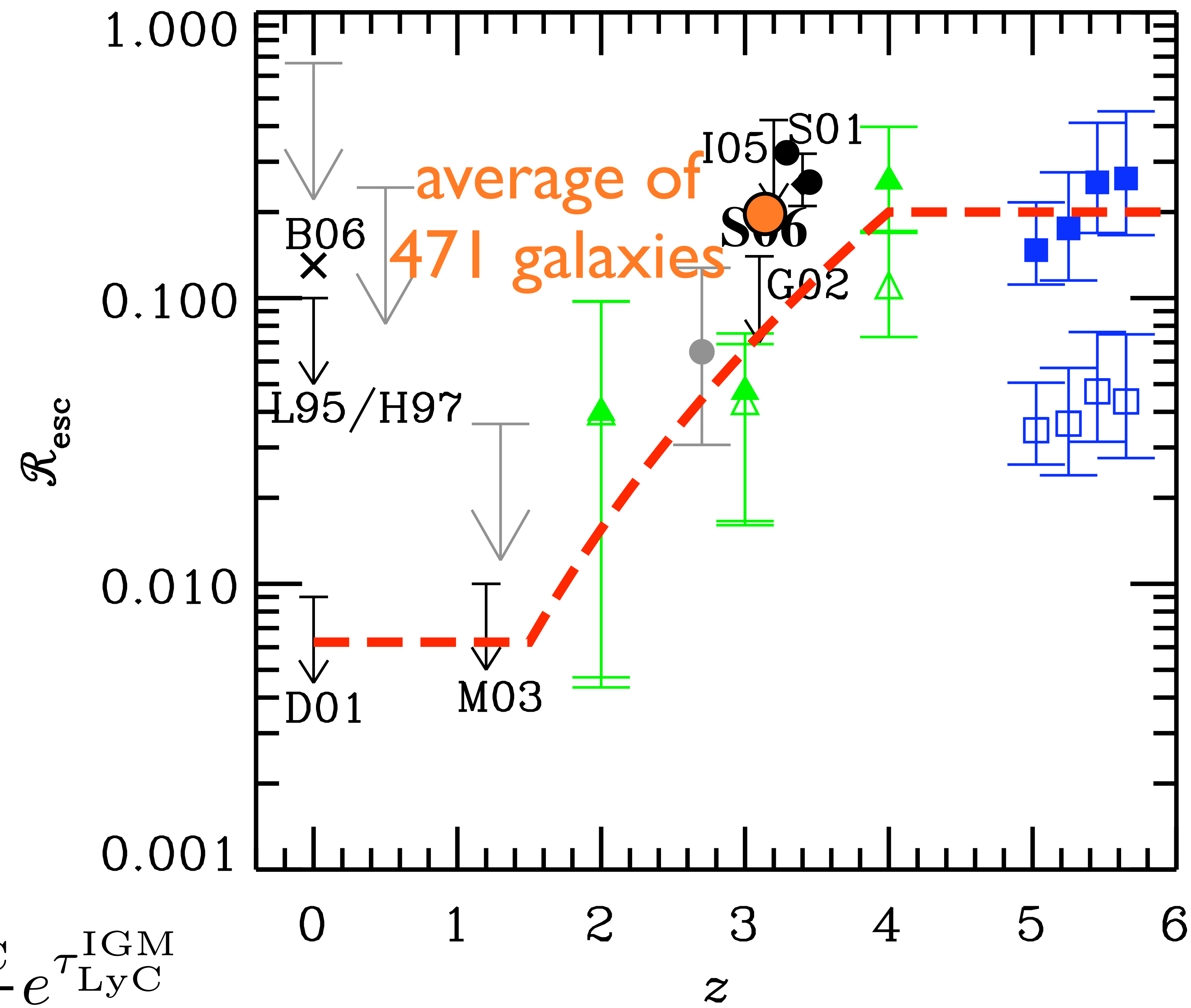
NB359,
413 galaxies
(w/o individual
detections)



NB359,
all 471 galaxies
at 3.06<z<3.2

- If we exclude >3σ detections, composite of 413 galaxies is only ~1σ level
- 3σ upperlimit of fesc,rel=0.28

Evolution of Escape Fraction?



$$\mathcal{R}_{\rm esc} = \frac{F_{\rm LyC}^{\rm obs}}{F_{\rm UV}^{\rm obs}} e^{\tau_{\rm LyC}^{\rm IGM}}$$

Inoue, Deharveng, Iwata 06

Summary

- Suprime-Cam + NB Filterにより7 LBGs, 10 LAE candidatesからの電離光子の直接検出に成功
- 特にLBGでは電離光子はUV peakから離れたところから放射されている
- 7 LBGsの平均としてfesc,rel=0.65, fesc=16%
  - $(L_{UV}/L_{LC})_{int}$=3.0, IGM吸収なしの場合
- 471 Composite: fesc,rel=0.60
  - 平均的IGM吸収を仮定した場合

One More Thing ...

WISH: 超広視野 遠方宇宙探査計画

Wide-field Imaging Surveyor for High-z

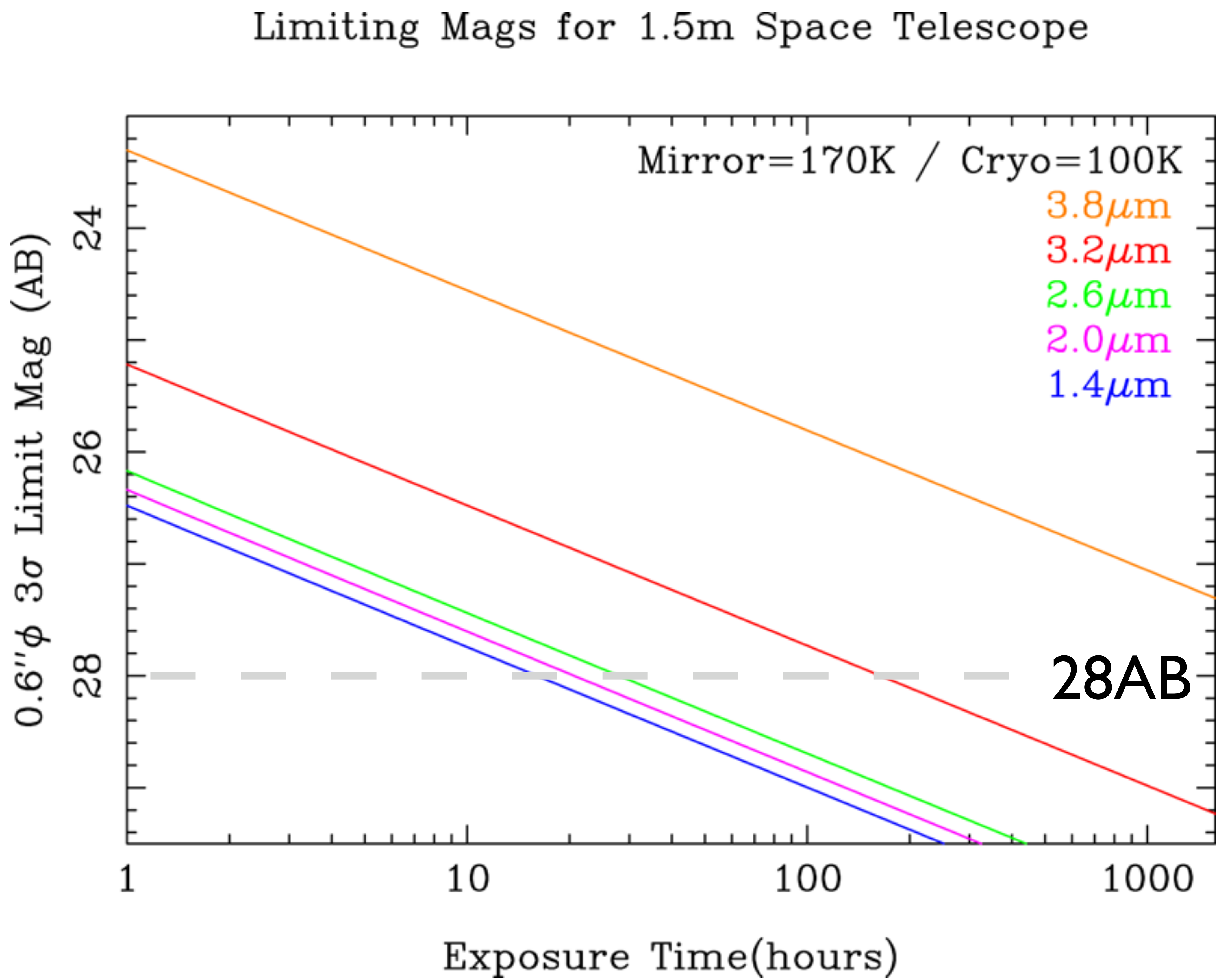
岩田 生[1], 山田 亨[2], 常田 佐久[1] ほか
超広視野近赤外スペースミッション検討グループ
(1: 国立天文台 2:東北大)

WISH: Wide-field Imaging Surveyor for High-z

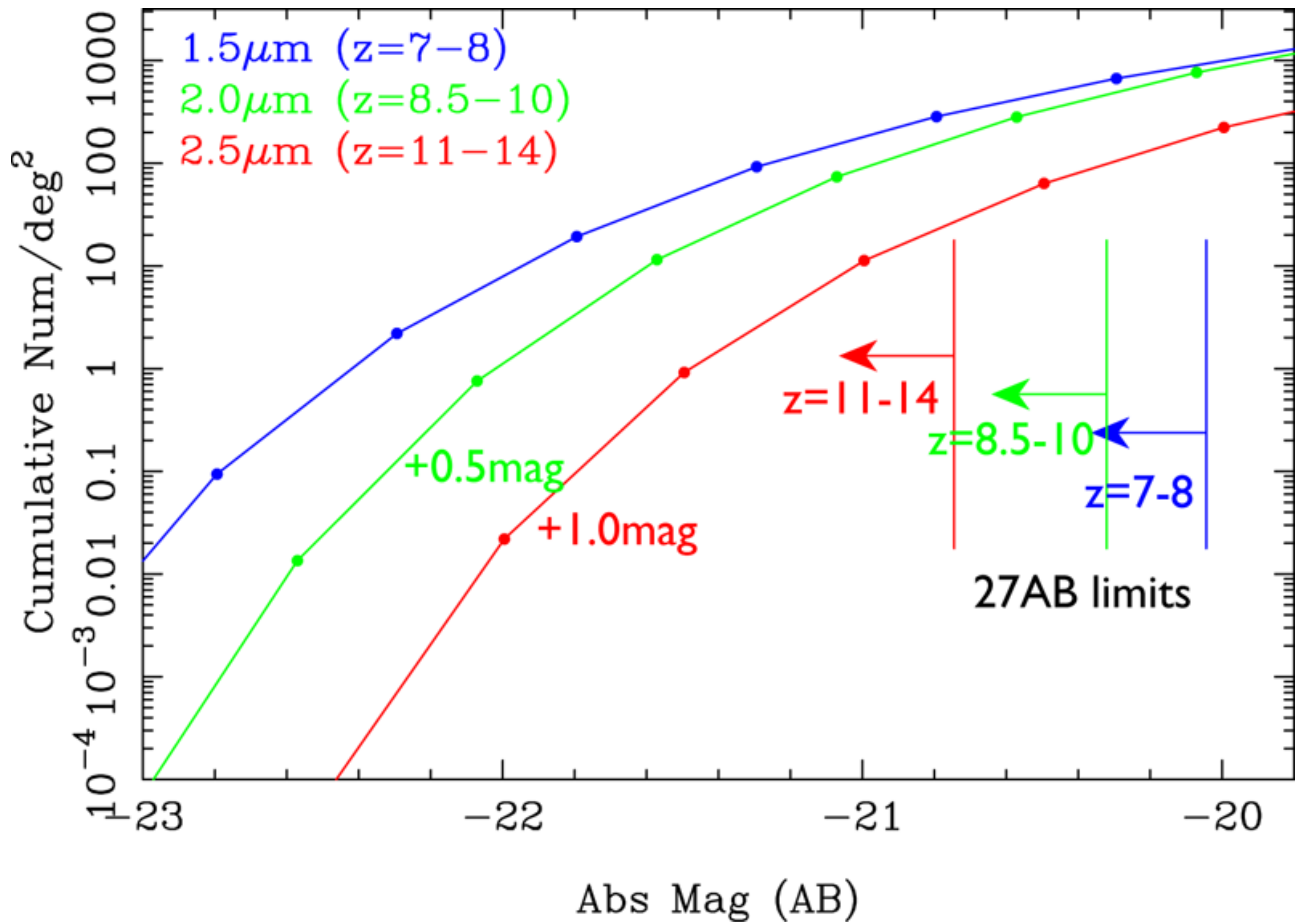
- 口径1.5m級望遠鏡
- 1-5μmで地上から到達不能な深さ
  - SPICAと相補的な波長域
- 100平方度のサーベイ
- 現在 宇宙理学委員会へのWG設置提案準備中

WISH: Wide-field Imaging Surveyor for High-z

- 最遠方銀河の発見 (z=7-14)
- 宇宙再電離過程の理解
- 銀河の星質量集積過程の理解
- SN Iaによる宇宙論パラメータ探査



Limiting Mags for 1.5m Space Telescope
Mirror=170K / Cryo=100K
3.8μm
3.2μm
2.6μm
2.0μm
1.4μm
28AB
0.6"φ 3σ Limit Mag (AB)
24
26
28
1
10
100
1000
Exposure Time(hours)



Sample Feeder for TMT

検討グループメンバー

- 山田 亨:PI (東北大)
- 岩田 生, 常田 佐久, 児玉 忠恭, 諸隈 智貴, 小宮山 裕 (国立天文台)
- 松原 英雄, 和田 武彦, 大藪 進喜 (宇宙研)
- 河合 誠之 (東工大)
- 太田 耕司, 矢部 清人 (京大)
- 土居 守, 安田 直樹, 内一・勝野 由夏 (東大)
- 後藤 友嗣(ハワイ大)

contact: yamada@astr.tohoku.ac.jp or iwata@oao.nao.ac.jp