

初期宇宙と銀河形成

柏川伸成
(国立天文台, オーバーエイジ枠)

どこまで遠くに行っても存在する銀河...

■ 1989年「大型光学赤外線望遠鏡計画 説明書」by 国立天文台

「...この $4 < z < 1000$ の時代の宇宙に何が起こったのか？この謎を解く鍵は原始銀河の発見にある。JNLTはこの問題に対しても答えを出すであろう。」

■ 2007年“TMT Detailed Science Case” by TMT SAC

“The detection of the first luminous objects will be challenging with TMT even if they lie in an accessible redshift range from $z=7$ to 20 ”

■ “銀河形成”というキーワードを持つ科研費採択課題

— 177件(1983-現在)

...未だに見えてこない銀河形成

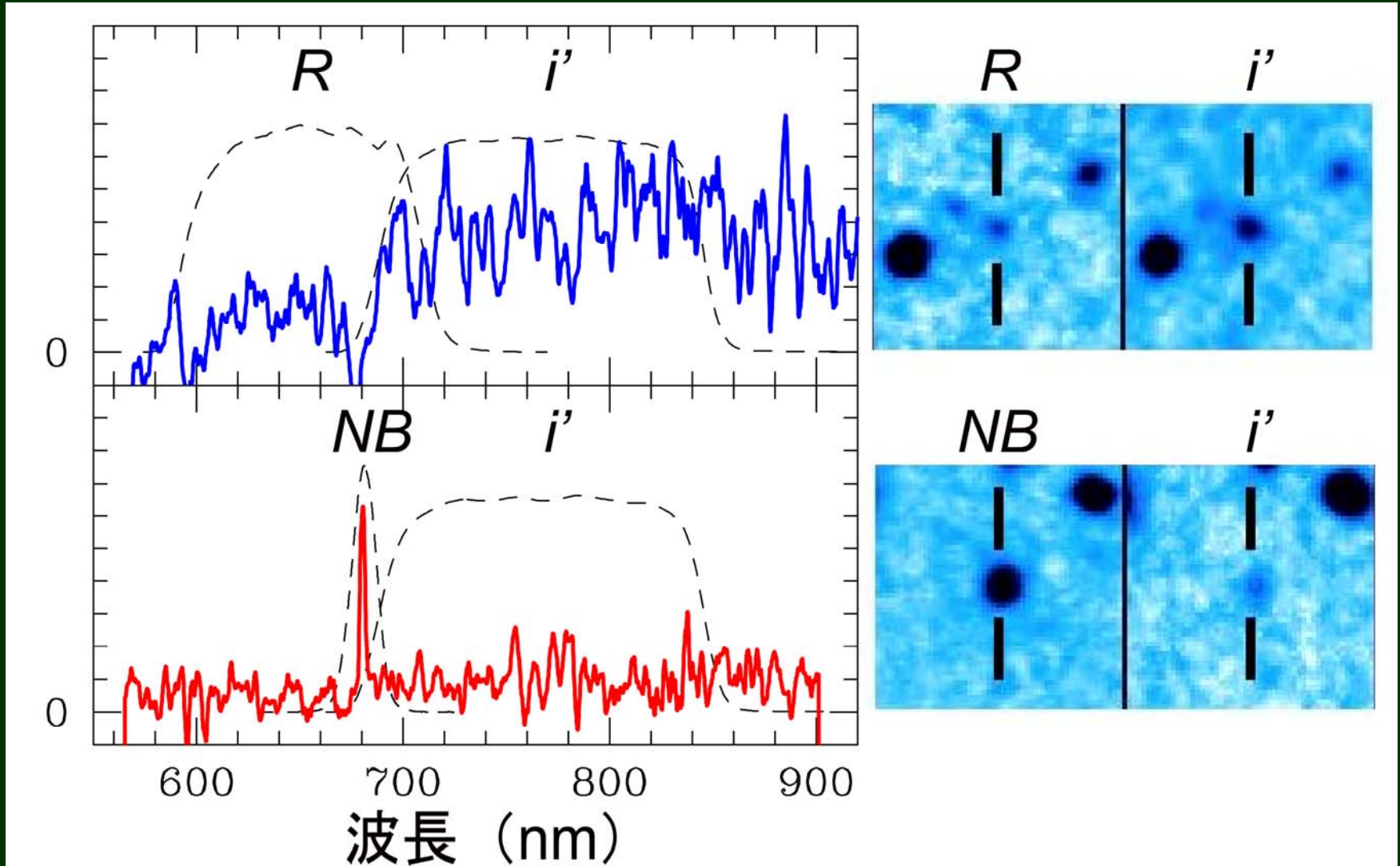
- high- z 銀河について観測的にどこまでわかったか？
 - これまでのhigh- z ($z > 3$)銀河の観測的研究のまとめ
- モデルとの比較はどこまで進んだか？
 - 観測屋はモデルをどのように使うべきか
- これ以上high- z で銀河形成の現場は見る事が出来るか？
 - 再電離とpopIII

high-z銀河について観測的にどこまでわかったか？

これまでのhigh-z($z>3$)銀河の観測的研究のまとめ

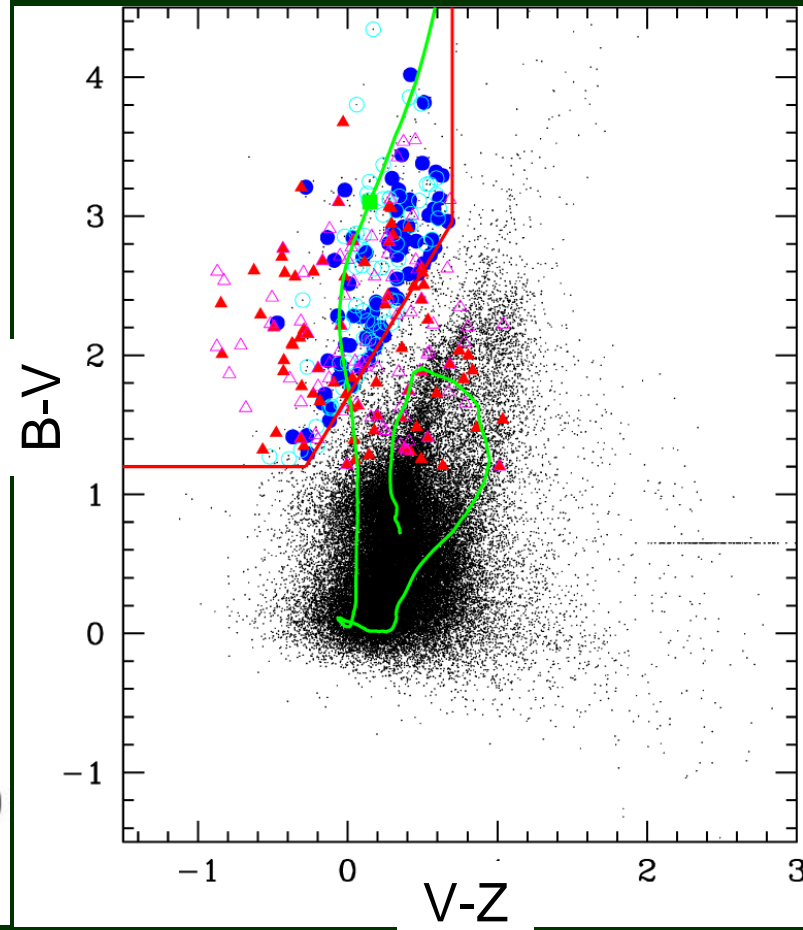
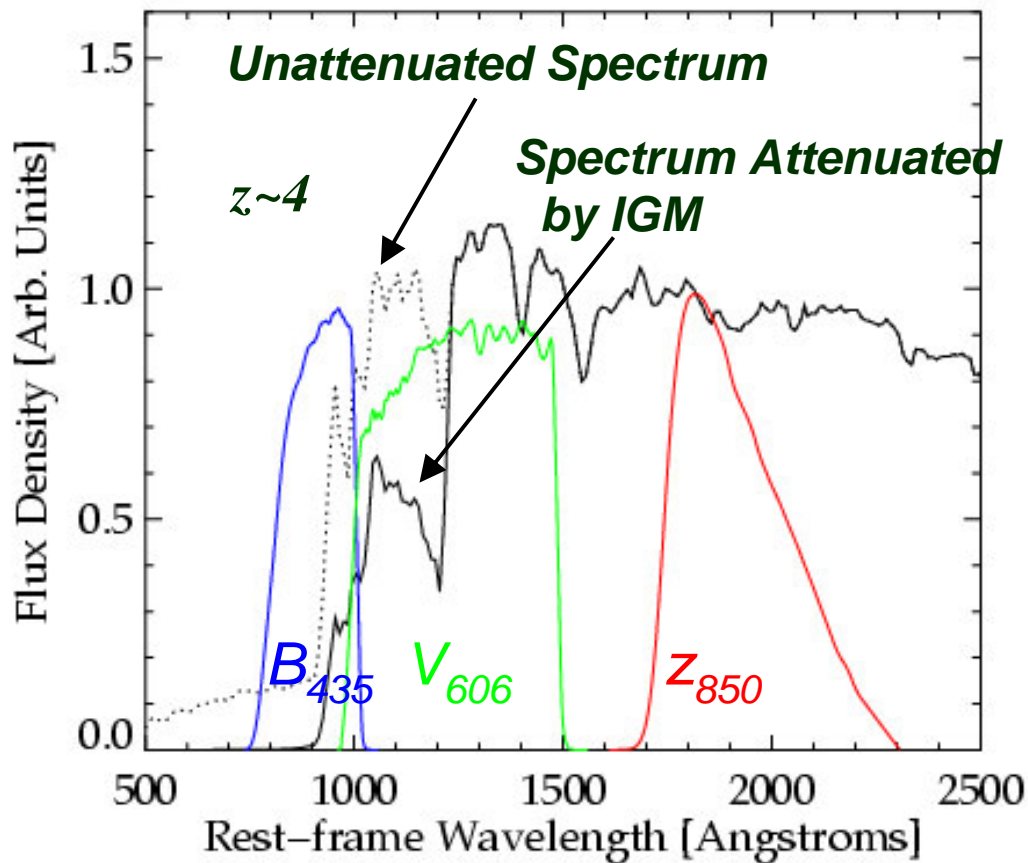
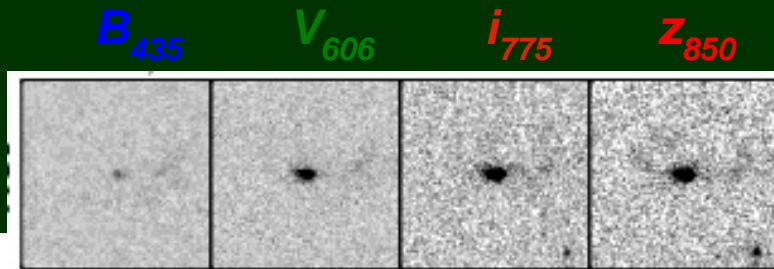
High- z ($z > 3$) galaxies; LBG & LAE

- LBG (Lyman Break Galaxy)
- LAE (Lyman Alpha Emitter)



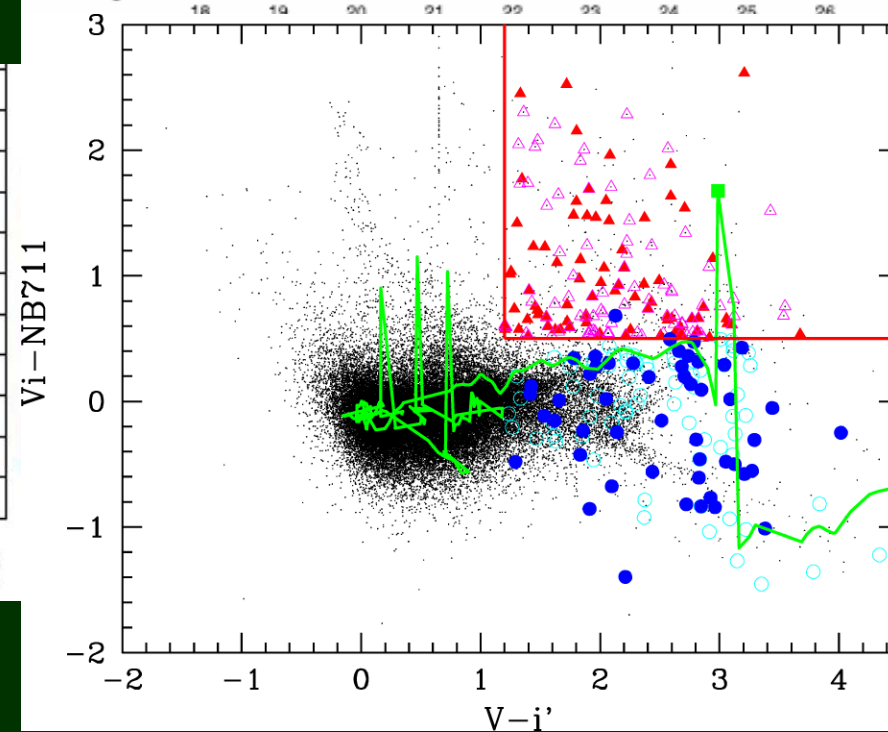
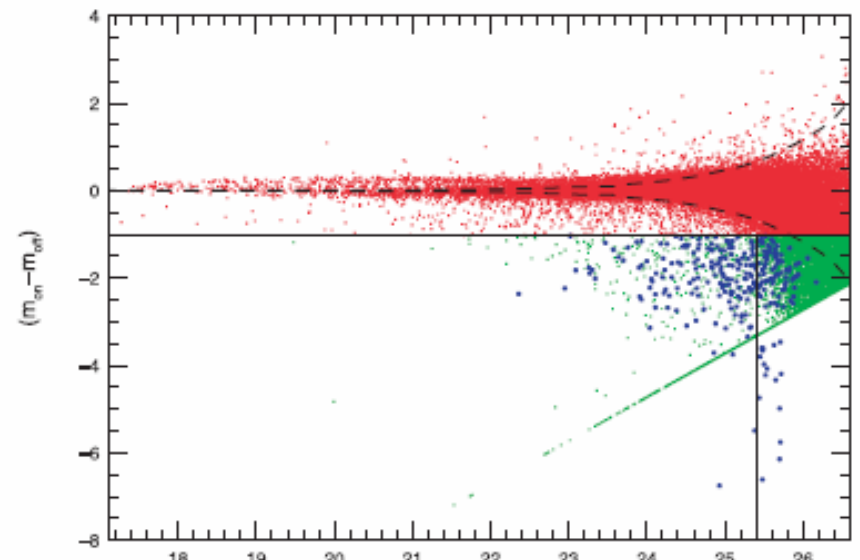
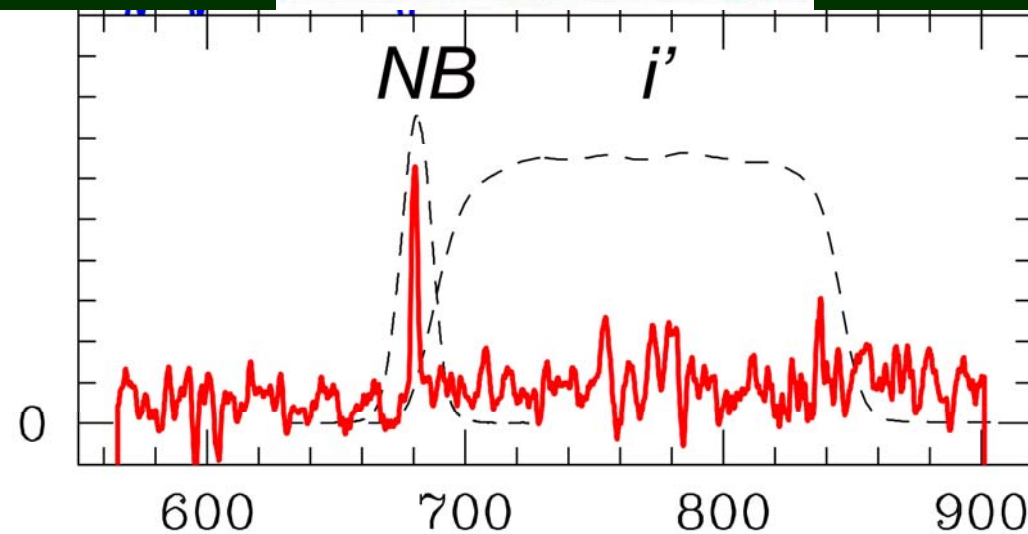
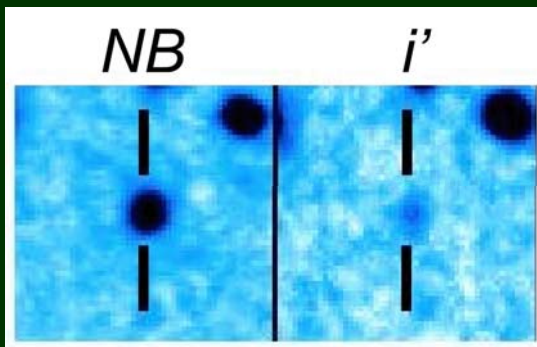
Lyman break galaxy (LBG)

■ Lyman breakを2色図上で測光的に検出することによって、分光前に効率よくhigh-z銀河を同定することができる。



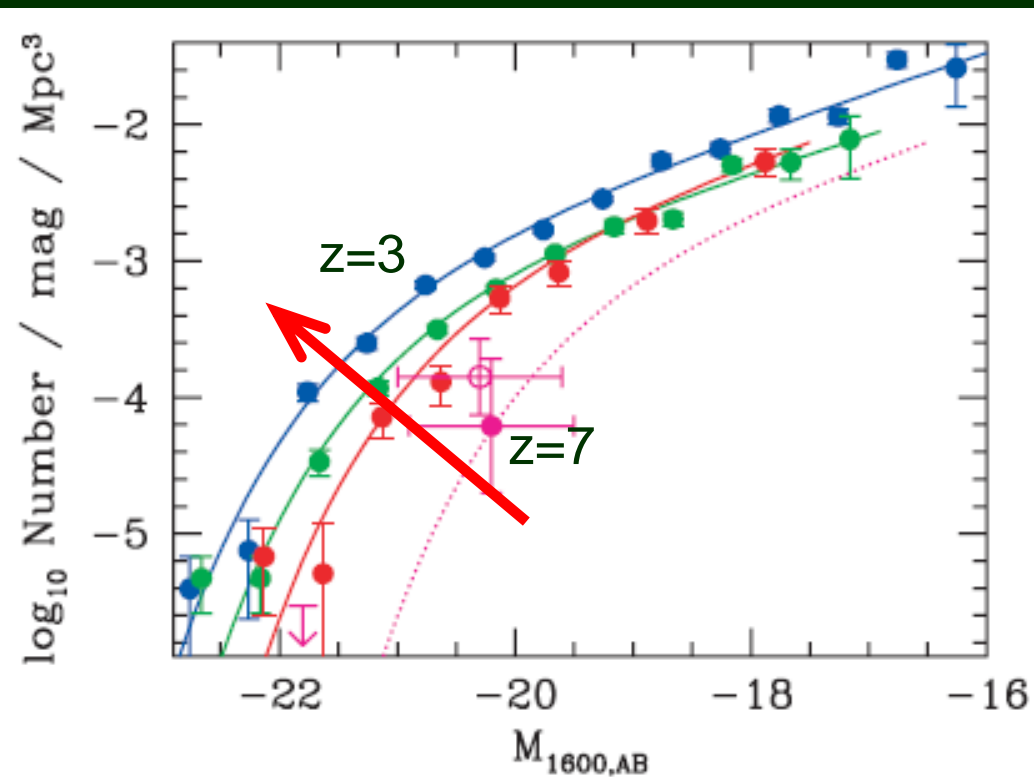
Lyman- α emitter (LAE)

■ Lyman- α 輝線をNBで検出する。



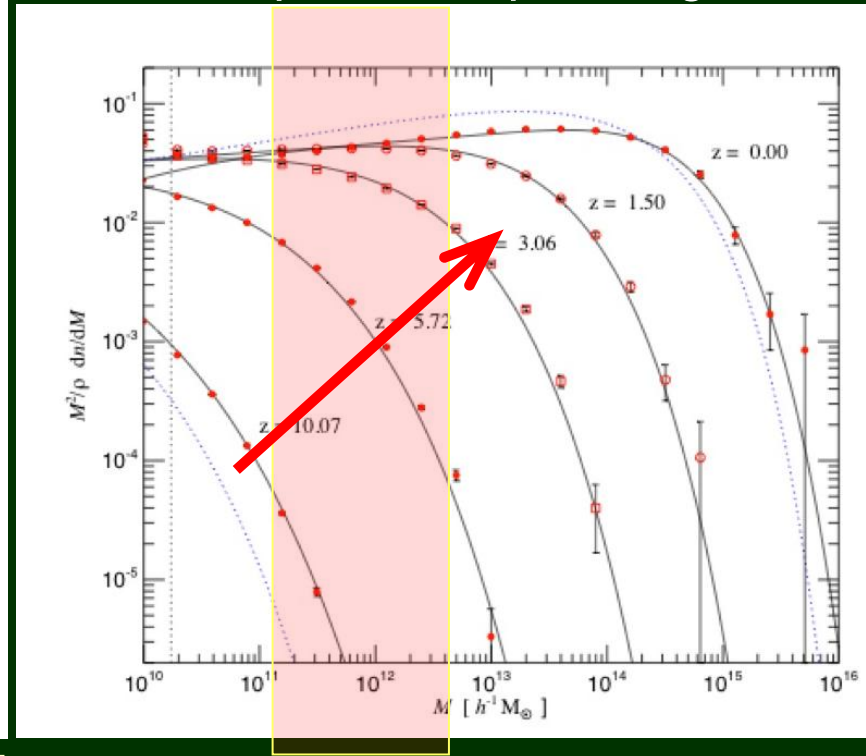
LBG: rest-UV LF

- LBGのrest-UV LF evolution
 - $z=7 \rightarrow 3$ で明るい方の数密度が増加(L^* が進化)。
- See also: Yoshida+ 06, Shimasaku+ 05



Bouwens+ 07

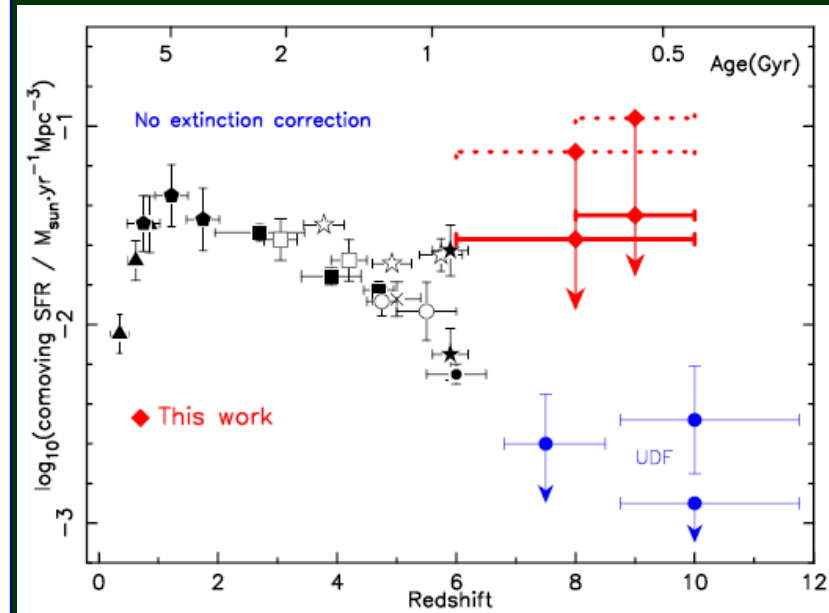
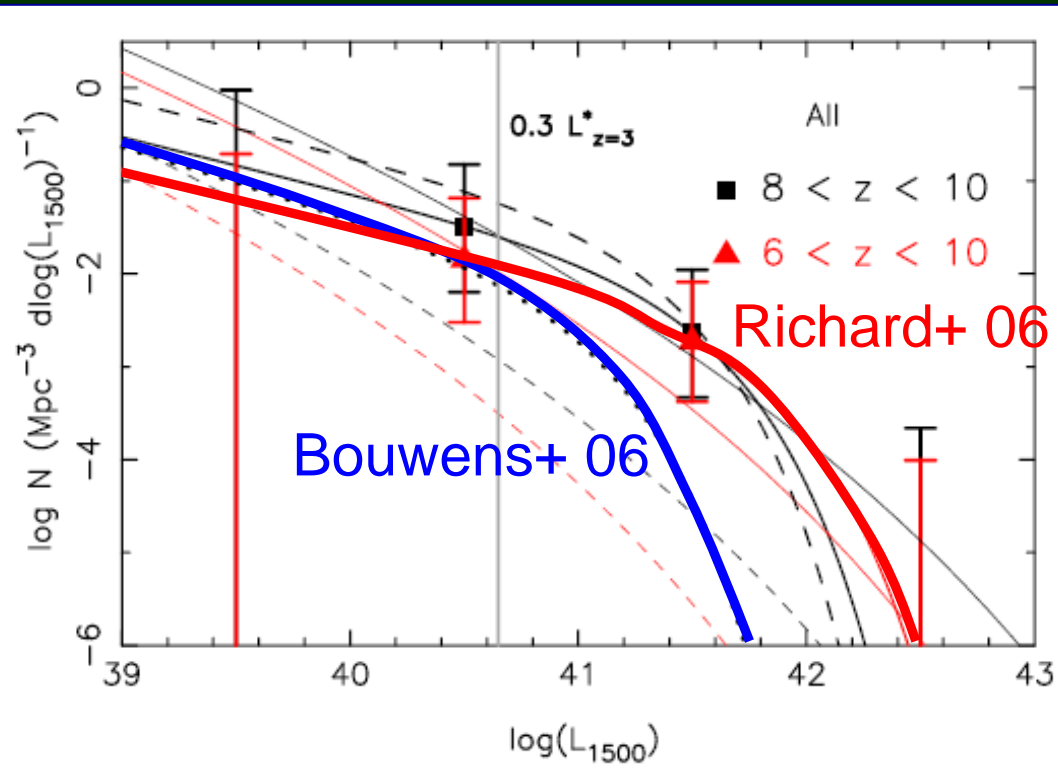
Rapid Buildup of L^* galaxies



Mass of $\sim L^*$ galaxies
Springel et al. (2005)

LBG: rest-UV LF

- さまざまな”deep survey”で結果に食い違いが見られる。
- $z > 6$ のrest-UV LF



Richard+ 06	VLT/grav.L 12arcmin ²	LF @z=3と同じ
Bouwens+ 06	UDF 5arcmin ²	LF @z=3と違う

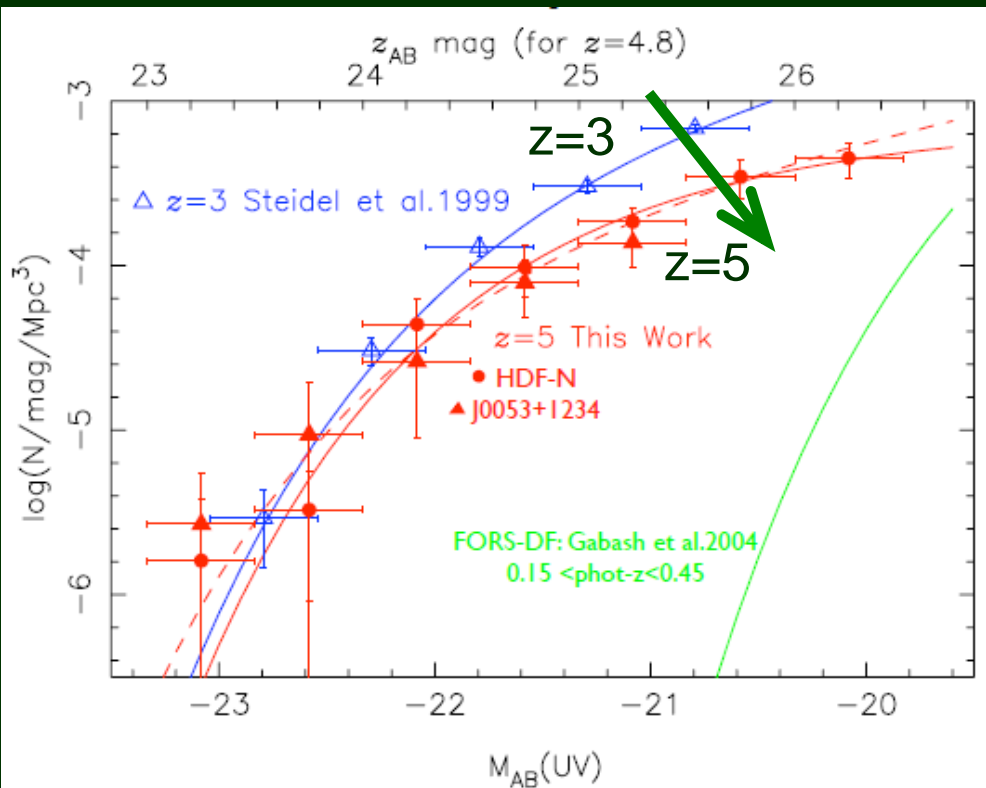
LBG: rest-UV LF

■ さまざまな”deep survey”で結果に食い違いが見られる。

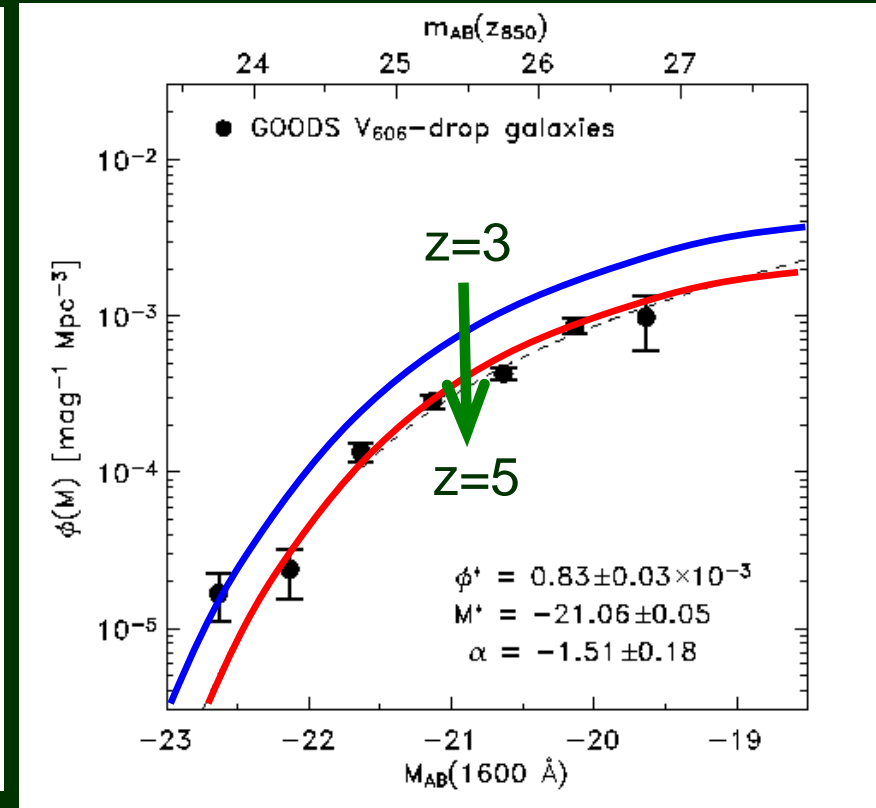
■ $z=3 \rightarrow 5$ のLF evolutionの傾向

$z=3 \rightarrow 5$ で α が進化する

$z=3 \rightarrow 5$ で ϕ^* が進化する



Iwata+ 05 HDF, Sawicki+ 06 KDF



Giavalisco+ 06 in prep. GOODS

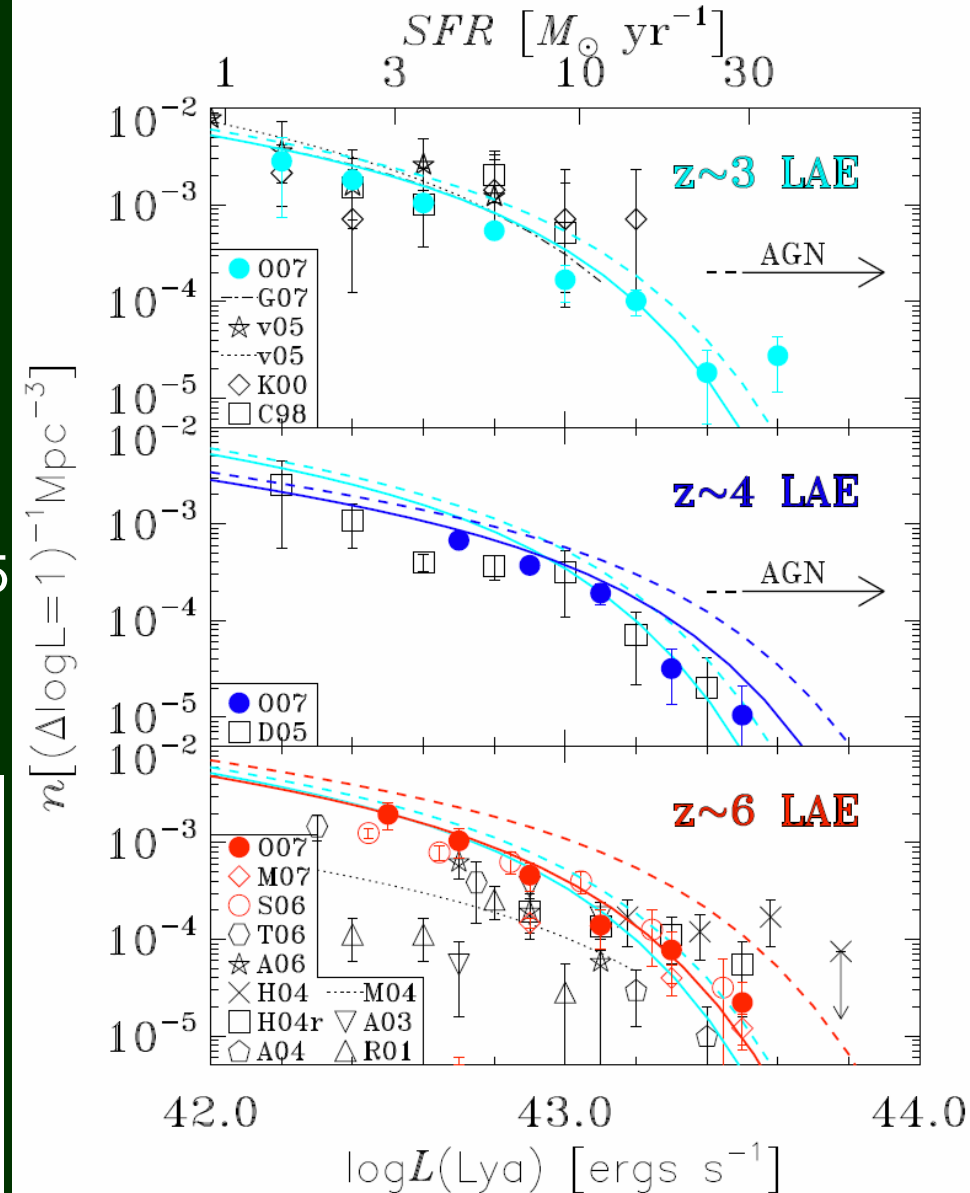
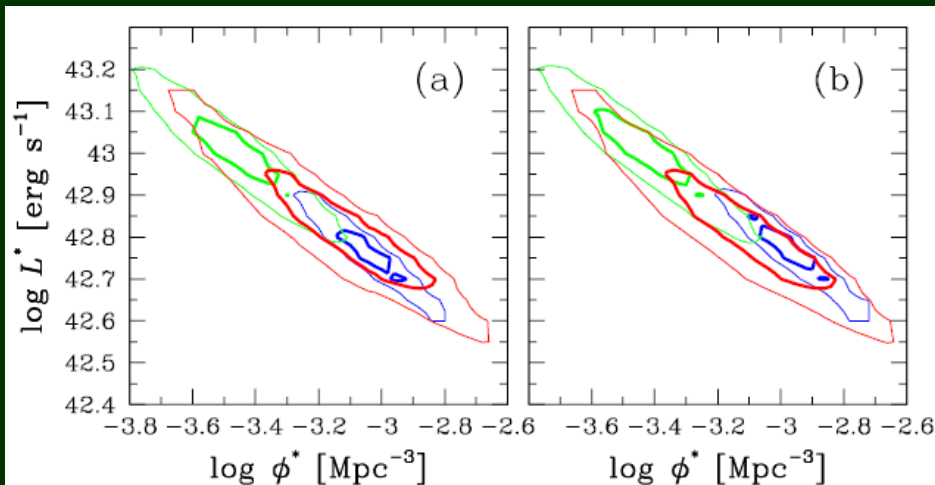
LAE: Ly α LF

Ly α LF at $3 < z < 5.7$

No evolution

- Systematic LAE survey at $z=3.1/3.7/5.7$
- SXDS 1sqdeg survey
- Contrary to LBG evolution
- See also: Dawson+ 07
Gronwall+ 07, van Breukelen+ 05

ではなぜ進化しないのか？



LBG&LAE: stellar mass, age, dust

■ LBG/LAE --- 典型的な星質量、年齢、ダスト量がわかり始めてきた。

(Shapley+ 05, Egami+ 05, Eyles+ 06, Dunlop+ 06, Gawiser+ 06, Overzier+ 06, Labbe+ 06, Yan+ 06, Lai+ 06, Nilsson+ 07...)

■ Stellar mass

LBG: $> 10^{10-11} M_{\odot}$

LAE: $\sim 10^8 M_{\odot}$

■ Age

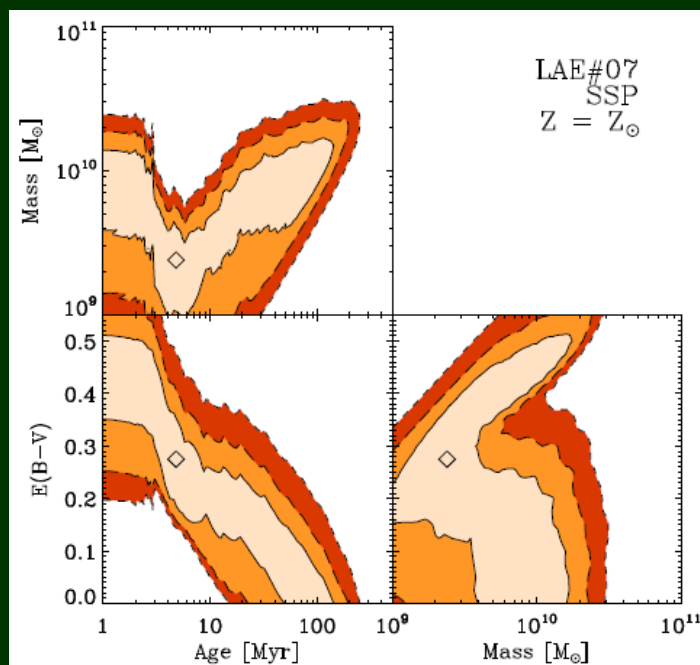
LBG: $> 10^9$ yr

LAE: $\sim 10^8$ yr

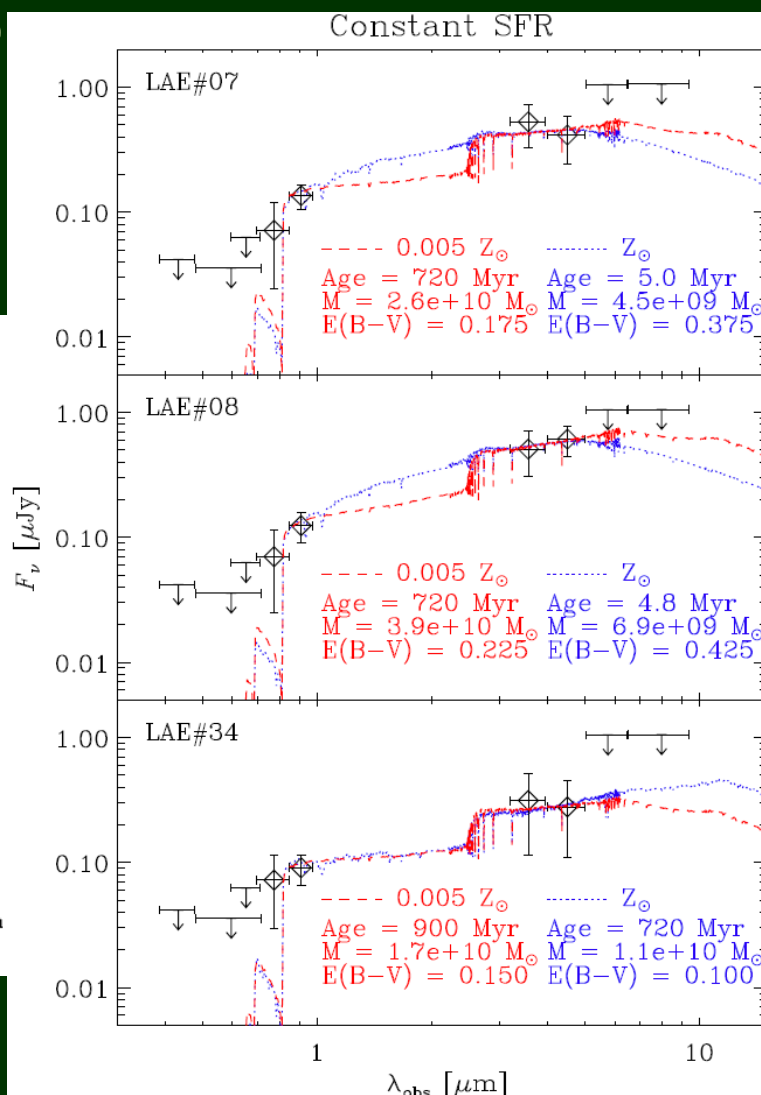
■ A_v

LBG: < 1

LAE: < 0.1

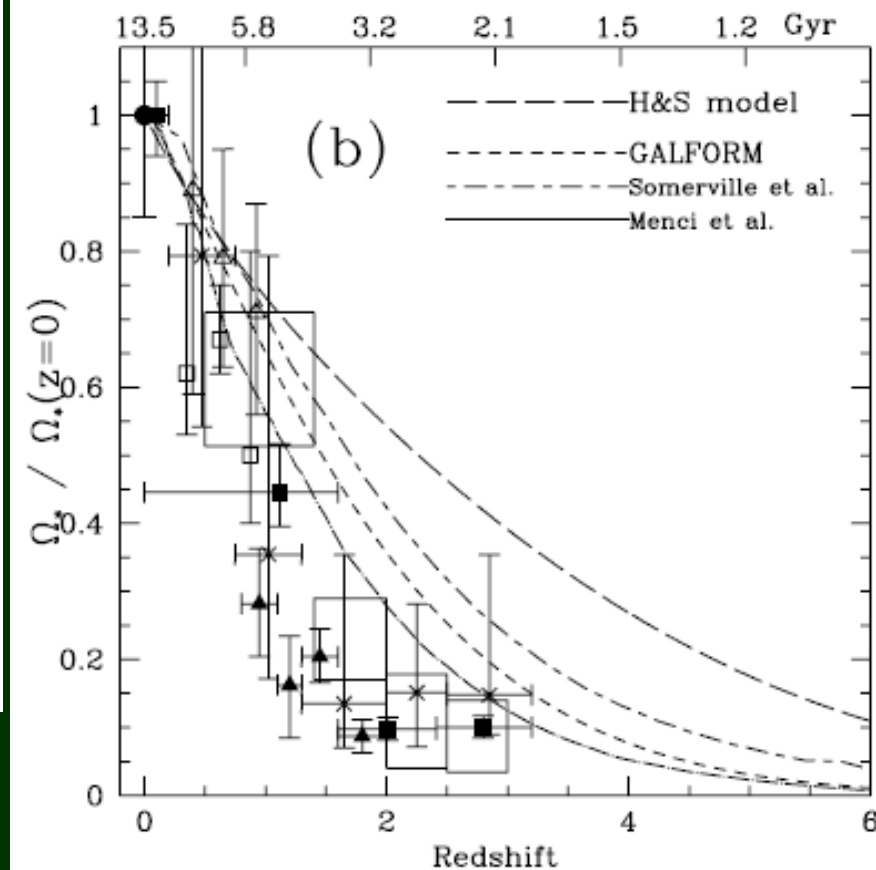
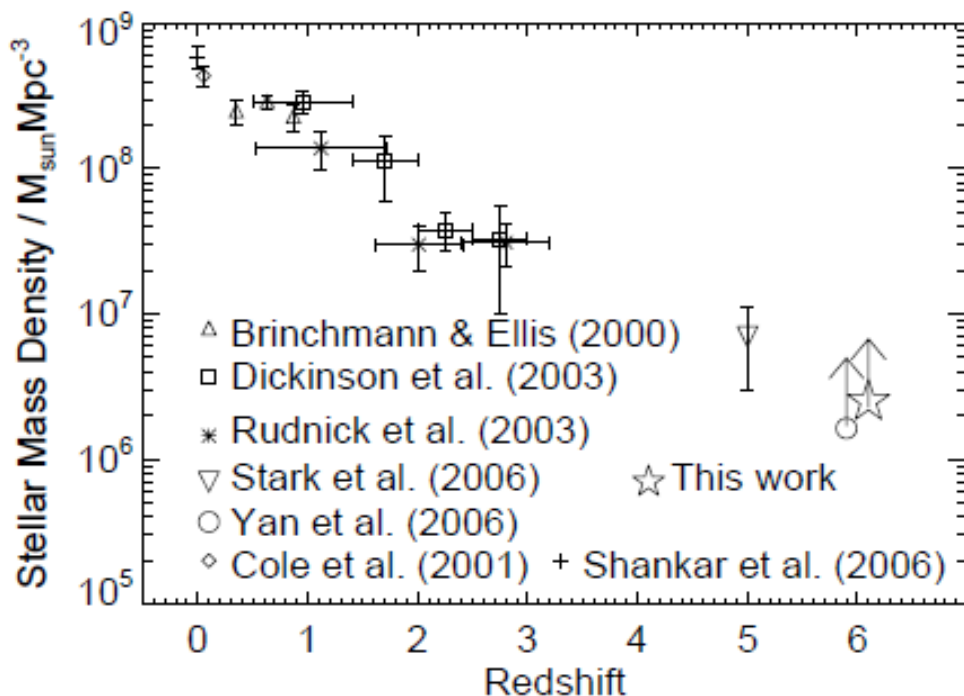


Lai+ 07



LBG&LAE: stellar mass, age, dust

Evolution of stellar mass density



Eyles+ 07

Inconsistent w/ models

- Missing $\sim 50\%$ of the total ρ_* ?
- Dust obscured SF galaxies?

Nagamine+ 04

See also Menci+ 04, Hopkins 06など

LBG&LAE: stellar mass, age, dust

■ 典型的なじゃない子も見つかった？

■ Old & massive galaxy at $z=6.5$?

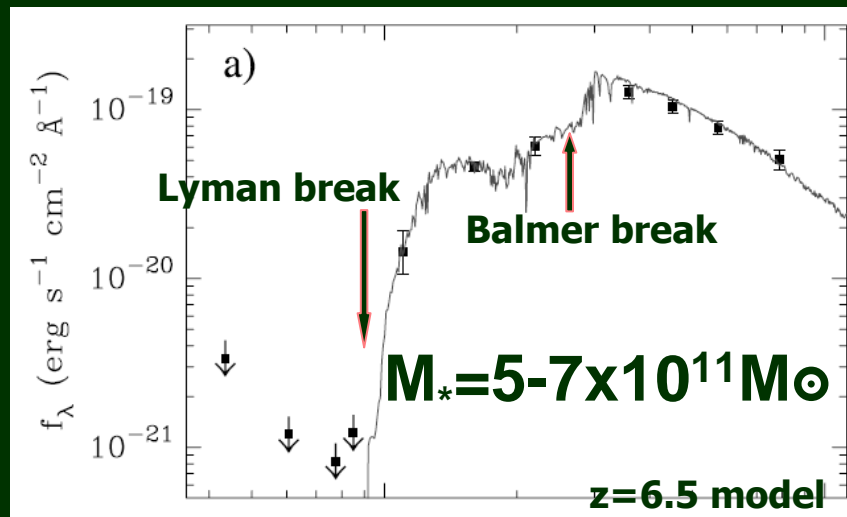
■ HUDF-JD2

■ $M_* = 5-7 \times 10^{11} M_\odot$!!!

■ 近傍 L^* gal の4倍, L^* LBG @ $z=3$ の50倍!

■ $z_f > 9$

■ photo- z のみ、specなし



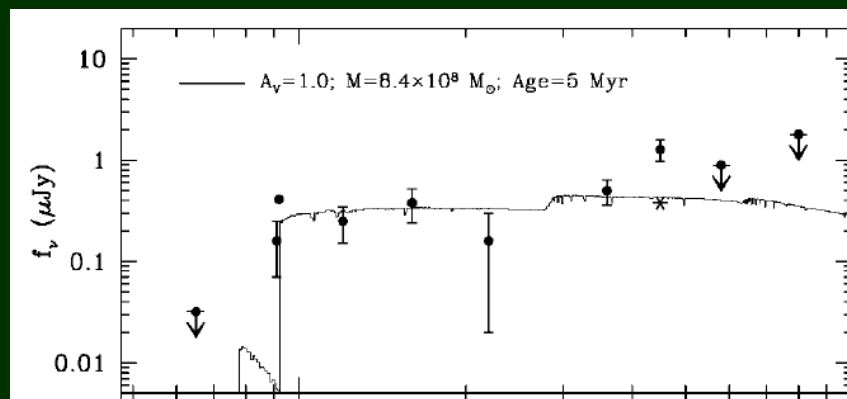
Mobasher+ 05

■ Very dusty galaxy at $z=6.5$?

■ HCM 6A

■ $A_V \sim 1$!!!

■ $z_f \sim 20$



■ $z \sim 5$ で $3 \times 10^{11} M_\odot$ を超える LBG はない (McLure+ 06)

■ 別の phot- z code 使ったら HUDF-JD2 は $z=3$ (Rodighiero+ 07)

LBG(LAE): morphology

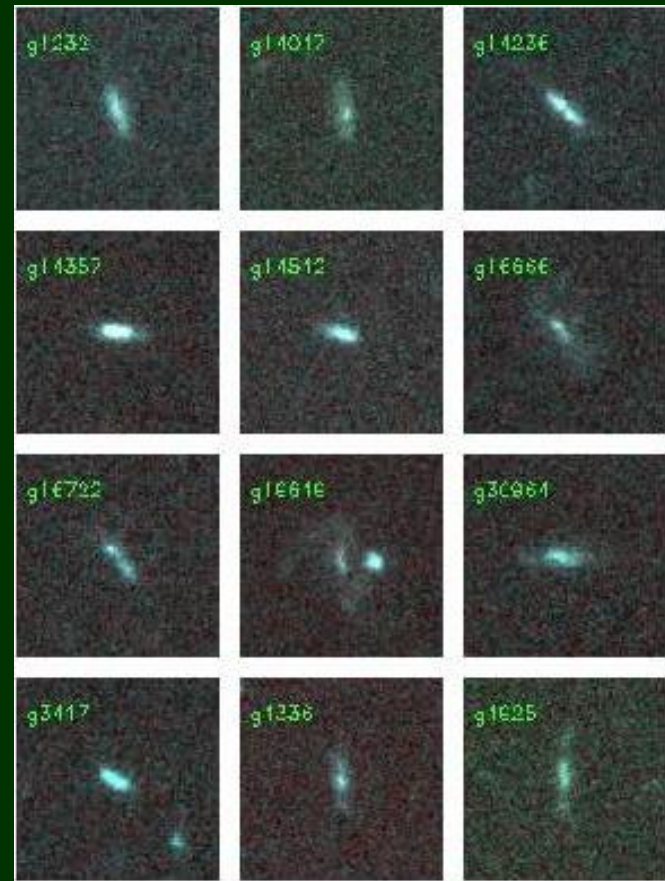
■ LBG --- 典型的な形態がわかり始めてきた。

(Ravindranath+ 06, Low+ 06, Lotz+ 05, Ferguson+ 04)

■ LBGs at $2.5 < z < 5$: rest-UV morph.

- ~ 40% exponential disks
- ~ 30% spheroid-like
- ~ 30% mergers, multiple cores
- excess of “Elongated” morphologies
→ Star-formation in filaments of cold gas in DM halos?

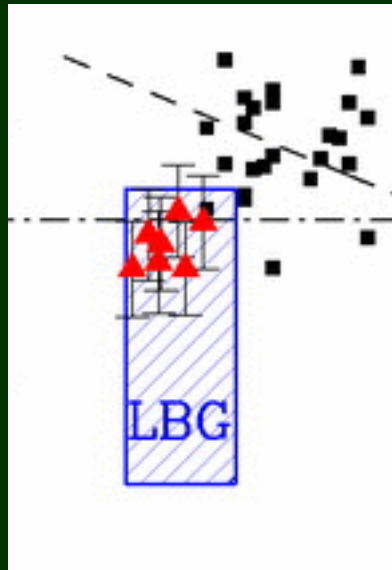
■ Rest-Opt morph. w/ NIR-AO
ほとんどdisk (Akiyama+ 08)



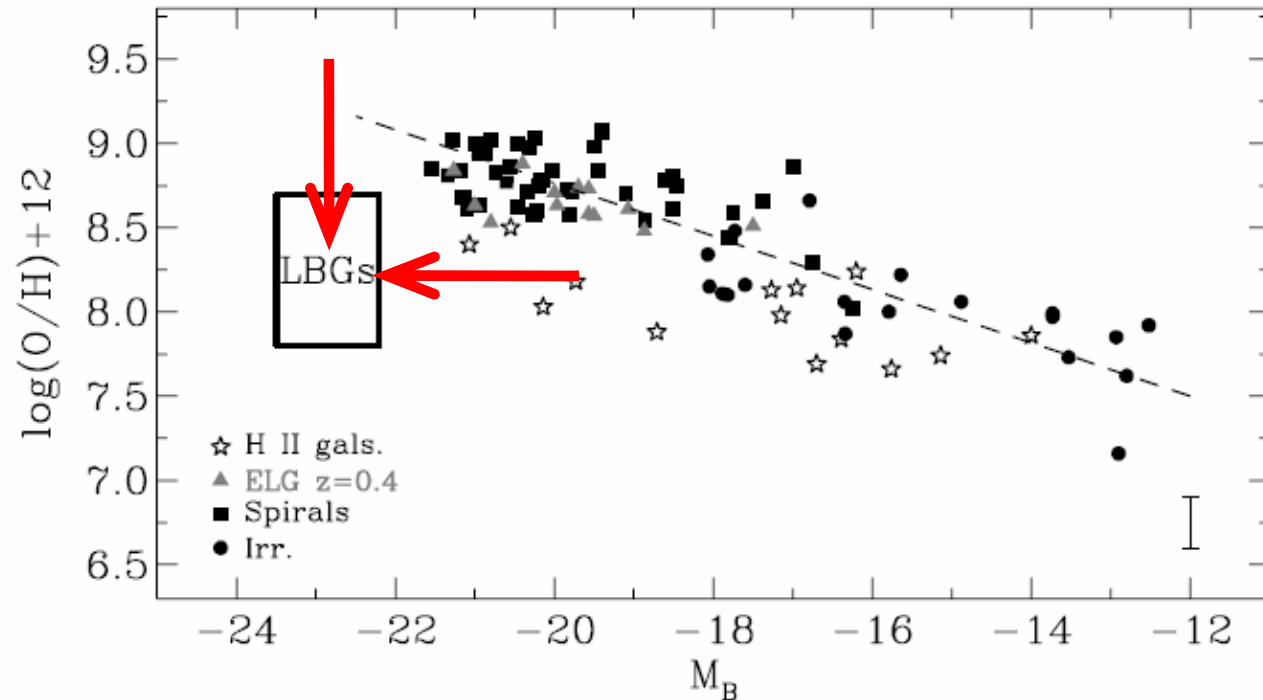
Ravindranath+ 06

LBG(LAE): abundance

- 明るいものについては金属量が測られている。
 - $\sim 1/10$ solar ($z=3$)
 - 近傍のM-L relationよりは低くDLA($1/30$ solar)よりは高い。
 - LBGのM/Lが低いのか、M-L relationが進化しているのか。
 - $z=2$ ではsolarのものもある(Shapley+ 04)
 - $z=5$ では $z=3$ と変わらず(Ando+ 07)



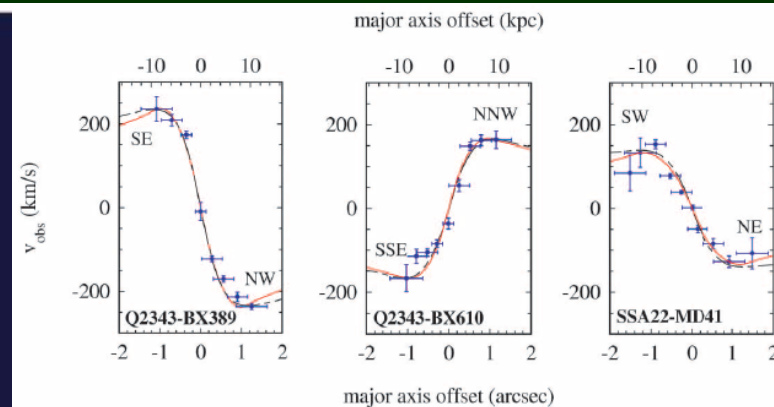
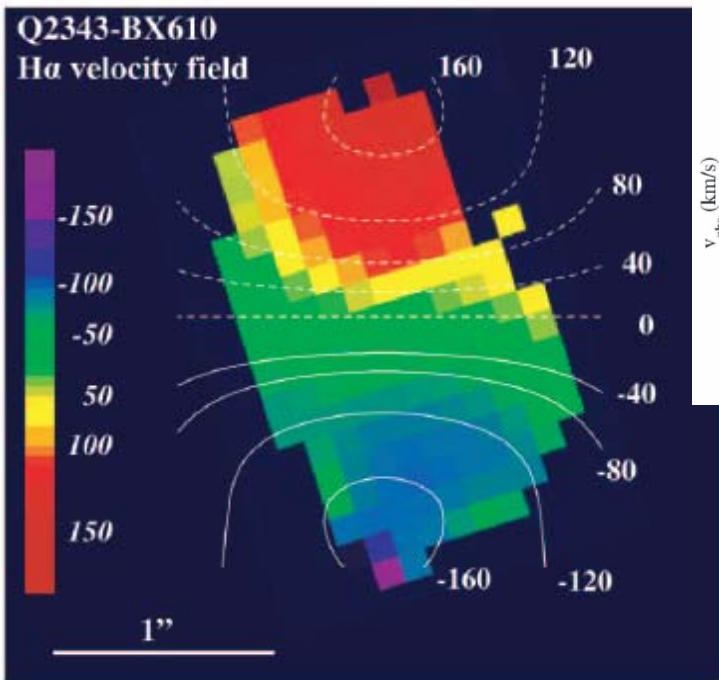
Shapley+ 04



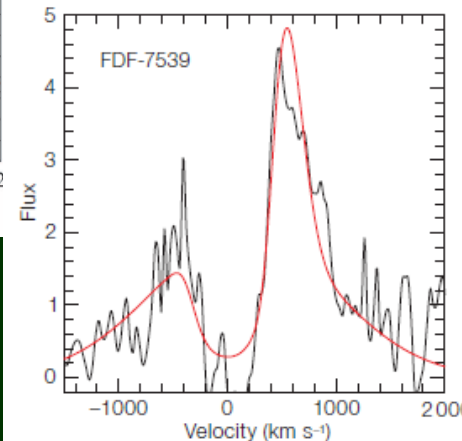
LBG(LAE): kinematics

■ 明るいもの@ $z \sim 2-3$ については力学構造が見え始めた

- rotation curveがいくつかで測られている。40 - 410km/s out to 10kpc
- Dynamical mass: $0.5-25 \times 10^{10} M_{\odot}$ (half light radius) consistent w/clustering
- \Leftrightarrow いやrotationを持つものは少ない。(Law+ 07, LGAO)
- 多くのLAEでbulk motion, galactic wind \sim 数100km/s
→ 重要: IGMのmetal enrichment/ escape of Lyman cont. photons.
- 全体像をつかむにはサンプルがまだまだ少なすぎる。



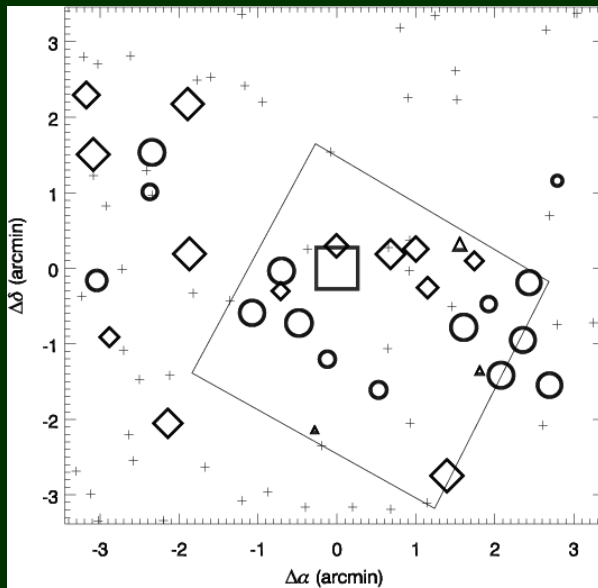
Tapken+ 07



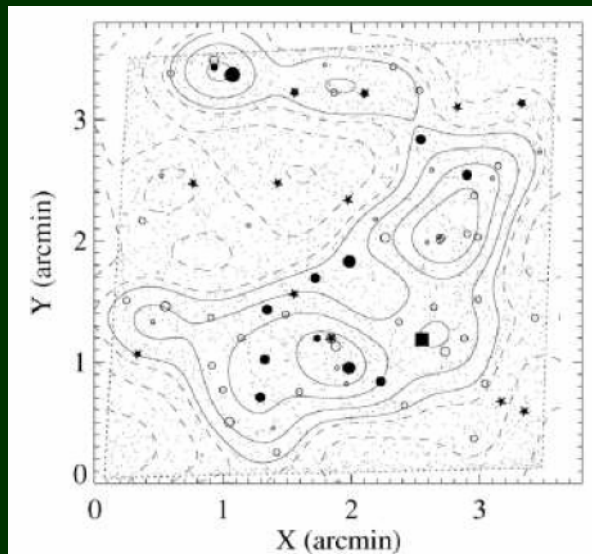
Forster Schreiber+ 07: SINFONI

LBG&LAE: environment

LBGs/LAEs around RGs

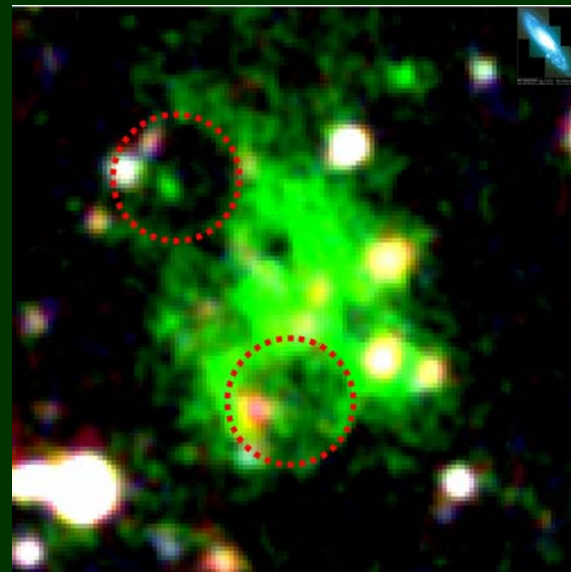


Venemans+ 05

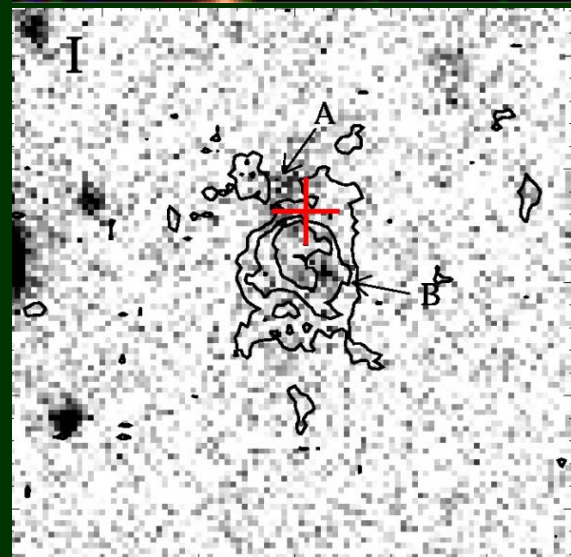


Overzier+ 06

LABs(Lyman α blobs)

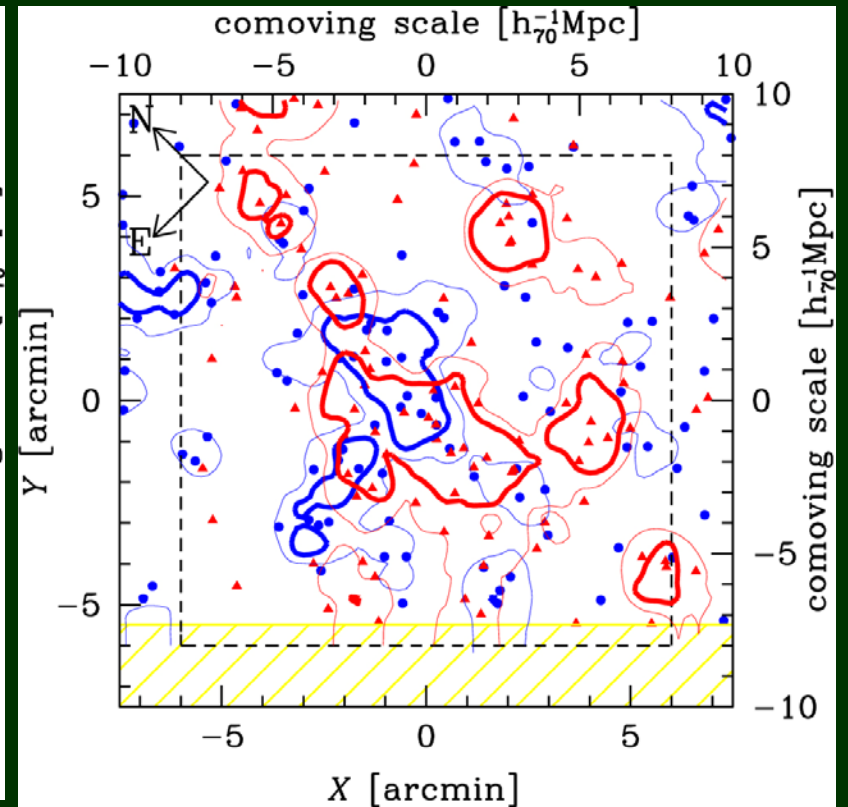
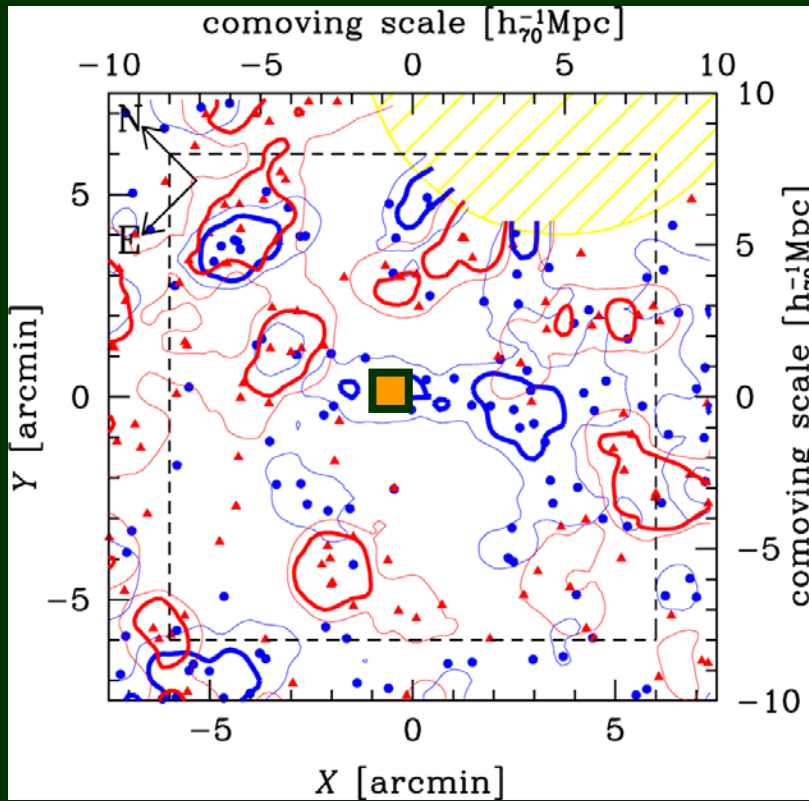


Matsuda+ 04



Dey+ 05

QSO/cluster 領域におけるLAA/LAEの空間分布



NK+07

■ QSO領域:

LAAはQSOの周囲にフィラメント状に分布し、LAEはQSOを避けるようにリング状に分布。

■ QSO領域では銀河形成が早くLAEはすべてLBGになってしまった?

■ QSO領域ではQSOのphotoionization effectによってLAEの星形成が阻害されている?

■ cluster領域:

LAAとLAEはほぼ同じ空間分布。

ここまでのhigh-z ($z > 3$) 銀河観測のまとめ

■ LF

- $2 < z < 7$ にかけてのrest-UV LFの緩やかな進化, LyA-LFは無進化

■ Clustering (→浜名さんのお話)

- $3 < z < 5$ にかけての進化、luminosity-dependence, small scale excess

■ Stellar mass, age, dust

- 典型的な値が求まった。M* LBG: $> 10^{10-11} M_{\odot}$ LAE: $\sim 10^8 M_{\odot}$ Age LBG: $> 10^9$ yr
LAE: $\sim 10^8$ yr Av LBG: < 1 LAE: < 0.1

■ Morphology

- HST/AOで明るいものについて調べられ始めた。Irregular/disk-like

■ Abundance

- 極明るいものに限られる。1/10-1solar ?

■ Kinematics

- 明るくて $z \sim 3$ のものについて調べられ始めた。Rotation, galactic wind

■ Environment

- LABは高密度領域に。高密度領域における進化の促進、局所輻射の影響

Open Problems @z>3

- LBG rest-UV LF evolutionはどの観測結果が正しいのか？
- なぜLAEのLyA LFは $3 < z < 5.7$ で無進化か？
- LAEのclusteringは？
- Stellar mass density evolutionがモデルと合わないのはなぜ？
Missing metal problem
- SED fitting --- JD1は本当か？
- LBGは回っているのか？
- 銀河風はどの程度普遍的で、IGMへのfeedbackはどの程度？
- LABのメカニズムは？

- LBGとLAEはどういう関係？近傍のどの銀河に対応？
- 最初の数GyrのSF historyは？

モデルとの比較はどこまで進んだか？

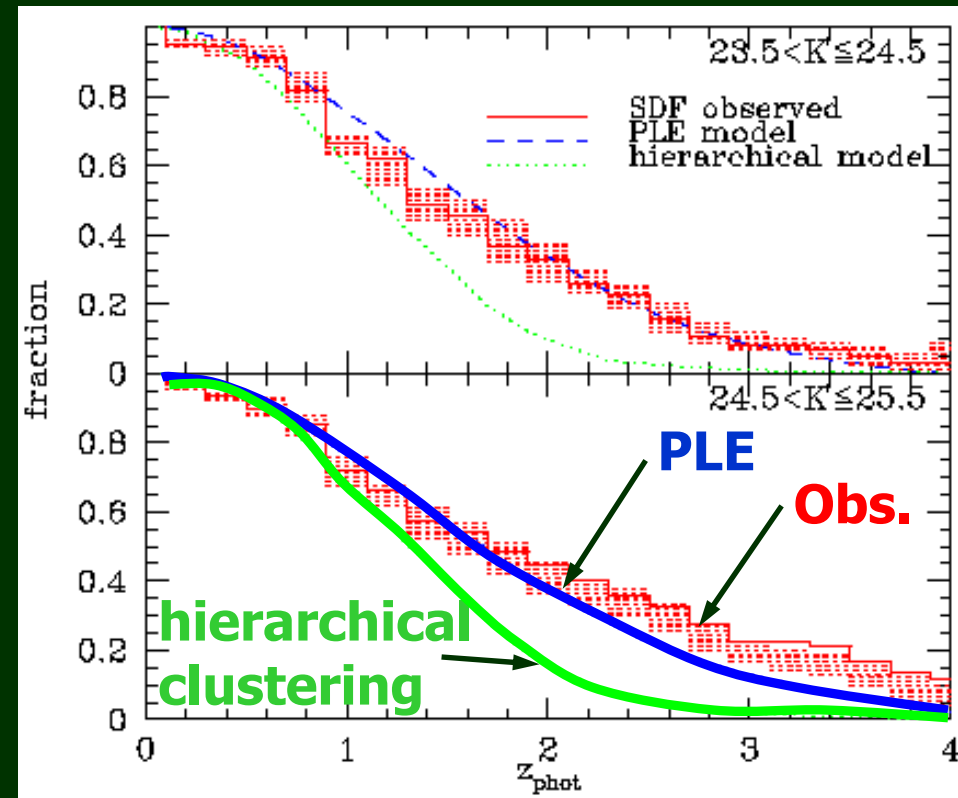
観測屋はモデルをどのように使うべきか

観測屋のためのモデル(セミアナ)活用のススメ

- モデルを使えば「時間」が観測できる。
 - LBG/LAEが進化すると何になるか？
 - QSO領域は進化すると銀河団になるのか？
 - ...
- モデルを使えば未知の物理量が観測できる。
 - Mergingの経験数
 - Dark halo内銀河のoccupation number
 - ...
- モデルを使えば作為的な物理を入れて解釈の実験ができる。
 - 宇宙論を変えたら観測に合うか？
 - ガスを抜いたら本当に星形成をやめるか？
 - ...
- みんなが信じきっている Λ CDMモデルを困らせたい。
 - Missing satellite problem
 - NFW profile
 - ...

三鷹モデルを使った例1 --- $N(z)$

- Kauffman & Charlot test
- broadly consistent with previous obs. on $K < 21$
- **inconsistent with hierarchical model** on reliable mag range $22 < K < 24$
- hierarchical model shows an apparent deficiency at $z > 2$
- See also: Somerville 04, Cimatti 03, Daddi 03



- 観測に比べてセミアナモデルの方が $z > 2$ において
 - stellar mass density が大きい。
 - 一方で $N(z)$ では数が少ない。
- セミアナで high- z high-mass 銀河を増やす or 観測で、M/Lの大きい銀河などを落としている、SED fittingの不定性。

NK+ 03

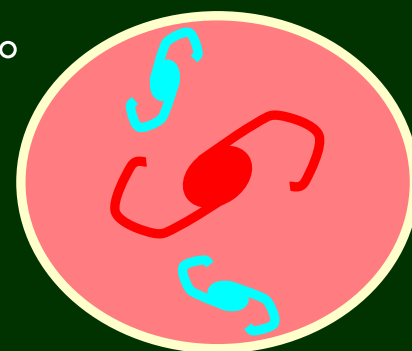
三鷹モデルを使った例2 --- LBG LF & clustering

Consistent with LBG LF & ACF on the SDF

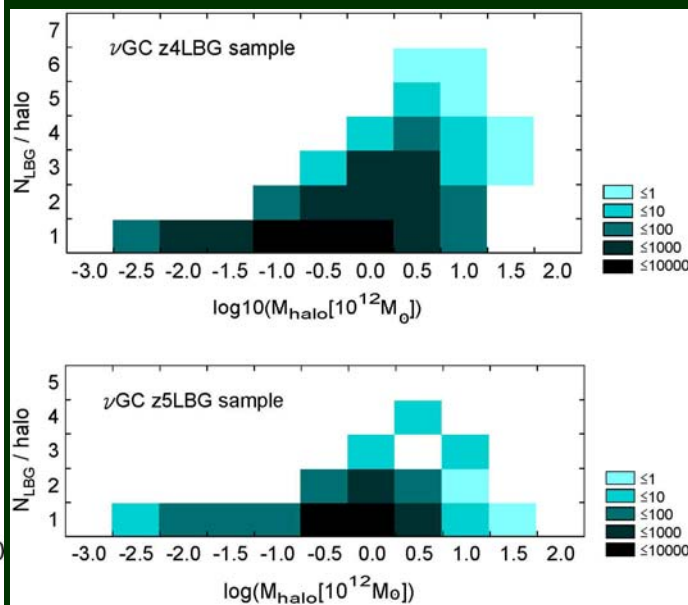
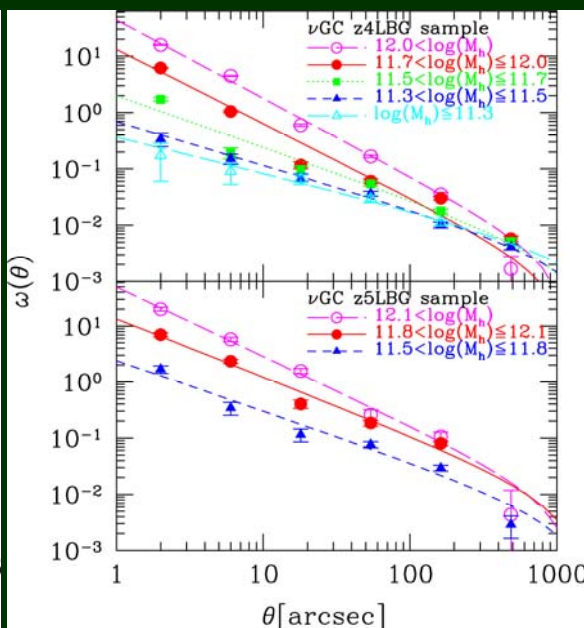
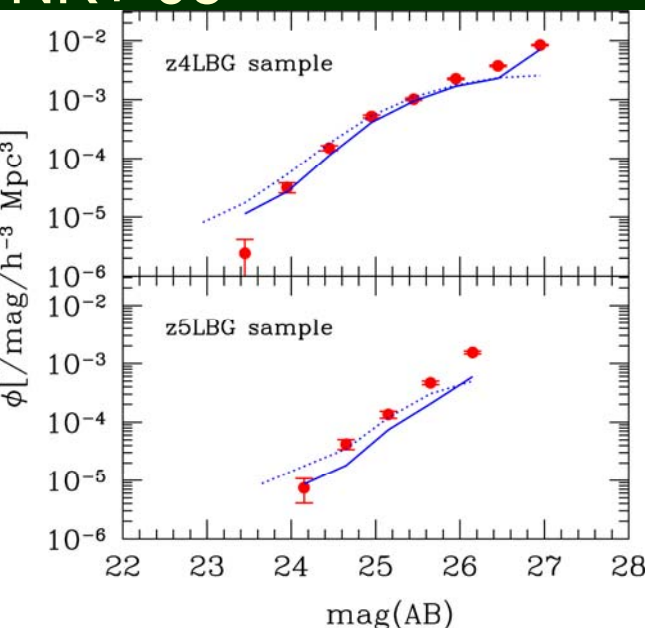
- 近傍の $N(m)$, LFなどの基本的観測量を同時に再現できている点が大事。
- 同じ観測条件、同じサンプル選択条件にすることが大事。

■ 未知の観測量としてのdark halo内のLBG数を予言。

■ ACFのsmall scale excessが本当にhalo内のmultiple LBGによって生じているのか実験できる。



NK+ 06

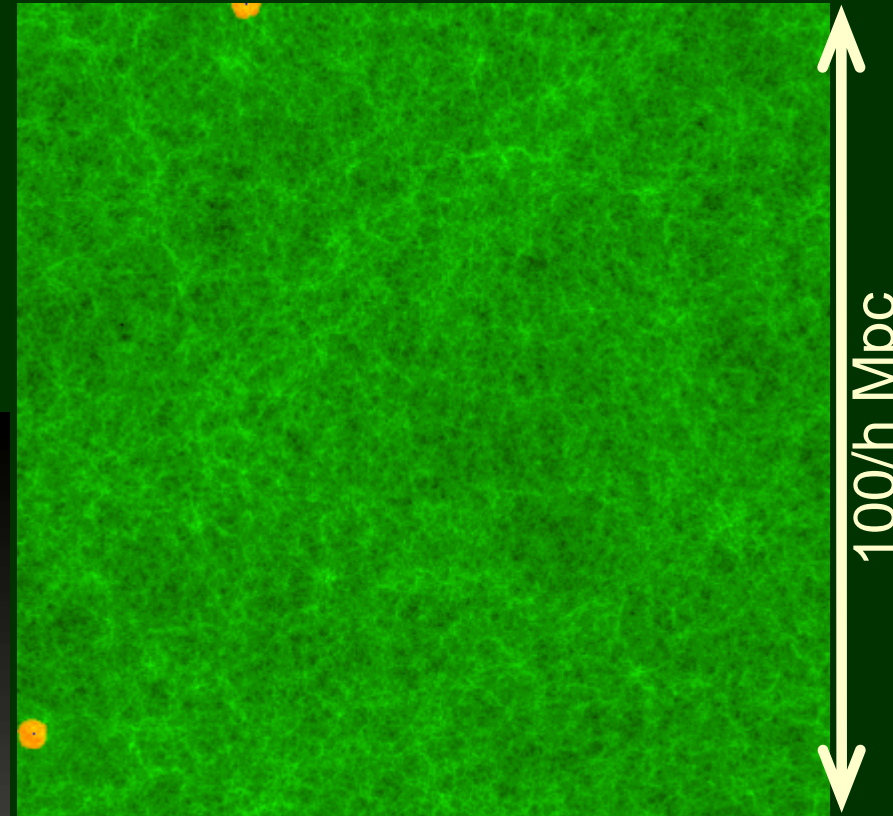
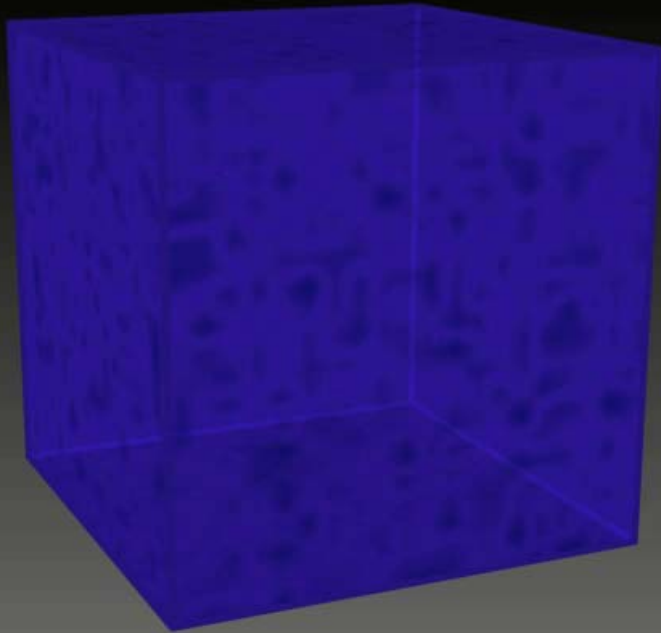


これ以上high-zで銀河形成の現場は
見ることが出来るか？

再電離とpopIII

銀河形成の現場は宇宙再電離の時代へ

- いつ再電離したか？
 - $6 < z < 15$
- 何が再電離したか？
 - QSO, LBG/LAE, popIII
- どのように再電離したか？
 - 2回電離？ 空間的非一様？



Iliev+ 06

Green: H I

Orange: H II

Black: ionizing source

The Ly α LF of $z=6.5$ LAEs in the SDF

Ly α photon

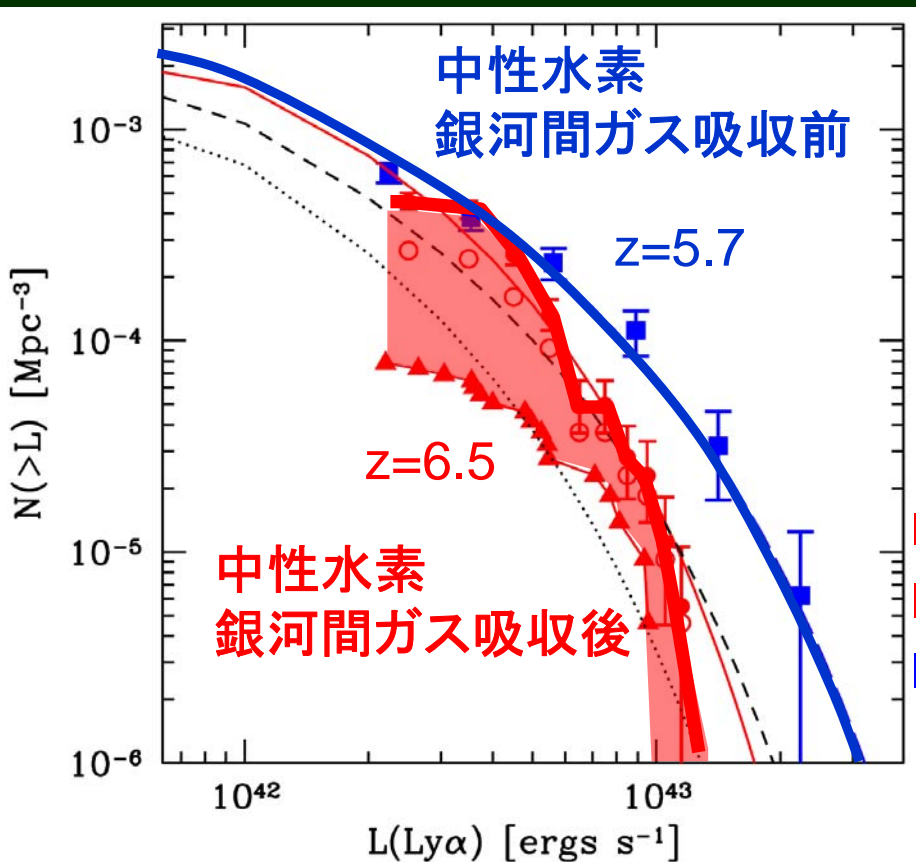
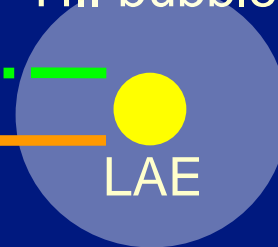
UV-cont. photon



HII IGM

HI IGM

HII bubble



■ Ly α photonは中性水素IGMによって減衰される。

■ LF, line profile, clusteringが影響される。

■ Apparent deficit compared w/ $z=5.7$

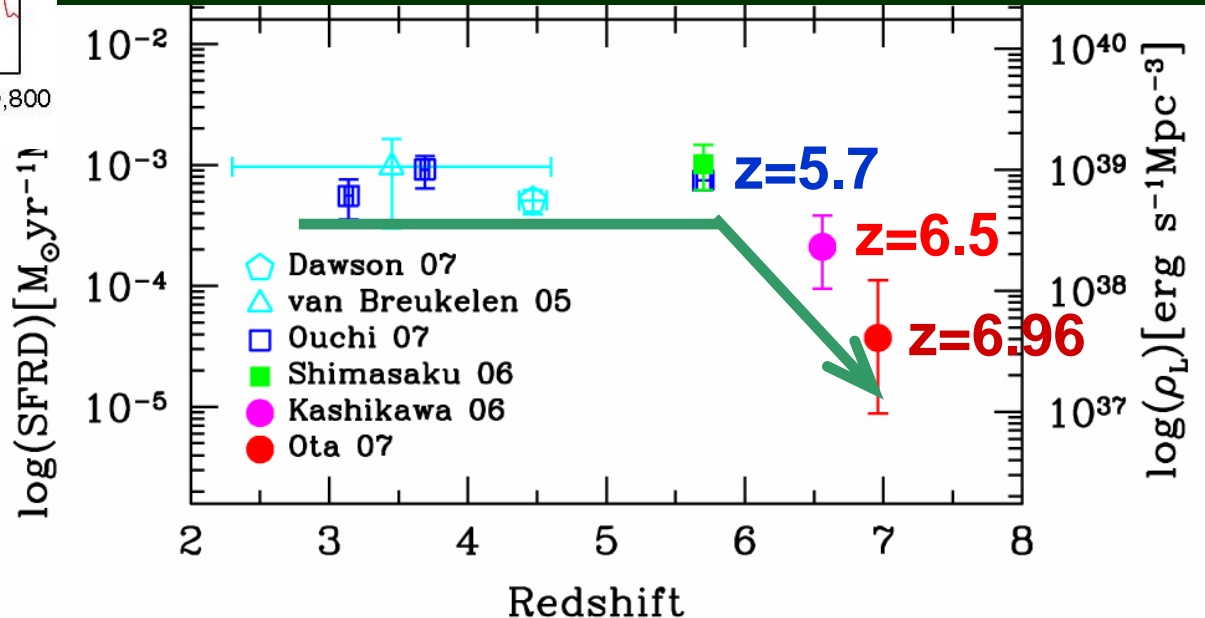
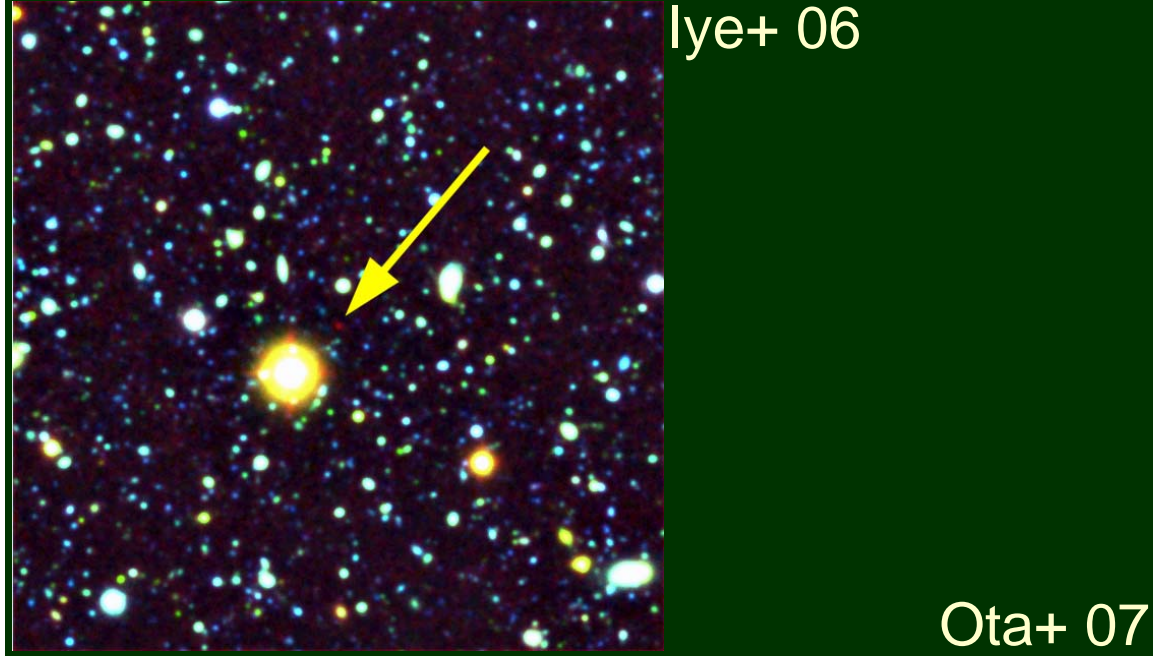
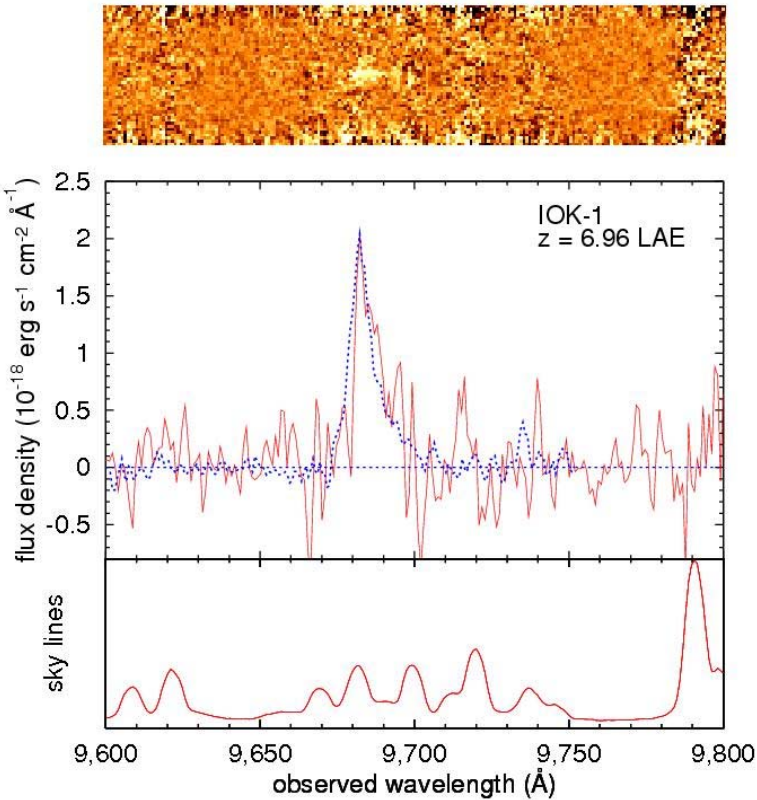
■ Reionization has not completed @ $z=6.5$

■ $L^* = 0.75$ mag difference

$\rightarrow x_{\text{HI}} < 0.45$ at $z=6.5$ (Santos 04)

LAEの光度関数 (NK+ 06)

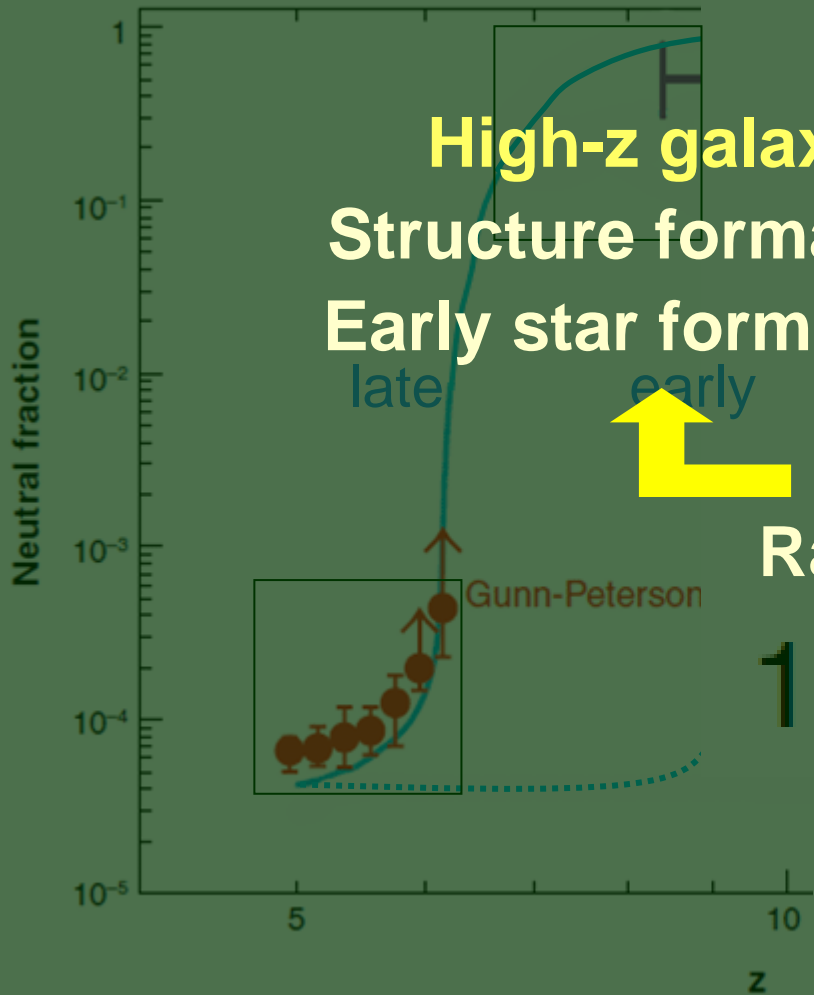
A LAE at $z=6.96$ in the SDF



The LyA luminosity density ($L > 1 \times 10^{43} \text{ erg/s}$) of LAEs gradually decreases from $z=5.7$ to 7.0

The End of the reionization (EoR) に突入？

The history of neutral fraction



High-z galaxy
Structure formation
Early star formation



Feedback

Radiative transfer



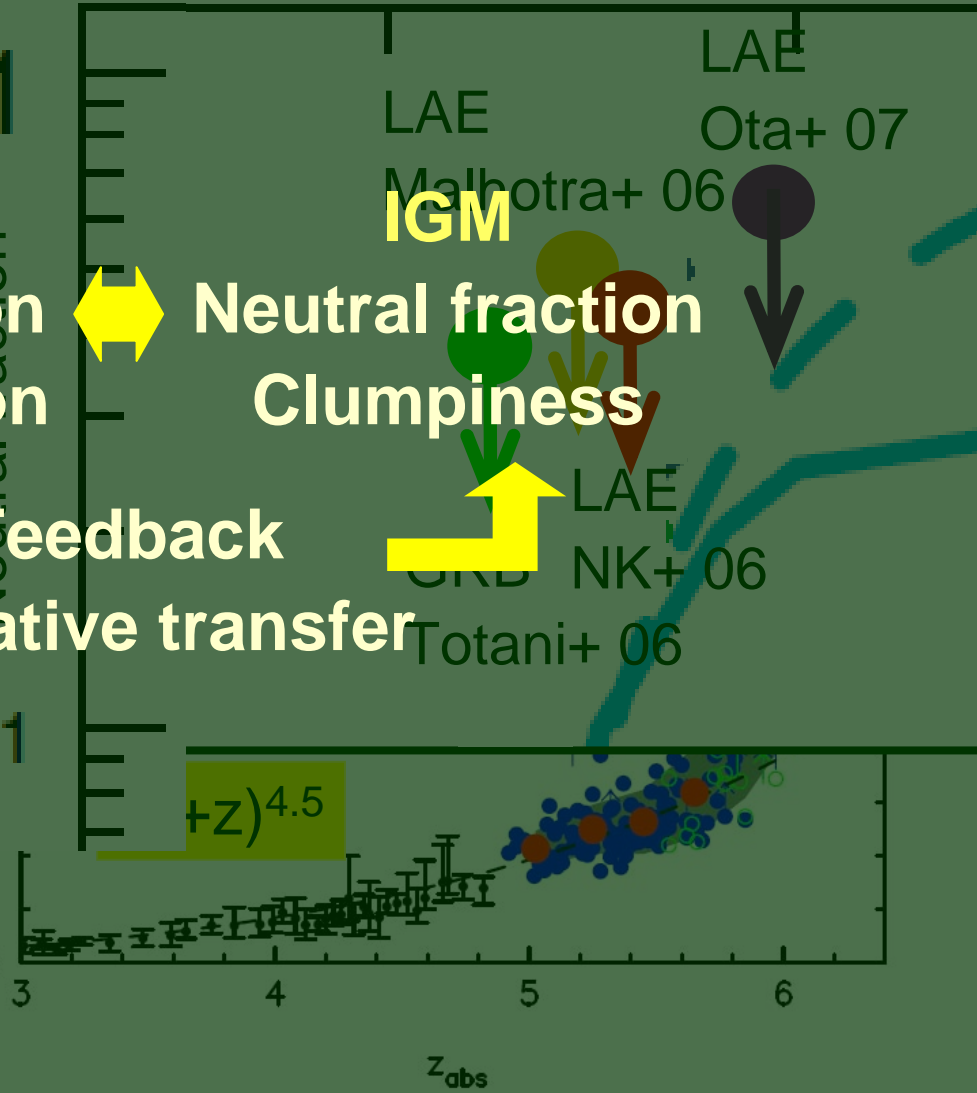
Neutral fraction
Clumpiness



Neutral fraction

z=6

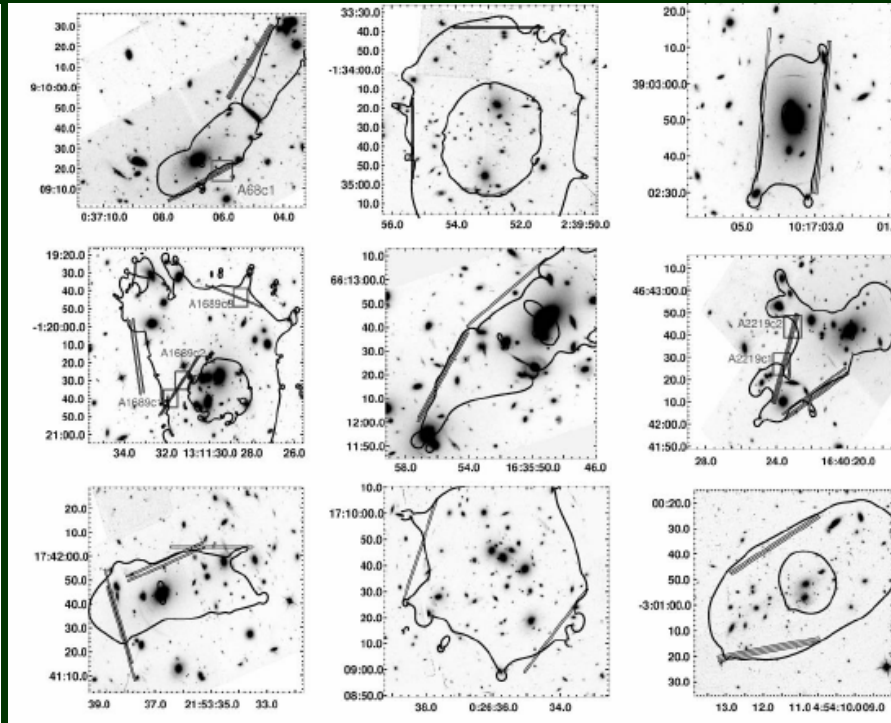
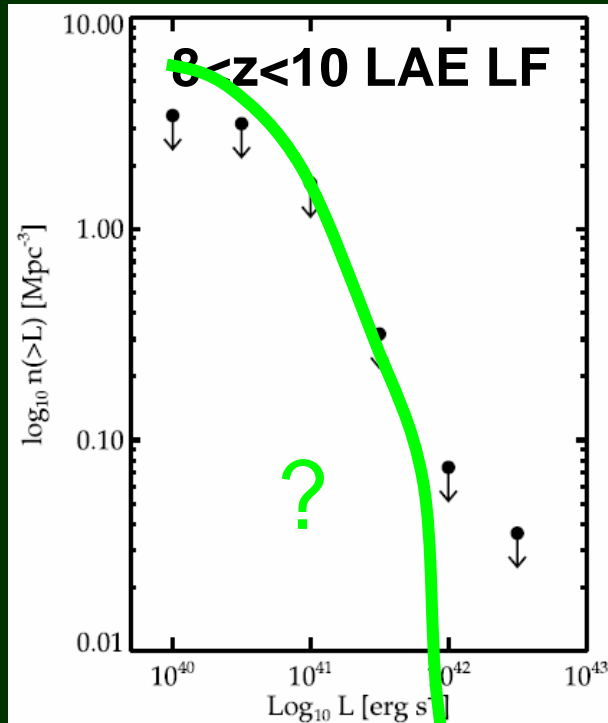
7



Uncertainties of Ly α -test ... too many

- Intrinsic properties of LAEs
 - Does LAE really have no LF evolution ?
 - Does LAE trace large-scale structure ?
 - Is $L(\text{LyA})$ of LAE proportional to its mass ?
 - How large the effect of dust is ?
 - What is the escape mechanism of LyA photons ?
- Internal structure of LAE
 - How internal density profile of HI does LAE have ?
 - Does LAE have galactic wind ?
- IGM physics
 - How large the typical density of IGM ?
 - How large the clumping factor of IGM ?
 - Does LAE really have cosmological HII region ?
- cosmic variance

LAE survey beyond $z=7$



Stark+ 07

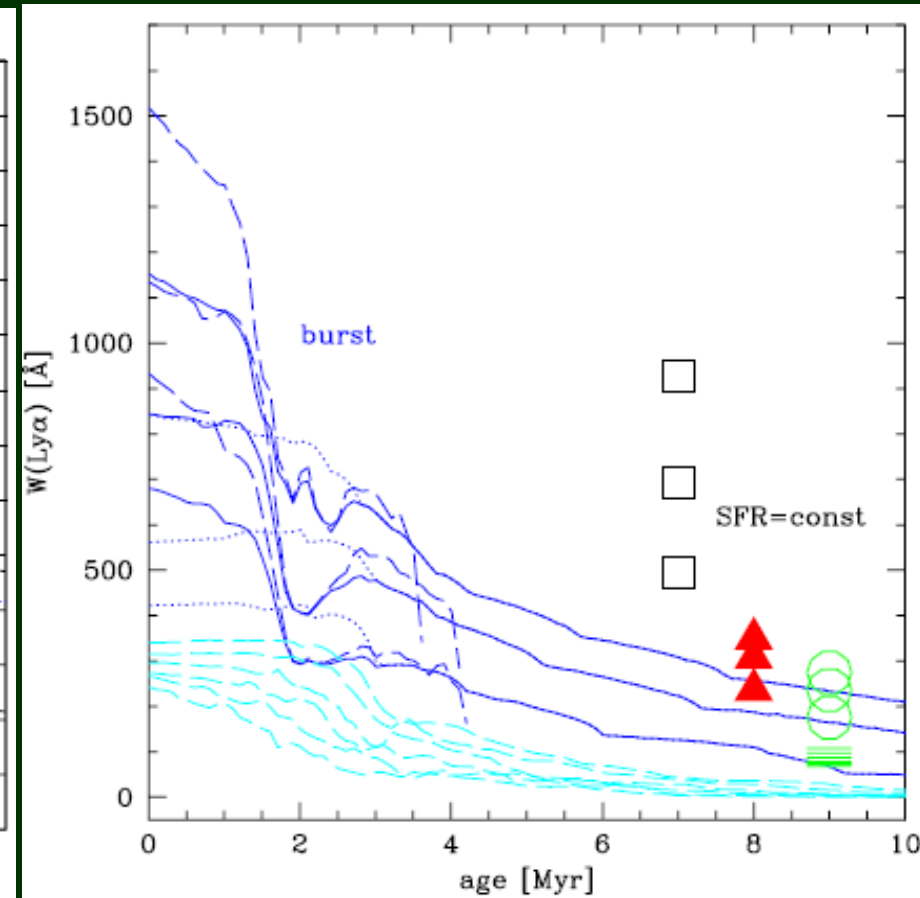
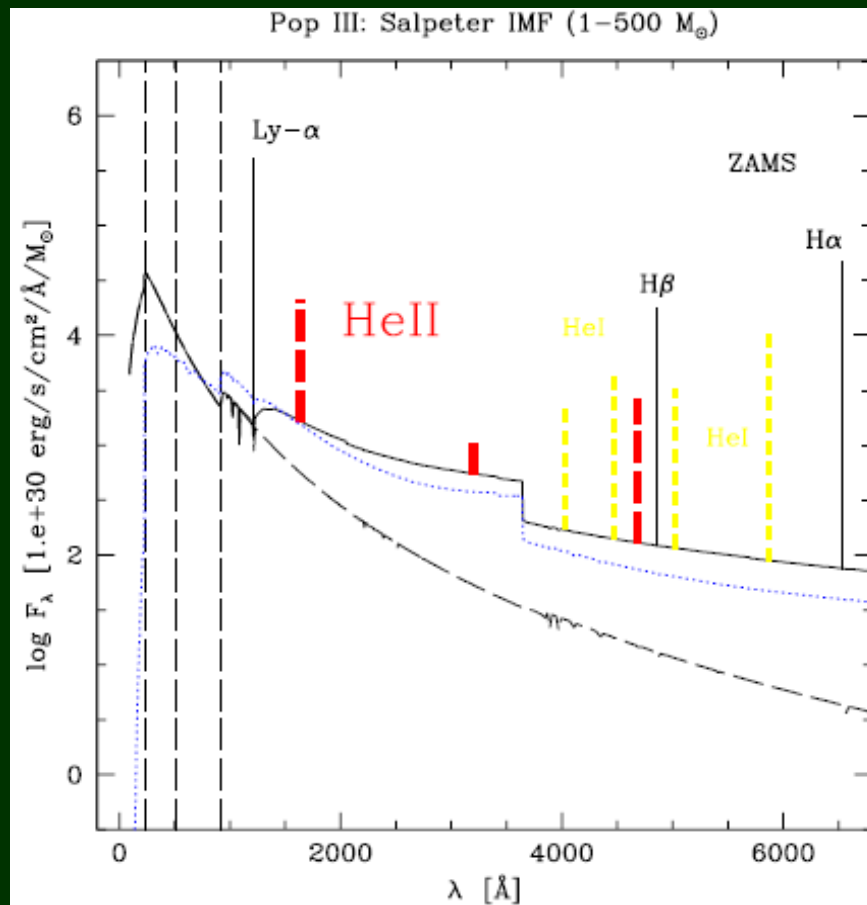
■ Critical line mapping of 10 clusters in J-band, corresponding to $\text{Ly}\alpha$ at $3.5 < z < 10.2$

■ Sensitive to sources $0.1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ over 31 Mpc^3 (comoving)

■ 1 convincing (6σ) $\text{Ly}\alpha$ emission candidate

■ 6 moderately-convincing candidates ($>5\sigma$)

もし本当に銀河形成の現場が見れるとすれば...

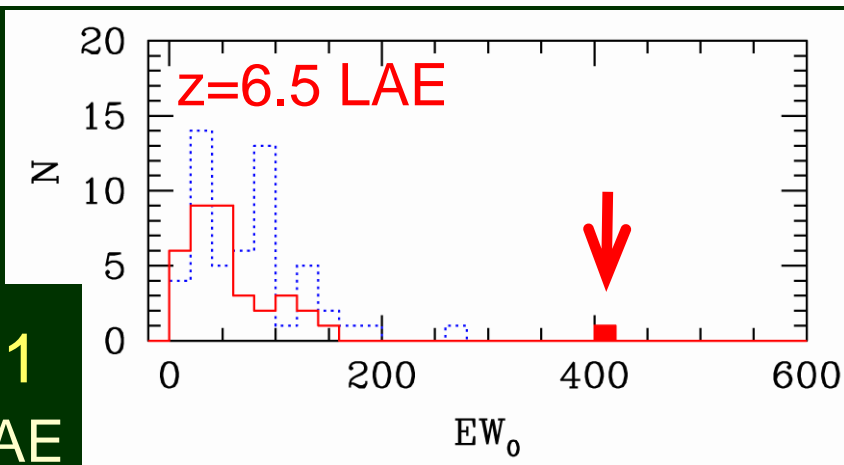
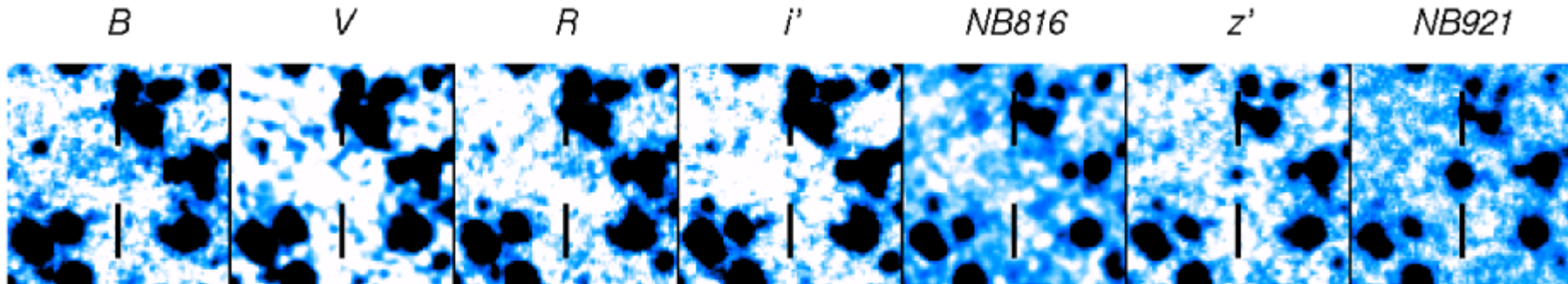


Shaerer+ 02,03

popIII

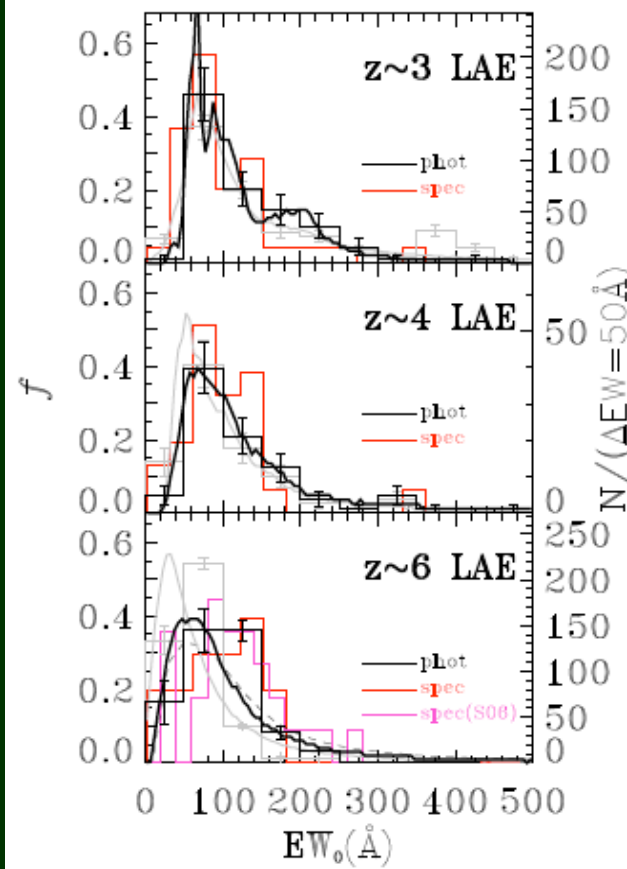
- Low-metal $Z < 10^{-5} Z_{\odot}$ High effective temperature, hard SED
- Large EW of Ly α + HeII λ 1640A emission
- Feedback from popIII will have strong impact on initial galaxy formation and the subsequent SFH+ IGM evolution (Ciardi+ 07)

PopIII candidate with $EW=800!$



SDF-popIII-1

- $z=6.545$ LAE
- Continuum flux is detected (28mag)
- $EW=406^{+58}_{-61}$ A (rest)
- Intrinsic $EW \sim 800$ A
- Need NIR spec. to detect HeII emission
- See also; Nagao+ 08



Open Problems @reionization epoch

■ reionization

- When?
- What?
- How?

■ PopIII

- 見つかるのか？
- どこにいるのか？
- Abundance / IMFは？
- Feedbackは？

- High- z 銀河についていろんなことがこの10年くらいでわかった。
- でも、まだまだわからないこともたくさんある。
- よりhigh- z で銀河形成を見るためには、再電離、popIIIなど近傍にはない現象も考慮しなければ。
- 銀河だけでなく、IGM(+feedback)、星形成の素過程も重要。
- そのためにはまずlow- z のことをよく理解する必要がある。
- 観測サイドとして
 - モデルと比較できるように観測データを提供しよう。
観測条件、選択条件は何か、誤差は何に基づいているか。
随所に行き届いた細かい心配りが日本のmentality & originality
 - モデル屋さんといっしょに仕事をしてみましょう。

Partridge & Peebles (1966) "Are young galaxies visible?"

"...most of the radiation from young galaxies would arrive at wavelengths of 1-3 μ where detection is difficult. However, it seems possible that the Lyman- α line might be detected if it is a strong feature of the spectra of young galaxies."