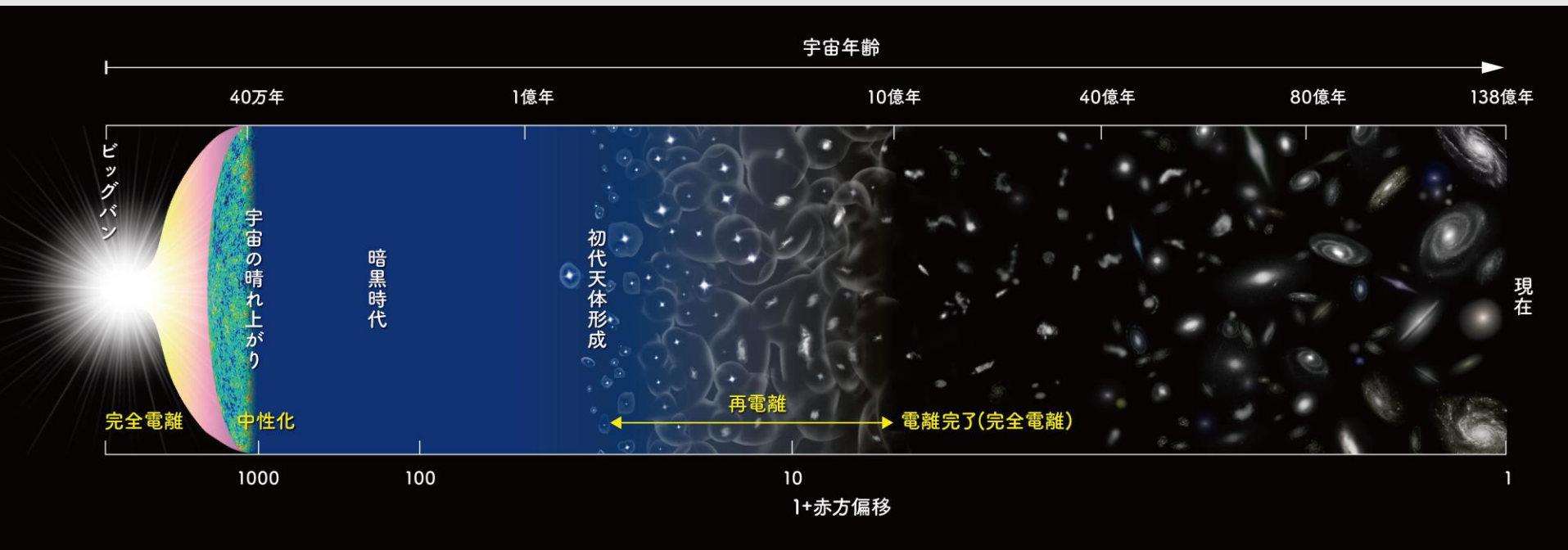


宇宙再電離期の銀河 の観測：ALMAと Subaru/HSC

井上昭雄（大阪産業大学）

宇宙再電離期

- 宇宙史最初の10億年
 - 赤方偏移 $z \sim 6 - 20$
- 初代星や初代銀河の形成時期
 - 最初の重元素やダスト汚染



もくじ

- ALMAによる[OIII]88ミクロン輝線観測と宇宙再電離期の星間物理学
- Subaru/HSCによる宇宙再電離期のLAE観測と比較すべきシミュレーションの開発（途中）

ALMAによる[OIII]88ミク ロン輝線の観測と宇宙再 電離期の星間物理学

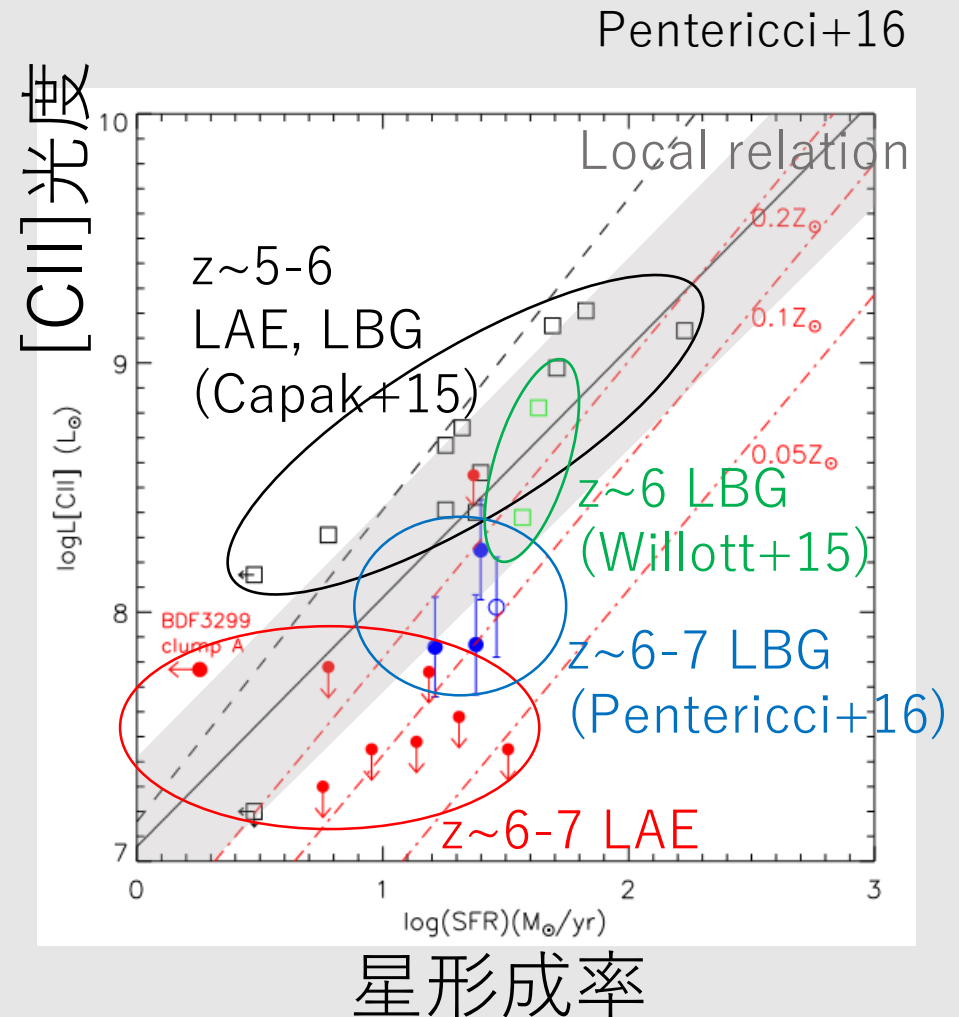
田村陽一、松尾宏、馬渡健、澁谷隆俊、清水一紘、他

再電離期の[C II] 158 μm 輝線

- 再電離後 ($z < 6$) の銀河の [CII] 輝線強度は近傍の星形成銀河と同程度

- 再電離期 ($z > 6$) の [CII] 輝線は**弱い**

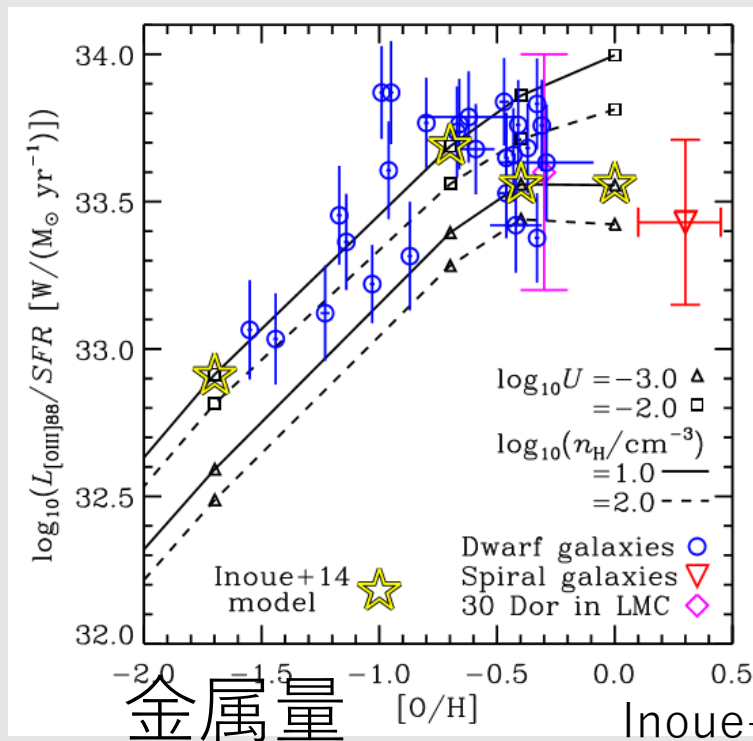
- Ly α と [CII] の反相関?
 - Harikane+
- 空間的なズレ?
 - Maiolino+15, Pentericci+16
- 他波長対応天体の無い [CII] 輝線天体?
 - Aravena+16, Hayatsu+



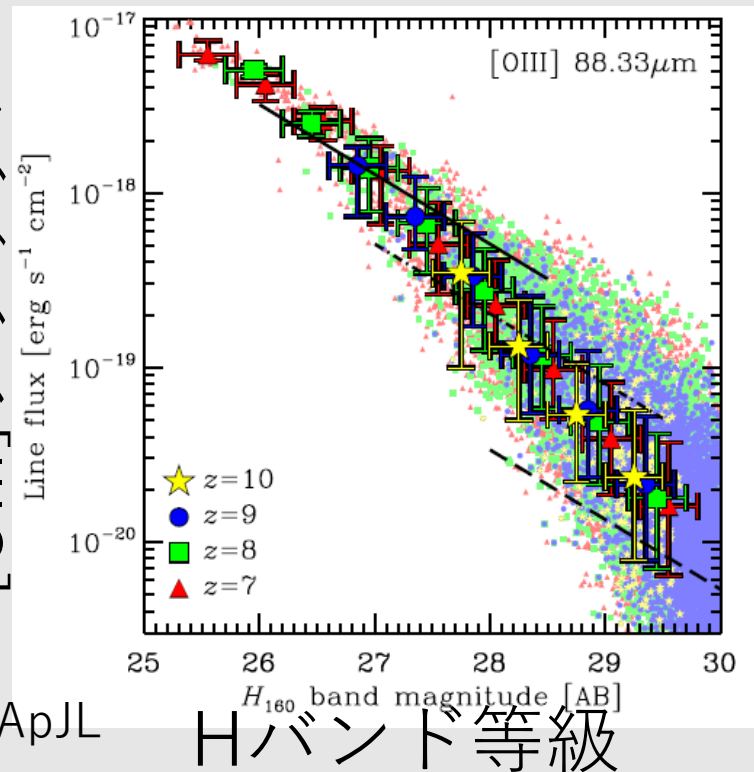
再電離期の [O III] 88 μ m 輝線

- Herschelによる近傍低金属量銀河の [O III] 88輝線観測結果にもとづく理論モデルによると、再電離期の [O III] 88輝線はALMAで検出可能。

[O III] 放射率

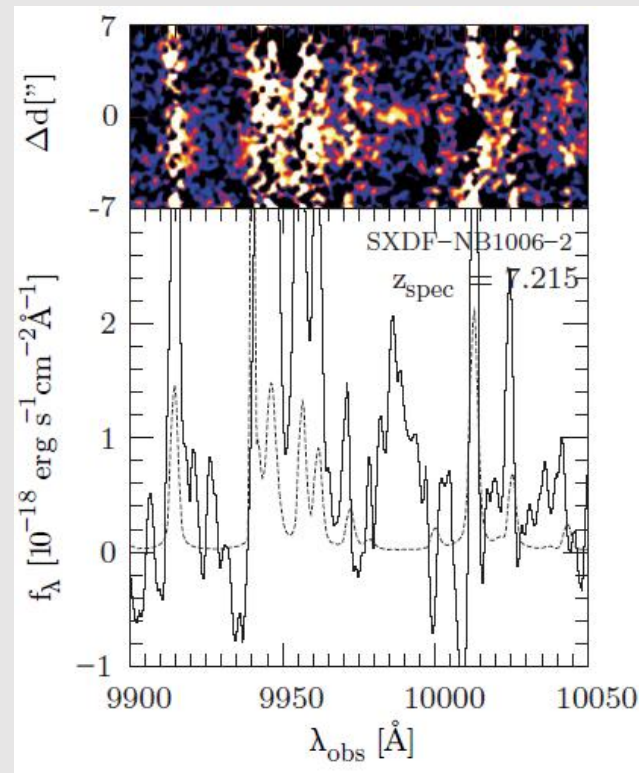
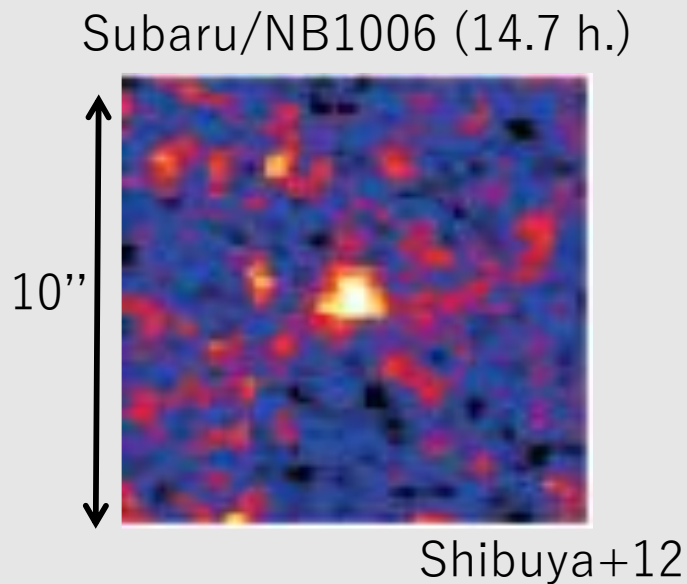


[O III] フラックス



赤方偏移 $z=7.2$ LAE

- SXDF-NB1006-2: $z(\text{Ly } \alpha)=7.215$ (Shibuya+12)
 - 当時、最遠方銀河記録を更新
- ALMAで2時間積分
 - 2015年6月 (Cycle2)

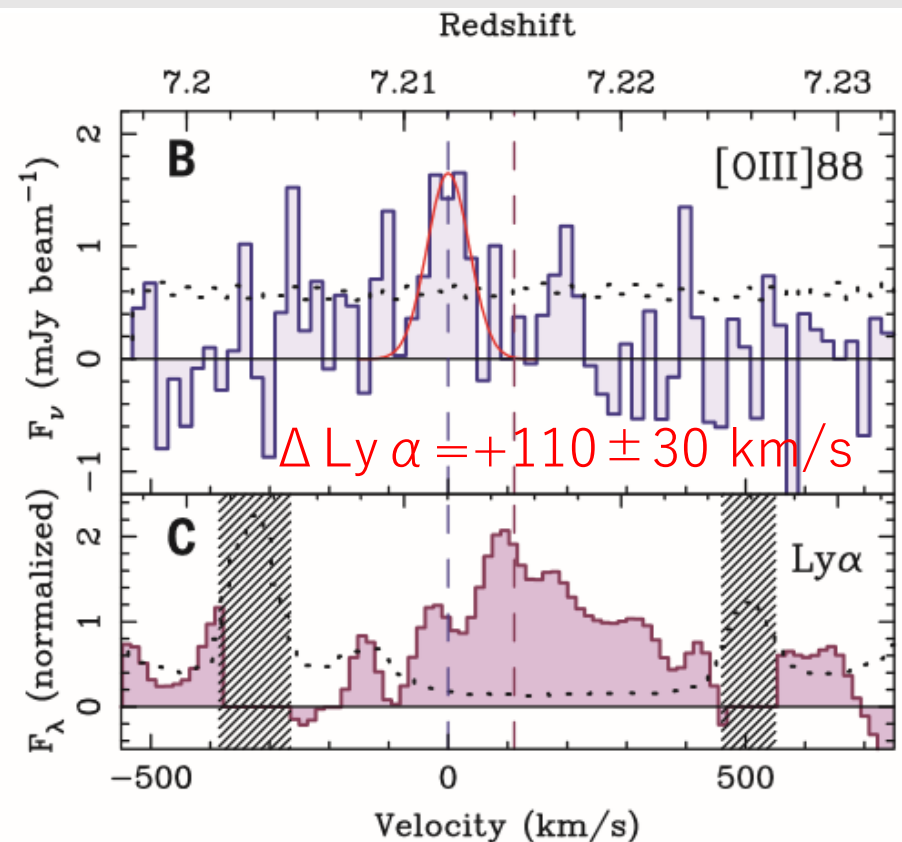
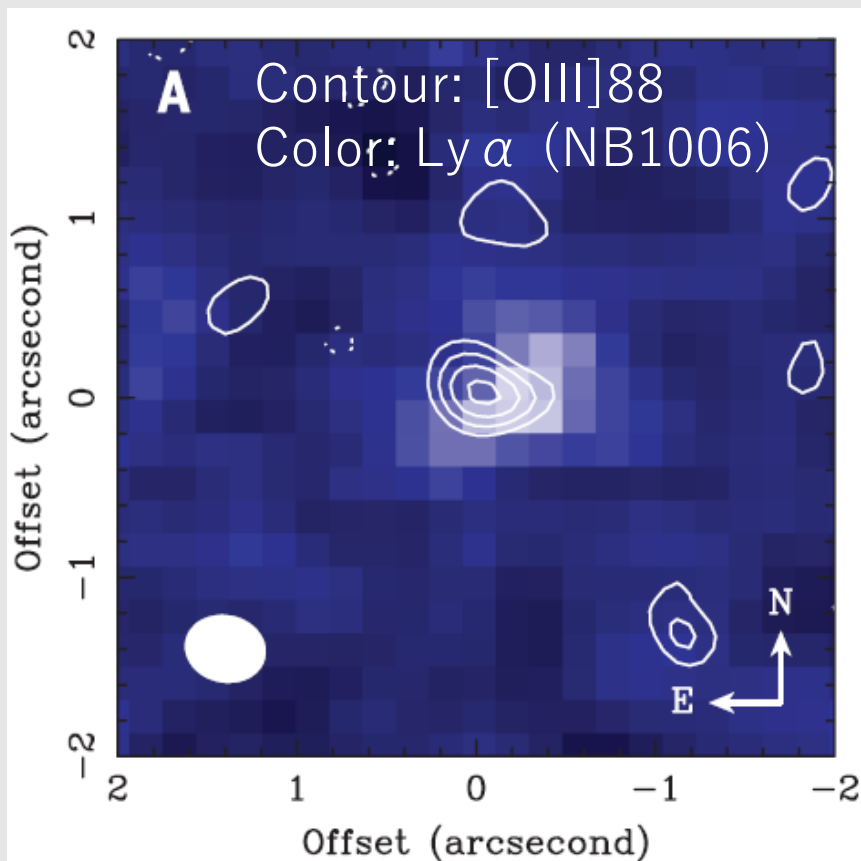


Keck/DEIMOS
(3.5 h.)

ALMA観測結果: [OIII]88

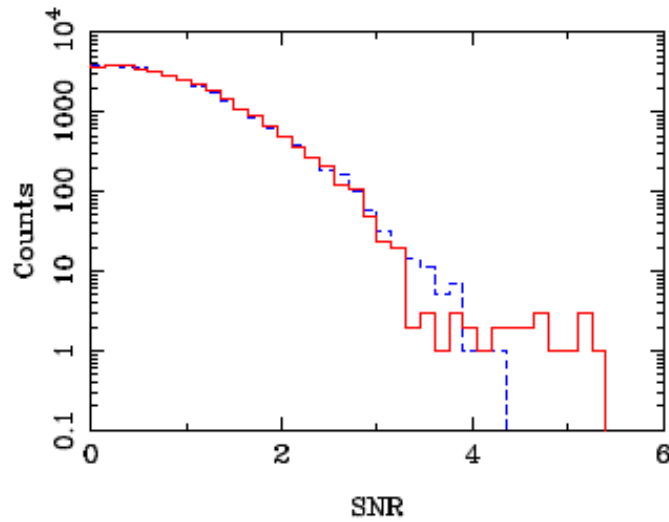
Inoue+16, Science

- [OIII] 88 μm 輝線の検出 (5.3σ).
 - $z([\text{OIII}]) = 7.2120 \rightarrow$ 最遠方酸素!



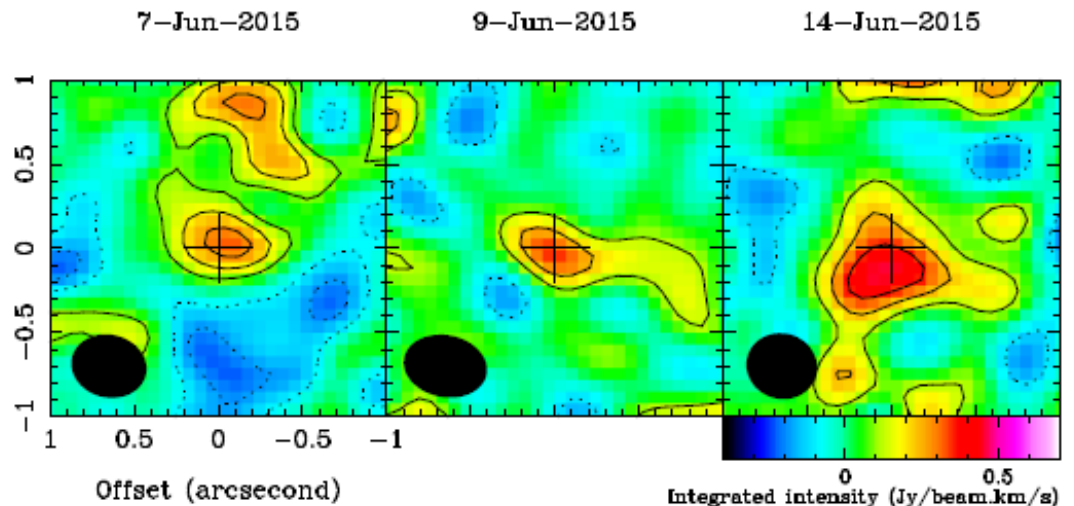
ALMA観測結果: [OIII]88

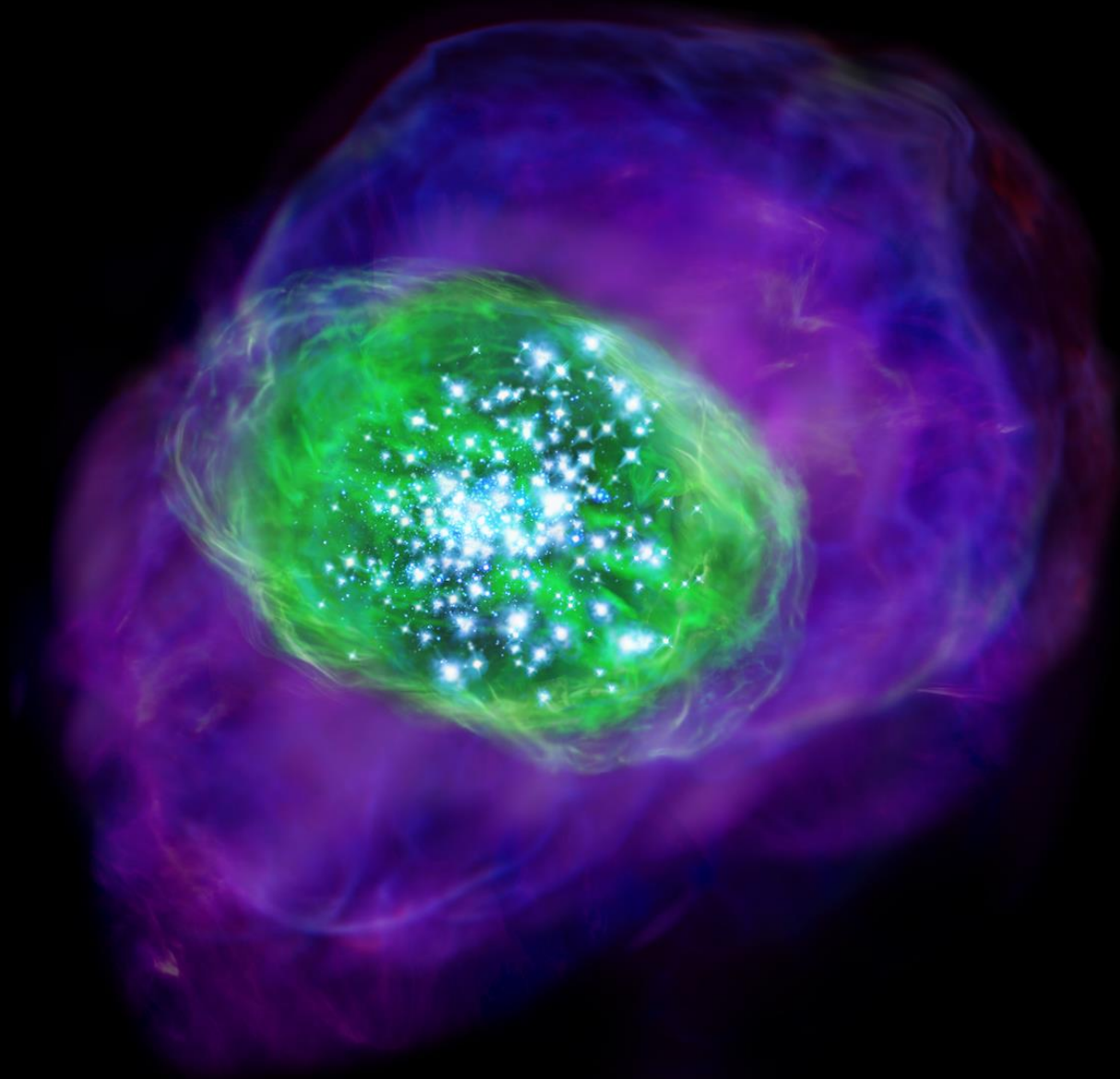
Inoue+16, Science



3日間ともに $> 3\sigma$ 以上の信号

ピクセルS/N分布関数
赤：ポジティブ
青：ネガティブ

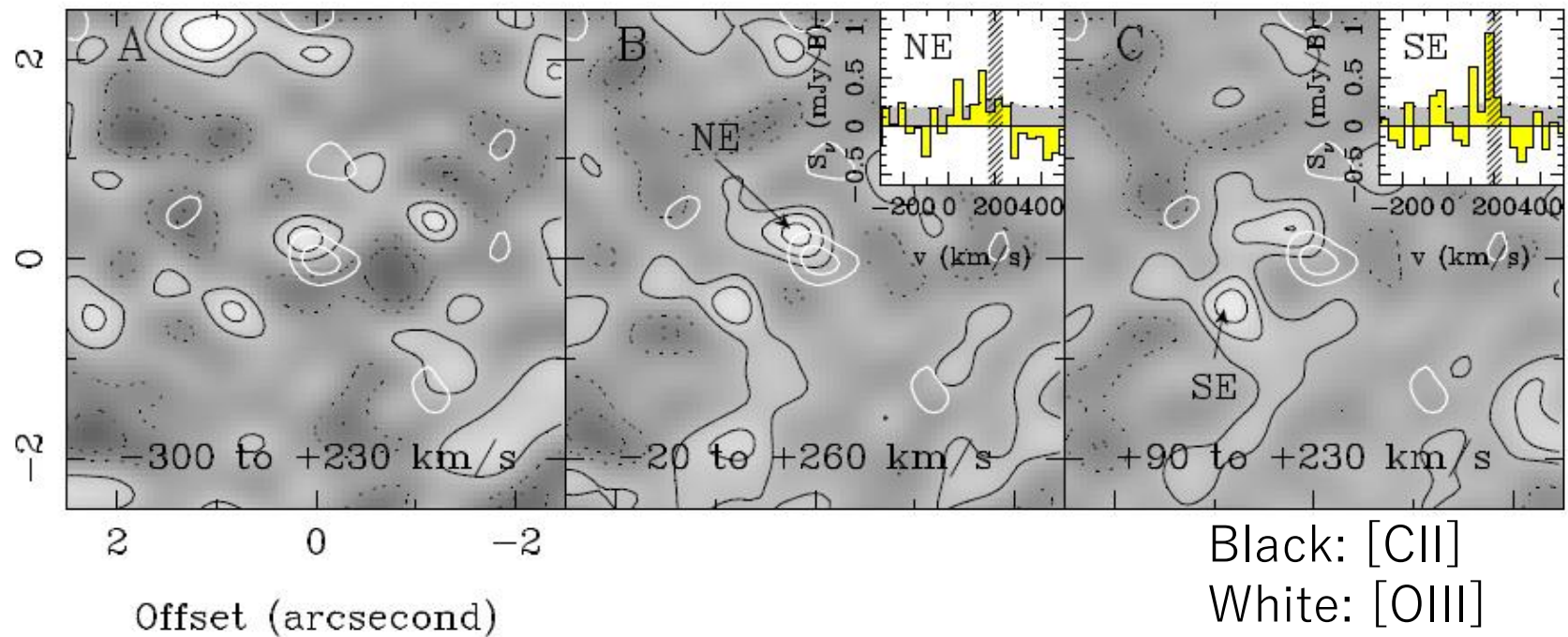




ALMA観測結果: [CII]158

Inoue+16, Science

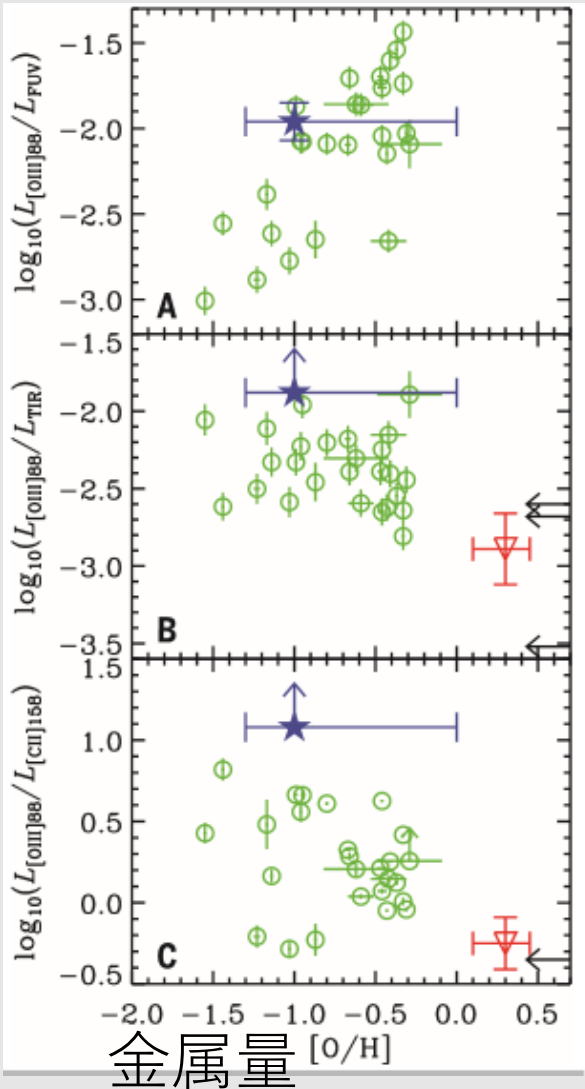
- [OIII]の位置で[CII]輝線は未検出
- 2バンドともダスト連続光は未検出



近傍矮小銀河との比較

Inoue+16, Science

$[OIII]/[CII][OIII]/IR$
 $[OIII]/UV$



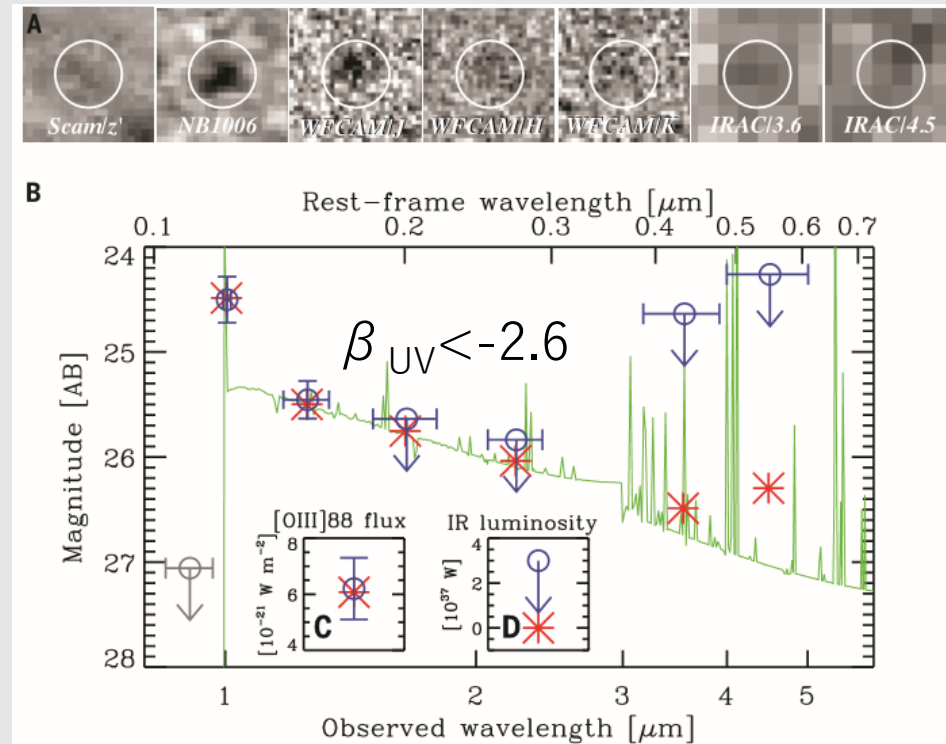
- $[OIII]/UV$ は似ている
- $[OIII]/IR$ は大きい
 - ダストが少ない
- $[OIII]/[CII]$ は大きい
 - $[CII]$ が弱い
 - HIガス(PDR)が少ない

SEDフィット

Inoue+16, Science

PEGASE2, Sapeleter IMF, constant SFR, Calzetti dust law, nebular lines and continuum

[O/H]	$-1.0^{+1.0}_{-0.3}$
$\log(\text{SFR}[M_{\text{sun}}/\text{yr}])$	$2.54^{+0.17}_{-0.71}$
$\log(\text{age}[\text{yr}])$	$6.00^{+1.00}$
$\log(\text{Mstar}[M_{\text{sun}}])$	$8.54^{+0.79}_{-0.22}$
$E(B-V)$ [mag]	$0.00^{+0.04}$
f_{esc}	$0.54^{+0.17}_{-0.54}$
$\log(f_{\text{esc}} \xi_{\text{ion}}[\text{Hz/erg}])$	$25.44^{+0.46}_{-0.84}$



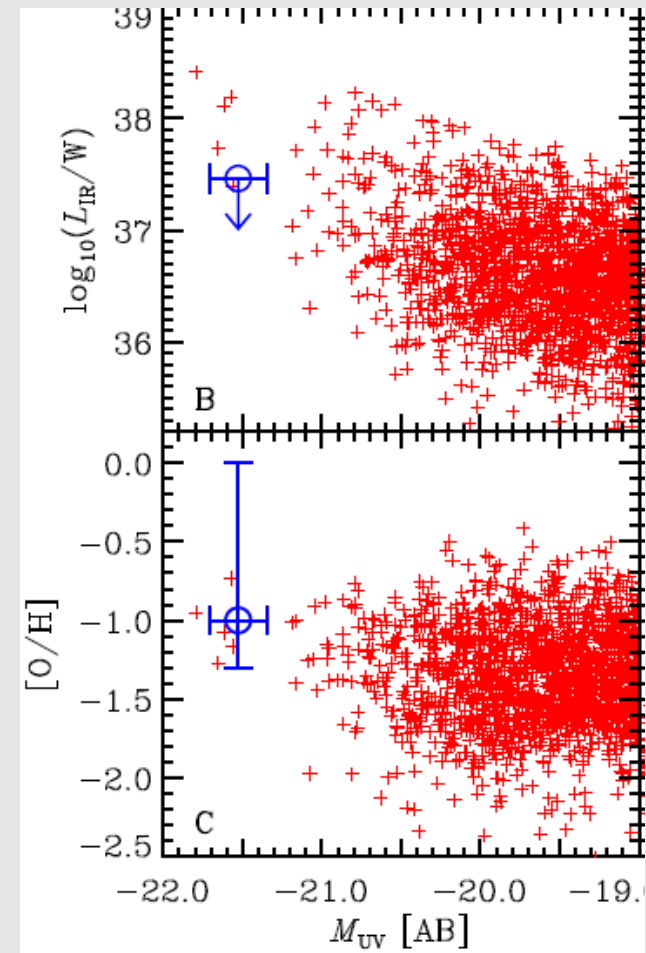
低ダスト/金属質量比

Inoue+16, Science

- SED、[OIII]輝線光度から酸素組成は太陽組成の約10分の1
 - シミュレーションの予想通り
- 赤外線光度がシミュレーションより弱い
 - シミュレーションでは銀河系と同じ50%というダスト/金属比を仮定
 - 赤外線光度の上限値から、ダスト/金属比は20%未満

Blue: SXDF-NB1006-2

Red: Shimizu+16 simulation



議論 (その1)

Inoue+16, Science

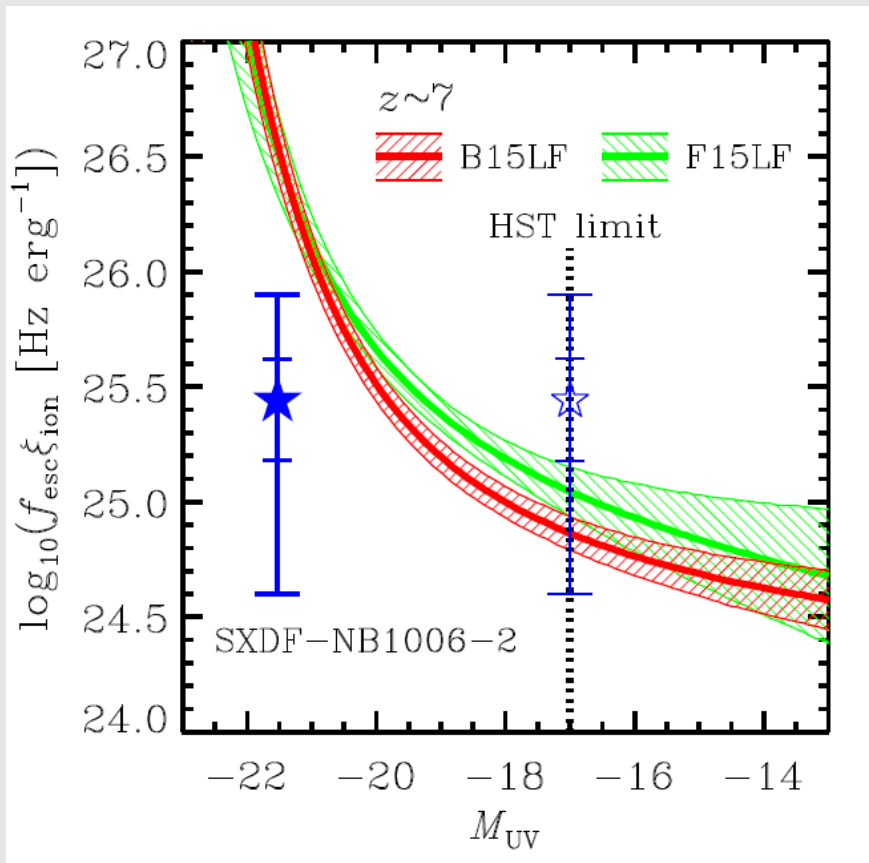
- Ly α 速度差: $\Delta v(\text{Ly } \alpha) = +110 \pm 30 \text{ km/s}$
 - $N_{\text{HI}} < 1e20 \text{ cm}^{-2}$ (Shibuya+14, Hashimoto+15)
- 高い [OIII]/[CII] 比 ([CII] 弱い) : $[\text{OIII}]/[\text{CII}] > 12$
 - [CII] を放射する低温 HI ガスが少ない
- 低い ダスト/金属比: $< 20\%$
 - 超新星爆発による効率的なダスト破壊あるいは ISM 中のダスト質量成長が非効率 (濃いガスの欠乏?)

ISM 中の HI ガスが極めて少なく、電離光子脱出が容易になっている可能性

- SED フィットでは約 50% という高い脱出率が得られた
 - IGM を電離した銀河の典型例の可能性?

議論 (その2)

Inoue+16, Science



光度関数の下限となる等級

- 宇宙再電離に必要な電離光子放射率
 - IGMへの光子注入率
- SXDF-NB1006-2より明るい天体だけでは再電離は起こせない
 - 銀河の数が少なすぎる
- HSTで検出済の銀河 ($M < -17$) だけで再電離を起こせる可能性はある
 - SXDF-NB1006-2並みの電離光子放射率が必要

まとめ

- 宇宙再電離期である $z=7.2$ （宇宙年齢7億年）の銀河から[OIII]88輝線を検出！
 - 初期宇宙の銀河の星間物理化学状態の新しいプローブとして[OIII]88輝線は超有望！！
- 一方、[CII]158輝線やダスト連続光は非常に弱い
 - [OIII]/[CII] >12 が系外銀河で観測されたのは初
- SXDF-NB1006-2は、HIガスが少ない可能性大
 - 電離光子脱出に有利であり、再電離光源の典型例かも

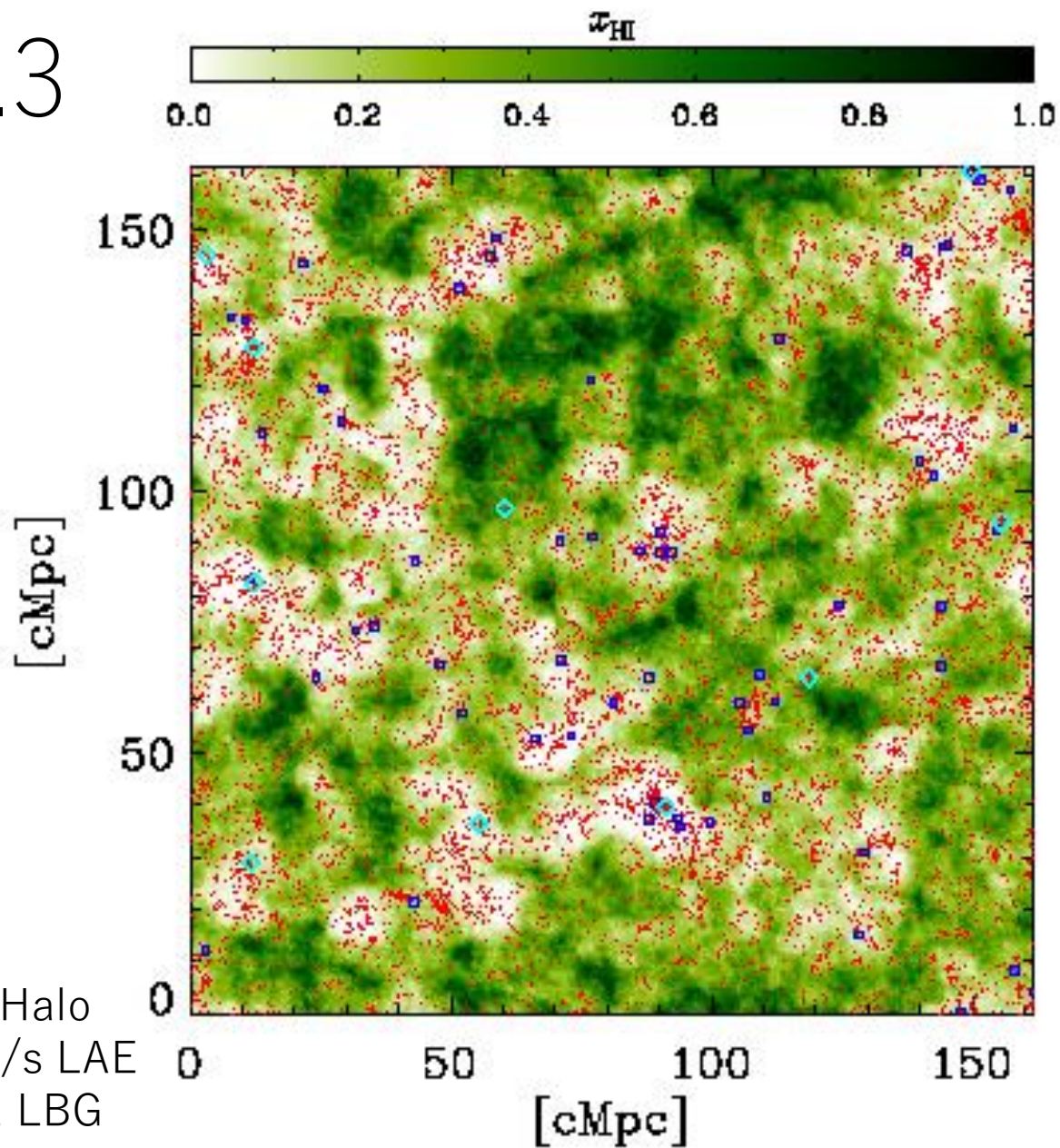
Subaru/HSCによる宇宙 再電離期のLAE観測と比較 すべきシミュレーション の開発（途中）

長谷川賢二、石山智明、矢島秀伸、清水一紘、大内正己、
他

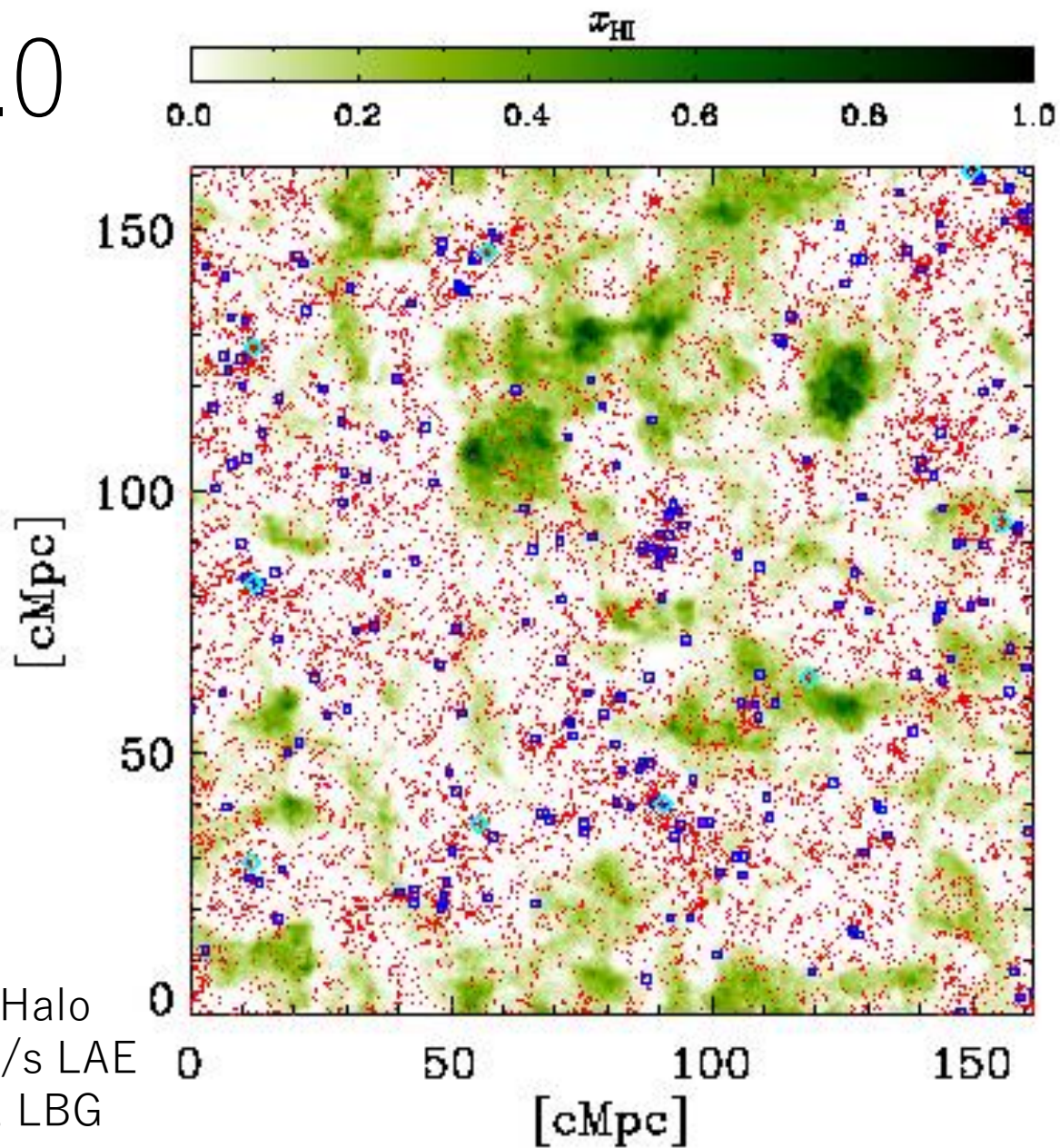
再電離シミュレーション

- 石山智明によるN体計算 + 長谷川賢二による輻射輸送計算
- 160 cMpc立方
- 256^3 輻射輸送グリッド

$z=7.3$



$z=7.0$

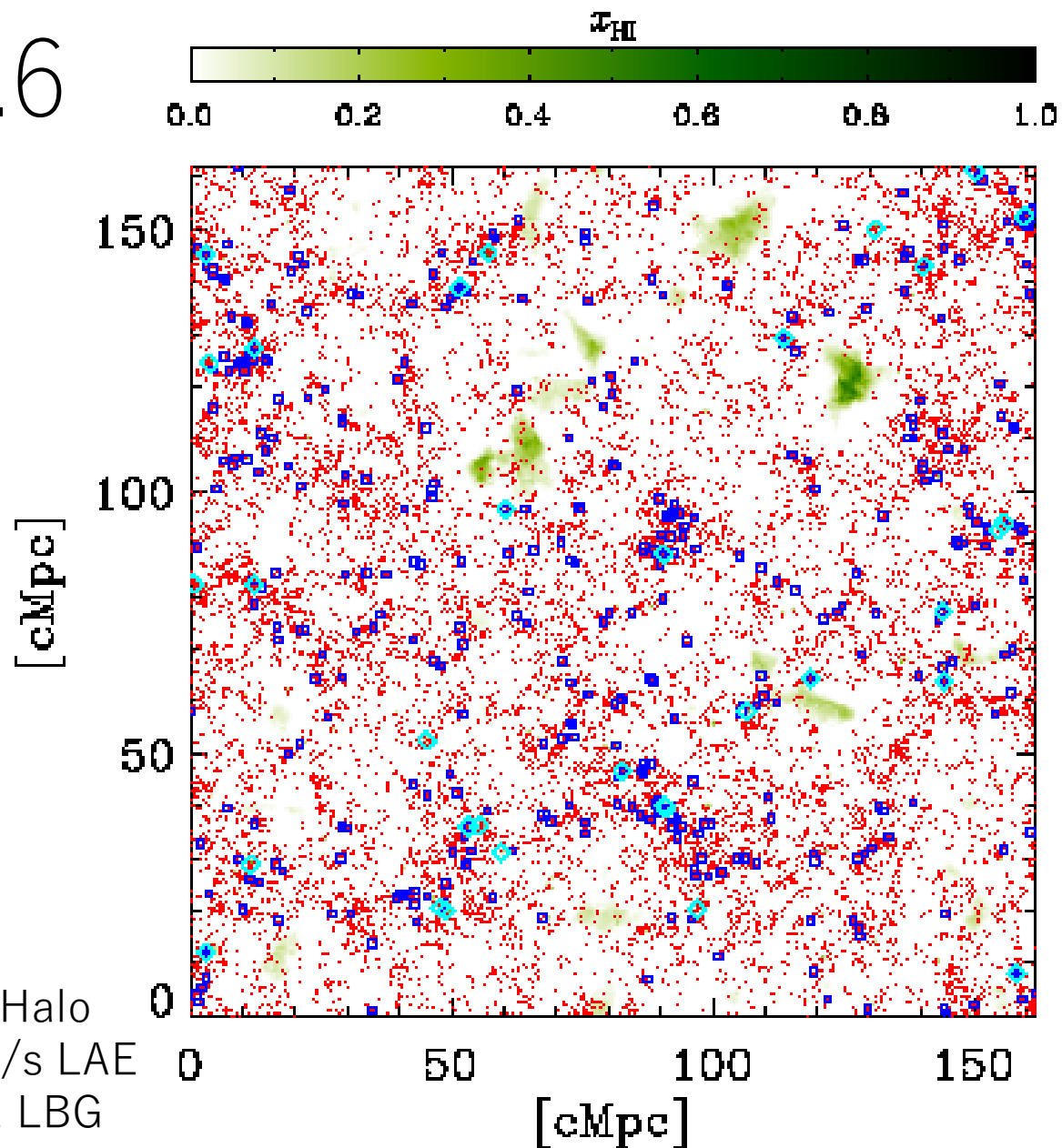


Red: $>1e10 M_{\odot}$ Halo

Blue: $>3e42 \text{ erg/s}$ LAE

Cyan: $M_{\text{uv}} < -21$ LBG

$z=6.6$

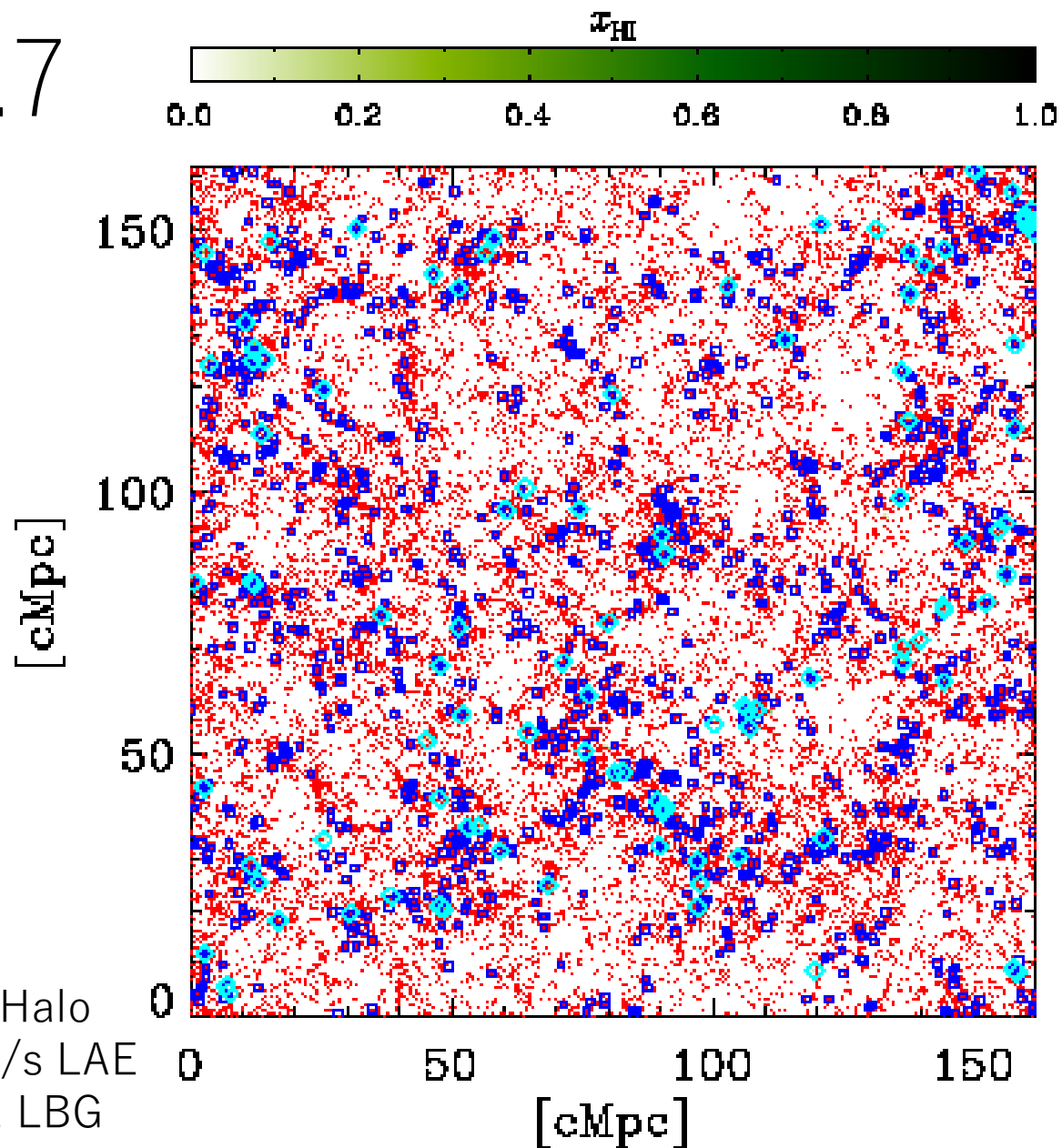


Red: $>1e10 M_{\odot}$ Halo

Blue: $>3e42 \text{ erg/s}$ LAE

Cyan: $M_{\text{uv}} < -21$ LBG

$z=5.7$

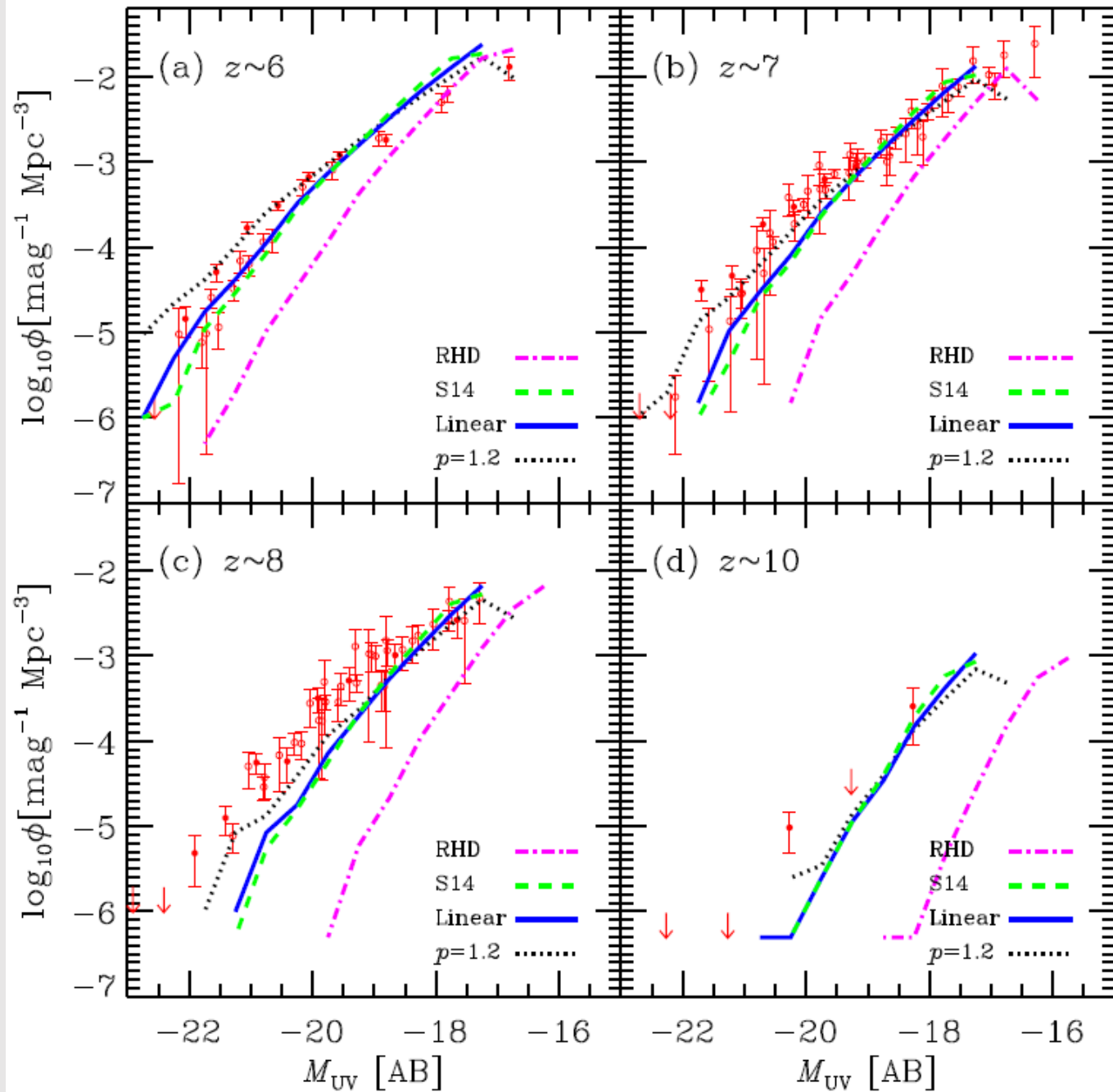


Red: $>1e10 M_{\odot}$ Halo

Blue: $>3e42 \text{ erg/s}$ LAE

Cyan: $M_{\text{uv}} < -21$ LBG

UV LF

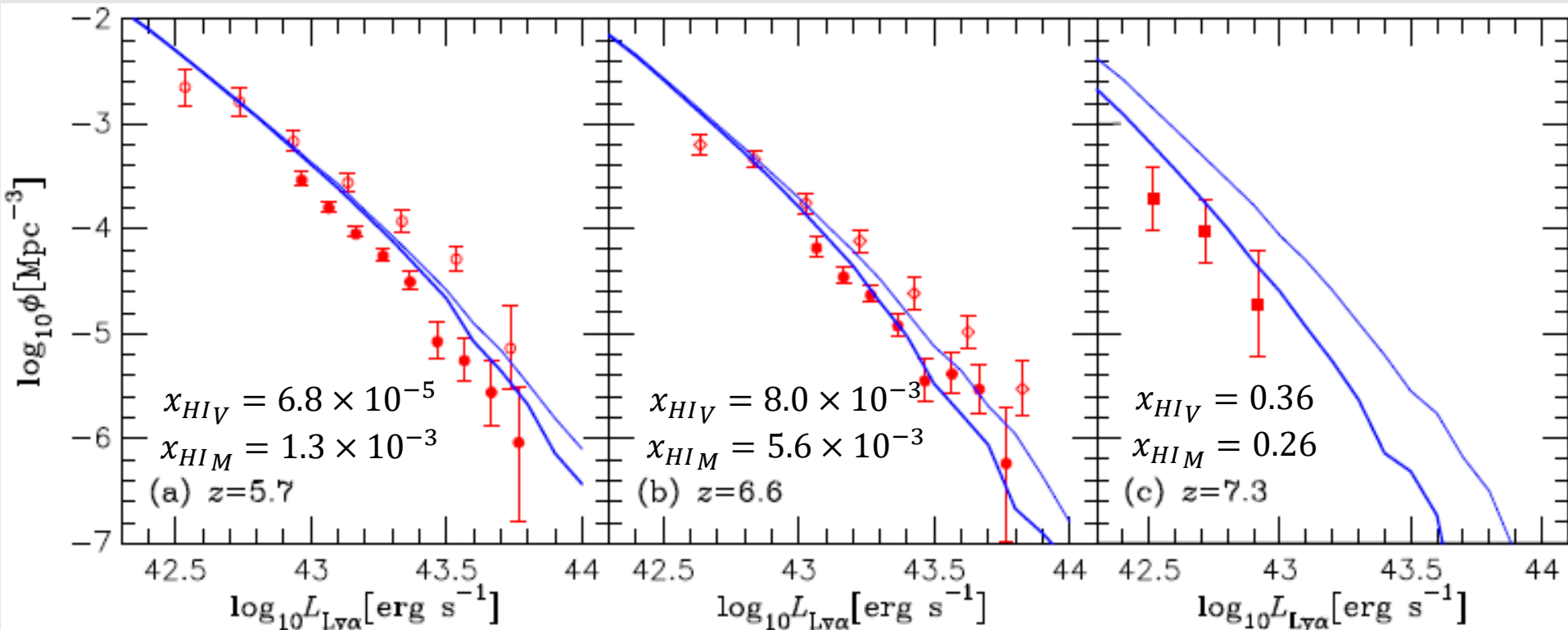


LAEモデル

- Ly α production (Hasegawa RHD)
 - $L_{Ly\alpha,int} = 10^{42} \text{ [erg/s]} \left(\frac{M_h}{10^{10} \text{ Msun}} \right)^{1.1} \pm \sigma$
- Ly α escape
 - $f_{\alpha,esc} = \exp(-\tau_\alpha)$
 - $P(\tau_\alpha) \propto \exp\left(-\frac{(\tau_\alpha - \tau_{\alpha 0})^2}{2\tau_{\alpha 0}^2}\right)$
 - $\tau_{\alpha 0} = \tau_0 \left(\frac{M_h}{10^{10} \text{ Msun}} \right)^{1/3} \propto M_h / R_{vir}^2$
- IGM transmission
 - $L_{Ly\alpha,obs} = L_{Ly\alpha,int} \times f_{\alpha,esc} \times T_{\alpha,IGM}$

LyA LF

- $\tau_0 = 1.8$ (Ly α optical depth for $1e10$ Msun halos)

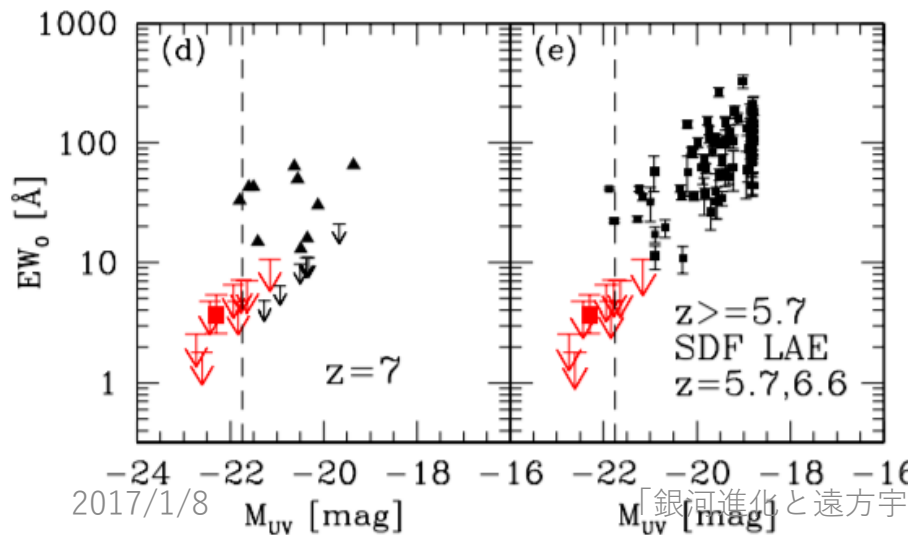
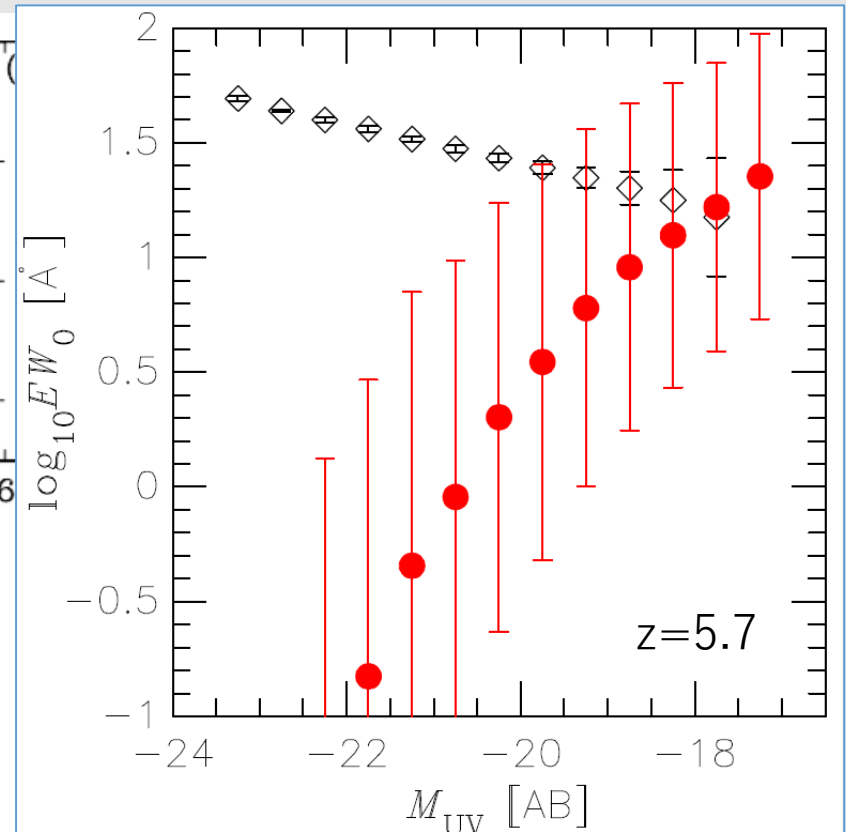
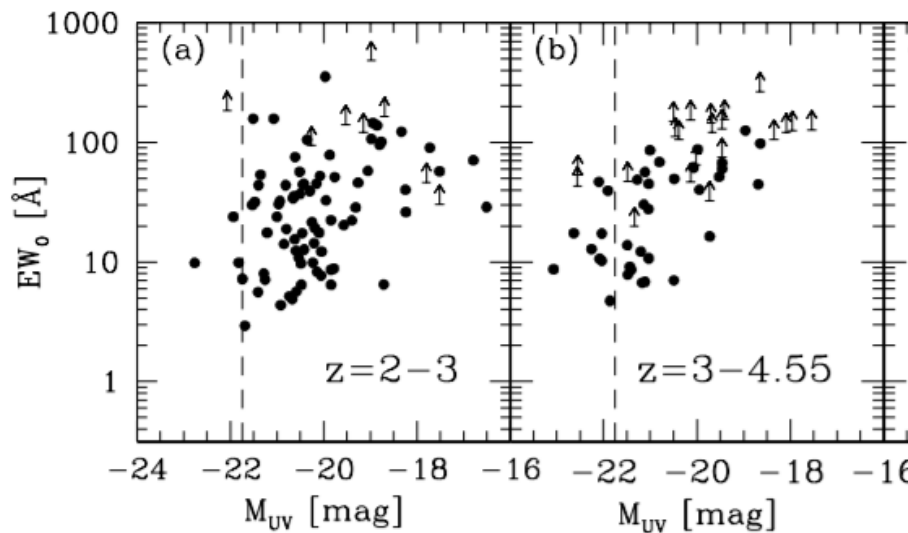


青細線：IGM透過率100%

青太線：再電離シミュレーションにもとづくIGM透過率

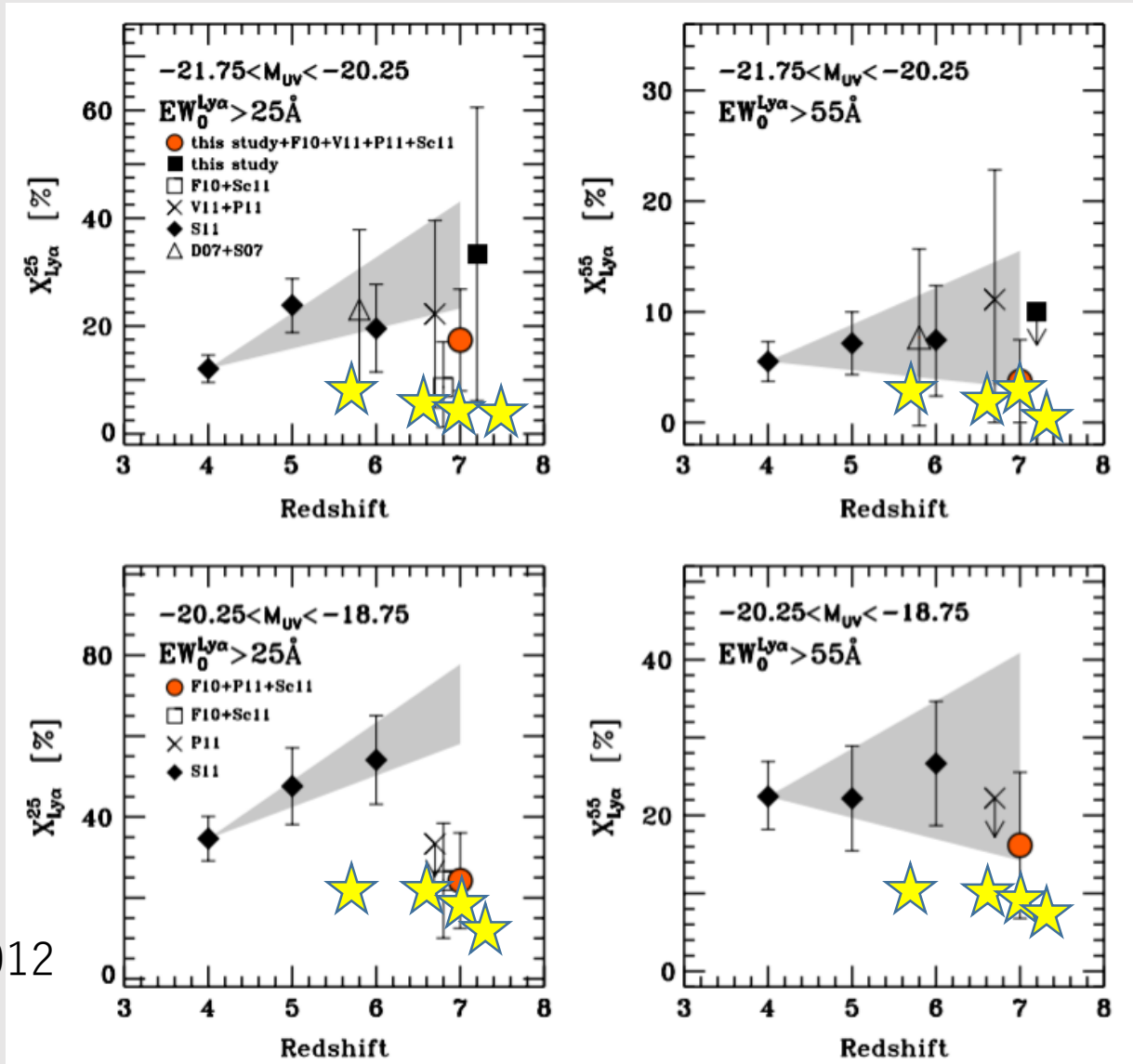
EW-Muv: “Ando-relation”

Ando et al. 2006



Furusawa et al. 2016

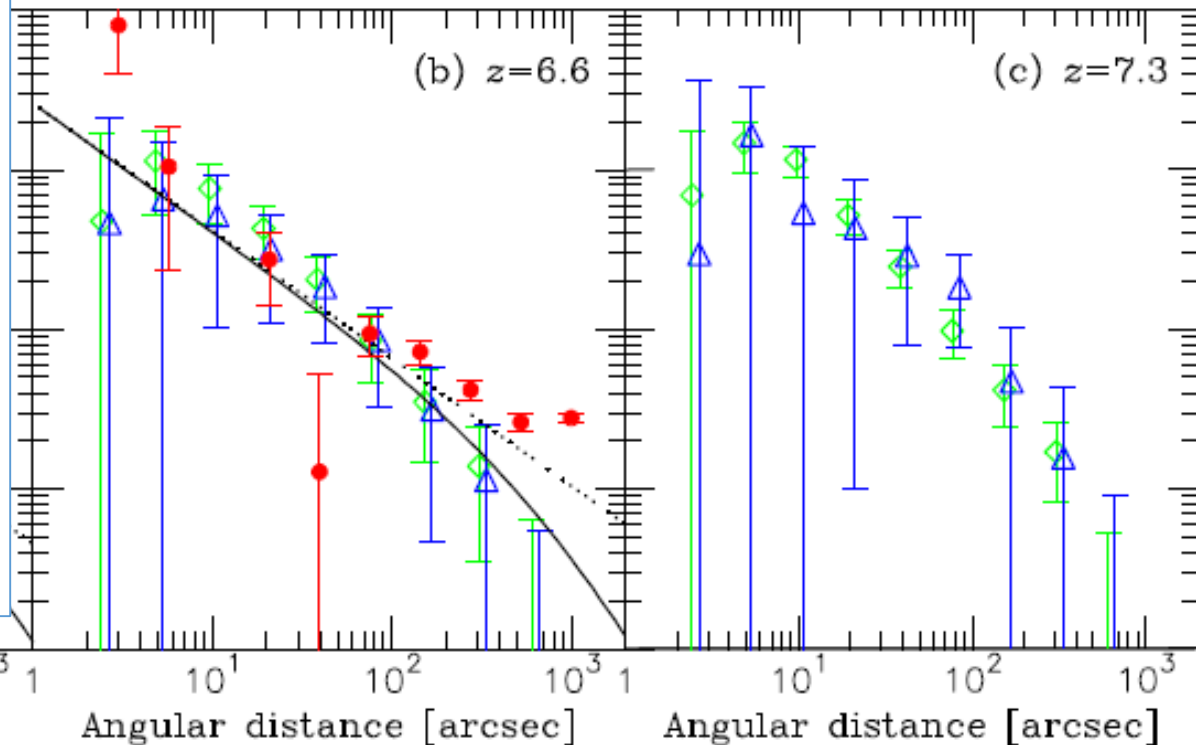
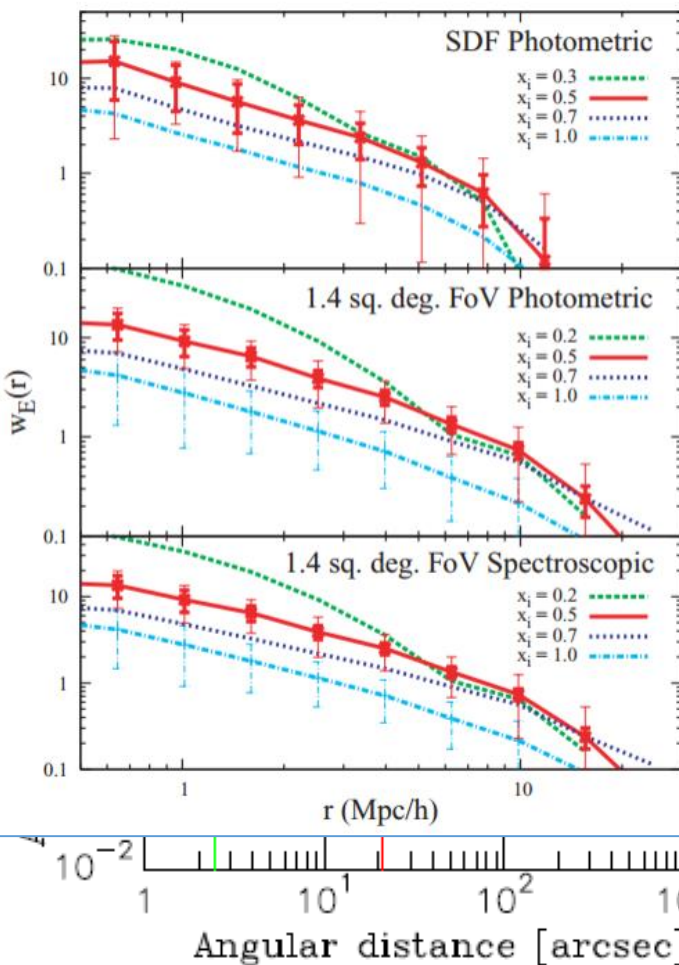
LAE fraction



Ono et al.2012

ACF

McQuinn et al. 2007



緑：IGM透過率100%

青：再電離シミュレーションにもとづくIGM透過率

まとめ

- Subaru/HSCによるLAE探査結果と比較するためのLAEシミュレーションを開発中である。
- よりリアルな銀河光源モデルを組み込んだ再電離シミュレーションにもとづいている。
- ハロー質量の関数としてLy α 脱出率を確率的に与えるLAEモデルを作成した。
- HSCによるLy α 光度関数でモデルを校正。
- UV光度に反比例したLAE割合の“傾向”を再現。
- HSCによるLAE角度相関ともおおむね合っているが、 >100 秒角で齟齬が見られる。