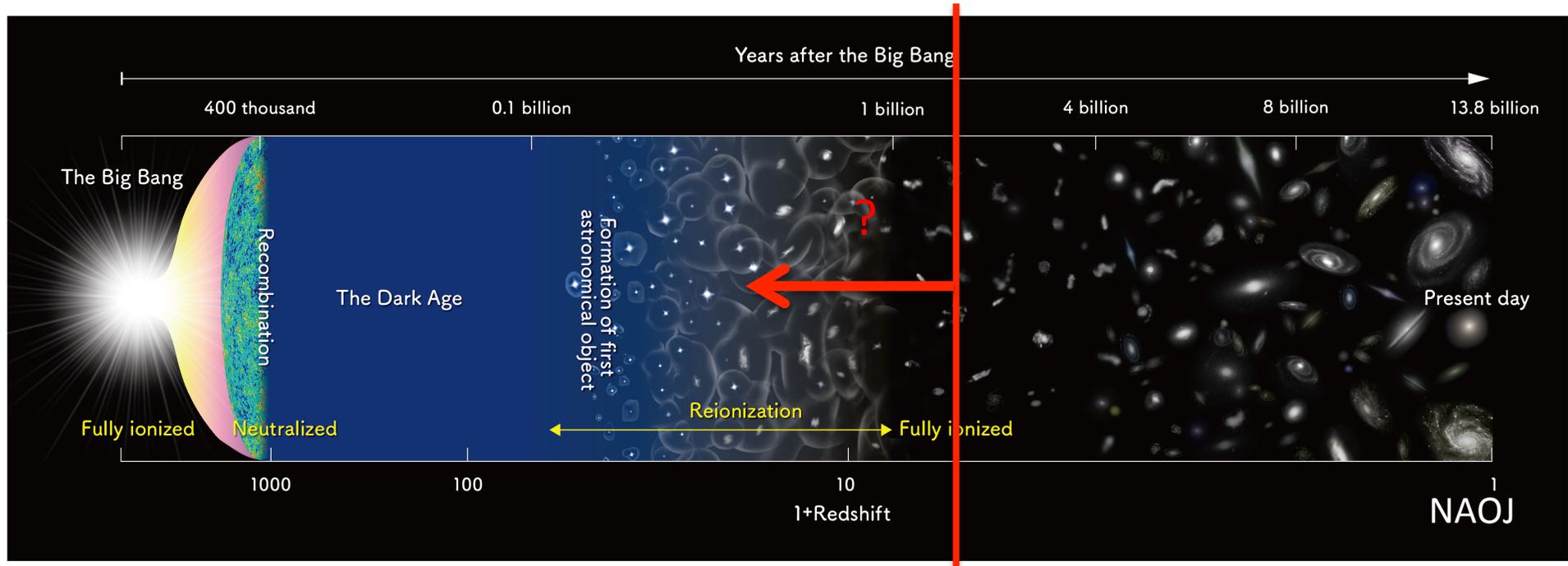


宇宙論シミュレーションを用いた 遠方銀河におけるサブミリ輝線強度の解析

森脇可奈(東京大学)

共同研究者: 清水一紘(大阪大学)、吉田直紀(東京大学)

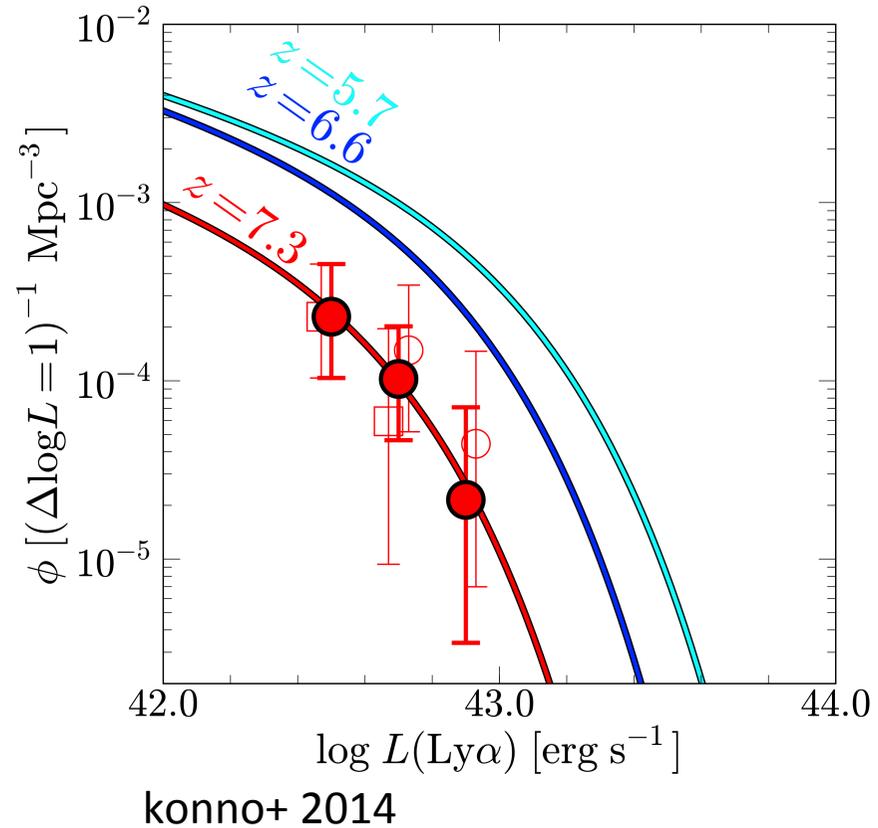
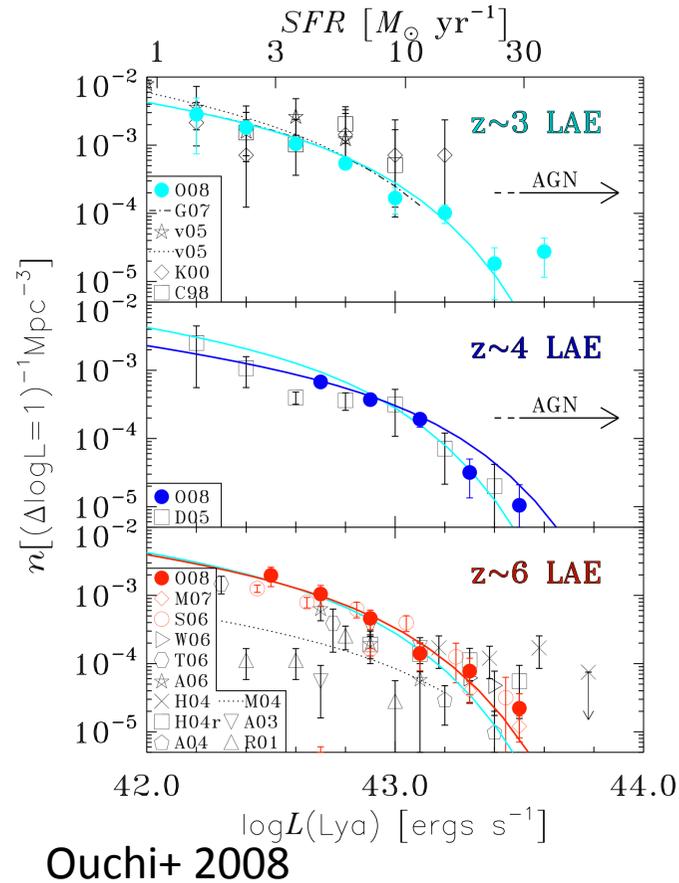
遠方銀河の探索、赤方偏移決定



$z \sim 6-7$ までは Ly α 輝線、dropout 等を用いて探索、赤方偏移決定がされてきた

遠方銀河の探索、赤方偏移決定

Lya は high-z で見えにくい

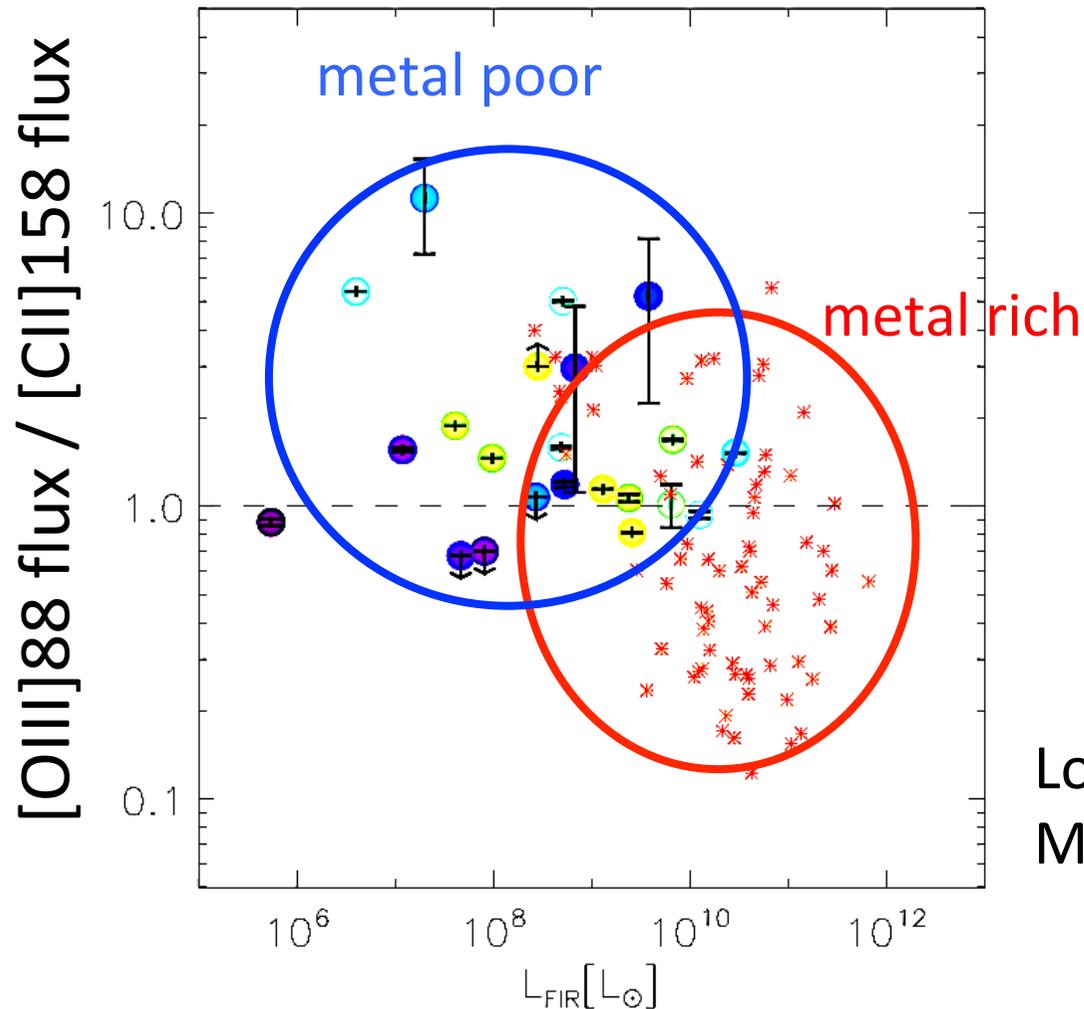


→ 代わりとなる輝線はあるか？

遠方銀河の探索、赤方偏移決定

Lya は high-z で見えにくい

近傍では low-metallicity だと [OIII]88um が強い

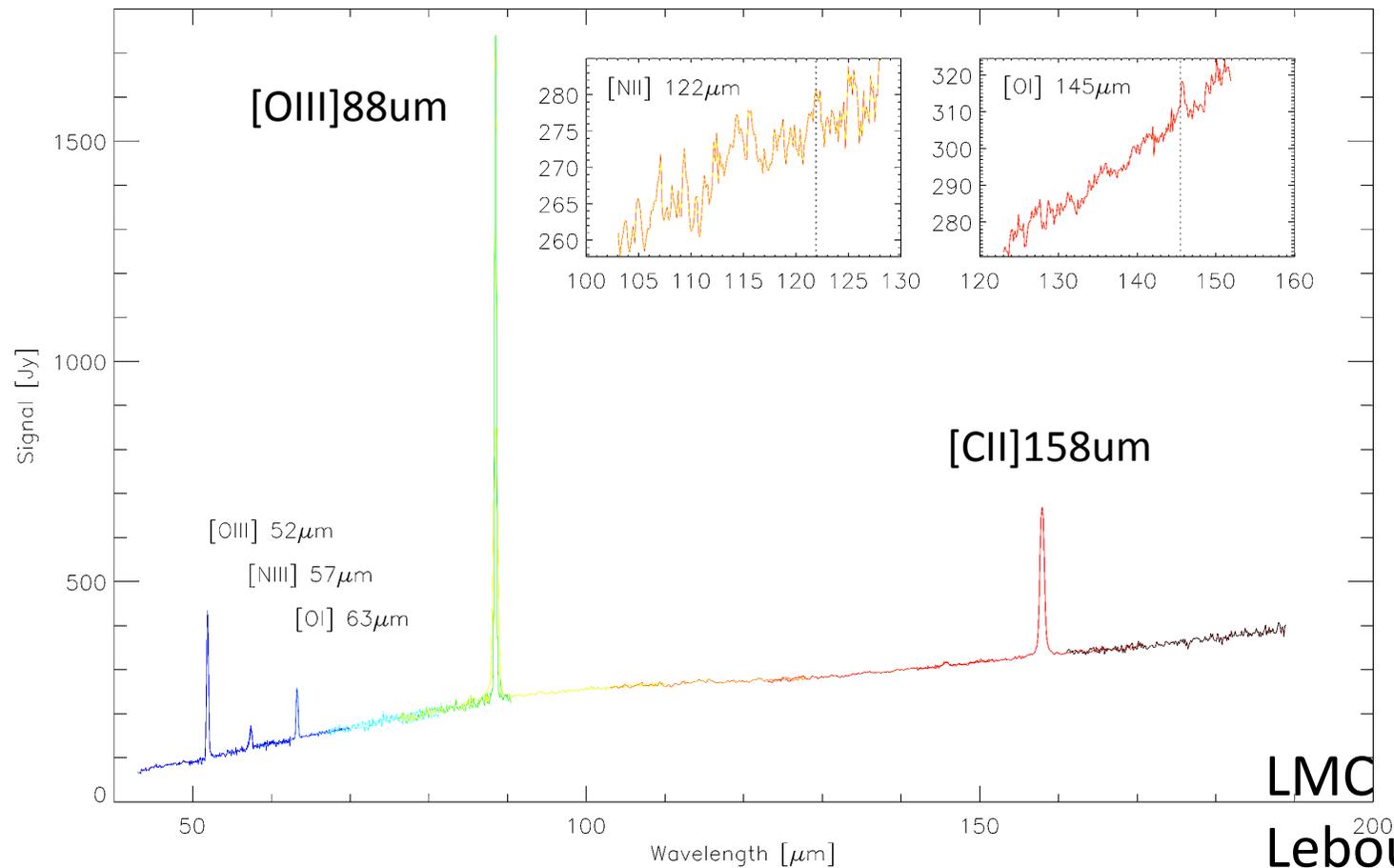


Local dwarf galaxy
Madden+ 2012

遠方銀河の探索、赤方偏移決定

Lya は high-z で見えにくい

近傍では low-metallicity だと [OIII]88um が強い

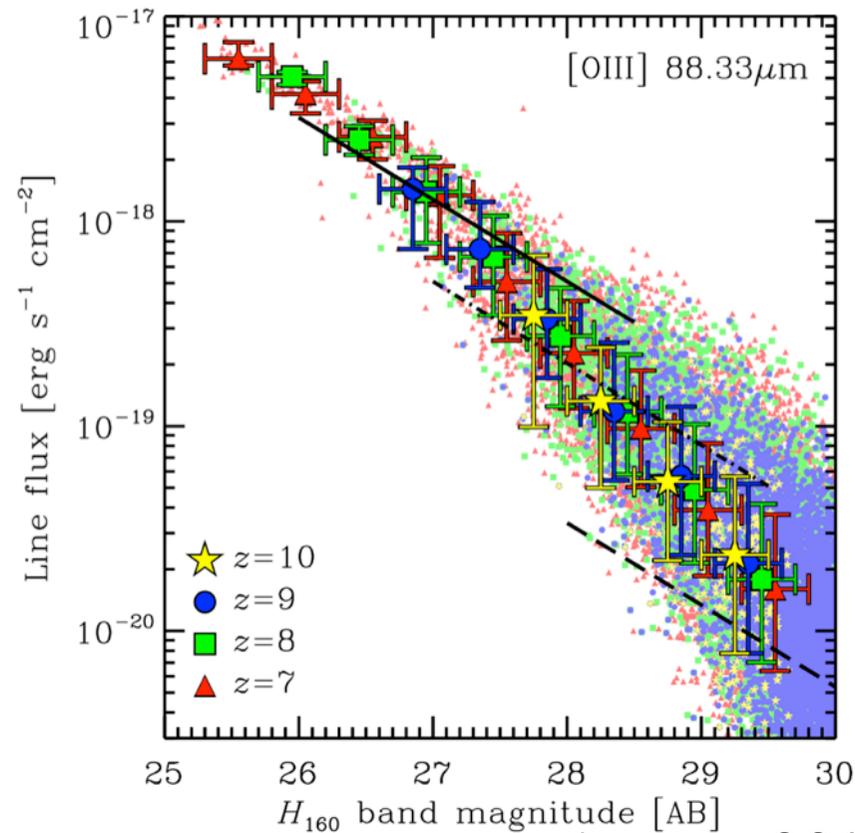


遠方銀河の探索、赤方偏移決定

Lya は high-z で見えにくい

近傍では low-metallicity だと [OIII]88um が強い

ALMA で [OIII]88um が $z > 8$ で受かる



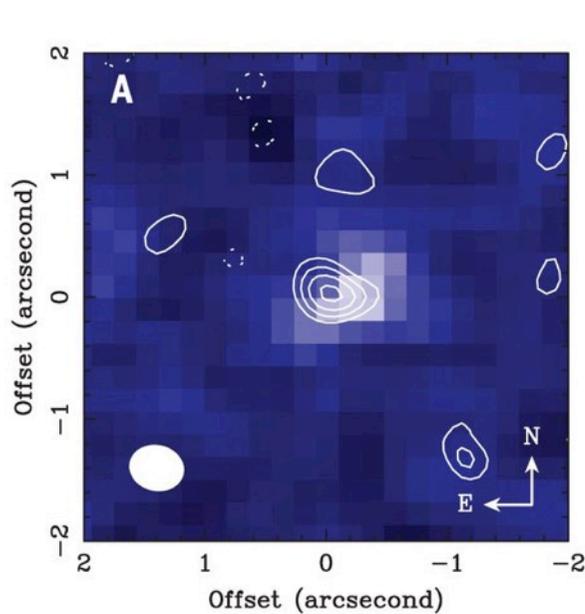
Inoue+ 2014

遠方銀河の探索、赤方偏移決定

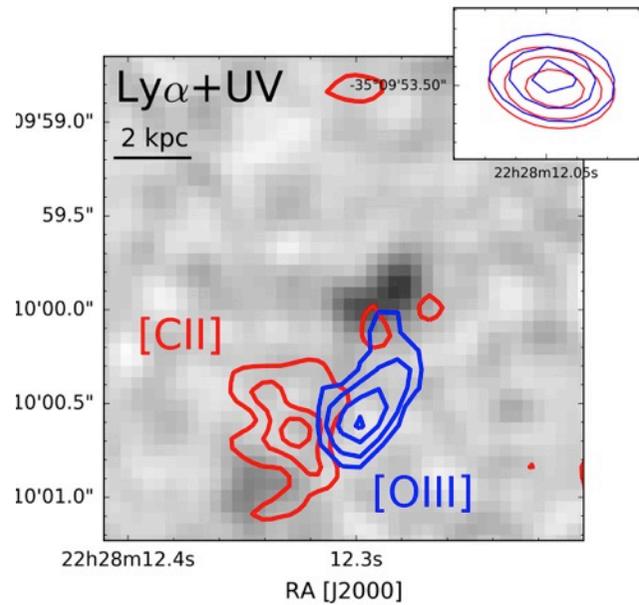
$\text{Ly}\alpha$ は high- z で見えにくい

近傍では low-metallicity だと $[\text{OIII}]\text{88}\mu\text{m}$ が強い

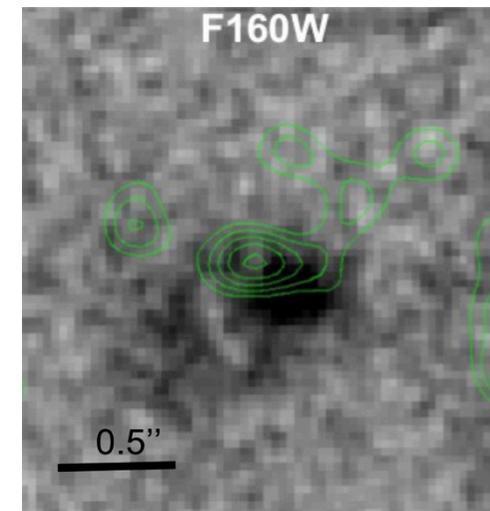
ALMA で $[\text{OIII}]\text{88}\mu\text{m}$ が $z > 8$ で受かる



$z = 7.2$
(Inoue+ 2016)



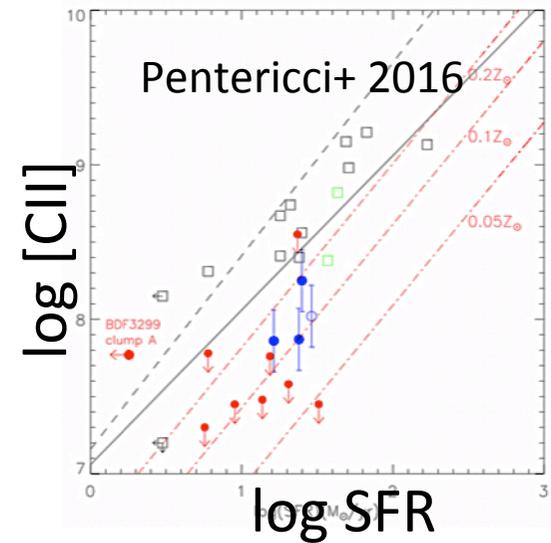
$z = 7.1$
(Carniani+ 2017)



$z = 8.4$
(Laporte+ 2017)

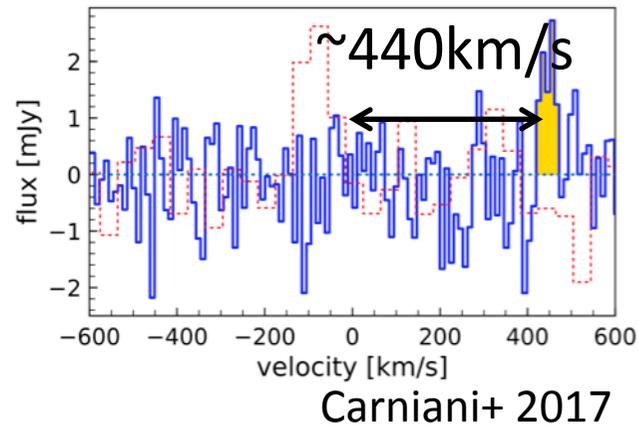
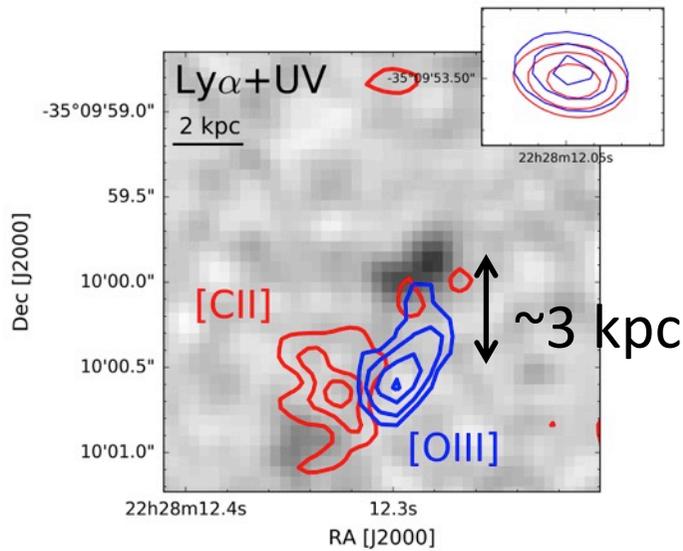
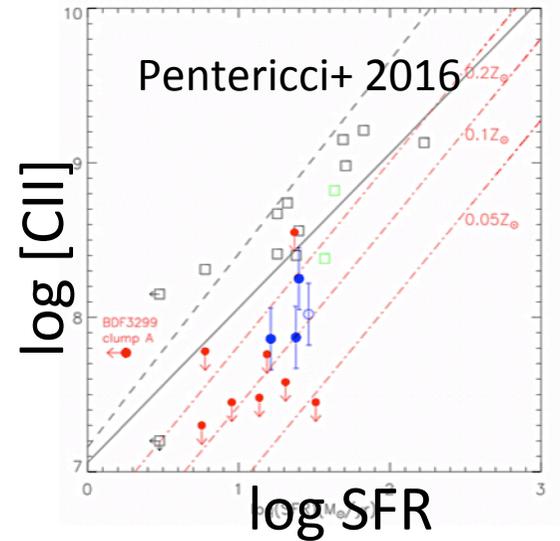
観測結果からわかってきたこと

- $z > 6$ で [CII]158um 輝線が弱い (LAE)
パラメータ(金属量,電離パラメータ,etc.)の影響?
中性水素領域が壊されている?



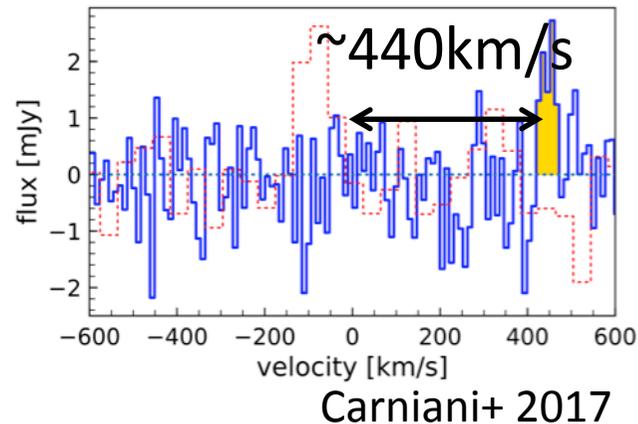
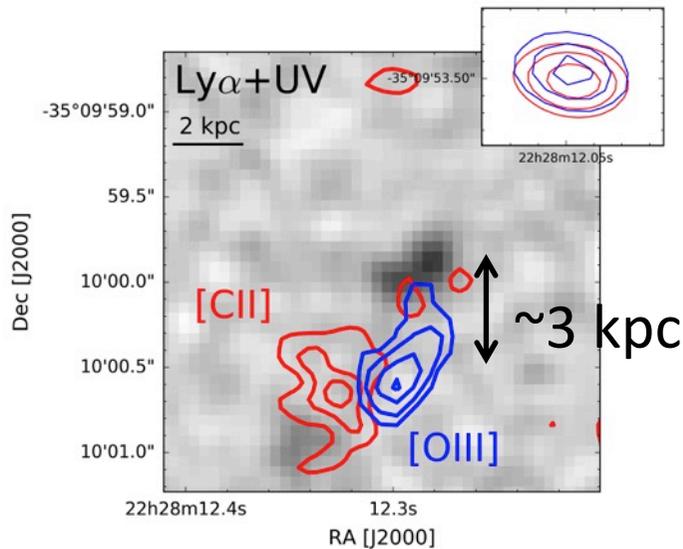
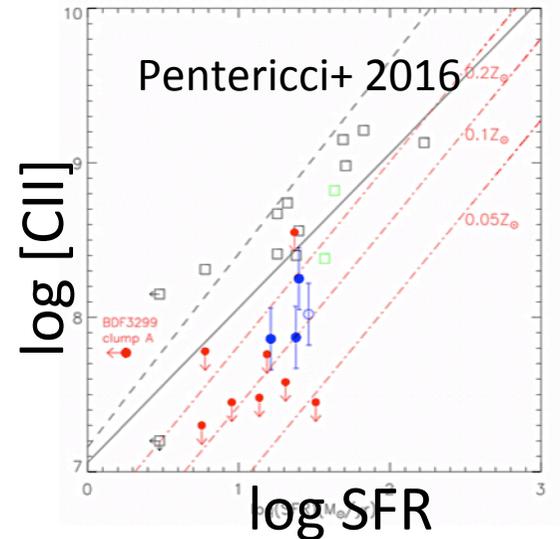
観測結果からわかってきたこと

- $z > 6$ で [CII]158um 輝線が弱い (LAE) パラメータ(金属量,電離パラメータ,etc.)の影響? 中性水素領域が壊されている?
- UV continuum、Ly α からのオフセット 輝線の出所が異なる?



観測結果からわかってきたこと

- $z > 6$ で [CII]158um 輝線が弱い (LAE)
 パラメータ(金属量,電離パラメータ,etc.)の影響?
 中性水素領域が壊されている?
- UV continuum、Ly α からのオフセット
 輝線の出所が異なる?



宇宙論シミュレーションを用いて
 high-z サブミリ輝線強度の傾向を調べる

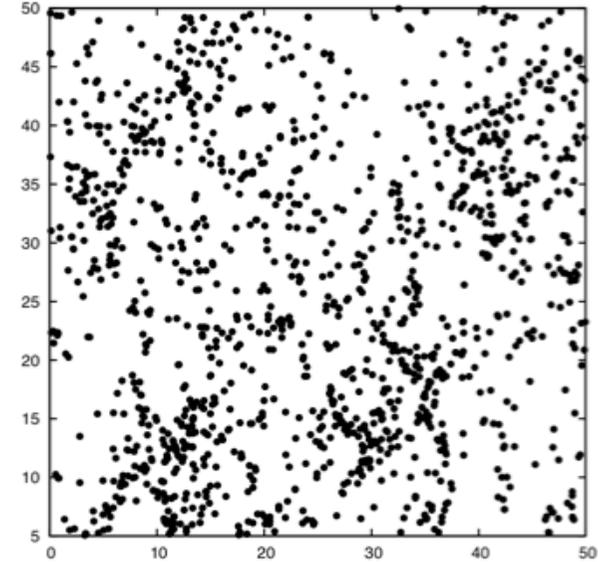
シミュレーション

Shimizu+ 2016 (GADGET-3)

Boxsize = (50 cMpc)³

z = 9 で M* > 1e7 Msun が ~1500個

star particle mass ~ 1e5 Msun



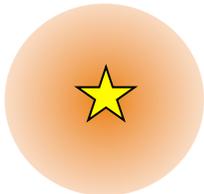
輝線強度の計算(HII領域)

$$L_{\text{line}} = R(Z, n, U) \times L_{\text{Hb(caseB)}}(Z^*, \text{age}^*, M^*)$$

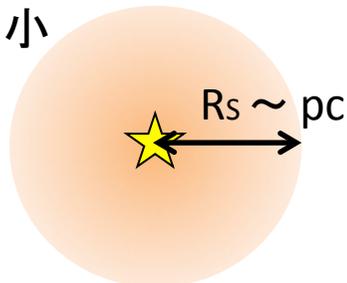
↪ CLOUDY で計算したテーブル (Inoue 2011)

$$U = N_{\text{電離光子}}/N_{\text{ガス}} \propto \epsilon^{2/3} Q^{1/3} n^{1/3} \quad (\text{Panuzzo+ 2003})$$

n 大



n 小



$$\begin{aligned} \langle U \rangle &= \frac{1}{\frac{4}{3}\pi R_s^3} \int_0^{R_s} U(r) 4\pi r^2 dr \\ &= \frac{3\alpha_B^{2/3}}{4c} \left(\frac{3Q\epsilon^2 n_H}{4\pi} \right)^{1/3} \end{aligned}$$

$$\epsilon = \frac{V_{\text{clump}}}{V_{\text{HII}}}$$

HII 領域以外からの [CII]

(local)

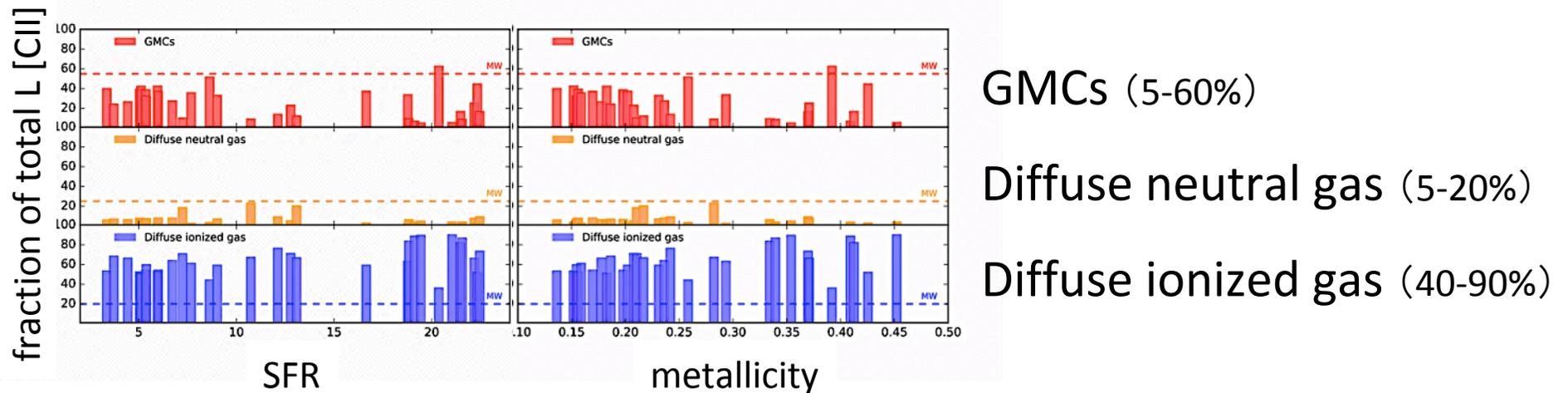
Cormier+ 2012 PDR(10%), diffuse ionized medium(50%)

Accurso+ 2017 PDR(60-80%)

($z > 6$)

Vallini+ 2013,2015 PDR(90%), diffuse neutral medium(10%)

Olsen+ 2015,2017



→ HII領域からの [CII] 強度が全体の 20% とする

- 結果

- (i) シミュレーション全体としての傾向

- (ii) 個々の銀河における輝線の空間分布

- 結果

- (i) シミュレーション全体としての傾向

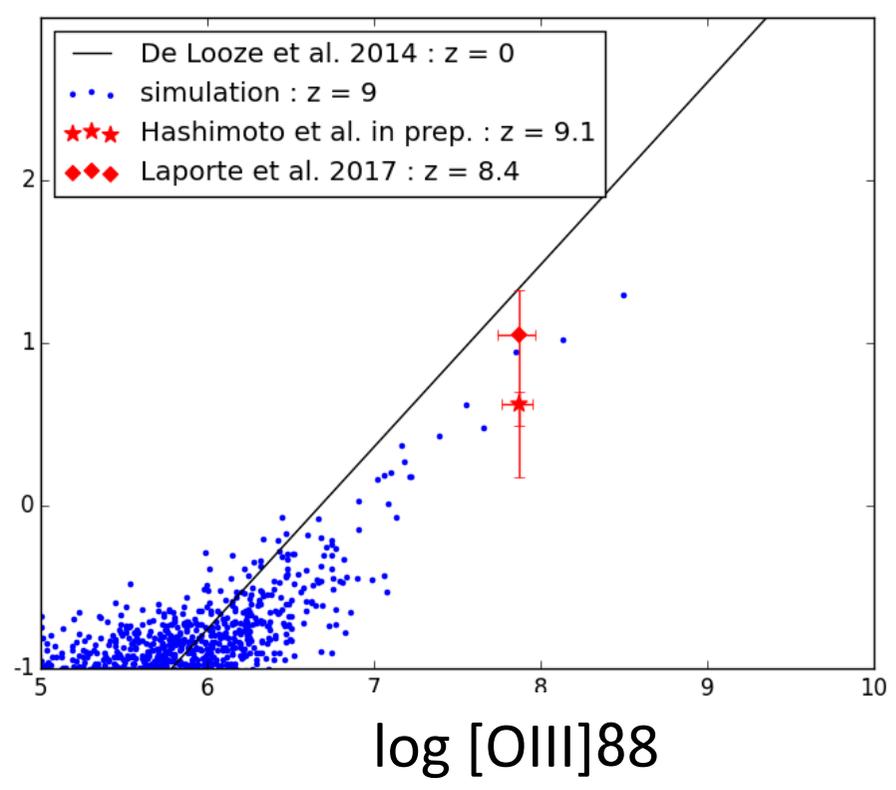
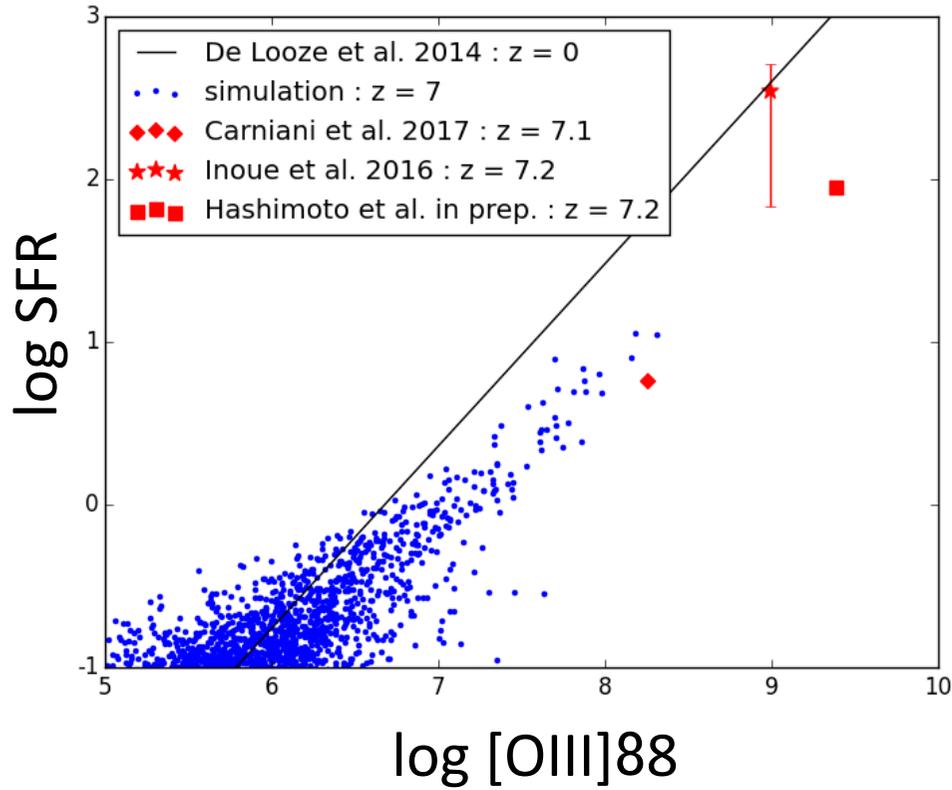
- (ii) 個々の銀河における輝線の空間分布

(i) シミュレーションデータの全体としての傾向

観測と比較 [OIII]88

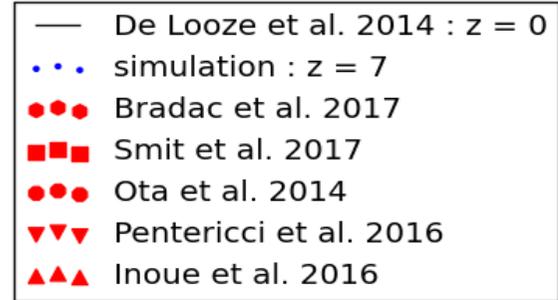
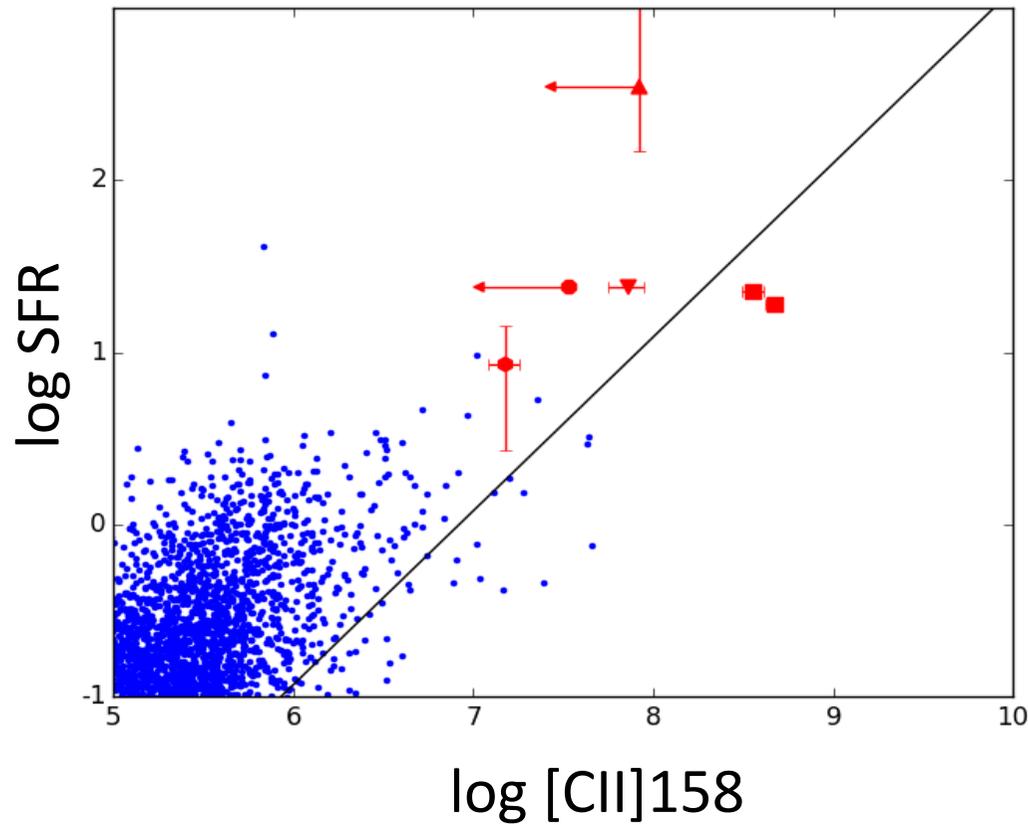
$z \sim 7$

$z \sim 9$



観測と比較 [OIII]88

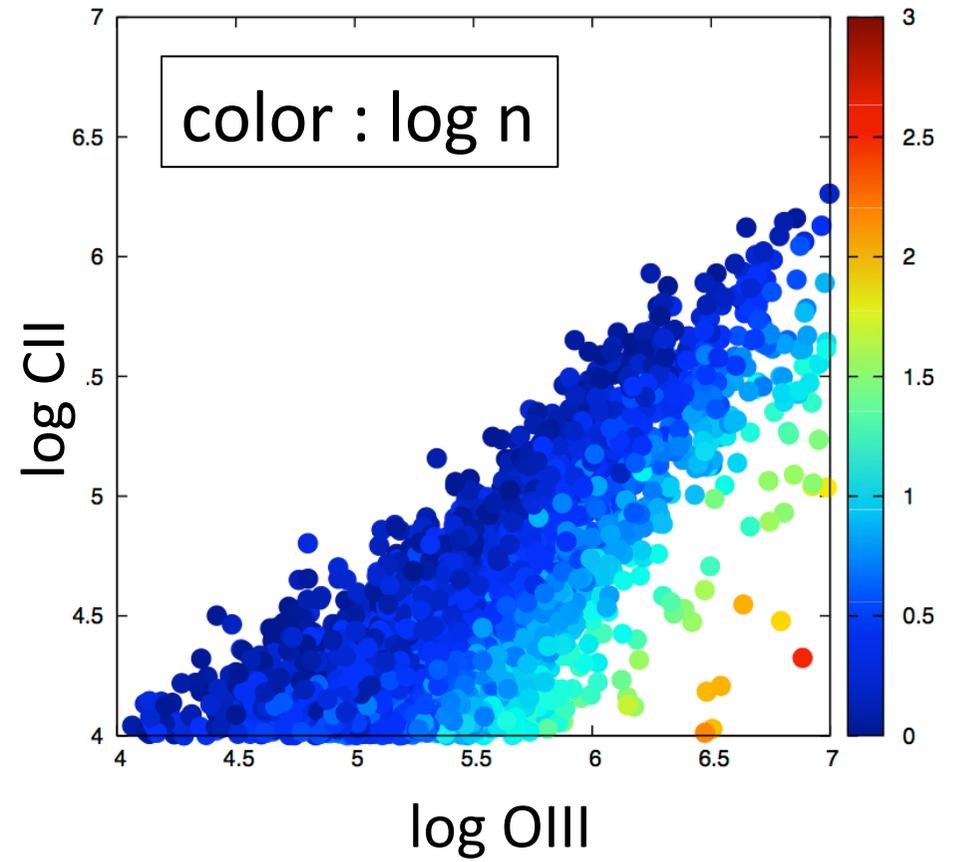
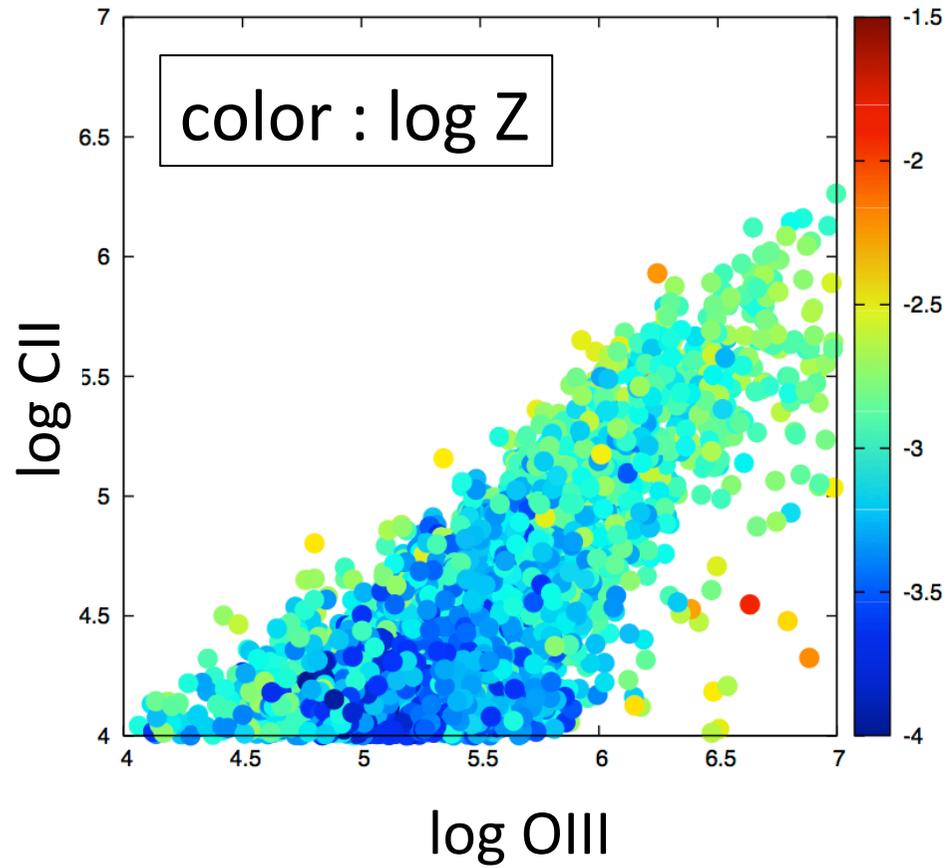
$z \sim 7$



※ HII 領域以外の寄与を80%と仮定

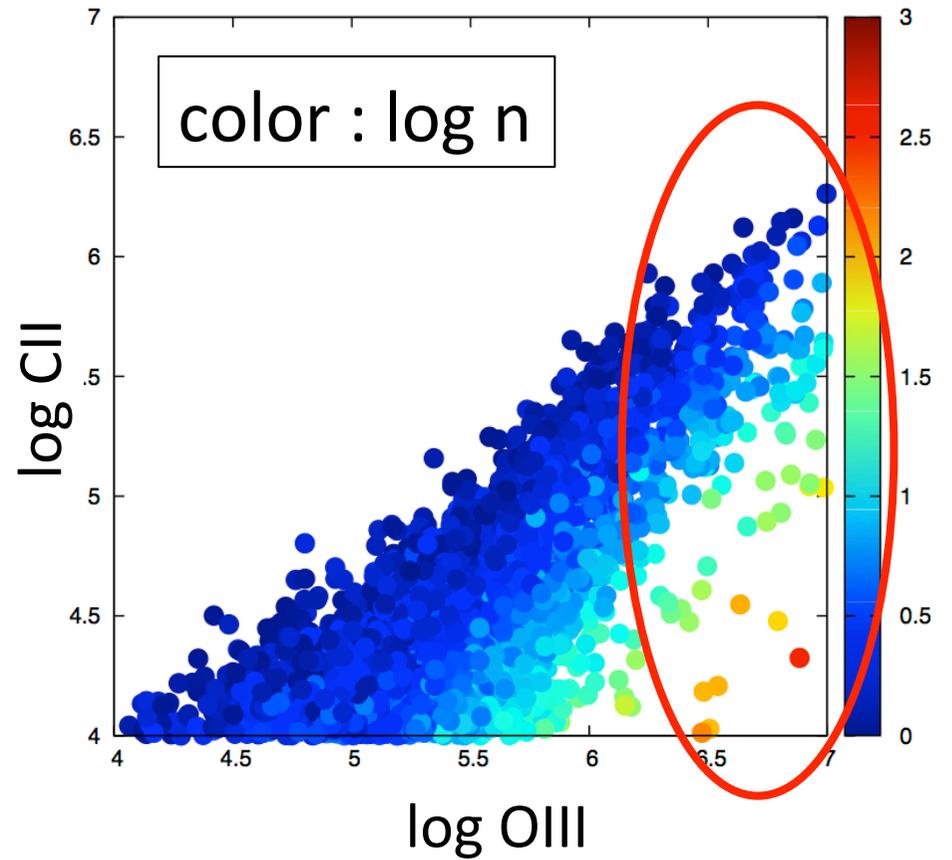
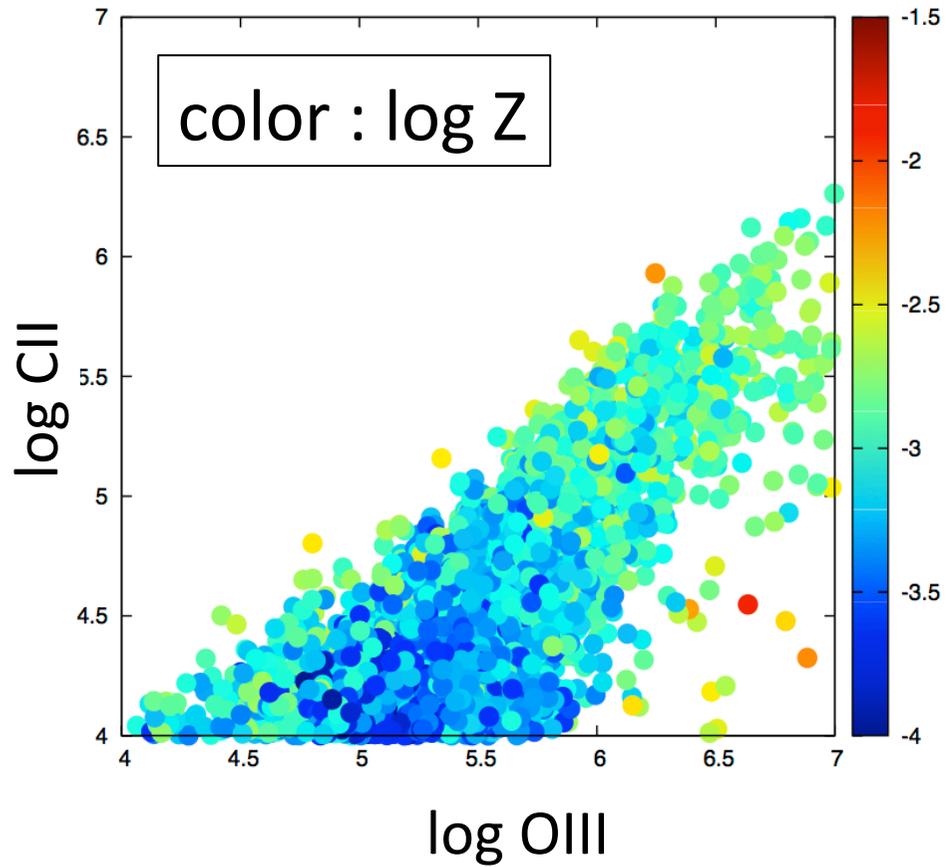
(i) シミュレーションデータの全体としての傾向の解析

OIII vs CII



(i) シミュレーションデータの全体としての傾向の解析

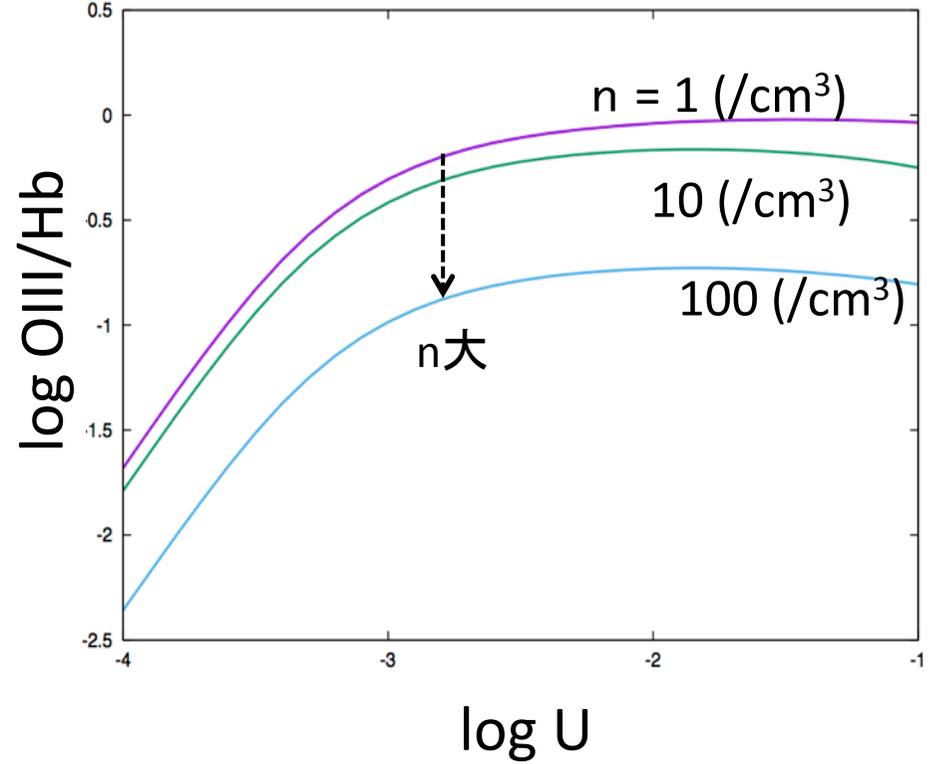
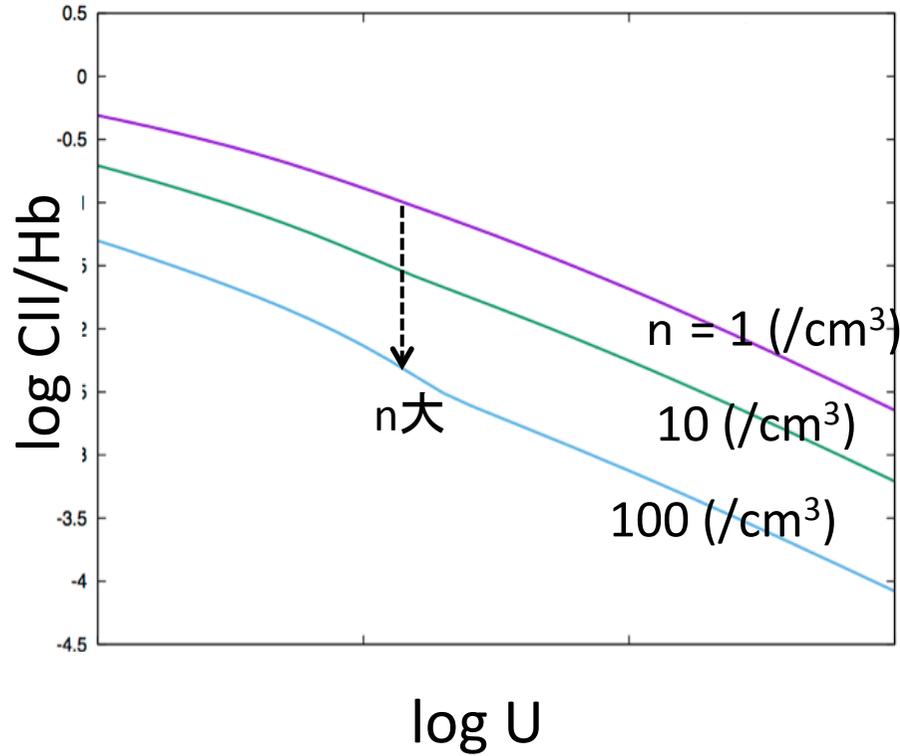
OIII vs CII



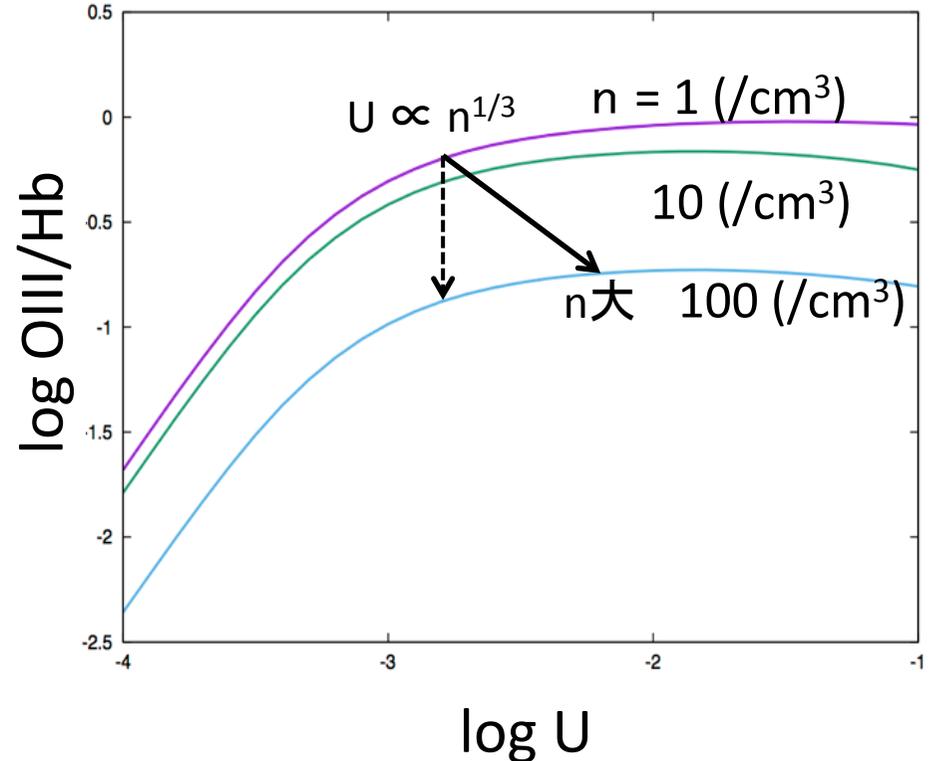
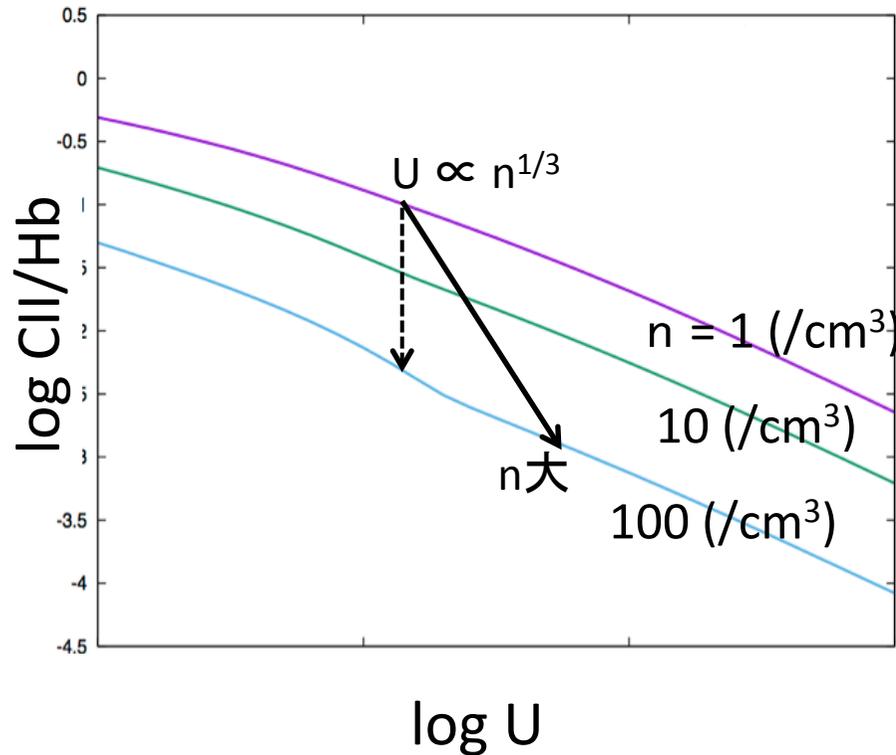
CII : ガス密度依存性が大きい

(i) シミュレーションデータの全体としての傾向

輝線強度の n_{gas} 、 U 依存性 ($Z = 0.004$)

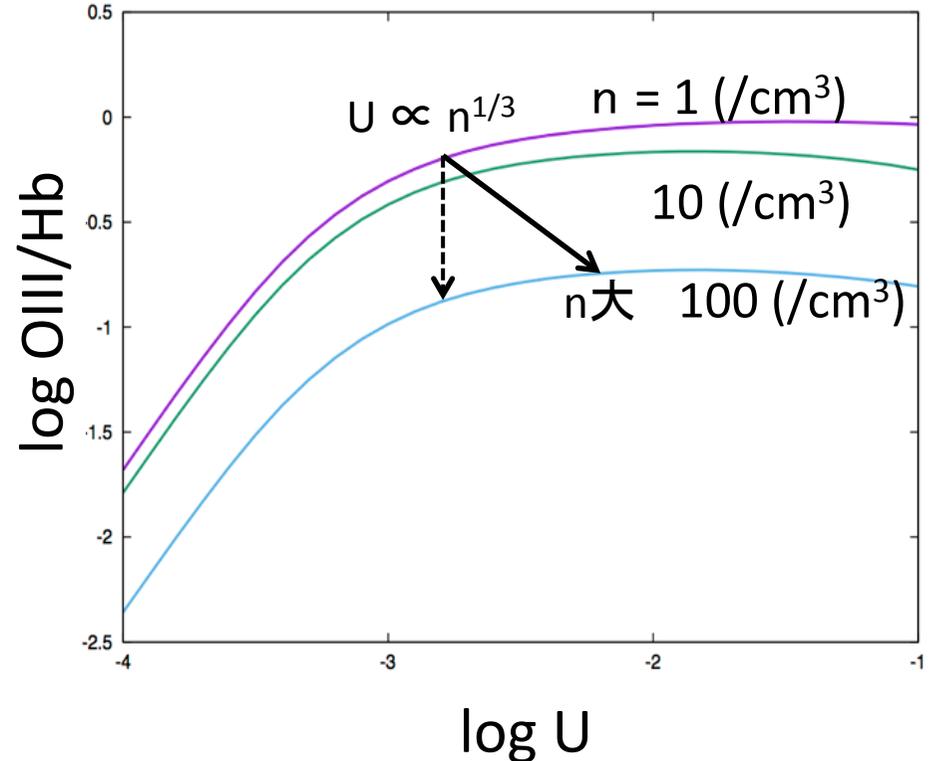
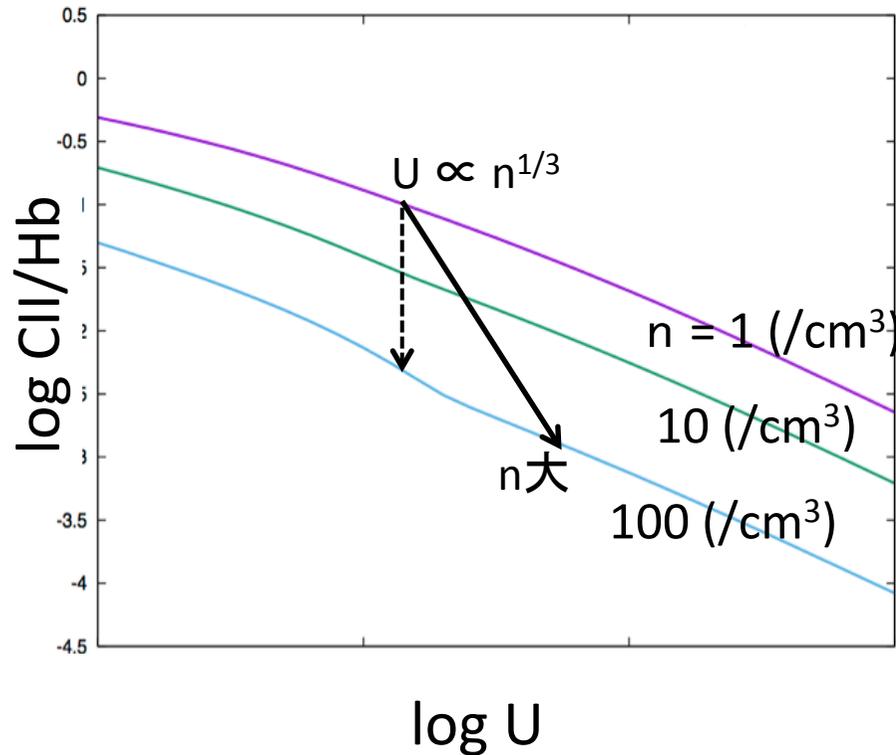


輝線強度の n_{gas} 、 U 依存性 ($Z = 0.004$)



低電離輝線ではガス密度がより強く影響する
→ 密度が高い (= 電離領域がコンパクト) で
[CII] 強度が弱い?

輝線強度の n_{gas} 、 U 依存性 ($Z = 0.004$)



低電離輝線ではガス密度がより強く影響する
→ 密度が高い (= 電離領域がコンパクト) で
[CII] 強度が弱い?

ただし詳細な議論にはPDRなどの計算が必要

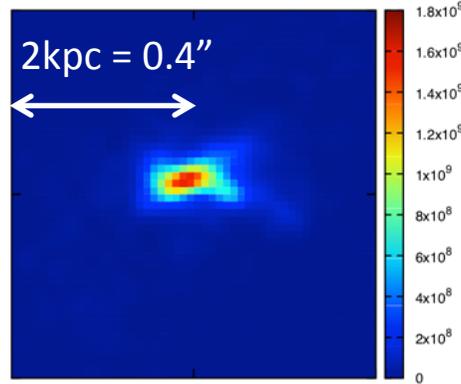
- 結果

- (i) シミュレーション全体としての傾向

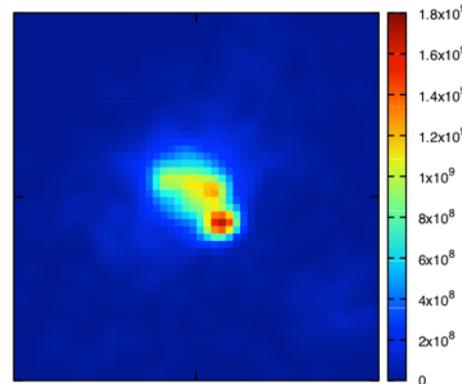
- (ii) 個々の銀河における輝線の空間分布

(ii) 個々の銀河における輝線の空間分布

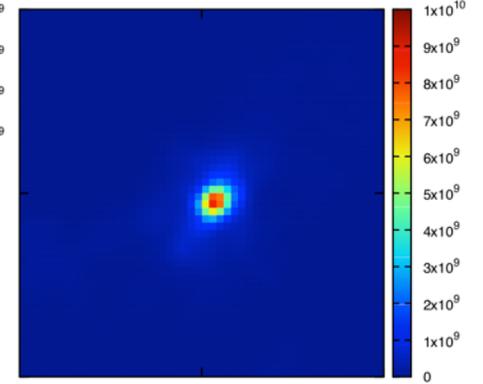
color : M^*
projected
($z = 7$)



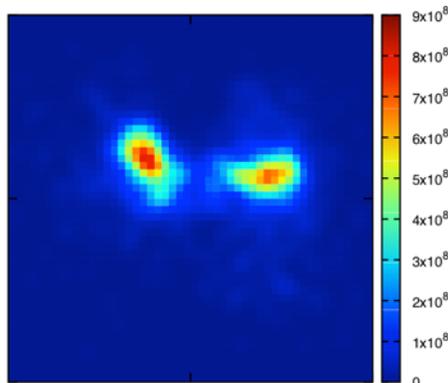
$M^* = 9.6 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 12 \times 10^7 L_{\odot}$
 $SFR = 7.9 M_{\odot}/yr$



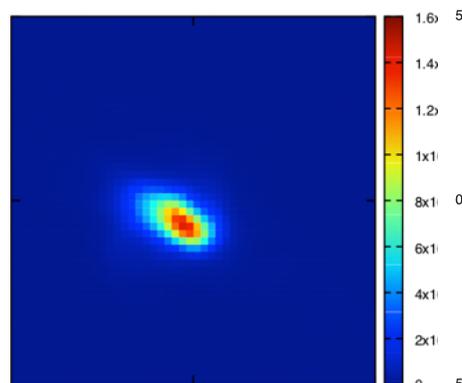
$M^* = 14 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 16 \times 10^7 L_{\odot}$
 $SFR = 13 M_{\odot}/yr$



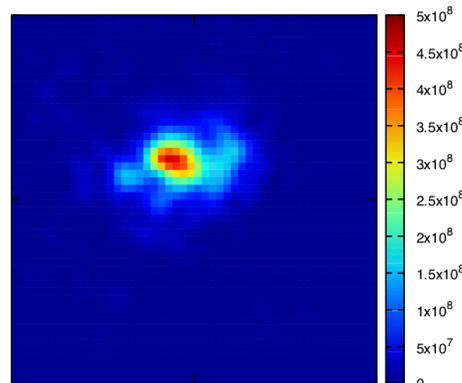
$M^* = 20 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 37 \times 10^7 L_{\odot}$
 $SFR = 54 M_{\odot}/yr$



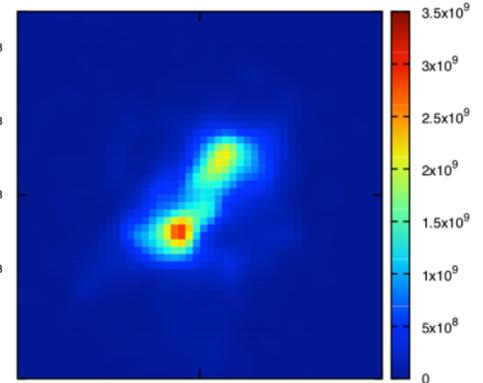
$M^* = 5.8 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 8.0 \times 10^7 L_{\odot}$
 $SFR = 4.3 M_{\odot}/yr$



$M^* = 45 \times 10^8 M_{\text{sun}}$
 $OIII = 41 \times 10^7 L_{\odot}$
 $SFR = 20 M_{\odot}/yr$



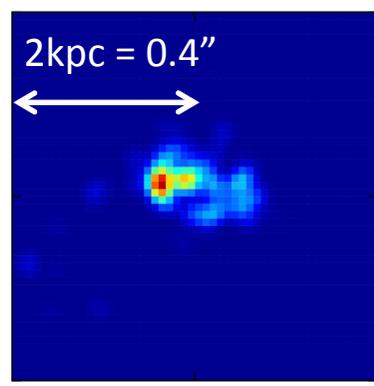
$M^* = 2.3 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 3.0 \times 10^8 L_{\odot}$
 $SFR = 2.2 M_{\odot}/yr$



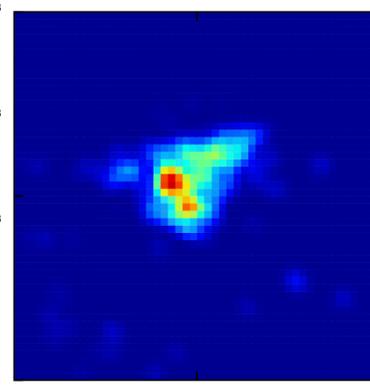
$M^* = 24 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 40 \times 10^7 L_{\odot}$
 $SFR = 26 M_{\odot}/yr$

(ii) 個々の銀河における輝線の空間分布

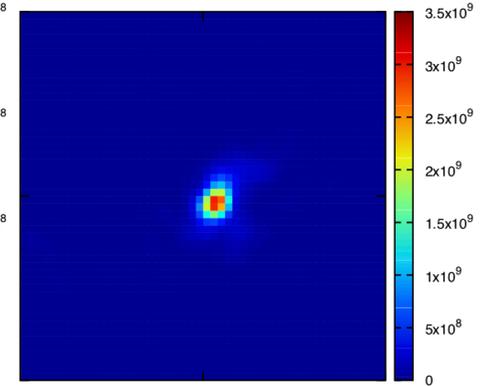
color :
[OIII] 88um
luminosity
(z = 7)



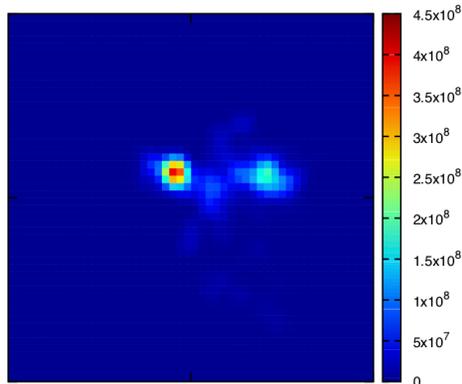
$M^* = 9.6 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 12 \times 10^7 L_{\odot}$
 $SFR = 7.9 M_{\odot}/yr$



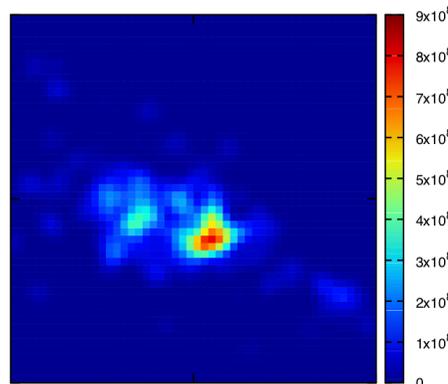
$M^* = 14 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 16 \times 10^7 L_{\odot}$
 $SFR = 13 M_{\odot}/yr$



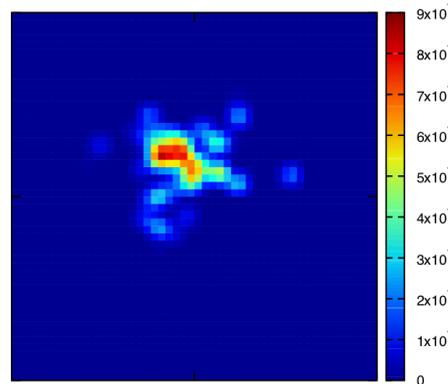
$M^* = 20 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 37 \times 10^7 L_{\odot}$
 $SFR = 54 M_{\odot}/yr$



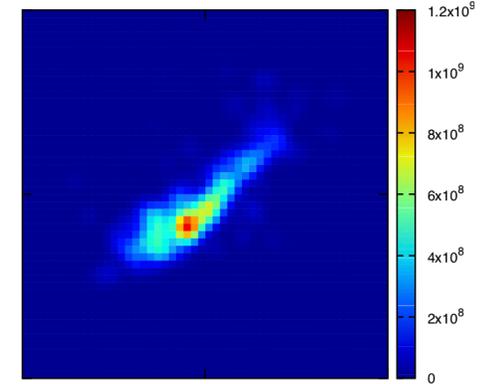
$M^* = 5.8 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 8.0 \times 10^7 L_{\odot}$
 $SFR = 4.3 M_{\odot}/yr$



$M^* = 45 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 41 \times 10^7 L_{\odot}$
 $SFR = 20 M_{\odot}/yr$



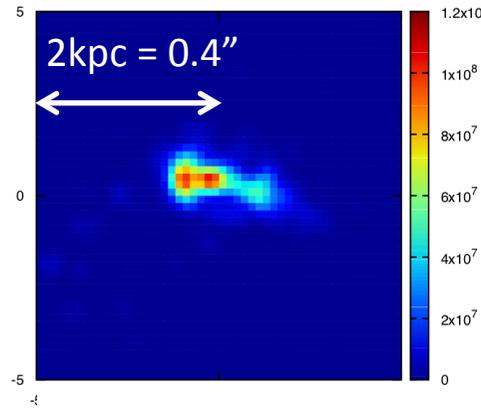
$M^* = 2.3 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 3.0 \times 10^8 L_{\odot}$
 $SFR = 2.2 M_{\odot}/yr$



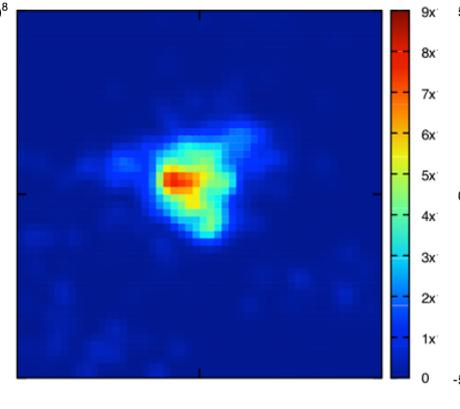
$M^* = 24 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 40 \times 10^7 L_{\odot}$
 $SFR = 26 M_{\odot}/yr$

(ii) 個々の銀河における輝線の空間分布

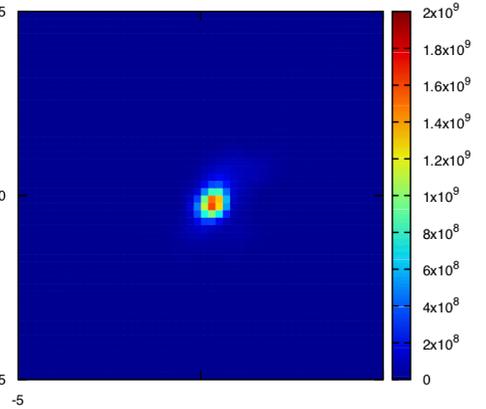
color : UV
(z = 7)



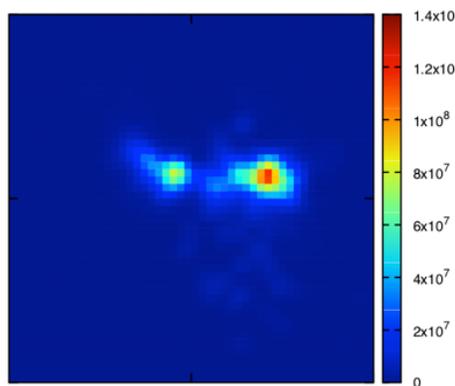
$M^* = 9.6 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 12 \times 10^7 L_{\odot}$
 $SFR = 7.9 M_{\odot}/yr$



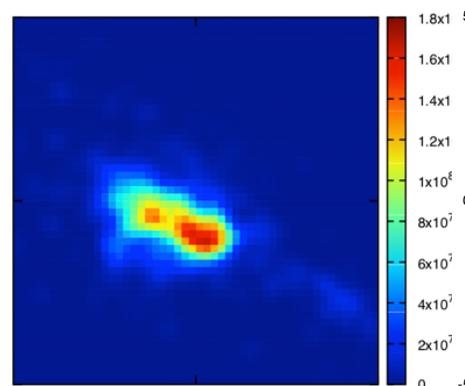
$M^* = 14 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 16 \times 10^7 L_{\odot}$
 $SFR = 13 M_{\odot}/yr$



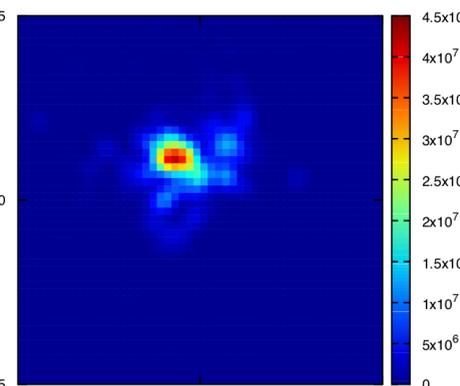
$M^* = 20 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 37 \times 10^7 L_{\odot}$
 $SFR = 54 M_{\odot}/yr$



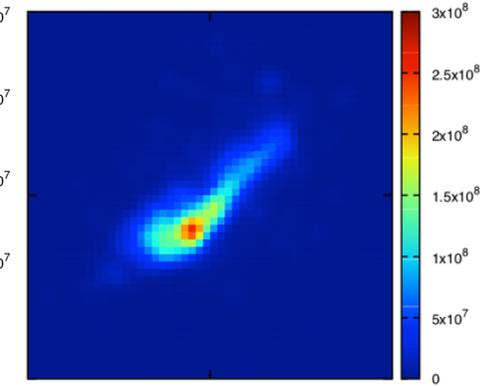
$M^* = 5.8 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 8.0 \times 10^7 L_{\odot}$
 $SFR = 4.3 M_{\odot}/yr$



$M^* = 45 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 41 \times 10^7 L_{\odot}$
 $SFR = 20 M_{\odot}/yr$

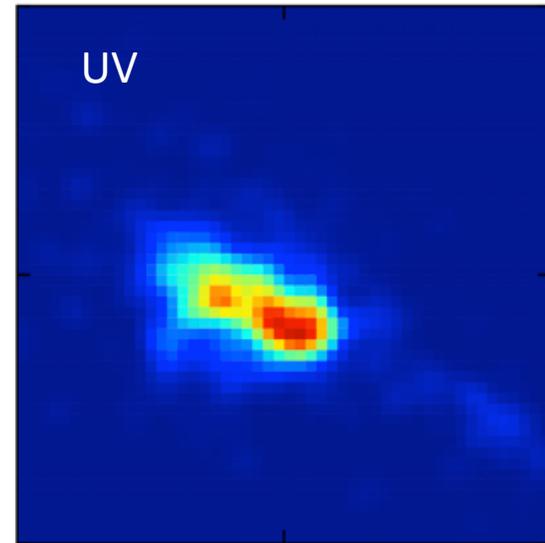
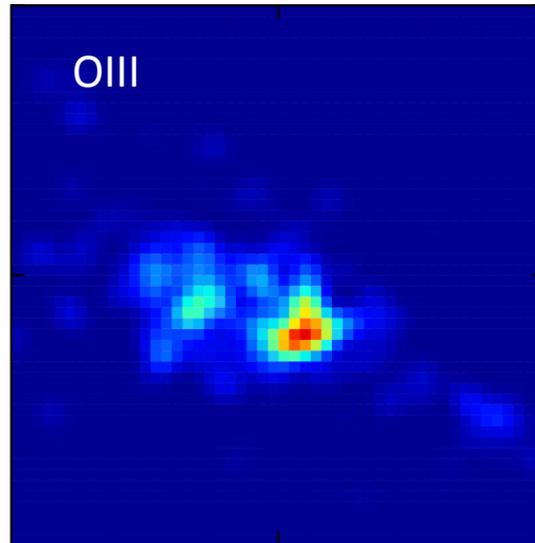
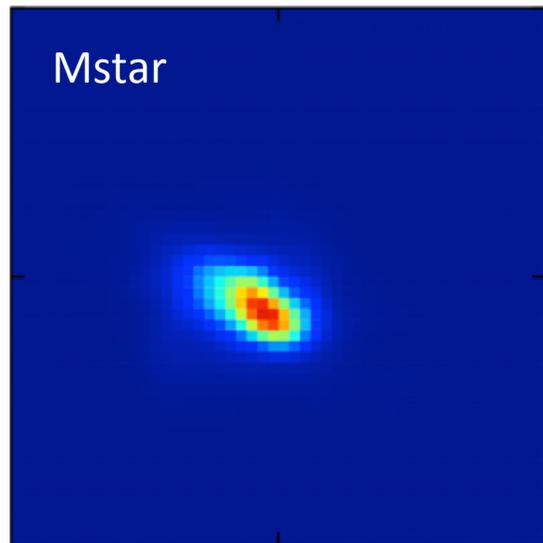


$M^* = 2.3 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 3.0 \times 10^8 L_{\odot}$
 $SFR = 2.2 M_{\odot}/yr$

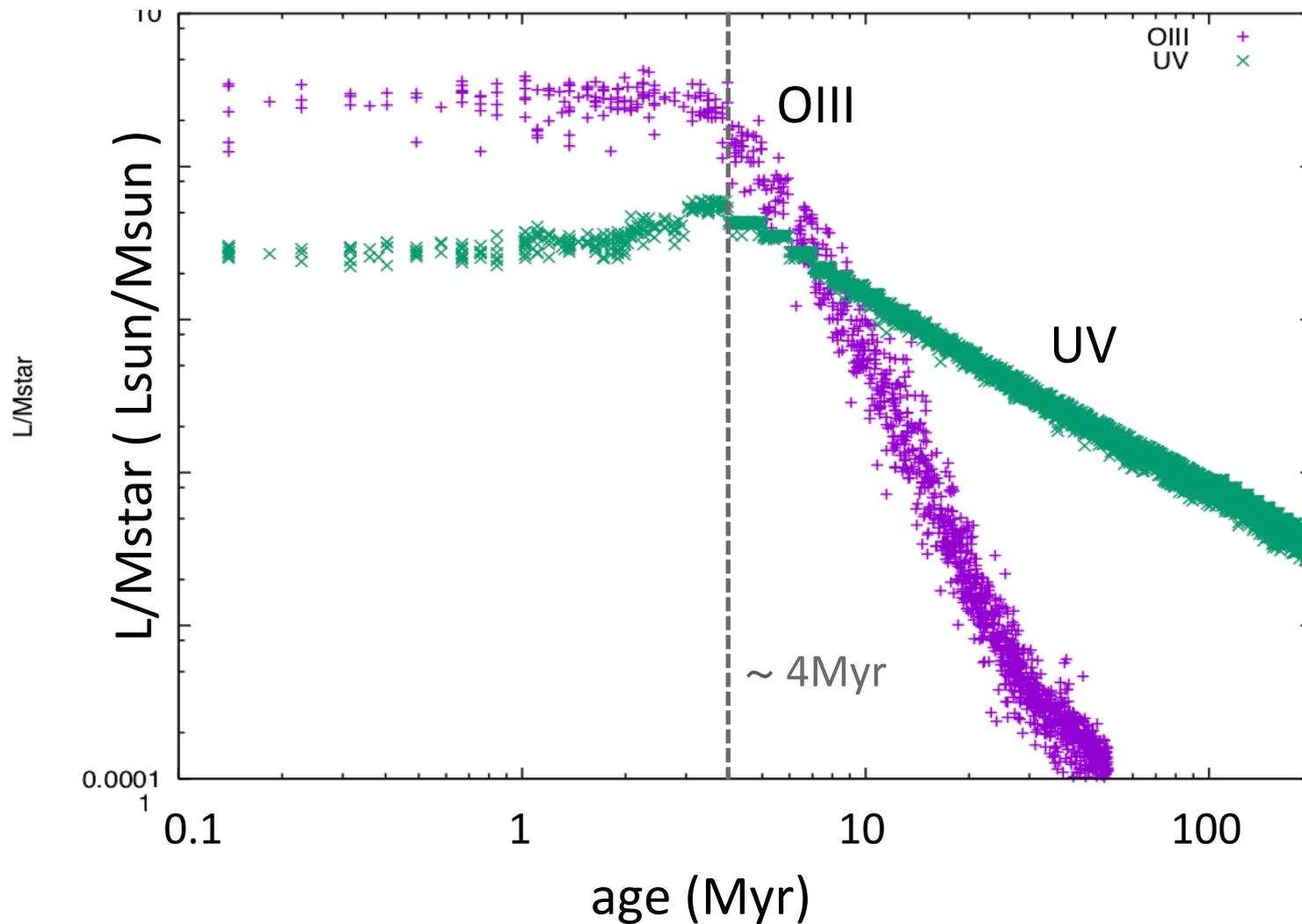


$M^* = 24 \times 10^8 M_{\odot}$
 $OIII = 40 \times 10^7 L_{\odot}$
 $SFR = 26 M_{\odot}/yr$

(ii) 個々の銀河における輝線の空間分布



輝線強度の星年齢依存性

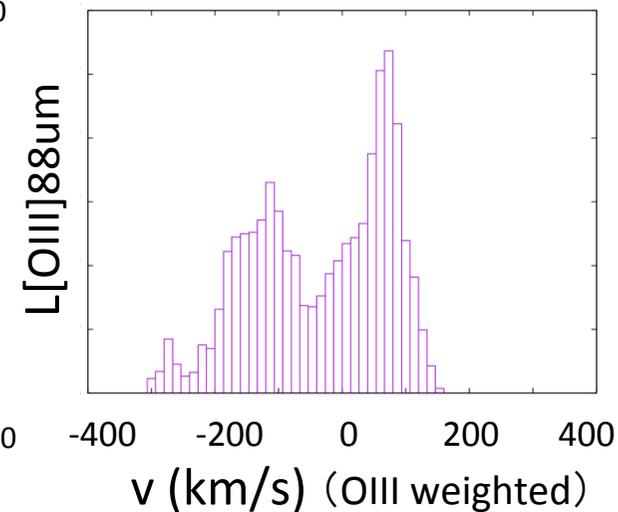
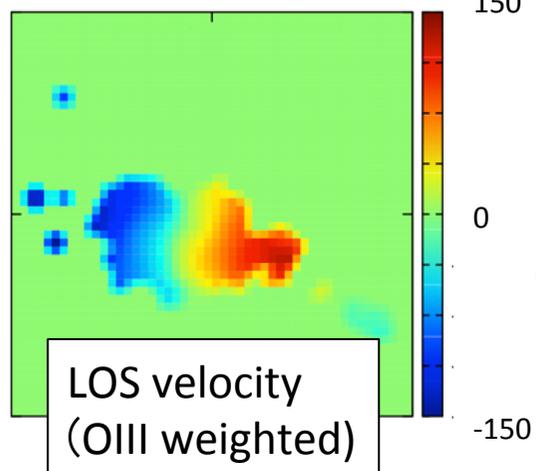
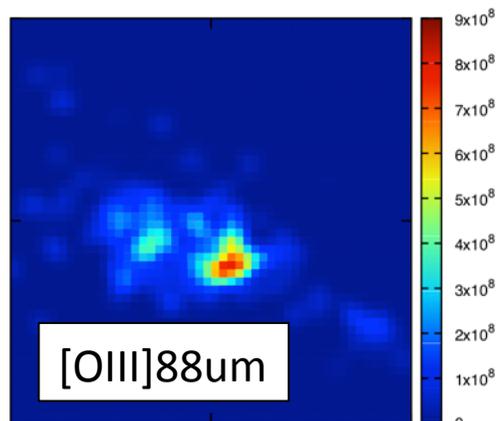
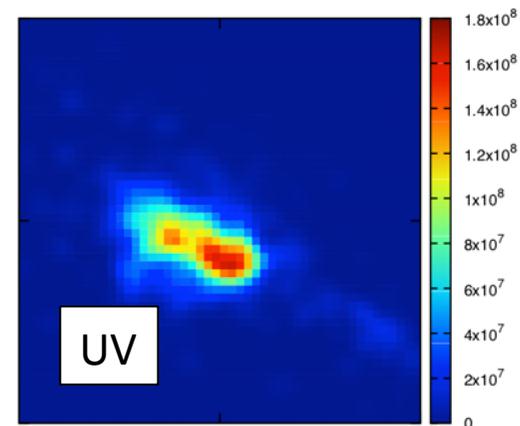
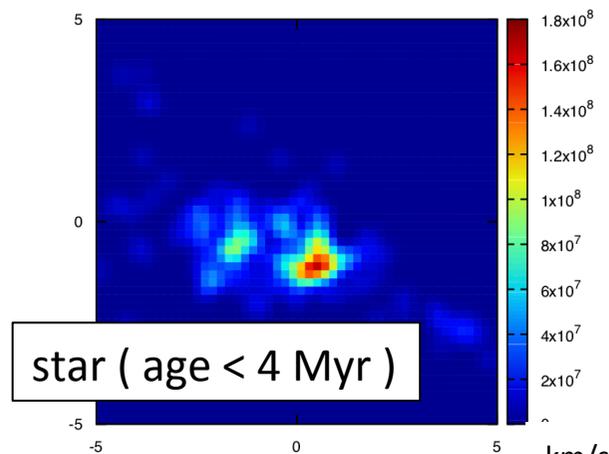
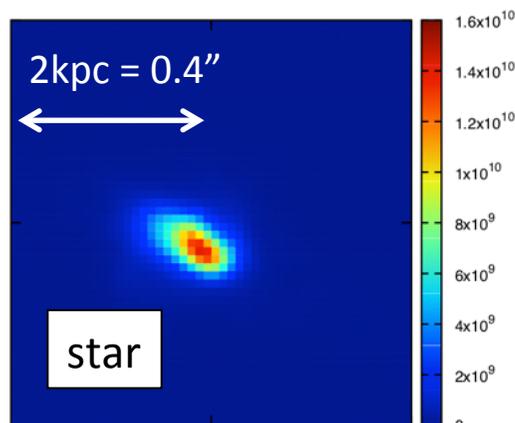


(ii) 個々の銀河における輝線の空間分布

$M^* = 45e8 \text{ Msun}$

$OIII = 41e7 \text{ Lsun}$

$SFR = 20 \text{ Msun/yr}$

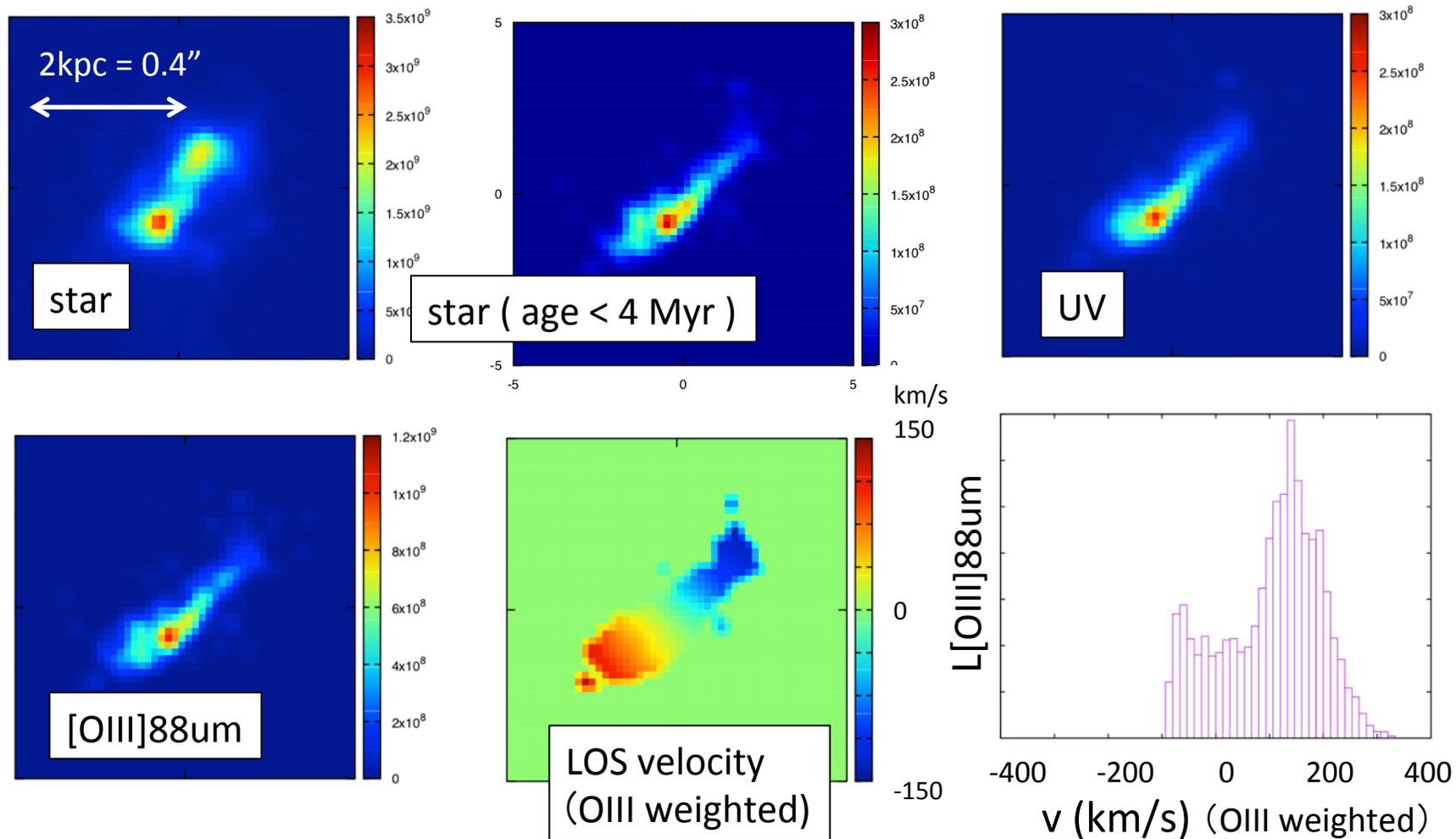


(ii) 個々の銀河における輝線の空間分布

$M^* = 24e8 \text{ Msun}$

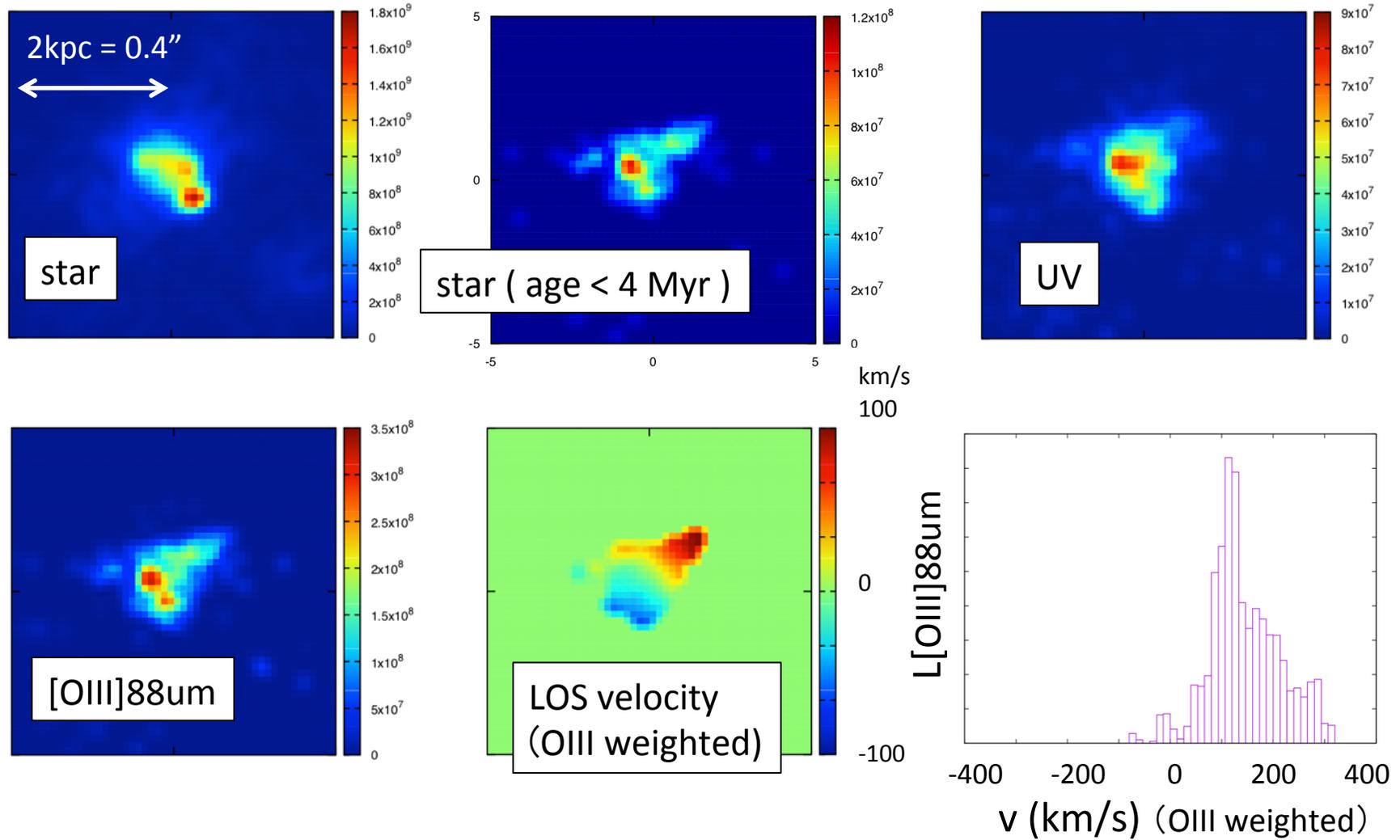
$OIII = 40e7 \text{ Lsun}$

$SFR = 26 \text{ Msun/yr}$



(ii) 個々の銀河における輝線の空間分布

$M^* = 14e8 \text{ Msun}$
 $OIII = 16e7 \text{ Lsun}$
 $SFR = 13 \text{ Msun/yr}$

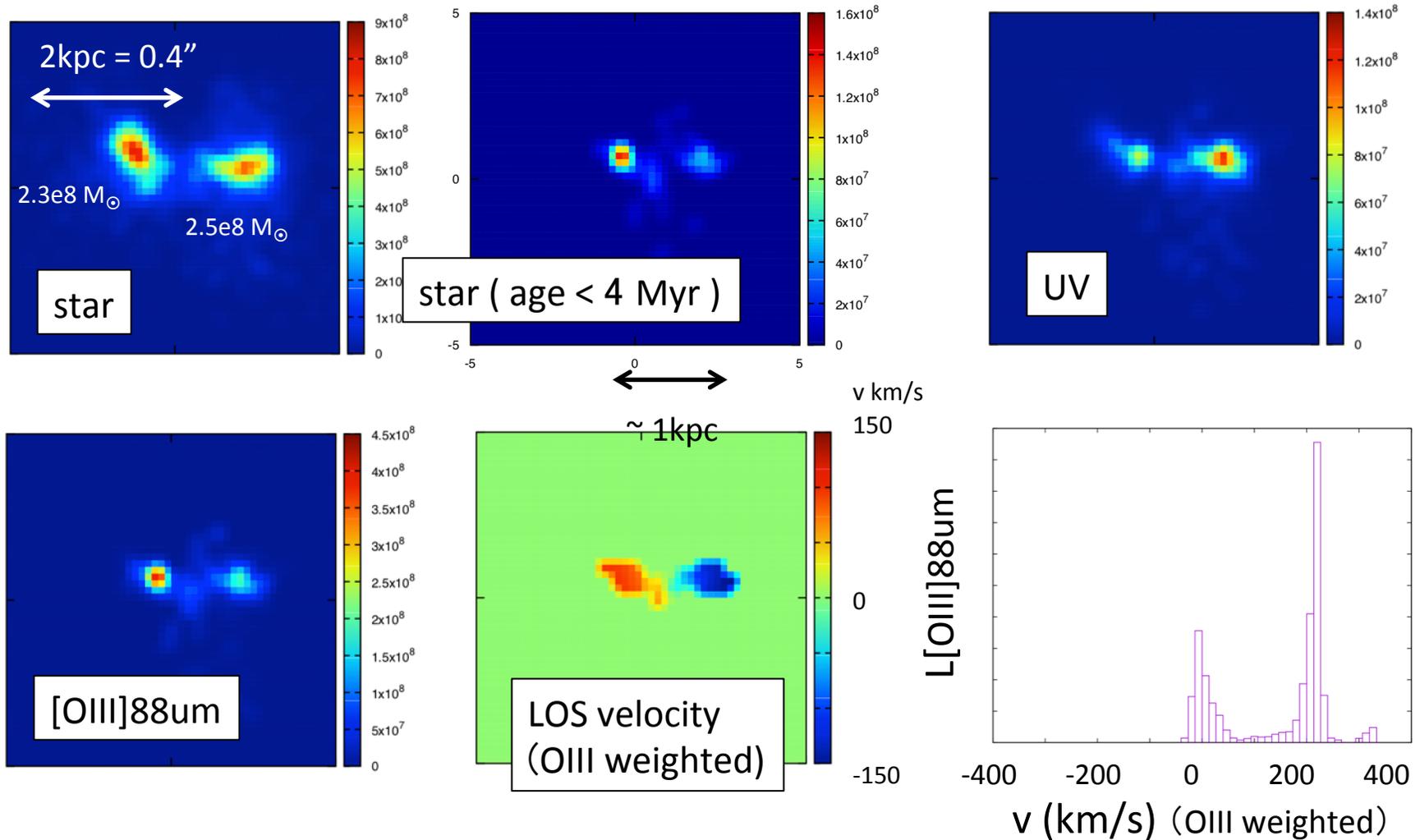


(ii) 個々の銀河における輝線の空間分布

$M^* = 5.8e8 M_{\text{sun}}$

$OIII = 8e7 L_{\text{sun}}$

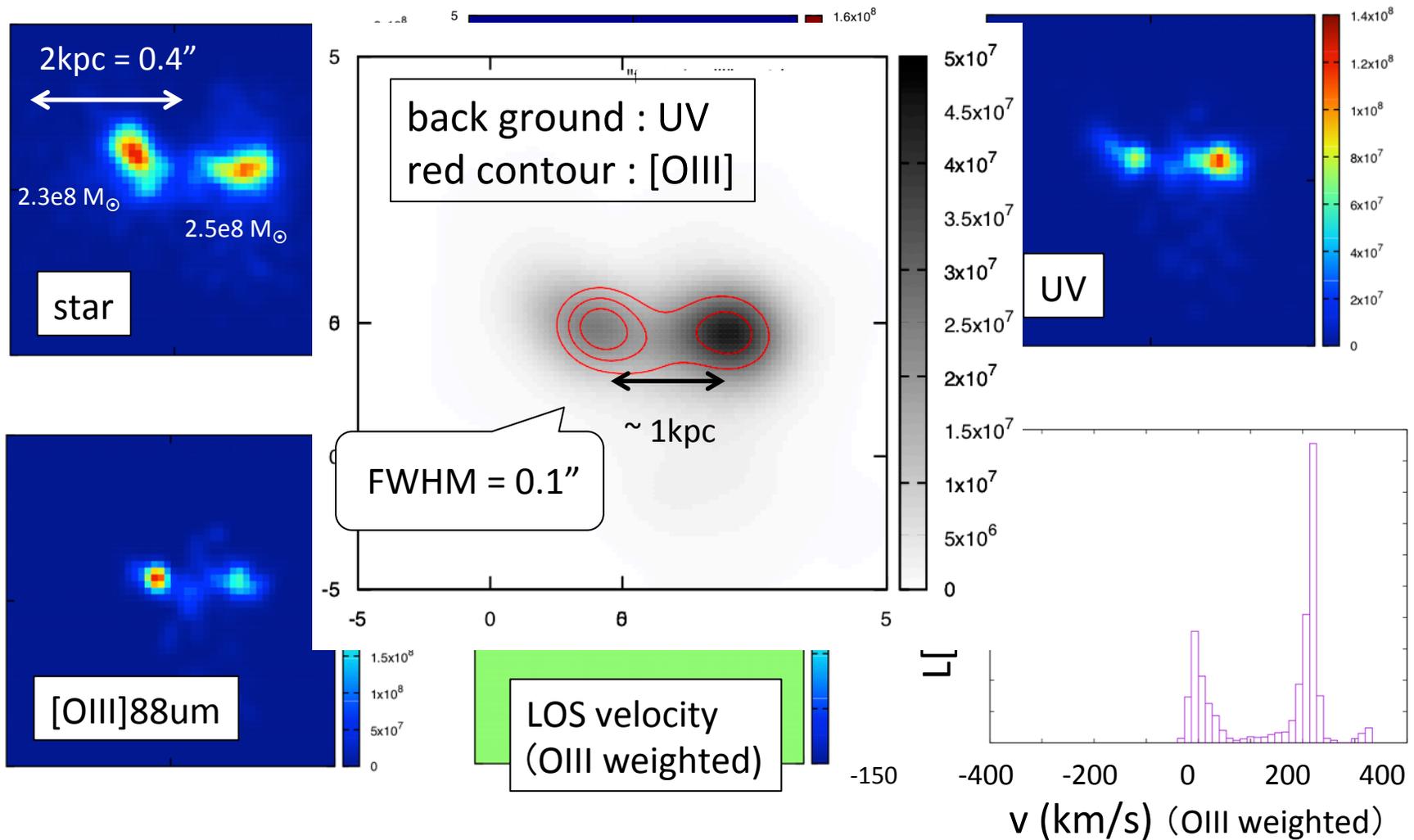
$SFR = 4.3 M_{\text{sun/yr}}$



(ii) 個々の銀河における輝線の空間分布

$M^* = 5.8e8 \text{ Msun}$
 $OIII = 8e7 \text{ Lsun}$
 $SFR = 4.3 \text{ Msun/yr}$

観測されているオフセットを説明する



まとめ

- 宇宙論シミュレーションで得られた銀河に対して、HII領域からの輝線強度の計算を行った
 - HII領域における輝線強度のガス密度依存性は、[OIII]88umで小さく、[CII]158umでは大きい
 - PDRなど、HII領域以外の寄与の計算が必要
- L [OIII]88um $\sim 1e8 L_{\odot}$ の銀河内の分布を調べた
 - multi-component
 - スペクトルにダブルピーク ($\sim 200\text{km/s}$)
 - 輝線と UV continuum の分布が異なる ($\sim 1\text{kpc}$)

今後の課題

- 輝線強度の計算
 - 電離光子の脱出確率 f_{esc} (or ϵ) を変化させて輝線強度を計算
 - PDR 領域のモデルを取り入れて輝線ごとの空間分布を調べる
- zoom-in シミュレーション