

# 初代星由来の銀河間物質重元素汚染

桐原 崇亘 (千葉大学)

共同研究者

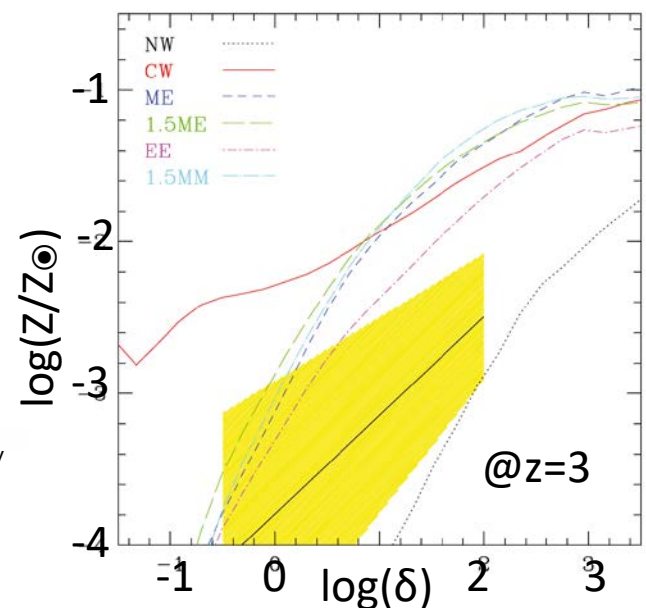
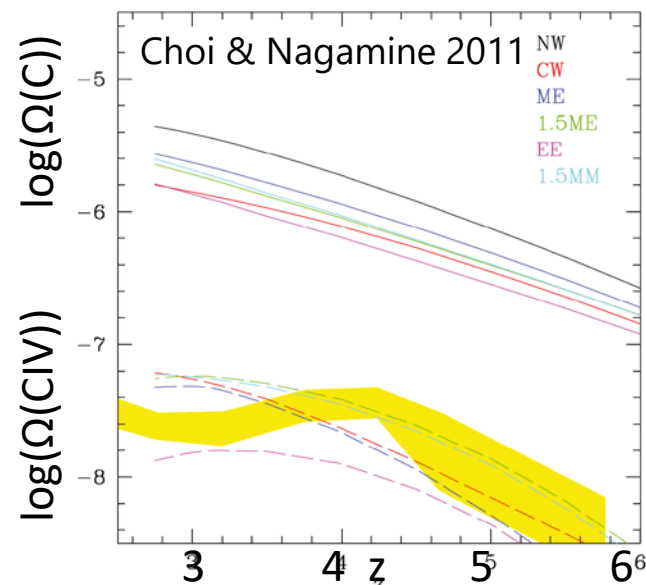
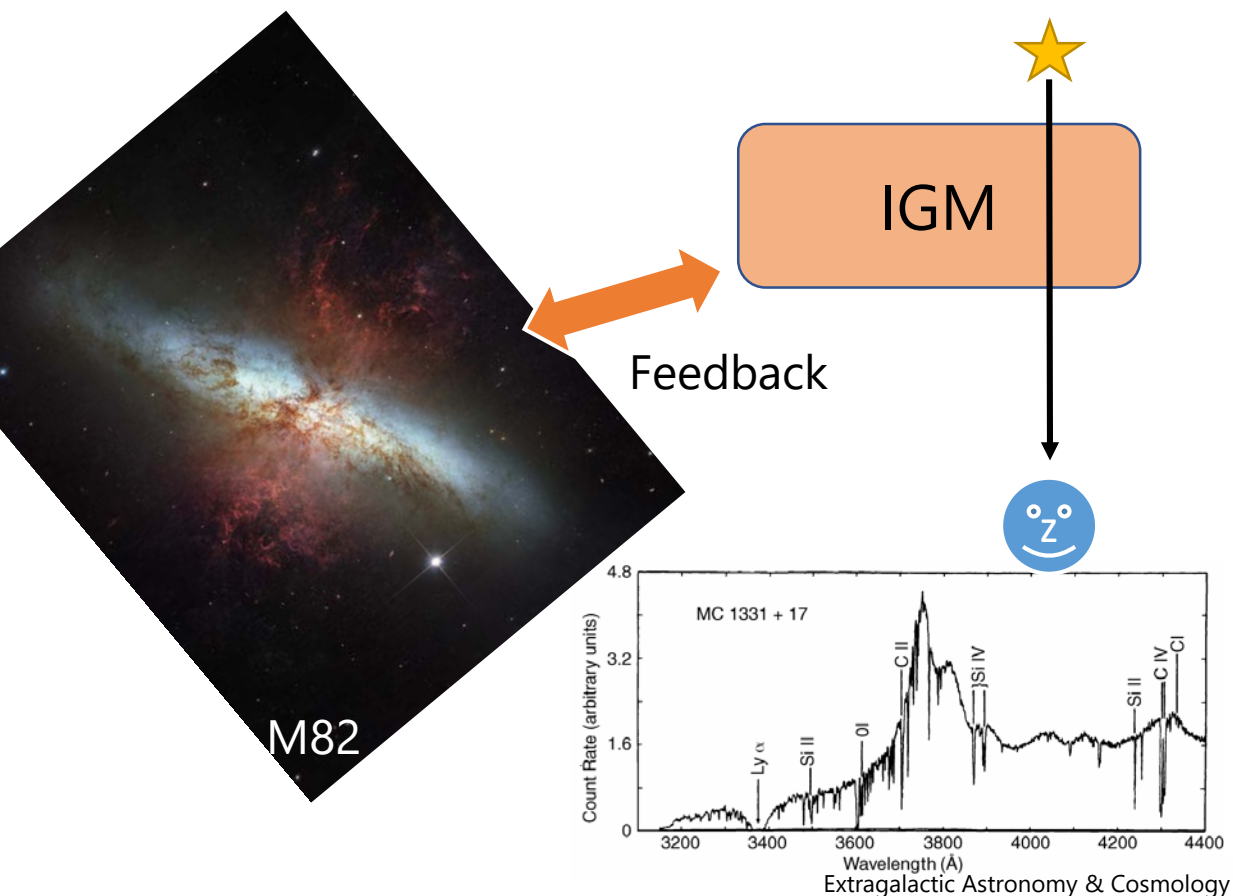
梅村 雅之, 森 正夫(筑波大学), 長谷川 賢二(名古屋大学),  
石山 智明(千葉大学), 鈴木 尚孝, 大内 正己(東京大学)

# Outline

- 銀河間物質(IGM)の重元素汚染と天体形成
- 初代星形成と重元素汚染
- 初代星由来の重元素汚染モデルと分布
- absorbersの疑似観測

# IGMの重元素汚染と天体形成

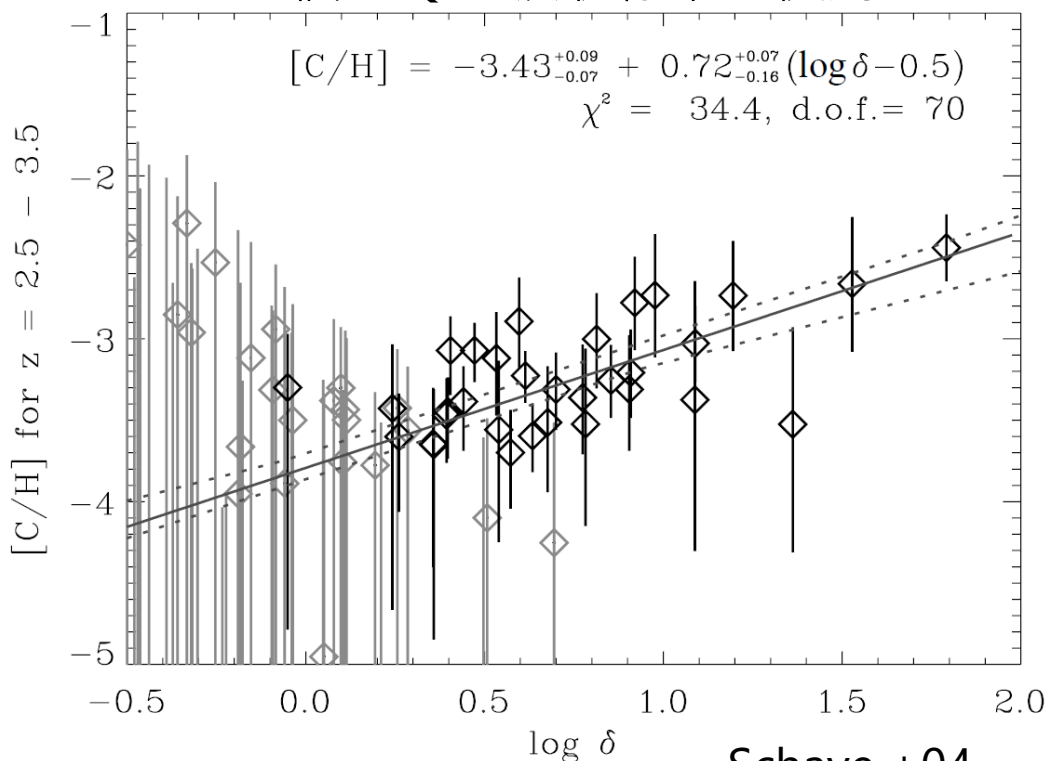
背景QSO・銀河吸収線の観測からIGMのMetal分布やMetallicity, 温度等の情報が得られる



宇宙論的流体計算により銀河からのoutflowによる重元素汚染の詳細が調べられてきた

# IGM重元素汚染のKey questions

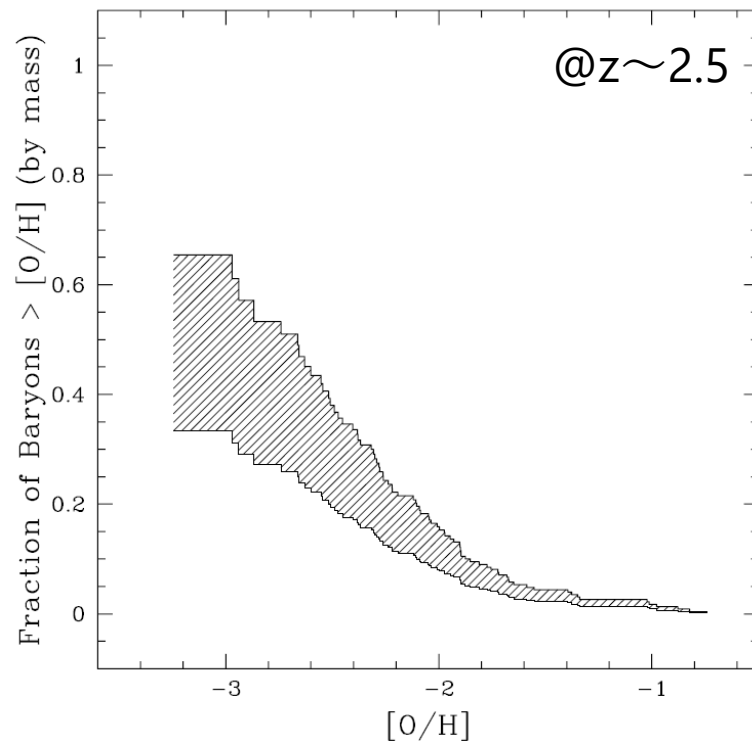
Metallicity of IGM @z=3  
19個のQSO吸収線系を使用



Schaye +04

Carbon の $\delta$ 依存性は見られる。  
 $z$ 依存性は $z=1.8-4.1$ でみられない。  $[C/H] \sim -3$   
一方,  $z=0$ では $0.1 Z_{\odot}$  (Cen +01他)

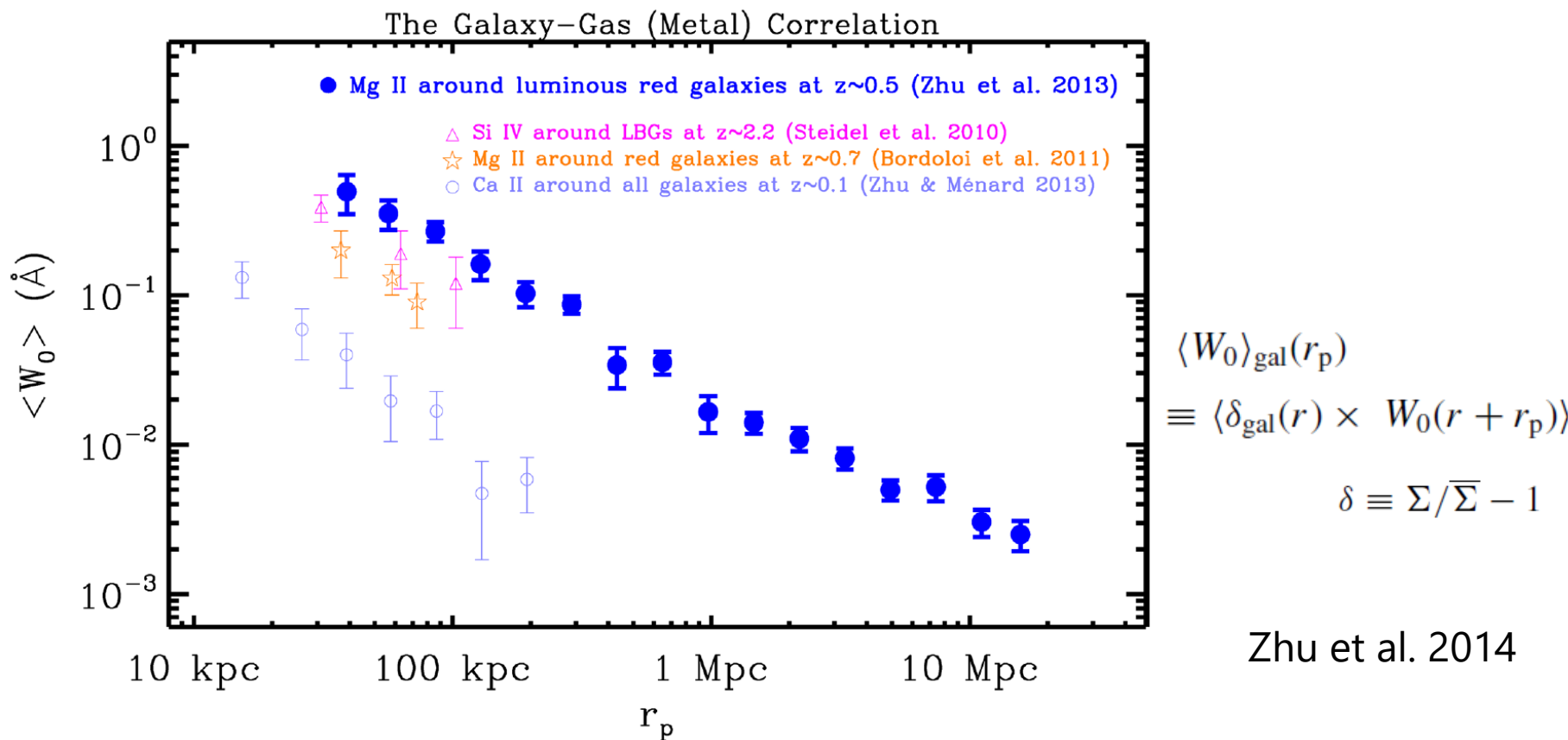
Inhomogeneity of IGM  
Enrichment mass function



Simcoe+04

Massにして50%程度のBaryonが  
Metal enrichmentを受けている.

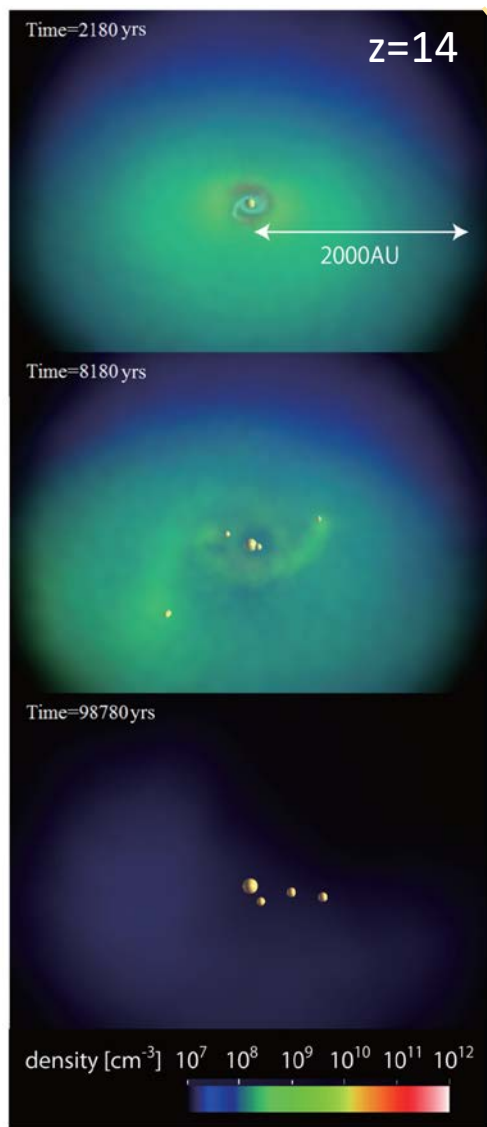
# 銀河由来のCGM, IGMの重元素汚染



銀河の位置とその周辺的气体によりinduceされたEWとの相関  
 銀河のサイズを大きく超えた半径で重元素吸収線EWとの間に相関関係

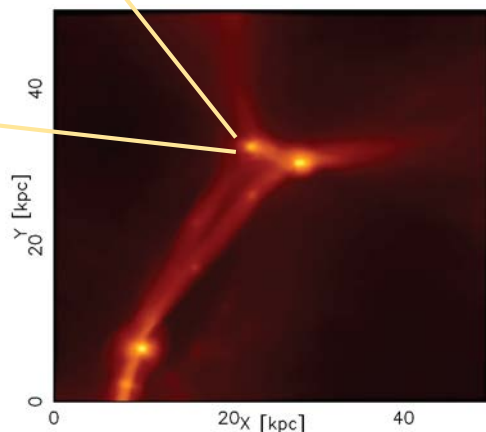
# 構造形成中の初代星形成

Susa+14

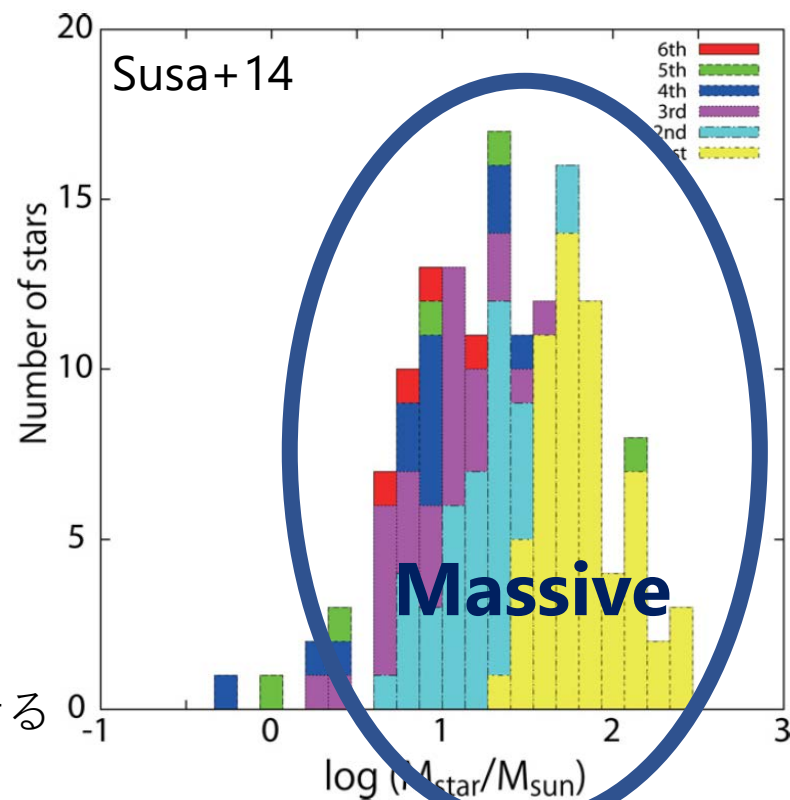


Primordial gasからの星形成

(H, He, Li)



H<sub>2</sub> Cooling でCollapseさせる



他 Hirano+15 etc.

IMFは初代星の痕跡を知る上で本質的には重要  
(現時点で議論は収束していない)

金属欠乏星, 高赤方偏移銀河, 銀河間物質重元素(本研究)<sup>6</sup>

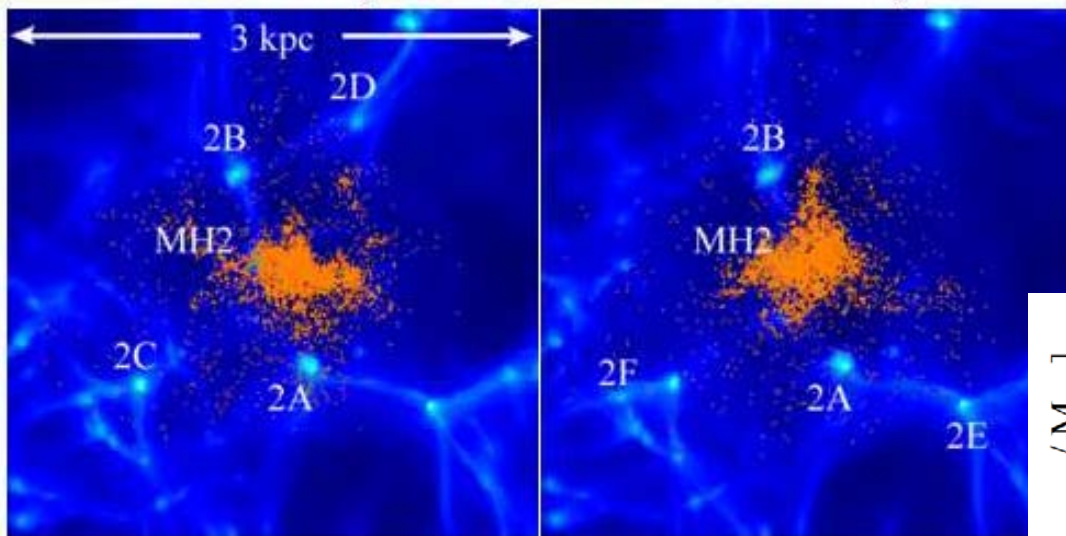
# popIII 重元素汚染の数値計算

Chiaki, Susa, and Hirano 2018

PISN in MH2 ( $M_{\text{halo}} = 3 \times 10^5 M_{\odot}$ )

170  $M_{\odot}$

200  $M_{\odot}$



Recipe

zoom-in cosmological sim.

popIII formation

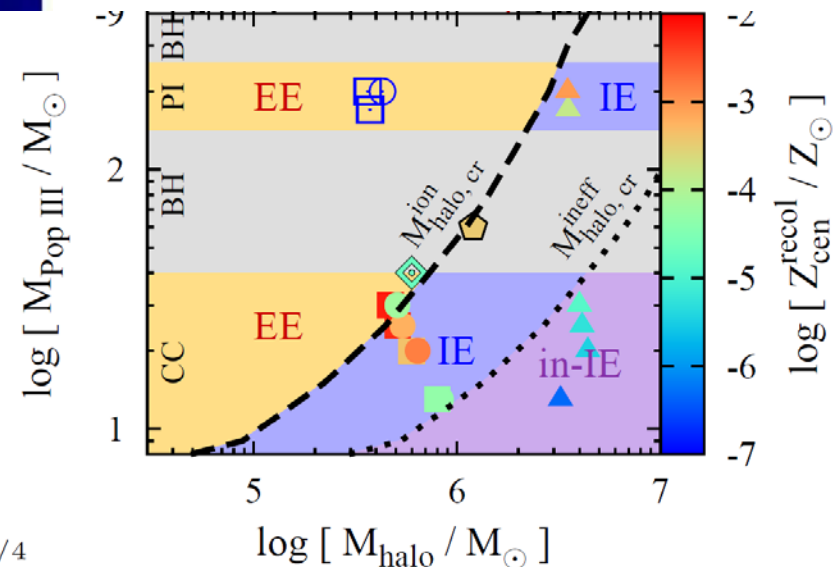
radiative FB

SN FB

ミニハロー中でPISNを起こすと基本的に  
External Enrichment (EE) する

$$M_{\text{halo,cr}}^{\text{ion}} \simeq 6 \times 10^5 M_{\odot}$$

$$\times \left\{ \left( \frac{M_{\text{PopIII}}}{25 M_{\odot}} \right) \left[ 1 - \exp \left( -\frac{M_{\text{PopIII}}}{25 M_{\odot}} \right) \right] \right\}^{3/4}$$

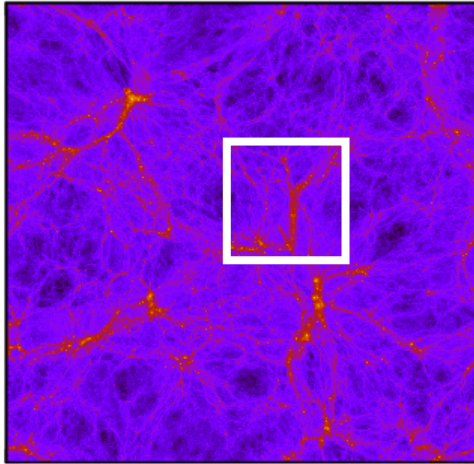




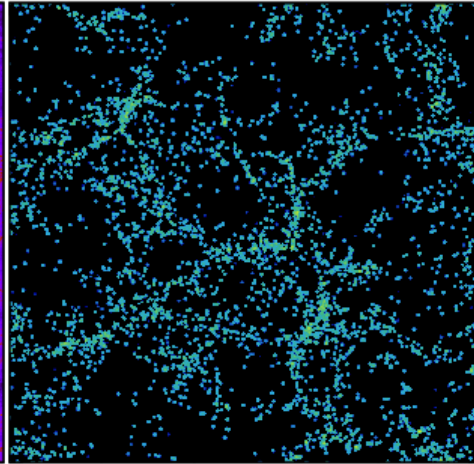
# 本研究のシミュレーション概略

目的: IGM重元素汚染における初代星の寄与を調査する

Matter



pure Pop III gas



データ: Ishiyama +16

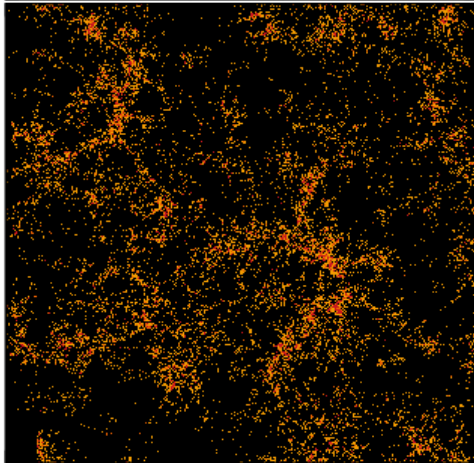
宇宙論的 $N$ 体計算

✓  $N=2048^3$

✓ Boxsize:  $8 h^{-1} \text{cMpc}$

✓ 最小ハロー質量:  $2.4 \times 10^5 M_\odot$

+popIII星形成モデル



Full popIII

150 pkpc slice

**Step1. popIIIミニハローリスト作成** (石山氏)

popIIIミニハローは $z > 10$ で形成

**Step2. 重元素汚染源の $z=3$ での分布を調査**

◆ sample 1. Pure popIII gas

Merger treeを探索し,  $z=3$ までMergerを経験しない  
popIIIミニハローを選出

◆ sample 2. Full popIII sample

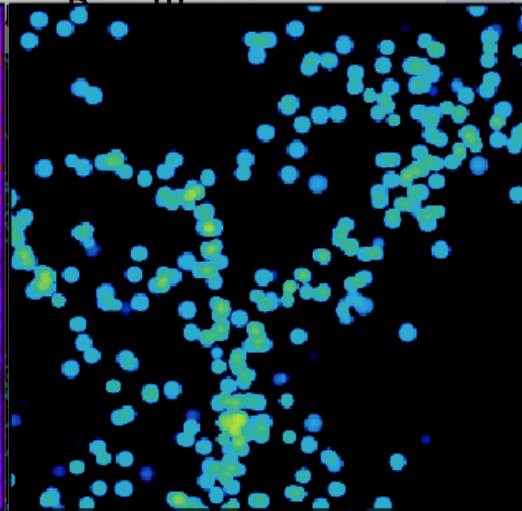
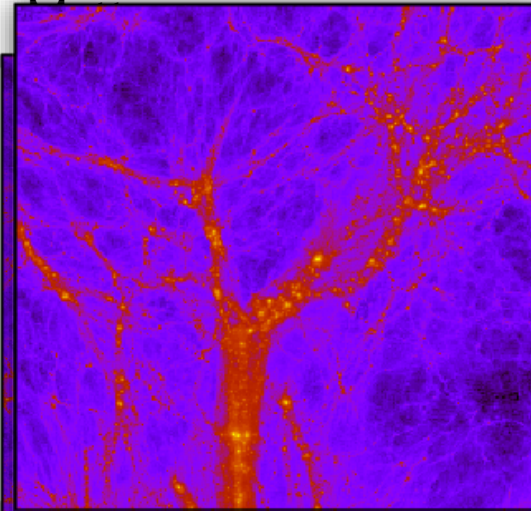
**Step3. 準解析モデルで汚染半径を推定**

**Step4. 背景スペクトル上に得られる吸収線を解析** 8



# 本研究のシミュレーション概略

目的: IGM重元素汚染における初代星の寄与を調査する



データ: Ishiyama +16

宇宙論的 $N$ 体計算

$N=2048^3$

Boxsize:  $8 h^{-1} \text{cMpc}$

最小ハロー質量:  $2.4 \times 10^5 M_{\odot}$

popIII星形成モデル

**Step1. popIIIミニハローリスト作成** (石山氏)

popIIIミニハローは $z > 10$ で形成

**Step2. 重元素汚染源の $z=3$ での分布を調査**

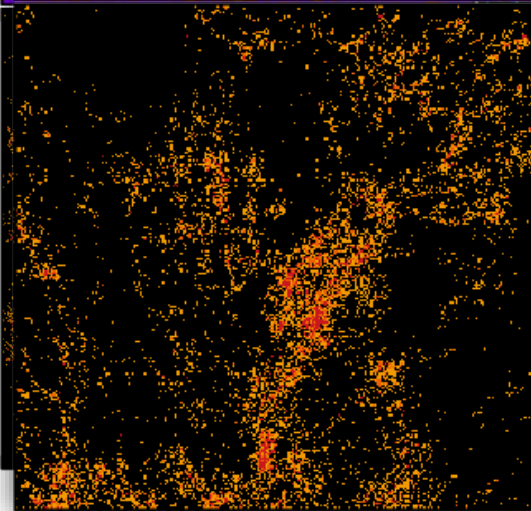
◆ sample 1. Pure popIII gas

Merger treeを探索し,  $z=3$ までMergerを経験しない  
popIIIミニハローを選出

◆ sample 2. Full popIII sample

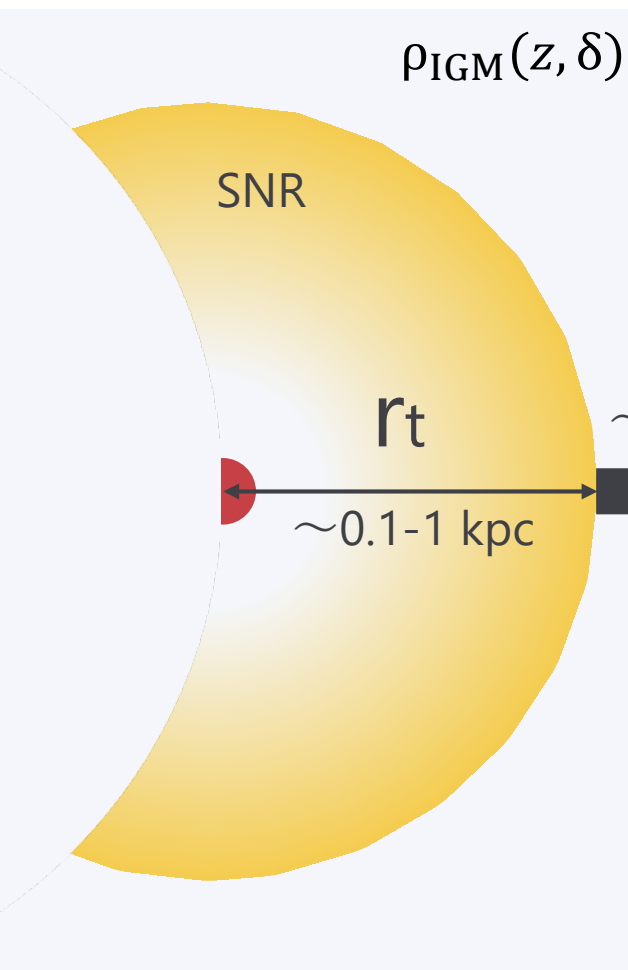
**Step3. 準解析モデルで汚染半径を推定**

**Step4. 背景スペクトル上に得られる吸収線を解析**



150 pkpc slice

# 準解析的汚染半径モデルの概要



宇宙膨張の効果考虑した運動量保存雪かきモデル

dtの間に掃くIGM質量

$$(M_{(r < r_i)} + 4\pi r_i^2 \rho_{\text{IGM}}(z, \delta) (v(t) - v_H(z, \delta)) dt) v(t + dt)$$

$$= A_i + 4\pi r_i^2 \rho_{\text{IGM}}(z, \delta) (v(t) - v_H(z, \delta)) dt v_H(z, \delta)$$

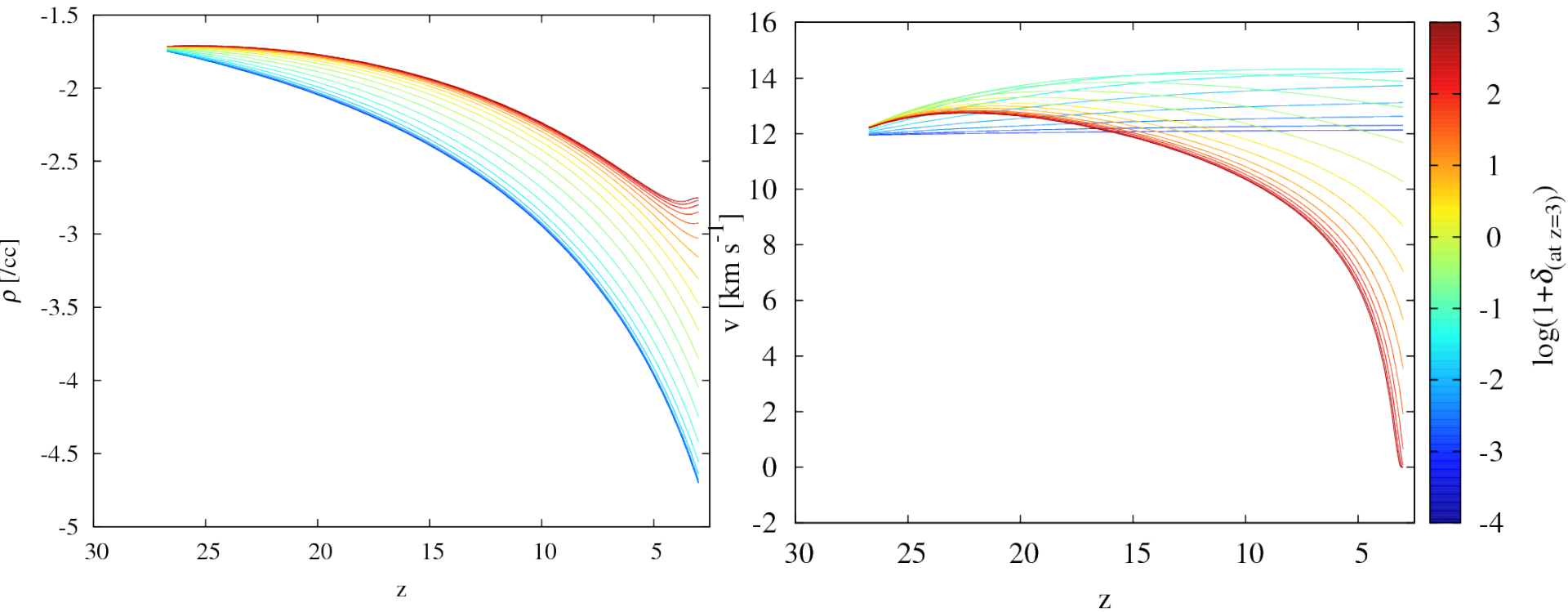
IGMから受け取る運動量

~数km/s

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}(t) - \mathbf{V}_H$$

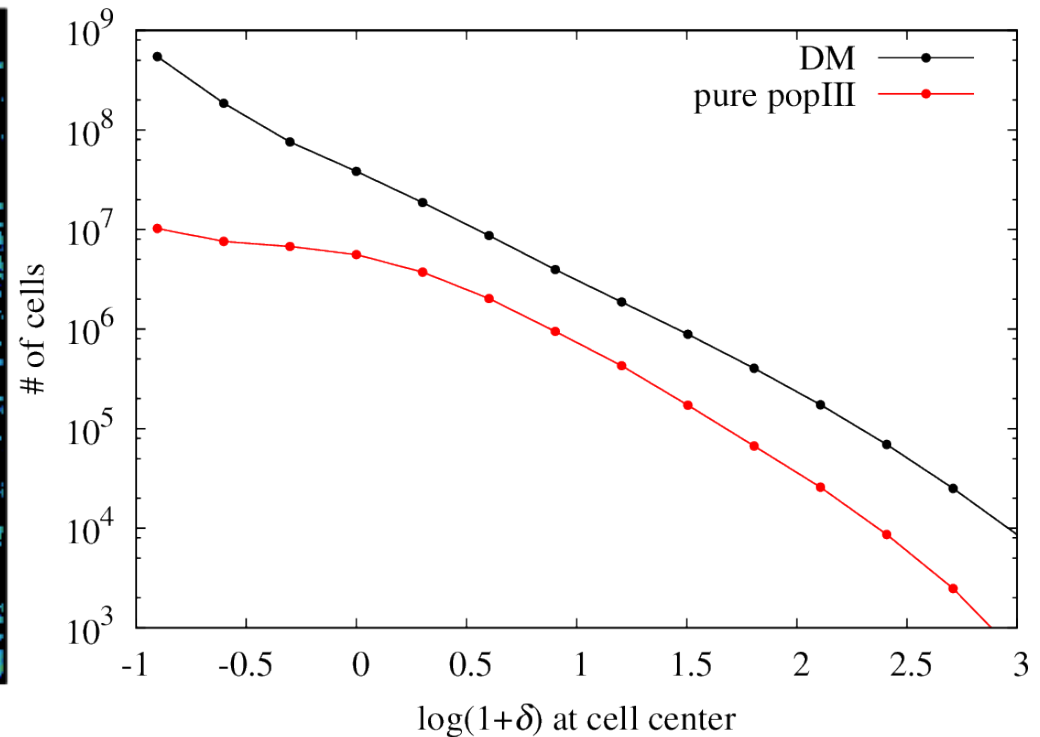
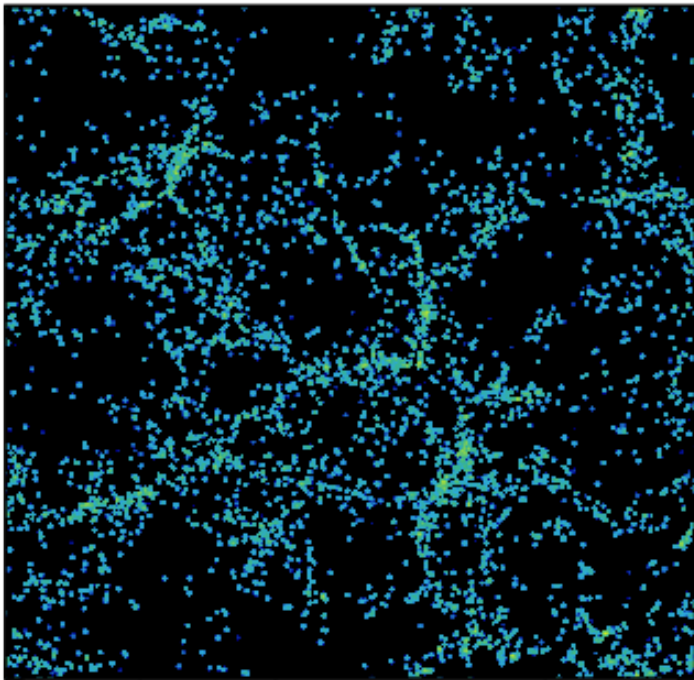
- ✓ 初期の運動量, 速度, 半径はChiaki+18計算より取得
- ✓  $\rho_{\text{IGM}}(z, \delta)$ ,  $v_H(z, \delta)$  は宇宙膨張と重力収縮が Consistentになるように扱う
- ✓ Overdensity  $\delta$  はpopIII sampleごとに Cosmological simulationから取得

# 密度・速度の時間進化のIGM $\delta(z=3)$ 依存性



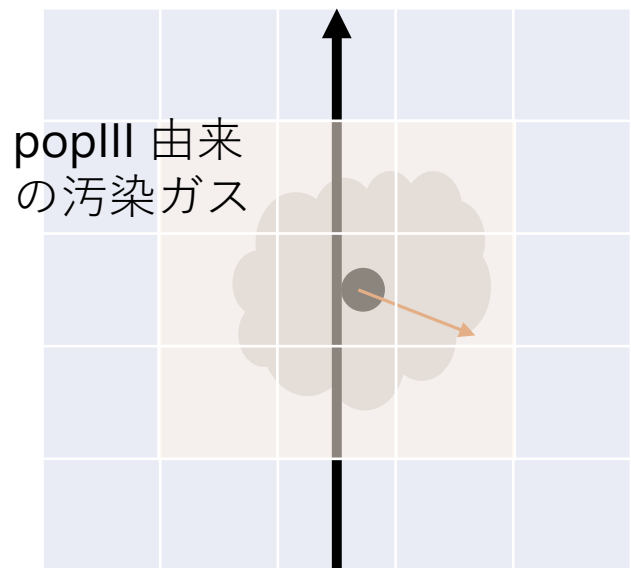
- 掃き集めたIGMを含む汚染ガスの密度・速度情報を得た
- 低密度なIGM中では, 質量増加が小さいため減速しづらい
- 周辺のIGMが比較的高密度であれば, IGMからの運動量 injectionはあるものの減速する

# popIII星由来のガスの分布



$\delta \sim \text{several}$ の領域を最も効率的に重元素汚染する  
Underdens regionも% orderで重元素汚染する

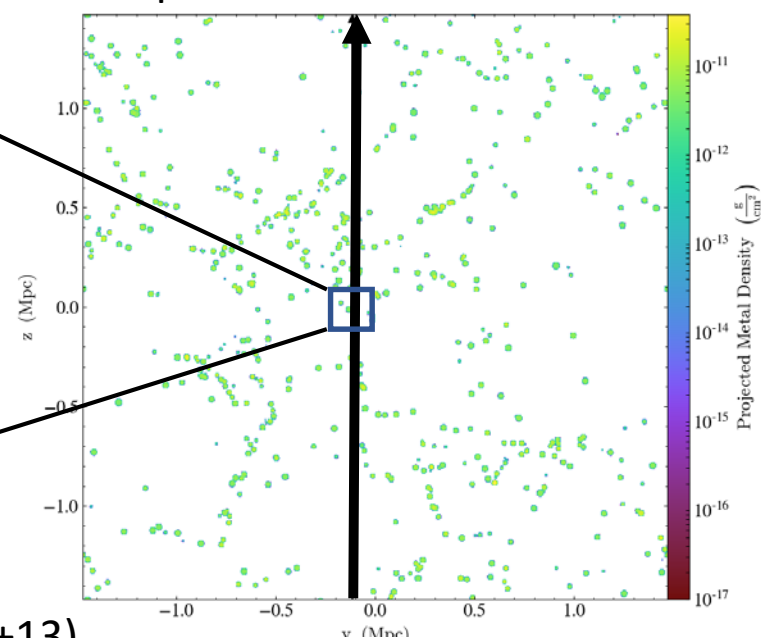
# popIIIによる汚染ガス雲解析の概略



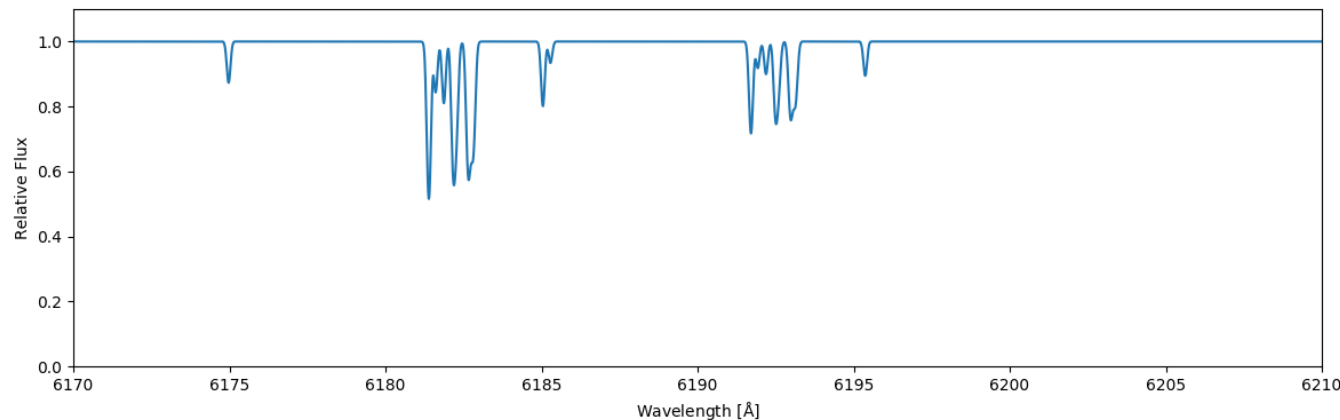
Cloudの温度:  $10^4\text{K}$

abundance pattern: 200 Msun PISN yield (Nomoto+13)

Pop III起源の金属量分布

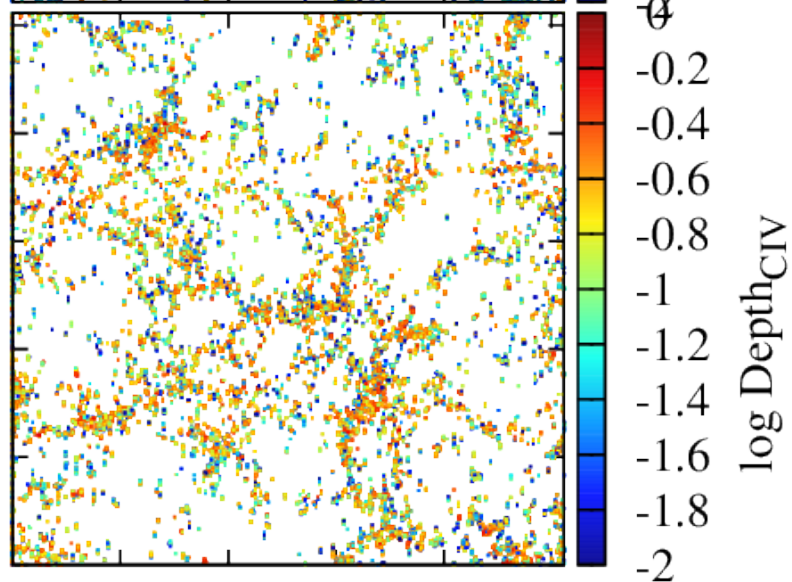
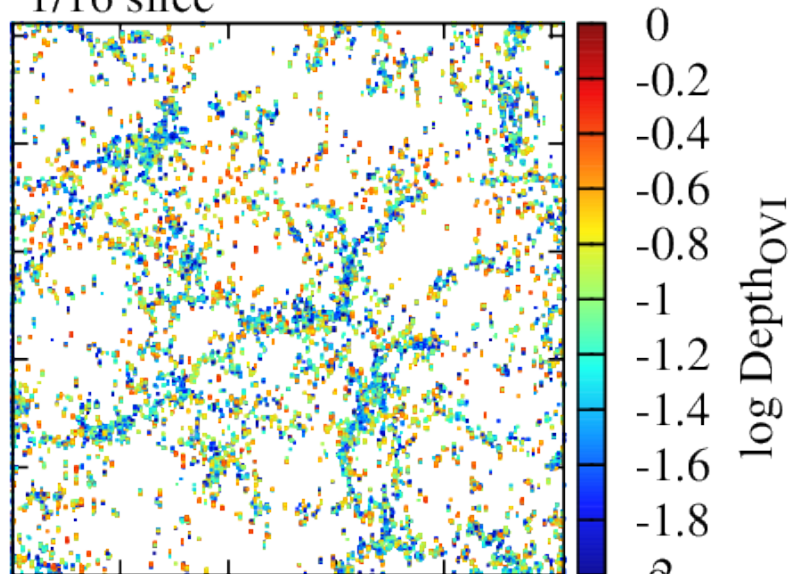


CIV 吸収線

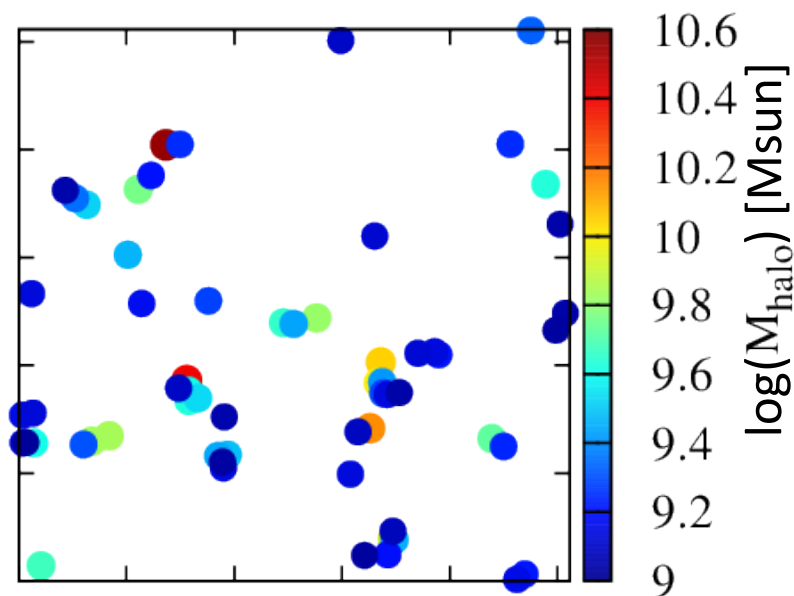


# pure popIII absorberの吸収線の特徴

1/16 slice



PISN 200 Msun case



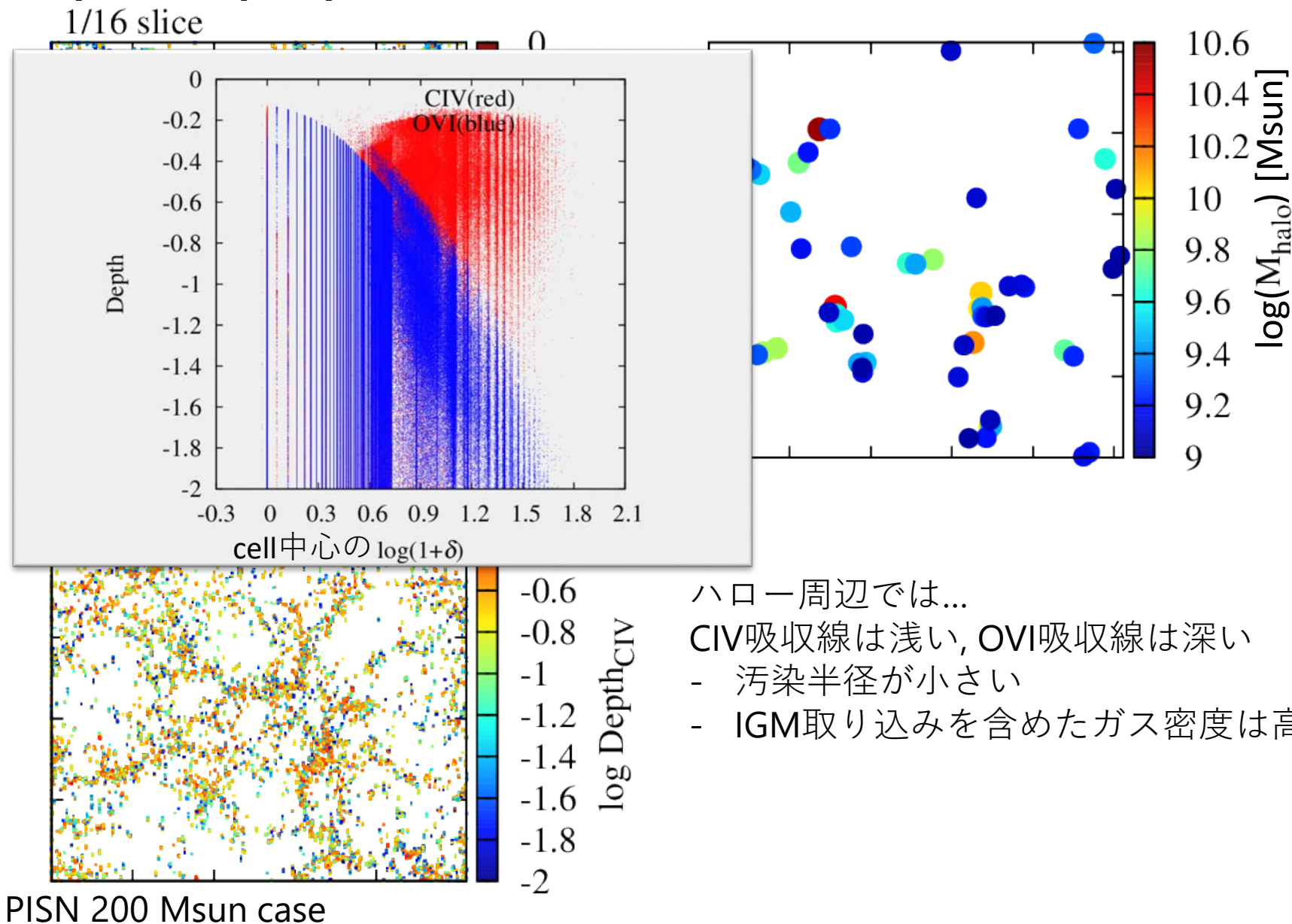
ハロー周辺では...

CIV吸収線は浅い, OVI吸収線は深い

- 汚染半径が小さい
- IGM取り込みを含めたガス密度は高い



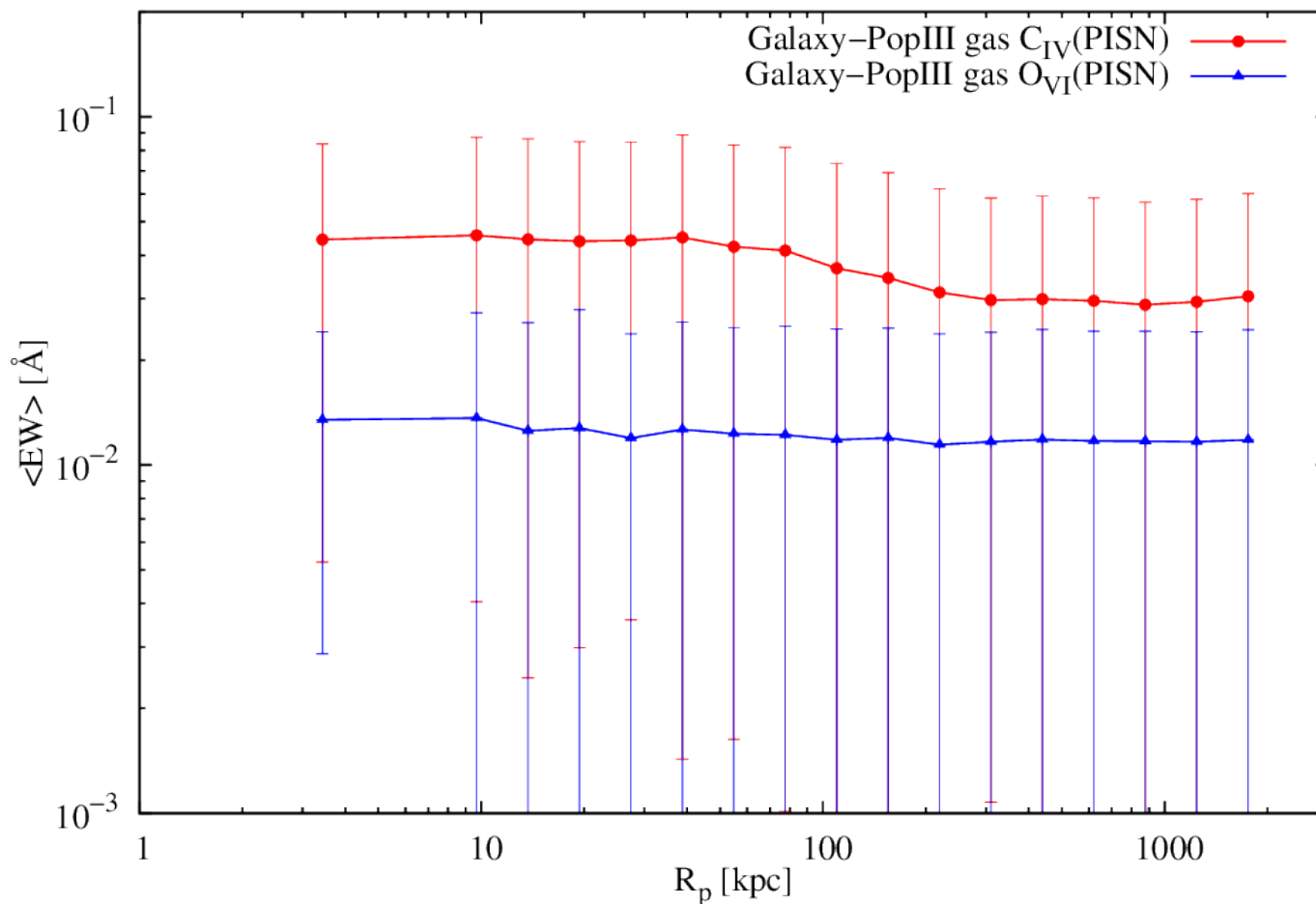
# pure popIII absorberの吸収線の特徴





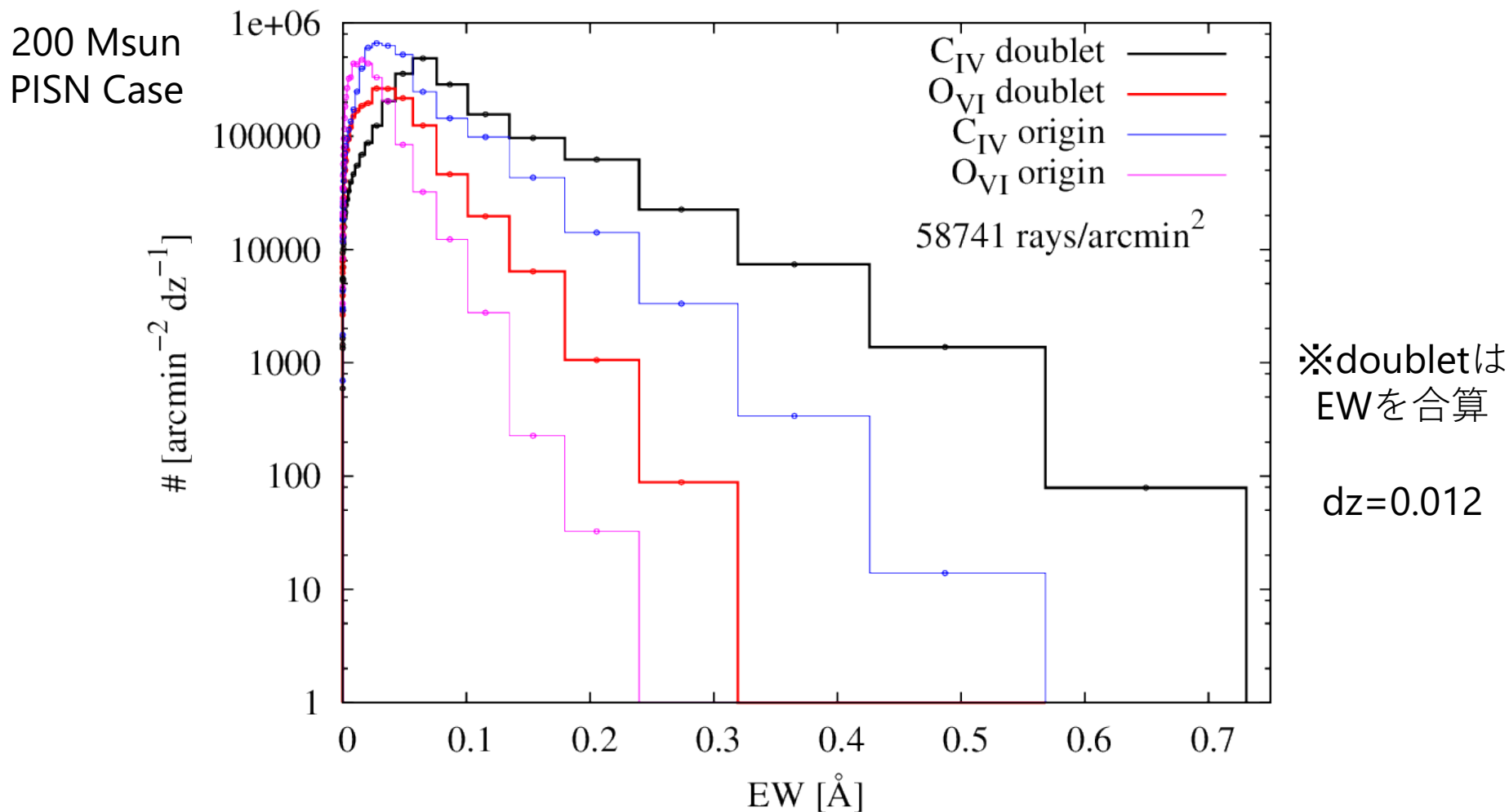
# 銀河位置と吸収線EWの相関

銀河ハロー:  $M_{\text{halo}} > 5 \times 10^{10} M_{\odot}$



銀河からのProjectedな距離に対する顕著な依存性はみられない  
吸収の深さは、よりLocalな $\delta$ に依存するためと思われる

# PopIII起源ガスの深い吸収は得られるか？



EW<sub>CIV</sub> > 0.3 Å で数万個 arcmin<sup>-2</sup> dz<sup>-1</sup> 程度

# Summary

- $z = 3$ における初代星由来の重元素によるIGMの重元素汚染の様子を調査した。
- **popIII ミニハローを分解する**高解像度宇宙論的 $N$ 体計算の結果を用いて疑似観測を行った。
- $z=3$ に至るまでpureであるpopIIIガスには、銀河からの距離に対する依存性が確認されなかった。
- Absorber単体のOVI, CIV等価幅は小さいが、視線上でのを被りを考慮することで $EW_{\text{CIV}} > 0.3 \text{ \AA}$ で数万個  $\text{arcmin}^{-2} \text{ dz}^{-1}$ 程度のPure popIII absorberが存在することがわかった。