

pop III 天体による銀河間重元素の 検出可能性

筑波大学（M2）

田辺直人

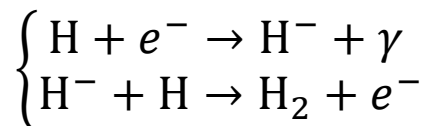
population III

- $z \geq 20$ にできた宇宙の最初の星
- 重元素がなく水素とヘリウムで占められており、popIIIの進化・超新星爆発により重元素が生成・放出
- 未発見の星で、銀河形成の影響のない銀河間などで超新星爆発の痕跡の発見が期待されている
- 重力収縮を起こす最小質量のジーンズ質量

$$M_J = \left(\frac{kT}{G} \right)^{\frac{3}{2}} m_p^{-2} n^{-\frac{1}{2}}$$

で温度が低下するとpopIIIの形成が可能

自由電子を触媒とした



により水素分子をつくり、水素分子の放射冷却によりガスの温度を低下させることで圧力低下しpopIIIが形成

本研究の目標

- 先行研究のpop I ・ II の爆発による重元素の汚染のシミュレーションと、pop III の爆発による重元素放出の汚染を比較する
- pop I ・ II が観測されない領域でのpop III の爆発による重元素汚染を、実際の観測が可能かどうか数値計算によって考察する

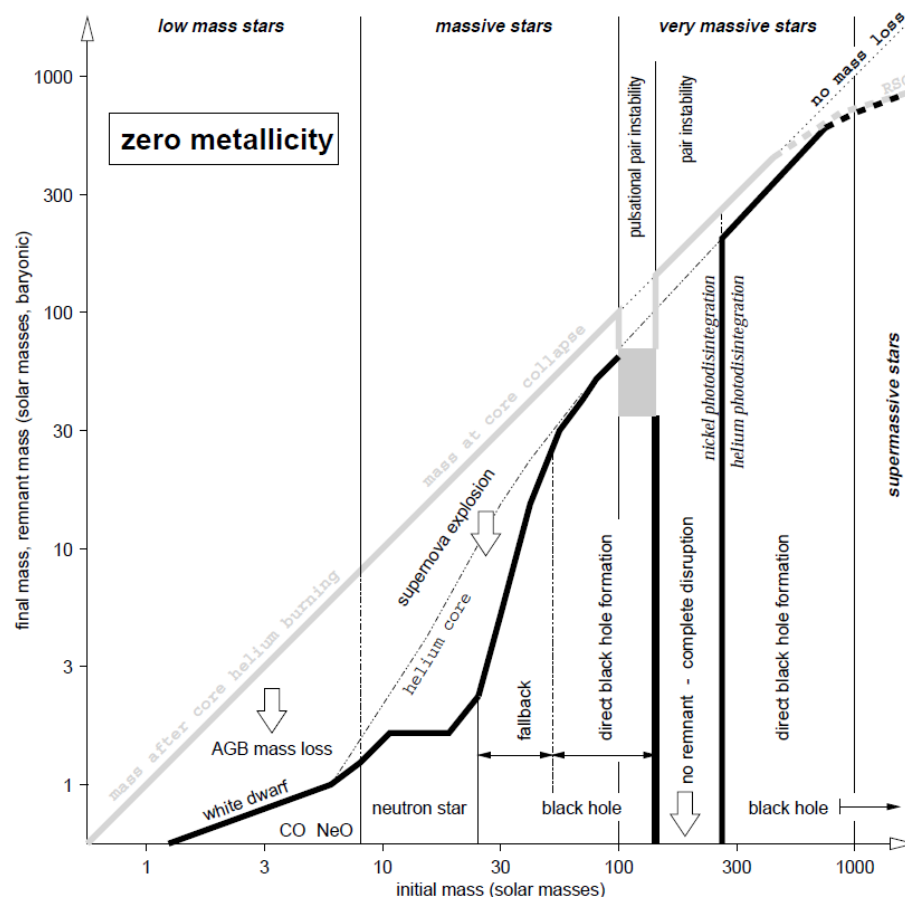
pop III の超新星爆発

■ 星の質量により機構や超新星爆発で放出される元素の特徴が異なる

- CCSN (重力崩壊型長超新星爆発)
 $8M_{\odot} \sim 100M_{\odot}$
- PISN (電子対生成型超新星爆発)
 $140M_{\odot} \sim 300M_{\odot}$
- PPISN (pulsational PISN)
 $100M_{\odot} \sim 140M_{\odot}$

➤ データでは $8M_{\odot} \sim 300M_{\odot}$ を使用
(Nomoto et al. 2013)

Heger & Woosley (2002)



GADGETO (Okamoto et al. 2014)

■ Tree-PM SPHコードGADGET-3に岡本さんの星形成・feedback model(**TO**)を追加(GADGET**TO**)

- Λ CDMモデル(Planck2013)

$$\Omega_0 = 0.318, \Omega_{\Lambda 0} = 0.682, \Omega_{b0} = 0.049, \sigma_8 = 0.835, \\ n_s = 0.962, H_0 = 100h^{-1}\text{Mpc}^{-1}, h = 0.67$$

- 冷却/加熱率は11元素(H,He,C,N,O,Ne,Mg,Si,S,Ca,Fe)をそれぞれ計算

- **星形成**：星形成条件で星形成率に応じて星粒子を生成

- **feedback**

超新星爆発：周囲のSPH粒子に運動エネルギー、重元素を与える

AGN：AGNによる銀河団中心での冷却率の低下させる

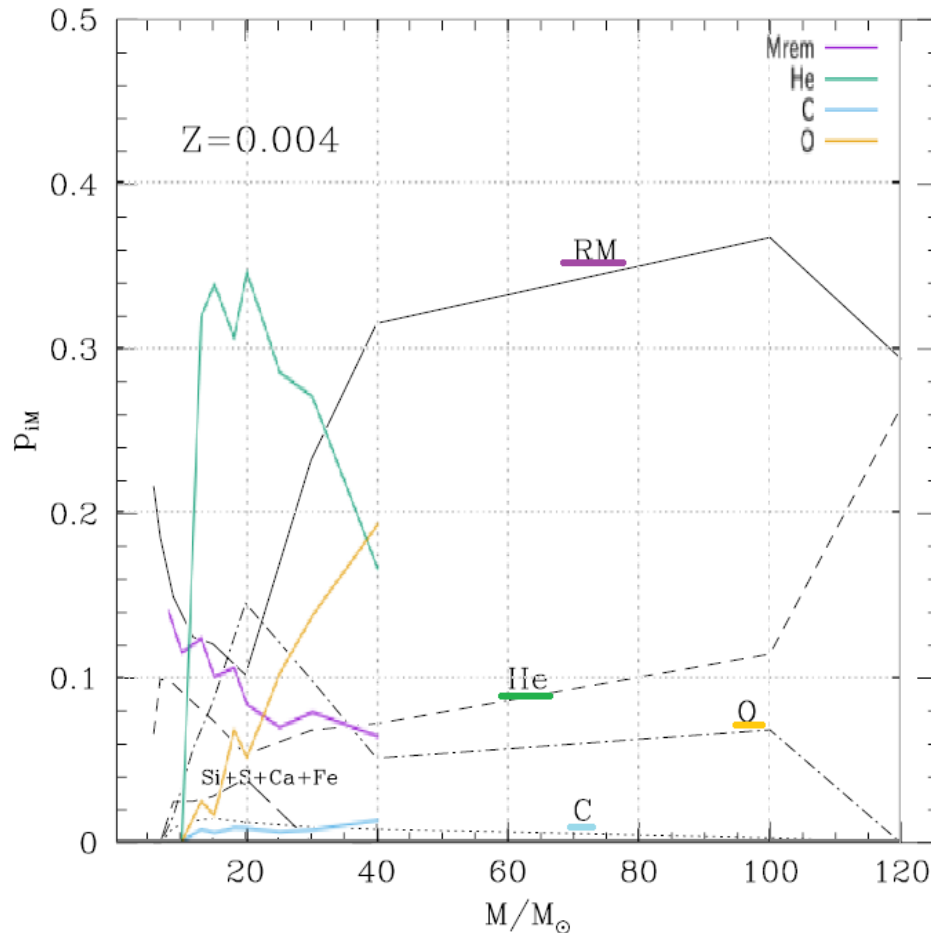
輻射圧：若い星から周囲のSPH粒子に運動量を与える

➤ Pop I II 由来の重元素のデータが組み込まれており、このデータとpop III 由来の重元素を比較・観測可能性について考察する

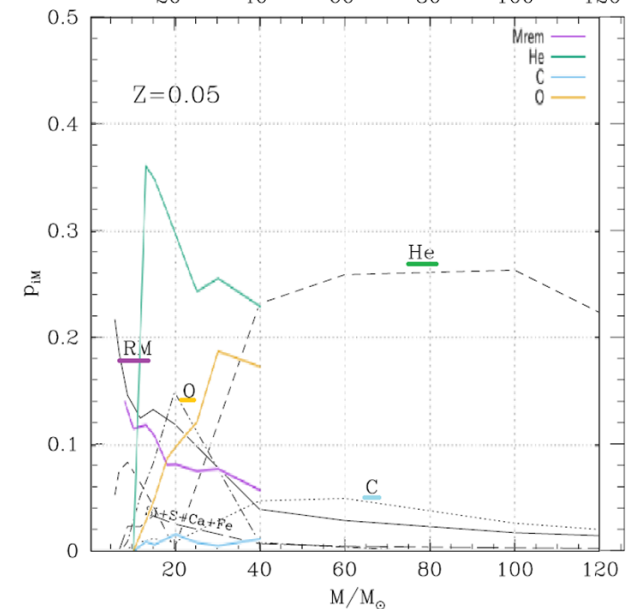
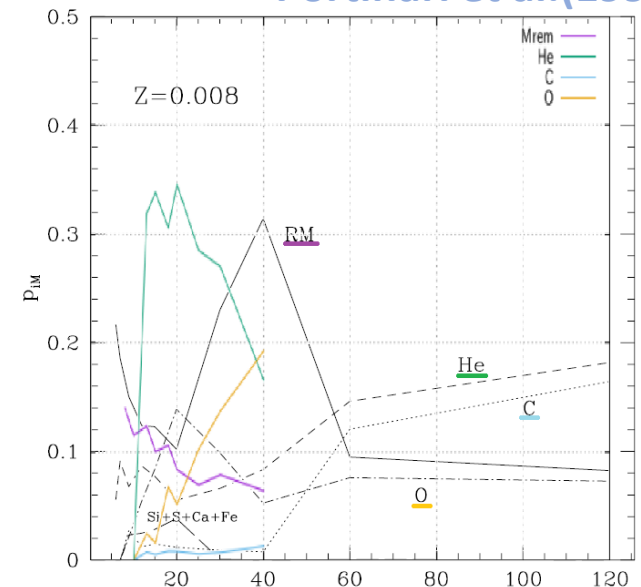
用いるtableのpop I, II とGADGETO内の pop I, II との比較

Portinari et al.(1998)

質量 M/M_{\odot} それぞれの放出される元素
の割合



$8M_{\odot} \sim 40M_{\odot}$ (色線) Nomoto et al. (2013)
 $0.6M_{\odot} \sim 120M_{\odot}$ (黒線) Portinari et al.(1998)



Pop III 由来の重元素汚染(1)

- ダークマターの分布からpop III の情報を入れる

現在まで残っていると仮定される低質量pop III ($0.15M_{\odot} \sim 1.0M_{\odot}$)をDM minihalo中に分布させる (Ishiyama et al. 2016)

ダークマターの密度 ρ_{DM}

$$\rho_{\text{DM}} > \rho_{\text{DM,th}} = \epsilon \overline{\rho_{\text{DM}}} \quad (\epsilon: \text{パラメータ})$$

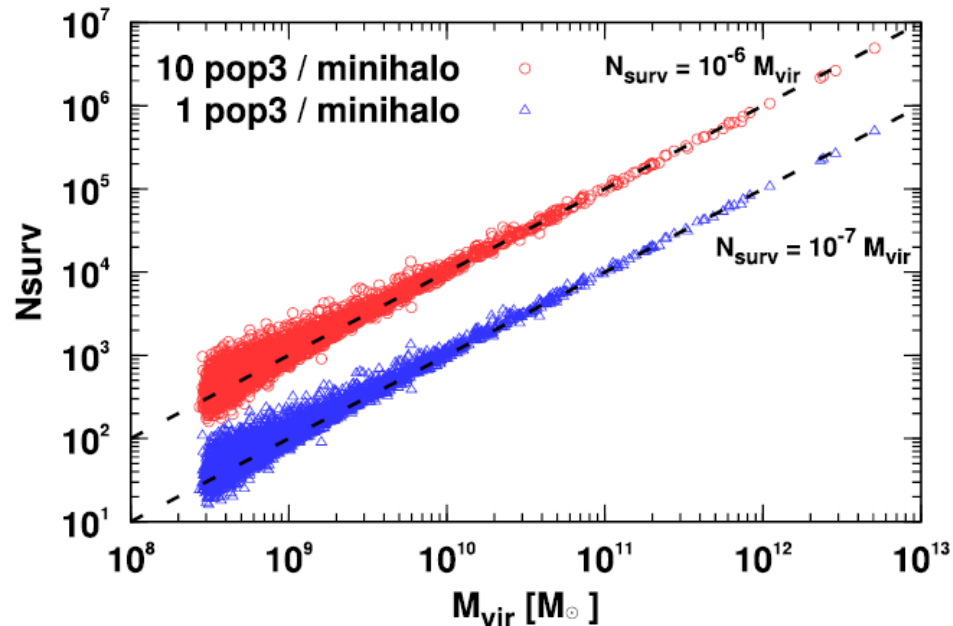
に低質量pop III ($0.15M_{\odot} \sim 1.0M_{\odot}$)の数 N_{surv}

$$N_{\text{surv}} = 10^{-7} n_{\text{pop III}} \frac{M_{\text{vir}}}{M_{\odot}}$$

を入れる ($n_{\text{pop III}} = 1, 10$)

この低質量pop III から、爆発により重元素を放出する

$8M_{\odot} \sim 300M_{\odot}$ のpop III を設定していく



Pop III 由来の重元素汚染(2)

- 超新星爆発により重元素を放出するpop III ($8M_{\odot} \sim 300M_{\odot}$) の質量分布を決める

Kroupa IMF

$$\phi(m) \propto m^{-\alpha_i} \quad \begin{cases} \alpha_0 = +0.3 \pm 0.7 & 0.01 \leq m/M_{\odot} < 0.08 \\ \alpha_1 = +1.3 \pm 0.5 & 0.08 \leq m/M_{\odot} < 0.50 \\ \alpha_2 = +2.3 \pm 0.3 & 0.50 \leq m/M_{\odot} < 1.00 \\ \alpha_3 = +2.3 \pm 0.7 & 1.00 \leq m/M_{\odot} \end{cases}$$

から全質量領域のpop III の数 $N_{\text{pop III}}$

$$N_{\text{pop III}} = N_{\text{surv}} / \int_{0.15M_{\odot}}^{1M_{\odot}} \phi(m) dm$$

を計算、超新星爆発するpop III により放出される重元素 i の質量 $M_{\text{pop III}, i}$ は重元素放出質量 yield , $y_i(m)$ を用いて

$$M_{\text{pop III}, i} = N_{\text{pop III}} \int_{8M_{\odot}}^{300M_{\odot}} y_i(m) \phi(m) dm$$

meshごとのpop III 由来の重元素を計算

Pop III 由来の重元素汚染(3)

- 各mesh n でのequivalent widthの計算(linear regime $\tau_\lambda \ll 1$)

$$W_{\lambda,n} = \int_{-\infty}^{\infty} \tau_\lambda d\lambda \cong \frac{\pi e^2 \lambda^2}{mc} N_n f_{ik}$$

pop III の重元素汚染はmeshサイズ($\sim 100\text{kpc}$)より小さい

⇒mesh内にpop III が複数存在していた場合、pop III 汚染された領域が直線状に並ぶ最大柱密度となるよう N_n を設定

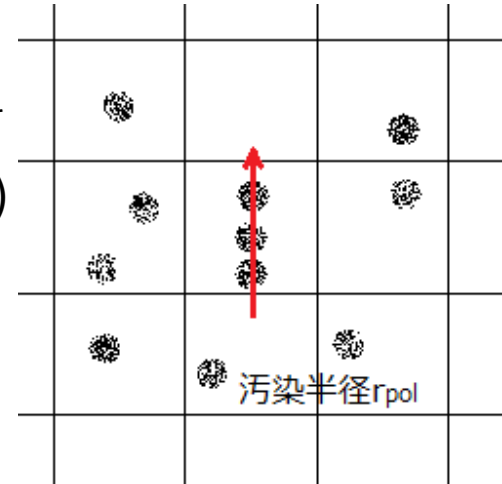
- pop III の爆発により重元素の拡がり（汚染半径）について
星質量・時間進化により汚染半径が依存(Chiaki et al. 2018)

➤ 汚染半径 r_{pol} をまずは 10kpc で計算

- 電離については計算出来ていないため、今は放出される
重元素が同じ電離として計算

各CII, CIII, OII, OIIIの実際に観測された代表的な波長を用いる (NIST)

CII	CIII	OII	OIII
1335.7Å	977.0Å	834.5Å	703.9Å



観測可能性についての議論

- HST（ハッブル宇宙望遠鏡）のCOS（宇宙起源分光器）での観測により議論を行う
- ✓ COSのFUV検出限界：900Å~2000Å ⇒ $z = 0 \sim 1$ のC, Oの波長域
- ✓ 感度：EW > 10mÅ

Figure 3.8: Limiting Equivalent Width of FUV Medium-Resolution Gratings.

Limiting equivalent width as a function of wavelength for 3σ detections of absorption features at a S/N of 10 per pixel at lifetime position 4. Dashed lines represent the full on-orbit LSFs including MFWFEs. Solid lines represent Gaussian LSFs without MFWFEs. The colors correspond to features with intrinsic Doppler parameters $b = 0 \text{ km s}^{-1}$ (black), 10 km s^{-1} (red), 25 km s^{-1} (green), 50 km s^{-1} (blue) and 100 km s^{-1} (purple).

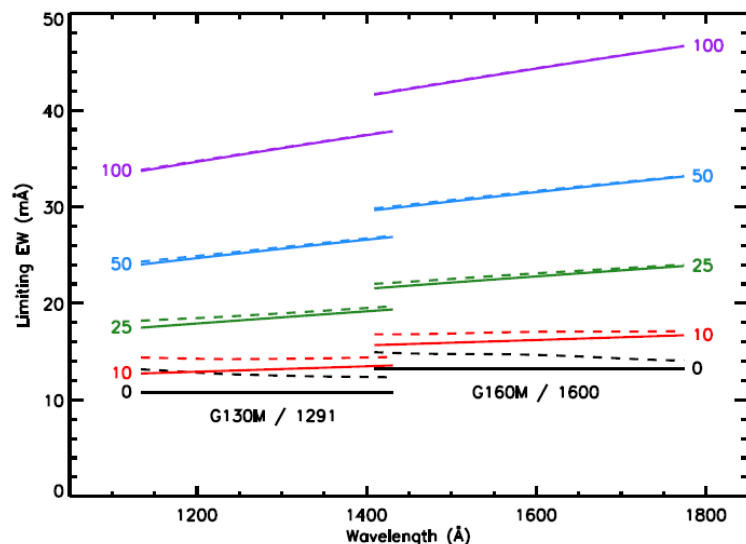


Table 1.2: COS Detector Characteristics

	FUV XDL (A/B)	NUV MAMA
Photocathode	CsI (opaque)	Cs ₂ Te (semi-transparent)
Window	None	MgF ₂ (re-entrant)
Wavelength range	< 900–2150 Å	1650–3200 Å
Active area	85 × 10 mm (two)	25.6 × 25.6 mm
Pixel format (full detector)	16,384 × 1024 (two)	1024 × 1024
Image size recorded per spectrum	16,384 × 128 (two, ACCUM) 16,384 × 1024 (two, TIME-TAG)	1024 × 1024
Pixel size	6 × 24 μm	25 × 25 μm
Spectral resolution element size (= resel)	6 × 10 pix	3 × 3 pix
Quantum efficiency	~26% at 1335 Å ~12% at 1560 Å	~10% at 2200 Å ~8% at 2800 Å
Typical dark-count rate (away from SAA) ¹	1.13 cnt s ⁻¹ cm ⁻² 1.63 × 10 ⁻⁶ cnt s ⁻¹ pix ⁻¹ 9.77 × 10 ⁻⁵ cnt s ⁻¹ resel ⁻¹	140 cnt s ⁻¹ cm ⁻² 8.77 × 10 ⁻⁴ cnt s ⁻¹ pix ⁻¹ 7.89 × 10 ⁻³ cnt s ⁻¹ resel ⁻¹
Detector Global Count rate limit ²	60,000 cnt s ⁻¹	770,000 cnt s ⁻¹
Local count-rate limit ^{2, 3}	~1.67 cnt s ⁻¹ pix ⁻¹ ~100 cnt s ⁻¹ resel ⁻¹	~200 cnt s ⁻¹ pix ⁻¹ ~1800 cnt s ⁻¹ resel ⁻¹
Screening limits for bright objects	see Table 10.1	
Dead-time constant	7.4 μs	280 ns

結果：汚染の条件(1)

- popⅢの重元素が多く分布するmeshを用いるため

$$M_{\text{popⅢ}} : M_{\text{pop I II}} \geq 1 : 1 \quad f_i = \left(\frac{M_{\text{pop3}}}{M_{\text{pop12}} + M_{\text{pop3}}} \right)_i \geq 0.5$$

を考える

$f_i \geq 0.5$	$z = 1$	$z = 0.5$	$z = 0$
CII($\lambda = 1335.7\text{\AA}$)	1.17mÅ	$8.18 \times 10^{-1}\text{mÅ}$	$8.93 \times 10^{-1}\text{mÅ}$
OII($\lambda = 834.5\text{\AA}$)	4.07mÅ	3.86mÅ	4.70mÅ

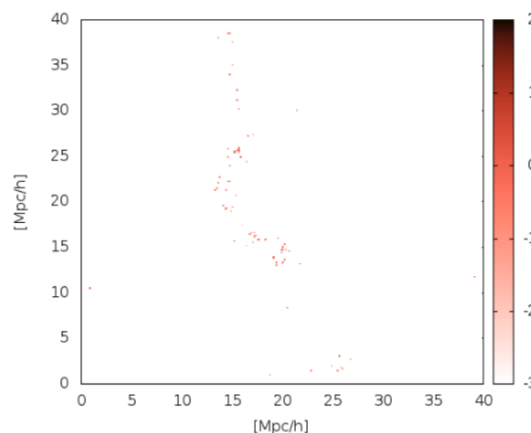
➤ COSでの観測可能なEWは $> 10\text{mÅ}$ であるため $f_i \geq 0.5$ では観測は難しい

- $M_{\text{popⅢ}} : M_{\text{pop I II}} \geq 1 : 10$

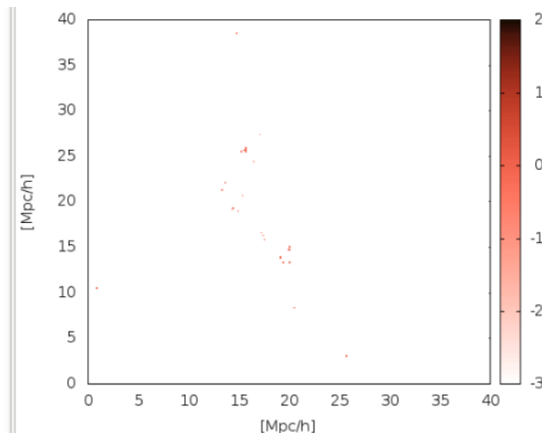
$$f_i = \left(\frac{M_{\text{pop3}}}{M_{\text{pop12}} + M_{\text{pop3}}} \right)_i \geq 0.09 \text{ を満たす}$$

pop I II 過多のmeshのEW

⇒いくつかの条件についてでEWを計算



$W_\lambda (f_{\text{OII}} \geq 0.09)$



$W_\lambda (f_{\text{OII}} \geq 0.5)$

結果：汚染の条件(2)

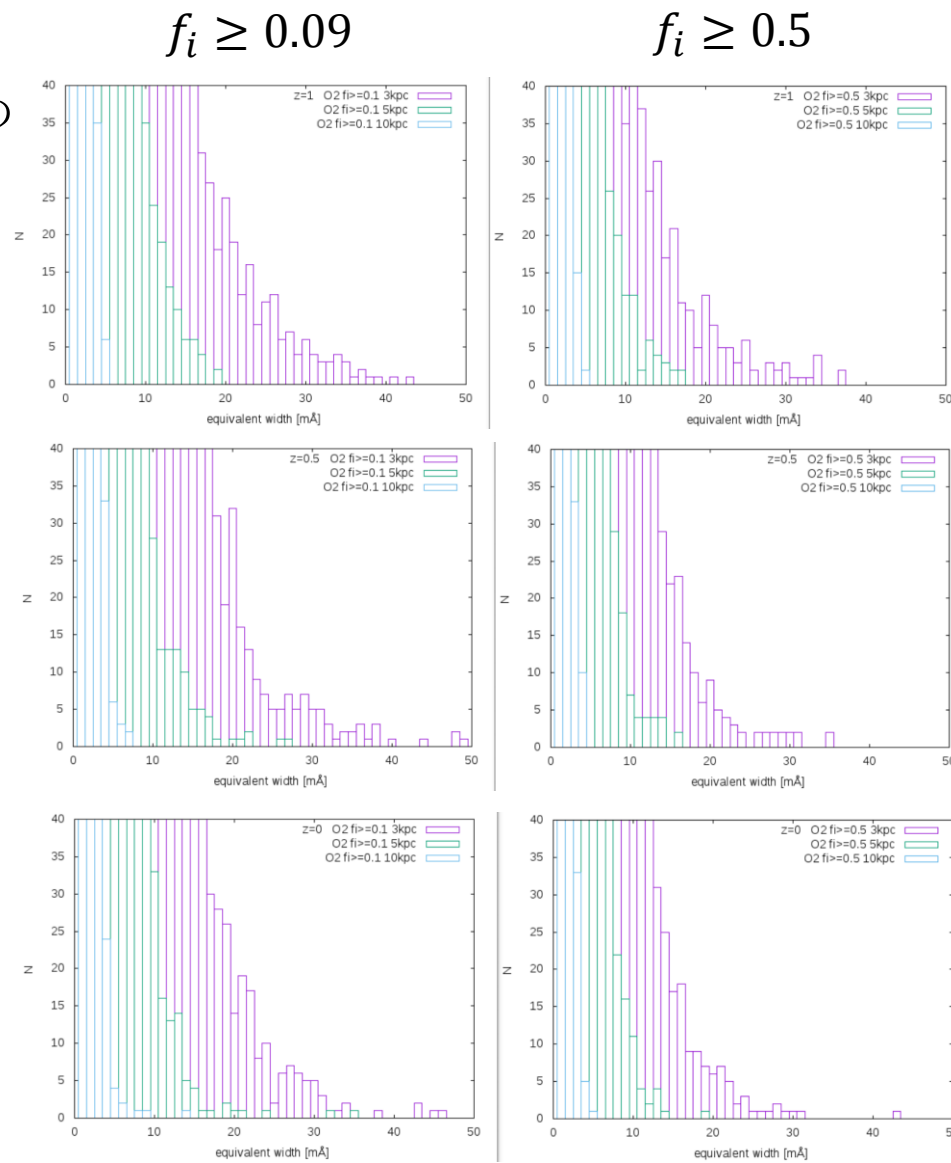
EW > 10mÅを満たす領域を見つけるために条件変更

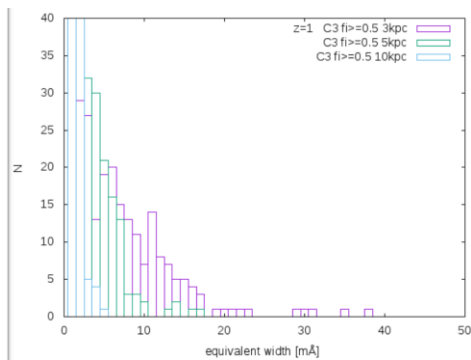
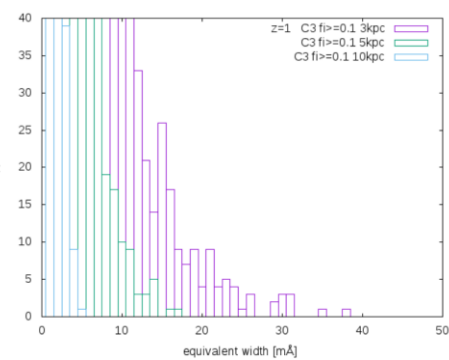
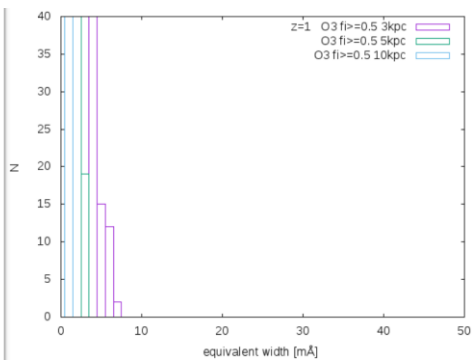
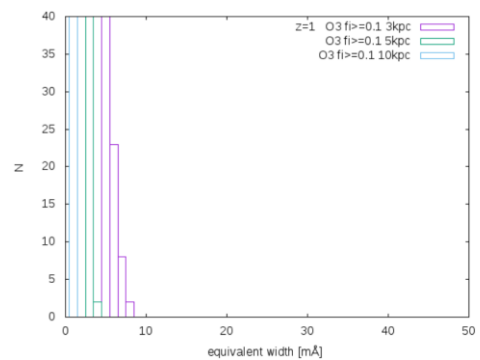
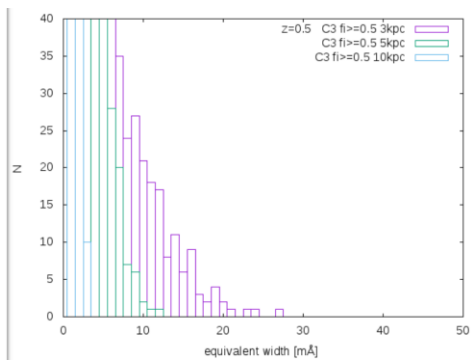
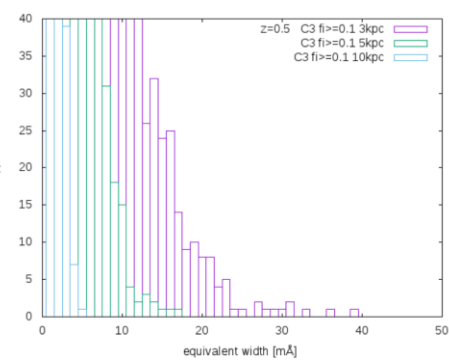
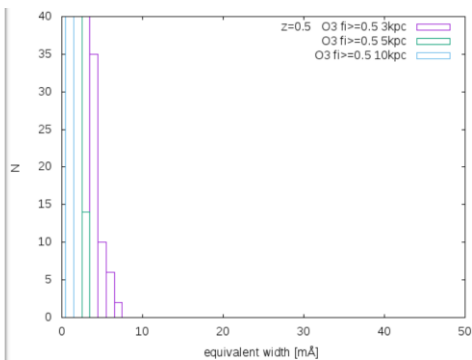
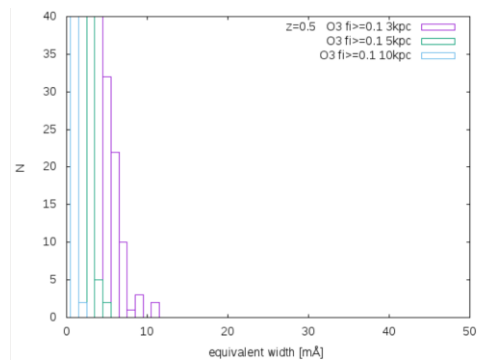
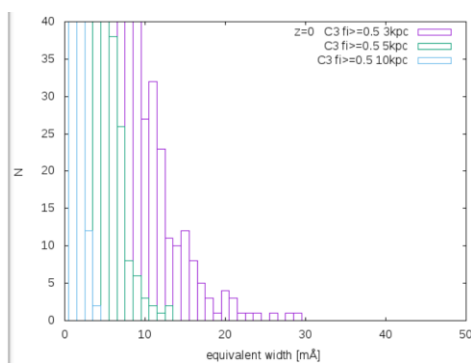
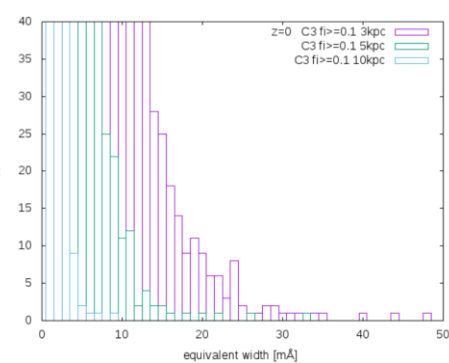
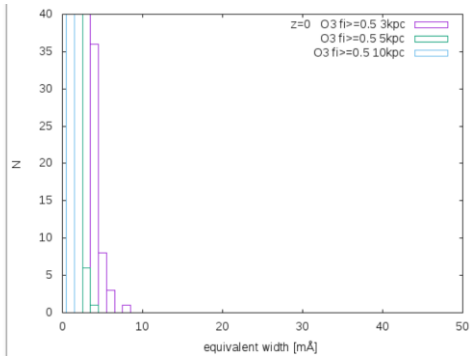
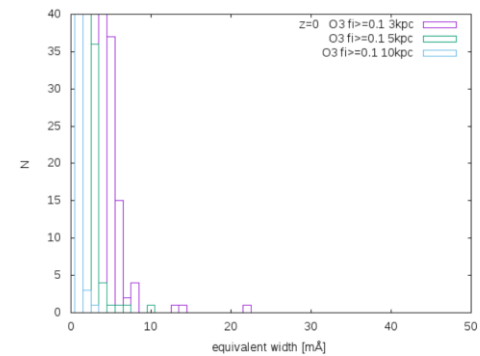
✓ $f_i = \left(\frac{M_{\text{pop3}}}{M_{\text{pop12}} + M_{\text{pop3}}} \right)_i \geq 0.09, 0.5$

✓ 汚染半径 r_{pol} : 10kpc, 5kpc, 3kpc

- 各meshでのEWのヒストグラム
($z = 1, 0.5, 0$ OIIのEW)

汚染半径3kpcの場合では $f_i \geq 0.5$ でも
EW > 10mÅとなるmeshが出てくるよう
になる



$f_i \geq 0.09$ $f_i \geq 0.5$ $f_i \geq 0.09$ $f_i \geq 0.5$ 

OIII(703.9mÅ)

CIII(977.0mÅ)

上段 $z = 0$, 中段 $z = 0.5$, 下段 $z = 1$

まとめ

- Pop III と pop I II の混在の度合いや爆発による重元素の汚染半径 r_{pol} によって観測できる可能性が変わってくる
- pop III 由来の重元素検出可能性として、pop I II 由来重元素との混在している領域での観測は出来る可能性があるが pop III のみの汚染となる場所での観測は限られてくる
- 今後
今の段階では重元素の電離についての情報が入っていないので電離度を加えて CII, CIII, OII, OIII の EW を計算し、それぞれの電離度での観測可能性について調べる
COS で観測可能性について議論出来る $z = 0, 0.5, 1$ の間の EW も調べる