

# 宇宙再電離期中の銀河と活動銀河核

吉浦伸太郎(熊本大学)

共同研究者

長谷川賢二(名古屋大) 市來淨與 (名古屋大) 田代寛之(名古屋大)

島袋隼士(パリ天文台) 高橋慶太郎(熊本大)



第3回 銀河進化研究会 2016/6/1-3 @東北大学



Kumamoto University

# 目次

- 1, 宇宙再電離
- 2, 活動銀河核と星形成銀河モデル
- 3, 電離史とパラメータへの制限
- 4, まとめ

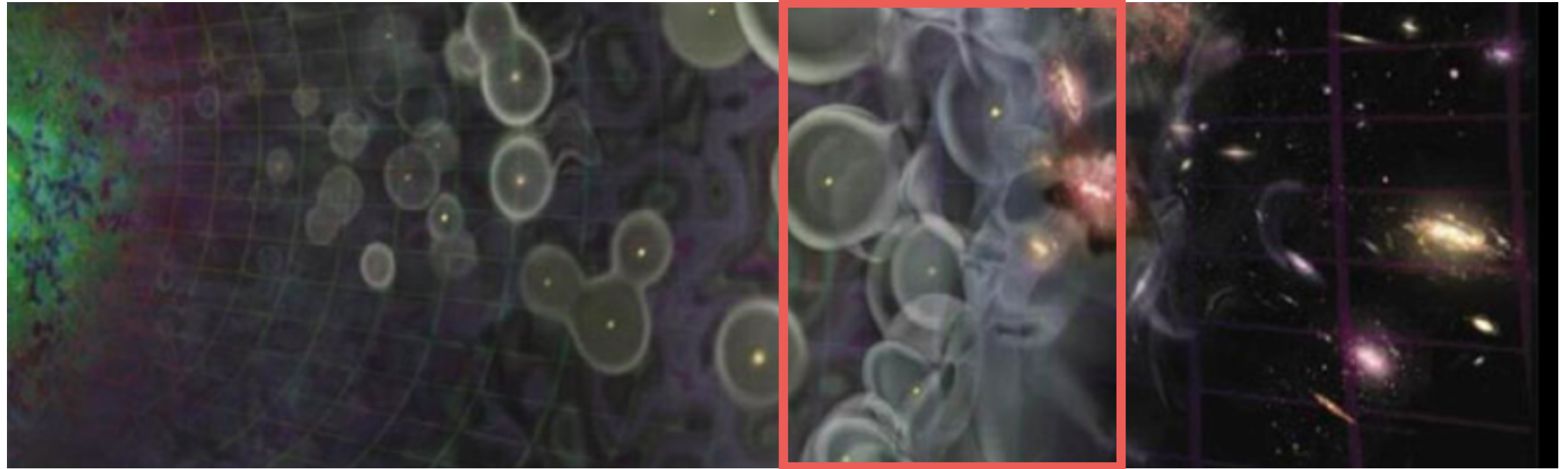
# 宇宙再電離

暗黒時代

宇宙の夜明け

宇宙再電離

(HERA home page)



宇宙論的赤方偏移  $z \sim 30$   
宇宙誕生から 2億年

$z \sim 15$   
5億年

$z \sim 6$   
10億年

$z = 0$   
138億年

宇宙再電離：初期の星や銀河からでた光子によって水素が電離される時代

高赤方偏移クエーサーのスペクトル観測から

水素再電離は $z \sim 6$ で終了 (Fan et al. 2006)

ヘリウム再電離は $z \sim 3$ で終了 (Worseck et al. 2014)

# 電離源

HI ( HII ) を電離するには  $13.6\text{eV}$  (  $54.4\text{eV}$  ) 以上の**紫外線**光子が必要

主な電離源候補

**星(銀河)** : 既に  $z > 6$  でいくつも銀河が見つかった  
(e.g. Ouchi+ 2010, Bouwens+ 2015)

**活動銀河核 (AGN)** の電離への寄与はよくわかっていない

これまで : AGNは $z > 3$ で急激に減少する (Masters et al. 2012)

最近の観測 (Giallongo et al. 2015) : high- $z$ の暗いAGNの検出

> AGNの再電離への寄与の可能性 ? (e.g. Haardt & Madau 2015)

> 20天体程度しか見つからないのでまだ不定性が大きい

# 本研究の目的

宇宙再電離に対する星(銀河)とAGNの寄与を制限する

モデル (赤文字はパラメータ)

銀河 : 星形成率(SFRD)、電離光子数、光子脱出率 $f_{\text{esc}}$

AGN : UV光度関数 faint end slope  $\alpha = -1.5 - a(z-2)$

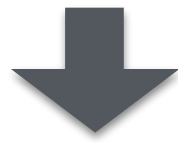
例  $a=0.03$  のとき  $\alpha(z=6) = -1.72$

: Spectral energy distribution(SED)

$\epsilon = c^2 \dot{M} / L_{\text{Edd}}$  SEDの電離光子放射効率に対応



モデルをもとに水素やヘリウムの電離進化を計算



観測から得られている水素やヘリウムの中性率に関する制限等と比較



パラメータに制限を与えて、許されるモデルを議論する

# 星形成銀河

## 星形成銀河モデル

- ・ 星形成率密度 (観測)
- ・ 電離光子数 (理論)
- ・ 光子脱出率  $f_{\text{esc}}$  (パラメータ)

電離光子数(Choudhury & Ferrara 2005)

$$\int_{\nu_1}^{\nu_2} d\nu \gamma_\nu = \begin{cases} 5.43 \times 10^{60} / M_\odot, & (\nu_1, \nu_2) = (\nu_{\text{HI}}, \nu_{\text{HeI}}), \\ 2.61 \times 10^{60} / M_\odot, & (\nu_1, \nu_2) = (\nu_{\text{HeI}}, \nu_{\text{HeII}}), \\ 0.01 \times 10^{60} / M_\odot, & (\nu_1, \nu_2) = (\nu_{\text{HeII}}, 100\text{eV}/h_p) \end{cases}$$

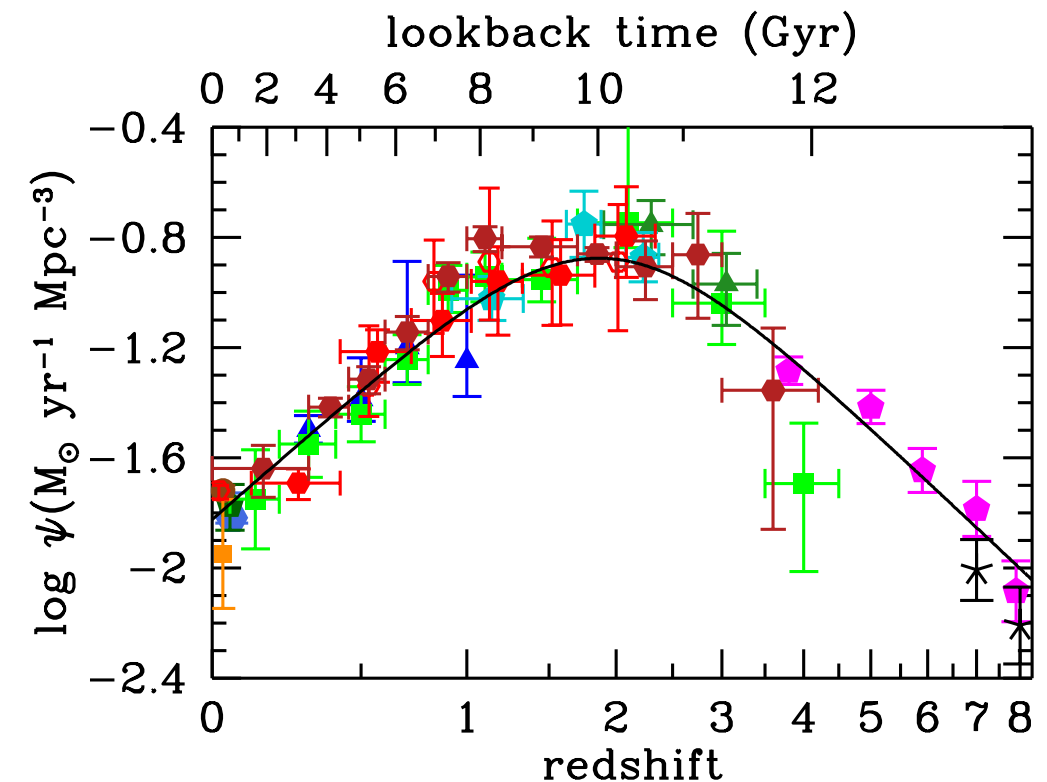
Opacity

$$n_{*,i} = \int_{\nu_i}^{\infty} d\nu \frac{n_i \sigma_i \gamma_\nu}{n_{\text{HI}} \sigma_{\text{HI}} + n_{\text{HeI}} \sigma_{\text{HeI}} + n_{\text{HeII}} \sigma_{\text{HeII}}}$$

**光子脱出率 $f_{\text{esc}}$**  : 銀河中で生成される光子が外の銀河間物質に出て行く割合

観測的には $z \sim 1$ で $f_{\text{esc}} = 0.1 \sim 0.2$ 、理論的には $f_{\text{esc}} = 0.01 \sim 1$

→ 不定性が大きいのでパラメータとする



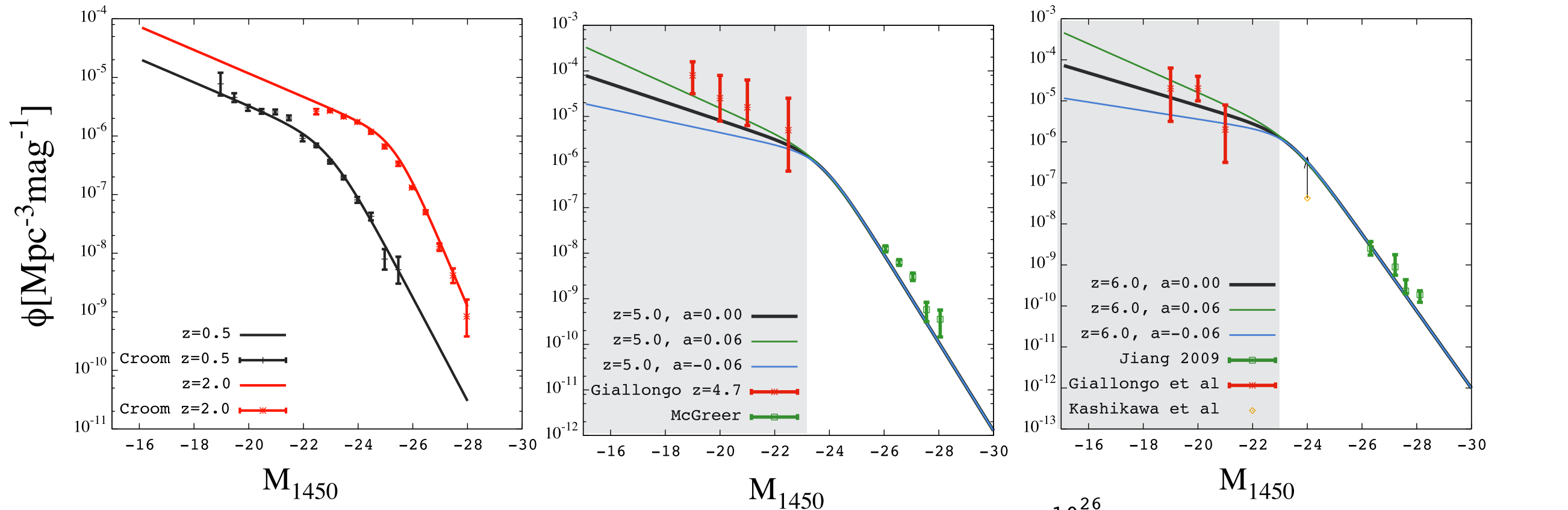
星形成率密度

( Madau & Dickinson 2014 )

# 活動銀河核 (AGN)

## 1, UV光度関数

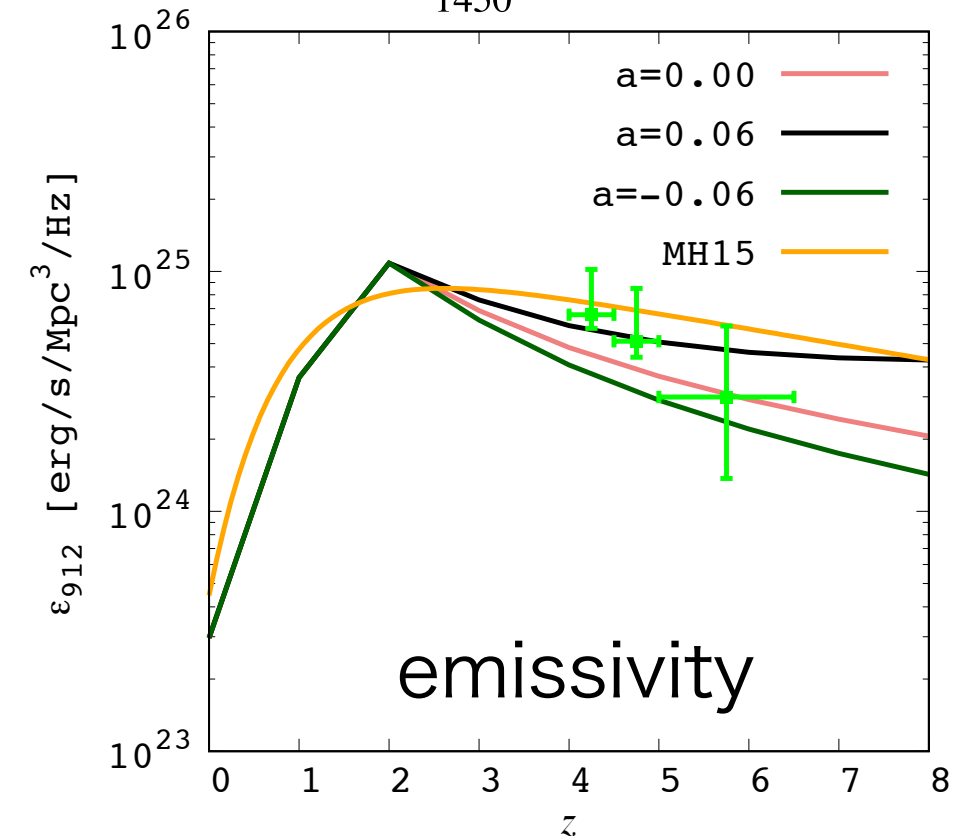
$$\Phi(M_{1450}, z) = \frac{\Phi(M_{1450}^*)}{10^{0.4(\alpha+1)(M_{1450}-M_{1450}^*)} + 10^{0.4(\beta+1)(M_{1450}-M_{1450}^*)}}$$



## AGNのUV光度関数モデル作成

(Croom et al 2009, Giallongo et al 2015)

$z=2-6$ 、LFの $\Phi(M_{1450}^*)$ ,  $M_{1450}^*$ ,  $\beta$  はlogで補間  
 かつ  $z>6$ にも外挿( $z=20$ まで)

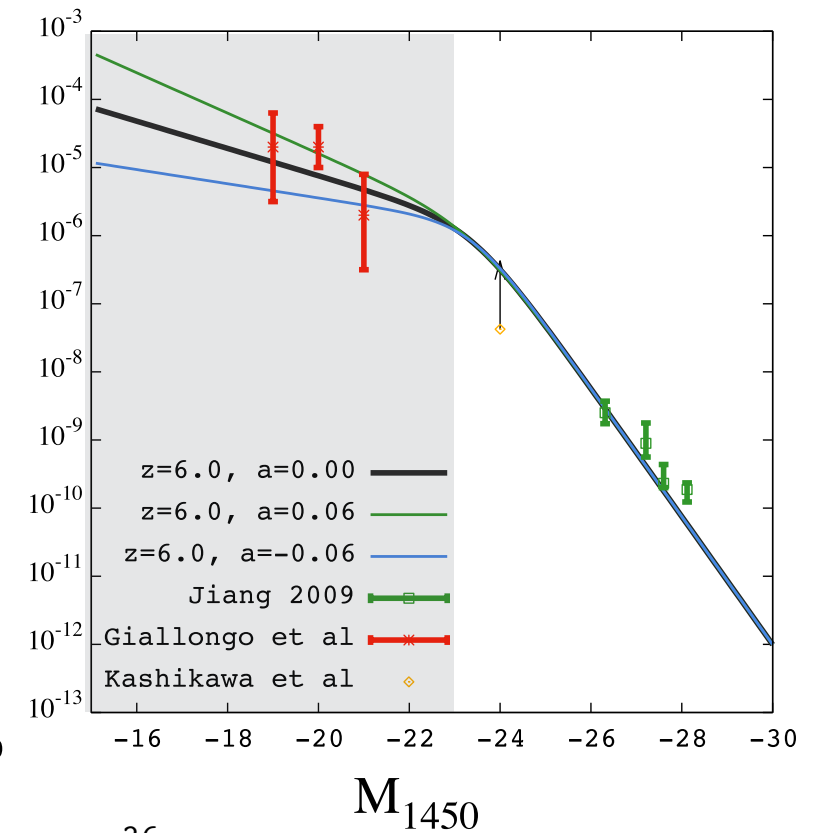
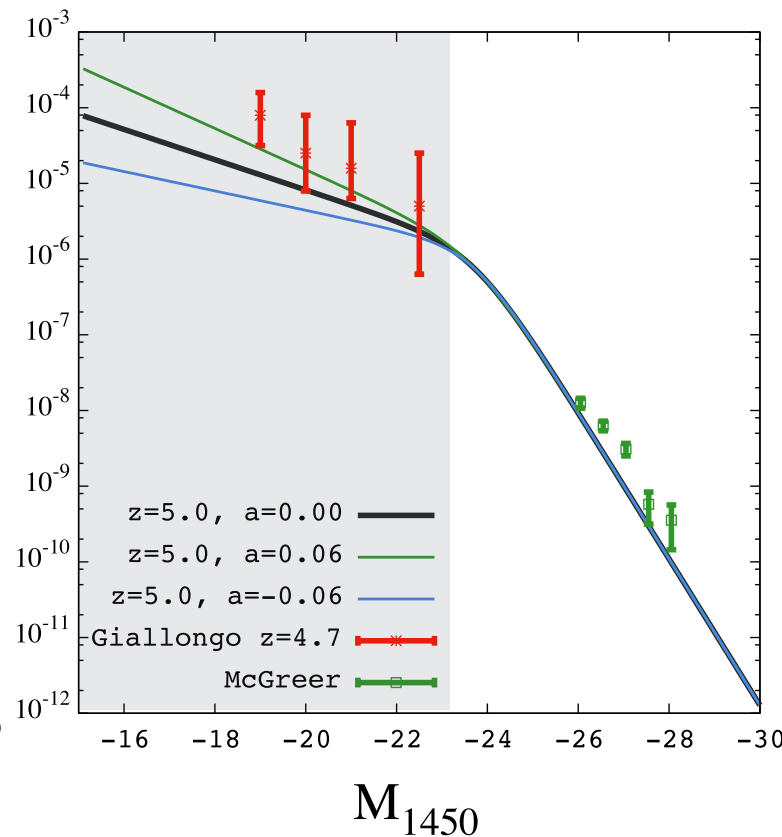
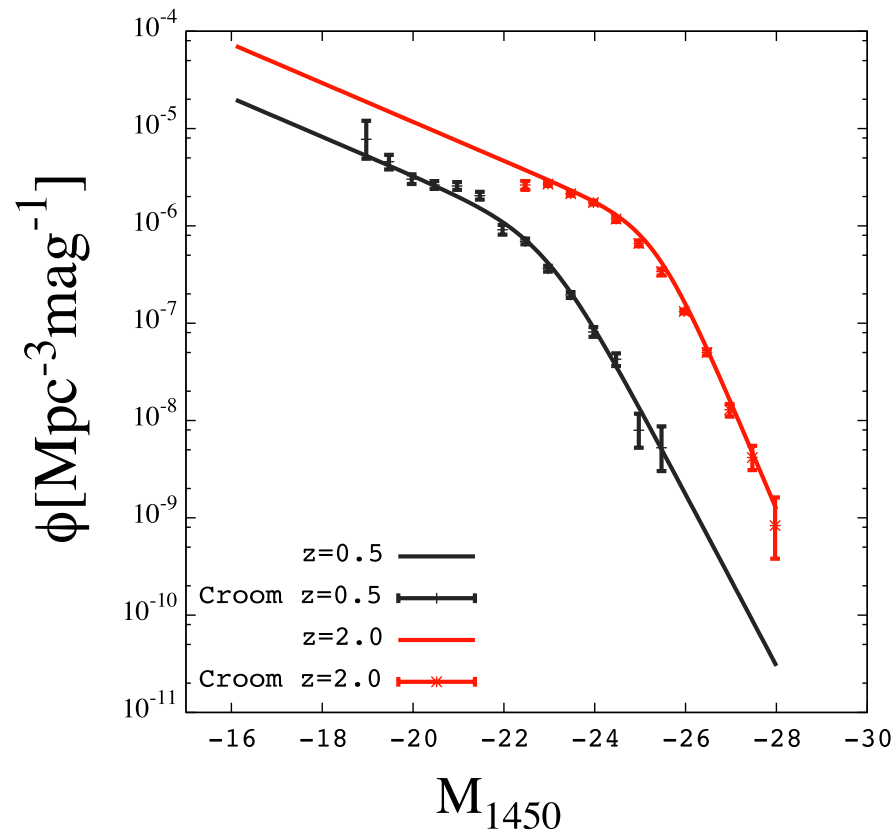




# 活動銀河核 (AGN)

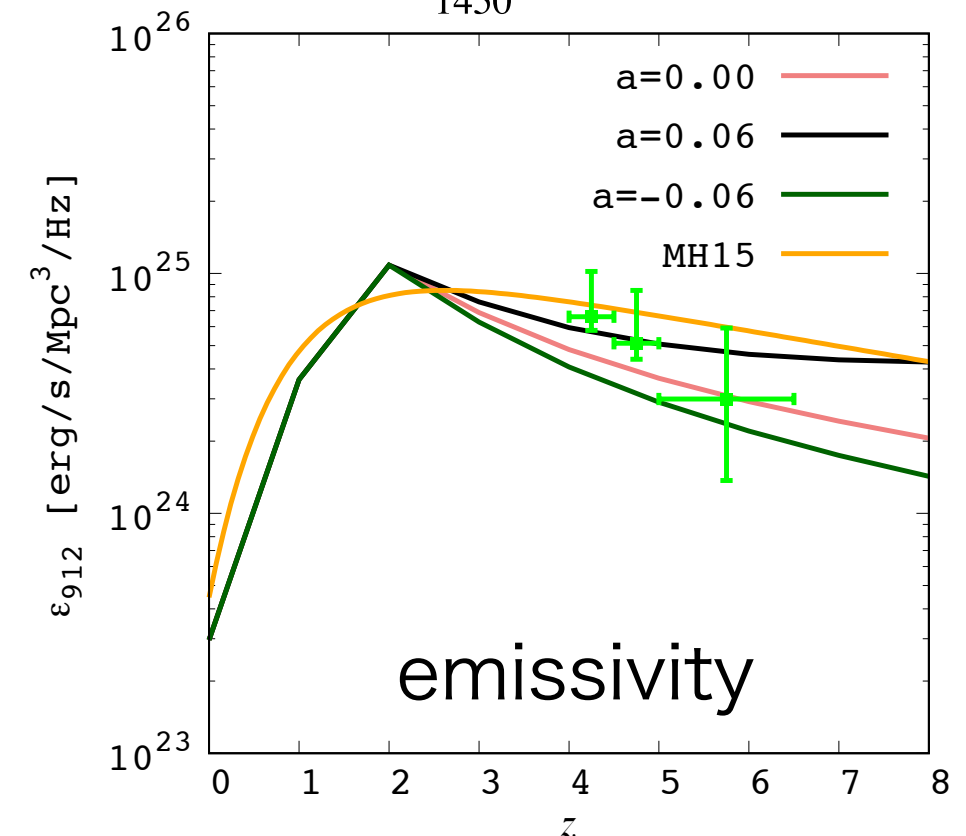
## 1, UV光度関数

$$\Phi(M_{1450}, z) = \frac{\Phi(M_{1450}^*)}{10^{0.4(\alpha+1)(M_{1450}-M_{1450}^*)} + 10^{0.4(\beta+1)(M_{1450}-M_{1450}^*)}}$$



faint end slope  $\alpha = -1.5 + a(z-2)$   
 $a$ は $\alpha$ の $z$ 進化を決めるパラメータ  
 $a$ が大きいとhigh- $z$ で暗いAGNが増加  
 例:  $a=0.06$   $\alpha(z=6)=-1.72$

また、faint endは $M_{1450}=-18$ とする





# 活動銀河核 (AGN)

## 2, SED

基準モデルはコンポジットスペクトル再現(右図)

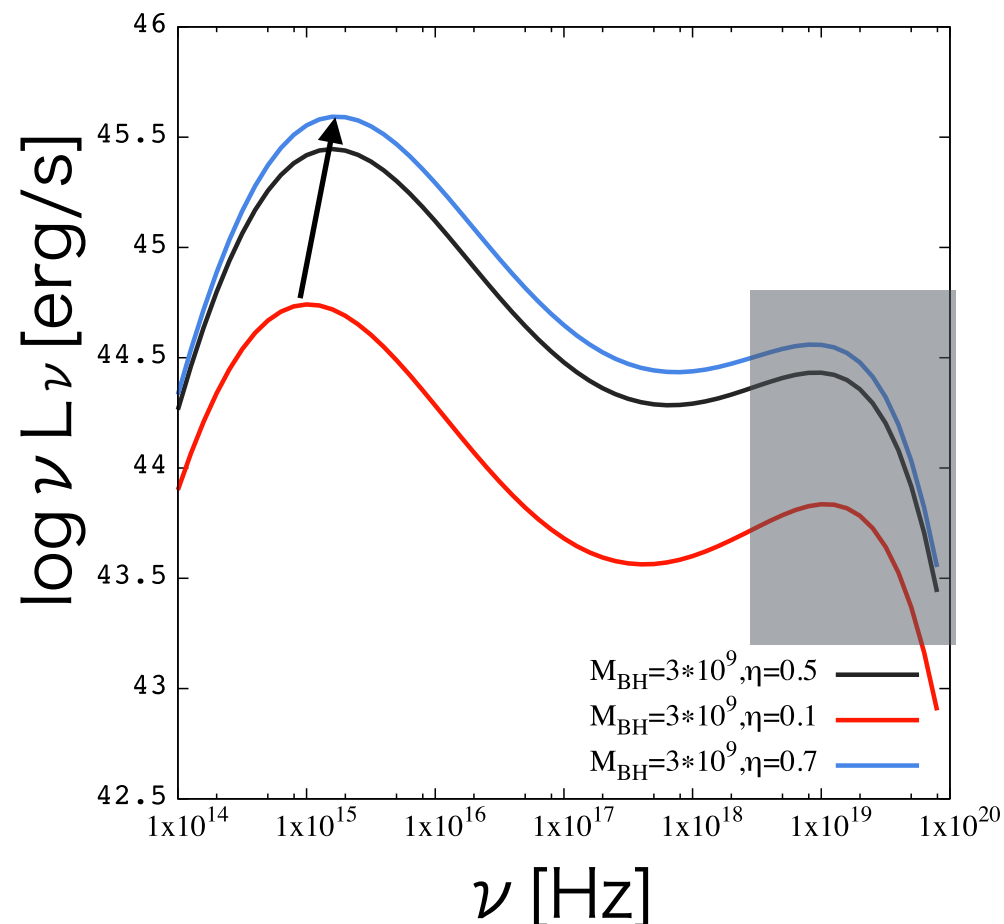
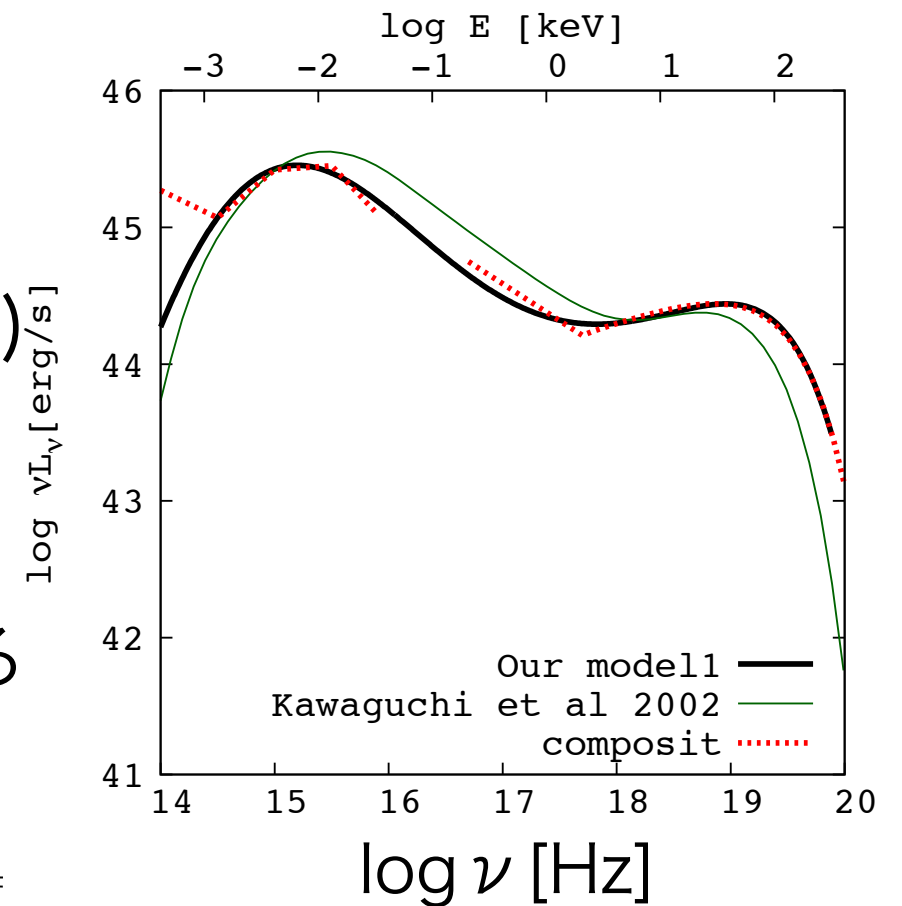
そのときのBH質量と  $\epsilon$  は  $M_{\text{BH}} = 3 \times 10^9 [M_{\odot}]$

Kawaguchi et al 2002  $c^2 \dot{M} / L_{\text{Edd}} = \epsilon = 0.5$

SEDにパラメータ  $\epsilon$  とBH質量依存性を持たせる

パラメータ  $\epsilon \propto \dot{M} / M_{\text{BH}}$

全体光度  $\propto \epsilon$  UVピーク周波数  $\propto M_{\text{BH}}^{-1/4} \epsilon^{1/4}$

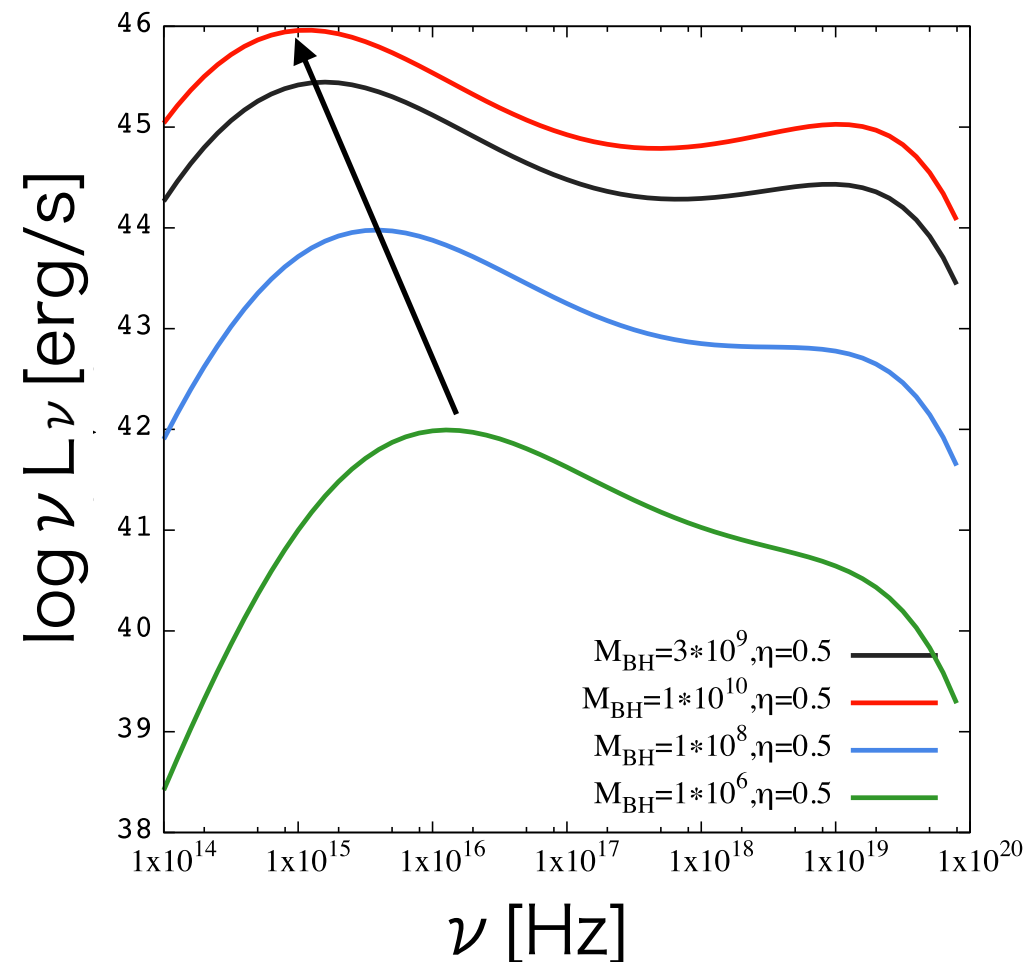


パラメータの  $\epsilon$  が高いほど、  
AGNは電離光子を多く放射  
->AGNの電離効率を決める。

X-ray側の振る舞いは合わないが  
そのまま上がるとする

# 活動銀河核 (AGN)

$$\text{全体光度} \propto M_{\text{BH}} \quad \text{UVピーク周波数} \propto M_{\text{BH}}^{-1/4} \epsilon^{1/4}$$



BH mass依存性を持たせることで  
ある  $\epsilon$  に対して、任意の  $M_{1450}$  を持つ  
AGNのSEDの形が決まる

各  $z$  ごとのAGN光度関数から平均のスペクトルを計算

$$\overline{L_\nu} = \frac{\int \phi(M_{1450}, z) L_\nu(\nu, M_{1450}) dM_{1450}}{\int \phi(M_{1450}, z) dM_{1450}}$$

暗いAGNが多いとUVピーク周波数は高くなる > 電離しやすくなる

# 観測的制限

- ・ **水素**に対する制限

高赤方偏移クエーサースペクトル観測 HI再電離  $z > 5.7$  (Fan et al 2006)

Lyman- $\alpha$  Emitter(LAE)観測  $f_{\text{HII}} > 0.8 \pm 0.2$  at  $z=6.6$  (Ouchi et al 2010)  
 $0.2 < f_{\text{HII}} < 0.7$  at  $z=7.3$  (Konno et al 2014)

- ・ **ヘリウム**に対する制限

高赤方偏移クエーサースペクトル観測 HeII再電離  $z > 3.4$   
(Worseck et al 2014)

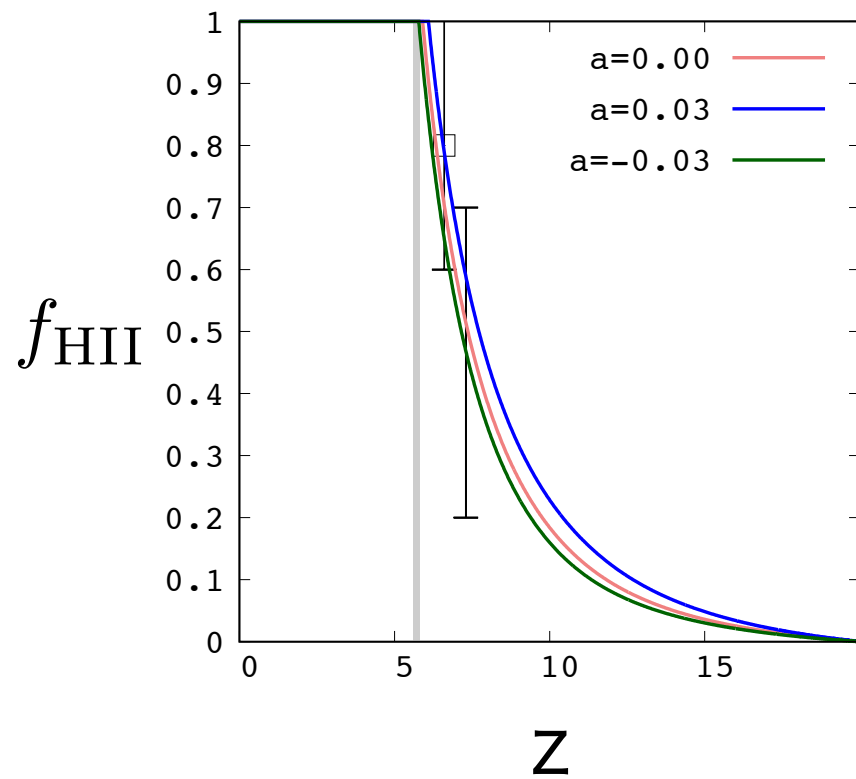
- ・ **CMB optical depth**

$$\tau_e = 0.055 \pm 0.009 \quad (\text{Planck Collaboration 2016})$$

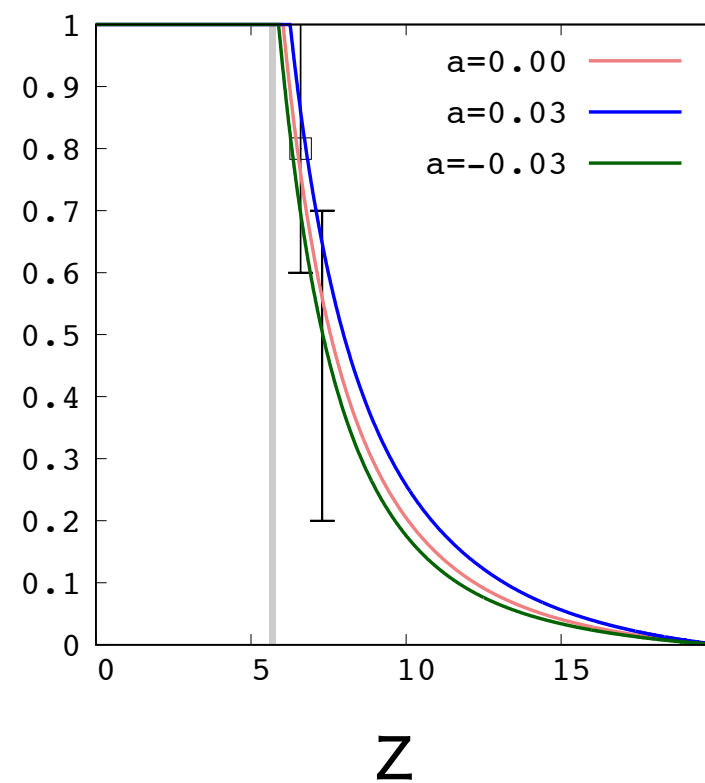
# 電離史：HI

$$f_{\text{esc}}=0.08$$

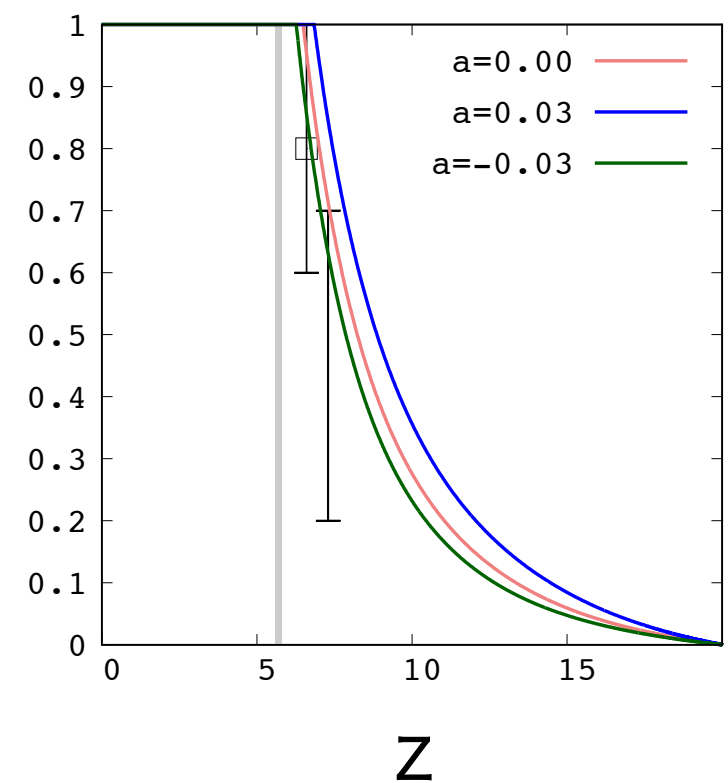
$$\varepsilon = 0.5$$



$$\varepsilon = 1.0$$



$$\varepsilon = 5.0$$



HI reionization  $z > 5.7$  (Fan et al 2006)

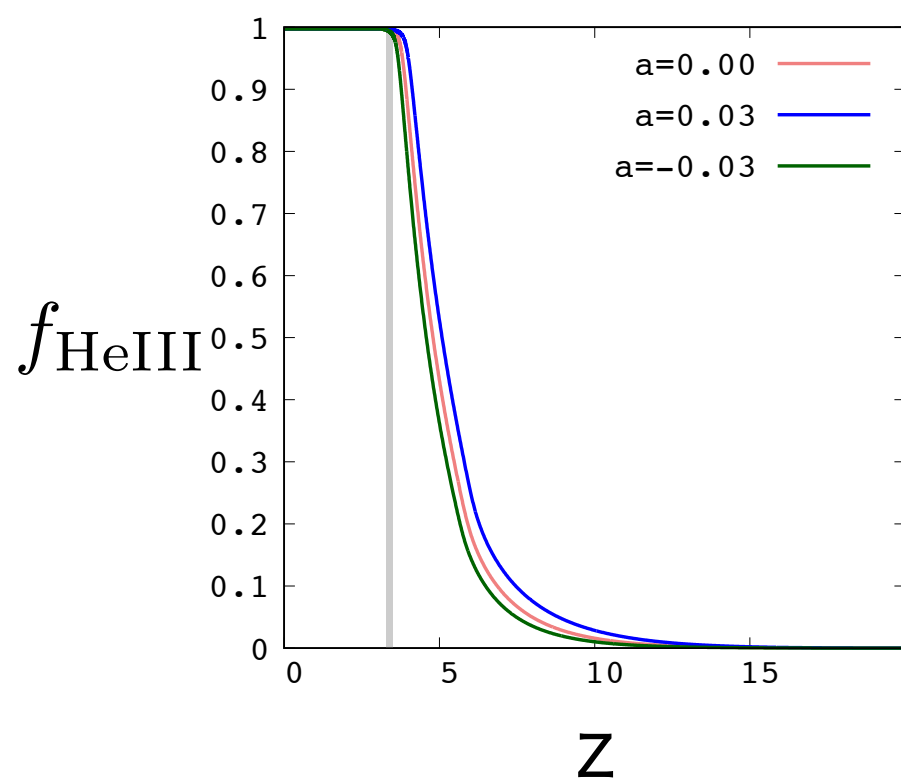
$f_{\text{HII}} > 0.8 \pm 0.2$  at  $z=6.6$  (Ouchi et al 2010)

$0.2 < f_{\text{HII}} < 0.7$  at  $z=7.3$  (Konno et al 2014)

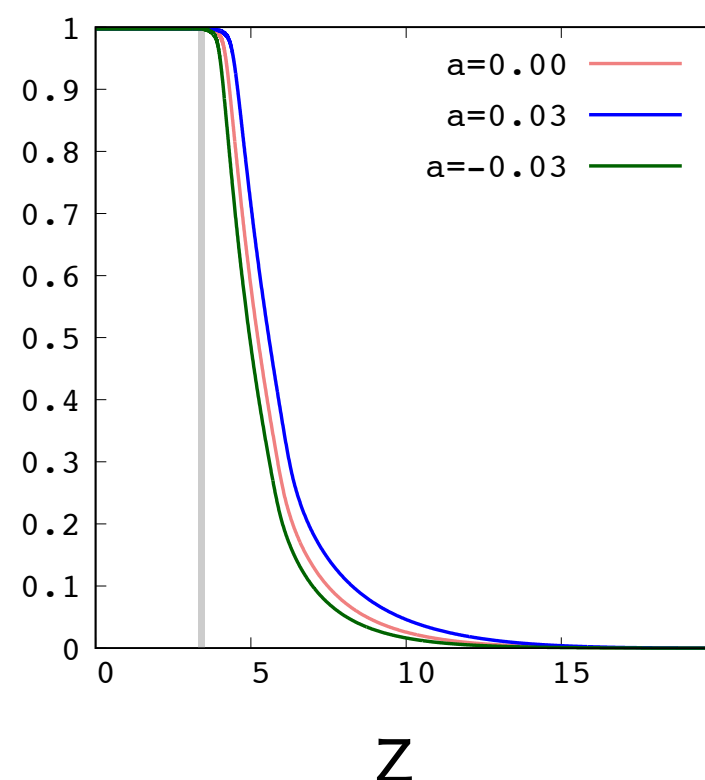
# 電離史：HeII

$$f_{\text{esc}}=0.08$$

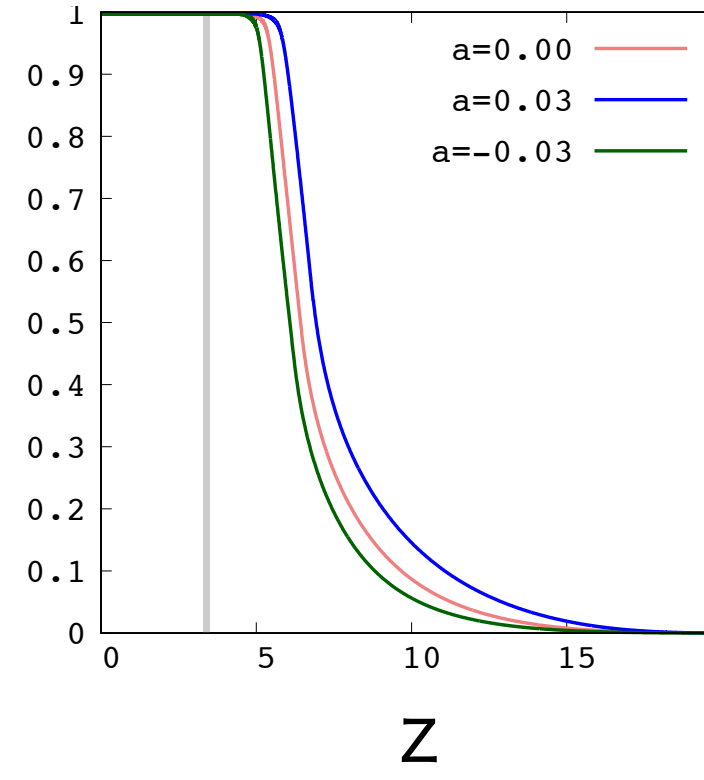
$$\varepsilon = 0.5$$



$$\varepsilon = 1.0$$



$$\varepsilon = 5.0$$

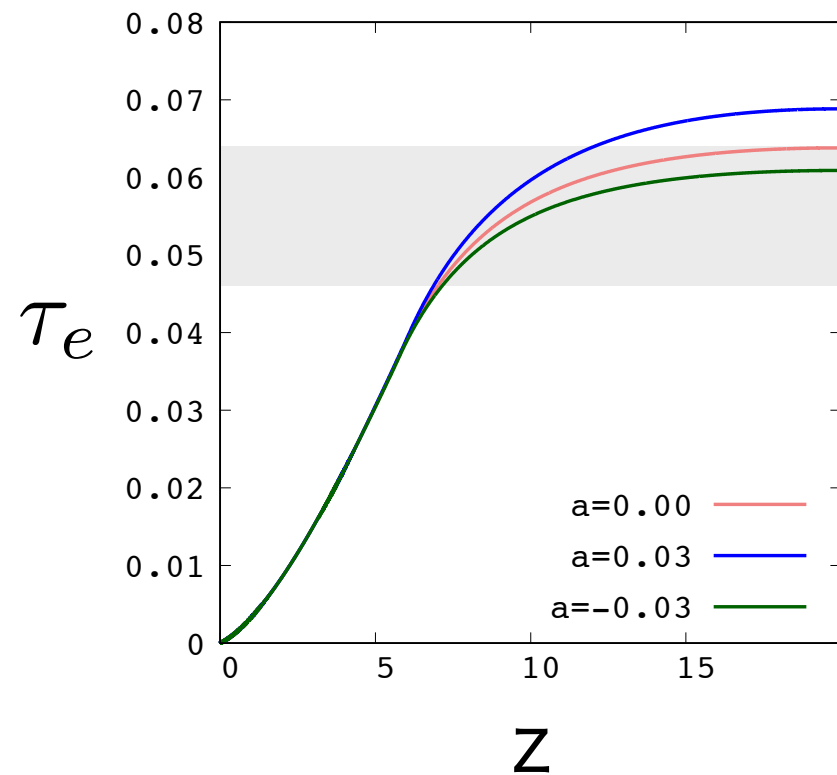


HeII reionization  $z > 3.4$  (Worseck et al 2014)

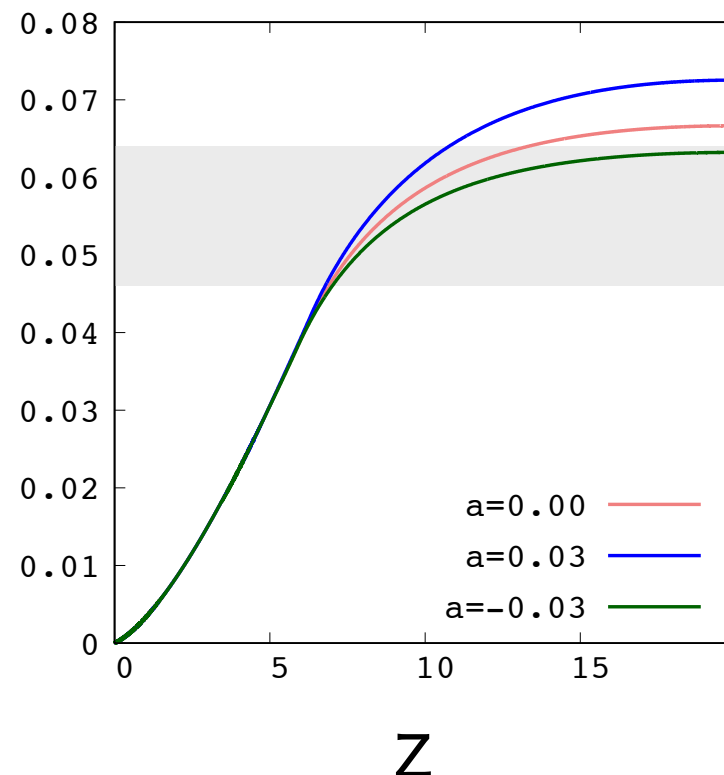
# CMB : optical depth

$$f_{\text{esc}}=0.08$$

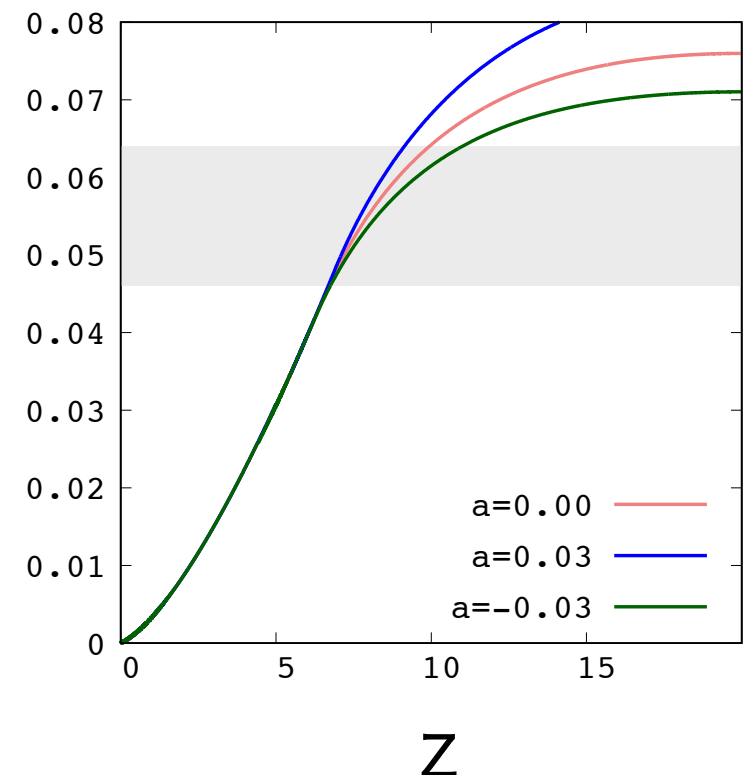
$$\varepsilon = 0.5$$



$$\varepsilon = 1.0$$



$$\varepsilon = 5.0$$



$$\tau_e(z) = \int_0^z c\sigma_T n_e (1+z)^3 \frac{dt}{dz} dz$$

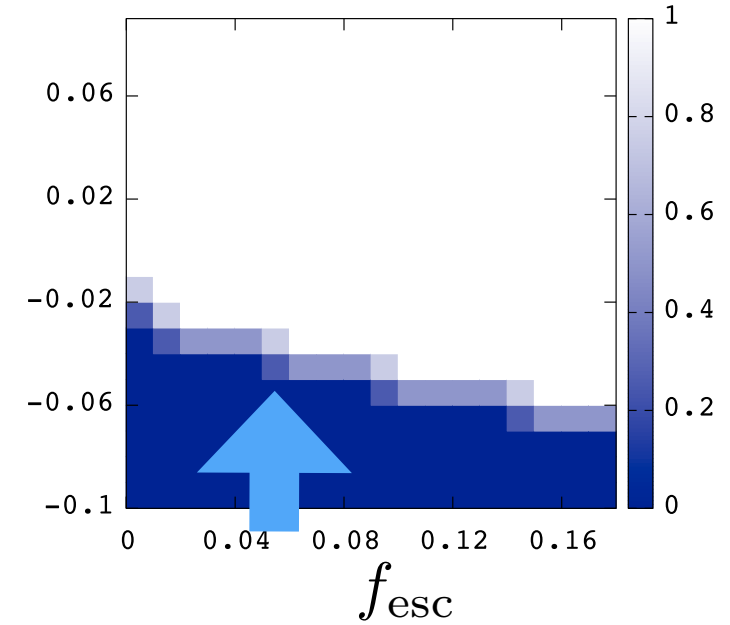
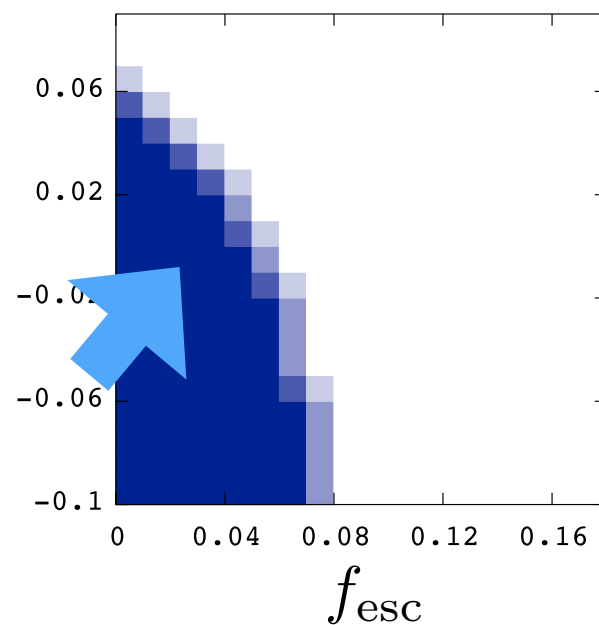
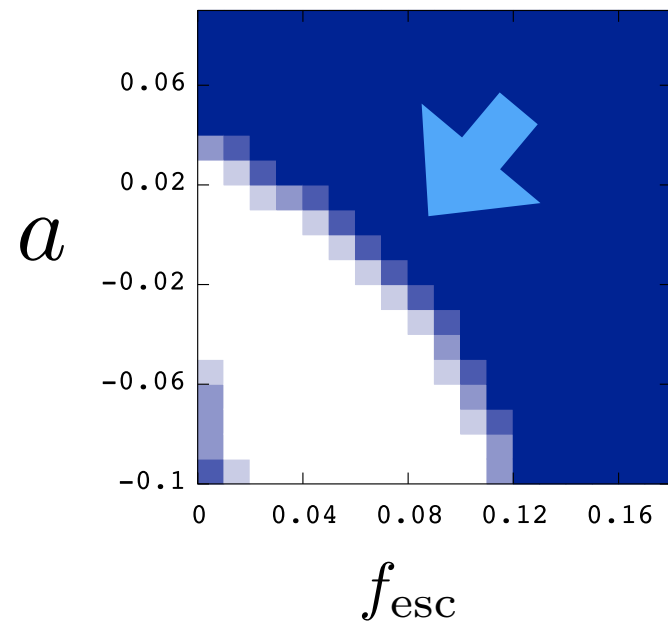
Thomson optical depth  $\tau = 0.055 \pm 0.009$   
(Planck Collaboration et al. 2016)

# 観測的制限 $\epsilon = 1.0$

$$\tau = 0.055 \pm 0.009$$

$$z_{\text{H}} > 5.7$$

$$z_{\text{He}} > 3.4$$

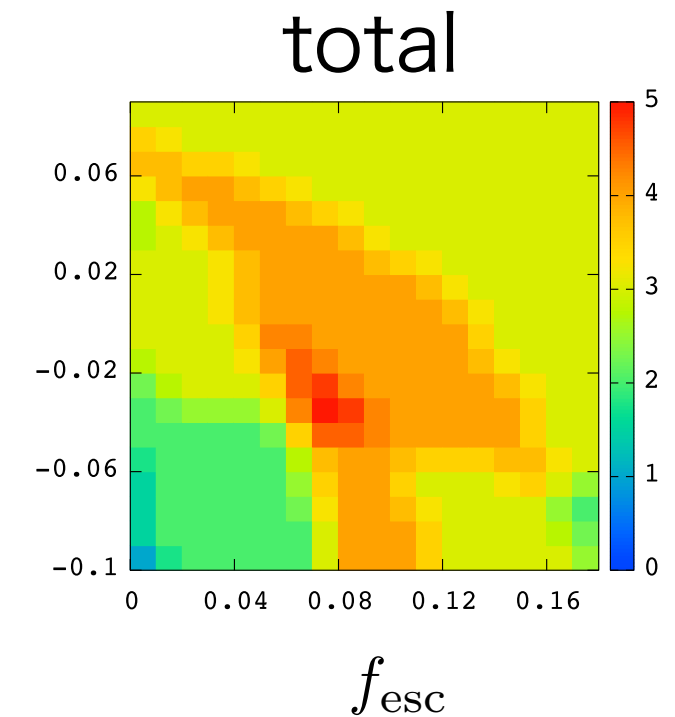
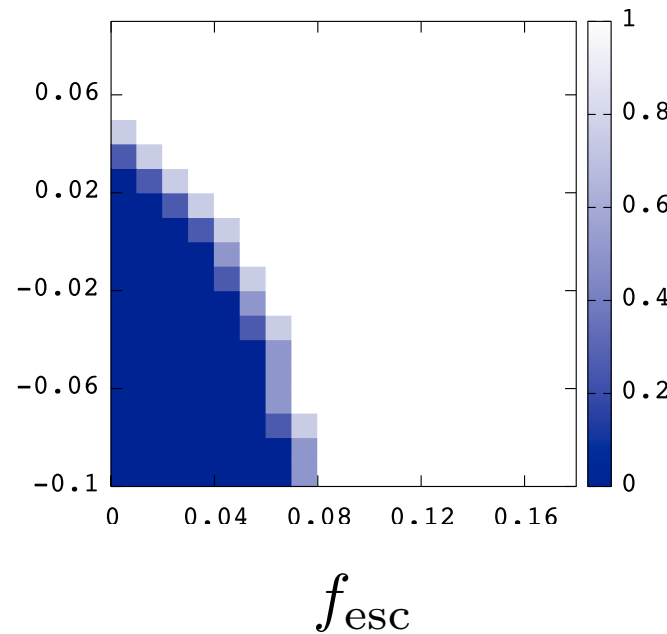
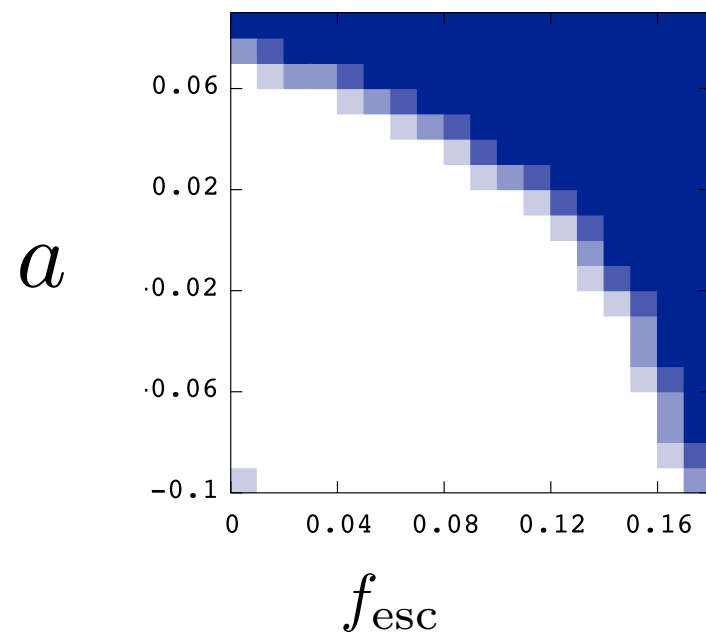


$$0.3 < f_{\text{HI}} < 0.8$$

$$z = 7.3$$

$$f_{\text{HI}} < 0.2 \pm 0.2$$

$$z = 6.6$$



白：制限を満たす 青：制限を満たさない カラーバー：満たす制限の個数

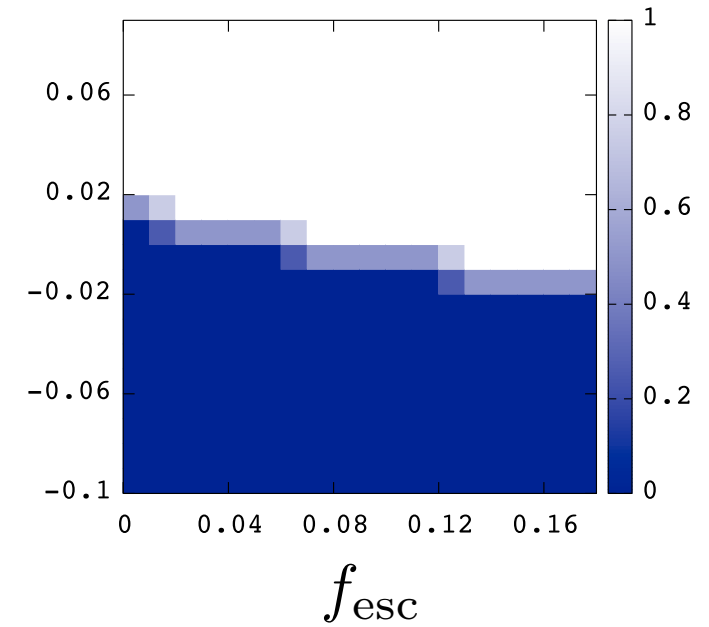
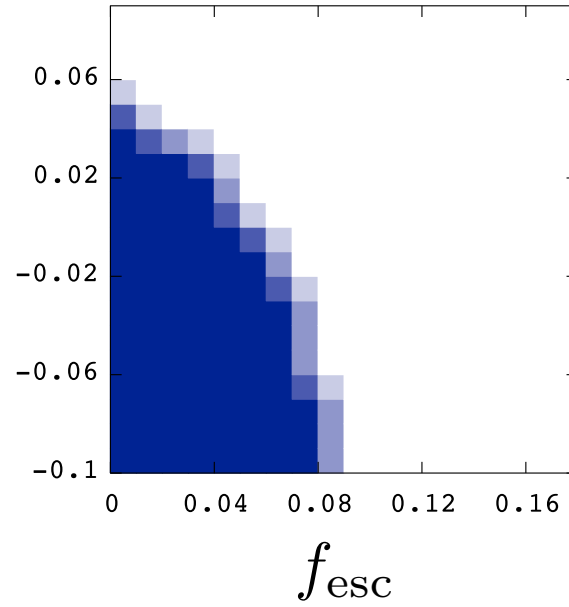
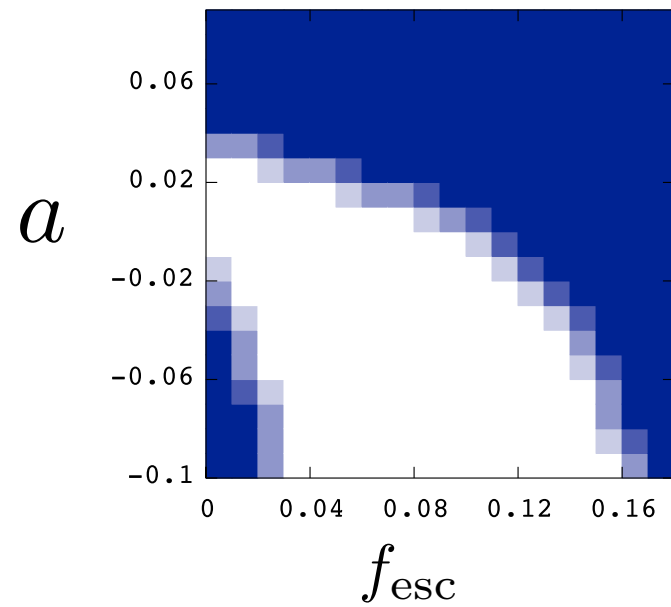


# 観測的制限 $\epsilon = 0.5$

$$\tau = 0.055 \pm 0.009$$

$$z_{\text{H}} > 5.7$$

$$z_{\text{He}} > 3.4$$

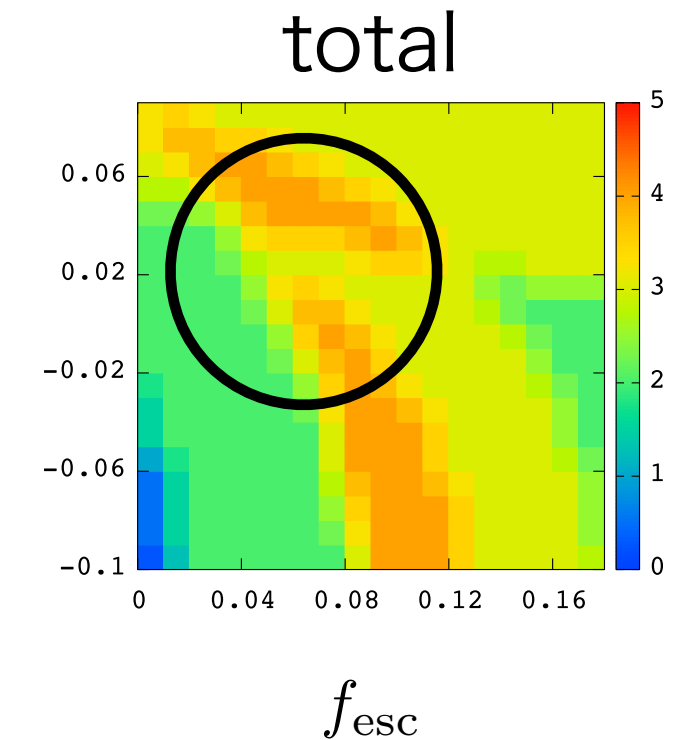
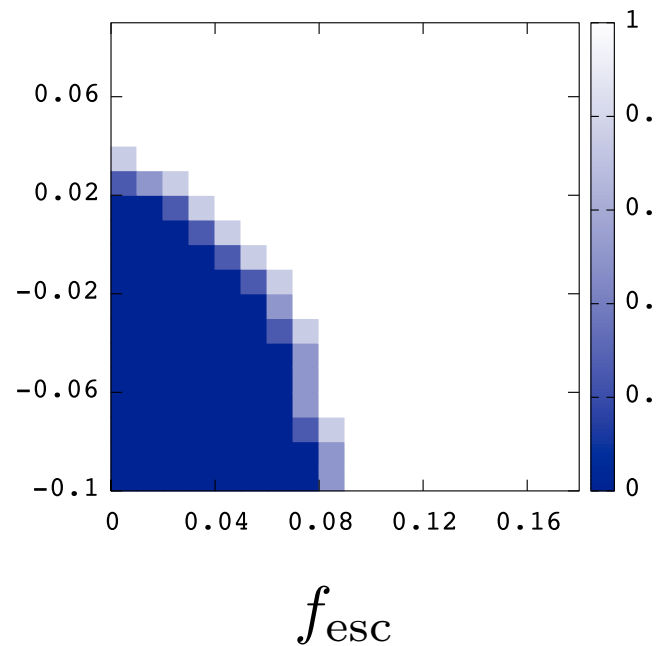
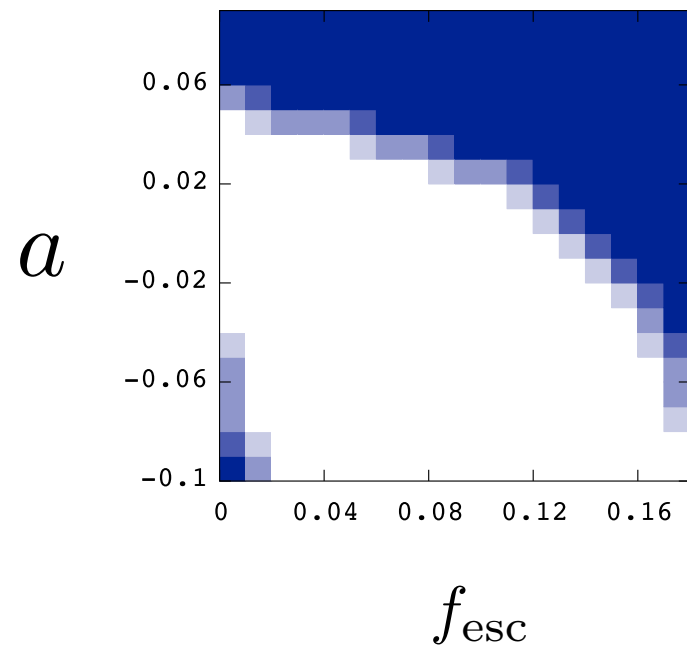


$$0.3 < f_{\text{HI}} < 0.8$$

$$z = 7.3$$

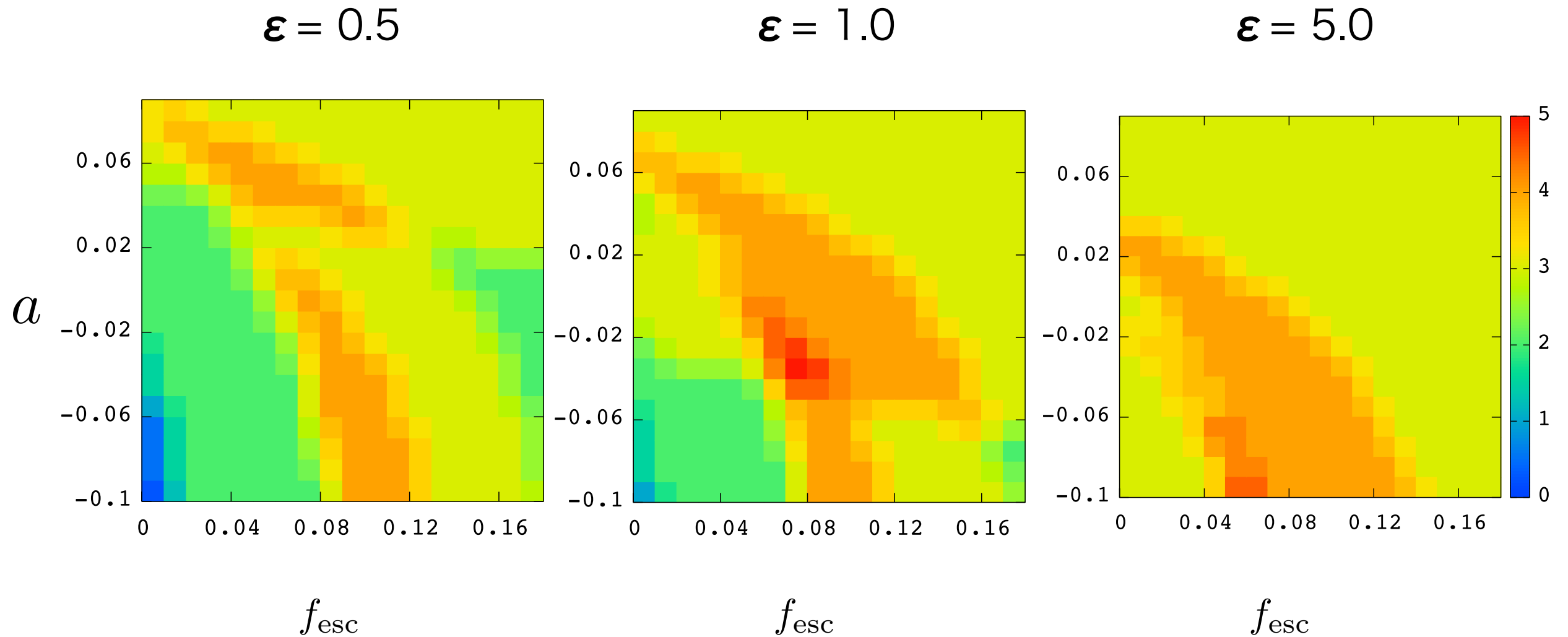
$$f_{\text{HI}} < 0.2 \pm 0.2$$

$$z = 6.6$$



白：制限を満たす 青：制限を満たさない カラーバー：満たす制限の個数

# 観測的制限



すべての制限を満たすのは、  
 $0.04 < f_{\text{esc}} < 0.08$ 、 $a < 0.01$

但し、feint endやAGNの登場時期にも依存

## まとめ

星形成銀河 (SFRD,  $f_{\text{esc}}$ , 電離光子数)

AGN (UVLF, SED)

モデルからHとHeの電離を計算し観測の制限と比較

CMB optical depthが下がった事で、  
むしろAGNがhigh-zにたくさんいては問題

ただし、CMB optical depthとHe reionizationを同時に  
満たすには、AGNの高いHe電離効率が必要  $\varepsilon > 1$

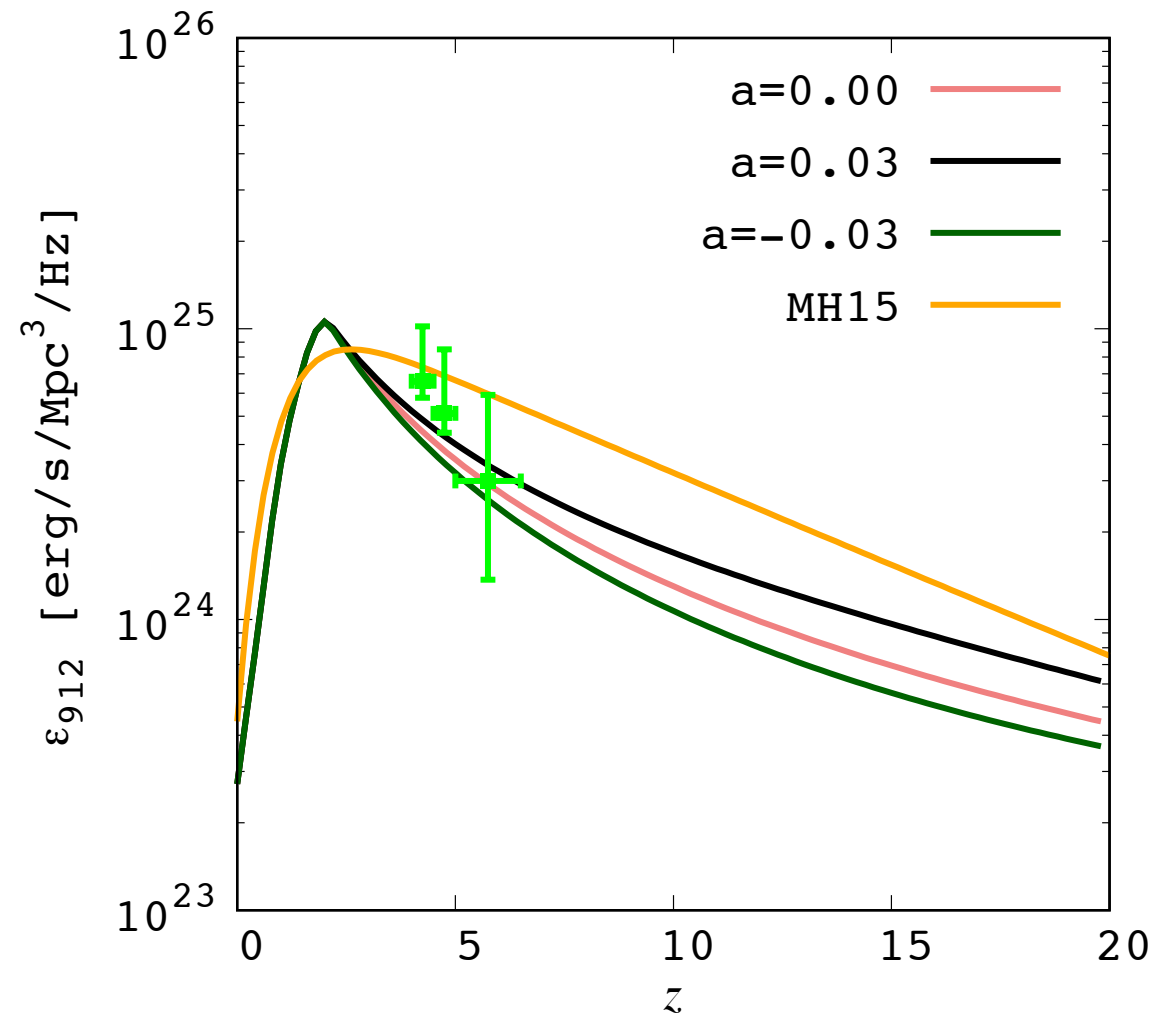
totalの結果は  $f_{\text{esc}} < 0.08$ ,  $a < 0.01$

ただし、結果はLFのfaint endやAGNの登場時期にも依存

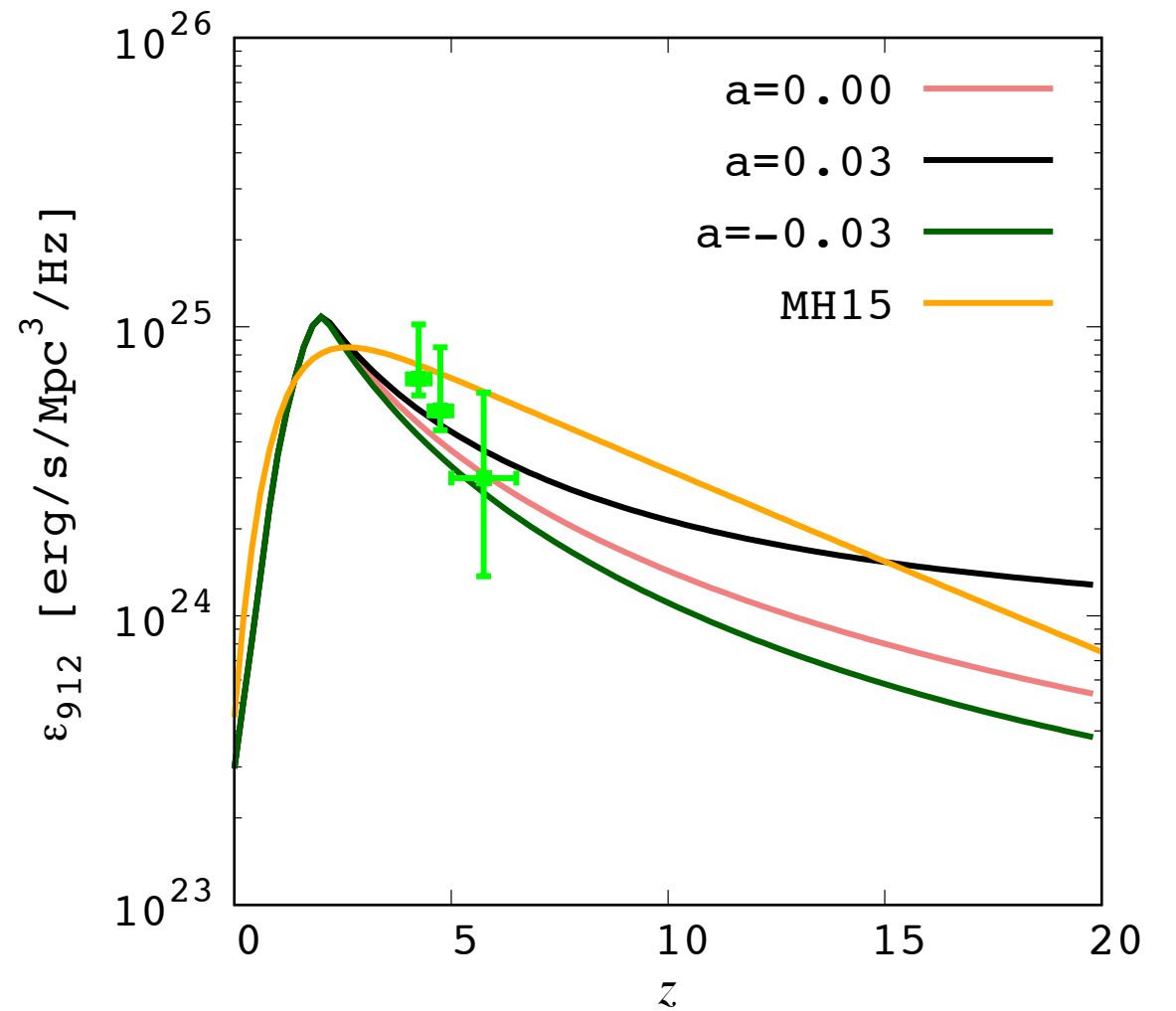
**Back up**

# ionizing emissivity

## faint end -18



## faint end -15

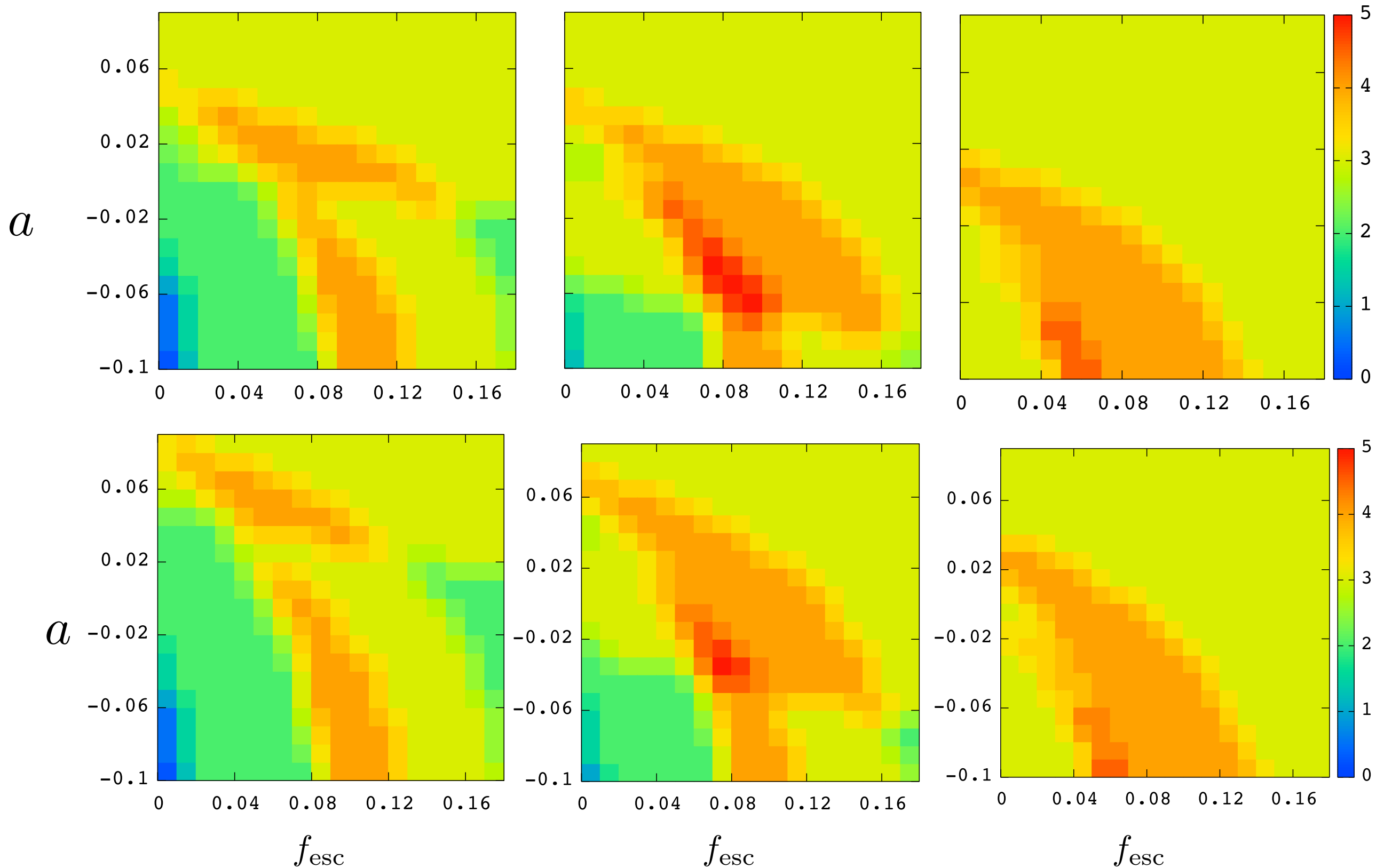


観測的制限 上段：faint end = -15 下段：デフォルト -18

$\epsilon = 0.5$

$\epsilon = 1.0$

$\epsilon = 5.0$

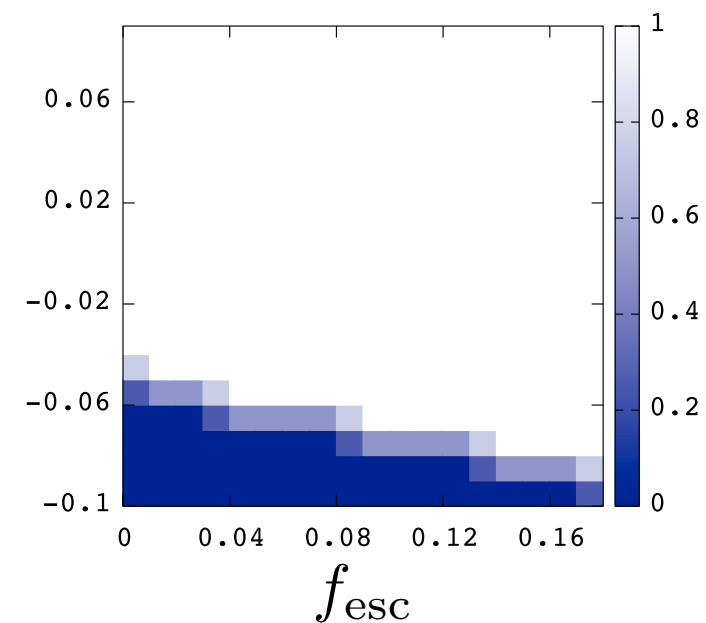
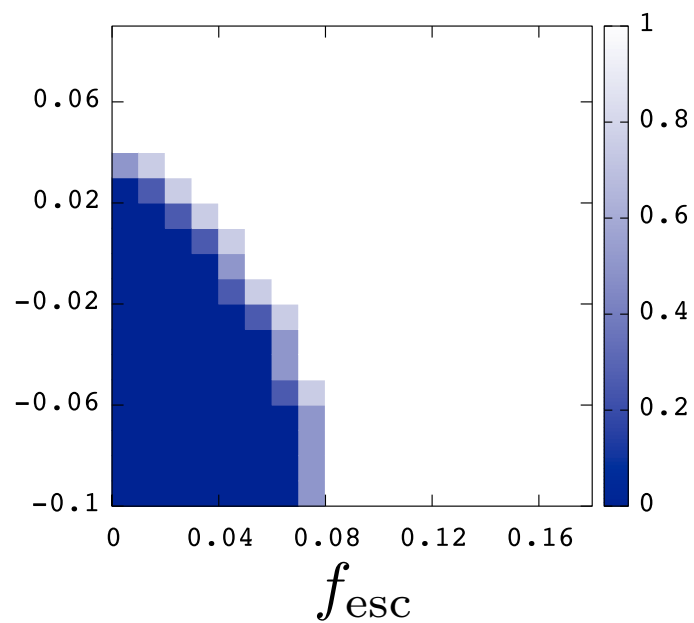
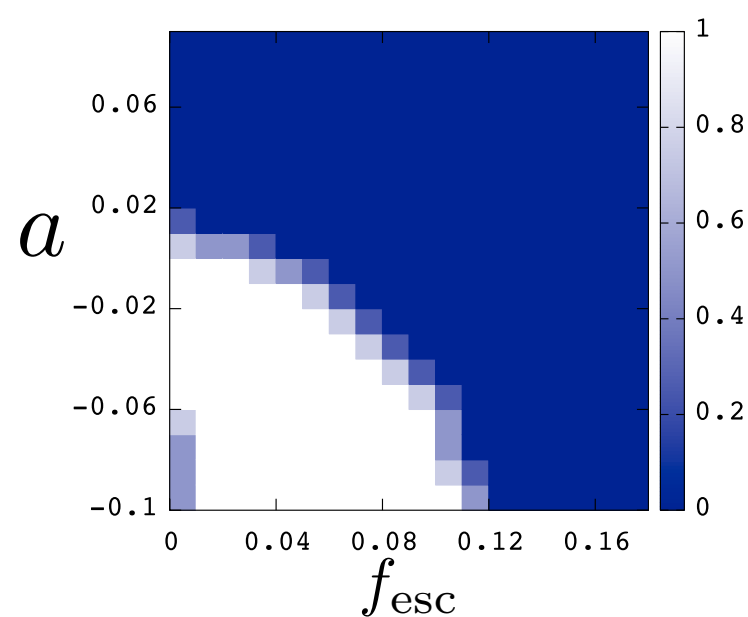


観測的制限  $\epsilon = 1.0$  faint end = -15

$$\tau = 0.055 \pm 0.009$$

$$z_{\text{H}} > 5.7$$

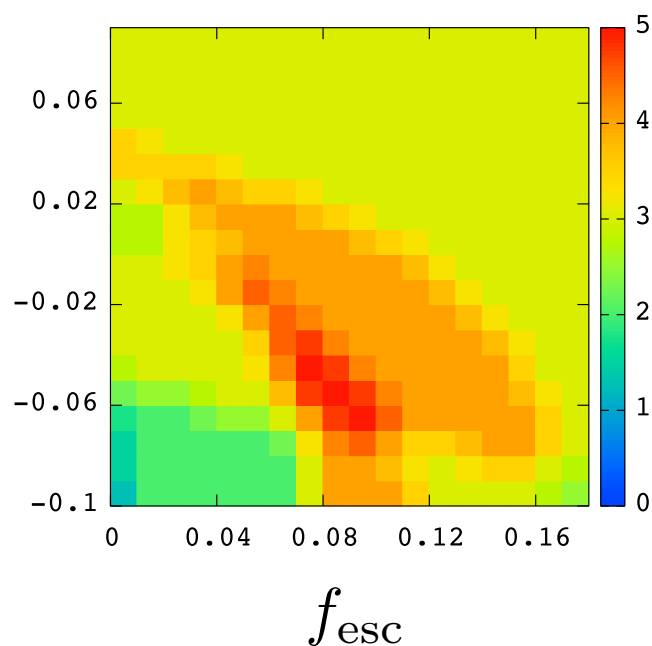
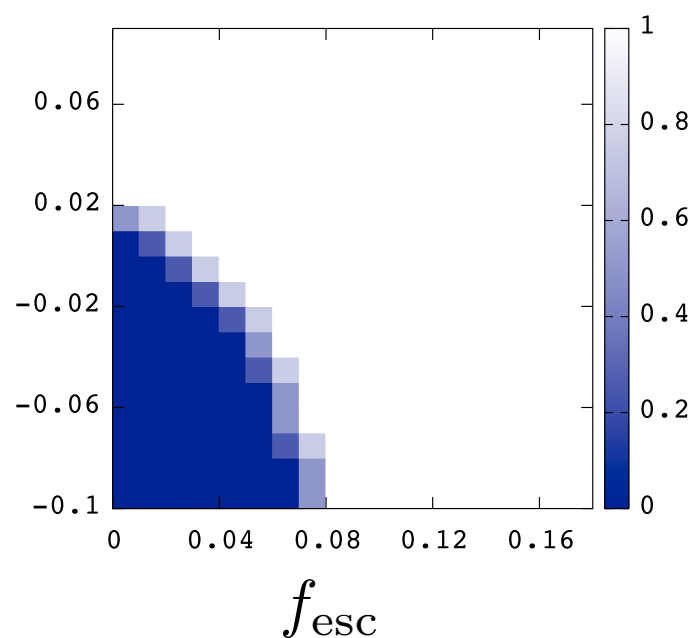
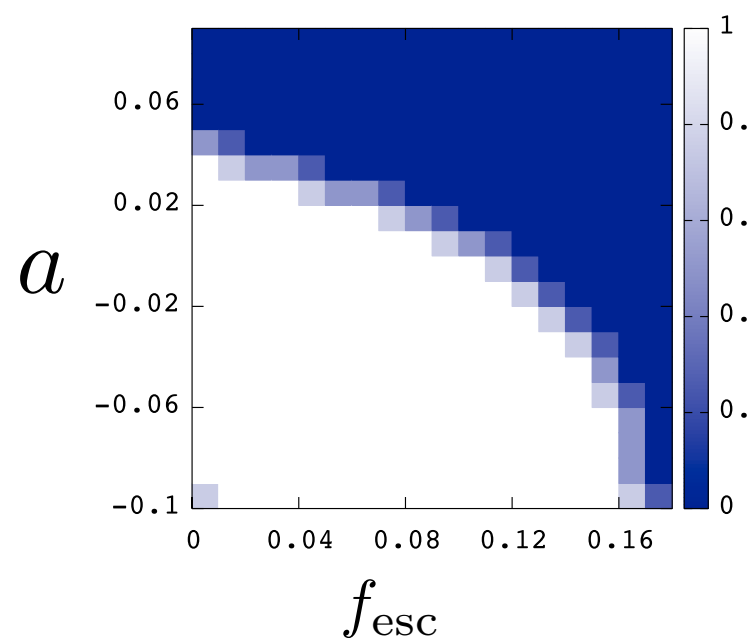
$$z_{\text{He}} > 3.4$$



$$0.3 < f_{\text{HI}} < 0.8$$
$$z = 7.3$$

$$f_{\text{HI}} < 0.2 \pm 0.2$$
$$z = 6.6$$

total



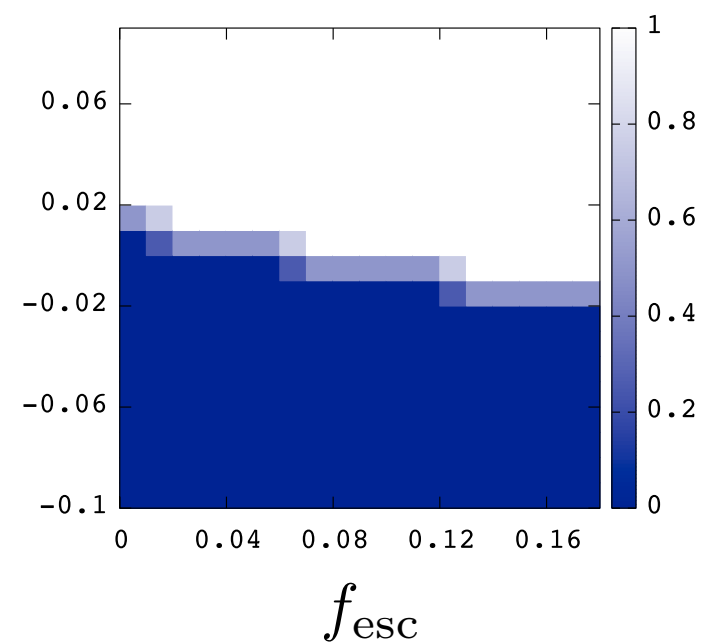
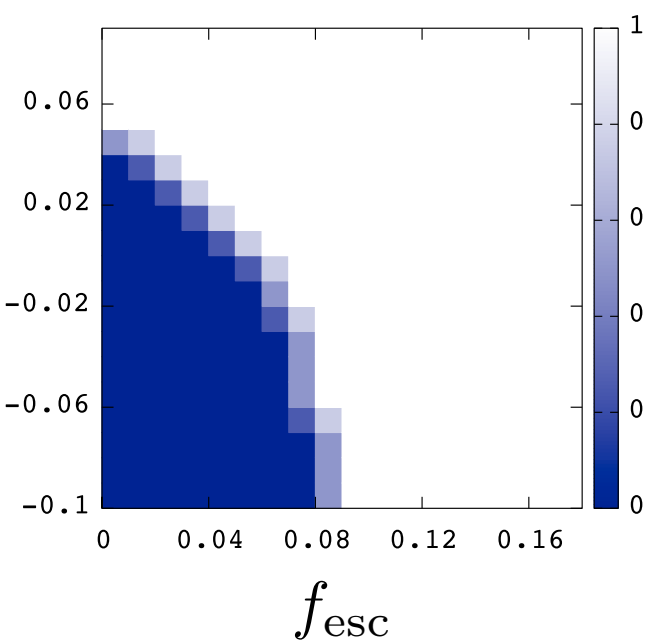
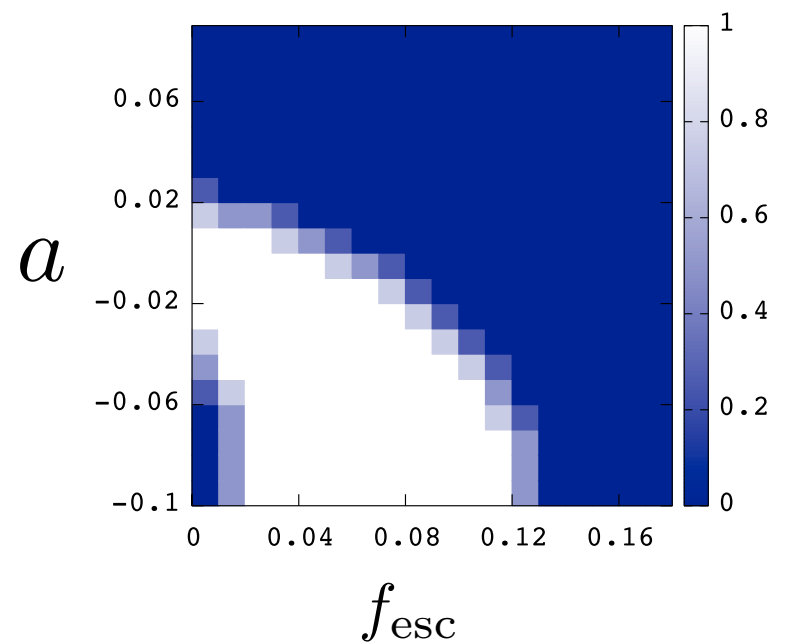


# 觀測的制限 $\epsilon = 0.5$ faint end = -15

$$\tau = 0.055 \pm 0.009$$

$$z_{\text{H}} > 5.7$$

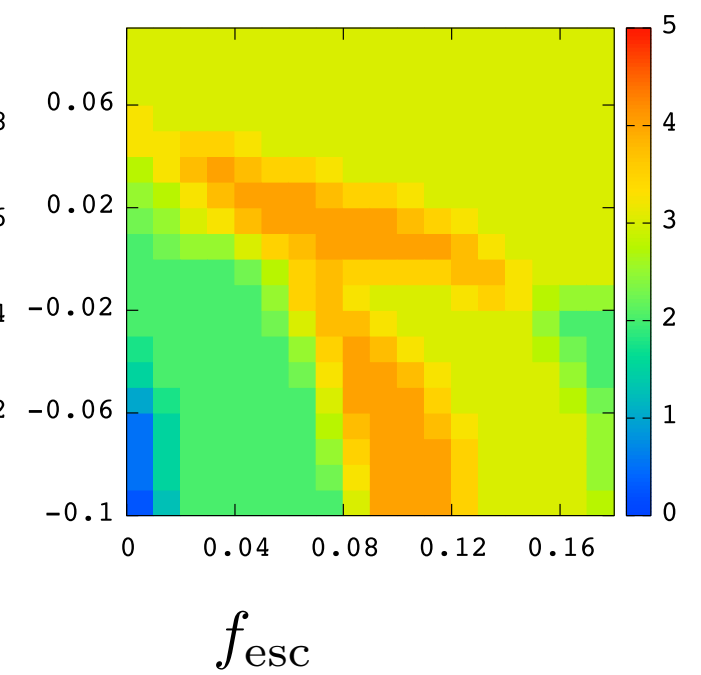
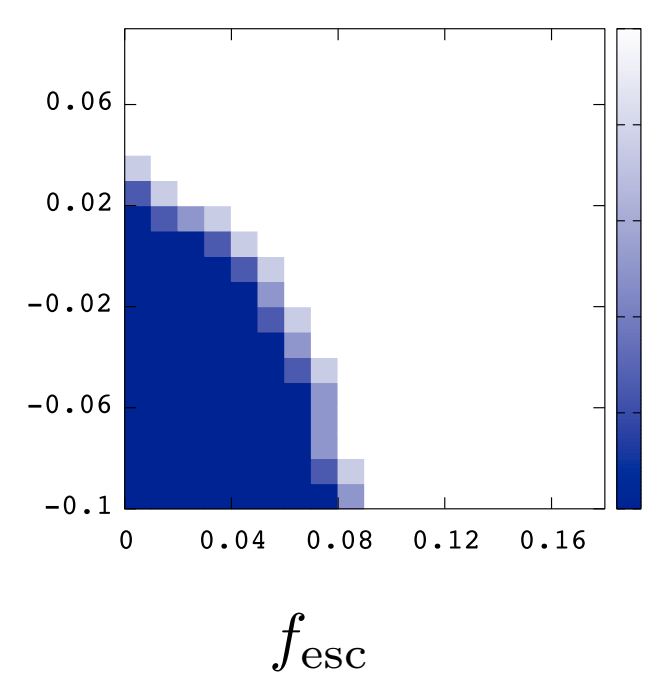
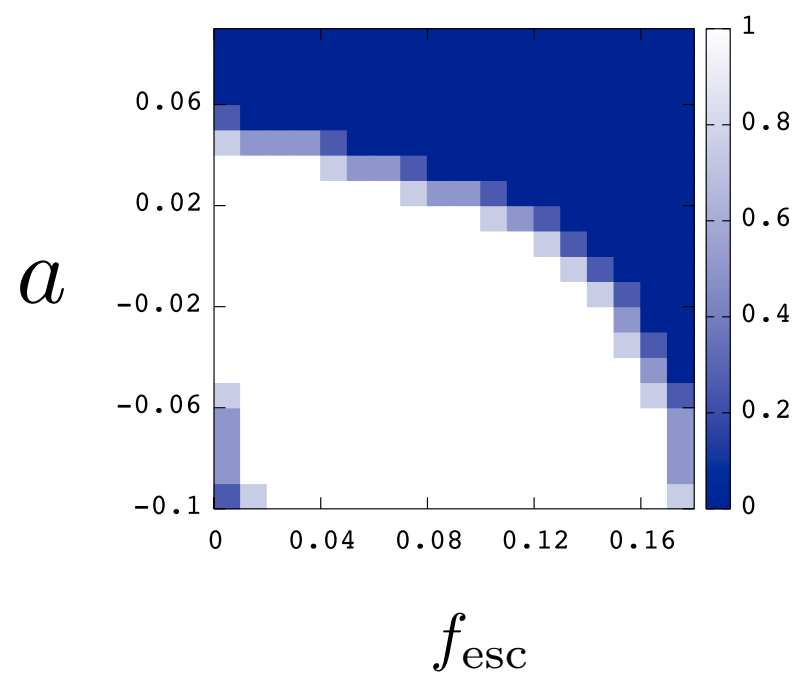
$$z_{\text{He}} > 3.4$$



$$0.3 < f_{\text{HI}} < 0.8$$
$$z = 7.3$$

$$f_{\text{HI}} < 0.2 \pm 0.2$$
$$z = 6.6$$

total

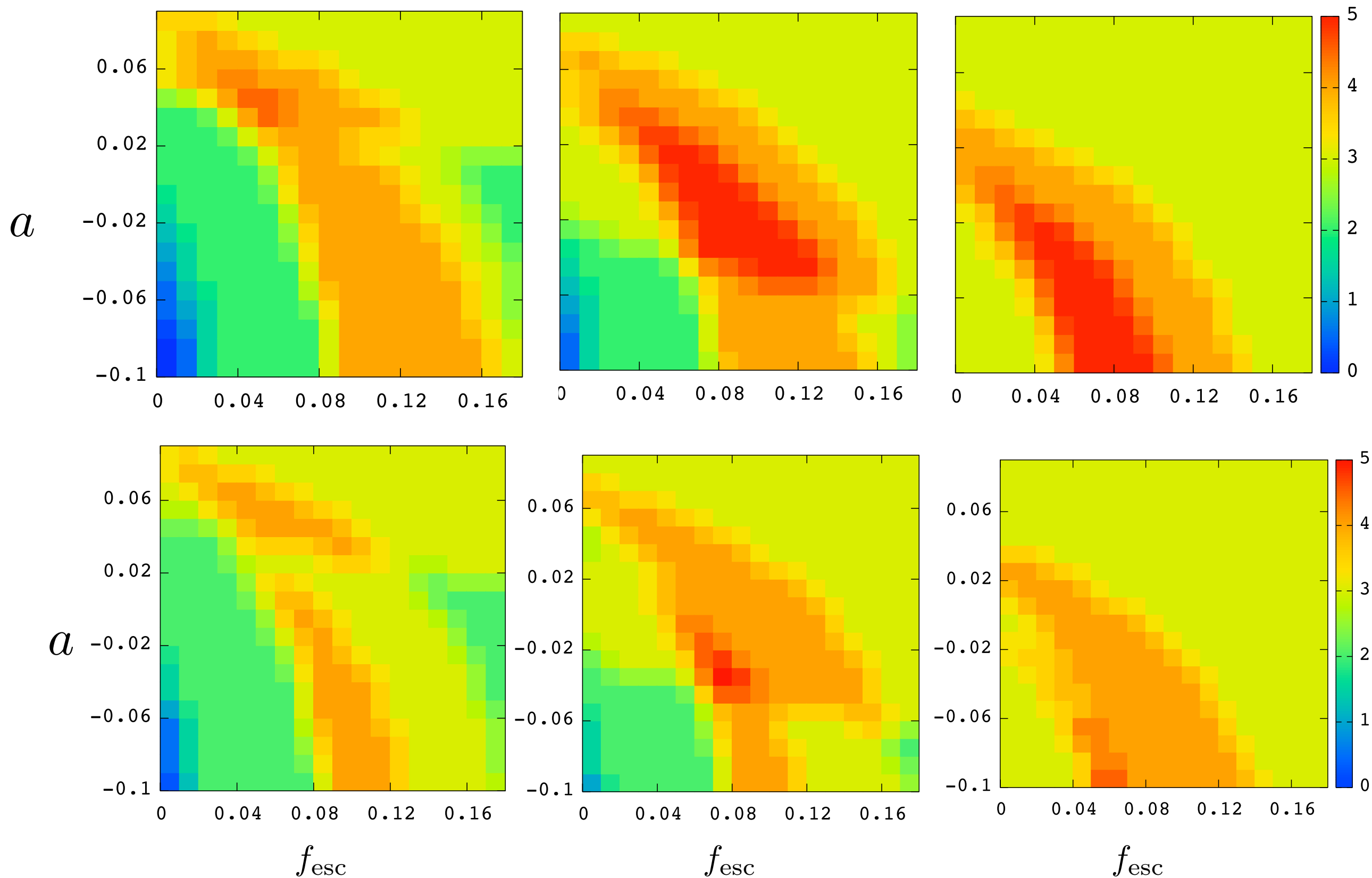


観測的制限 上段：AGN登場  $z=15$  下段：デフォルト  $z=20$

$\epsilon = 0.5$

$\epsilon = 1.0$

$\epsilon = 5.0$

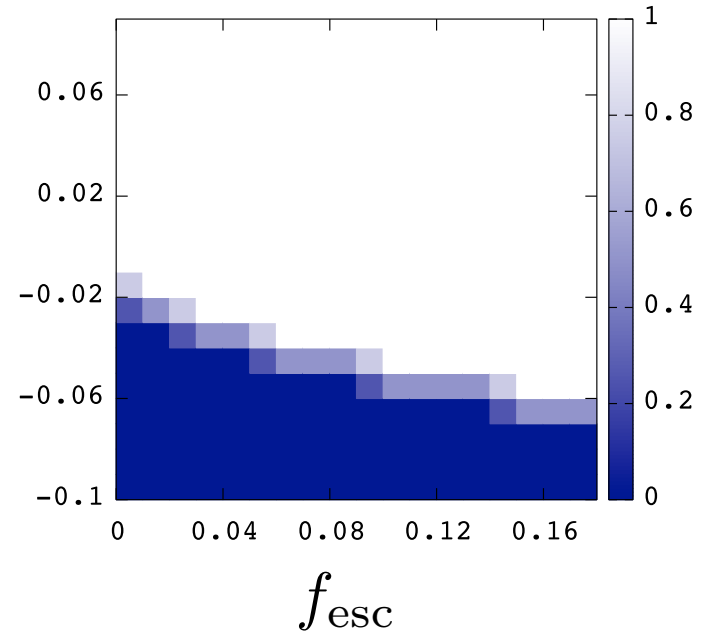
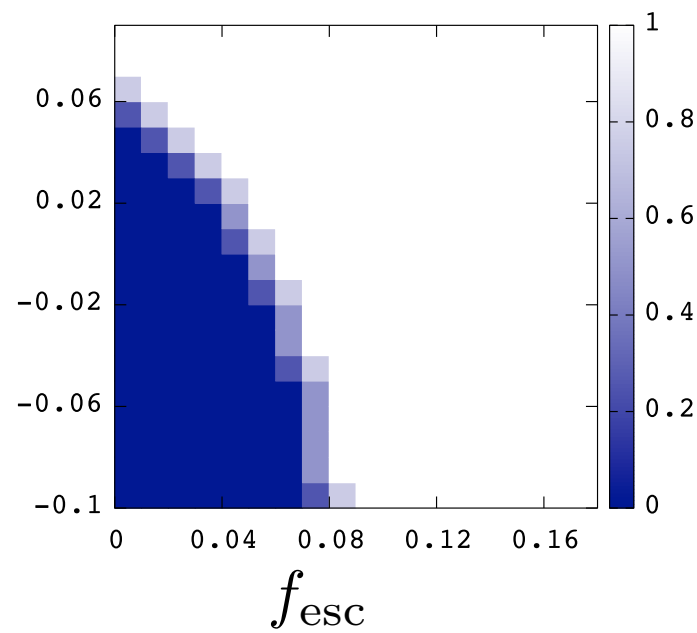
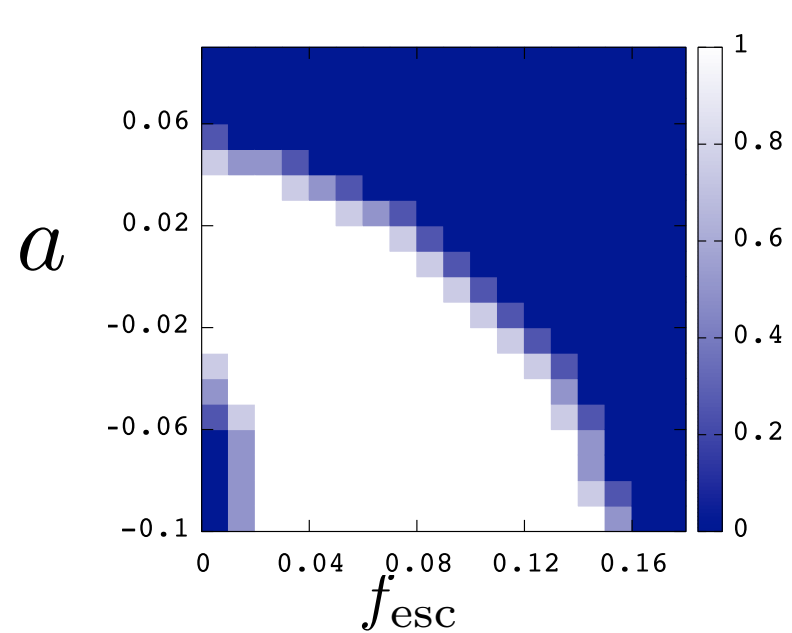


# 観測的制限 $\epsilon = 1.0$ AGN登場 $z=15$

$$\tau = 0.055 \pm 0.009$$

$$z_{\text{H}} > 5.7$$

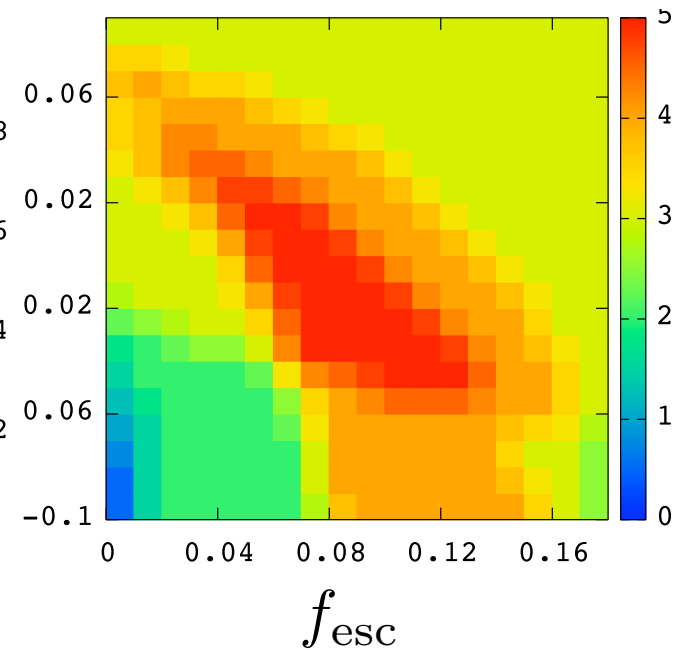
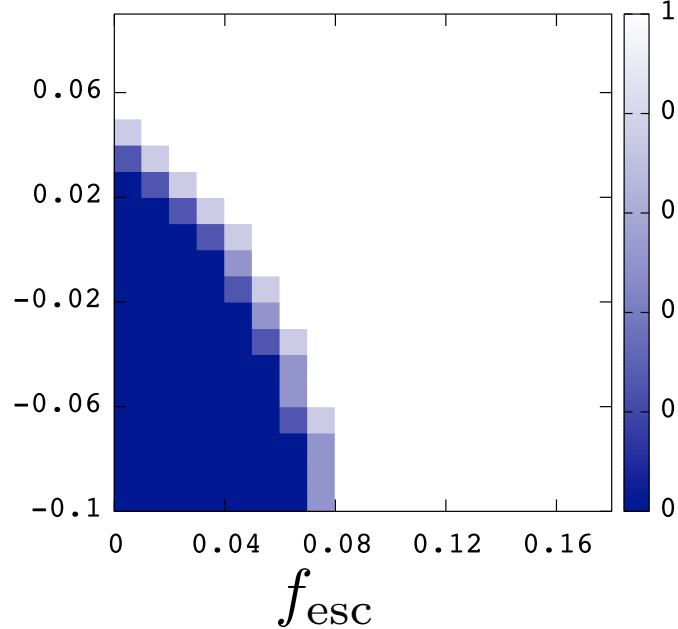
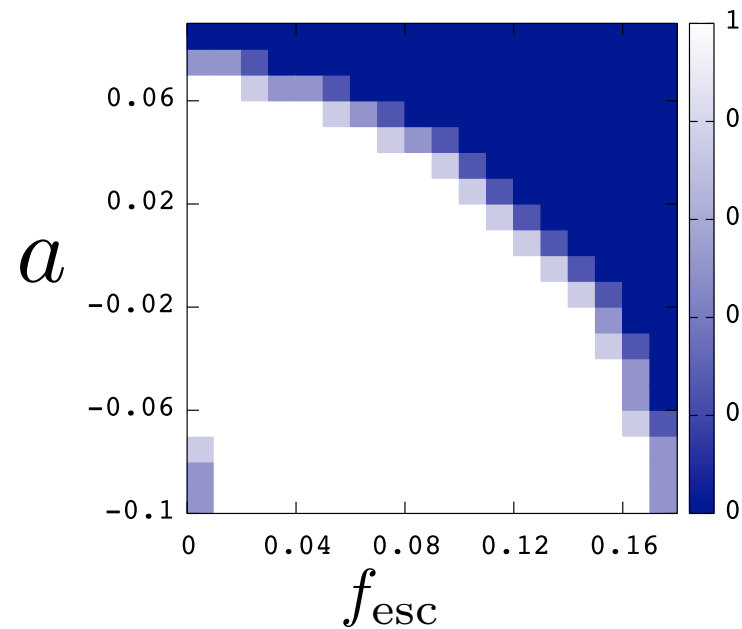
$$z_{\text{He}} > 3.4$$



$$0.3 < f_{\text{HI}} < 0.8$$
$$z = 7.3$$

$$f_{\text{HI}} < 0.2 \pm 0.2$$
$$z = 6.6$$

total

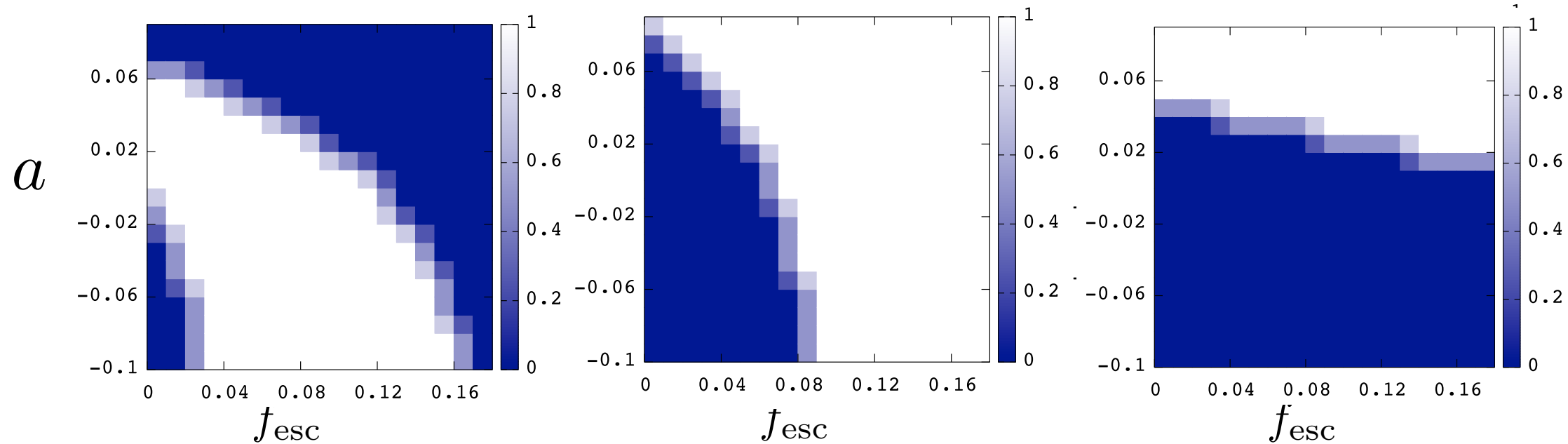


# 観測的制限 $\epsilon = 0.5$ AGN登場 $z=15$

$$\tau = 0.055 \pm 0.009$$

$$z_{\text{H}} > 5.7$$

$$z_{\text{He}} > 3.4$$



$$0.3 < f_{\text{HI}} < 0.8$$
$$z = 7.3$$

$$f_{\text{HI}} < 0.2 \pm 0.2$$
$$z = 6.6$$

total

