

光線追跡計算によるClumpy銀河 からの電離光子脱出率の見積もり



角田 匠(名古屋大学)

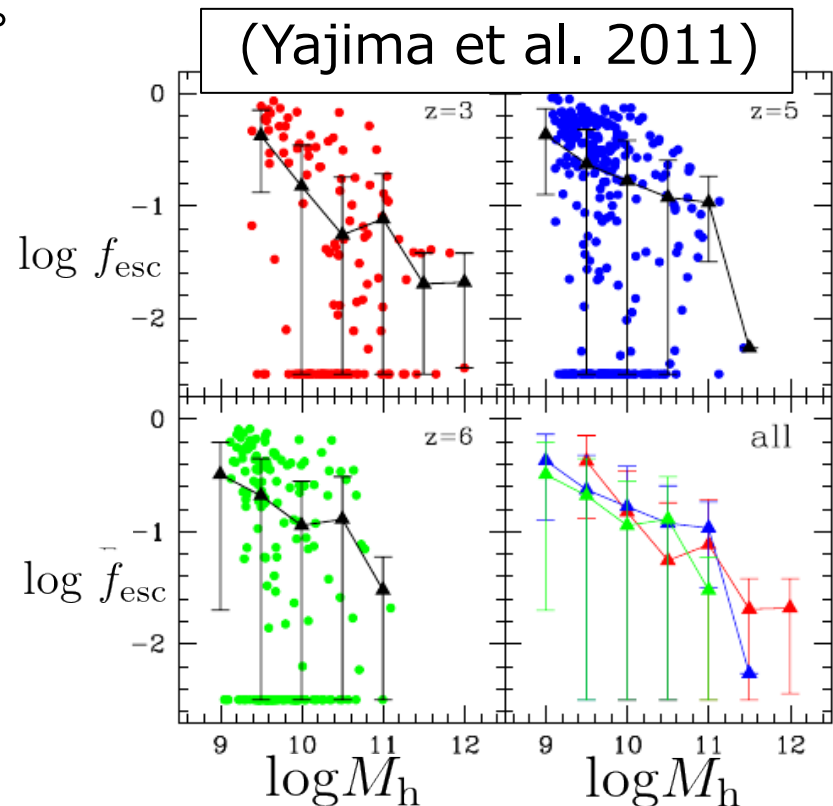
共同研究者 長谷川 賢二(名古屋大学), 柏野 大地(ETH Zurich)

INTRODUCTION

電離光子脱出率 (f_{esc})

- f_{esc} は銀河がどれくらい再電離に寄与したのかを知る上で重要なパラメータである。
- 今日までの観測やシミュレーションから電離光子脱出率は多様な値を示すことが知られている。

- 何が f_{esc} にどれくらいの影響を与えているのかはよくわかっていない



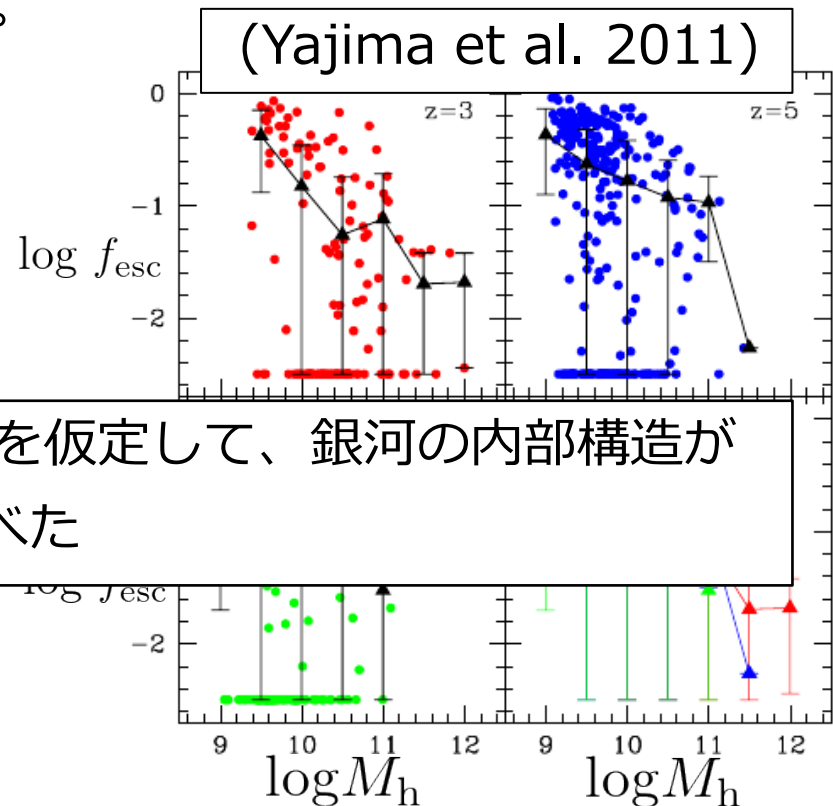
INTRODUCTION

電離光子脱出率 (f_{esc})

- f_{esc} は銀河がどれくらい再電離に寄与したのかを知る上で重要なパラメータである。
- 今日までの観測やシミュレーションから電離光子脱出率は多様な値を示すことが知られている。

- 何が f_{esc} にどれくらいの影響を与えているのかはよくわかっていない

単純化した銀河モデルを仮定して、銀河の内部構造が f_{esc} に与える影響を調べた



SETUP

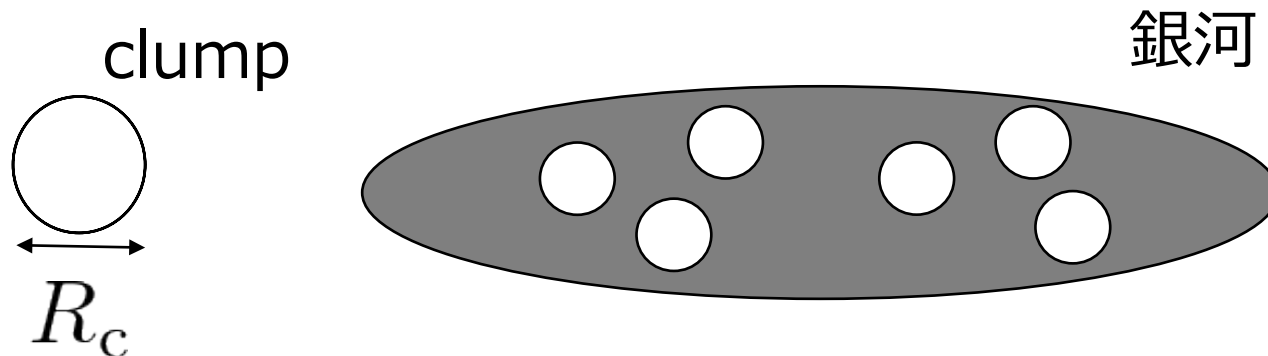
■ Clump

- 高密度なガスの塊(clump)について考える

Clump の性質

銀河内部にあるclumpの総数	N_c
Clumpの直径	R_c
Clump内の数密度	n_c

- Clumpを銀河内部にランダムに配置する



SETUP

■ Clump

- 高密度なガスの塊(clump)について考える

Clump の性質

銀河内部にあるclumpの総数	N_c
Clumpの直径	R_c
Clump内の数密度	n_c

仮定

- Clumpを銀河内部にランダムに配置する
- 銀河内部のどこにおいても clump 内の数密度は一定とする。
- 銀河の総質量は固定する。

SETUP

■ Clump

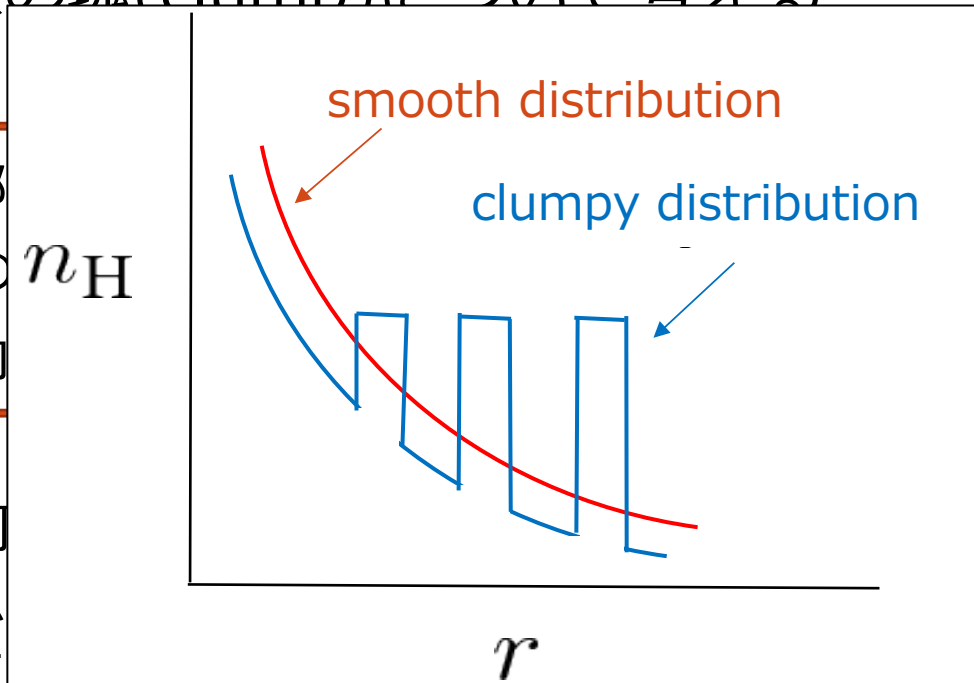
- 高密度なガスの塊 (clump) について考える

Clump の性質

銀河内部

Clump の n_H

Clump 内



仮定

- Clump を銀河
- 銀河内部のど
- 銀河の総質量は固定する。

ガスの数密度プロファイル (smooth distribution)

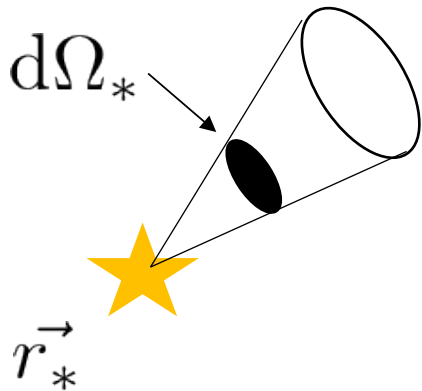
$$n_H(r, Z) = n_0 \exp[-r/r_h] \operatorname{sech}^2(Z/z_0)$$

SETUP

■ 電離光子脱出率の見積もり

レイトレーシング法を用いて、電離平衡の計算を行う

$$Q \frac{d\Omega_*}{4\pi} = \alpha_B \int_0^{r_s} n_{\text{gas}}^2(r, \phi, \theta) r_*^2 dr_* d\Omega_*$$



: 電離光子源からの距離

- Q : 単位時間あたりに電離光子源から放射される電離光子数
- r_s : ストレンジレン半径

仮定

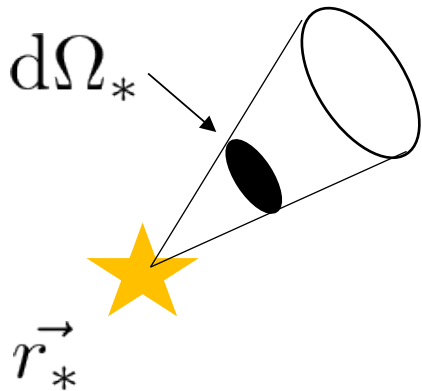
- 電離光子源は星団とする。
- 電離光子源は銀河面上に分布している。
- どの電離光子源も単位時間あたりに放射する電離光子数は同じとする

SETUP

- 電離光子脱出率の見積もり

レイトレーシング法を用いて、電離平衡の計算を行う

$$Q \frac{d\Omega_*}{4\pi} = \alpha_B \int_0^{r_s} n_{\text{gas}}^2(r, \phi, \theta) r_*^2 dr_* d\Omega_*$$



Q : 単位時間あたりに電離光子源から放射される電離光子数
 r_s : ストレンジレン半径

$d\Omega_*$ において、 r_s が銀河より大きい



幾らかの電離光子が銀河から脱出している

$$f_{\text{esc}} = \frac{\text{銀河から脱出する電離光子数}}{\text{銀河内で生産される電離光子数}}$$

RESULTS



RESULTS

▪ no clumps の場合

銀河の質量に対する星質量の割合

$$f_* = 0.1$$

ハローの質量 $M_{\text{halo}} = 10^9 M_{\odot}$

仮定

銀河内部で生成される
全電離光子数は全ての計算で同じ

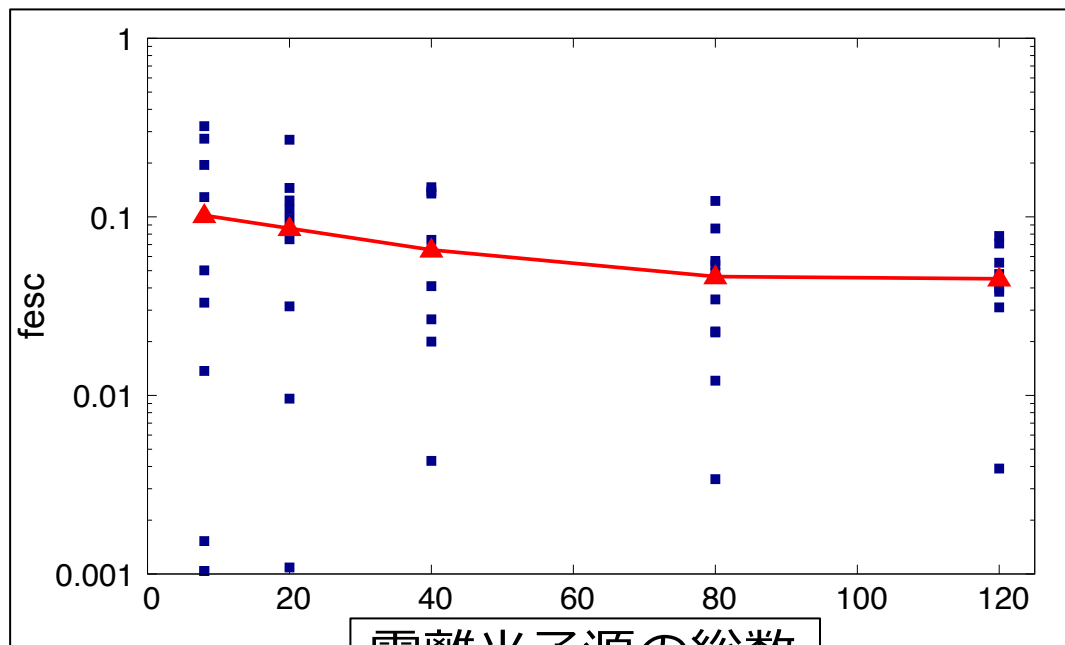


電離光子源の数を増やすと
1つの電離光子源が放射する
電離光子数は小さくなる

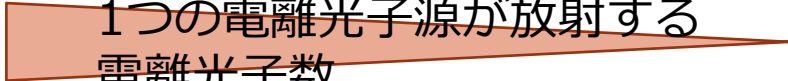
結果

- 電離光子源が少ないと電離光子脱出率の多様性が大きくなる
- 電離光子源の数が増えるにつれて電離光子脱出率は下がる傾向にある

電離光子源の数と電離光子脱出率の関係



電離光子源の総数

大  1つの電離光子源が放射する
電離光子数 小

RESULTS

▪ no clumps の場合

銀河の質量に対する星質量の割合

$$f_* = 0.1$$

仮定

1つの電離光子源が放射する
電離光子数は一定とする

$$(Q = 10^{52})$$

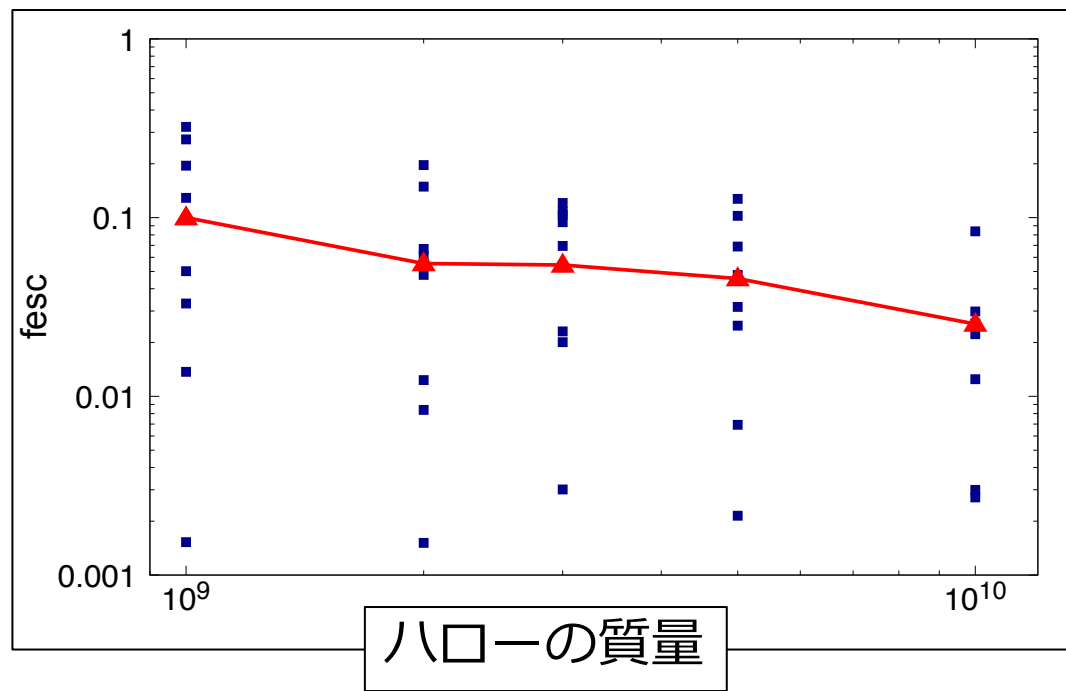
結果

ハローの質量が増加すると scale height や scale radius が大きくなる



電離光子脱出率は下がる

ハローの質量と電離光子脱出率の関係



RESULTS

Clump がある場合

パラメータ

----- 定数 -----

ハローの質量 :

$$M_{\text{halo}} = 10^9 M_{\odot}$$

Clumpの直径 : $R_c = 10 \text{ pc}$

clump内のガスの数密度:

$$n_c = 100 \text{ cm}^{-3}$$

----- 変数 -----

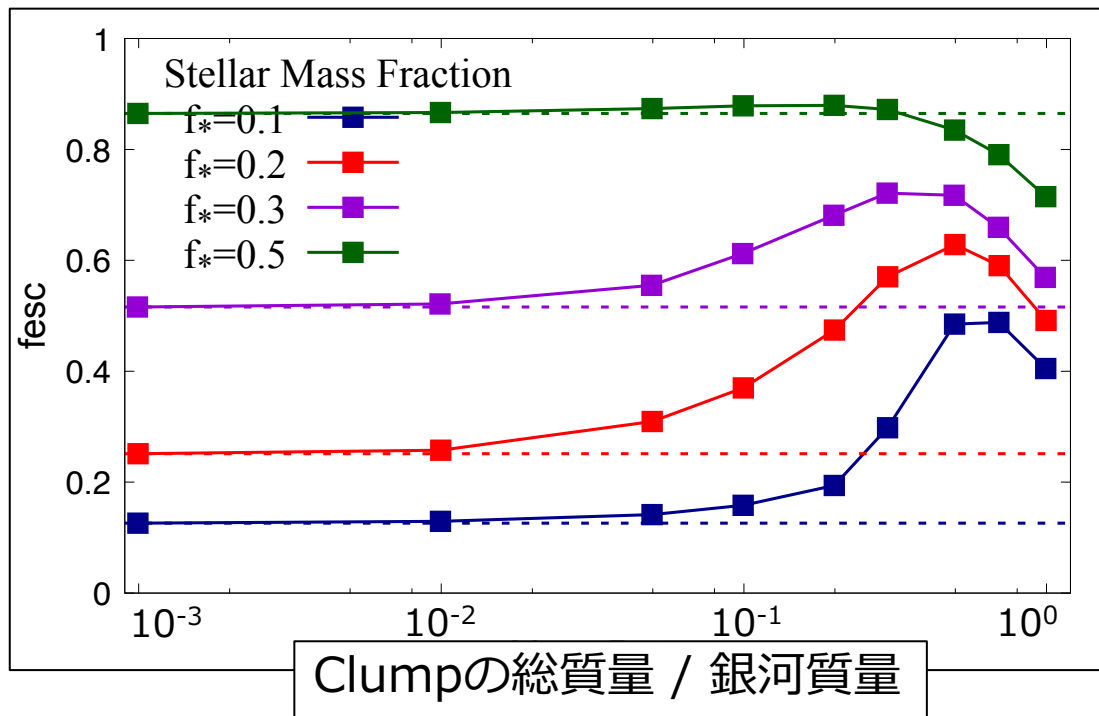
星質量の割合 : f_*

Clumpの総数 : N_c

Clumpの質量

$$M_c = \frac{4\pi}{3} R_c^3 n_c$$

clumpの総質量比と電離光子脱出率の関係



RESULTS

Clump がある場合

パラメータ

----- 定数 -----

ハローの質量 :

$$M_{\text{halo}} = 10^9 M_{\odot}$$

Clumpの直径 : $R_c = 10 \text{ pc}$

clump内のガスの数密度:

$$n_c = 100 \text{ cm}^{-3}$$

----- 変数 -----

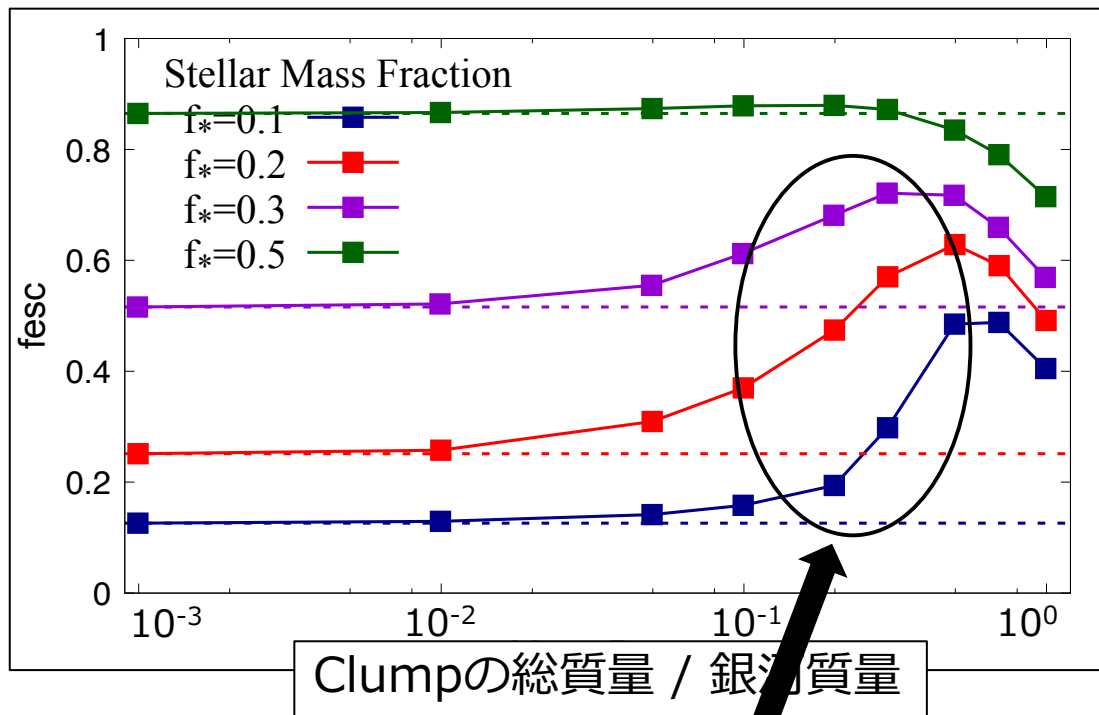
星質量の割合 : f_*

Clumpの総数 : N_c

Clumpの質量

$$M_c = \frac{4\pi}{3} R_c^3 n_c$$

clumpの総質量比と電離光子脱出率の関係



- Clumpでない領域の数密度は低いので電離光子が脱出しやすくなる

RESULTS

Clump がある場合

パラメータ

----- 定数 -----

ハローの質量 :

M_h

Clumpの直径

clump内のガ

$n_c = 100 \text{ cm}^{-3}$

----- 変数 -----

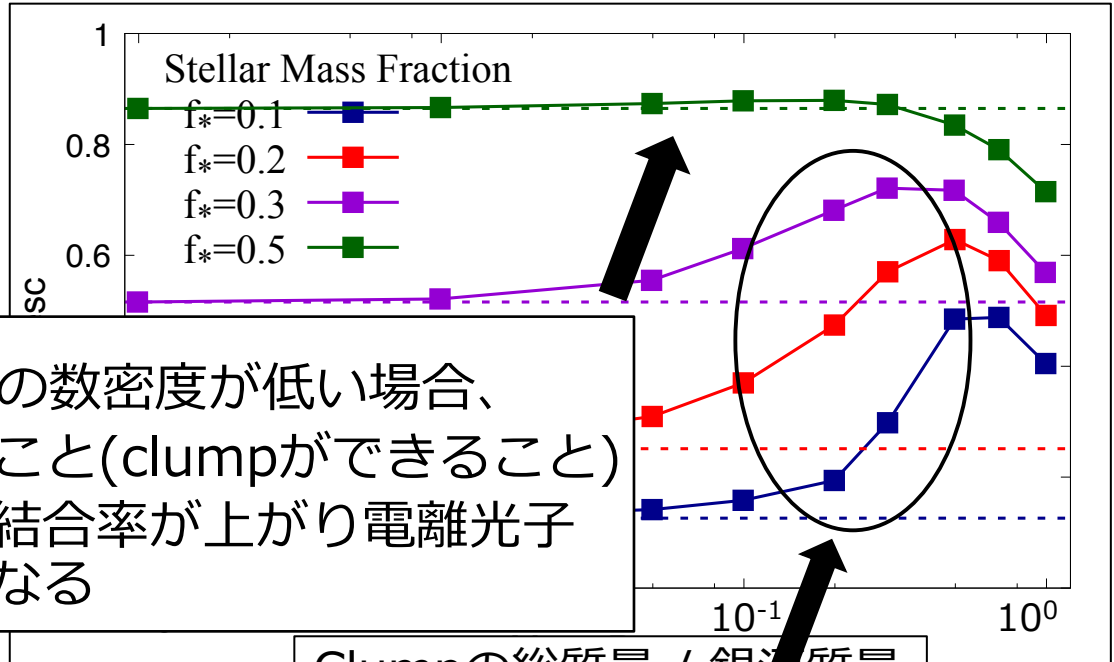
星質量の割合 : f_*

Clumpの総数 : N_c

Clumpの質量

$$M_c = \frac{4\pi}{3} R_c^3 n_c$$

clumpの総質量比と電離光子脱出率の関係



Clumpの総質量 / 銀河質量

もともとガスの数密度が低い場合、ガスが集まること(clumpができること)によって、再結合率が上がり電離光子脱出率が低くなる

Clumpでない領域の数密度は低いので電離光子が脱出しやすくなる

RESULTS

Clump がある場合

パラメータ

----- 定数 -----

ハローの質量 :

$$M_{\text{halo}} = 10^9 M_{\odot}$$

Clumpの直径 : $R_c = 10 \text{ pc}$

clump内のガスの数密度:

$$n_c = 100 \text{ cm}^{-3}$$

----- 変数 -----

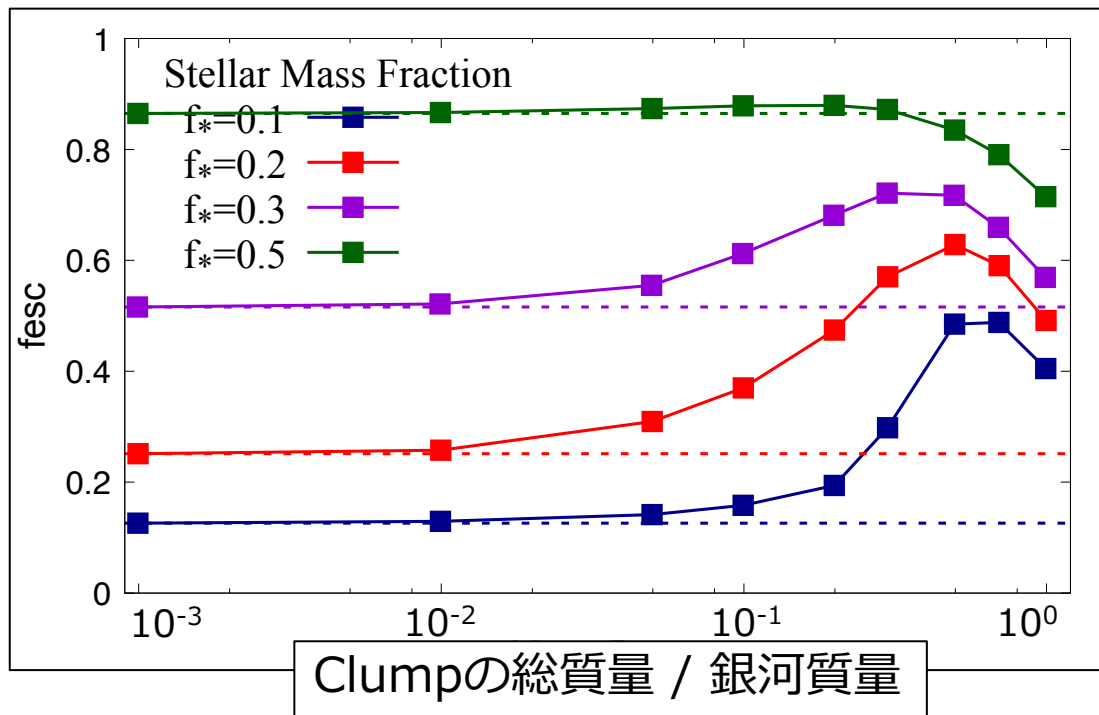
星質量の割合 : f_*

Clumpの総数 : N_c

Clumpの質量

$$M_c = \frac{4\pi}{3} R_c^3 n_c$$

clumpの総質量比と電離光子脱出率の関係



- 星質量の割合が増えるに従って電離光子脱出率は高くなる
- Clumpの総質量比が ~ 0.1 あたりから電離光子脱出率が変化し始める

RESULTS

・ Clump がある場合

パラメータ

----- 定数 -----

ハローの質量 :

$$M_{\text{halo}} = 10^9 M_{\odot}$$

星質量の割合 : $f_* = 0.1$

clump内のガスの数密度:

$$n_c = 100 \text{ cm}^{-3}$$

----- 変数 -----

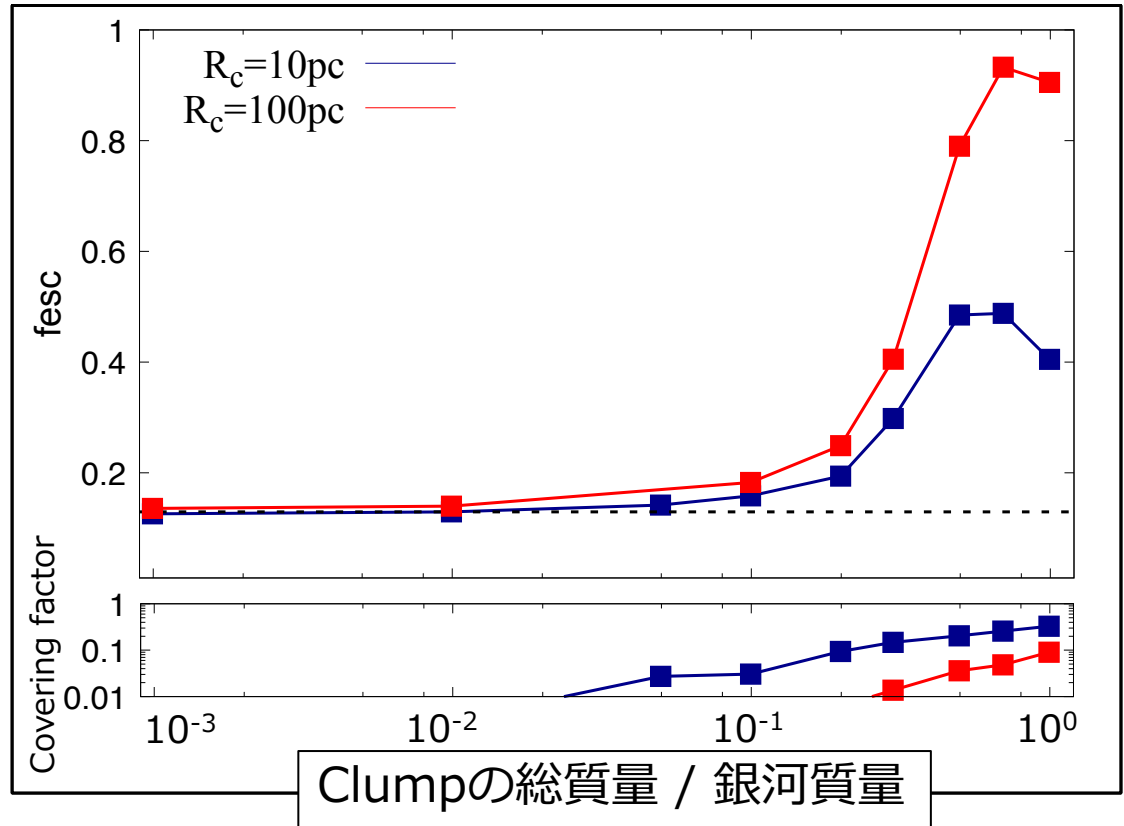
Clumpの直径 : R_c

Clumpの総数 : N_c

Clumpの質量

$$M_c = \frac{4\pi}{3} R_c^3 n_c$$

clumpの総質量比と電離光子脱出率の関係



RESULTS

・ Clump がある場合

パラメータ

----- 定数 -----

ハローの質量 :

$$M_{\text{halo}} = 10^9 M_{\odot}$$

星質量の割合 : $f_* = 0.1$

clump内のガスの数密度:

$$n_c = 100 \text{ cm}^{-3}$$

----- 変数 -----

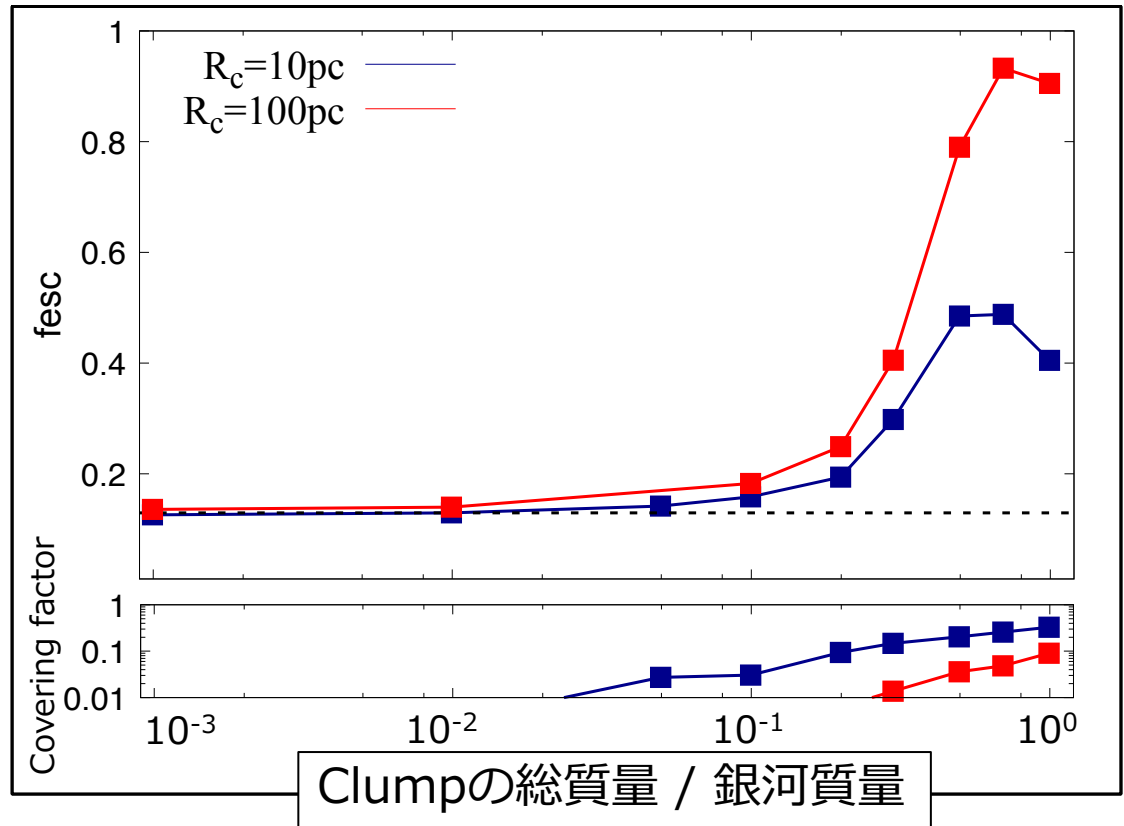
Clumpの直径 : R_c

Clumpの総数 : N_c

Clumpの質量

$$M_c = \frac{4\pi}{3} R_c^3 n_c$$

clumpの総質量比と電離光子脱出率の関係



Clumpの直径が大きくなるにつれて
clumpのcovering factorが小さくなる



Clumpを大きくすると電離光子脱出率は高くなる

RESULTS

・ Clump がある場合

パラメータ

----- 定数 -----

ハローの質量 :

$$M_{\text{halo}} = 10^9 M_{\odot}$$

星質量の割合 : $f_* = 0.1$

clump内のガスの数密度:

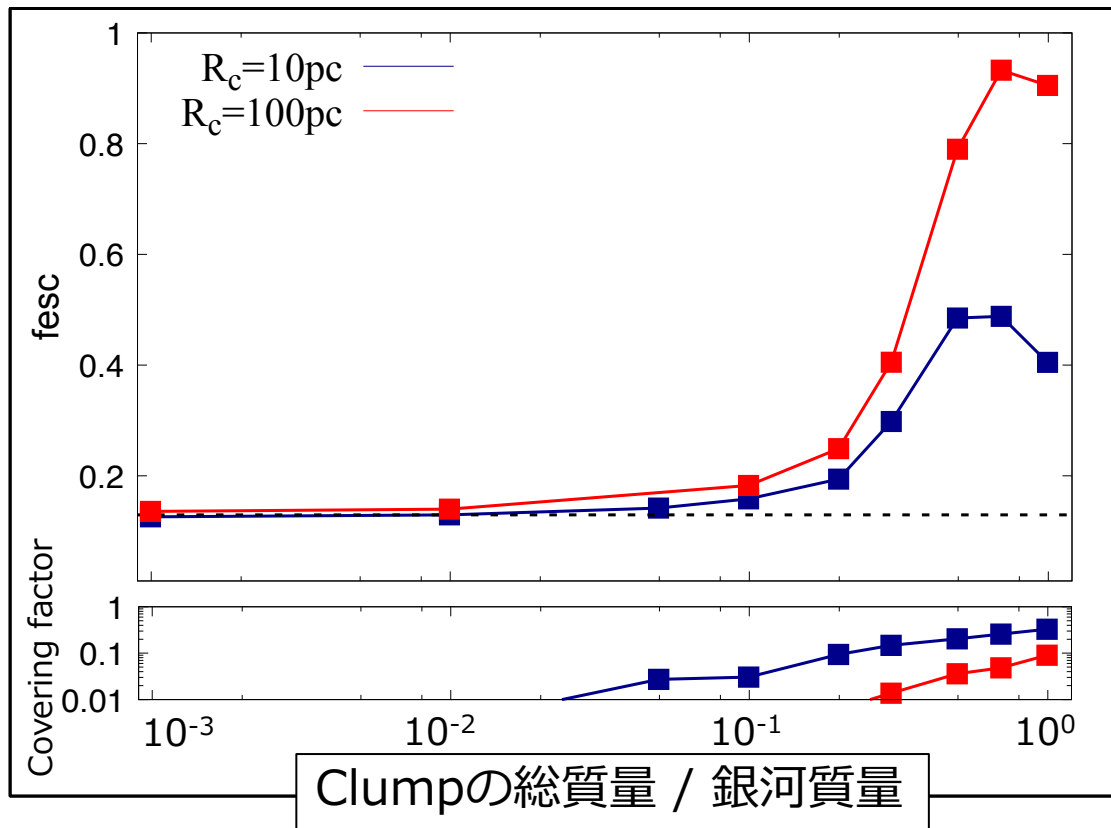
$$n_c = 100 \text{ cm}^{-3}$$

----- 変数 -----

Clumpの直径 : R_c

Clumpの総数 : N_c

clumpの総質量比と電離光子脱出率の関係



Clumpの直径が大きくなるにつれて

Clump

シミュレーションの空間分解能によって
電離光子脱出率が変わる

Clumpを小さくすると電離光子脱出率は高くなる

RESULTS

・ Clump がある場合

パラメータ

----- 定数 -----

Clumpの直径 : $R_c = 10 \text{ pc}$

星質量の割合 : $f_* = 0.1$

clump内のガスの数密度:

$$n_c = 100 \text{ cm}^{-3}$$

----- 変数 -----

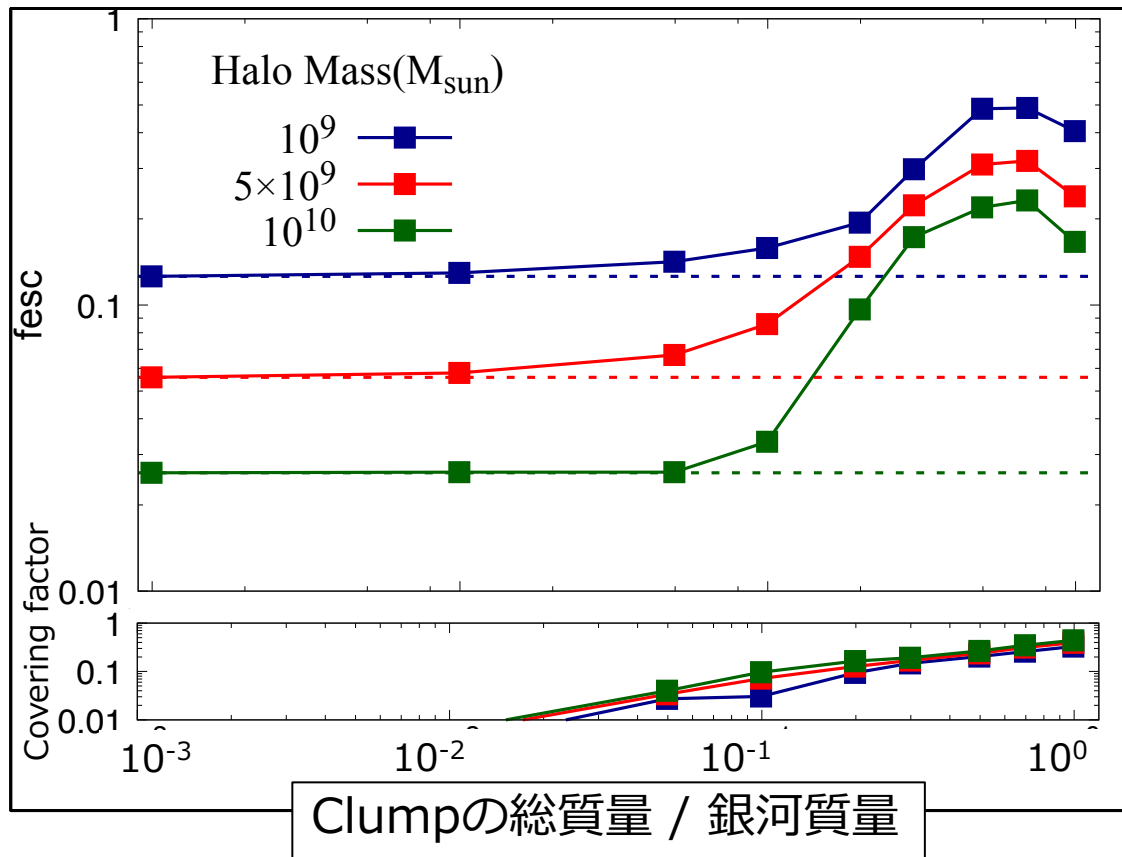
ハローの質量 : M_{halo}

Clumpの総数 : N_c

Clumpの質量

$$M_c = \frac{4\pi}{3} R_c^3 n_c$$

clumpの総質量比と電離光子脱出率の関係



ハローの質量が増加するに従って
電離光子脱出率は低くなる

SUMMARY

----- 結果 -----

- 電離光子脱出率は電離光子源の位置によって2桁ほど変化する
- Clumpを考慮した場合、その性質によって最大5倍ほど電離光子脱出率が高くなる

----- 電離光子脱出率の多様性の起源 -----

Clumpがない場合



電離光子源の位置

Clumpがある場合



Clumpの総質量 / 銀河質量

Clumpのcovering factor