

# SMBH形成問題における 軽い種BH急成長シナリオの実現性

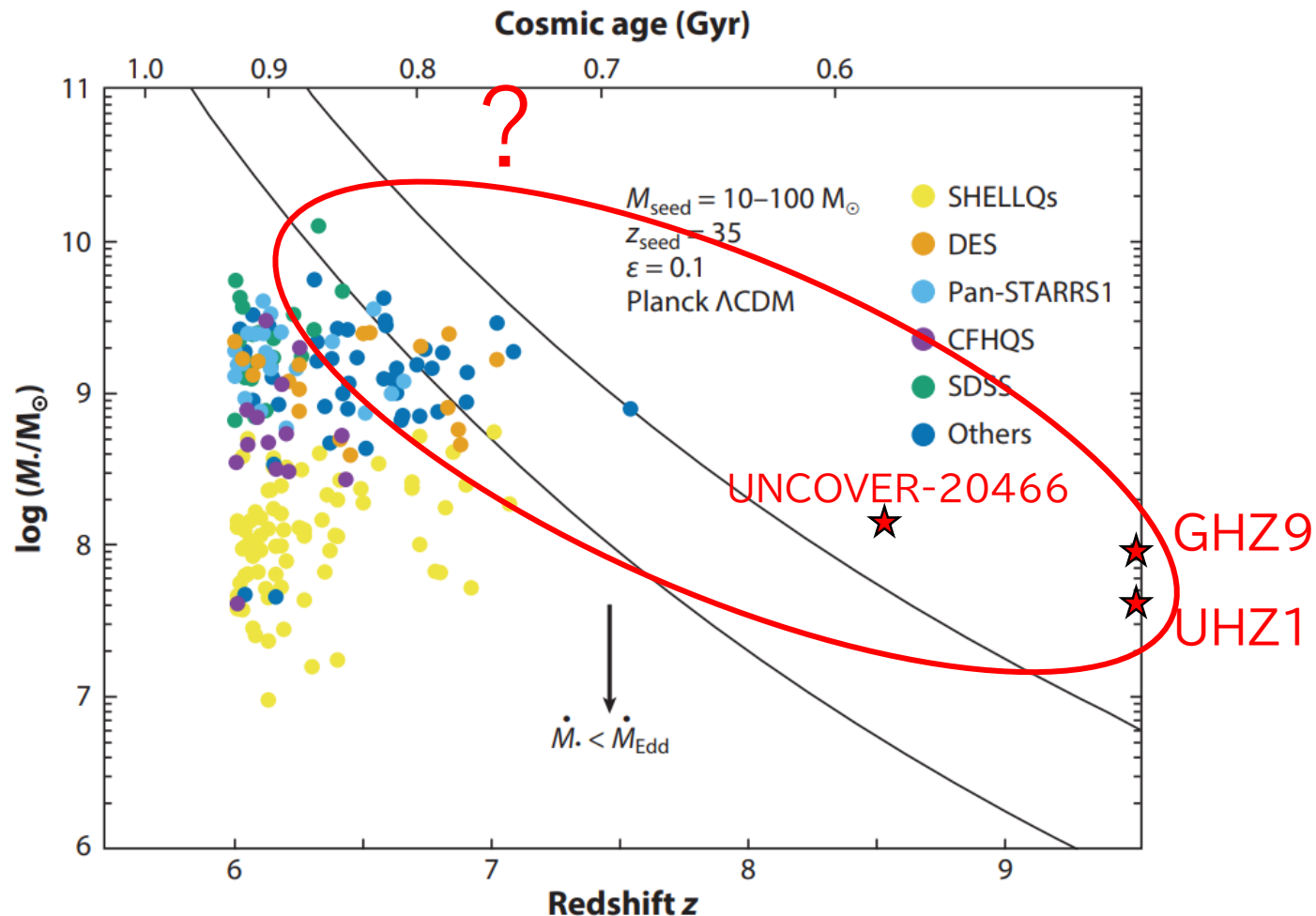
(Kiyuna 2025)

喜友名正樹(東北大学PD)



1. インポート□

# 超大質量ブラックホール



Inayoshi K. et al., ARAA (2020)

✓ 銀河中心に普遍的に存在.  
質量  $10^5-10^6 M_{\odot}$

✓ どのように形成されたか  
未解決問題

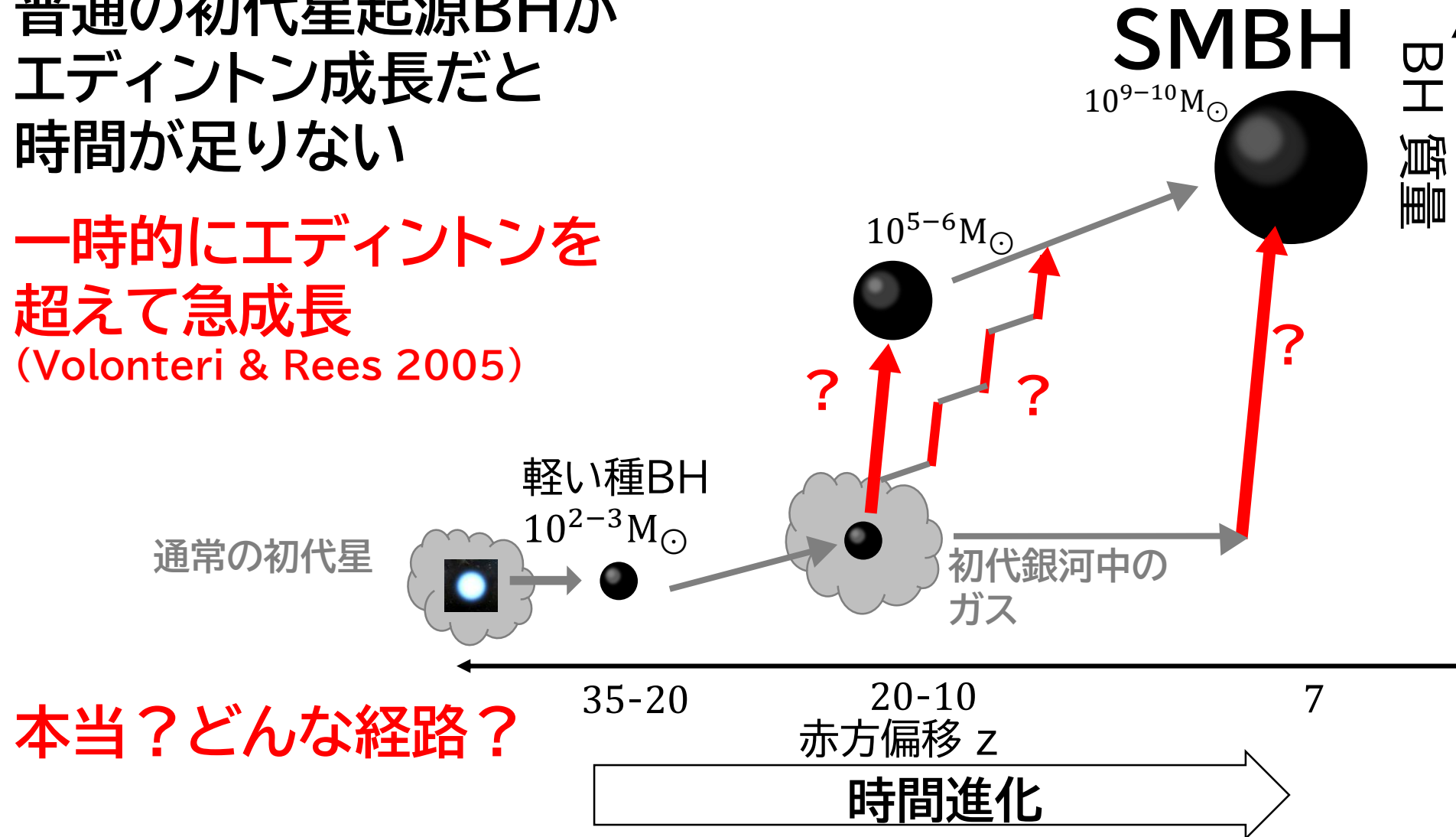
✓ 宇宙初期にも存在  
 $z = 6 - 10$   
 $M_{\text{BH}} = 10^9-10^{10} M_{\odot}$   
短期間にどう作る？

✓ Little Red Dotsが  
起源解明に重要！？

# SMBH形成シナリオ

普通の初代星起源BHが  
エディントン成長だと  
時間が足りない

一時的にエディントンを  
超えて急成長  
(Volonteri & Rees 2005)

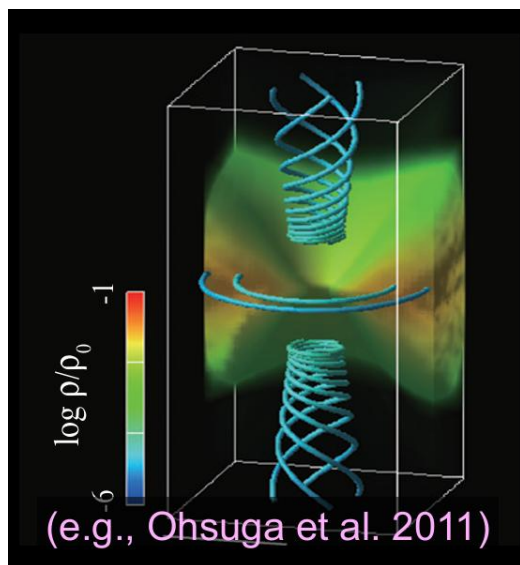


本当?どんな経路?

# 各スケールの超エディントン降着問題

小スケール ← → 大スケール

降着円盤スケール  
 $\sim 10^{-8} \text{ pc}$

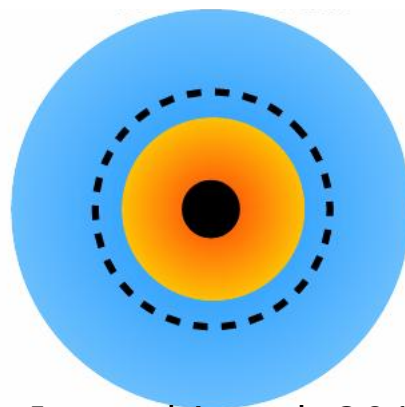


非球対称構造

Bondi スケール  
 $\sim 10^{-1} \text{ pc}$

密度 大

Bondi半径 > 電離半径



(e.g. Inayoshi et al. 2016)

photon-trapping  
(光子も引きずって降着)

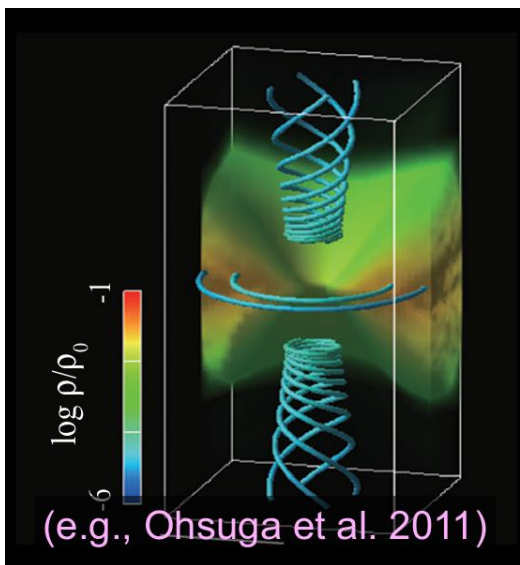
により 定常的な超エディントン降着が**可能**

$\dot{M} > 3000 \dot{M}_{\text{Edd}}$  が維持できれば  $10^3 M_{\odot} \rightarrow 10^{5-6} M_{\odot}$

# 各スケールの超エディントン降着問題

小スケール ← → 大スケール

降着円盤スケール  
 $\sim 10^{-8} \text{ pc}$

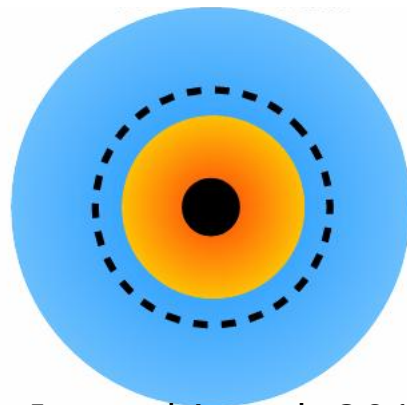


非球対称構造

Bondi スケール  
 $\sim 10^{-1} \text{ pc}$

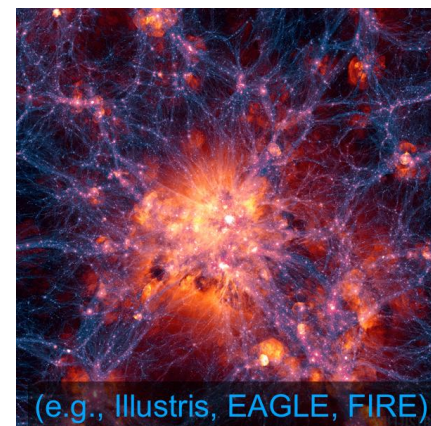
密度 大

Bondi半径 > 電離半径



(e.g. Inayoshi et al. 2016)  
photon-trapping  
(光子も引きずって降着)

ハロー/銀河スケール  
 $\sim \text{kpc}$



超エディントン降着は困難  
そもそもエディントン降着すら困難？  
(Smith et al. 2018, Latif et al 2018, Chon et al. 2021,...)

BHが高密ガスに埋まっていれば可能  
(Alexander&Natarajan2014, Lupi et al. 2021,...)  
実際の宇宙でいつ・どのように  
超エディントン成長が実現？

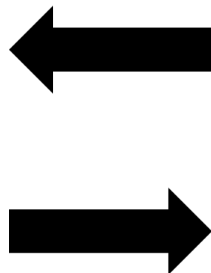
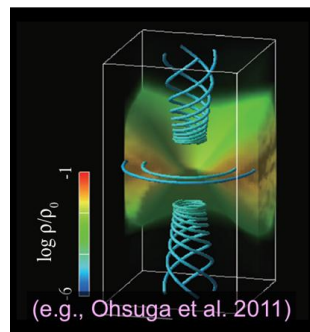
により 定常的な超エディントン降着が可能  
 $\dot{M} > 3000 \dot{M}_{\text{Edd}}$  が維持できれば  $10^3 M_{\odot} \rightarrow 10^{5-6} M_{\odot}$

## 2. 本論

# そもガスをどうやって集める？

小スケール ← → 大スケール

降着円盤スケール  
 $\sim 10^{-8} \text{pc}$



Bondi スケール  
 $\sim 10^{-1} \text{pc}$

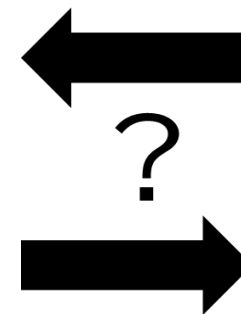


BH重力 > ガス圧

BH質量 > ガス質量



大スケール・  
長時間成長に外挿

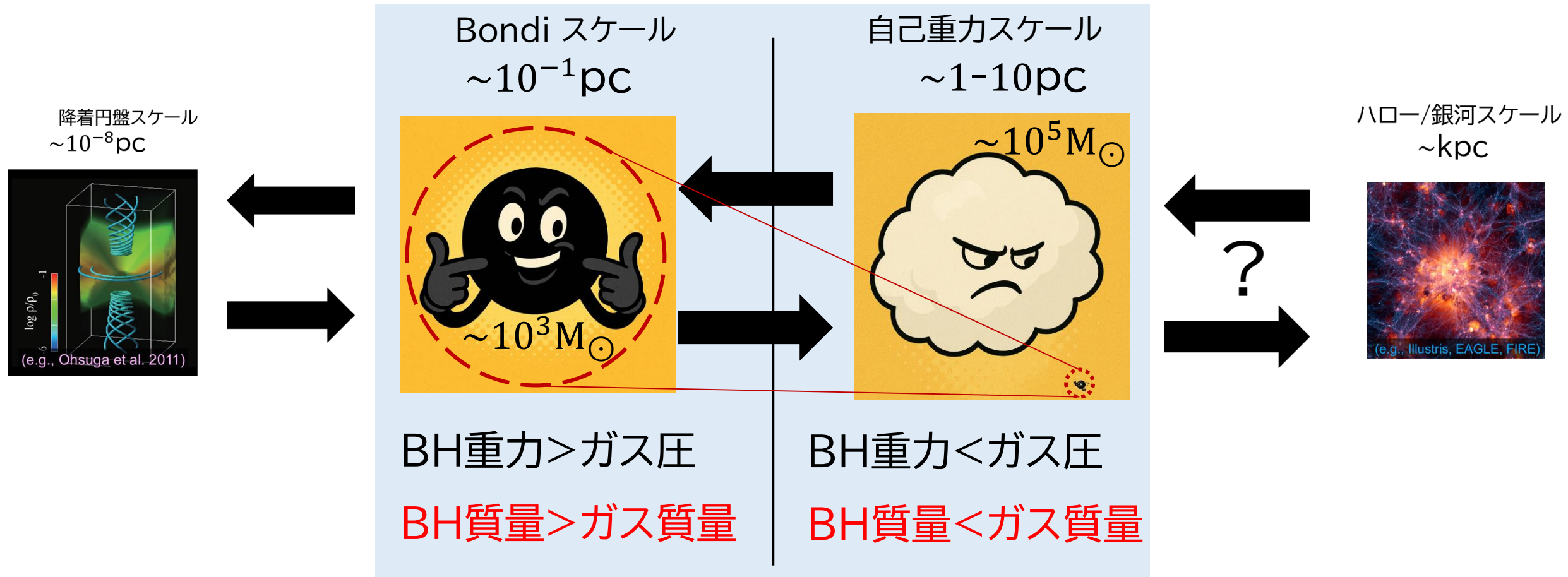


ハロー/銀河スケール  
 $\sim \text{kpc}$



# そもガスをどうやって集める？

小スケール ← → 大スケール



- BH重力以外の力(ガス自己重力?)で
- ①大質量ガスを集める
  - ②それをBHのBondi半径に押し込む

# そもガスをどうやって集める？

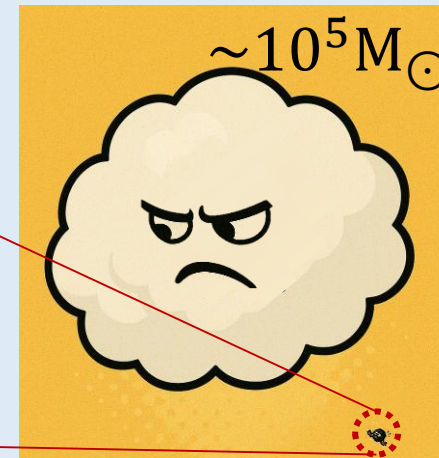
小スケール ← → 大スケール



BH重力 > ガス圧

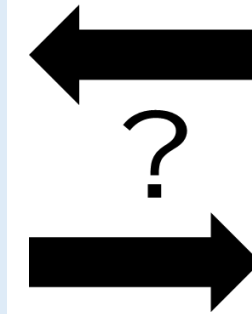
BH質量 > ガス質量

自己重力スケール  
~1-10pc

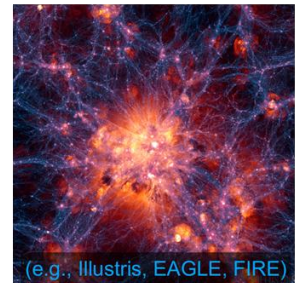


BH重力 < ガス圧

BH質量 < ガス質量



ハロー/銀河スケール  
~kpc



- BH重力以外の力(ガス自己重力?)で
- ①大質量ガスを集める
  - ②それをBHのBondi半径に押し込む

# “BH-clump-capture” モデル

(suggested by Lupi et al. 2016)

自己重力ガスclumpとBHが偶然出会う

- BHの性質
- clumpの性質
- 軌道

により...

$t_{\text{cross}} \sim t_{\text{ff}}$

trap成功

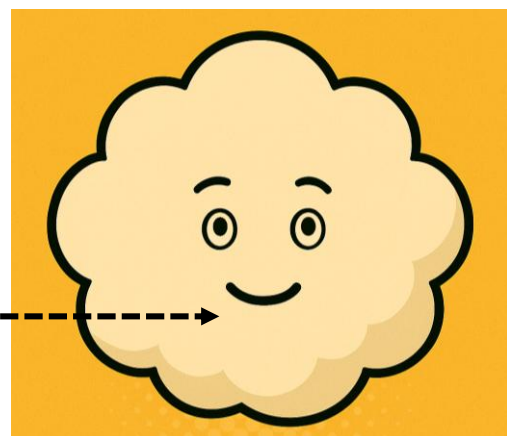
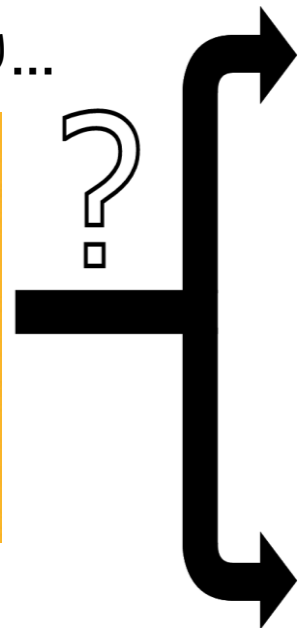
$t_{\text{acc}} \gg t_{\text{ff}}$

超エディントンで質量成長！  
clumpのガスを大部分獲得

trap失敗

ほぼ質量成長なし

?

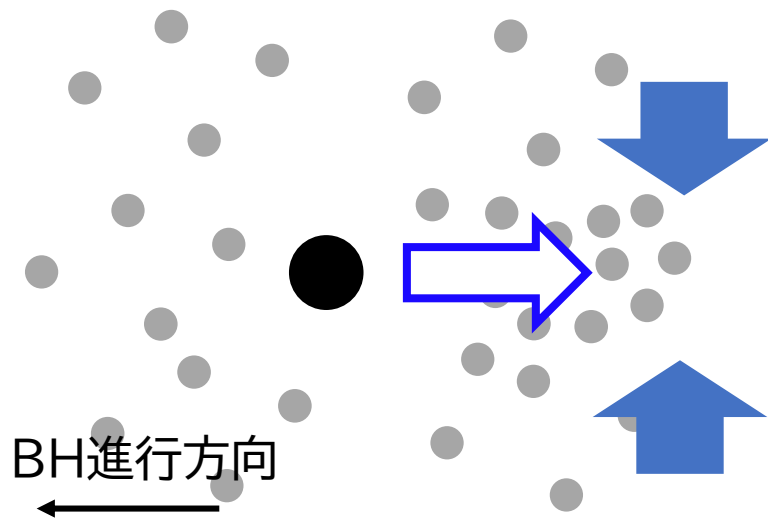


# 力学摩擦で減速 v.s. 電離バブルで加速

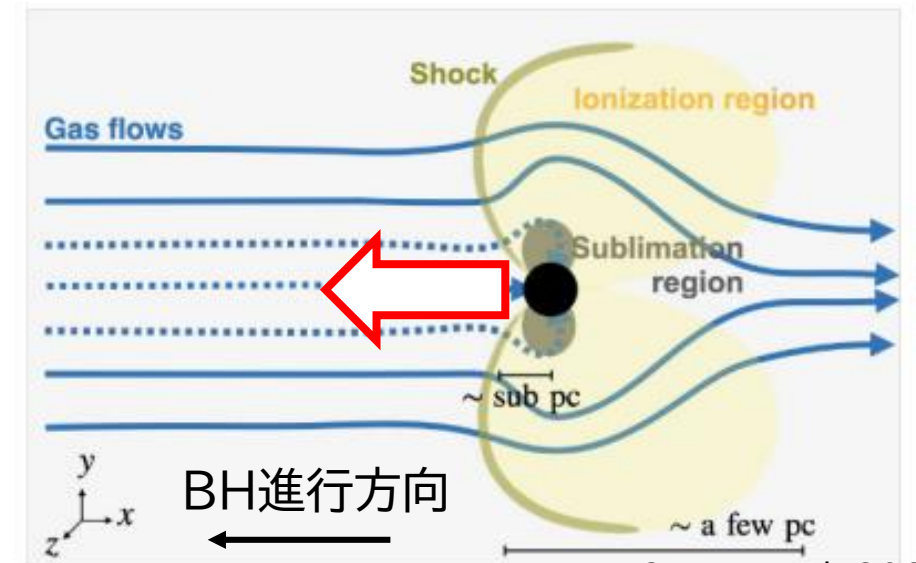
trap成功するかは, clump内でBHが十分減速できるかで決まる

減速力: ガスの力学摩擦

加速力: 電離バブルシェルによる重力  
(Toyouchi+2020, Ogata+2024)



V.S.



Ogata et al. 2024

$$f_{\text{DF}} = \frac{\pi G^2 M_{\text{BH}}^2 \rho}{v^2} \times F(v/c_s)$$

(Tanaka & Haiman 2009)

$$f_{\text{shell}} = \pi G M_{\text{BH}} \rho r_{\text{str}} \left( 1 - \frac{v}{v_R} \right)$$

(Sugimura & Ricotti 2020)

clumpの密度・温度, BH質量, 運動の相対速度により決定・進化

### 3. Toy シミュレーション

# 手法

5つの独立パラメータ (clumpガス密度 $n_H$ , 温度 $T$ , 初期BH質量 $M_{\text{BH},0}$ , 初期入射速度 $v_{\text{in}}$ , 衝突径数 $b$ )

入力

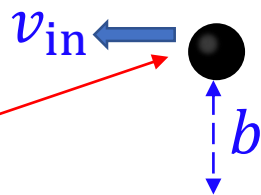
clumpとして 質量 $=M_{\text{Jeans}} \propto n_H^{-1/2} T^{3/2}$ , 半径 $=\lambda_{\text{Jeans}} \propto n_H^{-1/2} T^{1/2}$  の  
一様ガス球を置き、それにむかって無限遠からBHを入射

初期条件

変数

$$(\mathbf{r} \equiv \mathbf{r}_{\text{BH}} - \mathbf{r}_{\text{cl}}, \mathbf{v} \equiv \dot{\mathbf{r}}, M_{\text{BH}})$$

BH ... 質点



clump ... 一様球

5次 Runge-Kutta法で,  
BHとclumpの相対運動+BH降着成長を解く

$$\dot{\mathbf{r}} = \mathbf{v}$$

$$\dot{\mathbf{v}} = \left( \underset{\text{重力}}{f_{\text{grav}}} + \underset{\text{降着の反作用}}{f_{\text{acc}}} + \underset{\text{力学摩擦}}{f_{\text{DF}}} + \underset{\text{電離バブルによる加速力}}{f_{\text{shell}}} \right) / M_{\text{BH}}$$

$$\dot{M}_{\text{BH}} = \begin{cases} \text{Bondiスケールで条件を満たすと超エディントン降着} \\ \text{エディントン-limited 降着, (otherwise)} \end{cases}$$

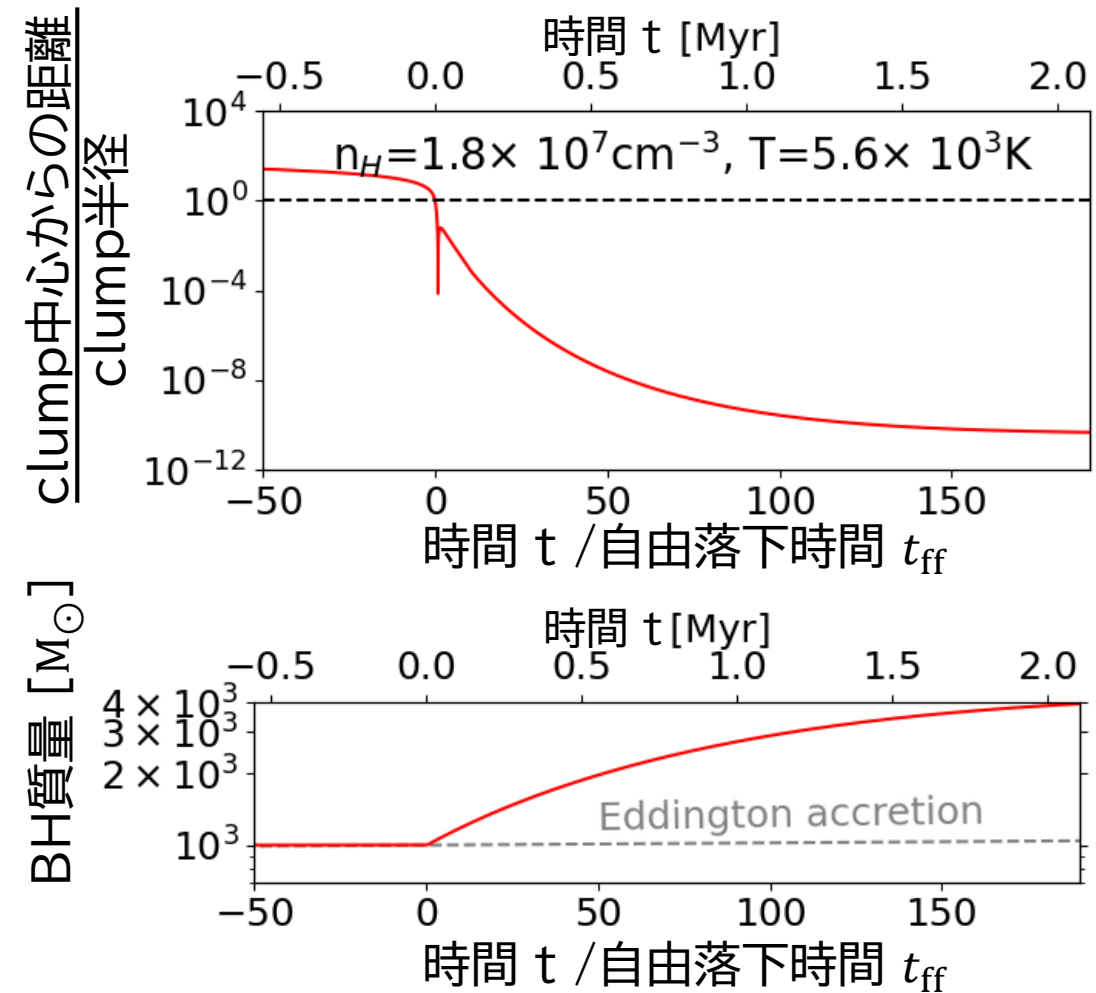
軌道進化計算

trap or not?  
trap条件?

# 結果

$$M_{\text{BH}} = 10^3 M_{\odot}, \quad v_{\infty} = 0, b = 0$$

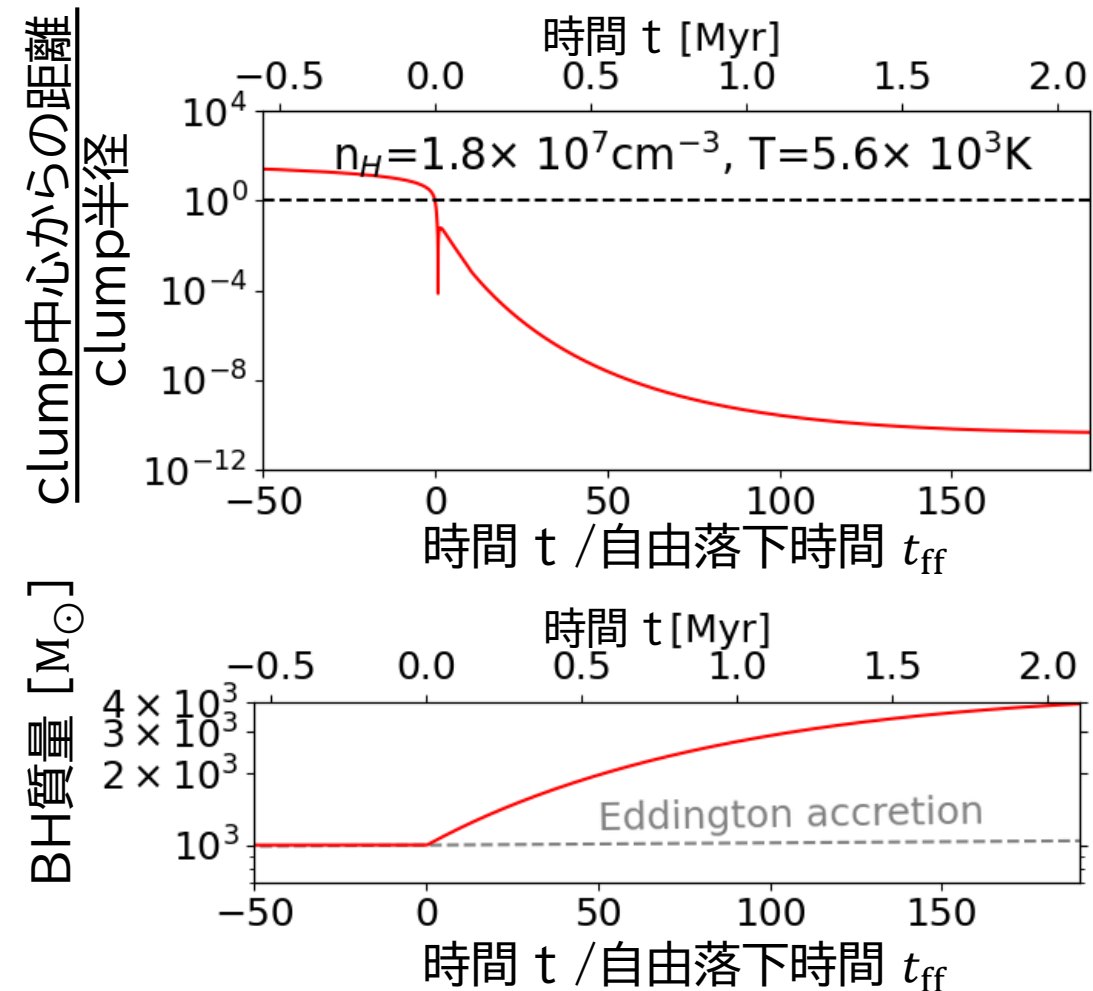
## ☆ 成功したケース



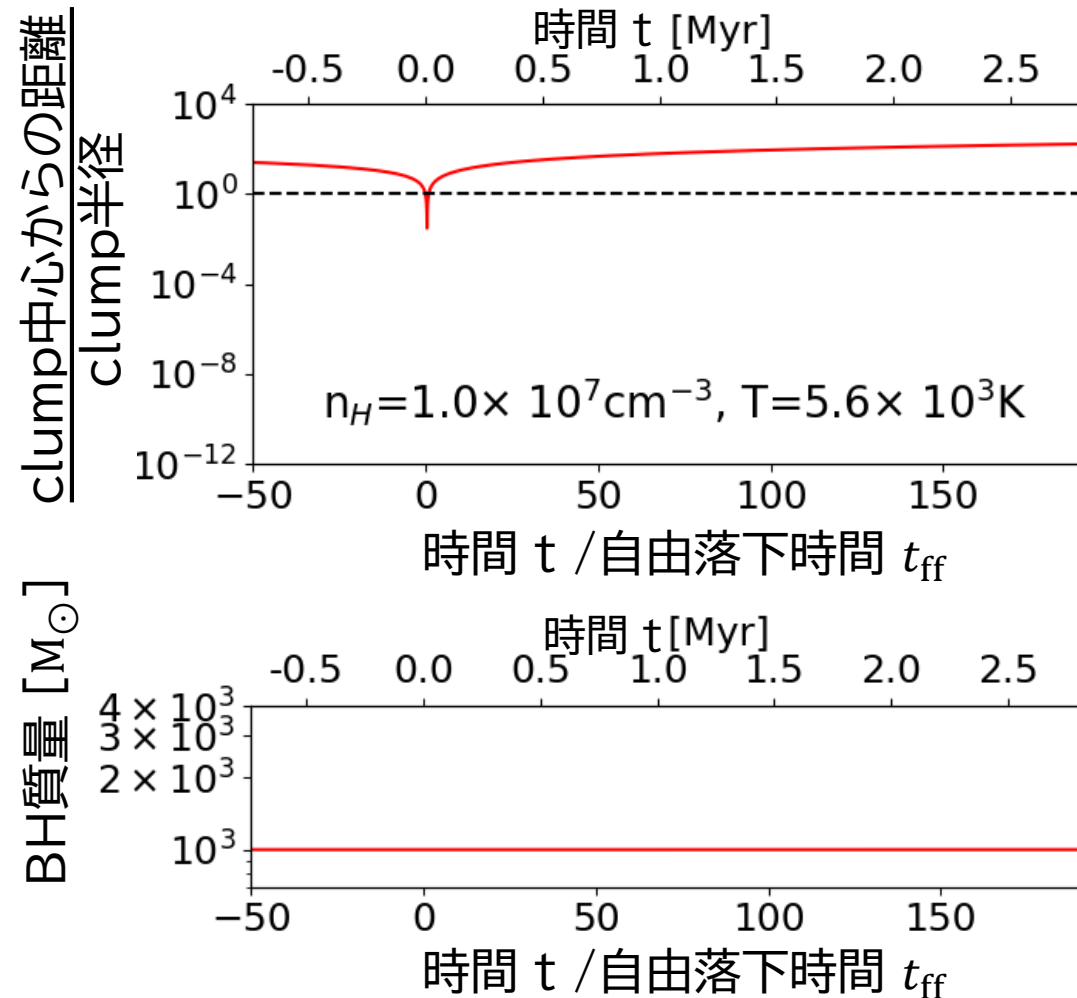
# 結果

$$M_{\text{BH}} = 10^3 M_{\odot}, \quad v_{\infty} = 0, b = 0$$

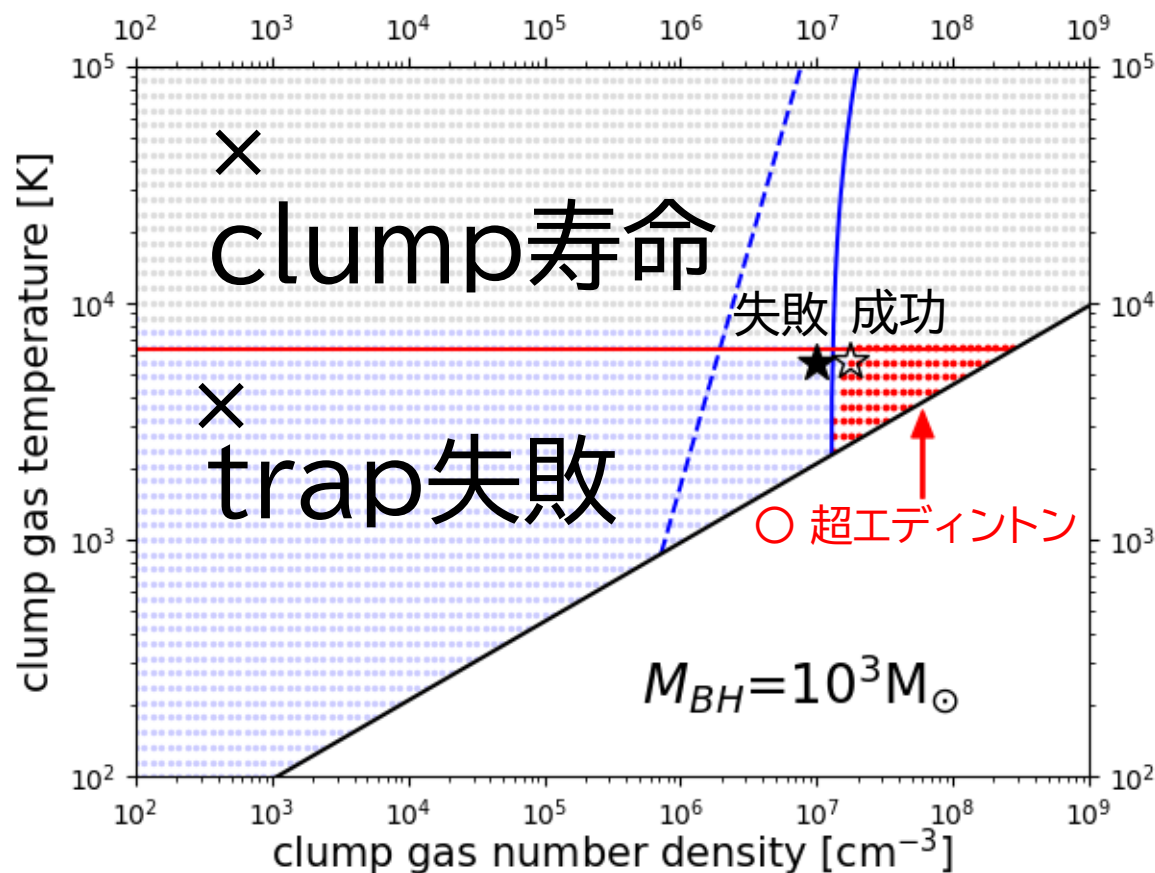
## ☆ 成功したケース



## ★ 失敗したケース



# 結果 ( $M_{\text{BH}} = 10^3 M_{\odot}$ , $v_{\infty} = 0, b = 0$ )

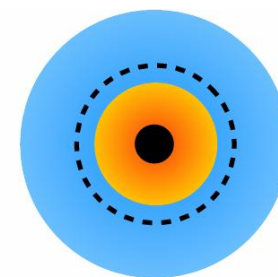


超エディントン降着のための条件は、

- ...mass-doubling 条件 ( $M_{\text{cl}} > M_{\text{BH}}$ )
- ...clump寿命条件
- ...BH trap条件 (力学摩擦 > 加速力) で解釈  
力学摩擦 > 電離バブル加速力

⇔

clump全体において  
Inayoshi+2016同様  
やや厳しめの  
photon-trapping条件  
BHL半径 > 電離半径



- ...BH-trap成功し, 超エディントン成長
- ...BH-trap失敗し, ほぼ無成長
- ...trapするより先にclumpの寿命がきてclump崩壊

$$n_{\text{H}} > 2 \times 10^7 \text{ cm}^{-3} \left( \frac{M_{\text{BH}}}{10^3 M_{\odot}} \right)^{-0.88}$$

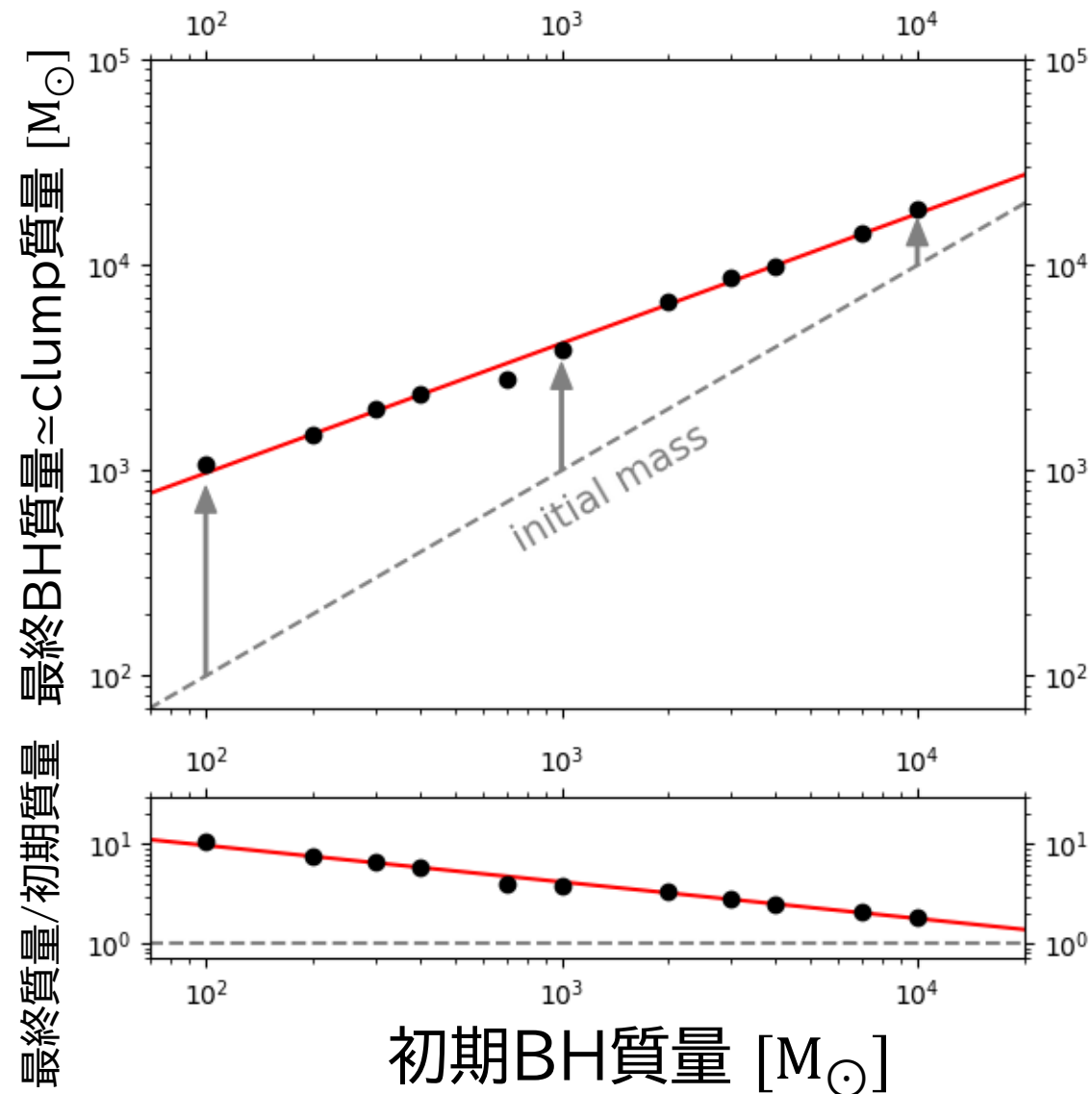
# 結果 BH質量依存性

各BH質量に対し、  
全 $(n_H, T)$ を試し最大成長できたケースを比較

BH trap条件の密度依存性等により  
初期BH質量が増えるほど  
trapと更なる成長が困難に

成長できるBH質量に上限

$$M_{\text{BH}} \lesssim 10^4 M_{\odot}$$



# Summary

- 超エディントン降着を維持してBHを質量数倍以上に成長させるには中間スケールで自己重力が重要
- BH急成長のための3つの条件を導出

特に 力学摩擦 > 電離バブル加速力  $\Leftrightarrow$

$$r_{\text{BHL}} > r_{\text{str}}$$

急成長シナリオでは  
最も恵まれた条件で $\sim 10^4 M_{\odot}$ までは  
超エディントン成長できる

その後はエディントンで頑張ってください  
(SMBH形成に届く? 届かない?)

