

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)

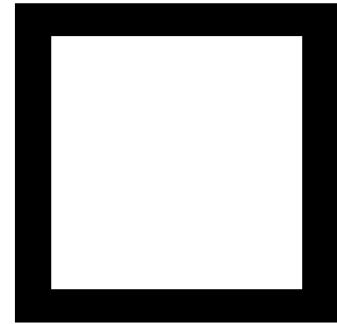
喜友名正樹(東北大学PD)

2025/12/1 初代星・初代銀河研究会2025 @AOSSA(福井)

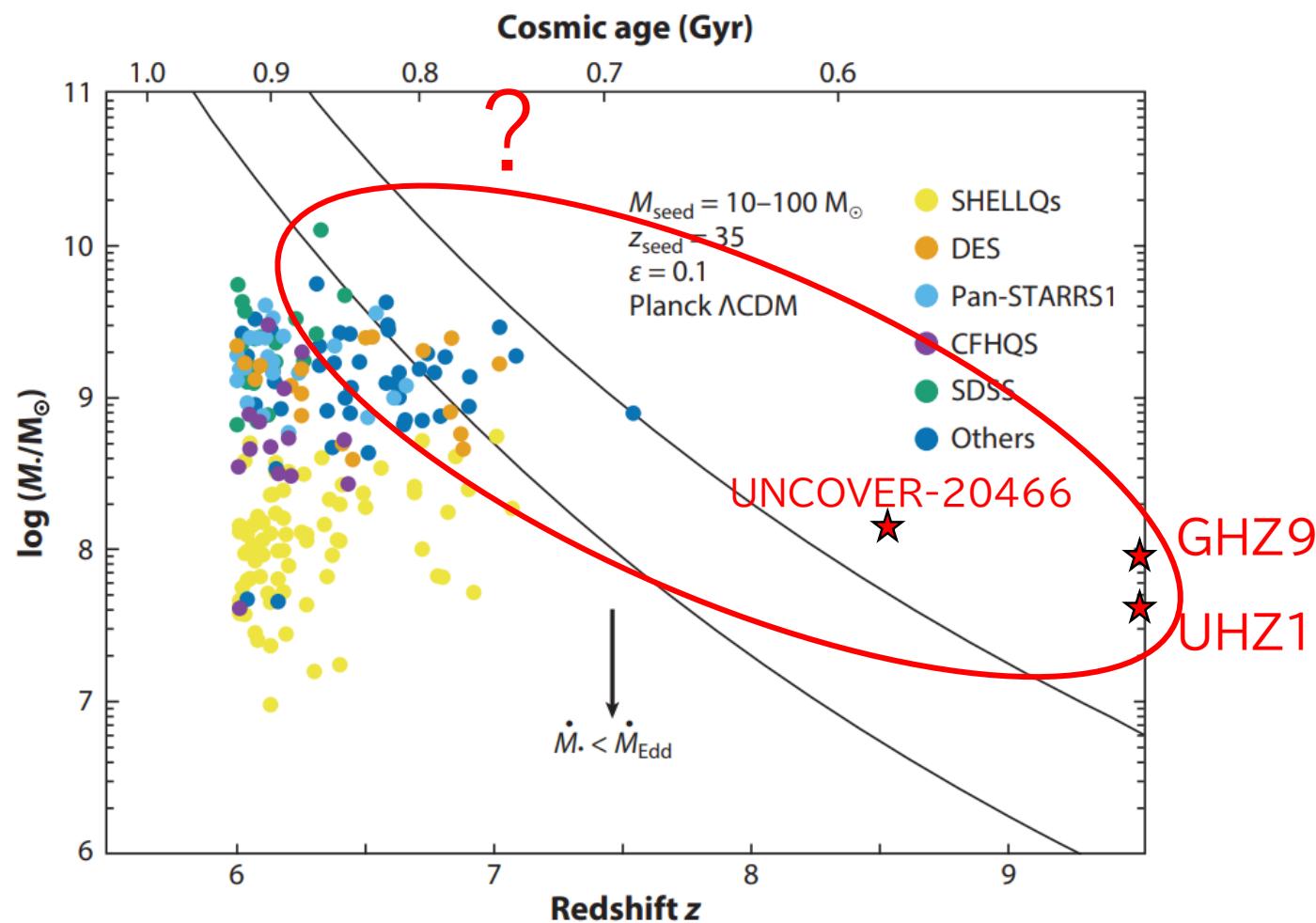


1.

イント



超大質量ブラックホール



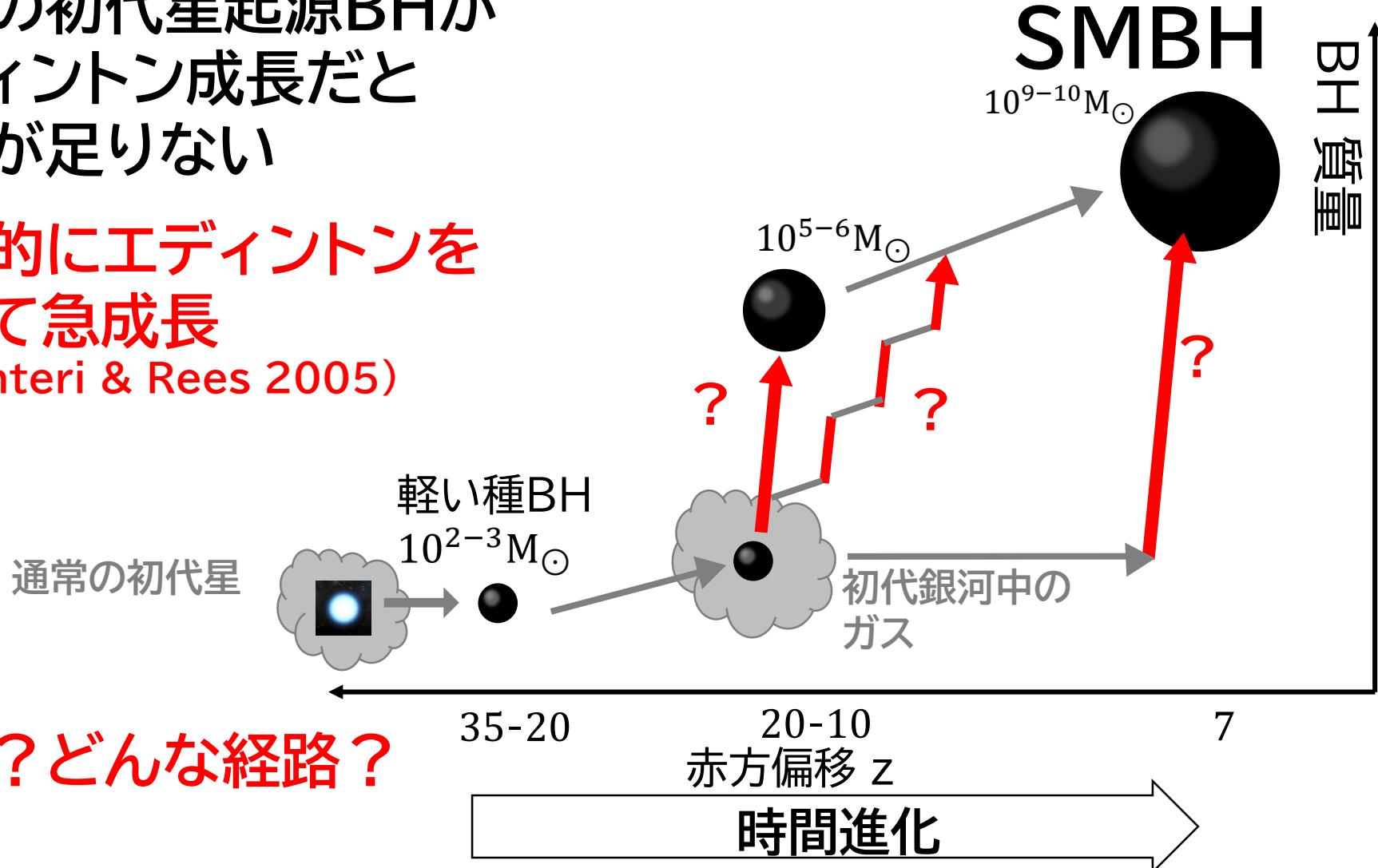
Inayoshi K. et al., ARAA (2020)

- ✓ 銀河中心に普遍的に存在。
質量 $10^{5-10} M_\odot$
- ✓ どのように形成されたか
未解決問題
- ✓ 宇宙初期にも存在
 $z = 6 - 10$
 $M_{\text{BH}} = 10^{9-10} M_\odot$
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)

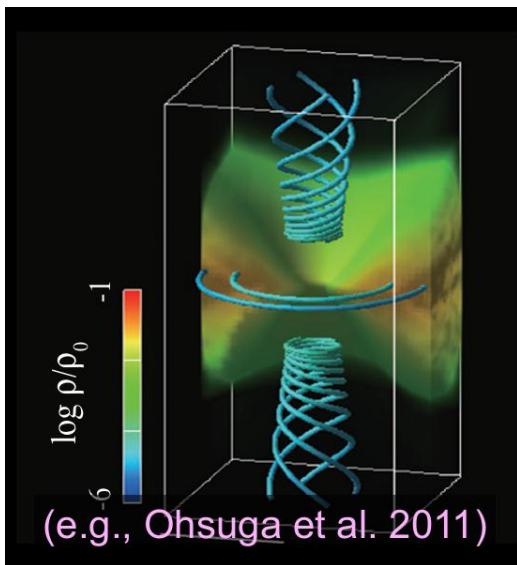


本当？どんな経路？

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
 $\sim 10^{-8} \text{ pc}$



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)

非球対称構造

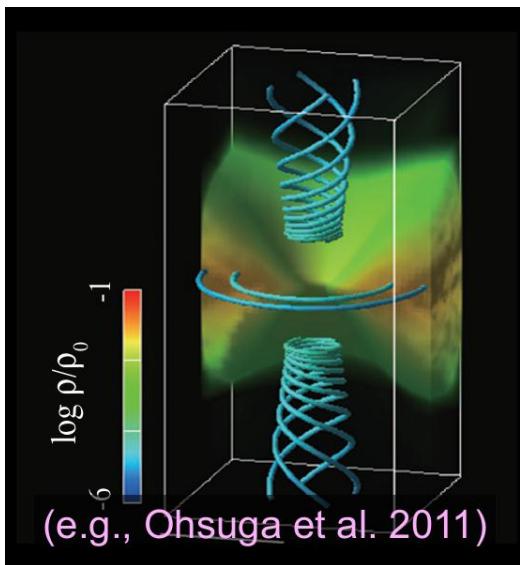
により 定常的な超エディントン降着が可能

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

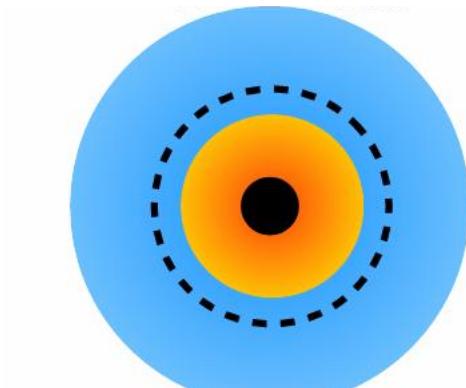
各スケールの超エディントン降着問題

小スケール ← → 大スケール

降着円盤スケール
~ 10^{-8} pc



Bondi スケール
~ 10^{-1} pc
密度 大
Bondi半径 > 電離半径



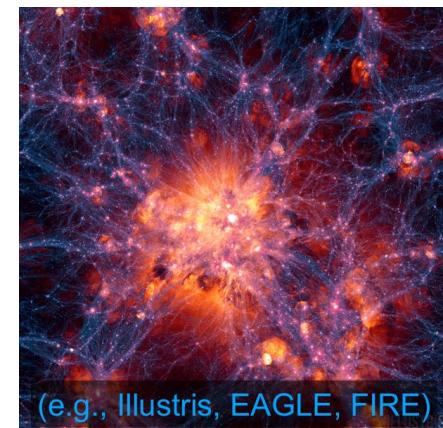
(e.g. Inayoshi et al. 2016)
photon-trapping
(光子も引きずって降着)

非球対称構造

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 $10^3 M_{\odot} \rightarrow 10^{5-6} M_{\odot}$

ハロー/銀河スケール
~kpc

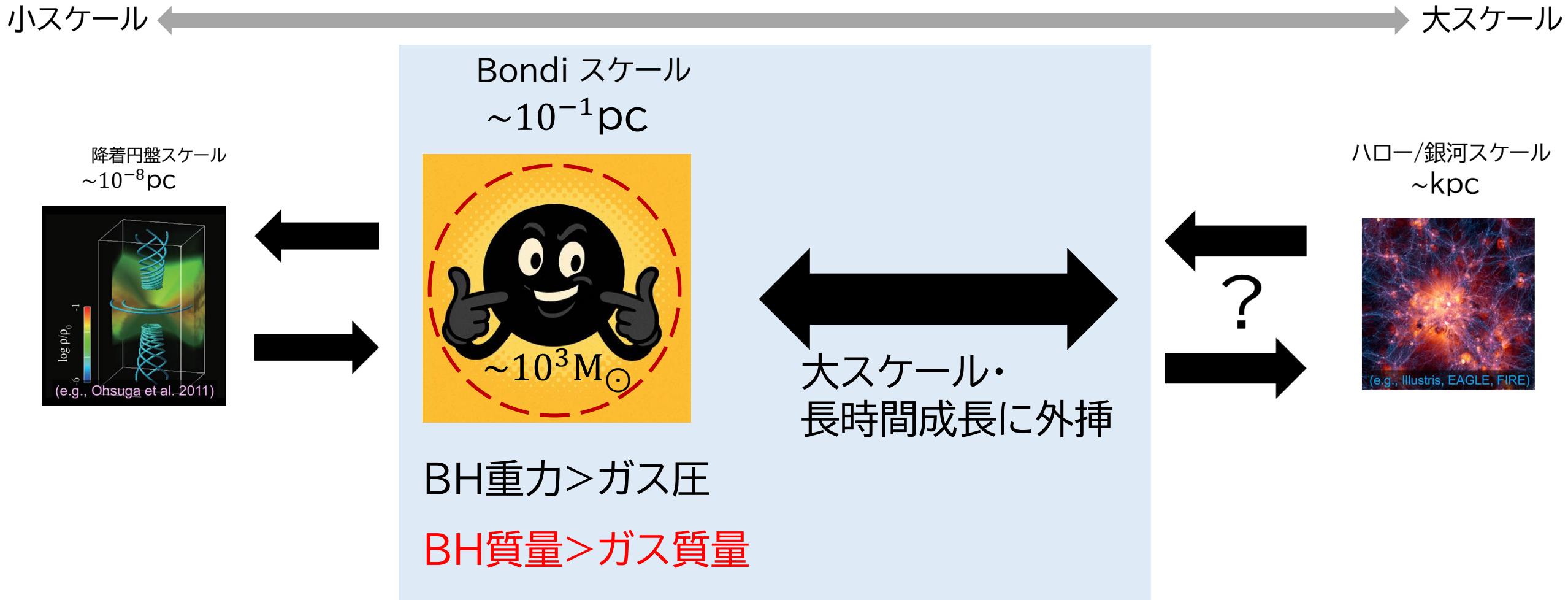


超エディントン降着は困難
そもそもエディントン降着すら困難?
(Smith et al. 2018, Latif et al 2018, Chon et al. 2021,...)

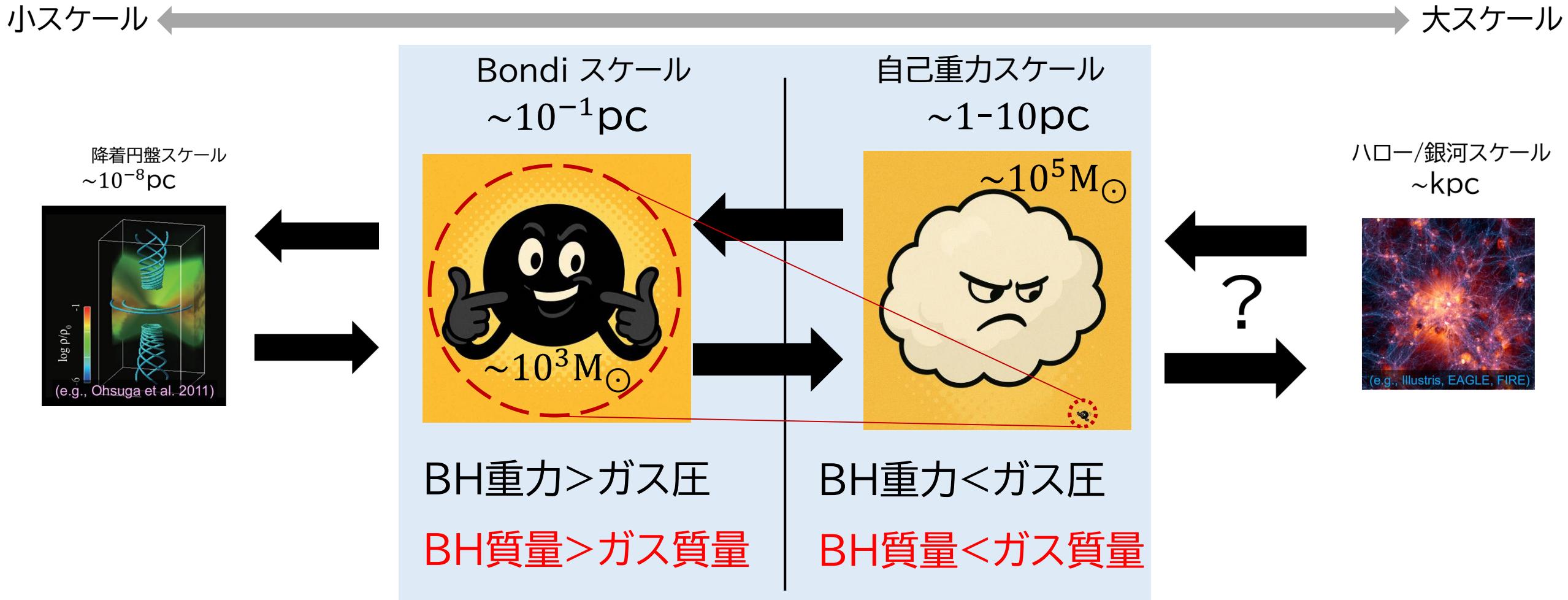
BHが高密ガスに埋まつていれば可能
(Alexander&Natarajan2014, Lupi et al. 2021,...)
実際の宇宙でいつ・どのように
超エディントン成長が実現?

2. 本論

そもそもガスをどうやって集める？



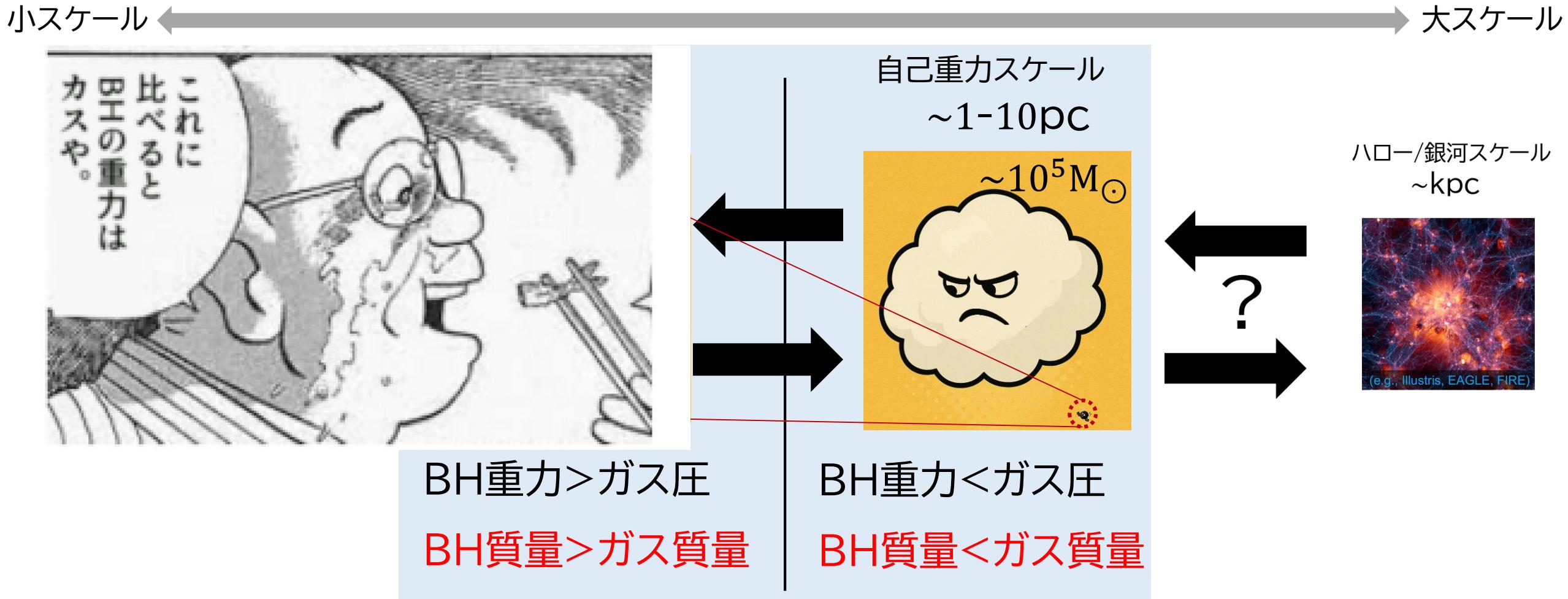
そもそもガスをどうやって集める？



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

そもそもガスをどうやって集める？



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

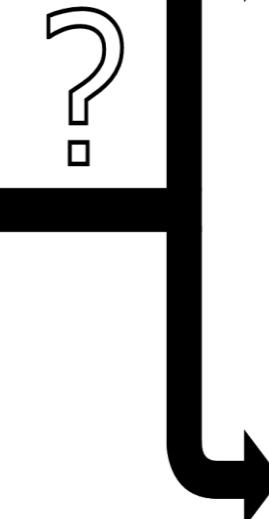
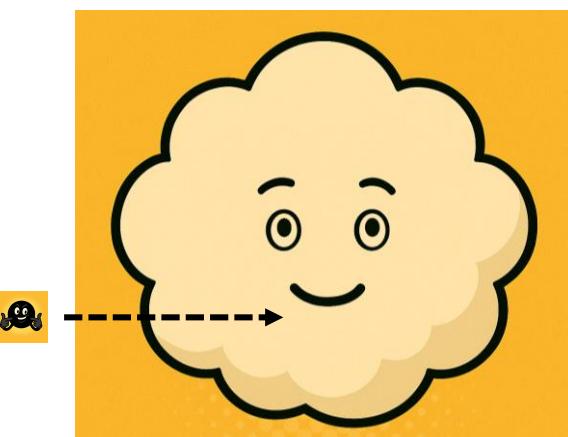
(suggested by Lupi et al. 2016)

自己重力ガスclumpとBHが偶然出会う

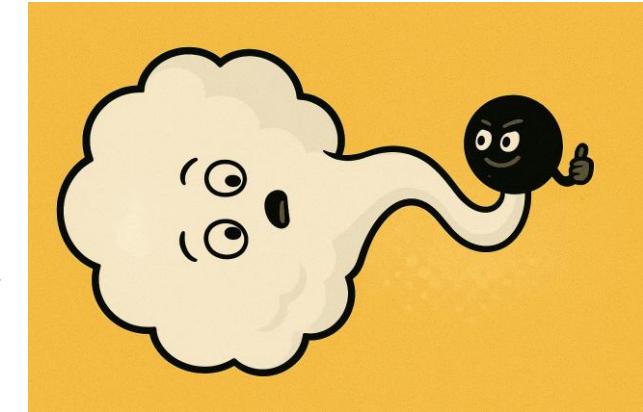
- BHの性質
- clumpの性質
- 軌道

により...

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



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



超エディントンで質量成長！
clumpのガスを大部分獲得

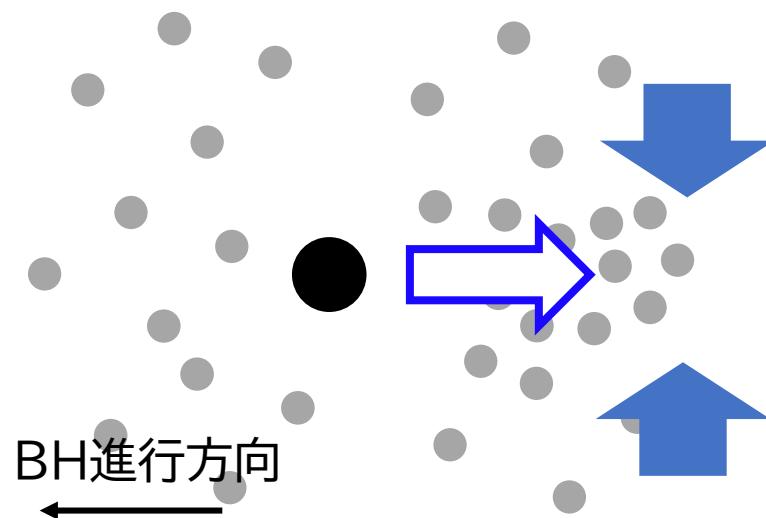


ほぼ質量成長なし

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

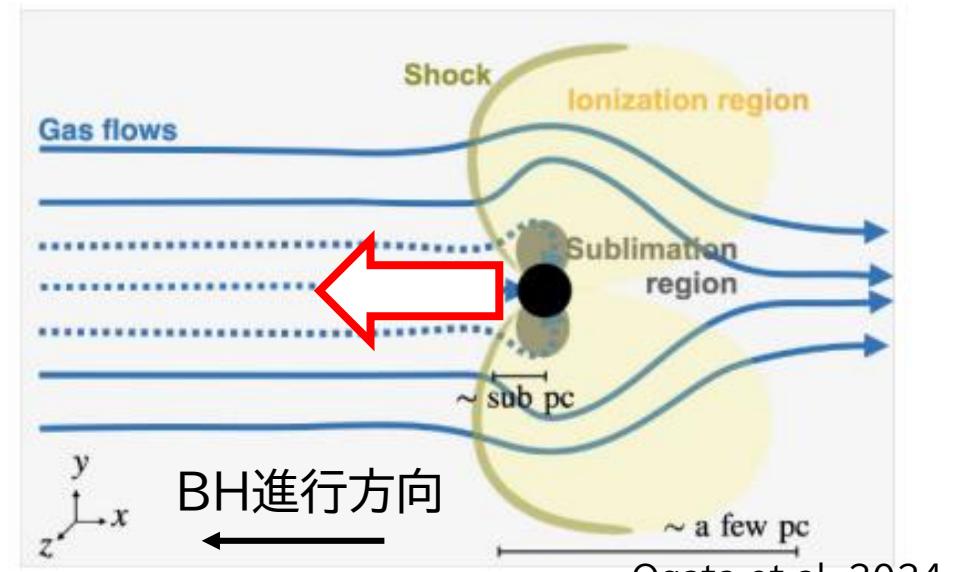


$$f_{\text{DF}} = \frac{\pi G^2 M_{\text{BH}}^2 \rho}{v^2} \times F(v/c_s)$$

(Tanaka & Haiman 2009)

V.S.

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



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

(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 $M_{BH,0}$, 初期入射速度 v_{in} , 衝突径数 b)

入力



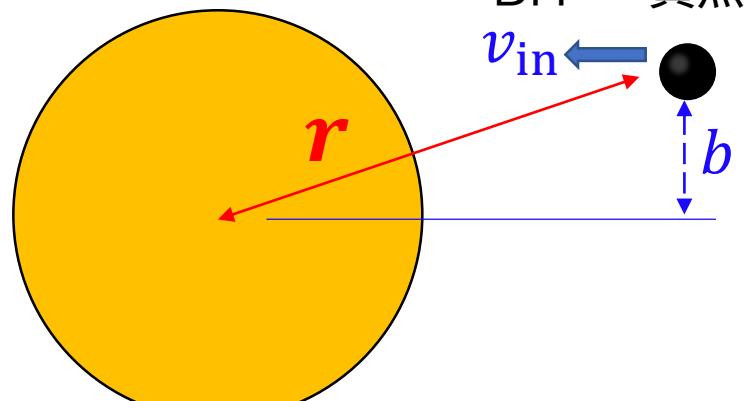
clumpとして 質量 = $M_{\text{Jeans}} \propto n_H^{-1/2} T^{3/2}$, 半径 = $\lambda_{\text{Jeans}} \propto n_H^{-1/2} T^{1/2}$ の
一様ガス球を置き、それにむかって無限遠からBHを入射



初期条件

変数

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



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

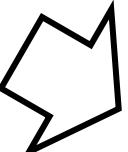
$$\dot{r} = v$$

$$\dot{v} = \left(f_{\text{grav}} + f_{\text{acc}} + f_{\text{DF}} + f_{\text{shell}} \right) / M_{\text{BH}}$$

重力 降着の 力学摩擦 電離バブル
反作用 による加速力

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

軌道進化計算

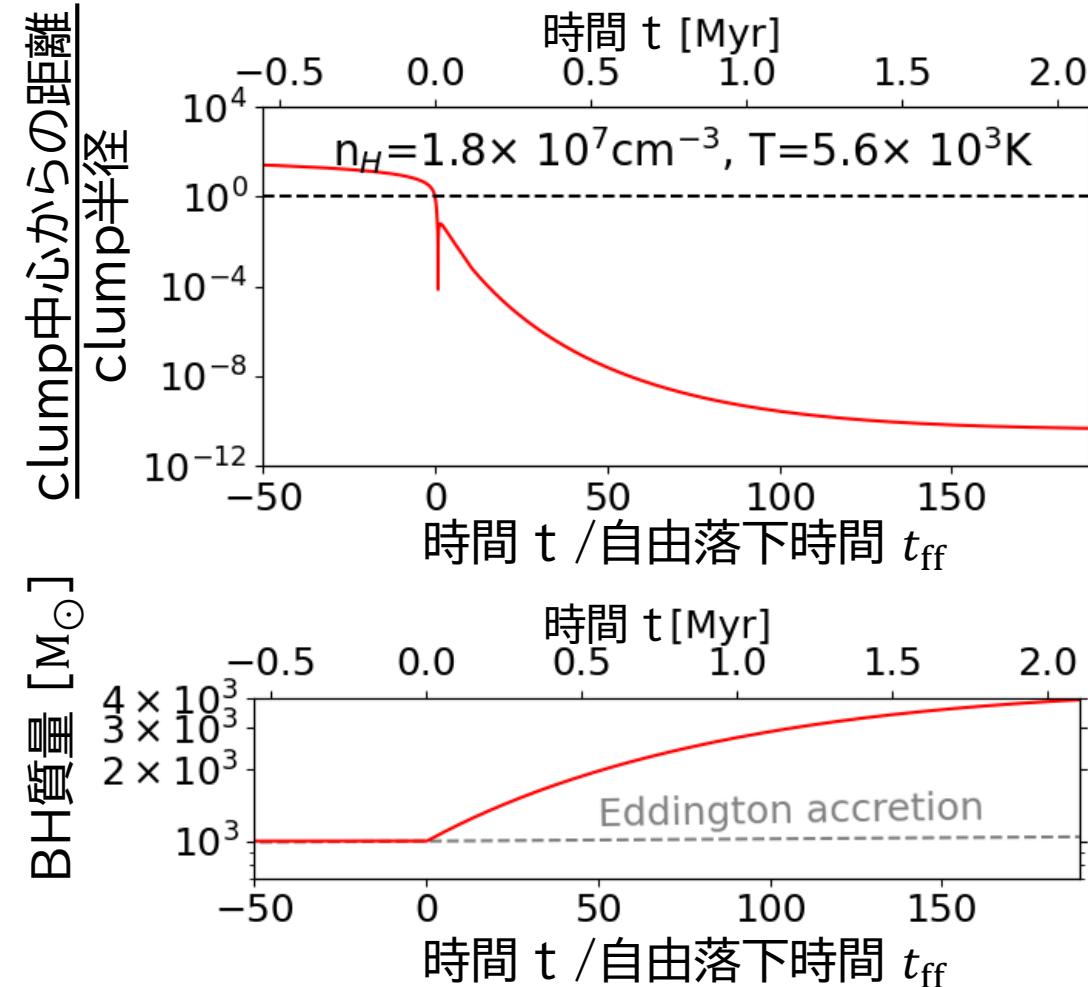


trap or not?
trap条件?

結果

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

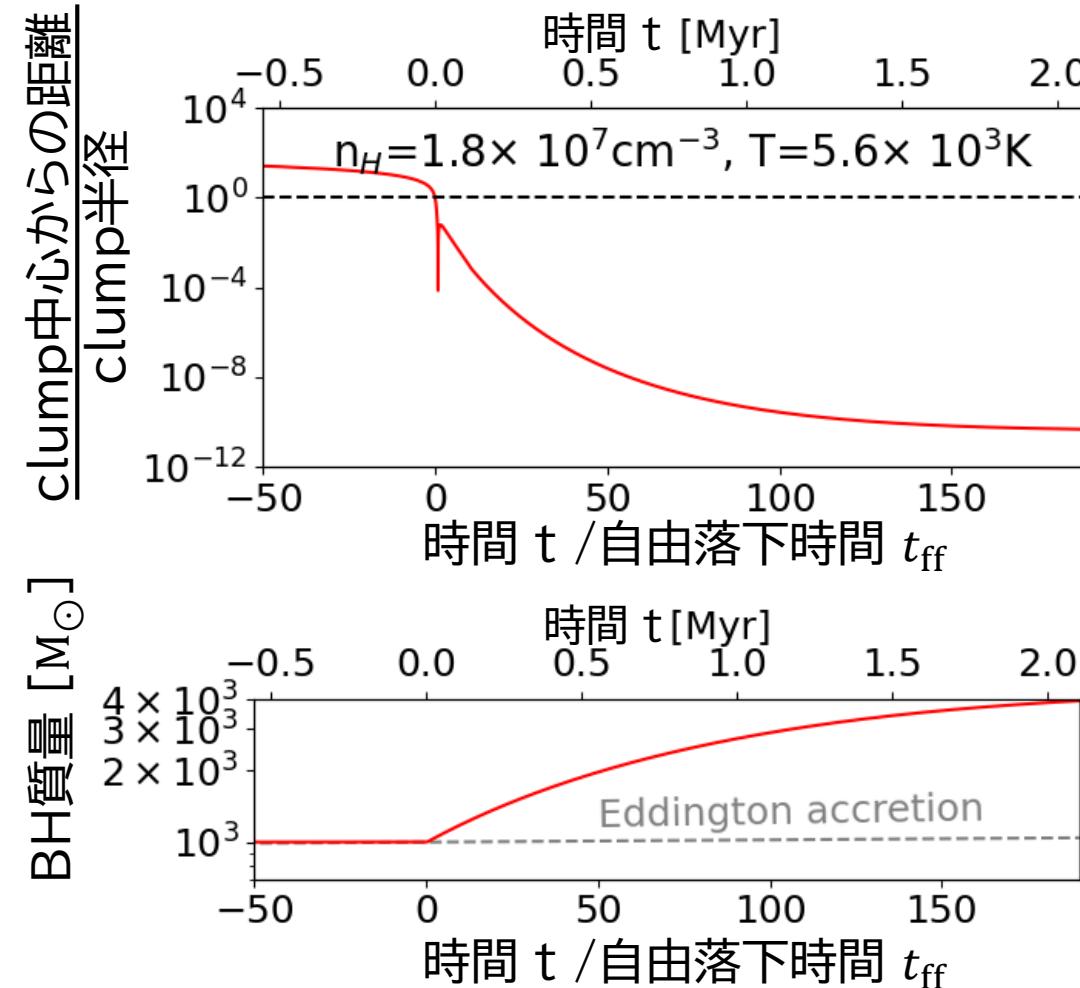
☆ 成功したケース



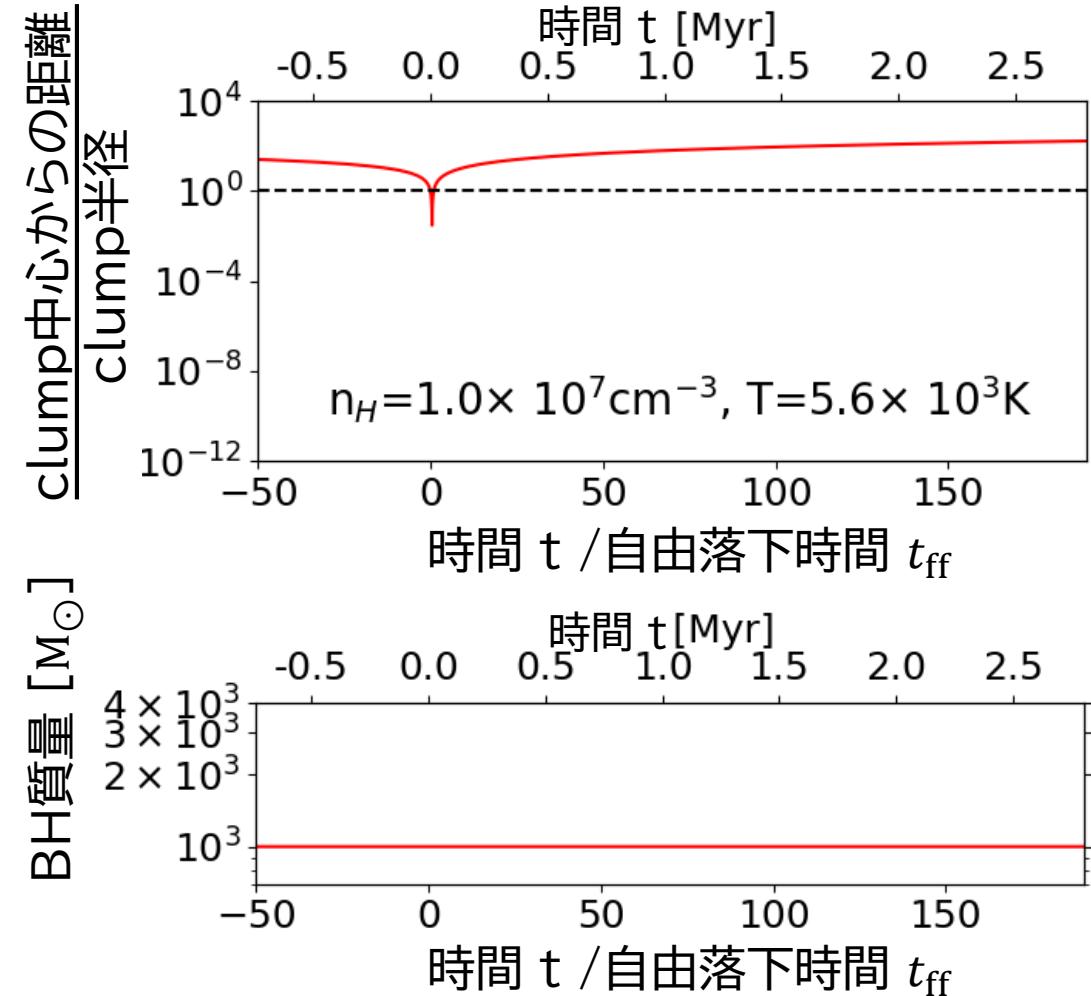
結果

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

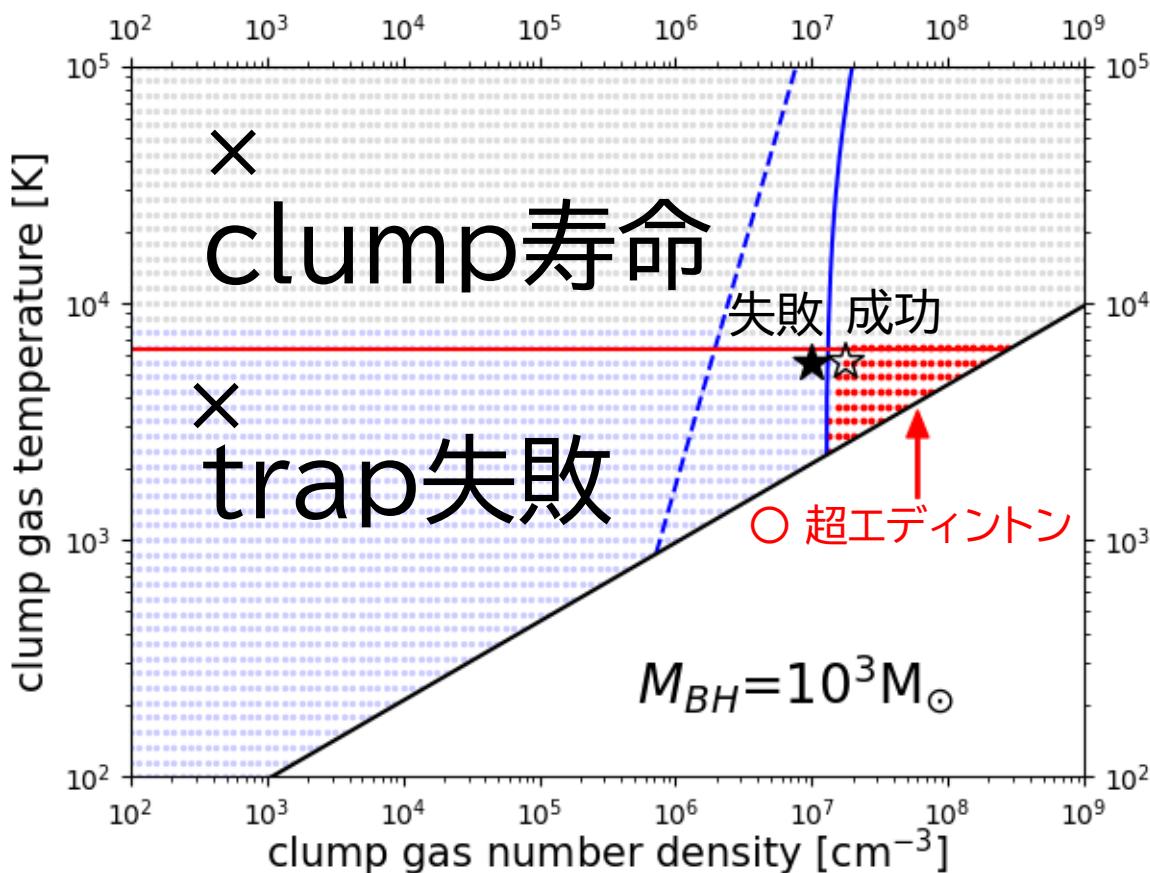
★ 成功したケース



★ 失敗したケース



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



- …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

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



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

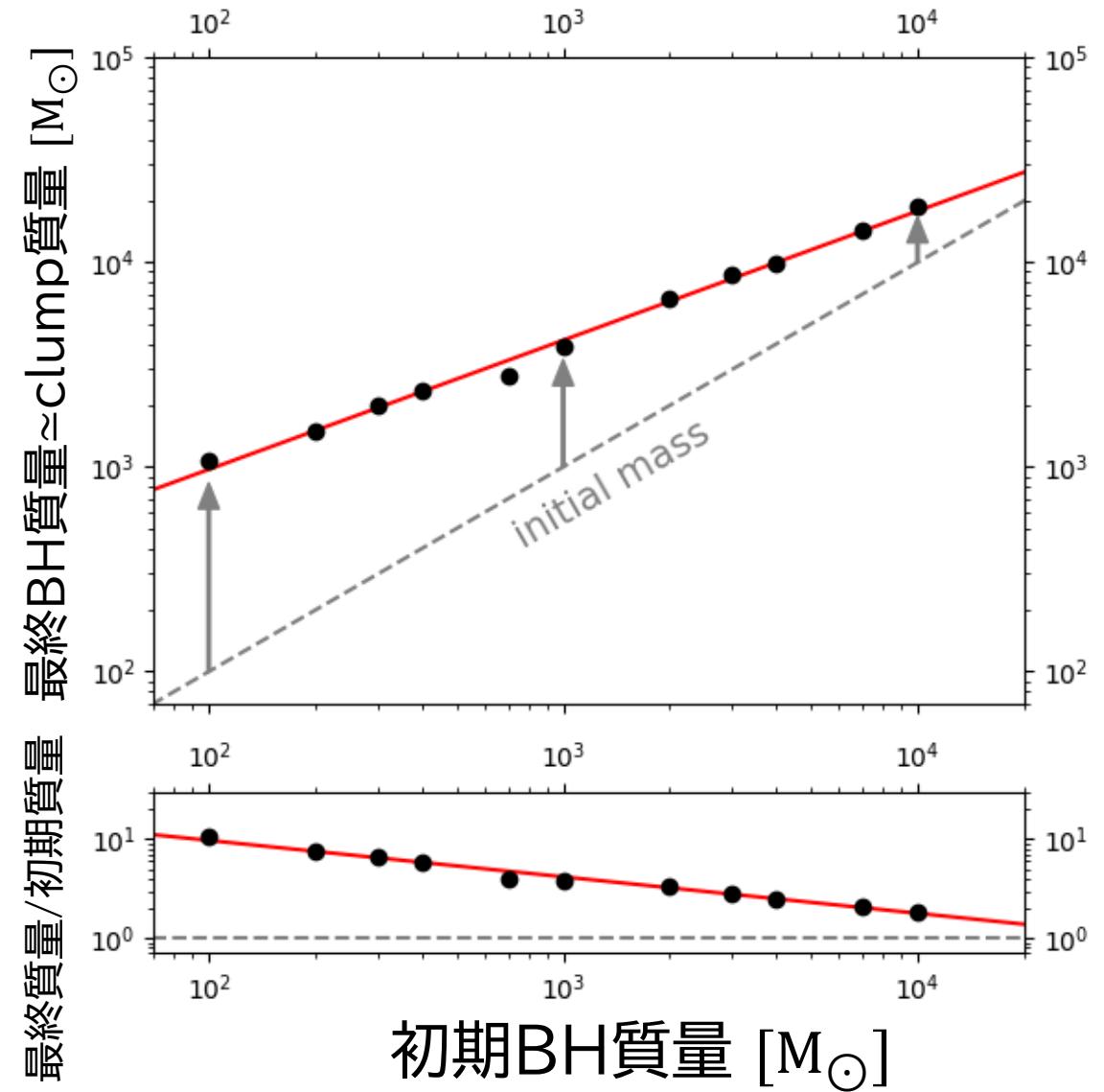
結果 BH質量依存性

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?)

