

遠方宇宙における超大質量ブラックホールの起源： 浮遊する種ブラックホールの進化

尾形絵梨花(Erika OGATA)*

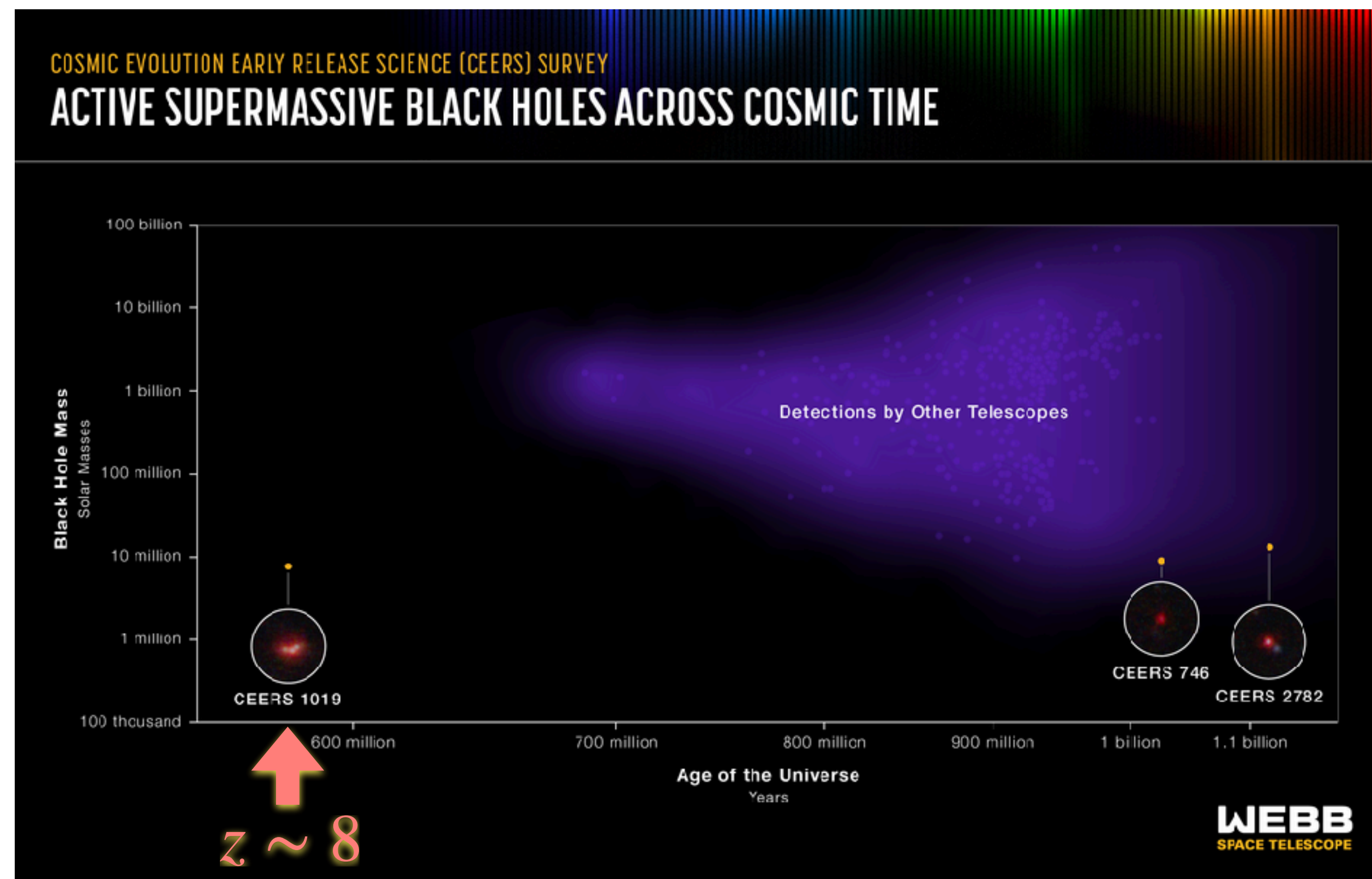
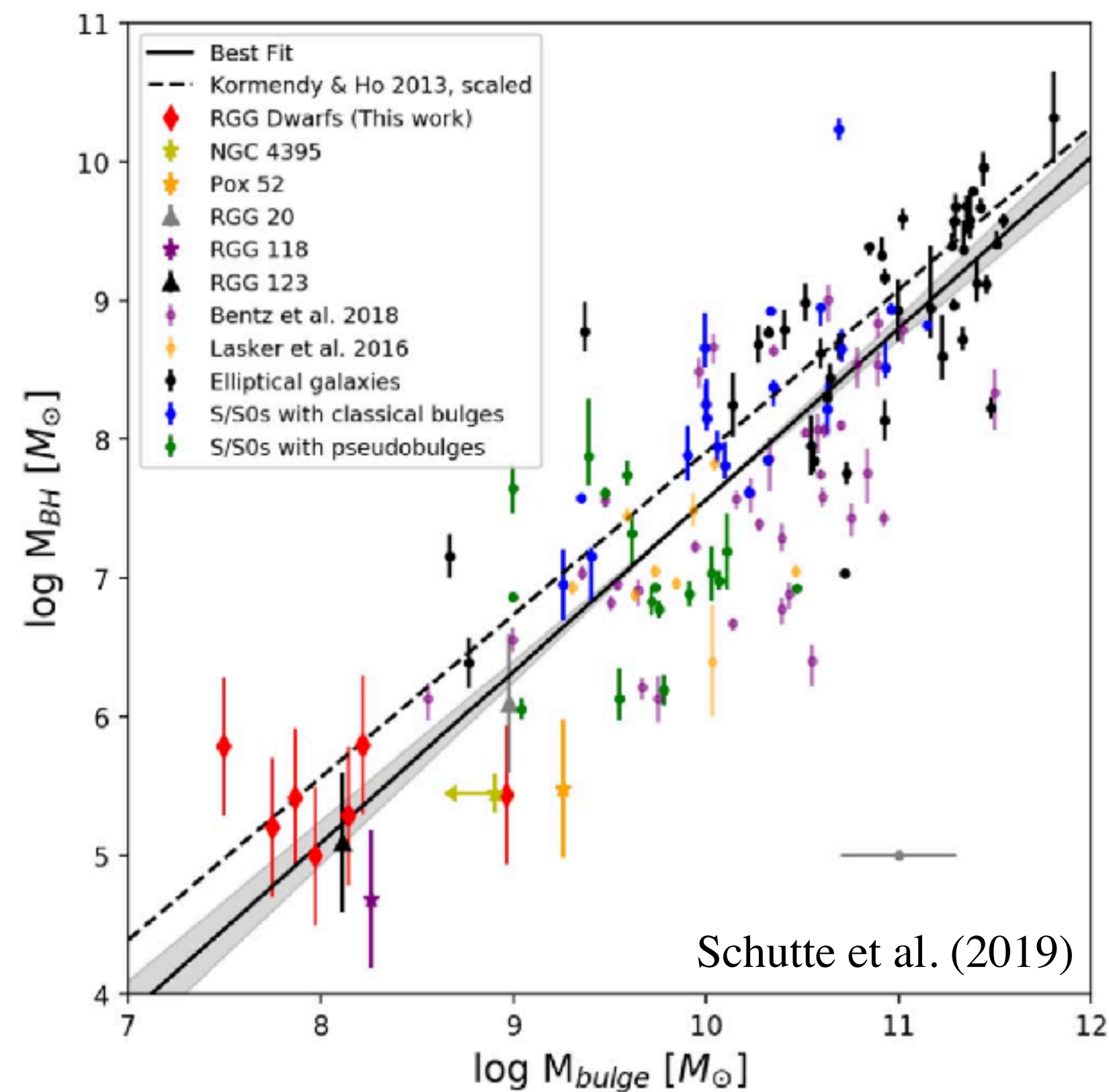
大須賀健(Ken OHSUGA)*

福島肇(Hajime FUKUSHIMA)*

(*Center for Computational Sciences, University of Tsukuba)

超大質量ブラックホールとは？

- 観測で発見されているほとんどが母銀河の中心に位置する
- 銀河中心に存在する超大質量BHと、銀河バルジ質量の間に強い相関がある(左図)
- 初期宇宙($z \gtrsim 6$)においても超大質量BHは存在する(右図)



超大質量ブラックホールとは？

- 観測で発見されているほとんどが母銀河の中心に位置する
- 銀河中心に存在する超大質量BHと、銀河バルジ質量の間に強い相関がある(左図)
- 初期宇宙($z \gtrsim 6$)においても超大質量BHは存在する(右図)

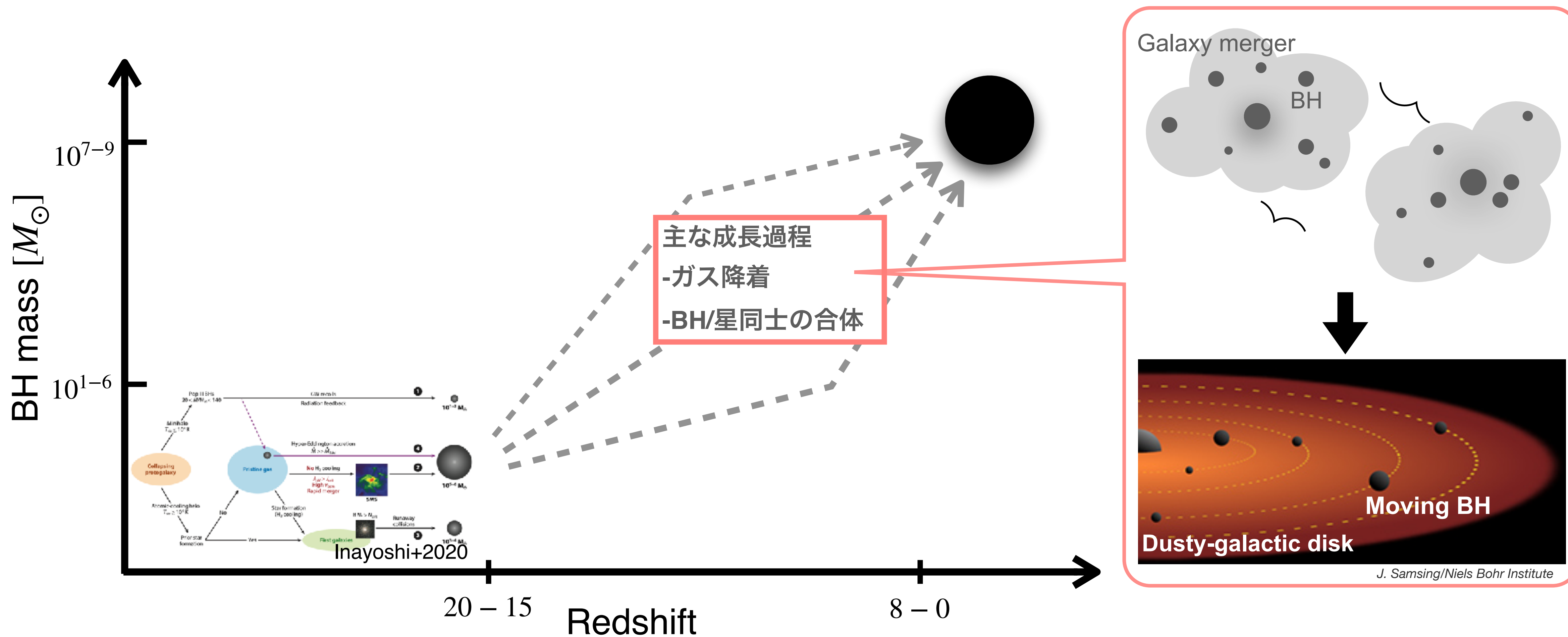
観測による理論モデルへの制限

- ① **位置** 母銀河の中心に普遍的に位置する
- ② **共進化** 少なくとも $z = 0$ の時点で母銀河のバルジ質量と相関関係を持つ (e.g. Kormendy & Ho 2013)
(※遠方宇宙でも相関関係が成り立つかどうかは現在も議論が続いている)
- ③ **時間** 最も成長の早いもので、およそ数百Myrの期間で形成される (e.g. Finkelstein et al. 2023)

→ これらの条件を満たす超大質量BH形成過程の理論モデルは未だ確立されていない

超大質量ブラックホール形成の理論モデル

- 超大質量BHは、質量 $\sim 10^3\text{--}5 M_{\odot}$ の種BHがガス降着や合体を経て形成されると考えられている
- 種BHから超大質量BHへの成長過程では、種BHがDustyな銀河ガス中を漂いながら周囲のガスを吸い込み成長している可能性がある (Bondi-Hoyle-Lyttleton降着)



Dustyな銀河ガス中を漂う種BHの先行研究

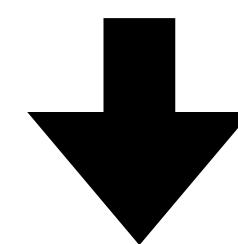
	流体	輻射場	※結果：降着率 (10^4 [/cm ³], 20 [km/s], 0.1Z _⊙)
Toyouchi+2020	解く	Isotropic	$0.006\dot{M}_{\text{BHL},\infty}$ - ①
Ogata+2021	解かない	Isotropic	$0.2\dot{M}_{\text{BHL},\infty}$ - ②
	解かない	Anisotropic	$0.3\dot{M}_{\text{BHL},\infty}$ - ②*
This work	解く	Anisotropic	???

Dustyな銀河ガス中を浮遊する種BHの成長率に対して、

② vs ① → 流体は重要なfactor

② vs ②* → 輻射の非等方性は重要なfactor

- 輻射場の非等方性や流体の効果（ガス圧勾配力）は、種BHの成長率を左右する重要な要素の一つであることが先行研究で示唆されている
- しかし、これら2つを同時に考慮したシミュレーションは未だ実施されていない



本研究は、Dustyな銀河ガス中を漂う降着円盤を纏った種BHの成長率を明らかにするために、**輻射場の非等方性および流体の効果**を考慮した**3D輻射流体シミュレーション**を実施する

SFUMATO-M1

e.g. Matsumoto (2007), Sugimura et al. (2020), Fukushima & Yajima (2021)



シンク半径 $R_{\text{in}} = 2 \times 10^{-3} \text{pc}$ (<ダスト昇華半径)

計算領域サイズ $R_{\text{out}} = 2 \times 10^1 \text{pc}$ (\gg 電離領域, Bondi-Hoyle-Lyttleton半径)

ダスト昇華温度 $T_{\text{subl}} = 10^3 \text{K}$ ボロメトリック光度 $L \propto \dot{M}$ スペクトル $L_\nu \propto \nu^{-1.5}$

Radiation hydrodynamics eq.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla (\rho \mathbf{v} \otimes \mathbf{v}) + \nabla P = \rho(\mathbf{g} + \mathbf{f})$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla [(\rho E + P)\mathbf{v}] = \rho(\mathbf{g} + \mathbf{f}) \cdot \mathbf{v} + \Gamma - \Lambda$$

$$E = \frac{|\mathbf{v}|^2}{2} + (\gamma - 1)^{-1} \frac{P}{\rho}$$

Moment eq. (M1 closure)

$$\frac{\partial E_{\text{rad}}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{F}_{\text{rad}} = S - \alpha_E \tilde{c} E_{\text{rad}}$$

$$\frac{1}{\tilde{c}} \frac{\partial \mathbf{F}_{\text{rad}}}{\partial t} + \tilde{c} \nabla \cdot \mathbf{P} = -\alpha_F \mathbf{F}_{\text{rad}}$$

$$\mathbf{P}_{\text{rad}} = E_{\text{rad}} \mathbf{D}$$

$$\mathbf{D} = \frac{1 - \chi}{2} \mathbf{I} + \frac{3\chi - 1}{2} \mathbf{n} \otimes \mathbf{n}, \quad \mathbf{n} = \frac{\mathbf{F}}{|\mathbf{F}|}$$

$$\chi = \frac{3 + 4f^2}{5 + 2\sqrt{4 - 3f^2}}, \quad f = \frac{|\mathbf{F}|}{\tilde{c} E}$$

Chemical networks

$$\frac{\partial (y_i n_{\text{H}})}{\partial t} + \nabla \cdot (y_i n_{\text{H}} \mathbf{v}) = n_{\text{H}} R_i$$

H, H₂, H⁺, H⁻, H₂⁺

CO, C⁺, O, O⁺, O²⁺, e

ρ : density E : total energy Γ : heating rate E_{rad} : radiative energy density α_E : absorption coefficient y_i : n_i/n_{H}

\mathbf{v} : velocity \mathbf{g} : gravity Λ : cooling rate \mathbf{F}_{rad} : radiative flux α_F : absorption coefficient R_i : chemical reaction

P : pressure \mathbf{f} : radiation force \mathbf{P}_{rad} : radiative pressure tensor \tilde{c} : reduce light speed rate

計算モデル

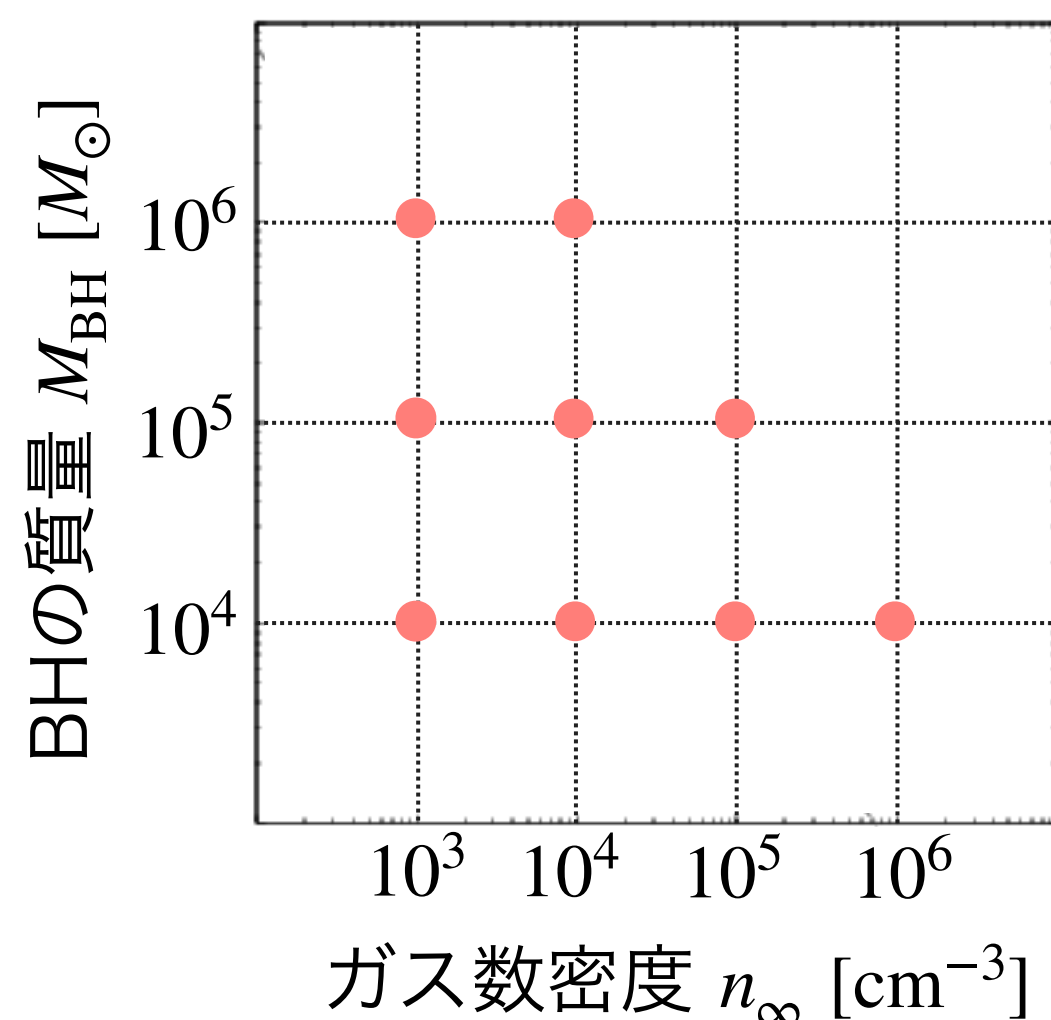
■ Fixed values

- 金属量 : $Z = 0.1Z_{\odot}$
- BH質量 : M_{BH}
- 円盘面 : x-z面

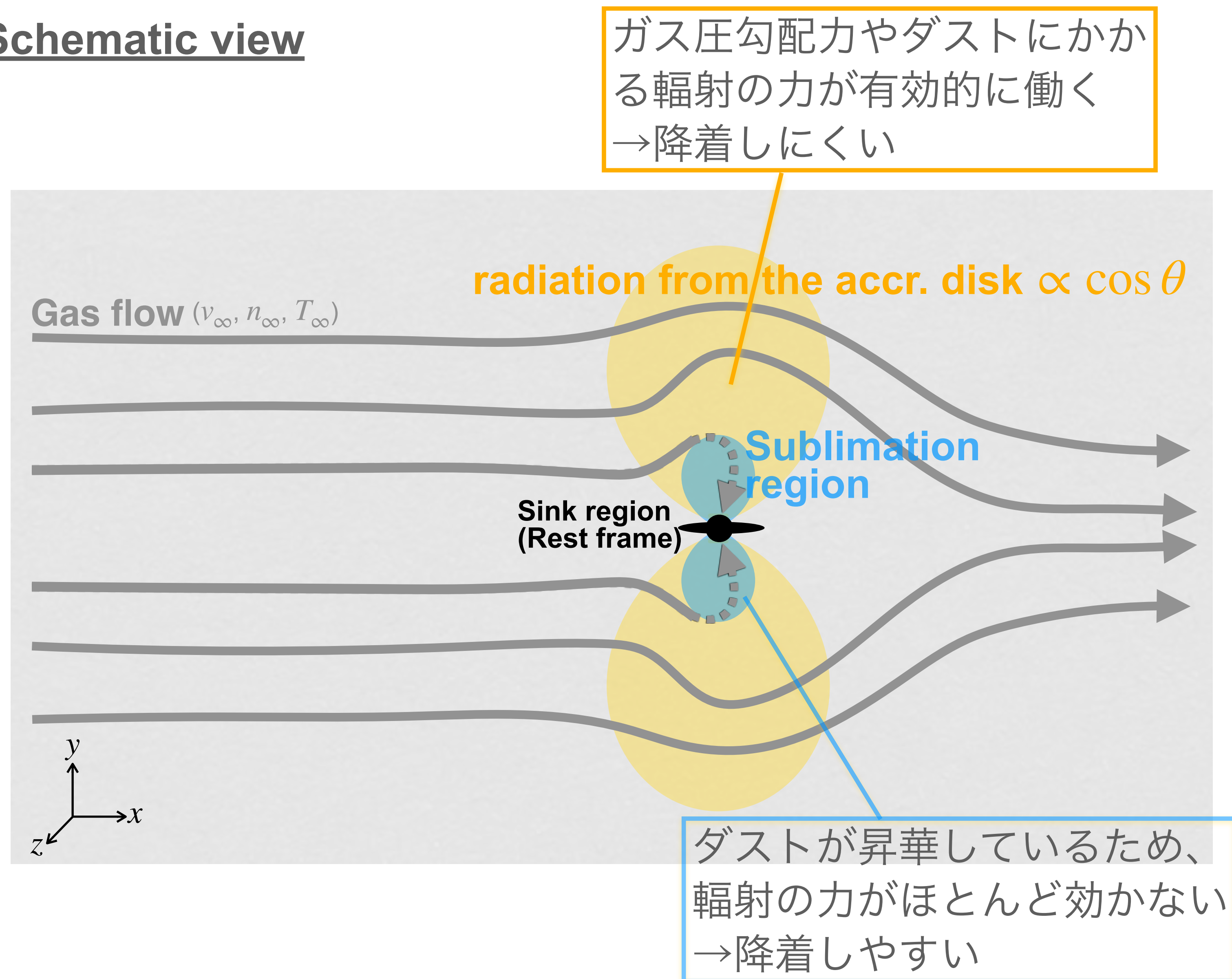
■ Boundary condition

- ガス速度 : $v_{\infty} = 20 \text{ km/s}$
- ガス温度 : $T_{\infty} = 180 \text{ K}$
- ガス密度 : n_{∞}

■ Parameters



■ Schematic view

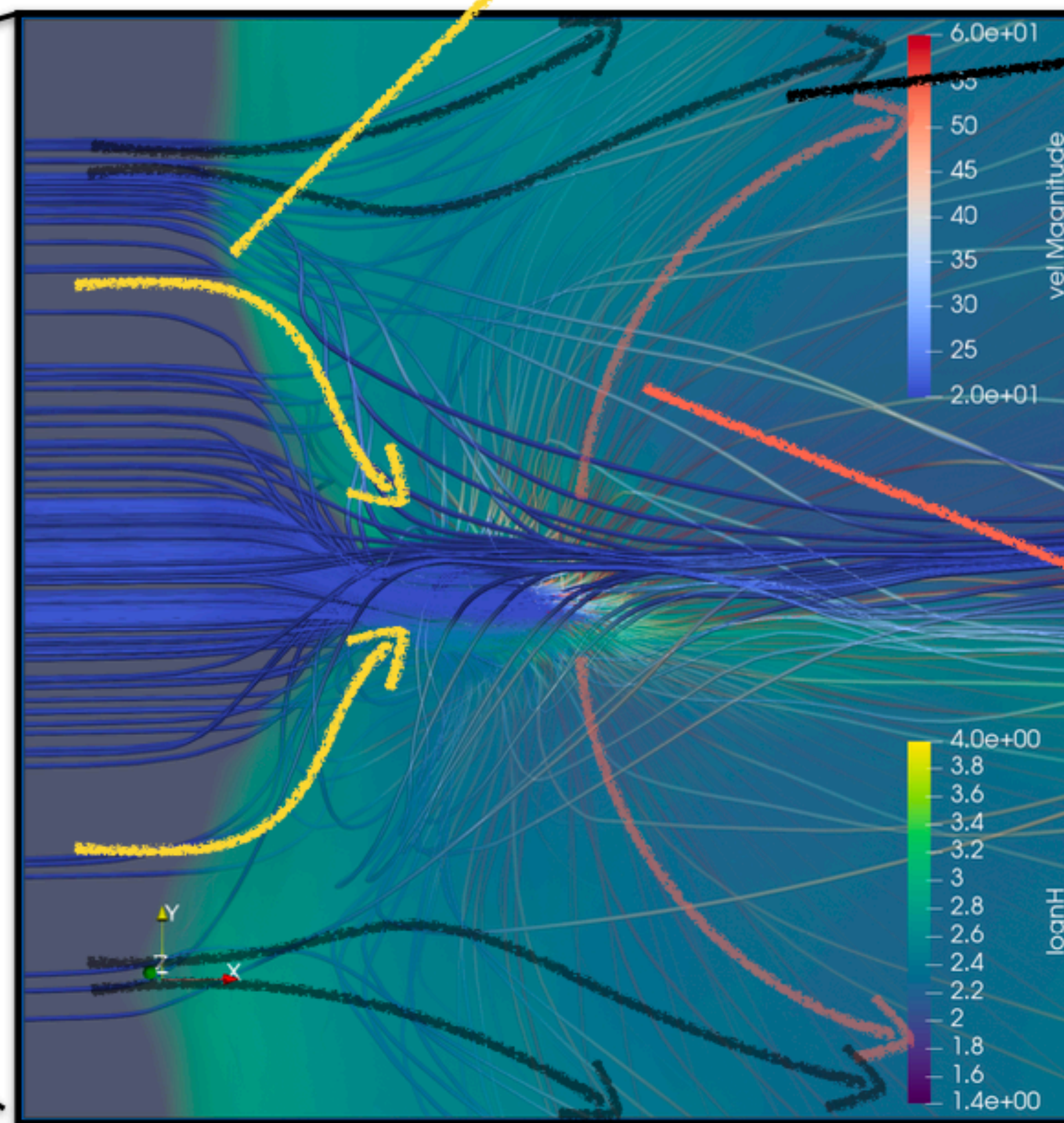
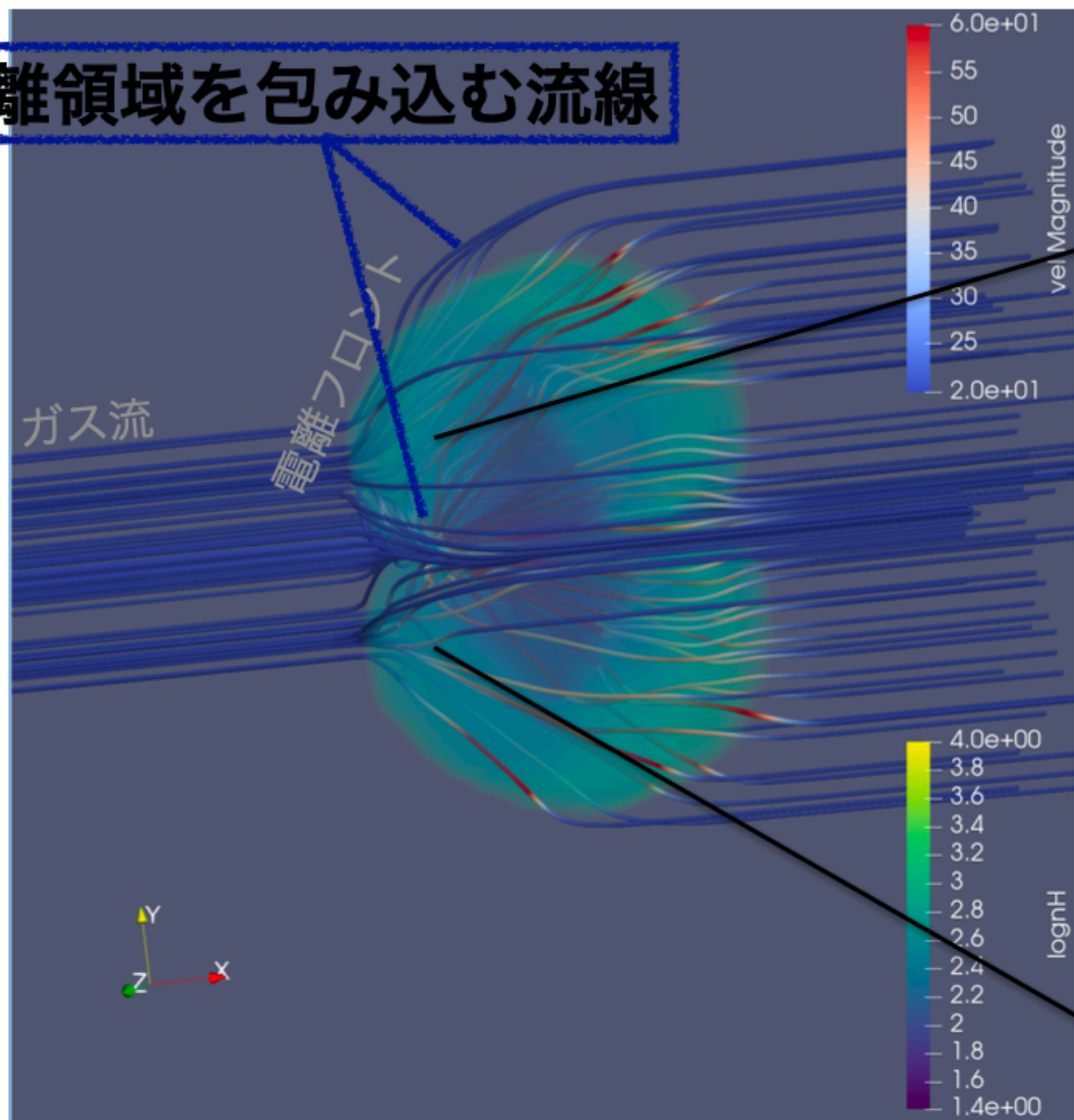


流れの大局的な構造

- 流れの大局的な構造は、どのモデルも似通っている

電離フロントで、衝撃を受け赤道面に集まる流線

電離領域を包み込む流線



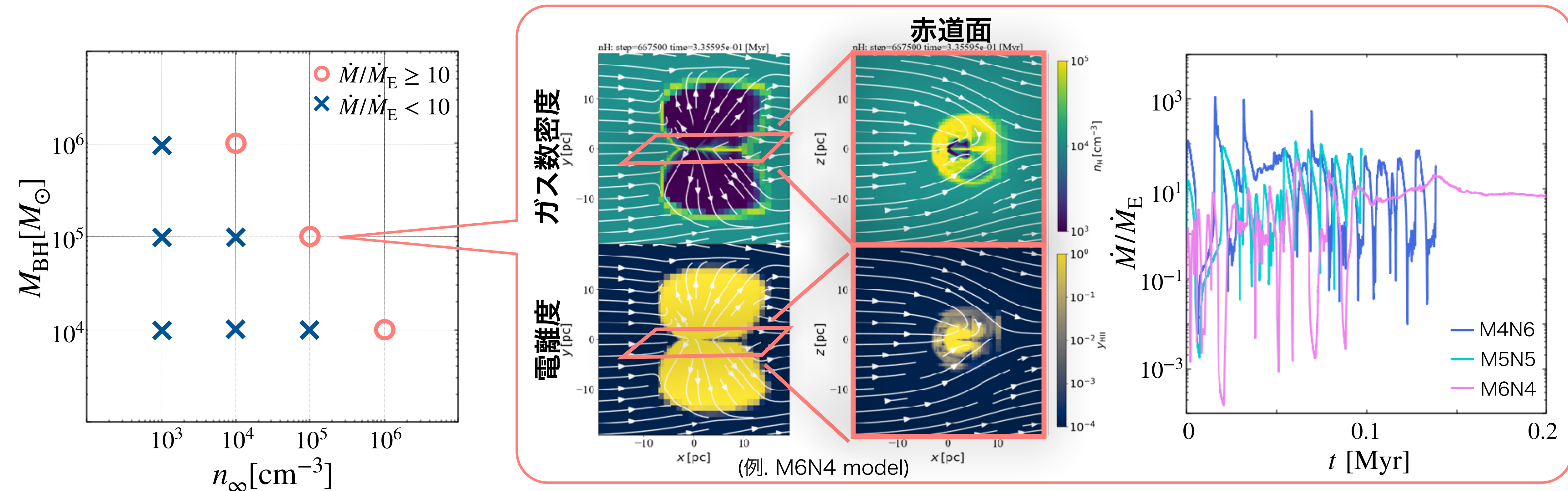
電離領域に突入後、放射+ガス圧勾配力で回転軸方向に押し上げられるガス

電離領域内で、放射力によって赤道面近傍から円盤回転軸方向に噴き出す流線

Dustyな銀河ガス中を浮遊する種BHへの質量降着率

Dusty-gas中を相対速度20 km/sで浮遊する種BHsについて、

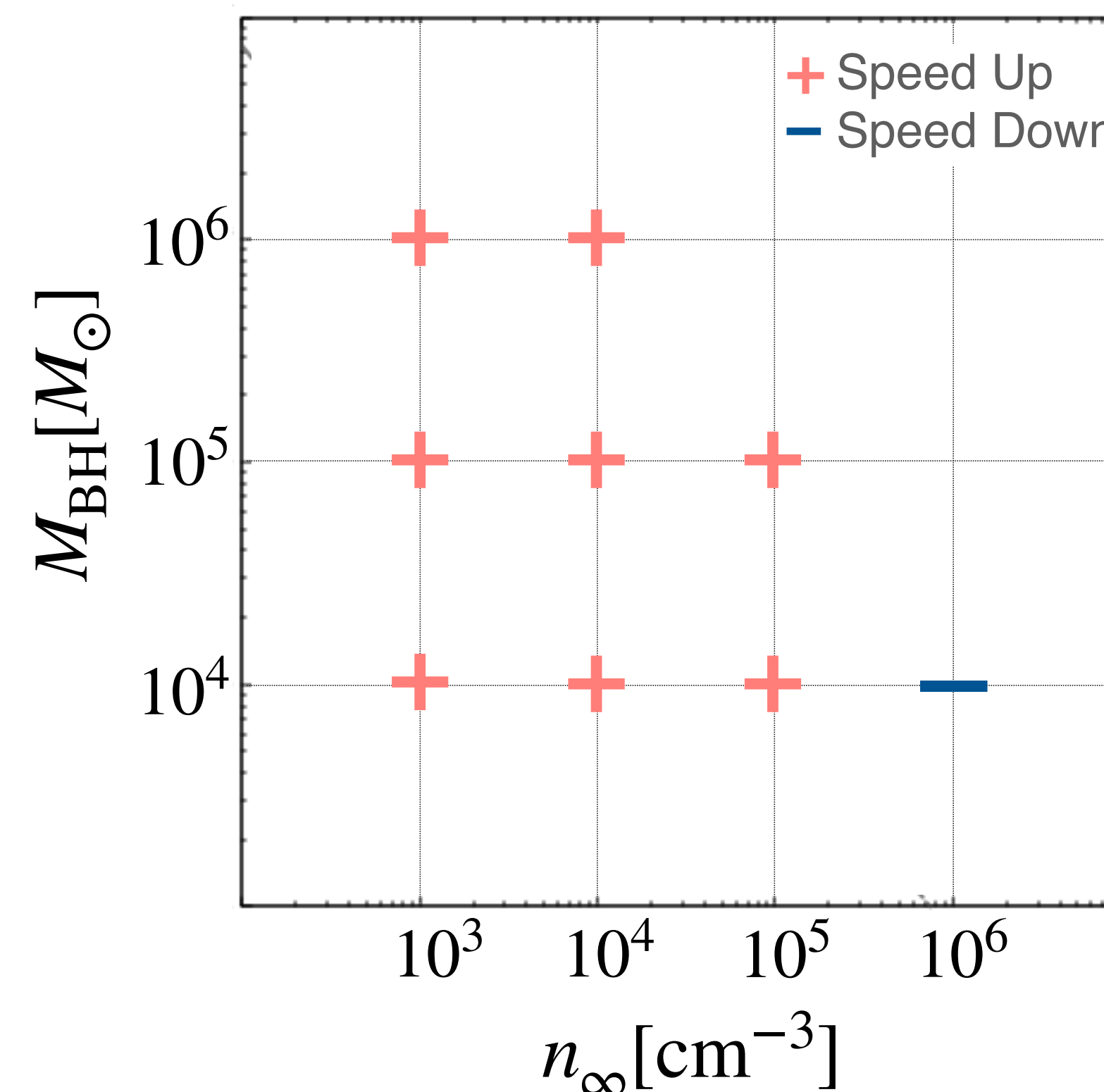
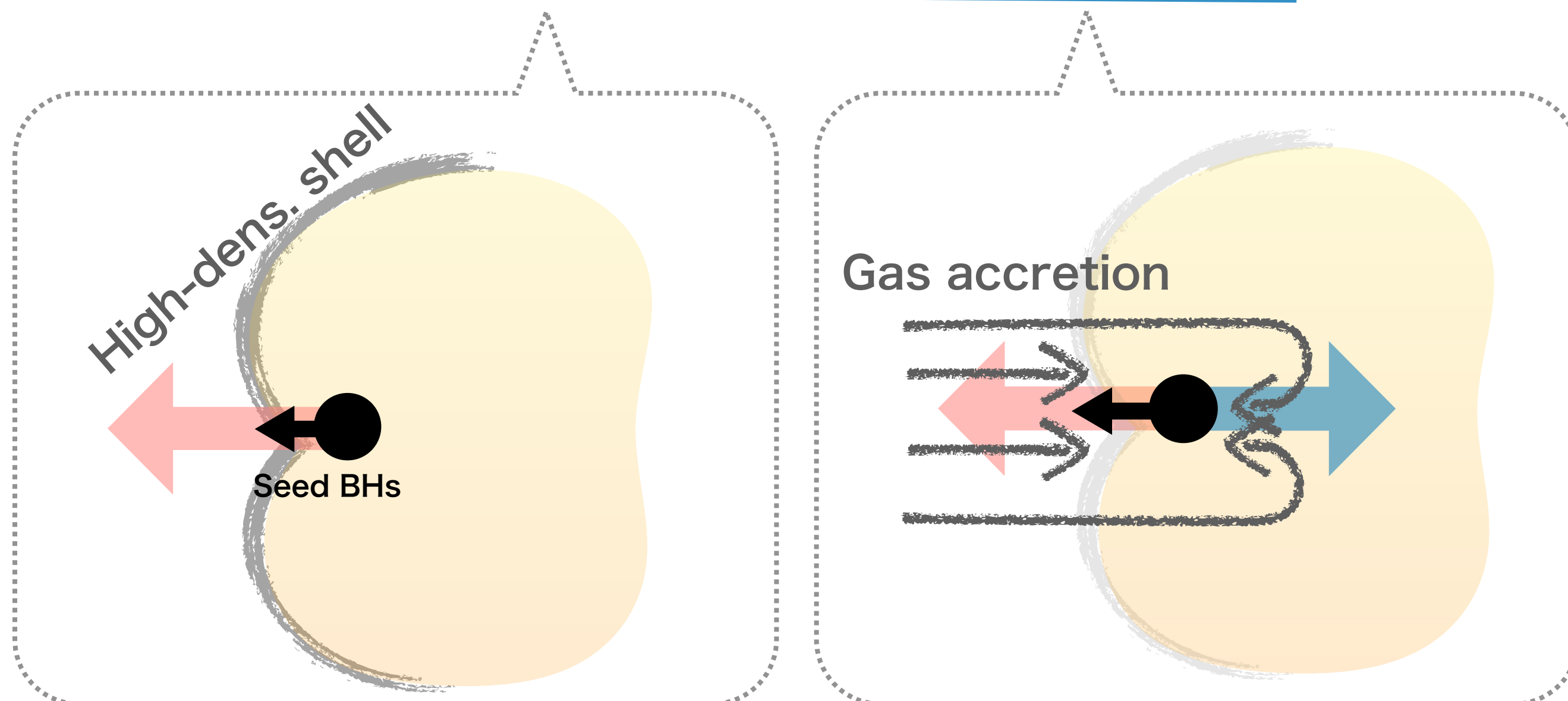
- 時間平均の降着率は、 $M_{\text{BH}} n_{\infty} \gtrsim 10^{10} [M_{\odot} \text{cm}^{-3}]$ でSuper-Eddington率($\dot{M}/\dot{M}_{\text{E}} \geq 10$, $\dot{M}_{\text{E}} \equiv L_{\text{E}}/c^2$)となる (左図)
- Super-Eddington降着は、赤道面付近からのガス降着だけで生じる (中央図)
(電離領域の崩壊(e.g. Inayoshi+2016)は必要条件ではない)
- 赤道面付近での電離領域の拡大と縮小により、降着率は間欠的 (右図)



種BHの速度変化率

- シミュレーションで得られた密度分布や速度分布から、種BHsの加速度を計算(左下式)
- 相対速度20 km/sで $n_\infty \lesssim 10^5$ [cm⁻³]のdusty-gas中を浮遊する種BHsは加速する可能性がある
- 主な加速の要因は、上流側の電離フロント付近に存在する高密度シェルによる重力
(e.g. Toyouchi+20, Ogata et al. Submitted)

$$\text{加速度} = \underbrace{\int_0^{4\pi} \int_R^{R_{\text{out}}} \frac{\rho G x}{R'^3} dR' d\Omega}_{\text{Gravity from shell}} + \underbrace{\int_{S_{\text{sink}}} \rho v_x \mathbf{v} \cdot d\mathbf{S}_{\text{sink}}}_{\text{Accretion force}}$$

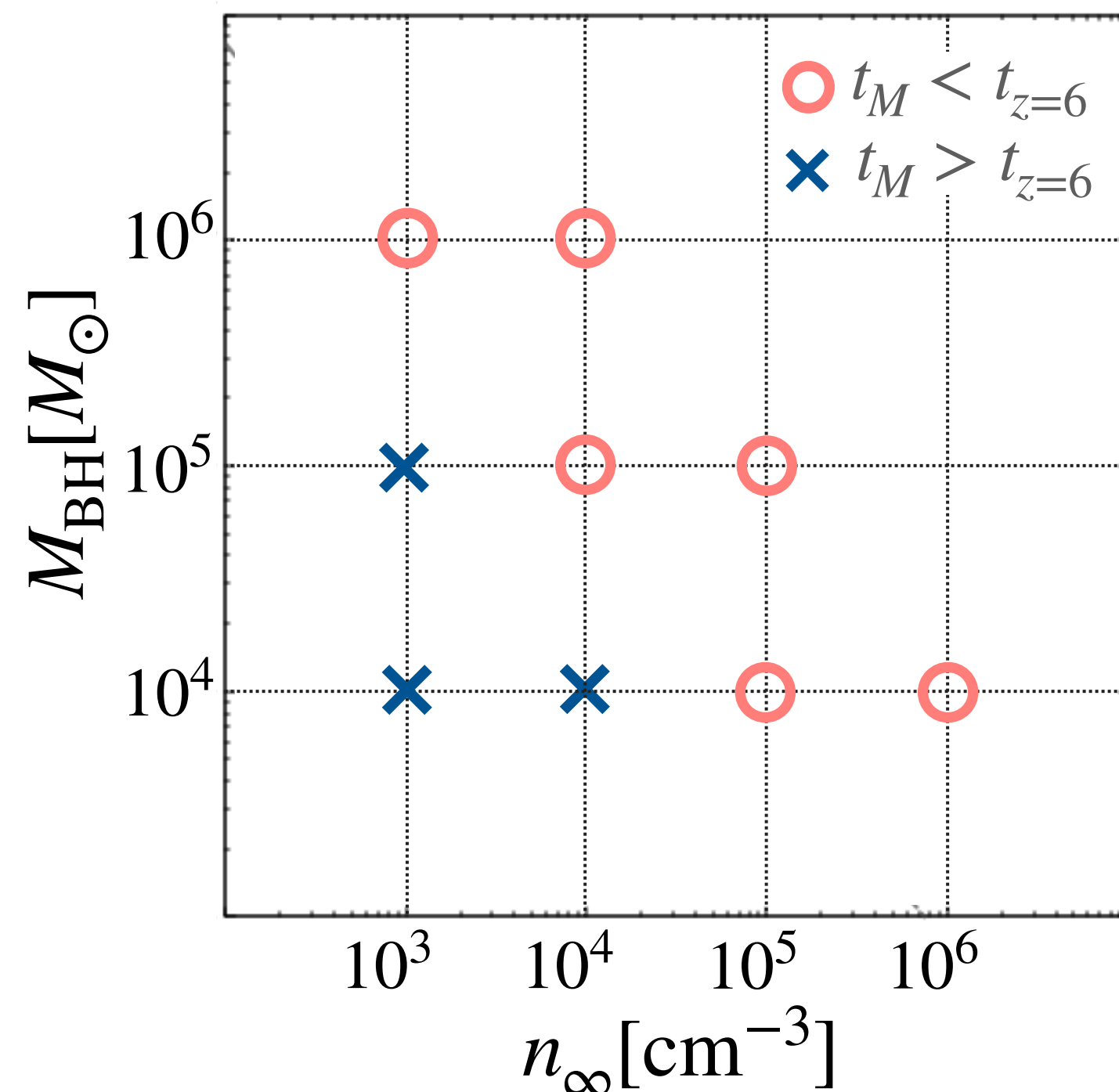


Dustyな銀河ガス中を浮遊する種BHはどう成長するのか？

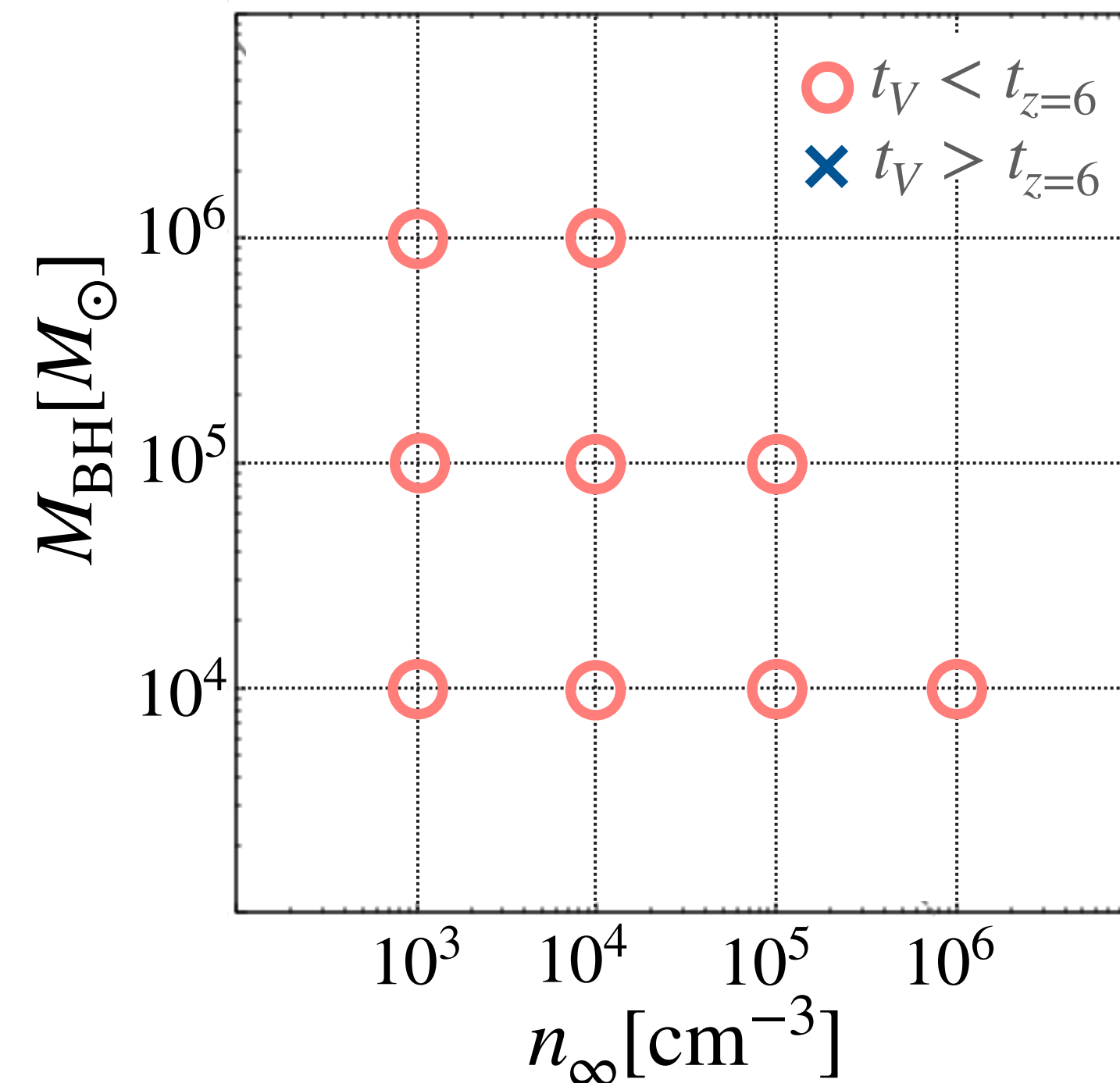
相対速度20 km/sでdusty-gas中を浮遊している種BHsは、

- $M_{\text{BH}}n_{\infty} \gtrsim 10^9 [M_{\odot}\text{cm}^{-3}]$ ならば、high-zに存在する超大質量BHに成長し ($t_M < t_{z=6}$: 左図)、
それ以外の種BHは質量一定のまま速度だけを変化させながら浮遊している可能性がある (右図)

質量増加のタイムスケール vs
宇宙年齢(at z=6)



速度増加のタイムスケール vs
宇宙年齢(at z=6)



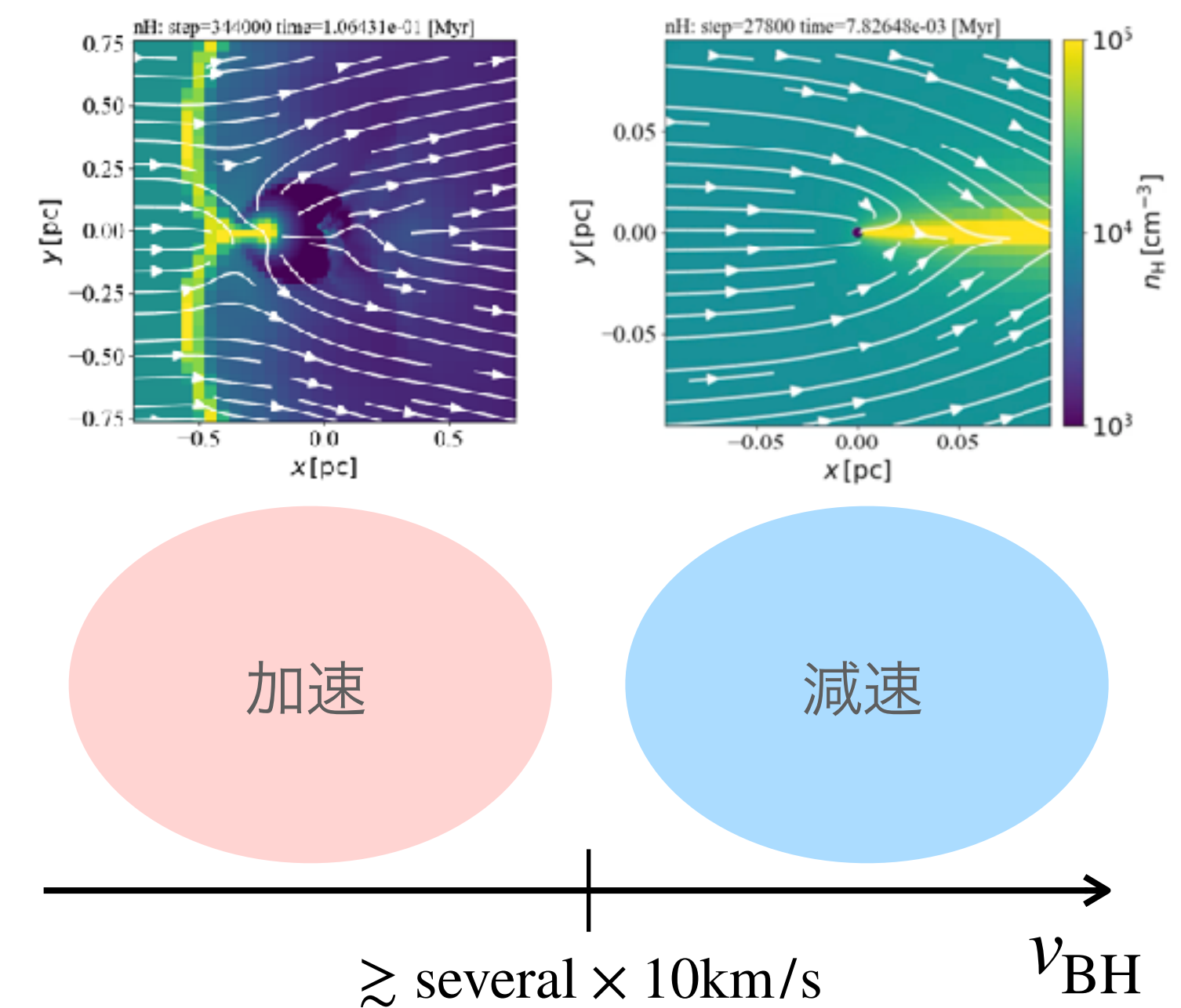
Dustyな銀河ガス中を浮遊する種BHはどう成長するのか？

相対速度20 km/sでdusty-gas中を浮遊している種BHsは、

- $M_{\text{BH}} n_{\infty} \gtrsim 10^9 [M_{\odot} \text{cm}^{-3}]$ ならば、high-zに存在する超大質量BHに成長し ($t_M < t_{z=6}$: 左図)、それ以外の種BHは質量一定のまま速度だけを変化させながら浮遊している可能性がある (右図)

ただし、

- 種BHsが加速して速度が ~ 100 km/s程度になると、古典的なBondi-Hoyle-Lyttleton降着 (Bondi&Hoyle 1944) に似た流れの構造となる
- すなわち、種BHsは減速フェーズとなる (いつまでも加速し続けることはない)
- よって、種BHの速度分布は $\gtrsim \text{several} \times 10 \text{km/s}$ に偏っている可能性がある



Dustyな銀河ガス中を浮遊する種BHはどう成長するのか？

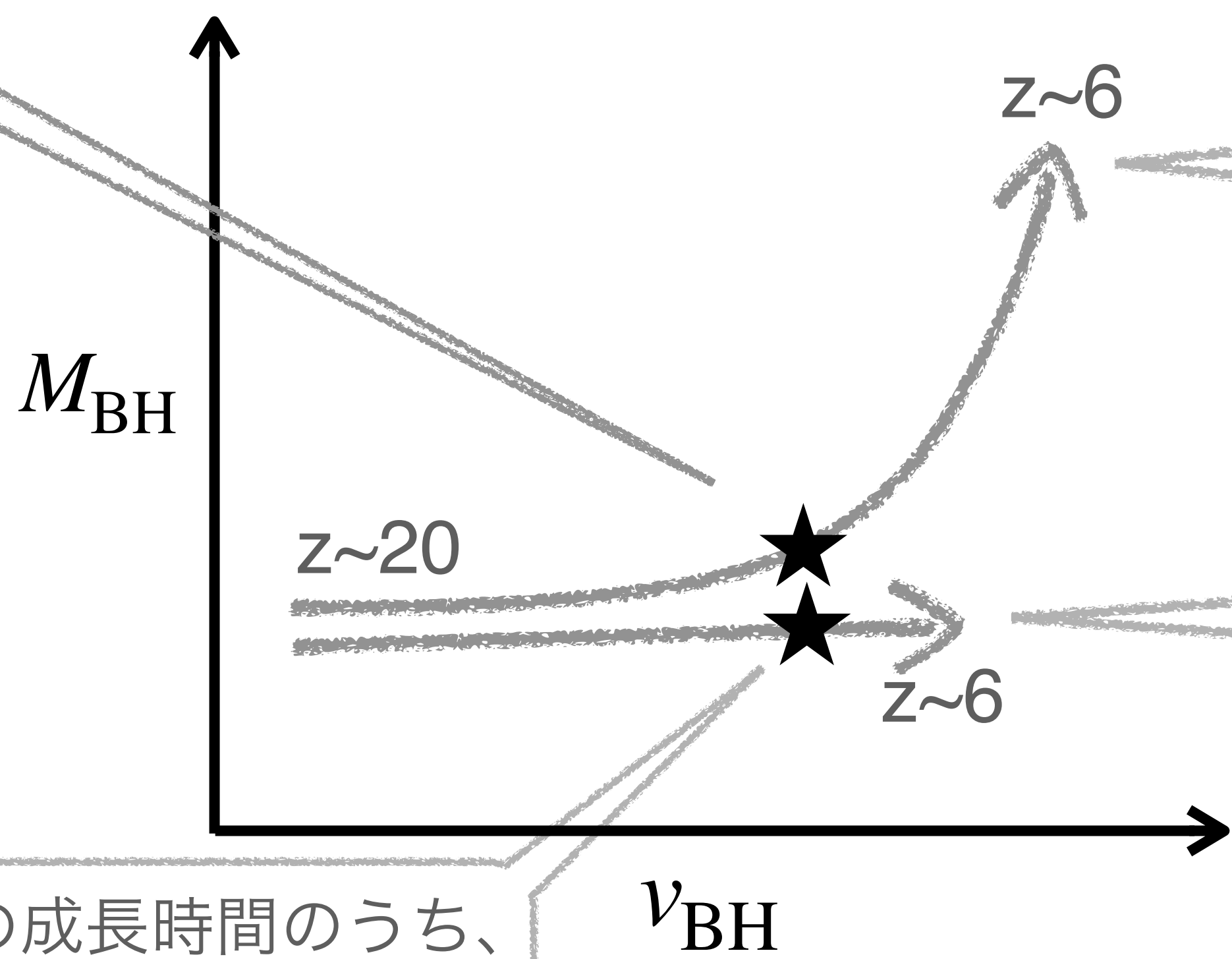
相対速度20 km/sで $n_{\infty} \lesssim 10^5$ [cm⁻³]のdusty-gas中を浮遊している種BHsは、

- 先に速度が変化し、質量は後に成長する可能性がある

(∵ 全モデルで、速度増加のタイムスケール \ll 質量増加のタイムスケール)

$$t_v \ll t_M < t_{z=6}$$

種BHはトータルの成長時間のおよそ1/5 (~20Myr) を★で過ごす



$$M_{BH} n_{\infty} \gtrsim 10^9 [M_{\odot} \text{cm}^{-3}]$$

Massive BHsが \gtrsim several \times 10km/sで漂っている

$$t_v \ll t_{z=6} < t_M$$

種BHはトータルの成長時間のうち、ほとんどを★で過ごす

Seed BHsが \gtrsim several \times 10km/sで漂っている

CONCLUSIONS

内容

- ✓ 3次元輻射流体シミュレーションを駆使して、初期宇宙のdustyな銀河ガス中を浮遊する種ブラックホールの成長率を調査

本研究の特徴

- ✓ 輻射場の非等方性、ダストの昇華を考慮

結果

初期宇宙のdustyな銀河ガス中を浮遊する種BHsは、

- ✓ Bondi-Hoyle-Lyttletonスケールで生じる赤道面付近からのガス供給だけで、Super-Eddington降着状態($\dot{M} \gtrsim 10\dot{M}_E$)となる可能性がある
- ✓ $M_{BH}n_\infty \gtrsim 10^9 [M_\odot \text{cm}^{-3}]$ ならばhigh-zに存在する超大質量BHに成長し、それ以外の種BHsは質量一定のまま速度 $\gtrsim \text{several} \times 10 \text{km/s}$ で浮遊している可能性がある