

# 降着成長する種BH が受ける

# Dynamical Friction

2023年初代星研究会@北海道大



GRADUATE  
SCHOOL OF  
FACULTY OF

SCIENCE  
KYOTO UNIVERSITY

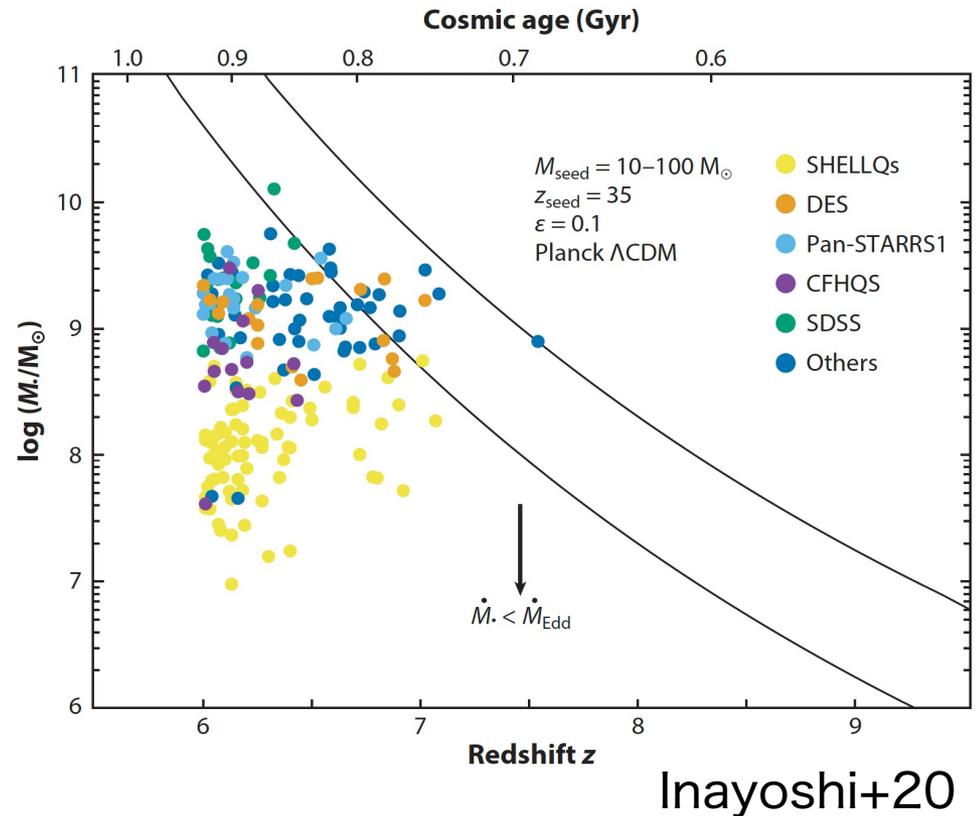
鈴木智也 (京大D1)

共同研究者：杉村和幸(北大)、細川隆史(京大)、  
松本倫明(法政大)

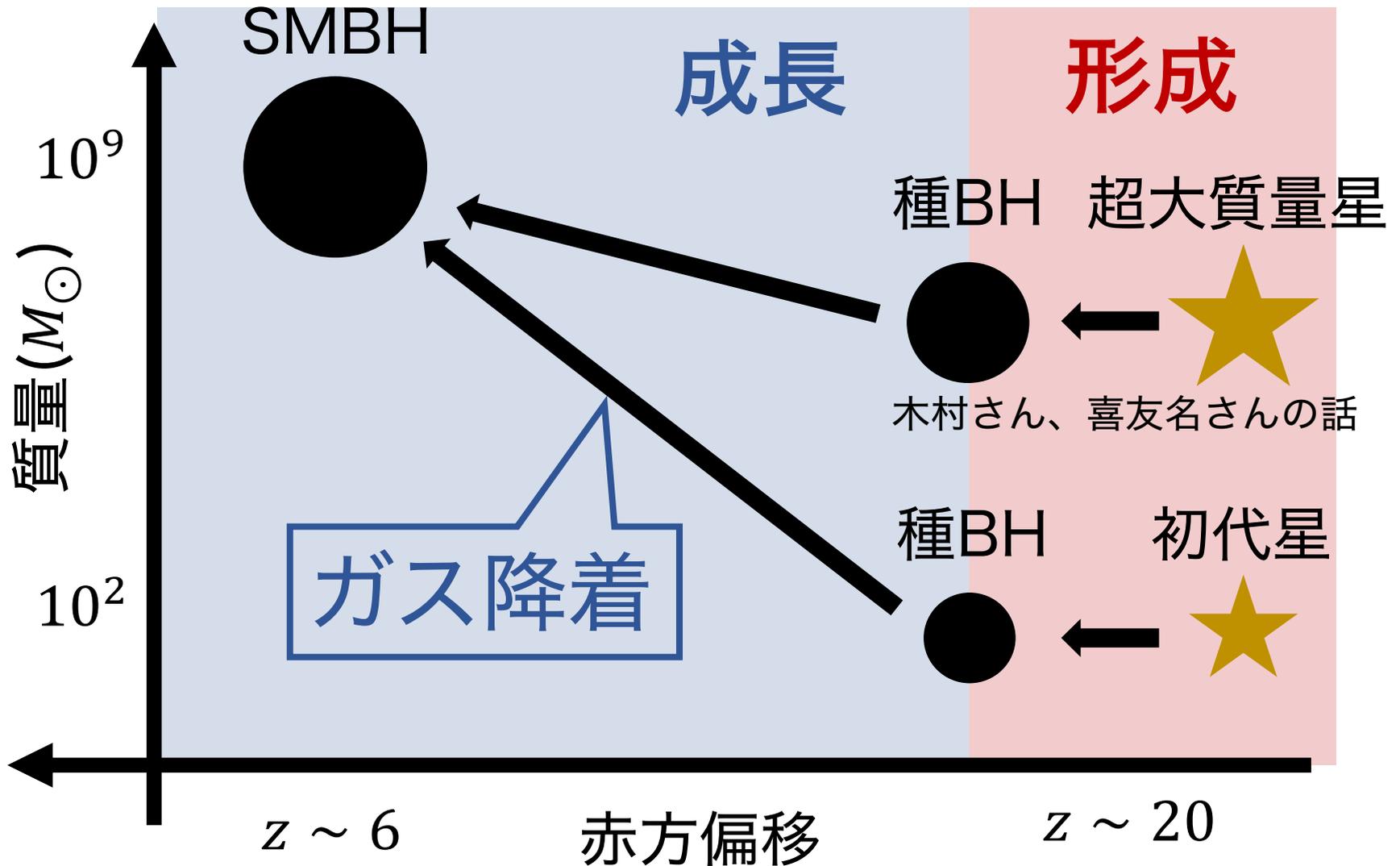
道入

# SuperMassive Black Hole

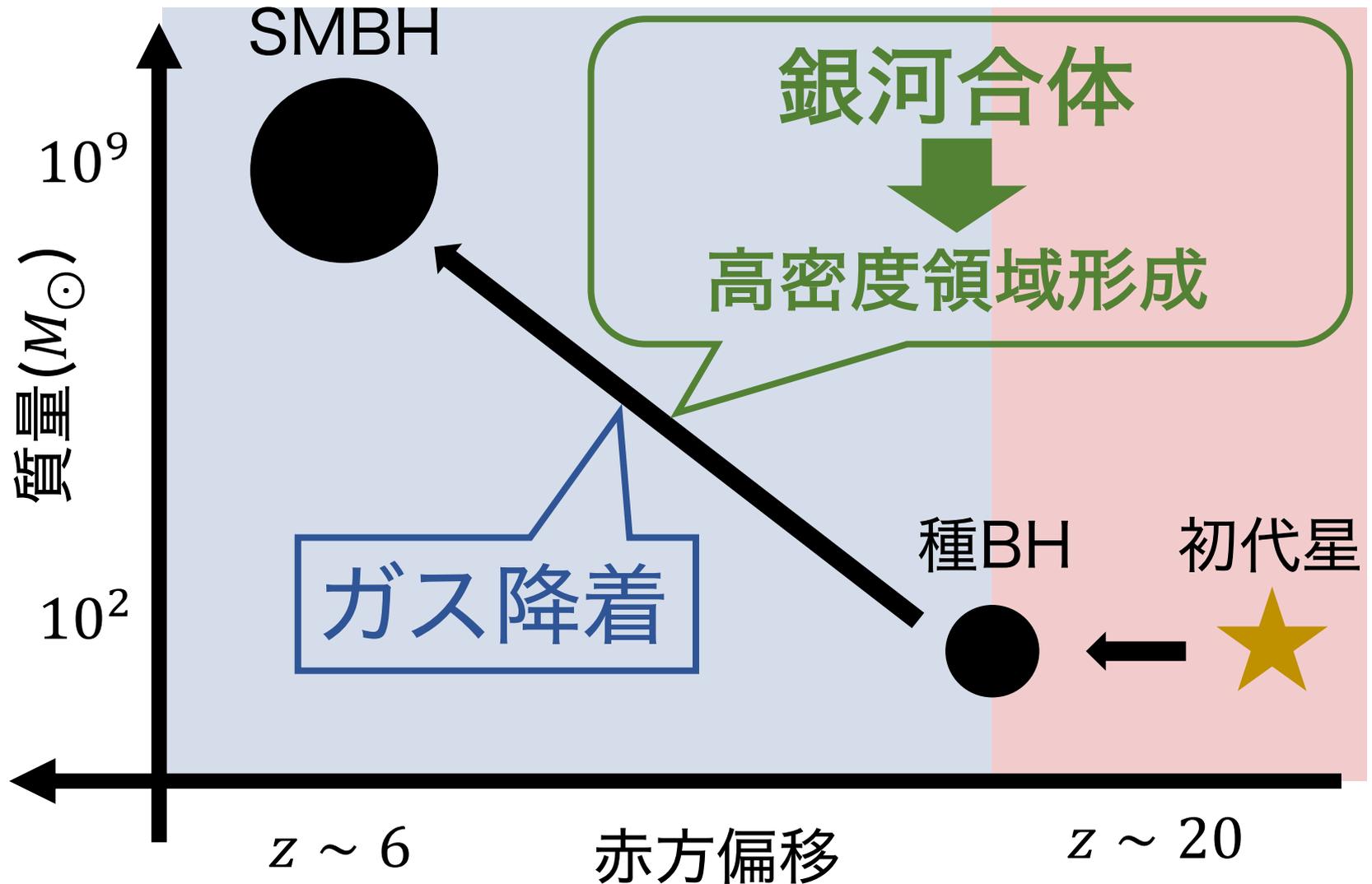
- 質量  $10^6 - 10^{10} M_{\odot}$
- 形成シナリオが未確立
- 銀河との共進化
- 特に、 $z \geq 6$  で観測された  $10^9 - 10^{10} M_{\odot}$  の SMBH は急速な成長が必要で問題



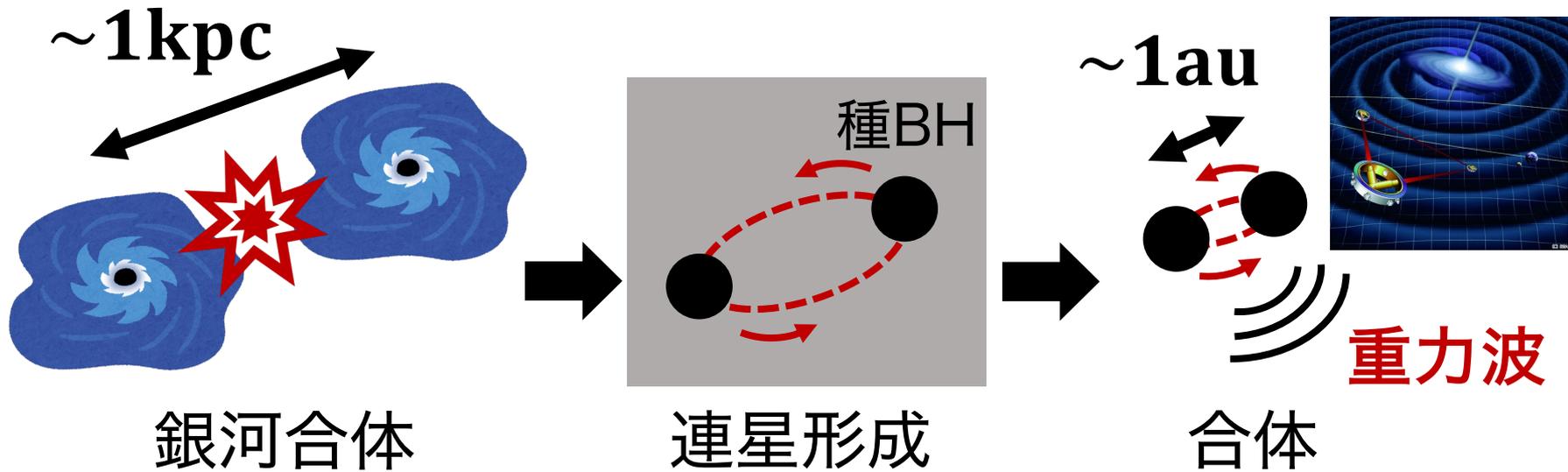
# SMBHの形成シナリオ候補



# SMBHの形成シナリオ候補



# 種BHの連星

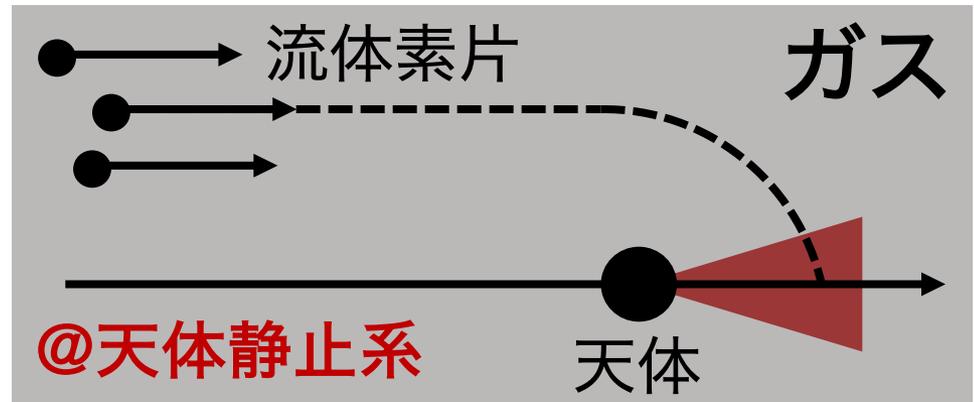


急速成長する種BHは連星である可能性が高い

Q. ガス降着、輻射フィードバックを考慮したときに、合体に至るまでの時間スケールは？

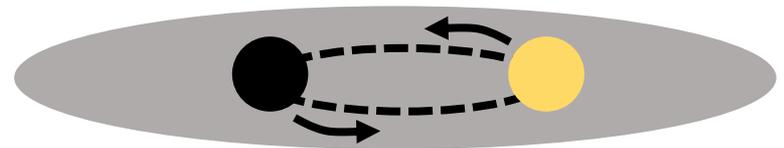
# ガス中を運動する天体

- 天体重力によって後方が高密度になり、減速する向きの力を受ける



↳ (ガスによる) 力学的摩擦  
Gas Dynamical Friction

知りたいこと： $F_{DF} = F_{DF}(v)$



# 線形理論 (Ostriker Formula)

時刻  $t = 0$  に重力源が突然発生すると仮定

$$F_{\text{Ostriker}}(\mathcal{M}, t, r_{\min}) = \frac{4\pi\rho_{\infty}(GM_{\text{BH}})^2}{v_{\text{BH}}^2}$$

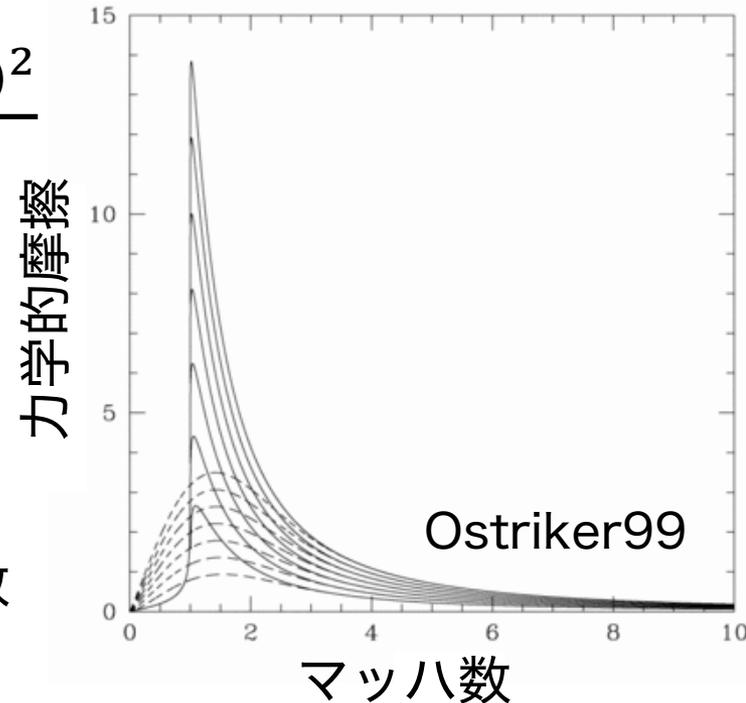
$$\times \begin{cases} \frac{1}{2} \ln\left(\frac{1+\mathcal{M}}{1-\mathcal{M}}\right) - \mathcal{M}, & (\mathcal{M} < 1) \\ \frac{1}{2} \ln\left(1 - \frac{1}{\mathcal{M}^2}\right) + \ln\left(\frac{v_{\text{BH}}t}{r_{\min}}\right), & (\mathcal{M} > 1) \end{cases}$$

$v_{\text{BH}}$ : BH速度     $M_{\text{BH}}$ : BH質量     $\mathcal{M}$ : マッハ数

$\rho_{\infty}$ : ガスの質量密度

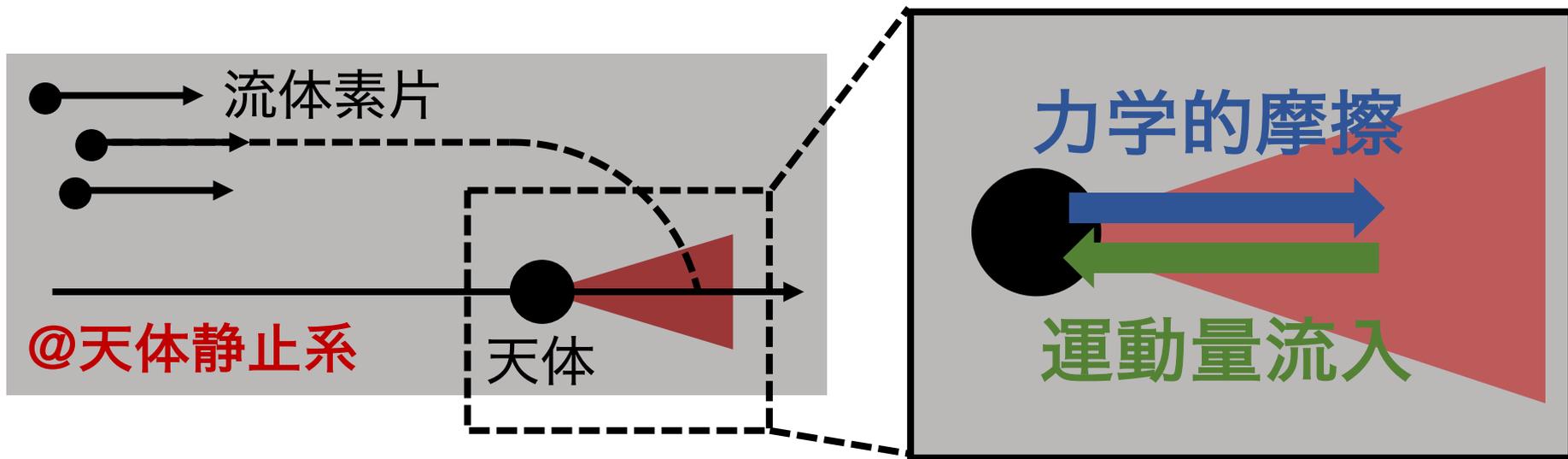
$r_{\min}$ : 不定のパラメータ (抵抗に寄与するガスが位置する最小距離を表す)  
→ シミュレーションで決定

(Sánchez-Salcedo&Brandenburg 99、Kim&Kim 09等)



# 抵抗力 w/ 降着

- 1 降着による**非線形性**
- 2 降着による**運動量フラックス**も力として寄与



線形理論をもとに、降着の効果を入れた抵抗力の公式を作りたい

# 重要な長さスケール

- 球対称ガス降着における典型的な長さスケール

$$R_B := \frac{GM_{\text{BH}}}{c_s^2} \quad \text{ボンディ半径}$$

- 軸対称ガス降着における典型的な長さスケール

$$R_{\text{BHL}} := \frac{GM_{\text{BH}}}{c_s^2 + v_{\text{BH}}^2} \quad \text{Bondi-Hoyle-Lyttleton半径}$$

$c_s$  : 音速

# 本研究の目標

ガス降着による非線形性を考慮したときに  
天体(BH)が受ける抵抗力の速度依存性を、  
線形理論による定式化をもとに求める

手

法

# 問題設定

- ガスに  $+x$  方向の初速を与え、BHへの降着率が一定になるまで計算

- 正味の抵抗力

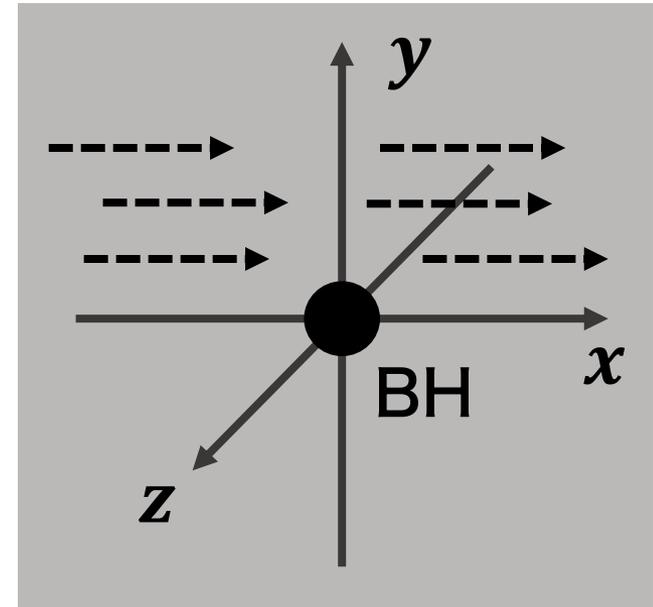
$$F_{\text{DF}} = F_{\text{grav}} + F_{\text{acc}}$$

を求める

- ガスの初速度がパラメータ

$$F_{\text{grav}} = \left( \int dV \rho G M_{\text{BH}} \frac{\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{BH}}}{|\mathbf{x} - \mathbf{x}_{\text{BH}}|^3} \right) \cdot \frac{\mathbf{v}_{\text{BH}}}{|\mathbf{v}_{\text{BH}}|}$$

$$F_{\text{acc}} = \left( \int d\mathbf{S} \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) \right) \cdot \frac{\mathbf{v}_{\text{BH}}}{v_{\text{BH}}}$$



# 計算手法

- SFUMATOによる  
3次元流体シミュレーション



- 初期密度  $10^5 \text{ cm}^{-3}$ 、等温 ( $10^4 \text{ K}$ )
- $M_{\text{BH}} = 10^3 M_{\odot}$  で、降着による質量変化は無視

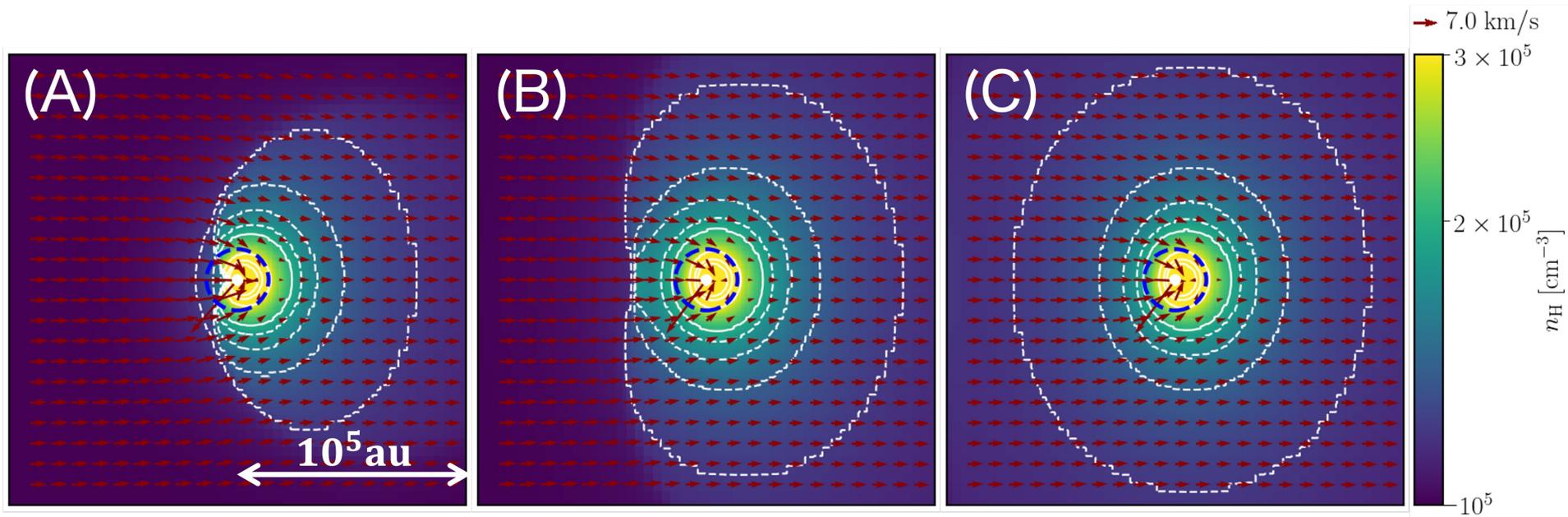
$$R_{\text{B}} = \frac{GM_{\text{BH}}}{c_{\text{s}}^2} \simeq 1.4 \times 10^4 \text{ au}$$

- $0 < \mathcal{M} < 3.0$  の範囲で、12ケース計算
- BHはシンク粒子として扱い、 $R_{\text{sink}} \leq \frac{1}{10} R_{\text{B}}$

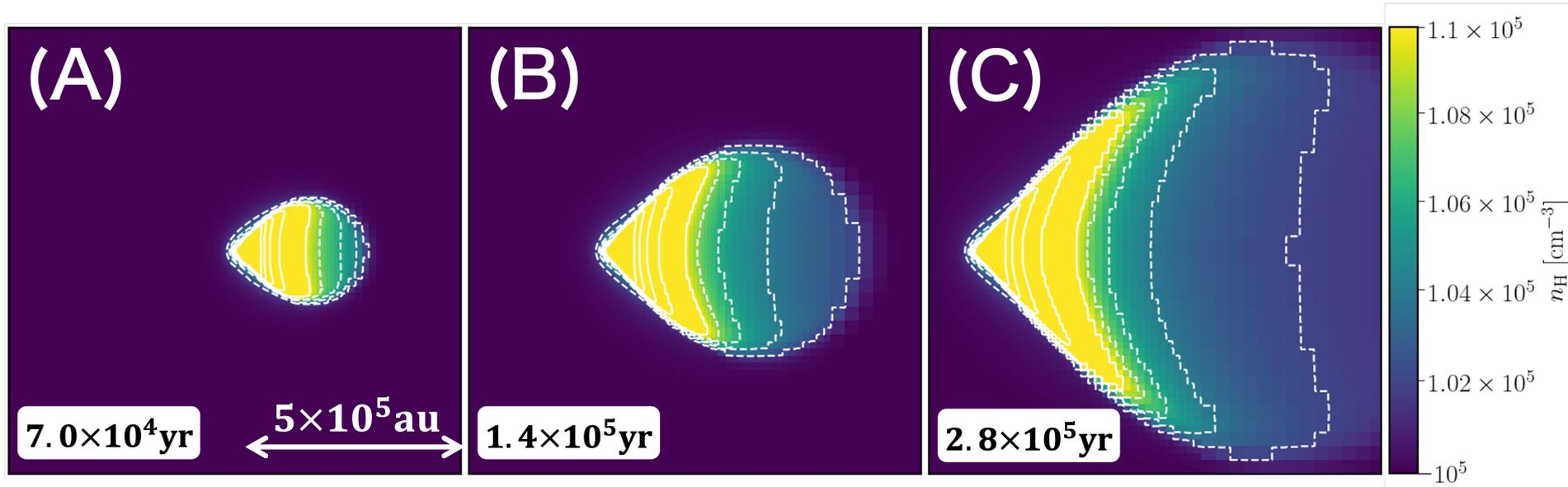
結晶

果

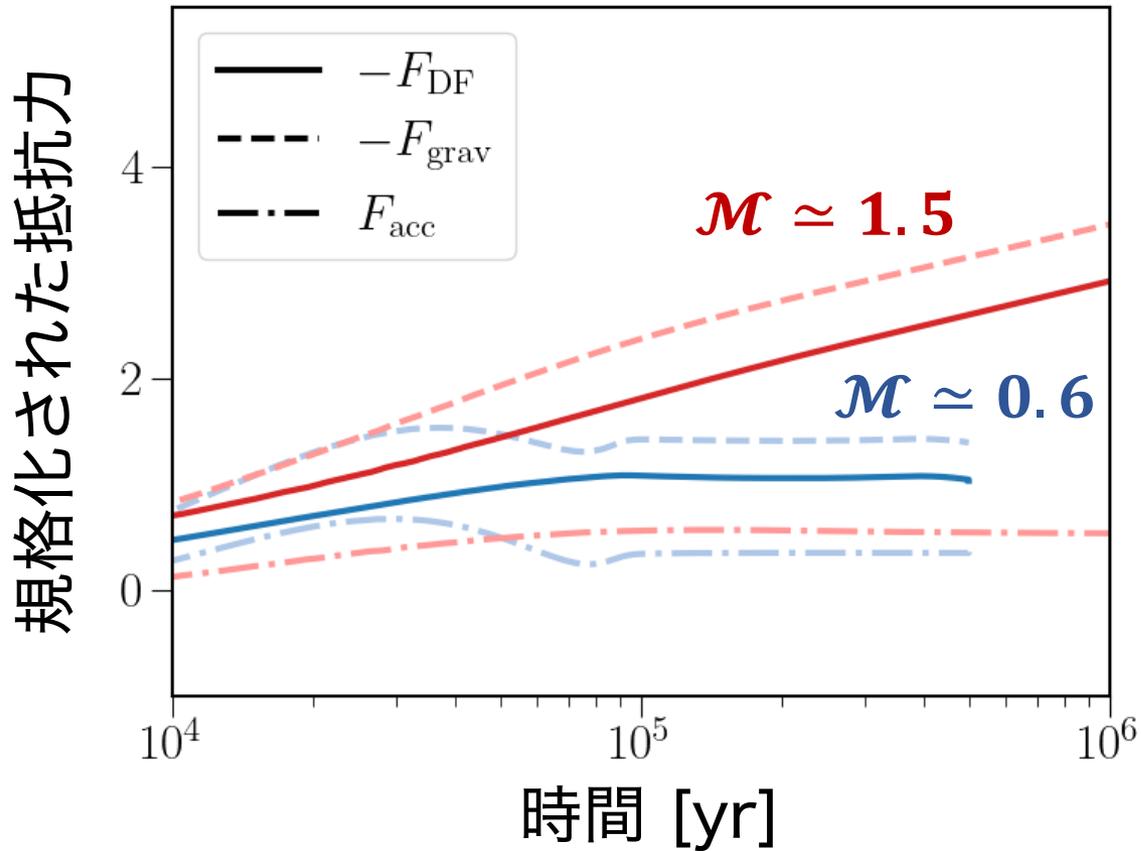
# 時間発展 ( $\mathcal{M} \simeq 0.6$ )



# 時間発展 ( $\mathcal{M} \simeq 1.5$ )



# 時間発展



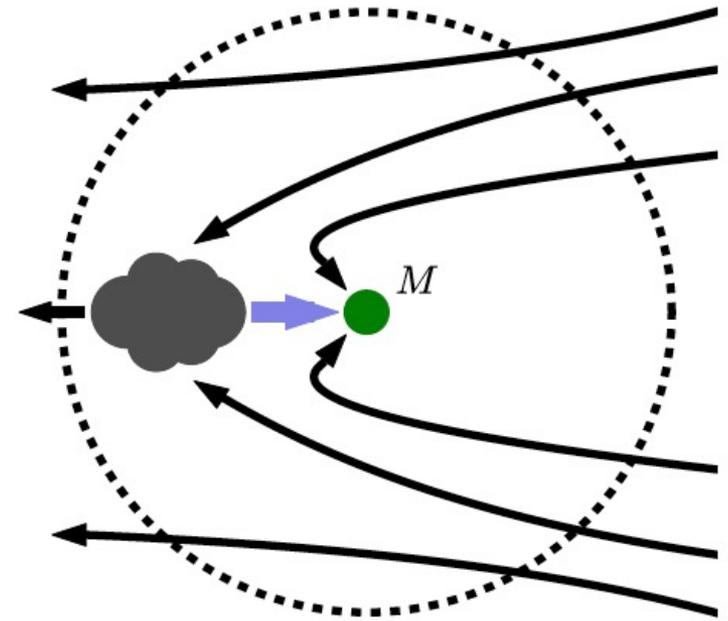
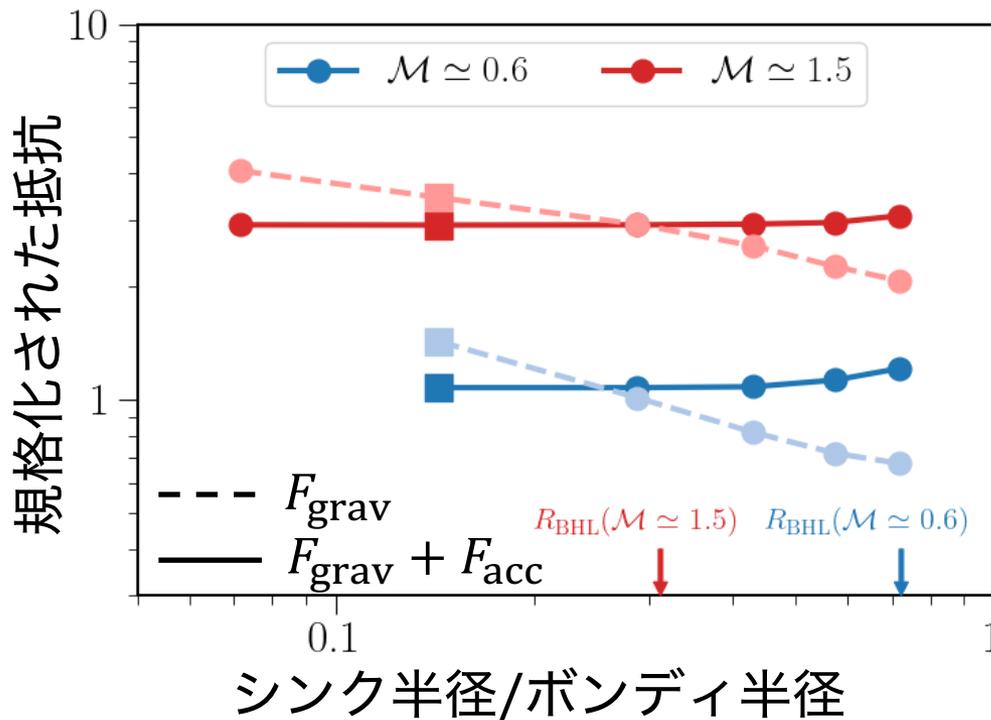
亜音速：時間依存性なし

超音速：時間依存性あり ( $\propto \log t$ )

線形理論に無矛盾！

# 解像度依存性

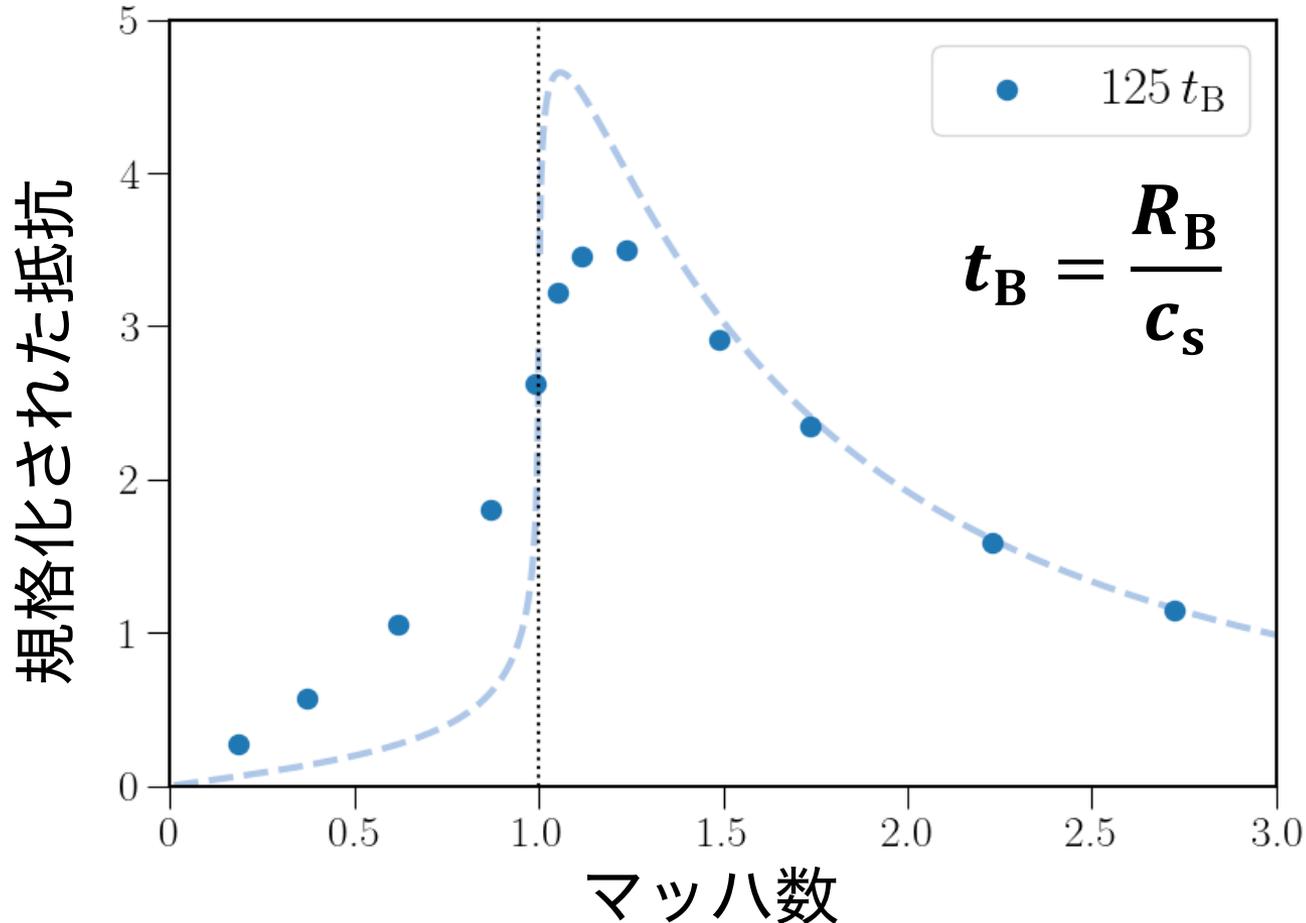
正味の抵抗力は解像度(シンク半径)に依存しない



図はLee & Stahler 14より

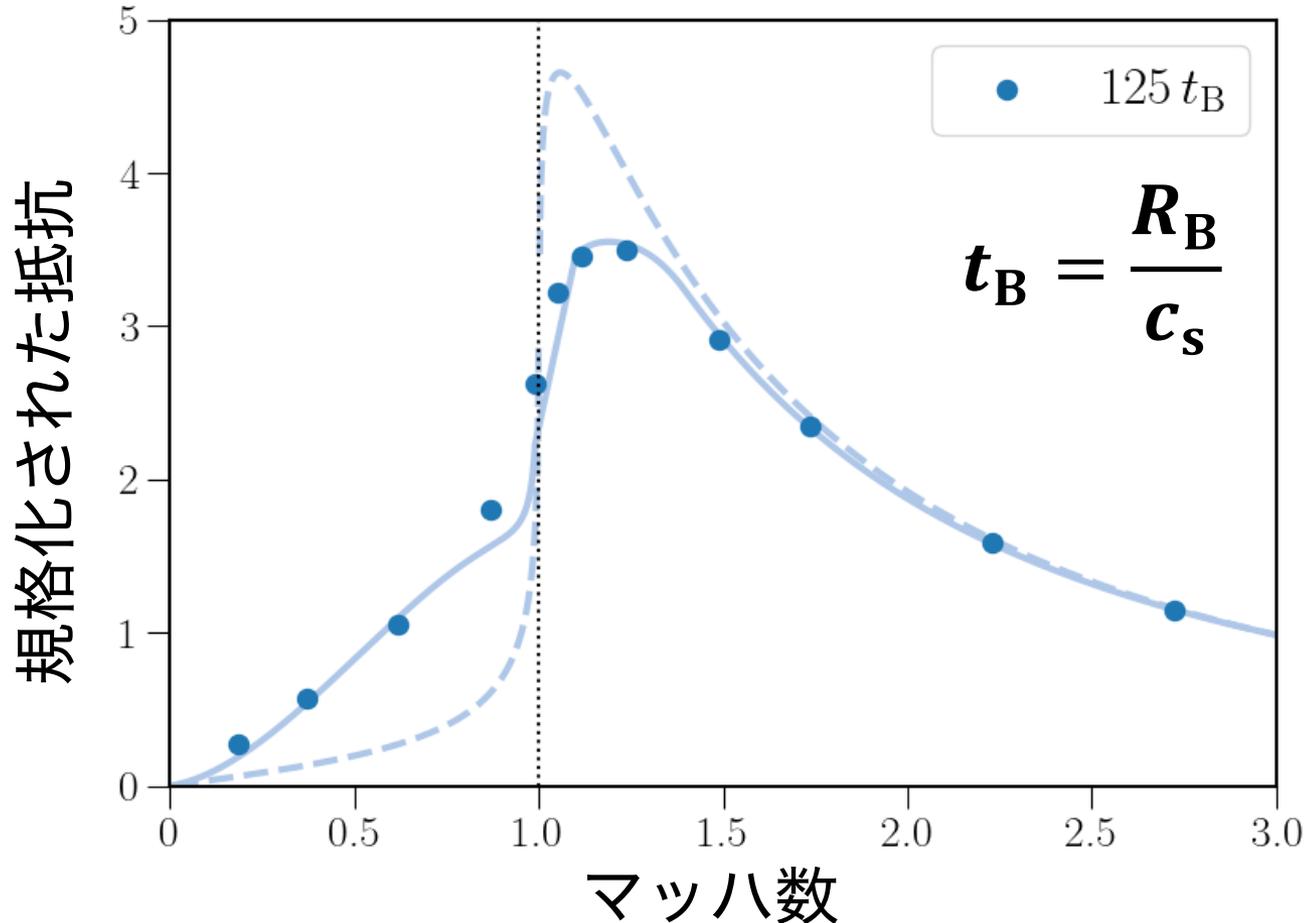
降着ガスは天体に力学的摩擦を及ぼす一方、降着時に運動量を持ち込み、結果として解像度依存性が消える

# マッハ数依存性



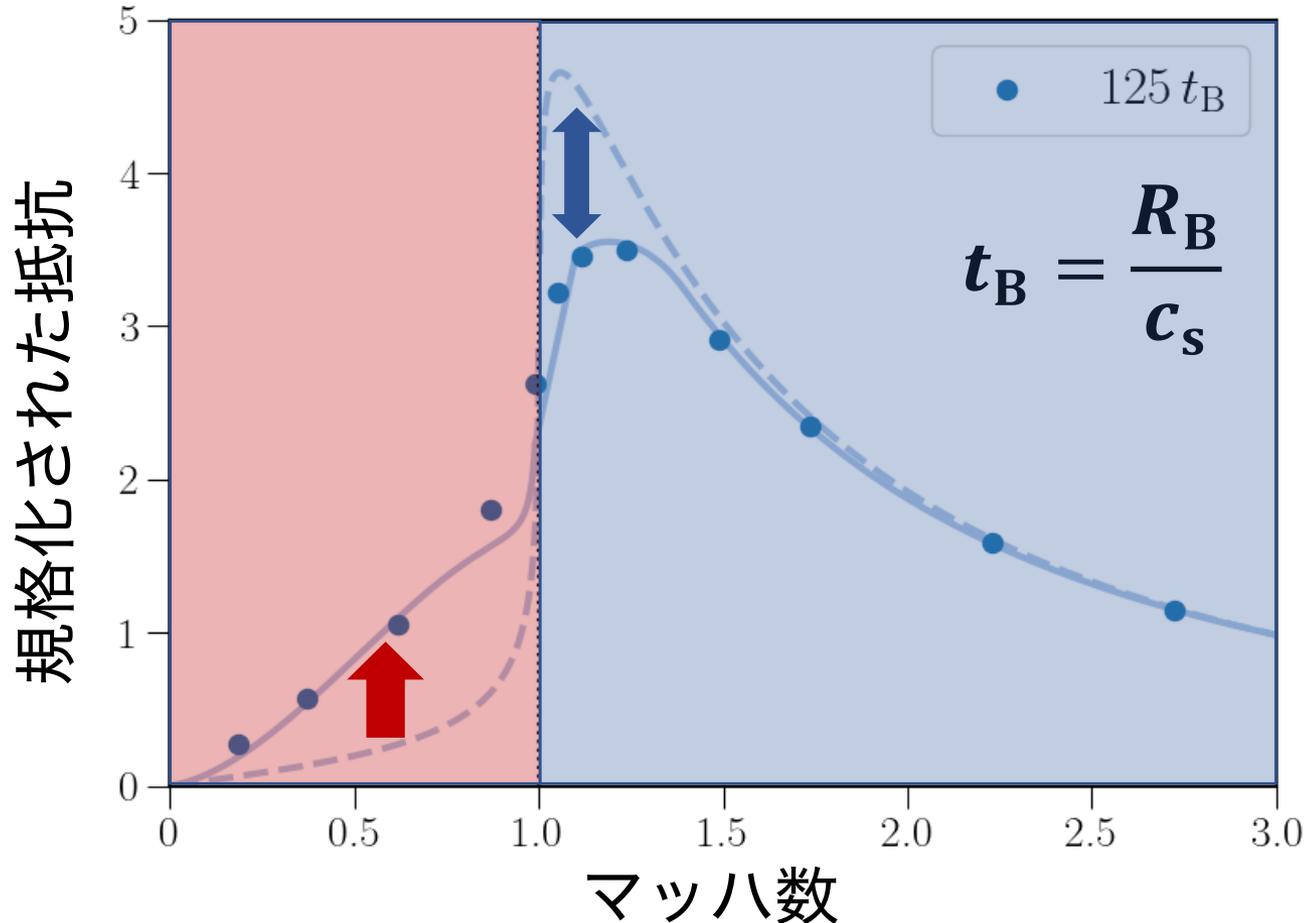
$$F_{DF} = F_{\text{Ostriker}}(t = 125 t_B, r_{\min} = R_{\text{BHL}}/2)$$

# マッハ数依存性



$$F_{DF} = F_{\text{Ostriker}}(t = 125 t_B, r_{\min} = R_{\text{BHL}}/2)$$

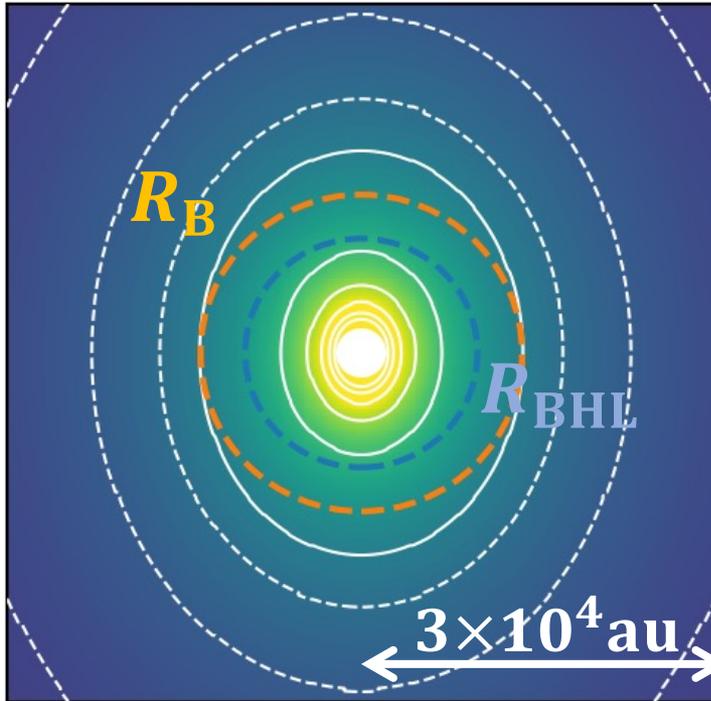
# マッハ数依存性



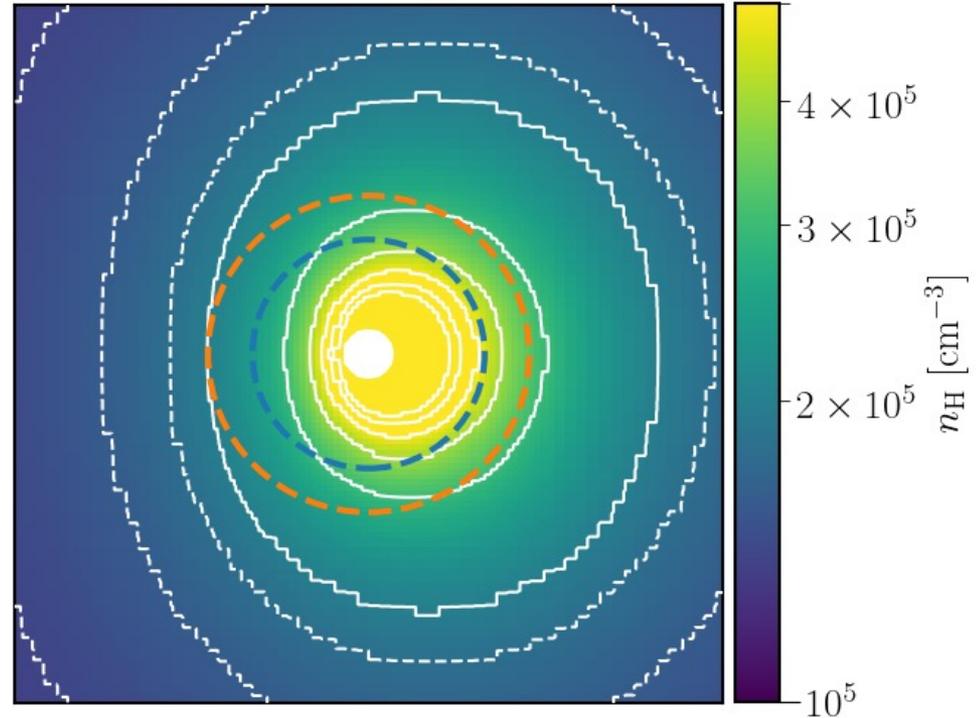
$$F_{DF} = F_{\text{Ostriker}}(t = 125t_B, r_{\min} = R_{\text{BHL}}/2)$$

# 物理的解釈(亜音速)

線形理論

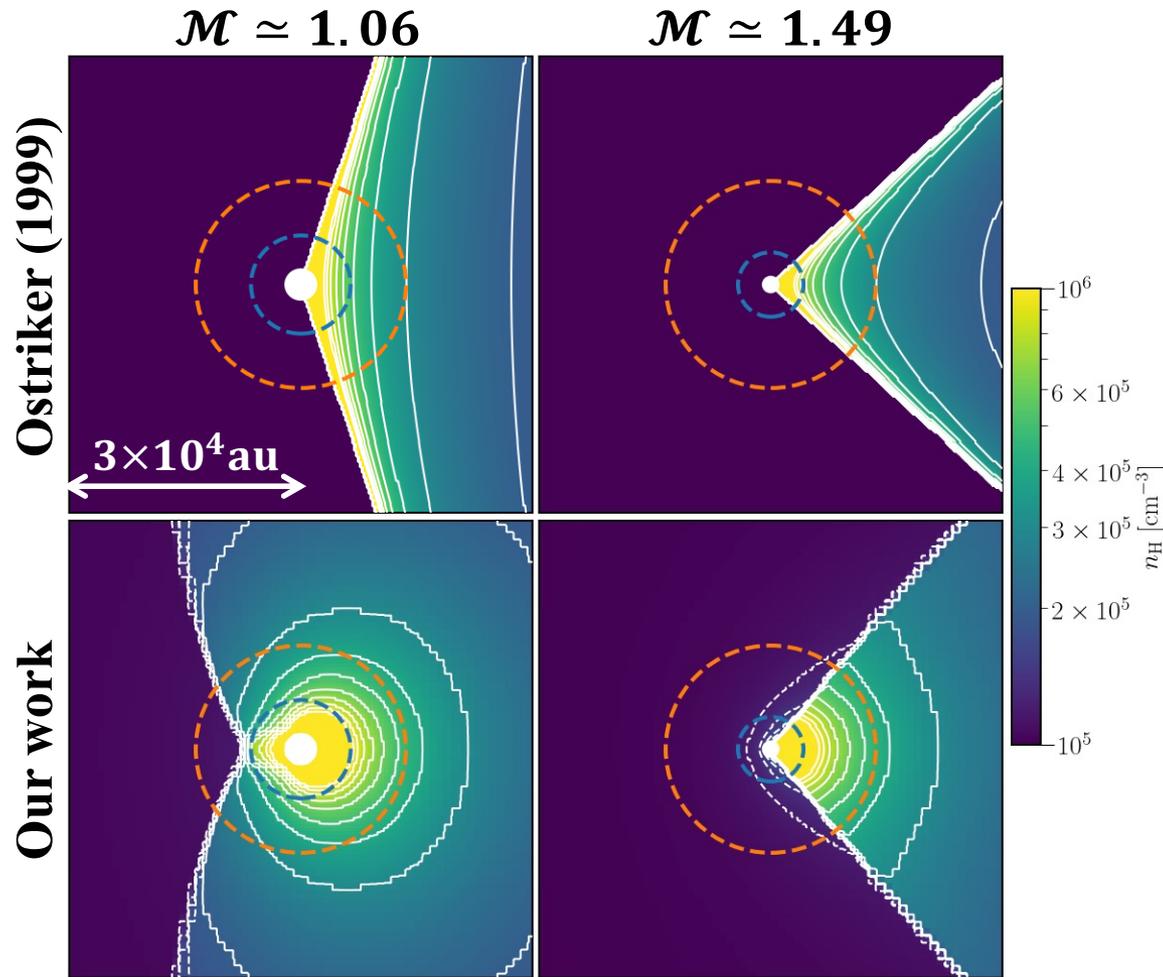


our works



非線形性の効果によって非対称な構造が現れ、その分だけ抵抗力が嵩上げされる

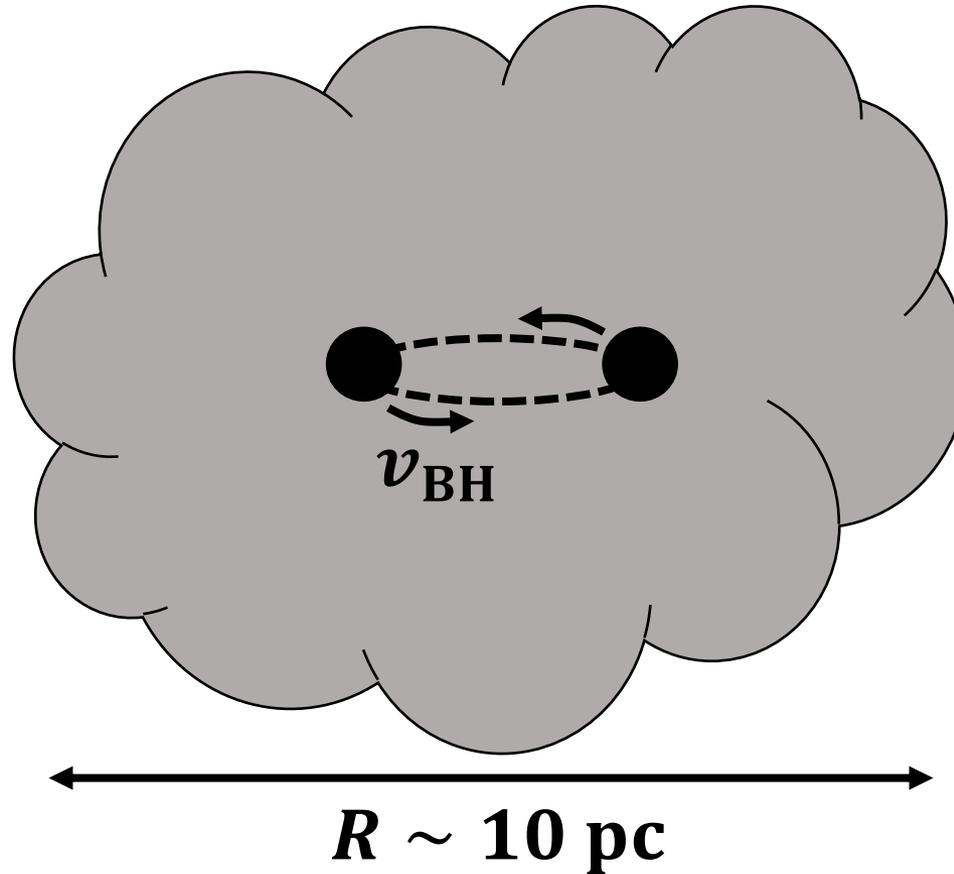
# 物理的解釈(超音速)



$\mathcal{M} \sim 1$ では、前後の非対称性が線形理論と全然違う

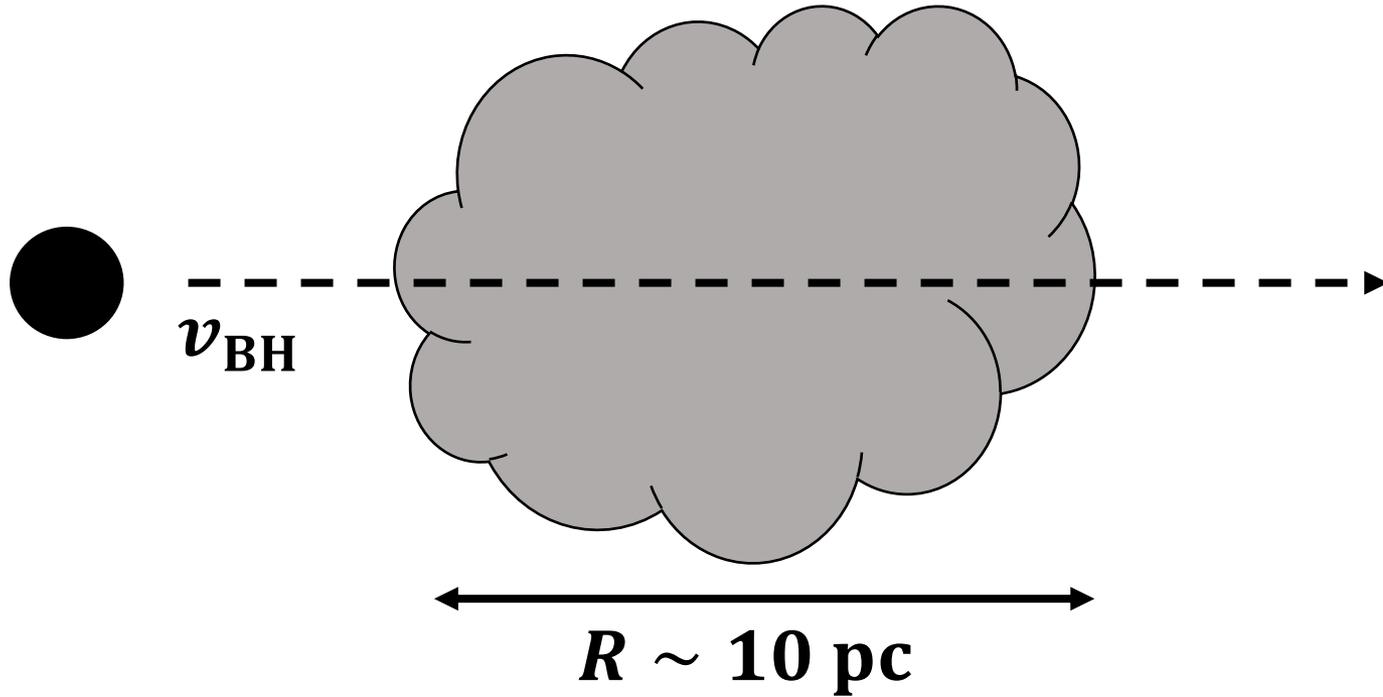
詩 我 詩 圃

# 例1：軌道運動



$t \gg t_{\text{max}} := \frac{R}{v_{\text{BH}}}$  のとき、 $t = t_{\text{max}}$  を代入すれば良い

# 例2：直線運動



$t_{\text{max}} = \frac{R}{v_{\text{BH}}}$  は、雲を抜ける時間スケールと同じ

➡ 時間依存性を無視することはできない

ま と め

と 展 望

# まとめと展望

- 高密度ガス中で急速成長する種BHは、**連星**をなす可能性が高い
- 降着、輻射フィードバックを考慮して軌道進化を調べたい (宇宙論的シミュレーションへ)
- まずは**単独**で、**降着**のみを考慮して抵抗力を調べた
- 抵抗力 = 運動量フラックス + 力学的摩擦
- 亜音速側では、**線形理論の値を嵩上げ**すれば良い
- 超音速側では、不定パラメータ  $r_{\min}$  がBHL半径程度になるが、マッハ数1付近では**前方に高密度部分が張り出し**、実効的に  $r_{\min}$  が大きくなる
- これまでわかったことを利用して、連星、更には輻射FB入り計算により軌道進化、降着による成長を調べる