

# 非等方輻射フィードバック下における超巨大ブラックホールへのdusty gasの超臨界降着

豊内 大輔(京都大学)

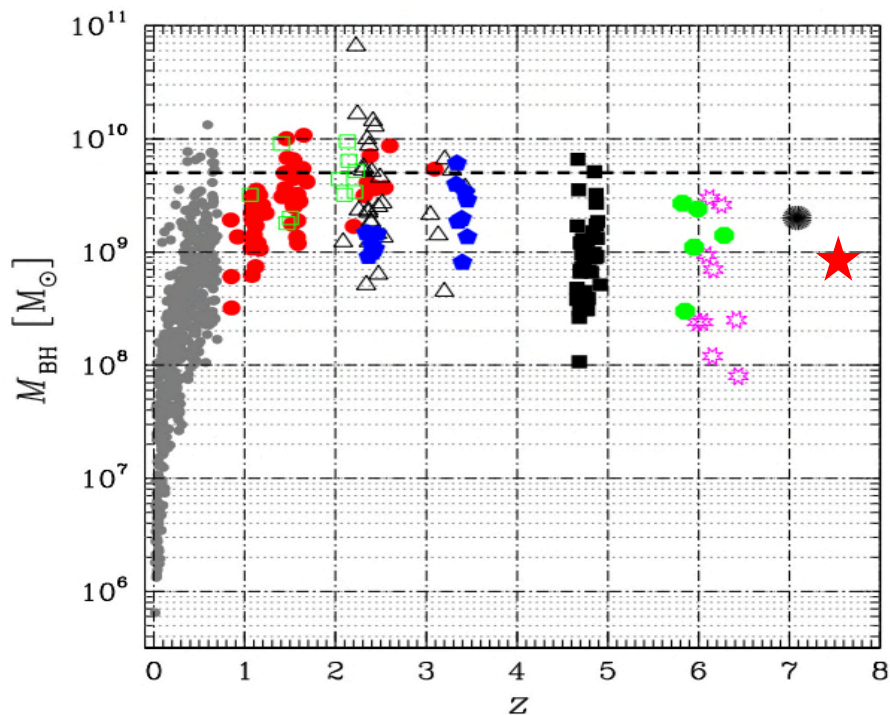
共同研究者

杉村和幸(東北大学), 仲谷 峻平(東京大学),  
細川隆史(京都大学), Rolf Kuiper (Tubingen Univ.)



初代星・初代銀河研究会@茨城大学 2018/11/20

# MBHs in the early universe



Marziani et al. (2012)

- BHへのガス降着(重力エネルギー => 輻射)

$$L = \frac{GM_{\text{BH}}\dot{M}_{\text{acc}}}{r_{\text{in}}} \equiv \epsilon \dot{M}_{\text{acc}} c^2 \quad \epsilon \sim 0.1$$

$$< L_{\text{Edd}} \equiv \frac{4\pi c GM_{\text{BH}}}{\sigma_{\text{T}}} = \epsilon \dot{M}_{\text{Edd}} c^2$$

- BHへの質量降着率限界

$$\dot{M}_{\text{BH}} = \frac{1 - \epsilon L}{\epsilon c^2} < \frac{1 - \epsilon L_{\text{Edd}}}{\epsilon c^2} \propto M_{\text{BH}}$$



$$M_{\text{BH}} \sim 10^9 \text{ Msun @ } z = 7$$

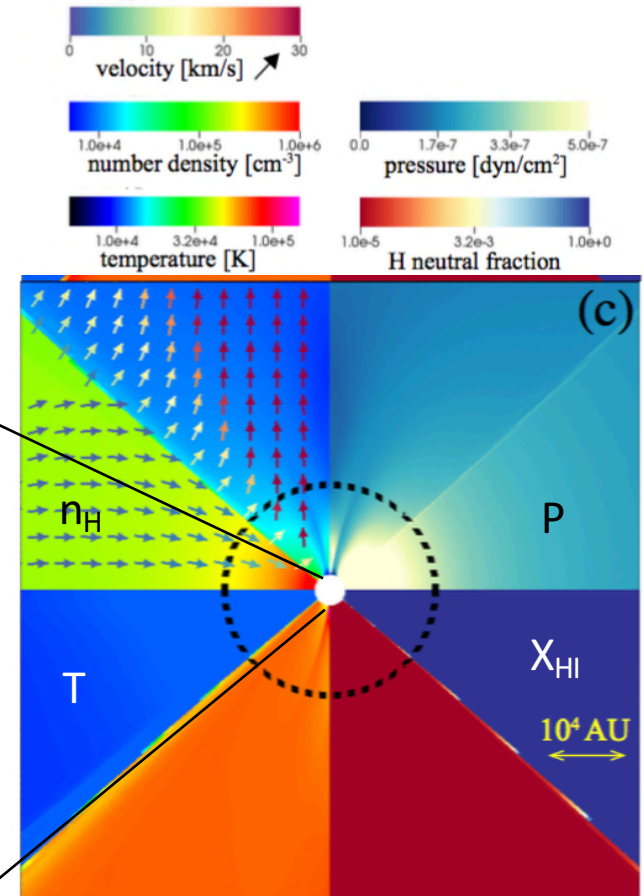
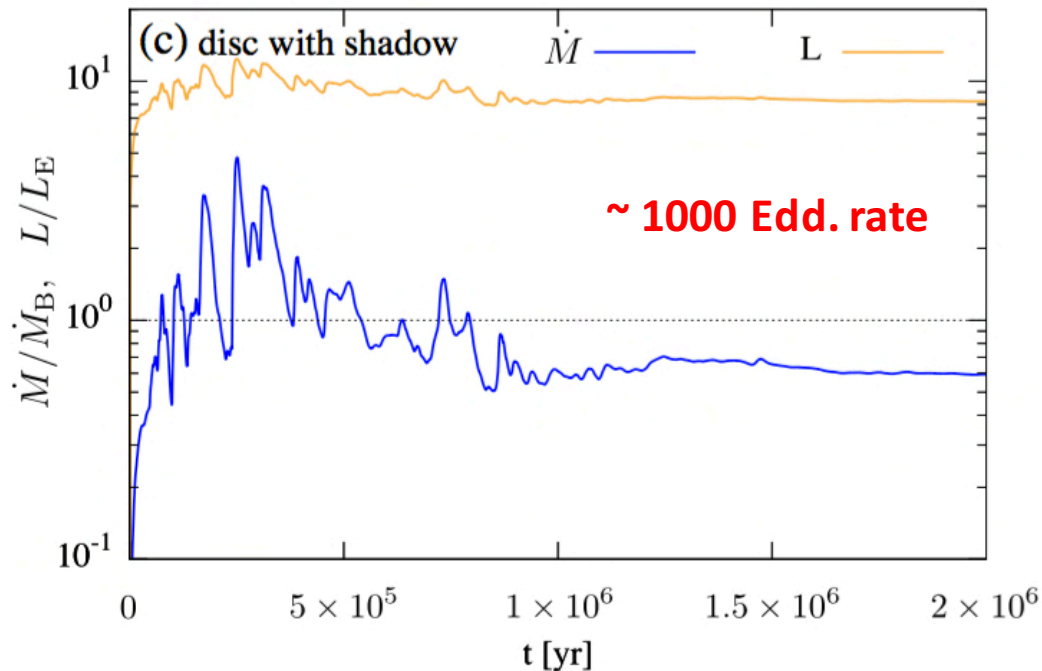
$$\Rightarrow M_{\text{BH,seed}} \sim 10^4 \text{ Msun @ } z > 20$$

$M_{\text{BH,seed}} > 10^4 M_{\text{sun}} ?$  or super-Eddington accretion ?

# 非等方輻射下における超臨界降着

Sugimura et al. (2017)

- 降着円盤内縁部からの電離光子が円盤外縁部で吸収され影ができる
  - 影になっている部分から効率よく降着
    - ガス降着率  $\sim$  (影の立体角)  $\times$  (ボンディ降着率)



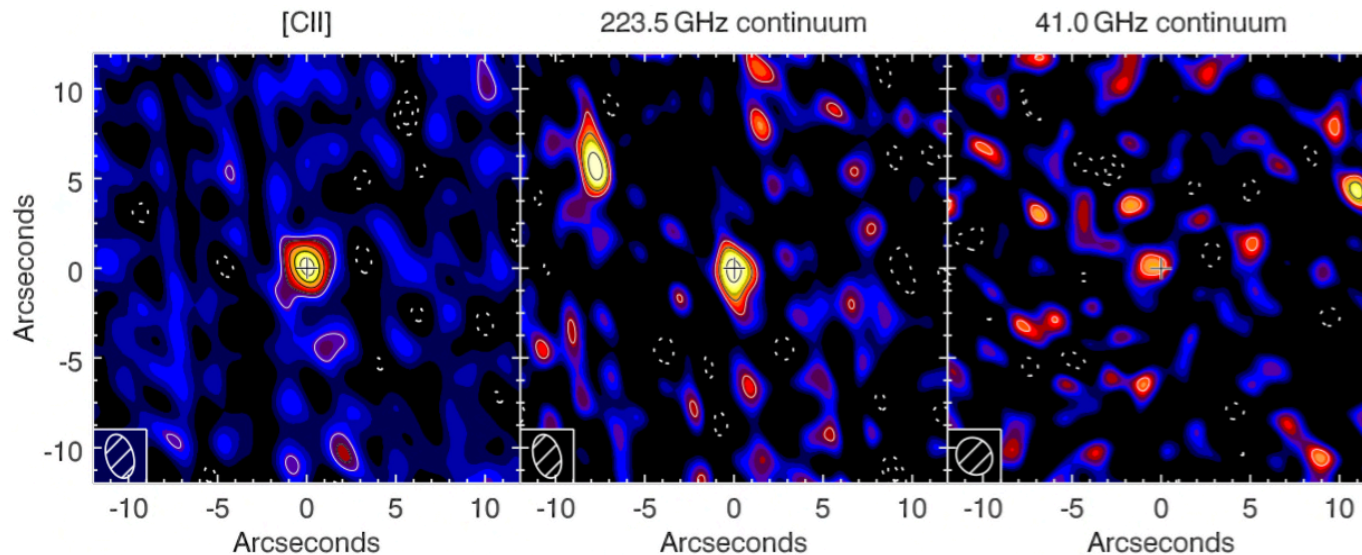
Sugimura et al. (2017)

# Existence of dust in high-z QSOs

ex) Venemans et al. (2017)

- [CII] line and dust continuum from QSO ( $M_{\text{BH}} = 8 \times 10^8 M_{\text{sun}}$ ) at  $z = 7.54$
- $M_{\text{dust}} \sim (0.6-4.3) \times 10^8 M_{\text{sun}}$ ,  $M_{\text{dyn}} < 1.5 \times 10^{11} M_{\text{sun}}$
- ダスト質量は全体の1000分の1程度

➡ **ダストを含んだガスでも超臨界降着が実現するか？**



# Simulation code

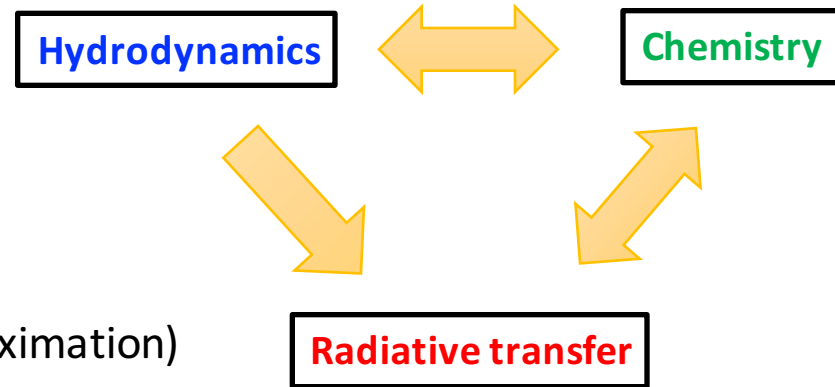
- **HD simulation (public code “PLUTO”)**

- **Radiative transfer**

- ✓ photoionization (EUV)
- ✓ dust attenuation (FUV, EUV)
- ✓ dust thermal emission (IR; FLD approximation)
- ✓ radiation pressure (Thomson scattering, photoionization, dust UV & IR radiative force)

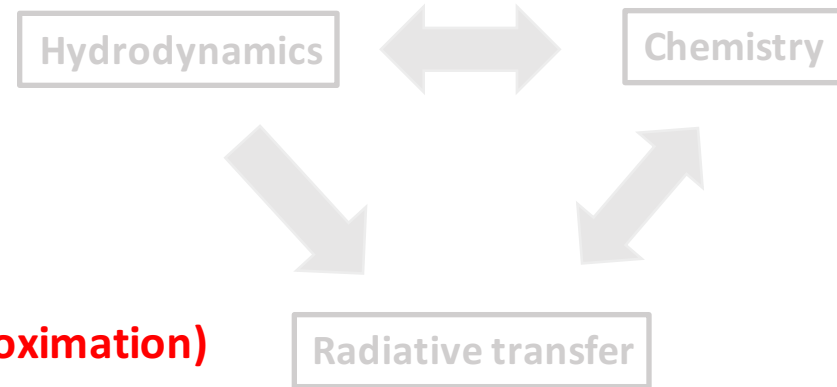
- **Non-equilibrium Chemistry**

- ✓ six species: HI, HII, HeI, HeII, HeIII, e-, (some heavy elements, molecules)
- ✓ photoionization, recombination, collisional excitation & ionization, free-free emission, metal line cooling, dust-gas collisional cooling etc.



# Simulation code

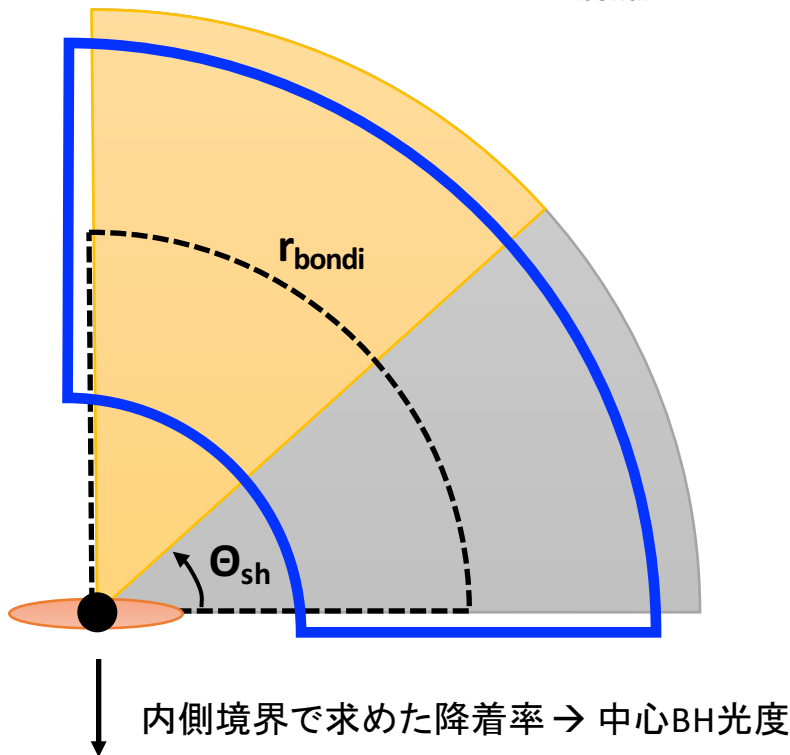
- HD simulation (public code “PLUTO”)
- Radiative transfer
  - ✓ photoionization (EUV)
  - ✓ **dust attenuation (FUV, EUV)**
  - ✓ **dust thermal emission (IR; FLD approximation)**
  - ✓ radiation pressure (Thomson scattering, photoionization, **dust UV & IR radiative force**)
- Non-equilibrium Chemistry
  - ✓ six species: HI, HII, HeI, HeII, HeIII, e-, (some heavy elements, molecules)
  - ✓ photoionization, recombination, collisional excitation & ionization, free-free emission, **metal line cooling, dust-gas collisional cooling** etc.



**Originality !!**

# Initial condition

計算領域:  $0.1 < r/r_{\text{bondi}} < 100$



- ✓  $M_{\text{BH}} = 10^3 M_{\text{sun}}$
- ✓  $n_{\text{gas}} = 10^4 \text{ cm}^{-3}$  (一様等方、角運動量なし)
- ✓  $T_{\text{gas}} = T_{\text{eq}}$  (<-- heating rate = cooling rate)
- ✓  $Z = 10^{-2} Z_{\text{sun}}$
- ✓ dust-to-gas mass ratio,  $D = 0.01 (Z/Z_{\text{sun}})$
- ✓ 影の角度( $\theta_{\text{sh}}$ )がパラメータ

$$L = \begin{cases} 2L_{\text{Edd}} \left[ 1 + \ln \left( \frac{\dot{M}}{2\dot{M}_{\text{Edd}}} \right) \right] & (\dot{M} > 2\dot{M}_{\text{Edd}}) \\ L_{\text{Edd}} \left( \frac{\dot{M}}{\dot{M}_{\text{Edd}}} \right) & (\dot{M} < 2\dot{M}_{\text{Edd}}) \end{cases} \quad \text{slim disk (Watarai+2000)}$$

# 一様密度の初期条件は妥当？

metal coolingの影響で温度が低くなると、 $R_{\text{bondi}} \uparrow \uparrow$

$$R_{\text{bondi}} = 1.4 \times 10^6 \text{ AU} \left( \frac{M_{\text{BH}}}{10^3 M_{\odot}} \right) \left( \frac{T_{\infty}}{1 \times 10^2 \text{ K}} \right)^{-1}$$

→ 大きな計算領域が必要

→  $R \sim 10^{7-8} \text{ AU} \sim 0.1-1 \text{ kpc}$  に  $n \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$  のガスが一様に分布

→ **非現実的** (分子雲・銀河円盤全体が分子雲コア相当の密度を持つようなもの)



2種類の初期密度分布を試す

## 1. 一様密度

- ✓ Sugimura+2017との単純な比較

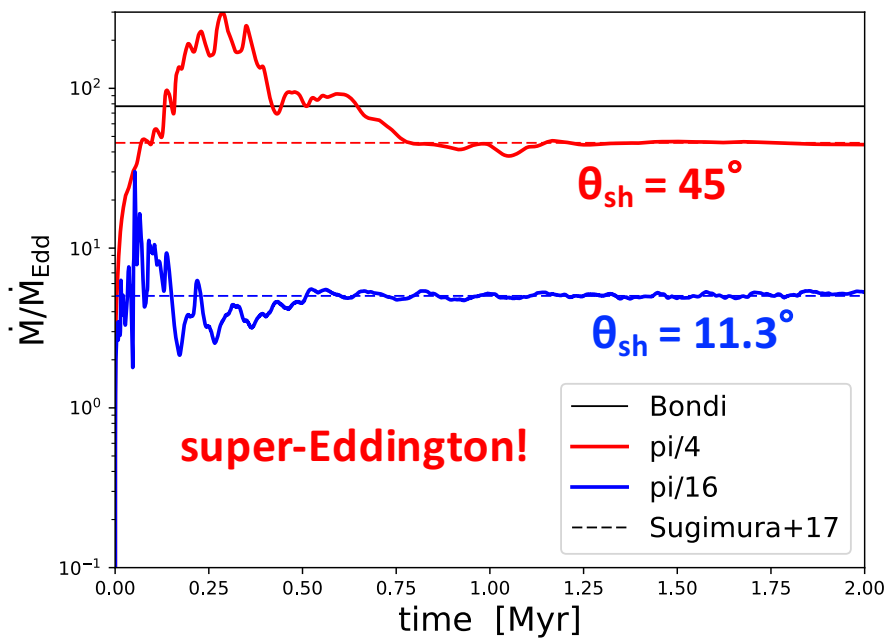
## 2. 円板状分布

- ✓ 原始銀河円盤に埋もれた種BHへの降着 (ガスBH間の相対速度は無視)
- ✓ 円盤厚み  $\sim 10^5 \text{ AU} \sim 1 \text{ pc}$ , ガス数密度  $\sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ , 温度  $\sim 100 \text{ K}$

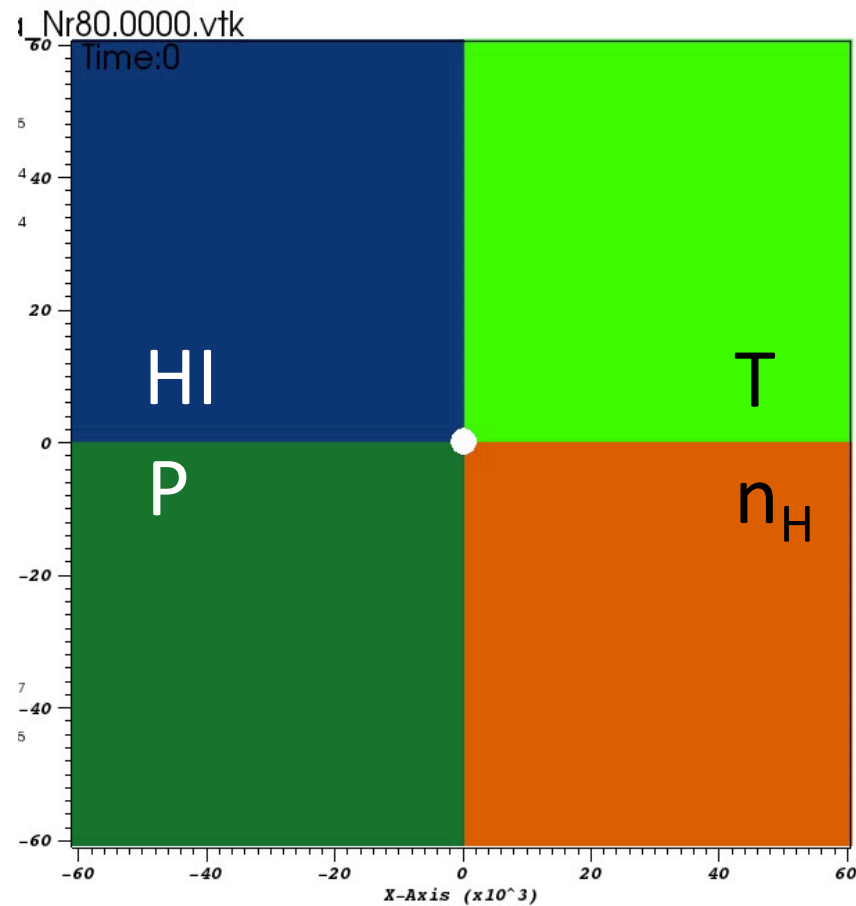


# 1. 一様密度の場合

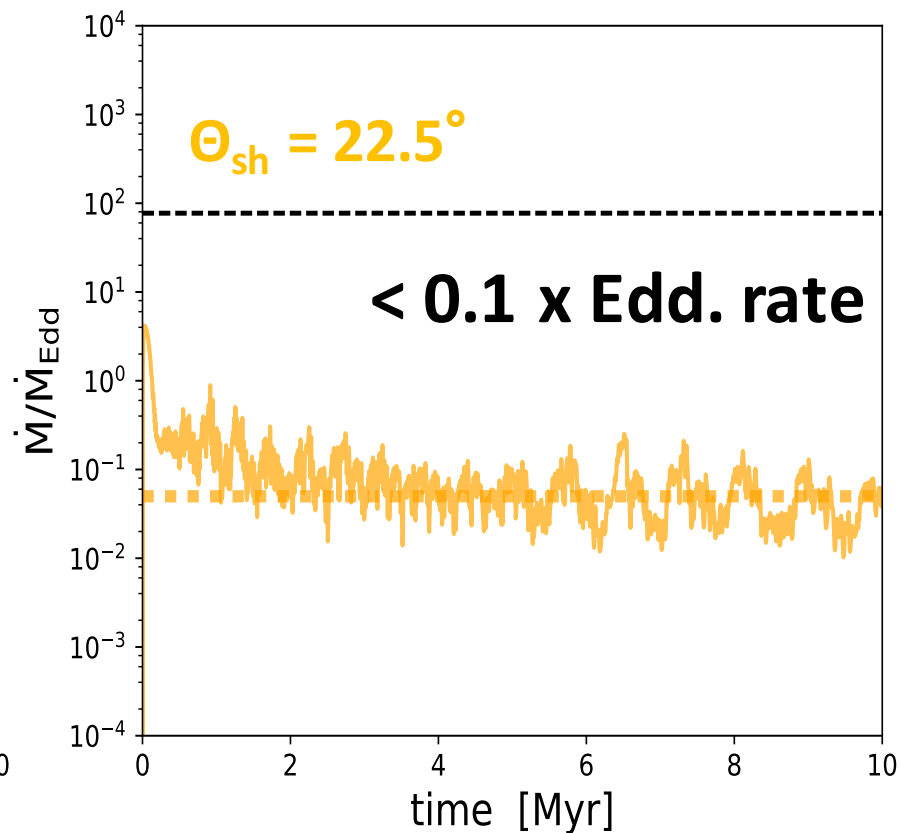
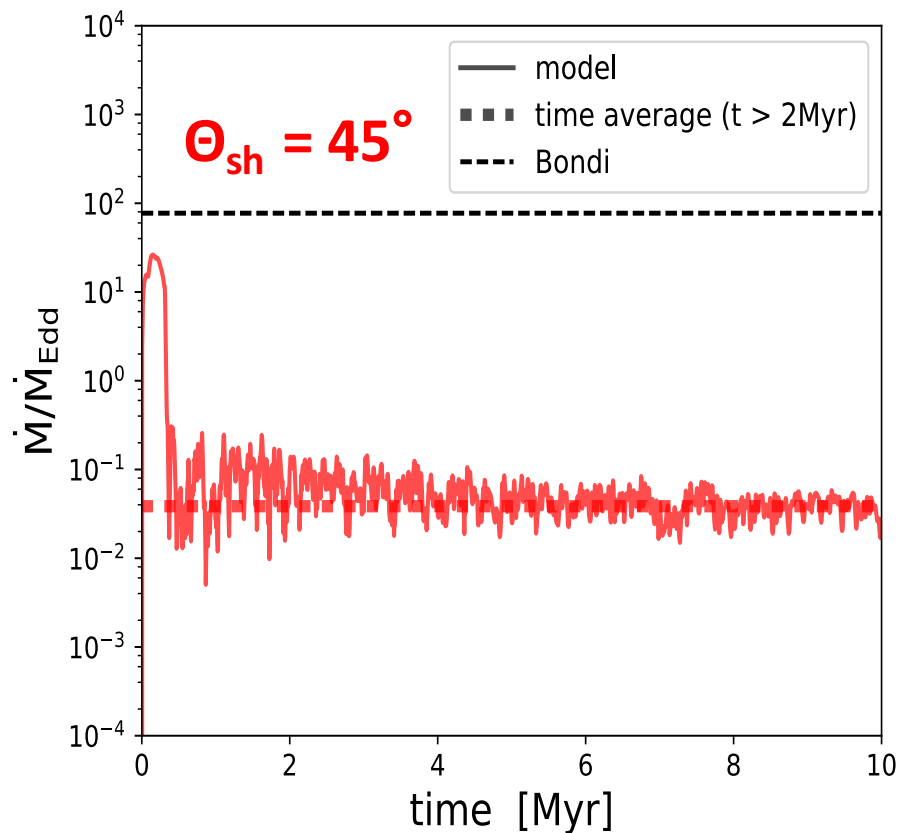
# 始原ガスの場合



$$\theta_{\text{sh}} = 45^\circ$$

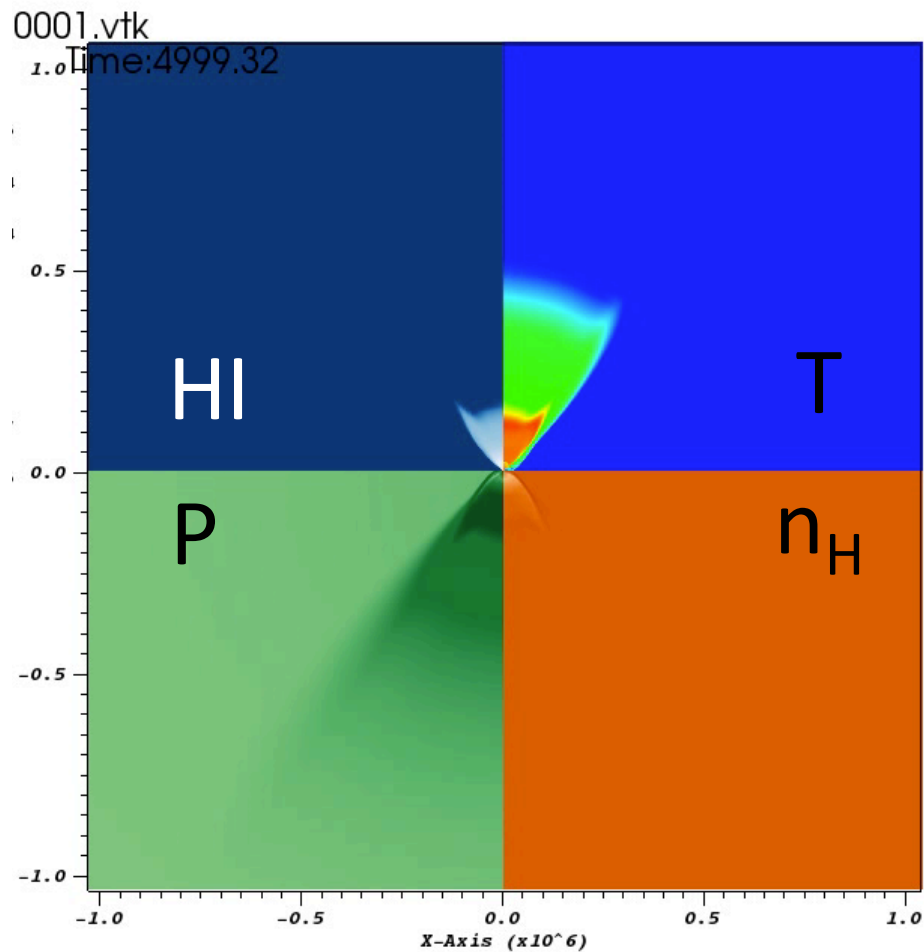
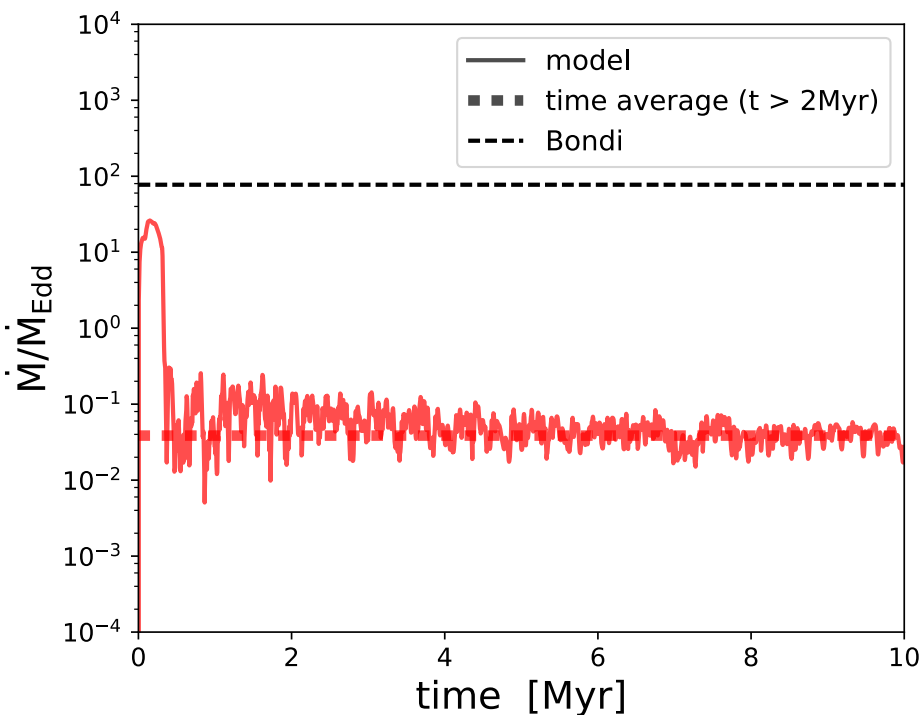


# $Z = 10^{-2} Z_{\text{sun}}$ の場合



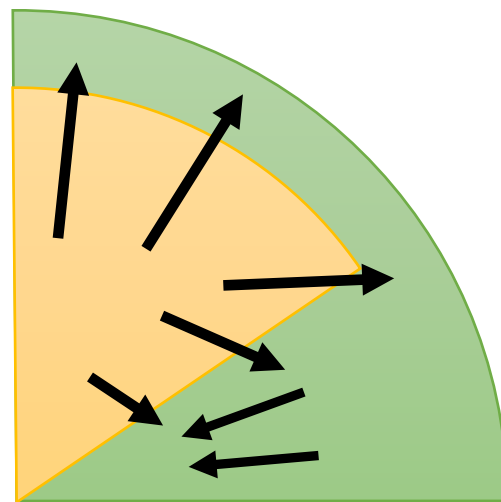
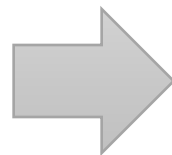
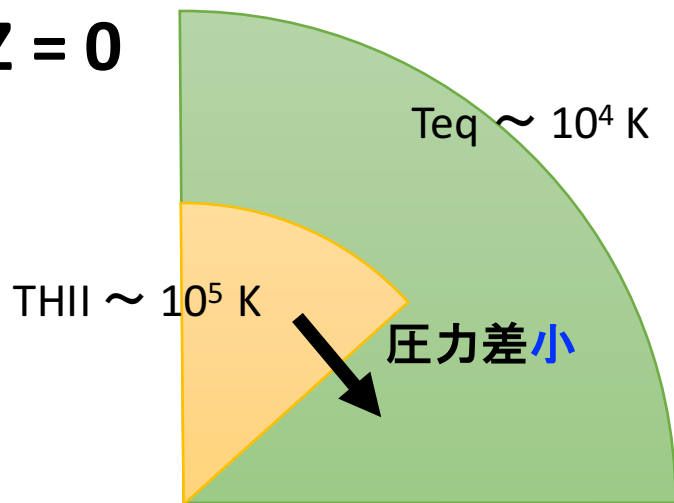
# $Z = 10^{-2} Z_{\text{sun}}$ の場合

$$\Theta_{\text{sh}} = 45^\circ$$



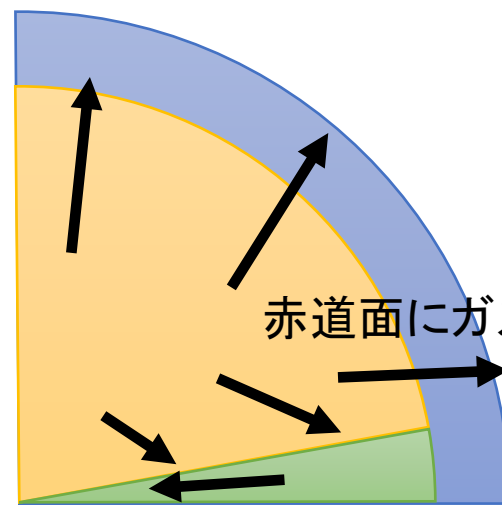
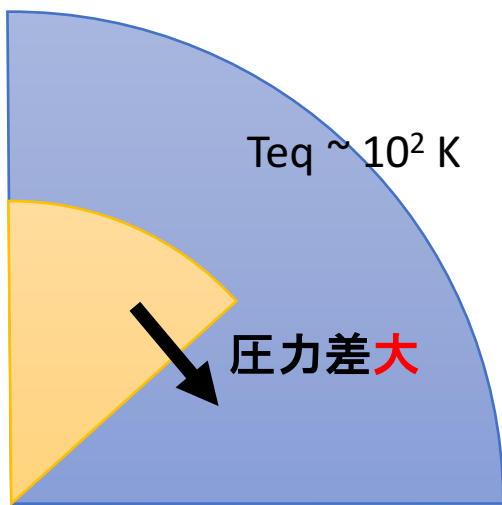
始原ガスでは影全体にガスが分布していたのに対し、ガスは赤道面に偏在。

$Z = 0$



中性領域から安定して降着

$Z = 10^{-2} Z_{\text{sun}}$



赤道面にガスが圧縮。

結局、開口角は狭いので降着率低い。

## 2. 円板状分布の場合

# 初期円盤の生成

- ✓ 計算コスト省略のため、円盤重力を外場として与える

$$\text{exp. disk} \quad F_{\text{disk},z} = -8\pi G \rho_{\text{disk},0} z_{\text{disk}} \tanh\left(\frac{z}{2z_{\text{disk}}}\right)$$

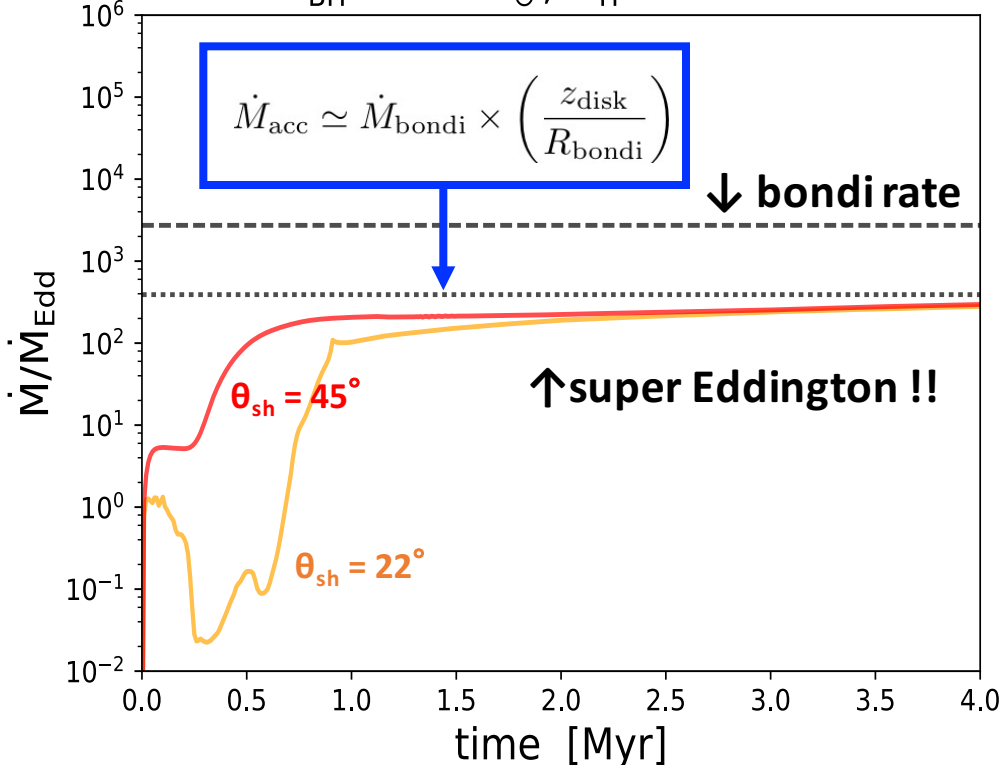
$$\text{円盤厚み} \quad z_{\text{disk}} = \frac{c_s^2}{2\pi G \Sigma_{\text{disk},0}} \sim 1.5 \times 10^5 \text{ AU} \left(\frac{T_{\text{disk}}}{100 \text{ K}}\right)^{1/2} \left(\frac{n_{\text{disk},0}}{10^4 \text{ cm}^{-3}}\right)^{-1/2}$$

$$\rightarrow \Sigma_{\text{disk},0} = 2 \rho_{\text{disk},0} z_{\text{disk}}$$

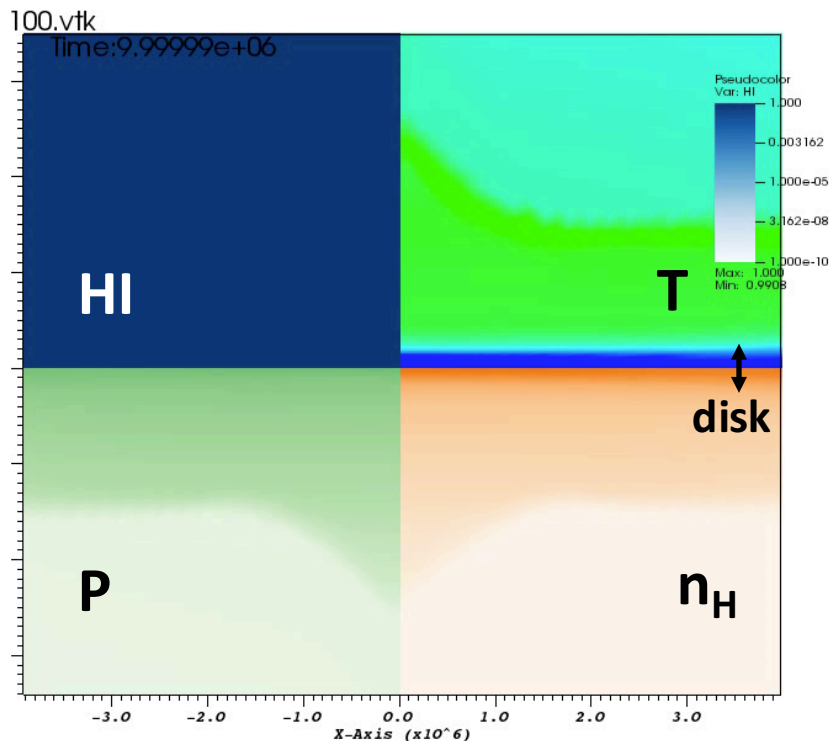
- ✓ 円盤構造が安定するまでBH重力を無視して計算
  - $n \sim 10^4 \text{ cm}^{-3}$ ,  $T \sim 100 \text{ K}$ ,  $z_d \sim 10^5 \text{ au}$  で安定
  - 近傍銀河に存在するstar-forming circum nuclear diskに対応

# 計算結果

$$M_{\text{BH}} = 10^3 M_{\odot}, n_{\text{H}} = 10^4 \text{ cm}^{-3}$$



$$\Theta_{\text{sh}} = 22^\circ$$



user: toyouchidaisuke  
 Fri Nov 16 20:36:07 2018

- ✓ 円板状分布では上空の圧力が小さいので、HI領域が上に向かって広がり、赤道面方向に押す力が弱い
  - 始原ガスと同様に影の部分から降着できる。

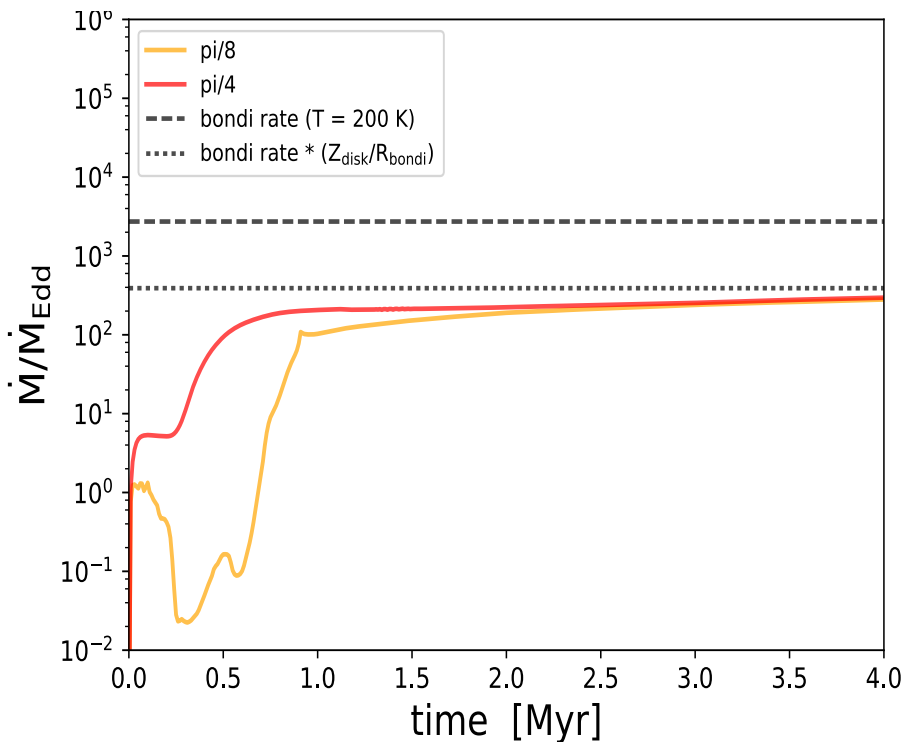


# BH mass dependence①

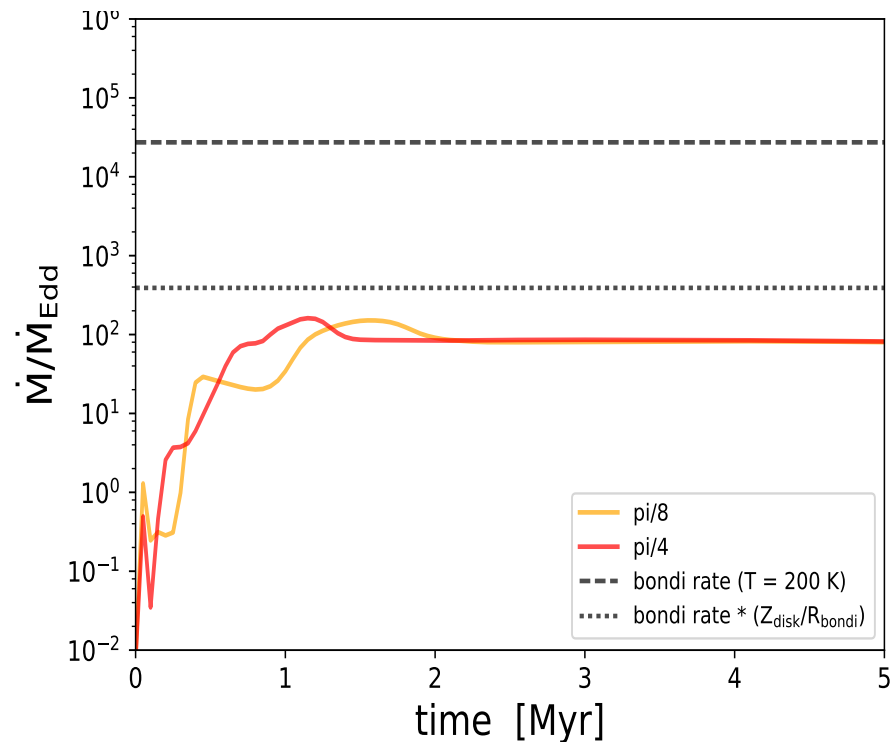
$$\dot{M}_{\text{acc}} \simeq \dot{M}_{\text{bondi}} \times \left( \frac{z_{\text{disk}}}{R_{\text{bondi}}} \right) \propto M_{\text{BH}} \quad \rightarrow \quad \frac{\dot{M}_{\text{acc}}}{\dot{M}_{\text{Edd}}} = \text{const.}$$

$R_{\text{HII}} > z_{\text{disk}}$  のなら効率はBH質量によらない

$M_{\text{BH}} = 10^3 M_{\text{sun}}$

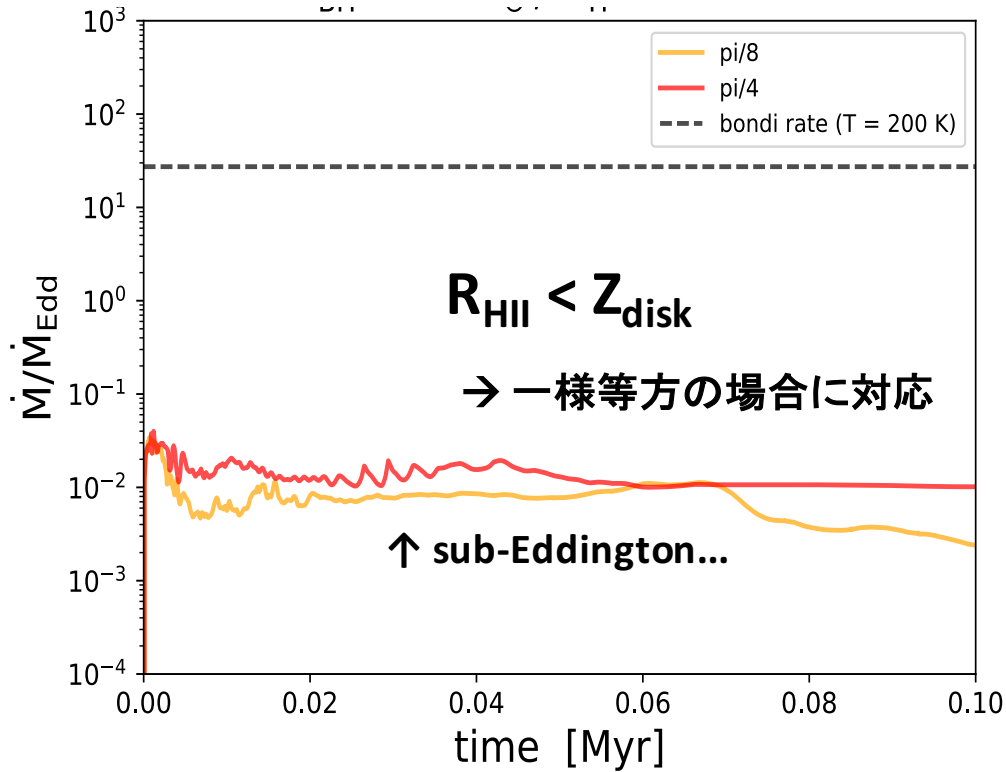


$M_{\text{BH}} = 10^4 M_{\text{sun}}$

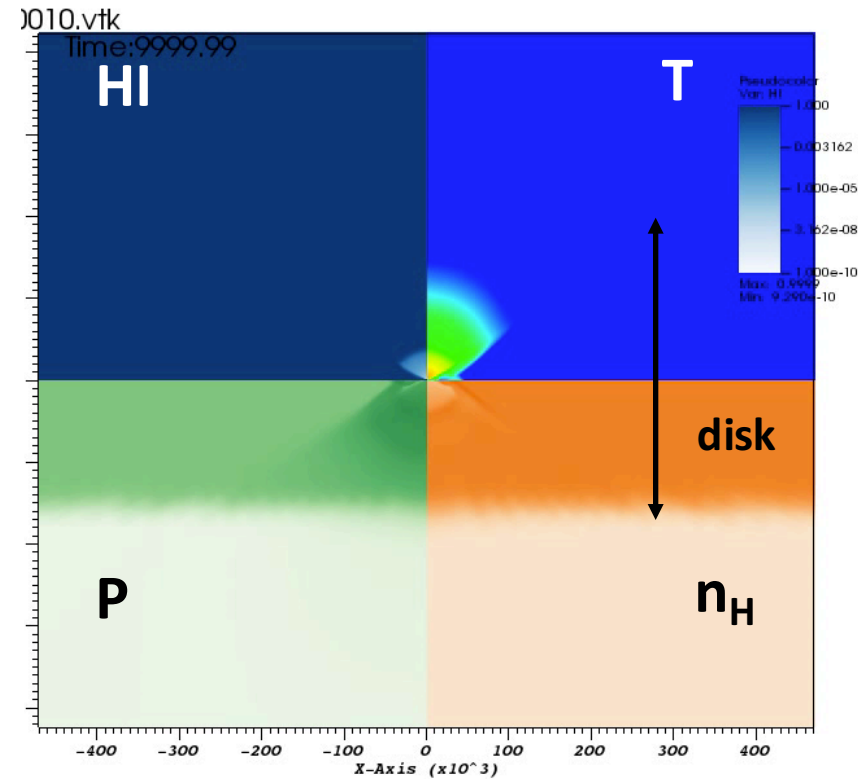


# BH mass dependence②

$M_{\text{BH}} = 10 M_{\text{sun}}$



$\Theta_{\text{sh}} = 22^\circ$



# まとめと結論

- 非等方輻射BHフィードバック下でのdustyガスの降着は・・・
  - ✓ 温度が低いせいで始原ガスの場合とは大きくガス降着の構造が異なる。
- $R_{\text{HII}} < z_{\text{disk}}$  の場合 (BH massが小さい時に対応)
  - ✓ HII領域から赤道面方向にガスが押され、狭い開広角からのsub-Eddington降着。
- $R_{\text{HII}} > z_{\text{disk}}$  の場合 (BH massが大きい時に対応)
  - ✓ HII領域が円盤上空に広がり、赤道面方向にガスが押されない。結果として光の当たっていない領域からボンディ的に降着。
  - ✓ 降着率は円盤厚みとボンディ半径の大きさで決まる。

$$\dot{M}_{\text{acc}} \simeq \dot{M}_{\text{bondi}} \times \left( \frac{z_{\text{disk}}}{R_{\text{bondi}}} \right) \propto M_{\text{BH}} \quad \rightarrow \quad \frac{\dot{M}_{\text{acc}}}{\dot{M}_{\text{Edd}}} = \text{const.}$$

- BH massが小さい時はなかなか降着できないが、ひとたび  $R_{\text{HII}} > z_{\text{disk}}$  になると、そのあとは効率良く成長できる。