

# ガスによる力学的摩擦を考慮 した原始銀河ブラックホール の合体過程の研究

初代星・初代銀河研究会 @鹿児島大学1/22-1/24

M2 山井 勇樹 、 梅村 雅之  
筑波大学(宇宙物理理論研究室)

# 研究背景

- 銀河→その多くは中心にSMBHを含む
- $10^{6-9} M_{sun}$  規模のものも観測されている
- →その形成過程は不明 合体or降着
  
- (仮定)初代星残余物としての種BH
- →降着だけでは観測されている規模には成長できない
- 合体を考える意味がある
- ロスコーン喪失の問題→3体反応を継続する必要性
  
- 第一世代天体の頃はガスが豊富で銀河中心領域において、その過程にガスの摩擦が有意に効く可能性が示唆される

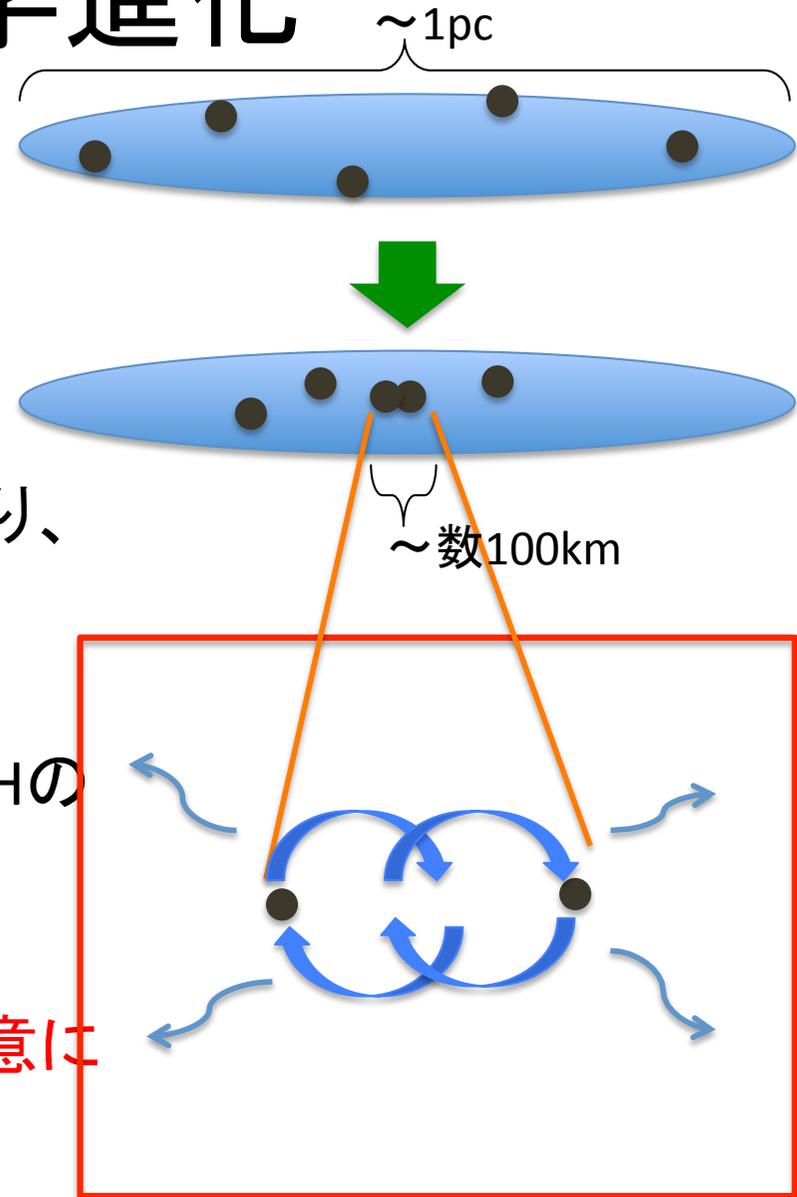
# 本研究の着目点と目的

- <着目点>
- 第一世代天体におけるガスの力学的摩擦の効果
- 重力波放出、近点移動の効果
- 合体
  
- <目的>
- SMBH形成過程の一端として、ガスによる摩擦がBHの力学進化に与える影響に焦点を当てる
- 数値計算によって、BHの軌道進化、バイナリー形成とその進化を追う
- ガスの摩擦があれば、BHは合体にいたるのかを知る
- BH合体を司る物理として何が支配的なのか議論する

# バイナリーBHの力学進化

- (1) 摩擦抵抗のためにBHが徐々に系の中心に向かう。
- (2) 形成されたバイナリーに3体目が近づき角運動量を持ち去り、バイナリーの軌道を収縮させる
- (3) 相対論の効果が増大するほど軌道が縮むと重力波放出がBHの合体を推進する。(Escala et al. 2004)

- ここに超音速でガスの効果が有意に働く可能性が指摘されている。



# 計算手法について

- Hermite (エルミート) 積分法 Makino&Aarseth(1992)

$$\left[ \begin{array}{l} x_p = x_0 + v_0 \Delta t + \frac{1}{2} a_0 \Delta t^2 + \frac{1}{6} \dot{a}_0 \Delta t^3 \\ x_c = x_p + \frac{1}{24} a_0^{(2)} \Delta t^4 + \frac{1}{120} a_0^{(3)} \Delta t^5 \end{array} \right.$$

$$\left[ \begin{array}{l} v_p = v_0 + a_0 \Delta t + \frac{1}{2} \dot{a}_0 \Delta t^2 \\ v_c = v_p + \frac{1}{6} a_0^{(2)} \Delta t^3 + \frac{1}{24} a_0^{(3)} \Delta t^4 \end{array} \right.$$

$$a_0^{(2)} = \frac{-6(a_0 - a_1) - \Delta t(4\dot{a}_0 + 2\dot{a}_1)}{\Delta t^2}$$

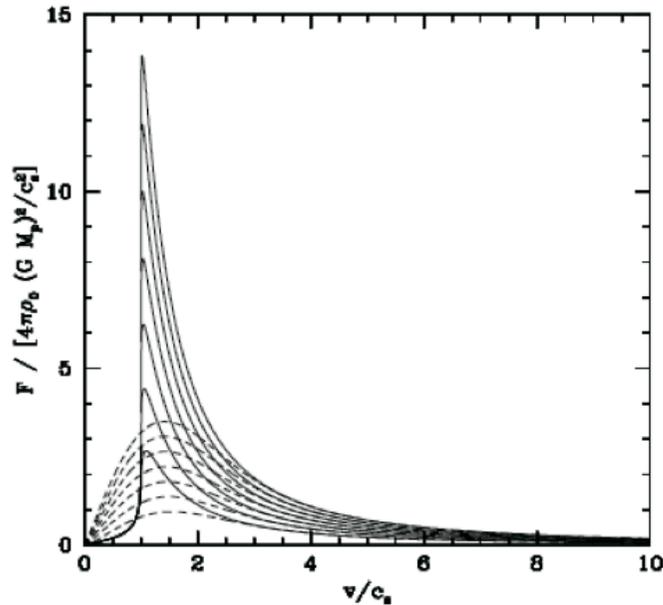
$$a_0^{(3)} = \frac{-12(a_0 - a_1) + 6\Delta t(\dot{a}_0 + \dot{a}_1)}{\Delta t^3}$$

- $\Delta t = \sqrt{\eta \frac{|a_1| |a_1^{(2)}| + |\dot{a}_1|^2}{|\dot{a}_1| |a_1^{(3)}| + |a_1^{(2)}|^2}}$   $\eta=0.001$ を採用した
- $\Delta t$ は最小の値を取るBH粒子に合わせshared timestepとした
- 初期条件で2階、3階導関数は定まらない  $\Delta t = \eta_s \frac{|a|}{|\dot{a}|}$

# ガスによる力学的摩擦 (gasDF)

- ガス系の方が摩擦が強く効く可能性の示唆
- 衝突媒体中のガス抵抗の解析
- →Ostriker(1999)

$$a_{DF}^{gas}(r, v) = -\frac{4\pi G^2 m \rho(r)}{v^2} \times f(M)$$



$$f(M) = \begin{cases} 0.5 \ln \Lambda \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{M}{\sqrt{2}} \right) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} M \exp \left( -\frac{M^2}{2} \right) \right] & (0 \leq M \leq 0.8) \\ 1.5 \ln \Lambda \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{M}{\sqrt{2}} \right) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} M \exp \left( -\frac{M^2}{2} \right) \right] & (0.8 \leq M \leq M_{eq}) \\ \frac{1}{2} \ln \left( 1 - \frac{1}{M^2} \right) + \ln \left( \frac{vt}{r_{min}} \right) & (M_{eq} \leq M) \end{cases}$$

$$M = \frac{v}{c_s} : (\text{音速との速度比})$$

Tanaka & Haiman (2009)

第3式はOstriker(1999)を採用

本研究では

球対称のガスのポテンシャルを置く

$$\frac{dv}{dt} = \frac{1}{m} \left( F_{BH-gas} + F_{BH-BH} \right) + a_{DF}(r, v)$$

# 合体条件

- 合体条件
- 合体操作の前後で質量保存、運動量保存を保証
- →合体条件に達したら、2体の重心に新たなBHを生成

$$|\vec{r}_i - \vec{r}_j| < 10(r_{sch,i} + r_{sch,j})$$

- A.Tanikawa and M.Umemura (2011)
- 単純なランダムプロセスで、たまたまこの半径内で遭遇するタイムスケールは $10^{25}[\text{yr}] \gg \gg$  (宇宙年齢)
- プログラム上で合体操作を行う際、その前後で質量保存と運動量保存を保証し、合体条件に達した時刻に、2体の重心に新たなBHを生成する

# 相対論効果のコード作成

- Kupi.G et al (2006)の相対論効果の式をコードにした。

$$\vec{a} = \vec{a}_{Newton} + \vec{a}_{1PN} + \vec{a}_{2PN} + \vec{a}_{2.5PN}$$

- 1PN、2PNは近日点移動の1次、2次の効果
- 2.5PNは重力波放出の効果
- Hermite積分法なので、加速度微分(jerk)まで導入
- -----
- 離心率が大きいほど、早く軌道を縮める
- 近点で相対論効果がより強く効く
- 軌道は徐々に円軌道へと変化をしてゆく事が知られている
- 実際にはBH10体系などでシミュレーションし、バイナリー形成から合体までの進化を追う

# 条件設定

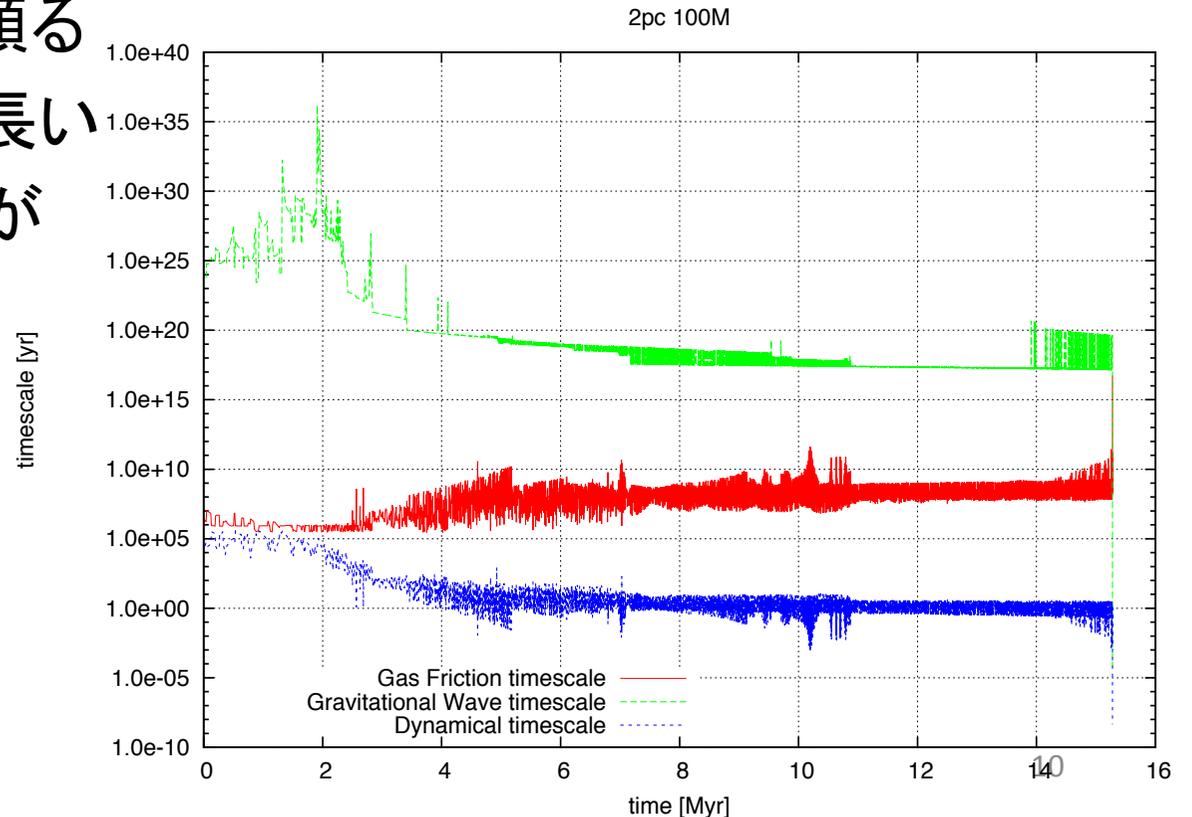
- $z=15$ で宇宙膨張から切り離された系 質量  $10^5 M_{sun}$
- BH(10個)の力学進化を数値計算
- 角運動量獲得状態からの重力収縮したガス円盤を想定
- 系の半径をパラメータとし  $R_{rot} = 0.01 \sim 10.0 [pc]$
- 対応するガス円盤のガス密度  $\rho_{rot} \cong 10^2 \sim 10^{12} [g/cm^3]$
- BH質量は10, 30, 50, 100Msunを想定
- 音速  $c_s = 3.7 [km/s]$  温度 1000[K]
- 初期速度  $v_{initial} = v_{\varphi} + v_{rand}$
- ランダム速度の速度分散  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z = \frac{1}{\sqrt{3}} f v_{\varphi}$
- ここでfはBHの形成時期の調整をするパラメータ
- 円盤形成後に形成されたBHなら  $f = 0$  (回転平衡)
- $f = 0.1$ 、 $f = 1.0$ を採用
- 摩擦が効くタイムスケール  $\tau_{fric(N=10)}(z=15) = 3.34 \times 10^6 [yr]$

# 結果 Case-A

タイムスケールの色分け  
 赤 : gasDF time scale  
 青 : Dynamical time  
 緑 : GW time scale(Peters 1964)

- Case-A「3体反応で合体」
- 赤線と青線が入れ替わる事無く推移
- 青線(3体反応)でタイムスケールを縮める
- ガスの密度が低いためgasDFは弱く、軌道収縮は3体反応の角運動量引き抜きに頼る
- 合体に要する時間は長い
- 最後はGW time scaleが  
 逆転→合体

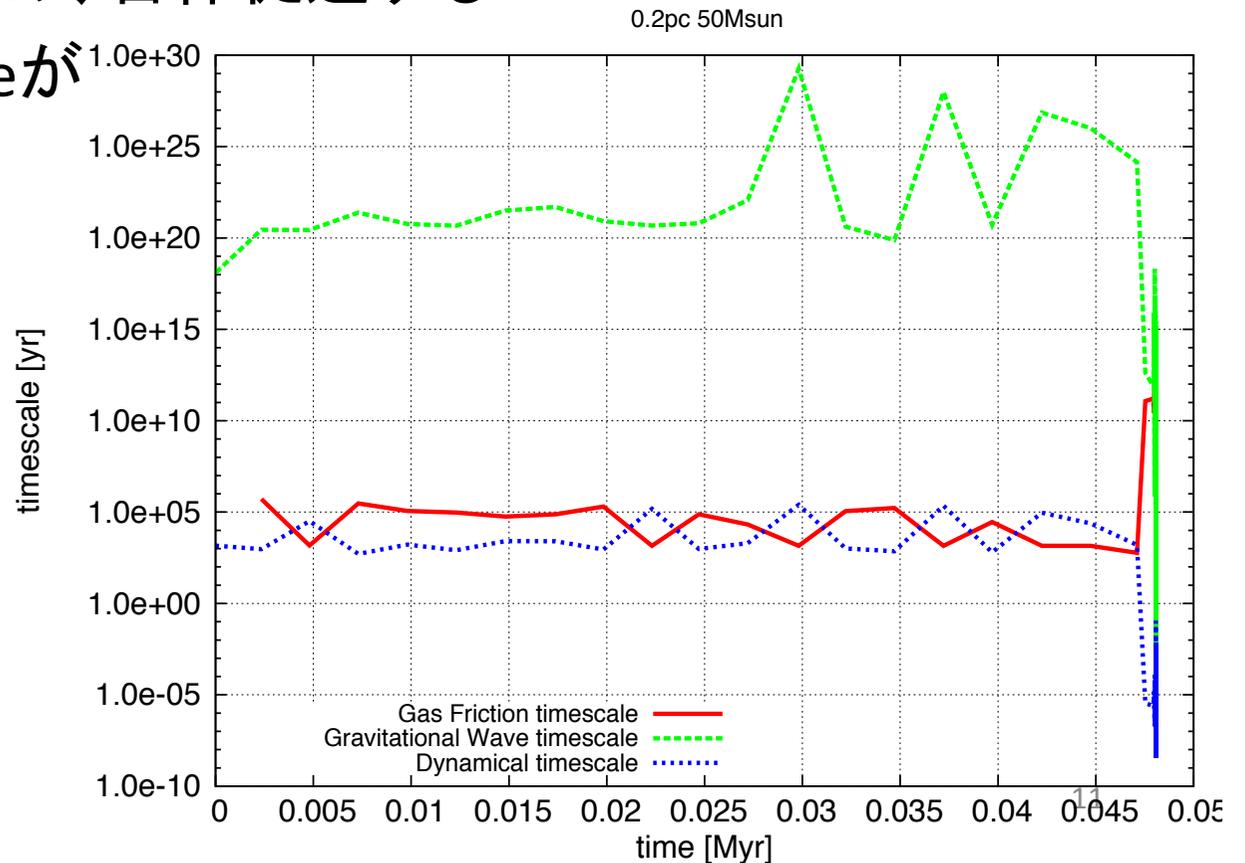
$$t_{DF} = \frac{|\vec{a}_{DF}^{gas}|}{v}, t_{Dyn} = \frac{r_{rel}}{v}, t_{GW} = \frac{a}{\langle \dot{a} \rangle}$$



# 結果(続き) Case-B

タイムスケールの色分け  
 赤: gasDF time scale  
 青: Dynamical time  
 緑: GW time scale(Peters 1964)

- Case-B「3体反応とgasDFのマーヅナル」 $t_{DF} = \frac{|\vec{a}_{DF}^{gas}|}{v}, t_{Dyn} = \frac{r_{rel}}{v}, t_{GW} = \frac{a}{\langle \dot{a} \rangle}$
- 赤線と青線が入れ替わりを繰り返す
- ガス密度が比較的高く、gasDFによるBH落ち込みが期待できる
- 3体反応の頻度を高め、合体促進する
- 最後はGW time scaleが  
 逆転→合体



# 結果(続き) Case-C

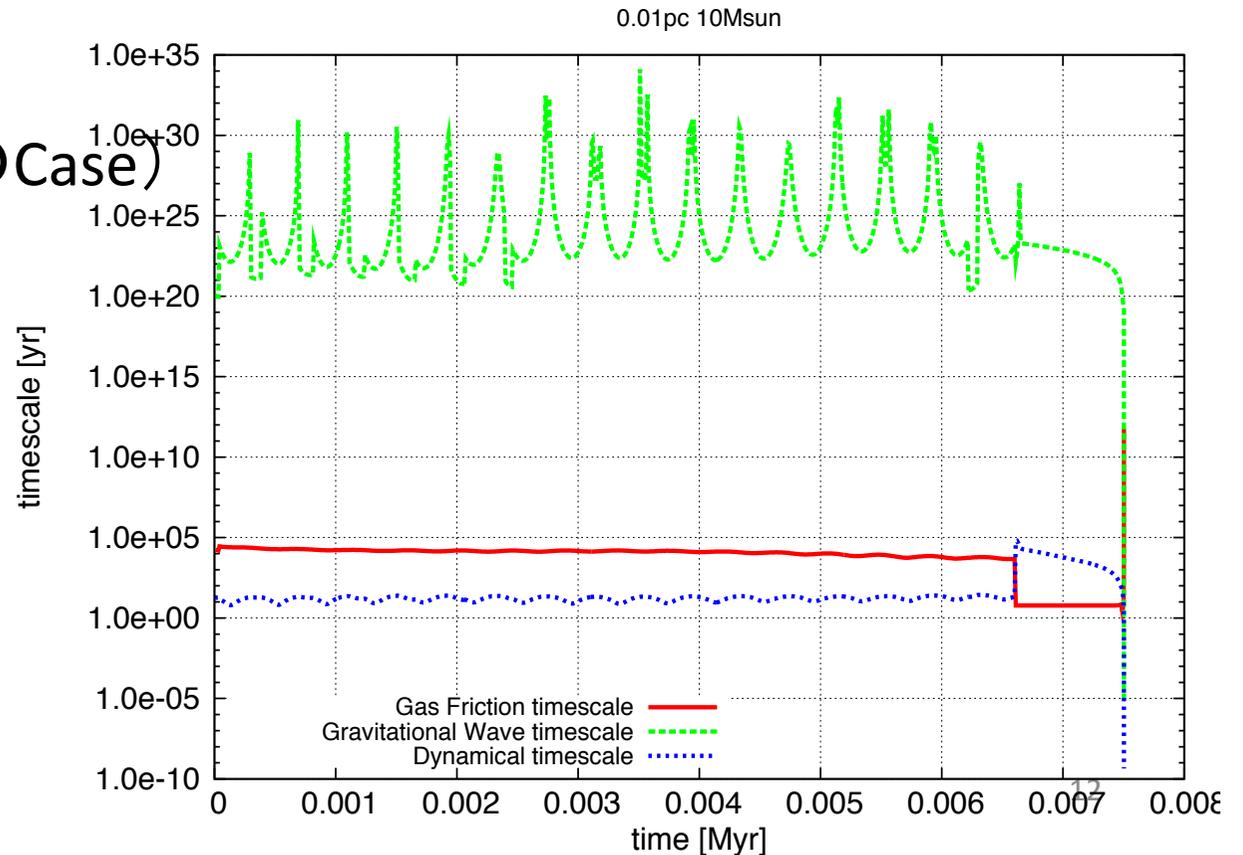
タイムスケールの色分け  
 赤: gasDF time scale  
 青: Dynamical time  
 緑: GW time scale(Peters 1964)

- Case-C 「gasDFのみで合体」
- 後半でgasDF time scaleを一気に縮める
- 3体相互作用を経験する前にgasDFの影響で、軌道を収縮
- 最後はGW time scaleが

$$t_{DF} = \frac{|\vec{a}_{DF}^{gas}|}{v}, t_{Dyn} = \frac{r_{rel}}{v}, t_{GW} = \frac{a}{\langle \dot{a} \rangle}$$

逆転→合体

- (9回目の合体はこのCase)



# 結果(続き) $f = 1.0$

- 「1回目」の合体を司る物理で場合分け(100[Myr]のsnapshot)
- 高密度域はgasDFだけでBH合体を促進
- 9回目の合体はgasDFのみで合体した(Case-C)
- 中密度域のgasDFは3体反応誘発の補助要因

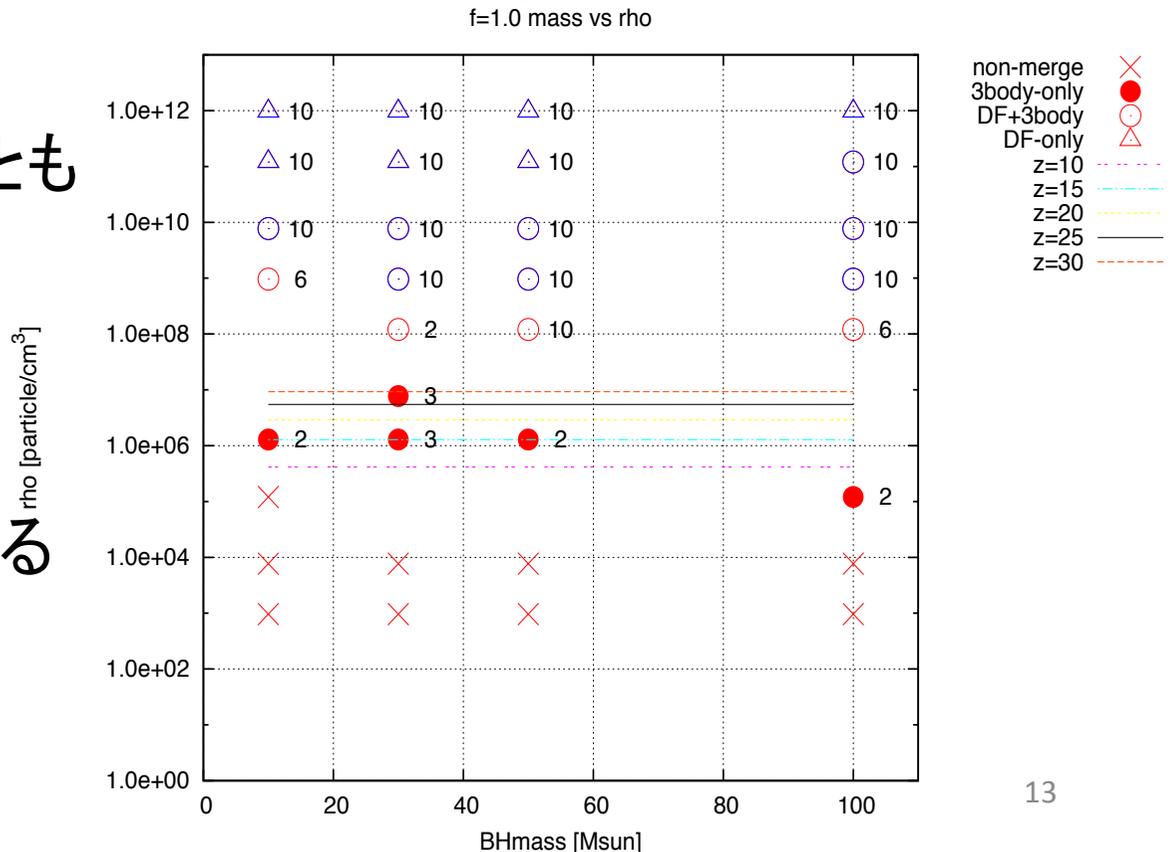
- gasDFを入れると10個とも合体できる場合もある



- Tanikawa&Umemura (2011)の星のDFとは異なる

$$R_{rot} = 0.01 \sim 10.0 [pc]$$

$$\rho_{rot} = 10^2 \sim 10^{12} [1/cm^3]$$

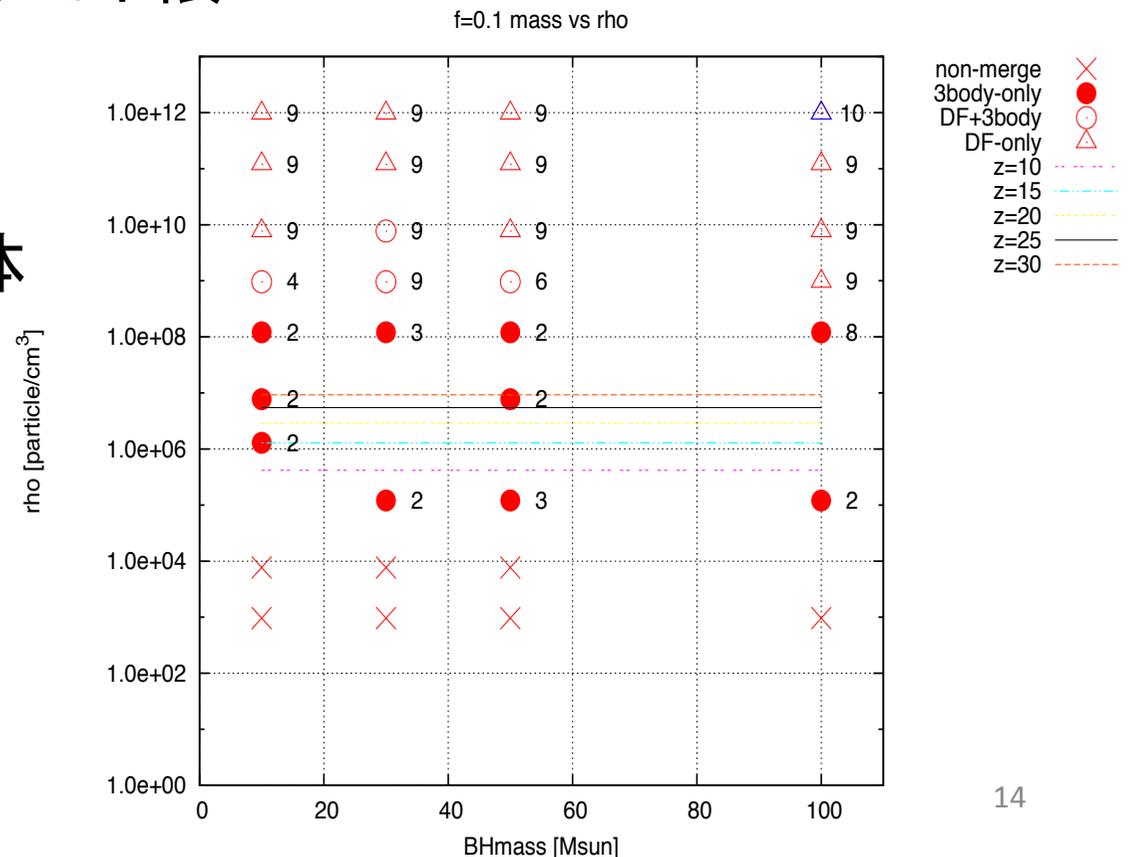


# 結果(続き) $f = 0.1$

- 「1回目」の合体を司る物理で場合分け(100[Myr]のsnapshot)
- 少なくとも1回合体が起きる密度の下限には大差は無い
- これも複数回の合体が確認でき、gasDFはBH合体を促進する
- $z=10 \sim z=30$ の線はあくまで下限
- (密度はもっと高い)



- 初代星残余物BHの合体はgasDFの影響を受ける



# まとめ

- ガスの力学的摩擦に加え、相対論効果を取り入れたBH多体系の数値計算を行った
  - ガスの力学的摩擦でBH同士の3体反応の頻度・確率を高めた
  - 密度によってBH合体を司る物理にちがいがある
  - 高密度域) gasDFがBH合体そのものを起こしうる
  - 中密度域) gasDFは3体相互作用の頻度・確率を高める補助要因
  - 星のDFと違い、gasDFを入れると10個全て合体できる場合もある
- 
- 初代星残余物BHはガスの影響を受けて合体している可能性
  - SMBH形成過程の一端を担っているかもしれない

ありがとうございました

**FIN**