

卒業研究中間発表

巨大ブラックホールの合体シミュレーション

筑波大学 理工学群 物理学類4年
石川 徹

卒業研究のベースとなる論文

Early cosmic merger of multiple black holes

H. Tagawa, M. Umemura, N. Gouda, T. Yano and Y. Yamai
MNRAS 451, 2174-2184 (2015)

- 初期宇宙で、(複数ある)BHがどのように合体するか
- 初期宇宙でのSMBHの形成に、BHの合体が寄与しているのか

BHの合体の要因

① ガスの力学的摩擦

ガス中をBHのような大質量物体が動くとBHが減速して、系の中心に向かう

② 三体反応

バイナリーを形成している二体のBHに三体目のBHが近づき、バイナリーから角運動量を引き抜くことによりバイナリーの軌道を収縮させる

③ 重力波放射

重力波が放射されることにより、エネルギーと角運動量を損失させ、軌道を収縮させる

BHの運動方程式

i 番目のBHの運動方程式

$$\frac{d^2 \mathbf{r}_i}{dt^2} = \sum_j^{N_{\text{BH}}} \left\{ -Gm_j \frac{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j}{|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^3} + \mathbf{a}_{\text{PN},ij} \right\} + \mathbf{a}_{\text{DF},i}^{\text{gas}} + \mathbf{a}_{\text{pot},i}$$

$\mathbf{a}_{\text{PN},ij}$: Post Newtonian近似による、一般相対論的な効果の修正項

$\mathbf{a}_{\text{DF},i}^{\text{gas}}$: ガスによる力学的摩擦

$\mathbf{a}_{\text{pot},i}$: BHとガスとの間の重力ポテンシャル

キーとなるパラメーター

- $\rho_{\text{BH}} [\text{M}_{\odot} \text{pc}^{-3}]$: 半径 $r_{\text{typ}} [\text{pc}]$ の球に分布しているBHの密度 (一様)

$$\rho_{\text{BH}} = \frac{3}{4\pi r_{\text{typ}}^3} \sum_i m_i$$

($m_i [\text{M}_{\odot}]$: i 番目のBHの質量)

- $n_{\text{gas}} [\text{cm}^{-3}]$: BHの周りのガスの数密度

キーとなるパラメーター

BHの個数は10個(すべて同じ質量)

BH質量 M_{BH} は、以下の2通りを考える

- $M_{\text{BH}} = 30M_{\odot}$ (第一世代天体から生じた初代星残余物の種BH)

$$r_{\text{typ}} = 0.01 - 1 \text{ pc} \quad (\rho_{\text{BH}} = 72 - 7.2 \times 10^7 M_{\odot} \text{pc}^{-3})$$

- $M_{\text{BH}} = 10^4 M_{\odot}$ (原始銀河中のBH)

$$r_{\text{typ}} = 0.1 - 10 \text{ pc} \quad (\rho_{\text{BH}} = 24 - 2.4 \times 10^7 M_{\odot} \text{pc}^{-3})$$

ガスの数密度は、どちらも $n_{\text{gas}} = 10^4 - 10^{12} \text{ cm}^{-3}$

合体の条件

i 番目と j 番目のBHの距離が、

$$|\boldsymbol{r}_i - \boldsymbol{r}_j| < 100(r_{\text{sch},i} + r_{\text{sch},j})$$

を満たしたとき、2つのBHが合体したとみなす。

($r_{\text{sch},i}$ は i 番目のBHのシュヴァルツシルト半径)

結果 ($M_{\text{BH}} = 30M_{\odot}$)

- $\rho_{\text{BH}} = 72 - 7.2 \times 10^7 \text{ M}_{\odot} \text{ pc}^{-3}$ において
10個すべてが合体
 $\Rightarrow n_{\text{gas}} = 5 \times 10^6 - 10^8 \text{ cm}^{-3}$

初代星残余物のBH密度 $\rho_{\text{BH}} \approx 10^7 \text{M}_{\odot} \text{pc}^{-3}$
 ガスの数密度 $n_{\text{gas}} \approx 10^7 - 10^8 \text{cm}^{-3}$
 (Greif et al. 2011; Susa 2013; Susa et al. 2014)

つまり、
初代星残余物のBHは1つに合体できる

- $n_{\text{gas}} \geq 5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ なら、100Myr以内に少なくとも1回は合体が起こる

Table 1. The results with $M_{\text{BH}} = 30 M_{\odot}$ and $N_{\text{BH}} = 10$.

| r_{typ} (pc) | 1.0 | | 0.464 | | 0.215 | | 0.1 | | 0.0464 | | 0.0215 | | 0.01 | |
|---|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|
| $\rho_{\text{BH}} (\text{M}_{\odot} \text{ pc}^{-3})$ | 7.2×10^1 | | 7.2×10^2 | | 7.2×10^3 | | 7.2×10^4 | | 7.2×10^5 | | 7.2×10^6 | | 7.2×10^7 | |
| $n_{\text{gas}} (\text{cm}^{-3})$ | N_{m} | Type | N_{m} | Type | N_{m} | Type | N_{m} | Type | N_{m} | Type | N_{m} | Type | N_{m} | Type |
| | t_{fin} (yr) | | t_{fin} (yr) | | t_{fin} (yr) | | t_{fin} (yr) | | t_{fin} (yr) | | t_{fin} (yr) | | t_{fin} (yr) | |
| 10^{12} | 0 | – | 5 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | B |
| | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 3.6×10^7 | | 4.4×10^6 | | 1.7×10^6 | | 7.0×10^5 | | 4.3×10^5 | |
| 10^{11} | 2 | A | 8 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | B |
| | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.3×10^7 | | 1.8×10^5 | | 1.8×10^5 | | 2.3×10^4 | | 2.8×10^4 | |
| 10^{10} | 5 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | B | 9 | B |
| | 1.0×10^8 | | 4.5×10^7 | | 5.1×10^6 | | 5.9×10^5 | | 7.4×10^4 | | 6.3×10^4 | | 1.7×10^5 | |
| 5×10^9 | 5 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | B | 9 | B | 9 | B |
| | 1.0×10^8 | | 2.9×10^7 | | 3.1×10^6 | | 4.5×10^5 | | 1.6×10^5 | | 3.4×10^5 | | 7.7×10^4 | |
| 10^9 | 8 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B |
| | 1.0×10^8 | | 2.4×10^7 | | 3.5×10^6 | | 2.6×10^5 | | 4.3×10^5 | | 3.5×10^5 | | 3.0×10^5 | |
| 5×10^8 | 8 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B |
| | 1.0×10^8 | | 1.2×10^7 | | 1.3×10^6 | | 6.5×10^5 | | 4.3×10^5 | | 5.5×10^5 | | 5.1×10^5 | |
| 10^8 | 9 | A | 9 | A | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B |
| | 3.0×10^7 | | 5.1×10^6 | | 4.0×10^6 | | 5.5×10^6 | | 3.6×10^6 | | 4.2×10^6 | | 1.2×10^7 | |
| 5×10^7 | 9 | A | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B |
| | 4.5×10^7 | | 3.7×10^6 | | 2.2×10^7 | | 3.2×10^7 | | 1.3×10^7 | | 4.7×10^6 | | 3.6×10^6 | |
| 10^7 | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B |
| | 3.8×10^7 | | 2.3×10^7 | | 1.7×10^7 | | 3.3×10^7 | | 1.8×10^7 | | 2.9×10^7 | | 1.7×10^7 | |
| 5×10^6 | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B |
| | 4.2×10^7 | | 3.9×10^7 | | 4.2×10^7 | | 4.7×10^7 | | 6.3×10^7 | | 3.5×10^7 | | 3.1×10^7 | |
| 10^6 | 6 | B | 6 | B | 8 | B | 6 | C | 8 | C | 6 | C | 6 | C |
| | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | |
| 5×10^5 | 2 | C | 6 | C | 6 | C | 4 | C | 5 | C | 3 | C | 4 | C |
| | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | |
| 10^5 | 0 | – | 0 | – | 1 | C | 0 | – | 1 | C | 2 | C | 0 | – |
| | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | |
| 10^4 | 0 | – | 0 | – | 0 | – | 1 | C | 0 | – | 0 | – | 0 | – |
| | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | |

結果 ($M_{\text{BH}} = 10^4 M_{\odot}$)

- $\rho_{\text{BH}} = 2.4 \times 10^2 - 2.4 \times 10^7 \text{M}_{\odot} \text{pc}^{-3}$
 において10個すべてが合体

$$\Rightarrow n_{\text{gas}} = 5 \times 10^6 - 10^9 \text{cm}^{-3}$$

- $n_{\text{gas}} \geq 5 \times 10^6 \text{cm}^{-3}$ において、BH分布半径 r_{typ} が数pc以上離れていても10個すべてが合体したところが存在

⇒ 初期宇宙のSMBHの形成過程に寄与している可能性

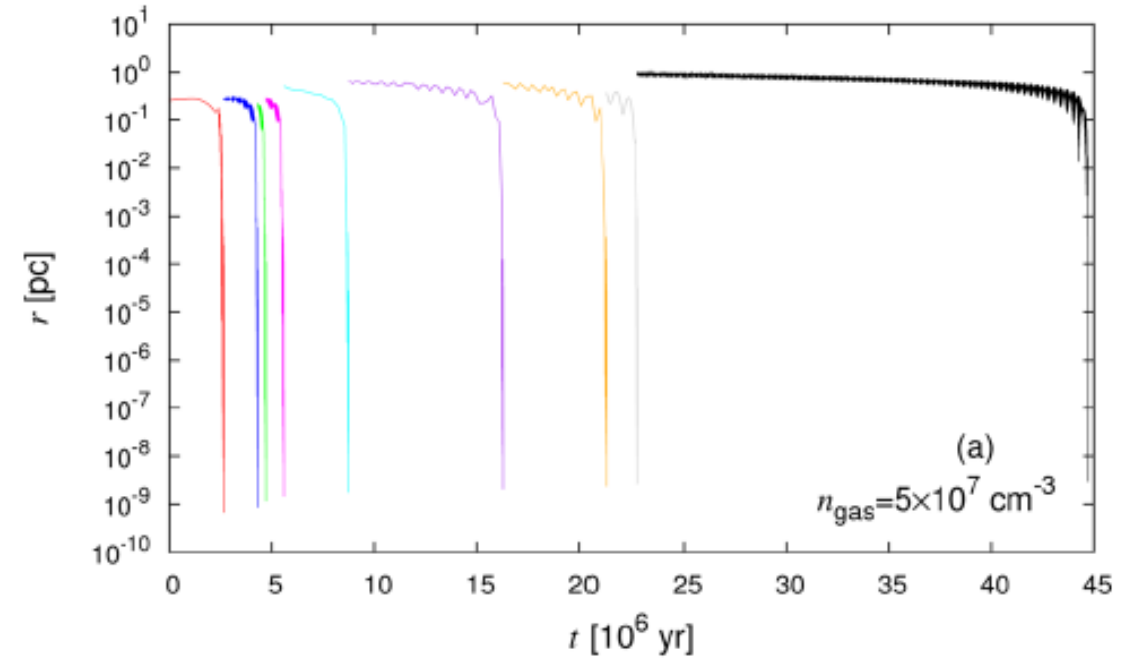
- $n_{\text{gas}} \geq 5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ なら、100Myr以内に少なくとも1回は合体が起こる

Table 2. The results with $M_{\text{BH}} = 10^4 M_{\odot}$ and $N_{\text{BH}} = 10$.

| r_{typ} (pc) | 10.0 | | 4.64 | | 2.15 | | 1.0 | | 0.464 | | 0.215 | | 0.1 | |
|---|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|-----------------------|------|
| $\rho_{\text{BH}} (\text{M}_{\odot} \text{ pc}^{-3})$ | 2.4×10^1 | | 2.4×10^2 | | 2.4×10^3 | | 2.4×10^4 | | 2.4×10^5 | | 2.4×10^6 | | 2.4×10^7 | |
| $n_{\text{gas}} (\text{cm}^{-3})$ | N_{m} | Type | N_{m} | Type | N_{m} | Type | N_{m} | Type | N_{m} | Type | N_{m} | Type | N_{m} | Type |
| | t_{fin} (yr) | | t_{fin} (yr) | | t_{fin} (yr) | | t_{fin} (yr) | | t_{fin} (yr) | | t_{fin} (yr) | | t_{fin} (yr) | |
| 10^{12} | 0 | – | 4 | A | 7 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | A |
| | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.3×10^7 | | 1.5×10^6 | | 1.7×10^5 | | 2.2×10^4 | |
| 10^{11} | 0 | – | 5 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | B |
| | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 4.6×10^7 | | 5.0×10^6 | | 5.8×10^5 | | 7.2×10^4 | | 1.6×10^4 | |
| 10^{10} | 4 | A | 8 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | B |
| | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.7×10^7 | | 2.0×10^6 | | 2.5×10^5 | | 9.3×10^4 | | 4.1×10^4 | |
| 10^9 | 5 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | B | 9 | B | 9 | B |
| | 1.0×10^8 | | 5.8×10^7 | | 7.0×10^6 | | 9.6×10^5 | | 7.6×10^5 | | 9.0×10^5 | | 2.4×10^6 | |
| 5×10^8 | 5 | A | 9 | A | 9 | A | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B |
| | 1.0×10^8 | | 5.0×10^7 | | 1.0×10^7 | | 1.5×10^6 | | 9.5×10^5 | | 7.6×10^5 | | 6.7×10^5 | |
| 10^8 | 7 | A | 9 | A | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B |
| | 1.0×10^8 | | 2.5×10^7 | | 3.7×10^6 | | 8.3×10^6 | | 4.9×10^6 | | 5.6×10^6 | | 7.9×10^6 | |
| 5×10^7 | 9 | A | 9 | A | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B |
| | 7.3×10^7 | | 2.0×10^7 | | 1.3×10^7 | | 7.1×10^6 | | 1.2×10^7 | | 3.5×10^6 | | 9.4×10^6 | |
| 10^7 | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B |
| | 7.7×10^7 | | 3.5×10^7 | | 9.3×10^7 | | 6.0×10^7 | | 3.3×10^7 | | 3.6×10^7 | | 4.1×10^7 | |
| 5×10^6 | 8 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B | 9 | B |
| | 1.0×10^8 | | 8.3×10^7 | | 3.9×10^7 | | 8.5×10^7 | | 4.6×10^7 | | 4.8×10^7 | | 7.9×10^7 | |
| 10^6 | 5 | B | 7 | B | 4 | B | 9 | B | 5 | C | 5 | C | 6 | C |
| | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 6.5×10^7 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | |
| 5×10^5 | 3 | B | 3 | C | 3 | C | 3 | C | 6 | C | 4 | C | 4 | C |
| | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | |
| 10^5 | 0 | – | 0 | – | 0 | – | 0 | – | 0 | – | 1 | C | 0 | – |
| | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | |
| 5×10^4 | 0 | – | 0 | – | 1 | C | 0 | – | 1 | C | 1 | C | 1 | C |
| | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | |
| 10^4 | 0 | – | 0 | – | 0 | – | 0 | – | 0 | – | 0 | – | 1 | C |
| | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | | 1.0×10^8 | |

合体メカニズム(タイプA)

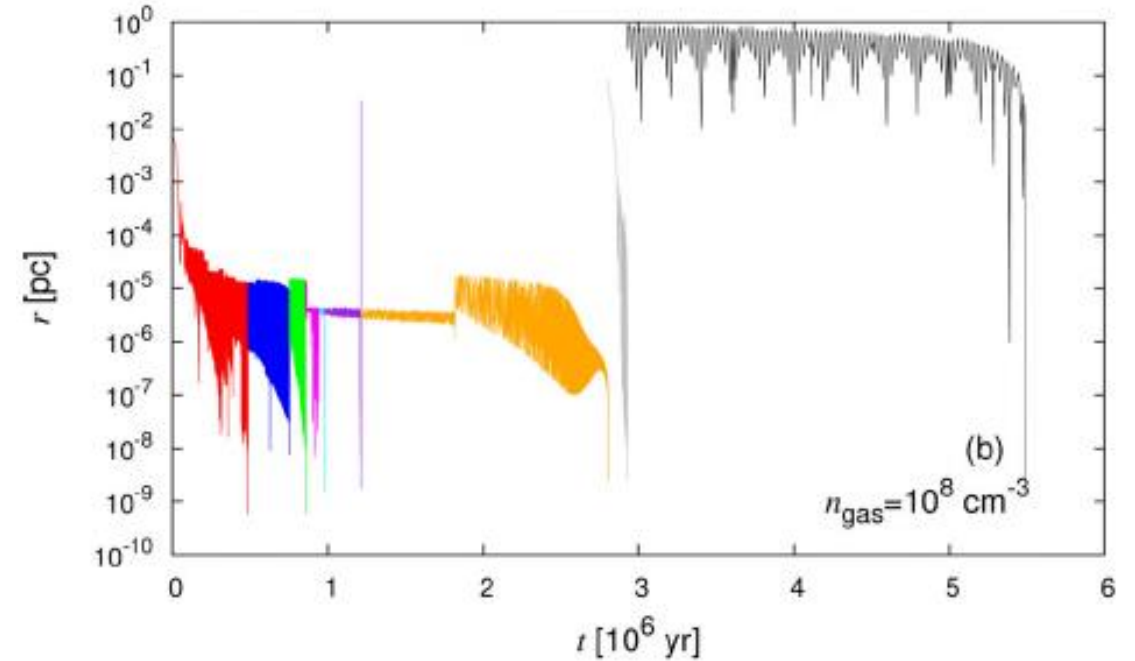
- ガス密度が高く、BH密度が低いところで見られる
- バイナリーの距離の減少が滑らか
 - ガス密度が高いために、ガスによる力学的摩擦が効いて、最後に重力波放射によって合体が起きている



タイプAの例($M_{\text{BH}} = 30 M_{\odot}$, $r_{\text{typ}} = 1.0 \text{ pc}$)

合体メカニズム(タイプB)

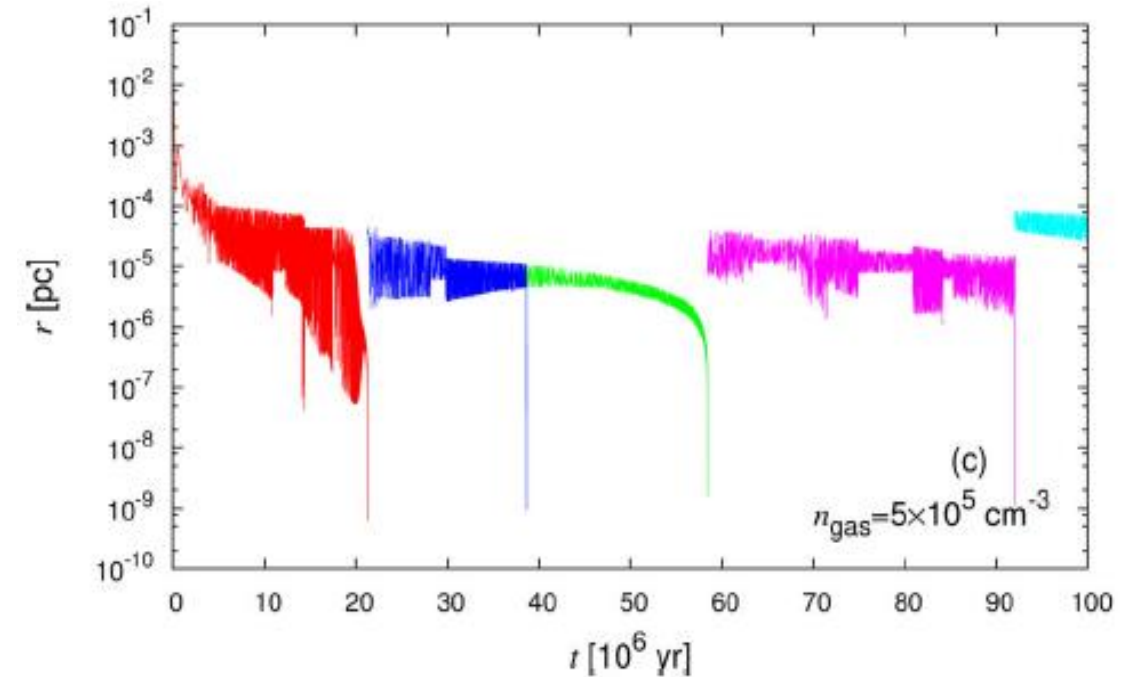
- ガス密度が比較的高く、BH密度が高いところで多くみられる
- 最初はバイナリーの距離が揺れて、最後の方でゆっくり減少する
- ガスの力学的摩擦により三体反応の頻度を高め、合体を促進させ、最後は重力波放射が効いて合体に至る
- 最後の合体は、三体反応の三体目がないことによりガスの摩擦のみにより合体



タイプBの例($M_{\text{BH}} = 30 M_{\odot}$, $r_{\text{typ}} = 0.1 \text{ pc}$)

合体メカニズム(タイプC)

- ガス密度が低いところで見られる
- バイナリーの距離の減少が最後まで揺れる
 - 三体反応の角運動量の引き抜きが効いて、最後に重力波放射によって合体が起こる



タイプCの例($M_{\text{BH}} = 30 M_{\odot}$, $r_{\text{typ}} = 0.1 \text{ pc}$)

まとめ

- 複数分布するBHはガス密度の広い範囲の値で1つに合体でき、
 $n_{\text{gas}} \geq 5 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$ なら、少なくとも1回は合体が起こる
- 合体メカニズムは3種類あって、ガスの力学的摩擦によるタイプA、ガスの摩擦と三体反応のマージナルによるタイプB、三体反応によるタイプCで分けられる
- 初代星残余物のBHは1つに合体できる
- BH分布半径が数pc以上離れていてもBHがすべてが合体したことから、初期宇宙のSMBHの形成過程に寄与している可能性がある