

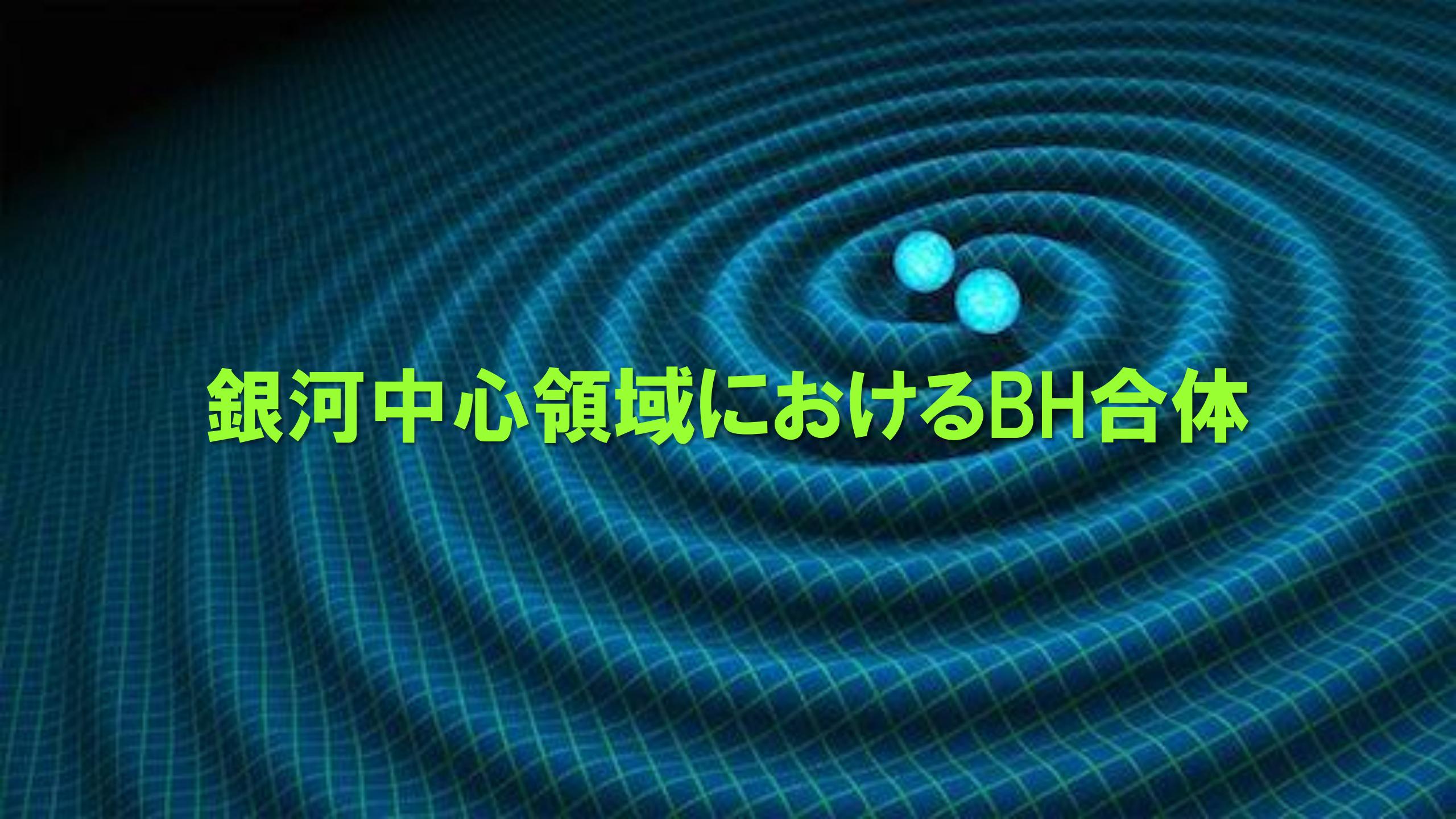


# 天体形成研究会

2017/10/14

筑波大学 宇宙物理理論研究室B4

竹澤 多聞



# 銀河中心領域におけるBH合体

## ・卒業研究のベースとなる論文

►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

山井勇樹（修士論文）

## ・「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」の紹介

ガスの力学的摩擦がSMBH形成過程に与える影響に焦点を当てると同時に、相対論効果(近日点移動、重力波放出)を取り入れたBH多体系の数値計算を行つたもの。

この論文では、ガスの力学的摩擦は初代星残余物のBHの合体を促進している可能性が高く、SMBH形成過程を紐解く道標になるかもしれないと結論づけている。

# ・状況設定

- ◆質量 $10^5 M_{\odot}$ の系が宇宙膨張から切り離され、赤方偏移が $z=15$ でビリアル平衡に達した場合を考えている。
- ◆系内のBHの数は10個である。
- ◆角運動量を獲得した状態からの重力収縮を検討する。
- ◆ビリアル半径は $R_{vir} = 1.82 \times 10^2 [pc]$ なので角運動量獲得条件を考えると $R_{vir}$ の200分の1程度( $z=15$ の場合 $R_{rot} = 0.909 [pc]$ )の系を考える。
- ◆ガス密度もパラメータ化したい  
→密度が一桁ずつ変化するように $R_{rot}$ を $10, 5, 2, 0.909 (z=15), 0.5, 0.2, 0.1, 0.05, 0.02, 0.01$ と変えて計算する。
- ◆BHの質量は $10, 30, 50, 100 M_{\odot}$ を考えている。
- ◆系の温度は $1000 [K]$ を仮定している。
- ◆音速は $C_s = 3.709 [\text{km/s}] = 3.793 \times 10^{-6} [\text{pc/yr}]$

- BH合体過程の物理

- ガスの力学的摩擦
- 3体反応による角運動量の損失

## ・ガスの力学的摩擦

ガス中を運動する天体(BH)が作る重力ポテンシャルによって、運動する天体の前方より後方のガス密度が大きくなるようにガス粒子が散乱され、これによる重力が運動する天体を引っ張り、速度減衰をさせる現象



角運動量を失い、軌道収縮

## ・3体反応

BHバイナリーに3体目のBHが近づき、バイナリーから角運動量を持ち去る。



バイナリーは角運動量を失い、軌道収縮

## 結果①: ガス密度の高い領域( $10^{11} \sim 10^{12} [/cm^3]$ )

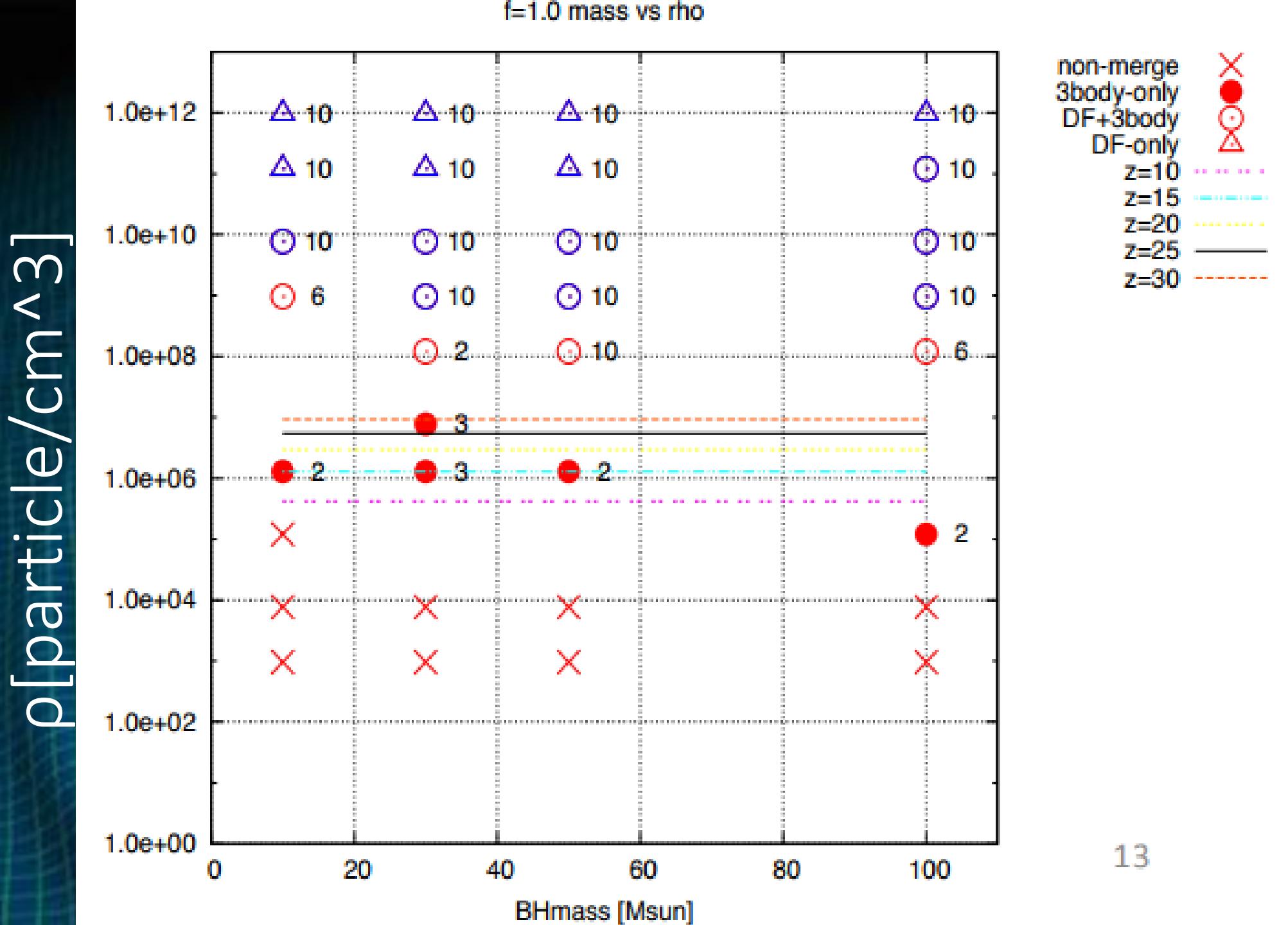
3体反応による角運動量の引き抜きを経験する前にガスによる力学的摩擦の影響で軌道収縮し合体する。

## 結果②: ガス密度の比較的高い領域( $10^8 \sim 10^{10} [/cm^3]$ )

ガスの力学的摩擦によるBHの落ち込みが期待でき、3体反応の頻度を高め合体を促進している。

## 結果③: ガス密度の低い領域( $10^5 \sim 10^7 [/cm^3]$ )

ガスの力学的摩擦が弱く軌道収縮は3体反応の角運動量引き抜きに頼っている。



## ・卒業研究の導入

先行研究では、ガスの力学的摩擦がSMBH形成過程に与える影響に焦点を当てると同時に、相対論効果を取り入れたBH多体系の数値計算を行っていた。



しかし、BHへの質量降着を考えていない！

卒業研究では質量降着(ホイル-リットルトン降着)の影響を考慮した場合のBH多体系の数値計算を行う。

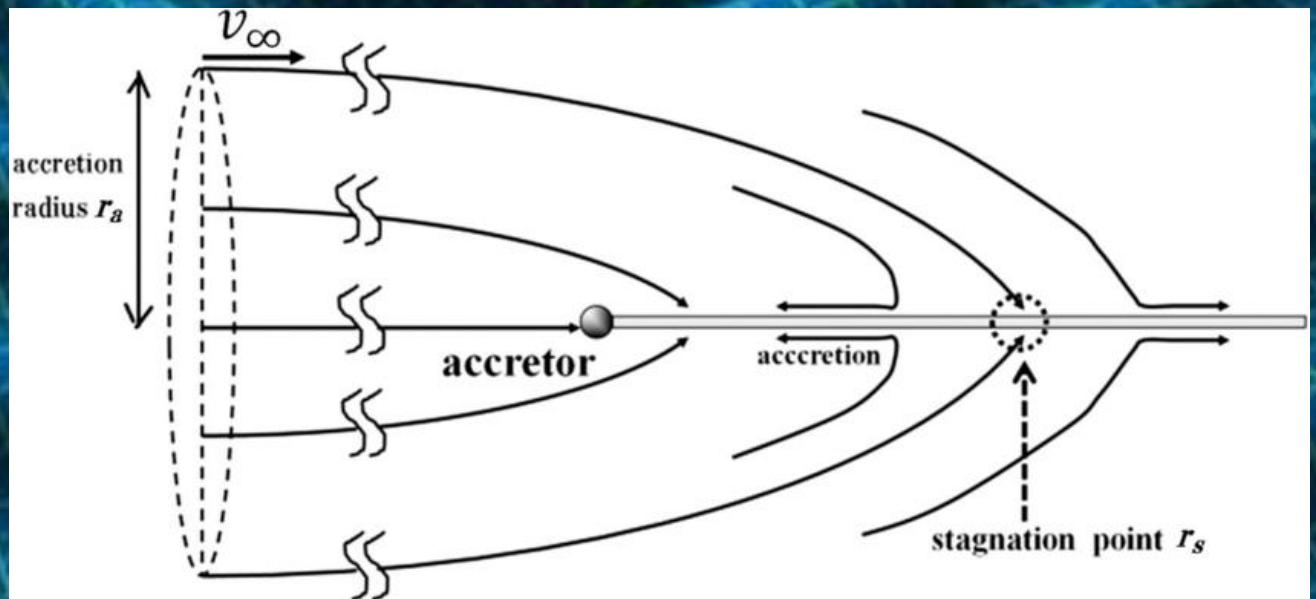
# ・ホイル-リットルトン降着

ガスに対して天体が動いていれば、上流から飛んできたガス粒子は、双曲線軌道を描いて天体の下流で交わり、合体する。さらに、合体粒子の位置が天体に十分近く、位置エネルギーが大きければ、ガス粒子は天体の重力場に捕らわれ、天体に落下(降着)することになる。これが、ホイル=リットルトン降着の古典的描像である。

ホイル-リットルトン降着率は

$$\dot{m}_{HL,i} = \frac{4\pi G^2 m_H n_{gas} m_i^2}{(C_s^2 + v_i^2)^{\frac{3}{2}}}$$

と表される。



## ・ホイル-リットルトン降着

増加効率(accretion efficiency)を $\varepsilon$ として、質量降着率を

$$\dot{m}_i = \varepsilon \dot{m}_{HL,i} = \varepsilon \frac{4\pi G^2 m_H n_{gas} m_i^2}{(c_s^2 + v_i^2)^{\frac{3}{2}}}$$

と設定する。

すると、運動量保存式から

$$a_{acc,i} = -\frac{\dot{m}_i}{m_i} v_i$$

の関係が導かれる。

## ・ホイル-リットルトン降着

「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」では

$$a_{acc.i} = -\frac{\dot{m}_i}{m_i} v_i$$

の項が運動方程式に組み込まれていない。



卒業研究ではこの項を組み込んで数値計算を行う！！

## ・重力波放出について

本研究のようなBHバイナリーの合体の計算を行う際、重力波放出を考慮する必要がある。

→先行研究と同様、G.Kupi(2006)で示されているPost Newtonian近似を採用する。

$$\boldsymbol{a} = \boldsymbol{a}_{Newton} + c^{-2} \boldsymbol{a}_{1PN} + c^{-4} \boldsymbol{a}_{2PN} + c^{-5} \boldsymbol{a}_{2.5PN} + o(c^{-6})$$

## ・運動方程式

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

## ・計算方法

→山井勇樹さんの作成したコードを改良して行う予定。

C言語・Hermite法

## ・卒研の設定

- ✓ 基本的に状況設定は変えず、ホイル-リットルトン降着による影響をBHの運動方程式に組み込んで数値計算を行う。
- ✓ 降着した質量の分、全体のガスの質量を減らすよう設定する。ガスの密度も系内全体で一定になるように設定する。
- ✓ 合体条件はH.Tagawa, M.Umemura and N.Gouda (2016)(参考①)に従い、 $|r_i - r_j| < 100(r_{sch,i} + r_{sch,j})$ とする。なお、 $r_{sch}$ はシュヴァルツシルト半径である。

## ・参考

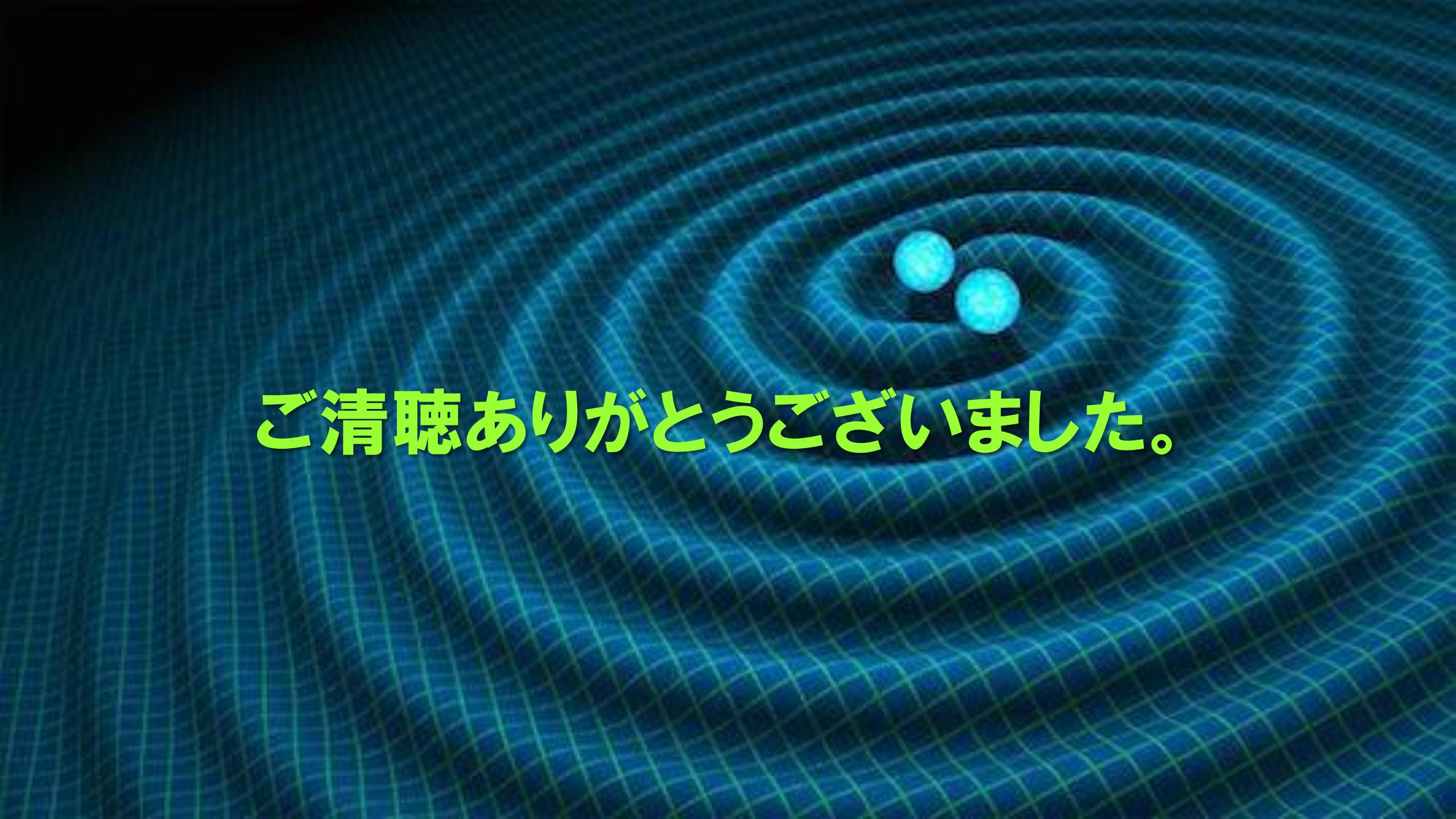
- ① Mergers of accreting stellar-mass black holes

H.Tagawa, M.Umemura and N.Gouda

MNRAS 462,3812-3822(2016)

- ② 宇宙流体力学の基礎

福江純 和田桂一 梅村雅之



ご清聴ありがとうございました。

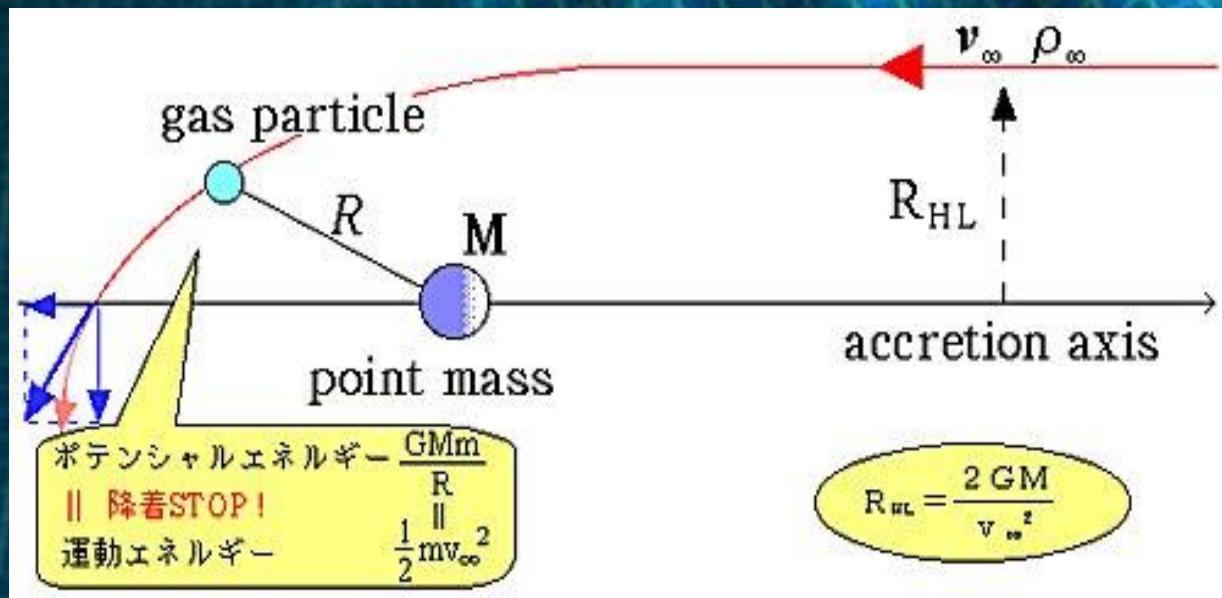
- ・出た質問
- ・BHは中で形成されたのか、外から来たのか  
スーパーノヴァでガスが飛んでしまう？
- ・ホイルーリットルトン降着の輻射圧を考慮したもの勉強をするべし
- ・輻射の条件などを考えて、 $a_{acc}$ と $a_{DF}$ の比較・予想を数値計算前に行うべし。どういう条件でどっちが支配的か。

## ⑤BHの数が10個：

→「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」で想定している初代ハローにできると言われているBHになる星の数がその程度である事を根拠にしている。(Susa.H 2013)

→今後読む予定

## ⑦ガス摩擦の原理・ホイル-リットルトン降着



$$\textcircled{5} \quad \rho_{vir} = 18\pi^2 \Omega_b \rho_{crit,0} (1+z)^3 \quad \rho_{crit,0} = 1.878 \times 10^{-29} h^2 \left[ \frac{g}{cm^3} \right]$$

$\Omega_b = 0.04$  (物質がバリオンのみで構成されているとする。)

音速:  $c_s = \sqrt{\left(\frac{\partial p}{\partial \rho}\right)_s} = \sqrt{\frac{\gamma k_B T}{m_p}}$

$$a_{DF,i}^{gas} = -4\pi G^2 m_i m_H n_{gas}(r) \frac{v_i}{v_i^3} \times f(\mathcal{M}_i)$$

$$f(\mathcal{M}_i)$$

$$= 0.5 \ln \left( \frac{v_i t}{r_{min}} \right) \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{\mathcal{M}_i}{\sqrt{2}} \right) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \mathcal{M}_i \exp \left( -\frac{\mathcal{M}_i^2}{2} \right) \right], \quad (0 \leq \mathcal{M}_i \leq 0.8)$$

$$= 1.5 \ln \left( \frac{v_i t}{r_{min}} \right) \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{\mathcal{M}_i}{\sqrt{2}} \right) - \sqrt{\frac{2}{\pi}} \mathcal{M}_i \exp \left( -\frac{\mathcal{M}_i^2}{2} \right) \right], \quad (0.8 \leq \mathcal{M}_i \leq \mathcal{M}_{eq})$$

$$= \frac{1}{2} \ln \left( 1 - \frac{1}{\mathcal{M}_i^2} \right) + \ln \left( \frac{v_i t}{r_{min}} \right), \quad (\mathcal{M}_{eq} \leq \mathcal{M}_i)$$

$$\mathcal{M}: \text{マツハ数} \quad \mathcal{M}_{eq}=1.5$$

## ・エディントン光度・エディントン降着率

中心光源の重力場によって働く重力(引力)とその輻射場によって働く輻射力(斥力)が釣り合う輻射光度をエディントン(Eddington)光度と呼ぶ<sup>1)</sup>。エディントン光度は中心光源が自身の重力場により周囲のガスを束縛できる最大の輻射光度を表しており、つまりは天体の古典的な限界光度として知られている。またその時の質量降着率はエディントン降着率と呼ばれ、ブラックホールをはじめ 降着天体の質量増加の目安としてよく用いられている。

## ・スーパーEddington降着

本来恒星の様な球対称な系ではEddington光度を超えて光ることはできない。輻射圧が重力よりも大きくなるため、質量の降着が不可能になるからである。しかし、BH 降着円盤のような系は球対称ではないため、Eddington 光度を超える可能性がある。