

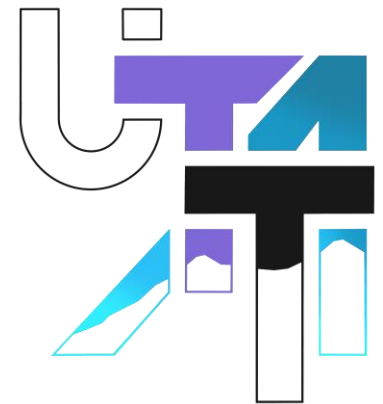
# 銀河衝突過程における 多重AGN発現機構の解明

仲野友将（筑波大学）

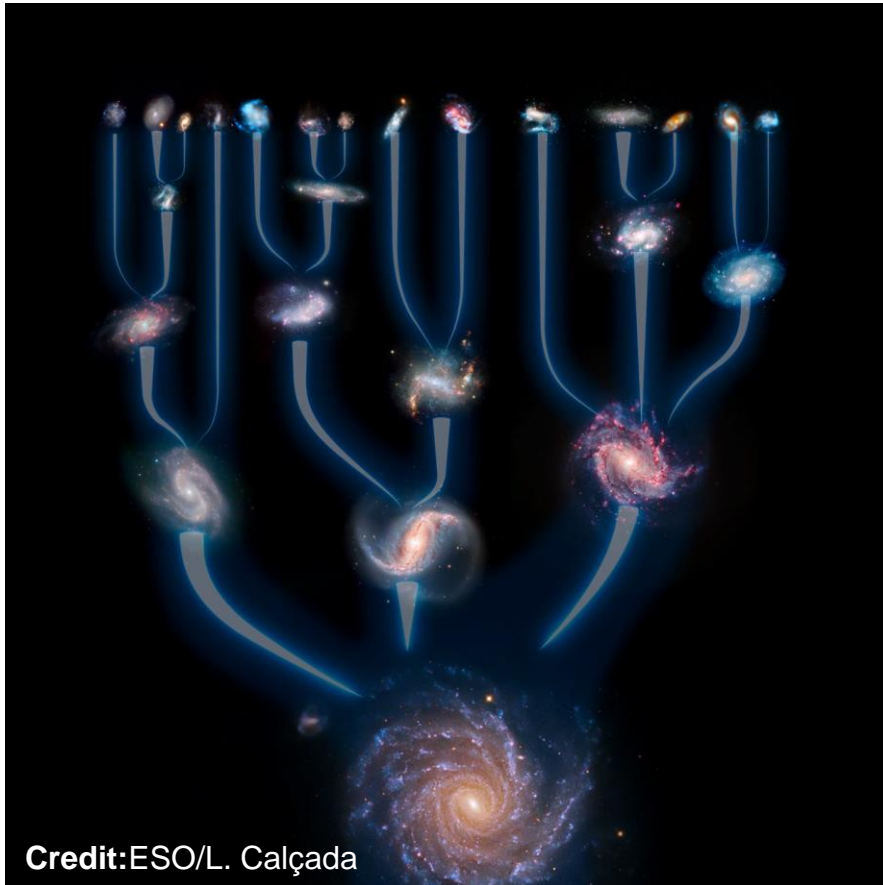
共同研究者：

矢島秀伸（筑波大学）

桐原崇亘（筑波大学）



# 銀河衝突と銀河中心BHの成長



- 銀河は衝突・合体を経て成長
- 多様な銀河衝突
  - 二体major merger
  - 二体minor merger
  - 三体以上の多体merger
- 銀河衝突・合体過程は
  - BHの成長（AGN形成）
  - BHと銀河の共進化にとって非常に重要な役割  
(Di Matteo et al. 2005)

二体mergerの研究はこれまで多くされてきたが、  
**多体merger は理論的に詳しく調べられていない**

## 四重AGNの観測 (Hennawi et al. 2015)

- ✓ AGN×4 (クエーサー+AGN×3)
- ✓ ~ 200 – 300 kpc スケール
- ✓ 赤方偏移  $z \sim 2$

多体銀河衝突過程における銀河中心BHの成長過程の詳細はわかっていないため

- 多体銀河衝突過程で数百 kpc スケールの多重AGNを形成できるのか
  - どれくらいの lifetime があるのか
- は不明である



JF Hennawi et al. (2015)

**多体銀河衝突、特に三体の銀河衝突過程に着目し、多体銀河衝突過程におけるBHの成長過程や銀河との共進化過程の理解を深める**

**特にその過程で発現したと考えられる「多重AGN」に着目し、三体衝突のパラメータ（三体目の衝突タイミング）を変えながら**

- **Triple AGNs の発現時間**
- **Triple AGNs の空間スケール**
- **角運動量輸送メカニズム**

**を数値シミュレーションを用いて調査し、多重AGNの発現メカニズムに迫る**

# Dual AGNs の先行研究 (Capelo et al. 2017)

## 手法

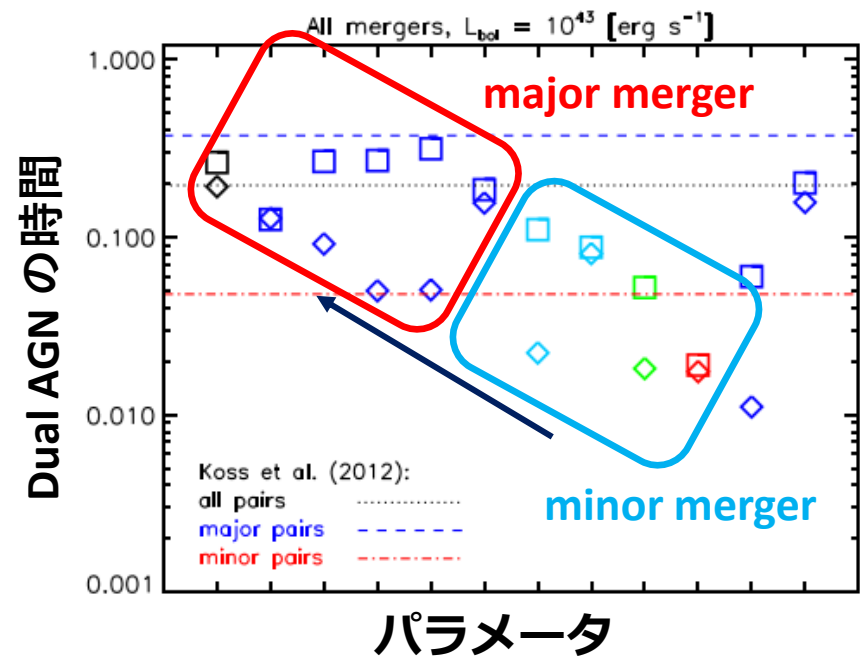
- 孤立系銀河衝突シミュレーション
- SPH × sub-grid モデル (AGN, cooling, 星形成, SN など)

## パラメータ

- 銀河の質量比
- 円盤の gas fraction
- 銀河の傾斜角

## 結論

- 質量比が最も重要なパラメータ
- 質量比が小さいほど  
活発な dual AGNs を形成



## 孤立系多体銀河衝突シミュレーション

コード : Gadget3 (Springel 2005)

➤ sub-grid モデル : FOREVER22 project (Yajima + 2022)

### ブラックホール

- ボンディ・ホイル・リットルトン降着率

$$\dot{M}_{\text{Bondi}} = \frac{4\pi G^2 M_{\text{BH}}^2 \rho}{(c_s^2 + v^2)^{3/2}}$$
$$L_{\text{bol}} = f_r \dot{M}_{\text{Bondi}} c^2$$

- 降着率の上限

$$\dot{M}_{\text{BH-Edd}} = \frac{4\pi G M_{\text{BH}} m_p}{\epsilon_r \sigma_T c}$$

- Stochastic thermal feedback (Dalla Vecchia & Schaye 2012)

$$\Delta E = f_e f_r \dot{M}_{\text{BH}} c^2 \Delta t$$

$f_e = 0.15$  : thermal coupling factor

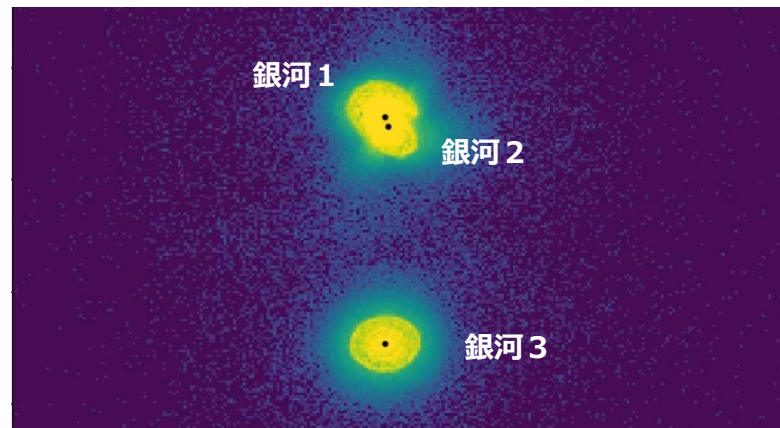
$f_r = 0.1$ :放射効率  
 $G$  : 重力定数  
 $\rho$  : BH周囲のガス密度  
 $c_s$  : 音速  
 $v$  : BHとガスの相対速度  
 $m_p$  : 陽子質量  
 $\sigma_T$  : 電子散乱断面積

# 三体シミュレーションのセットアップ

run

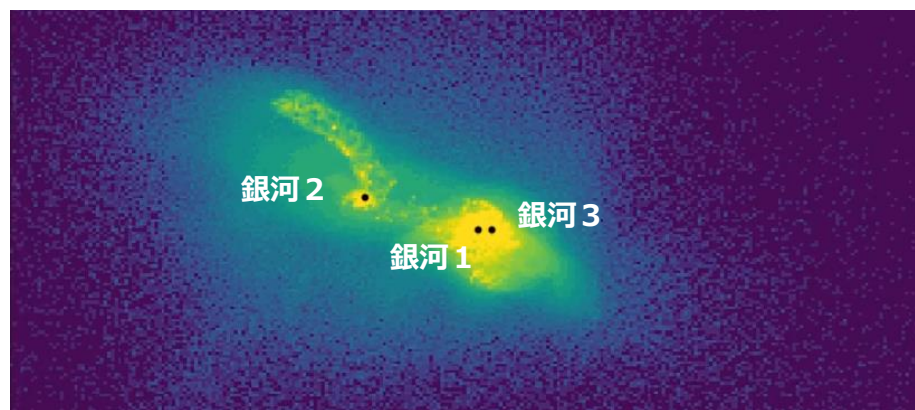
Run	$\Delta t_{\text{merge}}$ [Gyr]
Run1	0.171
Run2	0.21
Run3	0.267

銀河1と銀河2の近点通過時間



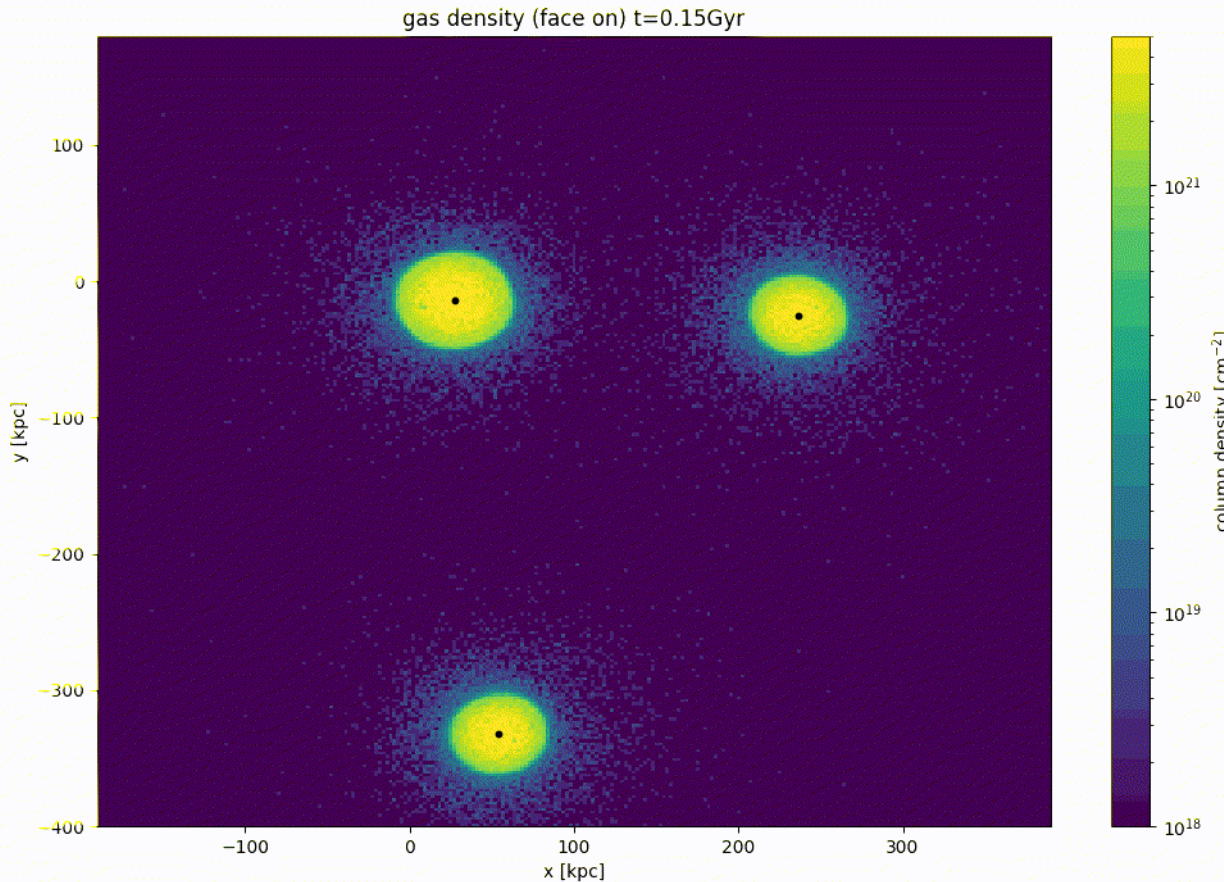
$\Delta t_{\text{merge}}$

銀河3と銀河1の近点通過時間



# 三体シミュレーションのセットアップ

## ★ AGN phase BH



先行研究を参考に  
(Capelo et al. 2017)

### galaxy

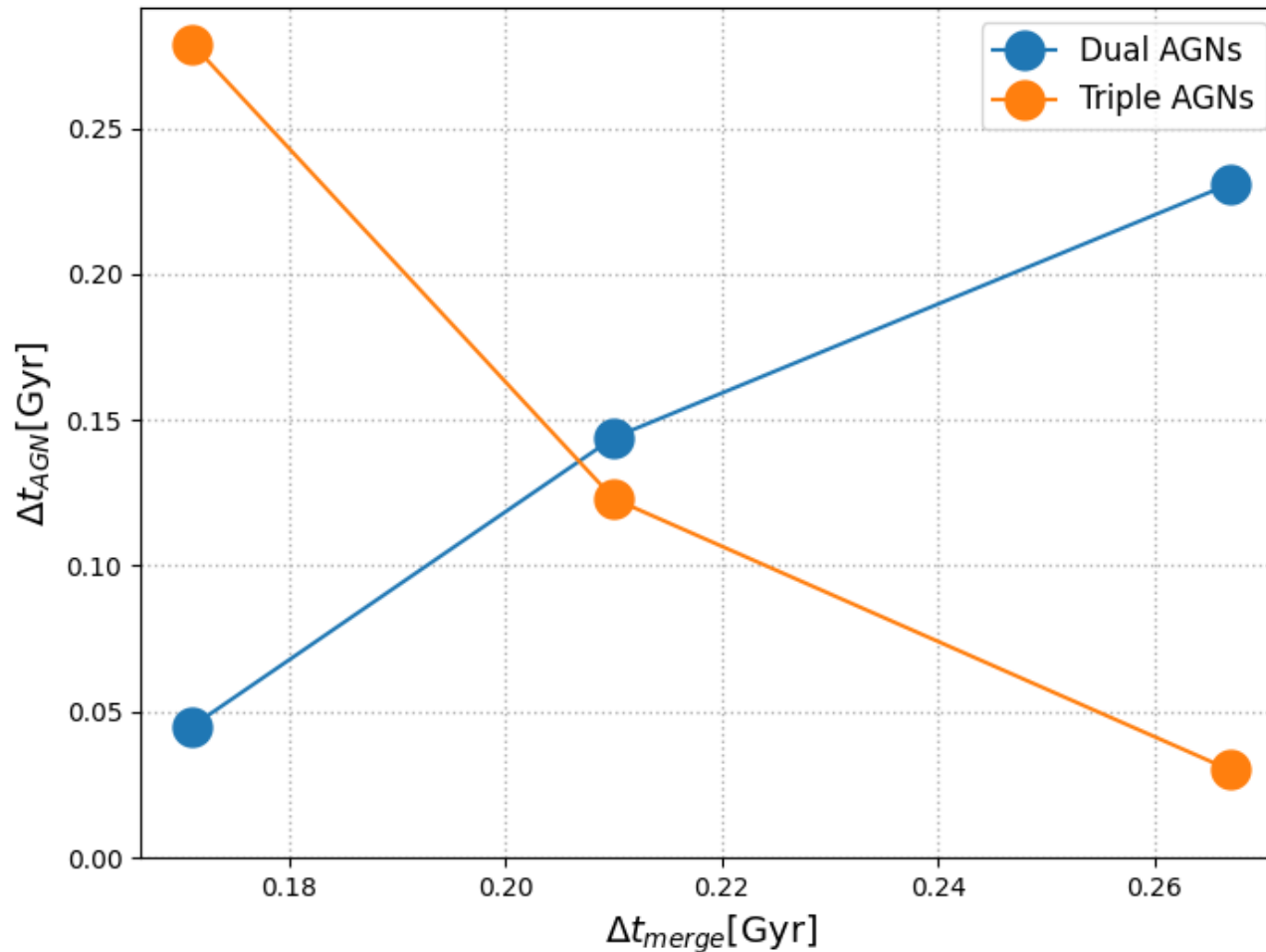
- $M_{\text{vir1}} : M_{\text{vir2,3}} = 2:1$
- $f_{\text{gas}} = 0.3$
- $M_{\text{BH1}} = 1.6 \times 10^8 M_{\odot}$
- $M_{\text{vir1}} = 10^{13} M_{\odot}$
- Redshift 2.0

### resolution

- $\sim 1300$ 万體
- $m_{\text{DM}} = 3.0 \times 10^6 M_{\odot}$
- $m_{\text{gas}} = 1.0 \times 10^5 M_{\odot}$
- $m_{\text{star}} = 1.0 \times 10^5 M_{\odot}$
- softening = 0.1kpc



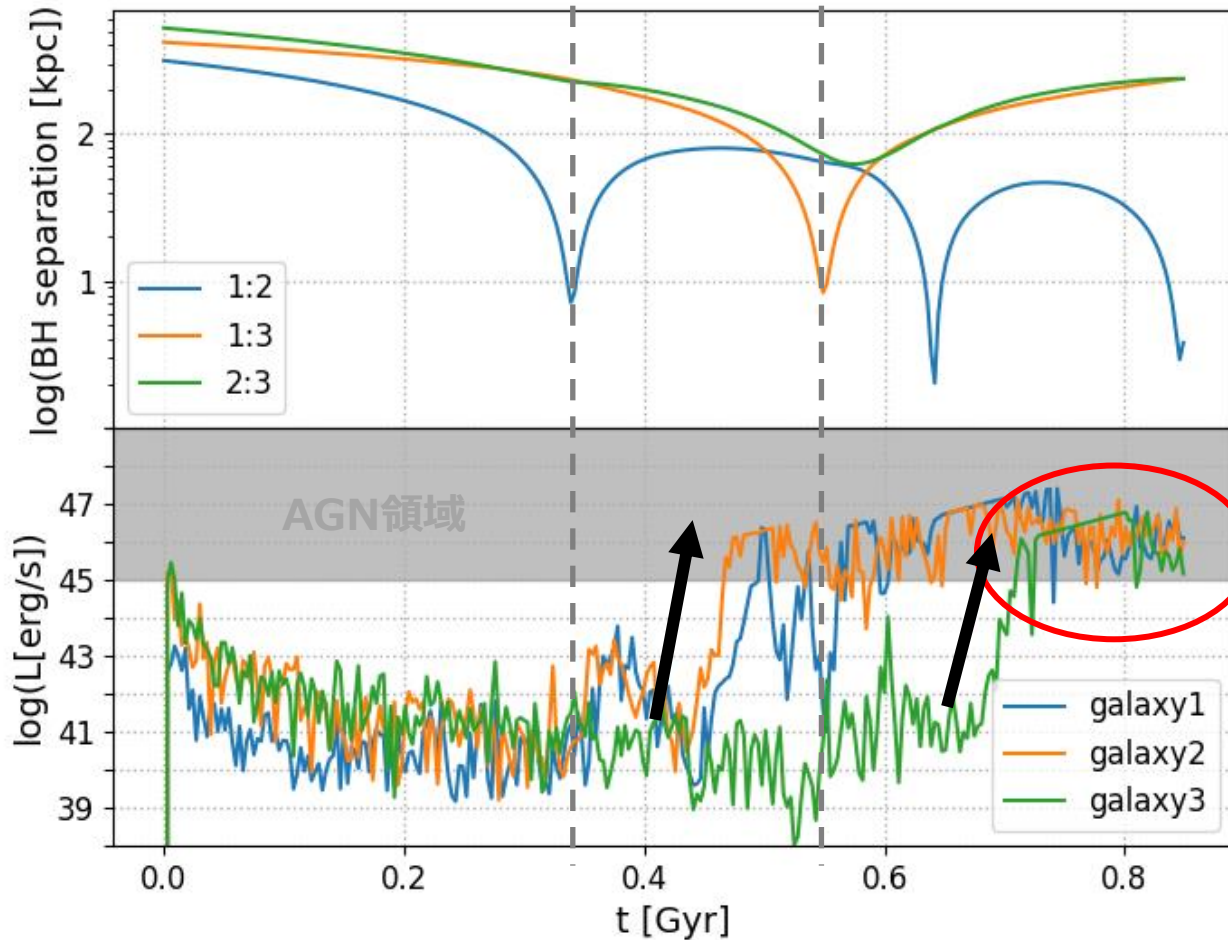
# Triple/dual AGNs の継続時間



- $\Delta t_{\text{merge}}$  によらず 0.03 – 0.3 Gyr の triple-AGNs phase を形成
- 銀河3の衝突が早いほど triple-AGNs の時間を稼げる

# 銀河衝突と光度上昇 (run2)

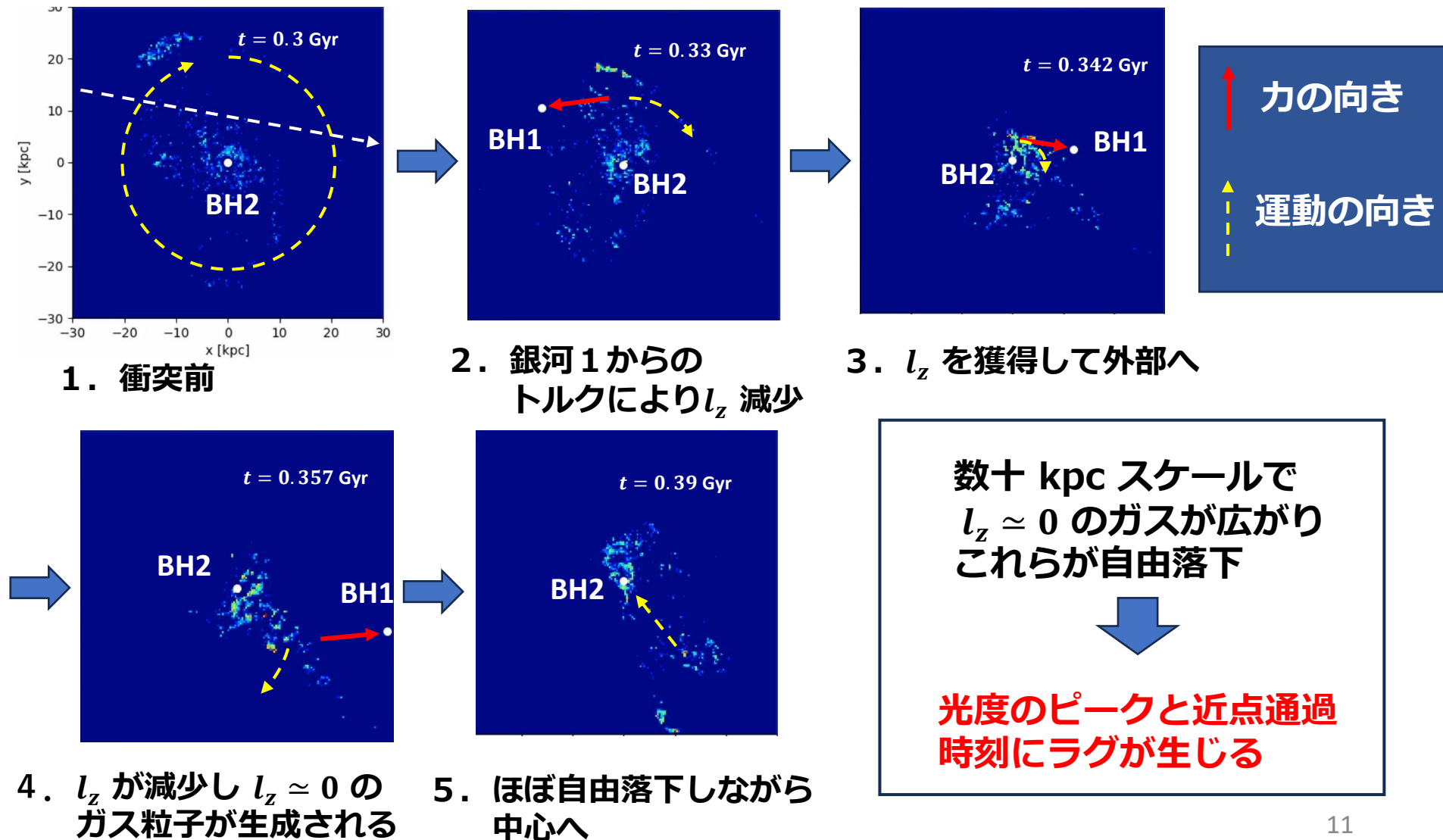
銀河 1, 2 の近点 銀河 1, 3 の近点



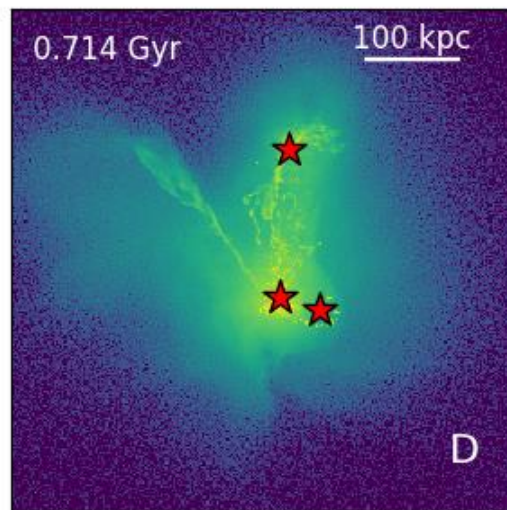
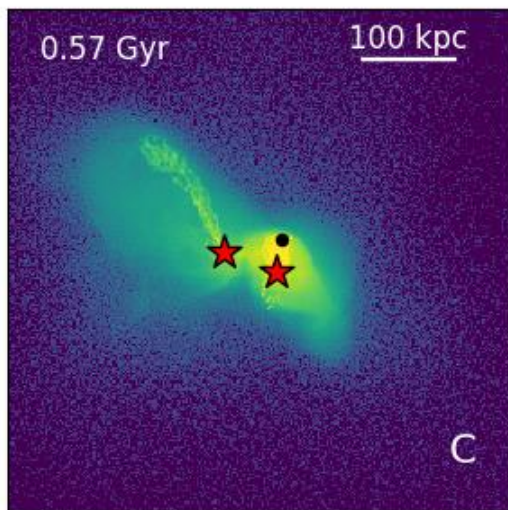
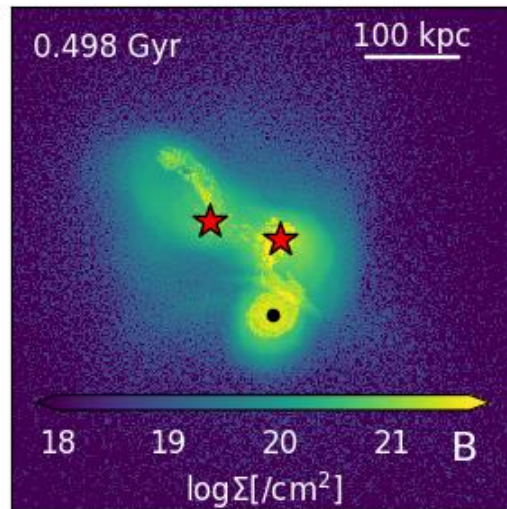
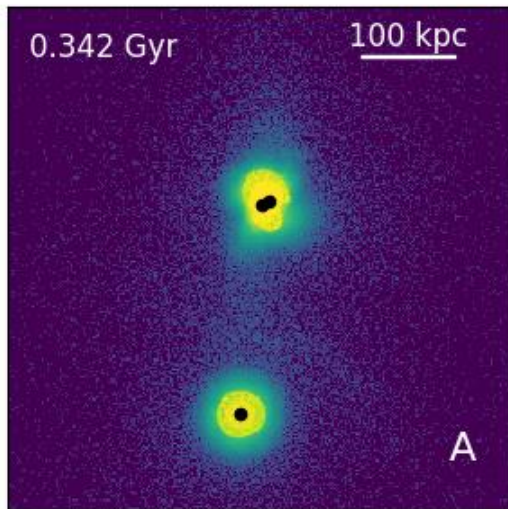
- 近点通過後の急激な光度上昇
- 銀河 1, 2 の衝突により dual-AGNs 形成
- 銀河 3 の衝突後に triple-AGNs 形成
- 近点通過と光度上昇にラグがある。なぜか？

# 角運動量輸送メカニズム

AGN phase にBHのスミージング長以内にいるガス粒子の運動を解析



# Triple/Dual AGNs の空間分布

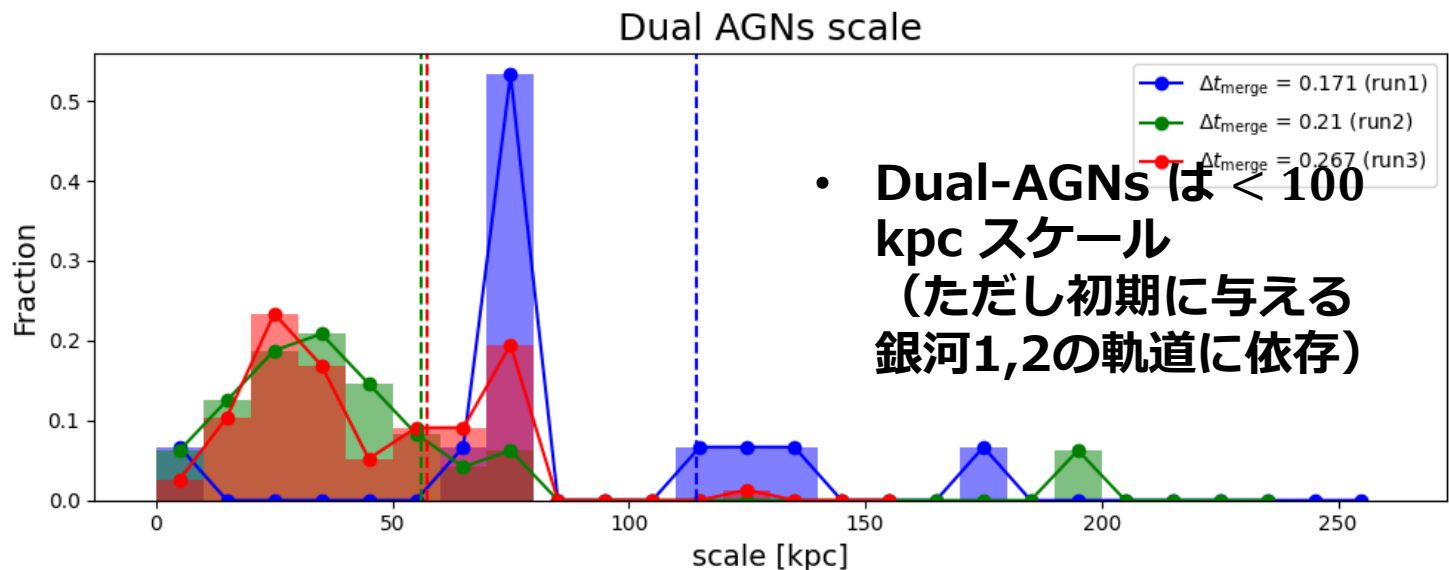
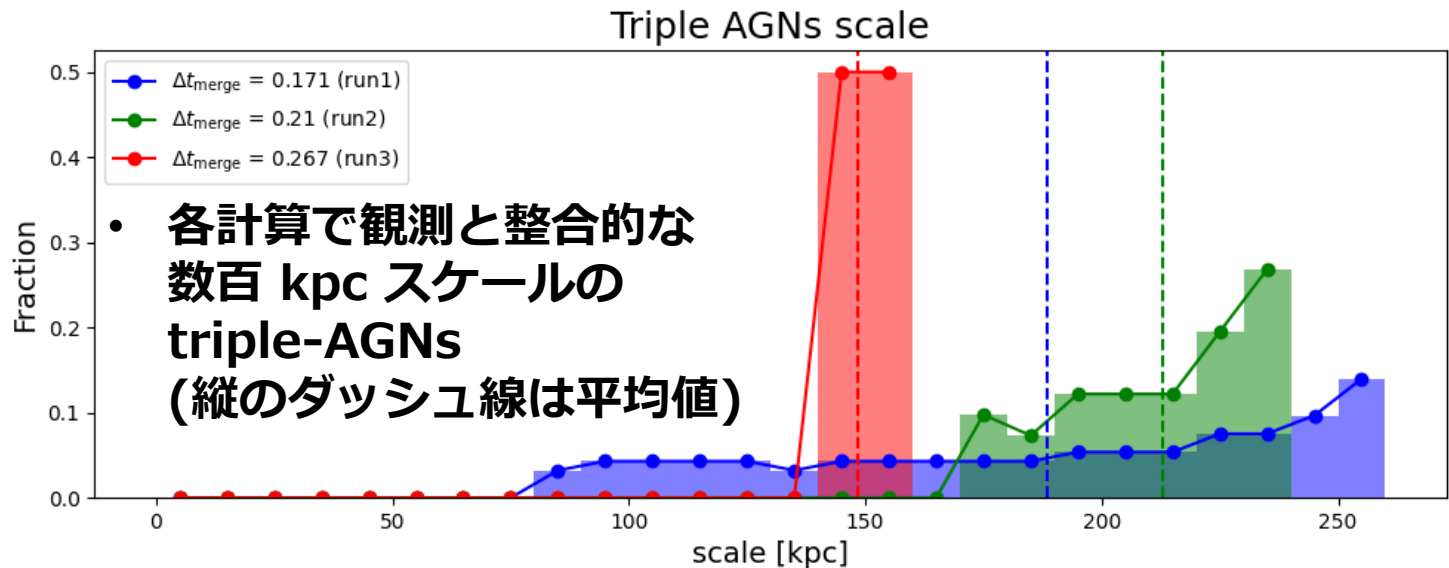


- A) 銀河1,2の近点通過
- B) 銀河1,2の遠点付近で dual-AGNs 形成
- C) 銀河3の衝突直後は dual-AGNs のまま
- D) 銀河3の衝突後、100 kpc 以上離れてから triple-AGNs 形成

近点通過と降着のタイムラグによりAGN化が遅れ、(B) (D) でみられるような大スケールの triple/dual AGNs を形成

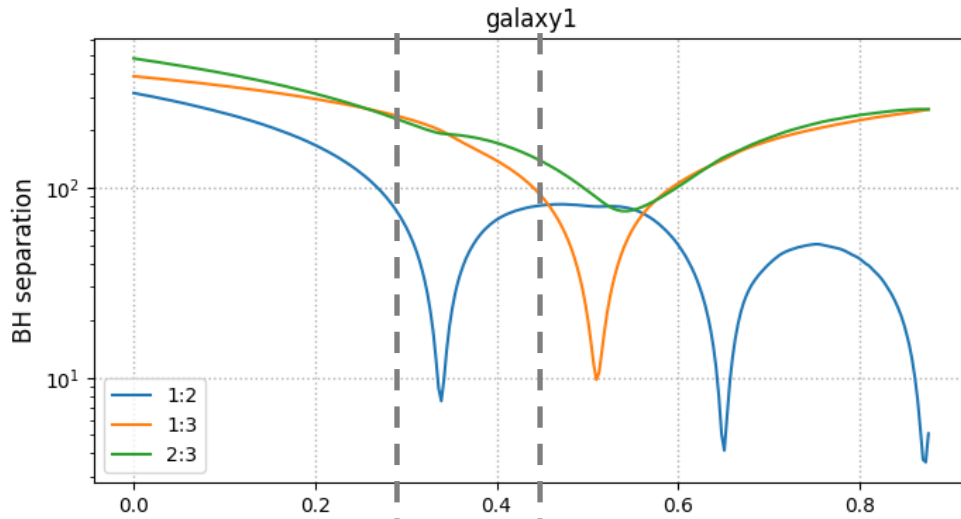
★ AGN phase BH

# Triple/Dual AGNs の空間スケール分布



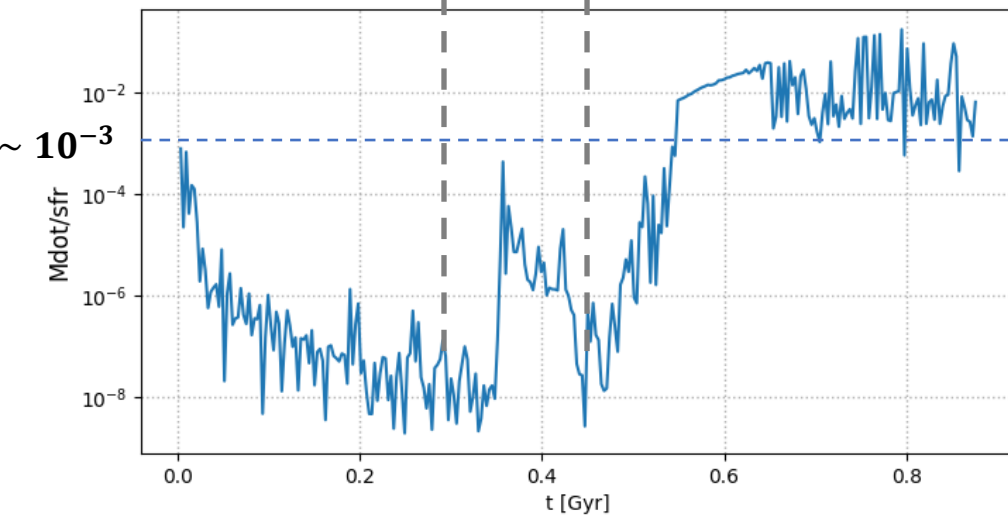
$$\text{Fraction} = t_{\text{triple (dual)}}(r_1 < r \leq r_2) / t_{\text{triple (dual)}}(\text{total})$$

# 共進化に関する議論



あまり議論は進められていないが、

- 一度目の衝突後、 $\dot{M}_{\text{BH}}$  が優勢になる
- 二度目の衝突によって  $\dot{M}_{\text{BH}}$  優勢領域が延びる



local Magorrian relation

- 銀河衝突過程における triple-AGNs の発現を、孤立系銀河衝突シミュレーションを用いて調査した
  - dual-AGNs 形成に合わせた銀河3の衝突は、triple-AGNs phase を長くし、最大で  $\Delta t_{\text{triple}} = 0.27 \text{ Gyr}$  を得ることができた
  - 角運動量輸送メカニズムを明らかにし、光度上昇と近点通過のタイムラグについて説明をした
  - 銀河3の衝突タイミングを変化させた計算を行った結果、すべての run で数百kpc スケールの triple-AGNs を形成することができた
  - 三体銀河衝突における共進化について議論した