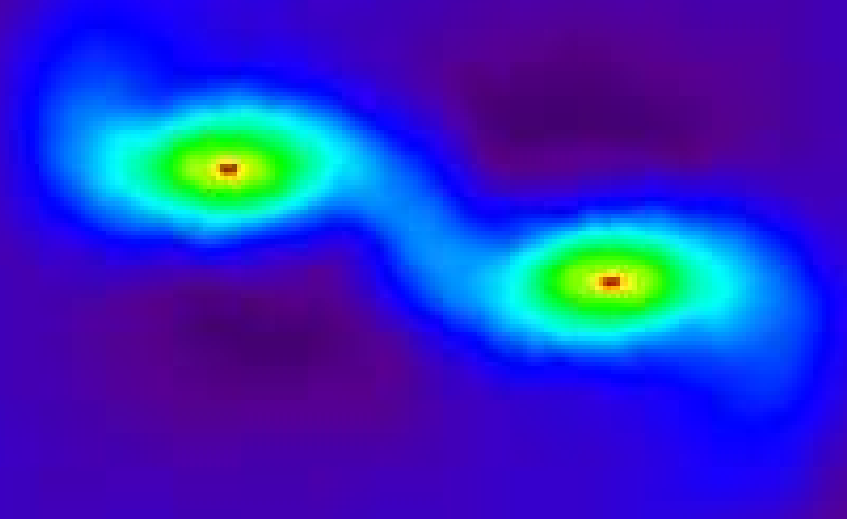


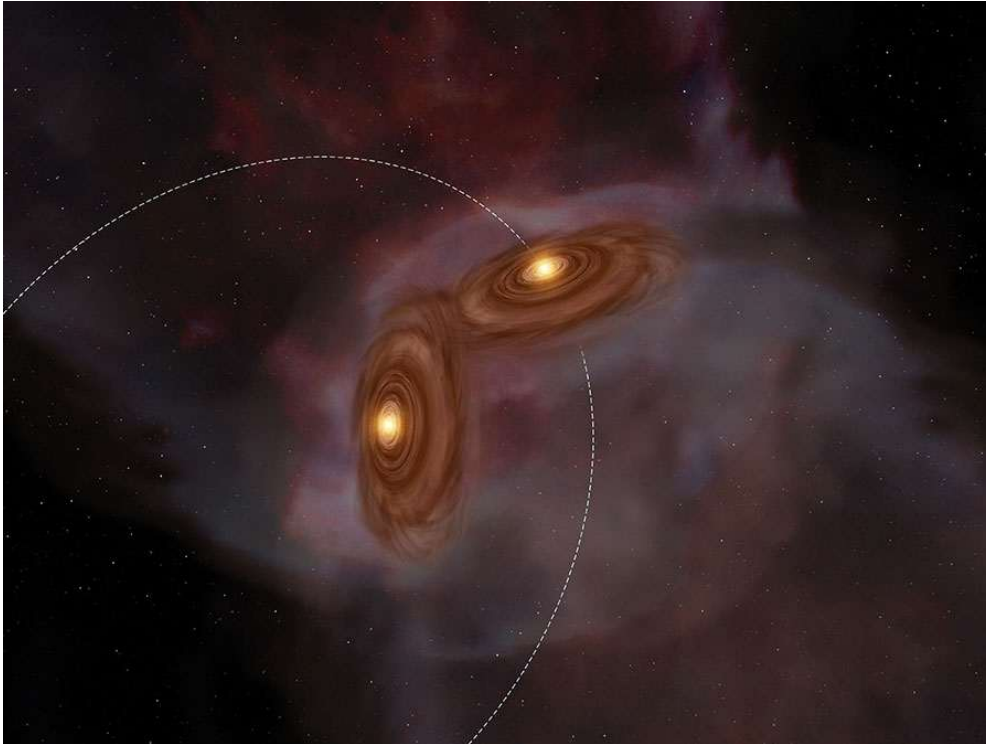
ポリトロープガス雲における 連星の種の成長過程



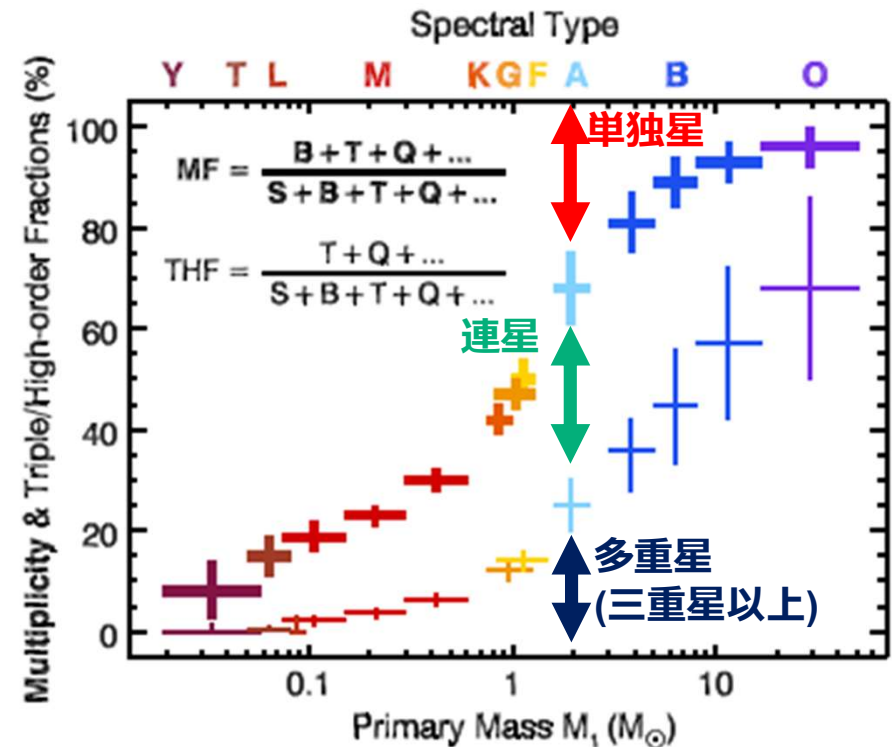
© 松永拓巳 森井健翔 釣部通
(茨城大学)

連星

2/20



連星・多重星(三重星以上)存在比

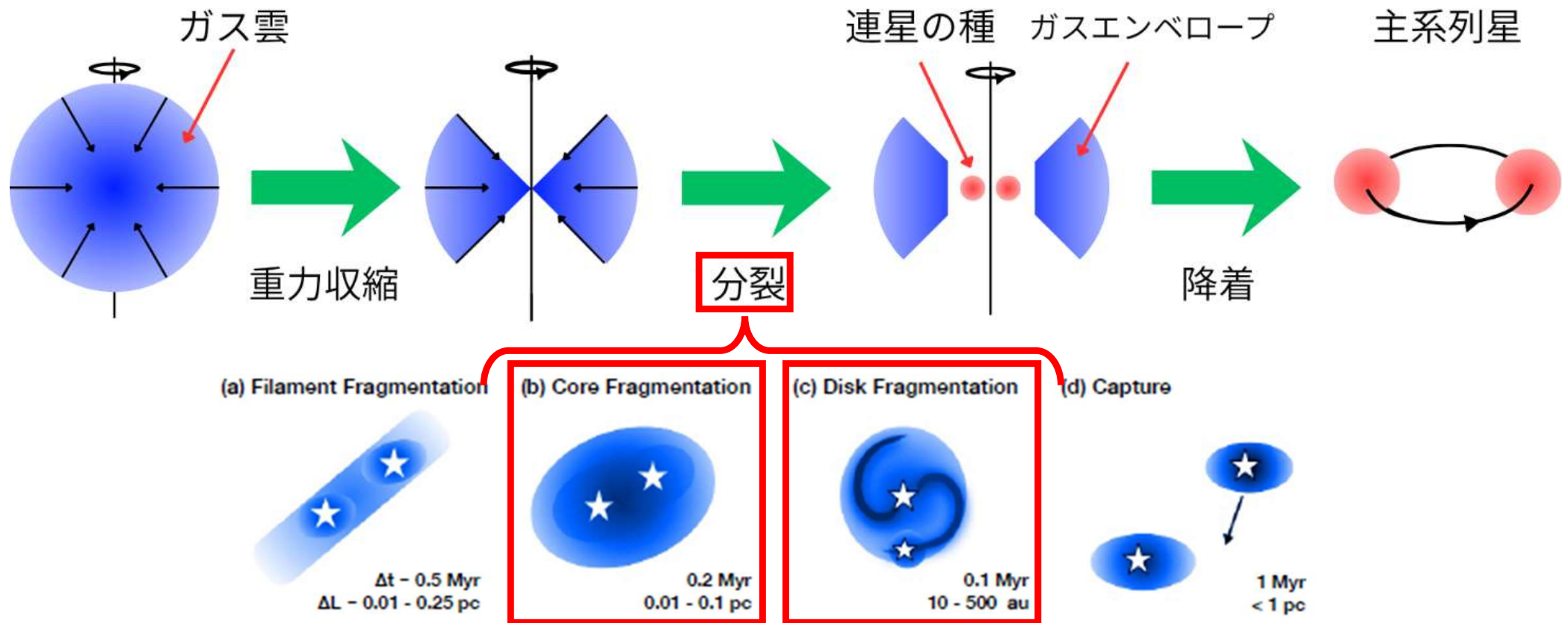


(Offner et al. 2022)

- 互いの重力の影響を受けて運動する系
 - $M_1 > M_\odot$ で多重星形成率が高い
 - 運動が単独星よりも複雑
- 連星形成過程ははっきり分かっていない

連星形成シナリオ

3/20



(Offner et al. 2022)

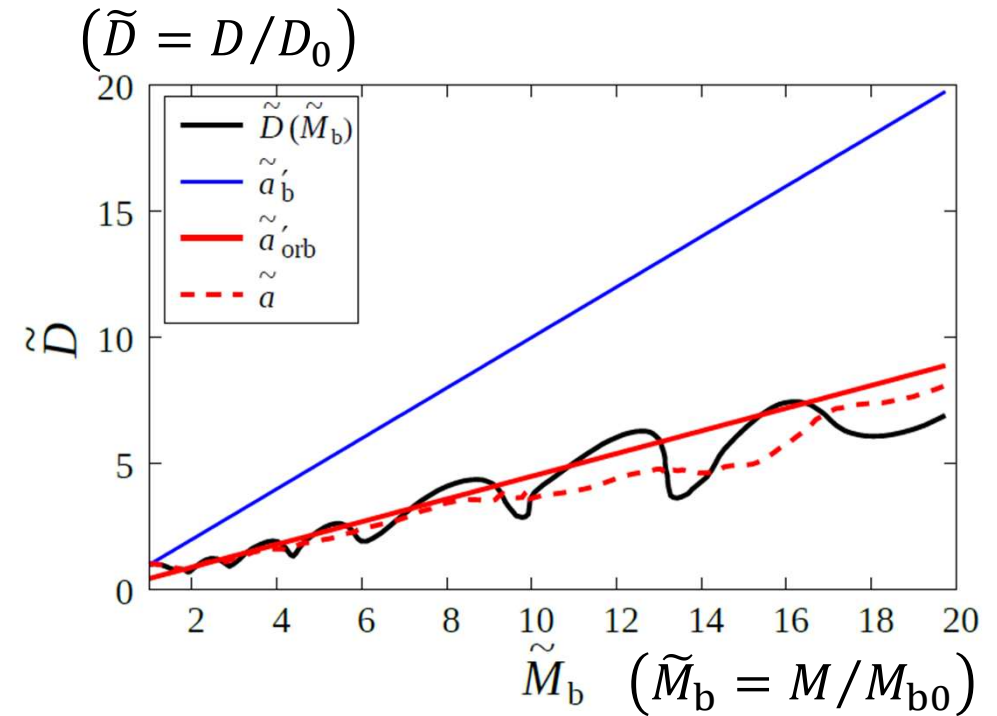
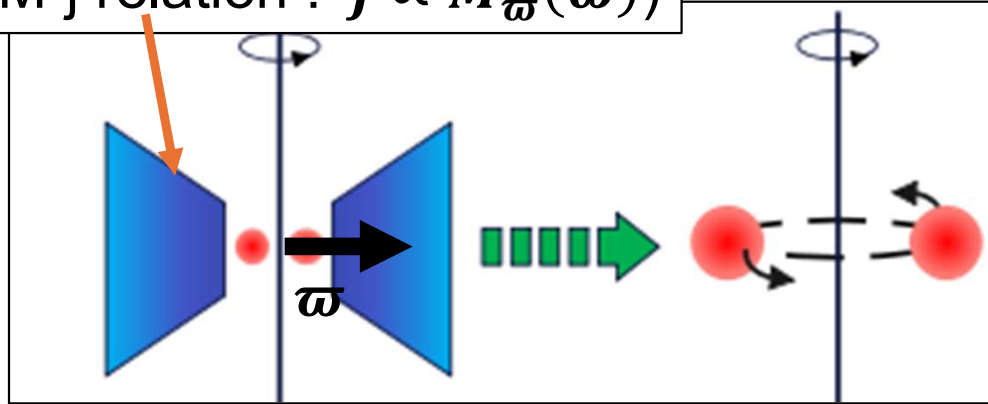
- 原始星(連星)質量 \ll エンベロープ質量
→ 連星質量、質量比、連星間距離 → **ガス降着過程で決定**

降着による連星の種の成長

4/20

回転等温ガス雲

(M-j relation : $j \propto M_{\varpi}^{\delta}(\varpi)$)



$$J_b = J_{\text{orb}} + J_{\text{spin}}$$

- ✓ 連星全角運動量 $J_b \rightarrow$ 軌道角運動量 J_{orb} とスピン角運動量 J_{spin} に分化
- ✓ 角運動量分布 δ と角運動量比 f で連星間距離 $\tilde{D} = f^2 \tilde{M}_b^{2\delta-1}$ が決定

$$\left(f \equiv \frac{J_{\text{orb}}}{J_{\text{orb}} + J_{\text{spin}}}, \quad \text{右図赤実線} \right)$$

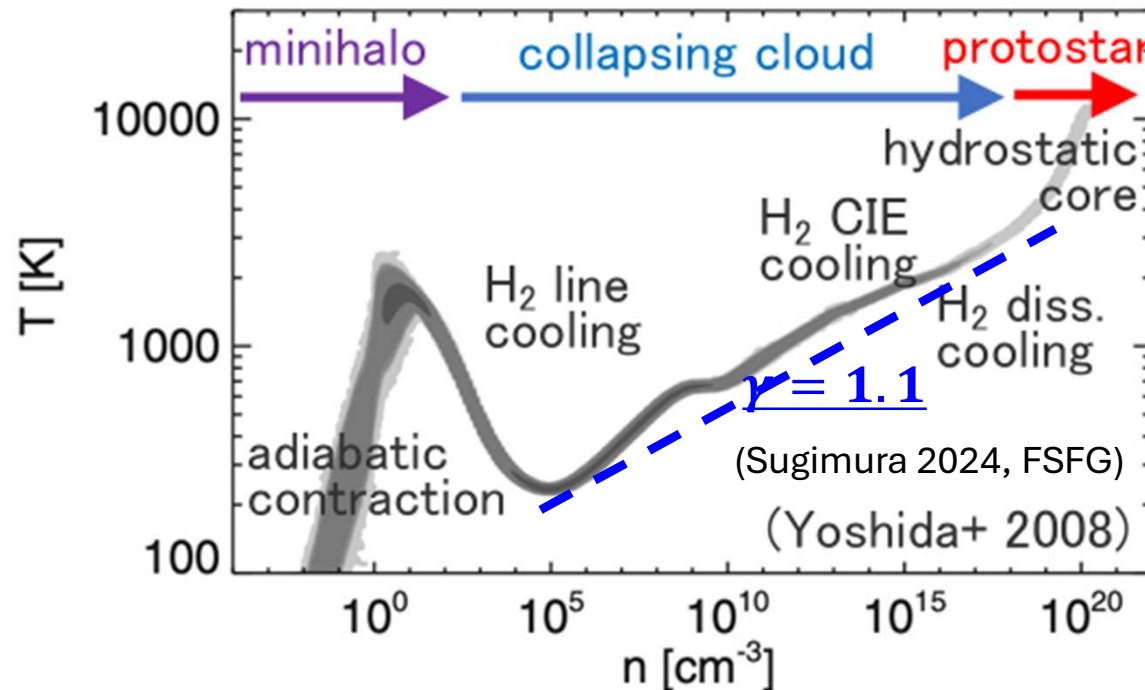
Morii & Tsuribe 2025

非等温ガス雲の場合は？

ポリトロープ

5/20

原始星形成時のガスの熱状態



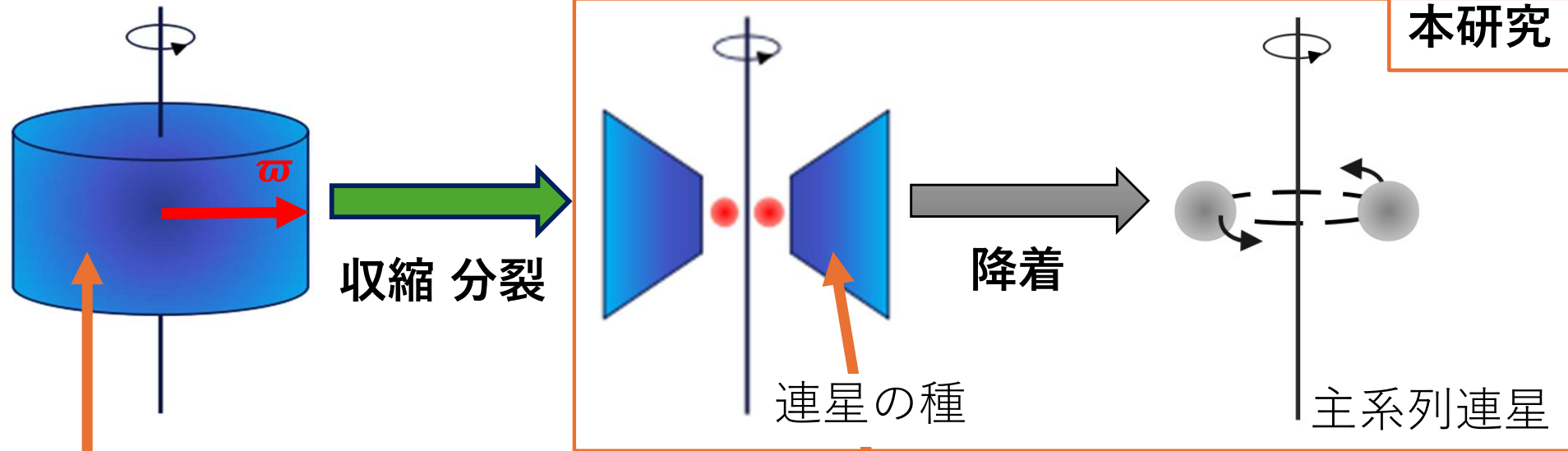
- 状態方程式 $P = K\rho^\gamma$ に従うガス雲
- 初期宇宙の星形成雲： $\gamma \approx 1.1$ が広い密度範囲で成立
- 2次元の非軸対称ガス雲における自己相似的進化は未解明
(1D：Yahil(1983)のガス球重力収縮)

本研究の目標

$P = K\rho^\gamma (\gamma = 1.1)$ に従うガス雲での連星の種の成長過程の解明

モデル設定

初期に連星の種と周囲のガス（エンベロープ）の形成を仮定



降着流モデル

比角運動量分布: $j(\varpi) \propto M_{\text{gas}}^{\delta}(\varpi)$
($M - J$ relation)

全角運動量分布: $\tilde{J}_{\text{gas}}(\varpi) \propto \tilde{M}_{\text{gas}}^{\delta+1}(\varpi)$

ガスの総質量: $M_{\text{gas,tot}} = 65M_{\text{b0}}$

角運動量分布: $\delta = 8/7$

エンベロープ

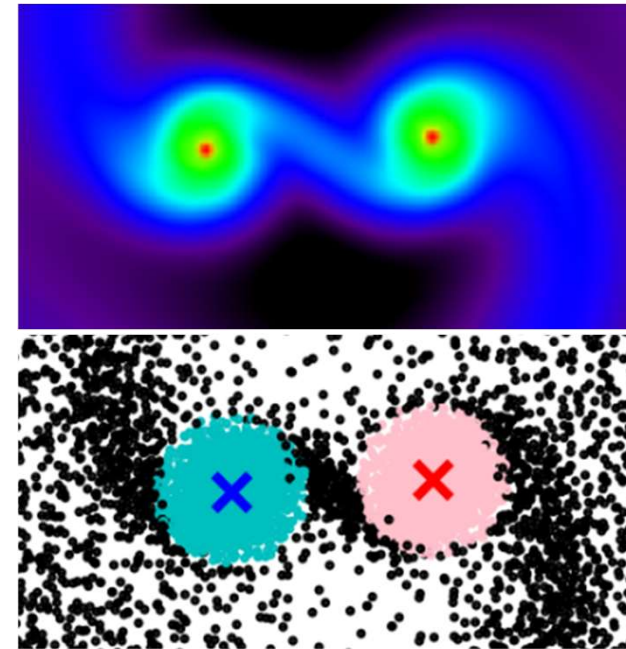
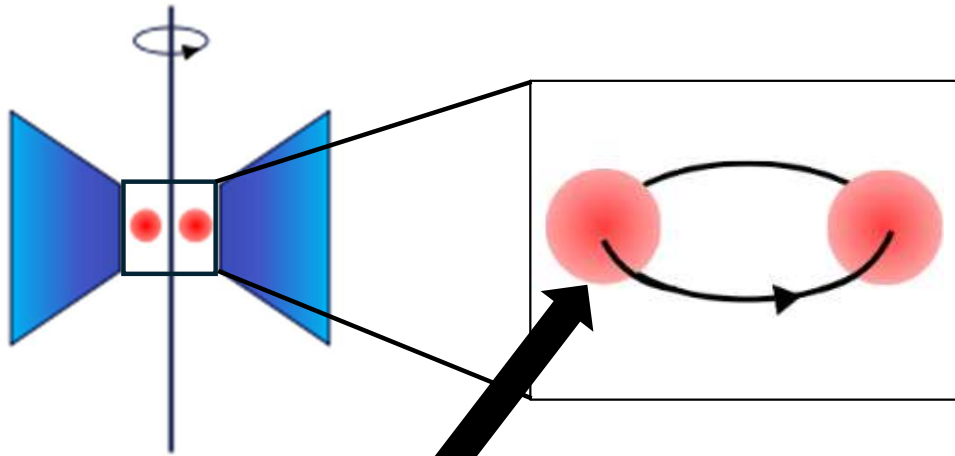
体積密度: $\rho = \begin{cases} \rho_{\text{in}}(\varpi/\varpi_{\text{in}})^{-\frac{2}{2-\gamma}} & (z \leq h) \\ 0 & (z > h) \end{cases}$

Scale height: $h = h_{\text{in}}(\varpi/\varpi_{\text{in}})$

面密度: $\Sigma = \Sigma_{\text{in}}(\varpi/\varpi_{\text{in}})^{-\frac{\gamma}{2-\gamma}}$

モデル設定(連星の種)

7/20



連星の種

初期連星間距離: $D_0 = 20\varepsilon = 1$
初期連星質量: $M_{b0} = 1$
($M_b = M_{b1} + M_{b2}$)
初期質量比: $q_0 = M_{b2}/M_{b1} = 1$
初期角速度: $\omega_k = \sqrt{GM_{b0}/D_0^3}$
(Kepler rotation)

連星の範囲はロッシュローブ内部とする

$$\begin{cases} R_1/D = 0.38 + 0.2\log(1/q) \\ R_2/D = 0.38 + 0.2\log 2 \end{cases}$$

(Paczyn'ski 1971)

↓

$$R_1 = R_2 = 0.38D$$

手法

- 数値流体計算法：3次元SPH法
- 数値計算コード：Gadget-2(Springel' 05)
- 粒子数： 1.31×10^5 粒子

基礎方程式

$$\text{連続の式：} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0$$

$$\text{運動方程式：} \frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v = -\frac{K}{\rho} \nabla \rho - \nabla \varphi$$

$$\text{ポアソン方程式：} \nabla^2 \varphi = 4\pi G \rho$$

$$\text{状態方程式：} P = K \rho^\gamma \text{ (ポリトロープ, } \gamma = 1.1, \frac{K}{\sqrt{GM_0/D_0}} = 0.45^2)$$

- 磁場、輻射は考慮しない
- sink particle 不使用

重力ソフトニング($\varepsilon = 0.05$)

$$F_i = - \sum_{j \neq i} \frac{m_i m_j}{(|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|^2 + \varepsilon^2)^{\frac{3}{2}}} (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)$$

自己相似的進化

9/20

分子雲ガスの自己相似的な進化を取り扱った研究

		等温ガス雲	ガス雲($P = K\rho^\gamma$)
回転無し(球対称)		Larson-Penston(1969)	Yahil(1983)
回転有 ($j \propto M_\varpi^\delta$)	軸対称	Saigo&Hanawa(1998) ($\delta = 1$)	
	非軸対称	Morii&Tsuribe(2025) ($\delta = 1$)	本研究($\delta = 8/7$)

回転するガス雲($P = K\rho^\gamma, \gamma = 1.1$, 角運動量分布 $j \propto M_r^\delta$)において

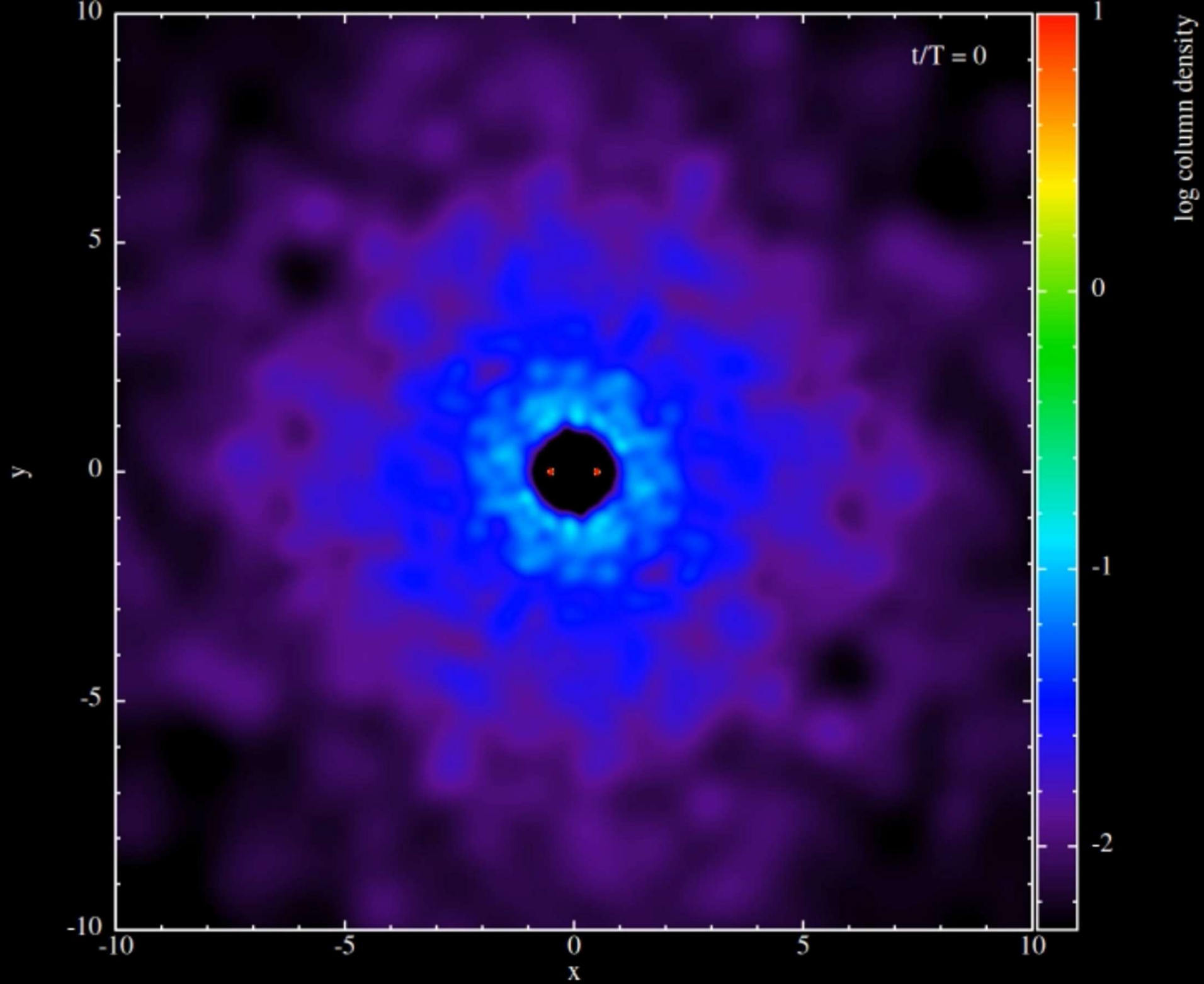
- 重力、圧力、遠心力の冪数が一致することを仮定。

$$\left(F_G, F_P \propto \varpi^{-\frac{11}{9}}, F_C \propto \varpi^{\frac{14}{9}\delta-3} \right)$$

→ $\delta = 8/7$ でスケーリングが一致。

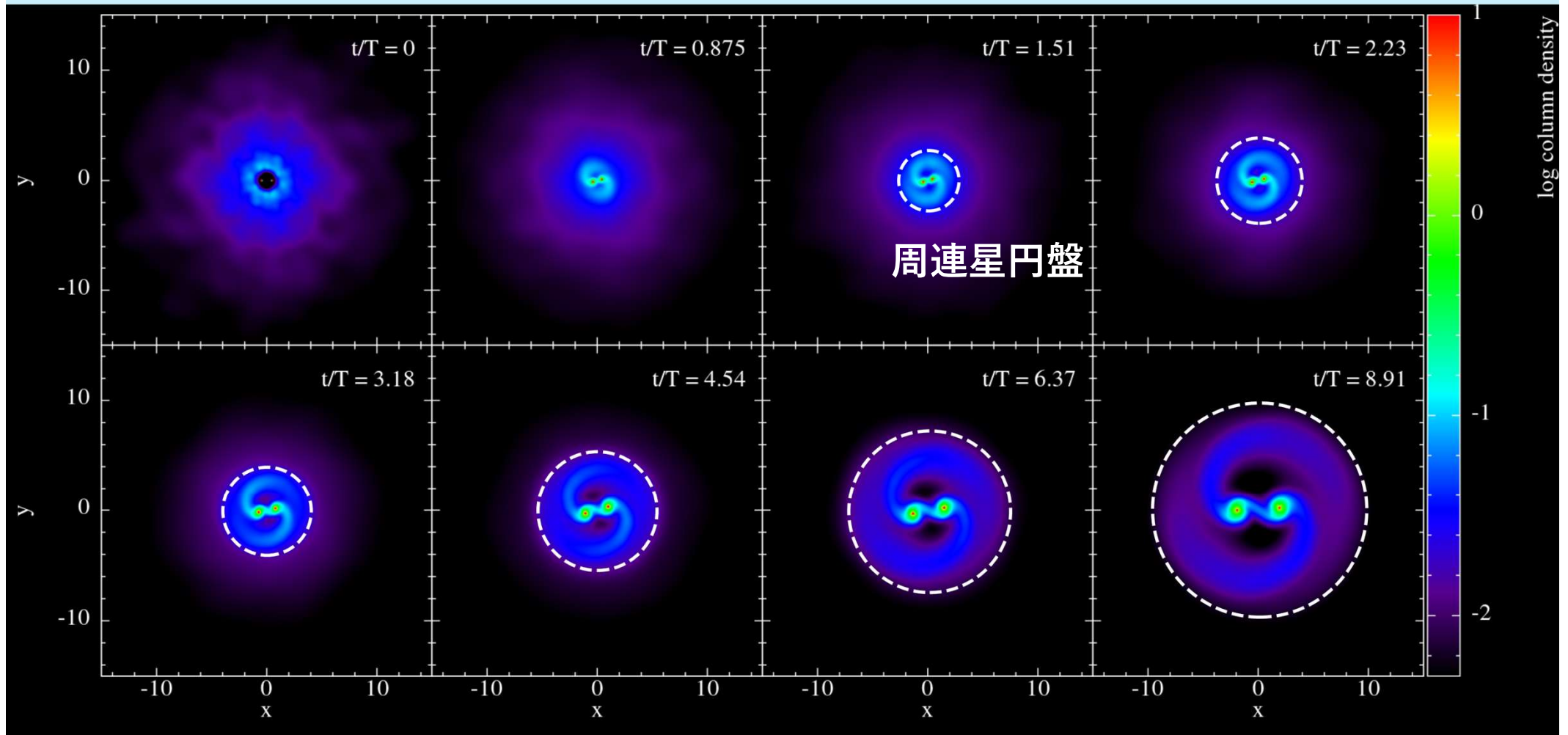
$\delta = 8/7$ において、自己相似的な進化をする可能性が高い！

(以降、 $\delta = 8/7$ での連星成長の結果を示す)



時間発展の概観($\delta=8/7$)

10/20

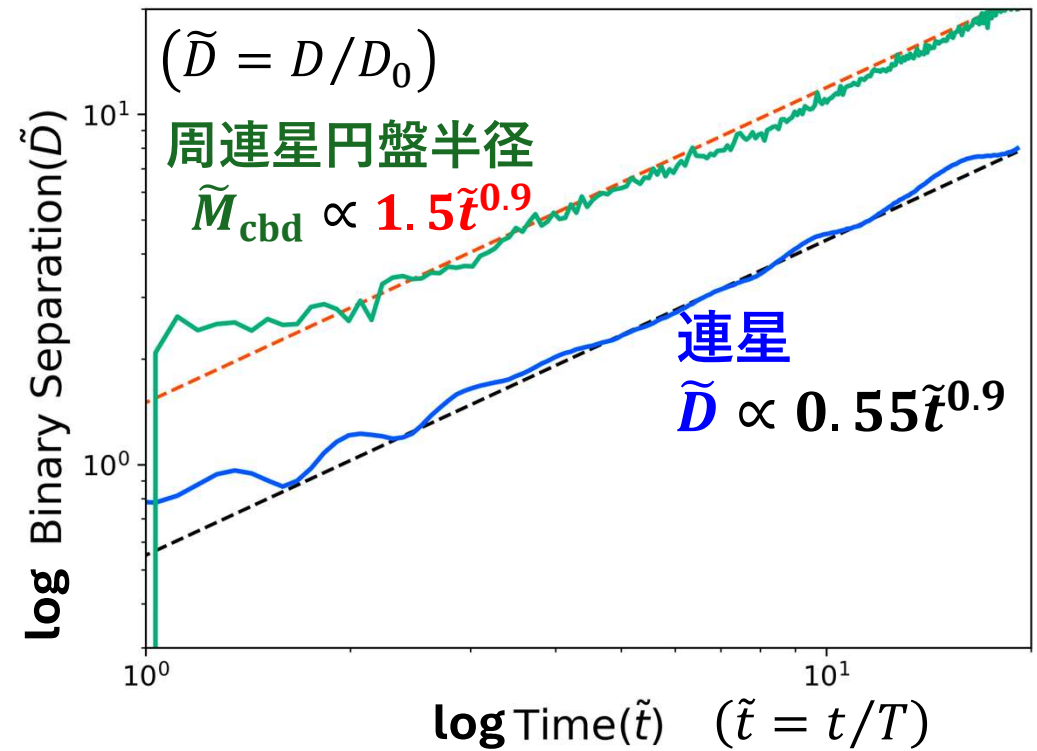
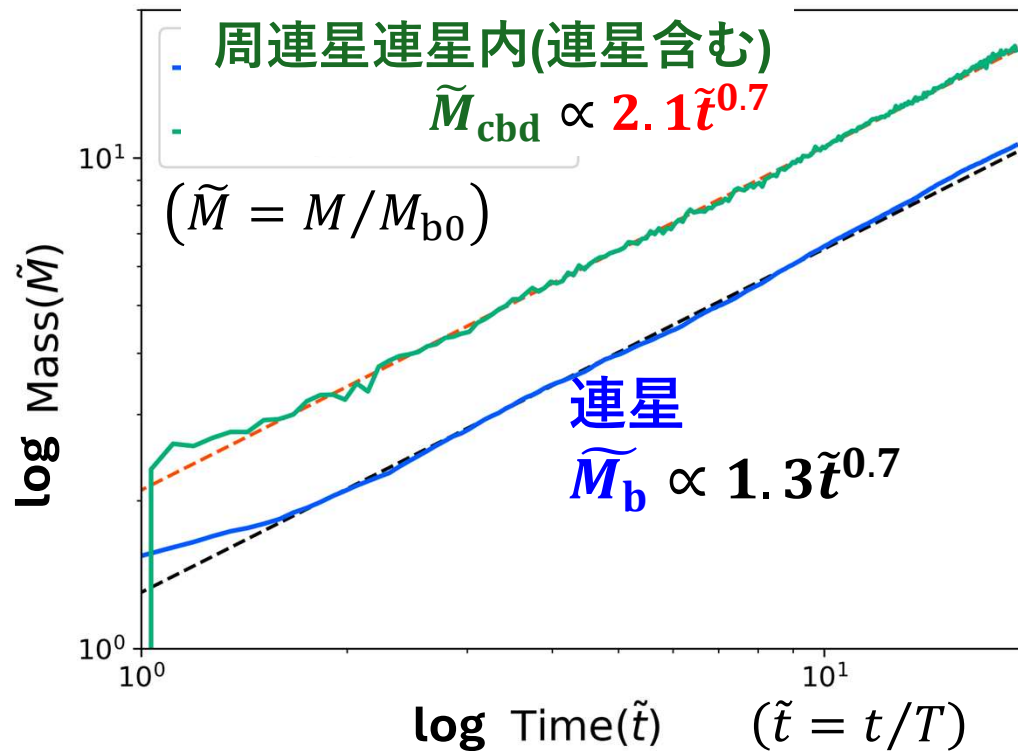


※左上から順に、0周、1周、2周、...、7周

- 連星質量、連星間距離が時間とともに成長。
- 周連星円盤の半径が成長。

連星質量・連星間距離の進化

11/20



連星質量

- $\tilde{M}_b \sim 1.3\tilde{t}^{0.7}$ で増加
- 初期の10倍まで成長($\tilde{t} = 19$)
→ **Yahil(1983)の自己相似解と一致** ($\tilde{M}_b \propto \tilde{t}^{0.7}$)

周連星円盤質量(連星除く)

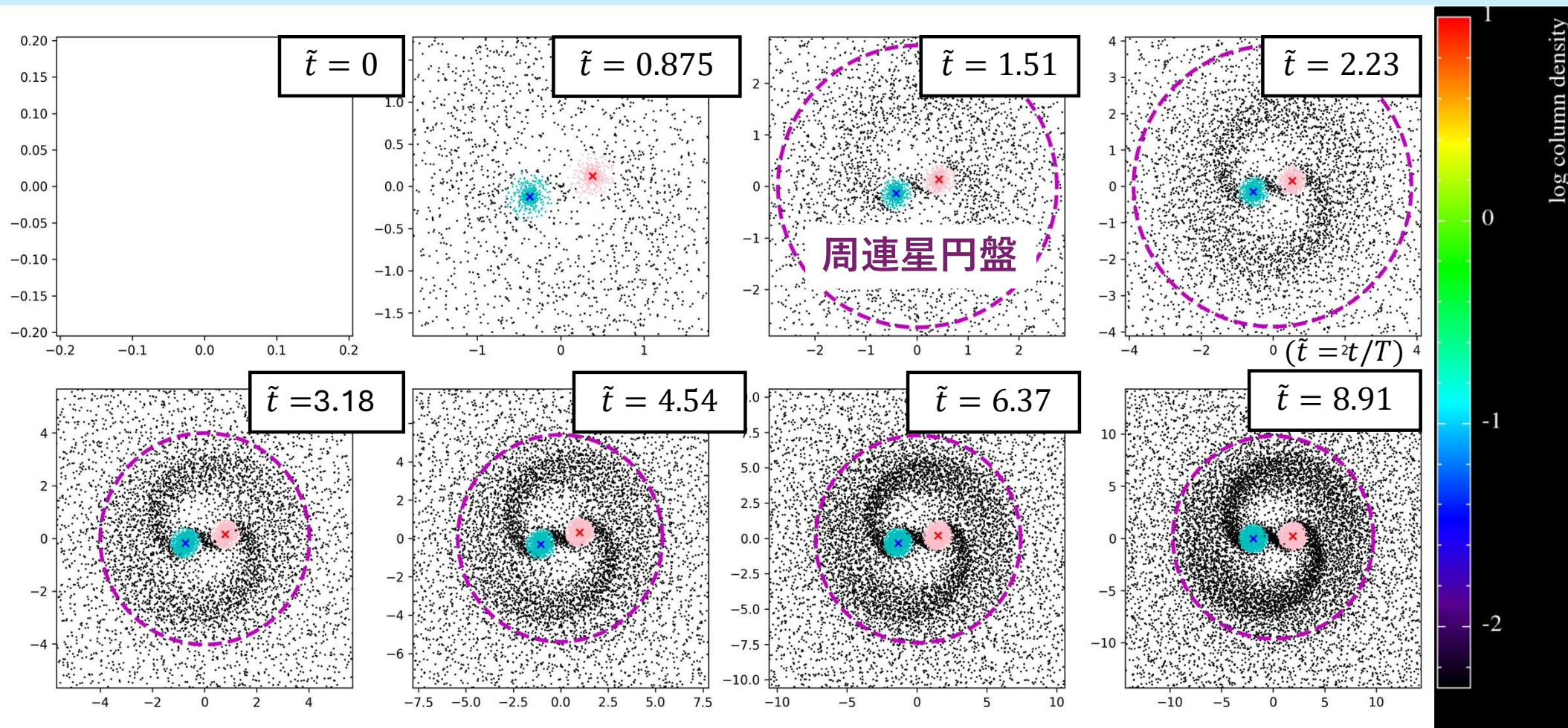
- 連星質量の6割程度

連星間距離

- $\tilde{D}_b \sim 0.55\tilde{t}^{0.9}$ で成長
- 初期の8倍まで成長($\tilde{t} = 19$)
- ※ **周連星円盤半径**
- $\tilde{D}_{\text{cbd}} \propto 1.5\tilde{t}^{0.9}$ で成長
(連星間距離の2.5倍)

自己相似的進化

12/20

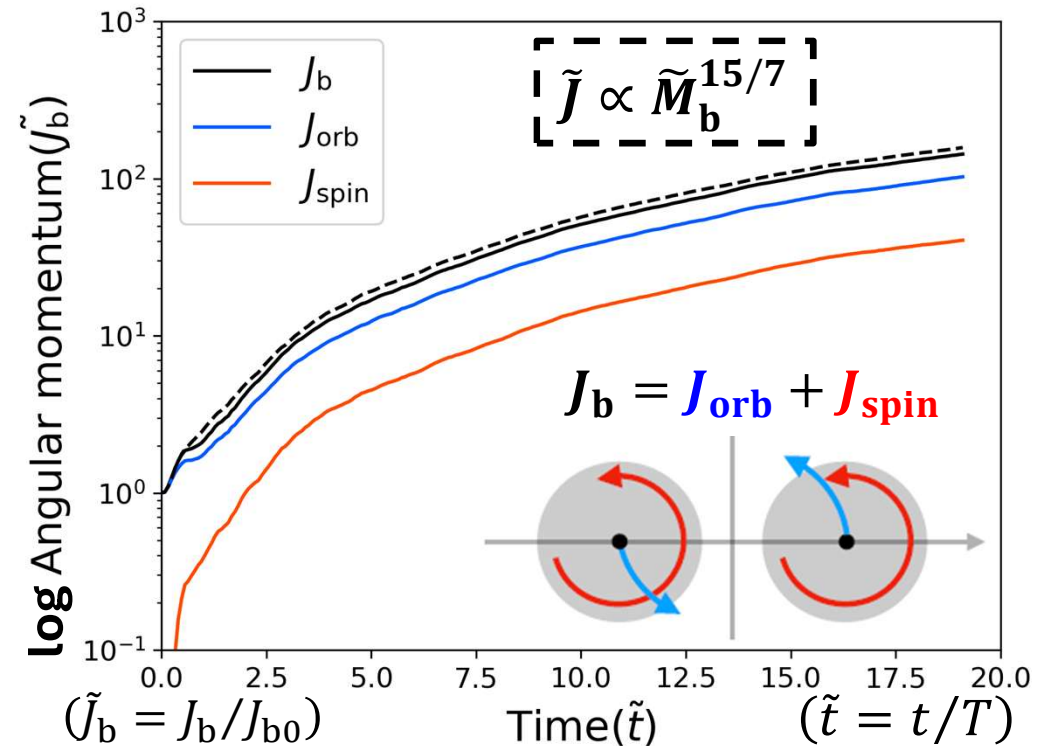
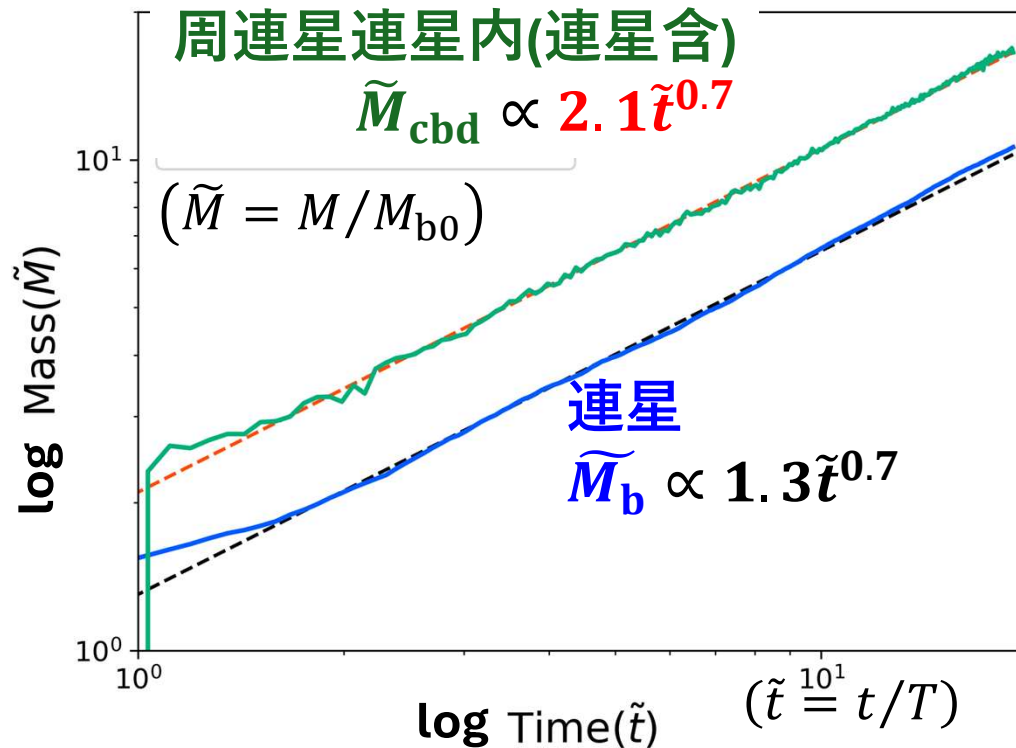


座標系を $\tilde{t}^{0.9}$ で規格化

→ 連星間距離、周連星円盤の半径が概ね一致(下段)
(自己相似的進化の特徴)

角運動量進化

13/20



連星質量

- $\tilde{M}_{\text{b}} \sim 1.3 \tilde{t}^{0.7}$ で増加
- 初期の**10倍**まで成長($\tilde{t} = 19$)

周連星円盤質量(連星除く)

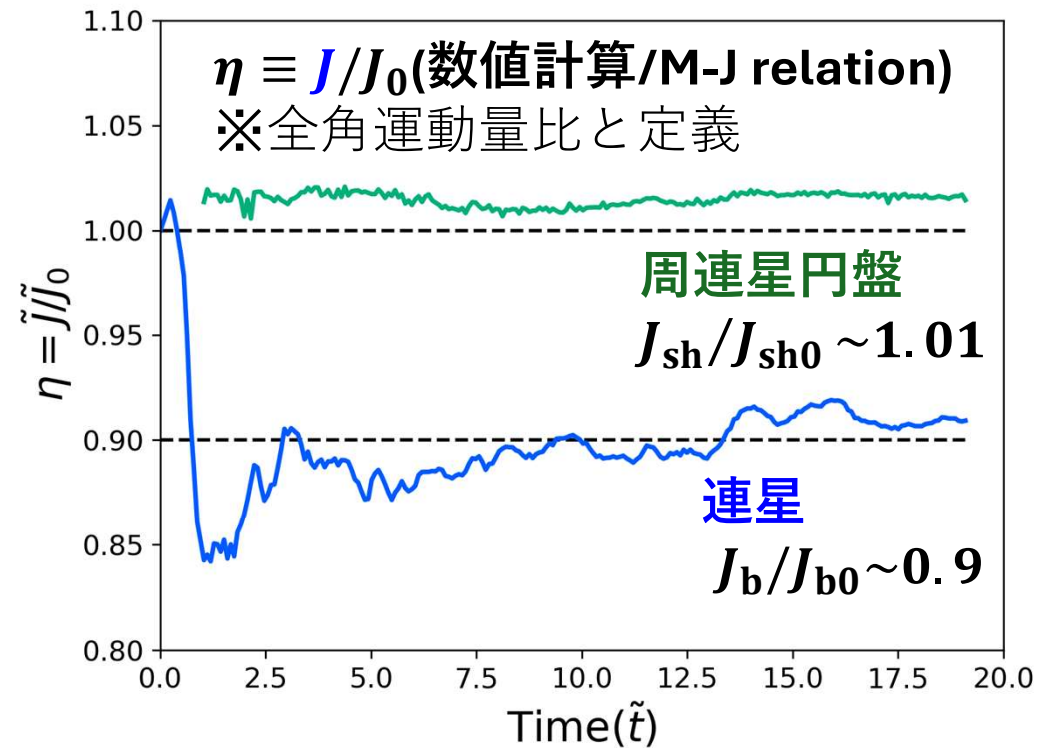
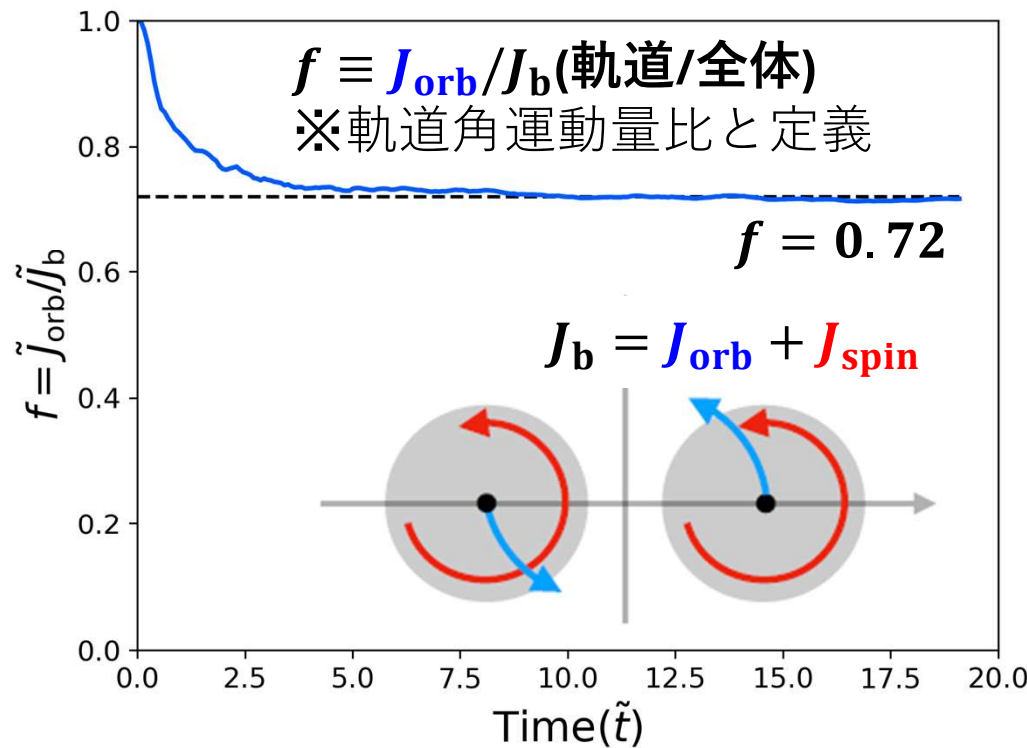
- 連星質量の**6割**程度

角運動量

- 概ね $\tilde{J}_{\text{b}} \propto \tilde{M}_{\text{b}}^{15/7}$ で成長。
→ ガス雲の初期角運動量分布と一致
($\tilde{J}_{\text{gas}}(\varpi) \propto \tilde{M}_{\text{gas}}^{\delta+1}(\varpi)$)
- 初期の**140倍**まで成長($\tilde{t} = 19$)

角運動量進化

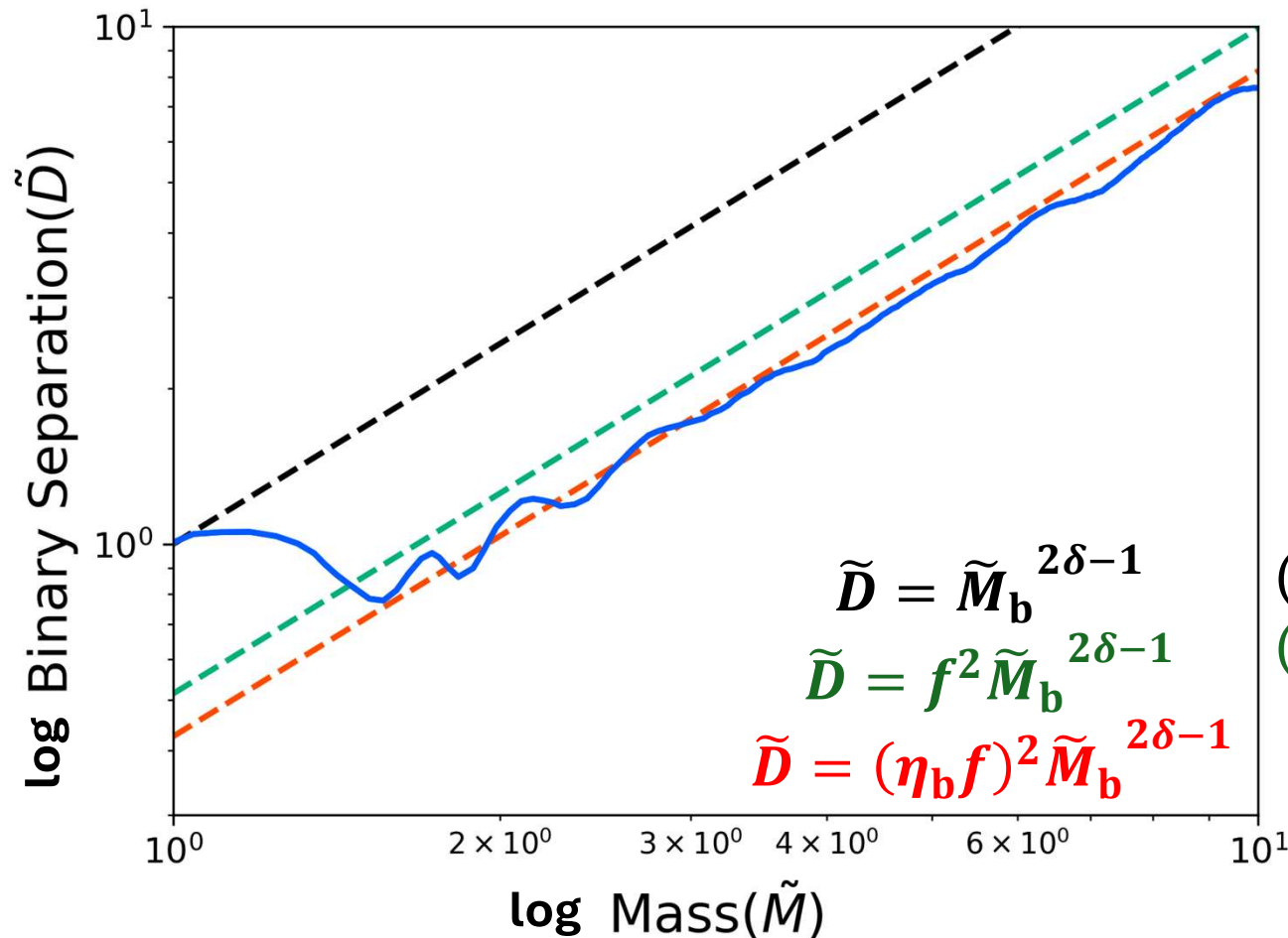
14/20



- 連星の軌道角運動量比 : $J_{\text{orb}}/J_b \sim 0.72$ (左図)
→ 一定の値に収束 (等温では0.66程度)
- 連星の全角運動量比 : $J_b/J_{b0} \sim 0.9$ (右図)
※ J_{b0} : M-J relationに基づいた初期角運動量 $J_{b0} = J_0 \tilde{M}_b^{\delta+1}$
- 連星 + 周連星円盤 では角運動量保存 $J_{\text{sh}}/J_{\text{sh}0} \sim 1.01$
→ 連星角運動量の一部が周連星円盤に輸送

連星間距離の質量変化

15/20



$$\left(\begin{array}{l} \delta = 8/7 \\ f = J_{\text{orb}}/J_b \sim 0.72 \\ \eta_b = J_b/J_{b0} \sim 0.9 \end{array} \right)$$

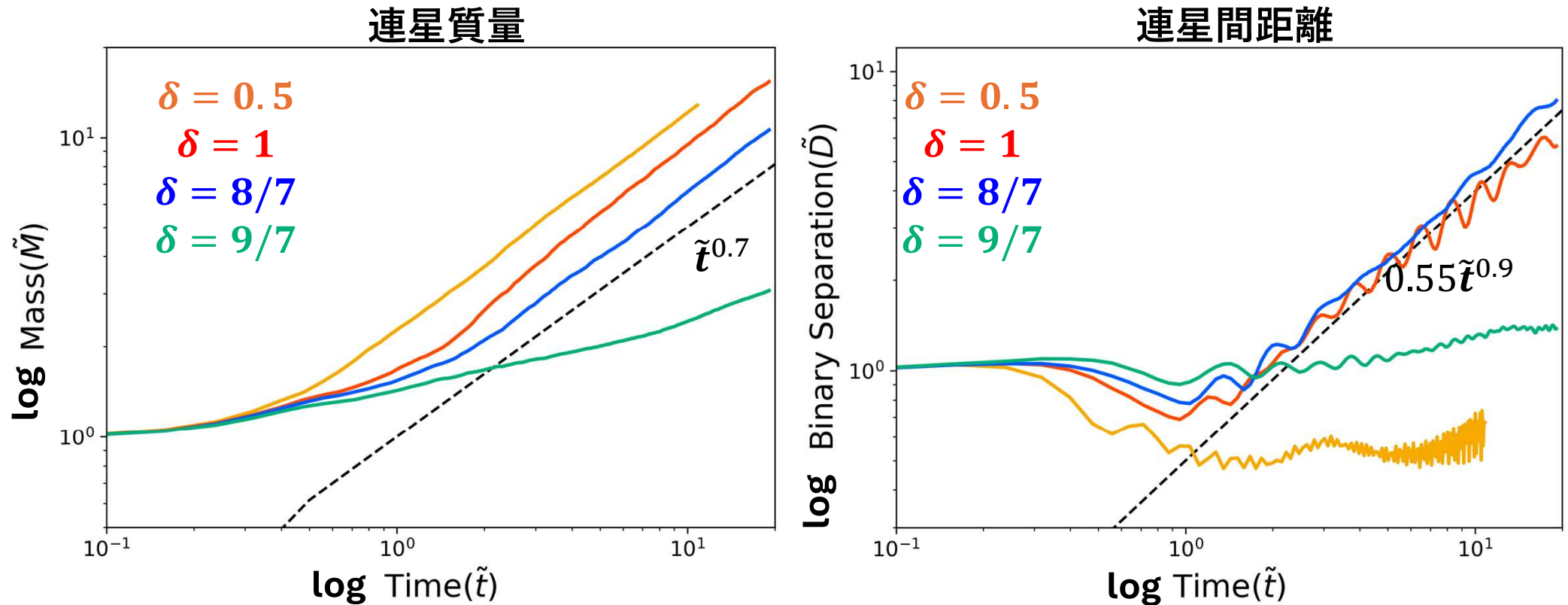
(Bate et al.(2000))
(Morii & Tsuribe(2025))

- ① 降着ガスの角運動量の分化を考慮しない場合(黒線)
- ② 降着ガスの角運動量の分配(軌道角運動量比 f)を考慮(緑線)
- ③ ①に加え、連星から周連星円盤への角運動量輸送を考慮(赤線)

f, η_b が連星間距離の変化を左右する

角運動量分布依存性

17/20

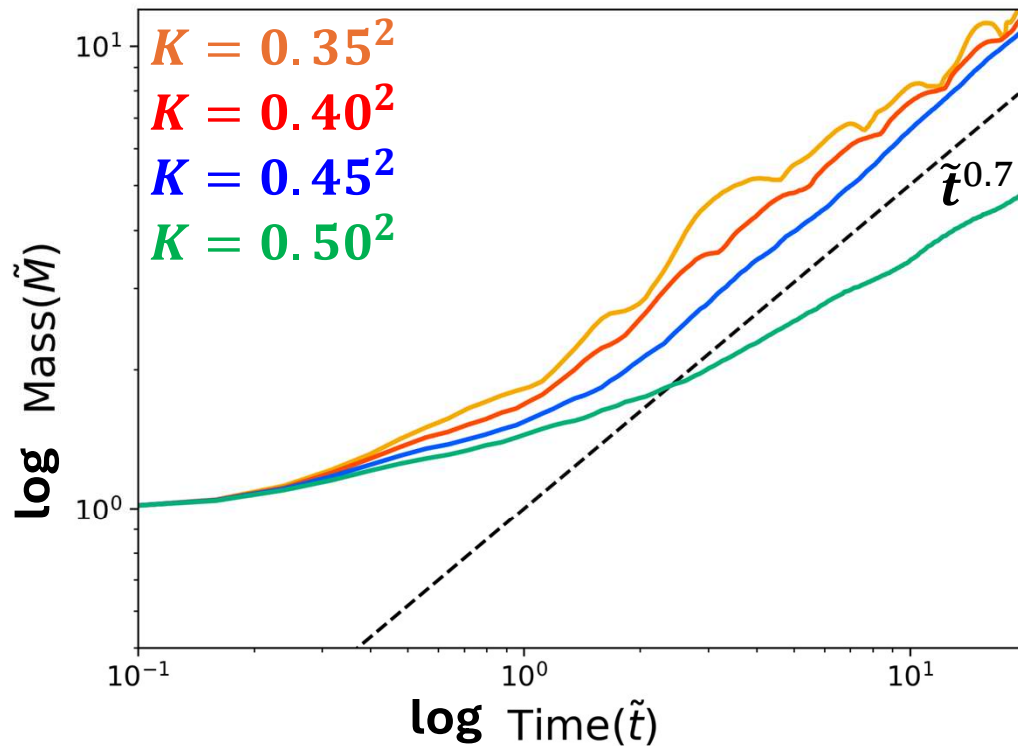


$\delta(j \propto M_{\omega}^{\delta})$	連星質量	連星間距離
$\delta = 0.5$	$\tilde{M}_b \propto \tilde{t}^{0.7}$ で成長	ほぼ一定の値に収束
$\delta = 1$	$\tilde{M}_b \propto \tilde{t}^{0.7}$ で成長	$\tilde{M}_b \propto \tilde{t}^{0.8 \sim 0.9}$ で成長(振動)
$\delta = 8/7$ (本研究)	$\tilde{M}_b \propto \tilde{t}^{0.7}$ で成長。	$\tilde{D} \propto \tilde{t}^{0.9}$ で成長
$\delta = 9/7$	緩やかに成長	緩やかに成長

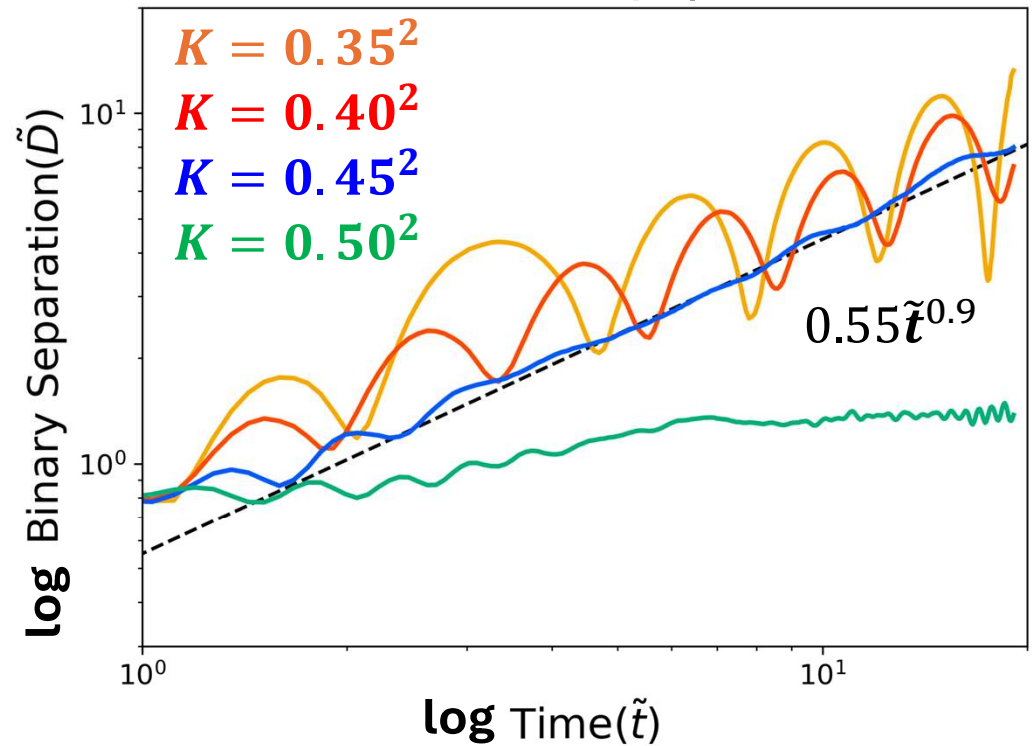
ポリトロープ定数依存性

18/20

連星質量



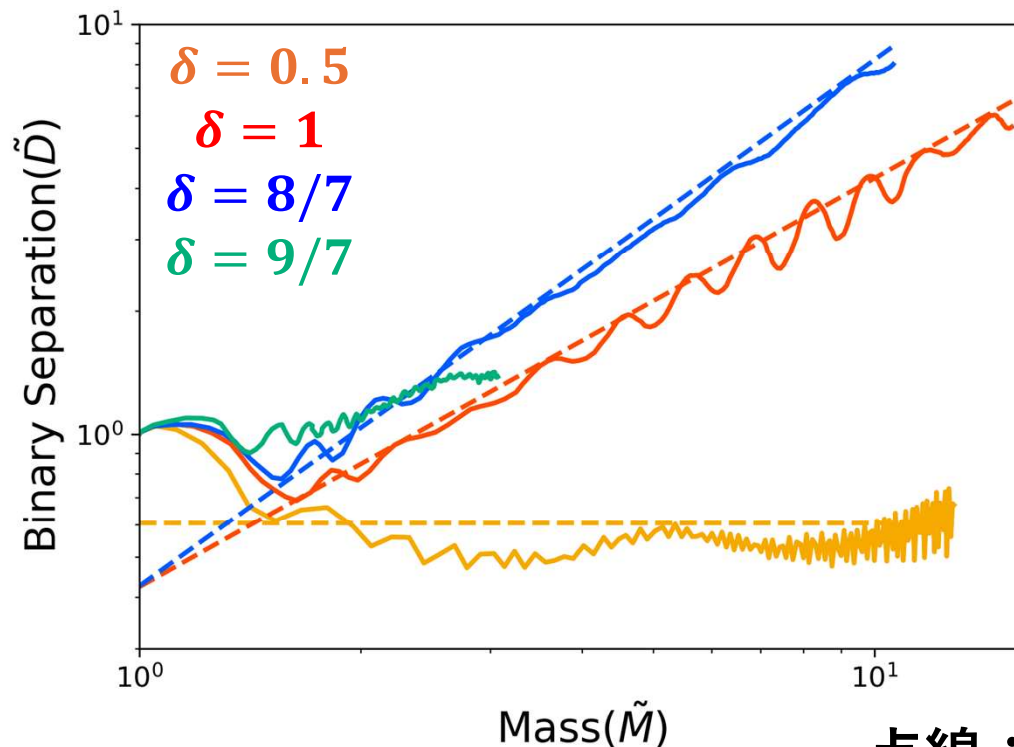
連星間距離



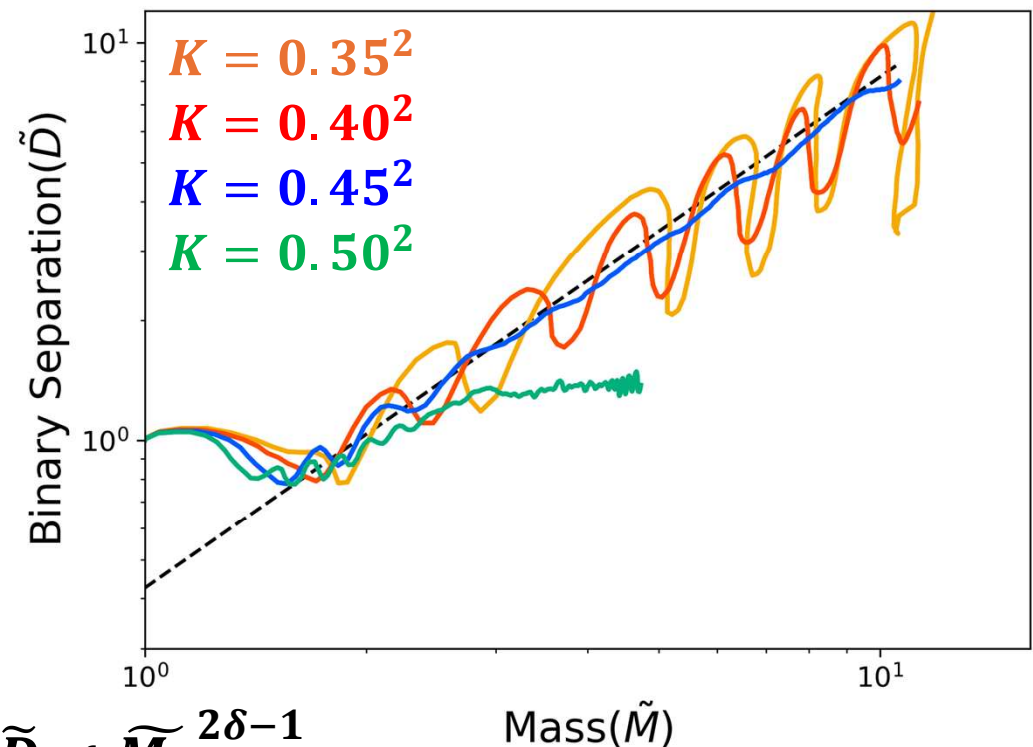
$K(P = K\rho^\gamma)$	連星質量	連星間距離
$K = 0.35^2, 0.40^2$	$\tilde{M}_b \propto \tilde{t}^{0.7}$ で成長(振動)	$\tilde{D} \propto \tilde{t}^{0.9}$ で成長(振動)
$K = 0.45^2$ (本研究)	$\tilde{M}_b \propto \tilde{t}^{0.7}$ で成長	$\tilde{D} \propto \tilde{t}^{0.9}$ で成長
$K = 0.50^2$	緩やかに成長	ほぼ一定の値に収束

連星間距離の質量進化(δ, K 依存性) 19/20

連星間距離($K = 0.45^2$ 固定)



連星間距離($\delta = 8/7$ 固定)



点線: $\tilde{D} \propto \tilde{M}_b^{2\delta-1}$

- δ, K のパラメータを変えた場合
→ほとんどの場合で $\tilde{D} \propto \tilde{M}_b^{2\delta-1}$ が満たされる

- ①角運動量分布 δ は連星間距離の成長に作用
- ② K は連星軌道の離心率に影響?

ポリトロープ関係式($P = K\rho^{1.1}$)に従う自己重力ガス雲での連星の種の成長について、角運動量分布 $j \propto M_{\text{w}}^{\delta}$ を考慮し調査。

<数値計算結果 ($\delta = 8/7$)>

- **連星質量, 連星間距離**がそれぞれ $\widetilde{M}_b \propto \tilde{t}^{0.7}, \widetilde{D} \propto \tilde{t}^{0.9}$ で成長。
- 連星の種、周連星円盤が自己相似的に成長。
- 降着ガスの角運動量の**分配比率**が一定の値に収束
($f \equiv J_{\text{orb}}/J_b \sim 0.72$)
- M-J relationに基づいた**初期角運動量**と**全角運動量**の数値計算結果の比率が一定の値に収束 ($\eta \equiv J_b/J_{b0} \sim 0.9$)
(**連星角運動量の一部が周連星円盤に輸送**)
- 角運動量の輸送を考慮した関係式($\widetilde{D} = (\eta f)^2 \widetilde{M}_b^{2\delta-1}$)で連星間距離を近似可能