

星団形成過程における 原始連星の力学進化

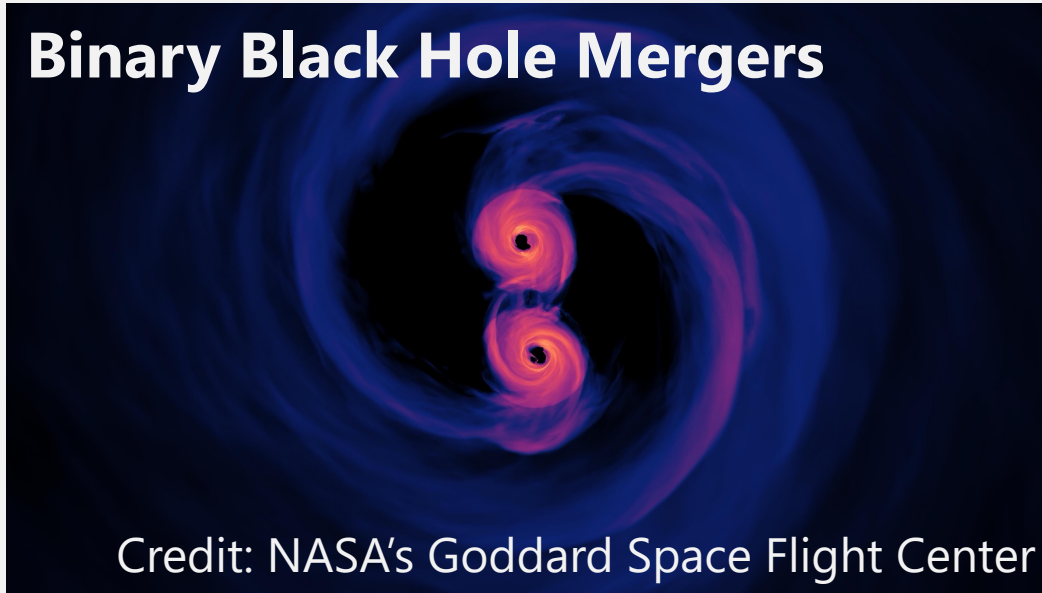
*Dynamical evolution of primordial binary
during star cluster formation*

原田直人¹, 藤井通子¹, 斎藤貴之², 平居悠³

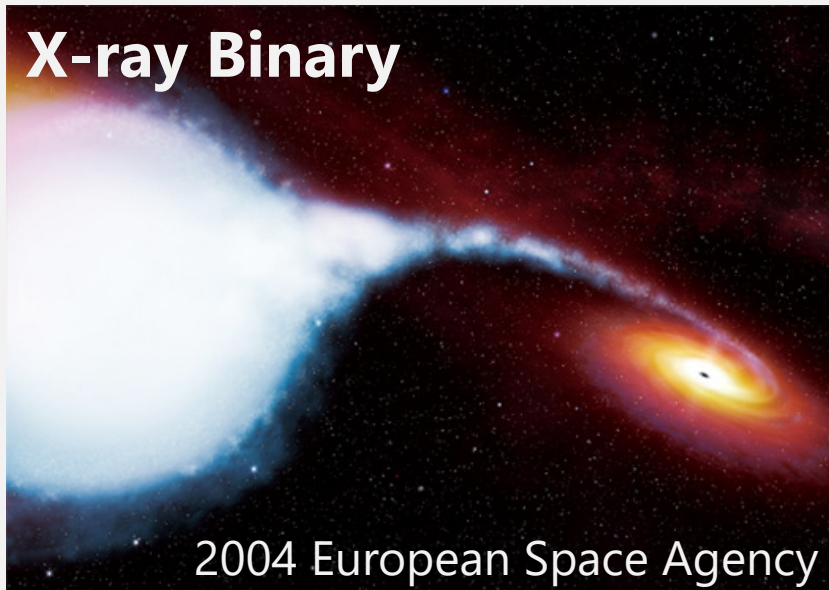
¹東京大学, ²神戸大学, ³東北公益文科大学

連星は普遍的

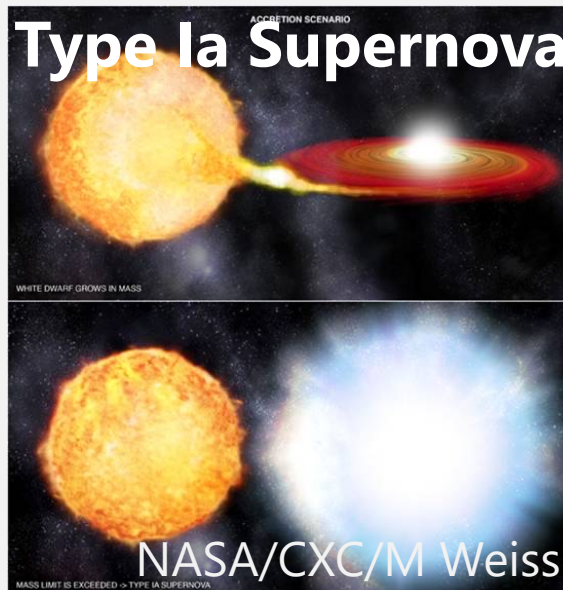
Binary Black Hole Mergers



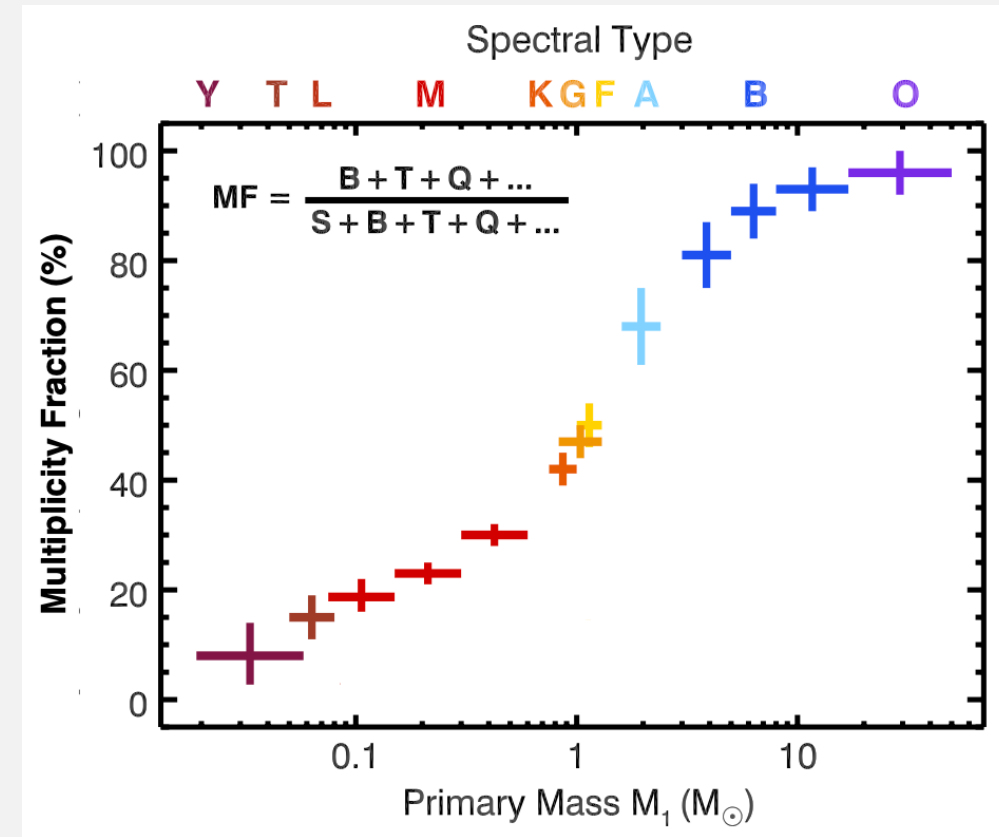
X-ray Binary



Type Ia Supernova

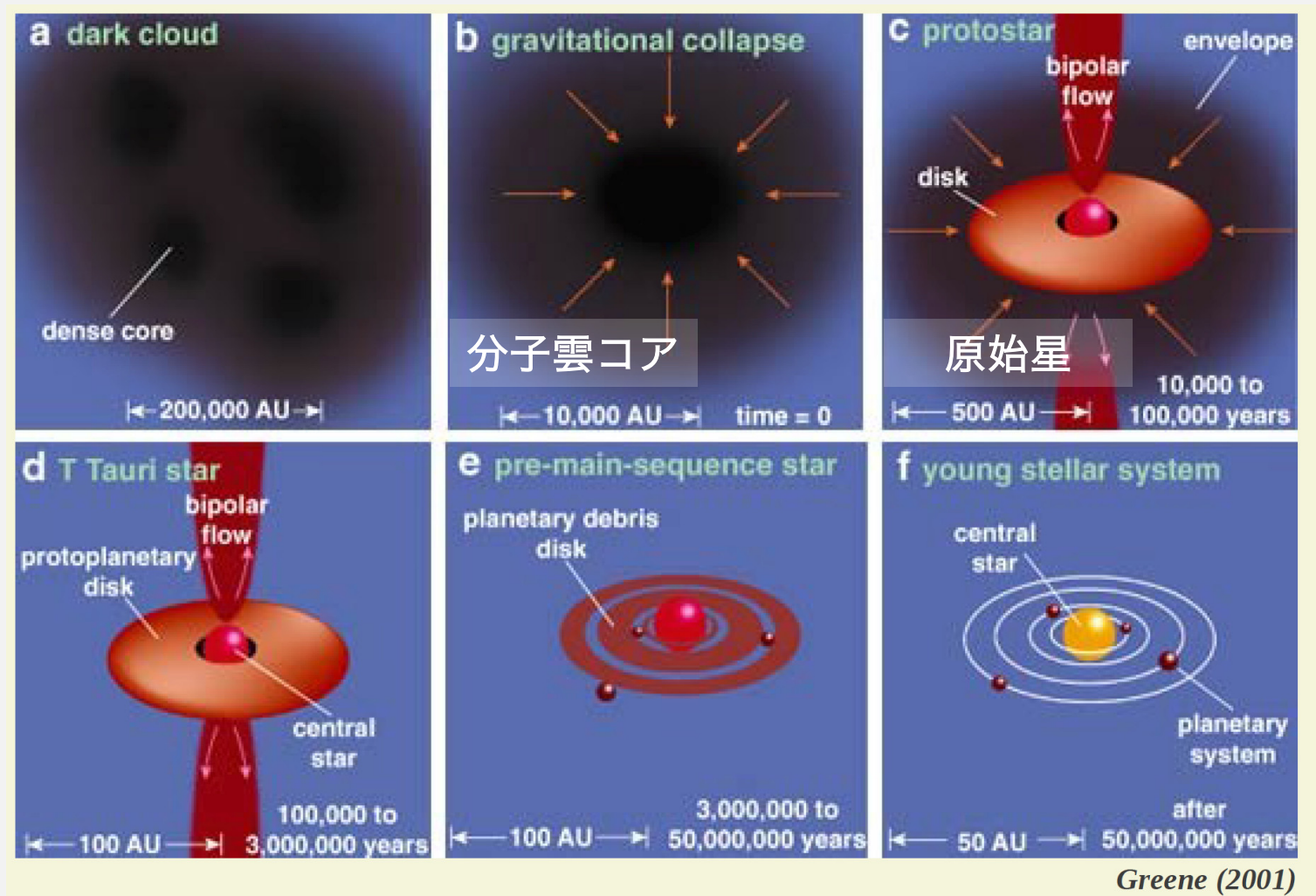
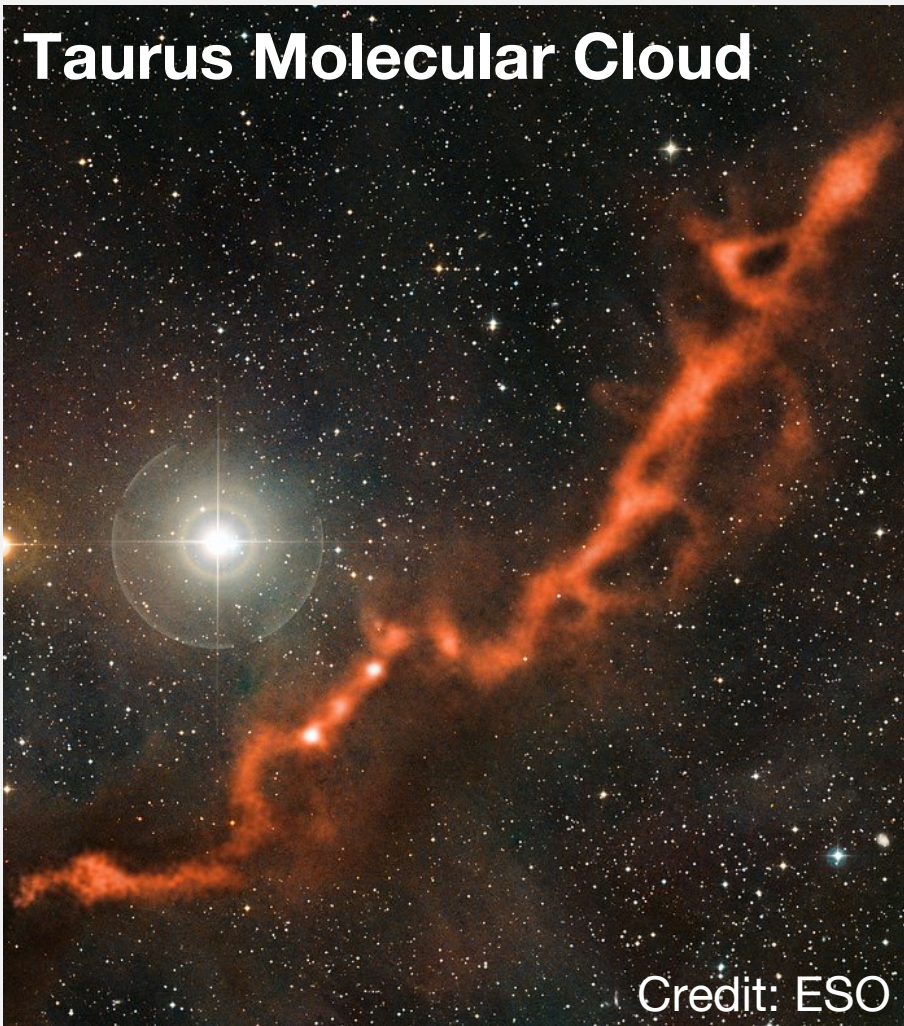


主系列星の多重星率



Offner et al. (2023)

星/惑星形成過程の描像

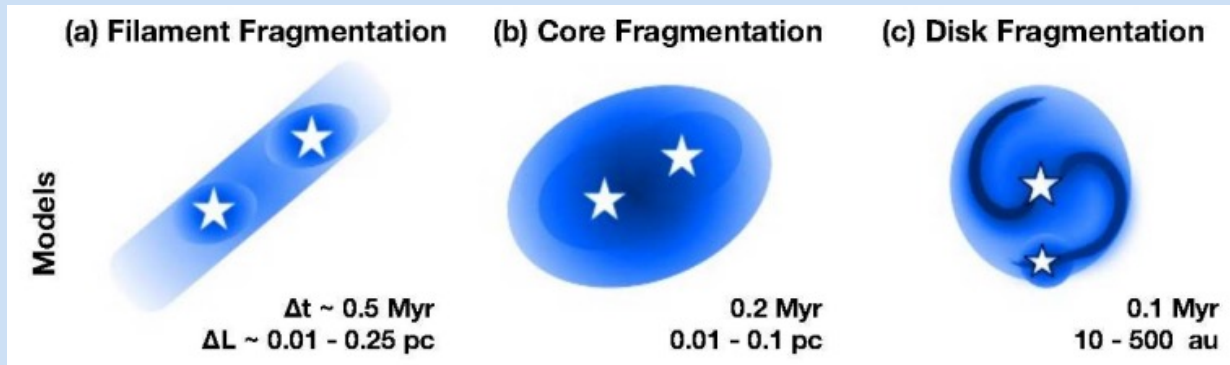


連星と星形成・惑星形成

星形成へのインパクト

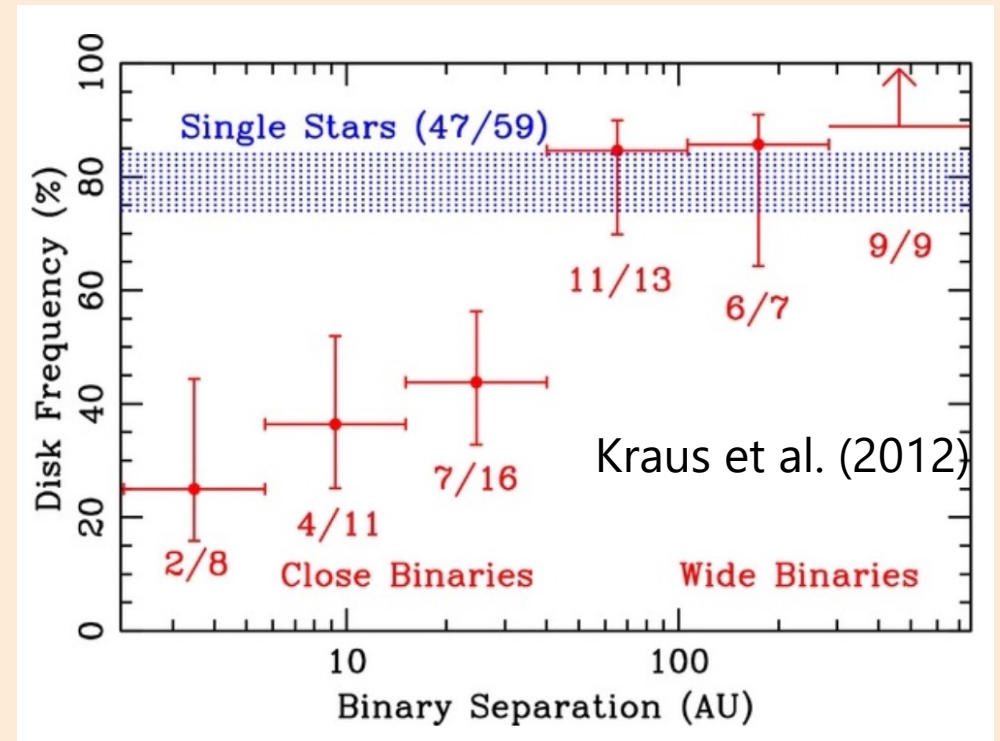
連星の周期, 軌道長半径...は
星形成時の状況や連星形成メカニズムへの
示唆を与える

連星形成メカニズム：
分子雲/コア/円盤の分裂



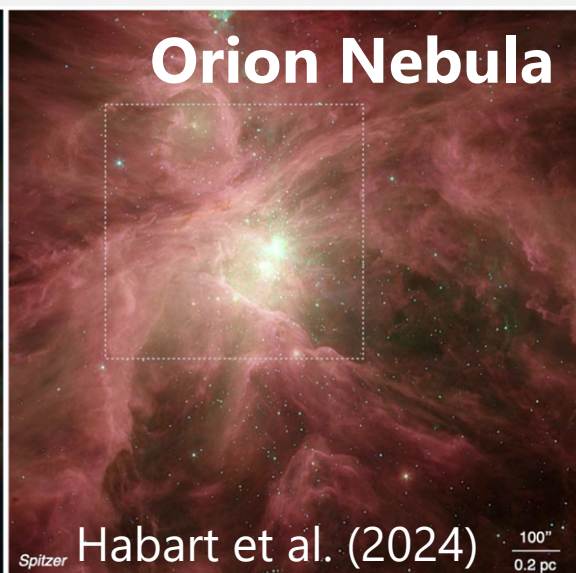
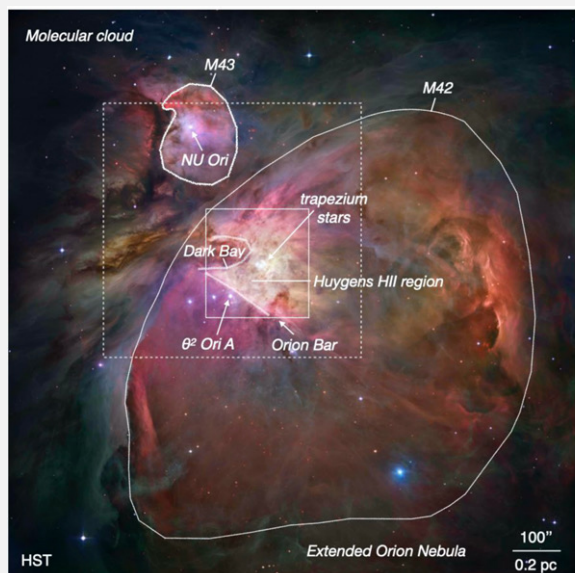
惑星形成へのインパクト

近接連星は星周円盤を削るので
円盤寿命が短くなる

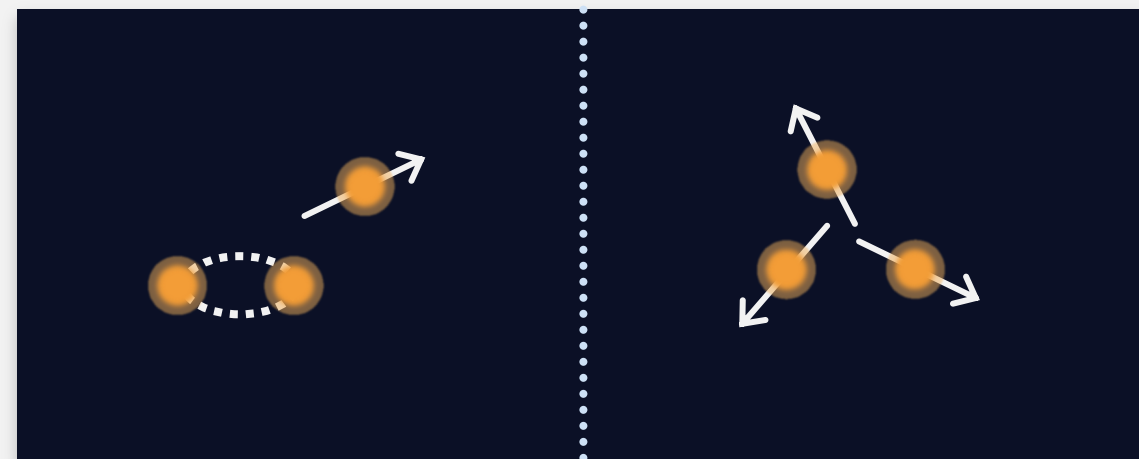
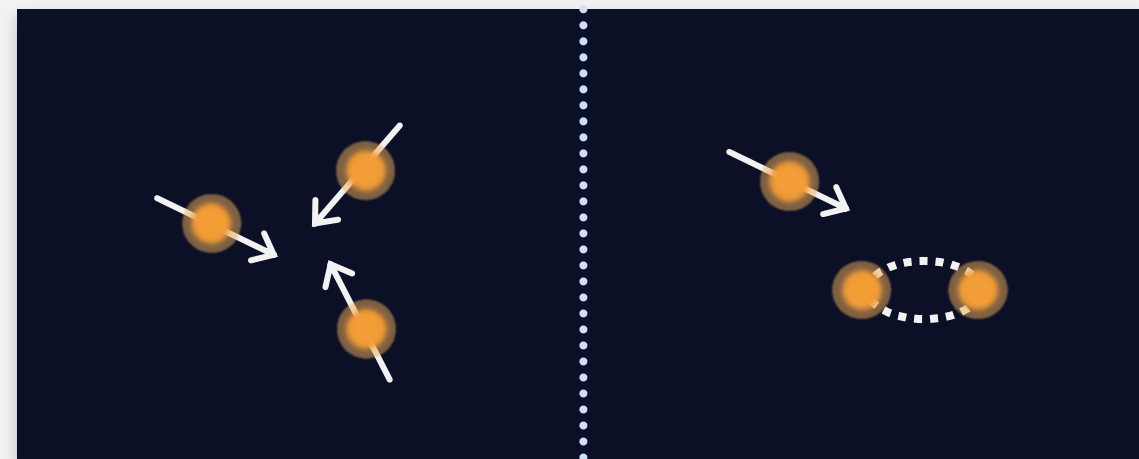


星団中での連星の力学進化

多くの星は星団中で生まれる



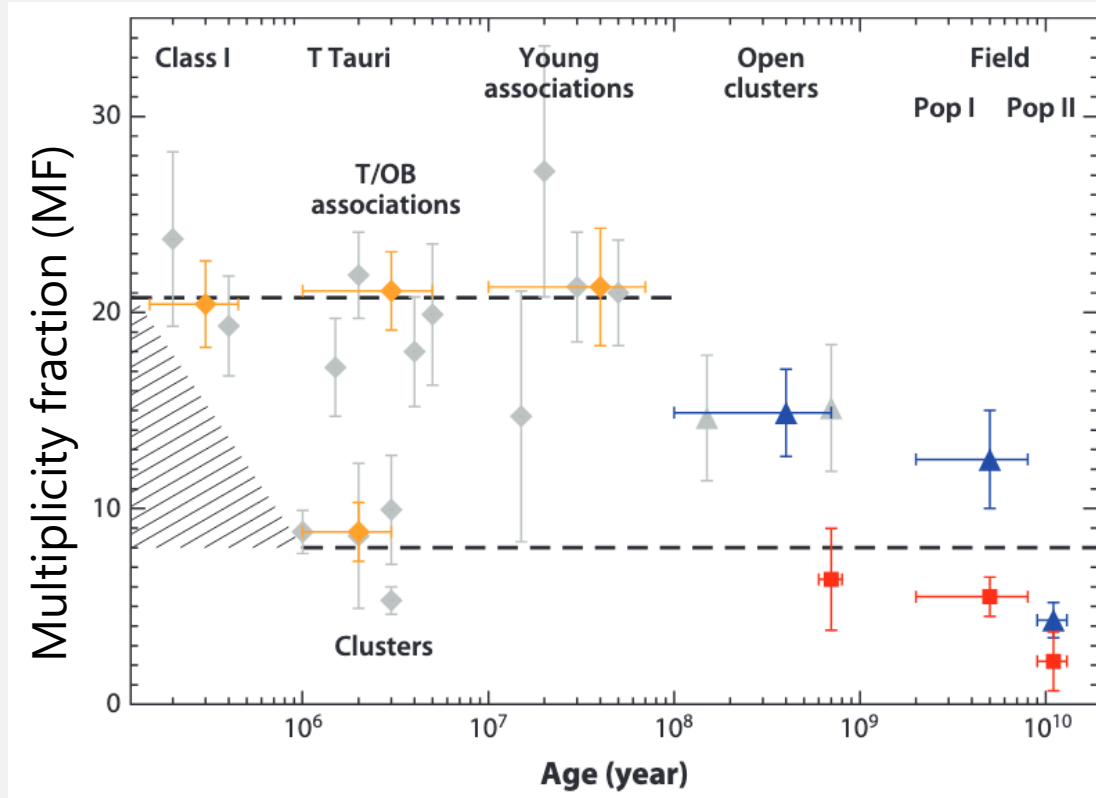
星団中で起こる近接(三体)遭遇



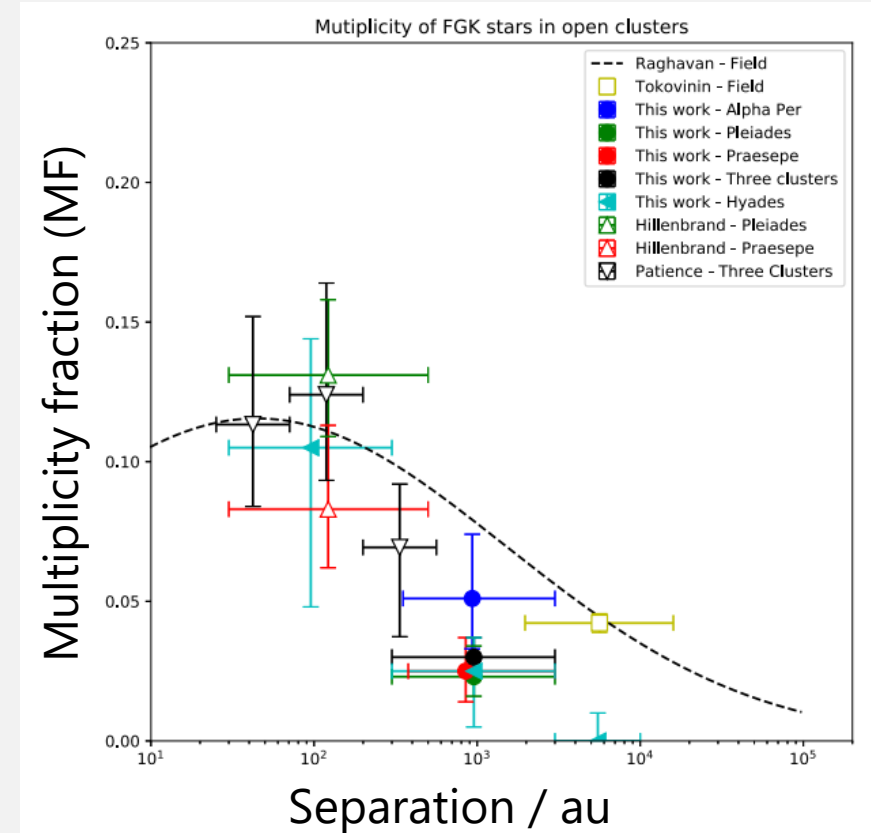
星団中での連星の力学進化

星団中で起こる近接遭遇が連星の始原始的な性質を変え得る

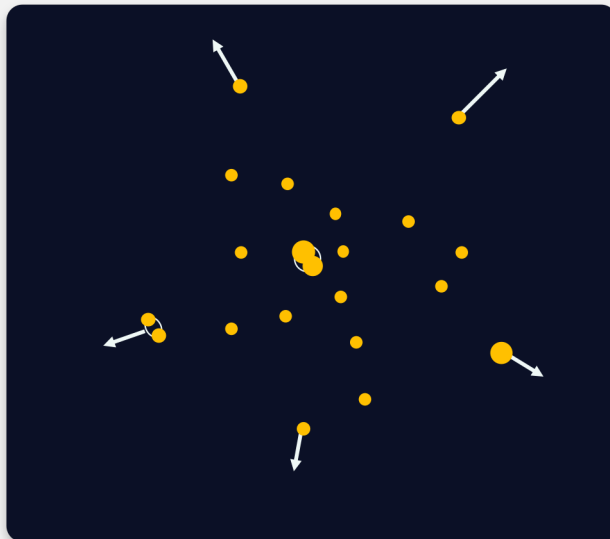
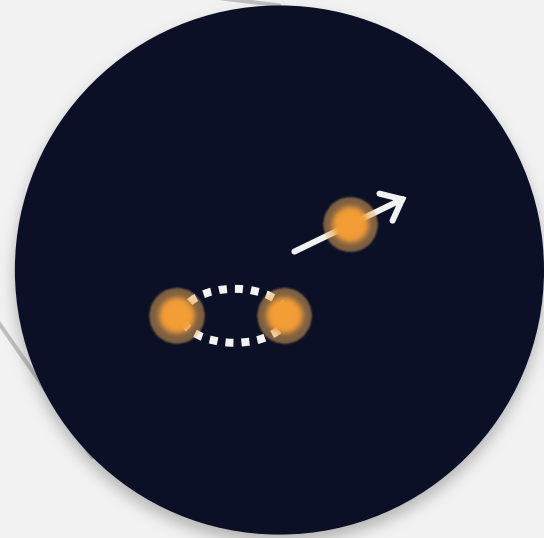
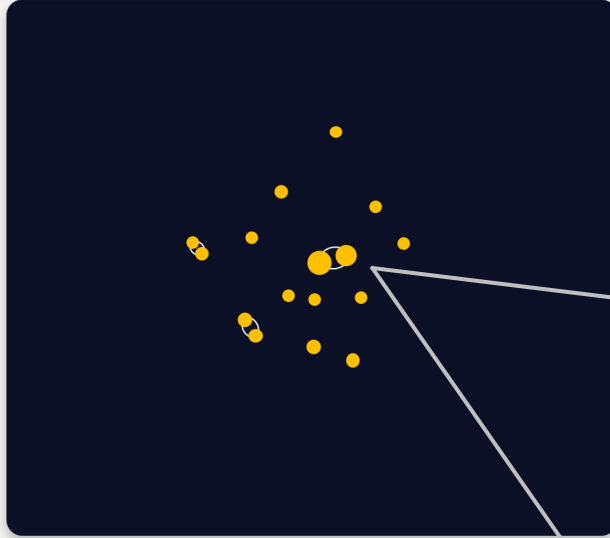
連星率は時間と共に下がる
(e.g., Duchene & Kraus 2013)



遠隔連星率: 散開星団 < フィールド星
(e.g., Deacon & Kraus 2020)



(原始) 連星が星団に与える影響



連星-単星遭遇を通して
連星は周囲の星にエネルギーを与える
(e.g. Heggie 1975)

= 連星は星団の“加熱源”として働く

星団に原始連星が存在すると
星団コアの重力崩壊を止める

(e.g. McMillan et al. 1990; Tanikawa & Fukushima 2009)

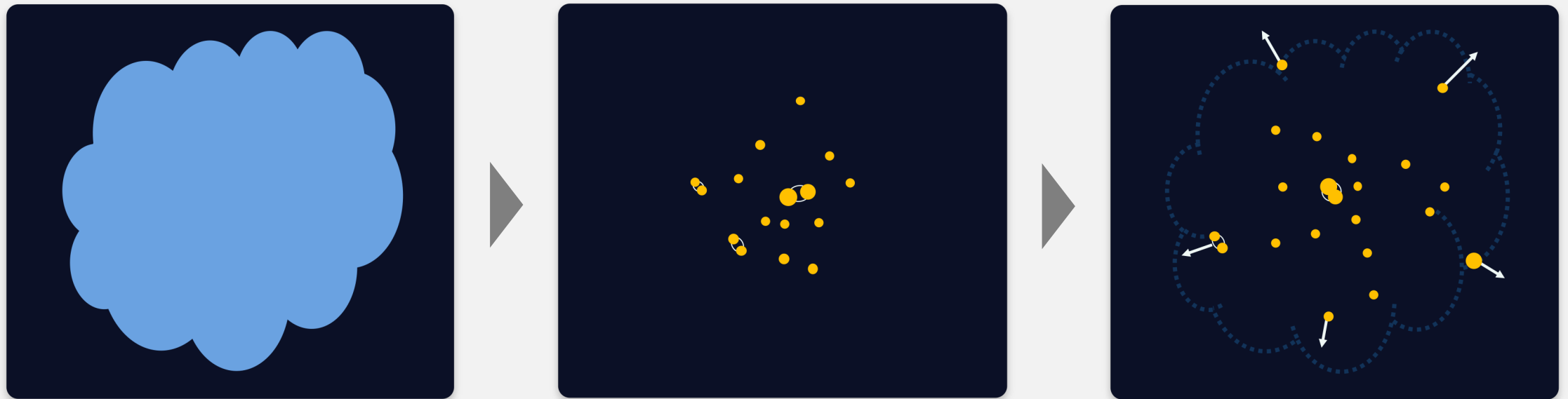
原始連星を考慮した星団形成に関する先行研究

N 体シミュレーション：星団の力学進化を計算

- ・ 球対称な分布 (e.g. Kroupa et al. 1995)
- ・ フラクタルな分布 (e.g. Parker & Meyer 2014)
- ・ 流体計算に基づく分布 (e.g. Farias et al. 2017; 2019, Torniamenti et al. 2021)

N 体 + 流体シミュレーション：星団の形成 + 進化計算

Cournoyer-Cloutier et al. (2021, 2024)



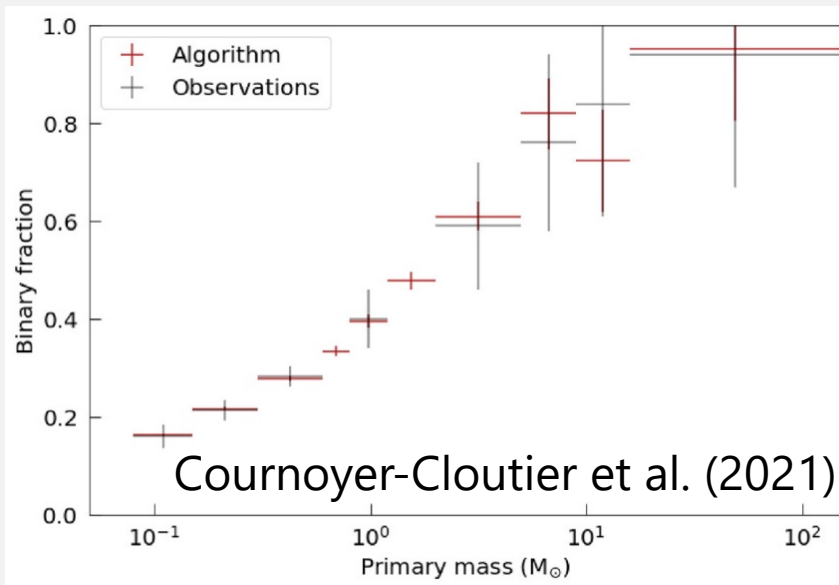
原始連星を考慮した星団形成に関する先行研究

N 体シミュレーション：星団の力学進化を計算

- ・ 球対称な分布 (e.g. Kroupa et al. 1995)
- ・ フラクタルな分布 (e.g. Parker & Meyer 2014)
- ・ 流体計算に基づく分布 (e.g. Farias et al. 2017; 2019, Torniamenti et al. 2021)

N 体 + 流体シミュレーション：星団の形成 + 進化計算

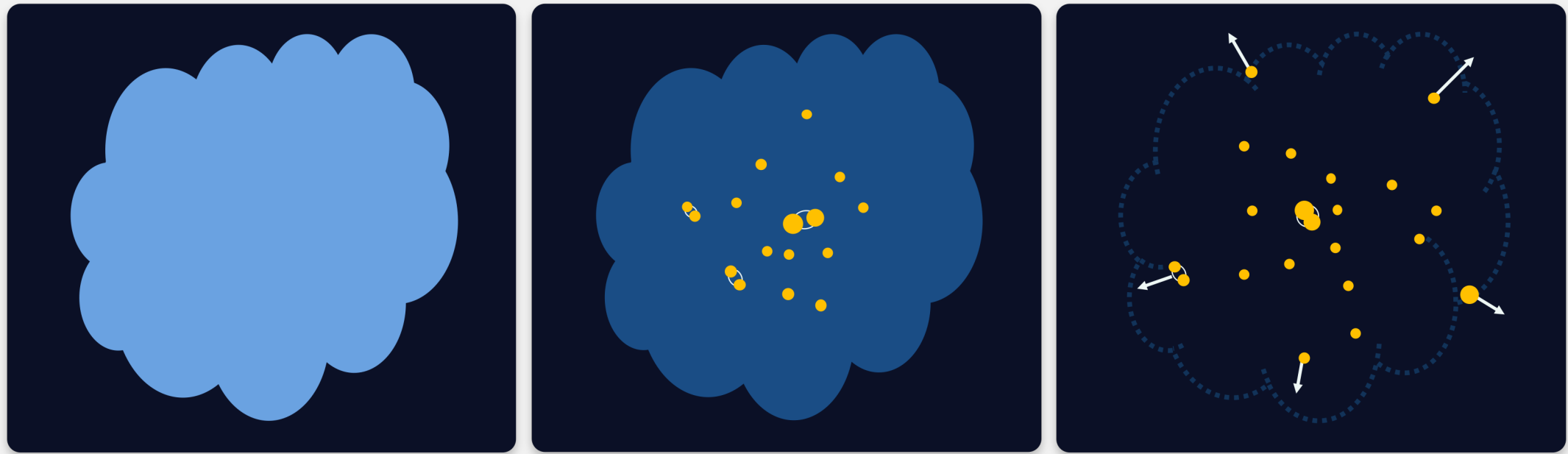
Cournoyer-Cloutier et al. (2021, 2024)



先行研究の多くは主系列星の観測データ
(e.g. Moe & Di Stefano 2017) を基にしている
...既に力学的な影響を受けているのでは？

目的: 星団形成段階における原始連星の力学進化過程は？

原始連星の性質の違いによって力学進化はどのように変わる？
形成される星団に与える影響は？



星団形成段階

力学進化段階

手法: *N*-body/SPH Simulation

ASURA+BRIDGE

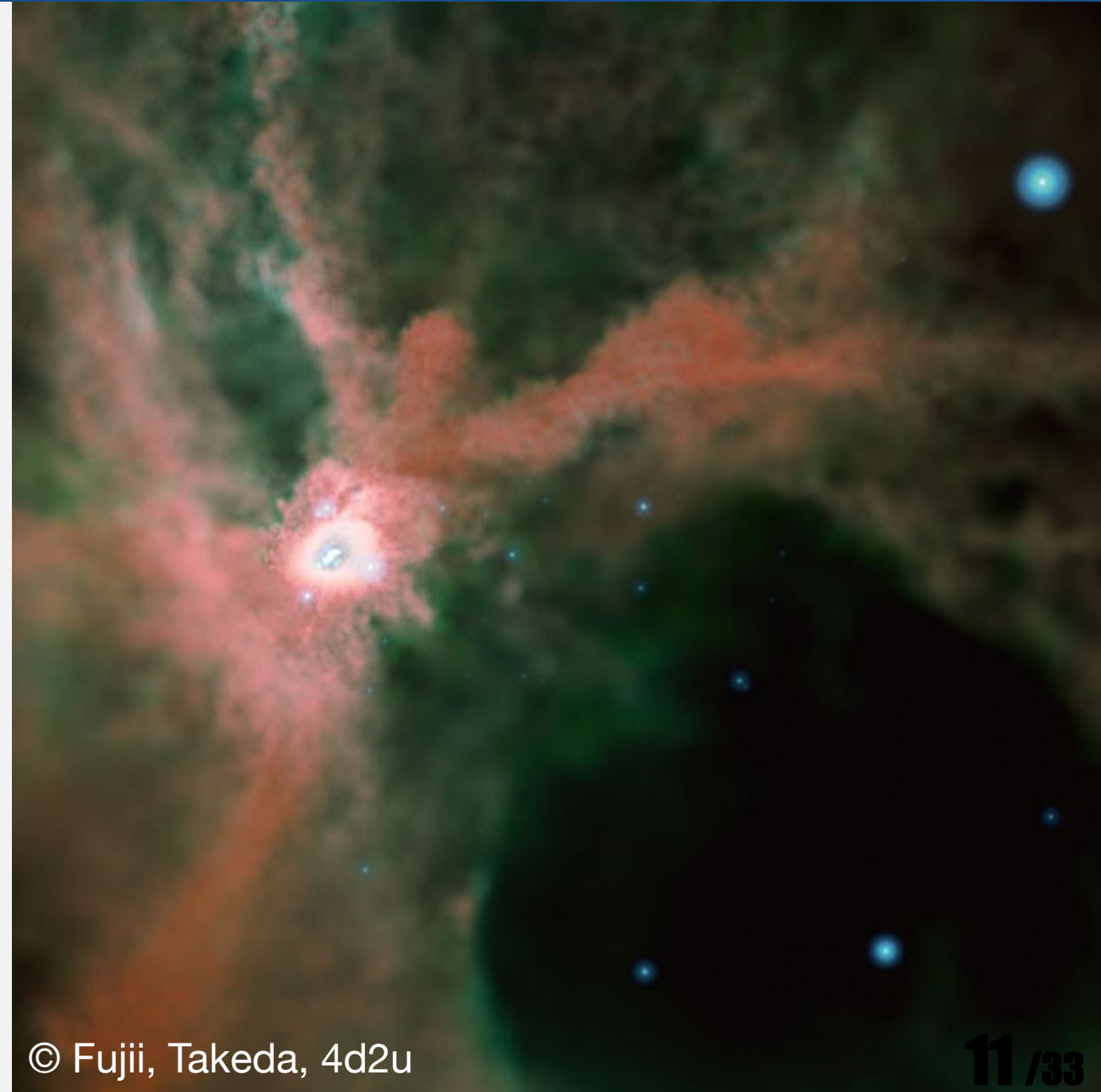
(Hirai+ 2021, Fujii+ 2021a, b)

- *N*体/SPHシミュレーションコード
- 星一つ一つを分解 (star-by-star)
- 重力ソフトニング0の高精度な軌道計算 (PeTar: Wang+ 2020)

確率的な“単独”星形成モデル

- 力学的な連星形成 🧑🏫
- 原始連星 🧑🏫

→ (原始)連星形成モデルを実装

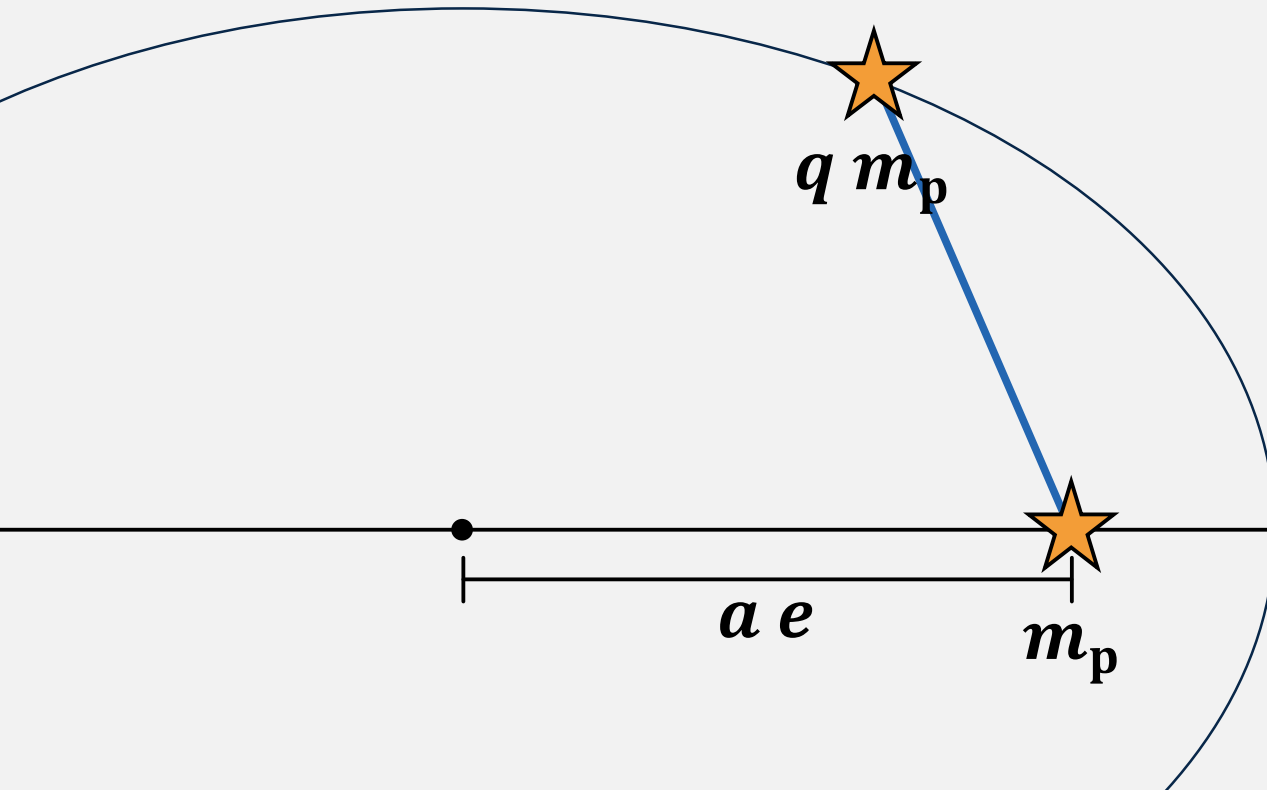


連星形成モデル

✓ 星形成条件を満たしたガス粒子 → **連星: 星粒子x2に置換**

$$\nabla \cdot \mathbf{v} < 0, n > n_{th}, T < T_{th} \text{ (Hirai et al. 2021)}$$

✓ 連星パラメータは楕円軌道に従うように確率的に決定



原始連星パラメータ

- 主星質量 m_p : IMF
- 質量比 $q \equiv m_s/m_p = 1$
- 軌道長半径 a : 一様分布
- 離心率 e : 一様分布
- 平均近点角: 一様分布

初期条件

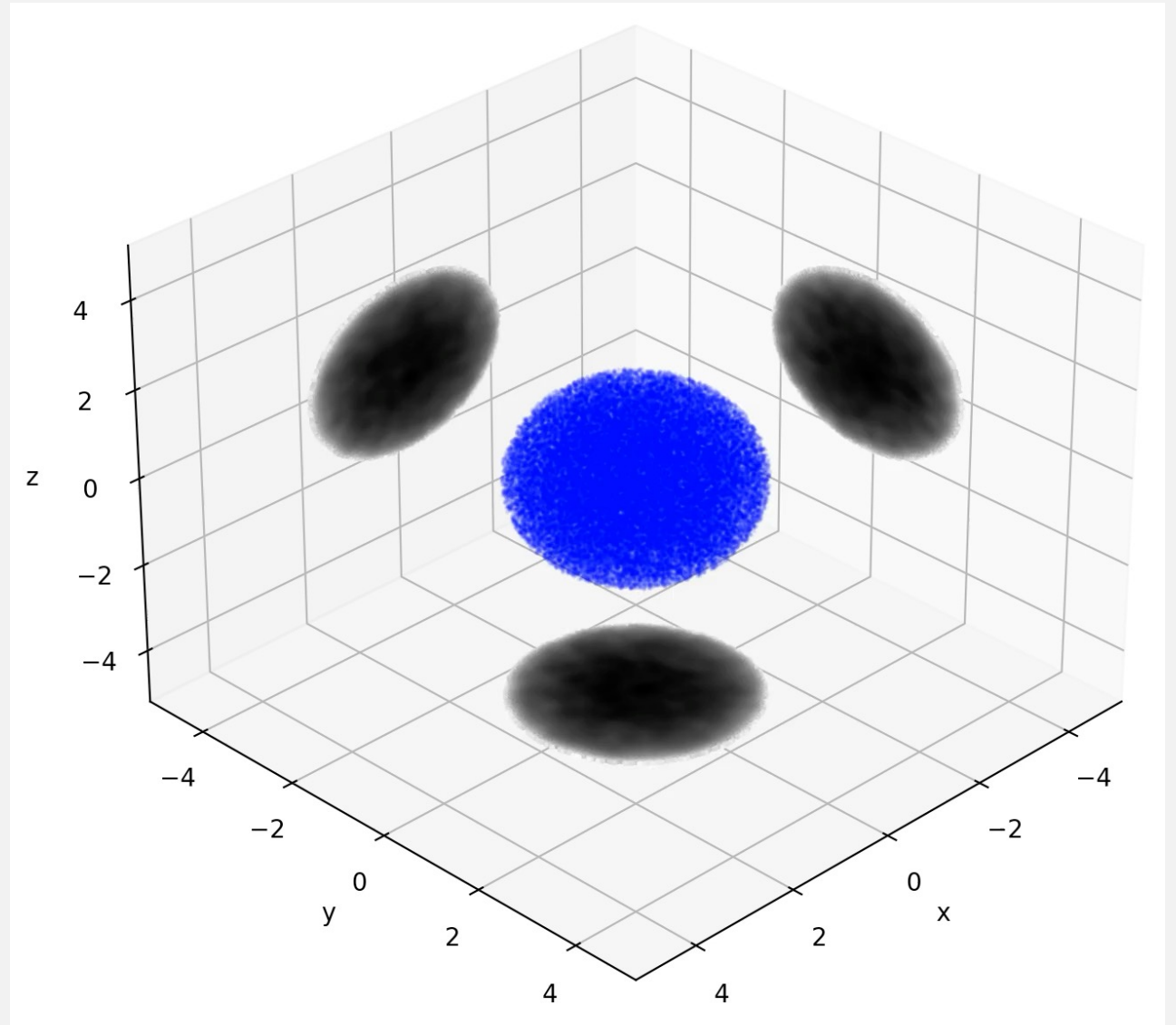
孤立分子雲 (等温ガス球)

- $M_{\text{cloud}} = 5000 M_{\odot}$
- $R_{\text{cloud}} = 2 \text{ pc}$
- $N_{\text{gas}} = 50000$

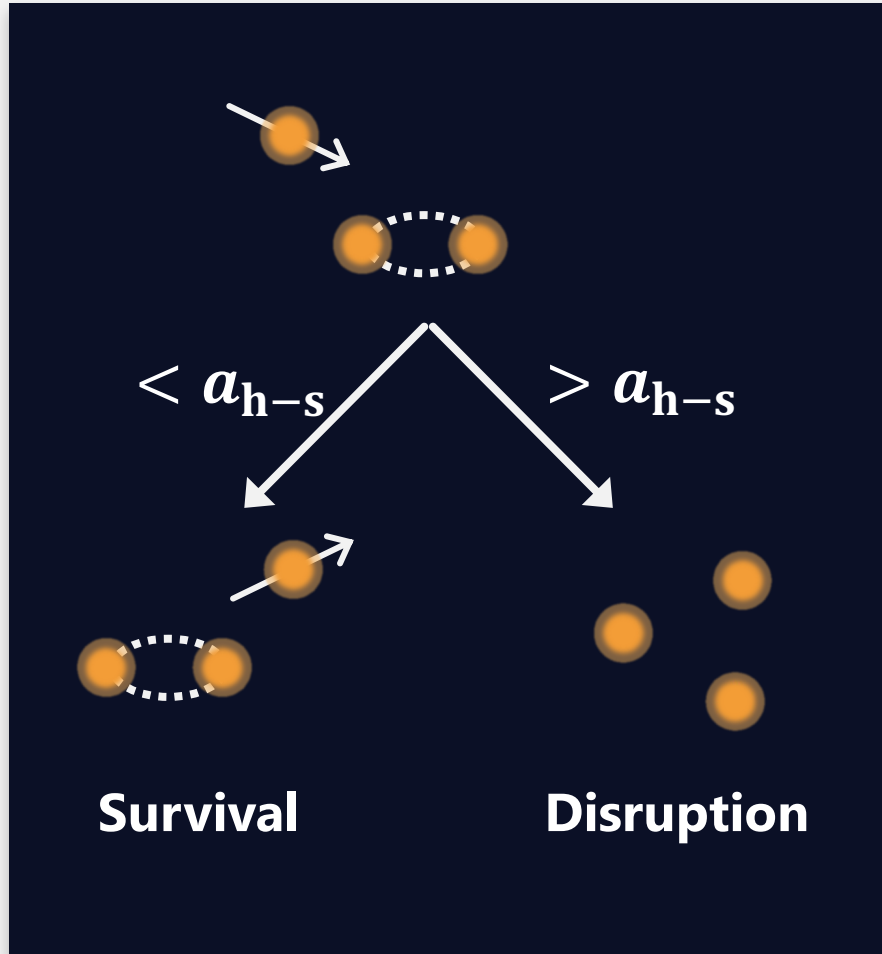
3種類の星形成モデル

- **CB**: Close Binary formation
 $1 \leq a \leq 100 \text{ au}$
- **WB**: Wide Binary formation
 $10^2 \leq a \leq 10^4 \text{ au}$
- **SS**: Single Star formation
2x SFE in CB & WB

...乱数値を変えた計算をスタック



補足 1 : Heggie-Hills law & Hard-soft boundary



Heggie-Hills law (Heggie 1975; Hills 1975a,b)

三体(連星-単星)遭遇を通して...

- 近接連星="硬い"連星はより硬くなる
- 遠隔連星="軟い"連星はより軟くなる

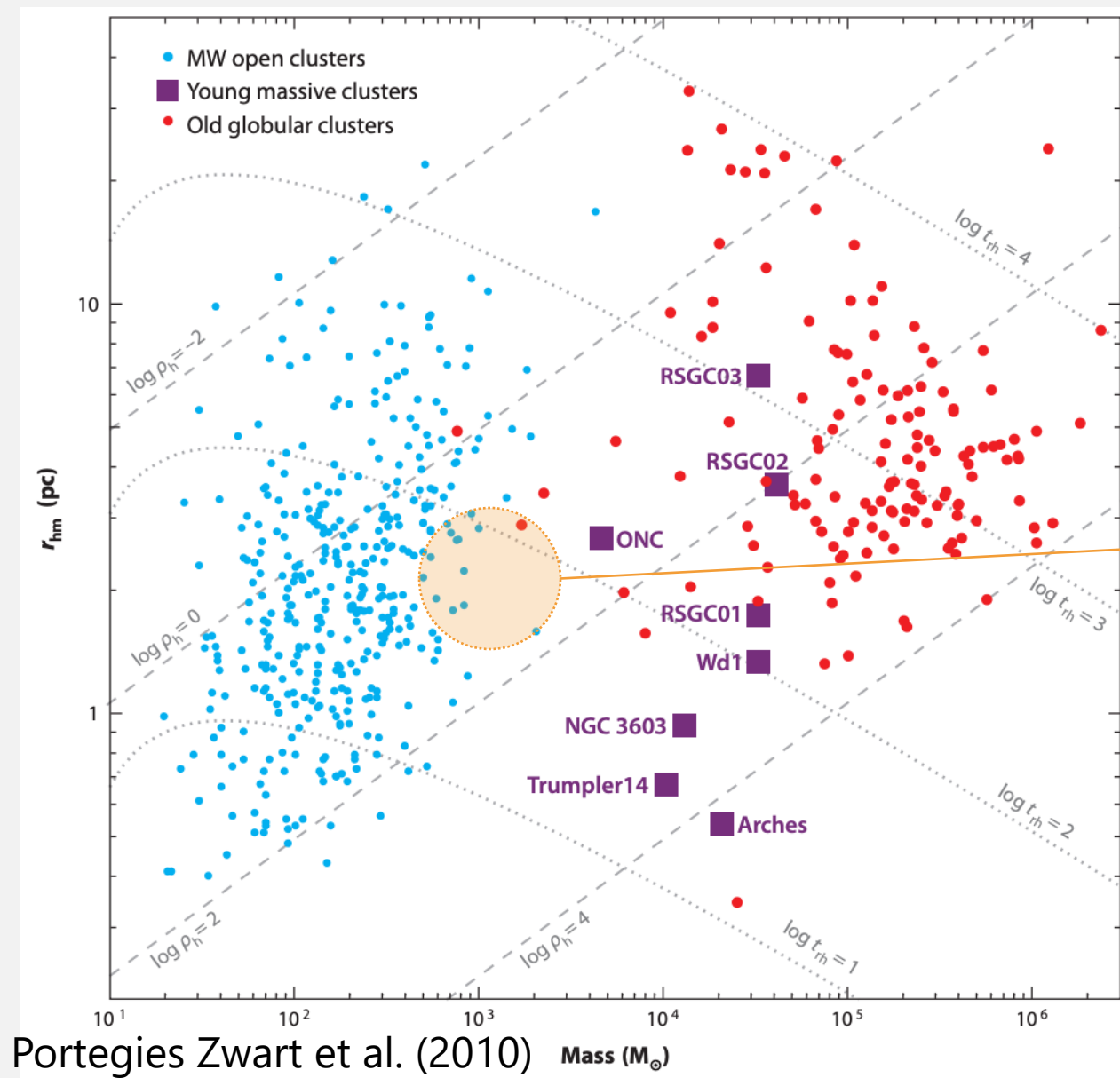
Hard-soft boundary

星団の運動エネルギー ~ 連星の束縛エネルギー

$$\frac{1}{2} \bar{m} \sigma^2 \sim G \frac{\bar{m}^2}{a_{h-s}}$$

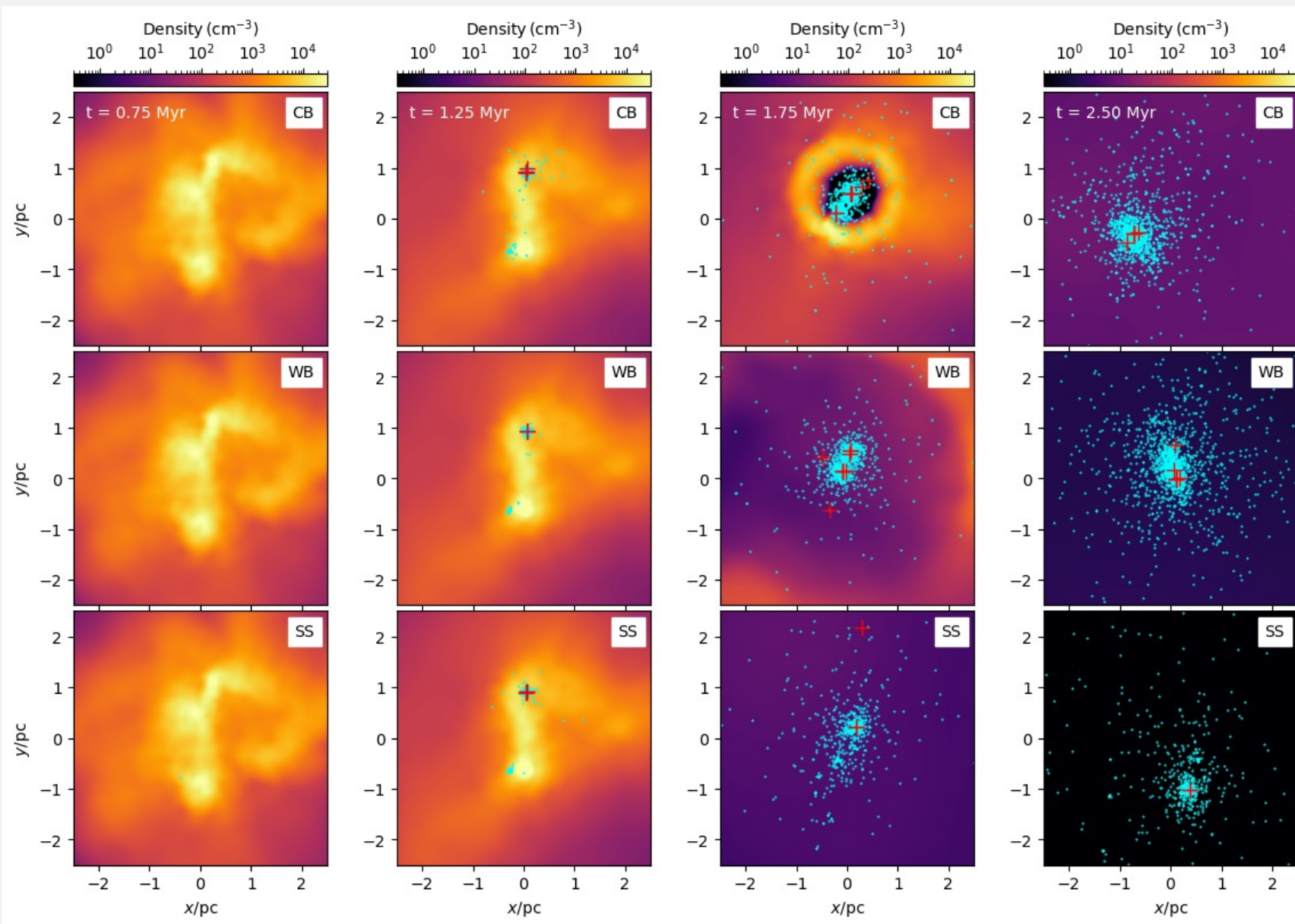
→ $a_{h-s} \sim 100$ au in this simulation

補足2：観測される星団との対応

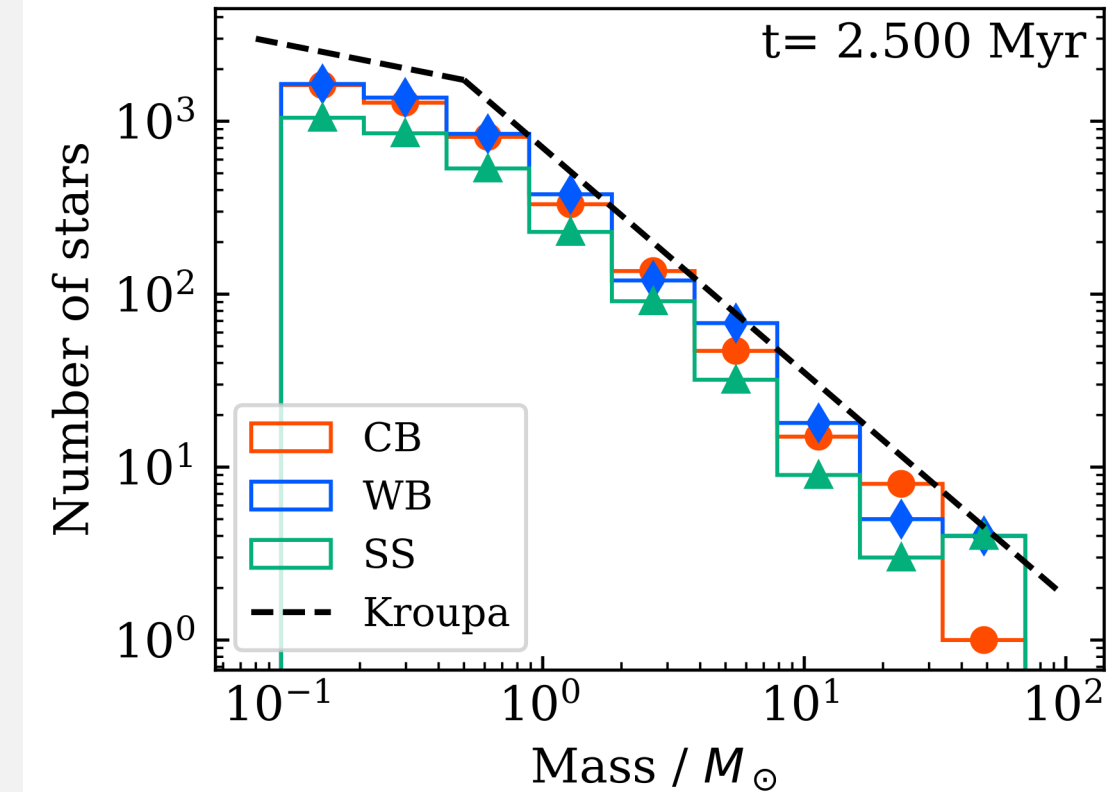
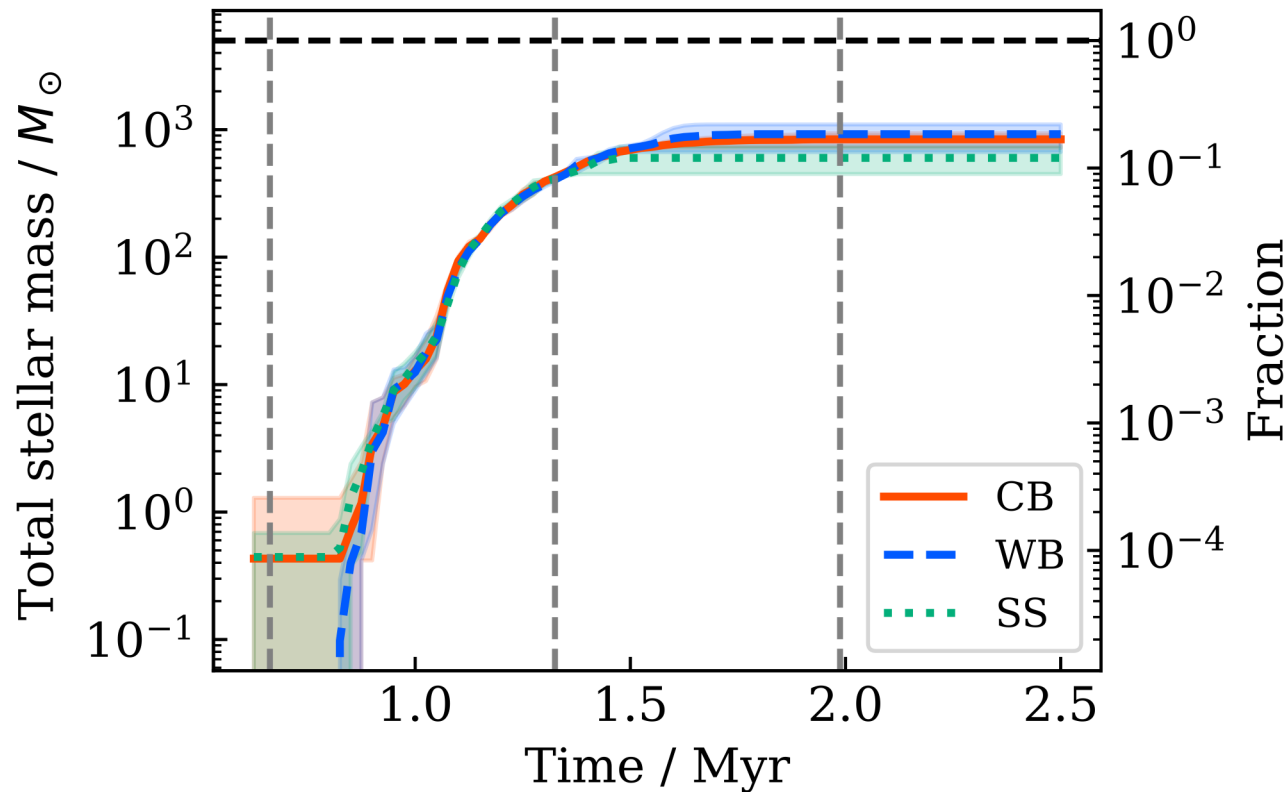


本研究で形成される星団は
重めの散開星団
～ **Young massive cluster**
のあたり

星&ガス密度分布の時間発展

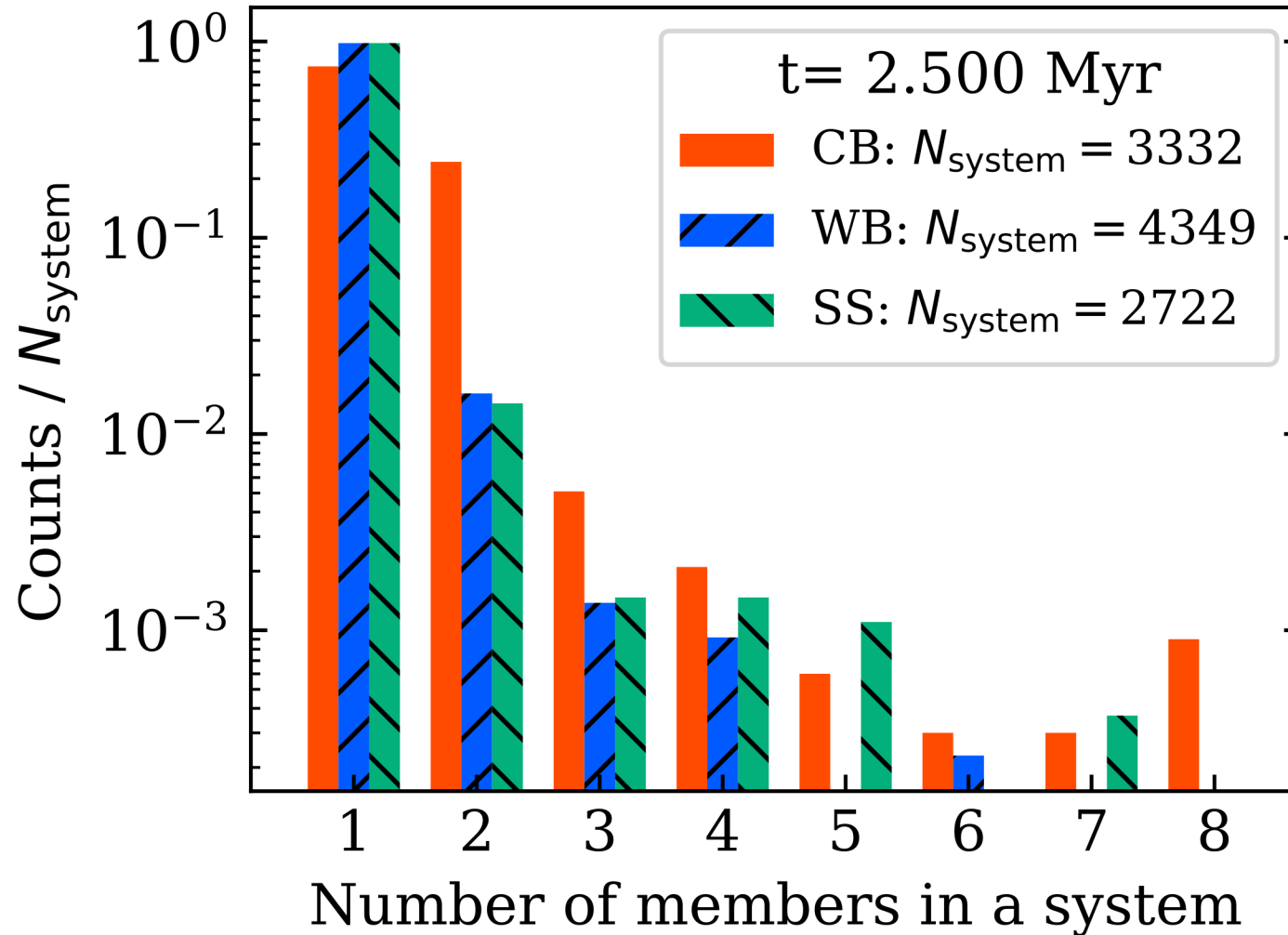


星の総質量の進化 & 最終的な星質量分布



星形成史・最終的な質量分布 共にほとんど同じ

単独星・多重星系の割合



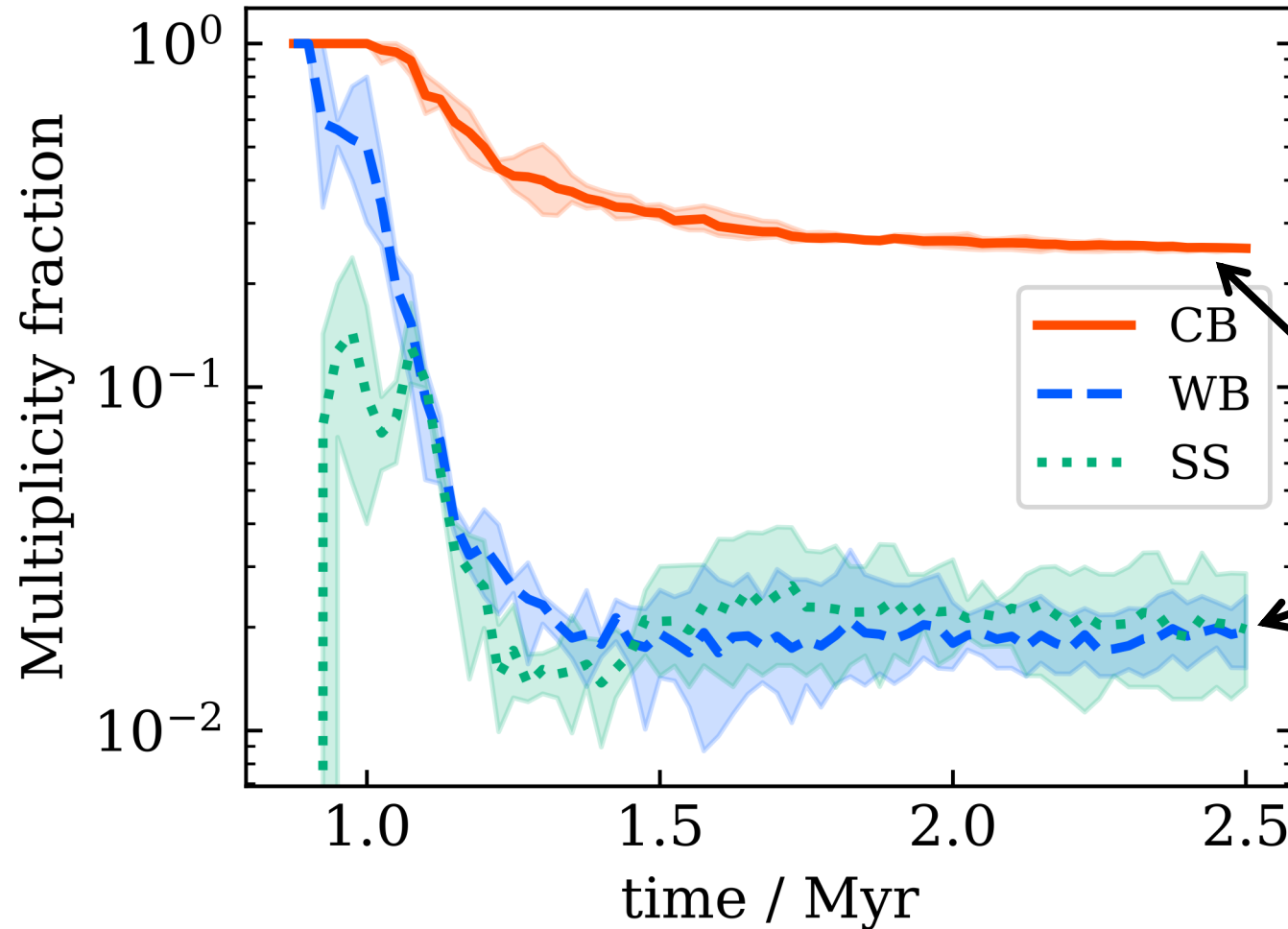
どのモデルも単独星が支配的
三重星以上も形成されるがレア

"1": 単独星

"2": 連星

"3": 三重星 ...

多重星率の時間進化



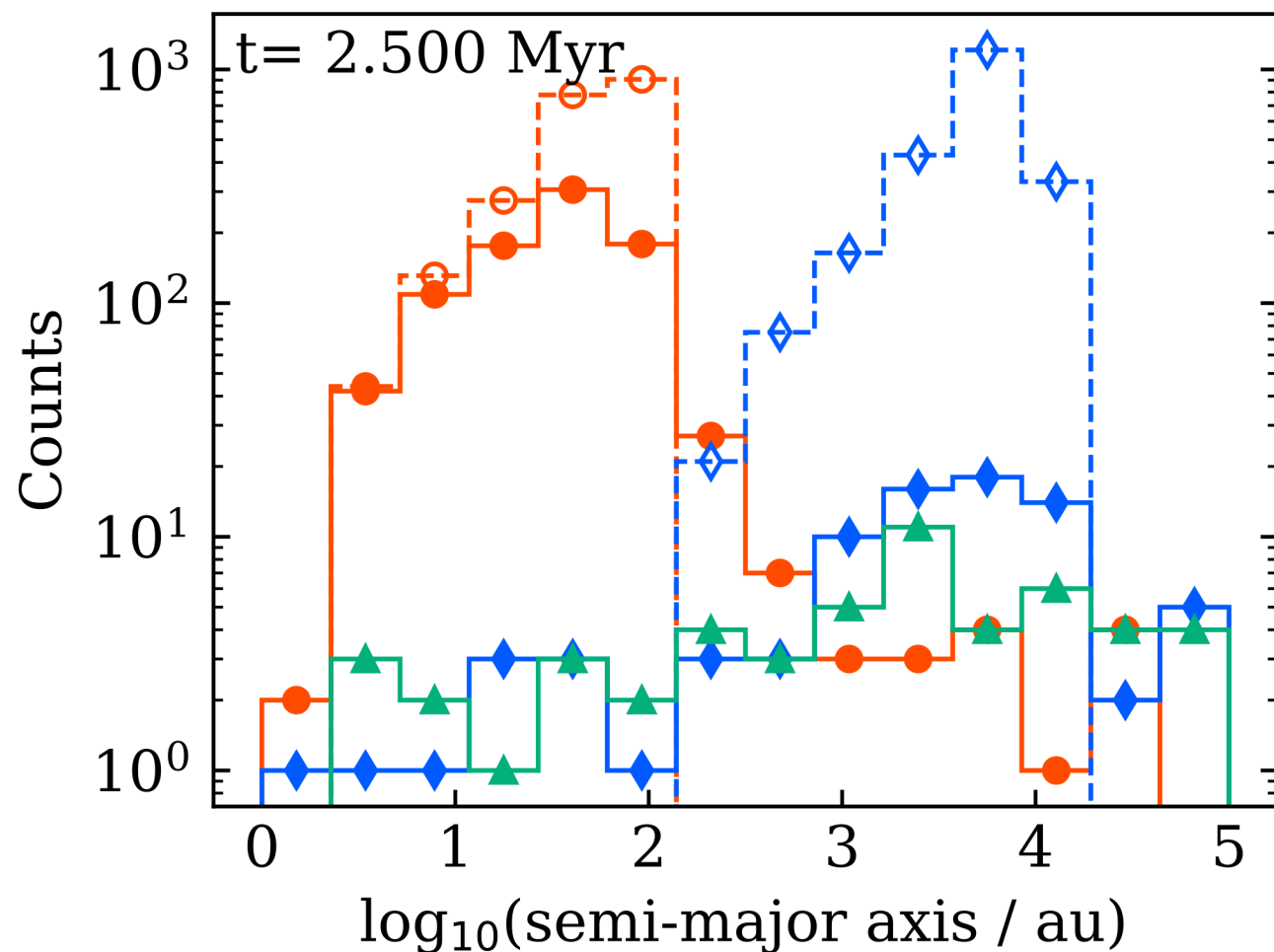
$$\text{多重星率 (MF)} \equiv \frac{B+T+\dots}{S+B+T+\dots}$$

CB: 高いMF (~30%)

WB: **SS**モデルと同水準に低下 (~1%)

軌道長半径: 初期 vs. 最終的な分布

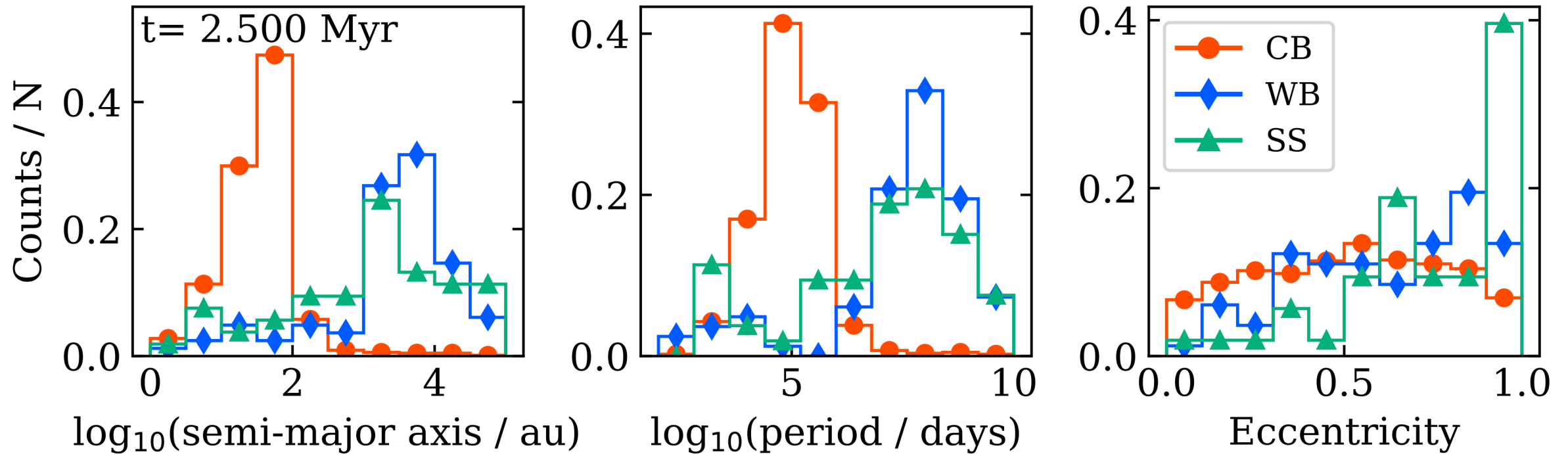
連星のhard/soft境界: $a_{h/s} \sim 100$ au



破線:
計算終了時までに形成した
すべての原始連星の分布

近接連星はhard
& 衝突断面積が小さい

連星パラメータの頻度分布

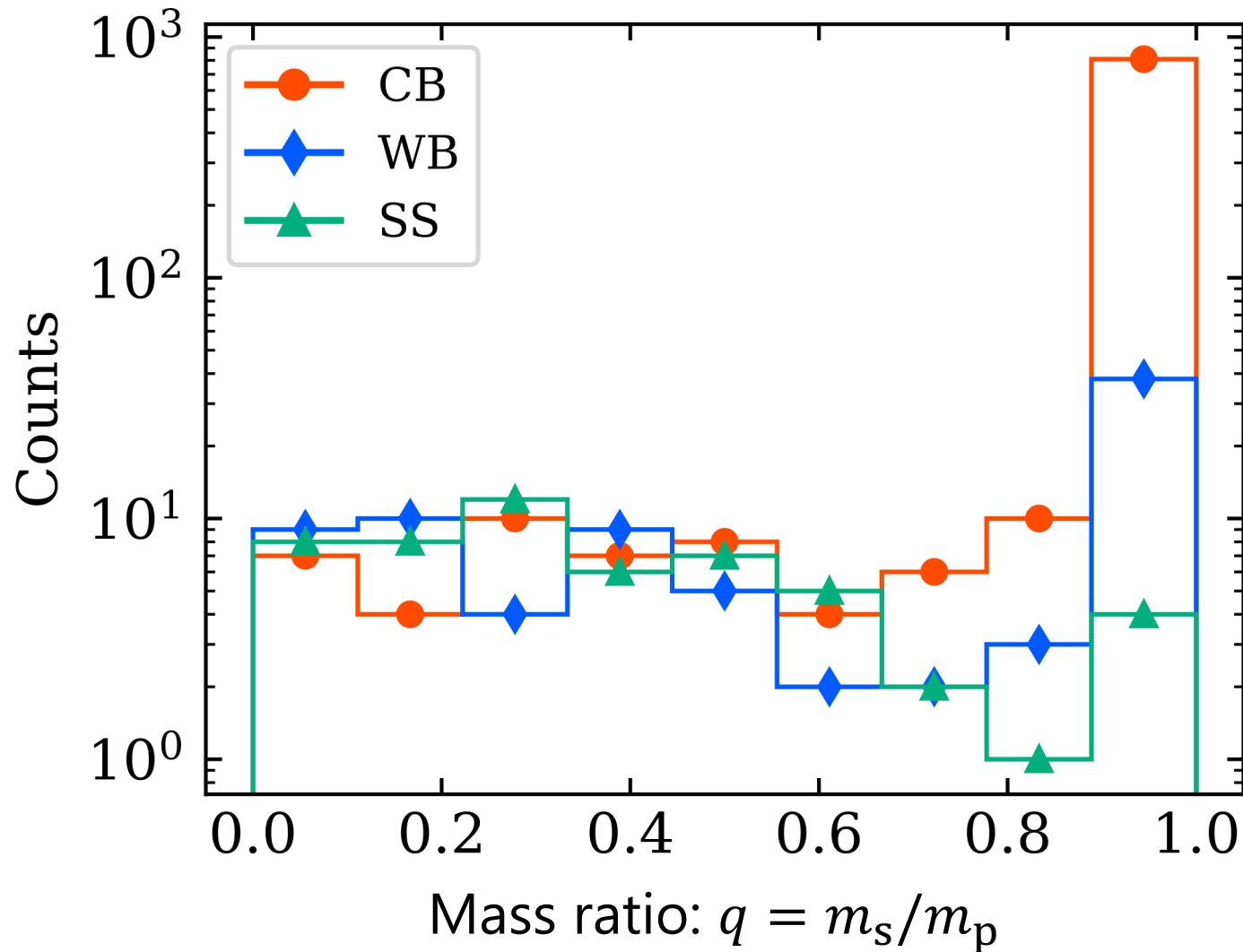


力学的に形成される連星はsoftな傾向

SS/WBの離心率分布はthermalに近い ← 頻繁な近接遭遇による進化を示唆

* 連星形成モデルでは一様な離心率分布を仮定

質量比の分布



* 原始連星の質量比 $q=1$ を仮定

SS: ランダムに近い

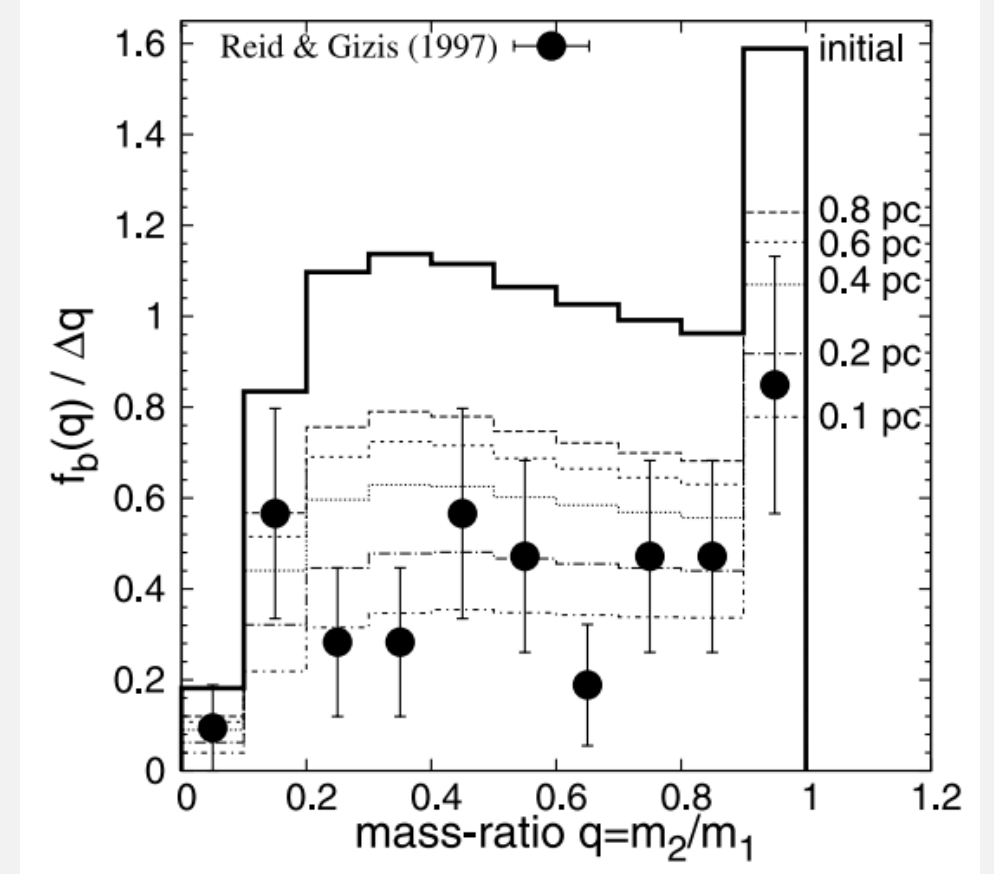
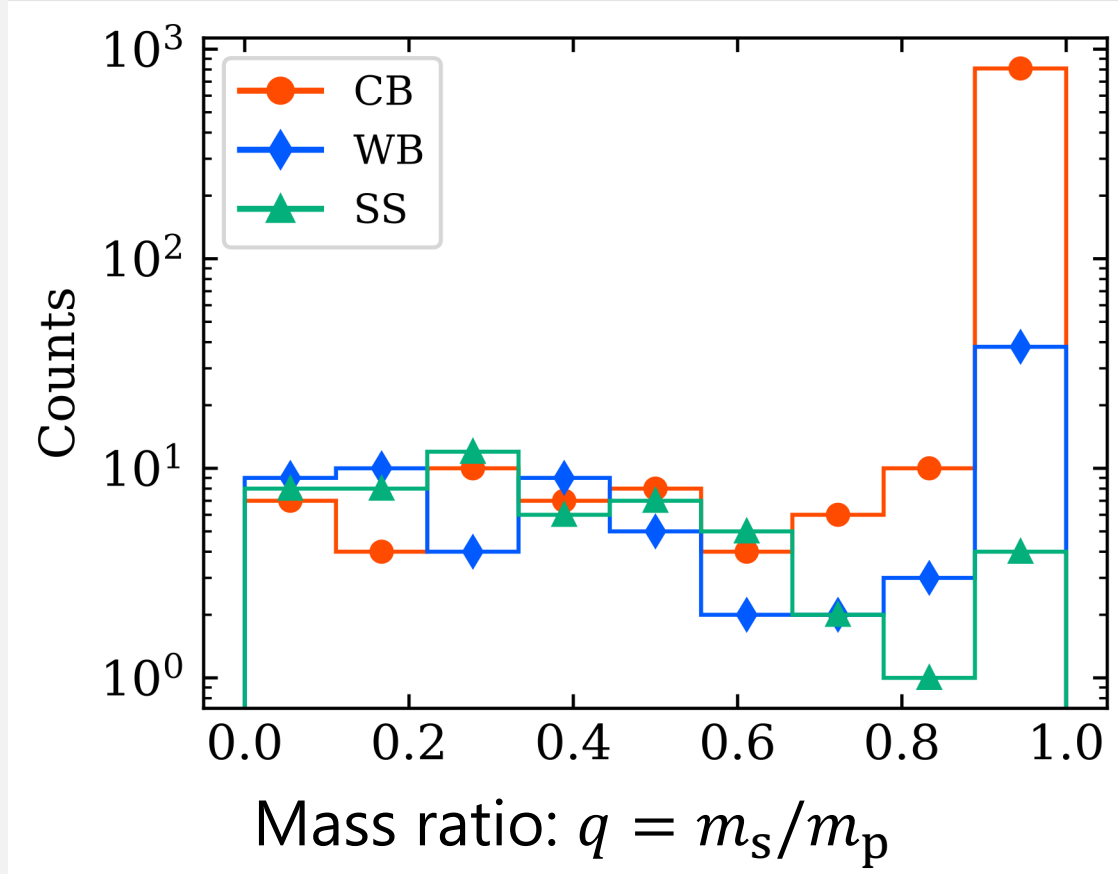
CB & WB: $q=1$ にピーク

← 観測と整合的

連星のうち始原的なものの割合

CB: ほぼすべて; WB: 約半数

質量比の分布

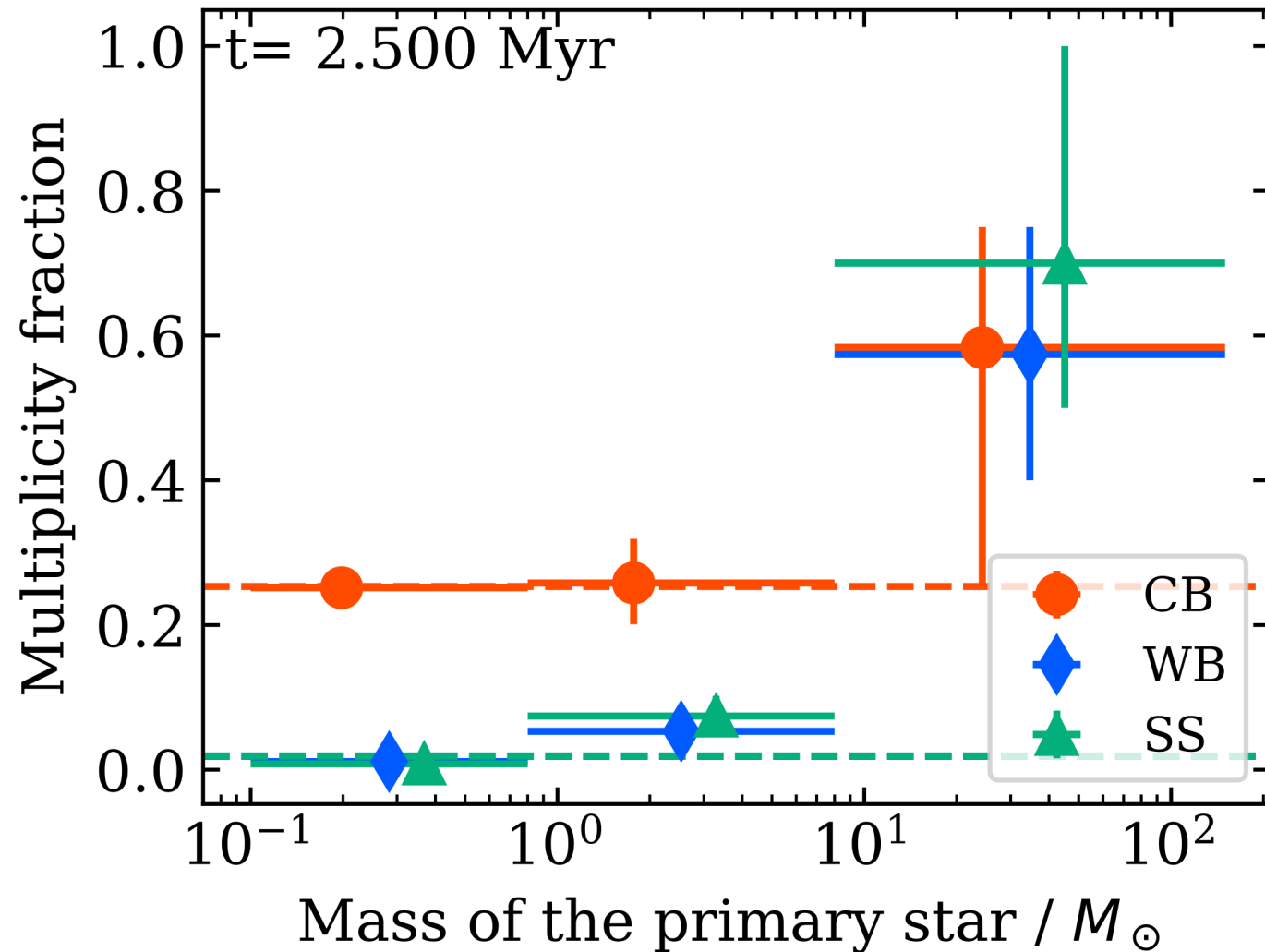


Mark & Kroupa (2011)

観測：等質量連星($q=1$)でピーク

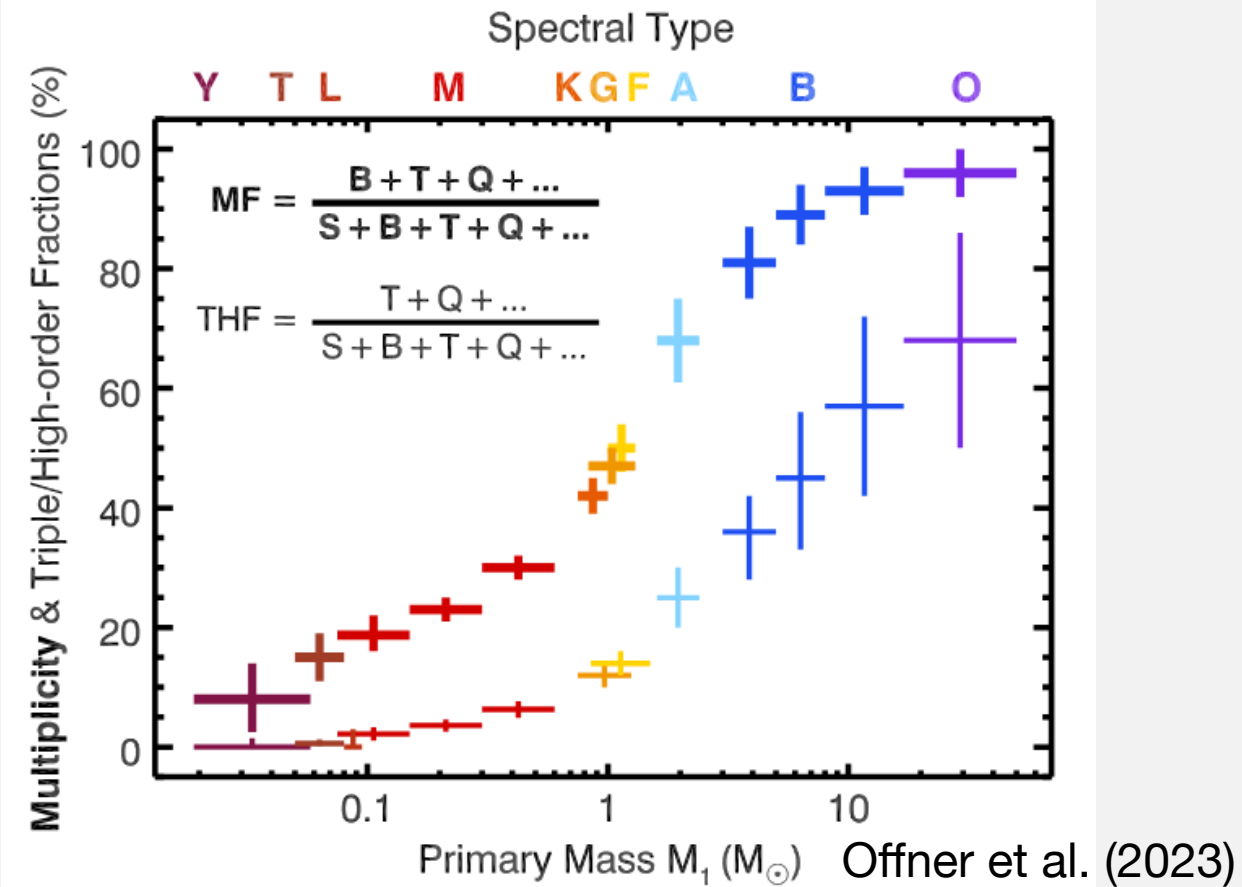
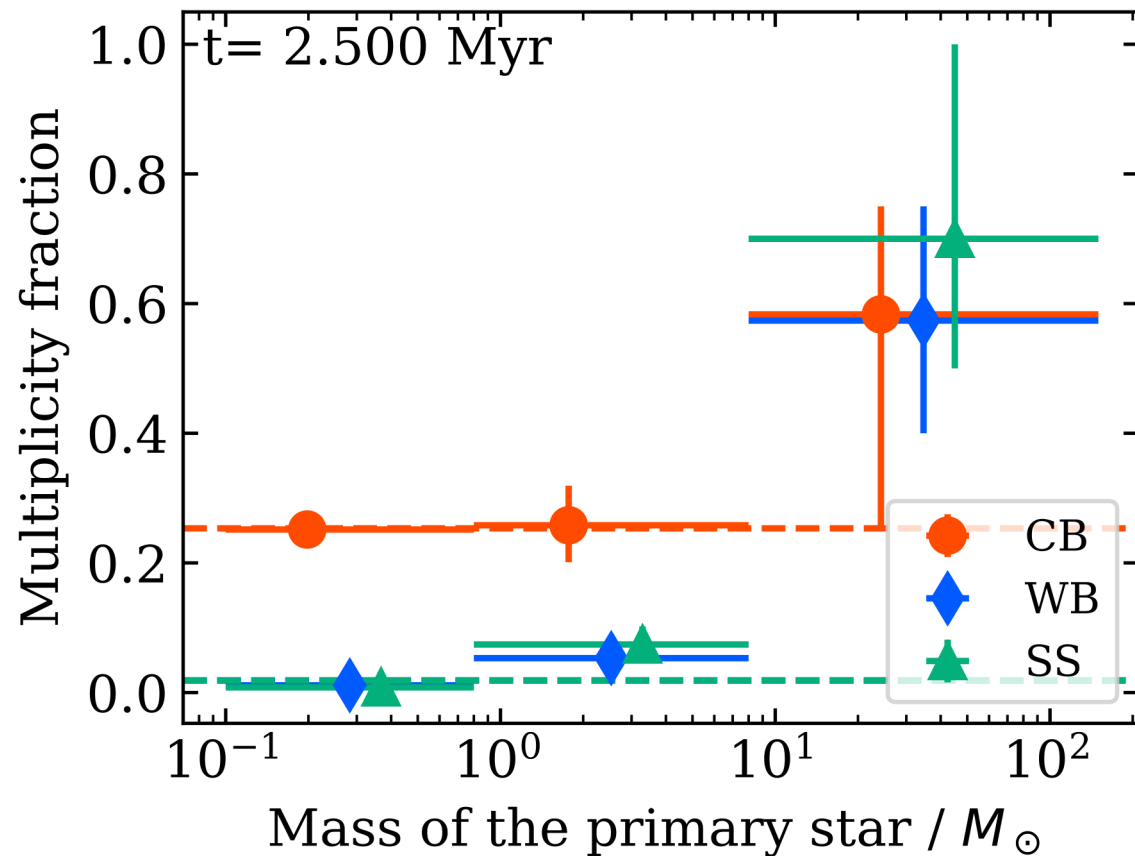
← 一定数の“原始”等質量連星が必要（星形成段階で双子星を作る必要）

多重星率と主星質量の関係



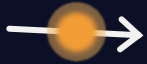
どのモデルでも正の相関が再現
モデル間の差は低質量側で大きい

多重星率と主星質量の関係



どのモデルでも正の相関が再現; モデル間の差は低質量側で大きい
 ... 観測と整合的なのはCB

小まとめ



近接連星：“硬い”・衝突断面積が小さい
→ 初期の性質を保ったまま生き残りやすい



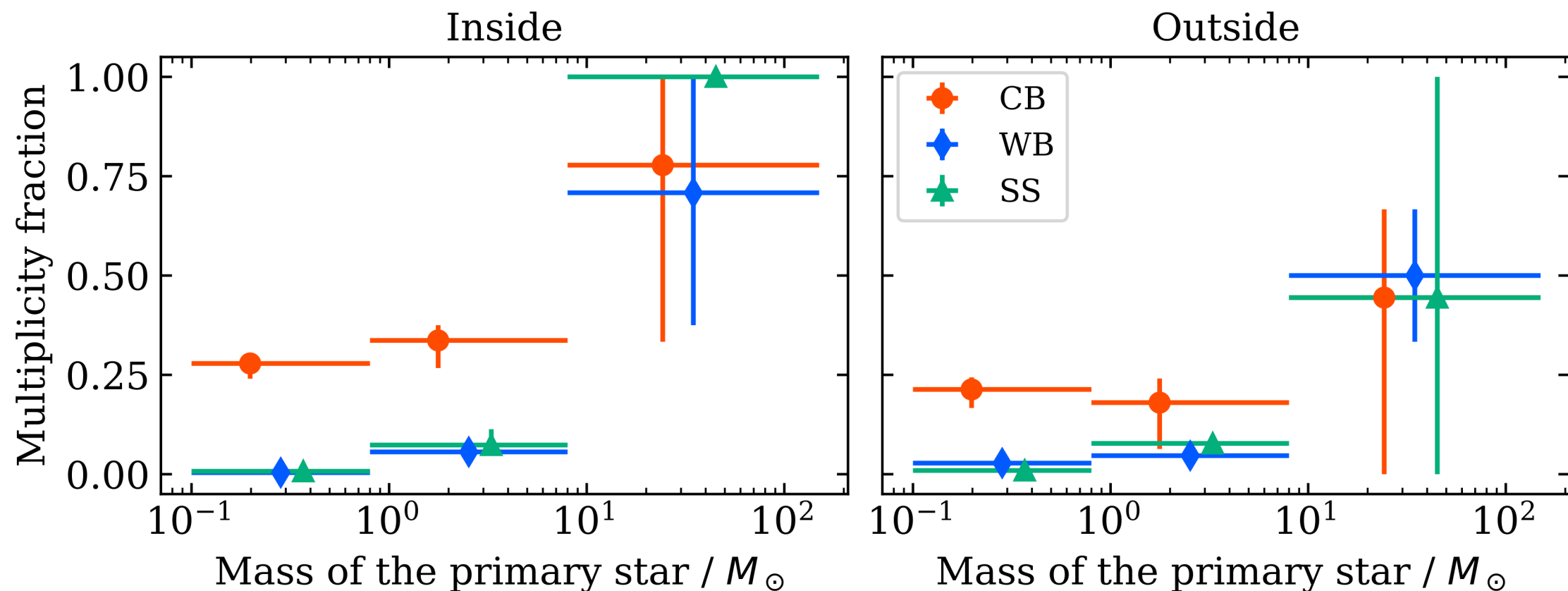
遠隔連星：“軟い”・衝突断面積が大きい
→ 重力相互作用によって破壊/再生成される
三体遭遇で形成される連星も“軟め”

観測との整合性

- ・ 硬い原始連星が存在しないと(特に低質量側の)連星率を説明できない
- ・ 等質量連星の過剰も初期の性質を反映？

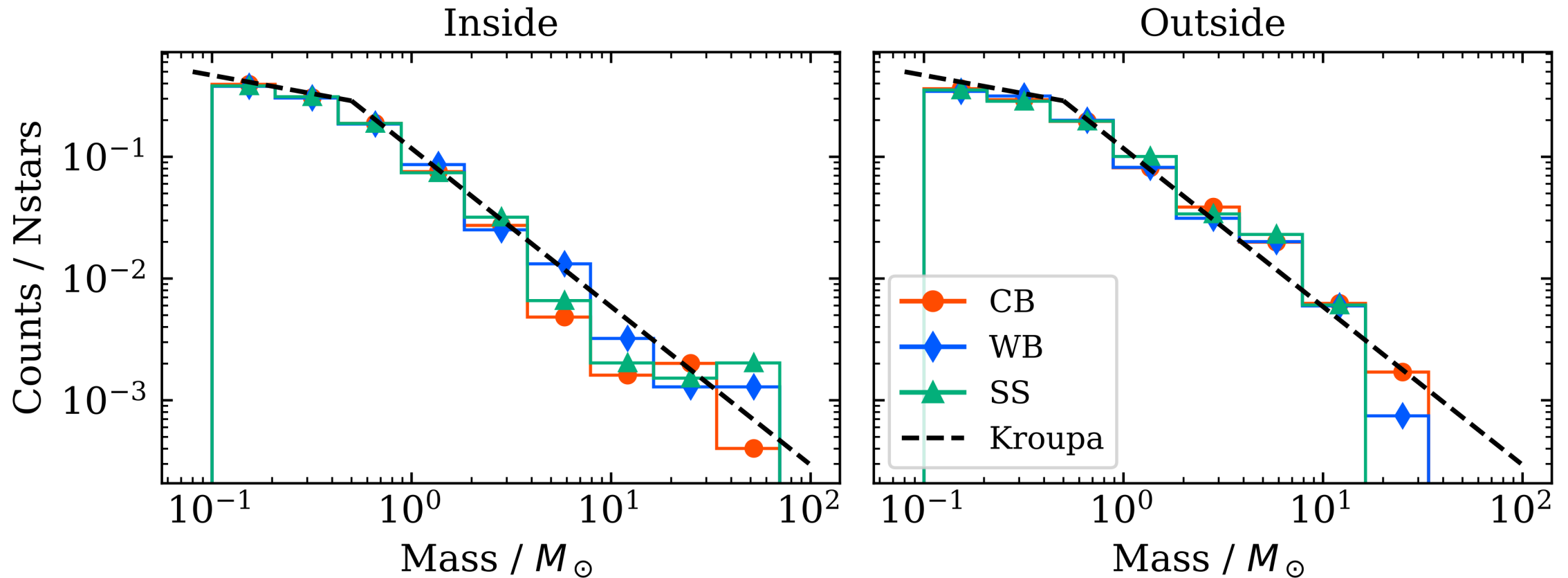
多重星率の領域差: 星団内部 vs. 外部

内外の境界: 星密度のピークから半径 2 pc



内側が外側より高い連星率

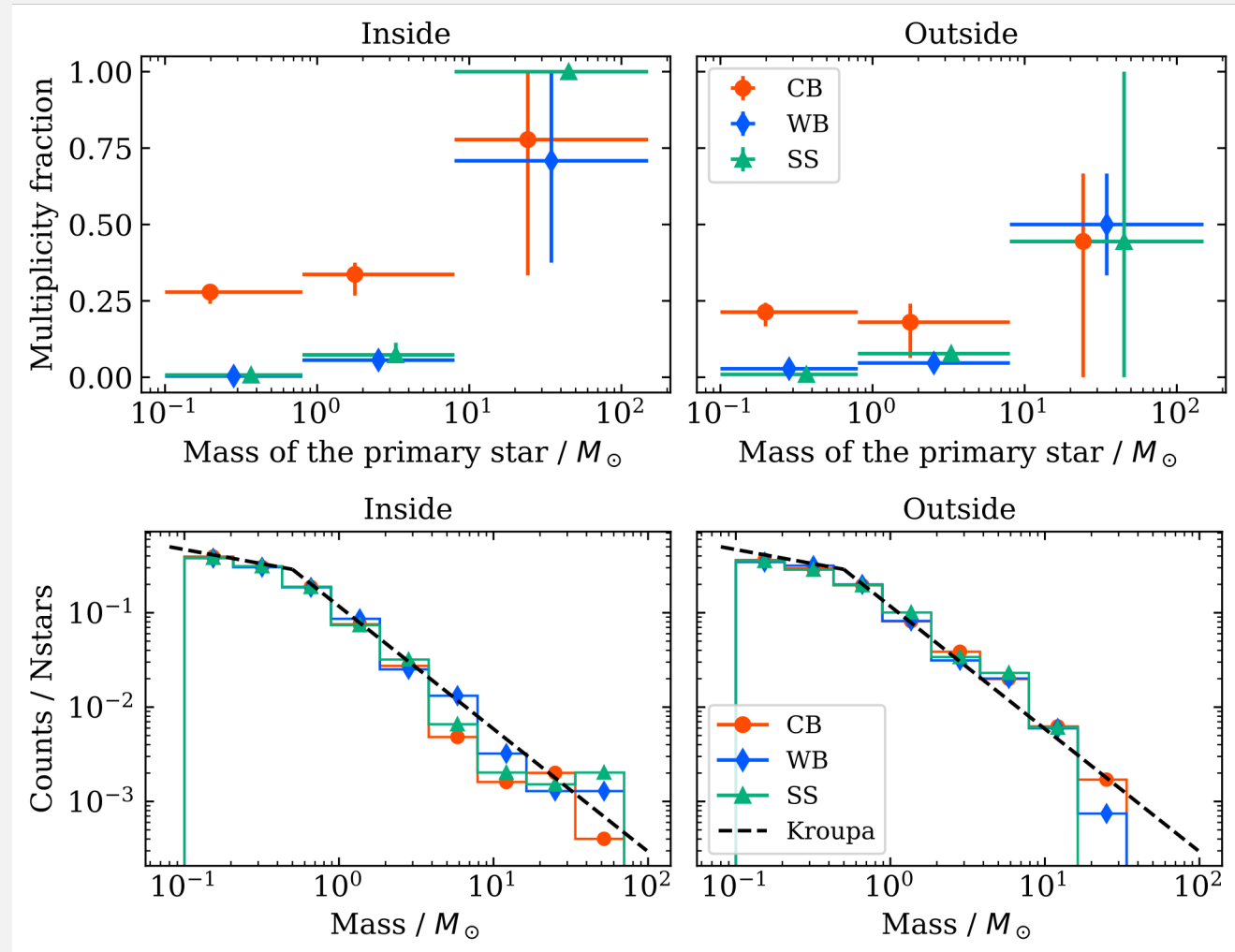
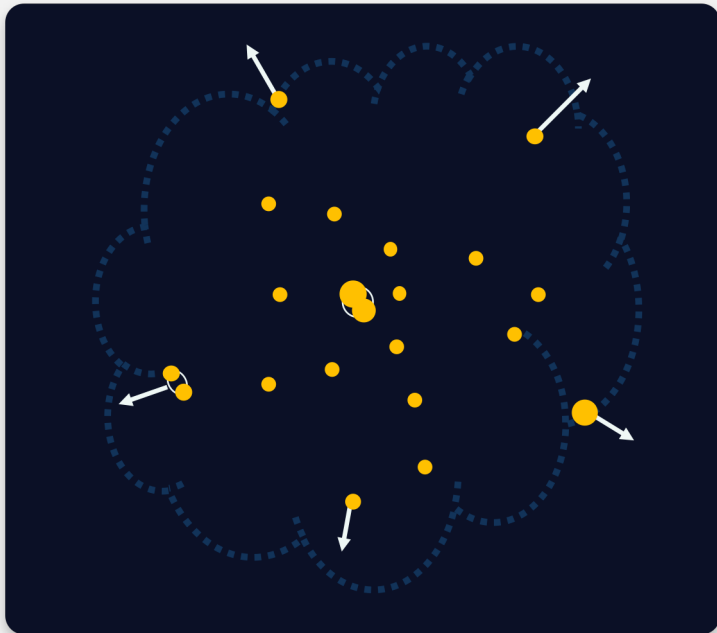
質量分布の領域差: 星団内部 vs. 外部



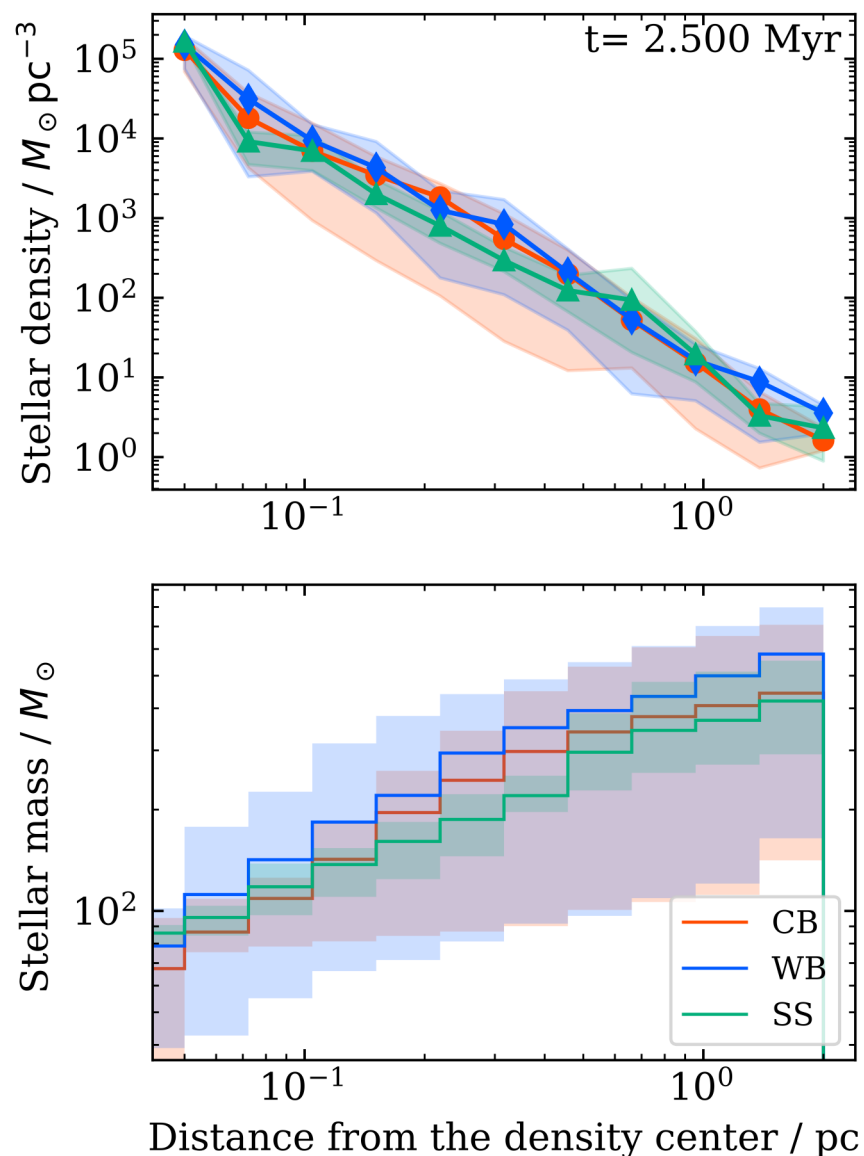
内部: 最も重い星が存在 $\leftrightarrow$ 外部: そこそこ重い星($\sim 10 M_{\odot}$)が多い

領域の差の起源: Mass segregation

1. **Mass segregation:**
重い星は力学摩擦を受け
星団中心に沈む
2. 最も重い連星が周囲の(重い)星を
弾き飛ばす ...Runaway star



星団の性質：星密度分布 & 星質量の累積分布



モデル間で星団の性質の差は小さい

→ 星団形成段階では...

ガスの作るポテンシャルが支配的

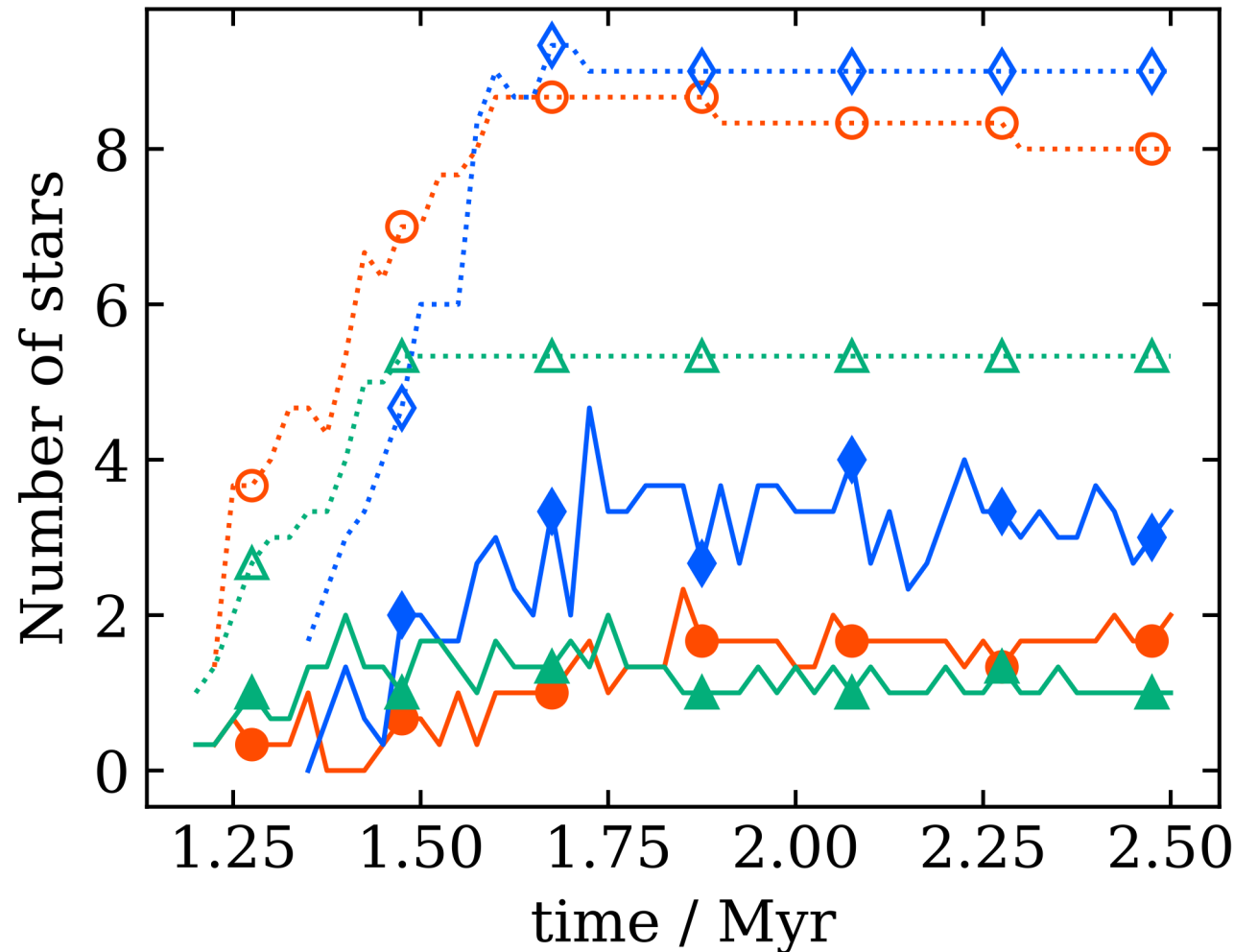
連星による周囲の星への加熱は限定的

→ 続く力学進化では...

連星率の高いCBの星団がより早く膨張するかも

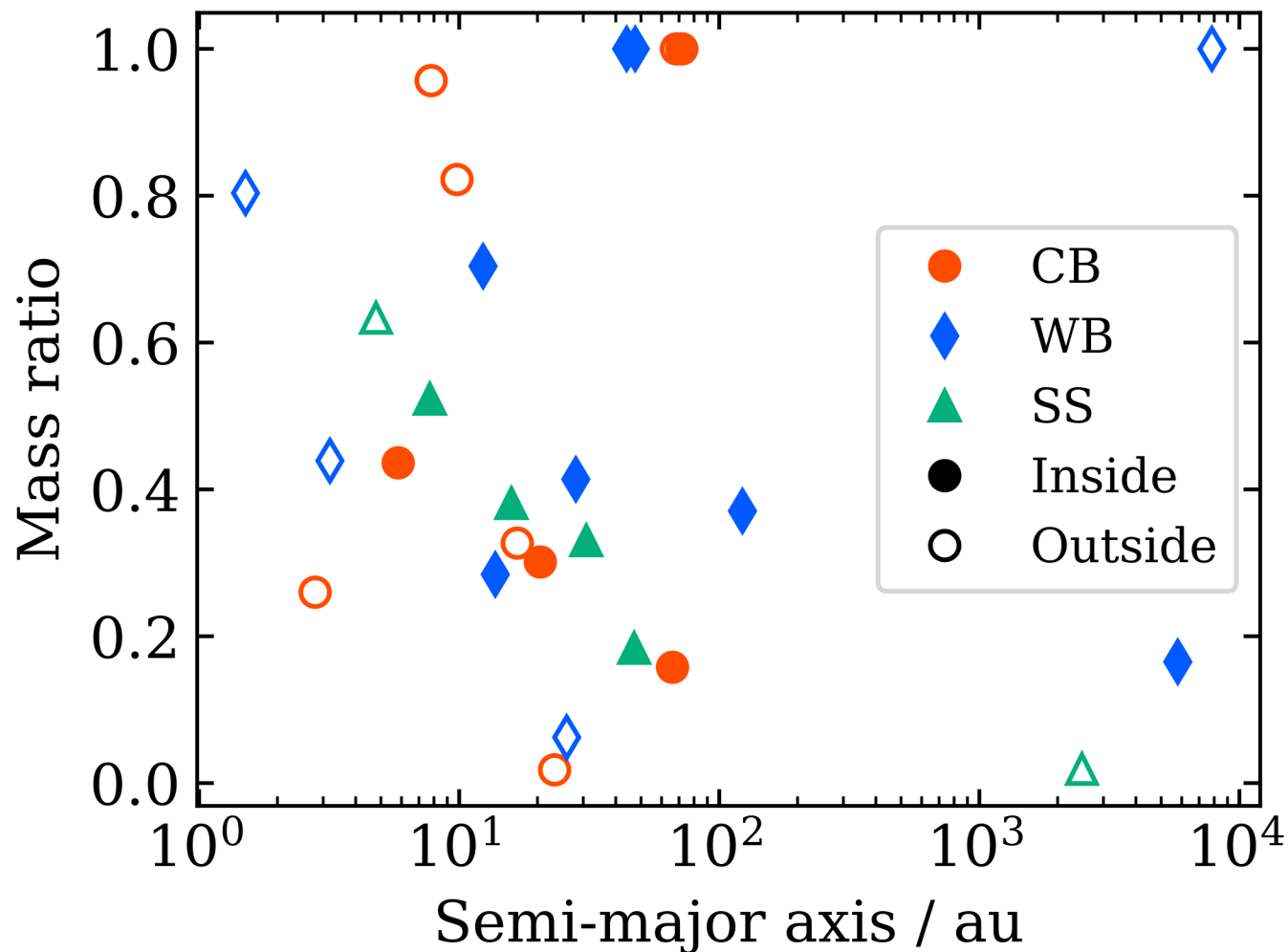
Mass segregationの度合いは初期の連星率に依存しないという報告もある

大質量星の数の進化

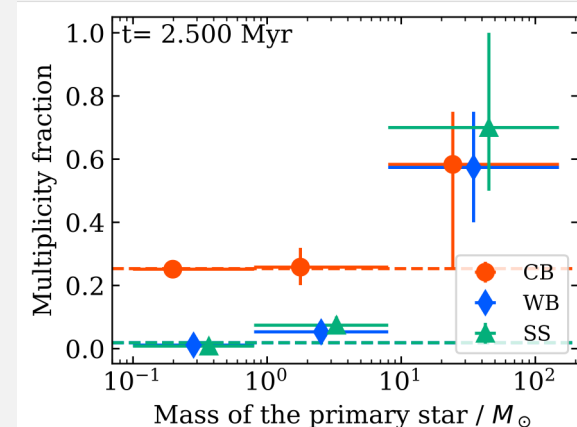


星形成と共に総数は増える
単独星の数はあまり増えない
→形成後すぐにペアを見つける
& 連星の破壊は稀

大質量連星の軌道長半径 & 質量比



- モデル間の差は小さい
 - **CB & WB:** オリジナルなペア($q=1$)は少ない
- 近接遭遇を経験し
ペアの入れ替えが発生
- 頻繁な恒星遭遇により
大質量星の連星率が
(ある程度)決定



まとめ

星団形成の N -body/SPHシミュレーションを実施し、
3つの星/連星形成モデル（近接/遠隔連星, 単星）を比較した

連星の性質：モデル差 大

- 連星率: CB ~30%; WB, SS ~1%
特に小質量星側の差が顕著
- 質量比: SS 平坦な分布
等質量連星の過剰は星形成起源

星団の性質：モデル差 小

- 星の密度/質量分布は類似
- Mass segregationにより
星団内：最も重い星を含む
星団外：中間質量帯の星が多い

連星の始原的な性質(の違い)は星団形成過程を経てもある程度残るが、
形成される星団に与える影響は限定的

観測と定性的に合うのは(等質量)近接連星が生まれるモデル