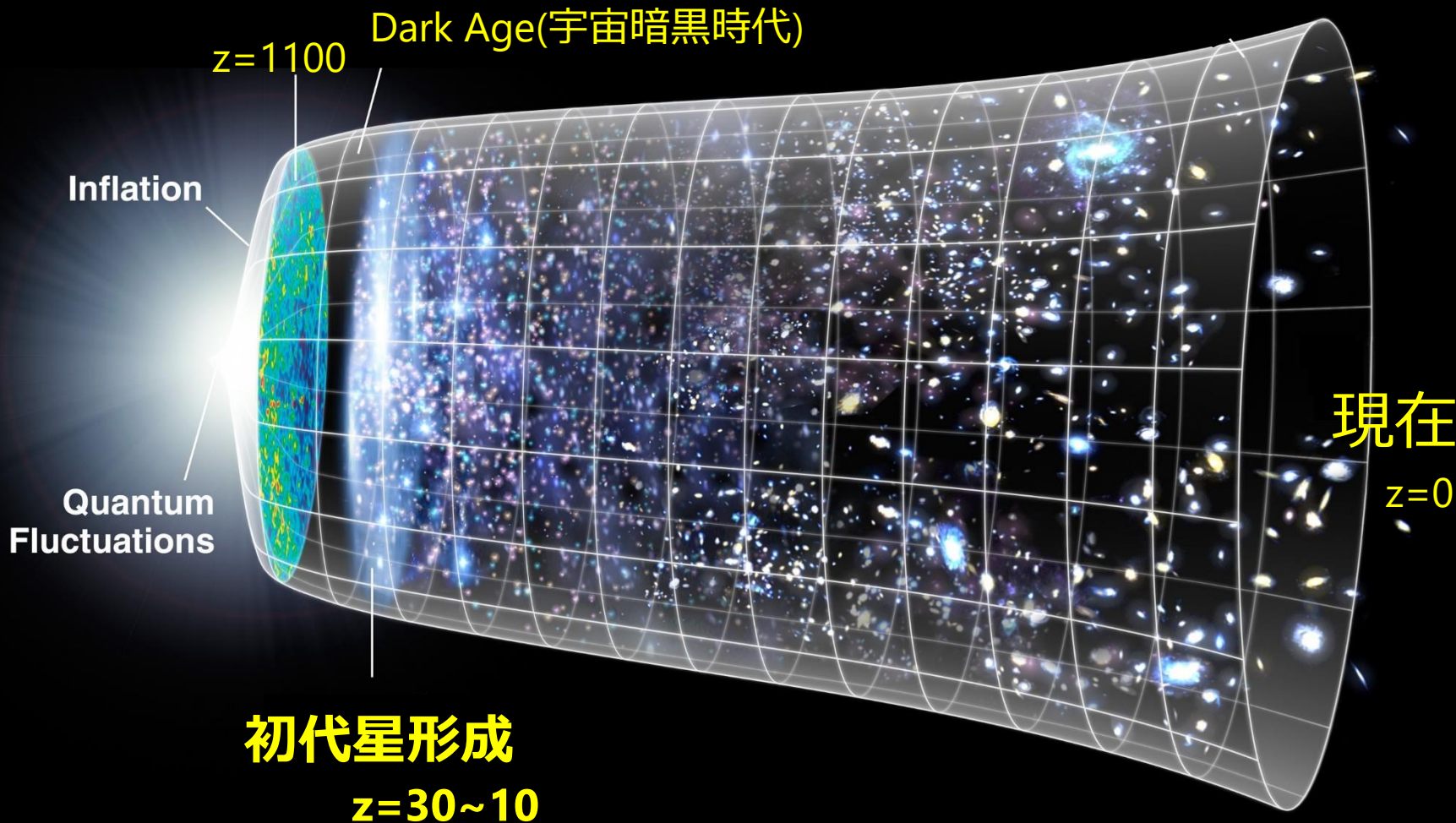


# 初代星近接原始星連星の合体機構 (Merger Conditions of Population III Protostar Close Binaries)

桐原 崇亘 (Takanobu Kirihara)

計算科学研究センター 宇宙物理研究部門  
Theoretical Astrophysics group in CCS

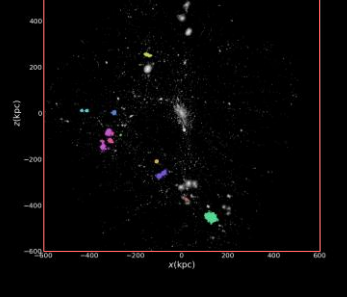
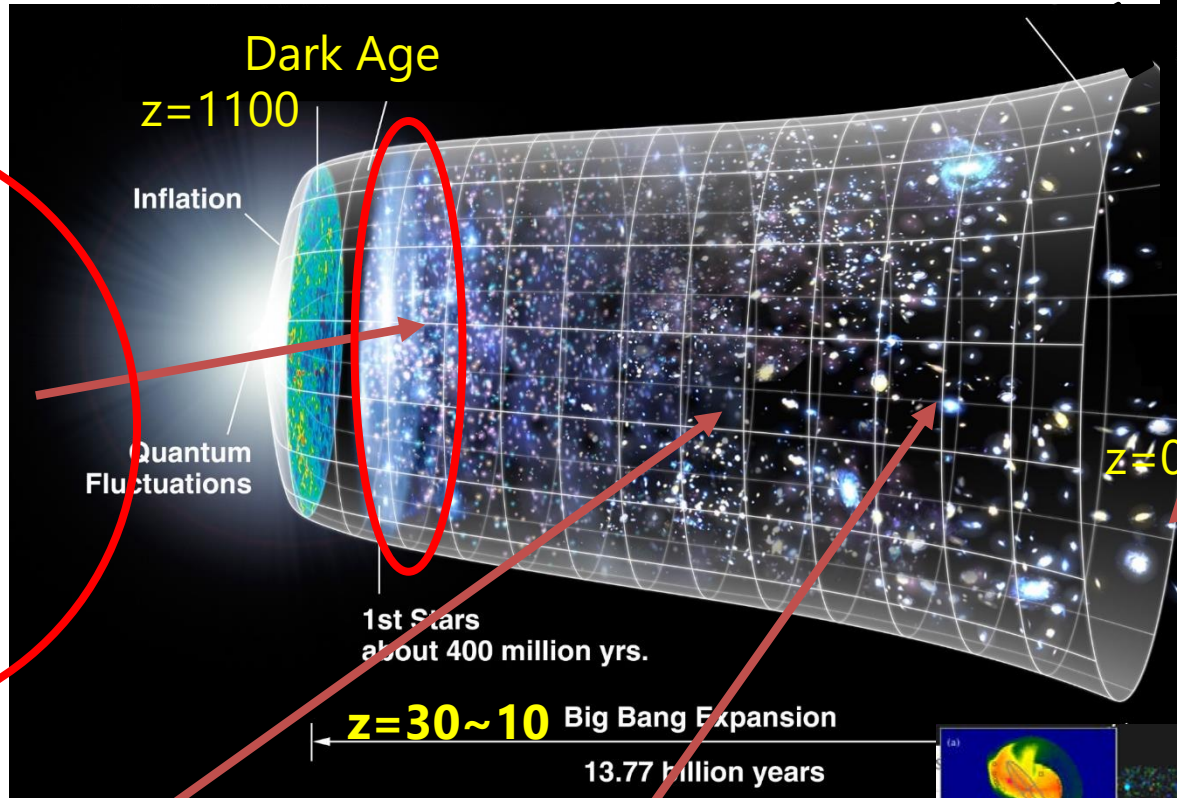
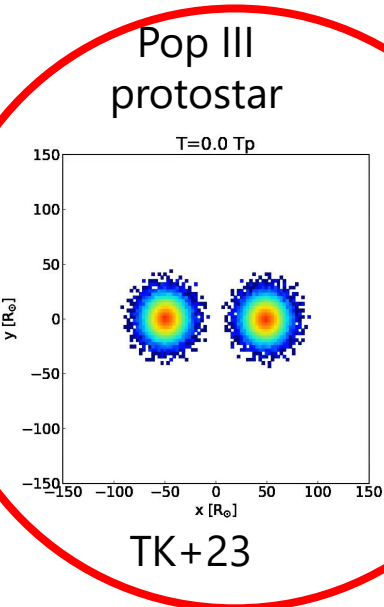
# 宇宙史と天体形成



H, He, Li  
ゼロメタル

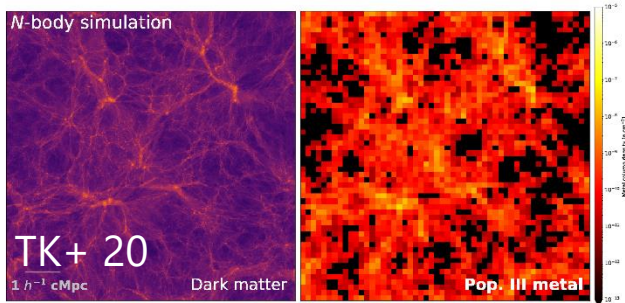


|       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |          |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|----------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|-------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| IA    |  |  |  |  |  |  |  |  |  | IIA   |  |  |  |  |  |  |  |  |  | IIIA     |  |  |  |  |  |  |  |  |  | IVA   |  |  |  |  |  |  |  |  |  | VA    |  |  |  |  |  |  |  |  |  | VIA   |  |  |  |  |  |  |  |  |  | VIIA  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | VIIIA |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 1 H   |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 2 He  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 3 Li     |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 4 Be  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 5 B   |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 6 C   |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 7 N   |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 8 O   |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 9 F   |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 10 Ne |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 11 Na |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 12 Mg |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 13 Al    |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 14 Si |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 15 P  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 16 S  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 17 Cl |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 18 Ar |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |       |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 19 K  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 20 Ca |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 21 Sc    |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 22 Ti |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 23 V  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 24 Cr |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 25 Mn |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 26 Fe |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 27 Co |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 28 Ni |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 29 Cu |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 30 Zn |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 31 Ga |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 32 Ge |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 33 As |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 34 Se |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 35 Br |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 36 Kr |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 37 Rb |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 38 Sr |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 39 Y     |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 40 Zr |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 41 Nb |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 42 Mo |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 43 Tc |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 44 Ru |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 45 Rh |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 46 Pd |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 47 Ag |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 48 Cd |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 49 In |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 50 Sn |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 51 Sb |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 52 Te |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 53 I  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 54 Xe |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| 55 Cs |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 56 Ba |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 57 La-Lu |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 58 Hf |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 59 Ta |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 60 W  |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 61 Re |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 62 Os |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 63 Ir |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 64 Pt |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 65 Au |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 66 Hg |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 67 Tl |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 68 Pb |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 69 Bi |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 70 Po |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 71 At |  |  |  |  |  |  |  |  |  | 72 Rn |  |  |  |  |  |  |  |  |  |

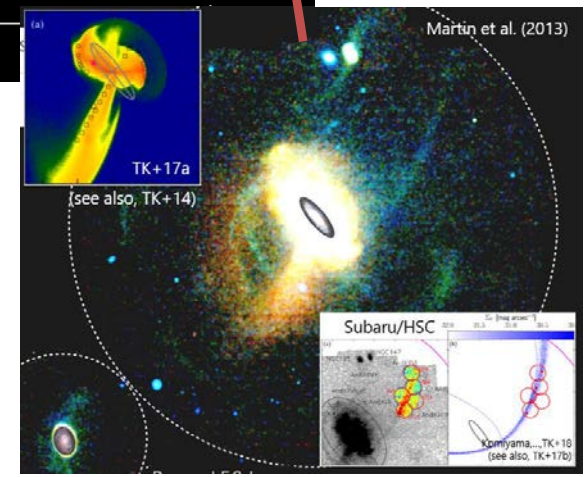
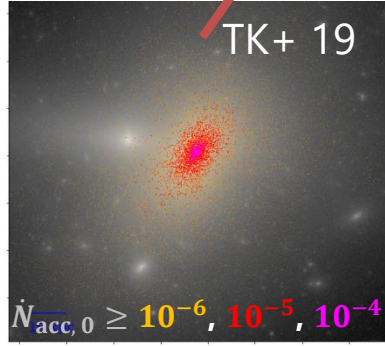


Galactic mergers in the MW and M31

Pop III metal enrichment



ISO metal accretion to stars



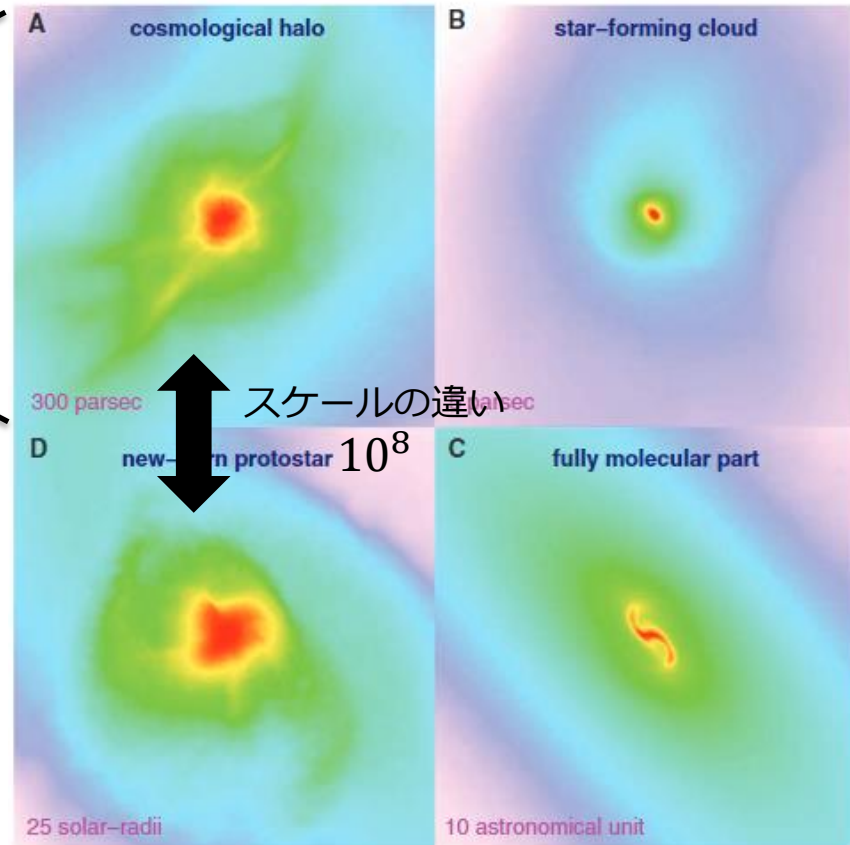
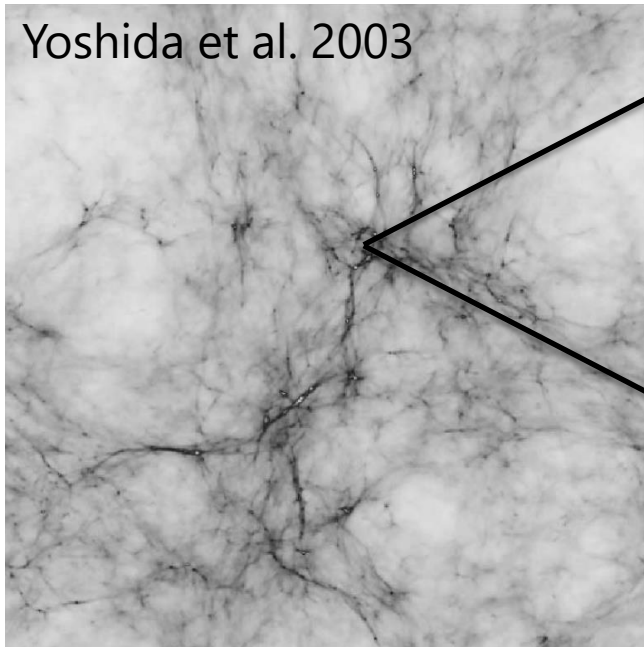
# Interactions of astronomical objects and accretion events



# ダークマターによる構造形成と初代星

The Smallest Dark Matter Structures in the Universe  
Movie

# 初代星(Pop III星)形成



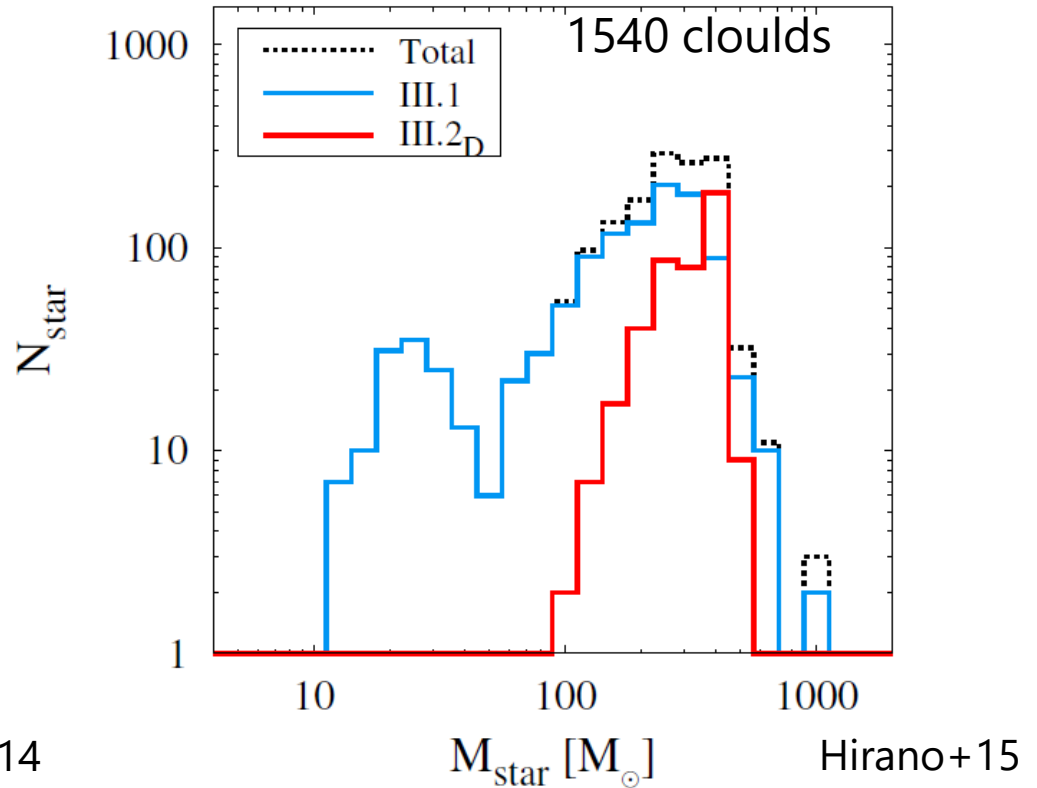
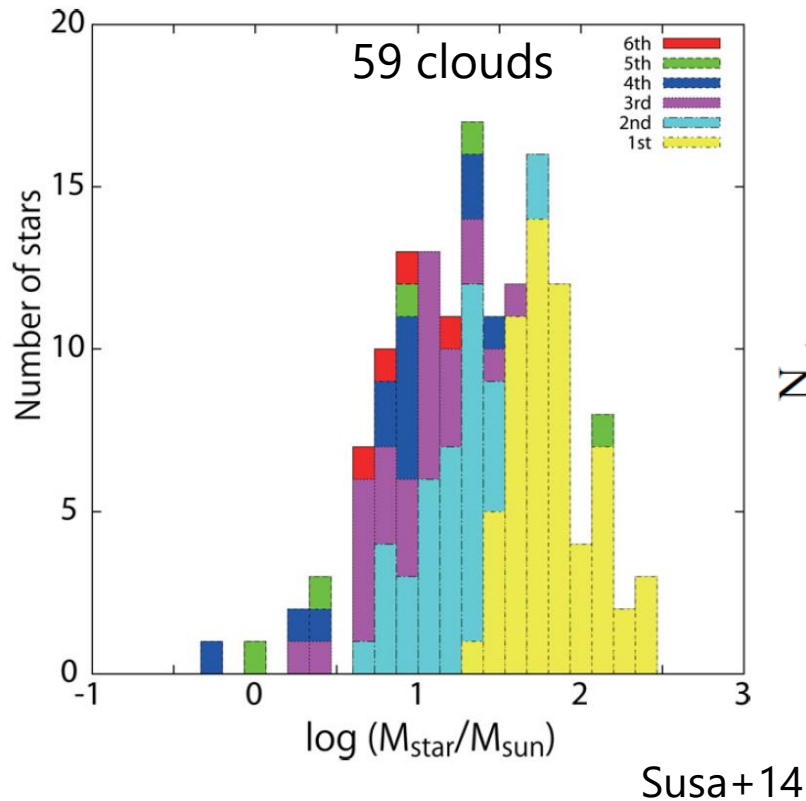
Yoshida et al. 2008

- ✓ ミニハロー  $10^{5-6} M_{\odot}$
- ✓ 始原ガス(H, He, Li)
- ✓  $H_2$ , HD冷却
- ✓ 典型的には大質量

$10 - 1000 M_{\odot}$

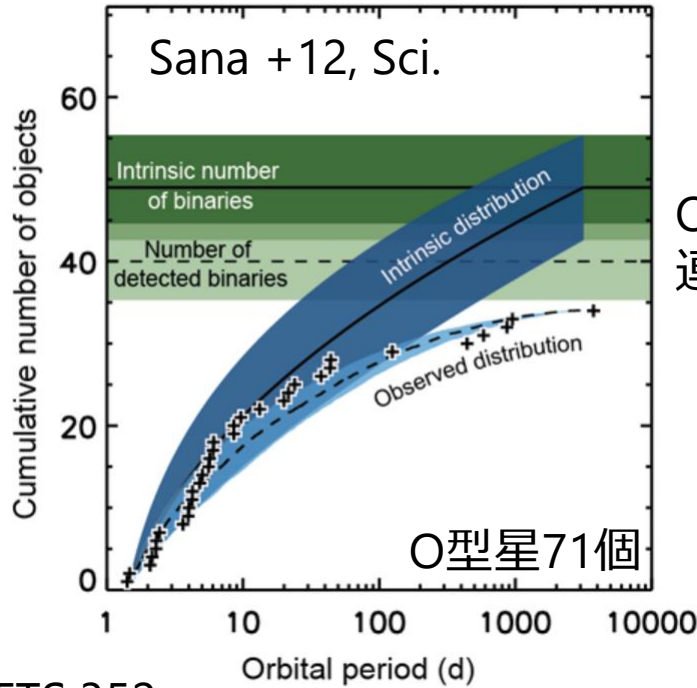
(e.g., Tegmark+97; Omukai & Nishi 1998; Omukai 2001; Omukai & Palla 2003; Nakamura & Umemura 2001; Abel+02; Bromm+02; Hosokawa+11; Stacy+12)

# 初代星の初期質量関数

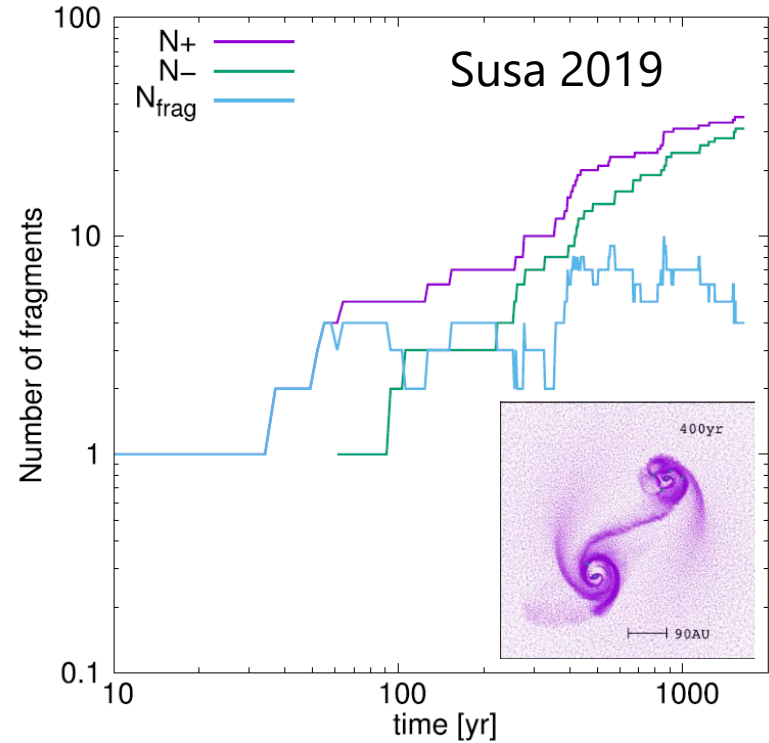


高赤方偏移で超新星爆発し重元素を供給

# 近接大質量連星



O型星の高い  
連星率(>70%)



初代星形成環境下でも原始星相互作用  
が数多く起こることが示唆される

VFTS 352

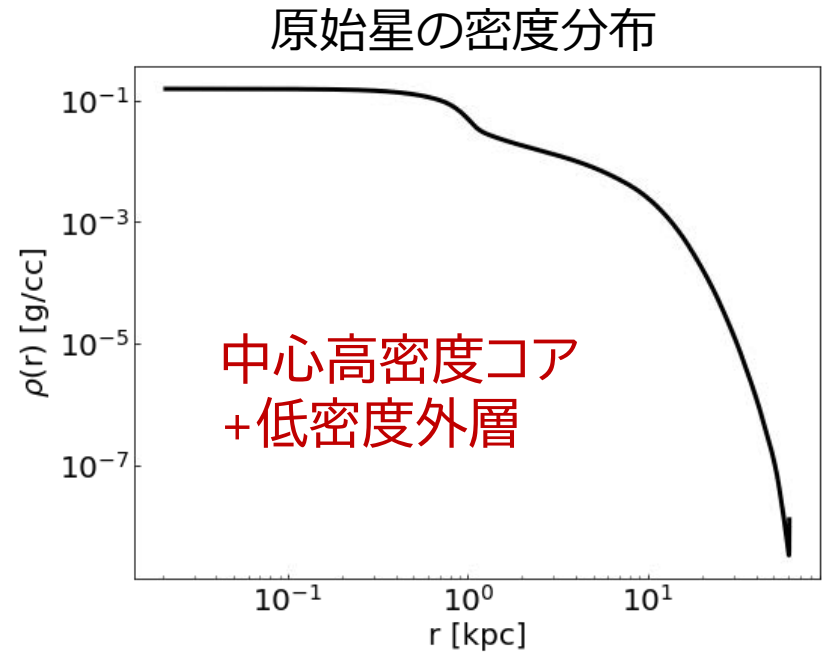
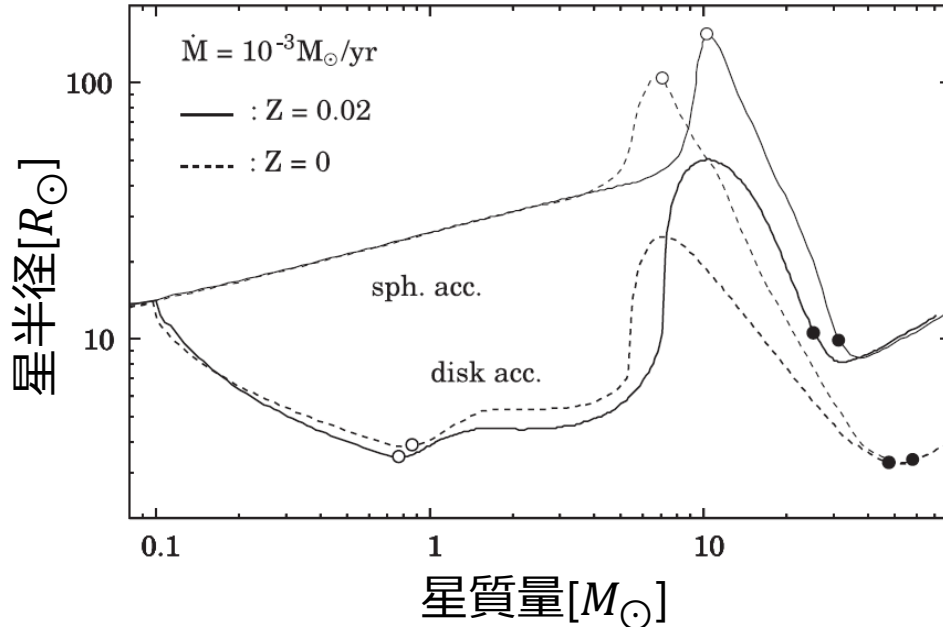


$$\begin{aligned}
 M_1 (M_{\odot}) &= 28.63 \\
 M_2 (M_{\odot}) &= 28.85 \\
 R_1^{\text{mean}} (R_{\odot}) &= 7.22 \\
 R_2^{\text{mean}} (R_{\odot}) &= 7.25 \\
 a (R_{\odot}) &= 17.55
 \end{aligned}$$

近接原始星連星が原始星段階で合体せずに、近接主系列連星に進化できるか？ 7

# 目的

Hosokawa, Yorke & Omukai 2010



典型的な降着率の原始星は $\sim 100R_{\odot}$ 程度まで膨らむ

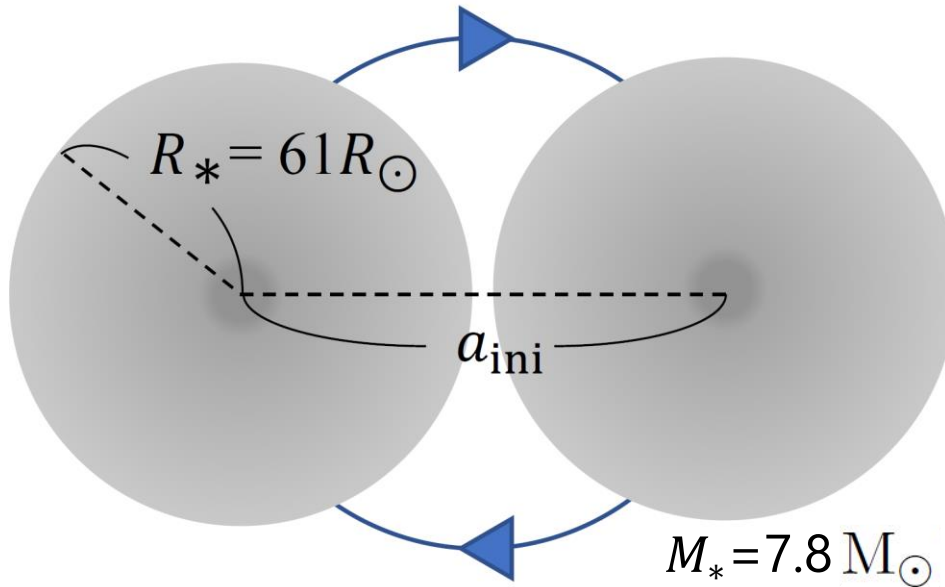
✓ どのようなメカニズムで連星は合体するのか？

✓ 原始星連星は外側をかすった程度で合体するのか？

➡ 原始星連星進化のSPHシミュレーションにより調べる



# 初期条件とパラメータ



原始星モデル(Hosokawa+2010)

$$\dot{M} = 10^{-3} M_\odot \text{ yr}^{-1}$$

$$Z=0$$

## パラメータ

初期の連星間距離  $a_{ini}$   
(軌道は  $e=0$ )

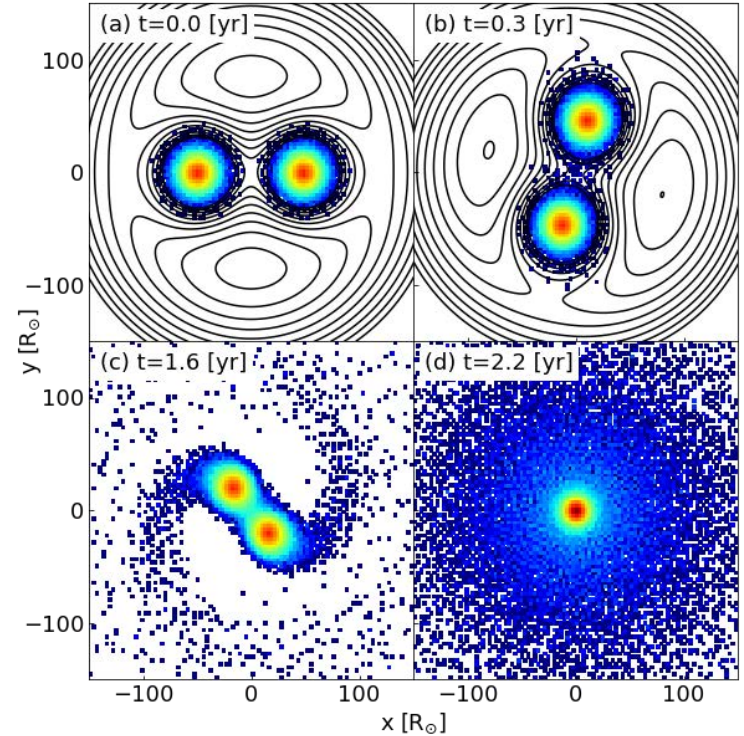
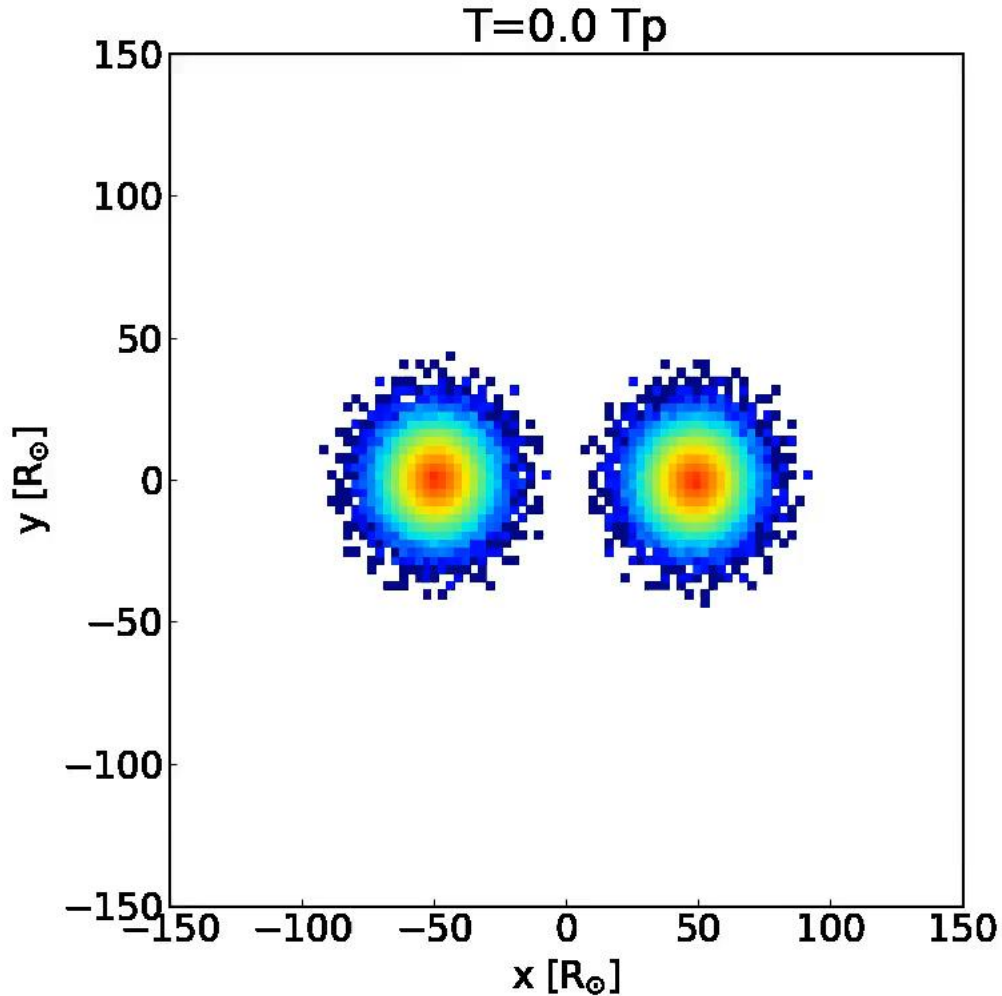
SPH法 (Smoothed particle hydrodynamic)  
simulations using RSPH code  
(Susa & Umemura 2004; Susa 2006)

計算機: XC50 @CfCA

$N=65536$

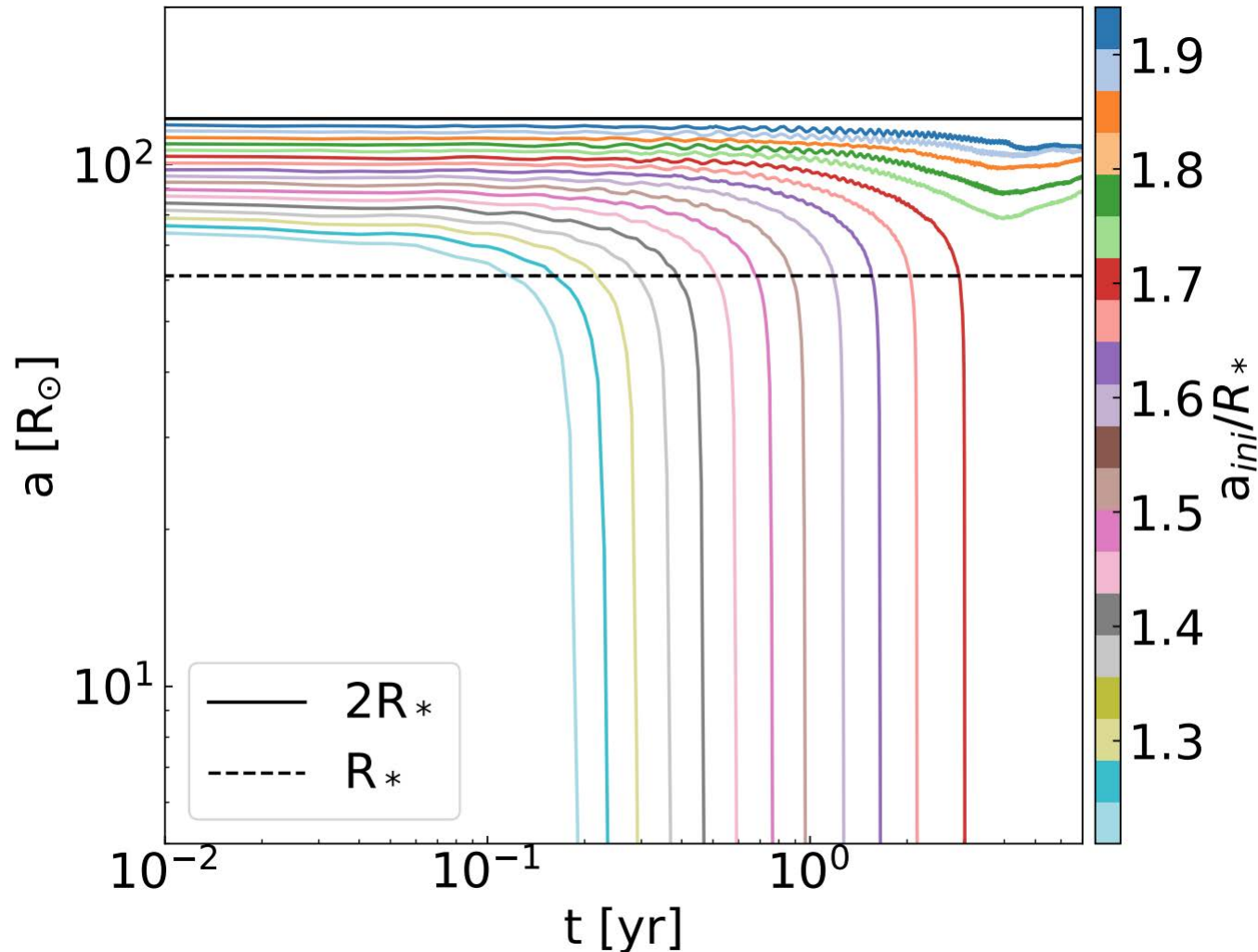
総計算量  $\sim 520$  core x 1 year

# 原始星連星進化



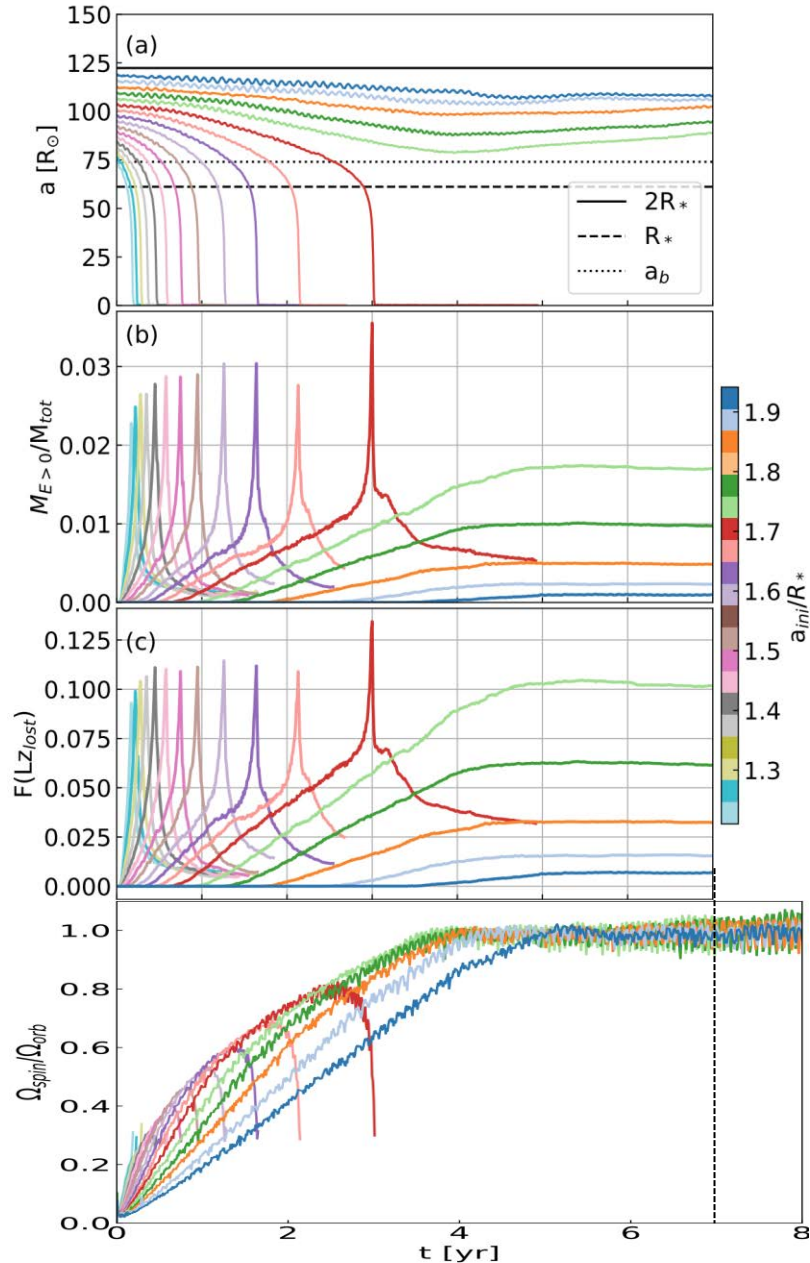
1. 角運動量を原始星の自転にわたして距離が縮まる(原始星はspin upする)
2. 大きな角運動量を持った外層がL2点から徐々に放出される
3. さらに連星間距離が縮まる
4. 最後に質量放出とともに合体に至る

# 連星間距離の時間進化



原始星連星は低密度外層同士が少し( $\sim 15\%$ )重なる程度で合体する<sup>1</sup>

# 質量損失と角運動量損失



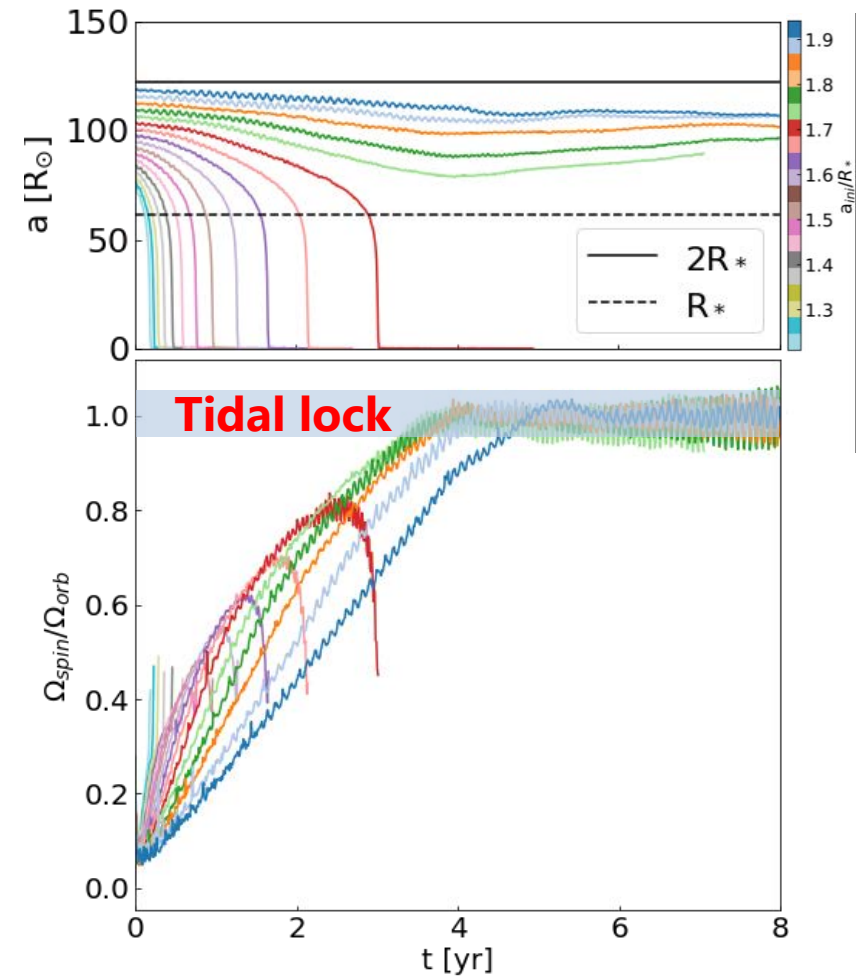
- ✓ 合体のタイミングで約3%のMass loss, 約10%の角運動量を失う
- ✓ 時間進化とともに星の自転回転速度が大きくなる  
(公転運動からの角運動量輸送)
- ✓ 星の自転角速度の増加とともに連星間距離が小さくなる



# 潮汐固定(Tidal lock)

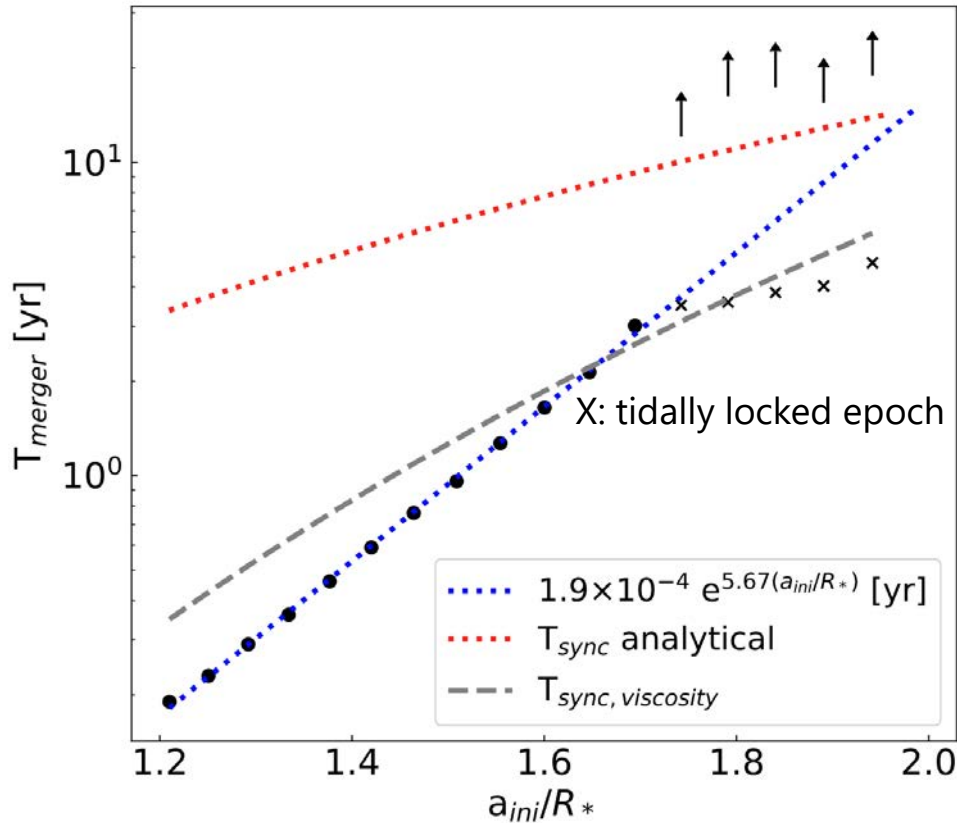


原始星の自転角速度の時間進化

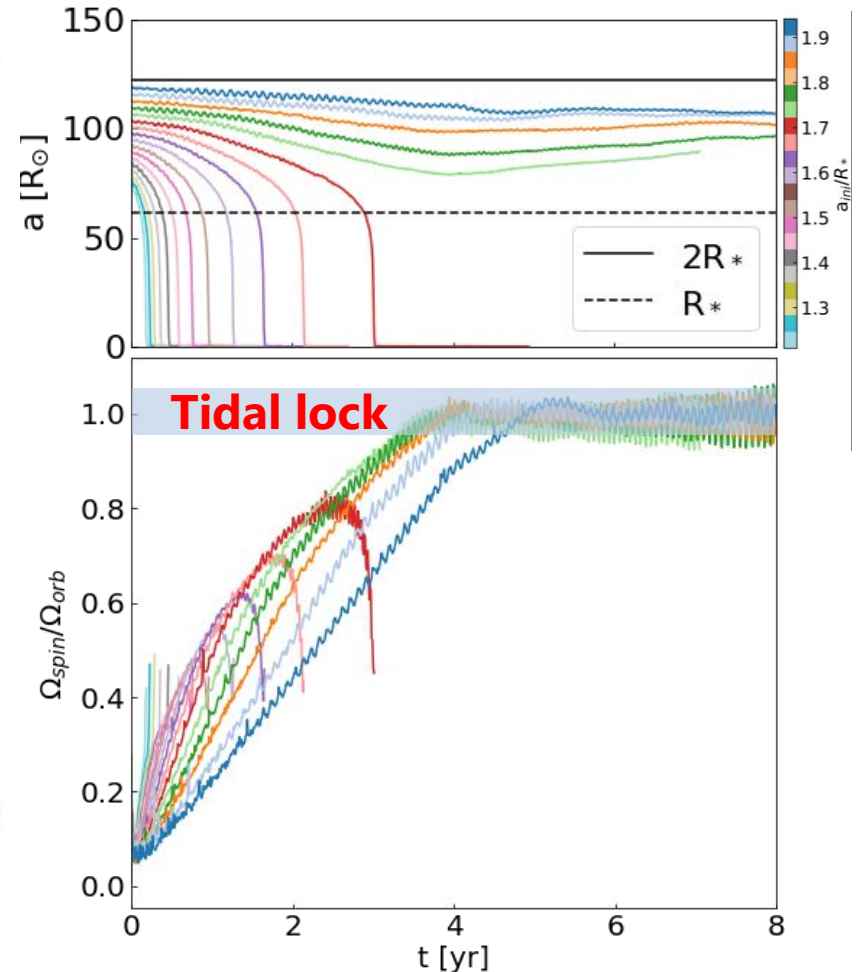


# 合体のタイムスケール

連星合体までの時間



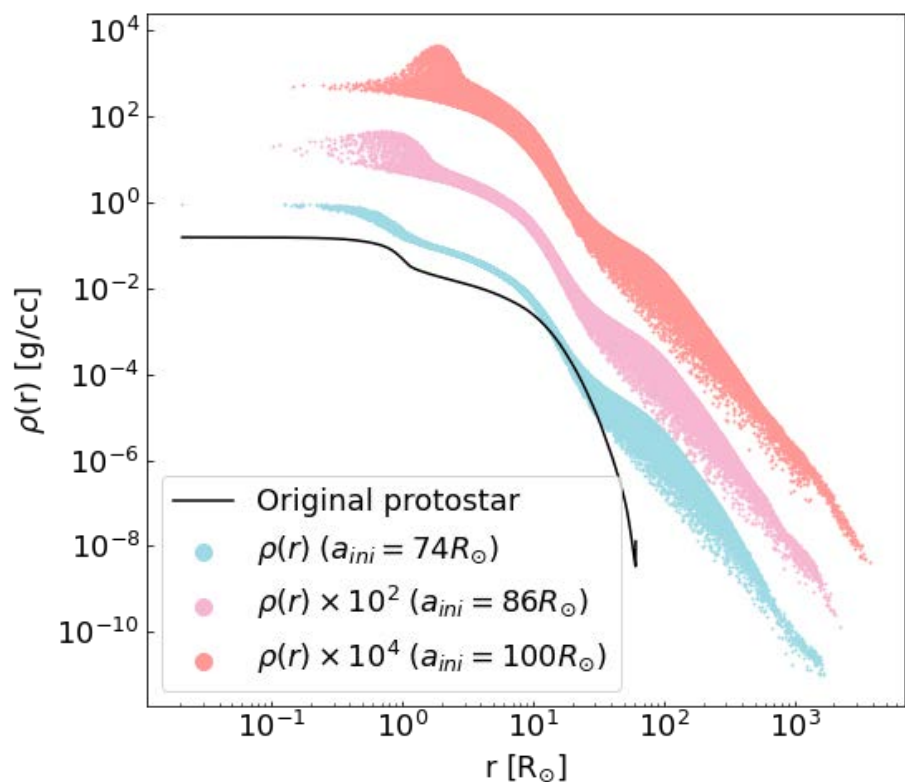
原始星の自転角速度の時間進化



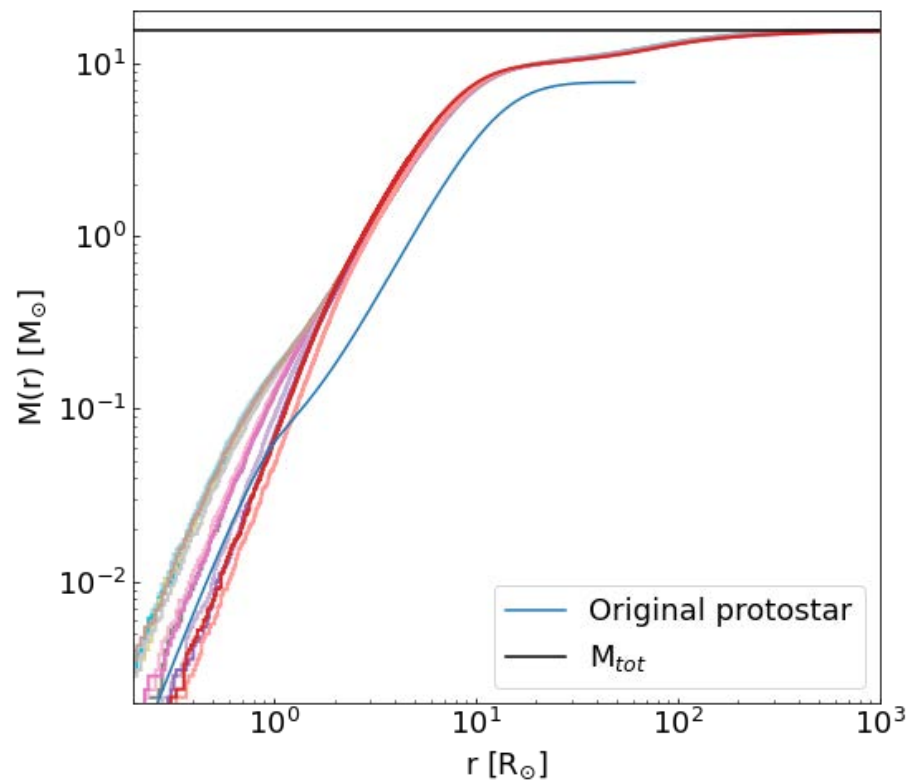
初期の連星間距離  $a_{ini} \leq 1.7 R_*$  では、潮汐固定のタイムスケールよりも短い時間で合体に至る。潮汐固定後に連星間距離は縮まらない。

# 合体後の星の構造

密度分布



質量分布



- ✓ 合体した原始星の密度分布・質量分布はimpact parameterにほぼよらない
- ✓ 実効的な星の半径は数倍膨れる

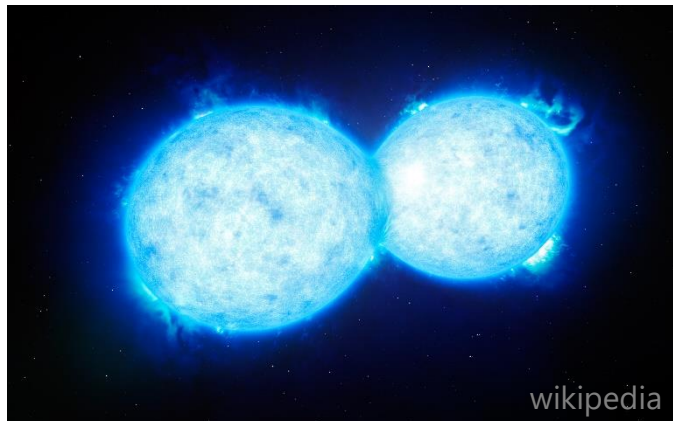
# 近接主系列星連星形成メカニズムの謎

## VFTS 352

- $M_1 (M_{\odot}) = 28.63 \pm 0.30$
- $M_2 (M_{\odot}) = 28.85 \pm 0.30$
- $R_1^{\text{mean}} (R_{\odot}) = 7.22 \pm 0.02$
- $R_2^{\text{mean}} (R_{\odot}) = 7.25 \pm 0.02$
- $a (R_{\odot}) = 17.55 \pm 0.06$

原始星段階ではより膨らんでおり形成過程が不明

見落としている物理がある？  
主系列連星に進化する段階 or  
連星形成後に軌道角運動量を  
抜くメカニズムが重要？





# まとめ

- 大質量近接連星の形成過程を理解するため、高密度の中心コアと巨大な低密度のエンベロープからなる原始星連星の合体条件を調査した
- 初代星原始星連星進化のSPHシミュレーションを行うことで原始星連星の合体プロセスを明らかにした
- 原始星の軌道角運動量を原始星の自転に渡し、大きな角運動量をもった原始星外層が連星系から放出することで、軌道角運動量を持ち去り連星合体に至った
- 原始星連星は原始星低密度外層が少し(15%ほど)食い込む程度で合体する
- 近接連星を形成するには、原始星がKH収縮した後に連星間距離を縮める何らかのメカニズムが必要である