

KH収縮期における近接連星形成の可能性



Kenji Eric Sadanari (Konan U.)

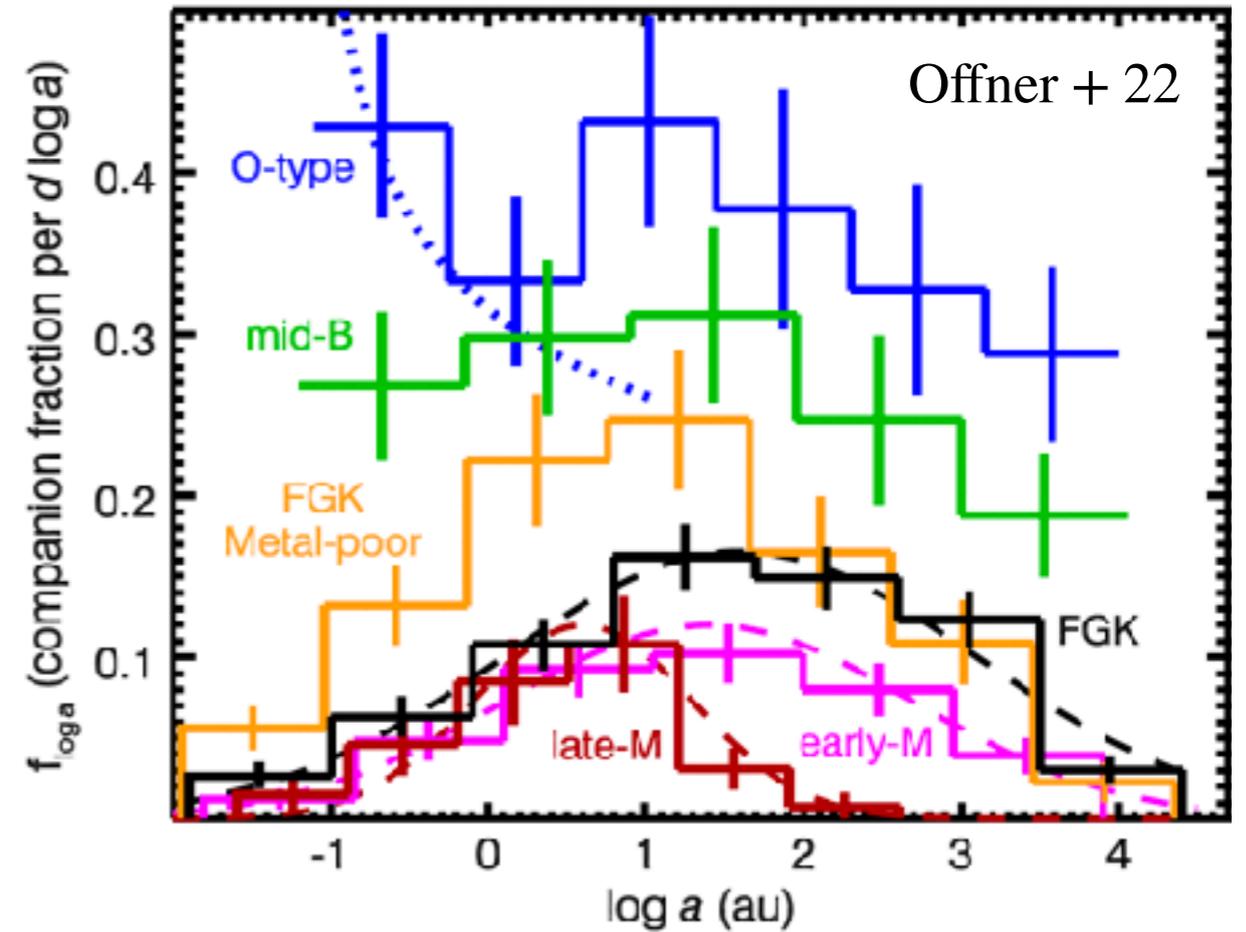
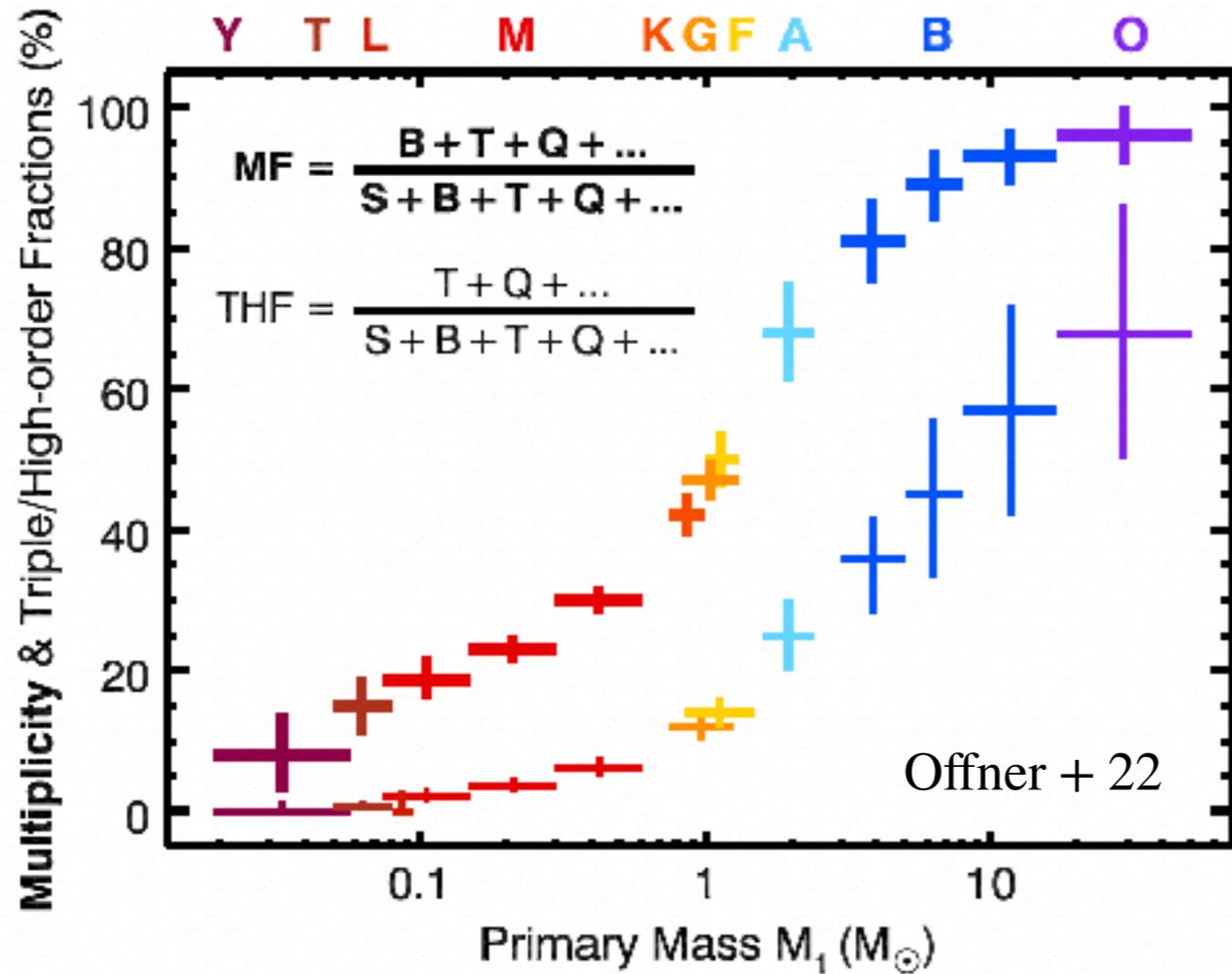
Hajime Susa (Konan U.)

VFTS 352
(Credit: ESO/L. Calçada)

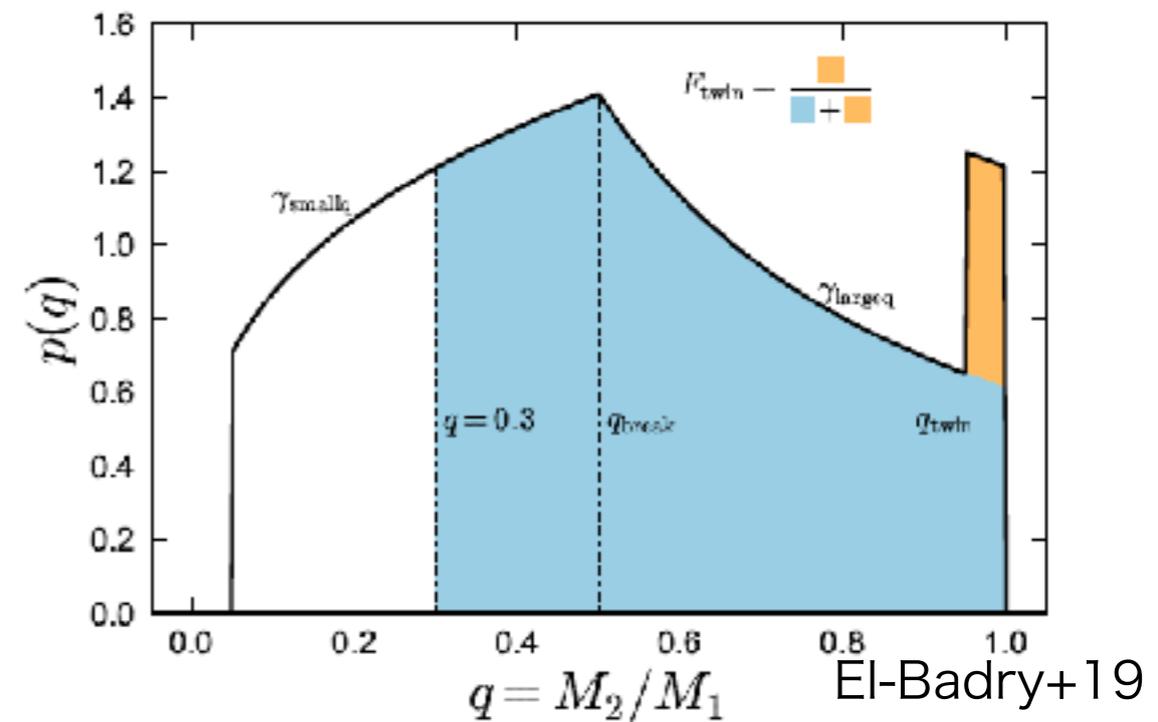


連星の統計的性質

星は単星よりも連星系を好む傾向になる

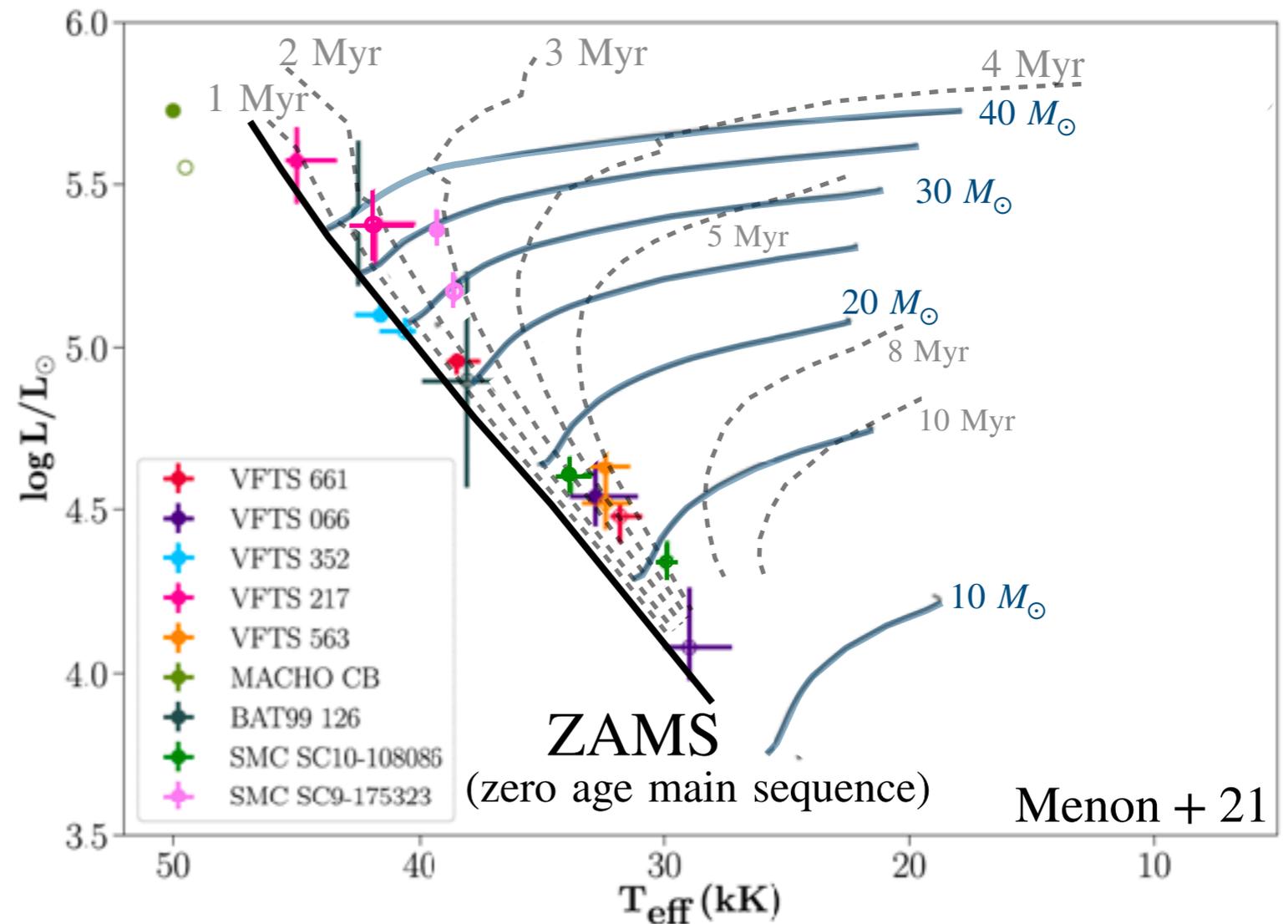
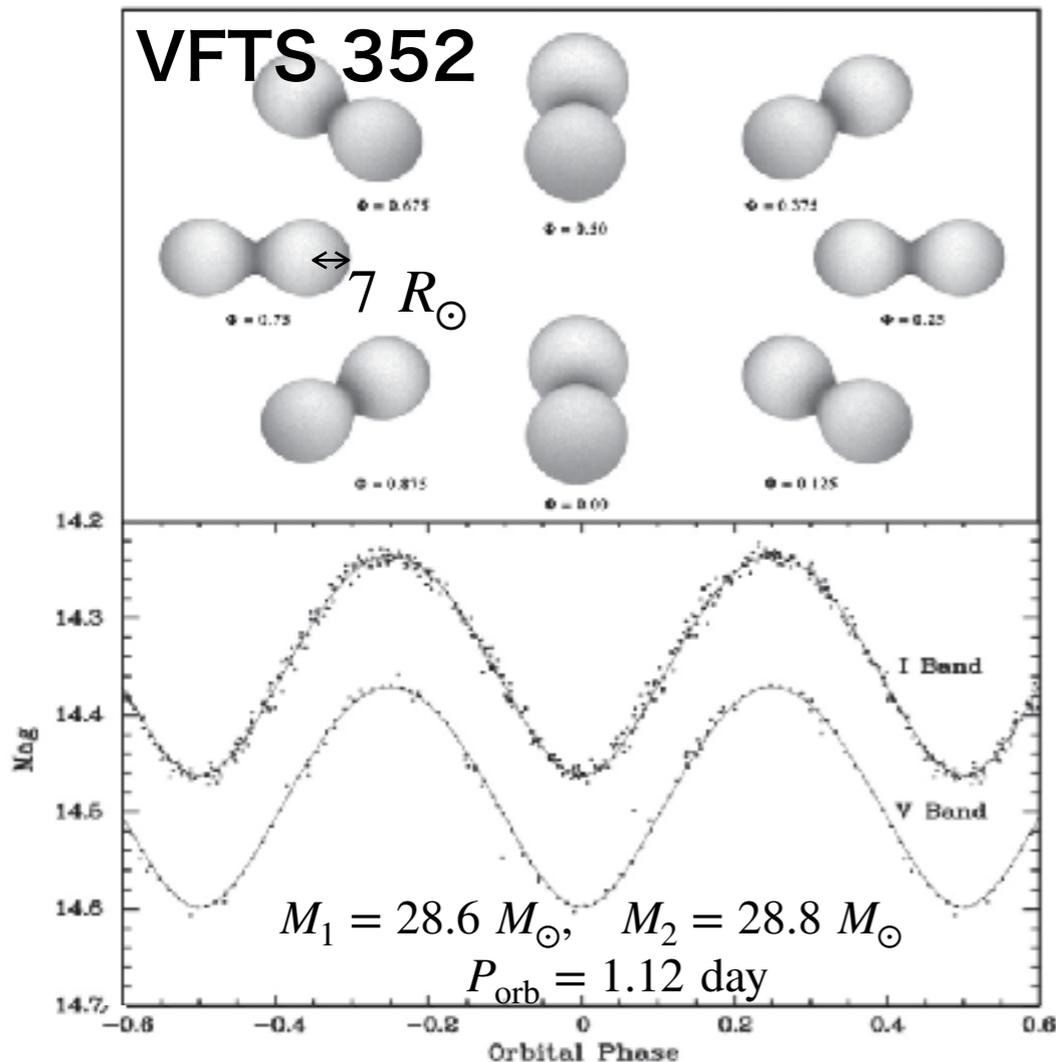


- 大質量星ほど連星率が高い (80%以上)
- 大質量星ほど近接連星の割合が高い
- 質量比 1 の連星の割合が高い (twin binary)



接触連星の観測

massive contact binary ($M_{\text{tot}} > 10 M_{\odot}$)



接触(近接)連星

- ・ 観測数: 数百個以上
- ・ 質量比: $q = 0.1 - 1$
- ・ 軌道周期 $P = 0.3 - 6.6 \text{ day}$

- ・ MS初期段階の接触連星が多く存在

→ X-ray binary, type Ib/c SN, GW

連星形成シナリオ

star formation process

コア形成

収縮期

降着期

ZAMS



(a) Filament Fragmentation

(b) Core Fragmentation

(c) Disk Fragmentation

(d) Capture

ΔL

$\Delta L \sim 0.01 - 0.25 \text{ pc}$

(連星間距離 a)

$0.01 - 0.1 \text{ pc}$

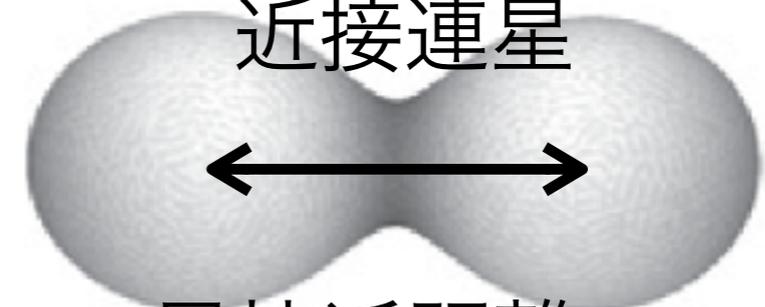
$10 - 500 \text{ au}$

$< 1 \text{ pc}$

Offner + 22 (PP VII)

- 近接連星 ($a < 10R_{\odot}$) を作れるか?
- ZAMS前(降着期)の
原始星構造 (i.e., 半径) に依存

近接連星



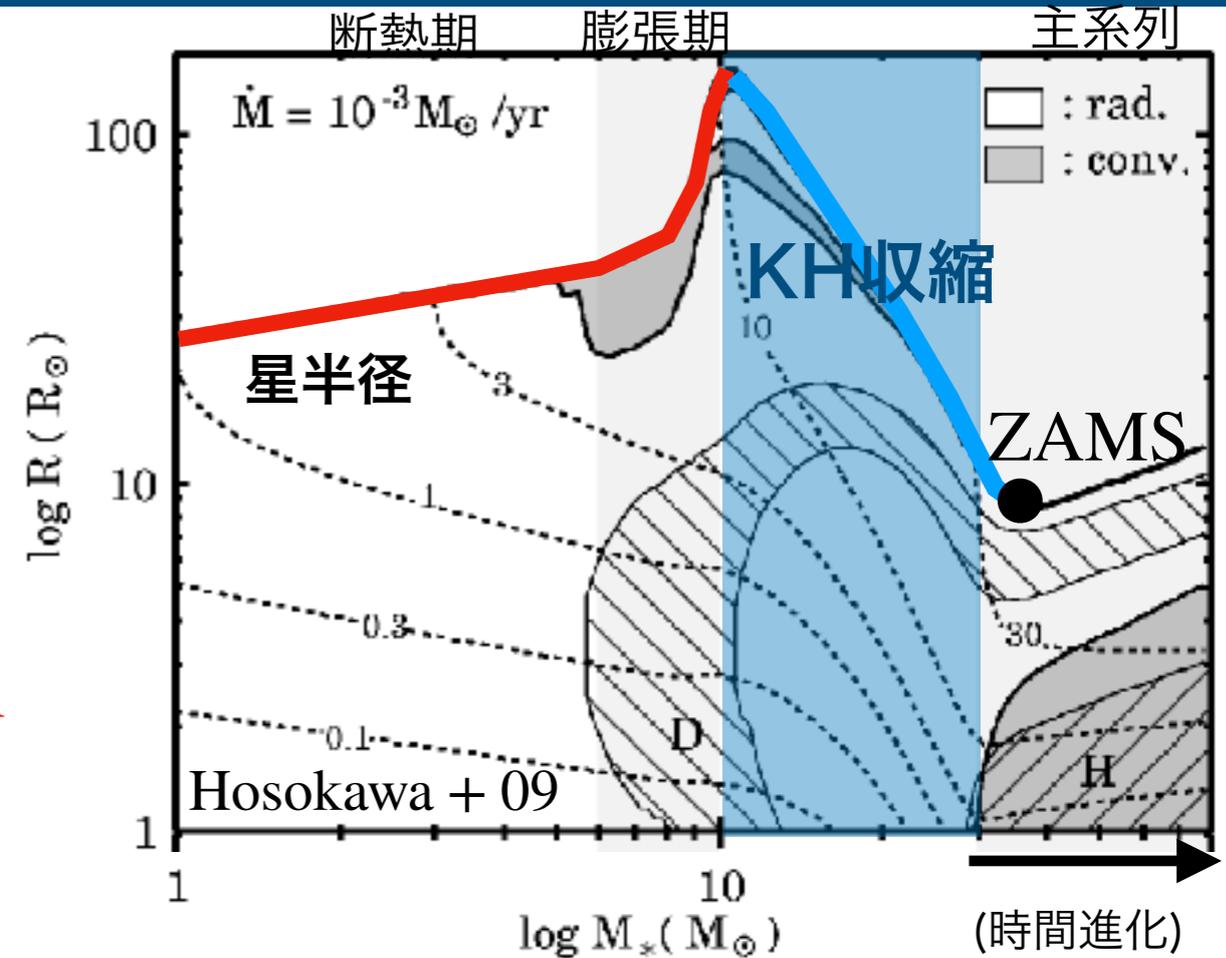
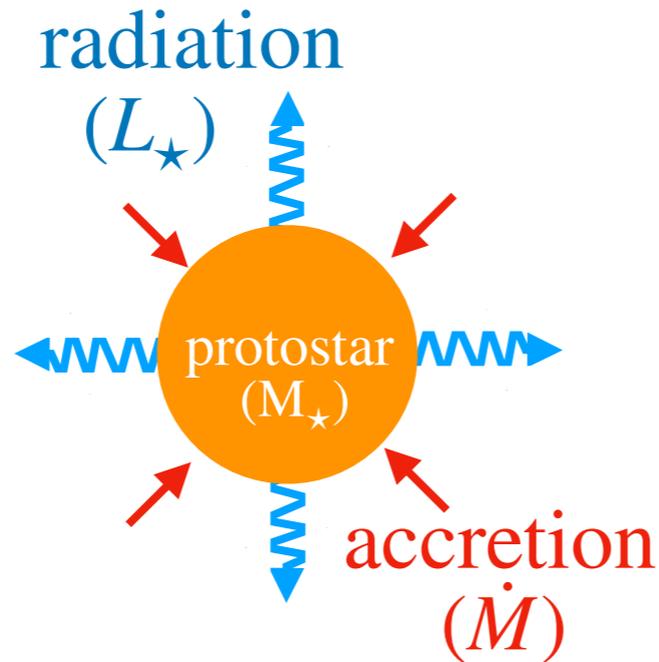
最接近距離 $a_{\min} = ?$

降着期における最接近距離

✓原始星半径の進化

$$t_{\text{KH}} = \frac{GM_{\star}^2}{RL_{\star}}, \quad t_{\text{acc}} = \frac{M_{\star}}{\dot{M}}$$

- $t_{\text{KH}} > t_{\text{acc}} : R \uparrow$
 - $t_{\text{KH}} < t_{\text{acc}} : R \downarrow$
- (Kelvin-Helmholtz収縮)



降着期における最大半径 $R_{\text{max}} \sim 100R_{\odot}$

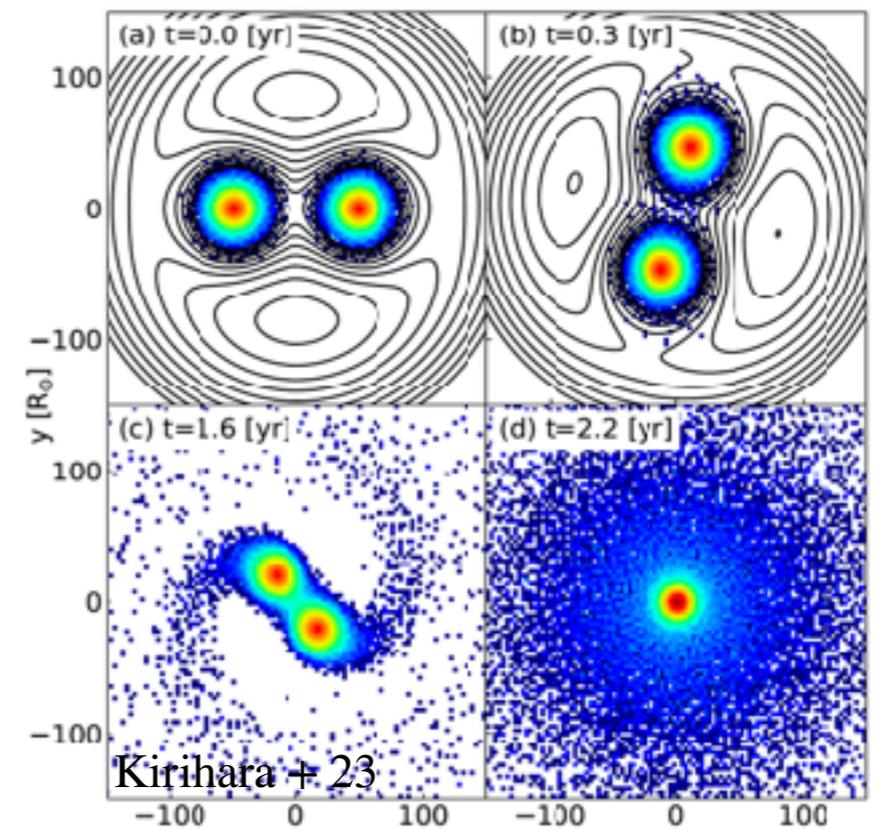
✓合体条件

- 連星間距離 a が、 $1.8 R$ よりも接近すると合体 (Kirihara+23)

→KH収縮前の接近可能最小距離

$$a > a_{\text{min}} \sim 2R_{\text{max}} \sim \text{数}100 R_{\odot}$$

→接触/近接連星 ($a < 10 R_{\odot}$) はKH収縮後に形成されるはず



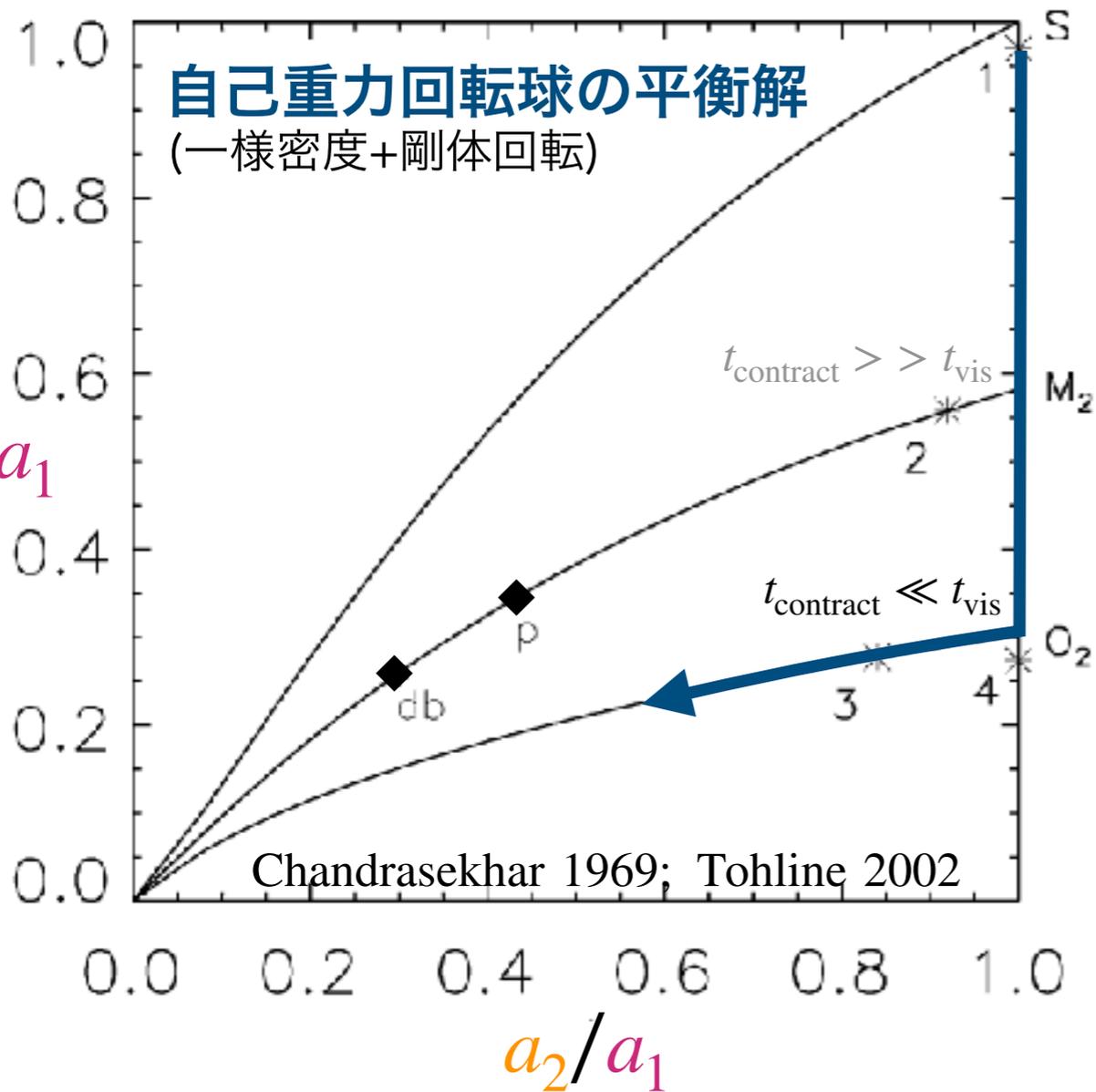
Kirihara + 23

KH収縮時のfissionシナリオ

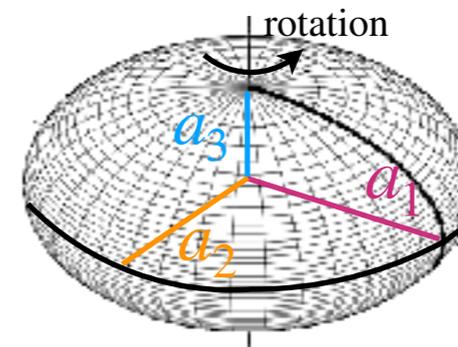
fission仮説(Lebovitz 1974, 1984)

KH収縮に伴う回転強度 $\beta (= E_{\text{rot}} / |E_{\text{grav}}|)$ の上昇により、最終的に星が二つに分裂

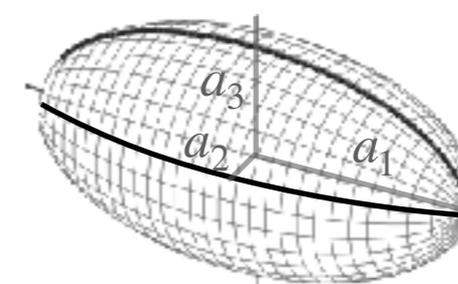
$$\beta_{\text{rot}} \propto \rho^{1/3} \text{ (角運動量保存 + 質量保存)}$$



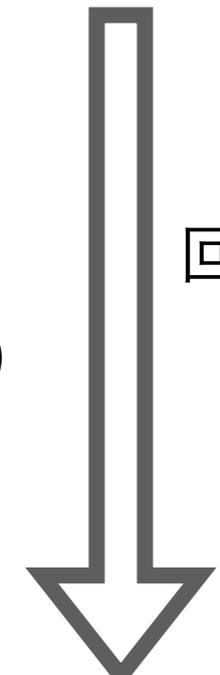
マクローリン楕円体



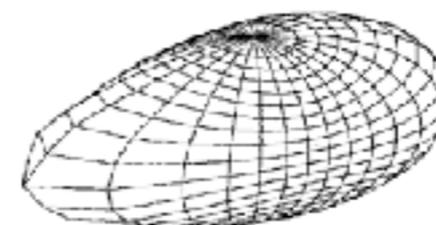
バー構造 (3軸不等)



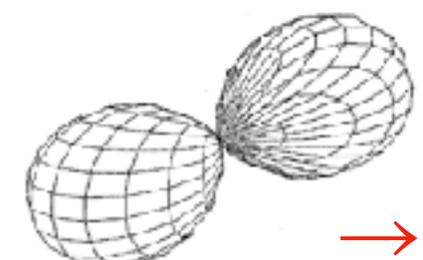
回転強度
(収縮)



洋梨型(p)

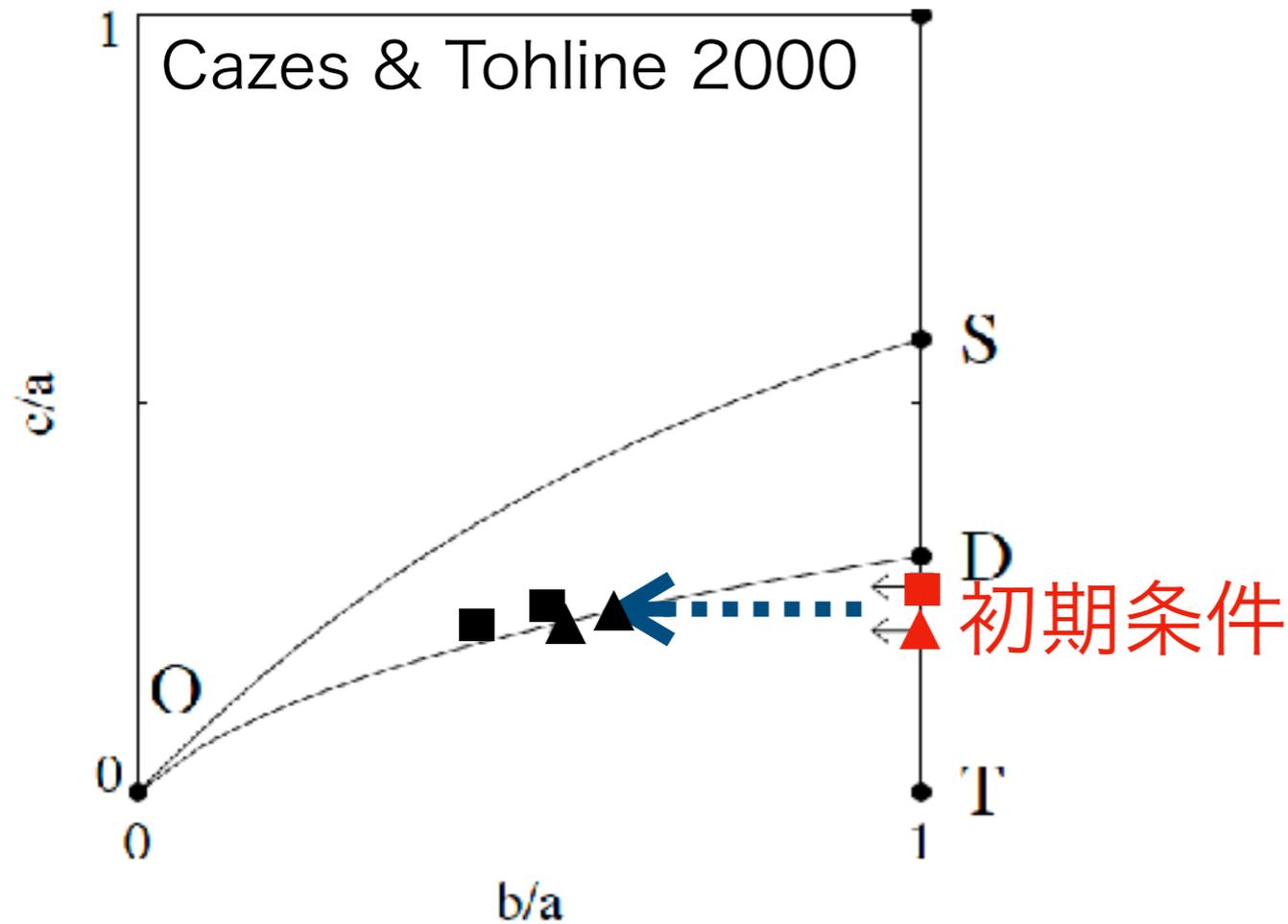


ダンベル型(db)



→連星

先行研究:自己重力回転球の数値計算



- ・ポリトロープガスを仮定

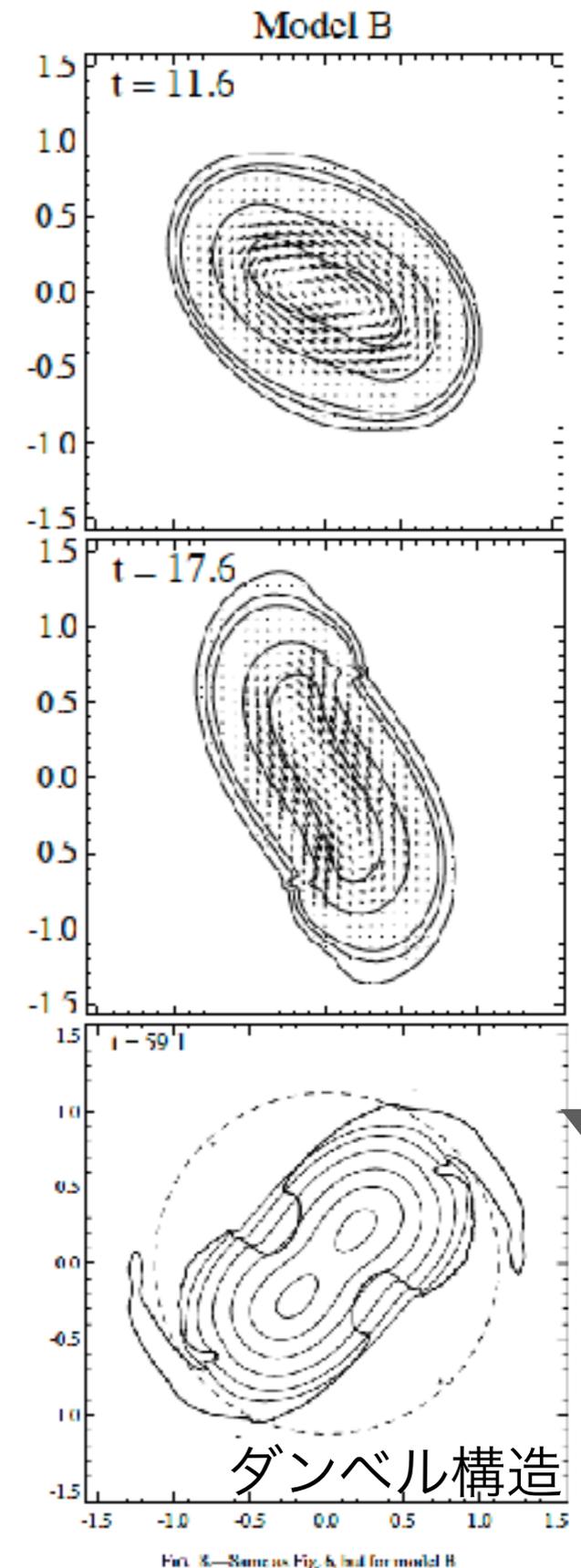
$$P = \kappa \rho^\gamma, \quad \gamma = 5/3$$

→ κ を減少させることで、ガス球を収縮させる

$$\kappa(t) = \kappa_0(1 - t/(4P_{\text{rot}}))$$

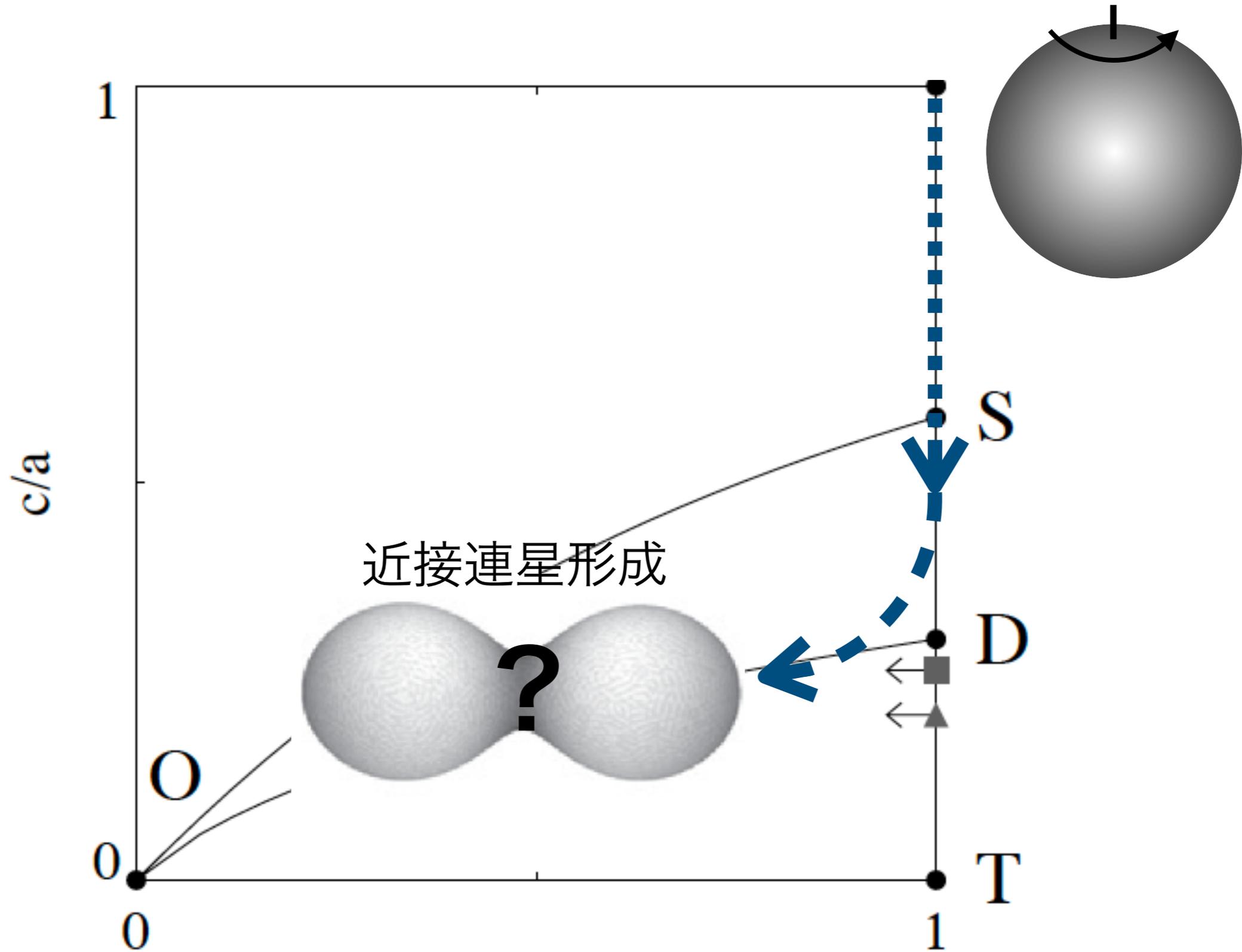
ダンベル構造の出現
冷やし続ければ、分裂するかも？

しかしながら、分解能不足により、長時間計算できなかった



本研究の目的

自己重力回転球（星）を冷やし続けた時、星構造はどのように変化するのか？



3D流体計算(バロトロピック)

- AMR(Adaptive Mesh Refinement) code

- 自己重力+ (磁気) 流体

- バロトロピックEoSを仮定

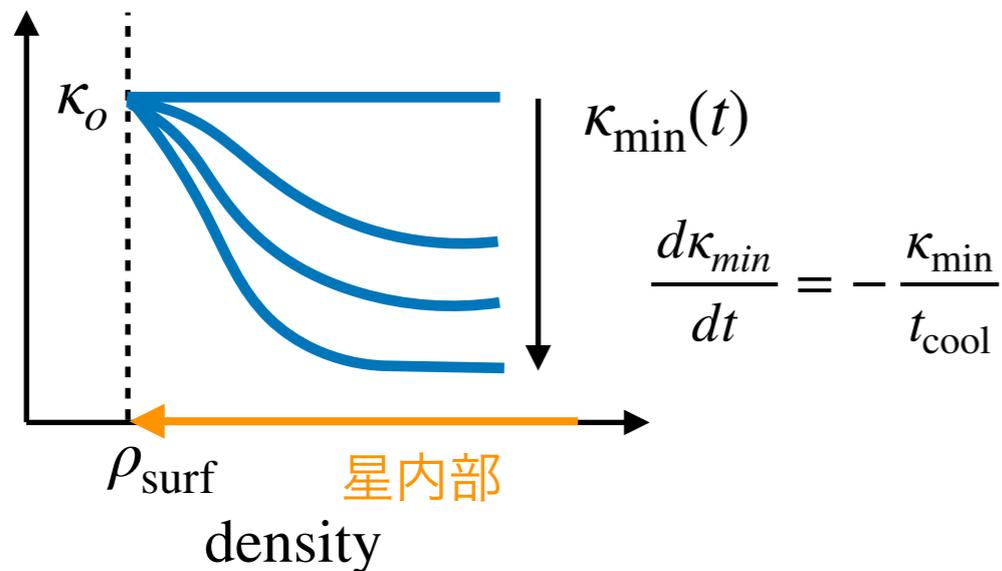
$$P = \kappa(t)\rho^\gamma, \gamma = 5/3 (\rho > \rho_{\text{surf}})$$

$$P = nk_b T_o, T_o = 10^3 \text{ K } (\rho < \rho_{\text{surf}})$$

- 冷却による星の収縮

- 星内部のエントロピーの時間変化(収縮)

log κ (エントロピー)



Step1

自己重力回転球を作る

Step2

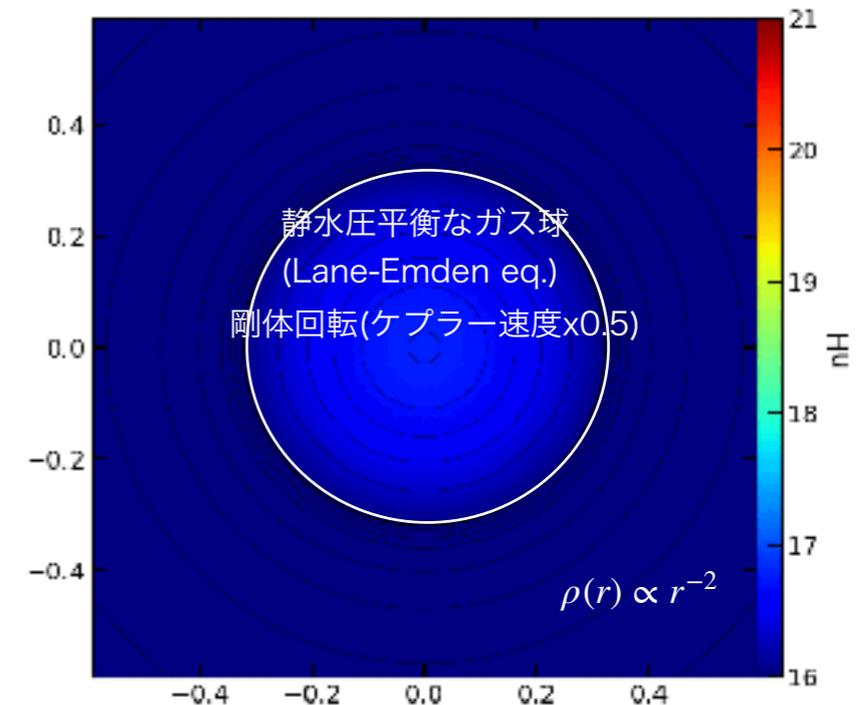
星内部のエントロピー(κ)を減少させる

→星の収縮を模擬



(Matsumoto 2007)

(' plane=', 'xy')
Fission_acc_KH_tacc01, step=0, time[yr]=0.0

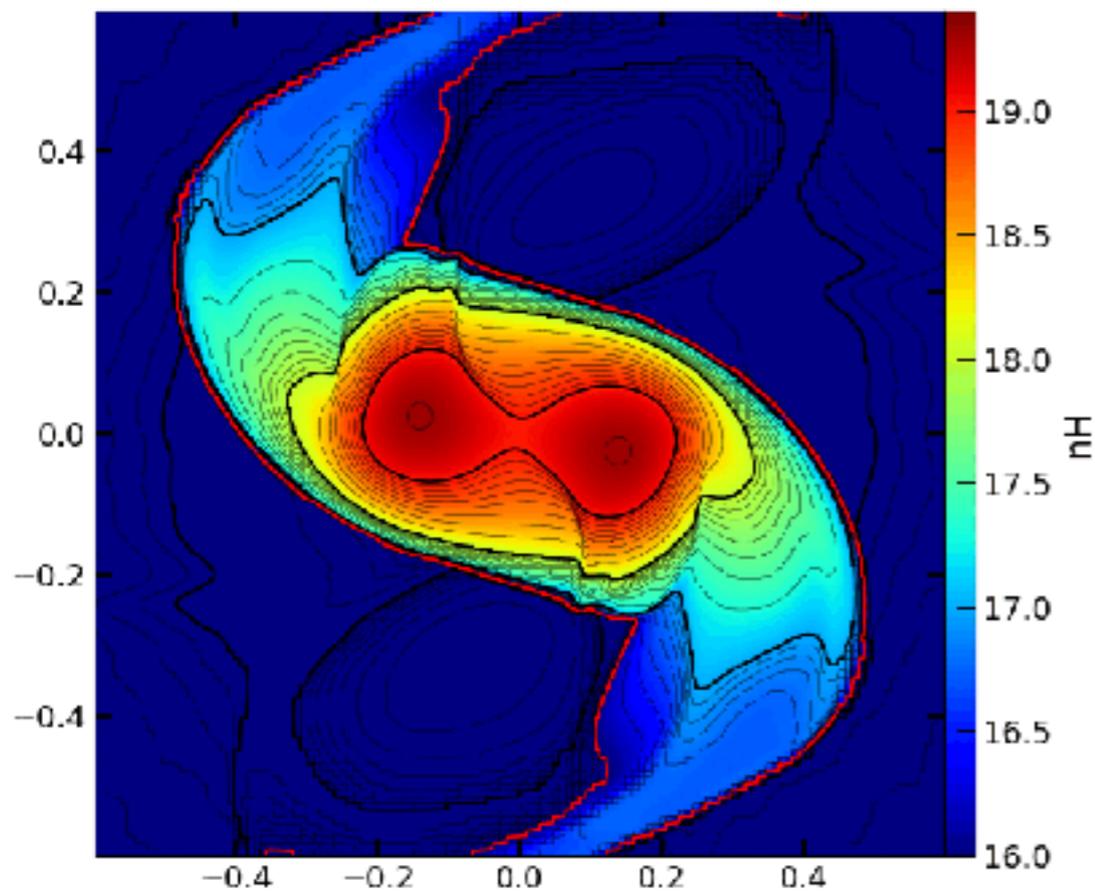


冷却によるガス球の収縮

$$t_{\text{cool}} > t_{\text{rot}}$$

(' plane=', 'xy')

Fission_acc_KH, step=24800, time[yr]=5.5502



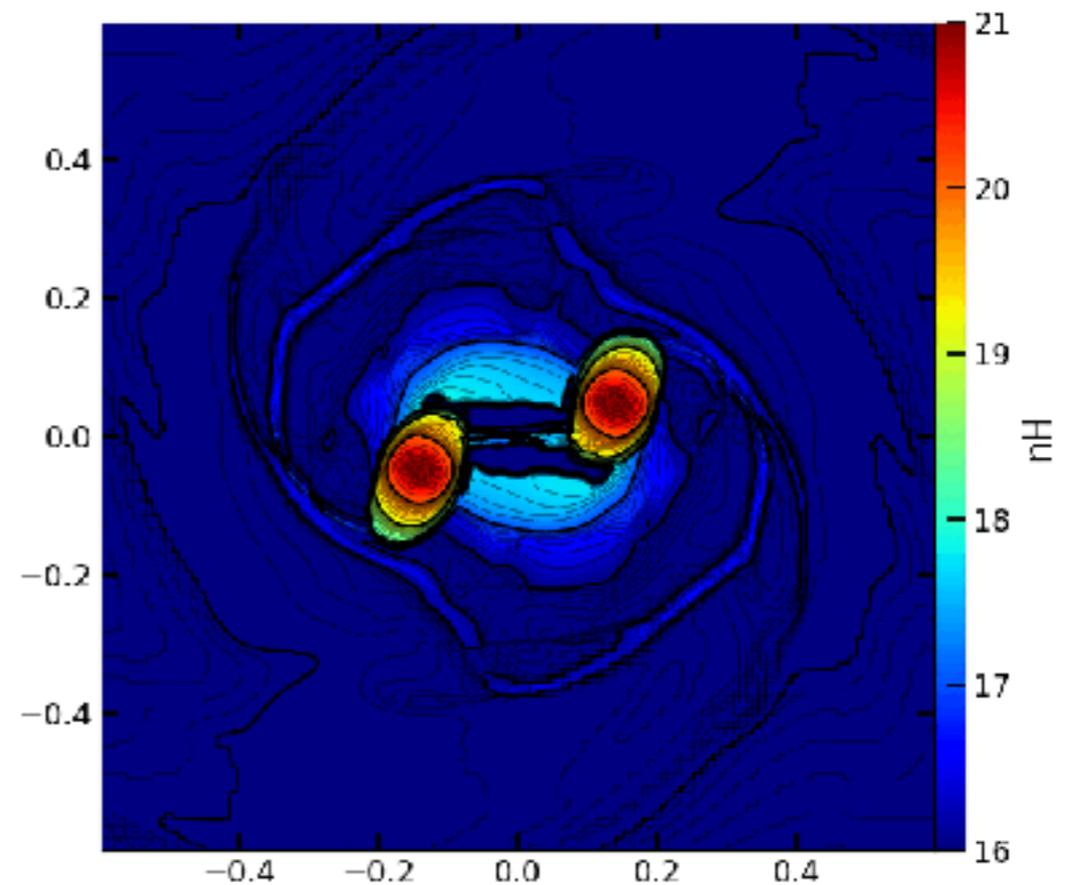
分裂なし

KH収縮

$$t_{\text{ff}} < t_{\text{cool}} < t_{\text{rot}}$$

(' plane=', 'xy')

Fission_acc_KH_tacc001, step=33444, time[yr]=4.9026

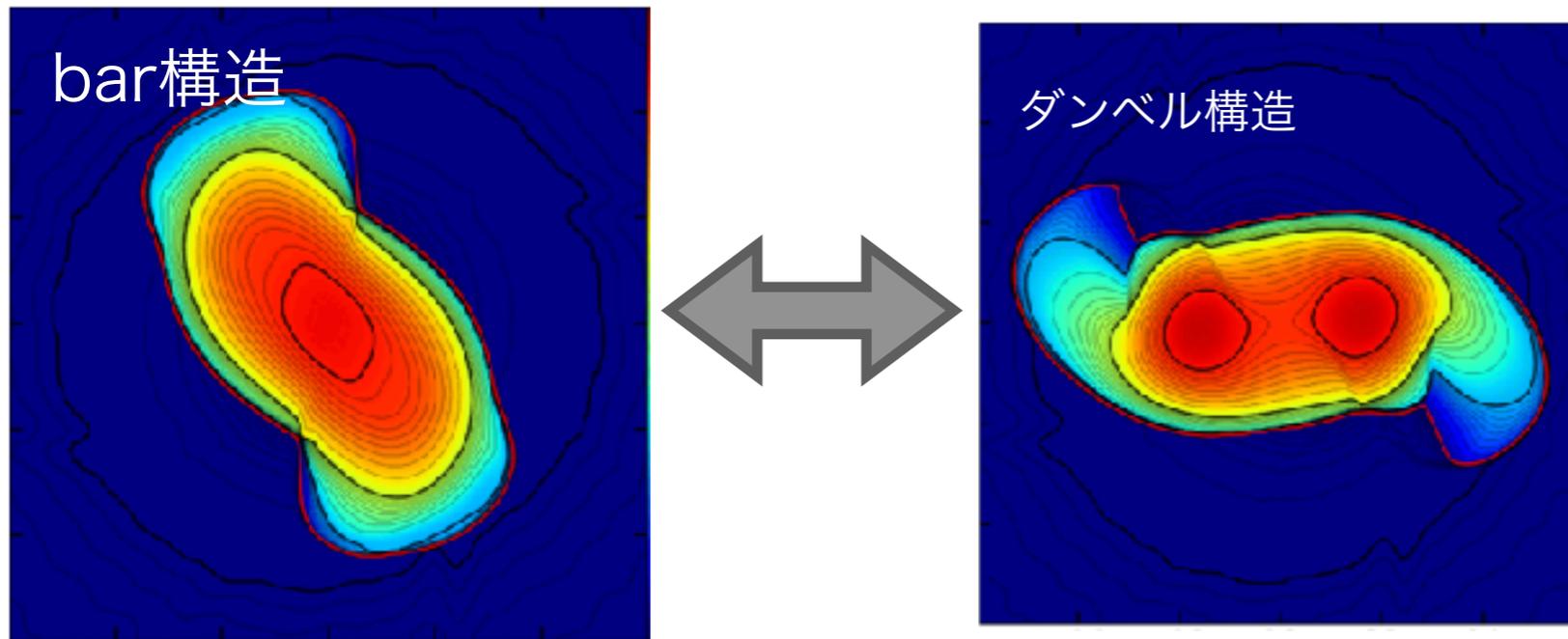


二つに分裂

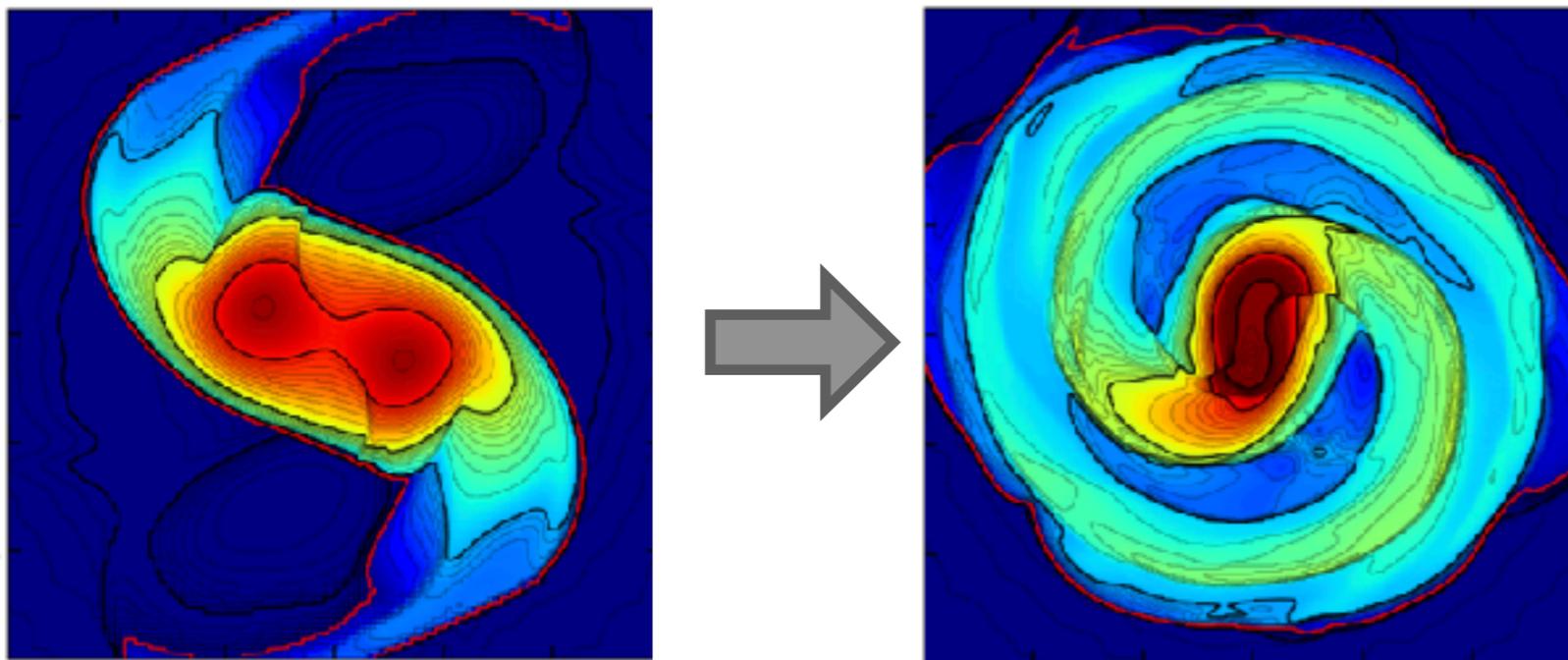
冷却によるガス球の収縮

$$t_{\text{cool}} > t_{\text{rot}}$$

1. ダンベル構造とバー構造の振動



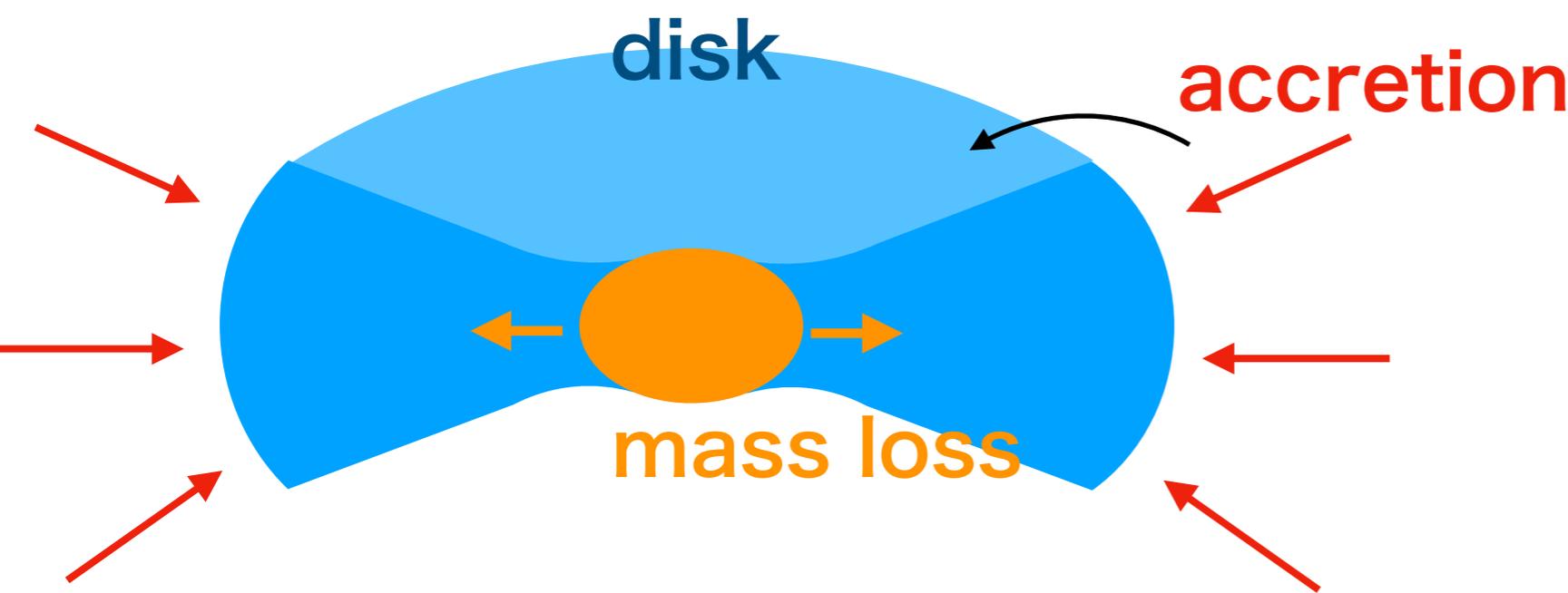
2. スパイラルアームによる質量放出



- 質量放出により安定化
→ fissionによる分裂を阻止
- 円盤構造を形成

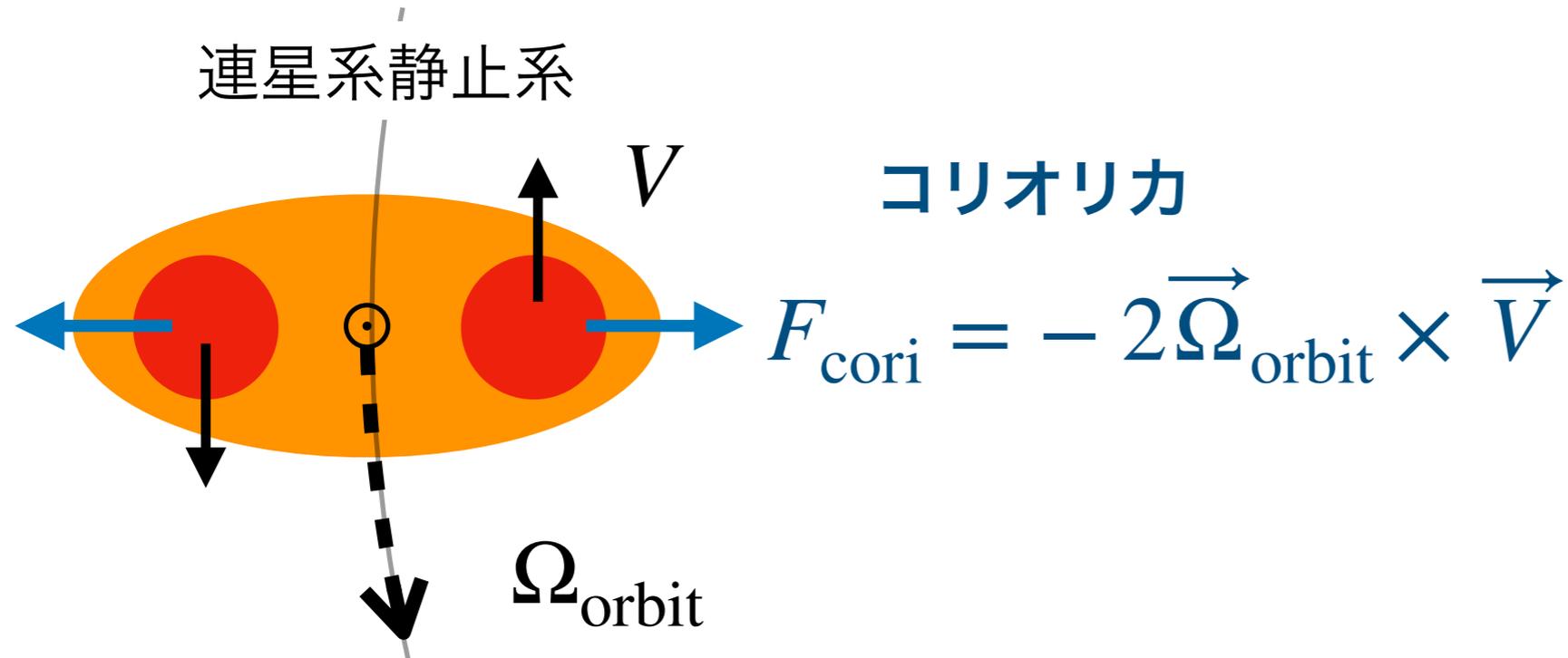
議論：KH収縮時の連星形成の可能性

[質量放出による円盤形成と分裂]



原始星からのmass loss
&
mass accretionによって
円盤が分裂する可能性

[連星系におけるKH収縮]



バロトロピック計算の問題点

星内部の冷却の仕方 (KH収縮) が非現実的
-> 星内部のエントロピーを一様に減少

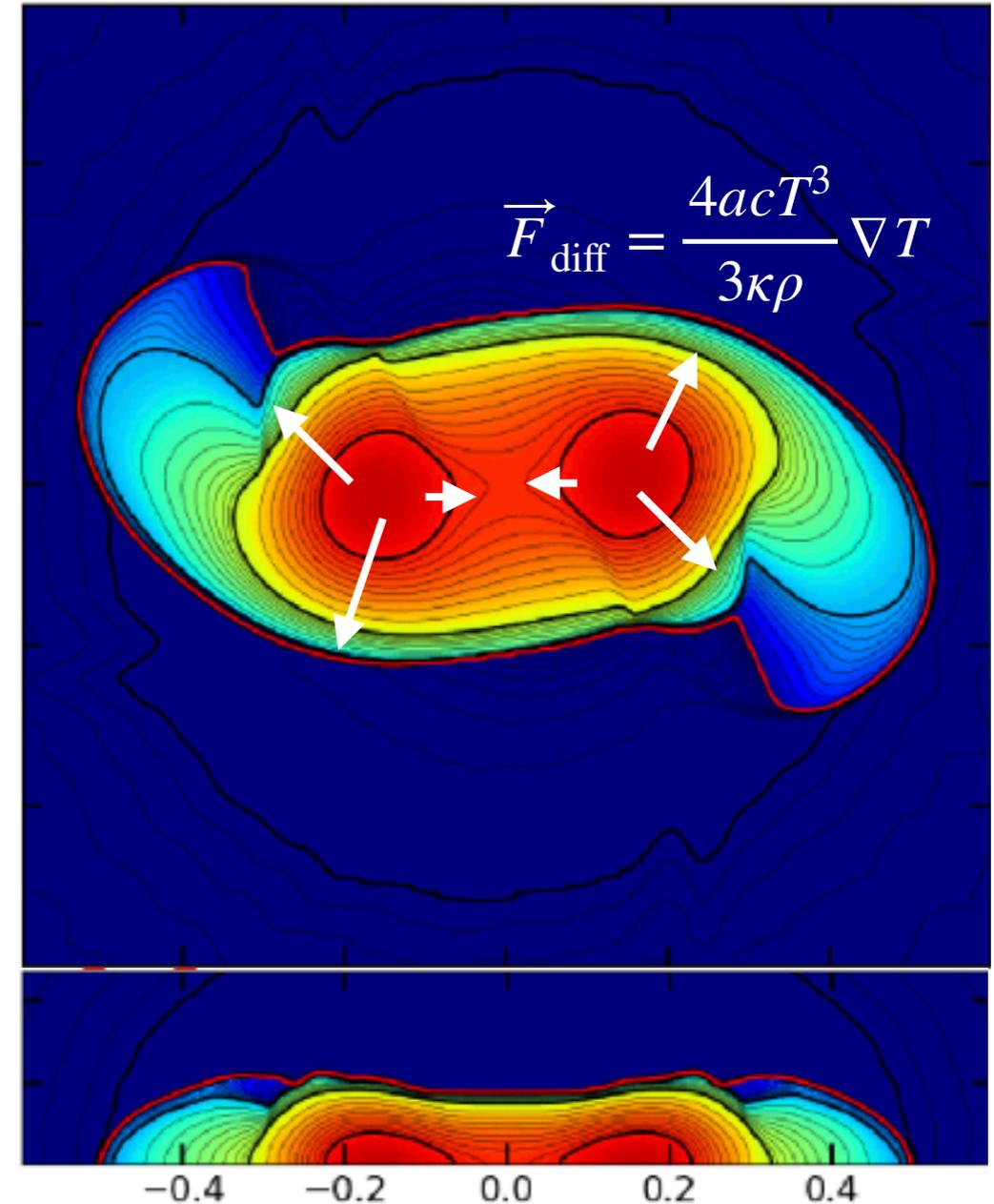


星の構造と冷却の仕方が整合的ではない。

$$\vec{F}_{\text{diff}} = \frac{4acT^3}{3\kappa\rho} \nabla T \propto T^4$$



星内部のエネルギー輸送を解いたシミュレーションが必要



Summary

fissionによる近接(接触)連星形成の可能性を3D流体シミュレーションを用いて検証。

Result

- エントロピー($\kappa(t)$)を時間と共に減少させる。
 - 先行研究と同様に、bar構造とダンベル構造を振動しながら、収縮していく。
 - spiral armによる質量放出で安定化し、分裂しない。
 - しかしながら、冷却の仕方が星構造と非整合で現実的でない。

Future work

- エネルギー-輸送を考慮した simulation ($\vec{F}_{\text{diff}} = \frac{4acT^3}{3\kappa\rho} \nabla T \propto T^4$)
 - 拡散近似のもと星内部のエネルギーを外側に輸送し、KH収縮を模擬