

急速降着によるSupermassive starと Supermassive BH形成

梅田秀之 (東京大学)

細川隆史、大向一行、吉田直紀、高橋亘

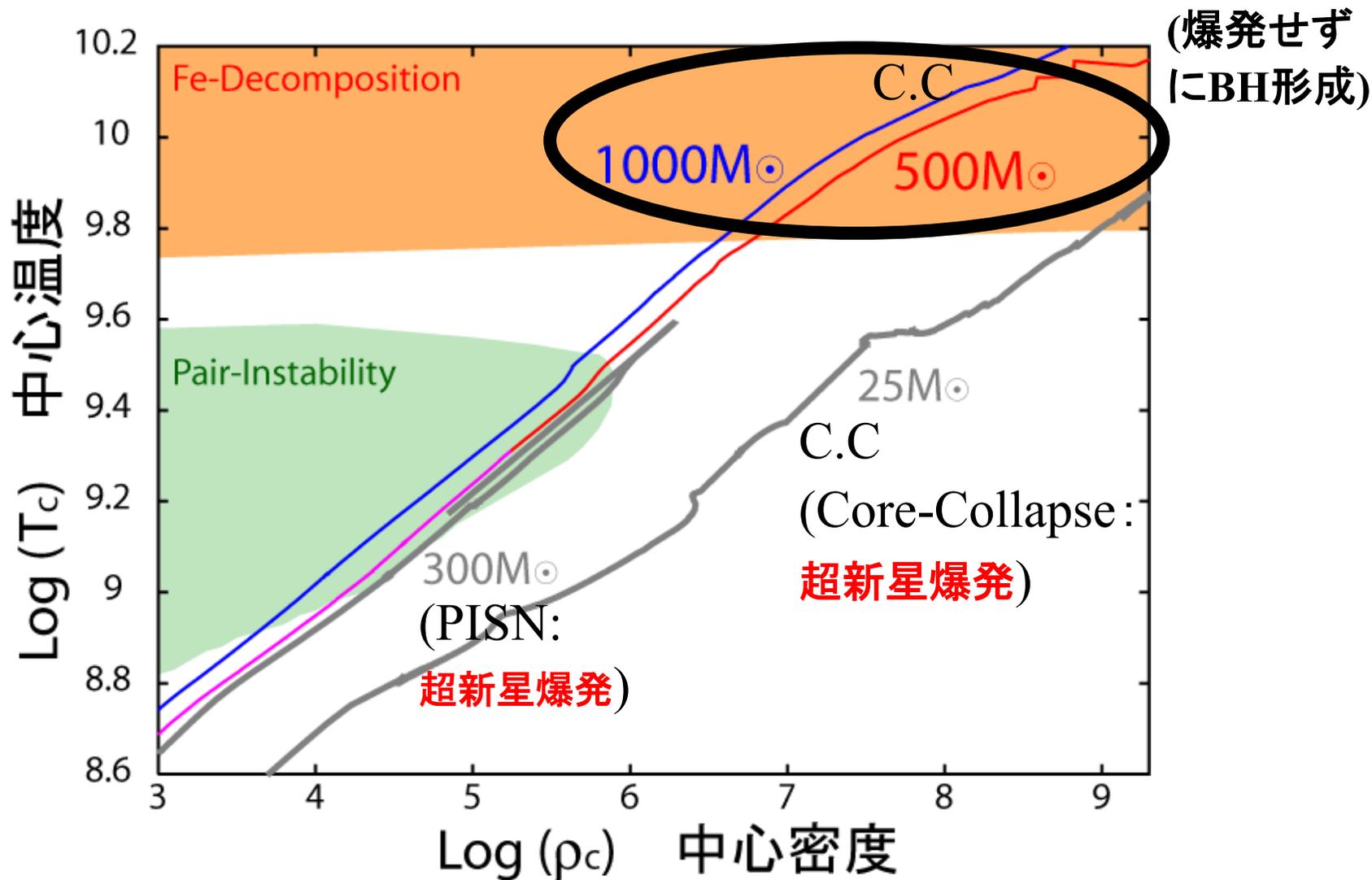
HU, Hosokawa, Omukai, Yoshida ApJL, 830 (2016) + α

2016.10.26 「初代星・初代銀河研究会」 @金沢

イントロ

- SMBHの起源、可能性の一つ、超巨大PopIII星($> \sim 10^5 M_{\odot}$)の形成とブラックホールへの崩壊 → SMBHの種
- 原始星への降着率が $0.1 M_{\odot}/\text{yr}$ を超えるような急速ガス降着
⇒ 星の半径増大、放射フィードバックの抑制
⇒ 超大質量星(10 万 M_{\odot} 以上)の形成が可能
(Hosokawa et al. 2012, 2013, Chon et al. 2016)
- 細川他は約 10 万 M_{\odot} に達するまでの計算を行った
- 本研究は、その後の**進化**、**最終質量**について 調べた

通常の巨大質量星の進化(質量一定)



Super Massive Stars $\sim 10^6 M_{\odot}$

[e.g., Shapiro & Teukolsky (Wiley)]

- Mostly supported by Radiation

- $P(\text{pressure}) = P_{\text{gas}} + P_{\text{radiation}}$

- $\beta = P_{\text{gas}} / P \ll 1$

$$\beta = 8 k_b (\text{Boltzman constant}) / S_r (\text{photon entropy per baryon})$$

$$= 8.49 \times (M/M_{\odot})^{-1/2}$$

(水素100%組成の時、等エントロピー (polytrope) model)

- Luminosity $L \cong L_{\text{Edd}} (1-\beta) \cong L_{\text{Edd}} (=4\pi cGM/\kappa)$

- Stability (for strictly Newtonian):

$$\Gamma = d \ln P / d \ln \rho = 4/3 + \beta/6 + O(\beta^2) \quad (\text{Stable even for } \beta=0)$$

Super Massive Stars (SMS): Effect of GR (General Relativity)

TOV(Tolman - Oppenheimer - Volkoff)

$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

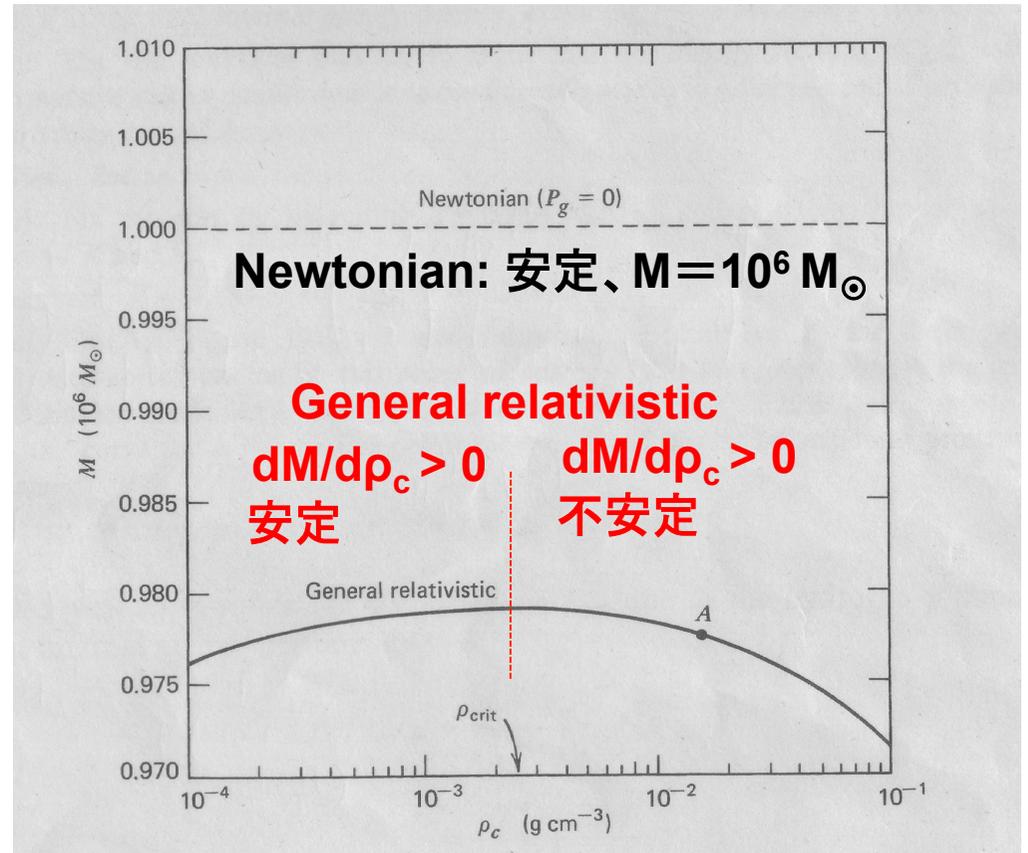
$$\frac{dP}{dr} = -\frac{\rho m}{r^2} \left(1 + \frac{P}{\rho}\right) \left(1 + \frac{4\pi P r^3}{m}\right) \left(1 - \frac{2m}{r}\right)^{-1}$$

– Post Newtonian (effective)
Gravity

$$G_{\text{eff}} = G \left(1 + \frac{P}{\rho c^2} + 4\pi \frac{r^3 P}{M c^2} + \frac{2GM}{rc^2}\right)$$

$$\rho_{\text{crit}} = 2.00 \times 10^{18} (M/M_{\odot})^{-7/2} \quad (\text{g cm}^{-3})$$

SMSは準静的に収縮し
臨界密度に達すると崩壊



$\beta = 8.49 \times 10^{-3}$ の場合
(等エントロピーを仮定)

GR不安定の条件

$$\Gamma_{\text{crit}} \approx \frac{4}{3} + 1.12 \left(\frac{2GM}{Rc^2} \right) \quad \text{Chandrasekhar (1964)}$$

$$> \Gamma \approx \frac{4}{3} + \frac{\beta}{6}$$

星質量の中心集中が進む(M/R上昇)か
βが小さい(エントロピーが大きい)とき
不安定になる

平衡状態にある星
に対しては次の関係
が成り立つ

$$\partial E / \partial \rho_c = 0, \quad E = E_{\text{int}} + E_{\text{grav}}$$

$$\frac{s_r}{k_B} = 0.942 \left(\frac{M}{M_{\text{sun}}} \right)^{1/2}$$

$$\left(\frac{GM}{Rc^2} \right)_{\text{crit}} = 0.6295 \left(\frac{M_{\text{sun}}}{M} \right)^{1/2}, \quad T_{\text{crit}} = 2.49 \times 10^{13} K \frac{M_{\text{sun}}}{M}.$$

PopIII超巨大星の運命(先行研究)

- GR不安定の境界温度
(with ideal gas EOS)

$$T_{\text{crit}} = 2.49 \times 10^7 M_6^{-1} \text{ (K)}$$

: 通常の水素燃焼温度より少し
高い温度

- $10^{56\sim57}$ erg で水素燃焼
中に崩壊して爆発するものがある
- が、 $Z=0$ では爆発しない
⇒ PopIII 巨大ブラックホール

1986ApJ

RESULTS

Initial Mass $M/10^5 M_{\odot}$ (1)	Initial Metallicity Z_{init} (2)	Fate (3)
1	0	Stable
5	0	Black hole
5	2×10^{-3}	Black hole
5	5×10^{-3}	2.1×10^{56} ergs He: 0.249 → 0.282
5	1×10^{-2}	2×10^{56} ergs He: 0.247 → 0.275
2.5	0	Black hole
10	0	Black hole
10	6×10^{-3}	Black hole
10	1×10^{-2}	2.5×10^{57} ergs He: 0.25 → 0.42

Fuller, Woosley & Weaver 1986

$M(10^5 M_{\odot})$

PopIII超巨大星の運命(先行研究)

- GR不安定の境界温度 $T_{\text{crit}} = 2.49 \times 10^7 M_6^{-1}$ (K)
($M_6 = M / 10^6 M_{\odot}$)
- $M_6 > \sim 0.5$ の星は水素燃焼中にGR不安定
- 不安定になると崩壊し(通常と同じ)CNOサイクルにより急激な水素燃焼
- しかし $Z < \sim 0.1 Z_{\odot}$ の星では、CNOサイクルによる発熱によって星が爆発することは無い (Fricke 1973, Fowler et al. 1986)
- 従って、ごく最近までは Pop III SMSは爆発せずにSMBH(もしくはその種)になる、と言われて来た。

本研究の目的

- 先行研究はどれもほぼすべてSMSの現実的な形成シナリオを考えておらず、一定の質量の星の進化
- SMS形成の最も妥当なシナリオは宇宙初期の急速質量降着
- 本研究の目的は急速降着によって形成されたSMSの性質を詳しく調べ、その進化と運命を明らかにする

- 計算したモデルは 0.1, 0.3, 1.0, 10 M_{\odot}/yr

比較的あり得る範囲

Upper limit

計算方法

- Henyey タイプの星の進化コード(主に超新星親星計算に用いていたもの 梅田 & 野本2002, 2005)を質量降着に伴う進化計算ができるようにしたもの(梅田他 2009).
- 加速項入り
- 降着物質は星の最外層に等じエントロピーで降着
- 降着流による外層の加熱は無視
 - これの有無は $M > 1000M_{\odot}$ の進化にはほぼ影響を及ぼさない (Hosokawa et al. 2013)
- Post Newtonian Gravity
$$G_{\text{eff}} = G(1 + P/\rho c^2 + 4\pi r^3 P/Mc^2 + 2GM/rc^2)$$

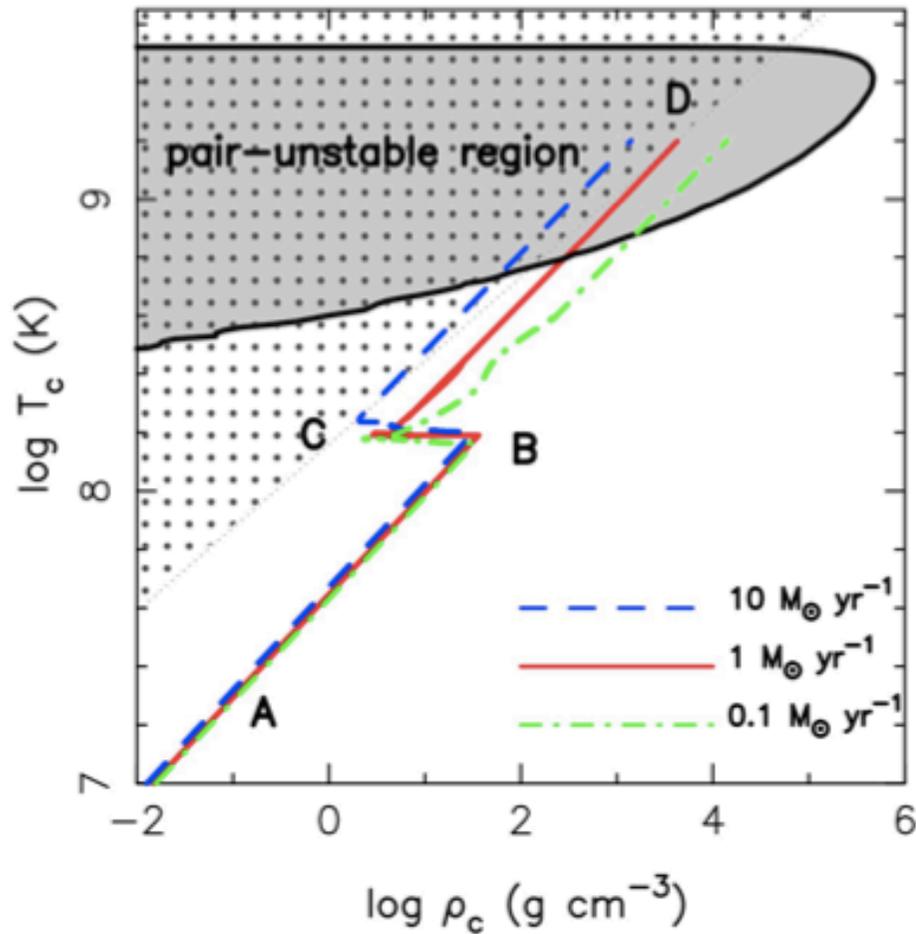
結果と議論

TABLE 1

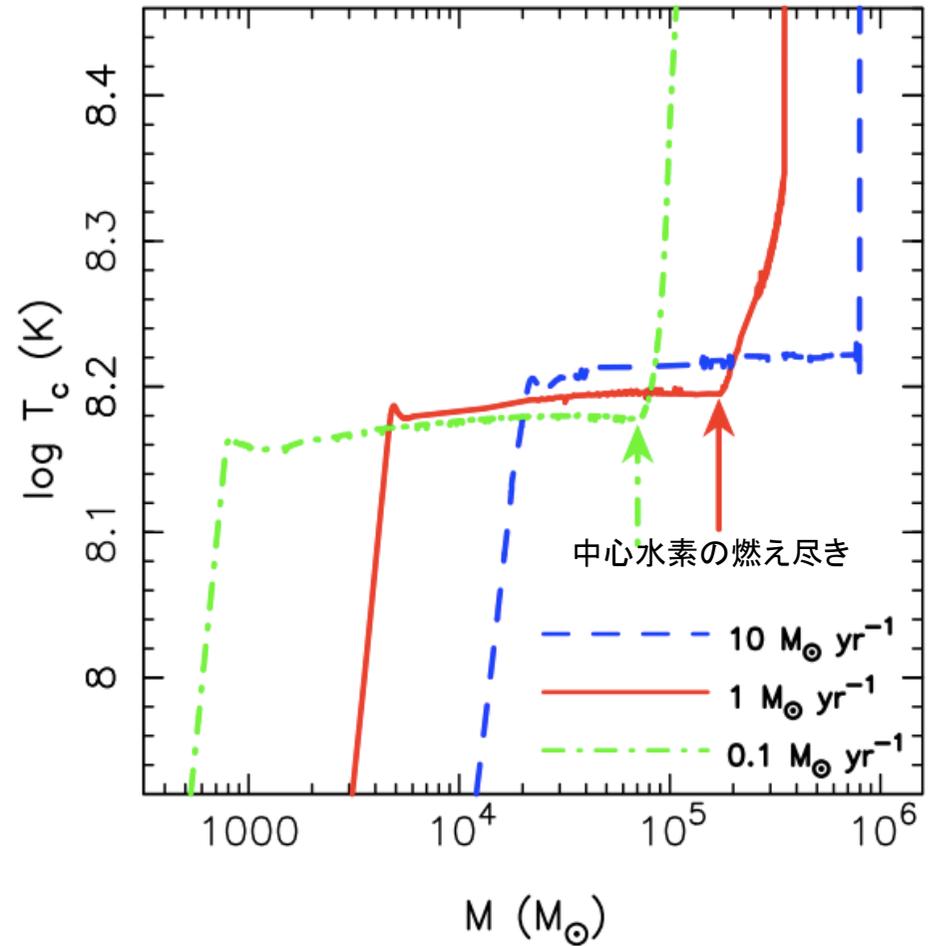
FINAL STELLAR MASS AND COMPOSITION OF THE INNER CORE

$\dot{M} [M_{\odot}/\text{yr}]$	0.1	0.3	1.0	10
$M_f [M_{\odot}]$	1.2×10^5	1.9×10^5	3.5×10^5	8.0×10^5
Y (or X)	0.00	0.99	1.00	(0.51)

中心温度 vs 中心密度



中心温度 vs 星の全質量(時間に比例)



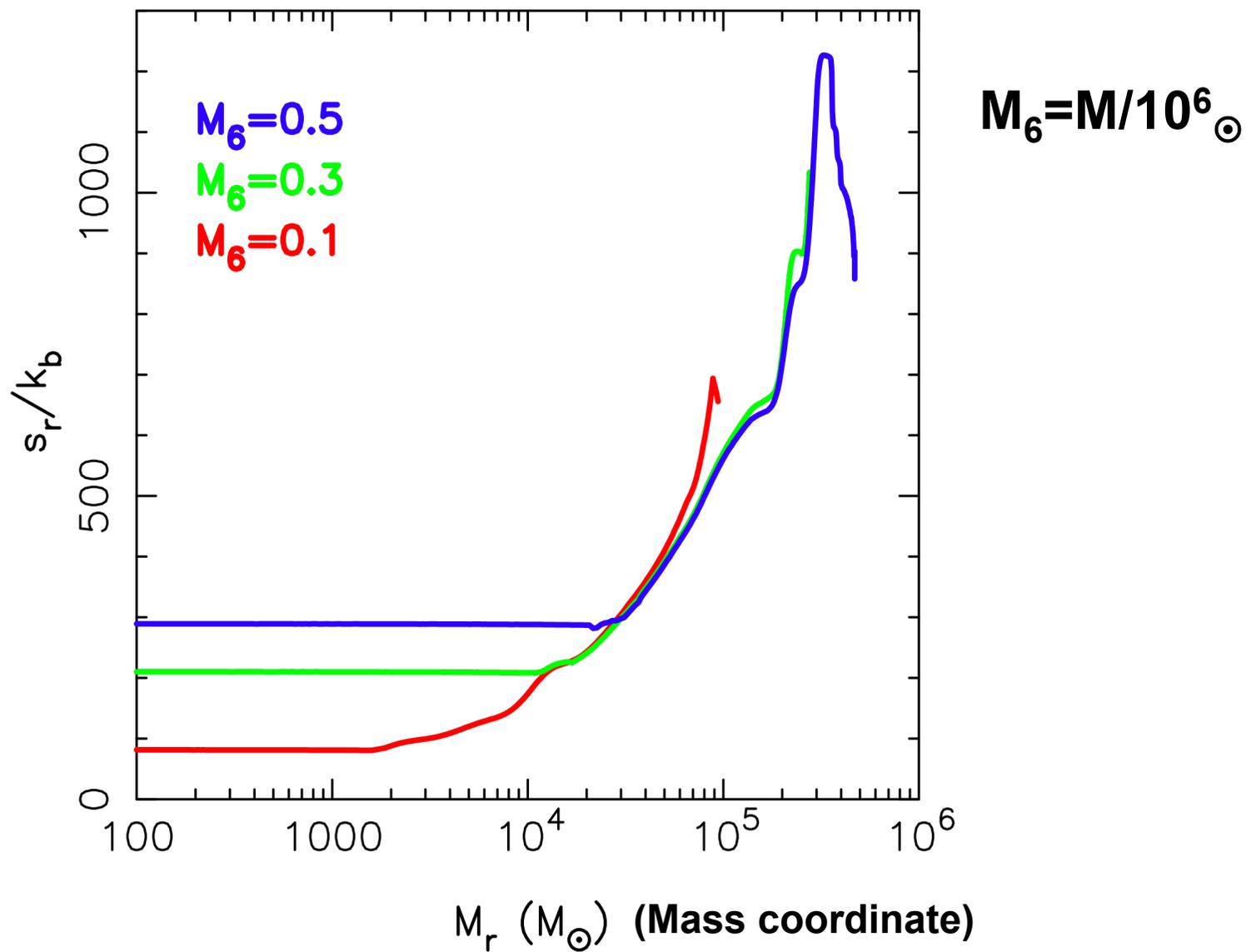
降着率と最終質量

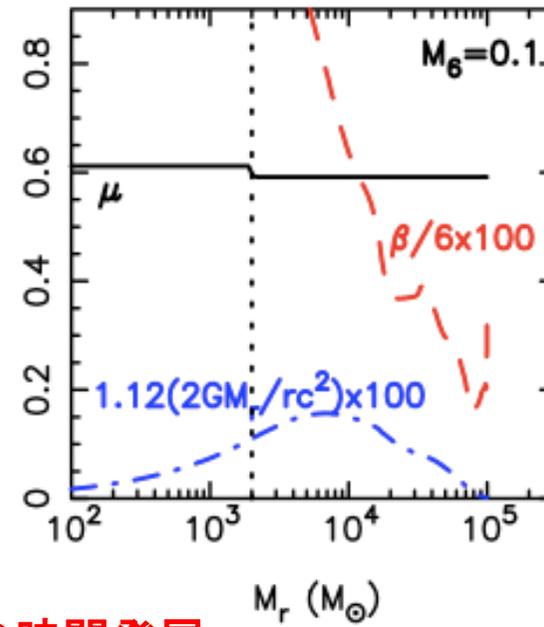
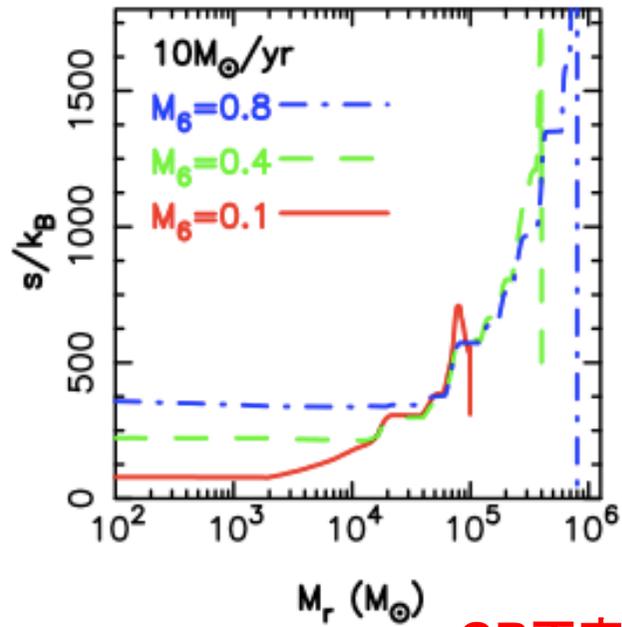
dM/dt (M_{\odot} /yr)	0.1	0.3	1.0	10.0
最終質量 (M_{\odot})	1.2×10^5	1.9×10^5	3.5×10^5	8.0×10^5
崩壊理由	Feコアの 重力崩壊	Heコアの GR不安定	Heコアの GR不安定	Hコアの GR不安定

**一定質量のモデル $\sim 1.5 \times 10^5 M_{\odot}$
より最終質量が大きい**

のはコアが等エントロピーでないため(等エントロピーモデルより膨らんでいる)

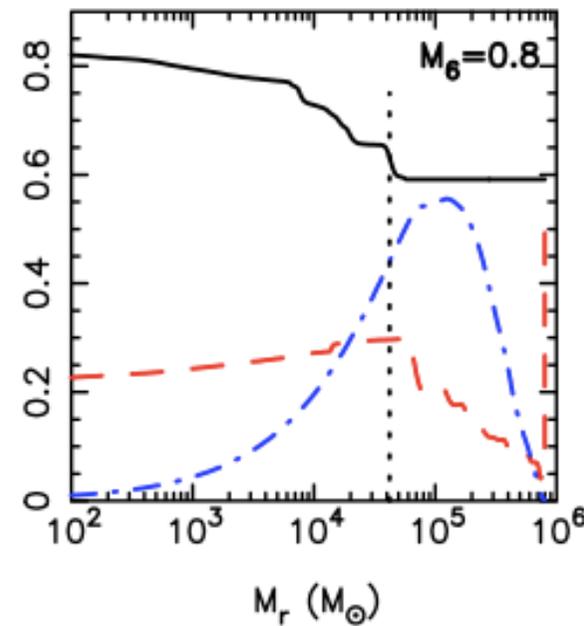
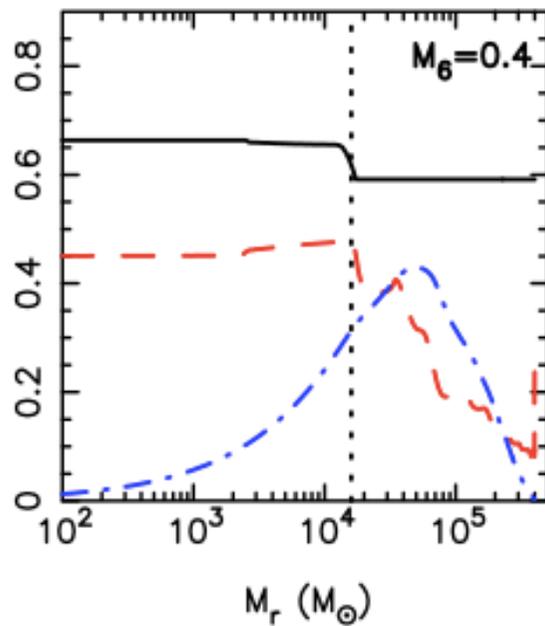
$dM/dt=10M_{\odot}/\text{yr}$ model エントロピー分布





GR不安定条件の時間発展

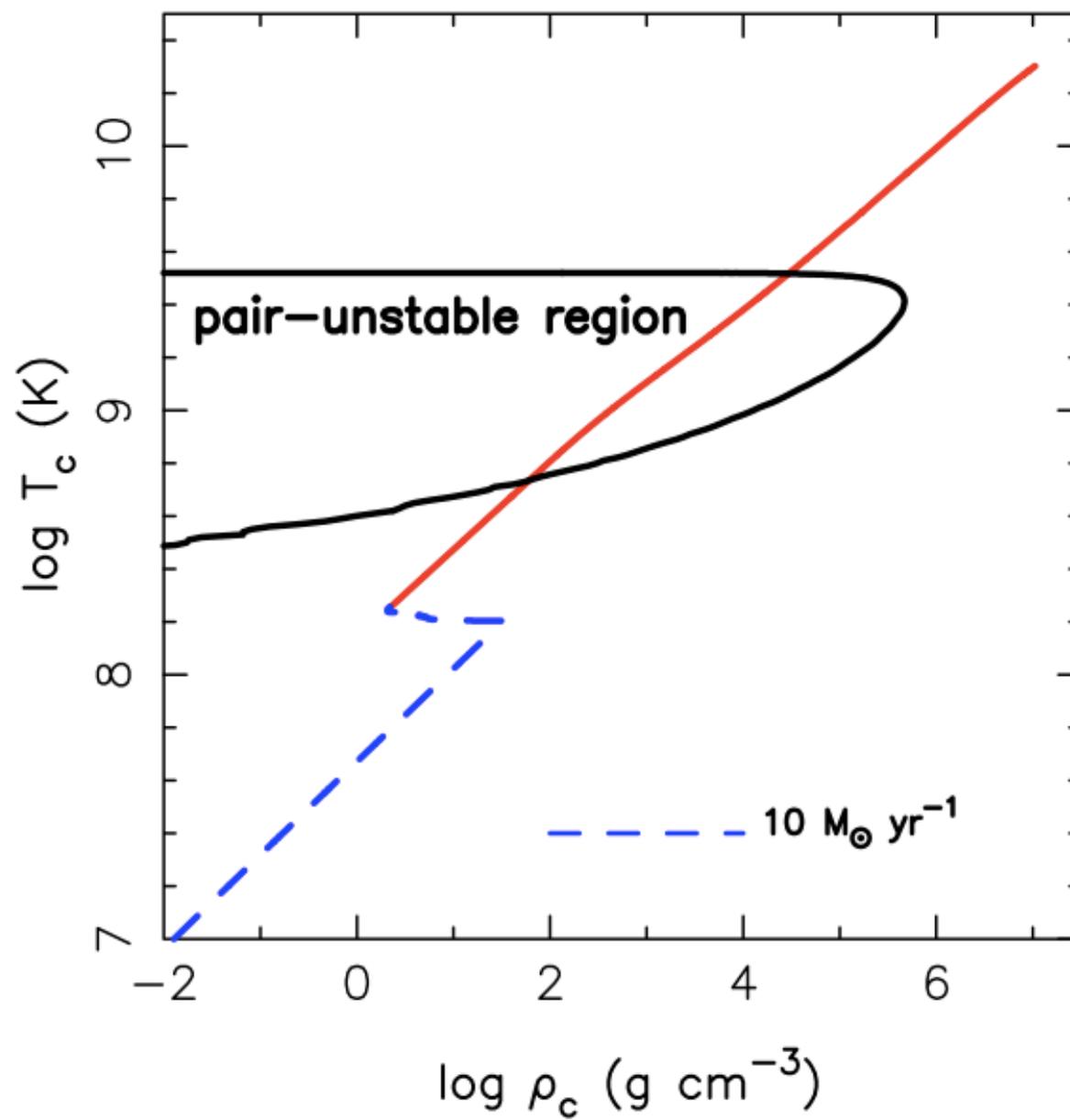
ドット線—等エントロピーコア、 $M_6=M/10^6 \odot$



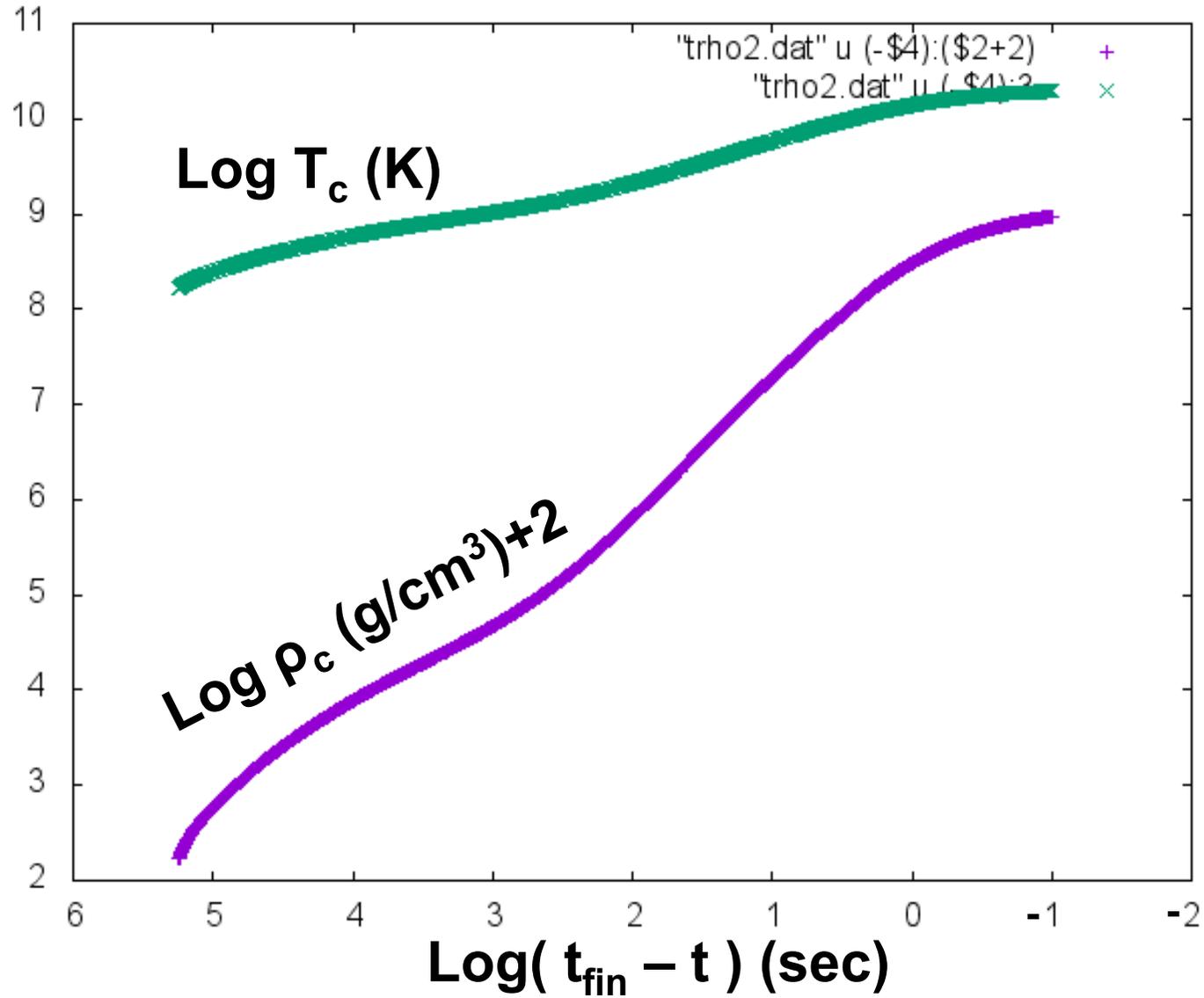
流体コードによる計算: 進化の最終段階

- 1D-Full GR implicit code (Yamada 1997)
+ Nuclear reaction network = Takahashi et al. (2015) で
PISNの爆発計算に用いたコードと同じ
- 核燃焼エネルギーによって爆発するか、BHへ崩壊するか
確認できる

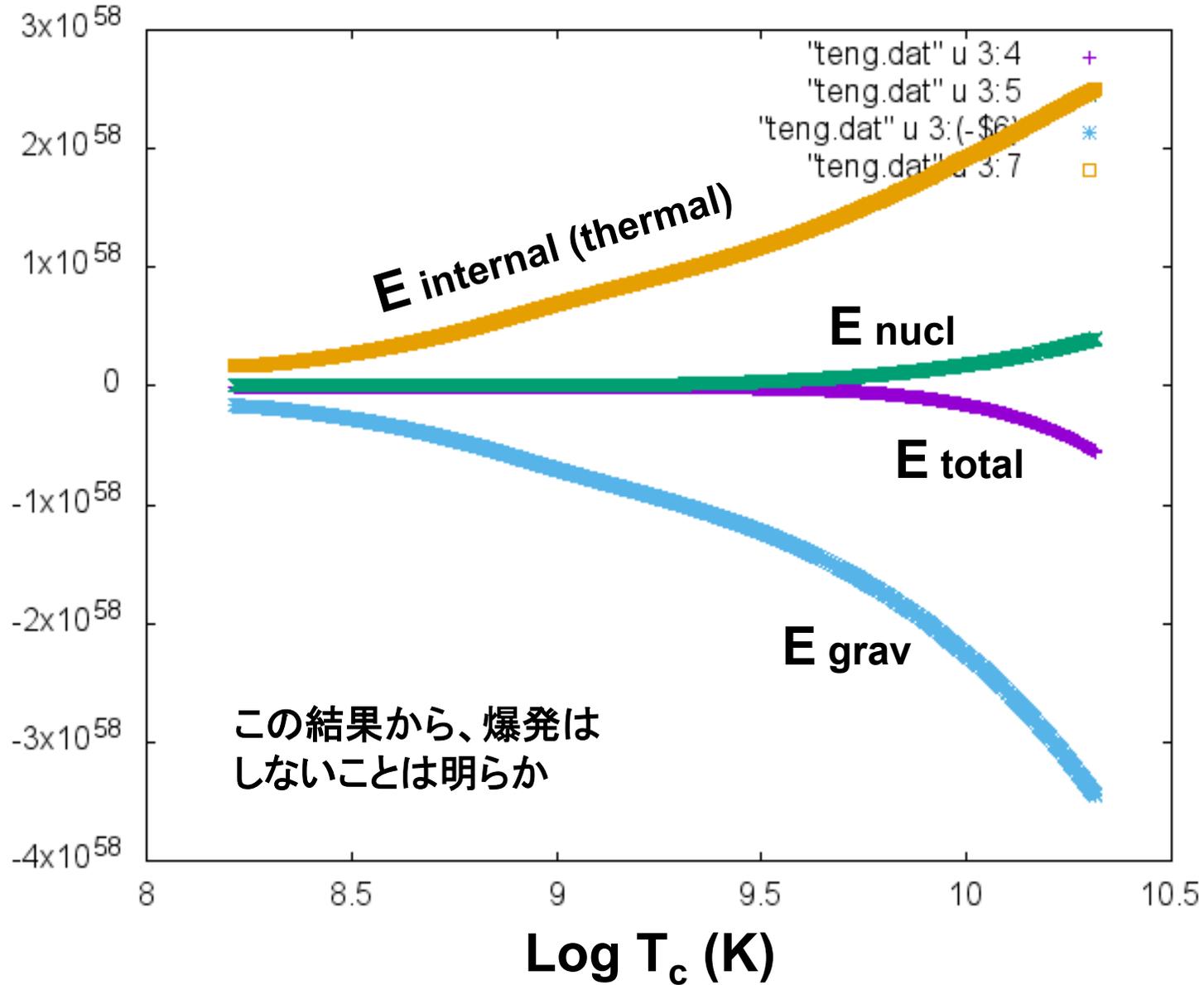
結果 (10M_⊙/yr の例)



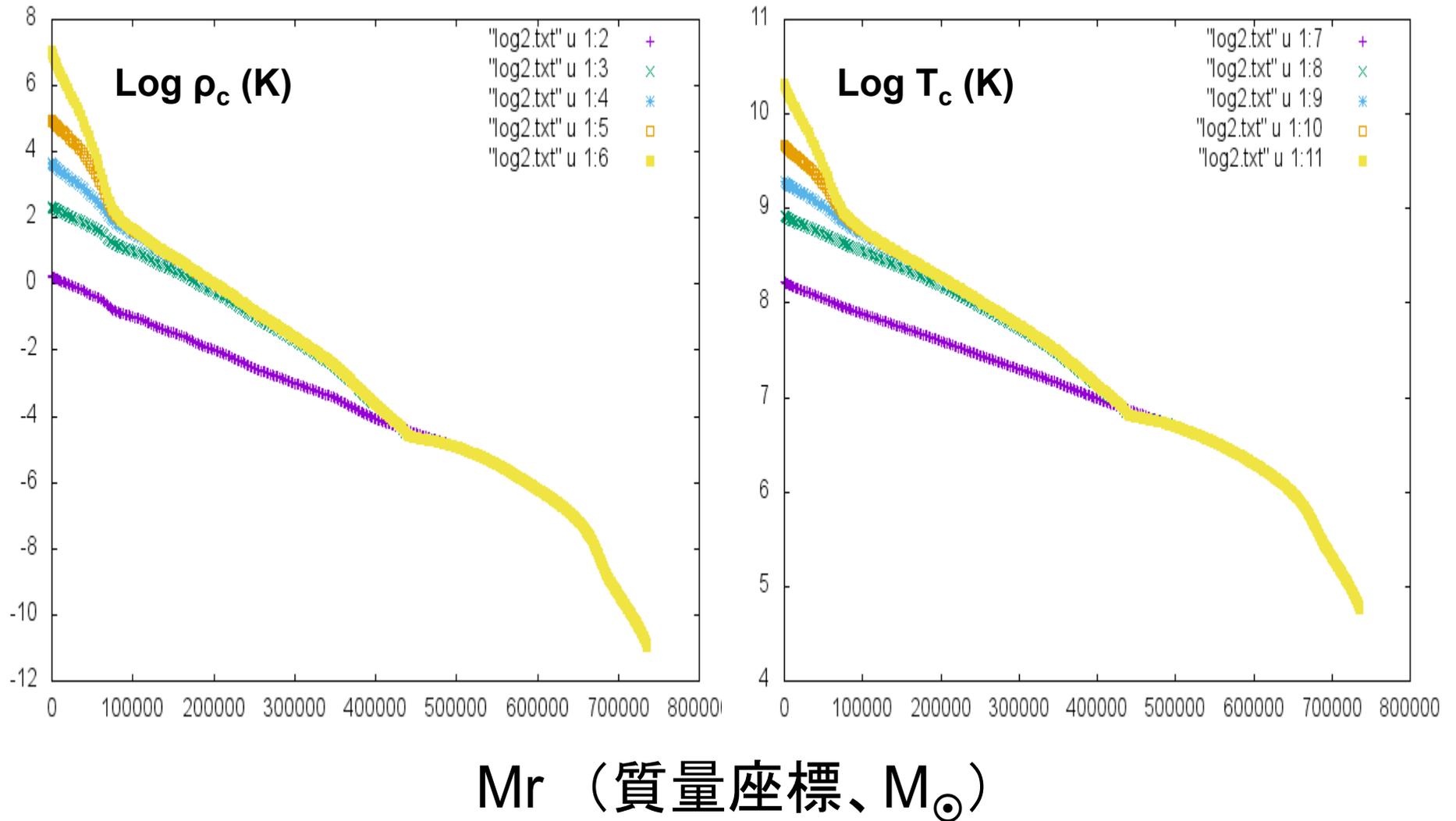
結果 $10M_{\odot}/\text{yr}$: 中心温度-密度 (time)



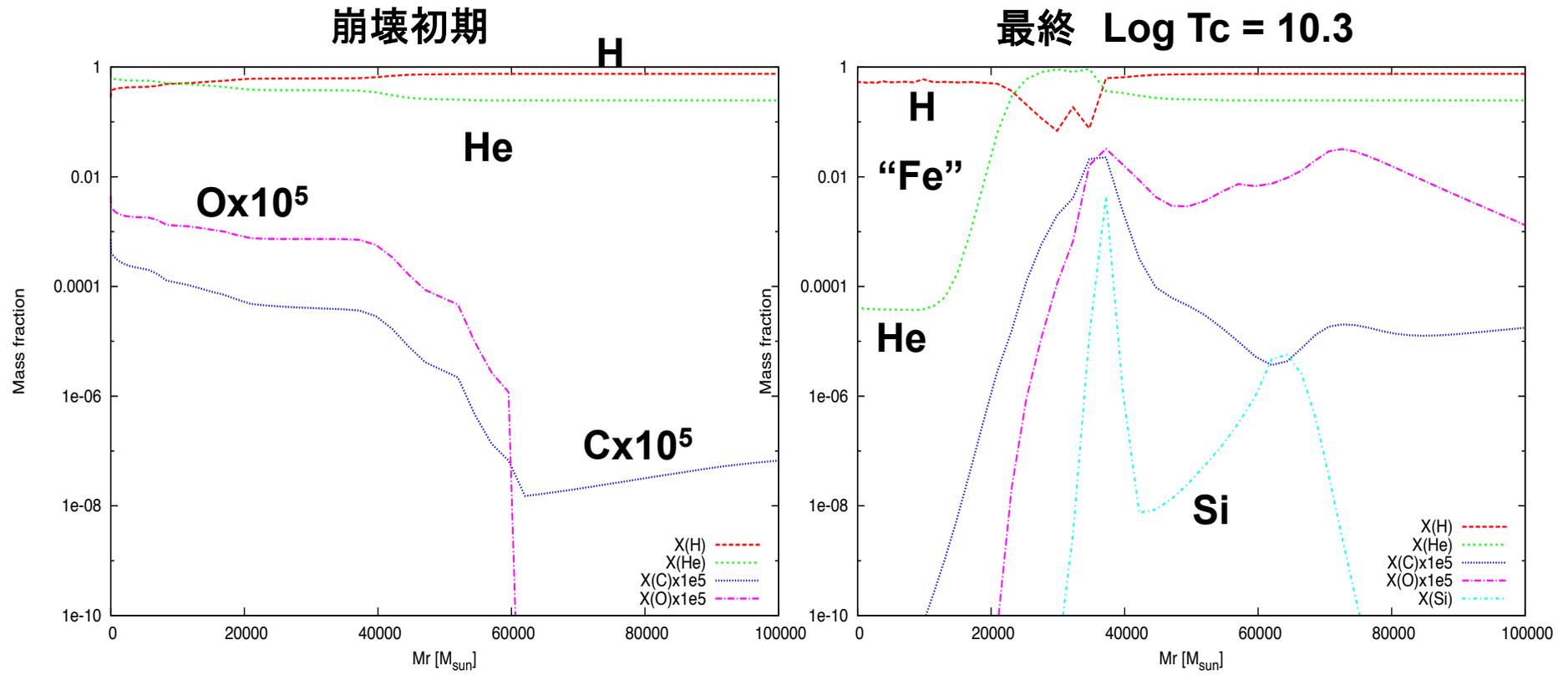
結果 $10M_{\odot}/\text{yr}$: エネルギー vs T_c



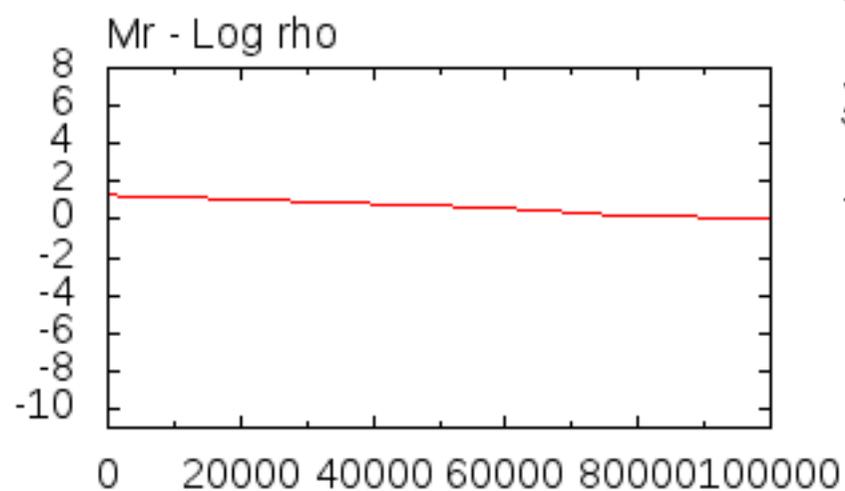
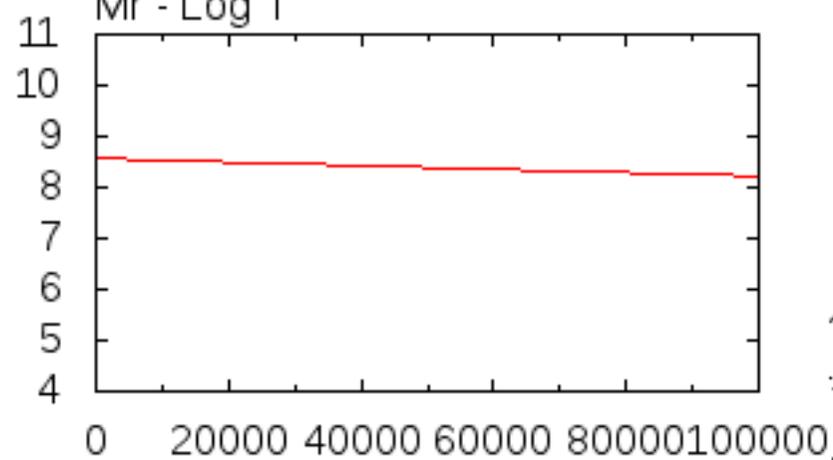
密度進化、温度進化の内部構造(10M_☉/yr)



初期 & 最終組成分布 ($10M_{\odot}/\text{yr}$)



nstg = 600
Log Tc = 8.577, Log rhoc = 1.311
t = 1.3722E+05 s, dt = 2.0247E+02 s
t-t(Tcmax) = -3.8701E+04 s
Mr - Log T



Log rhoc - Log Tc

