

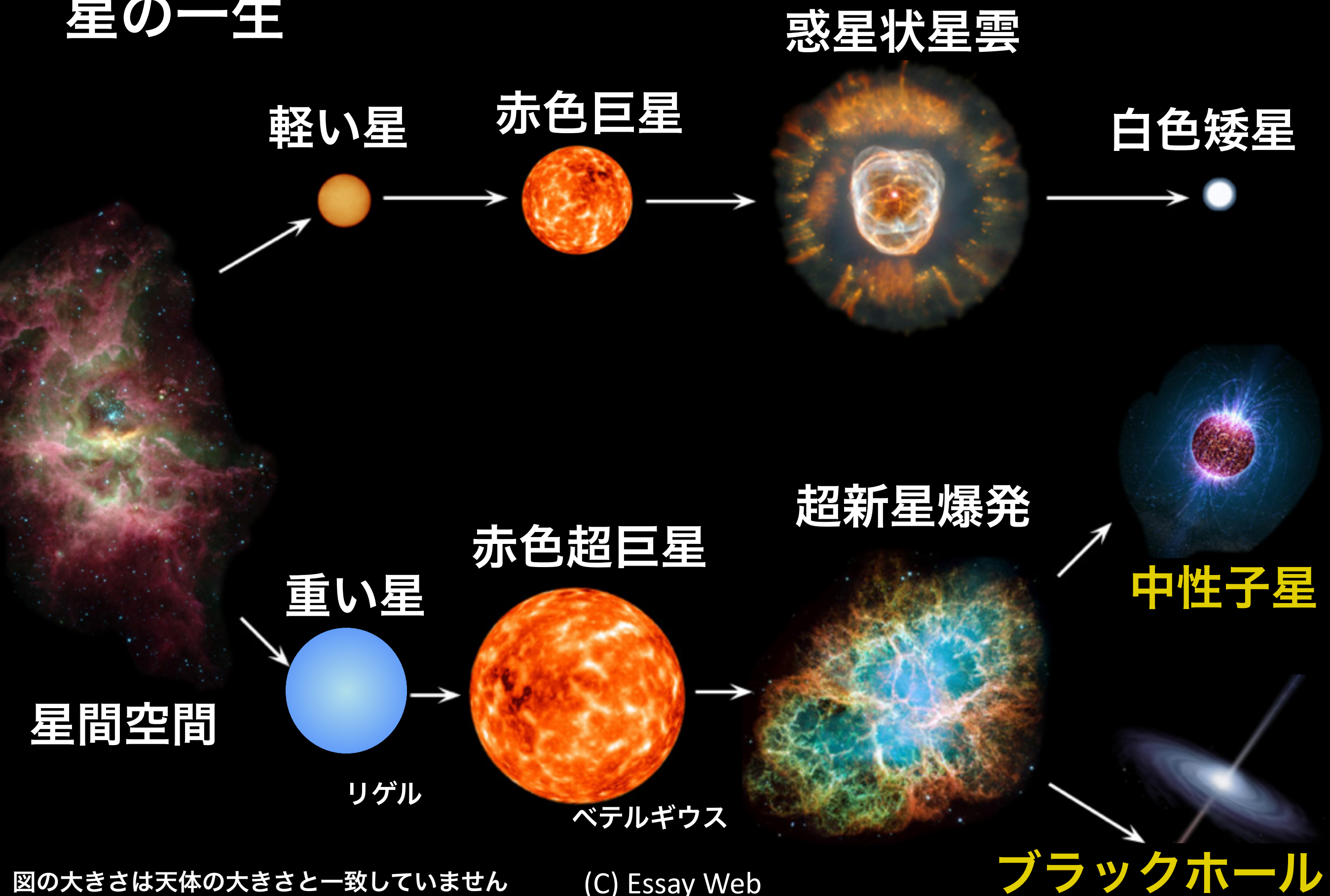
Section 4.

恒星進化の基礎

4.1 ビリアル定理

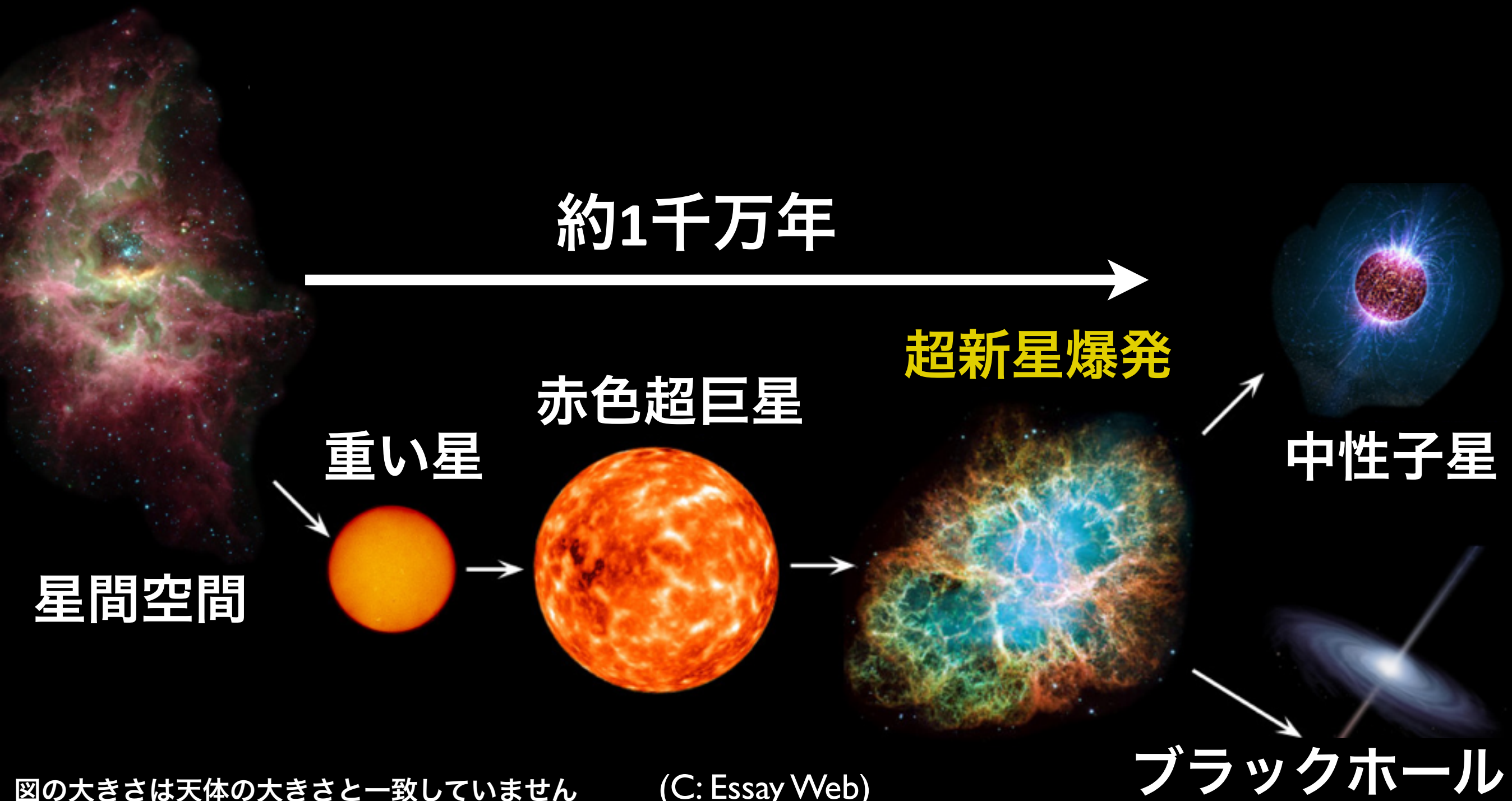
4.2 状態方程式と星の進化

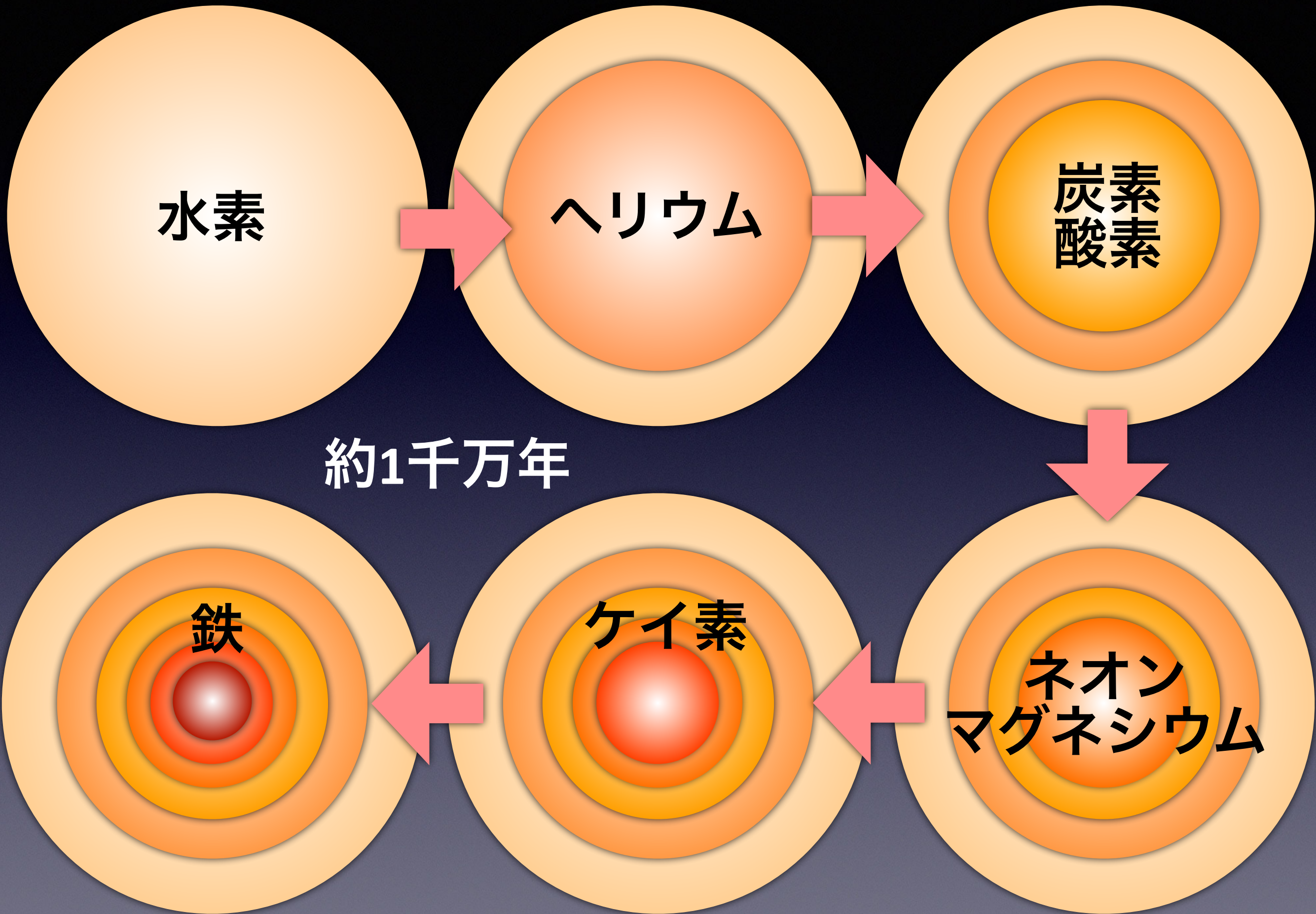
星の一生



1. 重い星の場合

* 太陽の10倍以上





約1千万年

水素

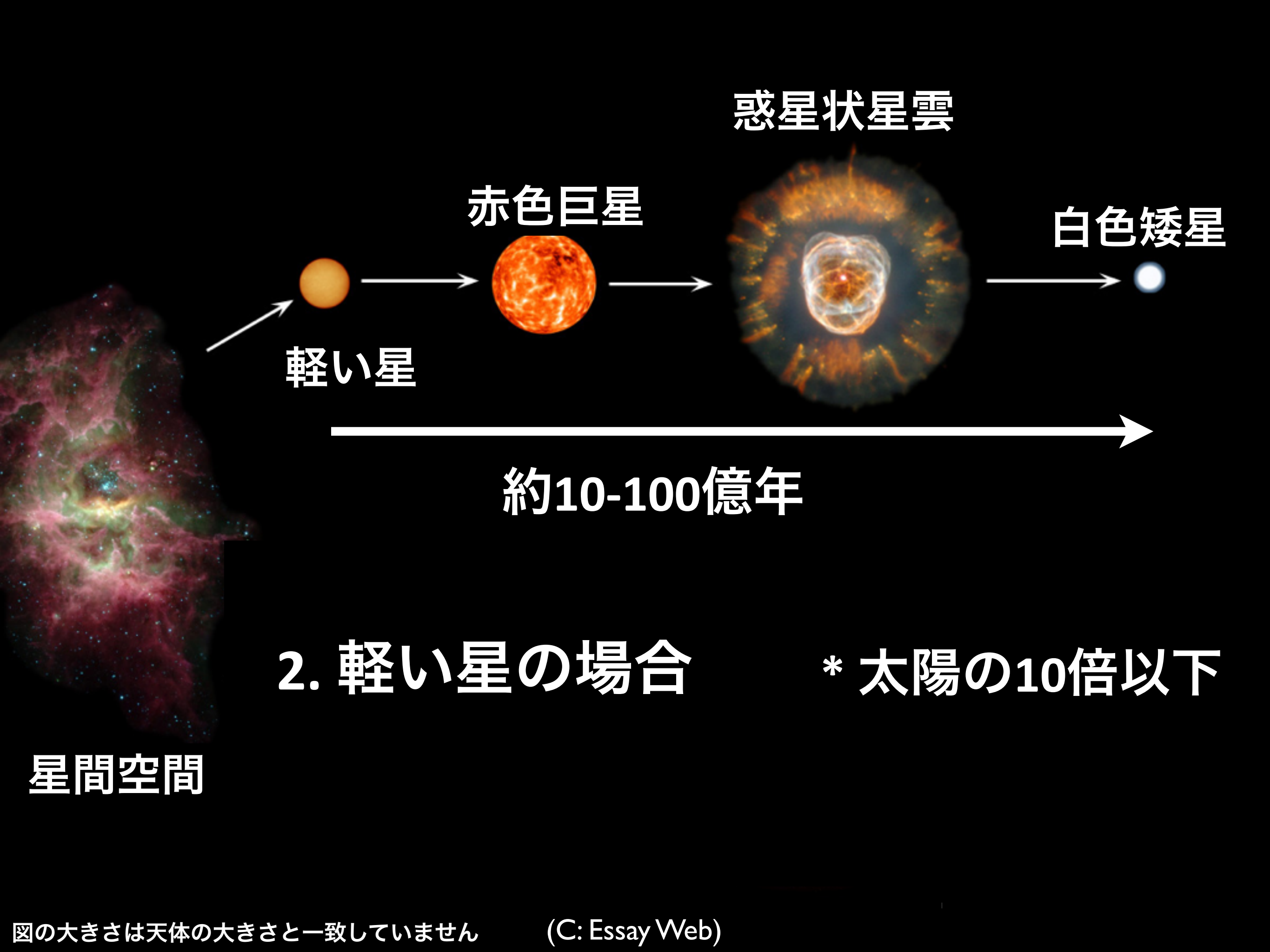
ヘリウム

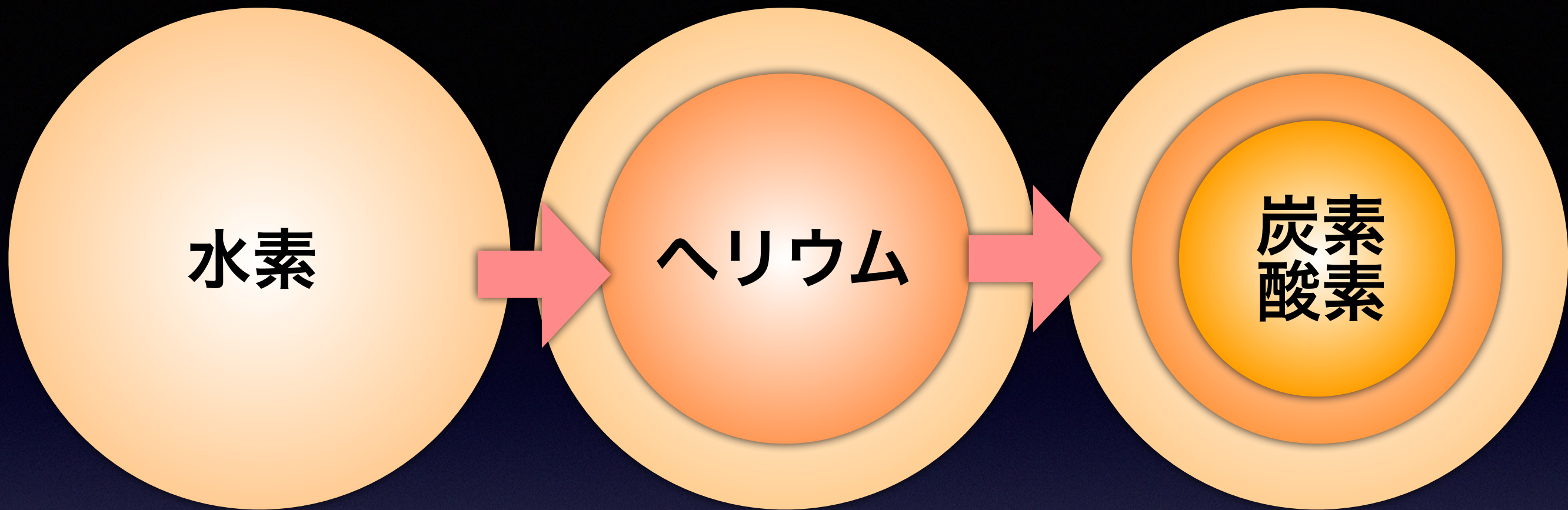
炭素
酸素

鉄

ケイ素

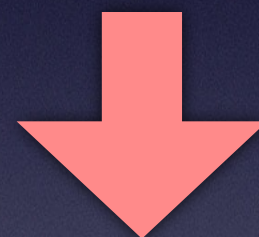
ネオン
マグネシウム





約10-100億年

何も起きない



白色矮星

なぜ星は「進化」するのか？

「進化」 = 時間とともにその姿を変化させる

核融合で輝いている星は、
いつか燃料を使い尽くしてしまう
=> そのとき星はどうなるか？



さまざまな疑問を**物理**を使って理解しよう

- 星の中はどうなっているの？
- なぜ重い星の方が大きいの？
- なぜ星は明るく輝くの？
- なぜ重い星の方が明るい？
- **なぜ星は「進化」するの？**
- **なぜ質量で星の運命が変わるの？**
- なぜ星は星でいられるの？
- なぜ一部の星は爆発するの？
- ...

E_{tot} : 全エネルギー

Ω : 重力エネルギー

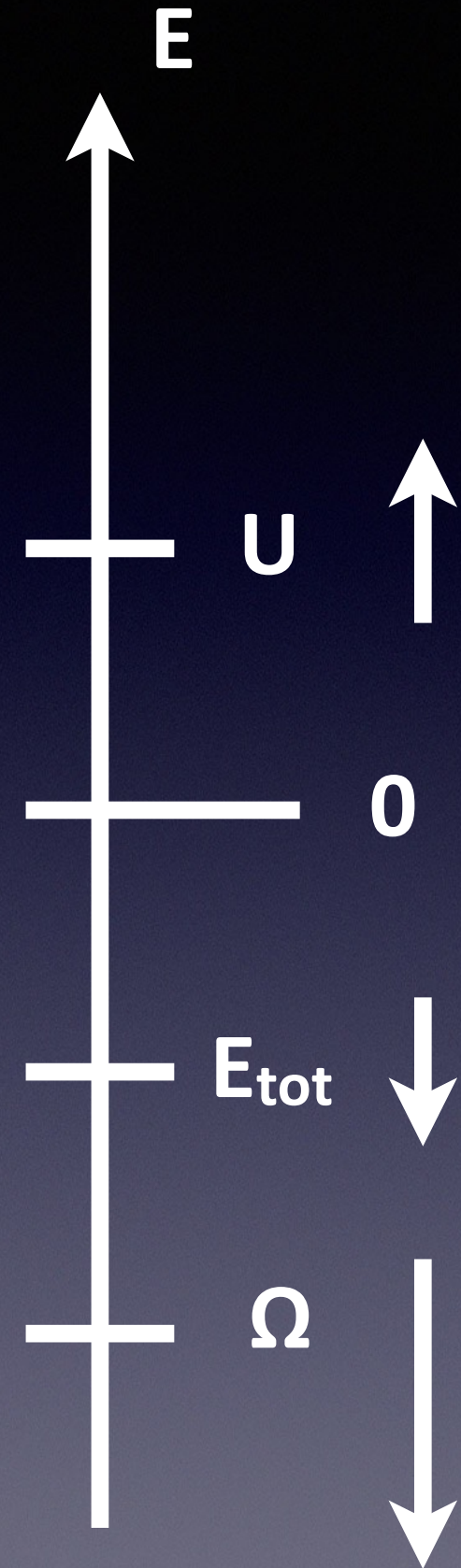
U : 内部エネルギー

$$U = -\frac{1}{2}\Omega$$

$$E_{\text{tot}} = U + \Omega = \frac{1}{2}\Omega = -U$$

核融合をしないと、

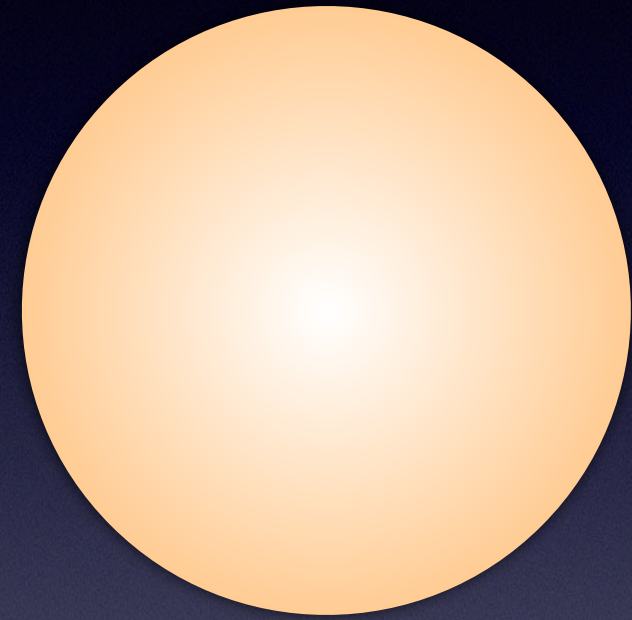
- 全エネルギーが下がり、
- 収縮して、
- 温度が上がる



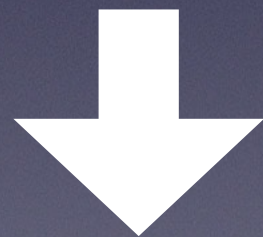
熱した鉄



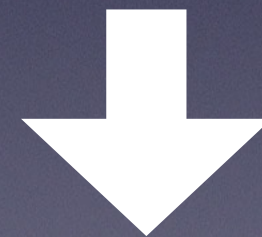
恒星



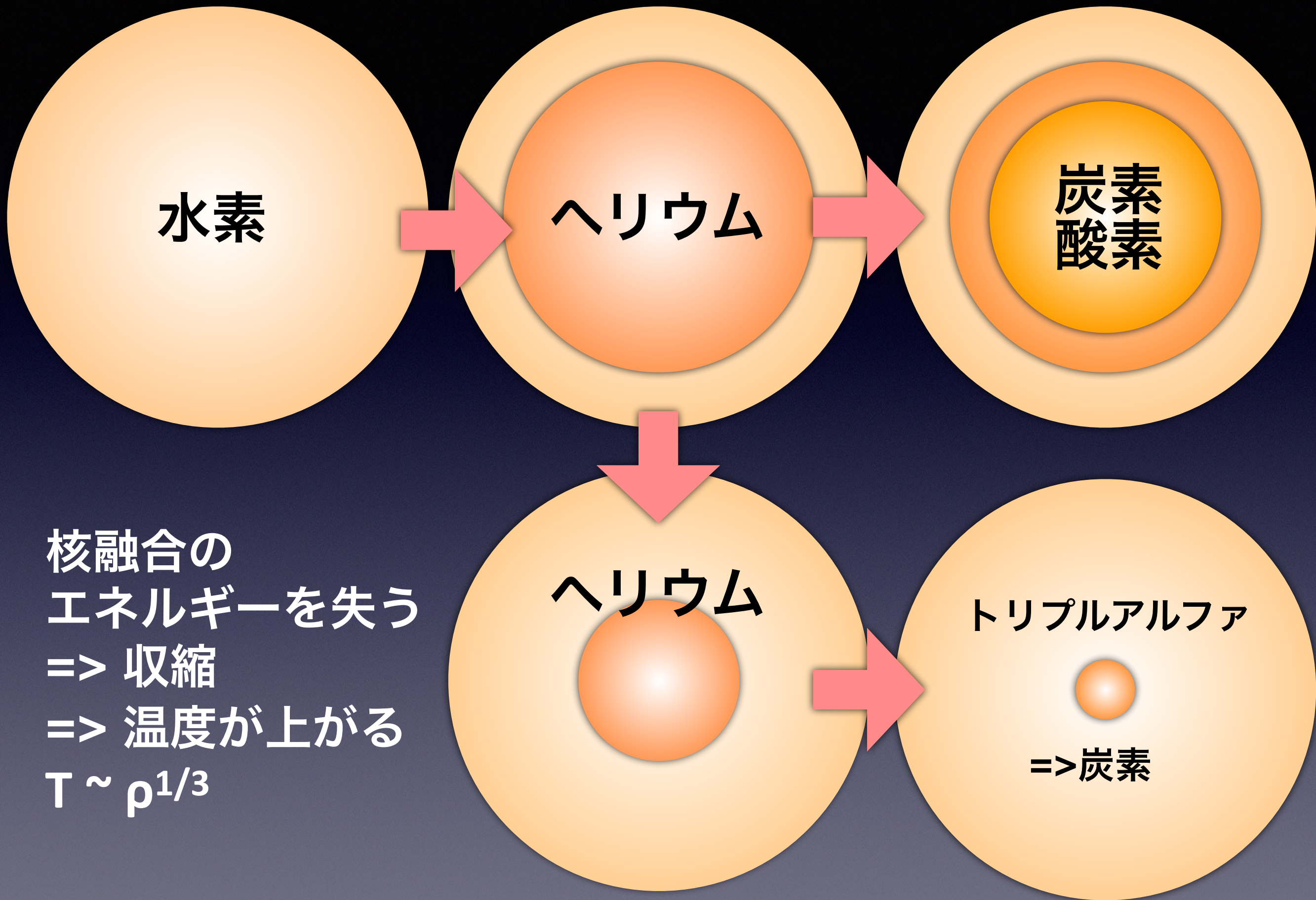
放置すると、、、



冷える



熱くなる



図の大きさは天体の大きさと一致していません

Phase	Main reactions	Products	T
燃焼段階	おもな反応	おもな生成物	温度 (10^8 K)
H	pp チェイン CNO サイクル	${}^4\text{He}$ ${}^{14}\text{N}$	0.15-0.2
He	$3{}^4\text{He} \longrightarrow {}^{12}\text{C}$ ${}^{12}\text{C} + {}^4\text{He} \longrightarrow {}^{16}\text{O} + \gamma$	${}^{12}\text{C}$ ${}^{16}\text{O}$	1.5
C	${}^{12}\text{C} + {}^{12}\text{C} \longrightarrow \begin{cases} {}^{23}\text{Na} + \text{p} \\ {}^{20}\text{Ne} + \alpha \end{cases}$	Ne, Na Mg, Al	7
Ne	${}^{20}\text{Ne} + \gamma \longrightarrow {}^{16}\text{O} + \alpha$ ${}^{20}\text{Ne} + \alpha \longrightarrow {}^{24}\text{Mg} + \gamma$	O Mg	15
O	${}^{16}\text{O} + {}^{16}\text{O} \longrightarrow \begin{cases} {}^{28}\text{Si} + \alpha \\ {}^{31}\text{P} + \text{p} \end{cases}$	Si, P, S, Cl, Ar, Ca	30
Si	${}^{28}\text{Si} + \gamma \longrightarrow {}^{24}\text{Mg} + \alpha$ ${}^{24}\text{Mg} + \gamma \longrightarrow \begin{cases} {}^{23}\text{Na} + \text{p} \\ {}^{20}\text{Ne} + \alpha \end{cases}$ 多くの反応 $\longrightarrow$ 統計平衡	Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu	40

Nuclear statistical equilibrium

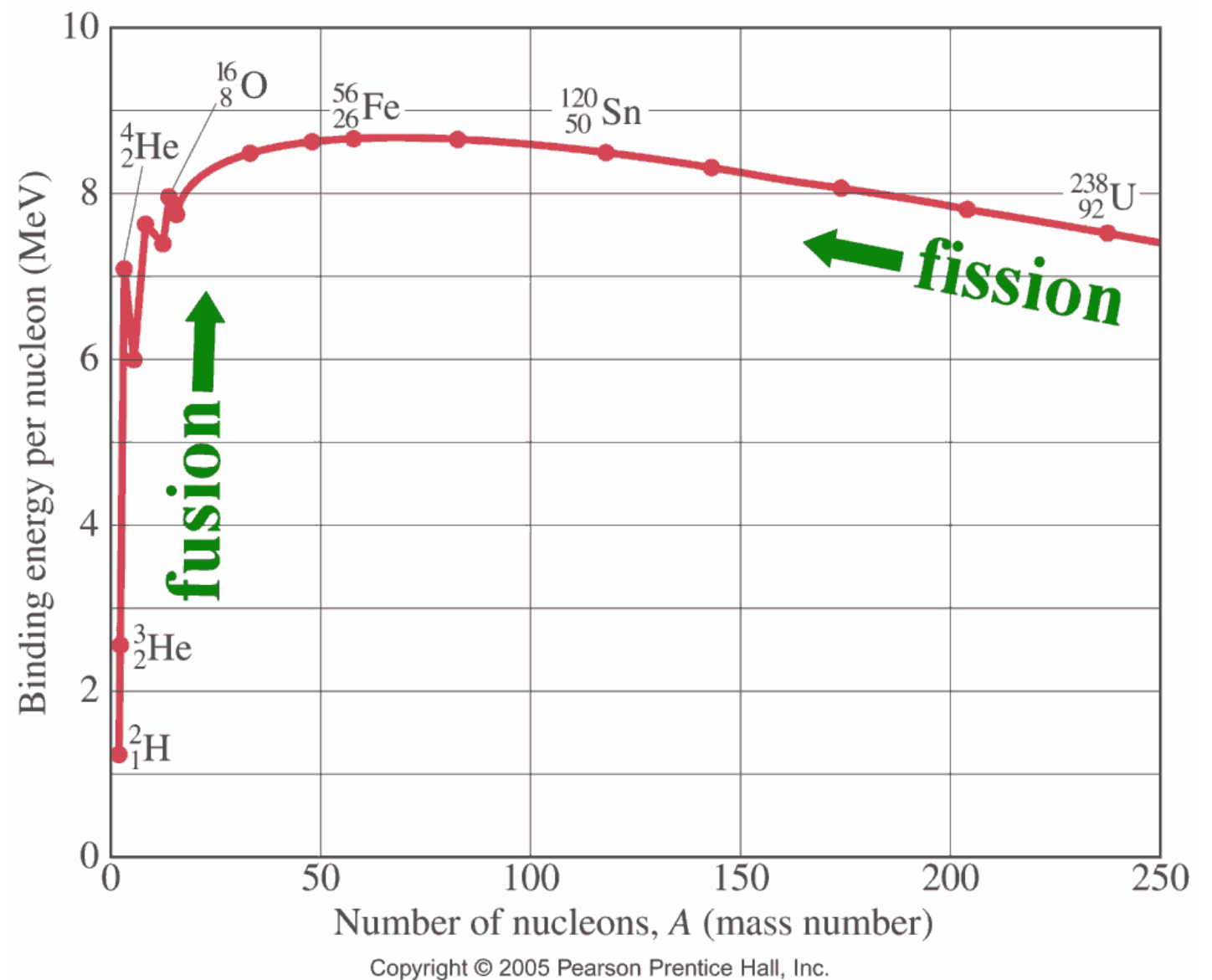
元素はいかにつくられたか (岩波書店)

原子核の束縛エネルギー

$$E_b = [Nm_N + Zm_p - m_i] c^2 > 0$$

束縛エネルギーが大きい
= より安定

鉄が最も安定



全ての星が鉄まで核融合を続けるの？ => No

理想気体ではなくなる効果が重要

Section 4.

恒星進化の基礎

4.1 ビリアル定理

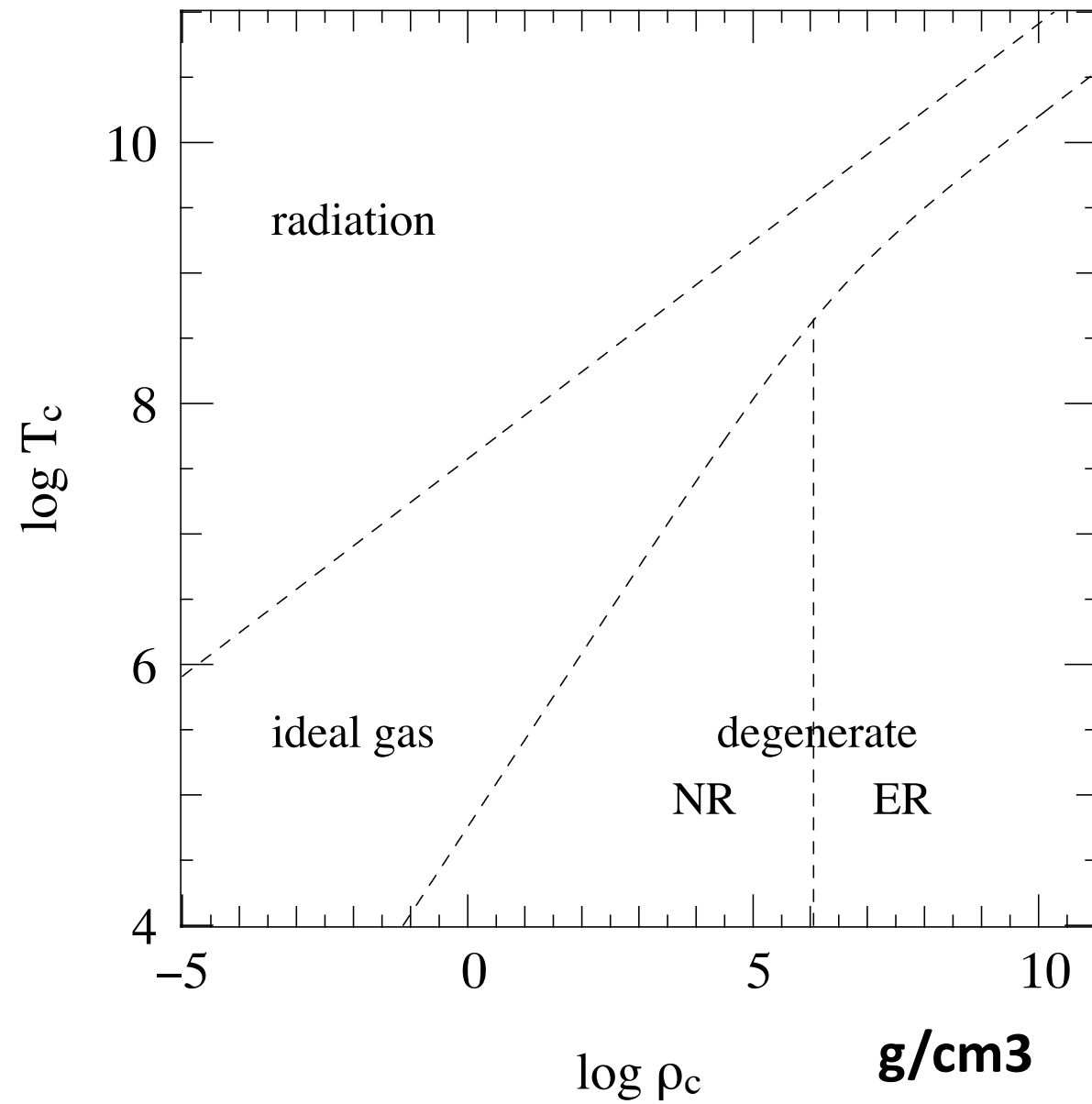
4.2 状態方程式と星の進化



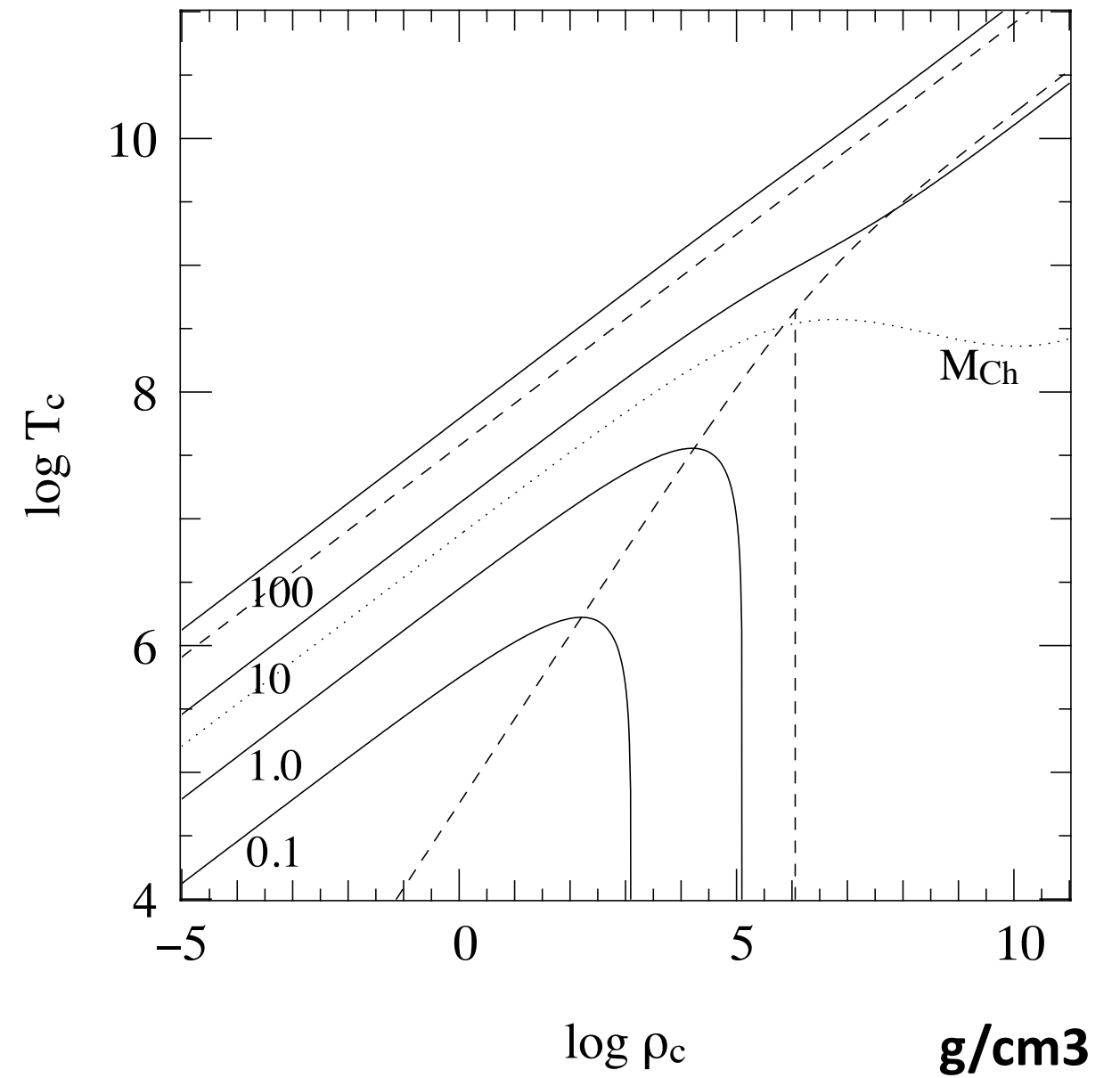
なぜ星の「運命」は質量で変わるのか？

ガスのミクロな性質が重要

状態方程式



進化経路の概略



レポート課題 3

3-1. マクスウェル分布から
理想気体の圧力の式を導け

3-2. 電子が非相対論的、超相対論的なときの
縮退圧の式を導き、実際に数字を入れて計算せよ

3-3. プランク関数から輻射圧の式を導け

レポート課題 3 (続き)

3-4. 密度 - 温度平面で

- 理想気体のガス圧
- 電子の縮退圧 (非相対論的)
- 電子の縮退圧 (超相対論的)
- 輻射圧

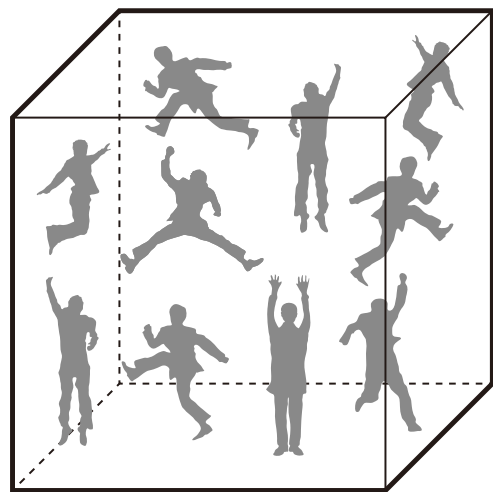
がそれぞれ支配的になる境界を求め、図示せよ

3-5. 太陽の中心温度を $T = 10^7$ K、中心密度を $\rho \sim 150 \text{ g cm}^{-3}$ として、 1 Msun と 10 Msun の星の中心部の進化を密度-温度平面に示せ。
ただし、進化でコアの質量が変化する効果は無視して良い。

白色矮星: 縮退圧で支えられた星

普通の気体の圧力

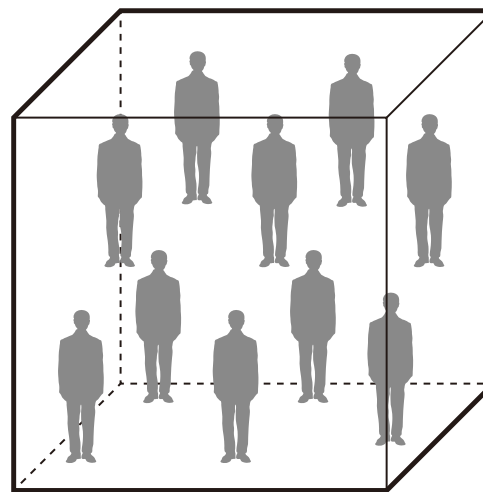
Ideal gas



温度を下げる



T decreases



圧力が下がる

縮退圧

Degeneracy pressure

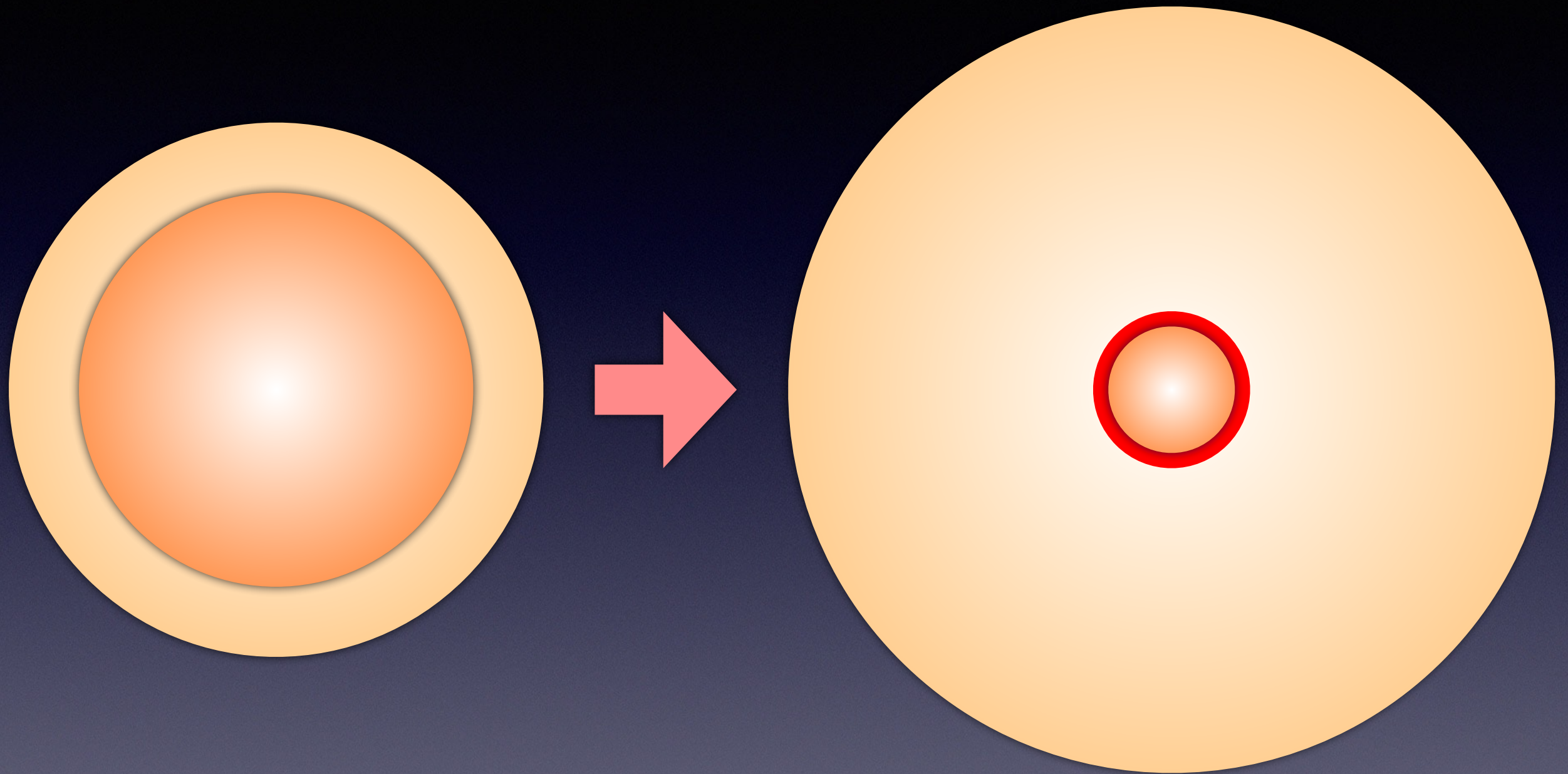


温度がゼロでも圧力が生まれる

温度がゼロでも
圧力はゼロにならない

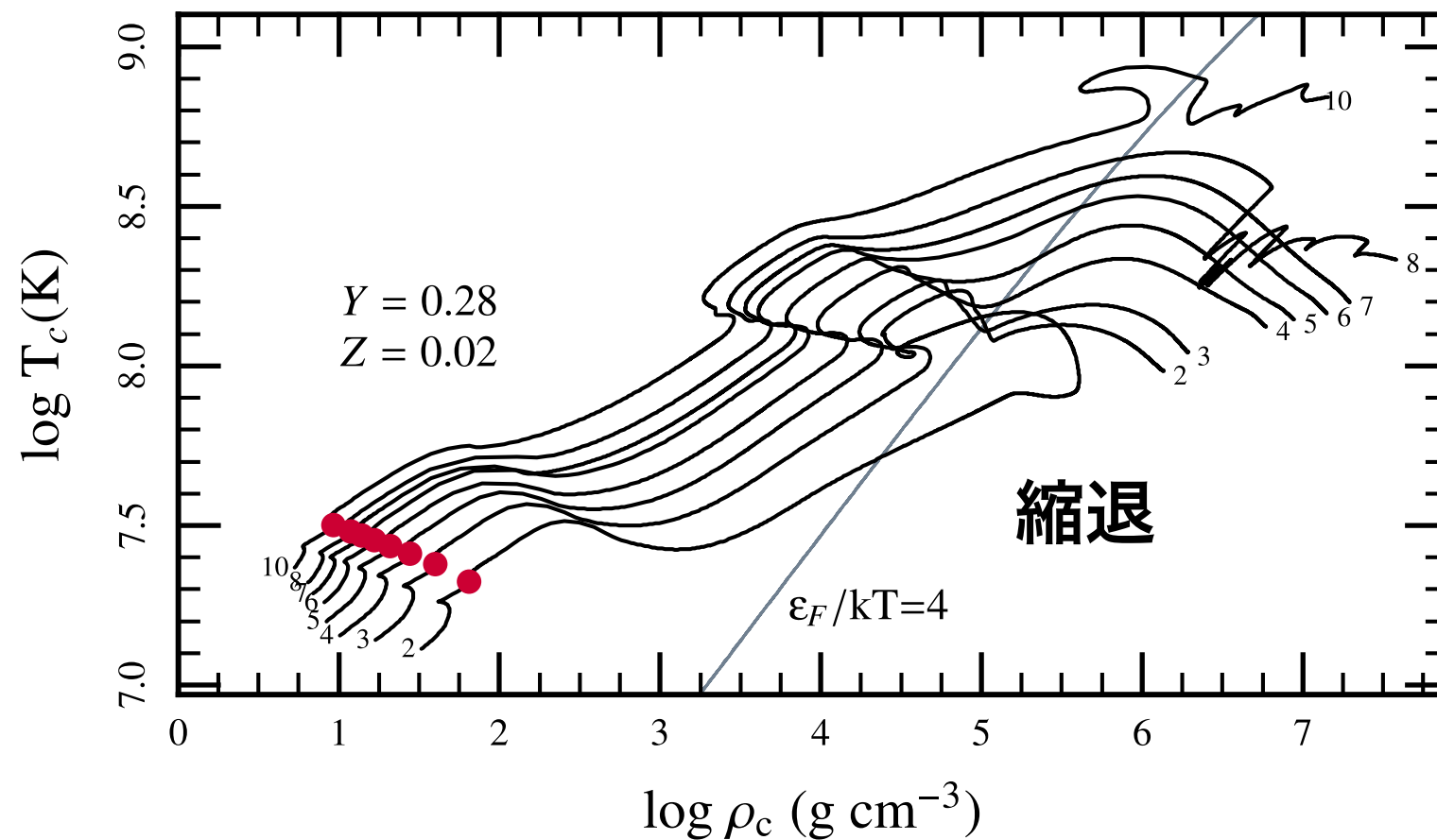
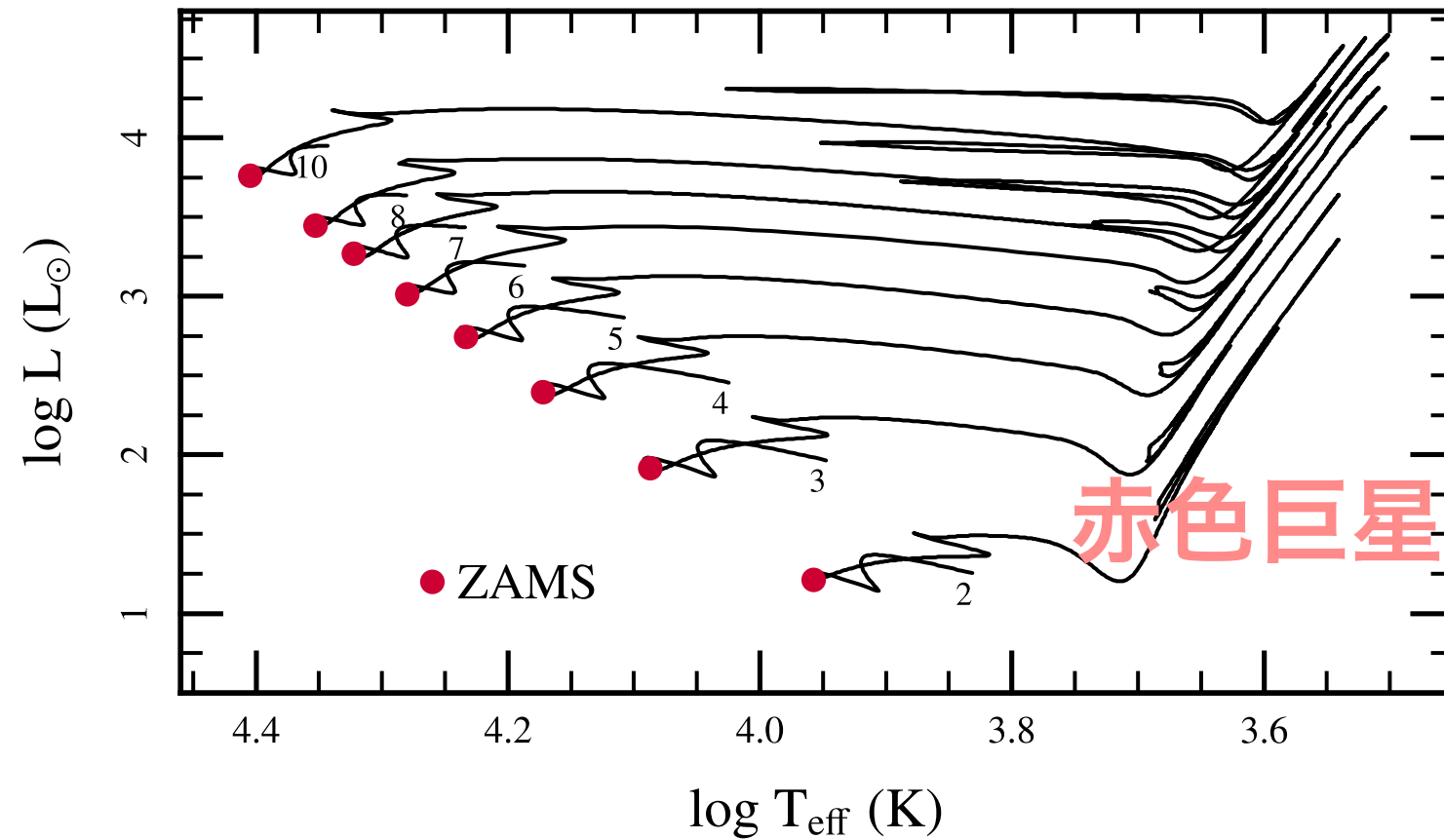
星が「死ぬ」とはどういうことか
(ベレ出版)

コアが収縮 => 外層は膨張

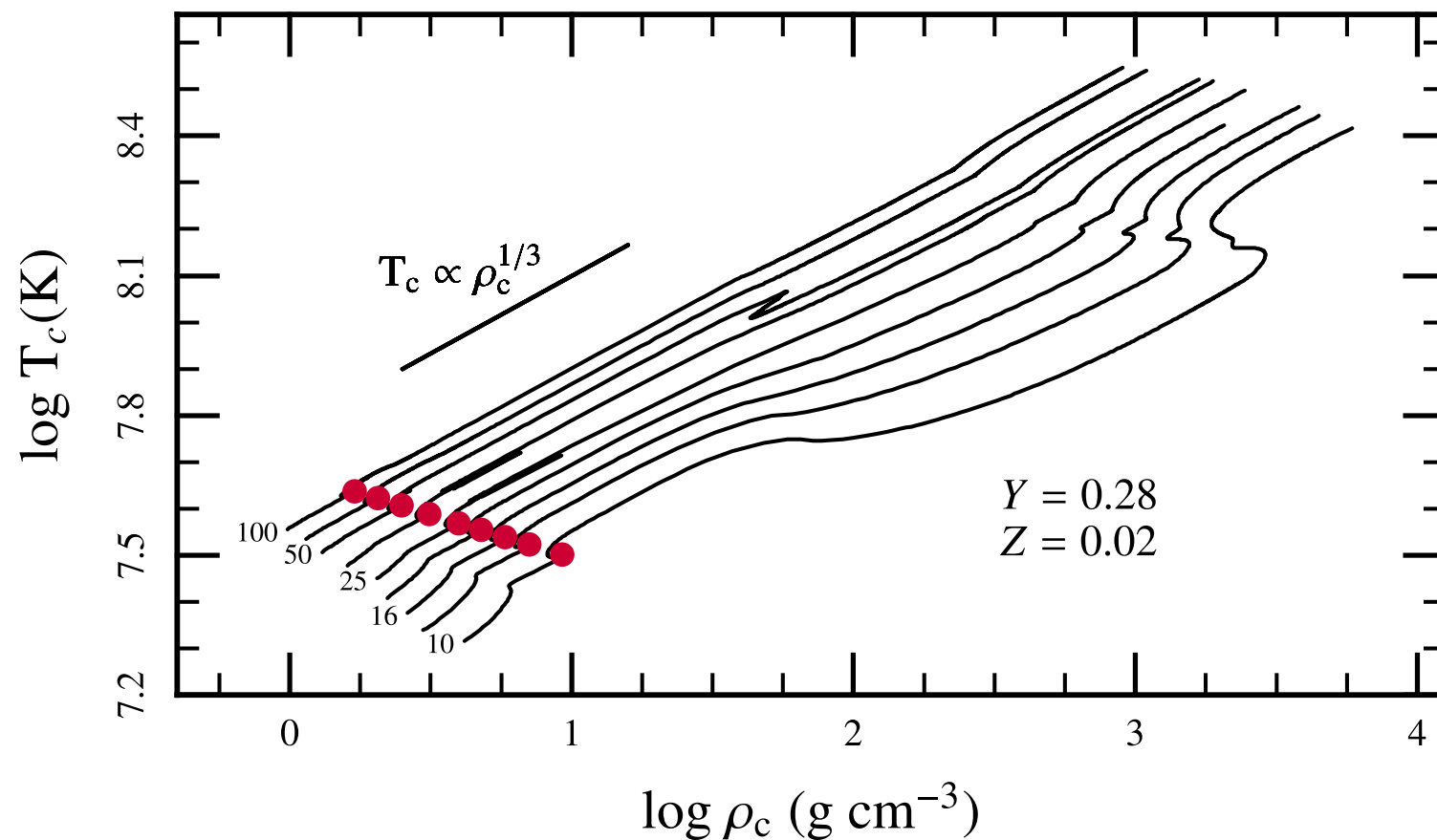
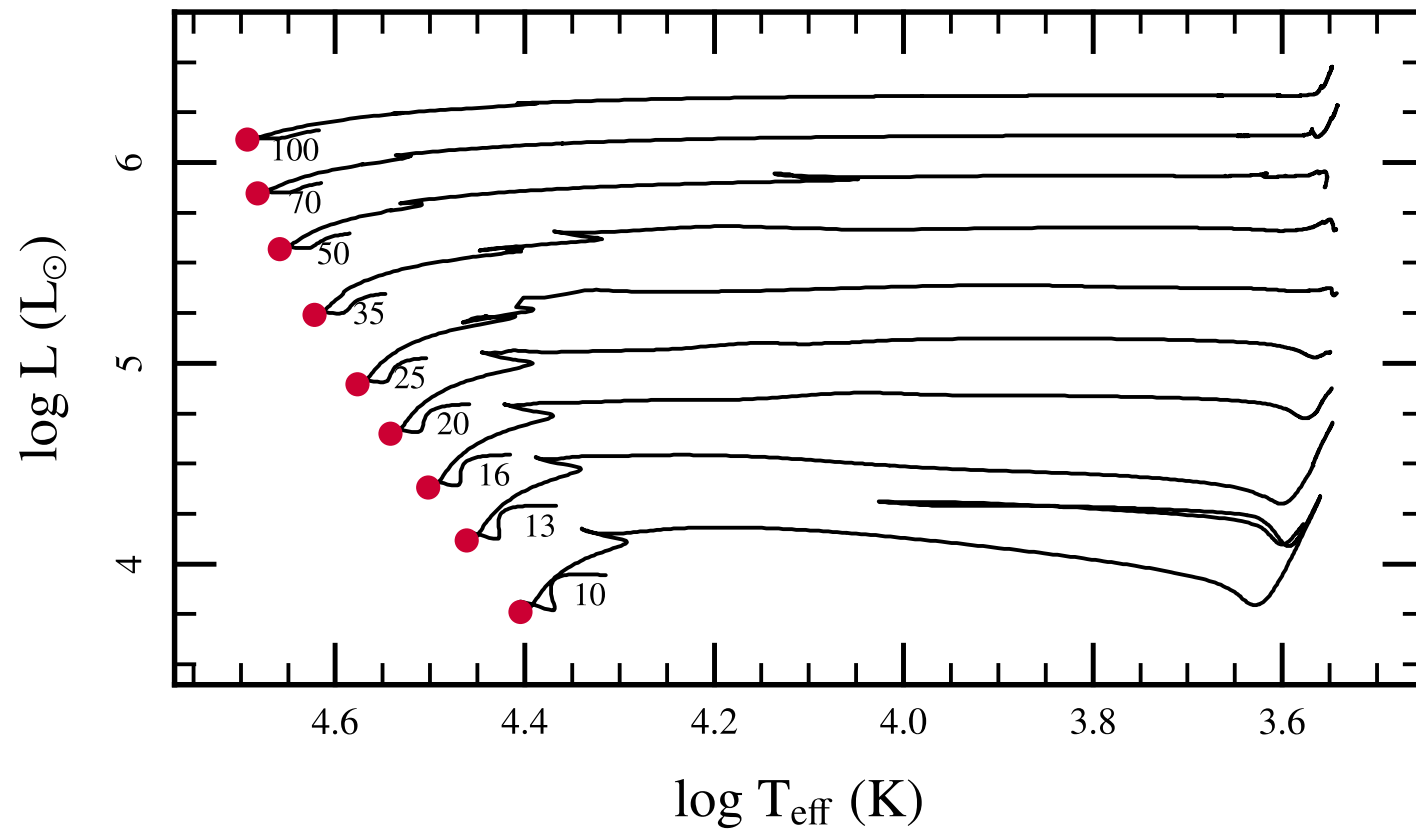


表面温度が下がる => 「赤色巨星」

低・中質量星の進化

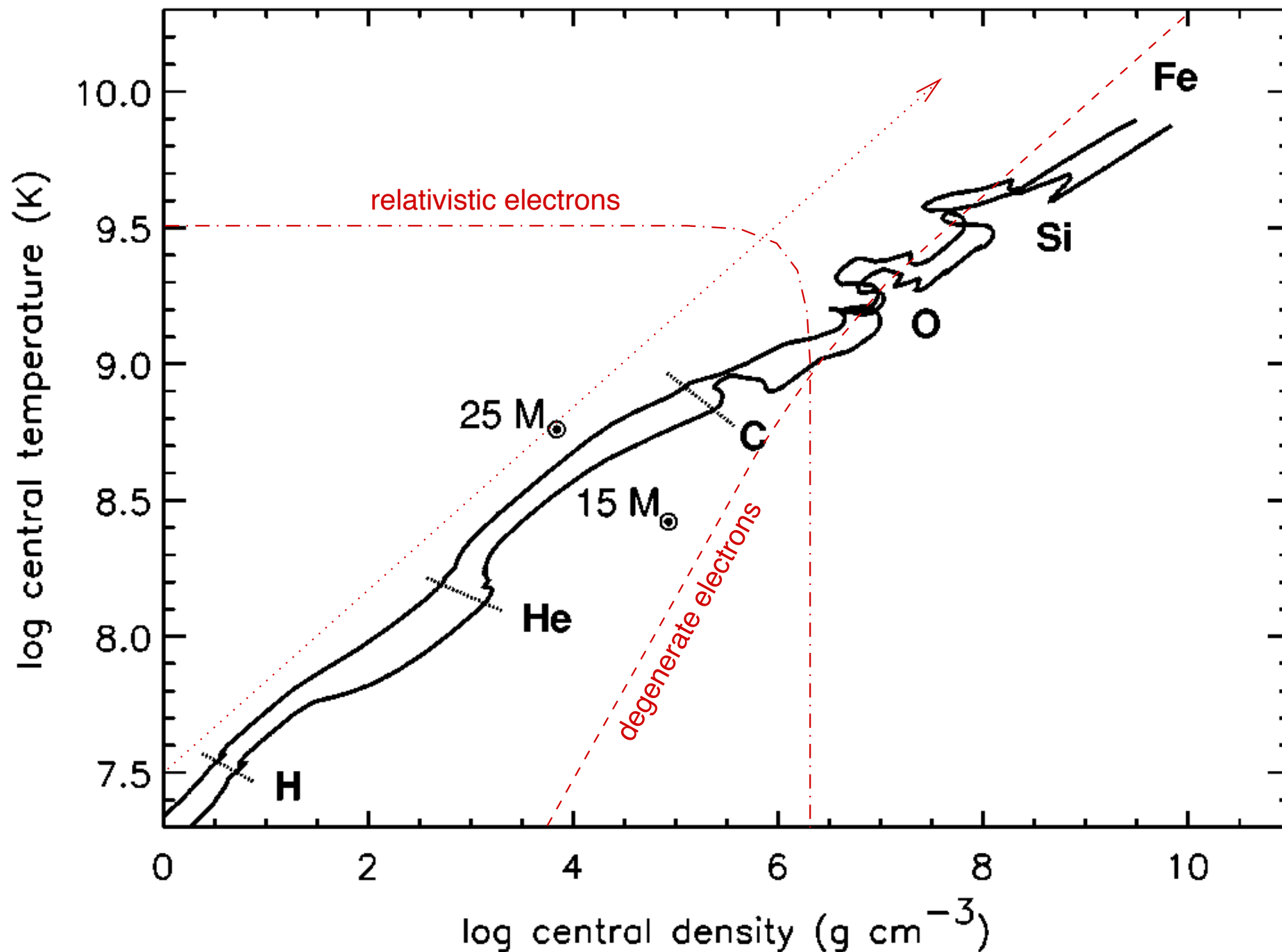


大質量星の進化 (ヘリウム燃焼まで)



大質量星の進化 (ケイ素燃焼まで)

Finally degeneracy pressure
becomes important



まとめ

- ビリアル定理
 - 星の内部エネルギーは重力エネルギーと常に関係
 - 全エネルギーが下がる $\Rightarrow$ 温度が上がる (負の比熱)
 - $T \sim \rho^{1/3}$
- 状態方程式：ガスのミクロな性質 $\Rightarrow$ 星のマクロな性質
 - 理想気体 $P \sim \rho T$
 - 縮退圧 $P \sim \rho^{5/3}$ (non-rel)、 $P \sim \rho^{4/3}$ (rel)
 - 輻射圧 $P \sim T^4$
- 恒星の進化
 - 低質量星: 縮退圧で支えられる $\Rightarrow$ 収縮しない
 $\Rightarrow$ 温度が上がらない $\Rightarrow$ 核融合の終わり
 - 大質量星: 鉄まで核融合が続く