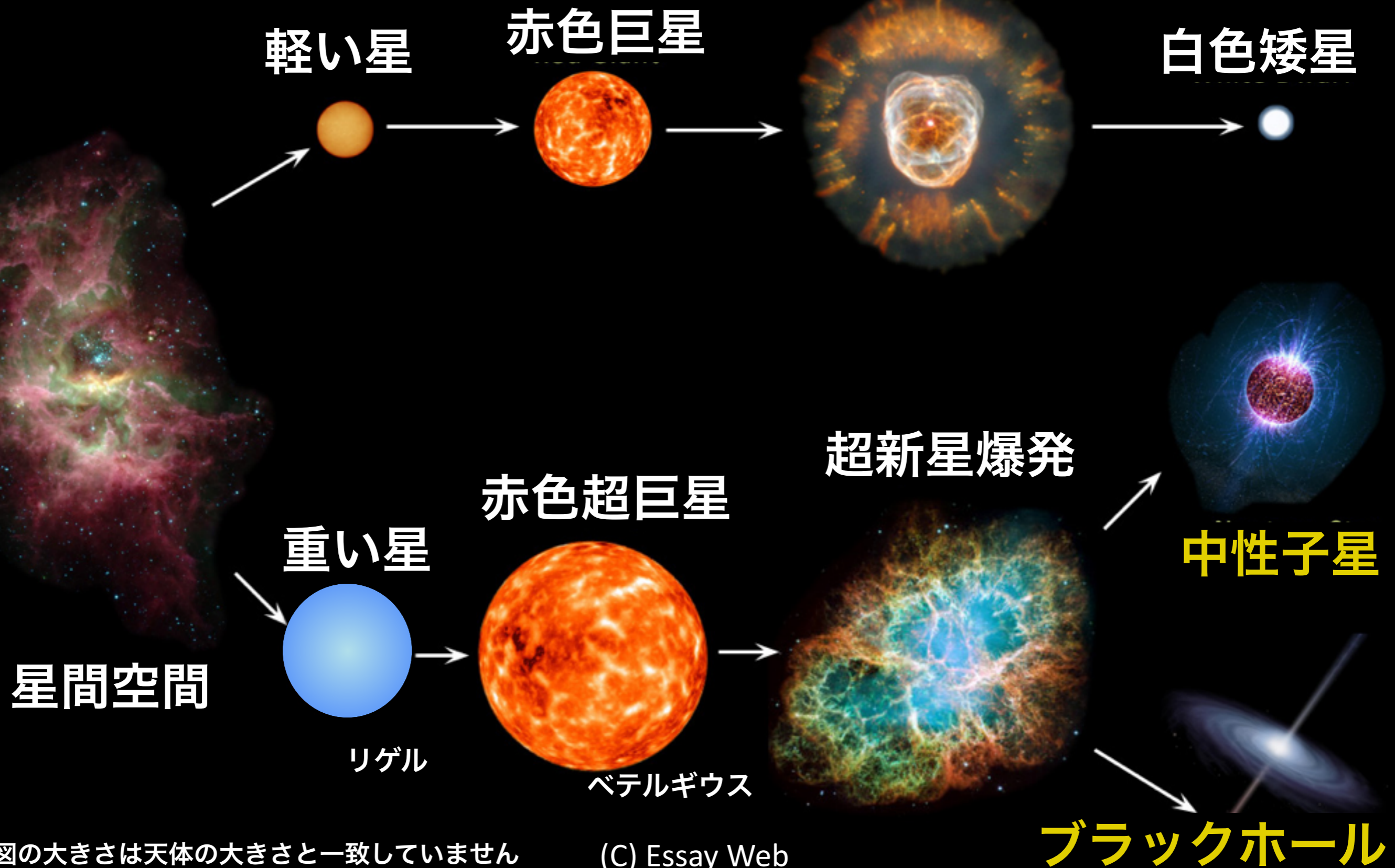


Section 6. 星の進化 (1)

6.1 ビリアル定理

6.2 温度と密度の進化

星の一生

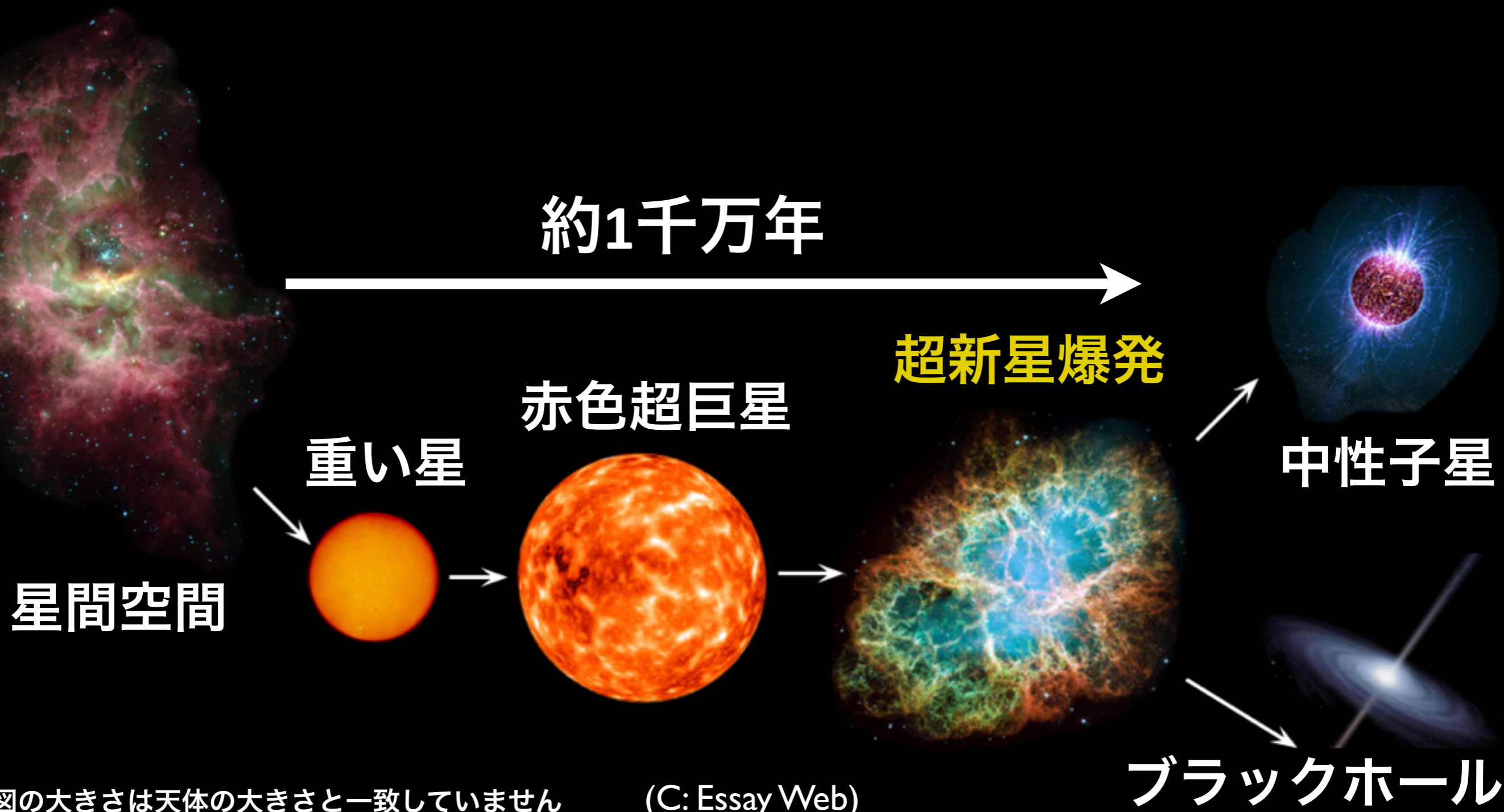


図の大きさは天体の大きさと一致していません

(C) Essay Web

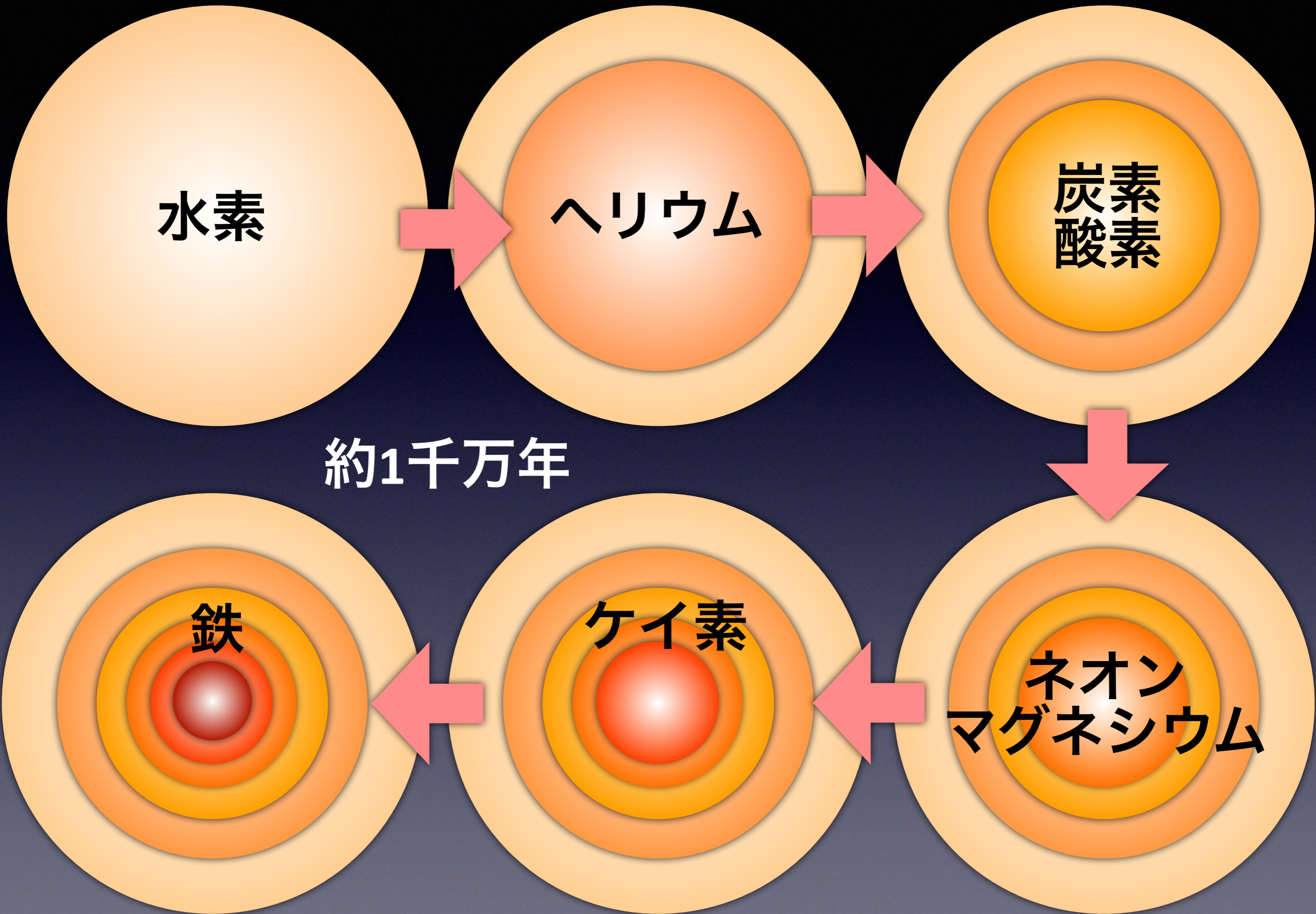
1. 重い星の場合

* 太陽の10倍以上



図の大きさは天体の大きさと一致していません

(C: Essay Web)



図の大きさは天体の大きさと一致していません



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？

E_{tot} : 全エネルギー

Ω : 重力エネルギー

U : 内部エネルギー

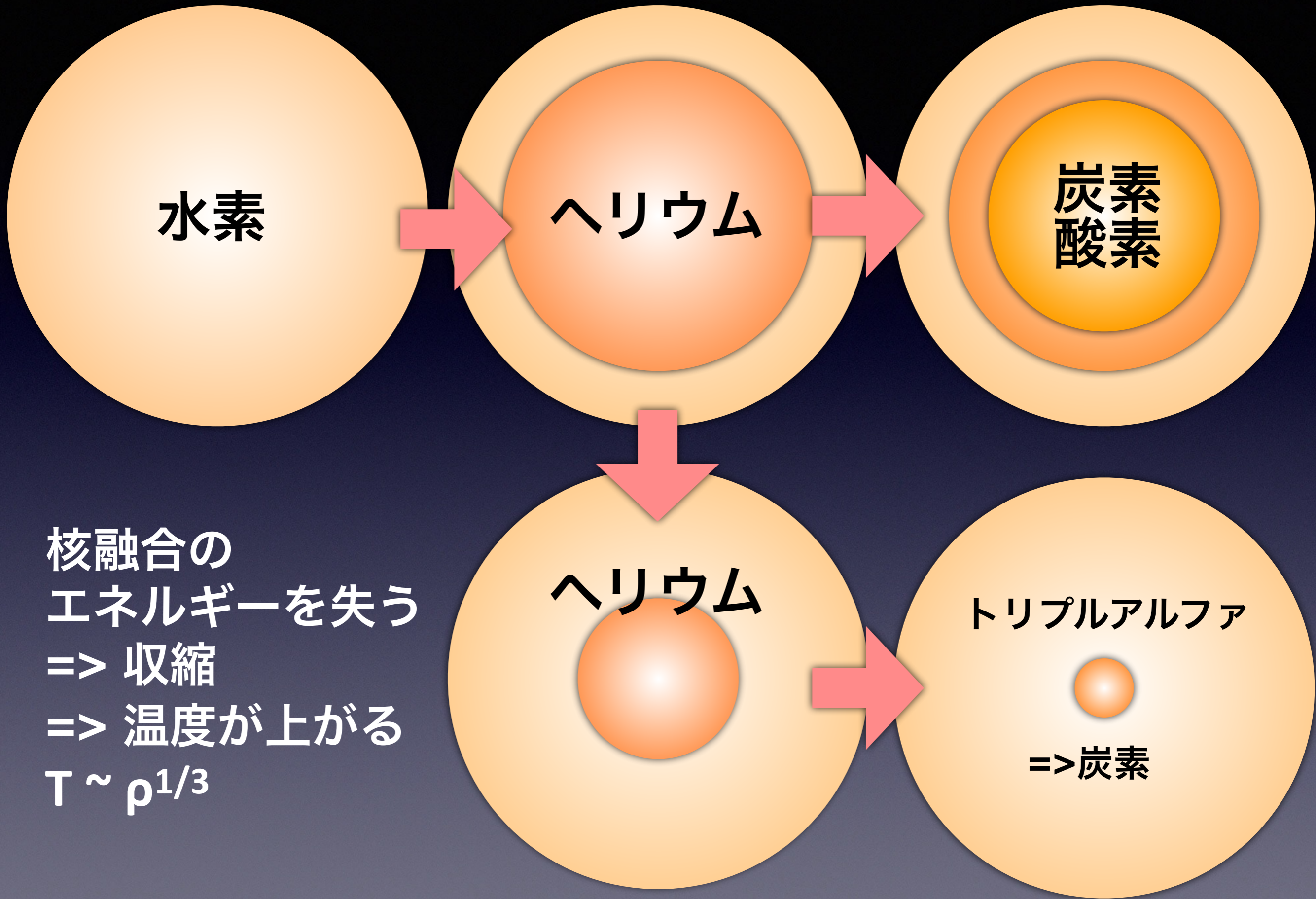
$$U = -\frac{1}{2}\Omega$$

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

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





水素

ヘリウム

炭素
炭素

ヘリウム

トリプルアルファ

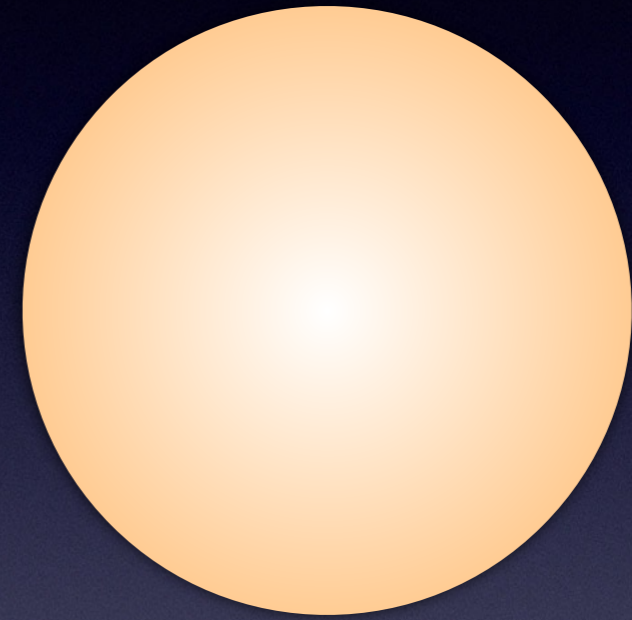
=>炭素

核融合の
エネルギーを失う
=> 収縮
=> 温度が上がる
 $T \sim \rho^{1/3}$

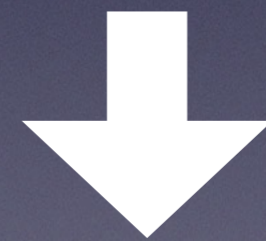
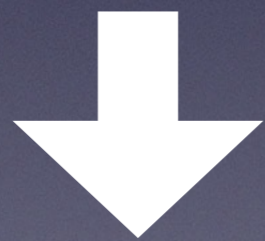
図の大きさは天体の大きさと一致していません

熱した鉄

恒星



放置すると、、、



冷える

熱くなる

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

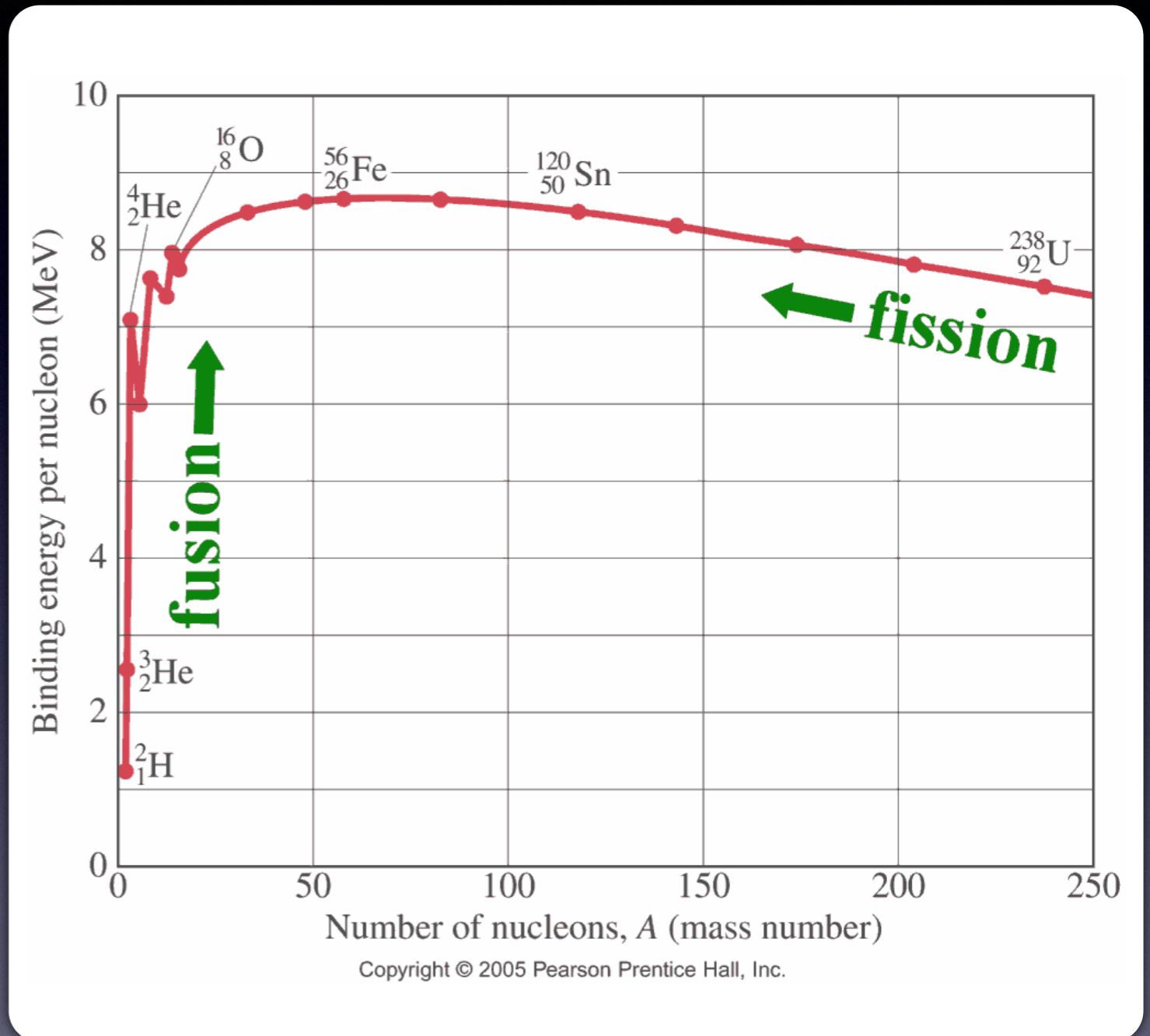
元素はいかにつくられたか (岩波書店)

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

まとめ: 星の進化 (1)

- ビリアル定理

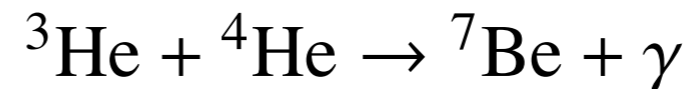
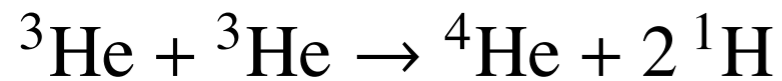
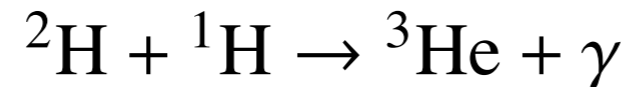
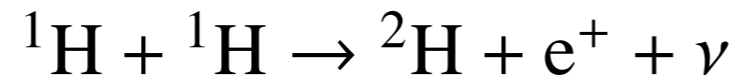
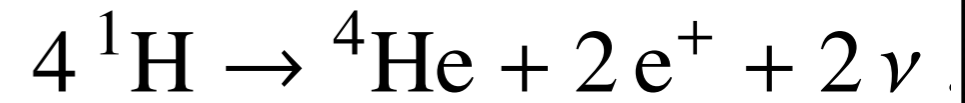
- 星の内部エネルギーは重力エネルギーと常に関係
- 全エネルギーが下がる \Rightarrow 温度が上がる (負の比熱)

- 温度と密度の進化

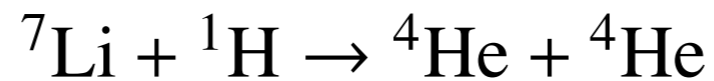
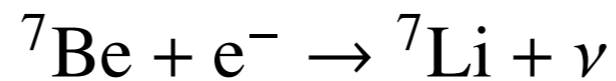
- 星が収縮して温度が上がる $T \sim \rho^{1/3}$
- より重い元素の核融合へ \Rightarrow たまねぎ構造
- 全ての星が鉄を作る? \Rightarrow No
星の状態方程式が重要になる (次回のテーマ)

Appendix

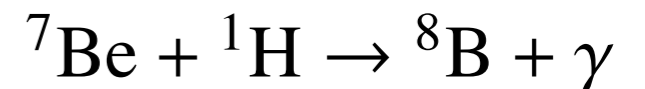
1a. H-burning (pp chain)



pp1



pp2

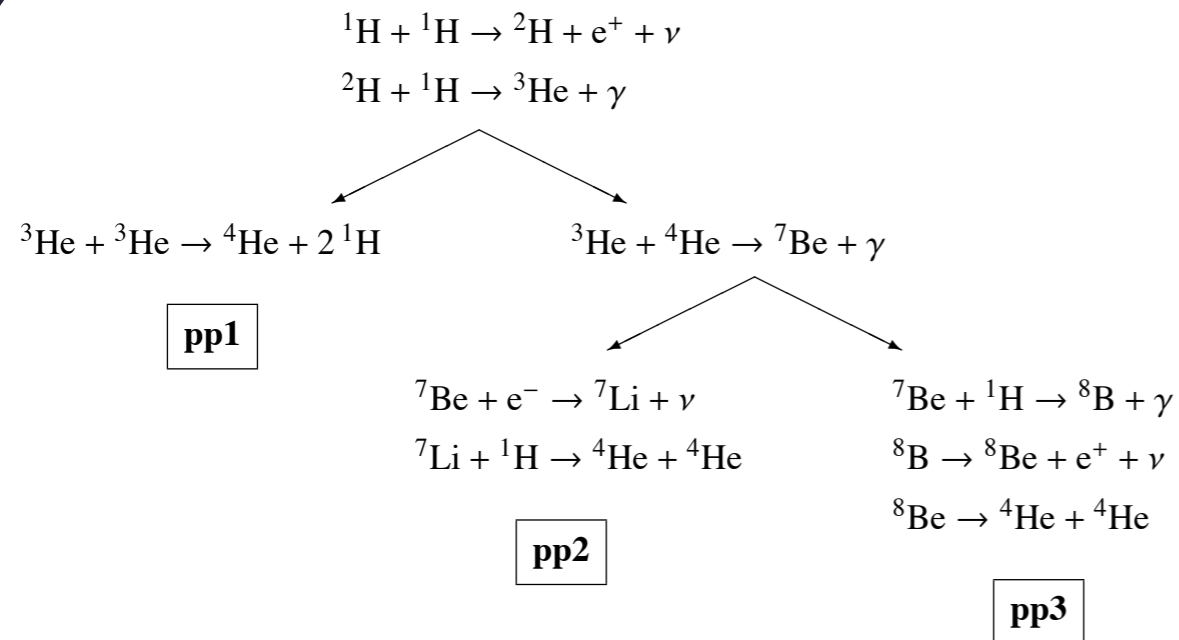


pp3

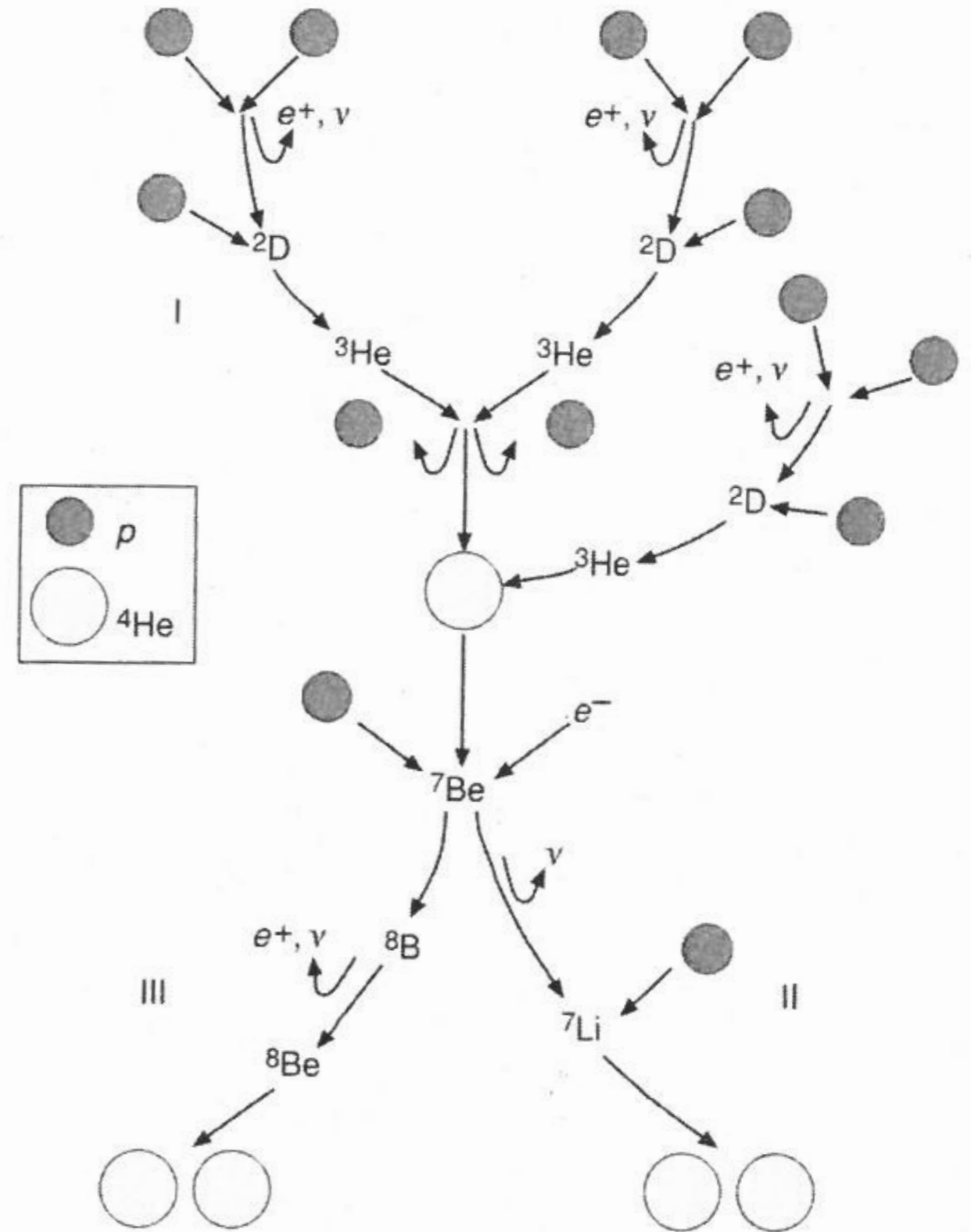
Energy production rate (per gram)

$$q \sim \rho T^4$$

$$T \sim 4 \times 10^6 \text{ K}$$



Textbook by Pols

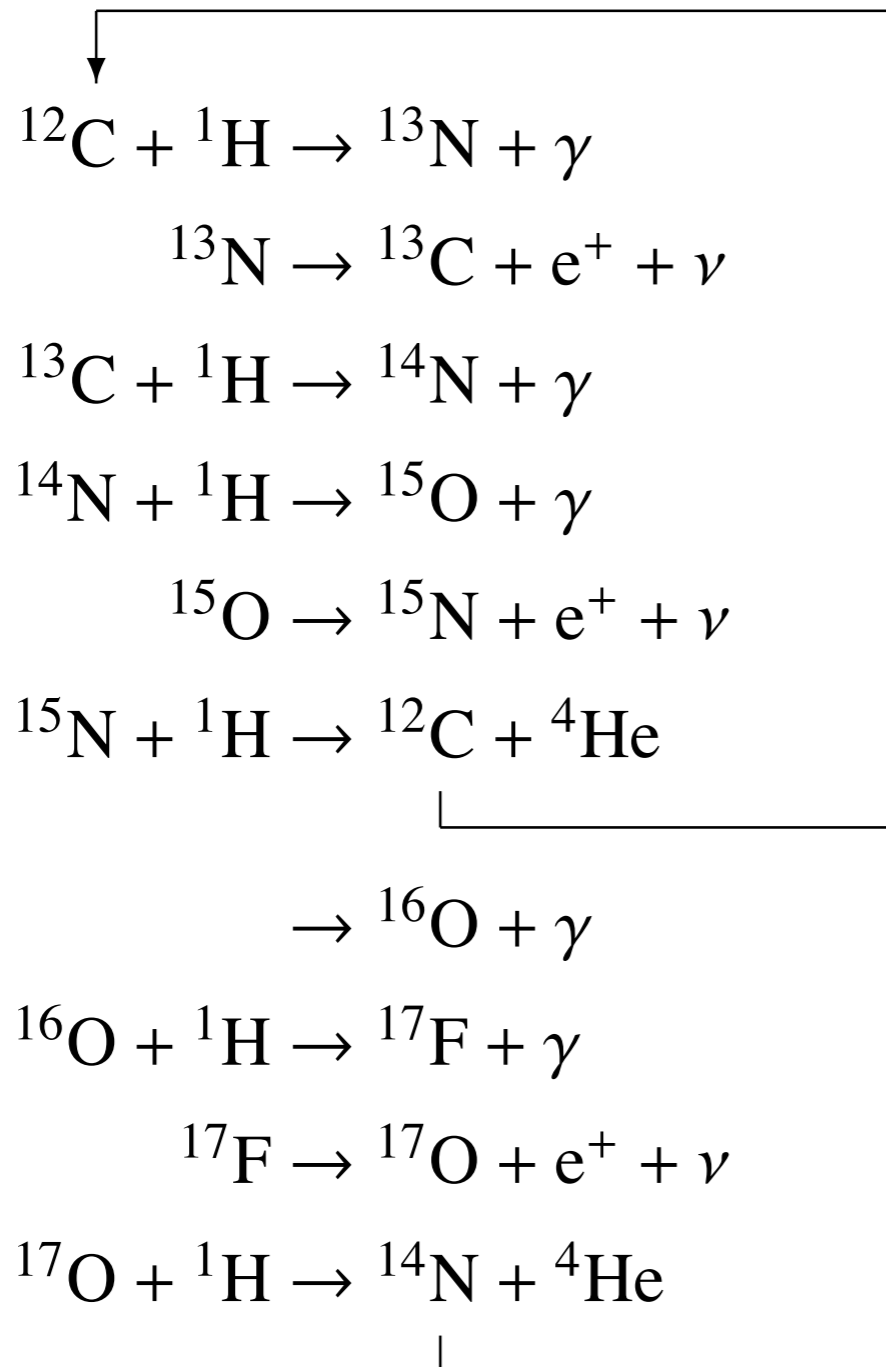


Textbook by Prialnik

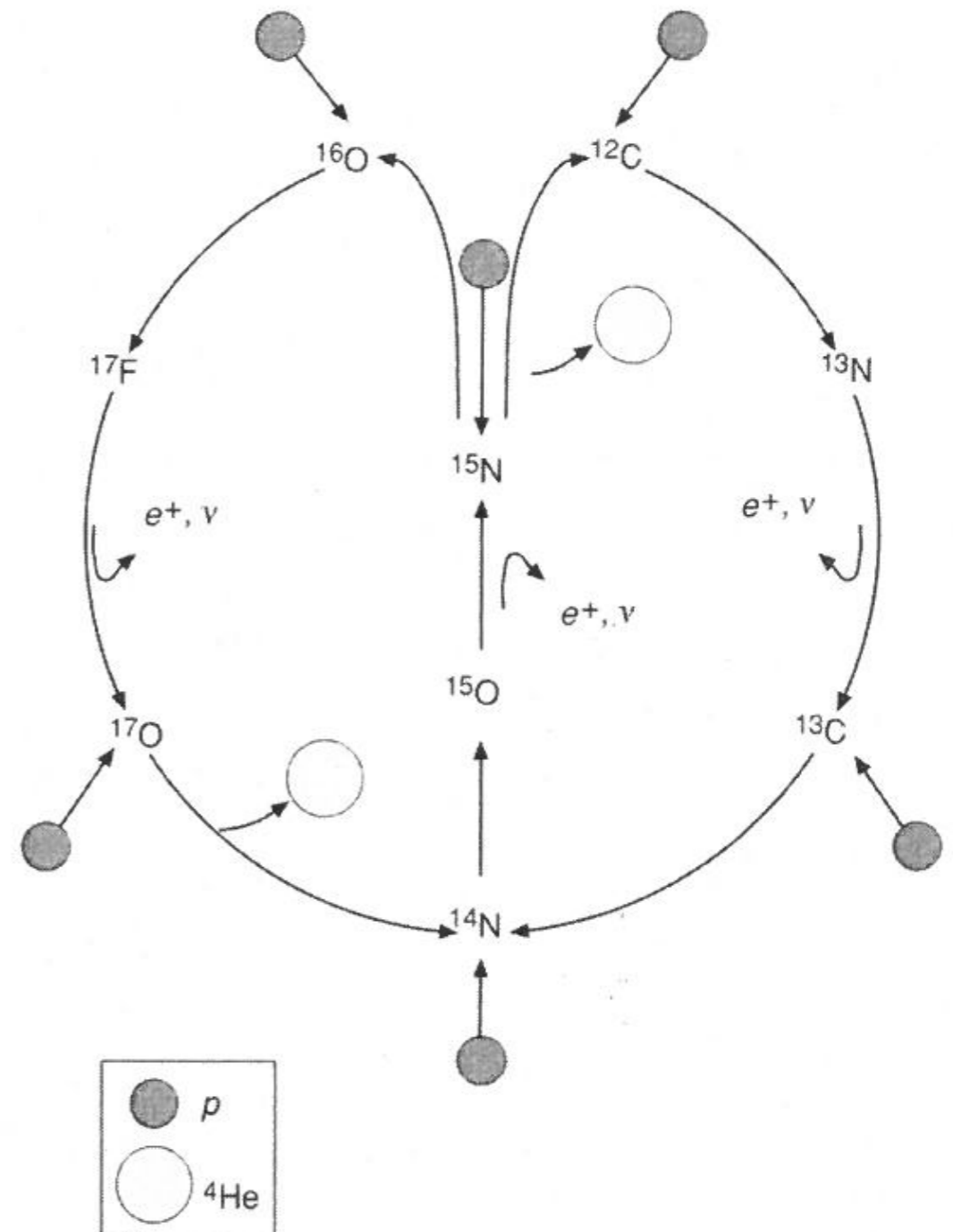
1b. H burning (CNO cycle)

E production rate $q \sim \rho T^{16}$

$T \sim 1.5 \times 10^7 \text{ K}$

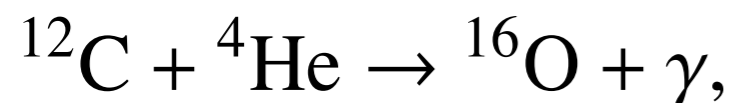
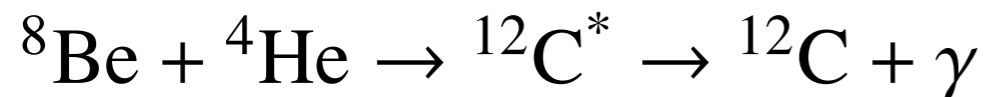


Textbook by Pols



Textbook by Prialnik

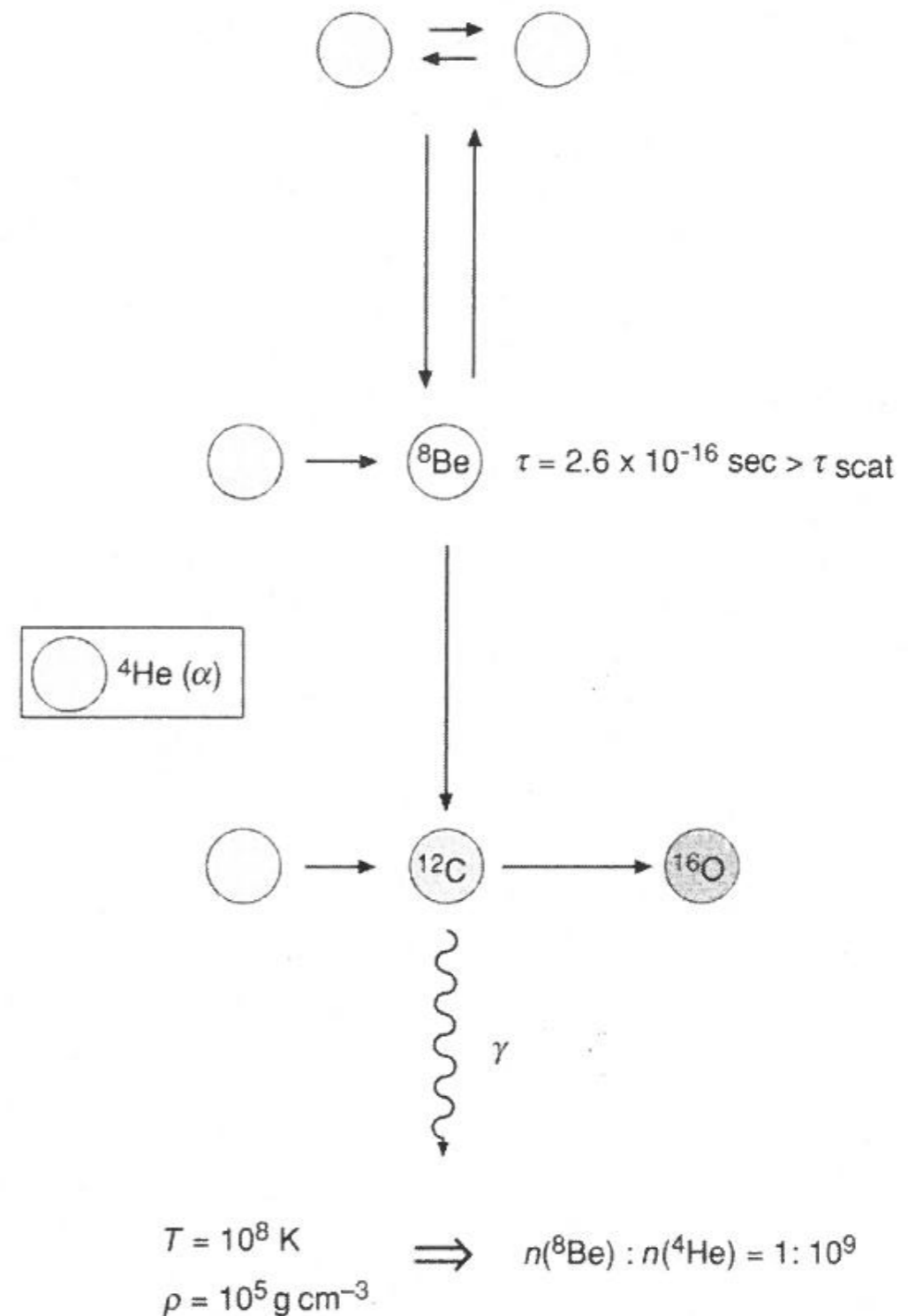
2. He-burning (triple alpha)



Energy production rate
(per gram)

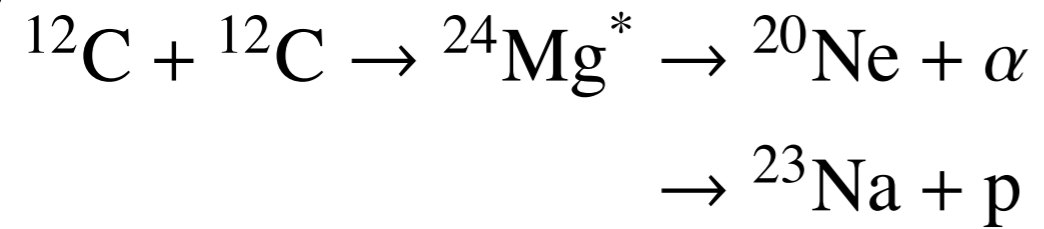
$$q \sim \rho^2 T^{40}$$

$$T \sim 1.5 \times 10^8 \text{ K}$$



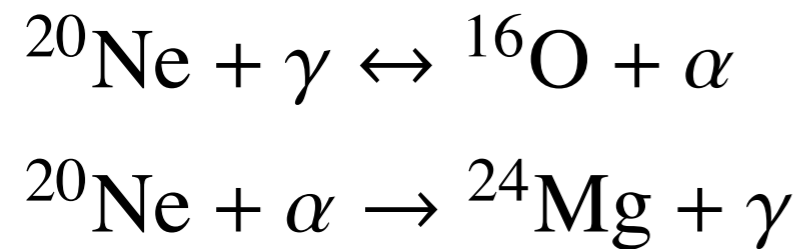
Textbook by Prialnik

3. C-burning



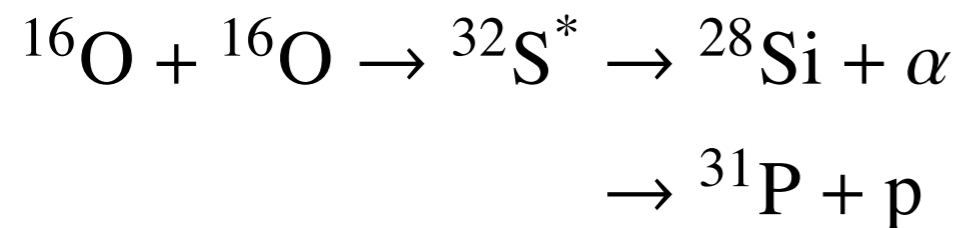
$$T \sim 7 \times 10^8 \text{ K}$$

4. Ne-burning



$$T \sim 1.5 \times 10^9 \text{ K}$$

5. O-burning

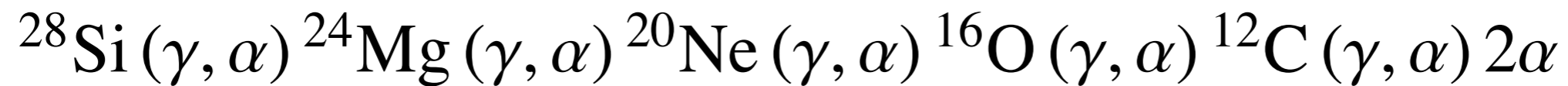


$$T \sim 2\text{-}3 \times 10^9 \text{ K}$$

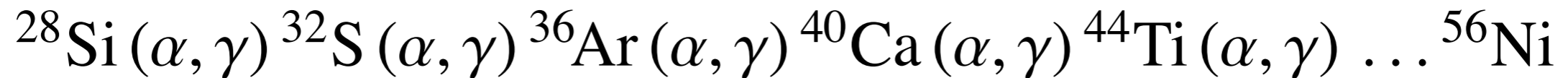
6. Si-burning (Nuclear statistical equilibrium)

$T > 4 \times 10^9 \text{ K}$

High temperature => photo-dissociation

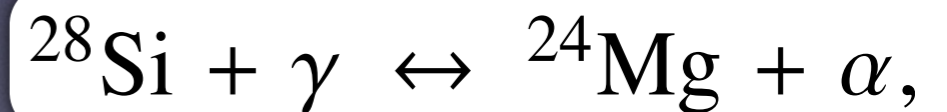


He capture



=> equilibrium of many reactions

(Ex.)



Nuclei with high binding energy tend to be produced (Fe, Co, Ni)