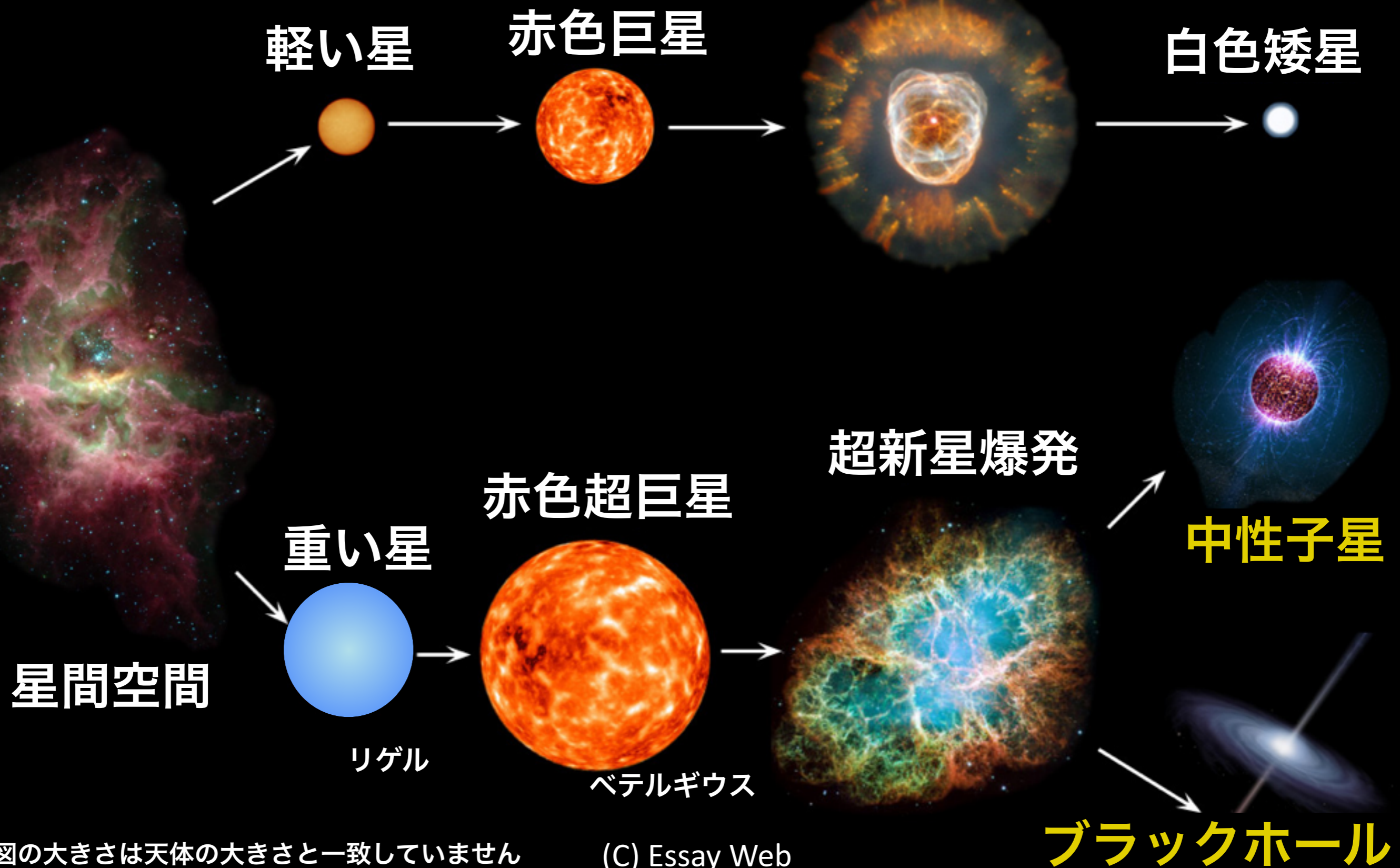


Section 5. 恒星の進化 (1)

5.1 ビリアル定理

5.2 温度と密度の進化

星の一生

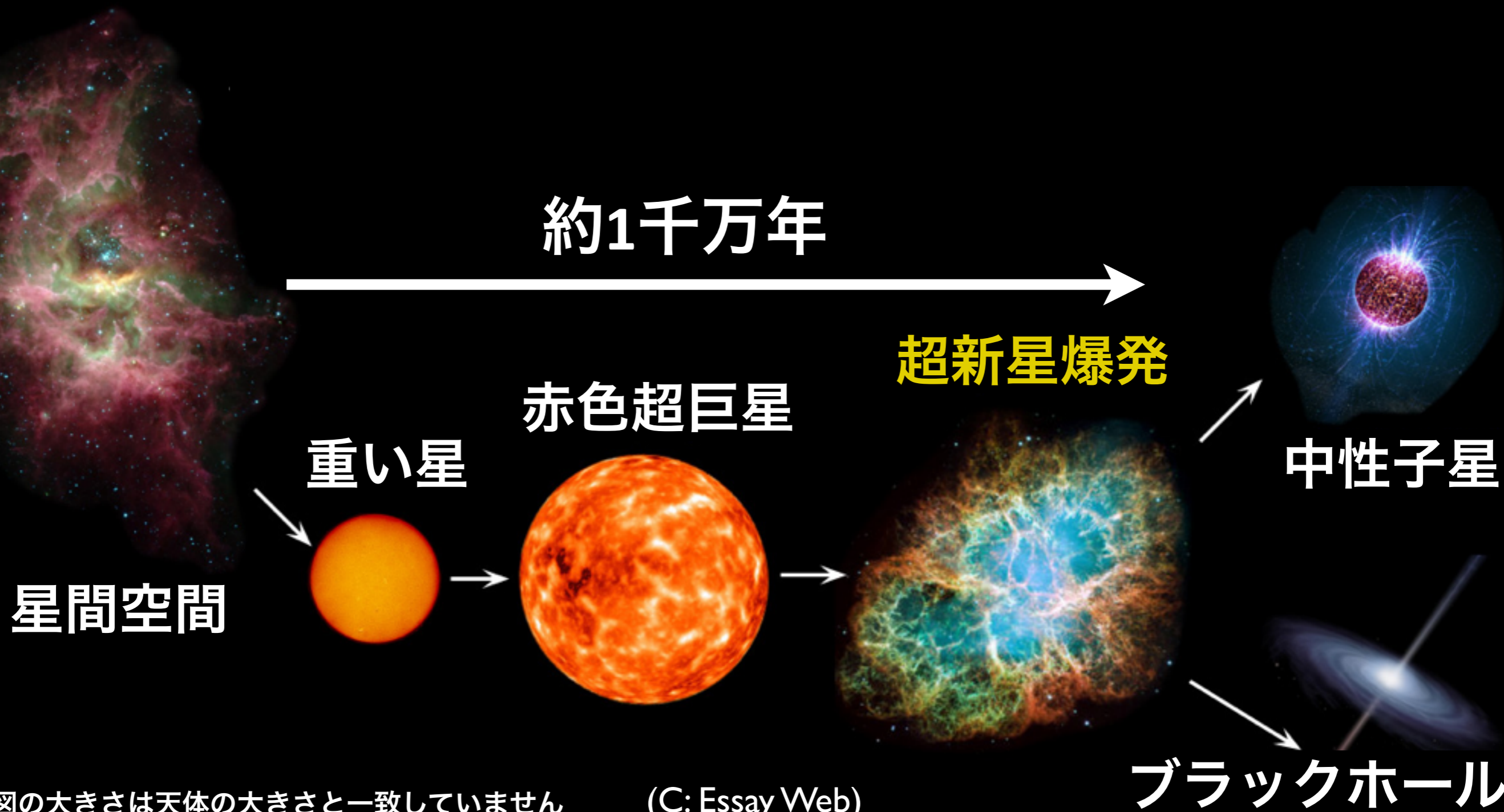


図の大きさは天体の大きさと一致していません

(C) Essay Web

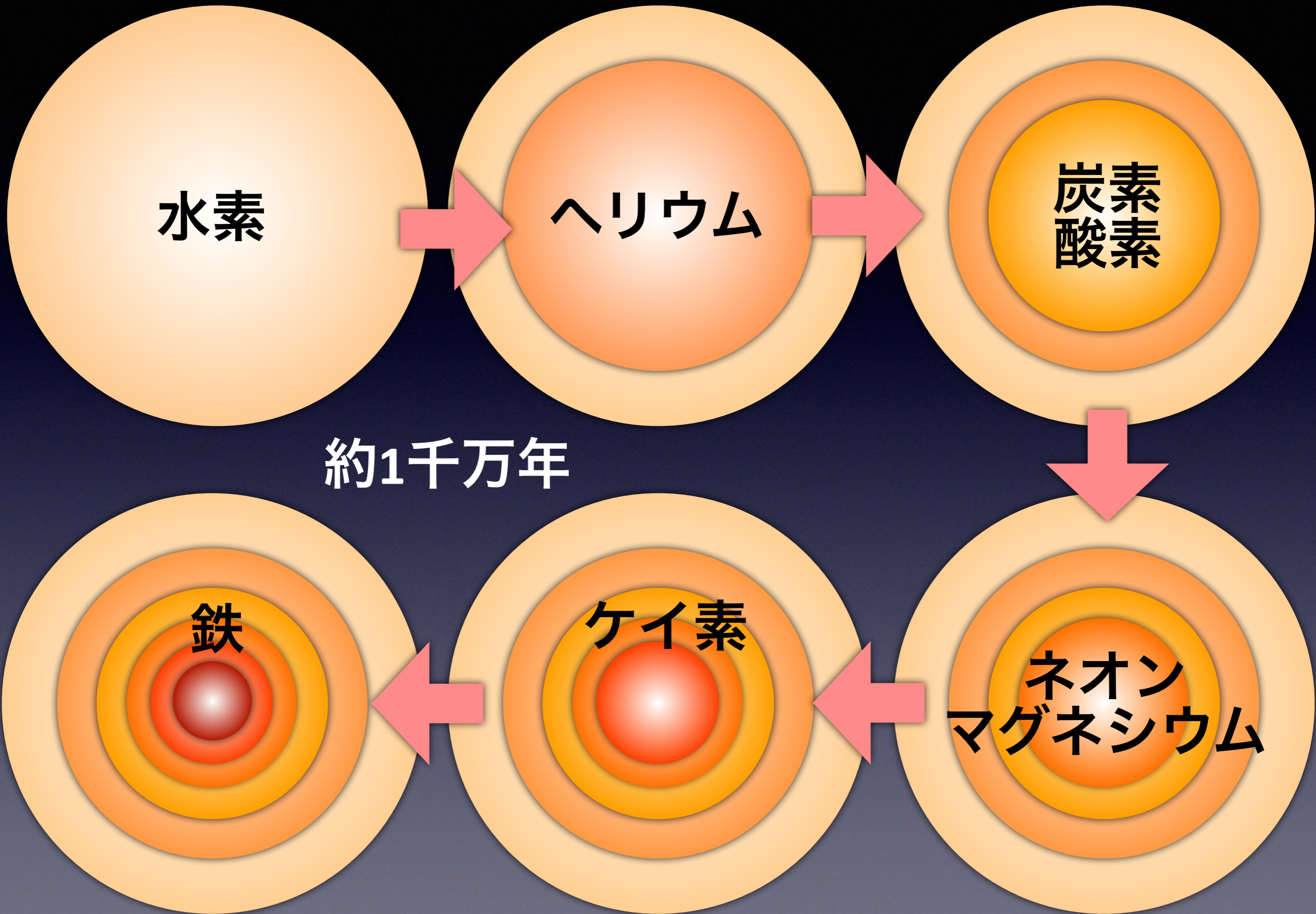
1. 重い星の場合

* 太陽の10倍以上

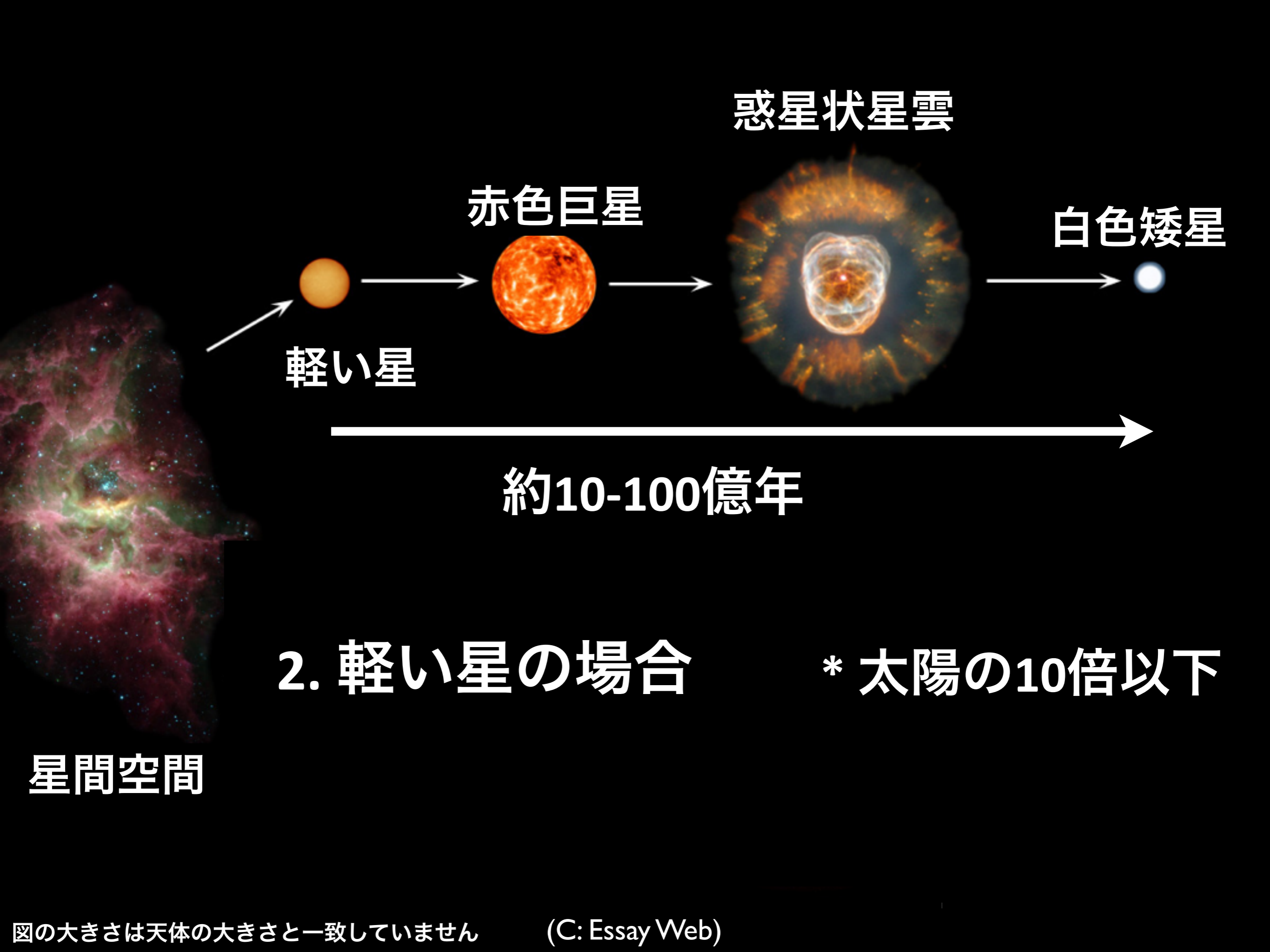


図の大きさは天体の大きさと一致していません

(C: Essay Web)



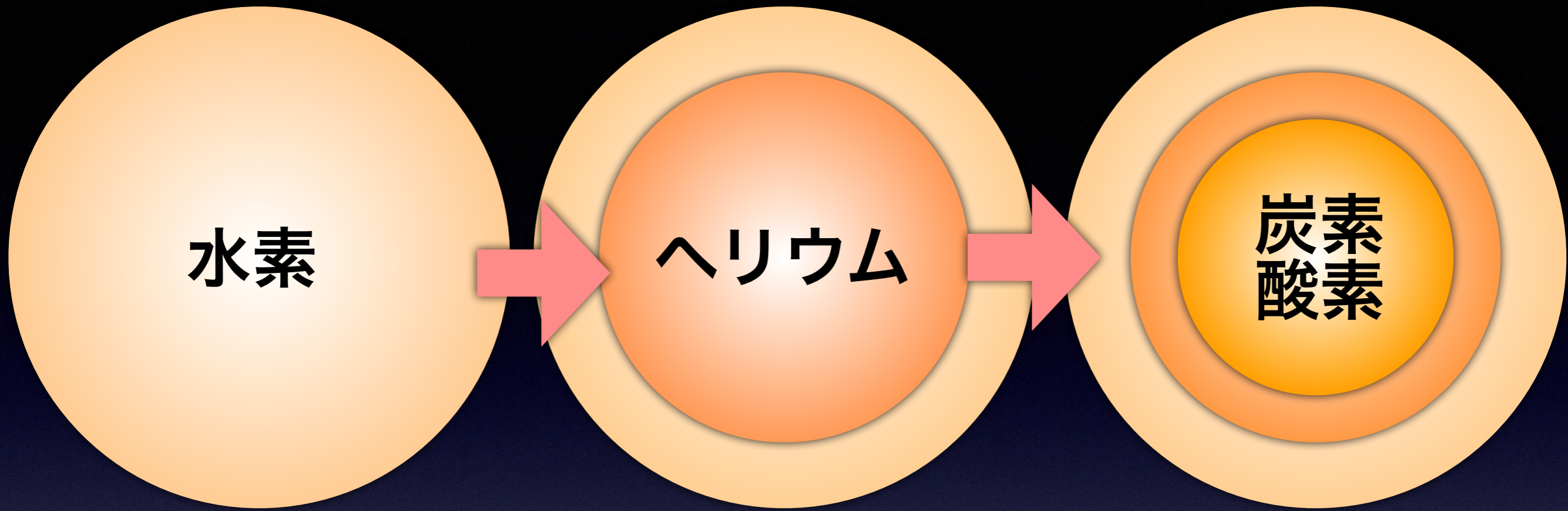
図の大きさは天体の大きさと一致していません



2. 軽い星の場合

* 太陽の10倍以下

星間空間



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か？
- なぜ星は明るく輝くのか？
- なぜ重い星の方が明るいのか？
- **なぜ星は「進化」するのか？**
- **なぜ質量で星の運命が変わるのか？**
- なぜ星は星でいられるのか？
- なぜ一部の星は爆発するのか？
- ...

E_{tot} : 全エネルギー

Ω : 重力エネルギー

U : 内部エネルギー

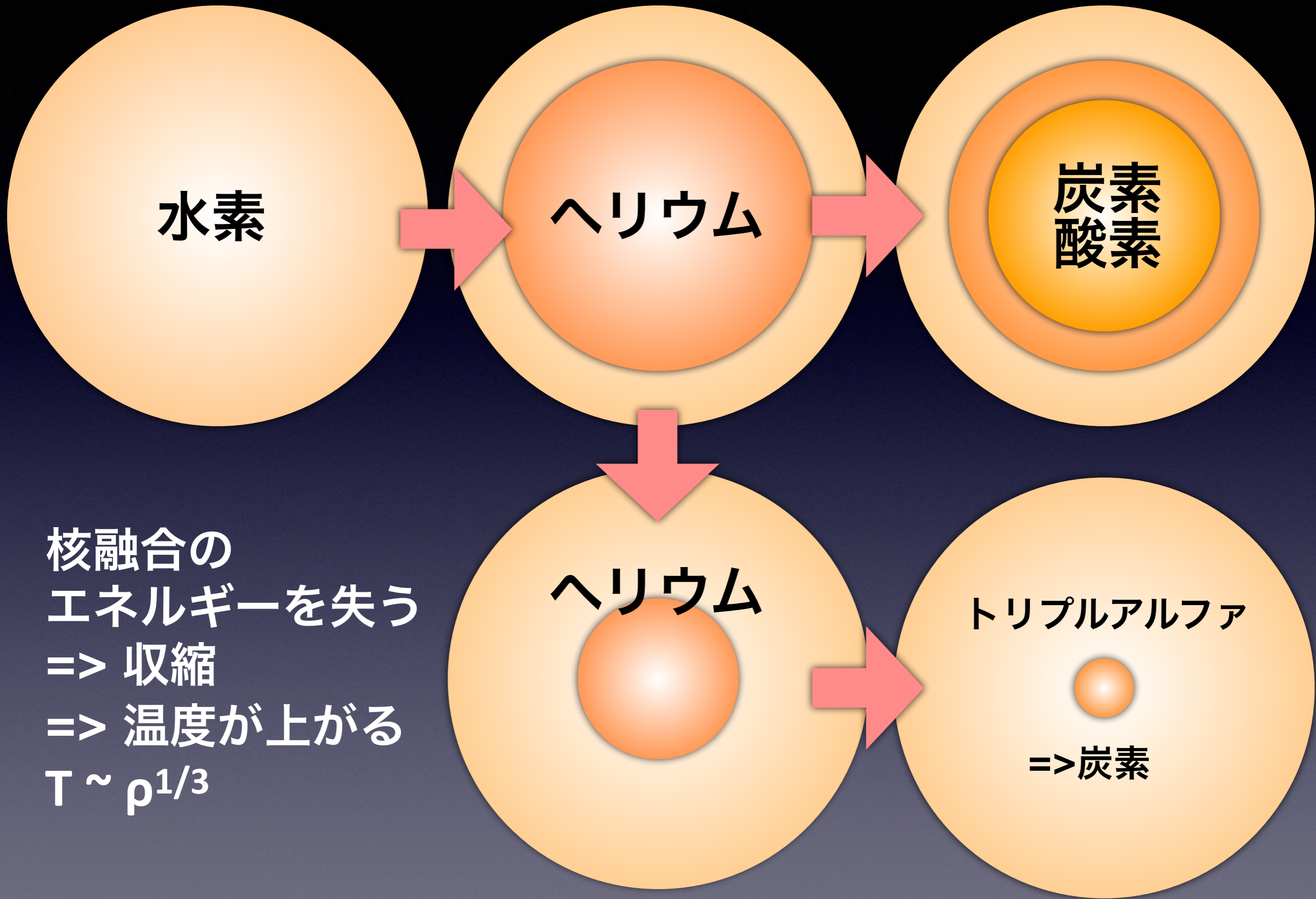
$$U = -\frac{1}{2}\Omega$$

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

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

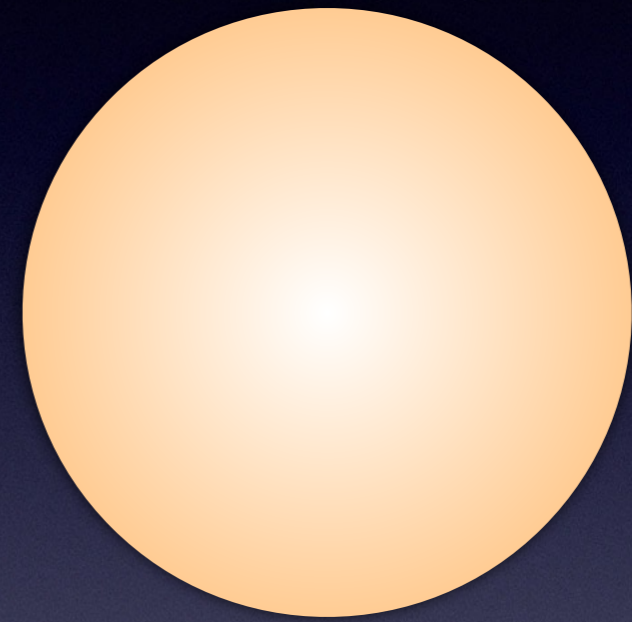
=>炭素

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

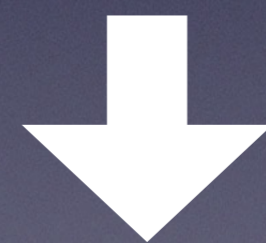
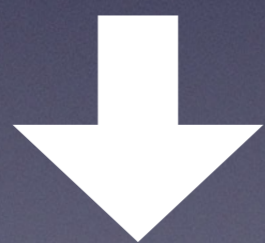
図の大きさは天体の大きさと一致していません

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

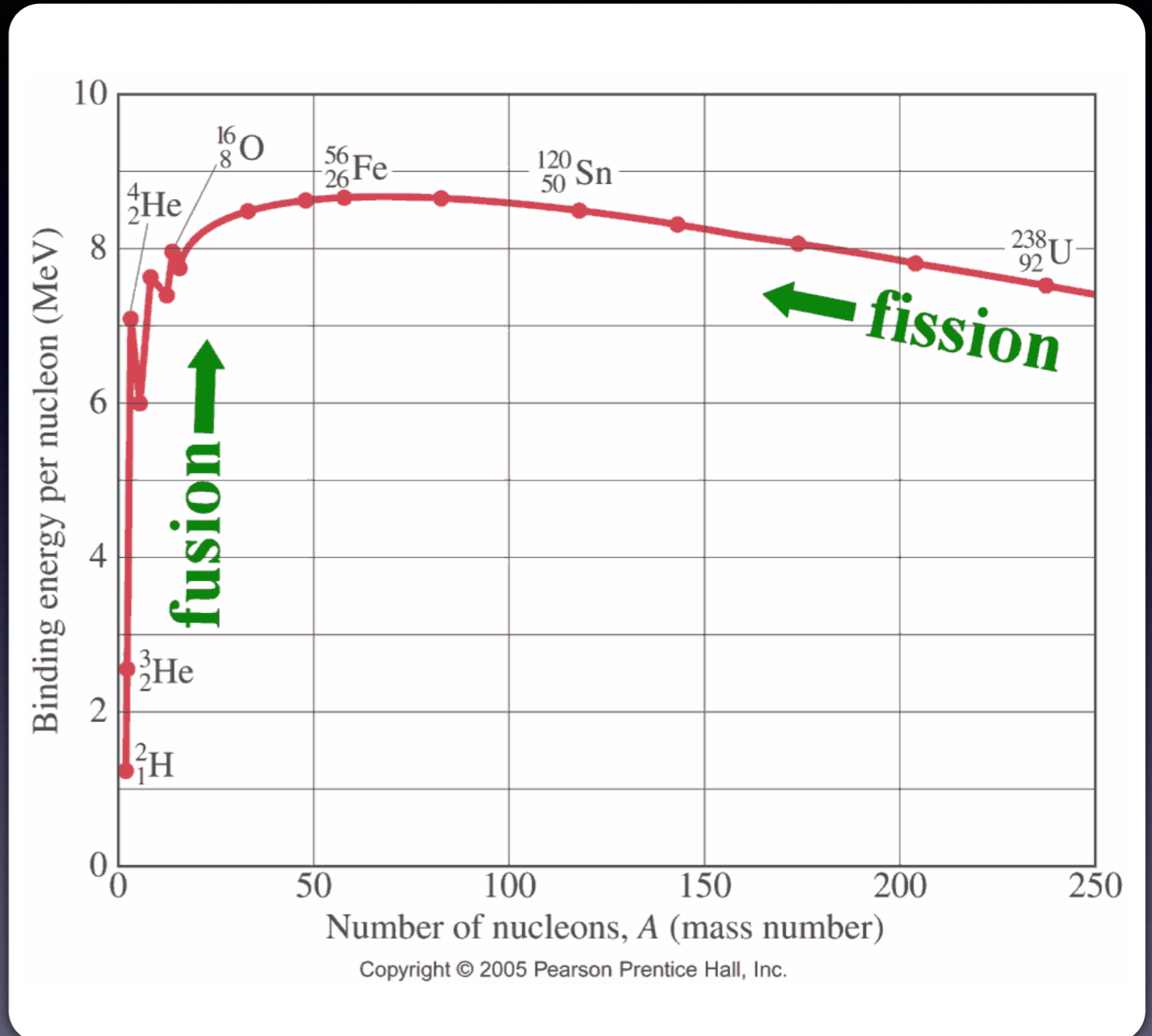
元素はいかにつくられたか (岩波書店)

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

- 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)

レポート課題 2

非相対論的(NR)/超相対論的(ER)粒子からなるガスを考える

2-1. 一般に、圧力 (P) とエネルギー密度 (ε) の間に、
以下の関係が成り立つことを示せ

* $P = (2/3) \varepsilon$ for NR

* $P = (1/3) \varepsilon$ for ER

2-2. P と ε の関係の係数と、Adiabatic index (γ) の間に成り立つ式を求め、
Adiabatic indexは以下のようになることを示せ

* $\gamma = 5/3$ for NR particles

* $\gamma = 4/3$ for ER particles

2-3. $P/\rho = (\gamma-1) u$ となることを示せ (u はspecific energy)