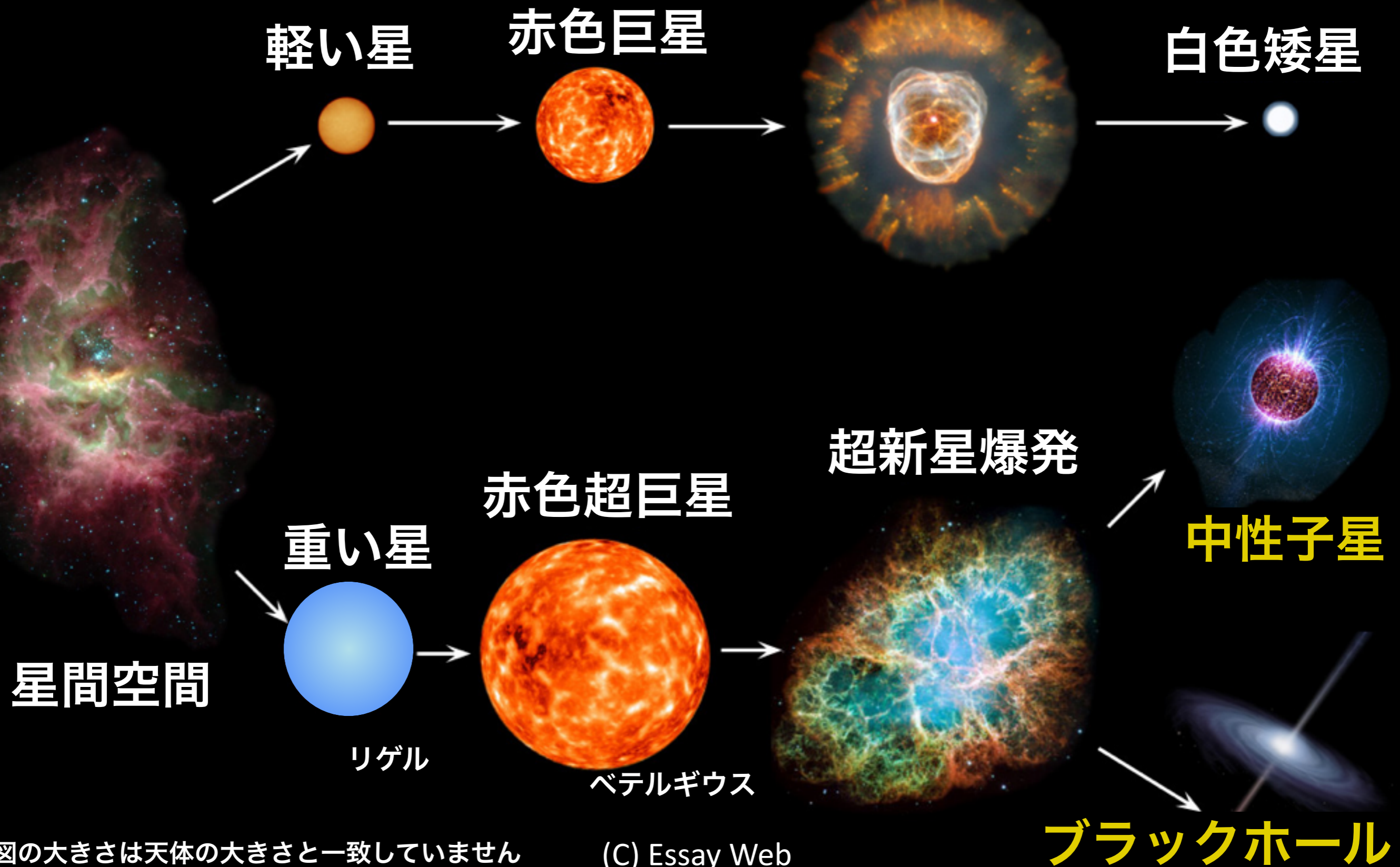


# Section 5. 恒星の進化 (1)

## 5.1 ビリアル定理

## 5.2 温度と密度の進化

# 星の一生



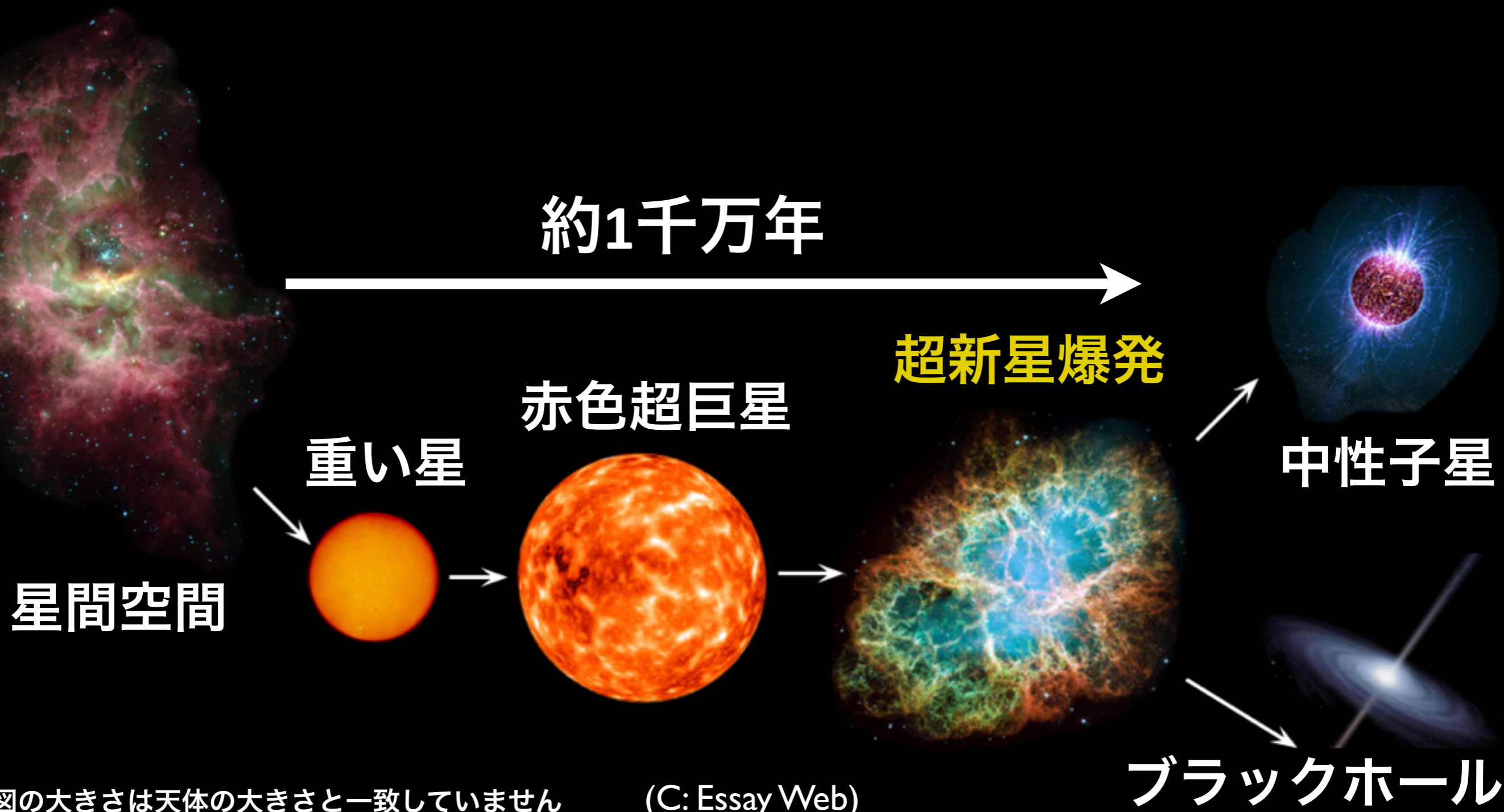
図の大きさは天体の大きさと一致していません

(C) Essay Web

**ブラックホール**

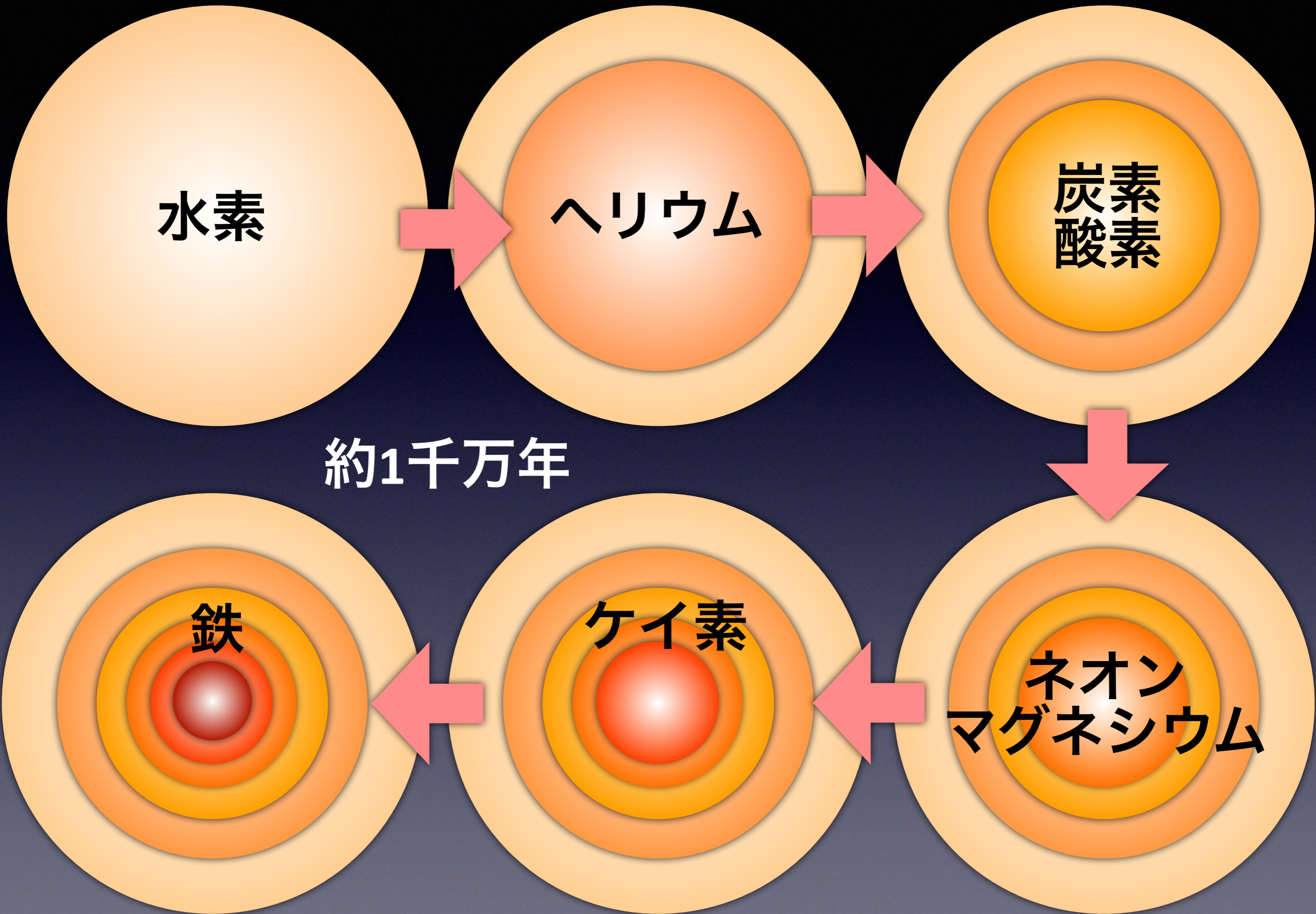
# 1. 重い星の場合

\* 太陽の10倍以上

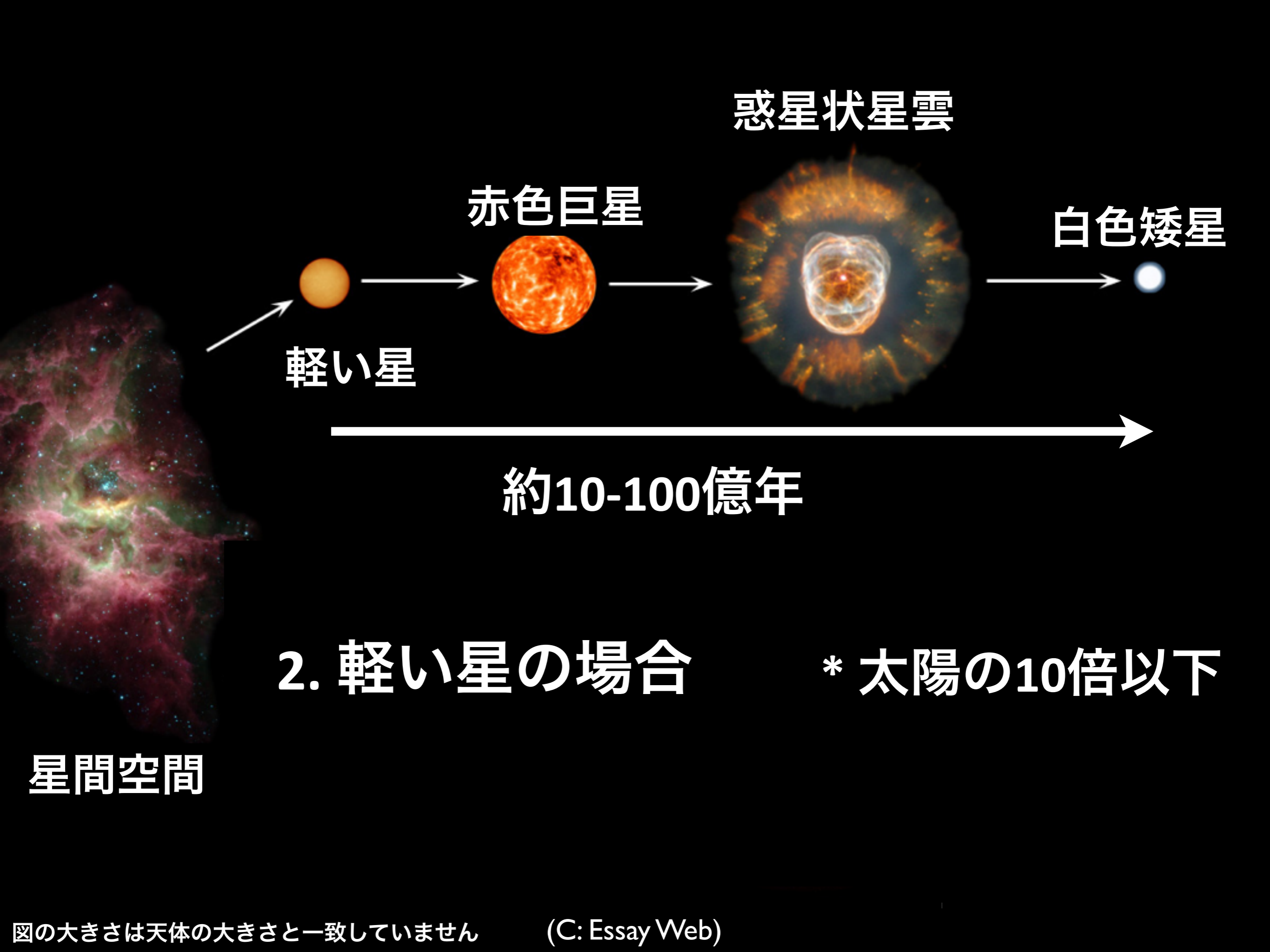


図の大きさは天体の大きさと一致していません

(C: Essay Web)



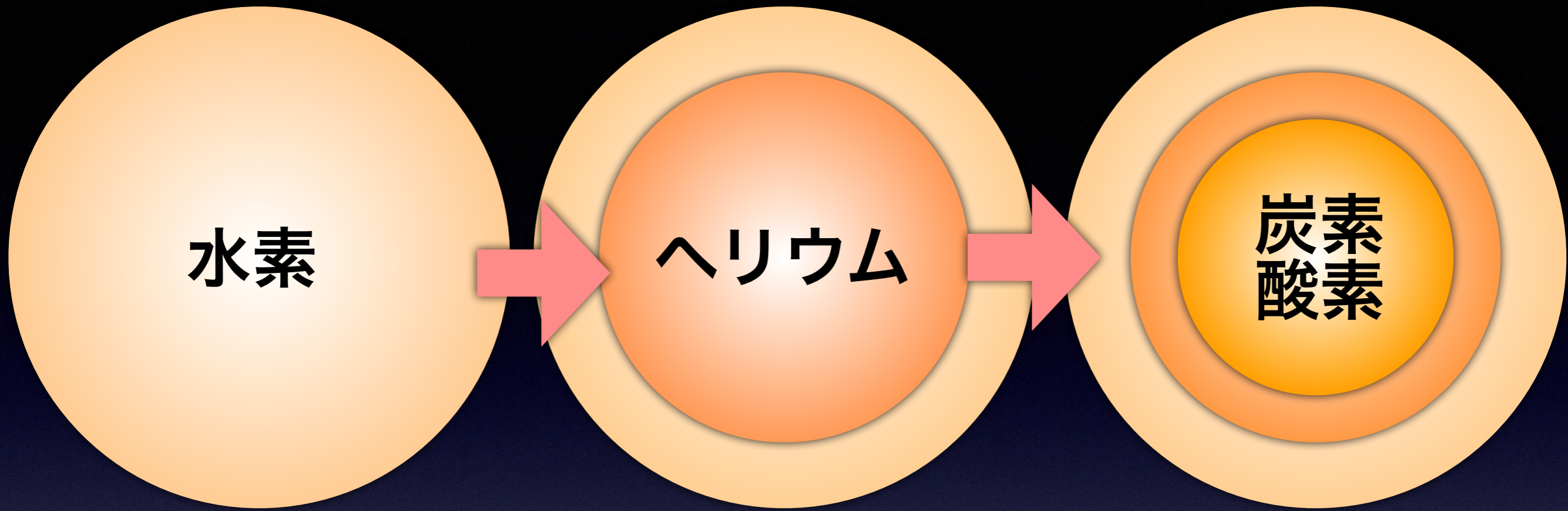
図の大きさは天体の大きさと一致していません



## 2. 軽い星の場合

\* 太陽の10倍以下

星間空間



水素

ヘリウム

炭素  
酸素

約10-100億年

何も起きない

炭素  
酸素

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？
- ...



$E_{\text{tot}}$ : 全エネルギー

$\Omega$ : 重力エネルギー

$U$ : 内部エネルギー

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

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

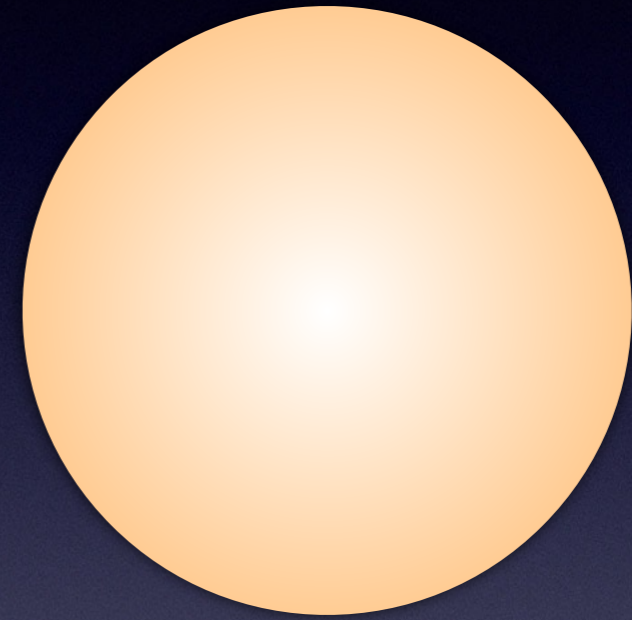
核融合をしないと、

- 全エネルギーが下がり、
- 収縮して、
- 温度が上がる

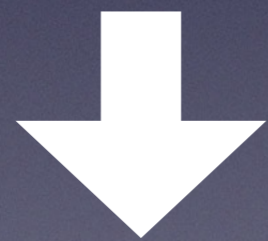


熱した鉄

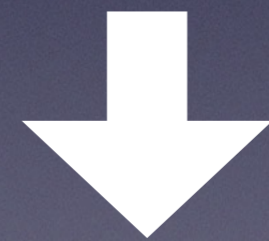
恒星



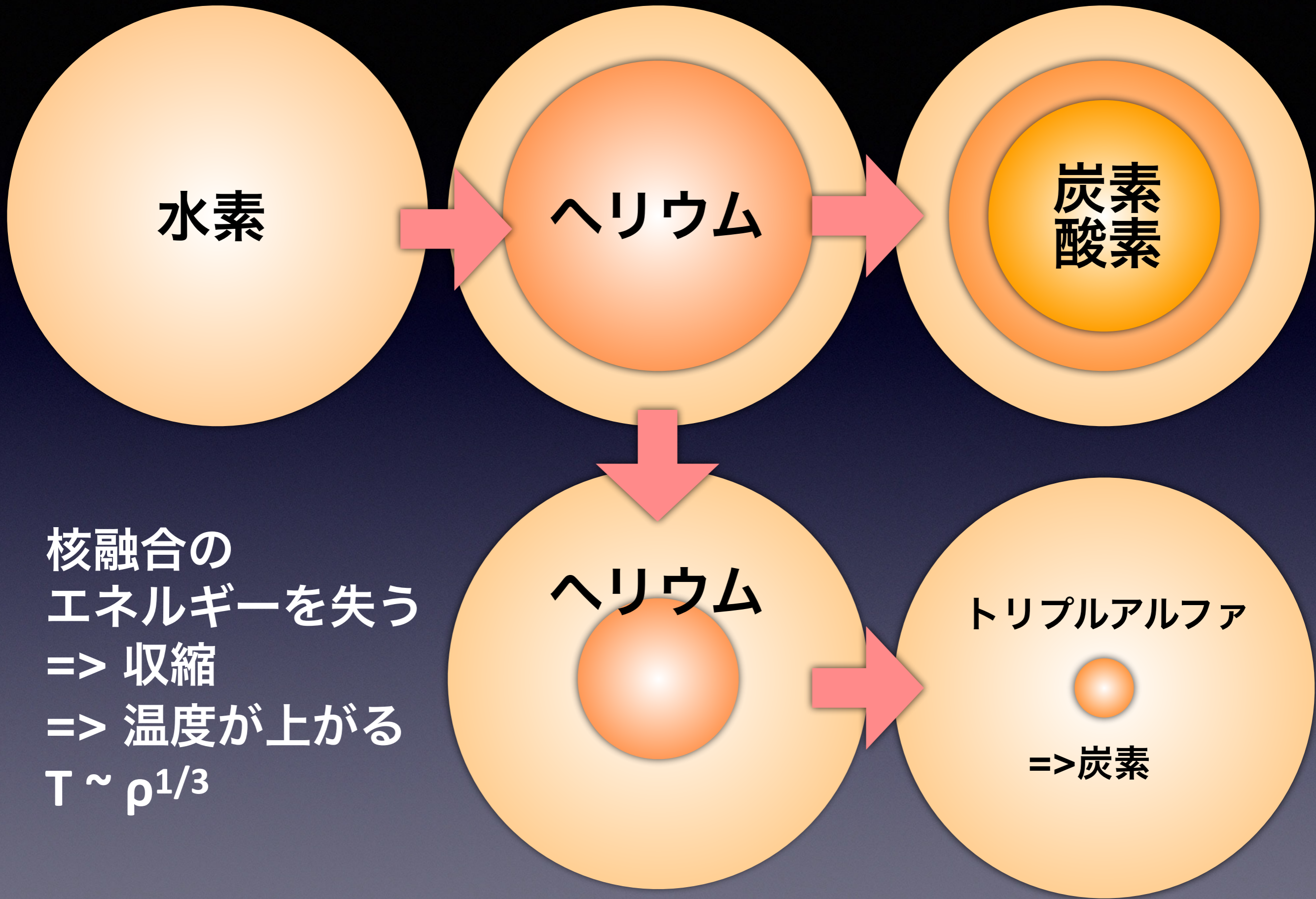
放置すると、、、



冷える



熱くなる



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

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

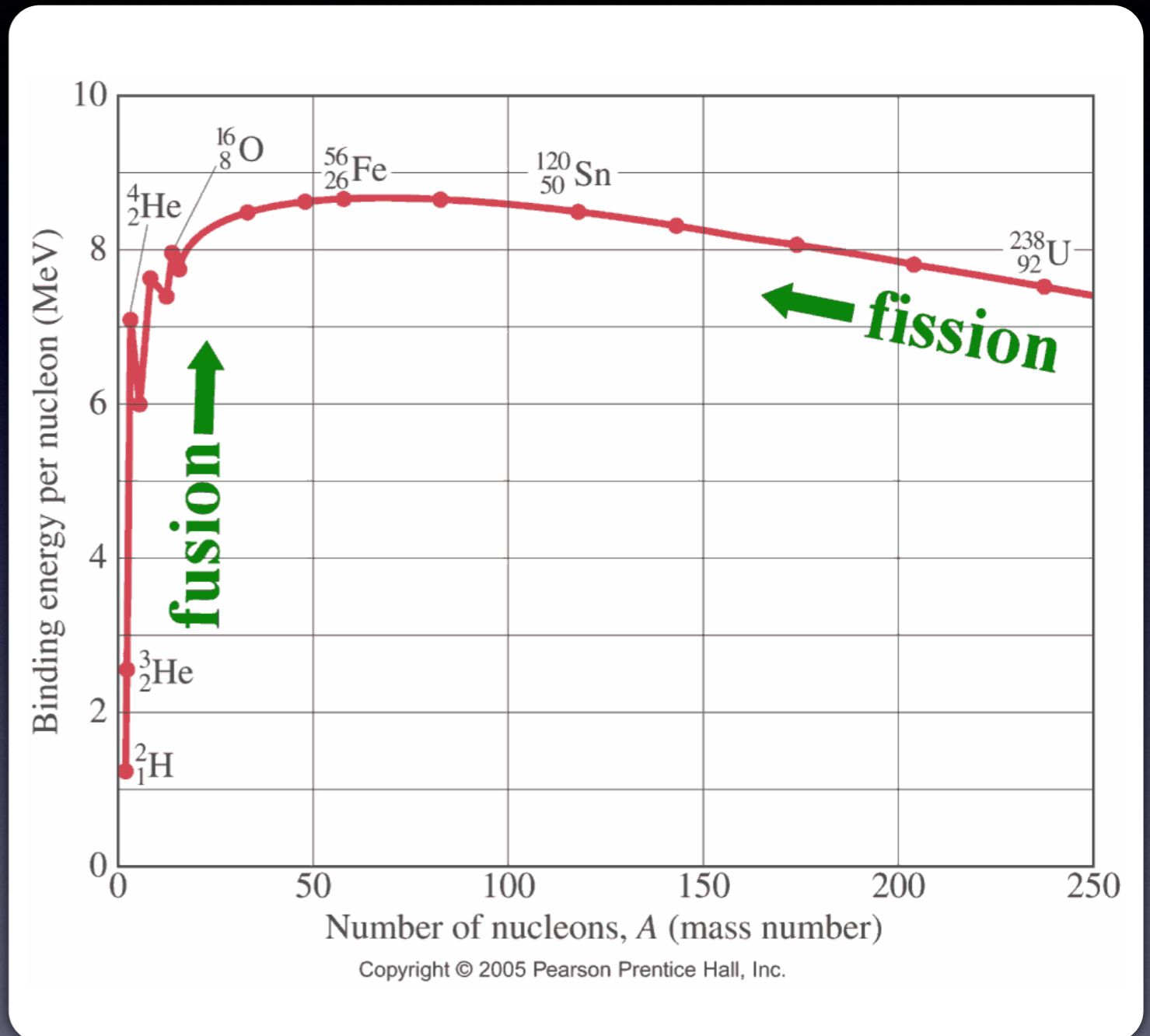
**Nuclear statistical equilibrium**

# 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 ( $\varepsilon$ ) 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 $\varepsilon$ の関係の係数と、Adiabatic index ( $\gamma$ ) 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)