

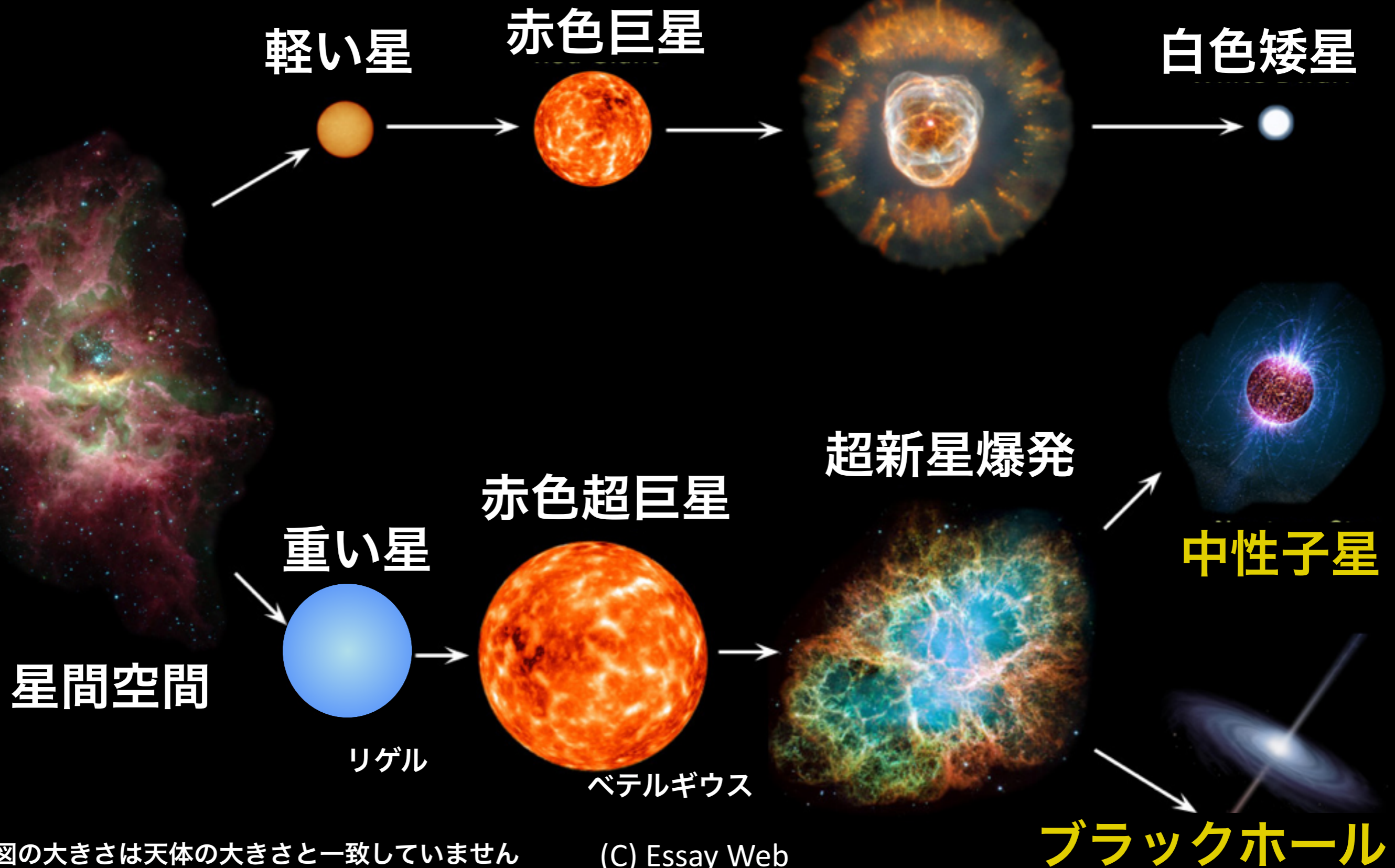
## Section 6.

# 恒星の性質と進化

### 6.1 星の性質

### 6.2 星の進化

# 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

星は「進化」するらしい  
(時間とともにその姿を変化させる)

なぜ？

=> 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？



# 星は燃料を使い尽くすとどうなる？

## サイズ

1. 変わらない
2. 小さくなる
3. 大きくなる

## 温度

1. 変わらない
2. 低くなる
3. 高くなる

$E_{\text{tot}}$ : 全エネルギー

$\Omega$ : 重力エネルギー

$U$ : 内部エネルギー

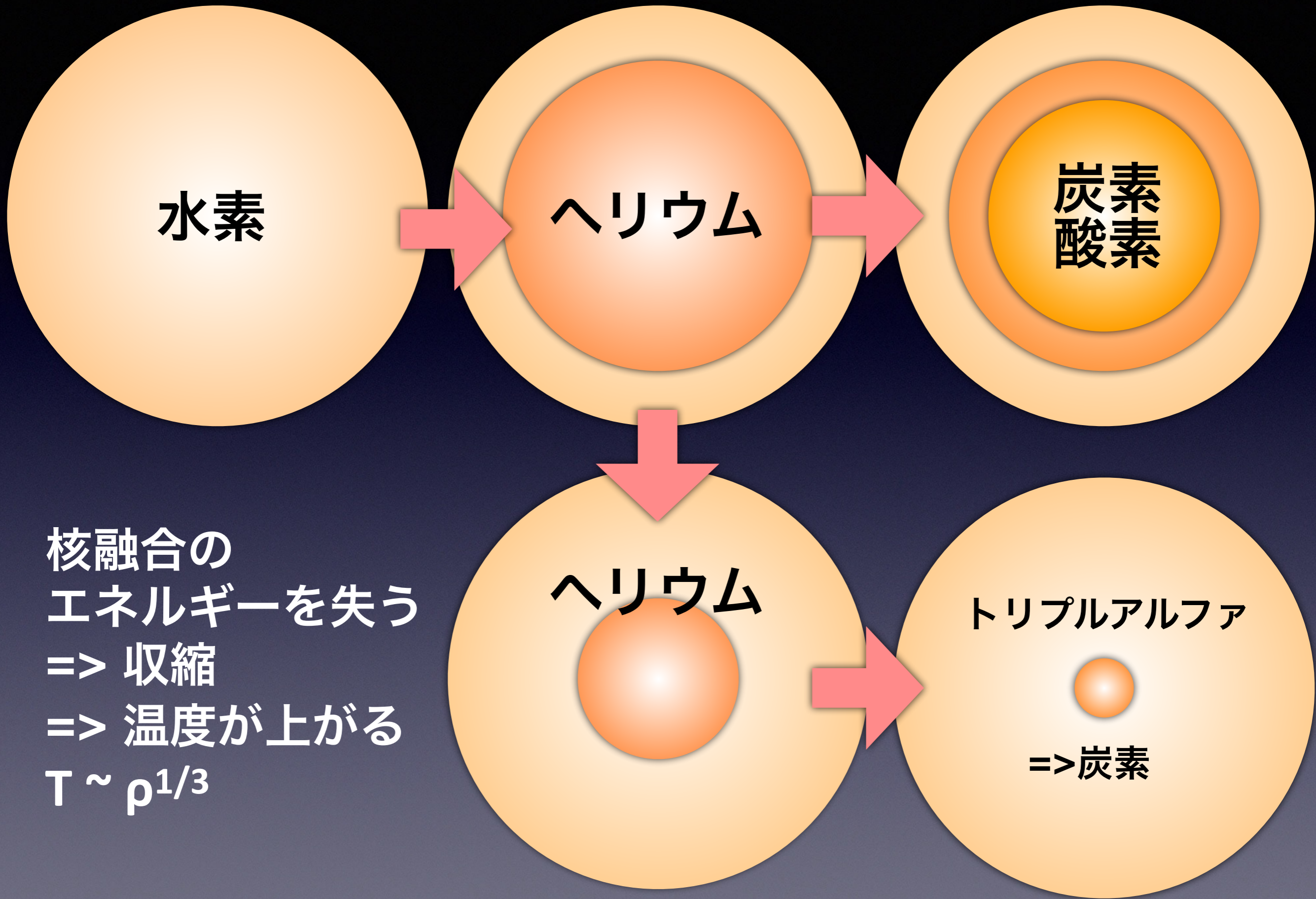
$$U = -\frac{1}{2}\Omega$$

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

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





水素

ヘリウム

炭素

ヘリウム

トリプルアルファ

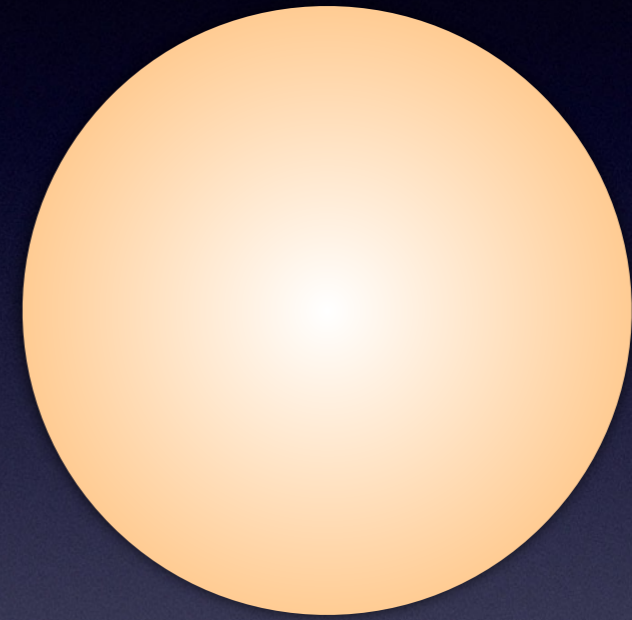
=>炭素

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

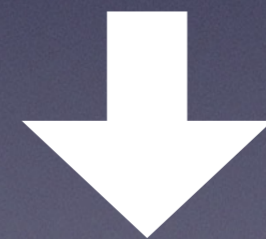
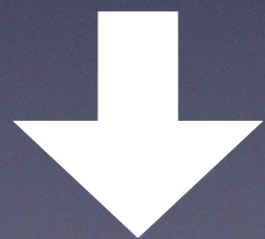
図の大きさは天体の大きさと一致していません

熱した鉄

恒星



放置すると、、、



冷える

熱くなる

星は燃料を使い尽くすとどうなる？

## 星の中心部 (コア)

サイズ

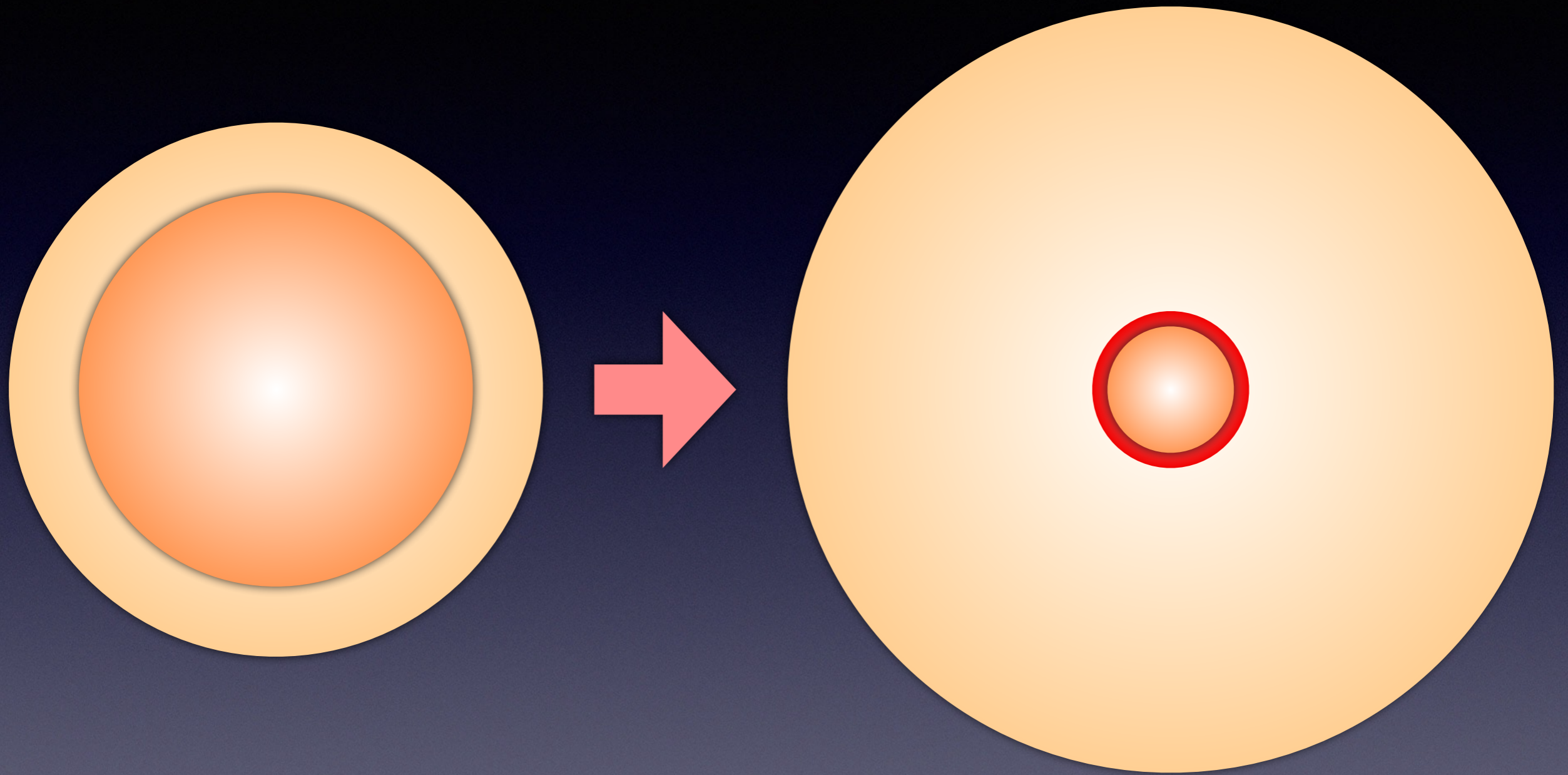
1. 変わらない
2. 小さくなる
3. 大きくなる

温度

1. 変わらない
2. 低くなる
3. 高くなる



コアが収縮 => 外層は膨張



表面温度が下がる => 「赤色巨星」

ベテルギウス

リゲル

(C) Matthew Spinelli

# 星は燃料を使い尽くすとどうなる？

## 星の外層

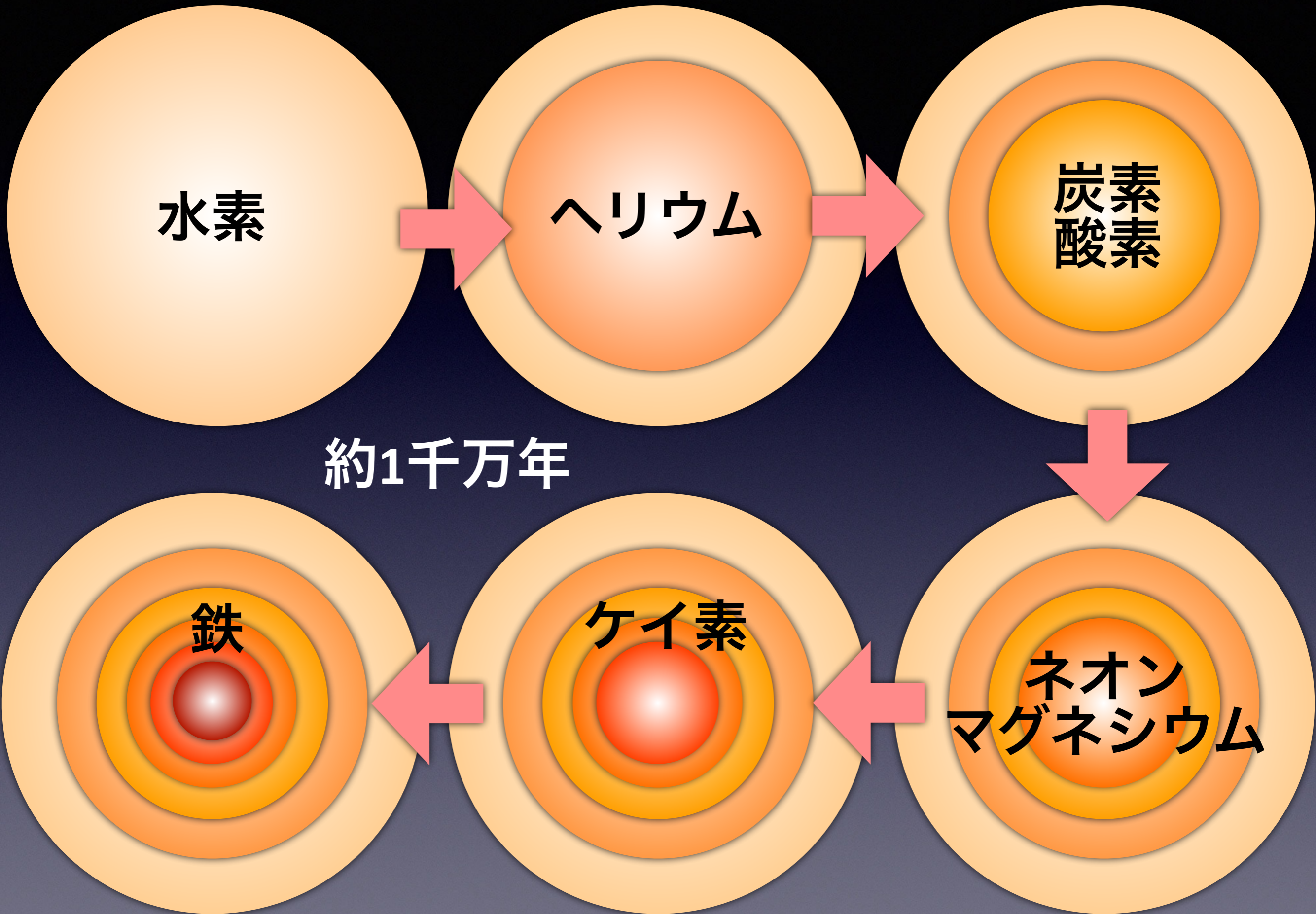
### サイズ

1. 変わらない
2. 小さくなる
3. 大きくなる

### 温度

1. 変わらない
2. 低くなる
3. 高くなる

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



図の大きさは天体の大きさと一致していません

# 原子核の束縛エネルギー

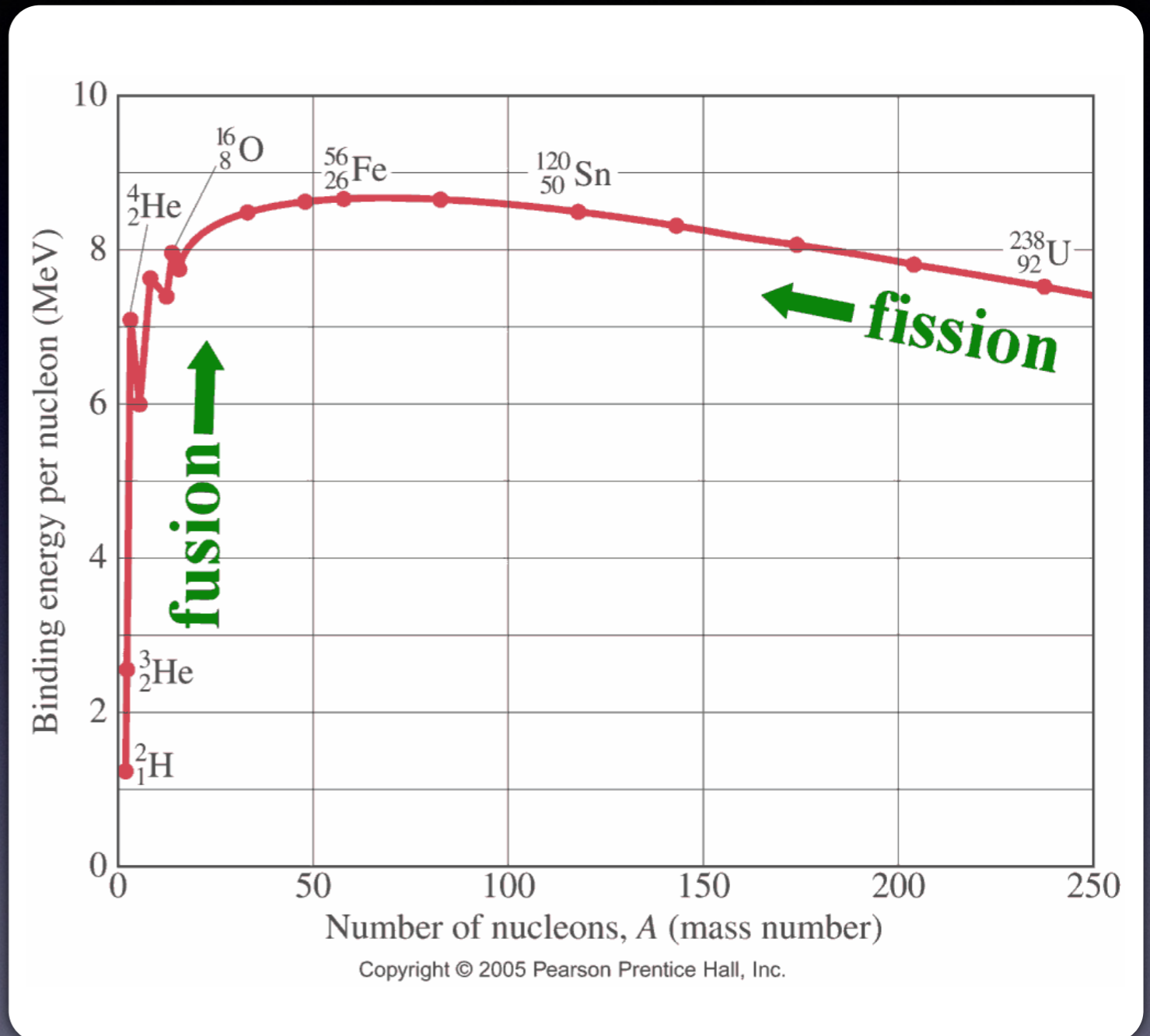
$$E_b = [Nm_N + Zm_p - m_i] c^2$$

ばらばら

実際

束縛エネルギーが大きい方が、  
より強く束縛されている  
(相対的に原子核が「軽い」)

鉄に向かう



どの星も鉄まで作るのか? => No

理想気体ではなくなる効果が重要

# まとめ

- 星の性質と進化
  - ビリアル定理： $-2U = \Omega$
  - 燃料を使い尽くして、星の全エネルギーが減少すると、温度が「高くなる」 (負の比熱)
  - 次の核融合反応へ進む
- 星の質量と進化 (次回)
  - 軽い星は電子の縮退圧で支えられる  
=> 白色矮星
  - 重い星は鉄まで核融合が進む => 超新星爆発