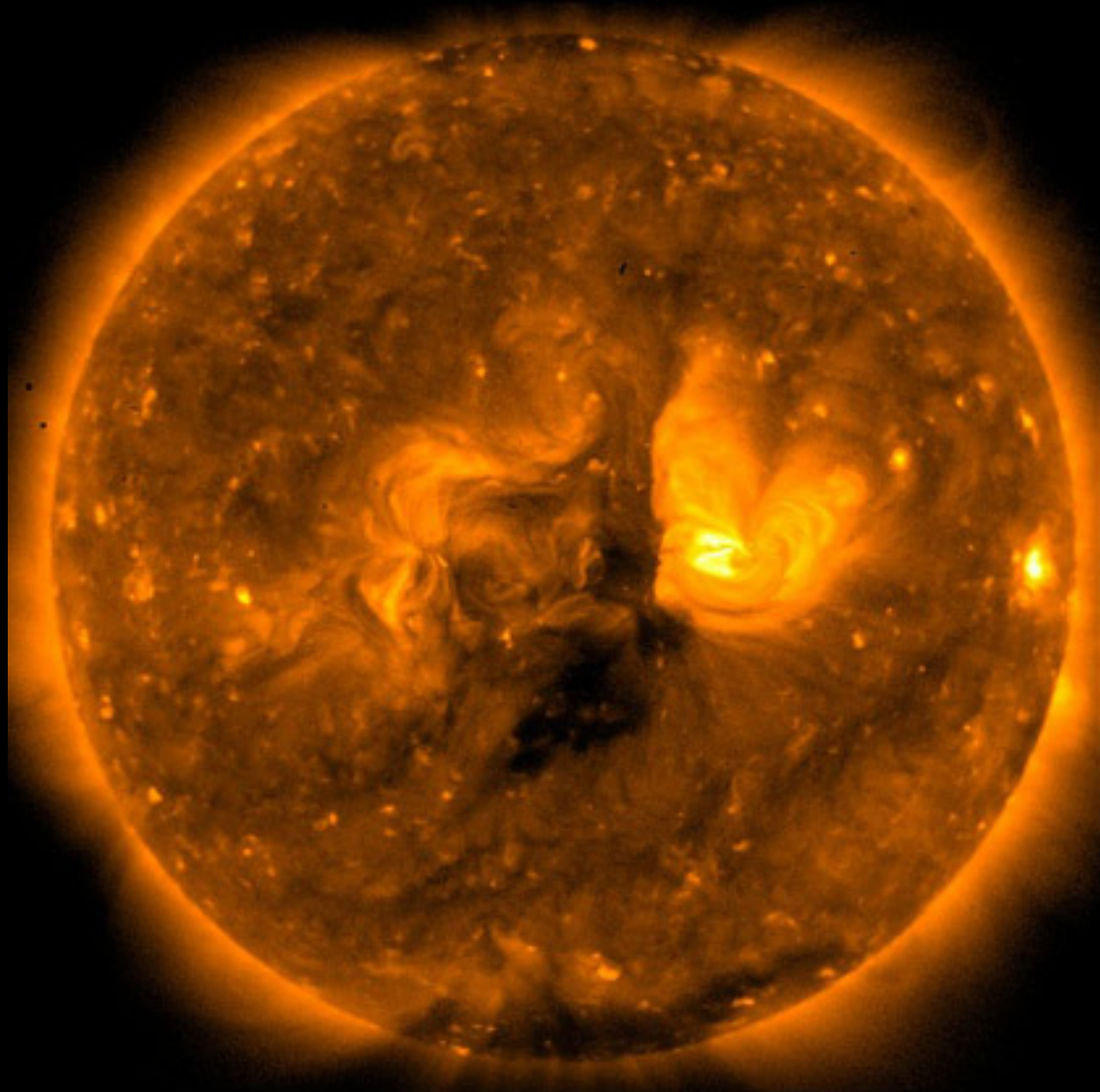


Section 2. 核融合反応

2.1 トンネル効果

2.2 核融合反応



太陽

太陽の明るさ

$$= 4 \times 10^{26} \text{ J/s (= W)} = 4 \times 10^{33} \text{ erg/s}$$

(C) JAXA/ISAS

日本の一年の消費電力 = $2 \times 10^{19} \text{ J} = 2 \times 10^{26} \text{ erg}$
日本が 10^7 年 = 1000万年かけて使うエネルギーを1秒で放射

そもそもなぜこんなに明るい??

太陽はなぜ明るく輝くのだろう？

A. 化学反応

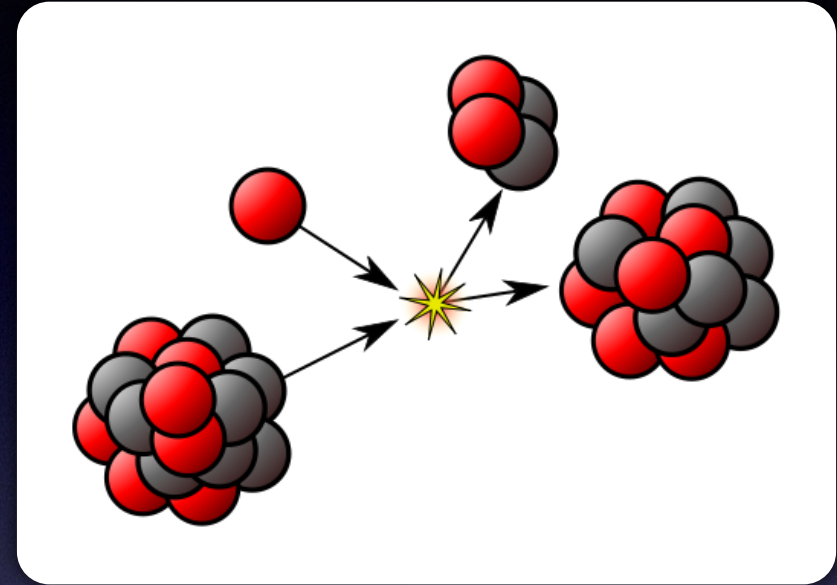


<https://www.britannica.com/science/chemical-reaction>



原子や分子がくっつく
= 原子核は変わらない

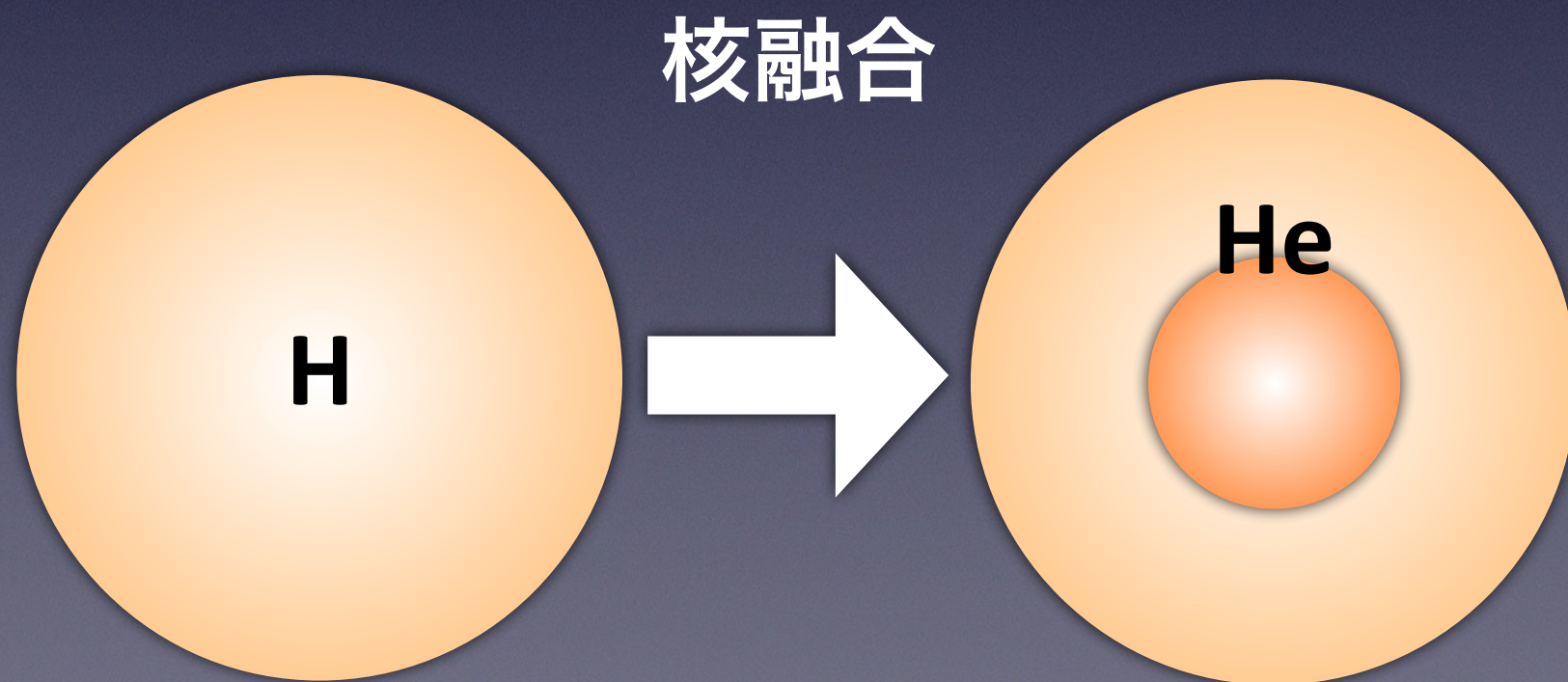
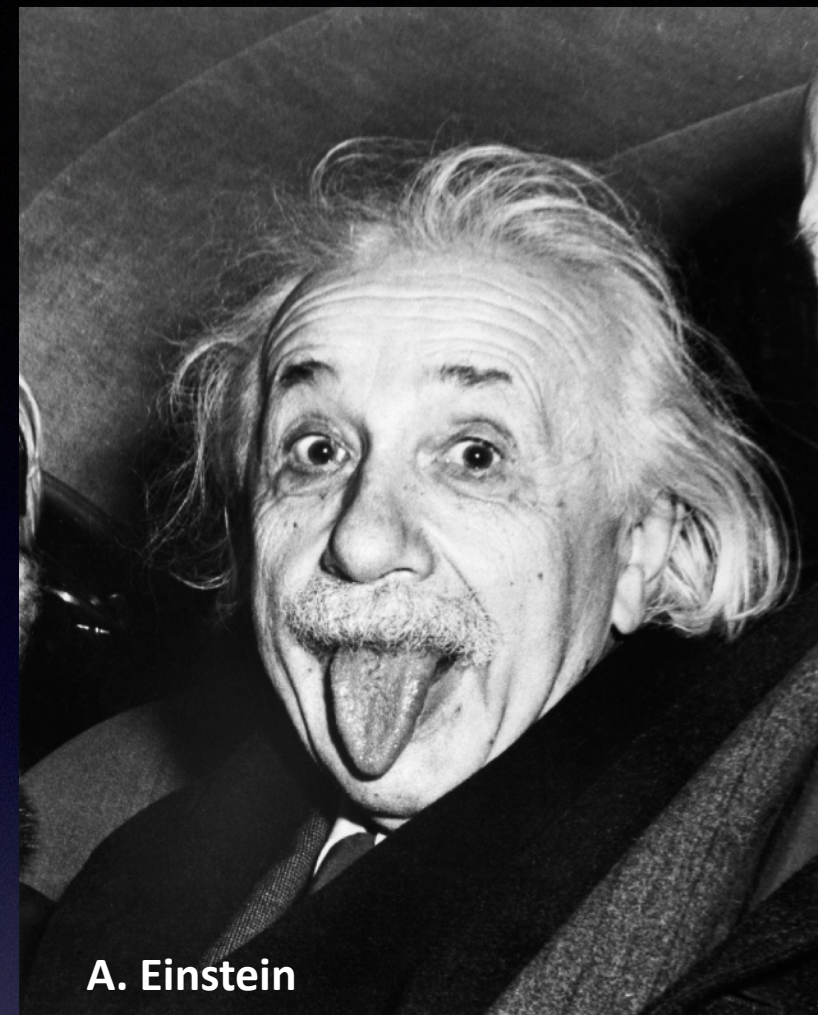
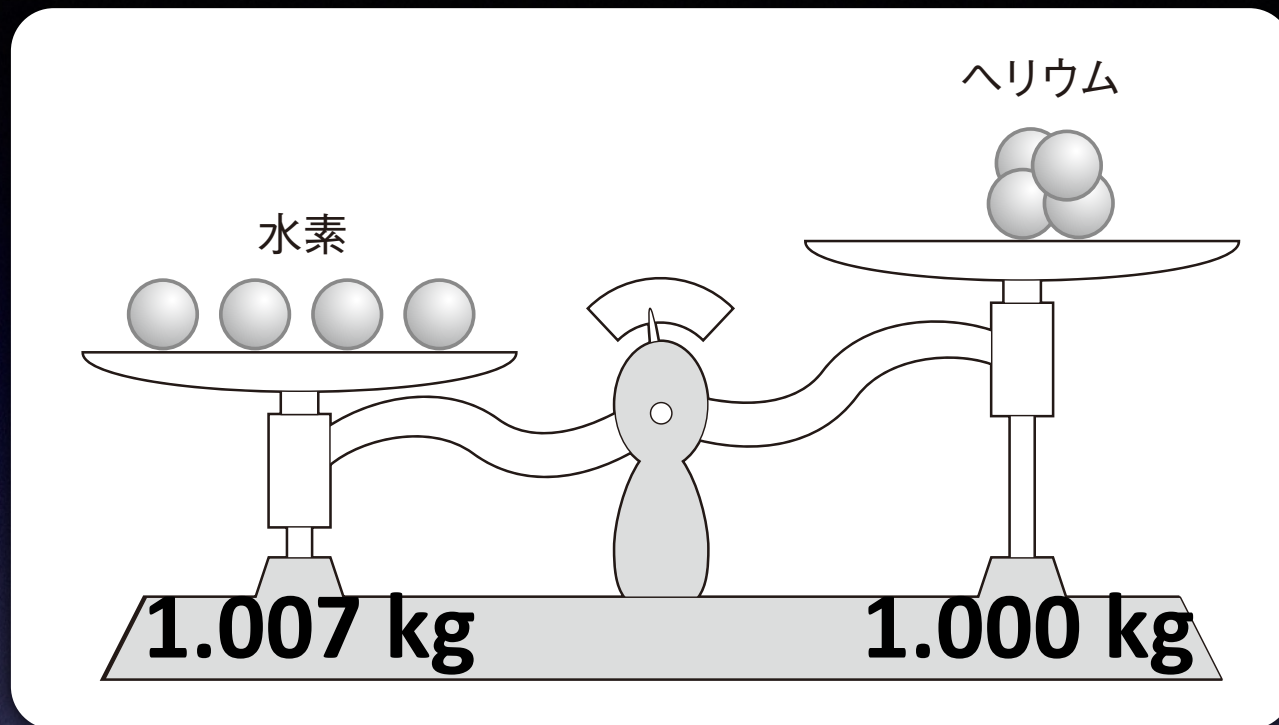
B. 原子核反応



原子核が変わる
= 新しい元素ができる

太陽を約100億年
輝かせることができる

エネルギー源: $E = mc^2$



本当にそんなことが起きるの？
どうやって??

元素の種類が変わるのを間近で見たことがある人は
ほとんどいないはず！



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？
- ...

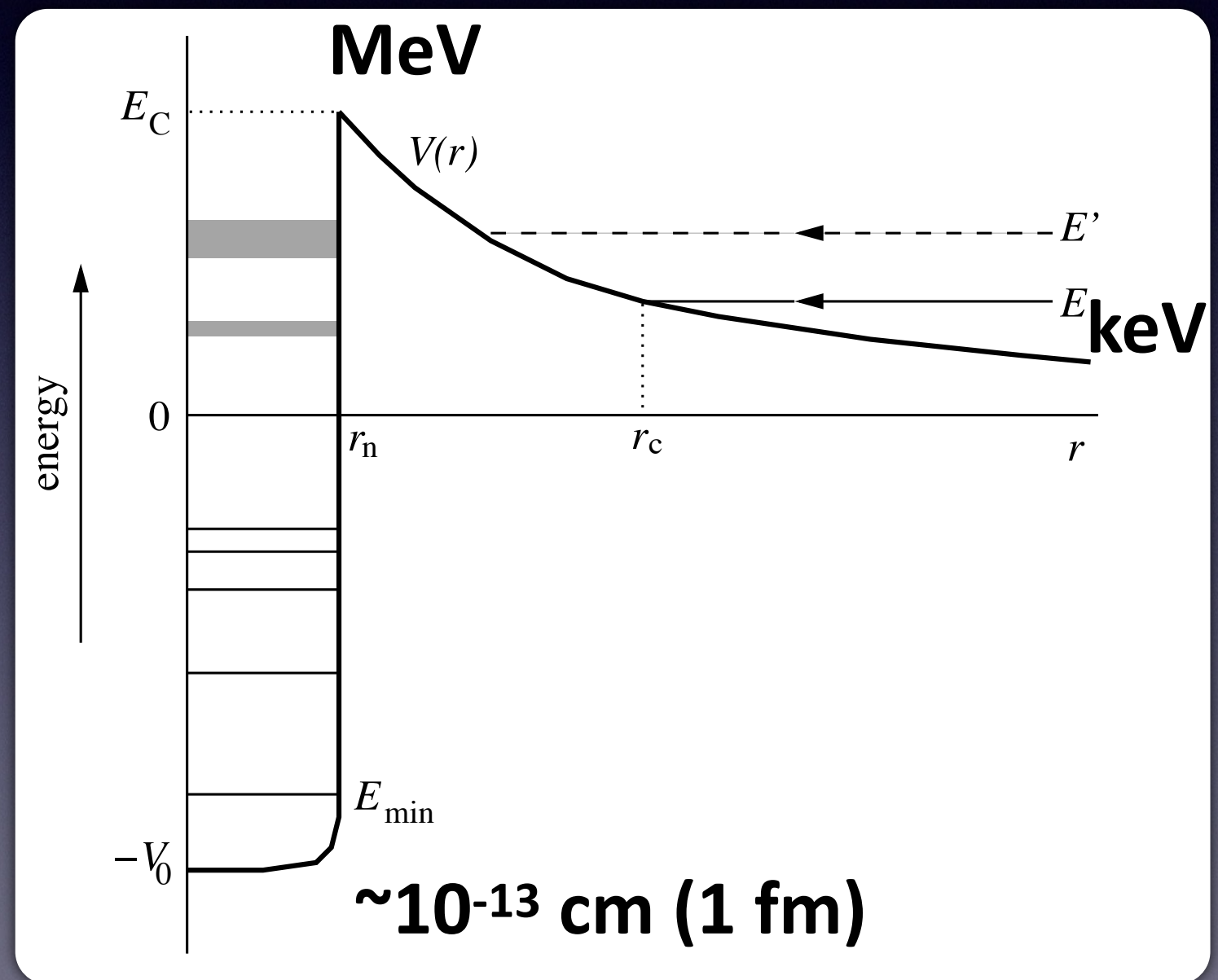
核融合

クーロン障壁 $E \sim (Z_1 Z_2 e^2)/r \sim 10^6 \text{ eV (MeV)}$

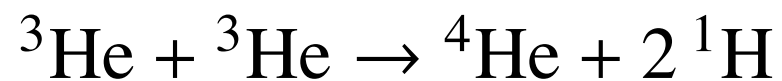
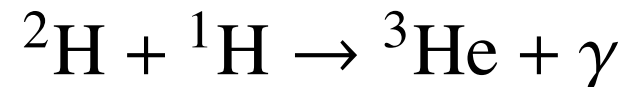
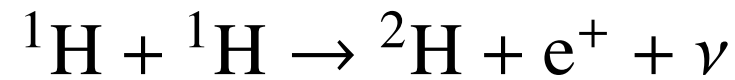
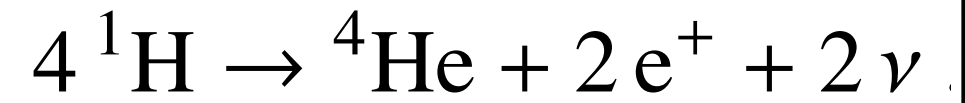
ガスの典型的なエネルギー $E \sim kT \sim 10^3 \text{ eV (keV)} \leq 10^7 \text{ K}$

=> トンネル効果が必要

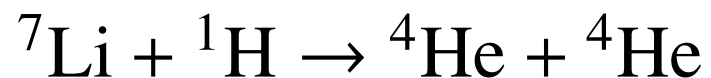
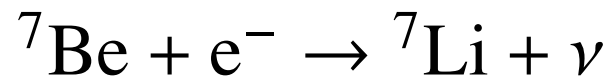
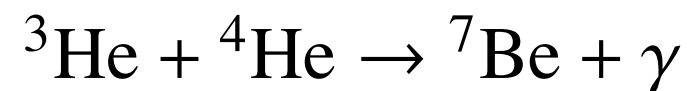
量子力学



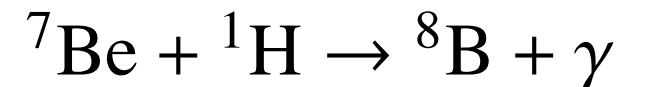
水素燃烧 (pp chain)



pp1

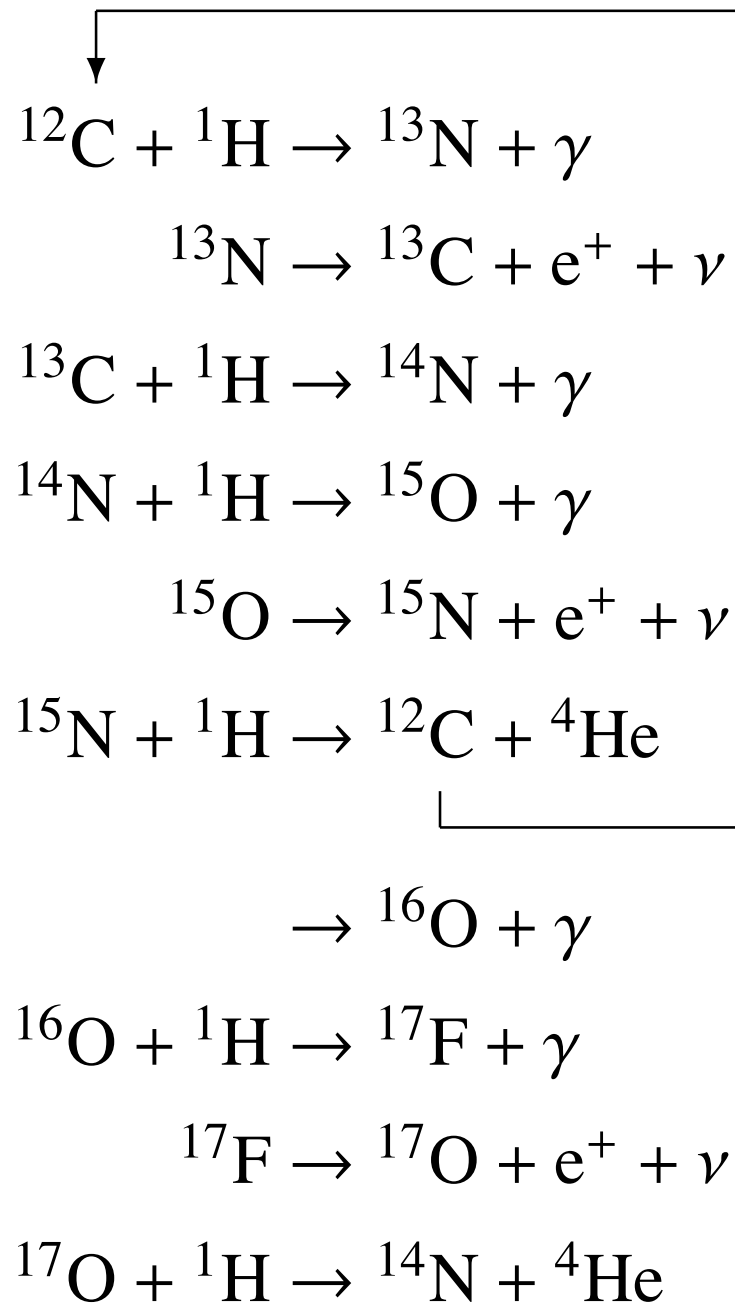


pp2

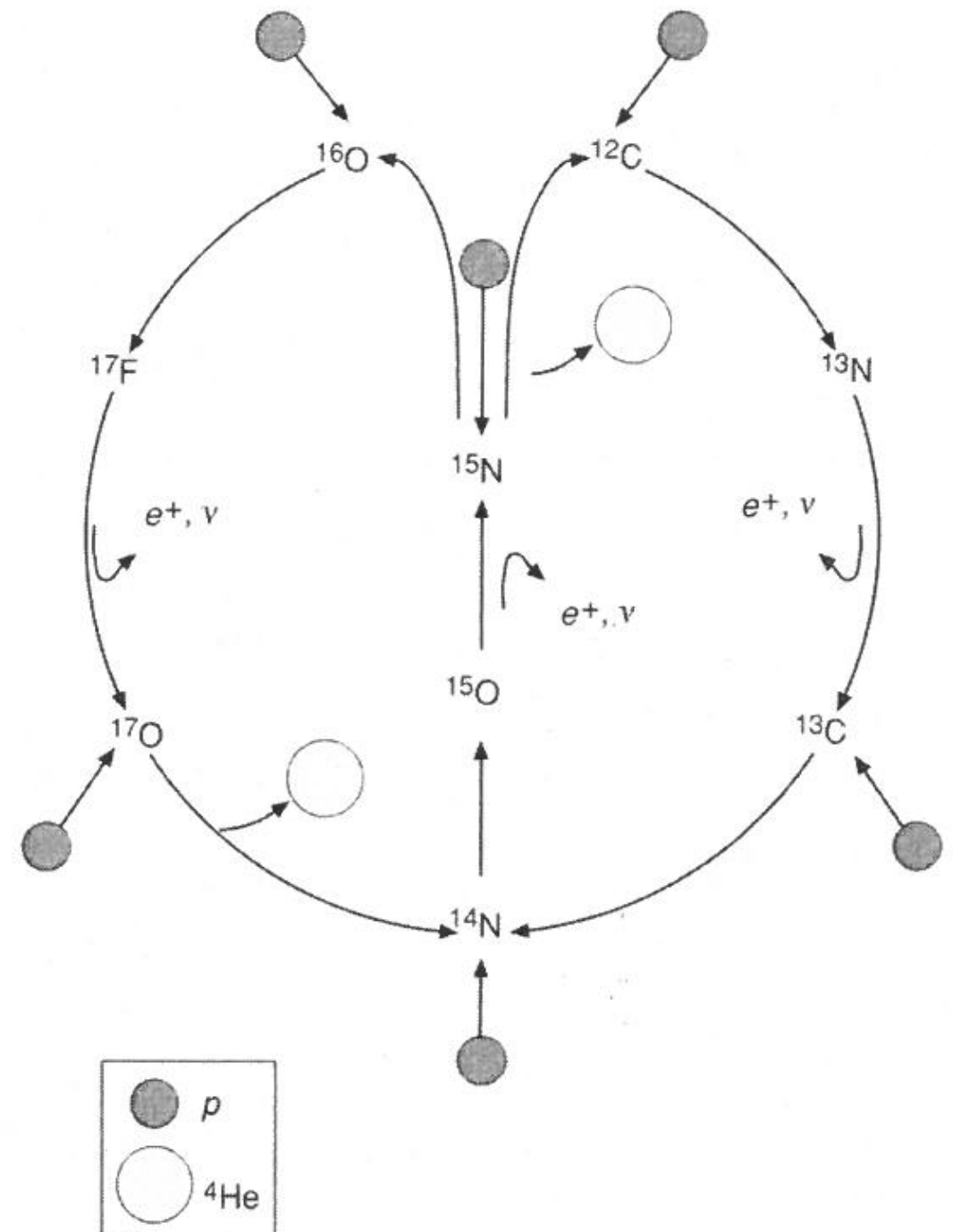


pp3

水素燃烧 (CNO cycle)



Textbook by Pols



Textbook by Prialnik

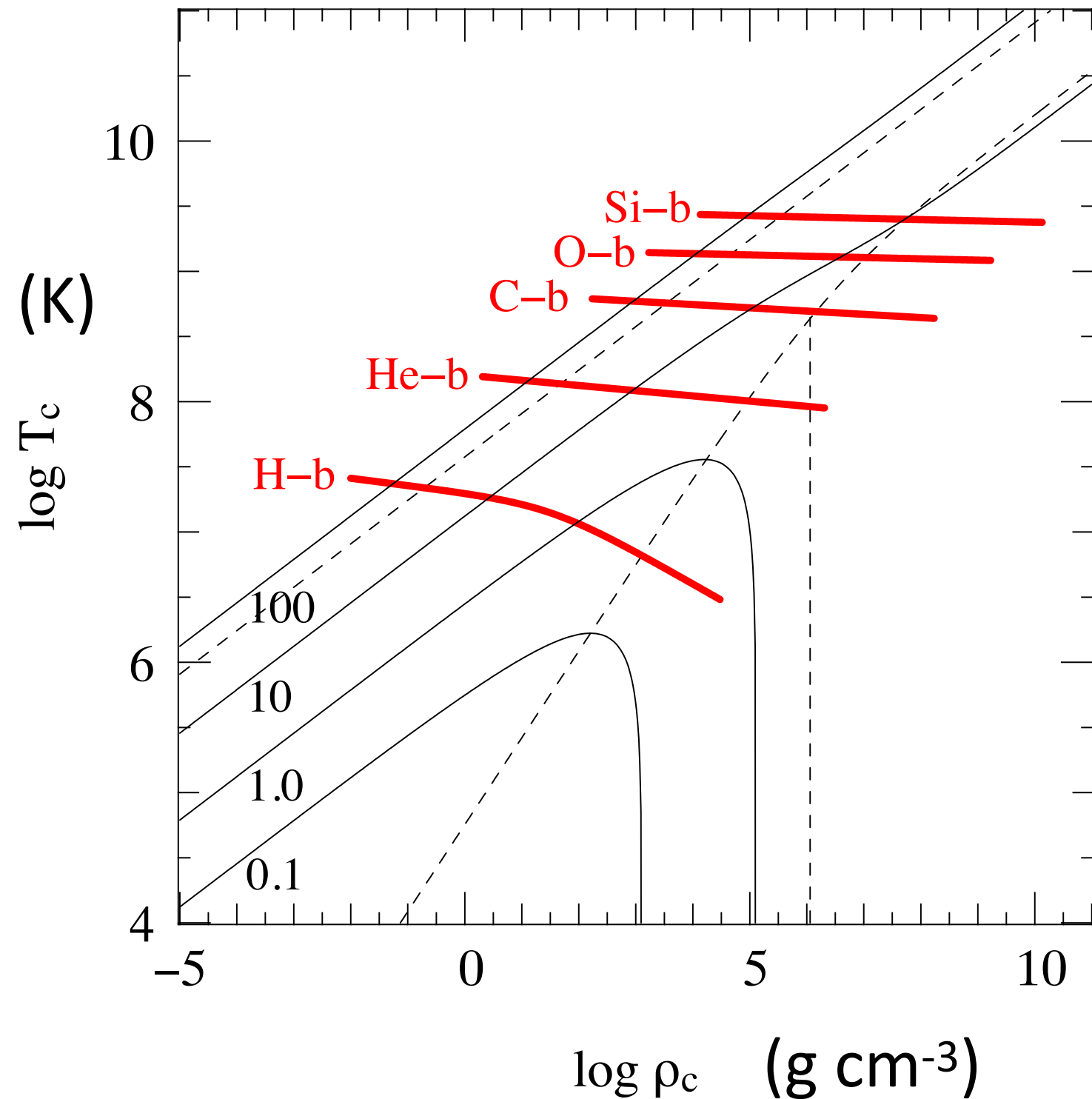
水素燃焼の条件

Fusion
reactor

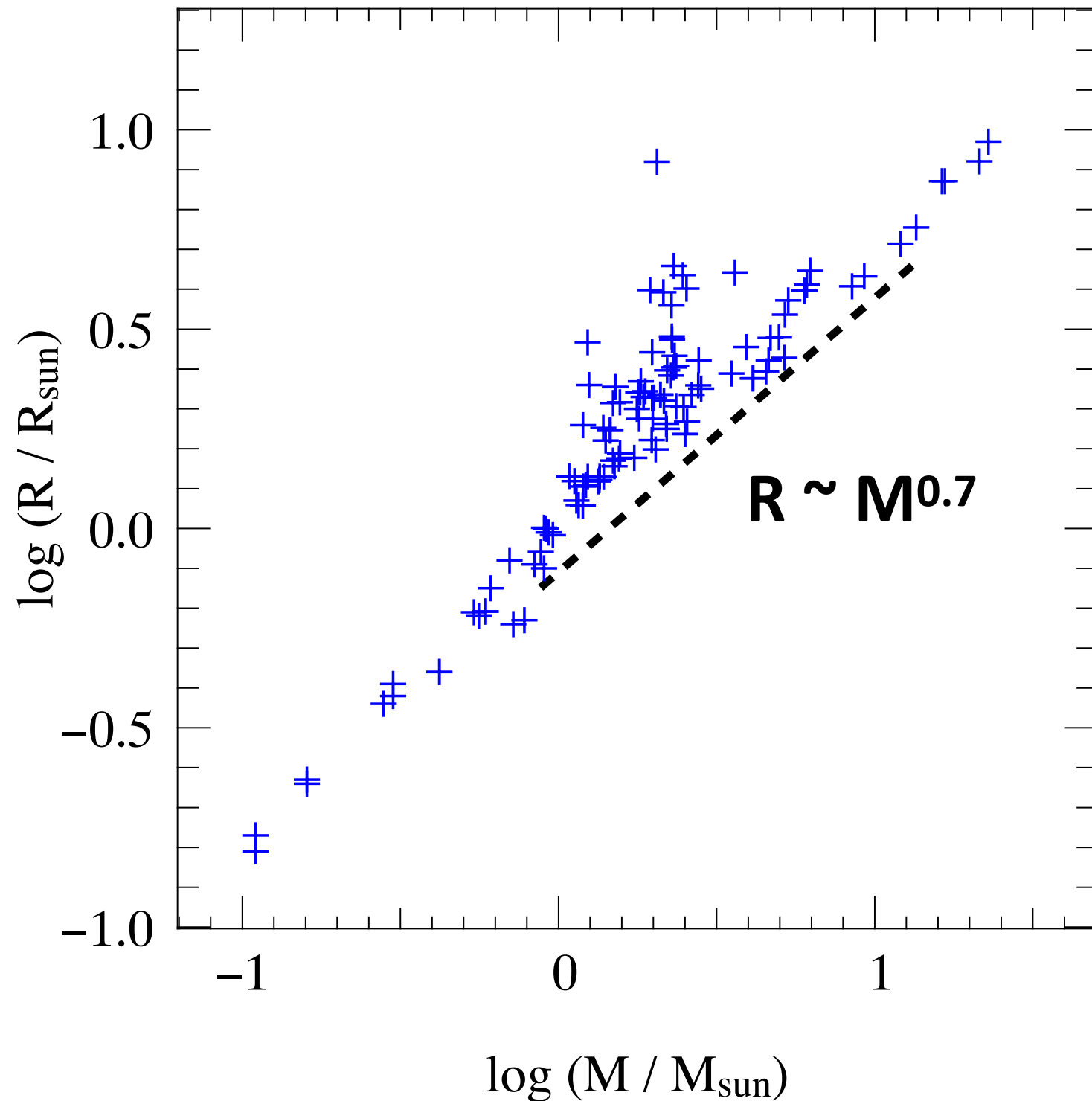
$\sim 10^8$ K



-10



質量と半径の関係 (主系列星)



星の中心温度が
ほぼ一定
 $\Rightarrow R \sim M$

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)

まとめ

- 恒星の内部
 - 力のつりあい：静水圧平衡 $\Leftarrow$ 力学
 - 理想気体の状態方程式 $\Leftarrow$ 熱力学
 - 太陽の中心温度は約 10^7K (1000万度)
- 核融合反応
 - トンネル効果が必要
 - トンネル確率 $\times$ 速度分布の端
 $\Rightarrow$ ガモフピーク
 - エネルギー生成率は温度に強く依存
 $\Rightarrow$ 閾値の温度に到達すると核融合が起きるとみなせる
 - 核融合がおよそ 10^7K で起きるとすると、
星の半径は(大雑把には)質量に比例する

レポート課題 2

現象の「タイムスケール」は一般的に

$$t = Q / (dQ/dt)$$

と表すことができる(Qは何らかの物理量)

- 2-1. 自由落下時間 (free-fall timescale) を説明せよ
- 2-2. 太陽の場合の自由落下時間を概算せよ
- 2-3. 太陽の場合のsound crossing timeを概算せよ
- 2-4. 上記の自由落下時間とsound crossing timeを比較して、
その物理的意味を考察せよ
- 2-5. Kelvin-Helmholtzタイムスケールを説明せよ
- 2-6. 太陽の場合のKelvin-Helmholtzタイムスケールを概算せよ