

Section 3.

核融合反応

3.1 トンネル効果

3.2 核融合反応

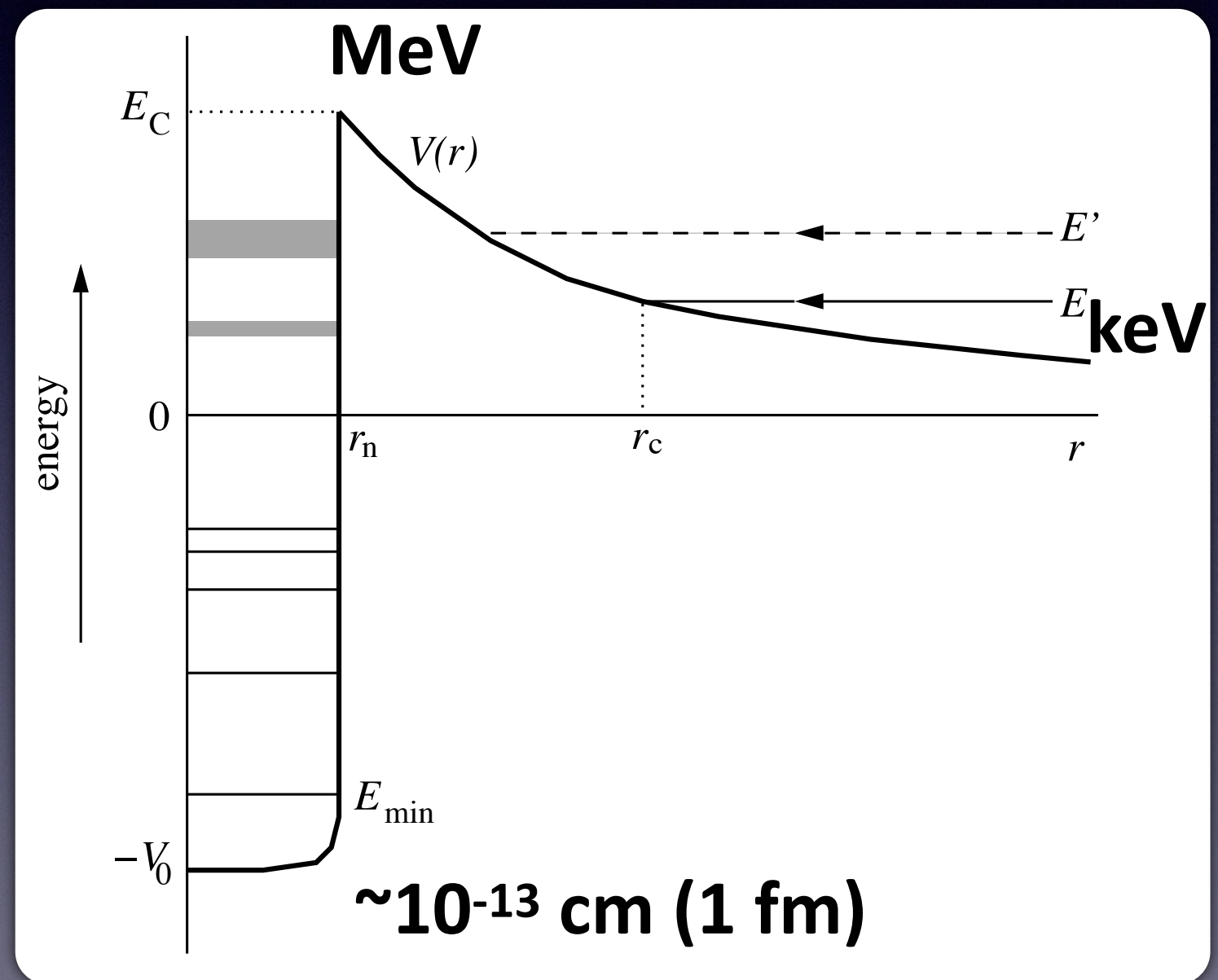
核融合

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



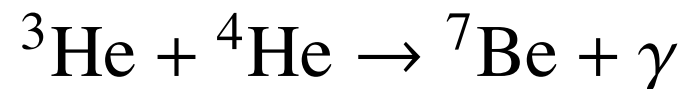
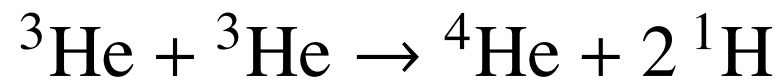
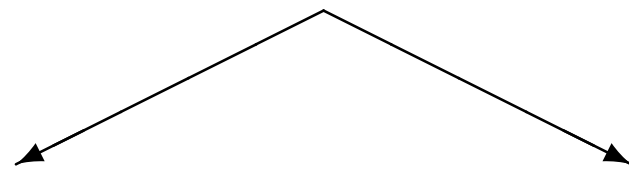
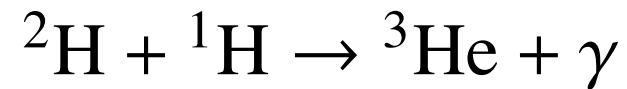
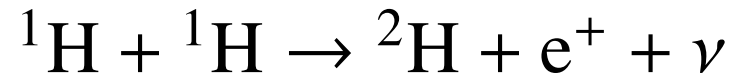


さまざまな疑問を**物理**を使って理解しよう

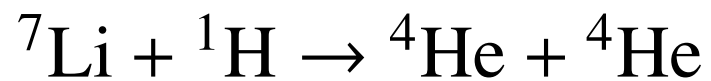
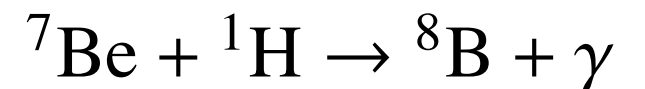
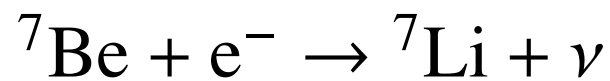
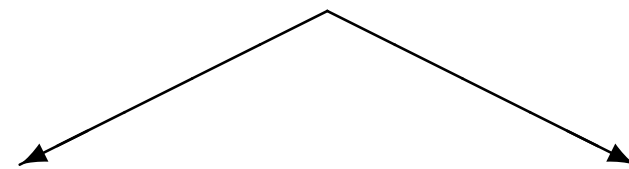
- 星の中はどうなっているの？
- なぜ重い星の方が大きいのか？
- **なぜ星は明るく輝くのか？**
- なぜ重い星の方が明るいのか？
- なぜ星は「進化」するのか？
- なぜ質量で星の運命が変わるのか？
- なぜ星は星でいられるのか？
- なぜ一部の星は爆発するのか？
- ...

水素燃烧 (pp chain)

$$4\ ^1\text{H} \rightarrow\ ^4\text{He} + 2\ e^+ + 2\ \nu$$



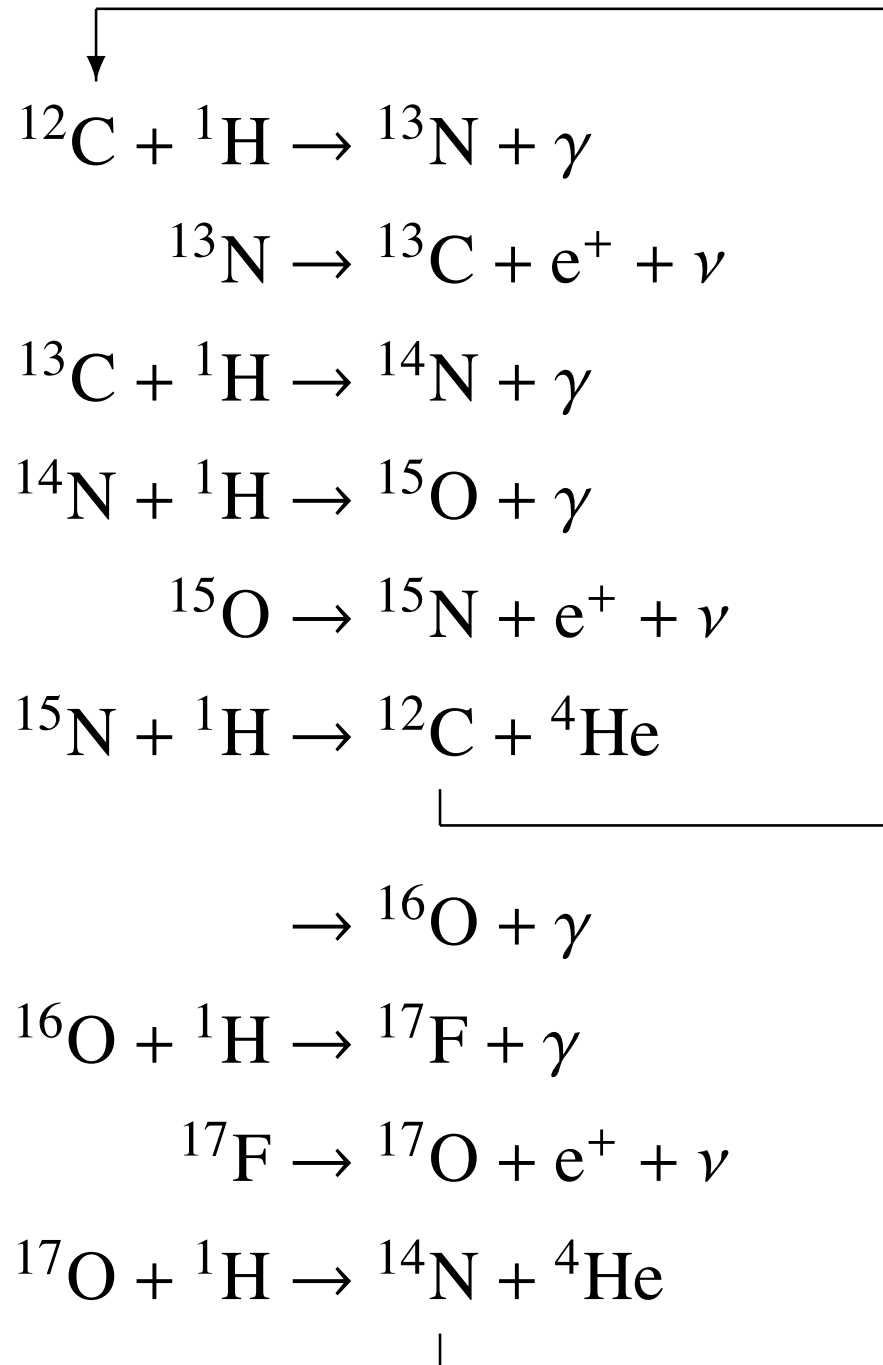
pp1



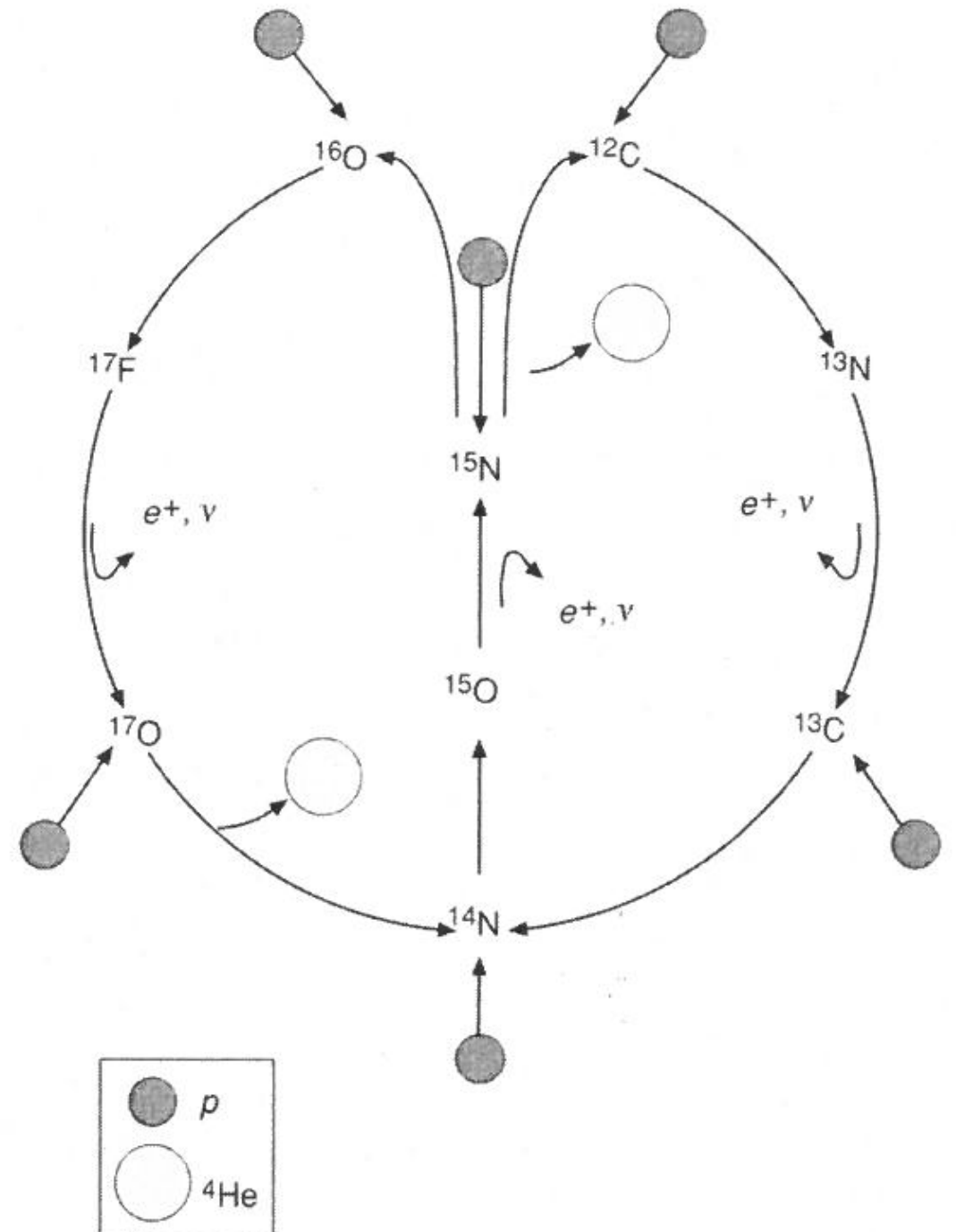
pp2

pp3

水素燃烧 (CNO cycle)



Textbook by Pols



Textbook by Prialnik

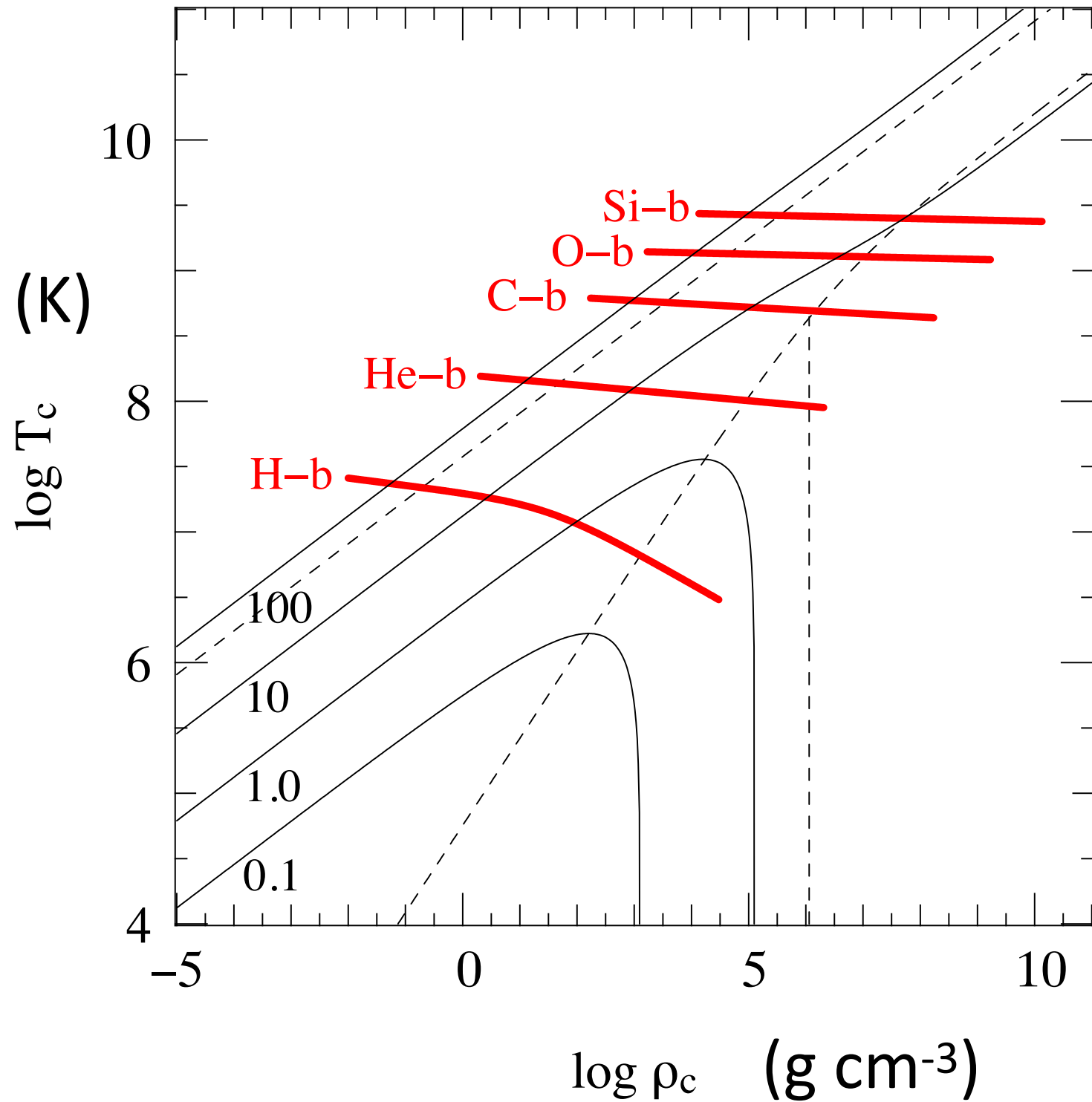
水素燃焼の条件

Fusion
reactor

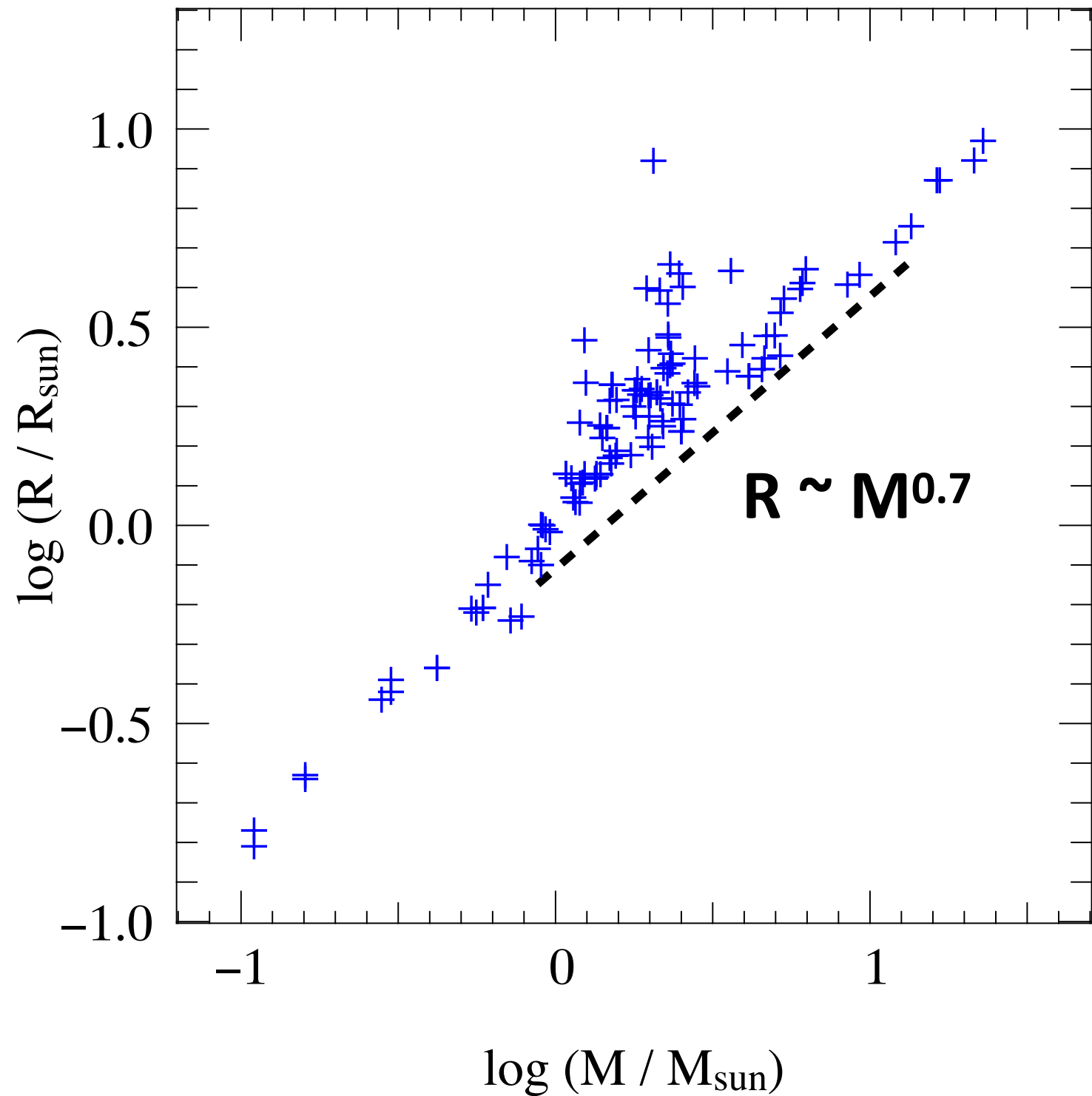
$\sim 10^8$ K



-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

- 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
=> ガモフピーク
 - エネルギー生成率は温度に強く依存
=> 閾値の温度に到達すると核融合が起きるとみなせる