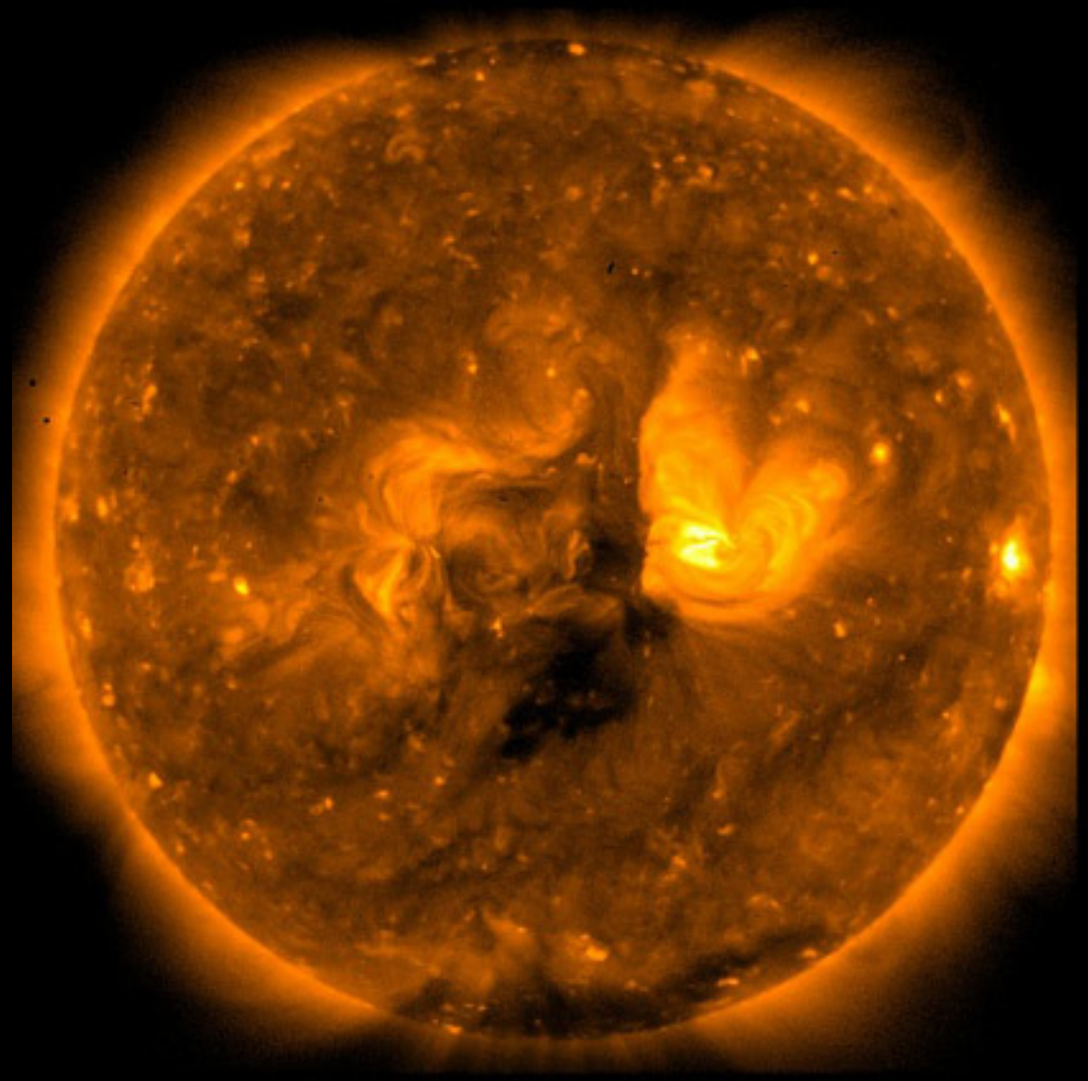
Section 5.
核融合反応

5.1 恒星内部の温度

5.2 核融合反応



太陽

(C) JAXA/ISAS

太陽の明るさ

= 4 x 10^{26} J/s (= W) = 4 x 10^{33} erg/s

日本の一年の消費電力 = 2 x 10^{19} J = 2 x 10^{26} 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

太陽はなぜこんなに明るいの？？

=> 物理を使って理解しよう

太陽はなぜ明るく輝くのか？

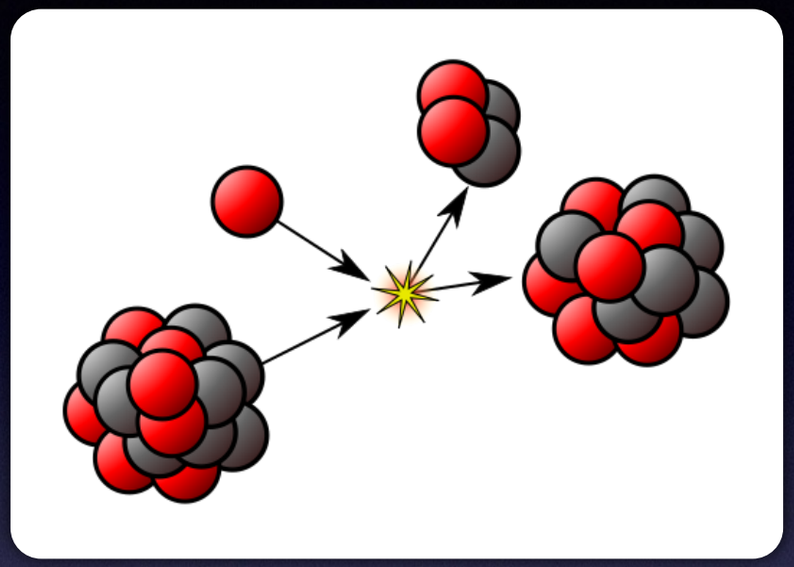
A. 化学反応

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

(例) $C + O_2 \rightarrow CO_2$

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



(例) $H + H + H + H \rightarrow He$

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

星の中では核融合反応が起きているらしい

=> 本当？

星の中はどうなっているの？

核融合

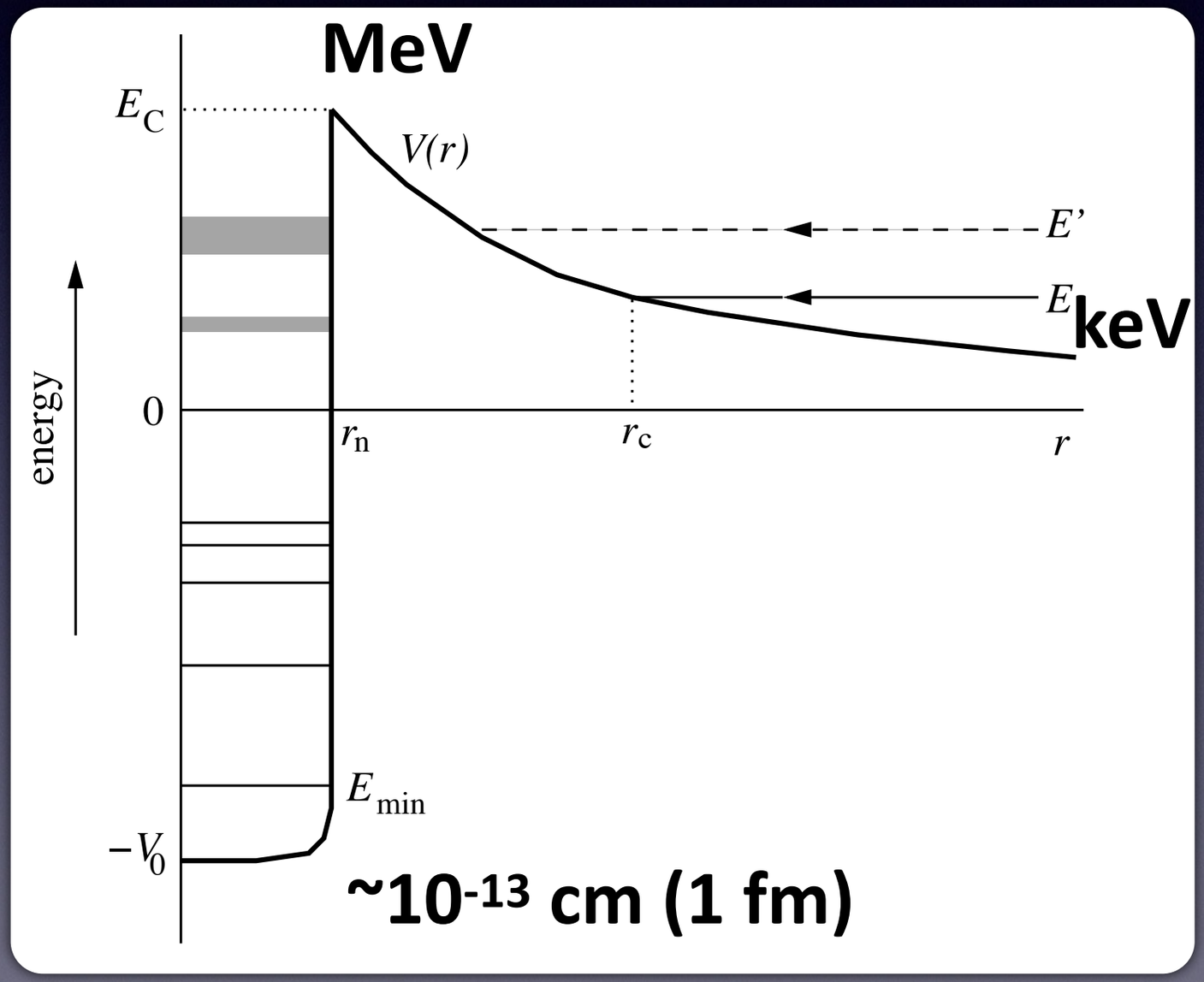
クーロン障壁 $E \sim (Z_1 Z_2 e^2)/r \sim 10^6$ eV (MeV)

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

=> トンネル効果

量子力学

温度が高いほど核融合が起こりやすい



Textbook by Pols

原子核物理

水素燃焼 (pp chain)

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

$${}^{1}\mathrm{H} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{2}\mathrm{H} + \mathrm{e}^{+} + \nu$$

$${}^{2}\mathrm{H} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{3}\mathrm{He} + \gamma$$

$${}^{3}\mathrm{He} + {}^{3}\mathrm{He} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + 2\,{}^{1}\mathrm{H}$$

pp1

$${}^{3}\mathrm{He} + {}^{4}\mathrm{He} \rightarrow {}^{7}\mathrm{Be} + \gamma$$

$${}^{7}\mathrm{Be} + \mathrm{e}^{-} \rightarrow {}^{7}\mathrm{Li} + \nu$$

$${}^{7}\mathrm{Li} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + {}^{4}\mathrm{He}$$

pp2

$${}^{7}\mathrm{Be} + {}^{1}\mathrm{H} \rightarrow {}^{8}\mathrm{B} + \gamma$$

$${}^{8}\mathrm{B} \rightarrow {}^{8}\mathrm{Be} + \mathrm{e}^{+} + \nu$$

$${}^{8}\mathrm{Be} \rightarrow {}^{4}\mathrm{He} + {}^{4}\mathrm{He}$$

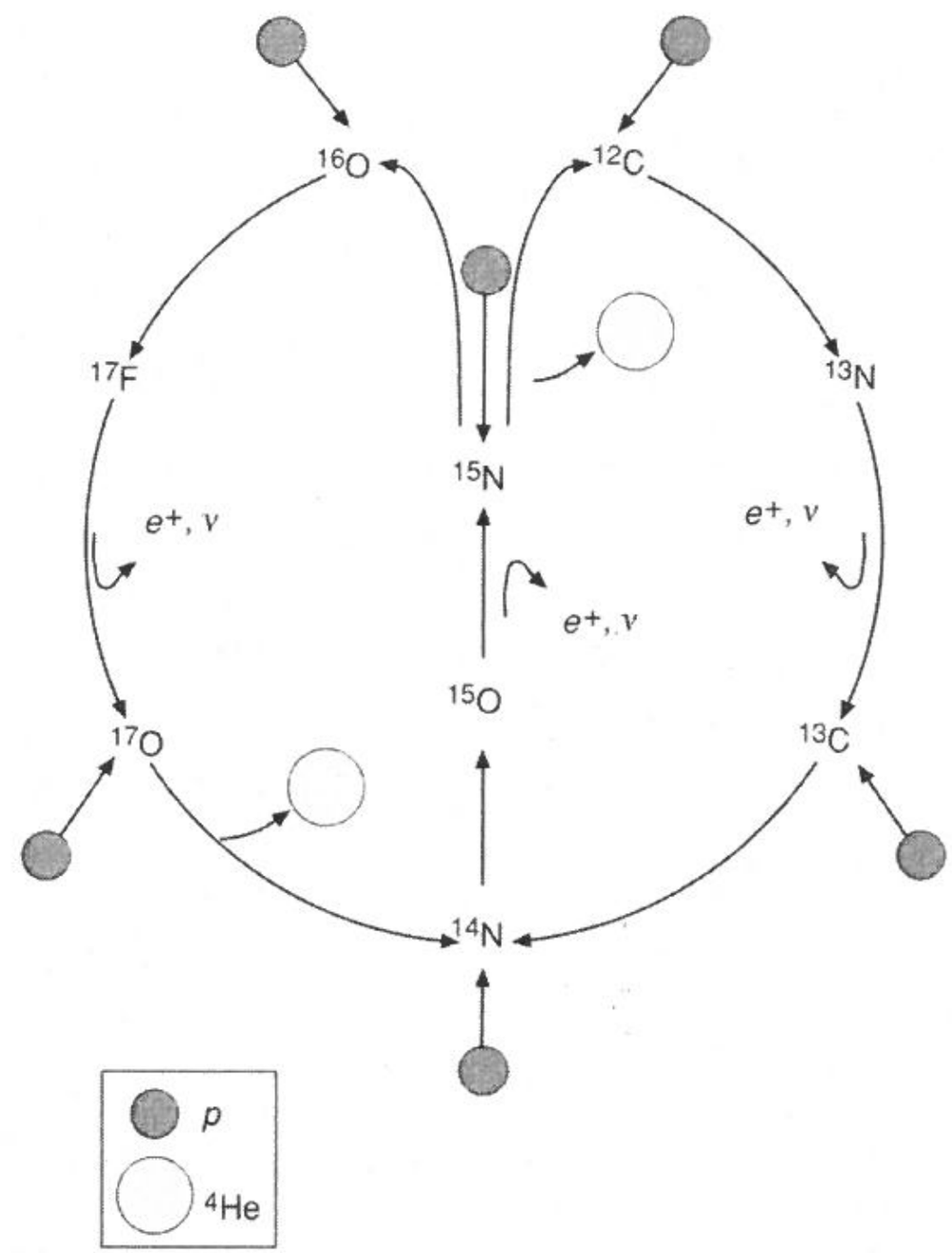
pp3

Textbook by Pols

水素燃焼 (CNO cycle)

$$
\begin{aligned}
{}^{12}\mathrm{C} + {}^{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{13}\mathrm{N} + \gamma \\
{}^{13}\mathrm{N} &\rightarrow {}^{13}\mathrm{C} + \mathrm{e}^{+} + \nu \\
{}^{13}\mathrm{C} + {}^{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{14}\mathrm{N} + \gamma \\
{}^{14}\mathrm{N} + {}^{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{15}\mathrm{O} + \gamma \\
{}^{15}\mathrm{O} &\rightarrow {}^{15}\mathrm{N} + \mathrm{e}^{+} + \nu \\
{}^{15}\mathrm{N} + {}^{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{12}\mathrm{C} + {}^{4}\mathrm{He} \\
&\rightarrow {}^{16}\mathrm{O} + \gamma \\
{}^{16}\mathrm{O} + {}^{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{17}\mathrm{F} + \gamma \\
{}^{17}\mathrm{F} &\rightarrow {}^{17}\mathrm{O} + \mathrm{e}^{+} + \nu \\
{}^{17}\mathrm{O} + {}^{1}\mathrm{H} &\rightarrow {}^{14}\mathrm{N} + {}^{4}\mathrm{He}
\end{aligned}
$$

Textbook by Pols



Textbook by Prialnik

まとめ

- 恒星の内部
  - 力学と熱力学で大まかに理解できる
  - 太陽の中心温度は約10^7K (1000万度)
- 核融合反応
  - 原子核のクーロンポテンシャル
    >> 粒子の運動エネルギー
  - トンネル効果が必要 (量子力学)

熱力学

3セメ

統計力学

5,6セメ

力学

1,2セメ

電磁気学

2,3セメ

宇宙物理学

天体物理学

流体力学

4セメ

原子核物理学

7セメ

量子力学

4,5セメ

相対論

4,7セメ