

核融合反応とその実例

目次

- § 1. 核融合反応の種類
- § 2. 原子核の結合エネルギーと核反応エネルギー
- § 3. 熱核融合反応の実例
- § 4. 種々のエネルギーを電子ボルトで測ると
- § 5. 高温核融合の起こる条件:ローソン条件
- § 6. 太陽における核融合と地上における核融合発電
- § 7. 太陽のエネルギー源は何か?
- § 8. わたしたちは星のかけら
- § 9. 宇宙における元素合成のサイクル
- § 10. 宇宙と星と私たち

Filename=fusion-summary20190124.ppt

§ 1. 核融合反応の種類

高温核融合

熱核融合反応ともいう。

ローソン条件が必要; 高温、原子核数密度、閉じ込め時間

一億度の(重水素+三重水素)の混合プラズマを、
原子核数密度100兆個(1立方センチあたり)、
約1秒間閉じ込め

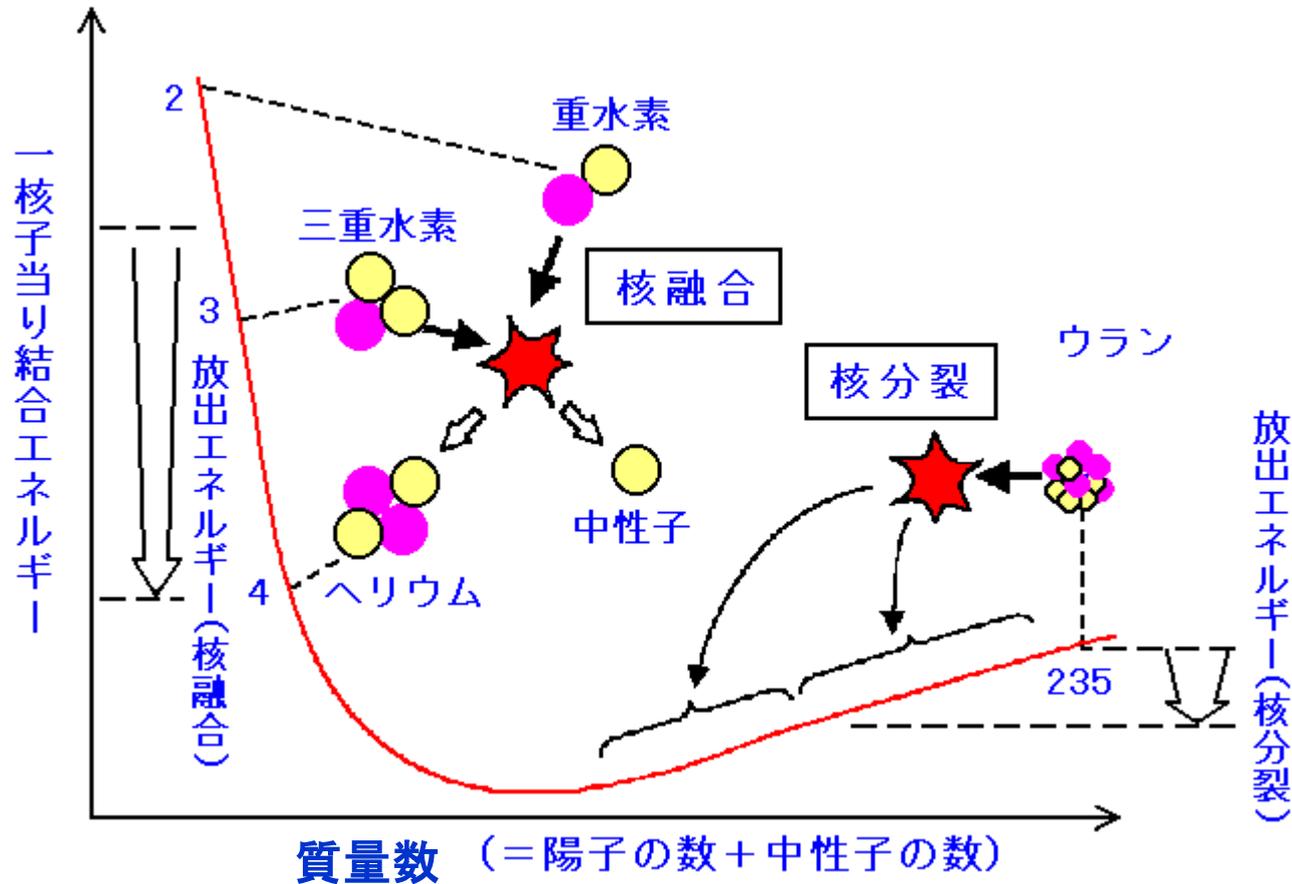
低温核融合

ミューオン触媒核融合反応ともいう。

例えば、マイナス272度という条件

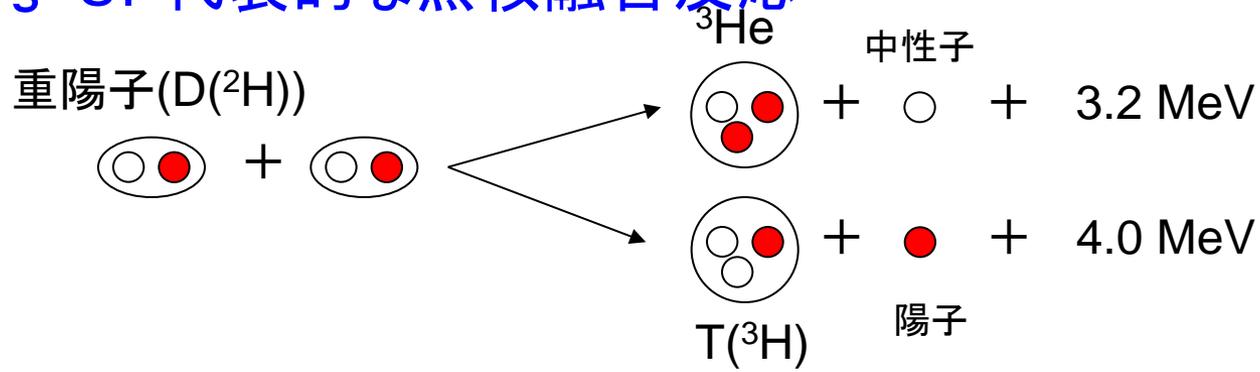
§ 2. 原子核の結合エネルギーと核反応エネルギー

軽い核が融合すると、結合エネルギーの余剰が生じる
重い核が分裂すると、結合エネルギーの余剰が生じる

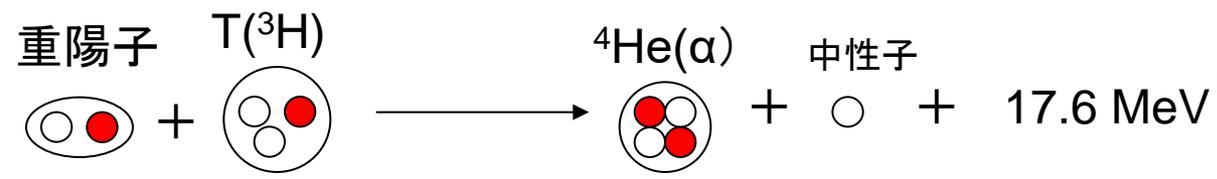


§ 3. 代表的な熱核融合反応

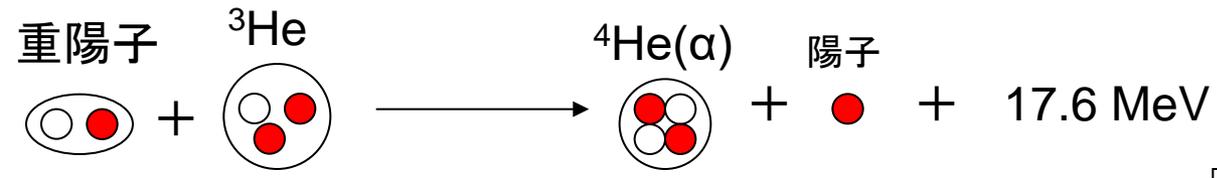
○ 中性子 ● 陽子



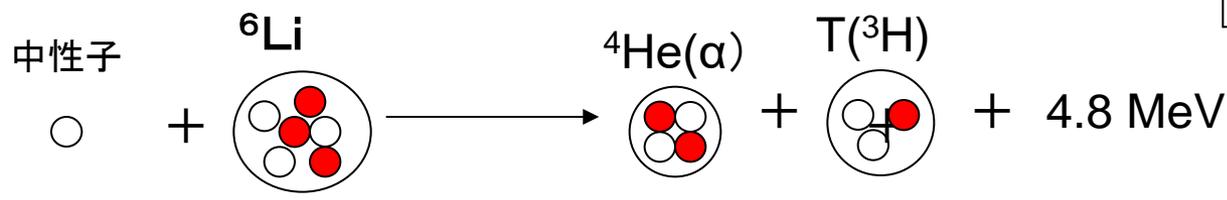
相対的に低温で起こるが、
反応断面積は相対的に大きくはない



相対的にやや高温で起こるが、
反応断面積は相対的に大きい



**T(³H)=トリチウム
天然には存在しない**



現代の核兵器の核融合反応に不可欠

§ 4. 種々のエネルギーを電子ボルトで測ると

常温における分子1個の熱エネルギー= 0.04 eV

可視光の光子のエネルギー= 1.5-3.5 eV

NaCl分子をNa原子とCl原子に分解するのに必要なエネルギー=4.2 eV

水素原子のイオン化エネルギー= 13.6 eV

カラーテレビのブラウン管にあたる電子のエネルギー=20,000 eV

医療用の高エネルギーX線のエネルギー=200,000 eV (=0.2 MeV)

原子核崩壊からの典型的なエネルギー:

(1)ガンマ崩壊=0-3 MeV

(2) ベータ崩壊=0-3 MeV

(3) アルファ崩壊=2-10 MeV

宇宙線のエネルギー= 1 MeV - 1000 TeV

§ 5. 高温核融合の起こる条件：ローソン条件

核融合反応によってエネルギーを取り出すためには、
超高温のプラズマを一定時間閉じ込めておくことが必要。

加熱に要するエネルギーよりも核融合により発生するエネルギーが大きくなり、
外部にエネルギーを取り出すことができる条件は

臨界プラズマ条件とよばれています：

プラズマ密度 × エネルギー閉じ込め時間 $> 6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3} \text{ s}$
プラズマ温度 $> 10 \text{ keV}$ (約 1 億度)

さらにプラズマの閉じ込めがよくなると、
核融合反応によって発生するエネルギーで
プラズマが直接加熱され、

外部から加熱する必要はなくなります。

この条件は**自己点火条件**とよばれています：

プラズマ密度 × エネルギー閉じ込め時間 $> 3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}$
プラズマ温度 $> 10 \text{ keV}$ (約 1 億度)

Q. なぜ高温が必要なのかなのか？

陽子間の電氣的反発力に打ち勝って接近するには、加熱して運動エネルギーを増大させる必要がある

マクロな系の中の粒子の平均の運動エネルギー

分子運動論におけるエネルギー等分配則

$$\frac{1}{2} m \langle v^2 \rangle = \frac{3}{2} k_B T$$

ボルツマン定数

$$\begin{aligned} k_B &= 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/deg} \\ &= 0.863 \times 10^{-4} \text{ eV/deg} \\ &= 0.863 \times 10^{-10} \text{ MeV/deg} \end{aligned}$$

星内部の高温

$$T = 10^8 \text{ deg (1億度)} \rightarrow \frac{3}{2} k_B T = 0.012 \text{ MeV}$$

分子運動論における速度分布則より、
平均運動エネルギーよりも高いエネルギーをもつ粒子も存在する

高温でなくても、わずかな確率で核融合が起きていて、
観測もできる。

実際には、きわめて低い頻度であるが、
常温でも

1) 速度分布則により

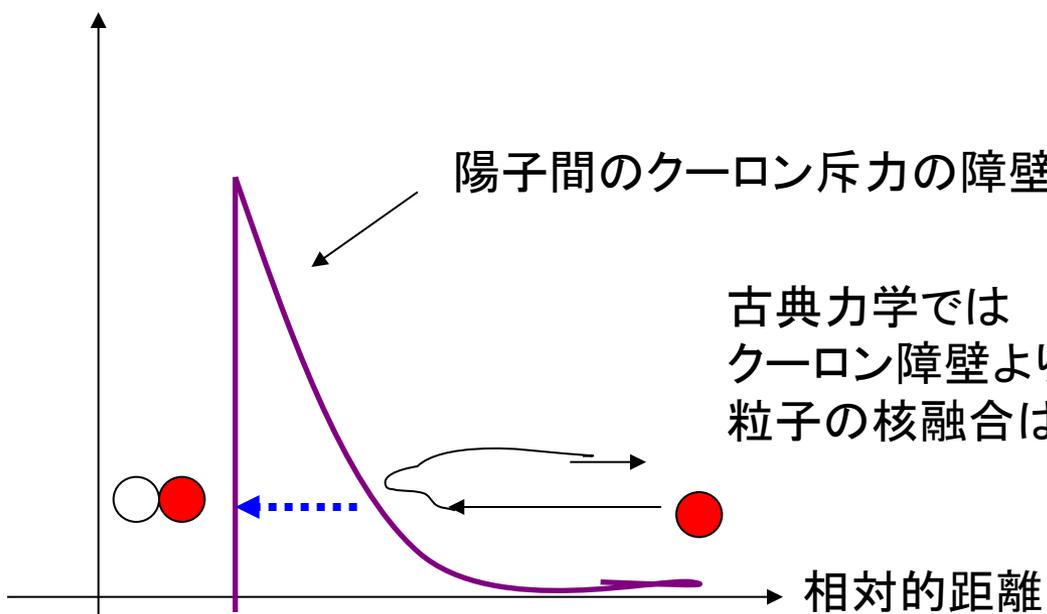
高エネルギーをもつ粒子もわずかな割合で存在する

2) (量子力学的)トンネル効果により

クーロン障壁より低いエネルギーをもつ荷電粒子も
核融合できる

3) 宇宙線に含まれるミュオン(ミュ粒子)を触媒とする核
融合反応は起きている

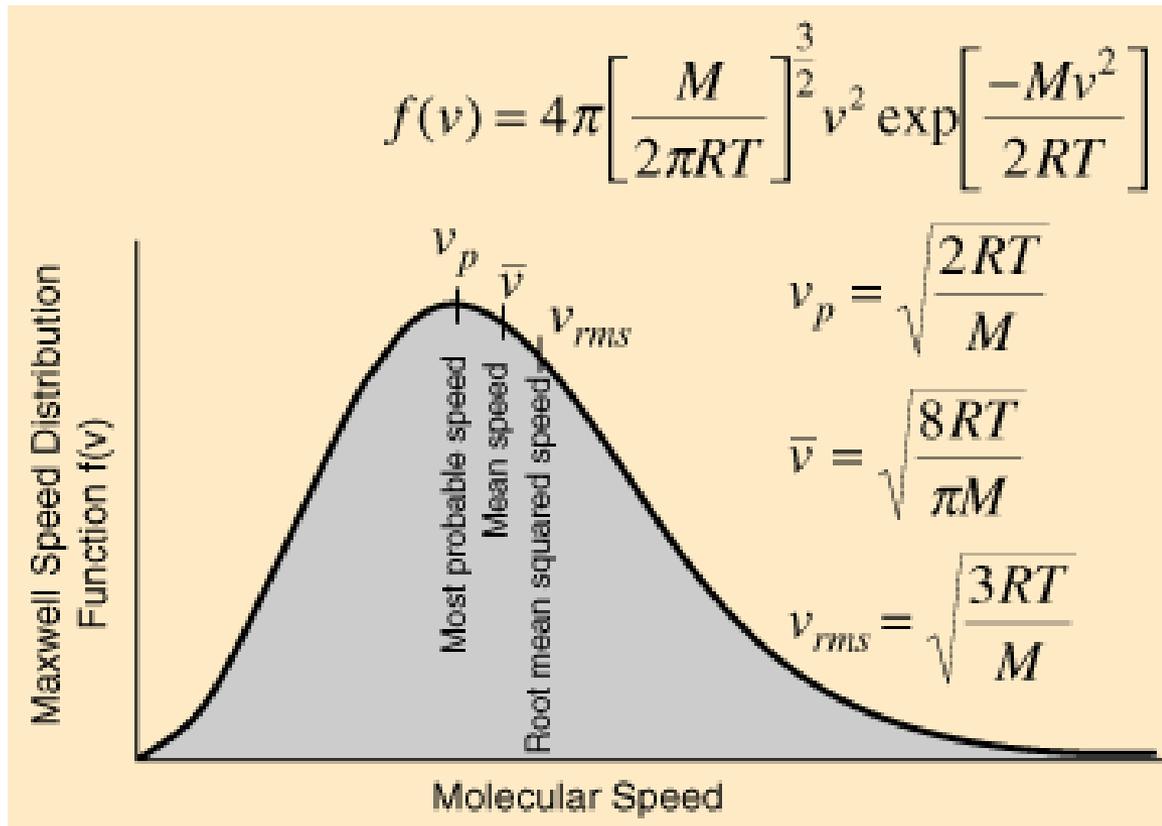
エネルギー



**量子力学ではクーロン障壁より低いエネルギーの
粒子でもトンネル効果で核融合は可能**

マックスウェル速度分布則

速さ(speed)が $(v, v + dv)$ の範囲内の値をもつ分子数の割合 $= f(v)dv$



ミューオン(ミュー粒子) μ

物質を構成する12種類の素粒子の1種。

質量は電子の約200倍、電子と同じ負電荷をもつ。

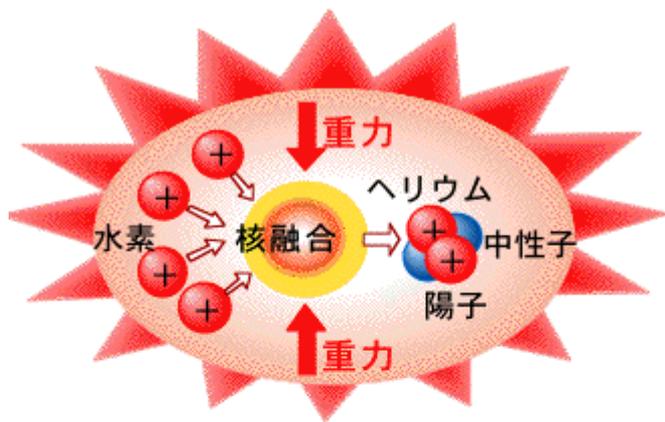
宇宙放射線(宇宙線)が大気に衝突して生じる。

地表に到達する宇宙線の約7割はミュー粒子であり、
残りのほとんどは電子である。

このミュー粒子を利用して火山の内部を、あたかもX線写真のように、「透視」する、すなわち、撮影する技術の開発を東京大学地震研究所と名古屋大学が進めている。
2007年夏から、長野県の浅間山などに写真乾板をおいて実験を始める。

(朝日新聞、2006.11.22)

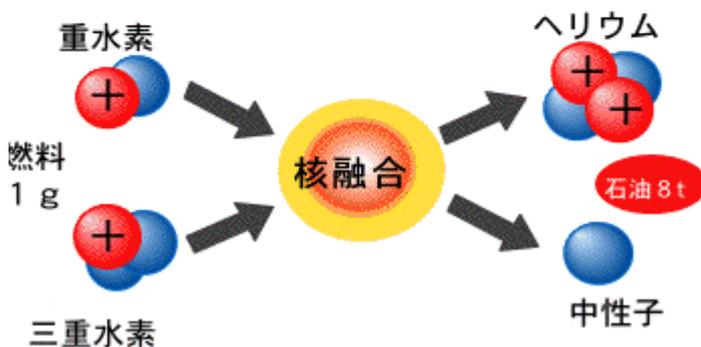
6. 太陽における核融合と地上における核融合発電



太陽

温度 ~約1500万度
密度 ~大気の200万倍
反応時間 ~100億年

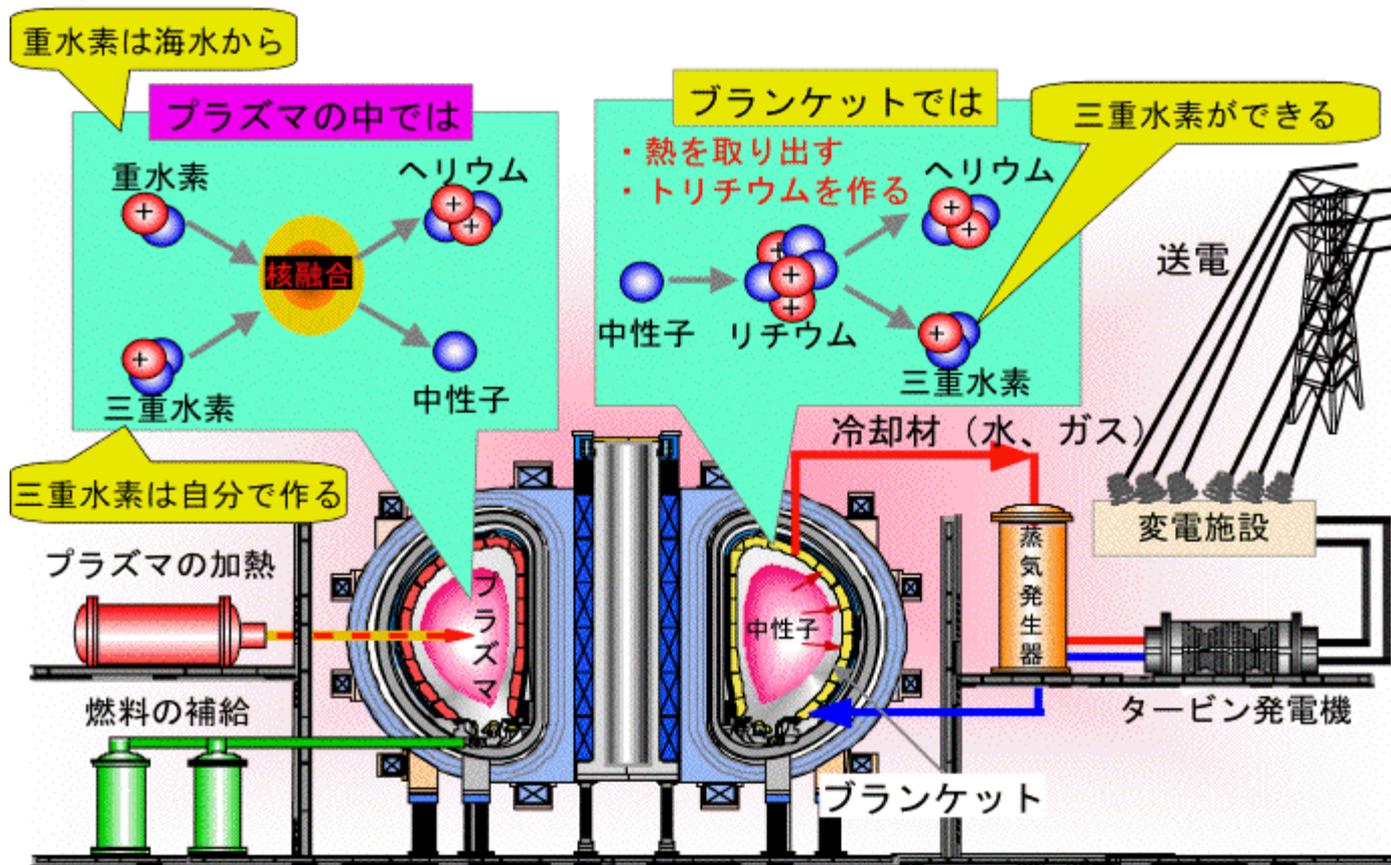
地球の30万倍の質量による閉じ込め



地上

温度 ~2億度
密度 ~大気の20万分の1
反応時間 ~約100秒
(エネルギー閉じ込め時間 ~2秒)

核融合発電の仕組み



核融合発電の特徴

無尽蔵のエネルギー資源

燃料となる水は地球上に大量に存在している。
ただし DT 反応を用いる場合には Li も燃料となるのでその採掘が必要です

暴走の危険なし

炉心は超高温ですが、蓄えられているエネルギーはわずかです。
しかも温度が上がるにつれてエネルギーの逃げ方が速くなるので、
温度が上昇しつづけて暴走することはありません。

少ない放射性廃棄物、しかし炉構造材の放射化対策が必要

核融合反応そのものから生成される放射性物質が蓄積することはありませんが、
高エネルギーの中性子は炉壁を通り抜けて、周囲の炉構造材を放射化します。
この誘導放射能をおさえるためには炉材料を適切に選ぶ必要があります。
しかし核分裂炉のように高レベル長寿命の放射性廃棄物の問題はありません。

温室効果なし

石油や石炭のような化石燃料で問題になっている二酸化炭素を発生しないので、
地球の温度を上昇させる温室効果を抑制できます。

装置の大型化

核融合反応を起こすためには超高温の燃料を閉じ込めなければならないので、
装置の体積を大きくしたり、レーザーを大出力にすることが必要です。
次期装置の性能を予測するために、理論的解析やシミュレーションが欠かせません。

§ 7. 太陽のエネルギー源は何か？

古代より、人類の諸民族は

生命の維持には太陽の恵みが必要不可欠であると考えてきた

→19世紀まで、石炭などの化石燃料であると考えられたが、
太陽から、毎時、宇宙空間に放出されるエネルギー量から
すぐ枯渇するはず

→20世紀になり、**星(恒星)のエネルギー源は核融合反応**
であることがわかった。

太陽は毎秒、 4×10^{26} Jのエネルギーを放出している
(=毎秒、460万トンの質量が消滅して、エネルギーに
転換されている)

現在の太陽は約50億才、今後も約50億年、エネルギーを生成する

§ 8. わたしたちは星のかけら

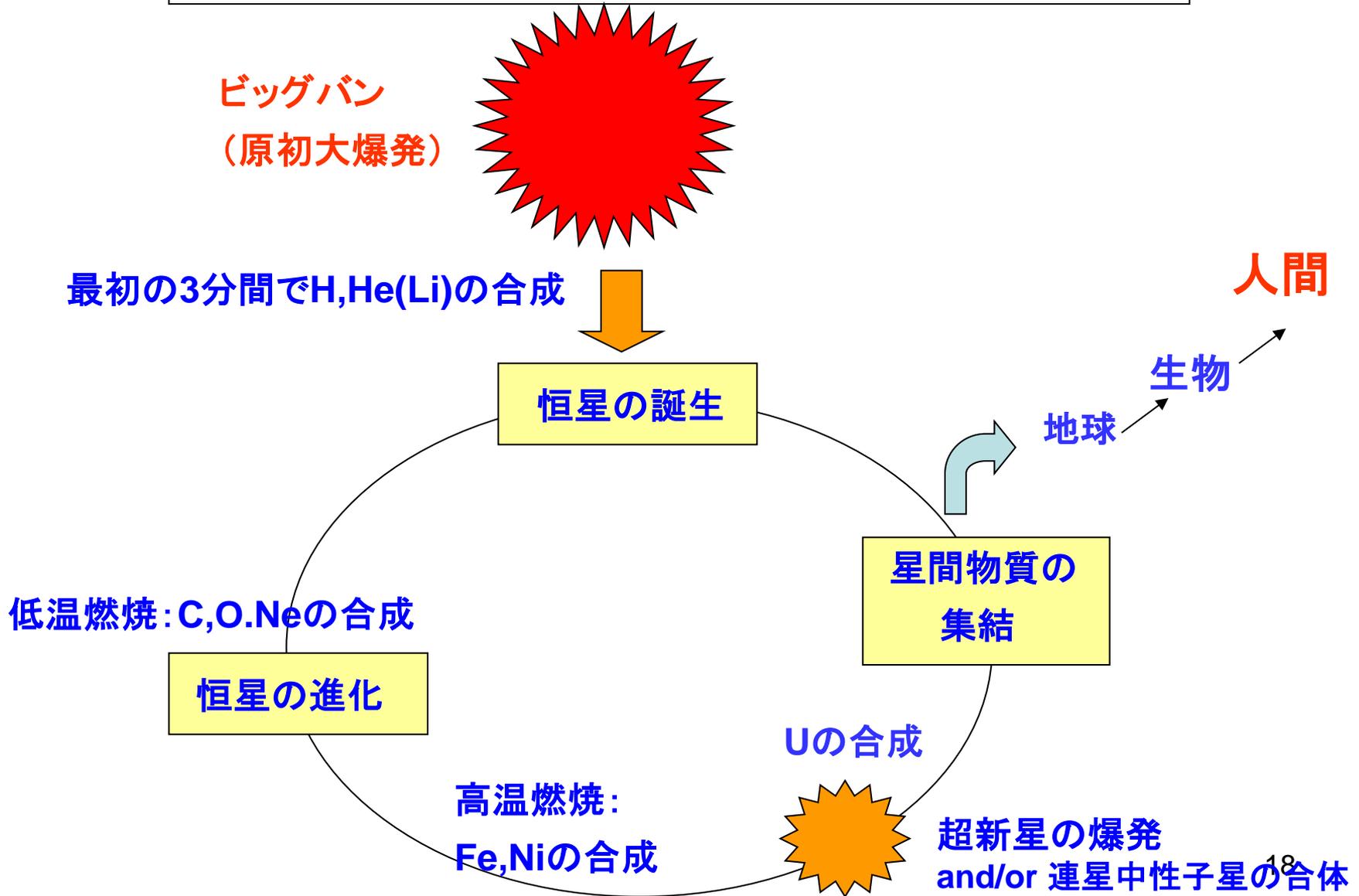
Q. 地球の素材や私たちの体や生物の材料である炭素やいつも呼吸している酸素原子の芯はいつ、どこで、どのようにつくられたのだろうか。

Ans.

- (1) 水素、ヘリウムなど軽い元素は私たちの(約140億年前の)宇宙の始まりから約3分間に合成された。
- (2) 炭素、酸素などから鉄までの原子核は星(恒星)の内部でゆっくり合成される。
- (3) 鉄より重い、金、銀、鉛、ウランなどは星の最後の段階である超新星の爆発直前に合成されて、爆発とともに宇宙空間に飛び散り、それらが集まって太陽系の惑星になった
- (4) 地球では生命が誕生して40億年間、生物の盛衰があり、進化がゆっくり進行している。

→星(超新星)のかけらとしての地球、生物、人間

§ 9. 宇宙における元素合成のサイクル



§ 10. 宇宙と星と私たち

私たちが吸う息には、

星の内部奥深くの灼熱の炉でつくりだされた原子が含まれている。

摘む花のひとつひとつには、

太陽の十億倍も明るい閃光を発生し、星が爆発したときに宇宙に放り出された原子が含まれている。

読む本の一冊一冊には、

星から星へと吹く風に運ばれ、想像を絶する空間と時間の隔たりを乗り越えて地球にやってきた原子が含まれている。