

# 核融合

一般的にいえば、次のような理由から、核融合反応は非常に起こりにくい。標的としての原子核は極めて小さい。核融合が実現するには正電荷をもつ原子核同士が原子核の大きさ程度に接近する必要がある。古典物理学的には荷電粒子は電氣的斥力エネルギー（クーロン障壁）の以上の運動エネルギーを持たなければ接近することができない。このために外部から入射粒子を加熱などにより加速する必要がある。このクーロン障壁は温度に換算すると、 $10^9\text{K}$ を越える。この意味で核融合は熱核融合と呼ばれることがある。そして、超高温の下で物質は電子とプラスイオンが分離したプラズマ (plasma) 状態となる。太陽など恒星では、膨大な質量が集まり、その重力による収縮で大きな熱が発生して超高温となる。(量子力学的にはクーロン障壁より低いエネルギーでもトンネル効果により核融合反応が起こる。ただ、反応率が低い。)

## 1 宇宙における元素合成のサイクル

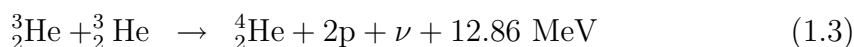
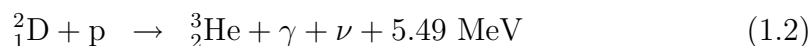
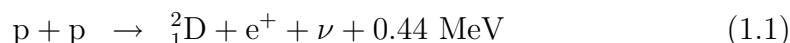
すべての物質は核反応で作られた

ビッグバンで水素 (H)、ヘリウム (He)、リチウム (Li) という軽い元素が合成された。その後、恒星の誕生と成長とともに鉄 (Fe) までの元素が作られた。鉄の原子核はもっとも安定である (質量数あたりの結合エネルギー最大) から、鉄よりも重い元素は出来ない。恒星の一生の最終段階である超新星爆発により、それまでに作られた鉄までの元素が宇宙空間に撒き散らされるとともに、鉄よりも重いウラン (U) までの元素が作られる。このように撒き散らされた星のかけらのごく一部が人間を含む生物や地球を形成している。

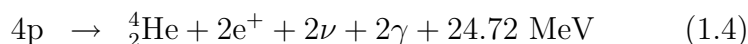
### 1.1 恒星の内部で起こっている核融合反応

#### 1. 水素燃焼反応

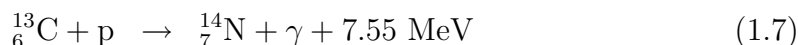
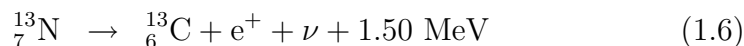
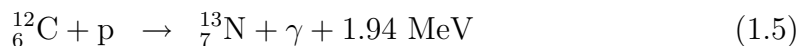
(a) P-P 連鎖反応 (質量が太陽の 2 倍以下、絶対温度  $T \leq 2 \times 10^7\text{K}$  の恒星)

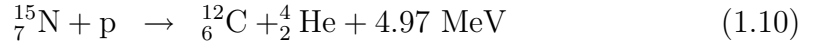
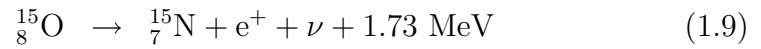
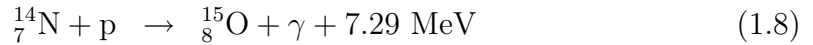


まとめると

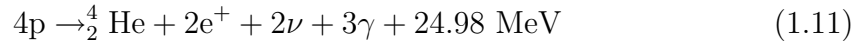


(b) CNO 循環反応 (質量が太陽の 2 倍以上、絶対温度  $T \geq 2 \times 10^7\text{K}$  の恒星)

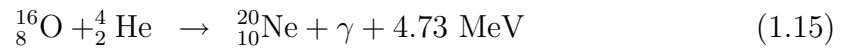
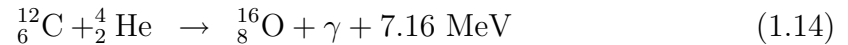
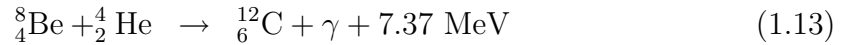




結局  ${}^{12}_6\text{C}$  は触媒的な働きをして元にもどり、正味の反応は



2. ヘリウム燃焼反応水素の原子核である陽子が燃え尽きると、重力収縮が起こって中心温度が  $10^8\text{K}$  に達し、 ${}^4_2\text{He}$  が燃え出す。



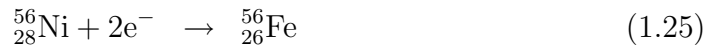
3. 炭素燃焼反応  ${}^4_2\text{He}$  が燃え尽きると、さらに  ${}^{12}_6\text{C}$  同士が燃える。



4. 酸素燃焼反応



5. 珪素燃焼反応



## 1.2 恒星の寿命はなぜ永いか

核融合反応がおこるために越えるべきクーロン障壁は温度に換算すると、 $10^9\text{K}$  を越えると前述したので、水素燃焼反応のひとつである P-P 連鎖反応が絶対温度が 1 千万度 ( $10^7\text{K}$ ) 程度で核融合が起こるとはとても考えられないかもしれない。しかし、次の二つの効果で可能である。

### 1.2.1 速度分布における高エネルギー粒子の存在

陽子は恒星の内部では気体分子運動論におけるマックスウエル分布にしたがって運動している。平均温度が1千万度 ( $10^7\text{K}$ ) 程度であっても、温度換算で数十億度 ( $10^9\text{K}$ ) 程度に相当する運動エネルギーをもつものも少しは存在する。

### 1.2.2 量子力学におけるトンネル効果

さらに、量子力学におけるトンネル効果により、クーロン障壁以下の運動エネルギーでも陽子と陽子は小さな確率ではあるが、反応できる以上の二つの効果により、核融合反応の断面積と粒子数密度のエネルギー依存性の曲線における、いわゆるガモフのピークができ、クーロン障壁以下の温度をもつ恒星の内部では核融合反応はゆっくり、百万年から百億年 ( $10^6 - 10^{10}$  年) という気の遠くなるような時間をかけて進行する。

## 1.3 鉄より重い元素の合成

恒星の中の熱平衡状態では、核融合反応によっては鉄より重い元素は合成できない。理由は質量数あたりの結合エネルギーが鉄で最大であるからである。(実は質量数あたりの結合エネルギーが最大である原子核は鉄ではないことが近年わかった。)

高温では鉄は光分解反応を起こし、むしろ軽い元素になってしまう。そこで重要になってくるのがクーロン障壁に関係なく核反応を進行できる中性子捕獲反応である。これにはゆっくり進行するS過程 (slow process) と超新星爆発時に爆発的に進行するR過程 (rapid process) がある。

### 1.3.1 S過程

恒星の核融合反応による生成物は、陽子やヘリウムの反応により中性子を発生させることがある。この中性子が鉄の原子核に吸収されて、質量数のひとつ大きい原子核をつくる、この原子核は中性子過剰のために、不安定で、ベータ崩壊により原子番号がまたひとつ大きい元素になる。この反応は極めてゆっくり進行する。

### 1.3.2 R過程

S過程だけでは現存する重い元素のすべてをつくれない。そこで考えられたのが、中性子を捕獲して、質量数が  $A \rightarrow A+1$  の原子核になったとき、ベータ崩壊する前にまた中性子を吸収し、 $A+2$  となり、次々と重い質量数の不安定核を作って最後にベータ崩壊する。これらの過程は正に猛烈な連鎖反応である。

### 1.3.3 元素起源論の課題

## 1.4 あらゆるエネルギーの根源としての重力エネルギー

太陽のエネルギーの発生源は核エネルギーである。核エネルギーは化学エネルギーに比べて数十万倍の大きさであり、この大きな核エネルギーによって太陽は50億年間も生命の源になった光のエネルギーを放出し続けることができている。

質量数あたりで考えると、鉄で結合エネルギーが最大となっている。

このため、星での核融合反応によって水素から始まって鉄までの元素が生成される。

太陽の4倍程度以上の質量の星は、核融合反応が鉄の生成を終えると、自らの重力エネルギーによってさらに収縮する段階に進む。(これまでは、重力と核融合反応で生成されるエネルギーとがつりあっていた)この段階では、電子のエネルギーは原子核内の陽子と反応して中性子を生成。星の中心部は中性子となる。このとき、中心部は急激に重力落下し、その際膨大なエネルギーが発生し、星の中心部を取りまく物質を吹き飛ばす。これが超新星爆発。この爆発の際に、鉄よりも重い、ウランにまでいたる重元素が生成され、宇宙に放出される。このような超新星爆発は近年では1987年に観測された。

太陽の8倍以上の質量の星は、超新星爆発後、中性子星やブラックホールとなる。

星の活動の形態は、原始星(核融合反応の始まる前)、活動期、爆発と変わってゆき、次の世代の星が生成される。太陽は、2代目以降の星。(太陽系のメンバーの地球にはウランなどの重元素があるから)

このような、星の世代の交代をつくりだす原動力は、重力エネルギー。

実際、私たちが利用する、化石エネルギー、水力や太陽光から得られた電気エネルギー、原子力発電のエネルギーなどさまざまなエネルギーは、重力エネルギーが姿を変えたものといえる。

## 2 人工系における核融合反応

### 2.1 核融合連鎖反応の成立条件

標的としての原子核は非常に小さいことなどにより一般に核融合反応は非常に起こりにくい。核融合が連鎖的に成立するためには次のような要因を考慮する必要がある。。

1. 原子核同士が原子核の大きさ程度以内に接近するための超高密度
2. 核融合反応が完了するための閉じ込め時間
3. 荷電粒子の加速度運動による電磁放射(制動放射)のためエネルギー損失

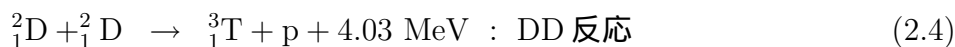
これらのことを考慮すると、自立的な核融合反応の実現のための条件は加熱と放熱がつりあう温度(自己点火温度)を達成することと、次の関係式で表されるローソン条件(臨界プラズマ条件)を満たすことである:

$$n\tau > 10^{20}\text{s/m}^3. \quad (2.1)$$

ここで、 $n$ はプラズマ粒子の数密度(単位体積あたりの粒子数)、 $\tau$ は閉じ込め時間である。

## 2.2 制御された核融合反応

核融合連鎖反応の成立条件と反応率（核融合反応の断面積の大きさ）などを考慮して、これまで考えられているのは重水素（D）と三重水素（T）を用いた核融合反応である。三重水素が自然にはない元素であるために、反応過程の中で生成するように次の複数の反応が組み合わせられた。

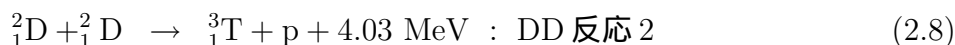


## 2.3 核融合反応の特徴と課題

1. 単位質量あたりのエネルギー発生率は核分裂の約 4 倍である。
2. 燃料資源（重水、Li）は普遍的に分布している。
3. 超高エネルギーの中性子の発生による放射線損傷の深刻さ、材料の放射化（2 次的放射線の発生）
4. 自立的連鎖反応の実現の困難さ

## 2.4 水爆、核融合兵器

歴史的には水素爆弾（水爆,Hydorgen bomb, H-bomb）として知られる核融合兵器には、三重水素が自然にはない元素であるために、反応過程の中で生成するように次の複数の反応が組み合わせられた。



実際の核兵器、特に、相対的に威力の小さい戦術的核兵器では核分裂連鎖反応を用いて、威力の大きい戦略核兵器においては、爆発力を高めるために核融合と核分裂の相乗効果が期待される反応系列が組み合わせられている。（プースター原理、booster principle）