

# 元素の起源

## 1 物質は原子から成る

地球上の物質は全て原子という粒が大量に集まってできています。さらに原子は正に帯電した陽子と電気的中性な中性子から成る原子核、その周りに存在する負に帯電した電子から成ります。

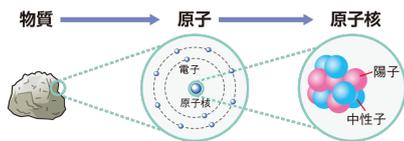


図 1: 原子の構造 (Atomuseum HP より)

原子には水素、酸素といった種類があり、原子の種類を元素と言います。これは「元素の周期表」にまとまっています。そんな原子は宇宙で作られますが、元素によって作られる時期や場所が異なります。ここからはどの元素がいつどこで作られたのかを見ていきましょう。

## 2 ビッグバン元素合成

話は宇宙が生まれた頃にまで遡ります。太古の宇宙は今よりも非常に小さく、高温高压の状態だったため陽子、中性子、電子等がまとまることができず、バラバラに飛び回っていました。その後、宇宙膨張によって温度が十分下がると<sup>\*1</sup>、重水素 ( $^2\text{H}$ ) やヘリウム ( $^4\text{He}$ ) といった<sup>\*2</sup>軽元素が作られました。これをビッグバン元素合成 (BBN) と言います。つまり、宇宙初期に生成された元素は水素、ヘリウム等の軽元素のみだったのです。しかし地球上にはこれらの軽元素以外にも様々な元素が存在しています。では、宇宙

初期に合成されなかった元素はどのようにして合成されたのでしょうか。

## 3 星の燃焼

実は鉄までの元素は恒星の内部での核融合により合成されます。

恒星のうち、太陽のような主系列星と分類される恒星は中心部での核融合により、水素  $^1\text{H}$  からヘリウム  $^4\text{He}$  を合成します<sup>\*3</sup>。

中心部で水素を使い切った恒星は次に、中心部での核融合によりヘリウム  $^4\text{He}$  から炭素  $^{12}\text{C}$  を合成します<sup>\*4</sup>。

さらに中心部でヘリウムを使い切った恒星は核融合により、炭素  $^{12}\text{C}$  から次々により重い元素を作り出します<sup>\*5</sup>。この過程によって鉄  $^{56}\text{Fe}$  までの元素が合成されます。

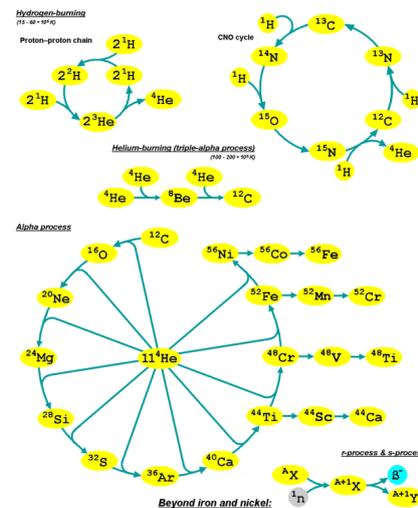


図 2: 核融合反応 (wikipedia より)

## 4 太陽からのエネルギー

ところで我々は太陽から降り注ぐエネルギーを利用していますが、そのエネルギーはここで紹介した核融

合反応によって生み出されたものなのです！太陽では 4 つの水素原子核  $^1\text{H}$  (合計質量  $6.690 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ) から 1 つのヘリウム原子核  $^4\text{He}$  (質量  $6.645 \times 10^{-27} \text{ kg}$ ) が合成されていますが、反応の前後の質量を比較してみると  $4.5 \times 10^{-25} \text{ kg}$  だけ軽くなっています。Einstein の特殊相対性理論によれば、質量はエネルギーと等価であり、質量  $m$  は  $E = mc^2$  のエネルギーに相当します ( $c$  は光速)。これを用いると今回の反応では、軽くなった分の質量がエネルギーとして解放されています。これをいけると今回の反応では、軽くなった分の質量がエネルギーとして解放されるといえる、その大きさは生成する  $^4\text{He}$  1 つにつき  $E = 4.05 \times 10^{-8} \text{ J}$  となります。太陽ではこの核融合によって毎秒 430 万トンの質量が  $3.8 \times 10^{26} \text{ J}$  のエネルギーへと変換されており、これはビッグマックセット<sup>\*6</sup>約 8400 京個分のカロリーに相当します。大きすぎてよくわかりませんね。それくらい宇宙はビッグスケールなんです！

## 5 鉄より重い元素は？

鉄より重い元素は恒星内部での核融合では合成できません。超新星爆発や連星中性子合体で合成されると言われていますがそれはまた別の機会に.....

## 参考文献

- [1] 佐藤勝彦, 二間瀬敏史. 『シリーズ現代の天文学 宇宙論 I』. 日本評論社 (2021).
- [2] Dodelson, Schmidt. 『Modern Cosmology』. Academic Press(2021).

<sup>\*1</sup> 束縛原子核が存在できる程度まで冷えると、すなわち、放射 (photon) のエネルギーが原子核の束縛エネルギーの 1/10 程度まで冷えると  
<sup>\*2</sup> 質量数 8 以下の元素 (Li まで)。大部分は水素とヘリウム。質量比では、水素が 78%, ヘリウムが 22%, その他が微量。  
<sup>\*3</sup> この反応は pp-chain や CNO-cycle という経路が知られており、4 つの  $^1\text{H}$  原子核から 1 つの  $^4\text{He}$  原子核が合成されます。  
<sup>\*4</sup> この反応は triple- $\alpha$  反応と呼ばれるもので、3 つの  $^4\text{He}$  原子核から 1 つの  $^{12}\text{C}$  原子核が合成されます。  $M > 0.5 M_{\odot}$  の星で可能です。  
<sup>\*5</sup> この一連の反応は  $\alpha$ -process と呼ばれ、 $^4\text{He}$  原子核が次々に衝突することでより重い元素の原子核が合成されます。  $M > 8 M_{\odot}$  の星で可能です。  
<sup>\*6</sup> M セット (フライドポテト, コカコーラ): 1080 kcal で計算しました。