

2. 4. 6 元素合成 —みんな星の子—

<ガモフの夢>

アインシュタインの重力の方程式は膨張宇宙を示唆していました。実際にハッブルの法則も発見されました。それを受けてガモフは「宇宙は昔は小さくて、熱い火の玉から始まった」というビッグバン宇宙を提唱しました。そのガモフの夢とは「宇宙の初期、火の玉がまだ熱かった時に核反応が起こり、原初の水素から全ての元素が合成された」という説です。後の定量的な計算によりこの夢は真実ではないことが分かり、夢に終わりました。ビッグバンはあまりに急激に冷えるので、重量比で言って全物質の 25%がヘリウムに変わった時点で反応が止まるのです。それより重い元素はビッグバンでは合成されません。でも、これは実はラッキーなことでした。もし核反応がもっと進んで、全ての物質が一番安定な鉄になってしまっていたら、もはや核融合はできず、宇宙に星は輝きはしなかったでしょう。もちろんわれわれのような、炭素や酸素や水素でできている生物も生まれなかったでしょう。

<ヘリウムから鉄まで>

それでは、ヘリウムより重い元素はどのようにして作られたのでしょうか？

それは恒星の中です。太陽の 3 倍より重い星では、核融合の燃えかすであるヘリウムも核融合を行い、炭素や酸素になります。星の重さが重いと、さらに炭素や酸素も核融合を行いネオンやマグネシウムに、さらにはシリコンや硫黄になります。そしてシリコンや硫黄が核融合し鉄ができます。星を輝かせているエネルギー源の核融合反応でできる元素は鉄までです。この一連の反応の後半は出るエネルギーが少ないので、下表のように水素燃焼と比べるとあっという間に反応が進みます。シリコンや硫黄が反応を始めると星の余命は1週間しかありません。

<SN1987A (太陽の 18 倍の質量) の場合>

反応			出るエネルギー	反応温度	輝く時間	
水素	→	ヘリウム	600 兆 ジュール/kg	1000 万度	1000 万年	
ヘリウム	→	炭素・酸素	60 兆 ジュール/kg	1 億 5000 万度	100 万年	赤色巨星に進化
炭素・酸素	→	ネオン・マグネシウム	50 兆 ジュール/kg	5 億度	1 万 2 千年	炭素・酸素は反応が激しいので速く燃えてしまう。
ネオン・マグネシウム	→	シリコン・硫黄	—	—	12 年	
シリコン・硫黄	→	鉄	—	—	1 週間	鉄は 50 億度で光崩壊を始める。それが II 型の超新星爆発を引き起こす。

<鉄からビスマスまで>

それより重い元素の鉄からビスマスまでは、星の中心部で核反応によって作られます。これはSプロセス(スロープロセス)と呼ばれています。水素などの核融合反応において中性子が発生します。その中性子の中には最初からあった鉄の原子核に衝突し、核反応を起こすものもあります。こうして原子核は原子量が1つずつ重くなって行きます。ある程度、中性子が多くなるとβ崩壊を起こし、原子番号が1つ上の元素に変わります。この反応は何万年もかけてゆっくり進むのでスロープロセスと呼ばれています。ゆっくりとした反応なので安定な原子核しか最終的に生成されません。タングステン、金などはこの反応で作られます。この核反応は星の燃料としての反応ではないので、その生成量は少ないのです。

<ビスマスより重い元素>

ウランなどビスマスより重い元素は、超新星爆発で作られると考えられています。超新星爆発の瞬間には爆発の衝撃波面など、大量の中性子が発生する場所があります。そこで鉄などが大量の中性子を一気に吸収し、「中性子過剰核」という状態になります。中性子過剰核は不安定なのですぐに崩壊して行き、準安定なウランなどに行きつきます。

いずれにせよ、ヘリウムより重い元素は、星の進化の過程で作られ、超新星爆発でまき散らされます。そしてガスやチリとなり、その濃い所が重力収縮してまた星が作られるのです。

我々の体を作っている炭素や酸素も、何十億年か昔には燃えたぎる恒星の中心部にあったことは間違いありません。我々は「星の子」なのです。目の前の本棚の鉄だって一時期には、大質量星の中心にあって何十億度という高温の中、勢いよく飛び回っていたに違いありません。「それがこんなにコチコチに冷たく固くなって」としばし感慨にふけるのです。