

## 12. 元素の起源

### 12-1 重要な観測事実

元素の起源を推定には、恒星や星間ガスの元素組成の観測が実証的な手掛かりとなる。そのなかで特に重要な観測事実を以下に列挙する。

**H と He が主要である** 太陽を含めて主系列星の組成を分光学的に求めると H と He が大部分を占める (重量にしておおよそ H が 3/4, He が 1/4)。

**重水素 (D) が存在する** D は原子核が陽子と中性子一つずつからなる水素の同位体である。恒星の内部では D は速やかに核反応によって消費され  ${}^3\text{He}$  となる。実際に太陽には D は検出されない。しかし木星大気など太陽系の惑星物質には D が含まれていることが知られている。また太陽近傍の星間物質にも D が見出されている。これは宇宙の誕生時に D が作られ、現在も消費し尽されていないことを意味する。遠方すなわち古いクエーサー天体 (活動的な銀河核と考えられている) の分光観測からは、H 原子 30,000 個に対して D 原子が 1 個の割合で含まれており、これが初期宇宙の値に近いと考えられる。

**重元素の乏しい恒星が存在する** 種族 II の恒星あるいは低金属星と呼ばれる恒星が存在し、推定年齢の古い球状星団に特に顕著に含まれることから、宇宙初期には重元素が乏しかったと推定される。

**重元素は核子の結合エネルギーが高い核種に富む** 恒星や星間ガスの重元素の中では、 ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{14}\text{N}$ ,  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{20}\text{Ne}$ ,  ${}^{24}\text{Mg}$ ,  ${}^{28}\text{Si}$ ,  ${}^{32}\text{S}$ ,  ${}^{36}\text{Ar}$ ,  ${}^{56}\text{Fe}$  等の割合が高い。これらはそれぞれと質量数の近いものと比較して核子の結合エネルギーが大きい核種である。

重元素には放射性核種や Fe より重い核種が存在する

### 12-2 元素合成の仕組み

以上の事実は大きく次の 3 つの元素合成過程により説明できる。

## ビッグバン元素合成

宇宙初期の高温高密度状態下で中性子を経て、 $^1\text{H}$ ,  $^2\text{H}(\text{D})$ ,  $^3\text{He}$ ,  $^4\text{He}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^7\text{Li}$ ,  $^7\text{Be}$  までが連鎖反応によって合成された。実験的に解明されている核反応速度と宇宙背景放射の観測から推定されるビッグバン時の宇宙膨張を与えて理論計算を行うと、これらの元素はビッグバン開始後約3分間で合成され、計算で得られる元素比は恒星や星間ガスの観測結果をうまく説明できる。この観測と理論の合致はビッグバン仮説の支持証拠の一つである。

## 恒星内核融合反応

ビッグバン元素合成では膨張冷却が急速にすすみ、元素合成が途中で止まるために、質量数7を超える元素は合成されない。他方、恒星内部の核融合反応はゆっくりと進行するため、核子の結合エネルギーが高い核種が恒星の進化段階に応じて次々に合成される。これらの核種は質量数が4の倍数のものが多く、 $^4\text{He}$  原子核 ( $\alpha$  粒子) が単位となって核融合が進む傾向があることによる。なお2つの  $\alpha$  粒子が融合して生じる  $^8\text{Be}$  は非常に不安定で、およそ0.1 フェムト秒<sup>1</sup>の間に再び2つの  $\alpha$  粒子に壊変してしまう。この壁を突破し炭素が合成されるには  $^8\text{Be}$  が崩壊する前に、速やかにもう一つの  $\alpha$  粒子が衝突する必要がある (トリプル  $\alpha$  反応)。このような条件は赤色巨星の中心核で実現する。

また漸近巨星分枝段階では、核融合反応にともなって穏やかに中性子が放出される。中性子は電荷を持たないため、既存の原子核に衝突して新たな重い原子核を作り出す (ゆっくりとした中性子捕獲過程, s 過程)。新たに作られた原子核は、次の中性子が衝突する前にベータ崩壊して安定な核種となる。これにさらに中性子が捕獲されることを繰り返し、より重い原子核が合成される。この過程では  $^{209}\text{Bi}$  (ビスマス) まで合成される。

## 超新星元素合成

超新星爆発の際に、重力崩壊する中心核から短時間に多量の中性子が放出される。中性子はベータ崩壊する間をおかずに原子核に次々に衝突し、中性子に富む重い不安定な原子核を作り出す (急速な中性子捕獲反応, r 過程)。不安定な原子核は、中性子の放出が終わった後にベータ崩壊をおこし、安定な原子核や長寿命の放射性核種へ変化する。地球型惑星の内部熱源として重要な  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  はこの過程により生じた。<sup>2</sup>

<sup>1</sup>1 フェムト秒= $10^{-15}$  秒

<sup>2</sup>超新星爆発に伴う r 過程で生じる元素の大部分は、超新星爆発後に残される中性子星やブラックホールに吸い込まれてしまい、超新星爆発は r 過程生成元素の生産には実は不利という指摘があ

超新星爆発時には高エネルギーの陽子や、ガンマ線（高エネルギーの電磁波）なども放出され、これらも元素合成に寄与すると考えられている。

---

る。ごく最近(2017年), 中性子星同士の合体現象が重力波と電磁波の双方ではじめて観測され, その結果中性子星同士の合体で大量の r 過程元素が放出されることが判明した。r 過程元素の生産の大部分は, 中性子星合体が担っているのかもしれない。