

星の運命と鉄の誕生

[協力]

東京大学理学部助教授

松井 孝典
Takafumi Matsui

鉄は核融合反応の最後の姿

宇宙における元素の存在量比を調べると、鉄は元素番号の近い他の元素に比べ 1,000倍程度多いことがわかっている。なぜ宇宙に鉄が多く存在するのだろうか。

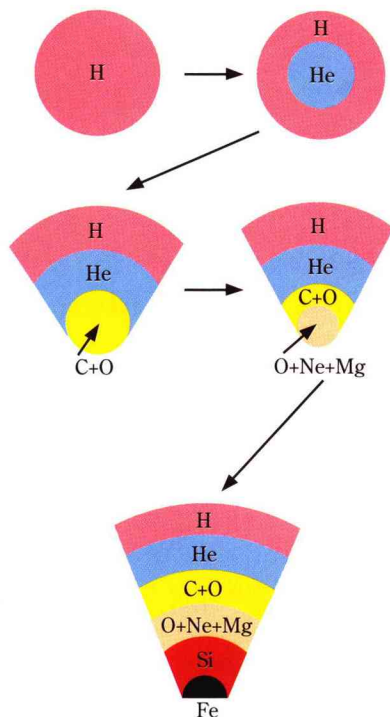
鉄は恒星の内部で生まれた。恒星は星間ガスが重力収縮で球状に集まってでき、中心部で核融合反応が起こる。最初に燃焼するのは中心部にある水素で、これがヘリウムになる過程でエネルギーを放出する。現在、太陽が輝いているのはこの水素の燃焼によるもので、この後100億年間は燃え続けると考えられている。太陽と同じぐらいの質量を持つ星は、中心部で水素が燃焼してヘリウムができ、ヘリウムが燃焼して炭素ができる。ここで燃焼は終わり、星は白色矮星となる。

質量が太陽の3倍から8倍の大きさの星では、中心部に炭素の核ができ、これに爆発的に火がついて大爆発を起こし、星全体が吹き飛ぶ。

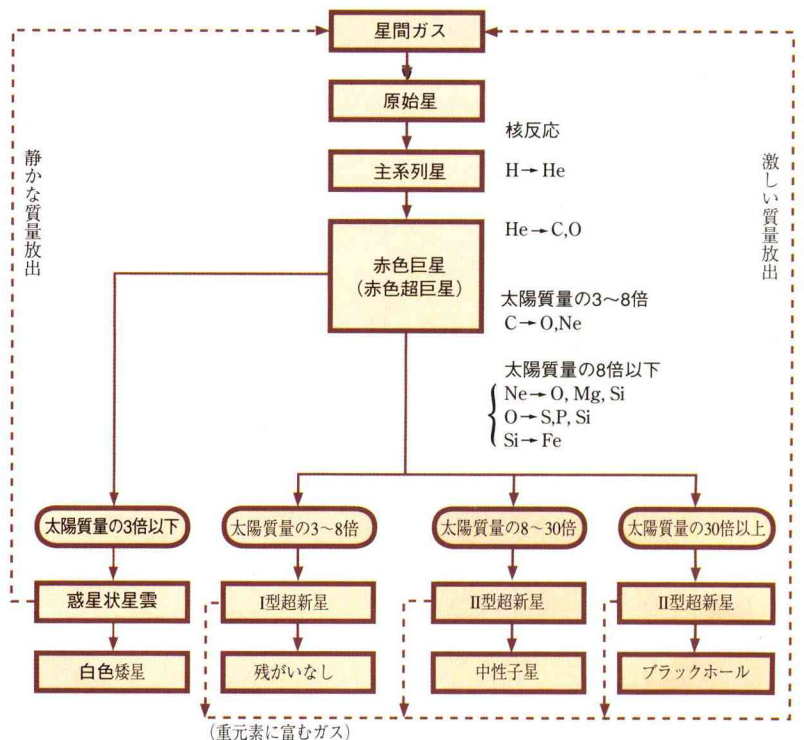
質量が8倍より大きい場合は、炭素が燃焼した後に酸素、ネオン、マグネシウム、アルミニウム、さらにシリコンなどが順々に生まれる。このように徐々に重い元素が作

られていくが、重い元素ほど生成に高い温度が必要のため、燃料となる元素とその生成物は層によって異なり、タマネギの皮状に重なる。そして最後には、中心に鉄の塊ができる。このように、星の進化とは、最初の水素燃焼でできた灰であるヘリウムを燃やし、このヘリウムを燃料にして次の燃焼が起こるといった過程のことである。ところが鉄はこれ以上燃焼できず、エネルギーを出すことができない。こうなると、内側からの圧力が減少してそれまでの外側との圧力均衡が破れる。鉄のコアは急激に収縮し、高密度の中性子星になる。この圧力が高くなって中心から跳ね返り、その衝撃波で外側は吹き飛び、爆発する。

鉄の原子核は核燃焼で得られる、最も安定したものである。このように鉄は、星の進化の最後の段階にできるため、宇宙の進化とともにその存在量比は増えていくが、現在の宇宙では水素とヘリウムとで全体の98%以上を占めている。これらの原子がすべて星の進化とともに鉄となり、核燃焼反応が終わった、いわば星の輝かない宇宙になるとすれば、それは何千億年も後のことになると考えられる。



星の内部に形成される元素組成のタマネギ構造



星の進化

太陽に近いほど多い鉄－ニッケル合金

それでは、惑星はどのようにしてできたのだろうか。自転する太陽の回りには星になりきれないガス（ダスト）が円盤状に漂う。この中の重い元素が互いに集まって原始惑星を形成する。これらは質量が少なく、内部の圧力も低いため、太陽のような核融合反応は起こらない。惑星の元素の存在量比は、惑星それぞれで大きく異なっている。たとえば地球は重い元素がほぼ 100% を占めているが、同じ太陽系の木星や土星では太陽と同じように水素やヘリウムが多く、重い元素は中心部に少し存在するだけである。しかしいずれも、太陽に比べて重い元素の存在量比は高い。

このような惑星にある鉄で金属となっているのは、鉄－ニッケル合金である。一方、岩石には鉄が酸化物として含まれているが、合金と酸化物の存在する割合は、それぞれの惑星で異なる。水星には、質量全体の3/4 以上を占める非常に大きな鉄－ニッケル合金のコアがあり、残りの1/4 の岩石の中に、他の酸化物とともに鉄酸化物が含まれている。このほか、地球では 8～10%、月では15%ほどの鉄酸化物が存在すると考えられている。

また、鉄－ニッケル合金については、太陽に近い惑星ほど存在量比が高いという傾向がある。地球や金星は質量の約半分が鉄－ニッケル合金だが、火星ではその比率は低くなる。定性的には、鉄－ニッケル合金は比較的融点が高いため、高温の太陽の回りに多く分布しやすいことになるが、くわしいことはまだわかっていない。

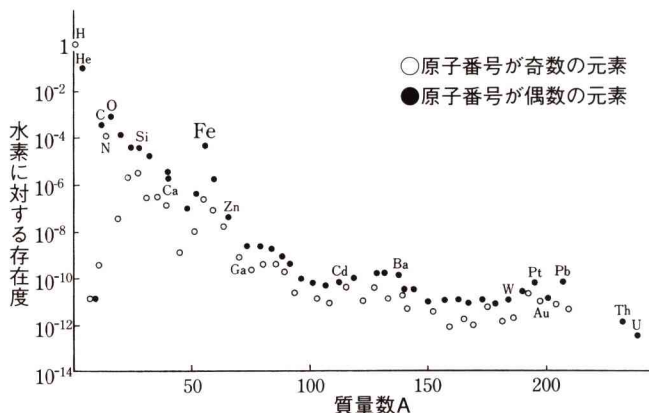
惑星は衝突を繰り返して段々に大きくなる。衝突によってできる初期の小さな惑星のことを微惑星というが、微惑星の中にどのくらい金属（鉄－ニッケル合金）が含まれているかが、衝突後の運命を決めていくのではないかと考えられている。もし、金属が多ければ延性によって衝突の力を吸収し、変形したり互にくっついたりすることになる。岩石が多い場合はばらばらに壊れ、飛散する。つまり、もともと金属が多い領域では、衝突によって金属的なものがたくさん集まりやすいことになり、太陽の近くに鉄－ニッケル合金が多く存在するという傾向についても説明がつく。

隕石は宇宙からの贈物

このようなふるまいのサンプルとして、われわれが手に入れることができるのが隕石である。隕石は太陽の周囲のガスが冷やされてできたもので、当然その中には鉄が含まれている。隕石の中に以前はある惑星の一部だったと思われるものもあり、それらを調べることによって惑星の内部構造についての推定ができる。

隕石は、その成分によって石質隕石、鉄隕石、石鉄隕石

太陽の化学組成



水素に対する元素存在度を表したもので、この組成は宇宙における天体の典型的な組成でもある。

に分けられる。石質隕石にはコンドリュールと呼ばれる、ミリメートルサイズの丸い液滴のようなものを含むコンドライトという種類がある。これは太陽系の星雲の中から鉱物の粒子が凝縮して隕石になって以来、熱的な影響を受けずそのままの形で残っている隕石である。このような隕石が、太陽系の元素存在度を推定するための大きな手掛りとなっている。

約46億年前に地球が誕生したときに、すでに現在とほぼ同じ量の鉄元素が存在していた。しかし金属と酸化物の存在量比は年月とともに変化しているはずだ。現在では、中心から半分ぐらいまでを鉄－ニッケル合金のコアが占め、その上の上部マントルという岩石の層の中に約 8% の鉄の酸化物が含まれていることがわかっている。

今から20億年以上前、地球上に酸素がない時代に、海の中に縞状鉄鉱層という鉄鉱石の層が形成された。現在人類が利用する鉄鉱石の90%以上はこの縞状鉄鉱層から供給されている。大陸の侵食、あるいは海洋底下の熱水噴出にともなって、多くの鉄イオンが海の中に溶け込んだ。これが酸化して水酸化物となり、海底に沈殿したのがこの鉄鉱層である。

古代ギリシャ人は鉄のことをワーエベ（天の産物）と呼んだ。人類が最初に知った鉄は、宇宙からやってきた隕石だった。現代人は、地球の中で生まれた鉄鉱石からすぐれた鉄を作り、生かすことを知っている。私たちが手に入れた鉄の文明は、まさに天と地の恩恵に預かっているといえるだろう。

【参考文献】

「現代の宇宙像」日本物理学会編、1991、培風館

「地球進化探訪記」松井孝典著、1994、岩波書店

「宇宙のデータブック」比田井、寿岳、高瀬著、1995、東海大学出版会