宇宙における金属誕生物語

高柳雄一*

1. 宇宙と金属

宇宙に金属はどのようにして現れたか？ これまで宇宙について、様々なタイプのテレビ番組を企画してきたが、こんな問いかけをテーマにとり上げたことは一度もない。

一般的な宇宙に対する疑問はもっと素朴だ。宇宙はどのようにして生まれたのか？ 宇宙に果てはあるのか？ 宇宙に生命はどのように現れたのか？ これではなかなか金属と宇宙を結びつけて考えるまでに至らなかったのである。

今回、金属を通して宇宙を眺める機会を与えられ、これまで気づかなかった宇宙の営みを知ることになった。筆者は以下に述べるどの分野においても、いわゆる研究者でも専門家でもない。それだけにこの一文は、これまでに出会った研究者や論文、啓蒙書まで含めた書物に教えられたことを私なりにまとめたものである。ただこんなスケールの大きなテーマでは、細部の議論はともかく、専門家の方も論じる機会はないと思われる。それだけに気楽に論を進めてみたい。科学読み物として読んでいただければ幸いである。

金属という言葉を知ると普通は地上の物質というイメージを思い浮かべる。私たちが日常生活で接する金属は固体の鉱物だから、地球の大地が生み出した産物としてぴったりだ。

元素の周期表を見ても私たちの物質世界を構成している元素の中で金属がどれだけ多数あるか一目瞭然である。非金属元素は希ガスを加えても元素全体の5分の1ほどになるだけだ。金属は私たちが住む地球を代表する物質ともいえる。

しかし視点を宇宙に置くと、金属は地球だけにある物質ではないことが分かる。金属元素の中で誰しものがその代表として考える元素は鉄であろう。この鉄、実は地球だけではなく我々の銀河系に集まる2千億といわれる星の表面には必ずちゃんと存在する元素でもある。鉄ばかりではない。近くで調

べやすい太陽の表面には金を始め様々な金属元素の存在が確認されている。金属は宇宙の中で星たちの輝きが創り出した元素であるからだ。

以下に述べるように、金属からみると宇宙の歴史は金属元素を生み出す歴史でもあった。金属元素は、宇宙が生まれてから時間が経てば経つほど増えてきている。金属が宇宙に現れてきた歴史は、宇宙の老化の歴史でもあるようだ。豊かな金属元素を利用した地球文明は、太陽系が比較的金属に恵まれた宇宙の歴史の程よい時に生まれたことを示している。

まずは宇宙の誕生からお話しよう。何とんでも宇宙の営みに金属を創る性質が備わったことを理解するには、この世に金属の無かった宇宙誕生の時から知る必要があるからだ。

2. ビッグバン

20世紀になって大望遠鏡による宇宙の観測が始まると、銀河系の外にも星の集団である銀河が無数に発見され、遠くの銀河は我々の銀河系からの距離に比例した速度で離れつつあることが確認された。これは宇宙の膨張を示すものだった。

宇宙の膨張は過去へさかのぼると収縮し、現在観測できる宇宙も無限に小さな世界になってしまう。この点のような世界から宇宙は爆発的に誕生し、膨張を続けてきたと現代の多くの科学者は信じている。最初の爆発のイメージを表現したビッグバンという言葉で宇宙誕生を指すことも多い。宇宙の歴史をビッグバンから考える宇宙論をビッグバン理論と呼んでいる。

ビッグバン理論によると、我々の宇宙は誕生後100分の1秒で、すでに現在の太陽系ほどの大きさに膨張していた。しかし、膨張を続ける宇宙は急激に冷えていき、初めは光だけが存在した世界にも、やがて原子を構成する基本粒子が姿を

* 日本放送協会解説委員室, NHK 解説委員(〒150-01 東京都渋谷区神南2-2-1)
Universe and Metal; Yuichi Takayanagi(NHK, Tokyo)
Keywords: universe, metal, supernova, nuclear fusion, big bang
1997年6月16日受理

宇宙望遠鏡がとらえた星の誕生現場。柱のような暗黒星雲の先端部、小突起中に星形成が進んでいる。この星雲中にも金属元素が含まれているはずだ。

現す。そして宇宙誕生後、数十万年もたつと温度は数千度にも下がり、基本粒子は安定した原子の世界に落ちていった。

この宇宙誕生の際に現れた原子は、理論によると質量比で水素が75%、ヘリウムが25%ほどである。この数字は観測からも確認されており、ビッグバン理論の確かさを示す事実の一つになっている。

元素の中で水素から鉄までは、原子核を構成する基本粒子は融合することによって核エネルギーを放出できる。そこで核融合は条件さえ許せば自然に進行して行く。しかし、重い原子核が融合されるには、原子核を構成するプラスの電荷を持った陽子や、陽子と中性子のグループが電気の反発力に打ち勝ち、強い核力で結びつく距離にまで接近する運動を可能とする高温状態が必要だった。

誕生後の宇宙では、原子核の構成粒子が出現し、水素原子が生まれた頃には、宇宙の温度が低くなっており、水素からヘリウムへの核融合がようやく一部進行しただけで、それ以上は進まなかったのだ。

もっとも、もし宇宙の誕生後、もっと膨張がゆっくりとしており、さらに核融合が進行する高い温度が保たれたとすると、場合によっては核融合が完了し、宇宙は鉄の原子で満ち溢れた世界になっていたかもしれないという。膨張する宇宙の中で星を生み、太陽系をもたらし、宇宙は生まれなかったかもしれないのである。我々は金属元素の登場が遅かった宇宙に住んでいることを感謝すべきであろう。

3. 星の輝きと元素合成

鉄までの核融合は核を構成する陽子や中性子が結びつけば自然に進行する。その結びつきには核を構成する粒子たちが接近できる高温状態が必要となる。それを実現できたのは星の内部だった。以下星たちの元素合成を眺めてみよう。

ビッグバン後の宇宙にできたヘリウムは質量比で25%ほどだといった。ヘリウム原子の質量が水素原子のおよそ4倍であることを考えると、数の上からは、宇宙はほとんど水素原子に占められていたわけだ。これは今の宇宙でもそんなに変わらない。宇宙に広がる星も銀河も大きな天体はすべて水素ガスが大部分を占めている。現在進行中の星の中での核融合も大多数の星で水素からヘリウムへのものがほとんどだ。

星の中で核融合はどう進行するか、それを理解するには星の誕生から考えてみるとよい。宇宙の膨張が続き、宇宙の温度が下がるに連れ、水素原子は互いに結びつき分子となった。ビッグバンの際の温度や密度の揺らぎが種となって巨大な分子の雲があちこちに生まれたようである。

この宇宙に広がったガス物質を支配した力が重力だ。原子の内部で働く力や、電気・磁気による力に比べ、重力は力が及ぶ範囲も、力が働く物質の種類にも制限はない。重力こそ宇宙のすべてに働く力と言える。

分子の雲は重力で収縮を始め、不安定なものは分裂し、その中で、密度の高い部分は周りのガスをさらに引き寄せ、大きく成長して行った。ランダムなガスの運動は整理され、巨大なガスの回転円盤が、そういう場所にはいくつも形成されたのである。この円盤状のガスの中心では、一段と物質の集中したガス球が成長し、周りから独立して収縮を続ける。これが太陽のような星の誕生の姿である。

星を形成するガスは収縮すると重力エネルギーを失っていく。放出されたエネルギーの半分はガスの温度を上げるのに使われる。収縮の大きな中心部のガスほど高温状態になるわけだ。こうしてガス球の芯の部分の温度が1500万度に達すると水素の核融合が始まる。これは4個の水素の原子核が融合して1個のヘリウムの原子核になる反応だ。この核反応を水素燃焼という。

ガス球の芯の部分で水素燃焼が始まると、星を造るガス球の重力収縮は水素燃焼で生じた放射の圧力で止まる。星は安定し、内部からの核エネルギーを表面から光の形で放ち輝き始める。こうして星の一生では一番安定した水素燃焼の時期が続くことになる。私たちが目にする星はほとんどこの中に含まれている。

やがて、水素燃焼によりヘリウムが芯の中に溜まると、水素燃焼は、その表面に限られて行く。この段階の星は中心にヘリウム、周りには水素と二層の球殻構造になっている。

こうして成長したヘリウムの芯は、ある程度大きくなると重力収縮を始める。しかし、今度も芯の中心部の温度が上昇し、1億5千万度に達すると3個のヘリウム原子核が融合して炭素の原子核に、さらに炭素の原子核とヘリウムの原子核

が融合して酸素の原子核になる核融合反応が始まる。これをヘリウム燃焼という。

ヘリウム燃焼が進むと、水素燃焼の際のヘリウムと同じく、燃焼で生じた炭素や酸素が星の中心部に溜り、炭素と酸素が新しい芯を形成する。この芯も大きく成長すると自分自身を支えることができなくなり、再び収縮を始める。こうして炭素と酸素の芯の収縮により中心部の温度はさらに上昇する。そして、7億度にも達すると、2個の炭素原子核が衝突する機会を持ち、融合されてネオンやマグネシウムの原子核が形成される。これを炭素燃焼という。

炭素燃焼が進むと、星の中心部の芯の成分は、それが生み出す酸素、ネオン、マグネシウムとなる。この芯の部分もさらに重力収縮と核融合を交互に進める。こうして星の中心部には次々と重い元素でできた新しい芯が中心に形成される。

星は成長し、年をとるにつれ内部で核反応を進め、その結果、多層の「玉ねぎ構造」と呼ぶ芯を生み出していくのだ。

この芯の形成は核融合で核エネルギーを生み出せる鉄の原子核が形成されたところで終わる。鉄より重い原子核を形成するには逆にエネルギーを与えてやる必要があるからだ。

こんなわけで、星の内部では鉄までの元素が合成され、玉ねぎ構造に分布する。しかし、これは鉄の原子核が融合されるまで重力収縮が続けられる大質量の星の場合である。

太陽のような星の場合、水素燃焼の後、ヘリウムの芯が収縮すると外側の水素の層は膨れ上がり、核融合はヘリウム燃焼で終わる。それまでに生まれた炭素と酸素の芯以外の外層は宇宙空間に流れ出し、芯は白色わい星という小さな星として残る。星は生まれつき持っている質量によって、その死の迎えかたが大きく異なるのだ。

ここでは宇宙における金属の出現に大きく関わっている太陽よりも10倍以上も重い星について考えていこう。この場合、星の内部は最終的に中心から鉄、珪素、酸素とネオンとマグネシウム、炭素と酸素、ヘリウム、そして星形成時の水素を主とした外層が玉ねぎの層のように形成される。そして、重力収縮を支える核融合エネルギーが利用できなくなると星は重力崩壊して死を迎えることになる。星の内部で造られた金属元素は、この巨大な星の爆発で宇宙に登場してくる。この爆発では鉄よりも重い金属元素が生まれるところが面白い。

爆発の際発生したエネルギーがさらに鉄より重い元素の核合成にも利用できるからだ。

4. 超新星爆発と重金属

巨大な星が重力崩壊で爆発するとき、宇宙に放出するエネルギーはすさまじい。遠い銀河の片隅に天文学者が発見するこんな星の爆発を超新星と呼んでいる。昔から、夜空の一角に突然明るく登場する天体は新星と呼ばれてきたが、超新星は桁違いに明るいので超をつけられた。実際、明るさが最高の時、それは属している銀河全体の明るさにも匹敵している。

超新星の爆発のタイプは大きく分けると二つになる。大質

量の星が中心に鉄の芯を造り、核融合によるエネルギーが絶たれて重力崩壊するタイプ、比較的軽い星の炭素燃焼時に核反応が暴走して、その際発生する核エネルギーが星全体を飛ばしてしまうタイプだ。

いずれにしても爆発の際に生ずるエネルギーは、崩壊する星の内部で急激に核反応を進める。現実には、鉄より重いニッケルが大量に形成されることが観測されている。特に重力崩壊で爆発するタイプでは、鉄の芯で発生した衝撃波が引き起こす高温高圧下の核反応が進行する。現在宇宙にある鉄よりも重い元素はすべてこの爆発時に合成されたものだと考えられている。

宇宙では鉄よりも重い元素の合成量は、鉄よりも軽い元素の合成量よりもずっと小さい。それだけに観測では超新星爆発時も比較的目立つ、ニッケル、コバルトの報告がほとんどだ。しかし、超新星爆発による元素合成はこれ以外の鉄より重い元素の合成にも重要な役割をになっていることは間違いない。

超新星爆発のもう一つの重要性は、宇宙の物質循環に果たす役割だ。銀河の中の星は星間のガスから生まれ、輝きを失うと星間ガスに戻る。超新星爆発は星を星間ガスへ戻す重要な過程でもある。この際、星が合成した元素、爆発時に形成された元素が宇宙空間に撒き散らされる。こうして宇宙には金属元素が増え続けることになった。

5. 宇宙の金

昔読んだSF小説に、超新星爆発の現場に金を集めに行く宇宙海賊の話があった。これだけで、この話は荒唐無稽の感がするが、鉄より重い元素である金は当然超新星爆発のとき形成されるのだからアイデアは面白い。現実には金は超新星爆発のときどのように形成されるのか、核合成のタイプの分類に金が記されている本も見つけたが、その詳細は分からなかった。

地球上で経済的に有望な金鉱としては、1トン当たり20グラムの金を含めばよいという。地球表面での金の含有量は1トン当たりおよそ1000分の1グラムである。地球内部も含めた平均含有量は隕石から推定すると表面の100倍から200倍になるという。宇宙ではどうか？

太陽が放つ光の連続スペクトル中には、太陽大気中の元素による吸収が複雑に見られる。この中に金の吸収線がひとつ確認されている。太陽大気中には確かに金が存在しているのだ。今のところスペクトルだけでは金の存在量は推定できない。しかし、金とニッケルの相似性と隕石での存在比を使い、ニッケルの吸収線研究の結果を当てはめると、太陽での金の存在量が推定できるという。それによると、太陽では1トン当たり1ミリグラムほどになる。

金は太陽でも大変な貴金属になるようだ。なぜこんなに宇宙で金は希少な存在なのか？ 恐らく、目立つとは言え超新星爆発は大変まれな現象で、宇宙の金もなかなか急には多くならないのであろう。

太陽の光のスペクトルで金の吸収は目立たないが、鉄の吸

収は比較的目立つ。これは太陽だけではない。銀河系の星の中には、その星の大気中に鉄が含まれていることをはっきりと示すスペクトルを持つものがほとんどだ。

こんなわけで、星の大気組成で鉄は大変よく調べられている元素である。例えば、天文学者は鉄の吸収の強い星をメタル・リッチと呼び、鉄の吸収が少ない星をメタル・プーアと呼んでいる。プーアとリッチの差を鉄のデータから金に換算した科学者の推定値がある。それによると太陽はメタル・リッチな星であり、メタル・プーアな星の金の含有量に比べて3万倍以上も金を保有しているということだ。

6. 銀河系と金属

宇宙誕生以来、ガスから星が生まれ、星の内部で重い元素が合成され、超新星爆発などでそれらの重い元素はまたガスに戻されてきた。星の大集団である銀河は星とガスの共存する物質循環の場でもあった。

超新星爆発を起こすような太陽より10倍も重い大質量の星は、燃料の消費が激しく数千万年で鉄の芯を形成し、爆発を起こして寿命を終える。超新星の世代交代は我々の太陽の寿命が100億年といわれているのに比べて実に早い。これは銀河のガスの中に超新星爆発がもたらす重い元素がどんどん溜まっていくことを示している。銀河はどんどん金属の豊かな世界に変わって行くのである。我々の銀河系も状況は同じだ。

太陽の大気中にはすでに述べたとおり、鉄も金も含まれていた。これは、太陽系を生み出したガスとチリの世界に、超新星が何世代にも渡って、星の内部で合成した重い元素や金属元素をすでもたらしていたことを物語っている。

銀河系を構成する星の中で、年老いた星が球状に集まる星団ある。この星たちは銀河系の中で最古の星だと考えられている。この星たちが一番メタル・プーアな星たちに当たるだろう。しかし、この星たちの大気にも鉄は存在する。

我々の銀河系がどうしてこんなにも急速に金属元素を手に入れたのか、まだよく分かっていない。銀河系が生まれた初期の時代、超新星爆発が集中した時期があったという考えも提案されている。

7. 太陽系と金属

我々の太陽系内の物質中の元素組成は、太陽や木星の大気に含まれる揮発性の元素を除くと驚くほど共通であることが分かっている。それはもちろん太陽系そのものが同じガス雲から生まれてきたからである。地球や木星など現在の太陽系内の多様な世界はどのように生まれてきたのか、太陽系の歴史からみて行こう。

星の誕生について述べたとき、星はガスの雲の巨大な回転円盤の中心に誕生した。太陽もそうだった。そして、太陽を取り巻く惑星系は周りに残されたガス円盤から形成されたと考えられている。中心の太陽と周りに残されたガス円盤の間には様々な相互作用があったに違いない。

太陽系の誕生は、隕石や月の古い石などに含まれている放射性元素の崩壊の割合から、およそ46億年前だと考えられている。この頃、ガス円盤の中心では太陽の原子の火が燃えはじめ、周りのガス円盤の揮発性成分は、太陽近くでははやばやと失われていったと想像されている。このため円盤状に集中した物質も太陽からの距離によって違いがあった。太陽に近い部分では高温で水の氷は存在できず岩石や金属が、現在の木星の辺りから外側では、これに水の氷が加わることになった。最初にガス円盤の中から生まれた小さな天体を微惑星といっている。無数の微惑星が衝突し、合体することで大きく成長し、生まれたのが惑星だった。

岩石や金属を多く含む微惑星からは水星、金星、地球、火星といった大地をもつ地球型の惑星が誕生した。岩石と金属のほかに氷を持つ微惑星は、これらの素材が持つ性質を組み合わせで大きく成長し、残されていた円盤部のガスを太陽系の内外から集め、木星や土星のような巨大ガス惑星となる。

そして、太陽からはるか離れた円盤部の外側では氷の多い微惑星が集まった世界が残ったわけだ。これらの小天体はその後時折、太陽系内部へ落ちてきている。隕石の衝突クレーターやすい星の出現はこうした小天体の訪れによって生まれている。

太陽系の歴史の中でこのようにガス雲は多様な天体に分化していったのだ。その中で、地球は太陽から近い位置を占め、岩石と金属に恵まれた惑星となったのである。そして、その後の地球の歴史は、人類にとって金属を使用しやすい環境をさらにつくりだしたといえる。

8. 地球と金属

46億年前、微惑星の衝突と合体によって生まれた地球の表面は、絶え間ない衝突で発生した熱によって岩石物質は溶かされ、いわゆるマグマの海に覆われていた。やがて衝突が少なくなるとマグマは冷え、一部の岩石天体や氷天体が持ち込んだ水は水蒸気として大気中に増えて行く。この水蒸気は、地表の温度が下がると、大気中で雨適となり、地球全体が大雨に見舞われ、海が誕生した。以来、海は大気とともに複雑な気象現象を地表にもたらすことになった。

地球内部では、深部の岩石中の放射性元素が熱をもたらし、重い鉄やニッケルが集中した核と内部の熱を地表に運ぶマントルと呼ぶ流動性をもつ岩石の対流層が生まれた。マントルの対流はやがて地表の薄い地殻を乗せたプレートをつくりと動かす仕組みを発展させた。この結果、地表は海洋や大陸を乗せた沢山のプレートで覆われ、以来海洋や大陸は数十億年昔からこのプレートに運ばれて分断や移動を続けている。地球表面は火山活動と風化作用が絶え間なく続く世界となった。それは今も地表近くの岩石や金属分布を変えている。こんな環境が金の鉱脈まで生み出したといえる。地球は、その歴史を通して金属の濃縮を人間に用意したわけだ。

人間は今、文明の力で地表の金属分布を変えつつある。地球の文明と宇宙の金属の関わりに新しいドラマを期待したい。