

愛知の大地のなりたち 2 恒星の誕生から地球の形成

恒星は集団をつくる傾向があります。その規模によって星団、銀河、局部銀河群、銀河団、超銀河団、宇宙の大規模構造と呼ばれます。「天涯孤独の星」というのはほとんど存在しないようです。前号で紹介したように、宇宙の誕生から数億年後に恒星は誕生したようです。今回は恒星の誕生から地球の形成までの話です。

(1) 天体の集団

私たちが住む地球は太陽系に属しており太陽系は銀河系（天の川銀河*）と呼ばれる銀河に属しています。宇宙には膨大な数の銀河が存在していて、それらは互いの重力の影響によって銀河の集団を形成しています。自身の重力で拘束された数十個程度の銀河の集団を銀河群、より大規模な集団を銀河団といいます。

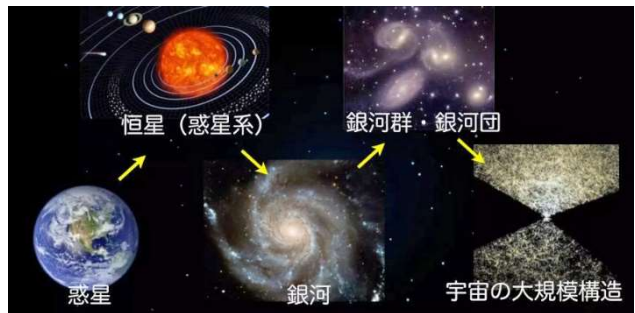


図1 宇宙の階層構造 (URL1)

太陽系が属している天の川銀河も 40-50 個ほどの銀河とともに局部銀河群をつくっています。局部銀河群も、より大きなスケールで見た時にさらに大きな銀河の集団の一部にすぎず、銀河群や銀河団の集合体である超銀河団を形成しています。

銀河系は棒渦巻銀河で、銀河系の中心には超大質量ブラックホールと考えられる非常に大きな質量を持つ小さな天体が存在しています。太陽系はオリオン腕と呼ばれる腕に属し、銀河中心から約 8 kpc の距離にあります。太陽系が銀河系内の軌道を一周するには約 2.25 億年~2.5 億年ほどかかるようです。この局部銀河群はおとめ座超銀河団の一部となっています。

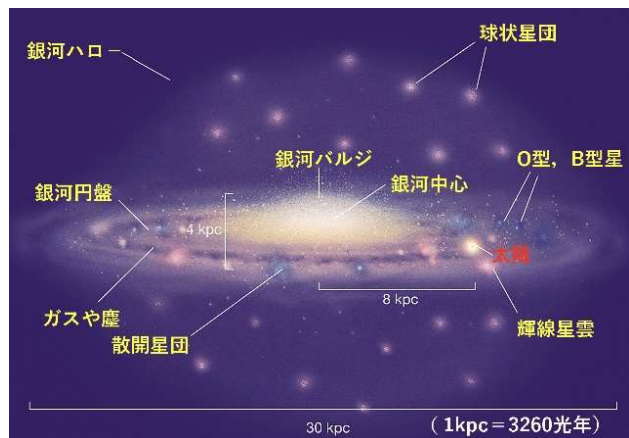


図2 銀河系 (URL2)

***天の川銀河**：宇宙にある多くの銀河の中で太陽系を含む銀河を銀河系と呼びます。他の銀河と区別するために、銀河系のことを天の川銀河と呼ぶことが増えています。

***アンドロメダ銀河**：以前はアンドロメダ星雲と呼ばれていましたが、ガス星雲と異なるためアンドロメダ銀河と呼ばれます。アンドロメダ銀河は、銀河系、さんかく座銀河などと局部銀河群をつくっています。

***輝線星雲**（図2の中）：さまざまな色の光を放出している電離ガスからなる天体でオリオン大星雲など。

***銀河ハロー**（図2の中）：銀河全体を包み込むように希薄な星間物質や球状星団がまばらに分布している球状の領域。

(2) 星の種族 (stellar population)

銀河系内の恒星はそのスペクトルの違い（＝化学組成や金属量の違い）によって年齢が古いものと新しいものに分けられ星の種族*と呼ばれます。比較的年齢の新しい恒星を第一種族、古いものを第

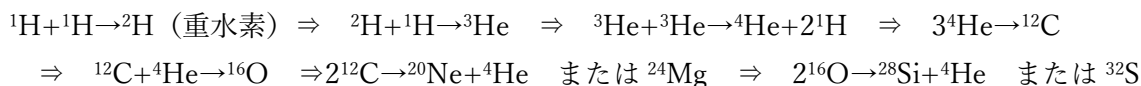
二種族と呼びます, その主な判断材料は, 恒星をつくる元素の違いです。次項で触れますが, 恒星の化学組成は水素とヘリウムという軽い元素からはじまり, 次第に重い元素(金属*)が造られます。したがって, 金属の含有量が増加するにつれて年齢が若くなる傾向があります。1978年には, 第二種族よりもさらに古く, 宇宙で最初に形成されたと考えられる星を種族 III と呼ぶようになりました。初代の星の質量は太陽の数百倍であったと推測されています。第一種族の恒星は超新星爆発の残骸の中から形成されるため同じような年齢の散開星団をつくります。太陽も第一種族の恒星で, 比較的重い元素を多く(1.4%)含んでいます。散開星団の星はそれぞれ遠ざかっていきますので, 太陽の誕生当時は周辺に同じ年齢の星がたくさんあったと考えられます。

*種族: 紛らわしいのですが, 種族を示す数字は, 恒星形成の順とは逆になっています。第一世代の恒星が第三種族で, 第三世代の恒星が第一種族です。

*金属: 天文学の世界ではヘリウムよりも重い元素を総称して「金属」と呼ぶことがあります。したがって炭素も酸素も金属として扱います。

(3) 恒星の進化と様々な元素の形成

現在, 多くの元素が知られていますが, 宇宙誕生の初期には水素とヘリウムの原子だけでした。図3で見られるように水素とヘリウムの組成がずば抜けて多いことがわかります。元素の生成は恒星の進化によるもので, 次々と起こる核融合反応によって新たな元素が誕生します。宇宙に広がる星間ガスに何らかの原因で密度の高い部分ができると, その中心部で核融合が始まります。大雑把にまとめると,



のように順に重い元素が造られます。しかしこの核融合反応は ^{56}Fe (鉄) の形成までで, それより重い元素の大半は, 星の内部や超新星爆発の際に合成されたと考えられています。炭素 ^{12}C から先の元素では, 酸素 ^{16}O , ネオン ^{20}Ne , マグネシウム ^{24}Mg など, 質量数が4の倍数となる元素の組成が高い特徴があります。これはそれぞれの原子核が ^4He を捕獲して成長することが原因です。さらに, 鉄は周囲に比べてきわめて高い組成をもっています

(図3)が, これは, 鉄がもっとも安定な原子核で, 超新星爆発で多量に放出されるためです。鉄よりも重い元素は, 原子核どうしの結合では合成されにくく, もっぱら原子核が中性子を捕獲する反応で成長します。

恒星は, その質量に応じて中心部から順に核融合反応が進みます(図4)。太陽が燃えている(=

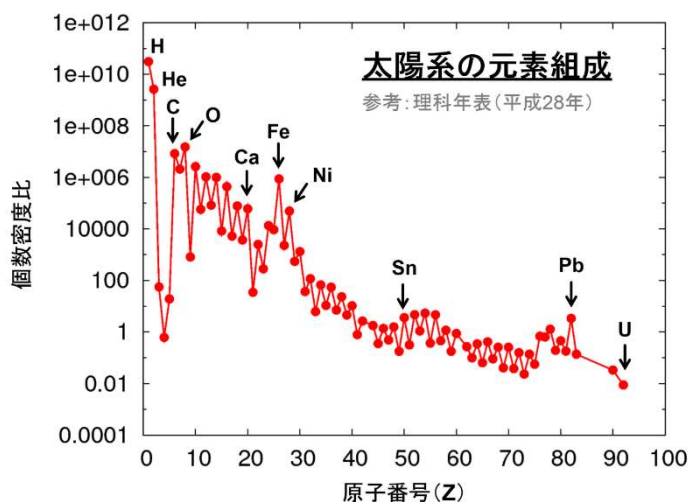


図3 太陽系の元素組成(URL3)

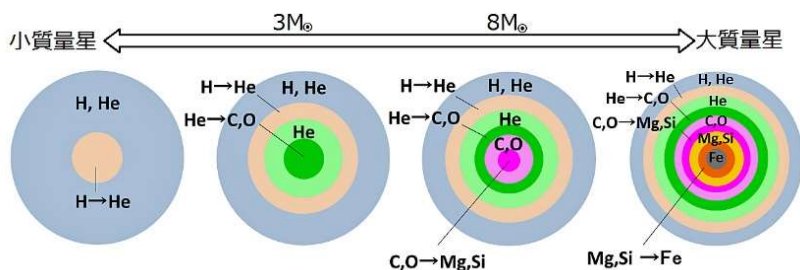


図4 質量の違いによる恒星内部の元素組成 (URL4)

核融合反応が起こっている)のは中心部(約1600万K)のみ(図4の左端)で、その時に発生する熱が太陽表面(6000K)に伝わり、太陽放射として地球にもたらされています。

(4) 恒星の一生

宇宙空間には、全体にわずかながら星間物質と呼ばれる物質が漂っています。その多くは星間ガス(分子雲)と呼ばれ水素やヘリウムを主体とした気体です。宇宙に広がる星間ガスに何らかの原因(近くで起こった超新星爆発の衝撃波など)で密度の高い部分ができると、その部分は重力が強くなり、その重力によって周囲の物質がさらに集まってきます。分子雲はいくつかの塊に分裂しながら、収縮と同時に回転を始めて、円盤形の原始太陽系星雲(原始惑星系星雲)になっていきます。そしてその中でさらに塊

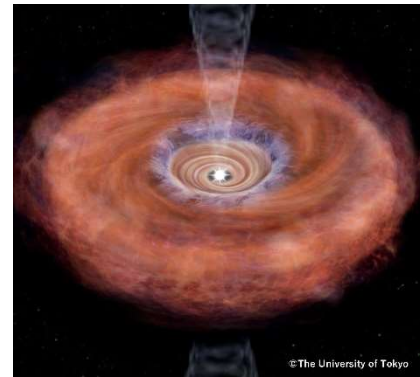


図5 原始星のイメージ図(URL5)

に別れていき、中心は恒星へと成長を始めます。この時に、重力による位置エネルギーが熱に変わり、温度が上昇して、熱の放射が始まります。これが原始星です。周囲からさらにガスが集積してくるため、降着円盤が形成され、取り込まれきれなかったガスは、円盤に垂直な方向へ宇宙ジェットとして放出されます(図5)。原始星は主系列星よりも明るく輝いていますが周囲を濃いガスとダストが覆っていますので、可視光では観測できず、主に赤外線や電波で観測されます。原始星は温度が低く、明るく赤い色で、半径の大きい星ですが、次第に安定した輝きと大きさを持つようになります。原始星は徐々に収縮して中心の温度を上昇させていきます。中心の温度が1000万Kを超えると水素がヘリウムへと変換される核融合反応が起こり始めます。核融合反応によって発生するエネルギーによって収縮は押しとどめられて、星は主系列星という安定した状態の恒星になります。太陽は現在、この段階にあります。この後の恒星の進化はその質量によって異なります。中心部の水素がほとんどヘリウムまで反応が進むとその周囲の水素

に核融合反応がうつり、ヘリウムの核の質量は増えていきます。するとヘリウムの核は収縮し、温度が上がり、周り(外層部)の水素は、膨張し、星の表面温度は低下していき赤色巨星となります。質量が太陽のおよそ半分以下の恒星は赤色巨星にはならず、水素を消費し尽くして白色矮星となり一生を終えます。質量の大きな赤色巨星は、超新星爆発を起こし、星間物質に戻ったり、中性子星、ブラックホールなどの天体に変わります。太陽程度の星は超新星爆発を起こさないと考えられています。星の一生をまとめたものが図6です。一般に、質量が大きい星ほど寿命は小さい傾向があります。

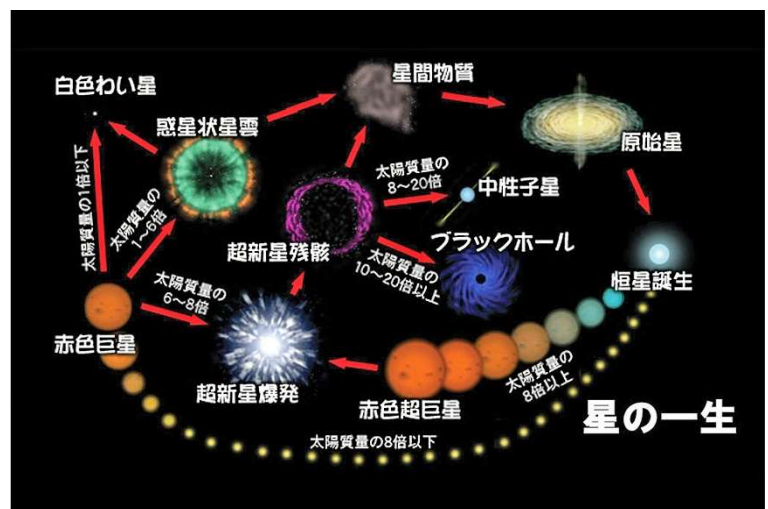


図6 星の一生(URL6)

に核融合反応がうつり、ヘリウムの核の質量は増えていきます。するとヘリウムの核は収縮し、温度が上がり、周り(外層部)の水素は、膨張し、星の表面温度は低下していき赤色巨星となります。質量が太陽のおよそ半分以下の恒星は赤色巨星にはならず、水素を消費し尽くして白色矮星となり一生を終えます。質量の大きな赤色巨星は、超新星爆発を起こし、星間物質に戻ったり、中性子星、ブラックホールなどの天体に変わります。太陽程度の星は超新星爆発を起こさないと考えられています。星の一生をまとめたものが図6です。一般に、質量が大きい星ほど寿命は小さい傾向があります。

(5) 太陽系と地球の誕生

太陽も星間ガスやチリが集まって生まれました。この大きなかたまりはしだいに重力によって収

縮し、さらに回転しているため、しだいに平たい円盤のようになっていきます。そして、中心にいちばん重いかたまりができ、まわりに薄いガスとチリの円盤ができます。これを原始太陽系星雲とよびます。中心のかたまりは原始太陽となり、残された円盤の中では星間ガスとチリがくっつき、を微惑星がつくられます。微惑星は互いに衝突することで、合体や破壊を繰り返しだいに大きなかたまりになって原始惑星となります。原始惑星は微惑星の衝突や、まわりのガスもひきつけて大きく成長していきます。原始太陽の近くでは、その光による圧力で水素や揮発性のガスが吹きはらわれ、岩石と鉄を主成分とした小さな惑星が残り、地球型惑星になりました。また、外側のガスが濃いところで成長した惑星は、軽い水素ガスを大量に集め（降着させ）木星型惑星になりました。地球型惑星は小さいために表面重力も小さく、ガスの降着に時間がかかりすぎたり、いったんとらえたガスを逃がしてしまうなどがおき、ガスをたくさん集めることができませんでした。また、天王星型惑星は惑星への成長が遅いためにガス円盤がその間に失われてしまったようです。こうして、太陽に近いところでは地球型が、太陽から遠いところでは天王星型が、その間では木星型の惑星ができました。隕石の年齢から太陽系が生まれたのは46億年前と推定されています。地球をはじめ太陽系の物質には鉄よりも重い元素が存在していることから、われわれ太陽系の材料となった元素は、超新星爆発によってまき散らされた元素がリサイクルされたものであることもわかります。さらに私たち人類もこれらの元素からつくられたと考えられますので、まさに人は「星の子」と言えると思います。

地球のもとになった地球母天体が成長するにつれて重力が大きくなると、微惑星の衝突速度が大きくなります。衝突のエネルギーによって、衝突地点の温度は上がり、揮発性物質も放出します。そして、衝突で放出された水（水蒸気）や二酸化炭素などは、原始地球を覆う大気になります。温室効果によって地表の温度は上昇し、岩石の融点を超えて、マグマの海（マグマ・オーシャン）が形成されました。密度の大きい金属成分は中心部に集まって、核になり、金属の核と岩石のマントルという、おおまかな成層構造ができます。グリーンランドで発見された38億年前の比較的変成度の低い堆積岩（礫岩）・縞状鉄鉱床・炭酸塩岩や玄武岩（枕状溶岩）により、この頃にはすでに、海や陸地があったことがわかりました。

引用・参考文献

在田一則ほか，2015，第2版 地球惑星科学入門.北海道大学出版会，447p.

谷合 稔，2014，地球・生命-138億年の進化. SBクリエイティブ，270p.

URL1：<https://www.slideshare.net/noinoi79528/rakuto-20140710> 佐々木貴教

URL2：<https://mymilkywayproject.weebly.com/>

URL3：<https://note.com/yoshikoba113/n/nad7af584758a>

URL4：https://storm.oldercloth.shop/index.php?main_page=product_info&products_id=22963

URL5：<https://www.nao.ac.jp/news/science/2014/20140213-alma.html>

URL6：<http://nico-wisdom.com/newfolder1/cosmo-story.html>