

特集記事・1

鉄～宇宙・地球・生命・文化・未来～

宇宙で最初の鉄はどのようにつくられたのか

How was Iron Synthesized in the Early Universe ?

吉田直紀

Naoki Yoshida

東京大学
大学院理学系研究科
教授

1 宇宙138億年の進化

最近の様々な宇宙観測の結果から、私たちの宇宙やその進化の歴史について多くのことが明らかになった。138億年前に熱い火の玉（ビッグバン）の状態で生まれた宇宙は、空間が膨張し全体がひろがるとともに温度は下がり、数分という限られた時間で水素やヘリウムなどの軽元素が合成された。膨張を続ける宇宙はやがて冷え切って、その後一旦闇に閉ざされるが、数億年ほど経つと最初の星々——ファーストスター——が誕生し、宇宙は再び光に満たされるようになった。そして星々の中では様々な元素が合成された。

このような話は遠い宇宙の出来事、あるいははるか昔の事で、確かめようもなく、単なる想像と大して変わりはないだろうと思われる読者もいるかもしれない。ところが、最近の宇宙観測技術の進歩は目覚ましく、宇宙進化の歴史のほとんどを、部分部分ではあるが直接見ることができる。ハワイ島に設置された日本所有のすばる望遠鏡は主鏡の口径が8.2メートルもあり、この巨大な目を夜空に向ければ、私たちから130億光年も離れた場所にある銀河の姿を捉えることができる。2010年代になってからは、宇宙衛星によってビッグバンの残光を観測し、生まれたての宇宙の姿もくっきりと見るできるようになった。現在の宇宙に飛び交う電波の大部分は宇宙マイクロ波背景放射と呼ばれるものであり、宇宙創生後37万年の頃に放たれた光が私たちのもとに届いている。この「晴れ上がり」と呼ばれる時期に、宇宙の温度は十分に下がり、電子などの光の進行を邪魔するものが原子核に取り込まれるために光は直進できるようになる。こうしてマイクロ波背景放射として138億年後のわたしたちにまで届く情報を全天にわたって詳しく解析することで、宇宙の中で物質がどのように分布していたか、すなわち宇宙の初期状態を知ることができる。

光（電磁波）の速さは有限であるために、宇宙では遠く

を見ることは過去の姿を見ることに相当する。したがって、130億光年も彼方にある銀河の姿を捉えるということは、130億年前の宇宙の様子をうかがい知ることでもある。また、それだけ広く宇宙全体を観測できるおかげで、宇宙の構成要素も判明した。私たちの宇宙は暗黒エネルギーという得体の知れないもので満たされており、割合にして7割も占めるこの謎の要素が宇宙空間をどんどんと膨張させている。しかも、その膨張する割合は過去から現在に向かって加速度的に速くなっているらしいのだ。一方、膨張を続ける宇宙のあちこちで物質が集まり、濃いガス雲を作り、星々が誕生した。それら星々や銀河が誕生する際には、宇宙を構成する残りの3割の大半を占める謎の物質ダークマターが重力源として大きな役割を果たした。ダークマターとは、電子や陽子など私たちがよく知る物質の構成要素とは異なり、未知の素粒子であろうと考えられている。星や星雲は通常物質から成るが、その総量は宇宙全体のエネルギー密度に換算してたったの5パーセントほどでしかない。宇宙のなかで重力をおよぼすもののほとんどは謎のダークマターであるらしい。本稿では、膨張宇宙の中でダークマターが果たした役割とともに、天体がどのように生まれたのかを解説し、元素の起源を明らかにしていこう。

2 「むらむら」から星の誕生

誕生したばかりの灼熱の宇宙は、物質と電磁波がいり混じった、どろどろで熱々のスープのような状態にあった。時間がたつとスープも冷めてしまうように、宇宙も誕生してから数十万年もたつとすっかり冷めてしまい、灼熱の状態ではなくなる。そして一旦闇にとざされ、暗黒の時代が訪れる。そもそも宇宙は暗闇に近いというイメージを持つ読者も多いかもしれないが、実際には宇宙は光に満ち満ちている。星々やブラックホール周辺から放たれる光や太古の宇宙の残光

などが重なり合い、現在の宇宙は電波からガンマ線に至るまで、ほぼ全ての波長帯で光っていると言ってもよい。最近ではニュートリノや重力波など、電磁波以外のものも次々と観測できるようになり、宇宙には実に様々なものがとびかっていることが明らかになった。それらはもともとあったものではなく、宇宙開闢以来、その中で生まれたなんらかの天体から放出されてきた。したがって、最初の天体が生まれる直前の宇宙は真っ暗闇だったことになる。より正確に述べると、熱いビッグバンの残光（宇宙背景放射）が漂ってはいたはずだが、人間の目に見える可視光よりも低いエネルギー帯にあったため、当時の宇宙は文字通り闇につつまれていた。

しかし、暗闇の中で何も起こっていなかったわけではない。始めに、ビッグバンは「さざ波」を残していた。宇宙誕生の際に物質はまったく均等には生成されなかったのだ。そのため、物質や電磁波の分布は場所ごとにほんの少しづつ異なっていて、色にたとえるなら濃い部分と薄い部分があちこちに入り混じった状態であった。湖の表面にさざなみがたっているように例えることもできるだろう。ただし、場所ごとの密度の差は平均の10万分の1程度であり、湖の例えを用いるなら、水深100メートルに対して高さ1ミリ(!)ほどのさざなみでしかない。この原始のゆらぎあるいは「むらむら」がいわば種となって、現在の宇宙の構造を形作ったと考えられている。わずかな違いといえども、濃い部分は少しだけ大きな重力をおよぼして周辺の物質をゆっくりと集め、さらに濃くなっていく。これを重力不安定性とよぶ。原始の密度ゆらぎが重力不安定性によってその振幅が増大し、いわば成長して大きなかたまりとなることで銀河などの天体を生み出した。このとき重力の源となるのは通常物質から成るガスではなく、未知の物質ダークマターである。

ダークマターの塊あり——これは現在の理論宇宙モデルの枠組みで天体形成を論ずる際に必須の考え方となっている。一般にどのような天体も、宇宙の中では極めて高い密度をもつ存在である。したがって、星や惑星が誕生するには、まずその材料となるガスをどうにかして大量に集めることが必要になる。

宇宙の始まりの頃にこの役割を果たすのがダークマターである。はじめにダークマターが自身の重力により集まり、かたまって重力の「器」をつくる。そして水素とヘリウムから成る始原ガスを引き寄せ、器の中で濃いガスが凝縮し、やがて星をはぐくむこととなる分子ガス雲を形成する（図1）。

宇宙がまだ暗闇につつまれていた頃、始原ガスが集積し、やがてファーストスターが生まれ、進化の後に超新星爆発をおこして最初の重元素を宇宙にばらまく。ここから“すべて”が——惑星系の誕生、そして最終的には生命の誕生が——始まる。ファーストスターはまるで伝説の英雄のような存在

だ。かつてどこかに間違いなく存在したはずだが、まだどのような観測によっても見つけられてはいない。はるか昔に姿を消してしまったのか、宇宙でまだ観測されていない場所に隠れているのかもしれない。

将来の観測による発見が待ち望まれるが、ファーストスターの正体に迫るため、理論的研究がとりわけ大きな役割を果たしてきた。それは次のような理由による。(1) 近年の宇宙マイクロ波背景放射の観測から、初期宇宙の状態が詳しくわかり、宇宙の構成要素や宇宙膨張の歴史がはっきりと定まった。標準宇宙モデルと呼ばれる、理論の枠組みが定まったのだ。(2) 宇宙初期の星形成に関わる物理過程は重力、気体力学、化学反応など数多いものの、それらはいずれも既知の物理であり、基本的には地上の実験室で確かめられたものばかりである。つまり、極言するならば、ファーストスターの誕生は、現代物理学を結集すれば明らかにできるはずだ。

私たちの研究グループは、この問題にスーパーコンピューター・シミュレーションを使って挑んだ。ガスの中で起こる化学反応などの関連する基礎過程をすべて直接的に取り入れ、コンピューター上に数式どおりに表現するという、手間はかかるが確かな結果を得ることができる方法を採用した。従来の星形成や銀河形成のコンピューター・シミュレーションでは、宇宙に漂う星間ガスがどう変化するかについて、いくつかの仮定をおき、簡潔なモデルにおきかえて与えていた。いわばガスの進化の道筋そのものを入力していたことになる。私たちの計算では逆に、やがて星となるガスの進化は膨

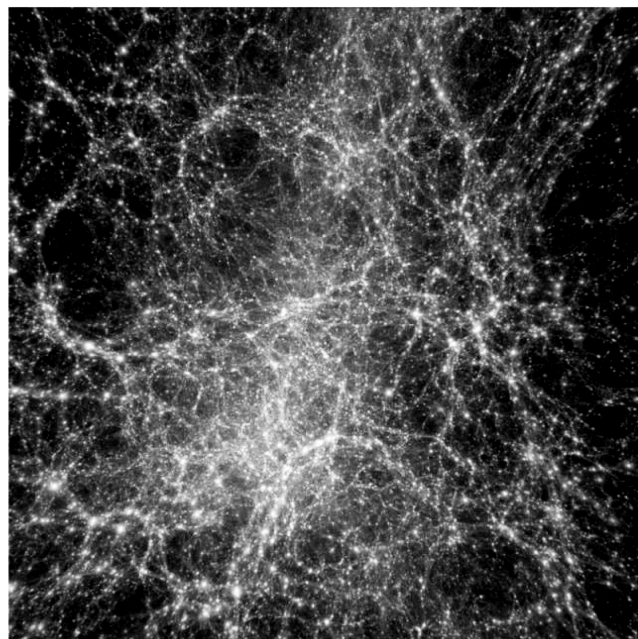


図1 スーパーコンピューターシミュレーションで再現した宇宙のダークマターの密度分布。明るい部分にはダークマターが集まっており、その強い重力により周辺のガスを引き寄せ、ガスは星や銀河の材料となる。

大な計算の結果（出力）である。ガス中におこる化学反応や放射輸送過程をすべて考慮し、次にどのような密度、温度になるのかを逐一計算した（図2）。そうすれば自然に誕生する星の姿を「観察」することができる。

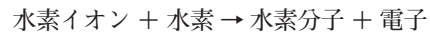
さて、ある程度ガスを集めてくれば、その先はガス自身の重力により密度がどんどん高まるものと期待するかもしれないが、それは天体形成のほんの初期段階にすぎない。ビニール袋に入れたガスを押しつぶそうとすれば分かるが、圧縮すればするほど反発力すなわち圧力が高まり、ガスの密度を一方的に上げることは容易ではない。ガスが自身の重力によって凝縮し、高密度になるためには、その熱エネルギーを放出して圧力を下げなくてはならないのだ。高密度高温のガスが冷えて高密度「低温」のガスになることで密度の高い天体を生み出すようになる。星間ガス中では、放射冷却と呼ばれる過程によりエネルギー放出が可能となる。ただし、放射冷却を効率よくすすめるには、まず媒体となる分子を生成しなくてはならない。

ビッグバンの際に生成された物質は、膨張しながら冷えていく宇宙の中でやがて安定な陽子と電子となるが、宇宙が高温の間はそれらがばらばらに存在するプラズマ状態にあり、光は電子と頻繁に衝突する。光はまっすぐに進めないため、いわば宇宙全体が曇った状態にある。ビッグバンから37万年ほど経ち、さらに宇宙の温度が下がると、陽子と電子が結合し、光子が直進できるようになって宇宙は晴れ上がる。このときに電子のうちほんのわずかな割合のものは、膨張を続ける宇宙の中で陽子と出会うことができず、薄くひろがって漂うことになる。

さて、初期宇宙で重要な化学反応は、水素分子を生成するものである。宇宙の晴れ上がりの後に始原ガス中にわずかに残された電子を媒体とする水素イオン生成反応



と、そうして生成された水素イオンに別の水素原子がぶつかっておこる分子生成反応



によって水素分子がつくられる。この一連の反応の前後で電子の数は変わらないため、電子は単に触媒としてはたらくのみであることがわかるだろう。さて、低密度のガス中にこうして出来た水素分子はほとんどが回転も振動もしていない状態（基底状態）にある。たまに周辺の水素原子と衝突した際に分子は回転し、やがて自発的に基底状態へともどる変化を通して光子を放出する。結果としてもともとガスがもっていた内部エネルギー（水素原子および分子の熱運動エネルギー）を少しだけ失うのだ。

こうしてゆっくりと光（赤外線）を放ちながら冷えることで、ガス雲は徐々に収縮し、全体のサイズは小さくなるとともに中心密度は増加していく（図2）。中心部の密度は、はじめの薄いガスの状態から100億倍のそのまた100億倍にも増大する。そして中心部分がちょうど水の密度と空気の密度の間くらいになったとき、とうとうガスの圧力が自身の強い重力と釣り合うようになる。つまり、サイズと形を保った天体（原始星）が誕生するのだ。

原始星はいわば星の種である。まわりには大量の温かいガスが存在し、それらが中心にむかって落ち込んでいくため、この小さな星の種はすぐに成長し、自ら輝く恒星になる。実際にスーパーコンピューターシミュレーションを行って、原始星の進化を詳細に調べたところ、最終的には質量がおおよそ太陽の100倍以上にもなることがわかった。どうやら初期宇宙の星は小さく生まれて大きく育つようだ。構成元素として水素とヘリウムだけしか含まないファーストスターの中で核融合反応がすすむためには星全体が高温にならなくてはならないため、その表面温度は高く、ファーストスターは青白く輝く。質量が太陽の100倍というのは明るさでは太陽の百万

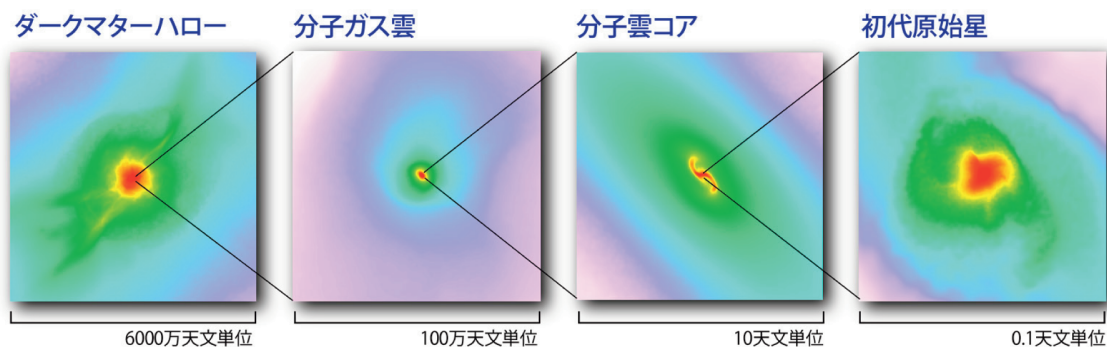


図2 ファーストスター周辺のガス分布。左から右に中心部分をクローズアップ。1天文単位とは地球と太陽との距離で定められ、およそ1億5000万km。左から順に巨大な暗黒物質の塊（ダークマターハロー）、その中央にできた分子ガス雲、その高密度中心部、そして一番右のパネルの赤い部分が生まれたばかりの原始星で、その質量はまだ太陽の100分の1でしかない。

倍以上にもなる。宇宙がまだ数億歳という若さの時に、猛烈に輝く青白いファーストスターが闇を照らし出し、暗黒時代に終わりを告げたのだろう。さらに、ファーストスターは暗黒の宇宙に光を灯すだけではなく、その内部で様々な元素を合成してやがて宇宙空間に放出する。

③ 星の進化と超新星爆発

星の明るさや寿命などは星の質量でほぼ一意的に決まる。これは、星は単に高温のガス球であるために、質量以外に特徴づける量がないからである。星形成の理論や私たちのコンピュータシミュレーションから、宇宙の始まりの頃は、星が大きく育つ環境が整っていたと分かってきた。面白いことに、宇宙初期には、炭素や酸素などの様々な元素が存在しなかったため、やがて星となるガスには複雑な分子や、ダストと呼ばれる重元素があつまった微粒子が含まれず、そのためガスが熱エネルギーを失う手立てがなかった。高温を保つガスは急速に収縮して大きな質量の星が生まれやすかったということになる。

太陽よりも何十倍も重いような星の中心部は1000万度以上もの超高温になっていて、核融合反応が猛烈なスピードですすむ。そのため寿命は数百万年程度ときわめて短い。人間の一生に比べれば途方もない長寿命だが、たとえば100億年以上も輝く太陽に比べれば、数百万年で死を迎える大質量星は太く短い一生を終えることになる。太く、と書いたのは、

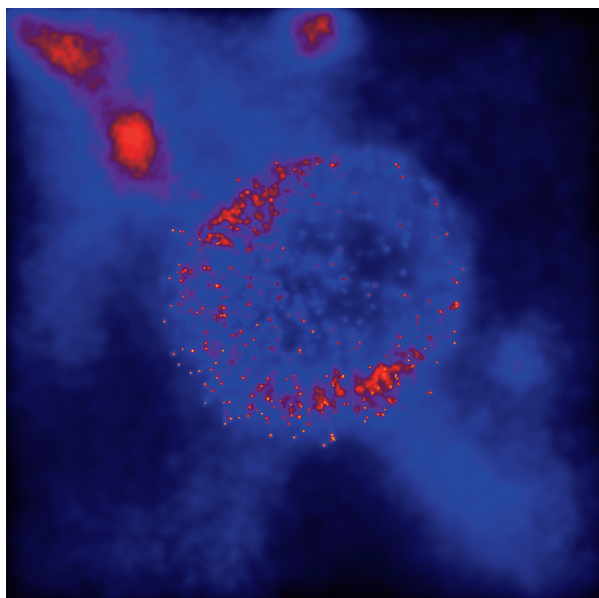


図3 太陽の200倍もの質量をもつ星の最後。対消滅生成不安定型超新星という大爆発を起こし、猛烈に明るく輝くと考えられている。星の内部で合成した鉄やケイ素などの重元素を一気に宇宙空間へばらまく。図中央付近のつぶつぶ状のかたまりには重元素が大量に含まれる。

最後の瞬間までに豊富な元素を合成するからである。星の中心にある水素原子核にとっては、単体の核子であるよりもより重い原子核として結合した状態にある方が核子あたりのエネルギーが低いため、全体としては核融合反応が進むとともに、重い原子核が割合として増えるよう変化していく。星の中心でははじめに水素からヘリウムを合成する反応が進む。現在の太陽もその真っ最中であり、核融合が進んでいるおかげで安定して光り輝いていると言えよう。

はじめは水素とヘリウムだけから成るガスから誕生したファーストスターの中では、水素からヘリウム、炭素や酸素、ケイ素そして鉄といった重元素が次々に生成され、星の進化の最終段階に起こる超新星爆発（この際には短時間で一気に重元素合成が進む）により宇宙空間へばらまかれる（図3）。私たちの体を構成する元素はもちろんのこと、地球上に存在する元素のほとんどはここで説明したようなプロセスを何度も経たのちに、わたしたちの目に触れる全てをつくっている。目の前の物質の起源を問うと、遠くの星の誕生に結びつくとはとても興味深い。

④ 最初の鉄

最後に、宇宙最初の鉄が生まれる瞬間を実際に見ることができそうだという期待を述べて話をしめくろう。ファース

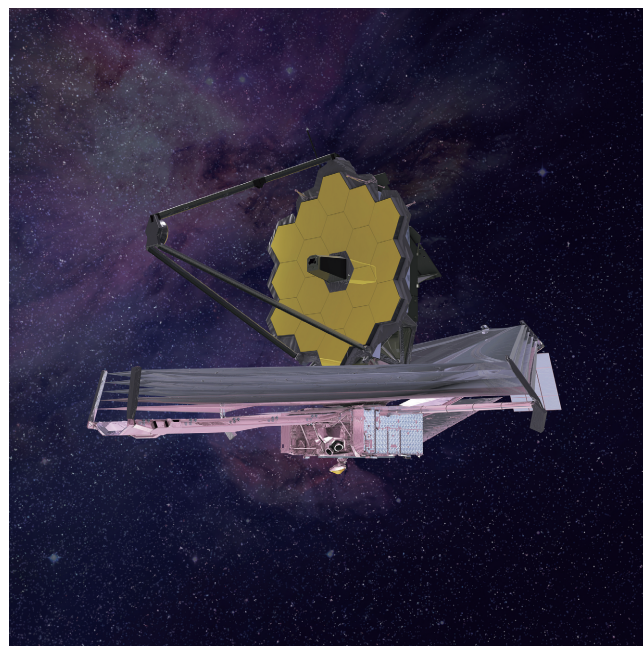


図4 米国NASAが2019年に打ち上げを予定しているジェームスウェッブ宇宙望遠鏡。口径6.5メートルの主鏡は金でコーティングされており、赤外線をつめる効率が高められている。遠方の天体を探索するのに最適の宇宙望遠鏡である。

出典：<https://www.flickr.com/photos/nasawebbtelescope/16865135741/in/album-72157624413830771/>

トスターの探索は21世紀の天文学の最重要事項の一つであり、この先10年で大きな進展が予想される。アメリカの次世代宇宙望遠鏡ジェームスウェッブ宇宙望遠鏡（JWST：図4）は、宇宙最初の日体からの光を捉えることを主要な目標に掲げている。2019年打ち上げの予定である。残念ながらファーストスターがいくら大きく明るくとも、個々の星からの光を捉えることは、次世代の望遠鏡でも難しいと考えられている。しかし、最後の大爆発の姿ならJWSTで見ることができるとは。質量が太陽の200倍もあるような巨大星は、特徴的な大爆発を起こして死をむかえると考えられている。このとき、最大で地球2000万個分もの鉄を合成し、爆発の際には木っ端微塵となって大量の鉄を宇宙にばらまく（図3）。この大爆発は猛烈な光を放出するが、光が我々のもとにとどくまでに宇宙の膨張とともにその波長も長くなり、赤外線となって観測されると予想される。遠くの宇宙の1点が忽然と赤外線で輝き、ゆっくりと消えていくとき、そこでは巨大星が爆発し、宇宙最初の鉄が合成されているのかもしれない。

始まりの頃の宇宙は多くの謎に包まれている。最初の日体はどのように生まれたのか。宇宙はいつ光に満たされたのか。これら現代天文学の未解決問題の鍵は宇宙暗黒の時代にある。

望遠鏡で「より遠くの宇宙」を目指してきた人類は、これまでに宇宙138億年の進化史の多くの部分を解明してきた。宇宙全体から見ればほんのちっぽけな存在にすぎない人類が、これほどまでに宇宙のことを知り、理解できるというのは驚異的で、感動的でさえある。そして、最初の数億年の出来事について明らかにし、宇宙進化史の最後の「ミッシングピース」を手に入れることができる日も近い。宇宙史の全貌を見渡すことができるという、幸運な時期に私たちは生きている。

参考文献

- 1) 日本物理学会編：宇宙を見る新しい目，日本評論社，（2004）
- 2) 須藤靖：ものの大きさ 自然の階層・宇宙の階層，東大出版会，（2006）
- 3) 杉山直：膨張宇宙とビッグバンの物理，岩波書店，（2001）
- 4) 青木和光：物質の宇宙史 ビッグバンから太陽系まで，新日本出版社，（2004）
- 5) 野本憲一：元素はいかにつくられたか，岩波書店，（2007）
- 6) マーカス・チャウン著，糸川洋訳：僕らは星のかげら，SB文庫，（2005）

（2017年8月29日受付）