

# 元素が星の中で作られる話

大阪大学・核物理研究センター 谷畑 勇夫

## 1. はじめに

私たちや、私たちの住む地球はいろいろな元素で出来ています。これらの元素はどこで、どうやって作られたのでしょうか？地球以外の惑星や恒星などを調べてみても、みんな地上と同じ元素で出来ていることから、元素は宇宙全体で共通で、地球だけが特別ではないことが分かります。ですから、元素の起源を知るには宇宙全体の進化を含めて考えなければなりません。宇宙の進化や恒星の燃焼元素の合成などを原子核をよりどころとして理解しようとするのが宇宙核物理学です。ここでは宇宙の「どこで」「どうやって」元素が作られてきたのかをいくつかのエピソードでお話ししましょう。

現在の物理学では宇宙はビッグバンという大爆発で作られたと考えられています。ビッグバン直後に元素の素である陽子と中性子が作られました。どうやって陽子と中性子が作られたのかも疑問ですが、ここでは陽子と中性子を出発点として、どうやって元素が創られたかを話しましょう。

図1に元素が創られていく道のりを示します。種々の元素はビッグバンの後、恒星の進化とともに創られ、その後に爆発や衝突などを経て宇宙空間にまき散らされました。それらの元素は星間物質となり、また次の新しい星になりますが、その一部が太陽系を作り、地球を作り、人間を作ったのです。私たちはまさしく星のかげらなのです。

まず元素や原子核の基礎知識から始めましょう。

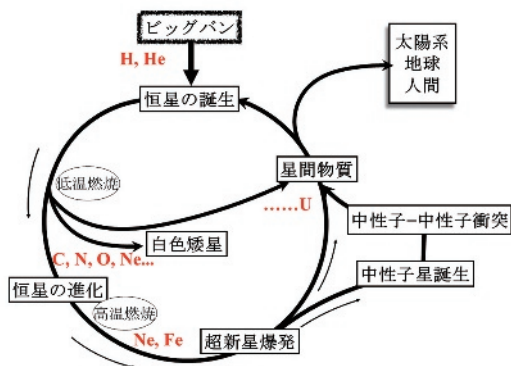


図1 宇宙での元素合成の道筋

## 2. 元素、原子、原子核

元素はある決まった化学的な性質を持った物質で、その一粒が原子です。原子は中心にある原子核とその周りを回る電子からできています。電子(負電荷)の個数と原子核の持つ正電荷の数は同じで、全体として電荷は持ちません(中性電荷)。電

子の数が化学的な性質を決めています。

原子核は陽子(正電荷数1)と中性子(電荷なし)がいくつか集まって結合したものです。正電荷どうしは電氣的な反発力が有るので、それを打ち消して結合するために強い引力を持った中性子が必要なのです。陽子数が多くなればなるほど中性子数も多くなっていきます。原子内の電子数は陽子数と同じで、結局、元素は原子核の中の陽子数で決まっていることとなります。

原子核を分類したものを核図表と言い、その一部を図2に示します。元素名は左側に書かれています。四角の中に書かれているのが原子核の名で、元素記号の左上の数字が陽子と中性子の数の和、質量数です。陽子数と中性子数がほぼ同じ付近に濃い青で塗られているのが、地上に存在する核で、自然には変化しないので安定核と呼ばれます。水色は中性子が多い原子核で、時間がたつと中性子が陽子に変化して安定な核になります。このとき全電荷が変化しないように電子を放出し、それをベータ壊変とよびます。ベータ壊変ではもう一つの粒子「反ニュートリノ」も同時に放出されます。逆に陽子が多い原子核(ピンク)は陽子が中性子に変わって、陽電子とニュートリノを放出する陽子ベータ壊変を起こし、安定核になります。例えば、炭素-14( $^{14}\text{C}$ )はベータ壊変して窒素-14( $^{14}\text{N}$ )になり、窒素-13( $^{13}\text{N}$ )は陽子ベータ壊変して炭素-13( $^{13}\text{C}$ )になります。このように、壊変してしまう原子核を不安定核と呼びます。不安定核は決まった半減期を持っていて、半減期だけ時間が経つとその原子核の半数が壊変して違った原子核になります。

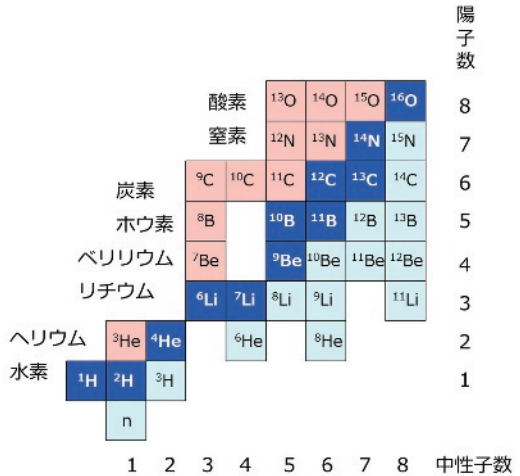


図2 核図表の一部。横軸は中性子数、縦軸が陽子数、その交差点にある四角が一種の原子核を示します。

水色は中性子が多い原子核で、時間がたつと中性子が陽子に変化して安定な核になります。このとき全電荷が変化しないように電子を放出し、それをベータ壊変とよびます。ベータ壊変ではもう一つの粒子「反ニュートリノ」も同時に放出されます。逆に陽子が多い原子核(ピンク)は陽子が中性子に変わって、陽電子とニュートリノを放出する陽子ベータ壊変を起こし、安定核になります。例えば、炭素-14( $^{14}\text{C}$ )はベータ壊変して窒素-14( $^{14}\text{N}$ )になり、窒素-13( $^{13}\text{N}$ )は陽子ベータ壊変して炭素-13( $^{13}\text{C}$ )になります。このように、壊変してしまう原子核を不安定核と呼びます。不安定核は決まった半減期を持っていて、半減期だけ時間が経つとその原子核の半数が壊変して違った原子核になります。

この図の中にある不安定核の半減期は、ほとんどのものは長くて15日ほどで、短いものでは1000分の1秒しかないものまであります。作ってもすぐに無くなってしまいます。(例外は $^{14}\text{C}$ の5730年、 $^{10}\text{Be}$ の151万年です)

地上にある安定核は約270種で、これまでに人工的に作られた不安定核は3000種近くにのぼります。理論的には原子核は6000種くらいあると予想されているので、これからもまだまだ発見されていくでしょう。

反応について見てみましょう。 $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$  は2個の水素分子と1個の酸素分子が反応して2個の水分子になる化学反応をあらわしたものです。化学反応は、原子や分子中の電子の状態が変化して結合が変わるもので、元素が変わるわけではありません。水はあくまで水素と酸素で出来ているのです。

一方、原子核反応は  ${}^4\text{He} + {}^{12}\text{C} \rightarrow {}^{16}\text{O} + \gamma$  などと書かれます。これは ${}^4\text{He}$ 核と ${}^{12}\text{C}$ 核が融合して ${}^{16}\text{O}$ 核になり、その時に発生するエネルギーが $\gamma$  (ガンマ)線として放出されることを表しています。原子核反応の場合には核内の陽子数が変化するので元素の変換が起こります。上の反応では、ヘリウムと炭素から酸素が作られたことになります。

逆に言えば核反応が起こらない限り元素は変換しないし、新しく作られることもありません。元素は核反応で創られたのです。原子核の反応がなければ私たちは存在しません。その原子核の性質や反応を研究するのが原子核物理学でそれを使って宇宙の発展や元素の合成を研究するのが宇宙核物理学です。

星の中で原子核どうしが近づいたときの衝突の激しさは温度によります。高温になるほど高速の原子核が多くなるからです。高速の原子核ほどお互いの電気反発力に打ち勝って反応を起こしやすくなります。この反発力は陽子の数が増えるほど大きくなるので原子番号が多くなればなるほど高温にならないと反応を起こさないこととなります。このことが星の進化に伴って徐々に重い元素が作られていく要因となっているのです。

### 3. ビッグバン元素合成

ビッグバンの直後には陽子、中性子と電子だけだったです。陽子は水素そのものなので作る必要はありません。最初の元素合成はこれらが融合してヘリウム-4になることです。融合過程はビッグバンが始まって3分くらいの間に起こります。宇宙が爆発で広がっていくので温度が急速に下がることと、中性子がベータ崩壊を起こして陽子になってしまい、新しい原子核を作れなくなるまでの時間です。陽子や中性子二つが融合した原子核は存在しませんが、陽子と中性子が融合すると重陽子( ${}^2\text{H}$ )になります。さらに陽子が融合すると ${}^3\text{He}$ 、中性子が融合すると ${}^3\text{H}$ 、そして最後には ${}^4\text{He}$ になります。 ${}^4\text{He}$ ができるとそこで合成は止まってしまいます。図2を見てください、質量数が5の原子核がありません、だから ${}^4\text{He}$ には陽子も中性子も融合して新しい原子核にはなれないです。ビッグバンの融合反応が終わる頃には ${}^4\text{He}$ とまだ融合していない残りの陽子が宇宙を満たしていることとなります。

現在の宇宙を観測すると、80%が水素で20%がヘリウム残りは一番多い酸素ですら水素の数千分の一しかありません。これがビッグバンから宇宙が始まったという重要な証拠の一つなのです。

ビッグバンで創られた原子核は宇宙に漂いながら電子と結合して原子が出来ま

す。原子になると電氣的に中性になるので電気反発力が無くなります。すると、重力によってそれらの原子が集まり始め、やがて星が誕生します。原子が出来るまでに10万年、星が出来るまで数億年、この間は新しい元素は創られないのです。

#### 4. 星の中での元素合成(鉄までの元素)

何億年か経つと重力により水素やヘリウムが集まって塊を作ります。重力で押し詰められて、塊の中はだんだん熱せられて核反応が再び起こる温度になります。恒星の誕生です(写真1)。最初は4個の陽子から ${}^4\text{He}$ と2個の陽電子を作る反応が始まり、それにより発生する熱で恒星が光り始めます。このときの原料は水素(H)とヘリウム( ${}^4\text{He}$ )だけです。ビッグバンで述べたようにHとHeは融合できません。また ${}^8\text{Be}$ という原子核が無いので(図2参照)、二個の ${}^4\text{He}$ も融合できません。そのため、普通の融合反応ではヘリウムより重い元素の合成は起こりません。もちろん、他に道があるはずで。私たちの周りにいろいろな元素があるのですから。



写真1 恒星誕生の現場、オリオン座 M42大星雲。星雲の中で星間ガスが集まり恒星が誕生している。星間ガスはほとんどの場合古い星が爆発などを起こしてばらまかれたものである。

イギリスの天文学者F. Hoyle氏が、3個の ${}^4\text{He}$ が同時に衝突して融合し炭素-12( ${}^{12}\text{C}$ )になる可能性があるとして提案し、実際にそれが正しいことが実験により証明されました。我々の体を作っている元素は、水素の他には炭素、窒素、酸素が主なものです。3個の ${}^4\text{He}$ が炭素を創るという特別な原子核反応があったからこそ私たちがあるのです。

ビッグバンでは ${}^4\text{He}$ までしか作られなかったこと、そして3個の ${}^4\text{He}$ が融合して ${}^{12}\text{C}$ が作られたことなど、原子核の性質が直接元素の合成に影響していることが分かります。

さて、炭素が作られると核図表でその周りには原子核が続いて存在するので、陽子の融合反応やその他の核反応が続いて起こり、より重い元素がどんどん作られるようになります。より重い原子核が反応するには、さらに高い温度が必要になります。星の大きさと内部の温度は一定の関係を満たしているので、どれくらい重い元素ができるかは星の重さによって決まります。太陽より3倍くらいまでの重さの星ではそれほど重い元素は生成されず、内部がほとんどHeになったころ、内部からの光の圧力で外部にある水素は吹き飛ばされてしまい、惑星状星雲を作るのと同時に、内側は冷

えてしまって白色矮星となります(写真2)。

それより重い恒星ではH. Betheが提唱したCNOサイクルという過程がおこります。これは図3に示したような反応の連鎖で、図に示された青い矢印に沿って反応が進みます。 $^{15}\text{N}$ が陽子を融合したときには $^{16}\text{O}$ が作られるのではなく $^4\text{He}$ が放出されて $^{12}\text{C}$ に戻ります。炭素、窒素、酸素が触媒のような働きをして4個の陽子を1個の $^4\text{He}$ にかえています。注意すべきはこの連鎖には、安定核だけではなく不安定核も含まれることで、この連鎖には不安定核 $^{13}\text{N}$ や $^{15}\text{O}$ は陽子ベータ崩壊をして安定な核になる過程が含まれます。このように、いろいろな原子核の反応が恒星を光らせながら窒素や酸素を作っていきます。星は内部で、原子核反応を起こして光っていること(燃焼過程と呼びます)そして同時に元素を合成しているのです。核反応を理解することが元素の創成を理解する上で基本的に大事なことであることが分かるでしょう。今、原子核物理学者は恒星の中で起



写真2 軽い星の終焉、子狐座 M27(亜鈴星雲)。太陽の3倍くらいまでの星が最後に吹き出したガスが作っている惑星状星雲。中央にある星が白色矮星である。

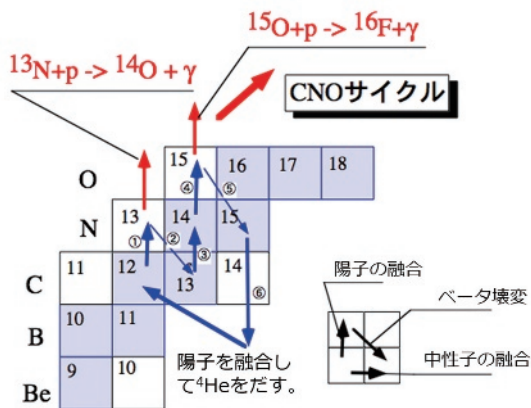


図3 CNOサイクルの反応の連鎖。矢印で反応が起こる順序を示している。

っているこれらの反応を実験室で再現し詳細に理解しようと研究を進めています。

さて、この過程では酸素より重い核は作られません。酸素より重い核が作られるのは、さらに温度が上がって陽子の衝突確率が増し、不安定核がベータ壊変する前に次の陽子と融合する反応が起こり、図の赤い線のような経路をたどり始めるからです。地上には存在しない不安定核が働きをすることが重要なのです。不安定な原子核の反応の研究はRビーム法という新しい実験手法が開発されて、研究がいま進んでいます。

より重い恒星では燃焼が進み次々に重い元素を創っていく、太陽の質量の8倍以

上の星では合成が鉄にまで進みます。鉄までは重い原子核ほど結合が強いので反応が進むとどんどん発熱します。しかし鉄は最も結合が強いので、もうどんな原子核とも融合しません。星の中心が鉄になると、融合反応が止まるので熱の発生は無くなり星の重力による重みを支えられなくなって、一気に中心に向かって陥没を始め、ついには爆発を起こしてしまいます。超新星爆発です。このときに、それまでに恒星の中で作られた元素が宇宙空間にばらまかれるのです。また同時に鉄より重い元素も合成されます。これについては次に述べます。

超新星爆発が起こると、もとの恒星の中心部は残されて中性子星やブラックホールになります。ブラックホールからはもう何も出てきませんが、中性子星も、もう燃焼をしないので元素合成は進まず通常はそのままになります。ただ、このような中性子星同士が衝突すると大量の中性子が反応して重い元素を作ると最近考えられるようになって来ました。

## 5. 鉄より重い元素の合成

鉄より重い元素は、主に二つの違った道筋で創られると考えられています。一つは遅い過程(S-過程)もう一つは早い過程(R-過程)と呼ばれます。

S-過程は高温の恒星の中で核反応が進むとき、時折発生する中性子を原子核が吸収することによっておこります。中性子は電荷を持たないので、低いエネルギーでも原子核と融合するからです。中性子を吸収した原子核は質量数が一つ増えて不安定核になり、そしてベータ壊変を起こし陽子の数が1つ増して、原子番号が一つ大きい元素ができます。しばらくすると又同じことが起こり、さらに原子番号が増していきます。中性子は非常に少ないため、この過程は長い年月を費やして起こるので“遅い”過程と呼ばれます。ただし、この過程では鉛より重い元素は作られません、ゆっくり中性子吸収が起こるので安定な原子核にしか起こらず、安定核のない鉛より重い元素はこの過程では作られないのです。しかし地上にはウランなどより重い原子核が存在します。ウランはどのように作られたのでしょうか？

その可能性と考えられているのがR-過程です。超新星爆発や中性子星の衝突で多量の中性子が発生すると、その中性子が次々と近くにある原子核に吸収されていきます。あまりにも中性子が多いので不安定になった原子核にもそれがベータ壊変する前に次々に中性子が融合して、より中性子の多い原子核ができます。中性子の多い原子核はベータ壊変しやすく、次々に原子番号が大きくなっていきます。大量の中性子があるとこの過程は非常に早く進みついにはウランやトリウムなどの一番重い元素まで合成します。

このR-過程の道筋にあるのは通常の原子核より中性子が極端に多い、いわゆる中性子過剰核です。ところが、そのほとんどが、まだ存在が確認されたこともない原子核なのです。それらの原子核の結合の強さや、半減期等も全くわかっていません。

原子核がどれくらい中性子過剰なものまで存在するのか、またその構造や半減期はどうなっているのか、その研究は最近始まったばかりです、この分野では先ほど述べたRビームファクトリなどを中心にして日本人核物理学者は世界の先端で研究を進めています。

超新星爆発や中性子星同士の衝突でR-過程が起こると書きましたが、実はこの過程は実際どこで起こっているのかという定説はまだありません。最近までは超新星爆発が有力だと思われていたのですが、いろいろな問題があつて理論は確立していません。一方、最近中性子星同士の衝突-融合が重力波として観測されました。同時にその衝突からの光も観測されR-過程が起こっていることを示す兆候が観測されました。そのため最近では中性子星同士の衝突がR-過程の現場であるとの意見が強くなっています。しかしながら、まだすべての理解がなされたわけでは無く、これから観測されたデータと原子核物理学の知識を詳しく調べて正しい結論を出していかなければなりません。

原子核の発見の糸口となったウランやラジウムは、R-過程と呼ばれる中性子過剰核が関与する過程で作られました。最近のRビーム法の開拓により、元素合成に関与した原子核を作りその半減期や反応を判定することがやっと可能となってきました。自然が我々に残してくれた長寿命の原子核ウランの生成された道筋がいまやっと解明されようとしています。これは、自然にたいする我々の恩返しでなくて何でしょうか？



写真3 超新星爆発の残骸、双子座 IC443(くらげ星雲)  
超新星爆発より放出された種々の元素が光っているものである。

### 著者紹介 谷畑 勇夫(たにはた いさお)



大阪大学核物理研究センター 特任教授。北京航空航天大学 教授。1947年兵庫県生まれ。大阪大学で理学博士修得。原子核物理学、宇宙核物理学の研究を続けている。Rビーム法を発明。著書にブルーバックス「宇宙核物理学入門」など。最近天体の写真を撮ることが趣味となっている。