

銀河の化学進化が物語る r プロセス元素の起源

石丸 友里

〈国際基督教大学教養学部物質科学部門 〒181-8585 東京都三鷹市大沢3-10-2〉

e-mail: ishimaru@icu.ac.jp



鉄よりも重い元素を作り出すrプロセスは、一体どこで起きたのだろうか。その手掛かりは、われわれの銀河系ハローに点在する古い星の元素組成に刻まれている。古い星には、rプロセスでできた元素が多いものと少ないものとで大きな開きがある。これこそ限られた天体しかrプロセスを起こすことができない証拠だ。その候補となる天体は二つ考えられており、一つは超新星爆発で、もう一つは中性子星どうしの合体である。ではどちらなのだろうか。銀河の化学進化によって星の元素組成を読み解けば、いつの時代に、どのような天体が、どんな元素を作り出したかが見えてくる。果たして、rプロセスにまつわる銀河の年代記は、星の元素合成の理論と、古い星に見いだされた証拠とをつなぐことできるだろうか。

1. 天空の果実、何を語らん

宇宙が誕生して間もない頃、この世は今のようには豊かではなかった。ビッグバンが生み出した元素は水素とヘリウム、そしてわずかな軽元素のみ。今私たちが足を踏みしめている大地や、その上で育まれる生命を形作り、そして生活に彩りを添えるような元素が作り出されたのは、宇宙の歴史に星が登場してからのことであった。星はその輝きとともに、さまざまな元素を作り出す。多くの元素は、星を支えるエネルギーの源となる熱核融合反応によって作られ、その星が生涯を終えるときに、惑星状星雲や超新星爆発となって宇宙空間にまき散らされる。新しい元素が作られるのは、星の生涯の途上だけではない。超新星爆発の爆風の中や、さらには星が死を迎えた後に残された白色矮星や中性子星がもとになって作られる元素もある。いわば星の営みによって結実した新しい元素で星間ガスは肥沃になり、その中から次の世代の星が生まれる。こうして、星の誕生と死が

幾世代も繰り返されるなかで、2千億もの星を抱くわれわれの銀河系は、だんだんと多種多様な元素で豊かになってきたのである。

そう思うと、星の元素組成には、祖先である星々の足跡が残されている。星の大気には、自分の生まれ故郷たる星間ガスの元素組成がとどめられているからだ（ただ、晩年の星や軽元素などはその限りではないが）。つまり、いつの時代に、誰がどんな元素を作ってきたのかという銀河の年代記が、いわば古からの伝言として星には刻み込まれている。これを読み解けば、金を作り出した、あのrプロセスの起源もわかるかもしれない。

鉄より重い元素の多くは、rプロセスと呼ばれる速い中性子捕獲過程で作られる。ところが、rプロセスを起こした天体の正体は、今も謎めいている。それを暴くべく、星の元素合成理論が今どこまで核心に迫りつつあるかは、先月号の和南城氏、西村・滝脇両氏、田中氏の記事で議論された。そして今月号では、銀河系のハローの長寿命

星と、球状星団や矮小銀河の星の観測を通じて、rプロセスの起源の手掛かりを探る研究が青木氏、本田氏によって紹介された。さて、役者はそろった。果たして銀河の年代記は、古からの伝言と星の進化論の両者をつなぎ、rプロセス元素の故郷にたどり着くことができるだろうか。

Hubert Reevesはその著書^{1), 2)}で、宇宙の長い歴史の中で、天空の営みが生み出すものを芳醇な果実にとどえている。元素はまさに天空の果実。色とりどりの果実の中に、金のリンゴを並べた星に問うて、それを実らせた樹がいったいどこにたたずんでいたかを、私たちは知りたいのである。

2. 古からの伝言の読み方

そう、星には銀河の年代記を物語る古からのメッセージが刻み込まれている。では、解読するにはどこから手をつければ良いだろう。まず、水素に対する鉄の組成比 $[\text{Fe}/\text{H}]$ *1 を金属量と呼ぶことにしよう。総じて言えば、星の世代交代が繰り返されるほど銀河全体の金属量は上昇するので、個々の星の金属量はその星が誕生した年代の指標となる（とは言え、銀河進化のごく初期の段階では、必ずしも金属量と年代が相関しない場合もあるが）。となれば、星の金属量とさまざまな元素の組成との関係を見れば、その元素がいつ作られたかがわかることになる。

さて次に、ある元素A, Bの相対組成比 $[\text{A}/\text{B}]$ *2 と金属量との関係を調べたとしてしよう。図1の概念図をご覧ください。もし星の相対組成比 $[\text{A}/\text{B}]$ が、(a) で示した線上に分布したならば、2種の元素A, Bはいつの時代も同じ割合で作られてきたことになる。つまり両者は同じ起源だと解釈できる。そして、(b) で示した線のように、 $[\text{A}/\text{B}]$

が金属量とともに減少するならば、銀河の年代史で元素Aが先に作られ始め、それより遅れてBができたことを意味する（ただし、元素Aが軽元素のように壊れやすい元素ならば、だんだんに減少していったという可能性もある。本稿では鉄やそれより重い元素について議論しているので、これには該当しない）。逆に、(c) で示した線のように、 $[\text{A}/\text{B}]$ が金属量とともに増加するならば、今度は元素Aのほうが遅れて増え始めたことになる。遅れて生成される元素とは、例えば、sプロセス元素のように長い寿命の低質量星の作る元素や、Ia型超新星爆発や、あとで話題にする中性子星同士の合体などで、元素合成に至るまでに時間のかかる現象でできるものがこれに該当する。あるいは、窒素などの二次元素と呼ばれる元素のように、金属量の高い星ほど作られやすいもの場合もある。

そう考えると、図の (b) や (c) で、急激に

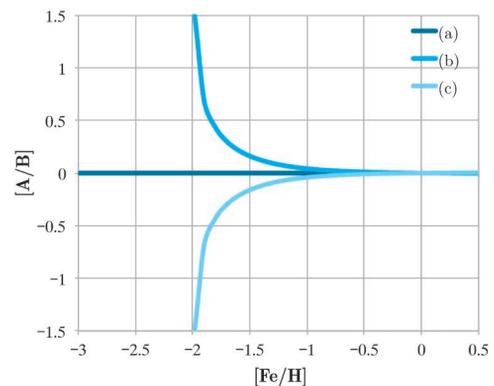


図1 星の金属量と相対組成比 $[\text{A}/\text{B}]$ との関係の概念図。(a) は元素A, Bが同じ起源である場合。(b) は元素Aが元素Bに先んじて作られ始める場合、(c) は元素Aが元素Bよりも遅れて作られ始める場合を示す。

*1 鉄の水素に対する質量比を Z_{Fe} としたとき、金属量 $[\text{Fe}/\text{H}]$ は次のように定義される： $[\text{Fe}/\text{H}] = \log[(Z_{\text{Fe}})/(Z_{\text{Fe}, \odot})]$ 、ただし、 $Z_{\text{Fe}, \odot}$ は太陽系における鉄の質量比。

*2 元素A, Bの水素に対する質量比を、それぞれ Z_A, Z_B としたとき、元素AとBの相対組成比 $[\text{A}/\text{B}]$ は、 $[\text{Fe}/\text{H}]$ と同様に次のように定義される： $[\text{A}/\text{B}] = \log[(Z_A/Z_B)/(Z_{A, \odot}/Z_{B, \odot})] = [\text{A}/\text{H}] - [\text{B}/\text{H}]$ 、ただし、 $Z_{A, \odot}, Z_{B, \odot}$ はそれぞれ太陽系におけるA, Bの質量比である。

[A/B] が減少あるいは増加し始めたときの金属量が、そのとき作られ始めた元素の起源の手掛かりとなる。つまり、銀河の金属量がこの値に達したときの銀河年齢が、その元素の生成までに要した時間ということだ。それは起源となった星の寿命かもしれないし、起源となる現象が起こるまでの時間かもしれない。でもこれこそ、その元素を作り出した天体を知るためには欠かせない情報なのである。

2.1 昔、星には貧富の差があった

ではいよいよ、鉄より重い元素を秘めた星々を見てみよう。青木氏の記事の図4が、銀河系のハローにある星（金属欠乏星と呼ばれる）のユーロピウム (Eu)、バリウム (Ba)、ストロンチウム (Sr) の元素組成比である。驚くべきことに、[Eu/Fe], [Ba/Fe], [Sr/Fe] のいずれの場合も、金属量の低い星で大きくばらついている。少なくとも、鉄と同じ起源ではないことは確かだ。金属欠乏星の鉄の起源は、大質量星の起こす重力崩壊型超新星爆発である。そしてどの大質量星も、大体同程度の量の鉄を作り出す。ということは、Eu, Ba, Srは、どの星でも作り出せるものではない、ということの意味する。

特にEuは、太陽系では90%以上がrプロセス起源であることがわかっていて、まさにrプロセスを代表する元素だ。つまり大昔の銀河では、rプロセス元素に恵まれた星と、そうでない星という大きな貧富の差があったのである。ただその格差は、時代とともにだんだん小さくなり、太陽系が誕生する頃には、どの星もおしなべて並の値になったということだ。

BaとSrは、太陽系では80%以上がsプロセス起源である。ところが金属欠乏星では、どの星でもBaとEuの元素組成比 [Ba/Eu] が、rプロセスだけでこれらの元素をつくったときの値とほぼ一致する。これは、金属欠乏星のBaがEuと同じくrプロセスでできたことを意味する。sプロセスは寿命の長い低質量星の晩年に起こると言われて

いるので、それもそのはずであろう。そうすると、[Ba/Fe] と [Eu/Fe] は、金属欠乏星では似たような分布になるはずである。観測値は一見異なるように見えるが、これはEuの測定がBaより難しいためである。つまり、実際に測定されていなくても、[Eu/Fe] も本来 [Ba/Fe] と同じように、金属量の低い星になるほど下がっていくような傾向になるのかもしれない。

一方、Srは全く異なる傾向を示す。金属欠乏星で、[Sr/Ba] の値に大きなばらつきが現れるのである（青木氏の記事の図4を参照）。もはやSrは、BaやEuと同一の起源と言うことはできない。では、どこでできたのだろうか。第2のrプロセスがあるのだろうか。この問題については、最後に考えよう。

さあこうして、星に刻まれたメッセージから、さまざまな手掛かりを読み取ることができた。次は、銀河の化学進化モデルを使って、銀河の年代記のどの時代に、どのような星でrプロセス元素が作られたのか考えていこう。

3. 金のリンゴの木は超新星爆発なのだろうか

rプロセスの候補となる天体には何があるのだろうか。すでに先月号で詳しく論じられてきたが、大きく分けて二つの候補がある。その一つが大質量星の起こす重力崩壊型超新星爆発だ。もう一つの候補は中性子星の合体であるが、これは次の節で考えるとして、まずここでは、超新星爆発説について考えよう。とは言い、2節で見たように、超新星爆発がどれでもこれでもrプロセスを起こしたならば、金属欠乏星の [Eu/Fe] はばらつかない。では、もしも超新星爆発でrプロセスが起こったとしたら、[Eu/Fe] のばらつきは、どんなストーリーを見せてくれるのだろうか。

3.1 種まきは鳳仙花のごとく

古の時代に、銀河系では何が起こったのだろうか。CS 22892-052という金属欠乏星が、一つの

ストーリーを語りだす。この星の金属量はとても低く $[\text{Fe}/\text{H}] = -3.1$ だ。でもその割りにEuはとても多く、 $[\text{Eu}/\text{Fe}] = 1.64$ に達する³⁾。しかもその元素組成比は、青木氏の記事の図3にあるように、太陽系のrプロセス起源の元素の組成比と、見事なほど一致する。ここからこんな想像ができる。CS 22892-052の生まれ故郷の星間ガスにあったのは、たった一つの超新星爆発の生成物だけだったのではないか。しかもその超新星爆発こそが、rプロセスの起源天体なのではないか、ということだ。そこでこんなストーリーが考えられる。超新星爆発が起こると、その衝撃波は周囲の星間ガスを圧縮しながらかき集め、そこから次の世代の星が形成される。すると次世代の星の元素組成は、かき集められた星間ガスと、超新星爆発の生成物を平均したものになるだろう。だからこそ、特に金属量の低い時代で超新星爆発の生成物が星の元素組成に強く反映される。つまり、 $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ のばらつきは、rプロセスの生成量の違いの現れだ。超新星爆発は、鳳仙花のごとくその種を自分の周りにまき散らす。けれど、超新星爆発がいくつも起これば、一つ一つの元素合成の個性はだんだんかき消される。こうして金属量が高くな

るにつれ、 $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ のばらつきは収束していくのである。

3.2 早生のリングは黄金色に実らず

図2, 3はこのようなストーリーに基づいて作った銀河の「非一様化学進化モデル」^{4), 5)} で予測した星の元素組成の分布である。ここではシンプルに、rプロセスを起こす超新星爆発は、もとの星の質量によらずどれも等しい生成量でEuやBaをつくるとした。それでも、太陽系の $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ や $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ の値が説明できなければならないので、最終的に作られるrプロセス元素の総量は決まっている。となると、rプロセス元素の起源となる星の数が少ないほど、1個あたりの生成量は多いことになる。

観測からは、rプロセス元素が極端に過剰な星は全体の5%程度と見積もられている（青木氏の記事を参照）。そこでまず、質量が上位5%の大質量星による超新星爆発で、rプロセスが起こったと仮定した場合を考えよう。これは、太陽のおよそ30倍以上の質量の星が起す超新星爆発に相当する。図2a, bは、この場合予測される星の $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ と $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ の分布図である。（実際にはこのモデルには、後述の弱rプロセスによる元素

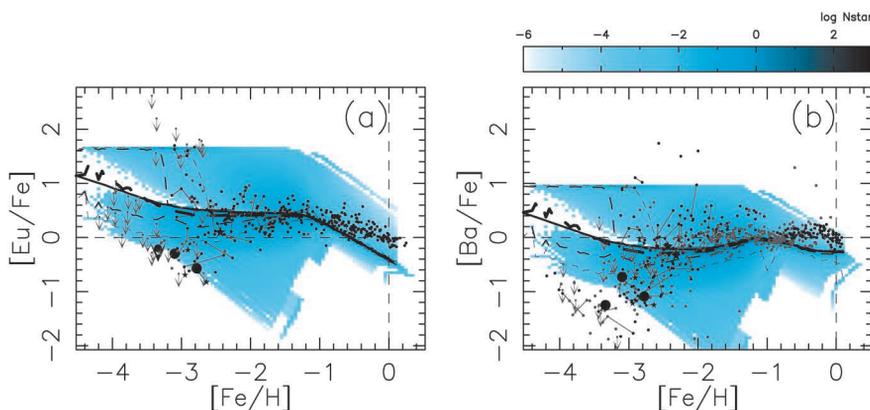


図2 非一様化学進化モデルで予測したrプロセス元素の組成比と金属量との関係。太陽の30倍以上の大質量星の超新星爆発でrプロセス元素が作られる場合の (a) $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ および (b) $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ の分布の予測。青の色指標はモデルによる予測を示し、黒い点は観測値を示す。太い実線は星間ガスの元素組成の平均値。太い破線、中太の破線、細い破線はそれぞれ、星の元素組成の中央値、50%、90%の信頼区間。

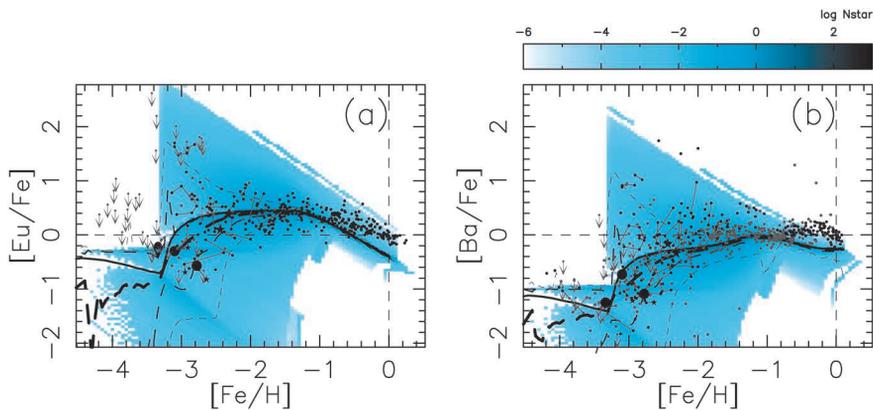


図3 図2と同様であるが、太陽の9-10倍の質量の星の超新星爆発でrプロセス元素が作られる場合。

合成も入っているが、 $[\text{Fe}/\text{H}] > -3.5$ の星のEuやBaにはほとんど影響しない)。このモデルでは、確かに金属量の低い星で $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ に大きなばらつきが現れ、金属量の増加とともにばらつきは収束していくように見える。CS 22892-052のようにrプロセスが極度に過剰な星も、かろうじて説明できる。ところが、観測では $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ が低い金属量ほど下がる傾向を示しているのに、モデルの予測は、これとはまるで逆である。銀河ができて、最初に死を迎えるような星でrプロセスが起こると、次の世代の星の多くは、少なからずrプロセス元素を含んで生まれてしまう。ちょうど平均的には、図1の(b)の線のような傾向になるのである。どうもrプロセス元素は、あまり早くできすぎてもいけないようだ。こうなると、まず最重量級の星の超新星爆発は、rプロセスの候補天体から一步後退してしまったようである。

3.3 リングの木の蜃気楼をみた

では逆に、比較的寿命の長い星の超新星爆発で、rプロセスが起これば良いのではないだろうか。次は、超新星爆発を起こすことのできるぎりぎりの質量の星を考えてみよう。図3a, bは、太陽の9倍から10倍の質量の星が、超新星爆発でrプロセス元素を作る場合の予測である。この質量の星は数が多いので、もしそのすべてが超新星爆発でrプロセス元素を作ったとしたら、1回の

生成量は先ほどよりも少ない。ただ、これほど軽い質量の星は鉄もほとんど作らないため⁶⁾、生成物には非常に高い割合でrプロセス元素が含まれることになる。そのため、図3aのように、CS 22892-052のようなrプロセス元素が過剰な星も無理なく説明できる。また、太陽の10倍程度の質量の星の寿命は、最重量級の星の寿命のおよそ50倍にも達するほど長いため、鉄に比べてrプロセス元素は一步遅れて作られ始めることになる。図3a, bで、 $[\text{Fe}/\text{H}] \simeq -3$ のところから急激なEu, Baの増加が見られるのは、このためである。これなら、図2bのときのような観測との食い違いも現れない。金属欠乏星の特徴である $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ や $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ の大きなばらつきや、rプロセス元素が過剰な星があることも、何もかもぴったりだ。

ああ、ついに見つかった。金のリングの成る木。それは太陽の10倍程度の質量の星の超新星爆発だったんだ…と見たのに。最新の超新星爆発のシミュレーションで、あっさり否定されてしまった。和南城氏の記事の図5をご覧ください。超新星爆発を起こすと、吹き飛んでいく中性子は大量のニュートリノを浴びて、どんどん陽子に変わってしまう。その結果、EuやBaのような重いrプロセス元素は全くできず、できたとしてもせいぜいSr止まり、となってしまうのだ^{6), 7)}。

金のリングの木は、蜃気楼のようにまた消えて

しまいそうだ。金属欠乏星からの伝言を、星の元素合成理論につなぐことのできるようなストーリーは何かないのだろうか。

4. 中性子星が出会うとき

そして今、もう一つのrプロセスの候補として名乗りを挙げているのが、中性子星どうしの合体だ。聞くに珍しい現象と思われるかもしれないが、とにかく現実味を帯びてきている。とにかくrプロセスには不可欠な中性子でできた星で起こることなので、もとより条件は十分と言われてきたが、最近この極限的な状況の数値流体シミュレーションが行われるようになった。そしてついに、中性子星の合体で起こりうるrプロセスで、極めて妥当な元素組成が予測されたのである^{8), 9)}。

さらに、2013年6月に発見されたショートガンマ線バーストGRB 130603Bが、「rプロセス新星」を伴っていたと見られることが報告された¹⁰⁾。詳細は、田中氏の記事をお読みいただきたいが、中性子星どうしが合体した際に起こったと考えられるショートガンマ線バーストの後に、rプロセスで作られた放射性元素によると見られる光が観測されたのである。ついに、金のリンゴの木のヴェールが剥がれるときがきたのだろうか。

4.1 出合いは遅すぎたのか

ところが、中性子星の合体説には、深刻な問題があった。それは、二つの中性子星が合体に至るまでの時間の長さ、中性子星合体の発生頻度の低さである。

中性子星の合体は、中性子星どうしの連星系が、重力波の放出によって角運動量を失うことによって起こる。連星系ができてから合体に至るまでの時間は、典型的なもので1億年から10億年は要すると考えられている¹¹⁾。極度に近接した連星系ならば、10万年程度という短い時間で合体する可能性もあるようだが、それは中性子星合体の中でもせいぜい数%以下に過ぎないようだ¹²⁾。

ではそうなると、もし中性子星の合体でEuが

作られたならば、[Eu/Fe]が増加し始めるときの金属量はいくらになるだろう。太陽系が誕生したときの銀河年齢を $T=100$ 億年としたら、中性子星の連星系が合体し始めたときの銀河年齢は、 $t_{\text{NSM}}=0.01T\sim 0.1T$ ということになる。銀河年齢が t になったとき、星間ガスに含まれる金属の質量比を $Z(t)^{*1}$ としよう。このとき星形成効率(単位時間あたりにガスからできる星の割合)を ν 、金属の生成効率(星の質量に対する金属の生成量の割合の平均値)を y とすれば、 $Z(t)$ と t の間にはおおよそ

$$Z(t) \propto \nu y t \quad (1)$$

の関係があることが銀河の化学進化を単純化したモデルで導くことができる¹³⁾。つまり、銀河年齢が t のときの星間ガスの金属量 $[\text{Fe}/\text{H}]_t$ は、

$$[\text{Fe}/\text{H}]_t = \log \frac{Z(t)}{Z_{\odot}} = \log t + \text{定数} \quad (2)$$

となる(ただし、 Z_{\odot} は太陽の金属量)。ここで、太陽系が誕生したときには $[\text{Fe}/\text{H}]=0$ となるはずなので、式(2)の定数は $-\log T$ のはずだ(実際には太陽系の鉄の約半分はIa型超新星爆発起源である。その分を補正したら、上の定数より0.3程度小さい値になる)。つまり、中性子星の合体が起こり始めたとき、銀河の金属量はすでに

$$[\text{Fe}/\text{H}] = \log t_{\text{NSM}} - \log T \simeq -2 \sim -1 \quad (3)$$

に達していることになってしまう! 金属欠乏星の観測では、 $[\text{Fe}/\text{H}] \simeq -3$ でrプロセス元素が過剰な星が多数存在しているので、明らかに矛盾している。

また中性子星合体の頻度は、ショートガンマ線バーストの観測から見積もると、銀河系内では1万年から100万年に1回程度しか起こらないことになる(田中氏の記事を参照)。せいぜい中性子星1,000個に1個程度の割合というところだ。もし太陽系のrプロセス元素をすべて中性子星の合

体だけで説明しようとする、1回のイベントでの生成量は極度に高いことになる。実際、3節で解説したものと同様の「非一様」化学進化モデルを用いて、Argastらは中性子星合体でrプロセスが起こると、観測されているより一桁高い金属量の星で、[Eu/Fe]のばらつきが現れてしまう、という計算結果を示した¹⁴⁾。この矛盾は非常に深刻であり、これ以降、中性子星合体説はしばらく影を潜めることになったのである。

4.2 大海の水も一滴から

それでも諦めるのはまだ早い。そもそもわれわれの銀河系は、どのようにしてできたのだろうか。宇宙の構造形成理論として、現在最も受け入れられている Λ -CDMモデル（冷たい暗黒物質とダークエネルギーが宇宙の全エネルギーの大半を担う宇宙論モデル）に従えば、原始の宇宙にはじめから銀河系のような大きな銀河が誕生したわけではない。原始銀河の前身となる小さなダークマターハロー（サブハローと呼ぶ）からでき始めたのである。その後、サブハロー同士は衝突と合体を繰り返して、より大きな規模の銀河へと成長していった。こうして現在の宇宙の階層構造ができたと考えられているのだ。大きな銀河も一滴のサブハローから。それならば、われわれの銀河系ハローも、もともとはサブハローからできたはずだ。つまり、銀河系ハローは出身地の違う星の集まりだ。となると、金属欠乏星で[Eu/Fe]がばらつくのは、出身地となったサブハローによって、星形成史が違ったためではないだろうか。その中には、ゆっくり化学進化が進んだために、まだ金属量が低いうちに、中性子星の合体が始まったものもあったかもしれない。ここに解決の糸口がありそうだ。

4.3 小さな銀河の年代記

果たしてサブハローの星形成史は、千差万別なのだろうか。手掛かりは、われわれの銀河系の周囲に群がる矮小銀河に垣間見える。矮小（楕円体）銀河は、銀河系のハローよりもおしなべて金

属量の低い星でできている^{15), 16)}。そして矮小銀河の（星の）平均金属量 $\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle$ と、銀河の（星の）質量 M_{\star} の間には

$$\langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle \propto \alpha \log M_{\star} \quad (\alpha=0.3-0.4) \quad (4)$$

という相関関係があるようだ^{17), 18)}。この意味を考えよう。

サブハローや矮小銀河のような小規模な銀河は、重力ポテンシャルが浅いため、超新星爆発によって星間ガスが銀河の外に吹き飛ばされやすい、と考えられている。となると、単位時間あたりのガスの放出率(R_{out})は、星形成率(R_{SF})に比例するであろう。このように仮定した銀河の化学進化モデルより、平均金属量の解析的な近似解が導き出せる¹³⁾。これより、サブハローのように軽い銀河では、 $R_{\text{out}} \gg R_{\text{SF}}$ であるはずだということを考慮すれば、平均金属量にはおおよそ以下の関係が成り立つことがわかる：

$$\langle Z \rangle \approx \frac{R_{\text{SF}}}{R_{\text{out}}} y, \quad (5)$$

$$\text{ただし、} \langle[\text{Fe}/\text{H}]\rangle = \log \frac{\langle Z \rangle}{Z_{\odot}}.$$

ここで、 Z, y は式(1)で扱った金属の質量比と金属の生成効率である。サブハローによって星の初期質量関数が違わなければ、金属の生成効率 y は定数とみなしてよい。すると、式(4)、(5)から結局、

$$\frac{R_{\text{SF}}}{R_{\text{out}}} \propto M_{\star}^{\alpha} \quad (6)$$

となる。これこそ、サブハローの質量による星形成史の違いを示す関係式である。

ところで、銀河系近傍にある矮小楕円体銀河と、銀河系ハローを作り上げたサブハローは、果たして同じタイプの銀河だったのだろうか。答はおそらくNoであろう。矮小楕円体銀河には少なからず若い星があるが、銀河系ハローの星は年老いている。しかしその割には銀河系ハローの金属量は高い。サブハローのほうが、矮小楕円体銀

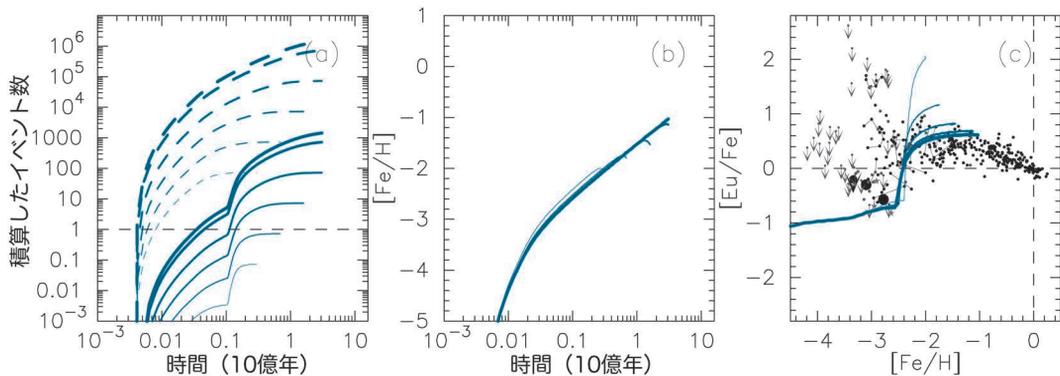


図4 異なる質量のサブハローの化学進化の違い. 重いサブハローほどガス放出率 R_{out} は低いが³, 星形成率 R_{SF} は等しい場合. (a) 超新星爆発 (点線) と中性子星合体 (実線) の積算した個数の時間変化. (b) 金属量の時間変化. (c) $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ と金属量との関係の予測 (実線) と観測 (黒点) との比較. 各図では, 最も細い線から太い線へ順に, (星の) 質量が太陽の 10^4 倍, 10^5 倍, 10^6 倍, 10^7 倍, 10^8 倍, 2×10^8 倍のサブハローを示す.

河より早いペースで星形成が進んだのであろう. それでも, 式(6) の関係をサブハローに適用しても問題ない. この式に従うサブハローの足し合わせで, ちゃんとわれわれの銀河系ハローの金属量分布を説明することができる¹⁹⁾. サブハローの R_{SF} や R_{out} の値は矮小楕円体銀河と異なるかもしれないが, その比の関係は変わらないということなのだ.

4.4 積み木で銀河を組み立ててみると

準備は整った. いよいよサブハローで, 中性子星の合体からrプロセス元素ができたとしたらどうなるのか見てみよう. サブハローの星形成史は, 関係式(6)を満たすことが条件なので, 両極端な二つのケースを考えよう. 一つは(A)重いサブハローほどガス放出率 R_{out} は低いが, 星形成率 R_{SF} がサブハローによらず等しい場合. そしてもう一つが(B)重いサブハローほど星形成率 R_{SF} は高いが, ガス放出率 R_{out} が等しい場合だ. 中性子星の合体は, 中性子星1,000個あたりに1回の割合で起こるとしよう. そのうち5%だけは極度に近接した中性子星連星として100万年という短い時間で合体に至るが, 残りは1億年かかるとした. ただどちらの中性子星合体でも, rプロセス元素の生成量に違いはないと考える. またこ

こでは, サブハローの星間ガスは一様に混ざっていると仮定した.

まず, (A) の場合を見てみよう. 図4をご覧ください. どのサブハローでも, 超新星爆発が起こり始めた少し後に, 極度に近接した中性子星連星が合体し始め, さらにスタートから1億年で一斉に残りの中性子星合体が始まる (図4a). 軽いサブハローのグラフが早々に止まっているのは, ガスをどんどん吹き飛ばした挙げ句, あっという間に星形成が終わってしまったからだ. ところが, このようなガス放出率の違いは, 金属量の増加率にはほとんど現れない (図4b). 式(1)を思い出してほしい. 実はこの式は, 定性的にはサブハローの場合も成り立つ. この式の星形成効率 ν とは, 星形成率 R_{SF} と星間ガスの質量との比例定数である. しかし, 式(1)には, ガス放出率に関わる部分が見当たらない. 結局, 金属量の増加率は星形成率だけで決まっているということだ. すると, どのサブハローでも, 中性子星が合体し始めるときの金属量に違いがないため, $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ と金属量との関係はほとんど同じようになる (図4c). そして, $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ が増加し始める金属量も, $[\text{Fe}/\text{H}] > -3$ になってしまう. このようなサブハローが合体しても, 金属欠乏星に見られるような

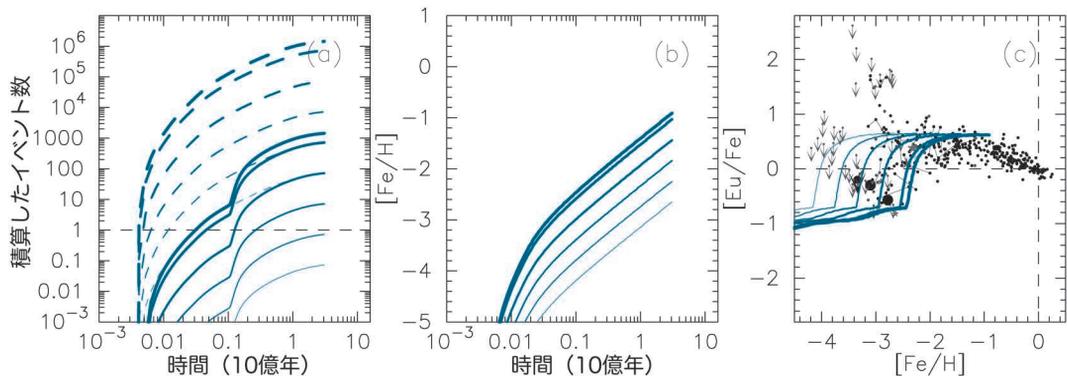


図5 図4と同様。ただし、重いサブハローほど星形成率 R_{SF} は高いが、ガス放出率 R_{out} は等しい場合。

[Eu/Fe] のばらつきは出そうにない。

一方、図5に示した(B)の場合はどうだろうか。中性子星合体の発生数の時間変化については、(A)の場合との大きな違いはない(図5a)。ところが、金属量は軽いサブハローほど上がり方が鈍い(図5b)。(B)の場合は、軽いサブハローほど星形成率が低いためである。そのため、軽いサブハローでは、金属量がまだそれほど上がらないうちに1億年が経過し、中性子星が合体し始める。つまり軽いサブハローほど低い金属量で[Eu/Fe]が増え始めることになる(図5c)。するとどうだろうか。このようなサブハローが集まって銀河系ハローを作ったとしたら、金属欠乏星の[Eu/Fe]は、当然ばらつくに違いない。逆に言えば、[Eu/Fe]のばらつきは、サブハローの星形成率の違いを反映していることになる。中性子星の合体に1億年もの時間を要したとしても、星形成率の低いサブハローならば金属量が上がりすぎることもない。

こう考えれば、中性子星の合体説に残されていた深刻な観測との矛盾は、決して解決できない問題ではない。金のリングの木は中性子星の合体なのか。それはまだ決着がついたわけではない。しかし少なくとも、候補から外す必要はもはやないのである。

5. 残された謎

金のリングはどこから来たのだろうか。いま、我々は着実にその故郷に近づきつつある。しかしそれでも尚、まだわからないことは数多く残されている。それは一体どんなことなのだろうか。

5.1 黄金郷の謎

rプロセスの起源は、中性子星の合体なのだろうか。われわれの銀河系が、星形成率の異なるサブハローが集合してできたものだと考えれば、金属欠乏星の[Eu/Fe]のばらつきがこの仮説で説明できそうなことはお話しした。ただ、ハローにはCS 22892-052のようにrプロセス元素が過剰な星も数%ある。このような黄金郷の星については、もう少し考えなければならない。

もちろん、3節で紹介したような「非一様化学進化」を組み合わせたハイブリッドなモデルならば説明ができるかもしれない。たとえば、Argastらは、中性子星の合体でも非一様化学進化を仮定している¹⁴⁾。ただ中性子星合体でも、超新星爆発と同様に、次世代の星の形成を誘発するかどうかはわからない。単純に超新星爆発を中性子星合体に置き換えればよい、というわけにはいかないであろう。

とは言え、非一様な化学進化でなくても、中性子星の合体でrプロセス元素が過剰な星の起源を

説明する方法が考えられないわけではない。図4a, 5aを見てみると、星の個数が 10^4 個や 10^5 個程度しかないような、ごく小さなサブハローでは、期待される中性子星合体の個数が1個にも満たない。つまり多くの小さなサブハローでは、そもそもrプロセス元素がほとんどできないのかもしれない。実際、極度に暗い矮小銀河では、極端にrプロセス元素が少ないことが指摘されている²⁰⁾。ということは、逆に1回でも中性子星合体が起これば、そのサブハローでは非常に高い[Eu/Fe]に跳ね上がることになる。そのような矮小銀河が見つければ決定的であろう。rプロセス過剰の星の起源を明らかにするには、まだ時間がかかるかもしれないが、このような星がrプロセスの起源のみならず、銀河の形成過程の鍵を握っているようである。

5.2 銀のリングと銅のリングの謎

もし、EuやBaが中性子星の合体からできたとしても、それで鉄より重い元素のすべての起源がわかったことにはならない。2節の終わりで触れたように、金属欠乏星には[Sr/Ba]が過剰な星が少なからずある。どうもSrには、BaやEuとは別の起源もあるようだ。青木氏の記事の図3にあるように、金属欠乏星HD 122563は、Srの組成比が高いが、重い元素になるほど組成比が下がっていく傾向を示す²¹⁾。中性子の捕獲が十分に進まないような、弱rプロセスという過程を示すのではないかとされている。銀はできるかもしれないが、金を作ることはできないようなrプロセスである。もし、弱rプロセスが存在するとしたら、一体どのような星で起こるのだろうか。

和南城氏の記事の図5にあるような、太陽の9倍程度の星の（電子捕獲）超新星爆発が、一つの鍵を握っている。このような比較的軽い星の超新星爆発では、Sr程度までならば鉄より重い元素が作られる可能性があるが、BaやEuのような重い元素までではできない⁶⁾。ただし、この超新星爆発でrプロセスが起こっているわけではないことに

注意したい。もしこれがSrのもう一つの起源だったとして、4節のストーリーと矛盾することはないだろうか。

青木氏の記事の図4dをご覧ください。[Sr/Ba]が過剰な星は[Fe/H] $\simeq -3.5$ で多く現れ、金属量の増加に伴って徐々に[Sr/Ba] $\simeq 0$ に近づいていく。これは、Srだけを作るイベントが、rプロセスよりも先に起こったことを意味する。たとえ比較的軽い星でも超新星爆発の寿命は1,000万年程度であるので、典型的な中性子星の合体より十分早く起こる。そう考えると、[Sr/Ba]を過剰にした原因は、電子捕獲超新星と考えても矛盾しないであろう。

一方、[Fe/H] < -3.5 では、[Sr/Ba]が過剰な星は極端に少なくなっている。つまりこの段階では、電子捕獲超新星はまだ起こっていなかったと考えることもできる。では何がこのときのSrやBaを作ったのだろうか。それこそ、ごくまれな極度に近接した中性子星連星が、10万年程度の短い時間で合体した際に起こったrプロセスなのかもしれない。

電子捕獲超新星が、いわゆる弱rプロセスと呼んでいたものの正体なのか。一つの手掛かりは、亜鉛(Zn)から得られる可能性がある。電子捕獲超新星は、Srとともに銅や亜鉛などのやや重い鉄族元素も多く作るようだ⁶⁾。Srの多い星でZnも多ければ、これが弱rプロセスと呼んでいたものなのかもしれない。銀のリングの木と思っていたら、実は銅のリングの木だったのか。それは今後の研究でわかっていくことであろう。

はるか彼方でぼんやりとしていた金や銀や銅のリングの実る天空の果実の木が、こうして今少しずつ見えてこようとしている。その実を手にとつて見つめる日も遠くはないのかもしれない。今年の蜜入りリングを味わいながら、そんな夢に心を踊らせつつ、ともあれ筆をおくことにしよう。

謝 辞

本稿で紹介した研究は、Dr. Nicholas Prantzos (パリ天体物理学研究所) と和南城伸也氏 (国立天文台) との共同研究によって進められた。また将来この研究を支えるべく現在成長しつつあり、楽しく研究を進める環境を作ってくれた学生一同に感謝したい。

参考文献

- 1) Reeves H., 1981, *Patience dans l'Azur: L'évolution cosmique* (Édition du Seuil, Paris)
- 2) リーヴス H. (野本憲一, 野本陽代訳), 1985, 天空の果実 (岩波書店)
- 3) Sneden C., Cowan J., Lawler J. E., et al., 2003, *ApJ* 591, 936
- 4) Ishimaru Y., Wanajo S., Aoki W., Ryan S. G., 2004, *ApJ* 600, L47
- 5) Wanajo S., Ishimaru Y., 2006, *Nucl. Phys. A* 777, 676
- 6) Wanajo S., Janka H.-T., Müller B., 2011, *ApJ* 726, L15
- 7) Wanajo S., 2013, *ApJ* 770, L22
- 8) Wanajo S., Janka H.-T., 2012, *ApJ* 746, 180
- 9) Wanajo S., et al., 2014, in preparation
- 10) Tanvir N. R., Levan A. J., Fruchter A. S., et al., 2013, *Nature* 500, 547
- 11) Belczynski K., Perna R., Bulik T., Kalogera V., Ivanova N., Lamb D. Q., 2006, *ApJ* 648, 1110
- 12) Dominik M., Belczynski K., Fryer C., Holz D. E., Bertini E., Bulik T., Mandel I., O'Shaughnessy R., 2012, *ApJ* 759, 52
- 13) Pagel B. E. J., 1997/2009, *Nucleosynthesis and Chemical Evolution of Galaxies* (Cambridge University Press)
- 14) Argast D., Samland M., Thielemann F.-K., Qian Y.-Z., 2004, *A&A* 416, 997
- 15) Helmi A., Irwin M. J., Tolstoy E., et al., 2006, *ApJ* 651, L121
- 16) Kirby E. N., Lanfranchi, G. A., Simon J. D., Cohen J. G., Guhathakurta P., 2011, *ApJ* 727, 78
- 17) Dekel A., Woo J., 2003, *MNRAS* 344, 1131
- 18) Kirby E. N., Cohen J. G., Guhathakurta P., Cheng L., Bullock J. S., Gallazzi A., 2013, *ApJ* 779, 102
- 19) Prantzos N., 2008, *A&A* 489, 525
- 20) Frebel A., 2010, *Astronomische Nachrichten* 331, 474
- 21) Honda S., Aoki W., Ishimaru Y., Wanajo S., Ryan S., 2006, *ApJ* 643, 1180

Story of r-Process Elements Written in the Galactic Chronicle

Yuhri ISHIMARU

Department of Material Science, International Christian University, 3-10-2 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8585, Japan

Abstract: Where is the site of r-process, which produces elements heavier than iron? Clues are provided from chemical components of ancient stars in the Galactic halo. Observations of ancient stars show wide star-to-star scatters in the relative amount of r-process elements. This is a piece of the evidence for that r-process occurs only in particular stars. There are two candidates: one is a supernova, and the other is a neutron star merger. But which is the actual site? If we can decipher the message in stellar chemical components, using the way of galactic chemical evolution, we may understand when and which stars produce what kind of elements. Eventually, can we find the way to connect theories of stellar nucleosynthesis and observational evidence?