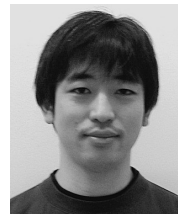


超新星爆発と宇宙初期の元素組成

富 永 望

〈国立天文台 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: nozomu.tominaga@nao.ac.jp



宇宙最初の重元素（金属）は超新星爆発によって供給された。これは多様な重元素を含む宇宙へ至る壮大な歴史の第一歩であり、その痕跡は金属欠乏星の中に残されている。本稿では、さまざまな超新星爆発における元素合成の様子を紹介し、金属欠乏星の元素組成と比較する。その結果から、金属欠乏星の多様性は超新星爆発の多様性（親星の質量・爆発エネルギー・エネルギー放出率の違い）を反映していることを示す。また、超新星爆発・ガンマ線バーストの起源について、金属欠乏星の元素組成から与えられる示唆を紹介する。

1. はじめに

ビッグバン直後の宇宙は、水素、ヘリウム、その他微量のリチウムなどの軽元素から構成されていた。それから現在に至る約 137 億年の間に、炭素、酸素、鉄などの多様な重元素（金属）を含む宇宙が形成されてきた。この進化過程は「宇宙化学進化」と呼ばれ、どのように現在の宇宙が作られてきたのかという謎を解明する取り組みが世界中で行われている。

宇宙化学進化は重元素量（金属量）^{*1} が時間とともに増加する宇宙の歴史である。重元素は星の進化・超新星爆発で合成され、星間空間に放出される。重元素で汚染されたガスから形成された次世代の星は、ガスの元素組成を取り込み宇宙化学進化のスナップショットを記録する。誕生した次世代星のうち、太陽質量 (M_{\odot}) の 8 倍以上の質量

をもつ星は超新星爆発を起こし、再び重元素を宇宙にまき散らす。この星形成・星の進化・超新星爆発というサイクルが宇宙化学進化の原動力である。一方で、軽い星は寿命が長く、宇宙初期に誕生した星でも現在まで生き残っている。それが、銀河系ハローで観測されている金属量の少ない星（金属欠乏星）であり、その元素組成は形成された当時の宇宙の元素組成を反映している^{*2}。このため、金属欠乏星の元素組成を観測するということは、宇宙初期の元素組成を観測することにほかならない。

1990 年代以降、HK サーベイ、Hamburg/ESO サーベイなどの大規模サーベイが行われ、多数の金属欠乏星の候補星が同定された。それらの詳細な元素組成はすばる望遠鏡や Very Large Telescope (VLT) などの大望遠鏡による高分散分光で決定され、宇宙初期の化学進化の一端が明らかに

^{*1} 金属量の指標としてよく用いられるのは、鉄と水素の組成比（鉄組成, $[\text{Fe}/\text{H}]$ ）である。ここで、 $[A/B] \equiv \log_{10}(A/B) - \log_{10}(A/B)_{\odot}$ は元素 A と元素 B の組成比を太陽組成比で規格化したもの。組成比の対数をとっており、 $[A/B]=0$ というのは A の量と B の量の比が太陽組成と同じ、 $[A/B]=-1$ というのは A の量の B の量に対する比が太陽組成の 10 分の 1 ということを意味する。

^{*2} ただし、金属欠乏星自身の対流や伴星・星間空間からの質量降着によって、表面の元素組成が変化している星も存在する。

されてきている^{1), 2)}.

本稿では、星の進化・超新星爆発における元素合成と金属欠乏星の元素組成との比較を通じて、金属欠乏星の起源・宇宙初期の化学進化・超新星爆発の物理に迫る研究について紹介したい。

2. 金属欠乏星

金属量の低い宇宙初期では、それまでに起こった超新星爆発の数が少なく、直前の超新星爆発による重元素汚染が支配的であった。超新星爆発によって放出されたガスは星間ガスを掃き集めながら星間空間に広がっていく。放出ガスと星間ガスの混合ガスから形成された星の元素組成は、超新星爆発によって放出された重元素と掃き集められた水素・ヘリウム・少量の重元素から構成される。星間ガス中の重元素の少ない時代に形成された星の元素組成は、一つの超新星爆発における元素合成そのものを反映していると考えてよく、そこから超新星爆発の物理を引き出すことが可能である。

[Fe/H] ≤ -2.5 の金属欠乏星では、*r* プロセス元素の鉄に対する組成比が数桁という大きな範囲でばらついている (図 1a)。これは [Fe/H] ≤ -2.5 では宇宙の元素組成が非均一であり、個々の超新星爆発の影響が残っているためだと考えられている。そこで、本稿では、[Fe/H] ≤ -2.5 の金属欠乏星について、個々の星の元素組成のほか、以下のような 2 点の特徴に着目する。

- **低い [Fe/H] で高い [C/Fe]:** 金属欠乏星の中には高い炭素の鉄に対する組成比 ([C/Fe]) を示す星 (炭素過剰金属欠乏星 (CEMP 星): [C/Fe] > 1) がある (図 1b)。CEMP 星の全金属欠乏星中に占める割合は低い [Fe/H] で大きく、特に、今までに発見された三つの [Fe/H] < -4.5 の金属欠乏星はともに炭素過剰である⁸⁾。

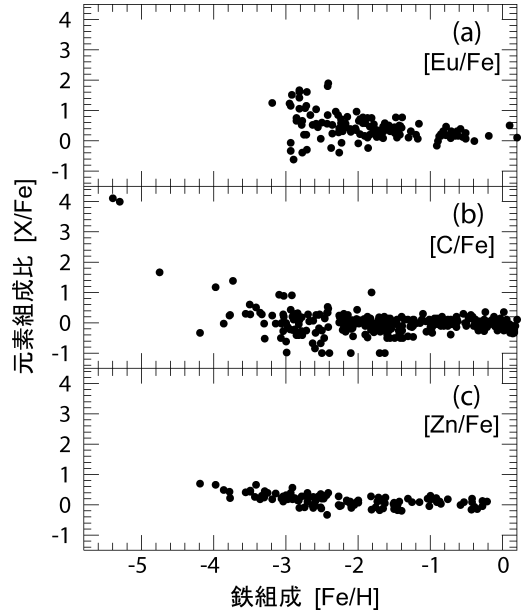


図 1 鉄組成と各元素の鉄に対する組成比の関係: (a) ユーロビウム (*r* プロセス元素), (b) 炭素, (c) 亜鉛. (過去に出版された論文²⁾⁻⁸⁾ のデータを筆者がまとめて作成.)

- **[X/Fe] vs. [Fe/H] のトレンド:** 炭素過剰でない金属欠乏星 (EMP 星) について、亜鉛より軽い元素 X の鉄に対する組成比 ([X/Fe]) には、[Fe/H] に対してトレンドを示すものがある^{*3} (図 1c)。そのばらつきは 1 桁程度であり、*r* プロセス元素の鉄に対する組成比のばらつきに比べると小さい。

以上の金属欠乏星の観測的特徴は、超新星爆発のどのような物理を反映しているのだろうか。

3. 星の進化と重力崩壊型超新星

星は核融合を起こし自身の重力を支えながら進化する。10M_☉ 以上の大質量星では、核燃焼が段階的に進み、最終的に鉄が合成される。超新星爆発直前の星内部は玉ねぎのような構造をしており、外側から水素、ヘリウム、炭素、酸素、

*3 例えば、低い [Fe/H] をもつ金属欠乏星は高い [Zn/Fe] を示す。

シリコン層，最も内側に鉄コアが形成されている⁹⁾。

鉄は最も安定な元素であるため，鉄コアでは核融合でエネルギーを取り出すことができない。その結果収縮し高温高密度になったコアでは，鉄が光子を吸収し分解される「鉄の光分解」によって暴走的な重力収縮が起こる。これが重力崩壊であり，その際に解放された重力エネルギーによって星が爆発する現象が重力崩壊型超新星である。しかし，重力崩壊型超新星の爆発メカニズム，つまり，解放された重力エネルギーがどのように外層に伝わるのかはいまだ明らかとなっておらず，さまざまな物理を取り入れた数値シミュレーションが精力的に行われている。

その一方で，超新星爆発の物理量は，明るさの時間進化（光度曲線）とスペクトルから観測的に明らかにすることができる。超新星の明るさからは光の源である ^{56}Ni ⁴⁾ の放出量が決まり，光度曲線のタイムスケールとスペクトルの幅からは爆発エネルギーと放出物質の全質量が決まる。観測から明らかにされた超新星爆発の物理量と星の進化モデルを組み合わせると，親星の質量を求めることができる。図2には，これまでに観測された重力崩壊型超新星がまとめられている。

親星の質量が $20M_{\odot}$ 以下の星は大体 10^{51} erg の爆発エネルギーで爆発し，約 $0.07M_{\odot}$ の ^{56}Ni を放出する。この爆発は標準的と考えられており，本稿では「標準的な超新星」と呼ぶ。一方，親星の質量が $20M_{\odot}$ 以上の星の超新星爆発では爆発エネルギー・ ^{56}Ni の放出量に大きなばらつきがある。特に， 10^{52} erg を超える爆発エネルギーで爆発する極超新星⁵⁾や，放出する ^{56}Ni の少ない暗い超

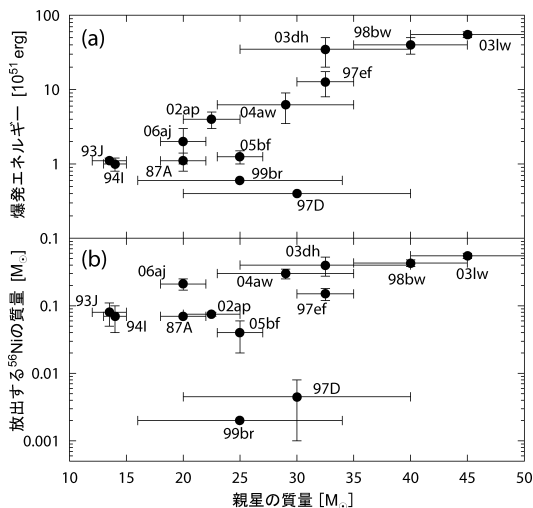


図2 重力崩壊型超新星の親星の質量と (a) 爆発エネルギー，(b) 放出する ^{56}Ni の質量の関係。

新星などが知られている。

また近年，一部の極超新星がガンマ線バースト (GRB) と呼ばれる宇宙で最も明るい爆発現象と同起源であることが明らかとなっている。特に，2005年までに赤方偏移 $z=0.2$ 以下の近傍で発見された3例の継続時間の長いガンマ線バースト (ロング GRB)⁶⁾ は，すべて極超新星を伴っていた。GRB はバーストと残光の観測から相対論的ジェットによる現象だと考えられており⁷⁾，極超新星・GRB の物理を理解するために，相対論的ジェットを伴う超新星爆発の計算が求められている。

4. ジェット状超新星爆発

極超新星・GRB のジェットを作り出すメカニ

*4 ^{56}Co を経て安定な ^{56}Fe へ崩壊する。

*5 非常に明るく，放出する ^{56}Ni の質量は $0.1M_{\odot}$ を超える。

*6 継続時間の短いガンマ線バースト (ショート GRB) も観測されている。ショート GRB は中性子星合体や強磁場中性子星による軟ガンマ線リピーターなどが起源なのではないかと言われている。

*7 2008年には，超新星の後期観測から，極超新星だけではなく標準的な超新星も非球対称な爆発であることが指摘された¹⁰⁾。

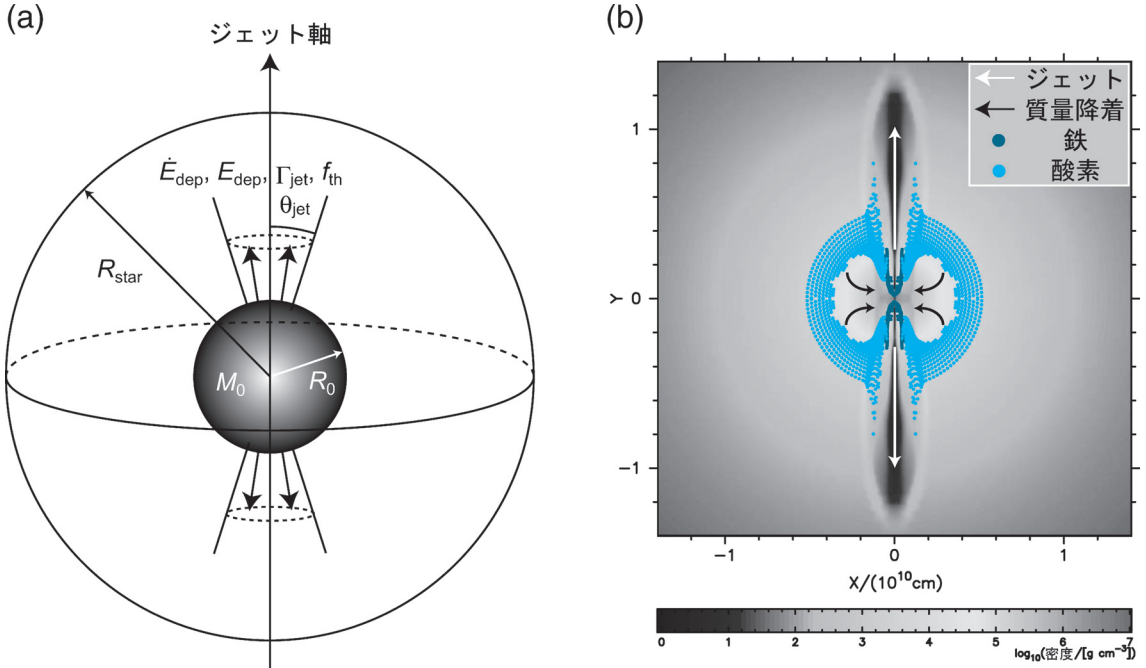


図3 (a) ジェット状超新星爆発のモデル. (b) ジェット状超新星爆発計算の様子.

ズムは、いくつか提案されている^{*8}が、いまだ明らかになっていない。そこで、本稿では、ジェットの形成メカニズムを問わずジェットが星中心から放出されたと仮定して^{*9} (図 3a), 特殊相対論的二次元流体・元素合成計算を行い、ジェット状超新星爆発によって放出される元素について調べた (図 3b)。

以前から指摘されていたが^{11), 12)}, ジェット状超新星爆発における元素合成ではエネルギー放出率が重要である。ジェットが放出されるためには、ジェットのラム圧力 (P_{jet}) が降着してくる物質のラム圧力 (P_{fall}) を上回らなければならない。ジェットのラム圧力はエネルギー放出率に依存す

る [$P_{jet}(\dot{E}_{dep})$]。一方で降着物質のラム圧力は星の密度構造によって決まり、爆発前に M_r, r の位置で $\rho_0(r)$ の密度をもっていた物質が R_0 まで降着したときのラム圧力は $P_{fall}(M_r) \propto \rho_0(r)r^{3/2}M_r$ という式^{*10}で与えられる。つまり、密度勾配が緩やかなほど、外層の密度が高くラム圧力が大きい。特に、酸素層の内側は緩やかな密度勾配をもっているため、酸素層内側の物質が降着する際のラム圧力と酸素層内側の物質を押し出すために必要なエネルギー放出率 ($\dot{E}_{dep, cri}^O$) は M_r によらずほぼ一定である (図 4a)。

図 4b には、ジェット状超新星爆発において、降着した物質の親星中での位置が示されている。

*8 ニュートリノによって降着円盤からエネルギーを抜き出すという説や磁場によって中心天体からエネルギーを抜き出すという説などがある。

*9 エネルギー放出率 (\dot{E}_{dep}), 全放出エネルギー (E_{dep}), 速度 (Γ_{jet}), 開き角 (θ_{jet}), 熱エネルギーの全エネルギーに対する割合 (f_{th}) という五つのパラメーターで書き表されるジェットが、 $40M_{\odot}$ の星 (半径 R_{star}) の位置 R_0, M_0 から放出されたと仮定した。

*10 密度勾配が $\rho_0(r) \propto r^{-9/4}$ より急であると、 $dP_{fall}(M_r)/dM_r$ は負である。

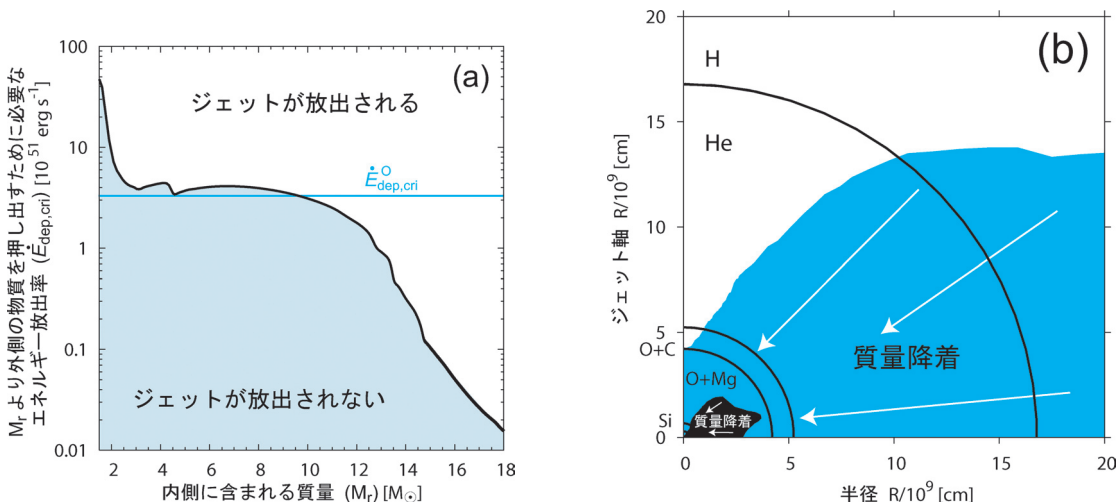


図4 (a) 爆発前に M_r の位置にあった物質を押し出すために必要なエネルギー放出率 ($\dot{E}_{dep,cri}$, 黒線). $P_{jet}(\dot{E}_{dep,cri}) = P_{fall}(M_r)$ である. ここで, $\Gamma_{jet} = 100$, $\theta_{jet} = 15^\circ$, $f_{th} = 10^{-3}$, $R_0 \sim 900 \text{ km}$ ($M_0 = 1.4 M_{\odot}$) を仮定した. 酸素層は $M_r 4\text{--}14 M_{\odot}$ で, この場合 $\dot{E}_{dep,cri}^O \sim 3 \times 10^{51} \text{ erg s}^{-1}$ (青線) である. (b) ジェット状超新星爆発において降着した物質の親星中での位置 [黒: 高いエネルギー放出率をもつ爆発 ($\dot{E}_{dep} = 1.2 \times 10^{53} \text{ erg s}^{-1}$), 青: 低いエネルギー放出率をもつ爆発 ($\dot{E}_{dep} = 1.5 \times 10^{51} \text{ erg s}^{-1}$)].

ジェットに沿った方向からは内側の物質が放出される一方で、ジェットと垂直な方向からは外側の物質でも降着する。また、エネルギー放出率によって降着する質量が大きく異なり、 $\dot{E}_{dep} > \dot{E}_{dep,cri}^O$ であると酸素層の物質はジェットに押し出され放出されるが、 $\dot{E}_{dep} < \dot{E}_{dep,cri}^O$ であると酸素層の物質は降着しほとんど放出されない。

超新星爆発で放出される重元素のうち、炭素、酸素、マグネシウムは星の進化過程で合成されたものがほとんどである。ジェット状超新星爆発による放出量は、それらがどれだけ降着するかによって決まる。エネルギー放出率が低い爆発では、内側に存在するマグネシウム・酸素は、質量降着の影響をより強く受けるため、外側に存在する炭素に比べてその放出量をより減らす。そのため、低いエネルギー放出率をもつ爆発では、高い炭素と酸素・マグネシウムの組成比 ([C/O],

[C/Mg]) が実現される (図 5a)。

ジェット状超新星爆発で放出される鉄は、爆発的に合成された鉄がジェットとして放出された鉄^{*11}である。エネルギー放出率の低い爆発では、 $P_{jet}(\dot{E}_{dep}) > P_{fall}(M_r)$ となる M_r まで物質が降着して初めてジェットが放出される。そのとき、星の密度は低くなっており、またジェットの単位体積当たりのエネルギーも小さいため、温度が上がり爆発的元素合成が弱い。さらに、合成された鉄も降着してしまう。その結果、エネルギー放出率の低い爆発では、放出される鉄が少なく、高い [C/Fe] が実現される (図 5ab)。特に、エネルギー放出率が非常に低い爆発では ($\dot{E}_{dep} \leq 1.5 \times 10^{51} \text{ erg s}^{-1}$)、鉄は爆発的に合成されず、ジェットとして放出された鉄が支配的である。

以上のように、ジェット状超新星爆発のエネルギー放出率の多様性は、鉄の放出量、[C/O],

*11 ジェットの組成は、ジェットが放出されるまでに降着した物質の足し合わせと仮定した。本稿では相対論的ジェットを考えているためジェットの質量は小さい。例えば $\dot{E}_{dep} = 1.5 \times 10^{52} \text{ erg}$ で $\Gamma = 100$ を実現するためには、ジェットの質量は $M_{jet} = E/c^2/(\Gamma - 1) \sim 10^{-4} M_{\odot}$ 以下でなければならない。

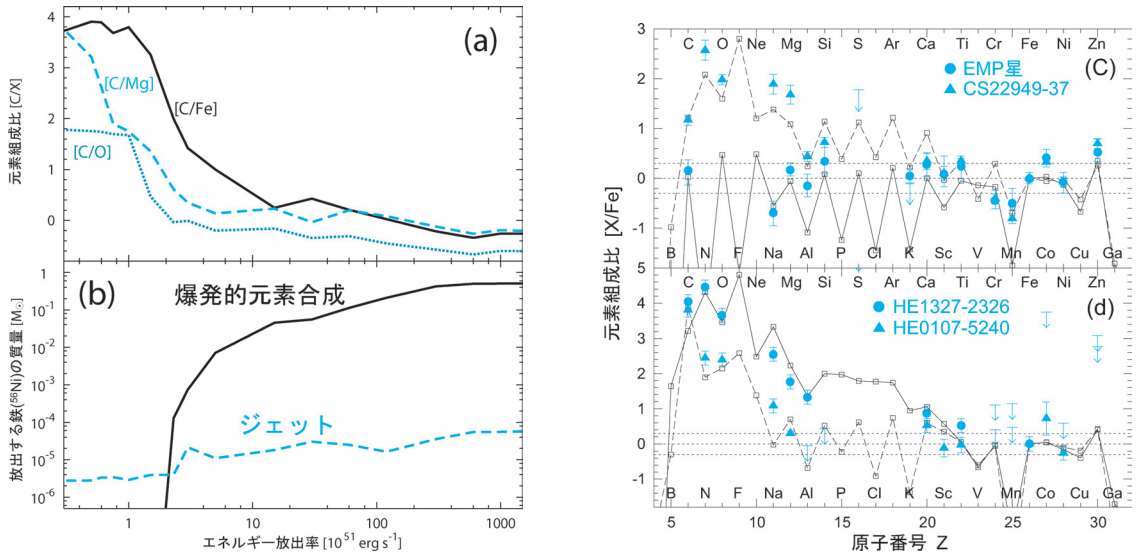


図5 (左) エネルギー放出率に対する依存性. (a) 元素組成比 ([C/Fe] (実線), [C/Mg] (破線), [C/O] (点線)), (b) 放出する鉄 (^{56}Ni) の質量 (爆発的元素合成によって合成された鉄 (実線), ジェットとして放出された鉄 (破線)). (右) 金属欠乏星の元素組成とジェット状超新星爆発の比較. (c) EMP 星⁵⁾ (丸), CS 22949–37³⁾ (三角) と $\dot{E}_{\text{dep}}=1.2 \times 10^{53} \text{ erg s}^{-1}$ (実線), $\dot{E}_{\text{dep}}=3 \times 10^{51} \text{ erg s}^{-1}$ (破線) をもつ爆発, (d) HE 1327–2326⁷⁾ (丸), HE 0107–5240⁴⁾ (三角) と $\dot{E}_{\text{dep}}=1.5 \times 10^{51} \text{ erg s}^{-1}$ (実線), $\dot{E}_{\text{dep}}=0.5 \times 10^{51} \text{ erg s}^{-1}$ (破線) をもつ爆発.

[C/Mg], [C/Fe] の多様性を作り出す. [C/O], [C/Mg], [C/Fe] 以外の元素組成比についても, エネルギー放出率の異なるジェット状超新星爆発によって, さまざまな金属欠乏星の元素組成が再現される (図 5cd). 高い [C/Fe] を示す超新星爆発は放出する鉄が少なく, その超新星によって汚染されたガスから形成される次世代星の [Fe/H] は低いことが期待される. これは, 低い [Fe/H] で CEMP 星の割合が増えるという傾向を定性的に説明する.

4.1 ガンマ線バーストと金属欠乏星の関連

上記計算は宇宙初期におけるジェット状超新星爆発計算であったが, エネルギー放出率に依存して放出される鉄 (^{56}Ni) の質量 [$M(^{56}\text{Ni})$] が異なるという性質は, ジェットと降着物質のラム圧力の釣り合いに基づいており, 金属量によらずその

依存性は変わらない*¹².

もし各ガンマ線バーストでエネルギー放出率が異なるとすると, 異なる $M(^{56}\text{Ni})$, つまり異なる明るさをもった超新星が付随することが期待される. 例えば, EMP 星の元素組成を再現する爆発は, 超新星 1998bw などの極超新星に匹敵する量の ^{56}Ni を放出する [$M(^{56}\text{Ni}) > 0.1 M_{\odot}$]. 一方で, CEMP 星の元素組成を再現する爆発は $M(^{56}\text{Ni}) \leq 10^{-3} M_{\odot}$ の ^{56}Ni を放出し, その明るさは超新星 1998bw の約 100 分の 1 以下と非常に暗い.

2006 年に 2 例の GRB 060505, GRB 060614 が, 赤方偏移 $z=0.089$, $z=0.125$ という近傍で発見された. それらはその継続時間からロング GRB に分類され, 付随する極超新星をとらえようと世界中で追観測が行われた. しかし, その残光中に超新星による増光は観測されず, (超新星が付随し

*¹² ただし, $\dot{E}_{\text{dep, cri}}^0$ は星の密度構造に依存する. 金属量の高い星は密度が低いため, 小さい $\dot{E}_{\text{dep, cri}}^0$ をもつ.

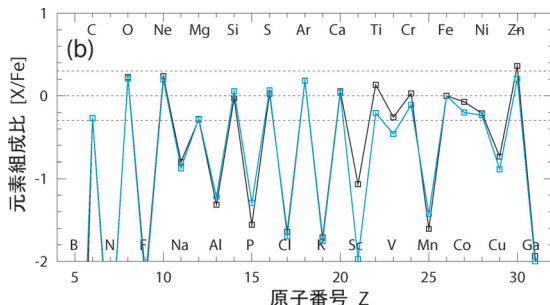
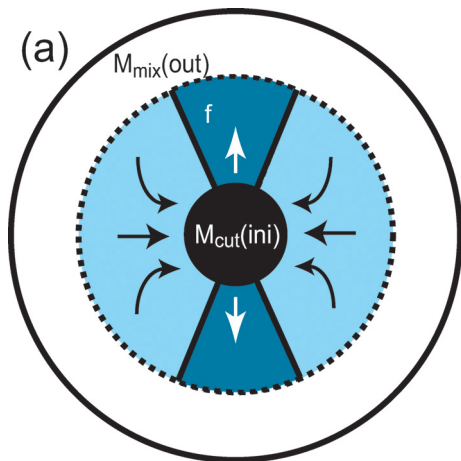


図6 (a) 混合降着モデルの描像の一つ。 $M_{\text{mix}}(\text{out})$ の外側からはすべての物質が放出されるが、 $M_{\text{cut}}(\text{ini})$ と $M_{\text{mix}}(\text{out})$ の間からはジェットに沿った方向からのみ物質が放出され、その放出される割合を f としている。
 (b) ジェット状超新星爆発（黒）、混合降着モデル（青）の元素組成比の比較。

ていたとしても) 超新星 1998bw の 100 分の 1 以下の明るさしかもたないという上限値が与えられた。

この上限値は CEMP 星に対応するジェット状超新星爆発によって矛盾なく再現される^{*13}。ジェット状超新星爆発のエネルギー放出率の多様性は、金属欠乏星の多様性のみならず、ガンマ線バーストに付随した超新星爆発の多様性も説明する。ジェット状超新星爆発を起源とするガンマ線バーストと金属欠乏星の関係については、今後の詳細な研究で明らかにされてくるだろう。

5. 親星の質量と爆発エネルギー

図 5a に示されているように、EMP 星の元素組成比を再現するエネルギー放出率の高い爆発では ($\dot{E}_{\text{dep}} \geq 3 \times 10^{52} \text{ erg s}^{-1}$)、異なるエネルギー放出率をもつ爆発でも元素組成比はあまり変わらない。では、EMP 星で観測されている $[X/\text{Fe}]$ vs. $[\text{Fe}/\text{H}]$ のトレンドは何に起因しているのだろうか？

現在の重力崩壊型超新星では、親星の質量と爆発エネルギー・ ^{56}Ni の放出量に関係があることが指摘されている(図 2)。本節では、13, 15, 18, 20, 25, 30, 40, $50M_{\odot}$ の八つの親星のモデルについて超新星の爆発計算を行い、親星の質量と爆発エネルギーの元素合成への影響を調べた^{*14}。超新星爆発は非球対称な現象と言われているが、八つのモデルで多次元計算を行うのは時間がかかるため、混合降着モデル¹³⁾を用いて非球対称性の効果を近似的に取り入れる。

混合降着モデルは三つのパラメーター $M_{\text{cut}}(\text{ini})$, $M_{\text{mix}}(\text{out})$, f を用いて非球対称爆発を近似するモデルで、 $M_r < M_{\text{cut}}(\text{ini})$ の物質は降着、 $M_{\text{cut}}(\text{ini}) < M_r < M_{\text{mix}}(\text{out})$ からは割合 f で放出、 $M_{\text{mix}}(\text{out}) < M_r$ の物質はすべて放出されるとしている。このモデルの想定している状況の一つは図 6a のようなジェットを伴う爆発である。混合降着モデルとジェット状超新星爆発の放出物質の元素組成比を比較してみると(図 6b)、スカンジウム、チタン、

*13 中性子星合体や中性子星+白色矮星合体で長い継続時間が説明できるという説(この場合当然超新星爆発は観測されない)も提案されており、議論が続いているところである。

*14 ここで、13, 15, $18M_{\odot}$ のモデルは 10^{51} erg で爆発する標準的な超新星、 $20M_{\odot}$ 以上のモデルは 10^{52} erg 以上のエネルギーで爆発する極超新星としている。また、爆発エネルギーは瞬間的に放出されたと仮定している。

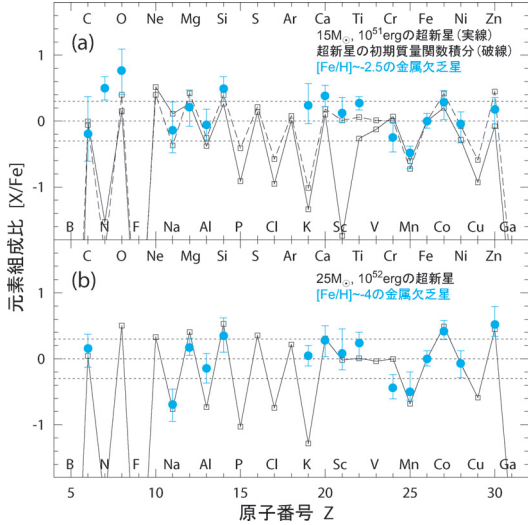


図7 金属欠乏星の元素組成比(点)と超新星モデル(線)の比較。(a) $[Fe/H] \sim -2.5$ の金属欠乏星⁵⁾と標準的な超新星 ($15M_{\odot}$, $E = 10^{51}$ erg, 実線)・超新星の初期質量関数積分(破線), (b) $[Fe/H] \sim -4$ の金属欠乏星⁵⁾と極超新星 ($25M_{\odot}$, $E = 10^{52}$ erg)。

コバルト, 亜鉛の合成量を低く見積もっている*15 以外は, 混合降着モデルがジェット状超新星爆発の元素組成をよく再現できていることがわかる。

5.1 個々の金属欠乏星の元素組成

EMP星のうち, $[Fe/H] \sim -2.5$ の星は太陽組成程度の $[Zn/Fe] (\sim 0)$ を示す。これは, 標準的な超新星, または標準的な超新星・極超新星の初期質量関数*16積分によってよく再現される(図7a)。一方で, $[Fe/H] \sim -4$ の金属欠乏星は高い $[Zn/Fe] (\sim 0.5)$ を示し, これを実現するためには高エントロピー環境での爆発的元素合成が必要である。このことから $[Fe/H] \sim -4$ の金属欠乏星の起源は極超新星であると考えられる(図7b)。

ところで, 第一世代星形成シミュレーション

*15 ジェット状超新星爆発では爆発エネルギーがジェット方向へ集中し, 高エントロピー環境が実現されるため, これらの元素の合成量が多い。

*16 星形成時に星の質量がどのような分布をしていたのかを表す関数。ここでは, Salpeterの初期質量関数 $[n(M) \propto M^{-2.35}]$ を仮定している。

*17 第一世代星の周囲に重元素を含まない $40M_{\odot}$ 程度の第二世代星が形成されるという指摘もあり¹⁵⁾, 本稿の結果と合わせて考えると, 重元素を含まない第二世代星の超新星爆発が金属欠乏星の起源として重要なかもしれない。

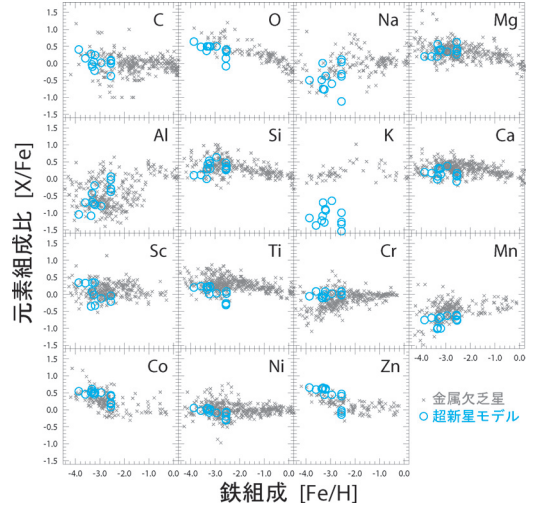


図8 金属欠乏星の元素組成^{5), 6)}(灰)とさまざまな質量をもつ星の超新星モデル(青)との比較。

では, 第一世代星は $100M_{\odot}$ を超えるような非常に重い星だったのではないかとされている^{14), 15)}, *17. $140-300M_{\odot}$ の質量をもつ星は重力崩壊型超新星ではなく, e^-e^+ を形成する電子対生成型超新星(Pair-instability supernova)を起こす。しかし, 電子対生成型超新星によって放出される元素の組成と金属欠乏星の元素組成とは全く一致せず, 電子対生成型超新星は金属欠乏星の起源として適当ではない¹³⁾。では, $300M_{\odot}$ 以上の質量をもつ星についてはどうだろうか? そういった星は電子対生成を起こすものの最終的には鉄の光分解によって重力崩壊する。そのような巨大質量星の進化・超新星爆発の研究は最近ようやく開始されたばかりで¹⁶⁾, 巨大質量星は超新星爆発を起こすのか, そしてそれは金属欠乏星の起源として適当なのかという疑問には今後の研究が答えてくれ

るだろう。

5.2 [X/Fe] vs. [Fe/H] のトレンド

低金属環境で形成される星の [Fe/H] は、超新星爆発によって放出される鉄の質量と掃き集められる水素の質量で決まる。超新星爆発による衝撃波は減速しながら星間空間に拡がり、その速度が周囲の音速と同程度になると消えてしまう。その時までには掃き集める星間ガスの質量は爆発エネルギーにほぼ比例するため¹⁷⁾、形成される星の [Fe/H] は、超新星爆発の爆発エネルギー (E) を用いて $[Fe/H] \sim \log(M(Fe)/E) + C$ (C は星間ガスの密度などによる定数) という形で書き表すことができる。

上の式に基づくと、標準的な超新星 ($E = 10^{51}$ erg, $M(^{56}Ni) = 0.07M_{\odot}$) と極超新星 ($E > 10^{52}$ erg, $M(^{56}Ni) > 0.1M_{\odot}$) では、極超新星を起源として形成される星の [Fe/H] のほうが低い。一方で、極超新星では大きな爆発エネルギーによって、高い [Zn/Fe] が実現される。以上の2点により、低い [Fe/H] をもつ星ほど高い [Zn/Fe] をもつ。これは金属欠乏星の [Zn/Fe] のトレンドと一致している。他の元素についても超新星爆発の親星の質量・爆発エネルギーの違いによってトレンドが比較的よく再現できている (図8)。このことは、EMP 星の元素組成の多様性が、超新星爆発の爆発エネルギー・親星の質量の多様性を反映しているということを示唆している。

6. まとめ、今後の展望

金属欠乏星の元素組成の多様性は、超新星爆発の親星の質量・爆発エネルギー・エネルギー放出率などの多様性を反映している。特に、金属欠乏星の [C/O], [C/Mg], [C/Fe] はジェット状超新星爆発のエネルギー放出率の違いを反映しており、より低いエネルギー放出率をもつ爆発はより炭素過剰な金属欠乏星の元素組成を再現する。ま

た、EMP 星で観測される [X/Fe] vs. [Fe/H] のトレンドは超新星爆発の親星の質量と爆発エネルギーの多様性によって再現される。

以上のように、金属欠乏星を用いた宇宙初期の化学進化の研究では、個々の金属欠乏星の元素組成という「点」の解釈だけではなく、元素組成のトレンドという「線」の解釈が可能となってきた。これは、詳細な元素組成の測定された金属欠乏星の数が増えてきたこと、超新星爆発の詳細なモデルが得られたことによる。今後、SEGUE, Skymapper, 計画段階であるが WFMOS などの新しい観測プロジェクト、観測装置によって、数年から十数年の間に金属欠乏星の観測数が飛躍的に増大することが期待される。これにより、さまざまな元素組成比をもつ金属欠乏星の観測から宇宙初期の超新星爆発のさまざまな特徴をそれぞれ決定するという「面」の研究が発展し、宇宙初期の大質量星の初期質量関数や超新星爆発の爆発エネルギー分布などの統計的な情報を引き出すことができるのではないかと期待している。

また、金属欠乏星の起源に対する詳細な研究は、超新星爆発の爆発メカニズムについての示唆を与えてくれる。これは、超新星爆発・GRB の観測に加えて超新星爆発の爆発メカニズムを探る新しい手段となりうる。さらに、金属欠乏星から明らかにされた宇宙初期の超新星爆発の特徴は遠方の超新星爆発・GRB に対する予言を与え、宇宙初期と現在の超新星爆発・GRB の比較はそれらの進化を教えてくれるかもしれない。これは、銀河進化・宇宙進化の解明という観点からも重要な一歩となるのではないだろうか。

謝辞

本稿は筆者の博士学位論文の一部をまとめたものであり、3編の論文¹⁸⁾⁻²⁰⁾にまとめられています*18。指導教員の野本憲一氏、共同研究者である

*18 本稿中で引用した研究の詳細な引用元はこれらの論文を参照してください。

梅田秀之氏, 前田啓一氏, 岩本信之氏, 田中雅臣氏, 鈴木知治氏, P. A. Mazzali 氏ほか有意義な議論をさせていただいた方々に感謝いたします。また筆者は日本学術振興会の特別研究員として採用され, 本稿の一部は研究奨励金, 科研費補助金を用いて行った研究に基づいています。

参考文献

- 1) 本田敏志, 2006, 天文月報 99, 358
- 2) 青木和光, 2007, 天文月報 100, 615
- 3) Depagne E., et al., 2002, A&A 390, 187
- 4) Christlieb N., et al., 2002, Nature 419, 904
- 5) Cayrel R., et al., 2004, A&A 416, 1117
- 6) Honda S., et al., 2004, ApJ 607, 474
- 7) Frebel A., et al., 2005, Nature 434, 871
- 8) Beers T. C., Christlieb N., 2005, ARA&A 43, 531
- 9) 野本憲一, 他, 2007, 元素はいかにつくられたか—超新星爆発と宇宙の化学進化 (岩波書店)
- 10) Maeda K., et al., 2008, Science 319, 1220
- 11) Maeda K., Nomoto K., 2003, ApJ 598, 1163
- 12) Nagataki S., Mizuta A., Yamada S., Takabe H., Sato K., 2003, ApJ 596, 401
- 13) Umeda H., Nomoto K., 2002, ApJ 565, 385
- 14) 吉田直紀, 2006, 天文月報 99, 452
- 15) 大向一行, 2006, 天文月報 99, 462
- 16) Ohkubo T., et al., 2006, ApJ 645, 1352
- 17) Shigeyama T., Tsujimoto T., 1998, ApJ 507, L135

- 18) Tominaga N., et al., 2007, ApJ 657, L77
- 19) Tominaga N., Umeda H., Nomoto K., 2007, ApJ 660, 516
- 20) Tominaga N., 2007, ApJ, submitted (arXiv: 0711.4815)

Supernova Nucleosynthesis and Elemental Abundances in the Early Universe

Nozomu TOMINAGA

National Astronomical Observatory, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: The first metal enrichment in the universe was made by supernova explosions of population III stars. The evolution of the early universe is traced by extremely metal-poor (EMP) stars. In this paper, supernova nucleosynthesis is reported and compared with the abundance patterns of the EMP stars. The variations of the EMP stars stem from variations of supernova properties: main-sequence masses, explosion energies, and energy deposition rates. Future detailed studies could constrain the explosion mechanism of gamma-ray bursts and supernovae.