

# 超新星爆発時に生成される軽元素の存在度比

吉田 敬

〈九州大学六本松地区物理学教室／日本学術振興会特別研究員 〒 810-8560 福岡市中央区六本松 4-2-1〉  
e-mail:tyoshida@gemini.rc.kyushu-u.ac.jp

隕石中にはプレソーラーグレインと呼ばれる星の元素合成時の同位体比を保持していると考えられているグレインが含まれている。これらグレインの同位体比とさまざまな元素合成過程で生成される元素の同位体比を比較することでプレソーラーグレインの起源を推定できる。ここでは超新星爆発起源のプレソーラーグレインを判別するために超新星爆発時にヘリウム層と水素層で生成される微量軽元素 (Li, Be, B) と C, N, O 元素の同位体比、存在度比のとりの範囲を調べた。

## 1. 物質天文学

昔から天文学者は星を観測することで宇宙の姿を調べてきた。さまざまな手法を用いて星を観測し、観測を再現する理論を展開することで星、そして宇宙のさまざまな姿を我々は知ってきた。一方で最近、星を観測することとは全く別の手法で宇宙の姿を知ろうとする試みが行われている。それは隕石を分析することによって太陽系内だけでなくさまざまな種類の星の情報を直接手に取ろうという試みである。隕石中にはごく少量ながら太陽系元素存在度と大きく異なる組成をもつグレイン (プレソーラーグレイン) が存在する。グレインの特徴的な元素組成から星内部の情報をとりだすことによりこれらグレインがどのような星で作られたかを探ろうというのである。しかし、グレイン中の元素組成と星内部の元素組成とを比較するには隕石の分析だけでなくさまざまな星で生成される元素の組成を知る必要がある。

本研究では超新星爆発起源のプレソーラーグレインを判別するため、超新星爆発で生成される元素の組成の傾向を調べる。ここでは本研究で行われている超新星爆発時の元素合成計算を紹介し、超新星爆発で生成された元素の組成をどのようにプレソーラーグレインの元素組成と比較するかを示す。

## 2. プレソーラーグレイン

隕石の組成を求める手法のひとつとして、いくつかの元素の同位体比を分析する方法がある。同位体は化学的に同じ性質を持つため、隕石中における同位体比は非常に均一でほとんどの場合は太陽系元素存在度における同位体比からせいぜい数%程度の違いしか生じない。ところが、隕石中にはごくわずかながら太陽系元素組成と非常に異なる元素の同位体比を持つ微小なグレインが存在する。隕石を化学処理することにより数ミクロン以下のグレインをとりだすと、これらグレインの中に元素の同位体比が太陽系元素存在度から大きく異なるグレインが含まれる。個々のグレインの同位体比にも非常に大きなばらつきがあり、元素によっては同位体比のばらつきの範囲が数桁に及ぶものもある。このように非常に大きな同位体比のばらつきを太陽系形成時の質量分別などで説明するのは難しく、これらグレインは太陽系形成以前にグレインが作られた時の星の元素合成時の同位体比を保持していると考えられている。そのため、これらグレインはプレソーラーグレインと呼ばれる。

プレソーラーグレインに含まれる元素の同位体比は元素合成時の情報を保持していると考えられることから、測定されたプレソーラーグレイン中の元素同位体比の特徴とさまざまな星の中で合成され

る元素の同位体比の特徴を比較することでプレソラーグレインの起源を探ることができる。ただし、プレソラーグレインの同位体比結果と比較するためには星全体で生成される元素の総量から求めた同位体比でなく、星内部での不均一を考慮した上で同位体比のとりうる範囲を議論する必要がある。あるプレソラーグレインのいくつかの元素の同位体比がある種類の星の内部での元素の同位体比の範囲に含まれるならば、そのグレインはその種類の星の起源と考えることができる。

これまで、プレソラーグレイン中の C, N, O, Al, Si, Ca, Ti 等といった元素の同位体比が測定されている<sup>1)</sup>。そして、これら測定された元素の同位体比と元素合成の理論から得られた同位体比を定性的、定量的に比較することによって AGB 星や超新星爆発を起源とするプレソラーグレインを特定しはじめて<sup>1)</sup>、超新星爆発起源のプレソラーグレインは主に<sup>28</sup>Si の過剰や<sup>44</sup>Ti の存在によって判別されている<sup>2), 3), 4), 5)</sup>。しかし、<sup>44</sup>Ti が検出されないグレインもあることや他の元素の同位体比では超新星爆発時に生成される元素の同位体比と一致しない場合があることなど問題点も残されている<sup>5)</sup>。そこで、できるだけ多くの種類の元素で同位体比等を比較できるようにすることと、同位体比のとりうる範囲を明確にすることが重要となる。

本研究では超新星爆発時に生成される Li, Be, B という微量軽元素と C, N, O という比較的多く生成される軽元素に注目する。Li, Be, B は主にヘリウム層や水素層という星の比較的外側の部分で生成される。一方、炭素や酸素は主に星の内側の部分で生成されるが、<sup>13</sup>C や<sup>17</sup>O, <sup>18</sup>O, 窒素は主に星の外側の部分で生成される。そのため本研究では超新星爆発時にヘリウム層や水素層で生成されるこれら軽元素に注目する。そして、ヘリウム層、水素層におけるこれら軽元素の生成過程を調べるとともに軽元素の同位体比や存在度比のとりうる範囲を明らかにする。

### 3. 超新星爆発モデル

#### 3.1. 超新星爆発モデル

超新星爆発時に生成される元素の生成量は超新星爆発時の爆発的要素合成過程を数値的に解くことで得られる。本研究では簡単な爆発モデルを用いて超新星爆発時の温度、密度進化を追い、超新星爆発中に進行する核反応を解く。超新星爆発前の星の構造は  $16.2M_{\odot}$  の爆発直前の星の密度構造<sup>6)</sup> を半径のべき乗で近似したものを扱う。爆発モデルは半径のべき乗で近似した密度構造の物質中での球対称中心爆発のモデルを用いる<sup>7), 8)</sup>。爆発のエネルギーは  $1 \times 10^{51}$  erg とした。この爆発モデルを用いて超新星爆発中の衝撃波の伝播および星内部の温度、密度進化を追った。核反応を数値的に追うための核反応ネットワークには中性子、水素からマグネシウムまでの核種が含まれている<sup>8)</sup>。

#### 3.2. ニュートリノプロセス

超新星爆発時には Li, Be, B はニュートリノプロセスという生成過程を経て生成される。ここではニュートリノプロセスについて簡単に説明する(文献9参照)。超新星爆発時には約  $10^{58}$  個という大量のニュートリノが放出される。そのため原子核とニュートリノとの反応断面積が小さいにもかかわらず原子核はニュートリノと非弾性衝突を起こして励起される。励起された原子核はすぐに小さい原子核に分裂したり電子や陽電子を放出する。これがニュートリノプロセスの一連の反応過程である。励起後に放出される原子核は主に陽子、中性子、ヘリウム原子核である。考えるニュートリノの種類はミューニュートリノ、タウニュートリノ、電子ニュートリノとそれぞれの反粒子である。超新星爆発時にニュートリノが運び去る全エネルギー(ニュートリノ全エネルギー)は  $3 \times 10^{53}$  erg、ニュートリノの平均エネルギーは温度に換算して電子ニュートリノとその反ニュートリノ

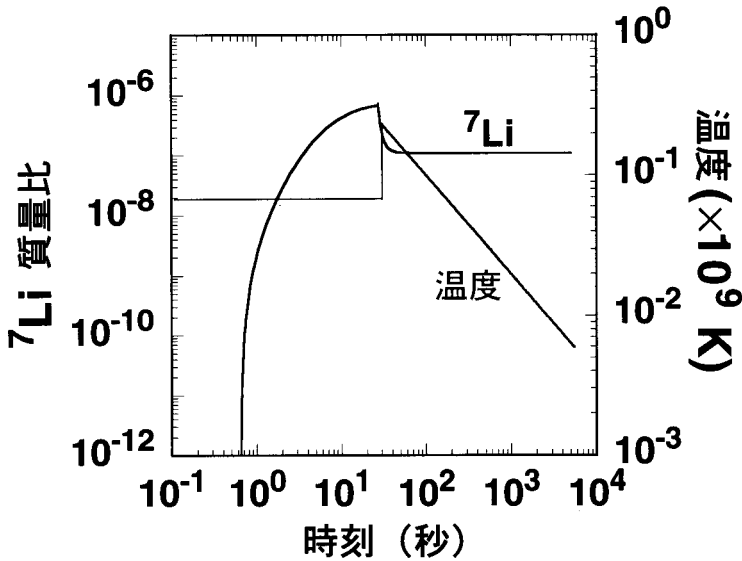


図1. ヘリウム層中部における ${}^7\text{Li}$ 質量比（黒線）と温度（青線）の時間進化。27秒のところで衝撃波が到達し、温度が上がり爆発的元素合成による核反応が進行する。

については4MeV、それ以外のニュートリノについては8 MeVと設定した。ニュートリノは星の中心にある鉄のコアが重力崩壊するとき中心から放出され、ニュートリノ流束はその後3秒の減衰時間で指数関数的に減少する。しかし、これらニュートリノ照射に関するパラメータはまだ不定性がある。本研究ではニュートリノ照射に関する不定性としてニュートリノ全エネルギーとニュートリノ流束の減衰時間（ニュートリノ照射時間）に注目した。軽元素の存在度比の範囲を求めるときには（5節参照）ニュートリノ全エネルギーを $1 \times 10^{53}$ erg,  $6 \times 10^{53}$ ergにした場合と、ニュートリノ照射時間を1秒、10秒にした場合をあわせて求めた。

## 4. 軽元素生成過程

### 4.1. ${}^7\text{Li}$ 生成過程

まず、 ${}^7\text{Li}$ の生成過程を例にして軽元素の生成過程の一例を示す。図1はヘリウム層の中部（質量座標（後述）で $5.0M_{\odot}$ ）における超新星爆発時の

${}^7\text{Li}$ 質量比の時間変化と温度変化を示している。時刻0は星の中心で爆発が起きた時刻である。時刻27秒までは温度は一定で、 ${}^7\text{Li}$ 存在度は増加している。この時は中心から衝撃波はまだ到達していないが、ヘリウム層に大量のニュートリノが照射されることによってニュートリノプロセスとそれに続く元素合成が起こり ${}^7\text{Li}$ が生成されている。27秒後に衝撃波が通過すると層の中の温度が上昇する。この位置では最高到達温度は $2.4 \times 10^8$  Kである。生成された ${}^7\text{Li}$ は温度上昇後すぐに熱核反応によって ${}^4\text{He}$ に分解される。衝撃波通過後は爆発によって層全体が膨張し温度と密度は下がる。

それによって熱核反応も凍結される。

### 4.2. 微量軽元素生成量

超新星爆発によってヘリウム層と水素層で生成された微量軽元素の質量比分布を図2に示す。この図の横軸は質量座標（内側に含まれる総質量）を示しこのモデルでは $3.8 \sim 6.0M_{\odot}$ がヘリウム対流層、 $6.0 \sim 6.5M_{\odot}$ がヘリウム輻射層、 $6.5M_{\odot}$ よりも外側が水素層である。微量軽元素の中では ${}^7\text{Li}$ と ${}^{11}\text{B}$ が比較的多くヘリウム層と水素層の内側で生成されていることがわかる。ヘリウム層では質量比でおよそ $10^{-8} \sim 10^{-6}$ の範囲、水素層内側で $10^{-8}$ 以下である。これらはヘリウム層の中においても異なる質量比をとることがわかる。 ${}^{10}\text{B}$ はこれら2種類の核種ほど多くないがヘリウム層で生成される。ヘリウム層での質量比はおよそ $10^{-11} \sim 10^{-9}$ の範囲である。しかし、水素層の内側では ${}^{10}\text{B}$ は生成されてもすみやかに壊される。 ${}^6\text{Li}$ と ${}^9\text{Be}$ はヘリウム層の外側でごく少量生成される。これらの核種はニュートリノプロセスを通して超新星爆発中に一度は生成さ

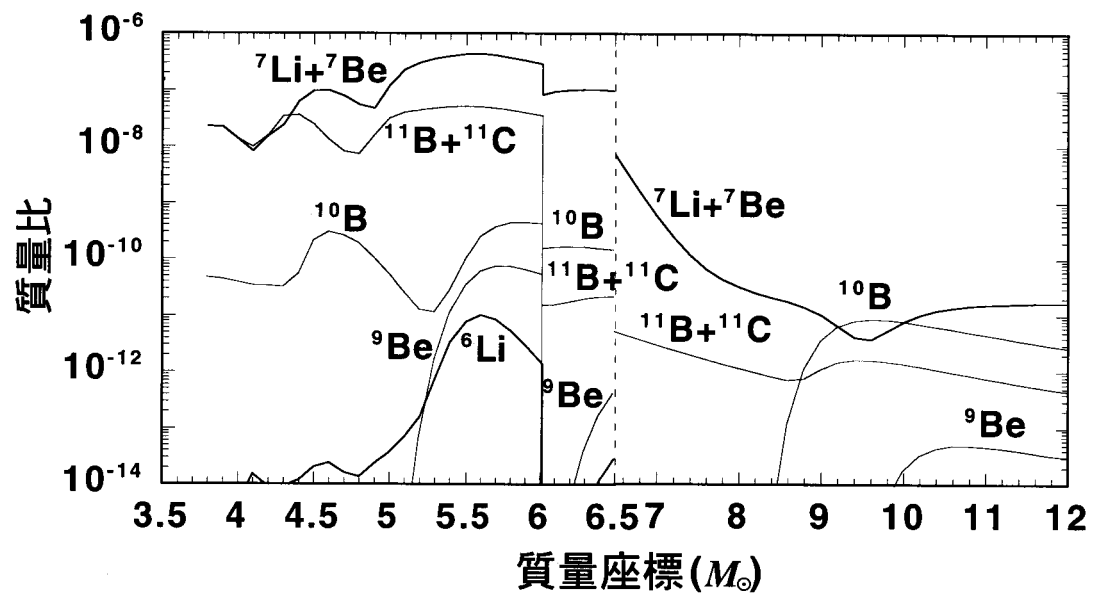


図2. ヘリウム層, 水素層における Li, Be, B 質量比分布. 質量比の不連続がヘリウム対流層-ヘリウム輻射層境界 (6.0M<sub>⊙</sub>), ヘリウム輻射層-水素層境界 (6.5M<sub>⊙</sub>) に見られる.

れるが衝撃波通過後の温度上昇によりすぐに再び壊されてしまうため最終的にはごく少量しか残らない.

ヘリウム層における <sup>7</sup>Li, 生成の核反応経路を模式的に表したものが図3である. <sup>7</sup>Li と <sup>11</sup>B の生成過程は質量座標約 5.0M<sub>⊙</sub> の内側と外側で異なる. ヘリウム層の内側では <sup>7</sup>Li, <sup>11</sup>B ともに <sup>4</sup>He のニュートリノプロセスが生成反応の起点となる. 続いて <sup>4</sup>He の捕獲反応を通して <sup>7</sup>Li, <sup>11</sup>B になる. <sup>7</sup>Li は不安定同重体である <sup>7</sup>Be を経て作られる. <sup>3</sup>H からも <sup>7</sup>Li は作られるが, さらに <sup>4</sup>He を捕獲し最終的には <sup>11</sup>B になる. <sup>11</sup>B は不安定同重体である <sup>11</sup>C を経ても生成される. 一方, ヘリウム層の外側では <sup>7</sup>Li は <sup>3</sup>H を経て作られ, <sup>11</sup>B は主に <sup>12</sup>C のニュート

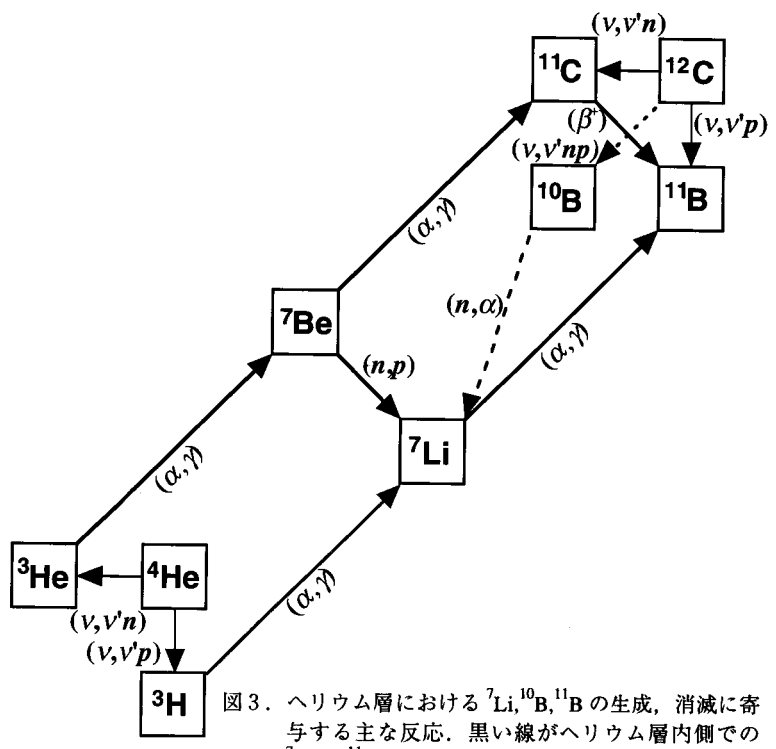


図3. ヘリウム層における <sup>7</sup>Li, <sup>10</sup>B, <sup>11</sup>B の生成, 消滅に寄与する主な反応. 黒い線がヘリウム層内側での <sup>7</sup>Li と <sup>11</sup>B に重要な反応, 青い線がヘリウム層外側での <sup>7</sup>Li と <sup>11</sup>B に重要な反応, 点線が <sup>10</sup>B に重要な反応.

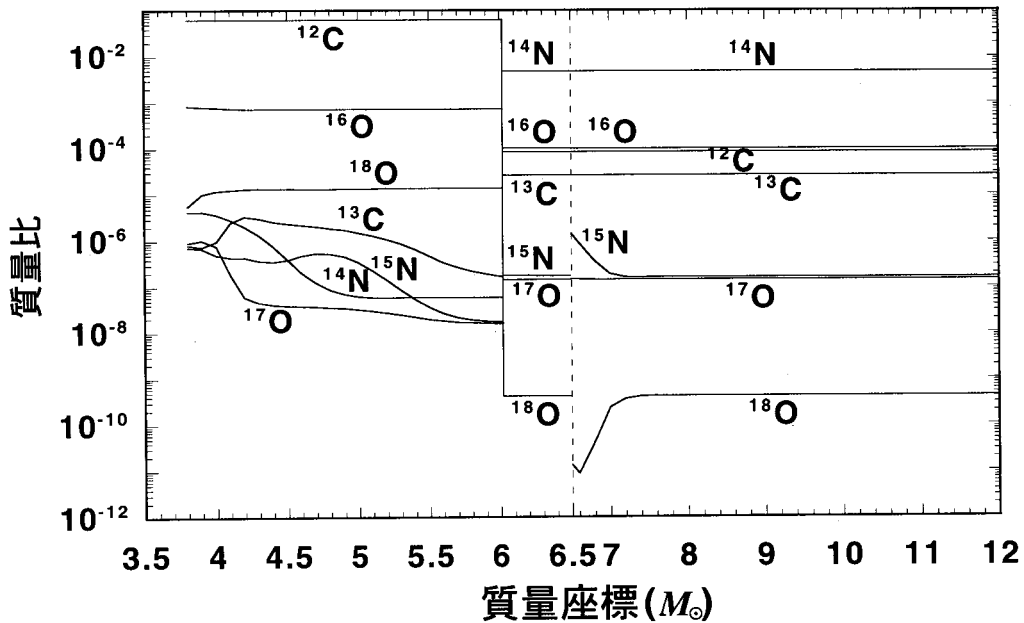


図4. ヘリウム層、水素層におけるCNO元素質量比分布. 質量比の不連続がヘリウム対流層-ヘリウム輻射層境界 ( $6.0M_{\odot}$ ), ヘリウム輻射層-水素層境界 ( $6.5M_{\odot}$ )に見られる.

リノプロセスによって生成される。 $^{10}\text{B}$ はヘリウム層で常に $^{12}\text{C}$ からのニュートリノプロセスによって生成される。しかし、ヘリウム層の中央部では生成された $^{10}\text{B}$ は $(n, \alpha)$ 反応によりこわされる。

これらのことから $^7\text{Li}$ と $^{11}\text{B}$ は同じような生成過程を経て生成されることがわかる。このふたつの核種の生成量はニュートリノプロセスの不定性に関して同じような影響を受ける。ニュートリノ全エネルギー、ニュートリノ照射時間を変えて元素合成過程を計算したところ、微量軽元素の生成量は数桁の範囲で変わるが $^7\text{Li}$ と $^{11}\text{B}$ (質量比)の比をとった $^{11}\text{B}/^7\text{Li}$ 比は一桁程度しか変わらないことが得られた。このように同じような生成過程により生成される核種の存在度比はモデルの不定性による影響を受けにくく、超新星爆発起源プレソーラーグレーンを判別するためには適した存在度比といえる。

### 4.3. CNO 元素生成量

続いて超新星爆発によってヘリウム層と水素層で生成されるC, N, O元素の質量比分布を図4に示す。ヘリウム対流層では $^{12}\text{C}$ と $^{16}\text{O}$ が多く存在する。その他の核種は質量比でおおよそ $10^{-8} \sim 10^{-6}$ 程度存在する。 $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ ,  $^{18}\text{O}$ の質量比はヘリウム対流層においてほぼ一定だが、これは超新星爆発時の元素合成過程で生成された結果ではなく、超新星爆発前の質量比が保たれているものである。その他の核種は主にヘリウム層の内側部分で生成されている。 $^{13}\text{C}$ と $^{17}\text{O}$ はそれぞれ $^{12}\text{C}$ と $^{16}\text{O}$ の中性子捕獲によって生成する。 $^{14}\text{N}$ は $^{11}\text{B}(\alpha, n)^{14}\text{N}$ 反応により、 $^{15}\text{N}$ は $^{16}\text{O}$ のニュートリノプロセスにより生成する。ヘリウム輻射層と水素層ではCNO元素のほとんどが超新星爆発時に生成もされず破壊もされない。ただし、水素層の内側でのみ $^{15}\text{N}$ が生成される。CNO元素の質量比分布はニュートリノ照射モデルを変えても最大で一桁程度しか変わ

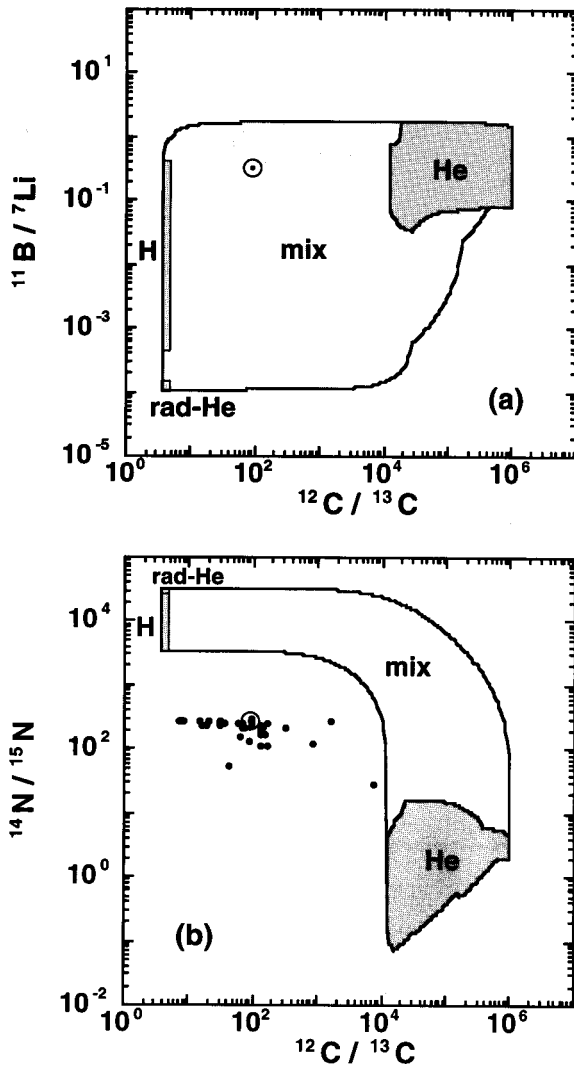


図5.  $^{11}\text{B}/^7\text{Li}$ - $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  存在度比 (a),  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ - $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  同位体比 (b). “He”, “rad-He”, “H” で示される灰色の領域はそれぞれヘリウム対流層, ヘリウム輻射層, 水素層で存在度比のとりうる範囲を示す. “mix” で示される青色の領域はヘリウム層と水素層との混合によってとりうる範囲を示す. ⊙ は太陽系元素存在度の存在度比. 図 (b) の点はそれぞれ文献5の表3に掲載されているグラフタイトのプレソラーグレインの同位体比を示す.

らない. また, 生成過程は異なる質量の星の超新星爆発でも変わらない. そのため CNO 元素は微量軽元素ほど超新星爆発モデルの不定性の影響を受けないと言える.

## 5. 軽元素存在度比

プレソラーグレインの同位体比と超新星爆発時の元素合成で生成される元素の同位体比の範囲を比較するときは縦軸と横軸に2種類の同位体比を設定した図を用いて比較する. ここではこの図のことを同位体比相関図と呼ぶ. 前節で述べたように微量軽元素で超新星爆発時の不定性に影響されにくいのは  $^{11}\text{B}/^7\text{Li}$  存在度比である. そのため, 微量軽元素としては同位体比を用いずに  $^{11}\text{B}/^7\text{Li}$  の存在度比を用いる. また, CNO 元素は比較的超新星爆発時の不定性には影響されにくい. そこでここでは微量軽元素を含めた存在度比相関図として  $^{11}\text{B}/^7\text{Li}$ - $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  比を, CNO 元素の同位体比相関図として  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ - $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  比を考える.  $^{11}\text{B}/^7\text{Li}$ - $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  比の存在度比相関図を図5(a)に,  $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ - $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  比の同位体比相関図を図5(b)に示す. 図5で “He”, “rad-He”, “H” と書かれた灰色の領域がヘリウム対流層, ヘリウム輻射層, 水素層での存在度比のとりうる範囲である. ここでは超新星爆発時のニュートリノ照射モデルの不定性 (ニュートリノ全エネルギー, ニュートリノ照射時間の不定性; 3.2節参照) を考慮して範囲を求めた.

図5(a), (b)ともに, これらの相関図ではヘリウム層と水素層ではそれぞれニュートリノ照射モデルの不定性を考慮しても比較的小さい存在度比の範囲しかとらなことがわかる. そしてヘリウム対流層と他の層ではとりうる存在度比が数桁も異なりうる. また, これらの層における存在度比は太陽系元素存在度における存在度比と異なる値を示している.

超新星爆発時には複数の層の大規模な混合が起こると考えられている<sup>6)</sup>. このことからヘリウ

ム層と水素層の混合を考慮した存在度比の範囲を求めた。ヘリウム層内の任意の部分と水素層内の任意の部分との混合を考え、混合の割合は全てヘリウム層の組成の場合から全て水素層の組成の場合までの範囲をとる。このように混合を考慮した場合に得られる領域を“mix”と書かれた青色の領域で示した。その結果、ヘリウム層と水素層が混合すると $^{11}\text{B}/^{7}\text{Li}$ - $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 、 $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ - $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ ともに数桁にわたる存在度比、同位体比をとるようになる。

図5(b)に文献5の表3に掲載されているグラファイトのプレソラーグレインの $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ 比と $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比をそれぞれ点で示してある。これらのグレインは $^{28}\text{Si}$ の過剰や消滅核種の $^{44}\text{Ti}$ の痕跡が見つかっていることから超新星爆発起源であると言われているものである。本研究のモデルでは $^{14}\text{N}/^{15}\text{N}$ - $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ 比の同位体比範囲には含まれなかった。文献5の結果においてもプレソラーグレインの窒素同位体比は超新星爆発モデルで得られた同位体比と一致していない。超新星爆発起源プレソラーグレインと超新星爆発モデルとの間の窒素同位体比の不一致の原因はまだ解決されていない。

## 6. 今後の課題

本研究では超新星爆発起源のプレソラーグレインを判別するために超新星爆発時にヘリウム層と水素層で生成される軽元素の同位体比、存在度比の範囲を求めた。しかし、全ての同位体比について超新星爆発起源であると思われるグレインの同位体比が理論から推定される同位体比の領域に必ず含まれるとは限らず、隕石にとりこまれるまでに何からの汚染を受けている可能性も否定できない。そのため、超新星爆発起源プレソラーグレインの判別はより多くの種類の同位体比や存在度比を比較しどの程度の同位体比や存在度比が一致するかにより行われることになるだろう。これからはより重い元素の同位体比や存在度比の範囲を求め、超新星爆発起源プレソラーグレインの判別法を確立したい。

## 7. 謝辞

ここで紹介した内容は筆者の博士論文<sup>8)</sup>で取り上げられた内容の一部です。この研究の遂行と博士論文作成にあたり、東京工業大学理工学研究科地球惑星科学専攻の中澤清教授と榎森啓元助手には非常に多くの面でお世話になりました。また、日本大学の岩本弘一氏、東京大学の野本憲一氏と茂山俊和氏には超新星爆発直前の星の構造を提供していただくとともに星の進化についての助言をしていただきました。ここに深く感謝いたします。

## 参考文献

- 1) Zinner E., 1998, *Annu. Rev. Earth. Planet. Sci.* 26, 147
- 2) Amari S., et al., 1992, *ApJ* 394, L43
- 3) Amari S., et al., 1995, *ApJ* 447, L147
- 4) Nittler L. R., et al., 1996, *ApJ* 462, L31
- 5) Travaglio C., et al., 1999, *ApJ* 510, 325
- 6) Shigeyama T., Nomoto K., 1990, *ApJ* 360, 242
- 7) Yoshida T., Emori H., Nakazawa K., 2000, *Earth, Planets and Space* 52, 203
- 8) Yoshida T., 2000, *Doctoral thesis* (Tokyo Institute of Technology)
- 9) Woosley S. E., et al., 1990, *ApJ* 356, 272

## Elemental ratios of light elements synthesized in supernovae

Takashi YOSHIDA

*Research Fellow of the Japan Society for the Promotion of Science, Department of Physics, Kyushu University, 4-2-1 Ropponmatsu, Chuou-ku, Fukuoka 810-8560*

**Abstract:** In meteorites there are presolar grains which have their isotopic ratios indicating the nucleosynthesis in their birth. Comparing the isotopic ratios in the grains with those obtained by nucleosynthesis theories, we identify the origin of the presolar grains. In order to identify presolar grains originated from supernovae we investigate available regions of the isotopic/elemental ratios of rare light elements (Li, Be, B) and the CNO-elements produced in the He-layer and the H-rich envelope in supernovae.