

金属欠乏星にみる元素合成と宇宙，銀河の進化 —最新の話題とすばる/HDS への期待

青木和光，梶野敏貴，安藤裕康

〈国立天文台 〒181-8588東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

aoki.wako@nao.ac.jp

kajino@nao.ac.jp

ando@optik.mtk.nao.ac.jp

最近の金属欠乏星の高分解能分光観測によって，軽元素から重元素にいたるまで，その合成過程の詳細が明らかにされるとともに，宇宙，銀河の化学進化に与える影響についての理解が急速に進んできている。我々の研究によって，ある種の超金属欠乏星に多量のs-プロセス元素が存在することが明らかにされ，その中で最も重い安定元素のひとつある鉛が初めて発見された。また，r-プロセス元素の起源と宇宙論，初期銀河の進化論で果たす役割の理解についても，大きな進展があった。本稿では，重元素の主要な合成過程である中性子捕獲反応（s-プロセスとr-プロセス）についての著者らの最近の研究を紹介し，始動したすばる望遠鏡高分散分光器（HDS）による研究を展望する。

1. はじめに

20世紀の物理学と天文学は，現在の複雑な物質世界が，宇宙誕生以来のさまざまな元素合成過程を経てかたち造られてきたことを明らかにした。図1に示した太陽系の元素組成は，地球や私達自身をつくる材料の組成でもあるが，これも宇宙の元素合成の歴史のひとつの到達点であるといえる。この物質進化の歴史を包括的に理解すること—これは現代天文学の重要課題のひとつである。

宇宙，銀河の進化を物質進化の観点から具体的に検証するためには，太陽系の組成を正確に解釈するだけでなく，銀河ディスク，ハローや球状星団といった形成過程の異なるさまざまな系での元素組成を観測的に調べることによって，水素からウランにいたる種々の元素量の空間分布と時間発展についての知見を得る必要がある。軽元素のいくつかはビッグバン元素合成で作られたが，これらを除く元素のほとんどは，膨張宇宙が晴れ上がった後に恒星内部における核反応によって合成されたと考

えられる。したがって，星形成—核合成と星の進化—超新星爆発（大質量星）と質量放出（中小質量星）一次世代の星形成，という宇宙での物質循環の要である恒星の構造進化を徹底的に理解することが不可欠である。

これらの研究において，観測面での柱を担っているのが高分散分光観測，とくに恒星の分光観測である*。進化の進んだ恒星では，内部での元素合成の結果が星の表面，すなわち，恒星大気に現れてくることがあるため，高分散スペクトルの解析によってその星における元素合成過程を調べることが可能になる。また，進化が進んでいない恒星（太陽もそのひとつ）の大気は，基本的に誕生時の元素組成を保持していると考えられるため，様々な年齢の星の高分散スペクトルの解析によって，元素組成の変遷をたどることができる。

近年，特に顕著な進展が見られるのが，超金属

*ここでは高分散分光と高分解能分光を区別しない。波長分解能1万以上の分光をさすことが多い。

欠乏星とよばれる、金属量が著しく少ない星の組成解析である^{**}。金属欠乏星は、宇宙誕生からまもない時期に誕生した星であると考えられる。この時期は、われわれの銀河形成の初期にあたるため、超金属欠乏星がもたらす情報は、銀河ハローやディスク、バルジの動力学的な構造形成史を探るという観点からたいへん貴重なものである。われわれの銀河のはじまりを理解することは、最近発展しつつある原始銀河の探査や系外銀河の進化、さらには、初期宇宙、初期銀河の物理状態を研究するための基礎をなすものである。

と同時に、超金属欠乏星は元素合成と物質進化を探る上でも重要な天体であることをここでは強調したい。太陽などの金属量が多い星の元素組成は、様々な元素合成過程の結果が蓄積された複雑なものであるのに対し、超金属欠乏星の元素組成は、少数の、ないしは単一の過程によって作られた元素量を反映していると期待される。したがって、個々の元素合成の過程を調べるには、超金属欠乏星が格好の対象となるのである。

この角度から行われている有名な研究例は、水素、ヘリウムについて軽いリチウム(Li)の組成についてである。図2には、最近、著者らがアングロ・オーストラリア望遠鏡およびウィリアム・ハー

^{**} 金属量とは、水素とヘリウム以外の全ての元素の組成の合計をさすが、鉄組成で代表させることも多い。ここでは超金属欠乏星とは、鉄組成が太陽の300分の1以下の星をさすことにする。なお、元素(M)の組成は、水素(H)との比をとり、その組成比が太陽での組成比に比べて(対数スケールで)どの程度であるか、という指標[M/H]で表す。たとえば、[Fe/H] = -3.0は、鉄の組成比が太陽に比べて1000分の1であることを意味する。

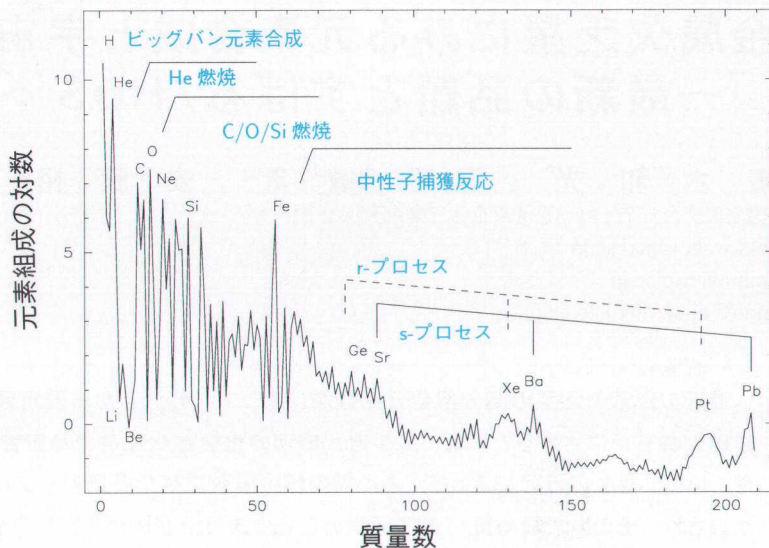


図1 太陽系の元素組成。

シェル望遠鏡を用いて行った矮星の高分解能スペクトルの解析結果とともに、これまでに調べられた多くの未進化の恒星についての観測結果も示してある¹⁾。Li量は金属量が少なくなるにつれて、ある一定の値に収束する傾向を示す。この一定値がビッグバン元素合成に起源を持つと解釈され、宇宙のバリオン質量密度の決定に利用されるとともに、宇宙背景放射ゆらぎのパワースペクトルの分析から宇宙論パラメータを決定する際に重大な影響を及ぼす²⁾など、ビッグバン宇宙論へ強い制限を与えるデータとして注目されている。しかし、現在の観測値は、対流によって引き起こされる恒星大気と内部との物質混合効果の影響を強く受けたために、ビッグバン元素合成の結果そのものではないという指摘もあり、議論は未だに収束していない。このように、ビッグバン初期宇宙の元素合成過程を検証するために超金属欠乏星の構造進化に対する正確な知識が必要とされるところまで、宇宙における物質進化の研究には精密化が要求される時代を迎えた。

最近では、超金属欠乏星の重元素の組成解析も

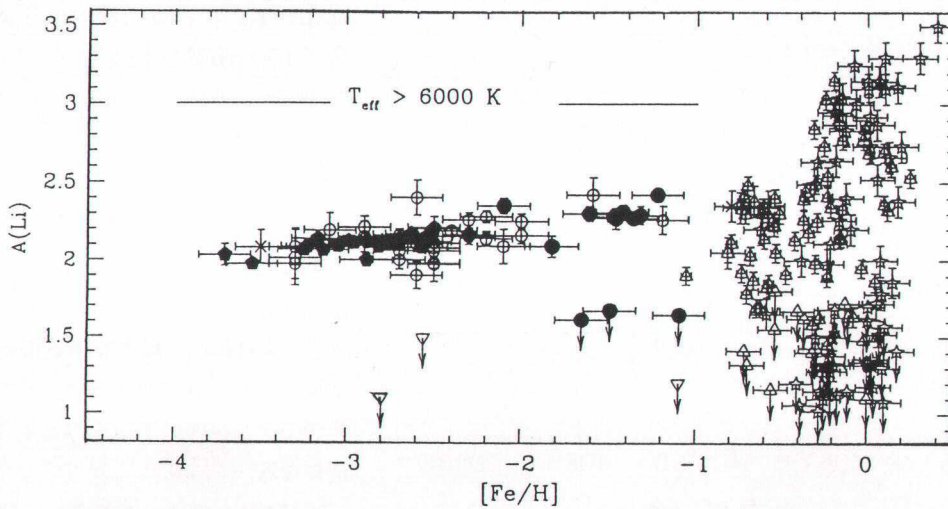


図2 銀河ハローとディスクの星におけるリチウム元素量 ($A(\text{Li}) = \log(n(\text{Li})/n(\text{H})) + 12$) と金属量 ($[\text{Fe}/\text{H}]$) との相関¹⁾.

精力的に行われ、恒星内部や超新星爆発に伴って起こる元素合成の研究にも重要な情報をもたらしている。鉄族までの元素は、星の内部での準静的な原子核反応過程によって合成されるのに対し、それより重い元素は、原子核が中性子を次から次へと捕獲して合成されることが知られている。図1に示した太陽系の組成を見ると、鉄よりも重い元素では、組成のピークが少なくとも6つあることが見てとれる。このうち、ゲルマニウム(Ge)、キセノン(Xe)、プラチナ(Pt)のピークは、爆発現象とともに起こる速い中性子捕獲反応 (rapid process を略して、r-プロセスとよぶ) によって形成され、ストロンチウム(Sr)、バリウム(Ba)、鉛(Pb)のピークは、比較的ゆっくりした反応 (slow process を略して、s-プロセスとよぶ) によってつくられることが知られている。中性子密度や温度など、これらの過程が起こる環境はかなり限られるため、太陽系組成を説明するためにいくつかの元素合成サイトが候補としてあげられている。しかし、上述のとおり、太陽系組成は無数の元素合成過程の蓄積の結果であり、その同定にはどうしても曖昧さが残ってしまう。そ

こで、背負っている元素合成の歴史が浅い超金属欠乏星の研究の出番となる。

本稿では、著者らによる最近の研究を紹介し、今後の展望を述べることにする。第2節でs-プロセスの観測的研究の最近の結果について、また第3節でr-プロセスについての主として理論的な研究の進展を紹介する。そして、2000年7月に初観測をむかえたすばる望遠鏡高分散分光器によって期待される研究について紹介する (第4節)。

2. s-プロセス元素過剰な超金属欠乏星における鉛の検出

第1節で述べたように、鉄よりも重い元素は、一般に中性子捕獲反応によって合成されるが、その合成過程が起こる物質環境を明らかにするうえで、最も重い安定核のグループに属する鉛の起源を理解することは非常に重要である。自然界にはウランやトリウムなどのより重い元素も存在するが、これらは結局は崩壊して鉛になるからであり、鉛は元素合成の終着点といってもよい。

鉛は主にs-プロセスによって合成されると考えら

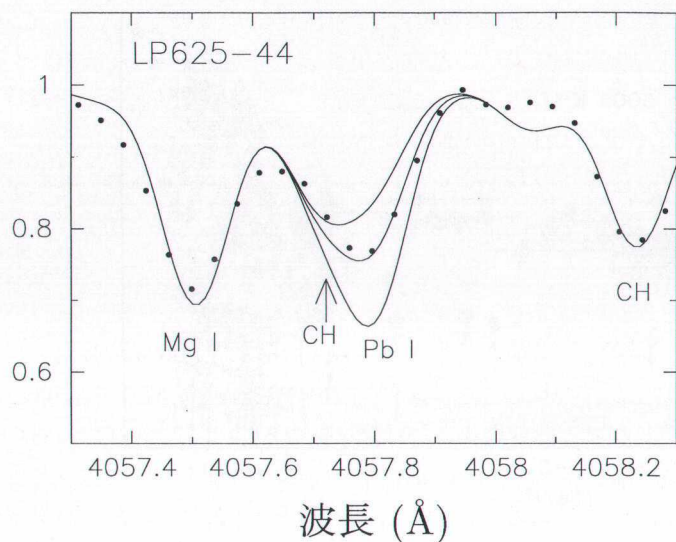


図3 Pb I 4057 Å 吸収線周辺の、観測されたスペクトル(点)とモデルによって計算されたスペクトル(線)の比較. 計算に用いた鉛の組成は、上から[Pb/Fe] = 2.35, 2.65, 2.95である³⁾.

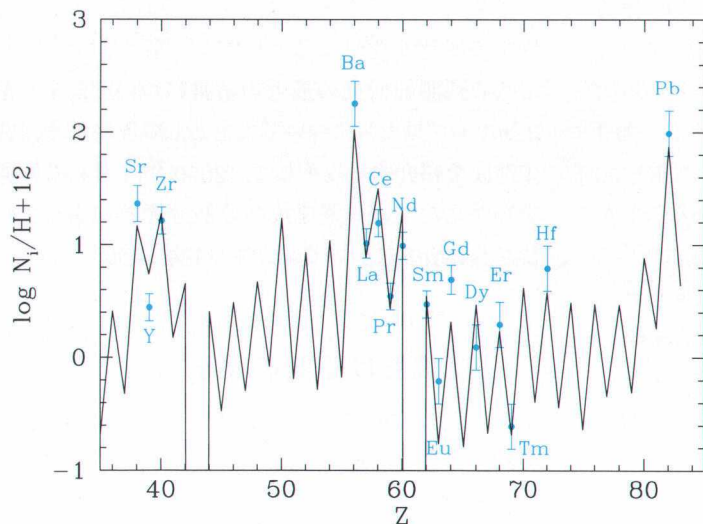


図4 LP625-44 の重元素組成パターン. データは文献3により、実線はs-プロセス元素合成の理論計算⁵⁾による. 鉛については、金属量の少ないAGB星の元素合成モデル⁴⁾では、この結果より1桁以上大きい組成が予測されていた.

れている. s-プロセスの主要なサイトは、進化終末期にある比較的小さな質量の星(10太陽質量程度以下、いわゆるAGB星)であると考えられており、AGB星でどの程度の鉛がつけられるのかを観測的に調べることは、中性子捕獲反応、ひいては太陽系組成を理解する鍵を握っている. また、星の内部構造と進化についていえば、ドレッジ・アップとよばれる大規模な物質混合過程や活発な質量放出を繰り返すAGB段階の星のモデルに強い制限を与えることが可能になる.

本研究³⁾では、アングロ・オーストラリア望遠鏡でとられた超金属欠乏星LP625-44の高分解能スペクトルの解析を行い、鉛の4057 Å吸収線の検出に成功した(図3). この天体は連星系に属

し、主星(現在は白色矮星に進化している)がAGB星だった時期に放出した物質が表面に降着した痕跡があり、重元素についてはAGB星の化学組成比がほぼ純粋な状態でその大気に保存されていると考えられる天体である. 実際、後述のように、この天体は、金属量は全体として非常に少ない([Fe/H] = -2.71)が、重元素の過剰はきわめて大きく([Ba/Fe] = +2.74)、それらの組成比は太陽系のs-プロセス元素の組成比と全体としてよく一致しているのである. さらに、12年間にわたる視線速度の測定の結果、この星が連星系をなしていることが明らかにされた³⁾ことも、このシナリオを強く支持している.

恒星大気における鉛の検出の例は少なく、太陽においても明確に



検出されている吸収線はたった 1 本である。これは、観測に適した鉛のスペクトル線が少ないこと、その多くが紫外から紫の波長域にあり、他の元素の吸収線に埋もれてしまうことが原因である。その鉛が、この種の金属欠乏星において検出されたのは今回がもちろん初めてであるが、これは偶然ではない。この星では、金属量が少ないために吸収線は著しく弱く数も少ないが、後に示すように、鉛組成はこの星では太陽に匹敵するレベルに達しており、図 3 に示すように、太陽では見えなかった鉛の線がはっきりと浮き出てきたのである。

今回の解析では、鉛のほかにも多数の重元素の吸収線が検出され、鉄族より重い 16 元素の組成を求めることができた。その結果を図 4 に示す。実線として、星の進化モデルの詳細にはよらない単純化された仮定にもとづいて計算された s-プロセスの組成パターン⁵⁾を示したが、鉛を含めてかなりの程度、この星の重元素組成を説明できることが見てとれる。

金属量の少ない AGB 星における s-プロセスでは、相対的に重い元素がより多く作られると考えられてきた。これは、AGB 星内部で供給される中性子の量は金属量にあまりよらないのに対し、反応の種となる鉄などの原子核の量が少ないためである。これを単純に外挿すると、最も重い一群の元素である鉛 (Pb) は、金属量の小さい星では非常に高いピークになると予想され、実際、AGB 星における元素合成の最近のモデル (文献 4 など) でも、バリウムより一桁以上高い鉛の組成が予測されていた。しかしながら、LP625-44 においては、鉛の組成はバリウムと同程度でしかないことが明らかになった。この結果は、AGB 星における s-プロセスの標準的なモデルに見直しを迫るものである。このモデルでは、AGB 星内部で中性子の供給源となる ^{13}C pocket と呼ばれる層の厚みがパラメータとなっており、このパラメータの調整によっては観測結果が再現できる可能性もあるが、太陽系組成を再現する標準モデルと異なるパラメータをとる物理

的根拠は説明できない。

金属量の小さい AGB 星における s-プロセスについては、基本的な概念でも不確定な部分が多い。もっとも大きな疑問は、上記の標準的なモデルでは、間欠的に起こる熱パルス (ヘリウムシェル・フラッシュ) の合間に、一万年程度の長い時間をかけて s-プロセスが起きるというものであるが、熱パルスのさなか、もしくは直後に s-プロセスが起きている可能性もある。現在、我々は AGB 星の構造進化モデルを用いた詳細な理論研究を行っており⁵⁾、金属量が著しく欠乏した環境においては、比較的小さい質量を持つ AGB 星でこれまでに知られていなかった熱パルスによる新しい物質混合メカニズムが働いて、s-プロセスが起こる可能性が示さつつある。

いずれにしても、我々の研究で s-プロセスの 3 つのピークがおさえられたことにより、重元素過剰の超金属欠乏 AGB 星における元素合成の理解に、新たに重要な情報もたらされたと言える。

3. 銀河進化論、宇宙論へのインパクト

ビスマスとともに自然界における安定元素の終着点に位置する鉛の起源には、未解明の問題が多い。太陽系の鉛組成の約 7 割は s-プロセスによってつくられたと考えられているが、これを初期銀河にまで敷衍してよいかどうかは自明ではない。鉛にみる銀河の化学進化のみちすじを明らかにすることは、それより軽い全ての元素の起源と進化を解釈するうえで、さまざまな知見をもたらすだろうと期待される。超金属欠乏星 LP625-44 における鉛の検出は、おそらく単一の起源天体における s-プロセスの結果を初めて直接的にとらえた画期的な研究成果である。鉛の量を著しく過剰に予測していた従来の AGB 星のモデル⁴⁾にもとづいて、銀河における鉛の起源を金属量の少ない AGB 星に求めるという考え方が最近提出されたが、LP625-44 の鉛組成はこれを否定するものである。今後、さらに多数の天体の観測による検証が必要である。

s-プロセス元素合成と並んで重元素を作るもうひとつの過程であるr-プロセスは、どこまでわかっているであろうか。図1に示した鉄より重い元素のうち、Ge, Xe, Ptの3つのピークに属する元素は、その中性子数が原子核を安定化させるために必要な魔法数よりも軽い質量側にシフトしているため、超新星爆発や中性子星連星系の合体にともなう高温高密度状態で瞬時に合成された放射性重元素が、最終的にベータ崩壊して作られたものと考えられている。大質量の星ほど短時間で進化し、その終焉で大爆発するとともに重元素を星間空間にまき散らすので、初期銀河においては、物質進化や銀河構造形成など動力学進化をつかさどる原動力として、大質量星は極めて重要な役割を担っている。

最近、大口径の光学望遠鏡を用いた高分散分光観測によって、宇宙年齢と同程度の半減期を持つトリウム (^{232}Th , 半減期 140.5 億年) が、幾つかの超金属欠乏星で検出された。既に述べたように、r-プロセスは鉛の一部の起源であるばかりでなく、より重いウラン (U), トリウム (Th), プルトニウム (Pu) などの起源として唯一知られている元素合成過程である。金属欠乏星のこれらの元素が、われわれの銀河における最初の超新星爆発で作られた核生成物であったとすると、複雑な銀河の進化にはほとんど影響されない純粋なr-プロセスの組成を保っていると考えられることができる。ユーロピウム (Eu) はそのほとんどがr-プロセス起源であることが知られているが、このようなr-プロセス元素と比較して、放射性元素であるトリウムの減少の割合を太陽系組成比と比較することにより、この初期世代の星の年齢、ひいては銀河年齢の下限値を推定することができる。このように元素組成比 Th/Eu を宇宙核年代計として用いる方法は、天体までの

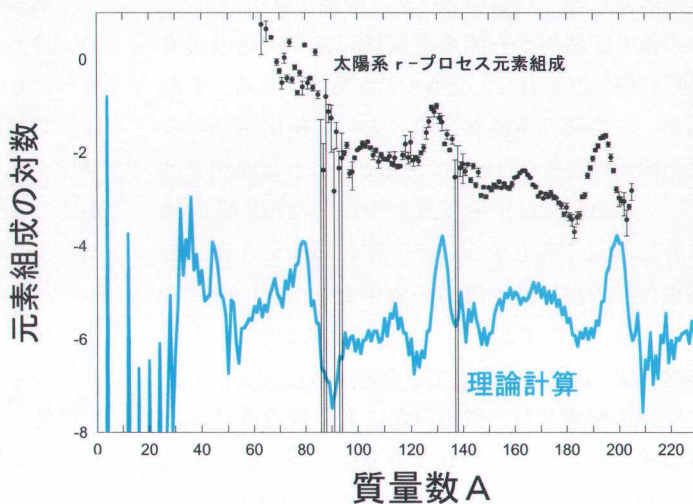


図5 太陽系r-プロセス元素組成と理論計算⁷⁾との相对比较。

距離測定が持つ不確定性には全く依存しないので、未だに宇宙年齢問題として波紋を投げかけている宇宙論パラメータによる宇宙年齢の推定や、天の川で最も古い星の集団である球状星団の年齢の推定にくらべて、原理的にはより高い精度での年齢推定が可能となる⁶⁾。

ただし、宇宙核年代計による銀河年齢の推定には、一つの大きな仮定がある。それは、初期世代の星に検出されたr-プロセス元素はすべて単一の起源を持つ、との仮定である。これを検証するためには、まず第一に、 Th/Eu 以外にも $^{238}\text{U}/\text{Eu}$ (^{238}U の半減期は44.7億年)、 $^{187}\text{Re}/^{187}\text{Os}$ (^{187}Re の半減期は435億年) など、複数の宇宙核年代計を構成する元素を観測的に同定することが必要である。異なる宇宙核年代計によって推定された年齢は一致しなければならない。そのためには、第二に、金属欠乏星の高分散分光観測において、同位体を分離する方法と観測精度とを確立しなければならない。そして第三に、理論的にも、大質量星の爆発モデルを構築して元素合成過程の計算を実行し、観測量を説明できるような物理条件を満たす物質

環境が、爆発現象で実現するかどうかを実証しなければならない。

1987年春、大マゼラン雲に現れた超新星からのニュートリノを神岡で検出することに成功し、重力崩壊型超新星爆発は中心星からのニュートリノ加熱による遅延型爆発であることが、ほぼ確実視されるに至った。強いニュートリノ流束は生まれたての中性子星の大気を加熱し、そこにホット・バブルと呼ばれる高エントロピー・プラズマを作り出す。当初、r-プロセス元素を合成するためには、核子あたり400という非常に高いエントロピーが必要であると考えられたが、超新星1987Aの数値シミュレーションの多くはこれを再現できず、超新星爆発はr-プロセス元素の起源として棄却されかけていた。しかし、我々は、原始中性子星が作る強い重力場による一般相対論効果を詳細に研究した結果、膨張の時間スケールが極端に短くなる大質量コア周りの大気では、低エントロピーでもr-プロセスが起こる物理条件が整うことを見出した⁷⁾。約3,000核種とそれらを結び付ける20,000以上の核力、電磁気力、弱い力による原子核素粒子反応からなるネットワークを構築し、100億度という高温の相対論的プラズマ流の中での反応過程を数値的に追跡できる計算コードを開発した結果、Geのピーク、希土類元素の丘（質量数165付近）、Ptのピークの起源が、単一の超新星爆発で説明できることを定量的に示し、超新星爆発をr-プロセスサイトとして復活させたのである（図5を参照）。現在、コア質量、すなわち超新星を起こした星の質量への依存性⁸⁾の検証のための観測が、すばる望遠鏡HDSに提案されている。また、宇宙核年代計として重要なUやThが十分な量合成されるかどうかは、さらに注意深い研究を必要とする。

我々の理論研究の成果は、最近の初期銀河の化学進化に関する予測とも合致する。 $[\text{Fe}/\text{H}] < -2$ の金属欠乏領域の星々で、2桁以上の大きな分散がr-プロセス元素に見つかっている。これは、星々がまだ世代を繰り返さず、超新星放出物質と星間ガ

スが十分混ざらない時代の、初期銀河ハローの非一様状態を反映していると解釈できる。すなわち、形成されつつある初期銀河のハローガス中を、第一世代の超新星爆発によって合成された重元素が拡散して行き、ショックによって掃き集められた高密度シェルから生まれた小質量星に取り込まれたと考えるのである。また、30太陽質量以上の大質量星だけからr-プロセス元素が放出されたとすると、観測された分散が最もよく再現できることが理論的に示されている。

4. すばる望遠鏡高分散分光器 (HDS)で期待されること

今回紹介した観測研究の多くは、4m級望遠鏡の高分散分光器によってなされたものである。これらに引き続き、いよいよ8-10m級望遠鏡での恒星スペクトルの研究が本格化しつつある。高分散分光は、天体の光を細かく分けるのが仕事であるので、とにかくたくさんの光を集めることが要求される。そのため、地上の大望遠鏡では、主力観測装置のひとつとして高分散分光器が搭載されることが多い。

すばる望遠鏡にも、可視用ナスマス焦点に高分散分光器(HDS)が搭載された。HDSは、最高波長分解能15万、 $3,000 \text{ \AA} - 10,000 \text{ \AA}$ ($0.3 - 1 \mu\text{m}$)を観測可能なエシェル分光器である。装置としては、標準的な分光器といってよいが、他の8-10m級望遠鏡の分光器に比べ、以下のような強みがある。

ひとつは、標準的な設定で達成できる波長分解能が高いことである。恒星大気の組成解析のためには、分解能5万(6 km/s)程度のスペクトルが用いられることが多く、その程度の分解能を標準としている装置も多い。これは、恒星大気における熱運動等によってスペクトル線はそもそも数km/s程度の幅をもっており、装置の分解能を上げてもスペクトル線が分解できないためである。しかしながら、微妙な組成を求めるには、スペクトル線のプロファイル解析が必要になることもあり、その際に



は、より高い分解能が威力を発揮する。例えば、1～3節で紹介したリチウムや重元素は、いずれも同位体の存在によって生じる線プロファイルのゆがみから同位体比を求められる可能性があり、HDSの高い波長分解能を生かした研究の発展が期待される。

また、すばる望遠鏡の高い空間分解能（解像度）も重要である。すばる望遠鏡の解像度の高さは、これまでの試験観測で十分実証されている。点光源である恒星の分光観測の場合、空間的な情報を必要としないため、撮像観測にくらべると解像度の重要性は低いといえるが、スリットに導ける光の量を稼ぐには、高い解像度はおおいに役立つ。これまでの4m級の望遠鏡にくらべ、鏡の面積が4倍になっただけでなく、解像度の高さによって、10倍以上の効率で分光観測が行えると期待される。

HDSは、2000年7月に初観測を迎え、分解能や透過効率といった基本性能については、ほぼ期待どおりに仕上がっていることが確かめられた。その後の調整も順調に進み、試験観測を重ねている。そして2001年4月からは、国内外の研究者の共同利用に供されることも決まり、現在その準備がすすめられている。これを、宇宙・銀河・恒星という諸階層の進化の歴史を包括的に理解することに役立つためには、これまで以上に、観測研究者と理論研究者との強い連携が必要である。世界の研究者と、ときには競い、ときには協力しながら、一步一步研究を積んでいきたいと考えている。

参考文献

- 1) Ryan S.G., Kajino T., Beers T.C., Suzuki T., Romano D., Matteucci F., Rosolankova K., 2001, *ApJ*, 548, Feb. 20 issue, in press.
- 2) Orito M., Kajino T., Mathews G.J., Boyd R.N., 2000, submitted to *ApJ* (astro-ph/0005446).
- 3) Aoki W., Norris J.E., Ryan S.G., Beers T.C., Ando H., 2000, *ApJ*, 536, L97.
- 4) Gallino R., Arlandini C., Busso M., Lugaro M., Travaglio C., Straniero O., Chieffi A., Limongi M., 1998, *ApJ*, 497, 388.
- 5) Iwamoto N., Kajino T., Mathews G.J., Fujimoto M., Aoki W., Ryan S.G. 2000, in preparation for submittal to *ApJ*.
- 6) 梶野敏貴 1999, *パリテイ*, 7, 40.
- 7) Otsuki K., Tagoshi H., Kajino T., Wanajo S., 2000, *ApJ*, 533, 424.
- 8) Wanajo S., Kajino T., Mathews G.J., Otsuki K., 2001, *ApJ*, in press.

Nucleosynthesis in very metal-deficient stars and the Cosmic and Galactic evolution —Latest topics and expectations in Subaru/HDS Wako AOKI, Toshitaka KAJINO, Hiroyasu ANDO National Astronomical Observatory, Mitaka, Tokyo 181-8588

Abstract: Recent studies in high resolution spectroscopy of very metal-deficient stars have revealed the details of nucleosynthesis for light-to-heavy mass elements, which has progressively enriched our understanding of the chemical evolution of the Universe and the Galaxy. We have discovered large excess of the s-process elements in one of these metal-deficient stars, and have succeeded in the detection of lead, for the first time, which is one of the heaviest stable elements discovered in this star. We have also made a great progress in the theoretical studies on the origin of the r-process and its role in cosmology as well as the evolution of the early Galaxy. In this article we present our recent progress in the studies of the neutron-capture processes (so-called s-process and r-process) and express our expectations in the High Dispersion Spectrograph for Subaru Telescope.