

高分散分光観測で探る初期宇宙の 元素合成

青木和光

〈自然科学研究機構国立天文台/総合研究大学院大学物理科学研究科天文科学専攻

〒181-8588 三鷹市大沢 2-21-1〉

e-mail: aoki.wako@nao.ac.jp



宇宙初期に生まれた小質量星は、金属欠乏星として銀河系内に生き残っている。高分散分光観測によってこれらの星の組成を測定すると、ビッグバンや第一世代星などによる、初期宇宙の元素合成を調べることができる。すばる望遠鏡高分散分光器を用いて進めてきた、第一世代星や炭素過剰天体に関する研究の進展を紹介する。

1. はじめに

今年（2007年）は、宇宙における元素合成の基本的な枠組みを示した二つの重要な論文^{1),2)}が出版されてから50年目にあたる。これらの論文は、原子核の性質と太陽系組成の分析をもとに、恒星（星）による元素合成過程がどのように起こり、その結果が宇宙にどのように蓄積されてきたのか議論し、その後の研究に重要な指針を与えた。

それらの元素合成過程が、具体的にどのような天体でどのように起こっているのか調べるのが、この分野における天文学の課題である。星の内部構造と進化、超新星爆発については、20世紀後半に理解が進み、そこでの元素合成も理論的に示されるようになってきている。これらを検証する観測研究も進められてきた。観測はときには理論的に予想されていない現象を発見し、理論研究を促すことがあるが、この分野でも事情は同じである。

元素合成の研究に係る観測はいろいろあるが、基本的には天体を分光観測し、いろいろな元素のスペクトル線を同定し、その組成を明らかに

する作業といえる。観測対象によって波長はX線から赤外線まで使い分けられる。本稿では専ら星の観測について議論するが、多くの星は可視光域において最も強くエネルギーを放っており、可視光域の分光観測が最も重要である。

観測対象としては、まずは超新星爆発（残骸）やAGB星（漸近巨星枝星＝進化の進んだ中小質量星）、惑星状星雲など、現在あるいはごく最近、新たな元素をつくりだしてきている天体が挙げられる。合成される元素と天体現象との関係を直接調べられるという点で、これらの天体の分光観測は疑いなく重要である。古くは1952年に、安定同位体の存在しないテクネチウム（Tc）がS型星（AGB星の一種）で同定され、この星の内部で重元素合成が進んでいる証拠とされた³⁾。

一方、合成された元素（の一部）は星間物質に還元され、やがては次世代の恒星に取り込まれる。星間物質、あるいは銀河間物質を調べると、環境にもよるが豊富な金属（水素・ヘリウム以外の重元素）を含んでいることがわかる。QSOの分光観測を行うと、そのQSOとわれわれの間にある物質による吸収スペクトルが観測され、さまざま

まな赤方偏移での重元素組成を調べることができる。星については、分光観測で個々に調べられるのは銀河系内および近傍銀河の天体だけである。しかし、そこにはさまざまな年代の星が含まれており、宇宙（銀河系近傍）の重元素合成の歴史を調べるのに有用なサンプルとなる。

本稿では、星の観測、そのなかでも宇宙初期の元素合成が記録されている銀河系内の古い星の高分散分光観測について、研究の手法といくつかの最近の成果を紹介する。

2. 高分散分光観測

さて、分光観測といっても波長分解能はさまざまであり、それは観測対象によって選択される。例えば、爆発直後の超新星は膨張速度が大きく、スペクトル線が広いために、その観測には高い波長分解能を必要としない。逆に静かな星間物質のつくる吸収線（背景の星の光に刻まれる吸収線）は細く、波長分解能の高い観測が有効である。

太陽のような星の場合、スペクトルを調べると吸収線が無数にある。これは内部から放射された光が星の表面（大気）中に存在するさまざまな原子や分子によって吸収を受けるためである。しかし、星の大気は高温の背景光源と低温の吸収物質に二分されるわけではなく、大気中で放射も吸収も起こる。つくられるスペクトル線は熱運動や乱流のために広がっており、観測されるスペクトル線にはこれに自転による広がり加わるため、線幅は少なくとも数 km/s になる。このため、星の分光観測には、5 km/s（比波長分解能 $R = \lambda / \delta\lambda \sim 60,000$ ）程度まで速度（波長）分解能を上げることが有効となる。

高分散分光（ここでは波長分解能の高い分光観測の意味）は、天体からの光を細かく波長に分けて検出することなので、検出器の素子あたりで受けられる光子数は小さくなる。暗い天体まで観測しようと思えば、とにかく大望遠鏡で光子をかき集めることが第一条件となる。8-10 m 級望遠鏡

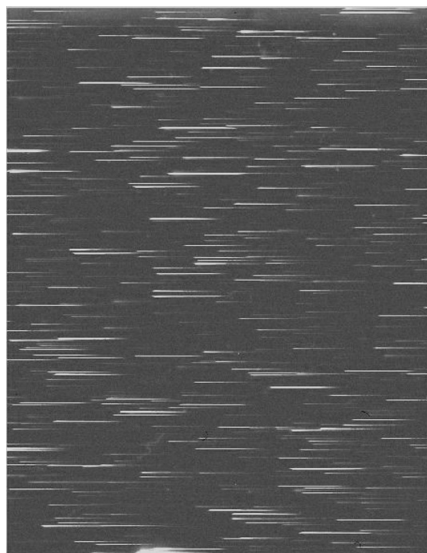
の登場によって、高分散分光の対象も大きく広がってきた。日本においても、2000年にすばる望遠鏡に高分散分光器（HDS⁴⁾）が搭載され、Keck や VLT に肩を並べる観測が可能になった。

筆者も大学院時代から HDS の検討に顔を出していたが、国立天文台に入った 1999 年から開発の最終段階と初期運用にまでかかわった。サポートアストロノマとしていろいろな観測の対応をさせていただいた（初期にはいろいろご迷惑もかけたが……）のも思い出になりつつある。

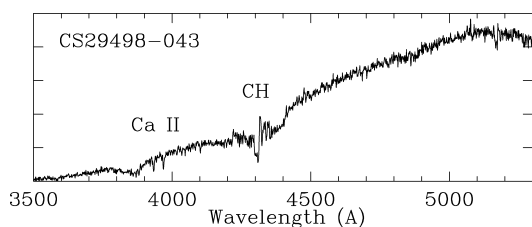
3. すばる/HDS での金属欠乏星観測

さて、すばる望遠鏡と HDS の登場によって、当時進展しつつあった金属欠乏星の研究でも世界の第一線の観測が可能になった。金属欠乏星は重元素の蓄積が進んでいない宇宙初期に誕生した小質量星の生き残りである。太陽系の組成が無数の天体での元素合成の結果の積分であるのに対し、金属欠乏星に記録されているのはごく少数の現象（ビッグバン元素合成や単一の超新星爆発など）の結果なので、宇宙における元素合成過程を一つひとつ理解するのに適している。

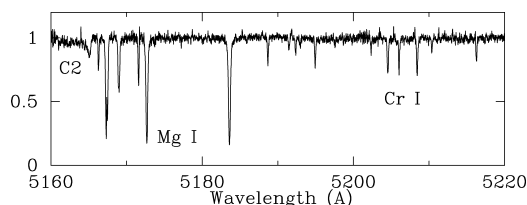
金属欠乏星の探査は 1980 年代よりミシガン大学などのグループによって精力的に進められ、主に銀河系ハローの星が多数検出された（HK サーベイ⁵⁾）。この観測はシュミット望遠鏡による広視野撮像に対物プリズムを適用することによって、一度に多数の低分散スペクトルを取得するもの（図 1a）で、カルシウム K 線の強度などから金属量の少ない星の候補がピックアップされる。それを中程度の分散（ $R = 3,000$ 程度）でスリット分光（図 1b）したり、測光観測を行ったりしてもう少し精度よく金属量や温度を見積もる。これによって選ばれた金属欠乏星（候補）に対して高分散分光観測を行い（図 1c）、化学組成を詳しく測定する。1990 年代には高分散分光によるフォローアップ観測も進められたが、本格的な研究には 8-10 m 望遠鏡の集光力が必要とされていた。



(a)



(b)



(c)

図1 (a) HK サーベイで得られたスペクトル画像 (提供: T. C. Beers). 線状に写っているのがプリズムによる個々の星のスペクトルで、これをトレースし、スペクトル線強度を調べることで金属欠乏星候補を探す. (b) 金属欠乏星 (炭素過剰星) の中分散スペクトルの例. Ca II 線や CH 分子吸収から金属量や炭素組成が見積もられる. (c) 同じ星の高分散スペクトルの例. 原子スペクトル線の多くが分離されている. C₂ 分子吸収はバンド状になっているが、これは多数の線が混ざり合っているため、装置の波長分解能を上げて分離することはできない.

一方、南半球からではあるがより深い探査としてハンプルク/ESO (HE) サーベイが行われた。この探査はもともと QSO をターゲットにしたものであるが、平行して行われた金属欠乏星探査からも重要なサンプルが得られている (後述)。

さて、すばる/HDS による金属欠乏星関係の研究については、筆者がかかわったものでは以下のようなトピックスがある。

- 第一世代星形成 (金属量分布と最も低金属の星の組成パターン)
- ビッグバンと軽元素合成 (リチウム同位体)
- 超新星・極超新星の元素合成 (金属元素の組成パターン)
- 炭素過剰星の起源と s-過程
- 爆発的な重元素合成 (r-過程)
- 矮小銀河や球状星団での星形成と元素合成

これらはいろいろな共同研究グループが進めている研究をあえて整理したものである。今の時点で振り返ってみると、それぞれで第一線の観測研究が行われているものの、正直なところ他の望遠鏡でも似たようなテーマでの観測が行われ、規模としては凌駕されているものがある。その中では炭素過剰星の研究はわれわれが早くから取り組み、最近活発に議論されるようになってきたテーマであり、かなり独自性が高いといえるだろう。これについては後で詳しく紹介するとして、その前に第一世代星に関する話題に触れておく。

4. 最も重元素組成の低い星たち

2001 年までは、知られていた金属欠乏星はすべて $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -4$ 以上の金属量をもっていた。しかし、2002 年には $[\text{Fe}/\text{H}] < -5$ の星の発見が報告され⁶⁾、2005 年にはすばる望遠鏡による高分散分光観測で、最も重元素 (鉄) 組成の低い星 (HE1327-2326) が見つかった^{7), 8)}。いずれも上述したハンプルク/ESO サーベイで最初に金属欠乏星の候補天体とされたものである。これらの星には第一世代星による元素合成の結果が直接記録さ

れているとみられる。HE1327-2326 の発見と化学組成からわかったことについてはすでに天文月報でも紹介している⁹⁾ので、ここでは現在、主に観測から提起されている問題を三つほど挙げる。

(1) 金属量分布

この星の鉄組成は太陽の約 30 万分の一 ($[\text{Fe}/\text{H}] = \log(n_{\text{Fe}}/n_{\text{H}}) - \log(n_{\text{Fe}}/n_{\text{H}})_{\odot} \sim -5.5$, ただしこの値には 2 倍程度の系統誤差がありうる) で、このレベルの鉄組成 ($[\text{Fe}/\text{H}] < -5$) をもつ星はほかに一つしか知られていない。最近, $[\text{Fe}/\text{H}] = -4.7$ の星が見つかっており¹⁰⁾, 一時期話題になった $-5 < [\text{Fe}/\text{H}] < -4$ のギャップはなさそうではあるが, $[\text{Fe}/\text{H}] < -4$ (あるいは < -3.5) の領域の金属量 (鉄組成) 分布は第一世代星形成の条件を考える上で興味深い (図 2)。なお, $[\text{Fe}/\text{H}] < -4$ の 3 天体はいずれも炭素過剰星であり, 炭素を含めた「金属量」は必ずしも最も低いわけではない。この領域は, 分解能の低い分光観測では鉄組成すら信頼できる精度で決まらず, また炭素

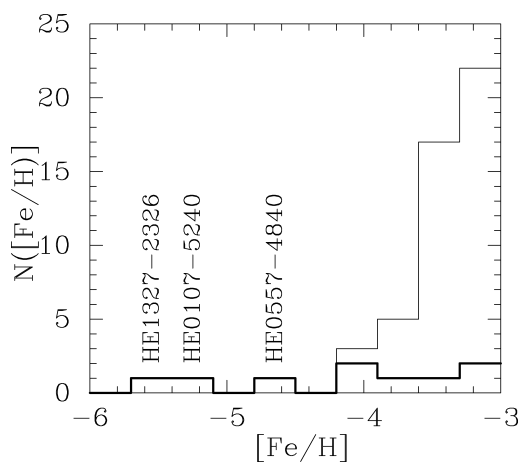


図 2 最も金属量の低い領域の星の鉄組成 ($[\text{Fe}/\text{H}]$) 分布. Norris, et al.¹⁰⁾ に基づいて作成。鉄組成が少なくなると検出できている天体数も減少するが, $[\text{Fe}/\text{H}] < -4$ にも 3 天体が見つまっている (天体名も記した)。太線はそのうち炭素過剰星を示している。 $[\text{Fe}/\text{H}] < -4$ の 3 天体がすべて炭素過剰星であるのは興味深い。

などの組成もきちんと知らないと金属量についての議論ができないため, 候補天体を逐一高分散分光観測する必要がある。

(2) リチウム組成

HE1327-2326 は主系列ターンオフ星で, 進化段階と金属量からはその表面にビッグバン元素合成の結果としてのリチウム (Li) の存在が期待される。しかし, 実際にはリチウムは検出されず, VLT 観測に基づく測定では上限値が他の金属欠乏星に見られる値 (いわゆる Spite plateau の値) の約 30 分の一となっている。この星は誕生時にリチウムがほとんど含まれていなかったか, あるいは表面のリチウムが壊されたか, どちらかである。どちらにしても, 初期宇宙ないしは星内部に未知のプロセスが存在することを意味している。実は, 最近の $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ のターンオフ星の観測からも, Spite plateau の値より若干低いリチウム組成をもつ星が見つかってきている¹¹⁾。HE1327-2326 でのリチウム欠乏と関係があるのか, さらには Spite plateau の値自体, 宇宙マイクロ波背景放射の観測から決められたバリオン密度を採用した場合に標準ビッグバン元素合成モデルから予測されるリチウム組成よりも低いという問題が知られているが, これと関係があるのか, 注目されるところである。

(3) 中性子捕獲元素

金属量の非常に低い星においては, 鉄より重い元素 (中性子捕獲元素) も一般に少なく, $[\text{Fe}/\text{H}] < -4$ の三つの星では検出すらされていない。唯一の例外が HE1327-2326 のストロンチウム (Sr) で, その組成は $[\text{Sr}/\text{Fe}] = +1$ と比較的高い。他の重元素の組成の上限値と比べると, 既知の r-過程あるいは s-過程では HE1327-2326 のストロンチウム組成の説明は難しい。ストロンチウムは中性子捕獲元素の中では比較的軽い部類に入るが, これらの「軽い」元素をつくるプロセスが初期宇宙においてはたらいた可能性が考えられる。実はこれらの「軽い」元素の過剰を示す金属欠乏星は

多数見つかっており、その詳しい組成パターンも最近詳しく調べられている¹²⁾。それはやはり既知のプロセスでは簡単には説明できないもので、これまで調べられてきた r -過程とは条件の大きく異なる爆発的元素合成の可能性も示唆されている。これが明らかになると、HE1327-2326 の起源となった第一世代星についても強い制限が与えられるものと期待される。

これらの問題の解明には、超低金属領域の星の観測を積むことが不可欠であり、後述するように新たな探査に基づく研究が重要と考えている。

5. 炭素過剰星と重元素合成

金属欠乏星の高分散分光観測が進むと、その中に特定の元素合成過程の結果を強く示す星が見つかってくる。たとえば、中性子捕獲元素の合成過程の一つとして爆発的な元素合成 (r -過程) が知られている。原子核の性質から短いタイムスケール (1 秒以下) で一気に進行する反応であることがわかっているが、どういった天体現象で、どのような条件で起こっているのか、詳細は不明である。金属欠乏星のなかには重元素の過剰を示し、かつその組成パターンが太陽系組成から推定される r -過程の組成によく一致する星が見つかってきている。こういった星の組成を詳しく調べると、実際に宇宙で起こっている r -過程の条件を絞り込み、ひいてはどのような天体現象が関与しているのか、解明する手がかりになると期待される。 r -過程の観測的研究については天文月報における本田の解説¹³⁾を参照されたい。

一方、筆者が力を注いで観測を進めてきた炭素過剰星も、炭素を大量につくりだす過程を反映しているといえるが、炭素はいろいろな天体でつくられだされる可能性があるため、その分類から行う必要がある。以下、(1) 炭素過剰星の分類、(2) AGB 星で起こる s -過程を探るための重元素組成パターンおよび (3) 同位体組成の研究について紹介する。

(1) 炭素過剰星の分類

太陽程度の金属量をもつ星 (いわゆる種族 I) では、スペクトル分類で炭素星と呼ばれる一群の星がある。代表的なものとしては、進化の進んだ中小質量星 (AGB 星) で、内部のヘリウムフラッシュによって合成された炭素が表面にくみ上げられ、炭素を含む分子のスペクトルが支配的になっているような低温度星が挙げられる。

これらの星の顕著な特徴は、炭素合成と並んでゆっくりとした中性子捕獲 (s -過程) によって鉄より重い元素を合成することである。合成される重元素組成には原子核の性質により三つのピークがあり、その一つがバリウム (Ba) にある。このため、炭素と並んでバリウムにも過剰が見られるなら、その天体の炭素は AGB 星起源であるとみておおむね間違いない (実は、重元素が r -過程起源のものもあり、それを区別するには詳細な組成分析が必要になるが、 r -過程によって重元素過剰になる天体は極めて希であることがわかっている)。

ただし、現在観測されている炭素過剰の金属欠乏星の進化段階は専ら主系列ないしは赤色巨星段階であり、AGB 段階に達しているものはほとんどない。こういった星は連星系に属し、主星が AGB 段階に達した際に表面が炭素および重元素過剰となり、それが伴星表面に降着 (質量移動) したものと考えられている。その後主星は白色矮星に進化して観測にかからなくなり、代わって当時の伴星が特異な組成をもつ星として観測されているというわけである。

多数の炭素過剰星を高分散分光観測し、重元素組成を測定したところ、約 8 割の星がバリウムの過剰を示すことが明らかになった¹⁴⁾ (図 3)。金属欠乏星の 1 割から 2 割が炭素過剰を示すと見積もられており、そのほとんどが AGB 起源であるとすると、かなり効率よく連星系における質量移動が起こったと考えなければならない。

さらに、その割合には金属量依存性があり、

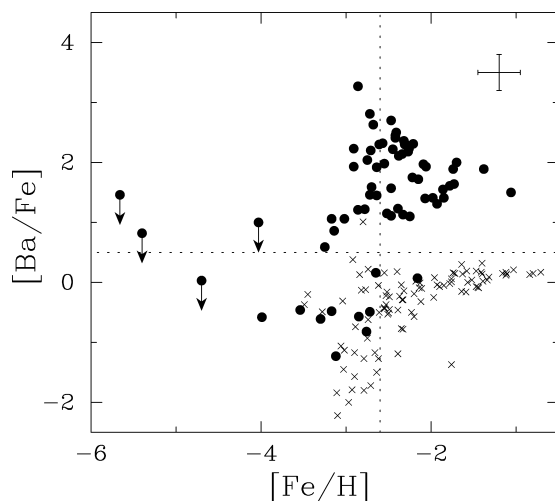


図3 金属欠乏星のバリウム組成比（横軸は鉄組成）. 黒丸は炭素過剰天体で、クロスはそれ以外の星. 図には典型的な誤差を示した. 炭素過剰を示さない星はほとんどが $[Ba/Fe] = +0.5$ 以下におさまるのでこれをバリウム過剰かどうかの境界とする（点線）. $[Fe/H] > -2.6$ の炭素過剰星のほとんどはバリウム過剰を示し、その炭素が AGB 星起源と考えられるのに対し、それより低金属の星のバリウム組成には高くないものも多い ($[Fe/H] \leq -4$ の星についてはいずれも上限値のみ求められている).

$[Fe/H] > -2.6$ ではほぼすべての炭素過剰星がバリウム過剰を示すのに対し、より金属量の低い星ではその割合は低下する. 実は $[Fe/H] < -4$ の三つの天体はどれもバリウム過剰を示さない炭素過剰星である. 重元素過剰を示さない炭素過剰星は、こういったメカニズムで形成されるのか不明であるが、第一世代星の形成・元素合成とも関連する興味深い天体である. 依然として観測例が多いとはいえないので、今後の観測の進展が期待されるであろう.

(2) s-過程によってつくられる組成パターン

さて、バリウムなどの重元素過剰を示す星は、AGB 星における s-過程の研究を行うには格好の研究対象であり、観測・解析に適した星については詳しい重元素組成パターンが得られている

(AGB 星そのものは低温であり、分子スペクトルが卓越してしまうために重元素の組成解析は一般に困難である).

s-過程は r-過程に比べると理解が進んでいるといわれ、その主要な成分が AGB 星によることもわかっている. しかし、詳細は十分理解されているとはいえず、特に中性子の主要な供給源とみられる ^{13}C の合成は星の構造進化モデルで再現されてはいない. そこで ^{13}C の合成をパラメータとしたモデルが構築され、それによって合成される重元素の組成パターンがいろいろと計算されている. その結果、低金属の AGB 星では、より重い元素が効率的につくられ、最も重い安定元素の鉛 (Pb) やビスマス (Bi) が豊富になると予測された. 1990 年代の終わりころのことである¹⁵⁾.

この時期はちょうど HDS の開発終盤あただが、当時筆者はオーストラリアなどの研究者と共同研究を始めており、AAT において観測された炭素過剰星のスペクトルをいくつか解析していたところであった. HDS の三鷹での組み上げ・調整を行っている最中はそのデータ解析も滞っていたが、ハワイに向けて装置を送りだして、少し時間の余裕ができたときに AGB のモデル計算の論文も目にし、それならばとスペクトルを丁寧に調べたところ、鉛がきちんと検出されていることに気がついた¹⁶⁾. HDS の立ち上げ前に思わぬ成果が得られてたいへん意気が上がったものである.

ただ、得られた結果はモデルが予測するよりかなり鉛の組成が低い、という皮肉なものだった. 鉛の組成そのもの (Pb/H) は、合成されたのちに連星系での質量移動や星の内部の物質による希釈の影響を受けるので、モデルと比較できるのは他の重元素 (バリウムなど) との組成比であるが、その Pb/Ba 比が予測より低いのである. 鉛の観測は、すばるでのわれわれの観測も含めてその後も続々と報告され、モデルから期待されるとおり鉛の組成の高い星も見つかったが、その分散が 1 桁以上にわたることがわかった (図 4). これ

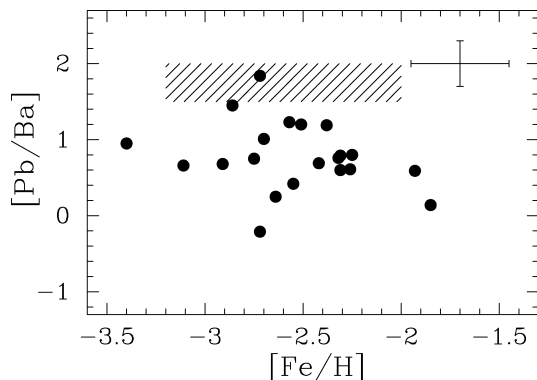


図4 炭素過剰星の Pb/Ba 組成比 (横軸は鉄組成). 2000年の初検出¹⁶⁾以降のデータを集めており, 図には典型的な測定誤差を示した. 斜線部は s-過程のモデルで予測されていた値¹⁵⁾. モデル予測に対してかなり Pb/Ba 比が低い星が多く, しかも分散が大きい. この分散の原因は不明であり, s-過程の理解がまだまだ不十分であることを示している.

は, 前述したモデルにおける ^{13}C 合成に大きな幅があることに対応づけられるが, その要因は依然不明であり, AGB 星における s-過程モデルには重大な問題が残されているといえよう. ここ数年で重元素全般の組成が決定された星の数が増えてきて, モデルとの比較もより詳細にわたって行えるようになってきている.

(3) 同位体組成比

s-過程の起こっている条件 (温度, 中性子密度) を観測的に知ることができれば, AGB 星のどこでどのように中性子捕獲反応が起こっているのか, 推定することが可能になる. そのためには, 中性子捕獲反応とベータ崩壊が同程度のタイムスケールで起こる原子核 (分岐点) の周辺を調べることが有効である. 重要な分岐点の一つとして, ^{151}Sm が知られている. この原子核のベータ崩壊の半減期は約 93 年であり, 中性子密度が高い環境では中性子捕獲が卓越し, 逆に低ければベータ崩壊が卓越する (ただし温度にも依存する). その結果は以後のより重い原子核の組成比に現れる. 従来から太陽系組成のガドリニウム同位体比

($^{152}\text{Gd}/^{154}\text{Gd}$) からこの分岐点は調べられてきた. しかし, 太陽系のガドリニウム組成には別の過程 (p-過程) の影響も入ってきてしまううえ, 調べられるのはさまざまな星で起こった s-過程の結果を積分したものである.

そこで注目したのが, s-過程元素過剰な金属欠乏星のユーロピウム (Eu) 同位体組成である. これらの星の重元素は, その起源となった AGB 星の s-過程によってつくられたと考えられる. Eu には二つの同位体 (^{151}Eu , ^{153}Eu) があり, その比は ^{151}Sm の分岐の影響を受ける. つまり, Eu 同位体比から個々の AGB 星における s-過程の条件を調べることが可能になる. この研究に取り組んだのは 2003 年頃で, s-過程に関して重要な原子核データの測定が進み, 従来のデータが更新されつつある時期だった. われわれが論文¹⁷⁾を発表したのちに ^{151}Sm の中性子捕獲の反応断面積の実験データが公表された. その結果を含めると, われわれの測定結果 (2 天体) は s-過程の環境として比較的・温度・中性子密度とも高い状況を示し, 中性子の供給源は標準的な s-過程モデルで想定されている ^{13}C よりもむしろ ^{22}Ne のほうが支配的であることと示唆するものであった. 金属量の低い星の s-過程は, 上の鉛の議論でも見たようにまだまだよくわかっていない. もう少し多数の天体について測定することが必要であろう.

なお, 最近, 隕石の分析によって太陽系形成時に溶かされずに生き残った粒子 (プレソーラー粒子) の研究が進んでいる. こういふ粒子は星や超新星爆発から放出されたもので, それらの天体での元素合成の結果が直接記録されていると期待できる. プレソーラー粒子での Eu 同位体比の測定も行われ, そちらからは標準的な s-過程モデルで説明可能な結果が出ている¹⁸⁾. プレソーラー粒子は太陽系誕生の頃の近傍での現象を最も強く反映していると思われるので, 金属欠乏星から得られる情報とは相補的である. 天文観測との共同が今後発展することを期待したい.

6. 今後の金属欠乏星探査と観測

現在進行している大規模な金属欠乏星の探査としては、Slone Digital Sky Survey (SDSS) のスペクトルからの金属欠乏星の検出、および SDSS の拡張プログラムの一つ (SEGUE) がある。最も金属量の低い星の検出などに威力を発揮した Hamburg/ESO サーベイが南天中心だったのに対し、今度は北天中心なので、すばる望遠鏡を含めた北半球の大望遠鏡の出番である。現在、探査を主導している T. C. Beers らと協力してフォローアップ観測の準備を進めているが、これが実現すると従来の数倍規模の超金属欠乏星サンプルについてデータを得ることができよう。

本稿での議論では、金属欠乏星はひとまとめにしている、銀河系のどの構造に属するかは問題にできなかった。銀河系ハロー構造も、金属量や運動学的性質によって二つの構造 (外部と内部) に分けられるのではないかという話がある。これまでに観測された星の多くは内部ハローの天体とみられるが、SDSS/SEGUE で検出される天体の観測によって外部ハローの研究も進むと期待できる。ハロー構造の起源と近傍の矮小銀河との関係もあらためて議論の対象となろう。外部ハローの星も矮小銀河の星も、高分散分光観測を行うには 8-10 m 級望遠鏡ではギリギリの暗さで、大規模サンプルに基づいた研究を行うには、すばる望遠鏡への搭載が検討されている WFMOS のような多天体分光器や口径 30 m 程度になると見込まれる次世代望遠鏡が要請されることになるだろう。

参考文献

- 1) Burbidge E. M., Burbidge G. R., Fowler W. A., Hoyle F., 1957, *Reviews of Modern Physics* 29, 547
- 2) Cameron A. G. W., 1957, Chalk River Report, CRL-41
- 3) Merrill S. P. W., 1952, *ApJ* 116, 21
- 4) Noguchi K., Aoki W., Kawanomoto S., et al., 2002, *PASJ* 54, 855

- 5) Beers T. C., Preston G. W., Shectman S. A., 1985, *AJ* 90, 2089
- 6) Christlieb N., et al., 2002, *Nature* 419, 904
- 7) Frebel A., Aoki W., Christlieb N., et al., 2005, *Nature* 434, 871
- 8) Aoki W., Frebel A., Christlieb N., et al., 2006, *ApJ* 639, 897
- 9) 青木和光, 2006, *天文月報* 99, 197
- 10) Norris J. E., et al., 2007, *ApJ*, in press, astro-ph/0707.2657
- 11) Bonifacio P., et al., 2007, *A&A* 462, 851
- 12) Honda S., Aoki W., Ishimaru Y., Wanajo S., Ryan S. G., 2006, *ApJ* 643, 1180
- 13) 本田敏志, 2006, *天文月報* 99, 358
- 14) Aoki W., Beers T. C., Christlieb N., Norris J. E., Ryan S. G., Tsangarides S., 2007, *ApJ* 655, 492
- 15) Busso M., Gallino R., Wasserburg G. J., 1999, *ARA&A* 37, 239
- 16) Aoki W., Norris J. E., Ryan S. G., Beers T. C., Ando H., 2000, *ApJ* 536, L97
- 17) Aoki W., et al., 2003, *ApJ* 592, L67
- 18) Terada K., Itoh K., Hidaka H., Yoshida T., Iwamoto N., Aoki W., Williams I. S., 2006, *New Astronomy Reviews* 50, 582

Nucleosynthesis in the Early Universe Studied by High Resolution Spectroscopy

Wako AOKI

National Astronomical Observatory of Japan and Department of Astronomical Science, The Graduate University of Advanced Studies, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Low-mass stars formed in the early Universe are found at present as metal-deficient stars in the Galaxy. Chemical abundance measurements based on high resolution spectroscopy for metal-deficient stars provide signatures of nucleosynthesis in the Big-Bang and first generations of stars. This article reviews our studies on first generation objects and carbon-enhanced stars with the Subaru Telescope High Dispersion Spectrograph.