

金属欠乏星探査と 宇宙初代星・元素合成・銀河形成



青木和光

〈国立天文台／総合研究大学院大学 〒181-8588 東京都三鷹市大沢 2-21-1〉

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

ビッグバン後の宇宙は元素としては水素・ヘリウムと微量のリチウムからなっていたと考えられている。やがて星の内部や超新星爆発などで重元素がつくられるようになり、その積み重ねで宇宙の金属量は全体として増加してきた。逆にいうと、金属量の少ない星（金属欠乏星）は宇宙の初期に生まれ、現在まで生き続けている長寿命の小質量星と考えることができる。金属欠乏星の探査とその詳細な分光観測に基づき、宇宙の初代星の形成とそれがつくり出す元素、さらに初期の銀河形成などを解明する研究が過去数十年にわたって積み重ねられてきた。そしてここ数年をとってもこの分野に大きな進歩が見られ、より大規模な金属欠乏星探査が現在も進められている。最近の話題とわれわれの進めている研究を紹介する。

1. 金属欠乏星にみる元素合成と銀河形成初期

太陽近傍の星の化学組成を調べてみるとその大半が太陽とよく似た組成をもっていることがわかる。太陽組成の3倍を超える金属量^{*1}をもつ星は皆無で、3分の1以下という星も割合としては多くない。太陽を含め星の光のスペクトル分析による化学組成の測定が可能になったのは20世紀に入ってからであるが、しばらくは星による化学組成の違いは認識されていなかった。例外は星のスペクトル分類で炭素星¹⁾やS型星²⁾などに分類された星で、これらはのちに星の進化の過程でつくられた炭素が表面における炭素組成の増大を引き

起こした結果と理解されるようになった。さらに、炭素星の一種としてCH分子吸収帯が強いという特徴で分類されたCH星³⁾がある。これは実は金属量が低く炭素が多い場合に見られるスペクトル型であり、そういう意味では早い時期に金属欠乏星を識別していたものといえる。

20世紀半ばになると、星に含まれる重元素量、すなわち金属量が太陽に比べて著しく低い星が存在することがわかってきた。これは星の種族の発見として知られ、宇宙における元素の起源の解明のうえでも重要な情報となった。当時はビッグバンで元素がつけられたのか、星のなかで元素がつけられるのか、という論争があり、星によって元素組成が異なることは後者、すなわち星のなかで

^{*1} 星の金属量とは水素・ヘリウム以外の元素全体の組成を指し、例えば太陽の金属量は重量比で1.5-2%程度とされている。しかし、一般の星ではすべての元素の組成を測ることはできないため、量が比較的多く測定しやすい鉄の組成を金属量とみなす場合が多い。元素の組成比は原子の個数比（数密度の比）で表す。すなわち、元素Xの組成は星の大部分を占める水素Hとの比として $\log A(X) = \log(N_X/N_H) + 12$ のように表す（定数12の意味は深く考える必要はない）。また2元素X, Yの比は太陽組成で規格化し $[X/Y] = \log(N_X/N_Y) - \log(N_X/N_Y)_\odot$ と表す。金属量＝鉄組成についていえば、例えば $[Fe/H] = -2$ は太陽に比べてFe組成が100分の1であることを意味する。どの程度鉄組成が低い星を金属欠乏星と呼ぶかは場合によって幅があるが、本稿で対象とするのは $[Fe/H] < -2$ の星である。

の元素合成を意味することになる⁴⁾。その後の研究により、ビッグバンによる水素・ヘリウムの合成とその後の宇宙での重元素合成、という描像が確立してきたことは周知のとおりである。

また、銀河系の初期の形成過程の解明においても金属量の低い星の存在は重要であり、それらの金属量と銀河系内での運動が重要な情報となるとされていた⁵⁾。初期に形成される銀河系ハローの星（一般的に金属量の低い星）の銀河系内の運動は太陽のような円盤に属する星とは大きく異なり、大きな固有運動をもつ高速度星として観測されることが多い。このため運動の特徴に基づいてハロー星の候補を選んで研究が行われたが、その場合、太陽の銀河系内での軌道に近い運動をもつ星が選ばれないというバイアスを生むことが指摘された。これを避けるには分光観測で金属量を測定しハロー星候補を探す必要がある。つまり、銀河系形成過程の解明にも金属欠乏星の探査とその詳細解析は重要な基盤となるといえる。

金属欠乏星の調査が次第に進んでくると、金属を全く含まない星、すなわち宇宙の初代星の生き残りが見つかるか、という問題が提起されるようになった⁶⁾。太陽程度の金属量を持つ星が種族I、金属量の少ない星が種族IIと呼ばれるのに対し、このような星は種族IIIとも呼ばれる。時間的に宇宙で最初に生まれた星かどうかはわからないため、ビッグバン元素合成の結果のみからなる始原的なガス雲から直接生まれ、水素・ヘリウムと微量のリチウムしか含まない星のことを指すことが多い。現時点では種族III星の生き残りは見つかっておらず、金属を含まないガス雲から寿命の長い小質量星が誕生しうるのか、あるいは太陽近傍以外のどこかに種族III星が生き残りうる場所があるのか、といった問題が検討されている。

一方、近年の観測で初代の大質量星が作り出した元素組成をほぼそのまま保存していると考えられる金属欠乏星は次々と見つかっており、後述するように初代星の性質の解明に重要なヒントを

与えている。

本稿では金属欠乏星の大規模探査の経緯と現状、それによって進んできた初代星や銀河系形成の理解を、筆者とその共同研究者の研究を含めて紹介する。ここでは主に銀河系ハロー構造の星を取り扱うが、その空間的な広がりイメージをもってもらうために、図1に簡単な概念図を示す。また探査の状況を把握してもらえるように、銀河系で見つまっている金属欠乏星の明るさと金属量を図2に示す。図中に名前を記してある天体については本稿でおいおい紹介する。

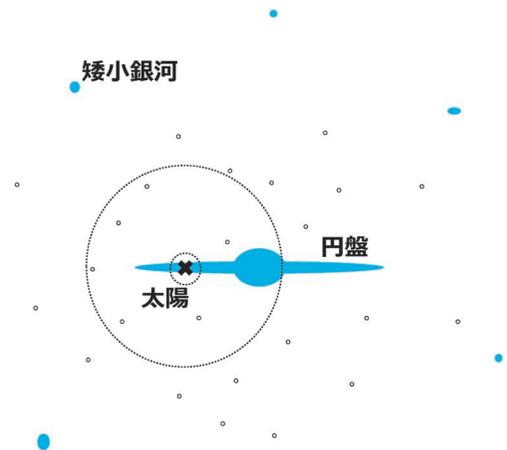


図1 銀河系構造の概念図。ハロー構造は円盤構造の数倍あるいはそれ以上に広がっている。高分散分光観測で調べられている星は15等級程度であり、赤色巨星であれば銀河系円盤サイズの距離の星まで調べることができる（点線の大きな円。実際には銀河系円盤方向は星間吸収のためそこまで調べられない）が、ハロー構造で見れば太陽から比較的近いところを調べていることになる。主系列の星についてはさらに調べられる範囲は限定され（点線の小さな円）、4.4節で取り上げる低温の主系列星についてはせいぜい数百パーセクの星しか調べられない。7章で触れる銀河系周辺の矮小銀河（近いもので数十キロパーセク）の星の研究は、銀河のなかでも最も明るい赤色巨星を時間をかけて観測するのが精いっぱいという状況である。

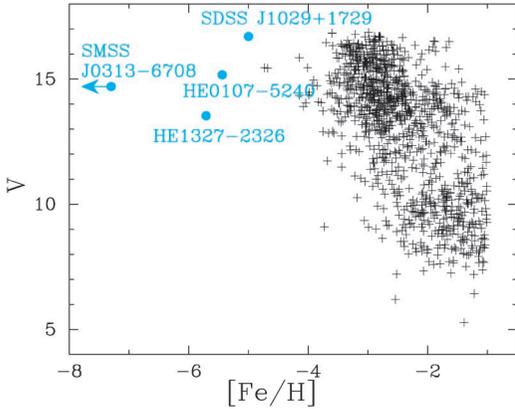


図2 これまでに調べられている銀河系の金属欠乏星のV等級（縦軸）と鉄組成（横軸）. データは金属欠乏星データベースSAGA⁷⁾から取得. $[Fe/H] < -2$ で13等級より暗い星の多くは1980年代以降の金属欠乏星探査で見つかった天体である. 天体名を付した $[Fe/H] < -4$ の四つの星については本文で取り上げている.

2. 金属欠乏星探査

星の種族の発見や1970年代に行われた明るい金属欠乏星の研究に続き、1980年代になると系統的な金属欠乏星探査が行われるようになる。一つは、前述したように、高速度星であるという特徴から固有運動に基づいて候補を探す方法である。金属量は測光観測に基づいて推定し、候補天体が絞られたところで分光観測を行う⁸⁾。

もう一つは、最初から分光観測で多数の天体の金属線の強さを測る方法である。対象は全天にまばらに存在しているので、広視野で調べていく必要がある⁹⁾。そのため、シュミット望遠鏡に対物プリズムを取り付け、視野内の星のスペクトルを写真乾板で一度に撮影する方法がとられた。BeersらはカルシウムのHK線を指標に金属量を見積もる方法を確立し、多数の金属欠乏星候補の検出に成功した¹⁰⁾。この探査は「HKサーベイ」と呼ばれる。プリズムによるスペクトルの分解能（波長 λ と分解できる波長差 $\delta\lambda$ に対し $\lambda/\delta\lambda$ で定義される）は数百程度で、金属量の見積もりの精度が高くな

い。そこで候補天体に対しスリット分光を行って中分散スペクトル（分解能2,000程度）を取得する。ここまでくると金属量などについての統計的な研究が可能になるとともに、詳しい研究のための候補を絞り込むことができる。

こうして選ばれた天体の高分散分光観測が1990年代になると本格化する。テキサス大学のマクドナルド天文台2.7 m望遠鏡やアングロオーストラリア望遠鏡（AAT、口径3.9 m）による観測^{11), 12)}により $-4 < [Fe/H] < -2.5$ の範囲で数十天体規模の化学組成が測定された。

これらの研究のなかで特筆される成果の一つは、鉄よりも重い元素の主要な起源である「速い中性子捕獲過程」(rプロセス)でつくられる元素に極端な過剰を示す星が発見され、その組成パターンが詳細に測定されたことである¹³⁾。その結果は個々の星を見ても太陽系組成から推定されているrプロセスの組成パターンと見事な一致を示すものであり、組成パターンの普遍性（universality）という、rプロセスの理解に重要な概念をもたらすことになった。詳しくは天文月報2014年1, 2号の「rプロセス特集」を参照いただきたい。

なお、HKサーベイの天体名はCS 22892-052とかBS 16934-002とかいう名前になっている。これはサーベイに用いられたシュミット望遠鏡の名前（Curtis SchmidtおよびBurrell Schmidt）、および撮影されたプレート番号とプレート内の候補天体に付けられた番号を意味する。

1990年代にはヨーロッパ南天天文台1 m望遠鏡による探査が進んだ（これにも写真乾板が用いられた）。ハンブルク大学を中心に行われたこの探査はハンブルク/ESOサーベイと呼ばれ¹⁴⁾、見つかった天体にはHE 1327-2326のような名前がつけられる。HEはサーベイの頭文字、数字は1950年分点での赤経・赤緯である。これは銀河系外天体の探査と合わせて行われたものなので、クエーサーの研究などでお馴染みの方もあろう。

ハンブルク/ESOサーベイからの重要な成果

は何といっても $[\text{Fe}/\text{H}] < -5$ の星の発見であろう。2002年には HE 0107-5240 という赤色巨星が $[\text{Fe}/\text{H}] = -5.3$ という、従来知られていた星より1桁以上低い鉄組成をもつことが報告された¹⁵⁾。2005年にはすばる望遠鏡による観測でさらに鉄組成の低い星 HE 1327-2326 も確認された¹⁶⁾。なぜハンプルク/ESOサーベイで一気に低い金属量の星が見つかったのかというのは興味深い点で、一つにはサーベイの深さが挙げられる。HE 0107-5240はV等級で15等であり、確かにこれはHKサーベイでは届かない暗さである。しかし皮肉なことに HE 1327-2326はV等級で13.5等と明るい星であった。これでは明るすぎて写真乾板での撮影でも飽和してしまうのでハンプルク/ESOサーベイの通常の数値処理でははじかれてしまっていた。それを明るい星だけ拾い直す作業をやってようやく見つけ出した星なのである¹⁷⁾。後述するとおり「明るい星をより広く探す」探査も重要なのである。

この二つの星について注目すべきことは、その鉄組成が極端に低いのに対し、炭素の組成はさほど低くないことである。標準的な組成解析によれば、炭素の組成は太陽の数十分の一に達している。酸素やマグネシウムなどの組成も鉄に比べれば高く、これらをすべて含めた金属量という意味では必ずしも極端に低いわけではない。金属欠乏星の化学組成は、多くの場合、大雑把に言えば太陽組成を全体としてスケールダウンしたものになっており、それからかけ離れた化学組成をもつ金属欠乏星はおそらく単一の超新星（あるいは別の天体現象）の元素合成の結果をそのまま取り込んで誕生してきた星と考えられる。これらの星は「初代星のあとに生まれた第二世代の星」と解釈されることが多いが、その根拠はここにある。

HKサーベイとハンプルク/ESOサーベイのフォローアップ観測としては、比較的短時間の露出で高分散分光データをとる「スナップショット観測」が行われた¹⁸⁾。当然、データのS/N比はい

まひとつなのだが、金属欠乏星のスペクトルでは原子の吸収線がまばらに現れるだけなので、これを検出するには低分解能・高S/N比のデータよりも高分解能・低S/N比のデータのほうが有利な面がある。このスナップショット観測はその後の研究でも多用されるようになってきている。

3. 金属欠乏星探査の新段階～SDSS

HKサーベイとハンプルク/ESOサーベイで見つかった金属欠乏星候補天体のフォローアップ観測は引き続き行われており、最近でも $[\text{Fe}/\text{H}] < -4$ の星の化学組成が報告されるなどの成果が上がっている¹⁹⁾。その一方、2000年代には金属欠乏星探査は新たな段階に入った。スローンサーベイ (SDSS) による探査である。

SDSSでは当初、銀河やクエーサーの撮像・分光観測が集中的に行われていたが、その際に分光データの較正目的でF型星に相当する温度をもつ星が多数観測されていた。その中に少なくない数の金属欠乏星が含まれていた。F型星の温度領域は太陽よりもやや高いため、太陽組成であるならば太陽よりもやや質量の大きい星が対応する。しかし金属量が低いと太陽よりやや軽い星がこの温度領域に入る。銀河系初期に誕生し、100億年以上の年齢をもつ星で最も質量の大きいものが太陽の0.8倍程度の星であり、これがちょうどこの温度領域に対応することになる。

SDSSの銀河・クエーサー探査がひと段落したところで、銀河系の星の探査が集中的に行われるようになった。これはSDSSのサブサーベイ計画として Sloan Extension for Galactic Understanding and Exploration (SEGUE) と名づけられ、24万個の星の分光データが取得・解析された²⁰⁾。従来の探査では写真乾板に記録されたプリズムの低分散スペクトルから天体を選び、その候補天体1個1個に対し中分散分光観測を行っていたが、それに対応するデータがSDSSではこれだけ多数でできたわけである。しかもSDSSによる測光データ

もそろっており、データセットの均質さという点でも従来の探査を凌駕するものである。

得られた分光データからはパイプライン処理によって温度や金属量などが測定される。これにはスペクトルのエネルギー分布やバルマー線・金属線の吸収線インデックスが複数用いられている。

SEGUEでは、分光サーベイの前に得られた測光データをもとに、金属欠乏星を含めてさまざまなタイプの星が調べられるようにサンプルが選定された。このため、金属欠乏星の割合などの統計的な議論を行うには一般的にはサンプル選択に対する補正が必要となる。しかし後述するように、金属量がかなり低い星（例えば $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ ）に限っていうと、測光はもちろん、中分散分光でも金属量を精度よく見積もることは困難であるため、高分散分光観測を行う天体の選択は（金属欠乏星のサンプルの範囲内で）ランダムになる。

4. SDSS/SEGUE 天体のフォローアップ観測

こうして見つかった金属欠乏星候補天体は多数にのぼるが、その大部分はV等級で16等から19等であり、15等級よりも明るいものはほとんどない。高分散分光によるフォローアップ観測には8 m級望遠鏡が必須である。SDSSはいうまでもなく北半球で行われているサーベイであり、フォローアップも北半球の望遠鏡で行うのが有利である。そこでわれわれはすばる望遠鏡による観測を早い段階から計画した。（ハンブルク／ESOサーベイは南半球で行われていたため、すばる望遠鏡によるフォローアップ観測では苦戦することも多かった）。この節ではわれわれが行ったフォローアップ観測の経緯と結果をいくつかのテーマについて紹介する。

4.1 最初のフォローアップ計画：炭素過剰星

初期には試験的に炭素過剰星の候補天体のフォローアップを企画し、天体数は少なかったがすばる望遠鏡高分散分光器（HDS）でデータを取得し、SDSSの分光データからの金属欠乏星候補の選択、炭素過剰星かどうかの推定の信頼性を確認した²¹⁾。本論から外れるが、この研究で扱った7天体のなかには、すばる望遠鏡での観測中に1時間程度でみるみる視線速度変化を示す星が存在していて、よほどの近接連星なのかと首をひねっていたが、これはのちにRR Lyr型変光星と同定され、視線速度変化は星の振動によるものであると解釈できた²²⁾。

4.2 スナップショット観測

この成功を踏まえ、すばる望遠鏡でのより大規模なフォローアップを「インテンシブプログラム」として実施した。このプログラムではまず2008年に10夜をかけてスナップショット観測を行った。対象天体はV等級で16等程度であり、15分程度の露出で鉄やマグネシウムなどの原子の吸収線を測定することができる。また、温度や組成によってはCH分子の検出も可能で、大きな炭素過剰を示す星を見分けることができる。

この観測では150天体を観測し、137天体について組成測定の結果を報告した²³⁾。残る13天体のなかにはデータの質が十分でないために最終的なサンプルから外したものにに加え、白色矮星など金属欠乏星でないことがわかったものもある。しかし、9割以上が確かに金属欠乏星であることが確認され、SDSSによる候補天体の選択が極めて信頼性の高いものであることが確認された。

図3にはすばる望遠鏡による高分散分光で得られた鉄組成とSDSSによる中分散分光データに基づく金属量の見積もりの比較を示した*²⁾。全体として相関が見られる一方、 $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ の天体を個々に見ると食い違いが大きいものも多い。つま

*²⁾ 実はここで示しているSDSSデータに基づく金属量には、すばる望遠鏡による観測が実施されている最中に見積もり方法が更新された結果が反映されている。それ以前の見積もりではこれよりだいぶ相関が悪いが、それでも $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ の星を効率よく選択できたという点では結果は変わらない。

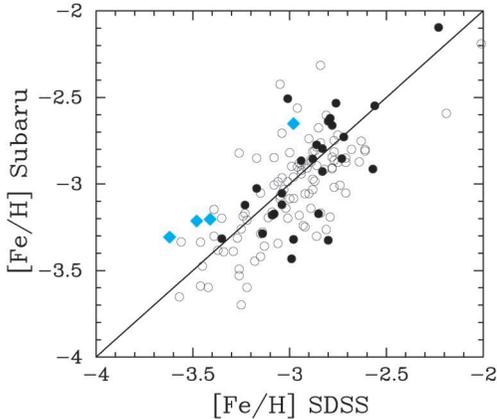


図3 SDSSによる中分散分光観測で見積もられた鉄組成（横軸）とすばる望遠鏡による高分散分光観測で決められた鉄組成（縦軸）の比較。黒丸印が赤色巨星、白抜きの丸印が温度の高い主系列星、青色のダイヤモンド印が低温の主系列星。全体として相関が見られ、系統的なずれはないが、分散は大きい。

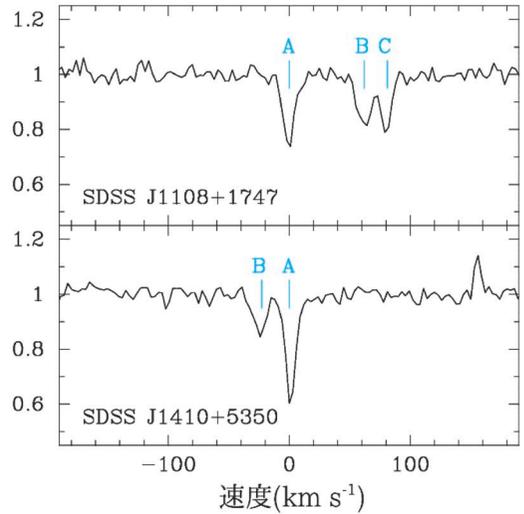


図4 二重線分光連星のスペクトルの例。複数のスペクトル線を速度スケールに直しスタックしたものを示している。上図の天体には3成分が見られ、三重星であることがわかる。

り、SDSSの中分散分光データの結果は統計的には意味をもつが、個々の天体の金属量を議論するにはやはり高分散分光が必要であるといえる。

この結果、やや意外なことであったが、 $[\text{Fe}/\text{H}] < -4$ の星が一つも見つからなかった。元々の観測提案ではこういう星の検出を大きな目的の一つとして掲げていただけに、この結果には正直なところ少々落胆した。しかし、手順どおり、予定どおりにデータを得た結果なのだからこれが現実で、やはり $[\text{Fe}/\text{H}] < -4$ の星は少ないのである。

それでも、これまでサンプルの多くなかった $[\text{Fe}/\text{H}] < -3.5$ の星はいくつか検出された。金属量分布の推定で、 $[\text{Fe}/\text{H}] = -3.5$ にシャープなカットオフがあるとの推定もあった²⁴⁾が、われわれの結果は $[\text{Fe}/\text{H}] < -3.5$ にも分布が伸びていることを示唆している²⁵⁾。この結果はこれまでに見つけていた金属欠乏星のデータの再解析によっても確認されている²⁶⁾。これらの最も金属量の低い星についてはさらに追加観測が行われ、詳しい組成解析が行われている²⁷⁾。

4.3 連星の割合

高分散分光を行うと、組成に加えスペクトル線から速度情報も詳しく得られるという利点がある。興味深いことに、この研究のサンプルには二重線分光連星が3天体見つかった²⁸⁾。これは速度の異なるスペクトル線が二重線として観測されるもの（図4）で、空間的には分解できていない連星で二つの星が似たような明るさをもっている場合に対応する。しかも速度差が見える程度に星同士が運動していないといけないため、軌道周期が比較的短い（連星間距離が短い）場合に検出できるものである。赤色巨星になると進化のタイムスケールが短くなり、二つの星が同程度の明るさで輝くためにはよほど質量が近くなければならないので、二重線分光連星はたいてい主系列星のペアの場合に見つかる。

この研究のサンプルには主系列から準巨星に進化するまでの星（ターンオフ星と呼ばれる）が109天体含まれていた。うち3天体が二重線分光連星という結果で、一度の観測で二重線分光連星を検出できる確率をいろいろと考慮すると金属欠

乏星 ($[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$) の少なくとも10%程度は連星間距離が数天文単位以内の連星であると見積もられた。統計を議論するにはサンプルが小さすぎるが、この数字は過去に金属欠乏星 ($[\text{Fe}/\text{H}] < -3$) のなかで見つかった二重線分光連星 (これも4天体だけだが) の割合とは矛盾しない。

これに加え、連星の割合を見積るのに有用な情報として炭素過剰星の割合がある。炭素過剰の起源はいろいろありそうだが、理解が確立しているプロセスとしては、連星系における相手の星からの質量移動がある。主星が1-3太陽質量程度の星だと、進化が進んだ赤色巨星段階 (漸近巨星分枝星=AGB星段階) 内部でつくられた炭素が表面にくみ上げられる。この段階で相手の星に星風等で物質が移動すると相手の星の表面が炭素過剰となる。やがて主星がさらに進化して白色矮星になってしまうと伴星のほうだけが炭素過剰星として観測される、というわけである。このような場合には炭素だけでなくバリウムなどの重元素がsプロセスで合成されるため、重元素過剰になる。これが連星系における質量移動に起因する炭素過剰星を特定する指標となる。実際、炭素と重元素の過剰を示す星の視線速度変化を長期にわたって調べた研究により、これらの天体の多くが連星系に属し、典型的な周期が数十日から数百日であることがわかってきている²⁹⁾。

この研究のサンプルには重元素過剰な炭素過剰星が11天体含まれていた。母集団が137天体で、温度の高い星の場合、炭素過剰であることを見落とす恐れがある (炭素の組成はCH分子の測定に基づくため、S/N比がよくないスペクトルでは検出できない場合がある) ことを考慮すると、10%程度は質量移動を起こした連星系であると見積もることができる。この見積もりも過去に見つかった炭素過剰 (かつ重元素過剰) な星の金属欠乏星全体に占める割合と矛盾しないものである。上述のように、このタイプの炭素過剰星の連星の周期は典型的には数十日から数年であるこ

とから、やはり連星間距離が数天文単位以内の連星であると推定することができる。

いずれも小さなサンプルに基づく検討で不定性の大きさは否めないが、非常に金属量の少ない星における小質量連星の割合の推定としては初の試みとなった。SDSSとそのフォローアップ観測の均質さがそのベースとなっている。連星の割合や軌道周期をより正確に求めるには、長期間にわたる視線速度変化の追跡が必要である。

これだけ金属量の低い星 (特に主系列星) のサンプルを増やすには数年以上はかかると見られる。しかし、宇宙初期の小質量星形成において連星がどの程度できるのか、というのは星形成理論のうえでも重要問題であり³⁰⁾、今後も時間をかけて取り組むべき観測課題である。

4.4 低温の主系列星

この研究ですばる望遠鏡HDSによってフォローアップ観測の行われたSDSS天体は137星で、大半が主系列ターンオフ星であり、残りの多くが赤色巨星であったが、4天体は低温の主系列星であることがわかった。有効温度は4,500から5,000度程度で、質量でいうと0.5太陽質量程度になる。その光度は太陽の1割程度なのでごく近傍でしか検出できず、これまでに金属量の低い星の中では極めて少数しか見つかっていなかった。例えば、低金属の低温の主系列星に着目して金属量や有効温度をコンパイルした研究³¹⁾ においては、最も金属量の低いものは $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.5$ 程度であった。ただし、例外的に、G77-61という炭素過剰な低温の主系列星 (dwarf carbon starとよばれる) が $[\text{Fe}/\text{H}] = -4$ であるという報告がある³²⁾。

このような事情もあって、SDSSデータの解析パイプラインではこれら4天体の表面重力の見積もりが不正確で、後に高分散分光観測によって求められた結果に比べると金属量も低めに出ていた (図3)。高分散分光観測を行うと、マグネシウム の強い吸収線などで広がった減衰部 (ウィング成分) が見られることや、一階電離した鉄の吸収線

が中性のものに比べて非常に弱いことなどから、表面重力が太陽よりも高いコンパクトな主系列星であることは明らかである。有効温度と表面重力がきちんと決められればこういう星の組成解析は特段困難なものではない。

この4天体のなかでまず1天体が目についた。鉄より重い元素の組成が異常に高いのである(図5)。すばる望遠鏡HDSによるインテンスブプログラムの後半で時間をかけて高S/N比スペクトルをとって組成解析を行ってみると、重元素の組成パターンがrプロセスによく合うことが判明した³³⁾。これまでにrプロセス元素の過剰を示す星は専ら赤色巨星で見つかったが、主系列でこれほどはっきりした過剰を示す星が見つかったのは初めてであり、rプロセス元素の過剰が観測している星の進化に起因するものではないことが裏づけられた。驚くべきは $[Fe/H] = -3.4$ という低金属量で、しかもrプロセスの代表としてよく用いら

れるユーロピウム (Eu) は鉄に対して2桁も過剰になっていることである。これはrプロセス過剰星のなかでも最も極端な例の一つである。

4.5 巨大質量星の痕跡か？

残る3つの低温の主系列星のうち、もう1天体、あまり目立たなかったものの奇妙な組成をもつ星が存在した。SDSS J0018-0939という星で、 α 元素のマグネシウムやカルシウムの組成が鉄に比べて異常に低いのである。それだけでなく炭素組成も鉄に比べて非常に低いことも明らかになった。実はSDSSのデータからの見積もりではこの天体はやや炭素過剰とされていたのだが、これは表面重力を過小評価していたためで、きちんと解析するとむしろ炭素組成はかなり低いという結果になった。(解析において重力が弱いと仮定すると分子ができにくいことになるので、測定された分子吸収帯を説明するには高い炭素組成を仮定する必要がある。)

これは宇宙初代星のなかに存在していたかもしれないと考えられている巨大質量星、すなわち太陽質量の100倍を超えるような星が起こす超新星爆発でつくられると予想される化学組成で説明できる可能性があると考え、追跡観測を実施した。

その結果得られたこの星の化学組成を超新星爆発による元素合成モデルと比較したものを図6に示す³⁴⁾。上の図で比較しているのは太陽の数十倍の質量をもつ星が起こす重力崩壊型超新星でつくられる元素の組成比で、多くの金属欠乏星の組成(図に示している比較星を含む)をよく説明できるモデルである。これに比べるとSDSS J0018-0939は軽い元素が相対的に少なく、鉄族元素のなかではコバルトが少ない。

重力崩壊型超新星でつくられる元素組成比にはある程度バリエーションが考えられ、例えば星の中心付近で合成される鉄族元素の大部分が爆発の際にブラックホールに取り込まれてしまうケースを想定すれば、炭素が鉄に対して過剰になることの説明も可能であると考えられている。これが前

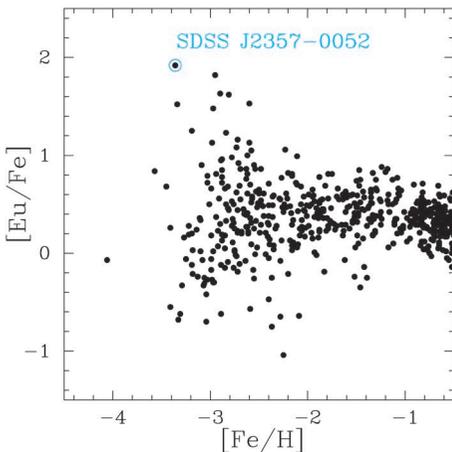


図5 rプロセス元素合成の指標となるユーロピウム (Eu) の組成比。データ点は銀河系内の星についてのもので、データベースSAGA⁷⁾から取得。金属量の低い星のEu組成は大きなばらつきを示す。これは初期の宇宙ではrプロセスの影響が局所的に強く表れEuが過剰になった場合があることを示唆しているが、そのなかでもSDSSで見つかった低温の主系列星の一つSDSS J2357-0052はとりわけ低い金属量で、鉄に対して最も高いEuの過剰を示す。

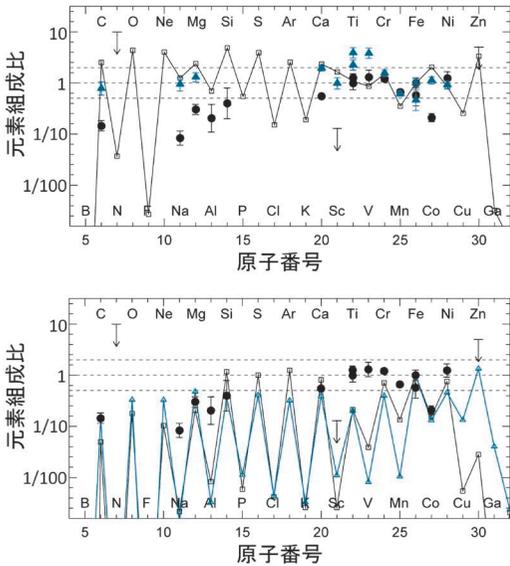


図6 低温の主系列星SDSS J0018-0939 (丸印) と比較星G39-36 (青色の三角印) の元素組成パターン. 上図では太陽質量の数十倍の星が起す重力崩壊型超新星でつくられるパターンと比較している. SDSS J0018-0939の組成パターンはこのモデルでは説明できない. 下図は太陽質量の300倍の星が起す電子対生成型超新星 (黒の実線) と太陽質量の1,000倍の星が重力崩壊したときに爆発を起こすと仮定した場合 (青色の実線) に期待される元素組成パターンとの比較³⁷⁾.

節で紹介した HE 0107-5240 や HE 1327-2326 の特異な組成の解釈の一つである^{35), 36)}. しかし、鉄族元素に対して軽い元素を少なく放出するような爆発を考えるのはなかなか難しく、しかもSDSS J0018-0939に見られるようにコバルト組成が低いことも同時に説明するのは困難である.

一方、この星の元素組成比は巨大質量星が起す超新星爆発で予想される元素組成比に似ているところがある. 図6の下図では300太陽質量の星が起す電子対生成型超新星、および1000太陽質量の星が重力崩壊型の超新星爆発を起こしたと仮定したモデルから予想される組成³⁷⁾ との比較を示している. 炭素やマグネシウム、鉄やコバルトなどの元素の全体的な組成パターンはよく説明

できているといえる. あまりよく合っていないナトリウムなどはモデルで考慮されていない星の進化途上での元素合成である程度説明できる可能性がある. また、チタンもあまり合っていないが、この元素は他の金属欠乏星でもうまく説明できない場合が多く、測定上の問題も含めて再検討してみる必要がある. 巨大質量星の進化と元素合成については、ここ数年、あまり新しい理論研究が発表されていない状況であったが、比較対象となる観測データが得られたことで今後理論研究が活発になることを期待している.

もう一つ注目すべき点は、この星の金属量 (鉄組成) は太陽に対して約300分の1と、最近見つかってきている金属欠乏星のなかではさほど低くはないということである. 実は、巨大質量星の爆発がつくる元素組成パターンをもつ星がこれまでに見つかっていなかったことに対して、そういう爆発では供給される鉄などの重元素が多いため、第二世代の星であってもすでに比較的少量の重元素を含んでしまうという可能性が指摘されていた³⁸⁾. つまり、重元素量の極端に少ない星ばかりを探していたのでは巨大質量星の痕跡を見逃してしまうというのである. SDSS J0018-0939がその予想どおりの金属量をもっていたことは興味深い. 巨大質量星を調べるには極端に金属量 (あるいは鉄組成) の低い星ばかりでなく、幅広く探査を進めることが重要である.

さて、4天体しか見つからなかった低温の主系列星のなかに極端な組成をもつ星が二つも含まれていたのはなぜかという疑問が生じるが、今のところ特に理由は見当たらない. 他の2天体にはこのような組成の異常は見られないためデータ解析上の問題とは考えられない. 今後サンプルを増やしていくなかで確認していきたい点である.

5. 低金属量のもとでの小質量星形成

SDSSで見つかった金属欠乏星候補天体のフォローアップ観測はすばる望遠鏡以外でも行われて

いる。南半球からではあるが、ヨーロッパ南天天文台 (ESO) の VLT でも精力的に観測が行われていて、上述の「スナップショット観測」にはやや分解能が低いものの高効率の分光器 X-shooter を用い、さらに詳しい測定には高分散分光器 UVES を用いて研究が進められている。

この手順で 2011 年には炭素過剰を示さない星としては初めて $[\text{Fe}/\text{H}] = -4$ を明らかに下回る星が見つかった (SDSS J1029+1729; $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -5$ 程度)³⁹⁾。これは低金属量のもとでの小質量星形成を考えるうえでは重要な発見である。小質量星の形成にはガス雲を効率的に冷却できるダスト放射や原子スペクトル線放射が重要と考えられている。鉄組成が非常に低くても、炭素や酸素が多く含まれていればそれらの禁制線放射によって小質量星の形成が可能になるかもしれない。逆にいうと、 $[\text{Fe}/\text{H}] = -4$ の星の大部分が炭素過剰を示すという結果は、炭素を比較的多量に放出する超新星爆発の影響を受けるなどして炭素過剰になったガス雲からは小質量星が形成された (そうでなければ小質量星は生まれなかった)、と解釈することができる⁴⁰⁾。しかし、SDSS J1029+1729 の存在は、炭素や酸素が過剰でなくても $[\text{Fe}/\text{H}] = -5$ 程度の金属量で小質量星が形成されうことを示している。ただし、このような星はやはり希なようで以後報告例がない。これまでに $[\text{Fe}/\text{H}] < -4.5$ の星は 7 個ほど見つかったが、この星以外はすべて炭素過剰である。

余談だが、SDSS J1029+1829 もわれわれが進めたすばる望遠鏡によるフォローアップ観測での対象リストに入っていたものの、若干暗めであったため実際の観測のときには外してしまっていた。SDSS のスペクトルだけからは $[\text{Fe}/\text{H}] = -3$ 以下になると金属量の推定は不定性が大きく (図 3)、高分散分光をやってみないとわからないところがあるのでやむをえないことではあるが、もう少し観測時間があればカバーできたはずであり、VLT での発見の話聞いたときは少し残念に感じたこ

とを記憶している。しかし逆にいえば、こういった星の発見は偶然の産物ではなく、現在の手法での観測を進めれば確実に見つけれられることが確認されたことにもなる。

6. 新たな金属欠乏星探査

さて、ハブルク/ESO サーベイや SDSS による金属欠乏星候補天体の高分散分光フォローアップ観測は継続的に行われているが、新たな金属欠乏星探査のほうも進展している。

その一つはスカイマップパー (SkyMapper) 望遠鏡による探査である。これは広視野測光観測を行うもので、超新星探査など時間変動を示す天体を見つけることを大きな目的としているが、同時に金属欠乏星の探査にも利用可能である。そのため金属量の違いに感度のあるフィルター (367–398 nm) を用意している。

この探査によって見つかった金属欠乏星候補天体のなかから、早速、最も鉄組成の低い星 SMSS J031300.36–670839.3 が見つかった⁴¹⁾。この星は赤色巨星であるが、フォローアップ観測を行ったマゼラン望遠鏡の高分散分光器 MIKE のスペクトルでは鉄が検出されず、上限値として $[\text{Fe}/\text{H}] = -7.3$ という値が得られた。カルシウムは検出され $[\text{Ca}/\text{H}] = -7$ であるので鉄組成も上限値に近い値であろうと推定されるが、今後の高精度な観測が待たれる。

この星もやはり炭素過剰 ($[\text{C}/\text{Fe}] > 4.9$) を示しており、マグネシウムも鉄ほどには欠乏していない ($[\text{Mg}/\text{H}] = -4.3$)。つまり、これまでに見つかった HE 1327–2326 などの炭素過剰星のより極端な場合と考えることができそうである。この星の発見論文およびその後の研究⁴²⁾でも鉄の放出量の小さな重力崩壊型超新星がこの星の化学組成をつくったという解釈が示されている。

また最近では、スカイマップパー望遠鏡での探査をもとに、バルジ構造にも金属量の低い星が存在することが確認されている⁴³⁾。今後、スカイマッ

パー望遠鏡のような測光サーベイが金属欠乏星探索でどのような役割を果たしていくのか、注目されるところである。

一方、北半球では中国の広視野分光サーベイ望遠鏡LAMOSTが稼働し、本格サーベイも5年目を迎えている。LAMOSTでは4,000本のファイバーで中分散分光 ($R=1,800$) サーベイを進めており、すでに600万天体以上の分光データが取得されている。観測対象の多くが銀河系内の星であり、金属欠乏星も多数含まれている。

高分散分光フォローアップを必要とする金属欠乏星の研究の面では、サーベイの対象に比較的明るい星 (12-15等級) が含まれていることは重要である。数年前にサーベイの計画段階で聞いていた話よりも明るい星までカバーするようになったようであり、視野の広さと望遠鏡時間を活かして「浅く広いサーベイ」も兼ねるようになったのは全天にまばらに存在している銀河系ハローの金属欠乏星を調べるにはたいへん有益である。

LAMOSTで選んだ星の高分散分光フォローアップは北半球の大望遠鏡で行うのが効率がよい。そこでわれわれはLAMOSTのサーベイで見つかった金属欠乏星候補天体のすばる望遠鏡による高分散分光観測を2013年に開始した。当初行った小規模な観測では、LAMOSTデータの解析処理に問題があって星の温度や金属量の見積もり誤差が大きく、金属欠乏星でないことが判明した天体も多かったが、2014年5月から行っている本格的な追跡観測では1晩あたり30近い天体の高分散分光データを取得することができ、ほぼすべてが非常に金属量の低い星 ($[Fe/H] < -2.5$) であることを確認できている。その中にはこれまでに観測例が10天体程度しかない $[Fe/H] = -4$ 付近の星も複数見つかると⁴⁴⁾、またrプロセス元素過剰を示す星も新たに検出されている⁴⁵⁾。

7. 銀河系形成過程の解明に向けて

銀河系ハローの星の大規模探索とその分光観測

が進む一方、今後数年でGaia衛星により星の位置・運動情報が明らかになる見込みで、この分野の観測研究は新たな時代を迎える。すでにGaiaデータが出てくることを見越してESO/VLTで300夜にわたる分光観測が行われ、銀河系のさまざまな構造・星団の約10万天体の組成を測定するプログラムが実施されている (Gaia/ESO survey⁴⁶⁾)。他の金属欠乏星観測プログラムにおいてもGaiaデータと組み合わせた研究が進展し、銀河系の形成・進化の解明に貢献することが期待される。特に、すばる望遠鏡主焦点分光器PFSによる分光サーベイへの期待は大きい⁴⁷⁾。

また、銀河系の衛星銀河である矮小銀河の個々の星の分光観測も大きく進展している。その多くが低金属量の星であり、銀河系形成過程との関係で注目される天体である。特に、銀河を構成する星の数が極端に少ない暗い矮小銀河 (Ultra-Faint Dwarf Galaxies) の発見が最近相次いでおり、それらは銀河系ハローの種となった小さな星の集団の生き残りである可能性が示唆されている。なかにはメンバー星が軒並みr過程元素の過剰を示す銀河も見つかっており⁴⁸⁾ 重元素合成解明の観点からも注目されている。こういった矮小銀河の探索とその分光観測は小さな星のシステムが初期にどのように形成され進化したのか、それが銀河系ハロー形成にどのようにかかわったのか、理解するうえで鍵となる。メンバー星が少ないことから一つの銀河あたりで調べられる比較的明るい星の数は限られている。将来的には、30 m級の大望遠鏡で探る重要なターゲットとなるだろう。

謝 辞

共同研究者であり、ともに天文月報編集委員を務めた富永望氏には原稿の確認と有益なコメントをいただいた。ここで紹介した著者の研究の多くは科学研究費補助金23224004およびJP16H02168の支援を受けている。

参考文献

- 1) Shane C. D., 1928, Lick Observatory Bulletin 396, 123
- 2) Merrill P. W., 1922, ApJ 56, 457
- 3) Keenan P. C., 1942, ApJ 96, 101
- 4) Burbidge E. M., Burbidge G. R., Fowler W. A., Hoyle F., 1957, Reviews of Modern Physics 29, 547
- 5) Eggen O. J., Lynden-Bell D., Sandage A. R., 1962, ApJ 136, 748
- 6) Bond H. E., 1981, ApJ 248, 606
- 7) Suda T., Katsuta Y., Yamada S., et al., 2006, PASJ 60, 1159
- 8) Ryan S. G., Norris J. E., 1991, AJ 101, 1835
- 9) Beers T. C., Christlieb N., 2005, ARA&A 43, 531
- 10) Beers T. C., Preston G. W., Shtetman S. A., 1992, AJ 103, 1987
- 11) McWilliam A., Preston G. W., Sneden C., Searle L., 1995, AJ 109, 2757
- 12) Ryan S. G., Norris J. E., Beers T. C., 1996, ApJ 471, 254
- 13) Sneden C., McWilliam A., Preston G. W., et al., 1996, ApJ 467, 819
- 14) Wisotzki L., Koehler T., Groote D., Reimers D., 1996, A&AS 115, 227
- 15) Christlieb N., Bessell M. S., Beers T. C., et al., 2002, Nature 419, 904
- 16) Frebel A., Aoki W., Christlieb N., et al., 2005, Nature 434, 871
- 17) Frebel A., Christlieb N., Norris J. E., 2006, ApJ 652, 1585
- 18) Barklem P. S., Christlieb N., Beers T. C., et al., 2005, A&A 439, 129
- 19) Hansen T., Hansen C. J., Christlieb N., et al., 2014, ApJ 787, 162
- 20) Yanny B., Rockosi C., Newberg H. J., 2009, AJ 137, 4377
- 21) Aoki W., Beers T. C., Sivarani T., 2008, ApJ 678, 1351
- 22) Kinman T. D., Aoki W., Beers T. C., Brown W. R., 2012, ApJ 755, L18
- 23) Aoki W., Beers T. C., Lee Y. S., et al., 2013, AJ 145, 13
- 24) Schörck T., Christlieb N., Cohen J. G., 2009, A&A 507, 817
- 25) Aoki W., 2012, ASP Conference Proceedings 458, 55
- 26) Yong D., Norris J. E., Bessell M. S., et al., 2013, ApJ 762, 27
- 27) Matsuno T., Aoki W., Beers T. C., Lee Y. S., Honda S., 2017, AJ, in press
- 28) Aoki W., Suda T., Beers T. C., Honda S., et al., 2015, AJ 149, 39
- 29) Hansen T. T., Andersen J., Nordström B., 2016, A&A 588, 3
- 30) Machida M. N., 2008, ApJ 682, L1
- 31) Plez B., Cohen J. G., 2005, A&A 434, 1117
- 32) Yong D., Lambert D. L., 2003, PASP 115, 796
- 33) Aoki W., Beers T. C., Honda S., Carollo D., 2010, ApJ 723, L201
- 34) Aoki W., Tominaga N., Beers T. C., Honda S., Lee Y. S., 2014, Science 345, 912
- 35) Umeda H., Nomoto K., 2003, Nature 422, 871
- 36) Iwamoto N., Umeda H., Tominaga N., Nomoto K., Maeda K., 2005, Science 309, 451
- 37) Ohkubo T., Umeda H., Maeda K., et al., 2006, ApJ 645, 1352
- 38) Karlsson T., Johnson J. L., Bromm V., 2008, ApJ 679, 6
- 39) Caffau E., Bonifacio P., Franois P., et al., 2011, Nature 477, 67
- 40) Norris J. E., Yong D., Bessell M. S., et al., 2013, ApJ 762, 28
- 41) Keller S. C., Bessell M. S., Frebel A., et al., 2014, Nature 506, 463
- 42) Bessell M. S., Collet R., Keller S. C., et al., 2015, ApJ 806, L16
- 43) Howes L. M., Casey A. R., Asplund M., et al., 2015, Nature 527, 484
- 44) Li H.-N., Aoki W., Zhao G., et al., 2015, PASJ 67, 84
- 45) Li H.-N., Aoki W., Honda S., et al., 2015, Research in Astronomy and Astrophysics 15, 1264
- 46) Gilmore G., Randichi S., Asplund M., et al., 2013, The Messenger 147, 25
- 47) Takada M., Ellis R. S., Chiba M., et al., 2014, PASJ 66, 1
- 48) Ji A. P., Frebel A., Chiti A., Shimon J. D., 2016, Nature 531, 610

Exploring Early Universe Based on Metal-Poor Star Surveys

Wako AOKI

National Astronomical Observatory of Japan/SOKENDAI (The Graduate University for Advanced Studies), 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan

Abstract: Starting from the primordial chemical composition that includes no heavy elements, the metallicity of the universe has been increasing by contributions of nucleosynthesis in stars and supernova explosions. This means that metal-poor stars, *i.e.* stars containing only small amount of heavy elements, are regarded as low-mass objects formed in the early universe and survived until now thanks to their long life times. Based on the surveys of metal-poor stars and subsequent detailed spectroscopic measurements, formation of first stars and their nucleosynthesis, as well as the early process of galaxy formation, have been studied in the past decades. Recent remarkable progress in this field promotes new programs of metal-poor star surveys. This article provides a brief overview of recent topics in this field including our ongoing studies.