

金属欠乏星の化学組成から探る 銀河系ハローの形成過程



石垣 美歩

〈カブリ数物連携宇宙研究機構・日本学術振興会特別研究員 〒277-8583 千葉県柏市柏の葉5-1-5〉

e-mail: miho.ishigaki@ipmu.jp

銀河系恒星系ハローは、主に金属欠乏星からなる古い成分であり、ハロー星の軌道運動や化学組成は、銀河系形成過程の手がかりとして注目されています。本研究では内部・外部ハロー、および同じく金属欠乏星からなる厚い円盤が、化学元素組成のうえでどのような違いを示すかを明らかにするため、すばる望遠鏡HDSで取得された高分散分光データをもとに、およそ100の金属欠乏星について α 元素、鉄ピーク元素、中性子捕獲の化学組成を導出しました。解析の結果、比較的金属量の高い内部・外部ハロー星は厚い円盤星と比べて平均の組成比や組成比の分散がいくつかの元素で異なることがわかりました。これは厚い円盤、内部ハロー、外部ハローを含む銀河系の金属欠乏星が、異なる化学組成比で特徴づけられるさまざまな星形成史をもつ環境のもとで生まれたことを示唆しています。

1. 研究の背景

夜空に星が帯状に広がって見える天の川の姿を、誰でも一度は目にしたことがあるのではないのでしょうか。天の川が私たちの住む銀河系である円盤状の星の分布を真横から見た姿らしいことを初めて観測によって示したのは、18世紀の天文学者、ウィリアム・ハーシェルだったといわれています¹⁾。その後、一つひとつの星の明るさ、色、位置、運動の測定精度が向上し、銀河系は天の川として見えている薄い円盤 (thin disk) のほかに、バルジや恒星系ハロー、厚い円盤 (thick disk) といった、星の空間分布、軌道運動、化学組成などによって特徴づけられるいくつかの星種族をもつことがわかってきました。

なかでも恒星系ハローは、太陽系に比べてヘリウムより重い元素 (金属元素) の組成が低い星、金属欠乏星で成り立っています。これらの星々は宇宙のなかで超新星爆発による重元素汚染が始

まって間もないころに生まれたと考えられ、銀河系の形成当時についての手がかりになる天体として注目されてきました。特に観測装置の進歩や膨大な観測時間を投入した大規模サーベイによって、たくさんの金属欠乏星について位置、運動、化学元素組成の測定が行われるようになり、われわれの思い描く恒星系ハローの姿も大きく塗り替えられつつあります。本稿では、銀河系形成解明のための化石情報の宝庫、恒星系ハローの形成・進化にまつわる最新の研究成果の一端と、私たちの行ったすばる望遠鏡での観測に基づく金属欠乏星の化学組成の研究について紹介したいと思います。

1.1 恒星系ハローの形成過程

金属欠乏星の軌道運動と化学組成の見積もりから銀河系の形成史に制限をつける初期の試みとして、1962年のEggen, Lyndenbell, Sandageらの研究がよく知られています²⁾。彼らは恒星の ($U-V$) (U バンドと V バンドの等級差) で定義される色が、その星の表面大気のもつ金属元素の組成

(金属量)によって変化することに着目しました。彼らは($U-V$)の値が小さい星ほど金属量が低く、したがってより昔に生まれたものである可能性が高いとする研究結果をもとに、金属量の低い恒星(金属欠乏星)の運動を調べれば、過去の銀河系の物理状態にさかのぼれると考えたのです。解析の結果、金属量が低いと思われる星ほど軌道離心率が大きいことに気づきました。彼らはその解釈として、銀河系は過去にガスの急激な収縮を経験し、金属欠乏星はその過程のなかでできたのではないかと考えました。この結果は、銀河系がガスの急激な収縮に対応する比較的短い時間($\sim 10^8$ 年)のなかでできたという考えを支持するものと受け止められました。

一方でそのような予想と矛盾する観測成果が、Searleらによってもたらされました³⁾。彼らは銀河系ハローの外部にある球状星団を調べ、それらの年齢に一定のばらつきがある可能性を指摘しました。もしEggenらの提唱したように、銀河系、およびそれに付随する球状星団が $\sim 10^8$ 年程度の短い時間でできたとすると、星団の年齢のばらつきもこの時間より大きくはならないと予想されます。しかしSearleら解析結果は、ハローの外部にある球状星団には少なくとも 10^9 年程度の年齢のばらつきがあることを示唆するものでした。このことから彼らは、特にハロー外部に関しては、Eggenらの提案よりもずっと長い時間をかけて形成されたのではないかと考えました。

1.2 スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS) による成果

銀河系形成史に対して、これらの大きく二つの見方のなかで、どちらが実際の形成史に近いのか、そのことについてより踏み込んだ事実、スローンデジタルスカイサーベイ (SDSS)⁴⁾のような大規模サーベイによって、ここ数十年のあいだに次々に明らかになってきました。SDSSでは銀

河系に所属する星々について、多色測光データと中分散分光データが取得され、恒星の空間分布、速度分布、金属量分布がこれまでになく広範囲にわたって調べられました。そのなかで、銀河系の周りを軌道運動している矮小衛星銀河(以後、矮小銀河)のうち、以前まで知られていたものよりも一段と暗い矮小銀河(*ultra-faint dwarf galaxy*)が新たにいくつか発見されました⁵⁾。これは宇宙論の予測する矮小銀河の数に対して観測される矮小衛星銀河の数が極端に少ないという、ミッシングサテライト問題を検討するうえでたいへん重要な成果でした。また恒星の密度超過構造や恒星ストリームの存在が次々に明らかになってきました⁶⁾。これらの大部分は、過去に銀河系へ矮小銀河が降着してきた痕跡と考えられ、銀河系形成の直接の証拠と見られています。

SDSSによる銀河系サーベイのなかでも最も重要な成果の一つとして、銀河系恒星系ハローの二重構造がこれまでより格段により統計精度で確かめられたことが挙げられます^{7), 8)}。Carolloらの解析によれば、恒星系ハローの内部(内部ハロー)と外部(外部ハロー)とは典型的な星種族の性質が異なることがわかりました。内部ハローは星がやや平べったい形に分布しており、銀河静止系での平均の回転速度は0キロメートル毎秒に近く、平均の金属量は $[Fe/H] = -1.6$ と見積もられています*1。一方で外部ハローは星がほぼ球状に分布しており、平均的に円盤構造とは逆回転になっており、平均の金属量は $[Fe/H] = -2.2$ と内部ハローよりも低くなっています。これらの2成分は互いに大きく重なり合っていると考えられ、銀河系中心から20-30キロパーセクのところで内部ハロー優勢から外部ハロー優勢へと移行する傾向があることがわかっています。こうした観測結果から、恒星系ハローの形成には少なくとも2種類の物理過程が関与していることが示唆されています。

*1 $[A/B]$ は原子、A, Bの固数密度の比の対数を、太陽値を単位として表したもの。すなわち、 $[A/B] = \log(A/B) - \log(A/B)_\odot$ 。

1.3 恒星の化学組成と銀河系の化学進化

恒星系ハローの各成分はどのようなメカニズムで形成されたのか、それ以上の観測的な制限を得るうえで、恒星表面大気化学組成が注目されています。というのも、低質量星の表面大気化学組成は、その星が生まれた当時の値をほぼ保存していると考えられるためです。したがってその星の原料となった星間ガスが過去にどのような化学元素汚染の影響を受けたかを知る手がかりになります。化学元素の起源は主に重い星の重力崩壊型超新星 (II型超新星爆発)、連星系の最期 (Ia型超新星爆発) または進化の進んだ低・中質量星の質量放出などが挙げられます。それぞれの天体による化学元素汚染の頻度や核生成物の星間物質への混合度合いなどは、さまざまな星形成の環境によって異なる予想されます。

例えば星が活発に作られているような環境では、重い星が次々に生まれては死ぬため、II型超新星爆発によってマグネシウムやシリコンなど一般に α 元素と呼ばれる元素が多く生成されます。いっぽうで星がゆっくりと作られているような環境のもとでは、II型の寄与が少ない一方で、それより長いタイムスケールをもつIa型超新星爆発からの生成物 (鉄など) の寄与が相対的に高くなります。このような違いから、異なる星形成史をもつ環境のもとで生まれた星々は異なる化学元素組成比をもつと予想されます。

銀河系やその周辺の矮小銀河に属する一つひとつの恒星の化学元素組成は、8-10メートルクラスの望遠鏡に搭載された高分散分光器のおかげで盛んに行われるようになりました。なかでも銀河系形成に直結する問題として、銀河系恒星系ハローと、銀河系に付随する矮小銀河とのあいだで、化学組成が異なる傾向にあることが、多くの高分散分光観測に基づく化学組成解析で報告されました⁹⁾。具体的には銀河系の金属欠乏星 ($[\text{Fe}/\text{H}] < -1$) では、 α 元素と鉄の組成比 ($[\alpha/\text{Fe}]$) が0.3-0.4 dex程度と一般に太陽値より高いのに

対し、矮小銀河では金属量とともに減少する傾向があり、 $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -1$ では $[\alpha/\text{Fe}] \lesssim 0.0$ dex程度と低いことがはっきりしてきたのです。現在標準的な宇宙論の予測する銀河系形成理論によれば、銀河系のような大きい銀河は、矮小銀河のような小さい銀河の衝突・合体を通して形成されたとされています。もしそうだとすると、古い星の表面大気の組成は生まれたときから変わらないとすれば、単純に考えれば矮小銀河とそれらが合体した銀河系とでは化学組成が似通っていることが期待されます。しかし実際は、特に金属量 $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.5$ のあたりで、銀河系の星と矮小銀河の星とでは大きく異なる $[\alpha/\text{Fe}]$ をもつ傾向にありました。このことは、銀河系恒星系ハローの化学組成は、現存する矮小銀河の重ね合わせでは説明できないことを示しています。

2. すばる望遠鏡HDSによる太陽近傍金属欠乏星の化学組成探査

ここからは以上の背景を踏まえて私たちがすばる望遠鏡を用いて行った研究について紹介します¹⁰⁾⁻¹³⁾。銀河系恒星系ハローの形成過程に対してより強い制限をうることができるという期待のもと、私たちは恒星系ハローに所属する星々の化学組成に着目しました。太陽のごく近傍ではハロー星は円盤星に比べて極端に数が少なく、わずか1パーセント未満程度しかありません⁶⁾。しかしハロー星は、円盤の星よりも大きい固有運動を示し、その軌道は銀河中心から数十キロパーセクの距離にまで到達するものもあります。同様に主に金属欠乏星 ($[\text{Fe}/\text{H}] \sim -0.6$) からなる星種族として厚い円盤があり、所属する星々は平均的に薄い円盤より数十キロメートル毎秒ほど小さい速度で銀河系の周りを回転運動しています。こうした運動の特徴によって、金属欠乏星を厚い円盤星、内部ハロー星、外部ハロー星に分類し、分類したグループごとにどのような化学元素の特徴をもっているかを調べることで、その星が所属して

いる銀河系構成成分の起源について、何らかの手がかりが得られると考えました。

これまでの研究から、ハローや厚い円盤成分に所属する金属欠乏星は全体として $[\alpha/\text{Fe}]$ が高いことが知られています⁹⁾。しかしこれまでに述べたように、一概に金属欠乏星といっても、銀河系が複雑な過程を経て形成されたことを考えると、もともとは全く別々の場所で生まれた星々かもしれません。それらの星の化学元素パターンは、一つひとつの星の起源にさかのぼる重要な手がかりになります。

2.1 高分散分光と化学組成解析

観測はすばる望遠鏡に搭載された高分散分光器 (High Dispersion Spectrograph; 以後HDS) によって、2003年から2010年の間の数回にわたって行われました。その結果およそ100近くの星々について高分散分光データが得られました。取得したスペクトルの例を図1に示します。

スペクトルから恒星大気の化学組成を見積もるためには、恒星大気の温度、圧力構造のモデルや原子、分子の構造に関するさまざまなデータが必要になります。恒星大気では、含まれる原子、分子が星内部から放出される光のうち特定の波長を吸収し、スペクトルに吸収線を作るため、吸収線の強さを表す等価幅は恒星大気にどれだけの物質が含まれているかを知る目安となります。

観測される吸収線の等価幅と、恒星大気の温度、圧力構造のモデル、および輻射輸送の計算を組み合わせることによって計算される等価幅とを比較することによって、化学組成の見積もりを得ることができます。しかしその見積もりを得るには、通常は局所熱平衡という仮定を用いています。しかし実際の恒星大気がこの仮定から大きく外れている場合、得られる化学組成にも大きな誤差が生じてしまいます。ほかにも化学組成解析には原子の構造や遷移確率などの不定性が影響し、正確な値を得ることはたいへん難しいのが現状です。

しかし同じ解析手法ですべてのサンプル星を解

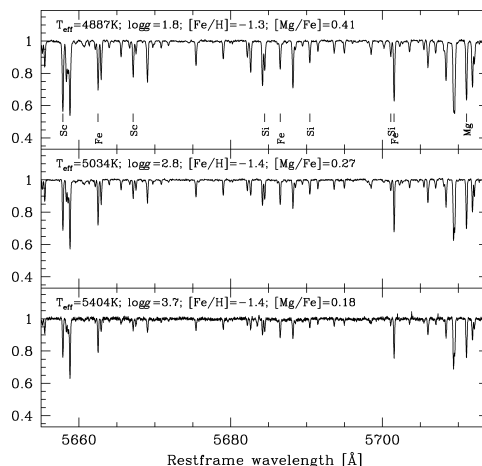


図1 すばる望遠鏡HDSで取得した金属欠乏星のスペクトルの例。

析することで、系統誤差を減らし、サンプル星の間での相対的な組成比を精度よく知ることができます。われわれの研究のように、厚い円盤、内部ハロー、外部ハローに属する星々を一般的なやり方で解析したことは、各サンプルの間での化学組成の違いや類似点を評価するうえでたいへん有意義です。

すべてのサンプル星はその視線速度と固有運動、距離が見積もられており、それらの銀河系内での軌道運動をおおよそ知ることができます。その軌道運動から、サンプル星が厚い円盤、内部ハロー、外部ハローの各成分に所属している確率を求め、その確率によってサンプル星を分類すると、図2のようになります。厚い円盤に分類されたサンプル星 (×) は太陽近傍で薄い円盤より数十キロメートル毎秒ほど遅い速度で回転しており、その軌道は銀河円盤から1-2キロパーセクの範囲内におおよそ収まります。内部ハロー星 (●) は厚い円盤よりも速度分散が大きく、平均的回転速度は0キロメートル毎秒付近になっています。一方で外部ハロー星 (▲) はより速度分散が大きく、大きく逆回転している星もあります。またその軌道は銀河中心から数十キロパーセクにまで到達するものもあります。それぞれのグループで、化学元素組成に系統的な違いが見られるか

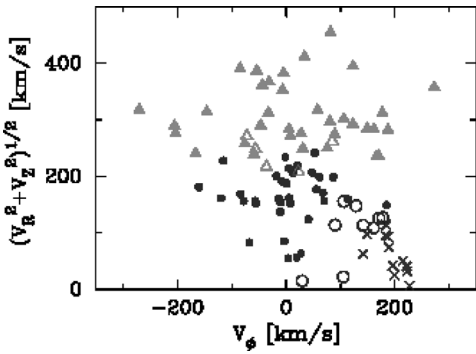


図2 サンプル星の3次元速度成分 (V_R , V_ϕ , V_z) を横軸 V_ϕ 、縦軸 $\sqrt{V_R^2 + V_z^2}$ で表した図。厚い円盤星 (×), 内部ハロー星 (●), 外部ハロー星 (▲), およびそれらの中間的な運動をもつもの (○: 厚い円盤・内部ハロー, △: 内部・外部ハロー) をプロットしている。

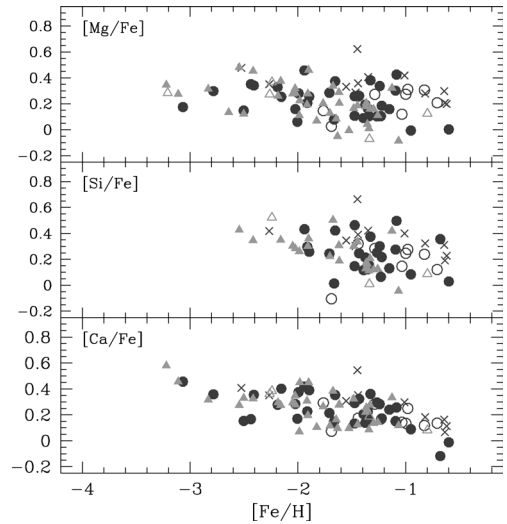


図3 マグネシウム (Mg), シリコン (Si), カルシウム (Ca), と鉄との組成比を $[\text{Fe}/\text{H}]$ に対してプロットしたもの。記号の意味は図2と同じ。

どうか本研究の重要なテーマです。

2.2 銀河系ハローの化学組成

組成解析の結果得られた元素組成比 ($[\text{X}/\text{Fe}]$) を $[\text{Fe}/\text{H}]$ に対してプロットしたものを図3-5に示します。組成解析の結果、異なる運動の特徴をもつ厚い円盤、内部ハロー、外部ハローのサンプルの間で、いくつかの元素で化学組成比の違いが認められました^{12), 13)}。違いが比較的顕著なのは、マグネシウム (Mg), シリコン (Si) などの α 元素です。厚い円盤に所属する星々は幅広い $[\text{Fe}/\text{H}]$ にわたって高い $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ および $[\text{Si}/\text{Fe}]$ を保っているのに対し、内部ハロー・外部ハロー星は $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.5$ で厚い円盤よりも平均的に低い値を取り、 $[\text{Fe}/\text{H}]$ の増加とともに緩やかに低くなる傾向が見て取れます。

似たような組成の違いがナトリウム (Na), 亜鉛 (Zn) にも見られます (図4)。さらにナトリウムと亜鉛では、組成比の平均値を内部ハローと外部ハローとで比較すると $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.5$ で外部ハローのほうがこれらの元素組成比がわずかに低くなっています。

一方、ユーロピウムの組成比 ($[\text{Eu}/\text{Fe}]$: 図5) に注目すると、厚い円盤と内部・外部ハローとの

間で組成の違いが見られますが、 $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ などで見られた傾向とは逆の関係になっています。つまり $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.5$ で、厚い円盤に比べて内部・外部ハローのほうが高い組成比を示しています。ユーロピウムなどの鉄より重い元素の一部は、鉄など種となる原子核が急速に中性子を捕獲する反応である r プロセス (r-process) でその多くが合成されると考えられています。この r プロセスがどのような天体で起こっているかはまだよくわかっていません。一説にはマグネシウムなどと同様、重い星の超新星爆発の際に起こるとされています¹⁴⁾。単純に考えれば、ユーロピウムとマグネシウムが同じような天体で合成されるとすれば、 $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ と $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ とでは $[\text{Fe}/\text{H}]$ に対して似たような傾向を示し、 $[\text{Eu}/\text{Mg}]$ (図5の下段) はほぼ一定になると予想されます。しかし図5からは、組成比はこの予想と反する結果が見て取れます。

ではこれらの化学元素パターンをすべて説明するには、恒星系ハローの形成過程としてどのようなシナリオが考えられるのでしょうか。まず注目したいのは、 $[\text{Fe}/\text{H}] > -1.5$ において、ハロー星では化学組成比 ($[\text{X}/\text{Fe}]$) の分散が厚い円盤星より

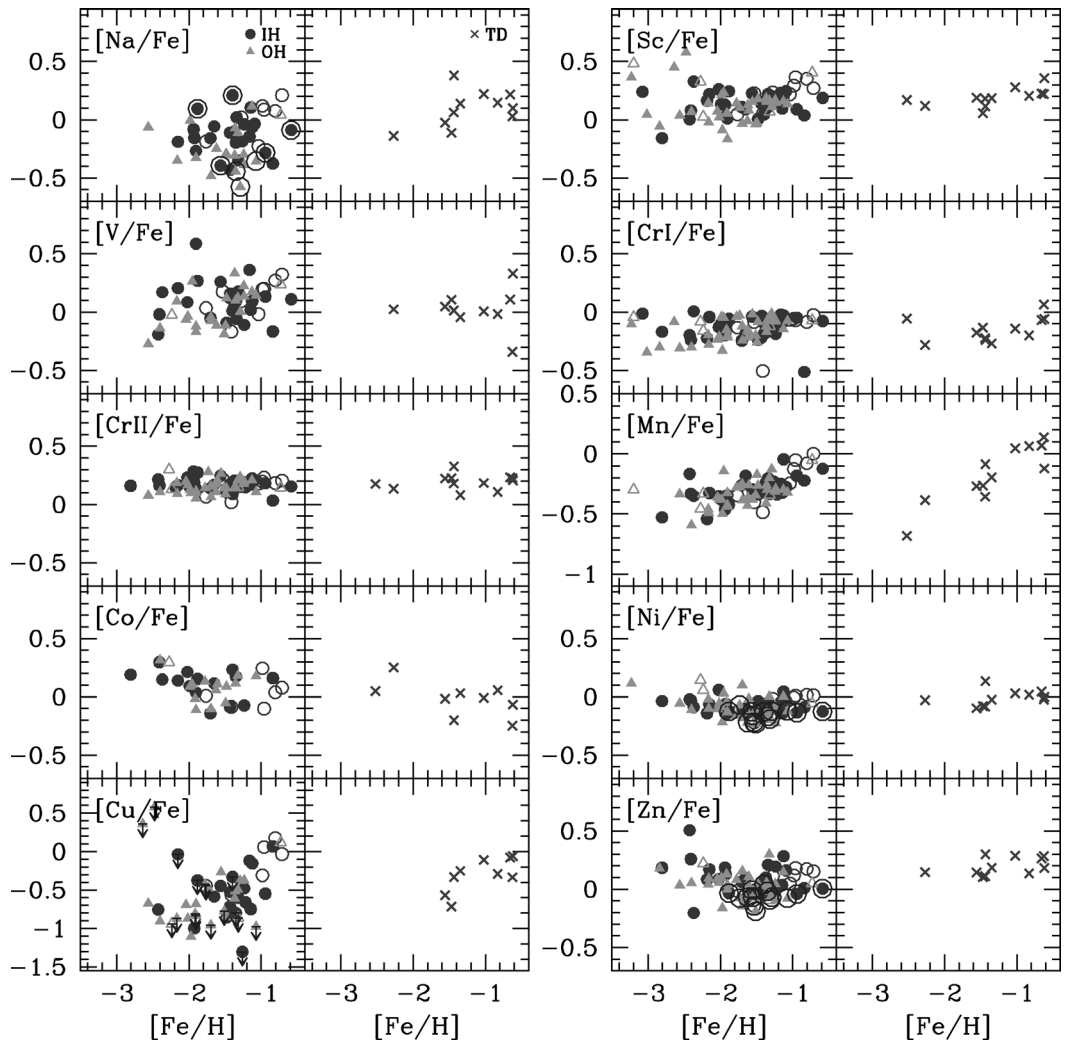


図4 ナトリウム (Na) から亜鉛 (Zn) までの元素と鉄との組成比を $[Fe/H]$ に対してプロットしたもの。見やすくするため、内部・外部ハロー (各列左側) と厚い円盤 (各列右側) を別々にプロットしてある。記号の意味は図2と同じ。

も大きい点です。前述したように、本研究の一番の特色として、厚い円盤、内部ハロー、外部ハローに所属している星々の化学組成比を一つの方法で導出しているの、化学組成比やそのばらつき具合の違いを評価するのにたいへん適しています。図3-5で、金属量 $[Fe/H] > -1.5$ に着目すると、厚い円盤ではほとんどが組成比のばらつきが観測の誤差程度におさまっていますが、内部ハロー、外部ハローではそれよりも大きくばらつ

ています。もし内部・外部ハローを含めたすべての金属欠乏星が、もともと銀河系のなかで生まれた星々だったとすると、金属量が高くなっていくにつれて、過去にたくさんの超新星爆発やAGB星で放出された元素の組成が平均化され、 $[Fe/H] > -1.5$ ではそのばらつきがだいぶ小さくなっていることが、単純な化学進化モデルからは予想されています。しかし実際はそうはなっておらず、厚い円盤星にくらべて内部・外部ハローでばらつ

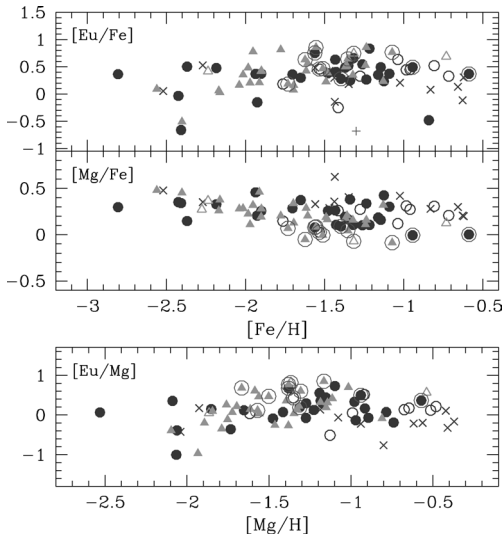


図5 図3と同様でユーロピウムの組成比 ([Eu/Fe]) を [Fe/H] に対してプロットしたものの (上段). 比較のために中段には [Mg/Fe], 下段には [Eu/Mg] の組成比を示す.

きが大きいということは、内部・外部ハロー星はもともと別々の領域、あるいは別々の銀河のなかで生まれたことを示唆しています。それぞれの領域（銀河）は、銀河系に降着する前までは、星の原料となるガスの流出入や、星形成の効率の違いなどを反映した別々の化学進化をたどるものと予想されます。これらがのちに銀河系に降着し、潮汐破壊でばらばらになることによって恒星系ハローができてきたとすれば、観測で見られたばらつきを説明することができます。

次に、 α 元素、ナトリウム、亜鉛の組成比が内部・外部ハロー星では厚い円盤よりも低くなっている原因を考えます。シンプルな化学進化モデルによれば、内部・外部ハロー星が作られた環境では、星形成率が低く、より長いタイムスケールで Ia 型超新星爆発による Fe の寄与が卓越してきたためと解釈されます。前述のように、 α 元素やナトリウム、亜鉛といった元素は、大部分が質量の大きい星で合成されると考えられています。星形成率が低いということは、大質量星によるこれらの元素合成も比較的強く抑えられ、金属汚染があ

まり進んでいない段階で Ia 型からの鉄の寄与が始まることが予想されます。一方でこのモデルで、もしユーロピウムがマグネシウムと同じように重い星の II 型超新星爆発で合成されるとすれば、[Eu/Fe] は [Mg/Fe] と似たような振る舞いをすると思われますが、前述のようにこれらの組成比は [Fe/H] に対しての振る舞いが全く異なっていました。これはユーロピウムはマグネシウムとは別の天体で主に合成されている可能性を示唆しています。例えば理論的には比較的低質量 (8–10 M_{\odot}) の星による II 型超新星爆発や合体する中性子星などの天体でユーロピウムが合成される可能性も指摘されています^{15), 16)}。しかしはっきりした結論を出すには、より多くのサンプルを使って今回の観測結果を検証する必要があります。

最後に観測された組成比を銀河系に付随する矮小銀河と比較します。金属量が低い範囲 ([Fe/H] < -2) では、いくつかの例外を除けば矮小銀河では高い [α /Fe] 値を示すものが多く、内部・外部ハローの組成比と似たような範囲の値を取っています。これは内部・外部ハローのうち金属量の低い星々は、現存する矮小銀河と似たような化学進化をたどった系が起源だったことを支持します。一方で金属量が高い範囲 ([Fe/H] > -2) では、矮小銀河との組成比の違いが顕著になっています。このことは、これらの内部・外部ハロー星 ([Fe/H] > -2) の起源は、現存する矮小銀河とは異なる性質をもっていたと推測されます。例えば現存する矮小銀河よりも大きく、星形成の原料となるガスが豊富な銀河が過去に降着してきて、恒星系ハローの少なくとも一部が形成されたというシナリオが提案されています。われわれの観測でも、特に内部ハローの星で、このようなシナリオを支持する結果になっています。しかし前述したように、化学組成比の分散が大きいことや、外部ハローの星の一部は内部ハローよりも低い [Mg/Fe], [Na/Fe] を示すことは、特に外部ハローの星は、大部分の内部ハロー星とは異なる星形成史をもつような

銀河が起源であったことを示唆しています。

2.3 まとめと今後の展望

前節までで紹介した化学組成解析の結果を一言でまとめると、太陽近傍の星々は、同じ金属量でも、その軌道運動またはその星が所属する構造成分によって化学組成比が異なるということです。これまでは、 $[Fe/H] = -1.0$ 以下の銀河系の金属欠乏星のほとんどが似たような化学組成で特徴づけられ、その大部分は化学元素が均一に混ざったガスから誕生したように考えられていました。しかしその軌道運動によってそれらの星を分類してみると、異なる運動の特徴をもつ星々の間で化学組成比の系統的な違いが見られたのです。化学組成の違いは、厚い円盤、内部ハロー、外部ハローが均一なガスから一気に誕生したのではなく、矮小銀河の降着を含む複数のメカニズムが寄与してきたことを裏づけるものです。銀河系の形成史についてここからより踏み込んだ制限を得るには、元素合成の理論計算や化学進化モデルの助けをかりなければなりません。観測的には近い将来、大望遠鏡に取り付けられる多天体分光器によって、より均一でハローの広範囲を網羅した恒星の位置、運動、化学組成データの取得が可能になります。また30メートルクラスの巨大望遠鏡では、矮小銀河などより遠くにある星の化学組成をこれまでより格段に効率よく調べることができるようになります。本稿で紹介したような金属欠乏星の化学組成をもとにした銀河系ハロー形成の研究はまだスタート地点に立った段階です。しばしば銀河形成の「実験室」にたとえられる銀河系ハローは、こうした理論・観測研究の進歩によってますますその威力を発揮することが期待されています。

謝辞

本稿は筆者の博士論文および筆者らの投稿論文¹⁰⁾⁻¹³⁾の研究成果に基づくものです。研究をまとめるにあたり、博士課程で指導教官だった千葉 柗司氏、HDSによる観測と化学組成解析を一か

らご指導いただいた青木和光氏に感謝いたします。本研究はすばる望遠鏡のHDSによる観測成果に基づいています。観測に当たってはサポートアストロノマーの田実 晃氏、Tae-Soo Pyo氏、すばる望遠鏡のスタッフの方々、すばる室の方々にたいへんご協力をいただきました。

参考文献

- 1) Hoskin M., 2012, *The Construction of the Heavens* (Cambridge University Press)
- 2) Eggen O. J., Lynden-Bell D., Sandage A. R., 1962, *ApJ* 136, 748
- 3) Searle L., Zinn R., 1978, *ApJ* 225, 357
- 4) York D. G., et al., 2000, *AJ* 120, 1579
- 5) Belokurov V., et al., 2006, *ApJ* 642, 137
- 6) Jurić M., et al., 2008, *ApJ* 673, 864
- 7) Carollo D., et al., *Nature* 450, 1020
- 8) Carollo D., et al., *ApJ* 712, 692
- 9) Venn K. A., et al., *AJ* 128, 1177
- 10) Zhang L., et al., 2009, *ApJ* 706, 1095
- 11) Ishigaki M., Chiba M., Aoki W., 2010, *PASJ* 62, 143
- 12) Ishigaki M. N., Chiba M., Aoki W., 2012, *ApJ* 753, 64
- 13) Ishigaki M. N., Aoki W., Chiba M., 2013, *ApJ* in press
- 14) Wanajo S., Ishimaru Y., 2006, *NuPhA* 777, 676
- 15) Tsujimoto T., Shigeyama T., 1998, *ApJ* 508, 151
- 16) Freiburghaus C., Rosswog S., Thielemann F. K., *ApJ* 525, 121

Formation of the Milky Way Stellar Halo Probed by Chemical Abundances of Metal-Poor Stars

Miho N. ISHIGAKI

Kavli IPMU (WPI), The University of Tokyo, 5-1-5 Kashiwanoha, Kashiwa, Chiba 277-8583, Japan

Abstract: The stellar halo(s) in our Milky Way mainly consist of metal-poor stars and thus contain fossil records of early formation and evolution of the Galaxy. We studied chemical abundances of metal-poor stars belonging to the thick disk, inner and outer stellar halos based on the high-resolution spectra obtained with High Dispersion Spectrograph mounted on the Subaru Telescope. We show that the kinematically selected thick disk, inner and outer halo stars in our sample show differences in some of the elemental abundances in the metallicity range of $[Fe/H] > -1.5$. The implication of our abundance results on the formation mechanisms of the stellar halo is discussed.