

球状星団と矮小銀河のrプロセス元素

本田 敏 志

〈兵庫県立大学 自然・環境科学研究所 天文科学センター 西はりま天文台

〒679-5313 兵庫県佐用郡佐用町西河内407-2〉

e-mail: honda@nhao.jp



rプロセス元素の組成の測定は主に銀河系ハローに存在する古い金属欠乏星に対して行われている。これらの星は、銀河系の化学進化のごく初期の状態を保持しており、単一のrプロセス元素合成の結果をそのまま星の大気に保持していると考えられるからである。その意味では、球状星団の星や矮小銀河の金属欠乏星も同様に誕生時の組成をよく保持していると考えられる。球状星団や矮小銀河の形成にはいまだに不明なことが多いが、銀河系最古の天体の一つとして年齢も得られているものもあり、銀河系そのものの形成とも密接に関係しているはずである。これらの星でrプロセス元素を調べれば、星が誕生した環境の違いとrプロセスの関係を明らかにできるとともに、銀河系形成についての手掛かりを得ることもできる。本稿では主に近年の大型望遠鏡による球状星団や矮小銀河でのrプロセス元素の観測について紹介する。

1. 銀河系ハローの種族II天体

本特集記事で青木氏によって詳しく述べられてきたように、rプロセス元素の観測は主に銀河系ハローの種族II天体である金属欠乏星を対象として行われてきている。これは、銀河の化学進化を考えると、金属量の少ない星は、太陽など種族Iの星と比べさまざまな金属汚染の影響を受けておらず、単一の元素合成過程の結果をそのまま保持している天体と考えられるからである。これまでの観測によって、金属欠乏星のrプロセス元素組成には大きなばらつきが見られ、それは誕生した環境のガス成分の違いによると考えられている。時間とともに銀河系規模で星間ガスが混ざると、これが均一になっていく。星間ガスが十分混ざっていない段階で誕生した金属欠乏星は、1回のrプロセス元素合成そのものの結果を保持していると考えられるのである。

一方、銀河系ハローに存在する種族IIの天体の

代表的なものといえば、球状星団がよく知られている。球状星団は10万から100万個程度の星がその名のとおりに球状に集まっている星団で、銀河系にはおよそ150個発見されている。これらはおおむね銀河系中心を中心としてハロー全体に星団そのものも球状に分布している。星団内の星はどれも高い年齢を示し、その金属量は全般に低く、 ω Cenなど一部の例外を除いて、星団ごとにほぼ均一な値を示す。このことからそれぞれの球状星団の星は銀河系形成初期のほぼ同時期に、均一の組成をもつガスから誕生した単一の種族であり、その後星団内で新たな星形成は起こらなかったと考えられてきた。そのため、銀河系形成初期の様子を探る目的や低質量星進化モデルの検証、あるいは宇宙年齢決定のために多くの観測が行われてきている。しかしながら、球状星団には元素組成異常などいまだに解決していない問題も以前から知られており、最近さらにクローズアップされている。

2. 球状星団のrプロセス元素

2.1 球状星団の元素組成異常

均一な組成のガスから誕生したと考えられていた球状星団だが、同じ星団内の星でもCN分子の吸収バンドの強度に違いが見られることが報告されていた¹⁾。その後の高分散分光観測により、特に明るい赤色巨星については化学組成も詳しく調べられ、鉄族元素やカルシウム、チタンなどが一定の値を示すのに対して、炭素や酸素、ナトリウムなど軽い元素にフィールドの星（つまり星団に属さない星）では見られないような組成のばらつきが見られることがわかってきた。例えばフィールドの星では、酸素やナトリウムなどの組成（鉄に対する組成比）の値はせいぜい0.5 dexの範囲に収まっているが、球状星団では1桁以上のばらつきが見られるのである²⁾。

これらの組成について元素同士の相関を調べると、ナトリウムと酸素の組成に逆相関が見られ、炭素、窒素の値は星の光度と相関が見られるが、炭素、酸素、窒素の値を合わせると一定になる。これらの事実から、組成異常は星の進化によるものと考えられた。すなわち、赤色巨星は、誕生したときの組成をそのまま保持しているのではなく、星の進化によって発達した対流層によって星の内部で合成された元素が、星の表面までくみ上げられたものが見えていると考えられるのである。

しかし、その後の観測の進展によって、この組成異常は進化の進んでいない、主系列ターンオフ（転回点）星でも見られることが明らかとなった³⁾。このことは、現在観測している星の内部での物質混合だけでは組成異常を説明することができないことを意味している。球状星団が形成された初期のころの組成がそもそも均一でなかったか、あるいは一部の星は何らかの物質の降着により組成が変化したと考えられるのだ。さまざまなシナリオが考えられているが⁴⁾、いまだに決定的なものはない。

2.2 重元素にも見られる組成のばらつき

炭素や酸素、ナトリウムなどの軽い元素の組成異常に加え、鉄より重い元素についても球状星団では興味深い問題がある。Snedenらは金属量が低い球状星団M15 ($[Fe/H] = -2.3$)で重元素（ここでは主に中性子捕獲などによってつくられる鉄より重い元素）のバリウム (Ba)、ユーロピウム (Eu) 組成にもばらつきがあることを発見した⁵⁾。これらの重元素は後述するようにrプロセス起源であるため、このばらつきは球状星団形成時の初期組成によるものだと考えられる。先に述べたように、フィールドの金属欠乏星で見られる組成のばらつきは、銀河系形成初期のガス組成の不均一性によると考えて構わないが（石丸氏、青木氏の記事参照）、組成が均一なガスからすべての星が誕生したとする従来の球状星団の形成シナリオではこのばらつきを説明できない。

その後SnedenらはM15の中から、特に重元素の多い三つの星を選び、Keck望遠鏡での追観測でランタン (La) やサマリウム (Sm)、ネオジウム (Nd) などさらに多数の重元素を検出し、その組成パターンが太陽系のrプロセスパターンに一致することを示した⁶⁾。これはフィールドの金属欠乏星でrプロセスが支配的であることと同じ傾向である。

ただし、これらの観測は赤色巨星を対象としているため、主に星の放射が強い赤い波長域 ($>5,000 \text{ \AA}$) で行われていることが多い。重元素のラインは青い波長域に多いことから、rプロセス元素組成についての観測データの質や量は十分とは言えないものであった。また、Baより軽い重元素（ストロンチウム (Sr) など）についてはほとんど観測されていない。

このような研究を受けてわれわれは、すばる高分散分光器 (HDS) を用いてM15の赤色巨星について青い波長域 ($3,550\text{--}5,250 \text{ \AA}$) での高分散分光観測を行った⁷⁾。この波長域にはBa, Euに加えてSrやLa, トリウム (Th) など多数の重元素のライン

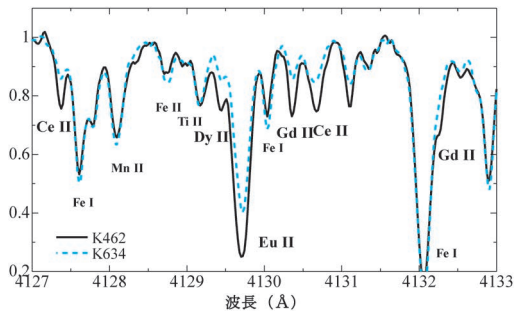


図1 すばる望遠鏡によって観測されたM15の星のスペクトルを比べたもの。Feなどに比べてEuやCeなど重元素の吸収線強度に違いが見られる。

が含まれている(図1)。球状星団の場合、地上観測ではシーイングがよくても星が込み合った中心部分まで完全に個々の星に分離してスペクトルを得ることは困難なため、やや周辺に存在する明るい星がターゲットとなる。また、手前にあるフィールドの星と球状星団に属する星とは、視線速度を調べることで見分けることができる。

すばるHDSの観測では、Eu組成に0.5 dex以上の大きなばらつきが確認され、さらにEuの高いグループと低いグループに分かれることが示された(図2)。

HDSの観測では重元素検出のため、あえてそれらの組成の高いものも選んでいるのでバイアスがかかっているとも考えられるが、Eu組成に2峰性分布が存在する可能性もある。M15の星のEu組成にばらつきが見られることは、Snedenらの赤色巨星のデータに赤色水平分枝星のデータも加えたものでも確認されており⁸⁾、近年VLT望遠鏡で行われたM15の観測では、重元素は2峰性分布を示すとの報告もある⁹⁾。

また、La組成とEu組成の比は一定であり、Baより重い元素の組成パターンは太陽系rプロセスパターンとよく一致することから、これらの星でsプロセスの影響はほぼ見られず、rプロセスが支配的であると言える(図3)。M15のこれらの星ではフィールドのrプロセス元素過剰な金属欠乏星と同じ傾向が見られたのである。

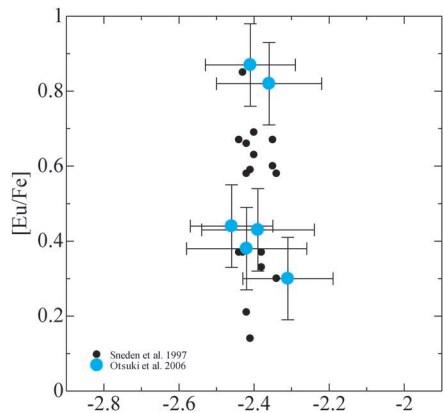


図2 球状星団M15のEu組成と金属量を比べた図^{5),7)}。[Fe/H]のばらつきは測定誤差に収まるのに対し[Eu/Fe]に大きなばらつきが見られる。すばるHDSの観測では2峰性分布が見られた。

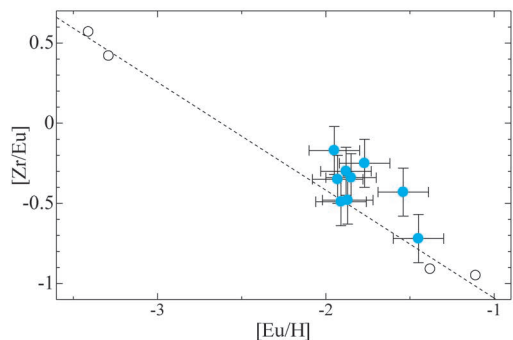
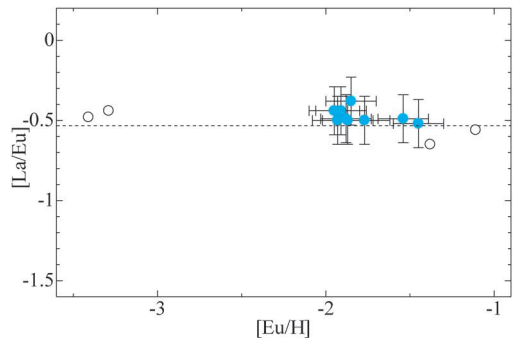


図3 球状星団M15のZr, LaとEu組成の比を比べた図。白抜き丸はフィールドのrプロセス過剰な金属欠乏星([Eu/H] > -1.5)と弱rプロセスを反映していると思われる金属欠乏星([Eu/H] < -3)。La/Euが一定なのに対してZr/EuにはEuとの逆相関が見られる。

2.3 球状星団に見られる弱rプロセス

それでは、Srなど重元素のなかでは比較的軽い元素はどうだろうか。フィールドの金属欠乏星では、中性子捕獲で作られる組成の第1のピーク（Srなど）と第2のピーク（Baなど）の組成比が星によって大きく違うことが明らかとなっており、Srなど軽い重元素を多く作るもう一つのrプロセス（弱rプロセス）の存在が示唆されている（青木氏の記事参照）。

すばるHDSによる観測ではSr、イットリウム（Y）、ジルコニウム（Zr）など弱rプロセスで作られるとされる元素の吸収線も多数検出しており、これらの組成について第2ピーク以降の元素との相関が調べられた。SrやBaは吸収線が強すぎるため、解析における不定性が大きくなることから第1ピーク元素の代表としてY、Zr、第2ピーク以降の元素の代表をEu、Laとして相関を調べた。その結果、LaとEuの比（ $[La/Eu]$ ）は一定の値を示すのに対して、Y、ZrとEu、Laの比（ $[Zr/Eu]$ など）にはばらつきが見られた。そして、Zr/Eu比にはEuやLaの量と逆相関が見られたのである（図3）。

星ごとの組成のばらつきは、EuやLaと比べてYやZrでは小さいということになる。このことから、球状星団でも弱rプロセスが働き、それが球状星団全体に普遍的に影響したと考えられる。第2ピーク以降の元素を作るような、以前から知られている（主）rプロセスより前に起こったと考えるのが自然な解釈である。すなわち、原始球状星団では超新星などによる鉄とともに、軽い重元素も早い段階で合成され、その後十分にそのガスが混合されてから、主rプロセスによる重い重元素の合成が部分的に加わったと考えられるとこれを説明できる。このように考えると、弱rプロセス元素を合成する天体はより質量の大きな星と考えられるが、この場合、星の進化とガスが十分に混合される時間、球状星団形成の時間スケールを考慮しなければならない。

M15で見られる重元素のばらつきや弱rプロセスの影響は、果たしてどの球状星団でも見られるのだろうか？ M15と同様に比較的金属量が少なく、質量の大きなグループとされるM22では、rプロセスの影響を受けた星とsプロセスの影響を受けた星に分かれることが報告されている¹⁰⁾。同じく金属量の少ないM92でもM15と同様に重元素の組成のばらつきが見られるとの報告もある¹¹⁾。しかし一方で、M92では組成は均一との報告もあり¹²⁾ まだ決着はついていない。

近年、ヘリウムやカルシウムの吸収線に対応する狭帯域フィルターを使った観測によって、球状星団の星が複数の種族に分かれるものが続々と見つかってきており^{13),14)}、球状星団の形成の研究は大きな注目を集めている。どうやらすべての球状星団は、昔から考えられていたように単一の種族から構成されているのではなく、複雑な系であるものが多いようである。重元素の組成も球状星団形成の理解に一役買うことになりそうである。

2.4 アクチノイド、トリウムの組成

球状星団においても、弱rプロセスの影響が見られるなど、銀河系ハローの金属欠乏星と同じ傾向が明らかとなったが、第3ピーク以降のアクチノイドについてはどうだろうか。

SnedenらはM15の三つの星でThの検出にも成功し、Euとの比を使った年代学によって、140億年（誤差30億年）と年齢を見積もった（青木氏の記事参照）。しかしながら、ThとEuを使った年代学では、Thの合成量がrプロセスの環境に大きく依存する可能性があるため不定性が大きく、信頼性の高い年齢を得ることは困難である¹⁵⁾。現在、Snedenらの観測以外に金属量の少ない球状星団でのThの観測はほとんどないが、すばるHDSによるM15の観測は、Th/Euにばらつきがほとんど見られず、低い値で一致することを示している。また、比較的金属量の多い球状星団であるが、M4やM5でもThが検出されており、やはりTh/Eu比のばらつきは小さい^{16),17)}。すなわち、

銀河系の一部の金属欠乏星で見られるアクチノイドの過剰が、球状星団では見られないのである。このことは、球状星団内のrプロセス元素は極めてよく似た環境で合成されたものであり、第2ピークから第3ピーク以降のアクチノイドまで、rプロセスの普遍性が成立していることを示す。

今後の詳細な解析と多数の球状星団の観測によって星団内部での元素合成や星団による違いなどが明らかになると期待されるが、このような観測には複数の天体について同時にスペクトルが得られるマルチスリットの多天体分光器が役立つであろう。

3. 矮小銀河のrプロセス

3.1 矮小銀河と銀河系

われわれの銀河系ハローには球状星団が分布しているが、さらに視野を広げると、銀河系周辺には小さくて暗い矮小銀河が多数分布していることが知られている。銀河系形成については、ダークマターの階層的な合体モデル(Λ -CDM)が主流であるが、このモデルからは、矮小銀河のような天体が銀河系ハローの構成要素となったと考えられ、矮小銀河に属する金属欠乏星の組成は、銀河系ハローの金属欠乏星と同じ振る舞いを見せると期待される。

矮小銀河の星は球状星団よりさらに遠方にあるため、見かけ上非常に暗く、銀河を構成する星一つ一つについて高分散分光観測を行い、組成を得るためには、8-10 m級の大口径望遠鏡をもってしても相当な観測時間が必要である。近年、VLT望遠鏡やKeck望遠鏡、すばる望遠鏡などによって矮小銀河の比較的明るい赤色巨星について、化学組成が調べられるようになってきた。現在観測されている矮小銀河が、銀河系の構成要素の生き残りであれば、その中に属する星の化学組成などは銀河系のもものと一致するものと期待されるが、矮小銀河の星ではマグネシウム(Mg)など α 元素が銀河系の星と比べて低い値を示し、金属量も狭

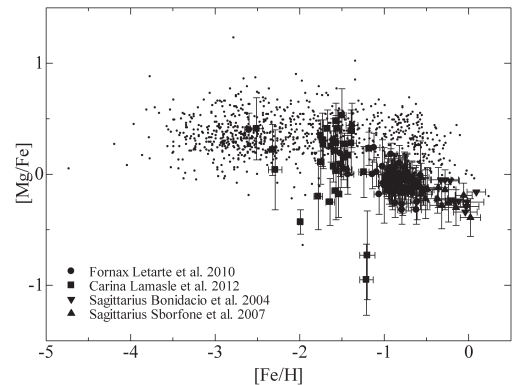


図4 矮小銀河の星のMg組成を銀河系のもの(点)と比べたもの。全体的に矮小銀河の星は銀河系のものに比べて低い値を示し、特に $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$ で $[\text{Mg}/\text{Fe}]$ の低い星が多数みられる。

い範囲にあるなど一致しない傾向が見いだされている。

例えば、MgとFeの比($[\text{Mg}/\text{Fe}]$)を見ると、銀河系では $[\text{Fe}/\text{H}] = -1$ より低い金属量では高い値($[\text{Mg}/\text{Fe}] \sim +0.3$)を示すのに対して、矮小銀河では $[\text{Fe}/\text{H}] < -1$ でも値の低い星が多い(図4)。また、このような銀河系の星と違う振る舞いは重元素でも見られる。一部の明るい矮小銀河(Fornaxなど)では、Baなどが測定されているが、銀河系の同じ金属量の星と比べて、Fornaxの星はBaの過剰な値を示し、sプロセスの影響を受けていることがわかっている¹⁸⁾。

このように、現在生き残っている矮小銀河の星の化学組成は、銀河系ハローの星と傾向が異なるのである。このことは、矮小銀河はすでに独自の進化を遂げており、銀河系の構成要素の生き残りとは言えない可能性を示唆する。ただし、数年前までは主に金属量の高い矮小銀河の星について観測がされており、金属量の少ない星での観測は極めて少なかったことに留意する必要がある。

3.2 超金属欠乏星の化学組成

もう一つ大きな問題として、銀河系の周りでは矮小銀河の数そのものが、モデルから予想されるよりかなり少ないという事実が知られている¹⁹⁾。

これについては、近年、SDSS（スローン デジタル スカイ サーベイ）によってこれまで発見されなかったような非常に暗い矮小銀河（Ultra-Faint dSph）が多数発見され、問題は部分的には解決されつつある。しかも暗い銀河（含まれる星が少ない銀河）には金属量の非常に低い星が含まれることも明らかとなり²⁰⁾、矮小銀河に超金属欠乏星（ $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ ）が見つからないという問題も解決されつつある。

矮小銀河の星の金属量分布については、ヨーロッパを中心としたVLT望遠鏡のチームは比較的暗い矮小銀河の星を大量に分光観測し、近赤外のCaIIラインからその金属量を見積もっていた²¹⁾。その結果、当初は、やはり $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ の星は発見されなかったのだが、その後金属量見積りの方のキャリブレーションを見直したところ、 $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ の星の存在が確認された²²⁾。

金属量を見積もるための研究などにおいては、超金属欠乏星の候補天体の高分散分光観測と詳細な組成解析が必要とされ、すばるHDSによって行われた研究も大いに貢献している^{23),24)}。この観測は非常に暗い星（V~17）を対象とするため、非常によい観測条件と長時間の露出が必要となるが、延べ3年にわたる観測でろくぶんぎ座矮小銀河（Sextans）やこぐま座矮小銀河（UMi）などで多数の $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ の星について組成が得られた。

これにより、星の金属量分布については矮小銀河と銀河系ハローで大きな違いは見られなくなってきた。しかし興味深いことに、Mgなどの α 元素は $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ でもやはり低い値を示す星が存在し、銀河系ハローとは違う傾向が見えてきた。これは鉄を多く放出するIa型超新星がかなり早い段階から起こっていたか、Mgを多く放出する大質量星からの影響が少なかった可能性を示している。

3.3 矮小銀河の超金属欠乏星ではrプロセス元素が欠乏か？

一方、矮小銀河の金属欠乏星においても、重元素としてBaが検出され、その値はおおむね低い値を示すことが明らかになった（図5）。その後行われたFrebelらのKeck望遠鏡を使ったおおぐま座矮小銀河II（UMaII）や、かみのけ座矮小銀河（Com Ber）といった暗い矮小銀河の観測でも、Baなど重元素についてはすべて低い値をもつことが示され²⁵⁾、銀河系ハローと違う傾向が見いだされつつある（図5）。

金属量の低い矮小銀河の星（ $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ ）の中では、SextansのS 15-19が例外的に $[\text{Ba}/\text{Fe}] = +0.5$ という重元素の高い組成を示している²⁴⁾。もしこのBaがrプロセスによって合成されたものであれば、 $[\text{Eu}/\text{Fe}] > +1$ となることが予想され、矮小銀河でもrプロセス過剰星が存在することになり、銀河系ハローの星の組成分布との違いはなくなる。そこでわれわれはこの星を詳しく調べてみることにした。

このような非常に金属量が低い矮小銀河の星でEuなどの吸収線を検出するためには、8-10 m級の望遠鏡でも、膨大な観測時間が必要となる。Baの過剰を示すS 15-19に対するすばるHDSを

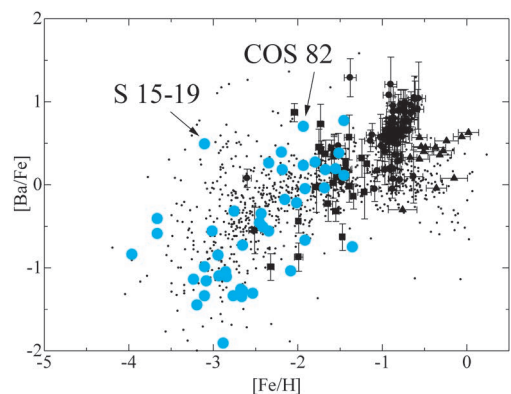


図5 図4の縦軸を $[\text{Ba}/\text{Fe}]$ でプロットしたものに矮小銀河の星のBa組成(青)を書き加えたもの。矮小銀河の超金属欠乏星でBa過剰な星はほとんどない。

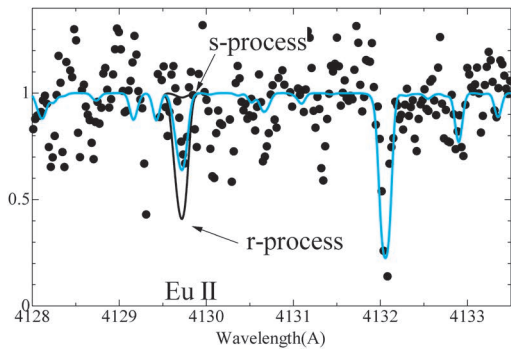


図6 Sextans S 15-19のスペクトル(黒丸). 実線(黒)はこの星のEuがrプロセスのみで作られた場合とsプロセスのみで作られた場合に期待される合成スペクトル. 青の線はEu組成の上限に対応するスペクトル.

用いた青い波長域での追観測では、一晩かけてようやく強いSrのラインが検出できるなど有用なデータが取得され、いくつかの重要な情報が得られている。この星の金属量はやはり $[\text{Fe}/\text{H}] < -3$ であり、 $[\text{Ba}/\text{Fe}] = +0.4$ であることが確認された。

しかし、Euのラインは検出することができず(図6)、 $[\text{Eu}/\text{Fe}] < +0.8$ の上限値のみが得られた²⁶⁾。このことは、この星のBaの多くはrプロセスによって合成されたのではなくsプロセスによって合成されたことを意味する。また、強いCH分子の吸収バンドから、この星が炭素過剰星であること、Srの値が非常に低いこと、視線速度の変化が見られたことなどから、この星はCEMP-sと呼ばれる連星系に属する天体で、高いBaの値はかつて主星だったAGB星から放出された元素が星の表面に降着したためと考えられている²⁷⁾。

結局、矮小銀河の超金属欠乏星 ($[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$) ではrプロセス元素過剰な星が見られない。銀河系では約5%の超金属欠乏星がrプロセス元素過剰な星 ($[\text{Eu}/\text{Fe}] > +1$) とされているが²⁸⁾、いまだに矮小銀河ではこういう星が見つかっておらず²⁵⁾など、この点では銀河系での振る舞いと大きく異なるということになる。

3.4 矮小銀河のrプロセス過剰天体

さて、もう少し金属量の高い星を見ていくと、明らかに銀河系とは違う傾向が見つかる。銀河系ハローでは、金属量が増えるに従って、重元素の組成のばらつきが小さくなり、全体として値は高くなっていき、太陽系組成 ($[\text{Ba}/\text{Fe}] = 0$) に近づいていく。それに対し、矮小銀河では $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.5$ 付近でも高いBa組成 ($[\text{Ba}/\text{Fe}] > 0$) を示す星が存在している。

こぐま座矮小銀河 (UMi) では、 $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.5$ だが $[\text{Eu}/\text{Fe}] = +1.5$ という非常にEuの値が高い星 (UMi COS82) が発見されている²³⁾。このようなrプロセス元素過剰な天体 ($[\text{Eu}/\text{Fe}] > +1$) は、銀河系では $[\text{Fe}/\text{H}] = -3$ 付近にしか存在しない。

この星ではrプロセス元素による吸収線は非常に強く、それまで検出できなかったラインも多数検出された。特に $5,989 \text{ \AA}$ のThのラインは、それまで主に使われてきた $4,019 \text{ \AA}$ のラインより、他の吸収線のブレンド成分が少なく、精度良くTh組成を決めることができる。COS82では銀河系外でのThの初検出に加え、その他のrプロセス元素組成も決めることができ、やはり太陽のrプロセスパターンとよく一致することが示された²⁹⁾。Th/Euでの年齢決定には依然として問題が残るが(青木氏の記事参照)、太陽系組成などから推定される典型的なTh合成量を仮定するならば、Th/Euからこの星は銀河系ハローの星と同様に100億年以上の年齢をもつ古い星であることが示唆される。

矮小銀河でのrプロセス元素も大口径の望遠鏡によって観測が進みつつあり、銀河の形成や進化とともにrプロセス元素合成そのものについてもさらに情報が得られるであろう。

4. 今後の球状星団、矮小銀河の観測について

銀河系周辺に存在する球状星団や矮小銀河の星

は、距離が遠いため高分散分光観測による化学組成の解析はなかなか進まないが、建設が計画されているTMTやE-ELTなどの次世代巨大望遠鏡が強力なツールとなるであろう。特に多天体同時分光が可能な装置は、球状星団や矮小銀河の観測において極めて有効である。

8–10 m級の望遠鏡では球状星団の赤色巨星の観測が中心だが、次世代の望遠鏡では多数の球状星団についてターンオフから主系列の星でもrプロセス元素が調べられるようになる。これによって星の進化モデルの検証とともに、組成異常の問題に決着がつく可能性もある。また、多数の星でTh, ウラン (U) など放射性元素や鉛 (Pb) の検出ができれば、年代学による年齢決定が再び注目される可能性もある。

矮小銀河の研究では、測光観測を基にその金属量や星形成史などを見積もることが多いが、分光観測で化学組成を正確に決めることによって、矮小銀河の形成や進化、あるいは銀河系形成過程についてもモデルの検証を行うことができる。また、近年ぞくぞくと発見されている、より暗く、金属量が少ないと思われるような銀河でも観測が進めば、銀河系との違いや類似点が明らかになると期待される。このような研究が進むことによって、銀河の形成や進化過程のみならず、rプロセス元素合成を起こす天体を観測から明らかにすることができるかもしれない。

謝 辞

本稿は、青木和光氏、大槻かおり氏、梶野敏貴氏、Grant J. Mathews氏、有本信雄氏、定金晃三氏との共同研究を基にまとめたものである。

参考文献

- 1) Norris J., et al., 1981, ApJ 224, 205
- 2) Carretta E., et al., 2006, A&A 450, 523
- 3) Gratton R. G., et al., 2001, A&A 369, 87
- 4) Ventura P., et al., 2001, ApJ 550, 65
- 5) Sneden C., et al., 1997, AJ 114, 1964
- 6) Sneden C., et al., 2000, ApJL 536, 85
- 7) Otsuki K., et al., 2006, ApJ 641, 117 L
- 8) Sobeck J. S., et al., 2011, AJ 141, 175
- 9) Worley C. C., et al., 2013, A&A 553, 53
- 10) Marino A. F., et al., 2011, A&A 532, A8
- 11) Roederer I. U., Sneden C., 2011, AJ 142, 22
- 12) Cohen J. G., 2011, 740, 38 L
- 13) Piotto G., et al., 2007, ApJ 661, 53 L
- 14) Han S.-I., et al., 2009, ApJ 707, 190 L
- 15) Wanajo S., et al., 2002, ApJ 577, 853
- 16) Yong D., et al., 2008, AJ 689, 1031
- 17) Lai D. K., et al., 2011, AJ 141, 62
- 18) Letarte B., et al., 2010, A&A 523, 17
- 19) Moore B., et al., 1999, ApJ 524, 19 L
- 20) Kirby E. N., et al., 2008, ApJ 685, 43 L
- 21) Helmi A., et al., 2006, ApJ 651, 121 L
- 22) Starkenburg E., 2010, A&A 513, 34
- 23) Sadakane K., et al., 2004, PASJ 56, 1041
- 24) Aoki W., et al., 2009, A&A 502, 569
- 25) Frebel A., et al., 2010, ApJ 708, 560
- 26) Honda S., et al., 2011, PASJ 63, 523
- 27) Masseron T., et al., 2006, A&A 455, 1059
- 28) Barklem P. S., et al., 2005, A&A 439, 129
- 29) Aoki W., et al., 2007, PASJ 59, 15 L

r-Process Elements in Globular Clusters and Dwarf Galaxies

Satoshi HONDA

Nishi-Harima Astronomical Observatory, Center for Astronomy, University of Hyogo, 407-2 Nishi-gaichi, Sayo-cho, Sayo, Hyogo 679-5313, Japan

Abstract: Measurements of r-process element abundances have been performed to very metal-poor stars in the Milky Way halo which should well record individual explosive nucleosynthesis processes. Dwarf galaxies and globular clusters also reflect the nucleosynthesis in the early Galaxy. These oldest objects in the Galaxy have useful information on galaxy formation and condition of early star formation. Investigations of r-process elements in globular clusters and dwarf galaxies are useful to study the environment of r-process nucleosynthesis and formation process of the Galaxy. Here we review recent observations of r-process elements in globular clusters and dwarf galaxies with large telescopes.