

機関番号：14301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21740148

研究課題名(和文) 銀河系の化学進化と重元素の起源を探る観測的研究

研究課題名(英文) A study of the origin of heavy element and chemical evolution of the Galaxy

研究代表者

本田 敏志 (HONDA SATOSHI)

京都大学・大学院理学研究科・研究員

研究者番号：20425408

研究成果の概要(和文)：

本研究では、未だに不明である金やウランと言った重い元素を合成する r プロセスの起源を明らかにすることである。r プロセスの銀河初期における振る舞い調べるために、すばる高分散分光器(HDS)を用いて、銀河系ハローや矮小銀河の超金属欠乏星の化学組成を調べた。矮小銀河は銀河系のビルディングブロックの生き残りと考えられており、その中の金属欠乏星には銀河系形成時の情報が含まれると考えられている。その結果、矮小銀河には銀河系のように r プロセスが過剰な星が発見されず、銀河の化学進化が矮小銀河と銀河系で異なる可能性があることを示した。

研究成果の概要(英文)：

The purpose of this study is to clarify the origin of the r-process elements which makes heavy elements like gold and uranium. In order to investigation of the r-process abundances, we observe very metal-poor stars in galactic halo and dwarf galaxy using the high dispersion spectrograph (HDS). The dwarf galaxies are believed to play roles in understanding the formation processes of the Galaxy. No r-process enhanced metal-poor star is found in dwarf galaxies. This result indicates that dwarf galaxies may have history of the chemical evolution different from the Galaxy.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,400,000	420,000	1,820,000

研究分野：天文学

科研費の分科・細目：若手研究(B)

キーワード：元素合成、金属欠乏星、銀河の化学進化

1. 研究開始当初の背景

金属欠乏星と呼ばれる大気に含まれる鉄などの元素が太陽と比べて非常に少ない星は、銀河系(宇宙)が誕生したころの状態をそのまま星の大気中に保持している非常に

古い星である。特に、その星の大気に含まれる金属量が、限りなく0に近い星(種族 III)の化学組成はビッグバン直後の元素組成や、超新星爆発による元素合成をそのまま表すものと考えられる。このような星では、太陽のように、様々な元素合成の結果が蓄積され

たものではなく、単一のプロセスによって合成された結果を反映していると考えられるので、宇宙最初の超新星爆発による元素合成の結果などを直接知ることが可能となる。また、宇宙が誕生したときには、水素とヘリウム、そして極わずかな軽元素しか存在しなかったが、その後、恒星内部での核融合反応などによって重い元素（金属）が合成され、超新星爆発や質量放出などによって合成された元素は宇宙にばらまかれてきた。そのため、後の世代の星ほど、金属量が多いガスから生まれることになる。よって星の金属量は、銀河系の化学進化において時間軸として考えることができるので、様々な金属量の星を調べることによって銀河における元素合成の歴史をたどることが可能となる。

地球や太陽系を構成しているあらゆる元素の起源やその進化を探ることは、現在の天文学、物理学において主要なテーマであり、そのような問題を調べる格好の対象である金属欠乏星の観測は世界中で非常に注目されている。そのため、ハッブル宇宙望遠鏡（HST）や世界最大級の8m望遠鏡などを用いて、金属欠乏星の高分散分光観測が精力的に行われ、詳細な組成解析が進められている。また、近年の計算機の発展により、超新星爆発における元素合成や、銀河系の化学進化について、様々な要素を取り入れた極めて現実的なモデルの構築も劇的に進みつつある。

2. 研究の目的

これまでの観測結果から、様々な元素合成モデルや銀河系の化学進化モデルが構築され、金属欠乏星の高分散分光観測が元素合成などの核物理の研究にも重要な役割を果たしている。しかしながら、このように多くの研究が何年にもわたって行われているにも関わらず、鉄より重い元素の半分を合成するrプロセスについては、未だにどのような天体が引き起こすのか、そのサイトもメカニズムもわかっていないのが現状である。残り半分を合成するsプロセスは、小、中質量星が進化したAGB（Asymptotic Giant Branch：漸近巨星分枝）段階で合成されることが分かっている。rプロセス元素は不安定核を経由して合成されるため、現在核物理の分野でも研究に力を入れており、新しい加速器の実験（例えば理化学研究所のRIBFなど）や理論の両面から強力に研究が進められているが、この問題を解決するためには金属欠乏星での様々な元素について組成を調べることが必要である。

3. 研究の方法

上述したように、金属欠乏星の組成を調べ

ることが、宇宙初期における元素合成や銀河系の化学進化について情報を得ることができる方法である。本研究では、多数の金属欠乏星の観測を行い、それぞれの星でのrプロセス元素組成を得ることによって、銀河形成初期におけるrプロセスの振る舞いや、銀河の化学進化の歴史を探ることを目的としている。

恒星の化学組成を得るには、星の高分散分光観測を行い、そのスペクトルに見られる吸収線の強度を測定し、その星の表面温度などの物理状態を考慮して上で恒星のモデル大気などを使って化学組成を計算する。そのため、星の吸収線が測定できる程度の波長分解能で分光観測する必要がある。このような高い波長分解能で観測できる装置として、すばる望遠鏡に搭載されたHDS、岡山観測所188cm望遠鏡のHIDES、また、ぐんま天文台15m望遠鏡に搭載されているGAOESがある。本研究では、これらの高分散分光器を用いてできるだけ多くの金属欠乏星について分光観測を行った。

4. 研究成果

主にすばるHDSを用いた観測によって以下のような結果を得ることができた。

(1) rプロセス過剰な星の発見

これまでの観測によって、超金属欠乏星では、rプロセス元素組成が星ごとに大きな違いを示すことが知られている。これは、 α 元素（マグネシウムやカルシウムなど）や鉄族元素には見られない振る舞いである。この組成のばらつきは、 $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$ 以下の星で見られることから、これは銀河系内で星間ガスが完全に混ざらず、不均一となっている時代に誕生したためと考えることができる。

$[\text{Fe}/\text{H}]$ はH（水素）に対するFe（鉄）の元素比を太陽と比べて、対数をとったもの）すなわち、これらの金属欠乏星の組成は銀河系形成初期の様子を反映しているものであり、rプロセス元素組成が高い値を示すものは、rプロセス元素合成そのものを強く反映していると考えられる。実際、Sneddenらはこのようなrプロセス過剰な星を発見し、その組成パターンが、太陽におけるrプロセスパターンと一致することを示した（Snedden et al. 1996）。このような非常に古く、化学進化の影響をあまり受けていない金属欠乏星が、多数の元素合成の結果が蓄積された太陽と同じ組成パターンを示すことから、rプロセスの組成パターンはユニバーサルなものであると考えられる。しかしながら、rプロセス過剰な金属欠乏星はさほど多く発見されておらず、果たして本当にすべてのrプロセス過剰な星が同じ組成パターンを示すか

どうか、より多くの星で検証する必要があった。

そこで我々は、SDSS (Sloan Digital Sky Survey) チームと協力して、金属量が少ないと思われる星のフォローアップ観測を行い、金属欠乏星の金属量分布と r プロセス過剰な星の探査を行った。その結果、我々はこれまでに発見されている r プロセス過剰な星の中で最も低い金属量の星を発見した (Aoki et al. 2010)。Eu (ユーロピウム：原子番号 63) はその大半が r プロセスによって合成されると考えられており、また、Ba (バリウム：原子番号 56) は s プロセスによって多く合成されると考えられている。このことから、r プロセス元素が過剰かどうかは、Eu の値が $[Eu/Fe] > +1$ であるもので、s プロセスによる影響を見積もるため、 $[Ba/Eu] < -1$ となることで判断している。

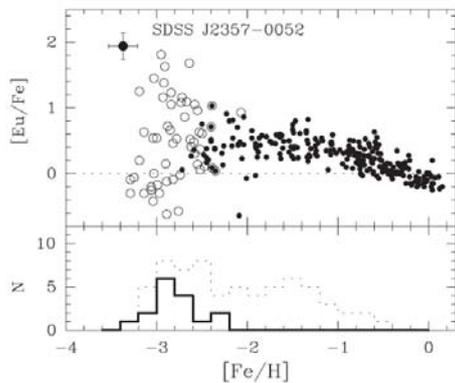


図 1：金属量に対する Eu の振る舞い (上のパネル) と、r プロセス過剰な星の分布 (下のパネル) を示したもの。

今回発見した最も r プロセス過剰な金属欠乏星 (SDSS J2357-0052) は、 $[Fe/H]=-3.4$ 、 $[Eu/Fe]=+1.9$ を示した (図 1)。より、統計的な議論を行うには、さらにサンプルを増やす必要があるが、今回の結果を基に、銀河の化学進化を考慮した r プロセス元素合成モデルの構築が現在進められており、この観測結果は極めて重要なものである。

(2) 矮小銀河における超金属欠乏星

近年、10-8m 級の大型望遠鏡によって、銀河系周辺に存在する矮小銀河の星について、一部は高分散分光観測が行われその化学組成が調べられている。矮小銀河は、現在の CDM モデル (階層的構造形成) によると、銀河系のビルディングブロックの残骸であり、銀河系形成の情報が含まれると考えられる。これまでの観測で、矮小銀河では $[Fe/H] < -3$ の超金属欠乏星がほとんど発見されず、 $[Fe/H] < -5$ の星も発見されている銀河系とは一致しないことが指摘されてきた。しかしながら、SDSS の観測を始め、より多くの星について組

成解析が進むにつれて、わずかではあるが、矮小銀河で $[Fe/H] < -3$ の星も見つかまり始めた。そんな中、矮小銀河 Sextans の星 (S15-19) で $[Ba/Fe]=+0.6$ 、 $[Fe/H]=-3.1$ の星が発見された。矮小銀河の超金属欠乏星ではどれも Ba は低い値を示す中、この星だけが際立って過剰な値を示している。

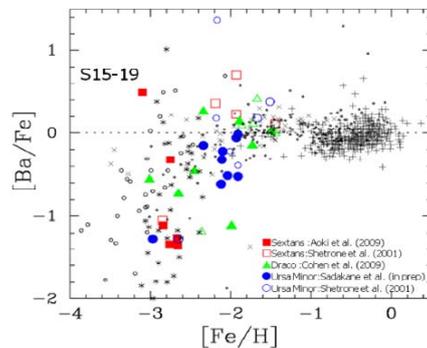


図 2：矮小銀河の金属欠乏星の $[Ba/Fe]$ と $[Fe/H]$ の分布に銀河系の星 (小さな丸と十字) をプロットしたもの。

Ba は s プロセスで多く合成されるが、これまでの銀河系ハロー星での観測では、AGB 星による s プロセスの影響は、 $[Fe/H] < -3$ ではほとんど見られないことから、この星の Ba は r プロセスによって合成されたものである可能性が高い。もし、この星が r プロセス過剰な星であれば、矮小銀河にも存在することになり、この点では銀河系と同じ傾向であることになる。

我々は、すばる HDS を使ってこの星の高分散分光観測を行い、以前の観測より質の高いデータを得て、この星の詳細な化学組成を調べた (Honda et al. 2011)。その結果、Eu は検出することができず、しかも炭素過剰な星であることが分かった。

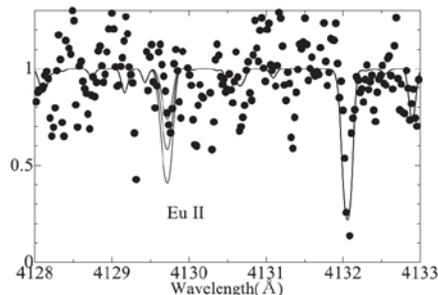


図 3：S15-19 のスペクトル (ドット) と合成スペクトル (実線)。Ba がすべて r プロセスで合成されたとする場合に予想される Eu のラインは、最も強く見えるもの。

加えて、以前の観測結果と比較して視線速度の変化も検出されたことから、この星は連星系に属したものであり、AGB 星による影響を受けたものであると結論できる。そのため、

この星の化学組成は生まれたときの状況をそのまま保持しているのではなく、AGB 星による s プロセス元素合成の結果を反映しており、Ba が過剰な値を示すのはそのためである。

このような星は、銀河系においても見つかっており、同種の星が矮小銀河でも存在することが明らかとなった。しかしながら、r プロセス過剰な超金属欠乏星が、未だに矮小銀河で発見されないことは、銀河系の傾向とは依然一致しないということになる。今後の大規模な観測を進めることが期待される。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 6 件)

- ① S. Honda, W. Aoki, N. Arimoto, K. Sadakane
Enrichment of Heavy Elements in the Red Giant S 15-19 in the Sextans Dwarf Spheroidal Galaxy
Publications of the Astronomical Society of Japan 査読有、63、p.523 (2011)
- ② S. Honda, W. Aoki, T. C. Beers, M. Takada-Hidai
Spectroscopic Studies of Extremely Metal-Poor Stars with the Subaru High Dispersion Spectrograph. V. The Zn-Enhanced Metal-Poor Star BS 16920-017
The Astrophysical Journal 査読有 730 p.77 (2011)
- ③ W. Aoki, T.C. Beers, S. Honda, and D. Carollo
Extreme Enhancements of r-process Elements in the Cool Metal-Poor Main-Sequence Star SDSS J2357-0052
The Astrophysical Journal Letters 査読有 723 p.201 (2010)
- ④ Y. Takeda, S. Honda, S. Kawanomoto, H. Ando and T. Sakurai
Behavior of Li abundances in solar-analog stars. II. Evidence of the connection with rotation and stellar activity
Astronomy and Astrophysics 査読有 515 p.93 (2010)
- ⑤ H. Ito, W. Aoki, S. Honda, and T. C. Beers

BD+44° 493: A Ninth Magnitude Messenger from the Early Universe; Carbon Enhanced and Beryllium Poor
The Astrophysical Journal Letters 査読有 698 p.37 (2009)

[学会発表] (計 6 件)

- ① 本田敏志、青木和光、有本信雄、定金晃三
ろくぶんぎ座矮小楕円体銀河の超金属欠乏星 S15-19 の化学組成
日本天文学会年会 2011 年 3 月 17 日、筑波大学
 - ② 青木和光、Timothy C. Beers、本田敏志、Daniela Carollo、伊藤紘子、Young Sun Lee
超金属欠乏星の金属量分布
日本天文学会年会 2011 年 3 月 17 日、筑波大学
 - ③ 青木和光、Timothy C. Beers、本田敏志
r-プロセス元素の過剰を示す超低金属の主系列星 SDSS2357-0052
日本天文学会年会、2011 年 9 月 22 日、金沢大学
 - ④ 本田敏志、青木和光
明るい巨星での Th の検出と宇宙年代学への適用 II
日本天文学会年会、2011 年 3 月 24 日、広島大学
 - ⑤ 銀河系におけるアクチノイド元素トリウム合成と蓄積
青木和光、本田敏志
日本天文学会年会、2009 年 9 月 16 日、山口大学
6. 研究組織
(1) 研究代表者
本田 敏志 (HONDA SATOSHI)
京都大学・大学院理学研究科・研究員
研究者番号：20425408