

平成22年6月2日現在

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2009

課題番号：20740114

研究課題名（和文） 銀河系における爆発的重元素合成の観測的研究

研究課題名（英文） Explosive synthesis of heavy elements in the Milky Way Galaxy

研究代表者

青木 和光 (AOKI WAKOU)

国立天文台・光赤外研究部・助教

研究者番号：20321581

研究成果の概要（和文）：

鉄族を超える重い元素の合成プロセスが銀河系内でどのように起こってきたのか観測的に調べるために、最も重い元素であるトリウムや鉛の組成を銀河系の星について測定した。これまでに測定例の少なかった金属量領域の星に観測を拡張することにより、銀河系ハロー構造および厚い円盤構造では爆発的な元素合成（r プロセス）が支配的であることを確認し、トリウムと重元素間の組成比の分散が化学進化とともに小さくなることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）：

Chemical abundances of the heaviest elements Thorium and Lead have been measured for Galactic stars to investigate the contributions of the neutron-capture processes that yields elements heavier than iron. Observations are extended to the metallicity range that has not well studied by previous work. We revealed that contributions of the explosive synthesis of heavy elements (the r-process) are dominant in the Galactic halo and thick disk structures, and also found a decreasing trend of scatter in abundance ratios between Thorium and other heavy elements with increasing metallicity.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	900,000	270,000	1,170,000
2009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：天文学・天文学

キーワード：元素合成、超新星爆発、低金属星、銀河系、分光観測

## 1. 研究開始当初の背景

鉄族より重い元素のほとんどは、原子核が

中性子を捕獲することによって成長する反応（中性子捕獲過程）によって合成されるこ

とが知られている。太陽系組成の分析と原子核の性質から、宇宙における中性子捕獲過程は、反応のタイムスケールの大きく異なる「遅い過程 (s-プロセス)」と「速い過程 (r-プロセス)」に大別される。このうち s-プロセスについては、主として進化の進んだ中質量星の内部で起こることが観測的にも示されており、星のモデル計算も詳しく行われている。

しかし、もう一方の r-プロセスについては、対応する天体すらはっきりしていない。必要とされる中性子捕獲反応のタイムスケールがごく短い (1秒程度以下) ことから、超新星爆発や中性子星の合体といった天体現象が考えられるが、観測的にも理論的にも十分な根拠が得られていない。

観測からの制限としては、長年にわたって太陽系の重元素組成が重要な考察対象とされてきたが、ここ10年余りの間に非常に金属量の低い星の組成解析が集中的に行われ、新たな観測的制限を与えている。金属量の低い星は宇宙の初期に誕生した小質量星の生き残りであり、当時の元素組成をその表面にとどめている。こういった星のなかには、鉄族より重い元素の組成が相対的に高い天体が少数ながら存在しており、その組成は、星の誕生の直前に起こった r-プロセス元素合成の結果をよく保存していると期待できる。これらの観測から、太陽系の組成 (多数の元素合成の結果の積分である) に加えて、個別の r-プロセス元素合成の結果についても観測的な情報を得ることが可能になった。

こういった研究のなかで、特に重要なのがアクチノイド元素 (トリウムとウラニウム) である。これらの元素が合成されるまでには、多数の不安定原子核を経由する反応が必要であるため、その起源は100%爆発的な元素合成であるといえる。上述した非常に金属量の低い星の研究においても、アクチノイド元素組成が測定された例がある。その結果は提唱されている r-プロセスモデルのいくつかで説明できるとされるが、アクチノイド元素合成はモデルパラメータのわずかな違いによって大きく左右されると予測されており、多数の観測例を積んでモデルに制限を加えることが重要である。

## 2. 研究の目的

本研究では、アクチノイド組成を調査する対象を特別に金属量の低い星から、銀河系内の典型的な星に拡大し、(1) r-プロセスによってつくられる組成パターンの一般性、(2) 銀河系内における r-プロセス元素起源の蓄積過程、の二点を観測的に明らかにする。また、s-プロセスと r-プロセスの両方で合成

される元素のなかで最も重いグループに属する鉛の組成を測定し、銀河系ハロー構造などでのそれぞれの寄与を調査する。

## 3. 研究の方法

本研究では、銀河系ハロー構造および円盤構造の星 (金属量が太陽の10分の一程度以下) について、国立天文台のすばる望遠鏡を用いて高分解能スペクトルを取得し、アクチノイド元素トリウムや鉛をはじめとする重元素組成を決定した。上に述べたように、これまで金属量の非常に低い星 (太陽の100分の一以下) に集中して観測が行われてきたが、本研究では観測を金属量の比較的高い領域に大幅に拡張したのが特色である。

太陽系近傍の星のなかでは、金属量の少ない星ほど数密度が低く、したがって金属量の低い星ほど、サンプルを得るためには暗い星を観測しなければならないという困難がある。にもかかわらず、これまでに比較的金属量の高い領域の星の重元素トリウムの組成の測定がほとんどなされてこなかったのは、金属量が高くなると、鉄をはじめとする他の元素のスペクトル線が一般に強くなり、トリウムのスペクトル線への混入が激しくなるためである。具体的にいうと、金属量の非常に低い星では419nm のトリウムの吸収線を用いて組成が測定されてきたが、この波長では鉄の原子スペクトル線および CH 分子のスペクトル線の混入がトリウムの測定を困難にしている。

本研究では、これまで観測例がほとんどなかった、599nm のトリウム吸収線 (図1) の解析を行った。この吸収線は、低温度の赤色巨星では十分に測定可能であることが我々の過去の研究で示されており、観測対象となる星は太陽系近傍に多数存在している。これらの星を、すばる望遠鏡高分散分光器を用いて約30天体観測した。

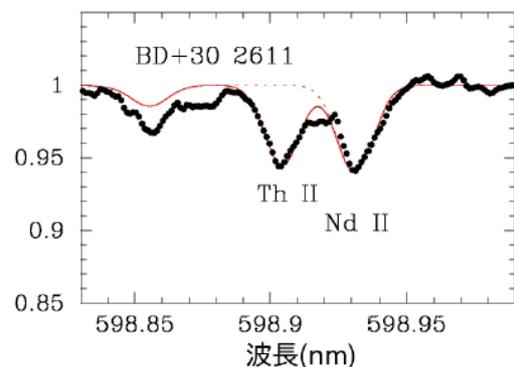


図1：解析に用いたトリウム吸収線

このデータセットからは、トリウム以外の重元素組成の測定も可能である。そのなかで特に重要な鉛の組成は、406nmの鉛のスペクトル線から測定した。

#### 4. 研究成果

##### (1) トリウム組成

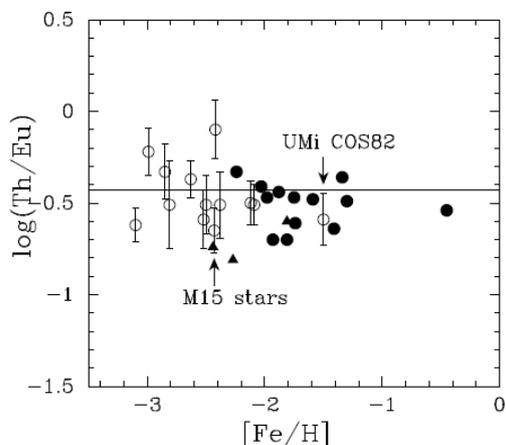


図2：トリウム組成比（ユーロピウムとの比）

図2には、トリウムとユーロピウムの組成比を金属量（鉄組成 $[Fe/H]$ ）の関数としてプロットした（下記のIAUシンポジウムでの発表より）。このうち、黒丸で示したのが本研究での測定結果であり、それ以外は過去の研究結果を文献よりとったものである。ユーロピウム（原子番号63番）はr-プロセスによって作られる典型的な元素のひとつであり、これとの比較により、環境によって合成量が大きく変動すると予測されているトリウムが、実際にはどの程度合成されているのかを調べることができる。

その結果、トリウム/ユーロピウム組成比(Th/Eu)の分散は全体としては小さいものであることが確認された。モデル計算では、この組成比は一桁以上ばらついても不思議ではないという予測があったが、このような大きな組成比の分散は金属量の非常に低い星の観測（図の白丸）にも見られていなかった。今回の測定ではさらに、金属量の非常に低い星にはみられた3倍程度（対数スケールでは約0.5）の分散も、比較的金属量の高い領域では見られなくなることが新たにわかった。これは銀河系形成の進行に伴って星間物質がよく混合されることにより、個別の天体現象（おそらく超新星爆発とみられる）でつくられる組成比の分散が見えなくなった結果と解釈される。

また、トリウム・ユーロピウム比は平均として太陽系における組成比よりやや低いことも明らかになった。これは放射性元素であるトリウムの崩壊がより進行していると解

釈でき、観測された銀河系ハローおよび厚い円盤構造の星が高年齢であるという一般的な理解と整合している。

##### (2) 鉛組成

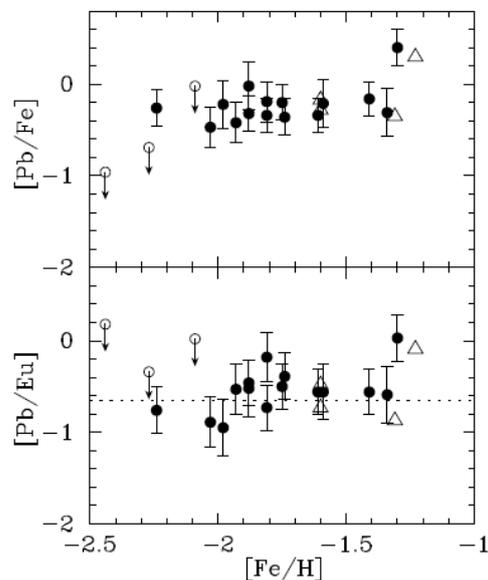


図3：鉛組成比（鉄およびユーロピウムとの比）

図3には鉛組成の測定結果を、鉄組成との比（上段：Pb/Fe）およびユーロピウム組成との比（下段：Pb/Eu）として示した（IAUシンポジウム発表より。ここでは三角印が球状星団の星の観測結果として文献からとったもので、それ以外は本研究の結果である）。鉛については、金属量の低い領域での観測例は非常に少なく、本研究ではじめてまとまった観測データが得られた。

この金属量領域だけをみると、Pb/Fe比に急激な変化はみられない。しかし、金属量の低いところにある上限値のデータから、金属量の非常に低い領域では鉛組成はかなり低く、金属量が太陽系の100分の一付近からPb/Fe比の増加がみられる。この鉛の起源は専らrプロセスであり、sプロセスの寄与は小さいとみられる。これは、Pb/Eu比がほぼ一定であることからの推測である。ただし、金属量が太陽系の20分の一程度（ $[Fe/H] = -1.3$ 付近）にはPb/Eu比、Pb/Fe比が高い星が見られ（球状星団の一つも同様の組成を示す）、これはs-プロセスの強い影響を受けた結果とみられる。

以上をまとめると、これまで研究例が少なかったトリウムと鉛の組成の測定を拡張することにより、rプロセスで合成されるトリウムの組成比は、平均的には太陽系組成から

の推定と概ね一致すること、銀河系ハローと厚い円盤の星の重元素は専ら r プロセスで供給されたことが明確になった。

#### 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 1 件)

- ① Wako Aoki, Satoshi Honda, 2008 年  
“Enrichment of Lead (Pb) in the Galactic Halo”, Publication of Astronomical Society of Japan, 60, L7-L11, 査読有

[学会発表] (計 4 件)

- ① Wako Aoki, “High resolution optical spectroscopy with the Subaru Telescope”, The 2<sup>nd</sup> Conference on Spectroscopy and its Applications, 2009 年 3 月 10 日, リマ、ペルー
- ② Wako Aoki, Satoshi Honda, “Enrichment of Th and Pb in the early Galaxy”, IAU symposium 265, 2009 年 8 月 10-14 日, リオデジャネイロ、ブラジル
- ③ 青木和光、本田敏志、「銀河系におけるアクチノイド元素トリウム合成と蓄積」日本天文学会秋季年会、2009 年 9 月 16 日、山口大学

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

青木 和光 (AOKI WAKO)  
国立天文台・光赤外研究部・助教  
研究者番号：20321581

##### (2) 研究分担者

該当なし

##### (3) 連携研究者

該当なし