

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 9 日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2011～2015

課題番号：23224004

研究課題名(和文) 宇宙初代星誕生から銀河系形成期における恒星進化と物質循環

研究課題名(英文) Stellar evolution and chemical enrichment from the first stars to the Milky Way formation

研究代表者

青木 和光 (AOKI, WAKO)

国立天文台・TMT推進室・准教授

研究者番号：20321581

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 90,500,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙で最初の星の誕生から、その後の星形成・銀河形成にわたる元素合成・物質循環を探るために、銀河系やその周辺の矮小銀河に生き残る初期世代星を多数観測し、データベース構築を行いました。超新星爆発による元素合成の理論研究を進め、観測結果と比較することにより、宇宙初代の大質量星の質量や超新星の特徴を明らかにしました。また、超新星で作られるダストを含んだガス雲からの次世代星の形成、矮小銀河の星の化学組成分布をもとにした重元素の起源の研究を進めました。

研究成果の概要(英文)：We observed a large number of metal-poor stars in the Milky Way and satellite dwarf galaxies, constructing a database of metal-poor stars, to investigate the nucleosynthesis and chemical enrichment in the early Galaxy from the first star formation to galaxy formation. Theoretical studies of nucleosynthesis by supernova explosions, and the comparisons to observational results, have revealed the masses of the first generations of massive stars and their nature. We also investigated the formation of next generations of stars from gas clouds which include dust grains produced by first stars, as well as the origins of heavy elements based on chemical abundance trend found in dwarf galaxies.

研究分野：天文学

キーワード：超新星 ダスト 銀河系 金属欠乏星 化学進化

### 1. 研究開始当初の背景

宇宙の構造と物質の歴史を理解する上で重要なポイントは、ビッグバン後数億年で誕生してきた宇宙の初代星たちにあります。ビッグバン後の宇宙には、元素としては水素とヘリウム、および微量のリチウムだけしか含まれず、そこから誕生してきた初代星には、太陽よりもはるかに質量の大きな星が多かったとみられています。それらは超新星爆発により多量の重元素を宇宙空間に放出し、ダスト（細かな固体粒子）となった重元素を含むガス雲から生まれる次世代の星には太陽程度の質量の小さな星も多数含まれていました。小質量星のなかには約 130 億年を経た現在でも生き残っているものがあります。

このような宇宙初期に生まれた星には、まだ重元素（金属）がわずかしこ含まれていません。それらは現在、金属欠乏星として私たちの銀河系のなかにも見出されます。その探査は過去 30 年以上にわたって精力的に進められ、2000 年代に入ると、代表的な重元素である鉄の含有量が太陽に比べ 10 万分の 1 以下という極端な例も発見されるようになりました(引用文献①)。これらは初代星が作り出した元素組成をそのまま保持している「第二世代星」と解釈することができ、その分析から初代星が作り出した元素組成を求め、それを通じて初代星がどのような質量をもち、どのような超新星爆発を起こしたのか、推定することができるようになってきました(引用文献②)。

さらに、金属欠乏星は、銀河系の周囲にある小さな銀河（矮小銀河）たちにも見出され、その化学組成も測定されるようになってきました。銀河系の形成過程の初期においては、こういう小さな銀河の降着・分解が起こり、銀河系の古い星の成分の起源となっていると考えられており、矮小銀河の星の観測は、銀河形成の研究の観点からも注目を集めるようになりました。

### 2. 研究の目的

宇宙初期に生まれた、太陽に比べればまだ重元素の含有量が少ない金属欠乏星の組成を測定し、初期の宇宙における星の形成と進化、超新星爆発を探るのが本研究の第一の目的です。そして、超新星から放出された物質からのダストの形成と進化および次世代星の形成という物質循環を、星の集団としての小さな銀河たちの形成史のなかで解明することを目指しています。

### 3. 研究の方法

すばる望遠鏡などを用いて、銀河系内の古い星や周辺の小さな銀河（矮小銀河）の星を観測し、組成を測定します。銀河の形成と進化については、さまざまな距離にある遠方銀河の観測による研究がさかんに行われていますが、本研究は銀河系および近くの銀河について、個々の星を観測することによってそ

の形成を調べるという点が特徴であり、遠方銀河の観測研究とは相補的な関係にあります。

金属欠乏星の観測研究は、これまでの私たちの研究も含めて多数存在しているため、それらの結果をコンパイルして金属欠乏星の化学組成のデータベースを構築します。また、矮小銀河の星の分光観測を効率化するために、すばる望遠鏡の高分散分光器に多天体観測機能を追加します。

これらの初期世代星の化学組成を説明できる超新星爆発の理論研究を推進し、爆発モデルを構築します。また、放出される物質からつくられるダスト、それを材料にした小質量星の形成および矮小銀河の形成についての理論研究を推進します。

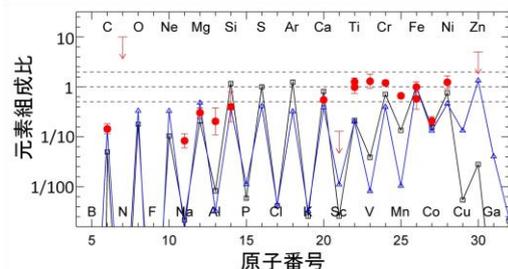
矮小銀河については、星の数が少ない環境のもとで化学進化が進むという特徴があり、それを活かして重元素の合成過程や初期の星形成過程の解明に取り組みます。

### 4. 研究成果

#### (1) 銀河の初期世代星（金属欠乏星）の観測研究

銀河系ハロー構造の星の大規模探査で見つけてきた金属欠乏星をすばる望遠鏡で詳しく分光観測し、137 天体の化学組成を測定しました。金属欠乏星の観測研究は多数ありますが、個々の研究は多くても数十天体を対象にしたものが多いため、データの質や解析手法にばらつきがあるという問題がありました。今回の研究は均質なデータと一貫した解析手法にもとづく結果なので、星の金属量分布や連星の割合の推定など、金属欠乏星の統計をとることが可能です（引用文献③）。

この観測プログラムのなかで、金属のなかでも特に炭素やマグネシウムなどの比較的軽い元素が少ないという特異な化学組成をもつ星が発見され、太陽の 100 倍以上の質量を持つ巨大質量星が起こした超新星爆発がその起源となったという解釈を提案しました（引用文献④、図）。



図：巨大質量星の痕跡をとどめている可能性のある星の化学組成。今回見つかった星の元素組成（赤丸）と超新星の元素合成モデルからの予測（黒線が太陽質量の 300 倍、青線が 1000 倍の星の爆発の場合）を比べると、全体的な元素組成の傾向はよく説明される。

また、銀河系周辺の矮小銀河の星の研究も活発になっており、似たように見える銀河の化学組成にも意外と個性があることがわかってきています。その中で、星の密度の低い、暗い矮小銀河は、銀河系ハロー構造の種になった星の集団の生き残りである可能性が指摘されています。我々も、暗い矮小銀河のひとつに注目し、星の化学組成を測定したところ、この銀河では金属量には幅がある一方で、その化学組成比はほぼ均一で銀河系ハローの星に似ていることを明らかにしました（引用文献⑤）。

また、後述するように、星の数が少ない矮小銀河においては、個々の元素合成イベントの影響が強く影響するという特徴があり、これを活かして鉄より重い元素の起源を解明するという観測研究も推進しました。

これらのデータを含め、金属欠乏星についての過去の論文で報告された情報を集めたデータベース（SAGA）の構築を進め、世界に公開しています。本研究では、銀河系ハロー構造の星についてのデータを大幅に増やすとともに、矮小銀河の星にもデータベースを拡張しました。データベース構築にあたっては、天体の名称の扱いや複数の研究がある場合のデータの取捨選択の方法、化学組成の基準としてとられる太陽系組成の標準化を行いました。このデータベースを用いて、星が誕生する際の質量分布が金属量に依存する可能性などを調査しました（引用文献⑥）。すばる望遠鏡高分散分光器への多天体観測機能の追加については、光学系および搭載機構の製作は完了しましたが、予定より時間を要し、制御ソフトウェアの製作が遅れていることから、観測成果につなげるには至っていません。今後作業が完了次第、装置への搭載・観測へと進めることを予定しています。

## (2) 超新星による元素合成

このような金属欠乏星の化学組成を決定づけたのは、宇宙の初代星をはじめとする初期の大質量星の超新星爆発です。そこでまず、観測で測定された金属欠乏星の元素組成を再現する重力崩壊型超新星の爆発モデルを構築しました。従来は少数の星を対象に、少数のモデルで検討が行われてきましたが、多数の金属欠乏星データに対して系統的にモデル構築を行うことにより、宇宙初期に起こった初代星の超新星爆発の性質について、その統計的な性質を明らかにしました（引用文献⑦）。その性質を近傍で現在観測される重力崩壊型超新星の性質と比較してみると、両者はほぼ一致することがわかりました。この研究により、金属欠乏星の元

素組成と超新星爆発の性質を直接結びつけることができたので、観測によって求められた金属欠乏星の元素組成の分布から超新星爆発の性質の分布を明らかにすることができるようになりました。

一方、初代星形成の高解像度シミュレーションにより、初代星の質量分布を求め、初代星が引き起こす超新星爆発による元素合成を推定しました。今後得られると期待される金属欠乏星、とくに第2世代と思われるとくに金属量の低い星の大規模サンプルとの比較により、このモデルの検証を行うことが可能です。

また、太陽質量の10倍程度の星の進化とそれが起こす超新星爆発について、数値計算によって系統的に調べることにより、電子捕獲型超新星を起こす星の質量範囲を精密に求めました。その結果、爆発が暗い超新星に対応することがわかりました。さらに、この型の超新星がストロンチウムなどの鉄よりやや重い元素を多く合成し、銀河系初期における重元素の重要な供給源となり得ることを明らかにしました。

## (3) ダストと小質量星形成

初代星が水素・ヘリウムのみから成るのに対し、以降の宇宙では重元素が分子やダストを形成することにより、星形成の様子は大きく変わります。超新星で形成されたダストは超新星残骸中での後退衝撃波や星間衝撃波によってかなりの部分が破壊されますが、星間ガス雲中に少量のダストが残っていれば、金属量が太陽の約10万分の1であっても重力収縮するガス雲中でのダスト成長が可能であること示しました（引用文献⑧）。炭素の過剰を示さない低質量の極金属欠乏星の存在が2011年に報告されましたが、ダストを考慮することにより、このような小質量星が初期宇宙で形成されるメカニズムを明らかにしました。

また、超新星からの放出物質中で形成されると考えられる $Al_2O_3$ 粒子の形成を理論的に調べ、超新星起源と考えられる太陽系のダスト粒子（プレソーラー粒子）のサイズ分布を再現するには、放出物質の密度には大きなコントラストが必要であることを明らかにしました。

一方、ダストは中小質量星（太陽質量の数倍程度）からの放出物質においても大量につくられます。進化の進んだ中小質量星（AGB星）のうち、とくに金属量の低い場合について、形成されるダストおよび質量放出量が、星の温度・高度や表面組成の変化に伴ってどのように変化するか、理論的に調べました。

#### (4) 化学進化と重元素の起源

鉄より重い元素は、その起源がなかなか特定できず、化学進化のうえでの位置づけがはっきりしていませんでした。最近、連星中性子星の合体が重元素合成過程の一つである r-プロセスの起源である可能性が注目されていますが、その頻度が超新星に比べて極端に低いため、星の数の少ない矮小銀河においては一回の元素合成イベントで重元素の組成が決まるという仮説を提案しました(引用文献⑨)。これは、矮小銀河の星の重元素を系統的に測定することで検証可能です。そこで、矮小銀河の星の観測により代表的な重元素(r-プロセス元素)である Eu の組成を測定し、ある金属量(鉄組成)を境に、金属量が少ない星では Eu を検出できず、それより金属量が多い星からは金属量によらずほぼ一定の Eu 組成となることを示すデータを得ることができました。これは r-プロセスが超新星よりもずっと希な現象で起こることを意味しており、中性子星合体が有力な候補であることを示すものです。

#### (5) 初代の小質量星形成の可能性の追求と銀河形成過程

宇宙の初代星の多くが大質量星であったと考えられていますが、小質量星が誕生して現在まで生き残っているか、というのは未解明の問題です。こういう星は重元素を全く含まずに誕生してくるはずですが、その後、周囲の物質には重元素が供給され、それが星の表面にもある程度降着してくると考えられます。星が矮小銀河のような小さな集団として誕生し、やがてそれが合体して銀河系ハロー構造を形作ったとする銀河形成シナリオ(階層的構造形成)の枠組みのなかで、小質量星への重元素降着の影響を評価し、降着の影響を受けない星の探査の方針を提案しました(引用文献⑩)。

#### <引用文献>

- ① Christlieb et al., Nature 419, 904 (2002)
- ② Nomoto et al., Ann. Rev. Astron. Astrophys. 51, 457 (2013)
- ③ Aoki, W. et al., Astron. J., 145, 13 (2013)
- ④ Aoki et al., Science 345, 912 (2014)
- ⑤ Ishigaki et al., Astron. & Astrophys. 562, 146 (2014)
- ⑥ Suda et al., Mon. Not. R. Astron. Soc. Letters, 432, 46 (2013)
- ⑦ Tominaga et al., Astrophys. J. 785, 98 (2014)
- ⑧ Nozawa et al., Astrophys. J. Letters, 756, L35 (2012)
- ⑨ Tsujimoto & Shigeyama, Astron. &

Astrophys. 565, L5 (2014)

- ⑩ Komiya et al., Astrophys. J. 820, 11, (2016)

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 132 件)

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

- ① “Population III Stars Around the Milky Way”, Komiya, Y., Suda, T., Fujimoto, M.Y., Astrophys. J. 820, 11, (2016), DOI: 10.3847/0004-637X/820/1/59、査読あり
- ② “Chemical feature of Eu abundance in the Draco dwarf spheroidal galaxy”, Tsujimoto, T., Ishigaki, M.N., Shigeyama, T., Aoki, W., Publication of Astronomical Society of Japan 67, L3, (2015), DOI: 10.1093/pasj/psv035、査読あり
- ③ “A chemical signature of first-generation very massive stars”, Aoki, W., Tominaga, N., Beers, T.C., Honda, S., Lee, Y.S., Science 345, 912 (2014), DOI: 10.1126/science.1252633、査読あり
- ④ Chemical compositions of six metal-poor stars in the ultra-faint dwarf spheroidal galaxy Boötes I”, Ishigaki, M. N., Aoki, W., Arimoto, N., Okamoto, S., Astron. & Astrophys. 562, 146 (2014), DOI: 10.1051/0004-6361/201322796、査読あり
- ⑤ “Abundance Profiling of Extremely Metal-Poor Stars and Supernova Properties in the Early Universe”, Tominaga, N., Iwamoto, N., Nomoto, K., Astrophys. J. 785, 98 (2014) DOI: 10.1088/0004-637X/785/2/98、査読あり
- ⑥ “Enrichment history of r-process elements shaped by a merger of neutron star pairs”, Tsujimoto, T., Shigeyama, T., Astron. & Astrophys. 565, L5 (2014), DOI: 10.1051/0004-6361/201423751、査読あり
- ⑦ “High-resolution Spectroscopy of Extremely Metal-poor Stars from SDSS/SEGUE. I. Atmospheric Parameters and Chemical

Compositions”, Aoki, W., Beers, T. C., Lee, Y. S., Honda, S., Ito, H., Takada-Hidai, M., Frebel, A., Suda, T., Fujimoto, M. Y., Carollo, D., Sivarani, T., *Astron. J.*, 145, 13 (2013), DOI: 10.1088/0004-6256/145/1/13、査読あり

⑧ “Transition of the stellar initial mass function explored using binary population synthesis”, Suda, T., Komiya, Y., Yamada, S., Katsuta, Y., Aoki, W., Gil-Pons, P., Doherty, C. L., Campbell, S. W., Wood, P., Fujimoto, M. Y., *Mon. Not. R. Astron. Soc. Letters*, 432, 46 (2013), DOI: 10.1093/mnrasl/slt033、査読あり

⑨ “Can the Growth of Dust Grains in Low-metallicity Star-forming Clouds Affect the Formation of Metal-poor Low-mass Stars?”, Nozawa, T., Kozasa, T., Nomoto, K., *Astrophys. J. Letters*, 756, L35 (2012), DOI: 10.1088/2041-8205/756/2/L35

[学会発表] (計 90 件)

① Aoki, W., “Metal-poor stars in the Galactic halo and dwarf galaxies”, First stars, galaxies, and black holes: Now and Then, 2015年06月15-19日, グローニンゲン大学 (オランダ)

② Suda, T., “Stellar evolution and the triple-alpha reactions”, Origin of Matter and Evolution of Galaxies, 2013年11月18日, エポカル筑波、つくば (茨城県)

③ Nomoto, K., “Supernova Yields for Chemical Evolution Modeling” International Astronomical Union Symposium No. 298, 2013年05月20-24日, Lijiang, China

④ Tominaga, N., “Properties of supernovae in the early universe”, XII International Symposium on Nuclei in the Cosmos, 2012年8月5-12日, ケアンズ (オーストラリア)

⑤ Aoki, W., “Extremely metal-poor stars in the Milky Way Galaxy”, First Stars IV - From Hayashi to the Future, 2012年5月21-25日, ハートピア京都 (京都府)

[その他]

ホームページ等

① 金属欠乏星データベース SAGA  
<http://sagadatabase.jp>

② 国立天文台記者発表 2014年8月22日  
「天の川銀河の星の元素組成で探る宇宙

初代の巨大質量星の痕跡」  
<http://www.nao.ac.jp/news/science/2014/20140822-subaru.html>

③ 国立天文台記者発表 2014年7月1日  
「中性子星合体は金、プラチナ、レアアース等の生成工場」  
<http://www.nao.ac.jp/news/science/2014/20140701-neutronstar.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

青木和光 (AOKI, Wako)

自然科学研究機構国立天文台・TMT 推進室・准教授

研究者番号：20321581

### (2) 研究分担者

富永望 (TOMINAGA, Nozomu)

甲南大学・理工学部・准教授

研究者番号：00550279

須田琢磨 (SUDA, Takuma)

東京大学・理学系研究科・特任助教

研究者番号：90374735

茂山俊和 (SHIGEYAMA, Toshikazu)

東京大学・理学系研究科・准教授

研究者番号：70211951

野本憲一 (NOMOTO, Ken'ichi)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・特任教授

研究者番号：90110676

小笹隆司 (KOZASA, Takashi)

北海道大学・理学研究院・教授

研究者番号：90263368

藤本正行 (FUJIMOTO, Masayuki)

北海学園大学・工学部・客員教授

研究者番号：00111708

### (3) 連携研究者

石垣美歩 (ISHIGAKI, Miho)

東京大学・カブリ数物連携宇宙研究機構・研究員

研究者番号：30583611

野沢貴也 (NOZAWA, Takaya)

自然科学研究機構国立天文台・理論研究部・特任助教

研究者番号：90435975

小宮悠 (KOMIYA, Yutaka)

東京大学・理学系研究科・特任研究員

研究者番号：10455777