

**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**  
Stellar evolution and chemical enrichment from the first stars to the Milky Way formation

**青木 和光 (AOKI WAKO)**  
国立天文台・TMT 推進室・准教授



研究の概要

宇宙で最初の世代の星の進化と超新星爆発、それに引き続く星と銀河の形成を解明することは現在の天文学の大きな課題です。私たちは、銀河系や周辺の矮小銀河に生き残っている小質量星の化学組成を測定し、それを手がかりに初代星による元素合成や、ダストとなった重元素をわずかに含むガス雲からの星形成、および銀河初期の化学進化の解明を進めています。

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：天文学・天文学

キーワード：光学赤外線天文学、理論天文学

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。当初、水素とヘリウムだけしか含まないガス雲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。

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、その後の物質循環、さらには星の集団としての小さな銀河たちの形成史をさぐるのが本研究の目的です。

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。観測効率を大幅に上げるための装置の機能向上を行います。

過去の観測結果と合わせて初期世代の星のデータベースを構築し、超新星爆発と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。

4. これまでの成果

**銀河の初期世代星（金属欠乏星）の研究**

銀河系ハロー構造の星の大規模探査で見つかっ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。バイアスが小さく、均質なデータ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。このデータを含め、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。

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。矮小銀河の星についても、文献データを集積してデータベース化を進めており、これを用いて矮小銀河の化学進化の特徴、特に個々の銀河に表れる個性を解明していく計画です。

**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。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、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。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。この研究で、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。

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。

#### 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。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。

#### 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。最近注目されている中性子星合体を重元素合成過程の一つである r-プロセスの起源とする仮説では、その頻度が超新星に比べて極端に低いため、矮小銀河の星の重元素を系統的に測定することがその検証になることがわかりました。そのための観測の準備を進めています。

#### 5. 今後の計画

本研究の特色は、独自の観測とデータベース構築により統計的な議論が可能なレベルの金属欠乏星の観測データを集積し、銀河系

ハローだけでなく矮小銀河にもそれを拡張していること、それに対応する超新星爆発、ダスト形成、化学進化の理論研究を連携して進めていることにあります。この 3 年間の内外の研究の進展を踏まえ、観測データからさらに情報を引き出す研究を観測・理論の枠組みを超えて推進しています。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

・ “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)

・ “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)

・ “Abundance Profiling of Extremely Metal-Poor Stars and Supernova Properties in the Early Universe”, Tominaga, N., Iwamoto, N., Nomoto, K., *Astron. J.*, 印刷中, (2014)

・ “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)

・ “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., *Astron. J. Letters*, 756, L35 (2012)

ホームページ等