

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：30107

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400233

研究課題名(和文) 宇宙黎明期から現在に至る漸近巨星分枝星の進化の全体像の解明

研究課題名(英文) A study of the evolution of asymptotic branch stars from the dawn of Universe to the present day.

研究代表者

藤本 正行 (Fujimoto, Masayuki)

北海学園大学・工学部・研究員

研究者番号：00111708

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：銀河系ハローから数多くの超金属欠乏星が観測され、その多くが炭素の過剰や中性子捕獲で生成される重元素の含有量に異常な表面組成を示すことが知られている。本研究では、超金属欠乏星の漸近巨星分枝段階での進化、特に、遅い中性子捕獲過程による核種合成について、その特性の全体像を理論的に明らかにするとともに、それに基づき、銀河系ハローの金属欠乏星、とりわけ、炭素の過剰を示す星が蓄積する中性子捕獲元素の含有量、分布の違いから、これらの炭素過剰星の起源を解明した。この結果から、宇宙初期および銀河系の形成初期には生成される恒星の特性についての新たな知見が導かれ、宇宙初代星の探査への手掛か得られた。

研究成果の概要(英文)：Recently, a number of extremely metal-poor stars have been observed, among which, a significant fraction of stars show peculiar abundances patterns, enriched with carbon and with heavy elements, synthesized via slow-process of neutron captures in asymptotic giant branch (AGB) stars and via rapid-process in some explosive events.

We study the evolutionary characteristics of AGM stars in particular of s-process in them systematically and by applying the theoretical results, we explore the formation mechanisms of carbon enhanced stars and the origins of neutron capture elements, either via slow- and/or rapid-processes under the environment of extremely metal deficiency in the early Universe. From these analyses, we reveal new aspects of star formation during early evolution of Milky Way and even preceding it and the properties of stars survive to date in the Galactic halo, which also gives a new insight into the search for the first stars in our Universe.

研究分野：宇宙物理学

キーワード：恒星進化 核種合成過程 宇宙初代星 銀河系形成史 元素の起源 漸近巨星分枝星 炭素星 質量放出

1. 研究開始当初の背景

宇宙の進化における第一世代の星、すなわち、重元素を含まない種族 III とよばれる星がどのようなものであったか、それに続く恒星がどのように形成されたかを明らかにすることは、観測的にも理論的にも、現在の天文学の焦点の一つである。これらの恒星は、我々の宇宙で最初あるいは極初期に他の天体に先立って輝いた天体であり、そのうちの低質量星は、現在まで生き残り、銀河形成に先行する宇宙黎明期の貴重な情報源と考えられている。これらの恒星に依拠して宇宙初期における構造形成過程を探る分野は near field cosmology (近傍領域宇宙論) と呼ばれ、近年 8 m 級の望遠鏡での観測の進展を受けて活発に展開している。筆者も、これまで、理論的研究と観測的研究を結合して、銀河系ハローの超金属欠乏星の素性を詳らかにし、それを基礎に、銀河系の形成、初期進化の過程を解明、種族 III 星とそれに続く世代の恒星が宇宙の曙光に果たした役割の全体像を明らかにする研究に取り組み、この分野の発展に参画してきた。

2. 研究の目的

銀河系ハローでは、中・低質量星の後期進化 (AGB) 段階で起きる核種合成の痕跡である炭素や中性子捕獲の s-(遅)過程の元素に富んだ星の割合が大きいことが知られているが、これらは、宇宙初期の星形成・構造形成を探る手掛かりになると考えられている、本研究では、これらの組成異常を示す恒星の素性を解明するため、これまで研究してきた金属欠乏下での低・中質量星の後期進化についての研究成果と、最近の大型望遠鏡や赤外線衛星などでの近傍の AGB 星の詳細な観測とを関連付けることによって、これまで未解決である AGB 星内部での物質混合とそれに伴う元素合成、質量放出について、現行の球対称の枠組みを超える新たな構造進化の描像を導出するのが目的である。また、これを基礎に、宇宙の黎明期の恒星の研究と宇宙開闢史の解明、および極金属欠乏星の起源の解明と初期質量関数の検証を目指すものである。

3. 研究の方法

中・低質量星の進化と核種合成を研究、炭素星の形成機構、s-過程元素合成過程の元素合成について、現行の球対称の枠組みのなかで基本的な描像を構築するとともに、連星系での主星からの化学組成の変成を受けた物質の流入、星風からの降着による金属を含んだ星間物質の降着等を考慮して、現在銀河系ハローで観測される恒星が誕生以後蒙る表面組成の変成過程の統一的な描像を導く。これに応えるため、現行の AGB の進化の理論 (Fujimoto et al. 2000, Suda & Fujimoto

2010) を、さらに球対称の枠組みを超えて発展させ、最近の大型望遠鏡による詳細な観測との照合に耐え得るものに整備・改良を図る。

それとともに、これまで、銀河系ハローの超金属欠乏星 (鉄の組成が太陽の 1/300 以下) は、炭素星の割合が、若い種族 I や II の恒星に比して、オーダーで大きいという炭素星の統計から、超金属欠乏星の初期質量関数が太陽の 5-20 倍の大質量のものであったこと、現在銀河系ハローで観測される超金属欠乏星は、連星系の伴星として生まれたこと、を示してきた。

また、これをもとに、宇宙黎明期の恒星の生き残りは、連星系の伴星として生まれたという「汎連星 (Pan Binary) 説」を提唱、とりわけ、これまでの観測で知られている極金属欠乏 (鉄組成が太陽の 10 万分の 1 以下) の炭素星の起源について、その特異な表面組成が連星系での主星からの質量降着で変成を受けた種族 III 星であるという連星系シナリオを提起した。

これらの宇宙の初期における構造形成、銀河の化学進化等の研究の解明の研究を継承・発展させ、連星系シナリオ、大質量の初期質量関数と引き続く変遷、とりわけ、種族 I や II で観測される低質量の初期質量関数への転換の解明を進める。

4. 研究成果

本研究は、恒星の進化については、金属欠乏星の観測を主たる対象として s-過程元素の理論的研究、恒星の進化に伴う慣性エネルギーの評価を基礎とした回転星の進化の追究を軸として進めた。

s-過程元素合成については、金属欠乏でのその特性を解明するとともに、統一的な描像をまとめることが出来た。それにより、炭素過多星の中に、s-過程元素の過多を示すもの (CEMP-s) とそうでないもの (CEMP-no) があり、それらの形成の起源が、連星系で質量が異なり、中性子源が異なる AGB 星で s-過程元素合成と質量輸送によって説明できることを明らかにした。加えて、炭素過多星の中には、超新星爆発に起源をもつ r-process の過多を示すもの (CEMP-r)、r-過程元素と s-過程元素が混在するもの (CEMP-r/s) が存在するが、r-元素の形成過程の研究の成果 (Komiya et al. 2014) を取り入れて、その起源が CEMP-no と CEMP-s と同様の枠組みで解釈できること示すことができた。

また、回転星の進化に関しては、球対称の構造の解析に基づいて、星の回転の進化を構成し、進化の過程で表面が臨界回転に到達し、遠心力により赤道からの質量の放出に至るために恒星が持つべき角運動量の条件とその質量依存性を求めることができた。これに基づき、HR 図上での臨界回転星が出現する領域を決めることができ、decretion disk を持つ Be 星や B[e] 星との観測との比較が可

能となった。その結果、これらの恒星の内部はほぼ一様回転していなければならないこと、したがって、そのために必要な効率的な角運動量輸送の機構が存在しているとの結論を得た。ただ、回転に伴う内部での物質混合については今後の課題として残った。

また、宇宙初期の星形成とその化学的な変成の追跡については、宇宙初代星の生き残りである種族 III 星について、星間物質の降着の金属汚染による表面組成と空間分布との関連について調べ、探査の可能性を議論した。また、初期質量関数、連星の性質についても s-過程元素合成の描像を基礎に、その変遷の可能性を探った。

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 11 件)

Komiya, Y., Suda, T.; Fujimoto, M.Y., Population III Stars Around the Milky Way The Astrophysical Journal, Volume 820, Issue 1, article id. 59, 11 pp. (2016). 10.3847/0004-637X/820/1/59

Noda, T., Yasutake, N. Hashimoto, M., Maruyama, T., Tatsumi, T., Fujimoto, M.Y. Cooling of Compact Stars with Color Superconducting Quark Matter Conference Proceedings of Quarks and Compact Stars (QCS 2014)

Komiya, Y., Suda, T., Fujimoto, M.Y., The Most Iron-deficient Stars as the Polluted Population III Stars The Astrophysical Journal Letters, Volume 808, Issue 2, article id. L47, 5 pp. (2015). 10.1088/2041-8205/808/2/L47

Yamada, S., Suda, T., Komiya, Y., Aoki, W., Fujimoto, M.Y. Analysis of enrichment histories for elements and two modes of star formation during the early evolution of Milky Way AIP Conference Proceedings, Volume 1594, Issue 1, p.93-98 101063/14874051

Komiya, Y., Yamada, S., Suda, T., Fujimoto, M.Y., The New Model of Chemical Evolution of r-process Elements Based on the Hierarchical Galaxy Formation. I. Ba and Eu The Astrophysical Journal, Volume 783, Issue 2, article id. 132, 22 pp. (2014), 10.1088/0004-637X/783/2/132

Suda, T., Hidaka, J., Ishigaki, M., Katsuta, Y., Yamada, S., Komiya, Y.;

Fujimoto, M.Y., Aoki, W., Stellar Abundances for Galactic Archaeology database for stars in dwarf galaxies Memorie della Societa Astronomica Italiana, v.85, p.600 (2014)

Komiya, Y., Suda, T., Fujimoto, M.Y., Current signatures and search for Pop. III stars in the Local Universe, Memorie della Societa Astronomica Italiana, v.85, p.531 (2014)

Yamada, S., Suda, T., Komiya, Y., Aoki, W., Fujimoto, M.Y., The Stellar Abundances for Galactic Archaeology (SAGA) Database - III. Analysis of enrichment histories for elements and two modes of star formation during the early evolution of the Milky Way, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 436, Issue 2, p.1362-1380, 10.1093/mnras/stt1652

Komiya, Y., Yamada, S., Suda, T., Fujimoto, M.Y., The stellar initial mass function in the early universe revealed from old stellar populations in our neighbourhood The Intriguing Life of Massive Galaxies, Proceedings of the International Astronomical Union, IAU Symposium, Volume 295, pp. 322-322, 101017/S1743921313005243

Katsuta, Y., Okazaki, A.T., Fujimoto, M.Y., The Evolution of Stellar Rotation and the Origin of Be Stars Massive Stars: From to , held 10-14 June 2013 in Rhodes, Greece; Online at <http://a2omega-conference.net>, id.75

Suda, T., Komiya, Y., Yamada, S., Katsuta, Y., Aoki, W., Gil-Pons, P., Doherty, C.L., Campbell, S., Wood, P. R., Fujimoto, M.Y., Transition of the stellar initial mass function explored using binary population synthesis Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, Volume 432, Issue 1, p.46-50, 10.1093/mnrasl/slt033

[学会発表](計 20 件)

恒星の自転の進化- 慣性モーメントの変動とBe 星の起源 勝田豊(北海道大学), 岡崎敦男(北海学園大学), 須田拓馬(国立天文台), 藤本正行(北海道大学・北海学園大学)、天文学会秋季年会2013年9月東北大学

銀河系近傍宇宙で種族 III 星を探す
小宮悠、須田拓馬(国立天文台)、藤本正行(北海道学園大学)、天文学会秋季年会、2013年9月東北大学

矮小銀河中の恒星の観測データベース、須田拓馬、日高潤、青木和光(国立天文台)、勝田豊(北大理)、藤本正行(北海学園大学)、天文学会秋季年会2013年9月東北大学

恒星の自転の進化 II - 慣性モーメントの変動の金属量依存性、勝田豊(北海道大学)、岡崎敦男(北海学園大学)、須田拓馬(国立天文台)、藤本正行(北海道大学・北海学園大学)、天文学会春季年会2014年3月国際基督大学

階層的化学進化モデルで探る金属欠乏星の r プロセス元素：連星中性子星、合体説への制限、小宮悠、須田拓馬(国立天文台)、藤本正行、山田志真子(北海道大学)、天文学会春季年会2014年3月国際基督大学

球状星団における元素組成異常と水平分枝形状の起源、須田拓馬、辻本拓司(国立天文台)、茂山俊和(東京大学)、藤本正行(北海道大学・北海学園大学)、天文学会春季年会2014年3月国際基督大学

Analysis of Enrichment Histories for Elements among the different Galactic Components during the Early Evolution of Milky Way、山田 志真子(北海道大学)、須田拓馬、小宮悠(国立天文台)、藤本正行(北海道大学、北海学園大学)、天文学会春季年会2014年3月国際基督大学

恒星の進化に伴う differential rotation の生成と成長、勝田豊(北海道大学)、岡崎敦男(北海学園大学)、須田拓馬(東京大学)、藤本正行(北海道大学・北海学園大学)、天文学会秋季年会2014年9月山形大学

金属欠乏星における表面汚染と hyper

metal-poor stars、小宮悠、須田拓馬(東京大学)、山田志真子(北海道大学)、藤本正行(北海学園大学)、天文学会秋季年会2014年9月山形大学

連星仮説に基づく超金属欠乏星の起源と Hyper Metal-Poor Stars、須田拓馬、小宮悠(東京大学)、山田志真子(北海道大学)、藤本正行(北海学園大学)、天文学会秋季年会2014年9月山形大学

超金属欠乏 AGB 星での中性子捕獲を伴う核種合成過程と Hyper Metalpoor stars、山田志真子(北海道大学)、須田拓馬、小宮悠(東京大学)、藤本正行(北海道大学、北海学園大学)、天文学会秋季年会2014年9月山形大学

恒星の自転の進化-質量および進化段階への依存性、勝田豊(北海道大学)、岡崎敦男(北海学園大学)、須田拓馬(東京大学)、藤本正行(北海道大学・北海学園大学)、天文学会春季年会 2015 年 3 月大阪大学

銀河系における種族 III 星発見にむけて、小宮悠、須田拓馬(東京大学)、藤本正行(北海学園大学)、天文学会春季年会 2015 年 3 月大阪大学

球状星団における元素組成異常と水平分枝形状の起源(2)、須田拓馬、茂山俊和(東京大学)、辻本拓司(国立天文台)、谷川衝(理化学研究所)、藤本正行(北海学園大学)、天文学会春季年会 2015 年 3 月大阪大学

超金属欠乏 AGB 星での中性子捕獲を伴う核種合成過程と Hyper Metalpoor stars (II)、山田志真子(北海道大学)、須田拓馬、小宮悠(東京大学)、藤本正行(北海道大学、北海学園大学)、天文学会春季年会 2015 年 3 月大阪大学

s-過程核種合成と炭素過多金属欠乏(CEMP)星形成の統一的描像、山田志真子(北海道大学)、須田拓馬、小宮悠(東京大学)、藤本正行(北海道大学、北海学園大学)、天文学会春季年会2015年9月甲南大学

矮小銀河中の恒星のデータベース(2)、須田

拓馬, 大谷友香理, 野田和弘, 増山美優(東京大学), 日高潤(明星大学), 勝田豊(北海道大学), 青木和光(国立天文台), 藤本正行(北海道学園大学)、天文学会春季年会2015年9月甲南大学

階層的化学進化モデルによるr過程元素の中性子星連星起源説の検証、小宮 悠、茂山俊和(東京大学)、藤本正行(北海道学園大学)、天文学会春季年会2015年9月甲南大学

SAGAデータベースを用いた銀河の化学進化の検証、須田拓馬, 小宮悠, 大谷友香理, 増山美優, 野田和弘(東京大学), 日高潤(明星大学), 勝田豊, 山田志真子(北海道大学), 青木和光(国立天文台), 藤本正行(北海道学園大学)、天文学会春季年会2016年3月首都大学東京

連星中性子星合体によるrプロセス元素の化学進化、小宮 悠、茂山俊和(東京大学)、藤本正行(北海道学園大学)、天文学会春季年会2016年3月首都大学東京

〔図書〕(計 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

藤本 正行 (FUJIMOTO, Masayuki)
北海道学園大学・工学部・客員研究員
研究者番号：00111708

研究者番号：

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

小笹 隆司 (KOZASA, Takashi)
北海道大学・理学研究院・教授
研究者番号：90263368

須田 拓馬 (SUDA, Takuma)
東京大学・理学系研究科・特任助教
研究者番号：90374735

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