

令和元年6月24日現在

機関番号：30107

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K05298

研究課題名(和文) 宇宙黎明期の漸近巨星分枝星の進化の全体像の構築と銀河系形成史の解読

研究課題名(英文) A study on the evolution of Asymptotic giant branch stars in the early Universe and on the formation history of the Galaxy

研究代表者

藤本 正行 (Fujimoto, Masayuki)

北海学園大学・工学部・客員研究員

研究者番号：00111708

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：銀河系ハローで観測される超金属欠乏(EMP)星は、その表面の元素組成に、形成当時の情報を保持していると考えられる。本研究では、その解析に必要な、宇宙黎明期の金属欠乏下での漸近巨星分枝(AGB)星の元素合成、進化の全体像を構築するとともに、それと銀河系ハローで多くの割合を占める超金属欠乏炭素過剰(CEMP)星の特異な元素組成との照合を通し、これらのCEMP星の大部分が、その起源をこれらのAGB星と連星系に持つことを証明した。加えて、CEMP星を含む連星系の軌道半径、および、その存在の金属量依存性の分析を通して、宇宙初期に於ける星・連星系形成の特異な側面を明らかにすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

科学における最大の関心事の一つは、人類を含む生命の起源であり、それへの進化の過程である。これは、生命とそれを取り巻く環境を構成する元素の合成過程、生命の活動をその究極のエネルギー源として支える太陽＝恒星を通して、現代天文学における中心的な研究課題の一つである、星形成と進化、および、その生成・進化の舞台としての銀河の形成と進化の研究に結び付く。本研究は、宇宙初期を題材にとり、これらの課題の研究推進の一端を担うものである。宇宙初期は、採取可能な観測題材は少ないが、その当時の宇宙の構成・構造の単純さ、また、その始原にかかわる故、現代の成熟した銀河における星形成とは異なる成果をもたらすと考えられる。

研究成果の概要(英文)：Extremely metal-poor (EMP) stars in the Galactic halo, whose existence has been revealed recently, may carry precious information of the formation and evolution of stars in the Early Universe in their surface abundances. In this study, we have investigated the evolution and nucleosynthesis of AGB stars under the extremely metal-poor condition. Through the comparison of the general picture with the peculiar surface abundances, observed from CEMP stars, we have revealed that a majority of CEMP stars have their origin in the binary systems with an AGB stars as companion. In addition, from the distribution of binary separation and of metallicity among CEMP stars, we have revealed a peculiar aspect of the star/binary formation process in the early Universe, which is different from that of the present day. This may open the possibility of revealing the star formation history in the early Universe and of constraining the theory of star formation.

研究分野：天体物理学

キーワード：恒星進化 核種合成過程 初代星 銀河考古学 漸近巨星分枝星 炭素星 星形成 質量放出

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

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。我々が対象とする恒星は、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8m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、基盤研究(A)、基盤研究(S)で、分担者と共同で、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。

本研究は、すばる等の大型望遠鏡で観測された銀河系ハローの金属欠乏星の表面組成、とりわけ、多くの割合を占める炭素過剰を示す恒星の起源を、筆者がこれまで研究してきた金属欠乏の低・中質量星の後期進化、s-過程元素の合成機構の理論との照合によって、詳細に分析することを通して、宇宙黎明期に形成された星、さらには、初代星の特性を明らかにし、銀河系誕生期の星形成史を読み解き、銀河系形成過程に迫ることを目指した。これは筆者が代表者である基盤(S)「宇宙の黎明期の恒星の研究と宇宙開闢史の解明」の最終年度の検証で提起された「極金属欠乏星の起源の解明と初期質量関数の検証に関して、今後の更なる進展に期待する」との課題に応えることを目指したものである。

2. 研究の目的

筆者は、これまで、中・低質量星の進化と核種合成の研究に取り組み、金属欠乏炭素過剰(CEMP)星の形成機構、元素合成機構について、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变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变成過程の統一的な描像を導いてきた。それとともに、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、すなわち、 $[Fe/H] < -2.5$)は、炭素星の割合が、若い種族IやIIの恒星に比して、桁違いに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(PanBinary)説」を提唱、とりわけ、これまでの観測で知られている $[Fe/H] < -5$ の3個の極金属欠乏星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变成を受けた種族III星であるという連星系シナリオを提起した。

これらの研究は、残存する低質量恒星から質量関数を導出するというユニークなものであり、宇宙の初期における構造形成、銀河の化学進化等の研究に重大な影響を与えるものと考えている。基盤研究(S)検証報告の指摘に応じて、これらの研究を継承・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のが本研究の課題である。そのため、現行のAGBの進化の理論(Fujimoto et al. 2000, Suda & Fujimoto 2010)を球対称の枠組みを超えて整備・改良、観測されるハローの組成分布の観測との詳細な照合を通して、個々の恒星の素性を明らかにする。とりわけ、低金属量下での炭素星形成機構の精密化とそのためのAGB星からの質量放出機構および

連星系での質量輸送過程の解明、加えて、炭素星から観測される遅い中性子捕獲過程 (s-過程) 元素の核種合成過程の確立を目指す。

3. 研究の方法

本研究の課題は、まず、銀河ハローから観測される超金属欠乏星中の炭素過剰を示す恒星 (CEMP 星) の元素組成と理論との比較から、その成り立ちを明らかにすることであり、そのために、低金属量のもとでの漸近巨星分枝 (AGB) 星の進化と核種合成の、球対称の枠組みを超える物質混合過程と質量放出の金属量依存性を考慮して、低金属量下における炭素星の形成機構と s-過程元素合成過程を構築することである。また、それに基づいて、初期質量関数、誕生後に蒙った連星系での変成過程、また、星間ガスとの相互作用の過程を調べ、銀河系形成過程を紐解くことである。研究当初は、下記の項目に従って進めることを目標とした。

基本となるのは、AGB 星の進化と炭素星の形成機構の研究。AGB 星の進化、特に、その化学組成の特異性の解明には、内部における物質混合とその進化への影響が鍵となるが、対流層での物質混合の効率、対流の境界での overshoot に加えて、回転による流体力学的な不安定に励起される extra な物質混合の存在とその程度などが現行モデルの不定性の原因となっている。後者の回転については、これまでも、Langer や Maeder のグループによって計算されてきたが、これらは、恒星の構造に加えて、回転星の流体力学的不安定性についての理論への適切な配慮を欠き、角運動量輸送係数および物質拡散係数をパラメータとした、toy model の域を出ていない。筆者は、X線バーストの研究の過程で、回転星の非軸対称断熱摂動に対する流体力学的不安定性の必要条件を求め、それに基づいて、角運動量輸送、物質混合の係数をそれぞれ評価し、回転星の進化の方程式を定式化した (Fujimoto 1993)。これは、回転星では、従来用いられてきた Kelvin-Helmholtz 不安定ではなく、barotropic あるいは barotropic 不安定が重要であることを証明したもので、上記のモデルとは全く異なった振る舞いをもたらすと考えられる。この定式化に基づいて、回転における物質混合の効果を研究することが、基本的な方向である。観測との照合によってモデルの当否を調べ、超金属欠乏星の物質混合について制約を課することを目標とする。

より現実的な課題としては、金属欠乏星でその過剰が多く観測される s-過程元素合成過程の精密化である。これまでの s-過程元素合成は表面对流層から炭素を含むヘリウム層への水素混合によって形成される ^{13}C pocket のモデルのみが議論されてきた (Busso et al. 1999, Bisterzo et al. 2010, 2011, 2012, 2013)。これに対して、筆者はヘリウム対流層への水素混入が金属欠乏下では球対称モデルでも起きることを示してきた (Nishimura et al. 2008)。これらによる s-過程元素合成の違いを調べ、金属欠乏下での特性を解明し、CEMP 星とその subgroup との関連等を明らかにする。それとともに、extra mixing による水素混合の可能性とその帰結についても調べる。これらのために、水素からピスマスまでを含むネットワークを拡大し、恒星進化コードとの接合を図る。

最終的に AGB 星の進化を決めるのは質量放出であり、質量放出の効率と金属量依存性の研究が課題となる。連星系シナリオでは、AGB 星からの質量放出と伴星への降着の効率、特に、その外層の組成に対する依存性を考慮する必要がある。現在の AGB 星の質量放出については、最終的に、脈動による外層の膨張とその中で形成されるダストへの輻射圧によって、全外層を放出する機構が適されている。しかし、現在までの研究で、脈動とダスト形成の首尾一貫したモデルが証明されたのは炭素過多 ($\text{C}/\text{O} > 1.2$, $[\text{C}/\text{H}] > -1$) の場合のみで、それ以外では、ダストの形成量、あるいは、それへの輻射圧が不十分であるとされている (Winters et al. 2000, 2004, Mattsson et

al. 2010)。したがって、炭素がCNサイクル反応で窒素に返還されたと考えられるNEMP星の場合は、炭素組成が小さくなるため、この機構が働かない可能性がある。この場合には、AGB星は白色矮星ではなく、超新星爆発で終り、その際の鉄の生成量は化学進化に影響する。一方、C+O中心核がChandrasekhar質量に近くに達すると光球内の輻射圧が大きくなり、輻射圧による質量放出の可能性も考えられる。その際は、星風の速度が大きくなり、連星系での伴星への降着率が大きく削減され、NEMP星の形成が抑えることになる。恒星進化と質量放出を連動して解き、これらの場合の決着することが必要となす。

研究は、現行球対称理論と観測との照合を通して、モデルの発展方向を検討するとともに、恒星進化とs-過程元素合成のネットワークの計算コードの改良・整備して、数値計算の準備をすることから始めた。その後、開発した、恒星進化、s-過程元素合成、および、質量放出の研究テーマに沿っておのおのの計算コードを用いて、それぞれの特性を研究する。その結果を総合してAGB進化の描像を構築へと進める。

4. 研究成果

本研究の推進の基盤となるのは、宇宙初期の超金属欠乏下における漸近巨星分枝(AGB)星の進化の理論、とりわけ、中性子捕獲元素合成過程の機構、工程の解明である。今回の研究の成果としては、これまで、筆者が提唱してきた、超金属欠乏のAGB星のヘリウム殻燃焼段階において、ヘリウム対流層が水素を巻き込むことで引き起こされる遅い(s-)中性子捕獲元素合成過程の特性を系統的、全面的に明らかにできたことである。これによって、(1) 超金属欠乏下でのs-過程元素過程の理論の確定とAGB星の進化の描像への前進、(2) 銀河系ハローの超金属欠乏(EMP)星とりわけCEMP星の観測との比較によるCEMP星の連星起源説の決着、および、(3) CEMP星の連星周期、金属量依存性の解析を通して、宇宙初期に於ける星の質量関数、連星系の形成機構過程に関する情報を銀河系ハローの星から読み解く展望を切り開く、等の成果を上げることができた。一方、AGB星内部での物質混合と質量放出については、CEMP星の組成解析を通して、今後の展開の手掛かりとなり得る観測的な制約を導くことができたが、今後の課題として残った。

成果の発表については、上記の成果(1)と(2)については、論文投稿中であり、(3)についても、現在投稿準備中である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3 件)

Liu, H., Matsuo, Y., Hashimoto, M., Noda, T., Fujimoto, M.Y. Quiescent Light Curve of Accreting Neutron Star MAXI J0556-332 JSPJ, 86, 123901 (2-17) 10.7566/JPSJ.86.123901

Suda, T., Hidaka, J., Aoki, W., Katsuta, Y., Yamada, S., Fujimoto, M.Y., 他 4 名 Stellar Abundances for Galactic Archaeology Database. IV. Compilation of stars in dwarf Galaxies, PASJ, 69, issue 5, (2017) 10.1093/pasj/psx059

Suda, T., Yamada, S. Fujimoto, M.Y. The s-Process Nucleosynthesis in Extremely Metal-Poor Stars as the Generating Mechanism of Carbon Enhanced Metal-Poor Stars JPS Conference Proceedings, 14, 1-4, (2017) 10.7566/JPSCP.14.010901

〔学会発表〕(計 1 2 件)

藤本正行 漸近巨星分枝星と宇宙初期の連星系形成史 銀河の化学進化とダスト形成 2019年3月

藤本正行 炭素過剰超金属欠乏星で探る宇宙黎明期の星・連星系形成史 初代星・初代銀河研究会 2018年11月 茨城大学

藤本正行 炭素過剰超金属欠乏星と宇宙初期における星・連星系形成史 (II) 日本天文学会 2018年9月

山田志真子, 須田拓馬, 小宮悠, 町田正博, 藤本正行 銀河系ハローにおける超金属欠乏炭素過剰星の起源と星・連星系形成史 日本天文学会 2018年3月 千葉大学

山田志真子, 須田拓馬, 小宮悠, 合川正幸, 藤本正行 s-過程核種合成と炭素過剰金属欠乏 (CEMP) 星の Ba と Eu の起源 (2) 日本天文学会 2018年3月 千葉大学

山田志真子, 須田拓馬, 小宮悠, 藤本正行 s-過程核種合成と炭素過剰金属欠乏 (CEMP) 星の Ba と Eu の起源 日本天文学会 2017年 9月 北海道大学

勝田豊, 岡崎敦男, 須田拓馬, 藤本正行 恒星の自転の進化 -- 恒星内部の粘性係数の評価 日本天文学会 2017年 9月 北海道大学

野田常雄, 安武伸俊, 橋本正章, 松尾康秀, 丸山敏毅, 巽敏孝, 藤本正行 クォークの2SCカラー超伝導と核子の超伝導を考慮した高密度性の冷却計算 天文学会春季年会 2017年03月 九州大学

藤本正行, 山田志真子, 須田拓馬, 小宮悠 超金属欠乏炭素過多星の起源と宇宙初期における連星系の周期分布特性 初代星・初代銀河研究会2016 2016年10月 金沢歌舞伎座 (金沢市)

山田志真子, 須田拓馬, 小宮悠, 藤本正行 s-過程元素合成と炭素金属欠乏過剰星形成の統一描像 天文学会秋季年会 2016年 09月 愛媛大学

松尾康秀, 橋本正章, 町田真美, 野田常雄, 藤本正行 近似ネットワークを用いた Type I X線バーストシミュレーション 天文学会秋季年会 2016年 09月 愛媛大学

野田常雄, 安武伸俊, 橋本正章, 松尾康秀, 丸山敏毅, 巽敏孝, 藤本正行 2SC カラー超伝導を考慮した高密度性の冷却 天文学会秋季年会 2016年 09月 愛媛大学

〔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：
国内外の別：

取得状況（計 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号（8桁）：

(2) 研究協力者

連携研究者

須田 拓馬 Suda Takuma 東京大学理学系研究科 特任助教 90374735

小宮 悠 Komiya Yutaka 東京大学理学系研究科 研究員 10455777

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。