

令和 4 年 6 月 21 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03931

研究課題名(和文)炭素過剰金属欠乏星に抛る銀河系ハローの星・連星系形成史の解読と銀河形成の研究

研究課題名(英文) A study on the early history of star and binary formation and the Galaxy formation through the analysis of carbon-enhanced, metal-poor stars in the Galactic halo

研究代表者

藤本 正行 (Fujimoto, Masayuki)

北海道大学・理学研究院・名誉教授

研究者番号：00111708

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：近年の大規模な探査観測およびすばる等の大型望遠鏡による高分散分光観測によって、銀河系ハローの超金属欠乏星の存在とその特異な性質が明らかにされてきた。本研究では、宇宙初期に誕生し、現在まで生き残っているこれらの低質量星に刻まれた表面組成の特性やその統計的な性質を手掛かりに、これらの恒星の素性を明らかにし、それを基に初期宇宙における星・連星系形成過程を解明した。それとともに、これに必要な低金属欠乏下での恒星、とりわけ漸近巨星分枝星、の進化と核種合成過程、および、星・連星系形成過程の理論の構築を目指した。これによって、ビッグ・バンで始まる初期宇宙における構造形成史、物質進化史の新たな描像を導いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

宇宙の曙光とそれに続く恒星がどのように誕生し、初期宇宙の物質進化、構造形成でどのような役割を果たしてき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。宇宙初期に誕生した恒星の痕跡を情報源として、宇宙初期における星形成、構造形成過程を探る分野は near field cosmology と呼ばれ、今世紀になって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。本研究は、超新星で金属を生成放出する大質量星ではなく、漸近巨星分枝星に注目した点が新しく、それによって、これまでの研究にはなかった、新たな側面を明らかにすることができた。

研究成果の概要(英文)：The existence of extremely metal-poor (EMP) stars and their characteristics has been revealed through recent large-scaled surveys and high dispersion spectroscopic observations with large telescopes such as Subaru. In this study, we explore the origin of these EMP stars from the peculiarities imprinted on their surface abundances and their statistical properties, and on the basis, investigate the star and binary formation processes in the early Universe under the EMP conditions. We also construct the theory of the evolution and nucleosynthesis of stars, in particular of Asymptotic giant branch stars, and the star and binary formation, which are necessary for understanding the observations. Thus, we can derive a new picture on the structure formation history and the origin of elements in the early Universe initiated by the Big Bang.

研究分野：天体物理学

キーワード：宇宙最初の星 超金属欠乏星 漸近巨星分枝星 恒星進化 星風・質量放出 星・連星系形成 核種合成過程 銀河系形成史

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、研究者個人に帰属します。

1. 研究開始当初の背景

宇宙の曙光とそれに続く恒星がどのように誕生し、初期宇宙の物質進化、構造形成でどのような役割を果たしてき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。宇宙初期に誕生した恒星のうち、低質量星は、現在まで生き残り、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星形成、構造形成過程を探る分野は near field cosmology と呼ばれ、今世紀になって 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。

近年の大規模な探査観測およびすばる等の大型望遠鏡による高分散分光観測によって、銀河系ハローの金属欠乏星の実態が明らかにされてきた。特に、炭素組成が酸素他の金属に比して過多 ($[C/Fe] \approx 0.7$) の炭素過剰金属欠乏 (CEMP) 星が多くの割合を占める。高分散分光で観測された銀河系ハロー星は、 $[Fe/H] \approx -2$ に限っても 1000 個近くに達するが、CEMP 星の割合が、種族 I や II 星の若い種族に比して、非常に高く、20~30% を占める。さらには、CEMP 星は、中性子捕獲元素についても特異な分布を示し、s-過程元素の過多を伴う CEMP-s 星 ($[Ba/Fe] > 0.5$ で定義される) と、普通の恒星(炭素過多ではない)と同程度の Ba を含有する CEMP-no 星に分類される。

代表者は、これまで、共同研究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、宇宙の曙光から銀河系の形成、初期進化の過程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。CEMP 星の起源については、漸近巨星分枝 (AGB) 星を主星とする連星系で形成されると考えられていた。一方、宇宙初期における低質量星の形成は、宇宙初代星の超新星爆発によって放出される重元素やダストによる星間ガスの冷却、また、CEMP-no 星の起源については、炭素過多の核種合成する特異な超新星 (faint SNe) の寄与などが主張されていた。これに対して、連星系起源の見地から、代表者は、初期宇宙の超金属欠乏下での中・低質量星の進化と核種合成過程の解明を中心課題とし、炭素過剰星の形成機構、s-過程中性子捕獲元素の核種合成過程について、金属依存性をも考慮した基本的な理論の構築を目指すとともに、連星系の形成過程、その進化の過程での、主星から伴星への化学組成の変成を受けた物質の流入、降着等の過程の効果を考慮して、銀河系ハローを構成する恒星の誕生から現在に至る変成過程の統一的な描像を追求してきた。この中で、銀河系ハロー星の表面組成と炭素星の統計から、宇宙初期の初期質量関数が大質量であったこと、および、銀河系ハローで観測される低質量の金属欠乏星は、もっぱら、連星系の伴星として生まれたことを提起してきた。これらの結果は、残存する低質量恒星とその表面に刻まれた核種合成の残滓から恒星の初期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星形成・進化過程の解明に重大な影響を与えるものと考えられる。我々のグループは、これをもとに「汎連星 (Pan Binary) 説」を提唱、銀河ハロー星の形成・進化過程の解明を進めてきた。これが本研究の背景となっている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、近年の大規模な探査、すばる等の大型望遠鏡の高分散分光観測でその全貌が明らかになってきた銀河系ハローの金属欠乏星について、その組成分布から星・連星系の形成史を解読、それを通して、低金属量の環境の下での連星系の形成機構及び進化過程を明らかにし、銀河系の形成、初期進化の研究に資することである。

本研究の出発点は、銀河系ハローで 20~30% を占める炭素過剰金属欠乏 (CEMP) 星の炭素組成と中性子捕獲元素組成の分析を通して得られた、銀河系ハローに現存する低質量星は大多数連星系の伴星であり、特に、CEMP 星の母体となる連星系は、漸近巨星分枝星に進化する中質量星を主星とし、かつ、CEMP-s と CEMP-no 星は、軌道周期、主星との質量比等の異なる 2 つのグループからなるという、銀河系ハロー星の起源に関する我々のグループのこれまでの研究の成果である。これを基礎づけるのに必要な、漸近巨星分枝 (AGB) 星の構造と進化の理論、AGB 星での核種合成、物質混合過程の理論を整備することを通して、恒星進化、核種合成の理論的な発展をもたらすことである。AGB 星等の進化、あるいは、s-process 元素合成過程については、最近は、数値シミュレーションを中心に研究されているが、数値計算では、対流や物質混合のパラメータの不定性、数値計算の分解能の限界等の制約のため、妥当な結論を得られていないのが現状である。本研究では、むしろ、解析的な手法をも用いることによって、介在する物理過程の解明にせまることを目指す。

それとともに、連星系の形成・進化と物質輸送の解明である。本研究では、データベースを作って集積してきたハロー星の表面組成の観測と我々が開発する AGB 星の進化・核種合成のモデルとの照合を通して、CEMP 星の親連星の特性—形成時の軌道半径、質量比等—を導出する。そのため必要な、連星系内の質量・角運動量輸送、系からの質量放出に伴う連星系としての進化の過程を、現在の宇宙で観測される連星の特性との比較較量を踏まえて、解明する。超金属欠乏星の探査、同定の経緯から考えて、CEMP 星は、連星系形成・進化を議論する斉一的かつバイアスのない標本を構成すると考えられ、個別の連星特性、進化過程の研究のみならず、銀河系ハローの形成過程についての統計的研究にも適している。銀河系ハローの星・連星系形成史は、CEMP 星の金属量依存性から導かれるであろう。

本研究は、CEMP 星を探査指針として、低金属量の環境下での連星系の形成機構、進化過程の解明に挑戦するものであり、観測的には、金属量の多い現在の環境下での星・連星系形成の研究に相補的な分野を切り開くものである。また、本研究の主たる対象は、CEMP 星に進化する低質量星を伴星とする連星系であり、主星としても高々中質量星を含むものであるが、これらの研究を通して、大質量星とその連星系についても、星・連星系の形成機構、その物理機構の研究に材料を提供し、観測的な制約、新たな知見がもたらされるであろう。これによって、最近の重力波の検出によって注目されている、ブラックホール (BH) 連星や中性子星 (NS) 連星を形成する大質量同士の連星系の形成・進化過程の研究、その宇宙物理学的な意義の解明に直結、その進展にも寄与できると考える。

3. 研究の方法

本研究では、近年の大規模な探査、すばる等の大型望遠鏡の高分散分光観測でその実態が明らかにされてきた銀河系 (MW) ハローの金属欠乏星を対象として、その進化とそれに伴う核種合成、表面組成分布の変成の特性を理論的に解明、および、これらの星を誕生させた星・連星系の形成、および、連星系での物質輸送、降着機構のモデルを構築し、それとの照合を通して、宇宙初期の低金属量の環境の下での星・連星系の形成史、核種・元素合成史を解読、宇宙初期に於ける構造形成過程、銀河系の形成、初期進化の研究への手掛かりを得ることである。

第一の課題の超金属欠乏 AGB 星の進化に伴う核種合成、物質混合については、我々は、ヘリウム・フラッシュの対流層への水素混合の発見を取り入れて理論を展開してきたが、一方、観測では、CEMP 星の中で、従来 r-過程と s-過程の中性子捕獲過程の中間の Eu/Ba の値が報告されている。これは、低金属欠乏下での中性子捕獲元素合成の新たな側面を明らかにするものであり、どう位置付けるかは、理論的な課題である。この解明は、金属欠乏下での AGB 星の進化、核種合成についての理解を進めることになる。

それとともに、CEMP 星の起源について決着をつける上で、AGB星の進化で残された問題は、炭素を含むヘリウム・フラッシュ対流層への表面对流層による浚渫 (TDU) の効率、および、質量放出の過程と機構である。これらは不確定要素であり、第二の課題に関連している。現在は、CEMP 星の炭素組成の観測値から、TDU の上限値、質量放出物の組成に太陽系の値 ($[C/H] \sim 0$) を仮定しているが、連星系の進化、CEMP 星の形成に直結する問題である。しかし、これらの問題の解明は、現在のAGB星においてのみ遂行可能な課題であり、しかも、現行の数値計算の適用限界を超えた問題である。本研究では、AGB星進化の最終段階であるミラ型変光星の観測グループとの共同で、取り組む。

第三の課題は、これらの成果に基礎に宇宙初期に於ける星・連星系の形成過程、形成史を明らかにすることである。この研究には、我々のグループが開発してきた、これまでに出版された金属欠乏星の表面組成の観測結果を網羅した SAGA データベースが基盤となる。CEMP 星には、表面組成以外にも、様々な進化の特性が残されている。CEMP 星の周期の分布、観測の有無、あるいは、金属量による表面組成の特性変動など、痕跡を読み取り、銀河系ハローの星・連星系の形成史、その進化過程を解明、その物理的な機構について明らかにする。これらの結果と銀河系の階層的構造及び銀河系ハローの形成過程形成の理論的研究、数値シミュレーションとの照合を通して、初期宇宙における構造、元素合成の全体的な描像の構築を目指すことになる。

4. 研究成果

第一の課題にかかわる本研究の主たる成果は、金属欠乏下における中性子捕獲核種合成過程について、従来の従来の理論とは異なる新たな機能を解明するとともに、中性子捕獲過程が、金属量が $[Fe/H] \sim 2.5$ を境に変化するという宇宙進化に伴う展開を明らかにした

ことである。中性子捕獲過程は、低中性子密度で起きる s -過程と高密度下での r -過程に2分されてきたが、EuとBaとの比がこの2つの過程の中間の値を持つCEMP-r/s 星の発見を受けて、中間の中性子密度の下での“ i -過程”が提唱されていた。本研究では、中性子捕獲過程で Eu/Ba 比を決める機構を突き止めるとともに、“ i -過程”の特性について、中性子捕獲過程としては s -過程と変わらないが、違いは、中性子捕獲断面積の中性子密度依存性によるものであり、それに伴う、bottleneck となる魔法中性子数の核種移動、また、 β 崩壊の終点となる shielding 核種の存在によることを示した。これは、従来 of B 2 FH (1957) によって定式化された中性子捕獲核種合成の理論に新たな知見を導いた。これらの成果については学会発表するとともに、前半部は論文投稿中であり、現在その続編を執筆中である。

第二の課題での主たる成果は、AGB 星からの質量放出とその機構についてである。これは、CEMP星の起源に直接かかわる問題であり、恒星進化の分野の長年の課題とされてきた。本研究では、鹿児島大学の観測グループが考案した周期-光度関係を適用して、多数の銀河系のミラ型変光星について、周期-絶対光度の図上での進化を議論することにより、最後に急激に大きくなる質量放出によってその最後を迎えることを論証した。これは、ミラ型星の間の脈動と星周塵への輻射圧による質量放出に対して、最後は、外層の動力学的な不安定が質量放出の機構として働くことを指示するものである。動力学的な不安定は、水素とヘリウムの電離によって駆動されるので、大小マゼラン星雲のミラ型星との比較を通して、金属量に関係なく働くことを示した。これは、宇宙における炭素星の形成、質量放出について新たな展開を切り開くものであり、宇宙初期の金属欠乏下におけるCEMP星の形成、進化の解明に直結するものである。これらの結果について、初期的な部分は出版、恒星進化の見地からの研究については今後投稿予定である。

以上の成果は、初期宇宙の低金属量の下での単独および連星系での恒星の成り立ち、変遷についての物理過程についての要請を補強するものであるが、これらの要請を踏まえて、宇宙における星・連星系形成、その変遷の描像を構築することになる。銀河系ハローの低質量星に残された特性を闡明することによって、金属量分布からは鉄を生成する大質量星と低質量星の割合、初期質量関についての制約が導かれ、また、CEMP星の表面炭素組成から、連星系の主星の特性、および、連星系の軌道半径に対する知見が、また、その金属量依存性からは金属量 $[\text{Fe}/\text{H}] \sim -3$ を境に連星系の形成の遷移が示唆される。これらと、宇宙初期に於ける構造形成の理論との対応から、初期宇宙における、低質量星形成の3種のモードが導かれる。金属量の増加とともに、原始星雲の複数分裂に伴う時間差による成長不全により低質量にとどまずついで、大質量の星周円盤でのダスト冷却による分裂で生成、最後に、現在の宇宙と同様に、ダスト冷却によりJeans 不安定星雲での中心星としての誕生へと変遷することを導いた。これらの結果については、これらの過程を組み込んで、今後、初期宇宙における、銀河形成、その初期進化の描像を構築してい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Chibueze James O, Urago Riku, Omodaka Toshihiro, Morikawa Yuto, Fujimoto Masayuki Y, Nakagawa Akiharu, Nagayama Takahiro, Nagayama Takumi, Hirano Ken	4. 巻 72
2. 論文標題 Astrometry and infrared observations of the Mira variable stars AP Lyncis, V837?Herculis, and BX?Camelopardalis: Implications for the period?luminosity relation of the Milky Way	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publications of the Astronomical Society of Japan	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psaa056	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

1. 著者名 Riku URAGO, Ryohei YAMAGUCHI, Toshihiro OMODAKA, Takumi NAGAYAMA, James O. CHIBUEZE, Masayuki Y. FUJIMOTO, 他 8 名	4. 巻 57
2. 論文標題 Trigonometric parallax of O-rich Mira variable star OZGem (IRAS07308+3037): A confirmation of the difference between the P-L relations of the Large Magellanic Cloud and the Milky Way	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Publ. Astron. Soc. Japan	6. 最初と最後の頁 1-13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1093/pasj/psaa024	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yutaka Komiya ¹ , Takuma Suda, Shimako Yamada, and Masayuki Y. Fujimoto	4. 巻 890
2. 論文標題 Are Faint Supernovae Responsible for Carbon-enhanced Metal-poor Stars?	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Astrophys. J.	6. 最初と最後の頁 No. 66
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3847/1538-4357/ab67be	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 藤本正行, 山田志真子, 須田拓馬, 小宮悠（東京大学）, 町田正博（九州大学）
2. 発表標題 宇宙初期における低質量星の形成過程とその変遷
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浦郷陸, 面高俊宏(鹿児島大学) 藤本正行(北海道大学)
2. 発表標題 天の川銀河のミラ型変光星と漸近巨星分枝星の進化の金属量依存性
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 須田拓馬(放送大学/東京大学), 松野允郁(フローニンゲン大学), 青木和光(国立天文台), 勝田豊, 山田志真子, 藤本正行(北海道大学)
2. 発表標題 金属欠乏星データベースとGaia のクロスマッチで見る銀河系の星種族の分類
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 浦郷陸, 面高俊宏(鹿児島大学) 藤本正行(北海道大学) 須田拓馬(東京工科大学)
2. 発表標題 天の川銀河のミラ型変光星と漸近巨星分枝星の進化の金属量依存性II
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田志真子(北海道大学), 須田拓馬, 藤本正行
2. 発表標題 金属欠乏星における s-process の特性とその起源
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤本正行, 勝田豊, 須田拓馬, 茂山俊和(東京大学)
2. 発表標題 Why the star expands
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 浦郷陸, 面高俊宏, 藤本正行, 須田拓馬
2. 発表標題 天の川銀河のミラ型変光星と漸近巨星分枝星の進化の金属量依存性III
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山田志真子, 須田拓馬, 藤本正行
2. 発表標題 金属欠乏星における i-process 中性子捕獲の特性
3. 学会等名 日本天文学会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------