

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800115

研究課題名(和文) 金属欠乏星の元素組成から探る、宇宙最初の10億年における天体形成

研究課題名(英文) The first billion years of the Universe: approach from the elemental abundance of metal-poor stars

研究代表者

小宮 悠 (Komiya, Yutaka)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・研究員

研究者番号：10455777

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,700,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙の最初にはリチウムより重い元素(金属)は存在せず、星や超新星などの天体現象で形成されてきた。金属量の少ない星は、初期宇宙で生まれた星の生き残りと考えられる。銀河形成を考慮した初期宇宙での元素組成の進化計算により、金属欠乏星の形成史を探った。観測的に、r過程元素と呼ばれる特に重い元素では、星ごとに多様な組成が見られる。この組成分布が銀河の階層的形成の影響として説明できることを示した。また、金属欠乏星の中でも最も金属量が低い、金属量が太陽の十万分の一以下の星たちが、実は全く金属を持たずに生まれた初代星の生き残りであり、形成後に星間物質の降着により表面組成が変化した星と考えられることを示した。

研究成果の概要(英文)：Metal (elements heavier than lithium) were not synthesized in the Big Bang nucleosynthesis but formed in the stellar interior or at supernova explosion. Metal-poor stars are relics from the early Universe. We model the enrichment history of heavy elements in the early Universe considering hierarchical galaxy formation. We investigate the enrichment history of r-process elements. The r-process is a process to synthesize elements heavier than iron-group. It is known that the r-process element abundances of metal-poor stars show large scatter. We successfully reproduce the observed distribution of r-process element abundances by considering the hierarchical galaxy formation process. We also show that hyper metal-poor stars, which are the most iron-deficient stars ever identified, were formed without metal. The surface pollution by accretion of interstellar medium can account for the surface metal abundance of hyper metal-poor stars.

研究分野：天文学

キーワード：金属欠乏星 初代星 元素合成 r過程 Hyper metal-poor star

1. 研究開始当初の背景

金属欠乏星は、宇宙黎明期に生まれた星の生き残りの星であり、その元素組成の理解は銀河形成や初期宇宙天体を探る上で重要である。近年の観測の進展により、金属量 $[Fe/H] < -3$ (注1) の星数百個の組成が測定されている。これまで発見された最も金属量の低い星は、極超金属欠乏星と呼ばれる $[Fe/H] = -5$ 以下の星であり、2 天体のみ発見されていた。

金属欠乏星から宇宙黎明期を探るには、元素組成の進化(化学進化)と星形成、銀河の形成過程を結び付けることが必要である。また、宇宙初期では、形成される星の質量分布(初期質量関数)が現在とは異なっていた可能性が指摘されており、初期質量関数の進化史の解明も重要である。特に、金属の無い状態でも現在まで残る低質量の星があったかどうかは謎である。

宇宙黎明期の化学進化において鍵となる元素のひとつが、r 過程元素(注2)である。観測的には金属欠乏星の r 過程元素分布には大きなばらつきがあることが知られており、そのような組成分布をもたらす機構の解明が求められていた。また r 過程元素合成を起こす天体現象としては、超新星爆発と、中性子星連星衝突の2つが考えられるが、どちらが主要な起源かは未解明である。

(注1) 星の金属量の指標として鉄と水素の個数密度比の対数を、太陽組成で規格化した値 $[Fe/H] = \log(N_{Fe}/N_H) - \log(N_{Fe}/N_H)_{solar}$ を用いる。

(注2) r 過程元素: 速い中性子捕獲過程によって形成される鉄族より重い元素。

2. 研究の目的

宇宙最初の 10 億年における化学進化を、銀河形成プロセスと統合的に計算できる理論モデルを構築する。これによって以下のような課題に迫る。

(1) 金属欠乏星を銀河形成史の中に位置づけ、金属欠乏星の多様な元素組成分布がどのようにもたらされたかを明らかにする。

特に r 過程元素について、初期宇宙における元素合成史を明らかにし、r 過程元素の起源天体を探る。

(2) 宇宙黎明期の星の初期質量関数に対し、金属欠乏星の観測から制限を与え、初期質量関数の進化史に迫る。

特に、金属を全く持たない星(種族 III 星)のなかに低質量星が存在したのかを探る。

3. 研究の方法

これまでの研究で、銀河の合体史を現在の宇宙論に基づいてモンテカルロ的に再現し、その中で元素組成進化を追う、階層的化学進化モデルを構築してきた。このモデルに改良を加え、星からの紫外光によるフィードバック、超新星による銀河からの質量放出やそれに伴う銀河間ガスの金属量変化といった過程を取り入れた。

r 過程元素については、この新しいモデル

を用いて化学進化を計算し、金属欠乏星観測と比較することで、r 過程元素の起源天体について議論した。

種族 III 星については、星形成後の星間物質の降着により表面組成が変化している可能性も考慮し、極超金属欠乏星の組成などとの比較から、金属の無い状況での低質量星形成の可能性を探った。

一方で、この表面汚染を受けない種族 III 星もあったと考えられる。そうした星が現在の宇宙でどのような場所に分布するかを推定し、純粋な種族 III 星を観測できる方法を探った。

4. 研究成果

(1) 金属欠乏星における r 過程元素の組成分布を、階層的銀河形成と、星への表面汚染を考慮することで説明した。

銀河は、初期宇宙の小さな銀河(原始矮小銀河)の合体により形成されてきたと考えられる。金属欠乏星の元素組成は、母体となった原始矮小銀河ごとに異なると考えられる。実際、r 過程元素では、星によって大きな組成の違いが見られる。これは、r 過程元素を作る現象の発生頻度が低いため、銀河ごとの違いが顕著にあらわれたものと考えられる。

本研究では、階層的化学進化モデルを用いて、r 過程元素の組成分布を予測した。その結果、9~10 M_{\odot} (太陽質量)の星の超新星爆発時にのみ r 過程元素が作られるとした場合に、観測された金属欠乏星の組成分布がよく再現できることを示した。

r 過程元素を放出する超新星が起きた後の組成には、原始矮小銀河の質量・金属量のばらつきを反映して、多様性があらわれる。特に、質量の小さな原始矮小銀河では、r 過程元素組成の極めて高い星が生まれる。その後銀河の合体と化学進化が進むと、組成は次第に平均化されてゆくの、金属量の高い星では、ばらつきは見られなくなっていく。

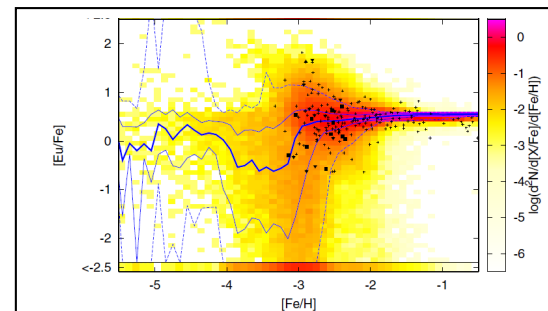


図1. 金属欠乏星の r 過程元素(ユーロピウム Eu)組成分布。横軸: 金属量、縦軸: Eu 組成。色がモデル計算により予測される分布、点が観測された金属欠乏星組成。青線は、モデル中の星の 5%, 25%, 50%, 75%, 95% が分布する範囲を示す。

r 過程元素はごく一部の超新星でしか形成されない、r 過程元素を全く持たない金属欠乏星も生まれる。しかし観測的には、r

過程元素を全く持たない金属欠乏星はほとんど存在しない。この理由は、恒星への表面汚染にあったと考えられる。恒星が形成されたあと、その表面に星間物質が降り積もることにより、表面組成が変化する場合がある。この表面汚染の影響は、通常の星では無視できるほど小さいのだが、金属欠乏星の場合は元々の金属量が少ないうえに、降着量が比較的高いため、無視できない影響をもたらしたと考えられる。

(2) 極超金属欠乏星の起源を、種族 III 星への星間物質降着による表面汚染により説明できた。

階層的化学進化モデルを用い、モデル計算の中で作られた種族 III 星に対する、星間物質の降着率、および降着する星間物質の元素組成を調べた。その結果、 $10^{-11} \sim 10^{-6} M_{\odot}$ 程度の鉄が表面に降着し、 $[Fe/H] = -5$ 程度まで表面金属量が変化することが示された。特に原始矮小銀河中では降着率が高く、降着率は $10^{-10} M_{\odot}/yr$ 近くに達すると考えられる。この理由は、原始矮小銀河では現在の銀河系に比べ星とガスの相対速度が遅く、ガスが重力的に星に束縛されやすいことによる。

本研究の結果は、金属量ゼロでも低質量星が形成されていたことを示唆する。ただしその割合は少なく、種族 III 星中の低質量星の割合は、金属欠乏星の場合に比べても 1/3 から 1/5 程度であったと推定される。

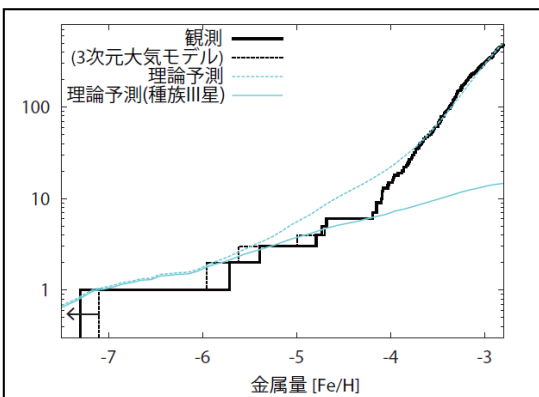


図 2 . 表面汚染を考慮した、金属欠乏星の金属量の累積分布。横軸：金属量([Fe/H])、縦軸：金属量が[Fe/H]以下の星の個数。青線が理論予測(点線：表面汚染を受けた種族 III 星の分布、実線：その他の星を含めた分布)。黒線は観測値で、実線と破線は観測データの解析手法による違い。

本研究期間中に、Keller らにより、これまでの最低金属量の記録を更新する天体、SMSS J031300.36-670839.3 が発見された(Keller et al. 2014, Nature, 506, 463)。この天体の元素組成についても、我々のモデルが予測する元素組成分布と整合的であることを示した。

(3) 種族 III 星が原始矮小銀河から外に放出される可能性を検討し、放出された種族 III 星の銀河系周辺の空間における分布を予測した。これらの種族 III 星は、次世代の観測装置により発見されることが期待される。

原始矮小銀河は現在の銀河より軽いため、重力も弱く、星は比較的容易に銀河から放出される。例えば、連星系において主星が超新星爆発を起こした場合、伴星が主星の重力から解放されて飛び出すことがありうる。銀河から放出された星は、(2)で議論したような表面汚染を受けることがない。そのため、種族 III 星が現在でも全く金属をもたないまま生き残っている可能性がある。

もし、こうした純粋な種族 III 星を観測できれば、初代星の質量という長年の問題に決着がつく。また、銀河の階層的形成の証拠となり、原始矮小銀河の質量に対する観測的な制限が得られる。

本研究では、種族 III 星について、原始矮小銀河からの脱出確率を推定した。その結果、超新星との連星の場合で、約 20%の星が脱出すると考えられる。

さらに、放出された種族 III 星の軌道を計算し、現在の銀河系付近における分布を推定した。その結果、典型的に太陽系から 100kpc 程度に分布していることが分かった。

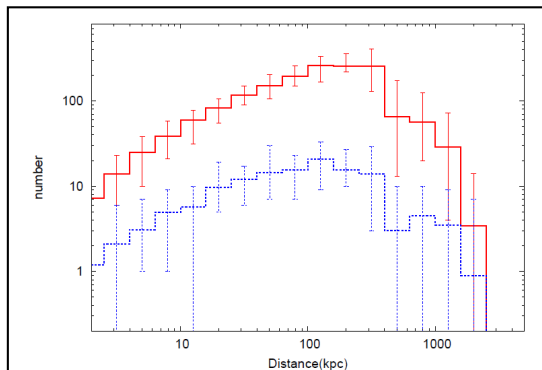


図 3 . 原始矮小銀河から脱出した種族 III 星(青)と金属欠乏星(赤)の分布の予測。太陽系から 100kpc 付近にいる星が多い。

これらの星は暗く数も少ないので、既存の装置では発見は困難である。しかし、現在開発が進められている、すばる望遠鏡の超広視野分光器(Prime Focus Spectrograph)が稼働すれば検出される可能性がある。そして、昨年建設が開始された 30m 望遠鏡を用いれば、詳細な元素組成などを知ることが出来ると考えられる。

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 5 件)

Komiya, Yutaka; “Extremely metal-poor stars and chemical signature of the first stars”, American Institute of Physics Conference

Proceedings, vol. 1594, p.76-81 (2014)

査読無

DOI: [10.1063/1.4874048](https://doi.org/10.1063/1.4874048)

Komiya, Y.; Yamada, Shimako; Suda, Takuma; Fujimoto, Masayuki Y. “The New Model of Chemical Evolution of r-process Elements Based on the Hierarchical Galaxy Formation. I. Ba and Eu” *Astrophysical Journal*, 2014, vol. 783, id. 132, 22p (2014) 査読有

DIO: [10.1088/0004-637X/783/2/132](https://doi.org/10.1088/0004-637X/783/2/132)

Komiya, Y.; Suda, T.; Fujimoto, M. “Current signatures and search for Pop. III stars in the Local Universe”, *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, vol.85, p.531-535 (2014) 査読無

<http://ads.nao.ac.jp/abs/2014MmSAI..85..531K>

Yamada, Shimako; 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*, Vol. 436, p.1362-1380 (2013) 査読有

DOI: [10.1093/mnras/stt1652](https://doi.org/10.1093/mnras/stt1652)

Komiya, Y.; Yamada, S.; Suda, T.; Fujimoto, M., “The stellar initial mass function in the early universe revealed from old stellar populations in our neighbourhood”, *Proceedings of the International Astronomical Union*, vol. 295, pp. 322-322 (2013) 査読無

DOI: [10.1017/S1743921313005243](https://doi.org/10.1017/S1743921313005243)

〔学会発表〕(計 8 件)

小宮悠、須田拓馬、藤本正行、「銀河系における種族 III 星発見にむけて」、天文学会秋季年会、2015/3/18、大阪大学(豊中市)

小宮悠、須田拓馬、山田志真子、藤本正行、「金属欠乏星における表面汚染と hyper metal-poor stars」、天文学会秋季年会、2014/9/11、山形大学(山形市)

Komiya, Y., Yamada S., Suda, T., Fujimoto, M. Y., “R-process elements on the extremely metal-poor stars and effects of surface pollution”, *INT workshop The r-process: status and challenges*, 2014/7/30, シアトル(米国)

Komiya, Y., “Chemical evolution of r-process elements in hierarchical galaxy formation models”, *RIKEN-IPMU- RESCEU Joint Meeting*,

2014/7/7, 理化学研究所(和光市)

小宮悠、山田志真子、須田拓馬、藤本正行、「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」、天文学会春季年会、2014/3/20、国際基督教大学(三鷹市)

小宮悠、「銀河考古学における連星の役割」、連星天文学研究会、2014/2/10、京都大学(京都市)

小宮悠、須田拓馬、藤本正行、「銀河系近傍宇宙で種族 III 星を探る」、天文学会秋季年会、2013/9/11、東北大学(仙台市)

Komiya, Y., Suda, T., Fujimoto, M. Y., “Current signatures and search for Pop. III stars in the Local Universe”, *European Week of Astronomy and Space Science*, 2013/7/9, Turku(フィンランド)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小宮 悠 (KOMIYA Yutaka)

東京大学・理学研究科附属ビッグバン宇宙

国際研究センター・研究員

研究者番号: 10455777

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

()

研究者番号: