

令和元年6月6日現在

機関番号：62616

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H02168

研究課題名(和文) 初期世代星の大規模分光観測による初代星の質量分布と銀河形成へのインパクトの解明

研究課題名(英文) Exploring mass distribution of first stars and their impact on galaxy formation by a large spectroscopic survey of early generation stars

研究代表者

青木 和光 (Aoki, Wako)

国立天文台・TMT推進室・准教授

研究者番号：20321581

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 35,100,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙の構造形成および物質進化の理解の鍵を握る初代星と初期の化学進化を解明するために、中国の分光探査望遠鏡LAMOSTとすばる望遠鏡を用いた初期世代星の化学組成の測定、星の化学組成データベースの構築、およびこれらと比較可能な超新星・恒星進化・ダスト形成の理論研究を推進した。その結果は(1)初代星には典型的には太陽の13-40倍程度の質量をもつ大質量星が多かったこと(2)小質量星は形成されたとしても少なかったこと(3)非常な低金属量においてもダスト形成がおこり星形成に影響したこと、などを示している。また、矮小銀河のような星の集団がある程度化学進化をとげたのちに銀河系に降着した強い証拠を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

私たちが形づくる物質、そして地球を含むあらゆる天体が宇宙のなかでどのように作り出されてきたのか--これは人類共通の疑問と言っても過言ではない。宇宙の初期に誕生し、現在でも太陽系の近くに生き残っている星を調べることにより、宇宙の最初に生まれた星は超新星爆発を起こす大質量星であったこと、星や超新星が作り出した多様な元素やダストが後の世代の星形成につながっていったことを様々な角度から調べ、明らかにした。

研究成果の概要(英文)：To explore the nature of first generation stars and early chemical evolution, which are key to understanding the structure formation and evolution of matter in the universe, we conducted a large spectroscopic survey of metal-poor stars with LAMOST in China and the Subaru Telescope, along with construction of a database of stellar chemical abundances as well as theoretical studies of supernovae, stellar evolution and dust formation. The results of these studies indicate that (1) a majority of first stars should have been massive stars having typical mass of around 13-40 solar masses, (2) low-mass stars are few, if any, among first stars, and (3) dust is formed in the environment of very low-metallicity and affects the star formation process. We also obtained a strong evidence for accretion of a small stellar system like dwarf galaxies into the Milky Way after it experienced chemical evolution.

研究分野：天文学

キーワード：金属欠乏星 超新星 化学進化 ダスト 銀河系

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

1. 研究開始当初の背景

現代の天文学において、宇宙の初代星形成をはじめとする最初の数億年における星の形成・進化および銀河形成の解明は重要課題である。我々の銀河系や周辺の矮小銀河にも年齢の高い星が重元素含有量(金属量)の少ない星(金属欠乏星)として存在しており、その化学組成と運動には、銀河形成初期の情報が記録されている。その化学組成を測定することにより、初代星がどのような元素合成を行ったのか解明し、そこから初代星の性質、とくにその質量を推定するという研究の流れが確立した。超金属欠乏星にみられる典型的な元素組成は、20~40太陽質量程度の初代星の超新星爆発によるものと説明できる一方、太陽質量の数百倍の星が起こした爆発の結果を保存している可能性のある星も見つかり、初代星は、数十太陽質量を中心に幅広い質量分布をもつことが明らかになってきていた。

一方、観測されている金属欠乏星は、初代の大質量星が爆発し放出した重元素を取り込んだガス雲から誕生してきた小質量星である。超新星爆発の後に大量のダストが作られることが明らかになってきており、ダストはガス雲の冷却に寄与することから、次の世代の小質量星の形成に大きく影響したと考えられる。初期世代星が矮小銀河サイズの星の集団を形成し、そこで星からの物質の放出・次世代星の誕生という物質循環が始まったというシナリオが描かれており、実際、銀河系のまわりに相次いで発見されている超低光度矮小銀河はほぼ単一の世代の超新星によって銀河の星たちの組成が決定づけられたとみられるケースもみつかった。こういう星の集団が種となって、銀河系ハロー構造のうち最も金属量の低い成分を作り出した可能性が示唆されるようになった。

2. 研究の目的

(1)初代星の質量分布の推定

これまでの研究により、初代星の質量には大きな幅があることが示されたが、次世代以降の星・銀河形成において重要なのはその質量分布である。銀河系ハロー星の均質かつ大規模な化学組成の調査とデータベース化により、初代星の質量分布に制限をつけることが第一の目的である。観測される化学組成から初代星の質量を推定するには、超新星による元素合成を親星の質量ごとに理解しておく必要がある。これまでの研究で考慮されていなかった星の回転を星の進化計算にとりいれ、超新星爆発とそこでの元素合成の計算を1次元から多次元に発展させて、より現実的な親星の質量の推定を行う。

(2)銀河系初期の星形成と物質循環の特徴の解明

初代の大質量星が爆発したあと、次の世代の星が誕生するまでのプロセスには未解明な点が多い。超新星爆発により大量のダストが形成されることはこれまでの研究でわかってきたが、その後のダスト進化は次世代星の形成に直接影響する重要課題である。とくに、低金属量では炭素過剰星の割合が高いことにみられるように、銀河初期には化学組成等の環境が多様であり、それを考慮したダスト進化の理論研究が必要である。それをふまえて初代星爆発後の小質量星形成への影響を解明する。このような物質循環と星形成は、矮小銀河スケールの星の集団において進行すると考えられ、銀河系周辺の矮小銀河がその解明の糸口となる。矮小銀河の星と銀河系の星の化学組成を詳細に測定し比較することにより、銀河系初期に形成された小銀河の化学進化を解明する。

(3)初期の小質量星の進化と表面組成の変化の解明

現在観測される金属欠乏星は、初期に誕生した小質量星(太陽質量の約0.8倍以下)である。これらの星は進化の過程で表面組成に変化が見られる場合がある。小質量の初代星が形成された場合でも、表面には星間物質の降着により重元素がある程度存在する可能性がある。この可

能性も考慮し、初代の小質量星形成への制限をつける。また、星は連星で誕生する 경우가多く、伴星からの質量降着により表面組成が変化する場合が少なくない。金属欠乏星に多くみられる炭素過剰天体のある部分はこのことによって説明され、その存在割合が星の初期質量関数によることが示されていることから、銀河系と矮小銀河の星について、炭素過剰星の割合および連星の割合を系統的に調査し、銀河による初期質量関数等の違いを評価する。

3. 研究の方法

(1) 観測研究：銀河系ハローおよび矮小銀河の星の大規模な化学組成測定とデータベース化

銀河系ハロー星を含む星の大規模分光探査が中国のLAMOST望遠鏡で2011年から進められている。中国の研究者と協力し、検出された金属欠乏星候補約500天体の高分散分光観測・化学組成測定をすばる望遠鏡高分散分光器(HDS)を用いて実施し、得られた結果を我々の構築してきたデータベース(SAGA)に追加する。

また、矮小銀河の化学進化の解明には、鉄より重い元素(BaやEuなど)の組成が鍵を握っていることがわかってきている。また、炭素過剰天体の割合およびその起源の解明も課題となっている。これらの解明のための矮小銀河の星の高分散分光観測をすばる望遠鏡HDSを用いて行う。これらをもとめて、データベースSAGAで矮小銀河の星のデータを強化し、銀河系の星との比較を実施する。

(2) 理論研究 I：初代星の質量ごとの超新星爆発および元素合成

個々の金属欠乏星に注目した研究を通じて、一部の元素組成比については超新星爆発の非球対称性を考慮することによって説明される一方、超新星爆発の第一原理計算によって、球対称ではほとんどの場合超新星爆発に失敗することが示されている。そこで、多次元流体・元素合成計算に基づく非球対称超新星爆発モデルデータベースを構築する。その際、超新星爆発の非球対称性のみならず、初代星の進化についても回転の効果も考慮することにより、より現実的な理論予言を提出する。また、これまでは個々の金属欠乏星に対応する超新星モデルが構築されてきたが、観測研究によって得られる多数の金属欠乏星の観測データに対応するため、金属欠乏星の元素組成比を与えることで最適な超新星爆発・初代星の性質を自動的に制限するシステムの構築を行う。これにより、銀河系ハロー星と矮小銀河の星とに寄与した超新星爆発・初代星の性質が同一なのか、異なるのか、という問題を検討する。

(3) 理論研究 II：銀河初期におけるダスト進化

これまでの研究により、超新星爆発後には大量のダストが形成され、その量は親星の金属量にあまりよらないことがわかってきた。その後ダストは超新星残骸のなかで破壊されるものと、星間空間に放出されるものがある。生き残ったダストは次世代の星形成に重要な役割を果たす可能性がある。超新星残骸とその後のダスト進化の理論的研究を推進し、超新星が作り出す多様な化学組成など環境の違いがダスト進化にどのように影響するか、ガスとダストの分離が起こって次世代星の形成や化学組成に影響するか、といった問題を解明する。

(4) 理論研究 III：小質量星の進化と表面組成の変化

現在観測される金属欠乏星は、誕生から100億年以上を経た小質量星であり、その表面組成は自身の進化や周りからの物質の降着により変化している可能性がある。この影響を定量的に評価し、金属欠乏星の化学組成と初代星の元素合成とを対応づける上記の研究の妥当性を元素ごとに評価する。とくに重元素を含まないガス雲から小質量星が誕生した場合に、現在どの程度の重元素を含有する可能性があるか検討し、観測される金属欠乏星の化学組成と詳細に比較して、初代星として小質量星が誕生した可能性を探る。また、炭素過剰星の割合が星の初期質量関数によるというこれまでの研究成果を活かし、観測研究で行う矮小銀河の観測から、銀河

ごとの星の初期質量関数の違いやその金属量依存性を評価する。

4. 研究成果

(1) LMOST による探査で検出された金属欠乏星候補天体をすばる望遠鏡 HDS で分光観測するプログラムを 2 年間にわたって実施し、当初の目標に近い約 400 天体のデータを取得することに成功した。全般的なデータ解析を進めるなかで、特徴的な組成を示す星について集中的に解析を行い、以下の結果を得た。

- ・ 金属欠乏星のなかに異常に高いリチウム組成を持つ星が存在することを明らかにし、その進化段階が準巨星から赤色巨星まで広範にわたることを示した。これは比較的理解が進んでいると考えられている小質量星の進化についても重大な未解明問題が存在することを意味する結果である（引用文献）。

- ・ 初代星のつくった化学組成をとどめているとみられる炭素過剰星を同定し、その組成を詳細に決定することにより、起源天体の質量を 25 太陽質量程度と推定した（引用文献）。

- ・ 元素が相対的に少なく r 過程元素が過剰な天体を同定し、矮小銀河が比較的進化の進んだ後に天の川銀河に合体した証拠を得ることに成功した（引用文献）。

また、矮小銀河の星の中性子捕獲元素の測定を系統的に行い、金属量がある程度増加した段階で r-プロセス起源の重元素が不連続的に増加している様子を明らかにした（引用文献）。これは天の川銀河ハロー構造の起源となった小さな星の集団における化学進化の解明につながる成果である。

金属欠乏星データベースについては、矮小銀河の星を新たに加え、銀河系の星についても大幅な拡張を行って公開し、データベースの概要および矮小銀河と銀河系の星の比較から得られる知見を論文としてとりまとめた（引用文献）。さらに、2018 年に公表された位置天文衛星ガイアのデータを取り込み、星の銀河系内の位置や軌道運動の情報を化学組成と合わせて取り扱うことを可能にした。

(2) 大質量星進化・超新星爆発に関する理論研究では、約 200 個の金属欠乏星に見られる化学組成のパターンをいくつかの質量と爆発エネルギーの超新星/極超新星が生成する元素組成のパターンと比較し、13-40 太陽質量の範囲の星の爆発で説明することができることを示した（引用文献）。100 太陽質量というような大質量の星の寄与は少ない。この結果は初代星の質量関数が 13-40 太陽の範囲にピークを持つことを示唆する。これは最近の初代星形成シミュレーションの結果とも一致する。

また、超新星元素合成モデルと準解析的初代星形成モデルを用い、第二世代星を選び出すために有用な元素組成比を提案した（引用文献）。一方、重力波の起源である重いブラックホールの親星候補として 80~140 太陽質量の初代星の大規模脈動段階の進化計算を行い、これらの星は炭素・酸素のコアの一部をも放出した後に崩壊して 50 太陽質量までのブラックホールを形成し、超高輝度超新星になることを示した。

(3) ダスト進化に関する研究では、AGB 星からの質量放出について、宇宙初期で形成された低金属・中小質量星の AGB 段階でのダスト形成量と形成されるダストの平均サイズを見積もる手法を確立した。恒星進化計算に基づいて低金属中質量星進化末期の TP-AGB 段階でのダスト形成とそれに伴う質量放出を調べ、初期金属量が太陽の 1 万分の 1 以下でも中質量星が宇宙初期の炭素ダスト供給源となる可能性があることを明らかにした（引用文献）。また中小質量星の赤色巨星段階以降の進化において磁気駆動星風が持続的に起こること、それによりダストが形成され星風が駆動されることを示した。

(4) 初代星でも太陽の 0.8 倍以下の質量を持ち宇宙年齢以上の寿命を持つ星が形成される可

能性が指摘されている。そこでそのような小質量初代星が銀河系のどの場所に存在しており、それらを観測するためにはどの方向を観測すればよいのかを N 体計算によって明らかにし、これまでに行われている金属欠乏星探査観測によって既に小質量初代星の数にある程度の制限が与えられていることを示した(引用文献)。一方、低質量星が始原的なガス雲から形成されたとしても、後の星間物質の降着により金属を含む星として観測されるという仮説があるが、星からの輻射および星風を初めて考慮したモデル計算により、降着は阻害され金属を含まない星として観測される可能性を示した(引用文献)。

低金属量の環境での s-過程元素合成の理論と炭素過剰星の組成の金属量依存性から導いた連星形成史への制約などから、星形成へのダストの影響は $[Fe/H] > -3.5$ で現れるが、小質量星は主に大質量星との連星系で形成され、全体としての初期質量関数は大質量が中心のままで維持されることを示した。

引用文献

- Li Haining, Aoki Wako, Matsuno Tadafumi, Kumar Yerra Bharat, Shi Jianrong, Suda Takuma, Zhao, Gang, Enormous Li Enhancement Preceding Red Giant Phases in Low-mass Stars in the Milky Way Halo, *The Astrophysical Journal*, 852, 2017, L31
- Aoki Wako, Matsuno Tadafumi, Honda Satoshi, Ishigaki Miho N., Li Haining, Suda Takuma, Kumar Yerra Bharat, LAMOST J221750.59+210437.2: A new member of carbon-enhanced extremely metal-poor stars with excesses of Mg and Si, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 70, 2018, 94
- Xing Qian-Fan, Zhao Gang, Aoki Wako, Honda Satoshi, Li Hai-Ning, Ishigaki Miho N., Matsuno Tadafumi, Evidence for the accretion origin of halo stars with an extreme r-process enhancement, *Nature Astronomy*, 2019
- Tsujimoto Takuji, Matsuno Tadafumi, Aoki Wako, Ishigaki Miho N., Shigeyama Toshikazu, Enrichment in r-process Elements from Multiple Distinct Events in the Early Draco Dwarf Spheroidal Galaxy, *The Astrophysical Journal*, 850, 2017, L12
- Suda Takuma, Hidaka Jun, Aoki Wako, Katsuta Yutaka, Yamada Shimako, Fujimoto Masayuki Y., Ohtani Yukari, Masuyama Miyu, Noda Kazuhiro, Wada Kentaro, Stellar Abundances for Galactic Archaeology Database. IV. Compilation of stars in dwarf galaxies, *Publications of the Astronomical Society of Japan*, 69, 2017, id76
- Ishigaki Miho N., Tominaga Nozomu, Kobayashi Chiaki, Nomoto Ken'ichi, The Initial Mass Function of the First Stars Inferred from Extremely Metal-poor Stars, *The Astrophysical Journal*, 857, 2018, 46
- Chiaki Gen, Tominaga Nozomu, Nozawa Takaya, Classification of extremely metal-poor stars: absent region in A(C)-[Fe/H] plane and the role of dust cooling, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 472, 2017, L115
- Tashibu, Shohei, Yasuda, Yuki, Kozasa, Takashi, Dust formation and mass loss around intermediate-mass AGB stars with initial metallicity $Z_{ini} \leq 10^{-4}$ in the early Universe - I. Effect of surface opacity on stellar evolution and the dust-driven wind, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 466, 2017, 1709
- Ishiyama Tomoaki, Sudo Kae, Yokoi Shingo, Hasegawa Kenji, Tominaga Nozomu, Susa Hajime, Where are the Low-mass Population III Stars?, *Astrophysical Journal*, 826, 2016, 9
- Tanaka Shuta J., Chiaki Gen, Tominaga Nozomu, Susa Hajime, Blocking Metal Accretion onto Population III Stars by Stellar Wind, *The Astrophysical Journal*, 844, 2017, id.137

5 . 主な発表論文等

[雑誌論文](計 45 件)

- Xing Qian-Fan, Zhao Gang, Aoki Wako, Honda Satoshi, Li Hai-Ning, Ishigaki Miho N., Matsuno Tadafumi, Evidence for the accretion origin of halo stars with an extreme r-process enhancement, *Nature Astronomy*, 2019, (査読有)10.1038/s41550-019-0764-5
- Li Haining, Aoki Wako, Matsuno Tadafumi, Kumar Yerra Bharat, Shi Jianrong, Suda Takuma, Zhao, Gang, Enormous Li Enhancement Preceding Red Giant Phases in Low-mass Stars in the Milky Way Halo, *The Astrophysical Journal*, 852, 2018, L31, (査読有) 10.3847/2041-8213/aaa438
- Ishigaki Miho N., Tominaga Nozomu, Kobayashi Chiaki, Nomoto Ken'ichi, The Initial Mass Function of the First Stars Inferred from Extremely Metal-poor Stars, *The*

Astrophysical Journal, 857, 2018, 46, (査読有) 10.3847/1538-4357/aab3de
Suda Takuma, Hidaka Jun, Aoki Wako, Katsuta Yutaka, Yamada Shimako, Fujimoto Masayuki
Y., Ohtani Yukari, Masuyama Miyu, Noda Kazuhiro, Wada Kentaro, Stellar Abundances
for Galactic Archaeology Database. IV. Compilation of stars in dwarf galaxies,
Publications of the Astronomical Society of Japan,69, 2017,id76, (査読有)
10.1093/pasj/psx059

Tashibu, Shohei, Yasuda, Yuki, Kozasa, Takashi, Dust formation and mass loss
around intermediate-mass AGB stars with initial metallicity $Z_{ini} \leq 10^{-4}$ in the early
Universe - I. Effect of surface opacity on stellar evolution and the dust-driven wind,
Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 466, 2017, p.1709, (査読有)
10.1093/mnras/stw3160

Ishiyama, Tomoaki, Sudo, Kae, Yokoi, Shingo, Hasegawa, Kenji, Tominaga, Nozomu, Susa,
Hajime, Where are the Low-mass Population III Stars?, Astrophysical Journal, 826,
2016, 9, (査読有) 10.3847/0004-637X/826/1/9

[学会発表](計48件)

Ken'ichi Nomoto, Pulsational Pair-Instability Supernovae, Conference on "Shocking
Supernovae" (招待講演, 国際学会), 2018年5月28日-6月1日、Stockholm (Sweden)

T. Suda, J. Hidaka, Y. Katsuta, S. Yamada, Y. Ohtani, M. Masuyama, K. Noda, K. Wada,
M. Y. Fujimoto, W. Aoki, The SAGA (Stellar Abundances for Galactic Archaeology)
Database for Stars in Dwarf Galaxies, Galactic Archaeology and Stellar Physics (国
際学会), 2016年11月21-15日, Canberra (Australia)

Wako Aoki, Observational Constraints on the Astrophysical Site of the r-Process,
Nuclei in the Cosmos XIV(招待講演, 国際学会)2016年6月23日 朱鷺メッセ(新潟市)

[その他]

研究成果の公表

Star with Strange Chemistry is from Out of Town

<https://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2019/04/29/index.html>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名: 富永望

ローマ字氏名: TOMINAGA, Nozomu

所属研究機関名: 甲南大学

部局名: 理工学部

職名: 教授

研究者番号(8桁): 00550279

研究分担者氏名: 須田琢磨

ローマ字氏名: SUDA, Takuma

所属研究機関名: 東京大学

部局名: 理学系研究科

職名: 特任助教

研究者番号(8桁): 90374735

研究分担者氏名: 野本憲一

ローマ字氏名: NOMOTO, Ken'ichi

所属研究機関名: 東京大学

部局名: カブリ数物連携宇宙研究機構

職名: 上級科学研究員

研究者番号(8桁): 90110676

研究分担者氏名: 小笹隆司

ローマ字氏名: KOZASA, Takashi

所属研究機関名: 北海道大学

部局名: 理学研究院

職名: 特任教授

研究者番号(8桁): 90263368

研究分担者氏名: 藤本正行

ローマ字氏名: FUJIMOTO, Masayuki

所属研究機関名: 北海学園大学

部局名: 工学部

職名: 客員研究員

研究者番号(8桁): 00111708

(2)研究協力者

研究協力者氏名: 石垣美歩

ローマ字氏名: ISHIGAKI, Miho

研究協力者氏名: 野沢貴也

ローマ字氏名: NOZAWA, Takaya