

氏 名 松野 允郁

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2135 号

学位授与の日付 2020 年 3 月 24 日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 High-Precision Abundance Study for the Milky Way Halo  
Stars with Kinematics and Asteroseismology

論文審査委員 主 査 准教授 竹田 洋一  
教授 郷田 直輝  
准教授 田中 賢幸  
教授 千葉 柁司  
東北大学大学院理学研究科  
教授 和田 桂一  
鹿児島大学大学院理工学研究科

(様式3)

## 博士論文の要旨

氏名 松野允郁

論文題目 High-Precision Abundance Study for the Milky Way Halo Stars with Kinematics and Asteroseismology

Stars record galaxy formation processes in their chemical abundance, kinematics, and age. The Milky Way is the only disk galaxy in which we can measure all these quantities for individual stars. The Galactic archaeology aims to reconstruct the formation history of the Milky Way to understand galaxy formation processes in general by studying its stellar contents.

While precise measurements of stellar kinematics and stellar ages have been limited to the solar neighbourhood until recently, space missions are revolutionizing this situation. The Gaia mission is measuring positions of stars with high precision, providing distance and proper motion over a large volume. These provide velocities of stars in the three-dimensional space with a help of radial velocity measurements by spectroscopy. This information enables us to search for signatures of past galaxy accretions.

Recent long-term photometric monitoring of stars by the space missions, Kepler or CoRoT, enables us to obtain power spectra of stellar oscillations. Since stellar oscillations depend on stellar structure, fundamental information about stars, such as stellar mass or evolutionary status, can be extracted from oscillation frequencies. This approach is called asteroseismology. Asteroseismology with data from the space missions provides mass estimates for a large number of red giants, which are otherwise almost inaccessible. From these mass estimates, stellar ages have been estimated for a large number of stars beyond the Solar neighbourhood for the first time.

Thanks to the novel observational data from the space missions and ground-based large spectroscopic surveys of stars, new stellar populations are revealed. Some of them seem to challenge our understanding of the galaxy formation, and others might provide new insights about the Milky Way formation history. The detailed property of the newly identified populations needs to be investigated in either case. Chemical abundance allows us further investigations since it should reflect the past star formation in the population and sometimes contains information about the evolution of the observed stars.

Chemical abundances are usually measured from high-resolution spectra obtained with ground-based telescopes. Efforts to measure chemical abundances of individual stars in the past decades have accumulated data for a large sample of Milky Way stars. Through such studies, the power of high-precision abundances is being

recognized. One way to achieve high-precision in abundance analysis is to focus on relative abundance between stars with similar spectral types. In the analysis of high quality spectra, the largest source of uncertainties is stellar model atmospheres and atomic data. Since these affect abundances similarly between stars with similar spectral types, the relative abundance difference between them can be measured with high precision without being affected by model atmospheres or atomic data.

In this thesis, I report on observational studies about the Milky Way halo stellar populations and the Milky Way formation history by combining precise stellar chemical abundances with kinematics and asteroseismology, which become available very recently. Previous studies have revealed two major halo populations with different  $\alpha$ -element abundances, low- $\alpha$  and high- $\alpha$  populations. The low- $\alpha$  population is now considered to be an accreted dwarf galaxy, Gaia Enceladus. Although the two populations are well characterized in the solar neighbourhood, we aim to explore their properties beyond the solar neighbourhood. In addition, we aim to study recently identified halo stellar populations besides the two major ones. These studies constrain past galaxy mergers that have shaped the Milky Way.

This thesis starts by confirming our standard understanding about the chemical evolution and the asteroseismology. Recent combination of asteroseismology and chemical abundances identifies a peculiar stellar population having a high  $[\alpha/\{\text{Fe}\}]$  ratio and relatively high mass, called “young  $\alpha$ -rich stars”. Existence of these stars is not expected in standard chemical evolution models. We obtained high-precision abundances of multi-elements, including neutron capture elements, for 14 young  $\alpha$ -rich stars. We show that they have abundance patterns similar to typical old  $\alpha$ -rich stars in almost all the elements studied.

Comparison of our radial velocities with previous measurements confirms the high fraction of young  $\alpha$ -rich stars showing radial velocity variation. The lack of abundance anomaly and the presence of radial velocity variation support the hypothesis that these stars are indeed a part of the old stellar population in the Galactic disk but gained mass as a result of binary interaction. This work demonstrates the validity of the standard framework of chemical evolution and asteroseismology. It also shows the ability of high-precision abundance in constraining the origin of peculiar stellar populations.

With this confirmation of our understanding of the chemical evolution, this thesis then moves on to the interpretation of chemical abundances of a halo stellar population. Analyses of stellar kinematics using the recent Gaia data pointed out an excess of stars on highly retrograde orbit with high orbital energy (high- $E$  retrograde halo). While previous studies suggested its relation to Gaia Enceladus (or the low- $\alpha$  halo population) or to the globular cluster  $\omega$  Centauri, it could be independent from both of them. We select candidate member stars of this high- $E$  retrograde halo from a database of chemical abundances to investigate its chemical property. We suggest that

the member candidates of the high-E retrograde halo have low Na, Mg, and Ca abundances than stars belonging to Gaia Enceladus. In addition, the high-E retrograde halo stars do not show Ba abundance anomalies, such as those seen in  $\omega$  Centauri. These results indicate that the high-E retrograde halo is caused by an accretion event that is independent from Gaia Enceladus or  $\omega$  Centauri. Moreover, lower  $\alpha$ -element abundances indicate that the progenitor galaxy experienced slower star formation and hence had lower mass than Gaia Enceladus.

The final part of this thesis adds another type of information, stellar mass and age from asteroseismology, into the analysis. We attempt to constrain formation of the two major halo populations by combining all of stellar chemical abundances, kinematics, and stellar age (mass) for red giants. This was made possible by the Kepler observation and large spectroscopic surveys and is the first attempt of such studies for a large number of halo red giant stars beyond the solar neighbourhood. We study 26 halo stars for this purpose. Since halo stars are metal-poor, we first investigate the reliability of asteroseismology at low-metallicity, which has been debated in previous studies. We find that mass of our program stars is systematically over-estimated despite the use of theoretical correction in a scaling relation of asteroseismology. Although there is a systematic offset, masses of less evolved giants seem consistently measured in terms of a relative scale. There is no significant scatter in the measured masses among 15 less evolved stars with an upper limit of mass dispersion of 0.05  $M_{\text{sun}}$ . This provides a constraint on the timescale of star formation as  $\leq 2$  Gyr for the entire stellar halo.

Precise chemical abundance of the program stars enables us to separate our sample into low- $\alpha$  and high- $\alpha$  halo stellar populations. These two populations show chemical abundance differences consistent with previous studies of nearby halo turn-off stars. The chemical abundances indicate that the low- $\alpha$  population formed within a timescale of 100-300 Myr while the high- $\alpha$  population has even shorter timescale. Asteroseismology additionally constrains their age difference as  $< 4$  Gyr, indicating their formation epochs are not very different.

In summary, we obtained the following results by combining three stellar properties, that is, stellar chemical abundances, kinematics, and asteroseismology: i) we confirm the binary origin of the so-called young  $\alpha$ -rich stars whose existence is unexpected in standard chemical evolution. This result ensures our current understanding of chemical evolution. ii) There was a galaxy accretion event that was independent from Gaia-Enceladus or from  $\omega$  Centauri. It has highly retrograde orbit with high orbital energy and very low  $\alpha$ -element abundances. The abundance indicates its long star formation timescale, indicating its low mass. iii) Asteroseismology opens a new window to investigate relative age difference or dispersion among halo stars beyond the solar neighbourhood. The halo high- $\alpha$  and low- $\alpha$  stellar populations have short star formation timescales with the low- $\alpha$  having longer timescale than the other. Their formation epochs are shown to be not significantly different.

These three results demonstrate that the combination of precise chemical abundances with stellar kinematics and ages is a powerful approach to reveal the nature of stellar populations in the Milky Way halo, and ultimately constrains the Milky formation history.

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏名 松野 允郁

論文題目 High-Precision Abundance Study for the Milky Way Halo Stars with Kinematics and Asteroseismology

出願者は本論文で、最近のスペースからの高精度観測（Gaia 衛星の超高精度位置測定並びに Kepler 衛星による超高精度測光）と地上望遠鏡を用いた分光観測（化学組成の決定）を結びつけることで銀河考古学において新たな道を切り開いており、本研究はこの分野に重要な寄与をもたらすものと位置づけられる。

古い恒星には生まれた当時の銀河ガスの組成や運動の情報があたかも化石のように残されているので、それを読み解くことで銀河系の形成や進化の歴史に迫ろうとする学問を銀河考古学と称しており、大望遠鏡を用いた遠方の暗い星の観測や大規模サーベイ観測による大量データの取得が可能になった現代では近年著しい進歩を見せている最前線の天文学分野である。

我々の銀河系は昔考えられていたように最初からあったガスと星の進化だけで現在に至ったのではなく、特に外部に球状に分布するハローと呼ばれる古い種族については過去に複数の矮小銀河が銀河系に衝突して取り込まれた外来成分の星がかなり混ざり合っていることが最近分かってきた。

出願者は独自に工夫した恒星パラメータ決定法（特に Kepler 衛星の高精度測光データには星震学が適用できて赤色巨星の質量や年齢がかなり正確に決定出来る）や組成解析手法を基に、運動学的に異なる分布（Gaia 衛星のデータを活用して分類される）の恒星グループの化学組成の特徴を調べることで、「銀河系がいかになら形成されたのか」という問題に切り込んでおり、本論文は三つの主題で構成されている。①見かけは若いのに年老いた星のような化学組成を示す星の素性解明、②銀河ハローに属する星の運動学的に異なるグループの分類と文献値データベースから求めた化学組成の特徴に基づく起源の推定、③星震学と高精度組成解析法を適用したハロー種族星の化学組成決定と形成史の研究、である。

まず第一のテーマは「若いのに  $\alpha$  元素が過剰の星」という不可解な星に関するものである。 $\alpha$  グループと呼ばれるマグネシウムやカルシウムなどの元素は寿命の短い大質量星で合成されて II 型超新星爆発で周りに放出されるが、鉄(Fe)は主に寿命がより長い中質量星で作られて Ia 型超新星爆発でガスに還元される。したがって  $[\alpha/\text{Fe}]$  と書かれる組成比は II 型の影響の強い古い星ほど大きく Ia 型の影響が出る比較的若い星では小さくなるはずで、実際にその傾向が観測されている。しかし一見この常識に反する星が出てきて問題になっている。つまり、進化した赤色巨星は昔から年齢決定が困難だったが、最近星震学で質量と共に年齢も精度良く決まるようになった結果、若い（質量が大きい）のに  $[\alpha/\text{Fe}]$  比が大きいという理解しがたい恒星グループの存在が明らかになり、これは銀河化学進化の標準理論を脅かしかねない。出願者はこの  $\alpha$  過剰の特徴が報告されている星 14 個を基準

星とともにハワイの 10m Keck 望遠鏡で分光観測して独自の手法で高精度組成解析を行い、確かに星震学から決まる年齢は比較的若いのに $[\alpha/\text{Fe}]$ 比は古い星のように高い値を持つ矛盾を確認した。一方、この種の星は視線速度が変化しているものが多く連星系である可能性が高い、という重要な特徴を見いだした。これにより、(質量が大きいから)若いということは先に進化して膨れた伴星から物質が流入して獲得したみかけの増加に過ぎず実際は古い星である、というシナリオが有力になってくる。よって、 $[\alpha/\text{Fe}]$ 比が高くても質量が比較的大きい星は化学進化の標準理論に関わる問題ではなかろう、との結論に至った。

次の二番目のテーマは銀河系ハローの多数の恒星の運動学的情報に基づく分類と化学組成の特徴に関するものである。この研究において出願者は各元素の化学組成データについては既存の文献の値を広く集めてまとめた SAGA (Stellar Abundances for Galactic Archaeology) というデータベースを活用している。Gaia 衛星によって得られた位置データと速度データから銀河系内の軌道が計算できるので、約 1600 個のハローの星をエネルギー-角運動量図の上で運動学的特徴に応じて 4 つのグループに分類した。各グループの化学組成の特徴を調べたところ、高いエネルギーの逆行回転のグループについて意義深い知見が得られた。つまりこのグループは、これまで推測されていた Gaia-Enceladus という矮小銀河に由来する種族 (低い $[\alpha/\text{Fe}]$ 比を示すことで知られている) ではなく、更になお $[\alpha/\text{Fe}]$ 比が低いことから別の (質量がより小さい) 矮小銀河の合体に起因するものであろう、と帰結したのである。これはハローの形成史を理解する上で重要である。

そして第三のテーマは星震学を利用して年齢を決定した運動学的・組成的に異なるハローグループの赤色巨星に対する精密化学組成解析である。出願者は高精度測光による星震学的手法で年齢を決定出来る Kepler 領域の星から運動学的情報を基にハロー種族の赤色巨星二十数個を注意深く選び出し、ハワイの 8.2m すばる望遠鏡を用いて得られた高分散スペクトルを基に詳細な化学組成解析を行った。特に運動学的にも性質の異なる $[\alpha/\text{Fe}]$ 比が高いグループと低いグループに着目し、 $\alpha$  元素のみならず合成過程の異なる s プロセス元素や r プロセス元素などについても組成を求めてその特徴と年齢 (質量) との関係について考察を行った。その結果我々の銀河系の中で生まれたと思われる $[\alpha/\text{Fe}]$ の高いグループは $< \sim 1$  億年の短いタイムスケールで、一方矮小銀河 Gaia-Enceladus に由来するとみなされている $[\alpha/\text{Fe}]$ の低いグループは $\sim 1-3$  億年のタイムスケールで、形成されたと結論するに至った。一方両グループとも内部の年齢の散らばりは $< 20$  億年とそう大きくなく、また平均年齢差 (前者が後者よりやや古い) も $< 40$  億年という結果となった。これは矮小銀河の衝突がからむハローの進化を理解するために重要な観測的制約を与えるものである。

これら三つの研究はいずれも完成度が高く、①と②はすでに査読論文として出版されており③も近く投稿予定とのことである。結論として、本論文は我々の銀河系の構造と進化の解明という究極の目標にそれぞれ異なるアプローチで迫ろうとするもので、恒星物理学と銀河物理学が融合した銀河考古学という新たな分野に大きなインパクトを与えるものと高く評価される。

以上の理由により、審査委員会は本論文が学位の授与に値すると判断した。