

氏 名 深川 奈桜

学位(専攻分野) 博士(学術)

学位記番号 総研大甲第 2521 号

学位授与の日付 2024 年 9 月 27 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 Chemical Evolution of Dwarf Galaxies

論文審査委員 主 査 富永 望
天文科学コース 教授
岡本 桜子
天文科学コース 助教
石垣 美歩
天文科学コース 助教
千葉 証司
東北大学 大学院理学研究科 教授
本田 敏志
兵庫県立大学 自然・環境科学研究所 准教授

Summary of Doctoral Thesis

Name in Full : Nao Fukagawa

Title : Chemical Evolution of Dwarf Galaxies

In the low-metallicity environment, rare events are expected to impact the chemical abundances. Also, nucleosynthesis products of stars can vary with the properties, and thus the relative contribution of astrophysical sources of elements may not always compared to that in the solar neighbourhood.

Dwarf galaxies have small masses in stars and low average metallicities. Also, low-mass galaxies tend to have in average low star formation rate. Since the number of stars formed from the gas tends to be small and that astrophysical events can sporadically appear, these rare events are expected to impact the chemical abundance of the interstellar medium, especially in environments where the abundance of heavy elements is low.

In this thesis, we investigate the chemical evolution of dwarf galaxies by comparing observed quantities about stars and gas to those predicted by theoretical models and mainly discuss (i) astrophysical sources of the chemical enrichment and (ii) the impact of rare events on the chemical abundance in the low-metallicity environment.

We define rare events and introduce the stochasticity into the occurrence of the astrophysical events in the chemical evolution model to take into account the ejection of nucleosynthesis products released by astrophysical events that appear with low occurrences. In the model, the chemical evolution proceeds through the gas accretion, the star formation and the gas outflow. Under the assumption that physical quantities related to the nucleosynthesis (e.g. stellar yields) among different systems, including the Milky Way (Chapter 2) and dwarf galaxies, we include massive stars of different initial rotating velocities, low- and intermediate-mass stars, type-Ia supernova and the r-process candidates (neutron star merger and collapsar) in the source of the chemical enrichment. The number of these events is estimated from the star formation history derived for individual dwarf galaxies, and the rates of the gas accretion and the outflow are roughly determined based on metallicity distributions of long-lived stars.

Among satellite galaxies around the Milky Way, we focus on Sculptor and Sextans dwarf spheroidal galaxies (dSphs). The star formation history of the dSphs is similar in that the star formation rate peaks at the early time of the evolution and then decreases. The mass in stars of Sculptor dSph is about six times larger than that of Sextans dSph. We estimate the occurrence of the astrophysical sources in each time-step with the star formation history of Sculptor and Sextans dSphs derived from the colour-magnitude diagram. Due to the low star formation rate, the astrophysical sources, especially the r-process candidates, can be rare.

By comparing abundance ratios of stars in the dSphs to those predicted by the model, we discuss the research questions (i) and (ii) above. With regard to the contribution of rotating massive stars to the nitrogen abundance, the surface of the red giant stars can be changed due to mixing (e.g. first dredge-up and thermohaline mixing) in the earlier phase of the evolution. Also, massive asymptotic giant branch stars can produce a large amount of nitrogen. Although the contribution of nitrogen has to be assessed with caution, the model with rotating massive stars predicts higher $[N/Fe]$ ratios ($[A/B] = \log_{10}(N_A/N_B) - \log_{10}(N_A/N_B)_{\text{sun}}$, where N_A and N_B denote the abundance of A and B) than the model without rotating massive stars, which suggests that rotating massive stars can contribute to the chemical evolution of the dwarf galaxies.

As for trans-iron elements, $[Eu/Fe]$, $[Sr/Fe]$ and $[Ba/Fe]$ predicted by the model show that the impact of rare r-process events on the abundance ratios appears as the oscillation and the amplitude seems larger at lower chemical abundances. Also, the amplitude of the oscillation seen in the abundance ratios predicted for Sextans dSph seems larger than that for Sculptor dSph, which suggests that rare events can influence more the chemical abundance of lower-mass galaxies.

With regard to the astrophysical sources of trans-iron elements, comparisons of abundance ratios predicted by the model show that in average r-process sites can contribute more at the low metallicity, and the contribution of rotating massive stars to the abundance ratio through the weak s-process is seen at $[Fe/H] > -2$, partly due to the low abundance of seed nuclei of the s-process at the low metallicity.

However, it does not mean that rotating massive stars do not contribute to the enrichment of trans-iron elements at the low metallicities. In a context of hierarchical galaxy evolution, individual events enrich the interstellar medium of less massive building-block dwarf galaxies in heavy elements. By investigating a simple case, we observe that the different chemical histories of the building-block dwarf galaxies can be reflected in the abundance ratio of a merged dwarf galaxy. Since the r-process events sharply increase the ratios, the upper part of the dispersion in $[Eu/Fe]$, $[Sr/Fe]$ and $[Ba/Fe]$ is created by the r-process. Also, rotating massive stars of different initial rotating velocities enrich each building-block galaxy in Sr and Ba, which can increase the averages of the $[Sr/Fe]$ and the $[Ba/Fe]$ ratios and create part of the dispersion. We also show that $[Sr/Fe]$ and $[Ba/Fe]$ of part of the stars in ultra-faint dwarf galaxies can be explained by the contribution of rotating massive stars through the weak s-process.

Through comparisons between observational data about stars and gas (metallicity distribution of long-lived stars, chemical abundances of supergiants and HII regions and gas fraction) and the model predictions, we explore the chemical evolution of star-forming dwarf galaxies of different star formation histories. Despite the uncertainty associated with the observational data and the simplicity of the model, we discuss that the variation in the star formation rate can be reflected in the occurrence of astrophysical sources that release the nucleosynthesis products on different time-scales and also in the evolution of abundance

ratios.

The results and the discussions in this thesis support the idea that (i) the relative contribution among astrophysical sources depends on the star formation history, the time-scale on which the source releases the nucleosynthesis products, the occurrence and the appearance of individual events, and the properties of individual stars. Also, (ii) since astrophysical events can appear sporadically, the impact of individual events on abundance ratios can be large when the mass of the system is small and/or the star formation rate is low and when the chemical abundance is low.

In the thesis, we show that massive stars of different initial rotating velocities enrich each building block dwarf galaxies in trans-iron elements through the weak s-process and create part the dispersion in the abundance ratios with simple models where the stochasticity is introduced as rarity in a unique way. Finally, the discussions with stellar and gas-phase data expand scopes of future studies on the astrophysical sources of various elements, including trans-iron elements, and the chemical enrichment in dwarf galaxies of different star formation histories and types.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 深川 奈桜

Title
論文題目 Chemical Evolution of Dwarf Galaxies

ビッグバン直後の宇宙には水素とヘリウムと少量のリチウムしか存在しなかった。その後、様々な元素合成サイトにおいて、炭素より重い重元素が合成され少しずつ宇宙に増えていくことにより宇宙は進化した。この進化を宇宙の化学進化と呼ぶ。

宇宙の化学進化を探る研究は、銀河系や矮小銀河に存在する宇宙初期に形成された寿命の長い小質量星と化学進化モデルの比較を通じて行われる。これらの小質量星は形成当時の宇宙の元素組成を現在に伝える。化学進化モデルとしては、銀河全体を一領域として近似したモデルがよく使用される。一領域近似を用いた化学進化モデルでは、様々な元素合成サイトによる重元素の合成・放出と銀河への質量降着・放出を合わせて解くことにより、宇宙初期から現在までの重元素量の進化を求めることができる。化学進化モデルと観測の比較により、観測を再現するために必要な、様々な元素合成サイトの寄与や銀河への質量降着・放出量を求めることが可能となる。本研究は、これにより、(i) 化学進化に寄与した元素合成サイトの性質、(ii) 低金属量環境下での元素組成に対する発生率の低い元素合成サイトの寄与を議論した。

出願者は、重力崩壊型超新星、Ia型超新星、rプロセス元素源（中性子星合体、コラプサー）、中低質量星からの質量放出、高速自転する大質量星といった様々な元素合成サイトによる重元素放出を取り入れ、一領域近似を用いた化学進化モデル計算を行った。まず、銀河系の化学進化を計算し、用いた化学進化モデルによって、銀河系の金属量、金属量分布、ガス割合や様々な元素の進化が無矛盾に説明できることを示した。

次に、発生率の低い元素合成サイトの寄与を間欠的に取り扱う手法を新たに提案し、その手法を用いて矮小銀河の化学進化計算を行った。本計算によって得られた結果を同様の星形成史をもち質量の異なる矮小楕円体銀河 **Sculptor** 銀河、**Sextans** 銀河の元素組成比と比較した。その結果、高速自転する大質量星が存在すれば、これらの銀河の窒素量を説明可能であることを示した。また、rプロセス元素源の発生率が低いことにより、中性子捕獲元素の元素組成比の進化に振動が見られることを示した。この振動の大きさは金属量が増えると小さくなり、また質量の小さい **Sextans** 銀河では **Sculptor** 銀河より大きい振動がみられることを示した。これにより、発生率の低い元素合成サイトの間欠性によって低質量銀河に見られる元素組成比の分散を説明できることを示した。また低質量銀河では高速自転する大質量星による s プロセス元素の合成の影響が比較的高金属量まで見られることを示した。

さらに、銀河の階層的進化に基づき、小さな矮小銀河が合体して現在観測されるような矮小銀河が形成される場合には、小さな矮小銀河における化学進化の影響が矮小銀河で現

在観測される元素組成比の分散を説明しうることを示した。

その他、同様の手法を星形成史の異なる矮小楕円体銀河 **Fornax** 銀河、**Carina** 銀河、現在も星形成を行っている矮小不規則銀河 **Wolf-Lundmark-Mellote** 銀河、**Barnard** 銀河、**I Zwicky 18** 銀河に適用し、それぞれの銀河におけるそれぞれの元素合成サイトの寄与を議論した。

本研究では、出願者が新たな発生率の低い元素合成サイトを取り扱う手法を提案し、それを用いた一領域近似を用いた化学進化モデル計算を行い、銀河系、矮小銀河の観測との比較を行った。それにより、得られた結果に基づく考察、論文の執筆も含めて出願者が主体的に行った。

これまで発生率の低い元素合成サイトの間欠性を考慮した一領域近似を用いた化学進化モデルが構築されたことはなく、発生率の低い元素合成サイトの間欠性が低質量銀河や低金属量環境で重要であることを定量的に示した点は特に価値が高い。

以上に基づき、審査委員全員一致で学位の授与に値すると判断した。