

氏 名 石川 裕之

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2219 号

学位授与の日付 2021年3月 24日

学位授与の要件 物理科学研究科 天文科学
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 Detailed Characterization of Nearby M Dwarfs with
High-Resolution Near-Infrared Spectroscopy

論文審査委員 主 査 泉浦 秀行
天文科学専攻 准教授
深川 美里
天文科学専攻 教授
原 弘久
天文科学専攻 准教授
犬塚 修一郎
名古屋大学 大学院理学研究科 教授
河原 創
東京大学 大学院理学系研究科 助教

(様式3)

博士論文の要旨

氏名 石川 裕之

論文題目 Detailed Characterization of Nearby M Dwarfs with High-Resolution Near-Infrared Spectroscopy

M dwarf stars are the most numerous constituents of the Galaxy and recently observed intensively as prominent targets of planet search projects. Their chemical composition is crucial to understand the formation process and internal structure of orbiting exoplanets. However, measurements of elemental abundances of M dwarfs have been limited due to difficulties in the analysis of their optical spectra.

In this thesis, we report the abundance ratios of individual elements of M dwarfs in the solar neighborhood, including the mid- to late-M subtypes with effective temperature ($T_{\text{eff}} < \sim 3200$ K) that has not been well studied by previous studies. This enables the first understanding of the elemental abundance distribution of nearby M dwarfs as promising planet-host candidates.

We firstly conducted a detailed chemical abundance analysis of five M dwarfs ($T_{\text{eff}} \sim 3200\text{--}3800$ K), which form binary systems with G/K-type stars, by performing a line-by-line analysis based on high-resolution ($R \sim 80,000$) near-infrared (960–1710 nm) spectra obtained with CARMENES (Calar Alto high-Resolution search for M dwarfs with Exo-earths with Near-infrared and optical Échelle Spectrographs). We determined the chemical abundances of eight elements (Na, Mg, K, Ca, Ti, Cr, Mn, and Fe), which are in agreement with those of the primary stars within measurement errors (~ 0.2 dex). This means the analysis method is reliable under this precision, given the reasonable assumption that the chemical abundances of stars in a binary system are identical.

Through the analysis process, we investigated the unique behavior of atomic lines in a cool atmosphere. Most atomic lines are sensitive to changes in abundances not only of the corresponding element responsible for the lines but also of other elements, especially dominant electron donors such as Na and Ca, through the change in continuous opacity. The Ti I lines show a negative correlation with the overall metallicity at $T_{\text{eff}} < 3400$ K due to the consumption of neutral titanium by the formation of TiO molecules. These findings indicate that, to correctly estimate the abundance of any element or the overall metallicity, it is needed to determine the abundances of other individual elements consistently.

We subsequently applied the verified abundance-analysis technique to 13 objects ($2900 < T_{\text{eff}} < 3500$ K) among the targets of the IRD-SSP (InfraRed Doppler planet search project in the framework of the Subaru Strategic Program), which consists of nearby M dwarfs. We used the high-quality spectra obtained in the IRD-SSP to determine the abundances of eight elements (Na, Mg, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, and Sr) for all 13 M dwarfs. The abundances of three additional elements (Si, K, and V) were also determined for the hottest one.

The resulting metallicities of these M dwarfs, represented by $[\text{Fe}/\text{H}]$ values, agree with previous metallicity estimates by medium-resolution K-band spectra within the error margin. The values range from approximately -0.6 to $+0.4$ centered at around 0.0 . The abundance ratios of individual elements with respect to Fe, determined for the first time in the present work, are generally aligned with the solar values within the measurement errors in all M dwarfs. An exception is GJ 699 (Barnard's star) that shows a small departure from the solar abundance ratios.

The abundance ratios of individual elements are comparable to those of FGK stars in the solar neighborhood, most of which belong to the thin disk population. The wide distribution of metallicity, however, suggests a few of them could be thick disk stars. The Galactocentric space velocities UVW , which are calculated from the radial velocities we measured from the IRD spectra and the astrometric measurements of the Gaia mission also suggest that a couple of M dwarfs studied in Chapters 2 and 3 show similar features to FGK stars classified into the thick disk.

The wide distribution of metallicity could have an impact on planet formation around M dwarfs. Whereas scaled solar abundances were found for the 13 objects studied in the present work, different abundance ratios could be found in a larger sample, given that the existence of thick disk stars is suggested. Abundance measurements of individual elements are required to determine accurate metallicity and to characterize planets found by the IRD-SSP and other planet searches.

This study provides the first reliable elemental abundances from the line-by-line analysis for a homogeneous sample of nearby M dwarfs, especially including more than 10 objects with T_{eff} less than 3200 K that have not been previously investigated. We also show the possibility of locating M dwarfs on the Galactic chemical evolution based on the elemental abundance ratios. The future extension of the analysis to all the targets of the IRD-SSP and other planet search projects around M dwarfs will lead to a further understanding of the abundance distribution of M dwarfs. This will be useful to explore the relation between the chemical composition of M dwarfs and

properties of the orbiting planets and constrain planet formation theories around the most ubiquitous stars in the Galaxy.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 石川 裕之

論文題目 Detailed Characterization of Nearby M Dwarfs with High-Resolution Near-Infrared Spectroscopy

M型矮星は近傍宇宙においてもっとも数多く存在する恒星である一方、最も小質量かつ最も低温の恒星であり、その寿命は宇宙年齢を超える。しかしながら、M型矮星の物理・化学的特性、特にその元素組成はあまりよく理解されていない。M型矮星の放射スペクトルが可視域でたいへん暗く観測が困難な上、分子の複雑なバンド吸収線に支配され伝統的な元素組成解析の手法が全く適用できないためである。しかし、近年の近赤外線領域の高感度・高分解能の分光観測の発展に伴い、ようやく酸素、炭素、鉄の存在量の研究が進み始めた。しかし、それ以上に詳細な元素組成の導出は依然として困難を極めている。この元素組成解析の壁がM型矮星の研究、さらには、M型矮星を組み込んだ恒星種族や銀河系構造の研究を阻んできており、その打破が望まれている。さらにM型矮星は、近年、系外惑星、特にハビタブルゾーンにある地球型惑星を見つけ出す対象として脚光を浴びている。それに伴い、ハビタブルゾーン惑星の特質や真のハビタビリティを調べるため、ホストであるM型矮星の特質に関する情報も重要となり、M型矮星の元素組成解析に新たな関心が集まり始めている。このように現在、M型矮星のより詳しい元素組成の解明が多方面で必要とされている状況にある。

本研究は、そのような情勢を背景に、M型矮星の詳細な元素組成解析の開拓を試みたものである。出願者はまず、GまたはK型の矮星と連星をなす5つのM型矮星の近赤外線高分解能スペクトルを、スペインにあるカラール・アルト天文台の3.5m望遠鏡に取り付けられたCARMENES分光器で取得されたデータのアーカイブ、並びに、同CARMENESを用いたサービス観測から入手した。そのスペクトルに対し、モデル大気とスペクトル合成モデルを慎重に適用し、途中スペクトル線の特異な振る舞いを同定しつつ、素性の良いスペクトル線だけを選び出し、詳細な解析を統一的に進めた。その結果、各星において周期表でナトリウム以降の8種の元素の存在量を導出することができた。それらの値を文献で報告されている主星のG、K型星の元素存在量と比較し、約0.2 dexの範囲内で一致することを見出した。これにより出願者は構築した当該解析法の妥当性を確認し、高分解能近赤外線スペクトルに基づきM型矮星の個々の元素の存在量を求める解析手法を確立することに成功した。そしてこの成果を欧文査読論文として出版した。

次に出願者はその手法を、すばる望遠鏡の赤外ドップラー法観測装置IRDを用いて得られた13個のより低温のM型矮星の近赤外線高分解能スペクトルに適用し、同様にそれぞれの星で8種の元素について個別に存在量を導出した。この13星の個別元素存在量について高分解能スペクトルに基づく初めての導出であり、特に有効温度3200Kを下回る低温のM型矮星で鉄、チタン以外の元素存在量を決定したのは世界初の成果である。出願者

は、少数サンプルではあるがこの 13 星の金属量分布が一桁近い幅を持ち太陽近傍 F、G、K 型矮星のそれに近いことを見出した。また過去に F、G、K 型矮星で調べられてきたように、各種元素間の存在量比と空間運動の情報を用いて、本研究で解析した全 19 星について銀河系の恒星種族の弁別を試みた。その結果、ほぼ全てが薄い円盤成分に属するとの結論を得る一方、少なくとも一星については厚い円盤成分に属する可能性を見出し、M 型矮星に基づく銀河系研究の新たな可能性を示唆した。これらの成果は学術的に新しく優れた価値を持ち高く評価できるものである。

以上により審査委委員会は、本論文が学位の授与に値すると判断した。