

氏 名 八田 良樹

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2221 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 Asteroseismology of a Possible Blue Straggler Star
KIC11145123

論文審査委員 主 査 青木 和光
天文科学専攻 准教授
鹿野 良平
天文科学専攻 教授
関口 和寛
天文科学専攻 教授
李 宇珉
東北大学 大学院理学研究科 准教授
比田井 昌英
東海大学 名誉教授

(様式3)

博士論文の要旨

氏名 八田 良樹

論文題目 Asteroseismology of a Possible Blue Straggler Star KIC11145123

Asteroseismology, a branch of stellar physics where we infer interiors of stars based on measurements of stellar oscillations, has been firmly established with the advent of the space-borne missions such as MOST, CoRoT, Kepler, and TESS, enabling us to identify evolutionary stages and investigate internal structure and internal dynamics of the stars; the interiors of the stars are no longer observationally inaccessible places for us, and a large number of asteroseismic studies have been currently greatly contributing to the development of stellar physics in the way the other branches have not been able to do.

KIC 11145123 is one of the Kepler targets, and it has been actively studied asteroseismically. Its well-resolved frequency splittings for p, g, and mixed modes have allowed us to reveal various fascinating aspects of the star, among which there remain two important issues to be solved.

The first issue is related to its evolution. Spectroscopic analyses of the star with Subaru/HDS indicate that the star is a blue straggler star, thought to be born via some interactions with other stars. Although all of the previous theoretical models of the star are computed assuming single-star evolution, high initial helium abundances of >0.30 are preferred, which partly supports the possibility that the star has experienced some interactions during the evolution. However, non single-star evolution where such interactions are taken into account has not been tested yet. To construct such a non-standard model of the star is one of the primary goals of this dissertation.

The second issue is related to the internal rotation of the star. Based on detailed asteroseismic analyses of the star, it has been pointed out that the convective core of the star is rotating around 5 times faster than the other regions of the star. This suggestion is of great importance because the current understanding of the stellar internal rotation obtained based on the other asteroseismic researches is that stars are rotating almost rigidly throughout them without any strong velocity shear inside them. Nevertheless, the suggestion of the fast core rotation is still far from being a convention in the community because of the model-dependence of the inference, leading to the second goal of this dissertation, namely, to infer the internal rotation of the star based on another model (which is actually the model obtained in the non-standard modeling)

to check whether the suggested fast-convective-core rotation really exists or not.

The non-standard modeling of the star is conducted with two steps. In the first step, a number of stellar models for some parameter range are calculated assuming single-star evolution, and models reproducing the observed pattern of g-mode period spacings ΔP_g are chosen as "candidate models". The grid-based modeling results in the overshooting parameter $f_{\text{ovs}} \sim 0.027$ for low-mass range (1.2-1.6 solar mass). The sum of squared residuals normalized by the observational uncertainties between the modeled g-mode frequencies and the observed ones is smaller ($\sim 3 \times 10^5$) than that for the previous models ($\sim 10^6$). In the second step, the chemical compositions in the envelopes of the "candidate models" obtained in the first step are modified (fixing the deep regions of the models so that the g-mode frequencies are not affected) based on a novel scheme developed in this dissertation. Another set of parameter range is prepared, and grid-based modeling is carried out to find the best model which reproduces the observed p-mode frequencies best. The best model thus constructed has the following parameters: $M = 1.36$ solar mass, $Y_{\text{init}} = 0.26$, $Z_{\text{init}} = 0.002$, $f_{\text{ovs}} = 0.027$, and $\text{Age} = 2.169 \times 10^9$ years old. The modification is down to the depth of $r/R \sim 0.67$ and the extent is $\Delta X \sim 0.06$ (ΔX is a difference in hydrogen abundance between the candidate model and the modified model) at the surface. The residuals between the model and the observation are comparable with those for the previous models, suggesting that it is possible that the star was born with a relatively lower initial helium abundance of ~ 0.26 compared with that of the previous models (> 0.30) and then experienced some modification of the chemical compositions in the envelope.

Based on the envelope-modified model, we have carried out rotation inversion with one of the most standard methods, the Optimally Localized Averaging (OLA) method, and we have also compared the results with the ones which were obtained based on the previous model of the star (computed assuming single-star evolution). We do not see a strong model dependence in the results, and the results are generally common for the two models. The deep radiative region is rotating slightly slower than the envelope does as has been indicated by Kurtz2014 et al. (2014). The latitudinally differential rotation has been confirmed with significance more than 2σ in a rather model-independent way, where the high-latitude region is rotating slightly faster than the low-latitude region is. We have also confirmed the hint for the fast-convective-core rotation for both models.

Resolutions for the two issues concerning KIC 11145123 are thus given by this dissertation. Firstly, the possibility that the star has experienced some interactions during the evolution has been tested for the first time. Though we cannot exclude

another possibility that the star has evolved as a single star throughout its life, the results of the test favors a scenario where the envelope of the star has been somehow modified, which is consistent with the formation channel of blue straggler stars. Secondly, the existence of the fast-core rotation is confirmed for both the standard model and the non-standard model, showing little model dependence of the inference. This result should shed new light on the current understanding of the stellar internal rotation, and it also could be an important constraint on theoretical works focusing on the angular momentum transfer inside stars.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 八田 良樹

論文題目 Asteroseismology of a Possible Blue Straggler Star KIC11145123

恒星の内部構造とその進化の解明は天文学の重要課題として研究が積み重ねられている。電磁波で直接観測されるのは恒星の表面だけであるが、その明るさや恒星表面の速度場による視線速度の時間変化から恒星の振動を測定することにより、内部の構造や回転を推定することができる。この研究分野は星震学と呼ばれ、近年の宇宙望遠鏡による高精度測光観測により急速な進展を見せている。これにより、かつては太陽に対してのみ可能であった恒星内部の観測的研究が様々な質量・化学組成・進化段階の恒星に拡張されている。

出願者は研究対象として KIC11145123 という恒星に着目し、その内部構造と回転速度分布を星震学の手法で多面的に調べた。恒星の振動には、圧力を復元力とする音波モード (p モード)、浮力を復元力とする重力波モード (g モード)、およびそれらが組み合わさった混合モードの 3 種類が存在し、それぞれ恒星内部の深さの違う層の構造を反映することが知られている。また、固有振動数は星の回転を反映して分裂する場合がある。KIC11145123 は太陽よりやや質量の大きな主系列星段階にある天体であり、そのなかでは 3 つの種類の振動モードが検出され、しかも星の回転に起因する固有振動数の分裂も明確に見られる数少ない天体のひとつである。データはケプラー宇宙望遠鏡による 4 年にわたる観測で得られたもので、この高精度データを説明できる恒星内部構造モデルが求められている。しかも先行研究により、この天体は太陽に比べると金属量が低く、振動の特徴を説明するには高いヘリウム組成 (相対的に低い水素組成) を仮定する必要があるという報告があり、その起源の解明という点でも関心を集めている天体である。出願者はこれを説明するのに単独星の進化だけでなく、他の恒星との相互作用を想定したモデルも検討し、星の振動への影響を調査してその包括的な理解を試みた結果を報告している。

本論文は 5 章からなる。第 1 章では導入として太陽質量よりもやや重い恒星の構造進化の標準的な理論を概説し、それに対して用いられる星震学の手法と最近得られている結果を報告している。そこでは 3 種類の振動モードとそれによって得られる恒星内部構造の情報が整理されている。そして今回の対象である KIC11145123 についてのこれまでの研究として、標準的な恒星モデルにもとづいた星震学的解析 (Kurtz et al. 2014) の結果や、分光観測による表面組成の測定結果 (Takada-Hidai et al. 2017)、および自身が筆頭著者となつて行った自転角速度の 2 次元分布を含めた星震学的解析 (Hatta et al. 2019) の結果が概説されている。特にこの天体は、他の恒星との相互作用により質量の増加や化学組成の変化といった影響を受けた「青色はぐれ星」と呼ばれる星である可能性があるとしてされている。これをふまえ、本論文の課題として、この恒星の特殊性を生み出した恒星進化過程の解明

と、過去の研究で示唆された内部対流コアの速い自転の検証が提示されている。

第2章では、gモードの振動スペクトルにおける隣り合うモードの周期の間隔から得られる恒星の深部構造について詳述されている。この周期の間隔は中心部付近の化学組成の変化に敏感であり、主系列段階において中心部で水素の核融合によりヘリウムの生成が進むと周期の間隔の平均値が短くなることから、恒星の進化段階、すなわち年齢を推定することができる。また周期の間隔を振動周期の関数としてプロットして得られるパターンは化学組成の分布の急激な変化を反映することから、それに影響する元素の拡散過程や混合過程を制限する情報となる。出願者は恒星モデルを構築し、gモード振動の解析を行うことにより、KIC11145123は中心部の水素が枯渇しつつある主系列星段階末期にあることを確認し、元素の拡散過程が何らかの混合過程により抑制されているという結果を得た。本章の成果はこの天体に限定されるものではなく一般性をもっており、発展性のあるものと評価できる。

第3章では、この星が青色はぐれ星である可能性があることから、外部からの質量降着により外層の化学組成が変化した場合の振動を検討している。このために、標準的な恒星の進化計算の解に対して、静水圧平衡を保ちつつ外層部の化学組成を少しずつ変化させることで、非標準進化に対応する新たな恒星モデルを構築している。それにもとづき、外層の化学組成の変化が恒星振動に与える影響を評価し、質量降着によって起こる可能性がある水素組成の減少・ヘリウム組成の増加の結果、pモードの固有振動数が増加することを定量的に示した。

第4章では、第2、3章を踏まえ、KIC11145123のgモードの周期の間隔の平均値とパターンの概略を再現するモデルをもとにして外層の化学組成を変化させた非標準モデルを構築し、先行研究では星全体がヘリウム過多になっていると仮定することで説明されていたこの星のpモードの固有振動数を、外層の化学組成の変化によっても再現できることを示した。すなわち、他の恒星との相互作用に影響された青色はぐれ星であると解釈してもこの星の振動を再現できることが示されたことになる。一方、Hatta et al. 2019が恒星の回転による固有振動数の分裂を用いて示唆した非常に速い内部対流コア回転について、新たに構築されたモデルでより詳細な解析をgモードと混合モードに対して行い、やはり速い回転コアが存在することを示した。

第5章では上記の結果にもとづき、KIC11145123は標準的な化学組成をもって誕生したが、他の星と相互作用することにより外層の化学組成が変化したと解釈することが星震学の解析結果からも支持されること、一方で内部対流コアは非常に速い回転をもっていることを結論としている。

この研究は、宇宙望遠鏡による観測データで恒星振動の詳細を最もよく調べることができる天体のひとつであり、しかも恒星進化の観点でも興味深い天体であるKIC11145123を独自のモデルで調べ上げたものである。この天体の起源の解明とともに、星震学の適用対象の幅を広げるといって波及性をもつものであると評価でき、博士（理学）の学位を授与できると認める。