

氏 名 長谷川 拓哉

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2150 号

学位授与の日付 2020 年 3 月 24 日

学位授与の要件 高エネルギー加速器科学研究科 素粒子原子核専攻  
学位規則第6条第1項該当

学位論文題目 MeV-scale reheating temperature and thermalization of  
active and sterile neutrinos in the early Universe

論文審査委員 主 査 教授 北野 龍一郎

教授 松原 隆彦

教授 長谷川 琢哉

講師 長谷川 雅也

准教授 郡 和範

助教 中山 和則

東京大学大学院

理学系研究科物理学専攻素粒子物理学講座

(様式3)

## 博士論文の要旨

氏名 長谷川 拓哉

論文題目 MeV-scale reheating temperature and thermalization of active and sterile neutrinos in the early Universe (再加熱温度が MeV スケールの宇宙におけるアクティブ及びステライルニュートリノの熱化)

Observations of light element abundances produced in the epoch of big-bang nucleosynthesis (BBN) have a great capacity to study physical phenomena in the early Universe. In addition, we can test underlying theories of cosmology and particle physics by comparing theoretical- and observed abundances of light elements. In this thesis, we especially focus on a possibility of an MeV-scale reheating temperature of the Universe, motivated by theories beyond the standard model of particle physics which include long-lived massive particles with masses around the weak scale  $\sim O(100)$  GeV, decaying only through gravitational interaction.

The other main focus of this thesis is on neutrino physics. Neutrinos play important roles in cosmological phenomena in the early Universe. This is because they are one of the most abundant species in the early Universe and therefore closely related to an expansion history and dynamics of the Universe. For this reason, it is important to understand a property and a behavior of neutrinos in extreme environments realized in the hot Big-Bang Universe. Apart from a cosmological interest, neutrino physics have been drawing strong attention to many physicist working in vast research fields such as the astrophysics, particle physics, nuclear physics, astronomy, and cosmic ray physics. In order to provide a deep understanding and a verification of physics related to the above fields, many observational- and experimental programs have been performed in the past, e.g. neutrino oscillation experiments, neutrino-less double beta decay experiments, neutrino mass measurements. Especially, a theoretical prediction of neutrino oscillation, the transition from a state of one flavor to another, has been experimentally verified, and many researchers currently believe that it should be a clear evidence of the physics beyond the standard model of particle physics. In addition, a lot of future neutrino experiments are planned. Relevant to neutrino physics, we also look into a possible existence of sterile neutrinos with a wide range of masses, motivated by a long-standing problem present in the short-baseline neutrino oscillation experiments and a possibility that sterile neutrinos constitute the dark matter.

This thesis is mainly based on our studies summarized in Refs. [1-2], both of which focus on the possibility of the MeV-scale reheating temperature, but their purposes are different; an aim of Ref. [1] is to investigate a lower bound on the reheating temperature, and that of Ref. [2] is to explore a possibility of sterile neutrinos with a wide range of masses in the range of  $O(\text{eV})$  to  $O(\text{keV})$  from cosmological point of view.

In Ref. [1], we perform a numerical computation of the neutrino thermalization in the reheating and evaluate its effects on production of light elements. As a result, we obtain the lower bound

on the reheating temperature  $TRH > 1.8$  MeV when a massive particle X responsible for the reheating dominantly decays into radiation, namely photons or charged leptons. Meanwhile, we obtain  $TRH > 4 - 5$  MeV when X dominantly decays into hadrons, namely quarks or gluons, depending on the mass of X and the hadronic branching ratio of the decay. In addition, we find that neutrino oscillation and neutrino self-interaction increase the efficiency of neutrino thermalization and decrease the exchange rate between neutrons and protons, thereby enhancing the theoretically expected abundances of helium,  $Y_p$ , and deuterium, D/H. These effects increase the minimum value of the reheating temperature at the level of  $O(10)\%$  in the case of the 100% radiative decays and  $O(1)\%$  in most cases of hadronic decays.

In Ref. [2], we calculate a thermalization of sterile neutrinos and find that an existence of eV-scale sterile neutrinos, inferred from experimental results of short-baseline neutrino oscillation experiments, is consistent with cosmology if  $TRH \sim O(1)$  MeV, in contrast to the case of the standard big-bang model. Also, we show that an existence of keV-scale sterile neutrinos, which is a plausible candidate of the dark matter, is still consistent with observations of X-rays, BBN, and CMB even if they have an appreciable mixing with active neutrinos. This opens a new window on directly detecting such sterile neutrinos in laboratory experiments such as KATRIN and its upgraded version with TRISTAN detector.

[1] T. Hasegawa, N. Hiroshima, K. Kohri, R. S. L. Hansen, T. Tram, and S. Hannestad, “MeV-scale reheating temperature and thermalization of oscillating neutrinos by radiative and hadronic decays of massive particles”, *JCAP* **12** (2019) 012 [arXiv: 1908.10189].

[2] T. Hasegawa, K. Kohri, S. Wang, R. S. L. Hansen, T. Tram, and S. Hannestad, “MeV-scale reheating temperature and cosmological constraints on sterile neutrinos”, In preparation (2019).

## 博士論文審査結果

Name in Full  
氏名 長谷川 拓哉

論文題目 MeV-scale reheating temperature and thermalization of active and sterile neutrinos in the early Universe

長谷川拓哉氏の学位論文は、宇宙のインフレーション後の再加熱温度に対する下限値を、理論的考察と観測との比較により与える研究に基づいている。特に、宇宙初期のプラズマ中で起こるニュートリノ振動を伴うニュートリノの熱化のプロセスに着目している。長谷川氏は日欧の共同研究者と共に、ニュートリノの熱化と振動の効果を同時に計算する方法の定式化を行い、高い精度で数値計算を行った。そしてビッグバン元素合成のコードと組み合わせて計算を行い、生成される重水素やヘリウムなどの軽元素の理論値を得た。これを軽元素の観測値と比較することにより、宇宙の再加熱温度の下限として 1.8 MeV 以上という値を得た。この数字は再加熱を引き起こす重い粒子が光子などの電磁的な放射に崩壊するという場合の結果であるが、クォークなどへ崩壊するハドロンのモードについての解析も同時に行なっている。また、ニュートリノに 4 番目の成分があるとするステライルニュートリノ説の場合についても検討しており、実験から示唆されるモデルパラメータと宇宙論との整合性についても議論している。プロジェクトの一部の結果はすでに、一編が英文学術誌に出版されている。また、別のもう一編は英文学術誌への投稿準備中の論文として用意されている。これらの結果は学術的に十分な価値が認められるものであり、博士論文の内容として必要な水準を満たしている。

本論文の構成は次の様になっている。まず、2 章から 4 章において、宇宙論、ビッグバン元素合成、ニュートリノ振動という鍵となる理論の基礎事項が要領よくまとめられている。次に、5 章と 6 章において、上で述べた、MeV スケールの再加熱温度についての下限と、ステライルニュートリノのモデルパラメータへの制限がオリジナルな研究結果として議論されている。申請者は審査会と公開発表会において、多数の質問について適切に回答した。また先行研究の成果と比較しつつ本研究の新しい点について明確に述べていた。こうした審査会の様子から、高い基礎学力と、研究能力を充分持っていると判断される。論文全体は、平易な英文で書かれている。また、長谷川氏の研究成果は、物理学会や国際会議においてすでに発表されていて、国際会議では英語での発表を複数回行ってきた。そのため、十分な英語力を持っていることが認められる。論文全体として、素材の選択、構成が的確である。レビュー部分である前半は、このテーマについての基本的な参考文献として使える内容となっている。また、共同研究に基づくものであるが、問題設定や具体的な計算、物理的意義の検討すべての面において長谷川氏が中心的な寄与をしたと認められる。以上の理由により、本論文を博士論文にふさわしいと判断した。