

氏 名 高橋 晴輝

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2650 号

学位授与の日付 2026 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 Axion search with high-energy gamma-ray observations

論文審査委員 主 査 冬頭 かおり
素粒子原子核コース 准教授
浦川 優子
素粒子原子核コース 准教授
遠藤 基
素粒子原子核コース 准教授
松原 隆彦
素粒子原子核コース 教授
郡 和範
天文科学コース 教授

博士論文の要旨

氏名： 高橋 晴輝

論文題目： Axion search with high-energy gamma-ray observations

Dark matter is a massive and invisible piece in the Universe. In chapter 2, we review observational evidences of dark matter at several scales and then summarize the general properties which dark matter candidates should have. Although dark matter is account for 26% energy of the Universe, we have not known what it really is. Several dark matter candidates have been discussed for a long time, including weakly interacting massive particles, primordial black holes, axions and so on. They have been investigated in cosmology, astrophysics, and particle physics. Especially, the QCD axion is a dark matter candidate also motivated as a solution to so-called strong CP problem. Axion-like particles are a kind of its generalization. The mass and coupling of the axion-like particles have no relation as opposed to the QCD axion. Models beyond the standard model often predict the existence of axion-like particles. The axions have been explored in several ways. Photons are one of the important probes and have the interaction with axions. This motivated us to search axions with magnetic field in the laboratory and in the Universe.

For example, axion helioscopes are trying to detect solar axions produced by the Primakoff process by imposing magnetic fields in laboratories. Axion haloscopes are searching axion dark matter in galactic halo with their cavity. So-called light shining through a wall experiments are on-going although their constraints are generically weaker than those by the helioscopes and the haloscopes. Observations of celestial objects are also one of ways to search axions, as discussed in Chapter 3. If there exist axions in the Universe, gamma-ray spectra can be distorted through the axion-photon conversion under magnetic fields in the Universe. Astrophysical sources have magnetic fields stronger than ones on the ground and are distant from the Earth, meaning that we naively expect relatively strong signatures from their observations. Actually, astrophysics have given us stronger constraints for lighter axions than the helioscopes. For example, gamma rays from extragalactic sources can indicate axion-induced signals in their spectra which gave us the constraints, in some axion mass range, exceeding ones by the CERN Axion Solar Telescope which is a helioscope. However, we should carefully take into account uncertainties arising from modeling of sources in astrophysics. Otherwise, such uncertainties can change significantly resulting constraints and make these results too optimistic or unreliable.

Axions have also been explored with gamma rays emitted by galactic sources such as supernova remnants and pulsar wind nebulae. For example, the Crab Nebula was used to constrain axions but an important piece was missing in reference: the magnetic field in the Crab Nebula. In Chapter 4 we consider the effects of magnetic fields in the Crab Nebula on axion search with gamma rays, and investigated possibilities that modeling of the magnetic fields should be cared. In reference, models of electromagnetic wave's emission have been developed for the Crab Nebula thanks to observational data sets from radio to gamma rays. The emission can be explained well using SSC emission model where synchrotron photons are radiated under magnetic fields of the Crab Nebula and kicked up by high-energy electrons in the Crab Nebula.

In this thesis, we discuss the axion search with the gamma-ray observations of the Crab Nebula. We considered the model of the variable magnetic field around the Crab Nebula. The magnetic fields are important not only for the SSC process but also the axion-photon conversion when axion-photon beams propagate through the Universe. This effect has not been taken into account in axion searches with gamma rays from the Crab Nebula so far. By considering the magnetic fields of the Crab Nebula, we obtain new constraints and exceeding the constraints by CAST in part of the axion mass range. This consideration can be applicable to other galactic sources. The analysis in this thesis will be a step forward to more precise constraints on axions with gamma rays.

Results of the Doctoral Thesis Defense

博士論文審査結果

Name in Full

氏名 高橋 晴輝

Title

論文題目

Axion search with high-energy gamma-ray observations

高橋晴輝氏の学位論文は、ダークマターの有力候補の一つである新粒子アクシオンについての彼の理論研究をまとめたものである。特に、新しいガンマ線観測を用いて、アクシオンと光子との結合定数 $g_{a\gamma\gamma}$ についてアクシオンの質量の関数として、全く新しい制限を課したことが中心課題となっている。

近年、ガンマ線の観測は目覚ましく発展しており、中国の LHAASO はエネルギーが 1PeV を越えるイベントを報告し始めた。これはガンマ線観測が素粒子実験としての天然の加速器、"PeVatron" とも形容される新たな段階に入ったことを意味する。高橋氏は銀河系内にある高エネルギー天体である Crab Nebula からの多波長観測に着目し、特にそのガンマ線が磁場中でアクシオンに変換されるプロセスに注目した。Crab Nebula で観測される電波から PeV ガンマ線までの幅広いスペクトルは、フェルミの1次加速電子をソースとしてみごとに説明できる理論が確立している。逆に言うと、アクシオン-光子変換が起こった場合、観測から即座にアクシオン-光子結合定数 $g_{a\gamma\gamma}$ への制限が得られるのである。高橋氏は、この考察から、過去の研究を大幅にアップデートしている。実は、過去の研究は、矛盾した理論モデルを用いており、Crab Nebula の内部の磁場が考慮されていないという致命的なミスがあった。高橋氏は、無矛盾な理論モデルを採用して過去の研究を修正したところ、自然にこれまでの制限より厳しい $g_{a\gamma\gamma} < 1 \times 10^{-11} \text{GeV}^{-1}$ という棄却領域を得ている。学位論文の構成は前半にダークマター全体のレビューパートとアクシオンの解説、後半に新しい計算を載せる予定となっている。プロジェクトの一部の結果は arXiv に発表され(arXiv:2511.19848)、Physical Review D 誌に投稿されている。すでに、コミュニティーから数々のポジティブな反応が寄せられているとも聞いている。

学位論文は英語で書かれ、学会発表や普段のセミナーでの英語発表を行ってきており、外国人研究者とも不自由なく議論することができる英語能力を有していることが認められる。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と判断し、高橋氏の博士論文本審査を合格と判定した。