

氏 名 鈴木 卓哉

学位(専攻分野) 博士(理学)

学位記番号 総研大甲第 2641 号

学位授与の日付 2026 年 3 月 24 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 Gamma-ray Observations and Primordial Black Holes
Dressed in WIMP Halos

論文審査委員 主 査 都丸 隆行
天文科学コース 教授
濱名 崇
天文科学コース 助教
高橋 亘
天文科学コース 助教
松田 智裕
埼玉工業大学 工学部 教授
廣島 渚
横浜国立大学 大学院工学研究院 准教授

博士論文の要旨

氏名：鈴木 卓哉

論文題目：Gamma-ray Observations and Primordial Black Holes Dressed in WIMP Halos

This dissertation aims to investigate two events, general relativistic effects on photon spectra and constraints on primordial black hole abundance, in the mixed dark matter scenario.

The primary objective of this study is to explore the viability of a mixed dark matter scenario, in which dark matter halos are formed via the gravitational capture of particle dark matter by primordial black holes. Dark matter is thought to constitute approximately 26% of the total energy density of the space, as inferred from various observational evidence such as cosmic structure formation, galactic rotation curves, and the cosmic microwave background. Nevertheless, its fundamental properties - such as its mass, cross-section, and lifetime - remain unknown. Resolving the nature of dark matter thus remains one of the most critical challenges in modern cosmology, particle physics, and astrophysics.

Among various theoretical candidates, increasing attention is being paid to the mixed dark matter scenario, in which both primordial black holes and particle dark matter (specifically WIMPs) coexist. Primordial black holes, which are believed to have formed from density fluctuations in the early universe, can gravitationally attract surrounding particle dark matter, leading to the formation of exceptionally dense halos. Also, the structure of these dark matter halos has been extensively discussed based on various numerical simulations. While the properties of the innermost region remain a subject of ongoing debate, the characteristics of the outer regions are well-established.

In this thesis, I focus on two primary investigations.

First, we investigate the unique general relativistic effects that arise in these environments. In the vicinity of a primordial black hole, the strong gravitational potential affects not only the dynamics of the particle dark matter decay or annihilation. Therefore, general relativistic effects are expected to leave distinctive signatures on the observed photon spectra. To address this, we developed a theoretical framework incorporating the Schwarzschild spacetime assuming non-rotating primordial black holes formed during the radiation dominated era. By modeling the halo as a static, spherically symmetric equilibrium state within general relativity, we consistently evaluate the resulting photon emission. These results were compared with

non-relativistic approximations to quantify the impact of gravitational redshift and spacetime curvature.

Second, we evaluate the fraction of primordial black holes relative to the total dark matter abundance. Various observational studies have already imposed stringent constraints on the fraction of primordial black holes within single component dark matter models. These limits are derived from diverse physical phenomena, including Hawking radiation for lower mass primordial black holes and gravitational lensing effects for those in higher mass ranges and so on. In contrast, the mixed dark matter scenario remains relatively unexplored despite its significance. Therefore, we calculated the expected photon flux by considering four distinct emission channels: the direct photon emission channel, and the secondary channels involving $b\bar{b}$, $\tau^+\tau^-$, and W^+W^- states. By applying these calculations to the mixed dark matter model and comparing the predicted fluxes with observational data from Fermi-LAT and MAGIC, we derived new constraints on the primordial black hole abundance.

Our analysis demonstrates that the mixed dark matter scenario introduces a novel perspective on the composition of the universe. For the first investigation, we have shown that general relativistic corrections are indispensable for an accurate description of the photon spectra. The gravitational redshift suppression and deformation of the flux, providing a unique theoretical signature of the mixed dark matter model.

For the second investigation conducted within a practical observational framework, the constraints derived from Fermi-LAT and MAGIC data show that the coexistence of primordial black holes and WIMPs significantly alters the allowed parameter space for dark matter. By incorporating four distinct emission channels, we have provided a more comprehensive evaluation of the photon flux than previous studies. The intensified dark matter density leads to stringent new limits on the primordial black hole fraction. Ultimately, these findings suggest that the mixed dark matter population offers a critical testing field for indirect detection searches. This study establishes a robust bridge between astrophysical halo modeling and gamma-ray observations, offering a new window into the early universe and providing essential constraints on the fundamental nature of dark matter components.

博士論文審査結果

Name in Full
氏名 鈴木 卓哉

Title
論文題目 Gamma-ray Observations and Primordial Black Holes Dressed in WIMP Halos

本博士論文は、原始ブラックホール (PBH) に重力的にトラップされたダークマター (DM, 特に WIMPs を仮定, mixed PBH-WIMPs model) の崩壊あるいは対消滅により放出されるガンマ線の信号を考察した理論的研究に関するものである。重力波観測などによりみつまっている重いブラックホールの起源の1つとしてPBHは注目を集めており、また、DMも物理学における非常に重要な研究対象であることから、本研究は時節を得た内容となっている。特に、PBH近傍でのWIMPs的なDMの分布について一般相対論的效果を取り入れ詳細に考察している点で新規性が高い。本研究では特に、DMとしてのエネルギー密度をPBHのみで説明できる質量帯 $10^{18} - 10^{22} \text{g}$ のPBHに着目して検討を行っている。論文は全7章からなり、第1章から4章までは相対論や宇宙論、DMについての概要、第5章と第6章が本研究の本論、第7章が結論である。他にAppendix 2章を含む。

本論である第5章ではPBHにトラップされたWIMPsが崩壊してガンマ線を放出した場合と対消滅して質量に対応する輝線のガンマ線を放出した場合を検討している。先行研究と異なり、一般相対論効果を取り入れた場合のガンマ線スペクトルを計算している点に新規性がある。この計算によりガンマ線のスペクトルはライン状から広がったものになることが示されている。また、放射されるガンマ線フラックスはWIMPsの崩壊の場合にはPBH質量に依存せず、WIMPsの対消滅の場合にはPBH質量に比例するという違いがあることも指摘されている。この研究内容は、出願者を主著者としてPhysical Review D誌に掲載済みである。

第6章ではDMハローを纏ったPBHが2つのDM空間密度分布モデル (NFW, Zhao) にしたがって銀河内に分布している場合に崩壊および対消滅で放射されるガンマ線フラックス ($b\bar{b}, \tau^+\tau^-, W^+W^-$ を経由して放出されるガンマ線も含む) を理論的に求め、観測結果と矛盾しないようにmixed PBH-WIMPs modelの存在量の上限を求めている。これにより、 $0(1) \text{TeV}$ 以上の比較的重いWIMPsに対して、PBHがDMのエネルギー密度に占める割合の制限が先行研究よりも3桁厳しくなりうることを示した。

本論である第5章、第6章ともに新規性のある研究内容で、十分な学術的価値が認められる。丁寧に考察を積み重ねて理論モデルを構築していることや専門誌に論文が掲載済みであることも高く評価できる。口頭試問では、自身の研究に関する質問に関しては的確に回答出来ていた。

以上の理由により、審査委員会は全員一致で本論文が博士の学位を授与するに値するものであると判断した。