OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Study of Radiative Muon Capture for COMET Phase-I Experiment
Author(s)	Pieters, Dorian
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/92888
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

Form 3

Abstract of Thesis

Name (PIETERS Dorian)	
Title	Study of Radiative Muon Capture for COMET Phase-I Experiment (COMET Phase-I実験における輻射ミュー粒子捕獲反応の研究)

Abstract of Thesis

The COMET Phase-I experiment will search for the coherent decay of a muonic atom into an electron. While in the Standard Model, extended with neutrino oscillations, this process is strictly suppressed ($O(10^{-54})$), many models beyond the Standard Model predict its possibility at an observable rate. This makes it a perfect probe for the search for physics beyond the standard model. The experiment aims at a single-event sensitivity of 3.0×10^{-15} in a running time of 150 days, which is an improvement of a factor of 100 from the current limit measured by the SINDRUM-II experiment. The experiment has been designed in such a way that other processes not predicted by the standard model of physics, such as the transition of a negative muonic atom into a positron, can also be studied. However, this decay can be shadowed by radiative muon capture-induced positrons. To account for this, analysis procedure has been developed to be able to measure the endpoint of the radiative muon capture photons by COMET Phase-I. The analysis is composed of four distinct steps: a hit filtering and track finding algorithm based on the combination of a gradient-boosted decision tree and a circular Hough transform algorithm; a track fitting algorithm based on Kalman filter technique; and a likelihood analysis to fit the reconstructed photon spectrum. In parallel, the online trigger scheme for the COMET Phase-I main physics measurement has been adapted for the measurement of radiative muon capture photons. A simulation of 10^{11} photons was performed to test the performance of the analysis procedure and the online trigger, as well as to gain a better understanding of the different acceptance of the COMET Phase-I experiment to the radiative muon capture process.

The online trigger specifically adjusted to the radiative muon capture process has shown that it can keep 90% of the radiative muon capture events while rejecting 96% of the background-only events, which reduces the trigger rate down to 4 kHz, a factor of 6 below the critical level for the DAQ of the COMET Phase-I experiment. This analysis procedure has been tested on simulation data. As a result, over the course of 100 days of measurement, the COMET Phase-I experiment will be able to reconstruct approximately 16k radiative muon capture events. The study has shown that the endpoint spectrum of the radiative muon capture photon for an aluminum target could be estimated with the precision of ±0.82 MeV which is an improvement of a factor of 2 over the previous measurement performed in TRIUMF. Assuming that the endpoint of the radiative muon capture photon in aluminum is 90.1 MeV as measured by the TRIUMF experiment, the improvement in the measurement of the endpoint spectrum reduces the background contribution of radiative muon capture to $\mu^- + N \rightarrow e^+ + N'$ ground state transition by a factor of 10.

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名	（ PIETERS Dorian Gerard Daniel Olivier ）	
	（職）	氏　名
論文審査担当者	主 査　教授	青木正治
	副 査　教授	民井淳
	副 査　教授	阪口篤志
	副 査　准教授	上野一樹
	副 査　助教	佐藤朗

論文審査の結果の要旨

本論文「Study of Radiative Muon Capture for COMET Phase-I Experiment」は、COMET Phase-I 実験における多様な物理研究テーマの一つであるミュー粒子・陽電子転換過程探索測定において問題となると予想されている背景事象の輻射ミュー粒子捕獲反応(RMC)に関して、当該プロセスからの光子のエネルギースペクトルならびに、エネルギースペクトルを Hwang-Primakoff Closure Approximation Model にあてはめたときの特徴量となる光子エネルギー(k_{max})を精密に測定する手法の開発ならびにその性能評価に関して報告したものである。

COMET Phase-I 実験は、荷電レプトンフレーバを破る反応の一つであるミュー粒子・電子転換過程を探索する実験である。COMET Phase-I 実験では、J-PARC ハドロンホールに建設中の革新的な大強度負電荷ミュー粒子ビームラインを活用し、ビームライン出口に設置するミュー粒子静止標的（アルミ製）中で発生するかもしれないミュー粒子・電子転換反応によって放出される 105 MeV/c の電子の運動量を、ミュー粒子静止標的を取り囲むように設置する円筒型ドリフトチェンバー（CDC）とトリガーカウンター（CTH）で測定する。

CDC はミュー粒子標的を円筒に取り囲んでいるため、陽電子の測定も可能である。すなわち、ミュー粒子・陽電子転換過程の測定を実施することができる。ミュー粒子・陽電子転換過程の測定では、RMC で放出されるガンマ線がミュー粒子標的や CDC 内壁などの物質中で電子・陽電子対生成反応で生起する陽電子が深刻な背景事象源となることがわかっている。この背景陽電子のエネルギーは、RMC で放出されるガンマ線のエネルギーを超えることはないと考えられている。しかしながら、これまで実験的に測定されているエネルギースペクトルや k_{max} の不定性が大きすぎるため、COMET Phase-I におけるミュー粒子・陽電子転換過程の探索感度に制限がかかっていた。

本論文では、RMC で発生するガンマ線のうち CDC 内壁で電子・陽電子のペアを生成するイベントに着目し、これを積極的に活用してガンマ線のエネルギースペクトルや k_{max} を測定する手法を開発した。高いノイズ環境下で運転される CDC のヒットパターンから、ひとつのガンマ線を起源として同時に発生する電子信号と陽電子信号の特徴を高い効率で抜き出し、電子と陽電子の運動量を個別に測定してガンマ線のエネルギーを再構成する手順を開発した。再構成されたガンマ線エネルギースペクトルに対して、測定器や解析手法に起因する系統的な影響を加味した理論スペクトルを当てはめることにより、従来の k_{max} 測定精度を 2 倍以上改善できることを示した。またこれにより、ミュー粒子・陽電子転換過程を測定する際に問題となる RMC 起源の予想背景事象を 10 分の 1 に抑制できる可能性を見出した。

本論文は、COMET Phase-I の実験装置を再現した計算機シミュレーションを活用して実施された。実際の実験データが入手可能となり次第、本論文で提案された手法を適応することにより、多様な物理成果を創出できることを示してみせたのである。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。