



Title	A Study of Optimization of Sensitivity and Backgrounds for the COMET Phase-II Experiment
Author(s)	Yao, Weichao
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/101905
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name (Weichao Yao)

Title	A Study of Optimization of Sensitivity and Backgrounds for the COMET Phase-II Experiment (負ミュー \rightarrow 電子転換過程を探査するCOMET Phase-II実験の研究)
-------	---

Abstract of Thesis

The “COherent Muon-to-Electron Transition” (COMET) experiment, conducted at the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC), aims to detect the rare Charged Lepton Flavor Violation (CLFV) process $\mu^-N \rightarrow e^-N$ conversion in a muonic atom of aluminium. This process, suppressed in the Standard Model to $O(10^{-54})$, serves as a sensitive probe for new physics beyond the Standard Model. COMET is conducted in phases, with Phase-II being the focus of this thesis following COMET Phase-I. The initial goal of COMET Phase-II was to achieve an upper limit sensitivity of $\leq 7 \times 10^{-17}$ at 90% confidence level (C.L.), which is four (4) orders of magnitude better than previous measurements. This thesis presents significant refinement to the COMET Phase-II project, enhancing experimental sensitivity through improvements in muon beam intensity and muon stop rate. Firstly, this thesis investigate high-efficiency pion production. The analysis shows that the production of low-energy pions is limited by the compromise between the range-momentum curve of low-energy pions and the initial pion momentum spectrum. The results reveal that the pion production spectrum at higher momentum cannot compensate for the limitations given by the range-momentum curve of pions. A potential further improvement in low-energy pion production could be achieved with an ideally narrow proton beam. In order to enhance muon stop rate, significant advancements have been made in the optimization of the muon stopping target system. This includes a detailed analysis of the system, focusing on the muon yields in stopping target and signal acceptance in the detector. The combination of these refinements yields a final expected Single Event Sensitivity (SES) of $\leq 7 \times 10^{-18}$ or an upper limit of $\leq 1.6 \times 10^{-17}$ at 90% C.L., assuming no background events are observed. This corresponds to an overall improvement factor of about four (3.8) compared to the previous sensitivity of COMET Phase-II. A detailed analysis of background source, including intrinsic physics, Beam-related Delayed, Beam-related Prompt, and Cosmic-ray induced backgrounds, along with their estimation methodologies, provide an estimated background of 0.49 events. With the heightened sensitivity, COMET Phase-II will become competitive in high-intensity measurements, positioning itself as a leading contender among future CLFV searches. These refinements enhance the potential for discovering new physics beyond the Standard Model.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名 (Weichao Yao)		
論文審査担当者	(職)	氏名
	主査 教授	青木正治
	副査 教授	野海博之
	副査 教授	福田光宏
	副査 准教授	小田原厚子
	副査 准教授	上野一樹

論文審査の結果の要旨

本論文「A Study of Optimization of Sensitivity and Backgrounds for the COMET Phase-II Experiment」は、COMET Phase-II 実験の予想到達感度をさらに向上させる可能性に関して、モンテカルロ計算による評価を網羅的に実行して検討を行い、従来よりも数倍の感度向上が可能であることを見出して報告したものである。

COMET Phase-II 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計画である。COMET Phase-II 実験では、J-PARC ハドロンホールに現在建設中である大強度高純度パルス負電荷ミュー粒子ビームラインを活用して、パルス陽子ビームによるパイ粒子生成から信号である電子の運動量測定までをひと続きの超伝導ソレノイド電磁石の中で実現することによって、現在 SINDRUM-II が持っている上限値を 4 衍改善した実験感度で探査測定を行うことを目指している。

COMET Phase-II の予想到達感度に関しては、2009 年の実験提案時だけではなく、超伝導電磁石装置の設計が進展した時や電子検出器の開発が進捗したときなど、感度に大きな影響を与えるほど研究開発が進むたびに再評価されてきた。いずれの再評価においても、最終的な到達感度は分岐比にして 10^{-17} 台前半よりも良くなることはなかった。その一方で、米国で計画されているミュー粒子・電子転換過程の探索実験 Mu2e では、さまざまな工夫によって 10^{-17} よりも高い感度へのアップグレードを目指す Mu2e-II を検討するなど、感度改善の試みを行ってきた。COMET Phase-II 計画においても、従来よりもさらに実験感度を向上させる方法の検討が待たれていた。

本論文では、2018 年に J-PARC で実施された陽子ビームサイズの測定実験結果に触発されて、Mu2e-II に匹敵する実験感度を実現するための方法について検討を行った。J-PARC の主リングから遅い取り出しでハドロンホールへ取り出される 8 GeV 陽子ビームの 2σ エミッタスが、2009 年の時点では $19.0 \pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ (水平方向) ならびに $36.4 \pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ (垂直方向) と予想されていた値から、2018 年に実施された測定を元にした外挿による $0.78 \pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ (水平方向) ならびに $10.56 \pi\text{mm} \cdot \text{mrad}$ (垂直方向) となったことを受けて、パイ粒子生成標的の半径を 10 mm から 4 mm へ細くすることによってミュー粒子収量が 1.6 倍になることを見出した。本論文ではさらに、パイ粒子生成標的の内部におけるパイ粒子の反応を詳しく解析することにより、ミュー粒子収量を増加させるためには陽子ビームのサイズに合わせて陽子標的のサイズを小さくすることが適切であることを説明してみせた。ミュー粒子を静止させる標的が置かれる場所の磁場配位に関しても複数の可能性を網羅的に検討して、ミュー粒子静止効率を 20% 向上させられることを示した。宇宙線バックグラウンドの再評価もを行い、従来の COMET Phase-II 感度予想に対しておよそ一桁低い宇宙線バックグラウンドを実現できる方策を示し、測定時間が延長できることを示した。これらの相乗効果により、従来の COMET Phase-II と比較して数倍の感度向上が達成可能であると結論した。

本論文は、COMET Phase-II の実験手法を発展させることによって SINDRUM-II の実験感度を 5 衍弱程も改善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。