

Study of Sensitivity to Search for a Charged Lepton Flavor Violating Process

大石, 航

<https://hdl.handle.net/2324/4474936>

出版情報 : 九州大学, 2020, 博士 (理学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏名 : 大石 航

論文名 : Study of Sensitivity to Search for
a Charged Lepton Flavor Violating Process
(荷電レプトンフレーバー非保存過程探索のための実験感度に関する研究)

区分 : 甲

論文内容の要旨

荷電レプトンフレーバー (CLFV) を破る過程の探索は、素粒子物理学の標準モデル (SM) でも説明できない物理を探る上で重要な役割を果たす。ミュオン・電子変換過程は、原子軌道に束縛されたミュオンが、ミュオン数と電子数保存に反して 105 MeV の単一電子に崩壊する過程であり、最も研究されている CLFV チャンネルの一つである。COMET (COherent Muon-to-Electron Transition) 実験は、日本の J-PARC でアルミニウム中の変換過程を段階的に探索する。Phase-II 実験では、最新の記録を 10000 倍向上する 10^{-17} という優れた感度を実現し、いくつかの標準模型を超える (BSM) 理論が示唆する発生確率に到達することを目指す。

九州大学のグループは、105MeV 電子の運動量とエネルギーを高分解能で測定するために、ストローチューブトラッカーと電磁カロリメータ (ECAL) からなる StrECAL 検出器システムの開発に貢献した。ストローチューブトラッカーは、エネルギー損失を最小限に抑えるために真空中でも動作可能なストロー状の極薄ガス検出器を何層も使い、磁場中での粒子軌道を測定する。ECAL は望ましいエネルギー測定性能を持つ LYSO 無機シンチレーション結晶を採用している。

本論文では、Phase-II 実験感度の実現可能性を確認するため、現実的な StrECAL の性能に基づいたシミュレーションによる研究について述べる。性能評価のために、東北大学 ELPH において StrECAL 検出器の試作機を製作し、電子ビームを用いた試験を行った。ストロー管は 100 μm 程度の空間分解能を示し、ECAL は 105MeV/c において、エネルギー分解能 $3.91 \pm 0.07\%$ 、時間分解能 0.54 ± 0.12 nsec、位置分解能 $7.65 \pm 0.07\text{mm}$ を示し、すべての条件を満たしていた。

シミュレーションとデータ解析のための COMET 公式のソフトウェアフレームワークを用いて、観測された StrECAL の性能を再現することに成功し、また一次陽子ビームから検出器応答に至るまでの Phase-II 事象をシミュレートした。再構成アルゴリズムも機械学習技術を用いて開発し、いくつかのクオリティカットも含めて最適化した。その結果、信号電子の運動量分解能は 190keV/c、全検出効率率は 72.5% であり、再構成されたイベントの内、シグナルイベント純度は 97.6% であった。

評価された解析性能に基づき、標準の測定時間窓を 600 から 1200 nsec とした場合、Phase-II の実験アクセプタンスは 0.034 と見積もられた。これは 1 年間のデータ取得で 1.4×10^{-17} の単一事象測定感度 (Single Event Sensitivity) が達成されることを意味する。系統誤差は全体で 11.6% と評価したが、そのうち再構成と解析の寄与は 1.2% のみである。また、異なる時間窓設定に対しても安定した性能を示した。

以下、英文（論文内容の通り）

The search for charged lepton flavor violation (CLFV) plays a vital role in probing a profound nature that even the standard model (SM) of high-energy particle physics cannot explain. The muon-to-electron (μ -e) conversion process, in which a muon captured by an atom decays to only a single electron with constant energy of 105 MeV, violating the muon and electron flavor conservation, is one of the most investigated CLFV channels. The COMET (COherent Muon-to-Electron Transition) experiment will search for μ -e conversion in aluminum at J-PARC in Japan in a staging approach. The second-phase (Phase-II) experiment aims for an excellent sensitivity of 10^{-17} , which improves the latest record 10000 times and reaches the conversion rate suggested by several theories beyond the SM.

The Kyushu University group has contributed to the development of the StrECAL detector system, consisting of the straw tube tracker and electromagnetic calorimeter (ECAL), which measure the momentum and energy of the 105 MeV electrons with a great resolution. The straw tube tracker tracks spiral particle trajectories in a magnetic field with layers of straw-shaped extremely-thin gaseous chambers that can even work in a vacuum to minimize energy loss. The ECAL has adopted the LYSO inorganic scintillating crystal, which has desirable properties in energy measurement.

This thesis is to present a simulation-based study result to check the feasibility of the Phase-II sensitivity based on realistic StrECAL performance. In order to evaluate the performance, a StrECAL detector prototype was constructed and examined with electron beams at ELPH in Tohoku University, Japan. The straw tube showed a spatial resolution of around 100 μ m, and the ECAL showed an energy resolution of $3.91 \pm 0.07\%$, a time resolution of 0.54 ± 0.12 nsec, and a position resolution of 7.65 ± 0.07 mm at 105 MeV/c; they meet all the requirements.

With the COMET-official suite for simulation and analysis, the observed StrECAL performance was successfully reproduced, and full-simulated Phase-II events from the primary proton beam to the detector response were produced. The reconstruction algorithms were also developed and implemented by utilizing machine learning techniques, as well as several quality cuts. They give a momentum resolution of 190 keV/c for the signal electrons with an overall efficiency of 72.5% while securing a good signal-event purity of 97.6% in the reconstructed events.

Based on the evaluated analysis performance, the total experimental acceptance of Phase-II is estimated at 0.034 with the default measurement timing window from 600 to 1200 nsec, which means a single event sensitivity of 1.4×10^{-17} can be accomplished in one-year data taking. Although the systematic uncertainty is evaluated at 11.6% in total, the reconstruction and analysis parts have only 1.2%. They also show a stable performance for different timing-window configurations.