平成２９年度採択分
令和２年３月３１日現在

# 大強度パルスミューオンビームで解き明かす荷電レプトン間のフレーバー混合

Study on the charged lepton flavor mixing using the high-intensity pulsed muon beam

課題番号：17H06135

**三原　智**（MIHARA, Satoshi）

**高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授**

研究の概要（４行以内）
素粒子標準模型内では素粒子の荷電レプトンのレーバー数の保存を破る過程は厳しく制限されている。 一方、標準模型を超える物理が実存すれば実験室でも十分観測にかかる頻度で生じることも示唆されている。本研究ではミューオン電子転換過程を $10^{-16}$ の感度で探索するために必要な大強度パルスミューオンビームを最適化し世界トップレベルの国際共同実験を実現する

研　究　分　野：物理学

キ　ー　ワ　ー　ド：素粒子実験、量子ビーム

## １．研究開始当初の背景

素粒子の荷電レプトンにおいてフレーバー数の保存を破る過程（Charged Lepton flavor Violation、cLFV 過程）はニュートリノ振動を考慮に入れたとしても標準模型内では厳しく制限される。しかしながら標準模型を超える TeV スケール物理が実存するならば、実験室でも十分観測に係る頻度で生じ得る。このため、cLFV 探索は広範囲のエネルギーに渡って新物理を探る可能性を有し、その到達範囲は LHC 実験のそれをも凌駕すると考えられている。現在、世界最高感度の cLFV 探索である $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索実験（MEG 実験）に続き、国内外で多くの cLFV 探索実験の準備が進められている。

## ２．研究の目的

このような状況のもと、本研究では $\mu$-e 転換過程を $10^{-16}$ の分岐比感度で探索する COMET 実験の早期実現のため、必要な大強度パルスミューオンビームを最適化し、ミューオンフレーバー物理を大きく進展させて、国内で世界トップレベルの国際共同実験を実現する。

## ３．研究の方法

本研究は COMET 実験において、その目標感度(Phase Ⅰ：$10^{-14}$、Phase Ⅱ：$10^{-16}$)実現に不可欠なパルスミューオンビームを開発する。このため別途製作中の運動量計測用ストロー飛跡検出器に加えて、エネルギー計測用の LYSO カロリメータ検出器を新規に製作し、必要なエレクトロニクスも整備してビーム診断が可能な検出器群(StrEcal 検出器　図１左)を立ち上げる。これにより大強度ミューオンビームの診断を実施し、ビーム中の粒子種別とその割合の計測、位相空間分布の決定を行う(図１右)。また、この結果を基に最適なコリメータシステムを設計し COMET 実験の実験感度を最大化するとともに、最終的なミューオン収量を向上するための陽子標的の検討も進める。

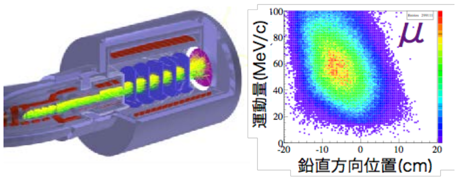



図１ 本研究で開発を行う StrEcal 検出器(左)とシミュレーションで予想されるビーム位相空間分布(右)

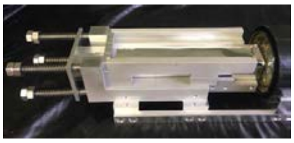
## ４．これまでの成果

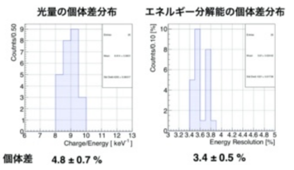
COMET 実験のミューオンビームの輸送効率や品質を向上させるため、磁場分布を調整する超伝導ソレノイド電磁石（ブリッジソレノイド；BS）の製作を開始した。

図 2 BS コイル

現在、超伝導コイルならびに構成部品の製作までが終了しており（図2)、今後下流に配置される検出器ソレノイドの詳

細仕様が決定次第、磁石として完成させる。
ビーム計測用の検出器である StrEcal 検出器の製作に関しては、LYSO カロリメータ検出器の開発・製作を中心に進めている。2018 年度には海外企業との連携により 20%のコスト削減を実現した。結晶の量産を行うに当たっては段階的に生産個数を増やしながら性能評価を実施している。研究開始後に行ってきたビームラインシミュレーションによる詳細検討により、実験室での放射線環境を校了すると検出器に使用する部品を慎重に選定する必要性が明らかになってきた。このため特にいくつかの主要な構成要素に関しては、2018 年度、2019 年度に実際に中性子、ガンマ線の照射試験を行った上でそれらがデータ収集中に放射線にさらされても問題なく動作することを確認しながら研究を進めている。また LYSO 結晶自体の放射線耐性を調べるための照射試験や、開発中の信号読出し用の波形計測装置 (ROESTI) に関しても放射線耐性を調べる試験を行っている。






ビーム計測に使用するモニターの開発に関してはミューオンビームモニターとして光ファイバー (シンチレーションおよびクリア) を使用し光半導体 (MPPC) による少数チャンネルの信号読出システムを構築し信号量の測定を行った。その結果、ミューオン1個の入射に対し15個程度の光電子が検出される見込みである。これに加えて光ファイバーの放射線耐性の調査も実施した。ミューオンビームを生成するための陽子ビームを計測する検出器として合成ダイヤモンド検出器の開発も並行して進めている。合成ダイヤモンド検出器は優れた放射線耐性を持ち、且つ高感度である利点がある。これをJ-PARCメインシンクロトロン加速器の終端部にインストールし、大強度陽子ビームの照射試験を実施した。その結果、0.5mm厚の結晶を用い、30GeV陽子ビームを精度良く検知可能であることを実証した。これによりミューオンビームの時間構造の詳細な理解が飛躍的に進展することが期待される。
陽子標的に使用する標的材料の開発においては、シリコンカーバイトの製作に関しては研究開始当初に問題ないことを確認している。本研究ではグラファイト、シリコンカーバイトの標的双方に陽子ビームを照射してミューオン収量を比較することを予定していたがビームライン建設が遅れているために計測が行われていない。この評価試験のための準備は既に完了しており、ビームラインが完成し次第、直ちに試験を行える状況である。これに加え、新たな標的素材として高温でも安定で密度の高い脆性タングステン合金の検討を進めており合わせてシミュレーションに基づく評価も行っている。

## ５．今後の計画

本研究で目的とするミューオンを用いたcLFV物理を飛躍的に進展させるため、現在建設中のブリッジソレノイドを完成させ世界最高品質の大強度パルスミューオンビームを実現する。並行してビーム診断に必要な StrEcal 検出機の完成をめざして LYSO カロリメータ検出器の建設を完了する。ミューオンビームの利用が可能になった時点で直ちにビーム計測が行えるように、ビームモニター検出器の準備を進めるとともにシミュレーションによる最適化を進める。これによりビームライン建設が終了してビームが使用できるようになった時点で二次粒子ビーム計測を直ちに実施してミューオン収量を実測し、その後すみやかに予定していた物理計測を実施する予定である。

## ６．これまでの発表論文等(受賞等も含む)

1. “COMET Phase-I technical design report”, COMET Collaboration, PTEP, Volume 2020 Issue 3, 033C01, 2020
2. “Radiation tolerance of LYSO crystal for the COMET experiment”, Rie Murayama, JPS Conference Proceedings, in press ,2020
3. “Radiation hardness study for the COMET Phase I electronics”, Yu Nakazawa et al., Nucl. Inst. and Methods A,955巻,163247(2020)
4. “Development of the proton beam mon itor based on the thin diamond cryst al for the COMET Experiment”, Y.Fuji i, et al., Nucl. Inst. and Methods A, 936巻, pp.669-670 (2019)
5. “Design and performance evaluation of front end electronics for COMET s traw tracker”, Kazuki Ueno et al., N ucl. Inst. and Methods A,936巻,pp.29 7-299(2019)
6. “Extinction Measurement of J-PARC M R with 8 GeV Proton Beam for the New Muon-to-Electron Conversion Search Experiment – COMET”H. Nishiguchi, e t.al., JACoW-IPAC2019, FRXXPLS2 (201 9)
7. “Radiation study of FPGAs with neu tron beam for COMET Phase I”, Yu Na kazawa, Yuki Fujii et al., Nucl. In st. and Methods A,936巻,pp.351-352(2 019)

## 7. ホームページ等

http://comet.kek.jp