

科学研究費助成事業（特別推進研究）公表用資料  
〔令和5（2023）年度 中間評価用〕

令和5年3月31日現在

研究期間：2021～2025  
課題番号：21H04971  
研究課題名：大強度ミュー粒子源で挑む荷電レプトンフレーバ研究  
研究代表者氏名（ローマ字）：青木 正治（AOKI Masaharu）  
所属研究機関・部局・職：大阪大学・理学研究科・教授  
研究者番号：80290849

研究の概要：

本研究は、素粒子の標準理論を超えた新しい物理を切り拓くためにミュー粒子・電子転換過程を探索する実験を実現し、これを発展させることを目的とする。J-PARC 独自の先進大強度ミュー粒子ビーム源を活用し、タイムリーに物理測定を実現して実データに基づく経験を積み上げ、着実に実験感度を向上させてゆく。これによって、PeV レベルのエネルギースケールで素粒子物理を俯瞰することを目指す研究である。

研究分野：素粒子、原子核、宇宙線および宇宙物理に関連する実験

キーワード：ミュー粒子、稀崩壊、標準理論、大強度ミュー粒子源

1. 研究開始当初の背景

素粒子の標準理論は LHC におけるヒッグス粒子の発見で完成した。しかしながら、暗黒物質の存在や物質優勢宇宙の謎、軽すぎるニュートリノ質量など、標準理論では適切に説明できない事も観測・発見されている。米国フェルミ研究所で行われた最新の実験でも、ミュー粒子異常磁気能率の実験値と標準理論予想の不一致が  $4.8\sigma$  にも達するなど、標準理論を超えた「より完全な理解」が渴望されている。ミュー粒子は陽子よりも軽い電子タイプの素粒子である。超伝導ソレノイド技術を用いた先進的な大強度ミュー粒子源の実現により、大量のミュー粒子を用いた稀反応の研究が可能となった。特にミュー粒子・電子転換過程の研究は、従来の実験感度を4桁も改善する研究が可能であり、国際的な競争が激化していた。

2. 研究の目的

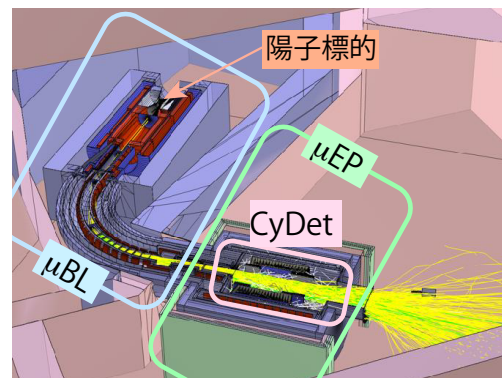
本研究の目的は、素粒子の標準理論を超えた新しい物理を切り拓くために、ミュー粒子・電子転換過程探索の実験を実現し発展させることにある。そのために、COMET 計画の一環として先行研究の100倍、 $3 \times 10^{-15}$ 、の感度でミュー粒子・電子転換過程を探索する。これによって、PeV レベルのエネルギースケールで物理を俯瞰する。

3. 研究の方法

負電荷ミュー粒子( $\mu^-$ )をアルミニウム標的に入射すると、 $\mu^-$ はアルミ原子軌道にトラップされてミュー粒子原子となる。ここにもしも標準理論を超えた物理現象である「荷電レプトンフレーバ非保存過程」が存在すれば、 $\mu^- + \text{Al} \rightarrow e^- + \text{Al}$  反応によってミュー粒子原子から 104.97 MeV の単色電子が 864 ns の寿命で放出されると期待される。この特徴的なエネルギーと時間構造をもった電子が本研究で発見を目指すミュー粒子・電子転換過程の信号である。

この信号の発生確率は $10^{-12}$ 以下と極めて稀であり、本研究を実現するためにはこれまでにない大強度のミュー粒子源が必要となる。本研究で開発中のミュー粒子源 ( $\mu$ BL) と実験装置 ( $\mu$ EP) の三次元模式図を右に示す。 $\mu$ BL では、J-PARC で発生させた大強度陽子ビームを 5 T の高磁場中に設置する陽子標的に照射し、当該陽子標的から発生する低エネルギーのパイ粒子を高磁場で捕獲する。捕獲された大量のパイ粒子は輸送ソレノイドの中でミュー粒子に崩壊し、毎秒 $10^{10}$ 個という大強度のミュー粒子ビームとなって  $\mu$ BL 出口から実験室に放出される。

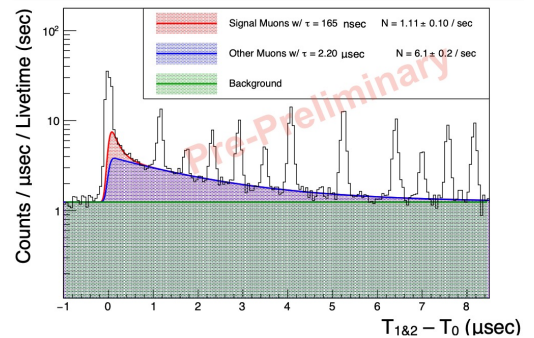
実験室には検出器用超伝導電磁石を用いた実験装置 ( $\mu$ EP) が設置しており、 $\mu$ EP の中心部分に設置されたアルミ標的に入射したミュー粒子がミュー粒子原子となる。ミュー粒子原子から放出される(かもしれない)電子は、アルミ標的を取り囲むように設置された電子飛跡検出器 (CyDet) で検出され、その運動量が高い精度で測定される。当該電子のエネルギーが特徴的なエネルギーと一致すれば、ミュー粒子・電子転換過程を観測したことになる。



#### 4. これまでの成果

$\mu$  EP は、ブリッジソレノイド (BS) と検出器ソレノイド (DS) から構成される。この内部に、CDC 検出器と CTH 検出器から構成される電子検出器 (CyDet) を実装して、電子スペクトロメータとなる。本研究では、2021-2023 年度にこれら大型実験装置の開発と製造を行い、2024 年度から物理測定に向けた調整を開始する計画であった。2021 年度に BS を製造し、2023 年度での DS 組み立てに備えて 2022 年度に DS 部品の調達を行った。 $\mu$  EP の建設は当初計画通り順調に進捗している。

さらに、2022 年度には  $\mu$  BL を構成する湾曲ソレノイドを用いたビーム試験を実施した。ファーストビームに沸く実験参加者の写真を下に示す。本研究で使用する輸送湾曲ソレノイドは、縦磁場を付加することによって  $\mu$  BL を通過する粒子の電荷と運動量を調節できる機能を持った本邦独自の革新的な装置である。本ビーム試験では、 $\mu$  BL 出口に銅標的を設置して銅に静止した負電荷ミュー粒子から放出される電子の時間スペクトルを測定した。測定結果の一例を右図に示す。赤色でハッチングされた部分が、銅中に静止した負電荷ミュー粒子による成分を示す。このようにして  $\mu$  BL で負電荷ミュー粒子を観測できたことにより、本研究はタイムリーな物理測定へ向けて大きく前進した。



#### 5. 今後の計画

DS と DS 鉄ヨークを調達して、 $\mu$  EP の完成に必要な物品を揃える。COMET 実験ホールに  $\mu$  EP を設置して、励磁試験と磁場測定を実施する。これによって  $\mu$  EP が完成する。

$\mu$  EP の建設と並行して、当初研究計画よりも前倒して高度化 CTH 検出器の製造を遂行する。

完成した  $\mu$  EP の内部に CyDet (CDC 検出器と高度化 CTH 検出器を組み合わせた装置) を設置して、電子スペクトロメータシステムの完成となる。宇宙線を用いた電子スペクトロメータ総合試験を実施する。宇宙線実データの解析作業を実施することにより、CyDet 装置を用いた物理解析のためのフレームワークやツールの開発を行う。

先進ミュー粒子ビームラインが完成し次第ビーム調整を行い、その後遅滞なくミュー粒子・電子転換過程の探索測定を開始する。宇宙線試験などであらかじめ入念に準備しておいた解析フレームワークを活用してタイムリーに物理解析を行い、成果を公表する。

#### 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

- “Construction Status of the Superconducting Magnet System for the COMET Experiment”, Naoyuki Sumi, Makoto Yoshida, Masami Iio, Kenichi Sasaki, Yasuhiro Makida, Takahiro Okumura, Hirokatsu Ohata, Masaya Onaka, Noriyuki Kurosawa, Yoshinori Fukao, Satoshi Mihara, IEEE Trans. Appl. Supercond. 32 (2022) 6, 4101204 [査読有].
- “Extinction Measurement at J-PARC MR with Slow-Extracted Pulsed Proton Beam for COMET Experiment”, Kyohei Noguchi, Yuki Fujii, Yoshinori Fukao, Yoshinori Hashimoto, Yuya Higuchi, Ryotaro Honda, Yoichi Igarashi, Fumihito Ikeda, Satoshi Mihara, Ryotaro Muto, Yu Nakazawa, Hajime Nishiguchi, Kou Oishi, Masayoshi Shoji, Fumihiko Tamura, Junji Tojo, Masahito Tomizawa, Kazuki Ueno and Hisataka Yoshida, PoS NuFact2021 (2022) 104.
- “CONSTRUCTION STATUS OF THE COMET EXPERIMENTAL FACILITY”, Y. Fukao, K. Agari, H. Akiyama, E. Hirose, M. Ieiri, Y. Igarashi, M. Iio, N. Kamei, Y. Katoh, Y. Komatsu, R. Kurasaki, M. Maki, S. Makimura, S. Mihara, M. Minakawa, Y. Morino, F. Muto, H. Nishiguchi, T. Okamura, K. Sasaki, Y. Sato, S. Sawada, N. Sumi, H. Takahashi, K. Tanaka, A. Toyoda, K. Ueno, H. Watanabe, Y. Yamanoi, M. Yoshida, Contribution to the 12<sup>th</sup> International Particle Accelerator Conference (IPAC) 2021, JACoW-IPAC2021-TUPAB210 (2021).

#### 7. ホームページ等

COMET Collaboration web page

<https://comet.kek.jp>