

科学研究費助成事業（基盤研究（S））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：21H04991  
研究課題名：世界最高感度のミュオン粒子稀崩壊探索で迫る素粒子の大統一  
研究代表者氏名（ローマ字）：大谷 航（OOTANI Wataru）  
所属研究機関・部局・職：東京大学・素粒子物理国際研究センター・准教授  
研究者番号：30311335

研究の概要：

本研究はミュオン粒子が電子とガンマ線に崩壊する稀な現象 $\mu \rightarrow e\gamma$ の探索によって、素粒子の大統一の実験的検証をめざすものである。世界最大強度のミュオン粒子ビームと革新的な高性能測定器を用いた最高感度の $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験 MEG II を実施し $\mu \rightarrow e\gamma$ の発見をめざす。さらに、究極の探索感度を持つ新たな $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験のための研究開発を行い、他の追随を許さない素粒子の大統一の徹底的な検証をめざす。

研究分野：素粒子物理学

キーワード：大統一理論、超対称性、ミュオン粒子稀崩壊、荷電レプトンフレーバーの破れ

1. 研究開始当初の背景

標準理論を超える新物理の明白な兆候は何も見つかっていない中、 $\mu \rightarrow e\gamma$ のように新物理粒子の媒介で起こる稀な現象の探索を通して、大統一理論など超高エネルギーの新物理に迫る実験の重要性はますます高まっている。本研究グループが中心となり実施した MEG 実験を一桁上回る $10^{-14}$ 台の感度の探索を行うことができれば、超対称大統一理論を強力に検証することが可能となる。そこで、本研究グループが中心となって、巧みな新設計で測定器性能を大幅に改善することで、 $10^{-14}$ 台の探索感度を持った MEG II 実験を新たに設計・提案するに至った。また、PSI のミュオン粒子ビームを大幅に増強する計画が始まっており、MEG II が終わる 2025 年頃には現在の 100 倍の強度のビームが利用可能になる見込みである。そこで、全く新しい手法で $\mu \rightarrow e\gamma$ を $0(10^{-15})$ の感度で探索し、超対称大統一理論の詳細に迫る新 $\mu \rightarrow e\gamma$ 実験の実現をめざした研究開発を開始することとした。

2. 研究の目的

本研究の第一の目標は、前実験である MEG 実験を約 10 倍以上回る探索感度 $5 \times 10^{-14}$ で $\mu \rightarrow e\gamma$ を探索し、研究期間内に発見することである。測定器の設計性能が達成され、本格的なデータ取得を開始すれば、およそ数ヶ月で MEG 実験の探索感度を超える見込みである。それ以降はいつ $\mu \rightarrow e\gamma$ が発見されてもおかしくない未踏の領域となる。 $\mu \rightarrow e\gamma$ が発見された場合は、大統一理論の決定的な証拠を掴んだことになる。逆に、発見されなかった場合でも、これまで考えられてきた大統一理論の枠組みに大幅な修正を迫ることになり、いずれにしても今後の素粒子物理研究全体の方向性を大きく左右する重要な成果となる。さらに本研究では、MEG II 実験実施と並行して $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊探索感度をさらに 30 倍以上引き上げた究極感度の新実験の実現をめざす。この圧倒的な探索感度により、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 発見をより確実なものとし、さらに発見後は、崩壊分岐比や崩壊角度分布といった $\mu \rightarrow e\gamma$ の精密測定を行うことで超対称大統一理論の詳細を解明することが可能となる。また、この新装置を用いて別の稀崩壊現象 $\mu \rightarrow eee$ を同時に測定することも可能となり、さらに厳しく大統一理論に迫ることができる。

3. 研究の方法

本研究の第一の目的である MEG II 実験では、巧みな設計で性能を大幅に改善した測定器と、強度を倍増したミュオン粒子ビームを使ってこれまでの約 10 倍の感度の $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索を行う。MEG II 実験用測定器の開発・建設は完了し、世界最高感度の $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験が開始された。本研究では、MEG II 実験測定器のうち、特に本研究メンバーが中心となって開発・建設を行った液体キセノンガンマ線検出器・陽電子タイミングカウンターに注力し、精度の高い較正・高性能な解析アルゴリズムの開発を行い、測定器の設計性能達成をめざす。さらに、測定器の長期安定運用により高品質な物理データの取得を行い、十分なデータを貯めて目標感度での $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索を行い、発見をめざす。100 倍以上強度が増強される PSI ミュオン粒子ビームと、アクティブコンバーター型ガンマ線ペアスペクトロメータ・超薄型シリコンセンサー陽電子スペクトロメータというこれまでにない性能を持った測定器を用いた新しいコンセプトの実験装置により、飛躍的に感度を改善した新実験の実現をめざす。

4. これまでの成果

MEG II 実験については、2021 年読み出しエレクトロニクスの量産が完了し、MEG 実験からアップグレードした全ての測定器について全チャンネルの信号を読み出すことが可能となった。ビームタイム後半には試

験的な物理データの取得を開始した(図 1)。2022 年のビームタイムでは、測定器の最終調整を行った後、7 月にいよいよ本格的な物理データ取得を開始した。停止ミュオン粒子頻度  $3 \times 10^7 \mu/s$  で開始、約 4 ヶ月にわたり順調にデータ取得を行うことができた(図 2)。2022 年までに取得した物理データで MEG 実験の探索感度を大きく上回る見込みであり、現在  $\mu \rightarrow e\gamma$  探索解析に向けた準備を精力的に進めている。新実験については、主に新実験測定器の要となる光子ペアスペクトロメータ用アクティブコンバーターの開発が進められた。アクティブコンバーターの候補物質の研究が行われ、LYSO が検出効率・エネルギー分解能・時間分解能の観点から最も適した物質であるとの結論を得た。LYSO 結晶を用いたアクティブコンバーターの試作機を製作、KEK PF-AR に新設されたテストビームラインにおいて、試作機を用いた性能試験を行った。暫定的な結果ではあるが、十分なエネルギー測定精度(光電子統計)を持っていることが示され、既に目標に迫る時間分解能(40-50ps)を達成している。

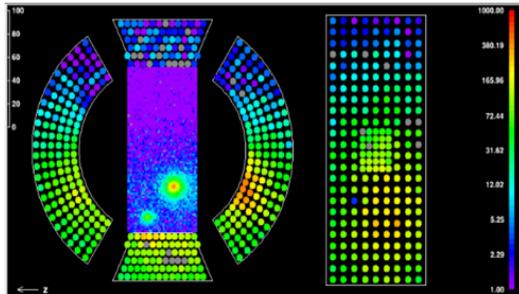


図 1 液体キセノン検出器による背景ガンマ線事象例

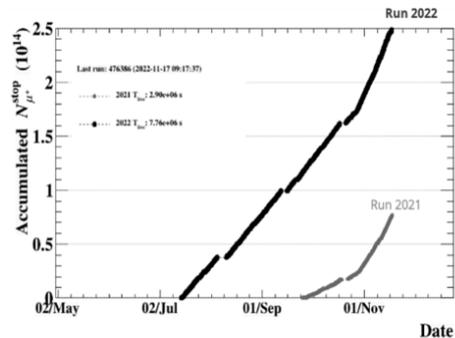


図 2 積算停止ミュオン粒子数の推移

## 5. 今後の計画

MEG II 実験については、本年度以降も引き続き長期物理データ取得を行う。並行して、2021-2022 年度に取得した物理データを用いた  $\mu \rightarrow e\gamma$  探索解析を進める。順調に行けば令和 5 年度中の探索結果公表を出来る見込みである。2022 年までに取得したデータで既に MEG 実験の探索感度を超える見込みであり、いつ  $\mu \rightarrow e\gamma$  の兆候が見つかるもおかしくない状況となる。MEG II 実験を実施するビームラインを使用する他の実験グループの動向にも依存するが本研究期間内に目標実験感度に到達、 $\mu \rightarrow e\gamma$  の早期発見を目指す。新  $\mu \rightarrow e\gamma$  探索実験については、昨年度に引き続き、各測定器に使用する要素技術の開発を継続して行う。アクティブコンバータースペクトロメータについては、昨年度までに SiPM で読み出す LYSO 検出器で、十分なエネルギー分解能、時間分解能が得られる見込みが立っているため、より詳細なプロトタイプを用いた性能実証試験を行う。フォトンスペクトロメータ用コンバージョン電子陽電子飛跡検出器の技術選定のためのプロトタイプ製作を開始する。プロトタイプを MEG II 測定器内に組み込み、性能評価試験を実施する。ここでは MEG II 実験較正装置の単色ガンマ線 (55 MeV) および、転換後の電子陽電子の測定に MEG II のドリフトチェンバーを利用する。陽電子測定器の研究開発は、Mu3e 実験コラボレーションと共同で進める予定である。アクティブターゲット用の HV-MAPS 読み出し手法の開発、放射線耐性試験を行うとともに、積層型 RPC の設計を時間測定用に最適化する。各要素の性能実証機を製作、Mu3e 用のデザインをベースに製作した飛跡検出器の性能実証機と組み合わせて陽電子測定器の性能実証機を構成し、MEG II 測定器内で大強度ミュオン粒子ビームを用いた性能評価試験を実施する各要素の性能実証機を用いて目標測定器性能を実証した後、崩壊分岐比感度  $1.5 \times 10^{-15}$  の新  $\mu \rightarrow e\gamma$  探索実験の計画を立案する。最後に実験提案書としてまとめ上げ、実際に PSI に提案することを本研究の最終目標とする。

## 6. これまでの発表論文等 (受賞等も含む)

Novel X-ray scanning technique for in-situ alignment of photo-detectors in the MEGII calorimeter, T. Libeiro, W. Kyle, S. Kobayashi, M. Francesconi, L. Galli, K. Ieki, T. Iwamoto, W. Molzon, T. Mori, M. Nakao, D. Nicolo, S. Ogawa, W. Ootani, D. Palo, Nucl. Inst. and Meth. A 1048 (2023) 167901, 1-14、査読有、2023 年

Towards a New  $\mu \rightarrow e$  gamma Search with the MEG II Experiment: From Design to Commissioning, Marco Chiappini, Marco Francesconi, Satoru Kobayashi, Manuel Meucci, Rina Onda, Patrick Schwendimann and on behalf of the MEG II Collaboration, Universe 2021, 7(12), 466, 1-16 査読有、2021 年

The search for  $\mu \rightarrow e$  gamma with  $10^{-14}$  sensitivity: The upgrade of the MEG experiment, Baldini Alessandro M., Iwamoto Toshiyuki, Mori Toshinori, Nishiguchi Hajime, Ootani Wataru, Uchiyama Yusuke, et. al, Symmetry 2021, 13(9), 1591, 1-13、査読有、2021 年

## 7. ホームページ等

<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/research/meg.html>