

学部生主体の加速器実験 ～J-PARC MLFにおける $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索～

京都大学理学部・大学院理学研究科

大杖 祐摩, ソク ジュンモ, 高井 ゆり*, 馬場 琉乃介†

担当教員: 中家 剛, 木河 達也‡, TA: 大谷 尚輝, 青柳 昂生

*yuri@icepp.s.u-tokyo.ac.jp, †baba.ryunosuke.34v@st.kyoto-u.ac.jp, ‡kikawa@scphys.kyoto-u.ac.jp

2026 年 (令和 8 年) 5 月 7 日

1 はじめに

加速器を用いた実験は、素粒子・原子核物理の最前線を支える基盤であると同時に、極めて豊かな教育の場である。加速器実験では、ビームラインの選定、検出器やデータ取得系の準備、測定条件の最適化、限られたビームタイムの中での測定遂行、さらには取得したデータの解析と結果の解釈まで、総合的な力が求められる。だからこそ、得られる教育的効果は大きい。

こうした考えのもと、京都大学理学部の4年生向け卒業研究である課題研究P2では、毎年、学部生が主体となって加速器施設を用いた本格的な物理実験に取り組んできた。加速器施設での実験は、学部生には敷居が高いように思われるかもしれない。しかし、適切なテーマ設定と周囲の支援があれば、学部生でも、自ら実験を構想し、準備し、測定し、そこから物理を学ぶことができる。

本記事では、京都大学課題研究P2におけるこうした取り組みについて、2025年度にJ-PARC MLFで行ったミュオン稀崩壊探索実験に焦点を当てながら紹介する。なお、本記事では、第1, 2, 5節を担当教員が執筆し、実験の具体的内容については、実際に研究を進めた学生が第3, 4節を執筆している。

2 京大課題研究P2における取り組み

課題研究P2では、後期の初回ゼミで、まず各学生が自ら「やってみたい実験」を提案するところから始める。その後、利用可能なビームライン、実験装置、予算面、安全面、準備期間などを踏まえて議論を重ね、実現可能なテーマへと具体化していく。さらに、施設側の担当者との相談を通じて日程や実施条件を調整し、学生自身が準備、測定、解析を進める。この過程では、単に与えられた課題をこなすのではなく、自ら課題を立て、制約条

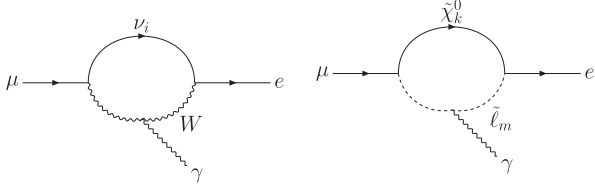
件の中で実験を設計し、結果を解釈するという、研究そのものの営みを学ぶことになる。

これまで本課題研究では、J-PARC MLFのミュオンビームを用いたミュオン崩壊の測定 [1] やミュオンウム生成実験、中性子ビームを用いた中性子の重力相互作用の測定、多層膜ミラーによる中性子干渉の観測、さらにはニュートリノビームを用いたニュートリノ反応断面積測定など、多様なテーマに取り組んできた。対象とする物理は多岐にわたるが、いずれの場合も共通しているのは、学生が実験の着想から準備、測定、解析までを主体的に担うという点である。

2025年度には、3つの加速器を用いた課題に取り組んだが、本記事ではそのうちの1つである、J-PARC MLF Muon D2 のパルスミュオンビームと自作検出器系を用いて、荷電レプトンフレーバーを破る崩壊 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ を探索した実験を紹介する。学生実験としては挑戦的なテーマであるが、信号とバックグラウンドの理解、検出器応答の較正、再構成、統計解析まで含めて、加速器実験の本質的な要素を学ぶことができる題材となった。

3 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索実験

ミュオンのニュートリノを伴わない崩壊 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ は、荷電レプトンフレーバーを破る崩壊モード (Charged Lepton Flavor Violation: CLFV) であり、ニュートリノ混合を経由した図1(a)のようなダイアグラムで実現される。しかしその分岐比は $\mathcal{O}(10^{-55} - 10^{-54})$ と極めて小さく [5]、実験的な観測は難しい。一方、超対称性模型では図1(b)のようなダイアグラムで $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊を生じ、分岐比が $\mathcal{O}(10^{-14} - 10^{-11})$ 程度まで増大することが示されている [2, 3]。したがって CLFV 過程である $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊を観測することは、新物理の直接的な根拠となる。



(a) ニュートリノ混合由来の寄与。 (b) 超対称性におけるニュートラリーノ・荷電スレプトンループの寄与の一例。

図 1: $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ に対する異なる理論の寄与の比較。

現在の $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊の分岐比に対する最も強い制限は、2025 年の MEG II 実験の報告 [4] によるもので、

$$\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 1.5 \times 10^{-13} \quad (90\% \text{C.L.})$$

となっている。本卒業研究では、自作装置を用いた実験で、どこまで稀崩壊の探索を可能にし、どこまで小さい分岐比に対する上限を与えられるかに挑戦した。本卒業研究の特色は、自作の検出器系を用いた加速器実験、パルスビーム由来の問題を解消するデータ再構成、自作検出器系に基づいた解析の実装の 3 点である。

3.1 自作の検出器系と DAQ システム

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊は二体崩壊であるため、エネルギー・運動量保存則より、陽電子と光子はともに 52.8 MeV のエネルギーを持って逆方向に放出される。実験では、(i) 180° をなす、(ii) 2 種類の粒子が、(iii) 同エネルギーで、(iv) 同時刻に放出されたという情報を抽出せねばならない。私たちは、学部の学生実験等で馴染みのある、NaI シンチレータ (NaI) とプラスチックシンチレータ (PS) と、光電子増倍管 (PMT) を用いて、この 4 つの情報を取得できる検出器系を作成した。検出器系は NaI 2 本と PS 1 枚に加え、3 つのシンチレータに取り付けられた PMT 3 本で構成された検出器セット A, B からなり、それぞれの検出器セットは図 2 のようになっている。この検出器セットを図 3 のように PS 側が内側に来るように向かい合わせに配置し、その中央にミュオン停止用のアクリル製ターゲットを置いた。こうすると、この配置の検出器に入射する信号は必然的に 180° をなす。また、崩壊後の陽電子や光子はまず前段の PS に入射した後、後段の NaI で全てのエネルギーを落として停止する。したがって、PS と NaI でともに反応があれば荷電粒子すなわち陽電子の信号、PS では反応がなく NaI のみで反応があれば光子だと判断できる。さらに、NaI は 52.8 MeV の陽電子や光子を十分に止められる奥行きを確保しているので、NaI での光量を用いて粒子のエネルギーを測定することができる。

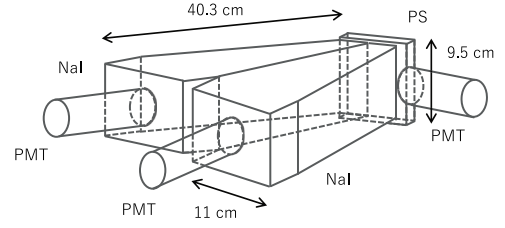


図 2: 検出器セットの模式図。

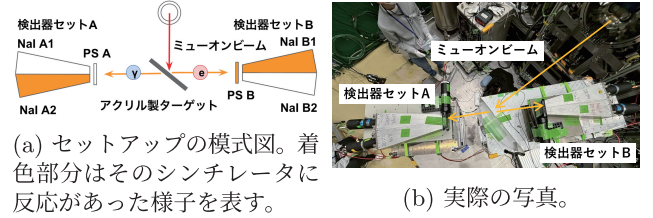


図 3: 本実験のセットアップ。

以降、検出器セット A に属するシンチレータを NaI A1, NaI A2, PS A といったように呼ぶことにする。J-PARC での本実験を開始する前は、DAQ のためのトリガー条件を「NaI A1 または A2 が反応、かつ、NaI B1 または B2 が反応したとき」と設定し、検出器セット A と B の両方に同時に何らかの粒子が検出されることを重視した。しかし実際に測定を開始してみると、NaI がビームに起因するノイズに影響されやすく、PS に全く反応がないデータばかりを取得していることがわかった。そこで急遽、「PS A または PS B のいずれかが反応したとき」という条件に変更した。トリガーがかかると、全ての NaI, PS と、加速器からのクロックの信号を、CAEN DT5725S Digitizer を用いて波形として取得した。

3.2 J-PARC MLF での実験

J-PARC MLF の Muon D2 ビームラインに、先述の自作検出器系を持ち込んで実験を行った。Muon D2 は、世界最強クラスのパルスミュオンビームで、25 Hz でダブルパルス構成になっている。強度は $5.0 \times 10^6 \mu^+ / \text{s}$ であり、表面ミュオンビーム (27.4 MeV/c) と崩壊ミュオンビーム (正: 20–100 MeV/c, 負: 20–45 MeV/c) が利用可能である。私たちは、45 MeV/c の正の崩壊ミュオンを用いた。

まずは、前節 (3.1 節) で説明した向かい合わせの配置とトリガー回路を用いて $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索のための測定を行い、その後、図 4 のように検出器セットのなす角を 180° から 120°, 60° に変更して、バックグラウンド推定のための測定を行った。

実験前に Muon D2 ビームラインのプロパティは分かっていたものの、ビームの出口がかなり高い位置に

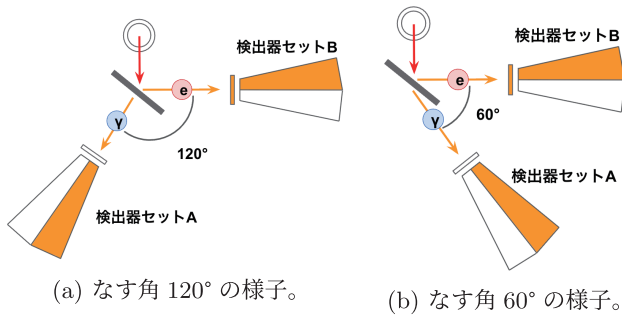


図 4: 検出器セットのなす角を変えたセットアップの模式図。

あることを、現地に行ってはじめて実感した。10 kg 以上もある NaI を目線ほどの高さまで持ち上げ、正確に距離や角度を合わせる作業は、非常に骨の折れるものだった。また、セットアップやテスト測定にかかる時間を事前に予想し、実験計画を立てていたが、全く想定通りに進まなかった。自分たちでは綿密に計画を立てていたつもりでも、現地に行き実験をする段階になると、部品が足りず別のもので代用することになったり、実験室の広さに余裕がなかったりと、セットアップを確定するのにもかなりの時間を要した。事前にビームラインの情報を数値で把握するだけではなく、装置を組み立てて予行練習をすることの大切さを痛感した。また、物理的な配置が決まった後も、ビームのエネルギーやフラックスを調整するところで非常に苦労した。パルスビーム特有の時間構造やパイルアップ、得られる全統計量の見積もりが甘かったことが原因であった。結局、現地で測定のタイムテーブルを組み直し、本測定の時間を想定の半分程度に減らすことはなったが、何とか必要なデータ取得を完了することができた。

3.3 イベント再構成

実験データを解析で使える形に持ち込むため、単一の崩壊事象の再構成を行った。手順は主に、単一パルスの抽出と同一崩壊事象の判定からなる。

比較的容易だった後者を先に説明する。単一パルスの抽出で取得した時刻情報をもとに、以下の方法で単一の崩壊事象を再構成した。まず、検出器セット内の2つの NaI の両方にエネルギーを落とした粒子の総エネルギーを求めるため、2つの NaI のパルスで同時判定を行った。次に粒子種を調べるため、検出器セット内の NaI と PS のパルスで同時判定を行った。最後に、同一崩壊事象に由来する陽電子・ガンマ線ペアの判定を行うため、2つの検出器セットで同時判定を行った。

さて、工夫を要したのは前者の単一パルスの抽出、特に NaI における抽出であった。NaI の実験データでは、ビームのパルス構造に由来するパイルアップが多く、想定

より高度なフィッティングが必要となった。また、データごとに含まれるパルスの数が異なること、シンチレータの応答の個体差、データの多さといった観点から、フィッティングパラメータをデータごとにチューニングしなくてよいコードの実装が求められた。こうした課題を解決するため、NaI における単一パルスの抽出は、きれいなパルスを探して単一パルスのテンプレートを作成した後、パイルアップしたパルスの分解を行うという方針をとることにした。

まず、図5の手順で、きれいなパルスの探索を行った。そして、きれいなパルスを使って単一パルスのパラメータの一部を決定した。これにより、この後のフィッティングにおけるパラメータを振幅と位置だけにし、安定性を向上させた。

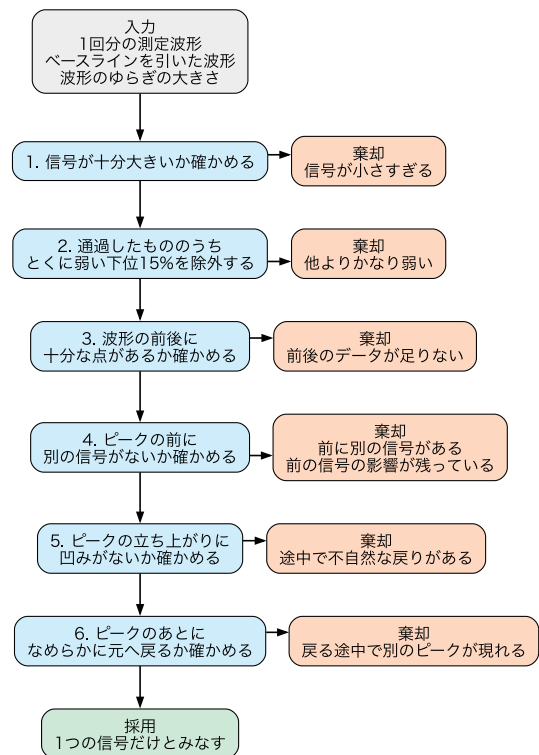


図 5: 単一パルス候補の棄却フロー。先行ピーク、立ち上がり形状、主ピーク後の再下降の各条件を順に適用して、テンプレート作成に用いる「きれいなパルス」を選別した。

次に、図6の手順でデータのフィッティングを行った。実装の要点は、テンプレートとデータの内積を利用したパルス位置の特定と残差二乗和を利用した停止条件の設定である。前者はパルスの位置にあたりをつけてからフィッティングを行うことで精度を上げ、後者はフィッティングに含めるパルス数を自動判定を行うことで汎用性を実現した。図7にフィッティング結果の例を示す。データに含まれるパルスの大小が様々でも、うまくフィットできていることが分かる。

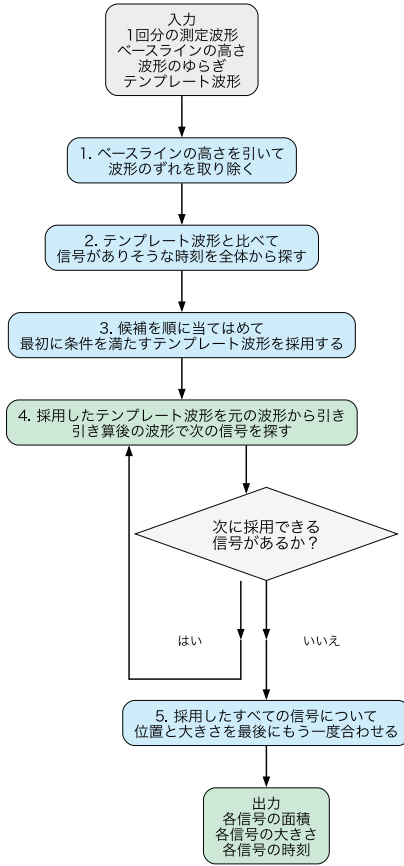


図 6: パイルアップしたパルス分解の処理フロー。候補探索，逐次フィット，採用判定，最終フィットの順に処理を行う。

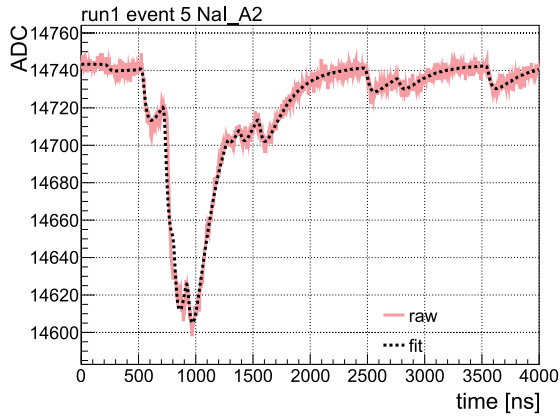


図 7: フィッティング結果の例。実線が実験データ，点線がフィッティングである。

3.4 統計解析

解析戦略の大部分は MEG 実験の手法を参考に設計した。具体的には，プロファイル尤度比を統計検定量として用いる Feldman–Cousins 法で信頼区間を求める手法である。一方，連続ビームを用いた MEG 実験と異なり，パルスビーム特有の問題が発生したため，独自の評価方

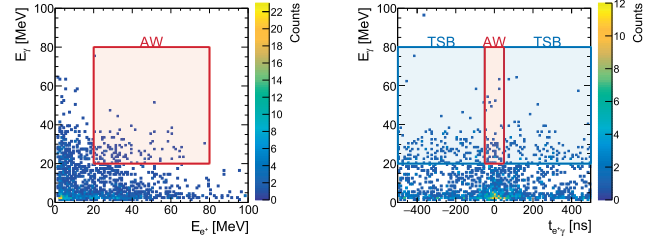


図 8: 解析に用いた事象分布と，解析窓 AW およびタイミングサイドバンド TSB の定義。

法も併用した。解析に用いた変数は，再構成で得られた陽電子エネルギー E_{e+} ，ガンマ線エネルギー E_{γ} ，陽電子とガンマ線の到達時間差 $t_{e+\gamma}$ ，陽電子のビーム軸に対する放出色 ϕ_{e+} ，ガンマ線のビーム軸に対する放出色 ϕ_{γ} からなる 5 次元ベクトル

$$\mathbf{x} = (E_{e+}, E_{\gamma}, t_{e+\gamma}, \phi_{e+}, \phi_{\gamma})$$

である。補助的に相対角 $\theta_{e+\gamma} = |\phi_{e+} - \phi_{\gamma}|$ も定義する。

最終解析に用いる解析窓 (Analysis Window; AW) は検出器分解能の 3 倍から 25 倍の大きさを保ち， $\mathcal{O}(10)$ 程度の事象数を含むようにに定義した。観測量全体の分布と，AW，背景評価に用いるタイミングサイドバンド (TSB; $|t_{e+\gamma}| > 50$ ns) の定義は図 8 に示す。

バックグラウンドは，主に Radiative Muon Decay (RMD) と偶発バックグラウンド (Accidental background: ACC) の 2 成分を考えた。

ACC については，当初は時間相関がない平坦な事象であると考えて解析コードを組んでいた。しかし，実際の TSB でのデータを確認すると，時間分布にパルスビーム由来の時間構造が見られたため，急遽対策を講じることになった。初めてデータを見たときはかなり面食らったが，試行錯誤を経て，時間構造がガンマ線のエネルギーに依存していることが分かった。したがっていくつかのエネルギービンごとに分け，時間構造をガウシアンと定数項の和でフィットし，AW への混入量を見積もった。得られた AW 内の ACC 事象数は最終的な尤度関数における制約項に用いた。

一方，RMD 事象数もエネルギーサイドバンド，角度サイドバンドから予想して制約項に使う予定であったが，これらのサイドバンドは信頼度が低いことがわかったためこれは行わず，PDF を用いたモンテカルロシミュレーションから予測した。これはサイドバンドから得たものではないため，最終解析とのクロスチェックに使った。

信号事象数 N_{sig} ，RMD 事象数 N_{RMD} ，ACC 事象数 N_{ACC} は，signal, RMD, ACC の PDF を用いた拡張最尤法で求めた。確率密度関数は，理論分布と予備実験で測った検出器応答を畳み込んで作った。このコードを作る過程が一番苦労した。特に，畳み込み積分の計算量をどう落とすかといった点が大きな問題点であった。最終

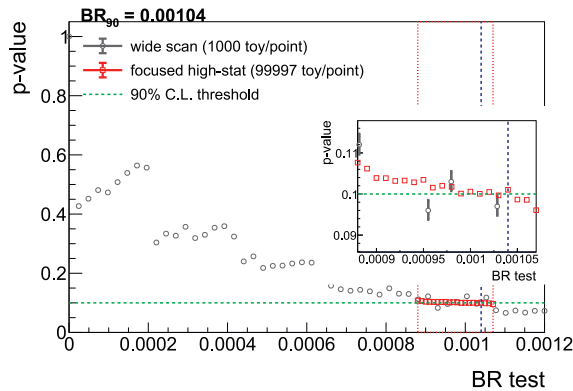


図 9: Feldman-Cousins 法による上限評価。横軸は仮定したテスト分岐比 B_{test} ，縦軸は各 B_{test} のもとで生成した pseudo-experiment に基づく p 値を示す。 $p = 0.1$ との交点を 90% C.L. 上限として採用した。

的には、事前に理論分布に対して検出器応答でスメアリングしたモンテカルロシミュレーションデータをグリッドとして保持しておき、計算時にはそこから値を直接読み出して使うという策で問題を解決した。

実験後、予想していなかったパイルアップの分解を1ヶ月程度かかって何とか成功させ、実データに対する最尤フィットをした結果、信号数 N_{sig} は0に張り付き、有意な信号超過は認められなかった。

分岐比の規格化には Michel 崩壊由来の陽電子を用いた。実データの陽電子数と Geant4 シミュレーションから有効停止ミューオン数を評価した。

信頼区間は、プロファイル尤度比を統計検定量とする Feldman-Cousins 法を用いて評価した。その結果、90% C.L. 上限として

$$B(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 1.04 \times 10^{-3}$$

を得た。 p 値の走査結果は図9に示す。この結果はPDFから生成した擬似実験によって見積もった感度 1.05×10^{-3} ，また標準模型から見積もったRMDの予想事象数と整合した。

4 まとめ

今回の加速器施設を用いた実験では、学部生の卒業研究としては非常に大規模で貴重な経験をさせていただいた。今回得られた分岐比上限は、世界最高感度の実験結果と比べればおよそ10桁大きく、探索実験としての到達感度には大きな差がある。しかし、限られた準備期間とビームタイムの中で、実験計画の立案から、ハードの設計・準備、測定、取得波形の再構成、解析コードの構築、統計的处理までを一通り経験できたことは、非常に意義のある経験だった。特に、現地でのセットアップや

測定条件の調整、パルスビームに由来するパイルアップへの対応など、実際に実験を行って初めて見える課題も多かった。事前の見積もりや計画が重要である一方で、現場で得られたデータを見ながら方針を修正していく柔軟さも必要であることを学んだ。

5 おわりに

学部生が自ら課題を立て、加速器施設での実験を構想し、測定と解析を通して物理に迫っていく経験は、大学での学びを研究へとつなぐ貴重な機会である。また、教員にとっても、自分ではこれまで扱ったことのなかった実験が提案段階から少しずつ形になっていく様子や、学生たちが試行錯誤を重ねる中でみるみる成長し、ビームタイムに向けて団結していく様子を見ることは大きな喜びである。課題研究P2では、本記事で紹介したミューオン稀崩壊探索実験以外にも、多くのユニークな実験に取り組んできた。ホームページ[6]では、過去の実験についてのレポートを公開しているので、ぜひそちらも参照していただきたい。今後も加速器施設の協力を得ながら、学部生が主体的に取り組める実験テーマを継続して開拓していきたい。

最後に、毎年、実験を進めるにあたっては、多くの方々のご支援とご協力をいただいている。本稿で紹介したミューオン稀崩壊探索実験にあたっては、KEKの梅垣いづみさんにJ-PARC MLF Muon D2 ビームラインでの実験実施に向けた調整をしていただき、東大ICEPPの難波俊雄さんに大型のNaI検出器を貸与していただいた。これまでの実験をご支援・ご協力いただいた各位に、この場を借りて深くお礼を申し上げる。

参考文献

- [1] 阿部 倫史 *et al.*, 高エネルギーニュース Vol.37 No.1, 012345R (2018).
- [2] J. Hisano *et al.*, Phys. Rev. D Vol.53 No.5, 2442 (1996).
- [3] J. Hisano *et al.*, Phys. Lett. B Vol.437, 351 (1998).
- [4] A. M. Baldini *et al.* (MEG II Collaboration), Eur. Phys. J. C Vol.85, 1177 (2025).
- [5] S. T. Petcov, Adv. High Energy Phys. Vol.2013, 852987 (2013).
- [6] 京都大学理学部課題研究 P1・P2 のホームページ <https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/p1p2.html#P2>