

【2】研究計画 適宜概念図を用いるなどして、わかりやすく記入してください。様式の変更・追加は不可です。

(1) 研究の概要及び研究の位置づけ 本項目は1頁に収めてください。

- ・まず、研究課題名及び研究の概要を500字程度で記入してください。
- ・続けて、特別研究員として取り組む研究の位置づけについて、当該分野の状況や課題等の背景、並びに本研究計画の着想に至った経緯も含めて記入してください。

波線部はコメント修正箇所です

研究課題名：ミュオン電子転換探索の感度向上に向けた解析手法の開発

概要

素粒子物理学における標準模型は、物質の最小構成要素である素粒子における基本的な相互作用を記述する理論である。標準模型は未だ不完全で、物質反物質非対称性やニュートリノ振動など説明できない現象が残っているため、新理論の発見が待ち望まれている。本研究で探索する荷電レプトンフレーバー非保存過程(以下、charged Lepton Flavor Violation:cLFV)は標準模型では崩壊分岐比が 10^{-54} 以下と非常に強く抑制されている。一方、多くの新理論内ではこの過程が 10^{-15} 程度の確率で観測可能と示唆されている。従って、cLFVの発見は標準模型の寄与がなく、新物理の直接的な証拠となる。COMET実験ではミュオン電子転換過程($\mu^- + N \rightarrow e^- + N$)と呼ばれるcLFVの一種を探索する。COMET実験は現状のミュオン電子転換過程に対する世界最高感度を二桁ほど更新するものとなる。

研究の位置付け

・当該分野の状況

ミュオン電子転換探索の世界最高感度は、先行実験のSINDRUM-IIでの 7×10^{-13} であり、発見には至らなかった^[1]。この測定では連続的なビームを使用したため、ビーム由来の背景事象が常に存在し、ビーム強度に対する探索感度に制限があった。そこでCOMET実験では、パルス状のビームを使用することと標的にアルミニウムを使用することで背景事象の問題を克服する。ビームのパルス間隔 $1.17 \mu\text{s}$ に対し、原子中のミュオン寿命が $0.86 \mu\text{s}$ と長いアルミニウムをミュオン静止標的に採用し、陽子ビームのバンチタイミングから遅れてトリガーをかける。これにより、ビーム由来のバックグラウンドが大幅に低減する。同様の実験として米国Fermi研究所にて建設中のMu2e実験^[2]があるが、COMET実験が先行して、世界最高感度に到達する計画である。

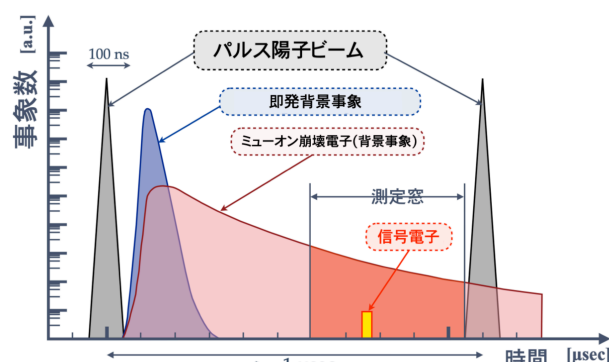


図 1: ビームの時間構造

・本研究の着想に至った経緯

COMET実験における背景事象にはビーム由来のもの以外に、原子軌道上におけるミュオンの三体崩壊(Decay In Orbit:DIO)による電子があげられる。そこで検出された電子の運動量を用いて、DIOによる電子とミュオン電子転換による電子を見分ける。ミュオンビームのアルミニウム標的への照射は1 Tのソレノイド磁場内で行う。そのため、荷電粒子が磁場で螺旋運動する性質を用いて、運動量を測定することができる。具体的にはガス飛跡検出器(Cylindrical Drift Chamber:CDC)による電子の飛跡の曲率と磁場の値よりその運動量を測定することができる。そこで、CDCで検出された背景事象を含むヒットのうち信号電子の飛跡を見つけるアルゴリズムの開発が必要不可欠であり、DIOによる信号と分離するためには200 keV/cの運動量分解能が要求されている。

COMET実験は2026年に全ての装置のインストールが完了し、同年末には低強度ビームでの物理測定を開始し、2028年にはいよいよCOMET Phase-Iが開始する予定である。従って2026年以降にはCDCの運動量較正や上述の物理解析手法の確立を行うことが優先順位の極めて高い項目である。そこで、申請者の修士課程における磁場分布に関する経験やトラッキングアルゴリズムに対する理解を活かし、世界最高感度でのミュオン電子転換過程探索を実現する。

[1] SINDRUM-II Collaboration, Eur. Phys. J.C47 337-346 (2006)

(研究の概要と位置づけの続き)

[2] Mu2e Collaboration, Universe, 9, 54. (2023)

(研究の概要と位置づけの続き)

「研究の概要と位置づけ」は 1 ページ以内で書いてください。

【2】研究計画（続き） 適宜概念図を用いるなどして、わかりやすく記入してください。様式の変更・追加は不可です。

(2) 研究目的・内容等 本項目は2頁に収めてください。

- ① 特別研究員として取り組む研究計画における研究目的、研究方法、研究内容について記入してください。
- ② どのような計画で、何を、どこまで明らかにしようとするのか、特別研究員奨励費の応募区分（下記（※）参照）に応じて、年次計画を示し、具体的に記入してください。研究計画が想定通り進まなかった場合の対応方法があれば、あわせて記入してください。
- ③ 研究の特色・独創的な点（先行研究等との比較、本研究の完成時に予想されるインパクト、将来の見通し等）にも触れて記入してください。
- ④ 研究計画が所属研究室としての研究活動の一部と位置づけられる場合は申請者が担当する部分を明らかにしてください。
- ⑤ 研究計画の期間中に受入研究機関と異なる研究機関（外国の研究機関等を含む。）において研究に従事することも計画している場合は、具体的に記入してください。

（※）特別研究員奨励費の研究期間が3年の場合の応募総額は（A区分）が240万円以下、（B区分）が240万円超450万円以下（DC1のみ）。2年の場合は（A区分）が160万円以下、（B区分）が160万円超300万円以下。1年の場合は（A区分）が80万円以下、（B区分）が80万円超150万円以下。（B区分については研究計画に必要の場合のみ記入）

1. 研究目的、研究方法、研究内容

本研究の目的はミュオン電子転換過程を世界最高感度で探索し、標準模型を破る新物理を実験的に観測することである。そのため、茨城県の大強度陽子ビーム施設 J-PARC で計画している **COMET 実験** で測定および物理解析を主導する。

アルミニウム原子核に捕獲されたミュオンのミュオン電子転換によって生成される信号電子の運動量はミュオンの質量から原子核の束縛エネルギーと反跳エネルギーを引いた **105 MeV/c** である。一方、背景事象である原始軌道上でのミュオンの崩壊 (DIO) は三体崩壊であるため、ミュオン電子転換過程よりも小さい運動量になる。そこで検出器全体をソレノイド磁場内に設置し、粒子の飛跡より求められる**電子の螺旋運動の曲率**を用いて信号電子の運動量を測定する。飛跡検出にはガス検出器 (CDC) を用い、CDC のデータ取得のトリガーにはシンチレータ検出器 CTH を用いる。図2のようにDIO電子と信号電子のスペクトルを分離するには**200 keV/c の運動量分解能**がCDCには要求されている。

信号電子が検出器内で複数周回転する multiple turn tracks が現在物理解析において問題視されている。その理由は三つあり、第一に、複数周 CDC にヒットを残すため、周回ごとにヒットを区別する必要があり、トラッキング精度が悪くなってしまう。第二に、CDCでのヒットが多い分、失う運動量も大きくなり、DIO との区別が難しくなる。第三に、周回が多い分、無関係なノイズを拾いやすい。結果的に検出器内で一周しかしない single turn tracks のアクセプタンスは11%であるのに対し、multiple turn tracks では7.2%になる。つまり、multiple turn track を判別できないと、最悪の場合 COMET 実験で期待できる**最高感度の2/3**ほどしか達成できない可能性がある。そこで、multiple turn tracks を判別できる解析法を開発し、SINDRUM-II^[1] の感度を100倍更新する 3.0×10^{-15} のミュオン電子転換過程探索を実現する。

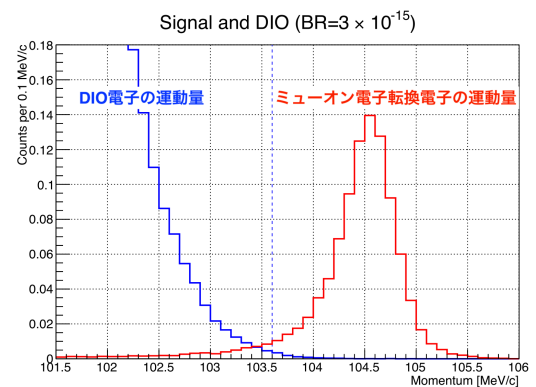


図2: 信号電子の運動量分布

2. 研究計画

・本番環境での磁場測定 (採用まで)

2025年に行われるDSおよびCDCなど検出器のインストールを主導し、実験開始の準備を着実に進める。

信号電子の運動量 p は磁場 B と曲率半径 ρ より、 $0.3B\rho$ で計算される。2025年末に行う磁場測定のデータは今後のトラッキングアルゴリズム開発や物理解析に使用するため、**非常に重要である**。申請者はCDCに必要な運動量分解能を実現する上で許容される磁場の誤差や要求される精度を、ICEDUST^[2] というフレームワーク (COMET 実験グループ内で独自に開発された) を用いて決定している。この結果に従って要求精度を十分満たす磁場測定システムを開発し、インストール後の2025年末に予定されている本番環境での磁場測定を行う。ここでは、物理測定時の設定磁場である1Tでの測定に加え、運動量較正 (後述) 用の低い磁場 (約0.7Tと約0.5T) での測定も加えて行う。この測定システムの開発には申請者が修士課程1年時に行ったDS納品後の健全性確認のための磁場測定試験で得られた経験が活きると考えている。この経験から得られたフィードバックを活かし、系統的な誤差や揺らぎを最小限に抑え、200 keV/c の運動量分解能達成に向けた測定システムを開発する。

・CDCの運動量較正および宇宙線Run(1年目)

最初に宇宙線を用いた検出器のテスト測定を行う。この測定では、2 GeV 程度の信号電子やDIO電子と比べて大きなエネルギーを持つ宇宙線の直線的な飛跡が設計通りの位置分解能で再構成できることを確認する。これにより、トラッキング性能だけでなく、CTHによるトリガーが機能していること設計通りにデータ取得ができていることも同時に確認できる。この測定ではハード、ソフト両面での様々な障害が発生することが予想され、各障害の原因特定およびデバッグ作業を行う。

宇宙線でのテスト測定に成功した後は、 π から e へのビーム即発背景事象 (運動量: 70 MeV/c) と標準模型内でのミュオンの電子への崩壊 (運動量: 52.5 MeV/c) を用いて、検出器の運動量較正を行う。信号電子 (運動量: 105 MeV/c) の磁場の強度では飛跡が長くなるため、これらの比較的低運動量電子でも信号電子と同程度の半径の螺旋運動になる

(【2】研究計画 (2) 研究目的・内容等の続き)

ように磁場強度を調整する。その後、同じ条件でトリガーをかけ、CDC での飛跡検出を行い、運動量較正を行う。

・低強度ビームでの物理測定およびトラッキングアルゴリズム開発 (2 年目)

2026 年末に COMET Phase-I の 1/10 の強度でビーム供給を行い、物理測定を行う。現在 COMET 実験では、検出器内で複数周螺旋運動をする multiple turn tracks によるアクセプタンスの低下が問題視されている。実際に電子の螺旋運動を用いて運動量測定を行う MEG 実験^[3]でもこの事象は問題視されており、各周回を判別できるようになったことで約 4 % 検出効率がアップしたことが報告されている。しかし、用いるソレノイド磁場の形状が異なるため、COMET 実験でも同じ方法を踏襲することはできず、COMET 実験独自のアルゴリズムの開発が要求されている。実際のソレノイド磁場は鉄ヨークに格納されていても完全に一様ではなく、円筒中心軸においてシミュレーション上で磁石中心に対し検出器両端 (磁石中心から 1 m) で約 15 % 磁場が低下する。即ち、105 MeV/c の運動量を持った電子では、磁石中心と比較して検出器両端で螺旋運動の半径が約 7 cm 大きい飛跡を描く。multiple turn tracks を残すような電子の平均的な円筒軸方向の運動量は約 1 MeV/c と予想されており、この運動量では螺旋運動一周の間隔は約 2 m となる。従って、周回ごとに数 cm 単位で曲率半径が変化することが予想され、CDC の 1 セルが 0.16 cm(%%多分表現正しくないの Sun さんとかに確認します)であることより、飛跡の曲率半径の違いから multiple turn tracks の各周回を分離するアルゴリズムを開発する。(%%何%感度が良くなるとか、逆に非一様性のせいで Track Finding に逆効果があるとかはまだ考えてないです)

・Phase-I 測定および物理データ解析 (3 年目)

2028 年には予定強度のビームで COMET Phase-I の測定が開始するため、2 年目までに深めた検出器への理解や低強度ビーム試験時で得たトラブルシューティングの経験を元にこの測定を主導する。

2 年目に開発したトラッキングアルゴリズムで実際に得られた物理データの解析を行い、飛跡の再構成の効率やアクセプタンスなどアルゴリズムの性能を評価する。低強度ビーム試験データを使ったアルゴリズムのブラッシュアップは 2028 年以降の COMET Phase-I でのビーム測定データ解析、ひいてはミューオン電子転換過程発見に繋がる。(%%コメントもらったと思うのですが、2026 年度のデータを解析し尽くすというところでもう少し相談したいです)

3. 研究の特色、独創的な点

先行実験の SINDRUM-II^[1]は連続的な DC ビームを使用していたことでビームの強度に対して探索可能な感度に制限があった。一方、COMET では世界最高の extinction(時間的純度) のパルスミューオンビームを用い、かつ効率の良い背景事象除去が可能なトリガーシステムを用いることで 100 倍感度を改善できる。本研究では、未だ同グループでは着手していないソレノイド磁場の非一様性を利用したトラッキングアルゴリズム開発を行う。また、関連実験として同じミューオン cLFV である $\mu \rightarrow e + \gamma$ を探索する MEG 実験^[3]がある。ガンマを放出するか否かの分岐比は理論依存が大きいので、本研究の結果と組み合わせることで、より詳細な新物理の検証が可能となる。

4. 申請者が担当する部分

aaaa

5. 異なる研究機関での研究従事

- [1] SINDRUM-II Collaboration, Eur. Phys. J.C47 337-346 (2006)
- [2] R. Derveni, Comparative analyses of sub-GeV physics in simulations and data for the COMET experiment, Ph.D. thesis, Imperial College London, April 2024. doi:10.25560/116399
- [3] A. M. Baldini *et al.*, “Search for the lepton flavour violating decay $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ with the full dataset of the MEG experiment,” *European Physical Journal C*, vol. 76, no. 8, p. 434, 2016.

【３】人権の保護及び法令等の遵守への対応 本項目は１頁に収めてください。様式の変更・追加は不可です。

- ・本欄には、「【２】研究計画」を遂行するにあたって、相手方の同意・協力を必要とする研究、個人情報の取り扱いの配慮を必要とする研究、生命倫理・安全対策に対する取組を必要とする研究や安全保障貿易管理を必要とする研究など指針・法令等（国際共同研究を行う国・地域の指針・法令等を含む）に基づく手続が必要な研究が含まれている場合、講じる対策と措置を記入してください。
- ・例えば、個人情報を伴うアンケート調査・インタビュー調査・行動調査（個人履歴・映像を含む）、国内外の文化遺産の調査等、提供を受けた試料の使用、侵襲性を伴う研究、インフォームド・コンセントが必要な研究、ヒト遺伝子解析研究、遺伝子組換え実験、動物実験、機微技術に関わる研究など、研究機関内外の情報委員会や倫理委員会等における承認手続が必要となる調査・研究・実験などが対象となりますので手続の状況も具体的に記入してください。
- ・なお、該当しない場合には、その旨記入してください。

該当なし

【4】研究遂行力の自己分析 本項目は2頁に収めてください。様式の変更・追加は不可です。

・日本学術振興会特別研究員制度は、我が国の学術研究の将来を担う創造性に富んだ研究者の養成・確保に資することを目的としています。この目的に鑑み、これまで携わった研究活動における経験などを踏まえ、研究遂行力について分析してください。

(1) 研究に関する自身の強み

コミュニケーション力

申請者の強みは日英を問わないコミュニケーション力である。COMET 配属前の学部4年生の頃に参加した会議では、初対面の研究者らにも積極的に話しかけ、配属前から名前を覚えてもらうなど、良好な関係を築くことができた。以降も COMET の活動を通じて、共同研究者と積極的に交流・議論を重ね、COMET 内における学術的・人的ネットワークの広がりや深化に貢献している。多くの研究者が協力して一つの実験を遂行するには、良好な人間関係と円滑な意思疎通を基盤とした組織風土が不可欠であり、申請者の人間性とコミュニケーション能力は、そのような環境の持続的な醸成において大きな役割を果たすと考えている。

加えて、申請者の強みは上述のコミュニケーションを英語でも行うことができる点である。COMET は国際コラボレーションであるため、英語での積極的なコミュニケーションが求められる。各種会議での対面のコミュニケーションに加え、申請者は、トラッキングのソフトウェアに関して学習するために中心となっている中国のグループと積極的に交流している。自分の理解を深めるだけでなく、トラッキングソフトウェアグループと磁石関連を担う KEK 低温セクションのリエゾンのような役割も果たし、物理解析の主軸であるトラッキングソフトウェアとトラッキングに欠かせない磁場測定の実験との情報交換の活性化を担っている。

(2) 今後研究者として更なる発展のため必要と考えている要素

研究費を獲得する術。

(【4】研究遂行力の自己分析の続き)