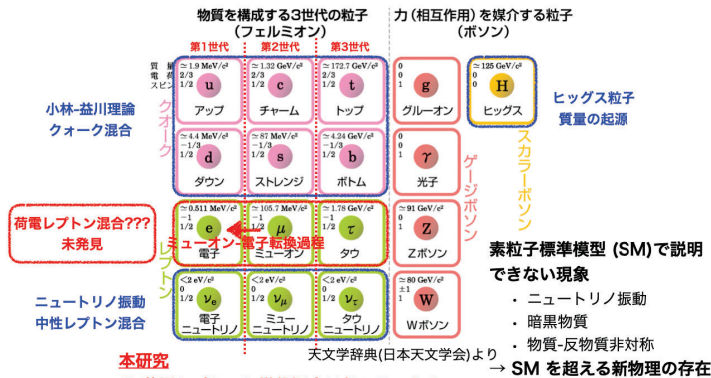
	研究代表者 九州大学・理学研究院・准教授 東城 順治（とうじょう じゅんじ） 研究者番号:70360592
	研究課題 情報 課題番号：22H04941 キーワード：ミュオン、荷電レプトン、世代混合、ミュオン-電子転換 研究期間：2022年度～2026年度

なぜこの研究を行おうと思ったのか（研究の背景・目的）

● 研究の全体像

素粒子の基本的な模型である素粒子標準模型(SM)は、素粒子に質量を与えるヒッグス粒子の発見により、一定の完成を遂げた。一方、SMの理論的な構造やSMで説明できない現象があることから、SMを超える新物理は必ず存在し、その解明が最重要課題である。多角的なアプローチが重視されている中で、本研究では、物質を構成するクォーク・レプトンのうち、電荷を持つレプトンである荷電レプトンの世代と呼ばれる構造に着目する。クォークと中性レプトンであるニュートリノには、素粒子の種類が転換する世代混合が発見されている。荷電レプトンでは、多くの新物理模型が世代混合を予測しているが、未発見である。特に、第2世代のミュオン粒子(ミュオン)が第1世代の電子に転換する「ミュオン-電子転換過程」は、最先端大強度陽子加速器によるミュオンの大量生成と先進的な高感度検出器・計測技術の開発により、発見感度の高い実験を実現できるとして注目されている。本研究では、史上最高感度でミュオン-電子転換過程を探索する実験を実現・遂行し、荷電レプトンの世代混合と新物理の探索に挑む。さらに発見感度を上げた次期実験の実現へと繋げる。



本研究
 (I) 荷電レプトンに世代混合は起こるのか？
 (II) 世代混合を起こす新物理の正体は？
 → 史上最高感度でミュオン-電子転換過程を探索
 新物理の発見を目指す

図1 研究の全体像

● 研究の手法（研究計画・方向等）

史上最高感度でミュオン-電子転換過程を探索するCOMET実験は、我が国が世界に誇る大強度パルス陽子ビームを供給することができるJ-PARC加速器で準備中である。図にCOMET実験の全体計画とその特徴を示す。陽子ビームで生成する膨大な2次粒子(パイ中間子・ミュオン)を高磁場超伝導ソレノイドで捕獲する。ユニークな湾曲ソレノイドで負電荷のミュオンのみを選択的に輸送して、静止させる原子核標的に導き、独自開発した高感度検出器で転換過程を探索する。転換過程の信号は、ミュオンの質量と等価な一定のエネルギーを持つ電子である。多くの新物理模型が予測する発生頻度は、 $10^{-14} \sim 10^{-17}$ と極めて小さく、大量生成するミュオンの高度なパルス化と高感度検出器が発見の鍵である。

COMET実験は、第1段階(Phase-I)と第2段階(Phase-II)の2段階で遂行する。Phase-Iでは、輸送ソレノイドの最初の90度までを建設し、ビーム計測と感度 10^{-15} の探索を行う。Phase-IIでは、計画の最終ライアウトを完成させ、陽子加速器の出力を上げて、感度 10^{-17} の探索を行う。本研究では、Phase-Iでのビーム計測、Phase-IIに向けた高感度検出器の開発と加速器の改良を主要な目的とする。

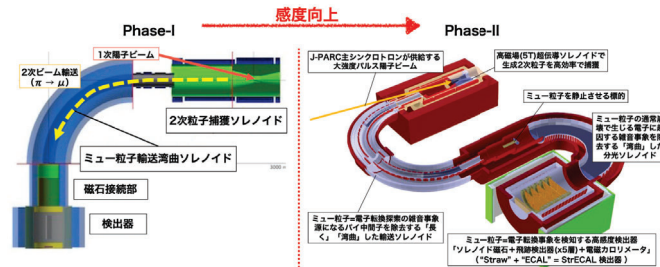


図2 COMET実験計画

- ・ ミュオン-電子転換過程 $\mu^- N \rightarrow e^- N$
- ・ 通常の崩壊 $\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$ と異なる
- ・ ニュートリノを放出しない
- ・ 信号：105 MeV 単色電子
- ・ 通常崩壊と比べて $10^{-14} \sim 10^{-17}$



図3 ミュオン-電子転換過程

この研究によって何をどこまで明らかにしようとしているのか

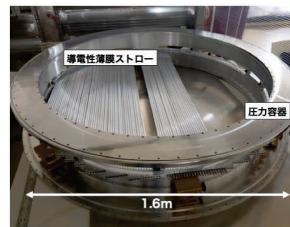
● Phase-Iにおけるビーム計測と感度 10^{-15} の探索

Phase-Iで遂行するビーム計測は、ソレノイド磁石・飛跡検出器・電磁カロリメータを組み合わせたStrECAL検出器を用いる。この高感度検出器は、Phase-IIで感度 10^{-17} の探索を実現するために開発を行ってきた。飛跡検出器は、真空中で動作可能かつ超低物質質量を実現するため、導電性薄膜ストロー(Straw)の比例計数管で構成したストロー飛跡検出器であり、荷電粒子の飛跡を検出する。電磁カロリメータ(ECAL)は、高発光量・高速応答のLYSO無機結晶シンチレータと磁場中で動作可能なシリコン光検出器で構成した、エネルギーを高分解能で測定する検出器である。

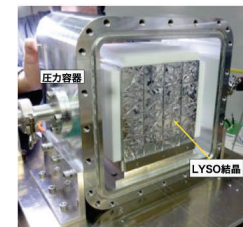
Phase-Iでは、輸送ソレノイドが短いため、ビーム中に残るパイ中間子が探索で背景事象となる。そのため、探索自体は、ビーム中心部分に不感円筒型検出器を用いる。本研究では、StrECAL検出器で全ビーム粒子を計測して背景事象を理解することにより、感度 10^{-15} を実現する。さらに、このStrECAL検出器は、Phase-IIに用いる検出器の試作機として位置付けることができ、ビーム計測により検出器の性能評価を行って、Phase-IIに向けた検出器の開発を完了させる。

● Phase-Iのビームを用いた、Phase-IIに向けた加速器の改良

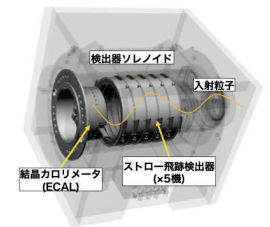
COMET実験を実現するためには、加速器における高品質陽子ビームの高度なパルス化と低エネルギー(8 GeV)加速が必須である。加速する粒子の塊はバンチと呼ばれ、バンチ間への漏洩粒子数が小さいことがパルス品質の目安となる。Phase-Iの実現に向けた加速器の準備は整っており、本研究ではPhase-IIに向けた課題を研究する。特に、ビーム軌道を変更する高速パルス電磁石は、駆動回路を改良し、Phase-Iでさらにパルス品質を向上させる。また、Phase-IIで低エネルギー加速時に大強度運転をするため、ビーム軌道をゆっくり変えてその一部を取り出す電磁石は、有効領域を広げる必要があり、新材料を用いた開発を行う。これらの研究により、Phase-Iで最高性能を実現し、Phase-IIに向けた加速器の準備を完了させる。



Straw飛跡検出器



ECAL試作機



StrECAL検出器

図4 高感度StrECAL検出器