

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 8 月 12 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25247043

研究課題名(和文)素粒子の新しい相互作用の探求をめざした大強度パルスミュオンビームの開発

研究課題名(英文) Development of a high-intensity pulsed muon beam to search for the new interaction of elementary particles

研究代表者

三原 智 (Mihara, Satoshi)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号：80292837

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 33,400,000円

研究成果の概要(和文)：標準模型を超える新物理を探索する手段としてミュオンの稀崩壊を探索することによりその手がかりをつかもうとする実験的手法が注目を集めている。本研究では大強度パルスミュオンビームによりミュオン・電子転換事象探索を行うにあたり、必要なミュオンビームを精緻に診断し実験感度を最大化するために必要となる検出器を開発した。必要とするミュオンビームは低運動領域で広い運動量範囲に渡っている。このため、ビーム診断用の検出器として、超低物質量のストロー飛跡検出器、高速応答が可能で高いエネルギー分解能を備えたLYSOカロリメータ検出器を建設して、それらの性能評価を実施した。

研究成果の概要(英文)：Searches for muon rare decays are drawing attention as a clue to the physics beyond the Standard Model in particle physics. We have developed a detector system to diagnose a muon beam for the search of the muon to electron conversion using a high-intensity muon beam. The muon beam in such purpose has a wide momentum range in low momentum region, thus we developed and successfully constructed a system composed of ultra-low material tracking detector using straw tubes and LYSO crystal calorimeter with fast response and good energy resolution. We conducted a performance evaluation test of this system in this research program.

研究分野：素粒子実験

キーワード：素粒子実験 量子ビーム

1. 研究開始当初の背景

本研究を開始する前年には CERN における LHC 実験においてヒッグス粒子が発見され、素粒子標準模型の最後の未発見粒子の存在が確認された年であった。ヒッグス粒子は素粒子物理がプランクスケールまで標準模型だけに従うのか、あるいは別な新物理に従うのかを確かめる手がかりとなるが、このようなヒッグス粒子の精密計測とは異なる方法で新物理の可能性を探ることもまた重要である。

ミュオン稀崩壊探索はまさにそのような手法の一つであり、実験感度を極限にまで高めて探索を行うことにより新物理の可能性を探る実験が世界中で計画・進行中である。

2. 研究の目的

1936 年の発見以来、ミュオンの性質の精密測定は、素粒子の標準模型の確立に貢献してきた。現在、標準模型を内包する、より大きな枠組の物理を探る手段としてミュオンの有効性が指摘されている。このような新物理の探索は大量のミュオンを必要とする。特に時間構造を最適化した大強度パルスミュオンビームを使用した μ -e 転換事象探索は、その感度の高さから次世代の新物理探索実験として有効であると考えられている。実際、大強度陽子加速器施設である J-PARC では、 μ -e 転換事象の探索を次期主要研究課題の一つとして定め、施設整備計画を進めている。本研究では、ここで生成されるミュオンビームを精緻に診断し、実験感度を最大化するために必要な基礎的研究を推進する。

3. 研究の方法

J-PARC の大強度陽子ビームを活用して世界最高感度で μ -e 転換事象の探索を行おうとする実験が COMET 実験である。COMET 実験では段階的に施設を建設することにより、最終的には 10^{-16} 以下にまで実験感度を押し下げることを目指している。

これを実現するためには μ -e 転換事象の元になるミュオンビームを実験に最適化することが不可欠である。これを実現するため本研究ではミュオンビームを診断するための装置開発を中心に行った。COMET 実験のビーム診断を行うための装置は、飛跡検出器とカロリメータ検出器から構成される。飛跡検出器は低エネルギービームの計測を行うため物質を低減する必要があり、そのため真空中で動作可能なストローチューブ飛跡検出器を開発した。カロリメータは入射粒子のエネルギーを計測する分解能に加えて、粒子の入射位置の位置分解能も要求されることから、2cm x 2cm の結晶をアレイ状に組み上げることで実現した。結晶は必要とされる測定器分解能を達成しつつ高レートビームの入射にも耐えられるように、高速応答が可能な結晶が選定され、本研究では LYSO 結晶を採用して研究を進めた。

4. 研究成果

(1) ストローチューブ飛跡検出器開発

COMET 実験では μ -e 転換事象で生成される電子の運動量を正確に測定することにより信号を同定する。運動量の計測は磁場中での荷電粒子の飛跡を測定しその回転半径の大きさから算出するが、これを精度良く行うには正確な磁場マップと物質を極限まで抑えることにより多重散乱の効果を最小化した飛跡検出器が必要となる。また COMET 実験のためのミュオンビームの最適化を行うためには、低運動量領域のビーム粒子の運動量を計測する必要があるが、後述するカロリメータ検出器と合わせてこのような飛跡検出器が必要になり、本研究における検出器開発はビーム計測と将来の物理計測の双方に活用できるものである。

本研究では飛跡検出器の最も重要な構成要素として、十分な強度を持ちながらも正確な円形状を有している極薄ストローの開発を協力研究者である JINR の研究者らの協力を得て行った。JINR では研究開始時点で CERN における NA62 実験のために 36 μ m 厚のマイラー製のストローを超音波溶接技術を駆使して製造する技術を確立していたが(図 1)、更に溶接のパラメータを最適化することにより 20 μ m 厚のストローを作ること成功した。本研究では製作後はすべてのストローに関して加圧試験を行い、リークがないことを確認した上で飛跡検出器製作に使用した。

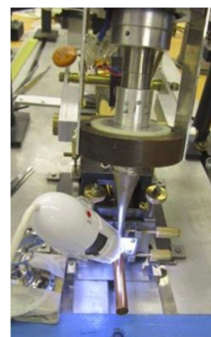


図 1 超音波溶接によるストローチューブ製作

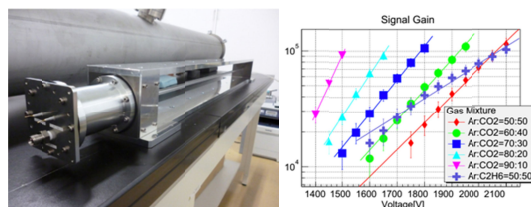


図 2 ストロー飛跡検出器プロトタイプ(左)とガス混合の違いによるガス利得の電圧依存性(右)

ストロー飛跡検出器で使用する混合ガスに関しては、実際に使用するストローを配置し

たテスト用プロトタイプ（図2左）を製作して選定した。この結果に基づき COMET 実験では最も安定な動作が期待される Ar:C2h6=50:50 のガス混合を基本デザインとして使用することとした。

COMET 実験のためのストロー飛跡検出器はストローの内側以外の部分が真空である必要があるため、ストローとその中心に配置されるアノードワイヤーとをそのように設置できるフレームが必要となる。またフレームには電気信号を読み出すためのエレクトロニクスが配置できる必要もある。このため本研究では図3に示されるようなストロー飛跡検出器フレームを製作し、その内部にストローおよびアノードワイヤーを配置することで飛跡検出器として完成させた。

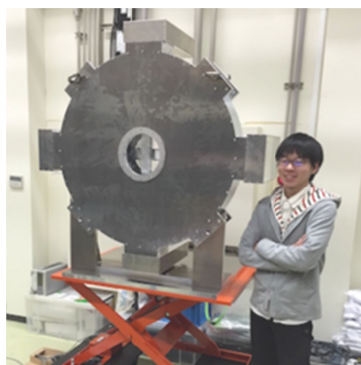


図3 ストロー飛跡検出器

ストロー飛跡検出器単体の性能評価試験として、検出器の前後面を中心部に電子ビームを通過させるためのマイラー窓を配置したカバーを設置して内部を真空に排気し、東北大学 ELPH 施設の電子施設からの 100MeV/c 電子を入射させて応答を調べた。図4にこの試験で得られた X-T 相関図と複数層のストロー面での飛跡再構成位置から算出した残差分布を示す。これにより飛跡検出器に要求される位置分解能 (200 μm 以下) を実現できていることが確認された。

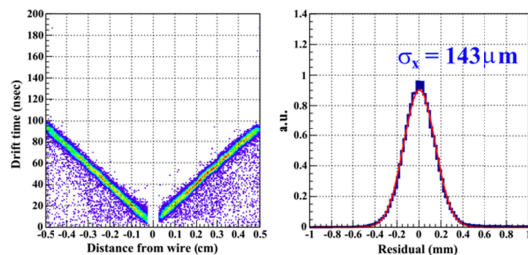


図4 X-T 相関図（左）と飛跡再構成位置から算出した残差分布（右）

(2) 結晶カロリメータ開発

本研究開始前には、使用する無機結晶シンチレータの候補として GSO 結晶と LYSO 結晶の2つがあった。シンチレータとしての性能は LYSO 結晶の方が光量も多いため有利である

ことが予めわかっていたが、実際にプロトタイプを製作し、100MeV/c を入射してその応答を調べることでこの点を確認した。

その後、LYSO 結晶を検出器としてアレイに組み上げるためのモジュール構造と、シンチレーション光を読み出すための光センサーの取り付け方法の最適化等を行った後、2015年夏にスイスポール・シェラー研究所にてビーム照射試験を行った。

この試験ではポール・シェラー研究所 M1 ビームラインで供給される 115MeV/c のビームを使用した。このビーム中にはミュオン、パイ中間子、電子が含まれており（図5左）、カロリメータ検出器による粒子識別能力の評価を行うためのデータを取得した。結果を図5（右）に示す。この結果はカロリメータで計測されたエネルギーだけによるものであるため、検出器単体の識別能力としては高くないが、今後波形情報を用いたり、飛跡検出器による運動量、ビーム入射位置の情報を多角的に利用することで識別能力の向上を行うことを検討している。

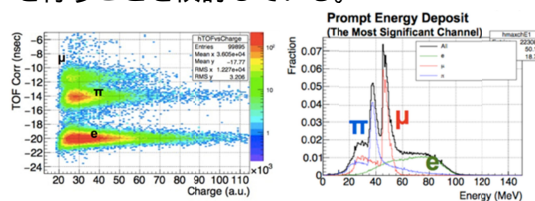


図5 ポール・シェラー研究所 M1 ビームラインで供給される荷電粒子ビーム（左）とカロリメータ検出器中でのエネルギーデポジットの入射粒子による違い（右）

(3) 総合試験

研究の最終段階には、ストロー飛跡検出器と LYSO 結晶カロリメータ検出器を組合せた総合試験（図6）を東北大学 ELPH 施設にて実施した。

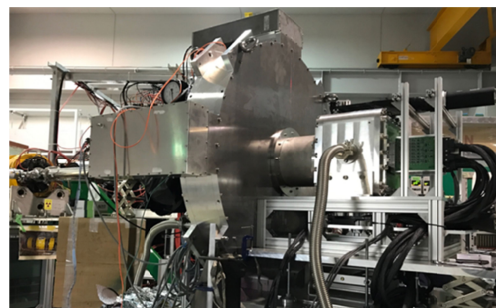
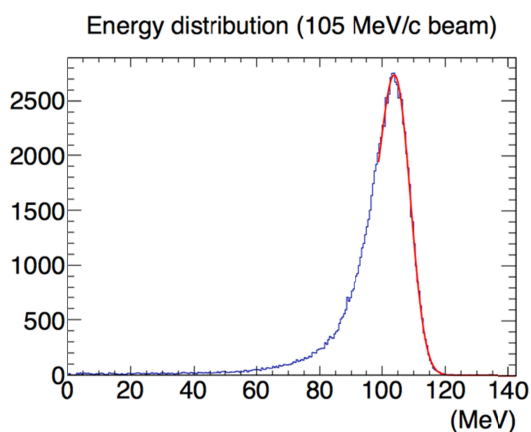


図6 ストロー飛跡検出器・LYSO 結晶カロリメータ検出器

この試験においては、実際に検出器を使用する環境と同じようにストロー飛跡検出器内およびカロリメータ検出器部分を真空排気し、電子がカロリメータ結晶に入射するまでの物質を極小化することに成功している。このようなセットアップで検出器全体が安定

に動作することを確認し、その後 65-165MeV/c の電子ビームをストロー飛跡検出器側から入射させて検出器全体の応答を調べた。その結果、飛跡検出器の位置分解能としてはおよそ 200 μm 、カロリメータのエネルギー応答の直線性としては $\pm 0.4\%$ 以下、105MeV/c 電子に対するエネルギー分解能としては 4.8% が得られることが判明している



(図7) 今後は検出器からの波形データを活用することで検出器性能の向上をはかることを予定している。

図7 LYSO 結晶カロリメータ検出器の 105MeV/c 電子に対する応答

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計4件)

Hajime Nishiguchi et al, "Development of an extremely thin-wall straw tracker operational in vacuum - The COMET straw tracker system", Nucl. Instr. and Meth. Phys. Res. A. 845:269-272, (2017) 2017年 査読有り
三原智 「荷電レプトンで探る新物理」日本物理学会誌 Vol. 70, No. 10, 740-741 2015年 査読有り

Hajime NISHIGUCHI, "COMET experiment: -A search for muon - to - electron conversion at J-PARC" PoS (EPS-HEP2015)585 2015年 査読有り

S. Mihara, J.P. Miller, P. Paradisi, and G. Piredda, "Charged Lepton Flavor-Violation Experiments" Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2013:63:531-552 2013年 査読有り

[学会発表](計17件)

Hajime Nishiguchi et al. Development of an extremely thin-wall straw

tracker operational in vacuum -The COMET Straw Tracker System-", VCI2016 - The 14th Vienna Conference on Instrumentation 2016年11月9日 ウィーン(オーストリア)

大石航、上野一樹、西口創、他 COMET 実験のためのビーム測定における粒子識別性能の研究 2016年9月21日 日本物理学会秋季大会 宮崎大学(宮崎県・宮崎市清武町)

野口恭平、上野一樹、他 COMET 実験電磁カロリメータ試作機の性能評価 2016年9月21日 日本物理学会秋季大会 宮崎大学(宮崎県・宮崎市清武町)

藤井祐樹、上野一樹、西口創、他 COMET Phase-I 実験に向けたトリガーシステム開発の現状 2016年3月19日 第71回日本物理学会年次大会 東北学院大学(宮城県・仙台市泉区天神沢)

山口博史、上野一樹、他 COMET 実験における電磁カロリメータの開発 2016年3月19日 第71回日本物理学会年次大会 東北学院大学(宮城県・仙台市泉区天神沢)

田中聡一、西口創、三原智、他 COMET 実験用ストローチューブ飛跡検出器の開発研究 2016年3月19日 第71回日本物理学会年次大会 東北学院大学(宮城県・仙台市泉区天神沢)

藤井祐樹、上野一樹、西口創、他 COMET Phase-I 実験に向けたトリガーシステム開発の現状 2015年9月25日 日本物理学会秋季大会 大阪市立大学(大阪府・大阪市住吉区)

田中聡一、西口創、三原智、他 J-PARC COMET 実験用ストローチューブ飛跡検出器のプロトタイプ性能評価 2015年9月25日 日本物理学会秋季大会 大阪市立大学(大阪府・大阪市住吉区)

大石航、上野一樹、西口創、他 J-PARC COMET 実験用検出器の粒子識別性能の研究 2015年9月25日 日本物理学会秋季大会 大阪市立大学(大阪府・大阪市住吉区)

藤井祐樹、上野一樹、西口創、他 COMET 実験 Phase-I に向けたフロントエンドトリガーボードの開発 2015年3月21日 第70回日本物理学会年次大会 早稲田大学(東京都・新宿区)

田中聡一、西口創、三原智、他 J-PARCC COMET 実験用ストローチューブ飛跡検出器の基礎特性研究 2015年3月21日 第70回日本物理学会年次大会 早稲田大学(東京都・新宿区)

山口博史、上野一樹、西口創、他 COMET 実験におけるストローチューブ飛跡検出器用フロントエンド読み出し回路の開発 2015年3月21日 第70回日本物理学会年次大会 早稲田大学(東京都・新宿区)
 山口博史、上野一樹、西口創、他 COMET

実験検出器の粒子識別性能評価 2014年9月18日 日本物理学会秋季大会 佐賀大学(佐賀県・佐賀市本庄町)

大石航、上野一樹、西口創、他 J-PARC ミューオン・電子転換過程探索実験 COMET のための電磁力カリメータ試作機の性能評価 2014年9月18日 日本物理学会秋季大会 佐賀大学(佐賀県・佐賀市本庄町)

Kazuki Ueno et al. "ROESTI: A Front-end Electronics on Technology and Instrumentation for Straw Tube Tracker in COMET Experiment", International Conference on in Particle Physics, 2014年6月2日 アムステルダム(オランダ)

大石航、上野一樹、西口創、他 J-PARC でのミューオン電子転換探索実験(COMET 実験)における電磁力カリメータの開発研究 2013年9月20日 日本物理学会秋季大会 高知大学(高知県・高知市曙町)

大石航、上野一樹、西口創、他 J-PARC でのミューオン電子転換探索実験(COMET)における電磁力カリメータの開発研究 2013年3月26日 第68回日本物理学会年次大会 広島大学(広島県・東広島市鏡山)

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

国内外の別:

〔その他〕

ホームページ等

<http://comet.kek.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三原智(MIHARA, Satoshi)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号: 80292837

(2) 研究分担者

五十嵐洋一(IGARASHI, Youichi)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師

研究者番号: 50311121

(3) 研究分担者

吉田誠(YOSHIDA, Makoto)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・研究機関講師

研究者番号: 70379303

(4) 研究分担者

西口創(NISHIGUCHI, Hajime)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号: 10534810

(5) 研究分担者

深尾祥紀(FUKAO, Yoshiori)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号: 80443018

(6) 研究分担者

上野一樹(UENO, Kazuki)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号: 20587464

(7) 連携研究者

三部勉(MIBE, Tsutomu)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号: 80536938

(8) 研究協力者

Zviadi Tsmalaidze

Joint Institute for Nuclear Research, Senior Researcher

(8) 研究協力者

Vladimir Kalinikov

Joint Institute for Nuclear Research, Researcher

(9) 研究協力者

Dimtry Grigorev, Budker Institute of Nuclear Physics, Senior Researcher