

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(S)

研究期間：2012～2016

課題番号：24224006

研究課題名(和文)革新的な実験手法を用いたミュオン・電子転換過程の探索

研究課題名(英文) A Search for Muon-Electron Conversion in a Nuclear Field with an Innovative Experimental Method

研究代表者

青木 正治 (Aoki, Masaharu)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号：80290849

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 167,800,000円

研究成果の概要(和文)：ミュオン粒子は、電子と同じ性質で200倍の質量を持った素粒子である。物質中に静止した負電荷ミュオン粒子(μ^-)が電子に変換する反応(μ^-e 転換過程)は、これまで1例も観測されたことが無い。この反応の探索は、素粒子の標準理論を超えた高いエネルギーにおける物理法則を研究する重要な手段である。この反応を探索することを目指した本研究では、J-PARC RCSからの大強度高品質パルス陽子ビームを用いた革新的な実験手法の開発を行い、独創的な放射線検出器を用いた実験装置の開発に成功した。ビームラインが完成し次第物理測定を開始する計画である。

研究成果の概要(英文)：A muon is a fundamental particle with the property same to the electron but with 200 times heavier mass than the electron. A muon-electron conversion is a process that the muon stopped in a material transfers to the electron. None of such process was observed yet. The study of such a process provides us important information about the energy scale higher than that of the Standard Model of particle physics.

We aimed to search for the muon-electron conversion at a high-purity high-power pulsed proton accelerator, J-PARC RCS, with a unique experimental method: a method that uses a proton target as a muon stopping target.

We successfully developed an inovative particle detector and constructed an electron spectrometer system. The construcion of a beam line is ongoing, and the physics data taking will be conducted once the beam line becomes available.

研究分野：素粒子実験

キーワード：素粒子(実験) ミュオン

1. 研究開始当初の背景

荷電レプトン・フレーバ保存則を破る反応 (CLFV) は、素粒子の標準理論 (SM) では禁止されている。「禁止」されている理由は特にないが、過去の実験において CLFV が 1 つも発見されていない¹ ため、SM に組み込まれたのである。理論的にはニュートリノ振動による高次ループの影響で発生する可能性があるが、その大きさは僅かに 10^{-50} 程度であり、SM の枠内では CLFV は実質的に存在しない。

このように CLFV は SM による予想値がほぼゼロであるため、実験によってなんらかの信号が観測されればたちどころに新しい物理の証拠となる。例えば、ニュートリノ振動現象の発見によって注目されているシーソー機構を超対称性と組み合わせると、 $10^{-13} \sim 10^{-15}$ の分岐比で $\mu^+ + N \rightarrow e^+ + N$ が見つかる可能性が高いと言う報告などもあった²。BNL で行われたミュオン $g-2$ の測定結果が理論予想値から 3 以上ずれていることから 10^{-14} 程度分岐比を预言しているモデルもあった³。その他、余剰次元⁴ やリトルヒッグス⁵ など多くのモデルにおいて、現在の実験リミットのすぐ下 (1~4 桁) に信号が観測される可能性が示唆されていた。研究開始当初は LHC が運転を開始してから 2 年ほど経過した時点で、超対称性粒子などを発見したという報告は存在しなかった。もしかしら、LHC において SM を超える新しい物理を発見することは難しいのではないかという雰囲気も現れ始めており、ミュオン・電子転換過程 (μ -e 転換) などの LHC と違った切り口から SM を超える物理に迫る研究手法の重要性が益々高くなりつつあった。

このような背景に後押しされて、様々な実験的研究の試みが進んでいた。例えば、スイス PSI では $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ を探索する実験 (MEG) が進行していた。MEG グループの 2010 年の結果では信号を見つけたかに思えたが、その後統計を高めた 2011 年の解析では上限値 2.4×10^{-12} を与えるに留まった⁶。また、 10^{-16} の感度で $\mu^+ + N \rightarrow e^+ + N$ を探索する実験が J-PARC・ハドロンホール (COMET 実験⁷) や米国 Fermilab (Mu2e 実験⁸) で個別に提案されていた。米国 P5 (Particle Physics Project Prioritization Panel) 委員会がミュオン電子転換過程探索実験について「どのような予算状況であっても推進すべきである。」と答申していたこともここに記しておきたい。

2. 研究の目的

本研究の目的は、 10^{-14} の感度でミュオン・電子転換過程を探索することにある。世界に先駆けた事象の発見を目指して、革新的な手法で実験を遂行し、物理解析を行う。研究期間内に、

1) 10^{-14} の感度で μ -e 転換の探索を行い最初の物理結果を発表する、

2) またこれにより LHC のエネルギーを超える物理に関する重要な情報を得る、ことを目指した。

3. 研究の方法

本研究では、「 μ^- をビームラインで引き出してから実験する」という常識を 180° 転換し、一次陽子標的中に静止した μ^- を直接利用して μ -e 転換の証拠を掴む、という斬新な発想に基づく研究方法を採用した。これにより、現存する施設を活用して、高感度の実験を低コスト・短期間で実現する事を目指した。

10^{-14} の感度で μ -e 探索実験を行うためには、1) 高品質パルス陽子ビーム、2) シリコンカーバイド (SiC) 回転標的、3) 大立体角ビームライン、4) 電子スペクトロメータ、が必要である。

(1) 高品質パルス陽子ビーム

本研究では、J-PARC RCS からの高品質大強度パルス陽子ビームを使用する。RCS は低ビームロスを実現するために空間的に余裕のある設計となっている。ビーム取り出しは早い取り出し方法であり、主パルスから遅れて取り出されてしまう遅延陽子が原理的には存在しない。

(2) SiC 回転標的

本研究では陽子標的がそのままミュオン静止標的として利用される。標準の標的はグラファイト製であるが、SiC を用いればミュオンと原子核の反応効率を 6 倍向上させることができる。

(3) 大立体角ビームライン

陽子標的からは、 μ^- の崩壊にともなう低エネルギー電子 ($E_e < 52.5 \text{ MeV}/c$) やミュオン原子核捕獲に伴う高速中性子が大量に発生する。これらの粒子から検出器を保護するため、 μ -e 転換によって放出される電子の運動量である $105 \text{ MeV}/c$ 近傍だけを選択的に輸送するビームラインを建設する。統計を稼いで実験精度を上げるためには、ビームラインアクセプタンスを大きくする必要がある。本ビームラインでは、大口径キャプチャソレノイドと収束ソレノイドレンズを用いることによって大立体角 110 msr を達成する。双極子電磁石でビームを曲げるため、COMET や Mu2e で計画しているビームラインと比較して建設コストを低く抑えられる。

(4) 電子スペクトロメータ

原子軌道上の μ^- が崩壊することによって発生する電子 (DIO 電子) の運動量は連続分布をする。最大運動量は μ -e 転換の信号電子と同じだが、高い運動量ほど発生頻度は急激に低下する。本研究では、 $p=105 \text{ MeV}/c$ の電子に対して $p=1 \text{ MeV}/c$ (FWHM) の分解能を達成すれば十分である。また、陽子パルスに同期して飛来する荷電粒子がパルス毎に約 10^8 個入射すると予想される。本実験で使用する飛跡

検出器は、この高レート入射に耐えた後で遅延飛来する信号電子を正確に検出しなければならない。これらの要求を満たすため、双極子磁場で偏向される電子軌道を高バースト耐性飛跡検出器で精密に測定して運動量を再構築する電磁石スペクトロメータを建設する。

4. 研究成果

(1) J-PARC RCS からの遅延陽子が、主パルス中の陽子に対して 10^{-17} 以下であることを確認する必要があった。どのような測定であれ、その割合を 10^{-17} の感度で評価するのは一般的には大変困難なことである。本研究においても、通常の放射線検出器では主パルス信号で装置が飽和してしまい、遅延タイミングで粒子を測定することは不可能であった。そこで本研究では、素粒子実験向けの放射線評価計算コード(G4Beamline)でモデル化した J-PARC RCS で遅延陽子の発生機構を解析し、取り出し部ビームダクト外側に設置したビームロスモニターで遅延陽子比率を評価する方法を開発した。長時間にわたる観測の結果、遅延陽子割合が 10^{-18} よりも小さいことを実証した。

本研究で開発したビームロスモニター手法や素粒子実験のスタイルに基づいた加速器計算モデルは、ビームロスの少ない大強度陽子加速器を開発するための基礎研究としても意義が高い。

(2) モノリシック SiC セラミックで回転標的を試作した結果、SiC セラミックが予想外にもろいためにモノリシックのままでは標的材料として不適切であることが分かった。そこで SiC/SiC 複合材料に着目し、従来よりも安価な製法で SiC/SiC 複合材料を製造するための研究開発を室蘭工業大学と共同で実施した。回転標的の機械設計も最適化し、本実験に耐えうる SiC 回転標的の設計を得ることが出来た。しかしながら、SiC 回転標的の導入に必要な許認可関連の手続が計画当初に予定したよりも複雑で時間がかかる事が判明した。そこで、現在実装されているグラフィート回転標的で物理測定を開始し、その実績に基づいて SiC 回転標的の実現を図ることとした。この方針は KEK 物質構造科学研究所ミュオン課題審査委員会でも高く評価され、2014 年にはグラフィート標的での物理データ収集を許可する Stage-2 承認を得ることができた。

なお、SiC を活用した加速器標的の技術研究は発展継続している。最近では、SiC でグラフィートをコーティングした新しい標的の研究なども欧米と協力して行われている。

(3) 本研究で使用する大立体角ビームラインは本研究以外の用途にも活用できる汎用ビームラインとして設計されている。本研究が刺激となり、ミュオン g-2/EDM やミュオ

ニウム HFS 実験、ミュオン顕微鏡など本ビームラインを活用した実験計画が相次いで提案された。

本ビームラインの上流部分の建設は完了している。現在下流部分の建設が進められている。

(4) 本研究で使用する検出器はバースト粒子が通過してからわずか数百 nsec 後に飛来する遅延電子を高い効率で測定できなければならない。また、多重散乱による運動量分解能の悪化を避けるため、シリコンストリップ検出器などを使用することはできず、ガスワイヤー検出器をベースとした飛跡検出器技術で実現することが求められる。類似の開発例は過去に存在しないため、全くの手探り状態からの開発であった。最終的に、ポテンシャルワイヤーとセンスワイヤーを 0.7 mm 間隔で繰り返すことにより、ポテンシャルワイヤーにける高電圧でセンスワイヤーでのガスゲインを $1\sim 10^4$ の範囲で自由に調整できる技術の開発に成功した。この方法によるガスゲイン調整では、低いガスゲインモードにおいても有効体積中の電子イオン対を掃引することが出来る。そのため、大強度バーストの直後であっても高い検出効率で動作する。

開発に成功した高バースト耐性 MWPC を 4 台製造し、小型のセクター電磁石と組み合わせてビーム試験を行った。読出しアンプやデジタイザー、データ収集機器まで含めたスペクトロメータシステムとして、装置全体が正常に動作することを証明した。

(5) D10 バックグラウンドの測定

μ -e 転換過程探索実験では、Decay-in-Orbit (DIO) 起源の電子スペクトルが主要なバックグラウンド源となる。従来から用いられてきた Watanabe らによる理論計算スペクトルに対して、Czarnecki らによる原子核の反跳を考慮したスペクトル⁹ではシグナル領域でスペクトル強度が小さくなると予想されている。Czarnecki らによる計算を検証することは DIO バックグラウンド評価の信頼性を増し、 μ -e 転換過程への感度を向上させるために大変重要である。

高バースト耐性 MWPC とセクター電磁石を組み合わせたスペクトロメータ総合試験では、C, Si, SiC を標的とした DIO スペクトルの実測を行った。現在解析を進めている。

革新的な実験手法による μ -e 転換過程の探索を目指した研究を行い、物理測定に使用する検出器システムの開発製造に成功した。ビームラインの建設も着々と進められており、完成し次第物理測定を開始したい。COMET や Mu2e と比較して数年早く物理成果を出すことを目指している。

<引用文献>

1. W.J. Marciano, T. Mori and J.M. Roney, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 58 (2008) 315.
2. J. Hisano and D. Nomura, *Phys. Rev. D* 59 (1999) 116005.
3. G. Ishidori *et al.*, *Phys. Rev. D* 75 (2007) 115019.
4. K. Agashe, A. Blechman and F. Petriello, *Phys. Rev. D* 74 (2006) 053011
5. M. Blanke *et al.*, *JHEP* 0705 (2007) 013.
6. J. Adam *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 107 (2011) 171801.
7. The COMET Collaboration, KEK Report 2009-10 (2009).
8. The Mu2e Collaboration, Mu2e Proposal (2008).
9. A. Czarnecki *et al.*, *Hyper. Int.* 210 (2012) 19.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 17 件)

H. Natori, M. Aoki, S. Mihara, Y. Nakatsugawa, Y. Seiya *et al.*, “A Fast High-Voltage Switching Multiwire Proportional Chamber”, *PTEP* 2017 (2017) 023C01 査読有.

DOI: 10.1093/ptep/ptw193

Y. Nakatsugawa, DeeMe Collaboration, “Search for Muon to Electron Conversion in Nuclear Field at and J-PARC MLF”, *Nucl. and Part. Phys. Proc.* 273-275 (2016) 1692 査読有.

DOI:

10.1016/j.nuclphysbps.2015.09.273

Y. Nakatsugawa, M. Aoki, M. Kinsho, S. Makimura, S. Mihara, Y. Miyake, H. Natori *et al.*, “Silicon Carbide Target for a Muon-Electron Conversion Search at J-PARC MLF”, *JPS Conf. Proc.* 8 (2015) 025013 査読有.

DOI: 10.7566/JSPSCP.8.025013

K. Yamamoto, P.K. Saha, M. Aoki, S. Mihara, Y. Nakatsugawa, K. Shimizu and M. Kinsho, “Measurement System of the Background Proton in DeeMe Experiment at J-PARC”, *JPS Conf. Proc.* 8 (2015) 012004 査読有.

DOI: 10.7566/JSPSCP.8.012004

N. Kawamura, A. Toyoda, M. Aoki, Y. Nakatsugawa, Y. Miyake *et al.*, “H line; a beam line for fundamental physics study”, *J. Phys.: Conf. Ser.* 551 (2014) 012062 査読有.

DOI: 10.1088/1742-6596/551/1/012062

[学会発表](117 件)

N. Teshima, DeeMe Collaboration, “DeeMe experiment to search for muon to electron conversion at J-PARC MLF”, *NUFACT2017*, 2017, Uppsala.

M. Aoki, DeeMe Collaboration, “DeeMe - Yet another experiment to search for muon to electron conversion”, *The 2017 Tamura Symposium*, 2017, Austin.
H. Natori, M. Aoki, Y. Seiya, Y. Nakatsugawa *et al.*, “DeeMe, an

experiment searching for mu-e conversion using fast extracted proton beam at J-PARC”, *Korean Physical Society Meeting 2016*, 2016, Korea.

N. Teshima, DeeMe Collaboration, “Development of DeeMe detector, high-rate tolerant HV-switching multi-wire proportional chamber”, *HINT2016*, 2016, Tokai.

H. Natori, DeeMe Collaboration, “Development of wire chamber with tolerance for high rate burst pulse for DeeMe experiment”, *CPAD Instrumentation Frontier 2016*, 2016, Caltech.

H. Natori, “DeeMe, a muon to electron conversion search experiment at J-PARC MLF”, *PASCOS2016*, 2016, Vietnam.

M. Aoki, “DeeMe”, *NuFact15*, 2015, Brazil.

[図書](計 0 件)

[産業財産権]

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://deeme.hep.sci.osaka-u.ac.jp>

6. 研究組織

(1)研究代表者

青木 正治 (AOKI, Masaharu)

大阪大学・理学研究科・准教授

研究者番号: 80290849

(2)研究分担者

金正 倫計 (KINSHO, Michikazu)

JAEA・J-PARC センター・加速器ディビジョン 副ディビジョン長

研究者番号: 10354747

三宅 康博 (MIYAKE, Yasuhiro)

KEK・物質構造科学研究所・教授

研究者番号: 80209882

三原 智 (MIHARA, Satoshi)

KEK・素粒子原子核研究所・教授

研究者番号: 80292837

牧村 俊助 (MAKIMURA, Shunsuke)

KEK・物質構造科学研究所・技師

研究者番号: 10391715

(3)連携研究者

西口 創 (NISHIGUCHI, Hajime)

KEK・素粒子原子核研究所・准教授

研究者番号：10534810

下村 浩一郎 (SHIMOMURA, Koichiro)
KEK・物質構造科学研究所・准教授
研究者番号：60242103

河村 成肇 (KAWAMURA, Naritoshi)
KEK・物質構造科学研究所・准教授
研究者番号：60311338

Strasser Patrick
KEK・物質構造科学研究所・研究機関講師
研究者番号：20342834

山本 風海 (YAMAMOTO, Kazami)
JAEA・J-PARC センター・主任研究員
研究者番号：60354750

Saha Pranab
JAEA・J-PARC センター・主任研究員
研究者番号：10391335

清矢 良浩 (SEIYA, Yoshihiro)
大阪市立大・理学研究科・教授
研究者番号：80251031

山本 和弘 (YAMAMOTO, Kazuhiro)
大阪市立大・理学研究科・准教授
研究者番号：80303808

(4)研究協力者

Douglas Bryman (BRYMAN, Douglas)
University of British Columbia
Professor

沼尾 登志男 (NUMAO, Toshio)
TRIUMF
Senior Researcher