

令和 4 年 6 月 20 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14504

研究課題名（和文）ミュオン寿命の最高精度測定を目指した開発研究

研究課題名（英文）Development research aiming at the highest precision measurement of the muon lifetime

研究代表者

神田 聡太郎（Kanda, Sohtaro）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・助教

研究者番号：10800485

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、J-PARC MLF MUSEにおける大強度パルスミュオンビームを用いたミュオン寿命の精密測定を目指して、粒子検出器の開発および実証試験を行なった。それぞれについて主に次のような成果が得られた。(1) 小型のシンチレーターと半導体光検出素子、および高速応答の信号処理回路を組み合わせ、パルスビームのもたらす瞬間的な高計数率に対応できる陽電子検出器を開発した。(2) MUSEのミュオンビームを用いて正負ミュオンの寿命を測定し、検出器のパイルアップをモデル化した関数で時間スペクトルを解析する手法を確立した。これらの成果により、新たなミュオン寿命測定実験の実現に向けて大きく前進した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ミュオンは素粒子の一種であり、その平均寿命の測定は素粒子物理学における標準模型の検証に役立つ。寿命測定によって、弱い相互作用の強さを表すフェルミ結合定数が求められる。近年、異なる手法で求められたフェルミ結合定数の不一致やWボソン質量の乖離が報告されており、フェルミ結合定数の新たな精密測定は標準模型の理解を深化させる上で重要な役割を果たす。また、測定対象を負ミュオンに拡大したことで、ミュオンと原子核との反応を介して核物理への展開も可能となった。さらに、本研究で開発した高性能の粒子検出器はミュオンスピン分光器の高度化にも寄与し、ミュオンスピン緩和法を用いた物質科学研究への波及効果も期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this project, we developed a segmented positron detector aiming at precise muon lifetime measurement using an intense pulsed muon beam at J-PARC MLF MUSE. The following outcomes were obtained.

(1) A high-rate tolerant positron detector was developed by combining small scintillators, silicon photomultipliers, and fast-response front-end electronics. (2) We measured the lifetime of positive and negative muons using pulsed muon beams at MUSE and established a method to analyze the time spectrum with a function modeling the detector pileup.

With these results, significant progress was made toward realizing a new muon lifetime measurement.

研究分野：素粒子・原子核物理学

キーワード：ミュオン 粒子検出器 フェルミ結合定数

1. 研究開始当初の背景

ミュオンは第二世代の荷電レプトンであり、弱い相互作用によって約 2.2 μs の寿命で崩壊する。寿命 τ_μ と Fermi 結合定数 G_F との関係はミュオンの質量を m_μ として

$$\frac{1}{\tau_\mu} = \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192\pi^3} (1 + \Delta_q)$$

と書ける。 Δ_q は量子電磁力学(QED)における高次の補正項である。Fermi 結合定数は $V - A$ 型の四点相互作用の強さを表し、微細構造定数 α および W ボソン質量 m_Z と並んで素粒子物理学における標準模型の電弱領域を特徴づける重要な物理量である。上式に基づいて G_F を決定するとき、ミュオン質量の精度に由来する不確かさは 0.06 ppm、QED 補正項の寄与は 0.14 ppm である。一方、ミュオン寿命の測定精度は 1.0 ppm であり、 G_F の決定精度はこれが制限している。

Fermi 結合定数を様々な手法で独立に求め、結果を比較することで標準模型の高精度検証と新物理探索が可能となる。近年、電弱領域における大域的解析から得られた G_F と超許容 β 崩壊の観測から求めたそれとの間に乖離が報告されており、 G_F の新たな高精度測定は標準模型の理解を深化させる上で重要な役割を果たす。

ミュオンの寿命測定は長い歴史を持ち、実験技術の高度化と理論計算の進展に伴って高精度化が進められてきた。図 1 に主な実験結果と理論計算の不確かさを示す。研究開始当時、最も新しい実験結果は Paul Scherrer Institute (PSI) で実施された MuLan 実験および FAST 実験によって得られており、それぞれ

$$\text{MuLan } \tau_\mu = 2.1969803(21)_{\text{stat}}(7)_{\text{syst}} \mu\text{S}$$

$$\text{FAST } \tau_\mu = 2.197083(32)_{\text{stat}}(15)_{\text{syst}} \mu\text{S}$$

であった。MuLan の結果は 1.0 ppm、FAST のそれは 16 ppm の相対決定精度に対応する。二つの結果は約 100 ps、すなわち 47 ppm 異なる。また、Rutherford Appleton Laboratory (RAL) ではパルス状の時間構造を持ったミュオンビームを用いた R77 実験が行われた。

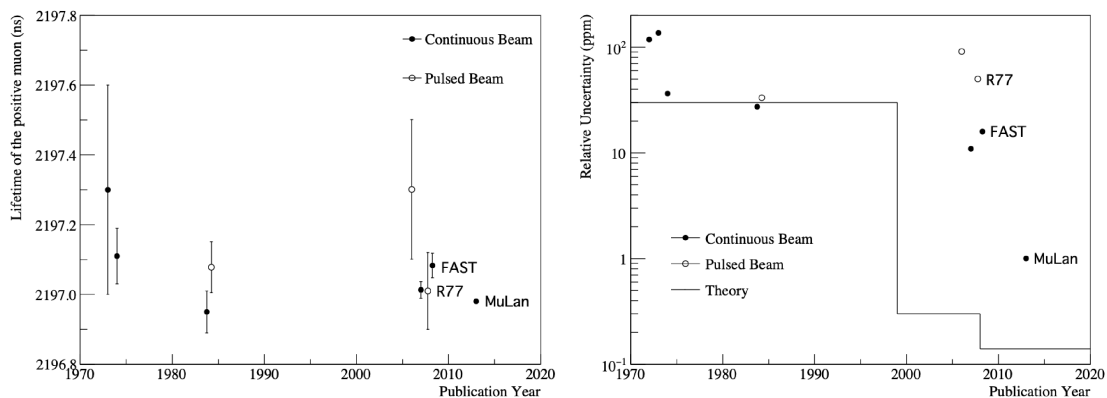


Figure 1 ミュオン寿命測定の歴史。(左) 1970 年以降の実験結果。(右) 測定および理論計算の不確かさ。S. Kanda, Proceedings of Science, PoS(NuFact2021)215 (2022)で誌上発表。

MuLan 実験は PSI の連続ミュオンビームを静電キッカーでパルス化したことで高い統計精度を達成した。パルスビームの利用はトリガー・パイルアップの問題を生じないため、統計精度の向上に大きく寄与する。一方で、大強度のパルスビームを用いた実験ではイベント・パイルアップを抑えるために粒子検出器に高い計数率耐性が求められる。MuLan 実験で用いられた陽電子検出器は $0.7 \times 4\pi$ の立体角を 170 のセグメントで覆ったシンチレーション・カウンターであった。統計的不確かさの寄与は 0.95 ppm、主な系統的な不確かさはミュオンのスピン回転の影響と検出器の利得変動で各 0.2 ppm の寄与であった。

2 . 研究の目的

本研究の目的は、J-PARC MLF MUSE における世界最高強度のパルスミュオンビームを用いた新たなミュオン寿命測定実験の原理実証である。そのために、高い計数率耐性を備えた陽電子検出器と系統的な不確かさの低減および評価に取り組む。最終的には、MuLan 実験の測定精度を 10 倍上回る 0.1 ppm の精度を目指す。MuLan で解析された崩壊陽電子の検出事象数は 1.6×10^{12} であったため、必要とされる統計量はこの百倍程度となる。

図 2 に実験と検出器の概念図を示す。 $0.8 \times 4\pi$ の立体角を 14,000 のセグメントで覆い、強度 $1 \times 10^8 /s$ のパルスミュオンビームを用いた 23 日間の測定で 1.6×10^{14} の陽電子統計を達成する。検出器は 3 mm 角のタイル状シンチレーターに小型の半導体光検出器 SiPM を接続して構成し、高速応答の信号処理回路で読み出す。測定器は磁気遮蔽内に設置され、ミュオンスピンの Larmor 歳差による系統的な不確かさを抑制する。

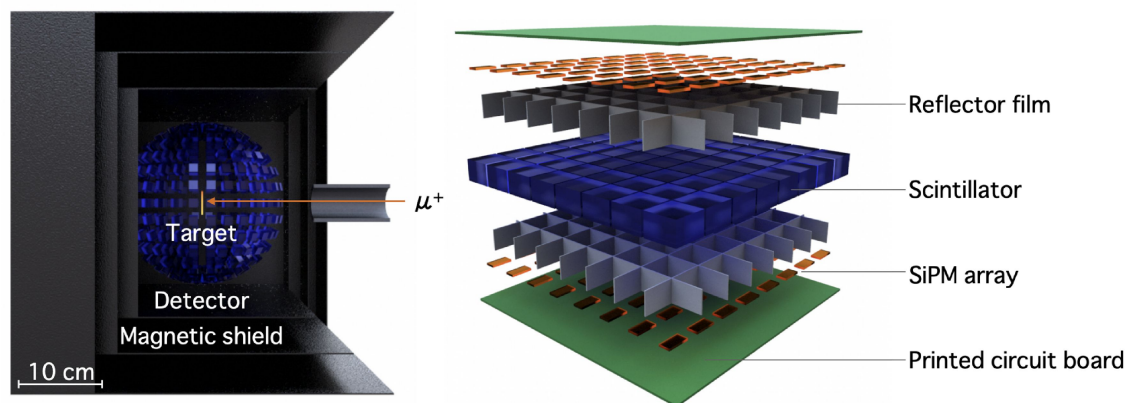


Figure 2 実験セットアップと検出器ユニットの概念図。(左) 実験装置の全体図。ミュオンビームを静止標的に照射し、標的を囲む球面状の検出器で崩壊陽電子を計測する。検出器は磁気遮蔽の内部に設置される。(右) 検出器構造の検討図。シンチレーターと SiPM を二次元配列し、反射材を間隙に挟む。S. Kanda, Proceedings of Science, PoS(NuFact2021)215 (2022)で誌上発表。

3 . 研究の方法

本研究課題では、ミュオン寿命の精密測定実験に用いる陽電子検出器を開発する。検出器の構成要素はシンチレーター、SiPM、信号処理回路である。検出器の要素開発および性能評価試験を通じて、実験の要求を満たす検出器の諸元を最適化する。検出器信号のパイルアップによる系統的な不確かさを低減するために、パイルアップによる計数損失を補正するモデルを構築して崩壊陽電子の検出時刻解析に実装する。

信号処理回路の候補は KEK で開発された Kalliope シリーズで、パルスの立ち上がりが高速な VOLUME2012 とポールゼロ補償によって波形のアンダーシュートを生じない VOLUME2014 の二種類を試験する。パルスレーザーを SiPM に照射する応答試験と、ミュオンビームを用いて崩壊陽電子を検出する実証試験を行う。波形測定と数値計算を組み合わせ、パイルアップに伴う系統的不確かさの評価と損失関数の定式化を試みる。

検出器は半径 10 cm の球面状に配置される。検出器の構成要素、配置、支持体の製作方法などを検討して原理実証に耐えうる試作機を開発する。

主要な系統的不確かさへの対策として、ミュオンビーム照射標的の近傍の磁場を磁気遮蔽で低減する。鉄とニッケルの合金を用いた三層の箱型磁気遮蔽の内部に測定器を設置する。標的位置における残留磁場によるミュオンスピンの回転を考慮した数値計算を行い、寿命測定における系統的な不確かさを評価する。

4 . 研究成果

本研究で得られた主要な成果を以下の四つに分けて述べる。

4-(1) 粒子検出器のセンサー部分に関する成果

小型のプラスチックシンチレーターと SiPM を組み合わせた粒子検出器を用い、大強度のパルスミュオンビームを用いた陽電子計数における信号パイルアップの影響を精査した。信号処理回路の動作パラメーターに応じた不感時間を調べ、それが崩壊陽電子の時間スペクトルに及ぼす影響を整理した。信号の数え落としを説明できるモデルを見出し、測定器の計数率耐性を定量化する指標を得た。また、寿命測定実験に利用可能な中規模の実証機を開発した。J-PARC MLF MUSE におけるパルスミュオンビームを用いて崩壊陽電子のスペクトルを測定し、検出器の性能を評価した。試験および解析結果の詳細をまとめ、論文化を進めている。

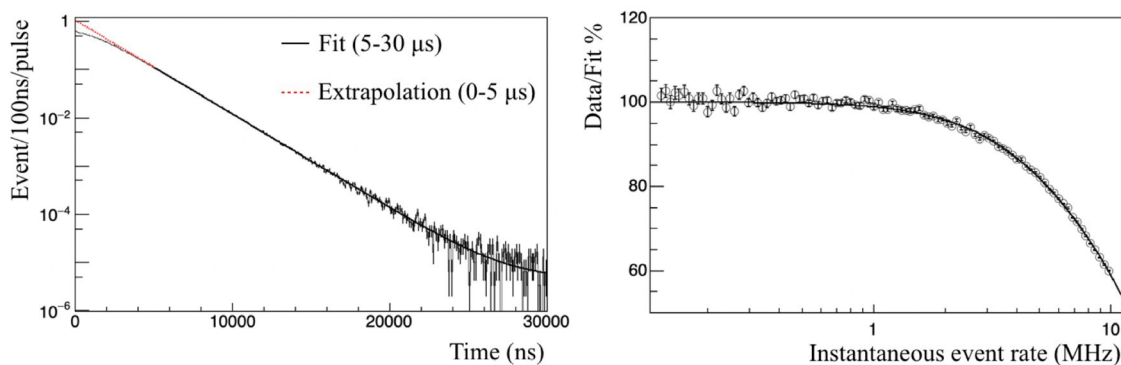


Figure 3 J-PARC MLF MUSE のパルスミュオンビームを用いて測定した陽電子の時間スペクトルとパイルアップ損失関数の解析。(左) 崩壊陽電子の時間スペクトルとフィッティング結果。黒実線は指数関数を用いた低計数率領域におけるフィッティングの結果、赤点線はその高計数率領域への外挿。(右) 左図における外挿曲線とヒストグラムとの比を計算して求めた計数率の関数としてのパイルアップ損失。S. Kanda et al., Phys. Lett. B 815, 136154 (2021). にて誌上発表。

4-(2) 粒子検出器の信号処理回路に関する成果

アナログ信号処理回路の応答が実験に及ぼす影響を詳細に評価するために、これまで用いてきた ASIC の性能試験を系統的に行なった。また、KEK で開発中の新しい ASIC が SiPM の信号処理に利用可能かどうかを試験した。これまでデジタル信号処理回路に用いてきた FPGA を次世代の機種に置き換えるべく、マルチヒット TDC のファームウェアを改修し移行作業を行なった。評価基板を用いたテストで期待通りの動作を確認し、新たなデジタル信号処理回路を開発するための設計検討を行なった。LED、宇宙線、および線源を用いた試験に加えて、ピコ秒パルスレーザーを用いた時間分解能の高精度測定に取り組んだ。回路の動作パラメーターを系統的に走査し、動作条件に応じた時間分解能を整理して最適な動作条件における性能を比較した。

4-(3) 検出器の設計に関する成果

球殻状の陽電子検出器をミュオン静止標の周辺に配置するためのフレームを光造形方式の 3D プリンターを用いて製作する環境を構築した。これにより、低物質量かつ複雑な形状を有する検出器支持体の開発が可能となった。また、基板加工機を導入して SiPM 実装基板の試作および量産が可能な体制を整えた。

4-(4) ミュオン崩壊時間計測の解析に関する成果

ミュオンビームを用いてテストデータを取得し、寿命解析における系統誤差の要因および対策を検討した。SiPM の温度変化に応じた検出効率の変化、高計数率環境下におけるパルス・パイプアップの影響を調査し、将来的な寿命測定実験の到達精度を議論するための材料を揃えた。さらに負ミュオン寿命測定の可能性を検討し、MUSE のパルス負ミュオンビームとミュオンスピ分光器を用いていくつかの標的についてデータ取得を行なった。負ミュオンの崩壊時間測定においてはミュオンよりも長い寿命を持った背景事象源が存在し、寿命解析に影響を及ぼすことが判明した。背景事象源の発生過程特定と影響の定量化に向けた考察に取り組んでいる。

本研究で得られた成果により、大強度パルスビームを用いてミュオン寿命を高精度測定する計画が実現に向けて大きく進展した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Kanda Sohtaro	4. 巻 PoS(NuFact2021)
2. 論文標題 Toward a high-precision measurement of the muon lifetime with an intense pulsed muon beam at J-PARC	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of Science	6. 最初と最後の頁 215 ~ 219
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.22323/1.402.0215	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 S. Kanda and K. Ishida	4. 巻 54
2. 論文標題 Measurement of muon spin rotation in muonic hydrogen atom	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 RIKEN Accelerator Progress Report	6. 最初と最後の頁 139
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Kanda S., Fukao Y., Ikedo Y., Ishida K., Iwasaki M., Kawall D., Kawamura N., Kojima K.M., Kurosawa N., Matsuda Y., Mibe T., Miyake Y., Nishimura S., Saito N., Sato Y., Seo S., Shimomura K., Strasser P., Tanaka K.S., Tanaka T., Torii H.A., Toyoda A., Ueno Y.	4. 巻 815
2. 論文標題 New precise spectroscopy of the hyperfine structure in muonium with a high-intensity pulsed muon beam	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136154 ~ 136154
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.physletb.2021.136154	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 3件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 S. Kanda
2. 発表標題 Development of Detector Systems at J-PARC
3. 学会等名 DDM2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Kanda
2. 発表標題 Toward a high-precision measurement of muon lifetime with an intense pulsed muon beam at J-PARC
3. 学会等名 NuFACT2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Kanda
2. 発表標題 Microwave spectroscopy of the hyperfine structure in muonium: zero-field results and high-field preparation
3. 学会等名 NuFACT2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 S. Kanda
2. 発表標題 A new search for time-reversal symmetry-breaking in muon decays
3. 学会等名 SPIN2021 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 神田 聡太郎
2. 発表標題 次世代 μ SR分光器のための開発研究
3. 学会等名 測定器開発プラットフォーム研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 神田聡太郎
2. 発表標題 ミュオン寿命の最高精度測定を目指した開発研究
3. 学会等名 日本物理学会 2020年秋季大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 神田聡太郎
2. 発表標題 先端計測器開発で切り拓くミュオン科学の未来
3. 学会等名 計測システム研究会2020
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

https://research.kek.jp/people/kanda/

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------