

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05113

研究課題名(和文) 荷電 K 中間子崩壊によるレプトン普遍性の破れ探索実験の解析及び補正

研究課題名(英文) Analysis and calibration of a search for lepton flavor universality violation using stopped positive kaons

研究代表者

五十嵐 洋一 (IGARASHI, Youichi)

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・研究機関講師

研究者番号：50311121

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：標準模型では電子とミュオンは質量以外は同様に振る舞う。これはレプトンフレーバー普遍性(LFU)と呼ばれている。本実験ではK中間子の崩壊 $K \rightarrow \mu \nu$ 、 $K \rightarrow e \nu$ の崩壊分岐比をJ-PARCにおける大強度ビームによる精密測定で決定するという手法でLFUの破れの探索を行い新たな物理に迫る。本研究において、検出器群の測定値の補正を行い、エネルギー測定アルゴリズムや粒子識別アルゴリズムの開発等を行った。また、モンテカルロシミュレーションの開発を行い検出器系の理解を進めた。これらの結果、部分データをもちいた崩壊事象の計数の成功、背景事象となる構造依存の放射性崩壊による事象の選別、理解を行うことが出来た。

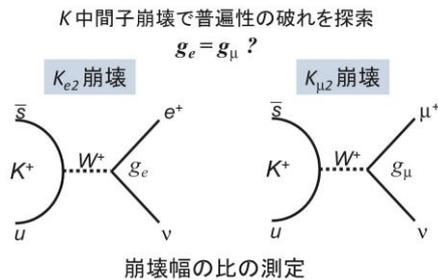
研究成果の概要(英文)：Electron and Muon have the same behavior without their mass on the standard model. This is known as Lepton Flavor Universality (LFU). The experiment searches the new physics by a search of the violation of LFU using the charged Kaon decay. The ratio of the branching ratio of $K \rightarrow \mu \nu$ and $K \rightarrow e \nu$ was measured precisely using the J-PARC high intensity beam by the experiment. This research calibrated the detectors and developed a calculation method of the energy and an algorithm of the particle identification. And also a detector Monte Carlo simulation program was developed to understand the detector system. From these, the research succeeded a counting of the target decay modes, a screening and an understanding of a background decay mode which is the structure dependent radiative decay.

研究分野：素粒子実験

キーワード：素粒子(実験) K 中間子 ミュオン電子普遍性

1. 研究開始当初の背景

素粒子の標準模型は物理現象を非常によく説明する。しかし階層性問題、宇宙の暗黒物質や暗黒エネルギーの存在、宇宙のバリオン非対称性などの標準模型では説明出来ない問題があり、標準模型を超えた新しい物理(New Physics, NP)の存在が示唆されている。これらの問題を解決するための理論面からのアプローチとして、標準模型を拡張し超対称性(SUSY)を導入したモデル(MSSM)など理論が提案され、また実験面では史上最高のエネルギーを生み出す装置 CERN の LHC が本格稼働し実験が行われている。すでに Higgs 粒子が最近発見され、今後の進展が待たれているところである。素粒子物理学は長らく続いた標準模型を超えてその拡張に手が届こうとしている。本実験では、J-PARC ハドロン実験施設の大強度 K⁺ビームを利用する。LHC の「高エネルギービームによる未知粒子の直接生成」とは異なり、「大強度ビームによる精密測定」という実験手法で新しい物理に迫る。この領域において我々はミュー粒子と電子に注目した。ミュー粒子と電子はレプトンとして標準模型においては同じ崩壊振幅をもって相互作用を行う。このことはレプトンフレーバー普遍性(LFU)と呼ばれ、標準模型の根幹をなす一つである。



$$R_K = \frac{\Gamma(K_{e2})}{\Gamma(K_{\mu2})} = R_K^{SM} + \Delta R_K^{NP}$$

R_K^{SM} : 標準模型からの寄与

R_K^{NP} : 標準模型を超える「新しい物理」からの寄与

図 2 測定の原理

本実験は、荷電 K⁺中間子の二つの崩壊 K⁺ → e⁺ν (K_{e2})崩壊と K⁺ → μ⁺ν (K_{μ2})崩壊の分岐比の比($R_K = \Gamma(K_{e2})/\Gamma(K_{\mu2})$)を求めることで LFU の破れを探索することで新しい物理を探索することを目的とする。図 1 中の ΔR_K^{NP} が標準模型からの差異であり新しい物理の寄与に対応する。SUSY、R-Parity を破る SUSY、擬スカラー相互作用、スカラー相互作用のループ効果などの様々な模型で $\Delta R_K/R_K$ の予想値が計算されている。特に SUSY の効果については最近研究が進んでいて、荷電ヒッグス粒子交換でレプトンフレーバーを破るバーテックス

ループからの寄与が R_K 値に 1% という大きな影響を与える可能性が議論された(引用文献①)。一方、B 中間子の稀崩壊から ΔR_K には既に強い制約がかかっているという最近の議論もある(引用文献②)。更に SUSY シナリオでなくても sterile neutrino の存在が R_K に大きい影響を与え得ることも最近議論されている(引用文献③)。本実験は我々が KEK 陽子加速器で築いて来た K 中間子崩壊による新しい物理探索研究(引用文献④)の延長上にある。

2. 研究の目的

本実験では、大強度陽子加速器施設(J-PARC) ハドロン実験施設の荷電 K⁺ビームを使用し、K_{e2} 崩壊と K_{μ2} 崩壊の分岐比の比 R_K を 0.25% の高精度で測定することで LFU の破れを探索する。本研究はこの実験において、平成 27 年度に行われた物理実験データ収集、引き続き行うデータ解析、物理データ収集終了後に検出器パラメータの補正測定を行ったものである。

3. 研究の方法

本実験では、時間反転対称性破れの探索を行った KEK-陽子加速器 E246 実験で使用した E246 測定器システム(引用文献④)を改良する。E246 実験では K 中間子の崩壊から生じるミュー粒子の偏極の測定を行ったが、J-PARC E36 実験では K_{e2} 崩壊、K_{μ2} 崩壊の測定を行う。そのため E246 測定器から偏極度測定装置を取り除き粒子識別(PID)のための測定系の強化を行っている。図 2、3 に測定器の全体図を示す。

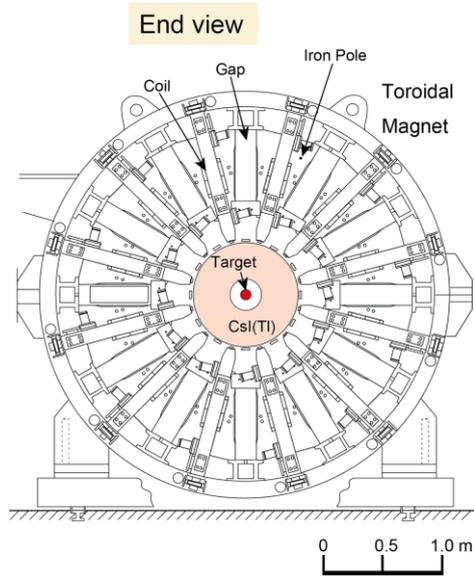


図 1 J-PARC E36 実験 検出器系セットアップ (後面図)

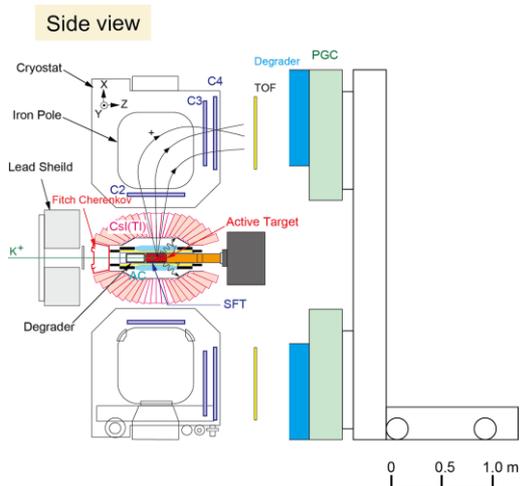


図 3 J-PARC E36 実験 検出器系セットアップ (側面図)

超伝導トロイダル電磁石の中心の標的に K^+ 中間子ビームが静止し崩壊する。崩壊から生じた e^+ , μ^+ は CsI(Tl) 光子検出器の間隙を通過し超伝導トロイダル電磁石によって運動量が測定される。二つの崩壊の識別は崩壊から放出される e^+ と μ^+ の識別によって行うが、これは e^+ で信号を出すエアロジェルチェレンコフ検出器(図 3 中の AC)、粒子飛行時間測定法(TOF)、鉛ガラス測定器(PGC)による 3 段構えの PID 手法を用いることで識別精度を 10^6 まで向上させる。荷電粒子トラッキングは崩壊の同定、TOF 法の精度に直接的に重要である。そのため、E246 で使用した 3 枚のマルチワイヤプロポーションアルチェンバー(MWPC、図 3 中の C2, C3, C4)に加え新たに開発された螺旋状のシンチレーションファイバーで構成される円筒状のファイバートラッカー(図 3 中の SFT)を標的の周りに導入する。標的自身も E36 実験のために最適化されたシンチレーションファイバーで構成され崩壊の軌跡が測定できるアクティブな標的(図 3 中の Active Target)を使用する。 K_{e2} と $K_{\mu2}$ の崩壊は共に分離不可能な放射崩壊(内部制動放射(IB))とともに測定する。その測定のために背景事象となる形状依存放射(SD)崩壊($K^+ \rightarrow \mu^+ \nu^+ \gamma$ 崩壊($K_{\mu2\nu}$))を除去するために CsI(Tl) 光子検出器(図中の CsI(Tl)) が用いられる。これらの測定器システムを使用して K 中間子を標的に静止させ K_{e2} 崩壊と $K_{\mu2}$ 崩壊の測定を行う。

実験は平成 27 年の 4 月から 6 月、10 月から 12 月にかけて行われた。

本研究では收拾されたデータから各種検出器の補正、崩壊粒子の軌道から運動量を求める手法の開発、解析、光子検出器からのガンマ線のエネルギーを求めるための波形解析アルゴリズムの開発、解析、PID 検出器の解析などを行い、崩壊の同定を行った。崩壊粒子の運動量を求めるために、定磁場を挟んでおかれた 3 台の MWPC(C2, C3, C4)

と SFT で検出された崩壊粒子の位置そしてターゲットで測定された K 中間子の崩壊点を持ちいて、トラッキングを行い磁場中の曲率から運動量を求める手法の開発を行った。またフラッシュ ADC を用いて測定された光子検出器の波形を複数の波形を含んだ関数によるフィッティングを行うことで一つの光子検出器に入った複数の粒子を分離しそれぞれのエネルギーを求める手法の開発を行った。

検出器の理解を進め、系統誤差の評価を行うために実験をすべて再現できるモンテカルロシミュレーションプログラムの開発も進んでいる。その他、検出器データの補正を行うために、ターゲットや SFT の読み出しに用いられた MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)読み出しシステムの問題の洗い出し、レート特性の測定や TOF カウンタの効率の位置依存性などの補正パラメータの測定を行った。

4. 研究成果

ここに示すプロットはデータの一部、全体統計の約 1/10 を用いて作成されたものである。図 4 に崩壊粒子の運動量分布を示す。

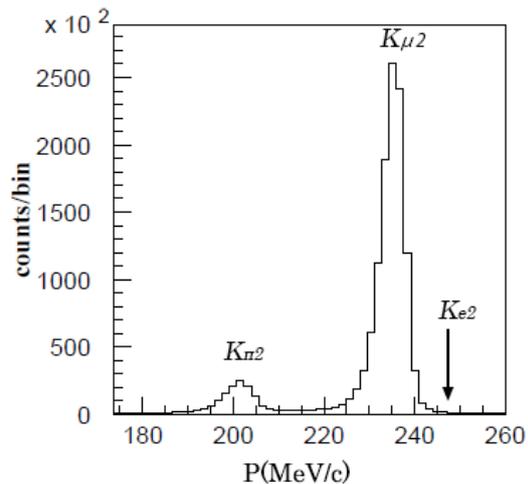


図 4 崩壊粒子の運動量分布

$K_{\mu 2}$ 崩壊, $K_{e 2}$ 崩壊が分離よく見えている。矢印に $K_{e 2}$ 崩壊の運動量の位置を示している。この運動量分布から PID を行い $K_{e 2}$ 崩壊の運動量付近を拡大したものを図 5 に示す。PID には運動量以外の PID 検出器(AC, PGC)のデータを用いて最尤的に電子を選び出したものである。大量の $K_{\mu 2}$ 崩壊のイベントの分布のテールから電子を抜き出していることが示されている。赤線はモンテカルロシミュレーションにより生成された $K_{e 2}$ 崩壊のイベントの分布である。分布の形状がよく一致している。これらにより十分な精度で $K_{e 2}$ 崩壊のイベントの計数が行えることを示すことが出来た。

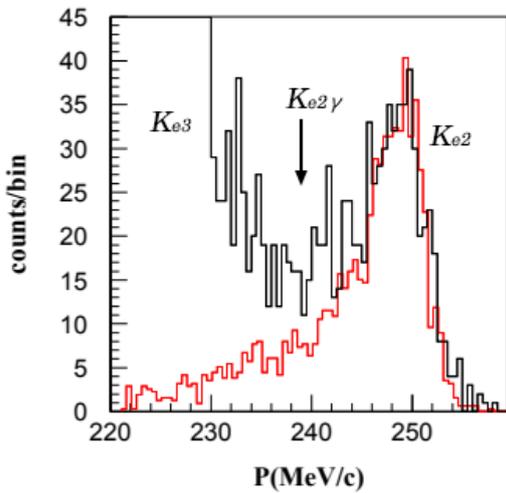


図 5 粒子識別後の電子の運動量分布

次に主要な背景事象となる SD について示す。図 6 (1)が光子検出器で一つのガンマ線がとらえられ $K_{\mu 2\gamma}$ とと思われる事象の運動量分布である。黒線が実験データから得られたもの、赤線はモンテカルロシミュレーションによるものである。(3)にニュートリノが持ち去ったエネルギーを質量で表したもの (Missing mass MM) の自乗の分布を示す。同様に黒線が実験で得られたもの、赤線がモンテカルロシミュレーションによるものである。(2)に運動量(1)と MM の自乗(2)の相関を示す 2 次元散布図(四角の大きさがその領域にあるイベントの数を示す)、これはダリツプロットと呼ばれる 3 体崩壊の力学自由度を表すものと同等であり 3 体崩壊がきちんと捉えられていることを示している。(4)が光子検出器でとらえられたガンマ線の飛んだ向きと電子が飛んだ向きが作る角度(開き角)の相関である。SD においてガンマ線のエネルギーとこの開き角は強く相関する。これらのプロットからモンテカルロシミュレーションにさらなる正確さの進展が必要なものの SD がきちんと捉えられていることを示している。

これらをまとめると、各種検出器の補正、崩壊粒子の運動量の導出、最尤的方法による K_{e2} 崩壊、 $K_{\mu 2}$ 崩壊の計数、背景事象となる $K_{e2\gamma}$ 崩壊の計数に成功した。モンテカルロシミュレーションの開発はまだ正確さの向上を図る必要はあるものの実験データを再現するようになってきている。

また、副産物実験であるダーク光子の探索 ($K^+ \rightarrow \mu^+ e^+ e^- N$ 崩壊の探索)についてもこれらの運動量測定精度、ガンマ線のエネルギー測定精度から十分に可能であることは示された。

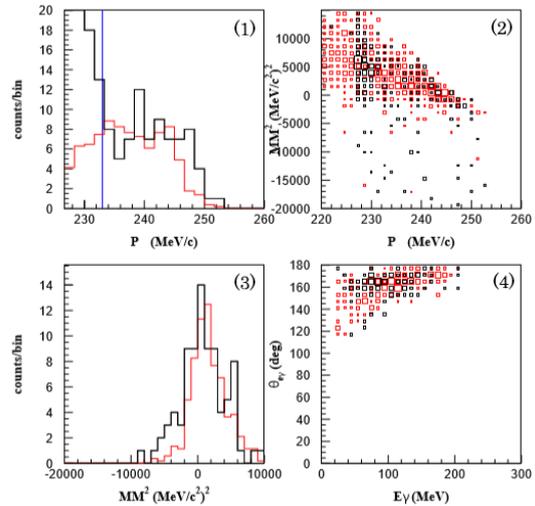


図 6 放射崩壊の分布

<引用文献>

- ① A. Masiero, P. Paradisi, and R. Petronzio, Phys. Rev. D74 (2006) 011701(R); J. Girrbach and U. Nierste, arXiv:1002.4906v1 (2012).
- ② R. M. Fonseca, J. C. Romao and A. M. Teixeira, Eur.Phys.J. C(2012)72:2228.
- ③ H. Lacker and A. Menzel, JHEP 07 (2010) 006; A. Abada et al., arXiv:1202.4906 (Nov. 2012).
- ④ M. Abe et al., Phys. Rev. D 73 (2006) 072005.

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 5 件)

- ① H. Ito, K. Horie, S. Shimizu, Y. Igarashi, et al., Performance check of the CsI(Tl) calorimeter for the J-PARC E36 experiment by observing e^+ from muon decay, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 2018 年、7 ページ、査読有、採択済
- ② PIENU Collaboration (A. Aguilar-Arevalo, Y. Igarashi, et al.), Improved search for heavy neutrinos in the decay $\pi \rightarrow e \nu$, PHYSICAL REVIEW D, 97, 072012 (2018), 6 ページ、査読有、DOI: 10.1103/PhysRevD.97.072012
- ③ Y. Igarashi, H. Lu, R. Tanuma, Data acquisition system for the J-PARC E36 experiment, 20th IEEE-NPSS Real Time Conference Proceedings (2016), 4 ページ、査読無、DOI: 10.1109/RTC.2016.7543154

- ④ O. Mineev, S. Bianchin, M. D. Hasiñoff, K. Horie, Y. Igarashi, J. Imazato, H. Ito, H. Kawai, S. Kodama, M. Kohl, Yu. Kudenko, S. Shimizu, M. Tabata, A. Toyoda, N. Yershov, The design and basic performance of a Spiral Fiber Tracker for the J-PARC E36 experiment, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 847, 2017, pp. 136-141, 査読有, DOI: 10.1016/j.nima.2016.11.057
- ⑤ M. Tabata, A. Toyoda, H. Kawai, Y. Igarashi, J. Imazato, S. Shimizu, H. Yamazaki, Fabrication of silica aerogel with $n = 1.08$ for e^+/μ^+ separation in a threshold Cherenkov counter of the J-PARC TREK/E36 experiment, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 795, 2015, pp. 206-121, 査読有, DOI: 10.1016/j.nima.2015.06.002

[学会発表] (計 9 件)

- ① 清水俊、五十嵐洋一、伊藤博士、今里純、木村翔太、小林篤史、堀江圭都、J-PARC E36 実験 $\Gamma(K^+ \rightarrow e^+\nu)/\Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+\nu)$ 測定によるレプトン普遍性破れ探索実験の解析進捗(1)、日本物理学会 第 73 回年次大会、2018 年
- ② 堀江圭都、清水俊、伊藤博士、今里純、五十嵐洋一、木村翔太、小林篤史 for the J-PARC E36 collaboration、J-PARC E36 実験 $\Gamma(K^+ \rightarrow e^+\nu)/\Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+\nu)$ 測定によるレプトン普遍性破れ探索実験の解析進捗(2)、日本物理学会 第 73 回年次大会、2018 年
- ③ 清水俊、堀江圭都、伊藤博士、今里純、五十嵐洋一 for the J-PARC E36 collaboration、J-PARC E36 実験 $\Gamma(K^+ \rightarrow e^+\nu)/\Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+\nu)$ 測定によるレプトン普遍性破れ探索実験の解析進捗(1)、日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年
- ④ 堀江圭都、清水俊、伊藤博士、今里純、五十嵐洋一 for the J-PARC E36 collaboration、J-PARC E3 実験 $\Gamma(K^+ \rightarrow e^+\nu)/\Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+\nu)$ 測定によるレプトン普遍性破れ探索実験の解析進捗(2)、日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年
- ⑤ 伊藤博士、堀江圭都、五十嵐洋一、今里純、河合秀幸、清水俊 for TREK-E36 Collaboration、J-PARC E36 実験のための背景事象 $K \rightarrow e\nu\gamma$ の研究、日本物理学会 2017 年秋季大会、2017 年
- ⑥ 堀江圭都 for the TREK collaboration (清水俊、五十嵐洋一 他)、J-PARC E36 実験 $\Gamma(K^+ \rightarrow e^+\nu)/\Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+\nu)$ 測定によるレプトン普遍性破れ探索実験の解析(2)、日本物理学会 第 72 回年次大会、2017 年
- ⑦ 伊藤博士、堀江圭都、河合秀幸、清水俊、

J-PARC E36 実験 : $\Gamma(K^+ \rightarrow e^+\nu)/\Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+\nu)$ 測定によるレプトン普遍性破れ探索実験のガンマ線測定最適化の研究、日本物理学会第 72 回年次大会、2017 年

- ⑧ Y. Igarashi, H. Lu, R. Tanuma, Data acquisition system for the J-PARC E36 experiment, 20th IEEE-NPSS Real Time Conference, 2016
- ⑨ 伊藤博士、堀江圭都、河合秀幸、児玉諭士、清水俊、J-PARC E36 実験用 CsI(Tl) カロリーメータのエネルギー較正、日本物理学会 2016 年秋季大会、2016 年

[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://trek.kek.jp/e36/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

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

(2)研究分担者

清水 俊 (SHIMIZU, Suguru)
大阪大学・理学研究科・助教
研究者番号 : 60294146

(3)連携研究者

(4)研究協力者

今里 純 (IMAZATO, Jun)
高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・名誉教授
研究者番号 :

山崎 寛仁 (YAMAZAKI, Hirohito)
高エネルギー加速器研究機構・放射線科学センター・准教授
研究者番号 : 40107686

堀江 圭都 (HORIE, Keito)
大阪大学・理学研究科・技術職員
研究者番号 : 80432467

伊藤 博士 (ITO, Hiroshi)
神戸大学・大学院理学研究科・研究員
研究者番号 : 60814720