

平成 30 年 9 月 8 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26287054

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ためのGEM検出器

研究課題名(英文) GEM detector for the experiment to search for lepton universality violation using charged kaon decays

研究代表者

今里 純 (IMAZATO, Jun)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・名誉教授

研究者番号：40107686

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 17,000,000円

研究成果の概要(和文)：J-PARC E36 実験「荷電K+中間子崩壊によるレプトン普遍性の破れ(LFUV)探策」のための荷電粒子飛跡トラッキング系の最適設計を行い、崩壊バーテックス検出器としてGEMに代わる、より適切なSpiral Fiber Tracker (SFT)を製作し、その検出位置決定能力、位置精度、検出効率などの性能が、E36実験での使用に十分高いことを確認した。これを組み込んだE36測定器を構築し、ハドロン実験施設でK+中間子ビームを用いて測定を実施、LFUV導出のための崩壊モード($K\mu 2$ と $Ke 2$)の抽出法などの解析法の開発と確立を行った。さらに目標の実験精度に向けてデータ蓄積を完了した。

研究成果の概要(英文)：Design optimization was performed for the decay vertex chamber of the charged particle tracking system for the E36 experiment "Search for lepton flavor universality violation in charged kaon decays" at J-PARC. A Spiral Fiber Tracker (SFT), which was a novel technique, was adopted superseding the initial plan of using a Gas Electron Multiplier (GEM) and constructed successfully. Its performance such as the ability of charged particle hit position determination, position resolution and detection efficiency was measured and confirmed to be high enough for an E36 tracking element. Then the total E36 detector was set up including SFT at the J-PARC Hadron Experimental Facility. Using K+ beams measurements were performed and a method was developed and established to extract relevant two-body decay events of $K\mu 2$ and $Ke 2$ for the LFUV analysis. Further, data acquisition was done aiming for required experimental statistical accuracy.

研究分野：素粒子実験物理

キーワード：荷電粒子飛跡検出器 Spiral Fiber Tracker レプトン普遍性の破れ 標準模型を超える新物理 J-PARC K中間子崩壊 超伝導トロードル測定器

1. 研究開始当初の背景

(1) 素粒子物理の標準模型(SM)は物理現象を非常によく記述する。しかし、階層性の問題、宇宙の暗黒物質や暗黒エネルギー、そしてバリオン非対称性などの SM では説明できない事柄があり、SM を超える新しい物理 “new physics(NP)” の存在が示唆されていた。これらの問題への理論面でのアプローチとして超対称性(SUSY)を導入した MSSM モデルなどが提案されて追求されていた。実験面では CERN で史上最高のエネルギーを生み出す加速器 LHC の本格運転が進められて Higgs 粒子が発見され、さらに NP の探索が佳境になりつつあった。国内の世界最高水準のビーム強度を有する J-PARC においても、ニュートリノ振動実験、K 中間子崩壊等の素粒子実験が NP 探索に向けての活動を高めつつあった。KEK 12-GeV 陽子加速器において静止 K^+ 中間子崩壊で実験を続けてきた TREK 研究グループ(本基盤研究の研究グループ)も J-PARC の高強度 K^+ ビームでの NP 探査実験を模索し、レプトン普遍性の破れ(LFUV)探索実験(E36)を提案した。今日注目を集めている B 中間子崩壊での LFUV は未だ確立されていなかった。

(2) 静止 K^+ 崩壊で精密実験を行うのには、 μ^+ や e^+ などの荷電粒子の運動量を、J-PARC の高い計数率の下で高い運動量分解能で測定しなければならない。磁気分析のスペクトロメータとしては超伝導トロイダル電磁石の装置を使用し飛跡のトラッキングをする。そのためにワイヤーチェンバー(MWPC)などの荷電粒子飛跡検出器を必要とするが、E36 の実験と測定器を設計するにあたり、MWPC よりも高速でしかも限られた空間に設置できる検出器が求められた。

2. 研究の目的

(1) 本基盤研究の最終的な目的は J-PARC E36 実験を遂行し、ハドロン実験施設での高強度 K^+ ビームを用いて、 K^+ 中間子の 2 対崩壊 $K^+ \rightarrow e^+ \nu$ (Ke2) と $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$ ($K\mu 2$) の崩壊幅の比 (R_K) を精密測定することでレプトンフレーバ普遍性の破れ(LFUV)を探索することである。LFU は SM の根幹の一つであり、観測した R_K と理論計算との差異は SM を超える NP の存在を示唆する。理論的には、荷電ヒッグスの交換でレプトンフレーバを破るバーテックスループからの寄与が R_K に 1% 程度の効果をもたらすという MSSM のモデルや、sterile neutrino を導入するモデルなどが検討されていた。実験的には DAΦNE の CLOE 実験、CERN の NA62 実験があったがそれらは “in flight decay” 実験であり、E36 では系統性の異なる静止崩壊法により R_K を 0.25 % の精度で決定することを目標とした。さらに副産物物理として重いニュートリノ (Heavy Neutrino) と Dark Photon の探索解析も目標に掲げた。

(2) E36 実験の超伝導トロイダルスペクトロメータ用に、3 台の MWPC に加え K 中間子崩壊点近傍での荷電粒子飛跡測定のための高計数率位置検出器の開発を目標とした。当初ガス電子増幅チェンバー (GEM) を計画しその最適化に基づいた E36 実験の設計を行うとともに、GEM チェンバーの性能評価を実施することを目標とした。

3. 研究の方法

(1) 初年度(H26 年度)E36 実験用荷電粒子位置検出器としての GEM チェンバーの詳細設計を行い、その評価を次の 4 つの観点から行った。

- ①. 研究協力者の持つ同仕様で面積が小型のチェンバーで、実際に海外の加速器ビームを用いて位置分解能、時間分解能、計数率特性、読出し回路の性能などの調査が研究協力者により行われた。
- ②. E36 実験測定器に設置された場合のシミュレーション解析により、予想される荷電粒子の運動量分解能、計数率等の評価を実施した。
- ③. E36 測定器への取り付け等のハードウェアの詳細設計をすることで、有効な検出立体角の評価や故障に備えての保守方法の検討を行った。
- ④. GEM と同等な機能を持つ検出器との比較検討を行った。

その結果、第 3 の点でやや問題のある GEM に替り、新案の Spiral Fiber Tracker (SFT) が同等以上の性能を持つことが判明し、それを E36 用に採用することとした。H26 年度の後期にその開発と製作を行った。

(2) また E36 実験は H26 年度の後半から J-PARC ハドロン実験施設に超伝導トロイダルスペクトロメータを始めとする測定器の設置を行った。SFT は測定器への据え付けに先立ち、ベータ線と宇宙線とでの作動テスト、ファイバー位置の較正、検出効率の測定等の準備研究を行い、H27 年春に無事に E36 Central Detector への組み込みを終えた。

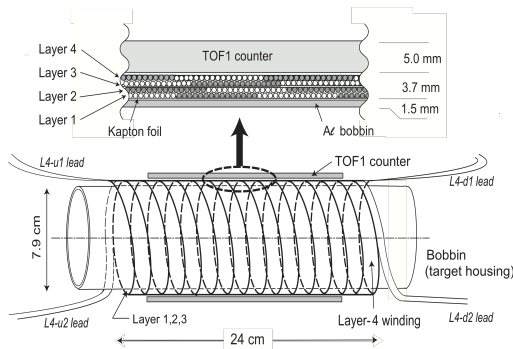
(3) H27 に入り K1.1BR ビームラインに K^+ 中間子ビームの供給とビームタイムの配分を受け、データ収集に向けての測定を開始した。

- ①. H27 年 4 月から 6 月にかけてのビームタイムで、SFT を始めとする各測定器の調整及び Ke2 崩壊と $K\mu 2$ 崩壊データの試験的な取得を行い、評価を行った。
- ②. SFT に関しては E36 実験の実際の測定条件でのビーム事象と宇宙線とでの試験と性能評価を行った。
- ③. H27 年夏に測定器に必要な改良を施し、10 月から 12 月にかけて配分されたビームタイムで R_K のための本格的なデータ取得を実施し、有意な解析に十分な統計量の Ke2 事象を収集した。

④. H28年からH29年はデータ解析を行った。
4. 研究成果

(1) SFTの製作と基本性能

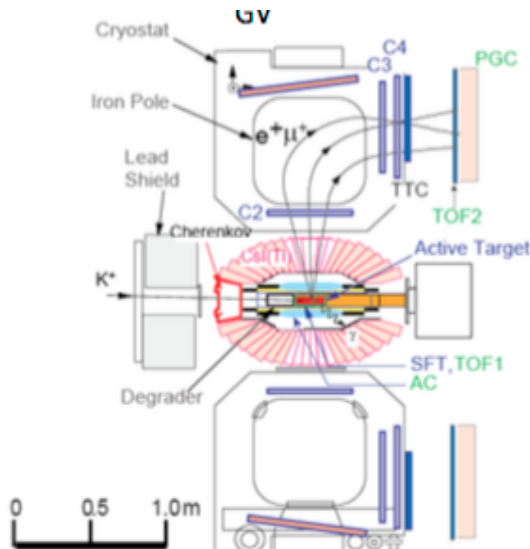
E36実験において静止K中間子の崩壊バーテックス情報のうち x, y 座標はシンチレーションファイバー標的で得る。 z 座標をバーテックス検出器が担当する。そのために複数本の1mm径シンチレーションファイバーで構築したファイバーリボンを円筒に螺旋状に巻き、両端で光信号を読み出す新機軸のSpiral Fiber Tracker (SFT)を考案し製作した。図に模式的に示すよう、リボンは左巻きと右巻きそれぞれ2層が巻かれ、ステレオ角の交点で荷電粒子の通過の z 位置が求められる。さらに左右の巻のリボン幅すなわちステレオ角を違えることで、ある方位角に対しての交点の縮退が解ける構造とした。幾つかの困難を解決し、実機の製作に成功した。



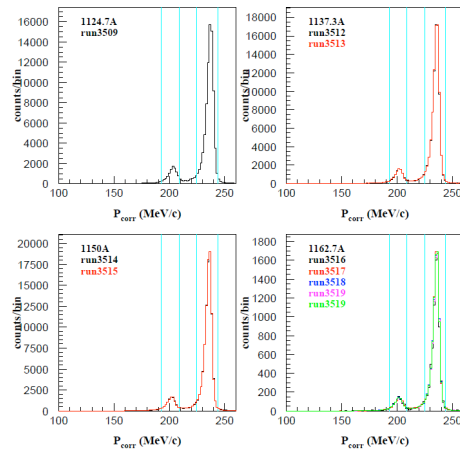
ベータ線と宇宙船での試験で、角層の検出効率は約80%であるが、ファイバーの2層積み状の各巻きでは95%を得、検出位置の分解能はファイバー径で決まることを測定し、E36への投入に問題ないことを確認した。またMPPC光素子とEASIROC等の電子回路での安定な測定を調整することができた。

(2) E36実験での荷電粒子運動量測定

図に実験のセットアップ(ビーム軸12回回転対称)の側面断面を示す。SFTは標的を囲んで置かれ、C2, C3, C4のMWPCとともにトラッキング系を構成した。



静止K+崩壊からの単色線である $K\mu 2$ と $K\pi 2$ の μ^+ と π^+ の運動量スペクトル(それぞれ205 MeV/cと236 MeV/cを4つの磁場設定について図に示す。約2%(標準偏差)の十分高い運動量分解能が得られた。



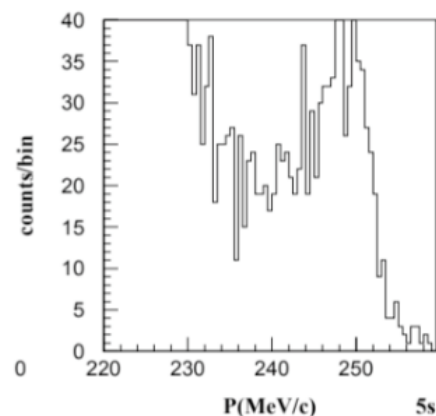
(3) Ke2事象の抽出と R_K の解析法開発

E36の最終的な目標である R_K の解析のため、SFTによる荷電粒子のトラッキングのほか、幾つかの検出器と組み合わせての総合的な解析を実施した。

- ①. Ke2の抽出のため、エアロゲルチェレンコフ検出器、鉛ガラス検出器、そして時間差法(TOF)の解析をし、誤認 10^{-6} レベルの粒子同定(PID)に成功した。
- ②. 崩壊粒子 μ^+ と e^+ とが標的中で受ける相互作用の補正を十分な精度で行うために、標的のファイバーのヒットパターンの解析法を開発した。
- ③. Ke2のガンマ線を伴う放射性崩壊の補正その他の目的で、CsI(Tl)電磁カロリメータの高精度解析法の開発法に成功した。さらに構造依存(SD)放射性崩壊の形状因子決定の方法を確立した。

(4) R_K の結果

図にPIDにより抽出されたKe2陽電子の運動量スペクトル(データの一部を使用したもの)を示す。 1.6×10^{-5} の崩壊分岐比($K\mu 2$ 比では 2.5×10^{-5})しかないKe2が十分に良い精度で決定できることとなった。



(5) 今後の展望

本研究により E36 実験の荷電粒子トラッキング系が整備されることにより、測定器の完成が図られ、データ収集が行われるとともに、解析方法の確立が図られた。今後、E36 コラボレーション全体で解析データ量の統計量をあげ、さらに系統誤差の評価を実施することで信頼度の高い R_K の最終値と実験誤差を得られる。この結果により「標準模型を超える新しい物理」の知見に迫る。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

1) O. Mineev, Y. Igarashi, J. Imazato, S. Shimizu, A. Toyoda et al., “The design and basic performance of a Spiral Fiber Tracker for the J-PARC E36 experiment”, Nucl. Instrum. Method A847 (2017), pp136-141, (査読有り)
DOI:10.1016/j.nima.2016.11.055

2) O. Mineev, J. Imazato, Y. Igarashi, S. Shimizu et al., “A Spiral Fiber Tracker for the J-PARC E36 experiment” PoS(PhotoDet2015)069 (2016) (査読有り)

3) M. Tabata, Y. Igarashi, J. Imazato, S. Shimizu, et al. “Assembly and Bench Testing of a Spiral Fiber Tracker for the J-PARC TREK/E36 Experiment” JPS Conf. Proc. 8, 024001 (2015) [6 pages] (査読有り).

4) Y. Miyazaki, Y. Igarashi, J. Imazato, S. Shimizu, et al., “Performance test of a lead-glass counter for the J-PARC E36 experiment”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A779 (2015), pp13-17 (査読有り)

[学会発表] (計 16 件)

1) 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解析進捗 (1) ”、日本物理学会 第 73 回年次大会(2018 年)、東京理科大学野田キャンパス (千葉県、野田市)

2) 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 (2) ”、日本

物理学会 第 73 回年次大会(2018 年)、東京理科大学野田キャンパス (千葉県、野田市)

3) 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解析進捗 (1) ”、日本物理学会 2017 年秋季大会、宇都宮大学 (栃木県、宇都宮市)

4) 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 (2) ”、日本物理学会 2017 年秋季大会、宇都宮大学 (栃木県、宇都宮市)

5) 堀江圭都, ” $\Gamma(K^+ \rightarrow e^+ \nu) / \Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu)$ 測定によるレプトン普遍性破れ探索実験の解析 ”、日本物理学会 2016 年秋季大会、宮崎県 (宮崎市)

6) M. Hasinoff for the E36 collaboration, “Status of the TREK/E36 Experiment at J-PARC”, Physics of Fundamental Symmetries and Interactions - PSI2016, 2016年10月、Villigen (スイス)

7) S. Bianchin for the E36 collaboration, “Precise measurement of the Ke_2 over $K\mu_2$ branching ratio and search for new physics beyond the Standard Model at TREK”, International Kaon Conference - KAON2016, 2016年9月、Birmingham(英国)

8) M. Kohl for the E36 collaboration, “The TREK-E36 Search for New Physics at J-PARC”, International Conference of High Energy Physics - ICHEP2016, 2016年8月、Chicago(米国)

9) H. Lu for the E36 collaboration, “Status of the TREK/E36 Experiment at J-PARC”, The XIIIth International Conference on Heavy Quarks and Leptons - HQL2016, 2016年6月、Blacksburg (米国)

10) B. Dongwi for the E36 collaboration, “Search for New Physics with Experiment E36 at J-PARC”, APS April meeting, 2016年4月、Salt Lake (米国)

11) O. Mineev for the E36 collaboration, “A Spiral Fiber Tracker for J-PARC E36 experiment”, International Photo Detector Conference - PhotoDet2015, モスクワ (ロシア) 2015 年

12) 田端誠, ”Progress in Developing a

Spiral Fiber Tracker for the J-PARC E36 Experiment”、Technology and Instrumentation in Particle Physics 2014, アムステルダム (オランダ) 2014年7月

13) 清水俊、” Precise $\Gamma(K^+ \rightarrow e^+ \nu) / \Gamma(K^+ \rightarrow \mu^+ \nu)$ Measurement using stopped Positive Kaons at J-PARC”、2nd International Symposium on Science at J-PARC, つくば国際会議場 (茨城県、つくば市) 2014年7月

14) 田端誠、” Assembly and Bench Testing of a Spiral Fiber Tracker for the J-PARC TREK/E36 Experiment”、2nd International Symposium on Science at J-PARC、つくば国際会議場 (茨城県、つくば市) 2014年7月

[その他]

研究グループの Web ページ:

<http://trek.kek.jp>

から J-PARC E36 “Search for lepton flavor universality violation in $\Gamma(Ke2) / \Gamma(K\mu 2)$ ” へ入る。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

今里 純 (IMAZATO, Jun)

高エネルギー加速器研究機構・その他の部局等・名誉教授

研究者番号: 40107686

(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

豊田 晃久 (TOYODA, Akihisa)

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: 20373186

清水 俊 (SHIMIZU, Suguru)

大阪大学・大学院理学研究科・助教

研究者番号: 60294146

山崎 寛仁 (YAMAZAKI, Hirohito)

東北大学・電子光理学研究センター・助教

研究者番号: 90260413

(H26年度のみ)

(6) 連携研究者

堀江 圭都 (HORIE, Keito)

大阪大学・大学院理学研究科・技術職員

研究者番号: 80432467

田端 誠 (TABATA, Makoto)

千葉大学・大学院理学研究院・特任研究員

研究者番号: 10573280

(8) 研究協力者

KOHL, Michael

Hampton University (米国)・教授

DONGWI, Bishoy

Hampton University (米国)・院生

HASINOFF, Michael

University of British Columbia (カナダ)・教授

BIANCHIN, Sebastien

TRIUMF (カナダ)・研究員

KUDENKO, Yury

INR (ロシア)・上席研究員

MINEEV, Oleg

INR (ロシア)・研究員

TAO, Chau Van

University of Natural Science

(ベトナム)・教授