

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 9 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25287064

研究課題名(和文) K+中間子崩壊のレプトン普遍性の破れの探索実験用エアロゲルチェレンコフ検出器

研究課題名(英文) Aerogel Cherenkov detector for the K meson decay experiment to test the lepton universality

研究代表者

豊田 晃久 (TOYODA, Akihisa)

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：20373186

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,400,000円

研究成果の概要(和文)：現在の理論(標準理論)では説明できない現象がいくつもあり、新しい物理(NP: New Physics)が必要になっている。それを見つける方法として、大強度ビームを利用した精密実験(J-PARC E36実験)を行った。具体的にはK中間子という粒子が二つの粒子に崩壊する現象には2種類($K \rightarrow 2\pi$ と $K \rightarrow \pi\ell$)があり、その発生比率 R_K を測定した。本研究では、本実験で利用する粒子識別装置であるエアロゲルチェレンコフ検出器を様々な手法で高性能化することに成功した。本検出器を上記実験装置に組み込んで無事データを取得した。

研究成果の概要(英文)：The new physics is lately necessary to explain matters which cannot be explained by the elementary particles theory, so-called "Standard theory". We performed the J-PARC E36 experiment by using the high intensity accelerator to find out the new physics. The E36 experiment precisely measured the decay ratio (R_K) of the two-body decay channels of the K meson. This work succeeded to enhance the performance of the aerogel Cherenkov detector to distinguish the decay particles by changing the parameters of this detector. This detector was installed to the E36 counter system, and we finally accomplished the experimental data acquisition.

研究分野：実験核物理

キーワード：エアロゲル 検出器開発 粒子識別 素粒子実験 精密測定

1. 研究開始当初の背景

近年素粒子物理学の根幹をなしている標準理論の限界が明らかになってきている。例えば階層性の問題であるとか、宇宙の暗黒物質や暗黒エネルギーが説明できない問題などがあり、標準理論を超える新しい物理(NP: New Physics)の存在が示唆されている。これらの問題に対する理論的な取り組みが続く中、実験側からのアプローチとしては史上最高のエネルギーを生み出す加速実験装置 LHC(Large Hadron Collider)が稼働し Higgs 粒子が観測され、素粒子物理学が大きく進展しつつある。本研究では LHC の「高エネルギービームによる未知粒子の直接生成」法とは異なるアプローチをとる。具体的には J-PARC による「大強度ビームによる精密測定」法を採用し、NP の探索を行う。LHC とは全く異なった方向から NP にアプローチできる最先端で重要な研究となっている。

2. 研究の目的

本研究では、J-PARC ハドロン実験施設の荷電 K 中間子ビームを使用して、K 中間子の 2 体崩壊 $K \rightarrow e \mu$ ($Ke2$) と $K \rightarrow \mu \mu$ ($K\mu2$) の分岐比の比 $R_{K^*} = (Ke2)/(K\mu2)$ を 0.25 % といういまだかつてない精度で測定することでレプトンフレーバー普遍性の破れを探索することを目的とする。この実験は J-PARC E36 実験として提案、採択されている。本研究では、J-PARC E36 実験において最重要課題である電子(e)とミュオン(μ)の粒子識別のために中心的な役割を果たすエアロゲルチェレンコフ検出器の開発を目的とする。

3. 研究の方法

エアロゲルチェレンコフ検出器の最大の課題はチェレンコフ光の開き角が 36 度と小さいため、エアロゲルチェレンコフ検出器中央付近に入射するメインの崩壊電子から生じる光の飛程が長く、光検出器に到達する前にレイリー散乱と反射ロスによって大きく光量を失ってしまうことである。この問題を解決するために、反射面が 3 回折れ曲がったポリゴナルミラーを用意し効率の向上を図る。このポリゴナルミラーによって側方に導かれたチェレンコフ光は、集光効率を向上させるためのウィンストンコーンによって集光される。これらの形状および発光体であるエアロゲルの性質(屈折率 n や厚み、透過率 TL)等を最適化することによって、検出効率を 99.9%まで高める。

4. 研究成果

本研究で重要なポイントは検出効率の向上のほかに μ を e と間違える misID 対策がある。misID の最大の原因はデルタ線であると考えられる。そのデルタ線の寄与を下げる目的で異なる屈折率(n)をもつエアロゲル 3 種類を用意して検出器を構成し、misID を低下させられるかどうかを、J-PARC ハドロン実験施設

K1.1BR ビームラインの 2 次粒子ビームを利用して試験した。本ビームラインでは、静電セパレーターが設置されており、 e や μ を選択的にビームとして取り出すことができる。また粒子の運動量として、実際の実験で利用する 250 MeV/c を選択して試験することができる。その結果デルタ線をカットするために n を下げると効率が大きく損なわれてしまうことが判明し、この方法は今回の形状では使えないことが分かった。そこで n は効率重視で 1.08 と高い値に設定し、その発光量の多さを生かして検出閾値を下げて misID を低下させる方法が最適であることが結論付けられた。

検出効率のさらなる向上の手段としては、検出器内面の反射材の最適化がある。反射材を数種類用意して上記と同様にビーム試験によって効率を測定した。最終的にはアルミナイズドマイラーが最適であることが分かった。

検出効率の向上についてもう一つの手段である主ミラーの形状については、計算シミュレーションによって効率がよいと評価された数パターンの形状でミラーを実際に試作し、最もビーム試験結果が良かった形状を採用した。

カウンター製作上で最も難しかったのがエアロゲル製造であった。通常製法では屈折率 n が高くなるほど透過率 TL が低くなるため超臨界乾燥法を利用して TL が高いエアロゲルを製作する必要があるが、クラック率が高くなり歩留まりが悪くなる問題がある。ビーム試験の結果光量の TL 依存性は低いことが判明したため、通常製法のエアロゲルが使用できることになりこの問題は解決できた。もう一つの問題はエアロゲル界面での乱反射であった。計算シミュレーションの結果本研究の検出器形状では正反射材が最適であると結論が出ていたので、上記の界面での乱反射は効率低下の原因となる。エアロゲルを本検出器のような複雑な形状に成形するのは難しく、通常はウォータージェットで加工することになるが、その加工面は加工前と比較するとどうしても平坦度が低下する。本研究では世界随一のエアロゲル製作技術を持つ千葉大河合研究室の技術によって何度か試作を重ねた結果、厚さ方向に 2 分割だけした形状で十分な歩留まりで製作できるようになった。この方法は一体成型のみでウォータージェット加工が不要となるため、エアロゲル界面の乱反射を最低限に抑えることが可能になった。

検出器 BOX 自身の形状については、お互いの検出器間の隙間を最小限にして立体角を稼ぐことが重要な点の一つである。粒子が通過する方向に関してはできるかぎり検出器厚さを確保しつつ、遮光を最小限の厚さで達成することが重要である。試行錯誤の結果光量の少ないチェレンコフ光に比べて十分な遮光ができる薄肉の検出器 BOX を製作すること

ができた。

上記で最適化されたエアロゲルチェレンコフ検出器検出器を再度 J-PARC ハドロン実験施設 K1.1BR ビームラインにて入射位置角度を変えた検出効率および misID 分布のデータを取得した。具体的にはエアロゲルチェレンコフ検出器を遠隔操作の駆動機構(平行移動および回転)上に乗せることで、位置角度を変えつつ試験した。その結果全域で検出効率98%以上、かつ misID 3%以下の性能を確認できた。

上記の結果を受けてエアロゲルチェレンコフ検出器 12 個を量産し、J-PARC E36 実験の中央検出器群に組み込んだ。遮光試験を行った後に宇宙線にて光電子増倍管高圧などによる信号出力波高の平坦化などのチューニングを行った。2015年4月から J-PARC ハドロン実験施設が再開し、同施設の K1.1BR ビームラインにおいてコミッショニングを開始した。2015年4月から5月、6月、および11月から12月までの3回のビームタイムを実施した。最初に個々の検出器の調整を行った。エアロゲルチェレンコフ検出器に関していうと、例えば光電子増倍管アンプおよび回路の閾値の調整によって e/μ の検出効率および分離能の最適化を行うなどした。続けて統計量の多い K 粒子の3体崩壊のデータを利用することによって検出器全体の運動量分解能や粒子識別分離能を最適化した。最後に本データ取得を行い、研究目的を達成した。ビームタイム後に検出器群を撤去し現在データを解析中である。

最後に今後の見通しを述べる。本研究の最大の特徴は R_k を導入することで K 崩壊におけるハドロン不定性がキャンセルされるため、精密な理論計算が可能なることにある。ゆえに NP の K 崩壊への影響を高精度で検証可能となっている。また R_k を測定する他実験は飛行中の K 中間子崩壊を観測する in-flight 法を採用している。本実験は静止 K 法を採用しており全く異なる系統誤差となるため、実験値の正しさを検証するうえで欠かせない重要な結果となる。またもし本研究で NP の影響が観測された場合、現在稼働開始しつつある super-KEKB において 粒子の稀崩壊が発見される可能性が高まり NP の理解にとって欠かせない情報となる。以上により今回のデータは極めて重要な結果をもたらすことができる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

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 A, 査読有、795、2015、pp206-212、DOI: 10.1016/j.nima.2015.06.002

〔学会発表〕(計 0 件)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕
出願状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等
<http://trek.kek.jp/e36/index/html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

豊田 晃久 (TOYODA, Akihisa)
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：20373186

(2) 研究分担者

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

河合 秀幸 (KAWAI, Hideyuki)
千葉大学・理学(系)研究科(研究院)・准教授
研究者番号：60214590

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

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

山崎 寛仁 (YAMAZAKI, Hirohito)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速
器研究機構・放射線科学センター・准教授

研究者番号： 90260413

(3)連携研究者

田端 誠 (TABATA, Makoto)

千葉大学・理学(系)研究科(研究院)・特任研
究員

研究者番号： 10573280