

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05480

研究課題名(和文) 高真空中で用いる荷電粒子検出器開発によるK中間子稀崩壊探索感度の向上

研究課題名(英文) Development of charged particle detector for KOTO experiment

研究代表者

林 ケヨブ (Lim, GeiYoub)

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・准教授

研究者番号：90332113

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究はJ-PARCで行っている中性K中間子の稀崩壊探索実験(KOTO実験)において、新たに発見されたバックグラウンド事象(信号と見誤る他の事象)の発生原因を取り除くための検出器開発を行い、その導入により実験の到達感度を向上させることを目的とする。KOTO実験は中性K中間子が中性パイ中間子と二つのニュートリノに崩壊の分岐比を測定し、新しい物理の存在を探索する試みである。極めて稀に起こる崩壊であり、様々な他KL崩壊によるバックグラウンドを除去することが実験の鍵となる。本研究では、K中間子が三つのパイ中間子に崩壊から生成される、荷電パイ中間子を検出する新たな荷電粒子検出器を開発・設置を行なった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

KOTO実験が探索している中性K中間子の稀崩壊は標準模型を越える新しい物理の探索に最も適している現象である。また、LHC実験で探しているTeV領域より、もっと高いエネルギー領域(1000TeV)までの探索が可能である。しかし、極めて稀なイベントを莫大なバックグラウンドを除去しながら検出する至難の実験なので、KOTO実験が唯一に探索し続けている。KOTO実験が新しい物理の存在を明らかにするためには、発見されているバックグラウンドの原因を調べ、適切な対応をすることを繰り返し、ゴールに近づくしかない。本研究はその一環であり、荷電パイ中間子を含む崩壊によるバックグラウンドを完全に抑えることを目指した。

研究成果の概要(英文)：We developed a new type of charged particle detector for the KOTO experiment at J-PARC. The experiment is searching for a clue of new physics beyond the standard model by measuring neutral kaon decay. The decay, a neutral kaon decays into a neutral pion and two neutrinos, is extremely suppressed in the frame of the standard model and is expected its decay probability with exceptionally small theoretical uncertainty. Among various background sources related to the other kaon decay modes, three-pion decay mode including charged pions will be background events when the charged pions are not detected due to hadronic interaction with materials before reaching detector. We fabricated a charged particle detector with compact read-out system and installed it at the most inside of the KOTO detector, where is very limited space and operated in vacuum as 10

研究分野：素粒子実験

キーワード：荷電粒子測定器 中性K中間子稀崩壊 KOTO

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

$K_L \pi^0 \nu \nu$ 崩壊を他 K_L 崩壊モードから選別するために、崩壊から生成される2次粒子を完全に検出することが必要である。たとえ、 $K_L \pi^+ \pi^- \pi^0$ 崩壊の場合、 π^0 と同時に生成される荷電パイ中間子 (π^+ 、 π^-) を検出することで $K_L \pi^0 \nu \nu$ 崩壊ではないことで排除することができる。図1に示されている KOTO 検出器は内部で生成された2次粒子を高い効率を持って検出するように建設されている。しかし、取得したデータの解析から予測できなかった $K_L \pi^+ \pi^- \pi^0$ 崩壊のバックグラウンド事象が発見された。

図2で示されているように、崩壊領域の下流で起きる崩壊では、 π^+ と π^- がカロリメータのビームホールを通して検出器から抜け出すことがある。この π^+ と π^- を検出するために、ビーム中心と周りをカバーする荷電粒子検出器(CC05, CC06, BHCV)を設置している。発見されたバックグラウンドは π^+ と π^- が検出器に到達する前に、ステンレス鋼製のビームパイプで反応を起こして消滅したからである。

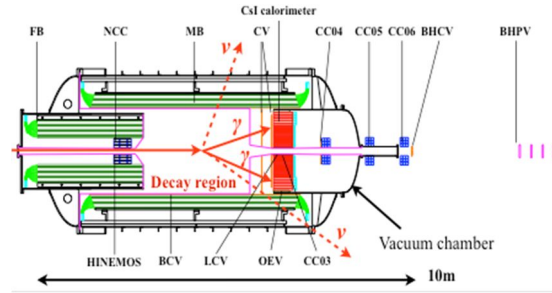


図1. KOTO 検出器

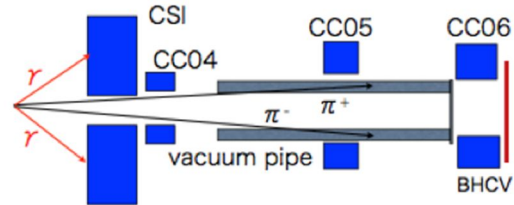


図2. $K_L \pi^+ \pi^- \pi^0$ バックグラウンドの生成原因

2. 研究の目的

本研究の目的は $K_L \pi^+ \pi^- \pi^0$ 崩壊によるバックグラウンドを除去するために、新たな荷電粒子検出器を開発することであった。2015年に収集したデータの解析を通じて、そのバックグラウンドの存在は確実なものであり、バックグラウンドイベントの数も予測できるようになった。KOTO 実験の最終目標である $K_L \pi^0 \nu \nu$ 崩壊の分岐比測定のためには、現状のバックグラウンドをさらに10分の1に減らす検出器の開発が必要であった。

カロリメータのビームホールを通して出て来る荷電粒子の検出のため、可能な限りカロリメータに接近してビームを囲むことが要求され、極めて狭い空間に隙間無く設置可能な検出器の開発を目指した。また、他の物質との反応を起こす前に検出するために、高真空(10^{-5} Pa)で運用される領域に設置する。そのため、高真空仕様の検出器を製作した。

3. 研究の方法

プラスチックシンチレータを用いた荷電粒子の検出は基礎的な実験手法であるが、本研究は極めて狭い空間の高真空環境で検出器システムを構築するために下記の研究を計画した。

- 検出器から発生するアウトガス量測定及び成分分析。

アウトガスの測定は高真空状態を維持する二つの真空チャンバーを所定のコンダクタンスを持つ穴で連結する。一つのチャンバには何も無い状態で、もう一つのチャンバにはシンチレータサンプルを入れる。排気を維持しながら、二つのチャンバーの真空度を測定する。サンプルのアウトガスは二つチャンバーの真空度差で求められる。測定装置が既に開発され測定実績を持つもので、本研究のために活用することができた。

- 真空薄膜を支えるための機械的な強度測定。

真空薄膜とは、K中間子が崩壊する領域(10^{-5} Pa)と検出器が設置されている領域(10^{-1} Pa)を分けるために設置されている厚さ0.2mmのアルミを含むプラスチックフィルムのことである。自立できず、ビームホールとして維持するためにはG-10のように薄くて強度をもつ物質で支える必要がある。開発する検出器を支えとして活用するために必要な空間配置などを検討した。

- 検出器信号の読み出し方法。

シンチレーション光を電気信号に変換し、データとして取得する方法が本研究の最大課題であった。従来の光電子増倍管(PMT)を用いた読み出し方法では、PMT の場所として 20cm 以上の隙間と、数 cm 以上の厚みが必要となる。数 mm しか空間的余裕がない本検出器には検討の余地もない。シンチレータに波長変換ファイバーを埋め込み、10mmX10mm の断面（有効領域：6mmX6mm）を持つ MPPC で読み出すことを検討した。しかし、波長変換ファイバーをまとめ MPPC に繋ぐためには、ファイバーの損傷を防ぐために 10cm 程度の空間が必要になり、新たな発想が必要になった。

本研究では MPPC をシンチレータ表面に固定し、信号を読み出す方式を開発した。ファイバーを通じてシンチレータの両断に到達するシンチレーション光は、アルミで製作した集光箱で反射され MPPC に入り、電気信号を作る。ファイバーを直接に MPPC に連結する方法と比べると獲得光量は減少するが、隙間なく検出器を設置することが可能になる。獲得光量がバックグラウンドの押さえるのに十分であることをテストモジュールを製作し検証した。

4 . 研究成果

本研究で製作した検出器の概念図と完成写真を図 3 で示す。汎用シンチレータである Eljen 社の EJ-200 に幅 1.2mm の溝を作り Kuraray 社の波長変換ファイバー(Y-11)を埋め込んで製作した。ファイバはアルミで製作した集光箱(light guide)の中まで入りこみ、ファイバーから出て来た光は箱の中で反射され MPPC に入り、電気信号として読み出される。

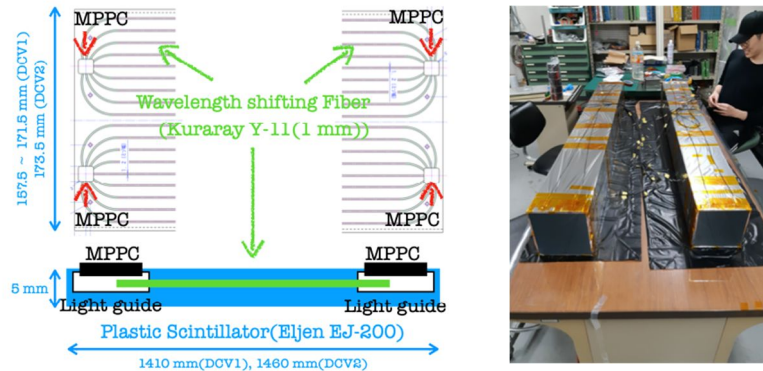


図 3. 本研究で製作した検出器の概念図(左)と完成写真

荷電粒子が通過すると、EJ-200 は 8000 個のシンチレーション光を放出する。その光が Y-11 に入り長い波長を持つ光に変換される。直径 1mm のファイバーで内部全反射条件を満足し、集光箱まで到達するのはそのうち 3.7% 程度である。MPPC が電気信号を生成する効率が 40% 程度なので、ファイバーを MPPC に直接つなぐ場合は MPPC で 120 個程度の光信号を得ることになるが、本研究で製作した検出器は集光箱で約 40% の損失がある。検出器を製作して、宇宙線を用いた性能評価では、予想した光量を得ることができた。ファイバーでの減衰を含み、検出器の中心で 60 個の光信号を得ることになり、荷電粒子が通過したかどうかを判断するためには十分大きい信号を得ることができた。

検出器が設置されている領域の真空度は設置前と比較して有意な差が見られなかった。まだ、高真空中でも検出器の性能には変化は見られなく、安定にデータ取得が可能であった。

図 4 は本研究で開発された検出器(DCV)が $K_L \pi^+ \pi^- \pi^0$ 崩壊によるバックグラウンドを除去している様子を示している。右の図は DCV に荷電粒子が通過したかどうかを問わずに、 $K_L \pi^0 \nu \nu$ 崩壊の候補を選び出した結果である。黒く隠されている信号領域の下に存在するイベントが $K_L \pi^+ \pi^- \pi^0$ 崩壊によるものである。DCV の信号を用いて荷電粒子が存在しているイベントを取り除くと、左の図のように完全になくなることが確認できた。

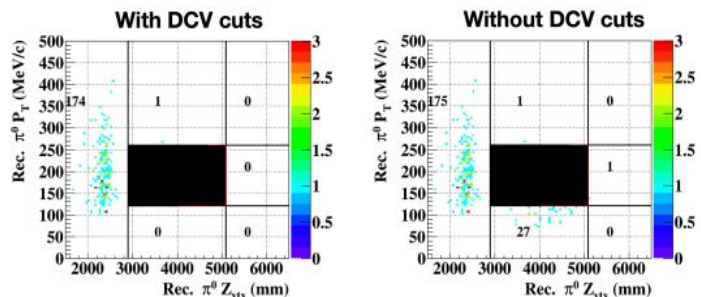


図 4. 本研究で製作した検出器(DCV)を用いて、 $K_L \pi^+ \pi^- \pi^0$ 崩壊のバックグラウンドを除去した結果（解析中）。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 H.M.Kim
2. 発表標題 A new charged particle detector for the KOTO experiment at J-PARC
3. 学会等名 International Conference on Kaon Physics 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
--	---------------------------	-----------------------	----