

令和 7 年 6 月 9 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2022～2024

課題番号：22K03659

研究課題名（和文）リサイクル材料・新蛍光素材によるK0稀崩壊実験用VETO検出器の高速応答化の試み

研究課題名（英文）R&D of a Fast-Responding VETO Counter for K0 Rare Decay Experiments Using Recycled and/or New Scintillating Materials

研究代表者

吉田 浩司 (Yoshida, Hiroshi)

山形大学・学士課程基盤教育院・教授

研究者番号：80241727

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）：K0稀崩壊実験次期計画実現に向けて、線VETO検出器の高速応答化をめざした基礎開発研究をおこなった。シンチレーター材料のうち、Wave Length Shifterについては応答速度の優れた材料が開発されたので、その蛍光寿命やファイバーの減衰長を評価する実験をおこなった。また、高速のWLSファイバーを集光系に組み込んだテストカウンタを製作し、加速器ビーム実験や宇宙線ベンチテストにより応答速度や時間分解能を評価した。結果、経済性に優れ、より高計数率な環境下で動作し得る高速応答で大型のサンドイッチカロリメーターの実現に一步近づいた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、素粒子原子核物理学実験の分野では、実験装置はますます大型化し、加速器ビームも大強度化しつつある。そういう状況下であらゆる検出器は応答速度の向上が求められており、本研究は学問分野全体に資するものとなっている。さらに使用材料については、リサイクル材料の活用、製造の環境負荷低減、低コスト化を常に意識しており、素核実験分野の未来における環境性、経済性、持続性などについて貢献できるものと考えている。

研究成果の概要（英文）：We performed fundamental R&D to develop a fast-response gamma VETO counter for the next phase of the K0 rare decay experiment. We conducted experiments to evaluate the fluorescence lifetime and fiber attenuation length of newly developed wavelength shifter (WLS) scintillator materials, which exhibit excellent time response. We constructed a test counter by integrating high-speed WLS fibers into its light collection system. We then evaluated its response speed and time resolution through accelerator beam experiments and cosmic ray bench tests. These results represent a step forward in developing a cost-effective large sandwich calorimeter that can operate in higher counting rate environments with its fast response.

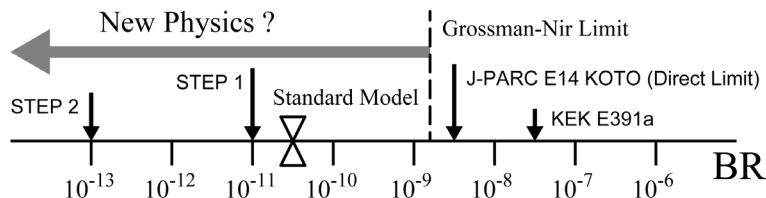
研究分野：素粒子原子核物理学

キーワード：粒子線検出器 カロリメーター シンチレーター

1. 研究開始当初の背景

直接 CP 対称性を破る $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 反応は標準理論により予想されている分岐比は 10^{-11} 程度と大変小さいものであるが、理論計算による不定性も $1\sim 2\%$ 程度と大変小さいと考えられていて、CKM 行列要素を決める上できわめて重要な反応である。これまでに実験で得られているこの反応の上限値は、山形大学も参加している J-PARC E14 KOTO による 3.0×10^{-9} であり、上記の予想に対してまだ 2 桁も大きく、この反応は K 崩壊で残された最大の実験対象といわれている。

J-PARC E14 KOTO は、KEK E391a の後継実験であり、この反応を捕らえ標準理論を超えた物理を探索するために、STEP 1 \rightarrow STEP 2 と 2 期の実験計画で臨んでいる。STEP 1 では KEK E391a の検出器を改造し、この反応の初観測を目指し目下ビーム実験が進められている。現在その最初の重要な成果が得られつつあり、KEK E391a で得られたこの反応の上限値 2.6×10^{-8} を一桁更新し、 3.0×10^{-9} という値が得られている。これは $K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}$ 反応から間接的に決まる Grossman-Nir limit 1.5×10^{-9} に迫る値であり、まさに新しい物理の扉を開きつつある。そして STEP 2 では K_L^0 の崩壊領域を大きく拡大し 20m 超の検出器でもって 10^2 events 程度の反応を観測し、標準理論の予想値のはるか先の領域において、その分岐比の精密測定を目指している。(以上の実験値は研究開始当初のものである。)

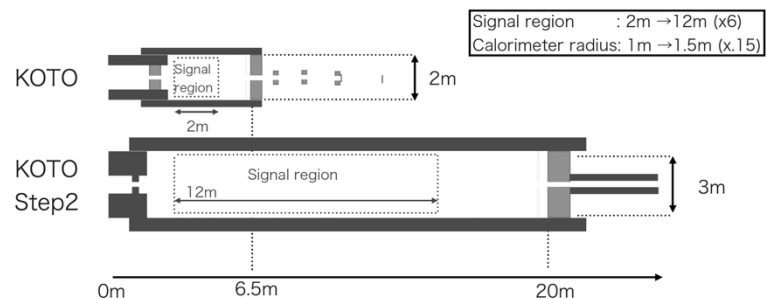


2. 研究の目的

本研究はこの STEP 2 実現に向けて、 K_L^0 崩壊領域側面部をカバーする Barrel Counter と呼ばれる $\sim 20\text{m}$ の γ 線 VETO 検出器やその他の γ 線 VETO 検出器の基礎開発を行うものである。検出器の性能向上もさることながら、リサイクル材料や新規に開発された材料を積極的に活用することを視野に入れ、製造に伴う環境負荷の低減と経済性の向上を図ることも本研究の目的である。「LHC や ILC 計画の予算規模を見ると、高エネルギー加速器物理学は持続性の限界に達しつつあるとの印象を拭えない。(中略) そのような研究戦略が有限のリソースしかないこの世界で早晚行き詰まることは必至である。」(国際リニアコライダー計画の見直し案に関する論点メモ@日本学術会議) という文書にも見られるとおり、いかに優れた研究テーマであろうとも、環境性や経済性に著しく劣る研究計画は社会的に許容されないという時代を迎えつつある。環境性・経済性に優れた汎用な γ 線検出器の基礎開発としても本研究を位置づけたい。

J-PARC E14 STEP 2 検出器の概念図を示す。図中、濃色の箇所が γ 線 VETO 検出器である。以前の実験に比べて特徴的なのは、 K_L^0 粒子の崩壊領域を 6 倍以上確保するために、検出器のビーム方向の長さが 20m 以上に及ぶことである。この計画は、検出器サイズを一気にスケールアップする一方で、 γ 線を VETO する性能は維持し、さらにエネルギー/位置/時間測定性能を向上させようという野心的なものである。

本研究は検出器量産前の R&D を担い、検出器の性能ならびに経済性を検討し、 γ 線 VETO 検出器の仕様決定の一助を担うために行うものである。発光が速い有機シンチレーターの特性を有し、機械的強度、加工性などにも優れた PEN 樹脂や PET 樹脂等のリサイクル材料を用いた蛍光材料、現在開発中で従来品よりも速い発光性能が期待できる

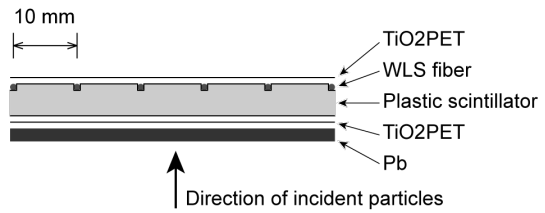


WLS Fiber、口径も大きくなり低ノイズで安定した単一光子観測が可能な MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) 等、新たに開発された素材やデバイスを積極的に活用し、性能のみならず環境性や経済性も追求する。必要な性能を損なうことなく、衝突型加速器実験で使用されるカロリメーターに比べて、製造・ランニングコストを大幅に圧縮することを目指したい。

3. 研究の方法

(1) 検出器構造のデザイン検討

右図は KOTO で使用されているサンドイッチカロリメーター (Barrel Veto Counter) の1層の断面図である。現行ではビーム軸とシンチレーター層が平行になるように積層されているが、次期計画では他の積層方式も採り得るのか検討の余地はある。本研究で様々なデバイスの特性をスタディしていく過程で他の積層方式の可能性についても探求していく。



(2) 新素材の探索と高速応答化の試み

物質の発光波長域が PMT の受光感度域にあることにこだわらなければ、リサイクル材料として社会に広く浸透している PET 樹脂等、蛍光発光し、経済性、加工性、力学的強度に優れている候補材料を見出すことは可能である。その波長域や発光量の不利があったとしても蛍光剤の付加や新開発の WLS Fiber でカバーできる可能性もある。

速い発光が期待できる Wave Length Shifter を試作できる段階になってきた (右図申請時写真)。最近の進展を追い風に、本研究では蛍光材料の探索をおこない、常温域、低温域、高温域における吸光発光スペクトル測定や、単一光子計数法による蛍光寿命測定など、UVSOR 放射光を利用したナノ・ピコ秒オーダーでの物性評価をおこない、検出器の高速応答化を追求する。また新しい Wave Length Shifter が Fiber 化されたときのテストベンチも山形大学に新たに整備する。



(3) 位置測定性能の向上の追求

STEP 2 では VETO 検出器にも良い位置分解能を有することが求められる。WLS Fiber 集光系の光電気信号変換デバイスとして MPPC を用いることにより、検出器にワイヤーチェンバーのような機能を持たせることが可能であろうと考えられる。新世代の MPPC は低ノイズであり、単一光子測定も容易にできるようになってきており、十分に実現可能なアイデアであると考えている。樹脂によっては上図のような溝の加工を施すことは難しいかもしれないが、WLS ファイバーやシートを層に挟み込んだり、サンドイッチ内部でシンチレーターをホドスコープ的に配置したりして位置分解能の向上を図ることは可能であろうと考えられる。

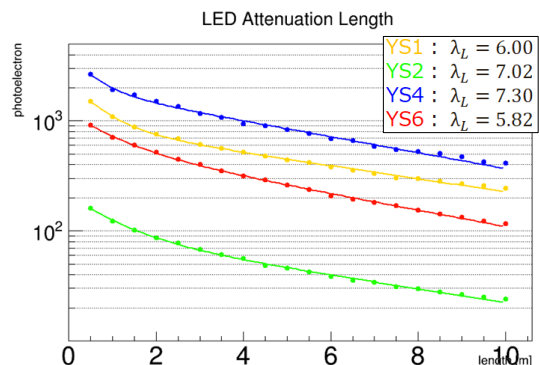
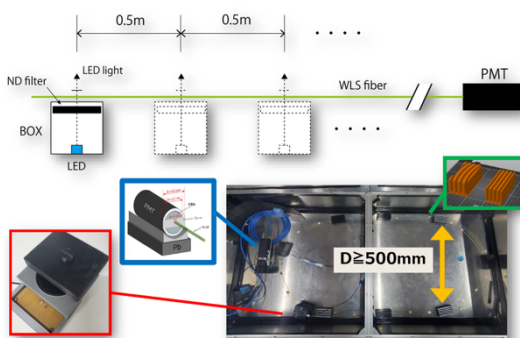
(4) テストモジュールの製作/ベンチテスト/ビームテスト

以上の研究を検証するためのテストモジュールを製作する。モジュールを支えるフレームは、汎用性の高い構造を持たせ、金属輻射体、シンチレーター、集光系デバイス、PMT や MPPC 等の光電気信号変換デバイス等をテストに応じて入れ替えられる構造になっている。組み上げ後は放射線源や宇宙線によるベンチテストをおこない、さらに東北大 ELPH の電子線、 γ 線ビームラインや J-PARC ハドロンホールにおいて、テストモジュールの応答性能などのビームテストをおこなっていく。

4. 研究成果

(1) 減衰長測定システムの製作とそれを用いた高速応答 WLS ファイバーの性能評価

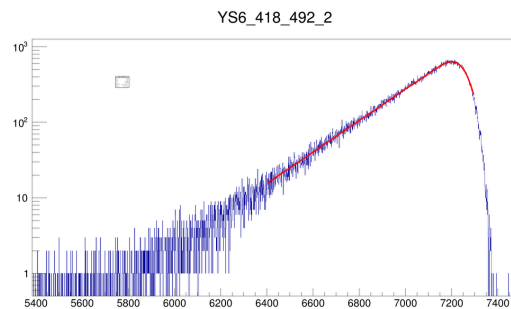
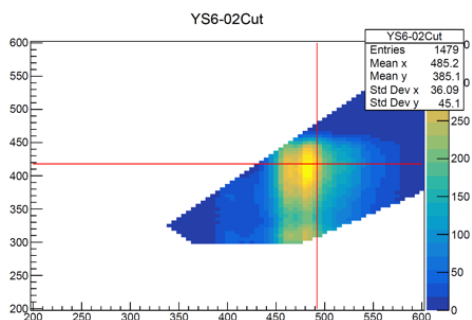
次期計画で使用が想定される 10m 超のファイバーの減衰長をそのままのスケールで測定評価



できるテストベンチを製作した（前頁左図）。放射線源励起によるプラスチックシンチレーターと LED の両方を発光源にでき、実地で使用される長さと同程度の長さのファイバーの減衰長を直接測定できる。前頁右図は高速応答のクラレ社製の新型ファイバーの測定結果である (YS1, YS2, YS4 & YS6 は商品型番)。いずれの新型ファイバーも現行の KOTO 実験で使用されているものと遜色ない性能（減衰長 ~ 6m 以上）を有していることがわかる。

(2) 新たに開発された高速応答シンチレーター（Wave Length Shifter）の物性評価

新たに開発されたシンチレーター、中でも特に従来品よりも応答が速いと思われる Wave Length Shifter 材料について UVSOR 放射光を用いて蛍光寿命測定等の物性実験をおこなった。シングルバンチ運転下の紫外光を励起光源とし時間相関単一光子計数法により試料の蛍光寿命を決定した。その主なもの (YS1, YS2, YS4 & YS6) についての結果を以下に示す。（なお試作にとどまったサンプルについての測定結果は非公表としている。）

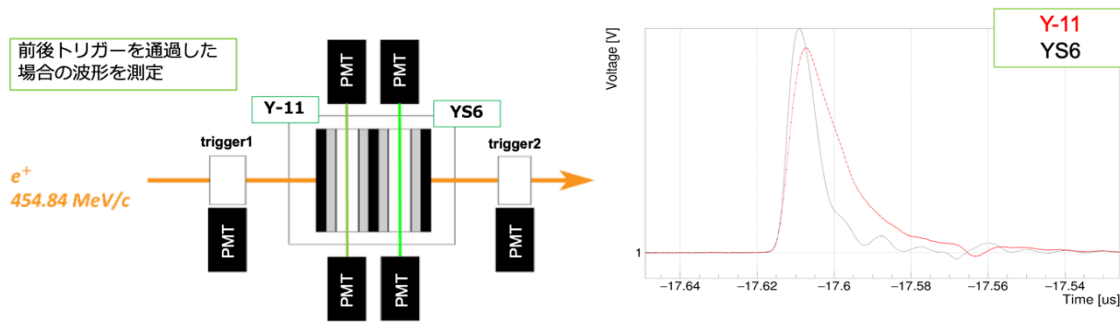


YS4 及び YS6 は蛍光寿命が 1.5ns 未満であり、汎用のプラスチックシンチレーターと同程度に高速応答であることから、STEP 2 のカロリメーターに相応しい性能を有しているといえる。

サンプル名	励起波長[nm]	発光波長[nm]	蛍光寿命[ns]
Y-11	424	500	6.44
YS4	416	500	1.37
YS6	418	492	1.27
BCF91A	450	493	6.30
BCF92	400	480	1.52
YS1	430	469	2.66
YS2	460	499	3.16

(3) 陽電子ビームを用いた時間応答性能比較実験

汎用のプラスチックシンチレーター EJ-200 (200×200×5mm) に 10mm 間隔に溝を掘り、そこに WLS ファイバーを埋め込み集光系を構成しカウンターの時間応答を測定した。長さ 65cm の WLS ファイバーをオプティカルグリースを用いて接着し、4 本を束ねて光電子増倍管に集光する構成とした。Y11 集光系を有するものと YS6 集光系を有するものの 2 種類のカウンターを製作し比較系とした。左下図のようにそれら 2 種類のカウンターを串刺しにするように運動量 455MeV/c の陽電子ビームを照射し、光電子増倍管からの出力波形を直接比較した。（実験は東北大学電子光理学研究センター ELPH でおこなった。）右下図は光電子増倍管からの出力波形の全データを平均した波形である。（この波形を積分すれば電荷量がわかり、平均獲得光電子数を求めることができる。）明らかに Y11 に比べて YS6 の方が波の幅が（平均して）30%程度狭く減衰時間が短くなっていることがわかる。なお、この実験では、YS6 カウンターで得られた獲得光電子数が Y11 カウンターのその 7 割程度にとどまったのだが、ファイバー断面の加工や PMT への装着方法等にまだ多く改善の余地があると考えられ、上記の時間応答性能についてもさらなる向上が期待できる。



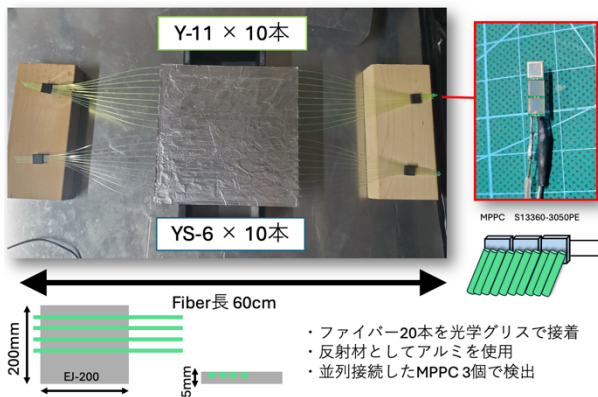
(4) 時間分解能／位置分解能比較実験用テストカウンターの製作とベンチテスト

上記(3)の実験結果を受けて、異なる WLS ファイバー集光系の時間測定性能及び位置測定性能を直接測定できるテストカウンターを製作した。(3)と同様にプラスチックシンチレーター EJ-200 (200×200×5mm) に 10mm 間隔に溝を掘り、同一のシンチレーター板上に、長さ 60cm のファイバー10 本による集光系を Y11（現行 KOTO 実験で使用されている）及び YS6（高速応答）の 2 系統構成し、集めた光は並列接続した 3 個の MPPC で読み出せるようにした。（次頁の図を参照。）

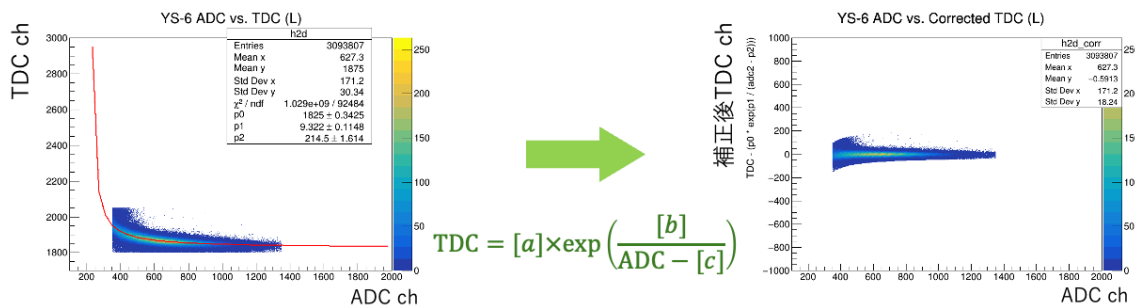
① 時間分解能測定

Y11 側、YS6 側のそれぞれの中央にβ線が照射されるように¹⁰⁶Ru線源を配置し、テストカウンタをβ線が突き抜けたときのMPPC出力(ADC及びTDC)を取得した。宇宙線を用いた測定についても類似のセットアップとトリガー条件の下で測定し、下図に示すようなADC補正を施すことにより時間分解能について以下の結果を得た。

	β線源測定	宇宙線測定
Y11	1.21 ns	1.10 ns
YS6	0.56 ns	0.68 ns



新しいWLSファイバーを採用することによって1.6~2.2倍程度時間分解能を改善することが可能であることがわかる。



② 位置分解能測定

¹⁰⁶Ru線源の位置をWLSファイバーの長手方向に変化させ、左右のMPPCに到達する光の時間差を測定することで、元の線源の位置を推定できるか、その際の位置分解能はどの程度になり、WLSファイバーの種類によって差が生じるのかという点についても実験した。しかし、WLSファイバーの母材が有する屈折率等、材料の光学特性から決まってくる値以上の差を見出せる精度の結果を導出するには、実験系にも解析手法にも一段の工夫が必要であり今後の課題としたい。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計0件

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>(1) 修士論文 新館航平, WLSFiberを用いたサンドイッチカロリメータの応答の高速化の試み, 山形大学大学院理工学研究科修士論文, 2024年3月. 林結吾, 小型デジタイザによるPMT信号波形の直接処理と蛍光寿命測定への応用, 山形大学大学院理工学研究科修士論文, 2024年3月. 内藤太一, K粒子稀崩壊実験次期計画に向けて角度分解能向上を狙ったカロリメータの試作モデルと評価実験, 山形大学大学院理工学研究科修士論文, 2024年9月. 阿部凌太, サンドイッチカロリメータのための高速応答WLSファイバー集光系についての基礎開発, 山形大学大学院理工学研究科修士論文, 2025年3月.</p> <p>(2) 卒業論文 阿部凌太, WLSFの減衰長測定に特化した暗箱の開発とLED線源を用いた減衰長測定, 山形大学理学部卒業論文, 2023年3月. 内藤太一, 電子ビームを用いたシンチレータの発光量の測定, 山形大学理学部卒業論文, 2023年3月. 村上有優実, 新しい波長変換ファイバーを使ったシンチレータ読み出しの位置分解能の評価, 山形大学理学部卒業論文, 2024年3月. 井澤七海, CsIカロリメータの発光量位置依存性の測定, 山形大学理学部卒業論文, 2025年3月. 本間陽多, UV硬化プラスチックシンチレータ作成と蛍光剤の発光評価, 山形大学理学部卒業論文, 2025年3月.</p>

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
研究協力者	田島 靖久 (Tajima Yasuhisa)		
研究協力者	新館 航平 (Shintate Kouhei)		
研究協力者	林 結吾 (Hayashi Yugo)		
研究協力者	阿部 凌太 (Abe Ryota)		

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	内藤 太一 (Naito Taichi)		
研究協力者	村上 有優実 (Murakami Yuami)		
研究協力者	井澤 七海 (Izawa Nanami)		
研究協力者	本間 陽多 (Honma Yota)		

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