

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25400293

研究課題名(和文) K0稀崩壊実験の次期計画実現に向けた新素材を用いた長尺カロリメーターの基礎開発

研究課題名(英文) Basic R&D of the long calorimeter using a new material for the future experiment of K0 rare decay

研究代表者

吉田 浩司 (Yoshida, Hiroshi)

山形大学・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) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：J-PARC E14 STEP 2実現に向けて、K0崩壊領域側面部をカバーするBarrel Counterと呼ばれる15m超の線VETO検出器の構成要素(シンチレーター、集光系、光センサ等)に関して基礎研究をおこなった。PEN樹脂ベースの新素材シンチレーター「シンチレックス」の可能性を探る研究をおこない、放射長7.5X0のサンドイッチカロリメーターを試作し、2015年11月には東北大学電子光物理学研究センター(ELPH)でビーム実験をおこなった。入射エネルギーに対する応答の直線性やエネルギー分解能について良好な性能を有することが確認できた。

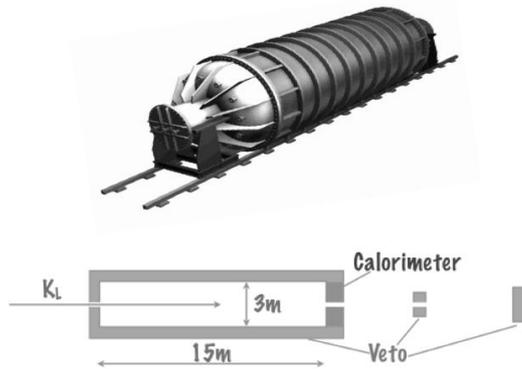
研究成果の概要(英文)：In the future plan of the K0 rare decay experiment J-PARC E14 STEP 2, the barrel veto counter must have the length over 15m in order to cover the whole decay area of the neutral kaons. To construct the barrel veto counter as a sandwich calorimeter, we made basic R&D on scintillator and optical devices. Especially, we explored the possibility of a new plastic scintillator "Scintirex" made of polyethylene naphthalate (PEN) as a component of sandwich calorimeter. We made a prototype sampling calorimeter which consists of alternate layers of lead plate (2mm) and Scintrex plate (1mm x 5) and has radiation length of 7.5X0. It was tested by using positron beam of the incident energy ranging from 100 to 800 MeV at ELPH. The obtained data shows that the test counter has good linear response and good energy resolution.

研究分野：数物系科学

キーワード：粒子線検出器 カロリメーター

1. 研究開始当初の背景

直接 CP 対称性を破る $K_L^0 \rightarrow 0$ 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、一方で理論計算による不定性も 1-2% 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。現在実験で得られているこの反応の上限値は、山形大学を含めた我々 KEK E391a による 2.6×10^{-8} であり、上記の予想に対してまだ 3 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 は、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、2 段階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す。そして STEP 2 では K_L^0 の崩壊領域を大きく拡大し、15m 超の検出器でもって 10^2 events 程度の反応を観測し、その分岐比の精密測定を目指している。



上図に J-PARC E14 STEP 2 検出器の概念図を示す。これまでの実験に比べて特徴的なのは、 K_L^0 粒子の崩壊領域を十分に確保するために、検出器のビーム方向の長さが 15m あまりに及ぶことである。(KEK E391a 及び J-PARC E14 STEP 1 での Main Barrel Counter の長さは 5.5m である。)この計画は、検出器サイズを一気に 3 倍近くスケールアップする一方で、線を VETO する性能は維持し、さらにエネルギー測定性能を向上させようという野心的なものである。

この数十年ほどの間に、B 中間子の崩壊の性質について詳細な実験的研究が行われ、CP 非保存の物理学は大いに進展した。中性 K 中間子の稀崩壊の物理は、この B の物理とは相補的な関係にある。 $K_L^0 \rightarrow 0$ と $K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^0$

の 2 つの反応は理論的な不定性が小さく、この 2 反応の精密測定だけから CKM 行列のユニタリ三角形を完全に決定できる。超対称性理論のあるものは、B 崩壊から決まる三角形と K 崩壊から決まる三角形とが一致しないことを予言している等、標準理論を検証しその先の物理学を探索していく上で J-PARC E14 STEP 2 の成果が待たれているところである。

2. 研究の目的

この STEP 2 を実現するためには、 K_L^0 崩壊領域側面部をカバーする Barrel Counter と呼ばれる 15m 超の線 VETO 検出器の基本デザインとその構成要素(シンチレーター、集光系、PMT や MPPC などのセンサ)に関する基礎的な研究が必要不可欠である。それは検出器量産前の R&D を担い、検出器の性能のみならず経済性を詳細に検討し、Barrel Counter の仕様を確定するために行うものである。

直径 3m 長さ 15m という検出器の大きさそのものは、巨大化・複雑化の一途をたどる高エネルギー物理学の分野から見れば決して珍しいものではないが、衝突型加速器実験で使用されるメイン・カロリメーターのような製造コスト/ランニングコストをこのような固定標の実験にかけるのは現実的ではないと考えられる。本研究では、それらのコストを 10 分の 1 以下に圧縮することを目指す一方で、線 VETO 性能のみならず、エネルギー測定性能、時間測定性能を追求していくことを長期的なゴールとしたい。

具体的な検出器デザインとしては、経済性という制約を考慮に入れればサンドイッチ型あるいはファイバーを用いたスパゲティ型のサンプリング方式を採用するのが最有力と考えられ、これらの方式の長所短所を詳細に検討しながら STEP 2 のデザインが進められていくことになる。

本研究では京大・帝人グループの産学連携事業により、2011 年に登場した新素材である放射線蛍光プラスチック(商標名「シンチレックス」)を発光体として採用することもターゲットに入れる。これはこれまでのプラスチックシンチレーターより加工が容易で丈夫であるので、サンドイッチ型検出器の発光体として有望であり、また製造コストをこれまでの 10 分の 1 程度に圧縮できると見込まれていることも利点である。実現できればシンチレックスを採用した世界初の大規模カロリメーターということになる。

また本研究では、J-PARC E14 STEP 2 検出器のビームテスト環境として東北大学電子物理学研究センター(ELPH)の Tagged ビームラインの利用を考えており、そこにおける新型の光子標識化装置の開発にも取り組んでいく。

3. 研究の方法

J-PARC E14 STEP 2 における物理的実情を考慮しながら Barrel veto counter の概念設計をおこない、デザイン上の長所短所を詳細に比較検討していく。その際 GEANT4 等の数値シミュレーションを活用する。

新素材シンチレックスをはじめとする

バイス等の物理特性測定やベンチテストをおこなう。

計算機シミュレーションの結果を受けてテストモジュールを設計・製作する。本番用のフルサイズの検出器の性能が十分に評価できるよう、このテストモジュールを支えるフレームは、下写真のような汎用性の高い構造を持たせ、金属輻射体、シンチレーター、WLS ファイバー等の集光系デバイス、光電子増倍管や MPPC 等のフォトン・カウンティング・デバイス等を入れ換え、検出器の性能を様々な角度から十分に評価できるようにする。こうすることによって、実験施設の都合によるスケジュールの変更や、テスト結果を受けての研究手順の変更に柔軟に対応できるようにしておく。



宇宙線や加速器ビームを用いたテスト実験をおこなう。東北大学電子光物理学研究センター（ELPH）等においてテストモジュールの電子線 / 線応答性能などのビームテストを行う。セットアップなど、実験条件を詳細に指定して、GEANT4 等による数値シミュレーションを行い、取得した実験データとの比較検討を行う。まずはエネルギー分解能などの基本性能、Sampling Effect や Punch Through などによる検出器の不感率などの実験データが、それらのシミュレーションを通して理解できるものなのかどうかを慎重に検討していく。

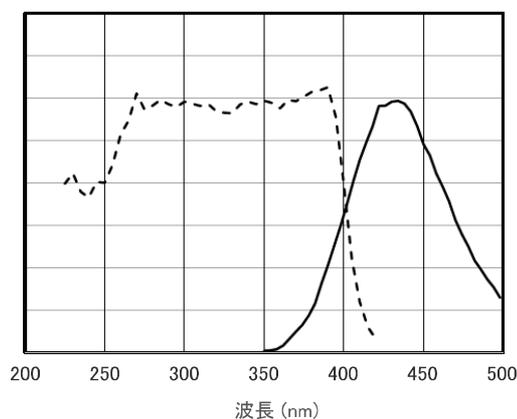
4. 研究成果

以下に主な実験結果および研究成果について述べる。

(1) シンチレックスの吸光・発光特性測定

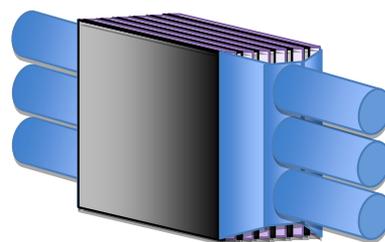
Polyethylene naphthalate (PEN) をベースとするプラスチックシンチレーター「シンチレックス」の吸光・発光スペクトルを測定した。(下図)発光波長範囲は光電子増倍管の利用に適したものになっており、また、シンチレーター内での再吸収が少ないであろうことが推測された。

吸光&発光スペクトル

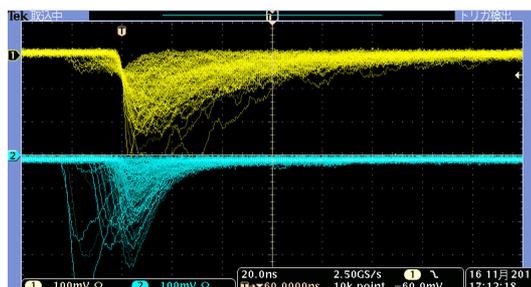


(2) ELPH におけるビーム実験

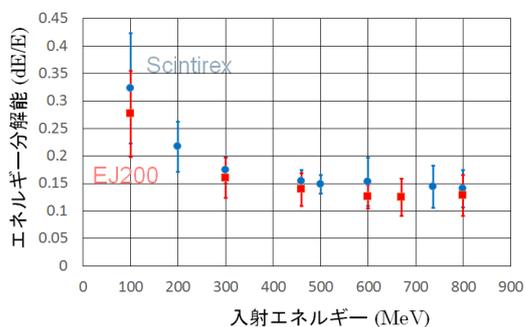
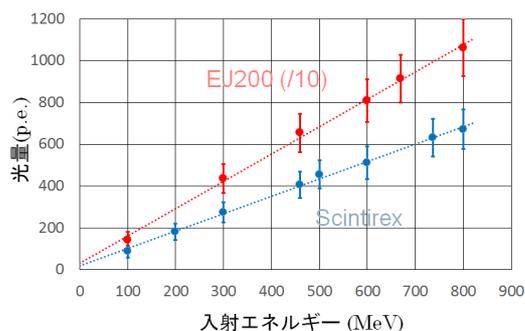
「鉛 2mm + シンチレーター 5mm」20 層のサンドイッチカロリメーターを試作しビームテストをおこなった。テストモジュールは 2 台製作し、比較のためそれぞれのシンチレーターをシンチレックス (1mm 厚の 5 枚重ね) と EJ-200 とした。それぞれの放射長は $7.5X_0$ および $7.4X_0$ である。サイズは 200mm x 200mm x 120mm とし、両サイドに口径 2 インチの光電子増倍管を 3 本ずつ装着した。



下図は陽電子ビームを照射したときにシンチレックス (上) と EJ-200 (下) の信号をオシロスコープで測定したものである。シンチレックスを用いた検出器の信号の減衰時間が EJ-200 より 100nsec 以上長くなっているのがわかる。シンチレーター 1 枚 (5mm) で宇宙線を測定した場合でも、シンチレックスの方が 60nsec ほど減衰時間が長くなっており、これはベースプラスチックそのものの蛍光寿命特性を反映したものであろうと推測される。



下図に獲得光量とエネルギー分解能の測定結果を示す。入射エネルギーに対する応答の直線性やエネルギー分解能については、良好な性能を有することが確認でき、シンチレックスと EJ-200 の顕著な違いは確認できなかった。シンチレックスカロリメーターの獲得光量はポリビニルトルエンベースのシンチレター (EJ-200) の 1/16 程度であったが、これは 5mm 厚のシンチレックスが入手できないので 1mm 厚のものを 5 枚重ねて製作したのが原因と考えられる。



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)

T. Masuda, J.K. Ahn, Y. Tajima, H.Y. Yoshida, et al., (計 57 名, 筆頭除き ABC 順 56 番目), Long-lived neutral-kaon flux measurement for the KOTO experiment, Progress of Theoretical and Experimental Physics, (2016) 013C03 (23 pages). (査読有)
DOI: 10.1093/ptep/ptv171

〔学会発表〕(計 4 件)

佐々木未来, GeV- ビームラインにおける新光子標識化装置の開発 VI, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 20 日, 東北学院大学 (宮城県仙台市).
田島靖久, ポリエステル系化合物ベースのシンチレターを用いたサンドイッチカロリメーターの試作, 日本物理学会第 71 回年次大会, 2016 年 3 月 19 日, 東北学院大学 (宮城県仙台市).
佐々木未来, GeV- ビームラインにおけ

る新光子標識化装置の開発 V, 日本物理学会 2015 年秋季大会, 2015 年 9 月 26 日, 大阪市立大学 (大阪府大阪市).
佐々木未来, サンドイッチカロリメーター Cerberus による KOTO 実験 KL ビームラインコア中性子の測定, ELPH 研究会 C010 『素粒子・原子核実験における全吸収型カロリメーターの実用と応用』, 2015 年 3 月 10 日, 東北大学電子光物理学研究センター (宮城県仙台市).

〔その他〕

修士論文・卒業論文等

関悠登, GEANT4 におけるカロリメーターのシミュレーション及び結果の検証と考察, 山形大学理学部卒業研究, 2014 年 3 月.

櫻井輝昂, Scintirex を用いた試作サンドイッチカロリメーターの光量測定, 山形大学理学部卒業研究, 2016 年 3 月.

岩佐美和, 宇宙線ミュオンによるドリフトチェンバーの性能評価, 山形大学理学部卒業研究, 2016 年 3 月.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉田 浩司 (YOSHIDA, Hiroshi)
山形大学・基盤教育院・教授
研究者番号: 80241727

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし

(4) 研究協力者

田島 靖久 (TAJIMA, Yasuhisa)
山形大学・基盤教育院・准教授
研究者番号: 50311577

佐々木 未来 (SASAKI, Miki)
山形大学・大学院理工学研究科・博士前期課程 5 年

関 悠登 (SEKI, Yuuto)
山形大学・大学院理工学研究科・博士前期課程 2 年

岩佐 美和 (IWASA, Miwa)
山形大学・大学院理工学研究科・博士前期課程 1 年

櫻井 輝昂 (SAKURAI, Terutaka)
山形大学・理学部・2016 年卒業