

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K03988

研究課題名（和文）エネルギー Splitting法を用いた全吸収型3D微細分割カロリメータの開発

研究課題名（英文）Development of a 3D total absorption calorimeter using energy splitting method

研究代表者

小寺 克茂 (Kotera, Katsushige)

大阪大学・大学院理学研究科・招へい研究員

研究者番号：60448074

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：荷電がない光子の運動量方向を測定することは重要であるが難しい。本研究ではカロリメータ内での光子のシャワー発展を観測し入射角度を測定する。特に高いエネルギー分解能を維持するために、シャワーの全エネルギーを観測するタイプとする。一つの方法はカロリメータ結晶をより細かく分割化し、各々の結晶の光量を読み取ればよいのだが、光検出器が作る死空間や、コストを考えると難しい。そこで、結晶の横からシンチレーションファイバを挿入し、シャワー発展をより細かく観測し、位置分解能を高める方法を試みた。達成点、ファイバーの読み取り方法の確立、結晶の横からの光量と、シャワーの発展パターンの相関データを得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

KOTO 実験では粒子（物質）と反粒子（反物質）の非対称性（現代の物理学でわかっていることは、粒子が作られるとほとんど同数の反粒子が作られるべきであるが、我々の宇宙にはほぼ粒子しか残っていない）の起源について研究している。そのため中性K中間子の崩壊過程を観測しているが、キーとなる崩壊過程は2光子が出るだけであり、光子は中性なのでその軌道を測ることが困難である。光子のエネルギーを測る装置の中で光子はシャワーを起こすが、このシャワーの発展を観測することにより、光子の入射軌道に遡ることができる。本研究が完成すれば、コストをおさえてその方法を高性能に改善することができる。

研究成果の概要（英文）：In particle physics experiments, it is important but difficult to measure the incident direction of photons. This study purposes to develop a calorimeter with high resolution of incident angle of photon, keeping its high energy resolution. One way of this is to make a highly segmented crystal calorimeter. However, the dead volumes of photon sensor to measure the scintillation photons and the cost are too large. Therefore, we attempted to make a virtually segmented crystal calorimeter using scintillating fibers. A certain amount of scintillating fibers are skewered from the side of the stacked crystals. Directions of the fibers are lateral (X, Y) and which has a few layers in depth (z: primary particle direction), then the intersection of x and y fibers will be a position of an energy deposited. The study arrived at the establishing readout of scintillating fibers. Also the study confirmed that the scintillation photons keep the position information of a shower even in crystals.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：カロリメータ 微細分割 入射角度 角度分解能 シンチレーションファイバー 結晶 MPPC

1. 研究開始当初の背景

物質、反物質の非対称の起源を探る KOTO 実験では、一般にはトラッキングができない光子 2 個だけを同時観測し、長寿命中性 K 中間子 (K_L) が 1 つの中性 π 粒子 (π^0) と二つのニュートリノに崩壊する事象、 $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \nu$ 崩壊を同定する (光子 2 個は π^0 の即時崩壊による)。この崩壊過程は粒子反粒子対称性の 1 つのキーであり、その数は K_L 1 つにつき $(3.0 \pm 0.3) \times 10^{-11}$ と正確に予測されている。実験結果がこれと異なれば、未知の物理学の研究に大きな貢献ができる。しかしこの崩壊比の小ささと、検出できるものが軌跡を残さない光子 2 個だけという制限のため、検出そのものが極めて困難である。実際 KOTO 実験が持つ世界最高の結果は、 2.0×10^{-9} 以下という上限を示すにとどまっている。そこで KOTO では、光子を観測するカロリメータの中での光子のシャワー発展を高精度で観測し、2 光子それぞれの入射角度を精密に測る方法を模索している。現在の KOTO カロリメータは直径 1.8m の円盤状ディスクを作るように、断面積 $25 \times 25 \text{ mm}^2$ (周辺部は $50 \times 50 \text{ mm}^2$) 長さ (円盤の厚み) 500 mm の高密度な結晶シンチレータを積層し、後方から PMT でシンチレーション光を読み出している。

本研究の提案者は、 $5 \times 50 \text{ mm}^2$ の短冊形プラスチックシンチレータを層ごとに X と Y 方向に敷き詰め (Z 方向は粒子入射方向)、X (Y) シンチレータに落とされたエネルギーを Y (X) シンチレータで検出されたエネルギー比でスプリット (エネルギー スプリッティング法) し、高精度なシャワー発展を測定する方法を確立した (国際リニアコライダー研究)。また、現在の KOTO カロリメータの光子入射面側に小さな光検出器 MPPC 2160 個を貼り付け、カロリメータの上下流での検出時間の差をもとに、エネルギーシャワーの深さ測定に成功していた。

2. 研究の目的

現在の KOTO カロリメータでは入射光の入射角分解能が十分ではなく、入射角から遡っての K_L 崩壊点位置の制限をかけられない。一方 K_L 崩壊の Z 位置は、2 光子の普遍質量が π^0 の質量であることと、その崩壊 X-Y 位置が、細い K_L ビーム中にあるという制限から求めるため、カロリメータの高いエネルギー分解能が要求される。本研究ではこれを維持しながら角度分解能を改善する。そこで、高エネルギー分解能を維持するために、現在と同じく高密度の無機シンチレータを積層して全吸収カロリメータとする。現在 KOTO で積層しているのは断面積 $25 \times 25 \text{ mm}^2$ 、Z 方向 $27X_0$ の無添加 CsI 結晶である。この積層結晶の側面からシンチレーションファイバーを差し込み、各結晶に落とされたエネルギーを再分割する。

事前のシミュレーション研究によれば、カロリメータの X-Y 面分割を $1.25 \times 1.25 \text{ cm}^2$ とし、深さ (Z) 方向を 5.0, 5.0, 5.0, 15.0, 15.0 cm に分割した場合に、カロリメータから 5 m 離れたところで崩壊した場合の崩壊位置 Z に 50 cm 内の制限をつけられるという結果が得られた。本研究では、このように実際に結晶を分割するのではなく、ファイバーによる仮想エネルギー分割でこれに迫ることを目標とする。

3. 研究の方法

1. シミュレーションにより、結晶の断面積、長さ、ファイバーの X 方向、Y 方向の間隔、Z 方向の間隔を最適化、
2. プロトタイプの実成とその評価。
 - 1) 個々のファイバーを読み出す技術の確立。
 - 2) 結晶にファイバーを差し込む前に、結晶側面に並べつけた MPPC で、結晶内でのシャワー発展と発光の相関を調べる。
 - 3) 粒子ビームを照射して、性能調査と次のステップの方向を得る。

4. 研究成果

(1) シミュレーションによる研究。

図 1 のように全吸収型カロリメータにファイバーを差し込んだモデルを GEANT4 (シミュレーションパッケージ) 上に作成して、入射角を変えて光子を打ち込み、結晶ブロック、シンチレーションファイバに落とすエネルギー量を測定した。この時点では読み出し効率は考えていない (100% とした)。

図 2 はこのモデルの角度分解能で 100 mrad の入射角度に対して 45 mrad の分解能であった (光子 400 MeV)。

本研究では、結晶シンチレータに差し込む予定のシンチレーションファイバーを、カロリメー

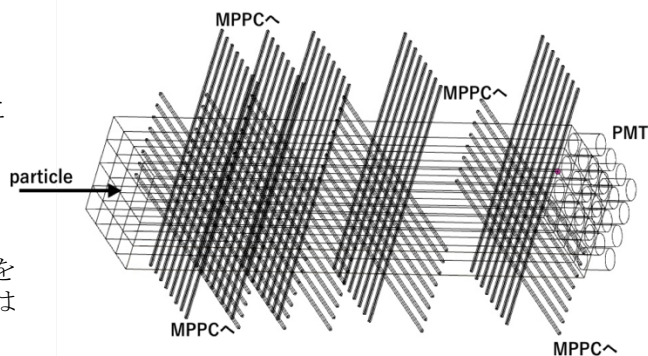


図 1. CsI 結晶にシンチレーションファイバーを差し込んだモデル。

タの前面に隙間なく積層し、荷電粒子と光子の区別をつける検出器の研究に応用できることも想定し、まずはシンチレーションファイバーのトラッカーとしての機能を確認した

(2) ファイバーの読み出し技術.

ファイバーからの光子の読み出しには浜松ホトニクス (HPK) 社製 MPPC S13552 を使った. これは CERN の LHCb グループが HPK 社に開発を依頼したものである. LHCb では $3 \times 3 \text{ m}^2$ に及ぶ大面積のファイバートラッカーを実現している. 図3はそのMPPCの一部で, 1つが $0.25 \times 1.6 \text{ mm}^2 \times 128$ 個のセルにアレイ化されており, 各々が独立に信号を読み出せる. 全体では $0.25 \text{ mm} \times 128$ で, $32 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$ のサイズを持つ. LHCb グループでは 0.25 mm のファイバーを積層し, $70 \mu\text{m}$ の位置分解能を実現している. 本研究では $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ の角形ファイバーを図3のようにならべ, 1 mm 分解能のトラッカーを目指した.MPPC からの信号は EasiRoc Module (64ch) 2台を用いた.

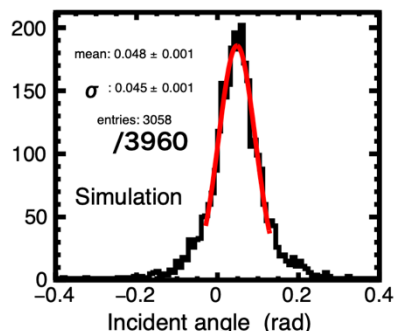


図2. CsI 結晶にシンチレーションファイバーを差し込んだモデルの角度分解能例 (400 MeV光子).

プロトタイプとして, 図4を作成し, 東北大学電子光物理学研究センター (ELPH) の電子ビームを照射した. 図5はヒットマップである. 一方の EasiRoc Module が故障したため, 位置分解能が2倍になっている. この実験ではビームの中心がずれたことを明瞭に示している.

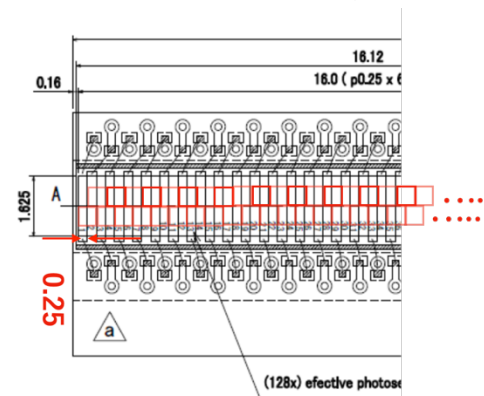


図3. MPPC S13552 の一部とその上の $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ ファイバー.

図6は1 channel のエネルギー分布である. MIP peak が認識できる. また, 小さなピークの林立は, 各光子数ピークである.

図7は同じプロトタイプを高エネルギー加速器研究機構の電子ビーム (KEK PF-AR) に照射した時のヒットマップである. 7.0 mm 幅のトリガーカウンターの影がはっきりしており, 前に置いた $1.07X_0$ の散乱効果も見えている. データ解析は進行中である.

ここまでの結果として, MPPC のデッドボリュームは非常に小さく抑えられ, この目的に適している. 0.5 mm 角の細いシンチレーションファイバー各々の光量を個別に読み出せることを確認できた. 読み出しに用いた EasiRoc module は不安定で, 別の方法を模索している.

(3) 横からの読み出し.

本研究ではファイバーを用いてクリスタル内でのシャワー発展を観測する計画であるが, その前段階として, 結晶の2側面に合計16個のMPPCをつけてELPHの電子ビームでシャワー発展を観測した. 図8は断面積 $70 \times 70 \text{ mm}^2$, 長さ 300 mm の無添加CsIの両側面にMPPCを貼り付けたものの写真で, 赤い線は入射電子ビームの方向である. MPPCはS13360-6075CSで受光面の大きさは $6 \times 6 \text{ mm}^2$ である. 結晶とMPPC面の間には 1 mm 厚のシリコンパッドを挟み空気層を無くしている.

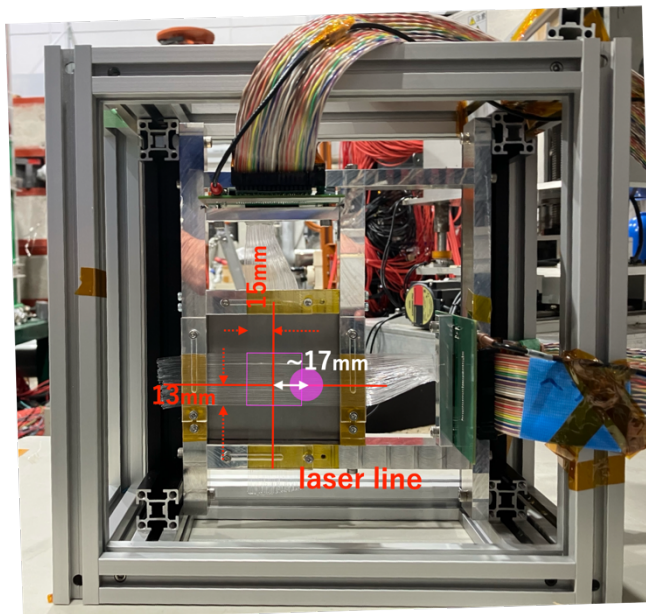


図4. $32 \times 32 \text{ mm}^2$ の有感面積を持つファイバートラッカー. 多数ファイバー読み出しの実試験として, 赤十字線はビーム中心の予定位置.

図9はCsI結晶側面の各MPPCの応答である. 図9上のように, ビームの入射位置と入射角を9

通り変えて実験した. 図9 (中央) の宇宙線に対する位置依存性の結果を指標にして, 図9 (下) のビーム位置, 角度にたいする MPPC 応答パターンとの相関を研究中である.

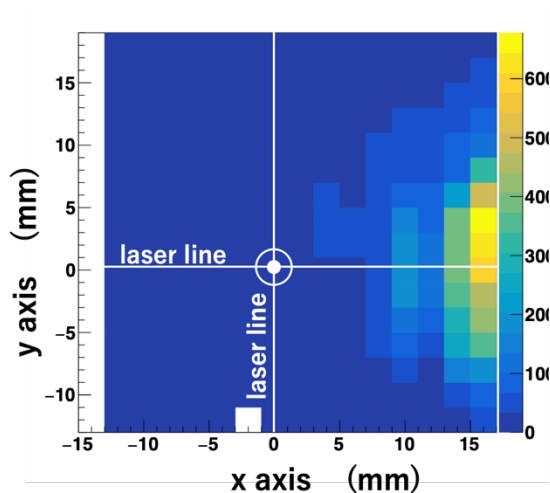


図5. ELPHの電子ビームを当てた時のヒットマップ. ビームの位置がずれた.

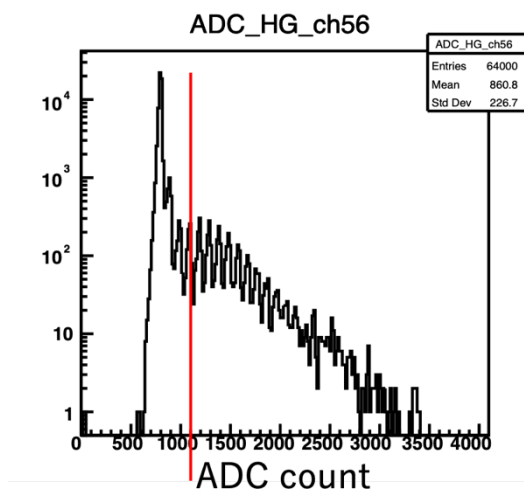


図6. 1 channel のエネルギー分布.

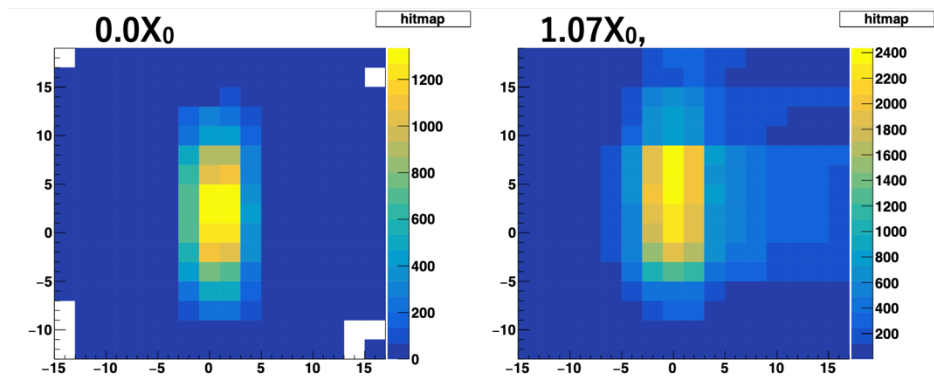


図7. 散乱ターゲットを置かない時 (左), と置いた時 (右) の比較.

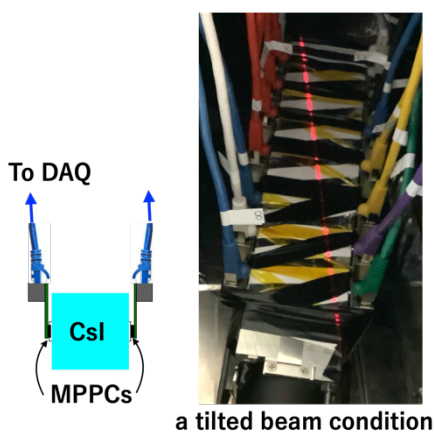


図8. ELPH ビームを使った CsI 結晶側面読み出し実験. 両側面に MPPC 8 / 面を貼り付け (左), ビーム照射を行った. 右の赤ラインは入射光路を示すレーザー (右).

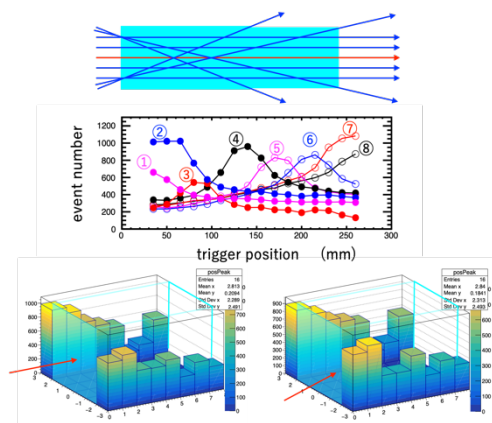


図9. スキャンしたビームの入射光路 (上). 宇宙線測定による各MPPC位置分解能 (中央). ビームに対する各MPPCの応答; 正面入射 (左) 斜め入射 (右).

(4) 課題

申請ではファイバーを結晶に貫通させる方法を提案したが, そのプロトタイプ作成は今後の課題とした. また, ビームデータの解析を継続しており, 前段階として行った MPPC による横から読み出しの結果から, ファイバーの挿入数, 挿入位置を決定し, ファイバーを挿入した結晶シンチレータのプロトタイプ作成したい.

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〕

-

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	林 ケヨブ (Lim GeiYoub) (90332113)	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	

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			
韓国	Korea University			