

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01118

研究課題名（和文）光子の入射角度測定を目的とする3次元に細分割された電磁カロリメータの開発

研究課題名（英文）Sampling calorimeter to measure photons angle of incidence

研究代表者

林 ケヨブ（LIM, GEIYOB）

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） 13,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では光子が発生する電磁シャワーの模様から、光子の入射角度を測定する電磁カロリメータを開発する。GEANT4を用いたシミュレーション計算をでは、鉛と細分割されているプラスチックシンチレータを用いたサンプリングカロリメータを使えば、1GeVの光子に対して1.3度の分解能を持つ測定が可能であることが分かった。

その計算結果を検証するために、1mmX1mmの断面を持つシンチレーションファイバーと14mm幅のタングステンストリップを組み合わせ、384個のモジュールを数製し、性能検証用検出器を完成した。陽子ビームをエネルギーと入射角度を変えながら検出器に入れ、データを取得し、解析を行っている。

研究成果の学術的意義や社会的意義

光子の測定とはカロリメータで生成される電磁シャワーの量とその中心位置から、入射エネルギーと位置を求めることである。一般の実験では、光子の発生点を他の情報から求めることで、光子の運動方向を求めることができる。J-PARCで行なっているKOTO実験では、二つの光子のみが観測されるので、発生点を他条件で求めることになる。もし、カロリメータで入射角度までを測定することができれば、実験感度の向上に大きな役割を果たす。また、暗黒物質の探索のような実験ではカロリメータのみで信号を求める必要があり、本研究で開発された検出器の活用が期待される。

研究成果の概要（英文）：We develop a sampling calorimeter to measure the photons' angle of incidence. A three-dimensional fine-segmented calorimeter will measure the profiles of generated shower particles along the photon's direction, indicating the incidence angle. A toy detector is designed for a feasibility study by simulation based on the GEANT4, a block consisting of alternating layers of a 1-mm-thick lead absorber and a 5-mm-thick plastic scintillator. The simulation results indicate that we can determine the angle with a resolution of 1.3 degrees for 1 GeV photon.

To confirm the simulation result, we fabricated a test module made of 1mm-square scintillating fibers and 0.15 mm-thick tungsten sheets. The performance test with a positron beam showed that the detector properly reconstructs the incidence angle for different energies and angles of the beam.

研究分野：素粒子実験

キーワード：光子の入射角度 サンプリングカロリメータ

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

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)が次のステップ (KOTO STEP-II)に移行するために必要な検出器開発を行うことである。KOTO 実験が探索している $K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊の分岐比は、未だに見つかっていない新しい物理の存在に敏感であり、標準模型における理論計算の不確実性が極めて小さい。KOTO 実験では初発見を目指しているが、新しい物理の存在を見つけ出し、その性質を明らかにするためには、現在の実験感度を 100 倍以上向上し、崩壊の分岐比を精密に測定することが重要である。高感度実験の成功のためには、より高い性能を持つ検出器の開発が必要になり、本研究はその線上にある。

2. 研究の目的

本研究では、新たな概念の電磁カロリメータ開発を目指す。電磁カロリメータは重い結晶などを用いて、光子が生成する電磁シャワーの情報から入射エネルギー、入射位置を測定する検出器である。電磁シャワーの情報を細分割された 3 次元の検出器で読み取り、光子の入射角度までを測定することが本研究の試みである。

光子がカロリメータで生成する電磁シャワーの形状を分析し、入射角度を再構成することが可能である。ただし、電磁シャワーの生成過程には確率的な要素があり、あまり高くないエネルギー (1GeV 付近) の光子に対する達成可能な角度分解能が不明である。本研究では、角度分解能を決定する要因を明らかにし、最適な検出器のデザインを模索する。

3. 研究の方法

電磁カロリメータを細分割し、電磁シャワーの情報を 3 次元で読み取ることで、入射角度を再構成することが可能になる。図 1 はシミュレーション計算を用いて測定方法を検証するためのカロリメータの概念図である。入射光子が鉛板で電磁シャワーを起こし、その情報を水平方向と垂直方向に分割して配列しているシンチレータで読み取る構造になっている。本研究では、分割されているシンチレータの幅による角度分解能を調べる。

シンチレータで測定したエネルギーの分布は GEANT4 を用いたシミュレーション計算で求める。こお分布から光子の入射角度の再構成するためには、機械学習のソフトの一つである XGboost を使用した。1 GeV の光子に対して、1.3 度の角度分解能が期待可能であることから、計算結果を検証するためのテストモジュールの制作を行う。

テストモジュールでは、シミュレーション計算の配置とは異なって、鉛の代わりにタンゲステン板を、シンチレータの代わりにシンチレーションファイバーを使用した。角度分解能に加えて、エネルギー分解能を向上する試みである。

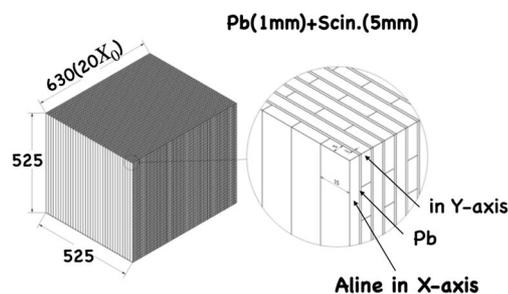


図 1. 角度測定方法を検証用検出器の概念図。

4. 研究成果

図2は厚み1mmの鉛板に幅5mm、15mm、25mmのシンチレータを挟むカロリメータで求められる角度分解能を示す。狭幅はシャワーの情報を詳細に読み取ることによって角度分解能がよくなる。ただし、そのためには多量のデータを用いた十分な学習が必要になる。本研究では学習に必要なメモリの制限などからデータ量を 10^5 にして、より多いデータを用いた学習方法を開発する予定である。

タングステン板とシンチレーションファイバーを用いて、厚さ5.75mm(1mmファイバーと0.15mmのタングステン板を5層重ねている)幅14mm、長さ250mmのサンプリングカロリメータモジュールを384個製作した。16個を配列して検出器平面を作る。24層の平面を交互に直角に並べて検出器を製作した。図3は東北大学の電子光物理学研究センターで陽電子ビームを用いた陽電子ビームを用いたビームテストの様子を示す。PAScal (Photon Angle Sample calorimeter) と命名した検出器にエネルギーと入射角度を変えながら、陽電子ビームを検出器に入射し、応答を記録した。PAScalのエネルギー分解能を検証するために、CsI結晶を用いたカロリメータを後方に設置した。結晶を用いたカロリメータのエネルギー分解能がサンプリングカロリメータより優れているので、PAScalによるエネルギー分解能の劣化を確認するためである。

図4は取得したデータの解析の一例を示す。それぞれの角度について、正しく入射角度を求めることができる。ただし、角度分解能はシミュレーション予測よりは悪い結果になっていて、その原因を理解するためにビームが持っている角度、検出器の応答特性などの詳細を調べている。

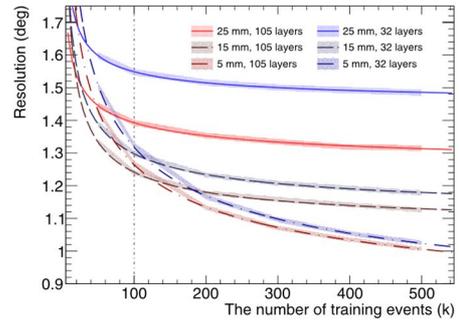


図2. シンチレータの幅と機械学習のために使用するデータ量による角度分解能。

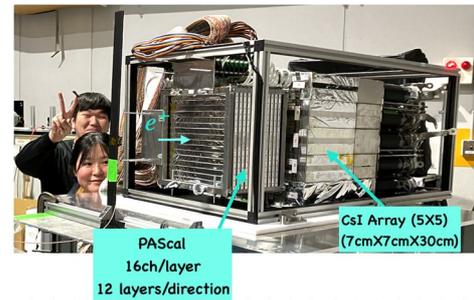


図3. 検出器(PAScal)のビームテスト様子。エネルギー分解能を理解するために、後にCsI結晶を配置している。

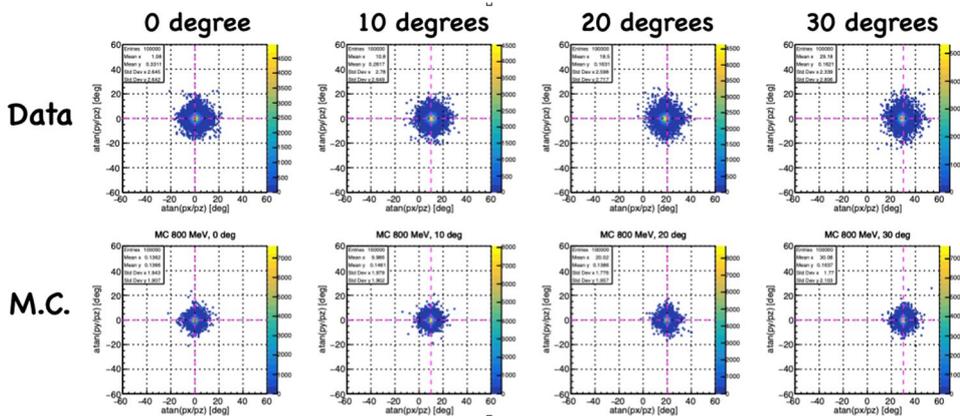


図4. 運動量 800 MeV/cの陽電子ビームが違う角度で検出器に入射したときに、再構成された入射角度(上)と同じ条件で生成されたシミュレーション計算結果(下)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Kim Junlee, Kim Eun-Joo, Kim Young Jun, Ahn Jung Keun, Lim Gei Youb	4. 巻 1052
2. 論文標題 Simulation of angular resolution of a new electromagnetic sampling calorimeter	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment	6. 最初と最後の頁 168261 ~ 168261
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.nima.2023.168261	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Junlee Kim
2. 発表標題 Simulation of angular resolution of a new electromagnetic sampling calorimeter for the KOTO2 experiment
3. 学会等名 Third International Workshop on the Extension Project for the J-PARC Hadron Experimental Facility (3rd J-PARC HEF-ex WS)" (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 GeiYoub Lim
2. 発表標題 Sampling calorimeter to measure the photon 's incident angle
3. 学会等名 20th International Conference on Calorimetry in Particle Physics (国際学会)
4. 発表年 2024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
---------------------------	-----------------------	----

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