

令和 6 年 6 月 6 日現在

機関番号：82110

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2023

課題番号：19K14737

研究課題名（和文）重粒子線を用いた軽い新粒子探索のための検出器開発

研究課題名（英文）Detector development for the search for light new particles using heavy particle beams

研究代表者

土川 雄介（Yusuke, Tsuchikawa）

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・研究職

研究者番号：60796423

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）：本研究では、電子・陽電子等の複数粒子崩壊事象を測定する小型大立体角検出器の実現可能性を検証するために、BGOやリチウムガラスをはじめとした複数のシンチレータとマルチアノード型光電子増倍管等を組み合わせた、エネルギー位置同時測定型検出器としての性能を調査した。最終的な検出器の設計では各種分解能のバランスが重要となるが、それを検討するためのパラメータを得たことで、シンチレータを用いた位置分解能を有する多チャンネル検出器の実現に向けた見通しが得られたと言える。

研究成果の学術的意義や社会的意義

我々の宇宙には未だ発見されていない新粒子が数多く存在しているであろうことが、WMAPやプランクを始めとした人工衛星による観測結果から強く信じられている。しかしながら、現在においてもそのような粒子の発見、実証はなされておらず、高エネルギー加速器を用いた実験をはじめとして、世界中で探索実験が続いている。未知粒子探索が未だ難航している理由の一つには、未知粒子の予言質量が数MeVから数百MeVと非常に幅広いことが挙げられる。2016年にハンガリーで報告された新粒子候補は十MeVオーダーと非常に軽いものであった。本研究では、このような軽い新粒子探索に有用な検出器の実現可能性を調査した。

研究成果の概要（英文）：In this study, I have verified the feasibility of a compact large solid angle detector that measures multiple particle decay events such as electrons and positrons. I investigated the performance of a detector that combines multiple scintillators, including BGO and lithium glass, with a multi-anode photomultiplier tube and other components as a simultaneous energy-position measurement type detector. The balance of various resolutions is important in the final detector design, and having obtained the parameters for examining them, I have obtained a prospect for the realization of a multi-channel detector with position resolution using scintillators.

研究分野：原子核物理

キーワード：検出器 マルチアノード型光電子増倍管 中性子 ガンマ線 シンチレータ

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

2016年、ハンガリーの研究グループによって $p^7\text{Li} \rightarrow {}^8\text{Be}^* \rightarrow e^+e^-{}^8\text{Be}$ 反応における電子・陽電子不変質量、及び開口角分布中に奇妙なピーク構造が報告された[1]。この電子・陽電子対は、通常であれば ${}^8\text{Be}^*$ の $1^+ 0^+$ 脱励起時に放出された(仮想)光子に起因したものであり、それらの開口角分布は $0^\circ$ にピークを持つ単調減少の振る舞いとなるはずであった。しかしながら、測定された開口角分布は $140^\circ$ 付近にピーク構造を持っており、量子電磁気学によってその分布を率直に説明することは困難であった。上記の報告では、電子・陽電子不変質量中 17 MeV にピークが見られたことから、相当質量をもつ未知の中性ボゾン ( $X(17)$ ) であるといった解釈がなされた。この質量は、 ${}^8\text{Be}^*(1^+)$  の励起エネルギーに近く、当該測定では閾値近傍での生成であったことから  $X(17)$  はほとんど運動量を持たず、崩壊した電子・陽電子対は実験室系において互いに反対方向に飛行し、結果として広い開口角にピーク構造を形成したものと考えられる。

当該報告以降、同様の測定で $X \rightarrow e^+e^-$ 崩壊事象を直接測定した報告はなく、ピーク構造の確認が必要であった。この背景には、1-100 MeV 程度のエネルギー領域において、広い立体角を覆い、電子・陽電子のような複数粒子への崩壊事象を測定することが可能な設備や検出器を備えた施設が世界的に見ても非常に少ないという事情がある。一方で、 ${}^8\text{Be}^*$ 等の原子核励起を可能とする研究施設は数多く存在する。すなわち、当該反応の入口チャンネルを再現することは比較的容易である。それに対して検出器は、基本的に脱励起の際に放出する単発のガンマ線等を捉えることを目的としており、その放出粒子が $e^+e^-$ 等の複数粒子であることは想定されていない。

[1] A.J. Krasznahorkay et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 042501 (2016).

### 2. 研究の目的

同時生成された電子・陽電子を測定するためには、小型の大立体角検出器を制作することが有用であると考えた。[1]では、5~6つの7cm 大エネルギー検出用プラスチックシンチレータやMWPC位置検出器を用いた測定が実施されていた。検出器のアクセプタンスは制限されており、方位角方向はほぼ $360^\circ$ であった一方で、極角方向は $70^\circ$ から $110^\circ$ 程であった。1つのプラスチックシンチレータが大きいことに加えて配置の関係から、電子・陽電子開口角に対するアクセプタンスも制限され、 $40^\circ$ から $160^\circ$ 程度であった。 $X(17)$ の粒子的解釈を巡っては、その粒子特性として、少なくともベクトル型、擬スカラー型、擬ベクトル型粒子である可能性を示唆する報告があり、また、粒子的解釈のみならず、フェイクピーク等の可能性を考慮するために、崩壊角分布を詳細に測定することが重要である。同様に $X(17) \rightarrow \gamma\gamma$ 等のその他の崩壊モードを想定した測定も重要な情報であると考えられる。

検出器は可能な限り小型化を図ることで、将来的には複数の研究施設に持ち込み、異なる反応入口チャンネルでの測定が実施可能な搬型にすることが最も望ましい。近年の技術の進歩によって検出器の小型化が容易になってきており、異なる施設やビームラインに移動可能なサイズの小型大立体角検出器が実現すれば、研究の幅を大きく広げることが可能になると期待される。本研究では、そのような検出器の実現可能性を調査するために、複数種類の検出器に関して、空間分解能等の性能を調査した。

### 3. 研究の方法

無機シンチレータ等の全エネルギー検出器を用いたそれ自体による位置分解と、薄いプラスチックシンチレータ等の電荷、又は位置検出を目的とした前置検出器の組み合わせを想定し、BGO、リチウムガラスシンチレータ (GS20, GS30)、プラスチックシンチレータ、LaBr といったシンチレータを使用した。光検出器には、主にマルチアノード型光電子増倍管 (MAPMT) を利用することで、エネルギー測定と位置検出を併用することを試みた。他に前置検出器用シンチレータでは側面読出しによる検出や位置分解性能を調査した。この研究では、特にシンチレータ内でのシンチレーション光広がりや位置分解能の関心に注目し、ガンマ線や二次的な荷電粒子によって発光点が空間的に広がる効果や、局所的な発光によるシンチレーション光広がりを測定した。後者は、中性子を用いることで $n + \text{Li} \rightarrow \alpha + t$ 反応における二次粒子の飛程がマイクロメートルオーダーと非常に短いことを利用して、点での発光とみなした。マルチアノード型光電子増倍管は、50 mm 角、8x8 や 16x16 ピクセルのものを使用し、アンダーロジックによる読出しや、ch 毎の読出し、また、一枚のシンチレータと MAPMT を使用することで、重心計算による位置分解能評価等を実施した。測定では、コリメートしたガンマ線や中性子線を使用し、シンチレータと PMT をマウントした二軸ステージを自動制御することによって照射位置を変更した。

### 4. 研究成果

ここでは本研究で得られた主要な成果を詳述する。

- (1) 8x8 MAPMT と 50 mm 厚の BGO シンチレータを使用した位置測定では、5 mm にコリメートしたガンマ線でシンチレータを走査するように照射し、ピクセル応答を確認した。照射点から 20 mm 内近傍では、十分な光量が得られ、また、中心と端で 40%程度の光量比が認められ

た(図1)。一方で、波高分布からは10 mm 超程度の領域に光量が集中していた。

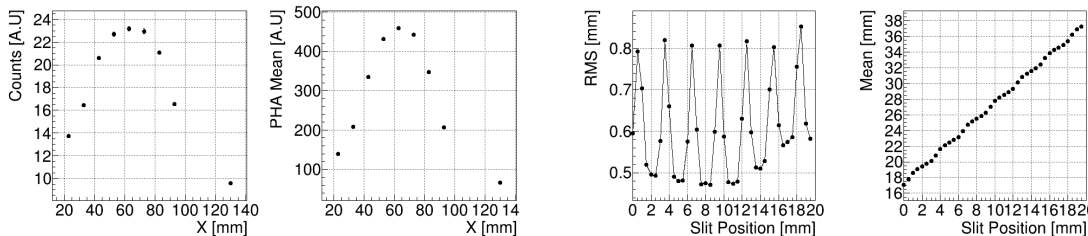


図1: 照射位置毎のBGO 計数と波高中心。 図2: 照射位置毎のGS20 波高分布RMSと中心。

(2) GS20 と16x16 MAPMT の組み合わせでは、FPGA ベースのVME モジュールを用いて、最も高い光量を記録したピクセルの周囲 3x3 ピクセルの波高値を用いた重心計算によって入射位置を再構築した。位置分解能の評価にあたっては、遮蔽が容易な中性子線を用いた調査が有用であり、3 ミクロンの Gd 膜や 5 mm 厚の B<sub>4</sub>C によって制御可能であった。スリットスキャンでは、PMT ピクセル間の不感領域を跨ぐことによる光量の低下と、それに伴う空間分解能の劣化が確認された。1 mm 幅のスリットを用いてシンチレータ表面をスキャンし、得られた射影分布では標準偏差 0.6 mm 程度であり、1 ピクセル (3 mm) の繋ぎ目における位置分解能の劣化が見取れた。しかしながら図2に見られる分布中心値と照射位置との比例相関からも、この変化は位置分解能としては大きな問題とならず、十分な能力を有することも認められている。また、更に速い応答を目的としたプラスチックシンチレータとの比較や光学グリスの有無での応答分布評価では、グリスの塗布によりシンチレーション光の反射臨界角が緩和され、倍弱程度に広がる様子や、点光源の中性子と広がりを持つガンマ線との比較では、後者が倍程度のシンチレーション広がりを見せること等が確認された(図3)。

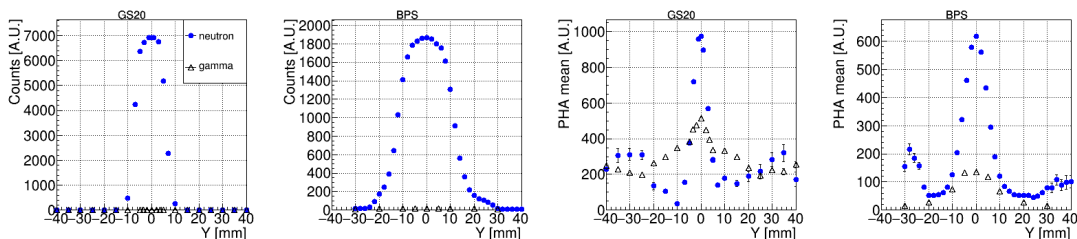


図3: GS20 とホウ素含有プラスチックシンチレータ、中性子/ガンマの計数及び波高中心

(3) 数 MeV オーダーのガンマ線に対しては LaBr が極めて良いエネルギー分解能を有する一方で、MAPMT と接続することによる位置分析型シンチレータとしての運用が容易でなかったことから、入射位置とエネルギー/波高測定検出器を分離する測定系を評価した。LaBr 等のカロリメータと組み合わせる前置検出器との候補として実施した MPPC 側面読み出し試験では、50 mm 角シンチレータの両端に 16x1 ch MPPC アレイ 2 つを接続し、5 mm に絞ったビームを照射することで、粒子入射位置の再構築能を調査した。それぞれの MPPC 中心ピクセルの信号に注目したものを図4に示す。シンチレータ中心付近で位置分解能が下がるものの、上記2ch のみの信号から粒子入射位置が一意に求められることがわかる。

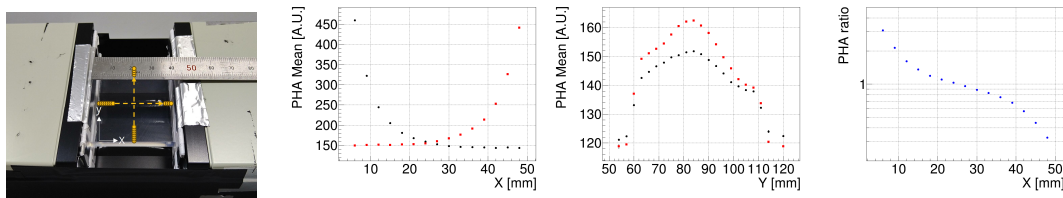


図4: MPPC を用いたシンチレータの両読みテスト測定。写真左右の MPPC 中心ピクセルで得られた波高値 (PHA) を黒点、赤点で示す。青点は両者の比を示す。

コロナ禍による制限で研究計画が大幅に変更されたものの、身近な施設を有効活用し、また、実施期間延長等により結果として当初予定を大きく上回る種類の検出器を検討することが出来た。最終的な検出器の設計では各種分解能のバランスが重要となるが、それを検討するためのパラメータを得たことで、シンチレータを用いた位置分解能を有する多チャンネル検出器の実現に向けた見通しが得られたと言える。

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

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