

令和 2 年 7 月 1 日現在

機関番号：82118

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2019

課題番号：18K13570

研究課題名(和文) GAGG結晶を用いたガンマ線と中性子を分離可能な電磁カロリメーターの開発

研究課題名(英文) Development of a new inorganic crystal GAGG for the calorimeter which has capability of the separation between neutrons and gammas

研究代表者

塩見 公志 (Shiomi, Koji)

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・助教

研究者番号：40648036

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：J-PARC KOTO実験のSTEP2実験で使用するための中性子とガンマ線が識別可能な電磁カロリメーターの開発を行った。本研究では近年開発されたGAGG結晶を使用した。GAGG結晶にはMgの添加量による時定数が変わるという特徴がある。異なる時定数の結晶を接着して使用し、出力波形の違いを測定することで、入射粒子の反応点を測定し、中性子とガンマ線を分離する。本研究では直径5cm、10cm長の円柱型のMgを添加していないGAGG結晶と、Mgを1%添加したGAGG結晶を光学接続した試作機を製作し、電子ビーム、中性子ビームの照射実験を行なった。測定データの解析から、中性子と電子の分離方法を確立した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年開発されたGAGG結晶を使用し、中性子と電子を分離する新たな手法を確立し、KOTO STEP2実験に必要な中性子とガンマ線が識別可能な電磁カロリメーターとしての一つの例を示すことが出来た。電磁カロリメーターでのガンマ線や電子の同定において、ハドロン反応を除去を行うことは高エネルギー加速器を用いるコライダー実験全般でも重要なテーマである。そのため、本手法はKOTO実験以外の電磁カロリメーターに対しても、有益な手法と成り得る。

研究成果の概要(英文)：We developed an electromagnetic calorimeter which can distinguish neutrons from gammas, by using GAGG crystals. The response of GAGG crystals can be faster by co-doping Mg²⁺ ions. To separate neutrons from gammas, we can use the difference of the interactions in the crystals between neutrons and gammas due to its short radiation length and long interaction length. Information on the depth of the interaction positions in the crystals can be obtained from the observed pulse shape by gluing a GAGG crystal and a GAGG crystal co-doping with Mg²⁺, which has a shorter decay constant, compared with GAGG crystals. We made a prototype module and carried out a series of beam tests. We established a method to distinguish gammas from neutrons.

研究分野：数物系科学

キーワード：電磁カロリメタ 素粒子実験 測定器

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

J-PARC KOTO 実験は稀崩壊 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ を探索する。この崩壊は CP 対称性を破り、標準理論の枠内では非常に抑制される。そのため、より大きな CP 対称性の破れを持つ新物理に感度がある。しかし、標準理論が予言する崩壊分岐比は 3×10^{-11} と稀なため、実験による観測例は存在しない。

KOTO 実験は、2015 年に取得したデータを使用し、 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊に対して 3×10^{-9} というこれまでの世界記録を約一桁更新する上限値を与えた。今後もデータ取得を続けて 10^{-11} の実験感度まで到達する見込みである。しかし、 $K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 崩壊分岐比の測定を行うためにはより高感度の実験を行う必要がある。そこで我々はより大強度の K_L^0 ビームと新しい検出器を使用した KOTO ステップ 2 実験を提案している。

$K_L^0 \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}$ 探索実験では π^0 からの崩壊でできた 2 つの γ 線の位置とエネルギーを崩壊領域下流におかれた電磁カロリメーターで測定し、崩壊領域全体を囲う veto 検出器群で「 2γ 以外は何かない」ことを保証し、信号事象を同定する。この時、上流から来る中性子ビーム周りに存在するハロー中性子がカロリメーターに入射し、複数回のハドロン反応を通じて 2 つのクラスターを生成する事象が問題となる。そのため、実験感度向上には γ 線と中性子の分離可能な電磁カロリメーターが必要不可欠である。

2. 研究の目的

本研究は近年開発された GAGG 結晶を使用して、KOTO ステップ 2 のための γ 線と中性子を分離可能なカロリメーターの開発を行う事である。

GAGG 結晶は高密度 (6.67g/cm^3)、高発光量 (Na(Tl) より 30% 多い)、早い時間応答 (時定数 90ns) という、高エネルギー実験用の電磁カロリメーターとして理想的な特徴を備えている。さらに、GAGG 結晶には Mg の添加量により時定数が変わるという特徴がある。本研究ではこの特徴を使って、 γ 線と中性子の新たな分離方法の開発を行う。 γ 線は結晶に入射後すぐに反応するのに対して、中性子は interaction length が radiation length より長いいため、結晶の奥まで入ってから反応を起こす。このため、 γ 線と中性子では結晶内での反応を会する深さの分布が異なる。この時、時定数の違う結晶をつなぎ合わせて使えば、反応点の違いを出力波形の違いによって観測し、 γ 線と中性子の分離ができる (図 1 参照)。

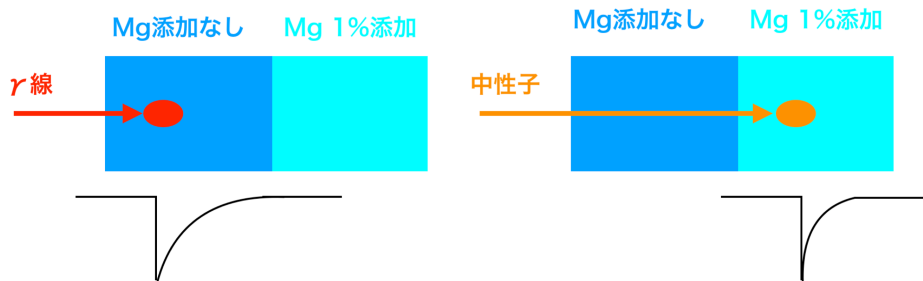


図 1: 結晶内での γ 線、中性子の反応の違い。

3. 研究の方法

本研究では直径 5cm、10cm 長の円柱型の Mg の添加なしの GAGG 結晶と、直径 5cm、10cm 長の 1% の Mg を添加した GAGG 結晶を光学セメントで光学接続した試作機 (図 2) を使用し、東北大学電子光理学研究センター (ELPH) での電子ビームテスト (1)、大阪大学核物理研究センター (RCNP) での中性子ビームテスト (2) を通じて、試作機の電子、中性子に対する応答を調べる。そして、試作機の中性子と電子の分離能力 (3) を評価する。

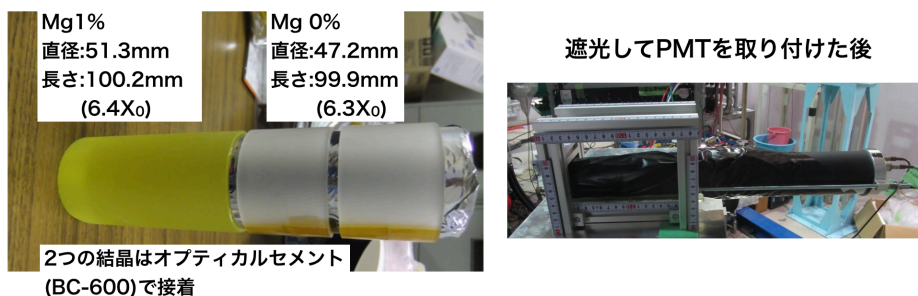


図 2: 製作した試作機

4. 研究成果

(1)ELPH における電子ビーム実験の解析

昨年度に行った ELPH での電子ビーム照射試験データの解析を行い、Mg 添加なしの GAGG 結晶の波形と 1%の Mg を添加した GAGG 結晶の波形の違いを確認した。また、どちらの結晶で反応が起こったのかを識別する方法を開発した。図 3 左図のように、試作機をビーム方向に対して垂直に置き、各結晶に対してビームを照射した。図 3 中央にそれぞれの結晶の波形を示す。1%の Mg を添加した GAGG 結晶は、Mg 結晶を添加していない GAGG 結晶に対して早い応答を持っていることがわかる。図 3 右図には波形の高さと波形の面積比(H/A 比率)の分布を示す。H/A 比率によりそれぞれの結晶で起こった反応を区別することが出来る。

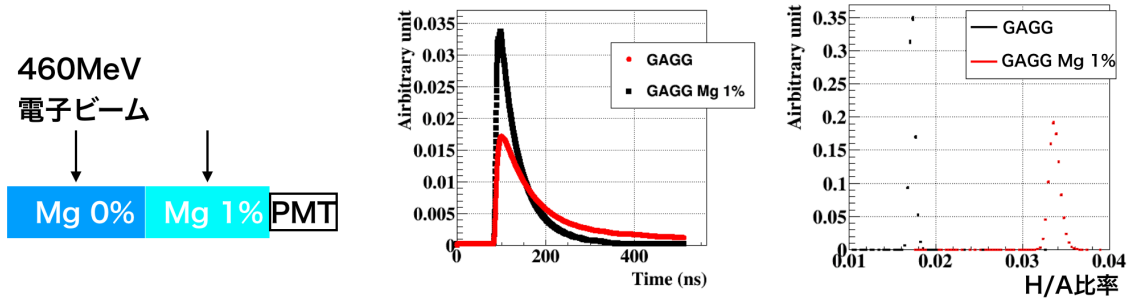


図 3:電子照射試験

(2)RCNP における中性子ビーム照射試験

RCNP の中性子ビームを使用し、試作機の中性子に対する反応を調査した。図 4 左に中性子照射試験のセットアップを示す。試験には 250MeV の中性子ビームを用い、試作機は標的から 25m の位置に設置した。試作機と加速器の RF 信号との時間差情報(図 4 中央)から、中性子事象の判別を行った。中性子事象に対する H/A 比率分布(図 4 右)を調べたところ、2つのピークが観測された。H/A 比率が 0.015 付近のピークは Mg を 1%添加した結晶で反応を起こした中性子事象、0.035 付近のピークは Mg を添加していない結晶で反応を起こした中性子事象である。また、2つのピークの間にある事象は両方の結晶で反応を起こした中性子事象である。

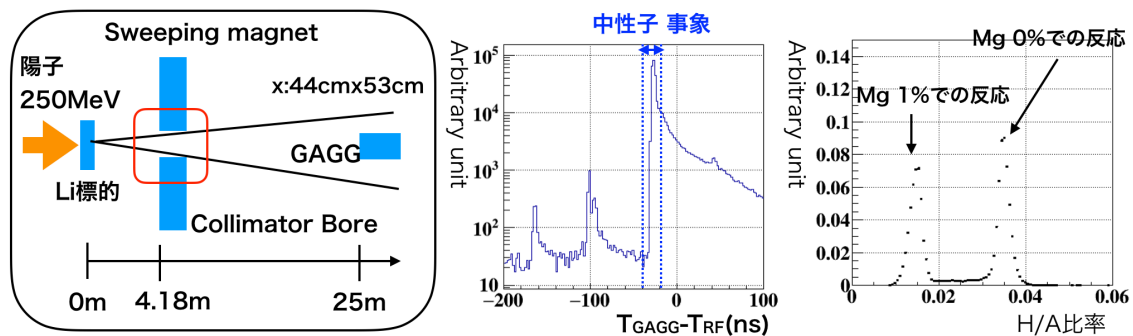


図 4:中性子照射試験

(3)電子と中性子の分離能力の評価

ELPH での電子ビーム照射試験と RCNP での中性子ビーム照射試験のデータを使用することで、試作機の電子と中性子の分離能力の評価を行った。図 5 左図のように、長手方向に 250MeV の中性子と 400MeV の電子を照射したデータの比較を行った。まず、電子ビームで得られた波形と中性子ビームで得られた波形を比較した所、Mg を添加していない結晶では図 5 中央のように、電子と中性子で違いが見られた。この波形の違いは Mg を添加していない結晶でのみ見られ、Mg を 1%添加した結晶では波形の違いは見られなかった。次に H/A 比率を使用し(図 5 右図)、中性

子と電子の識別能力の評価を行った。H/A 比率が図 5 右図の青の線で囲まれた領域にある事象を選ぶことで、電子の検出効率を 94%に保ちつつ、95%の中性子事象を排除出来ることがわかった。

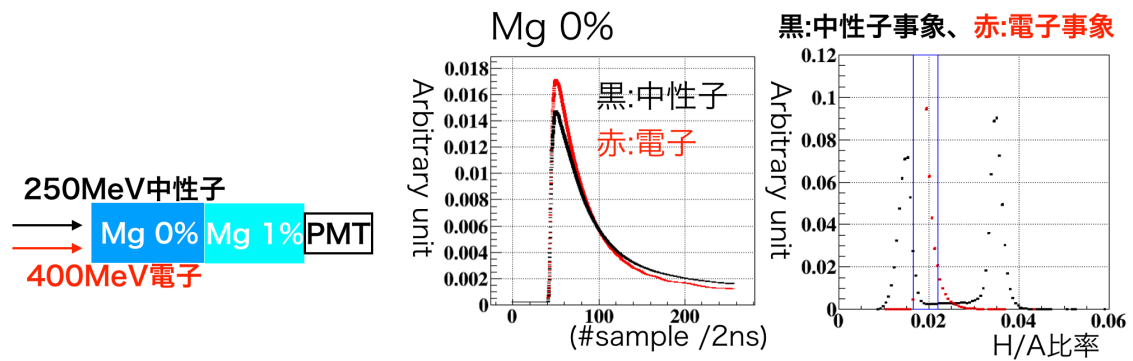


図 5 : 電子と中性子の識別能力

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 塩見 公志
2. 発表標題 GAGG結晶を用いた中性子と 線の分離可能なカロリメーターの開発
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 塩見 公志
2. 発表標題 Development of a new inorganic crystal GAGG for the calorimeter capable of the separation between neutrons and gammas
3. 学会等名 Calorimeter for the High Energy Frontier 2019 (CHEF2019) (国際学会)
4. 発表年 2019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