

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 2 年 7 月 7 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K05376

研究課題名(和文) 高線量下で動作するロバストで可搬なMeVオーダー 線コンプトンカメラの開発

研究課題名(英文) Development of a robust Compton camera operable under high dose environment

研究代表者

長谷川 庸司 (Hasegawa, Yoji)

信州大学・学術研究院理学系・教授

研究者番号：70324225

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：エネルギーがMeVオーダーの 線の入射方向を測定するコンプトンカメラは、物理学、医療、環境など広い分野で用いられる。本研究では、入射 線による反跳電子の飛跡の測定と、散乱 線のエネルギーと位置の測定を共通化し、散乱標的にガスを用いることにより高線量下で動作する簡素でロバストなコンプトンカメラを開発した。

細分化した無機シンチレータと半導体光検出器を用いることでガス増幅とシンチレータによる蛍光を同時に読み出し、線に対するエネルギー分解能散と入射位置測定の性能評価を行った。シミュレーションにより入射 線の方向を再構成のアルゴリズムの開発と評価を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高線量下で動作するロバストで可搬なMeVオーダー 線コンプトンカメラは、様々な分野で用いられることが期待される。特に、放射線源の分布を視覚的に捉える事ができるため、原子炉の廃炉作業のような高線量下で活躍が期待できる。本研究では、コンプトン散乱をガスで起こすことで、高線量下での動作させること、読み出し回路を簡単にする事でロバストで可搬なコンプトンカメラを開発した。実際の環境での使用に耐え得る性能は達成できていないが、様々な新しい技術を導入することで性能を向上させることができると考えている。

研究成果の概要(英文)：A Compton camera sensitive to MeV-order gamma rays is utilized in many fields for physics, diagnostic, and environment. In this study, we developed a simple and robust camera which has a common readout for measuring scintillation lights from gas amplification for electrons and from inorganic scintillator for gamma rays and operable under high radiation environments.

Energy resolution and position resolution of scintillation counters for scattered gamma rays were measured. For measurement of tracks of recoil electrons, a gaseous chamber with gas electron multipliers was filled with Ar + methane gas mixture. Light yields of gas amplification were too small to reconstruct the tracks. Simulation studies of developing algorithms for reconstruction of incident gamma rays were also performed.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：放射線測定器

1. 研究開始当初の背景

MeV オーダーの線の到来方向を広い視野で測定できるコンプトンカメラは、地上観測ができない MeV オーダーの線を放出する天体の衛星による観測、医療現場における放射性薬剤による汚染、福島第一原子力発電所事故で環境に放出された放射線源の汚染マップの測定など、宇宙物理学、核医学診断、環境の分野で広く使用されている。より簡便でロバストな検出器を開発できれば、実験室の外での観測や測定を前提とした宇宙物理や環境の分野において用途は大きく広がる。多くの開発例があるコンプトン散乱の標的が固体のコンプトンカメラの場合、散乱の起こる確率が大きいと、高い検出効率は放射線のレベルが高いところでは、背景事象の増加を招く。標的をガスにすることで、散乱の確率を下げ、バックグラウンドが多い環境や、強い放射線環境でも動作し、広い視野で精度の高い測定が可能となるコンプトンカメラの開発が可能となる環境に放出された高濃度の放射性物質の分布、例えば、原発事故の原子炉建屋内の放射性物質の分布を測定するのに有利となる。

2. 研究の目的

コンプトンカメラは、コンプトン散乱を検出する散乱検出器と、散乱された線を検出する吸収検出器からなる。コンプトン散乱の標的をガスにしたコンプトンカメラは先行研究があり、電子の飛跡を検出するため、散乱が起こった時刻から信号が観測されるまでの時間を測定し飛跡を再構成する TPC(Time projection chamber) と呼ばれる飛跡検出器を用い、TPC はガスによる雪崩増幅で増幅された電子の誘起電流を観測している。本研究の新しい点は、1) 電子の飛跡を検出する際のガス電子増幅器(GEM) に厚い GEM (thick GEM, tGEM) を用いることで、通常複数枚組み合わせる GEM を 1 枚で実現可能であること、2) この雪崩増幅と散乱線吸収のシンチレーション光を光読み出しにして回路を共通化することで、構造を簡略化、ロバストにすることができると考える。図 1 に示すように、散乱検出器にガス放射線検出器を、吸収検出器に無機シンチレータと半導体光検出器を用いたシンチレーションカウンタを用いている。動作原理についての研究は既に進めており、本研究では、実証機を作成し、最終的には屋外でのフィールドテストを目標とする。

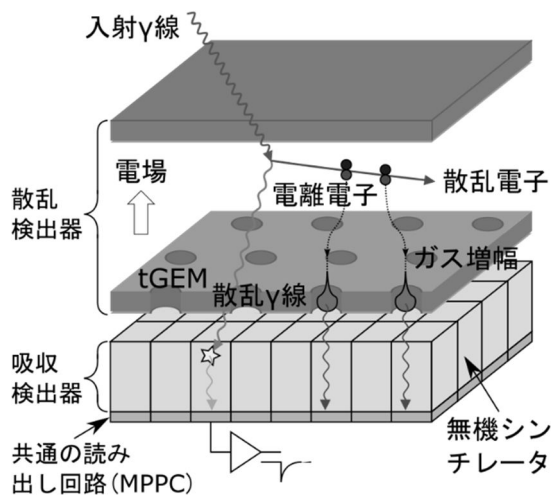


図 1 本研究で開発するコンプトンカメラの概略図

3. 研究の方法

(1) 吸収検出器の性能評価

シンチレーションカウンタからなる吸収検出器は散乱線のエネルギーと入射位置の測定精度を評価する。吸収検出器は、無機シンチレータ (古河電子製 Ce:GAGG) と半導体光検出器 (浜松ホトニクス社 MPPC) の組み合わせたシンチレーションカウンタである。放射線が入射した場合に、MPPC が感度を持つ波長 520nm のシンチレーション光を放出する。シンチレータのサイズや、シンチレータと MPPC の接合方法を変えることによる線に対するエネルギー分解能、位置分解能を評価し、最適化を図る。

(2) 散乱検出器の開発と製作

散乱検出器に tGEM を 1 枚、もしくは厚さ 50 と 100 $\mu$ m の GEM と合わせてガス増幅を行う。tGEM は 1 枚でもある程度の増幅率を期待でき、より簡素化されたコンプトンカメラを構成できる。飛跡再構成に重要な位置分解能は、tGEM の読み出し方法を最適化することで対応する。吸収検出器を構成する Ce:GAGG はアルゴンガス中の雪崩増幅から発生するシンチレーション光は真空紫外光を吸収し波長 520nm の光を放出する波長変換物質として働く。tGEM とシンチレーションカウンタの組み合わせにより、散乱電子と散乱線の異なる測定対象を一つの検出器で検出するより現実的な実証機を開発、製作し、性能評価を行う。

(3) 読み出し回路の開発と製作

半導体光検出器用の専用 IC を用い、出力信号の処理を柔軟に行うための回路の開発と製作を行う。また、信号処理回路に適した入射線の方向を再構成するアルゴリズムを開発する。

## 4. 研究成果

### (1) 吸収検出器の研究

シンチレータ Ce:GAGG は 2 種類のサイズ (6mm × 6mm × 10mm, 3mm × 3mm × 10mm) を用い, MPPC は 3mm × 3mm の受光面を持つ 4 つの独立した読み出しチャンネルが 2 × 2 のアレイ上に配置されている。読み出し形状による位置分解能を評価するために, 6mm × 6mm × 10mm のシンチレータ 1 個に対し, 2 × 2 のアレイに配置された 4 つの受光面を接合し, 4 つのチャンネルからの信号の重心を求め, 光の入射位置を測定する。一方, 3mm × 3mm × 10mm のシンチレータは 1 つのシンチレータに 1 つの受光面を接合した。エネルギー分解能を測定するために線源からの線を入射して光量を測定した。アナログ信号を CAMAC 規格の ADC モジュール (豊伸電子社製) を用いて読み出し, 十分な光量とエネルギー分解能が得られることが分かった。図 2 にエネルギー分解能と線のエネルギーの関係を示す。エネルギー分解能  $a/\sqrt{E}$  にしたがうことが分かった。次に, MPPC の各チャンネルを校正し, 線の入射位置の測定精度を求めた。図 3 に 3mm × 3mm × 10mm の Ce:GAGG を用いた場合の再構成した入射位置の分布を示す。殆どの事象が, 4 つの MPPC のチャンネルのうち一つだけ信号を出していることから, 光電吸収であることが分かる。対角線や四角形の辺に相当する部分に入射位置が再構成された事象は, コンプトン散乱により, 複数のチャンネルから信号が出ているものである。

### (2) 散乱検出器の開発と製作

tGEM のサイズは 10cm × 10cm, 厚さ 400 $\mu$ m, 孔径 300 $\mu$ m, GEM も同様のサイズで, 厚さ 50 $\mu$ m と 100 $\mu$ m, 孔径 50 $\mu$ m のものを用いて測定した。これらの GEM を 1 枚または複数枚組合せて測定を行った。まず, 陽極板を用いて誘起電荷による電気信号を, 陽極板と GEM に貼られた電極から読みだしたところ, 放射線 (線または X 線) による散乱電子により生成した, 電離電子によるガス増幅からの信号が観測された。次に, Ce:GAGG と MPPC によるシンチレーションカウンタをガス検出器内に設置し, ガス増幅からのシンチレーション光と誘起電荷による電気信号のコインシデンスを測定したところ, シンチレーション光と電気信号の有意な相関は見られなかった。原因としては, アルゴンと混合している CH<sub>4</sub> がシンチレーション光である真空紫外光を吸収し, Ce:GAGG まで十分な光が到達しなかったことが考えられる。ガスに混合する波長変換剤や, シンチレータの配置について様々な検討を行ったが, 有意に光量が増加することはなかった。実験室で行った性能評価により, フィールドで行うのに十分な性能が出せないことが分かったため, フィールド試験は行わなかった。

### (3) 読み出し回路の開発と入射方向再構成アルゴリズムの開発

散乱検出器と吸収検出器からの信号を共通で読み出す MPPC の信号は ASIC により処理され, その信号を用いて入射線の方向を再構成する回路の試験を行った。実際の検出器からの信号は取得出来なかったため, シミュレーションにより疑似信号を作成し, 再構成のアルゴリズムを評価した。

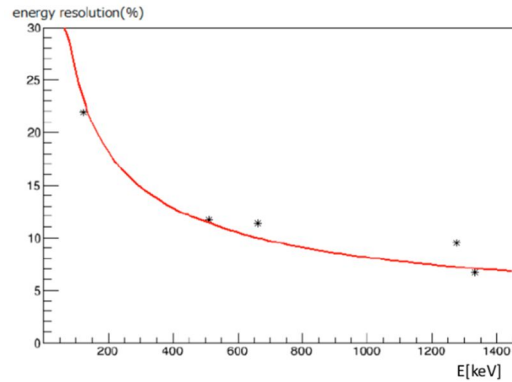


図 2 Ce:GAGG のエネルギー分解能の線エネルギー依存性。5 種類の線のエネルギーについて測定し,  $a/\sqrt{E}+b$  ( $E$ : 線のエネルギー,  $a, b$  は定数) でフィットした曲線を示す。

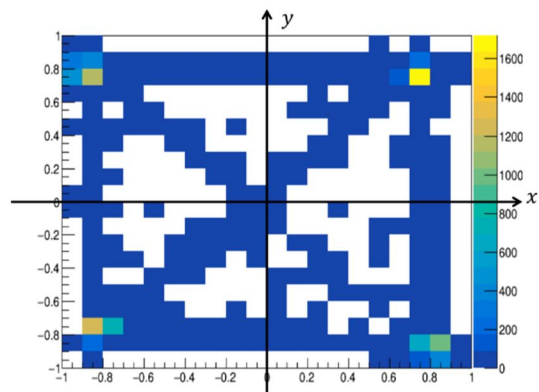


図 3 4 つのチャンネルで測定した光量から再構成した入射位置。x-y 座標の第 1 象限から第 4 象限のそれぞれが MPPC のチャンネルに相当する。縦軸, 横軸は MPPC の光電面の大きさに規格化している。第 1 象限のチャンネルに入射した場合, (0.8, 0.8) 付近に入射位置が再構成される。

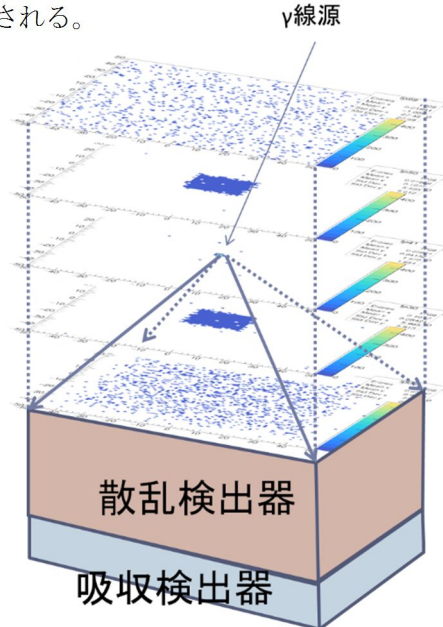


図 4 カメラの焦点深度を変えて再構成した場合の画像。正しく焦点深度を設定した場合に, 点線源の位置が分かる。

図 4 カメラの焦点深度を変えて再構成した場合の画像。正しく焦点深度を設定した場合に, 点線源の位置が分かる。

本研究で開発しているコンプトンカメラは、視野が広く、視差を利用することにより、3次元の分布図を作成できる。図4に示すように、焦点深度を変えることにより、3次元の線分布図が得られることが分かった。さらに、機械学習を用いたアルゴリズムを用いることで分布図が効率的に作成できると考えられる。

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〕

松尾竜也, 無機シンチレータCe:GAGGと半導体光検出器MPPCを用いたコンプトンカメラの性能評価, 2017年, 信州大学修士論文  
<http://azusa.shinshu-u.ac.jp/master/16/matsuo.pdf>

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