

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：13601

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26610066

研究課題名(和文) GEMと次世代シンチレーションカウンタを用いた新型コンプトンカメラの開発

研究課題名(英文) Development of a robust Compton camera with GEM and new inorganic scintillators

研究代表者

長谷川 庸司 (HASEGAWA, Yoji)

信州大学・学術研究院理学系・准教授

研究者番号：70324225

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：入射線の方向を決める検出器は、物理学、医療、環境など広い分野で用いられる。その一つがコンプトンカメラで、線による反跳電子を検出するコンプトン散乱検出器と散乱線吸収検出器からなる。散乱検出器でのガス増幅に伴う蛍光の読み出しと、吸収検出器での無機シンチレータでの蛍光の読み出しとを共通化し、簡素でロバストな検出器の開発が本研究の目的である。

散乱検出器に位置測定精度の高いガス電子増幅器(GEM)と混合ガス(Ar:CH₄が9:1)を用い、X線を入射してガス増幅率と蛍光量の関係を調べたところ、正の相関が見られた。しかし、要求される位置決定精度には光量が不足しており、さらなる改良が必要である。

研究成果の概要(英文)：Detectors reconstructing directions of gamma rays are utilized in many fields for physics, diagnostic, and environment. One of them is a Compton camera which consists of two kinds of detectors: one for Compton recoil electrons and the other for scattered gamma rays in order to reconstruct incident gamma rays. The purpose of this study is to develop a simple and robust detector with a common readout for measuring scintillation lights from gas amplification for electrons and from inorganic scintillators for gamma rays.

A chamber equipped gas electron multipliers(GEMs) for detecting electrons are filled with mixed gas of Ar(90%)+CH₄(10%). Dependence of light yield on gas amplification is measured with irradiation of X rays. A positive correlation can be found between them. However, light yields is too small to reconstruct the tracks of electrons, therefore, additional improvement is required.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：放射線検出器

1. 研究開始当初の背景

γ 線の飛来方向を特定する測定器に、コンプトン散乱を再構成するコンプトンカメラとコリメータで方向を限定するガンマカメラがある。人工衛星搭載のコンプトンカメラは10keV~数MeVの γ 線バースト源の全天探索に、ガンマカメラは γ 線放出核を用いた核医学診断や放射性物質のホットスポット調査に用いられる。現在広く用いられているガンマカメラは、構造は簡単であるが、視野角が狭く、核医学の診断装置のように、 γ 線源が局所的な場合には有効だが、広範囲に分布する γ 線源の探索には向かない。一方、広い視野を持つコンプトンカメラは構造が複雑で運用が難しいが、これを改良すれば、ガンマカメラの利用分野でも用いることができ、用途が大きく広がる。

2. 研究の目的

コンプトンカメラはコンプトン散乱の位置と散乱電子の運動方向測定を行う散乱検出器と、散乱 γ 線のエネルギーと検出位置の測定を行う吸収検出器からなる。先行研究では散乱検出器に厚さ50 μ mのガス電子増幅器(Gas Electron Multiplier: GEM)等を複数使用し、飛跡検出を検出することで、散乱電子の方向とエネルギーを再構成している。吸収検出器はそれと独立に散乱 γ 線を吸収し、その位置とエネルギーを測定するシンチレーション検出器を用いており、二つの検出器の独立した信号読出回路が構造を複雑にしている。

そこで、図1に示すように、散乱検出器において散乱電子が電離することで生成した電離電子を検出するためにGEMによりガス

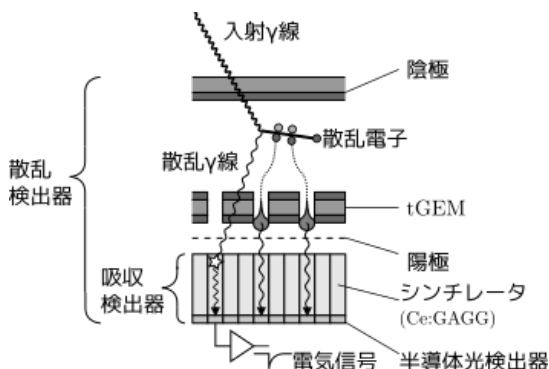


図1:新型コンプトンカメラの概略図

増幅を起こすが、その信号は陽極に誘起される電気信号を測定ではなく、ガス増幅中において電子イオン対の再結合する際に生ずる蛍光を観測することで、飛跡を測定しようとするものである。希ガスの真空紫外蛍光を観測と散乱 γ 線による無機シンチレータ内での蛍光を、同一の高密度の無機シンチレータとピクセル型半導体光検出器を組み合わせたシンチレーションカウンタを用いることでよりコンパクトな検出器を構成すること

ができる。さらに散乱検出器に複数の50 μ m厚GEMを複数枚用いる代わりに、1枚当たりの増幅率の高い400 μ m厚のGEM(thick GEM: tGEM)を用いることで、より簡素化することができる。これらの改良により、コンパクトで、ロバストなコンプトンカメラが構成可能になる。

この原理を実証することが本研究の目的である。実証されれば、広い観測視野と高位置分解能を持ち、低エネルギー γ 線(数100keVから数MeV)に感度を持つロバストなコンプトンカメラが実現できる。用途は基礎科学分野だけでなく、核医学の診断分野や、放射性物質の除染のような環境分野などに大きく広がると考えられる。

3. 研究の方法

(1) 散乱検出器での光読出しの研究

- ①シミュレーションを検出器の形状や配置を変えながら行い、性能評価を行う。その結果から試作機の作成に必要なパラメータを決定する。
- ② ガス種類や混合比、波長変換材を変えることによる発光量および光読出し効率の最適化を図る。
- ③GEMの形状および印可電圧を変えることにより、光読出しでの検出光量の最大化を図る。

(2) 吸収検出器の研究

シンチレータと光検出器との接合方法を変えることによる γ 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。

4. 研究成果

(1) 散乱検出器での光読出しの研究

- ①GEMの形状、配置、印可電圧等を変えながらシミュレーションを行い、それらの動作パラメータを決定し、ガスボリュームが20cm×20cm×10cmのテストチャンバーを作成した。
- ②ガスについては、アルゴン90%、メタン10%を基準として測定を行い、その他にメタンの混合比5%に変えた混合ガスおよび、アルゴン70%、二酸化炭素30%の混合ガスを用いて測定したところ、基準に用いたガスの光量が最も多かったため、以降の実験ではこのガスを用いて行っている。波長変換材は、波長変換ファイバーやプラスチックシンチレータを用いて行った。波長変換ファイバーの場合ではできるだけ読み出しの細密化を目的として行ったが、受光部分が小さいため十分な光量が得られなかった。そのため、40mm×40mmの受光面をもつプラスチックシンチレータを用いた。
- ③GEMについては、50 μ m厚、100 μ m厚、400 μ m厚の3種類のGEMを用いて評価を行った。簡素化を目指すため400 μ m厚1枚での測定を行ったが、増幅率が十分ではなく、400 μ mともう一枚のGEMを用いての測定を行った。50 μ mのGEMとの組み合わせでは、増幅率が不十分のため、十分な光量が観測できなかつ

た。そのため、100 μm の GEM との組み合わせで測定を行った。

定量的な測定を行うために、すべてのエネルギーが確実に吸収される ^{55}Fe からの X 線 (5.9keV) を入射することで測定を行った。X 線を透過させるためにメッシュ状にした陰極に負の高電圧を印可し、電気信号を読み出す陽極を 0V に設定し信号を読み出した。陰極と 100 μm 厚 GEM の間 (ドリフト領域, 10mm) で X 線が光電効果を起こし、放出された光電子による電離を測定する。100 μm 厚と 400 μm 厚の tGEM 間 (輸送領域) を 3mm 隔てて配置し、tGEM と陽極間 (誘起領域) を 2mm 隔てて配置した。

図 2 に tGEM の両面電極間の電場を 28.125kV/cm, 28.750kV/cm, 29.250kV/cm 変え、GEM の陽極側電極から読み出した誘起電荷の大きさの分布を示す。このとき、tGEM 間以外の電場は次のように設定した：ドリフト領域：400V/cm, 100 μm 電極間：4.5kV/cm, 輸送領域：4kV/cm, 誘起領域：8kV/cm である。

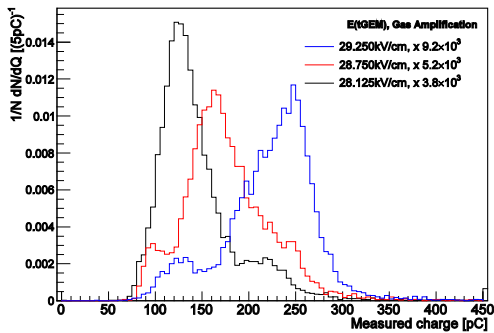


図 2: ガス増幅による誘起電荷分布

この図から増幅率を求めると 3.8×10^3 , 5.2×10^3 , 9.2×10^3 であった。

誘起電荷の測定と同時にガス増幅による蛍光を測定した。tGEM で発生するガス増幅による蛍光を透過させるためにメッシュ状にした陽極と蛍光を波長変換するプラスチックシンチレータは 10mm 隔てて設置した。プラスチックシンチレータには 1 インチの光電子増倍管 (PMT) を接合し光を読み出した。ガス増幅由来による蛍光を観測するために、陽極から誘起電荷による電気信号を読み出し、この信号と PMT からの信号のコインシデンスを取ることにより、ガス増幅由来であることを確認した。図 2 に示した誘起電荷と同時に PMT から読み出した光量を電荷量に換算した分布を図 3 に示す。誘起電荷の分布と同様に一定のピークが見られることが期待されるが、測定された光量が少なかったため、分布はピークを作らなかった。そこで、この分布から光量の平均値を求めて評価を行った。

散乱電子のエネルギーの測定および飛跡の位置の測定を精度よく行うためにはできるだけ光量が多くすべきである。そこで、それぞれの電極の印可電圧を変えることにより電場強度を変え、それらに対する測定光量

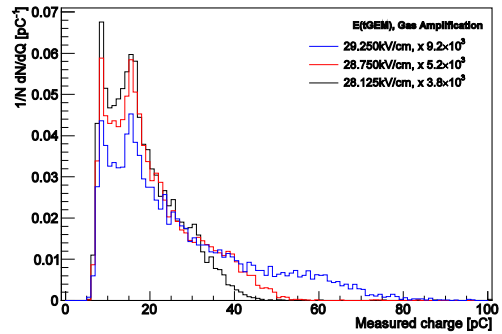


図 3: ガス増幅による蛍光の光量分布

の依存性を調べ、印可電圧を最適化した。電場の強度はガス増幅率に関係するため、ガス増幅率と光量の関係を調べた。測定できる蛍光に最も大きな影響を与えるのは、tGEM によるガス増幅なので、tGEM の両面電極間の電位差を変えながら増幅率を変化させ、光量の平均値の増幅率依存性を求めたものが図 4 である。

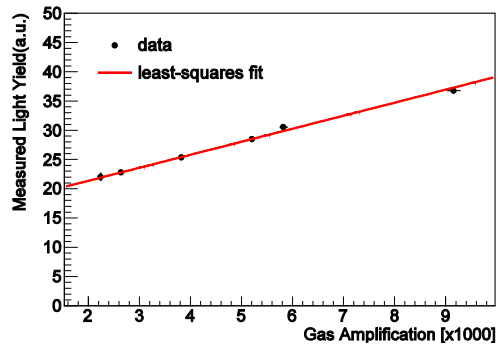


図 4: 測定光量のガス増幅率依存性

図 4 より、測定される光量とガス増幅率の間にはよい線形関係になっていることが分かった。光量の分布にピークを作らないことから、より増幅率を上げることが必要であるが tGEM の両面電極間の電場が 29.250kV/cm を超えると放電が発生したため、これ以上電場を強くすることができなかった。

測定される光量を増加させるには、蛍光は混合ガスに用いられているメタンに吸収されている可能性があるため、プラスチックシンチレータを tGEM に近づけること、波長変換を行うガスを混合し、真空紫外蛍光がメタンに吸収される前に、可視光に波長変換をすることが考えられる。

(2) 吸収検出器の研究

吸収検出器に用いる無機シンチレータとして、Ce:GAGG (古河電子製) を用いた。光検出器には、MPPC (浜松ホトニクス社製) を用いた。読み出し形状による位置分解能を評価するために、無機シンチレータは受光面が 6mm \times 6mm のものと、3mm \times 3mm のものを用いた。MPPC の受光面は 3mm \times 3mm なので、前者は一つの無機シンチレータに対し、MPPC を 2

×2のマトリクス状に配置し、4つのMPPCからの信号の重心を求めることで、光の入射位置を測定する。一方、後者は1つのシンチレータに1つのMPPCを配置するため、3mm以下の位置精度は出ない。シミュレーションによる評価では、位置の測定精度はやや不十分であるが、原理が実証できれば、より細密なシンチレータを用いることで、高精度の位置測定を得ることは、比較的容易である。MPPCからの信号の読み出しにはEASIROCモジュール（GND社製）を用いた。このモジュールはMPPCのようなピクセル型半導体光検出器の信号の読み出しに最適化されたフランスOMEGA社製のASIC（EASIROC）を2個用いて、64チャンネルの読み出しが可能になっている。

エネルギー分解能を測定するために γ 線源からの γ 線を入射して光量を測定した。まず、信号の増幅には高エネルギー物理実験のATLAS実験のTGCからの信号増幅のためのASDを用い、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を確認した。次に、読み出し回路をEASIROCモジュールに変更し、同様の測定を行ったが、MPPCとEASIROCモジュールを接続するケーブルとその接合部分で拾うと思われるノイズの低減が十分できずに、CAMAC ADCで得られた分解能までは達成できなかった。しかし、ケーブルおよびコネクタを改良することで低減可能であると考えられる。

5. 主な発表論文等

〔その他〕

ホームページ等

<http://azusa.shinshu-u.ac.jp/master/15/ebi.pdf>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 庸司 (HASEGAWA, Yoji)

信州大学・学術研究院理学系・准教授

研究者番号：70324225