

令和 2 年 6 月 22 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K05461

研究課題名(和文)ガンマ線・中性子イメージングのための結像系を用いた新しい手法の開発

研究課題名(英文)Development of new method of gamma ray and neutron imaging using optical system

研究代表者

三井 唯夫(Mitsui, Tadao)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・准教授

研究者番号：20283864

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)：ガンマ線の到来方向を、液体シンチレータの撮像という新しい方法によって行なうため、結像系・画像解析の方法を開発した。ミラー2枚からなる直径30 cm光学系と、5 cm × 5 cmマルチアノード光電子増倍管を用いた「カメラ」を開発した。このカメラ2つで2方向から、液体シンチレータ内のコバルト60線源からのガンマ線事象を、「撮像」する測定を行なった。この発光点を3次元的に再構成することに成功し、液体シンチレータ撮像によるイメージングの原理検証が行なえた。マルチコンプトン散乱によると思われる複数箇所発光事象の候補も見つかり、コンプトン散乱を捉えて到来方向を検出する研究への道筋も示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ガンマ線イメージングは、高エネルギー物理学だけでなく、医療や放射線安全管理などにも応用される技術である。しかしガンマ線は物質との反応が確率的なため、到来方向を再構成するためにはさまざまな工夫が必要になる。その有力な方法のひとつである「コンプトンカメラ」に新しいスキームを導入すべく、液体シンチレータの「撮像」を、本研究では試みた。コバルト60線源の位置を同定する基礎的測定が本研究で成功し、この可能性への期待が持てた。シンチレータ撮像は、検出効率の高さが特徴で、医療分野では被曝量を減らせる期待へと繋がる。今後、応用分野への研究に発展させていきたい。

研究成果の概要(英文)：In order to develop a new method to measure gamma-ray incoming direction by imaging liquid scintillator, we have developed 30-cm diameter optical system with two mirrors and 5 cm times 5 cm multi-anode photomultiplier tubes. Using two such "cameras", we have imaged a liquid scintillator box, which detected gamma rays from a cobalt 60 source. From two pictures taken by two cameras, scintillation points have been reconstructed 3-dimensionally. Candidate events for multi-point scintillation due to Compton scatterings of gamma rays have also been observed, by which a possibility to develop a Compton camera based on this principle have been shown.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ガンマ線カメラ シンチレータ

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

線・中性子イメージング用の、シンチレータ撮影方式の検出器を、リチウム6入り液体シンチレータ、反射鏡を用いた光学系、マルチアノード光電子増倍管を用いて設計・製作する。位置分解能 0.5 mm, 検出効率 80 %, 時間分解能 10 ns を実現する検出器を試作し、性能を評価する。これらをすべて満たす検出器は存在せず、これが実現できれば、医療用線カメラでは、高効率測定で被爆量を減らせる。パルス中性子イメージングでは飛行時間 (TOF) を用いたエネルギー弁別が行え、物質内部構造における化学組成の情報を得るのに役立つ。我々のこれまでの研究で、反射鏡を用いた光学系は、レンズ系では達成できない大集光量と低収差の両立が可能であることが示された。この技術を生かして線・中性子イメージングの新しい方法を開発する。

2. 研究の目的

エネルギー 1 MeV 程度のガンマ線イメージング手段として、コンプトン散乱を再構成して到来方向を決定する「コンプトンカメラ」が広く用いられている。コンプトンカメラの新しい可能性を探るために、シンチレータのガンマ線検出事象を可視化することの意義は大きい。そこで、特にこの部分に注力して研究を進める。液体シンチレータの撮像によって、エネルギーと、エネルギー付与の起こった位置(バーテックス)が同時に測定できれば、この方法でコンプトン散乱を捉える原理の検証となる。まずこの技術の確立を目指す。

3. 研究の方法

最初に、ガンマ線を検出する「液体シンチレータボックス」を設計、製作する。保有しているコバルト 60 線源を用いて、1.1 MeV, 1.3 MeV のガンマ線を観測する。このエネルギーで有効にコンプトン散乱事象を捉えるための大きさ、形状を決定し、ボックスを作成する。次に、光学設計ソフト「オプティクスタジオ」を用いて、このシンチレータを撮像する光学系を設計する。コストパフォーマンス的には反射系を用いるのが適切である。光検出器としては、マルチアノード光電子増倍管(MAPMT)を用いて、 $8 \times 8 = 64$ ピクセルの撮像を行なう。このような「シンチレータ撮影用カメラ」(以降、単に「カメラ」)を2つ用いて、液体シンチレータボックスを2方向から撮像し、3次元的な反応位置の再構成を行い、ガンマ線の液体シンチレータ撮像による検出、エネルギーと同時にバーテックスを高精度で決定できる原理の検証を行なう。

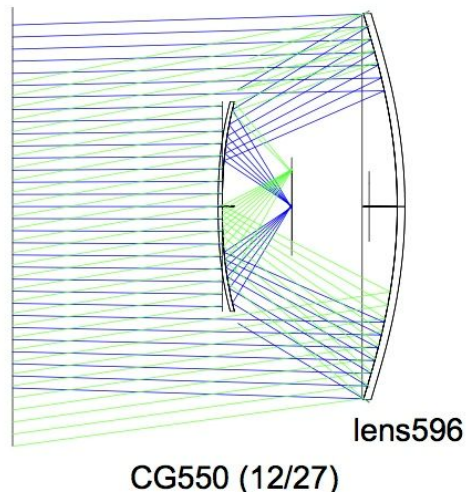
4. 研究成果

(1) 入射ガンマ線が高エネルギー反応によって検出される、シンチレータ部分の開発を2017年度に行った。特にガンマ線の方向検出においては、ガンマ線のシンチレータ内での反応部分を最適化することが、大きな開発要素であった。そして、その開発には、研究室の既存の設備であるワークステーションおよび高エネルギーシミュレーションキット「Geant4」のみが必要であるため、2017年度は、この開発を行った。コンプトン散乱事象から、ガンマ線の到来方向を決定する「コンプトンカメラ」では、コンプトン散乱を正確に再現することに重点をおき、エネルギー分解能の高い半導体検出器を用い、最初の反応がコンプトン散乱、2番目の反応は光電吸収である事象のみを選ぶ方法をとることが多い。しかしそれでは検出効率が非常に低い。本研究では検出効率の高いカメラを設計することが大きな目標なので、2番目の反応もコンプトン散乱で、多重コンプトン散乱の後、最後には全エネルギーをシンチレータに付与する事象も取得することを目指している。そういった目的に合うもっとも効率的なシンチレータの形状として、一辺 30 cm の立方体のシンチレータボックスが最適であることが示された。それを作成、準備し、コバルト 60 線源の保持機構なども準備した。

(2) ガンマ線の反応で生成した光子を結像させる部分の設計を、2018年度以降行った。光学設計ソフト Zemax OpticStudio と、それを稼働させるパソコンを購入し、ガンマ線イメージング検出器用の反射鏡結像系の設計を行った。また、ガンマ線検出器の別のオプション用として、CsI シンチレータを購入した。CsI は、計画当初の1体のものから変更し、1cm 立方のもの4個を購入した。Zemax OpticStudio の購入費用が見積もり時より増えたための調整である。そのため、粒子シミュレーションも一部やり直して、全体として、現在手元にあるシンチレータと光検出器の組み合わせによるガンマ線カメラの設計が完成した。4つのCsIの配置を工夫することで、コンプトン散乱を起こす部分、その後の2次ガンマ線を全吸収して全エネルギーを測定する部分を、別のシンチレータに行わせることにより、より鮮明な画像と、その再構成を目指すデザインとなった。

(3) 光学設計ソフトの購入を、当初1年目の予定だったものを2年目にしたため、光学系の設計に関しては遅れていた。2017度の予算を一部繰り越して、2018年度、光学設計ソフト、パソコンの購入を完了し、光学系の設計を行ったため、遅れは取り戻せた。また、ガンマ線検出用のCsIシンチレータも予算内で購入できるものを見つけて購入したため、最終2019年度に検出器の作製、測定を行うことができた。

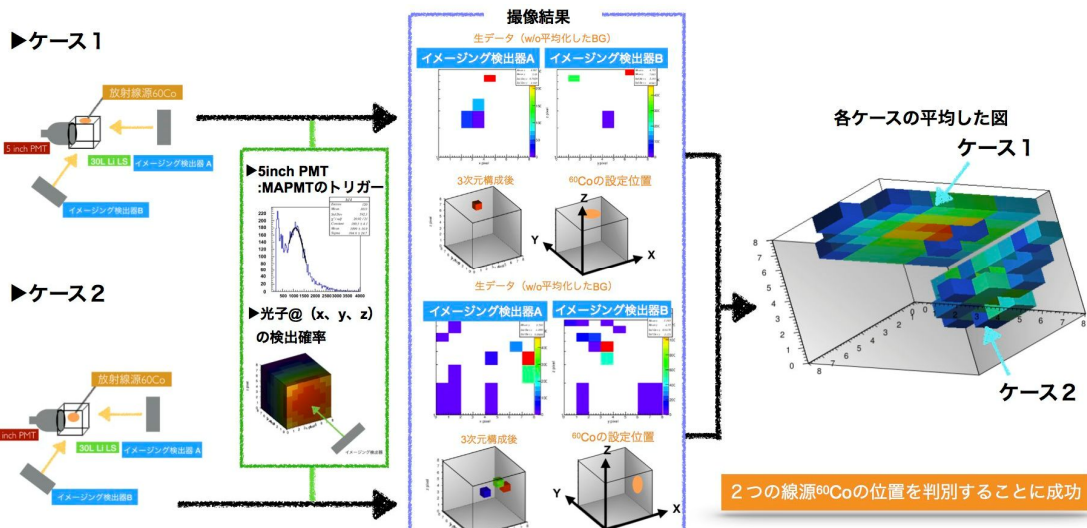
(4) 右図は、今回設計された結像系の OpticStudio によるシミュレーションの結果である。直径約 30 cm の「主鏡」と、より小さい「第二ミラー」の 2 回反射で結像させるものである。視野内中央（光軸と平行に到来した光）と、視野の端（カメラへの入射角度が、光軸に対して約 10 度）の光源に対する結像の様子である。このような比較的大視野で、大アキュラシーで、しかも視野中央のみならず、視野の端においても、収差がある程度抑えられたシステムは、通常的设计思想では達成できなかった。つまり、非球面鏡にすることはもちろんだが、その中でも、よく用いられる 2 次曲線のものでは条件を満たすことはできなかった。そこで最大 16 次の多項式による「自由曲面」を取り入れ、パラメータ空間を網羅する形で解を探した。ここでは、OpticStudio ならではの能力が発揮され、結果的に条件を満たす系が設計された。



(5) 2019 年度は、これまでに設計したカメラと、シンチレータボックスを用いて、2 方向からガンマ線の画像を撮像する測定を行なった。ガンマ線は、コバルト 60 線源からのものを用いた。右図は、実際に作成された 2 つの「カメラ」（図中では、「イメージング検出器」と表記）と、「シンチレータボックス」からなる測定系である。図中の「5 inch PMT」は、通常の光電子増倍管で、補助的にエネルギーのみを精度よく計ること（パーテックスは検出できない）とデータ収集のトリガーのために用いた。



(6) 下図は、今回の測定の流れを示している。線源をシンチレータボックスの上面、側面に置いた 2 つのケース（図中、「ケース 1」「ケース 2」）について測定を行い、2 つのカメラと、5 inch PMT からのシグナルを統合して、事象を再構成した。



事象のパーテックス 3 次元再構成は、最尤法の考え方で行なった。すなわち、ある点でシンチレータが発光したと仮定して、2 つのカメラと 5 inch PMT への期待されるシグナルの確率密度を

計算し、実際に観測されたシグナルに対するそれらの関数の積(ライクリーフッド積)が最大となるような発光点を求めた。図中一番右側のプロットが、そのようにして求めた、再構成された発光点の3次元的な分布である。線源を置いた位置に対応する場所に発光点の分布が現れており、液体シンチレータ撮像によって、バーテックスが検出されたことを示している。

(7) この測定では、エネルギーと発光位置(バーテックス)を同時に特定し、将来のコンプトンカメラへと繋げて行くための解析を行なっている。そのためには、電荷較正が場所ごとに揃っていることが極めて重要になってくる。そこで、光を検出したマルチアノード光電子増倍(MAPMT)の電荷較正を慎重に行なった。全 64 チャンネルの較正を揃えるため、ほぼ確実に 1 光子事象と考えられる、熱電子などによる「ダークシグナル」を用いた。その取得のため、自己トリガーによるデータ収集システムの開発を行ない、較正データ収集に成功した。これらのデータ解析のため、ラップトップコンピュータを購入し、解析環境、ソフトを開発し、エネルギーおよびバーテックスフィッティングなどの解析体制を確立した。フィッティングのアルゴリズムは、これまで蓄積してきたデータに基づいた。液体シンチレータ中の一点で発光したと仮定したときの、各 MAPMT 素子の電荷量の期待値を計算し、その確率密度を最大化する発光点を求める、という標準的な方法に、検出器特有の補正を加えた。

(8) 以上のように、ガンマ線を液体シンチレータで検出したときの発光点を、3 次元的に再構成することに成功した。それによって液体シンチレータの撮像によるイメージングの原理検証が行なえた。さらに実際のデータでは、マルチコンプトン散乱によると思われる、複数箇所発光事象の候補も見つかり、コンプトン散乱を捉えて到来方向を検出する研究へと継続していく道筋も示された。

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 0件）

1. 発表者名 前村直哉
2. 発表標題 液体シンチレーターによる反電子ニュートリノ到来方向検出に向けた検出器の研究
3. 学会等名 新学術「地下宇宙」第6回超新星ニュートリノ研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 前村直哉
2. 発表標題 Detector study for electron anti-neutrino directional measurement in liquid scintillator 2
3. 学会等名 日本物理学会 第75回年次大会
4. 発表年 2020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