

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 5 日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24340033

研究課題名(和文) 小型衛星搭載用ガンマ線バースト偏光度検出器のプロトタイプ開発

研究課題名(英文) Prototype development of gamma-ray burst polarimeter for a small satellite

研究代表者

郡司 修一 (Gunji, Shuichi)

山形大学・理学部・教授

研究者番号：70241685

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,100,000円

研究成果の概要(和文)：発見以来様々な観測がガンマ線バーストに対して行われてきたが、未だそのエネルギー輻射メカニズムは解明されていない。しかし近年数例のガンマ線バーストの偏光観測から、その輻射メカニズムの解明に大いに偏光観測が役立つ事が分かった。そこでより大型で精度の良い偏光度検出器を開発を行っている。本研究では、新しく開発されたマルチアノード光電子増倍管やGAGGシンチレーターを用いて、散乱型の偏光度検出器のブレッドボードモデルを製作した。そして、デザインした検出器が30keVでも10%の検出効率と36%のモジュレーションファクターを獲得できる事が分かった。

研究成果の概要(英文)：Since 1960', many gamma-ray bursts have been observed with various observation methods. However, the radiation mechanism has been not clarified, yet. Recently, it is recognized by the observations of polarization for a few gamma ray bursts that the measurements of the polarization are useful for the clarification of the radiation mechanism. So we are developing larger polarimeter with higher sensitivity. It consists of multianode photomultiplier with ultra bialkali photocathode and GAGG scintillator and we have constructed the bread board model. From basic experiments and computer simulation, we recognized that it can obtain both 10% detection efficiency and 36% modulation factor even for 30 keV.

研究分野：宇宙物理学実験

キーワード：ガンマ線バースト 偏光 検出器

## 1. 研究開始当初の背景

(1)ガンマ線バーストは宇宙最大の爆発現象であり、1960年代の発見以来様々な観測が行われてきた。例えば1)ガンマ線バーストは遠方の宇宙で起こっている事、2)ガンマ線バーストには少なくとも継続時間から2つの種類がある事、3)光速の99.999%以上のスピードでジェット状に物体が吹き出している事などが過去の観測から分かっている。しかしながら、未だに未解明の部分も多くあり、特にガンマ線がどのようなエネルギー輻射メカニズムで放出されているのかという事がまだ解明されていない。もしその輻射メカニズムが明らかになると、超新星に代わってガンマ線バーストを遠方宇宙の新しいスタンダードキャンドルにすることができる。

(2)ガンマ線バーストのエネルギー輻射メカニズムとして、現在有力なモデルにシンクロトロンモデルとフォトスフィアモデルの2つが上げられる。どちらが正しいのかを見分けるには、ガンマ線の偏光観測が重要な鍵を握っている。そこで我々は金沢大学や理研のグループと共同で、超小型のガンマ線バースト偏光度検出器GAPを開発し、2010年に観測を開始した。その結果、3例のガンマ線バーストに対して、偏光観測に成功し、そのうちの2例では70%程度の偏光度が観測された。このことから、シンクロトロンモデルが有力である事が示唆できたが、まだ統計が足りないために、モデルの決定までには至らなかった。より多くのガンマ線バーストの偏光観測を行い、この問題に決着を付けるためには、より大型のガンマ線バースト偏光度検出器で、数十のガンマ線バーストの偏光観測を実現する必要がある。

## 2. 研究の目的

(1)以上の観測を実現するには、まずは高感度のガンマ線バースト偏光度検出器の開発が必要となる。研究代表者はGAPの開発に携わる以前に、気球搭載用の偏光度検出器の開発を行っていた。この検出器はGAP同様コンプトン散乱型の偏光度検出器であるが、散乱体がセグメント化されていることから、より偏光方向の検出を精度良く行える。そこで、我々は以前デザインした偏光度検出器をベースに、衛星搭載用のガンマ線バースト偏光度検出器を設計した。この検出器には、浜松フォトンクスで新しく開発されたR11265-200-M16というマルチアノード光電子増倍管やGAGGと呼ばれる比較的新しいシンチレーターを使用する予定だったため、まずはそれらの基礎性能を測定し、実際に4分の1サイズのブレッドボードモデルを製作する事を本研究の第一目的とした。

(2)一方で、開発した検出器を実際に搭載するプラットフォーム(衛星)が必要とされる。我々の検出器はおよそ20kgで検出面積が300cm<sup>2</sup>程度の検出器であり、必要に応じて台数を増やすという方法を採用した。それは

20kg程度の重量であれば、すでに計画が立案されている衛星に相乗りする事が可能となるためである。そこで研究代表者は、国内外の衛星計画を持っている研究者にコンタクトを取り、我々の検出器の性能や特徴などを説明し、我々の検出器の搭載を承認してもらう事をもう一つの目的とした。

## 3. 研究の方法

(1)偏光度検出器の性能を向上させるには、検出効率と偏光解析能力(モジュレーションファクター)の2つを同時に向上させる事が非常に重要である。特に前者はプラスチックシンチレーターでの低エネルギーデポジットをマルチアノード光電子増倍管でどの程度検出できるのかという事に大きくよる。そのため、まずはプラスチックシンチレーターでの低エネルギーデポジットの読み出し実験を行った。次にGAGGシンチレーターにアバランシフोटダイオードを取り付け、30keV程度のエネルギーデポジットを読み出す実験を行った。以上の2つの基礎データからgeant4というコンピューターシミュレーションを使って、我々のデザインしている検出器の検出効率とモジュレーションファクターを調べる事を行った。

(2)4分の1の大きさのブレッドボードモデル検出器を製作し、マルチアノード光電子増倍管、アバランシフोटダイオード、シンチレーター等をどの様に固定するのか、また光学デバイスからの信号をどの様に読み出すのかを検討した。またエンジニアリングモデルを製作する上で、どのような問題点が存在するのかをこの段階で洗い出すことを行った。そして、ガンマ線を実際に照射し、信号が読み出せるのかを実験的に調べた。

(3)国内では小型衛星プロジェクトであるPolarisに、国外ではSMEX(Small Explorer Mission)プロジェクトであるIXPE衛星のグループとコンタクトを取った。そして我々の検出器の搭載可能性に関して、検討を行った。

## 4. 研究成果

(1)大きさが1.45×1.45×6cm<sup>3</sup>のプラスチックシンチレーターをR11265-200-M16のマルチアノード光電子増倍管に取り付け、そこに5.9keVのX線を照射し、どの程度そのエネルギーデポジットが取得できるのかを実験的に調べた。以下の図1がそのパルスハイトスペクトルである。この図を見て分かるように5.9keVのピークはノイズから分離できている事が分かる。このパルスハイト分布をポアソン関数でフィットし、そのフィットの結果から光電子増倍管のフォトカソードから出てきた光電子の数を調べた。そして、そのデータを基に他のエネルギーがシンチレーターに入射した時にどのようなパルスハイト分布になるかを予想した。そして、図1に示されたスレッショールドの場合に、各エネルギーに対して何%の確率でエネルギーデポジ

ットが検出できるのかを調べた。それが図 2 である。この図を見て分かるとおり、およそ 2keV のエネルギーデポジットしか無かった場合でさえも、60%以上という検出効率を得られる事が分かった。

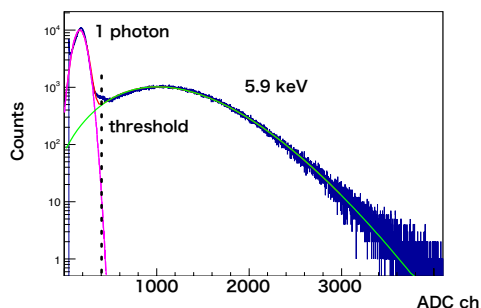


図 1: 横軸は ADC チャンネル、縦軸はカウント数である。1000 チャンネル付近にあるピークが 5.9keV のピークに相当する。緑色の線はフィッティングである。

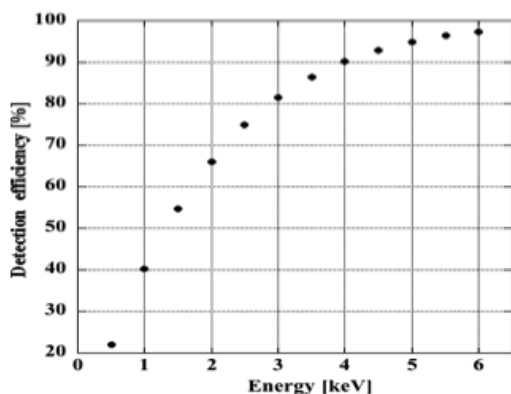


図 2: 横軸はプラスチックシンチレーターに落ちたエネルギー、縦軸は検出効率である。わずか 2keV のエネルギーデポジットも 60%以上の検出効率を得られている。

(2) 大きさ  $0.6 \times 1.45 \times 6.0 \text{ cm}^3$  の GAGG シンチレーターに S8664-55 というアバランシフォトダーオードを取り付け、22keV のガンマ線を照射してエネルギースペクトルを取得した。それが図 3 である。このデータは室温 (20 度) で取得している。実際にアバランシフォトダイオードは冷やすとノイズが急激に下がる事が知られており、衛星環境ではより低温で動作させる予定である。この様に室温ですでに 22keV のピークがはっきり見えている。

(3) 以上 2 つの基礎データを使って、geant4 によるシミュレーションを行った。そして、各々のエネルギーに対して検出器がどの程度の検出効率とモジュレーションファクターを得られるのかを調べてみた。その結果が図 4 に示されている。我々の設計した検出器の結果が青と赤い点で示されている。一方点線は GAP の結果である。また青が検出効率、赤がモジュレーションファクターを表している。図 4 から分かる様に、検出効率もモジュレーションファクターも両方とも GAP に比べて遥かに向上しているのが分かる。

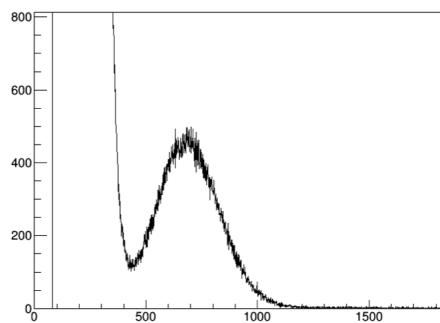


図 3: 700 チャンネル付近に存在するピークが 22keV のピークである。

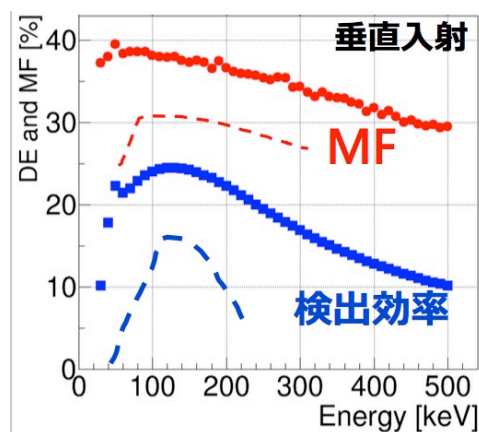


図 4: 横軸がエネルギー、縦軸が検出効率とモジュレーションファクターである。点線は GAP の値であり、点が我々がデザインしている検出器である。

(4) GAGG は今まで宇宙の実験で使われた事がない。従ってその放射化に関して詳しい事が分かっていない。そこで、我々は重粒子照射施設 HIMAC で、GAGG 結晶等主要な結晶にプロトンを照射し、その放射化の影響を調べた。その結果が図 5 に示されている。この図は横軸に衛星を打ち上げてからの時間、縦軸に予想される放射化によるカウントレート (相対値) である。この図を見て分かるとおり、GAGG が GSO や CsI に比べて放射化によるバックグラウンドレートが低いことが分かる。

(5) ガンマ線バーストが検出器の真正面では無く、ランダムな方向から入射したと仮定して、検出器が 1 年間で何個程度のガンマ線バーストに対して偏光を観測できるのかをフルシミュレーションを行って調べてみた。その結果が、図 6 に示されている。横軸は偏光度であり、縦軸は偏光検出が行えたガンマ線バーストの数である。この図で分かる様にもし磁場の揃ったシンクロトロンモデル (S0 モデル) が正しいのなら、年間 8 発程度 40%程度偏光したガンマ線バーストが検出される。一方フォトスフィアモデルが正しい場合には、偏光が有意に検出できるガンマ線バーストは見つからないという結果になる。この事から 1 つの検出器でも 4 年程度観測すれば、どちらのモデルが正しいかの判別が行える。

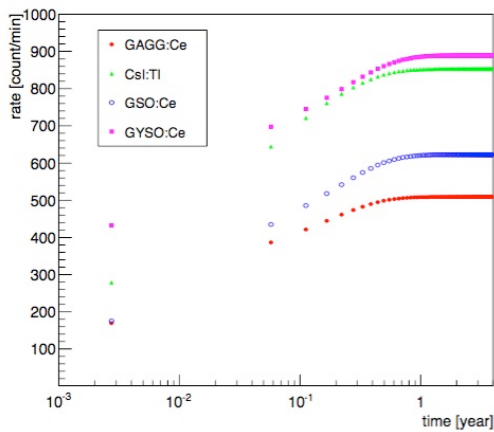


図5：横軸は打ち上げからの時間、縦軸は放射化による予想バックグラウンドレート(相対値)である。4つのシンチレーターに対して調べた所、GAGGシンチレーターが一番放射化が少なかった。

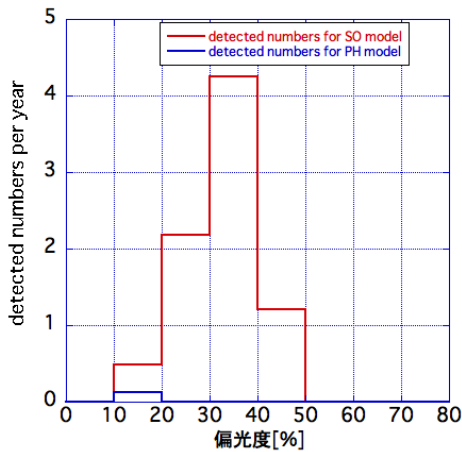


図6：横軸が偏光度。縦軸が年間に偏光度が検出できるガンマ線バーストの数。

6) 4分の1サイズの検出器を製作し、組み立てる際の問題点を調べるため、ブレッドボードモデルの製作を行った。

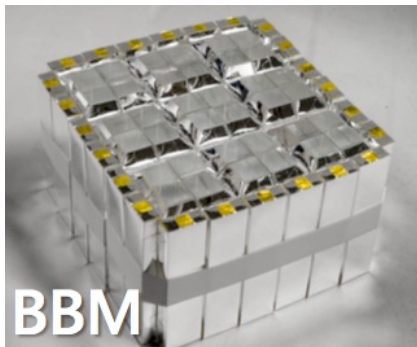


図7：シンチレーターを束ねた写真

図7と図8がブレッドボードモデルの写真である。図7はプラスチックシンチレーター36本とGAGG24本を束ねたところである。シンチレーターは全てESRという反射材を使っている。またこれらのシンチレーターにマルチアノード光電子増倍管とアバランシフォト

ダイオードを取り付けた写真が図8である。アバランシフォトダイオードからの信号の取り回しあまりうまくいっておらず、ノイズが乗りやすい事が判明している。エンジニアリングモデルの製作の段階では、ここを修正する予定である。



図8：光学素子も全部取り付けたところ

7) 検出器を載せるためのプラットフォームとして当初PolarisとIXPEを考えていたが、検出器16台を宇宙ステーションに搭載するという方向でNASA/MSFCとコラボレーションすることになった。このプロジェクトはLEAPと呼ばれていて、現在日本で10名程度の研究者がこのプロジェクトに参加する事となった。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4件)

- ① M. Sakano, T. Nakamori, S. Gunji, and et al., "Estimating the radiative activation characteristics of a  $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}:Ce$  scintillator in low earth orbit", 査読有り, Jinst, 2014, Vol. 9 pp10003-10013
- ② S. Gunji et al. "The development of gamma-ray burst polarimeter for a small satellite", 査読無し, SPIE, 9144, doi: 10.1117/12.2054708 (2014, July)
- ③ K. Hayashida, S. Gunji, and et al., "X-ray gamma-ray polarimetry small satellite Polaris", 査読無し, SPIE, 9144, doi: 10.1117/12.2056685, (2014, August)
- ④ D. Yonetoku et al., "High-z gamma-ray bursts for unraveling the dark ages mission HiZ-GUNDAM", 査読無し, SPIE, 9144, doi: 10.1117/12.2055041 (2014, July)

[学会発表] (計 15件)

- ① 岸川達哉, "小型衛星搭載用GRB偏光度検出器の開発と性能評価", 日本物理学会, 2015年3月24日, 早稲田大学
- ② 中森健之, "小型衛星用ガンマ線バーストの硬X線偏光計の開発と現状", 日本天文学会, 2015年3月18日, 大阪大学
- ③ S. Gunji, "The development of

gamma-ray burst polarimeter for a small satellite”, SPIE, 2014年6月24日, モントリオール・カナダ

- ④ 郡司修一, “小型衛星搭載用ガンマ線バースト偏光度検出器の予想される性能”, 日本物理学会, 2014年9月20日, 佐賀大学
- ⑤ 岸川達哉, “小型衛星搭載用GRB偏光度検出器の筐体設計と衝撃振動試験結果”, 日本物理学会, 2014年9月20日, 佐賀大学
- ⑥ 中森健之, “小型衛星搭載用ガンマ線バーストの硬X線偏光計の開発”, 日本天文学会, 2014年9月12日, 山形大学

〔図書〕 (計 0件)

〔産業財産権〕

○出願状況 (計 0件)

○取得状況 (計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://xpolar.kj.yamagata-u.ac.jp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

郡司 修一 (GUNJI Shuichi)

山形大学・理学部・教授

研究者番号：70241685

### (2) 研究分担者

### (3) 連携研究者

岸本祐二 (KISHIMOTO Yuji)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・助教

研究者番号：50583481

米徳大輔 (YONETOKU Daisuke)

金沢大学・理学部・准教授

研究者番号：40345608

三原建弘 (MIHARA Tatehiro)

理化学研究所・MAXI チーム・先任研究員

研究者番号：20260200