

令和元年6月10日現在

機関番号：11501

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2015～2018

課題番号：15H02080

研究課題名(和文)ガンマ線バーストの輻射メカニズムを説き明かすための偏光度検出器の開発

研究課題名(英文)Development of GRB polarimeter for elucidation of the radiation mechanism

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) 33,100,000円

研究成果の概要(和文)：宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バーストから、どのようなメカニズムでガンマ線が出てくるのかは未だ謎である。その問題の解決にはガンマ線の偏光観測が有効である。しかし光と異なりガンマ線の偏光は未だ測定が難しい。そこでガンマ線がコンプトン散乱される際の異方性を利用した高性能のコンプトン散乱型ガンマ線偏光度検出器を2種類開発し、その性能を評価した。片方は2次元的なガンマ線の散乱方向を測定するタイプのもので、後者は3次元的な情報を取得できる。前者では3000cm<sup>2</sup>程度のものを製作すれば2年間の観測でガンマ線バーストの輻射メカニズムを明らかにできる事が分かった。後者はコンプトンカメラとして働く事が分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ガンマ線バーストは大変面白いので、その輻射メカニズムの詳細が分かると、遠方宇宙を探るための優れたプローブとなりうる。そのため、その輻射メカニズムを解明できるガンマ線バースト偏光度検出器の開発は宇宙論の分野において非常に重要である。今回我々が開発したプロトタイプ検出器を大型化すれば、輻射メカニズムの解明に大きく迫れるため、今後アメリカなどと共同でして、実際の衛星実験につなげていきたい。

研究成果の概要(英文)：The radiation mechanism of gamma rays from gamma ray bursts is still in the mystery. For the elucidation, the observation of the polarization is very useful. However, it is more difficult to detect the polarization of gamma rays than of visible light. Then utilizing the principle of anisotropy for Compton scattering, we have developed two types of Compton scattering polarimeters with high sensitivity and investigated the performance. The former one can only measure the two-dimensional scattering direction and the latter one can obtain the information on the three-dimensional scattering direction. It was recognized that the former one with geometrical area of 3000cm<sup>2</sup> can elucidate the radiation mechanism of the gamma ray bursts in two years observation. For the latter one, we confirmed that it can operate as a Compton camera.

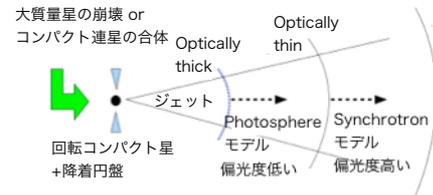
研究分野：高エネルギー宇宙物理学

キーワード：ガンマ線バースト 偏光度検出器 コンプトン散乱

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19(共通)

### 1. 研究開始当初の背景

ガンマ線バースト(GRB)は宇宙最大の爆発現象であり、現在では 131 億光年( $z \sim 8.2$ )離れた事象も発見されている。今後観測が進めば、 $z > 10$  の GRB も観測可能となるはずである。この  $z > 10$  の時代は宇宙の歴史をひも解く上で、非常に重要な時代である。宇宙の中性化が起こった  $z \sim 1000$  の宇宙は WMAP 衛星により精密に測定されており、その時代には星や銀河は存在しないことが分かっている。一方  $z$  が 6~7 程度では、光の観測から若い銀河が多数発見されている。つまり、その中間の時代(宇宙暗黒時代)に星や銀河の形成が起こった事を意味している。そのため宇宙暗黒時代を詳細に研究する手段として、GRB に大きな期待が寄せられている。しかし、GRB をスタンダードキャンドルとした研究を行うには、GRB の放射メカニズム、ひいては GRB の絶対光度を知る必要がある。そのため現在までに様々な観測が行われ、図のような GRB の描像が確立されてきた。そして現在ガンマ線の放射メカニズムは Photosphere モデル(PH モデル)か Synchrotron モデルのどちらかだという所まで絞り込まれた。そのモデルの判別の鍵を握るのがガンマ線の偏光観測である(Toma et al. Ap.J. Vol.698, pp1042, 2009)。PH モデルでは、ジェット状に放出された火の玉が、下流に動いていくにつれて光学的に薄くなり、そこからガンマ線が漏れ出すというモデルである。このガンマ線は基本的には熱的であるため、偏光度は低くなる。一方 Synchrotron モデルでは、より下流に動いていった火の玉の内部で速度差による追衝突が生じ、そこで生じた衝撃波により電子が熱化され、その電子が磁場に巻き付いてシンクロトロン放射を起こすというものである。従って磁場が揃っていれば、強い偏光が観測される事になる。実際に研究代表者が開発に貢献した GAP という超軽量(3.9kg)の GRB 偏光度検出器(Yonetoku et al. PASJ Vol.63, pp3, 2011)では、3 発の GRB に対して世界で初めて精度の良い偏光観測を実現した(Yonetoku et al. Ap.J. Vol.753 ppL1, 2012)。そして 3 発中 2 発の GRB に対して、強い偏光度が観測された。その事を考えれば、磁場の揃った Synchrotron モデル(SO モデル)が最も有力だが、2 例では確実な事が言えない。より多くの GRB の偏光観測が行われれば、どちらのモデルが正しいのか決着を付けることができる。そのため、高性能のガンマ線バースト偏光度検出器の開発及び、それによるガンマ線バーストの観測が待ち望まれていた。



### 2. 研究の目的

我々は以下の 4 つのステップを踏むことにより、ガンマ線バーストの放射メカニズムを明らかにしたいと考えている。第一段階は、プロトタイプ検出器を開発し、その性能を実験的に実証する事である。そして第二段階は具体的なプロジェクトを立ち上げ打ち上げの機会を確保することである。第三段階はプロトタイプ検出器のデザインを基にしたフライトモデルを製作する事である。そして第四段階は実際の偏光観測を行うことである。本研究では、第一段階と第二段階突破する事を当初の目的としていた。しかしながら以下で説明するように、プロポーザルの不採択などから研究自体はストレートフォワードには行われず、第二段階を完全に突破する事は現在まだできていない。しかし第二段階を突破するために、我々は 3 種類のガンマ線バースト偏光度検出器の開発を行ってきた。その意味で第一段階の目的に関しては、12 分の成果を上げたと考えられる。

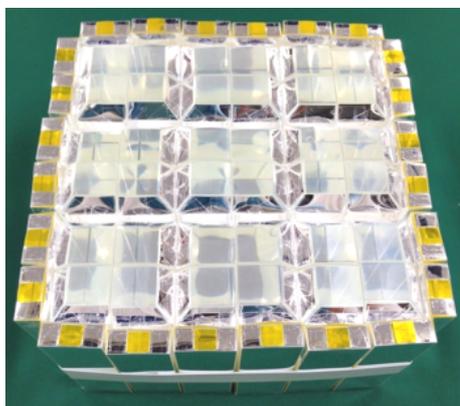
### 3. 研究の方法

主に我々が本研究費で行ってきた研究は 3 つのフェーズに分かれる。それぞれのフェーズでどのような活動や研究が行われてきたかを以下に示す。

1)2014 年 4 月~2017 年 9 月まで

我々は国際宇宙ステーションに大型のガンマ線バースト偏光度検出器を搭載するため、2014 年から NASA/MSFC と共同研究をスタートした。搭載する検出器は、山形大学が今まで開発してきた偏光度検出器をベースとしたものだった。そしてプロジェクトの名前を LEAP(LargE Area Polarimeter)として、2016 年 12 月に公募される Mission of Opportunity に向けて開発を続けてきた。下の 2 枚の写真が、我々が開発したガンマ線バースト

偏光度検出器である。この検出器は 2 種類のシンチレーターを使ったコンプトン散乱型の偏光度検出器であるが、左の写真は散乱体であるプラスチックシンチレーター 36 本の周りを 24 本の

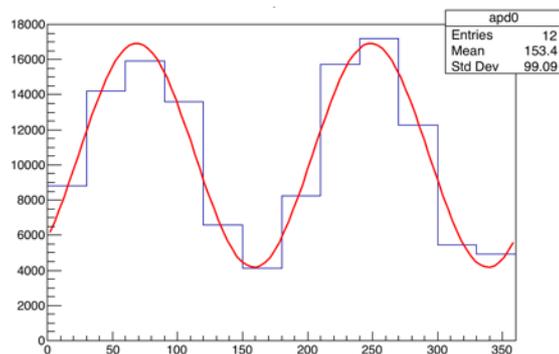


GAGG(Ce)シンチレーターが囲んでいる写真である。さらにこのシンチレーターにマルチアノード光電子増倍管やアパランシフォトダイオードを取り付け、読み出し回路と一緒に筐体に収めた写真が右に示されている。またこの検出器に偏光ビームを照射し、その性能を調べたものが次のページのグラフである。横軸がガンマ線の散

乱角度で縦軸がそのイベント数に相当する。この図ではコンプトン散乱の異方性が綺麗に見えており、40%程度のモジュレーションファクターが得られている事が分かる。

以上のように検出器の開発自体は順調に進んでいたが、2015 年後半にニューハンプシャー大学が LEAP プロジェクトに加わり、彼らも独自にガンマ線バースト偏光度検出器を開発していたため、山形で開発していた検出器とニューハンプシャー大学で開発していた検出器のどちらをベースにするか議論が行われた。性能自体は山形で開発していた検出器の方が高かったが、ニューハンプシャー大学で開発していた検出器の方が

TRL(Technology Readiness Level)が高かったため、最終的にはニューハンプシャー大学の検出器をベースにすることとなった。その間に研究代表者は、日米協力を強化するために、山形大学を中心とする日本側の研究グループを作り、宇宙科学研究所の中に LEAP ワーキンググループを設立した。また山形大学で開発されていたタイプの検出器が LEAP に採用されないことが決まった後も、ニューハンプシャー大学で開発されてきた検出器の性能をシミュレーションから明らかにする研究を geant4 等の放射線のシミュレーターを使って行った。そしてニューハンプシャー大学、NASA/MSFC、日本のコンソーシアムで 2016 年の 12 月に Mission of Opportunity にプロポーザルを提出した。しかしながら、2017 年の夏にプロポーザルが通らなかったという知らせを受けた。レフリーのコメントには、「物理的な意義は高く評価できるが、国際宇宙ステーションに載せる際の質量のマーヅンが十分ではない。またバックグラウンド等の評価が十分でない。」とコメントされていた。



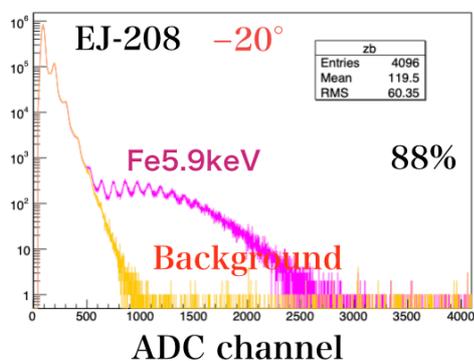
TRL(Technology Readiness Level)が高かったため、最終的にはニューハンプシャー大学の検出器をベースにすることとなった。その間に研究代表者は、日米協力を強化するために、山形大学を中心とする日本側の研究グループを作り、宇宙科学研究所の中に LEAP ワーキンググループを設立した。また山形大学で開発されていたタイプの検出器が LEAP に採用されないことが決まった後も、ニューハンプシャー大学で開発されてきた検出器の性能をシミュレーションから明らかにする研究を geant4 等の放射線のシミュレーターを使って行った。そしてニューハンプシャー大学、NASA/MSFC、日本のコンソーシアムで 2016 年の 12 月に Mission of Opportunity にプロポーザルを提出した。しかしながら、2017 年の夏にプロポーザルが通らなかったという知らせを受けた。レフリーのコメントには、「物理的な意義は高く評価できるが、国際宇宙ステーションに載せる際の質量のマーヅンが十分ではない。またバックグラウンド等の評価が十分でない。」とコメントされていた。

## 2)2017 年 9 月～2018 年 6 月まで

プロポーザルが通らなかった事を受けて、LEAP のメンバーで議論した結果、国際宇宙ステーションの正式運用は 2024 年までであり、もう一度軽量化を施した検出器を国際宇宙ステーションに搭載するというプロポーザルを出しても、実現可能性が低くなるという結論となった。そして国際宇宙ステーションでは無く、小型衛星に搭載できる検出器を提案する方向性が打ち出された。しかし小型衛星の場合重量制限がより厳しいため、今までの 2 次元的にシンチレーターを並べる検出器ではなく 3 次元的にシンチレーターを積層しコンプトンカメラが製作できないかという議論になった。そこで、2017 年から山形大学とニューハンプシャー大学で、プラスチックシンチレーターと CsI(Tl)シンチレーターを 3 次元的に積層したコンプトンカメラを各々開発し、実用化が可能かを独自に調査した。3 次元的にシンチレーターを積層し、そこからの信号を個別に読み出すには、薄型の光センサーが必要である。このような光センサーとして浜松ホトニクス社から Multi Pixel Photon Counter(MPPC)というデバイスが近年開発されたので、プロトタイプ検出器への利用の可能性を基礎実験から探った。右の写真は中心にプラスチックシンチレーターが位置し、4 方を CsI(Tl)シンチレーターが囲んだシンプルな検出器であるが、全てのシンチレーターには MPPC が取り付けられており、そこから信号が取得できる。まずはこのプロトタイプ検出器を使って、MPPC がプラスチックシンチレーターや CsI(Tl)のフォトセンサーとして利用できるかを調べた。その結果、マイナス 20 度に冷却すれば、MPPC からのノイズが減り、5.9keV 程度のエネルギーデポジットをプラスチックシンチレーターから読み出せる事が実験から分かった(右図参照)。またプラスチックシンチレーターと



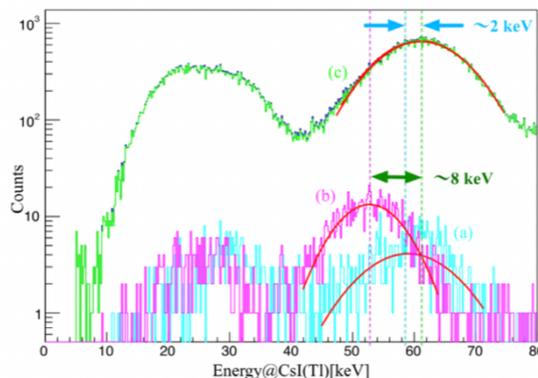
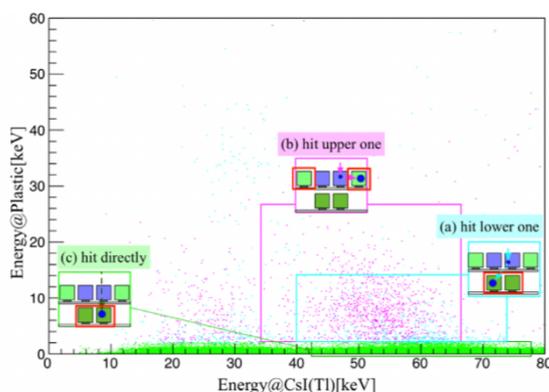
CsI(Tl)とのコインシデンスを取ると、さらにノイズが低減され、1.5keV 相当のエネルギーデポジットも読み出せる事も実験から実証できた。そこで我々は次にプラスチックシンチレーターと CsI(Tl)シンチレーターを 2 層に積層し、その全てに MPPC を取り付けられた非常に小型のミニコンプトンカメラを製作した。これが次のページの写真に示されている。写真には 1 層目だけが写っており、中心の白いテフロンテープで巻かれた 4 つのシンチレーターが 1cm キューブのプラスチックシンチレーターである。またその周り 8 個が 1cm キューブの CsI(Tl)シンチレーターである。各々下側には MPPC が取り付けられている。そして MPPC の信号は、基盤に取り付けられた抵抗やコンデンサを介して、後段の回路に導かれる。また写真には写っていないが、2 層目は、4 つの CsI(Tl)が取り付けられており、1 層目のプラスチックシンチレーターの直ぐ下に設置されている。この回路基板は、通常の基板に比べ 8 倍薄く、数 10keV のガンマ線であれば、ほぼ 100%透過する。



以上の様に4つのプラスチックシンチレーターを12個のCsI(Tl)シンチレーターで立体的に囲み、ミニコンプトンカメラを製作した。そして実際に60keVのガンマ線を照射して、その性能を調べた。その様子が以下の図に示されている。左図の横軸は散乱ガンマ線を吸収したCsI(Tl)シンチレーターのエネルギーデポジットであり、縦軸は入射ガンマ線が散乱されたプラスチックシンチレーターでのエネルギーデポジットである。まず、緑の点はガンマ線がプラスチックシンチレーターで散乱されず、2層目のCsI(Tl)に直に吸収されてしまったイベントである。そして水色の点は、プラスチックシンチレーターで散乱されて、2層目のCsI(Tl)で吸収されたイベントである。最後にピンク色の点はプラスチックシンチレーターで散乱されて、1層目のCsI(Tl)でその後吸収されたイベントである。そして、この3つの点を全てx軸方向に射影したのが、以下の右図である。この図を見るとCsI(Tl)のエネルギースペクトルのピーク位置が3つの場合でずれている事が分かる。これは、プラスチックシンチレーターでの散乱角度を反映したもので、角度分解能はそれほど高くはないが、コンプトンカメラとして動作している事を意味している。



以上の実験から、2種類のシンチレーターをMPPCに取り付けて積層し、マイナス20度に冷やして動作させれば、コンプトンカメラとして働く事が分かった。しかし、MPPCはまだ宇宙空間で安定に動作した実績がない。



そこで、放射線医学総合研究所でプロトンをMPPCに照射し、ダークカレントがどのように増加するのかを調べる実験を行った。一番最初の実験では5年間の衛星実験で受ける放射線ダメージをMPPCに与えて、そのときのダークカレントを測定した。しかし照射後ダークカレントが数千倍に増えてしまい、プラスチックシンチレーターからの微少なエネルギーデポジットは読み出せなかった。そこで様々に条件を変えながら、そのダークカレントの増加の様子を調べた。

・電源 ON と OFF での違い

前回の実験ではMPPCの電源をONにした状態のままプロトンをMPPCに照射した。しかし実際に上空に上がった際には、プロトンを大量に受けるのはSouth Atlantic Anomaly(SAA)を通過する時だけである。もしSAA通過中は電源をOFFにして運用するのであれば、電源をOFFにした状態でのダメージを調べるべきである。そこで、電源をOFFにした状態で同様の実験を行い、その後電源をONにしてダークカレントがどの程度増えたか調べてみた。しかしながら、ONの状態でも照射してもOFFの状態でも照射しても結果が変わらなかった。

・高フラックスと低フラックスでの違い

宇宙空間でプロトンを浴びる場合には5年間程度の間には浴びるが、地上で実験を行っている際には10分程度で照射を終える。もし低フラックスであるほどダメージが少ないという結果が得るのであれば、地上実験ではダメージが大きい地上ではそれほどでもないという結果となる。そこでプロトンビームを照射する際に、トータルドーズは同じであるがフラックスを30倍程度変えて、実験してみた。しかしながら、ダークカレントの増加はフラックスには関係なく、トータルドーズだけに依存していた。

・メーカーを変えてみる

現在浜松ホトニクスで販売されているMPPCという検出器は、他のメーカーでもSiPMという名前で販売されている。そこで、SensL社が販売しているSiPMと浜松ホトニクス社のMPPCで放射線耐性に大きな違いがあるのかビームを照射して調べてみた。しかし、照射条件が同じであればほぼ同程度のダークカレントの増加量が観測された。

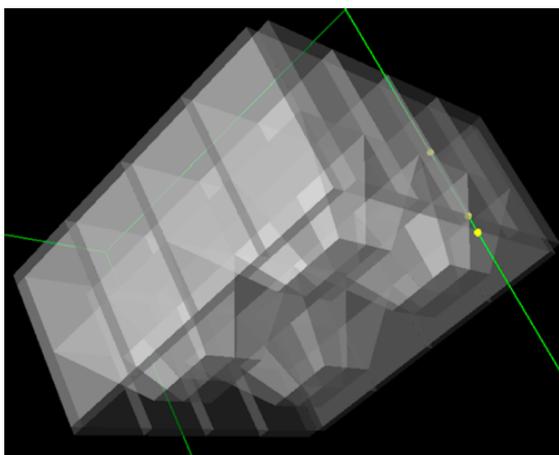
・アニーリングの効果

半導体検出器の場合、一時的に検出器の温度を上げると格子欠陥が修復されて、放射線で劣化した検出器の性能が回復することがある。MPPCも半導体検出器であり、そのような事が可能かもしれないため、実際に放射線でダメージを受けたMPPCを1時間程度60度、80度、120度でアニーリングした。確かに120度程度まであげてアニーリングを行った後は、ダークカレントが60%程度に落ちたが、精々この程度であり、効果は薄かった。

以上の様に様々な実験を行ってはみたが、5年間上空でMPPCを運用すると、そのダークカレントは数千倍になってしまう事が分かった。そしてダークカレントが数千倍に上がるとプラスチックシンチレーターでは60keVのエネルギーデポジットもノイズに埋もれて読み出せなくなる。以上の実験から、シンチレーターを3次元的に積層してコンプトンカメラを作るというアイデアは実現不可能である事が分かった。しかしながら、数週間程度の気球実験を行うのであれば問題無い事やCsI(Tl)シンチレーターとMPPCの組み合わせであれば、ノイズが数千倍に増えても30keV程度のエネルギーデポジットは読み出せるという事も同時に分かった。

### 3)2018年7月～2019年3月まで

以上で説明した様に、LEAPプロジェクトの先行きがかなり不透明になったため、以前から水面下で進めていた別プロジェクトへの検出器の搭載を考えた。以前自分はソーラーセイルのIKAROSにGAPという小型のガンマ線バースト偏光度検出器を搭載するプロジェクトに参加していたが、IKAROSの後継機としてOKEANOSというプロジェクトが現在検討されている。そしてOKEANOSにもGAPの後継機であるGAP2を搭載する機会が与えられたので、GAP2への搭載を検討することとした。しかしGAP2の場合も5kgという非常に厳しい重量制限がある。しかし、GAPの時とは違い、14年間の運用期間が与えられる。小さいながらも観測時間を稼げば、多くのガンマ線バーストに対して偏光測定が可能となる。しかしGAPに比べて数倍性能を向上させないと、100例弱のガンマ線バーストに対して偏光観測は不可能となる。そこで、5kgという制限の中でGAPと比べて4倍程度性能を向上すべく、コンピューターシミュレーションを使って検出器のデザインを行った。以下の左図が、geant4と呼ばれるコンピューターシミュレーションを使って検出器のジオメトリーを構築したものである。今まで開発してきた検出器同様、中心にセグメント化されたプラスチックシンチレーターが配置されており、その周りにはCsI(Tl)シンチレーターが置かれている。またプラスチックシンチレーターはマルチアノード光電子増倍管によって信号が読み出され、CsI(Tl)は小型の円形の光電子増倍管によって信号が読み出される。光学デバイス同士が干渉しないようにするため、プラスチックシンチレーターの形状は今までと違い、かなり複雑な形をしている。またシンチレーターの高さは今までの検出器に比べて2分の1程度にしてあるため、300keVを超えるガンマ線には感度は低いが、シンチレーターを小さくして微弱な光の集光効率を高めたため、30keVでも8%程度の検出効率を確保することができた。そして高さを削った分、面積を大きくすることができたために、結局GAPに比べて4倍程度MDPを下げる事ができると期待できる。そこで、実際にこの検出器が構造的に製作可能かという事を調べるために、検出器の一部を実際に製作したものが、以下の右の写真である。プラスチックシンチレーターの形状を最適化したため、検出器部品が干渉すること無く、綺麗に並んでいることが分かる。



## 4. 研究成果

以上で述べた様に、3つの時期でそれぞれの衛星計画に最適な検出器の設計及び開発を行ってきた。そこでそれぞれの時期における研究成果を以下に要約して述べる。

### 1)2014年4月～2017年9月:

この時期には宇宙ステーションに搭載を目指して、プラスチックシンチレーターとGAGG(Ce)シンチレーターでできたガンマ線バースト偏光度検出器を開発した。この検出器は50keV～1MeV程度までに感度を持ち、2年間程度で100個弱のガンマ線バーストに対して偏光観測が行える事が分かった。これにより、ガンマ線バーストの輻射メカニズムに制限を加えられることが分かった。

### 2) 2017年9月～2018年6月:

シンチレーターの受光デバイスとしてMPPCが利用できるかを調べた。その結果、-20度程度に冷やせばノイズの影響を無視できることが分かった。そしてシンチレーターを3次元的に積層して、各々のシンチレーターにMPPCを取り付ければコンプトンカメラを製作することも分かった。しかし、いまだMPPCの放射線耐性が十分でなく、数年間に渡って観測を行うと性能劣化が大きく進むことが分かった。しかし、我々とは違いプラスチックシンチレーターから信号を読み出すのでは無く、CsI(Tl)等の無機シンチレーターから信号を読み出す様な実験の場合、数年程度であれば宇宙で利用できることも分かった。この実験は現在小型衛星でMPPCを利用しようとしている他の研究者に大きな貢献をした事となる。

3) 2018年7月～2019年3月:

現時点で OKEANOS の打ち上げは決定していないが、もしこのプロジェクトが始動した場合には、以前開発した GAP とほぼ同じ重量で、4 倍程度性能向上が実現できる事が分かった。そして OKEANOS の場合、GAP に比べて 10 倍近い観測期間を有しているため、50 程度のガンマ線バーストに対して偏光観測が実現できる事が分かった。

#### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 3 件)

1) "Application of Silicon Photomultipliers to Compton-scattering-type Polarimeters for Gamma Ray Bursts", Y. Saito, S. Gunji, and et al.(9 人中 2 番目) IEEE NSS Conf. Rec. Accepted

2) "Readout Test of Plastic Scintillator with MPPC for the Development of Gamma-Ray Burst Polarimeter", S. Gunji and et al. (5 人中 1 番目) JPS Conference Proceedings 24 001009, 2019

3) "Evaluation of a Bread Board Model Gamma-ray Burst Polarimeter toward installation on the International Space Station", Y.Oikawa, S. Gunji and et al.(23 人中 2 番目) IEEE Conf. Rec. 2016

[学会発表](計 6 件)

1) "Application of Silicon Photomultipliers to Compton-scattering-type Polarimeters for Gamma Ray Bursts", Y. Saito, S. Gunji and et al., 2018IEEE NSS Conference, Sydney Australia

2) "Readout Test of Plastic Scintillator with SiPM for the Development of Gamma Ray Burst Polarimeter", S.Gunji et al., 2018 年 2 月 International Symposium of Radiation Detector 国際会議、高エネルギー物理学研究所

3) "ガンマ線バーストからのガンマ線偏光観測の現状と将来計画"、郡司修一、他、2017 年 11 月ガンマ線バースト研究の新機軸(招待講演)、東京大学宇宙線研究所

4) "LargE Area burst Polarimeter", S.Gunji et al., 2017 年 2 月 Cosmic Polarimetry from Micro to Macro Scales 国際会議(招待講演)、広島大学

5) "ガンマ線バースト偏光観測プロジェクト: LEAP"、郡司修一、他、2016 年 11 月縦偏光を用いる先端研究研究会(招待講演)、高エネルギー物理学研究所

6) "Evaluation of a Bread Board Model Gamma-ray Burst Polarimeter Toward Installation on the International Space Station", Y. Oikawa, S. Gunji and et al. 2016IEEE NSS Conference, Strasbourg France

[その他]

ホームページ等

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

#### 6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 中森 健之

ローマ字氏名: Nakamori Takeshi

所属研究機関名: 山形大学

部局名: 学術研究院

職名: 准教授

研究者番号(8 桁): 30531876

。