

## MPPC を用いた新型 GRB 偏光検出器の開発と性能評価

河合 謙太郎 (金沢大学大学院 自然科学研究科)

### Abstract

ガンマ線バースト (GRB) は 100 億光年以上遠方の宇宙で発生する宇宙最大の爆発現象であり、その偏光を観測することは、GRB 内部の磁場構造や、ガンマ線の放射メカニズムの解明につながる。IKAROS に搭載したガンマ線バースト偏光検出器 GAP により GRB から強い偏光が検出され、今後より詳細な偏光観測が望まれている。我々は 2020 年代前半の打ち上げを目標に計画されている木星圏探査用ソーラー電力セイルへの搭載を目指して、次世代の偏光検出器の研究開発を行っている。それが MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) を用いたマトリクス型偏光検出器である。散乱体が 1 つの GAP に比べ、複数の散乱体と吸収体を格子状に並べる形状になっており、偏光検出感度の向上が見込め、モジュール化で約 2 倍の性能となる。検出器の製作および、高エネルギー加速器研究機構で行った高い偏光度を持った放射光照射実験にて偏光の検出に成功し、実験とシミュレーションを比較し性能評価を行った。また、数 keV の低エネルギーガンマ線の検出を目指し、MPPC の読み出し環境の改良を行った結果について報告する。

## 1 はじめに

GRB は数秒～数十秒という短時間に大量のガンマ線を放出し、その総エネルギーは  $10^{52}$  erg にも達する。その多くは赤方偏移  $z > 1$  で発生していることから、初期宇宙探査のための光源として利用できる。GRB の重要な研究テーマの一つはガンマ線の放射メカニズムの解明である。GRB の標準理論となっている火の玉モデルによると、GRB では爆発の際、衝撃波により光速の 99.9% まで加速された宇宙ジェットが発生する。ガンマ線の放射は、ジェット内部の電子が強磁場中で曲げられ発生するシンクロトロン放射によるものと考えられており、強く偏光しているはずである。

2010 年に打ち上げられた小型ソーラーセイル実証衛星 IKAROS に搭載したガンマ線バースト偏光検出器 GAP により、GRB から強い偏光が検出され、GRB がシンクロトロン放射で輝いていることを特定した。今後は相対論的速度のジェット形成メカニズム解明のため高感度の偏光観測を行うべく、我々は半導体検出器 MPPC を用いたマトリクス型偏光検出器の開発を行っている。

## 2 マトリクス型偏光検出器

### 2.1 検出器のデザイン

偏光検出には、偏光方向と垂直に散乱しやすいというコンプトン散乱の散乱異方性を用いる。散乱体であるプラスチックシンチレータの周りに吸収体である CsI シンチレータを配置し、散乱光子の角度分布を測定する。GAP では 1 個の散乱体の周りに 12 枚の吸収体を配置したが、マトリクス型偏光検出器では 36 本の散乱体を格子状に並べ、周りに 28 本の吸収体を配置したものを 1 ユニットとする。散乱体が複数あることで、ガンマ線の入射位置を特定し、詳細な散乱角度決定を行える (図 1)。

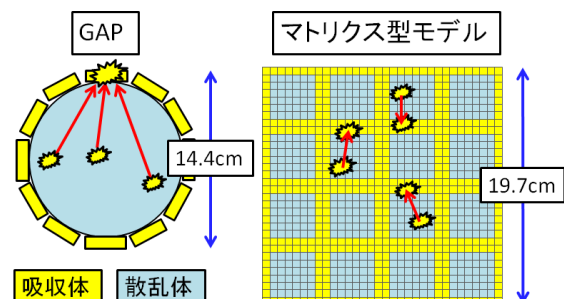


図 1: GAP とマトリクス型偏光検出器

## 2.2 MPPC

マトリクス型偏光検出器では GAP で使用した光電子増倍管に代わり、MPPC(Multi-Pixel Photon Counter)(図 2) を使用しシンチレーション光を読み出す。MPPC は複数のアバランシェフォトダイオード (APD) のピクセルからなるフォトンカウンティングデバイスであり、各 APD を降伏電圧以上で動作させ (ガイガーモード) 使用する。 $10^6$  倍という高い増幅率を持つほか、小型、軽量、振動に強い、磁場の影響を受けにくい、低電圧動作 ( $\sim 70V$ ) といった利点を持ち、衛星搭載に適している。

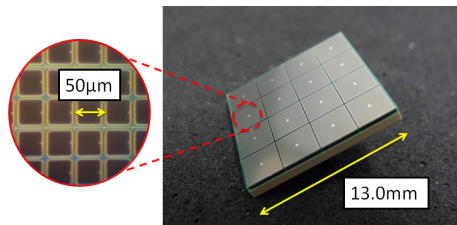


図 2: MPPC

## 2.3 マトリクス型偏光検出器 8×8 モデル

我々は 8×8 モデルのマトリクス型偏光検出器 (図 3) を開発した。MPPC は 3×3mm の 16 素子が一体となったアレイタイプを使用し、4 素子を結合して 6×6×60mm のシンチレータ 1 本を読み出す。16 個の MPPC アレイを使用し 36 本のプラスチックシンチレータと 28 本の CsI シンチレータ、計 64 本のシンチレータを読み出している。

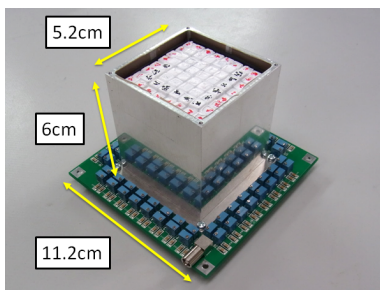


図 3: マトリクス型検出器 8×8 モデル

## 2.4 木星圏探査用ソーラー電力セル

世界初の木星トロヤ群領域への到達を試み、新たなソーラーセル探査機が 2020 年代前半の打ち上げを目標に計画されている。我々が目標とするプロジェクトは、検出器を衛星に搭載し、木星への航行中に GRB の偏光を観測するというものである。

## 3 高偏光度放射光照射実験

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) にて、高い偏光度を持つ放射光を用いた偏光観測実験を行った。実験で使用したビームは直径 1mm の単色のペンシルビームで、エネルギーは 79.9keV、偏光度は  $83.9 \pm 0.3\%$  である。各プラスチックシンチレータにビームを照射し、散乱角度分布を作成した。この際、散乱角度分布は  $\sin^2 \phi$  のカーブを描く (モジュレーションカーブ) ことが知られているが、本検出器では散乱体と各吸収体とのアクセプタンスが異なるため、モジュレーションカーブを得るには偏光の角度分布を無偏光の角度分布で規格化する必要があるのである (図 4)。

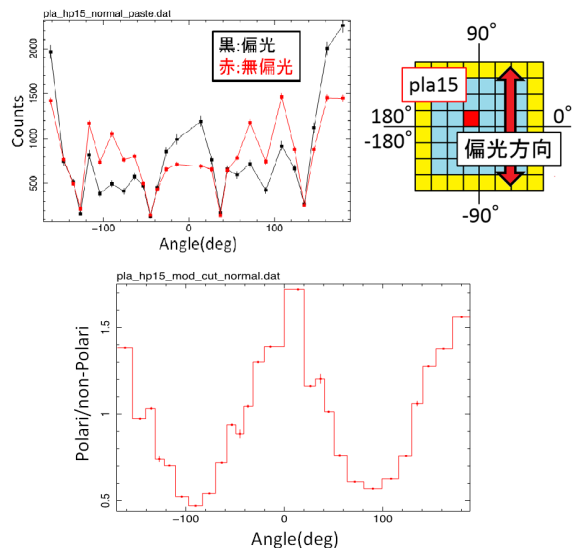


図 4: プラスチックシンチレータ 15 番における偏光と無偏光の散乱角度分布とモジュレーションカーブ

## 4 検出器の性能評価

### 4.1 モジュレーションファクタ

偏光検出器の性能比較にはモジュレーションファクタという指標を用いる。モジュレーションカーブの強度の最大値を  $N_{max}$ 、最小値を  $N_{min}$  としてモジュレーションファクタ MF は

$$MF = \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{max} + N_{min}}$$

と定義され、偏光度 100 % の光が入射したとき 0~1 の値をとり、理想的な検出器では MF=1 となる。観測で得られたモジュレーションファクタを偏光度 100 % のモジュレーションファクタで規格化することで偏光度が求められる。

Geant4 というシミュレータ上で検出器を再現し、モンテカルロ法により相互作用を計算した。シミュレーションからマトリクス型偏光検出器 8×8 モデルのモジュレーションファクタは、GAP のものと比べ 2 倍程度の向上が確認できている (図 5)。検出可能な最小偏光度を考えたとき、ある条件の GRB の 80keV のガンマ線において、有効面積と検出効率、モジュレーションファクタを考慮し計算すると、GAP では 12.4 % のところマトリクス型偏光検出器では 4.1 % まで小さくなる。

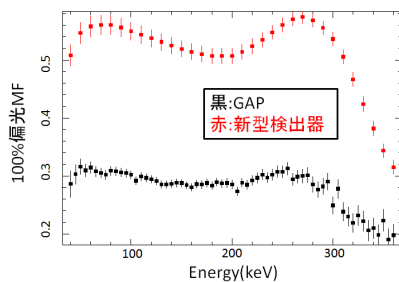


図 5: GAP とマトリクス型偏光検出器 8×8 モデルのエネルギーごとのモジュレーションファクタ

### 4.2 性能評価

実験とシミュレーションを比較し検出器の性能評価を行った結果について報告する。KEK での実験のデータを解析するにあたり、光量の多い CsI シンチ

レータから光漏れが確認されたため、中心の 16 本のプラスチックシンチレータの散乱角度分布のみを合成しモジュレーションカーブを作成し (図 6)、モジュレーションファクタを求めた。

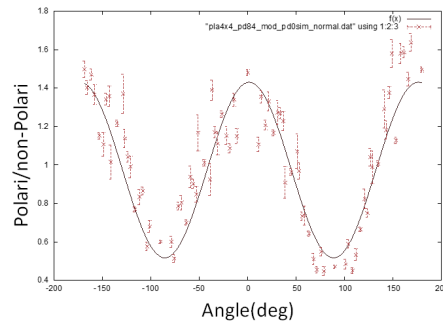


図 6: KEK での実験から作成したモジュレーションカーブ

表 1: 求めたモジュレーションファクタ

|                  | MF          |
|------------------|-------------|
| 実験結果             | 0.469±0.013 |
| 100 % 偏光シミュレーション | 0.645±0.003 |

表 1 のモジュレーションファクタから偏光度は  $72.8 \pm 2.1$  % と求まり、本来の偏光度  $83.9 \pm 0.3$  % と一致しない結果となった。モジュレーションカーブの振幅が小さく検出されており、原因として幾何学的なシンチレータのずれによる光度のばらつきや、光漏れが考えられる。

## 5 MPPC の読み出し環境の改善

### 5.1 ダークカウント

ダークカウントは熱励起によるノイズであり、MPPC では主に 1p.e. のパルスとして出力される。ダークカウントを減らすことは低エネルギーガンマ線の信号をノイズと分離するために重要であり、より低エネルギーのガンマ線を観測可能にすることは、強く赤方偏移した GRB の偏光検出を可能にする。ダークカウントの温度依存性を調べると、 $-40$  °C に至るまで一様な減少が認められた (図 7)。

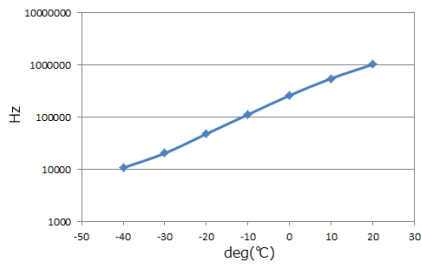


図 7: ダークカウントの温度変化

## 5.2 時定数

MPPC は増幅率が高く、また典型的なダークカウントの間隔は数 100nsec 程度と短いため、電荷積分型アンプ (チャージアンプ) の時定数が長いと信号に余分にダークカウントが含まれてしまう。そのため MPPC の性能を引き出すにはチャージアンプの時定数を非常に短くする必要がある。図 8 に MPPC の基本的なセットアップを示す。時定数を 50nsec~200nsec に調整することで出力波形のパイルアップを抑えられた。チャージアンプはクリアパルス社製 CS515 シリーズを使用した。また、シェーピングアンプを省略しチャージアンプからの出力を直接 AD 変換することで分解能を大幅に向上させることができた。

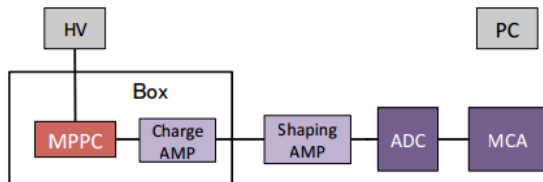


図 8: 放射線計測の際の MPPC の基本セットアップ

## 5.3 低エネルギー X 線スペクトルの読み出し

-40 °C までの低温下で数種類の X 線のスペクトルを取得し、エネルギー校正を行った。その結果ダークカウントの減少は大きく効果を表し、<sup>55</sup>Fe からの 5.9keV の X 線のピークがバックグラウンドから分離できた (図 9)。

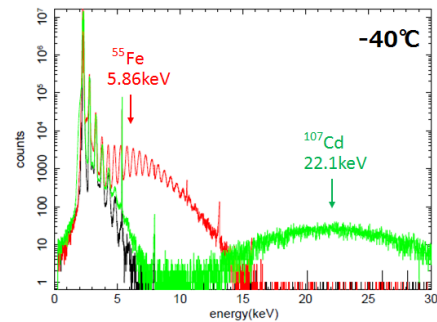


図 9: -40 °C における X 線スペクトル図、2.5keV ごとに見られるエッジは ADC の不具合によるもの

## 6 まとめと今後

我々は MPPC を用いたマトリクス型偏光検出器の開発を行っており、その性能は GAP に比べモジュレーションファクタで約 2 倍である。製作した検出器で偏光照射実験を行い偏光を検出することに成功したが、本来の性能を引き出せない結果となったため、アライメントの改良を行い再測定を行いたいと考えている。また、数 keV 程度の低エネルギーからの読み出しを目指し、MPPC の接続環境の調整を行った。ダークカウントが-40 °C まで一様に減少することから低温下での X 線スペクトルの取得を行ったところ、<sup>55</sup>Fe からの 5.9keV の X 線のピークがバックグラウンドから分離できた。

## Reference

D.Yonetoku et al., PASJ, 743:L30(5pp) (2011)