

モンテカルロシミュレータを用いた新型偏光検出器の性能評価

瀬田 大樹 (金沢大学大学院 自然科学研究科)

Abstract

ガンマ線バースト (GRB) は数十秒間に 10^{52} erg ものエネルギーをガンマ線として放出する宇宙最大規模の爆発現象である。理論的には相対論的な速度を持ったジェットの中で、シンクロトロン放射によってガンマ線が作られると考えられており、そのガンマ線は強く偏光しているはずである。我々の研究グループでは GRB 偏光検出器 GAP (GAMMA-ray burst Polarimeter) を開発し、2010 年 5 月に打ち上げられた小型ソーラーセイル実証機「IKAROS」に搭載し観測を行なった。その結果、GRB はシンクロトロン放射で輝いている可能性が極めて高い事を実証した。現在、ジェット内部の詳細な磁場構造の解明を目指し、より高性能な GRB 偏光検出器の開発を行なっている。新型偏光検出器には光電子増倍管にかわり MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) を使用している。また散乱体が 1 つしかない GAP と異なり、散乱体と吸収体を格子状に複数配置する形状となっている。そのため、より詳細な散乱角度の測定が可能になり偏光検出感度が向上するはずである。本研究ではモンテカルロシミュレータである Geant4 を用いて新型偏光検出器の性能評価を行った。その結果、GAP に比べ GRB の年間検出個数が約 3 倍向上することを明らかにした。

1 ガンマ線バースト (GRB)

ガンマ線バースト (GRB) は数十秒間に 10^{52} erg ものエネルギーをガンマ線として放出する宇宙最大の爆発現象である。爆発の際に光速の 99.9% まで加速された物質流 (宇宙ジェット) が発生し、ジェット内部の粒子が磁場に巻き付くことでシンクロトロン放射によってガンマ線がつくられる。我々の研究室では GRB の偏光検出器 GAP (GAMMA-ray burst Polarimeter) を開発し、小型ソーラー電力セイル実証衛星 IKAROS に搭載され 2010 年 5 月に打ち上げられた。2011 年 11 月までに 30 例の GRB を観測し、その中で 3 例の GRB (GRB100826A, GRB110301A, GRB110721A) から 2.9σ 以上の信頼度で偏光を検出した。GAP の成果から GRB はシンクロトロン放射によって輝いていることを特定した。今後はシンクロトロン放射に必要な磁場の構造、起源や相対論的ジェットの生成メカニズムの解明を目指し、偏光度や偏光角の時間変動などを含めたより詳細な GRB の偏光観測を行いたいと考えている。

2 新型偏光検出器のデザイン

GAP はコンプトン散乱の散乱異方性を利用し、散乱光子の角度分布を測定することで偏光を検出する散乱型偏光検出器である。GAP の構造は散乱体として中心に 12 角形のプラスチックシンチレータ、周りに吸収体として 12 枚の CsI(Tl) シンチレータを配置したものとなっている。新型偏光検出器では複数のプラスチックシンチレータと CsI(Tl) シンチレータを格子状に配置した構造を考えている。GAP の中心のプラスチックシンチレータは 1 つしかないため、ガンマ線の入射位置を特定できず、散乱角度の不定性が大きかった。しかし新型偏光検出器では散乱体としてのプラスチックシンチレータが複数あるためそれぞれの散乱体にガンマ線が入射したのが判別でき、より詳細なガンマ線の散乱方向の情報を得ることができる。

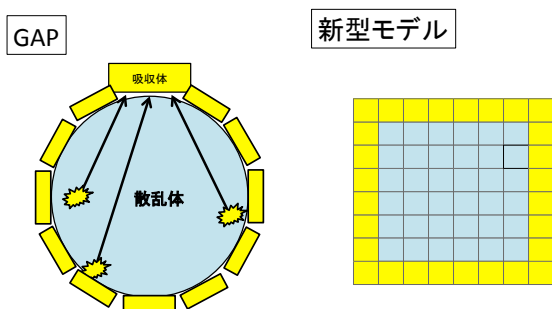


図 1: 新型偏光検出器

3 Multi Pixel Photon Counter (MPPC)

新型偏光検出器では GAP で使用した光電子増倍管に代わり、Multi Pixel Photon Counter(MPPC) を使用する。MPPC は数 100～数 1000 個の APD を 2 次元に敷き詰めた構造をしており、これらの各 APD ピクセルを降伏電圧以上で動作させる (ガイガーモード) ことでわずかな光の入射に対しても高い出力の信号が得られる。MPPC には高い量子効率、1 光子にも優れた感度を持つ、小型、軽量 磁場の影響を受けにくい、低電圧動作 (~70V) などの利点があり衛星搭載に適した検出器である。また、量子効率の観点でも従来の光電子増倍管と同等以上の性能もっており、非常に将来性のある検出器である。

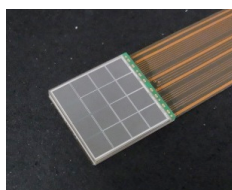


図 2: MPPC

4 Geant4 による新型偏光検出器の性能評価

モンテカルロシミュレーションソフト Geant4 を用いて新型偏光検出器の性能評価を行った。Geant4 は粒子の相互作用を正確にシミュレーションできるソフトウェアである。性能評価の方法として新型偏光検出器のモデルを Geant4 上で作成し、モジュールファクタ、検出効率、GRB 年間検出個数をそれぞれ求め、GAP と比較した。モデルはプラスチックシンチレータを 16 本、CsI シンチレータを 20 本を格子状に並べたモデル (以後 6 × 6 モデルと呼ぶ) とプラスチックシンチレータを 36 本、CsI シンチレータを 28 本を格子状に並べたモデル (8 × 8 モデル) の 2 つを作成した。以下には Geant4 上で作成したジオメトリを示す。

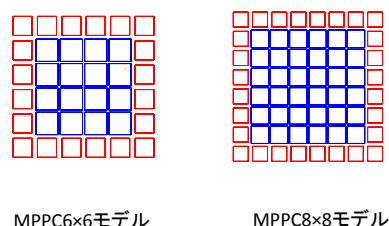


図 3: Geant4 で作成した新型偏光検出器のジオメトリ

4.1 検出効率

プラスチックシンチレータに入射した光子数を N_{pla} 、1 度散乱し、CsI シンチレータで止まった光子の数を N_{CsI} として検出効率 η を以下のように定義する。

$$\eta = \frac{N_{CsI}}{N_{pla}} \quad (1)$$

GAP、6 × 6 モデル、8 × 8 モデルそれぞれの検出効率を以下に示す。

図 4 から検出効率は 6 × 6 モデル、8 × 8 モデルは GAP と比べ 10 % 程度向上していることがわかる。

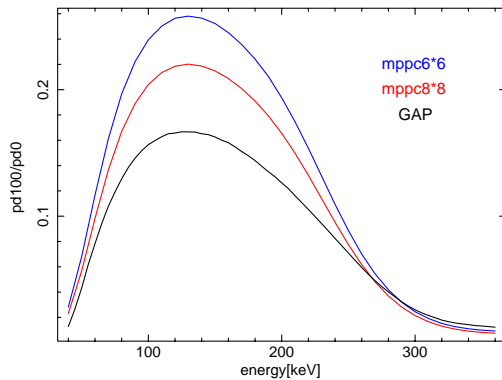


図 4: GAP と新モデルとの検出効率の比較

これは GAP と比べ、 6×6 モデル、 8×8 モデルでは散乱体からみた吸収体への立体角が小さく散乱した光子をより CsI シンチレータで吸収できるためである。モデルを拡張すると検出効率は下がる。

4.2 モジュレーションファクタ

モジュレーションファクタは偏光に対する感度を表す指標である。偏光した光がコンプトン散乱によって散乱する散乱角度分布は $\sin^2 \phi$ のカーブを描く。これをモジュレーションカーブという。強度の最大値を N_{max} 、最小値を N_{min} として m を定義する

$$m = \frac{N_{max} - N_{min}}{N_{max} + N_{min}} \quad (2)$$

m をモジュレーションという。偏光度 100% の光が入射した時のモジュレーションをモジュレーションファクタといい、0 から 1 までの値をとる。モジュレーションファクタは検出器ごとで決まった値をとり、検出器の偏光に対する感度を表す。1 に近いほど偏光に対する感度が高い。

40keV から 360keV におけるモジュレーションファクタを GAP、 6×6 モデル、 8×8 モデルについて求めた。結果を以下に示す。GAP と比べ、 6×6 モデル、 8×8 モデルではモジュレーションファクタは約 2 倍近く向上しており、特に 8×8 モデルは 100keV のとき、55 % のモジュレーションが見られる。

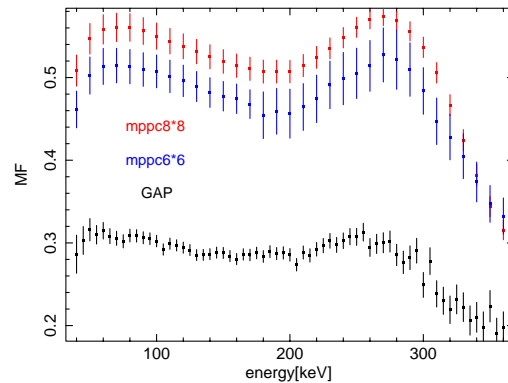


図 5: GAP と新モデルでのモジュレーションファクタの比較

4.3 最小偏光度 (MDP)

4.3.1 MDP

最小偏光度は観測対象の明るさ、観測時間、バックグラウンドレベル、検出器の性能 (M, η) を総合的に評価したもので、ある条件下で検出可能な最小の偏光度を表す。MDP の定義を以下に示す。

$$MDP = \frac{3\sqrt{2}}{MFS\eta} \sqrt{\frac{FS\eta + BS}{T}} \quad (3)$$

M はモジュレーションファクタ、 η は検出効率、 F は観測対象の明るさ [$\text{photon cm}^{-2} \text{s}^{-1}$]、 B はバックグラウンド [$\text{photon cm}^{-2} \text{s}^{-1}$]、 S が有効面積 [cm^2]、 T が観測時間 [s] である。

ある観測対象における MDP を、GAP、 6×6 モデル、 8×8 モデルに対して計算した。観測対象には GRB100826A (GAP が観測した中で最も明るい GRB) として F, B, T を設定した。GAP と新型モ

表 1: GRB

GRB100826A	
F[$\text{counts cm}^2 \text{s}$]	9.03
B[$\text{counts cm}^2 \text{s}$]	0.45
T[s]	100

デルを比較するにあたって、検出器の有効面積を確保

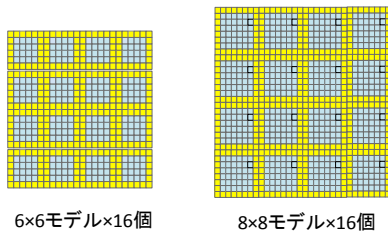


図 6: 6 × 6 モデル、8 × 8 モデルを 16 個並べた検出器

するため、それぞれ 16 個配置したモデルを考えた。80keV における MDP を以下に示す。

表 2: GRB

	有効面積 [cm ²]	MDP:80keV
GAP	144	12.4 %
6 × 6	87.6	6.0 %
8 × 8 モデル	197.1	4.1 %

4.3.2 年間 GRB 検出個数

MDP を利用して GRB の年間検出個数を求めた。これは各偏光度ごとの 1 年間の偏光検出可能な GRB の期待値である。GRB のフラックスと継続時間は BATSE の 4B カタログの 1972 個の GRB データを使用する。検出器が偏光観測を行う視野を GAP と同じく片側 30° 程度の領域とすると、有効立体角は、

$$\int_0^{2\pi} d\phi \int_{\frac{\pi}{3}}^{\frac{\pi}{2}} \sin\theta \cos\theta d\theta = \frac{\pi}{4} [\text{str}] \quad (4)$$

となる。BATSE は全天の 48.3 % を 9 年間観測していたので、ある偏光度に対して 1 年間に視野内で起こる GRB 数は、以下ようになる。

$$(\text{ある偏光度での GRB 数}) = \frac{\frac{\pi}{4}}{4\pi \times 0.48 \times 9} [\text{個 year}^{-1}] \quad (5)$$

図 7 より、偏光度 40 % の GRB が GAP で年間 1 個程度有意に観測可能であるのに対して 6 × 6 モデルでは年間 2 個程度、8 × 8 モデルでは年間 3 個程度有意に観測できることがわかる。

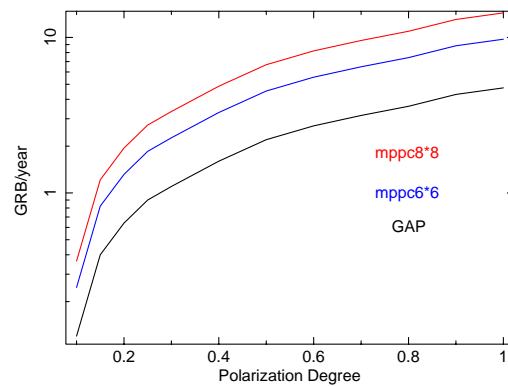


図 7: GRB 年間検出個数

5 まとめと今後の展望

- シミュレーション結果から検出効率は 8 × 8 モデルにして GAP の約 1.3 倍、モジュレーションファクタは約 2 倍、MDP は 3 倍向上することがわかった。今後はこの結果をもとに新型偏光検出器将来モデルの設計を行う。
- 現在開発しているプラスチックシンチレータ 4 本、CsI シンチレータ 12 本を使用した新型偏光検出器の基礎モデル (4 × 4 モデルと呼ぶ) でのビームラインを使った偏光検出の実証試験を行なう。

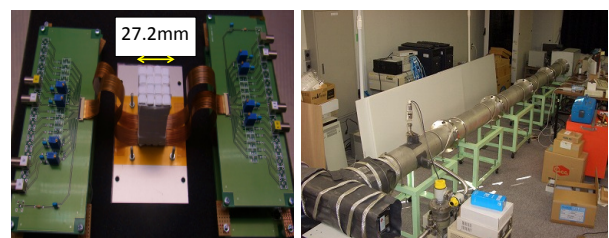


図 8: 4 × 4 モデル (左) とビームライン (右)

- 4 × 4 モデルをさらに拡張した 6 × 6、8 × 8 モデルの開発も進めていく。