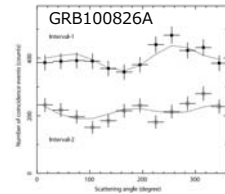


小型衛星PolariS搭載 ガンマ線バースト広視野偏光計の開発

中森健之、坂野光成、片桐惇、加藤晃紀、岸川達哉、木村沙也香、郡司修一（山形大理）、
米徳大輔（金沢大理）、三原建弘（理研）、他 PolariSワーキンググループ

Abstract X線・ガンマ線による偏光観測は、放射機構や磁場の構造などを知るための強力なプローブであるにもかかわらず、技術的な困難さから未だ開拓が進んでいない。高エネルギー天文学のフロンティアである。我々は小型衛星PolariS搭載を目指して、ガンマ線バースト観測用のX線・ガンマ線偏光計を開発している。この偏光計はコンプトン散乱の異方性を利用した広視野偏光検出器であり、散乱体であるプラスチックシンチレータアレイと吸収体であるGAGGシンチレータアレイによって50~400 keVのエネルギー帯域をカバーする。また信号の読み出しにはそれぞれマルチアノード光電子増倍管とアパランシェフォトダイオードを採用している。本講演では、我々が現在進めているマルチアノード光電子増倍管に関する要素試験と、シミュレーションによる検出器サイズの最適化について報告する。

Introduction



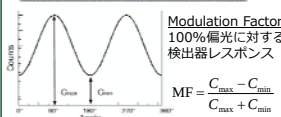
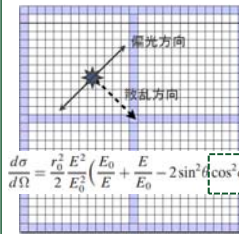
ガンマ線バースト (GRB) は宇宙論的な遠方で起こる宇宙最大の爆発現象であり、prompt emissionの発生機構については決定的な結論が得られていない。特に硬X線の偏光を測定することによってモデルに対して非常に強い制限を与えることができる。

RHESSI^[1]とINTEGRAL^[2]によるGRBからの硬X線偏光の検出報告には議論があったが、ソーラーセイル実証機イカロスに搭載されたGAP検出器が3σを超える有意度で偏光を検出 (左上図^[3]) した他、合計3例のGRBに対して偏光検出結果を報告した。

GRBの偏光度から輻射モデルを特定するためには、100例程度まで偏光検出数を増やし、GRBの個性が見えなくなるようにして統計的に判断する必要がある。我々は小型衛星PolariS^[4]に搭載するGRB用硬X線偏光計を開発している。GAPより高い感度を持つ検出器を4台、それぞれ別の方向を向けることによって広い視野を確保する計画である (左下図)。

	重量	電力	面積	MF	検出効率
GAP	3.8kg	5W	140cm ²	~30%	15%@100keV
新型	~6kg	~15W	300cm ²	~45%	>25%@100keV

検出器構成と開発のポイント

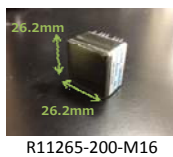


コンプトン散乱の異方性を利用した検出器である。散乱硬X線の方向は偏光方向に対して垂直になりやすい。プラスチックシンチレータ (散乱体) でコンプトン散乱させ、周囲を取り囲む無機シンチレータ (吸収体) によって散乱X線を吸収する。シンチレータをピクセル化することにより、散乱方向を知ることができる。シンチレータの読み出しにはマルチアノード光電子増倍管 (MAPMT) とアパランシェ・フォトダイオード (APD) を用いる。

検出器への要請は、GRBからの偏光X線を3~4年のミッション期間中に100例程度捉えることである。X線のエネルギーが低いほど入射粒子数は多いが、散乱体でのエネルギーデボリットが小さい。したがって、**散乱体のエネルギー閾値低下**は感度向上に直結する。また、衛星軌道上では吸収体シンチレータの放射化によるバックグラウンドが問題であり、GAPの場合ではGRBの信号を卓越するほど高いレートであった。**放射化バックグラウンドの影響が小さい素材を選ぶ**必要がある。

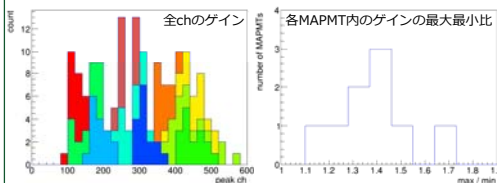
耐震改良型MAPMTの評価

耐震化を施したウルトラバイアルカリ光電面のMAPMTを採用予定である (右図)。通常MAPMTには個体差があり、平均的なゲインやピクセル間のゲインのゲインの均一性は保障されていない。今回**ピクセル間のゲインの最大最小比が2倍以下**という条件で10台のMAPMTを購入した。

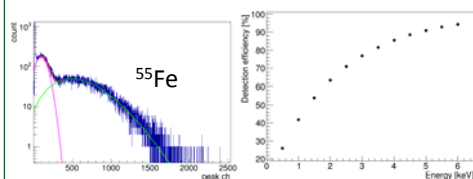


R11265-200-M16

すべてのチャンネルに対して、光電面からの熱雑音による1 p.e.を測定し、各MAPMTの平均ゲインやピクセルのゲインのばらつきを調べた。全160チャンネルのゲイン分布を下図、各PMT内でのゲインの最大最小比を下右図に示す。**要求値を十分に満足する1.4倍程度に収まっていることがわかった。**



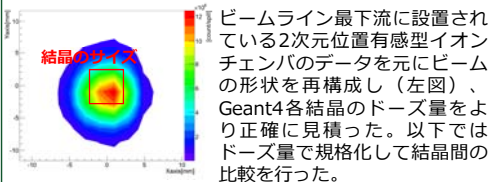
次に、10台の中で**最もゲインが小さい**チャンネルの性能を調べた。5.5x5.5x40 mm³のプラスチックシンチレータに5.9 keVのX線を照射して得られたスペクトルを、ガウシアン+ポアソン分布でフィットし、信号の検出効率をエネルギー閾値の関数として求めた (下図)。その結果、50%の検出効率を要求すると**1.5 keV程度まで閾値を下げられることがわかった**。またこのときの1p.e.ノイズレートは室温で143 Hzであった。



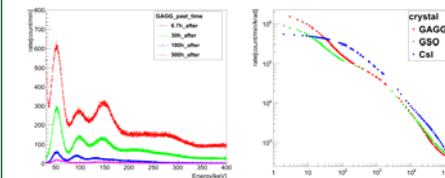
耐震化性能を確認するため、山形県工業技術センター試験場において正弦波のスワイプ試験 (x, y, z方向)、およびパイロ衝撃試験 (左図) を行った。典型的な打ち上げ振動プロファイルを元にした。振動試験後のMAPMTの性能変化について現在評価を進めている。

放射化実験による吸収体の選定

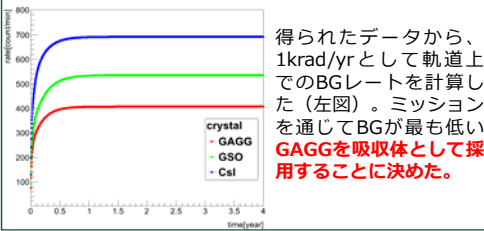
吸収体の候補となる無機シンチレータは衛星軌道上での放射化によるバックグラウンド (BG) が最も少ないものを選ぶ必要がある。我々はCsI(Tl)、GAGG、GSOを候補として挙げ、放射線医学研究所HIMACで150 MeVプロトンビームを各シンチレータに10kradを目標に照射した。



上記のセットアップで²⁴¹Amのスペクトルを取得することにより、発光量の評価とエネルギーキャリブレーションを行った。**ビーム照射前と比較して有意な光量の低下はいずれの結晶でも認められなかった**。偏光計を組み上げた際に問題となる、30~400 keVのエネルギーデボリットを起こすカウントレートを内在BGとして計上した。

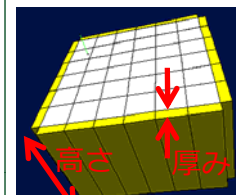


上左図はGAGGのBGスペクトルの時間変化である。時間経過と共に放射化で発生したピークと連続成分の減少が明らかにわかる。上右図にBGレートの時間変化を示す。1日より長いタイムスケールではGAGGが最もBGレートが低いことが分かった。



得られたデータから、1krad/yrとして軌道上でのBGレートを計算した (左図)。ミッションを通じてBGが最も低い**GAGGを吸収体として採用することに決めた**。

シンチレータの形状最適化



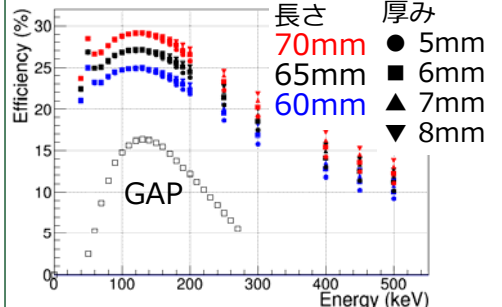
衛星搭載上の重量の制限の下で、検出効率を最大にするシンチレータの**高さ**及び吸収体の**厚み**をGeant4を用いて調べた。ここでは検出器1ユニットを用いて評価した。4ユニットで1台の偏光計となる。



14.5x14.5 mm²のプラスチックシンチレータを6x6に並べ、MAPMTとの接合部にテーパ加工を加えた。同じ幅を持つGAGGを6つずつ周囲に並べた。単色の硬X線を全面に対して垂直に入射し、以下の条件を満たすイベントの割合を求め、検出効率とした。

イベント選択条件 (1) 2本以下のプラスチックシンチレータでエネルギーデボリットが発生する。ここでは実験で求めた検出効率も考慮した。(2) ただ1本だけGAGGシンチレータで30keV以上のエネルギーデボリットが発生する。(3) 入射エネルギーを全吸収する。

検出効率のエネルギー依存性を下図に示す。**吸収体の厚みよりもシンチレータの長さを伸ばすことが効果的である**。このことから、X線が散乱する確率を上げることが検出効率に対して支配的であると考えられる。またGAP^[5]よりも高い検出効率でより広いエネルギー領域をカバーできることも分かった。今後は実験で評価したGAGGのエネルギー閾値を反映させ、最適解を決定し、デザインを確定する予定である。



References

- [1] Coburn, W. & Boggs, S. E. (2003), Nature, 423, 415
- [2] Goetz, D. et al. (2009), ApJ, 695, L208
- [3] Yonetoku, D. et al. (2011), ApJ, 743, L30
- [4] Hayashida, K. et al. (2012), SPIE, 8443, 9
- [5] Yonetoku, D. et al. (2011), PASJ, 63, 625