

ガンマ線バースト偏光検出器 GAP の成果と
新型偏光検出器の基礎開発

金沢大学 自然科学研究科
数物科学専攻 宇宙物理学研究室
修士1年

米持元

1 ガンマ線バースト (GRB)

GRB は非常に短時間 (数 msec から数 100sec) の間に激しい時間変動を伴ったガンマ線が遠方宇宙から飛来する天体現象である。総エネルギーは 10^{52} erg にもなり、ビッグバン以降宇宙で最大の爆発現象であると考えられている。発生位置に偏りはなく、全天で 1 日に 1 回程度、ランダムに発生している宇宙では非常にありふれた天体現象である。

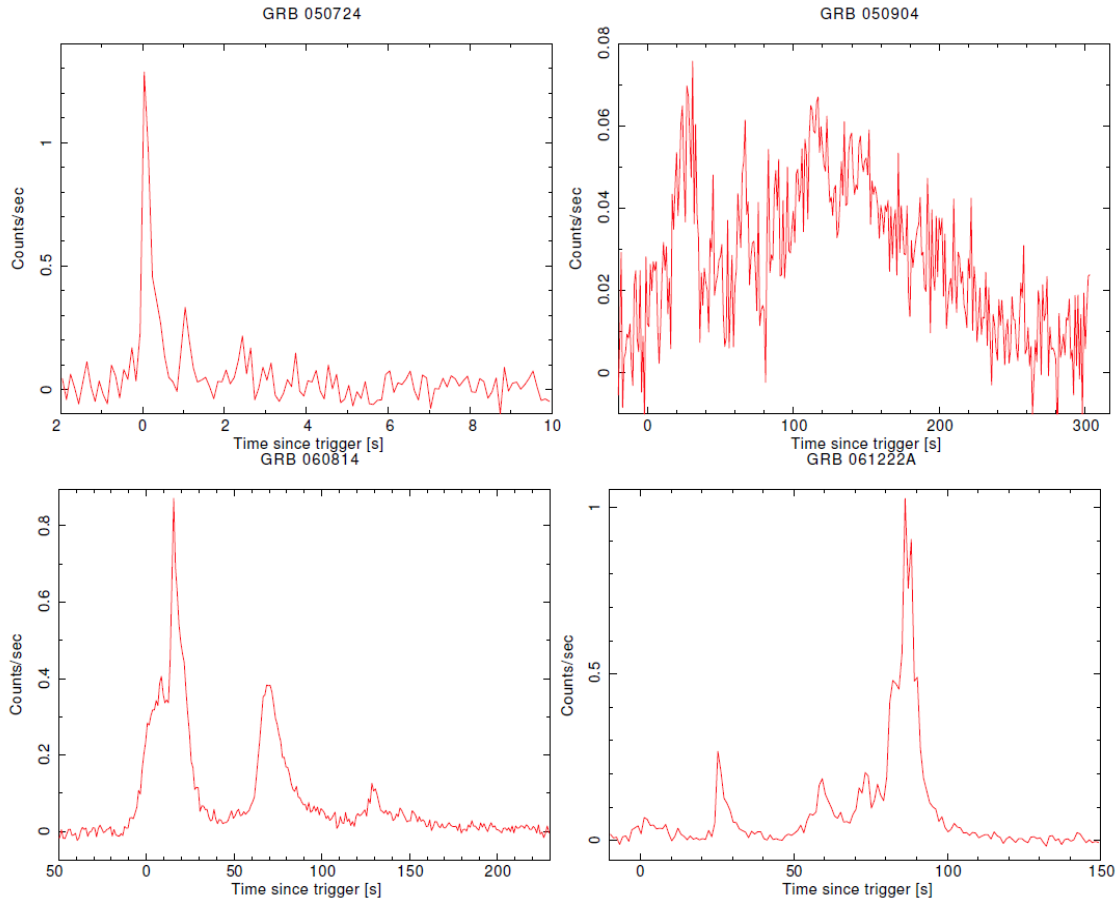


図 1: GRB のライトカーブの時間変動

GRB のライトカーブ (フラックスの時間変動) および継続時間は多種多様なものがある。図 1 に観測された GRB の時間変動の例を示す。時間変動は数 msec のものから数 10sec のものまでである。時間変動に関しても緩やかに立ち上がり長時間で減衰するものから、非常に短い時間に激しく変動するものまで様々である。このように GRB のライトカーブの形状は多種多様で単一の関数で記述することはできないが一般的には、急激に増光しゆっくり減光するという傾向を示す。

GRB を記述する標準理論モデルとして相対論的の玉モデルがある。このモデルでは大質量星が崩壊してブラックホールを形成する際に、高速な物質流 (ジェット) を形成する。吹き出したジェットは物質流同士の衝突によって内部衝撃波を生成する。内部衝撃波はプロンプト放射として観測される。GRB から放射される光は、作られた衝撃波中で加速された電子が磁場に巻きつき、シンクロトロン放射で明るく輝くと考えられている。GRB からの放射がシンクロトロン放射であるならば GRB からのガンマ線は強く偏光しているはずである。われわれは GRB の偏光を検出し観測的に標準理論モデルの検証を行なうことを目的としている。

2 GAMMA-ray burst Polarimeter(GAP)

Gamma-ray burst Polarimeter:GAP は金沢大学、山形大学、理化学研究所が共同で開発した GRB の偏光を測定するための偏光計である。GAP の外観と断面図を図 2 に示す。

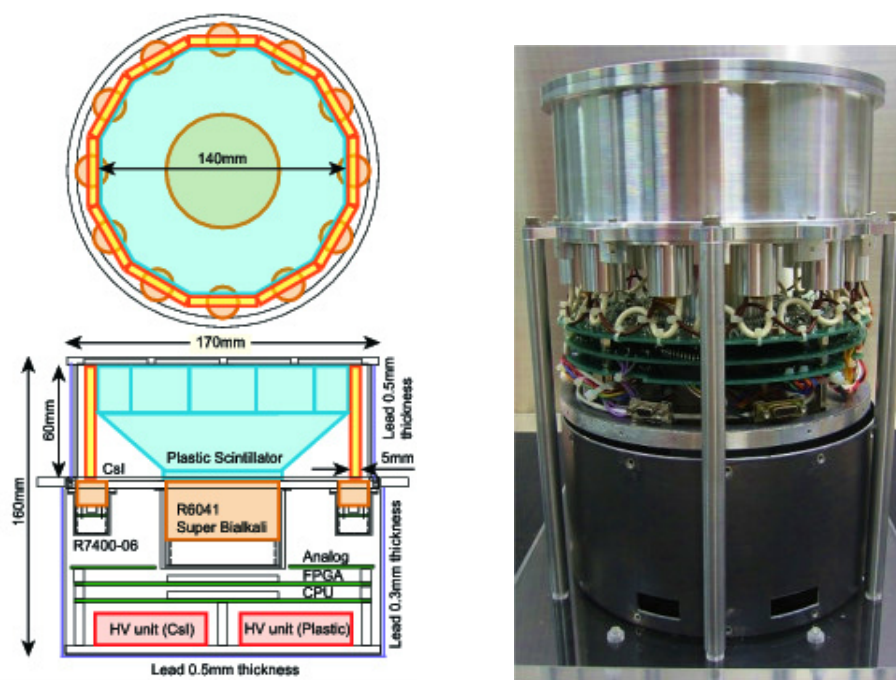


図 2: 左は GAP の断面図、中心に散乱体として 12 角形のプラスチックシンチレータとスーパーバイアルカリの PMT、その周囲に 12 枚の CsI(Tl) シンチレータと PMT が吸収体として配置してある。センサー下部には信号処理回路基板と PMT に高電圧を印加するための高電圧ユニットがある。右図は実際の GAP の写真。センサー下部の鉛シールドを下げ基盤部を露出させた状態

GAP の形状は円筒形で図 4.3 に示すように直径は 17cm、高さは 16cm という非常に小さな検出器である。重さはセンサー部と電気回路や高電圧モジュールをあわせて 3.8kg、消費電力は 5W である。GAP は中心に大きな 12 角のプラスチックシンチレータとスーパーバイアルカリの光電面を採用した PMT(R6041)、その周囲に 12 枚の CsI(Tl) シンチレータと PMT を配置している。R6041 はロケットの打ち上げに耐えるために耐衝撃・耐振動の処理が施されている。GAP に入射してきたガンマ線はプラスチックシンチレータによって散乱させられる。散乱したガンマ線は 12 枚のシンチレータによって光電吸収され 30 度の角度分解能で偏光を計測する事が可能である。GAP ではコンプトン散乱の散乱異方性を用いて偏光を検出している。コンプトン散乱は Klein-Nishina の式に従うため中心のプラスチックシンチレータでコンプトン散乱されたガンマ線を周りの CsI シンチレータで読み取った場合、偏光したガンマ線では散乱強度分布のモジュレーションの振幅は $\theta = 2/\pi$ 平面での $\sin^2\phi$ に比例する。そのため、天体からの $\sin^2\phi$ モジュレーションカーブから直線偏光を測定することができる。図 3 に 100%偏光したガンマ線と、0%偏光のガンマ線が GAP に入射した場合のモジュレーションの違いを示す。

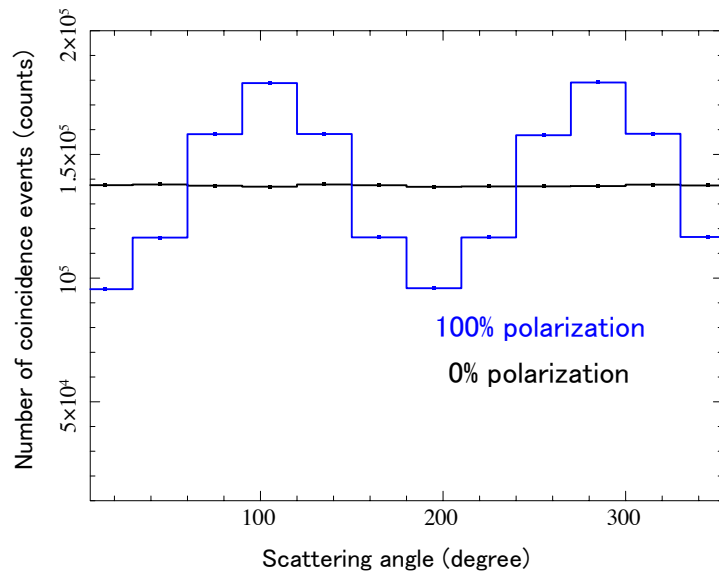


図 3: 100%偏光と0%偏光でのモジュレーションの違い。青が100%偏光したガンマ線が入射した場合、黒が無偏光の光が入射した場合のモジュレーションカーブ、偏光したガンマ線の場合は散乱角度分布に $\sin^2\phi$ の偏りが現れていることがわかる

GAP では高い幾何学対称性が実現されたことで偽のモジュレーションを軽減する事が可能である。またシンチレータの形状だけではなく、大きさも非常に重要であり、プラスチックシンチレータの深さと半径は散乱した光子がプラスチックシンチレータを抜け CsI シンチレータに到達するように、トムソン散乱長より短くする必要がある。CsI シンチレータは散乱光子を吸収することに対して高効率であることが要請される。5mm 厚の CsI シンチレータの光子に対するストッピングパワーは 100keV に対しておおよそ 100、200keV に対して-60 となっている。

GAP の偏光計としての最大の特徴はコインシデンスを取ることである。Lower Discriminate level(LD) を越えた信号を出したセンサーがあれば 5 μ s 間ウインドを開ける。その間に他のセンサーの信号が LD を超えていればコインシデンスイベントとして数える。この時、プラスチック-CsI と反応したイベントを偏光の情報として取り出す。CsI-CsI やプラスチック-CsI-CsI のイベントや Upper Discriminate level(UD) を越えたものも偏光情報として扱わない。

3 IKAROS

ガンマ線は地球大気で散乱されてしまうため GAP は IKAROS に搭載し宇宙空間で観測をおこなった。

小型ソーラー電力セイル実証機 (Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun : IKAROS) は 2010 年 5 月 21 日に宇宙航空研究開発機構 (Japan Aerospace Exploration Agency : JAXA) の種子島宇宙センターから H-IIA ロケット 17 号機で打ち上げられた技術実証機である。IKAROS は重量 307kg、直径 1.58m、高さ 0.95m の小型探査機である。宇宙空間で厚さ $7.5 \mu\text{m}$ 、差し渡し 20m の方形薄膜ポリイミドを展開し、その膜で太陽光圧を受けヨットのようにして航行を行う。2010 年 6 月 10 日に膜展開を成功させ、同時に薄膜太陽電池での発電も確認された。同年 7 月 9 日には太陽光圧での加速を確認し、7 月 13 日には姿勢制御デバイス (液晶デバイス) によってソーラーセイルの姿勢制御に成功した。12 月には金星フライバイを行いフルサクセスを達成した。その後はエクストラミッションとして、2011 年 10 月 13 日には逆スピン運用を行いスピン方向を逆にすることに成功した。

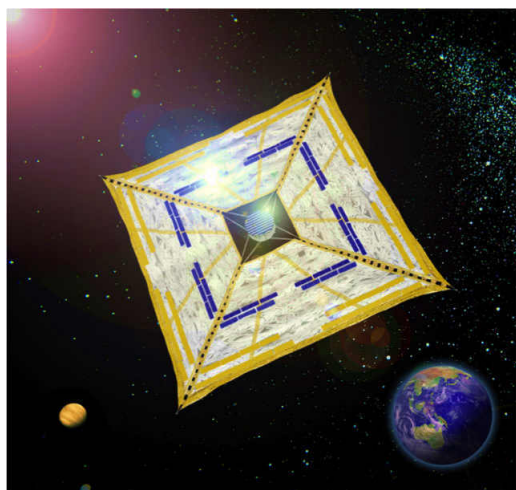


図 4: 左図は宇宙空間を航海する IKAROS の想像図、右図は実際に IKAROS に搭載された状態の GAP の写真、GAP は IKAROS の探査機本体の裏側に図のように配置され、常に反太陽方向を観測している

4 観測した GRB

GAP は電源投入以降約 30 例もの GRB の検出を行った。その中で 3 例の GRB から偏光を検出した。またその他の 4 例の GRB について偏光の上限値を決定することができた。

4.1 GRB110721A

GRB110721A は比較的小さな入射角で GAP が観測できた GRB である。正面から約 30 度の角度で GAP に入射したと考えられる。観測したライトカーブには、典型的な素早い立ち上がりとゆっくりとした減衰がみられる。

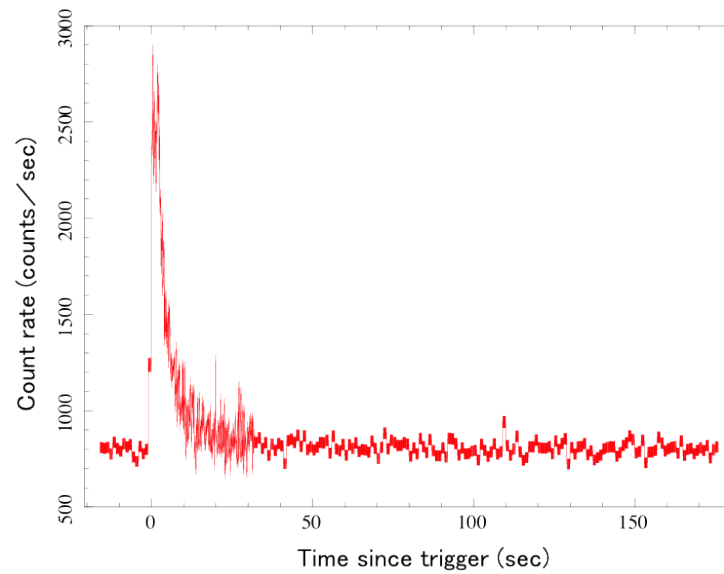


図 5: GRB110721A のライトカーブ

図 5 は GRB110721A のライトカーブである。次にこの GRB のコインシデンスヒットパターンとシミュレーションでの解析結果を示す。

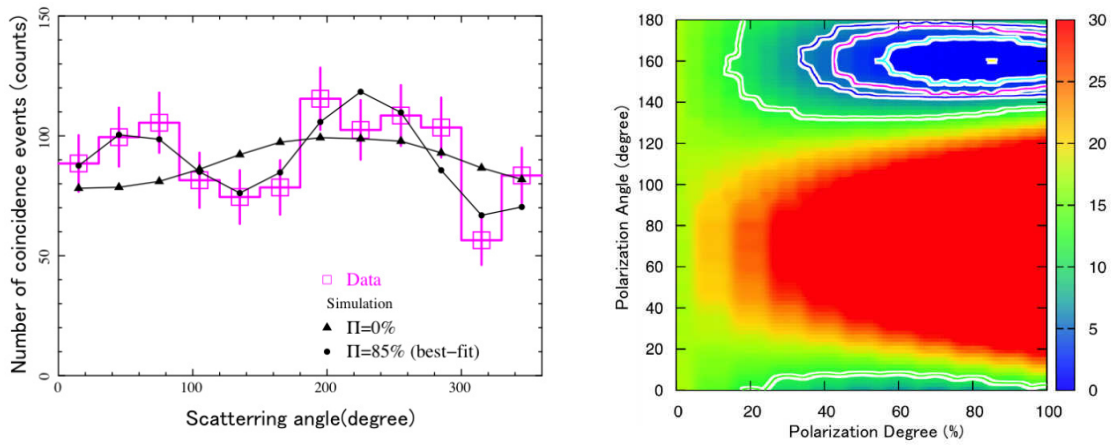


図 6: 図左はピンク色のデータ点が観測によって得られた値、三角の点が無偏光のガンマ線が入射したとした場合のシミュレーションの結果、丸い点のプロットが観測結果と最も良い一致が見られた85%偏光が入射したとした場合のシミュレーションの結果。図右は横軸に偏光度、縦軸に偏光角をとり、フィッティングで得られた χ^2 からのズレ $\Delta\chi^2$ 値を色で表している。ベストフィットの点は黄色で示している。等高線は 1σ 領域を水色、 90% 領域をピンク、 2σ 領域を青色、 2.9σ 領域を黄緑色で示している。

図 6 の左図に示した観測データ (ピンクの線と) シミュレーションのモデル関数 (黒線) から分かるように、シミュレーションで得られた偏光度 85%のベストフィット付近のモデル関数は観測データと非常に良く合っている。一方、無偏光のモデル関数は斜めからの入射による \sin の疑似モジュレーションは見られるものの、観測データとは合っていないことがわかる。信頼度を示している二次元カラーマップから分かるように、 3.3σ の信頼度で $84\%(+16, -28)$ の偏光を検出した。

4.2 GRB100826A,GRB110301A

GRB100826A と GRB110301A についてもライトカーブと解析結果をのせる。

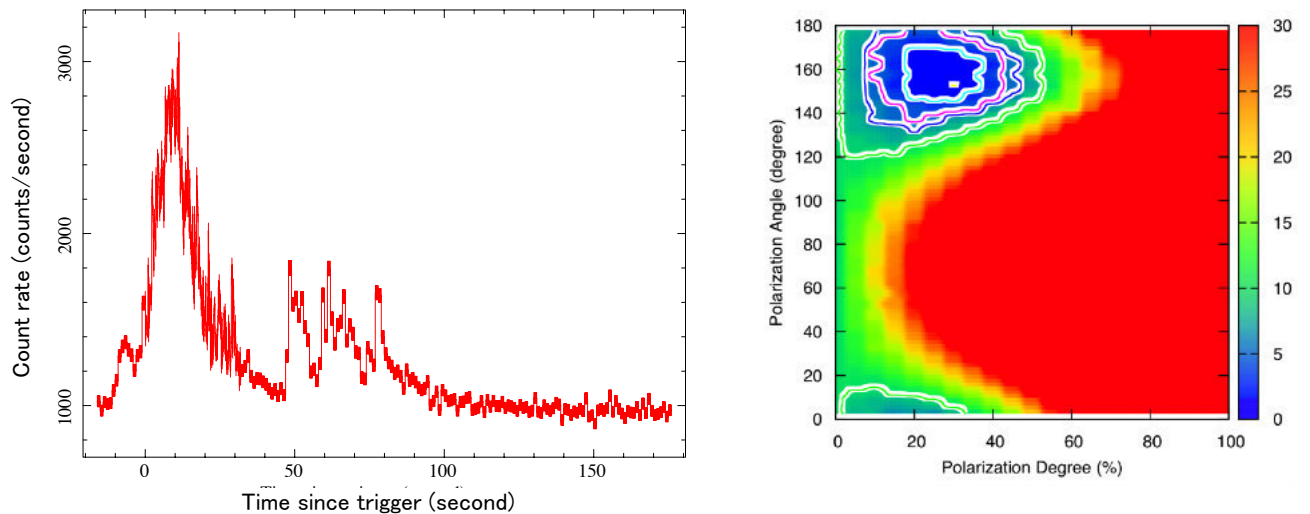


図 7: 図左は GRB100826A のライトカーブ。右図は前回と同様の解析を行ったカラーマップ

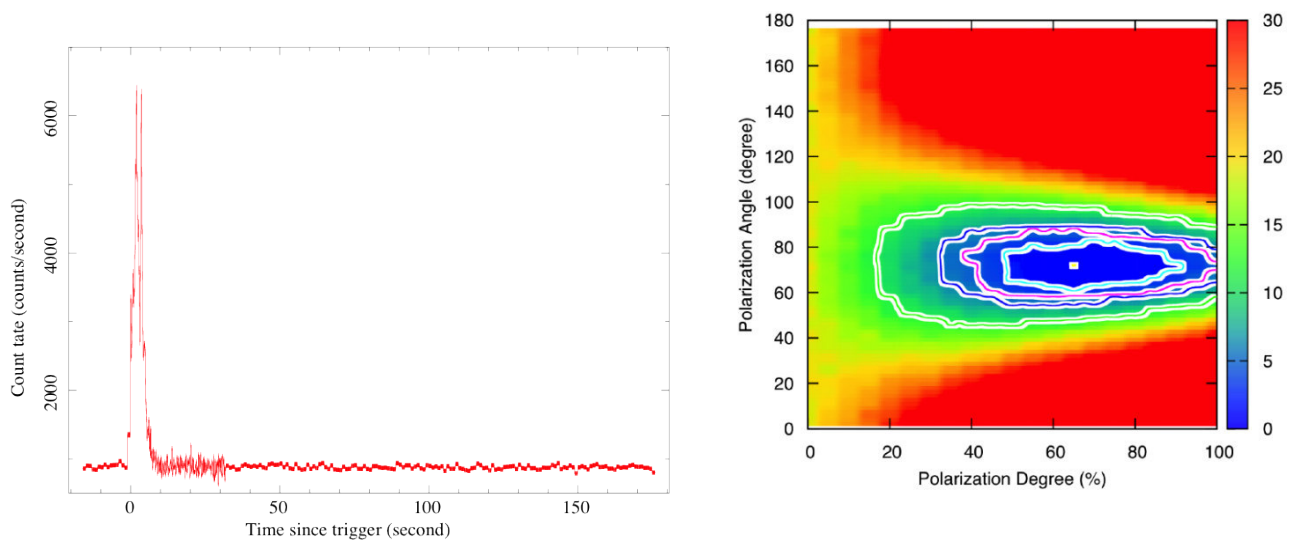


図 8: 図左は GRB110301A のライトカーブ。右図は前回と同様の解析を行った

その他2つの GRB100826A と GRB110301A についても同様の解析を行った。結果、GRB100826A については 2.9σ の信頼度で $27 \pm 11\%$ の偏光検出。GRB110301A については 3.7σ の信頼度で $70\% \pm 22$ の偏光を検出した。

5 GAPでの成果のまとめ

GAPでの観測結果のまとめを図9にのせる。

GRB	偏光度 Π (%)	継続時間 T (sec)	入射角 θ ($^{\circ}$)	E_p (keV)	fluence (erg cm $^{-2}$)	flux (photon cm $^{-2}$ s $^{-1}$)
100826	27 ± 11	50.5^a	20	606_{-109}^{+134}	2.94×10^{-4}	9.03
110721	84_{-28}^{+16}	11	30	$375.5_{-23.6}^{+26.5}$	3.43×10^{-5}	6.71
110301	70 ± 22	7	48	$106.80_{-1.75}^{+1.85}$	3.35×10^{-5}	75.59
110825	< 47	12	29	$233.6_{-19.9}^{+21.9}$	5.06×10^{-5}	6.16
110625	< 56	27	41	190_{-14}^{+17}	6.09×10^{-5}	8.21
100715	< 83	30	19	-	-	-
101014	< 71	30	54	$181.40_{-5.44}^{+5.66}$	1.88×10^{-4}	3.74
101123	-	17	74	476_{-11}^{+11}	1.28×10^{-4}	4.28

図9: GAPで観測したGRBの解析結果のまとめ

GAPの観測で 2.9σ 以上の信頼度で3例のGRBから偏光を検出した。また4例のGRBでは偏光の上限値を決定することができた。この結果により、GRBはシンクロン放射によってガンマ線が放射されている可能性が非常に高いことがわかった。

6 新型偏光検出器

GAPでの観測はGRBの偏光を強く示唆するものであった。われわれは今後より高性能な偏光検出器を開発し追観測を行うことで、GAPでの成果を補いたいと考えている。

新しい偏光検出器においてはMulti Pixel Photon Counter(MPPC)と呼ばれる新型光検出器を用いようと考えている。またデザインについても山形大学のPHENEXを参考にしてマトリックス型の検出器にし、同時に検出器を大型化することで、有効面積、検出効率の向上を図りたいと考えている。

7 新型偏光検出器のデザイン

GAP では中心に大型の 12 角形のプラスチックシンチレータ、その周りに 12 枚の CsI(Tl) シンチレータを吸収体として配置していた。新型偏光検出器では多数のプラスチックシンチレータと CsI(Tl) シンチレータをマトリックス状に配置した構造を取ろうと考えている。

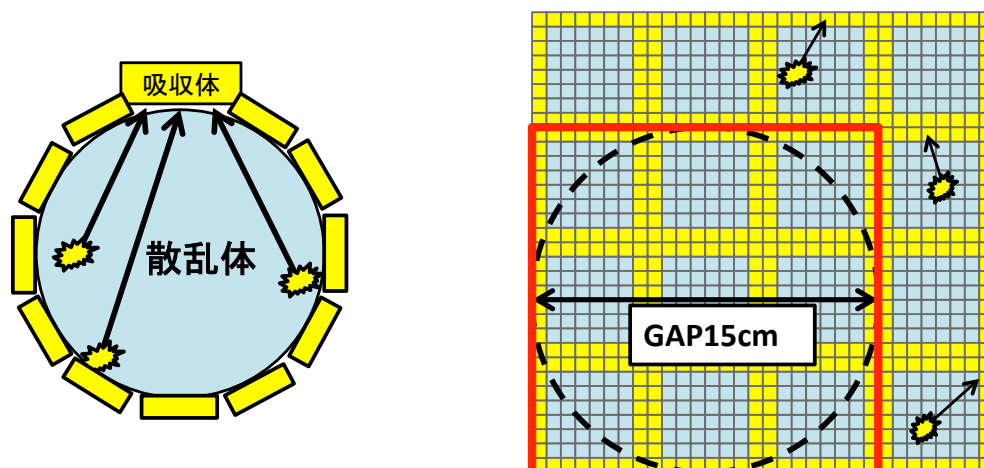


図 10: GAP と新型偏光検出器の構造の違い

GAP 偏光検出器は中心のプラスチックシンチレータでは'ガンマ線が入射した'という情報しか得ることができなかった。そのためプラスチックシンチレータのどこにガンマ線が入射したのかがわからず、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、それぞれどの散乱体にガンマ線が入射したかが判別でき、より詳細にガンマ線の散乱方向の情報を得ることができる。

また GAP に比べ面積比で約 2 倍の大きさに大型化することで有効面積、検出効率を向上させる。

8 Multi Pixel Photon Counter(MPPC)

GAP では光センサーとして光電子増倍管を使用した。新型偏光検出器では Multi Pixel Photon Counter(MPPC) と呼ばれる新型光検出器を使用しようと考えている。MPPC は Si-PM(Silicon Photomultiplier) と呼ばれる新しいタイプの光検出器である。MPPC は数 100 から数 10000 個の APD を 2 次元に敷き詰めた構造をしていて、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) ことで僅かな光の入射に対してもガイガー放電と呼ばれる放電現象を起こす。MPPC の写真を図 11 に載せる。

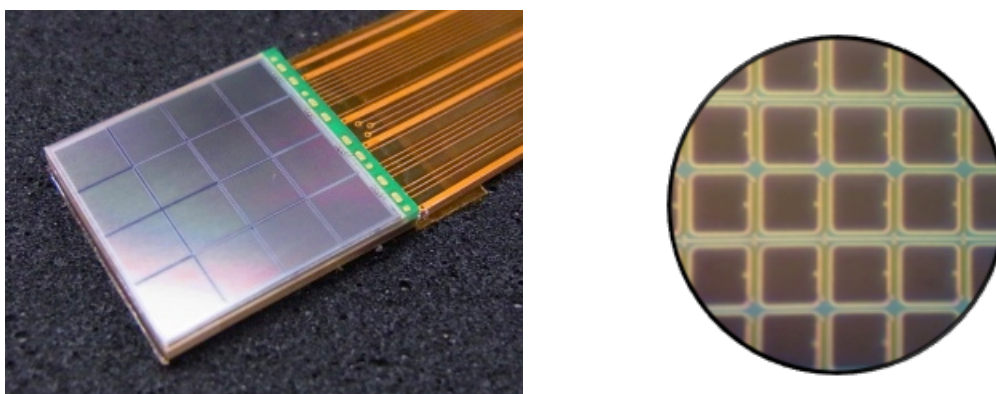


図 11: 図左は使用した MPPC の写真、3mm 角の MPPC 素子が 4×4 (16 個) のアレイ状に配置してある。図右は MPPC の 1 素子の受光面を拡大したものの。

MPPC には以下のような特徴がある。

1. 量子効率が高い。
2. 1 光子にも優れた感度を持つ。
3. ゲインが高い。(10⁶ 程度)
4. 小型、軽量
5. 磁場の影響を受けにくい。
6. 低電圧動作。

MPPC は小型、軽量、低電圧動作という点で衛星搭載に適した検出器である。また、量子効率という観点でも従来の光電子増倍管と比べ同等以上の性能を持っており、非常に将来性のある検出器である。

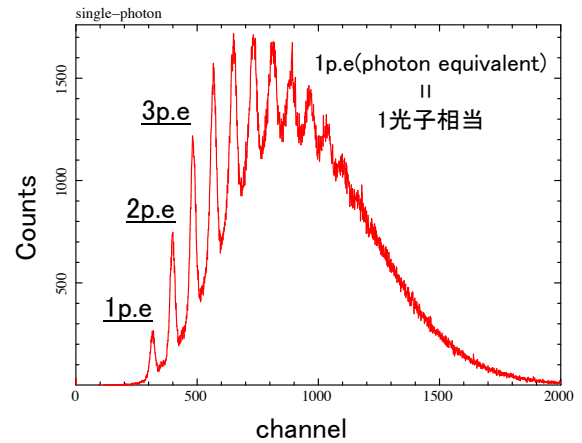
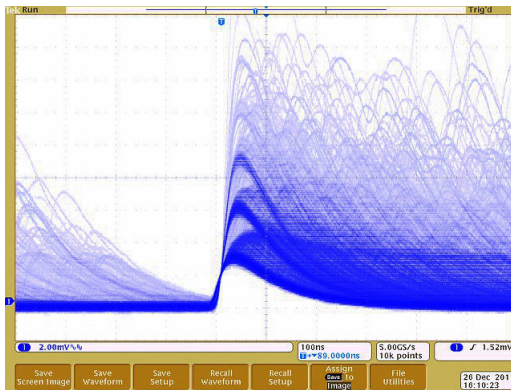


図 12: 図左は典型的な MPPC の出力波形。光に反応したピクセルの数によって離散的な出力が得られている。図右は MPPC を用いて取得した光子数毎の出力波高値分布、MPPC の左側のピークから 1 光子による出力、2 光子による出力、となる

図 11 右の写真にあるように MPPC は非常に微細なピクセル状の構造をしている。これらのピクセルはそれぞれ光の入射に対して独立に一定の大きさの信号を出す。各ピクセルからの出力の大きさを Q_{APD} 、光に反応したピクセルの数を N とすると MPPC からの出力は

$$Q_{total} = Q_{APD} \times N \quad (1)$$

という式で表される。MPPC 全体としての出力は各ピクセルからの信号の総和として得られ、離散的な値となる。図 12 は典型的な MPPC からの出力波形、と光子数毎の出力波高値分布である。これらの図からわかるように MPPC は光に対して非常に高い感度を持った検出器であるといえる。

9 4 × 4 モデル偏光検出器

現在、試作段階として MPPC を用いた 4 × 4 モデルの偏光検出器を開発している。

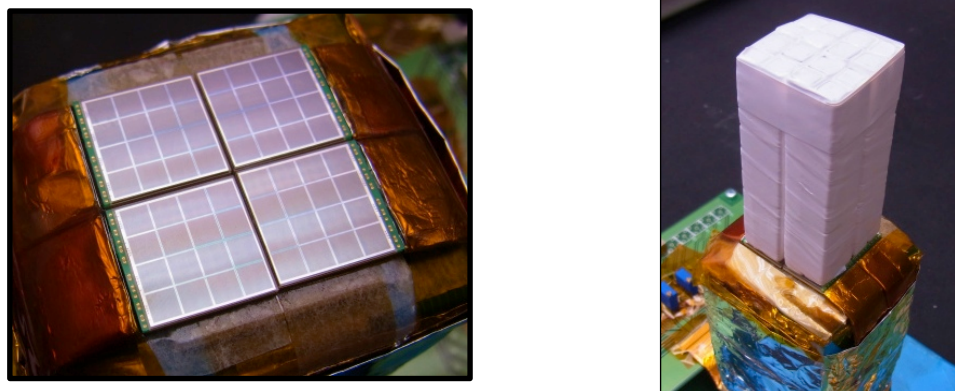


図 13: 図左、シンチレータを乗せる前の MPPC の写真。1 つの MPPC に対して 4 素子を結合し 1 つの読み出しができるように回路基盤を調整している。図右、高さ 60mm、6mm 角、のシンチレータが 16 本並んでいる。

偏光検出器には MPPC を 4 つ並べて使用した。また一つの MPPC に対して 4 素子の信号を結合し、一つのセンサーとして読み出せるように回路基盤を調整した。シンチレータは中心の 4 本が散乱体としてのプラスチックシンチレータ、その周りに 12 本の CsI(Tl) シンチレータが吸収体として配置してある。この検出器に ^{57}Co を照射して動作確認を行った。

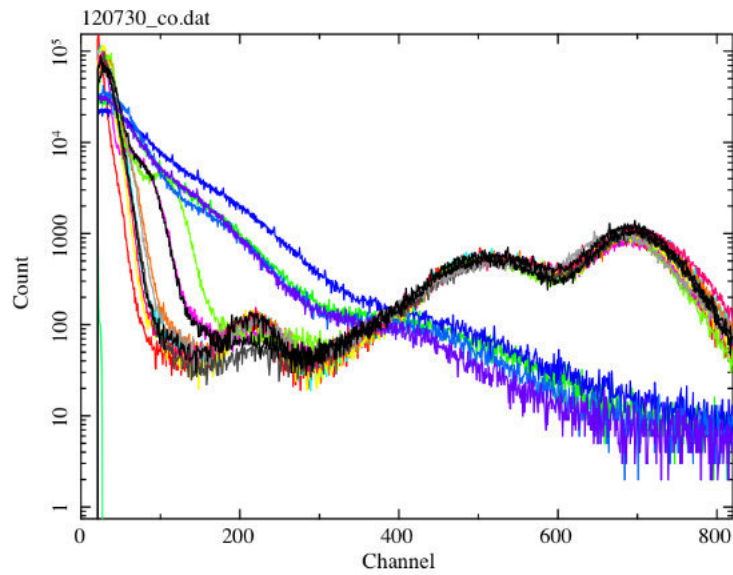


図 14: 図 13 の 4×4 偏光検出器に ^{57}Co を照射して取得したスペクトル。

図 14 が ^{57}Co を照射して取得したスペクトルである。4つあるなだらかなスペクトルがプラスチックシンチレータによるスペクトル。右側にある大きなピークが CsI(Tl) による ^{57}Co のピークである。またスペクトルの取得の際には回路基板での低抗値等を調整することで MPPC 毎のゲインの補正を行なっている。この実験により基本的な動作を確認することができた。

9.1 ^{57}Co を用いての散乱角度分布の作成

またこのデータを元にして中心のプラスチックシンチレータで散乱したガンマ線の散乱角度分布の作成を行った。散乱角度分布の作成にあたっては中心のプラスチックシンチレータと CsI(Tl) の間でコインシデンス (同期) したものをコンプトン散乱したイベントとして取得した。

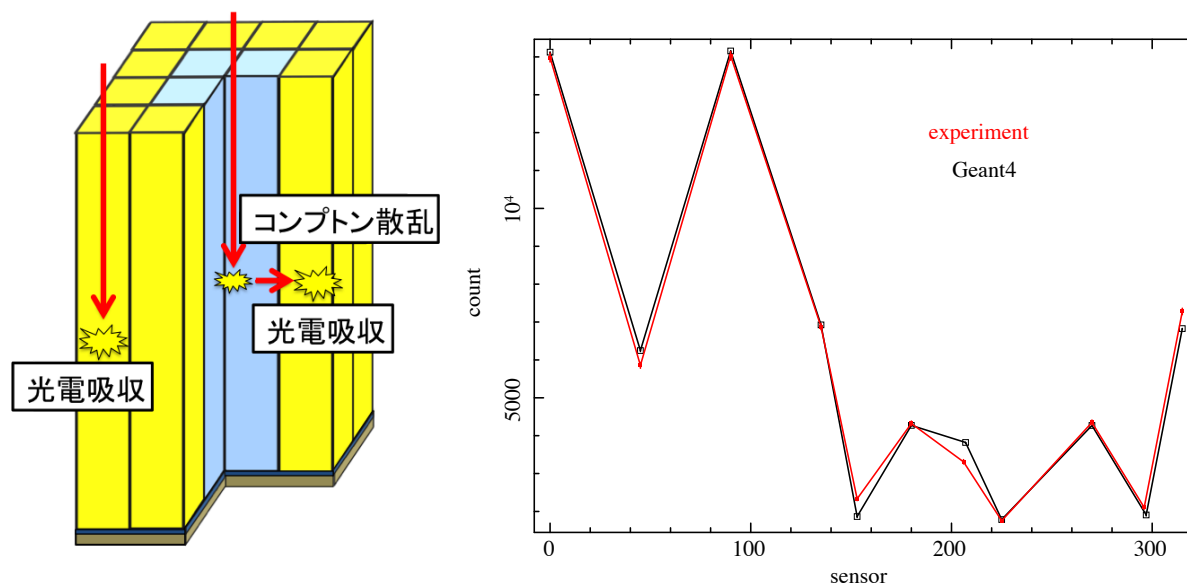


図 15: 図左、イベントの取得の際には中心のプラスチックシンチレータと CsI シンチレータが同時に光ったイベントのみを選択した。図右は作成した散乱強度分布、実験値とシミュレーションの間で系統誤差 3.7%の精度で一致している。

図 15 右が作成した散乱強度分布である。ある 1 本のプラスチックシンチレータとコインシデンスした各 CsI シンチレータの角度毎の強度分布をプロットしている。赤点のデータプロットが実験によって得られた結果、黒色のデータが Geant4 と呼ばれるモンテカルロシミュレーターによって得られたシミュレーションの結果である。4 × 4 モデルの偏光検出器では幾何学的な対称性が低いため、プラスチックシンチレータからの見込む角度によって散乱ガンマ線のカウント数が異なっている。今回の実験では測定結果とシミュレーションの間で 3.7%の系統誤差で一致が見られた。今後は実際に偏光した線源を入射させ、MPPC を用いた偏光検出を行いたいと考えている。

10 まとめと今後の課題

1. GAP での観測より 3 例の GRB から偏光を検出
2. GRB はシンクロトロン放射によって輝いている事を特定した
3. 新型偏光検出器の基礎開発として、MPPC を使用した 4×4 のマトリックス型偏光検出器を試作
4. 16ch 同時読み出しを行い基本的な動作を確認
5. Co 線源を用いてコンプトン散乱した光子の散乱角度分布を作成、系統誤差 3.7%の精度でシミュレーションと一致
6. 今後は偏光したガンマ線を入射させ、実際に偏光が検出できるか実験