

PoGOLite 気球実験 2016 年フライト

高橋 弘充 (広島大)、PoGOLite チーム

スウェーデン王立工科大、ストックホルム大、DST Control、広島大、東大、名大、早稲田大、ISAS/JAXA、東工大

1. はじめに : PoGOLite から PoGO+へ

Polarized Gamma-ray Observer (PoGOLite : PI Mark Pearce スウェーデン王立工科大学) 気球実験の目的は、スウェーデンのキルナ市にある Esrange 気球実験場から放球し、パルサー星雲やブラックホール天体を硬 X 線で観測してその偏光度と偏向角を測定することで、これらの天体における宇宙線加速と高エネルギー放射のメカニズムを明らかにすることである。2013 年 7 月 12 日～26 日の 14 日間におよぶフライトに成功し、高度 34~40 km でスウェーデンからカナダ上空を経てロシアまで、北極圏を周回した。この間、姿勢制御については要求精度 0.1° を 1 桁上回る十分な精度でコントロールすることができた。一方で、硬 X 線偏光計は 3 日目に電源系が動作しなくなり、3 日間の観測データしか取得できなかった (偏光計の地上較正実験、ゴンドラやフライトについては、それぞれ以下の論文を参照[1],[2])。得られた科学的な成果についても、現在論文を投稿中である。

前回のフライトが 3 日間と短時間しか行えなかったため、我々は来年 2016 年夏季に再フライトを実施することをスウェーデン宇宙公社に申請し、5 日以上長期観測が認められた。現在は、偏光計が動作不良に陥った原因への対策を施すとともに、5 日間の観測時間でも「かに星雲」から約 10%の偏光度を検出できるような偏光計を改良している。PoGOLite から様々な改修を施しており、2016 年のプロジェクト名は PoGO+となっている。

2. 硬 X 線偏光検出器 PoGOLite 2013 年版

PoGOLite は 25~240 keV 帯域において硬 X 線・軟ガンマ線の偏光を検出できる能力を持つ検出器である。シンクロトロン放射や散乱プロセスによって生じる偏光は、X 線・ガンマ線帯域においても、中性子星やブラックホール、超新星残骸、活動銀河核などにおける高エネルギー放射機構を研究する上で非常に強力な観測手法と考えられている。しかしながら、非常に明るい天体現象であるガンマ線バーストを除いては、現在までに有意な偏光の検出が報告されている天体は「かに星雲」(パルサー星雲)と「はくちょう座 X-1」(ブラックホール連星系)のみであり、その観測帯域も OSO-8 衛星による数 keV と、INTEGRAL 衛星による数百 keV の 2 帯域のみに限られている。こうした中で、最近になって本格的な X 線・ガンマ線偏光検出器の開発が世界中で進められている (ASTRO-H, PRAXyS, IXPE, XIPE 等)。我々の PoGOLite 実験は数日以上長時間フライトを行うことで、世界に先駆けて「かに星雲」と「はくちょう座 X-1 (low/hard 状態で Crab と同程度のフラックス時のみ観測可能)」、太陽フレアからこのエネルギー帯域における偏光検出を目指している。

偏光計は、図1に示すように主検出部（PDCユニット）をハニカム構造に並べており、天体からのX線・ガンマ線がこれらのユニット間でコンプトン散乱と光電吸収を起こす際の散乱角の異方性を検出することで偏光を測定する。PDCユニットの数は、2013年のパスファインダー観測では61本である。バックグラウンドとなる荷電粒子や中性子、天体以外からのX線・ガンマ線を除去するため、PDCユニットは井戸型フォスウィッチ検出器（主検出部：Fastプラスチックシンチレータ、シールド部：SlowプラスチックシンチレータとBGOシンチレータ）にして視野を絞り、さらに周囲をBGOアクティブシールド（SASユニット）とポリエチレン製のパッシブシールドで覆う。ただし約15 cm厚のポリエチレンで覆っていても、いぜん大気中性子による弾性散乱がバックグラウンドの支配的な要因であることから、中性子フラックスを計測するためにポリエチレンで熱化された中性子を計測できる中性子シンチレータ検出器も搭載している。これらPDC、SAS、中性子検出器の信号処理には、ASTRO-Hなどの科学衛星で利用されるSpaceWire通信規格を用いている。また検出器自身の系統誤差をキャンセルするため、観測中は検出器全体を5分で1回転させる。

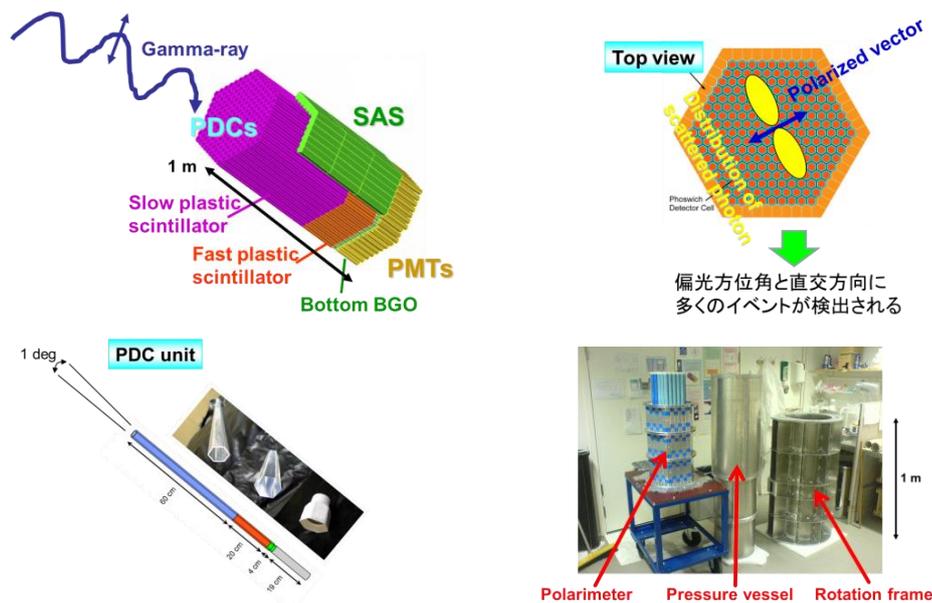


図1：(左上) PoGOLite 検出器の概要、(右上) コンプトン散乱を利用して偏光を検出する概念図、(左下) PDCユニットの概要、(右下) 実際に製作した偏光検出器。

3. PoGO+での改良点 2016年版

今回のPoGO+も、以前のPoGOLiteと同様に61本のPDCと30本のSASから構成され、25～240 keV帯域の偏光を検出できる能力を保持する。ここへ、2013年のフライトで実測した偏光計の電源系の不具合への対策を実施し、上空での気球環境を踏まえてバックグラウンドを除去するために検出器を改良に取り組んでいる。

偏光計の電源が動作しなくなった原因は、回収したゴンドラを解体して調べたところ、

電源部の ROM が書き換わってしまったことにあった（ROM を書き直したところ、正常に動作したことからハードウェアには何も不具合が生じていなかった）。これは 2013 年のフライト中に検出器が高温となり何度も電源の OFF/ON を繰り返した際に、電源部の ROM にアクセスしたまま電源を OFF したことに原因があることが判明した。これを受けて、PoGO+では熱設計を見直したり、読み出し回路を改良することで電力を削減し、偏光計全体が高温にならないように構造を見直した。これにより電源を OFF しなくてはならない機会を減らす（無くす）ことができる。また仮に電源 OFF をする必要が生じてしまった場合にも、電源部には簡易 UPS を追加することで、ROM へのアクセスが終了したことを確認してから電源を OFF する構成とした。実際に実機が完成した際には、何回も ON/OFF を繰り返すストレステストを実施して、不具合が生じないことを実証した上で放球する。

2013 年の実際のフライトデータを解析したところ、以下の図 2、3 のように、中性子に起因したバックグラウンドの寄与が大きいことが判明した。この点は、PoGOLite 計画が当初は緯度の低く宇宙線のフラックスが比較的低いアメリカ Fort Sumner でのフライトを想定していたためであり、スウェーデン上空での実測データを元に検出器を改修することで、性能の向上が見込まれる。現在、我々はおもに主検出部の改良（次ページで詳述）、中性子用のポリエチレン製パッシブシールドの最適化、読み出し回路の性能向上によるデッドタイムの削減（上記の発熱量の削減に加え）を行っている。

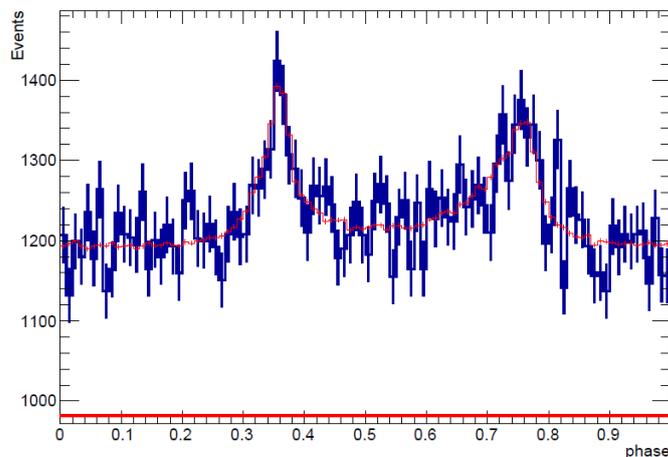


図 2: PoGOLite で観測した Crab のライトカーブ (青)。2 ヒットイベントのみを利用。比較対象として、「すざく」衛星 HXD-PIN 検出器のデータを重ねてある (赤)。パルス成分の高さと連続成分の比較から、S/N 比は約 0.25 であると推定される。[2]

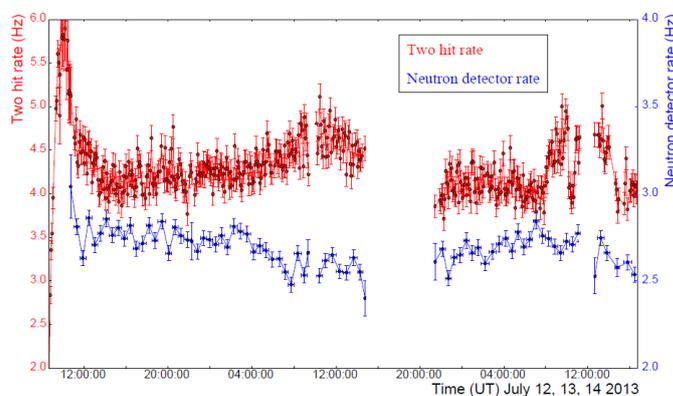


図 3: 2 ヒットイベント (偏光計: 赤) と、バックグラウンド源である中性子イベント (中性子検出器: 青) のレート。最初のイベントレートが高い期間は高度上昇中。Crab 観測は、各日の 12 時 (UT) 頃に行われており、7/13、7/14 では顕著に Crab 天体信号に起因した 2 ヒットイベントレートの上昇が見られる。[2]

検出器にとって、四方八方から降り注ぐバックグラウンドは体積に比例して大きくなるが、前方からのみ入射する天体信号は反応させる長さが重要である。そこで、「かに星雲」からのイベントとスウェーデン上空でのバックグラウンドの寄与を比較することで、主検出部 Fast シンチレータの長さを 20cm から 12cm へと短くした。この結果、天体信号の検出効率は 1 割しか下がらずに、バックグラウンドレートは $12/20=6$ 割に削減されるはずである。

また、PoGOLite では、シンチレータをコーティングしている BaSO₄ の反射材から 1% レベルで光漏れがあり、それにより隣の検出器に擬似的な 2 ヒットイベントが生じてしまっていることが判明していた。今回の検出器の再作成においては、シンチレータのコーティングの仕方も改良し、光漏れが起こらないように細心の注意を払った。

外周を覆う SAS アクティブシールドに加え、PoGOLite では各 PDC ユニットに細長い中空の Slow プラスチックシンチレータ (Pb と Sn のシートでくるまれている) を付けることで、さらにアクティブに視野を絞っていた。しかし、微弱な光量ではシールド部の Slow シンチレータか、主検出部の Fast シンチレータかの判別が難しく、バックグラウンド信号をコンプトンイベントと判定せざるを得ない状況が生じていた。そこで今回の再製作の際に Slow プラスチックシンチレータは、パッシブな Pb+Sn+Cu のシールドに置き換えることにした。これにより、高エネルギー荷電粒子に対して視野が大きくなってしまいが、シールド部からの偽信号は一切なくなるとともに、3mm 厚の Slow シンチレータが 0.5mm 厚の Cu になったことで開口率が上昇し約 2 割の天体信号の増加が見込まれる。

こうしてバックグラウンドや偽信号を減少させることで、読み出し回路の性能向上と相まって、2013 年には約 25% あったデッドタイムを 10% 程度まで減少させられる見込みである。

我々 PoGOLite チームでは、2016 年夏季にスウェーデンの Esrange 気球実験場から 5 日間以上のフライトを実施する予定である。2013 年のフライトの経験を踏まえ、検出器に改良を加えることで「かに星雲」を 5 日間で 15 時間 (1 日あたり「かに星雲」が仰角 20 度以上の仰角にある 6 時間のうち半分の 3 時間の観測を想定) 観測できれば、約 10% の偏光度を検出できると考えている。

参考文献

- [1] M. Chauvin et al., *Astroparticle Physics*, accepted, “Preflight performance studies of the PoGOLite hard X-ray polarimeter”
- [2] M. Chauvin, et al., *Experimental Astronomy*, accepted, “The design and flight performance of the PoGOLite Pathfinder balloon-borne hard X-ray polarimeter”