

## 硬 X 線偏光検出器 PoGOLite 気球実験 2016 年フライト

高橋 弘充、河野 貴文、大橋 礼恵、内田 和海 (広島大学)、Maxime Chauvin, Mette Friis, Miranda Jackson, Mozsi Kiss, Victor Mikhalev, Mark Pearce, Theodor Stana (スウェーデン王立工科大学)、PoGOLite/PoGO+チーム

### 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) 気球実験は、25~100 keV の硬 X 線帯域で天体の偏光度と偏向角を測定する。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 (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)」から偏光検出を目指している。

これまでに PoGOLite は、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 でスウェーデンの Esrange 気球実験場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  $0.1^\circ$  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、また得られた科学的な成果については、それぞれ以下の論文を参照[1],[2],[3])。

前回のフライトが 3 日間と短時間しか行えなかったことから、我々は今年 2016 年 7 月 12~18 日の 7 日間にわたって再フライトを実施した。この際には、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」(パルサー星雲)から約 10%の偏光度を検出できるように偏光計を改良しており、プロジェクト名を PoGO+に変更している。

### 2. 2016 年の PoGO+のフライトの概要

PoGO+は 2016 年 7 月の 7 日間で、スウェーデン Esrange 実験場から、グリーンランド上空を経て、カナダのビクトリア島まで到達し(図 1 の青線)、すでにゴンドラに保存していた全フライトデータを無事に回収できている。健康診断、天体観測データともに詳細な

解析は進行中であるが、約 40km の高度に到達し、予定通りに運用・姿勢制御も実施できたため、7日間で「かに星雲」を7回、「はくちょう座 X-1」を6回観測することに成功した。ゴンドラに設置したカメラによって、打ち上げ前から高度 40km でのフライト中、気球を切り裂いてからパラシュートで着地するまでの映像が、スウェーデン宇宙公社により youtube に投稿されている (<https://www.youtube.com/watch?v=0oxd9-Wl-Qg>)。この上空での映像からも、ゴンドラが方位角を規則正しく変えていることが分かり、天体観測とバックグラウンド観測を予定通り交互に実施できていることを確認することができる。



図 1 : 2016 年 7 月 12~18 日の PoGO+ のフライトの軌跡。スウェーデンからカナダまで。

### 3. PoGO+ の硬 X 線偏光計

PoGOLite/PoGO+ は、25~100 keV の硬 X 線帯域において、偏光を検出できる能力を持つ装置である。この偏光計について、2013 年の PoGOLite から 2016 年 PoGO+ への改良点は、昨年 2015 年の集録に詳細がまとめられている(性能の見積りについては論文[4]も参照)。

図 2 に示すように、PoGO+ の偏光計は 61 本の主検出部 (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。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 ユニットはフォスウィッチ構造 (主検出部: 12 cm の Fast プラスチックシンチレータ、下に 4 cm の BGO シンチレータ) をしている。また上部に鉛、スズ、銅のパッシブなコリメータ (67.5 cm 長) を置き、視野を約  $2^\circ$  に絞っている。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 2 台を搭載している。

これら PDC、SAS、中性子検出器の 93 本の光電子増倍管の信号は、日本チームが新規開発した 100 MHz (PoGOLite では 37.5 MHz) サンプルの高速 ADC ボードで処理される。これにより、PDC でのプラスチックシンチレータ (蛍光の減衰時定数~数 ns) と BGO (~300 ns) の信号は、2013 年と同様に容易に波形弁別される。今回さらに波形サンプリングを高速化したことで、プラスチックシンチレータで反応した天体からのガンマ線と、バックグラウンドである高速中性子の信号もある程度の弁別が可能となり、高速中性子と判定された信号を除去することで S/N 比の向上が期待される (論文[5]参照)。

信号処理部において取得されたデータについては、「ひとみ」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 6 分で 1 回転 ( $1^\circ$  /秒) させる。

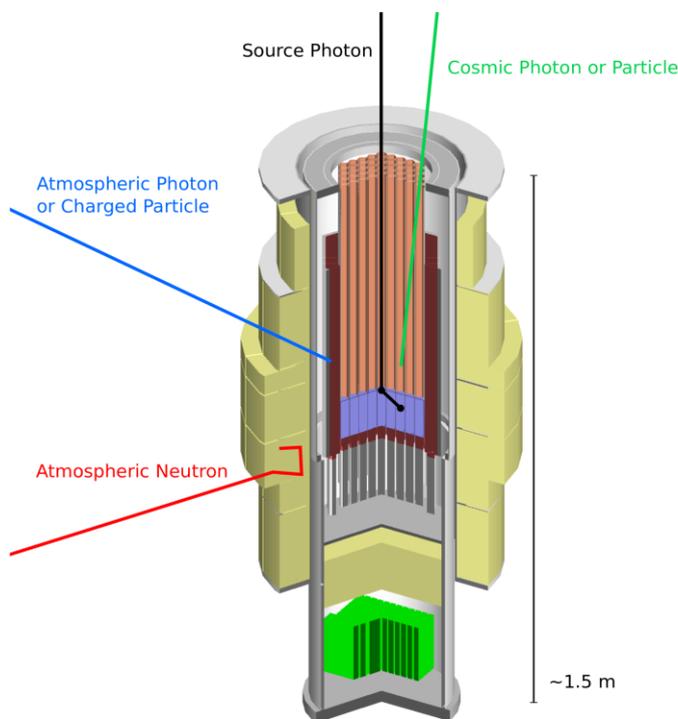


図 2 : PoGO+の偏光計の概念図。

- 61 本の SDC  
パッシブなコリメータ (橙)  
プラスチックシンチレータ (青)
- 下部の BGO (赤)
- 30 本の SAS (赤)。
- 光電子増倍管 (灰)。
- ポリエチレンシールド (淡黄)。
- 信号処理部 (緑)。

#### 4. ゴンドラ

2016 年の PoGO+のゴンドラを図 3 に示す。前回 2013 年のフライトから、太陽パネル、バッテリー、姿勢制御 (方位角、仰角、偏光計の回転) についての変更はない。姿勢計測について、differential GPS は同じままであるが、スタートラッカーを 2 台から 1 台へ、代わりに太陽トラッカーの追加を行った。これは、観測天体の 1 つである「かに星雲」が太陽方向にあり、2013 年のフライト中にスタートラッカーで星を認識することが困難な場合があったためである。一方で反太陽にある「はくちょう座 X-1」の観測では、2013 年と同じく偏光計のすぐ直下に平行に設置されているスタートラッカーにより姿勢制御を行った。

地上との通信は 2013 年と同様に、地上アンテナと直接に通信を行う E-link (スウェーデン宇宙公社が提供) と、スカンジナビア半島を離れた後に利用するイリジウム衛星通信の 2

つを利用している。今回はイリジウム通信に、電話回線に加え、最大 128 kbps のデータ通信を行える高速モデム (OpenPort) も設置した。これにより、フライト中のリアルタイムのモニタリングや運用が容易になった。



図 3 : 2016 年フライト直前の PoGO+ゴンドラ。中心にあるのが偏光計、スタートラッカーは偏光計の直下にある。上部の左側にあるのが新しく追加した太陽トラッカー。ブームの両端に differential GPS。上部の右側にある丸いアンテナがイリジウム衛星通信の OpenPort。

我々PoGOLite/PoGO+チームは、2016年7月にスウェーデンの Esrange 気球実験場から再フライトを実施した。2013年のフライトで見つかった不具合への対策に問題はなく、今回のカナダまでの7日間のフライトで、「かに星雲」を7回、「はくちょう座 X-1」を6回観測することに成功した。フライトデータの詳細解析は現在進行中である。

### 参考文献

- [1] M. Chauvin et al., *Astroparticle Physics*, Vol. 72, 1-10, 2016, “Preflight performance studies of the PoGOLite hard X-ray polarimeter”
- [2] M. Chauvin, et al., *Experimental Astronomy*, Vol. 41, 17-41, 2016, “The design and flight performance of the PoGOLite Pathfinder balloon-borne hard X-ray polarimeter”
- [3] M. Chauvin, et al., *Monthly Notices Letters of the Royal Astronomical Society*, Vol. 456, L84-L88, 2016, “Observation of polarized hard X-ray emission from the Crab by the PoGOLite Pathfinder”
- [4] M. Chauvin, et al., *Astroparticle Physics*, Vol. 82, 99-107, 2016, “Optimising a balloon-borne polarimeter in the hard X-ray domain: From the PoGOLite Pathfinder to PoGO+”
- [5] T. Kamae, et al., *Astroparticle Physics*, Vol. 30, 72-84, 2008, “PoGOLite-A high sensitivity balloon-borne soft gamma-ray polarimeter”