

## PoGO+気球実験による 2016 年フライトの成果

高橋 弘充、河野 貴文、大橋 礼恵、内田 和海、水野 恒史 (広島大学)、釜江 常好 (東京大学)、片岡 淳 (早稲田大学)、田島 宏康 (名古屋大学)、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)、H-G. Floren (ストックホルム大学)、PoGOLite/PoGO+チーム

### 1. 硬 X 線偏光検出器 PoGO+気球実験の 2016 年フライト

Polarized Gamma-ray Observer (PoGOLite/PoGO+ : PI Mark Pearce スウェーデン王立工科大学) 気球実験は、20~160 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、ASTROSAT 衛星で偏光観測が試みられたり、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 (IXPE, XIPE 等)。

我々の PoGOLite/PoGO+実験は数日以上 of 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)」の硬 X 線偏光観測を実施してきた。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。残念ながら硬 X 線偏光計は 3 日目に電源系が動作しなくなったため、3 日間の観測データしか取得できなかった。「かに星雲」についての観測結果を論文[1]にまとめてある(「はくちょう座 X-1」は、high/soft 状態で硬 X 線フラックスが低かったため、信号は検出されなかった)。

電源系の不具合解消や検出器の改良を行い、PoGO+と改名して次に行ったのが 2016 年 7 月 12~18 日の 7 日間の再フライトである。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た。今回も約 40km の高度に到達し、予定通りに運用・姿勢制御 (約 0.1° のポインティング精度) 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。打ち上げから着地までの映像が、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。

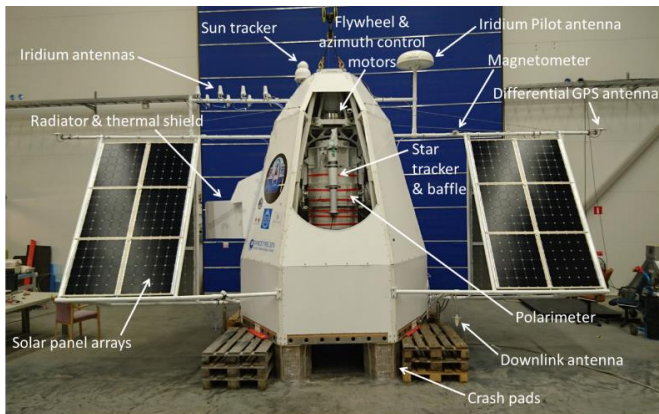


図1:2016年フライト直前のPoGO+ゴンドラ。中心にあるのが偏光計、スタートラッカーは偏光計の直下にある。上部の左側にあるのが新しく追加した太陽トラッカー。ブームの両端に differential GPS。上部の右側にある丸いアンテナはイリジウム衛星通信の OpenPort。

## 2. PoGO+の硬 X 線偏光計

PoGOLite/PoGO+は、20~160 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（偏光計の詳細は昨年 2016 年の集録や論文[2]を参照）。図 2 に示すように、偏光計は 61 本の主検出部のプラスチックシンチレータ（SDC 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天体以外からの X 線・ガンマ線を除去するため、視野を鉛、スズ、銅のパッシブなコリメータで絞り、下部と側面は BGO シンチレータ（SAS ユニット）をアクティブシールドとして配置してある。さらに中性子バックグラウンド除去のため、最外層からポリエチレンで覆っている。偏光計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° /秒）する。

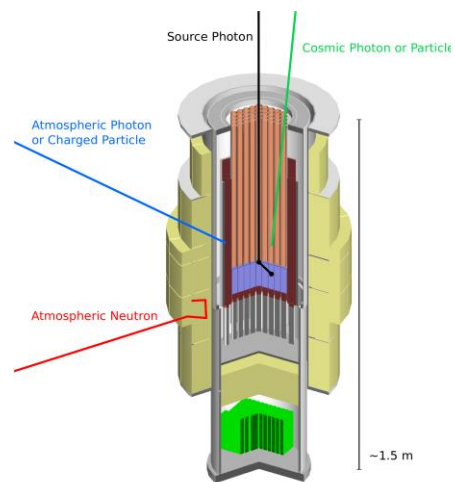


図 2 : PoGO+の偏光計の概念図。

- 61 本の SDC：フォスウィッチ構造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）。

## 3. PoGO+の 2016 年フライトの科学成果：「かに星雲」の偏光検出

2016 年の 7 日間のフライトで、PoGO+偏光計は「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。今回は論文[3]として発表した「かに星雲」の偏光検出について報告する（「はくちょう座 X-1」のデータ解析も進行中である）。

PoGO+の硬 X 線偏光計で「かに星雲」観測中に得た 2-hit イベントのライトカーブが図 3 である。2-hit イベントとは、主検出部のプラスチックシンチレータ 2 ユニットが同時に反応し、コンプトン散乱と光電吸収によって生じたと考えられるイベントであり、散乱角を測定する偏光解析に利用される。PoGO+には撮像能力はないが、15分おきに姿勢を変え「天体、右側 5 度のバックグラウンド、天体、左側 5 度のバックグラウンド、天体。。。」と天体観測とバックグラウンド観測を交互に繰り返しているため、ほぼ同時期のバックグラウンド情報が得られている。15 分間では、バックグラウンドの変化は小さいと考え、観測時間で規格化してバックグラウンドを差し引いた解析を行う。

図 4 は全観測時間で求めたモジュレーションカーブ (2-hit イベント間の角度であり、コンプトン散乱の散乱角分布に対応する) である。天体からの光が偏光していれば、クライン仁科の効果により、偏光方位角とは垂直方向にコンプトン散乱されやすい。よって、360°モジュレーションカーブ内の 2 方向で検出されるイベント数がピークをもつ (180°成分)。PoGO+では、偏光計を 1°/秒で回転させているため、その回転角をハニカム構造で決まる 60°刻みに足してあり、60°よりも細かい 1°刻みのプロットになっている。3 つのモジュレーションカーブは上から、(上)「かに星雲」観測中、(中)左右 5°ずらしたバックグラウンド領域を観測中、(下)観測時間で規格化してからバックグラウンドを差し引いた正味の天体信号、になっている。

(中)バックグラウンド観測時でも、モジュレーションカーブは平坦ではない。ただし、純粋な偏光によって生じる 180°成分では再

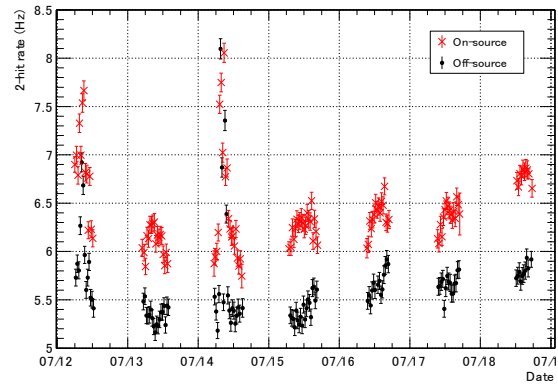


図 3: 「かに星雲」観測中の 2-hit イベントのライトカーブ。赤: 天体観測中、黒: 左右 5°ずらしたバックグラウンド領域を観測中。

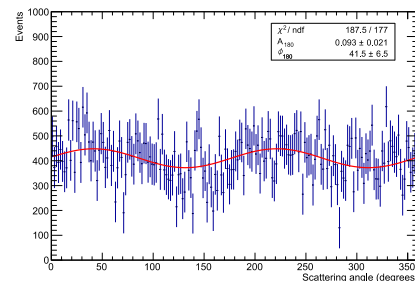
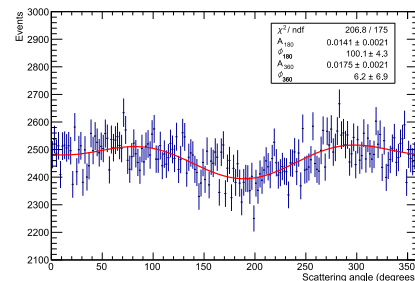
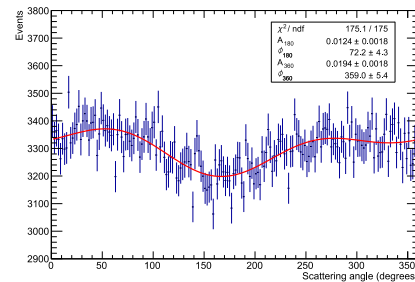


図 4: 「かに星雲」から得たモジュレーションカーブ。上: 天体観測中、中: バックグラウンド観測中、下: 正味の天体信号 (上から中を引いたもの)。

現されず、 $360^\circ$  成分 ( $360^\circ$  内の 1 方向のみでイベント数が多い) が卓越している。この  $360^\circ$  成分のピークは、検出器の上下方向に対応することから、検出器の下部から入射する大気中性子バックグラウンドによって生じていると考えられる。(下) バックグラウンドを差し引いた正味の天体信号は、 $360^\circ$  成分は必要なく、 $180^\circ$  成分のみで再現される。これは、バックグラウンドを精度良く差し引けており、また天体からの偏光信号を検出できていると解釈できる。得られた  $180^\circ$  成分の信号は、振幅  $0.093 \pm 0.021$ 、ピークの散乱角は  $41.5 \pm 6.5^\circ$  であった。検出器の偏光検出能力を Geant4 シミュレーションで計算し、この正味のモジュレーションカーブを再現する入射光を推定したところ、「かに星雲」からの硬 X 線放射は偏光度が  $20.9 \pm 5.0\%$ 、偏光方位角は  $131.3 \pm 6.8^\circ$  と  $4\sigma$  以上の有意度で決定することができた。この観測結果は、 $20\sim 160$  keV という硬 X 線帯域において世界で初めての成果である。

「かに星雲」は、中心に 33ms 秒で高速回転するパルサーをもつ。このパルサー周期による偏光の変化を調べたのが図 5 である。パルサー周期で畳み込んだ PoGO+ の 2-hit ライトカーブの上に、先と同じ手法で求めた偏光方位角と偏光度をプロットした。パルサーからのフラックスが高い時間帯を P1、P2 とし、フラックスが一番低い時間帯を Off pulse としてある。全積分した図 4 の場合よりも、分割してイベント数が減るため、統計的には上限値のみが求まった。

全積分した図 4 の偏光方位角は、「かにパルサー」の回転軸  $124.0 \pm 0.1^\circ$  とほぼ平行である。この結果から、シンクロトロン放射は磁場の向きと垂直方向に偏光するため、「かに星雲」の硬 X 線放射は回転軸と垂直のトーラス方向にそろった磁場によって TeV 電子がシンクロトロン放射していると考えられる。現在は理論研究を交え、他波長データを含めて「かに星雲」の磁場構造を考察中である。

## 参考文献

- [1] 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"
- [2] M. Chauvin et al., Nuclear Instruments and Methods A, Vol. 859, 125-133, 2017, "Calibration and performance studies of the balloon-borne hard X-ray polarimeter PoGO+"
- [3] M. Chauvin, et al., Scientific Reprints, Vol. 7, 7816, 2017, "Shedding new light on the Crab with polarized X-rays"

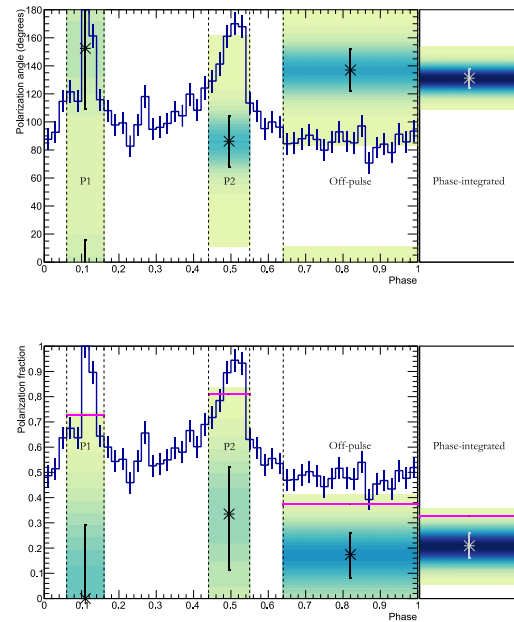


図 5: 「かにパルサー」のライトカーブに応じて求めた (上) 偏光方位角、(下) 偏光度。