



硬X線偏光検出器 PoGO+ 気球実験： 2016年のフライト

高橋弘充(広島大)、PoGOLite/PoGO+ チーム
(東京大、名古屋大、早稲田大、ISAS/JAXA、東工大、Royal Institute of Technology、他)、
PI: Mark Pearce (スウェーデン王立工科大学) <http://web.particle.kth.se/pogo/>

概要

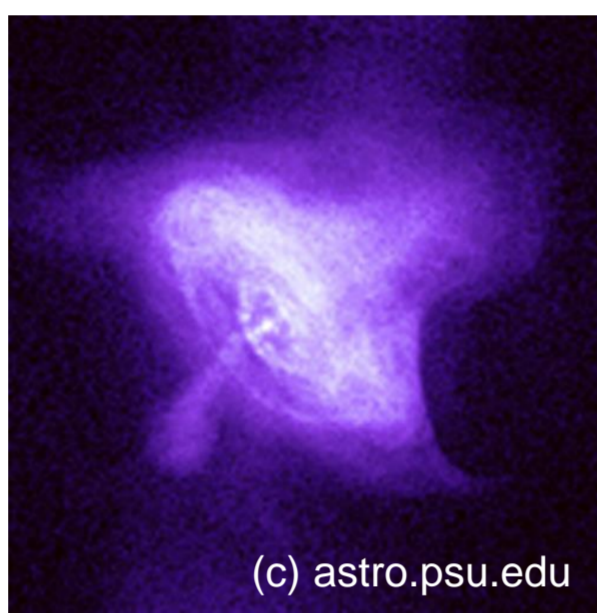
日本とスウェーデンで共同開発したPolarized Gamma-ray Observerは、20~100 keV 帯域において、1 Crab のフラックスをもつ天体から10%の硬X線・軟γ線偏光を検出できる検出器である[1]。世界に先駆けて天体からの偏光検出を目指し、これまでにスウェーデン・キルナ市にあるEsrangle実験場から気球による観測をPoGOLite(2013年に2週間)、PoGO+(2016年に1週間)と実施してきた。PoGO+のフライトは2016年7月12日~18日の1週間で、スウェーデンからグリーンランド上空を経て、カナダのビクトリア島までの長期フライトに成功した。ゴンドラ、姿勢制御、偏光計に大きなトラブルが生じることはなく、X線天体としてカニ星雲とCyg X-1を観測できている。偏光情報に関する科学的な成果は現在データ解析が進行中である。

強い磁場や散乱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、現在までに有意な偏光の検出が報告されている事例は、GAP検出器による明るいガンマ線バースト、OSO-8衛星による数 keV でのカニ星雲の観測と、INTEGRAL衛星による数百 keV でのカニ星雲と Cyg X-1 の観測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(X-Calibur、「ひとみ」/SGD, PRAXyS, IXPE, XIPE, ...)。

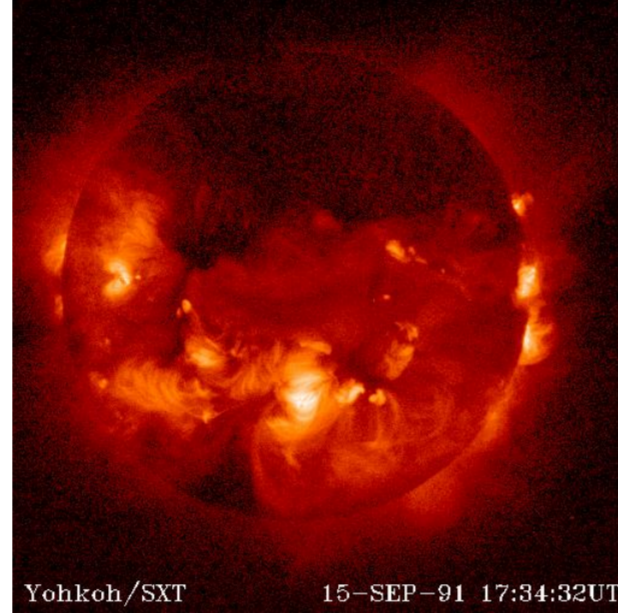
Cyg X-1 (ブラックホール連星系)



カニ星雲(パルサー)



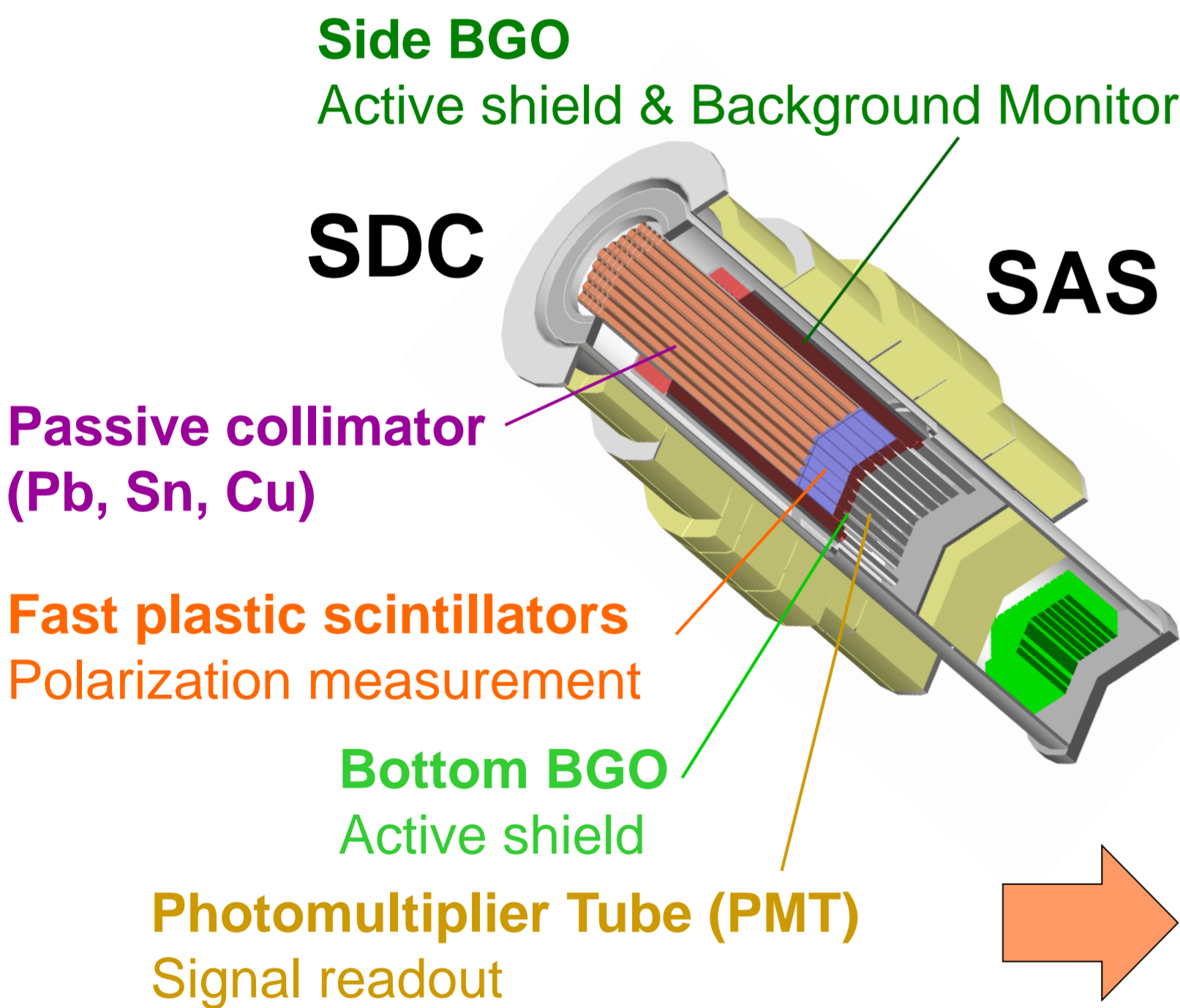
太陽フレア



PoGO+ 検出器

偏光を検出するために、PoGO+では天体からの信号が検出でコンプトン散乱した際に生じる散乱角の異方性を検出する。主検出部は 61 本の **Scintillator Detector Cells (SDCs)** から成り、コンプトン散乱の散乱位置と光電吸収の位置を検出する。1本の SDC は、主検出部の fast プラスチックシンチレータと、シールド部である下部 BGO シンチレータから構成される。また周囲には、30 本のBGOシンチレータ **side anti coincidence shield (SAS)** とパッシブな**ポリエチレンのシールド**を配置し、それぞれ荷電粒子や視野外からのガンマ線、中性子によるバックグラウンド信号を除去する。

The detector array of PoGO+



•主要なバックグラウンド源である大気中性子のフラックスをモニターする熱中性子検出器も搭載[2]

気球高度~40 km

検出器バックグラウンド

- 荷電粒子
- 大気ガンマ線
- 中性子

予想レート：数百 Hz/ユニット

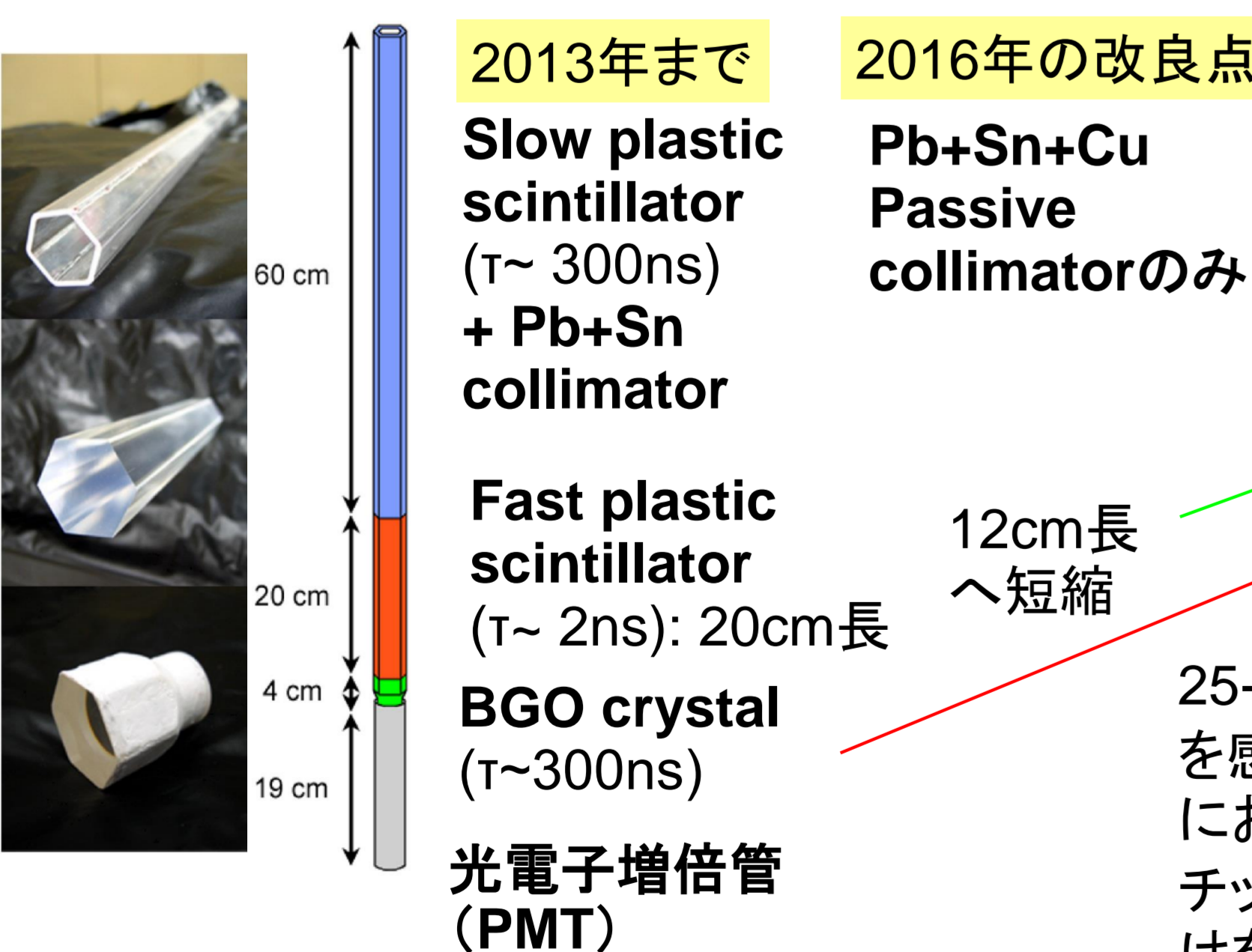
バックグラウンドの低減が重要

- 波形弁別が可能なフォスウィッチ構成
- BGOアクティブシールド
- ポリエチレンシールド(パッシブ)

2016パスファインダーフライト

- 61 SDCs + 30 SAS + 2 中性子検出器 = 93 本のPMT信号
- キルナ(スウェーデンの北部)から放球

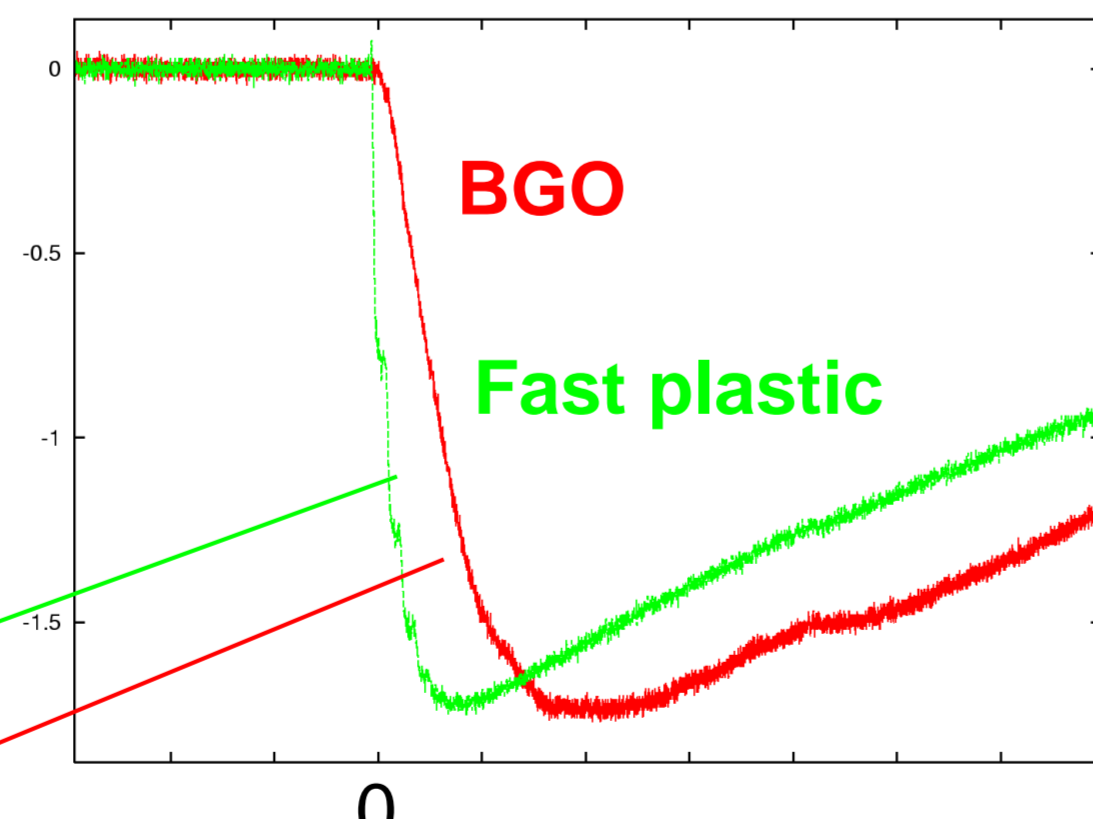
SDCの構造



2013年のフライトでの問題点

- ・バックグラウンドで支配的な中性子をより削減したい。
- ・各ユニット間で、1%の光漏れがあった(偽の複数ヒットが生じていた)。
- ・コンプトンイベントのエネルギーは低いため、低エネルギー側で主検出部とSlowプラスチックシンチレータの信号を波形弁別するのが困難だった。

プリアンプ出力波形



25-100 keVの偏光情報(コンプトン散乱)を感度良く検出するため、デジタル回路における波形弁別により、Fast プラスチックシンチレータのみで反応した信号だけを取得する。

再フライトへ向けて改良した点

- ・主検出部の長さを20cm=>12cmへ短く(検出効率は90%以上を維持)。
- ・ポリエチレンシールドの隙間を埋める。
- ・ラッピングを改良し、光漏れを無視できるレベルに下げた。
- ・Slowプラスチックシンチレータ(2mm厚)をパッシブなCu(500um厚)に置換。
- ・天体への開口面積も増えた。

SpaceWireに基づいたデータ取得系

PoGO+ のデータ取得系は、SpaceWire通信規格に基づいて設計されている。6枚の改良版FADCボード(1ボードあたり16本のPMT信号を処理)は、PMTプリアンプ出力をデジタル信号に変換した後、波形弁別処理を行う。またDIO2ボードが取りまとめる他ボードからのveto信号の情報を加味し、データを取捨選択する。FADCボードに一時保存された波形データは、ルーターと SpaceWire-to-GigabitEther を経由して、外部のPCから読み出される。このデータ取得系では数 kHz の読み出しスピードが実証されており、数十 Hz (veto信号などでバックグラウンドを除去した後)と予想される天体信号に対し、十分な性能を持ち合わせている[3]。

SpaceWire components

改良版FADC board



- ・1枚で16本のPMT信号を処理する。高圧電源の調整も行う。

Digital I/O board2



- ・1枚の DIO ボードで、全体のトリガー信号と veto 信号から、データの取捨選択を行う。

Router board



SpaceWire-to-GigabitEther



2013年のフライトでの問題点

- ・日中に偏光計の回路部の温度が上昇
- ・#太陽と観測天体のCrabの方向が近い
- ・偏光計の電源をOFFして、温度を下げる運用を繰り返した
- ・偏光計の電源部のROMにアクセス中に電源をOFFすると、ROMが書き換わってしまうことがある不具合が判明
- ・#2013年のゴンドラを回収して調べたところ、ハードウェアには問題は見られず、ROMを書き直したら正常に動作した

再フライトへ向けての対策

- ・発熱量・排熱パスの改善
- ・FADCボードを改良し発熱量を抑えた
- ・電源部に簡易UPSを用意し、ROMにアクセスしていないことを確認後に電源をOFFする仕様にした

PoGO+の放球(2016/7/12~7/18 : 7日間)

放球(2016/7/12)@スウェーデン・キルナ



上空40km

気球の直径100m

放球前のゴンドラ



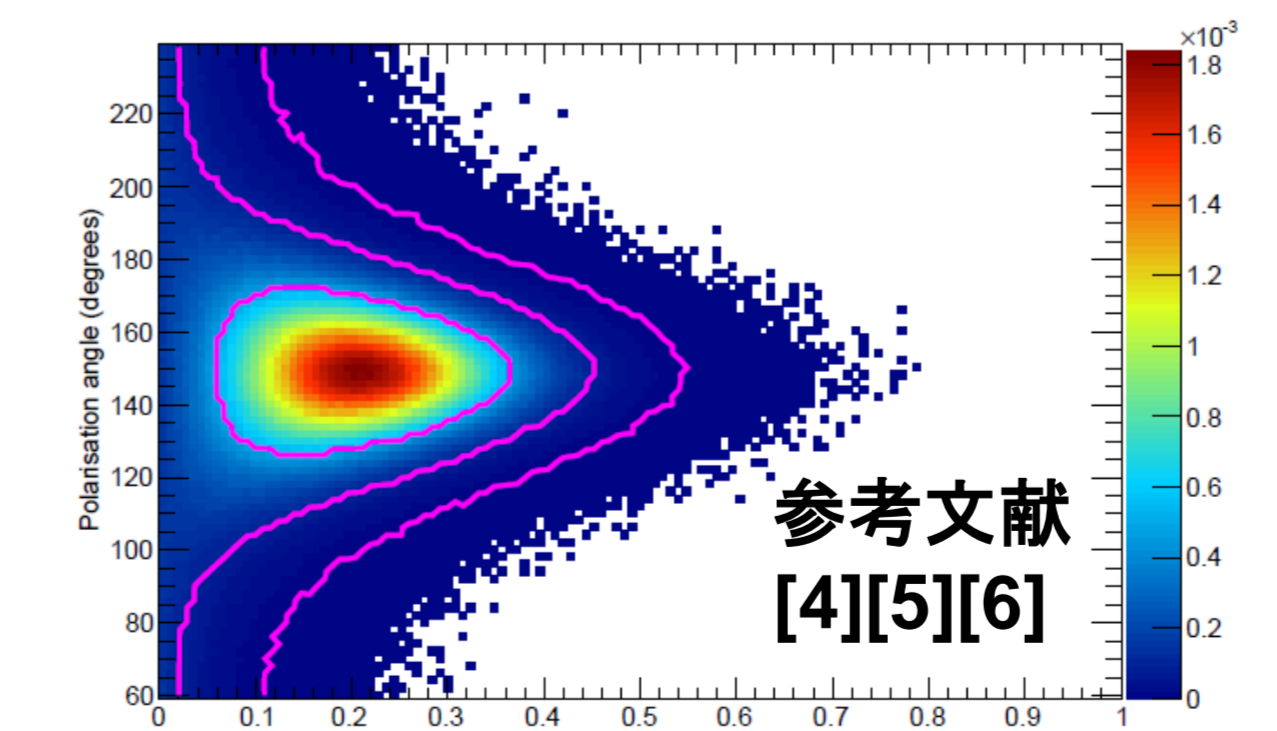
7日間のフライトの軌跡



フライト中のカメラ撮影

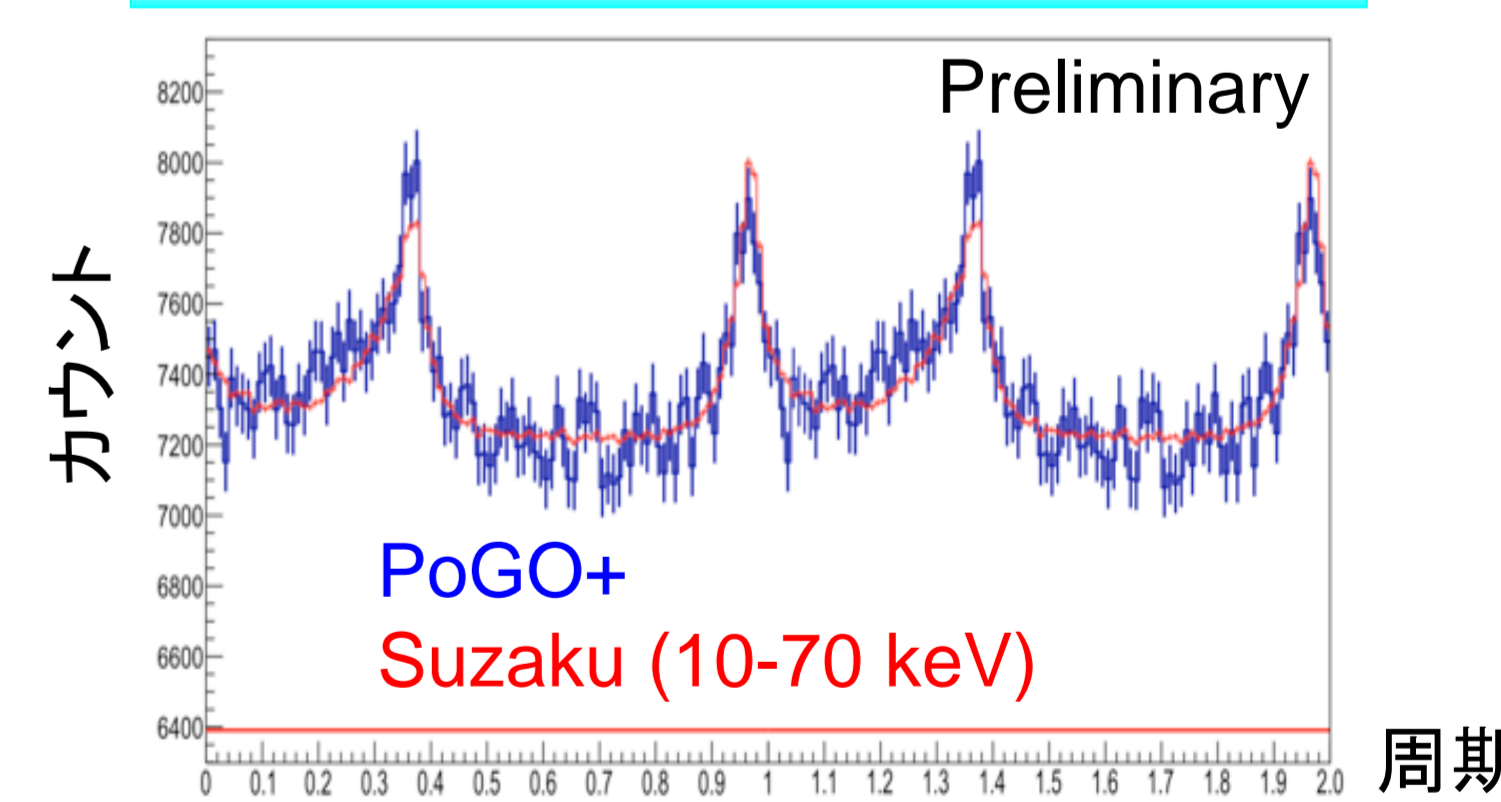


2013年のフライトで得られたカニ星雲の偏光情報



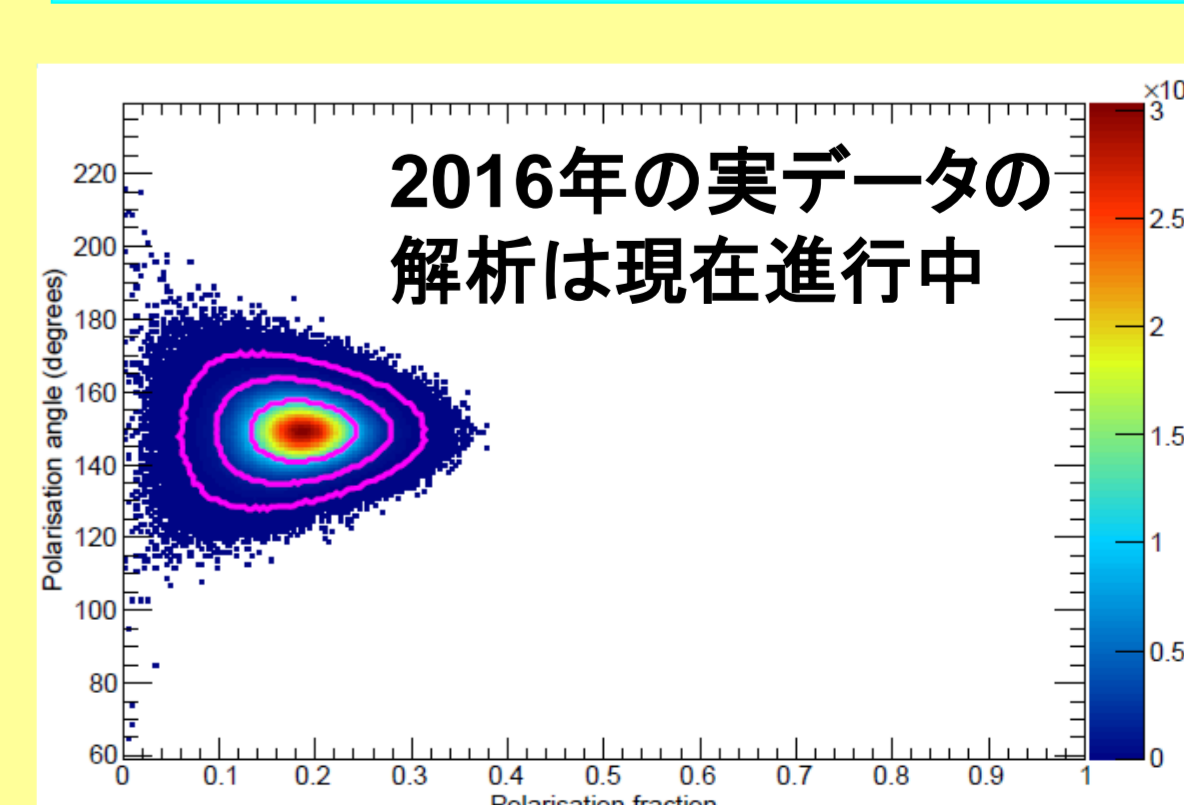
偏光度: (18.4, +9.8, -10.6)%
99%上限 42.4%
偏光方位角: (149.2 ± 16.0)°

カニ星雲からのパルスを検出



偏光解析に使う2ヒットイベントのみで、カニ星雲(パルサーからの30Hzのパルス)を検出

2016年フライトの予想感度



偏光度: 2013年のベストフィット値なら、
5σレベルで検出可能(18.4±3.7)%

REFERENCES

1. T. Kamae et al., "PoGOLite - A high sensitivity balloon-borne soft gamma-ray polarimeter" 2008, Astroparticle Physics, 30, 72-84
2. H. Takahashi et al., "A Thermal-Neutron Detector with a Phoswich System of LiCaAlF6 and BGO Crystal Scintillators Onboard PoGOLite", 2010, IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record
3. H. Takahashi et al., "Data acquisition system and ground calibration of polarized gamma-ray observer (PoGOLite)", Proc. SPIE 9144, 914441
4. M. Chavine et al., "The design and flight performance of the PoGOLite Pathfinder balloon-borne hard X-ray polarimeter", Experimental Astronomy 2015, 1-25
5. M. Chavine et al., "Preflight performance studies of the PoGOLite hard X-ray polarimeter", Astroparticle Physics, 2016, 72, 1-10
6. M. Chavine et al., "Observation of polarized hard X-ray emission from the Crab by the PoGOLite Pathfinder", MNRAS, 2016, 456, L84-L88