



# 硬X線偏光検出器 PoGOLite 気球実験： 2016年の再フライトへ向けて

高橋弘充 (広島大)、PoGOLite 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://gluon.particle.kth.se/pogolite/>

## 概要

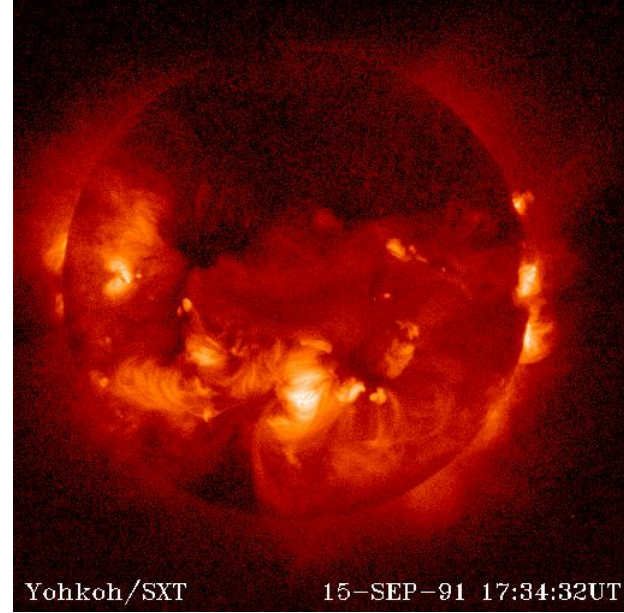
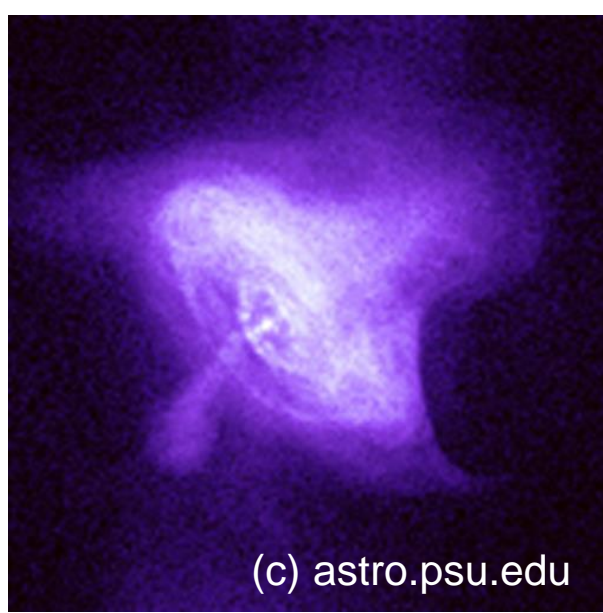
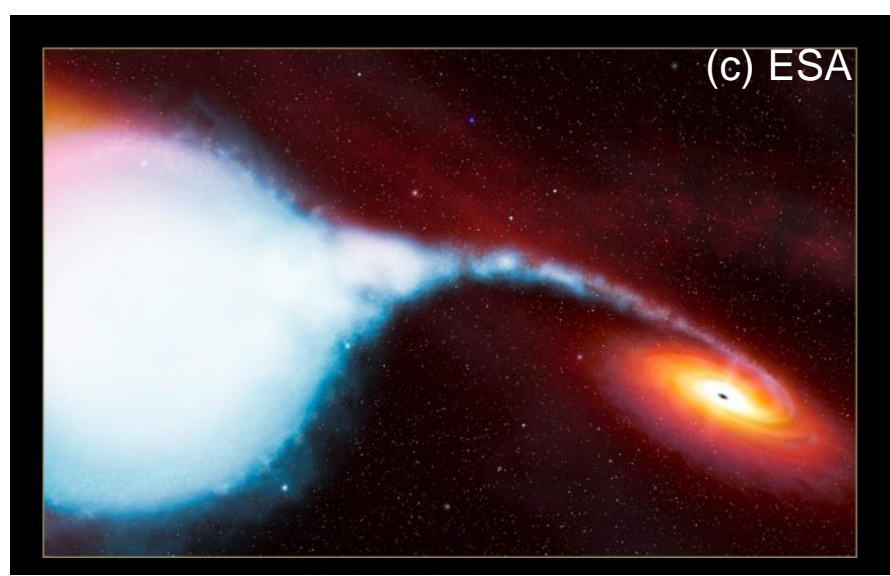
Polarized Gamma-ray Observer (PoGOLite) は、25~80 keV 帯域において、200 mCrab のフラックスをもつ天体から10%の硬X線・軟γ線偏光を検出できる検出器である [1]。日米欧で共同開発したパスファインダーモデルは、2013年7月12日にスウェーデンのキルナ市から放球に成功した。ロシアの協力のもと、スウェーデンからカナダ、アラスカ、ロシアの上空まで14日間かけて世界で初めて北極圏を周回するフライトを続け、7月26日にロシアに着陸した。この14日間にわたって姿勢制御系は順調に動作し、目標性能の0.1° 以内の精度を達成できた。偏光計は、電源系のトラブルのため最初の3日間しか動作させることができなかったが、目標天体であるカニ星雲からの信号を検出することに成功し、偏光情報についても制限をかけることができた [4][5][6]。より精度の高い測定結果を得るには、検出器の改良を行い、観測時間を増やす必要があるため、今年2016年夏に再度スウェーデンから放球することを計画である。

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, ASTRO-H, PRAXyS, IXPE, XIPE, PolariS ... )。

Cyg X-1 (ブラックホール連星系)

カニ星雲 (パルサー)

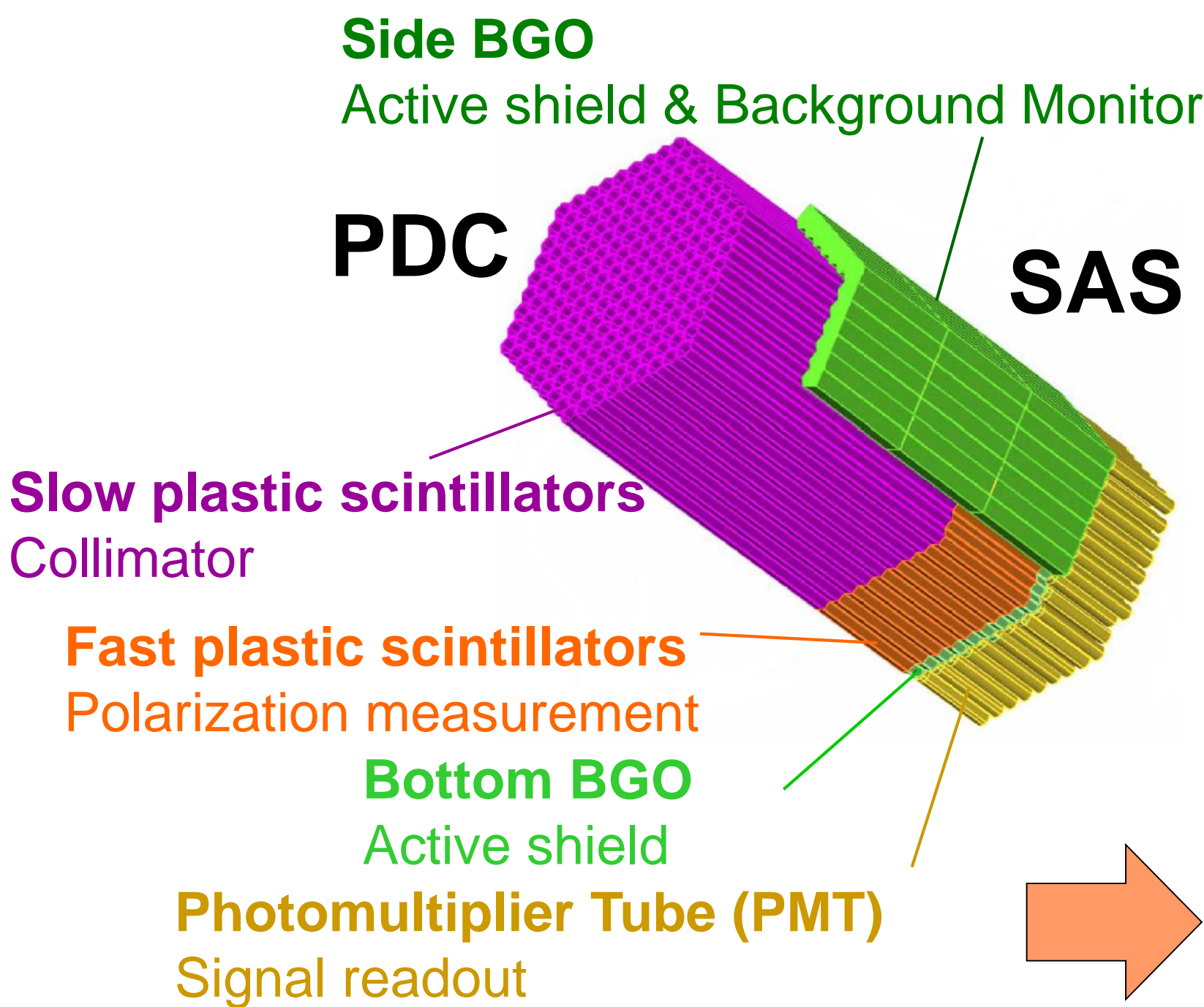
太陽フレア



## PoGOLite 検出器

偏光を検出するために、PoGOLite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 217 本の **well-type phoswich detector cells (PDCs)** 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PDC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slow プラスチック、BGO シンチレータから構成される。また周囲には、54 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 PoGOLite



### 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 PDCs + 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

### PDCの構造



#### 2013年まで

Slow plastic scintillator ( $\tau \sim 300\text{ns}$ ) + Pb+Sn collimator

Fast plastic scintillator ( $\tau \sim 2\text{ns}$ ): 20cm長

BGO crystal ( $\tau \sim 300\text{ns}$ )

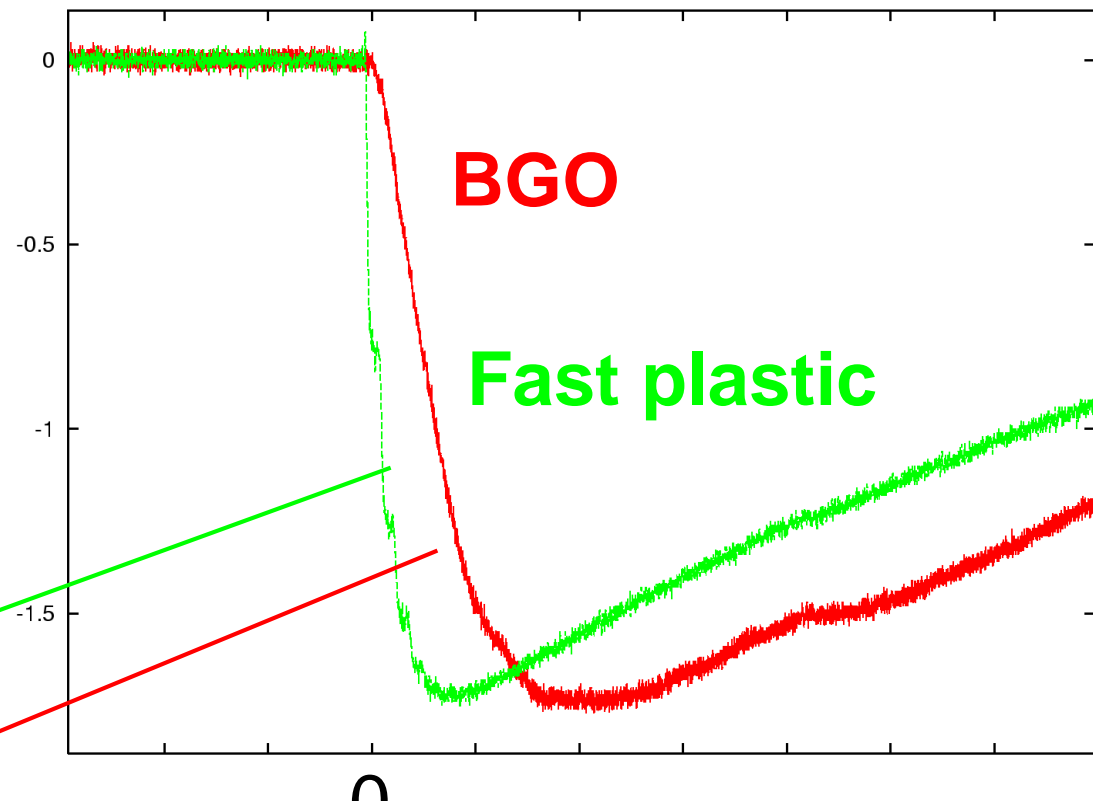
光電子増倍管 (PMT)

#### 2016年の改良点

Pb+Sn+Cu Passive collimatorのみ

12cm長へ短縮

### プリアンプ出力波形



25-80 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。

### 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。

## SpaceWireに基づいたデータ取得系

PoGOLite 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、データを取舍選択する。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]。

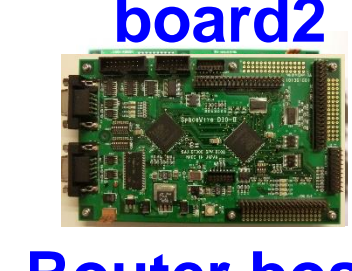
### SpaceWire components

#### 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

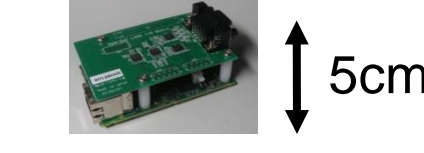


- ・1枚の DIO ボードで、全体のトリガー信号と veto 信号から、データの取舍選択を行う。

#### 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

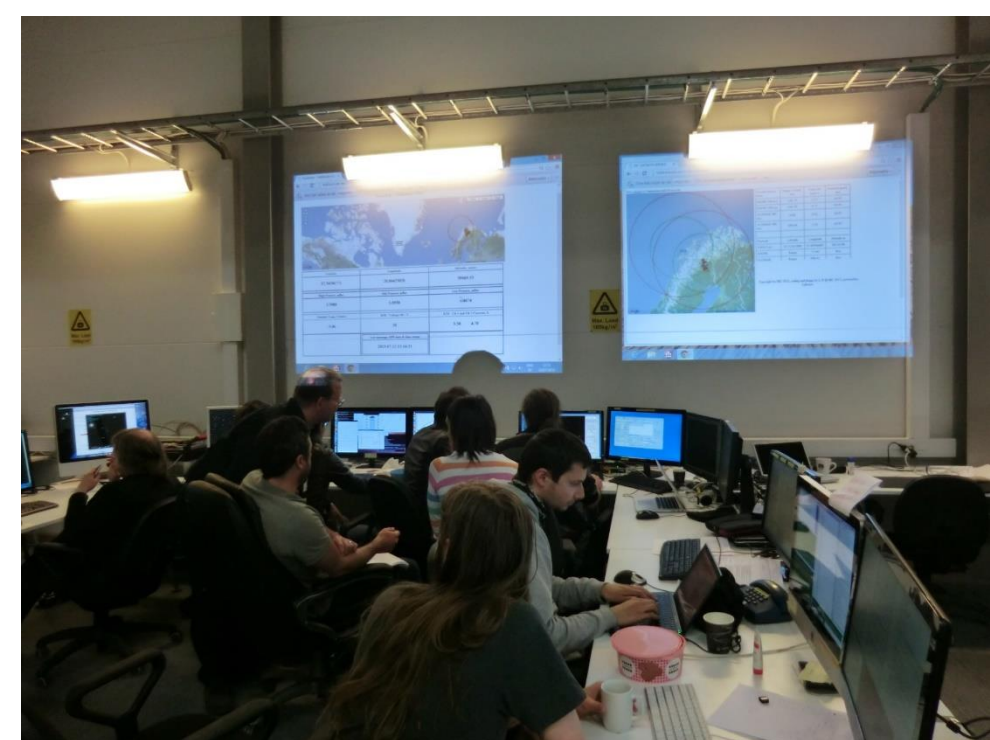
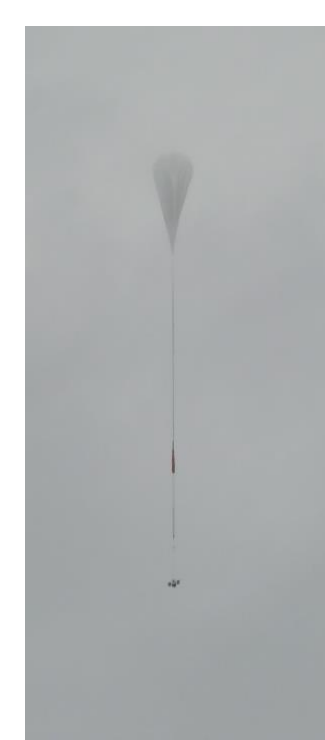
- ・発熱量・排熱パスの改善
- FADCボードを改良し発熱量を抑えた
- ・電源部に簡易UPSを用意し、ROMにアクセスしていないことを確認後に電源をOFFする仕様にした

## PoGOLiteの放球 (2013/7/12~7/26 : 14日間)

### 放球(2013/7/12)@スウェーデン・キルナ



### 運用中の様子



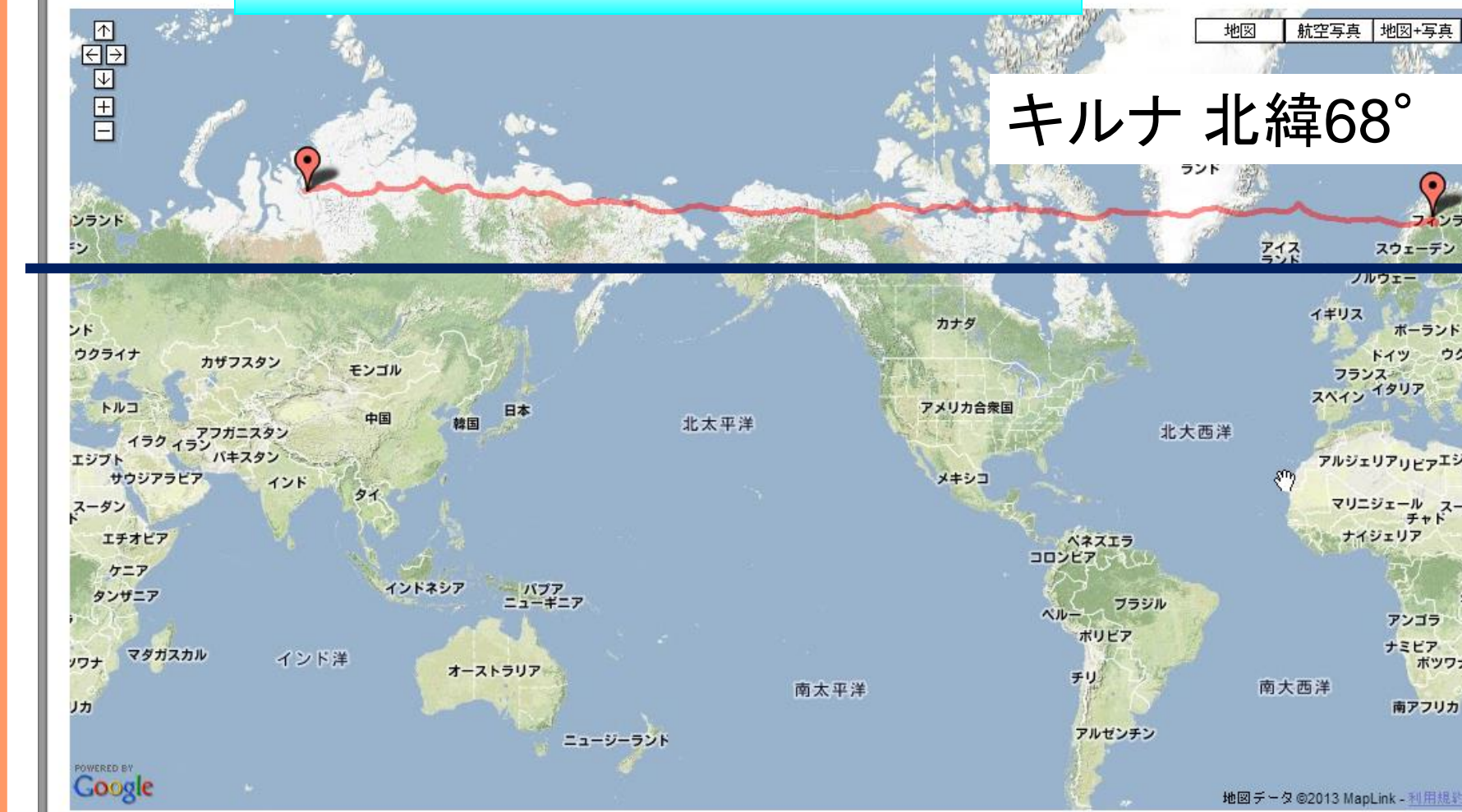
- ・Esrangle気球実験場から放球に成功。同実験場から、その後の運用を E-link (Esrangle実験場の高速データ通信) とIridium衛星で行った。

- ・姿勢制御は14日間にわたって動作要求性能の0.1° 以内の指向性を達成。
- ・偏光検出器は最初の3日間は正常に動作、電源系にトラブルが発生した。

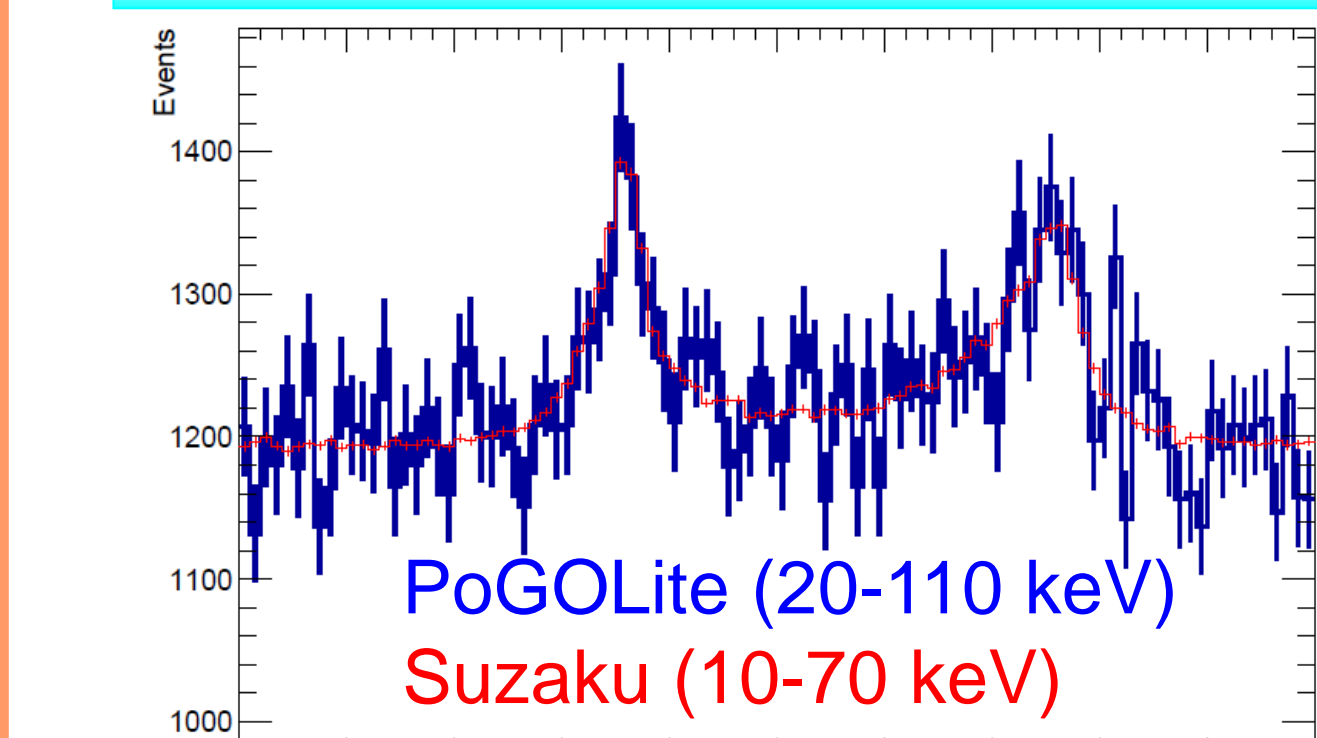
- ・高度は、日中で最高 39~40 km、夜間の最低値でも 36 kmに到達。
- ・7月末の風向きが北へ行く予報で、気球が北極海へ出て行ってしまう可能性が高まったため、ロシア国内で着陸させた。

- ・以下の解析結果については[4][5][6]参照。

### 14日間のフライトの軌跡

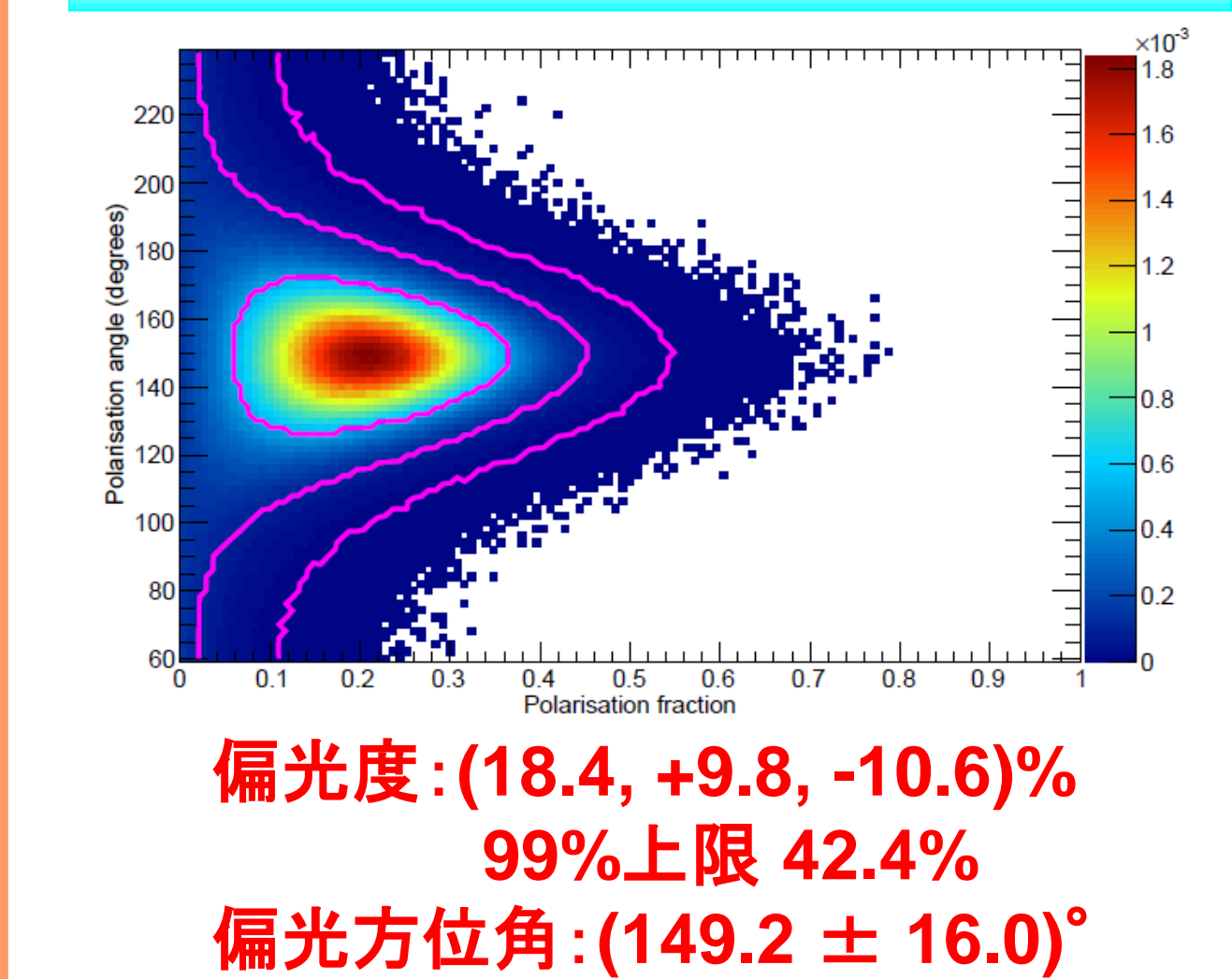


### カニ星雲からのパルスを検出



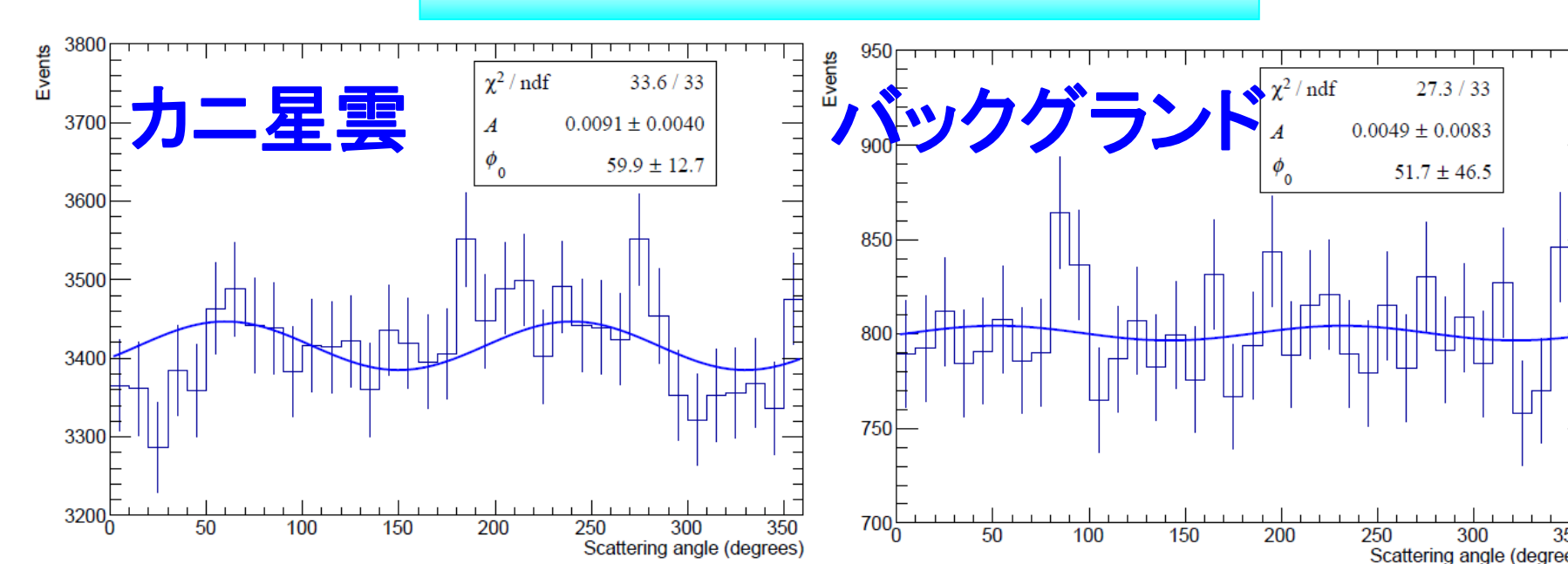
偏光解析に使う2ヒットイベントのみで、カニ星雲 (パルサーからの30Hzのパルス) を検出

### 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)°

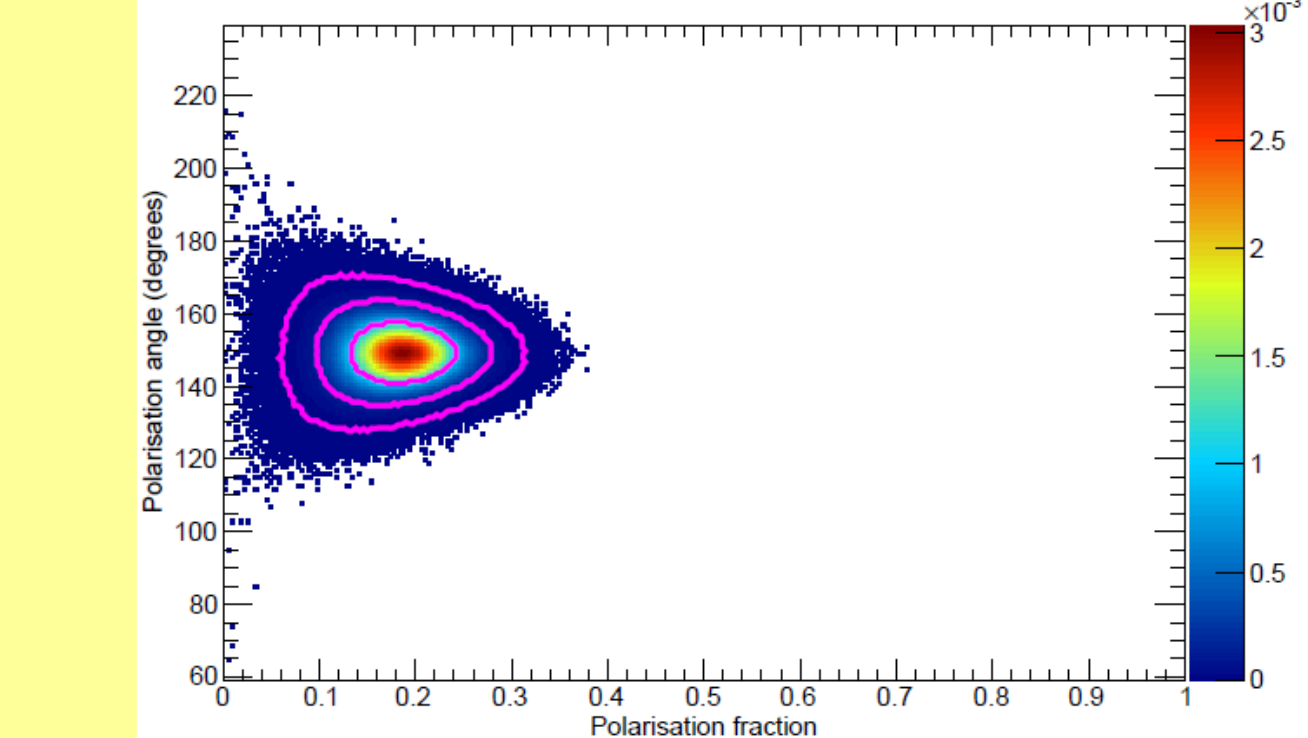
### モジュレーションカーブ



A: 偏光度,  $\Phi$ : 偏光方位角  
(左図) カニ星雲の観測33 ks、偏光検出は1.7 $\sigma$ の有意度  
(右図) バックグラウンド観測9 ks、統計の範囲で無偏光 (A=0)

### 2016年再フライトの予想感度

上述の検出器の改良を実施し、15時間=3時間x5日間の観測を想定 (1日6時間カニ星雲を観測できる=>天体3時間+bgd3時間)



偏光度: 2013年のベストフィット値なら、  
5 $\sigma$ 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 LiCaAlF<sub>6</sub> 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