

硬X線偏光検出器 PoGOLite 気球実験の現状と今後

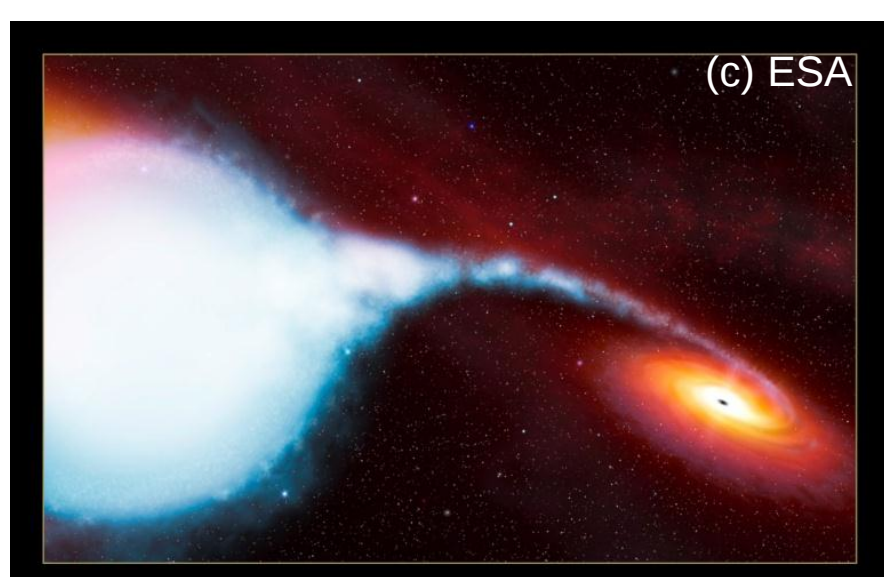
高橋弘充、河野貴文、水野恒史、深沢泰司(広島大)、釜江常好(東京大)、田島宏康(名古屋大)、片岡淳(早稲田大)、高橋忠幸(ISAS/JAXA)、河合誠之(東工大)、M. Axelsson, M. Jackson, M. Kiss, W. Klamra, M. Kole, S. Larsson, E. Moretti, M. Pearce, F. Ryde, S. Rydström (Royal Institute of Technology)、G. Olofsson, H-G. Floren (Stockholm University)、G. Madejski (SLAC)、G. Varner (University of Hawaii)、PoGOLite チーム

概要

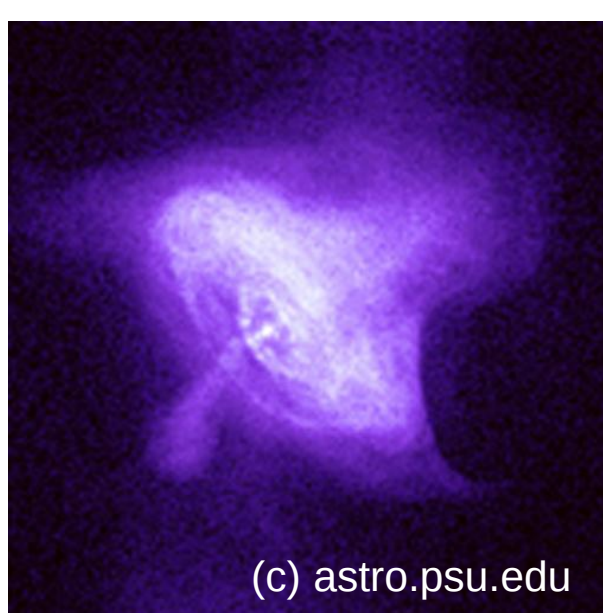
Polarized Gamma-ray Observer (PoGOLite) は、25~80 keV 帯域において、200 mCrab のフラックスをもつ天体から10%の硬X線・軟γ線偏光を検出できる検出器である [1][2][6][8]。これまでに日米欧によるパスファインダーモデルの共同開発が終了しており、2011年と2012年の夏にスウェーデンからの放球を目指していたが、気球本体の不具合や悪天候のために、残念ながら科学的な観測は実施できていない。今年2013年は5~7月の春夏3ヶ月間にわたって打ち上げウィンドウを確保することで、世界で初めてスウェーデンからカナダ、ロシア上空を経て北極を周回する約2週間の長期フライトを目指している。

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、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 (PHENEX, ASTRO-H, GEMS, Polaris ...)。我々の PoGOLite 気球実験は、今夏に2週間以上の長時間フライトを行うことで、世界に先駆けてカニ星雲とCyg X-1、太陽フレアなどからの偏光検出を目指している。

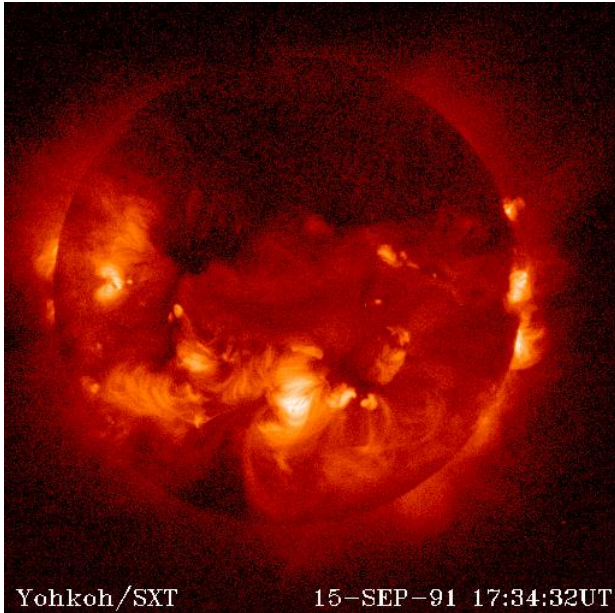
Cyg X-1 (ブラックホール連星系)



カニ星雲 (パルサー)



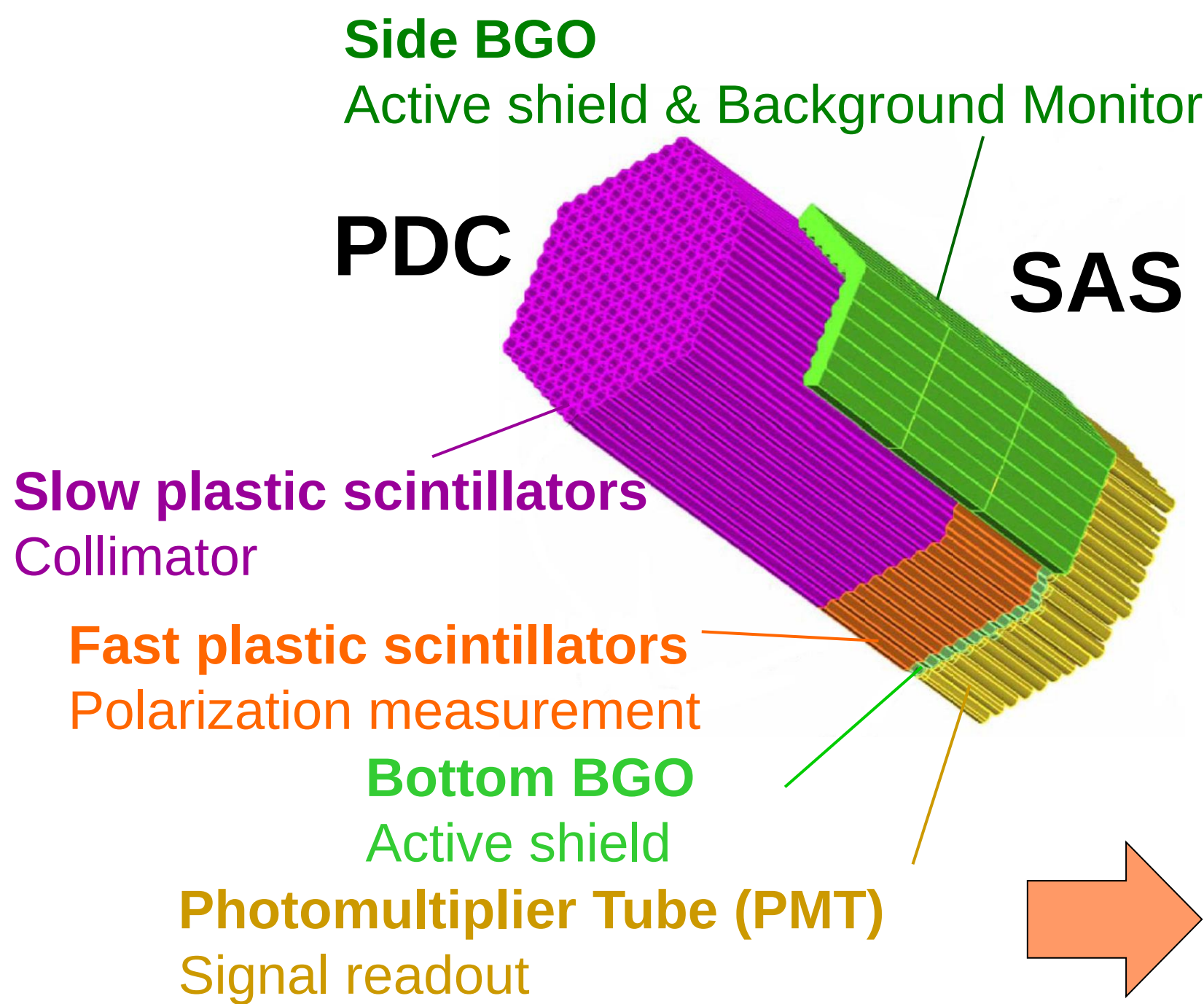
太陽フレア



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



- 217(PDC) + 54(SAS) = 271 本のPMT信号
- 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

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

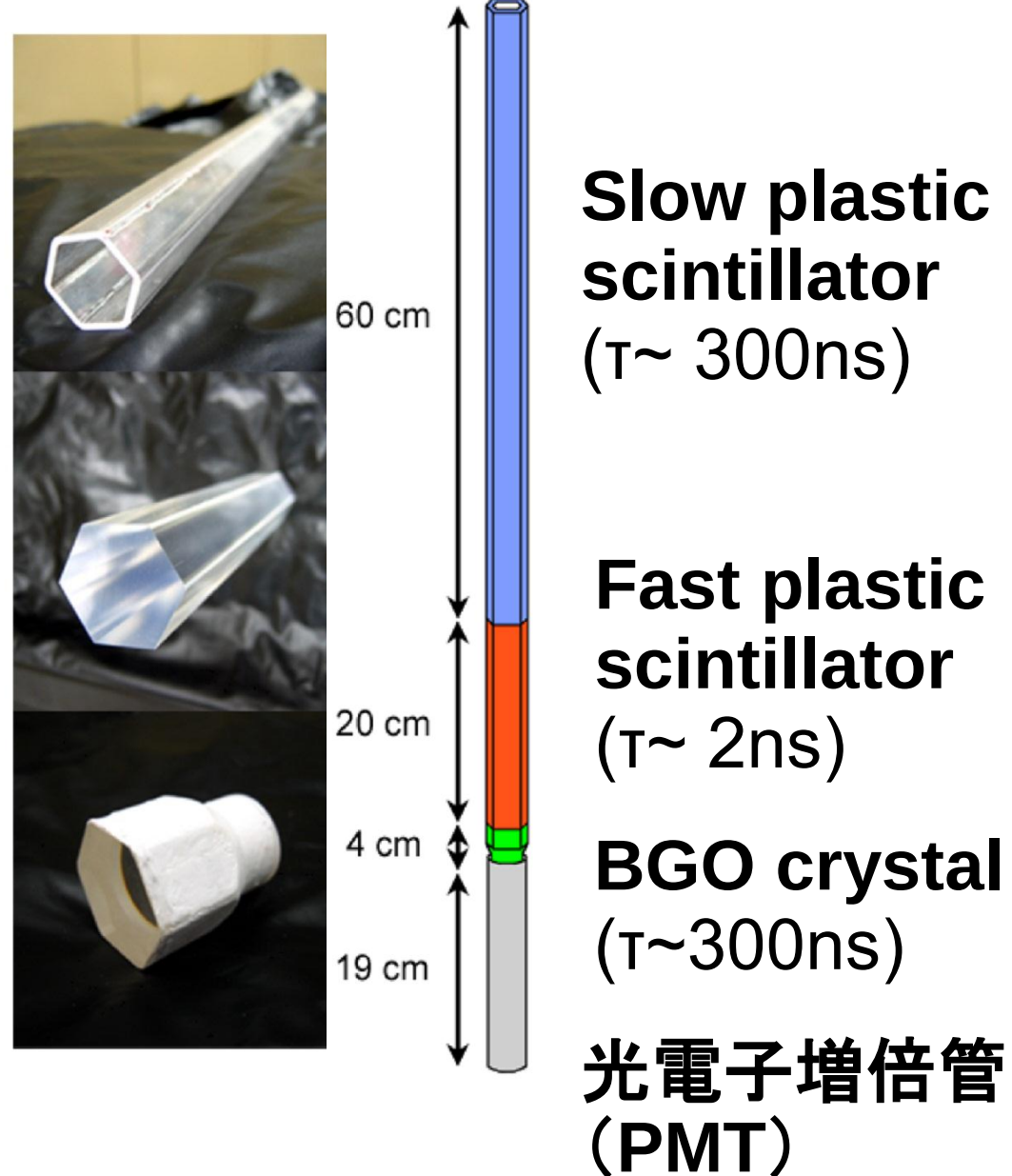
バックグラウンドの低減が重要

- 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)

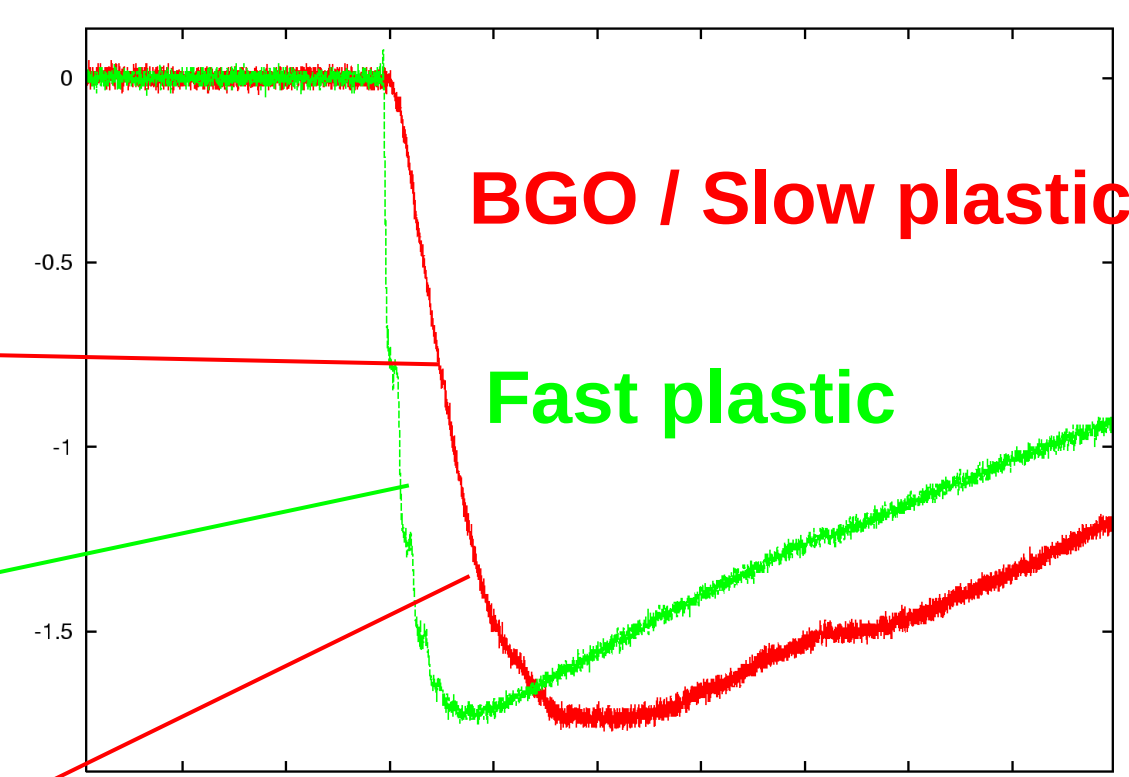
パスファインダーフライト (2010~)

- 61 PDCs + 30 SAS + 1 中性子検出器 = 92 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

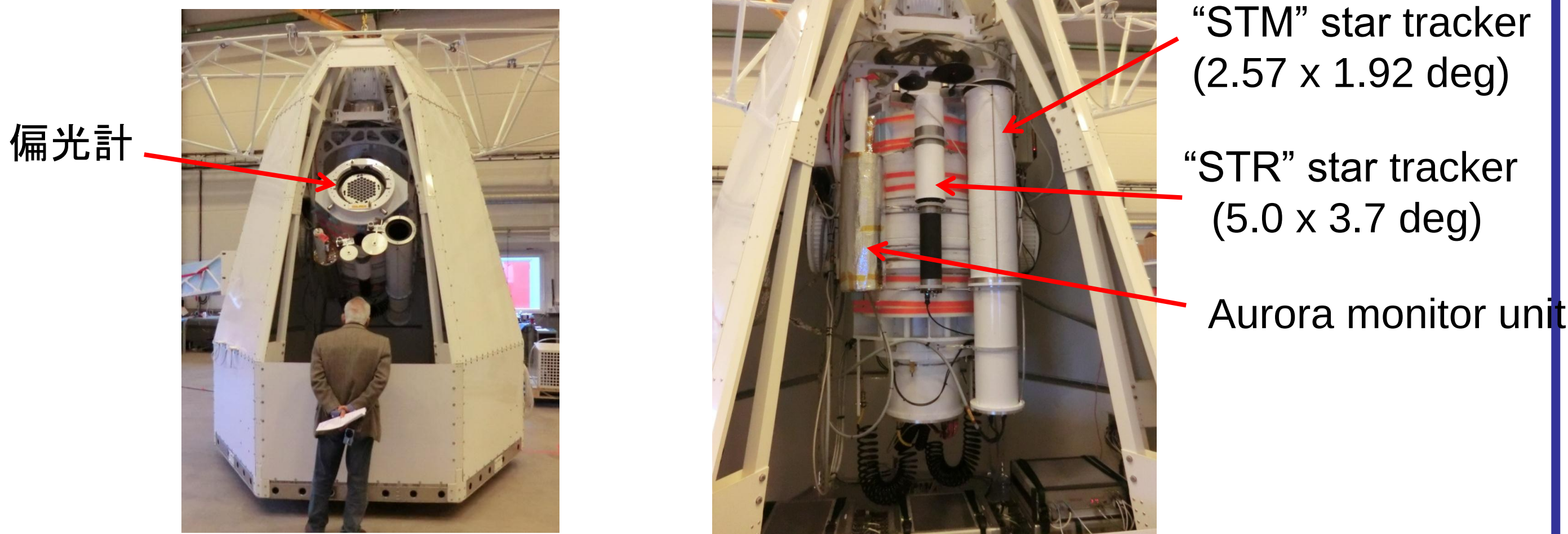


プリアンプ出力波形



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。

パスファインダーフライトのゴンドラ



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[4][5]。12枚のFADCボード(1ボードあたり8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DIO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-GigabitEthernet 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。

SpaceWire components

FADC board



- 1枚で8本のPMT信号を処理する。高圧電源の調整も行う。ハードウェアはPDCとSASで共通。

Digital I/O board



Router board



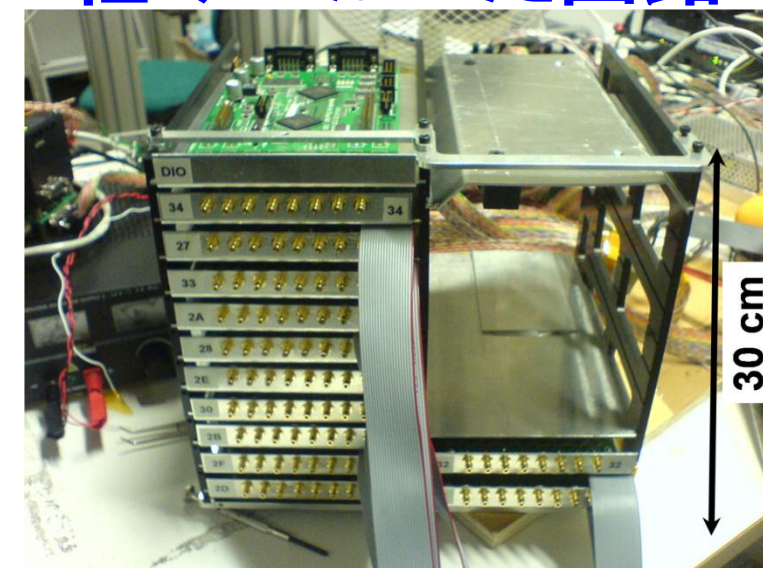
- 1枚のDIOボードで、全体のトリガー信号と veto 信号から、データの取捨選択を行う。

SpaceWire-to-GigabitEthernet



- SpaceWire 通信と外部のイーサネットをつなぐ。

組み上がった回路

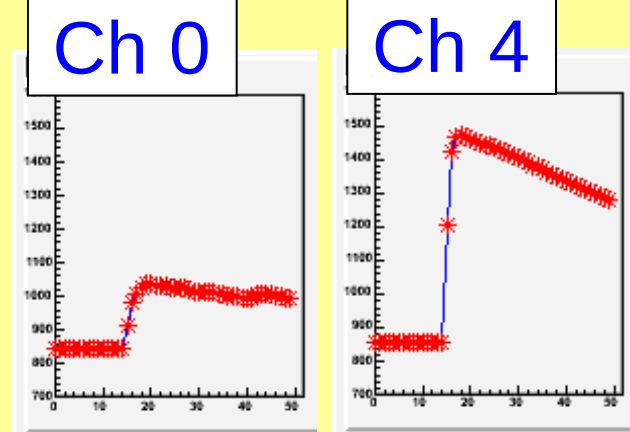


SpaceWire interface [3]

- New global standard of the communication interface for scientific missions.
- High speed (2~400 Mbps)
- Low power consumption, low noise
- High reliability
- Easy access from CPU by Remote Memory Access Protocol (RMAP)

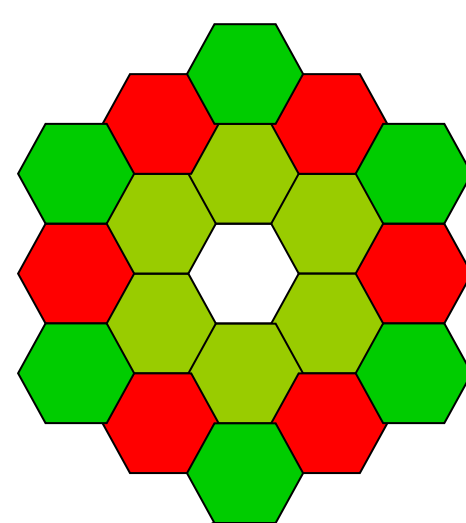
偏光X線ビームを照射@KEK-PF

検出したガンマ線イベントの一例



コンプトン散乱と光電吸収イベントのペア

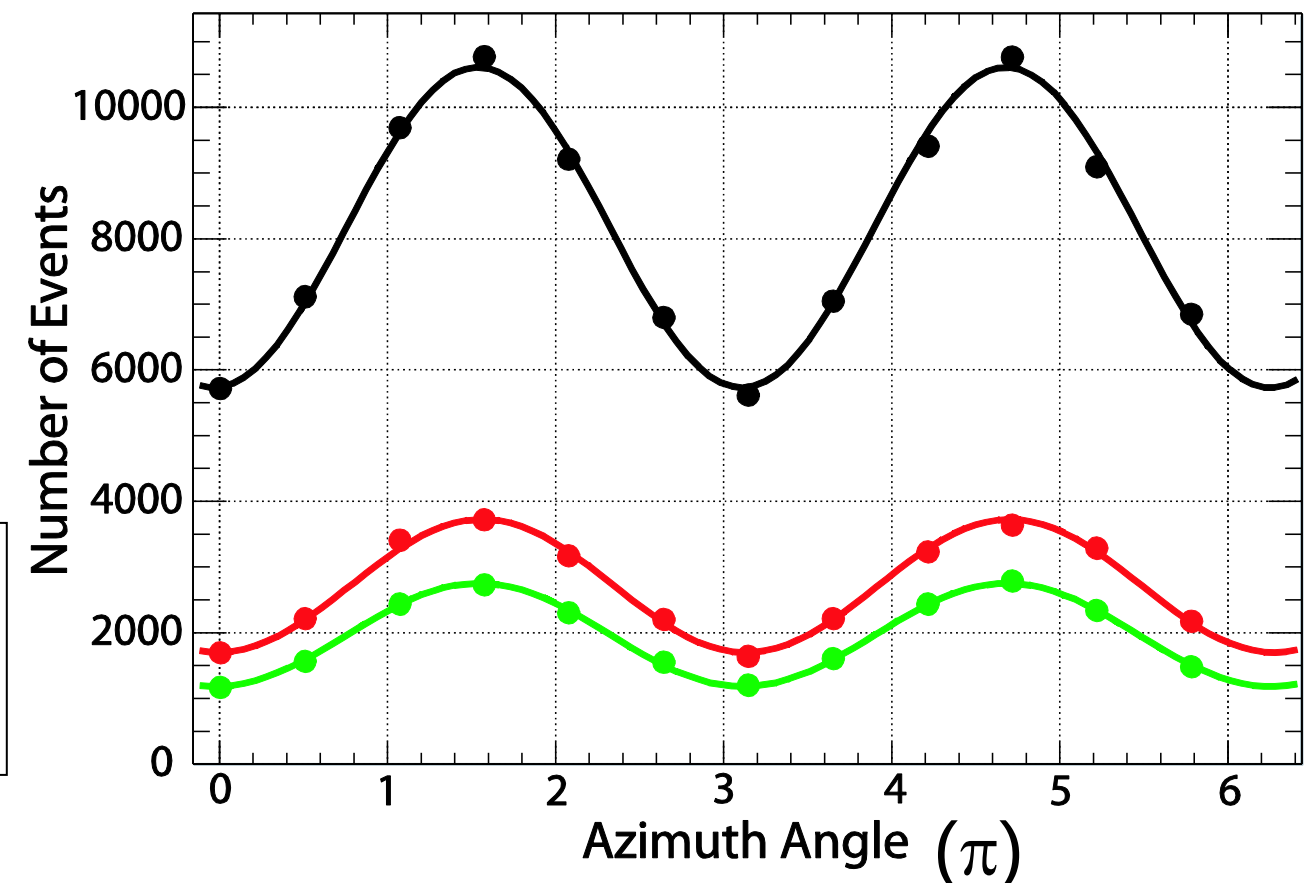
- 50 keV のペンシルビーム (90% 偏光) を中心ユニットに照射。
- 中心からの距離に応じてモジュレーションカーブを作成。
- 得られた測定結果は、GEANT4 モンテカルロシミュレーションの予想と~5%以内で一致。



Measured MF for each group

- Inner 6 units
31.3 +/- 0.4%
- Outer 12 units
37.9 +/- 0.7%
40.2 +/- 0.8%

モジュレーションカーブ



Combined MF over 3 groups

34.1 +/- 0.3%

PoGOLiteの放球記録(2010~)

- 2010年夏: 1-2 日間のフライト@スウェーデン、キルナ上空

- ➡ しかしながら、2010年4月にオーストラリアであったNASAの放球失敗の事故を受けて、延期されていた。

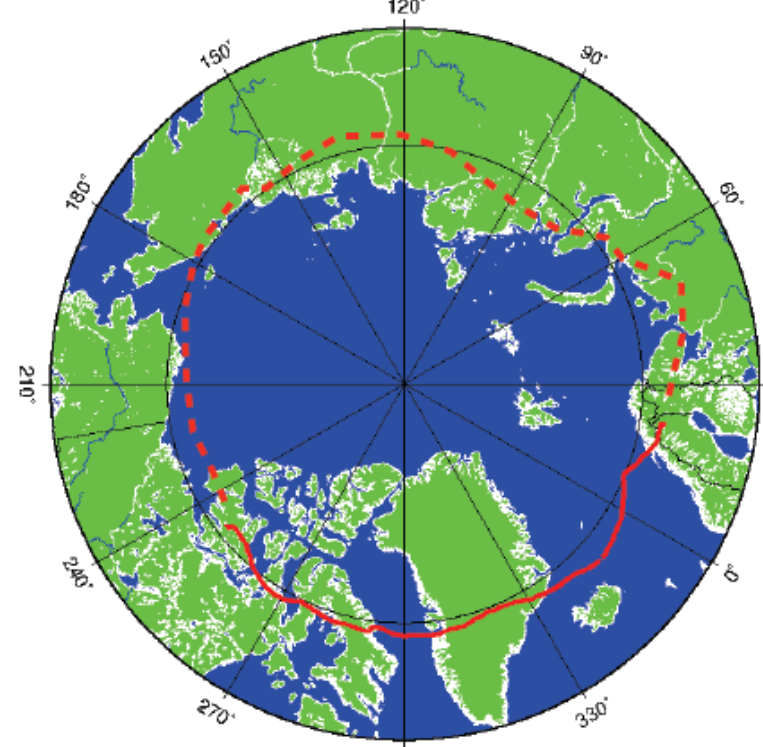
- 2011年7月6日 23:57(UTC) 放球成功 @キルナ
フライトはカナダまでの約 5 日間を予定していた。

- ➡ しかしながら、気球から He がリークするという不測の事態により、約5時間で地上へ戻ってきた。我々の検出器自身は上空でも正常に動作した。

- 2012年7月: 北極圏を周回する2週間のフライト@キルナ

- ➡ しかしながら、悪天候のために打ち上げ機会に恵まれず。。。
検出器を1年間保管し、今年2013年5~7月に再チャレンジ

北極圏を周回する軌道 (~2週間)



2012年のアップデート

2011年



2012年



- 偏光計、姿勢制御系、スタートラッカー: 変更なし
- 太陽パネルを4面から2面へ
 - 観測天体は、かに星雲(太陽方向)、Cyg X-1(反太陽方向)なので問題なし
 - (その他の軽量化を合わせて) 2000 kg => 1750 kg へ減量化に成功

REFERENCES

1. T. Kamae et al., "PoGOLite - A high sensitivity balloon-borne soft gamma-ray polarimeter" 2008, Astroparticle Physics, 30, 72-84
2. T. Mizuno et al., "High Sensitivity Balloon-Borne Hard X-Ray/Soft Gamma-Ray Polarimeter PoGOLite" 2007, IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 2538-2544
3. T. Takahashi et al., "Space Cube 2 - an Onboard Computer based on Space Cube Architecture", 2007, 1st international SpaceWire conference
4. T. Tanaka et al., "Data Acquisition System for the PoGOLite Astronomical Hard X-ray Polarimeter" 2007, Nuclear Science Symposium Conference Record, 445-449
5. H. Takahashi et al., "Data Acquisition system of the PoGOLite Balloon Experiment" 2008, International SpaceWire Conference 2008
6. M. Jackson et al., "PoGOLite - a high sensitivity balloon-borne soft gamma-ray polarimeter", 2009, IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record, 449-453
7. 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
8. M. Pearce et al., "Balloon-borne hard X-ray polarimetry with PoGOLite" 2012, IEEE Nuclear Science Symposium Conference Record