

超小型衛星TSUBAMEは東京工業大学と東京理科大学の学生が中心となって開発し、2014年11月6日にドニエプロケットによって打ち上げられた衛星であり、我々は本衛星によるGRBの初期放射における硬X線偏光観測を目的としている。GRB発生から15秒以内での偏光観測を実現するため、本衛星はGRBの検知と位置決定を行う広視野バーストモニタ(WBM)と硬X線偏光計(HXCP)の2種類の検出器と、高速姿勢制御システムを備えている。2014年はこれまで単機能開発していたシステムの統合試験を行い、全機能が動作することを確認した。本衛星は8月に完成しロシアへ出荷し、現地作業を経て11月に打ち上げられた。本発表では本衛星の観測機器の概要と、機上での観測シーケンスおよび具体的な運用方法について述べる。

## 1. TSUBAMEの目的

TSUBAMEは3つのミッションを持つ。

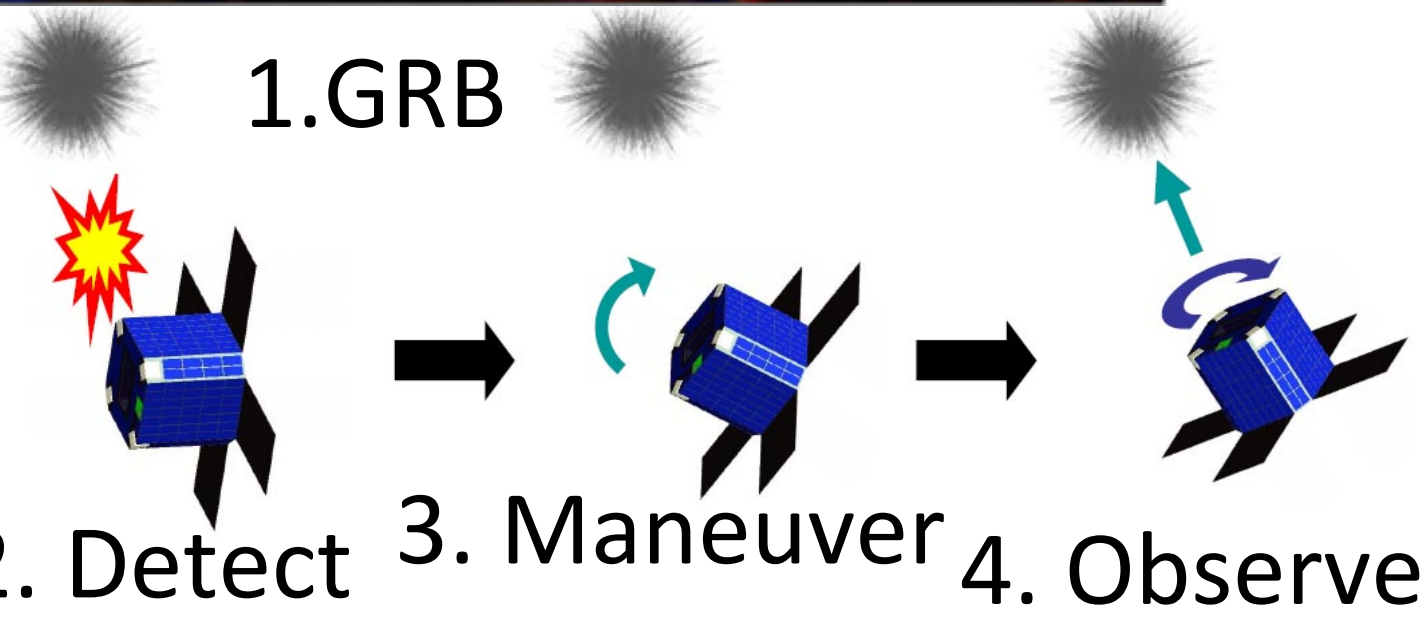
### -GRBの硬X線偏光観測

-Control moment gyroscopes(CMGs)を用いた高速姿勢制御実験

-小型カメラによる地球撮影



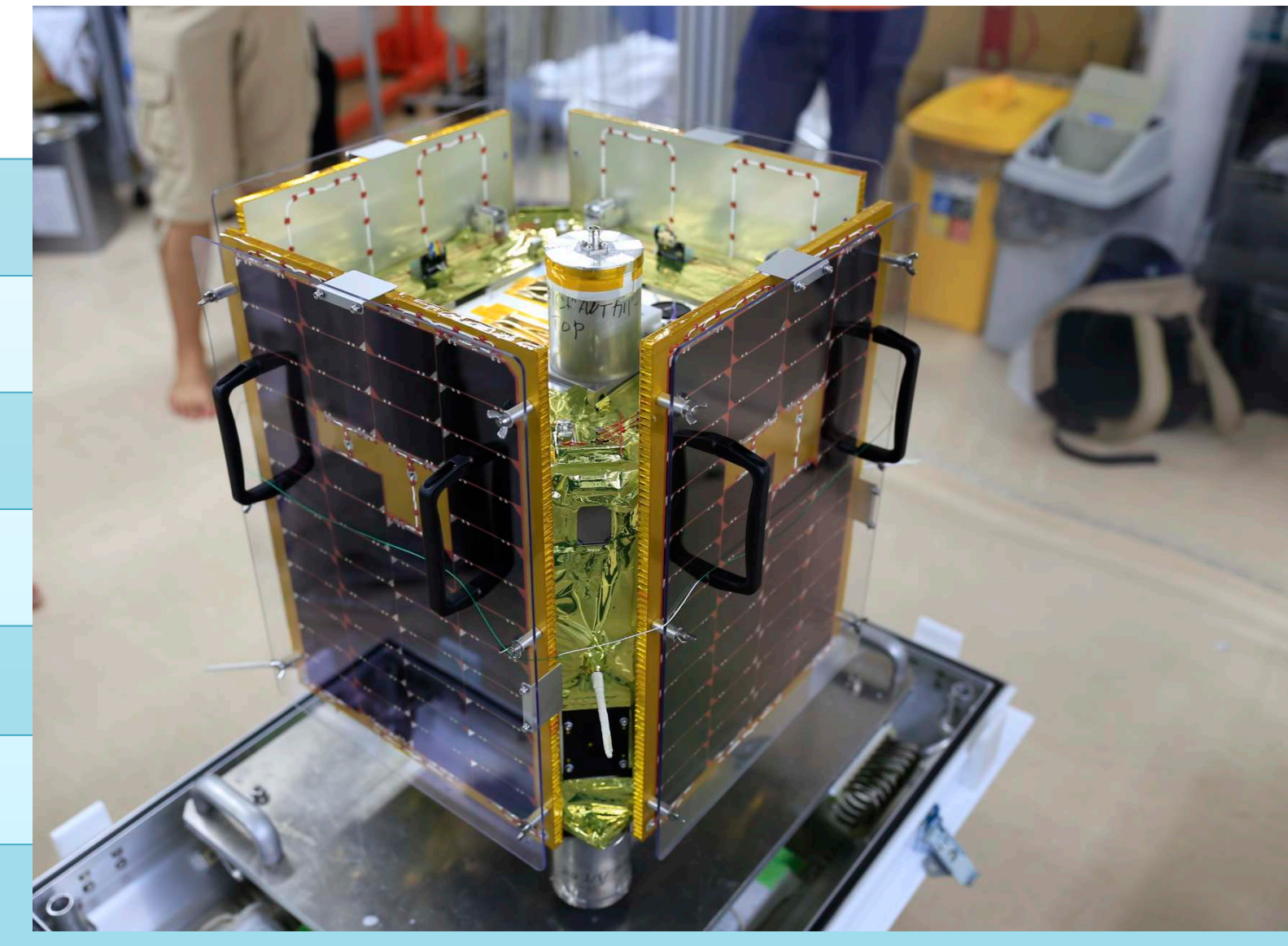
GRBは宇宙最大の爆発現象として知られているが、ジェットがコリメートされたり粒子が加速されたりする仕組みはまだ明らかになっていない。GRBの硬X線偏光観測から、GRB周辺の磁場構造が明らかになることが期待されている。



GRBが発生するとWBMが検知・位置決定を行う。衛星はCMGによる高速姿勢制御を行い、HXCPによる観測を行う。

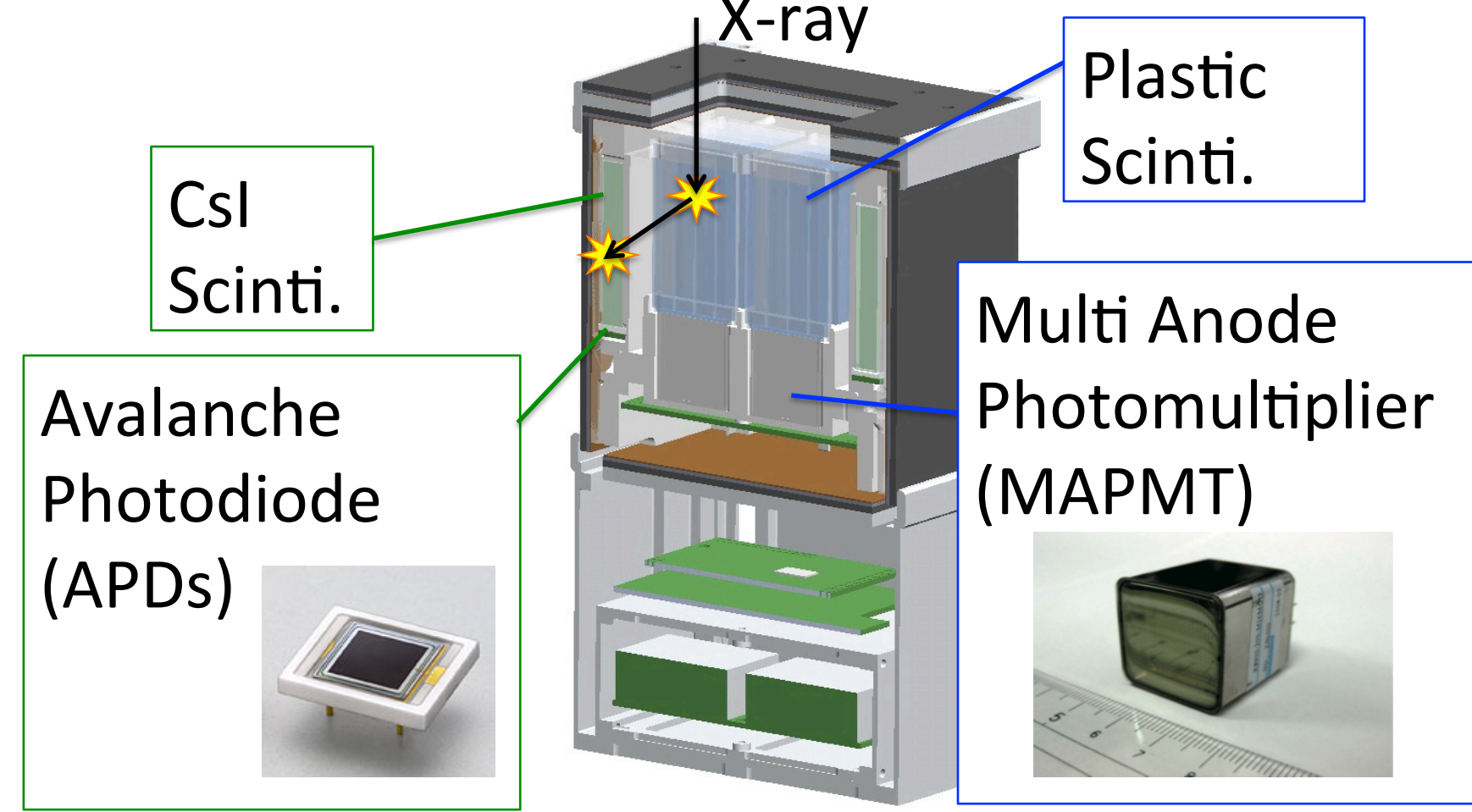
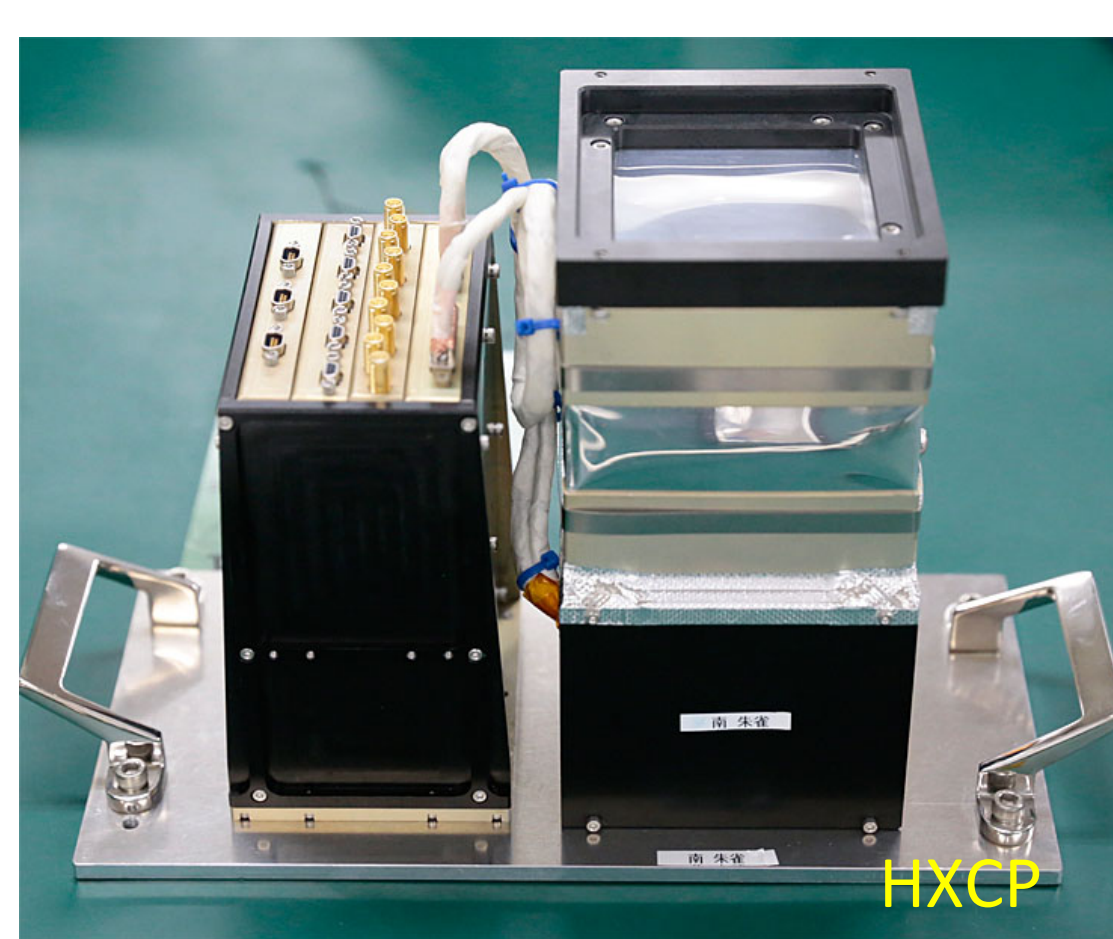
## 2. BUS System

|   |   |  |
|---|---|--|
| Size  | 50 x 50 x 47 cm <sup>3</sup>                          |  |
| Mass  | 50 kg   |  |
| Orbit   | 500 km (太陽同期軌道)                                       |  |
| Launch  | 2014年11月6日  |  |
| Electrical  | Cell  | InGaP/InGaAs/Ge  |
| Power Supply (EPS)                                | Power   | ~210 W (EOL)   |
|   | Battery   | ~360Wh (Li-Polymer)  |
| Command & Data Handling (C&DH)                    | Tx  | S-band (BSPK-100 kbps)                                       |
|   | Rx  | UHF (CW/AFSK-1200bps×2)                                      |
| Attitude Determination and Control Systems (ADCS) | スピン安定(MTQ使用時) / 3-axis zero momentum control(CMG使用時)  |  |
| Actuator  | Control Moment Gyroscopes(CMG)/Magnetic Torquers(MTQ) |  |
|   | Sensor  | Gyro (MEMS/FOG), Sun Sensor, Magnetometer, Star Tracker, GPS |

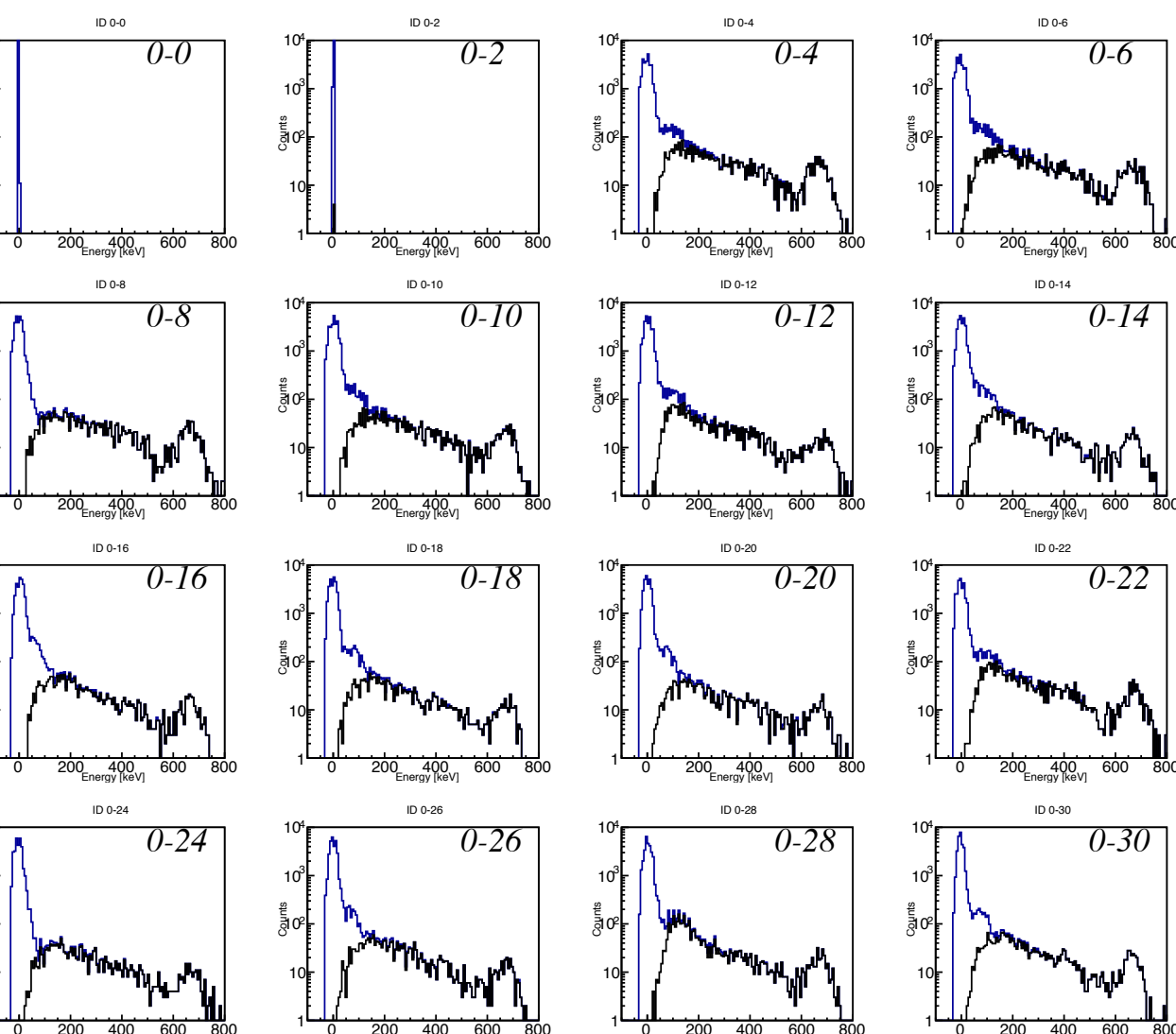


## 3. Hard X-ray Compton Polarimeter (HXCP)

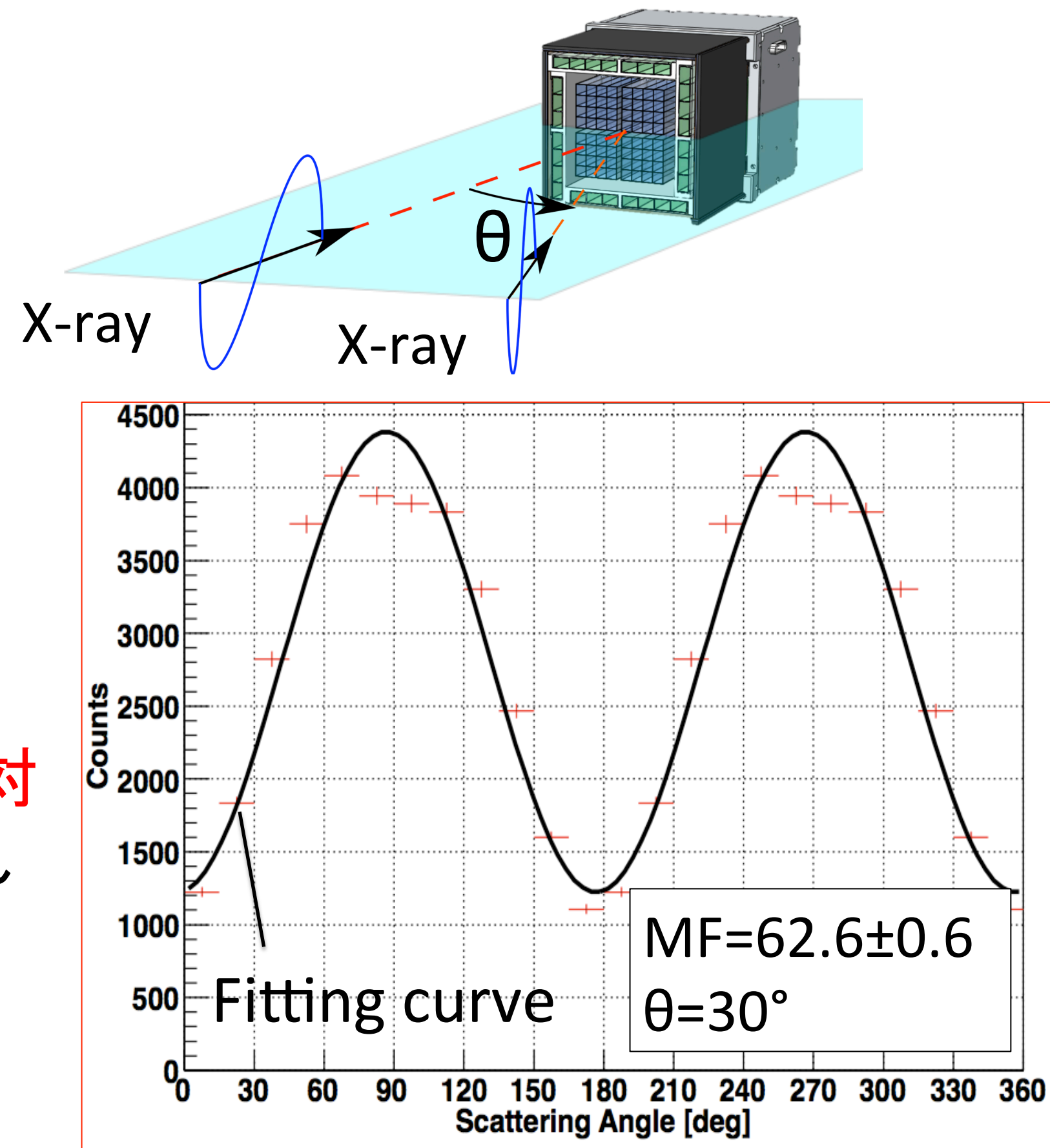
HXCPは光子のコンプトン散乱異方性を利用した偏光計である。直線偏光した光子は、偏光方向に対し垂直な面に散乱する傾向がある。



|                              |                          |
|------------------------------|--------------------------|
| Energy Band                  | 30 - 200 keV             |
| Field of View                | 60 x 60 deg <sup>2</sup> |
| Effective Area               | 2.4 cm <sup>2</sup>      |
| Detectable Polarization(3 σ) | 23% @ ~10 Crab           |



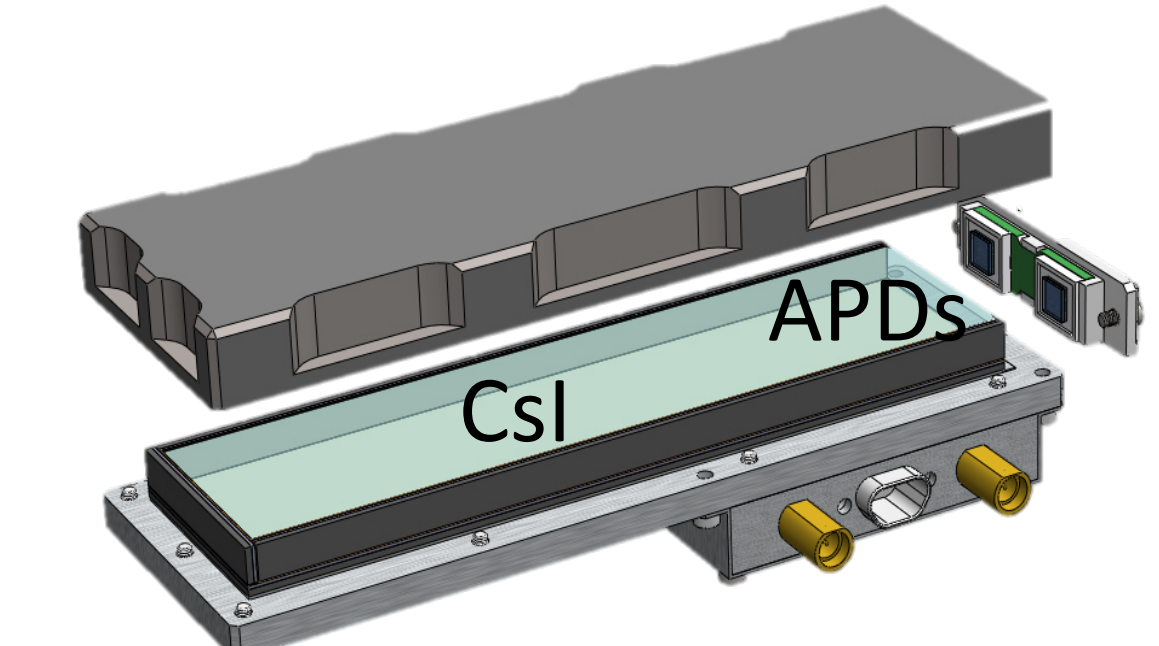
HXCP APDの較正のために取得した<sup>137</sup>Csスペクトル@+20°C。



2012年冬にKEKで80keVの90%偏光X線を照射し、斜め方向からの入射に対しても強いModulation Factorを得られることを確認した。

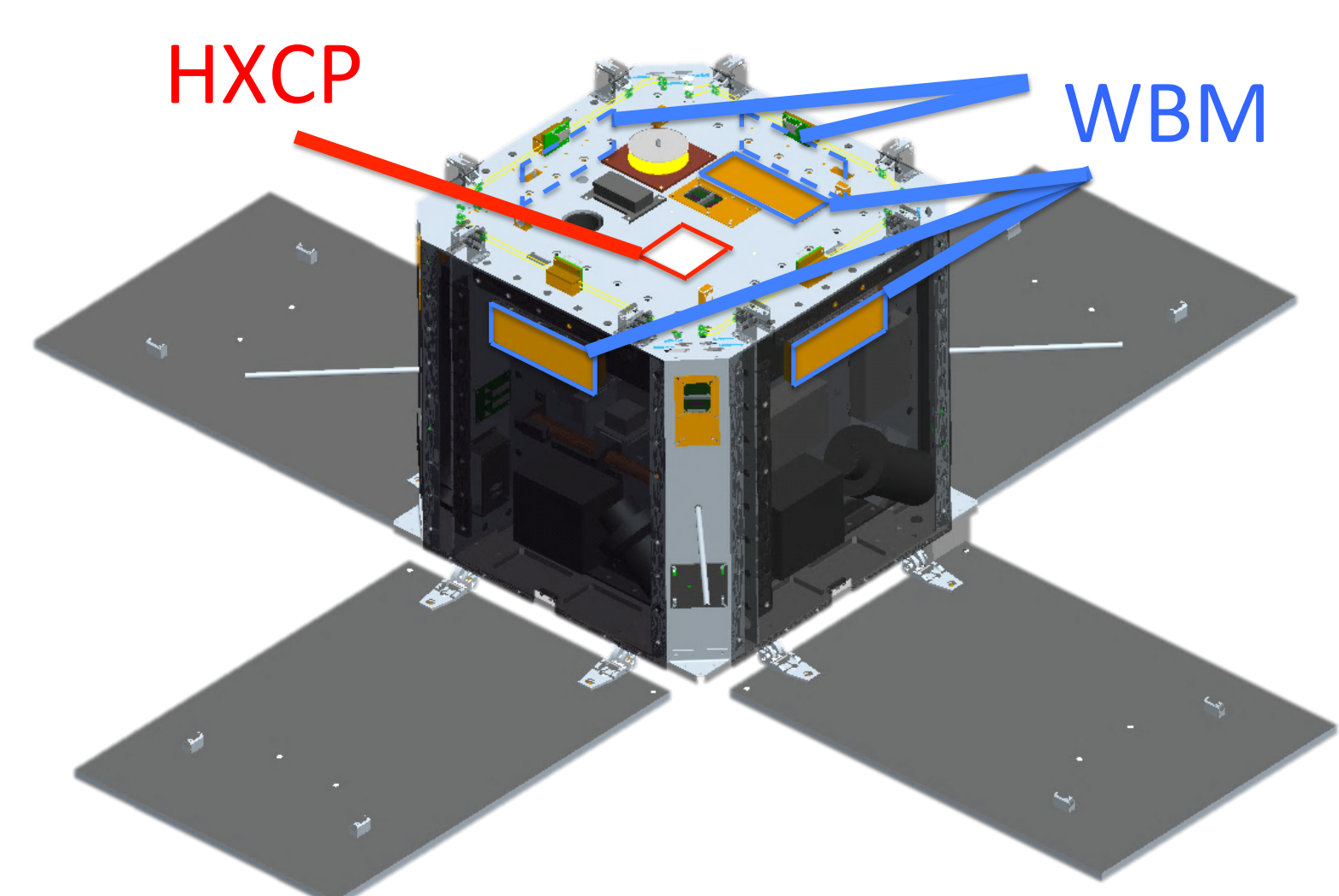
## 4. Wide-field Burst Monitor (WBM)

WBMはCsIとAPDから成るX線カウンターで、衛星の5面に1台ずつ配置されている。WBMは軌道上で常にX線のレートをモニタし、GRBを発見すると5度の精度で天体の位置決定をする。

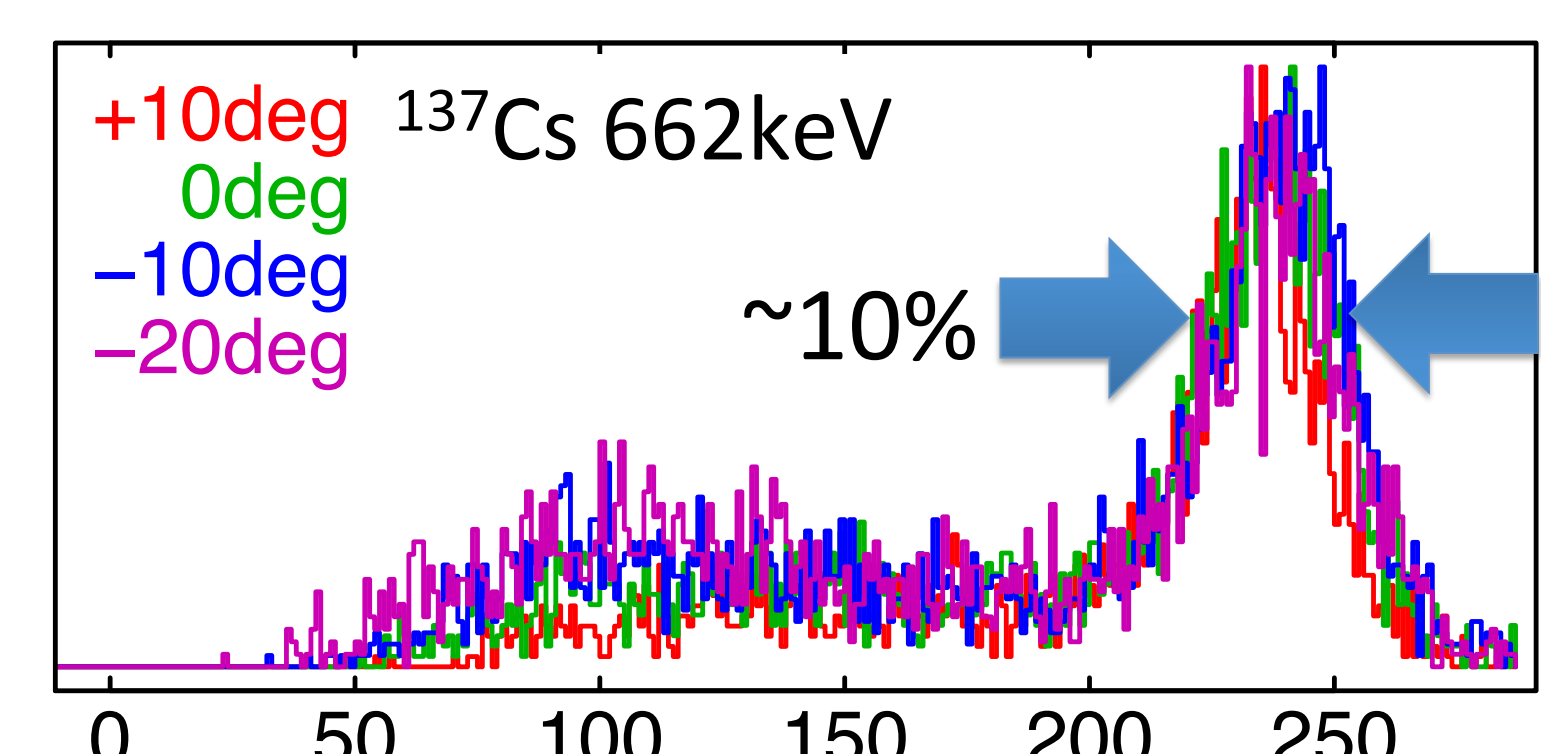


|                |                                      |
|----------------|--------------------------------------|
| Energy Band    | 30 - 200 keV                         |
| Field of View  | 2π str                               |
| Effective Area | 35.6 cm <sup>2</sup> /unit @ 100 keV |
| Accuracy       | 5 deg @ ~10 Crab                     |

GRBを検出すると、各面に設置されたWBMのカウントレートを比較し、天体の方向を決定する。



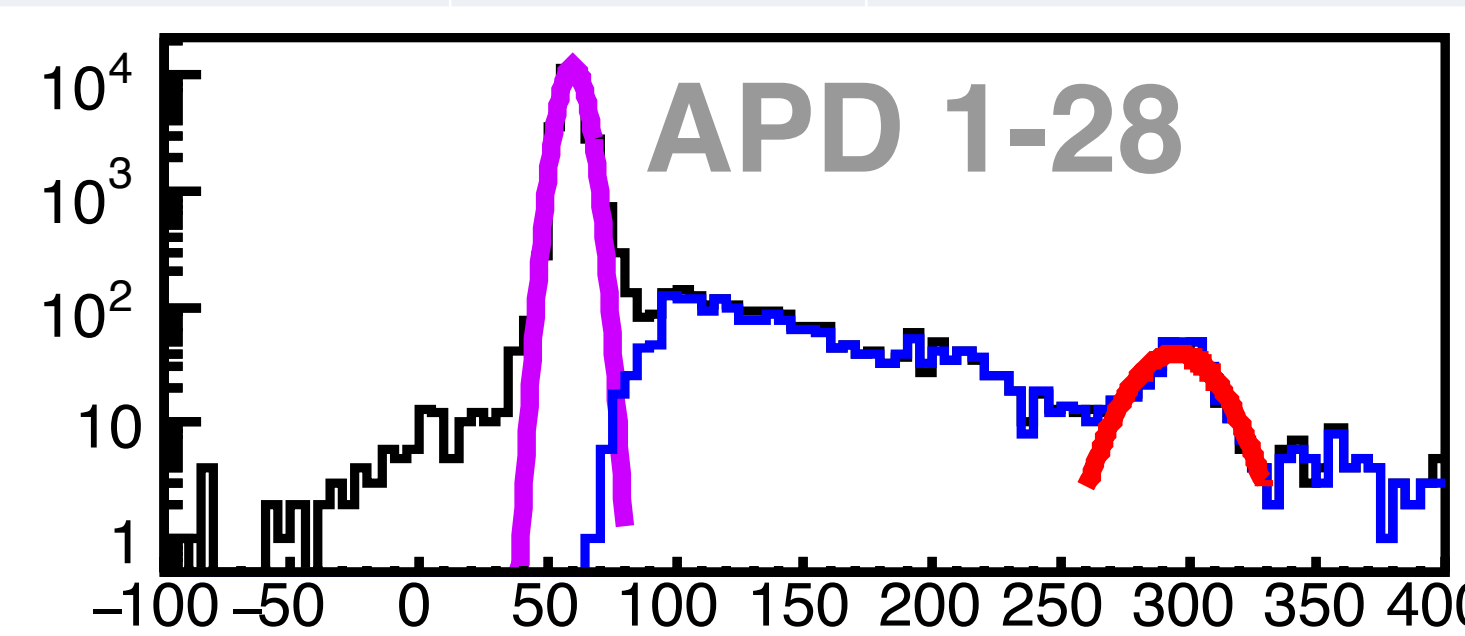
APDのゲインは温度・電圧によって大きく変化する。WBMは温度をモニタし、電圧を操作することでAPDのゲインを一定に保っている。



## 5. ミッション運用計画

観測機器は2つの観測モードを用意している。

| 観測モード     | 所用時間    | 概要   |
|-----------|---------|--|
| GRB待機/観測  | 電力が許す限り | 通常の観測モード。観測データは常にリングバッファに書き込み、GRBを検知したら、GRB検知前後のデータをダウンリンクする。                        |
| キャリブレーション | ~10分    | 観測機器の較正用。偏光計に設置した <sup>241</sup> Amと <sup>137</sup> Csを用いて、較正を行う。メモリがいっぱいになるまで観測を行う。 |

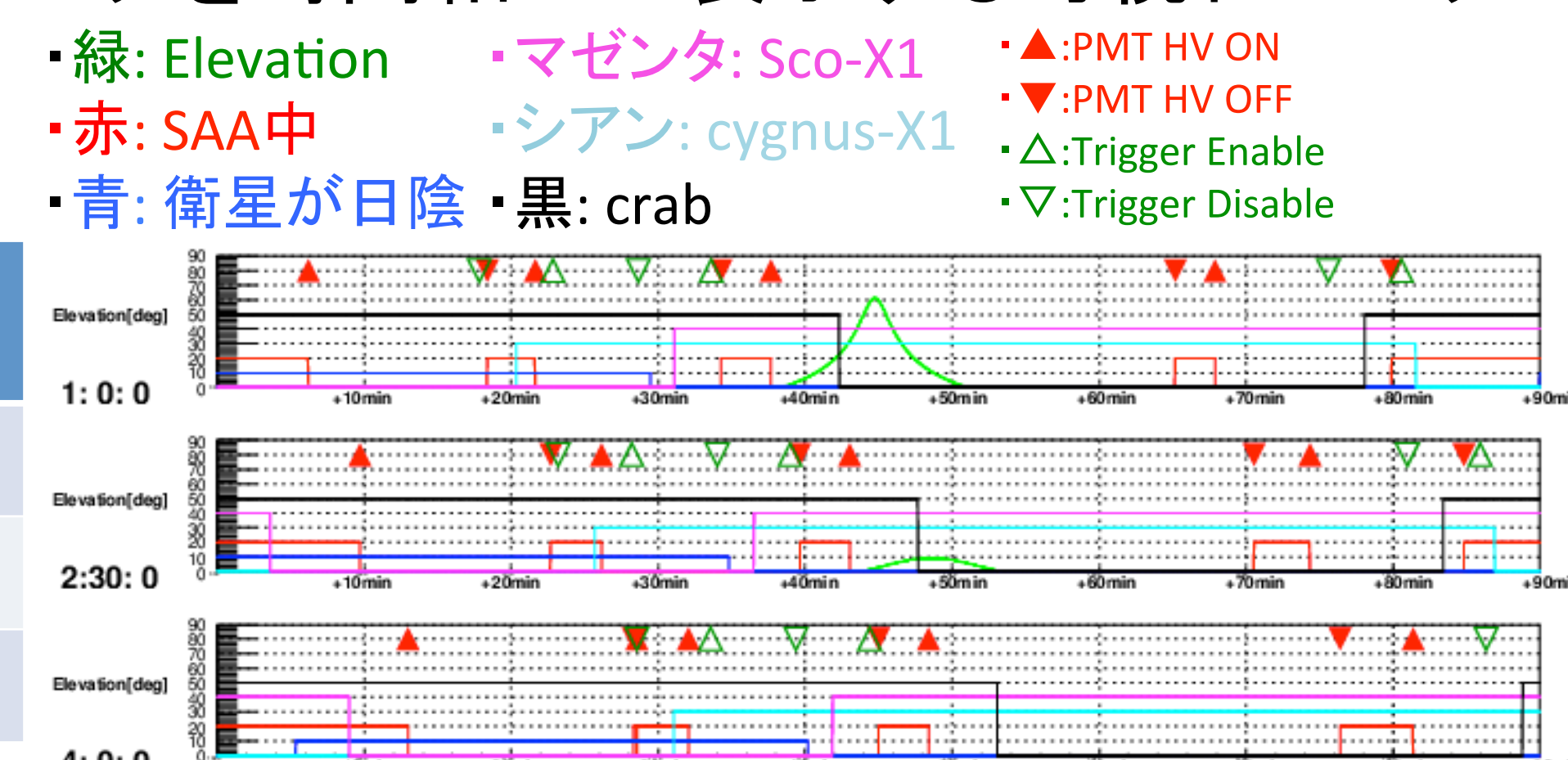


内蔵した<sup>137</sup>Cs線源で10分測定したHXCP APDのスペクトル@+20°C。  
紫: ペDESTAL  
赤: 光電ピーク

## 6. 運用支援システム

GRB偏光観測のためには、荷電粒子から装置保護や明るい既知天体の誤検知防止のために100を超えるコマンドをアップリンクする必要がある。そのためコマンド生成プログラムを用意し、人間が目視でコマンドを確認する目的で、コマンドの種類と発行タイミングを時間軸上に表示する可視化プログラムを用意している。

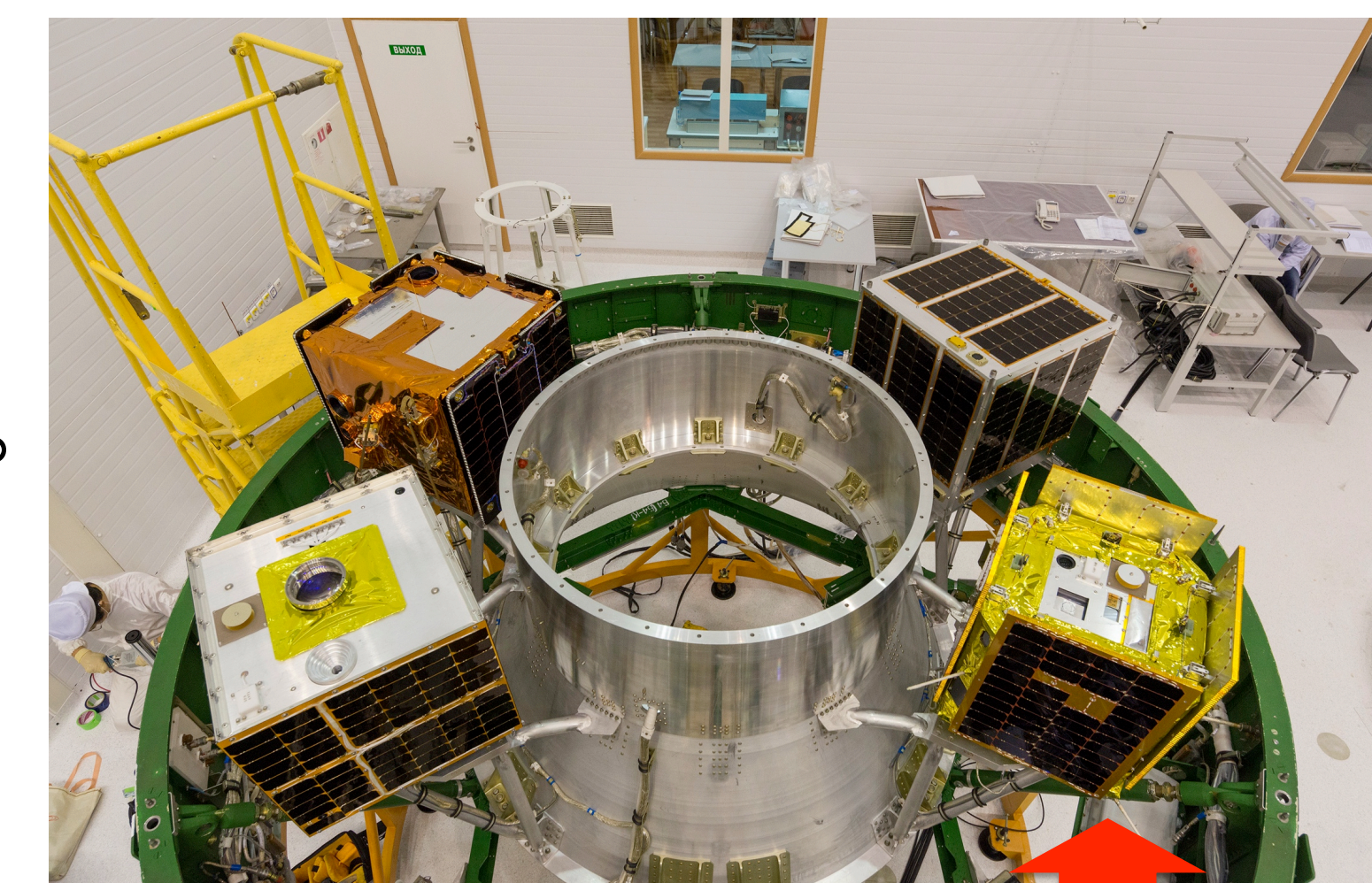
| コマンド種類     | コマンド数 (1日観測する場合) |
|------------|------------------|
| 検出器保護      | ~120             |
| 既知天体の誤検知防止 | ~30 (1天体辺り)      |
| その他設定コマンド  | <20              |



## 7. 統合試験と打ち上げ

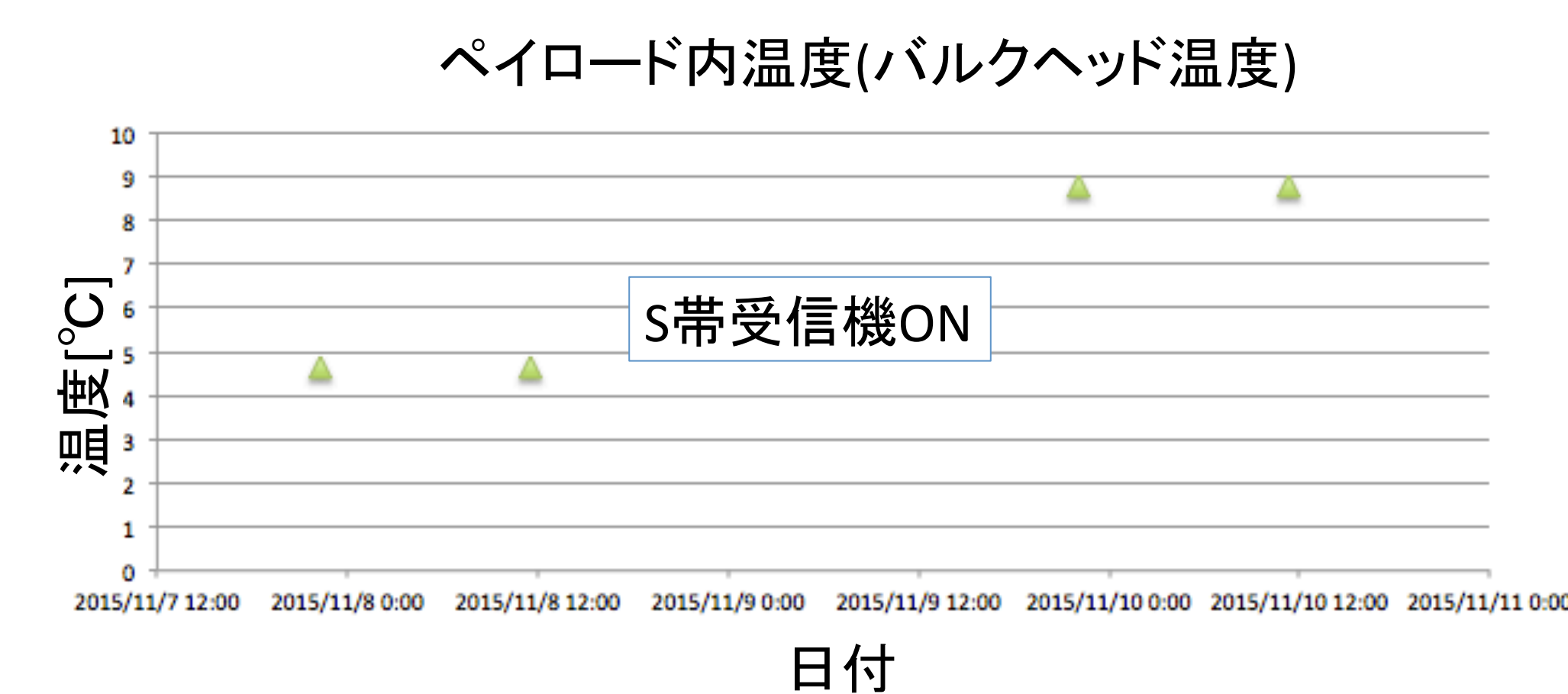
2014年8月TSUBAMEの組み上げと2週間の統合試験を行い、観測シーケンスの動作を確認し、バグをすべて修正した。

TSUBAMEは2014年11月6日に打ち上がり、テレメトリを取得してパドル展開および太陽捕捉に成功したことを確認した。その後通信系に不具合が発生したため、2015年1月5日の時点でGRB観測機器の電源はまだ入っていない。



TSUBAME

通信機器の不具合が発生する前に、ペイロード内の温度は4回取得できており、安定していることがわかる。



## 8. Reference

[1] Y. Yatsu et al. "Pre-flight performance of a micro-satellite Tsubame for X-ray polarimetry of gamma-ray bursts", Proceeding of SPIE, Vol. 9144 (2014)  
[2] 古賀将哉 他 P-044 "小型衛星開発プログラム活動報告"  
[3] 俵京佑 他 P-46 "超小型衛星TSUBAMEにおける姿勢決定制御系の設計と評価"