



SMILE-2+実験実施報告

高田淳史 (京大理)

谷森達, 水村好貴, 竹村泰斗, 吉川慶, 中村優太, 小野坂健,
齋藤要, 阿部光, 古村翔太郎, 岸本哲朗, 谷口幹幸, 窪秀利 (京大),
黒澤俊介 (東北大/山形大), 身内賢太郎 (神戸大), 澤野達哉 (金沢大),
濱口健二 (メリーランド大), 小財正義 (JAXA)

MeVガンマ線天文学

◆ 元素合成

SNR : 放射性同位体

銀河面 : ^{26}Al ・電子陽電子対消滅線

◆ 粒子加速

ジェット (AGN) :

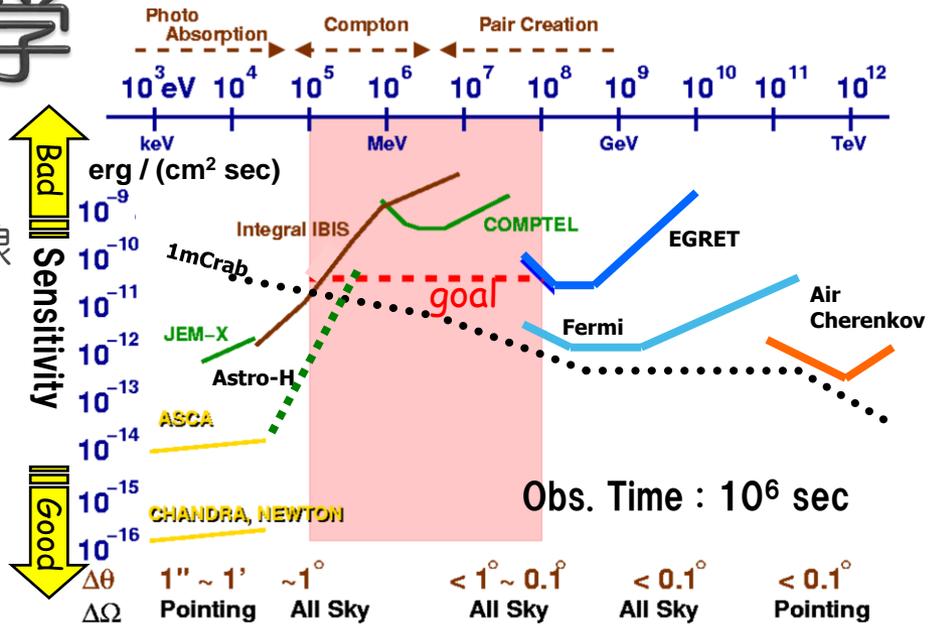
シンクロトロン + 逆コンプトン

◆ 強い重力場

Black hole : 降着円盤, π^0

◆ Etc.

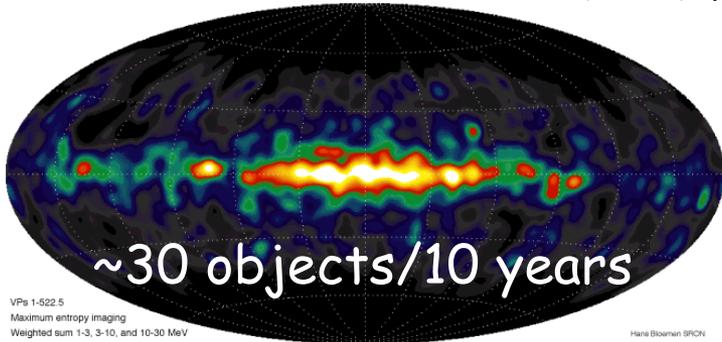
ガンマ線パルサー, 太陽フレア



MeV sky map

1-30 MeV

CGRO/COMPTEL



VPe 1-522.5
Maximum entropy imaging
Weighted sum 1-3, 3-10, and 10-30 MeV

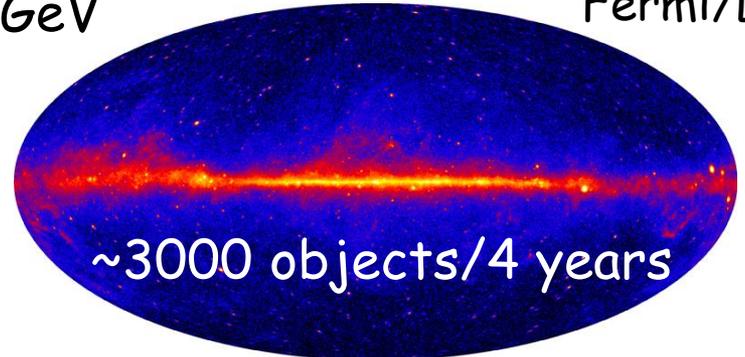
Hans Bloeman SRON

V. Schönfelder+ (A&AS, 2000)

GeV sky map

> 1 GeV

Fermi/LAT

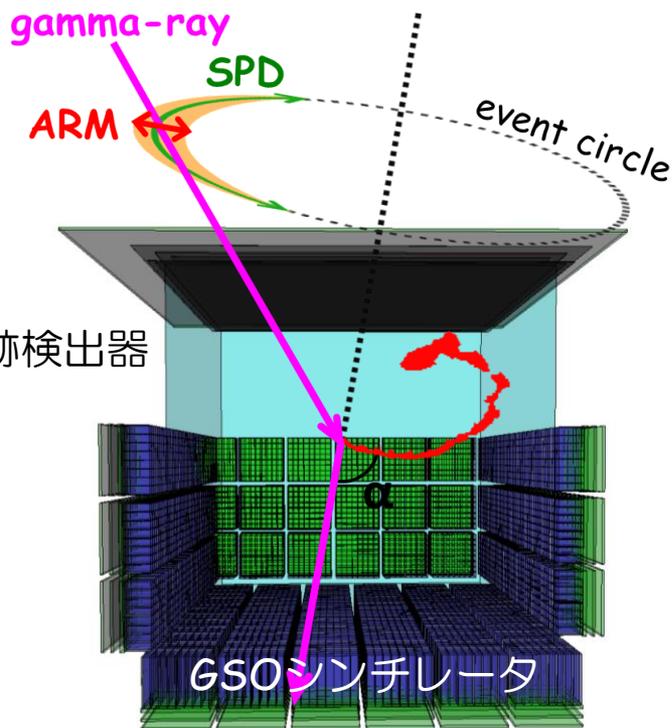


F. Acero+ (ApJS, 2015)

次世代MeVガンマ線望遠鏡への要請

- 数百keV ~ 100 MeVの広帯域
- 全天探査の為に広い視野
- 高S/Nの鮮明な画像

電子飛跡検出型コンプトン望遠鏡 (ETCC)



➤ ガス飛跡検出器

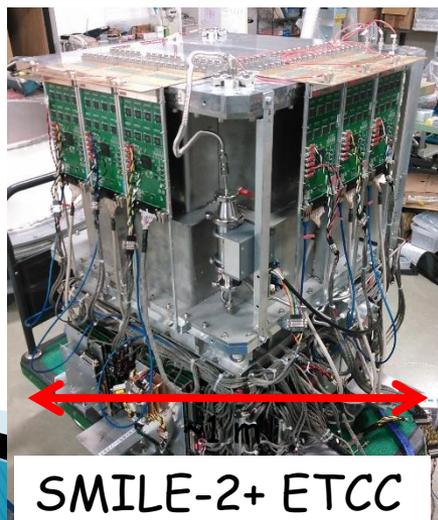
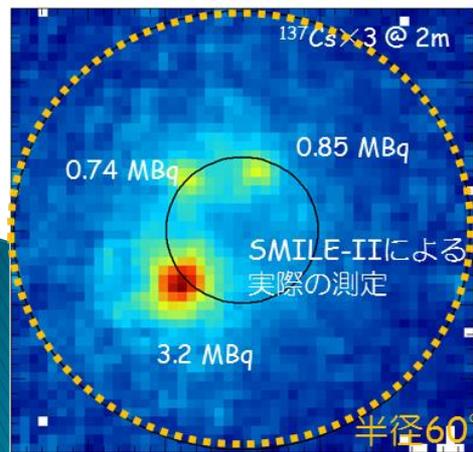
コンプトン反跳電子の
飛跡とエネルギー

➤ ピクセルシンチレータアレイ

コンプトン散乱ガンマ線の
吸収点とエネルギー



検出事象ごとに
コンプトン散乱を完全に再現



- 到来方向とエネルギーを一意に特定
- 大きな視野 (~3 sr)
- 電子飛跡による鋭いPSF
 - ⇒ 範囲外の雑音をイメージングで除去
- α 角によるコンプトン散乱運動学テストと dE/dx による粒子識別による雑音除去能力
 - ⇒ 重いVETO検出器が不要

SMILE

Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment

SMILE-I @ 三陸 (Sep. 1st 2006)

- 宇宙拡散・大気ガンマ線の観測 (0.1 ~ 1MeV)
- **dE/dXによるバックグラウンド除去の成功**

A. Takada+. ApJ,2011

SMILE-2: 地上試験のみ

T. Tanimori+. ApJ,2015

SMILE-2+ 1-day flight @ Alice Springs (Apr. 7th 2018)

- MeVガンマ線天文学におけるイメージングの確立
- 明るい天体(かに星雲と銀河中心)のイメージング

Requirement

Effective area

a few cm²

(detect 5 σ) PSF (50% included) ^{radius} ~ 10 deg @ 662 keV

NOW!!

SMILE-3

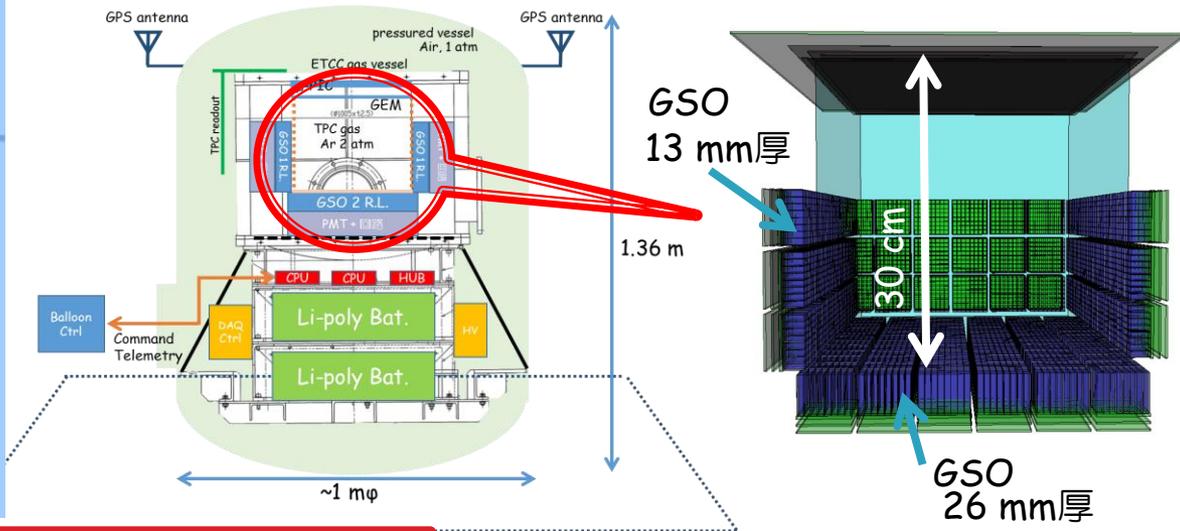
- 長時間気球を用いた科学観測
- COMPTELの感度を上回る望遠鏡で数回放球

人工衛星による全天観測

~ sub-mCrab sensitivity

天文観測気球実験 SMILE-2+

Sub-MeV/MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-Balloon Experiment 2+



2018年春の豪州気球実験に採択！！

最低成功基準：

大気ガンマ線を観測→残留大気圧特性+東西効果を検出
⇒ 雑音除去能力・有効面積の検証

高度成功基準：

e^\pm 対消滅線(銀河中心領域)及びCrab(かに星雲)を観測
⇒ 有効面積 (3 cm^2)・PSF (10°)で
かに星雲 5.1σ ・銀河中心領域 5.5σ

大気ガンマ線の撮像分光→大気成分の分析手法を検証

最高度成功基準：

MeVガンマ線背景放射のスペクトルを得る

オーストラリア
アリススプリングから
ロングリーチへ
約1日のフライト
予定高度38.5km

2018年4月の放球

SMILE-IIからSMILE-2+へ

▶ 広帯域化

GSO 13 mm ⇒ 500 keVで40%は素通り
光電吸収は~25%
Ar 1気圧, 30 cm角 ⇒ 測定できる反跳電子は
せいぜい150 keV以下



- ◆ GSOの厚みを増大
⇒ 散乱ガンマ線の検出確率大
- ◆ ガス容器内にGSOを設置
⇒ >150 keVの電子も測定

▶ PSFの向上

Ar 1気圧, 30 cm角 ⇒ ~50 keVの電子が受ける
多重散乱は~100度



- ◆ ガス容器内にGSOを設置
⇒ ~150 keVの電子の
多重散乱は~20度

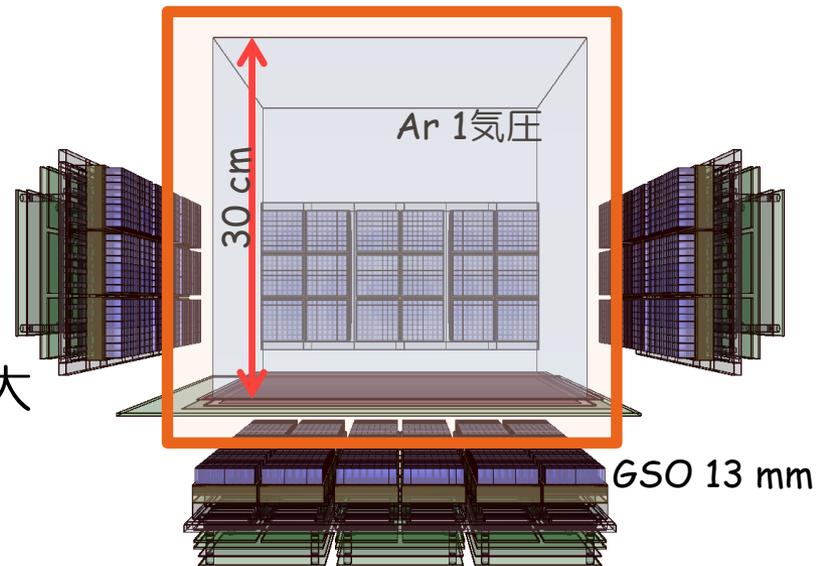
▶ 有効面積の拡大

GSOシンチの位置 ⇒ 飛跡検出器を覆えていない

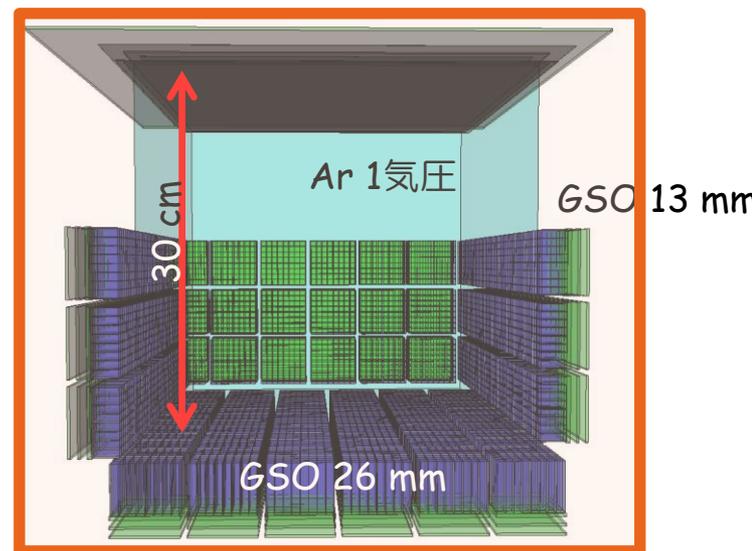


- ◆ ガス容器内にGSOを設置
⇒ シンチ間の隙間が激減

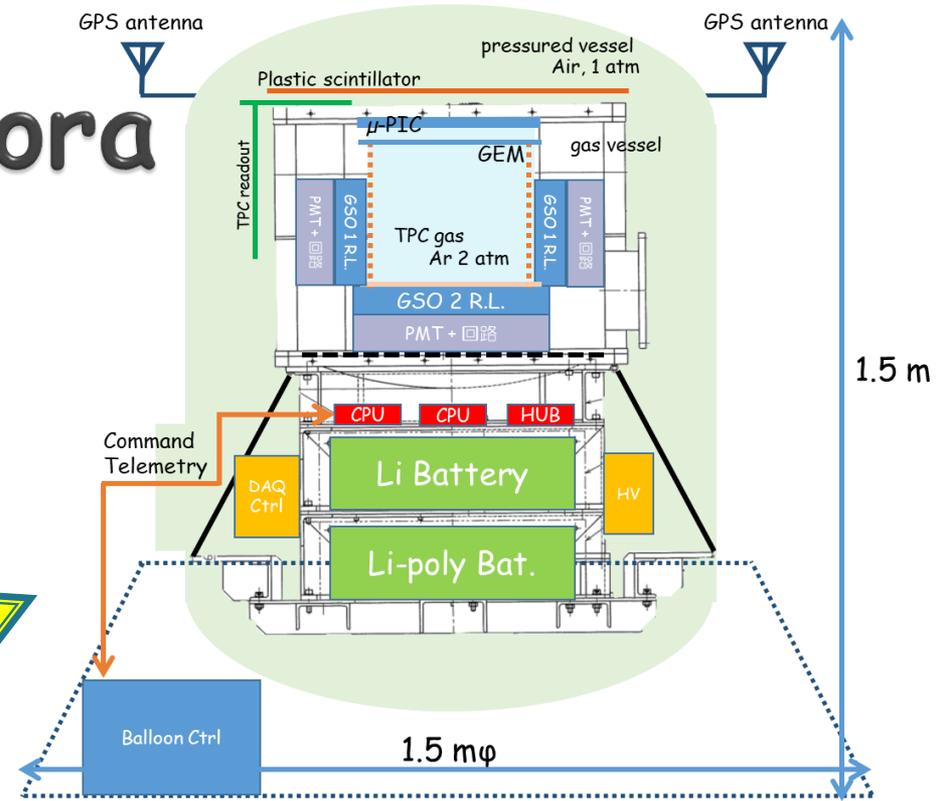
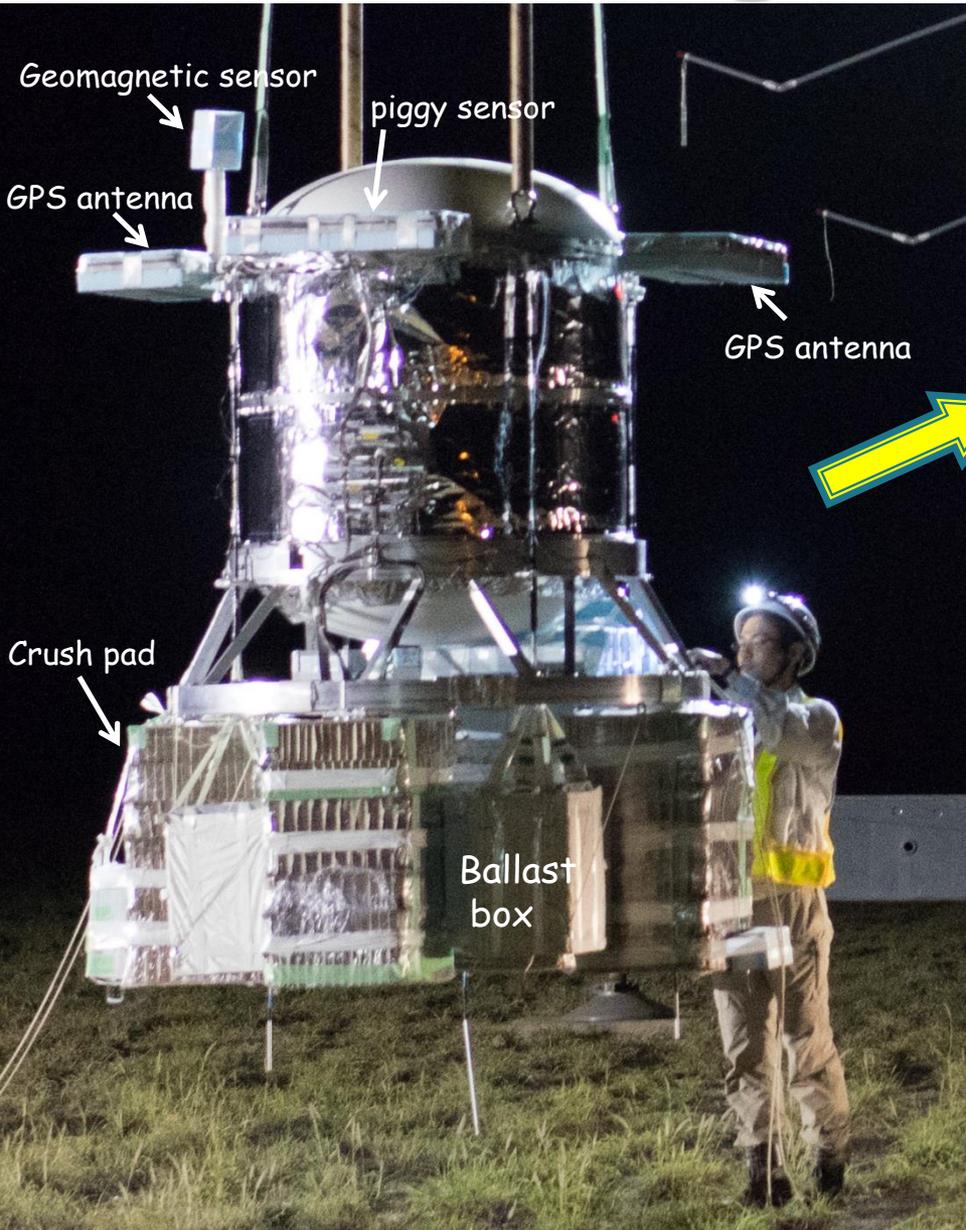
SMILE-II ETCC



SMILE-2+ ETCC



SMILE-2+ gondora



	重量 kg
気球 (B500A)	898.0
荷姿	87.7
観測器	839.0
ETCC	(179.0)
システム+電池	(132.2)
与圧容器など	(157.0)
バラスト	(328.0)
その他	(42.8)

搭載House Keepingセンサー

SMILE HKセンサー

姿勢・位置センサ



GPSアンテナ x2(東・西)
位置 < 2.5 m(RMS)



GPSコンパス
方位角 $< 0.15^\circ$ (95%CL)



磁気センサ x3 (x, y, z軸)
分解能 $< \pm 1.5^\circ$



傾斜計 x2 (東西・南北)
高度角 $< 0.002^\circ$ (RMS)

その他センサ



外気圧計
レンジ：0 - 130 hPa
精度： ± 0.2 hPa



温度計
 $\pm 0.3^\circ\text{C}$

ピギーバック



GPS姿勢ロガー

ピギーバックとして搭載して、SMILEのHKセンサーとは独立で姿勢・位置を測定する

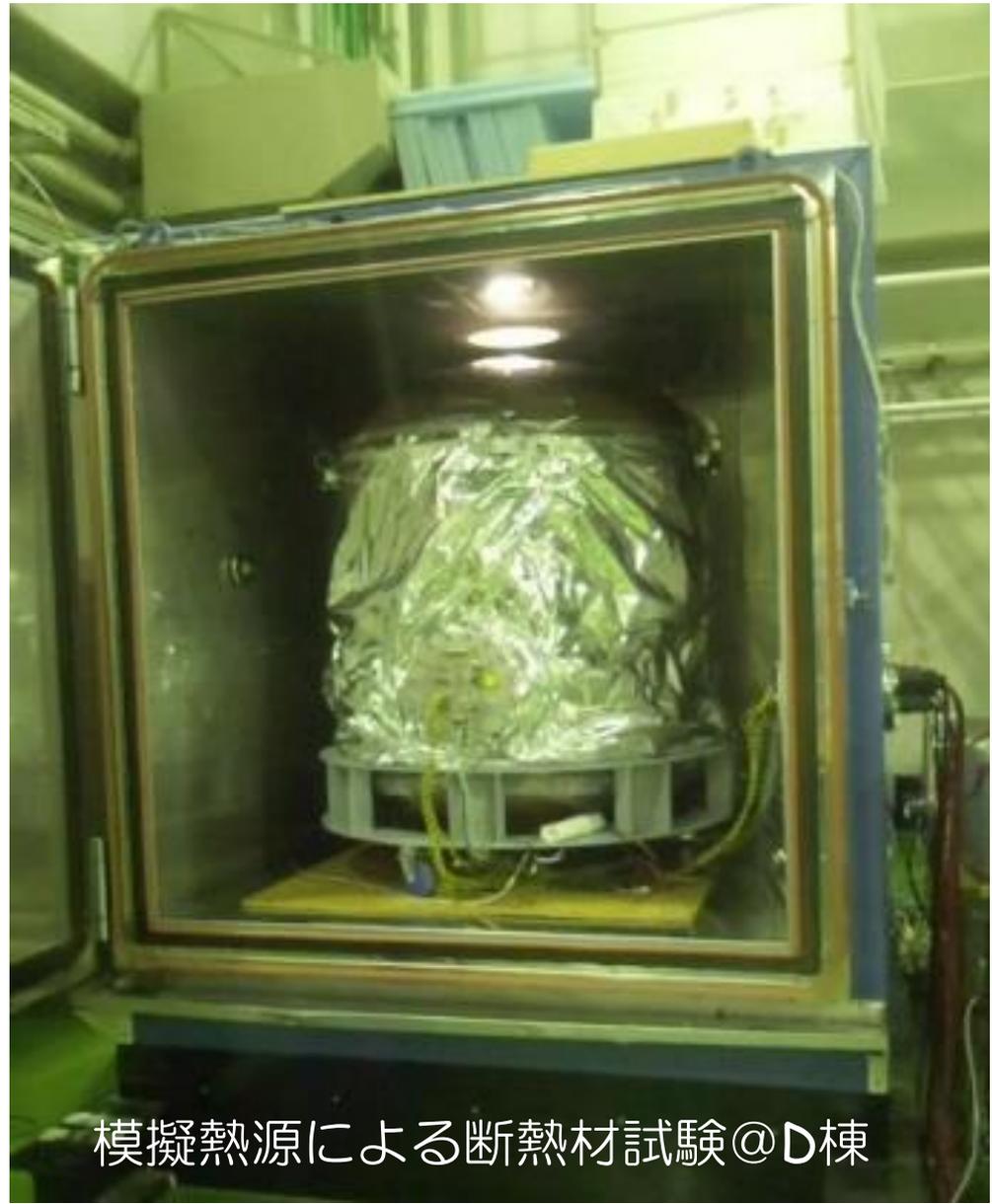
(莊司泰弘, 飯嶋一征 宇宙科学技術連合講演会, 3J15, 2017年10月
大気球シンポジウム, isas17-sbs-007, 2017年11月)

放球へ向けた準備...

2017年 1月17日 採択通知

放球へ向けた準備...

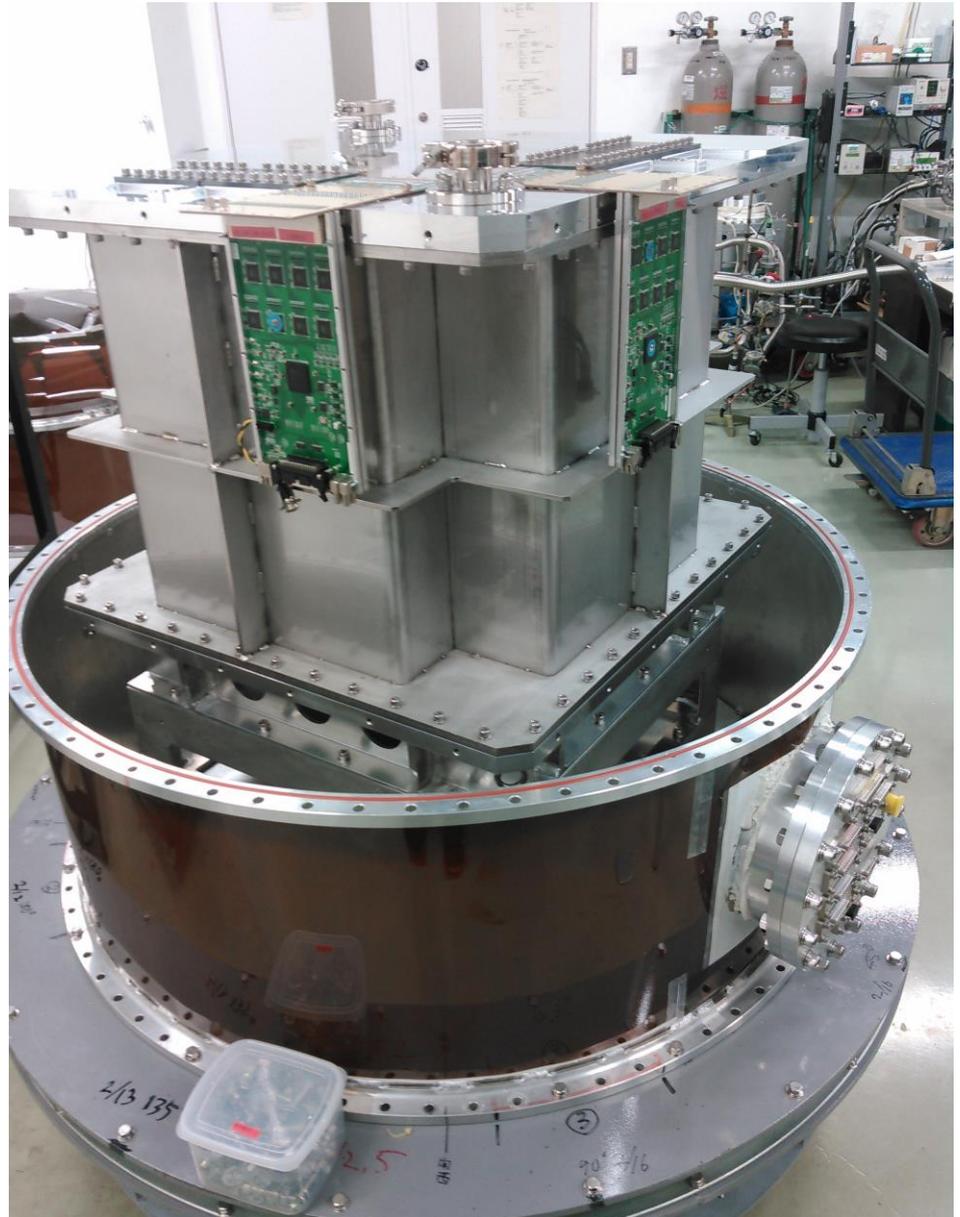
2017年 1月17日 採択通知
3月6-9日 熱真空試験その1



模擬熱源による断熱材試験@D棟

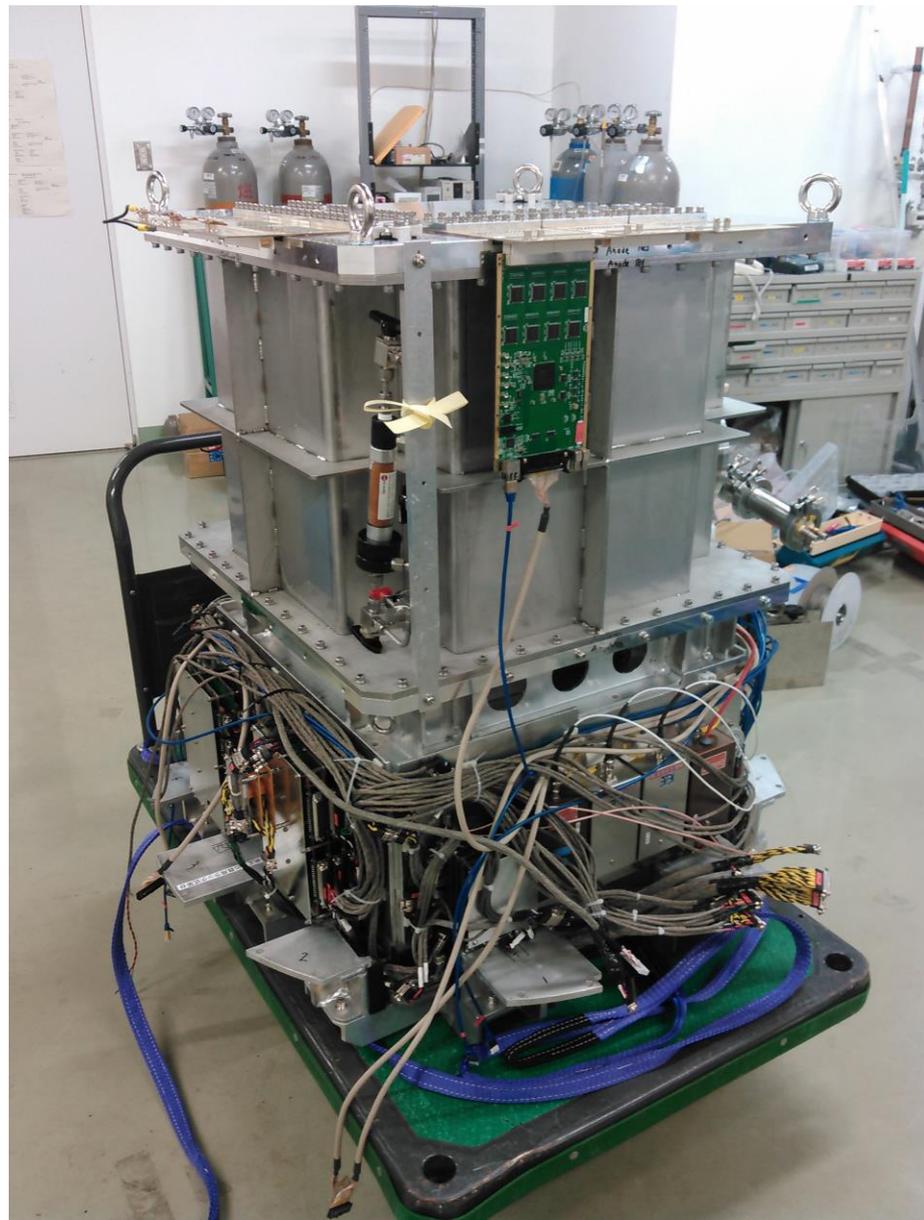
放球へ向けた準備...

2017年 1月17日 採択通知
3月6-9日 熱真空試験その1
3月24日 ガス容器完成



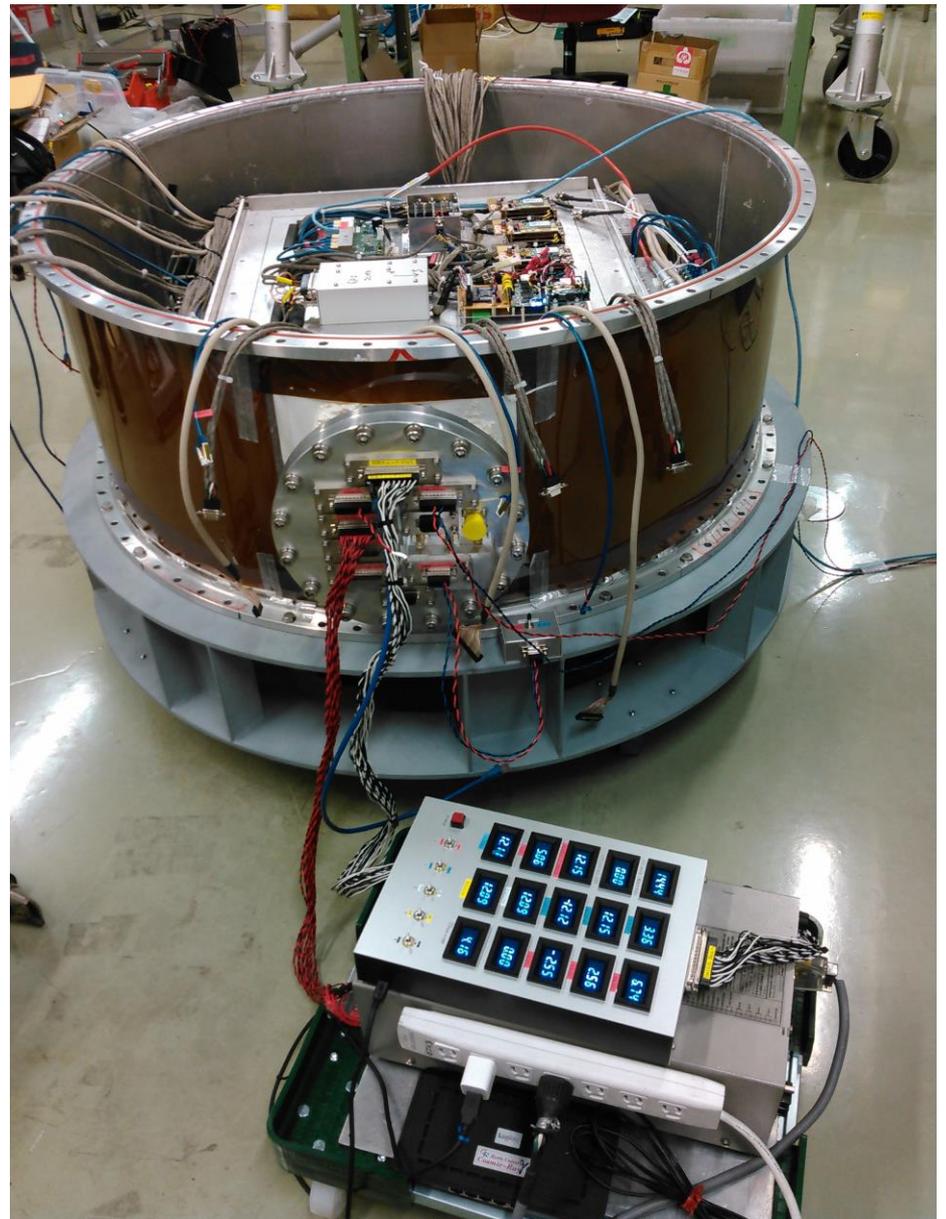
放球へ向けた準備...

2017年	1月17日	採択通知
	3月6-9日	熱真空試験その1
	3月24日	ガス容器完成
	5月11日	飛跡検出器動作
	6月15日	仮組上げ



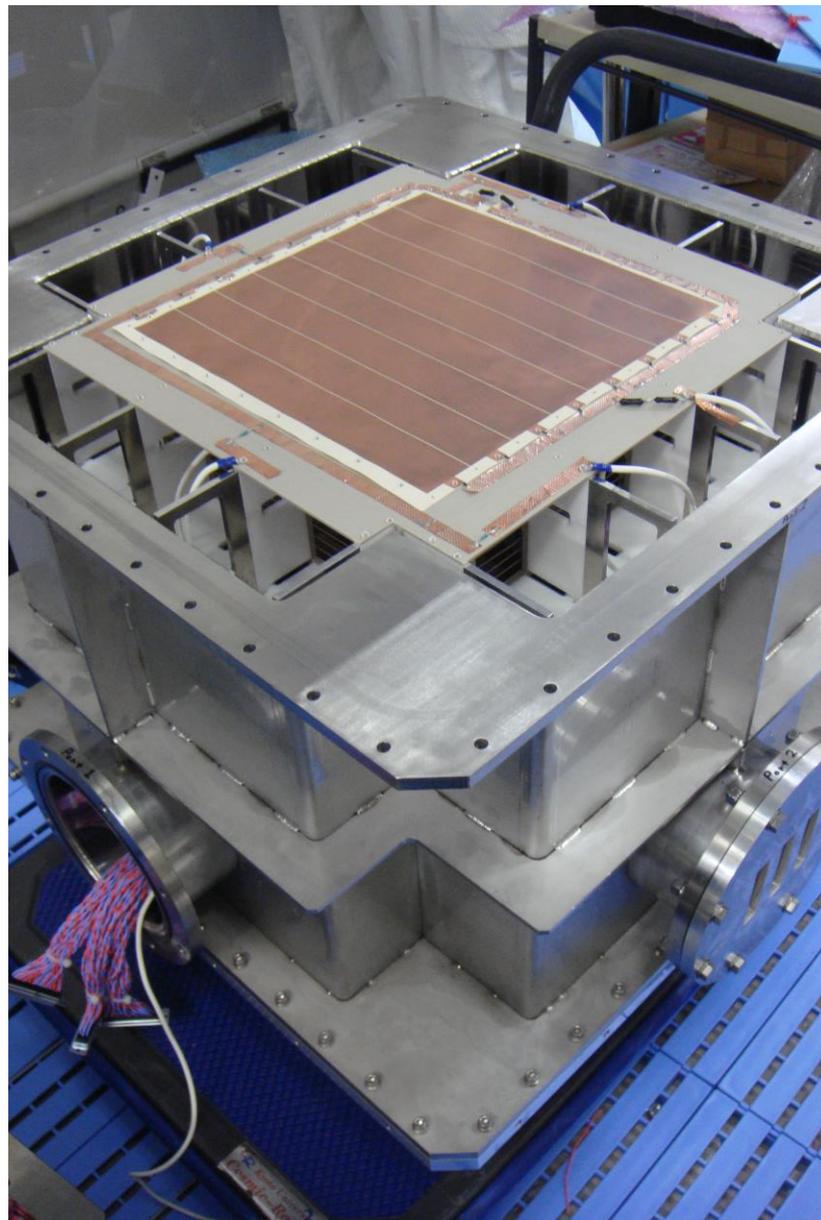
放球へ向けた準備...

2017年 1月17日 採択通知
3月6-9日 熱真空試験その1
3月24日 ガス容器完成
5月11日 飛跡検出器動作
6月15日 仮組上げ
7月4日 System組付け完了



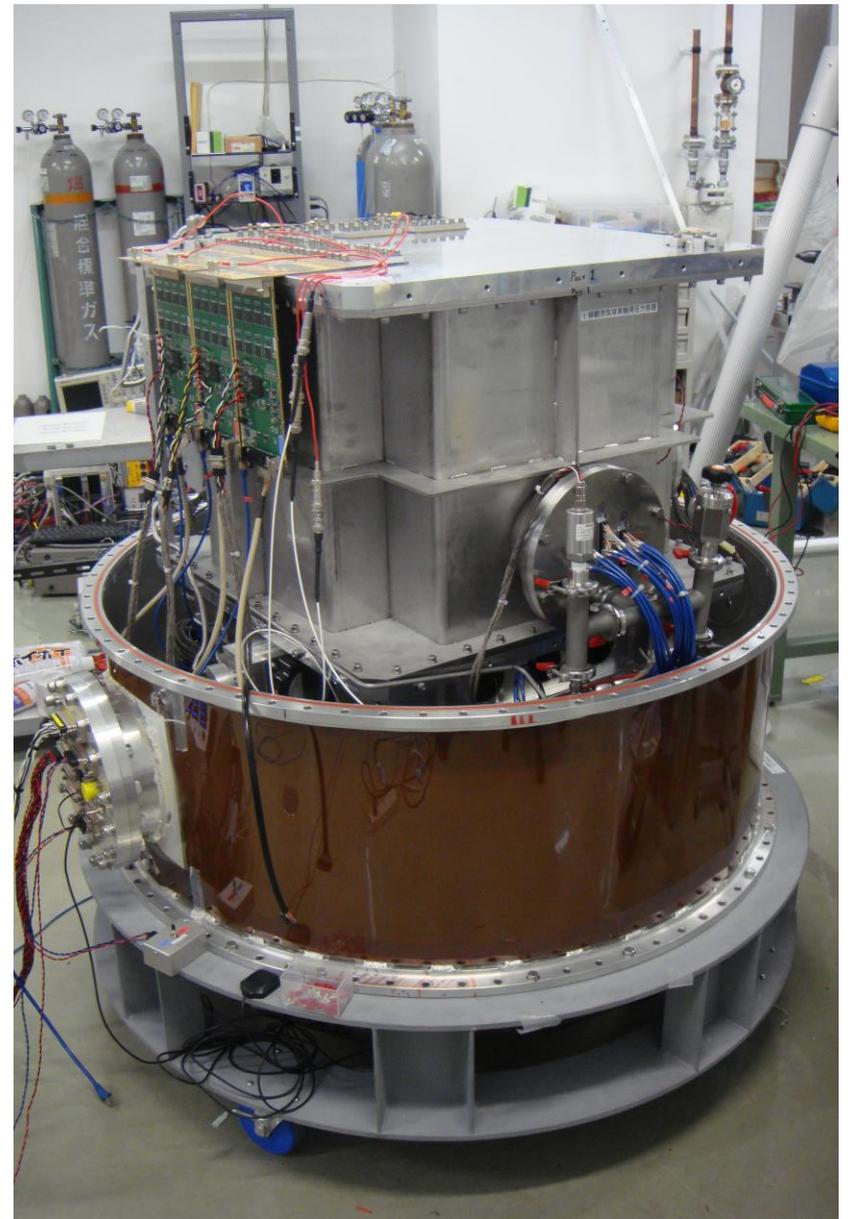
放球へ向けた準備...

2017年	1月17日	採択通知
	3月6-9日	熱真空試験その1
	3月24日	ガス容器完成
	5月11日	飛跡検出器動作
	6月15日	仮組上げ
	7月4日	System組付け完了
	7月22日	検出器組上げ完了



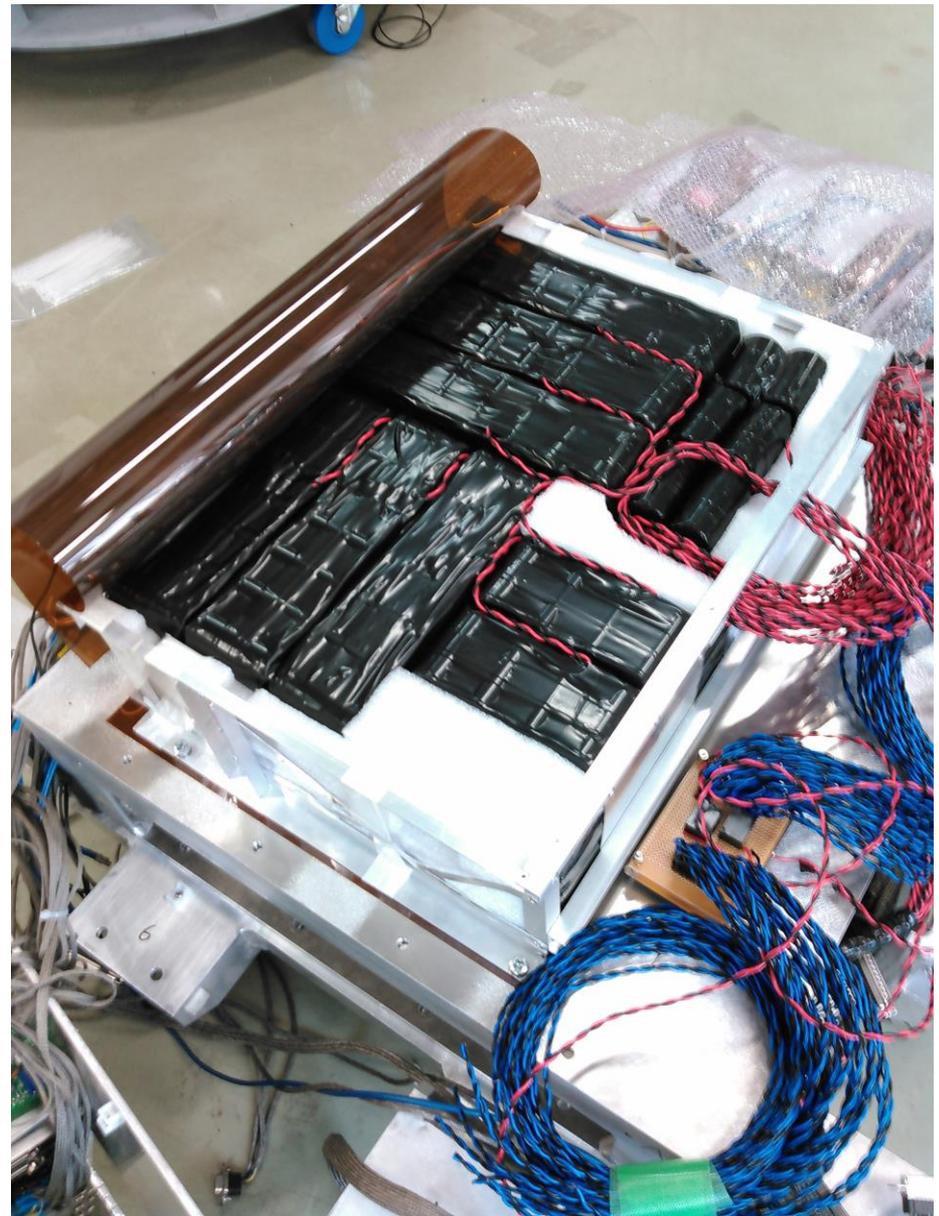
放球へ向けた準備...

2017年	1月17日	採択通知
	3月6-9日	熱真空試験その1
	3月24日	ガス容器完成
	5月11日	飛跡検出器動作
	6月15日	仮組上げ
	7月4日	System 組付け完了
	7月22日	検出器組上げ完了
	7月26日	検出器取り付け
	8月23日	ガンマ線検出確認



放球へ向けた準備...

2017年	1月17日	採択通知
	3月6-9日	熱真空試験その1
	3月24日	ガス容器完成
	5月11日	飛跡検出器動作
	6月15日	仮組上げ
	7月4日	System 組付け完了
	7月22日	検出器組上げ完了
	7月26日	検出器取り付け
	8月23日	ガンマ線検出確認
	9月26日	一次電池取り付け シンチレータ交換



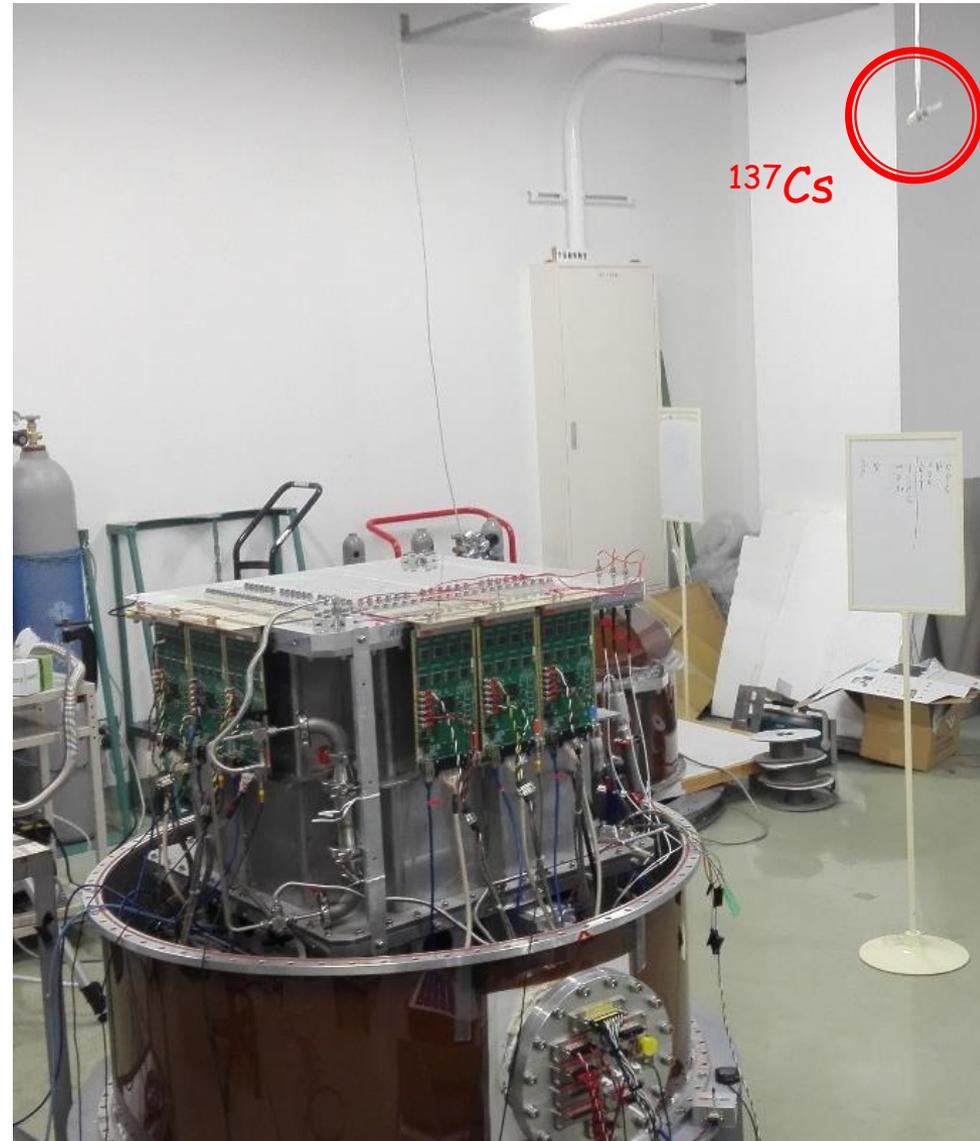
放球へ向けた準備...

2017年	1月17日	採択通知
	3月6-9日	熱真空試験その1
	3月24日	ガス容器完成
	5月11日	飛跡検出器動作
	6月15日	仮組上げ
	7月4日	System 組付け完了
	7月22日	検出器組上げ完了
	7月26日	検出器取り付け
	8月23日	ガンマ線検出確認
	9月26日	一次電池取り付け シンチレータ交換
	10月17	熱真空試験その2
	-30日	かみ合せ試験
	10月27日	電源事故



放球へ向けた準備...

2017年	1月17日	採択通知
	3月6-9日	熱真空試験その1
	3月24日	ガス容器完成
	5月11日	飛跡検出器動作
	6月15日	仮組上げ
	7月4日	System 組付け完了
	7月22日	検出器組上げ完了
	7月26日	検出器取り付け
	8月23日	ガンマ線検出確認
	9月26日	一次電池取り付け シンチレータ交換
	10月17日	熱真空試験その2
	-30日	かみ合せ試験
	10月27日	電源事故
	11月14日	System 修復完了
	11月15日	検出器較正試験
	- 12月27日	
	11月30日	かみ合せ試験



放球へ向けた準備...

2017年	1月17日	採択通知
	3月6-9日	熱真空試験その1
	3月24日	ガス容器完成
	5月11日	飛跡検出器動作
	6月15日	仮組上げ
	7月4日	System 組付け完了
	7月22日	検出器組上げ完了
	7月26日	検出器取り付け
	8月23日	ガンマ線検出確認
	9月26日	一次電池取り付け シンチレータ交換
	10月17日	熱真空試験その2
	-30日	かみ合せ試験
	10月27日	電源事故
	11月14日	System 修復完了
	11月15日	検出器較正試験
	- 12月27日	
	11月30日	かみ合せ試験
2018年	1月11日	京大から発送

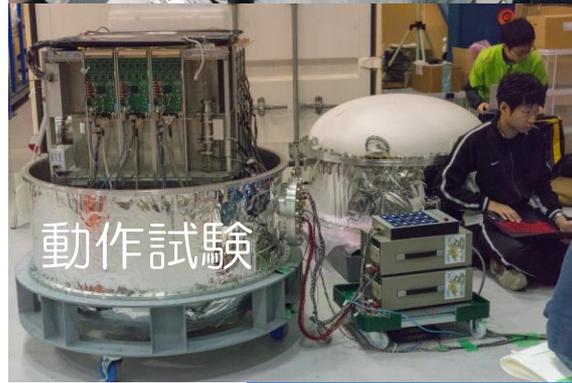


現地作業

- 3月2日 荷物着
- 3月5日 現地入り
- 3月6日- ETCC動作確認
- 3月7日 ガス入れ
- 3月8日 ガス入れ替え
- 3月9
 - 16日 ETCCキャリブレーション
- 3月13日 かみ合わせ
- 3月16日 GPS/GA屋外試験
- 3月17日 ガス純化システム作動
- 3月18
 - 19日 与圧容器密封試験
- 3月23日 感度試験 + 最終かみ合わせ
- 3月27日 ガス純化システム作動
- 3月28日 リハーサル
- 4月2日 ガス純化システム作動
- 4月4日 Flight Readiness Review



屋外試験

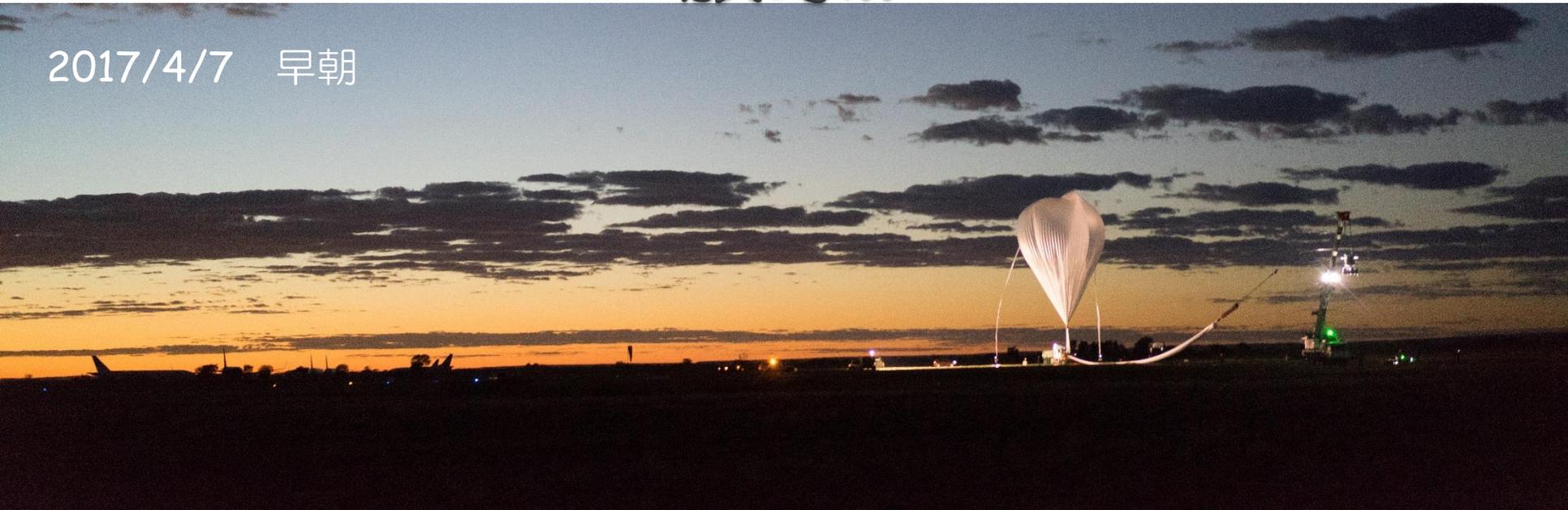


感度試験



放球!!

2017/4/7 早朝



放球直後



JAXA 梯氏提供

放球直後



高度~40 km

150 m

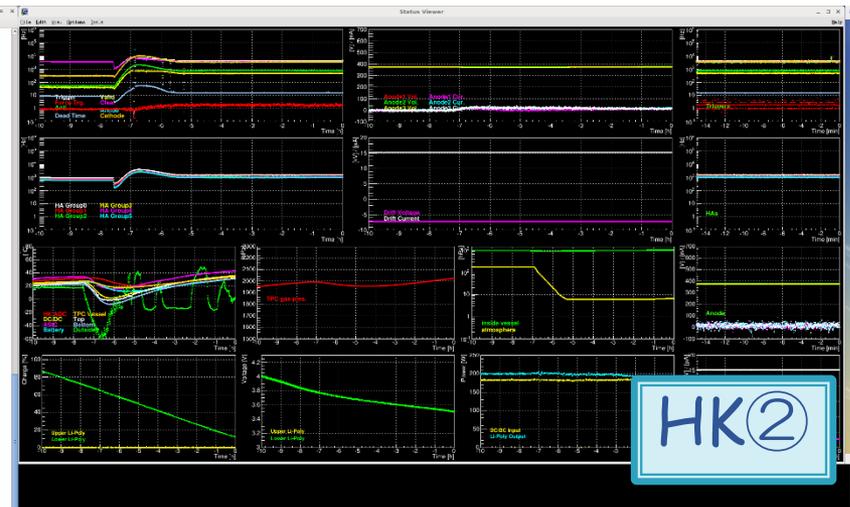
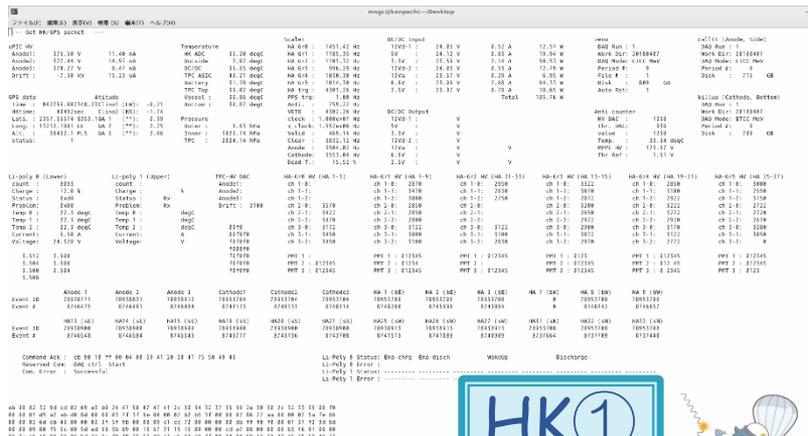
←ゴンドラ

JAXA 梯氏提供

フライト運用

Bi-phase 8 kbps HKデータ用 (144 byte/frame)

温度/圧力/GPS, Scaler, 電源モニタ, disk残量, event取得状況 など

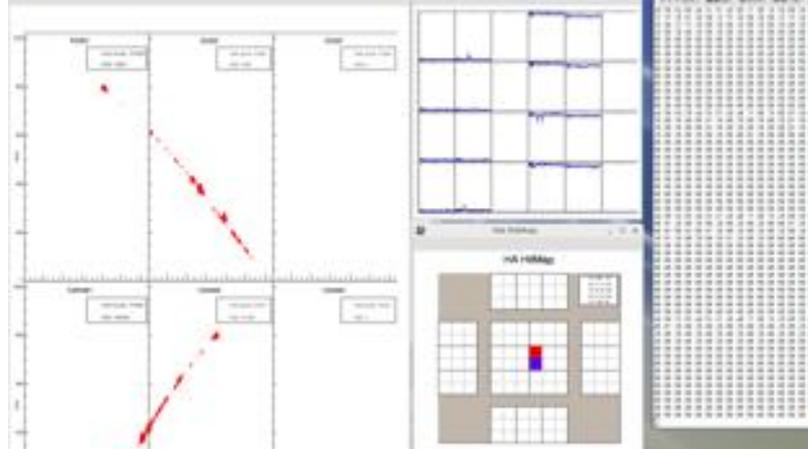


HK①



HK②

QPSK 800 kbps イベントデータ用



Quick Look

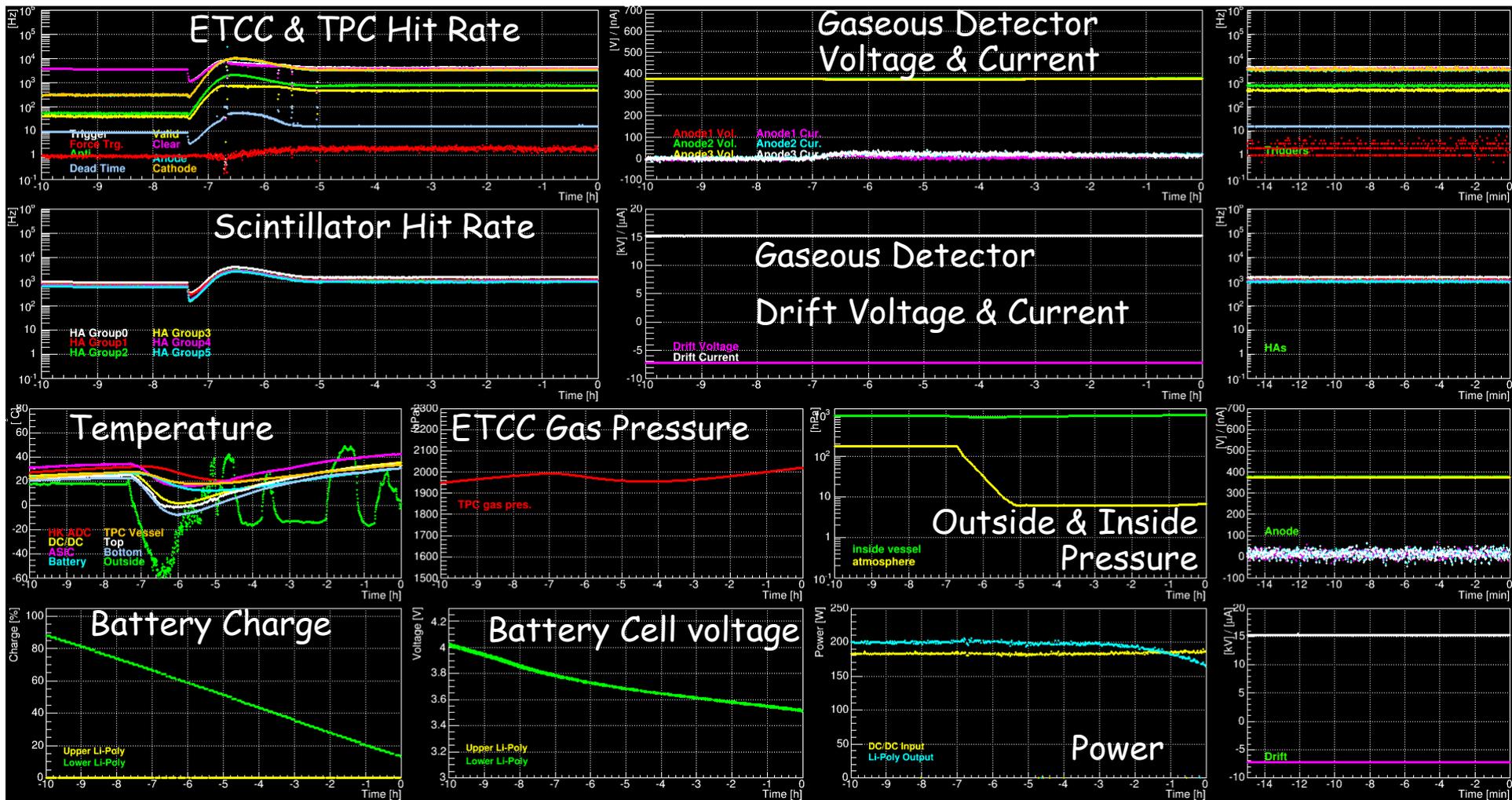


気球運用中様子

フライト運用 (QL画面)

10秒ごとの平均値 10時間分

1秒ごと15分間



フライト & 回収

April 7 (local time)

- 2:47-3:09 システム電源ON
- 3:09 DAQ Start
- 6:24 放球
- 8:44 レベルフライト開始

April 8

- 10:45 DAQ OFF
- 10:45-10:53 システム電源OFF
- 11:07 気球切り離し
- 11:40 着地

April 9

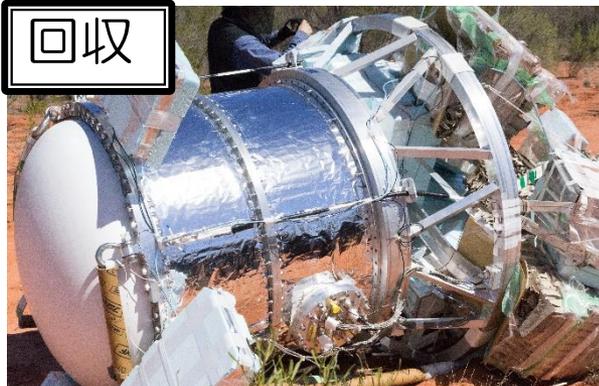
回収

July 19

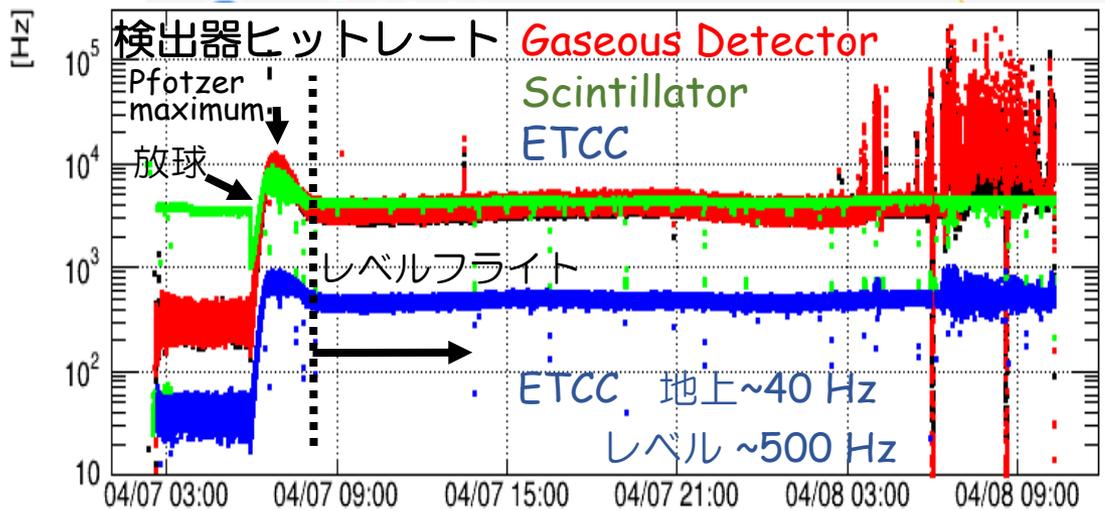
SMILE-2+
京都大学に帰還



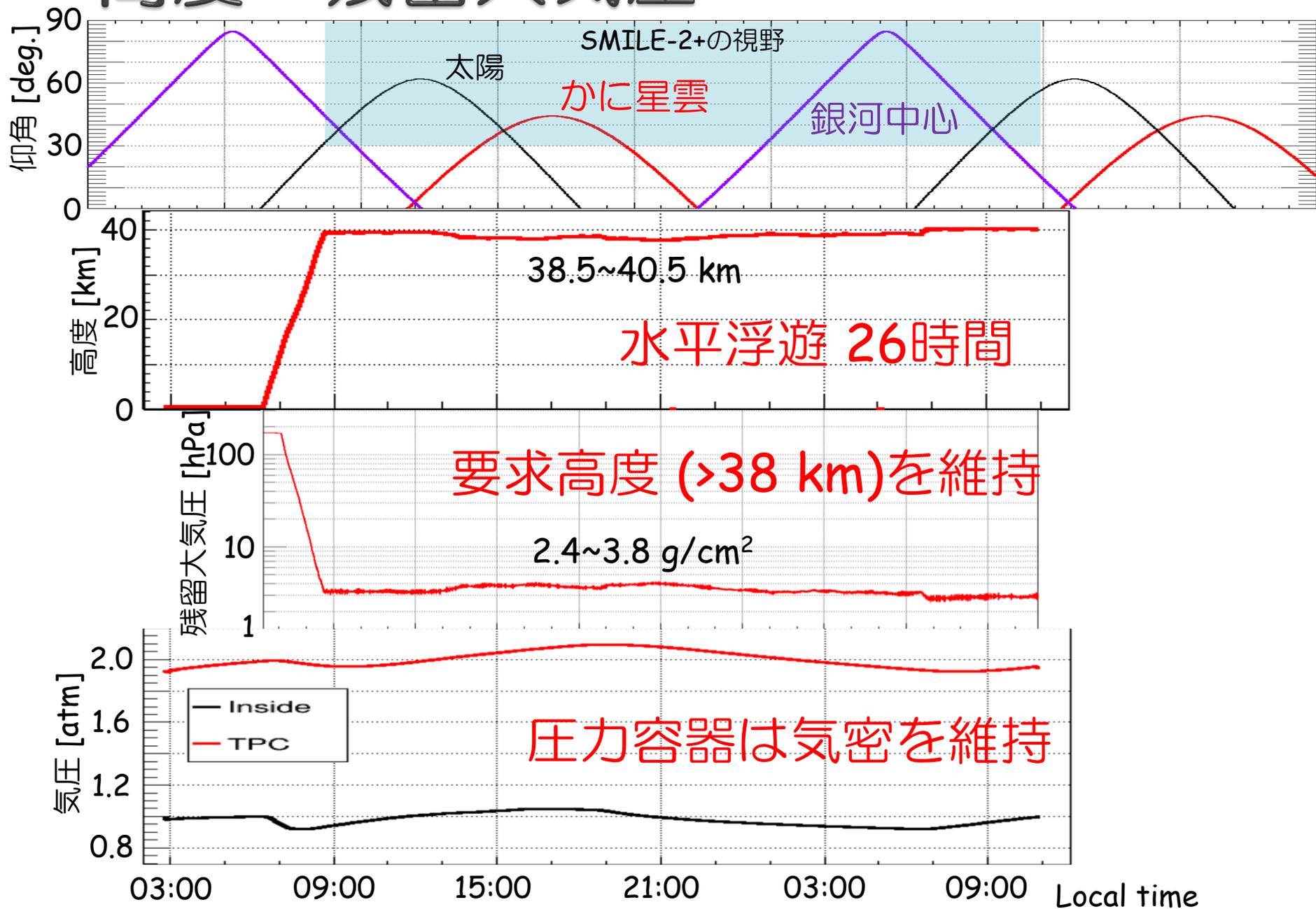
回収



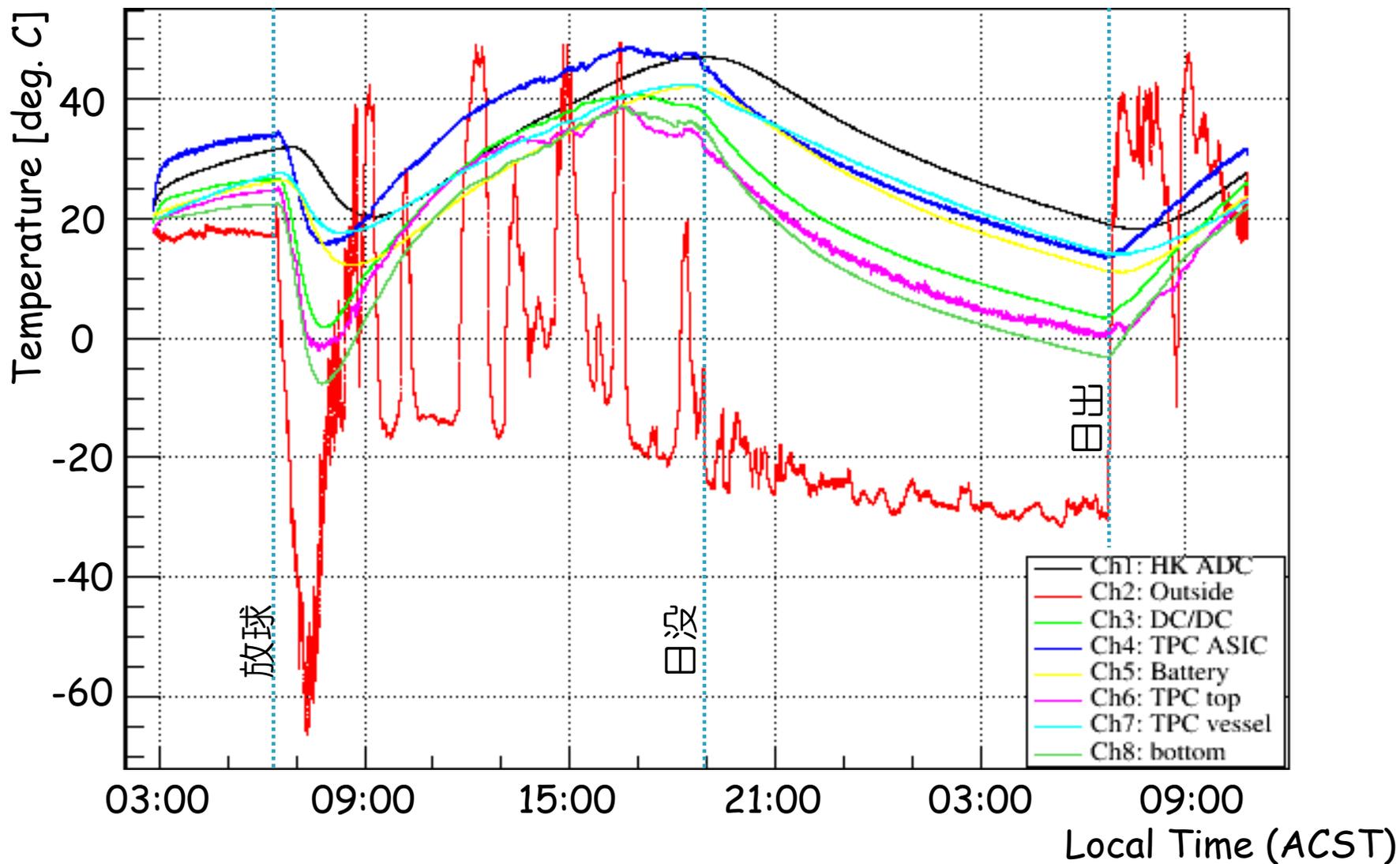
日本に帰還



高度・残留大気圧



フライト中の温度変化

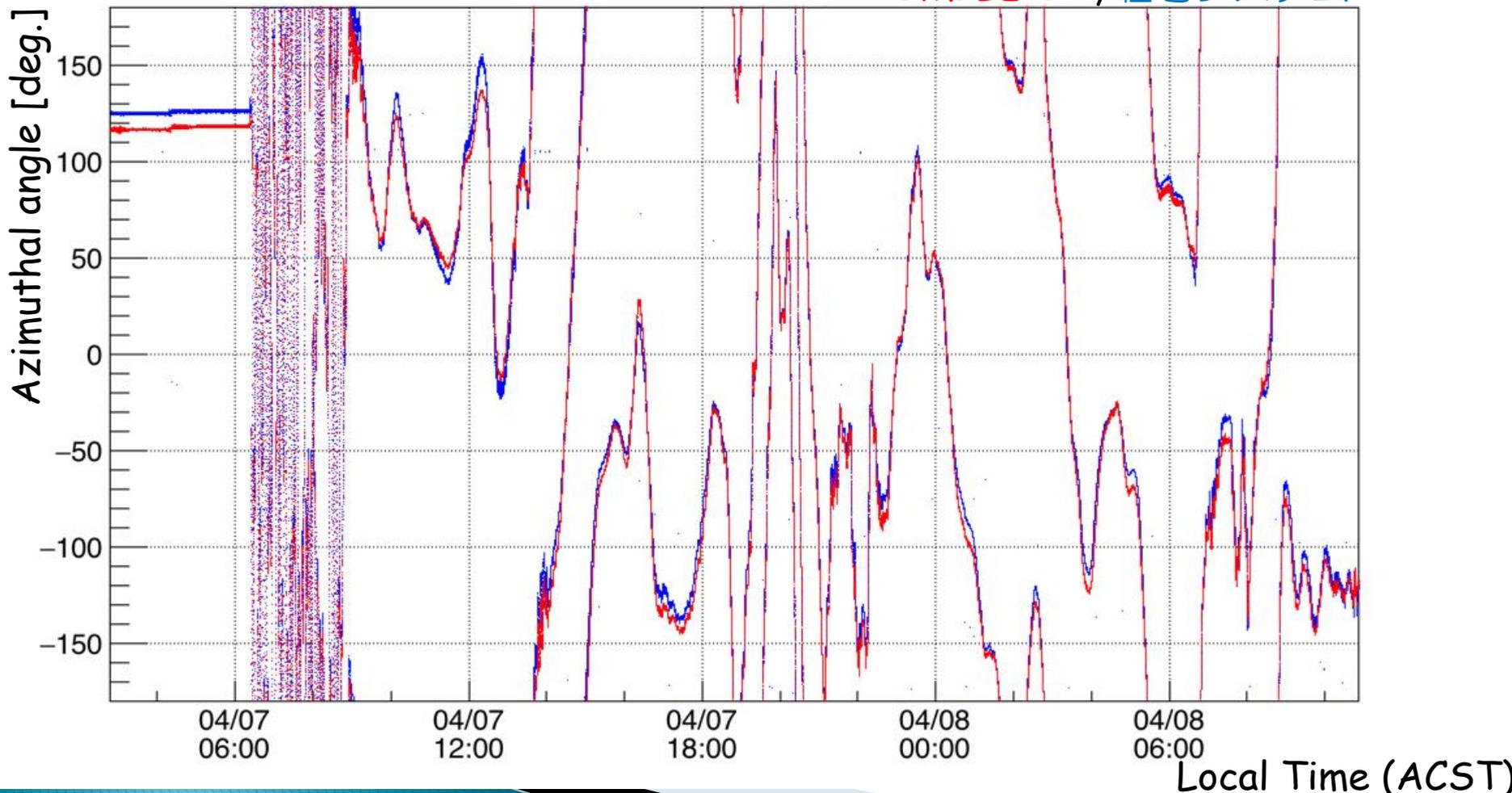


システムは動作保証温度範囲の中で動作

ゴンドラの姿勢情報

- GPSコンパス ⇒ GPSとしては動作するもコンパスとしては動作不良
- 傾斜計 ⇒ 放球直前に揺れを検知するも、放球後は応答が微妙？
- 磁場センサ ⇒ 温度による大きな出力変化 ⇒ ある程度補正済

SMILE-GA, 荘司システム



まとめ

- ▶ 2018年4月7日にAlice SpringsにてSMILE-2+気球実験を実施
目標：ガンマ線イメージングによる天体観測実証
銀河中心領域からの e^\pm 対消滅線・かに星雲を $>5\sigma$ レベルで観測
- ▶ 気球は38.5~40.5 kmにおいて、26時間もの水平浮遊を実現
銀河中心領域は8時間、かに星雲は5時間の間、
検出器の視野内に存在
- ▶ 検出器システムは、ほぼ健全に動作
観測時間中、不感時間 <20%でデータを取得
- ▶ 完全な形で検出器・データとも回収成功
- ▶ 姿勢センサには不具合が多い
ピギーの姿勢センサも用いて情報の補完は可能
- ▶ 現在、解析を鋭意進行中
 - 地上較正実験による検出器の評価 (竹村講演)
 - フライトデータの解析状況 (中村講演)
 - 応答関数や雑音評価に向けたシミュレーションも進行中

次期計画へ

検出感度を向上させて科学観測へ

⇒ @ Alice Springs : e^\pm の銀河面分布・Cen A・NGC4945他

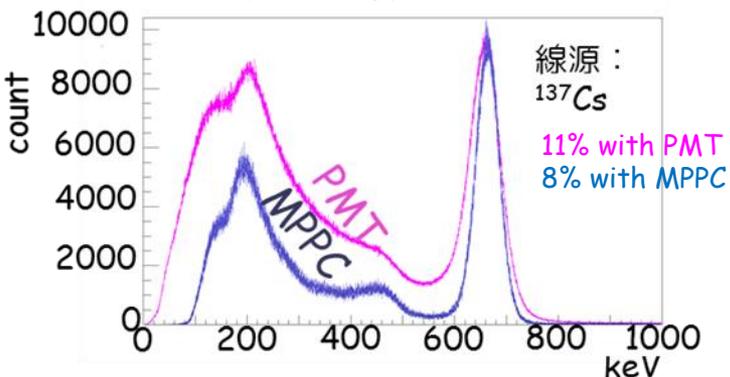
@ Fort Sumner : Cyg X-1 / Crabの偏光観測

有効面積を >10倍、角度分解能2~3倍改善していく為に...

シンチレータの改良

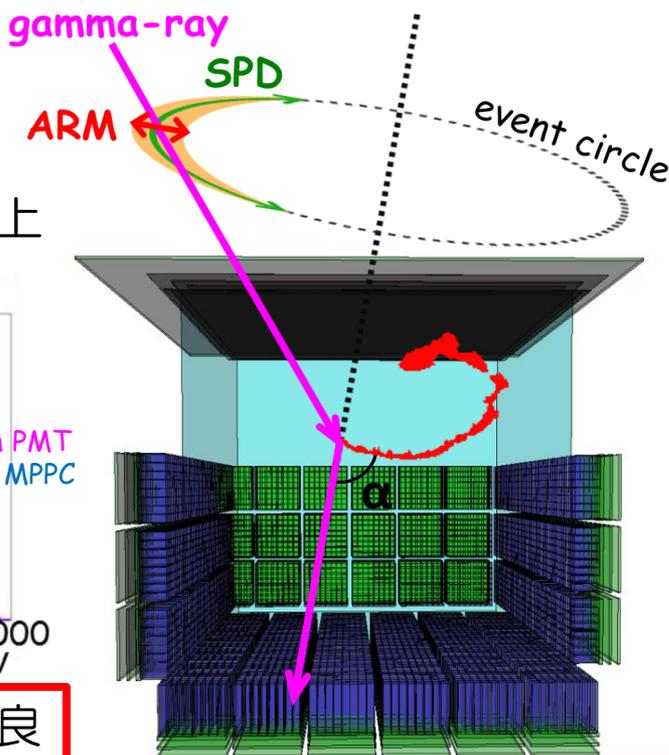
光読み出しをMPPCへ

⇒ エネルギー分解能向上
角度分解能向上



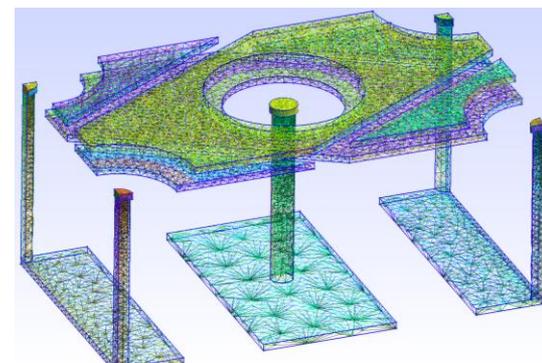
全体システムの改良

ガス圧力容器を露出
構造体の見直し (軽量化)



ガス飛跡検出器の改良

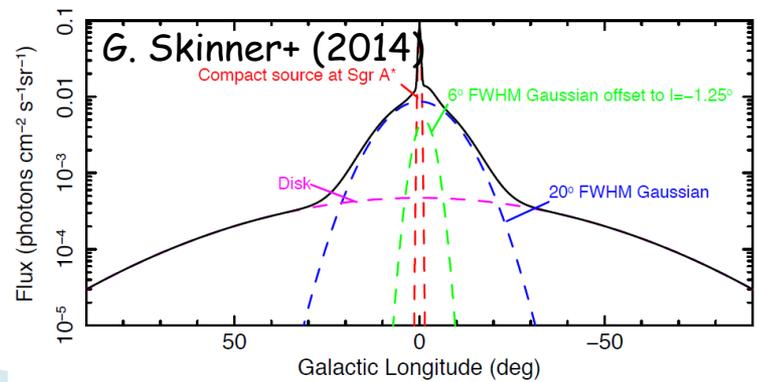
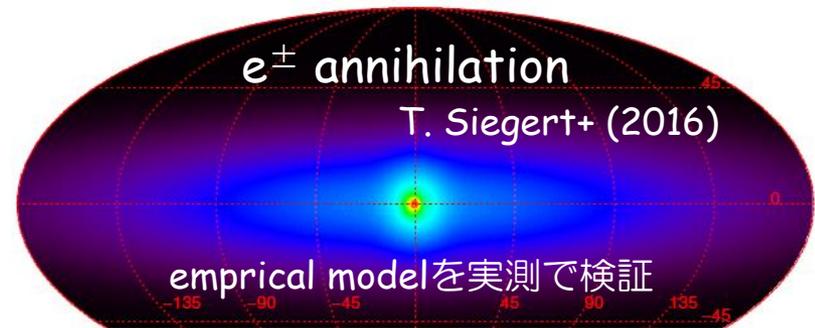
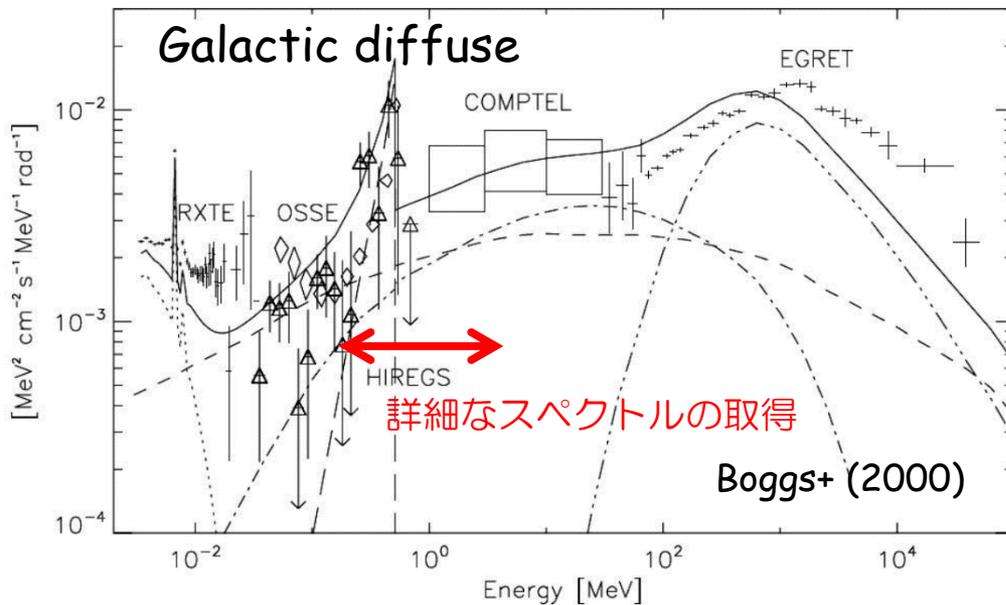
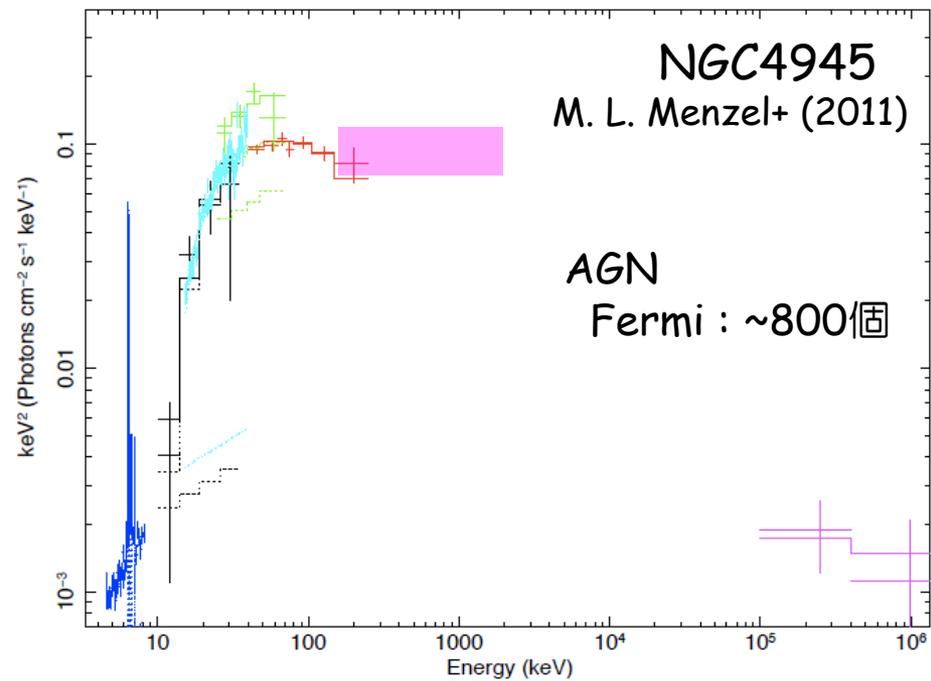
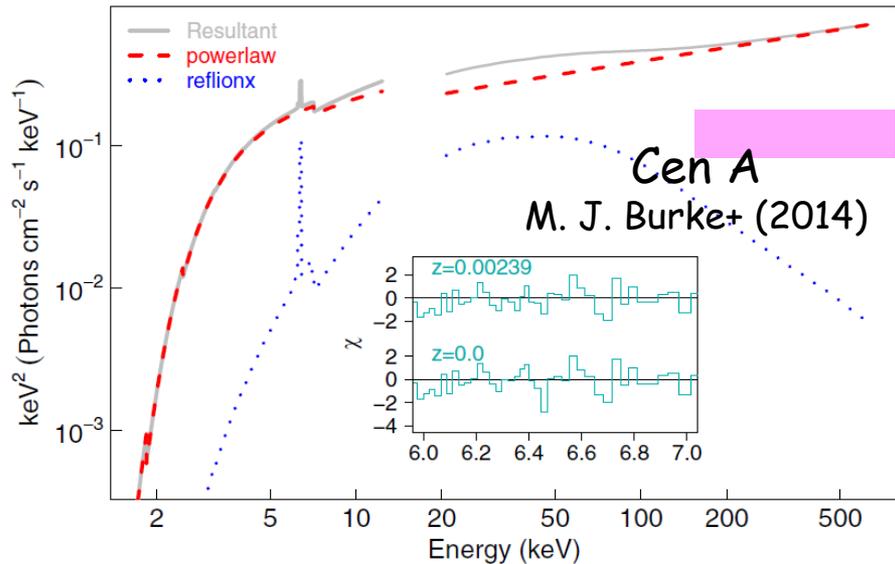
CF_4 baseのガスで3気圧
ガス容積を $(50\text{ cm})^3$ へ
ガス圧力容器の軽量化
3軸読み出し μ -PIC



今回からの修正点

姿勢センサの見直し

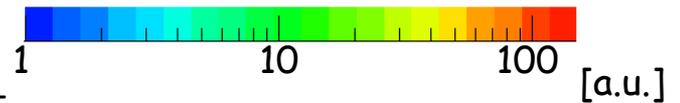
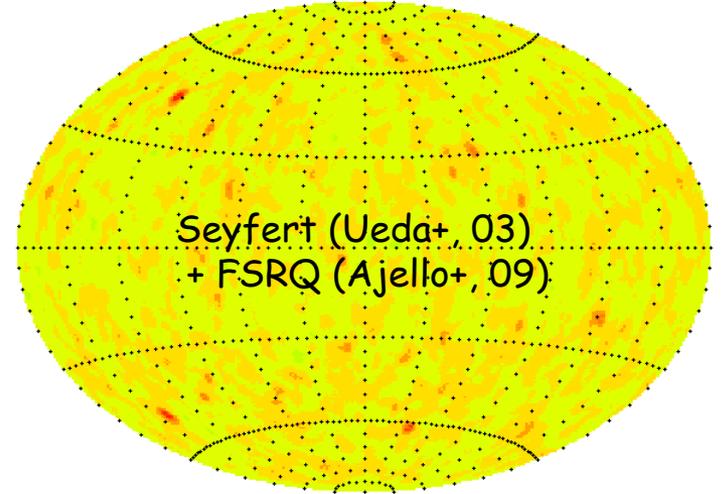
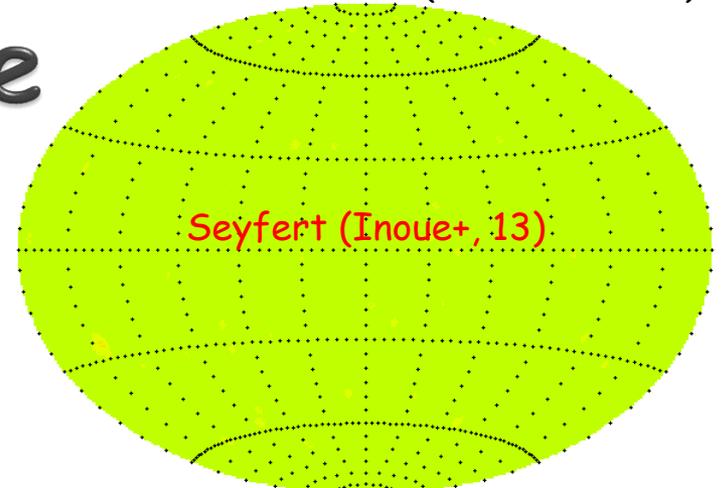
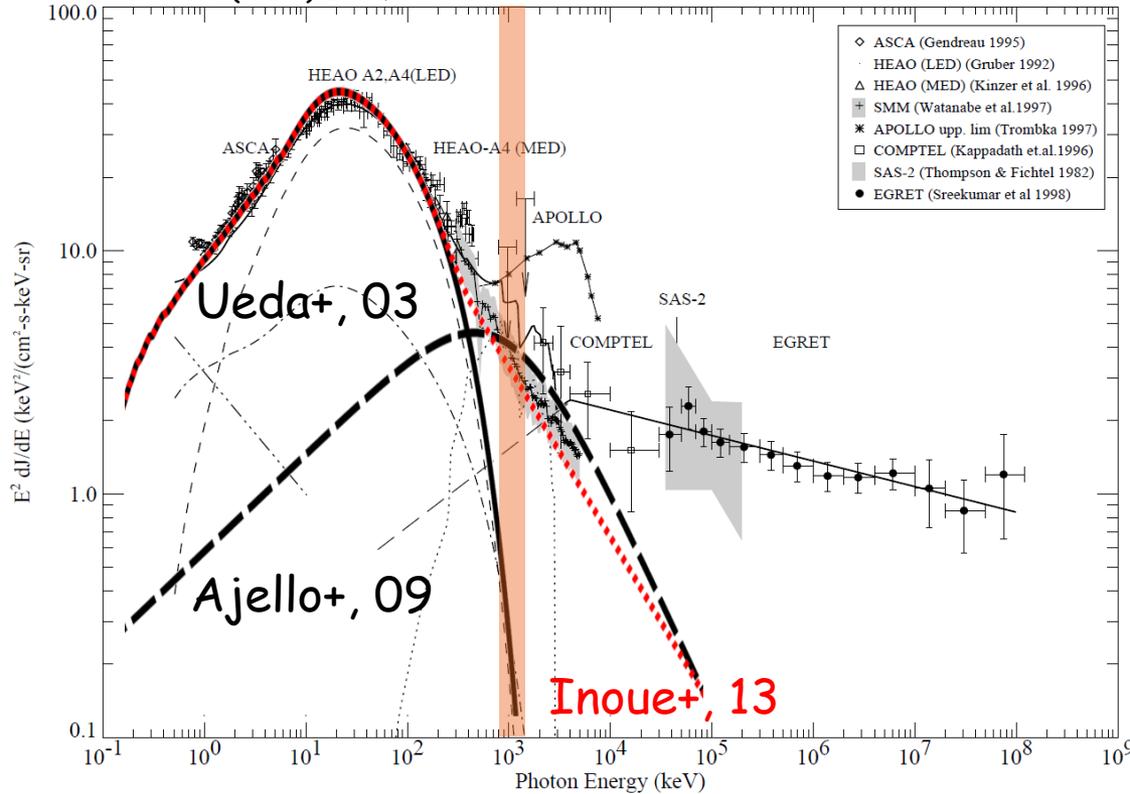
次期計画の観測対象



Extragalactic diffuse

0.8~1.2 MeV
PSF ~3° (ARM 2° SPD 10°)

M. Pohl (1998)に加筆



背景放射の詳細なスペクトル + 非一様性

⇒ MeV領域の背景放射の起源を特定可能

5° 以下のPSFがあれば非一様性が見える

今後の予定

2018 SMILE-2+



有効面積 $\sim 10 \text{ cm}^2$, 角度分解能 $5\sim 10^\circ$ に改善

現在、科研費申請中

2021 SMILE-3 @ Alice Springs



電子陽電子対消滅線の銀河面分布
銀河系内拡散ガンマ線の詳細スペクトル
Cen A・NGC4945の観測

etc...

有効面積 $> 50 \text{ cm}^2$ へ

^{26}Al の銀河面分布観測・未発見天体探査

@ Alice Springs or 圧力気球

Cyg X-1 / Crabの偏光観測 @ Fort Sumner



<http://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp>