



# 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** :  $^{26}\text{Al}$ ・電子陽電子対消滅線

## ◆ 粒子加速

**ジェット (AGN)** :

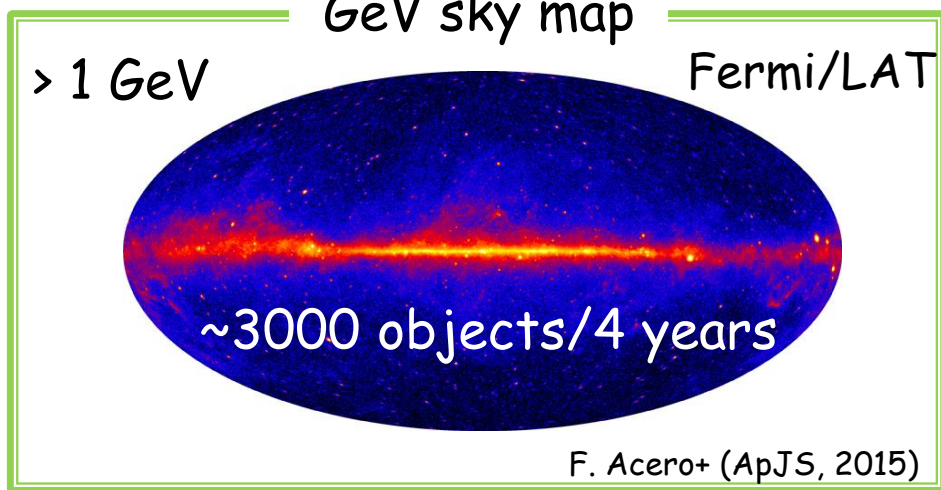
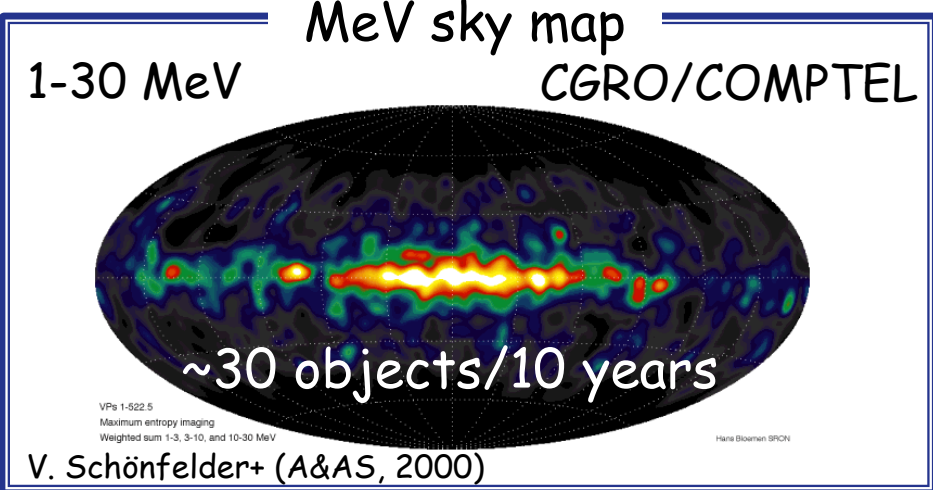
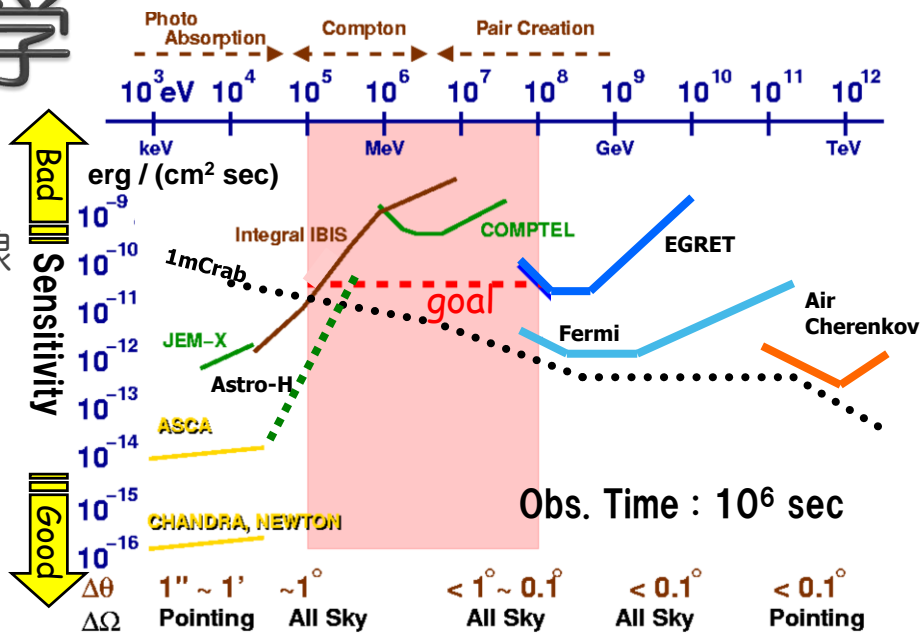
シンクロトロン + 逆コンプトン

## ◆ 強い重力場

**Black hole** : 降着円盤,  $\pi^0$

## ◆ Etc.

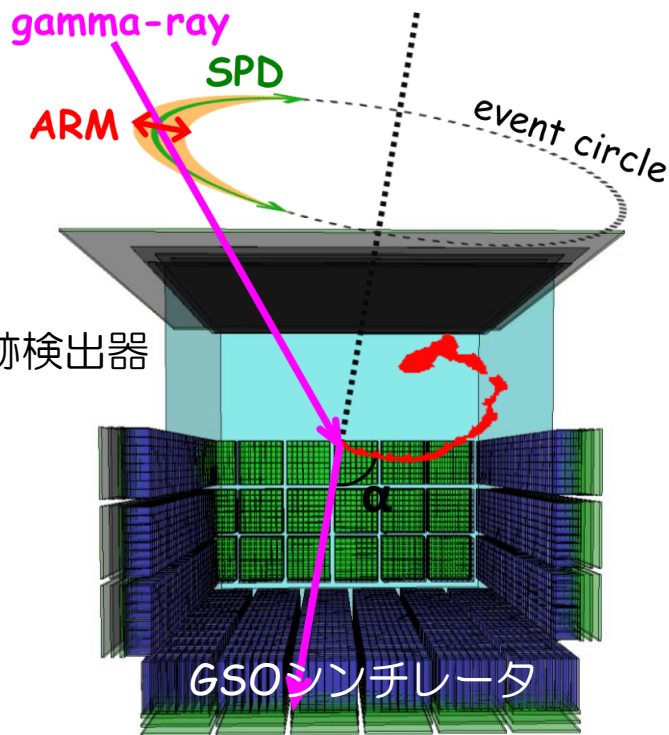
ガンマ線パルサー, 太陽フレア



次世代MeVガンマ線望遠鏡への要請

- 数百keV ~ 100 MeVの広帯域
- 全天探査の為の広い視野
- 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)

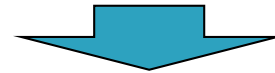


## ➤ ガス飛跡検出器

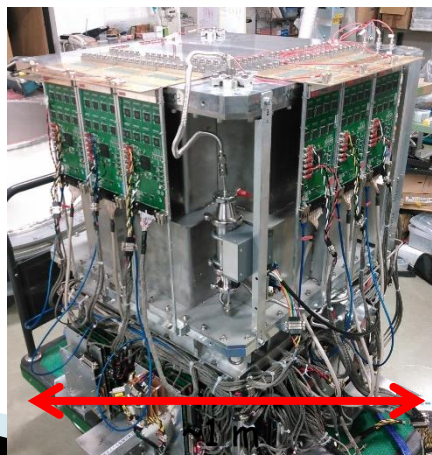
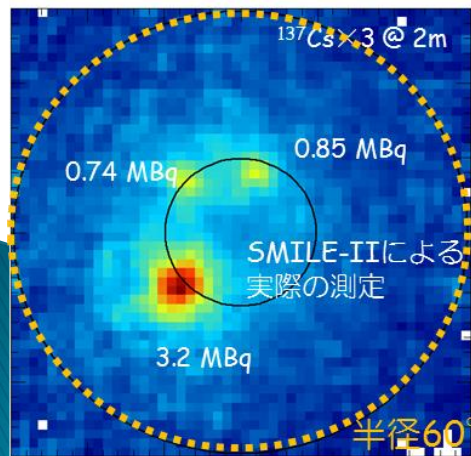
コンプトン反跳電子の  
飛跡とエネルギー

## ➤ 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



SMILE-2+ ETCC

- 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
- $\alpha$ 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. 1<sup>st</sup> 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. 7<sup>th</sup> 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  $\text{cm}^2$

(detect  $5\sigma$ ) PSF (50% included) <sup>radius</sup> ~ 10 deg @ 662 keV

NOW!!

### SMILE-3

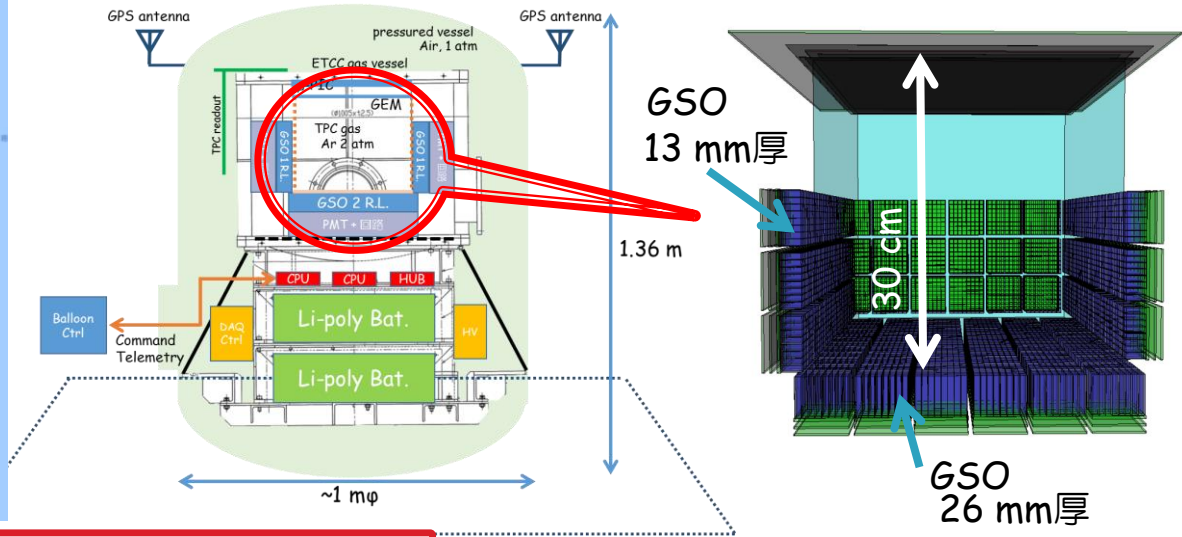
- ▶ 長時間気球を用いた科学観測
- ▶ COMPTELの感度を上回る望遠鏡で数回放球

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 ( $3 \text{ cm}^2$ )・PSF ( $10^\circ$ )で  
かに星雲  $5.1\sigma$ ・銀河中心領域  $5.5\sigma$

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

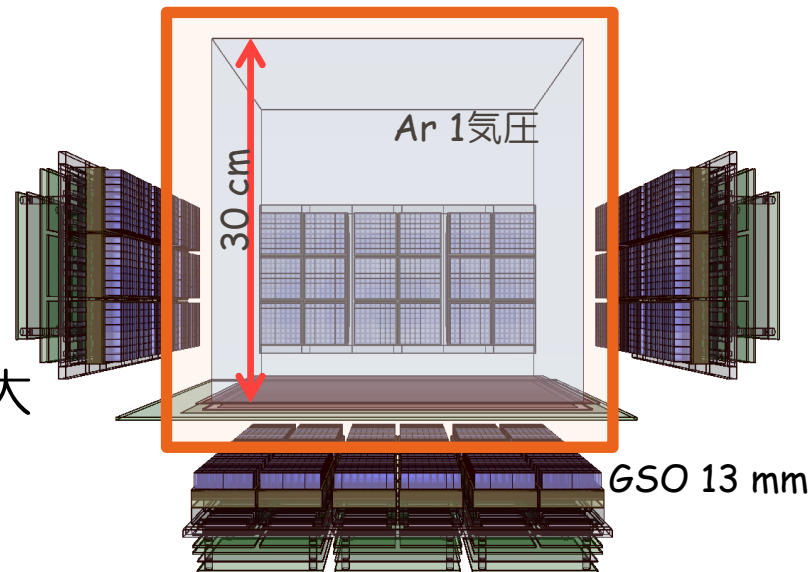
## ▶ 有効面積の拡大

GSOシンチの位置 ⇒ 飛跡検出器を覆えていない

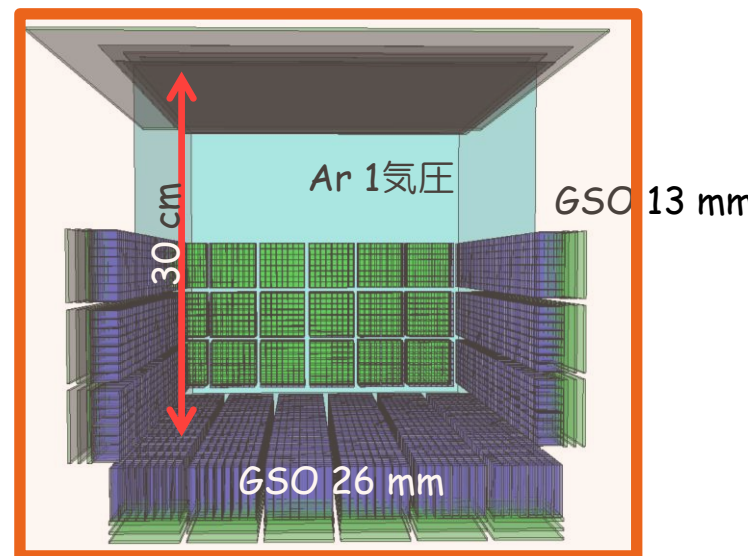


- ◆ ガス容器内にGSOを設置  
⇒ シンチ間の隙間が激減

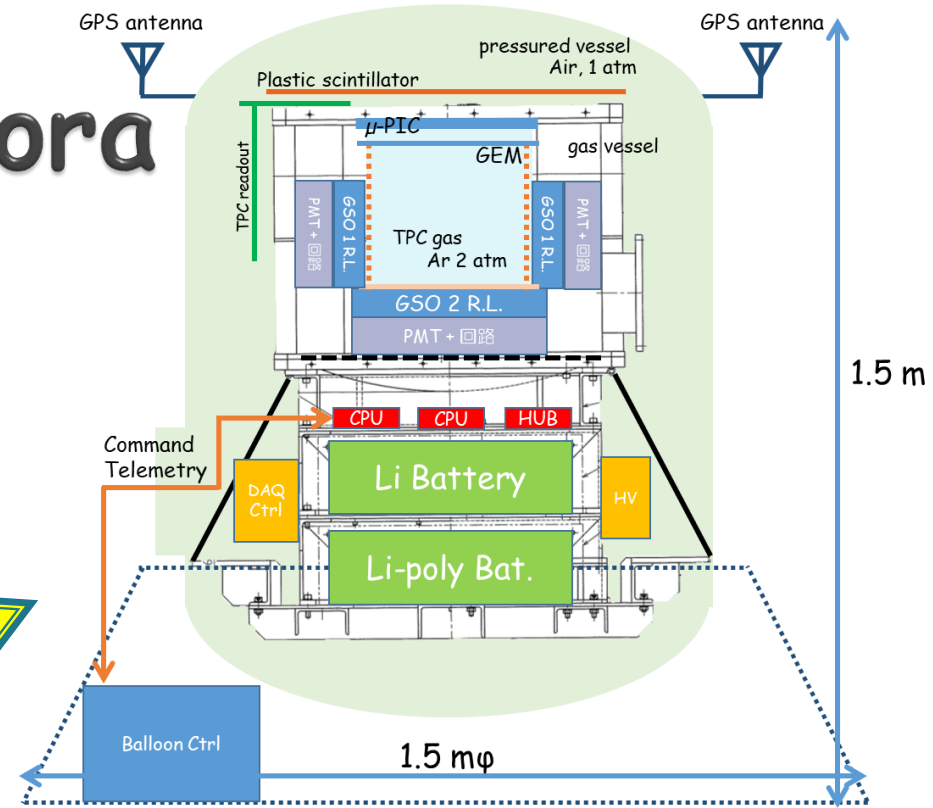
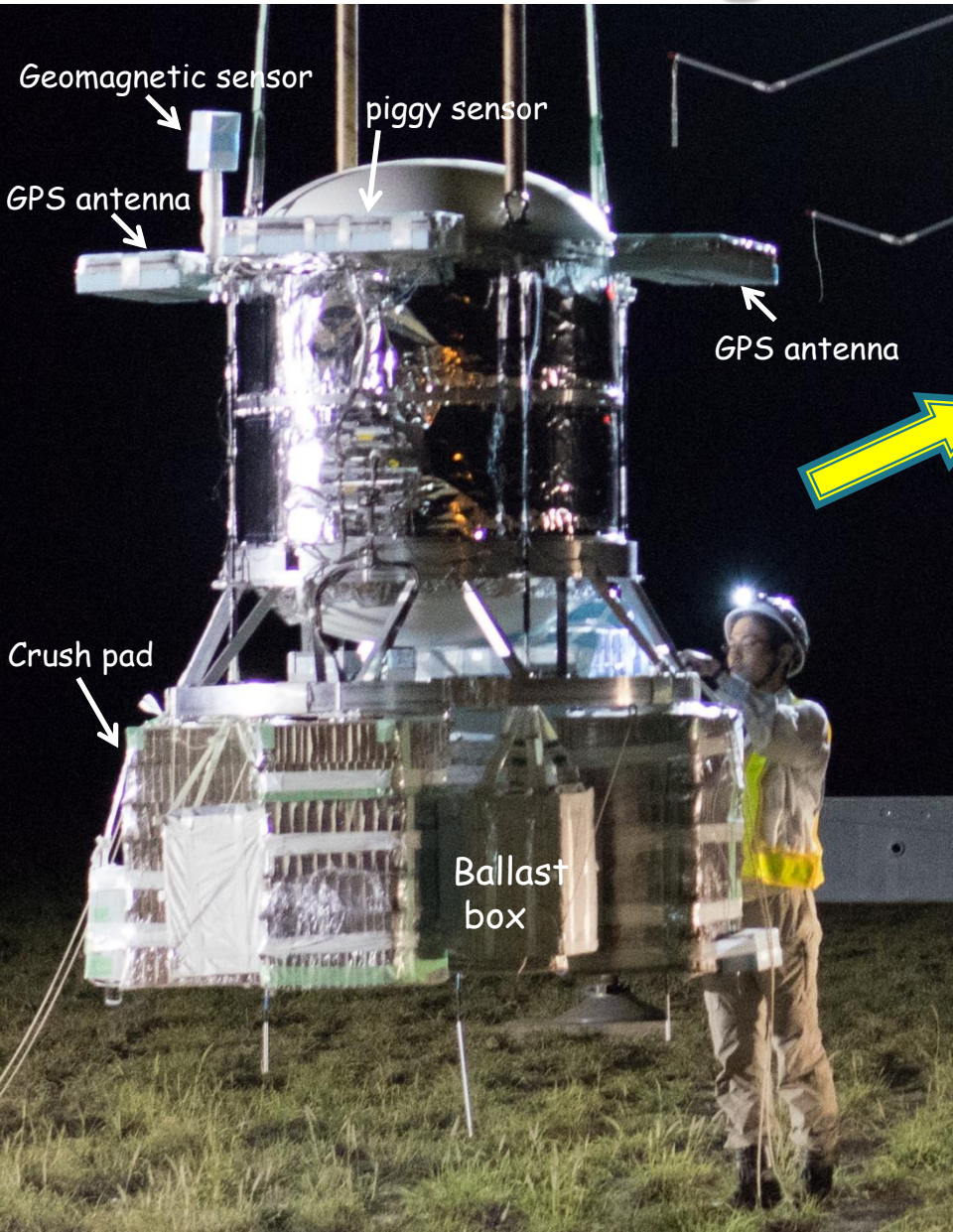
SMILE-II ETCC



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： $\pm 0.2$  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 )

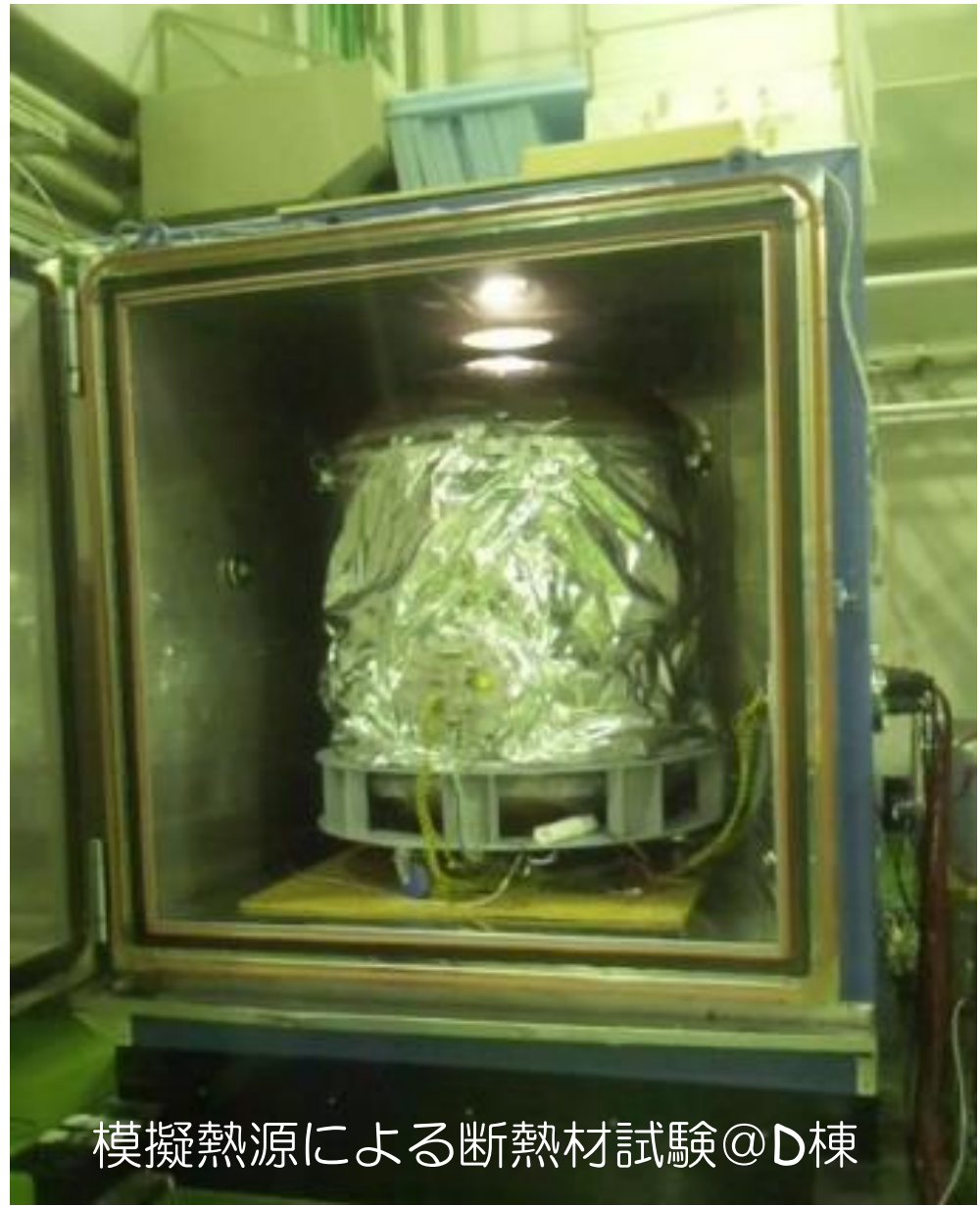


# 放球へ向けた準備...

2017年 1月17日 採択通知

# 放球へ向けた準備...

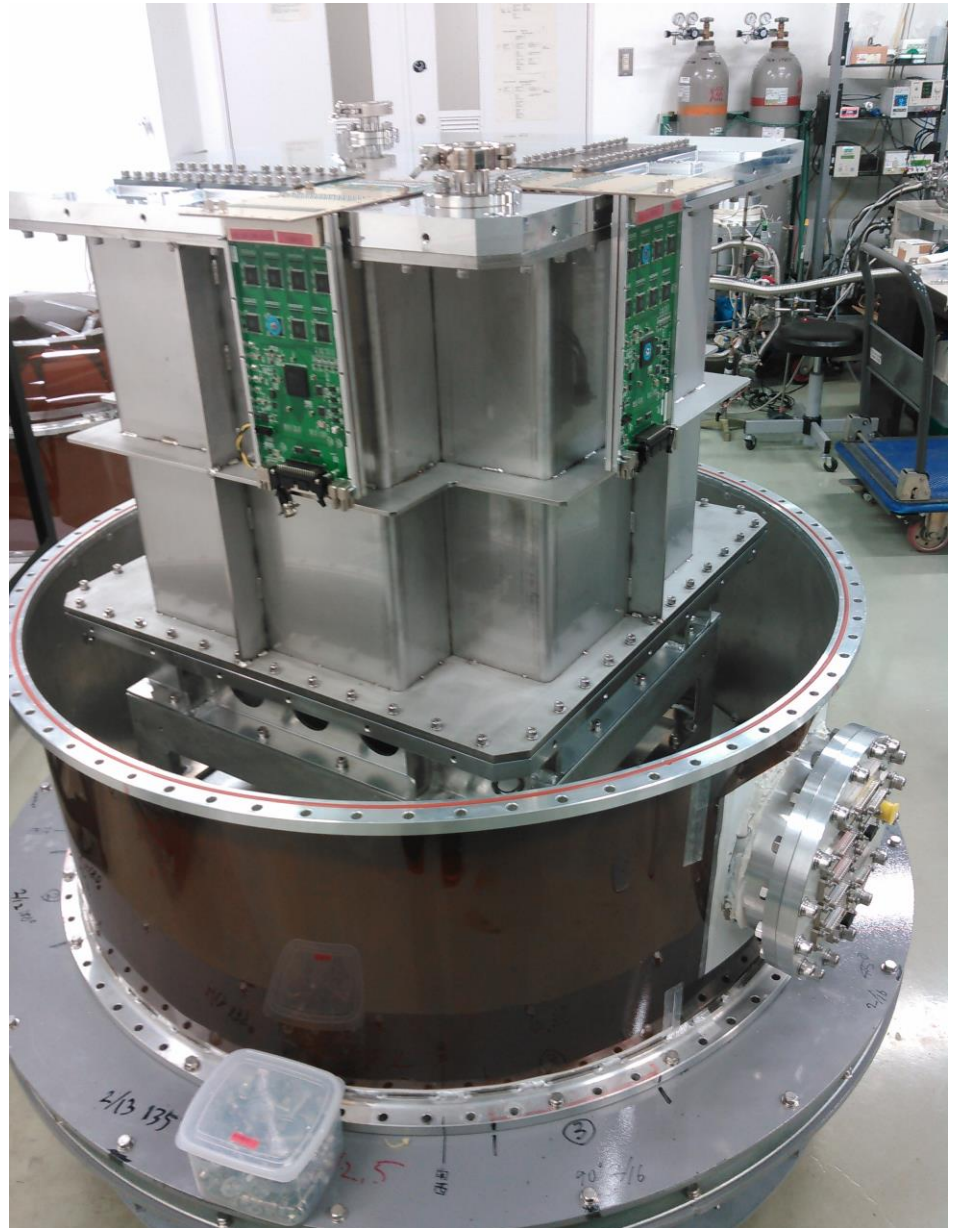
2017年 1月17日 採択通知  
3月6-9日 熱真空試験その1



模擬熱源による断熱材試験@D棟

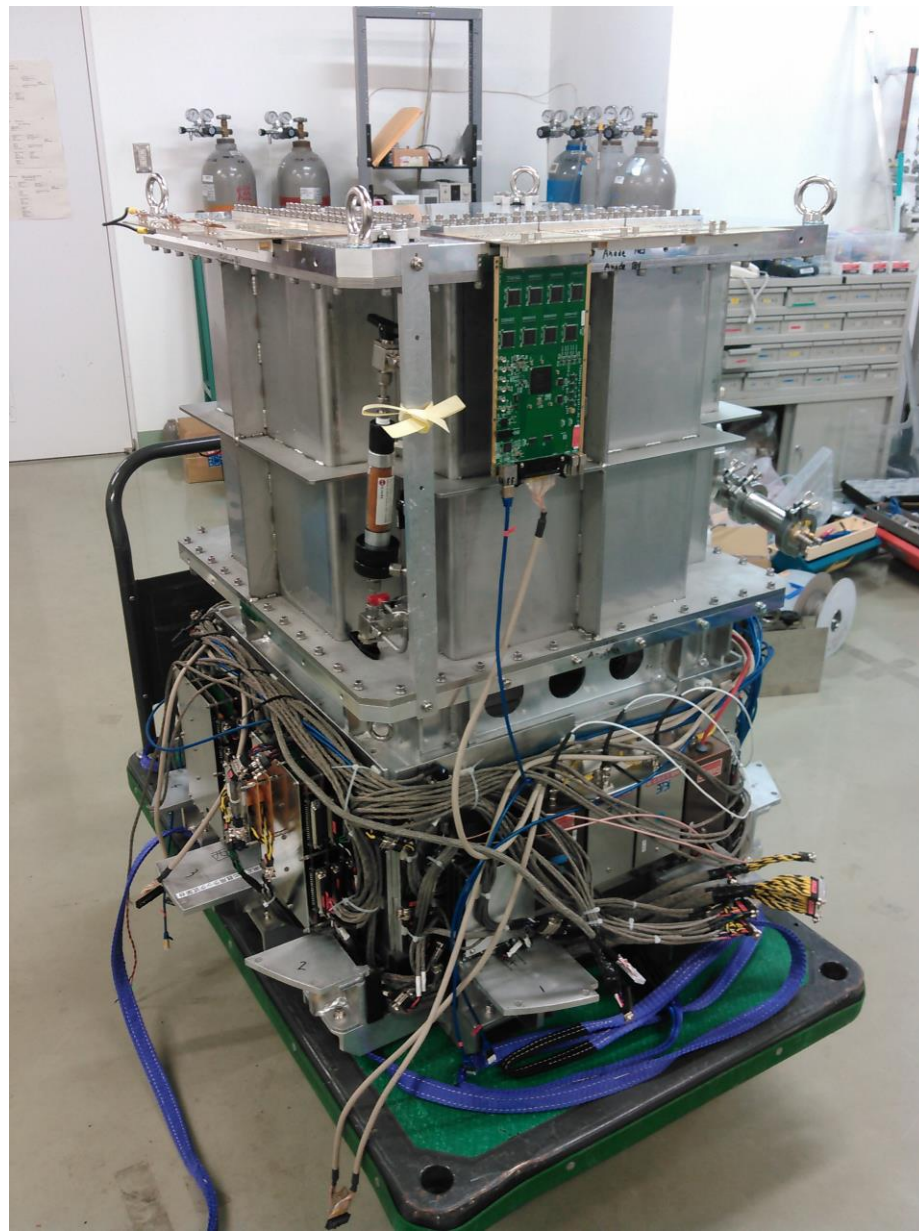
# 放球へ向けた準備...

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



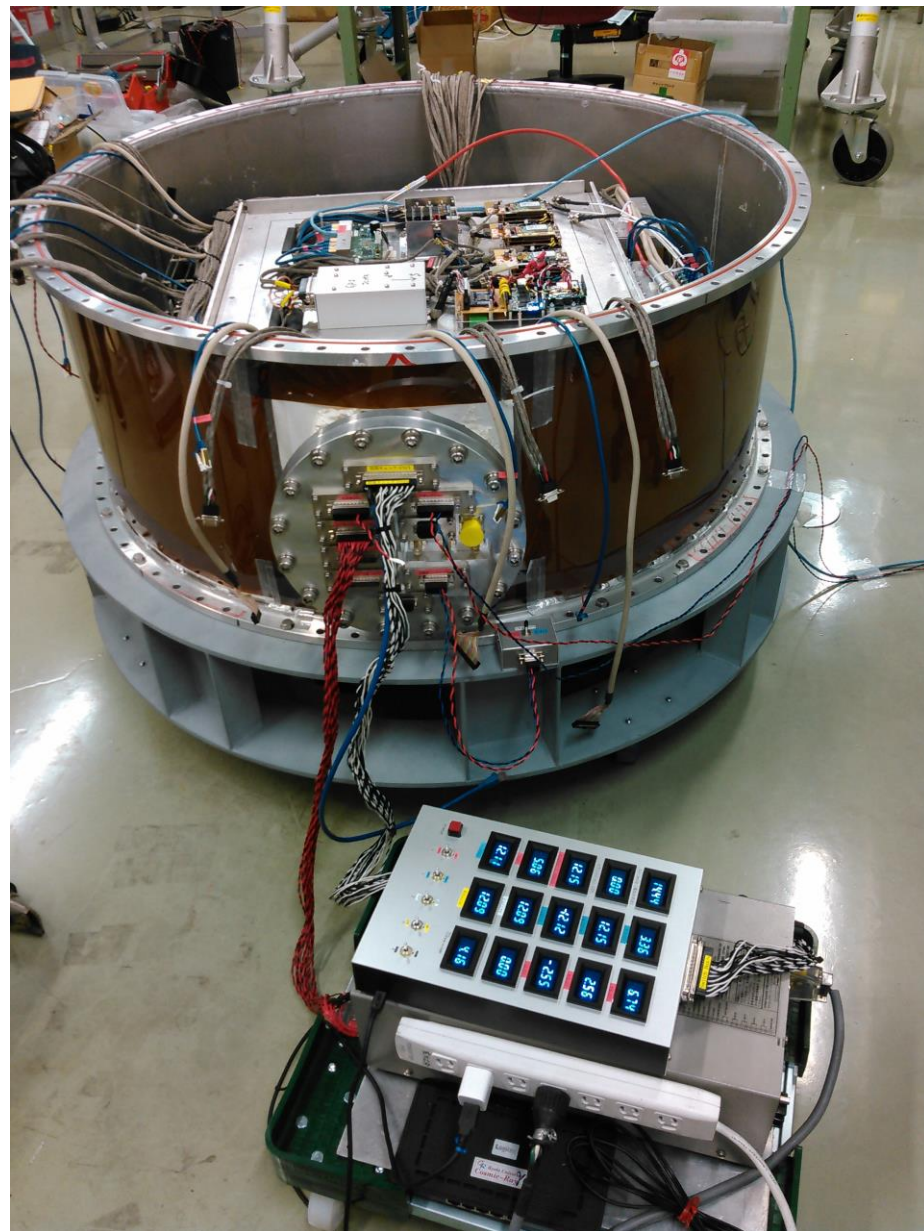
# 放球へ向けた準備...

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



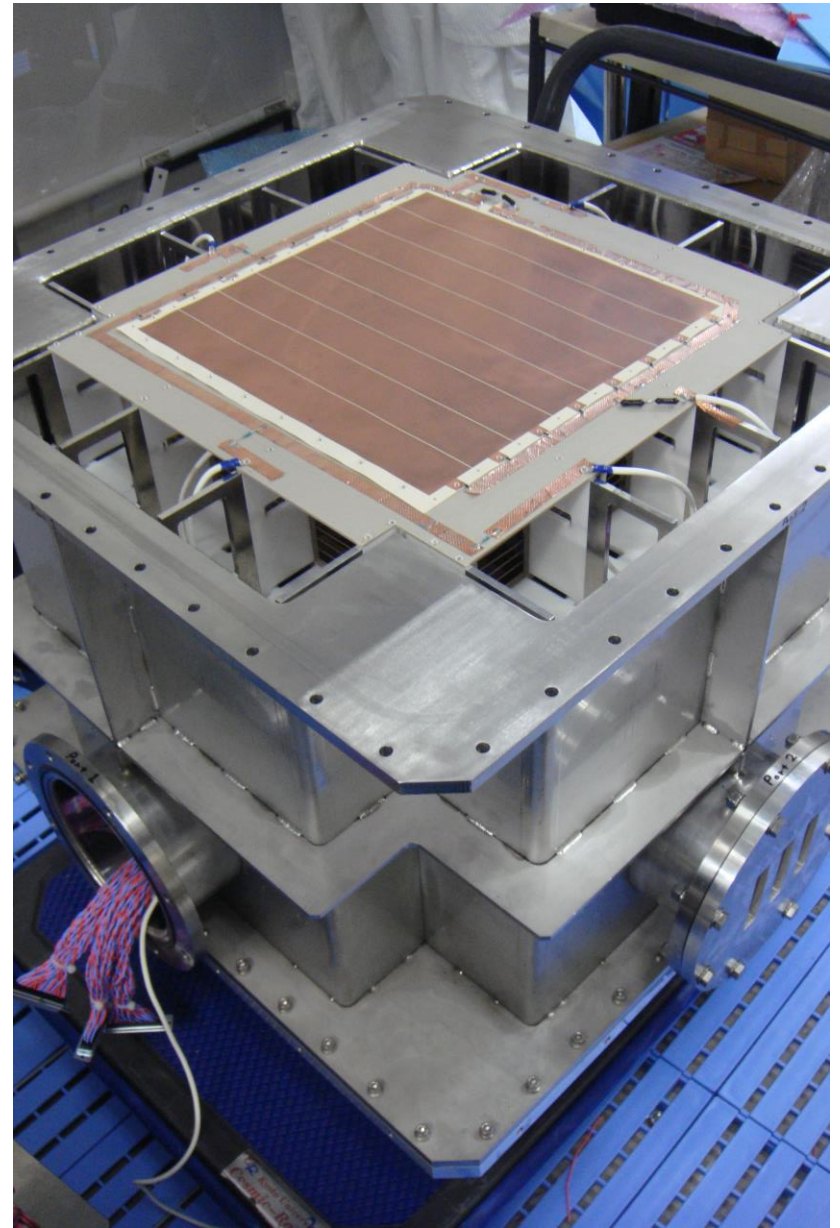
# 放球へ向けた準備...

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



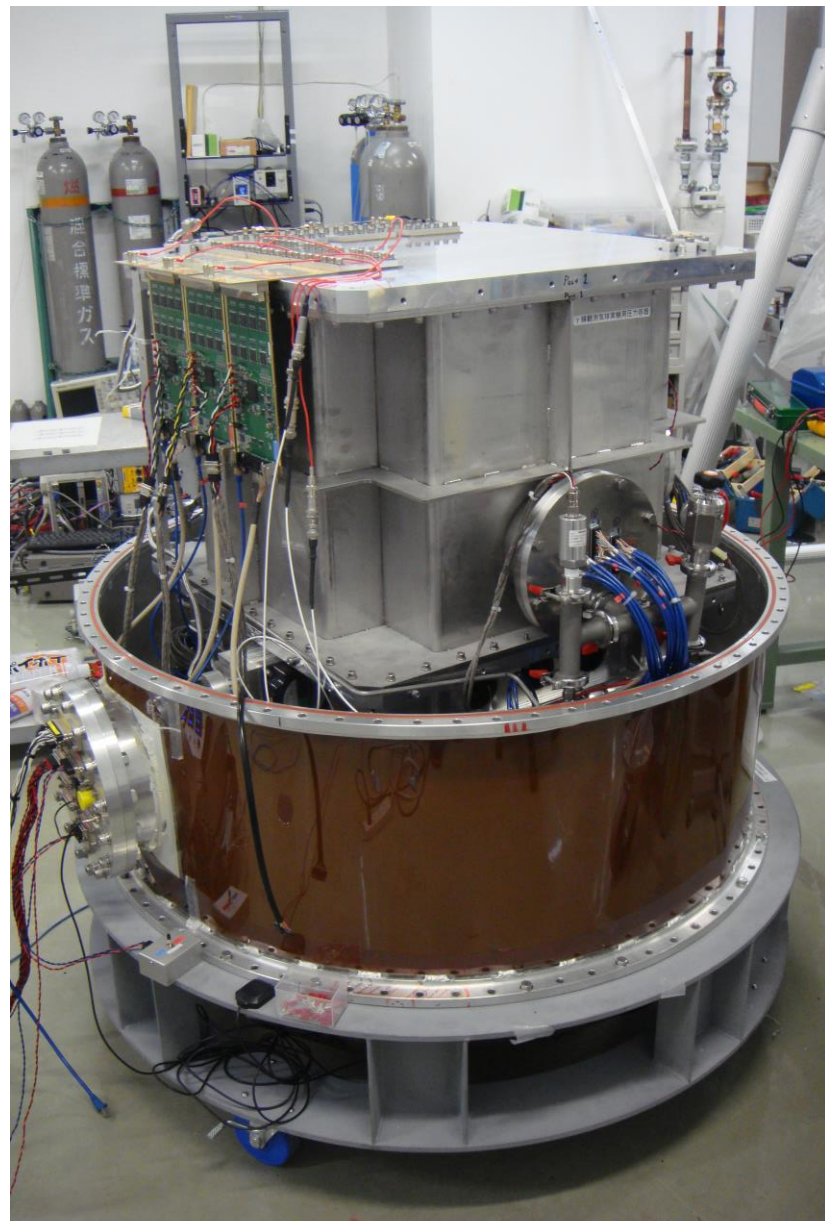
# 放球へ向けた準備...

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	<b>System</b> 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	<b>System</b> 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





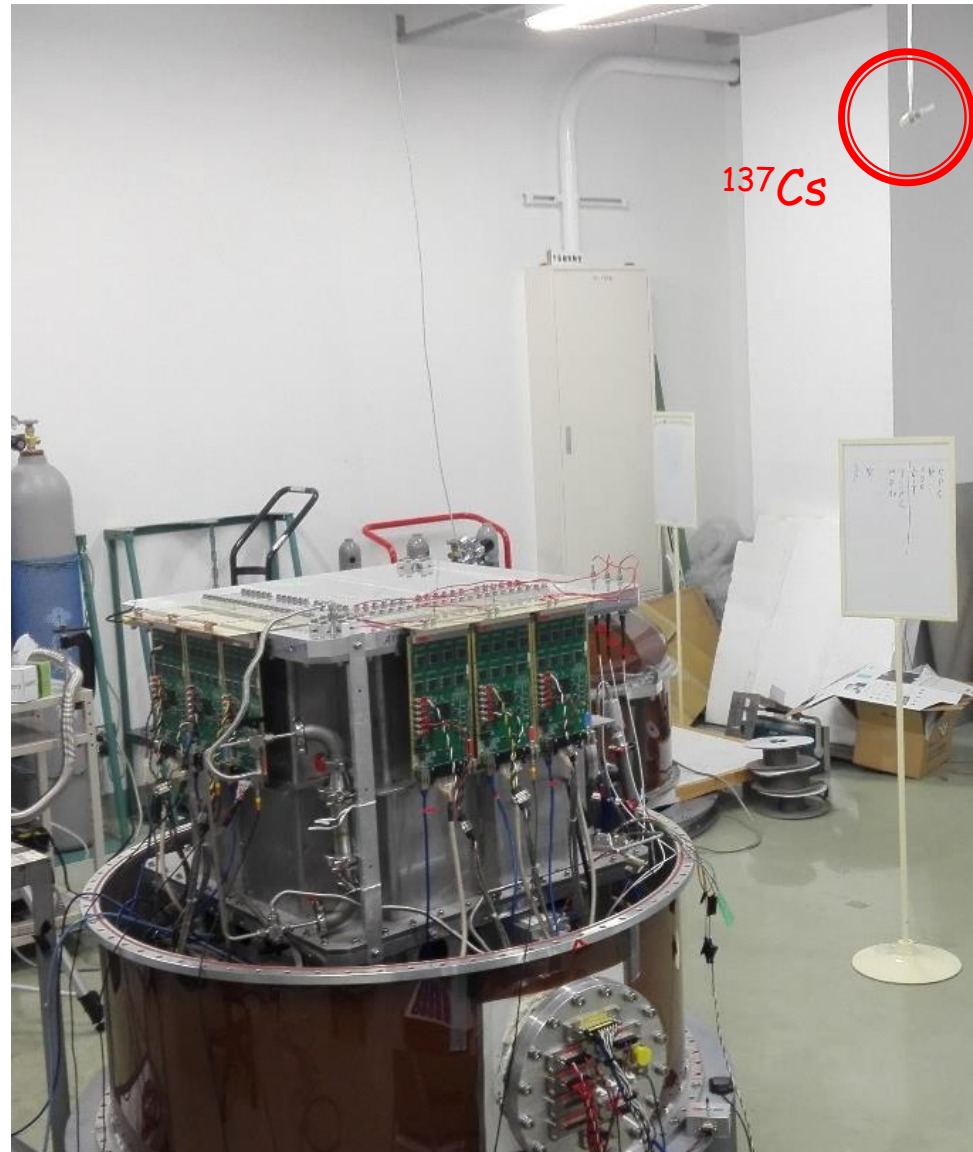
# 放球へ向けた準備...

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	<b>System</b> 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	<b>System</b> 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	<b>System</b> 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
	11月14日	<b>System</b> 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

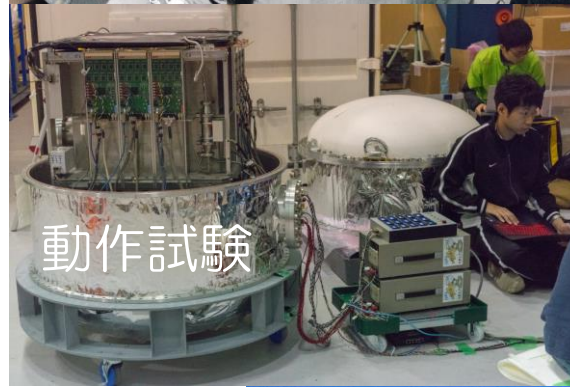


# 現地作業

- 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

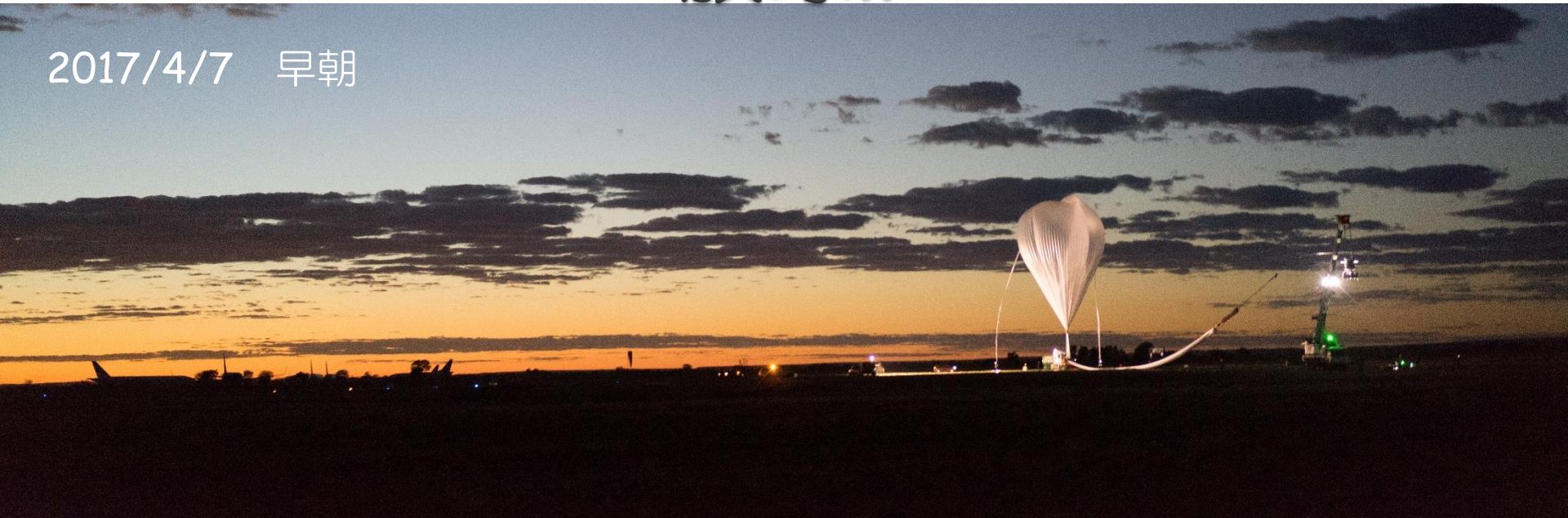


屋外試験



# 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

Terminal output showing system status and sensor data:

```

[~] get HKGPS packet
UPEC HV 175.58 V 11.48 mA
Analog1 137.44 V 16.07 mA
Analog2 178.27 V 8.43 mA
Drift1 -7.38 Hz 15.23 mA
Temperature 51.28 degC
Humidity 51.38 degC
TWC ASDC 41.21 degC
Inclination 51.28 degC
GPS data
Altitude 1817.00 m
Longitude 140.11 degE
Latitude 35.28 degN
Pressure 1003.28 hPa
Scaler 1817.00 m
TWC 2024.14 hPa
Li-ionly B (Lower)
Charge: 12.4 A
Status: Good
Problem: Good
Temp 1: 22.5 degC
Temp 2: 22.5 degC
Current: 3.18 A
Voltage: 14.70 V
Li-ionly P (Upper)
Charge: 12.4 A
Status: Good
Problem: Good
Temp 1: 22.5 degC
Temp 2: 22.5 degC
Current: 3.18 A
Voltage: 14.70 V
HK(1)
HK(2)
    
```

Status Viewer interface showing multiple data plots:

- Top row: Voltage, Current, Temperature, Humidity, GPS Altitude, GPS Longitude, GPS Latitude, Pressure, Scaler, TWC, Inclination.
- Middle row: Li-ionly B (Lower) status, Li-ionly P (Upper) status, HK Group 1, HK Group 2, HK Group 3, HK Group 4, HK Group 5, HK Group 6.
- Bottom row: Battery Level, DC-DC Load, DC-DC Input, DC-DC Output, DC-DC Error.

HK①



HK②

**QPSK 800 kbps** イベントデータ用

QPSK signal analysis software showing constellation diagrams and data plots:

- Top left: Constellation diagram showing a clear QPSK signal.
- Top right: Data plot showing signal amplitude and phase over time.
- Bottom: Data plot showing signal amplitude and phase over time.

Quick Look

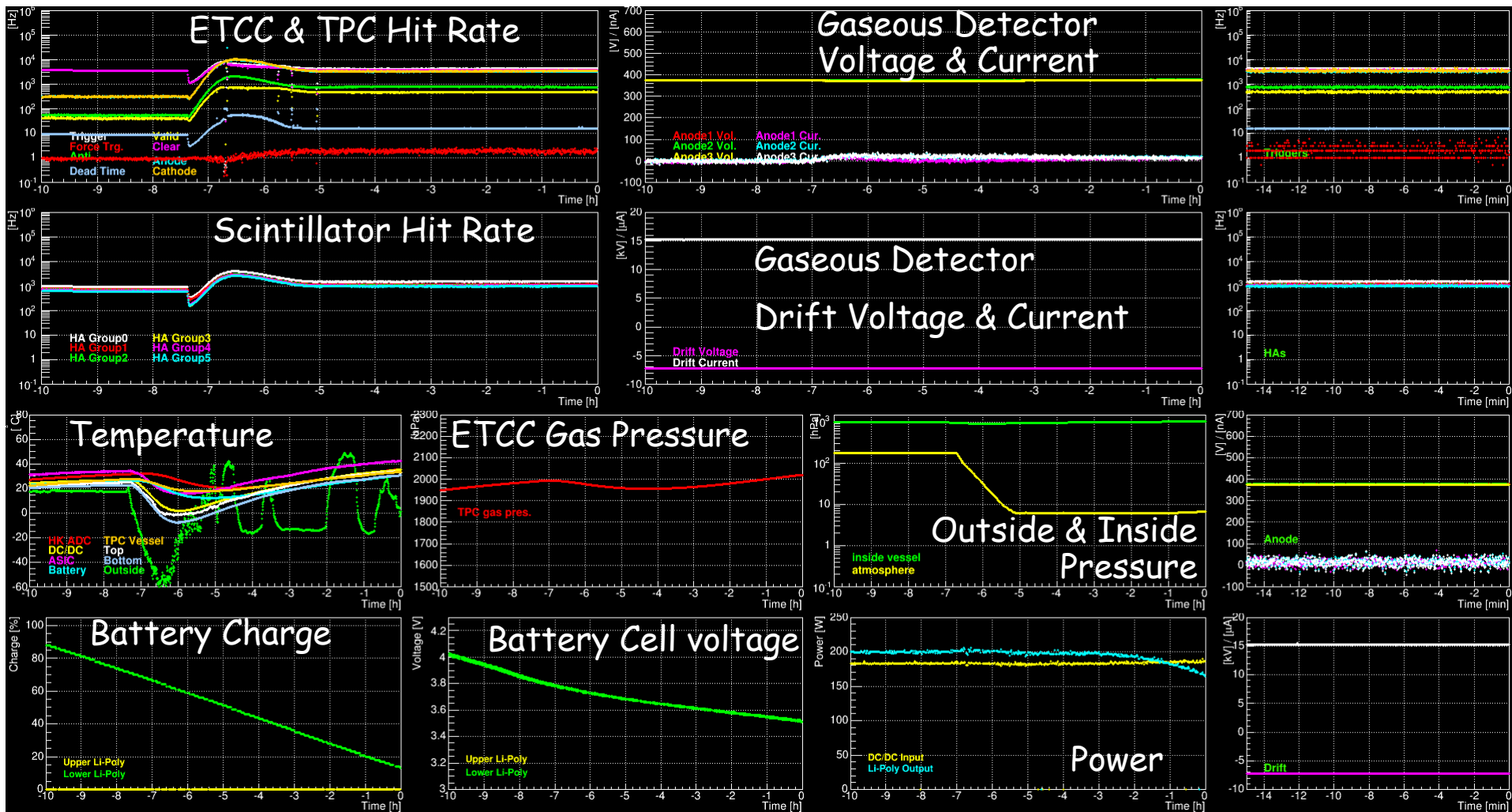
Control room with multiple operators at computer workstations:

- Top row: コマンド, HK①, HK②
- Bottom right: 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

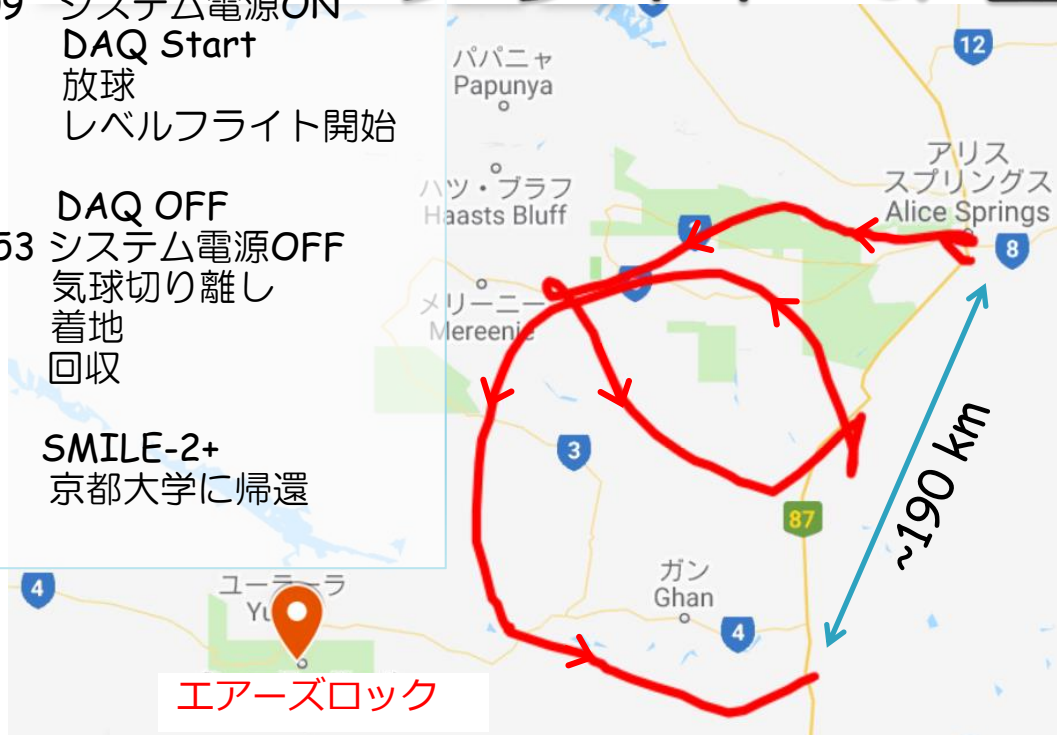
- 10:45 DAQ OFF
- 10:45-10:53 システム電源OFF
- 11:07 気球切り離し
- 11:40 着地

April 9

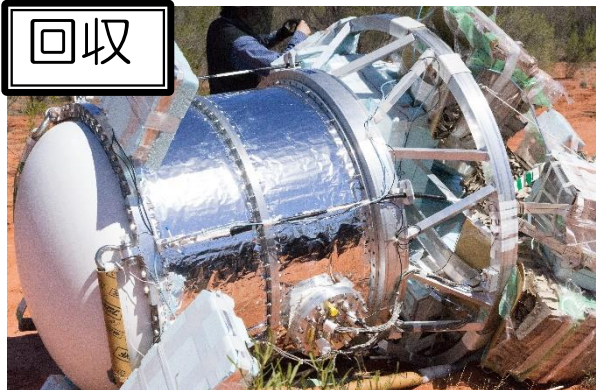
回収

July 19

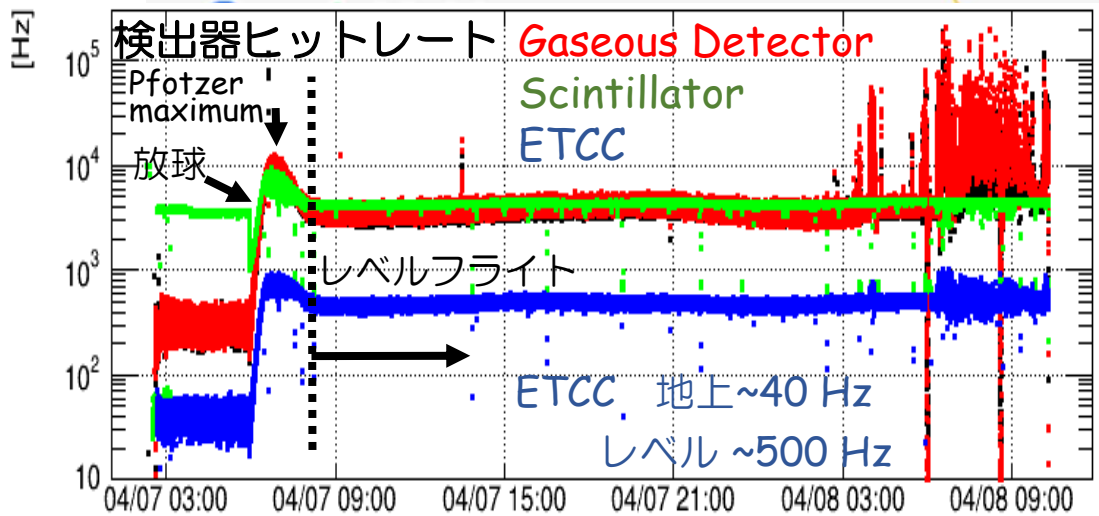
SMILE-2+  
京都大学に帰還



回収

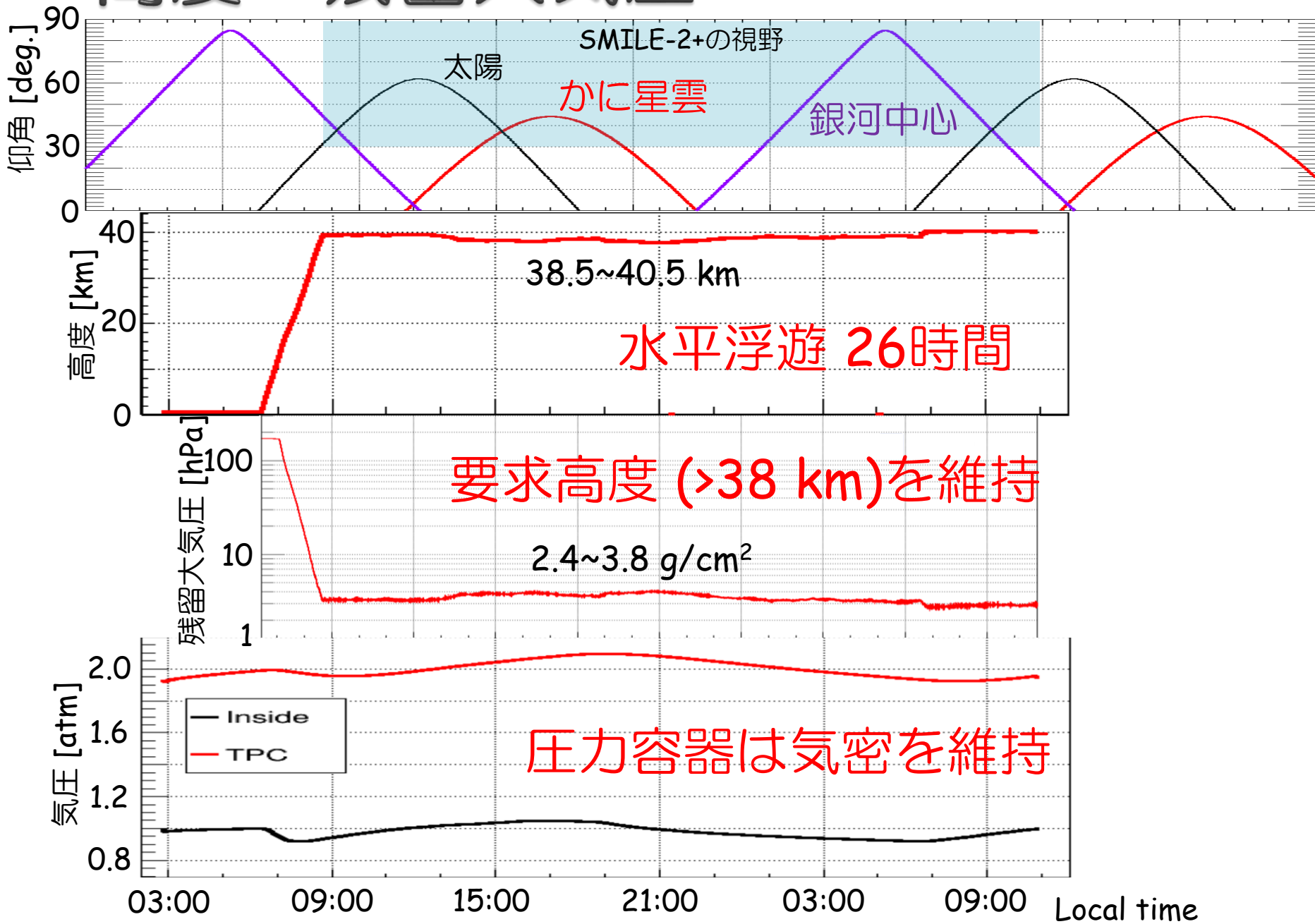


日本に帰還

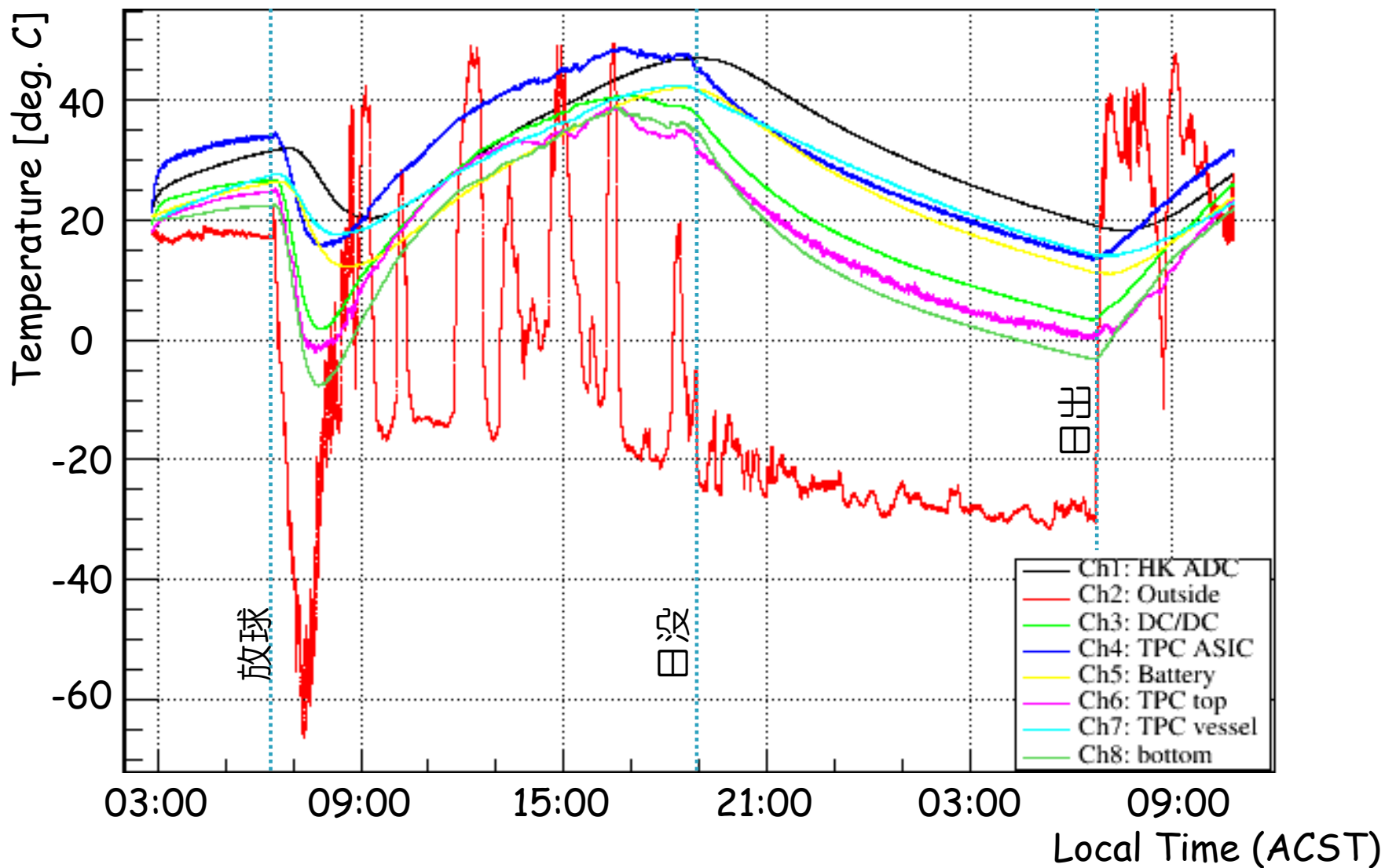




# 高度・残留大気圧



# フライト中の温度変化

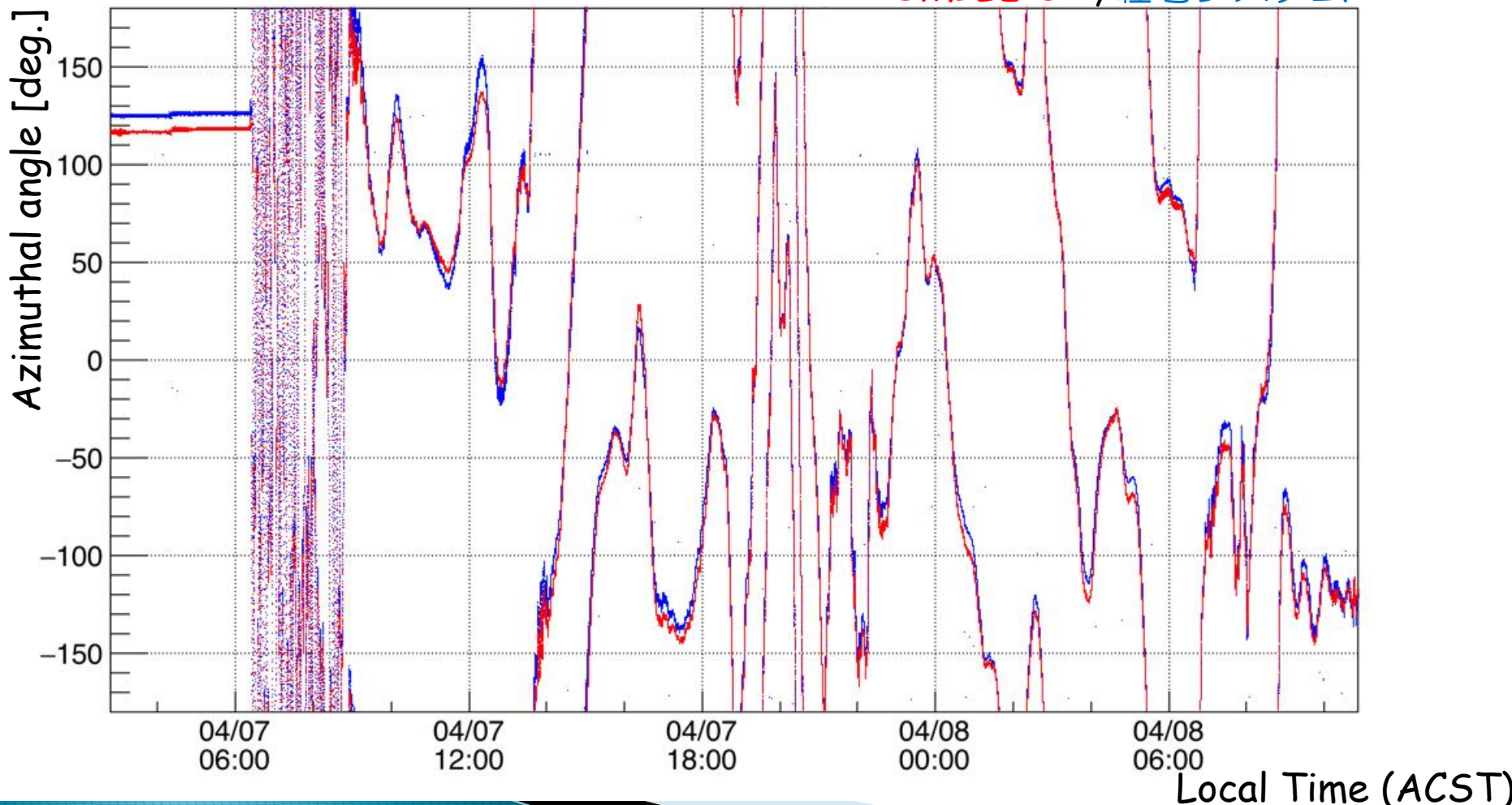


システムは動作保証温度範囲の中で動作

# 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

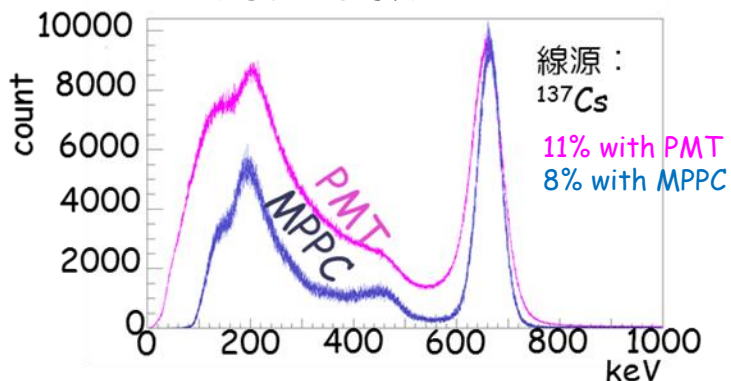
@ Fort Sumner : Cyg X-1 / Crabの偏光観測

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

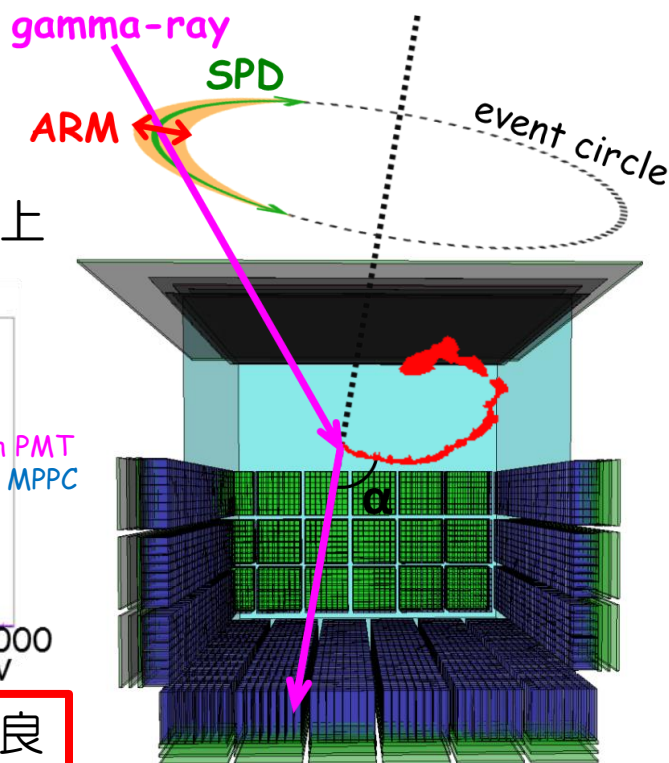
光読み出しをMPPCへ

⇒ エネルギー分解能向上  
角度分解能向上



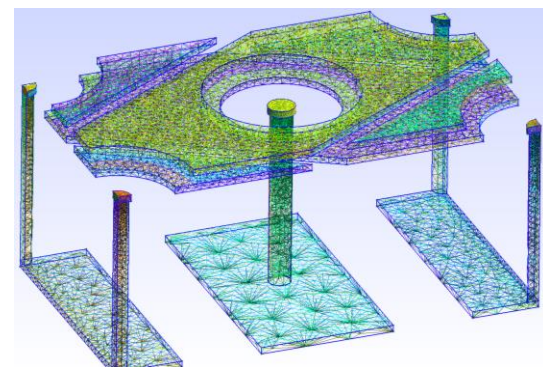
## 全体システムの改良

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

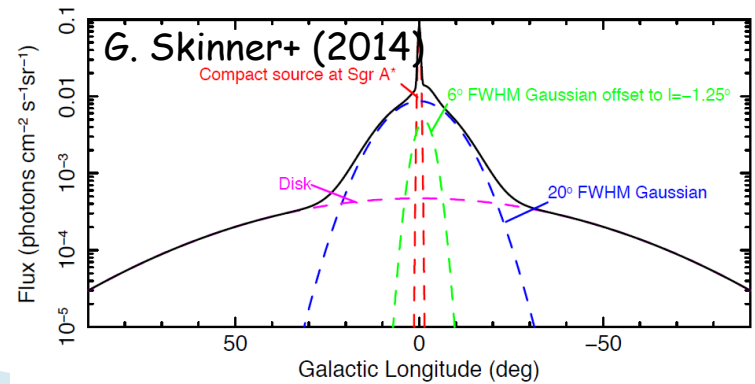
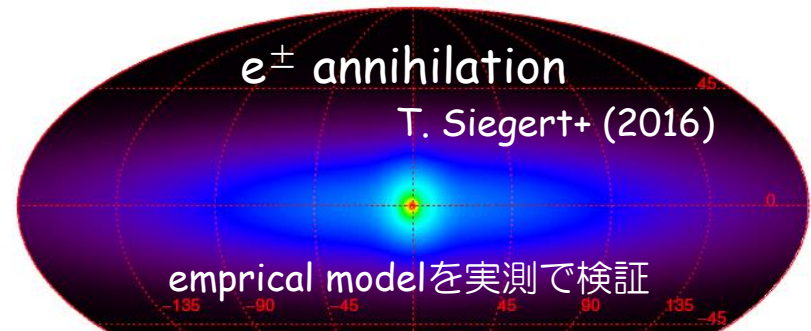
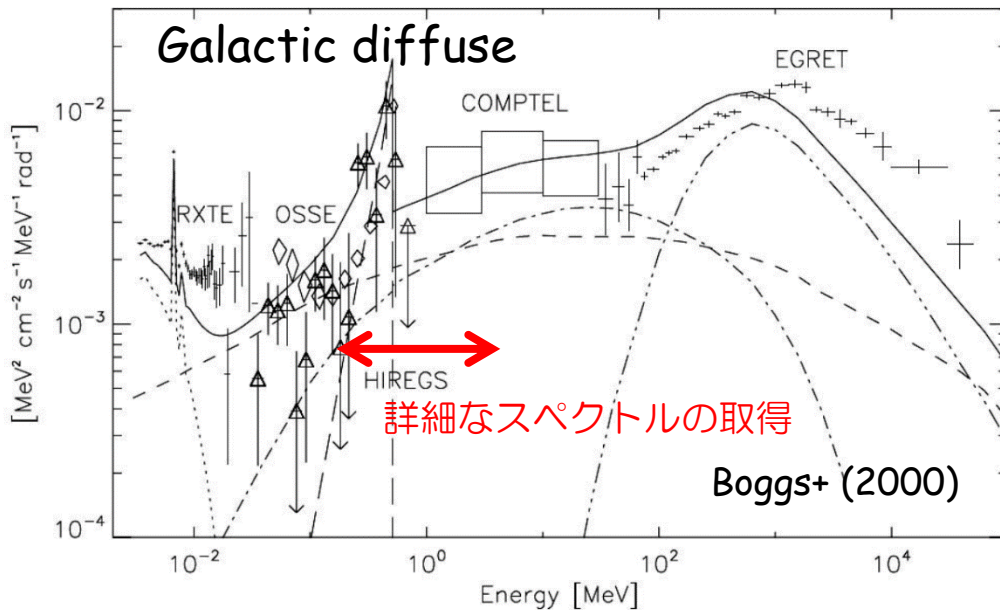
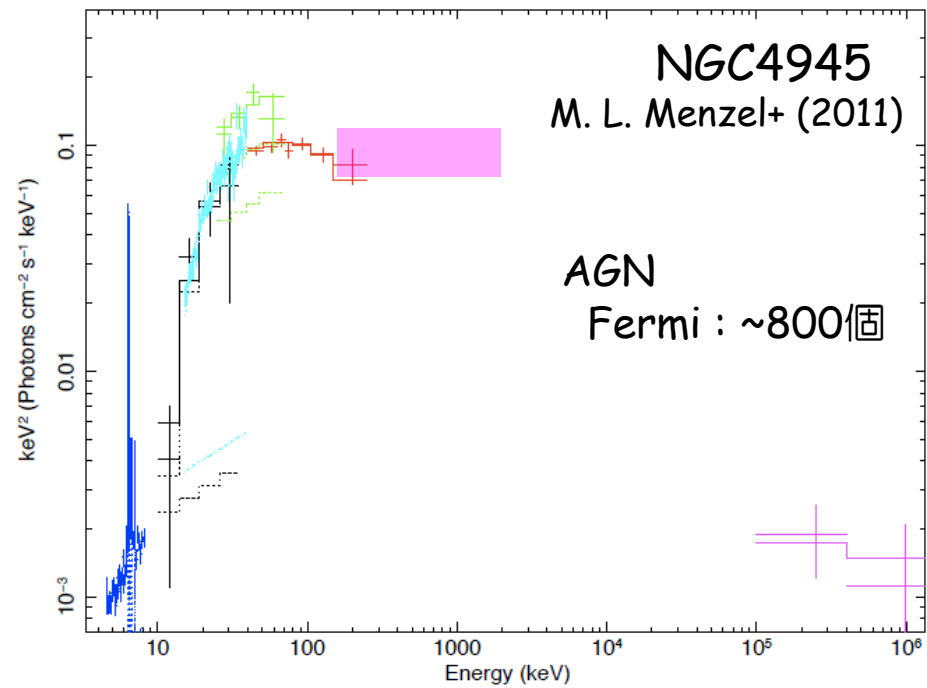
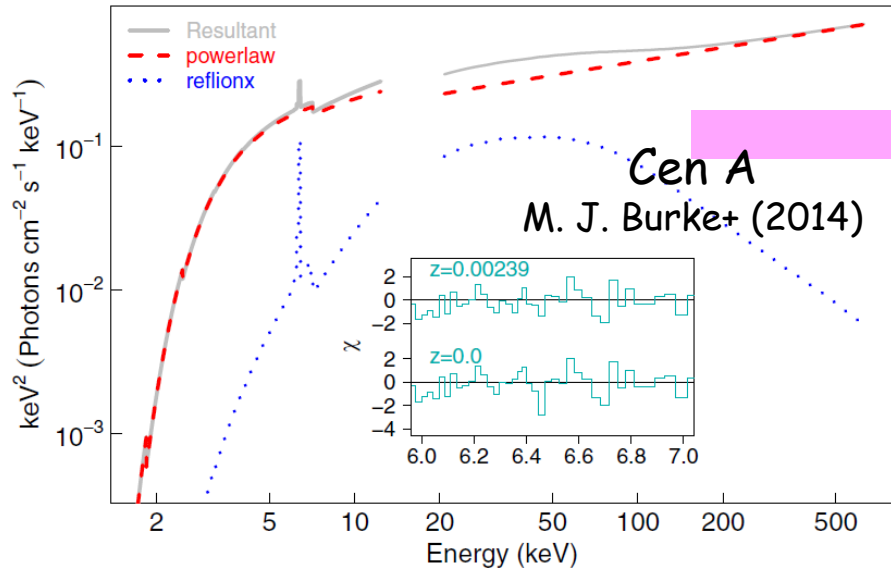
$\text{CF}_4$  baseのガスで3気圧  
ガス容積を $(50\text{ cm})^3$ へ  
ガス圧力容器の軽量化  
3軸読み出し $\mu$ -PIC



## 今回からの修正点

姿勢センサの見直し

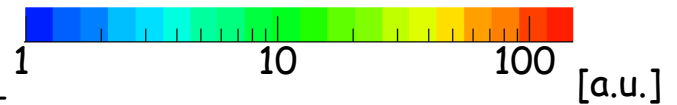
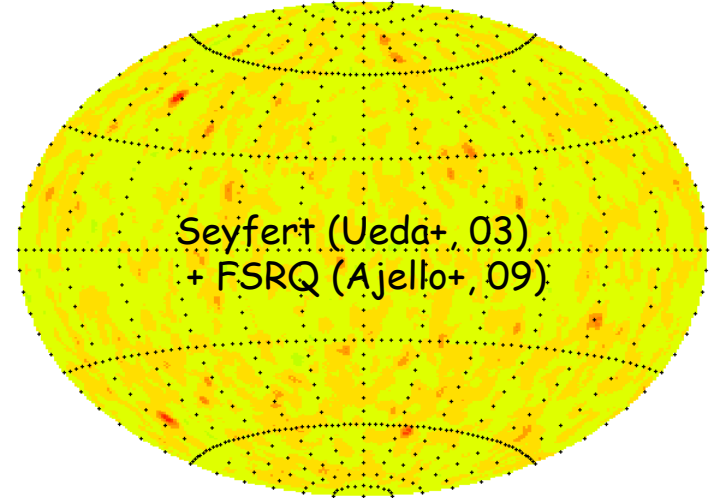
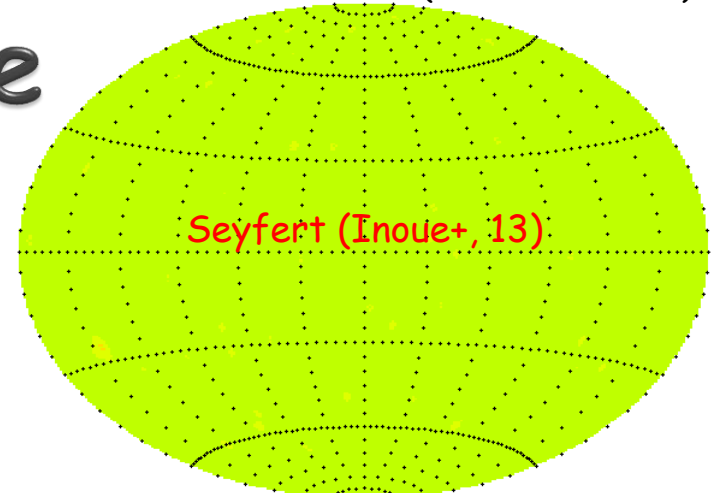
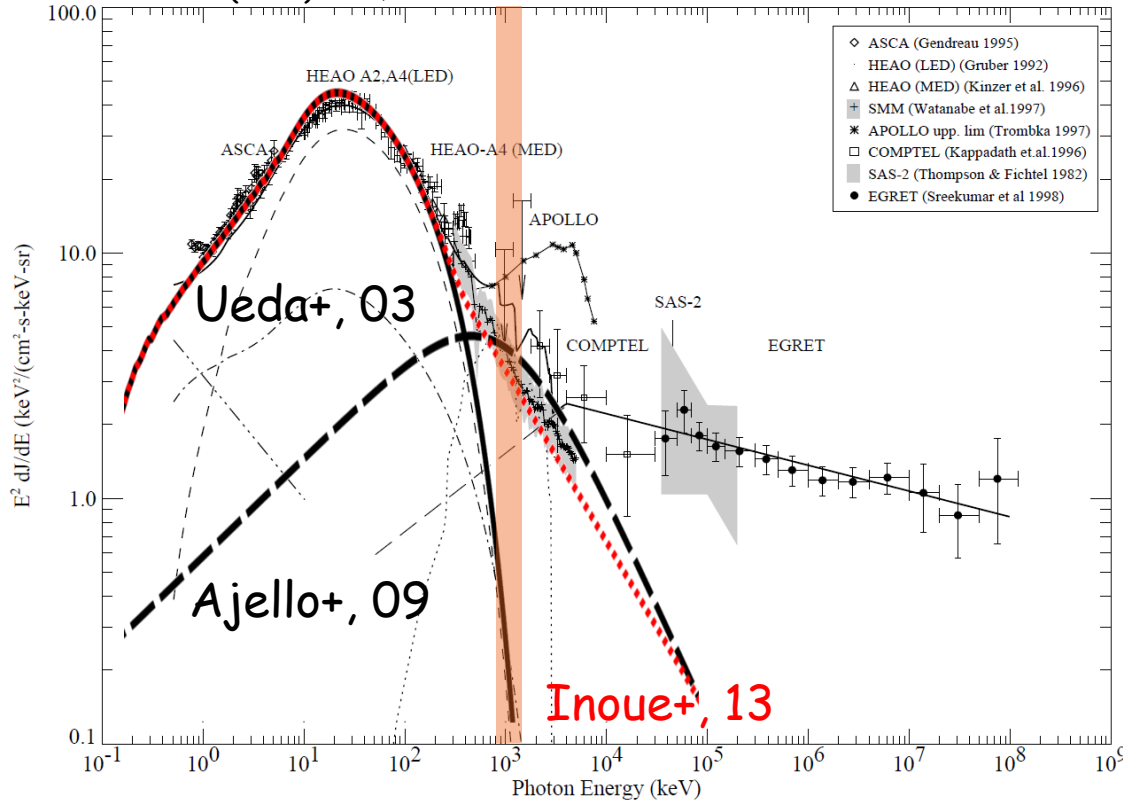
# 次期計画の観測対象



# 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...

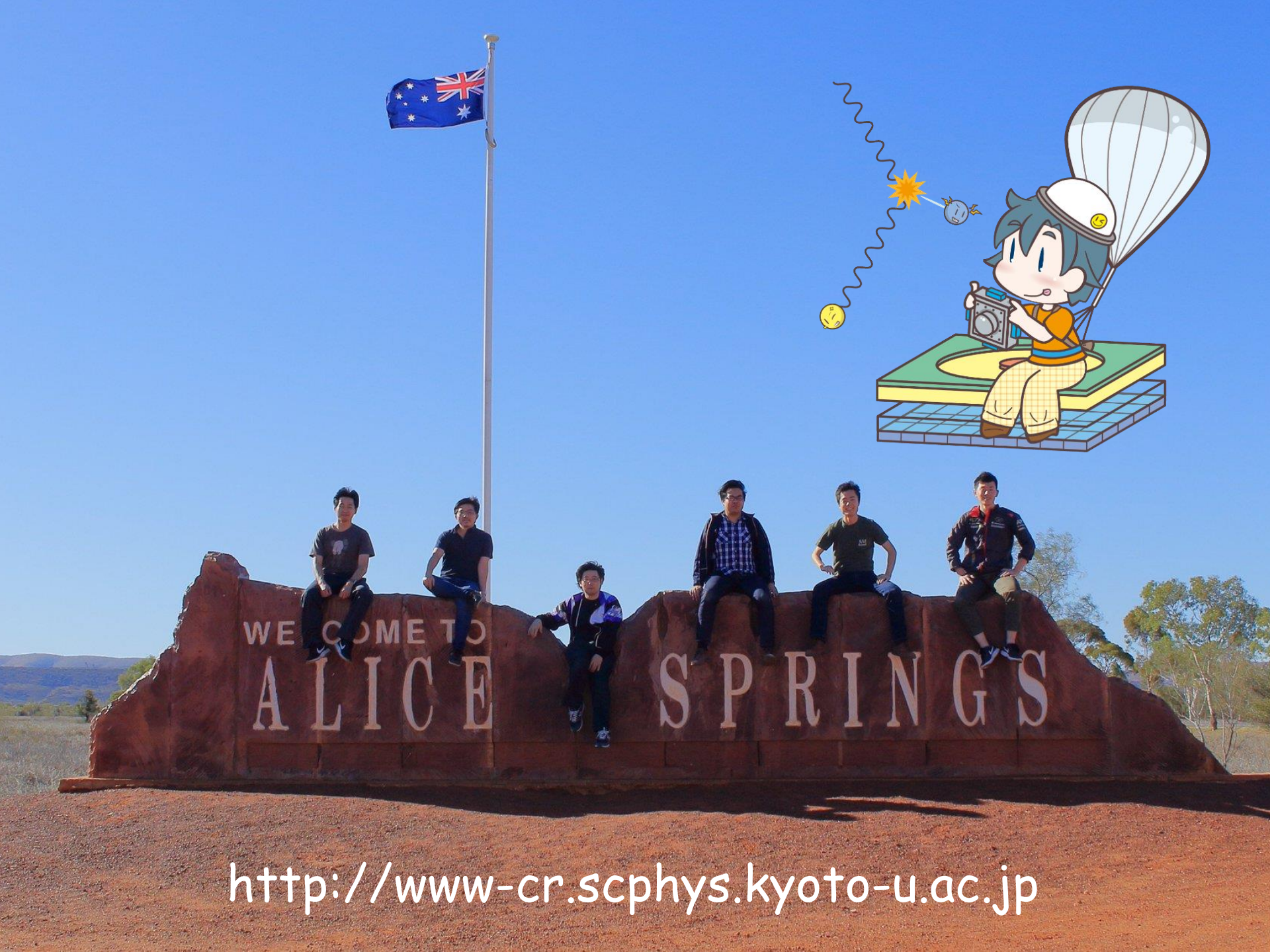
有効面積  $> 50 \text{ cm}^2$  へ

$^{26}\text{Al}$ 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>