



# 電子飛跡検出型コンプトンカメラによる気球高度でのガンマ線観測

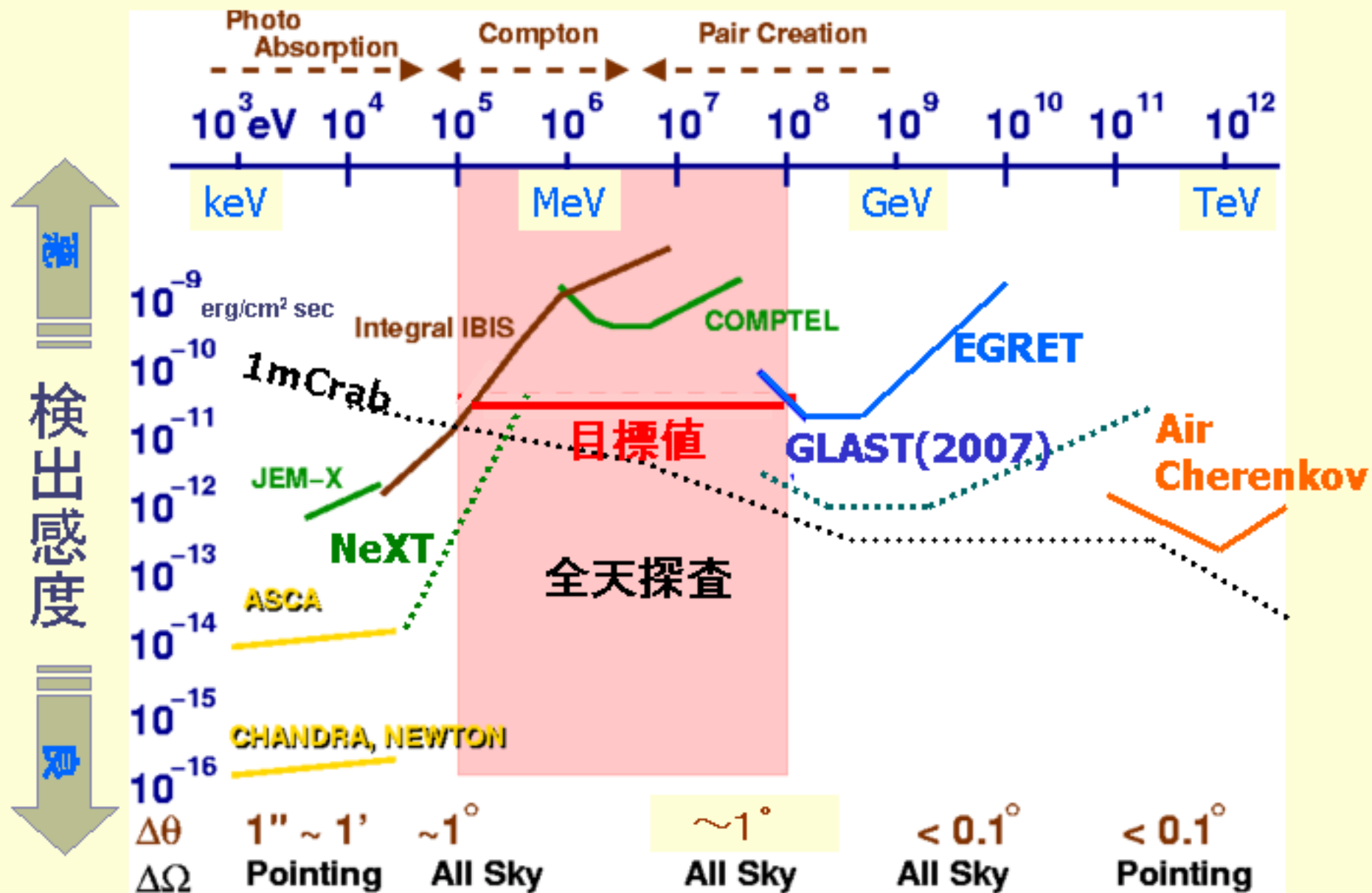
京大理 高田 淳史

谷森達、窪秀利、身内賢太郎、土屋兼一、株木重人  
岡田葉子、西村広展、服部香里、上野一樹、黒澤俊介

- Introduction
- MeV- $\gamma$  Compton camera
- 1<sup>st</sup> flight of SMILE
- Summary



# これまでのX・γ線検出感度



# COMPTON (GRO衛星:1991~2000)

## コンプトン散乱を利用した検出器

◆ 散乱  $\gamma$  線・反跳電子のエネルギー

⇒ 入射  $\gamma$  線のエネルギー  
 $\gamma$  線の散乱角

$$\cos \phi = 1 - m_e c^2 \left( \frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1 + E_2} \right)$$

◆ 散乱点・散乱  $\gamma$  線の吸収点

⇒  $\gamma$  線の散乱方向

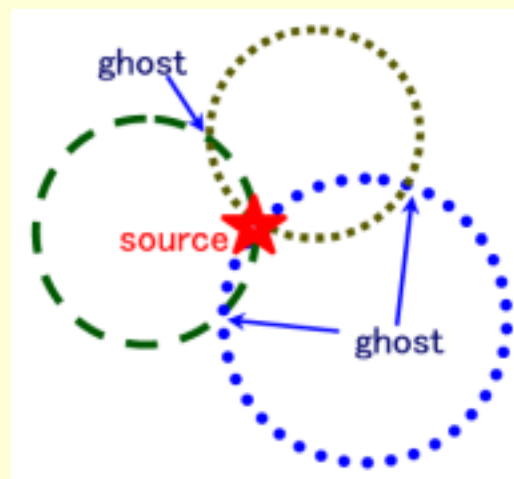
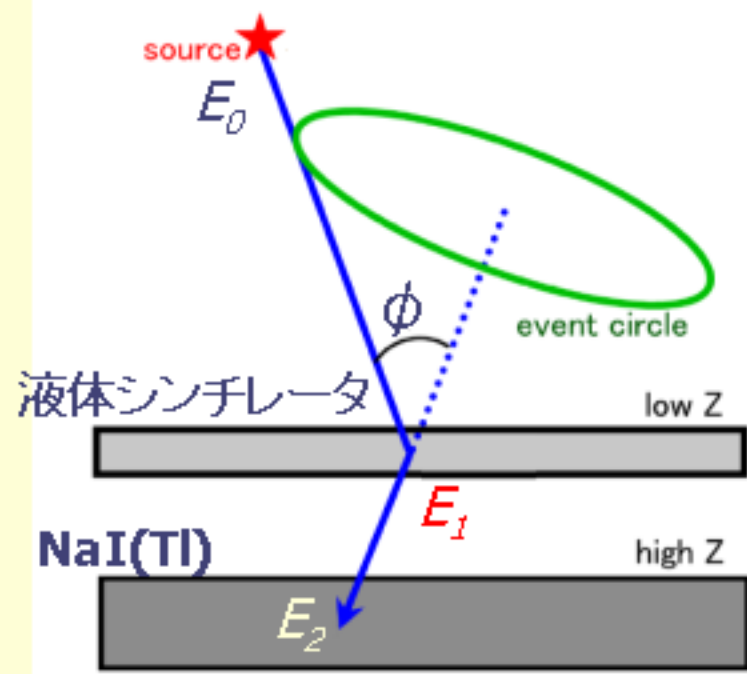
◆ 電子の反跳方向(2自由度)は破棄



➤ 到来方向を円形(event circle)に制限

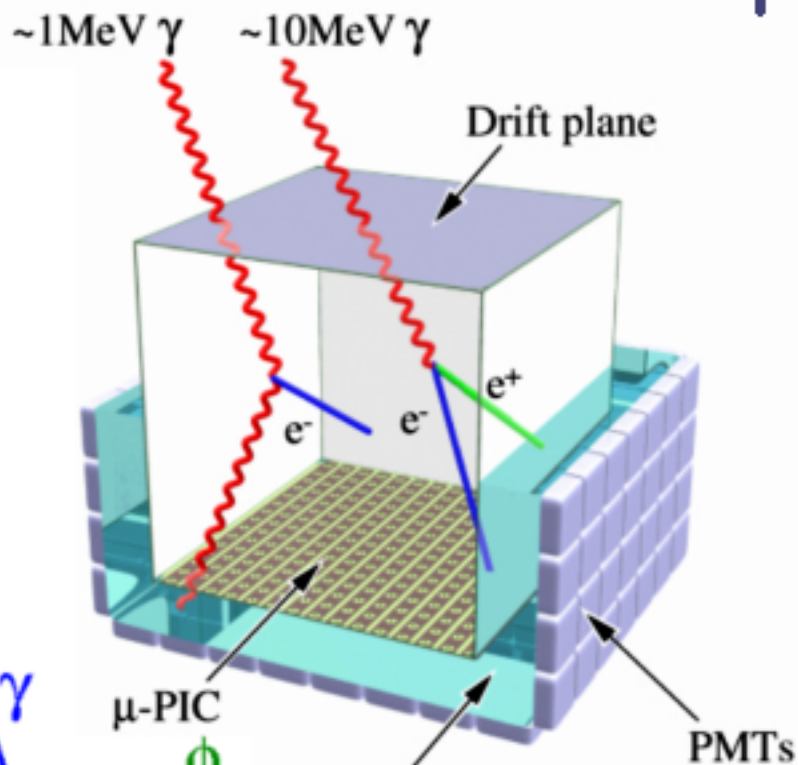
➤ 自由度が1つ足りないため

円上のどこから到来したかは不定





# Advanced Compton Imaging

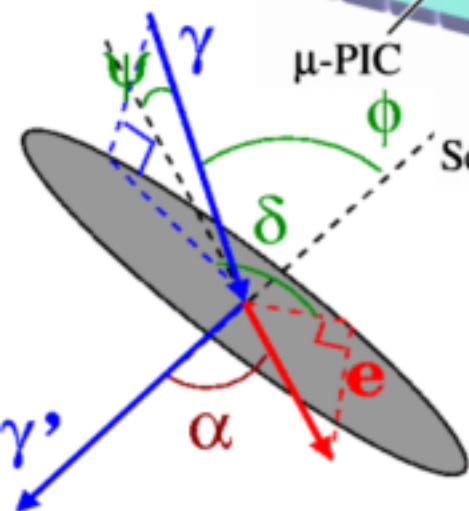


- $\mu$ -TPC ( $\mu$ -PIC)  
反跳電子のtrack, energy
- Scintillator  
散乱  $\gamma$  の位置, energy



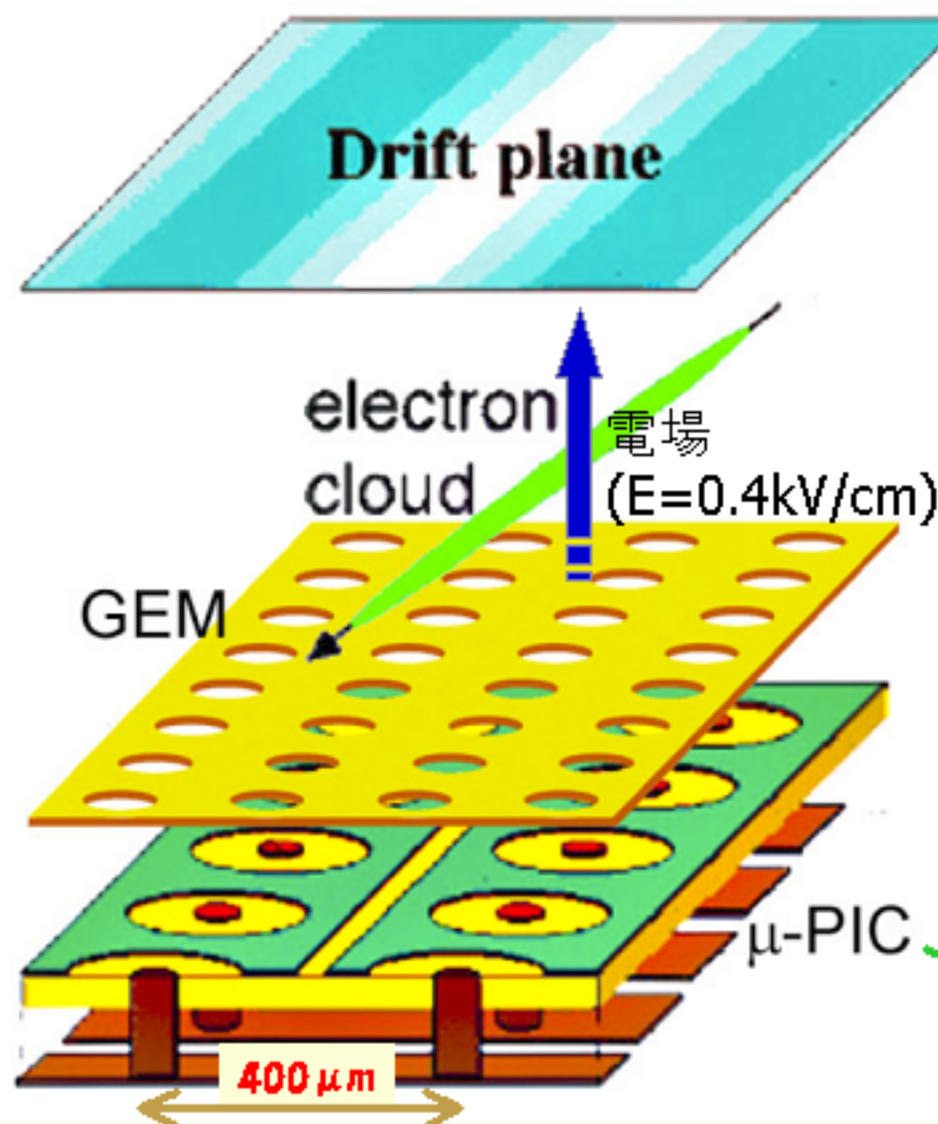
Event毎に  
Compton散乱を完全に再現

- $1 \gamma \Rightarrow$  到来方向 + energy
- 大立体角 ( $\sim 3 \text{str}$ )
- $\alpha \Rightarrow$  強力なbackground rejection

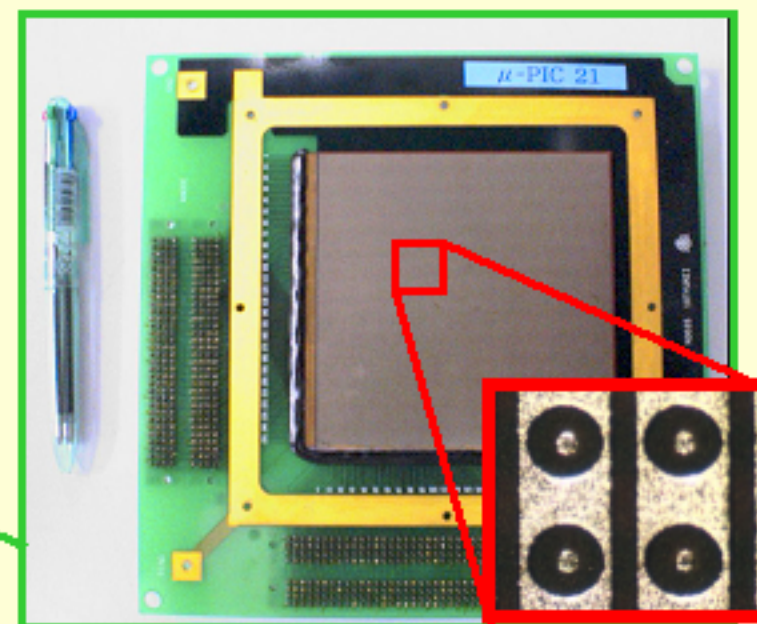


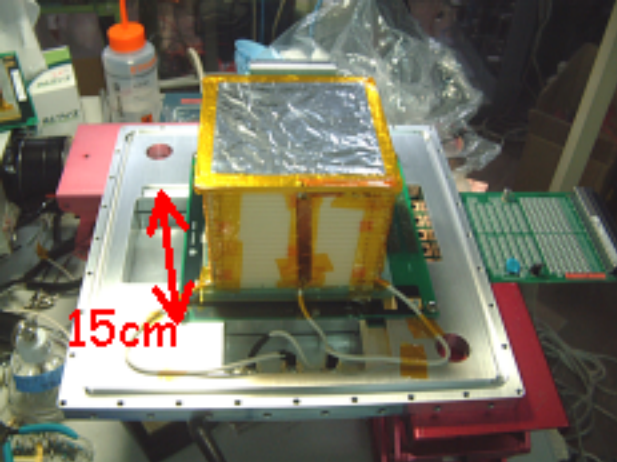
$$\cos \alpha = \left( 1 - \frac{m_e c^2}{E_g} \right) \sqrt{\frac{K_e}{K_e + 2m_e c^2}}$$

# 反跳電子3次元飛跡測定用 ガスTime Projection Chamber



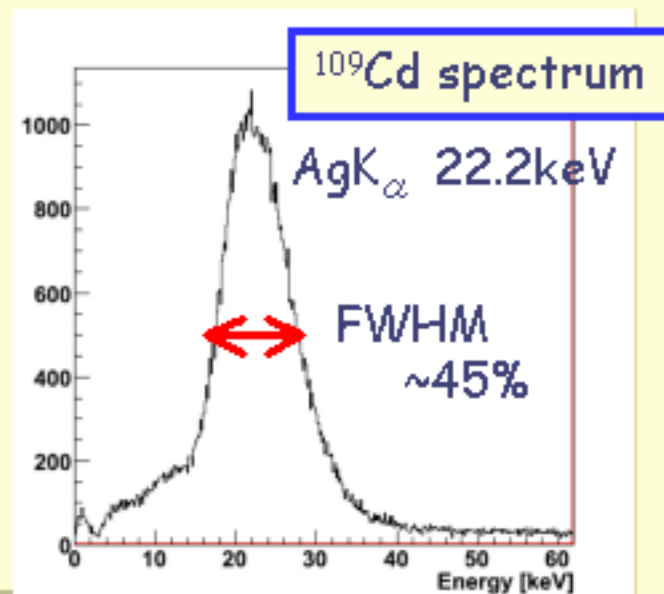
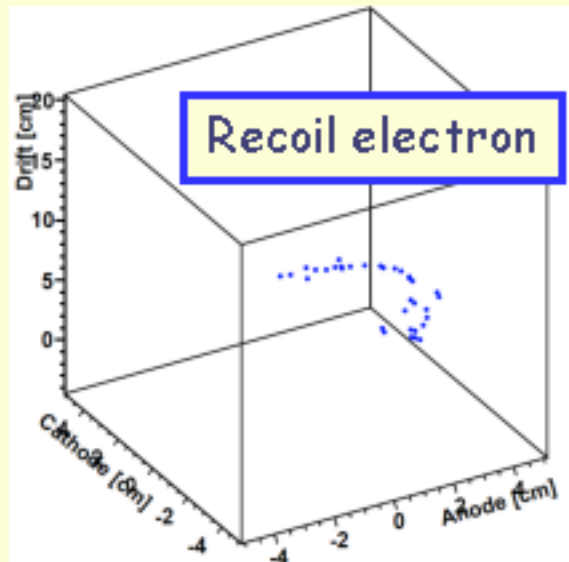
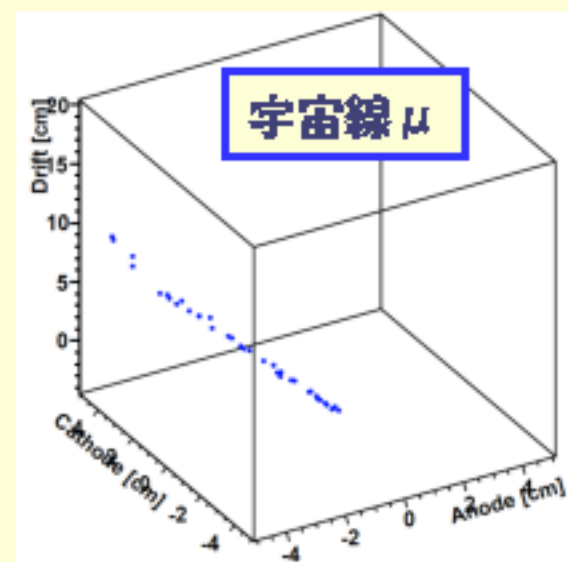
- 2次元読出し+時間情報  
 $10 \times 10 \times 15\text{ cm}^3$   
400  $\mu\text{m}$  pitchのpixel電極  
100MHz readout
- 高い位置分解能( $\sim 400\ \mu\text{m}$ )
- 安定ガス増幅率  $\sim 35000$





# Xe-based $\mu$ -TPC

- Gas : Xe 80% + Ar 18% + C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 2% 1atm (sealed)
- Gain : ~35000 ( $\mu$ PIC 3000  $\times$  GEM 12)
- Drift速度 ( $V_d=400V/cm$ ) :  
 実測 2.5cm/ $\mu$ sec      simulation 2.48cm/ $\mu$ sec
- Volume : 10 $\times$ 10 $\times$ 15 cm<sup>3</sup>



# SMILE計画 *Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment*

(10cm)<sup>3</sup>のMeV  $\gamma$ 線カメラ @三陸 (2006秋)

- ガスTPC@増幅率3万の動作検証  
(GSOシンチレータはSuzaku/HXDで実証済)
- 宇宙背景・大気ガンマ線測定  
予想値: 0.1~1MeV  
~400フォトン @ 35km, 6時間

(30cm)<sup>3</sup> カメラ @日本 6時間 (2009?)

かに星雲、白鳥座 X-1の観測

(40cm)<sup>3</sup> カメラ

スーパープレッシャー気球~10日間

(50cm)<sup>3</sup> カメラ 衛星に搭載し全天サーベイ



# 気球搭載コンプトンカメラ

Plasticシンチ

TPC

GSO  
シンチ

TPC用アンプ

NIMモジュール  
・シンチ用Amp  
・DAC

VMEモジュール  
・CPU  
・各種ADC  
・通信モジュール  
・スケーラー

FPGAデータ処理システム

・TPC

Xe+Ar+C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>ガス  
(80:18:2) 1気圧  
10×10×14cm<sup>3</sup>

・シンチレーションカメラ

3×3PMTs@bottom  
4×(3×2)PMTs@side

・Anti 用Plasticシンチ

30cm × 30cm × 3mm  
取得データ

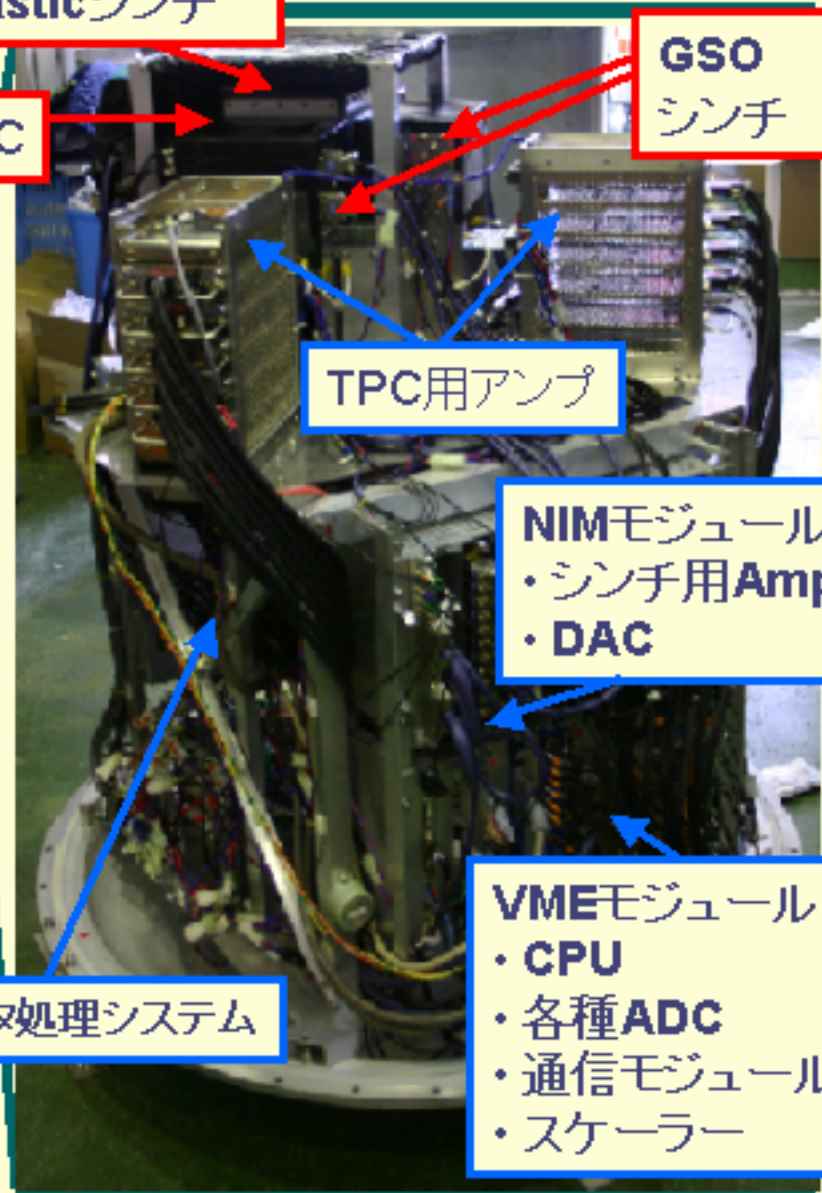
すべてHDDに書き込み

+

一部をテレメトリー  
地上に送信



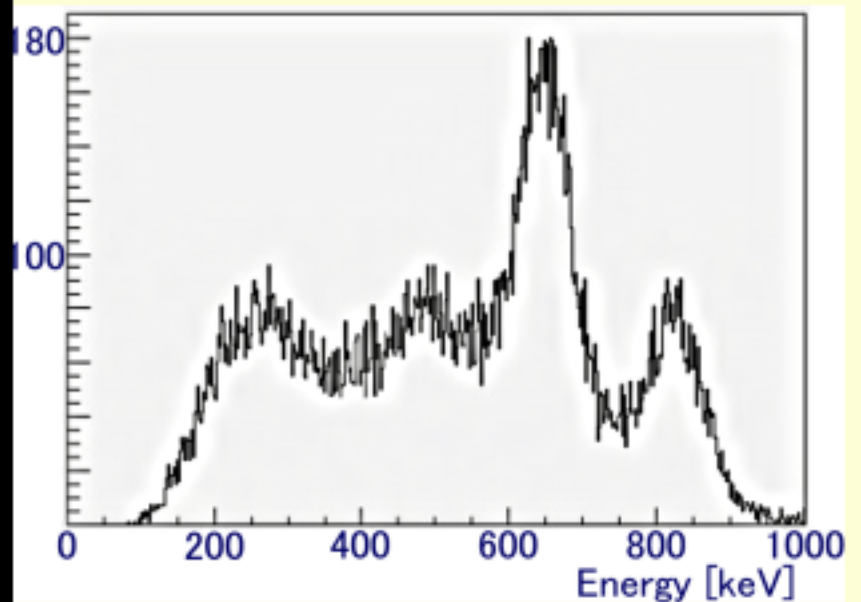
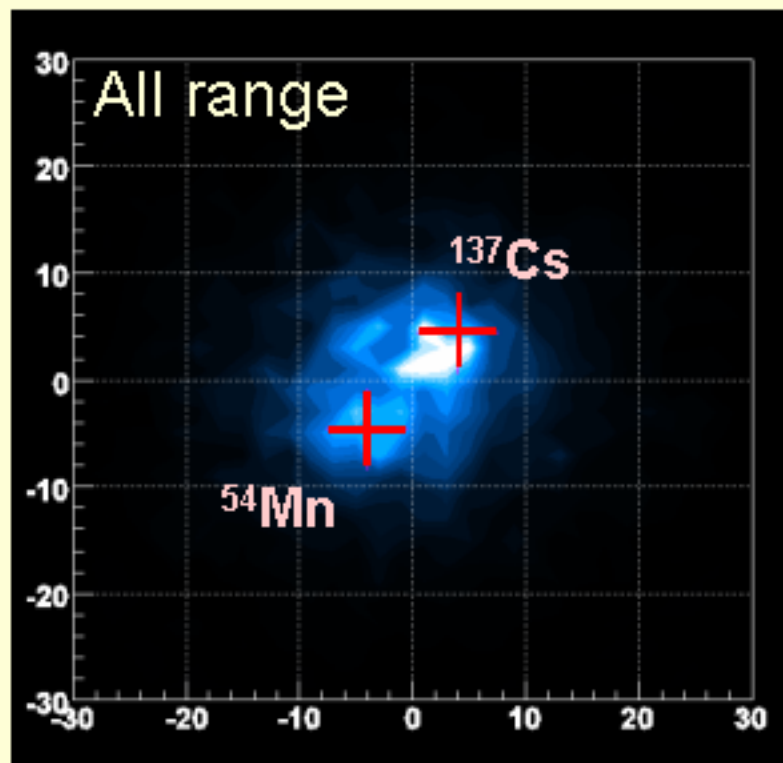
φ1×1.4m<sup>3</sup>



# MeV- $\gamma$ imaging

$^{137}\text{Cs}$  : 662keV, 0.89MBq

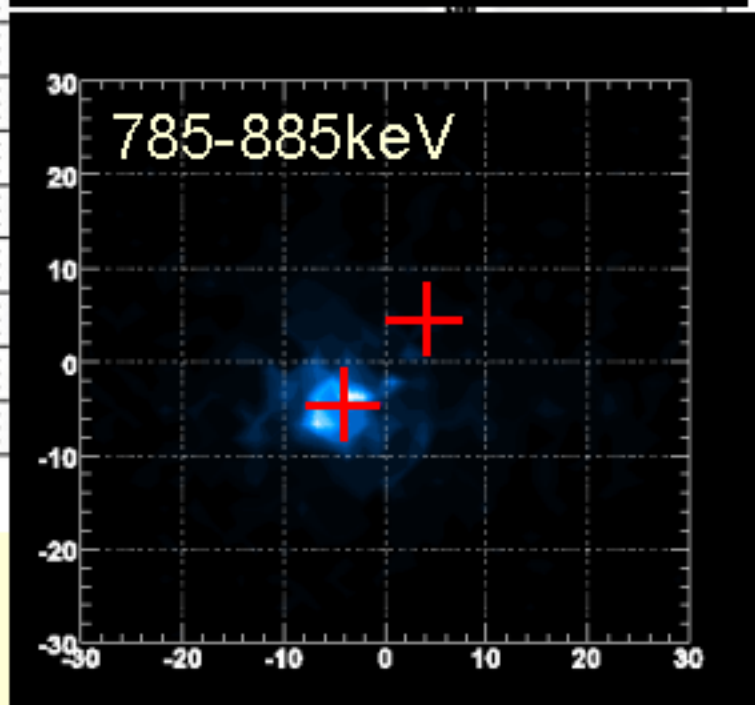
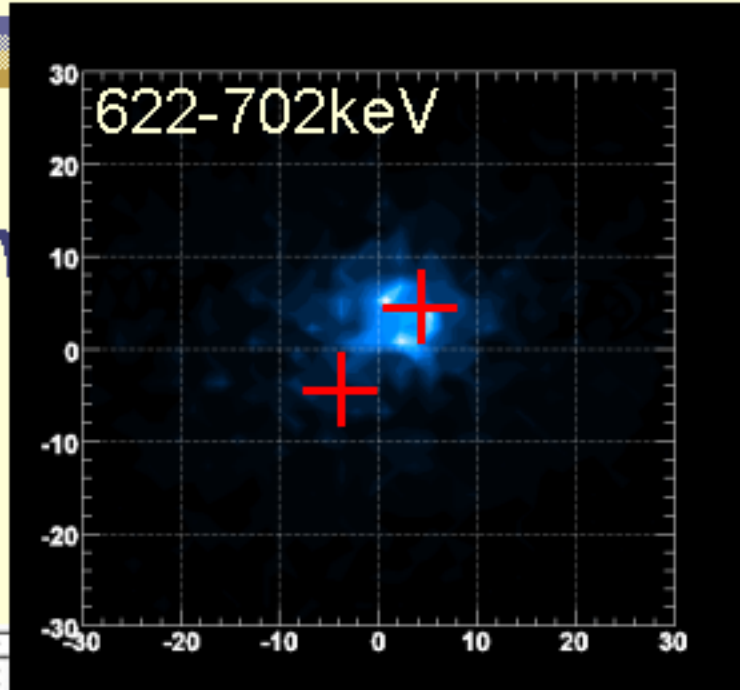
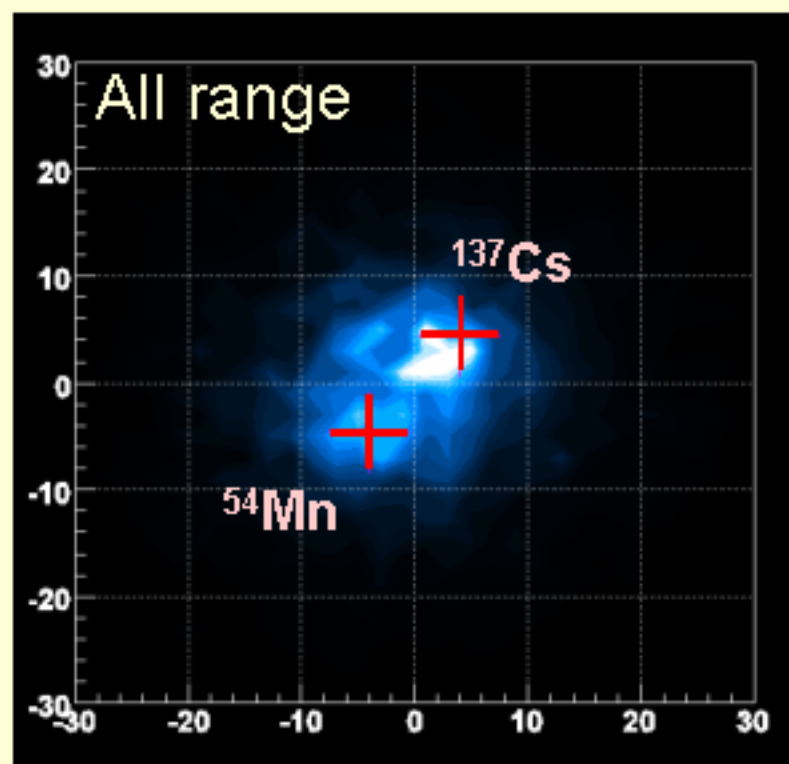
$^{54}\text{Mn}$ : 835keV, 0.65MBq



# MeV- $\gamma$ im

$^{137}\text{Cs}$  : 662keV, 0.89MBq

$^{54}\text{Mn}$ : 835keV, 0.65MBq



# 1<sup>st</sup> flight SMILE

- ・ゴンドラサイズ :1.45×1.2×1.55m<sup>3</sup>
- ・ベッセルサイズ:φ1×1.4m<sup>3</sup>
- ・ゴンドラ 総重量 397kg
- ・総消費電力: ~350W
  - ・ベッセル内部:220W

## 与圧ベッセル内(1 atm)

検出器  
DAQシステム・記憶装置  
温度センサー・圧力計  
GPS本体・傾斜計

## 気球工学

送信器・受信器  
トラポン・ブイ・ゾンデ  
GPS・圧力計・温度計等

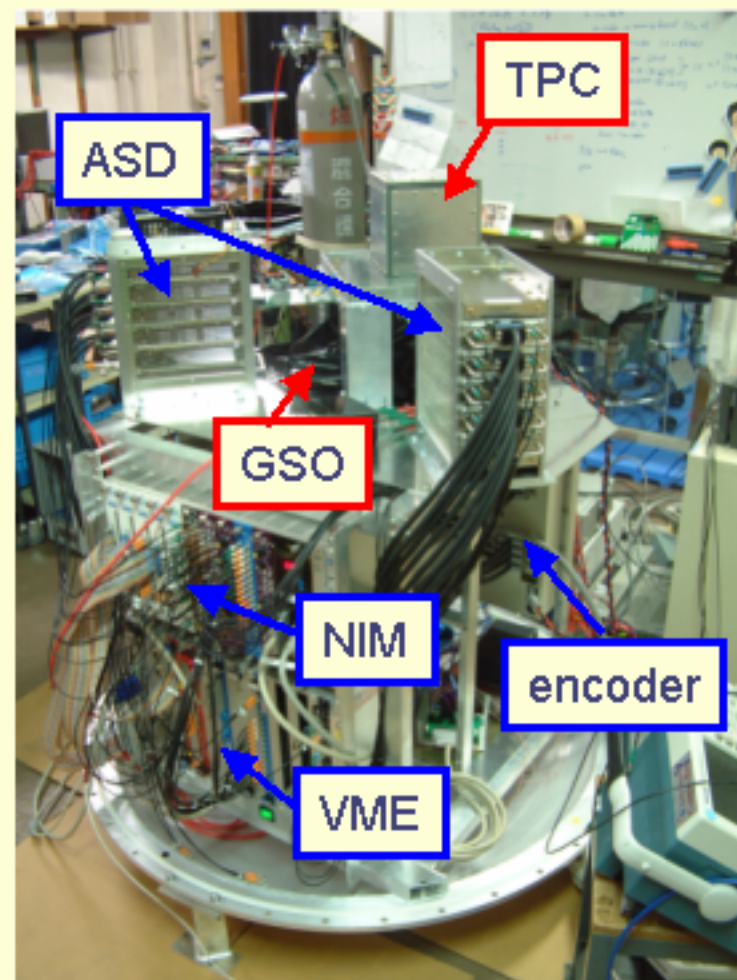
## ベッセル外

電源供給システム  
電池

温度センサー・圧力計  
GPSアンテナ・磁場センサー

## 気球

B100 (100,000m<sup>3</sup>)  
総重量 816kg  
気球263kg、ゴンドラ397kg  
荷姿25.8kg、バラスト130kg  
総浮力 888.2kg



# 1<sup>st</sup> flight SMILE

- ・ゴンドラサイズ :1.45×1.2×1.55m<sup>3</sup>
- ・ベッセルサイズ:φ1×1.4m<sup>3</sup>
- ・ゴンドラ 総重量 397kg
- ・総消費電力: ~350W
  - ・ベッセル内部: 220W

## 与圧ベッセル内(1 atm)

検出器  
DAQシステム・記憶装置  
温度センサー・圧力計  
GPS本体・傾斜計

## 気球工学

送信器・受信器  
トラポン・ブイ・ゾンデ  
GPS・圧力計・温度計等

## ベッセル外

電源供給システム  
電池  
温度センサー・圧力計  
GPSアンテナ・磁場センサー

## 気球

B100 (100,000m<sup>3</sup>)  
総重量 816kg  
気球263kg、ゴンドラ397kg  
荷姿25.8kg、バラスト130kg  
総浮力 888.2kg



# 1<sup>st</sup> flight SMILE

- ・ゴンドラサイズ :1.45×1.2×1.55m<sup>3</sup>
- ・ベッセルサイズ:φ1×1.4m<sup>3</sup>
- ・ゴンドラ 総重量 397kg
- ・総消費電力: ~350W
  - ・ベッセル内部:220W

## 与圧ベッセル内(1 atm)

検出器  
DAQシステム・記憶装置  
温度センサー・圧力計  
GPS本体・傾斜計

## 気球工学

送信器・受信器  
トラポン・ブイ・ゾンデ  
GPS・圧力計・温度計等

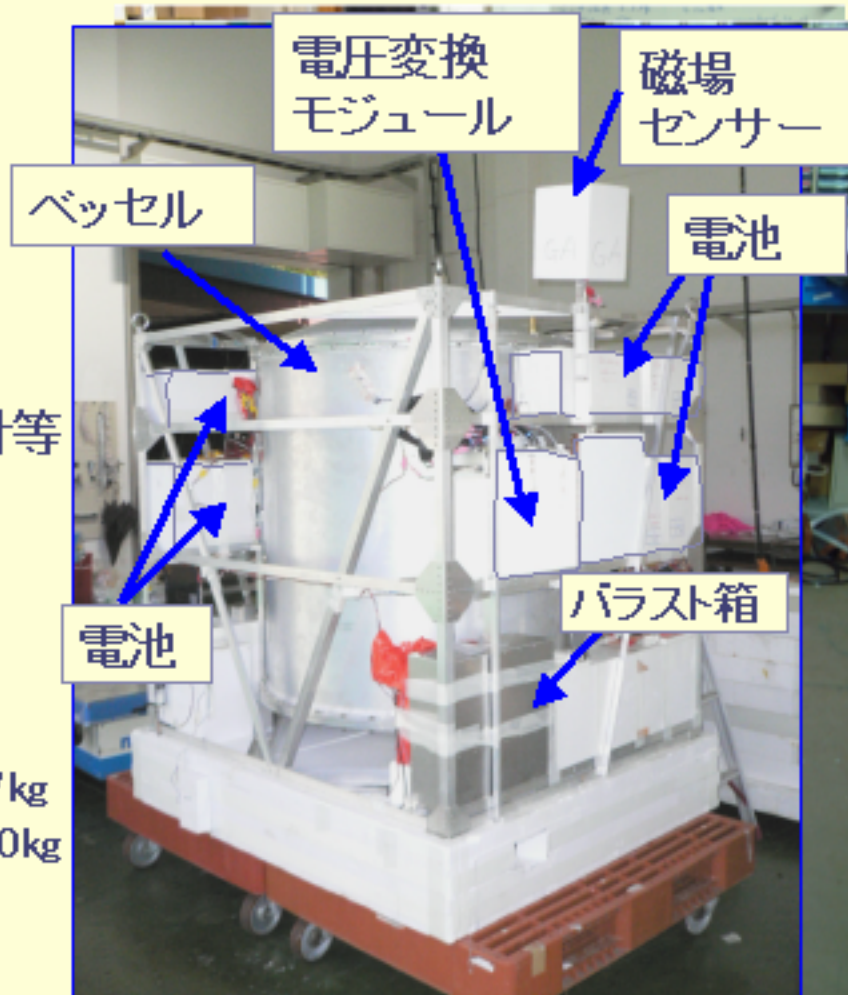
## ベッセル外

電源供給システム  
電池

温度センサー・圧力計  
GPSアンテナ・磁場センサー

## 気球

B100 (100,000m<sup>3</sup>)  
総重量 816kg  
気球263kg、ゴンドラ397kg  
荷姿25.8kg、バラスト130kg  
総浮力 888.2kg



# 1<sup>st</sup> flight SMILE

- ・ゴンドラサイズ :1.45×1.2×1.55m<sup>3</sup>
- ・ベッセルサイズ:φ1×1.4m<sup>3</sup>
- ・ゴンドラ 総重量 397kg
- ・総消費電力: ~350W
- ・ベッセル内部: 220W

## 与圧ベッセル内(1 atm)

検出器  
DAQシステム・記憶装置  
温度センサー・圧力計  
GPS本体・傾斜計

## 気球工学

送信器・受信器  
トラポン・ブイ・ゾンデ  
GPS・圧力計・温度計等

## ベッセル外

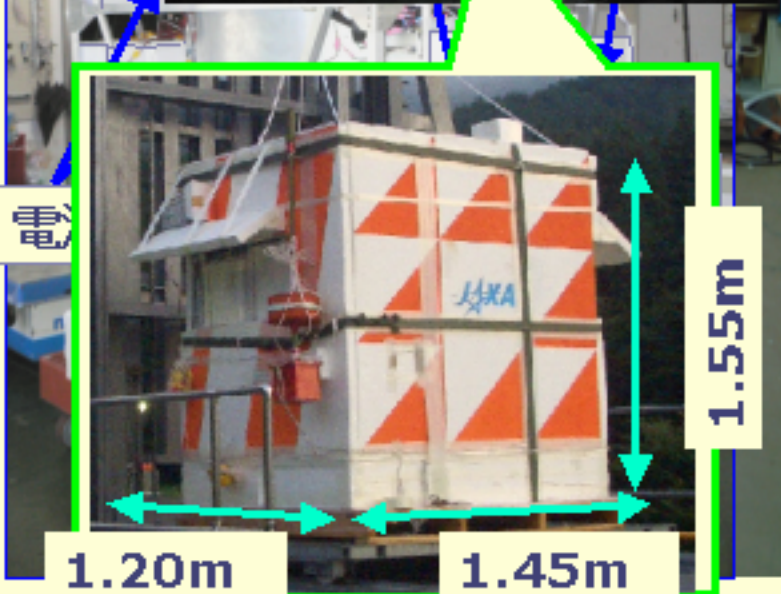
電源供給システム  
電池  
温度センサー・圧力計  
GPSアンテナ・磁場センサー

## 気球

B100 (100,000m<sup>3</sup>)  
総重量 816kg  
気球263kg、ゴンドラ397kg  
荷姿25.8kg、バラスト130kg  
総浮力 888.2kg

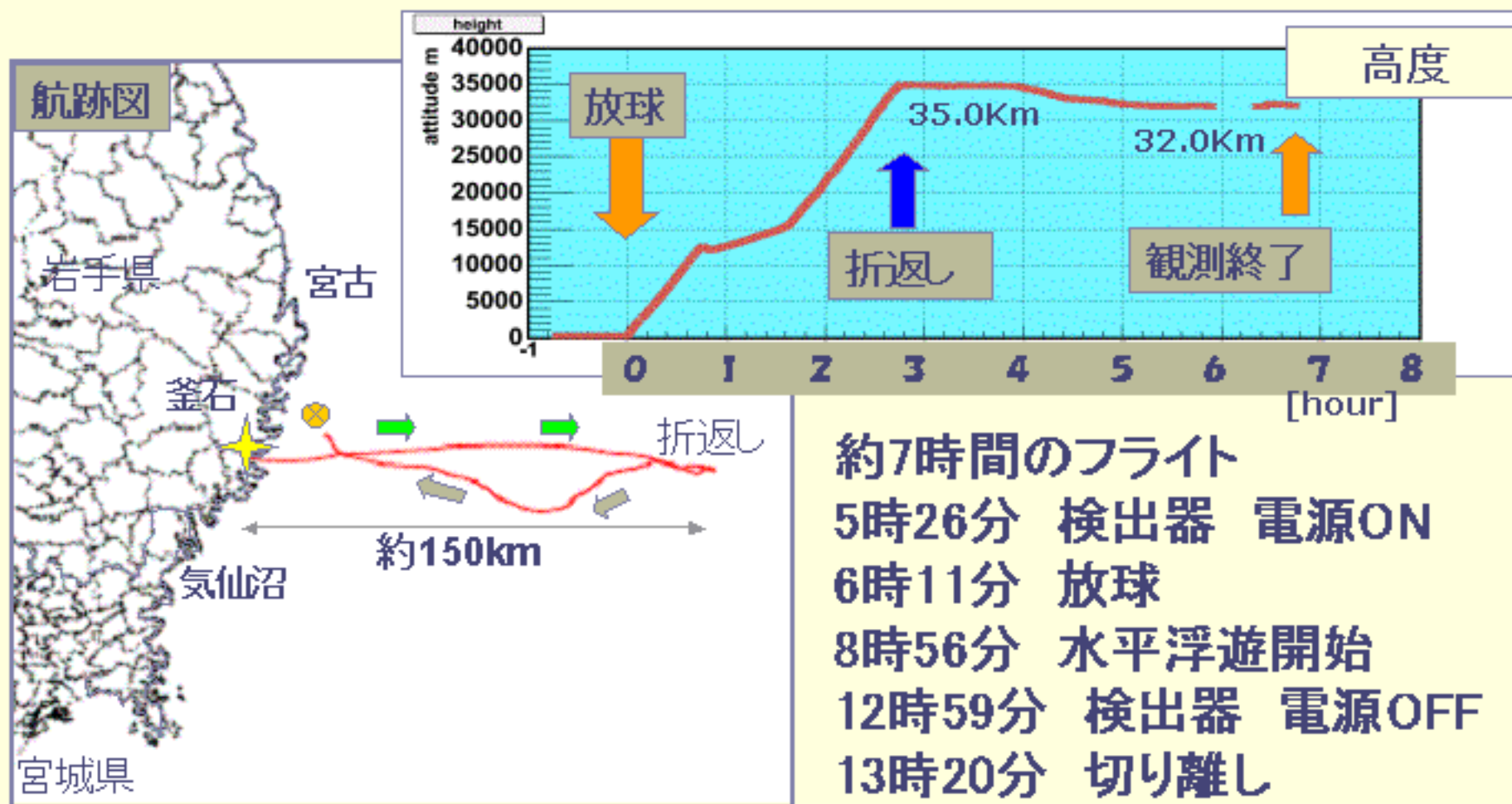
ベッセル

電



# フライト ● 三陸大気球観測所

● 2006年9月1日6時11分放球



約7時間のフライト

5時26分 検出器 電源ON

6時11分 放球

8時56分 水平浮遊開始

12時59分 検出器 電源OFF

13時20分 切り離し

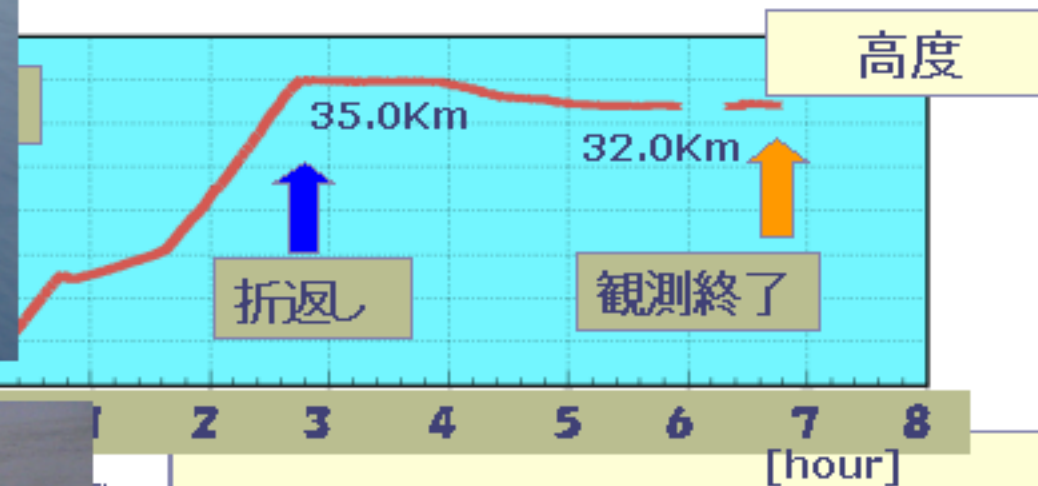
13時45分頃 釜石沖 着水

14時32分 回収



# 大気球観測所

年9月1日6時11分放球



約7時間のフライト

5時26分 検出器 電源ON

6時11分 放球

8時56分 水平浮遊開始

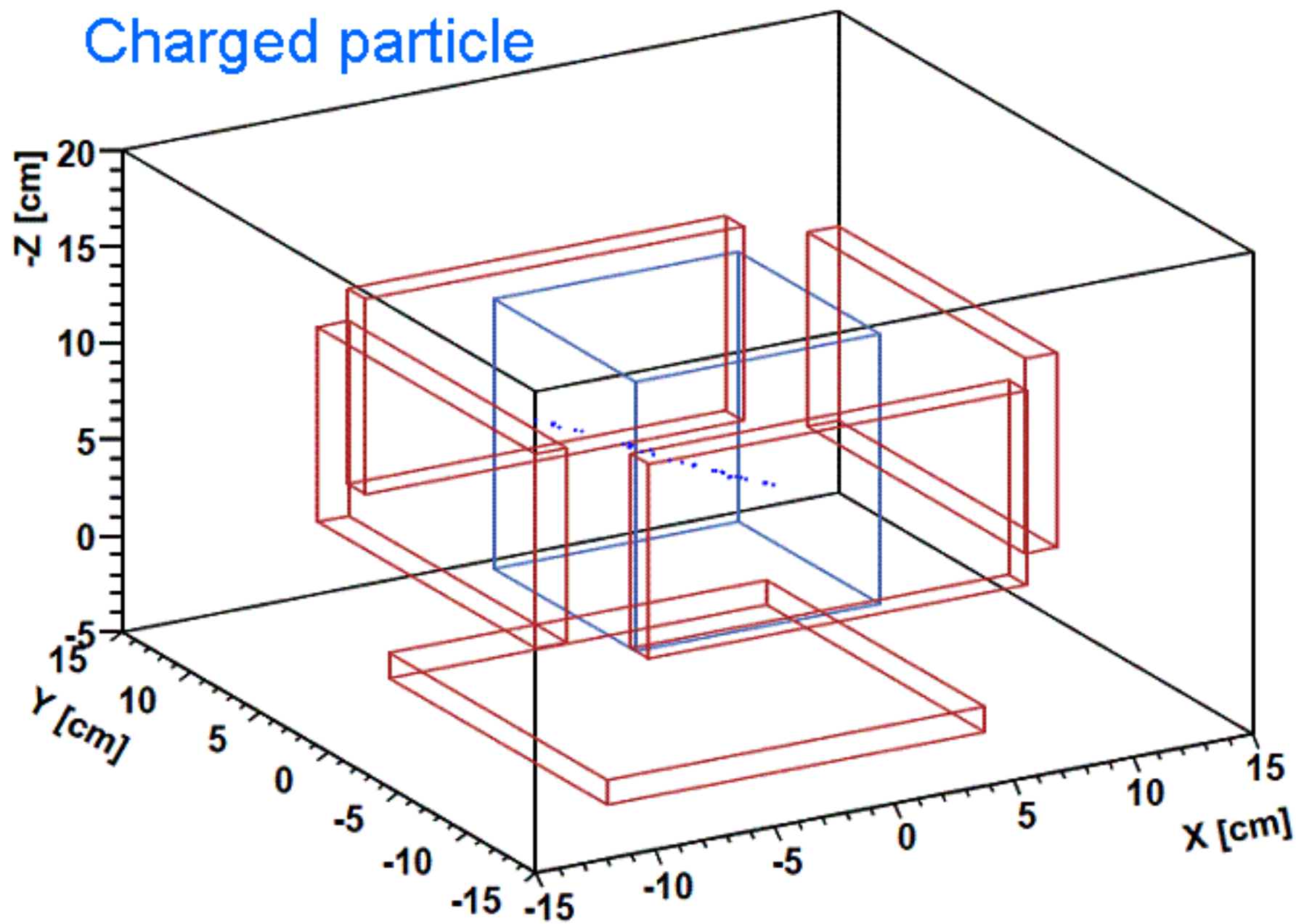
12時59分 検出器 電源OFF

13時20分 切り離し

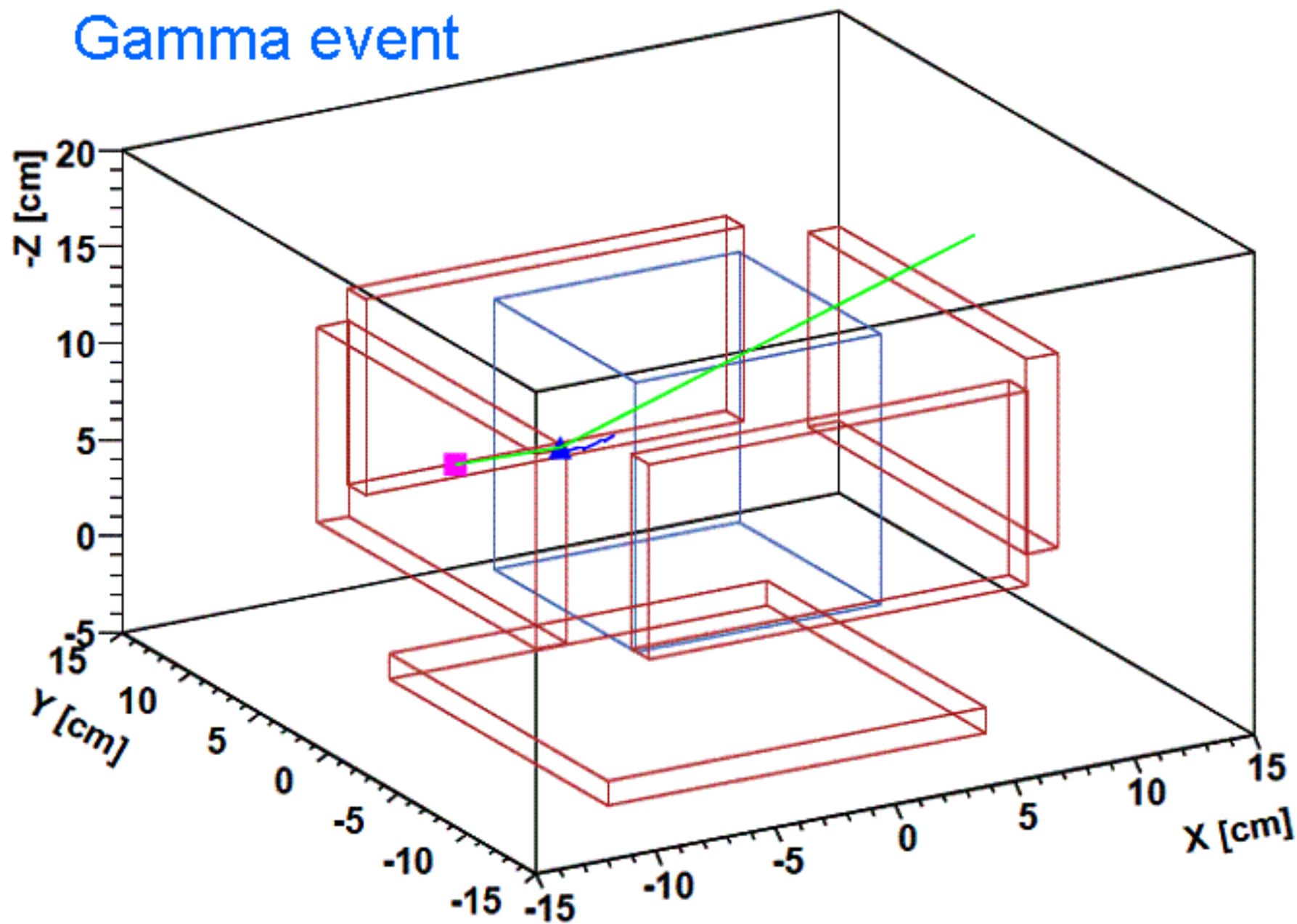
13時45分頃 釜石沖 着水

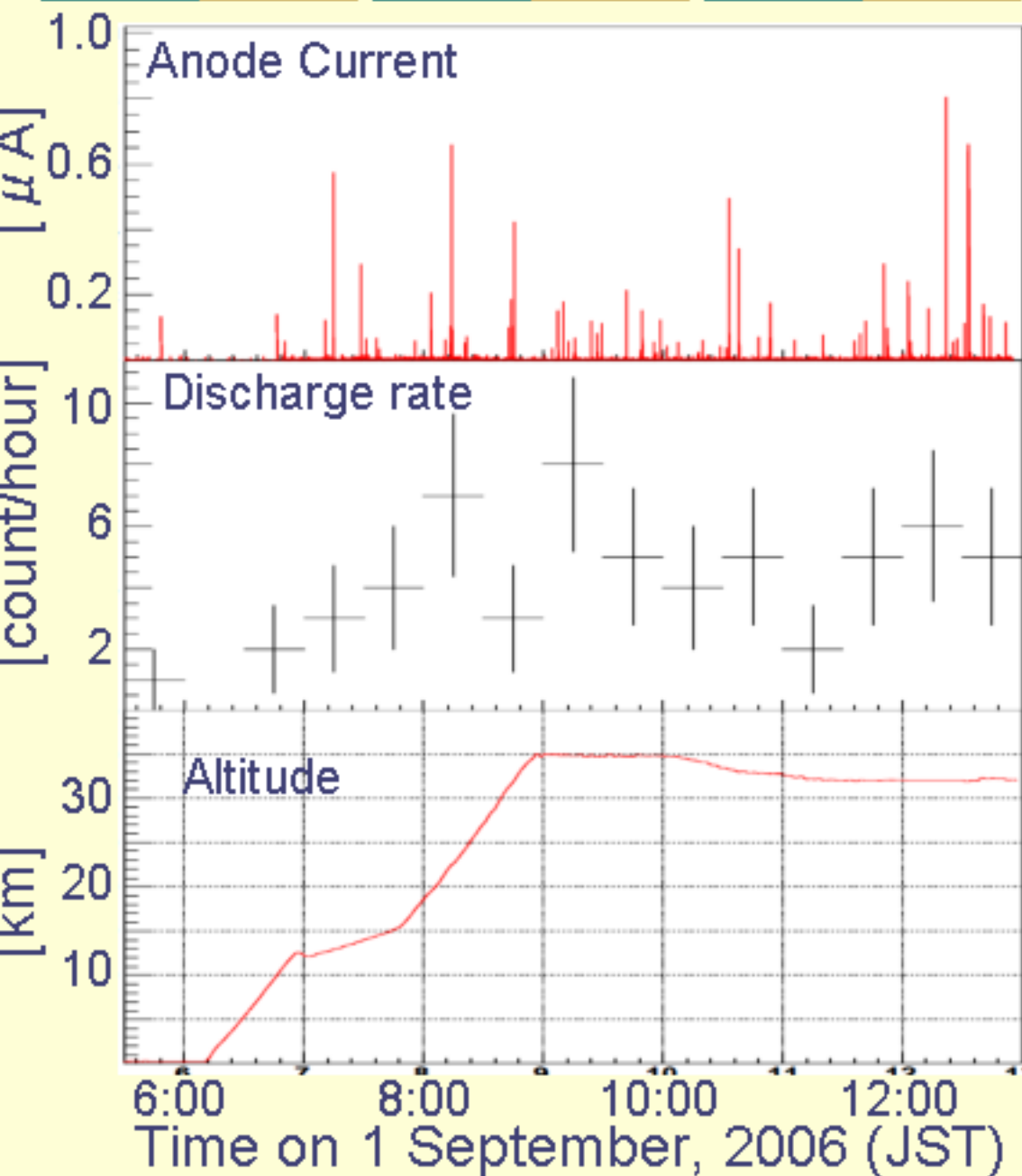
14時32分 回収

# Charged particle



# Gamma event

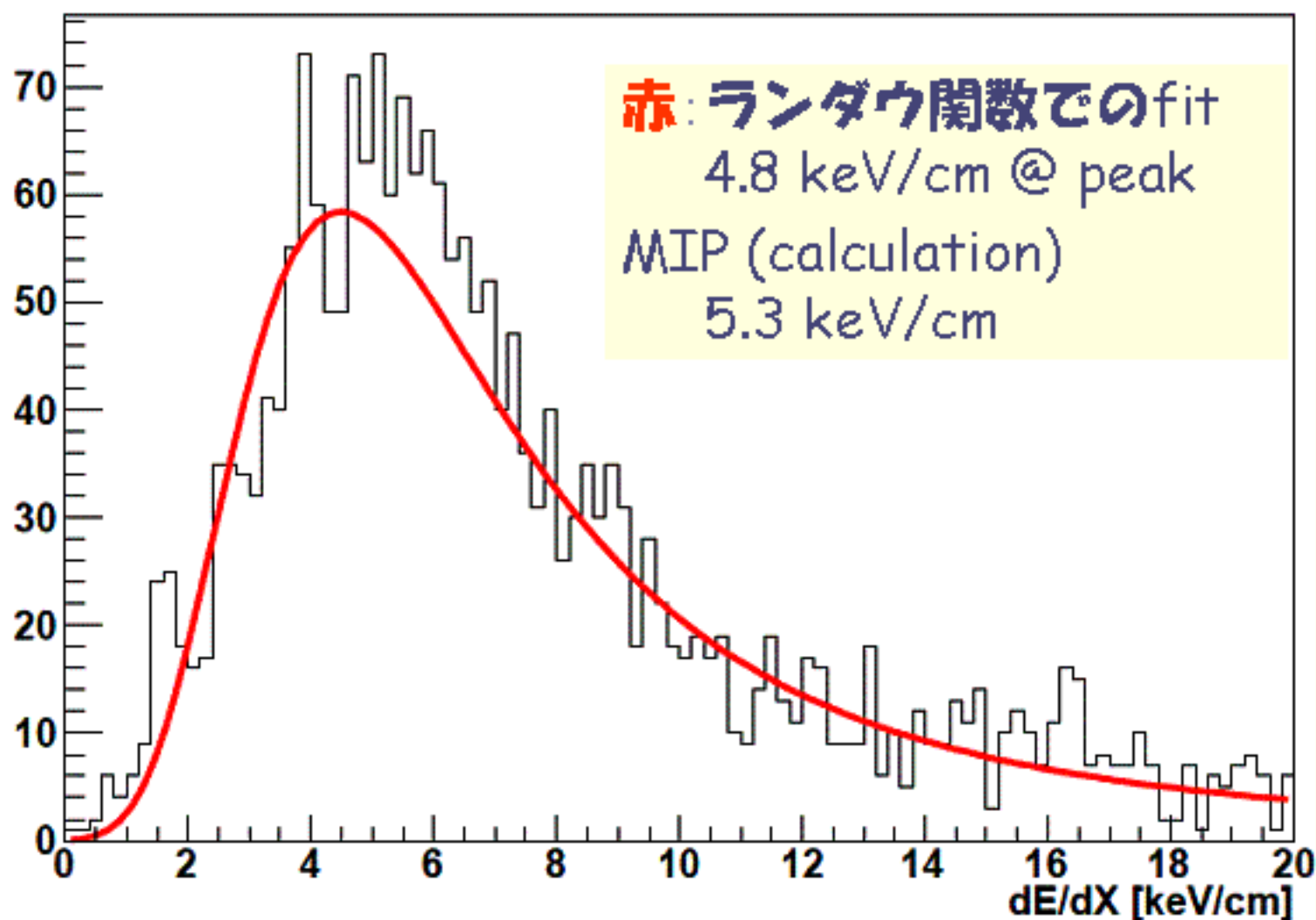




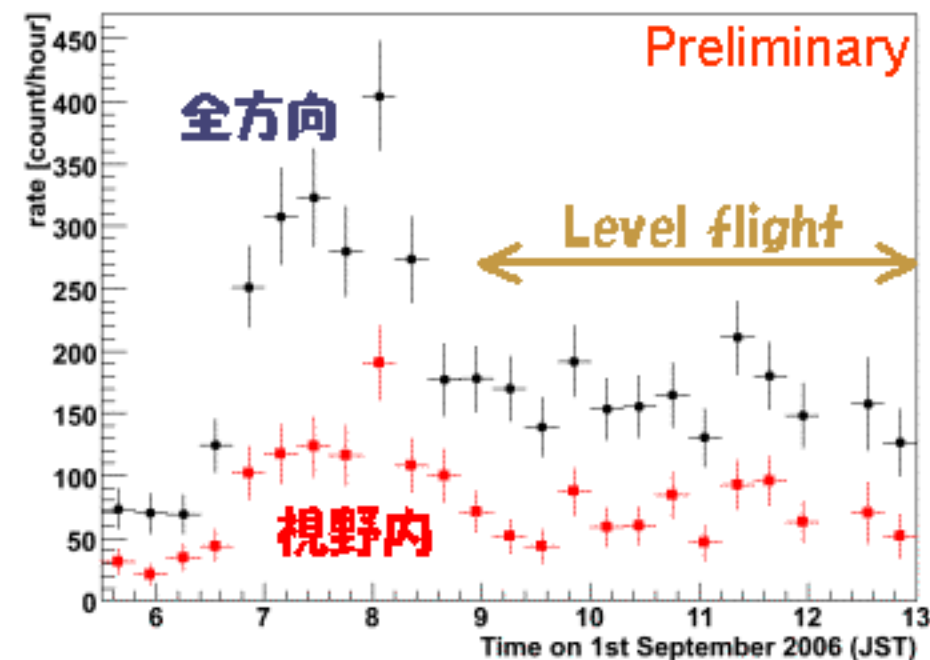
## Status of $\mu$ -TPC

- 気球高度と共に  
放電レートが増加  
⇒ Energy depositの  
大きいHeやCによる
- 放電以外の  
異常電流は見られない  
⇒ TPCは32~35 kmの  
上空で安定に動作

# $dE/dX$ of charged particle



# Gamma-ray rate & spectrum

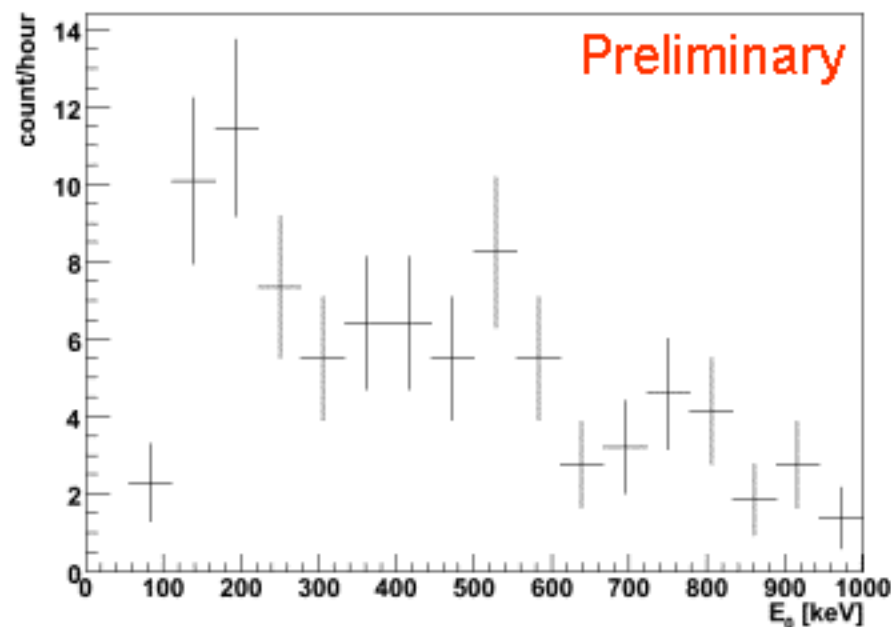


←ガンマ線カウントレート

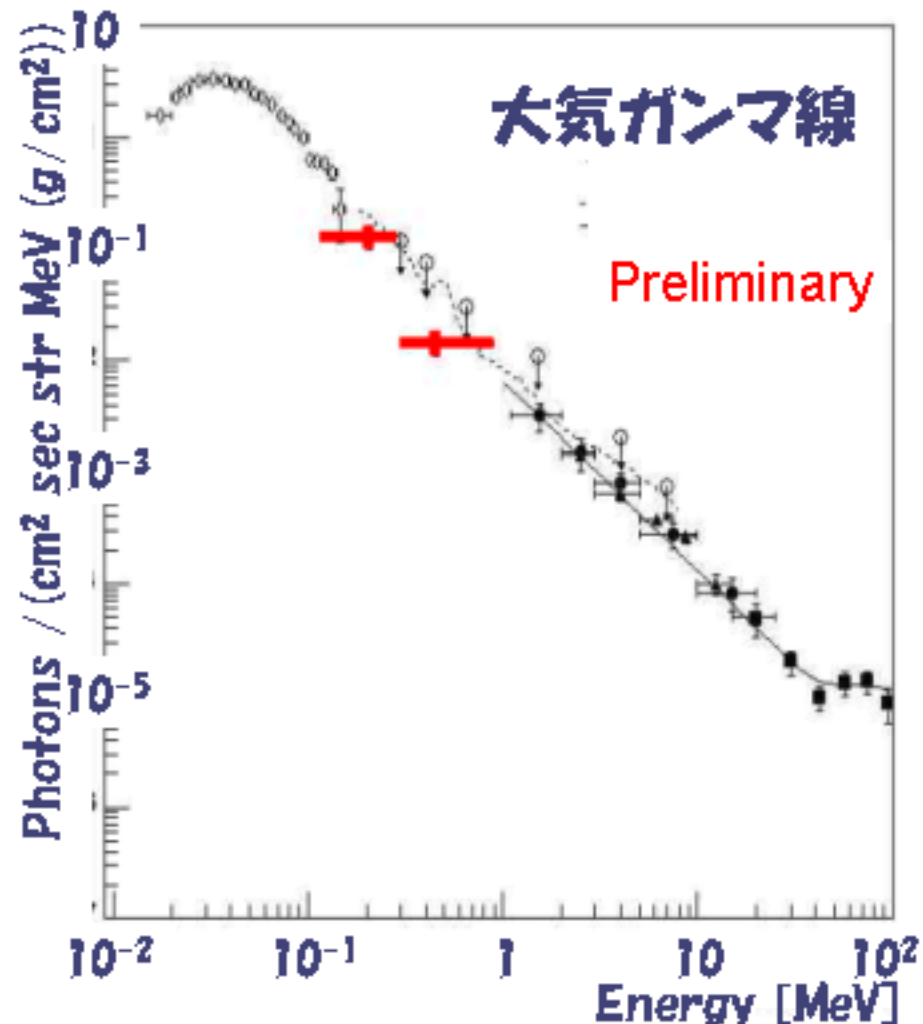
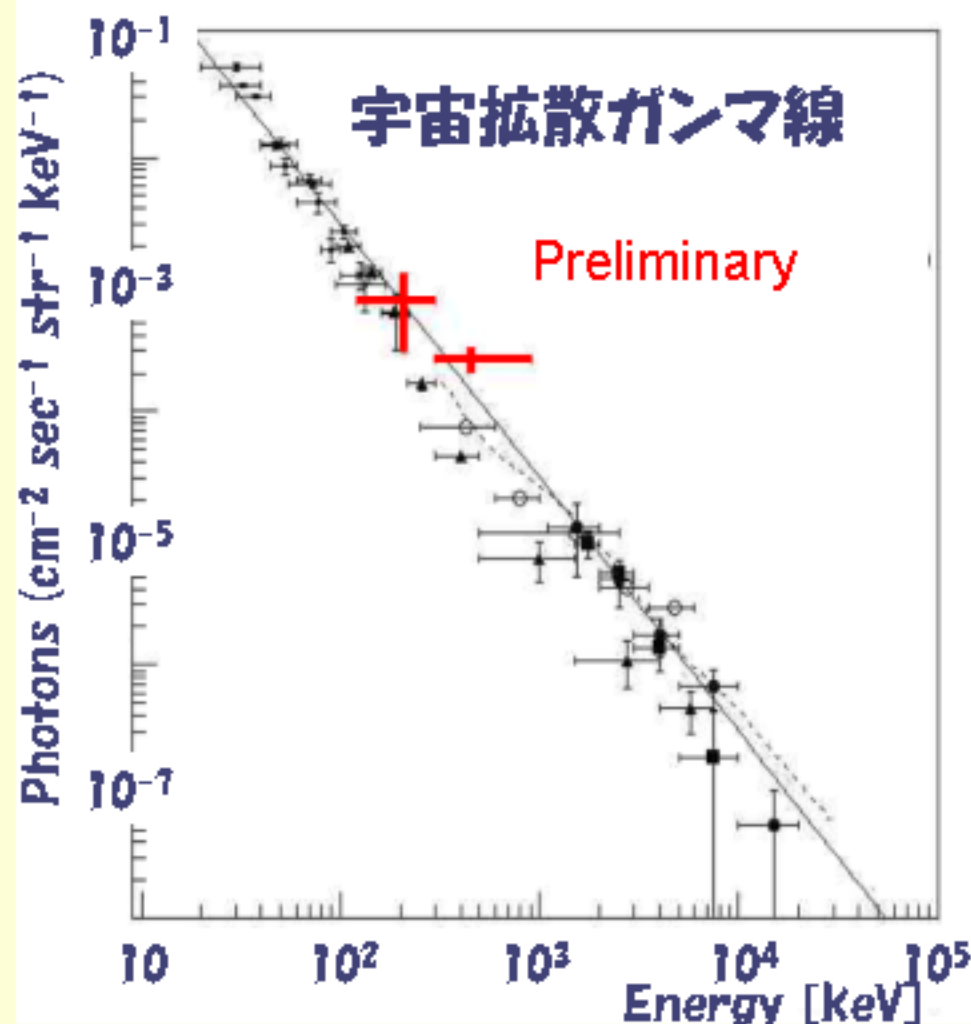
- 100~900 keV
- 4 $\pi$ 方向 ~1000  $\gamma$
- 視野(3str)内 ~450  $\gamma$

エネルギースペクトル →

- 32~35 km level flight
- 3.5 h (live ~3h)
- 視野3str内のevent
- ~200 photons



# 宇宙拡散・大気ガンマ線フラックス



Diffuse Cosmic/Atmosphericとも、過去の観測と矛盾しない

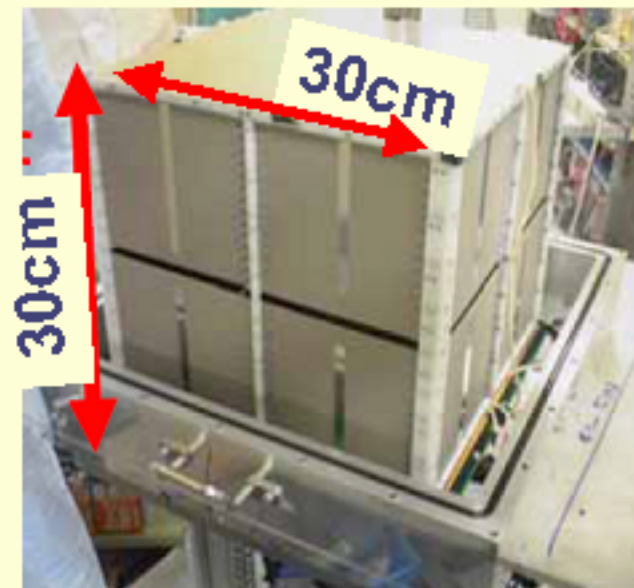
# まとめ

- 電子飛跡検出型コンプトンカメラを開発
- 入射ガンマ線の到来方向とエネルギーを一意に決定できることを証明
- 2006年9月1日 三陸気球センターから放球
- 7時間のフライト、高度32～35kmで4時間の水平飛行
- 上空において、検出器は安定に動作
- 電子飛跡検出型コンプトンカメラの気球高度での観測は世界初
- 全フライトで約1000個のガンマ線を観測
- 水平飛行中、視野内に200個のガンマ線を観測
- 測定結果から宇宙拡散・大気ガンマ線それぞれのフラックスを得ることに成功
- 広視野かつ高いバックグラウンド除去能力を気球高度で実証



# 30cm角 $\gamma$ 線カメラ開発

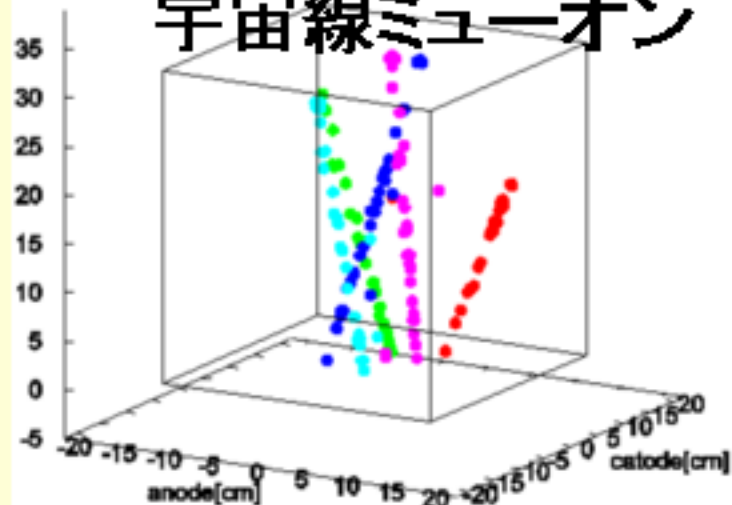
30cm角ガスTPC



30cm角GSOシンチレーションカメラ



宇宙線ミュオン



省電力化

- TPC用CMOS LSI (KEKと共同開発)
- PMT用CMOS LSI IDE社VATAチップ試験中



**おわり**

