



ガス飛跡検出器を用いたコンプトンカメラによるガンマ線観測気球実験

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, 野中 直樹*, 水田 栄一*
京大理 宇宙線研究室, *ISAS/JAXA

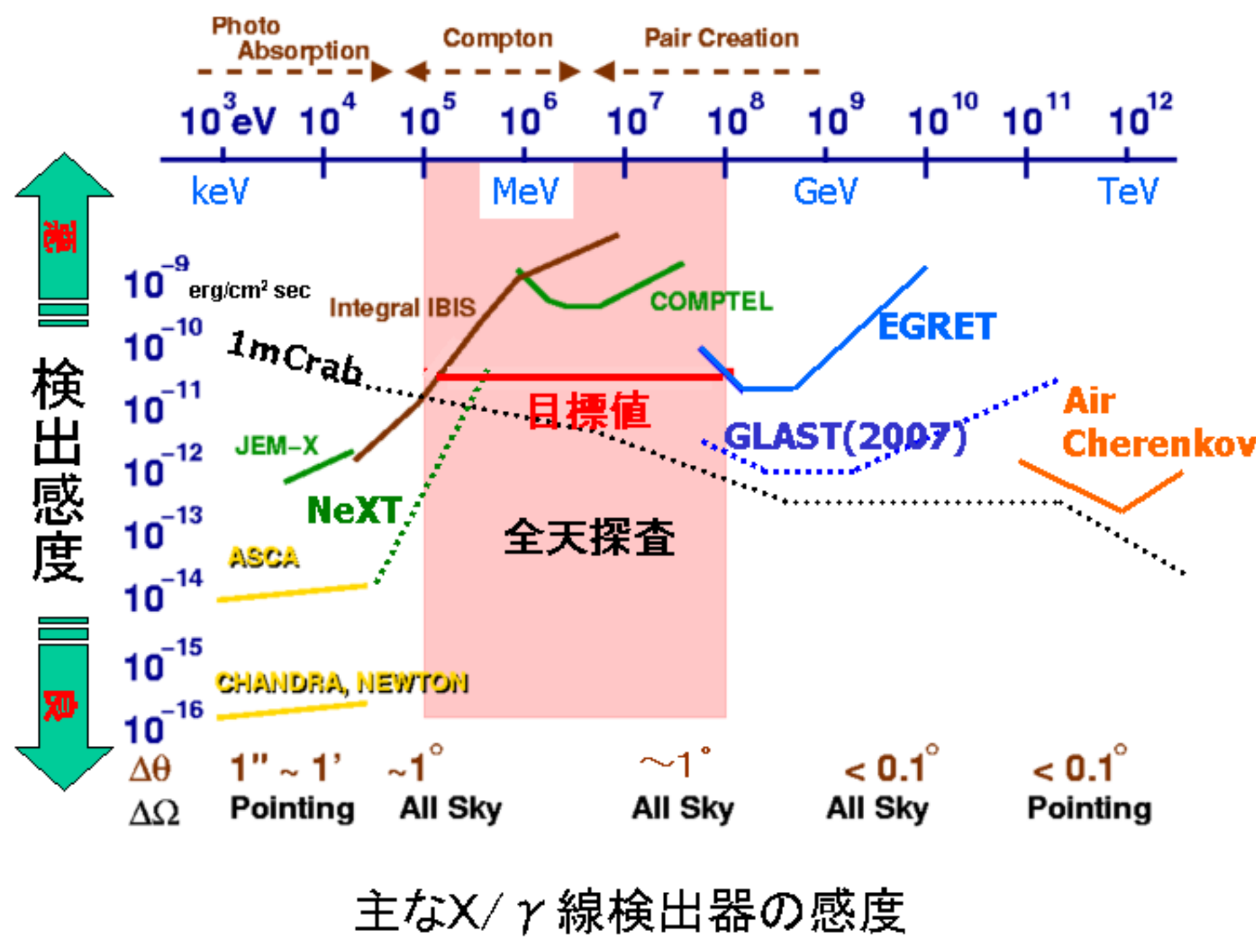


1. Observation in MeV γ -ray Astronomy

これまでの観測

- COMPTEL (CGRO)
Compton Imagingを用いた検出器
数十個の天体を検出
- IBIS, SPI (INTEGRAL)
Coded Aperture Imagingを使用
MeV付近での感度は
COMPTELとあまり変わらない

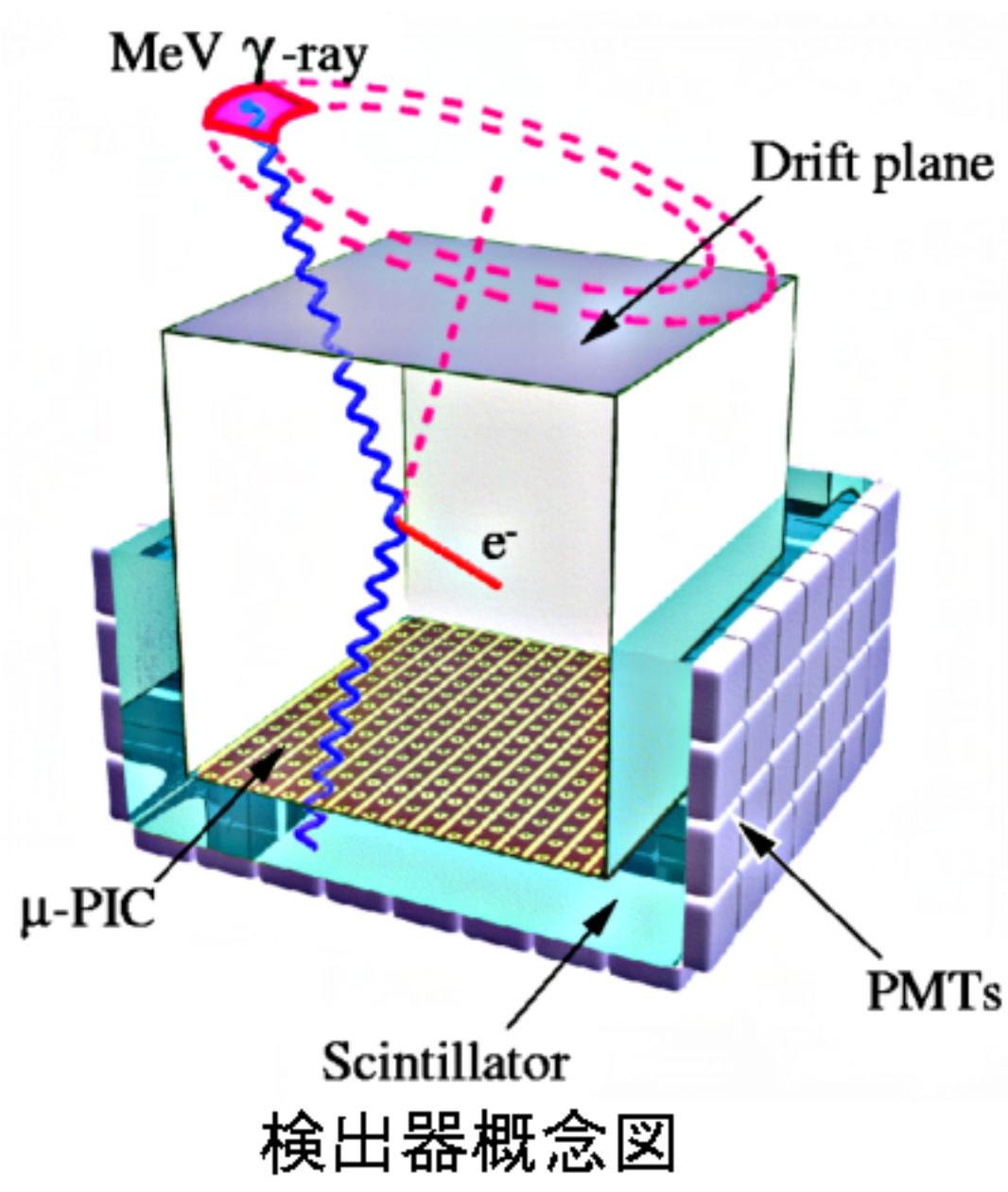
1 γ 毎に到来方向を得られる方法ではない
Backgroundに弱い



主なX/ γ 線検出器の感度

2. Advanced Compton Imaging

Advanced Compton Imaging

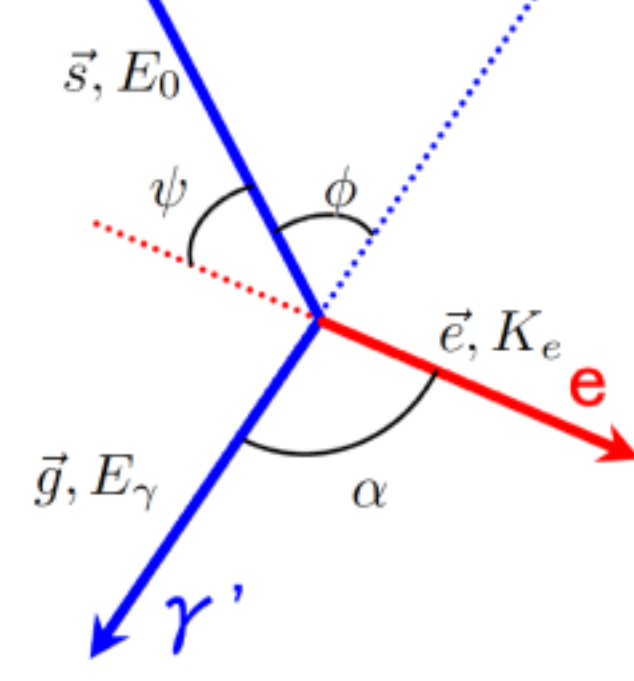


散乱体として荷電粒子の飛跡を追えるmicro-TPCを用いると、反跳電子のエネルギーと共に飛跡を得ることができる為、周囲のシンチレータの情報と合わせることで、eventごとにコンプトン散乱を再現することができ、元の γ 線のエネルギーと到来方向とを一意に求められる。

$$E_0 = E_\gamma + K_e$$

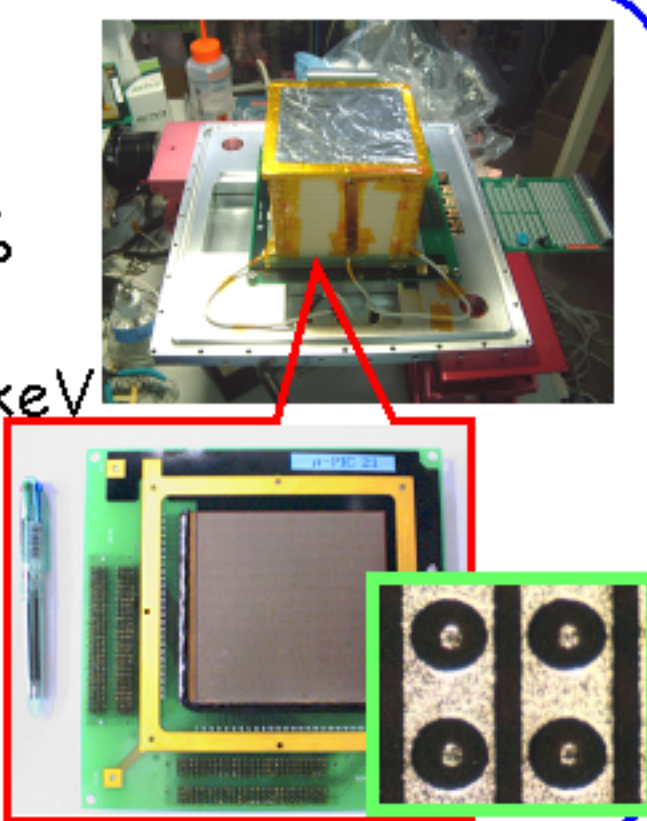
$$\vec{s} = \left(\cos \phi - \frac{\sin \phi}{\tan \alpha} \right) \vec{g} + \frac{\sin \phi}{\sin \alpha} \vec{e}$$

- E_0 : 元の γ 線のエネルギー
- \vec{s} : γ 線の到来方向
- \vec{g} : 散乱 γ 線の方向ベクトル
- \vec{e} : 反跳電子の方向ベクトル
- ϕ : γ 線の散乱角
- α : \vec{g} と \vec{e} の離角



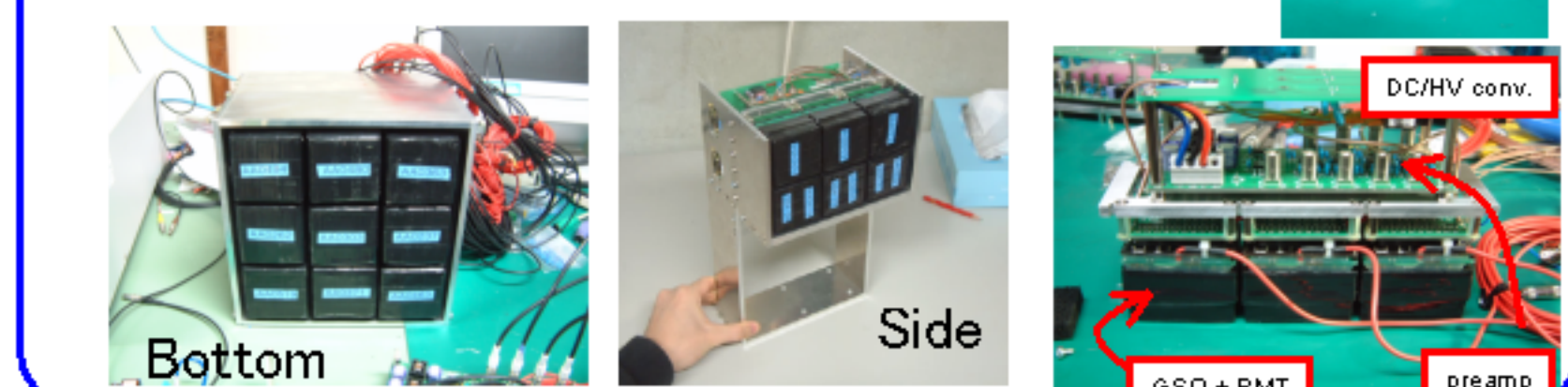
Tracker (μ -TPC)

- $10 \times 10 \times 15 \text{ cm}^3$
- gas: Xe 80% + Ar 18% + C_2H_6 2%
1 atm, sealed, 3.97 g/cm³
- energy resolution: $\sim 45\%$ @ 22keV
- position resolution: $\sim 400 \mu\text{m}$
- gas gain: ~ 35000
- Drift velocity: $\sim 2.5 \text{ cm}/\mu\text{sec}$
- dE/dX (MIP): 5.3 keV/cm



Absorber (GSO:Ce scinti.)

- pixel size: $6 \times 6 \times 13 \text{ mm}^3$
- Bottom: 3×3 PMTs
- Side: 3×2 PMTs \times 4側面
- energy resolution: $\sim 11\%$ @ 662keV



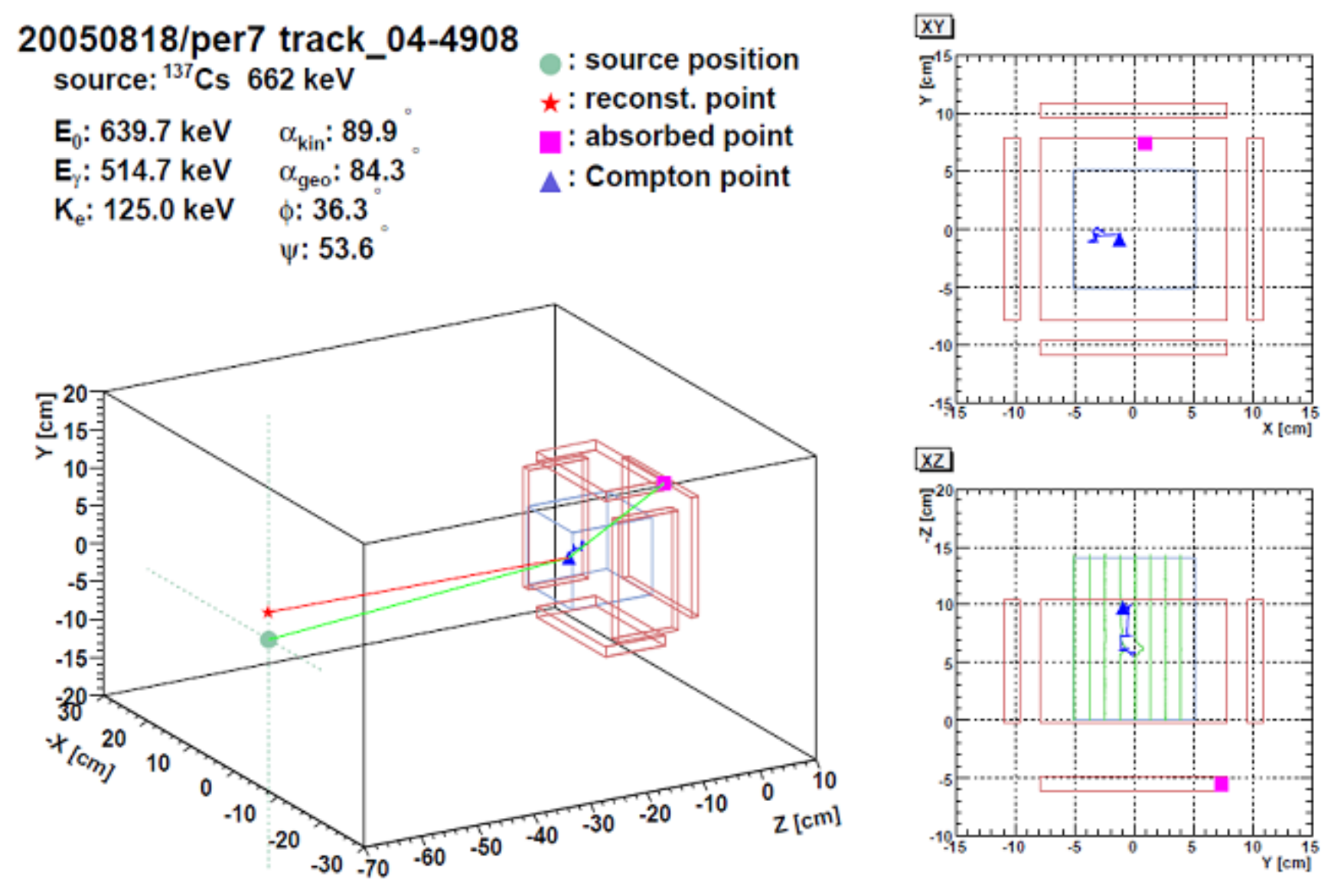
α 角によるevent選択

電子の反跳方向と γ 線の散乱方向の間の角 α は、幾何学的に測定する(α_{geo})だけでなく、コンプトン散乱の運動学を用いてエネルギー情報からも計算できる(α_{kin})。

$$\cos \alpha_{\text{geo}} = \vec{g} \cdot \vec{e}$$

$$\cos \alpha_{\text{kin}} = \left(1 - \frac{m_e c^2}{E_\gamma} \right) \sqrt{\frac{K_e}{K_e + 2m_e c^2}}$$

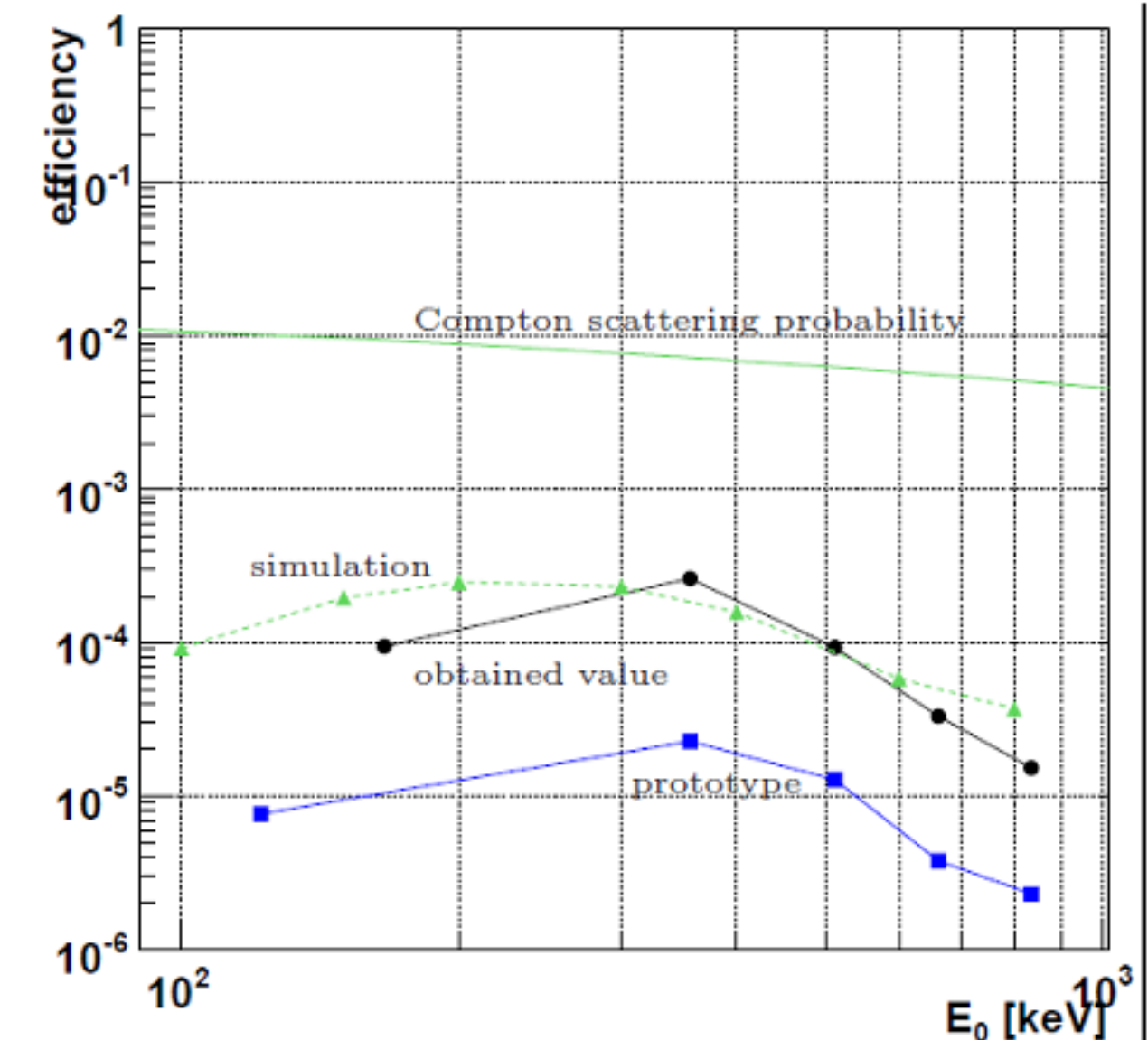
よって、この2つの α を比較することで、コンプトン散乱のeventのみを選び出すことができる。



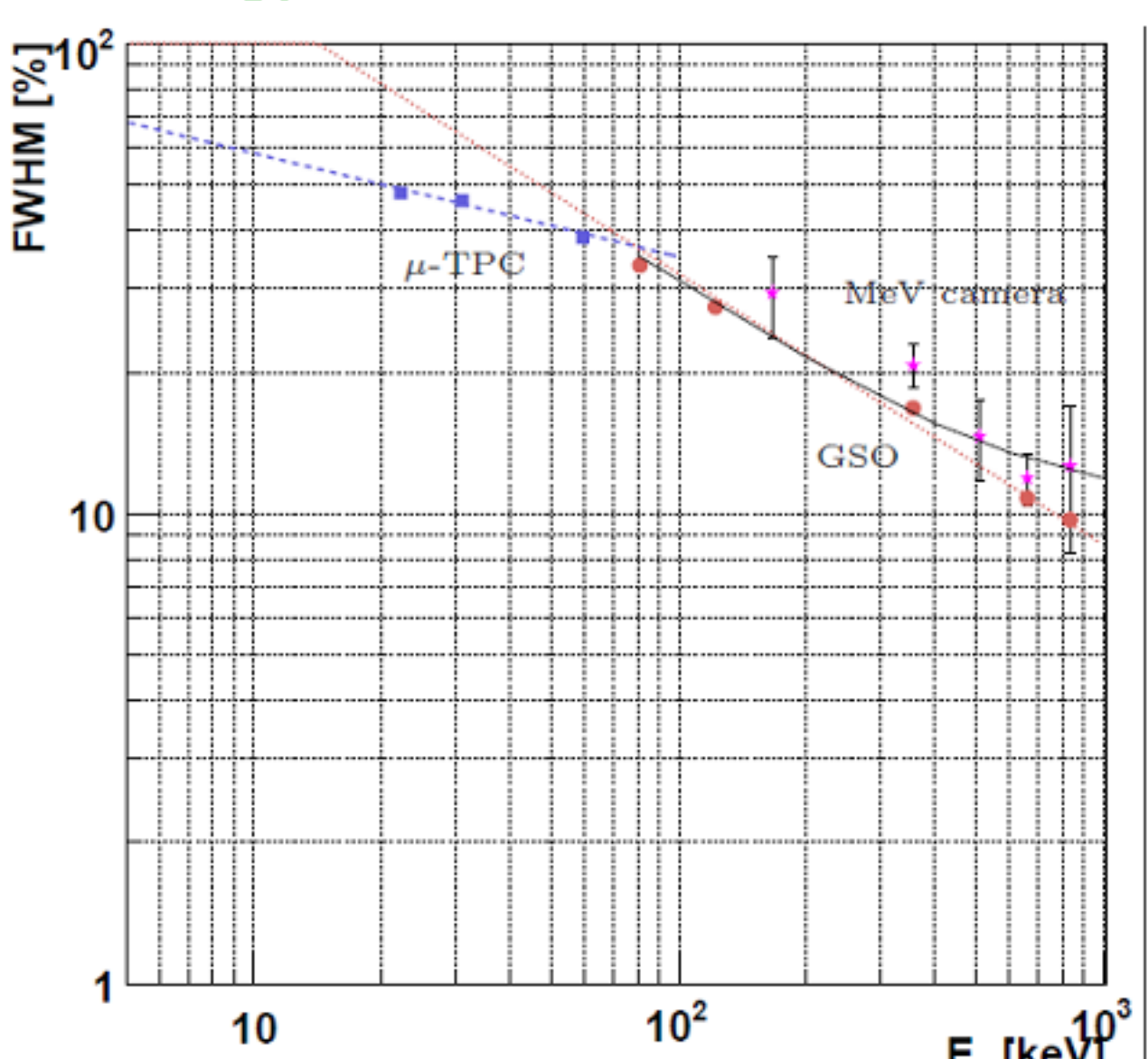
Typical Compton event

3. Performance of Our Detector

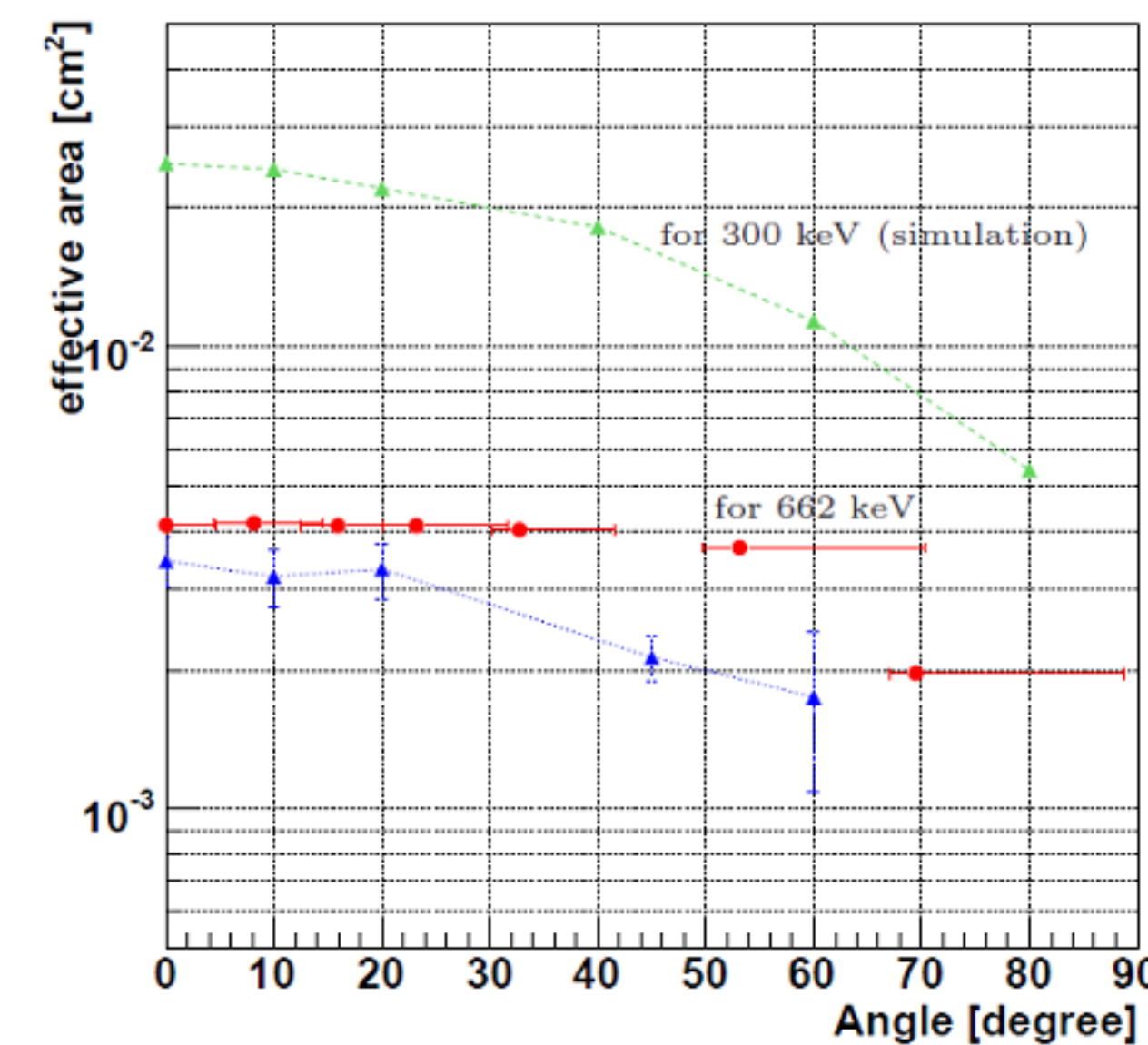
Detection efficiency



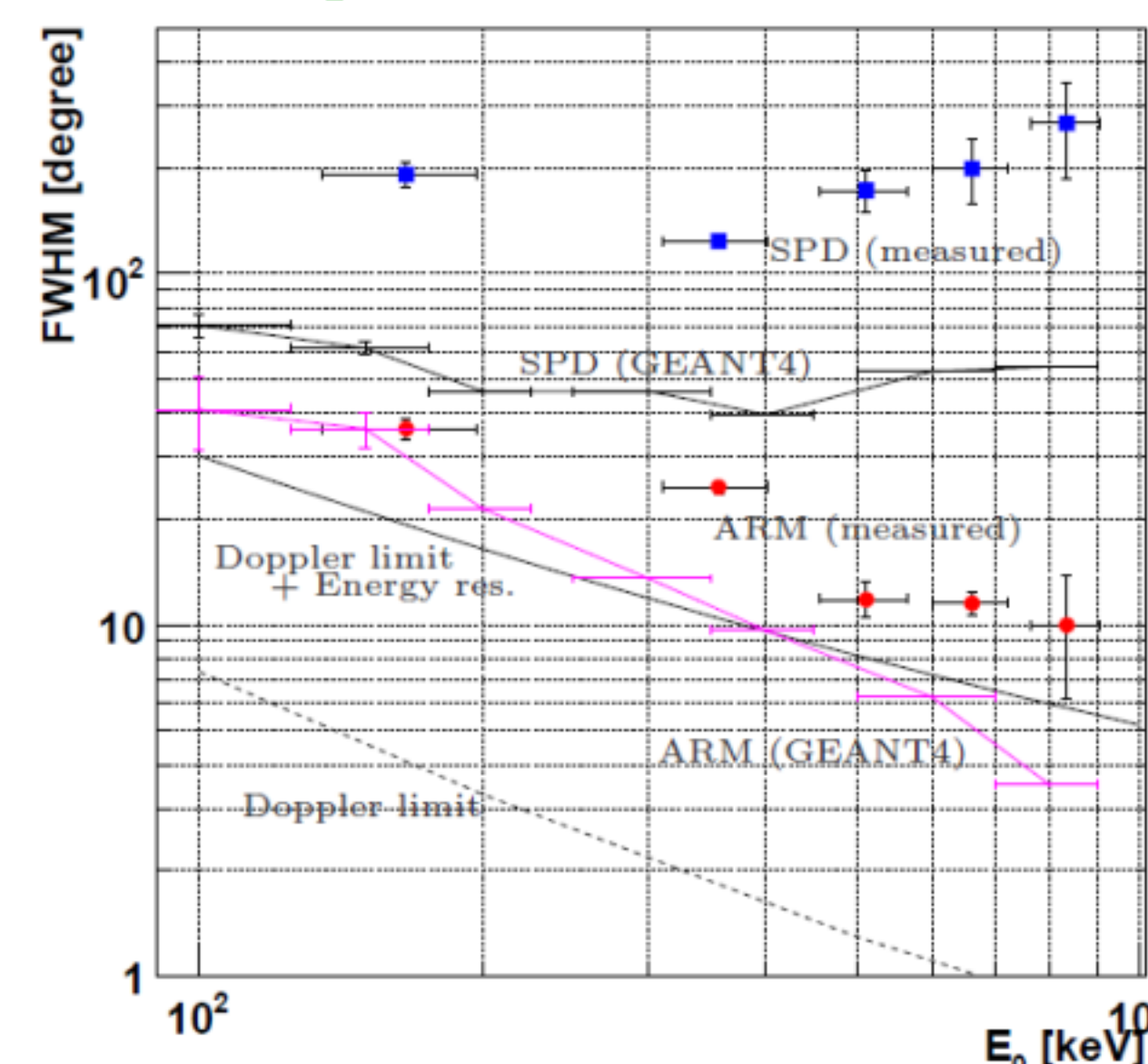
Energy resolution



FOV



Angular resolution



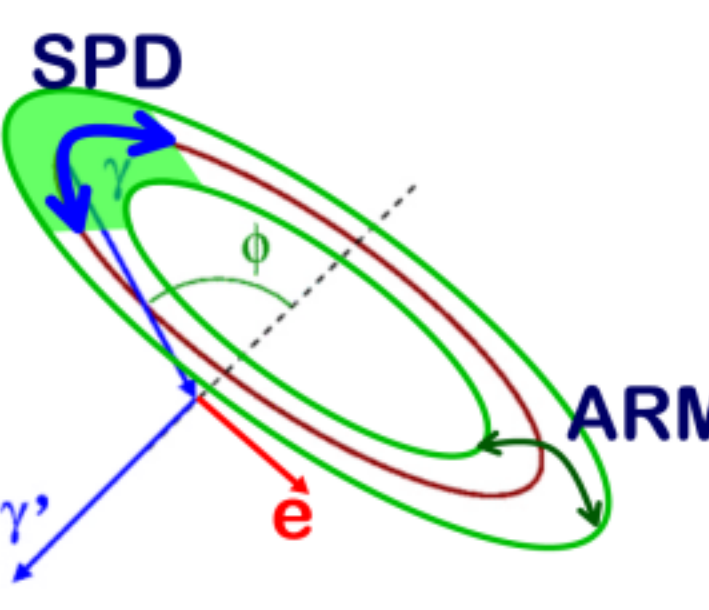
Detection efficiency : 2.5×10^{-4} @ 356 keV

FOV : $\sim 3 \text{ str}$

Energy resolution : $\sim 12\%$ @ 662 keV

ARM = 散乱角決定精度 (Angular Resolution Measure) : $\sim 25^\circ$ @ 356 keV

SPD = 散乱平面決定精度 (Scatter Plane Deviation) : $\sim 125^\circ$ @ 356 keV



4. 1st Flight of SMILE

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

(10cm)³のMeV γ 線カメラ @三陸 (2006/09/01)

- 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
 ~ 200 フォトン @ 35km, 3時間

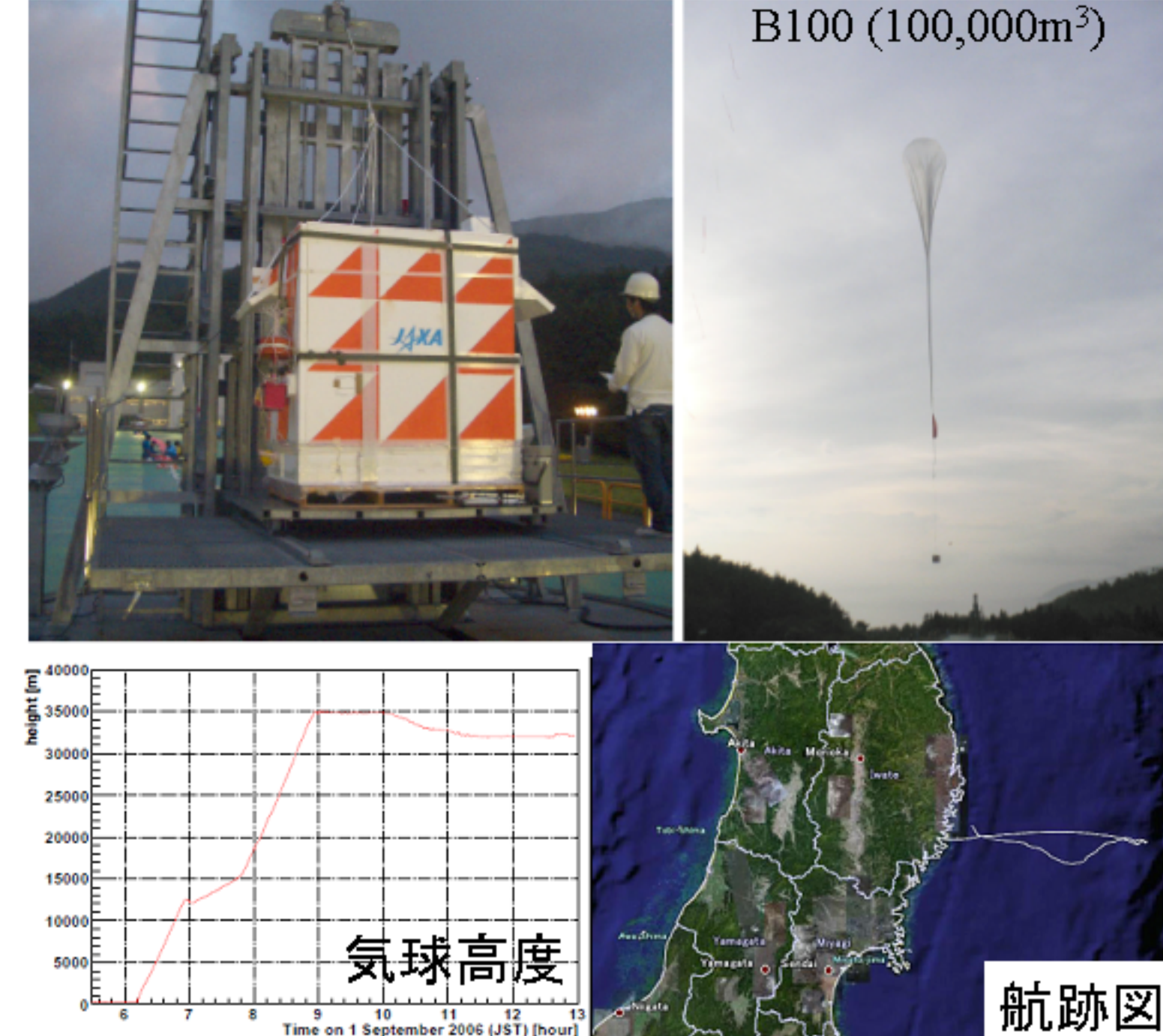
(30cm)³ カメラ @日本 6時間 (2009?)

かに星雲, 白鳥座 X-1の観測

(40cm)³ カメラ

スーパープレッシャー気球 ~ 10 日間

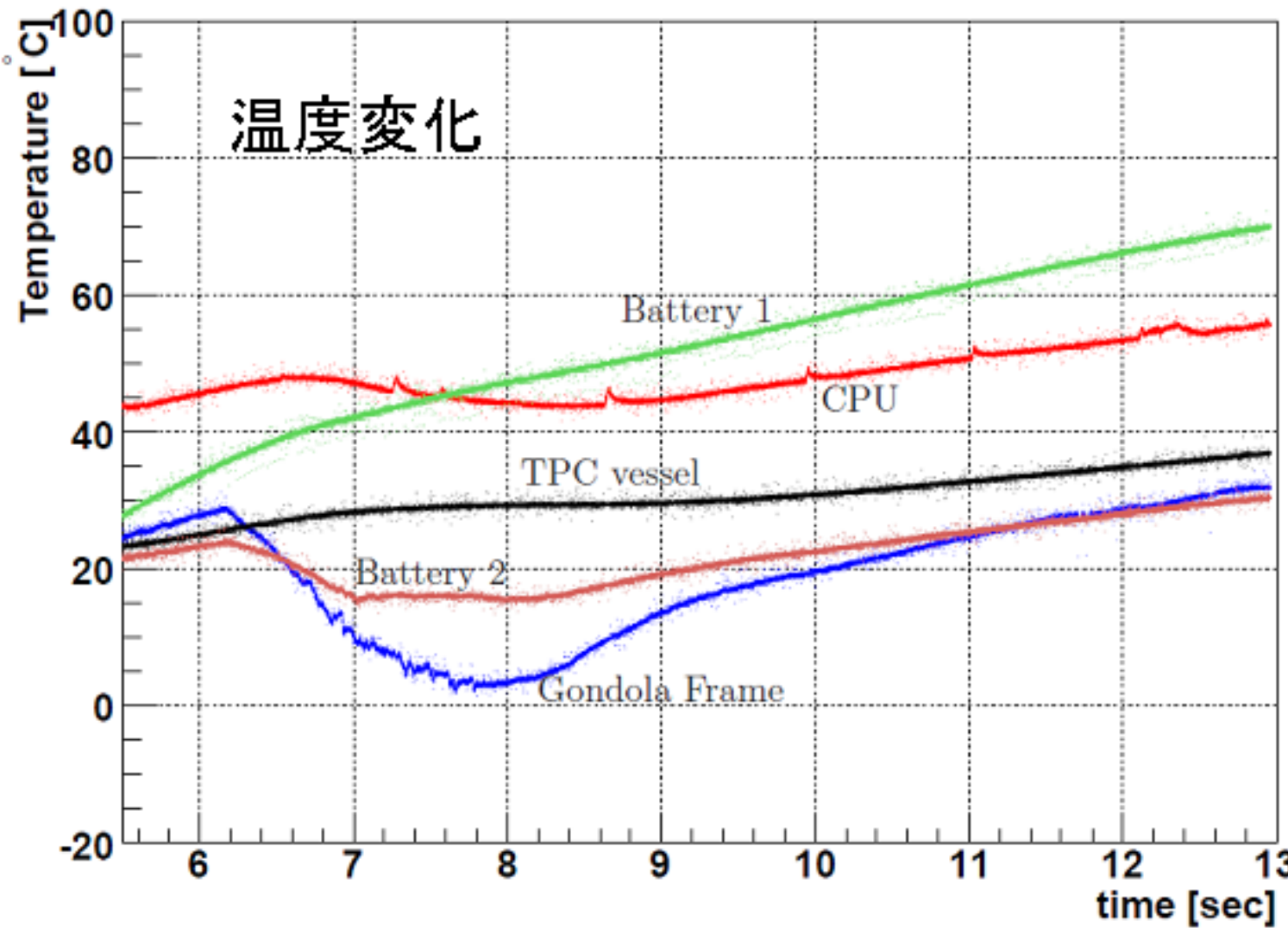
(50cm)³ カメラ 衛星に搭載し全天サーベイ



1st flight of SMILE

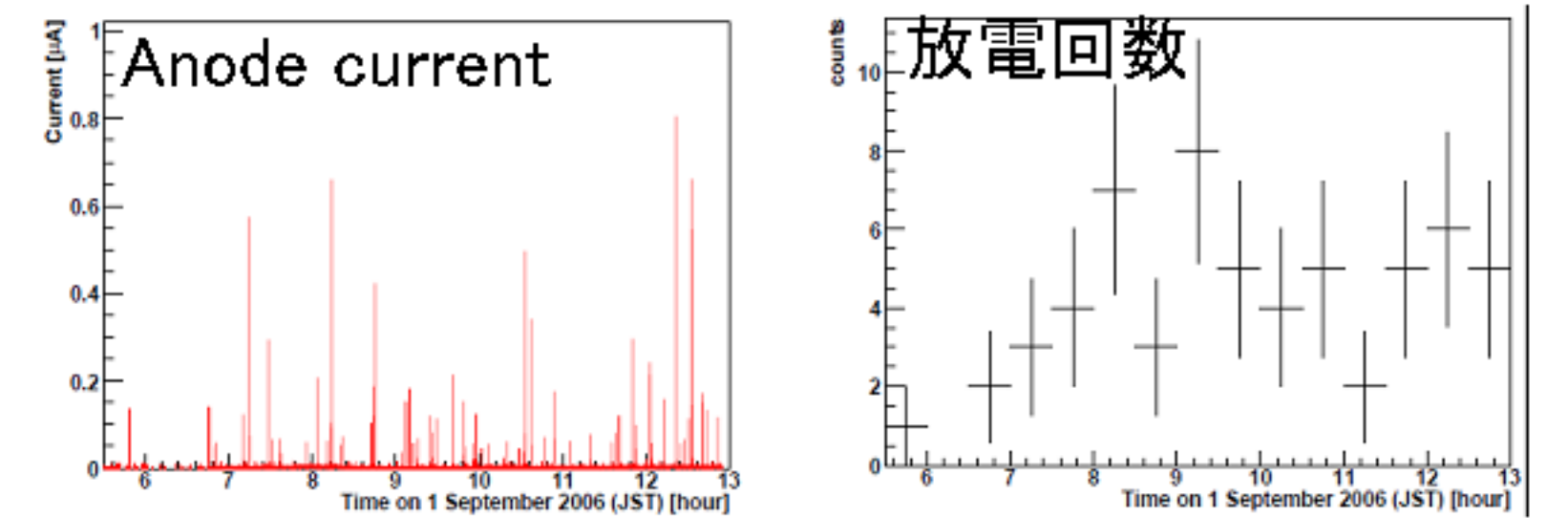
三陸大気球観測所 2006年9月1日

- 05:26 PI電源 ON (Compton camera mode)
- 06:11 放球
- 08:56 水平飛行開始 (@35km)
- 12:06 TPC modeに切り替え
- 12:34 Compton camera modeに切り替え
- 12:59 PI電源 OFF
- 13:20 切り離し
- 14:32 釜石沖にて回収



Status of μ -TPC

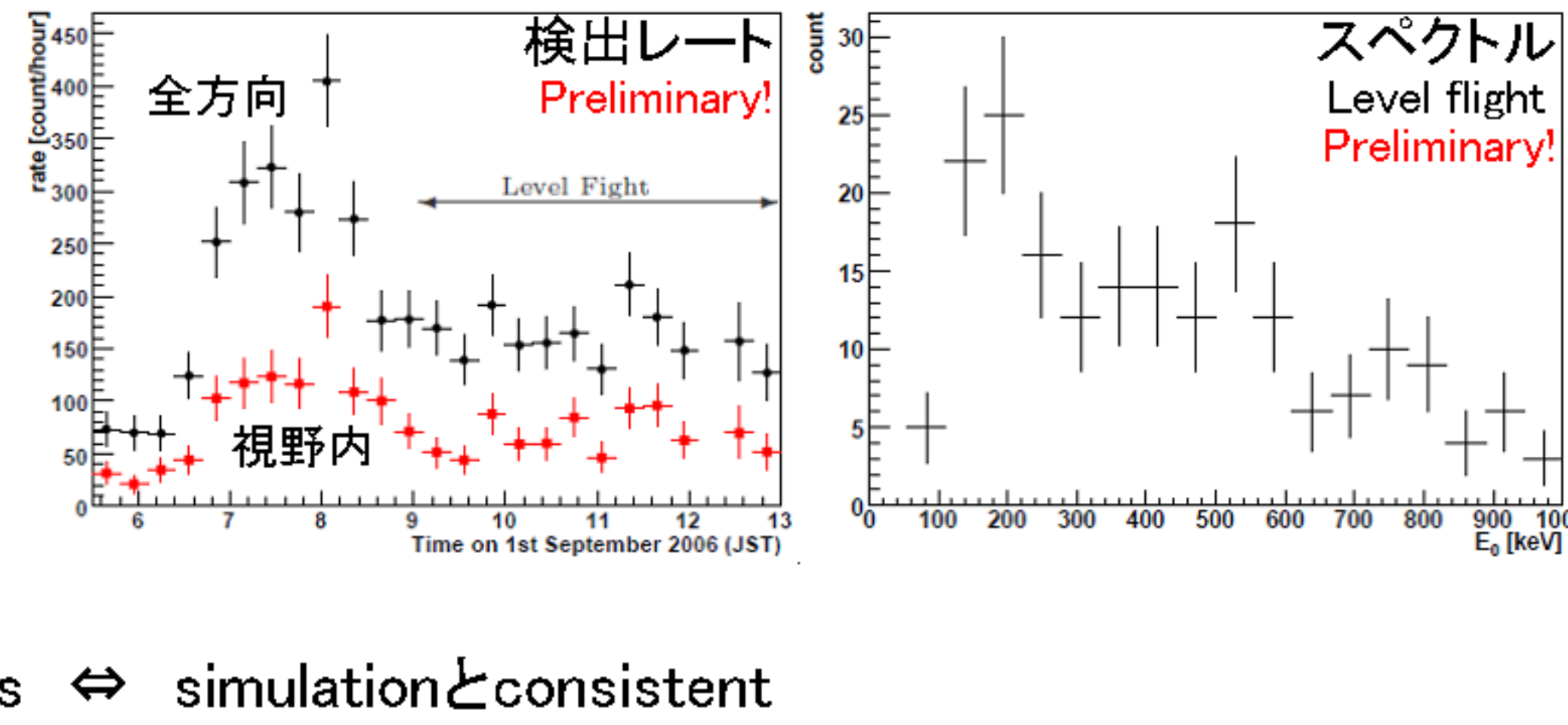
- 気球高度と共に放電レートが増加 \Rightarrow Energy depositの大きいHeやClによる
- 放電以外の異常電流は見られない \Rightarrow TPCは $32 \sim 35 \text{ km}$ の上空で安定に動作



5. Results

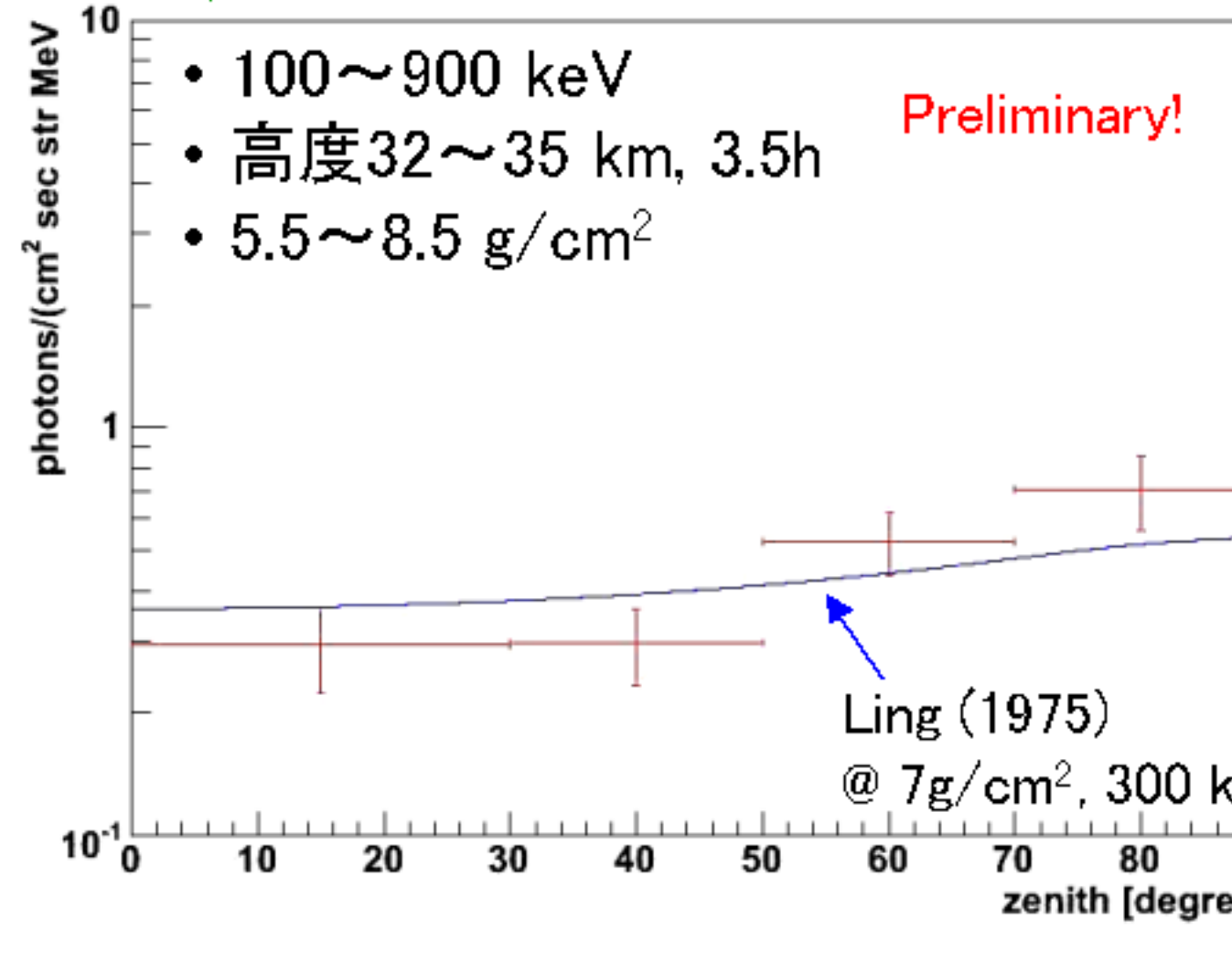
γ 線検出レート & スペクトル

- Energy range : 100 ~ 900 keV
- 検出photon数
全方向: ~ 1000 photons
視野内: ~ 450 photons
- Level Flight
気球高度: 32 ~ 35 km
観測時間: 3.5 h (live 3.0h)
検出光子数: ~ 200 photons \Leftrightarrow simulationとconsistent

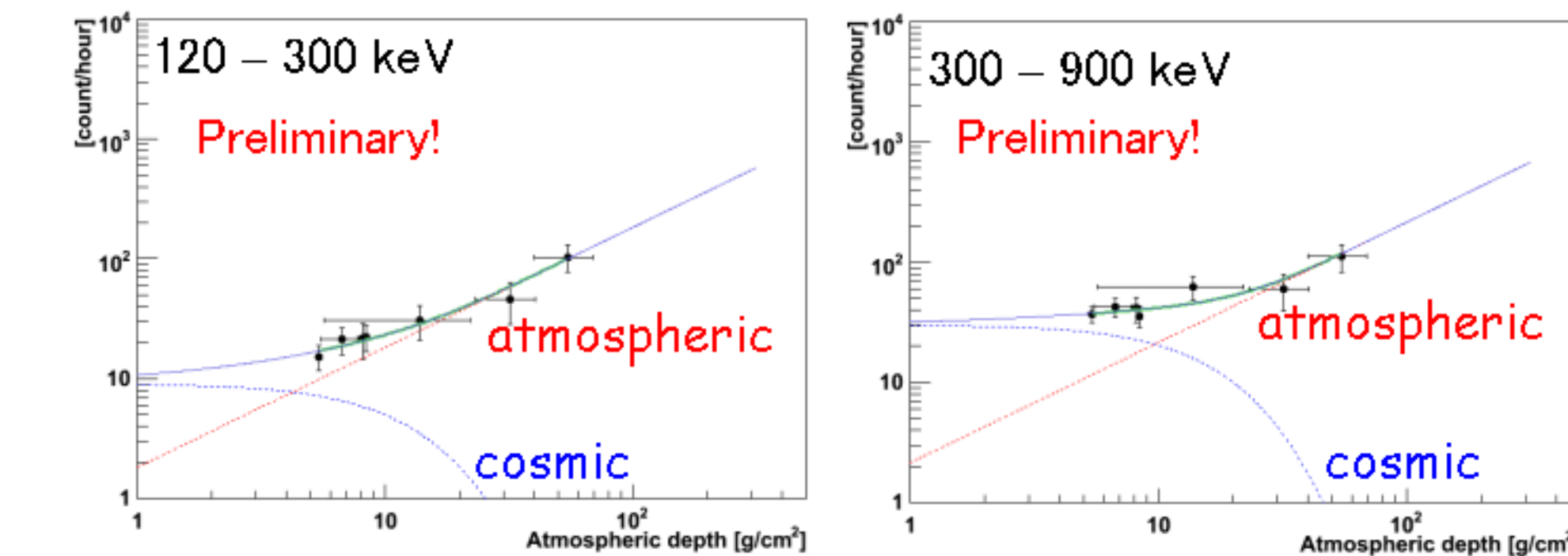


γ 線フラックス天頂角依存性

- 100~900 keV
- 高度32~35 km, 3.5h
- 5.5~8.5 g/cm²



Growth curve



\uparrow 大気成分, 宇宙成分それぞれを

$$F_{\text{atmos}} = a \times z$$

$$F_{\text{cosmic}} = b \times (1+p) \times \exp(-z/\tau)$$

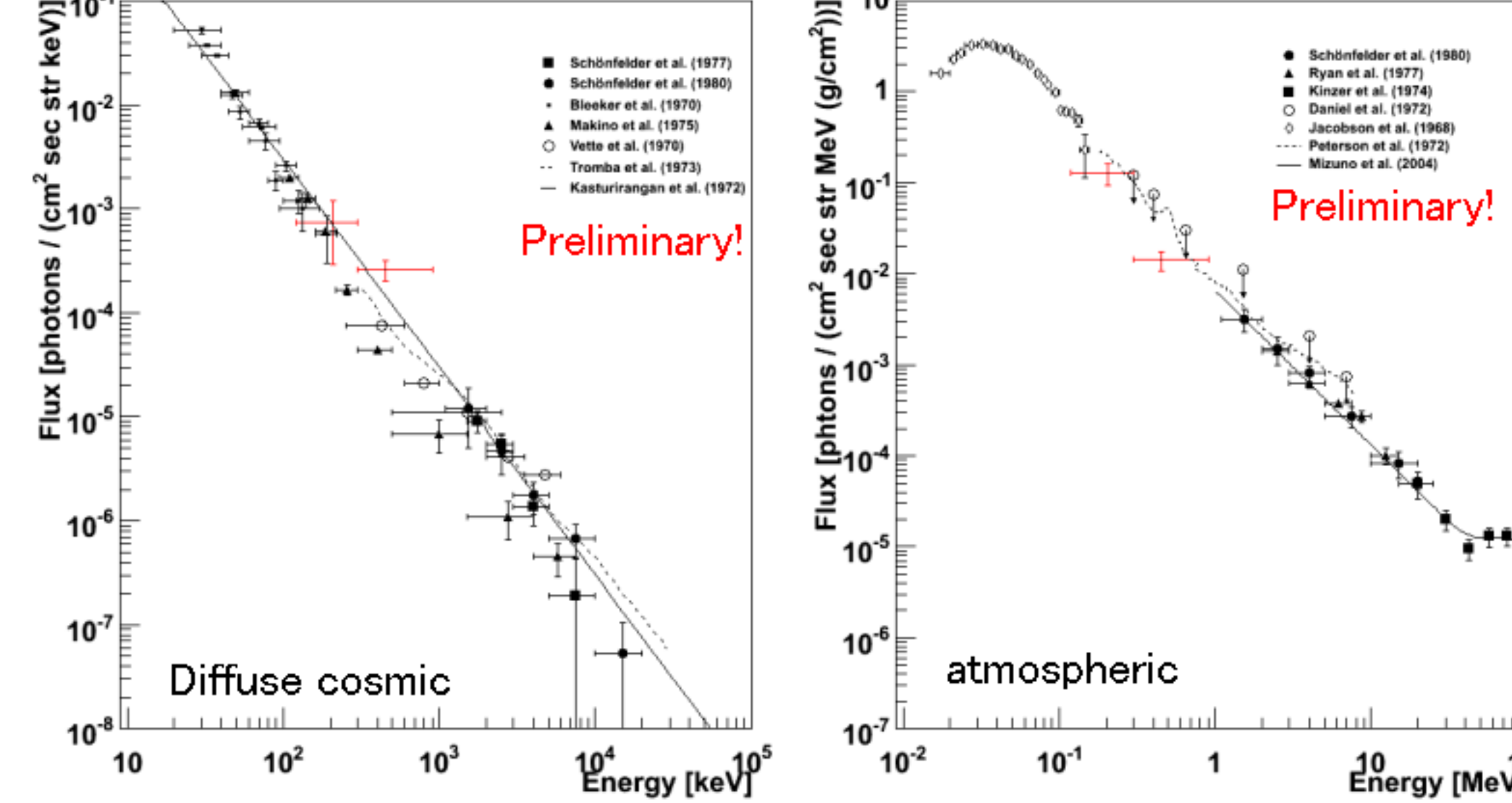
a, b : free parameter

p : 大気散乱補正項

τ : mean free path

として $F_{\text{atmos}} + F_{\text{cosmic}}$ でfitting

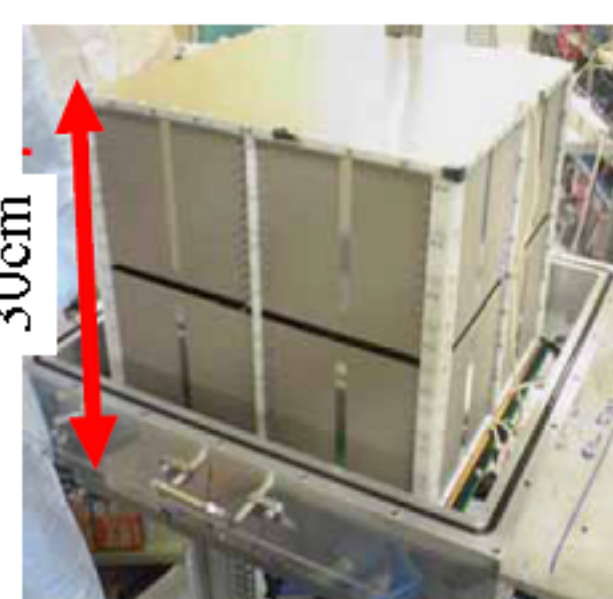
宇宙拡散・大気 γ 線フラックス



\leftarrow 今回の実験で得られたフラックス(赤)と過去の実験の比較 (error barは統計エラーのみ)

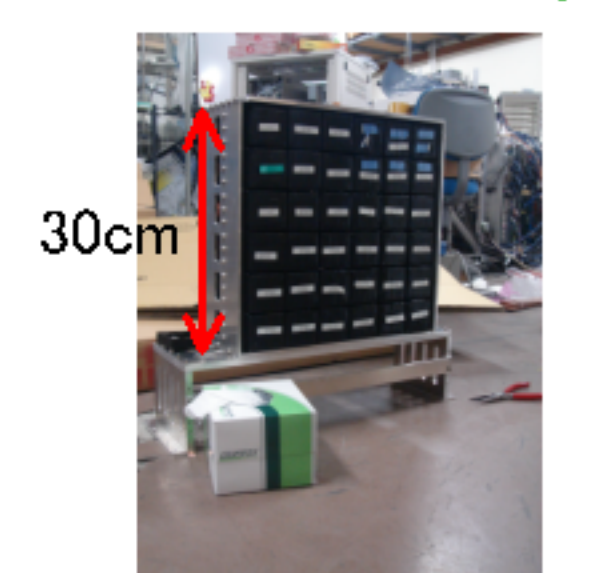
5. Present Work for Next Balloon

30cm cube μ -TPC



- 30cm cube TPC
宇宙線 μ の飛跡を検出
- 30cm角GSO array
callほぼ終了, MeV cameraに組み込みへ
- 30cm prototype
 $30 \times 30 \times 15 \text{ cm}^3$ TPCと
 $30 \times 30 \text{ cm}^2$ NaI(Tl) アンダーカメラで
イメージ取得に成功

GSO Array



30cm MeV camera prototype

