



# 広視野ガンマ線カメラによるMeV領域 ガンマ線観測（気球実験）

上野 一樹, 谷森 達彦, 秀利, 身内 賢太郎, 土屋 兼一, 株木 重人, 岡田 葉子  
高田 淳史, 西村 広展, 服部 香里, 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 $\gamma$ -ray Astronomy

### これまでの観測

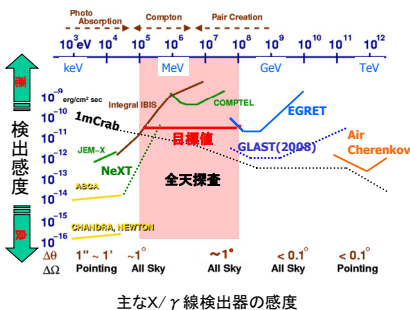
#### COMPTON (CGRO)

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  
COMPTONとあまり変わらない

1  $\gamma$  毎に到来方向を得られる方法ではない  
Backgroundに弱い



主なX/ $\gamma$ 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。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 $\gamma$ 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 $\gamma$ 線のエネルギー

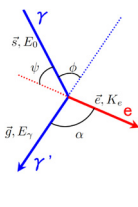
$\vec{s}$ :  $\gamma$ 線の到来方向

$\vec{g}$ : 散乱 $\gamma$ 線の方向ベクトル

$\vec{e}$ : 反跳電子の方向ベクトル

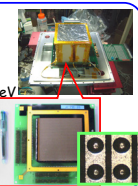
$\phi$ :  $\gamma$ 線の散乱角

$\alpha$ :  $\vec{g}$ と $\vec{e}$ の離角



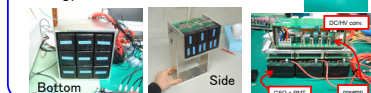
### Tracker ( $\mu$ -TPC)

- 10×10×15 cm<sup>3</sup>,
- gas: Xe 80% + Ar 18% + C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 2%
- 1 atm, sealed, 3.97 g/cm<sup>3</sup>
- energy resolution: ~45% @ 22keV
- position resolution: ~400  $\mu$ m
- gas gain: ~35000
- Drift velocity: ~2.5 cm/ $\mu$ sec
- dE/dX (MIP): 5.3 keV/cm



### Absorber (GSO:Ce scinti.)

- pixel size: 6×6×13 mm<sup>3</sup>
- Bottom: 3×3 PMTs
- Side: 3×2 PMTs × 4側面
- energy resolution: ~11% @ 662keV



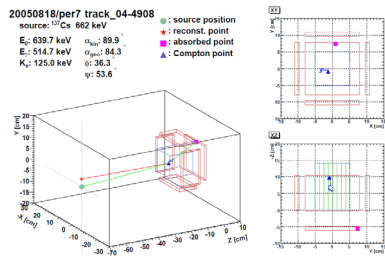
### $\alpha$ 角によるevent選択

電子の反跳方向と $\gamma$ 線の散乱方向の間の角 $\alpha$ は、幾何学的に測定する( $\alpha_{\text{geo}}$ )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( $\alpha_{\text{kin}}$ )。

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

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

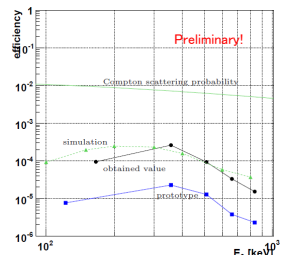
よって、この2つの $\alpha$ を比較することで、コンプトン散乱のeventのみを選び出すことができる。



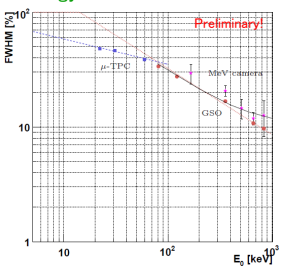
Typical Compton event

## 3. Performance of Our Detector

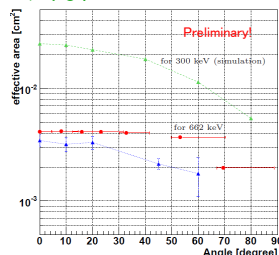
### Detection efficiency



### Energy resolution



### FOV



Detection efficiency :  
2.5 × 10<sup>-4</sup> @ 356 keV

FOV :  
~3 str

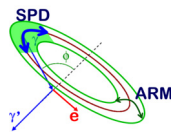
Energy resolution :  
~12% @ 662 keV

ARM = 散乱角決定精度  
(Angular Resolution Measure) :

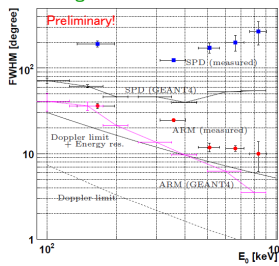
~25° @ 356 keV

SPD = 散乱平面決定精度  
(Scatter Plane Deviation) :

~125° @ 356keV



### Angular resolution



## 4. 1<sup>st</sup> Flight of SMILE

### 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 (2006/09/01)

- 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

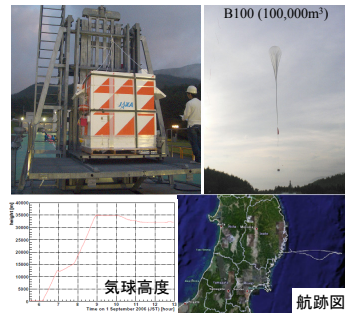
(30cm)<sup>3</sup> カメラ @日本 6時間 (2009?)

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



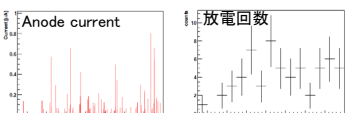
### 1<sup>st</sup> flight of SMILE

三陸大気観測所 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 $\mu$ -TPC

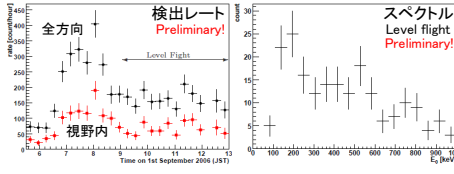
- ◆ 気球高度と共に放電レートが増加  
⇒ Energy depositの大きいHeやClによる
- ◆ 放電以外の異常電流は見られない  
⇒ TPCは32~35 kmの上空で安定に動作



## 5. Results

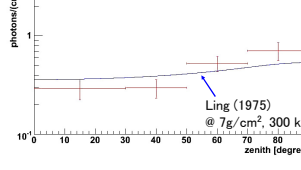
### $\gamma$ 線検出レート & スペクトル

- ◆ 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 ⇔ simulationとconsistent

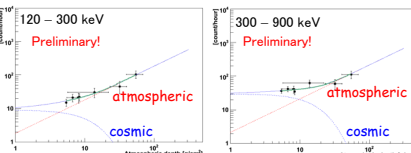


### $\gamma$ 線フラックス天頂角依存性

- ◆ 100~900 keV
- ◆ 高度32~35 km, 3.5h
- ◆ 5.5~8.5 g/cm<sup>2</sup>



### Growth curve



↑ 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

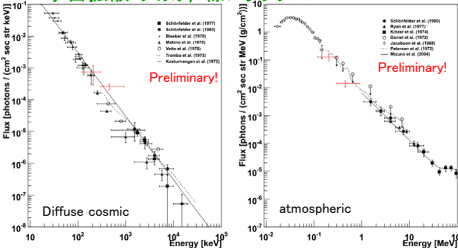
p: 大気散乱補正項

$\tau$ : mean free path

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

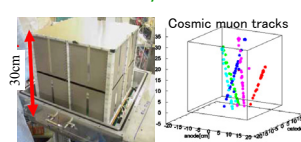
← 今回の実験で得られた  
フラックス(赤)と  
過去の実験の比較  
(error barは統計エラーのみ)

### 宇宙拡散・大気 $\gamma$ 線フラックス



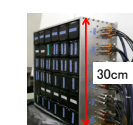
## 6. Present Work for Next Balloon

### 30cm cube $\mu$ -TPC

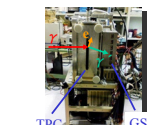


- 30cm cube TPC  
宇宙線 $\mu$ の飛跡を検出
- 30cm角GSO array  
cal終了、MeV cameraに組み込み
- 30cm prototype  
30×30×15cm<sup>3</sup> TPCと30×30cm<sup>2</sup> GSO(Ce)アレイ  
カメラでイメージ取得に成功
- 更なる有効面積拡大のため(30cm)<sup>3</sup>カメラを立ち上げ中

### GSO Array



### 30cm MeV camera prototype



point source ~40 cm from  $\mu$ -TPC

