

ガス飛跡検出器を用いた コンプトンカメラによる MeVガンマ線観測気球実験 (SMILE)

JAXA/ISAS 高田淳史
窪秀利, 谷森達, 身内賢太郎, 西村広展, 上野一樹,
永吉勉, 折戸玲子, 岡田葉子, 服部香里, 黒澤俊介, 井田知宏,
岩城智, 株木重人, 竹田敦, 関谷洋之 (京大理)
野中直樹, 水田栄一 (ISAS/JAXA)

MeVガンマ線天文学からの要求

◆ 原子核合成

超新星残骸：放射性同位体からの放射

銀河面： ^{26}Al ・ ^{60}Fe

電子・陽電子対生成

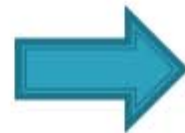


単色光

◆ 粒子加速

ジェット (活動銀河核), ガンマ線バースト:

シンクロトロン+逆コンプトン放射



連続スペクトル

◆ 強い重力場

ブラックホール：降着円盤からの放射, π^0



連続スペクトル
+ 単色光

◆ その他

ガンマ線パルサー, 太陽フレア

- 見つかっているMeV天体は30個程度 \Rightarrow MeV天体を探したい
- バックグラウンドが非常に多く、観測がそれで制限される
ex. 中性子・電子や宇宙線が筐体で作るガンマ線など

次世代のMeVガンマ線望遠鏡に求められるもの

- 広帯域
- 広い視野
- バックグラウンド除去能力

電子飛跡検出型コンプトンカメラ

MeV γ -ray

Drift plane

e^-

μ -PIC

incident γ

Scintillator

PMTs

recoil e

α

scattered γ

➤ **ガスTPC : Tracker**

反跳電子のエネルギーと
飛跡を取得

➤ **シンチレーター : Absorber**

散乱ガンマ線のエネルギー
と吸収場所を取得



光子毎にコンプトン散乱を再構成

- ▶ 1光子 \Rightarrow 到来方向 + エネルギー
- ▶ 広い視野 ($\sim 3\text{str}$)
- ▶ **運動学を用いたbackground除去**

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

g : 散乱方向の単位ベクトル
 e : 反跳方向の単位ベクトル

E_γ : 散乱ガンマ線のエネルギー
 K_e : 反跳電子の運動エネルギー
 $m_e c^2$: 電子の静止質量

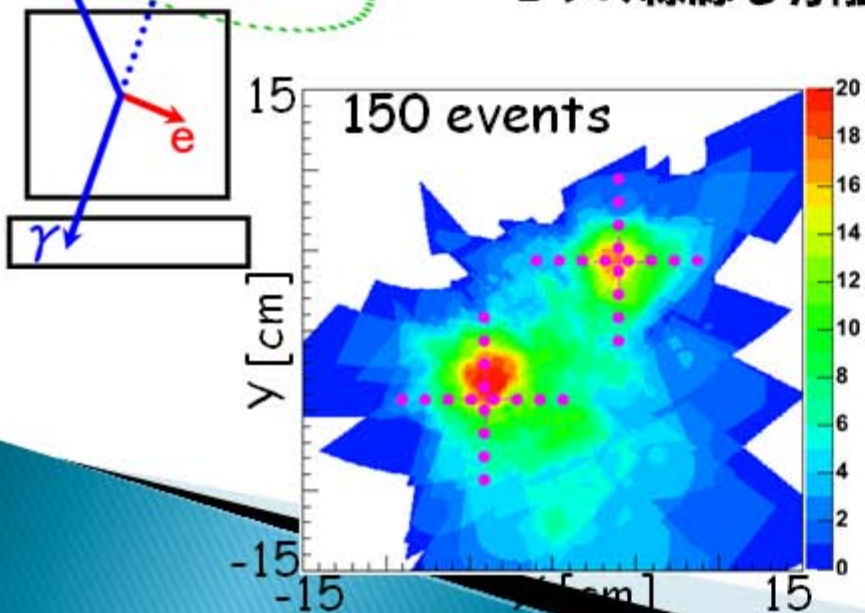
COMPTELのimaging法との比較

電子飛跡検出型Compton法

電子の反跳方向の測定

- ・到来方向を一意に決定
- ・誤差は扇型

少ないeventでも
2つの線源を分離

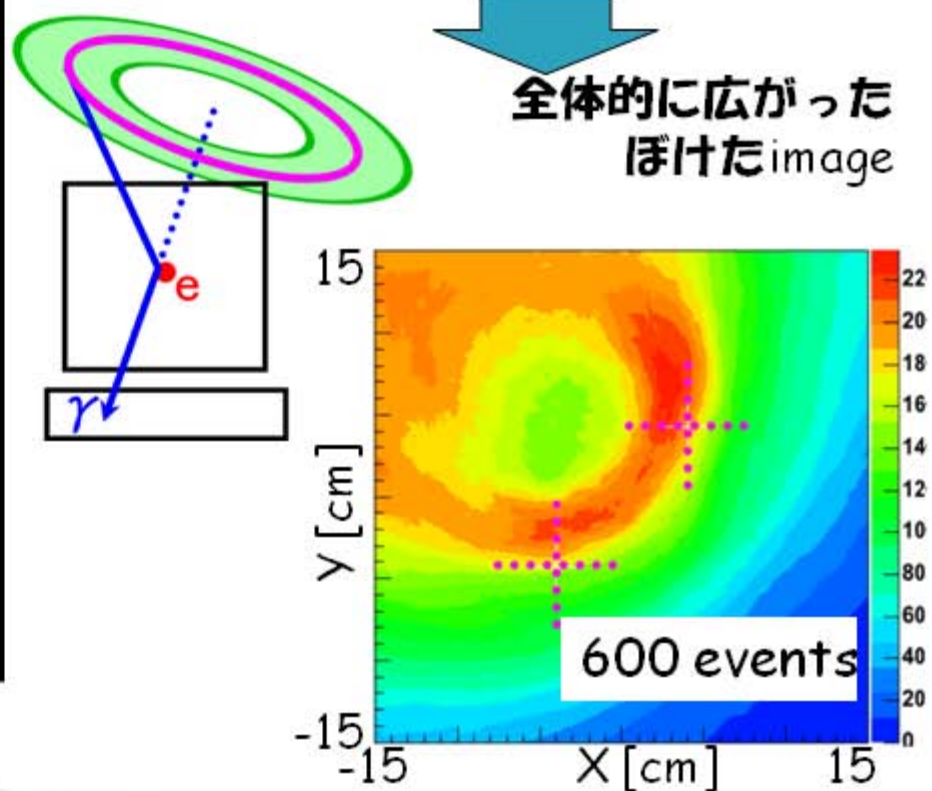


従来のCompton法 (COMPTEL)

電子の反跳方向を破棄

- ・到来方向を円形に制限
- ・誤差はドーナツ型

全体的に広がった
ぼけたimage



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

10cm cube camera @ 三陸 (Sep. 1st 2006)

- 気球高度での動作確認
 - 宇宙拡散ガンマ線・大気ガンマ線の観測
⇒ ガンマ線観測の実証
- ~400 photons during 3 hours
(100 keV~1MeV)

30cm cube camera

- かに星雲 or Cyg X-1の観測 ⇒ イメージングの実証

40cm cube camera Sub-MeV ~ MeV

- 長時間観測による天体観測
- 対生成モードの実証

50cm cube camera

- 衛星に搭載しての全天観測

SMILE-I Gondola

プラスチックシン

チ

TPC

GSO:Ce

フリアン

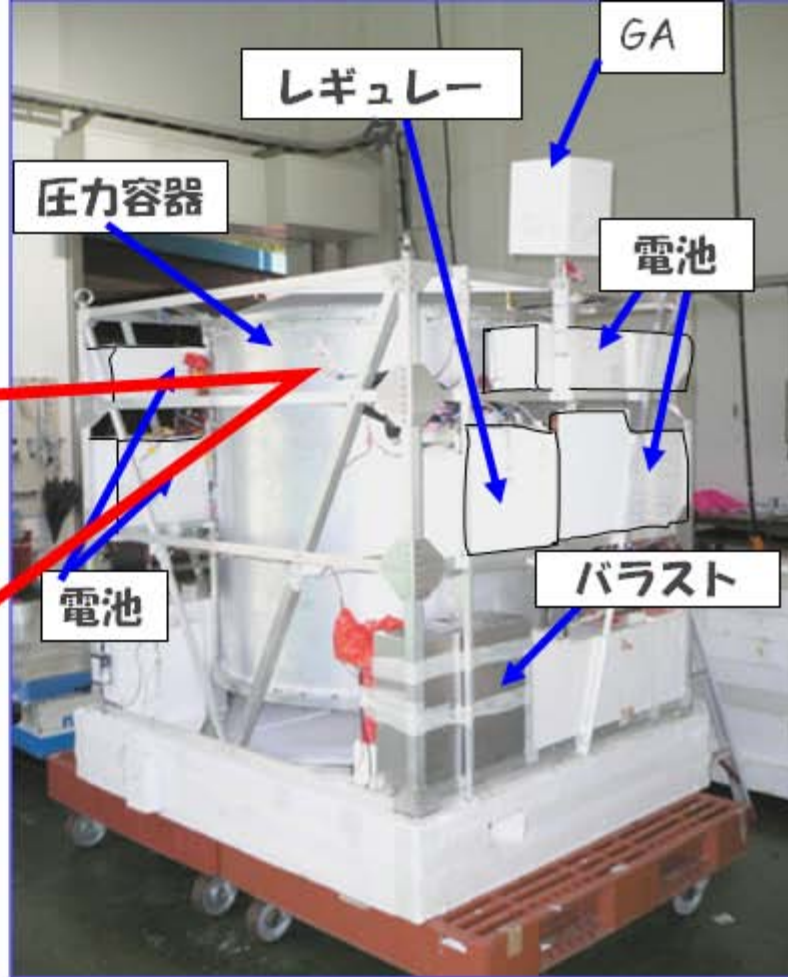
NIM module

- Shaper
- DAC

VME

- CPU
- ADC
- telemetry
- scaler

FPGAエンコーダ



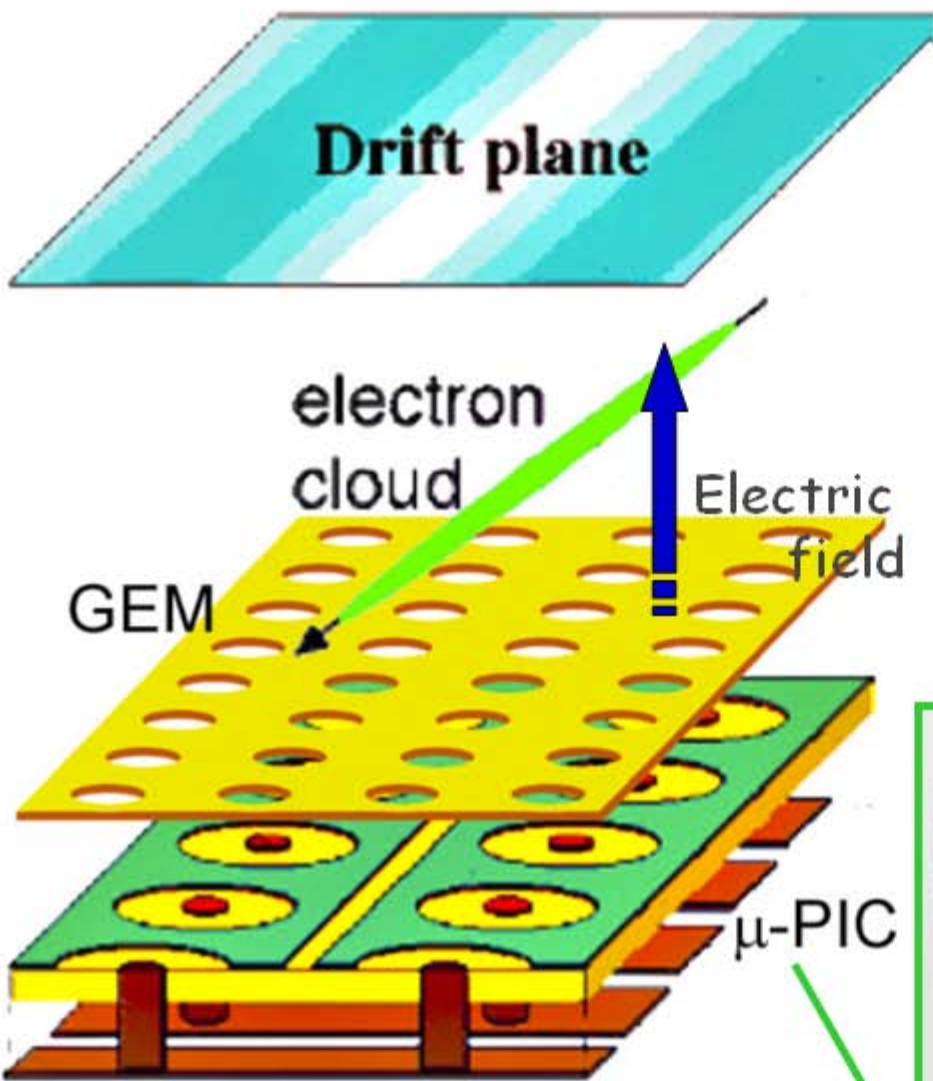
Size : 1.45×1.2×1.55m³

Weight : 397 kg

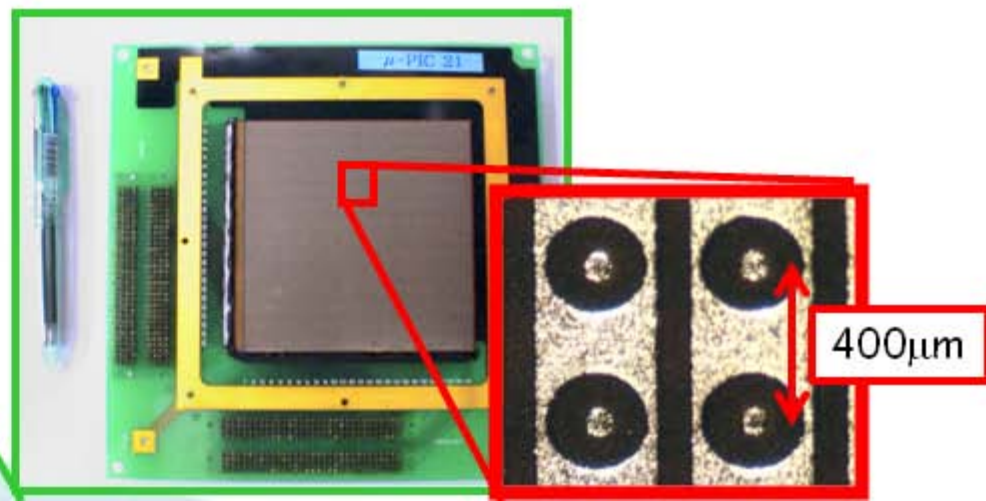
Power : ~250 W

ガス飛跡検出器

2D readout (400 μ m pitch) + Drift time (100MHz)



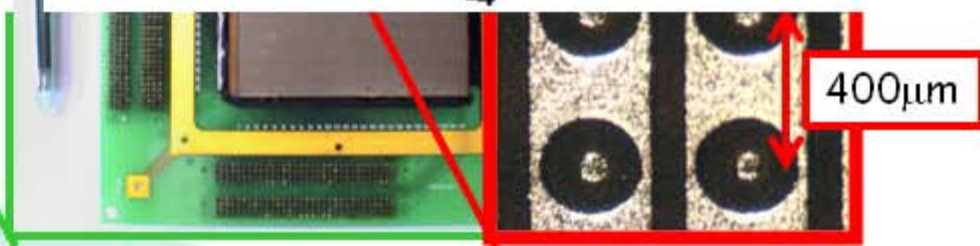
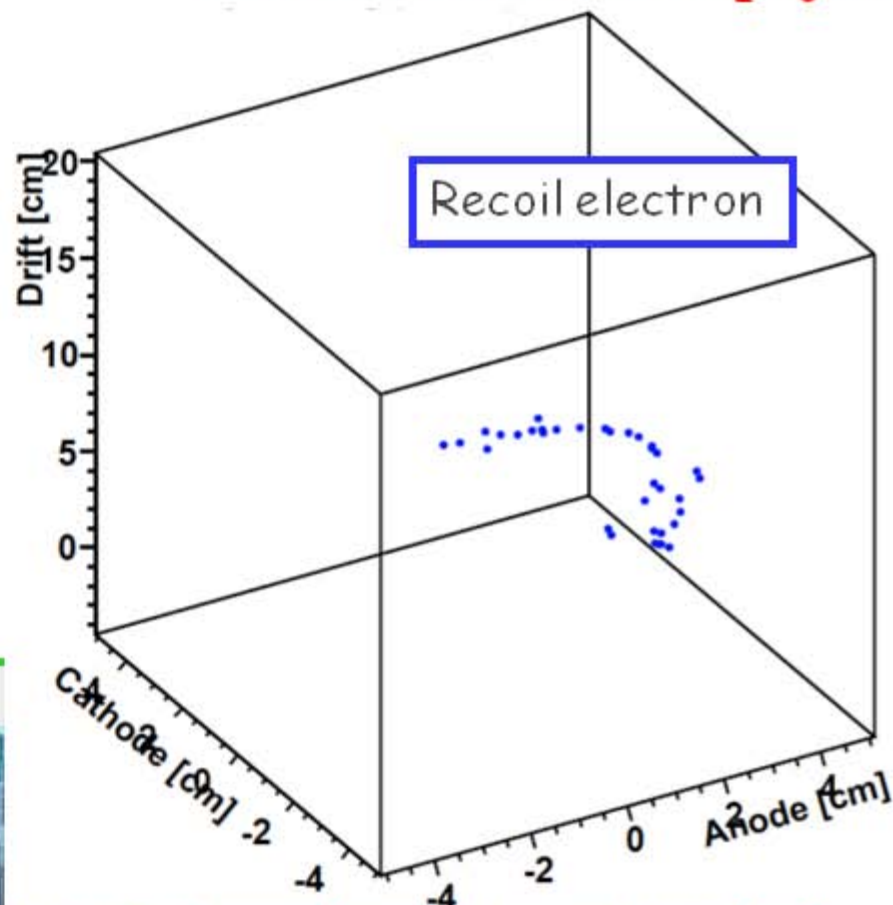
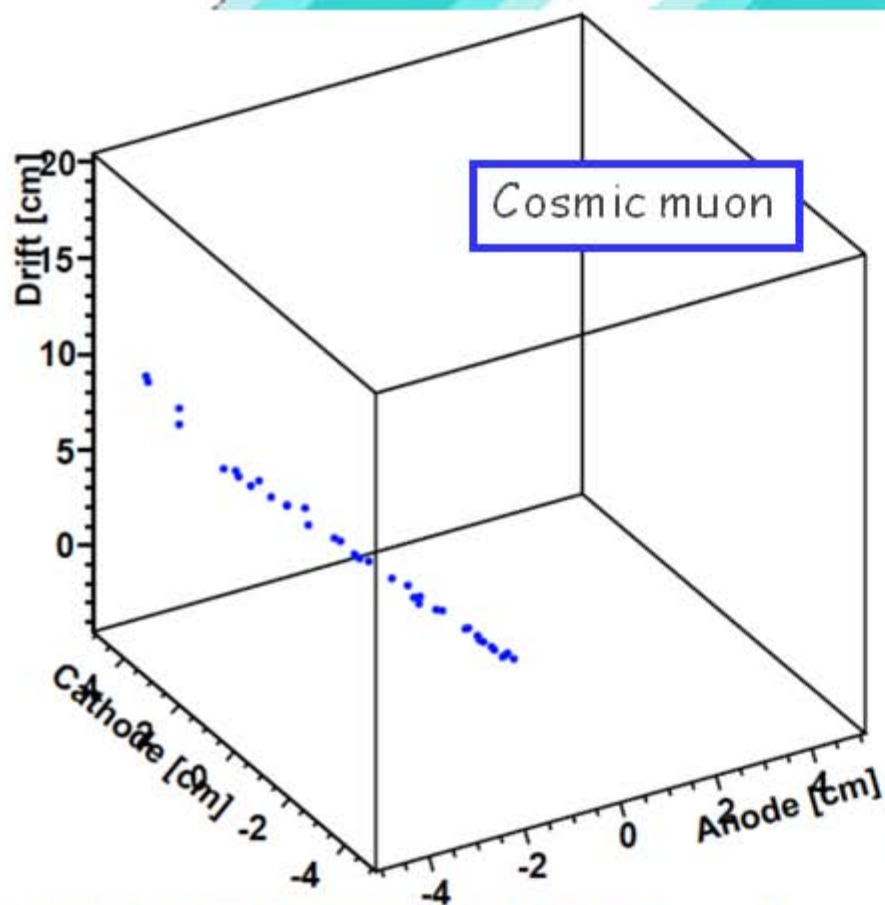
- ガス: Xe 80% + Ar 18% + C₂H₆ 2%
1気圧, 封じ切り
- 増幅率: ~35000
- ドリフト速度 ($V_d=400\text{V/cm}$):
実測 2.5cm/ μ sec
simulation 2.48cm/ μ sec
- 大きさ: 10 \times 10 \times 14 cm³
- エネルギー分解能:
~45% (22.2keV, FWHM)
- 空間分解能: ~500 μ m



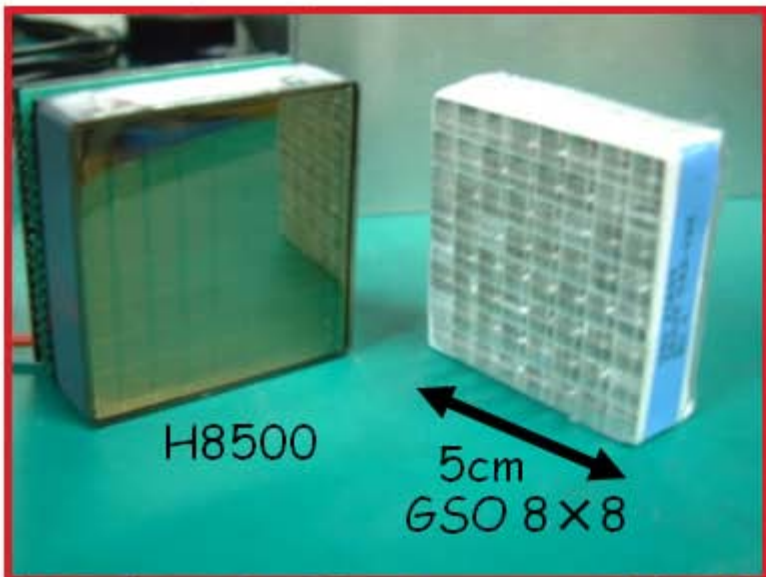
ガス飛跡検出器

2D readout (400 μ m pitch) + Drift time (100MHz)

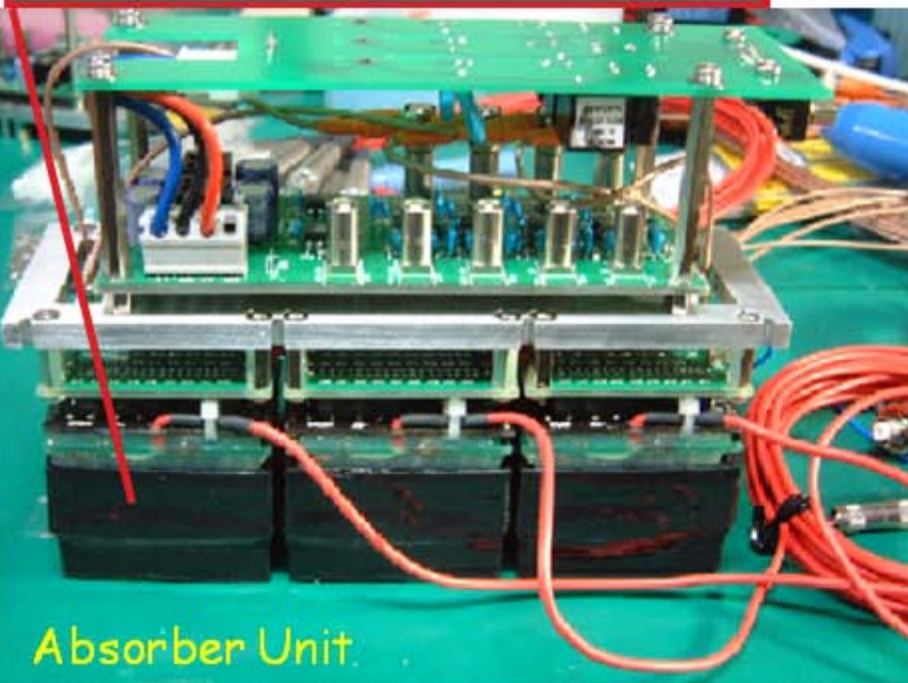
➤ ガス: Xe 80% + Ar 18% + C₂H₆ 2%



シンチレータ

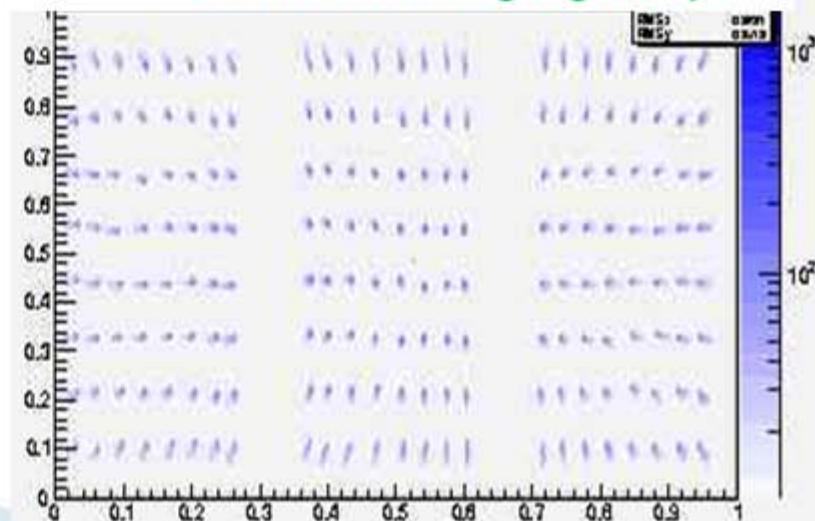


- シンチレータ: $GSO(Ce)$
 - ピクセルサイズ: $6 \times 6 \times 13 \text{ mm}^3$
 - PMT: H8500 (HPK)
 - DC/HV: EMCO Q12N-5
 - 192 ピクセル, PMT 3つ, DC/HV 3つ, フリアンプ4つ, で1ユニット
 - 抵抗チェーンを使用して1ユニットを4chで読み出し
 - Bottom: 3×3 PMTs
 - Side: 3×2 PMTs $\times 4$
 - エネルギー分解能: $\sim 11\%$ (662keV, FWHM)
- } 2112
ピクセル

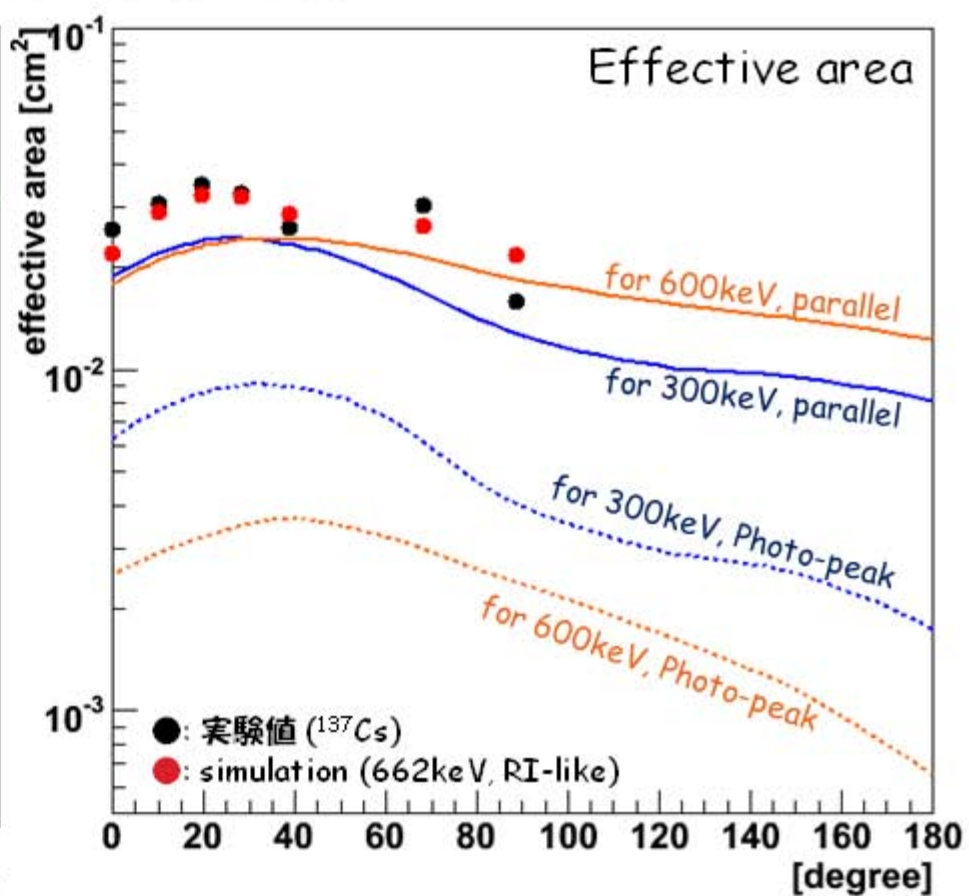
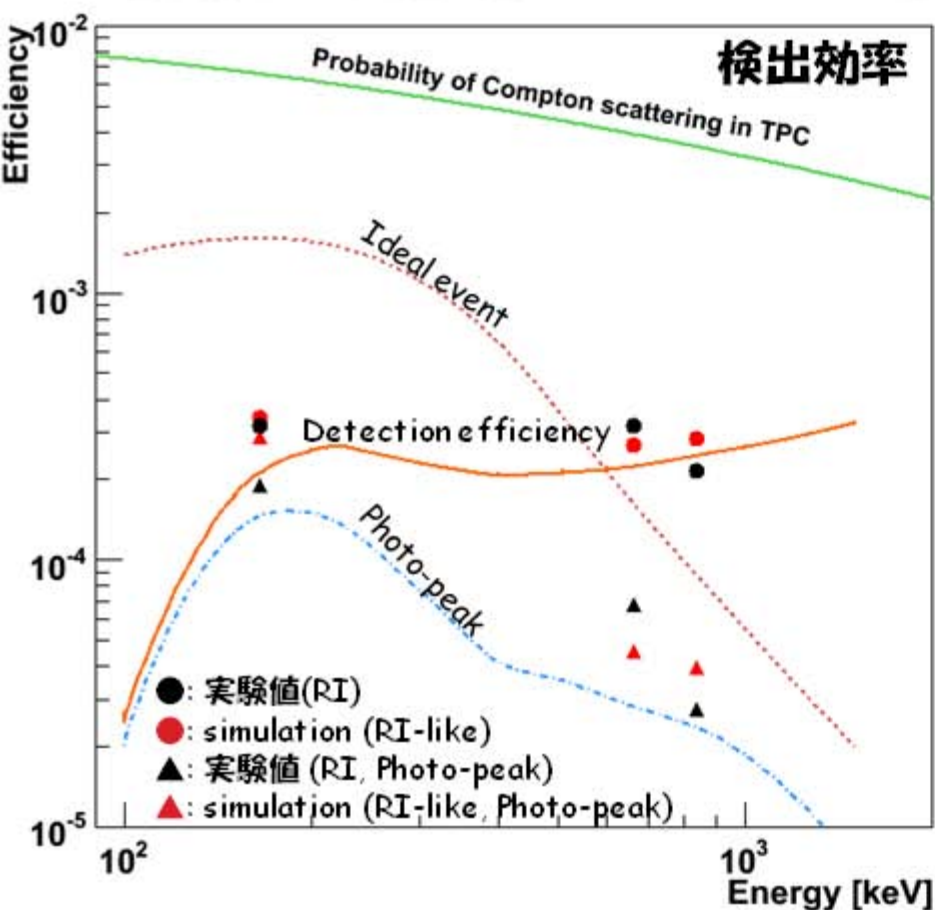


Absorber Unit

^{137}Cs Position imaging map



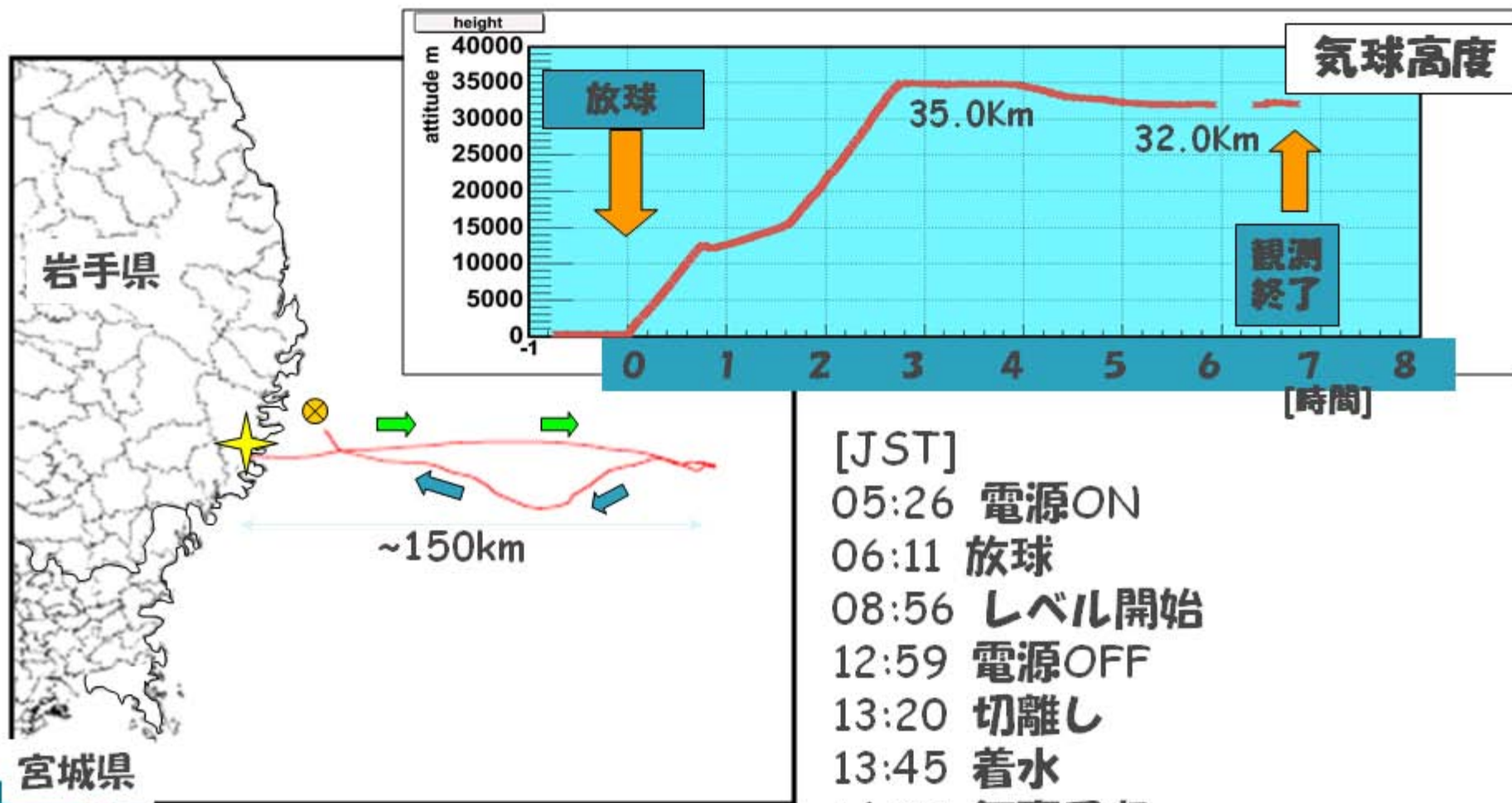
検出効率 & 有効面積



- 検出効率 : 3×10^{-4} for 150-1500keV
- 有効面積 : $2 \times 10^{-2} \text{ cm}^2$ for 150-1500keV, 0-60°
- simulationと実験値はほぼ一致
- 天頂角25° 付近で有効面積は最大に ← 検出器の配置によるもの

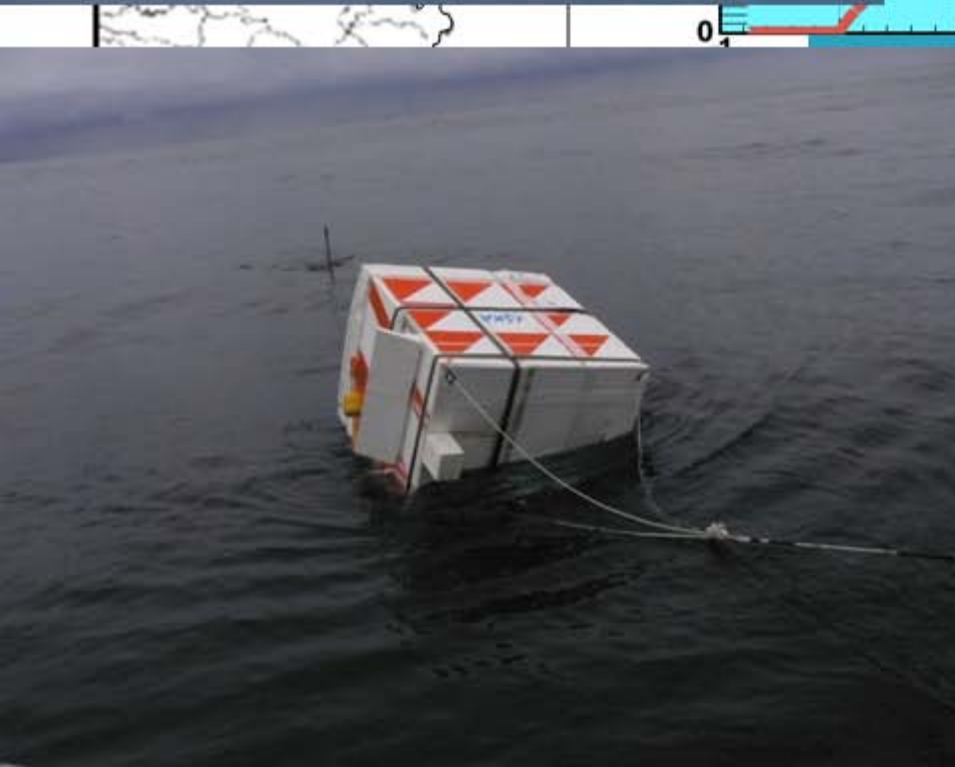
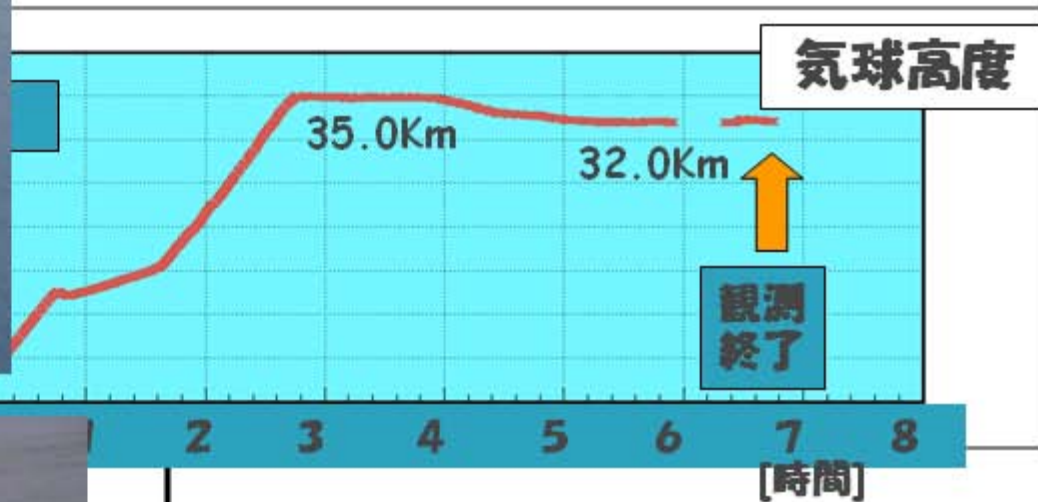
気球実験

- ▶ 三陸大気球観測所 (JAXA)
- ▶ 2006/9/1に放球



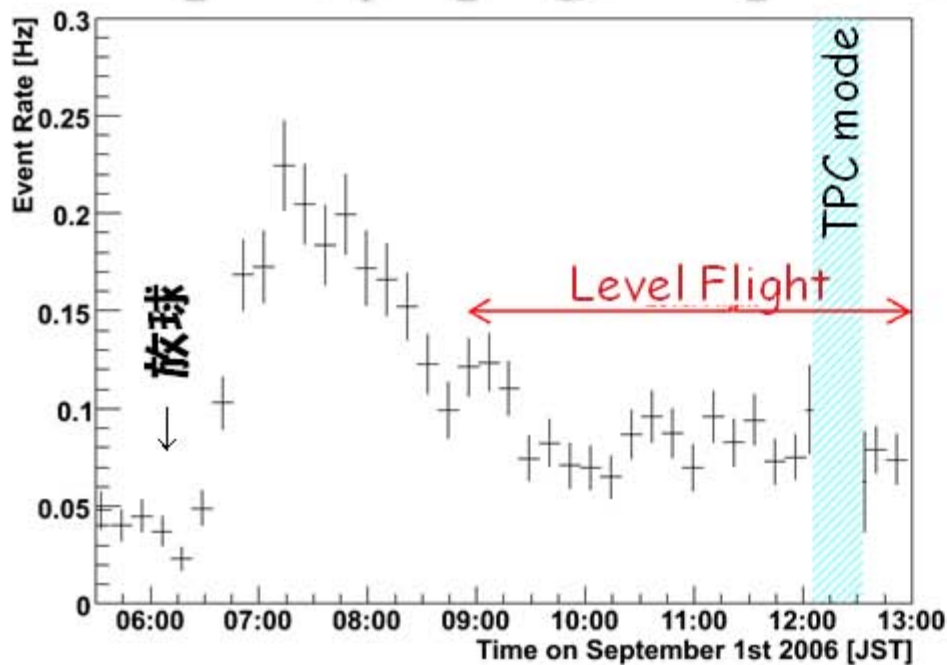
- [JST]
- 05:26 電源ON
 - 06:11 放球
 - 08:56 レベル開始
 - 12:59 電源OFF
 - 13:20 切離し
 - 13:45 着水
 - 14:32 無事回収

大気球観測所 (JAXA) /9/1に放球



- [JST]
- 05:26 電源ON
 - 06:11 放球
 - 08:56 レベル開始
 - 12:59 電源OFF
 - 13:20 切離し
 - 13:45 着水
 - 14:32 無事回収

イベントレート & スペクトル

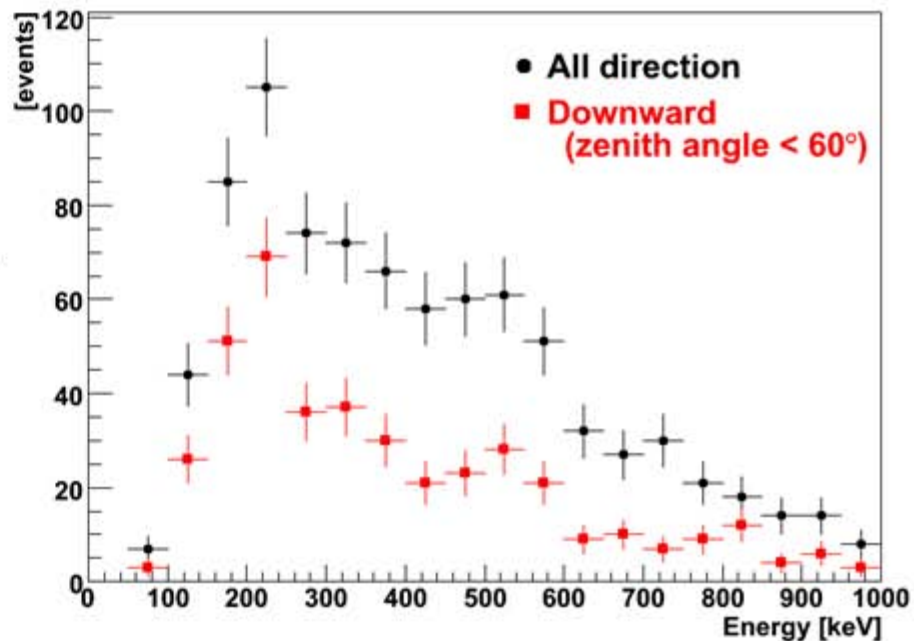


イベントレート

- 100~900 keV
- 全方向 ~2000
- 下向き(3str) ~940

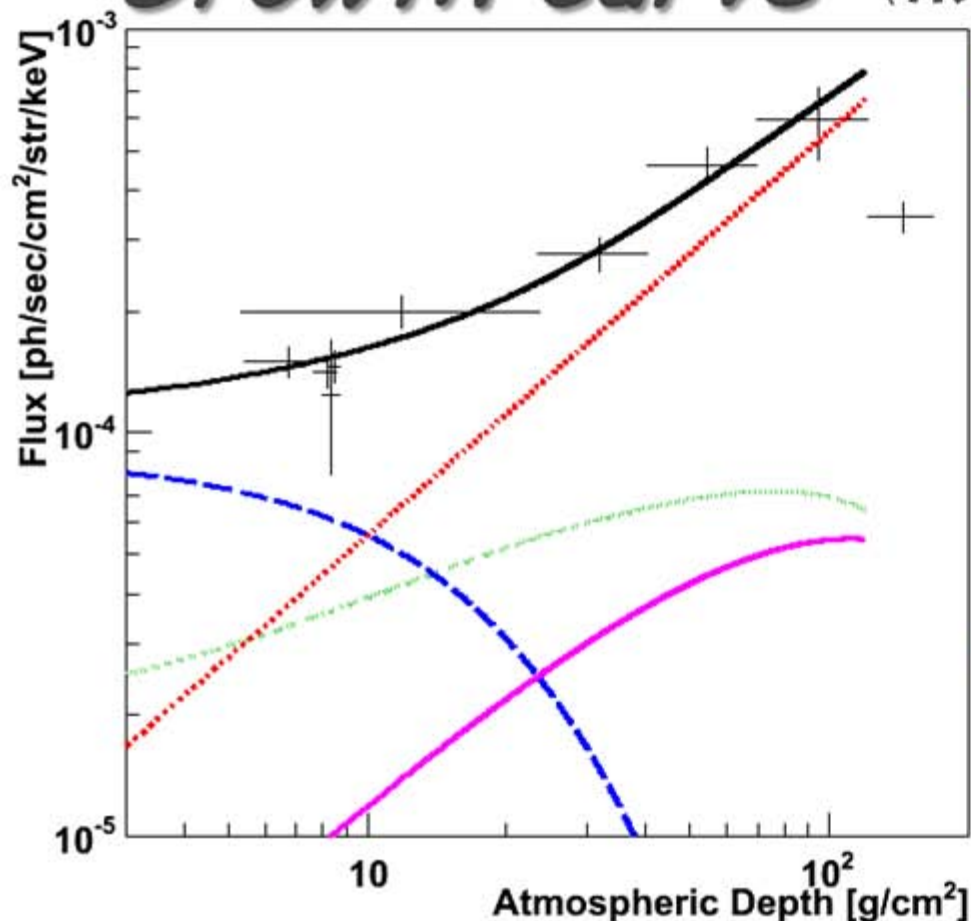
Energy Spectrum

- 32~35 km レベルフライト
- 3.5 時間 (live ~3h)
- 下向き (3 str)
~420 events
GEANT4 \Rightarrow ~400 events



Growth curve

(ガンマ線フラックスの気球高度依存性)



- 大気ガンマ線
- 宇宙拡散ガンマ線
- バックグラウンドガンマ線
- 大気511keV
- 総和

➤ 宇宙成分: $\phi_C = \phi_d + \phi_s$

・ 直接光成分

: 大気による減衰を受ける

$$\phi_d = A \times \exp(-z/\tau_{tot})$$

・ 散乱光成分

: 検出器に入る前に

大気で散乱された成分

$$\phi_s = p(E, z) \times \phi_d$$

➤ 大気成分: ϕ_A

宇宙線と大気との相互作用により
生成されたガンマ線

残留大気圧にほぼ比例
(過去の観測から)

$$\phi_A = B \times z$$

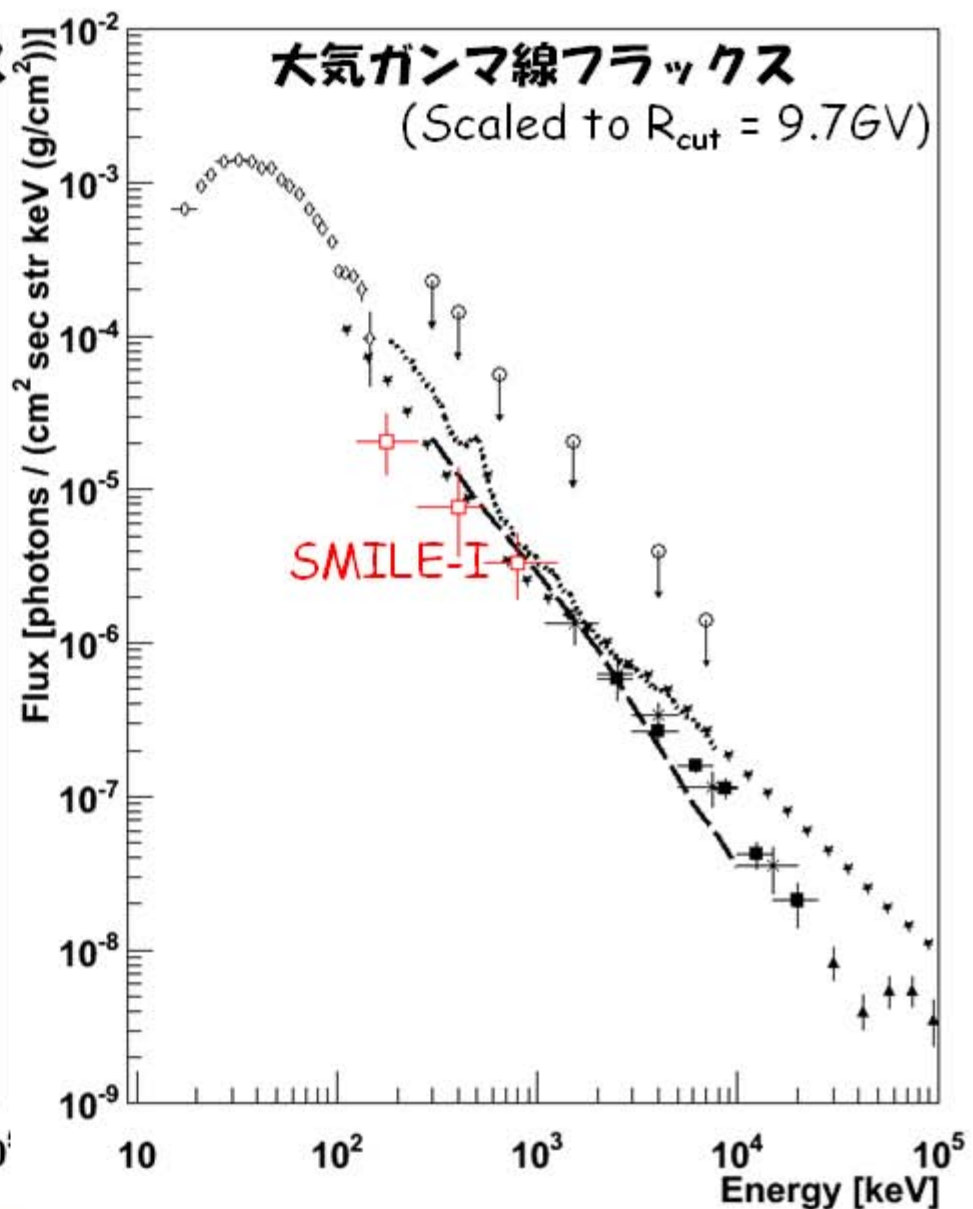
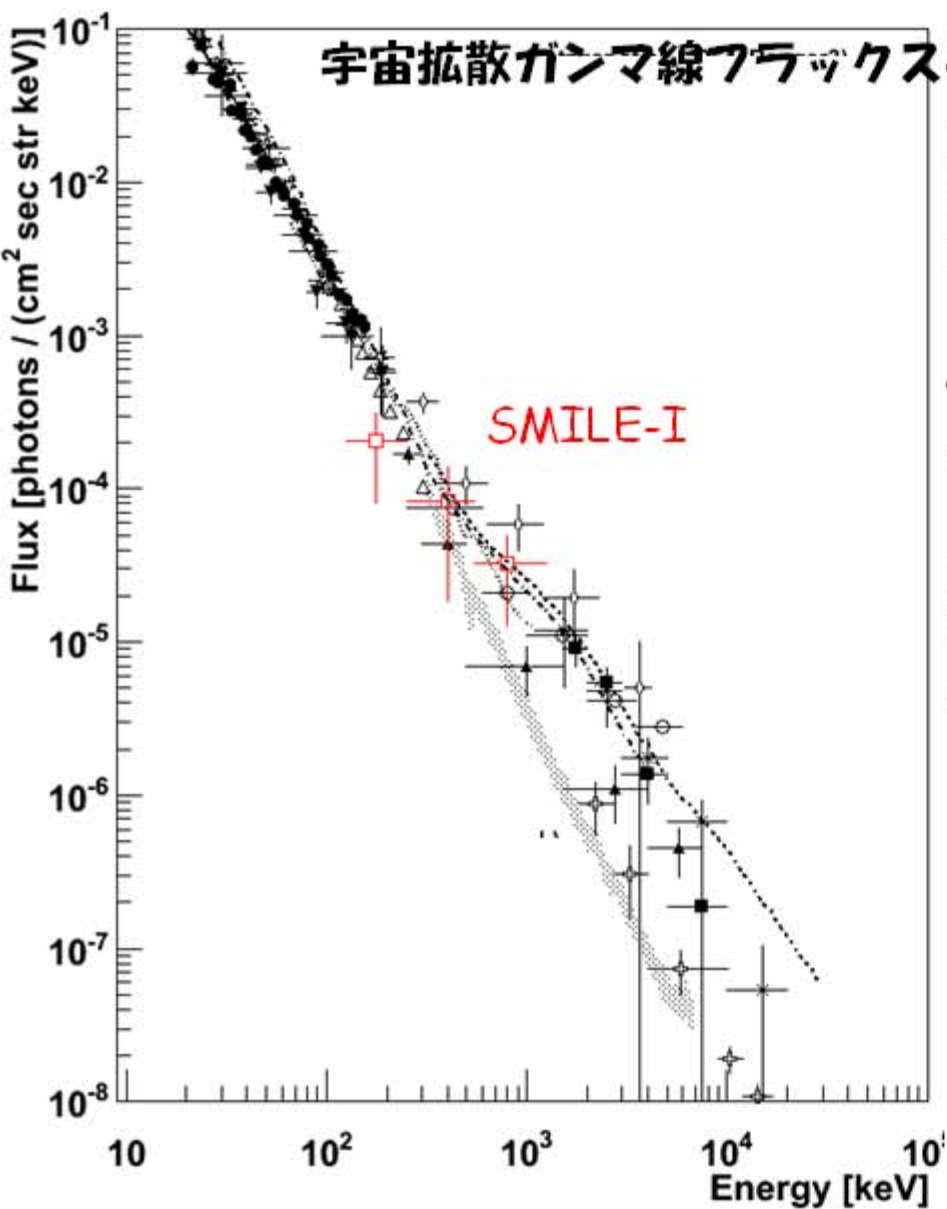
z : 残留大気圧

τ_{tot} : 平均自由行程

$p(E, z)$: 散乱補正項

A, B : Fittingパラメータ

宇宙拡散/大気ガンマ線フラックス



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

10cm cube camera @ 三陸 (Sep. 1st 2006)

- 気球高度での動作確認
 - 宇宙拡散ガンマ線・大気ガンマ線の観測
⇒ ガンマ線観測の実証
- ~400 photons during 3 hours
(100 keV~1MeV)

30cm cube camera

- かに星雲 or Cyg X-1の観測 ⇒ イメージングの実証

40cm cube camera Sub-MeV ~ MeV

- 長時間観測による天体観測
- 対生成モードの実証

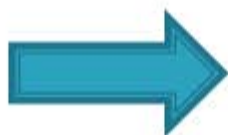
50cm cube camera

- 衛星に搭載しての全天観測

次の気球実験に向けて

➤ 明るい天体の観測 (かに星雲 or Cyg X-1)

3.0 時間, 40 km



必要な有効面積 : $\sim 1 \text{ cm}^2$

• **有効面積の拡大 :**

30cm cube TPCの開発

CF₄ gasの導入

• **角度分解能の向上 :**

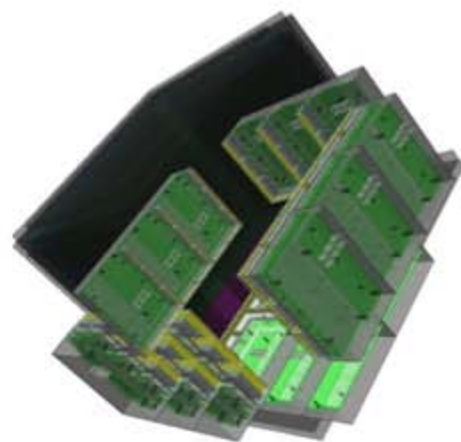
LaBr₃ PSAの開発

解析方法の見直し

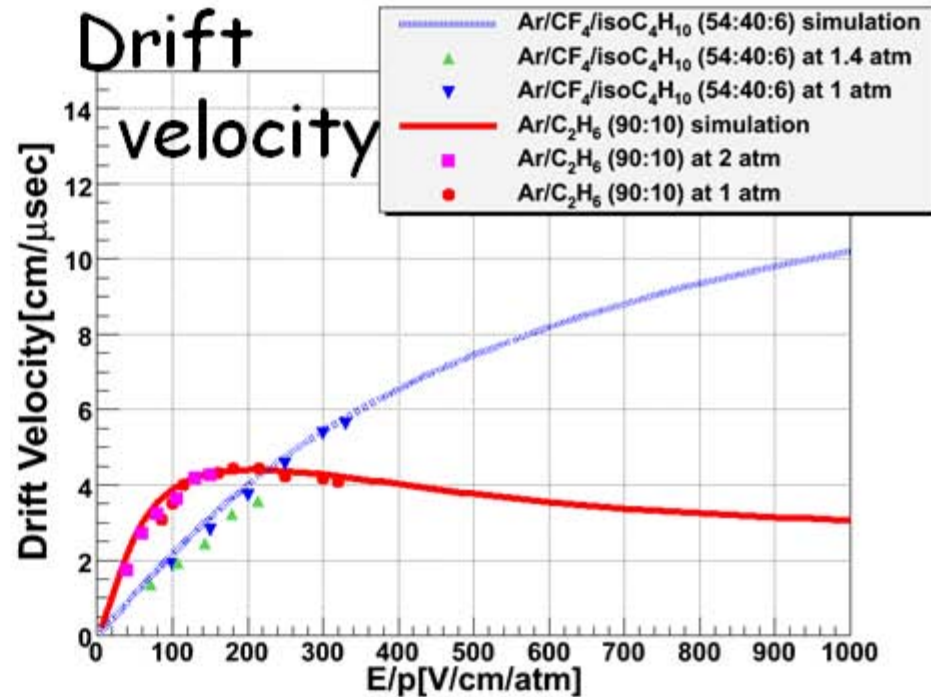
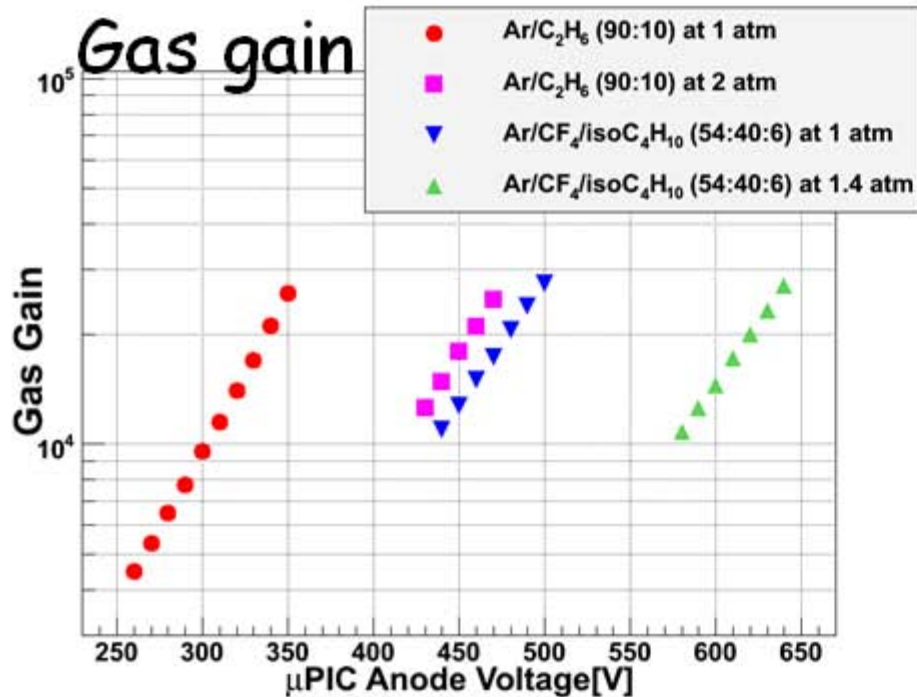
• **システムの省電力化 :**

H8500用新型ヘッドアンプの開発

TPC読み出し用 preamp & discri. Chipの開発



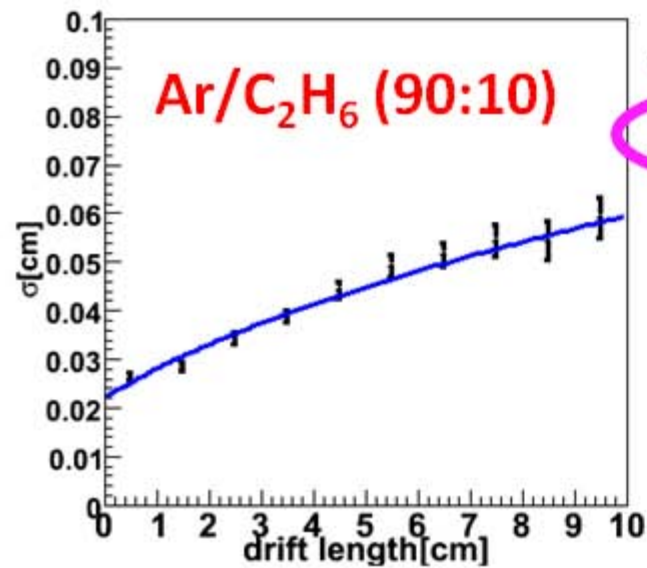
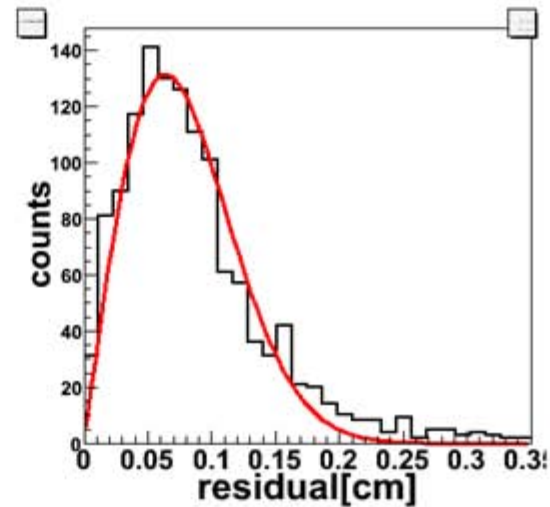
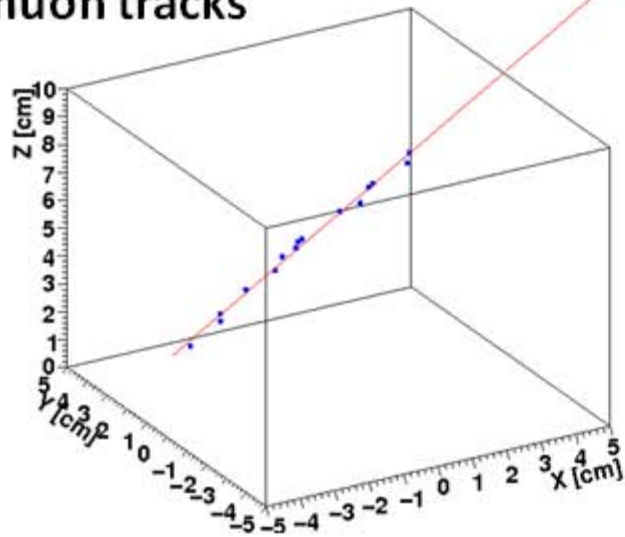
CF₄ gas study



- Zが小さく、電子の数の大きい分子はCompton散乱に有利
- CF₄は拡散が小さい ⇒ 角度分解能の向上
- CF₄のGas gainは小さい ⇒ Arと混合してgainを稼ぐ
- CF₄中の電子のDrift速度は単調増加
⇒ より安定で均一なDrift電場が必要

Position Resolution with CF₄

muon tracks



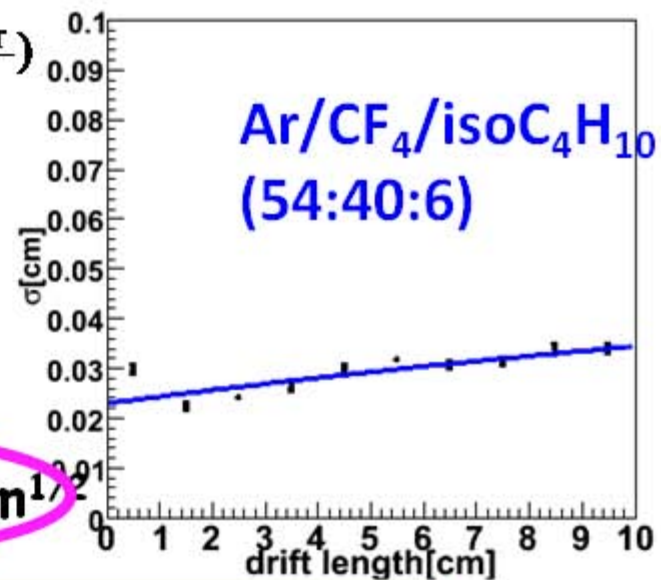
$$\sigma = 156 \mu\text{m} \left(\sigma = \frac{\sigma_{\text{detector}}}{\sqrt{2}} \right)$$

$$D = 175 \mu\text{m}/\text{cm}^{1/2}$$

Better by
factor 2

$$\sigma = 162 \mu\text{m}$$

$$D = 81 \mu\text{m}/\text{cm}^{1/2}$$



$$\sigma^2(l) = \sigma_{\text{detector}}^2 + (D\sqrt{l})^2$$

l : Drift length

D : Diffusion Constant

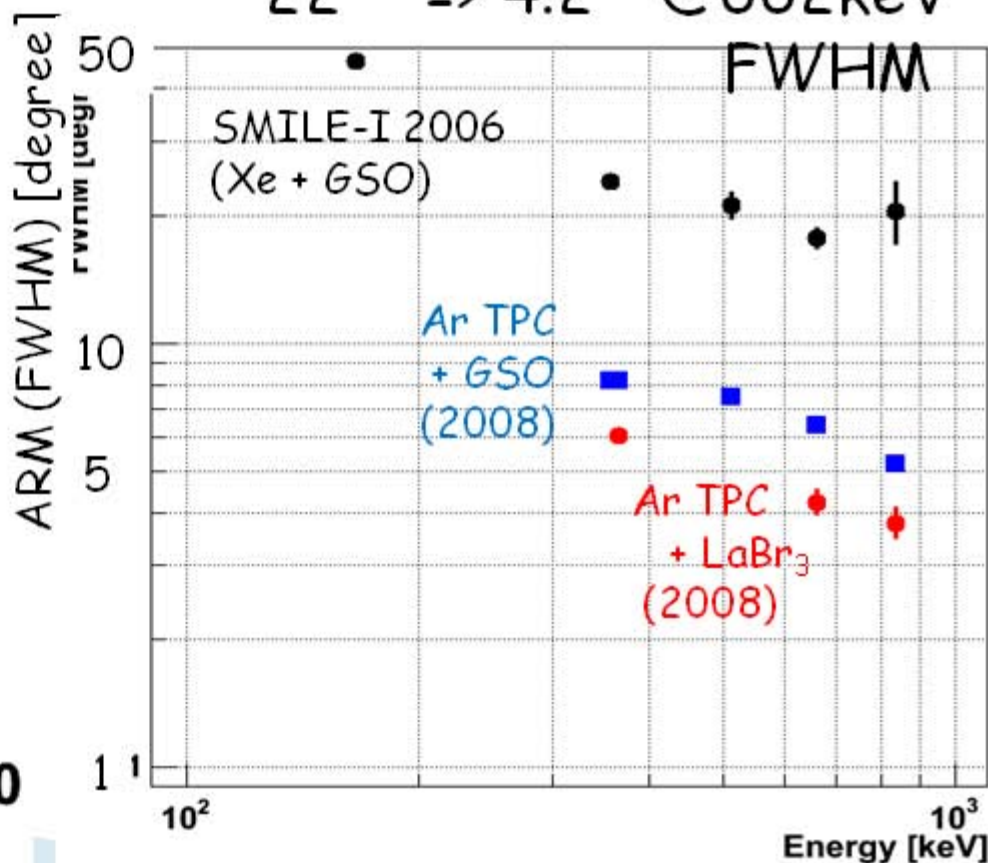
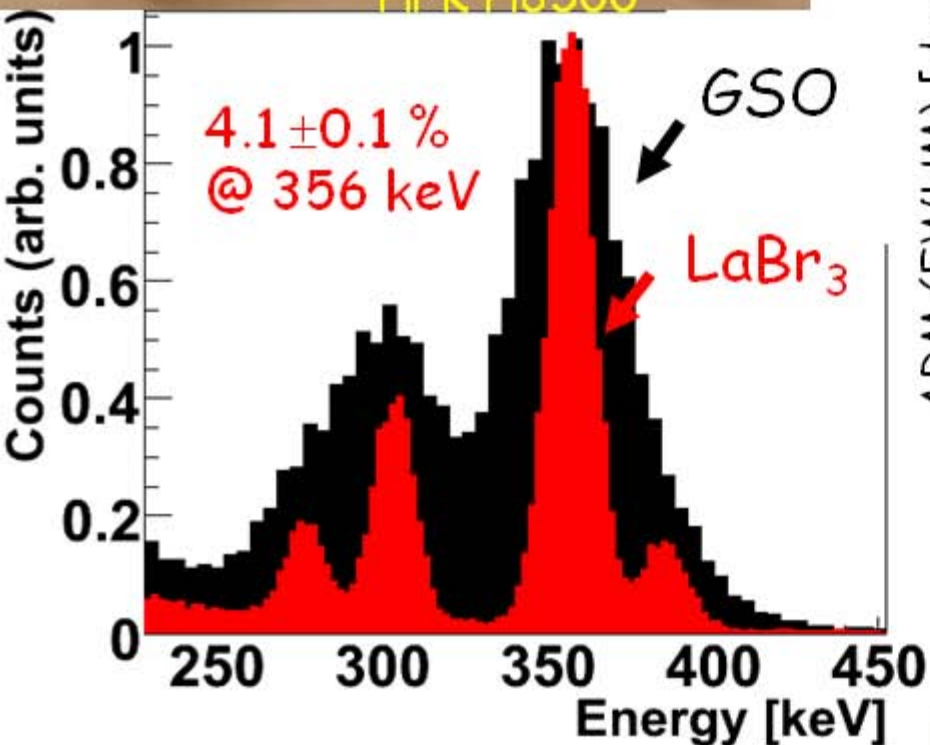
角度分解能の向上に向けて

ARM :

シンチレータのエネルギー分解能と
コンプトン点の空間分解能が制限



$Xe + GSO(Ce) \Rightarrow Ar + LaBr_3$
 $22^\circ \Rightarrow 4.2^\circ @662keV$



30x30x30cm³ ETCC current status

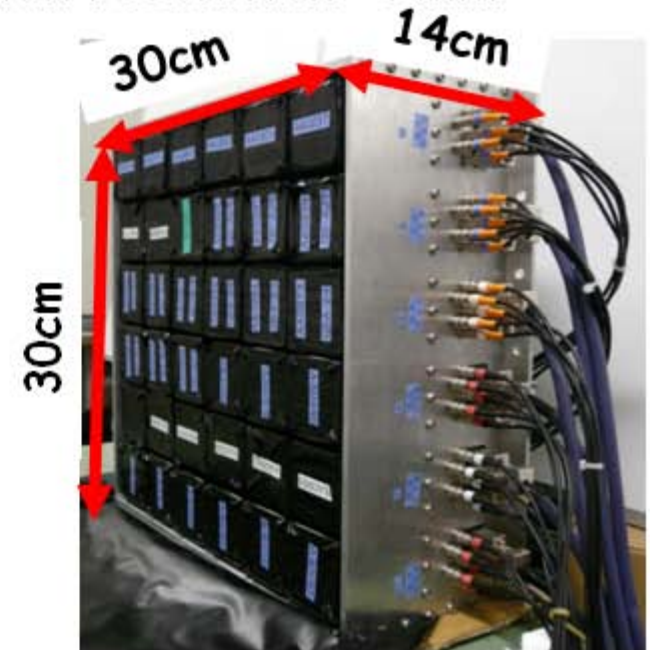
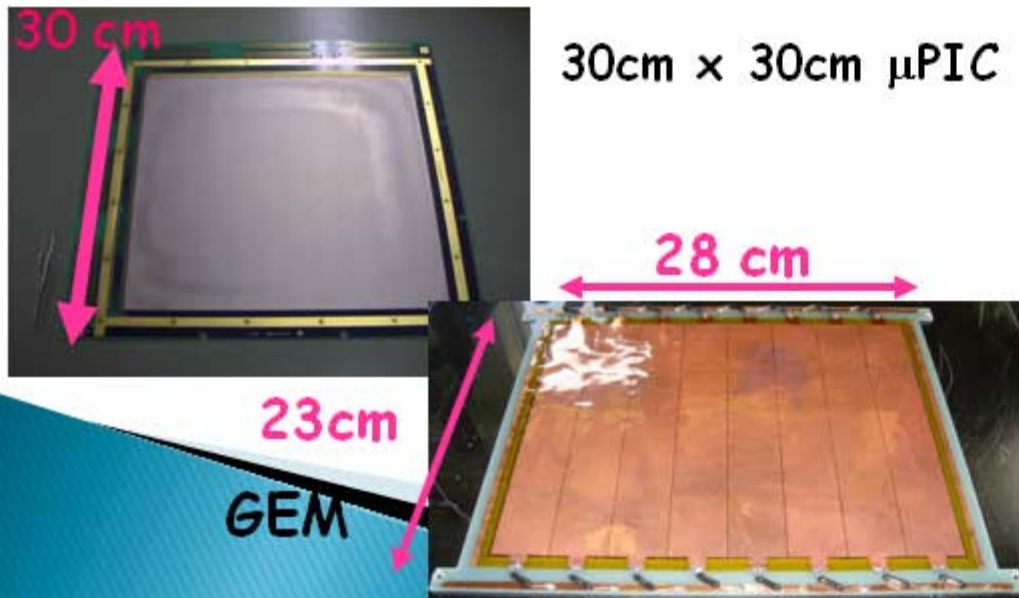
We are developing a larger ETCC based on the 30cm x 30cm x 30cm TPC and 6 x 6 scintillation cameras.

➤ Gaseous TPC

- volume : $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$
- gas : Ar 90% + C₂H₆ 10% (1atm)
- drift velocity : 4 cm/ μ sec
- gain : ~ 30000
- energy resolution : 46% @ 32keV
- position resolution: 400 μ m

➤ Scintillation Camera

- number of pixels : 2304 pixels
- Crystal : GSO(Ce)
- pixel size : 6 x 6 x 13mm³
- energy resolution : 10.9%
(@662keV, FWHM)
- position resolution : 6mm



30X30X30cm³ ETCC current status

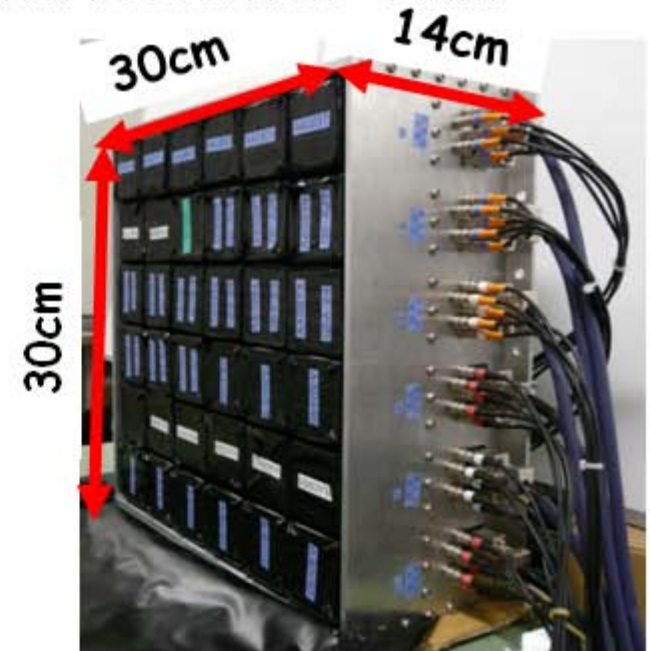
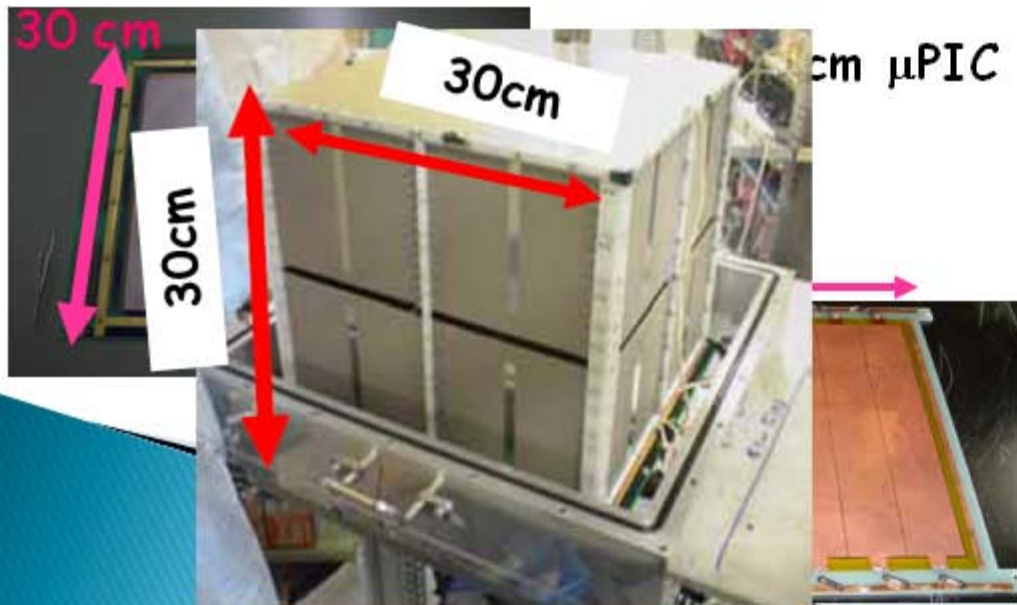
We are developing a larger ETCC based on the 30cm X30cmX30cm TPC and 6 x 6 scintillation cameras.

➤ Gaseous TPC

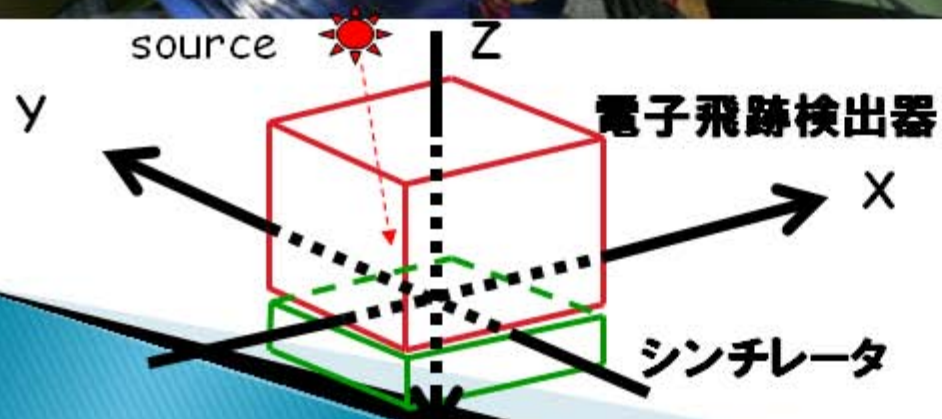
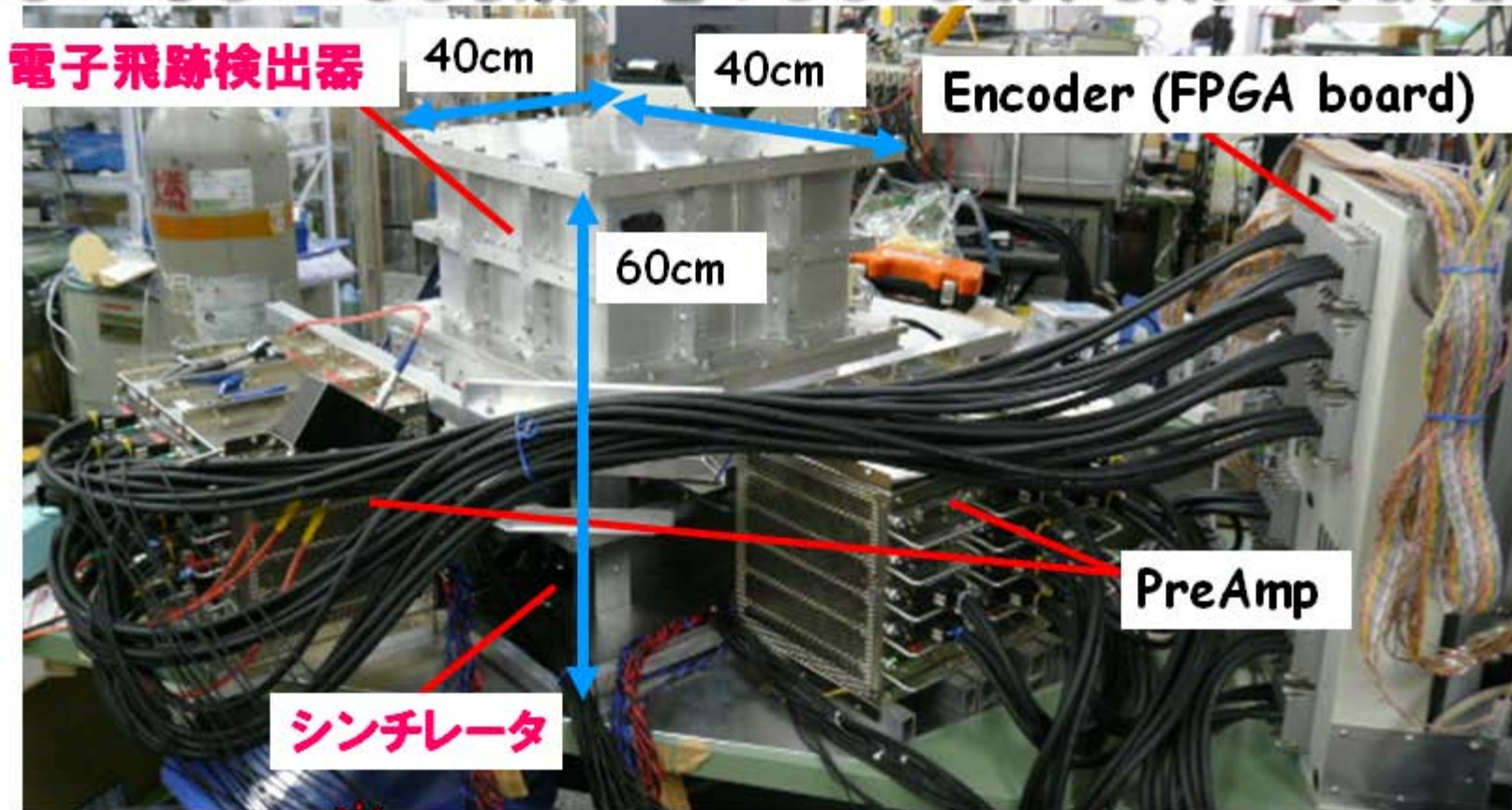
- volume : $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$
- gas : Ar 90% + C₂H₆10% (1atm)
- drift velocity : 4 cm/ μ sec
- gain : ~ 30000
- energy resolution : 46% @ 32keV
- position resolution: 400 μ m

➤ Scintillation Camera

- number of pixels : 2304 pixels
- Crystal : GSO(Ce)
- pixel size : 6 X 6 X 13mm³
- energy resolution : 10.9%
(@662keV, FWHM)
- position resolution : 6mm



30x30x30cm³ ETCC current status



Center of μ PIC : (0, 0, 0)
Center of Scinti. : (-3.3, 0.2, 5.7)

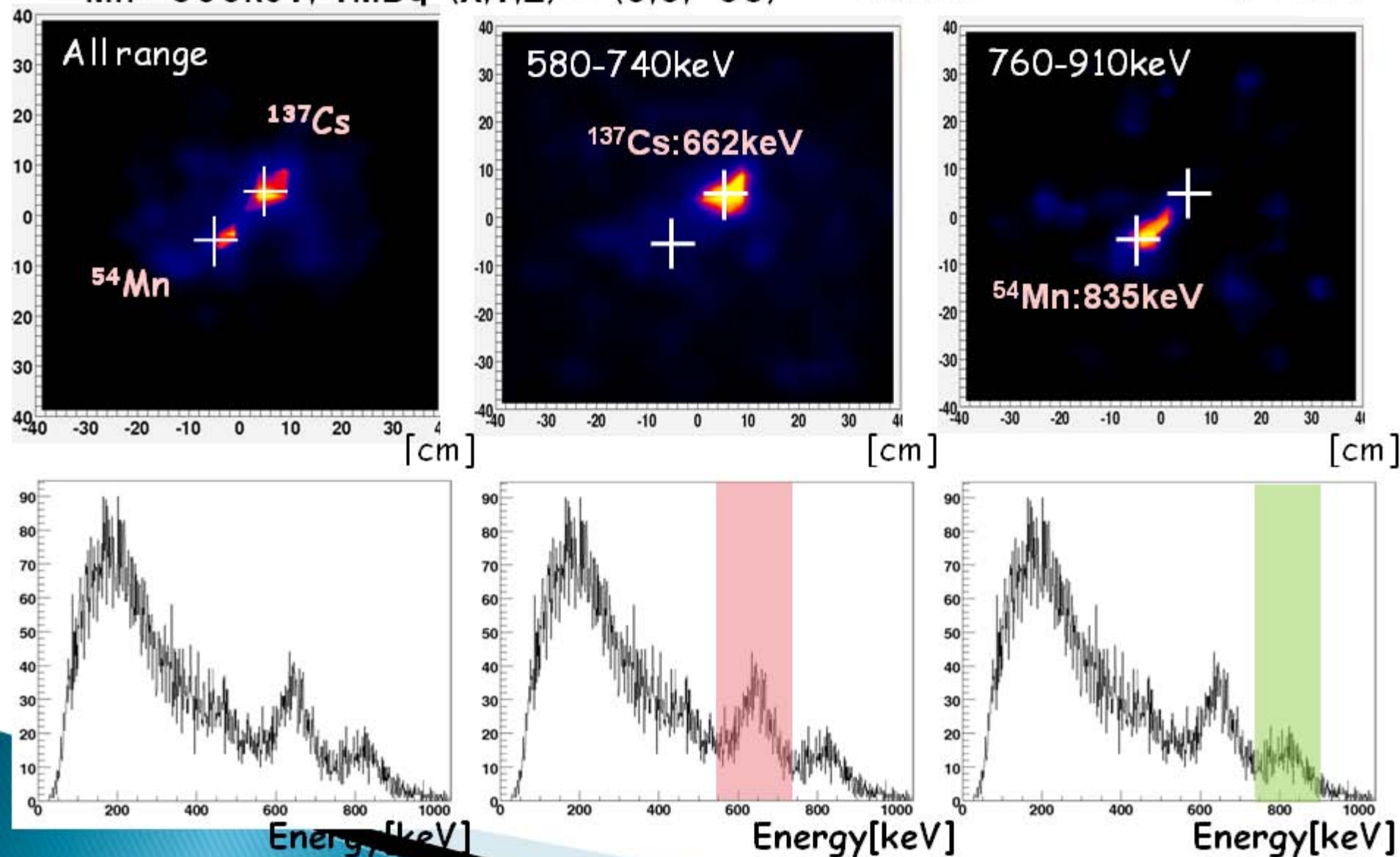
2 線源イメージング (preliminary)

^{137}Cs : 662keV, 1MBq (X,Y,Z) = (-5,-5,-58)

^{54}Mn : 835keV, 1MBq (X,Y,Z) = (5,5,-58)

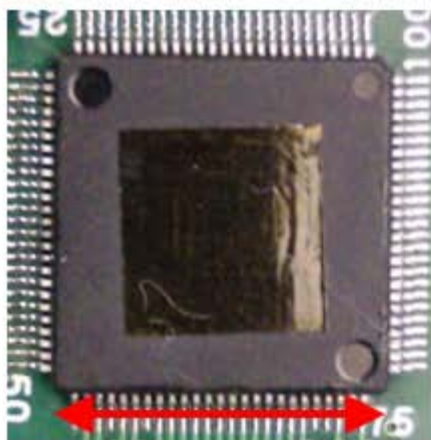
ノイズレベル改善

感度補正+ML-EM法を適用



TPC読み出し用CMOS ASICの開発

KEK測定器開発室と共同開発



16mm

	SMILE-I	FE2009bal
Ch数	4ch/chip	16ch/chip
ピーキングタイム	16ns	30ns
ダイナミックレンジ	-1.2~2.0pC	±1pC
ゲインばらつき		< 3%
ノイズ	~3000e (C=100pF)	~6000e (C=100pF)
クロストーク	< 0.5%	< 1%
タイムウォーク	< 6.5ns (20fC-1pC)	< 6ns (10fC-1pC)
消費電力	59mW/ch	18mW/ch

線源: ^{109}Cd

400mV Analog Sum

Digital (LVDS)

Ch辺りの消費電力を1/3に低減

Readout数:

10cm cube TPC 256ch × 2

30cm cube TPC 768ch × 2

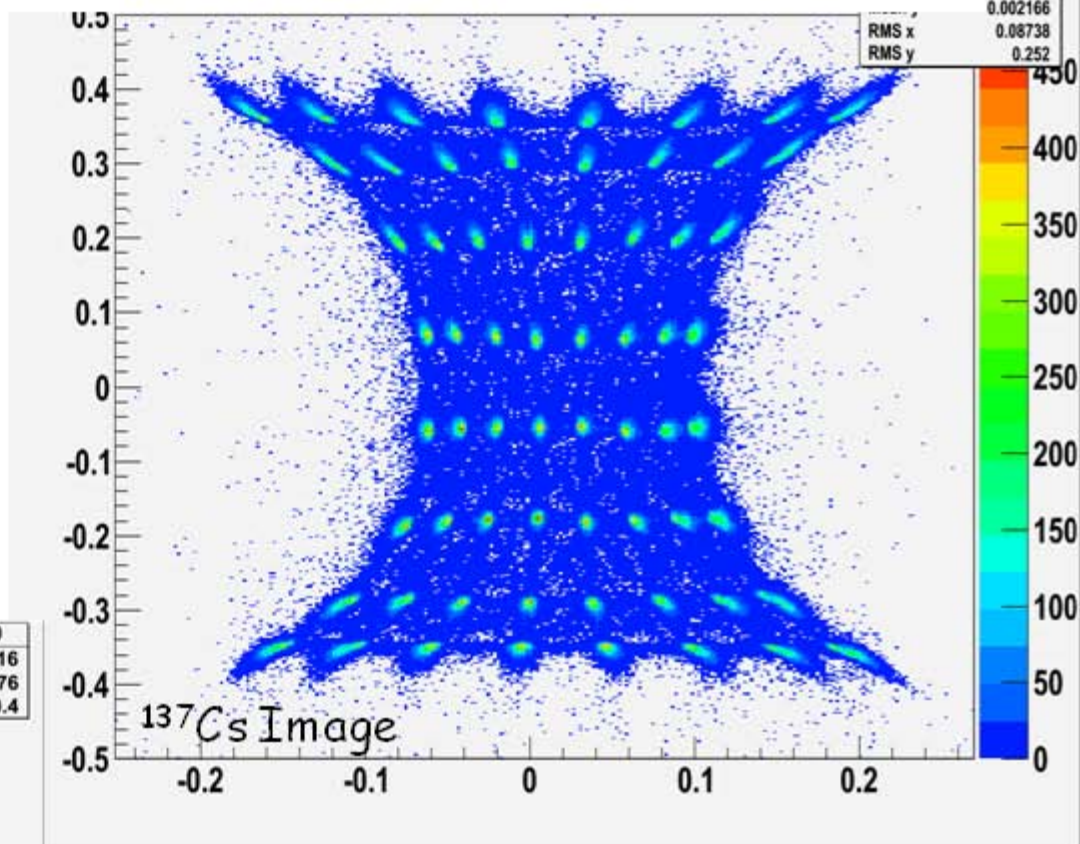
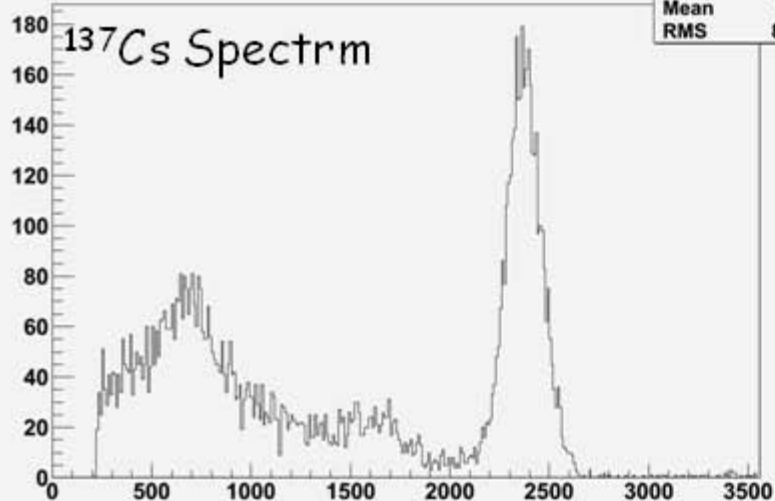
SMILE-Iと同等の電力で

30cm cube TPCの読み出しが可能!!

Flat panel PMT読み出しの改良



2.0	
Counts	9616
Mean	1476
RMS	810.4



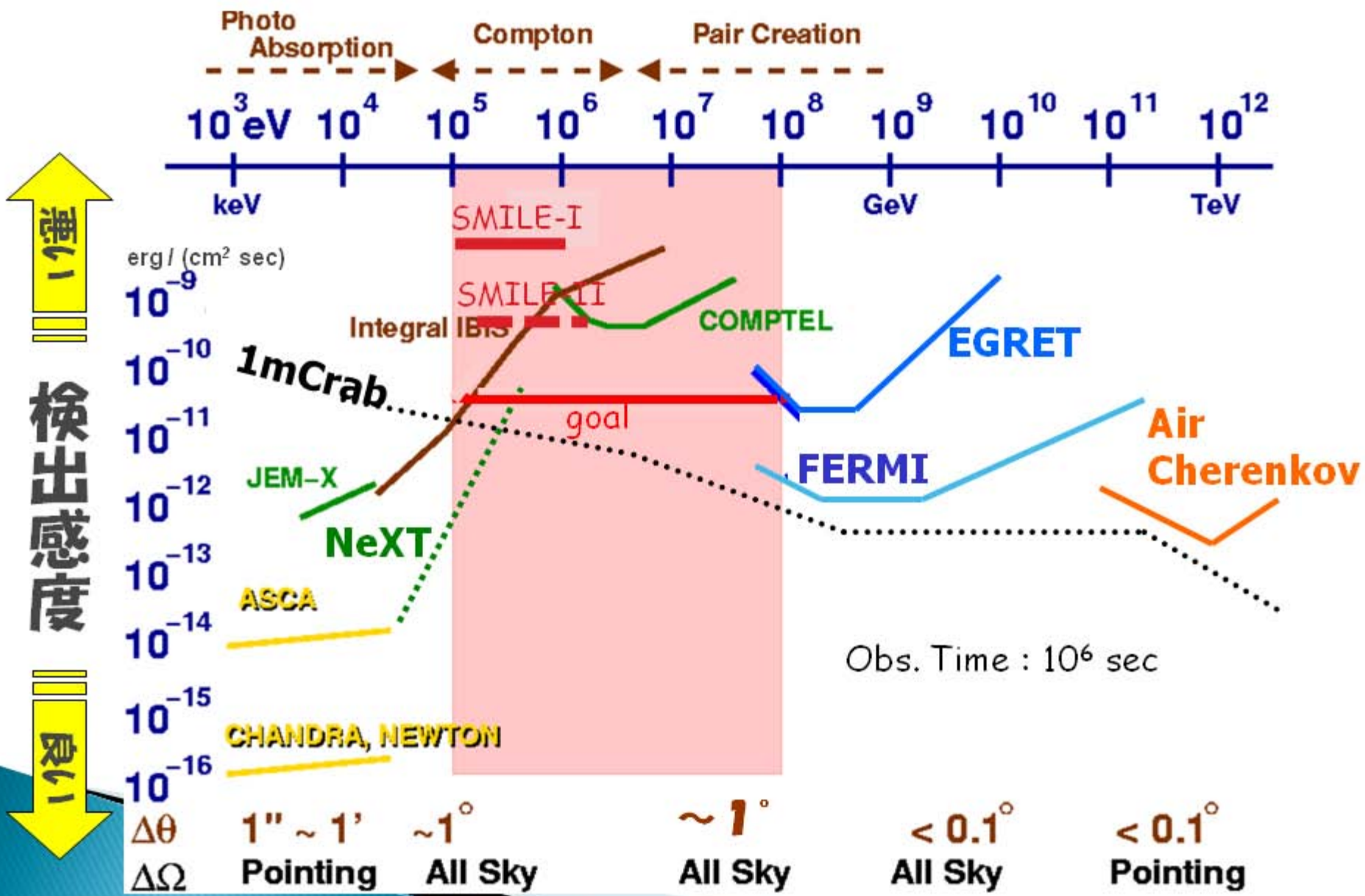
SMILE-I : $\sim 40\text{mW/pixel}$



Pixel辺り1/5に低減

新システム: $\sim 8.5\text{mW/pixel}$

X/ガンマ線観測の検出感度



Summary

- 電子飛跡検出型コンプトンカメラを開発
 - SMILE-1の検出器
 - エネルギー分解能: $\sim 12\%$ for 662keV @ FWHM
 - 検出効率: $\sim 2 \times 10^{-4}$ for 356 keV
 - 視野: $\sim 3\text{str}$
 - 2006/9/1に三陸大気球観測所より放球(ISAS/JAXA).
 - 検出器は安定に動作
 - 気球高度での電子飛跡検出型コンプトンカメラの動作は世界初
 - 宇宙拡散/大気ガンマ線の観測を行い、過去の観測に矛盾しない結果を得た
 - 気球高度において広い視野と強いバックグラウンド除去能力を実証
 - 現在、次の気球実験におけた開発を進行中
 - CF₄ gasの導入
 - 省電力な読み出しシステムの開発
 - 30cm cube TPCを用いたETCCの開発
- …等、鋭意開発中。

おわり。