

## SMILE45:

# 電子飛跡検出型コンプトンカメラにおける 電子のTPC脱出事象解析法と ガンマ線応答評価

水村 好貴  
(京大理)



谷森達, 高田淳史, 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, 中増勇真, 谷口幹幸, 水本哲矢,  
園田真也, 窪秀利(京大理), 黒澤俊介(東北大NICHe, 山形大理),  
身内賢太郎(神戸大理), 澤野達哉(金沢大数物),  
濱口健二(メリーランド大学), 小財正義(ISAS/JAXA), 莊司泰弘(阪大工)

# 本日のトークプラン

## ◆ SMILE45 (水村)

- イントロ: MeVガンマ線天文学
- SMILE-2+豪州気球実験の報告状況
- 電子のTPC脱出事象解析法  
(高エネルギー事象の解析法)

## ◆ SMILE46 (竹村)

- SMILE-2+ の **Crab** 解析報告

## ◆ SMILE47 (阿部)

- SMILE-2+ の **銀河中心領域** 解析報告

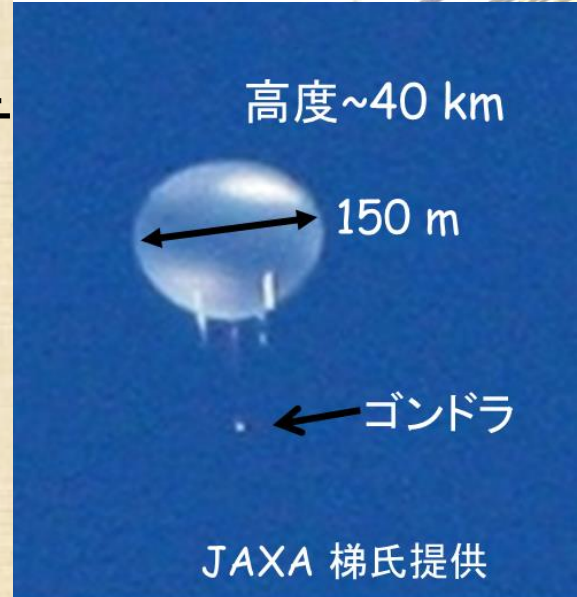
## ◆ SMILE48 (高田)

- 将来計画: **SMILE-3** の構想

後半なほど面白い内容を用意しています。  
是非、SMILEチームの発表をお楽しみください。



2018/4/7 6:24  
SMILE-2+放球直後





# MeVガンマ線天文学

## ◆ 元素合成

銀河面 :  $^{26}\text{Al}$ ・電子陽電子対消滅線  
 SNR : 放射性同位体

## ◆ 粒子加速

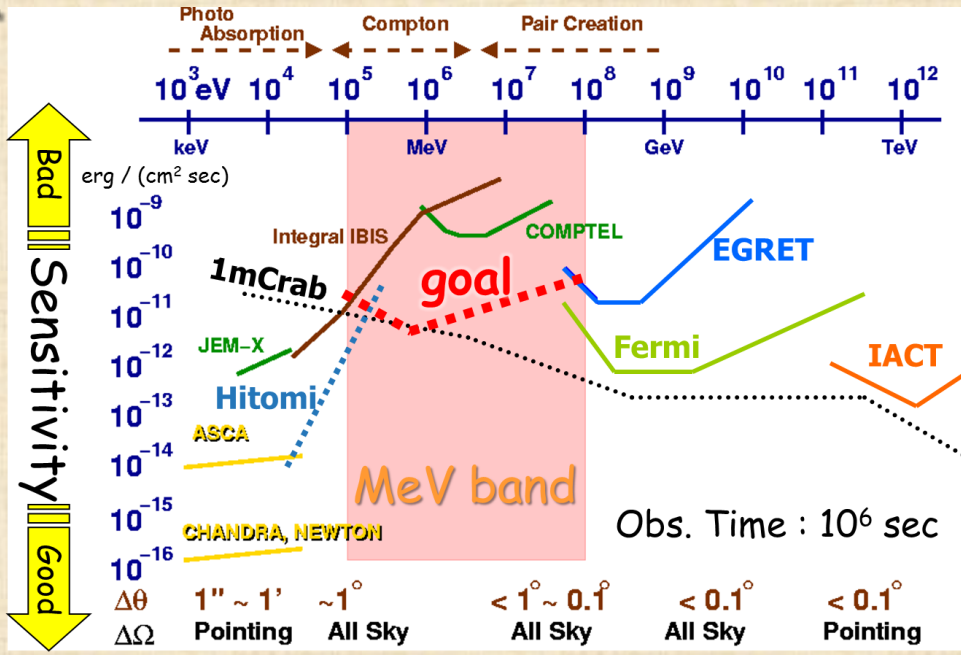
ジェット(AGN) : Leptonic or Hadronic

## ◆ 強い重力場

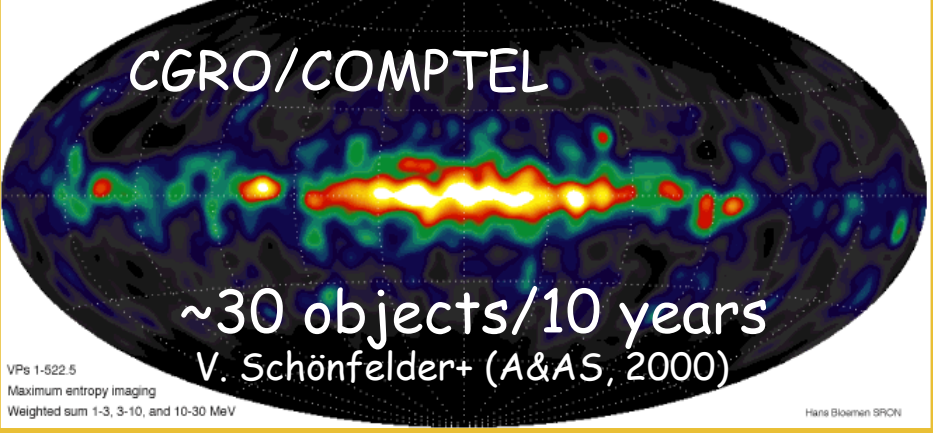
Black hole : 降着円盤,  $\pi^0$

## ◆ その他

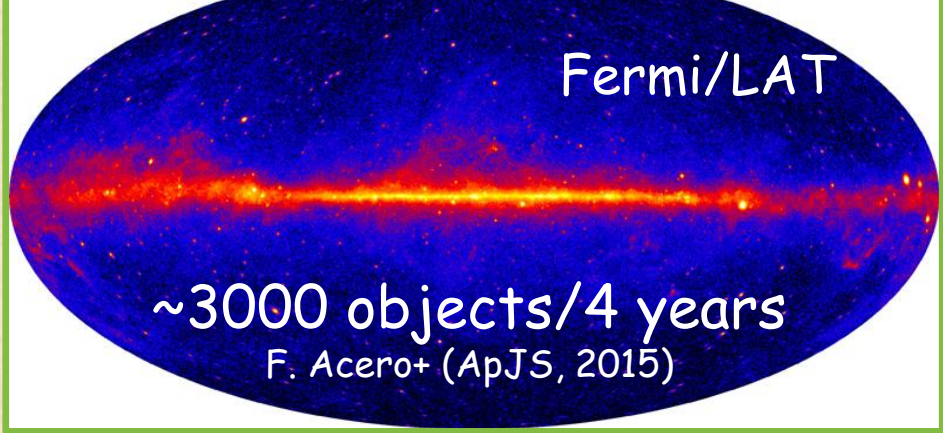
Pulsar, 太陽フレア, GRB, Ia型SN, 等



MeV sky map (1–30 MeV)



GeV sky map (> 1 GeV)

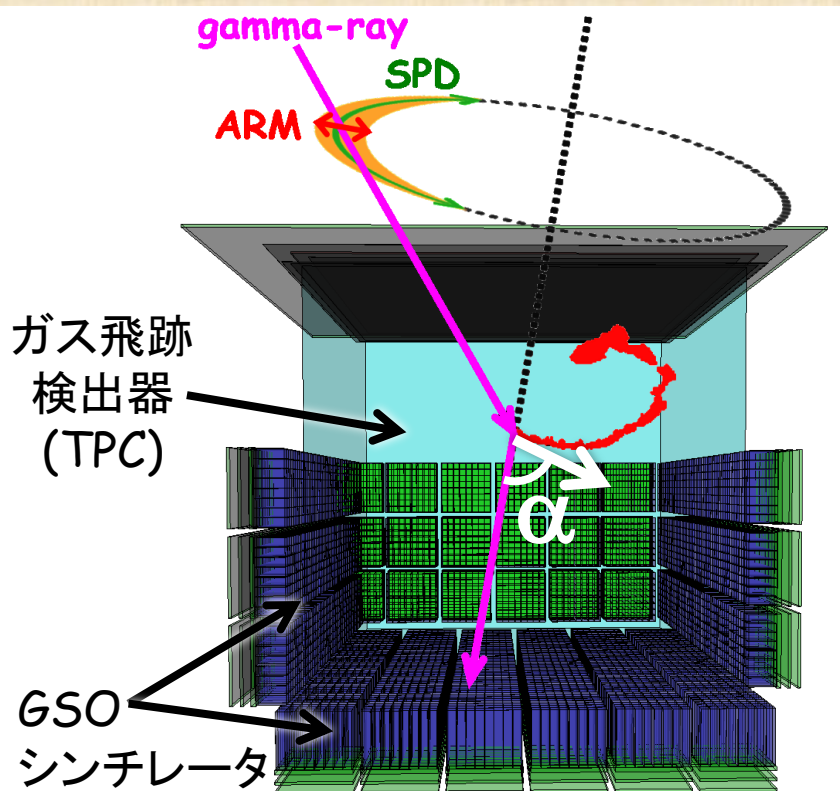


次世代MeVガンマ線望遠鏡  
 に期待する性能

- 数百keV ~ 数十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カメラ (ETCC)

4



## ◆ ガス飛跡検出器(TPC)

反跳電子のエネルギー + 飛跡

## ◆ GSOシンチレータアレイ

散乱ガンマ線のエネルギー + 吸収位置

検出事象ごとに  
コンプトン散乱を完全に再構成

## ● 到来方向とエネルギーを一意決定

### ➤ 鋭い2D-PSF:

推定手法に頼らない撮像分光  
背景雑音の強力除去

## ● 広視野 (> 3 sr)

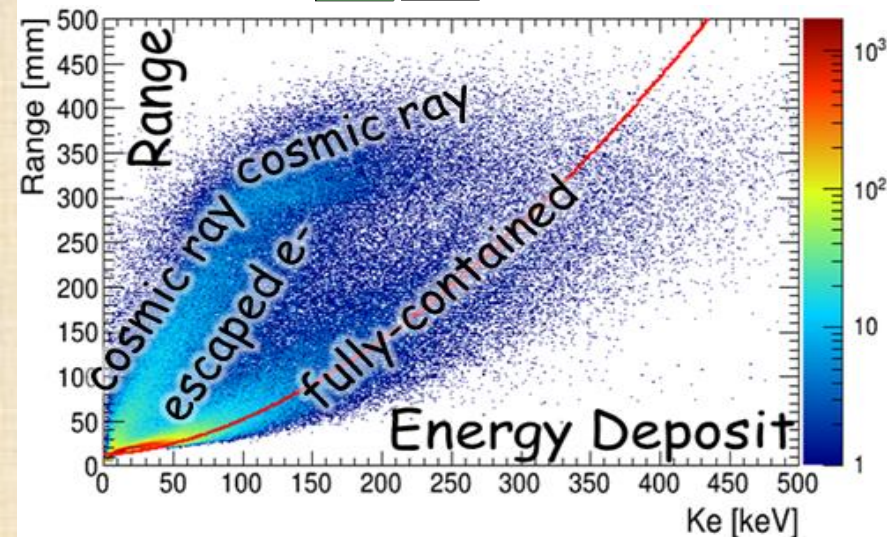
➤ 複数天体 & 背景放射の同時観測

## ● 冗長性のある雑音除去能力

➤ コンプトン散乱運動学テスト( $\alpha$ 角)

➤ 粒子識別( $dE/dx$ )

⇒ 重いVETO検出器(雑音源)不要



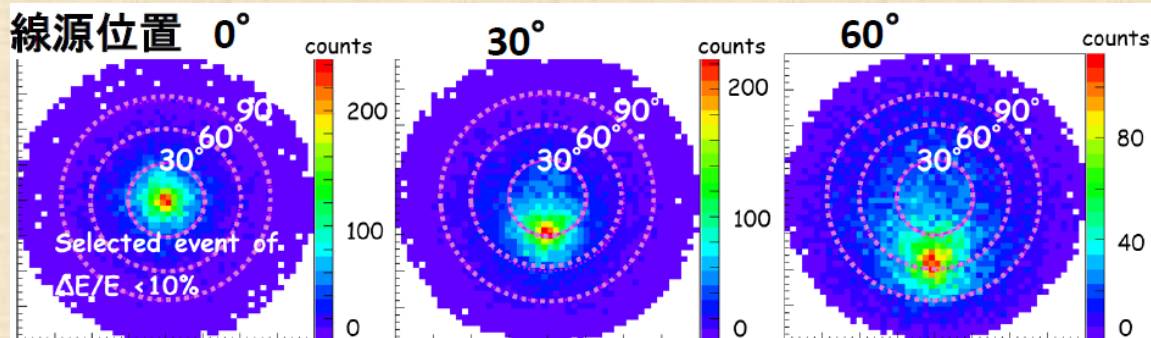


# SMILE-2+ 前回(2018秋)までの報告

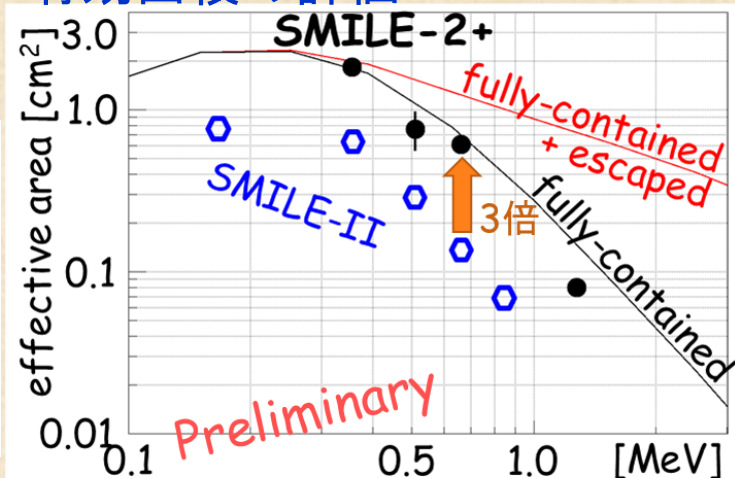
(Sub-MeV gamma-ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment-2+)

## 装置の地上性能評価

$^{137}\text{Cs}$  (662 keV) でのイメージングテスト



## 有効面積の評価



## 豪州フライト報告 & 初期解析

2018/4/7

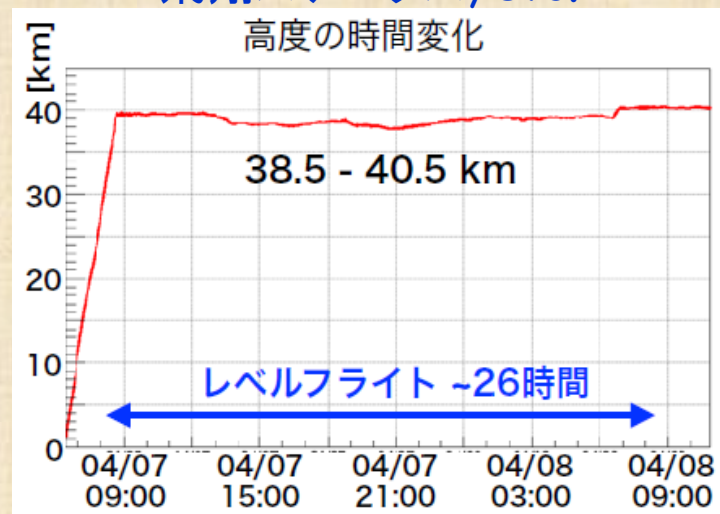
- 02:47 電源ON
- 03:09 DAQ start
- 06:24 放球
- 08:24 レベルフライト

2018/4/8

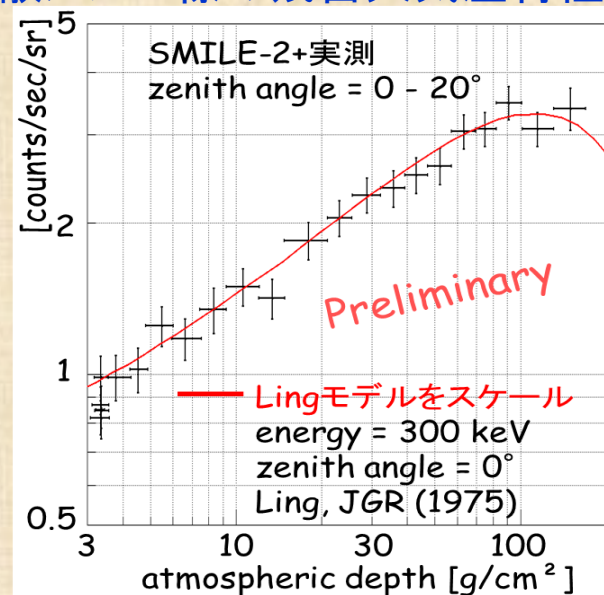
- 10:45 DAQ stop
- 10:53 電源OFF
- 11:07 カッター作動
- 11:40 着地

2018/4/9: 回収

### 飛行ステータス, etc.



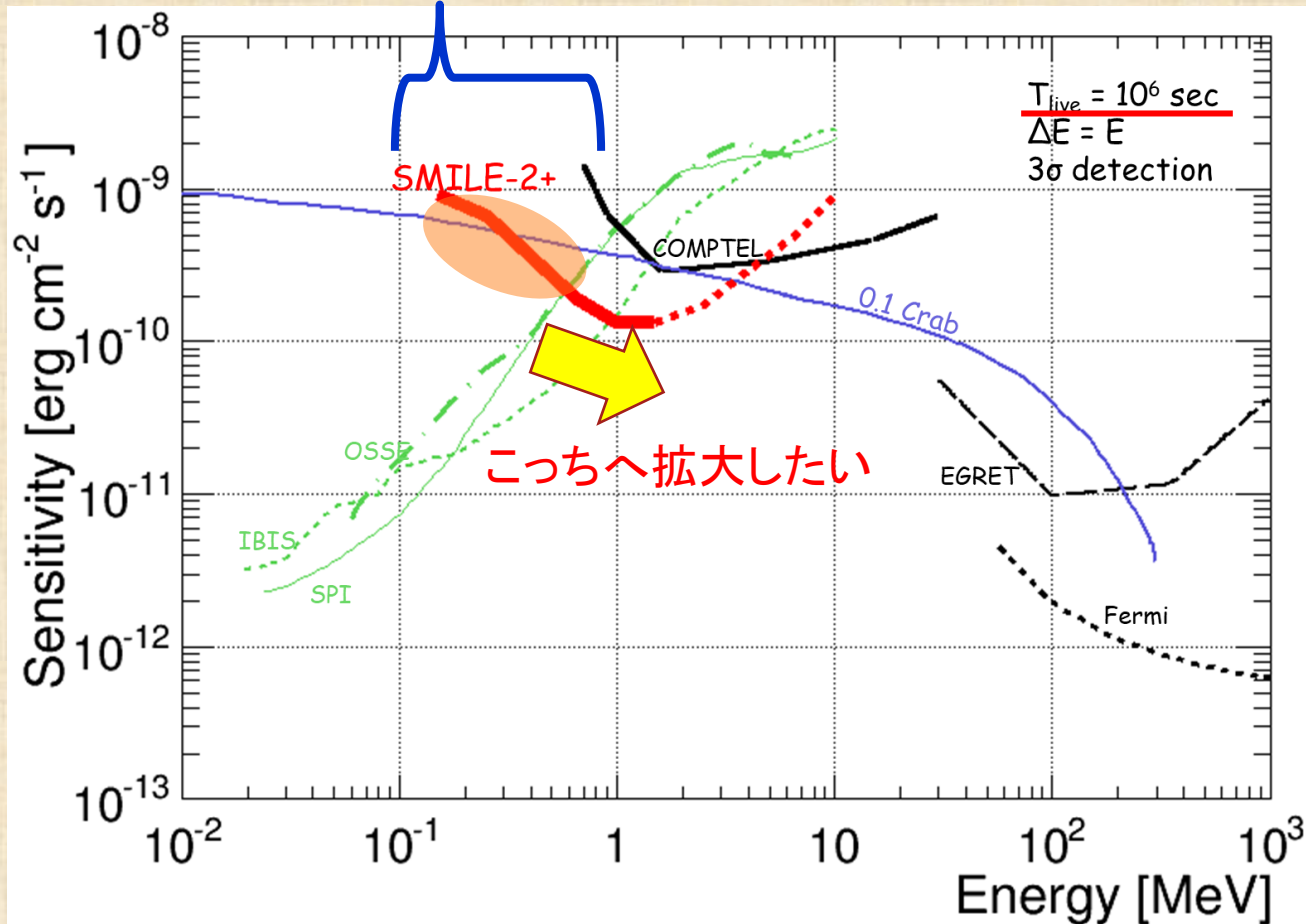
## 拡散ガンマ線の残留大気圧特性



Ling (1975) の半経験式と無矛盾

# SMILE-2+の観測エネルギー帯域

SMILE-2+ (豪州気球実験) では、  
sub-MeV を主とする観測エネルギー帯域に調整



MeV帯域のガンマ線をより高効率に解析できる手法が必要  
 → 電子のTPC脱出事象の積極的利用

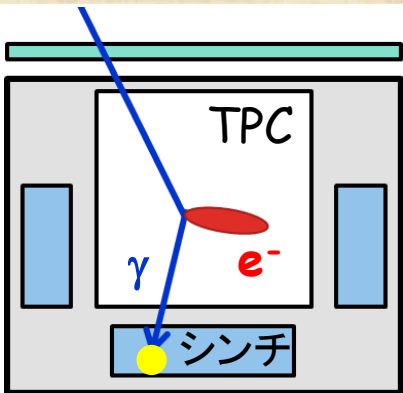
# 電子のTPC脱出事象

## 再構成可能なガンマ線事象の条件

- TPC内でコンプトン散乱
- 散乱ガンマ線と反跳電子を同時計測

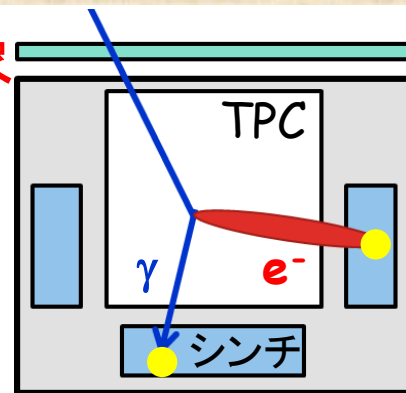
### 従来の解析対象

シンチ **1 hit**  
+ TPC 1 track



### 電子のTPC脱出事象

シンチ **2 hit**  
+ TPC 1 track



典型的な地上試験で

データ比率: (シンチ **1 hit** : **2 hit**) = (3 : 2)

シンチ 2 hit データ: ~30 Hz

偶然同時計数の予測: ~3.6 Hz



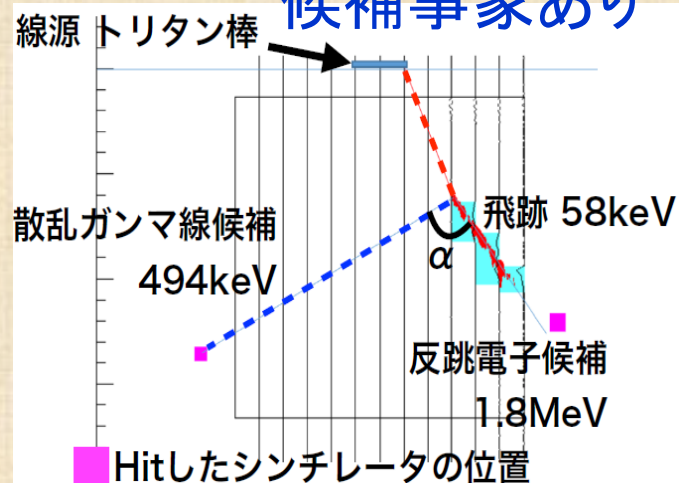
偶然同時計数だけでない

1つの物理現象で

シンチ **2 hit** + TPC 1 track

のトリガーがある

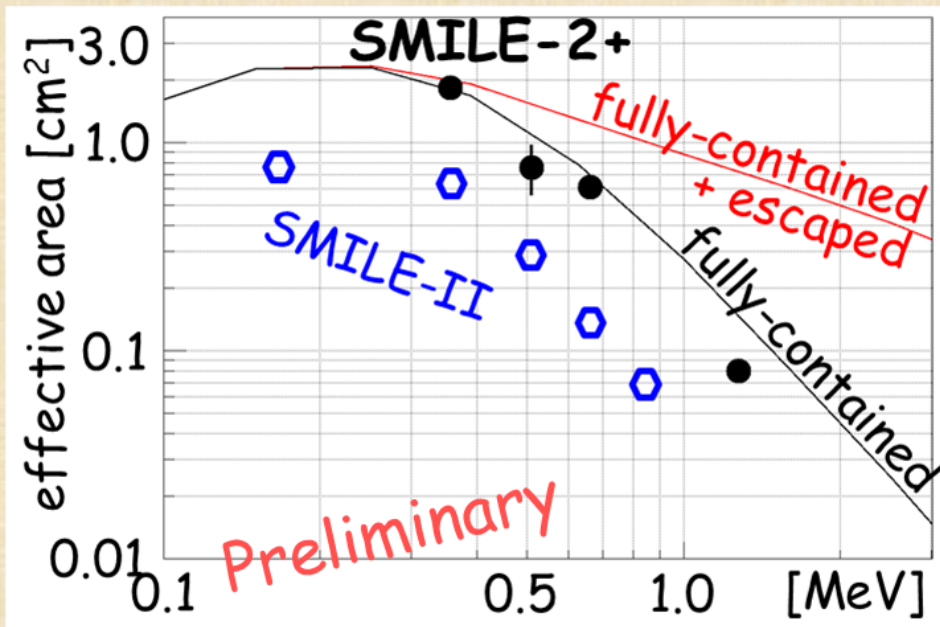
地上実測で  
候補事象あり





# 電子のTPC脱出事象を解析する利点

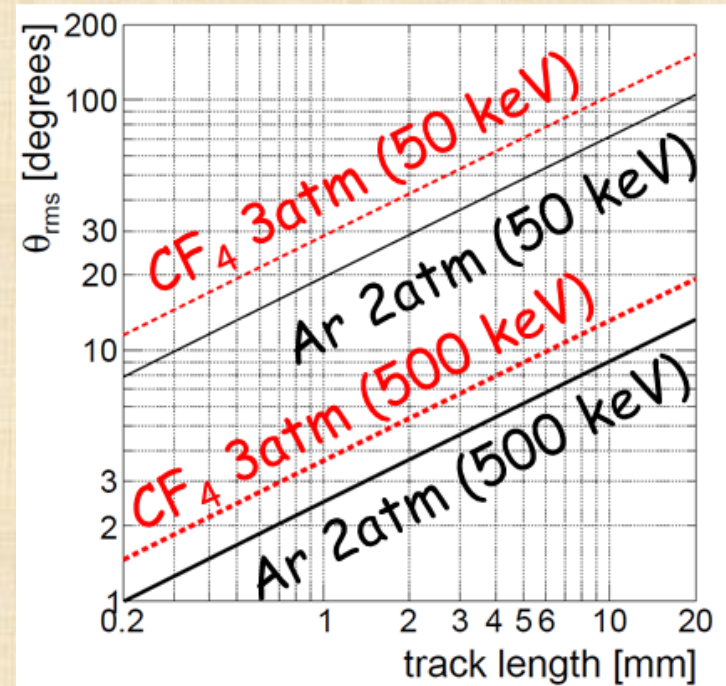
## 有効面積の増大



1 MeV で 4倍、  
2 MeV で 1桁以上の改善

## 角度分解能の向上

ガス中での電子の多重散乱角



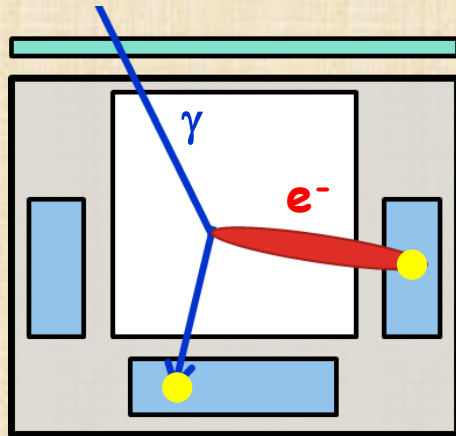
高エネルギー電子では  
電子反跳方向を高精度で決定可

電子のTPC脱出事象の解析は、  
MeV帯域での感度向上が期待できる



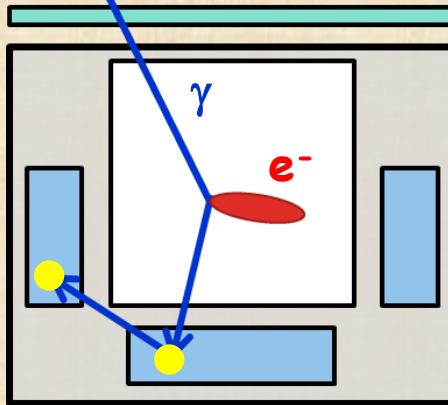
# シンチを2hitさせるトリガー一例

電子のTPC脱出



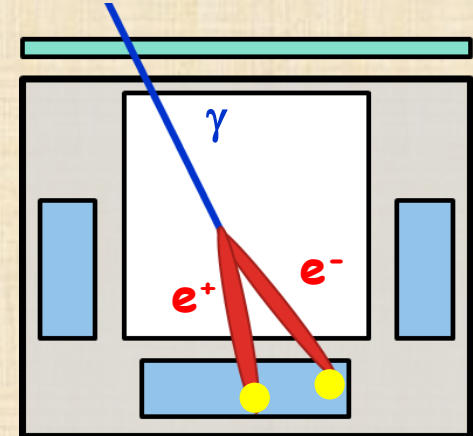
使いたい

ガンマ線の多重  
コンプトン



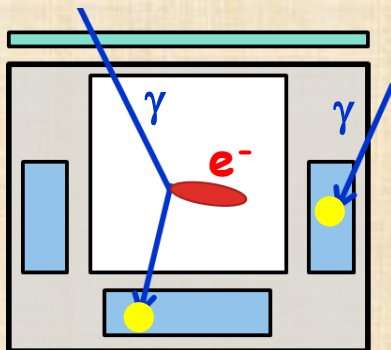
使いたい

対生成事象

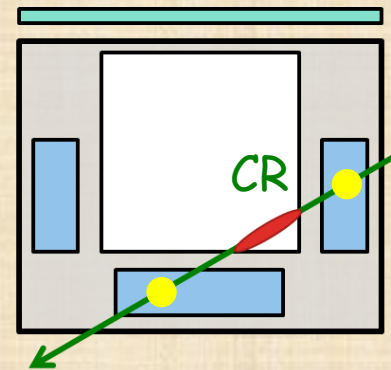
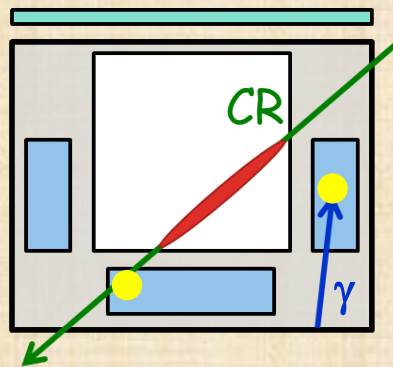


将来的に使うかも?

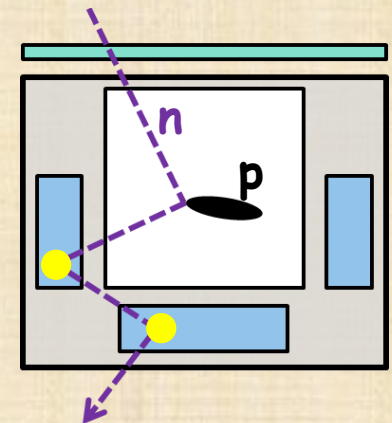
偶然同時計数



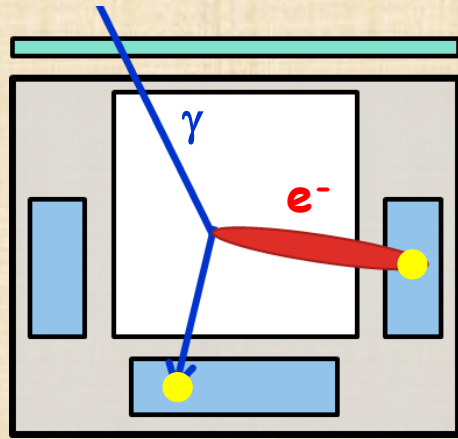
宇宙線の通過



中性子反跳



# 電子のTPC脱出事象の解析

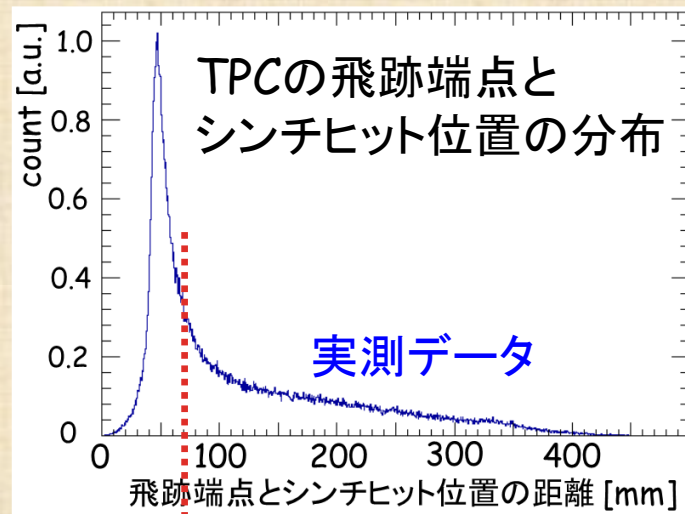
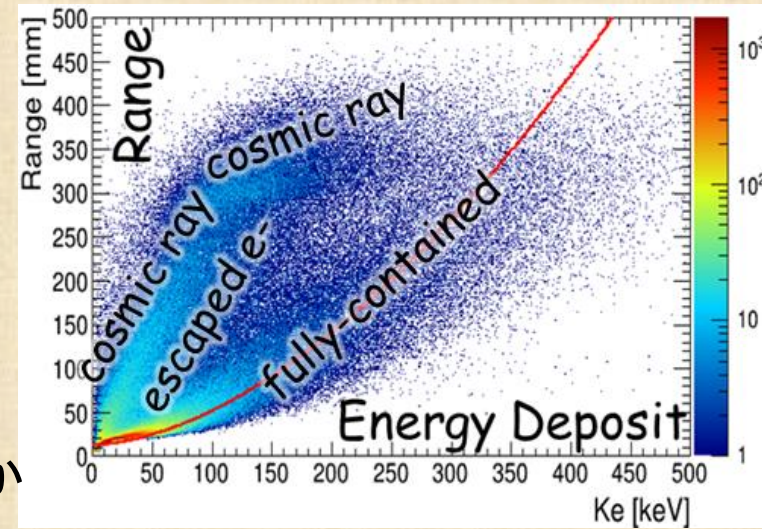


## ガスTPC

- エネルギー損失率が従来と異なる領域になる (escaped e<sup>-</sup>)

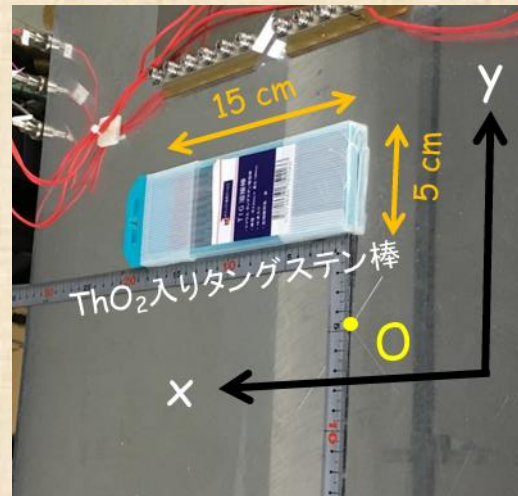
## シンチレーター

- 反跳電子ヒットなのか、散乱ガンマ線ヒットなのか判別する必要あり

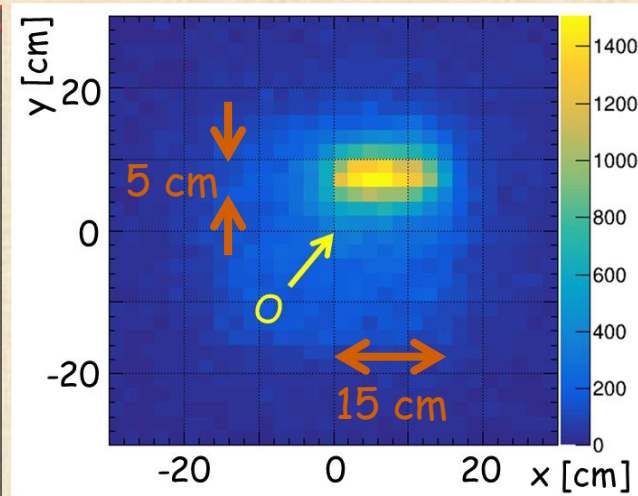


飛跡端点から 70 mm 以内のシンチヒットを反跳電子とする解析を試してみる

## 地上試験(トリタン棒)



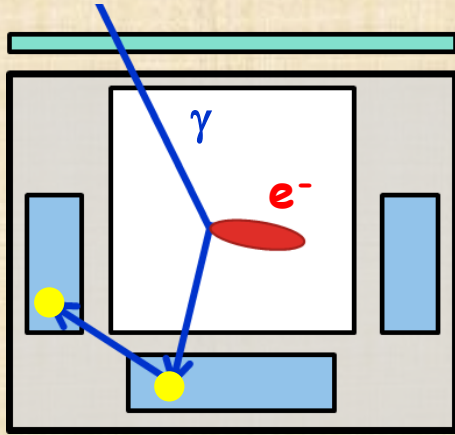
## 2.6 MeV付近での再構成画像



電子のTPC脱出事象を使った解析で面線源をイメージングできている



# ガンマ線の多重コンプトン事象

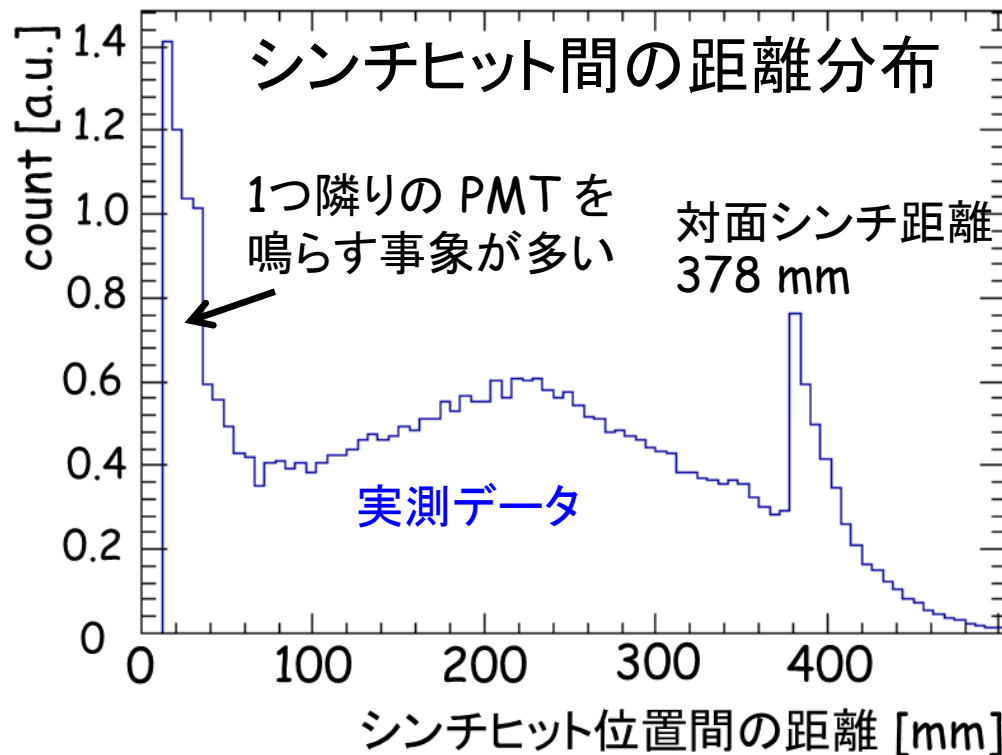
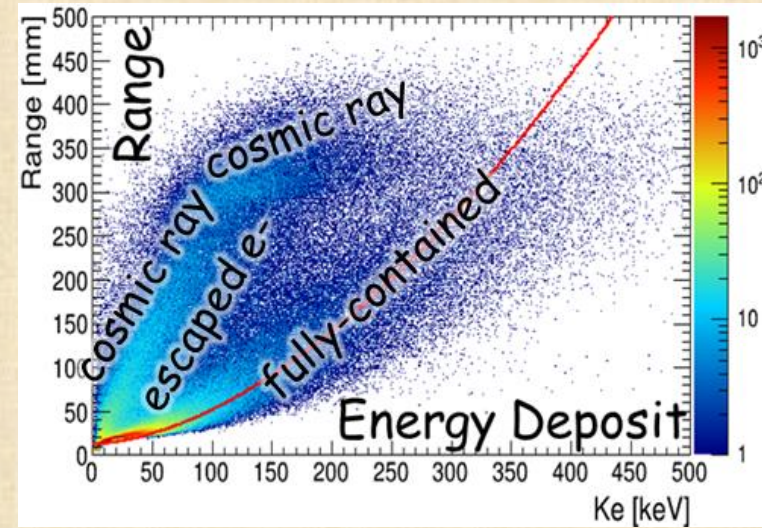


## ガスTPC

- 従来の解析対象と同じ (fully-contained)

## シンチレーター

- ヒット順番を解く必要あり



コンプトン散乱の運動学テスト (alpha角テスト) 等で、多重コンプトンのヒット順番や事象としての尤もらしさを評価する必要あり

今後、多重コンプトン事象を救う解析にも挑戦していく



# まとめ

- ◆ 電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) での  
高エネルギー事象の解析を目指した 地上study
  - 1つの物理現象でシンチレーターを 2 hit させる事象あり
  - **電子のTPC脱出事象**の積極的利用
    - ✓ MeV帯域の感度向上  
有効面積の増大 (1 MeV で 4倍、2 MeV で 1桁以上)、  
角度分解能の向上 が見込める
    - ✓ トリタン棒 (2.6 MeV, 面線源) の **イメージング成功**
  - 今後、2 hit 事象解析 の性能評価や、  
他のトリガーパターンへの適用を進める

この後の講演にて

豪州気球実験 SMILE-2+ (2018年4月) のフライトデータ報告

**Crab**解析報告: 竹村講演

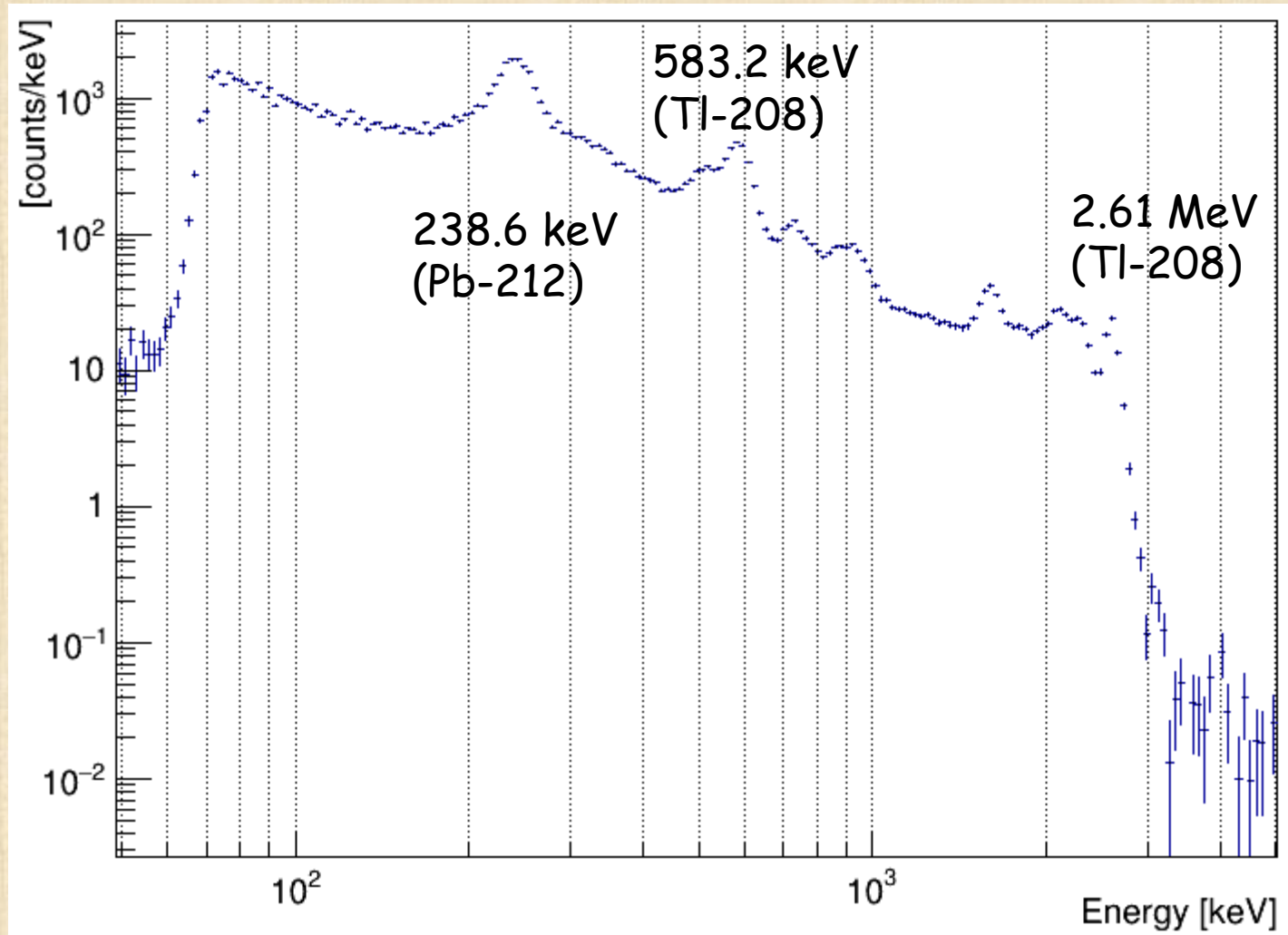
**銀河中心領域**の解析報告: 阿部講演

そして、SMILE-3 へ: 高田講演



# トリタン棒のスペクトル

( $\text{ThO}_2$ 入りタングステン棒)

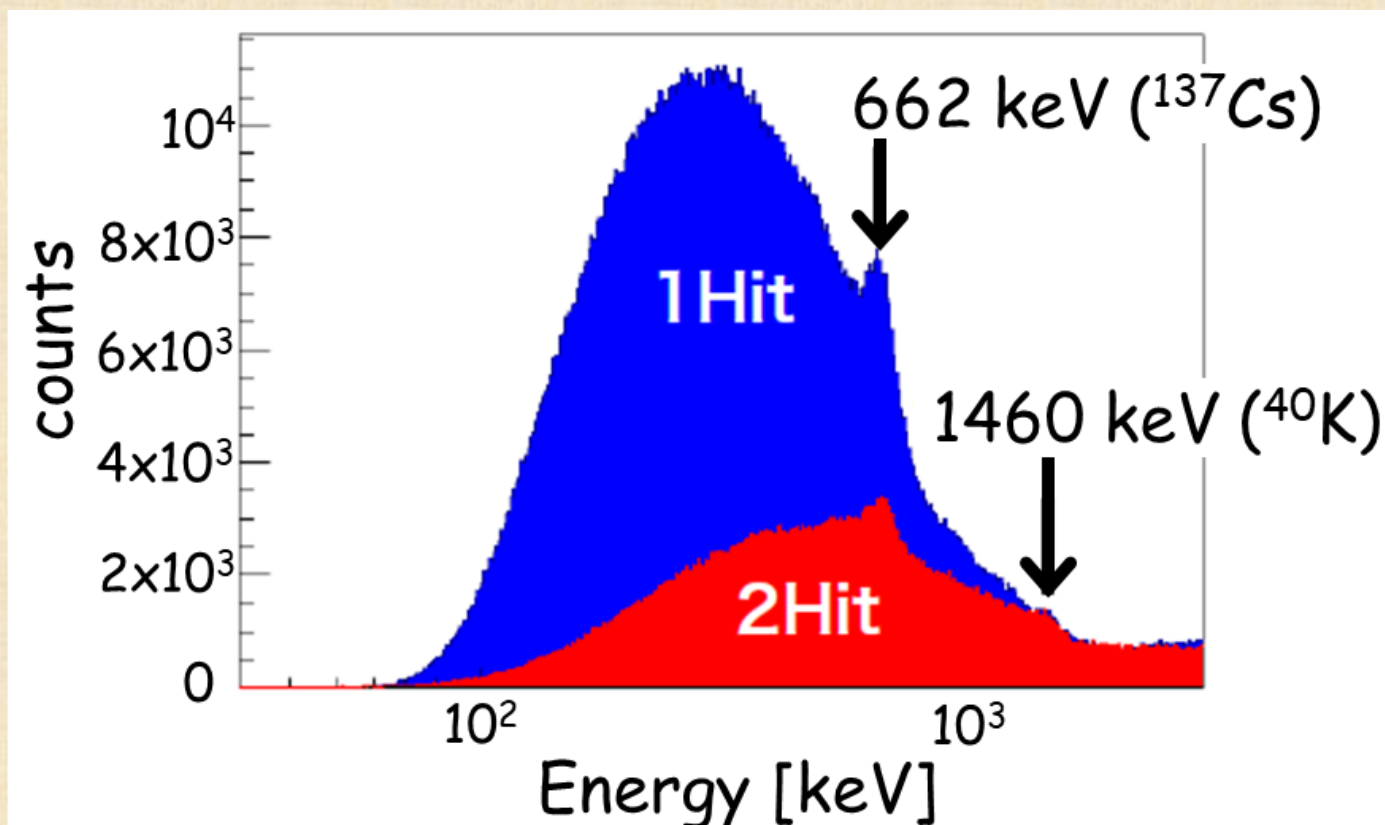


電気をを用いたアーク溶接で電極として用いられる

$\text{ThO}_2$ 濃度 2.0% 以下なら、放射線障害防止法・労働安全衛生法の規制対象外



# シンチ 1 hit, 2 hit のエネルギー特性 15



# SMILE気球実験計画

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

SMILE-I @ 三陸 (Sep. 1<sup>st</sup> 2006) 10 cm角, Xe+Ar 1気圧

- 気球高度での動作試験: 安定動作O.K.
- 宇宙拡散・大気ガンマ線の観測 (0.1 ~ 1 MeV):  
他の観測と一致する結果 Takada+ (2011, ApJ)

2018/4/7 06:24

SMILE-II (地上較正) (豪州中部標準時間) 30 cm角, Ar 1気圧  
Y. Mizumura+ (2014, JINST)

アリススプリングスより無事に放球!

- 有効面積:  $\sim 1 \text{ cm}^2$  @ 511 keV (Tanaka+ (2015, ApJ))
- 角度分解能: HPR  $\sim 15^\circ$  @ 662 keV (ARM=5.3°, SPD $\sim 100^\circ$ )

SMILE-2+ (大気ガンマ線観測, 天体イメージング) 30 cm角, Ar 2気圧

- 有効面積: a few  $\text{cm}^2$  @ 511 keV 511 keV from G.C. @ Alice Springs
- 角度分解能: HPR  $\sim 10^\circ$  @ 662 keV

2018春, 豪州気球実験

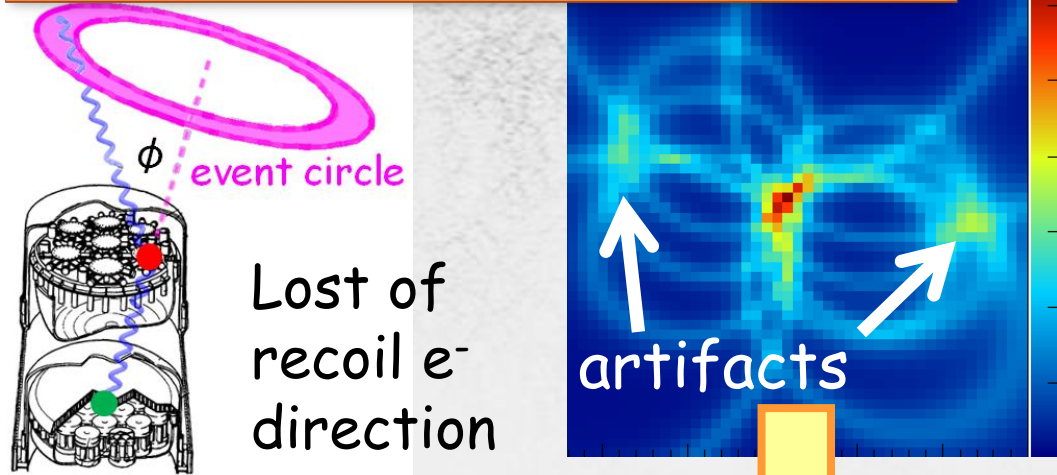
SMILE-3 (長時間気球を用いた科学観測) 30 cm角, CF<sub>4</sub> 3気圧

- 有効面積:  $\sim 10 \text{ cm}^2$  @  $< 500 \text{ keV}$
- 角度分解能: HPR  $\sim 5^\circ$  @ 662 keV

人工衛星での全天観測 50 cm角, CF<sub>4</sub> 3気圧

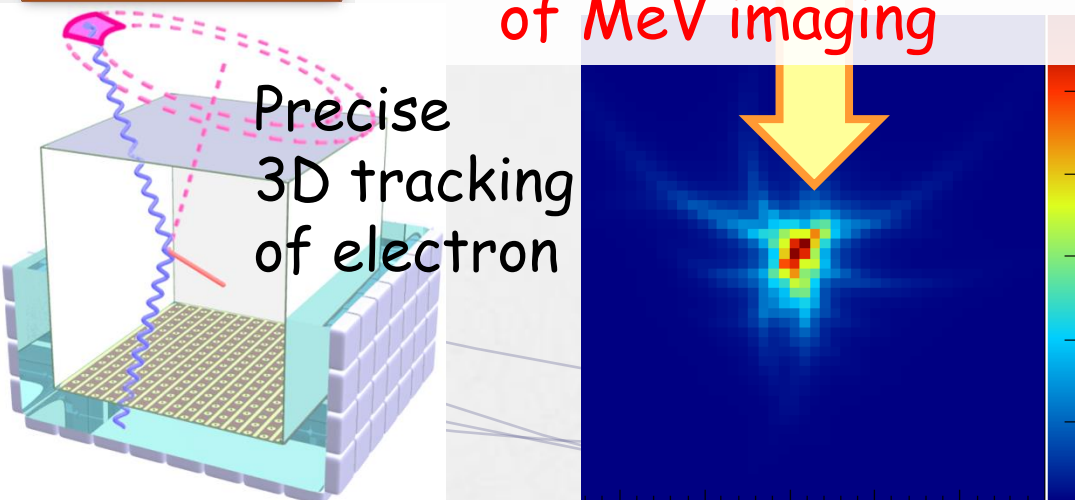
# Concepts of our MeV telescope: **ETCC** (**E**lectron-**T**racking **C**ompton **C**amera)

## Conventional Compton Camera

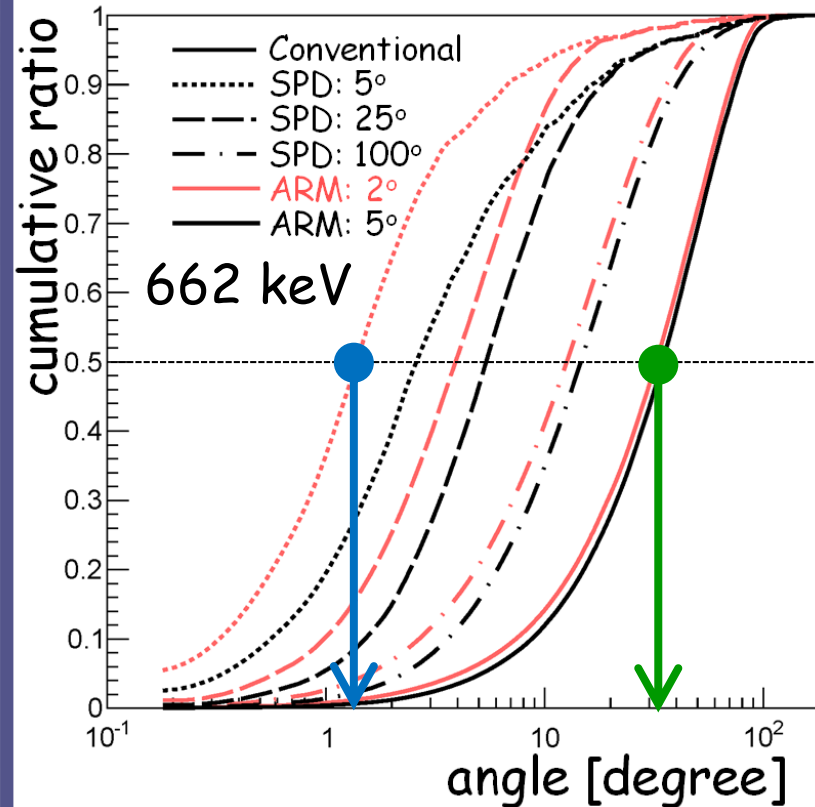


## ETCC

Significant Improvement  
of MeV imaging



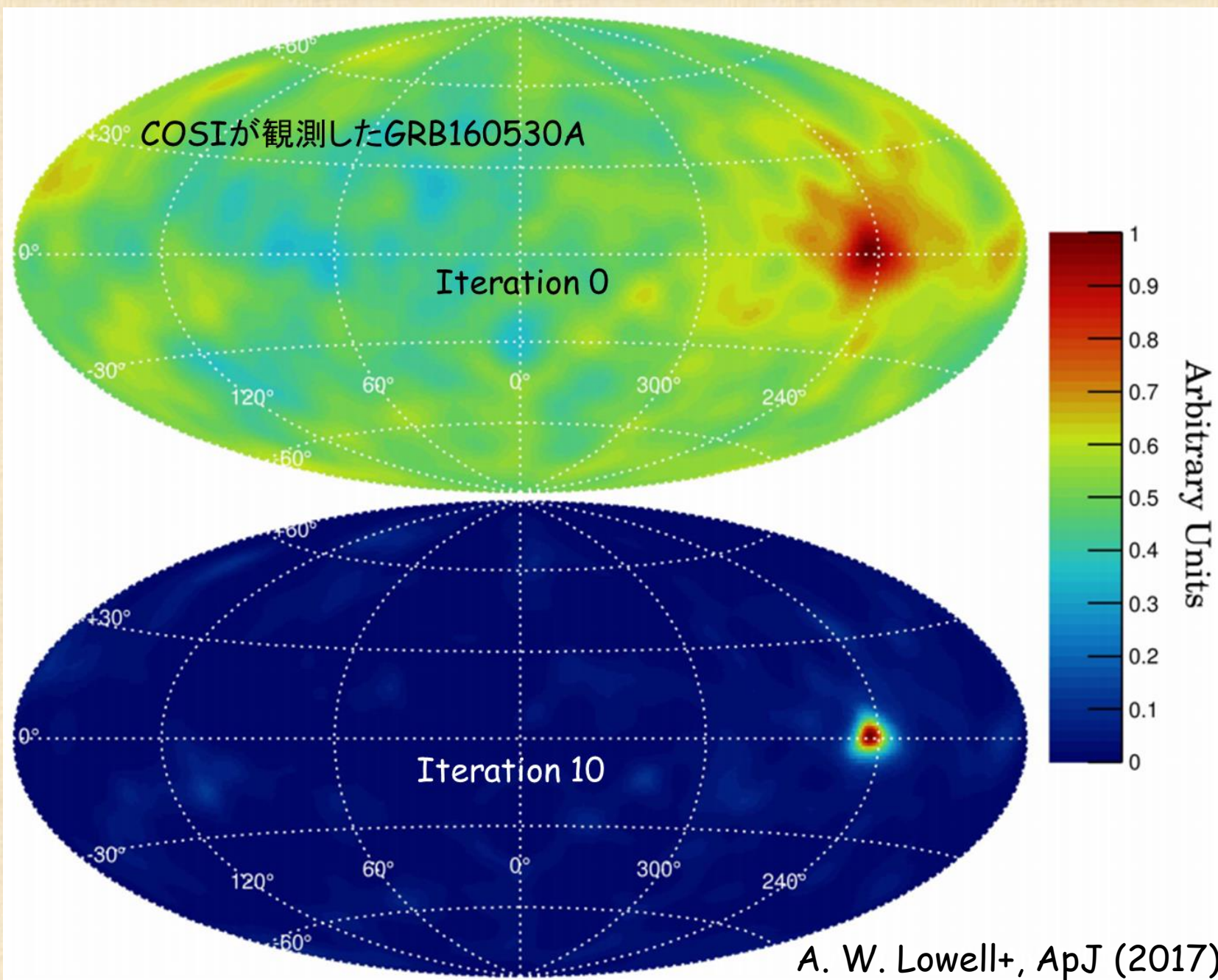
## Point Spread Function (PSF)



Half of all photons within  
>30°: Conventional CC.  
1-2°: ARM 2° + SPD 5°



# COSI によるガンマ線イメージング

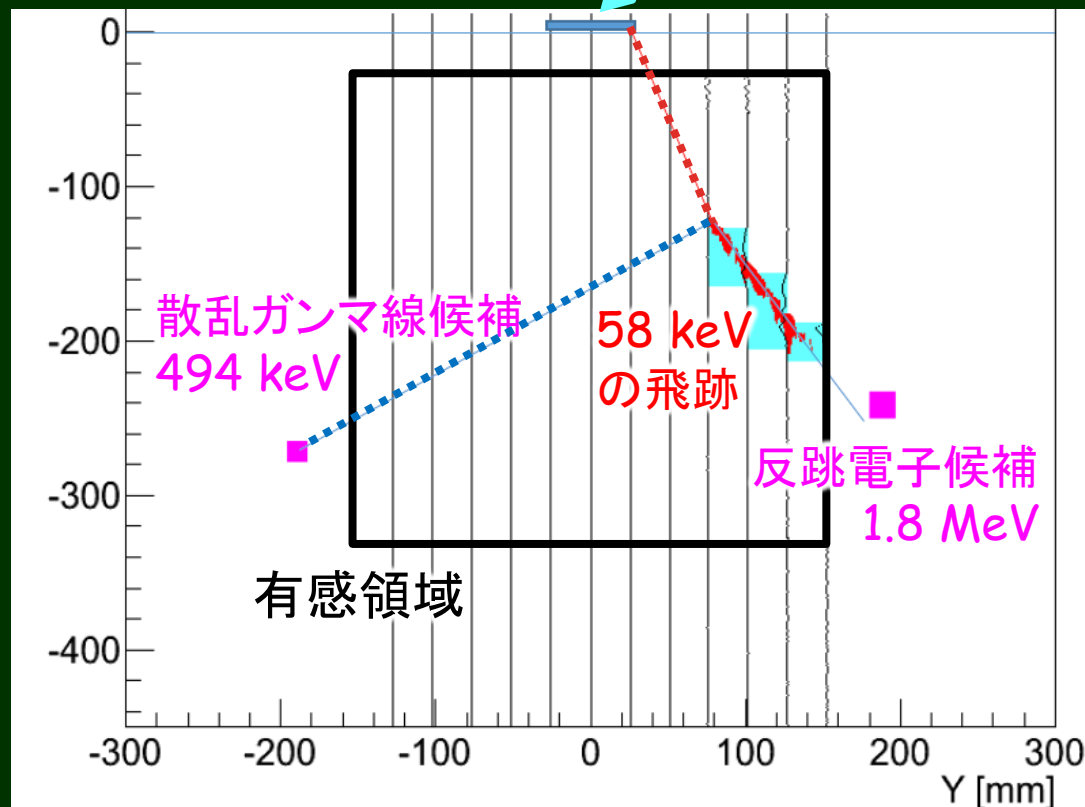
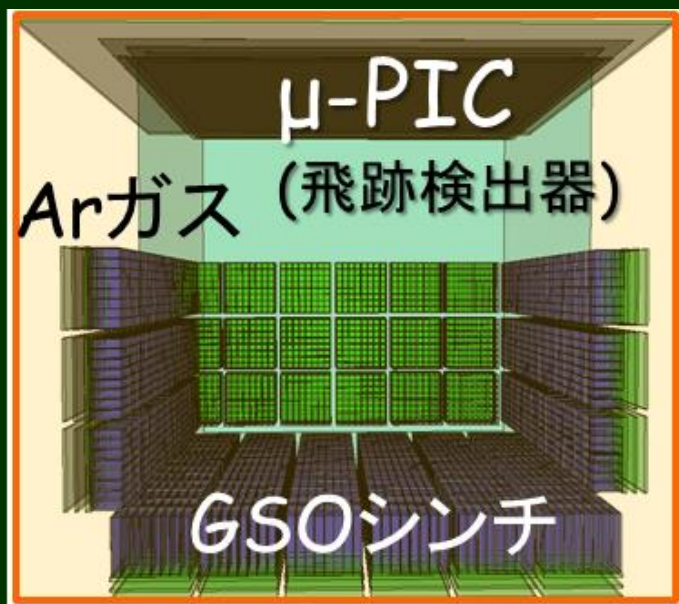


# 反跳電子をシンチで検出したイベント例 19

## ◆シンチをガス容器に入れた最大の理由

- 高エネルギーの反跳電子を検出  
→ 有効面積と角度分解能の向上を狙う！

トリウム入り  
タングステン棒  
(ガンマ線源)



実際に、高エネ電子をシンチで検出できている！

詳細解析はこれから

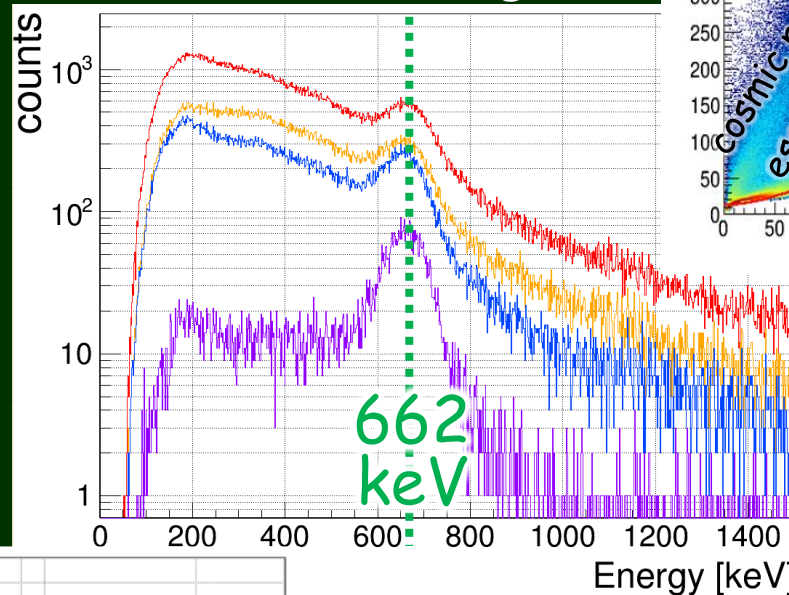


# 地上較正

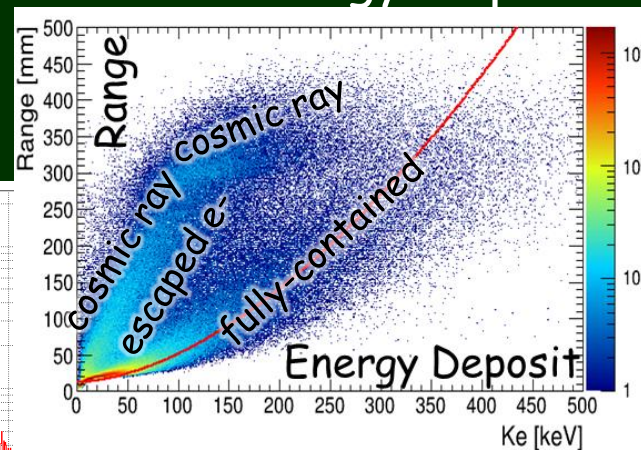
## 地上較正実験の様子



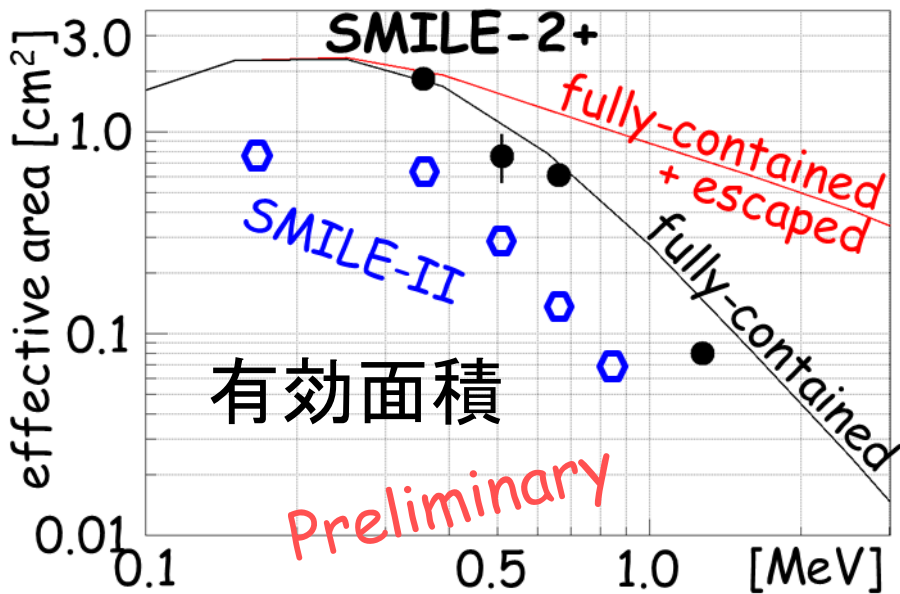
## エネルギースペクトル $^{137}\text{Cs}$ 線源 (662 keV) @zenith $\sim 0$ deg.



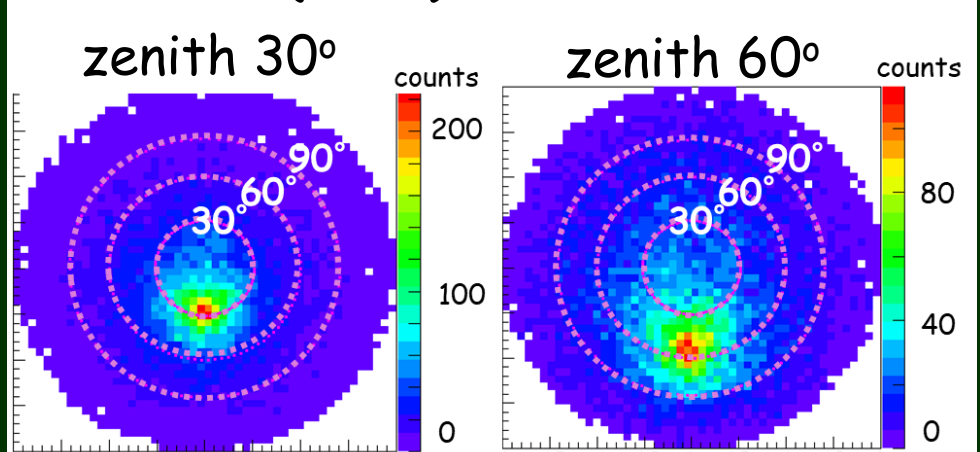
## 飛程 vs Energy Deposit



Accepted events  
Fiducial volume  
dE/dX selection  
Imaging selection  
(15 deg.)



## 点源( $^{137}\text{Cs}$ )のイメージング



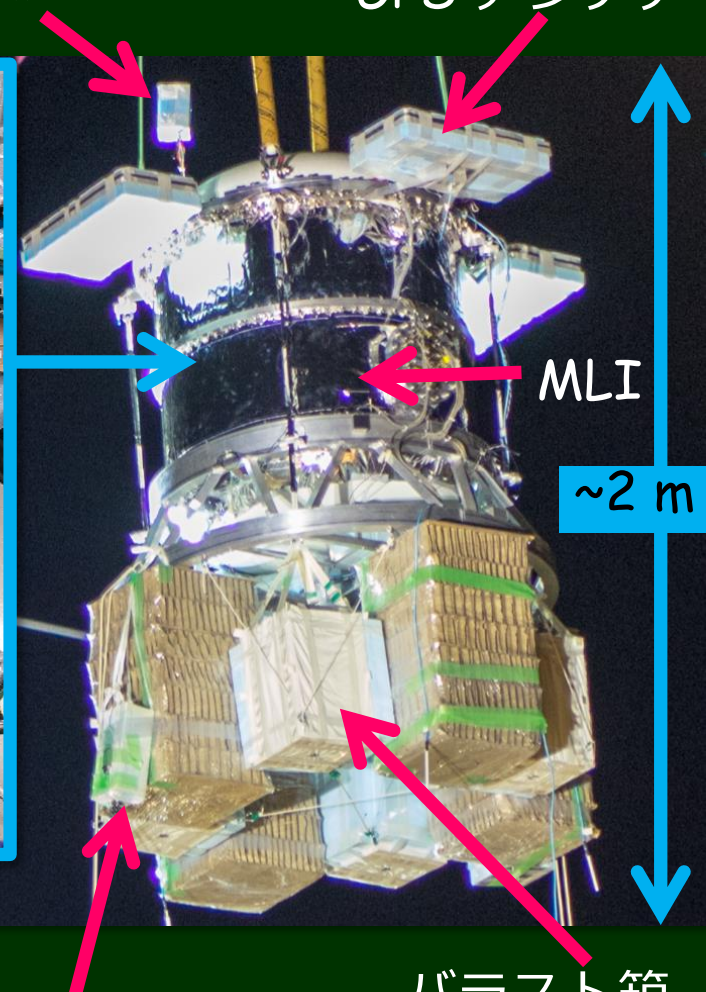
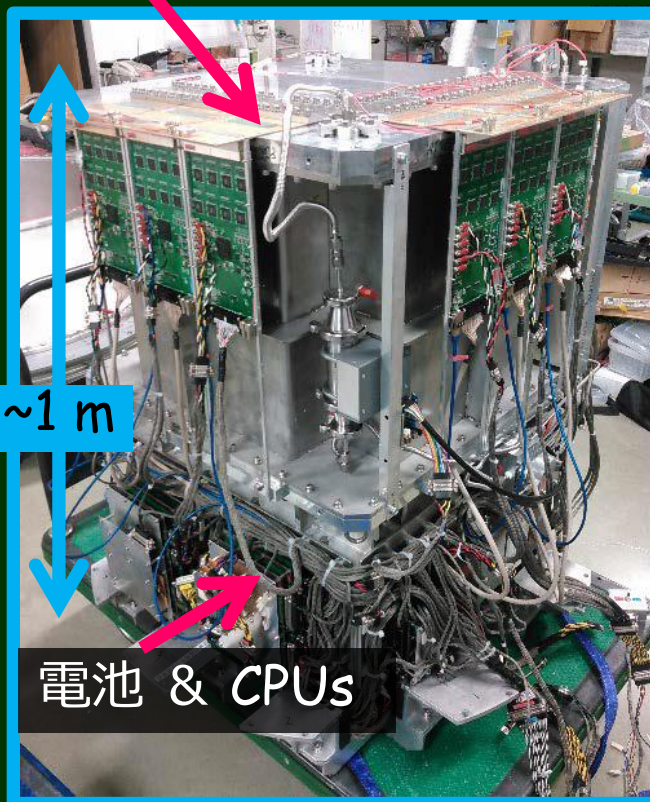
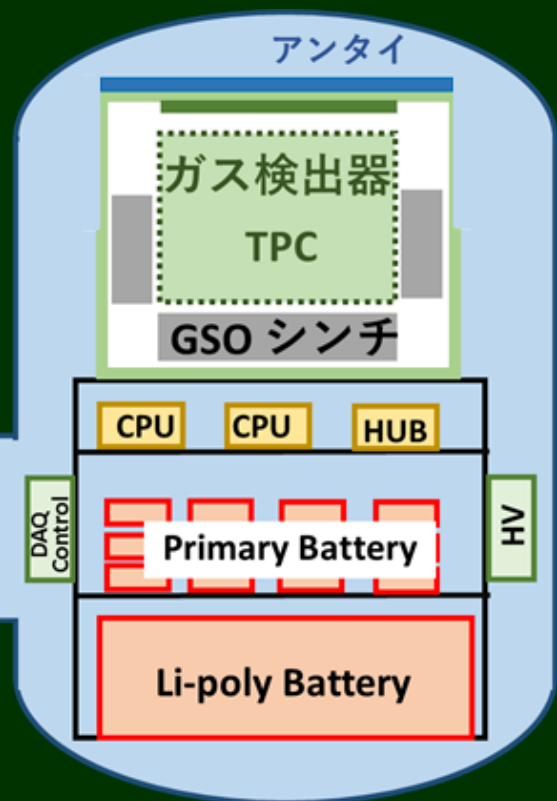


# SMILE-2+の気球ペイロード姿

検出器 (ETCC)

磁気姿勢計

GPS アンテナ



重量 511 kg  
消費電力 214 W  
姿勢制御なし  
姿勢センサー  $\sim 1^\circ$

衝撃吸収材

バラスト箱

# 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



# フライトの概要



4/7 6:24 放球

JAXA気球グループの運用



水平飛翔 26時間

- かに星雲 ~6 時間
- 銀河中心領域 > 8 時間



JAXA ← 望遠鏡装置

4/9 装置の回収



天体の観測、装置の回収に成功



# SMILE-IIからSMILE-II+へ

## ◆SMILE-IIの改良余地

シンチレーター(GSO 13 mm)

1. 0.5 MeV  $\gamma$ 線の40%が素通り
2. 飛跡検出器を十分覆えず

ガス飛跡検出器(Ar 1気圧, 30 cm角)

1. 150 keV以上の電子は測定困難
2.  $\sim 50$  keV電子の多重散乱 $\sim 100^\circ$



## ◆SMILE-II+での改良設計

①GSOの厚みを増大 大有効面積

⇒散乱ガンマ線の検出確率up!! 広帯域

②ガス容器内にGSOを設置

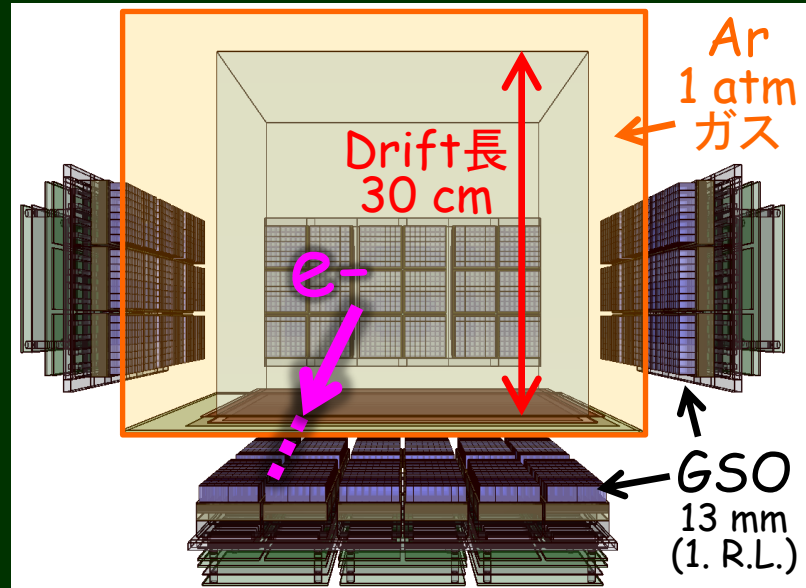
⇒150 keV以上の電子も測定可 広帯域

⇒150 keV電子の多重散乱 $\sim 20^\circ$  良PSF

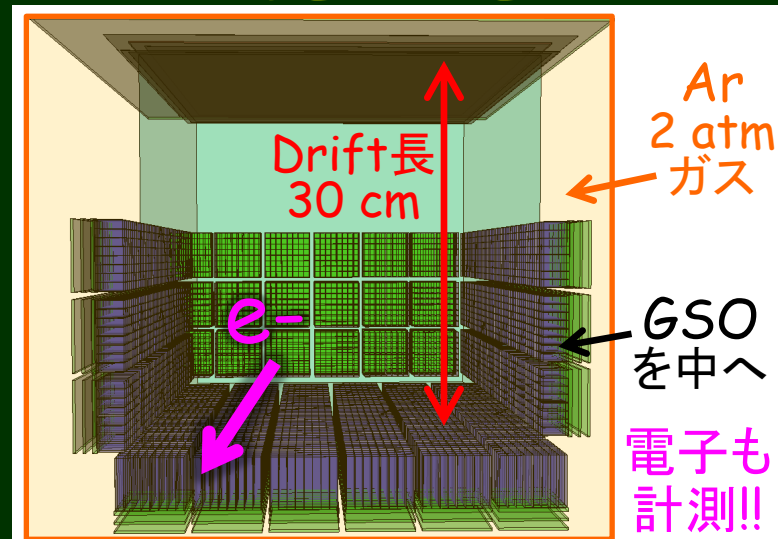
⇒シンチの隙間が激減 大有効面積

③ガス圧力の増強 大有効面積

### SMILE-II ETCC

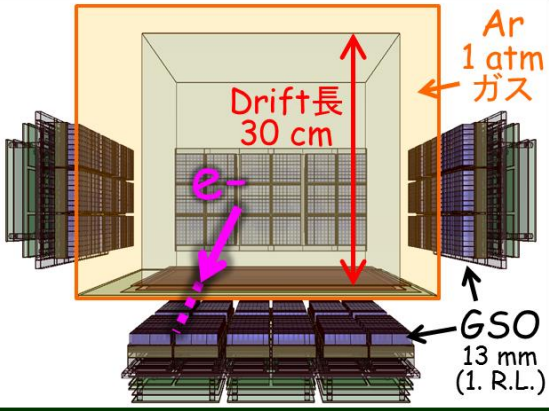


### SMILE-II+ ETCC

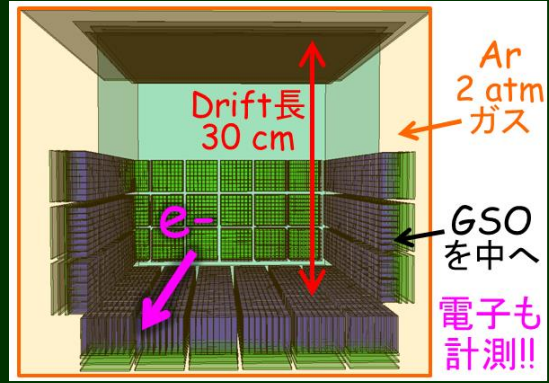


# SMILE-2+の予測性能

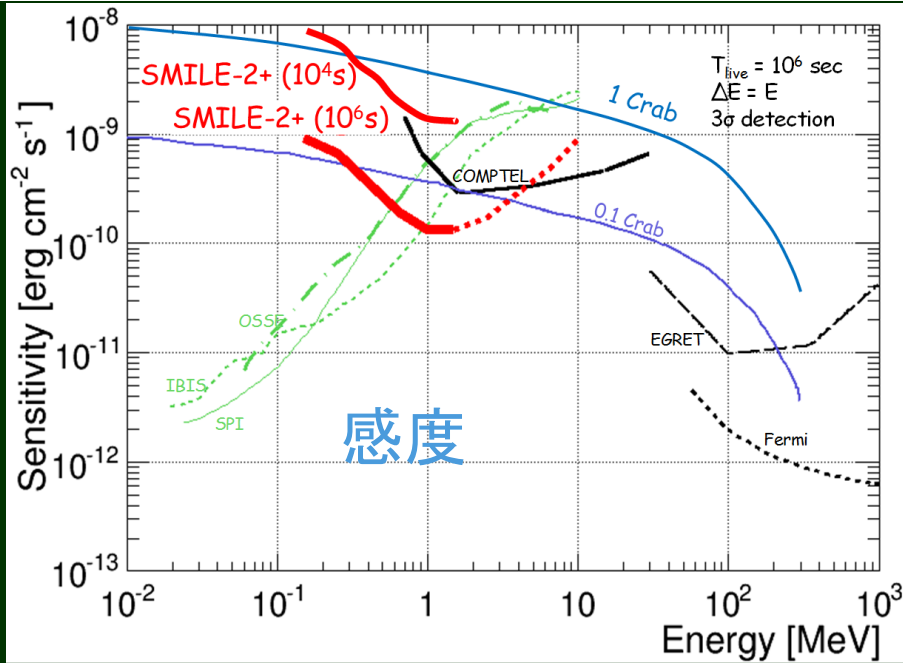
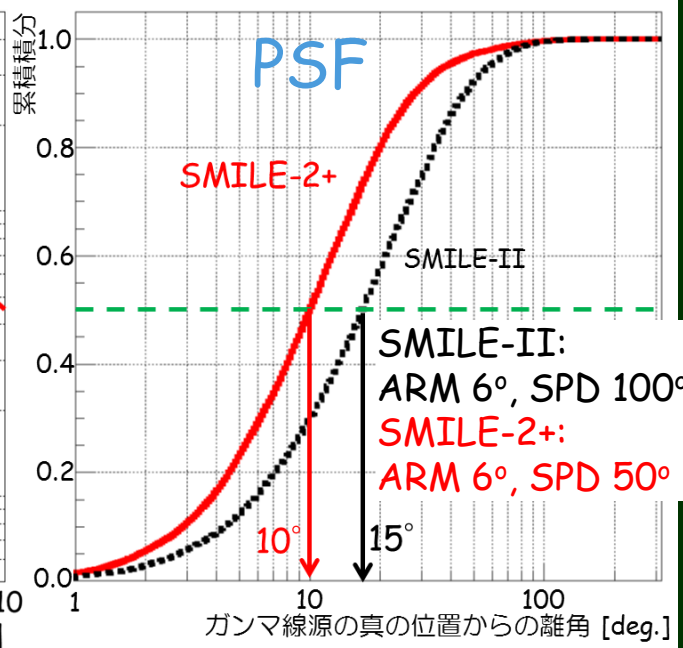
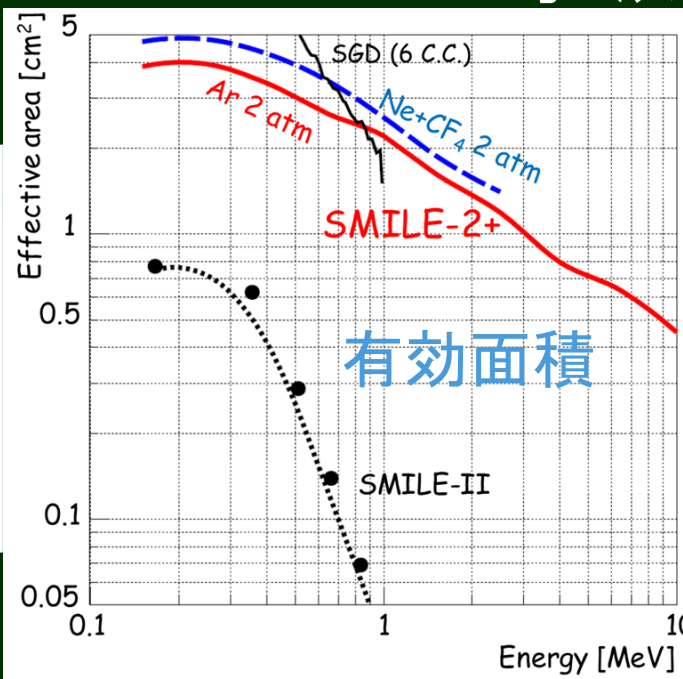
## SMILE-II



## SMILE-2+

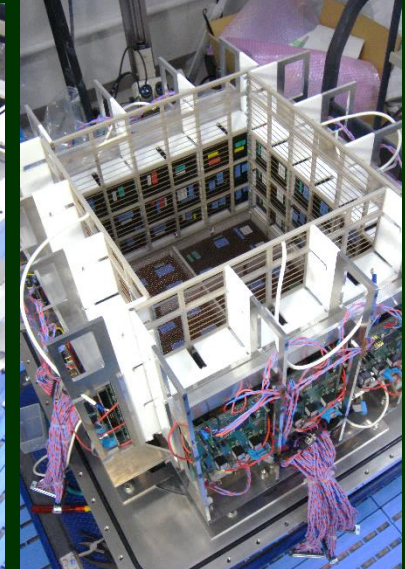
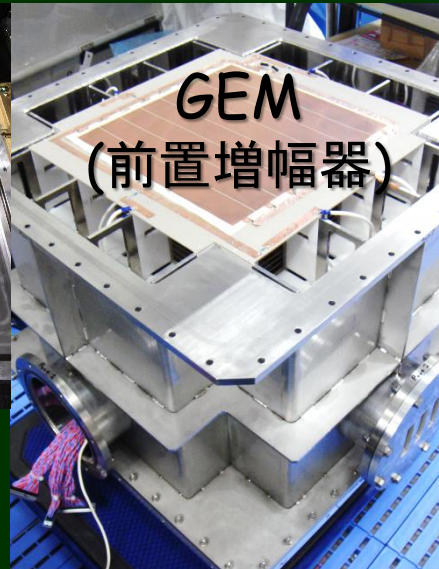
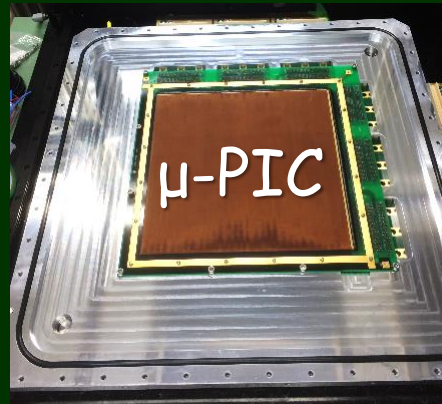
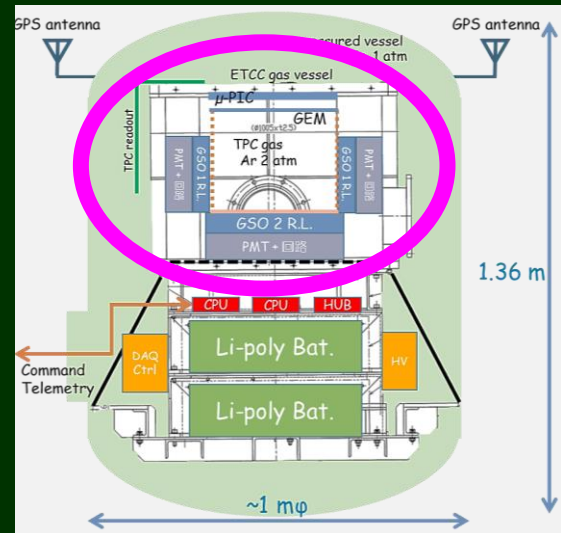
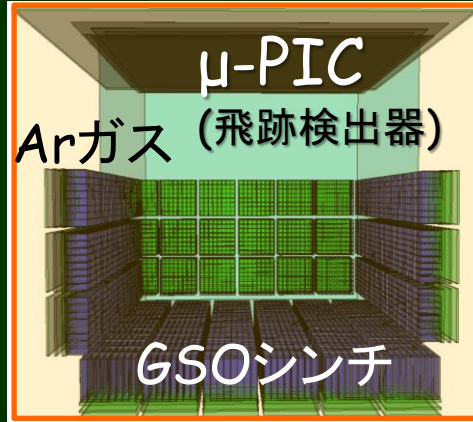
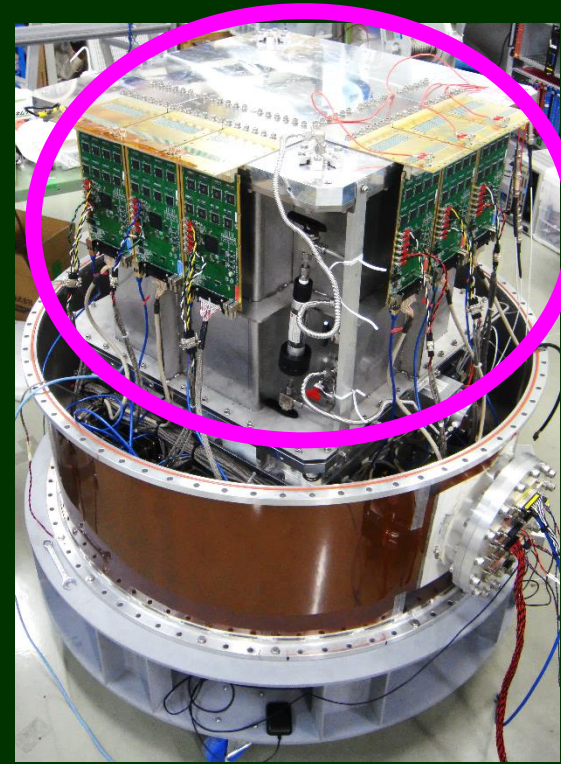


設計変更の詳細は  
前回までの年会で報告済み





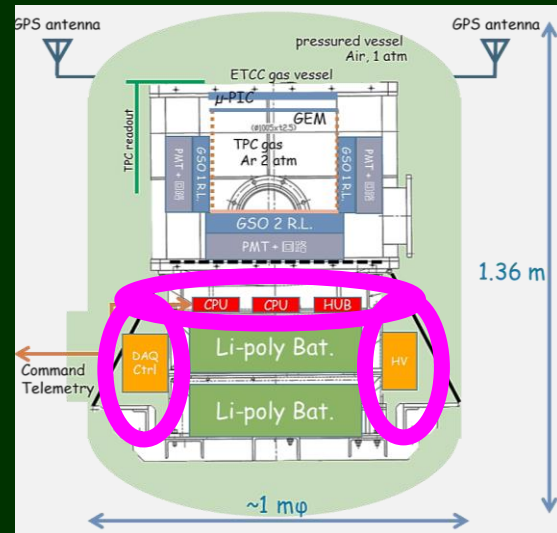
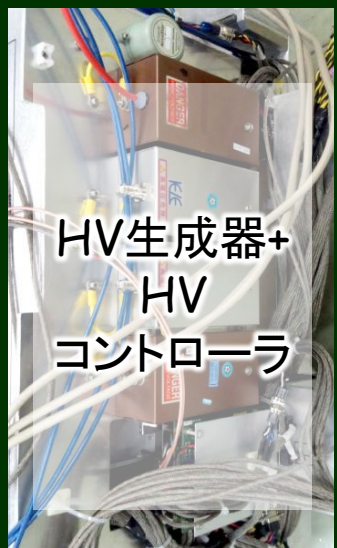
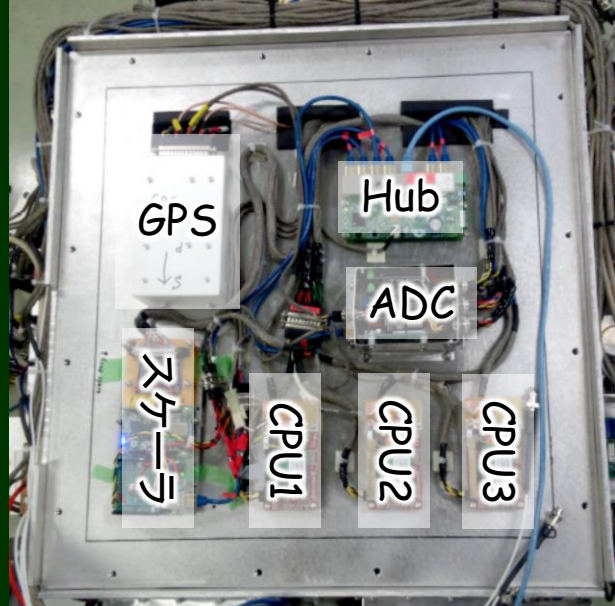
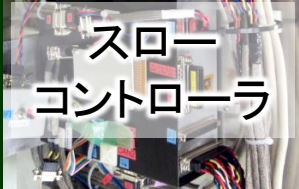
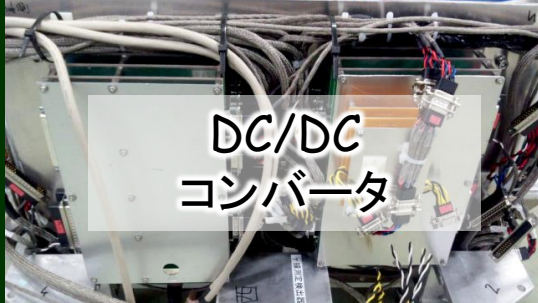
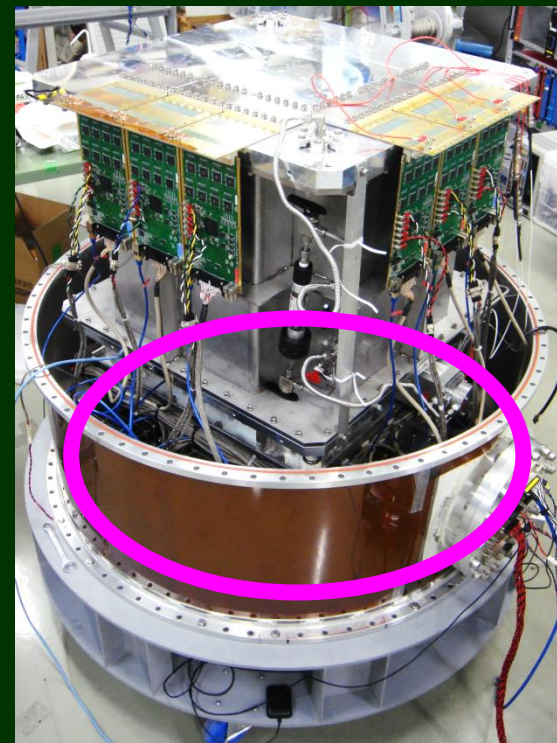
# SMILE-2+検出器部の構築



検出器部の  
重量: 171 kg



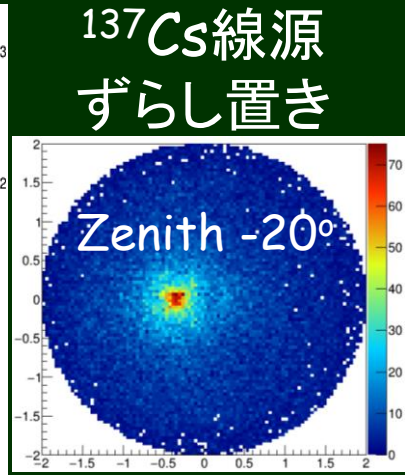
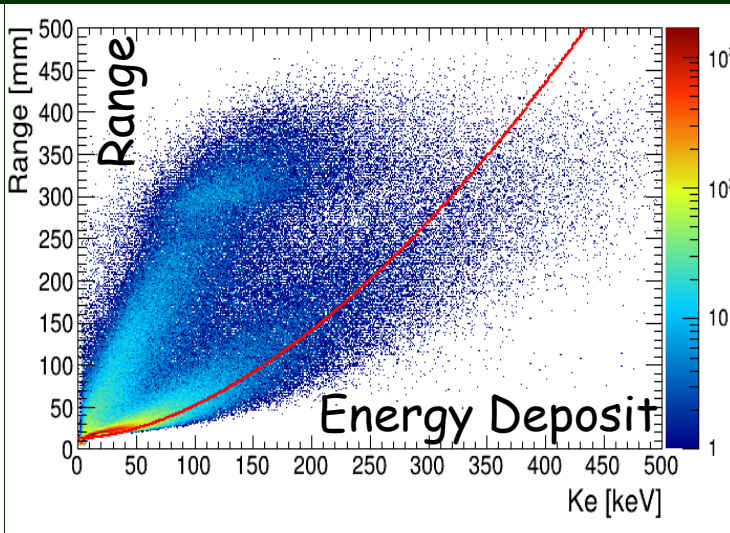
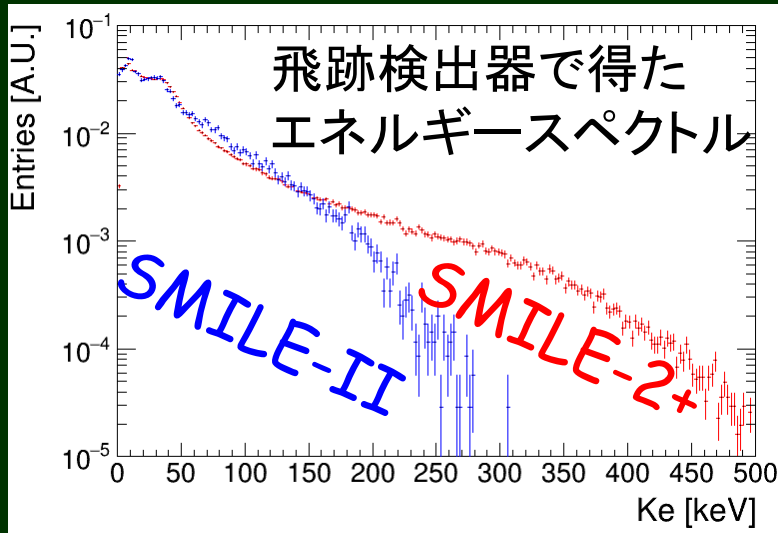
# SMILE-2+システムの構築



システム部の  
重量: 127 kg

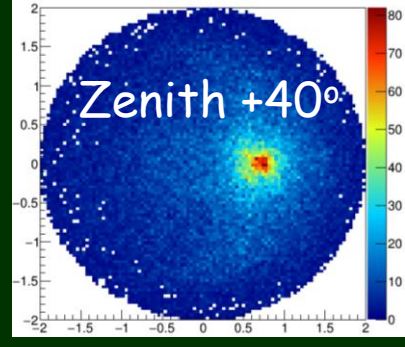
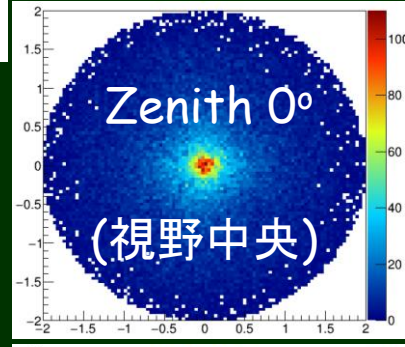
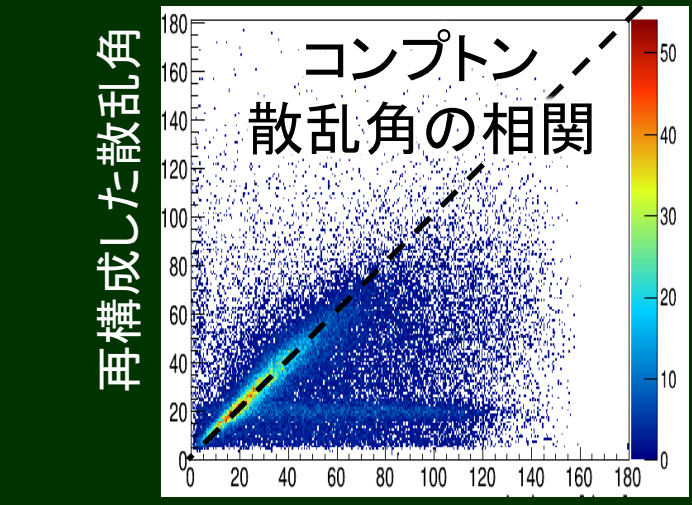
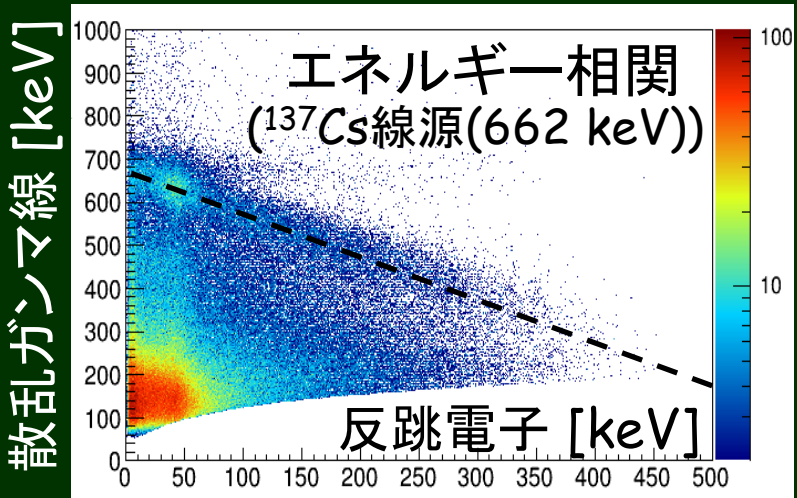


# 検出器の動作確認



↑ガス2気圧化による  
電子検出エネルギー拡大を確認

↑ Ar 2気圧の電子飛程に合致



線源位置に対応する散乱角

コンプトン散乱事象を検出している事を確認

撮像もO.K.