

# MeVガンマ線観測用 電子飛跡検出型コンプトンカメラにおける 電場歪み補正と事象解析への適用



京都大学 宇宙線研究室 中村優太

谷森達, 高田淳史, 竹村泰斗, 吉川慶, 阿部光, 水本哲矢, 園田真也, 窪秀利, 古村翔太郎, 岸本哲朗, 谷口幹幸,  
小野坂健, 齋藤要, 水村好貴<sup>A</sup>, 小財正義<sup>A</sup>, 黒澤俊介<sup>B</sup>, 身内賢太郎<sup>C</sup>, 濱口健二<sup>D</sup>, 澤野達哉<sup>E</sup>, 莊司泰弘<sup>F</sup>  
京都大学, ISAS/JAXA<sup>A</sup>, 東北大学<sup>B</sup>, 神戸大学<sup>C</sup>, メリーランド大学<sup>D</sup>, 金沢大学<sup>E</sup>, 大阪大学<sup>F</sup>

# Contents

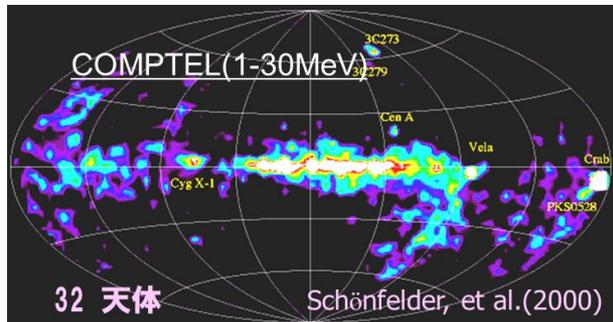
1. MeVガンマ線天文観測の現状とSMILE計画
2. SMILE-2+の最新成果と新事象解析
3. 新事象解析で問題となるドリフト電場歪みとその補正
4. 新事象解析の性能評価とフライトデータへの適用

# MeVガンマ線観測の現状と課題

核ガンマ線の帯域⇒  
 元素合成を直接観測可能  
 しかし、観測技術は未発達

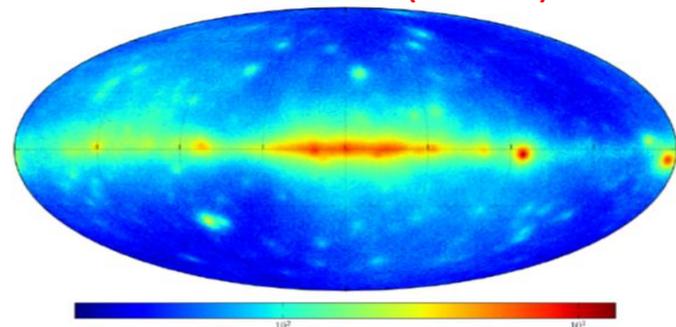
## MeVガンマ線観測の問題点：

1. 従来型CC (eg COMPTEL)はPSFの2成分のうち **ARM方向しか決定できない(1D-PSF)**
2. **宇宙線-筐体間の相互作用で発生する多量の雑音**



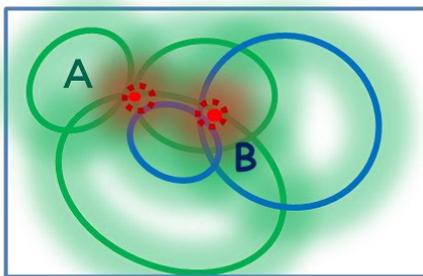
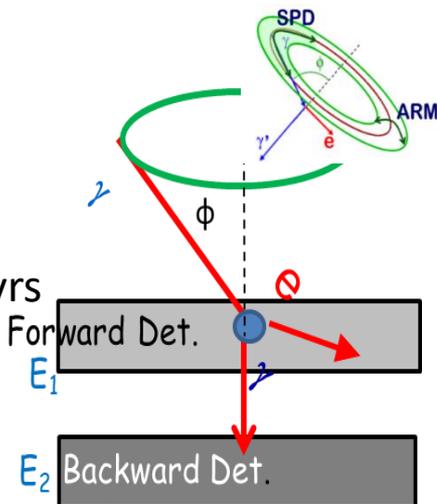
COMPTEL (1-30 MeV)

32天体検出 1D-PSF (~ARM) 1.5° 9yrs

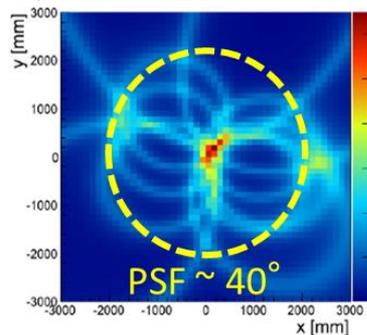


G. Principe+ (2018)  
 Fermi (30-100 MeV)

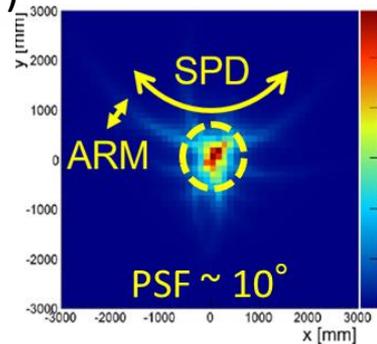
198天体検出 2D-PSF (3°-12°) 9yrs



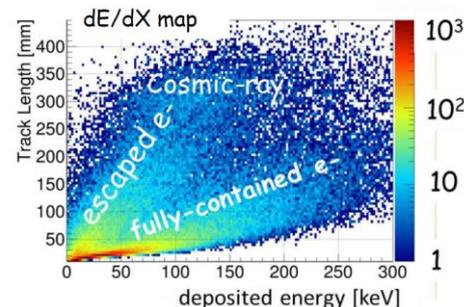
飛跡検出なし  
 (従来CC@662 keV)



飛跡検出あり



- 異なる線源間の漏れ込み
- 虚像の存在



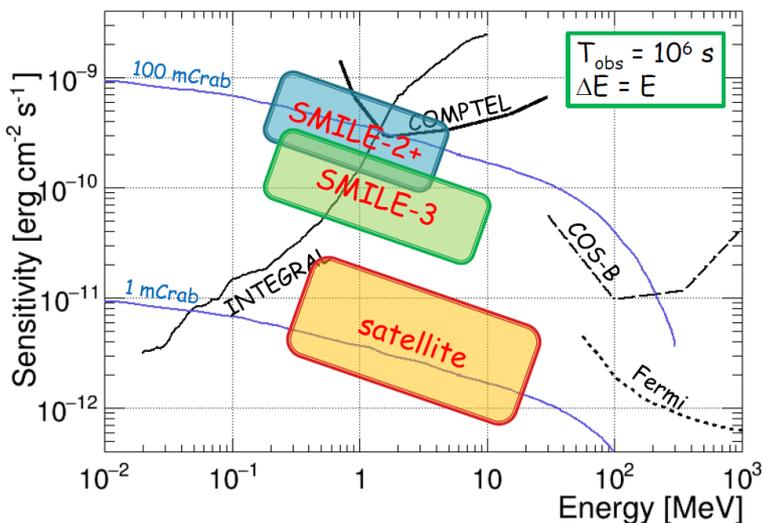
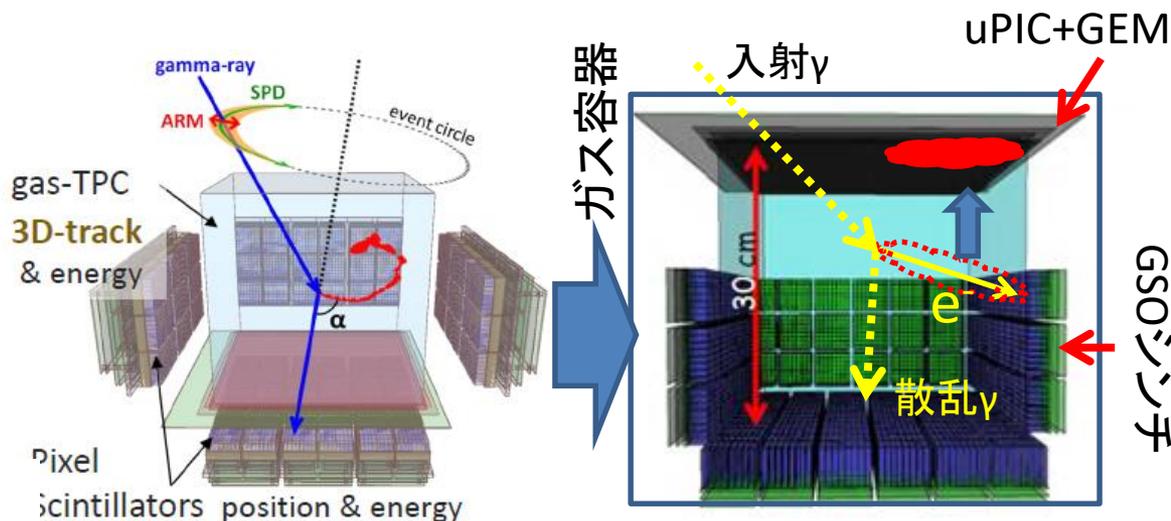
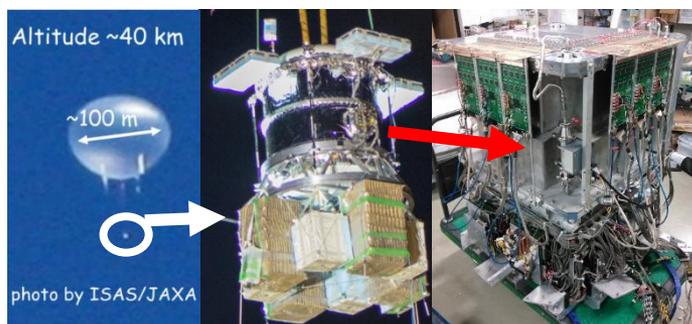
**2D-PSFによる正しい撮像・高い雑音除去能力が必要⇒飛跡検出が重要**

# 豪州MeVガンマ線気球観測: SMILE-2+

2018/4/7-8, 豪州で実施

目的: 電子飛跡検出型コンプトンカメラ(ETCC)の宇宙雑音環境での撮像性能実証

主な観測対象: 銀河中心領域からの511 keV・かに星雲



従来型ETCC(SMILE-2)

SMILE-2+用 ETCC

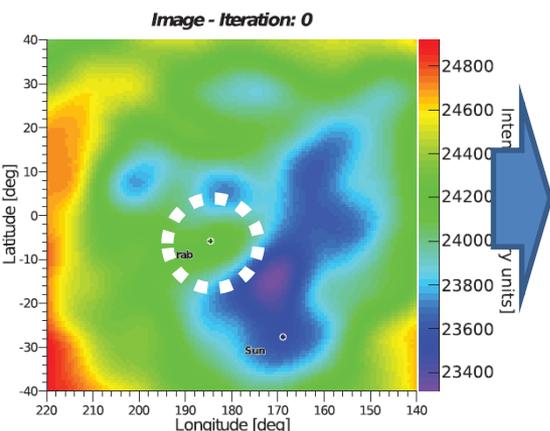
SMILE-2+での装置変更点まとめ

- ・ シンチ・u-PIC・GEMの配置など装置設計を改良  
⇒反跳電子がTPCを脱出事象する  
高エネルギーの事象(後述)も解析可能
- ・ 高圧化: Ar+CF<sub>4</sub>(3%)+isoC<sub>4</sub>H<sub>10</sub>(2%) 1atm -> 2 atm
- ・ ガス純化システムの搭載
- ・ 底面シンチ厚の拡大(GSO 13 mm -> 26 mm)

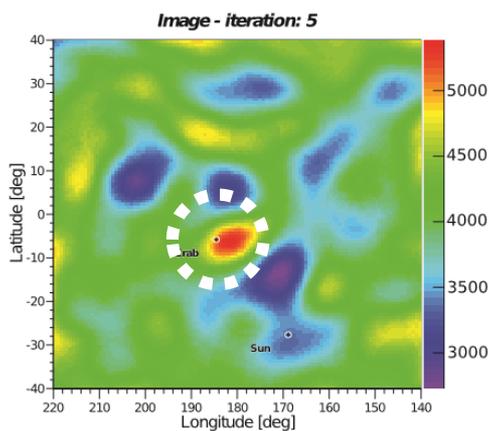
# 低エネルギー事象解析の成果1: かに星雲撮像

## NCT (従来型コンプトンカメラ)

### 単純強度マップ



### MLEMによる 画像処理後のマップ



flight: 38.5 hr  
data: 29.3 ks

M.S. Bandstra+ (2011)

従来型CCでは

NCTでの予測観測光子数: 3800 photon

=> 2009気球実験667 photon

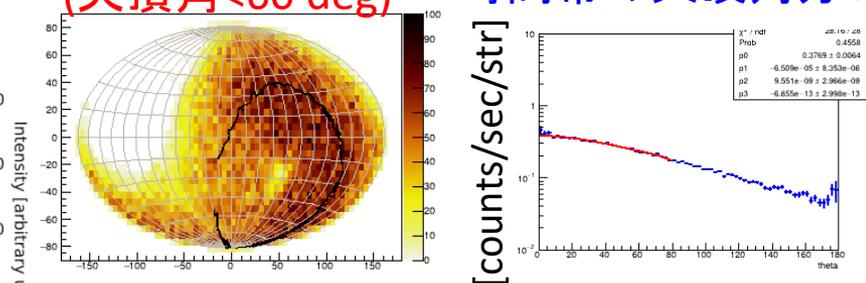
をはじめ、ことごとく観測性能の予想を外す。

一方、ETCCでは事前計算と合致する性能

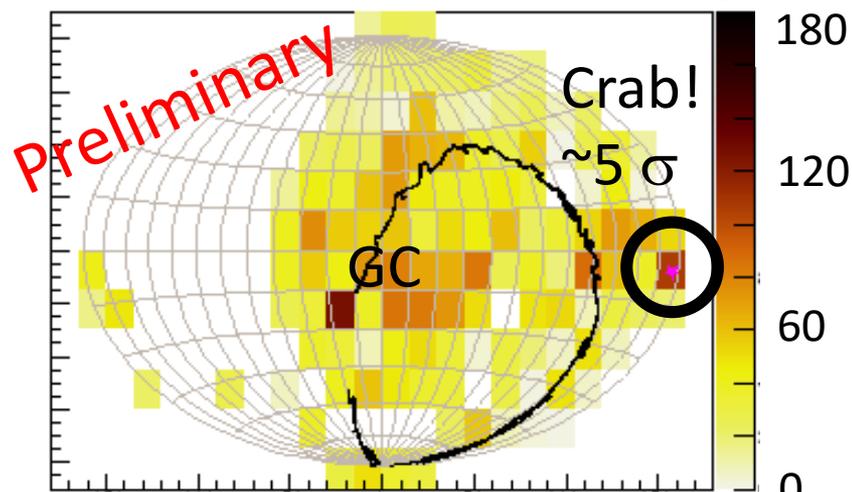
## SMILE-2+: ETCC

A: 単純count map  
(天頂角 < 60 deg)

B: 天体のない  
時間帯の天頂角分布



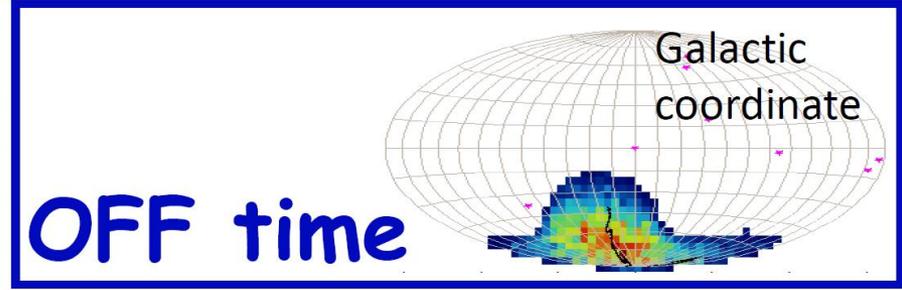
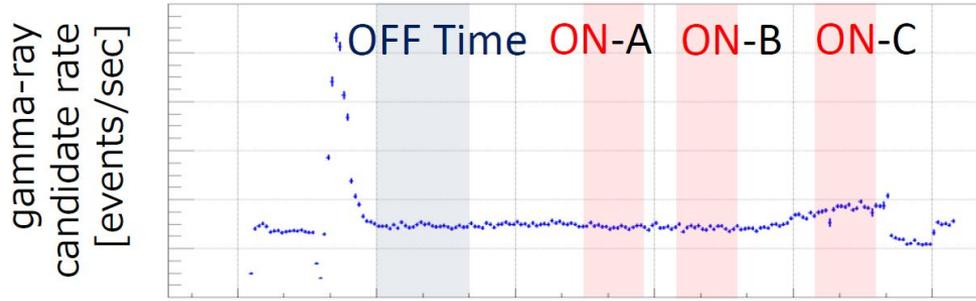
単純なON-OFFのcount map (A-B) [counts]



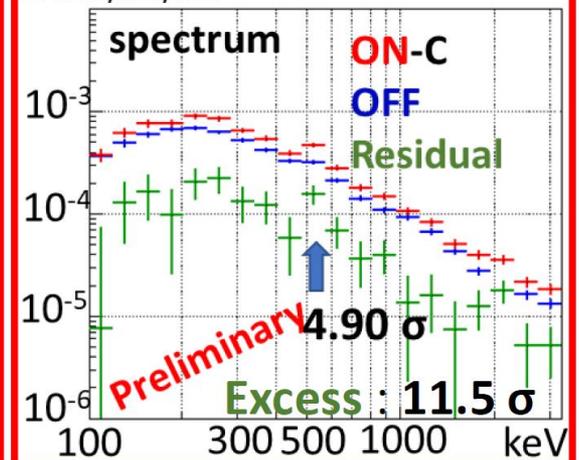
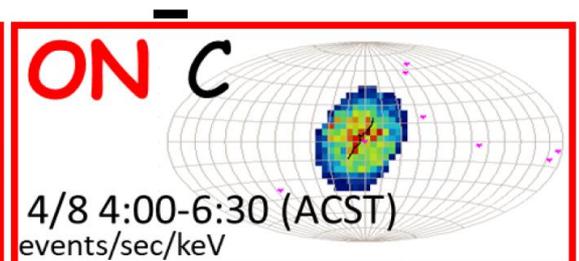
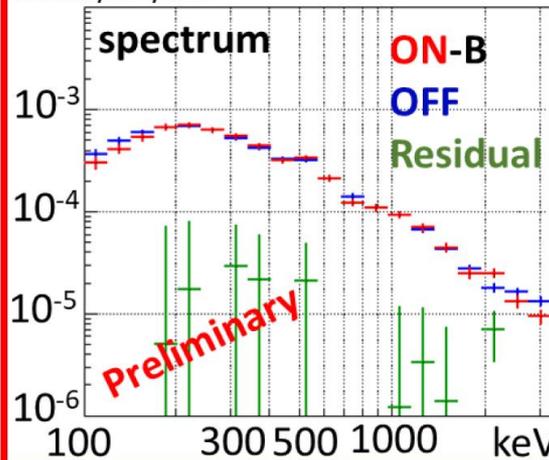
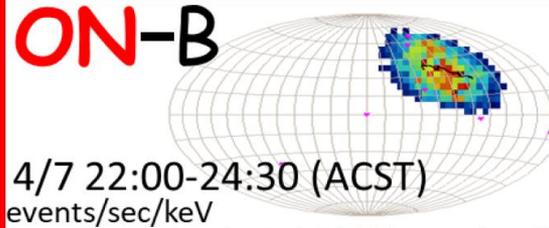
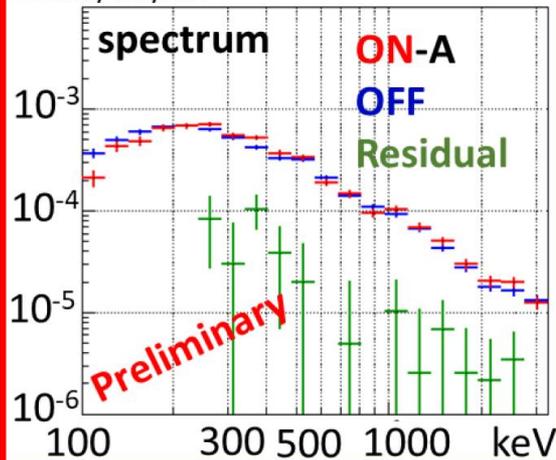
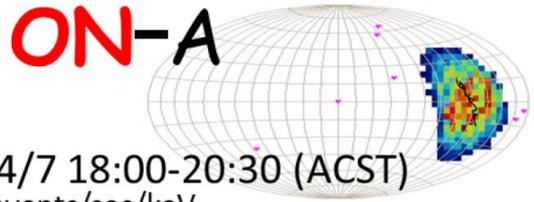
※銀河座標

単純な撮像手法と高い雑音除去能力が成功要因

# 低エネルギー事象解析の成果2: 銀河中心領域観測

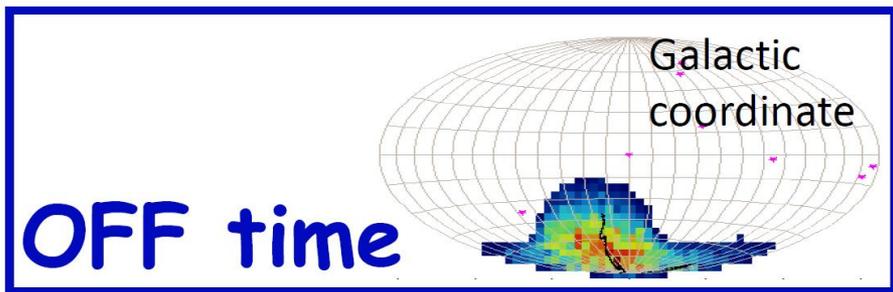


4/7 9:00-13:00 (ACST)

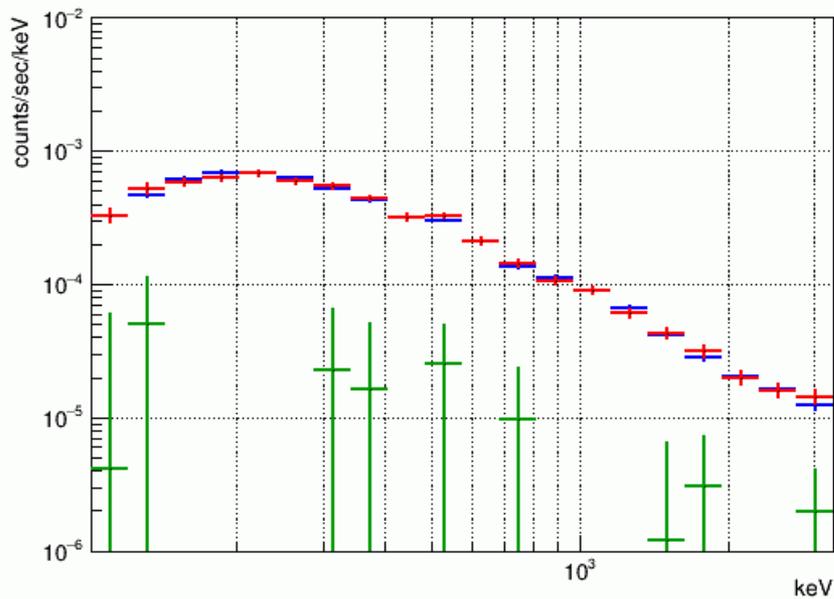
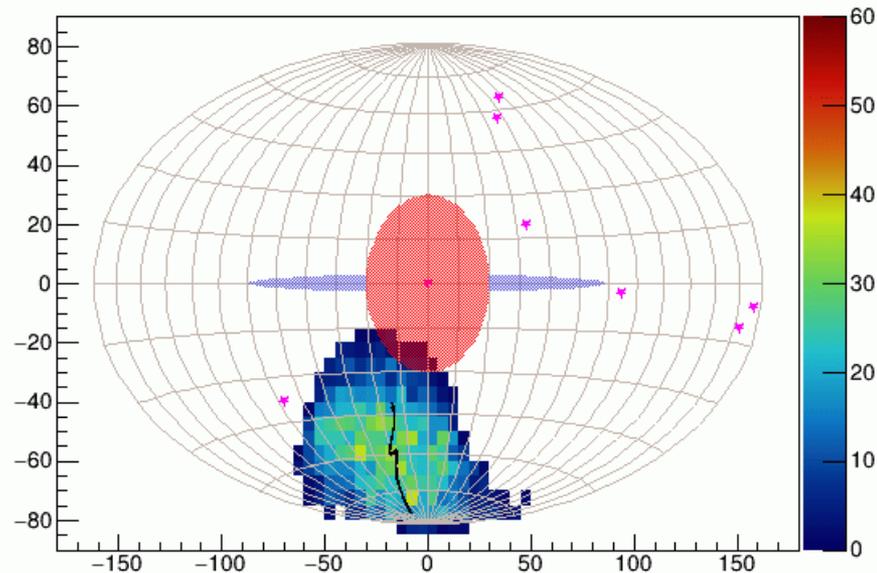


An excess of  $\sim 511$  keV & diffuse components in G.C. is observed

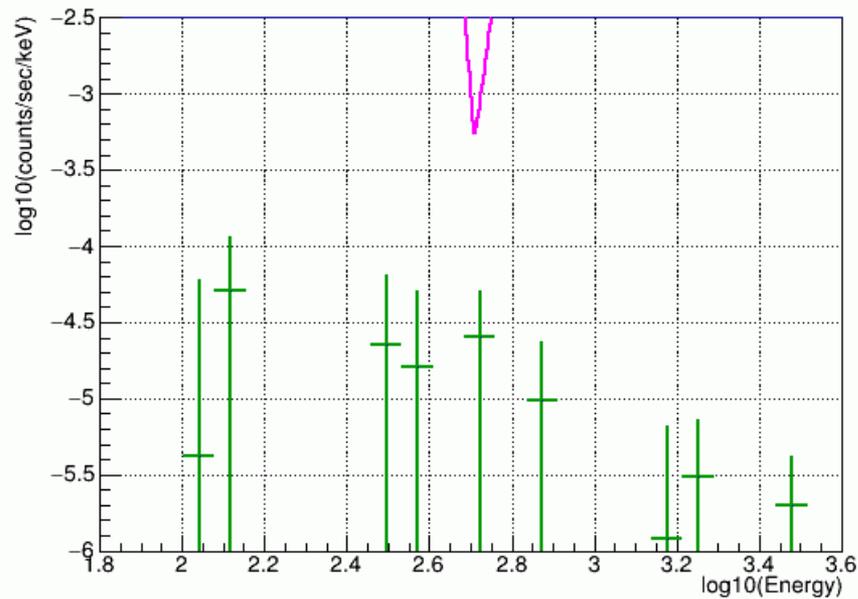
fully contained event analysis  
zenith < 30 deg  
OFF data: 4/7 11:00 - 13:00



Source region 9.000000-11.500000



gamma ray spectrum



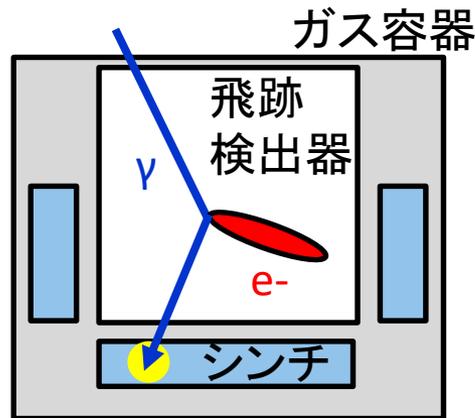
# 高エネルギー事象解析の重要性

主要な核ガンマ線: $^{26}\text{Al}$ (1.81 MeV),  $^{60}\text{Fe}$ (1.33 MeV, 1.17 MeV)は1 MeV以上  
 but 従来解析だけでは1 MeV以上に対して十分な感度は得られない  
 ⇒高エネルギー事象が核ガンマ線天文学開闢のキーワード

高エネルギー事象解析の3つのメリット:

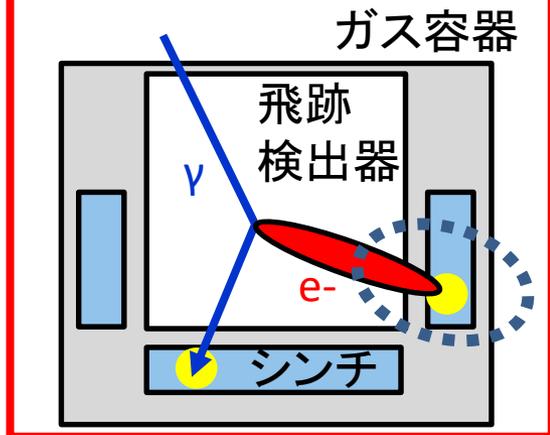
1. エネルギーレンジの拡大 (0.2-1 MeV⇒0.2-5 MeV)
2. 有効面積拡大 (従来放棄していた事象の利用)
3. 角度分解能が良い (散乱角・多重散乱影響が小さい)

≒1 MeVの主要事象

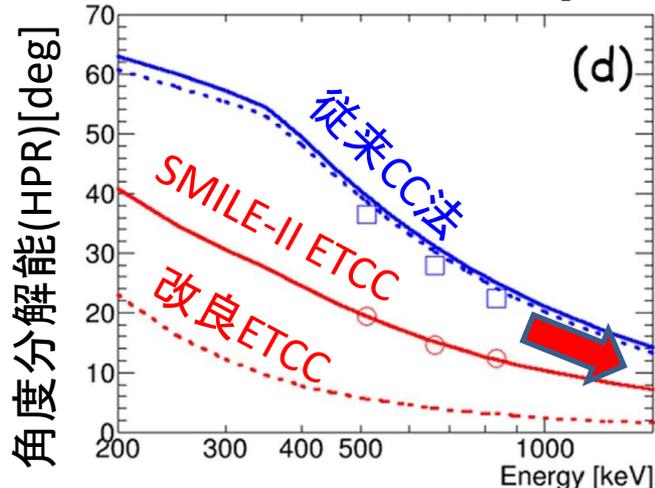
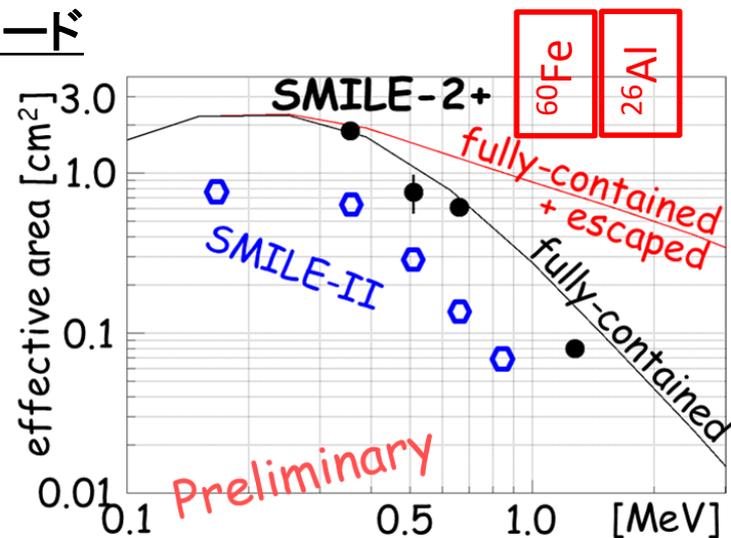


最も単純なコンプトン事象  
 シンチヒット点が1つ

≧1 MeVの主要事象



数百keV以上の反跳電子により、  
 2つ目のシンチヒット点が発生

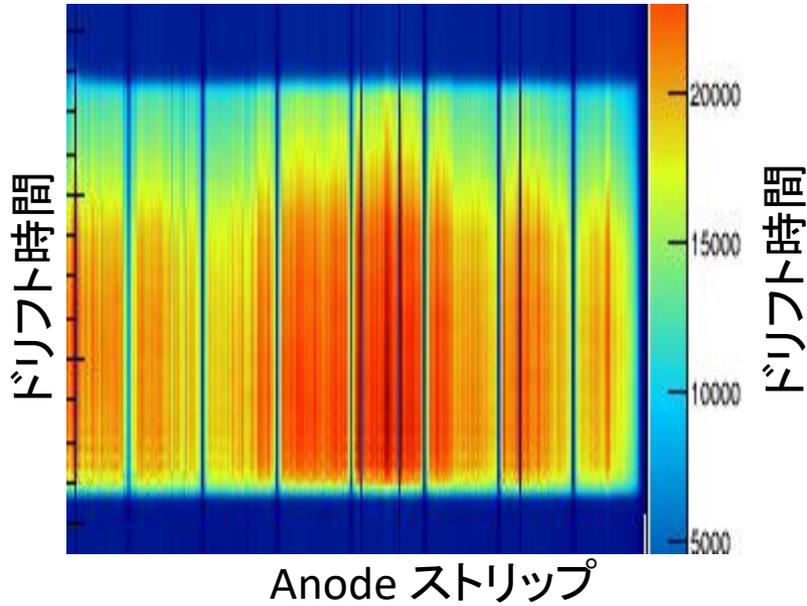


T. Tanimori+(2017)

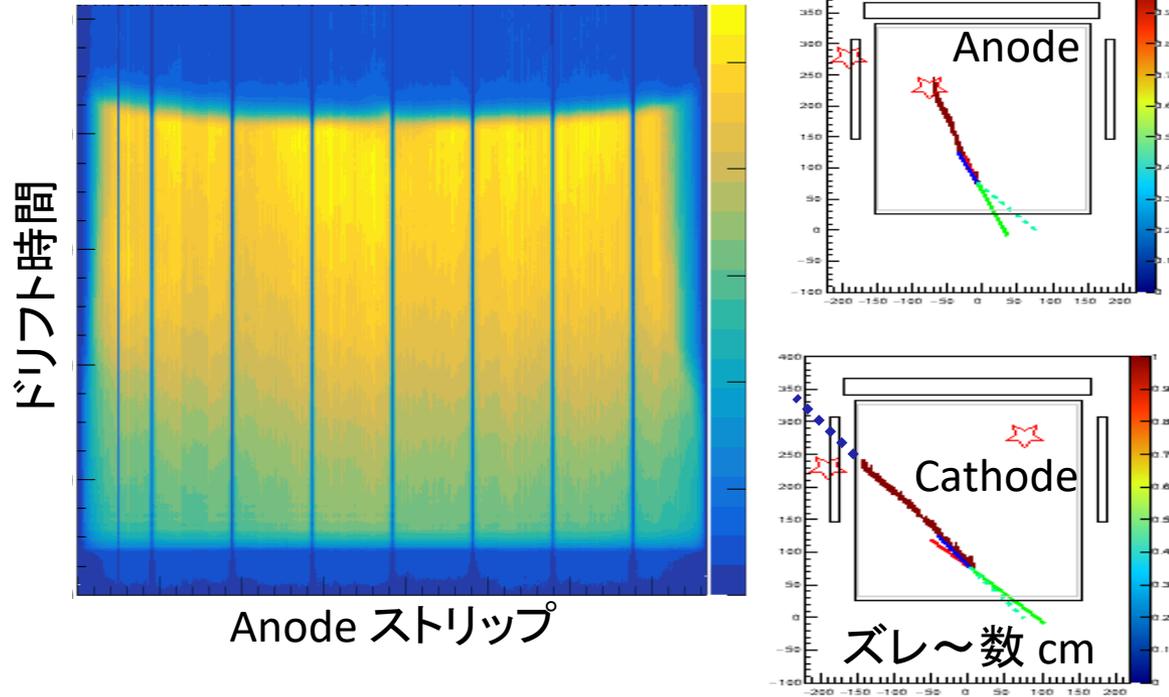
# ドリフト電場の歪み

☆: シンチヒット点

SMILE-2(従来)のTPCの飛跡積分図

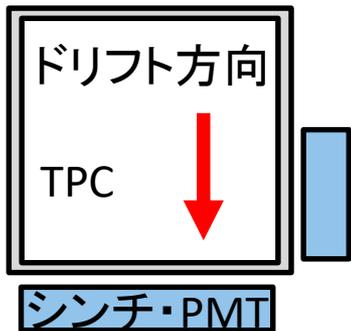


SMILE-2+(現行)のTPCの飛跡積分図



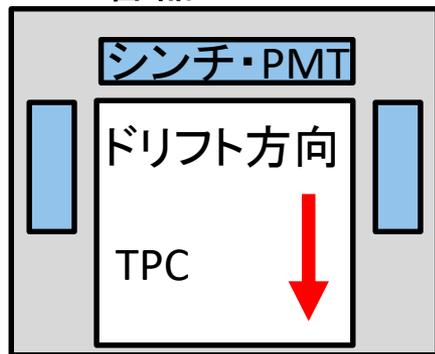
従来設計

ガス容器



SMILE-2+ 設計

ガス容器



シンチレータとTPCが隣接したことで  
TPC外部の電場構造が複雑化  
⇒外部の強電場に起因してTPC内部  
の電場構造に歪みが発生

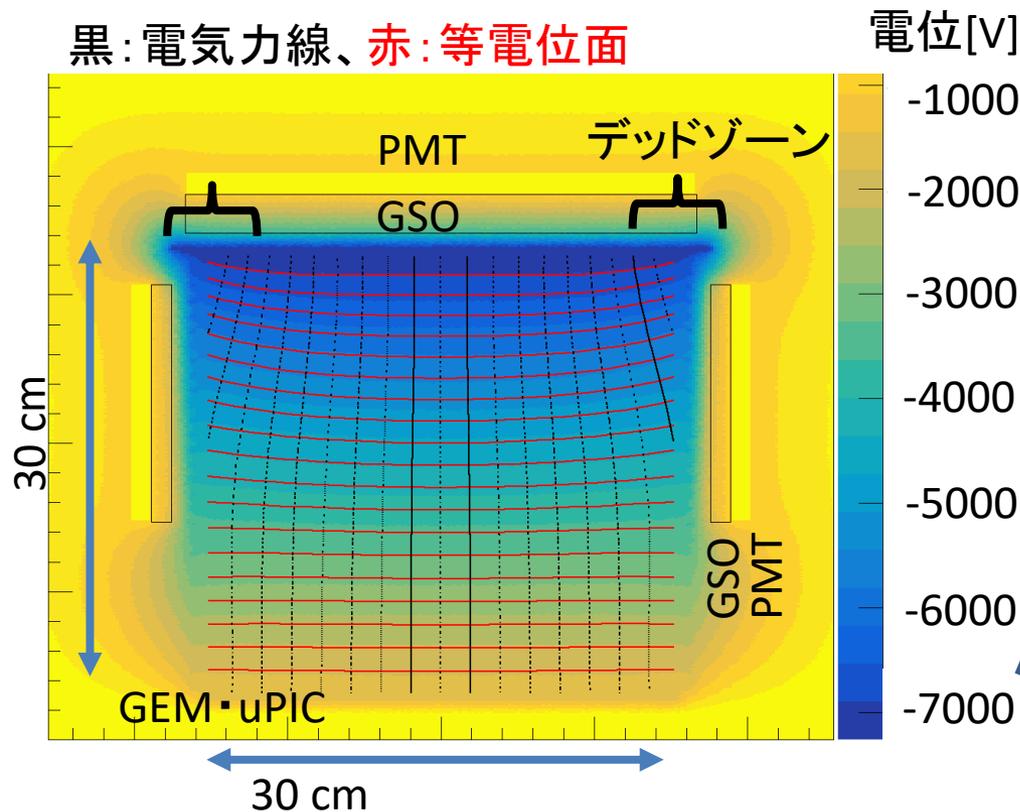
脱出点とシンチヒット点の接続において  
電場歪みの問題が本質化

# 電場歪みの補正方法

飛跡とシンチヒット点の接続を行うにあたって、飛跡検出器のドリフト電場歪みが問題

2次元モデルで電場計算(Elmer)

黒: 電気力線、赤: 等電位面

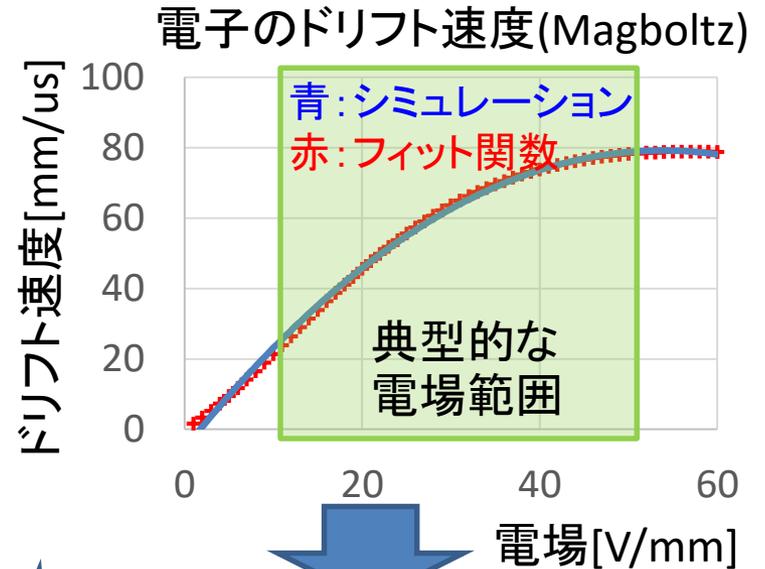


PMT電位: -900 V

ドリフト電極(上): -7290 V

ドリフト電極(下): -1525 V

デッドゾーンの体積 ~ 有感領域の20%程



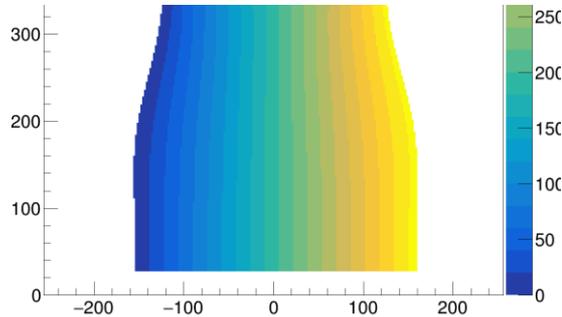
電気力線に沿ってドリフト時間で積分

$$\text{真の飛跡位置: } \vec{x} = \int_{0, \text{力線}}^{t_{\text{drift}}} \vec{v}(E) dt$$

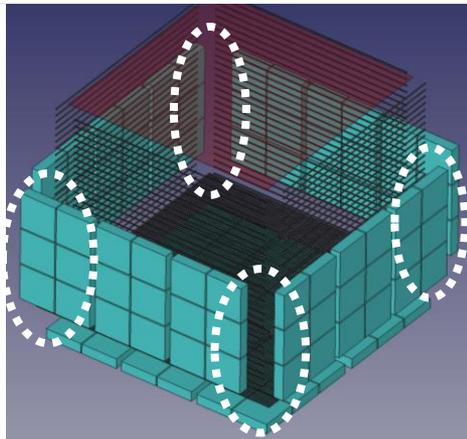
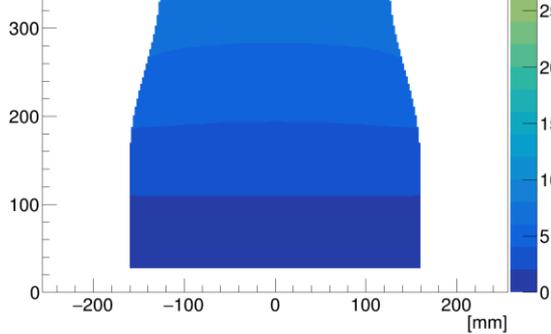
測定中のドリフト速度変化については  
 $v \propto E/P$ とみなしてドリフト時間のスケールで補正  
 $E \sim 50 \text{ V/mm}$ 付近は比例から多少ズれるが  
デッドゾーン付近なので問題ない

# 2次元補正データから3次元を構築

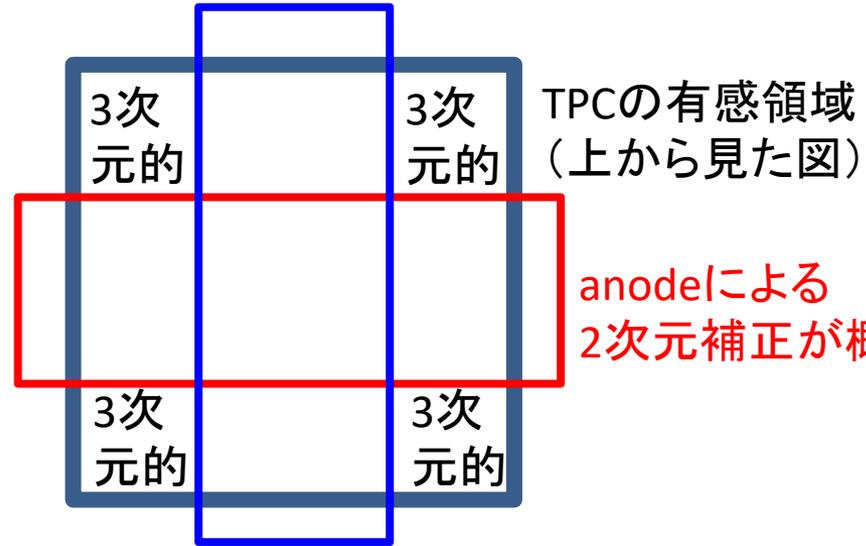
実空間と検出ストリップの対応



実空間とドリフト時間の対応



cathodeによる  
2次元補正が概ね正しい



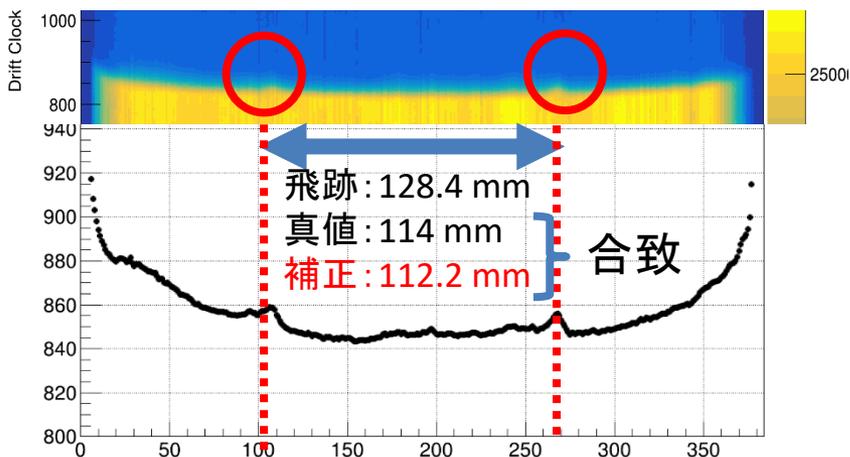
3次元的な電場構造が本質的なのは  
側面シンチが隣接する4隅  
⇒2次元だけで電場補正しても概ね正しい

Anode・Cathodeの補正が滑らかに切り替わりさえすればよい  
⇒補正なしの場合からの位置ズレをベクトル的に足し算して  
3次元飛跡に対する補正を作成

# 補正評価: 飛跡の位置

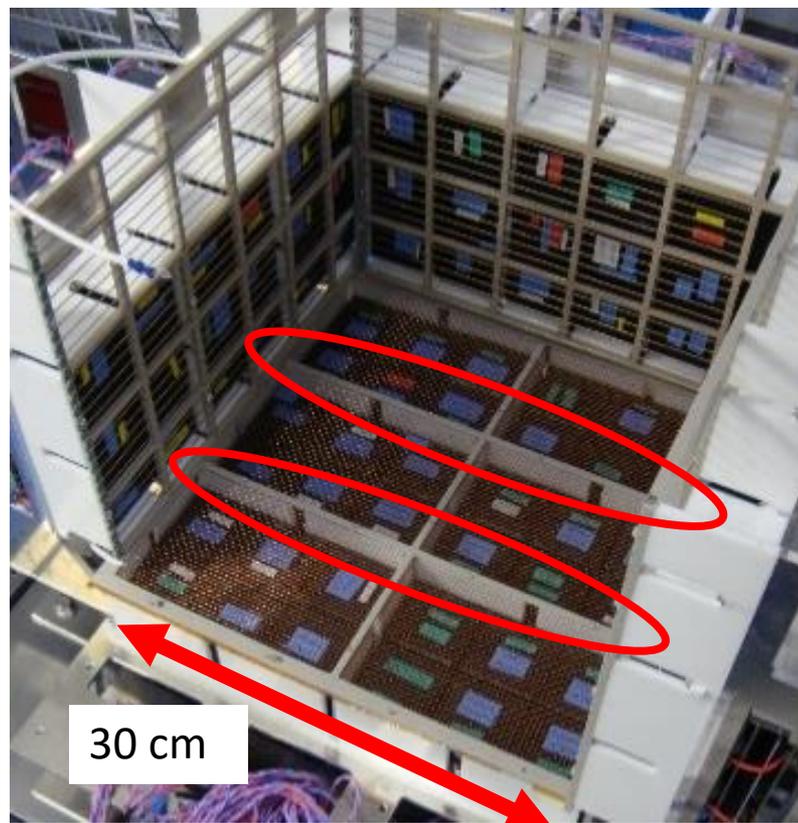
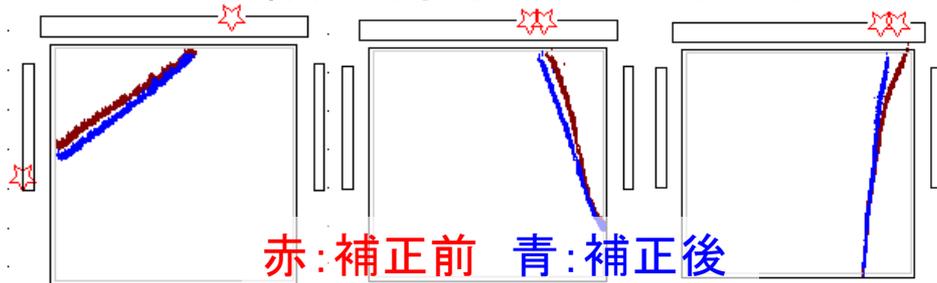
飛跡位置の最大補正量は42 mmであり、  
反跳電子の脱出点とシンチヒット点の接続を行う上で問題となる。

検出器内治具に由来する飛跡構造(補正前)



要求:  $<1.7$  mm (シンチ位置分解能  $6 \text{ mm}/\sqrt{12}$ )  
位置ズレ:  $7.2 \text{ mm} \Rightarrow 0.9 \text{ mm}$  (要求クリア)

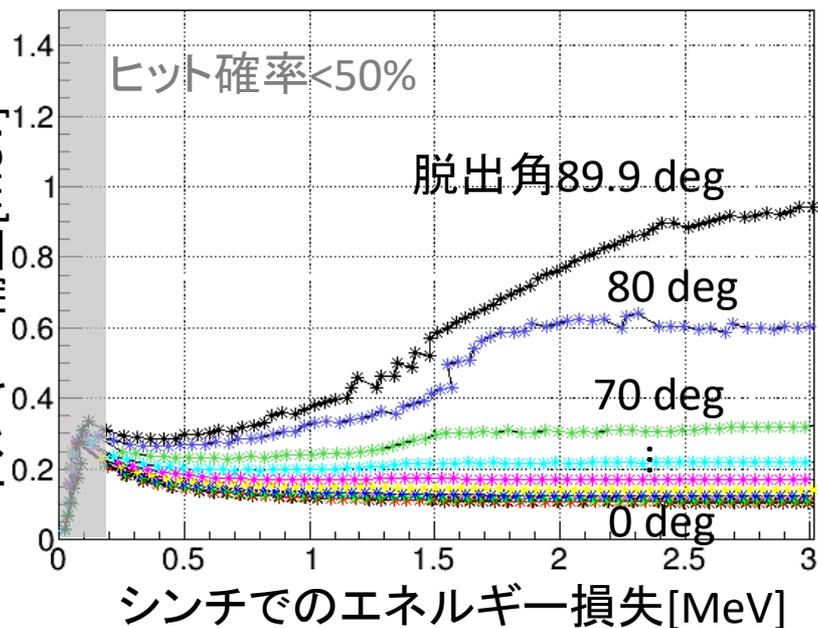
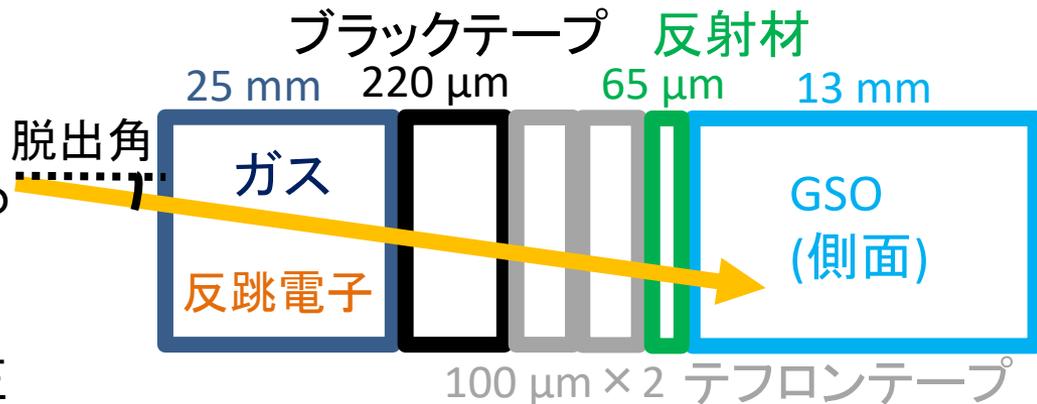
宇宙線候補事象での飛跡補正例



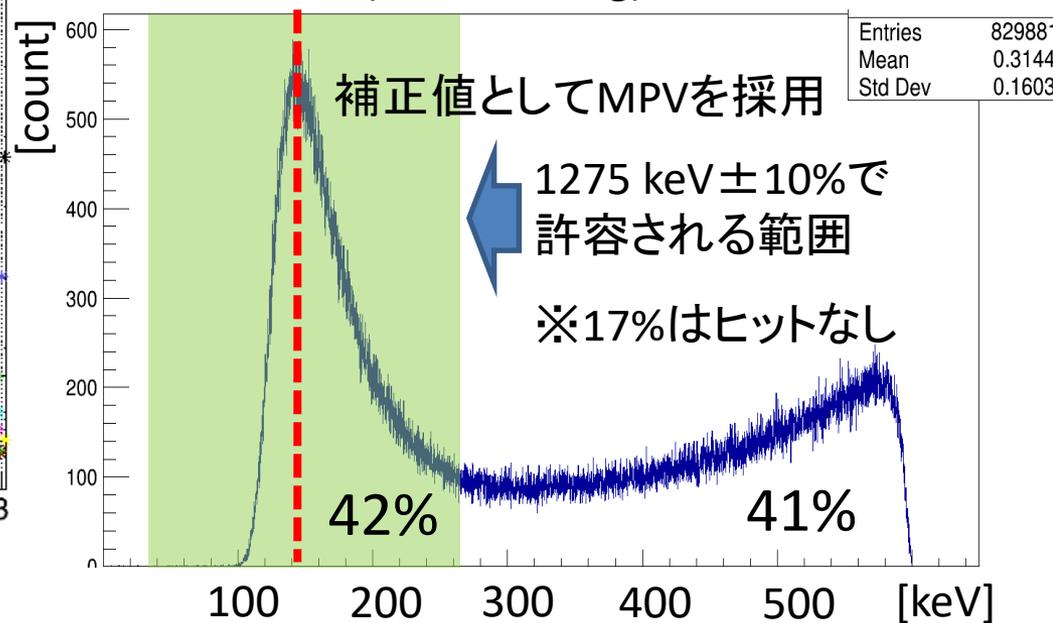
# 不感エネルギーの補正

Geant4シミュレーションを基に  
シンチレータでのエネルギー損失  
と飛跡検出器脱出角を引き数とする  
補正值テーブルを作成

条件の近い4点から補完計算し補正



600 keVの電子(脱出角0 deg)の不感エネルギー

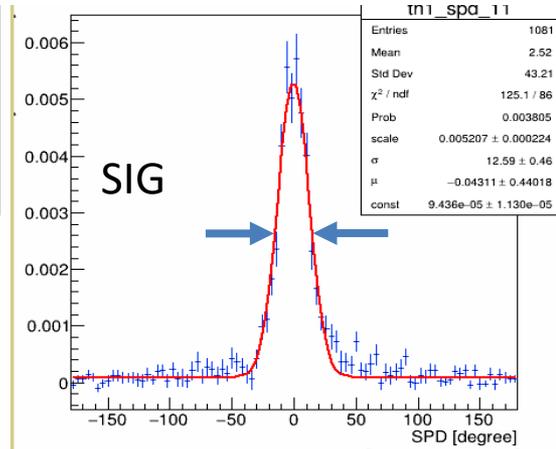
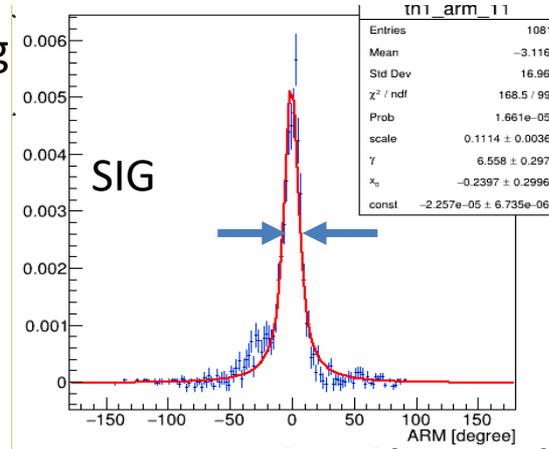
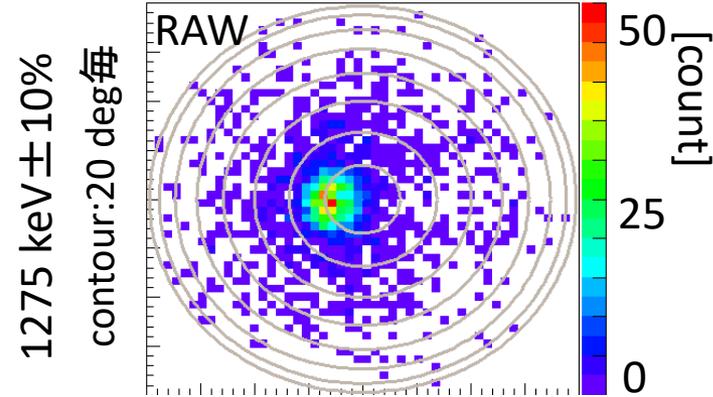


1275 keVの入射ガンマ線での典型的な反跳電子(~600 keV)に対して、  
平均損失: 300 keV、補正值: 140 keV、42%の事象が利用可能。

# 地上試験による評価(点線源)

$^{22}\text{Na}$ 線源 1275 keV

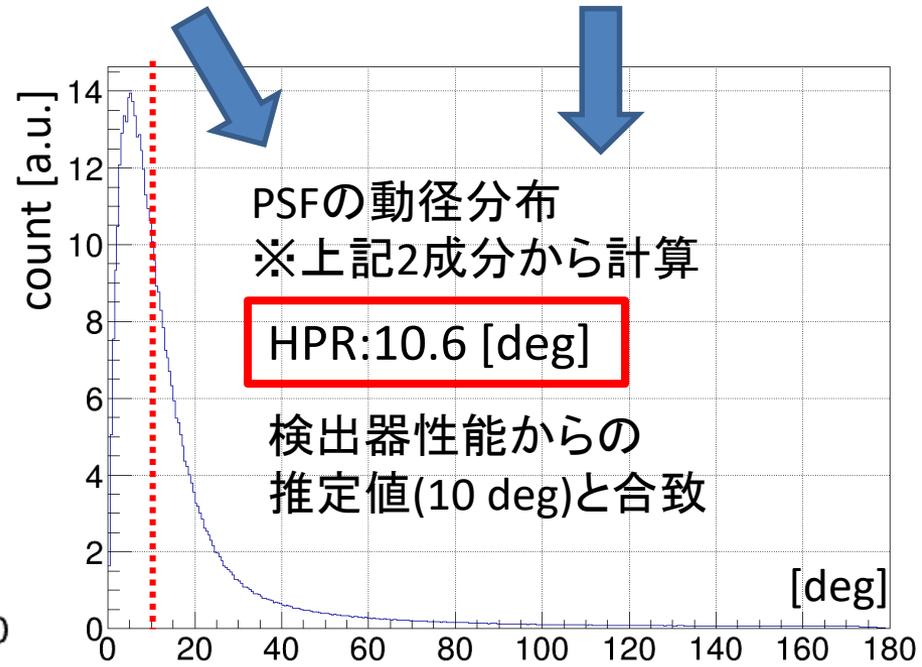
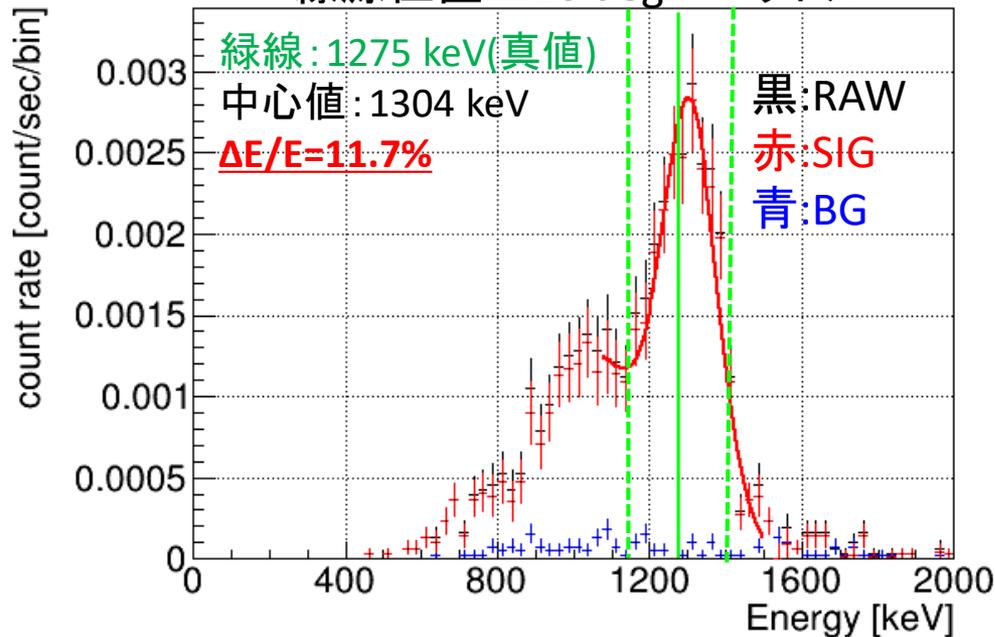
強度: 140 kBq, 距離: 70 cm, zeni: 20 deg



ARM: 13.0[deg](FWHM)

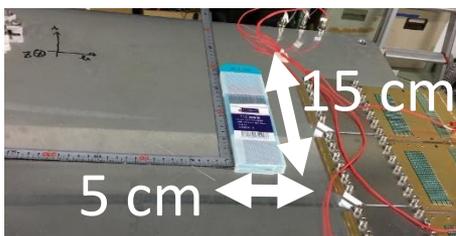
SPD: 29.6[deg](FWHM)

線源位置  $\pm 10$  deg スペクトル

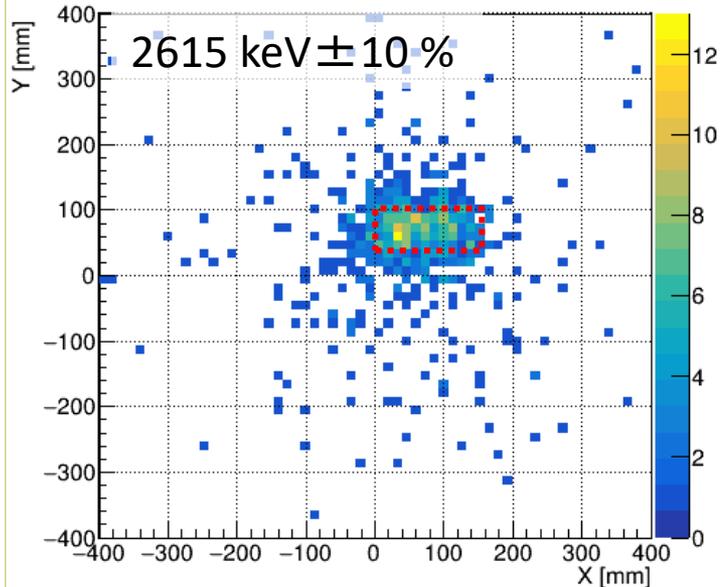


# 地上試験による評価(撮像・高エネルギー)

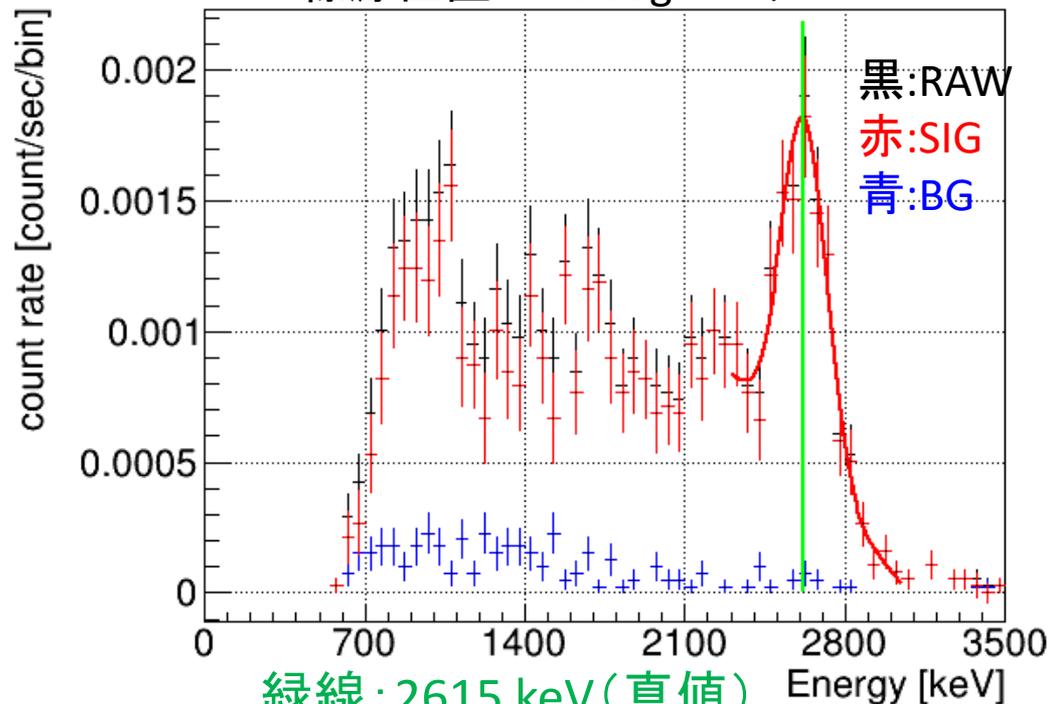
トリウム入り  
タングステン棒  
2615 keV



Back Projection Image(RAW)



線源位置  $\pm$  10 deg スペクトル

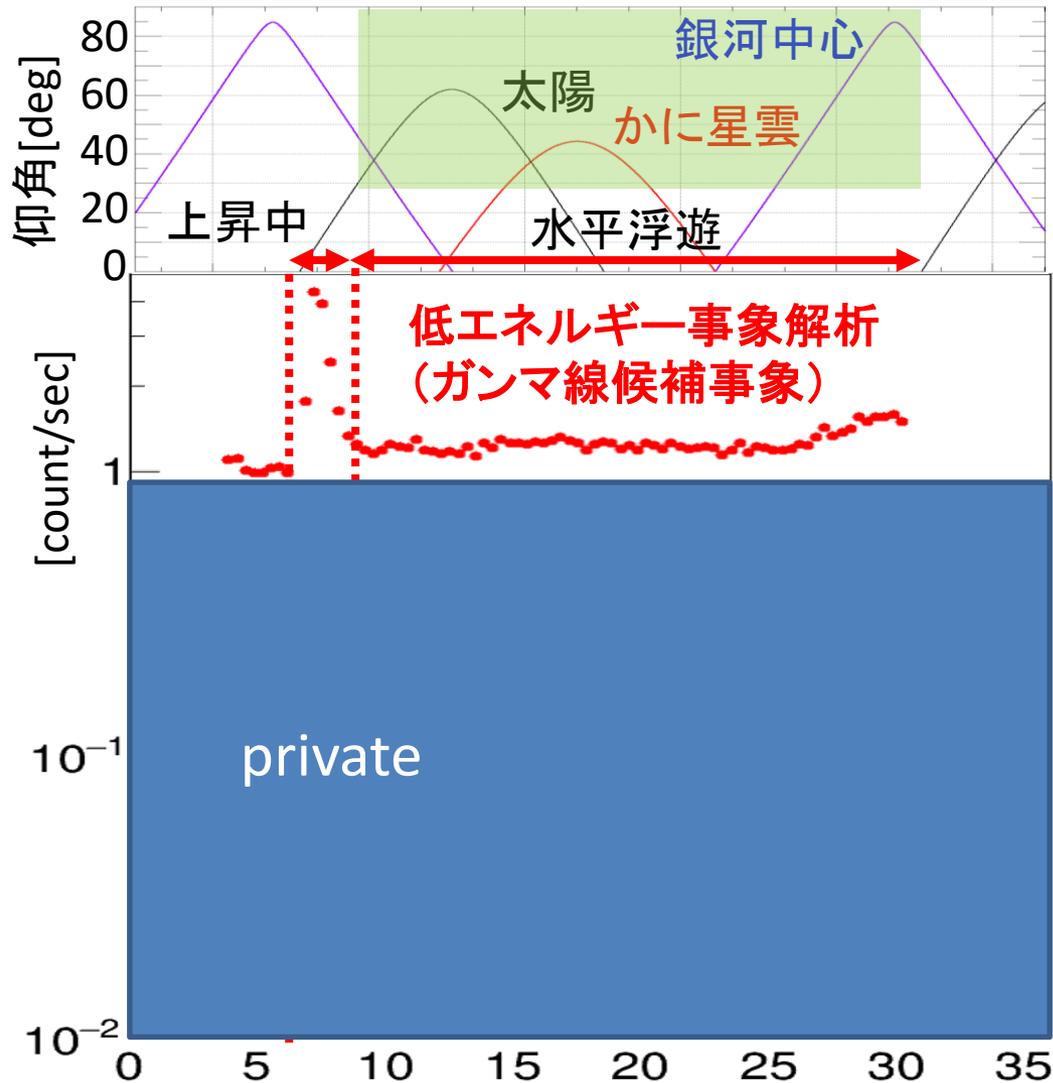


2615 keVにおいても撮像・スペクトルの取得を確認。

1275 keV同様線源領域によく集中した像。

1275 keVよりもスペクトル位置の精度が高いのは  
不感エネルギーの見積りが容易であることに起因か。

# ライトカーブの比較



- 低エネルギー事象同様に  
銀河中心領域に同期した計数率増加  
⇒ 雑音量を銀河中心領域の  
放射量に比べ十分少なくできている

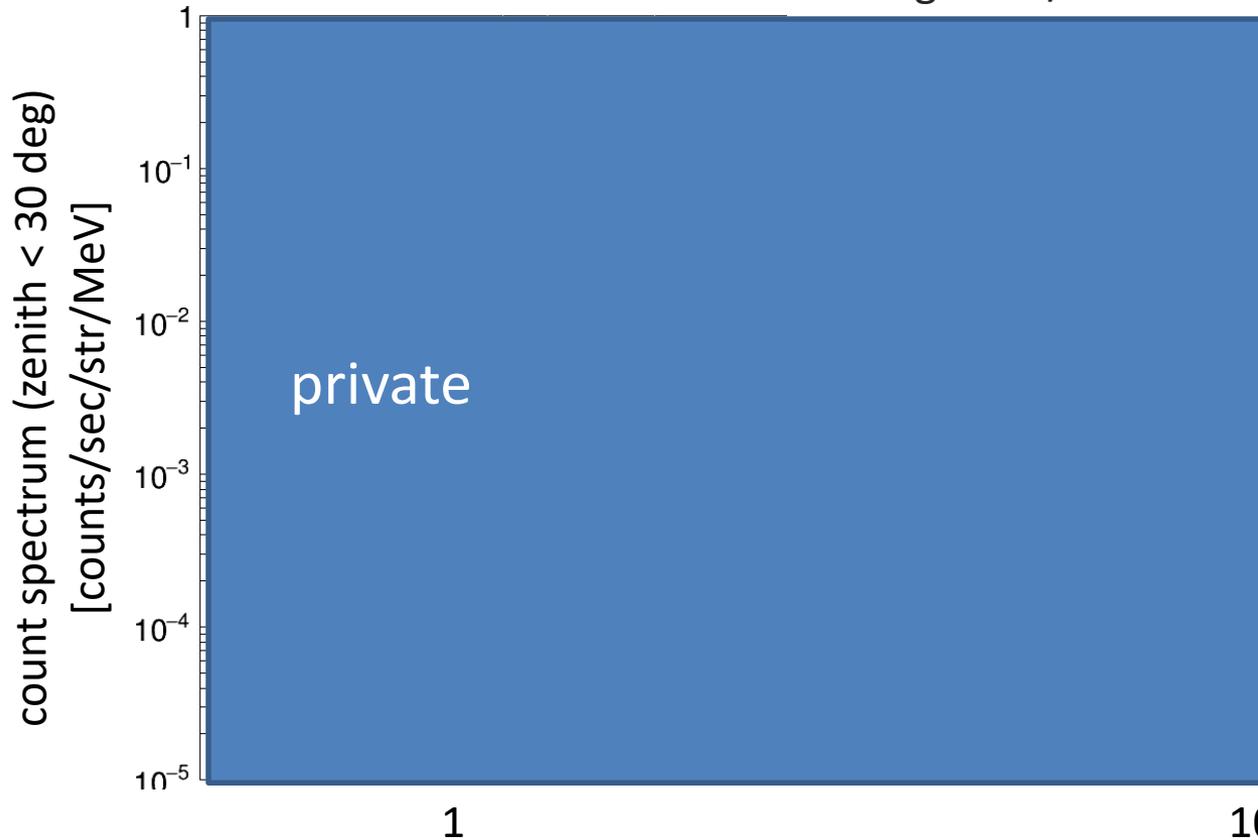
- private

(豪州中央時2018/4/7 0:00基準)[h]

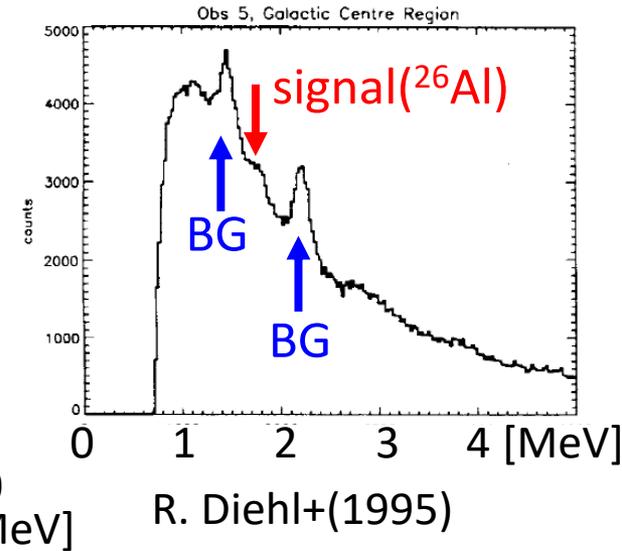
# 銀河中心領域のスペクトル

GC region : 4/8 4:30-6:30

11:00-4/8 1:30



COMPTELでの  
銀河中心領域スペクトル  
 $|\ell| < 30 \text{ deg}$ ,  $|b| < 10 \text{ deg}$



銀河中心領域からの連続放射成分を $5\sigma$ で検出。

signalには各種ピークの兆候、一方BGは平坦。

⇒ **signal優位なMeVガンマ線観測を実現**

今後、高度などによるBG変化の補正やレスポンスによる引き戻しを詰める  
次期長期気球実験による本格科学観測でこれらの兆候を明らかにする

# まとめ

2018年実施のMeVガンマ線気球観測実験: SMILE-2+では  
主要核ガンマ線の存在する1 MeV以上への感度獲得を目的に装置設計を変更、  
新たに高エネルギー事象(反跳電子のTPC脱出事象)が解析可能となった。

低エネルギー事象解析(従来解析):

- かに星雲の撮像による検出( $5\sigma$ )と銀河中心領域の511 keVの検出( $5\sigma$ )を達成  
⇒ **MeVガンマ線観測で初となる事前計算との合致、撮像・分光技術を確立**

高エネルギー事象解析:

- TPCとPMTの隣接によるドリフト電場歪みが発生  
⇒ 2次元電場計算+ドリフト速度シミュレーションで補正  
⇒ **外周領域の飛跡位置の誤差がシンチの位置分解能を以下であることを確認**
- 地上試験での撮像性能・エネルギー分解能とも良好
- 銀河中心領域と同期したカウントの超過を確認  
天頂角30 deg以内での解析で $5\sigma$ の有意度  
多数のラインの兆候を含む  
⇒ **signal優位なMeVガンマ線観測を実現**

今後の課題:

- 応答関数の作成、光子数への変換で天文解析へ

