

# 電子飛跡検出型コンプトンカメラにおける 飛跡取得アルゴリズムの改良 III

古村翔太郎, 谷森達, 窪秀利, 水本哲矢, 水村好貴, Parker Joseph, 岩城智, 澤野達哉, 中村輝石, 松岡佳大, 佐藤快, 中村祥吾(京大理), 身内賢太郎(神戸大理), 高田淳史(京大生存研), 岸本祐二(KEK), 上野一樹(KEK), 株木重人(東海大医), 黒澤俊介(東北大金属研)

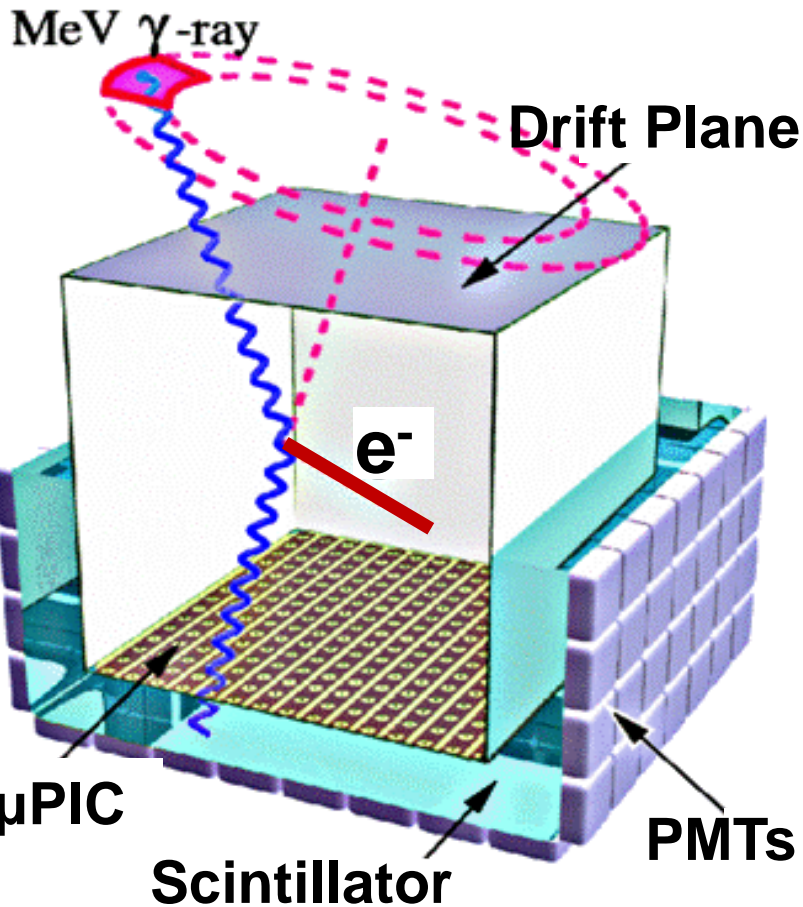
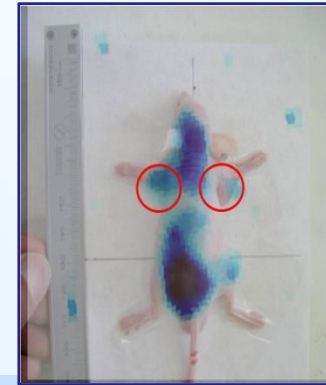
- ◆ 電子飛跡検出型コンプトンカメラ
- ◆ 改良内容、前回までの結果
- ◆ コンプトンカメラとして動作確認
- ◆ 今後の課題

# 電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC)

# Electron-Tracking Compton Camera

Sub MeV-MeV  $\gamma$  線による  
イメージング

- $\gamma$  線天文学  
気球実験SMILE
- 核医療

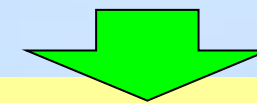


## ● ガス飛跡検出器 $\mu$ -TPC

反跳電子の3次元飛跡・エネルギー損失率

## ● シンチレーションカメラ

散乱ガンマ線の吸収点・エネルギー



1event毎にエネルギー・到来方向を決定

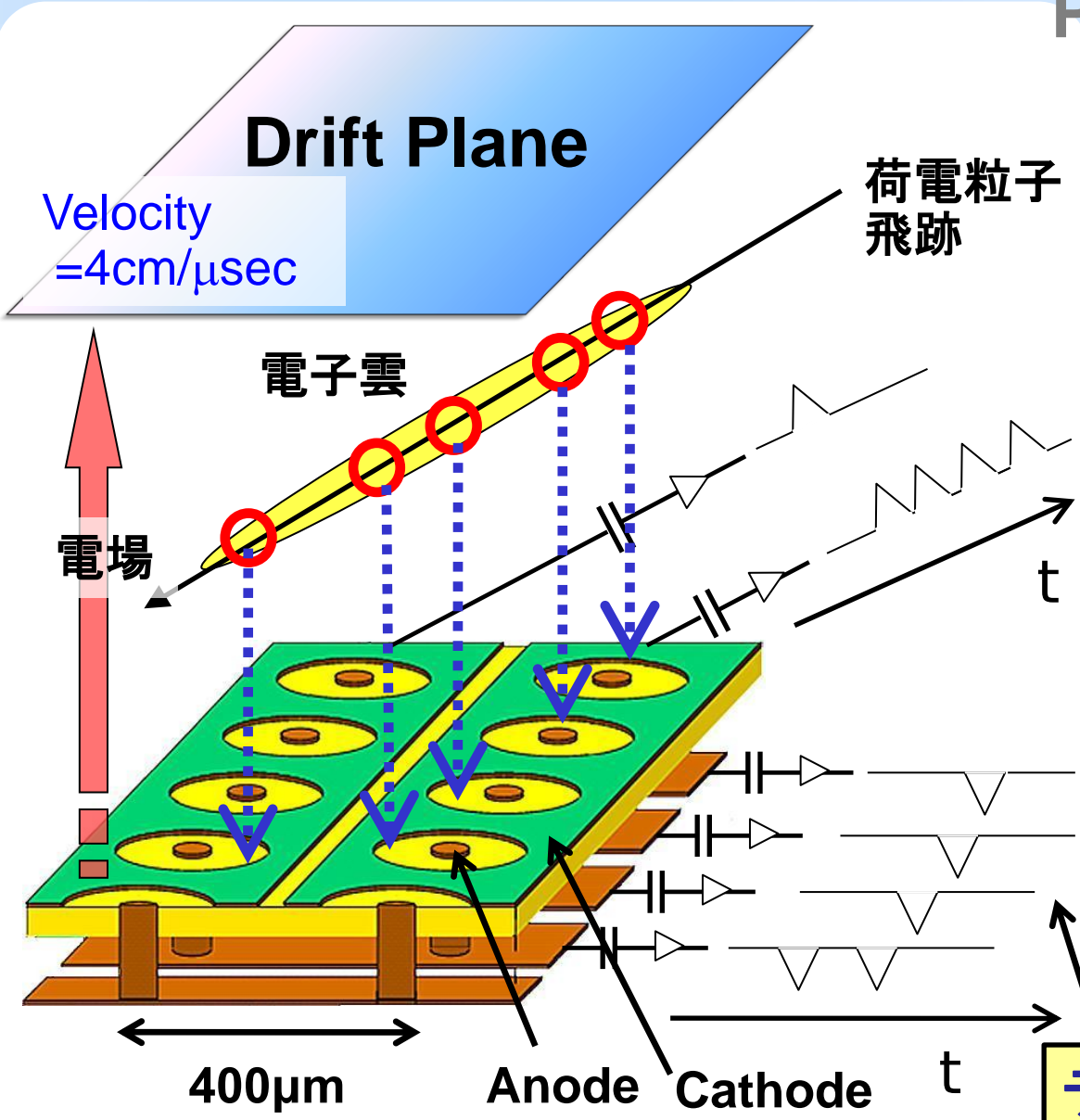
➤ 広い視野 (~3str)

➤  $dE/dX$ による粒子識別

➤ 運動学を用いたバックグラウンド除去

# ガス飛跡検出器 $\mu$ -TPC

# Micro Time Projection Chamber



## 2次元位置検出器 : $\mu$ PIC (Micro Pixel Chamber)

- 10cm × 10cm (400 $\mu$ m Pitch)
- 256 + 256本のストリップ構造 (~ 65,000 Pixel)
- 補助増幅器としてGEMを使用 (Gas Electron Multiplier)
- 典型的 ガスゲイン  
~ 3,000 ( $\mu$ PIC) × ~ 10 (GEM)  
= ~ 30,000

◆ 2次元位置情報 + 時間情報  
ストリップ番号 (X, Y)    Drift時間(Z)

データ処理のアルゴリズムを改良  
→ 次期気球実験SMILE-IIに向けて  
感度向上目指す

# アルゴリズムの改良内容・前回までの結果

従来のアルゴリズム ... 大強度X線の測定を想定 (高速処理に特化)

- 信号の立ち上がりを検出
- Max・Minストリップのみ取得
- 100MHzのXYコインシデンス

## 問題点

- $\mu$  PIC面に平行・垂直成分の損失
- ヒットの取りこぼし

→ ETCCの性能を劣化させている

## アルゴリズム変更

- 信号の持続時間(TOT)も記録
- 全ストリップ情報を取得
- XYコインシデンスを解除

前回: TPCとして“問題点”の改善を確認

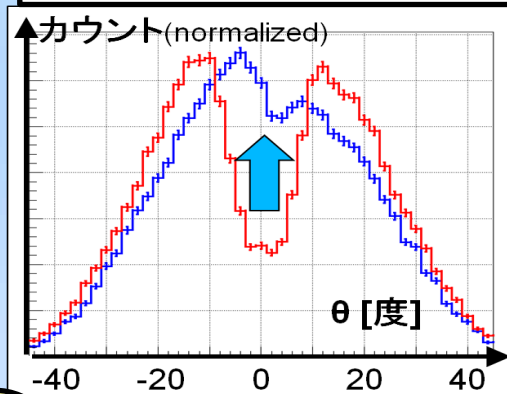
今回: ETCCとして動作させ、

◇コンプトンイベントの取得性能

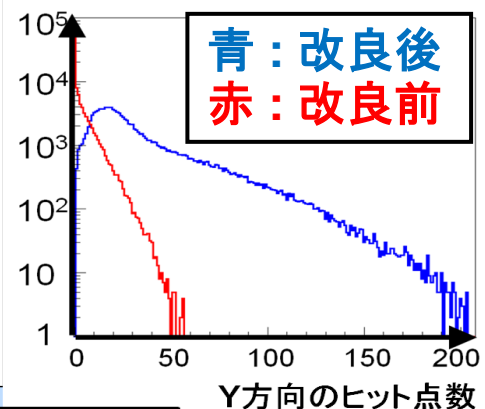
◇検出効率

のQuick Look

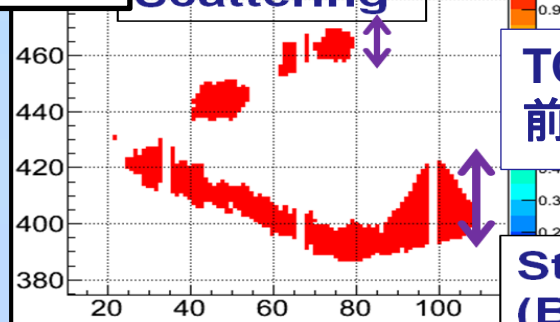
宇宙線 $\mu$ の天頂角分布



ヒット点数分布



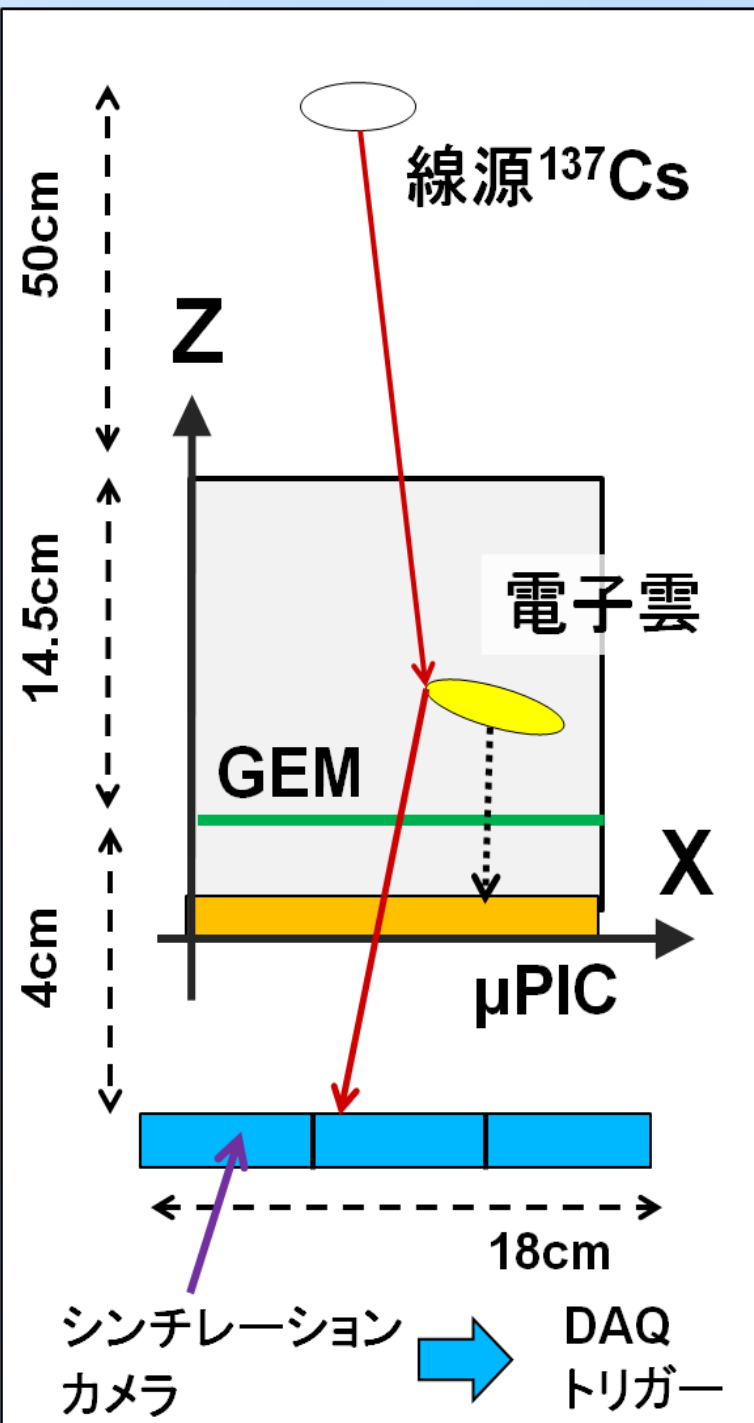
飛跡例



TOTを利用した  
前後判定可能性

Stop position  
(Bragg Peak)

# コンプトンカメラ用セットアップ

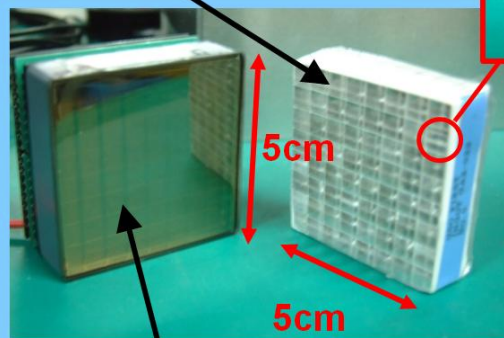
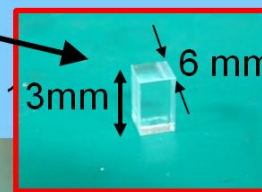


Volume	$10 \times 10 \times 14.5 \text{ cm}^3$
GEM	LCP 50 $\mu\text{m}$ 1枚
Induction Field	4mm
HV	Anode 430V, $\Delta\text{GEM}$ 300V $E_D$ 0.17kV/cm, $E_I$ 1.3kV/cm
Gas	Ar 90% $\text{C}_2\text{H}_6$ 10% 1atm
Gain	$\sim 20,000$
Threshold	Anode -40mV, Cathode -40mV

シンチレータ GSO(Ce)

結晶 :  $6 \times 6 \times 13\text{mm}^3$

全体 : 8 × 8 ピクセル



80keV - 1MeV

10.5% @ 662keV

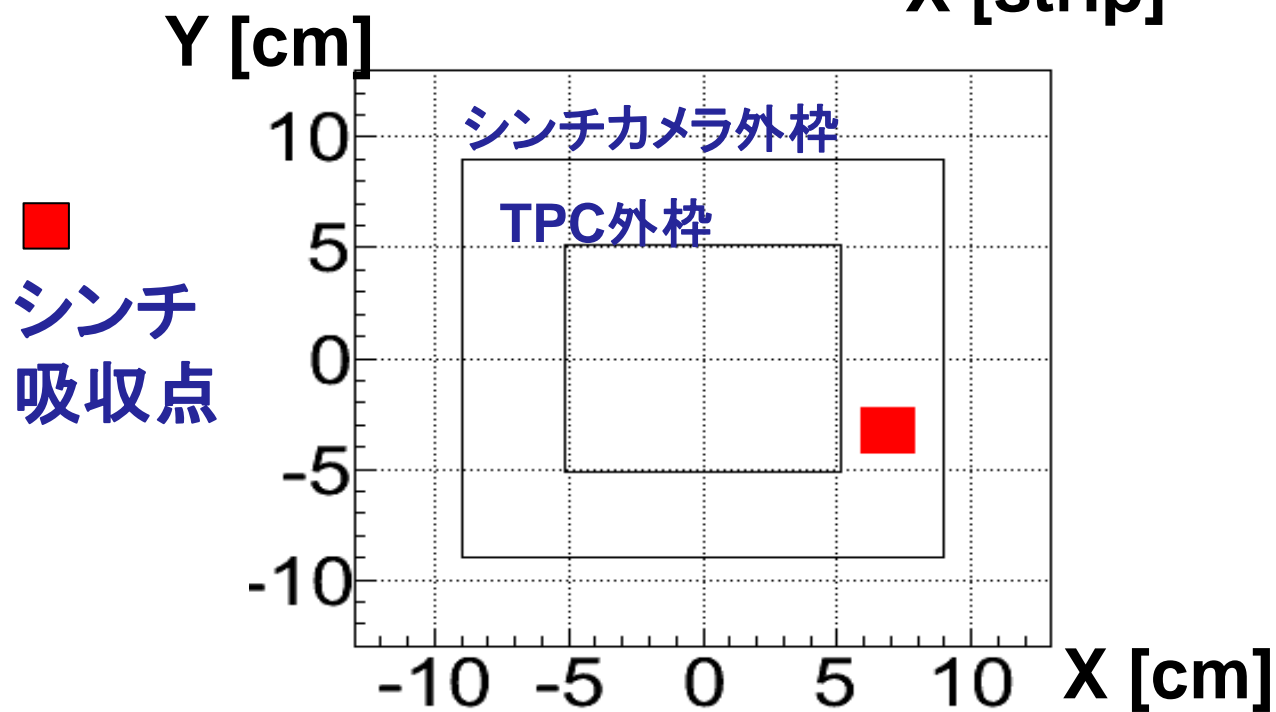
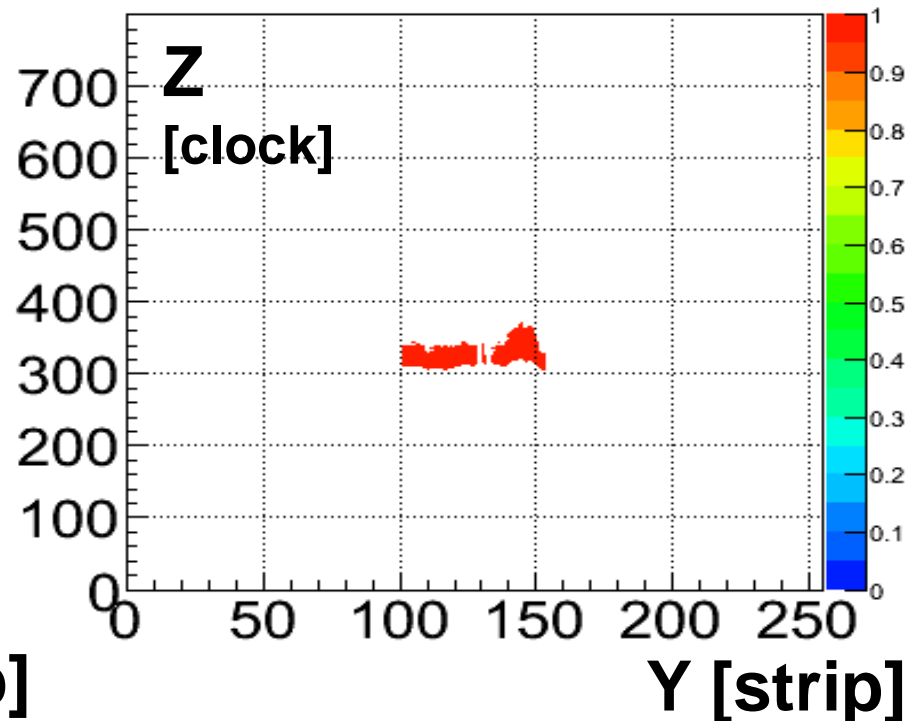
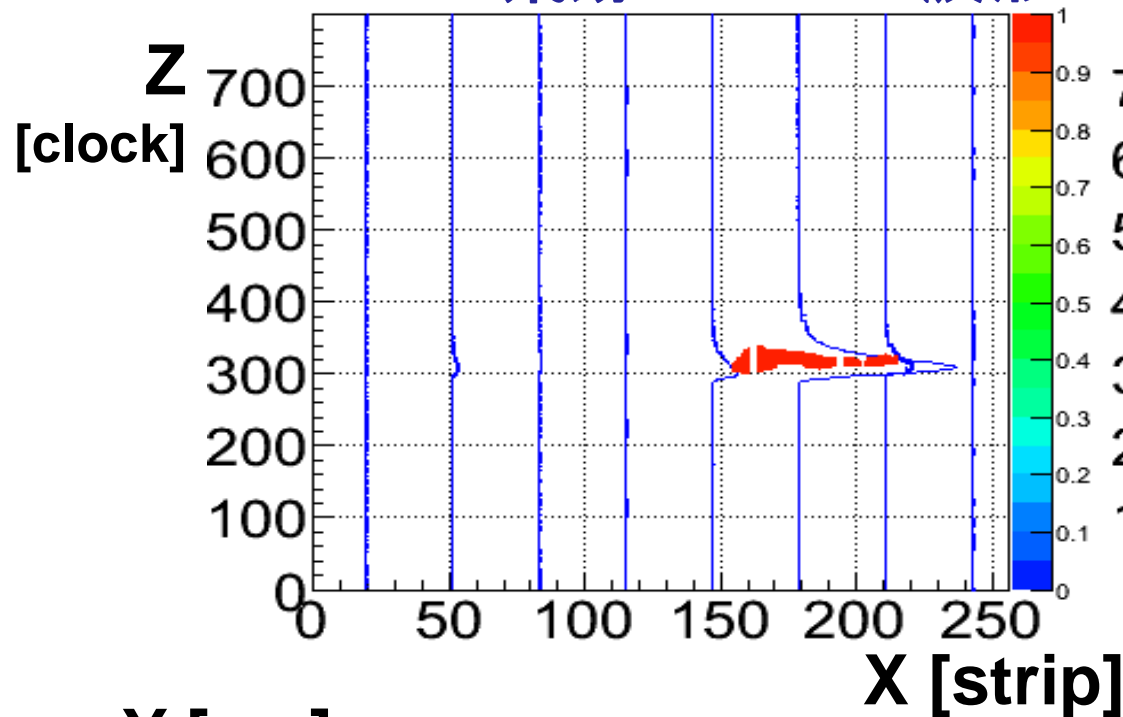
3 × 3 個のPMTをアレイ化

光電子増倍管 HPK H8500

マルチアノード (8 × 8 ピクセル)

# イベント例

## 飛跡 & FADC波形



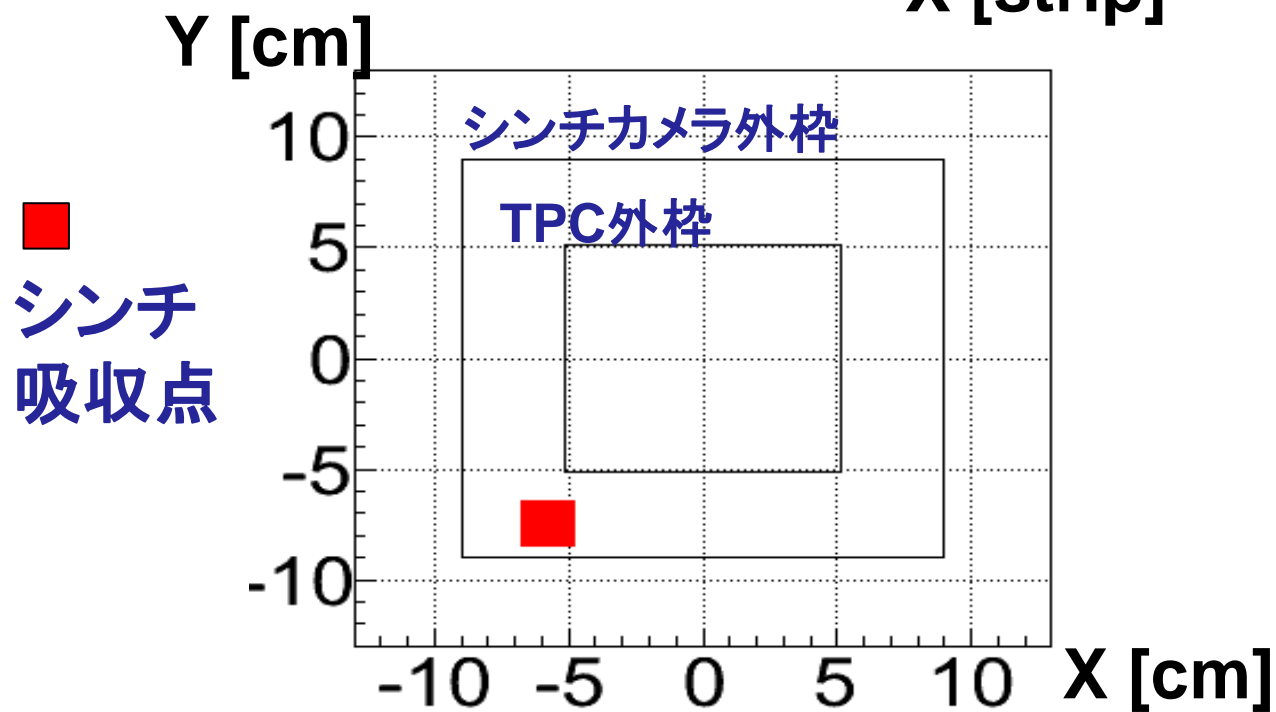
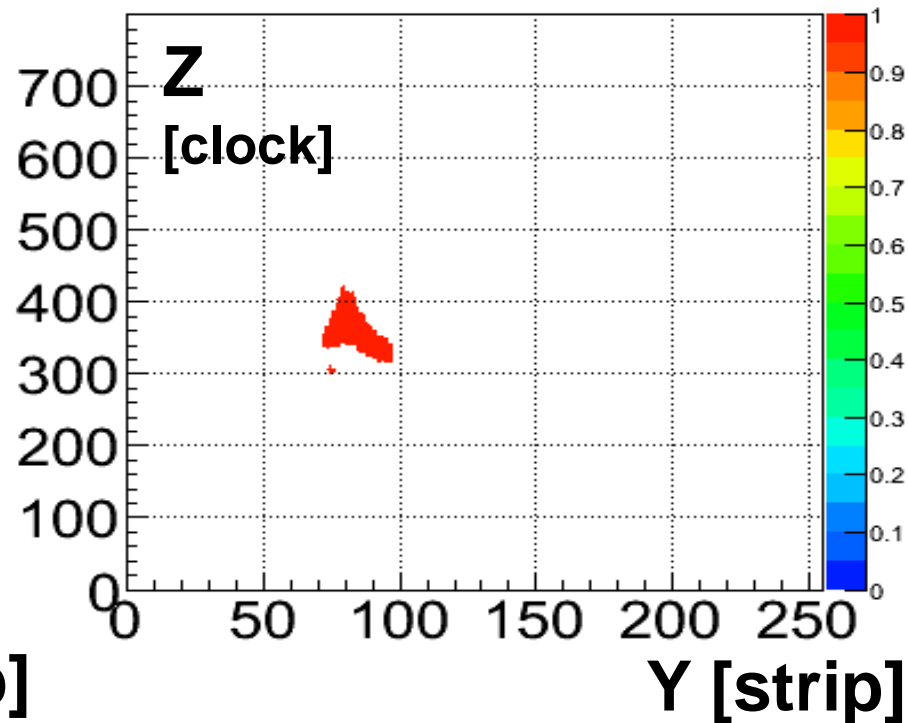
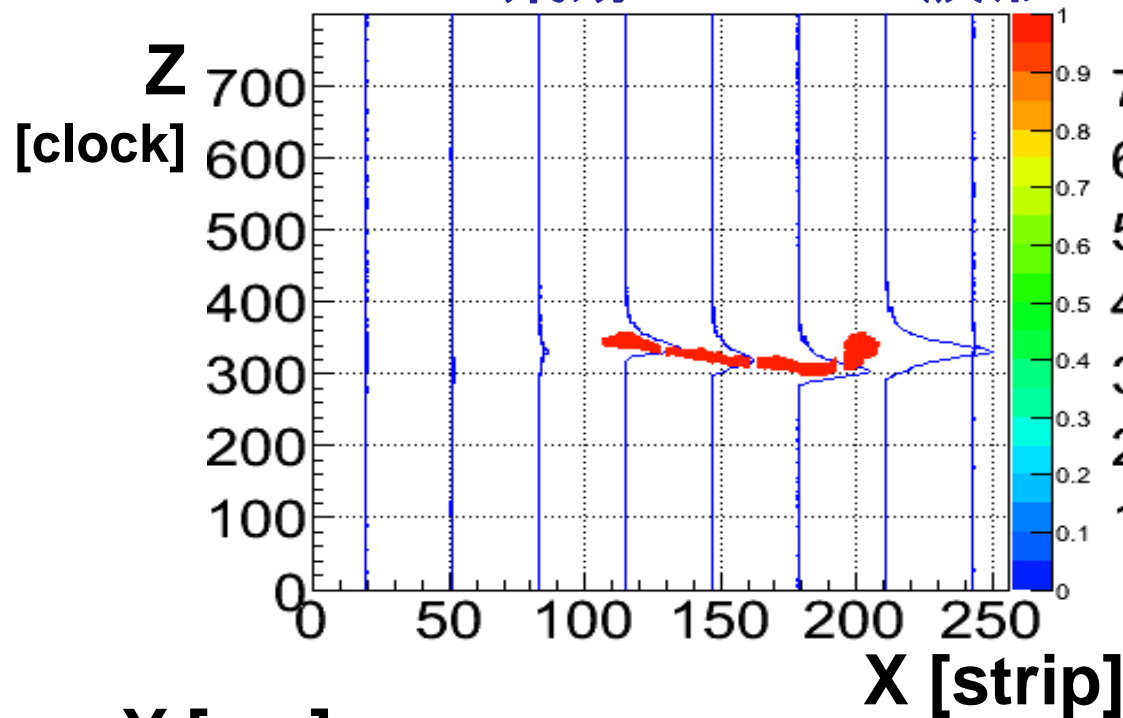
$E_e$  : 58.9 keV

$E_g$  : 669.2 keV

$E_0$  : 728.1 keV

# イベント例

## 飛跡 & FADC波形



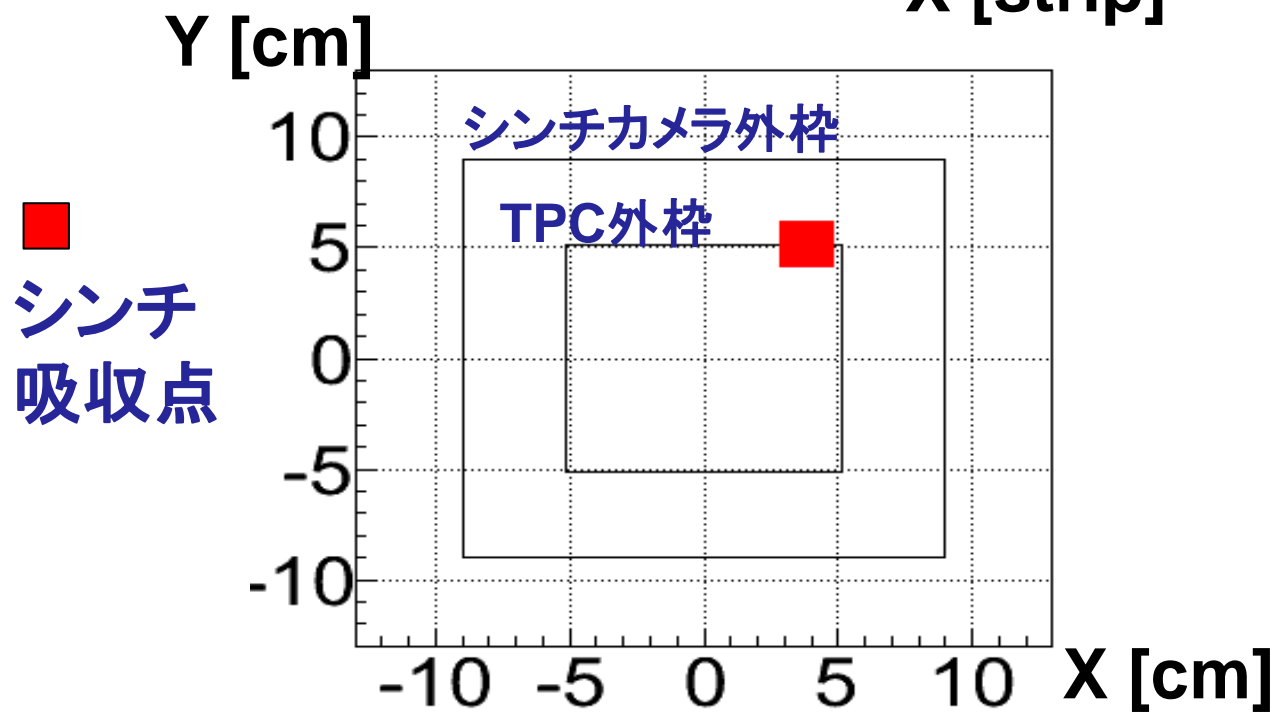
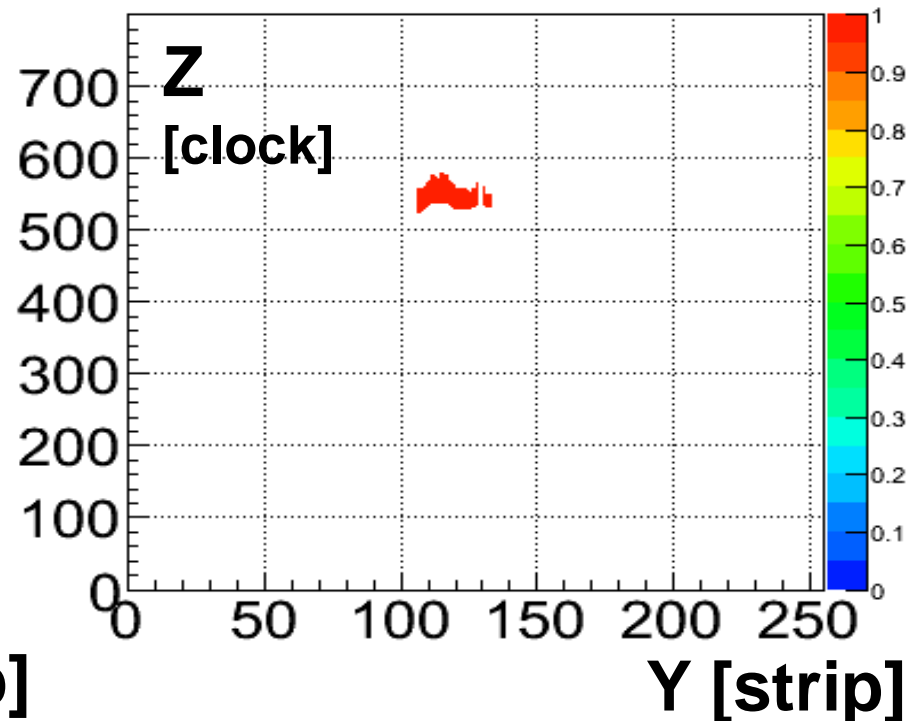
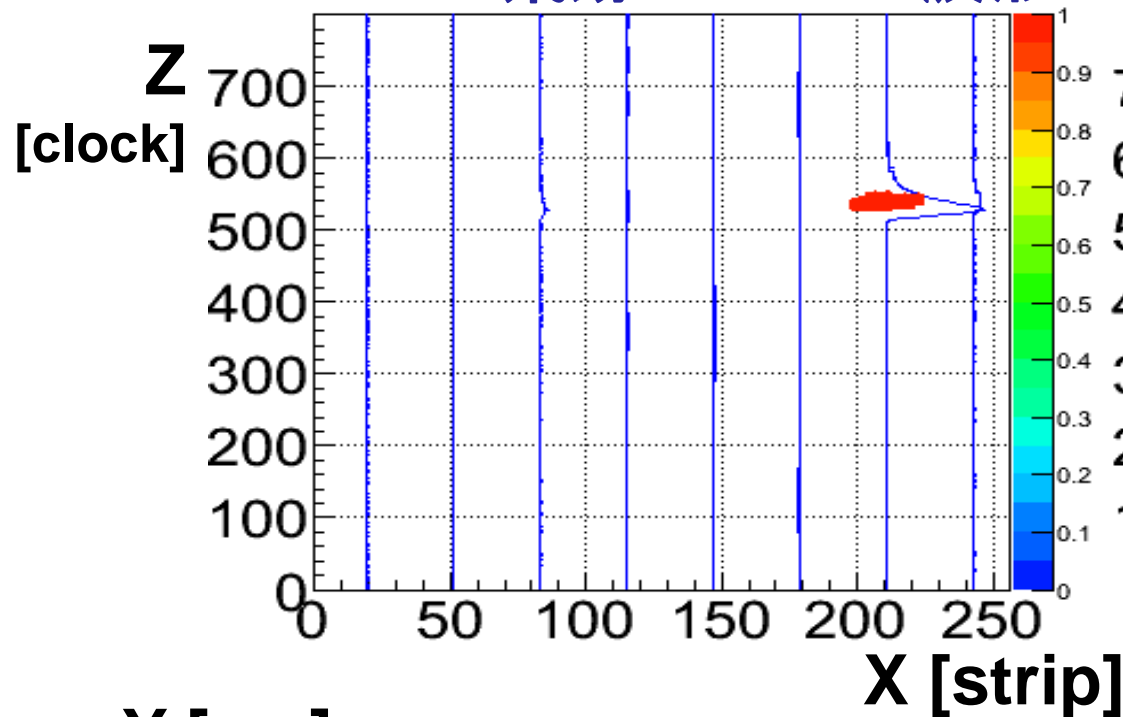
$E_e$  : 78.2 keV

$E_g$  : 209.4 keV

$E_0$  : 287.6 keV

# イベント例

## 飛跡 & FADC波形



$E_e$  : 24.1 keV

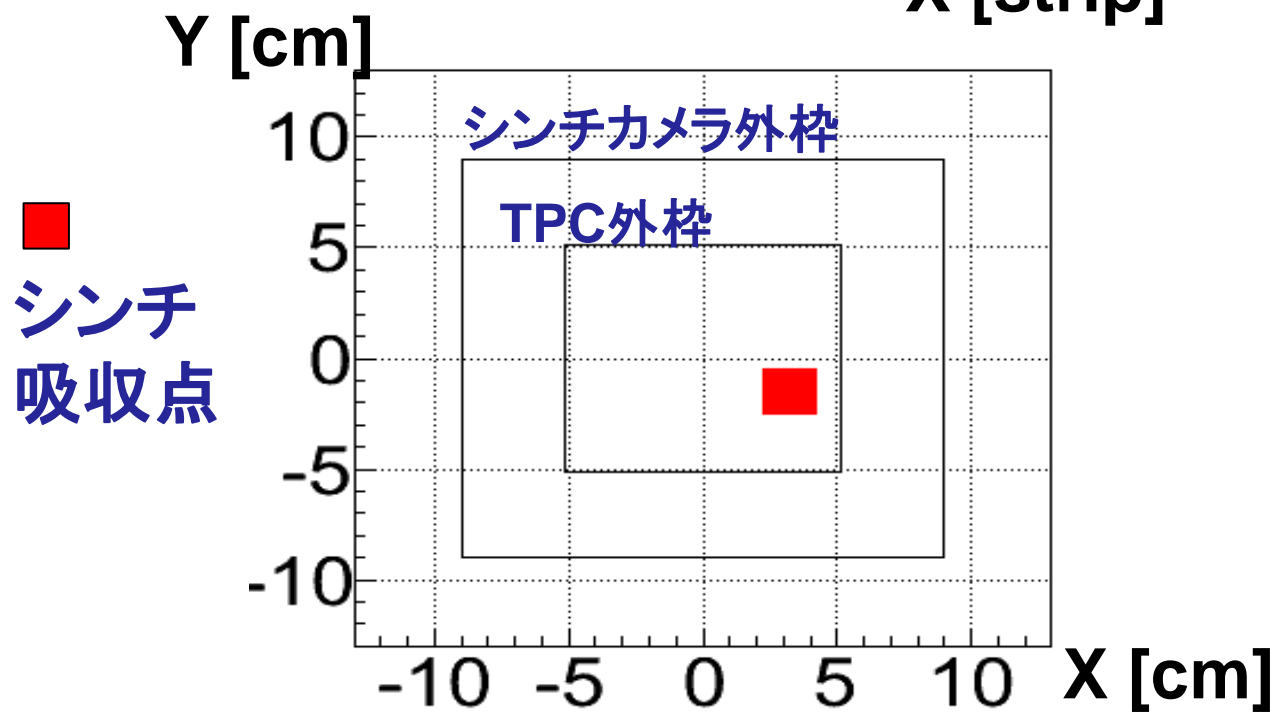
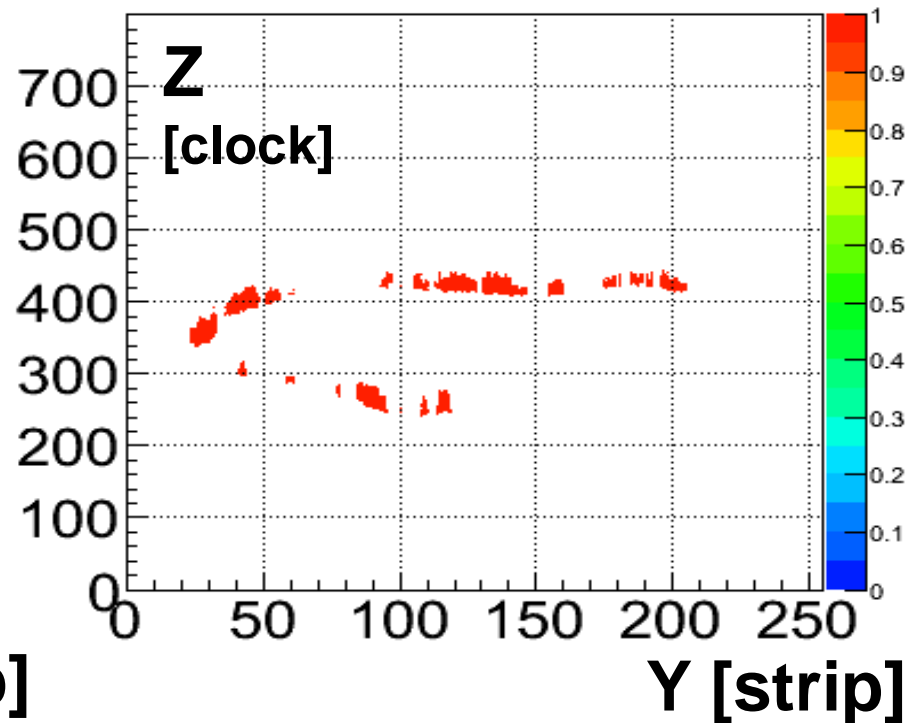
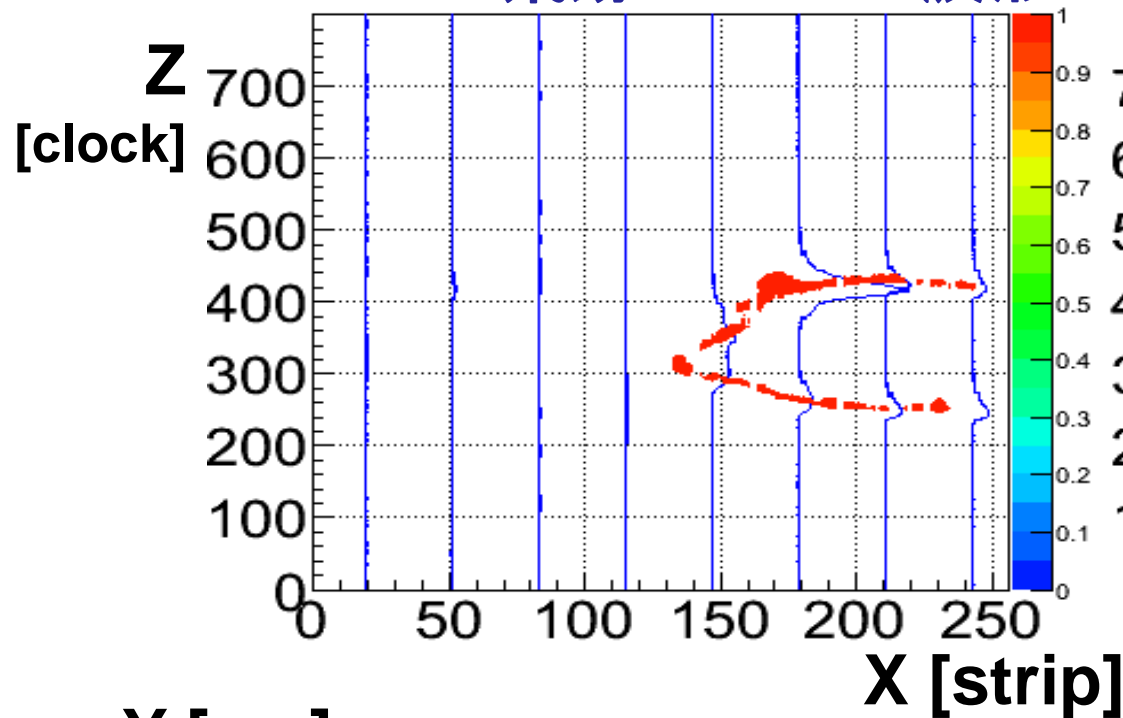
$E_g$  : 645.4 keV

$E_0$  : 669.5 keV



# イベント例

## 飛跡 & FADC波形



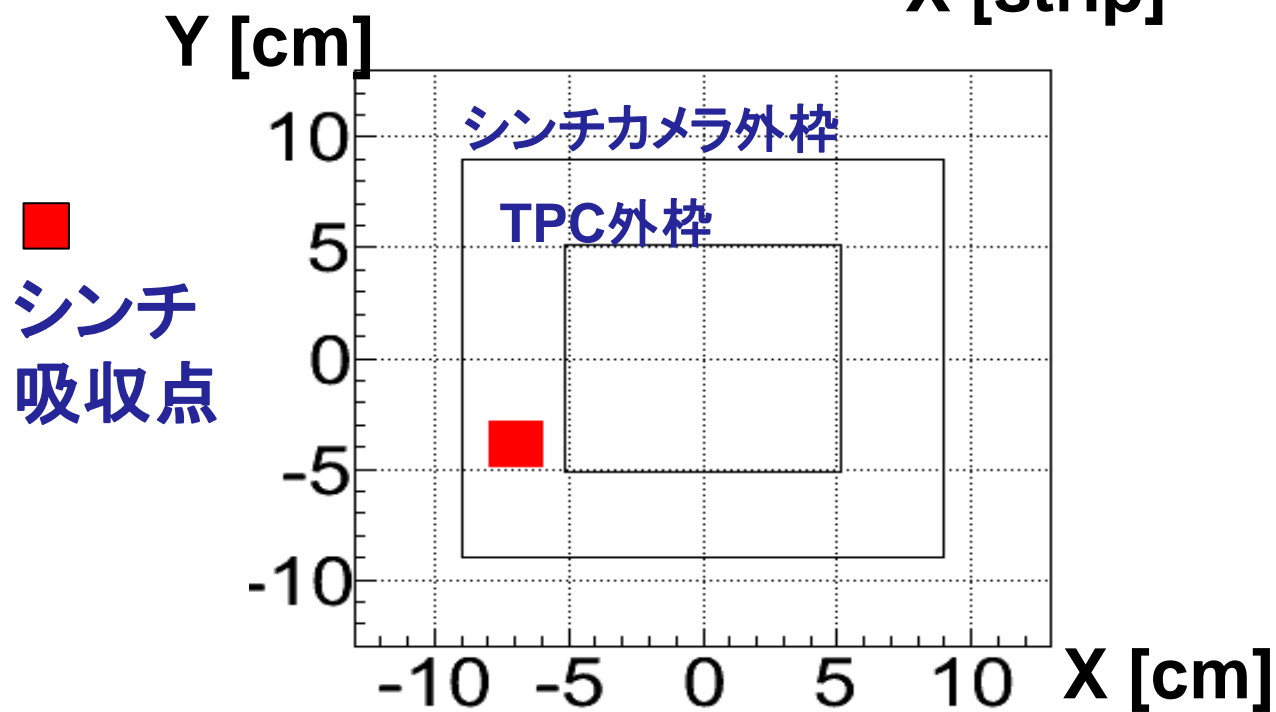
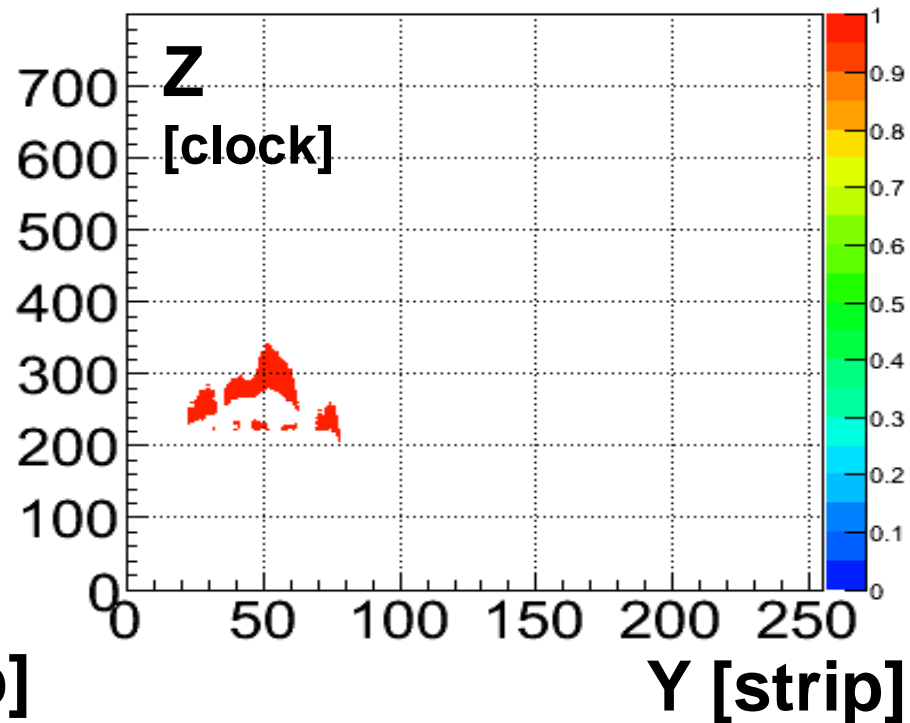
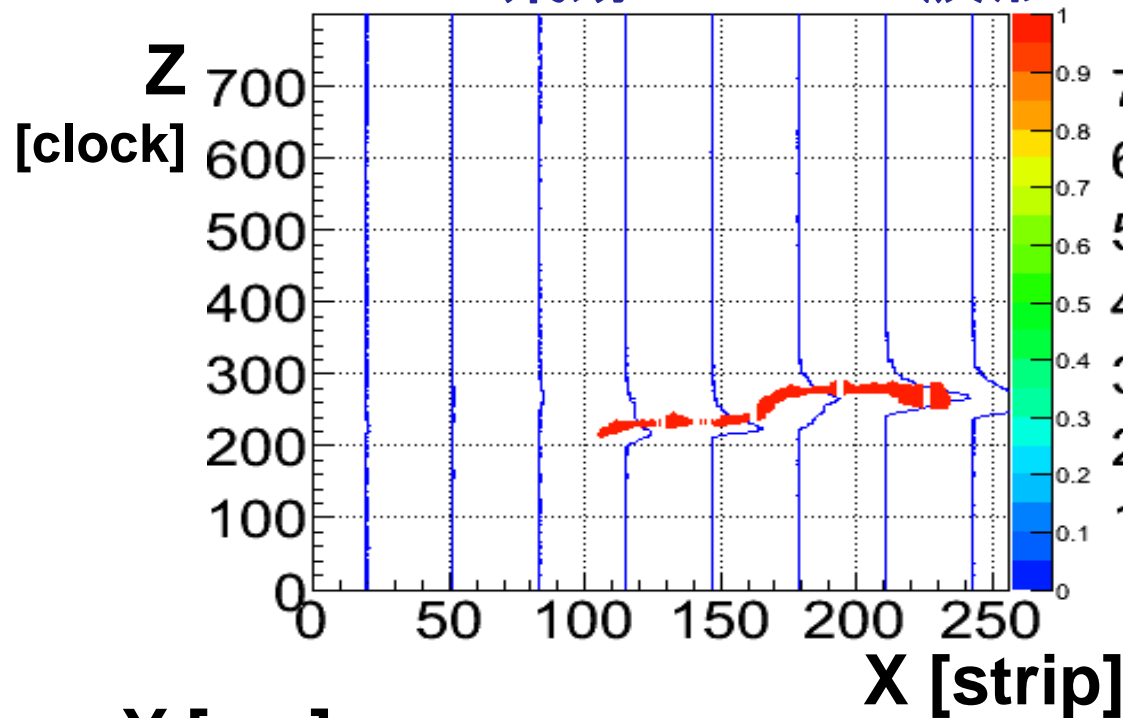
$E_e$  : 70.2 keV

$E_g$  : 791.2 keV

$E_0$  : 861.4 keV

# イベント例

## 飛跡 & FADC波形



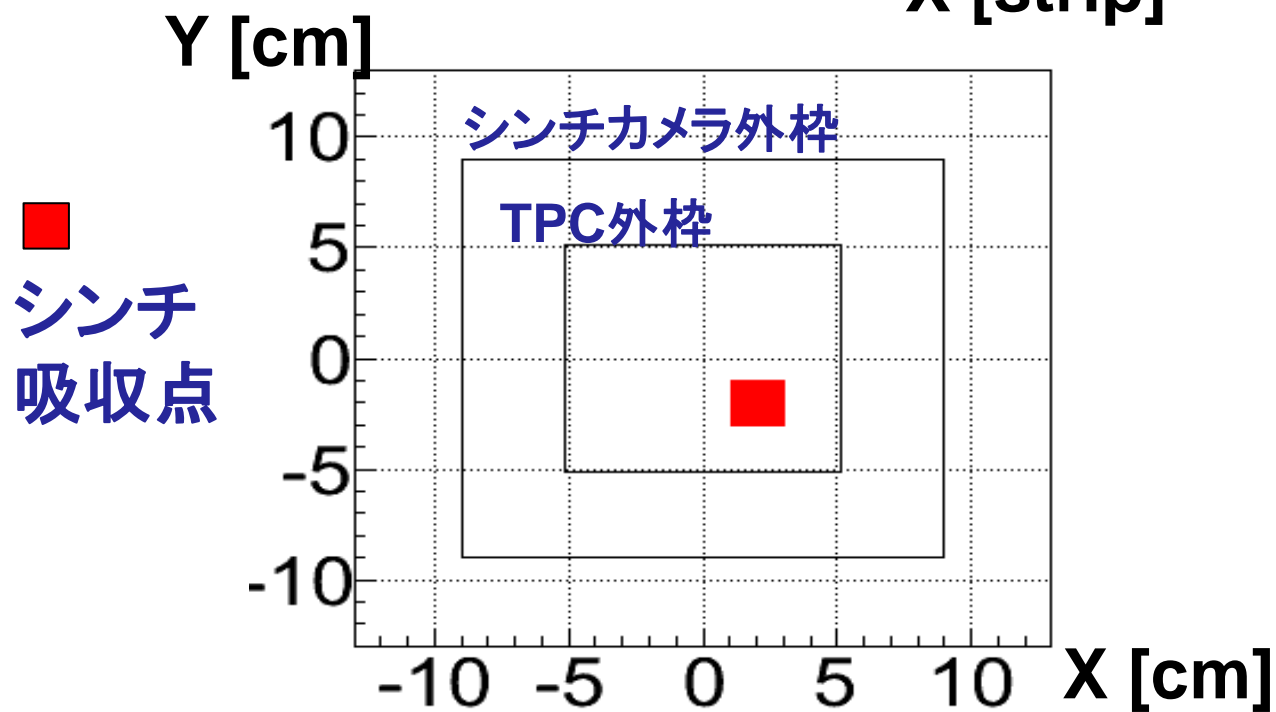
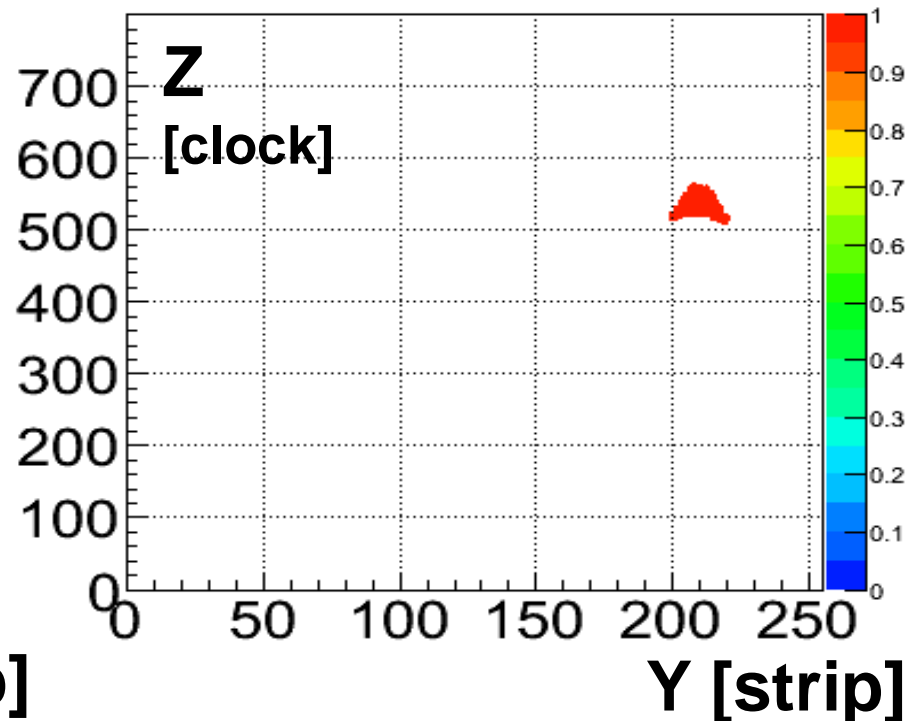
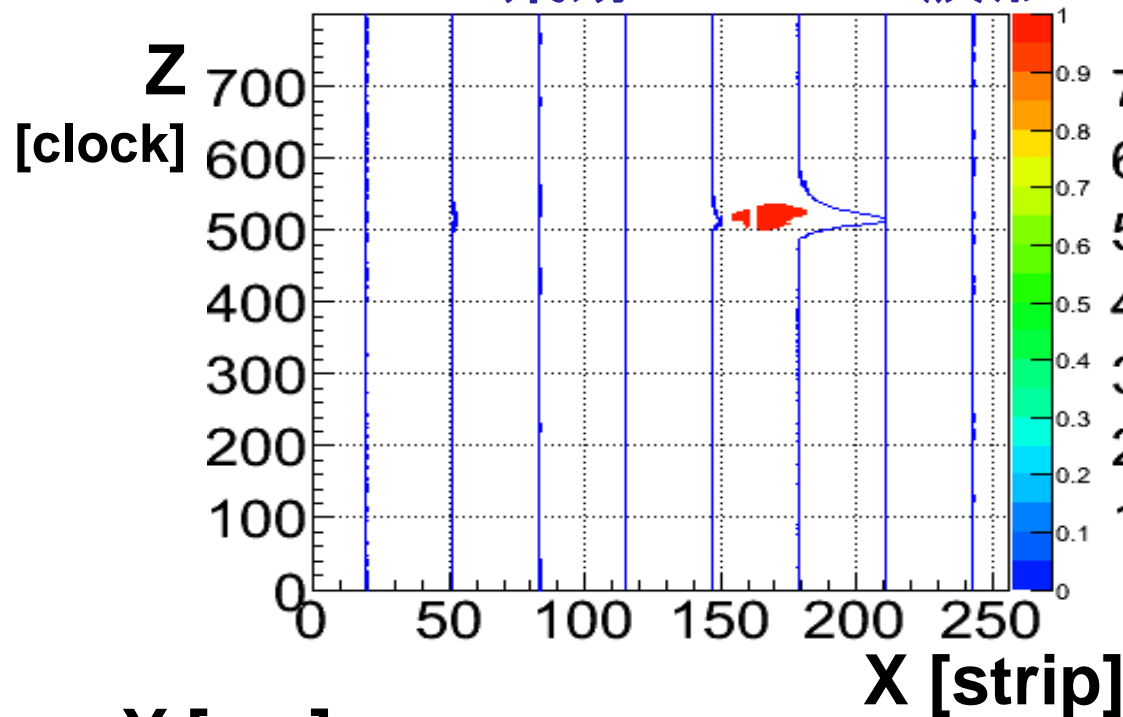
$E_e$  : 89.3 keV

$E_g$  : 492.5 keV

$E_0$  : 581.8 keV

# イベント例

## 飛跡 & FADC波形

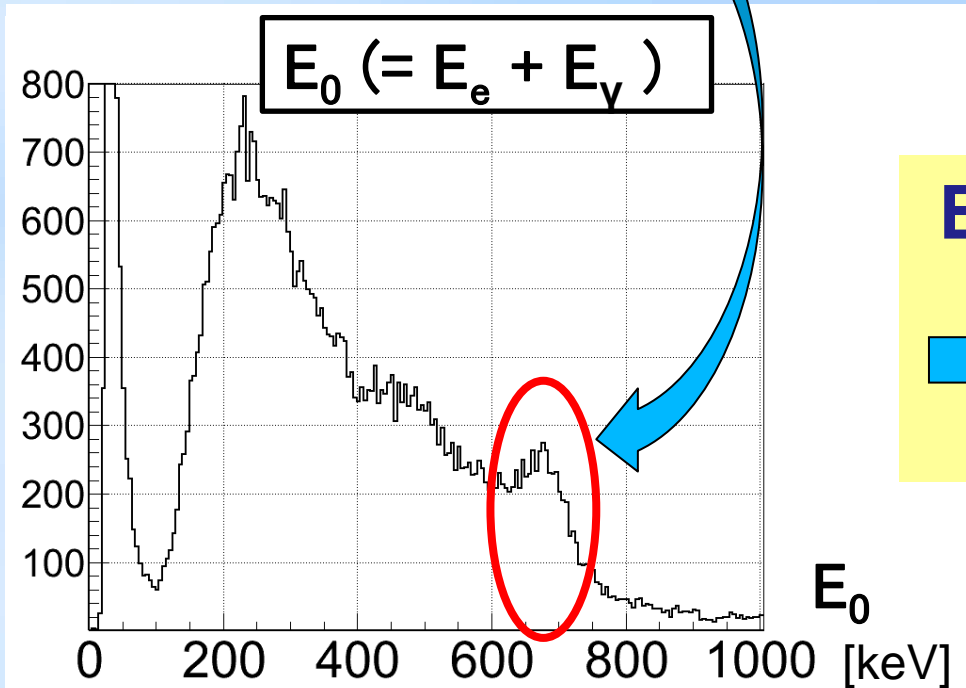
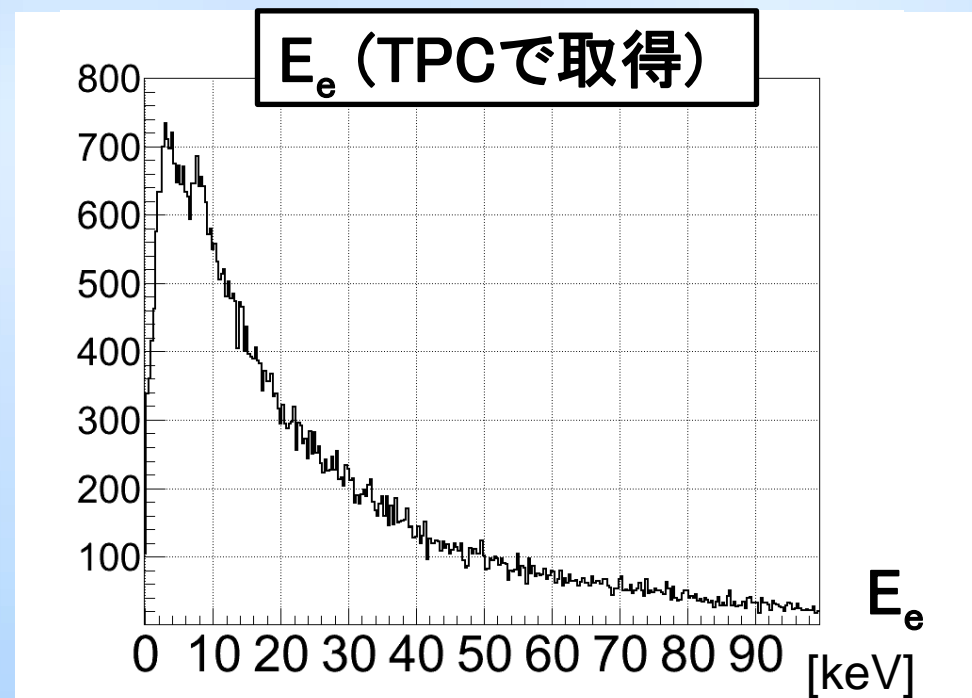
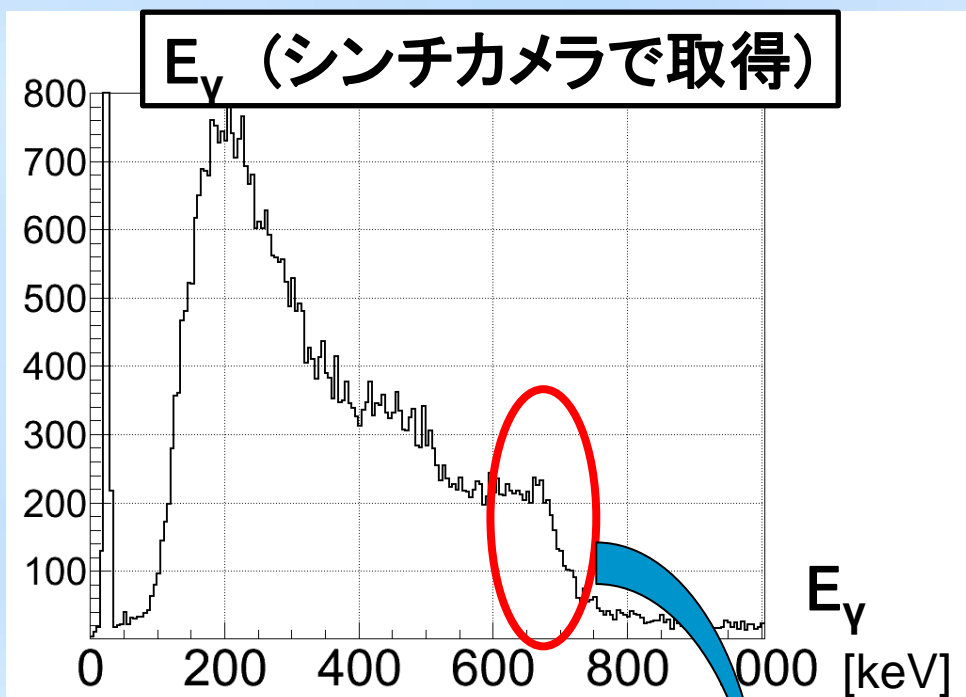


$E_e$  : 24.9 keV

$E_g$  : 255.1 keV

$E_0$  : 280.0 keV

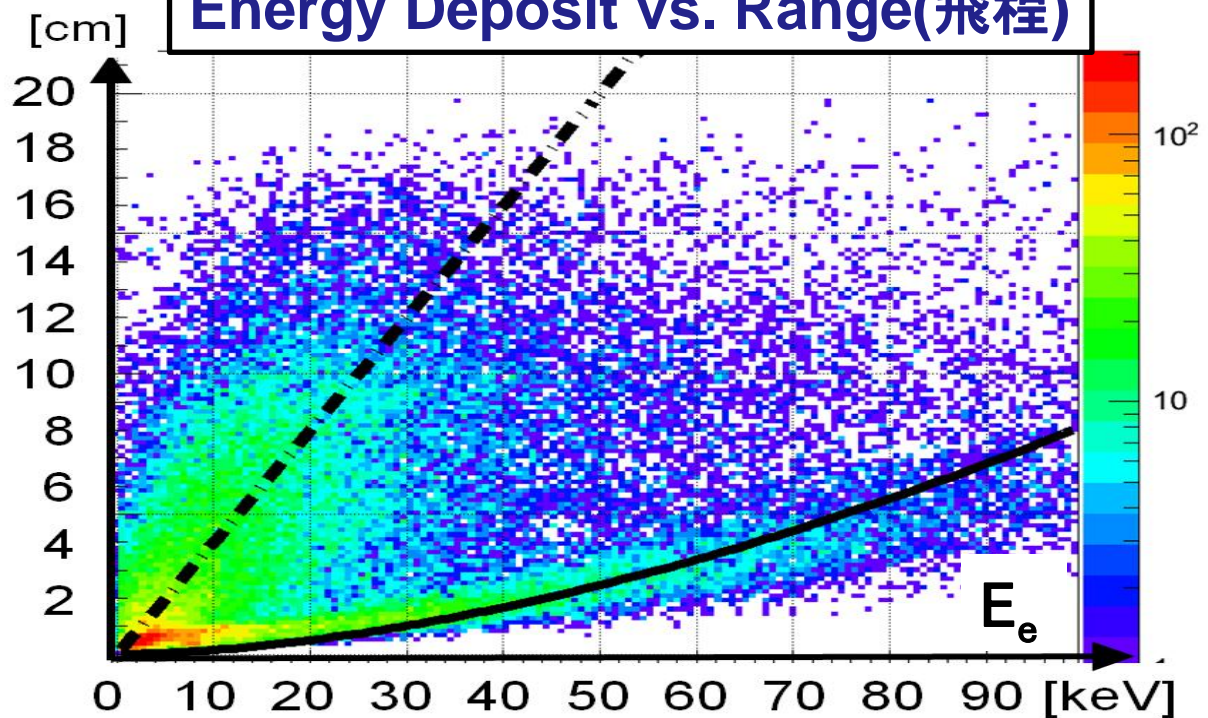
# コンプトンイベントの確認1



$E_0$  のスペクトル 662keV にピーク  
→ 反跳電子・散乱ガンマ線  
が同時に取得できている

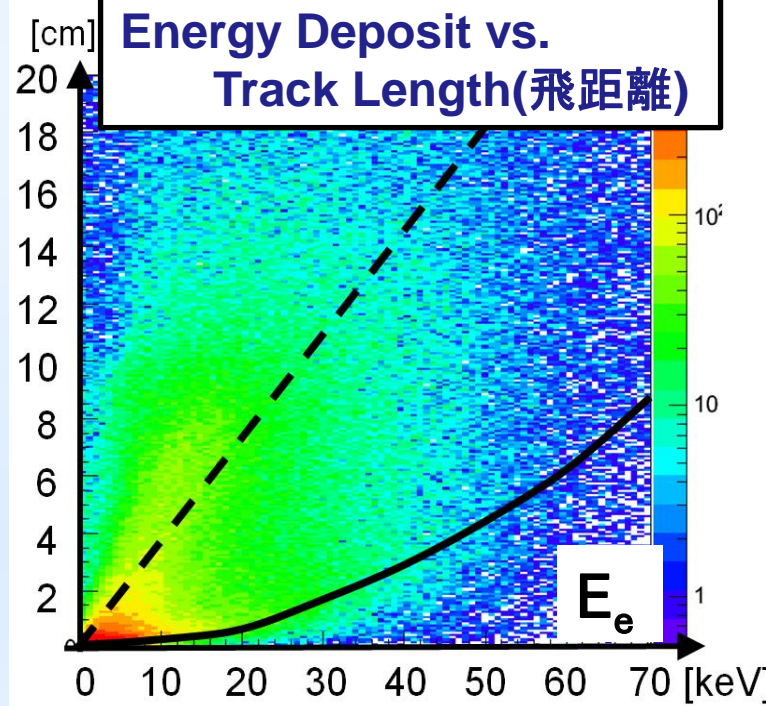
## コンプトンイベントの確認2

Energy Deposit vs. Range(飛程)



旧アルゴリズムの場合

Energy Deposit vs. Track Length(飛距離)



理論曲線

実線 : 反跳電子などの低エネルギー電子 ( $dE/dX$  大)

破線 : 宇宙線 $\mu$  などの高エネルギー荷電粒子 ( $dE/dX$  小)

- 反跳電子が検出できている
- 理論曲線に沿って分布している
- 高エネルギー荷電粒子と識別可能

ノイズにより、電子の飛距離が長めに解析されていた

新アルゴリズムでは、飛跡とノイズの識別は容易

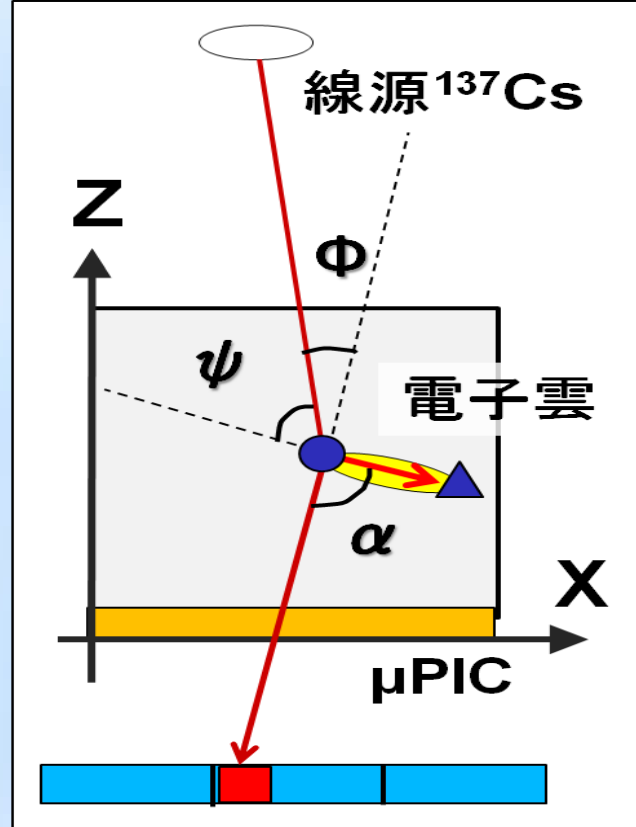
# コンプトンイベントの確認3

## 飛跡の解析方法

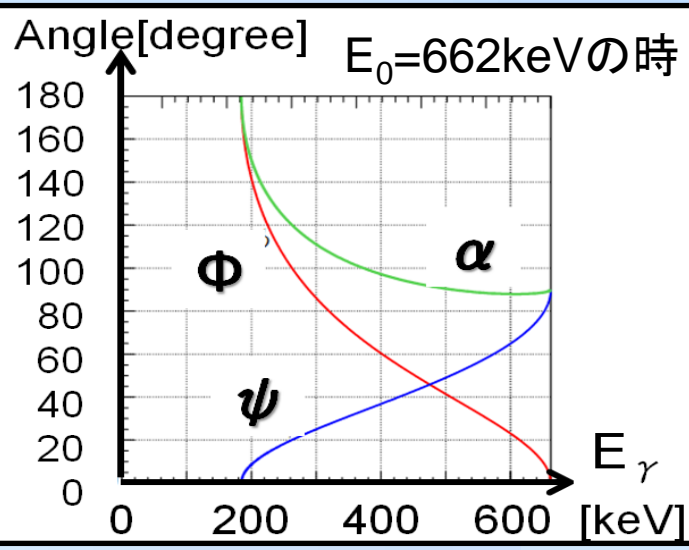
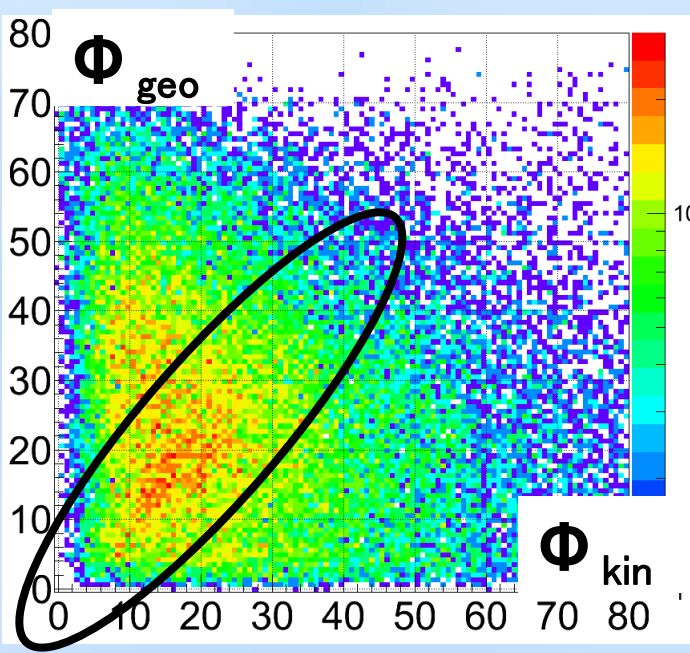
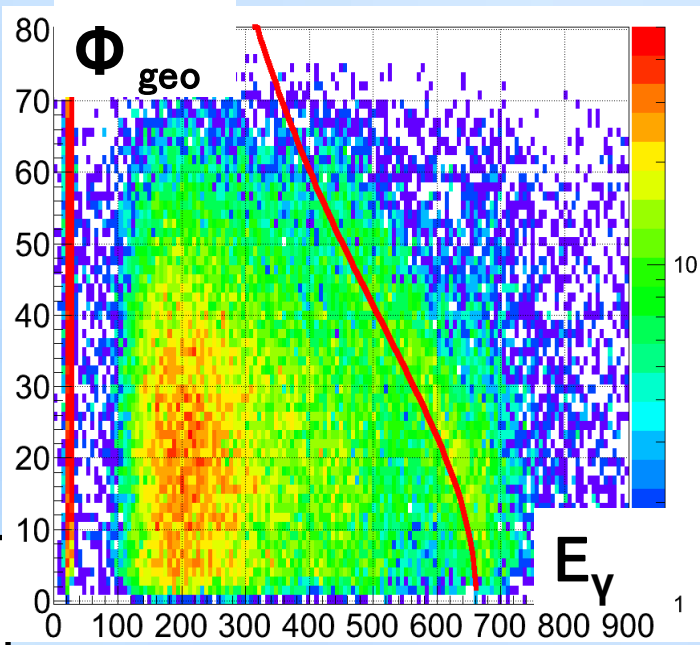
3次元飛跡をXY面に射影したとき、

吸収点 ■ との距離が最短の点 ● を“**散乱点**”

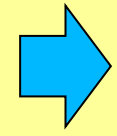
散乱点 ● と、最遠の点 ▲ を結んだベクトルを“**反跳方向**”



$$\cos \phi_{kin} = 1 - \frac{m_e c^2}{E_\gamma + E_e} \frac{E_e}{E_\gamma}$$



コンプトンの 散乱角 の関係を満たすイベントが存在  
 ノーカットでコンプトンイベントが識別  
 解析で散乱点を正しく選別  
 飛跡は散乱点を落とさず取得



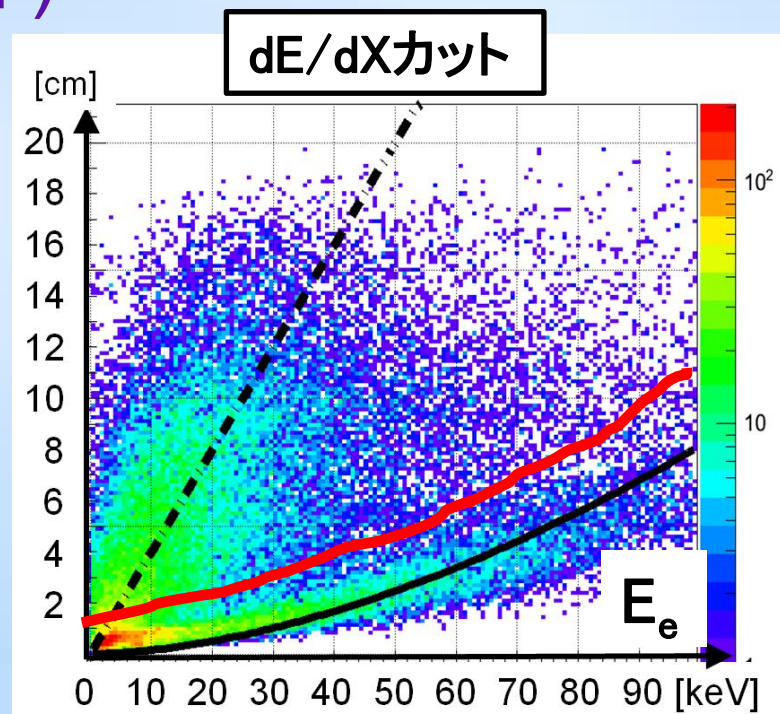
# コンプトンイベントの選択(カット条件)

## ◆ dE/dXカット

荷電粒子がTPCから抜け出ると、エネルギーが正確に取得できないため、**dE/dXが小さい成分(赤線より上)をカット**

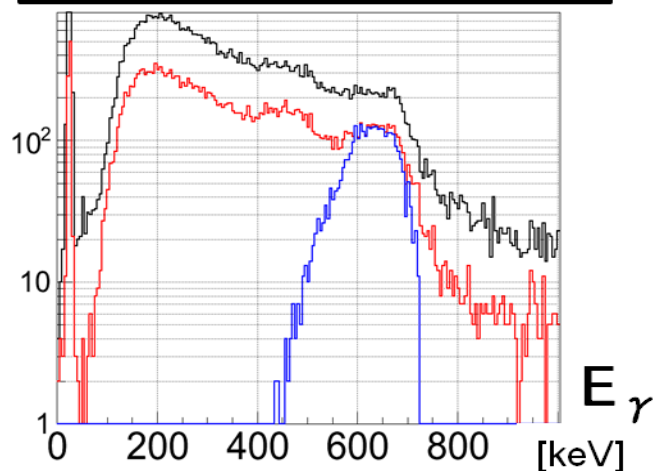
## ◆ エネルギーカット

TPC入射前に散乱したようなイベントを除くため、 **$600 < E_0[\text{keV}] < 730$  でカット**

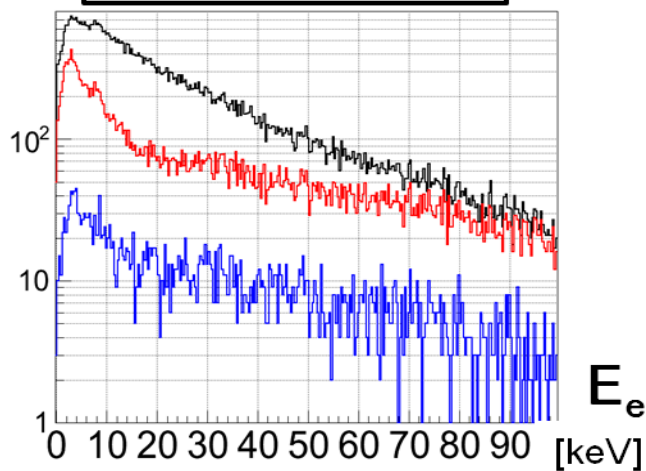


黒 : Raw、赤 : dE/dXカット後、青 : エネルギーカット後

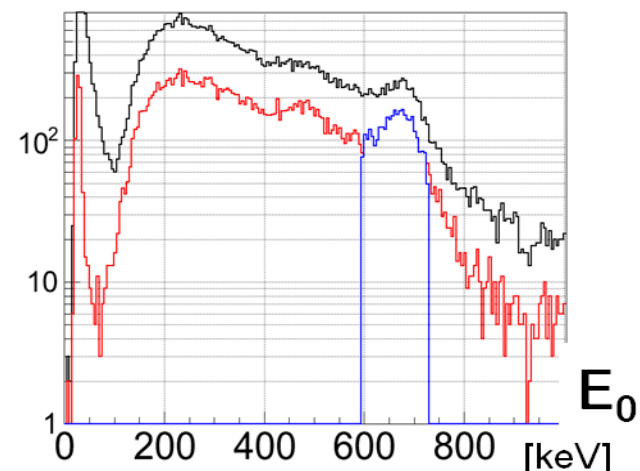
$E_\gamma$  (シンチカメラで取得)



$E_e$  (TPCで取得)

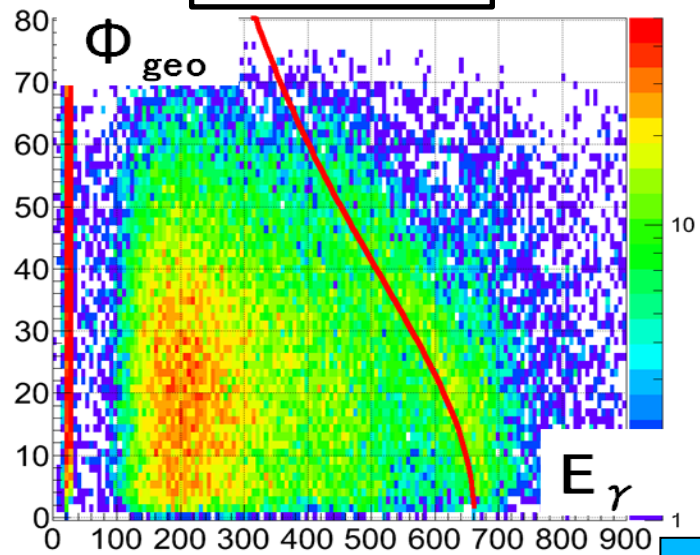


$E_0 (= E_e + E_\gamma)$

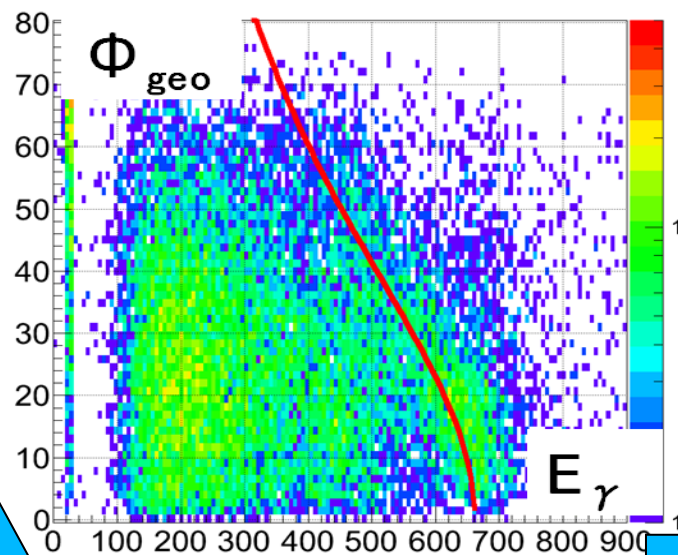


# カットごとの変化1

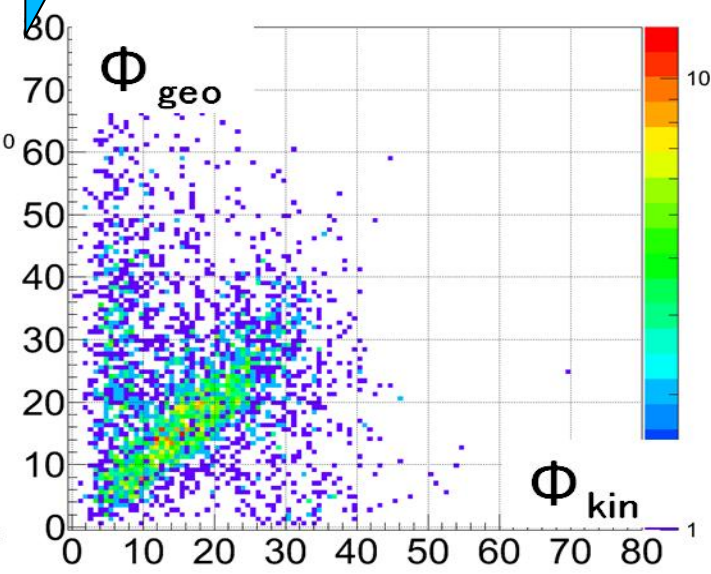
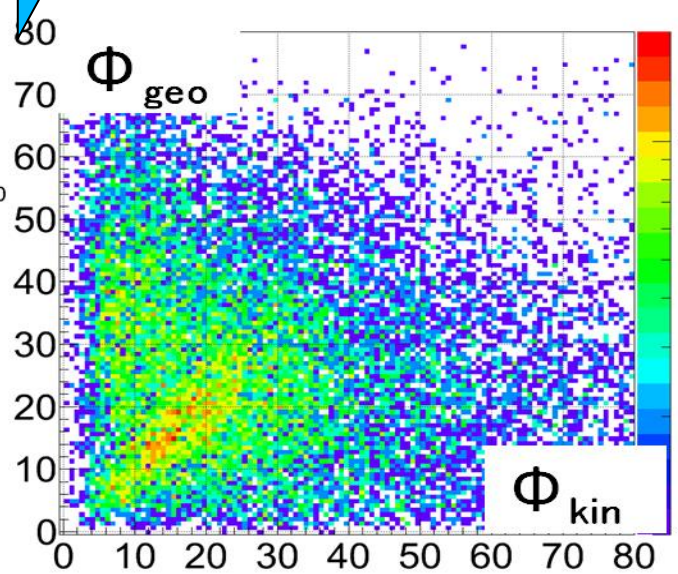
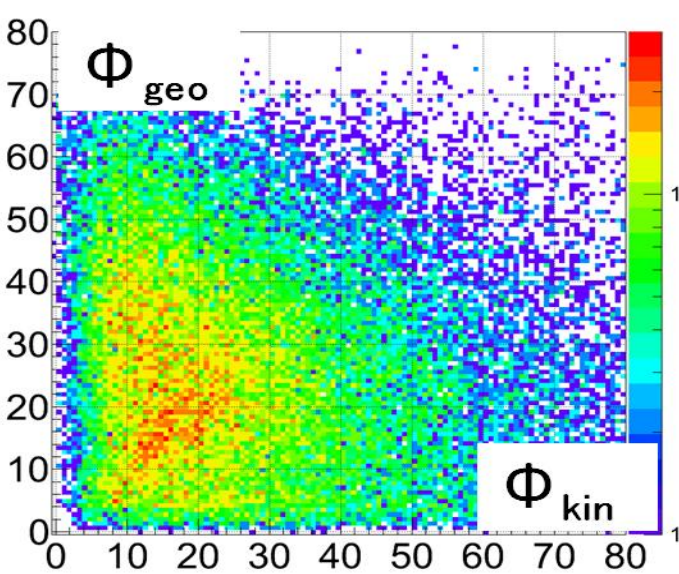
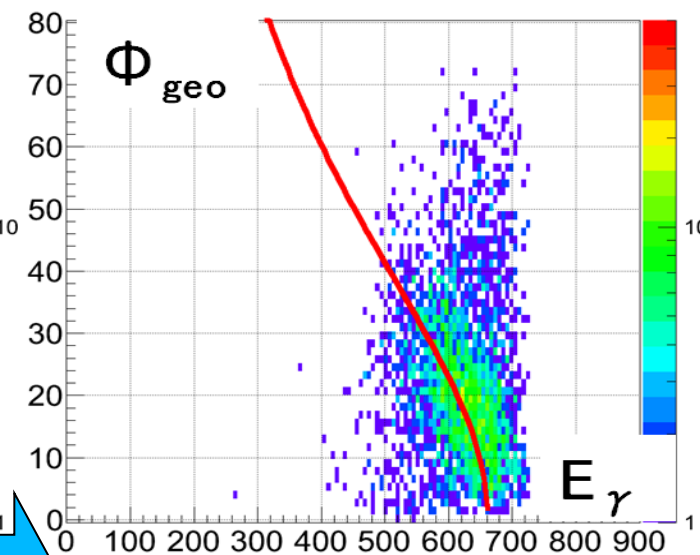
ノーカット



dE/dXカット後



エネルギーカット後

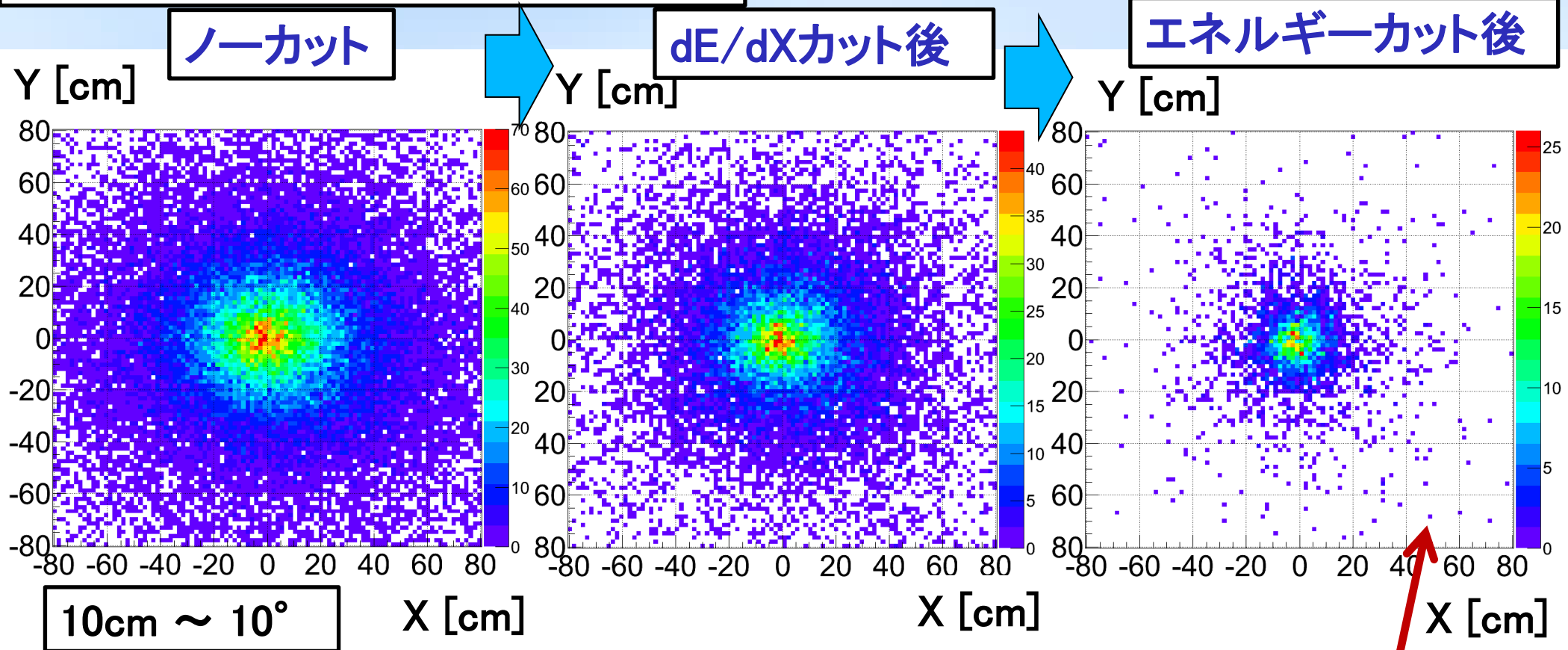


コンプトン散乱の関係を満たすイベントが残る (解析 & カット有効)



# カットごとの変化2

## ガンマ線 到来方向の再構成



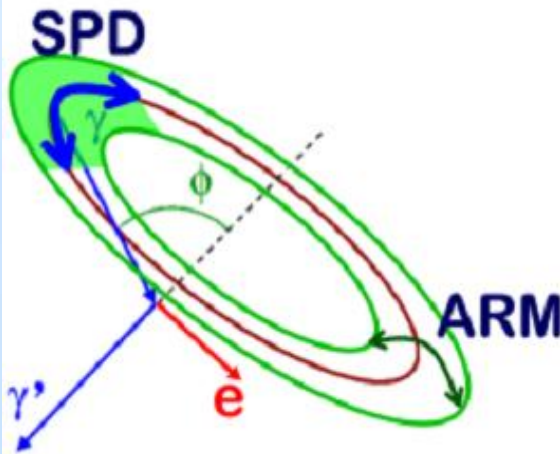
宇宙線 $\mu$ 、環境ガンマ線  
などバックグラウンド多数

空気散乱などにより、イメージが  
ぼけている様子が見えている

1イベント

- ◆ 新アルゴリズムで線源からのガンマ線再構成に成功
- ◆ 単純な解析 & カットで、バックグラウンドが良く除去できている

# 性能評価



	検出効率 (実機)	検出効率 (シミュレーション)	ARM (仰角)	SPD (方位角)
$^{137}\text{Cs}$ 662keV	$2 \times 10^{-5}$	$2.5 \times 10^{-5}$	$\sim 10^\circ$	----
$^{22}\text{Na}$ 511keV	$3 \times 10^{-5}$	$4.4 \times 10^{-5}$	$\sim 10^\circ$	----

## ◆ 単純な解析 & カットで、

- ✓ 検出効率は、10倍程度改善
- ✓ ARM  $\sim 10^\circ$  達成

## ◆ 今回は、従来の7割程度のゲインで運用

- ✓ 低ゲインでも十分な感度

## ◆ シミュレーションと50%以内で一致

- ✓ 入射ガンマ線のコンプトン散乱をほぼ検出できている

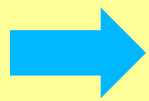
(コンプトン散乱確率 & 反跳電子はTPC内で吸収 & 散乱ガンマ線はシンチで吸収)

新アルゴリズムによる  
・ 平行・垂直成分回復  
・ ヒット点数増加  
の成果

# まとめ

飛跡取得アルゴリズムの改良により、

◆ 従来より**10倍程度の検出効率改善**



SMILE-II気球実験では、  
当初予想より4倍程度の感度改善が期待

◆ シミュレーションと**50%以内で一致**

◆ **dE/dXカットがバックグラウンド除去に有効**であることが判明

◆ 単純な解析で、線源からのガンマ線再構成に成功

◆ 従来より低ゲインでも十分な感度

## 今後の課題

◆ 角度分解能向上のため、diffusionを考慮した解析方法の確立

◆ シミュレーションと20-30%の範囲で一致させる

◆ 感度改善のために、ガス高圧化(3気圧)

◆ ガス種の選択(CF<sub>4</sub>感度改善、低電圧ガスの採用)