A close-up photograph of a square silicon-on-insulator (SOI) pixel detector chip. The chip is mounted on a dark green substrate and is surrounded by a gold-colored wire bond. The chip itself has a central square region with a smaller square in the center, and a larger square region around it, all in a light blue or purple color. The background is dark and out of focus.

V-321-a 日本天文学会2023春季年会

*MeV*ガンマ線観測への 応用に向けたSOIピクセル 検出器の基礎特性試験(2)

広島大学

先進理工学研究科 M1 橋爪大樹

須田祐介 深澤泰司(広島大学) 鶴剛(京都大学) 武田彩希(宮崎大学)

Introduction

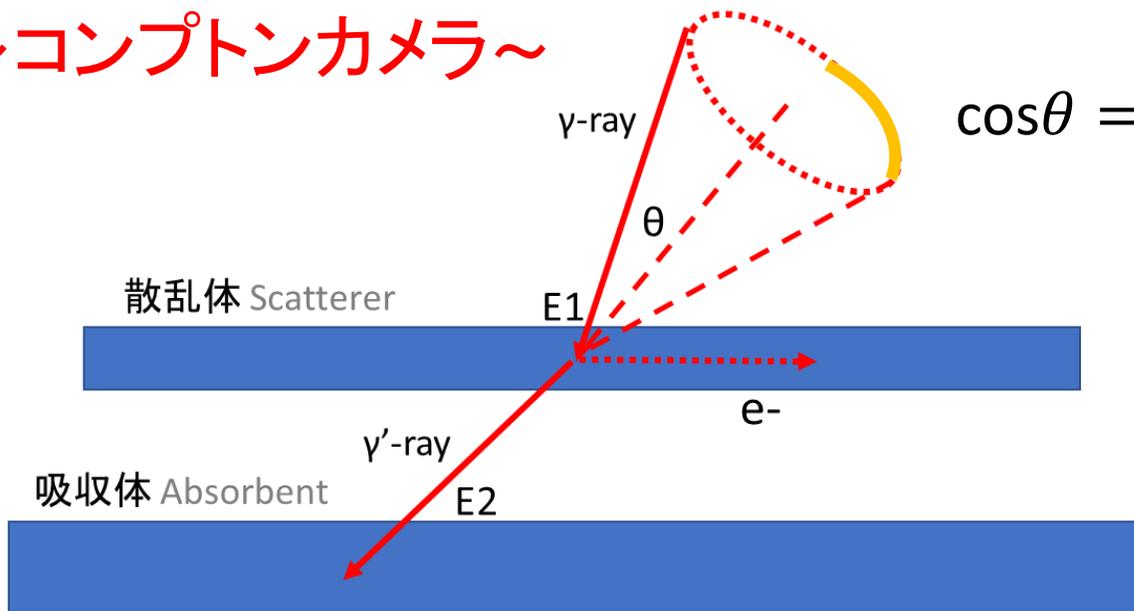
～MeVガンマ線天文学～

- ・ 開拓されていない波長帯
- ・ マルチメッセンジャー天文学への貢献



MeV領域の新しい衛星、検出器が必須

～コンプトンカメラ～

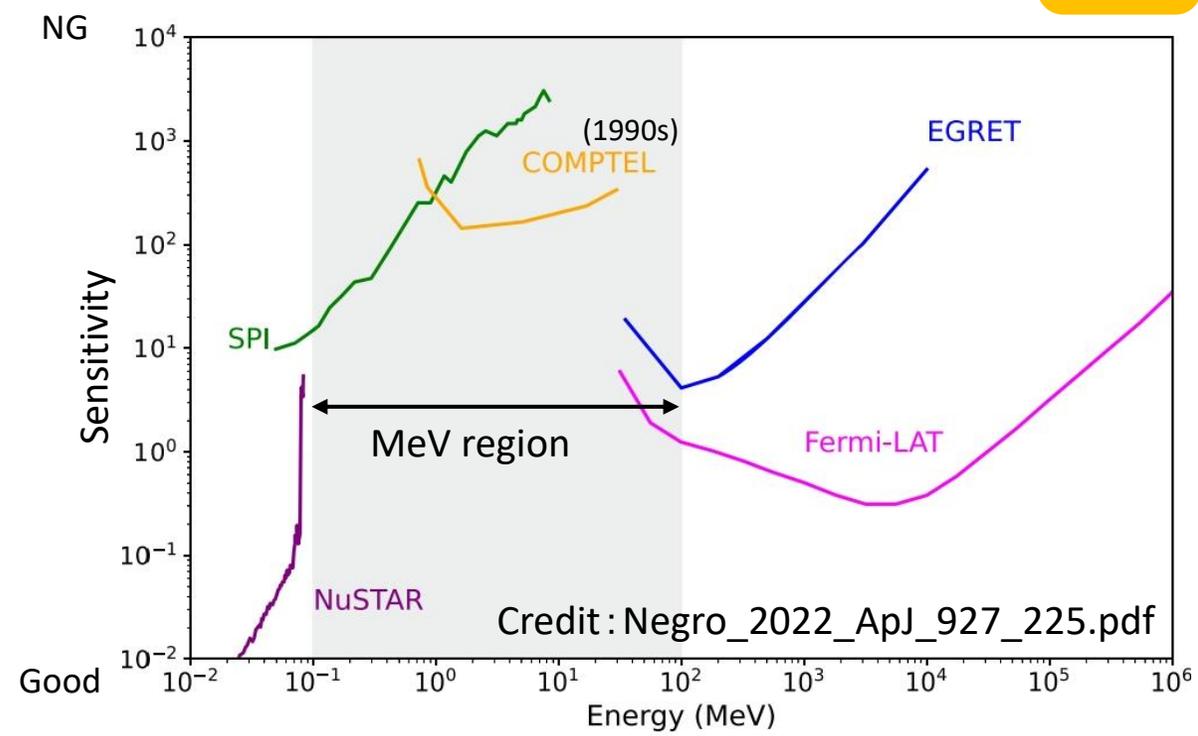


$$\cos\theta = 1 - mc^2 \left(\frac{1}{E_2} - \frac{1}{E_1} \right)$$

散乱電子 → 円環を円弧に！



ピクセル検出器が有効



Credit: Negro_2022_ApJ_927_225.pdf

Introduction

～使用素子～

イベント駆動型SOIピクセル検出器「XRPIX」

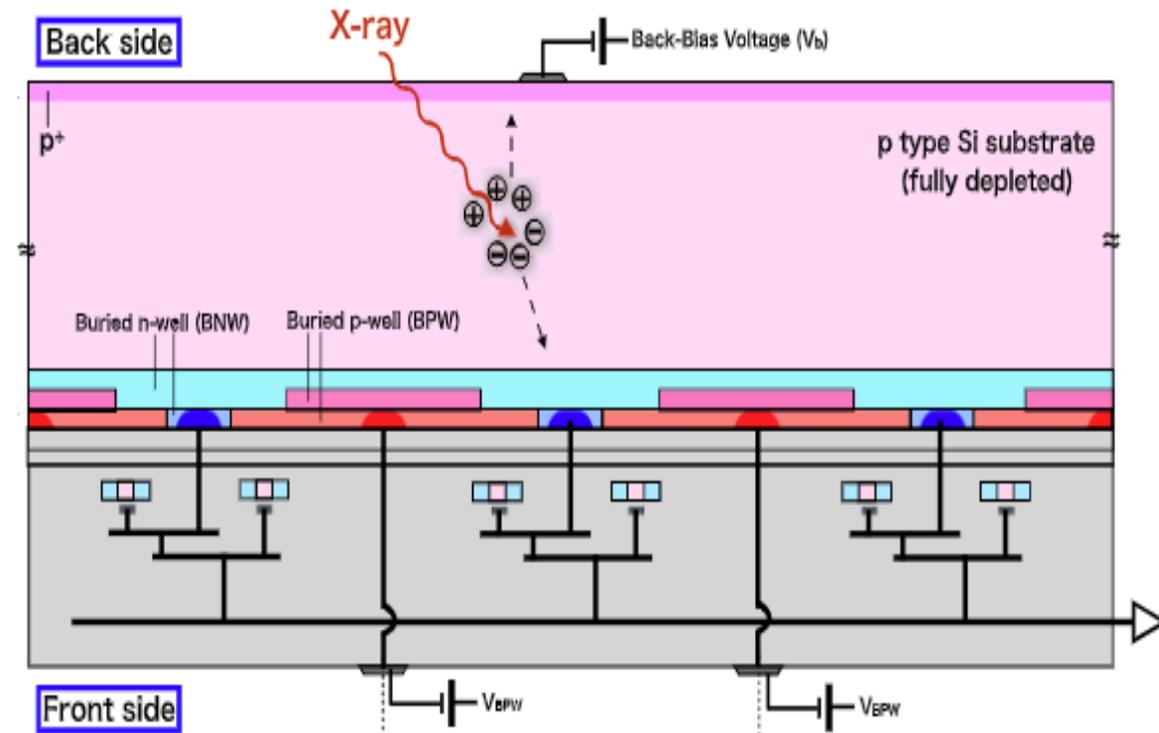
- ・ 必要なイベントの信号のみを選択的に読み出す = イベント駆動読み出し
- ・ 常温で完全空乏化できる「XRPIX 8.5」を使用
- ・ センサー層: $\sim 300 \mu\text{m}$ ピクセルサイズ: $36 \mu\text{m} \times 36 \mu\text{m}$

～研究目的～

- ・ X線観測用の素子 → MeVガンマ線観測に応用
- ・ XRPIXの基礎特性を評価し、コンプトンカメラの散乱体として使用する

～本講演内容～

- ・ 空乏層の厚さの測定
- ・ 電子飛跡の方向推定



空乏層の厚さの測定

X線(Am-241 , 13.9 keV , 59.5 keV)を照射 → 各ピークのカウント数を測定

$$\frac{\text{Emission rate}(E_1)}{\text{Emission rate}(E_2)} \times \frac{\exp\left(-\frac{d_{\text{other}}}{\lambda_{\text{other}}(E_1)}\right) \times \left[1 - \exp\left(-\frac{W_{\text{dep}}}{\lambda_{\text{Si}}(E_1)}\right)\right]}{\exp\left(-\frac{d_{\text{other}}}{\lambda_{\text{other}}(E_2)}\right) \times \left[1 - \exp\left(-\frac{W_{\text{dep}}}{\lambda_{\text{Si}}(E_2)}\right)\right]}$$

$$\lambda = 1/\rho\sigma(\text{cm})$$

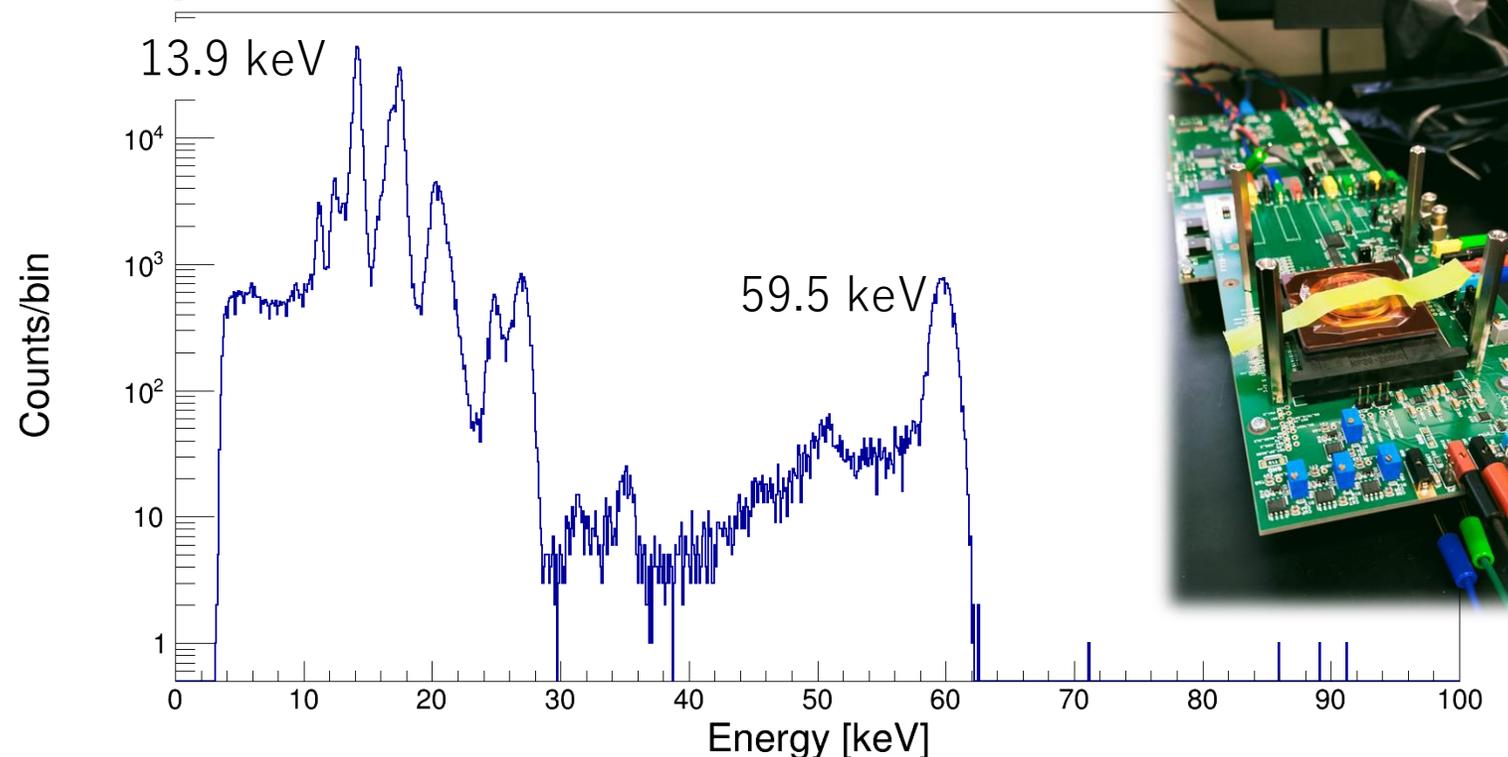
ρ : 密度 σ : 反応断面積

d_{other} : Si 層以外の厚さ (cm)

W_{dep} : 空乏層の厚さ (cm)

$$= \text{ratio}_{\text{Counts}} = \frac{\text{Counts}(E_1)}{\text{Count}(E_2)}$$

Spectrum of Am-241



測定条件

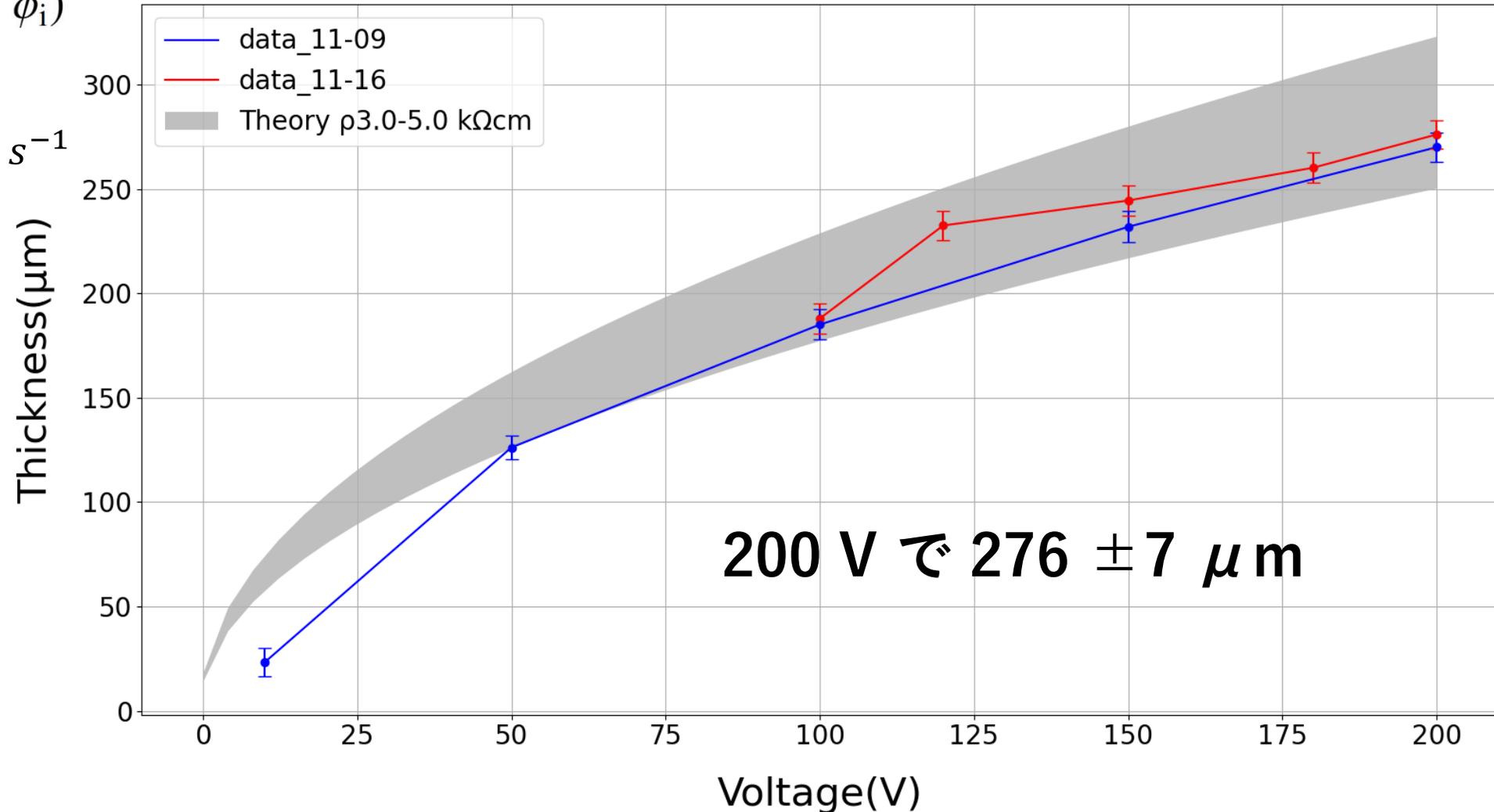
- ・ イベント駆動読み出し
- ・ 室温 (~25°C)
- ・ センサーに直置き
- ・ バックバイアス : 10V ~ 200V

Depletion XRPIX 8.5

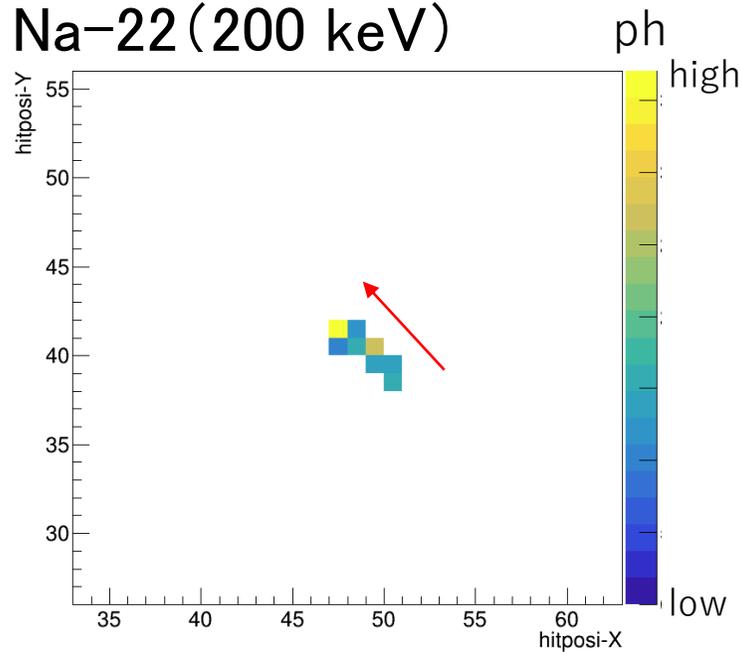
$$W_{\text{dep}} \sim \sqrt{2\varepsilon_{\text{Si}}\mu_h\rho_p(V_{\text{BB}} + \phi_i)}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{\text{Si}} &= 1.04 \times 10^{-12} \text{ F/cm} \\ \mu_h &= 5.0 \times 10^2 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1} \\ \rho_p &= 4.0 \times 10^3 \text{ k}\Omega \cdot \text{cm} \\ \phi_i &= 0.6 \text{ V} \end{aligned}$$

Thickness-of-Depletion-layer-XR85h



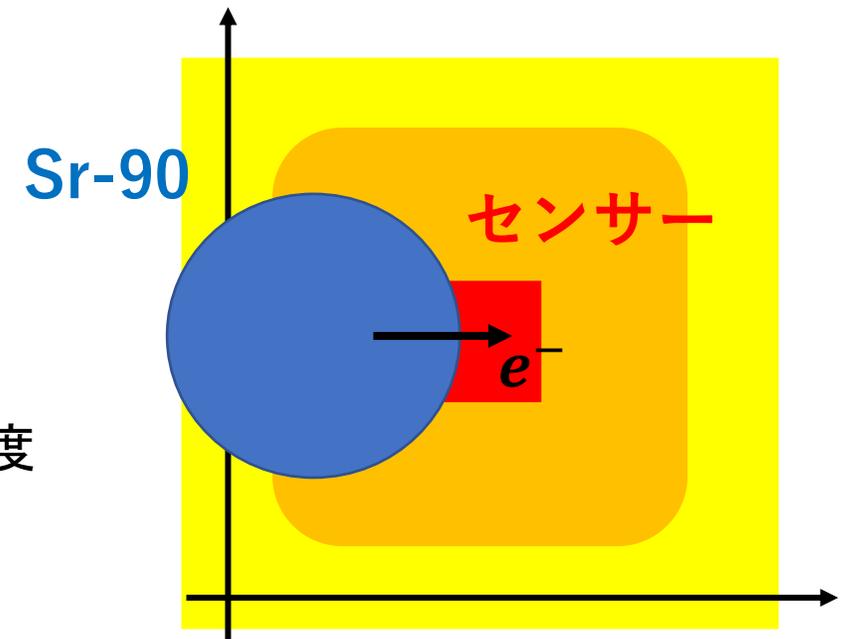
電子飛跡の方向推定



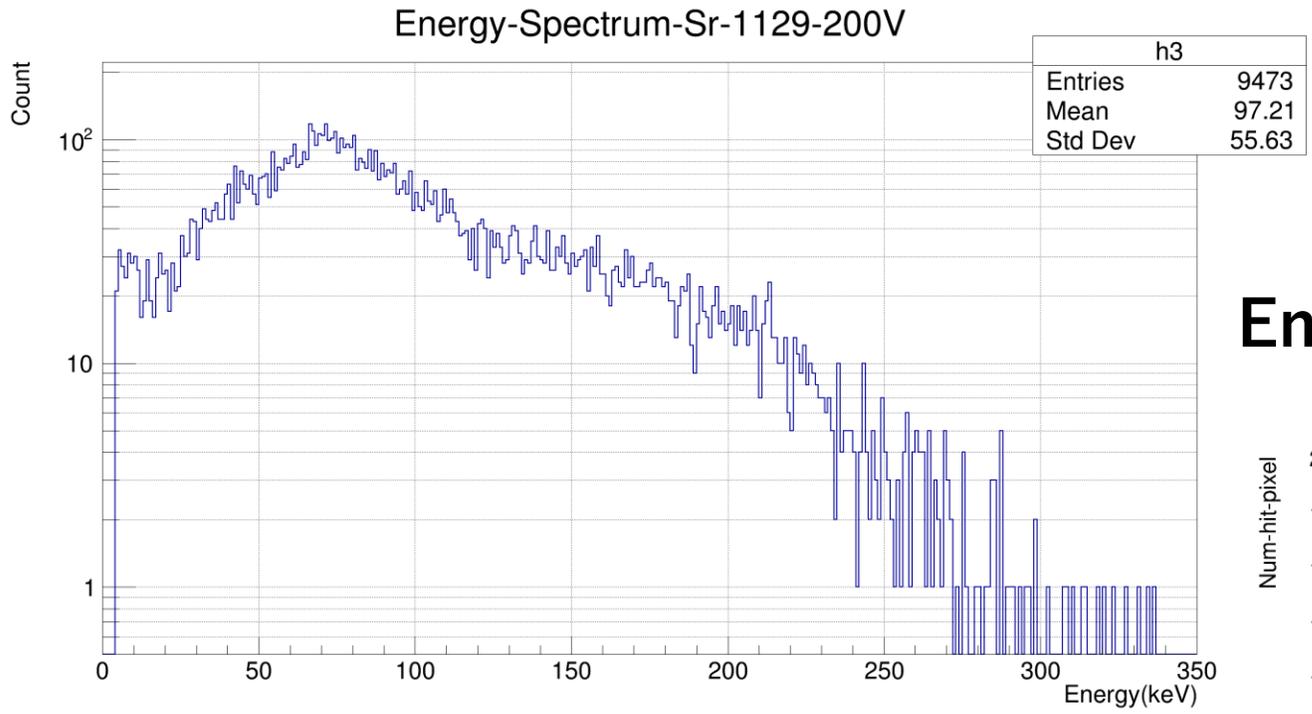
- 数100 keVの電子飛跡を検出 (ASJ 2022-09 V-335-a)
- 初期運動量方向の決定を自動化
→ 電子飛跡型コンプトンカメラの実現に大きく近づく
- Sr-90を用いて電子飛跡サンプルを取得、それをもとにアルゴリズムを開発

測定条件

- イベント駆動読み出し
- バックバイアス: 200 V
- 室温 (~25°C)
- 異方性が出ることを狙って、センサー真上からずらして配置
- 線源の窓の大きさがセンサーと同程度
- コリメートなし

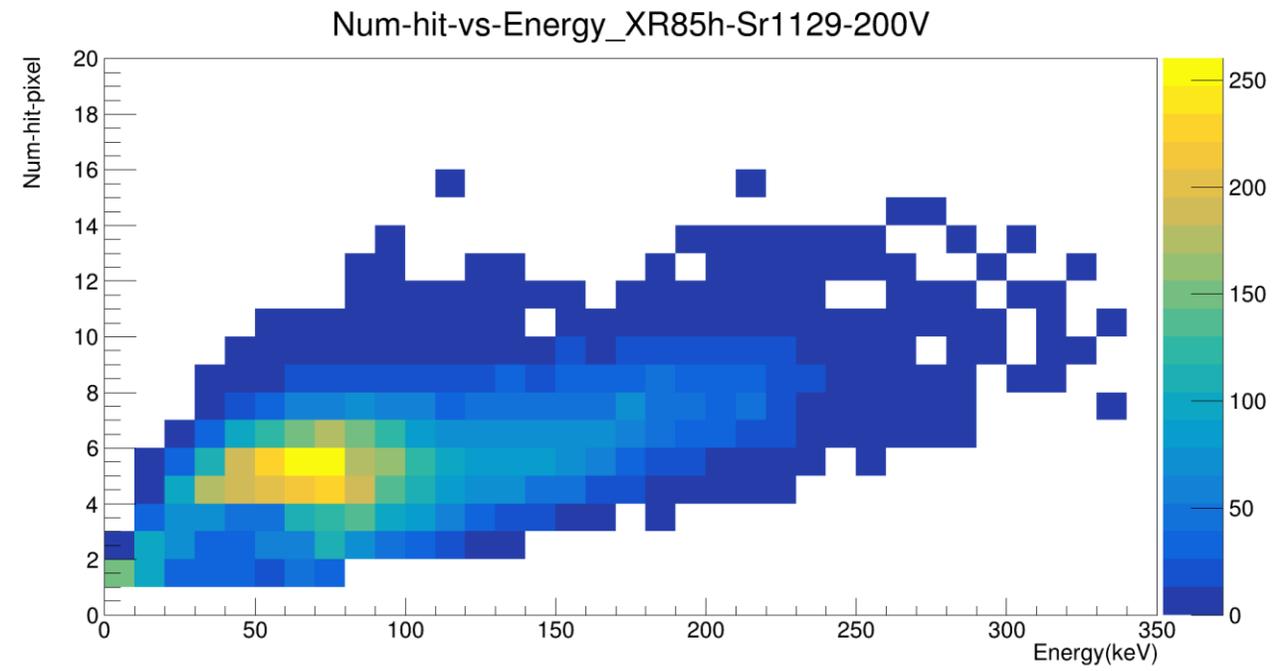


Spectrum of Sr-90



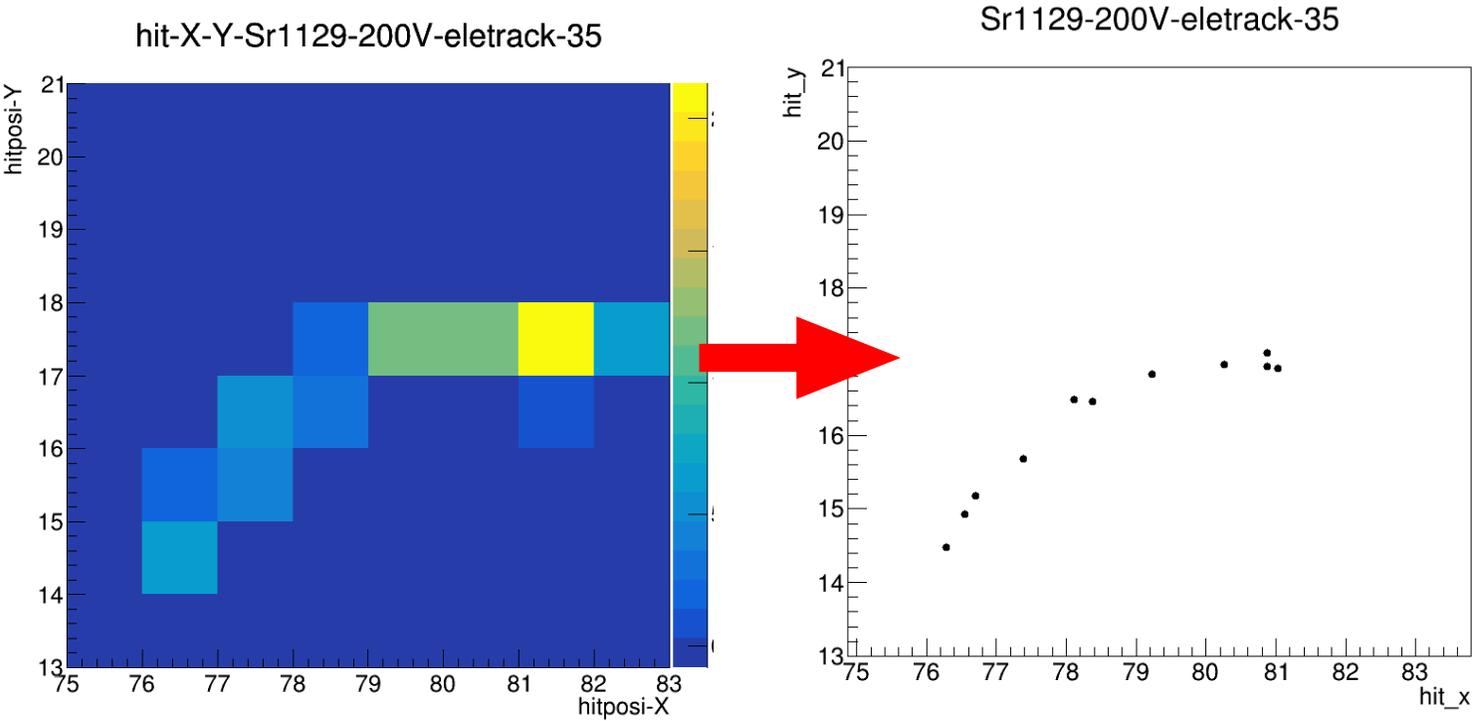
・連続的なスペクトル

Energy vs Number of hits Sr-90



・正の相関が見られる

Algorithm 電荷重心法



先行研究(米田 浩基, 東京大学 修士論文 (2017))を参考に,
3×3ピクセルの範囲で重み付け平均

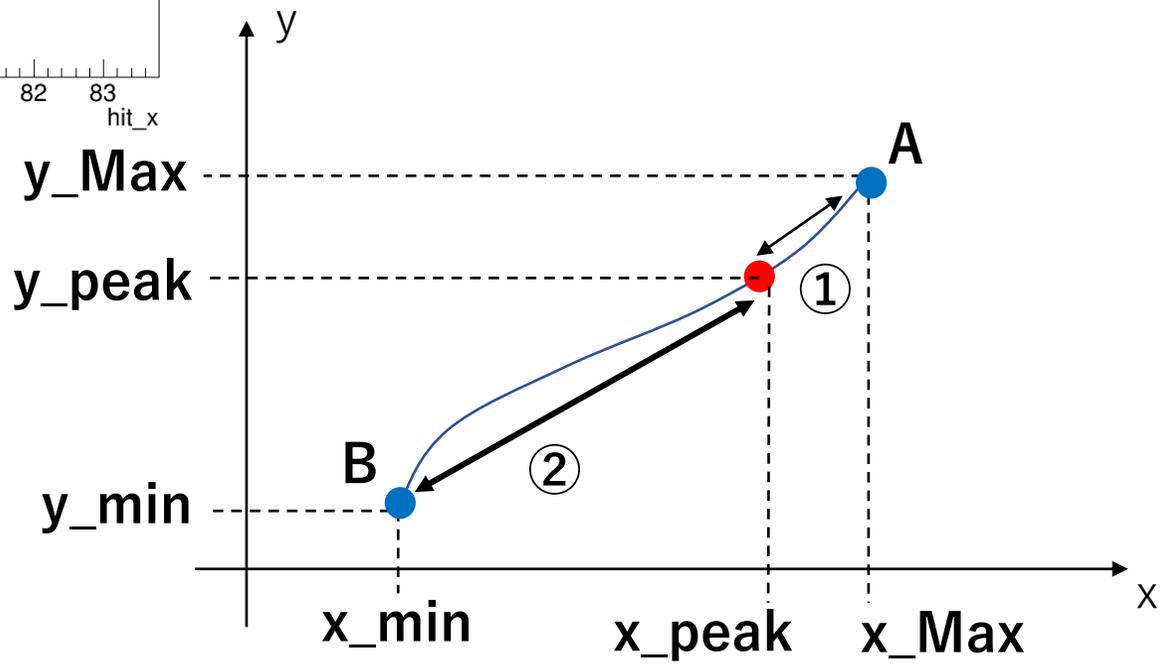
補正後の位置

$$= \frac{\sum(\text{元の位置} \times \text{波高値})}{\sum(\text{波高値})}$$

始点・終点の決定を自動化

fit範囲を飛跡の始点周辺に絞ることが狙い
 波高値が最大の位置をブラッグピークと見立て,
 そこから離れた端を始点とする

- ① > ② なら始点はA
- ① < ② なら始点はB

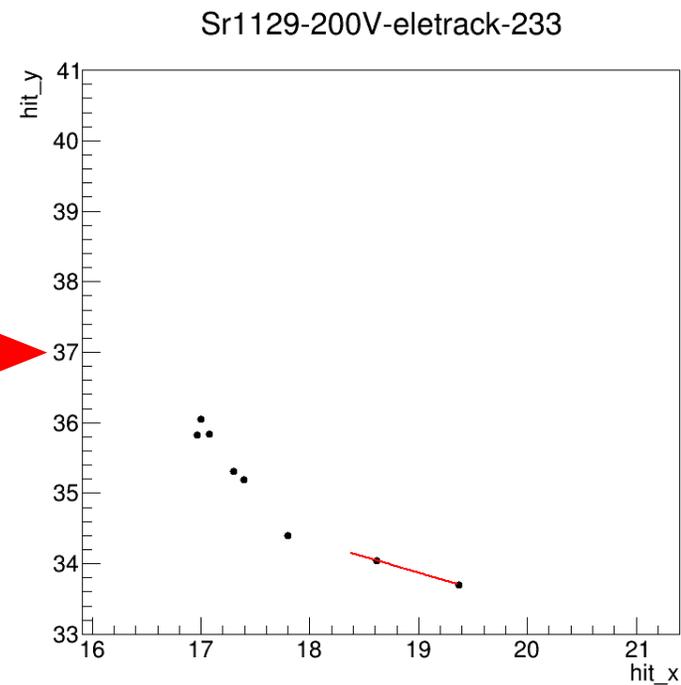
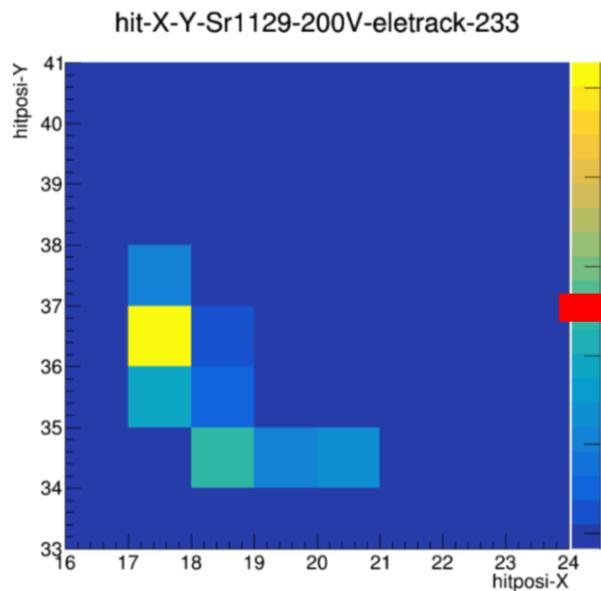
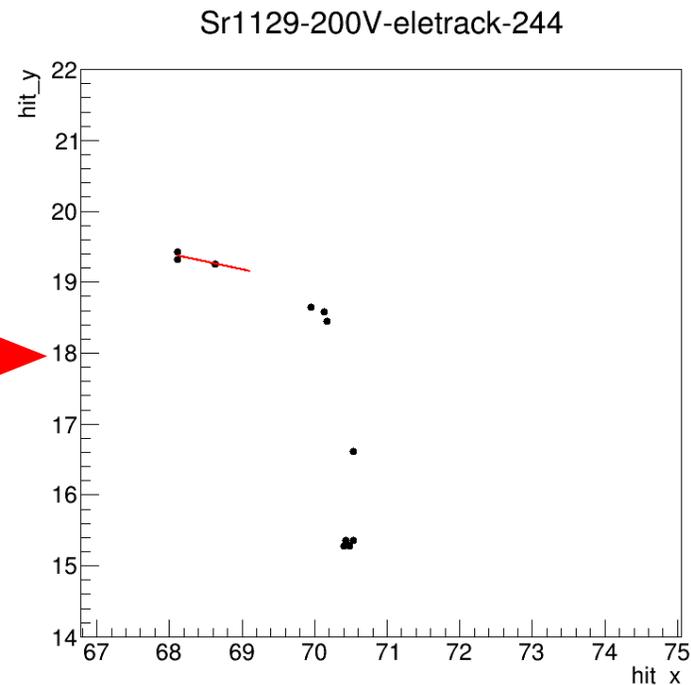
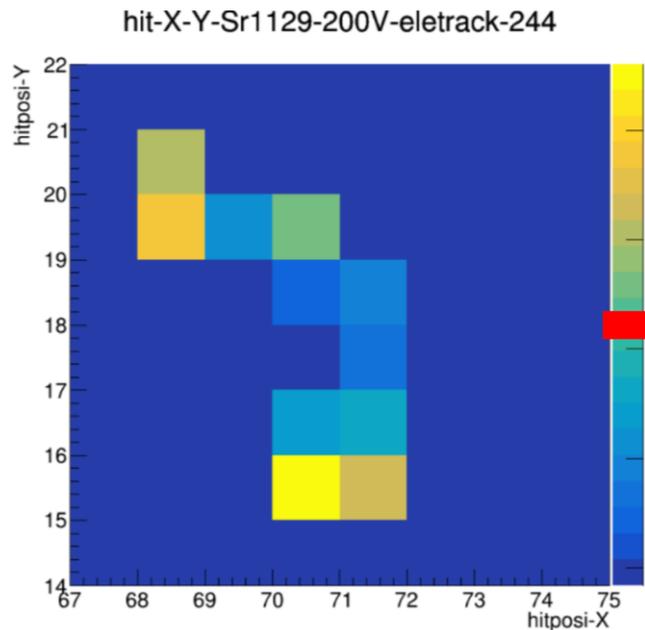


Result

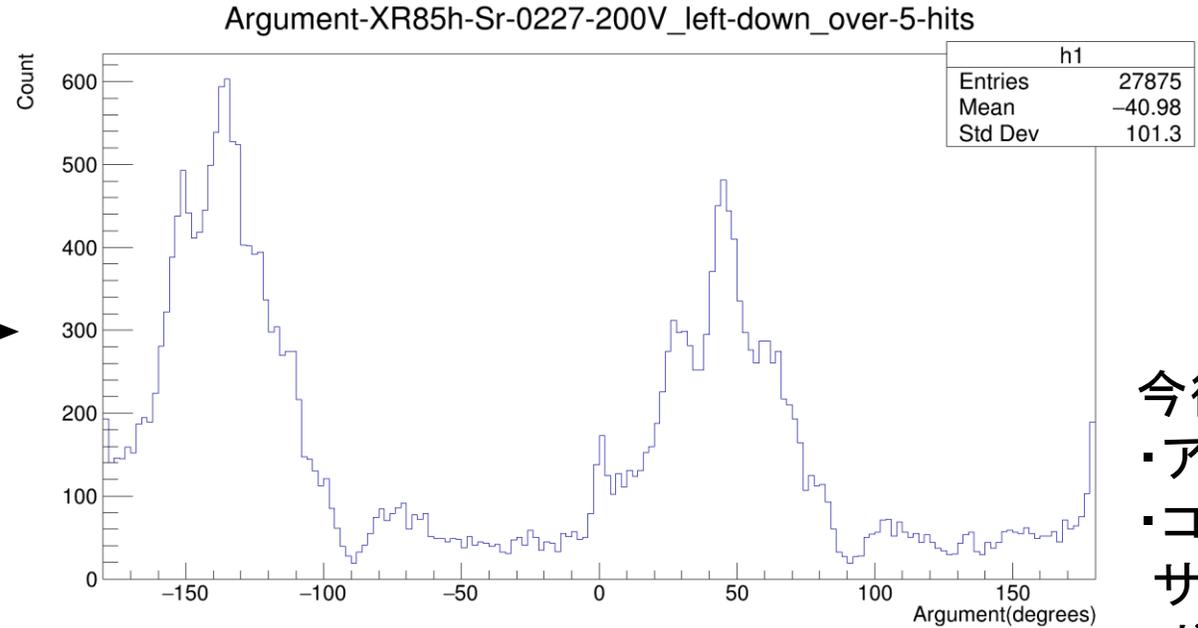
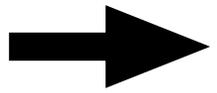
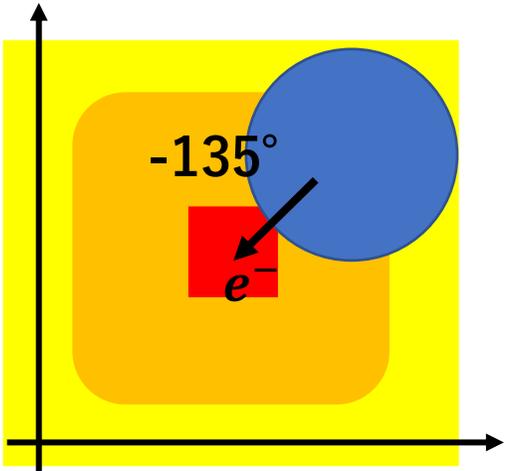
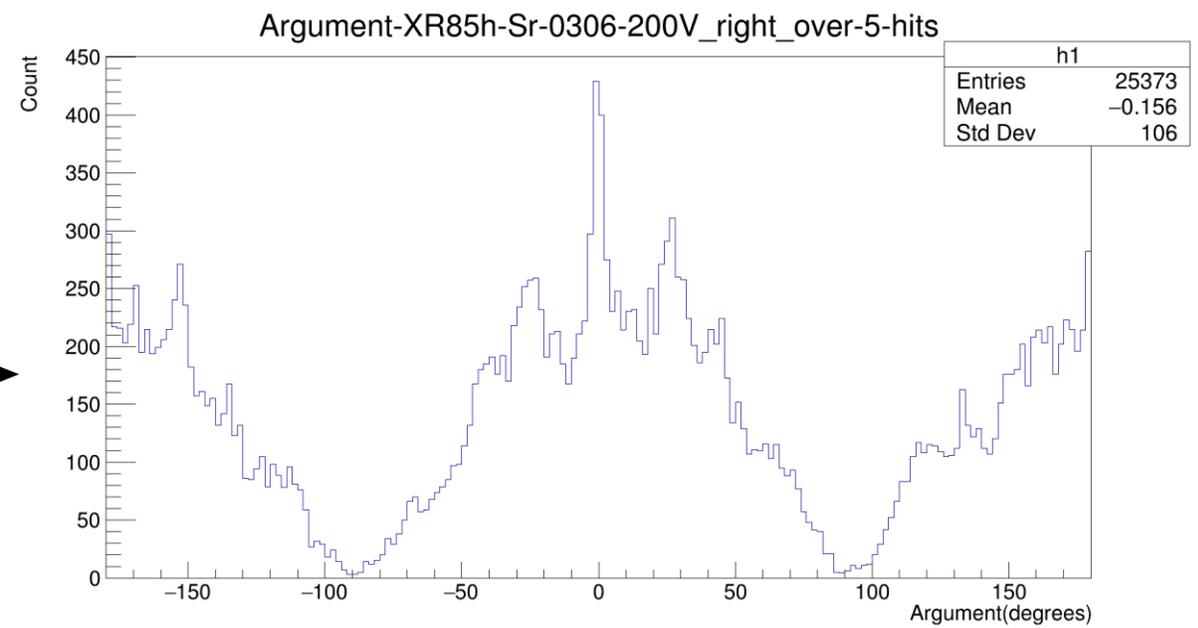
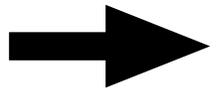
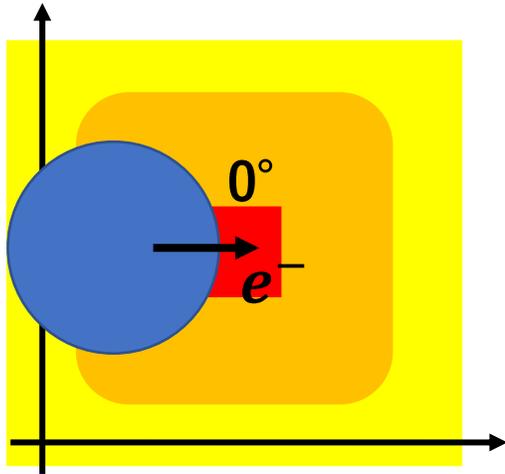
飛跡の始点周辺のみにおいて

直線 $y = \tan \theta * x + a$ でフィット

→ θ を算出する



Result 角度分布



「方向」に対して感度があることを確認

- 今後、
- ・アルゴリズムの精査
 - ・コリメートした電子飛跡サンプルの取得
 - ・ガンマ線データの解析
 - ・コンプトンカメラの作成

まとめ・今後

目的

- ・X線観測用素子「XRPIX」をMeVガンマ線観測に応用、コンプトンカメラの散乱体として使用

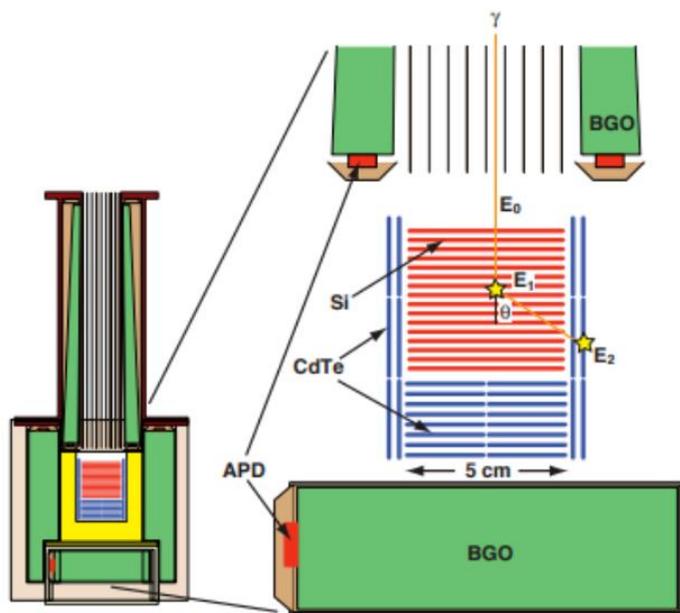
空乏層の測定

- ・2つのピークのカウント数の比から算出
- ・実測に成功 200 V で $276 \pm 7 \text{ um}$ (センサー層は $\sim 300 \text{ um}$)

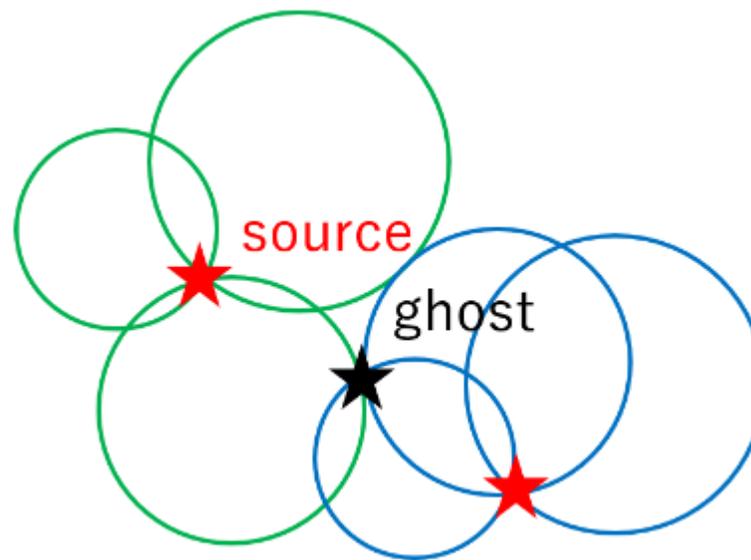
電子飛跡の方向推定

- ・電子の初期運動量方向を決定するためのアルゴリズムを開発中
- ・電荷重心法によって電子の位置を補正
- ・波高値の情報から飛跡の始点を決定
 - ・電子の初期運動量方向を算出
 - ・XRPIXが「方向」に対して感度があることを確認 → コンプトンカメラとして使えそう
- ・アルゴリズムの精査、コリメートした電子飛跡サンプルの取得
- ・ガンマ線のデータに対してアルゴリズムを適用する
- ・シンチレータと組み合わせて両者のトリガー信号を同期させる → コンプトンカメラの作成

コンプトンイメージング

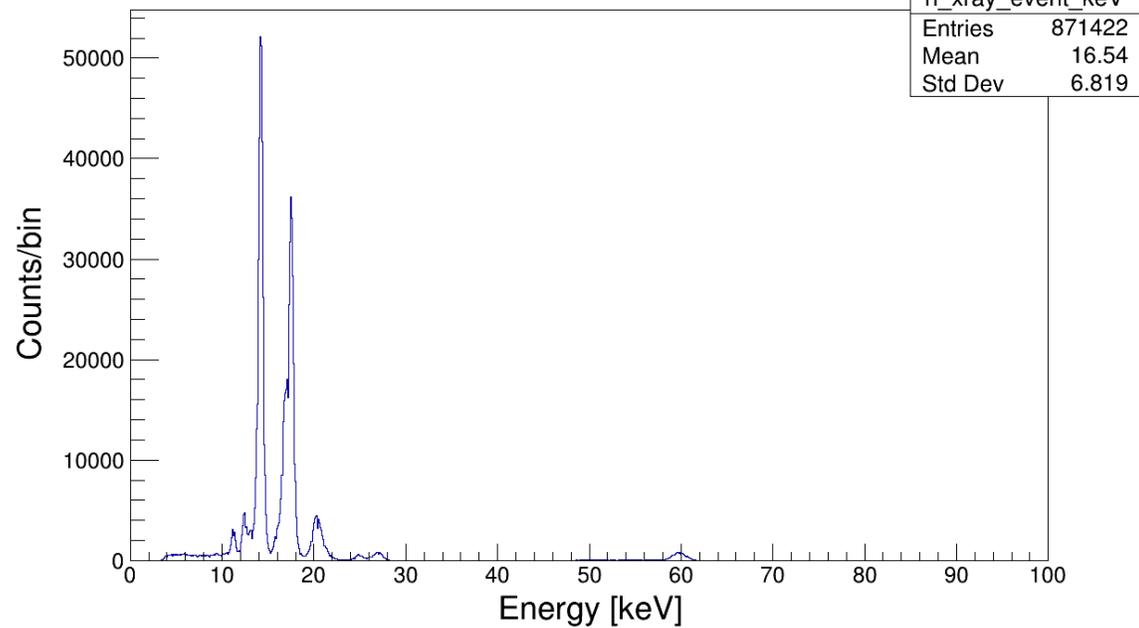


SGD on ASTRO-H

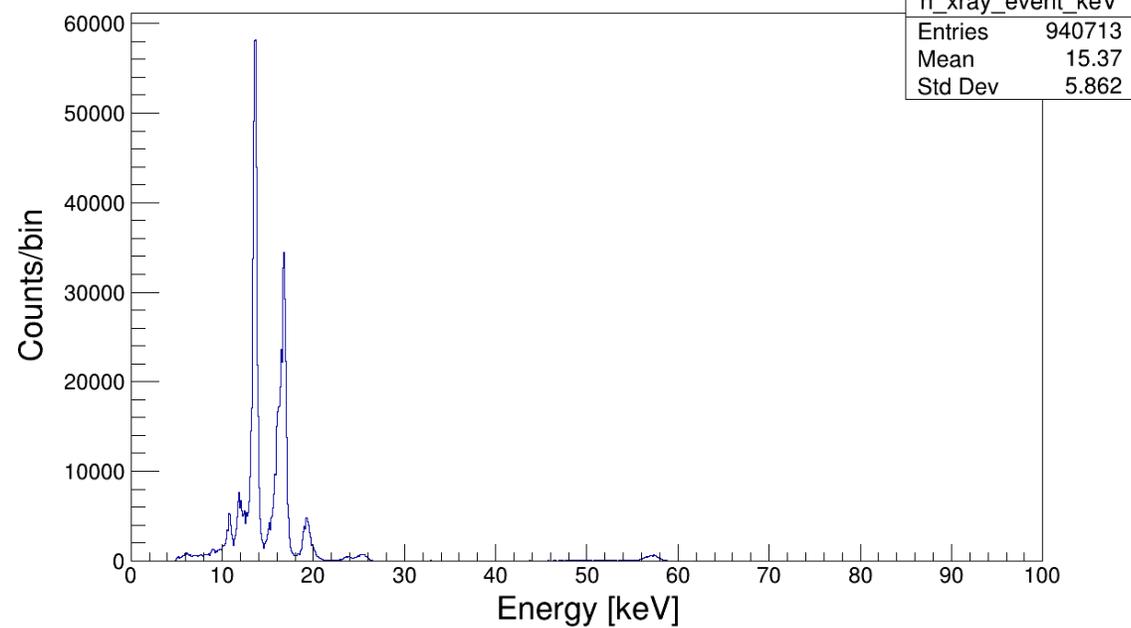


円環から円弧にすることで、ghostを除去

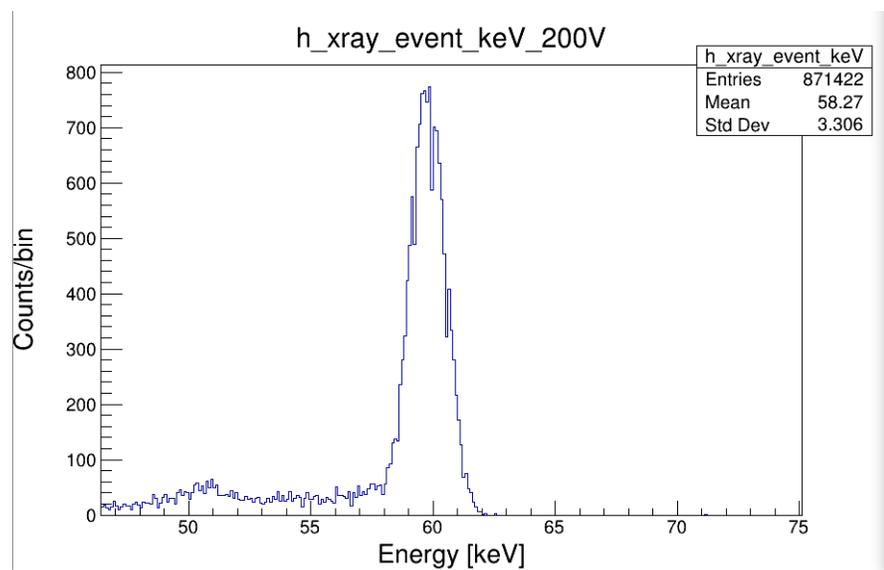
h_xray_event_keV_200V



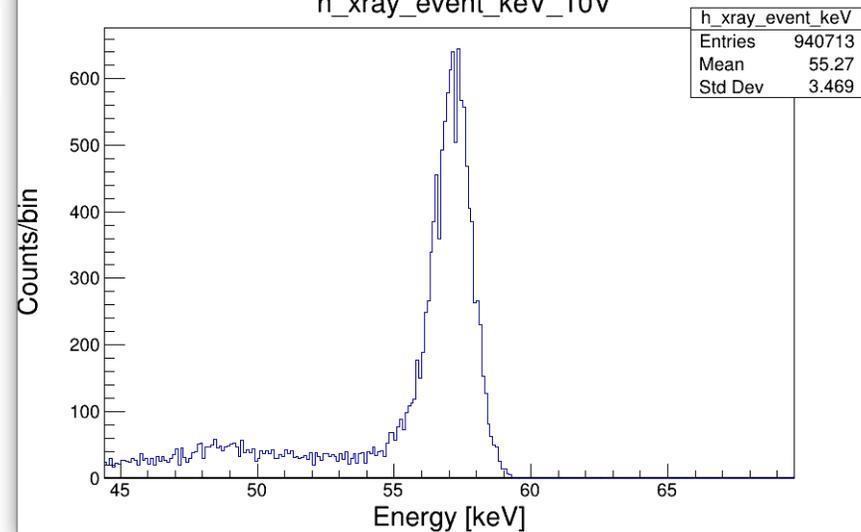
h_xray_event_keV_10V



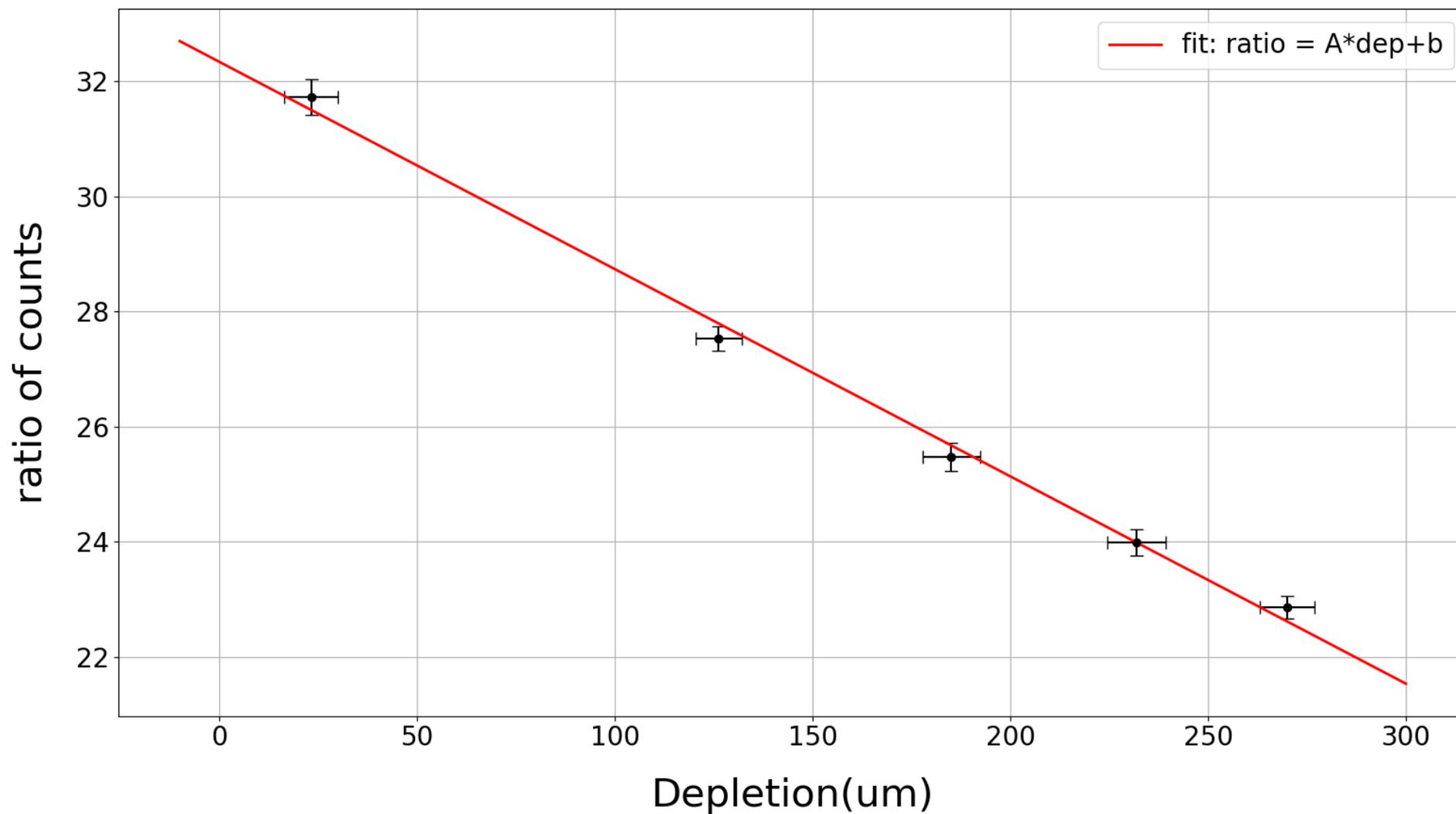
h_xray_event_keV_200V



h_xray_event_keV_10V



XR85h Depletion vs ratio



- 線形性が見られる
- Ratioの誤差からDepletionの誤差を推定

阻止能 Stopping power

単位長さあたりに失うエネルギー
Energy lost per unit length

$$S(E) = -\frac{dE}{dx}$$

