

SOI量子イメージング研究会2024

SOIPIXを用いた Sub-MeV ガンマ線測定用の コンプトンカメラの開発

加賀谷 美佳 仙台高専

片桐 秀明¹, 加藤 凌¹, 東城 直美¹,
鶴 剛², 武田 彩希³, 新井 康夫⁴, 島添 健次⁵, 上ノ町 水紀⁶

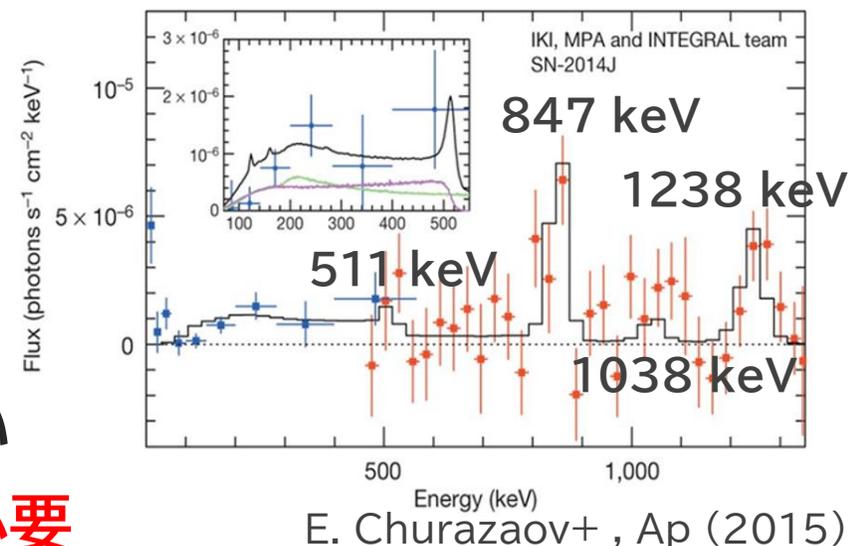
¹茨城大学, ² 京都大学, ³宮崎大学, ⁴KEK, ⁵東京大学, ⁶東京科学大学

宇宙観測における Sub-MeV ラインガンマ線の観測意義

- 超新星爆発による元素合成で放出される放射性核種
- 陽電子に起因する511 keV ラインガンマ線
- 超新星爆発で生成された核種による $\beta + \text{decay}$
- ダークマター同士の対消滅 (an exotic candidate)

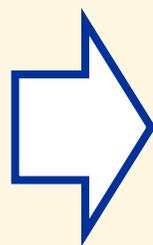
しかしSub-MeV ガンマ線の感度は他波長に比べて低い
高感度観測を実現するための画期的な検出器の開発が必要

SN2014J spectrum with INTEGRAL/SPI



開発要素

- 高エネルギー分解能
 - 広視野
 - バックグラウンドの低減
- 有効面積 ・角度分解能



半導体検出器: ラインガンマ線検出に最適
コンプトンカメラで広い視野を実現
反跳電子の飛跡検出でバックグラウンドを低減

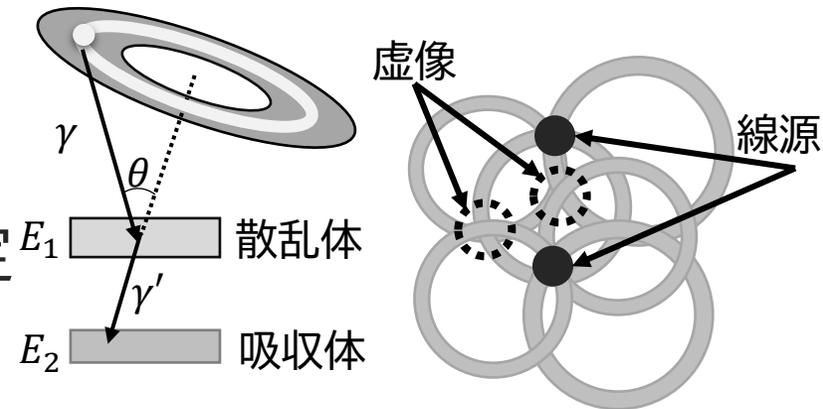
電子飛跡検出型コンプトンカメラ

コンプトンカメラとは？

コンプトン散乱と光電吸収の反応位置とエネルギーを計測
コンプトン運動学からガンマ線の到来方向を推定

従来のコンプトンカメラ

- ガンマ線の到来方向を散乱角 θ の円環で推定
- 複数事象の計測で円環を重ね合わせて線源の位置を特定
- 円環の重なりによる虚像の発生が問題

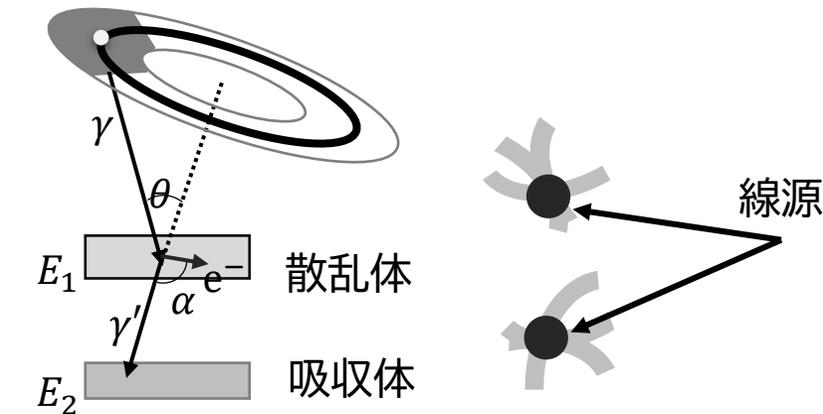


電子飛跡検出型コンプトンカメラ(電子の反跳方向を利用)

- ガンマ線の到来方向をイベント毎に一意に推定

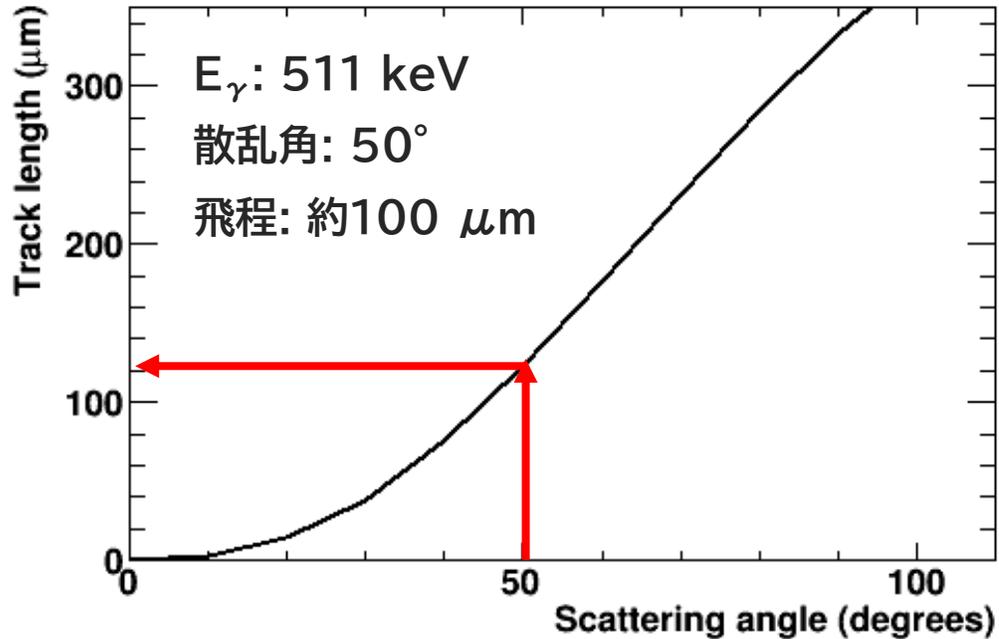


粒子識別, バックグラウンドの低減, PSFの向上など
コンプトンカメラとしての性能向上が可能
単純逆投影法で発生してしまう虚像も解決

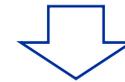


Sub-MeVガンマ線によるSi半導体中の電子飛跡

Si中の511 keVガンマ線による反跳電子の飛程



- 反跳電子の電子飛跡: \sim 数百 μm
- 複雑な形状の飛跡を捉えるために微細な位置分解能が必要(\sim 数十 μm)
- 時間同期したイベントを取得するために高い時間分解能が必要



SOI Pixel Sensor (SOIPIX) に着目

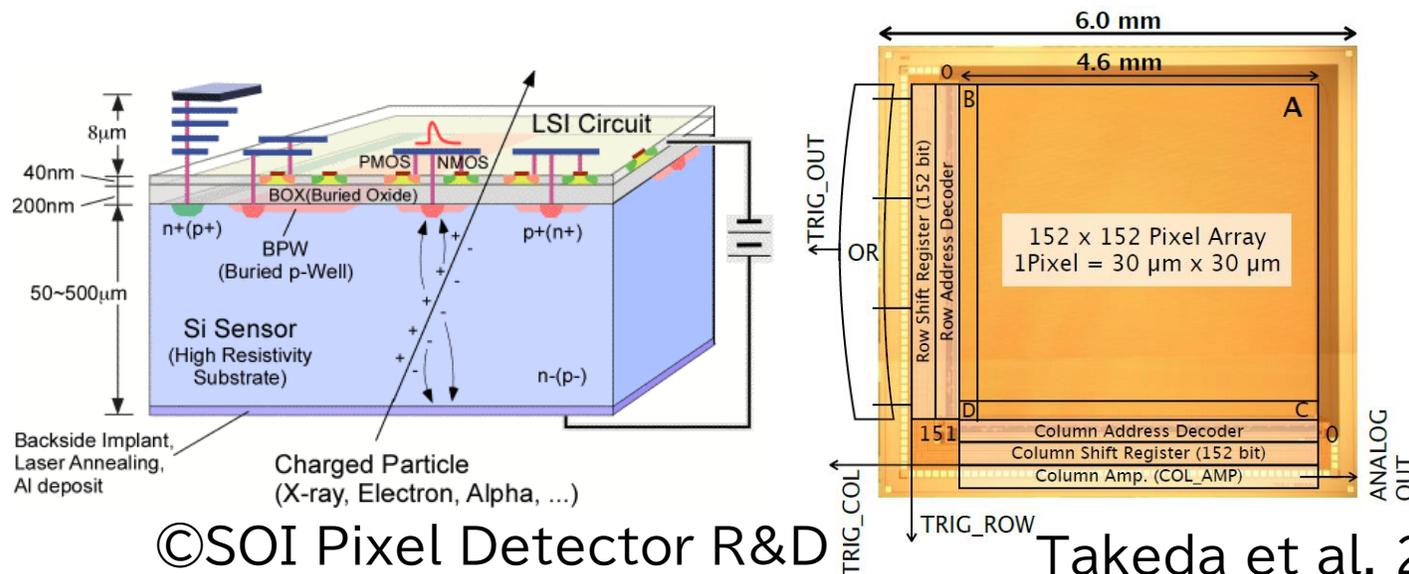
電子飛跡を捉えられるピクセル半導体検出器(SOIPIX)を用いて
ラインガンマ線検出に最適な電子飛跡検出型コンプトンカメラを開発したい

- ①既存の半導体素子を用いたプロトタイプで電子飛跡が検出できるかどうか検証
- ②コンプトンカメラに適したSOIPIX素子の開発

これまでの評価 XRPIX2bを用いたプロトタイプの評価

プロトタイプ検出器にはX線観測用に京都大で開発されたXRPIX2bを採用

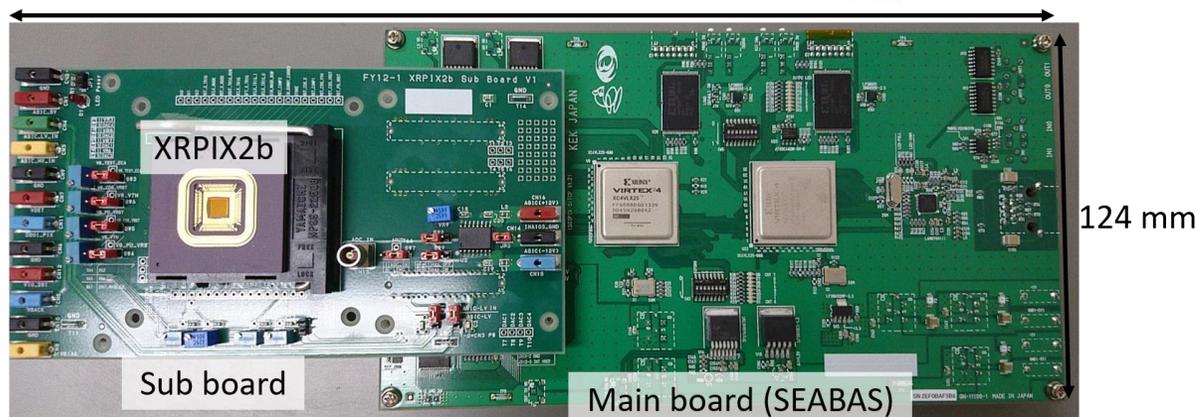
- 微細ピッチのピクセルを実現($30\ \mu\text{m} \times 30\ \mu\text{m}$)
- CCDと比べて時間分解能に優れている(数 μs 以下)
- セルフトリガーで信号を取得可能 \Rightarrow 吸収層との時間同期が可能



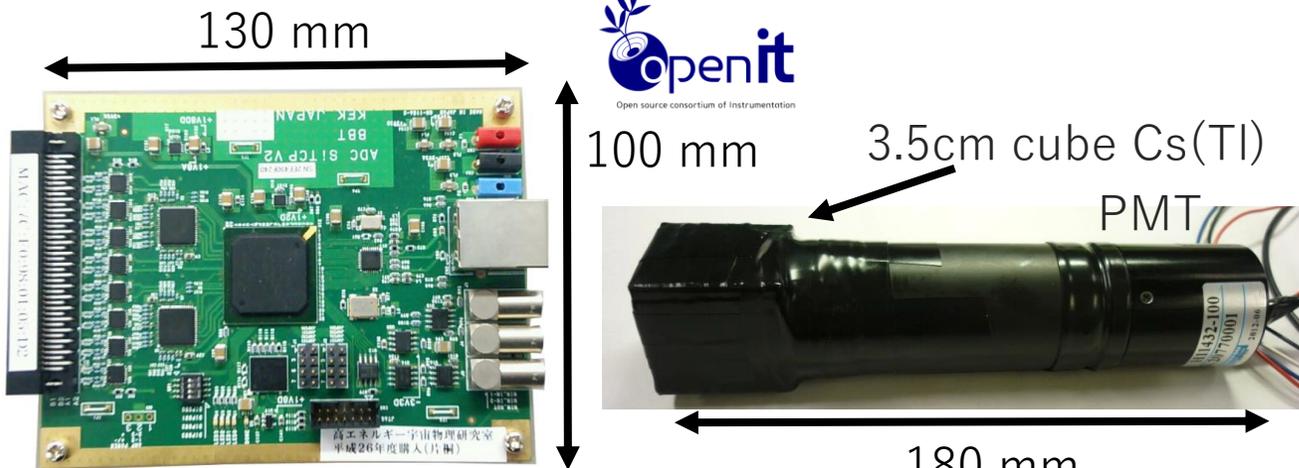
Characteristics	Value
Chip size	6.0 mm × 6.0 mm
Pixel size	30 μm × 30 μm
Number of pixel	152 × 152
Effective Area	4.3 mm × 4.3 mm
Thickness of sensor	300 μm

プロトタイプコンプトンカメラの製作

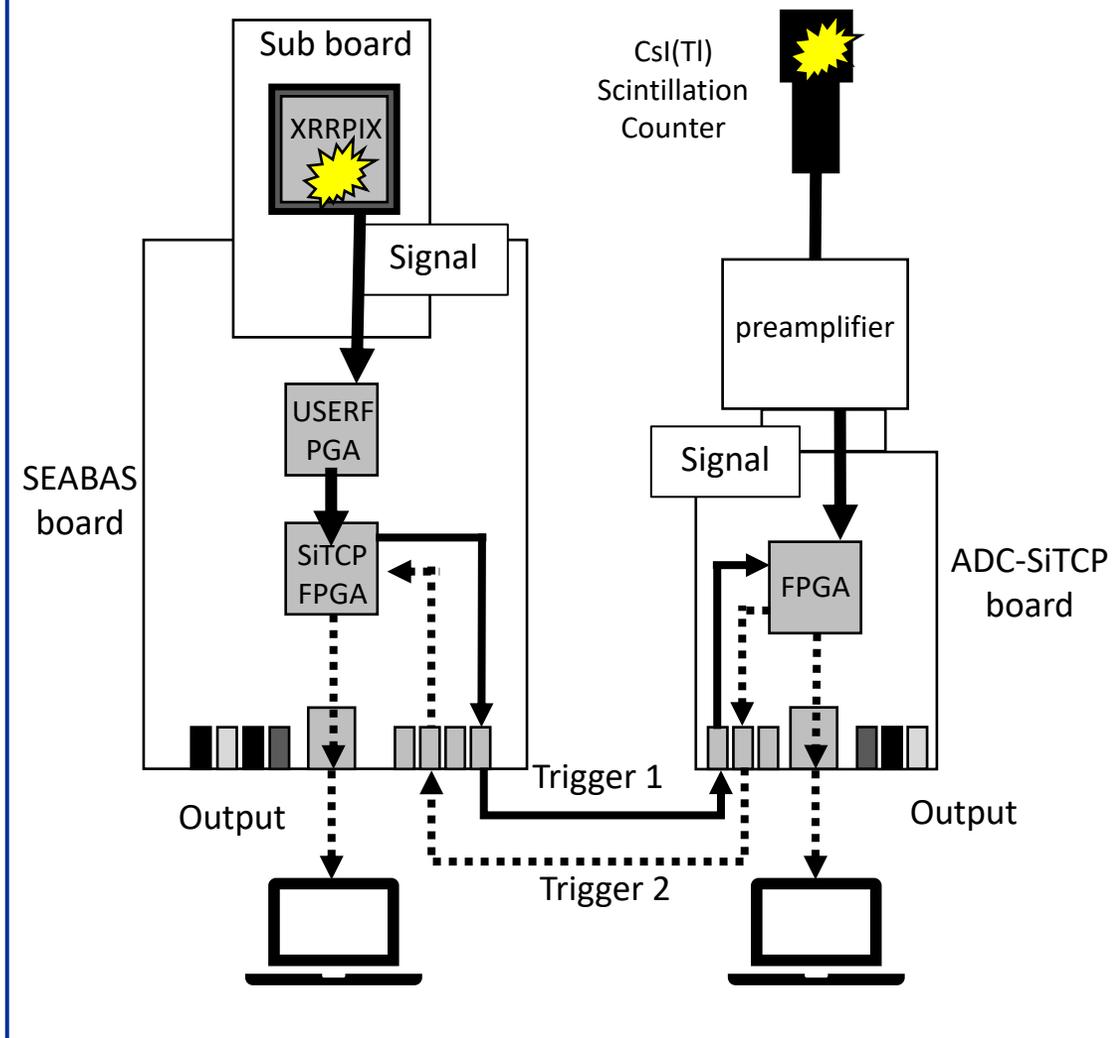
◆散乱体 - XRPIX2b



◆吸収体 - CsI (TI) シンチレーション検出器



データ取得 同期システム



SiTCP-ADC V2 board

実験のセットアップ

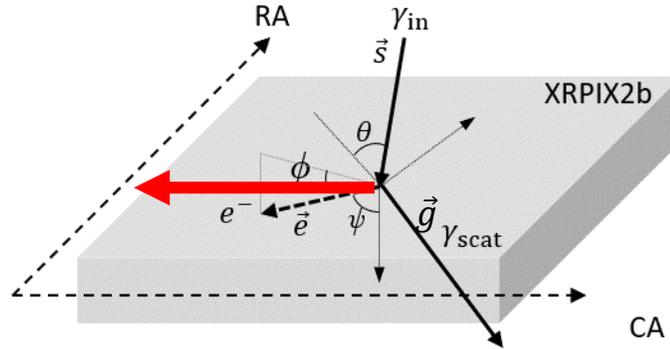
実測は茨城大学の実験室で実施

- 線源: ^{22}Na (1 MBq, 511 keV)
- 温度: -20°C
- 測定時間: 20時間 (実質測定時間 5h)
- 電子飛跡が飛ぶ方向を想定して線源を設置

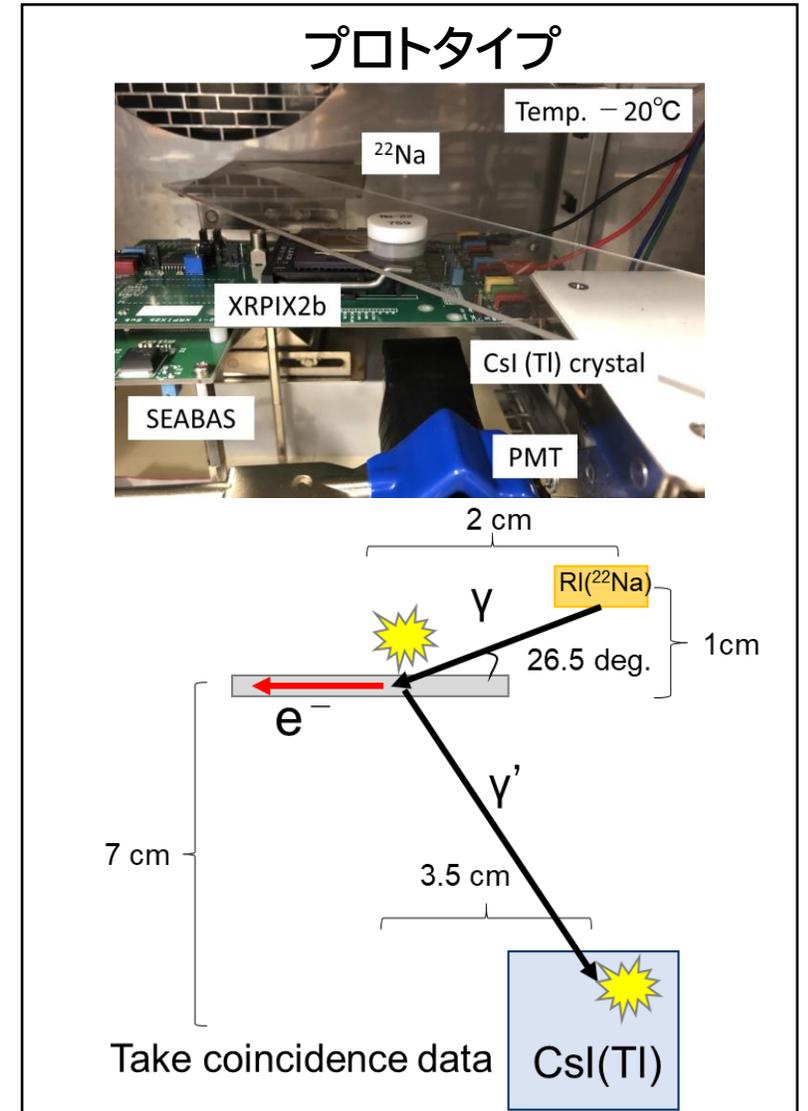
θ : コンプトン散乱の散乱角

ϕ : 検出面上での回転角

ψ : 素子の深さ方向の傾斜角



実測だけでなく、同様のセットアップで
Geant4シミュレーションによる性能評価も実施

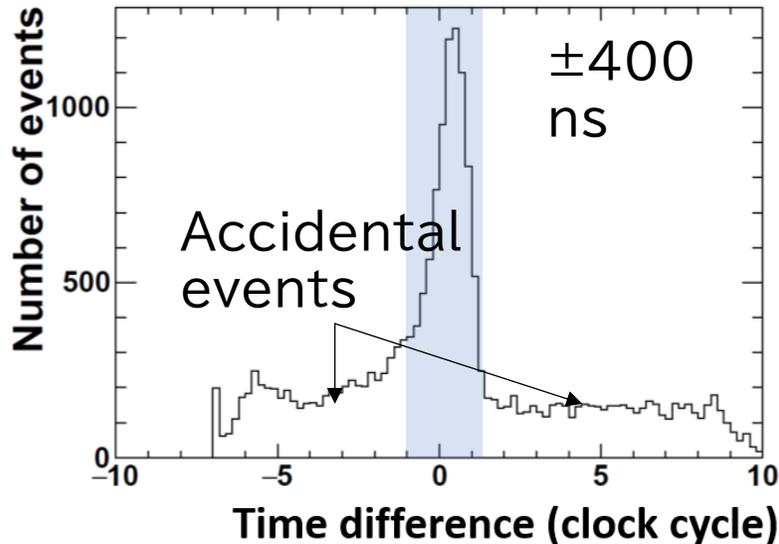


オフライン解析

- タイミングカット
2層間の時間情報を用いて時間同期したイベントのみを抽出
- エネルギーカット
エネルギーを制限することにより, アクシデンタルイベントを排除

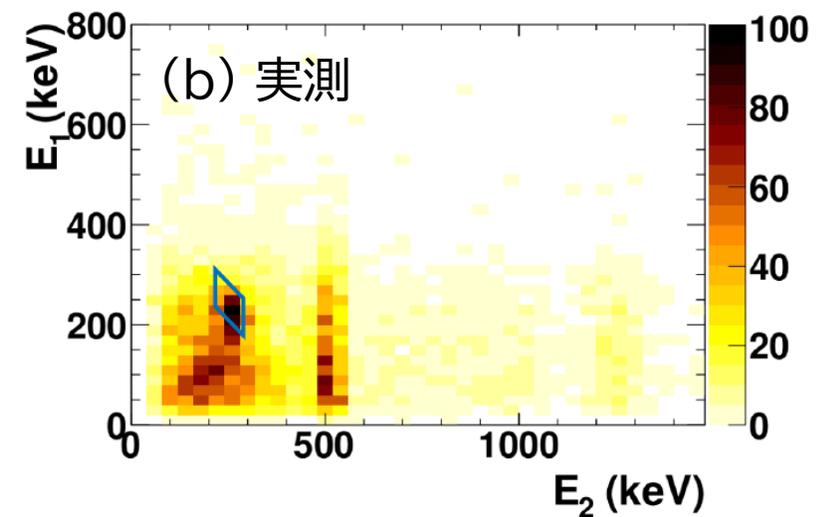
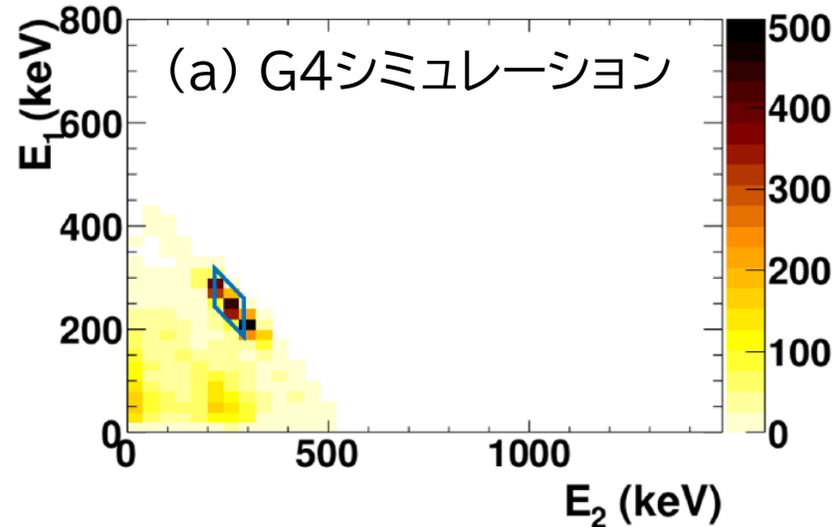
タイミングカット

$$\Delta t (t_1 - t_2) < \pm 400 \text{ ns}$$

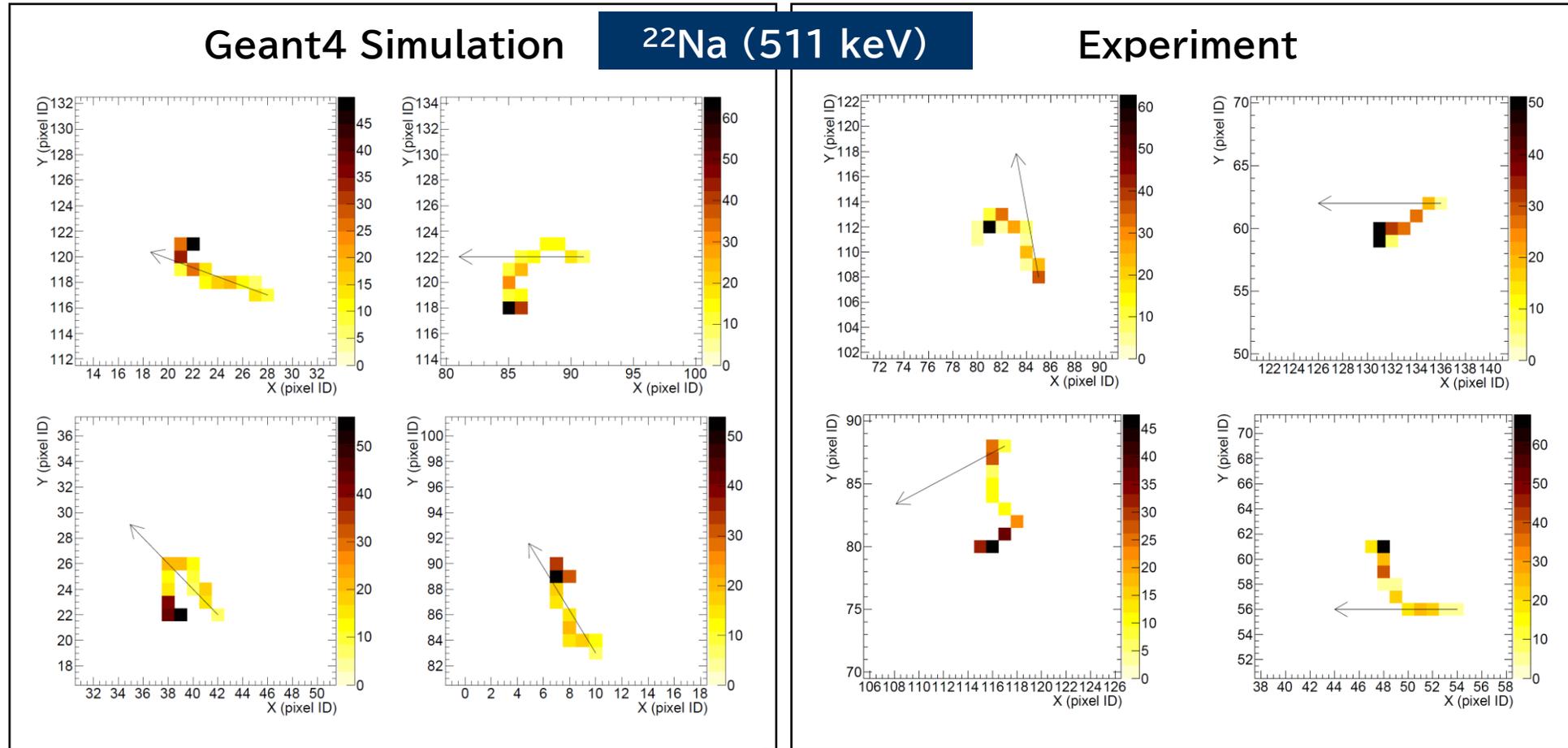


エネルギーカット (例: 散乱角90度の場合)

$$E_1 + E_2 = 511 \pm 40 \text{ keV}, E_2 = 255 \pm 40 \text{ keV}$$



データ選別後のイベントにおける電子飛跡のイメージ

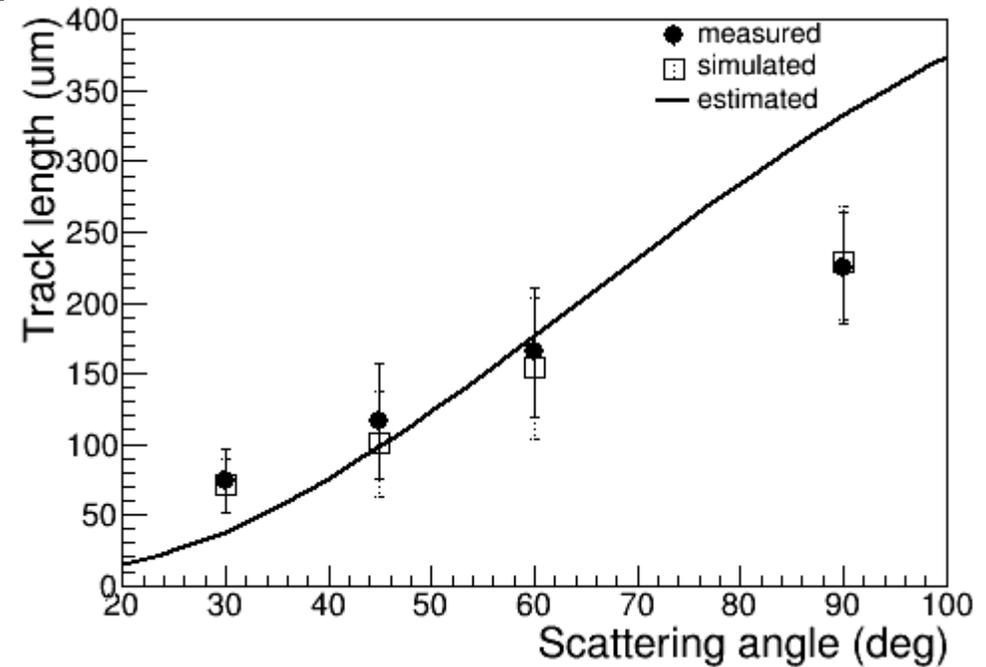
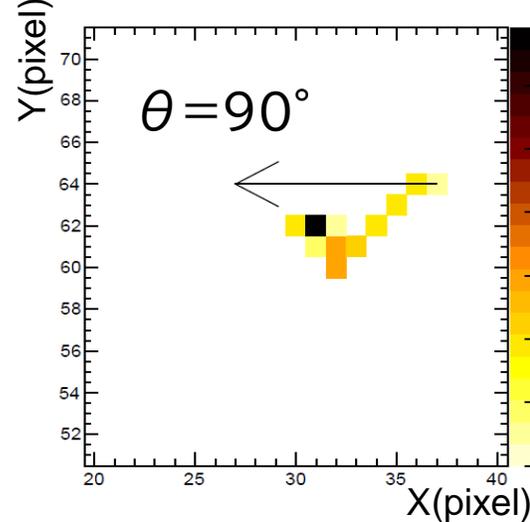
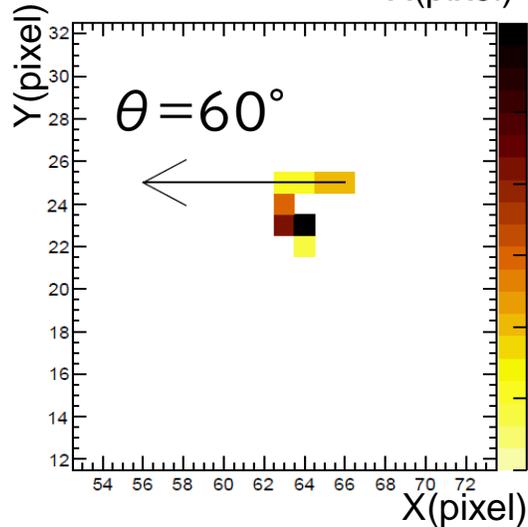
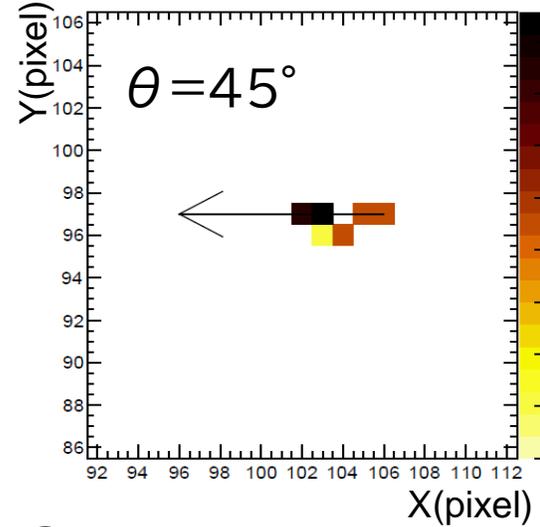
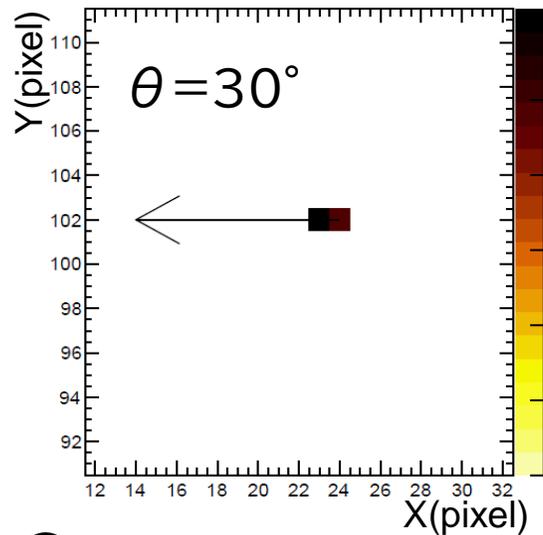


電子飛跡の検出に成功！

シミュレーションの結果で得られたイメージとも類似していることを確認

様々な散乱角での電子飛跡のイメージ

散乱角を変えた場合の飛跡のイメージの変化



※EstimateはSi中の電子の飛程で
実測・シミュレーションはピクセルの数

散乱角 θ ($^{\circ}$)	反跳電子の飛程 (μm)
30	40
45	120
60	180
90	300

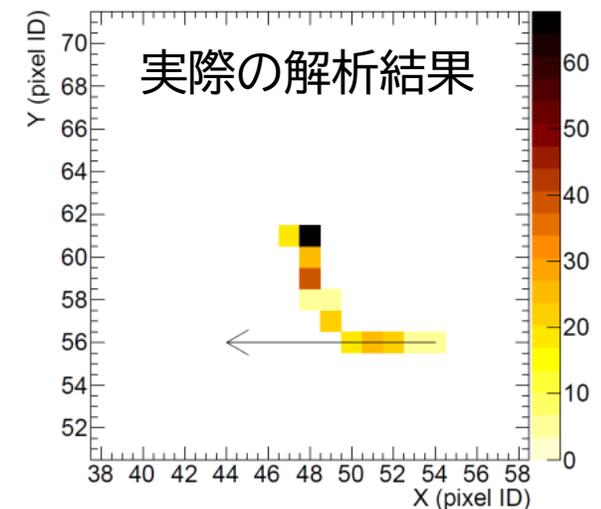
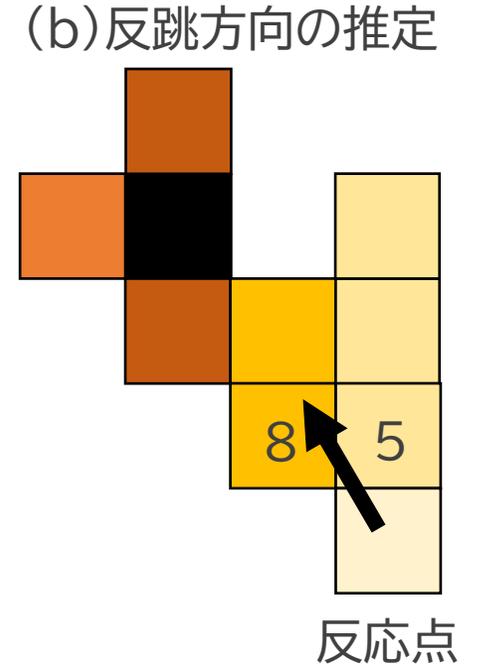
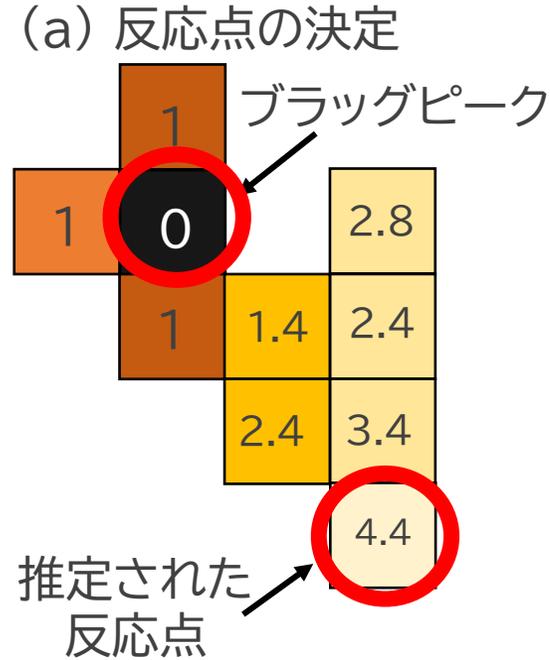
電子飛跡のイメージから反跳方向を推定

(a) 反応点の決定

- ブラッグピークを特定
- エネルギーデポジット最大のピクセルを特定
- 反応点を推定
(ブラッグピークから最も遠いピクセル)

(b) 反跳方向の推定

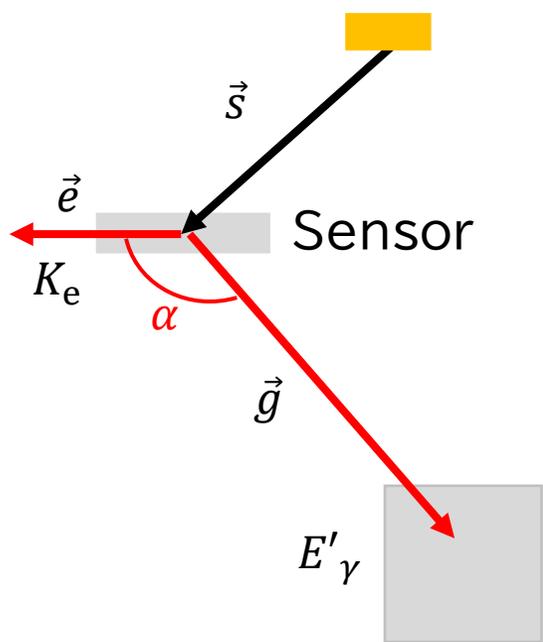
- 反応点の周囲のピクセルのエネルギーデポジットの重み付けでベクトルの方向
(電子の反跳方向)を決定



反跳角によるイベントセレクションと再構成画像

電子の反跳方向と散乱ガンマ線の間角 α (反跳角) で
ガンマ線の到来方向を制限可能

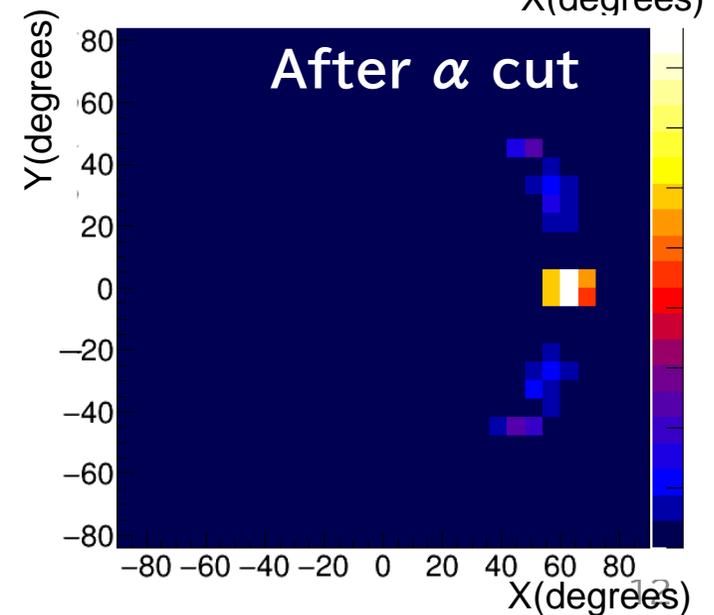
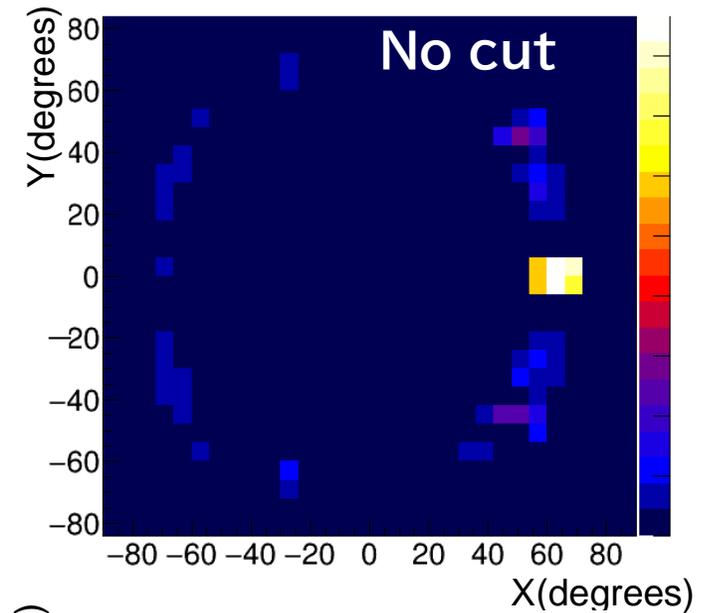
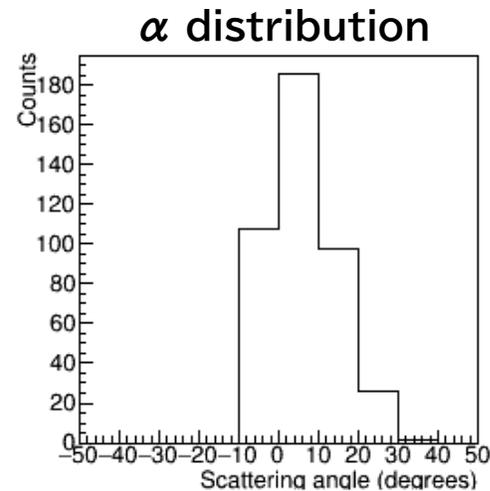
$$\Delta\alpha < \pm 10^\circ \quad (\Delta\alpha = \alpha_{\text{kin}} - \alpha_{\text{geo}})$$



$$\cos \alpha_{\text{kin}} = \left(1 - \frac{m_e c^2}{E'_\gamma}\right) \sqrt{\frac{K_e}{K_e + 2m_e c^2}}$$

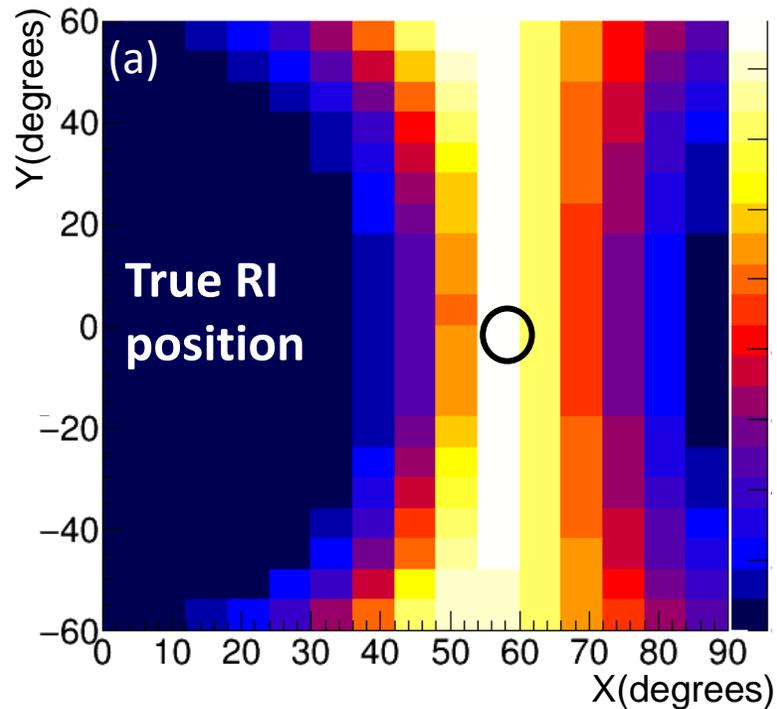
$$\cos \alpha_{\text{geo}} = \vec{g} \cdot \vec{e}$$

$$\Delta\alpha = \alpha_{\text{geo}} - \alpha_{\text{kin}}$$

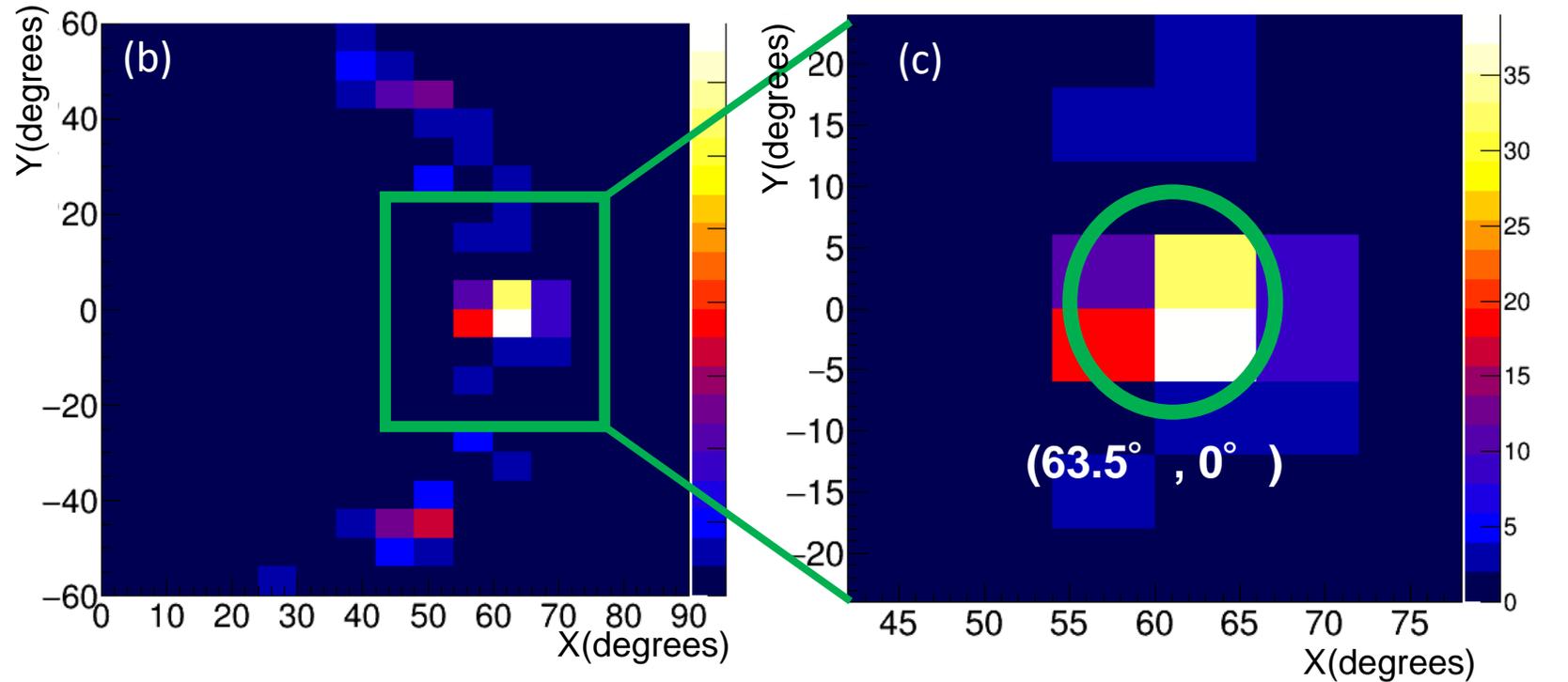


従来のコンプトンカメラと電子飛跡検出型との比較

従来のコンプトンカメラ



電子飛跡検出型コンプトンカメラ



2次元ガウシアンでフィットした結果
 $(61.2 \pm 0.4^\circ, -0.5 \pm 0.3^\circ)$

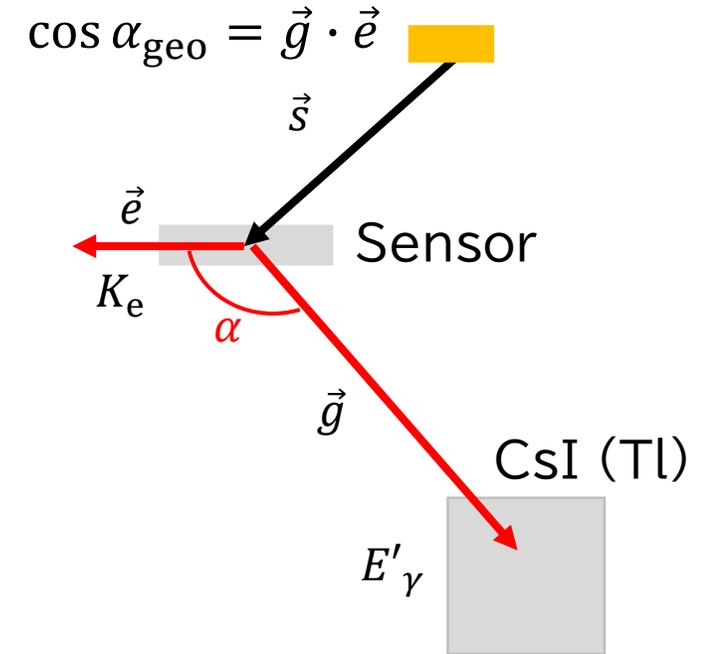
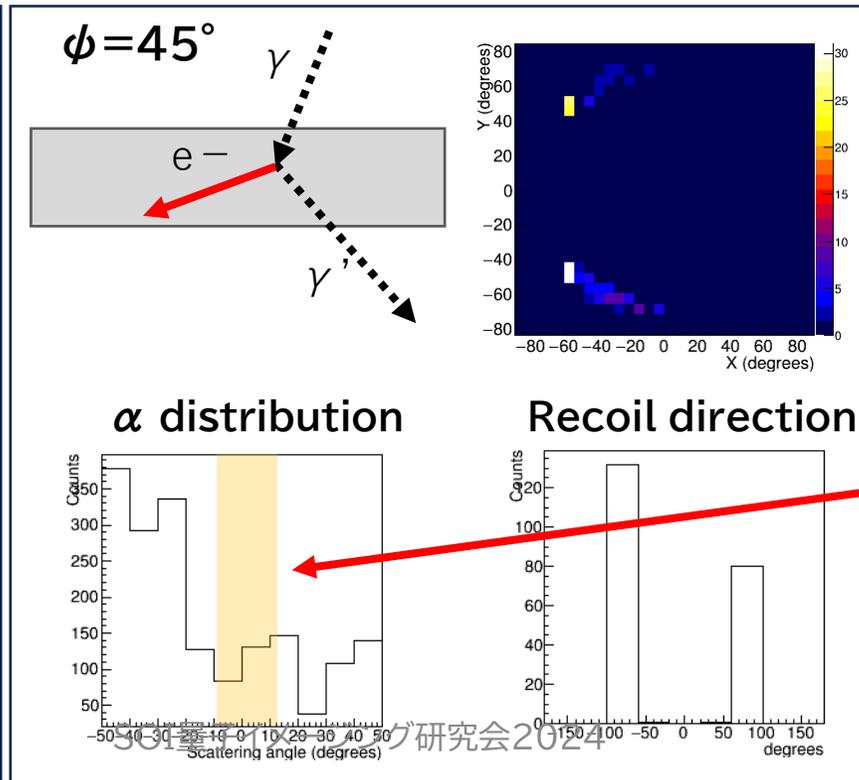
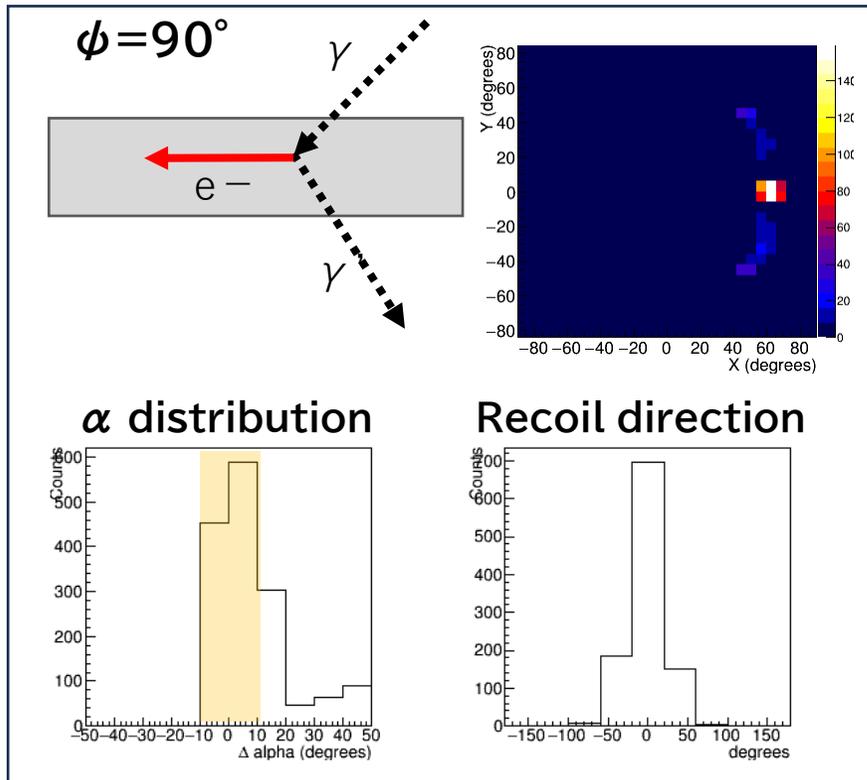
散乱部1つ, 吸収部1つのセットアップでも
電子飛跡の情報を利用して線源の位置を特定することに成功

今後の素子開発の課題 深さ方向の反跳方向の推定

2次元方向に関しては, 電子飛跡を取得してコンプトン再構成できることを確認

今後の課題

素子の深さ方向における電子の反跳方向の推定
電子飛跡を3次元的に飛跡を捉える必要がある



電子飛跡の画像から推定した
反跳電子の方向に誤り



反跳角 α の制限が効かない

今後の素子開発の課題 深さ方向の反跳方向の推定

半導体検出器で電子飛跡検出型コンプトンカメラを実現させるために重要なこと

Sub-MeVガンマ線の反跳電子の飛程は長くて数百 μm だが、反跳方向として利用できるのは弾き飛ばされた最初の部分のみ



複雑な電子飛跡の形状を精度よく捉えて反跳方向の推定精度を向上させる

(散乱角や深さ方向の進み方によって飛跡の長さも変化)

改良点

- 時間分解能の向上(速いコンパレータが必要)
- ピクセルサイズの微細化

コンプトンカメラ用の素子の試作を実施
評価に向けた準備中

散乱角 θ ($^{\circ}$)	反跳電子の飛程 (μm)
30	40
45	120
60	180
90	300

ピクセルサイズについて

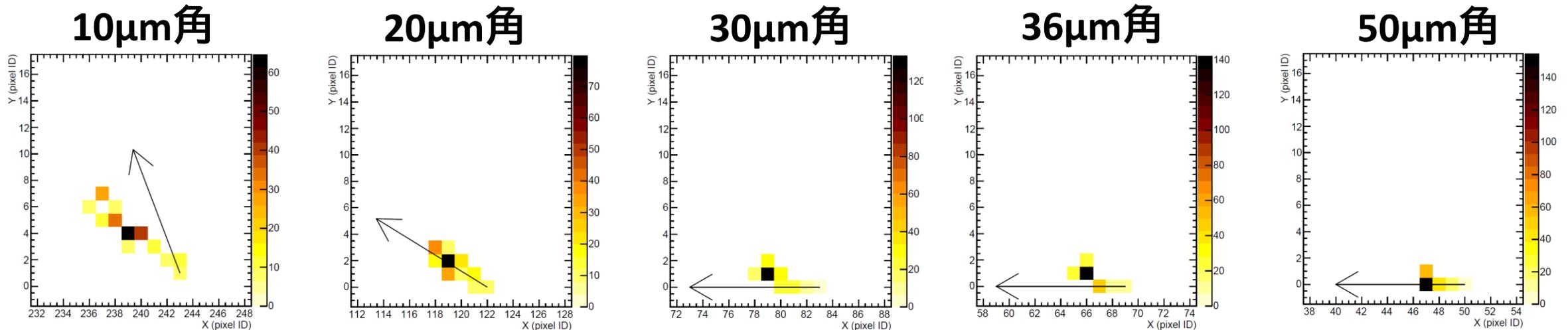
回路構成が最終的に決まった後、ピクセルサイズの微細化に向けた改良を検討

- XRPIX2b: $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$
- 試作した素子: $25\mu\text{m} \times 25\mu\text{m}$

$10\mu\text{m}$ 角は回路が入らないため、 $20\mu\text{m} \sim 30\mu\text{m}$ 角が目標

複数のピクセルで回路をシェアするなど、今後の開発でさらなる微細化も検討

(XRPIX2b以降の素子)



まとめ

SOIピクセル半導体検出器を用いた電子飛跡検出型コンプトンカメラ開発

既存の半導体検出器を用いたプロトタイプカメラ開発と測定試験を実施
シミュレーションと実測の結果を比較し、プロトタイプコンプトンカメラの性能を検証

- 時間同期をとったコンプトンイベントの電子飛跡のイメージ取得に成功
- 飛跡のイメージから推定した電子の反跳方向を利用して線源位置を再構成に成功
- 2024年3月に論文化 DOI: [10.1016/j.nima.2024.169213](https://doi.org/10.1016/j.nima.2024.169213)

今後の開発

電子飛跡の3次元検出に向けたコンプトンカメラ用に特化した
SOIピクセル半導体検出器の開発を進めている