

第1回MeVガンマ線天文学研究会

電子追跡型半導体コンプトンカメラに向けた Si-CMOS検出器の開発

東京大学理学系研究科物理学専攻
高橋研究室 修士課程2年

米田 浩基

MeVガンマ線観測とコンプトンカメラ

観測の現状

・ 感度が著しく低い

- 発見天体数

MeVガンマ線:32 X線:125万 GeVガンマ線:300

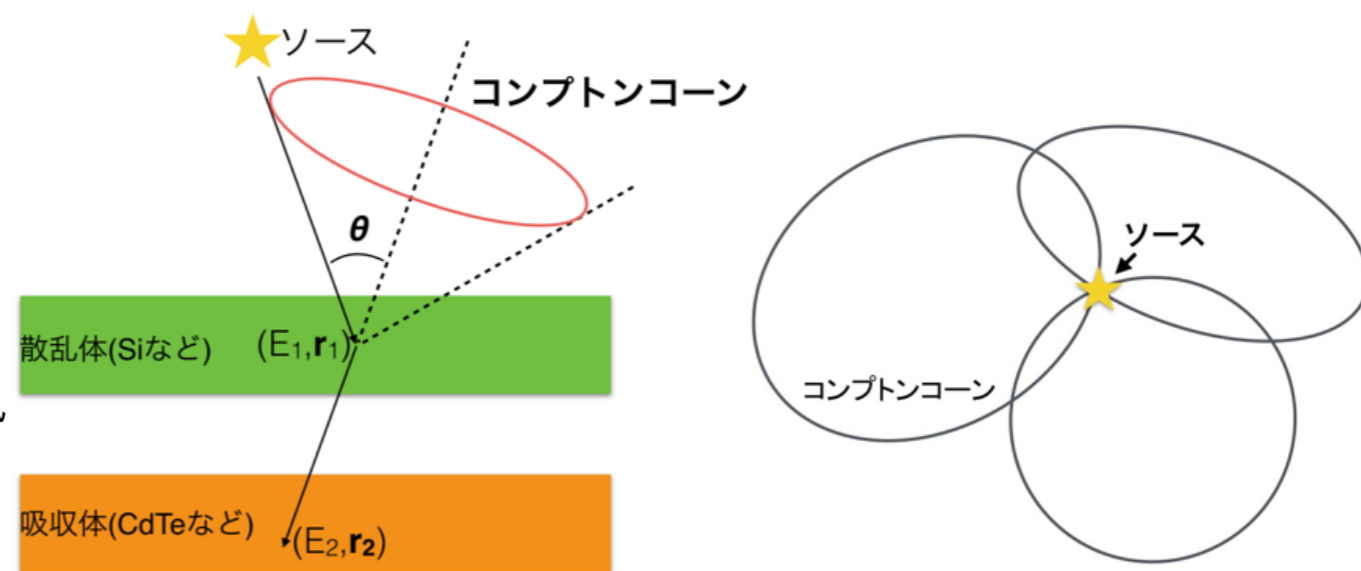
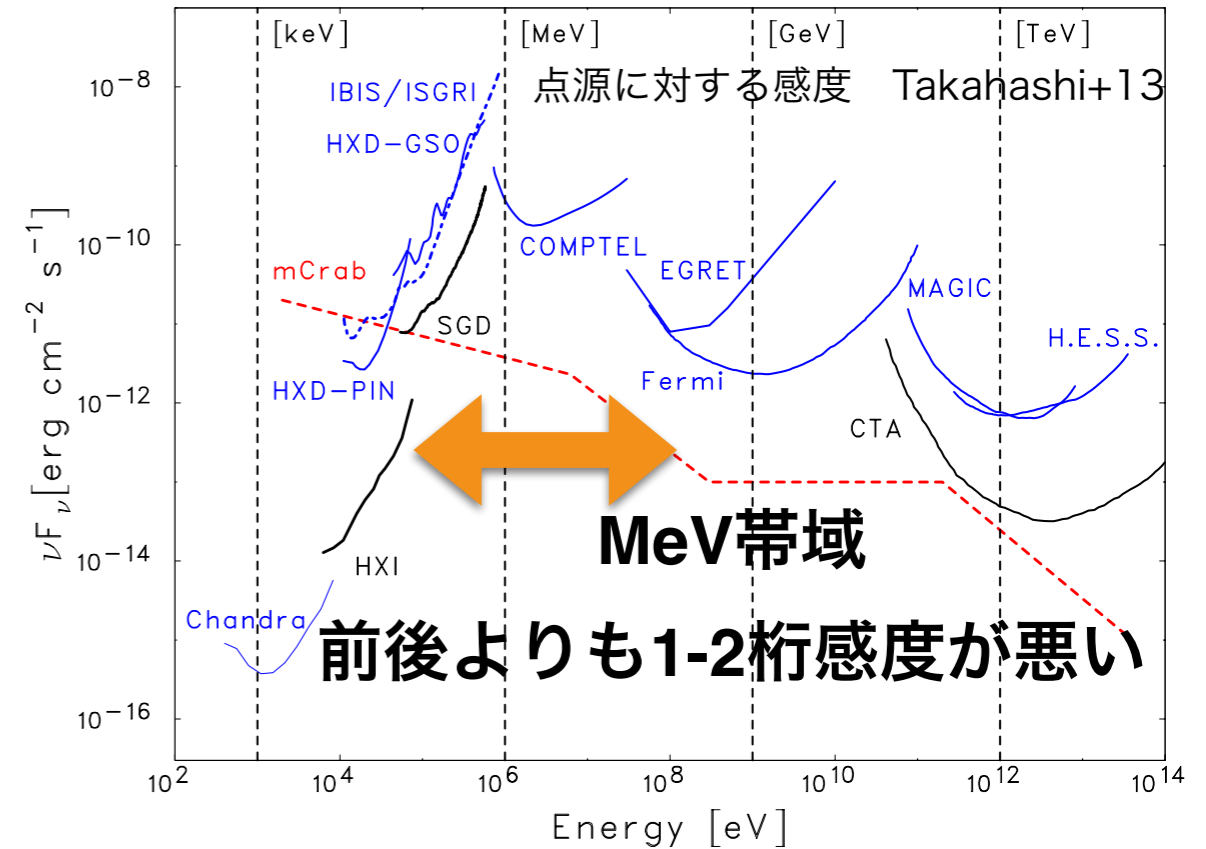
コンプトンカメラ

- 検出器内でのコンプトン散乱を検出し、コンプトン散乱式から散乱角を測定

- 到来方向を天球上の円に制限し、複数重ね合わせることで、到来方向を検出

・ 唯一有力な観測手法

- MeVガンマ線帯域では、コンプトン散乱が優勢



コンプトンカメラの要素

① エネルギー分解能

エネルギーが大きいと角度分解能への寄与は小
~1.3 % @662 keV(CdTe)

② 位置分解能

③ ドップラー効果 電子の元々の運動量

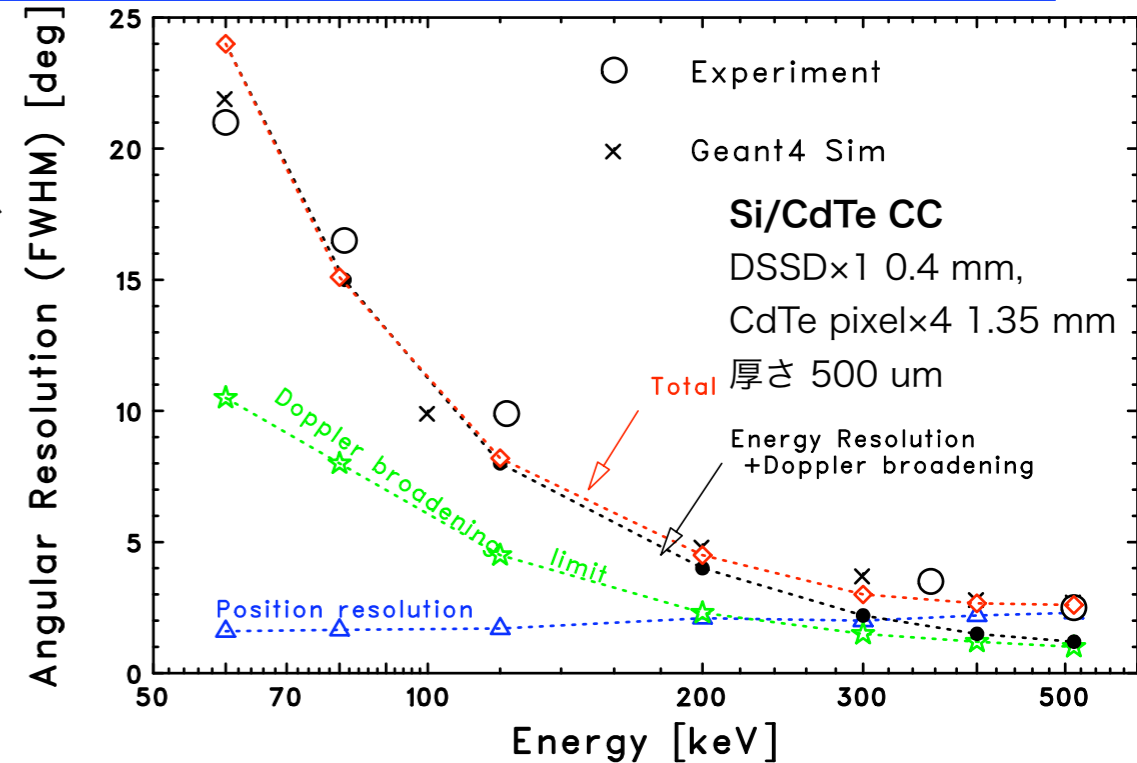
0.4° @1 MeV(Si)、0.7°@1 MeV(Ge)

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)} \left(1 + \frac{\mathbf{p}_e \cdot (\mathbf{p}'_\gamma - \mathbf{p}_\gamma)}{m_e c^2 E_\gamma} \right)$$

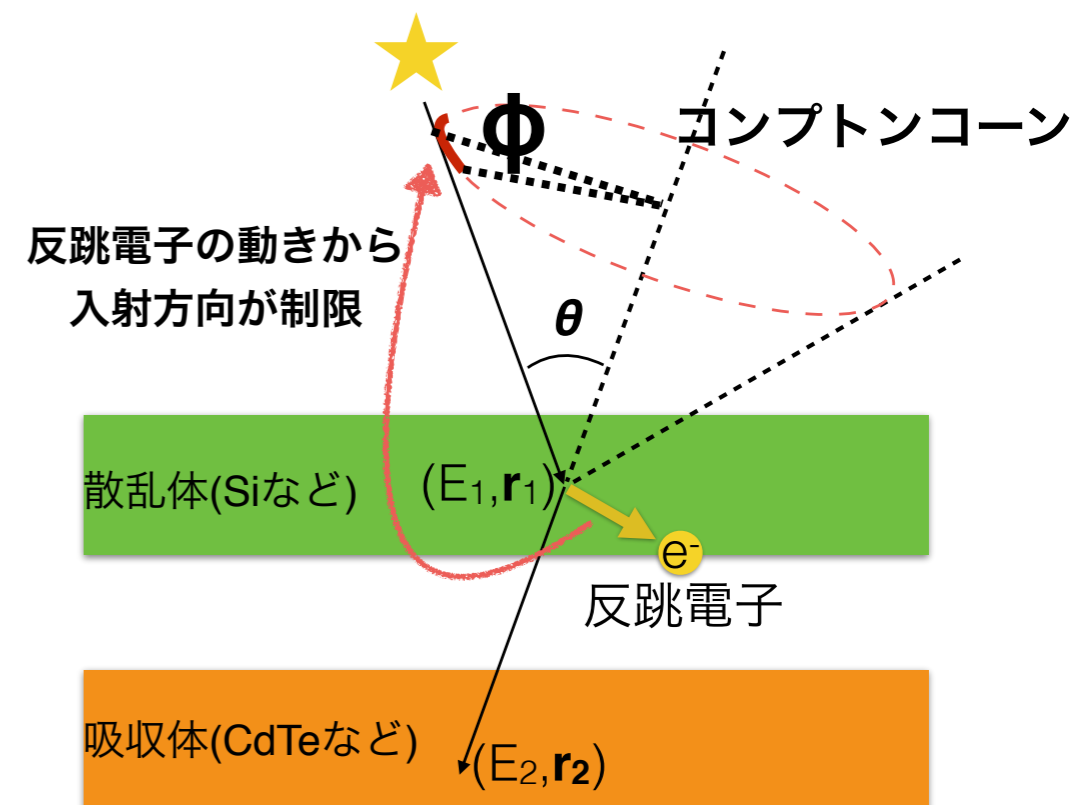
④ ϕ 方向の決定精度 (電子トラッキング)

円を重ね合わすだけでは、オフセット成分が大きい
(感度低下)

→コンプトン散乱の際の電子の運動方向が
分かればよい



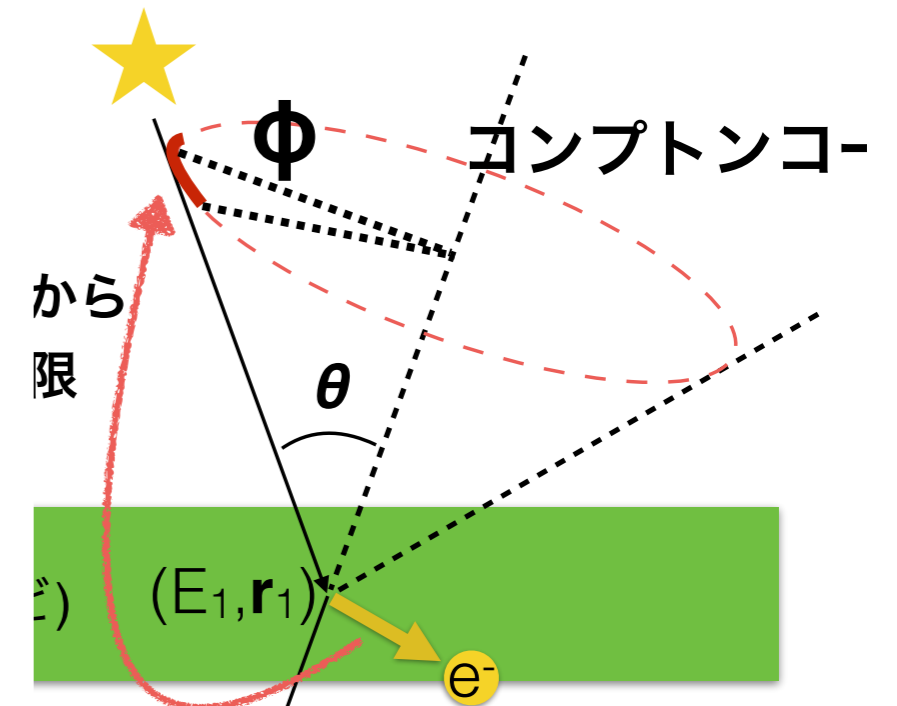
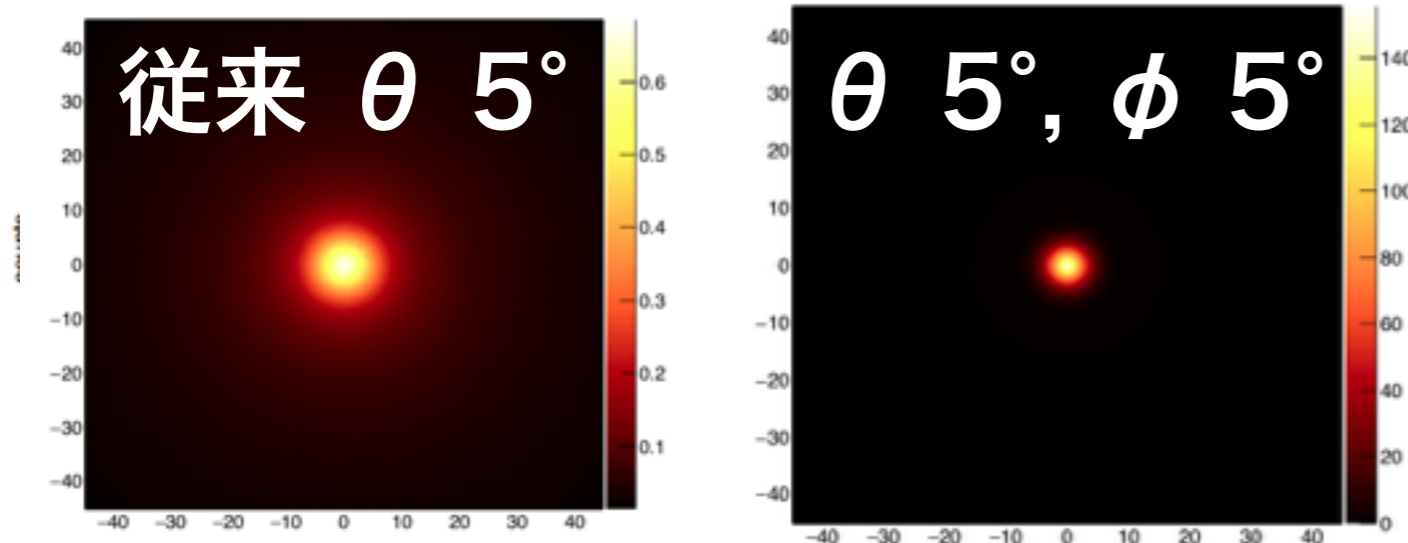
角度分解能の各要素の寄与(Takeda PhDthesis)



電子追跡型コンプトンカメラ

- ・ **コンプトン散乱時の反跳電子を検出し、光子到来方向を一意に決定**

- 反跳電子の運動量から到来方向を円弧上に制限



- ・ **半導体コンプトンカメラでの電子追跡実現への課題**

① 20 μm 程度の位置分解能が必要 (100 keV電子のSi中距離 $\sim 50 \mu\text{m}$)

② タイミングトリガ (数 μs) が取得可能 (イベント同時計測)

→ これらを満たす検出器で使用可能なものは存在しない

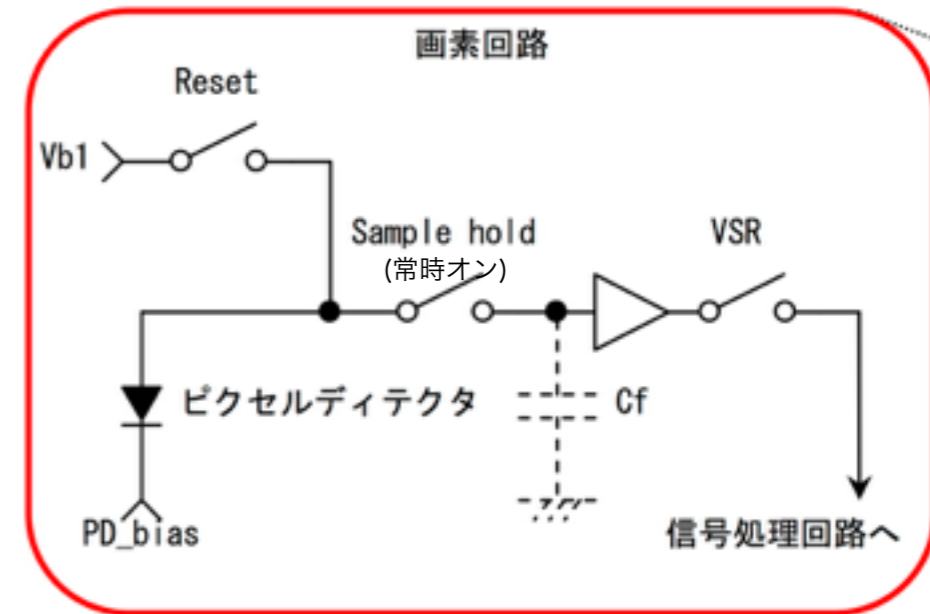
- 試作・実験段階にあるのも、CCDとストリップ電極を組み合わせたもののみ (Vetter+11)

我々のグループと浜松ホトニクスでCMOSセンサとSi素子を
組み合わせた検出器 (Si-CMOS検出器) を開発した

Si-CMOS検出器のコンセプト

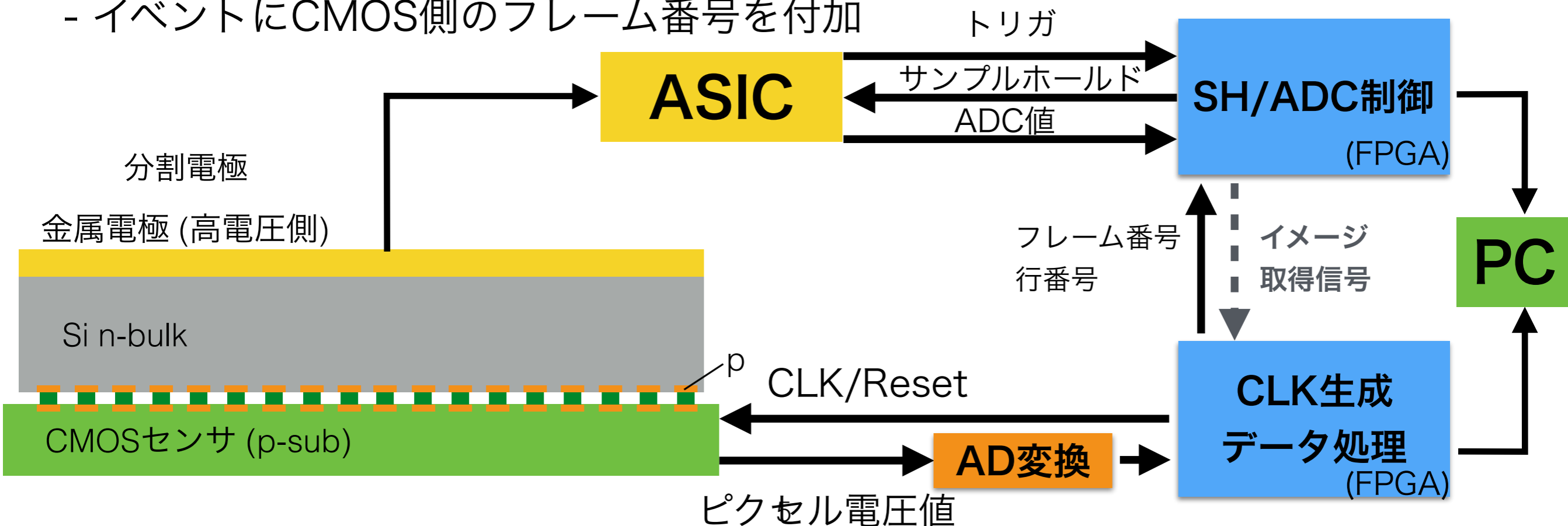
Si素子とCMOS回路をバンプ接合

- ピクセルサイズ 20 μm + 非破壊読み出し
- 入力電荷は、バッファ・素子間の浮遊容量に蓄積
- 行毎に順次読み出し、一定期間で全ピクセルリセット



電荷印加面からトリガを検出

- ASICを用いて、トリガ・エネルギーを取得
- イベントにCMOS側のフレーム番号を付加

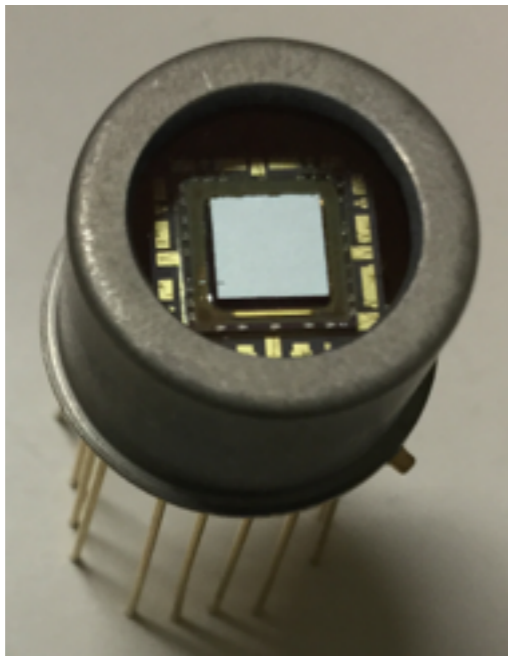


開発したSi-CMOS検出器

- 浜松ホトニクスと共同開発した2種類の素子について、性能評価

① 小型素子 (128×128)

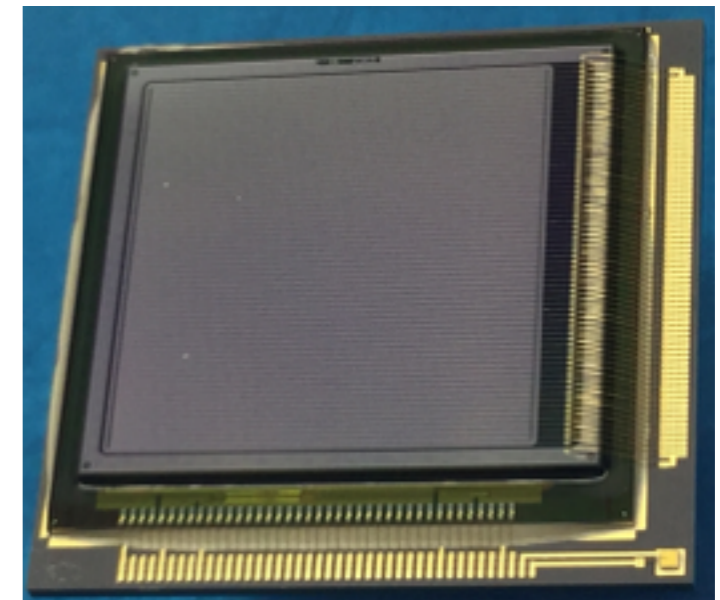
- Si素子とCMOSセンサが bumps 接続できるか検証
- 主に、**CMOSイメージの評価・解析**



ピクセル数	128×128
ピクセルサイズ	20 um×20 um
厚さ	0.5 mm
印加電圧	200 V

② 大型素子 (640×640)

- ピクセル数を増加
- 読み出しシステムを2種類
- 裏面がストリップ電極→トリガ取得

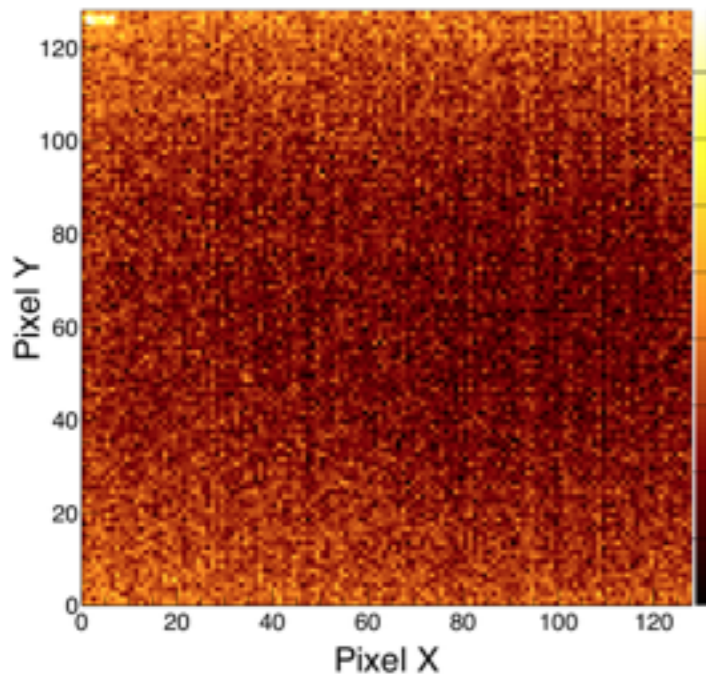


ピクセル数	640×640
ピクセルサイズ	20 um×20 um
厚さ	0.5 mm
印加電圧	200 V
電極ストリップサイズ	0.2 mm×12.8 mm
ストリップ数	64

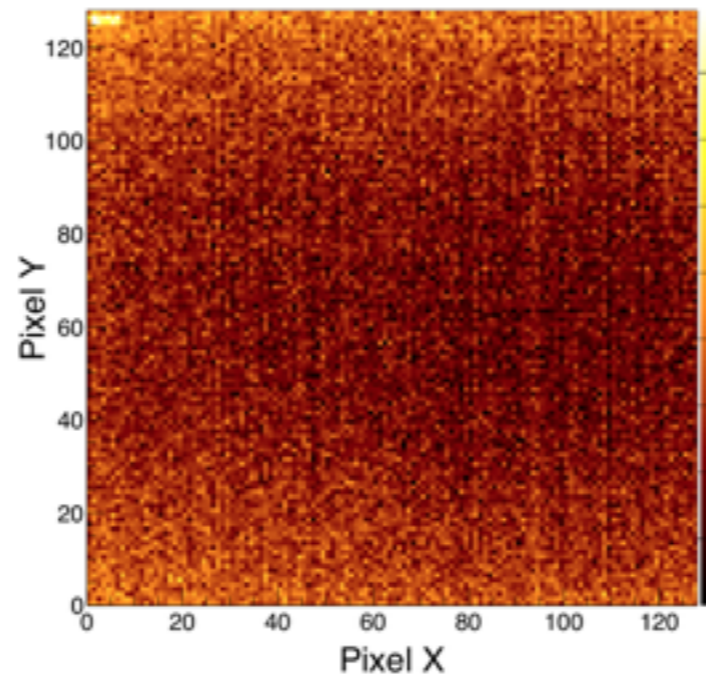
小型素子(128×128)での取得データと画像処理

^{60}Co (1.1 MeV, 1.3 MeV)の測定結果

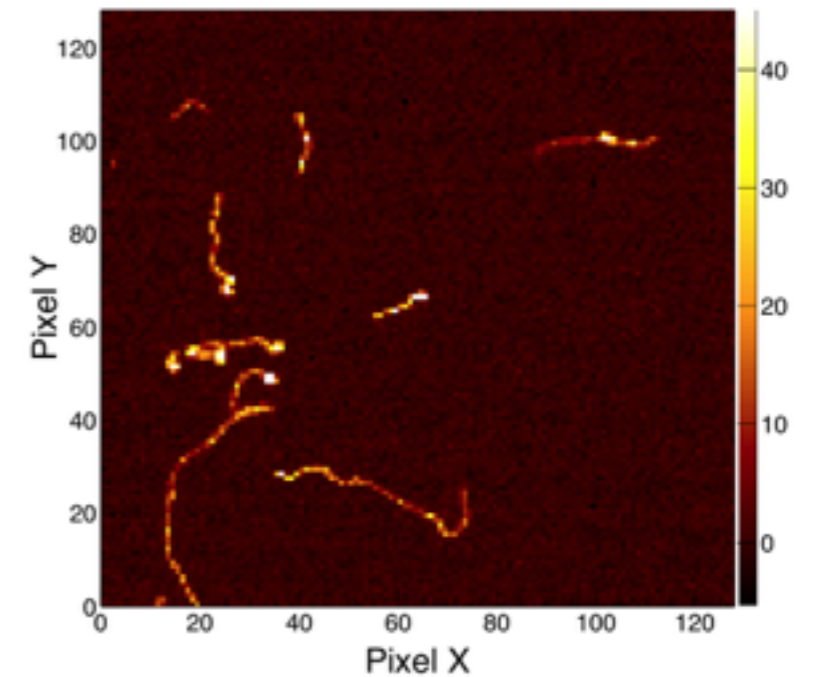
取得フレームイメージ



一つ前のフレームイメージ



差分イメージ (コモンモードノイズ除去後)



差分イメージ+ノイズ除去

蓄積された電荷が順次出力→前のフレームとの差分をとる

行毎に同期したノイズがあるので、その行内での中央値をノイズとする

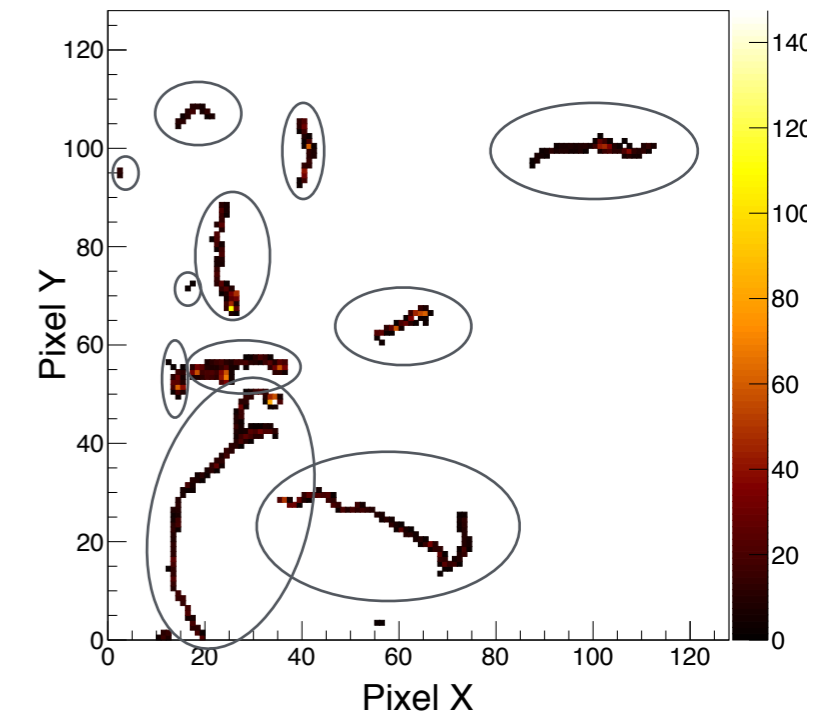
スレッシュホールド判定

全ピクセルから、スレッシュホールド値を超えたピクセルを抜き出す

グループ化

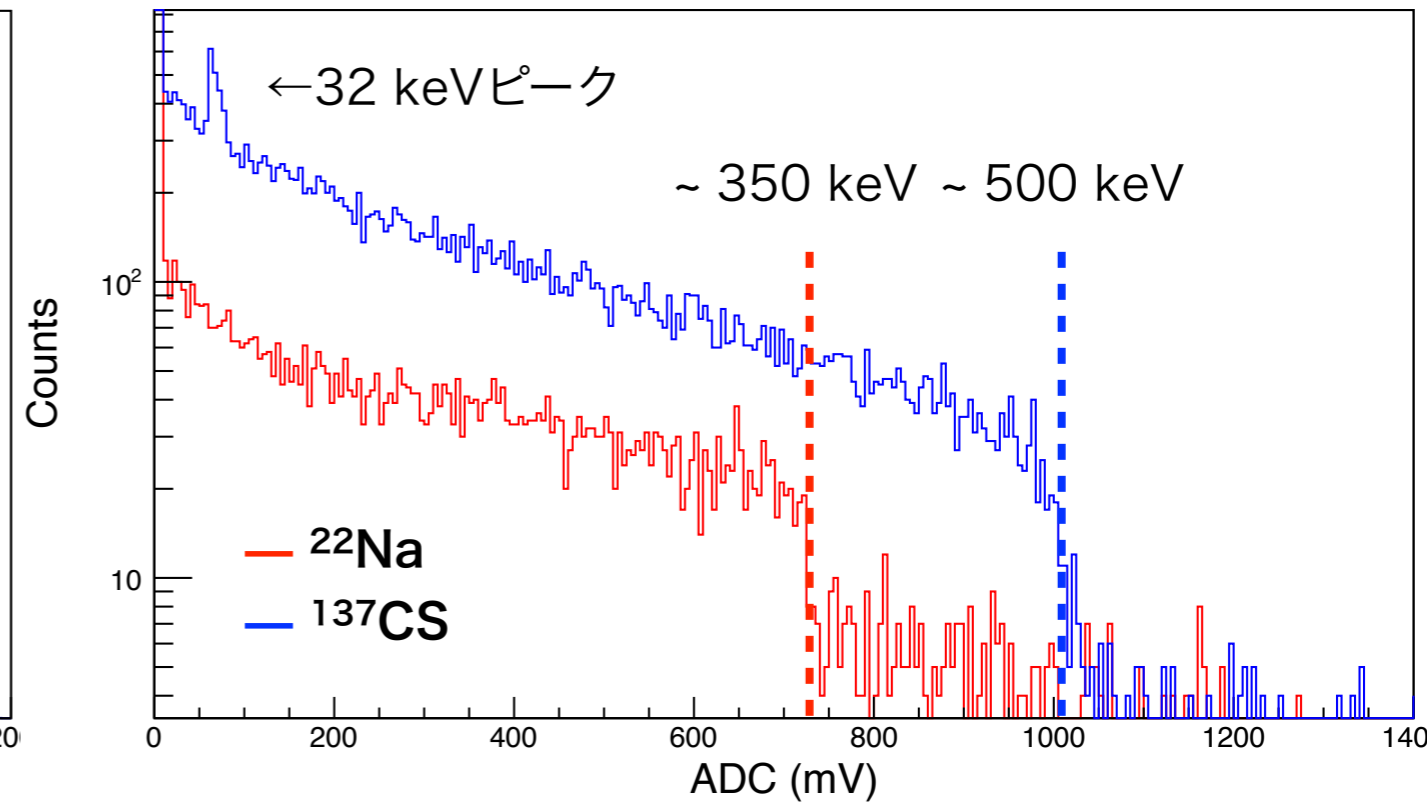
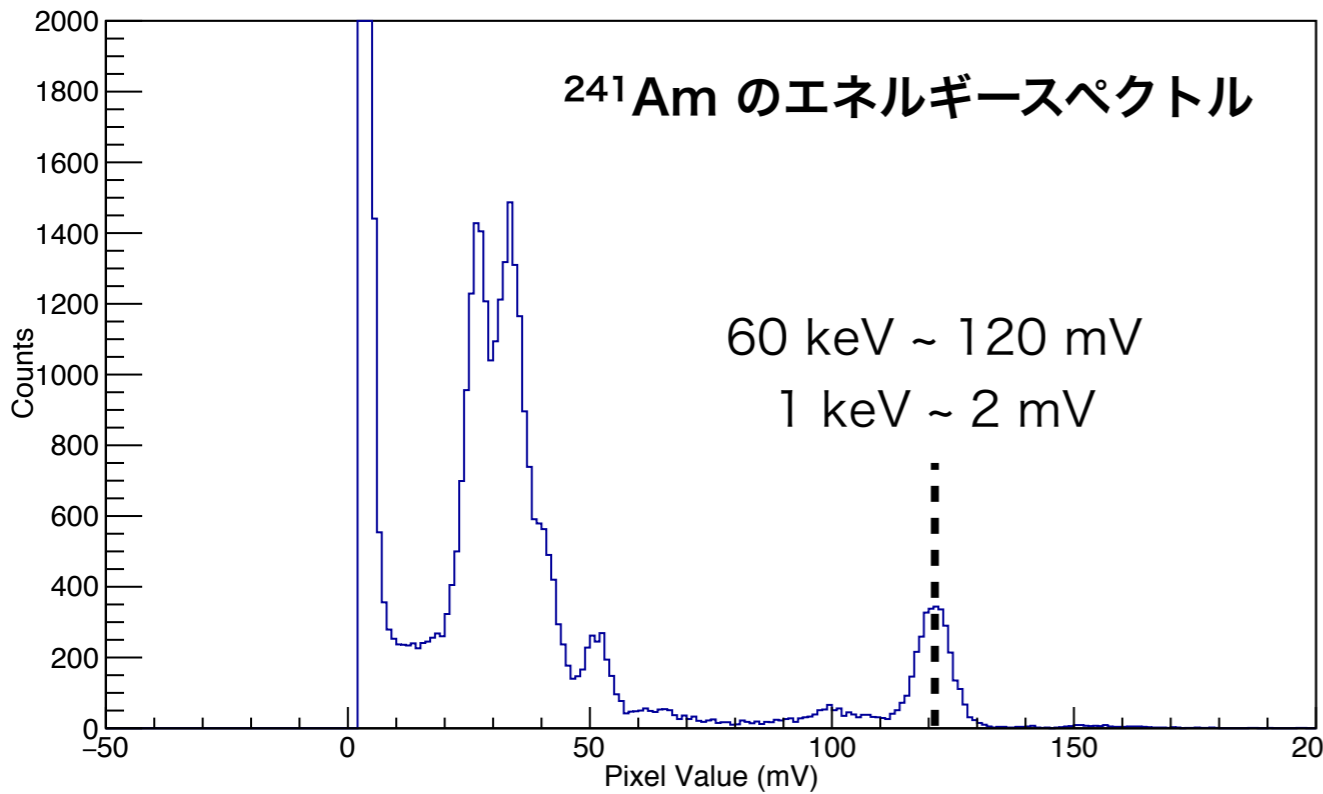
上で選ばれたピクセルについて、互いに周囲8ピクセルに含まれていた場合は、同一イベントによるものとみなし、グループ化

スレッシュホールド判定+グループ化



エネルギースペクトル

エネルギー取得 グループごとにピクセル値を足し合わせる



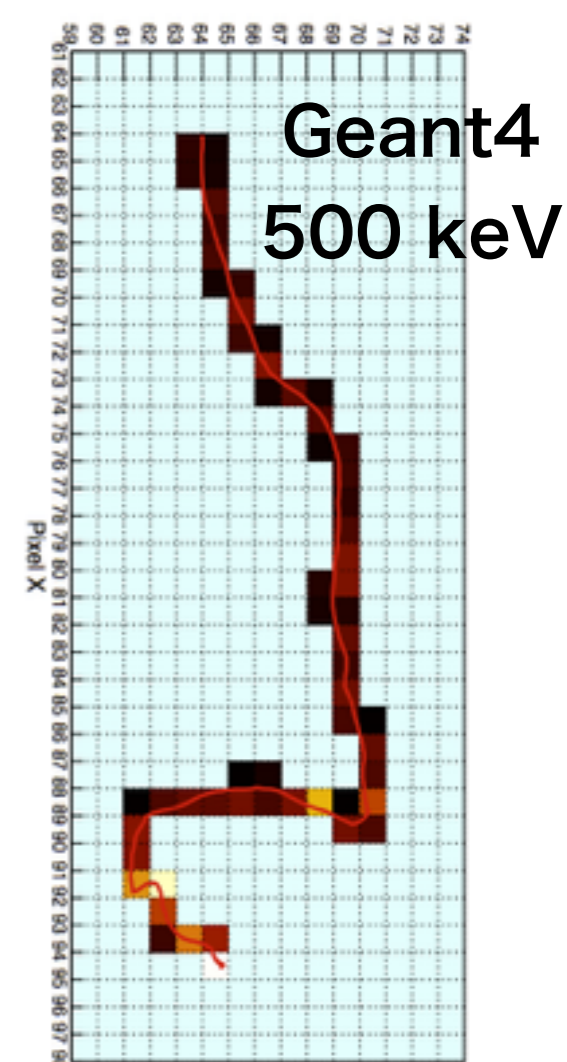
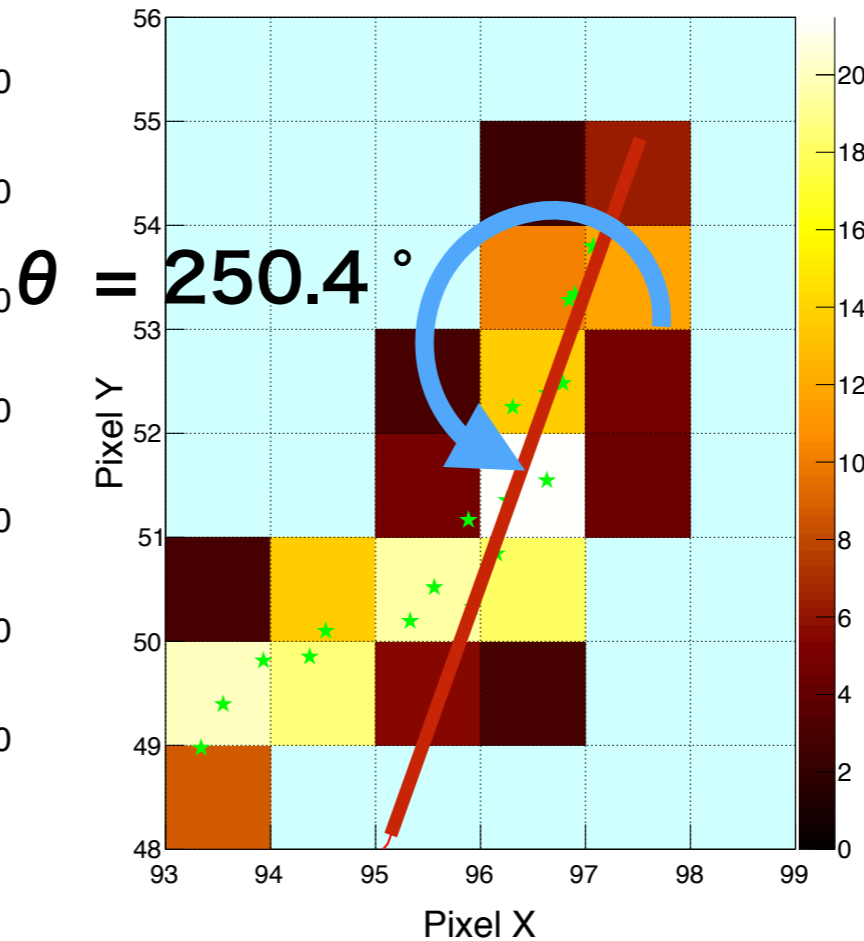
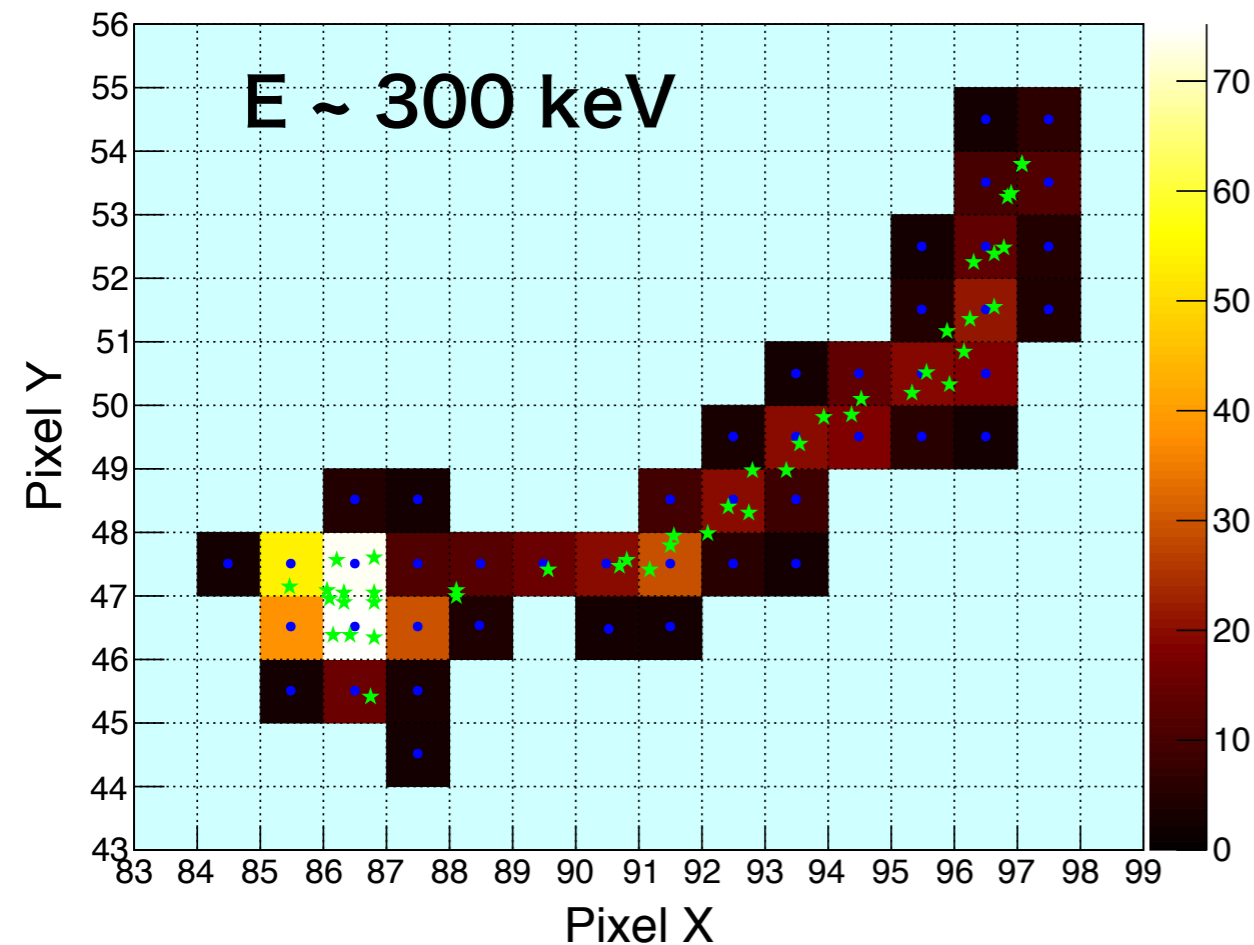
左図：²⁴¹Am(60 keV)

- スペクトル分解能が最もよくなるVth(2.0 mV)を設定
- エネルギー分解能 **4.3 keV@59.5 keV**

右図：²²Na(511 keV)、¹³⁷Cs(662 keV)

- 511 keV、662 keVのガンマ線に対するコンプトンエッジも確認

反跳電子の運動量方向測定



ピクセル間でのチャージシェア

- 飛跡よりもピクセルが広がっている → 周辺ピクセル値が電子の位置情報を反映

運動方向の測定

- 自身と周囲8ピクセルのピクセル値を重み付けとして、ピクセル位置の重心をとって移動 ($\bullet \rightarrow \star$) (周辺ピクセルの情報を利用)
- 始点から6点を選び、直線フィッティング。エラー計算+自動化が今後の課題。

両面同時読み出しシステム構築

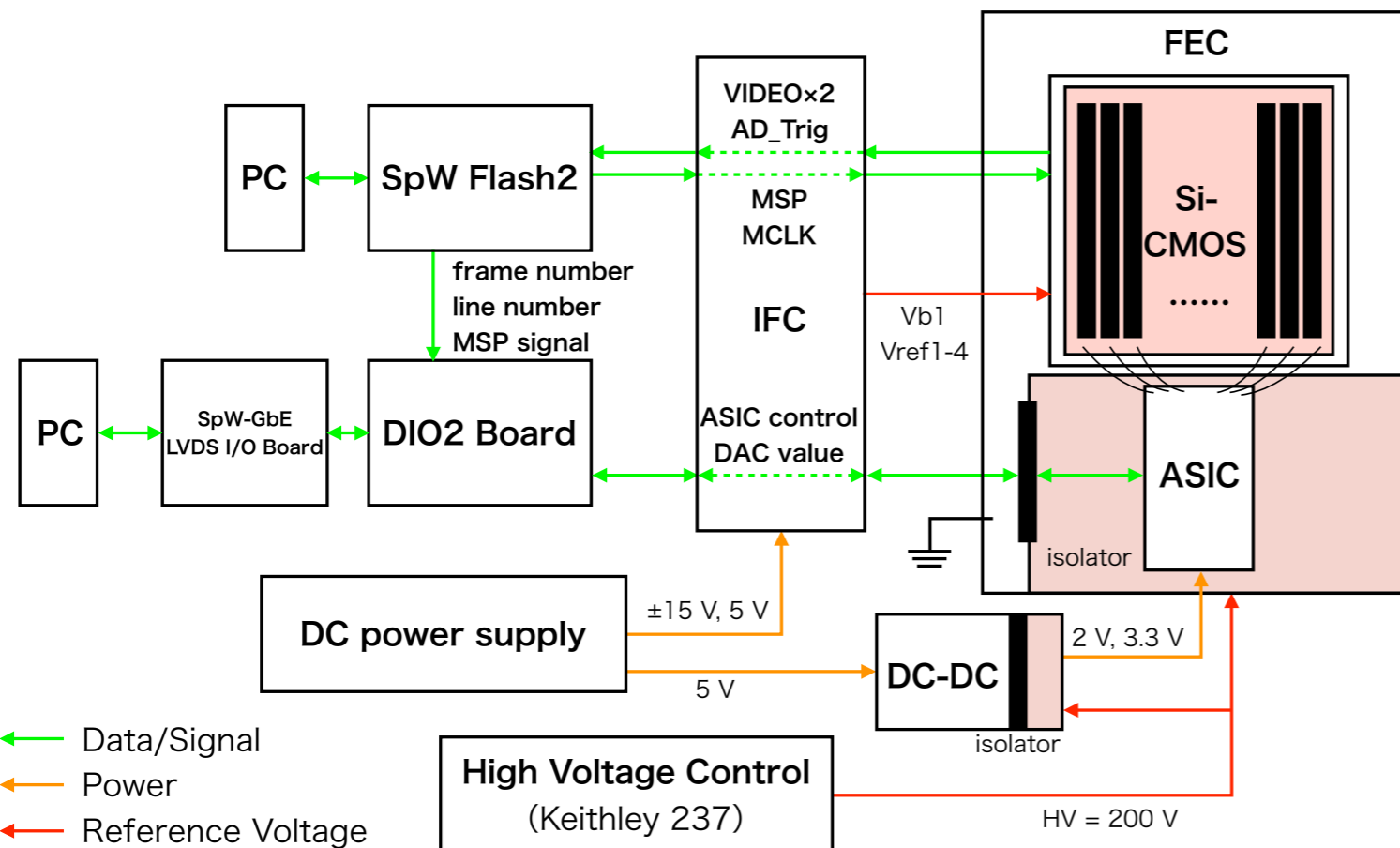
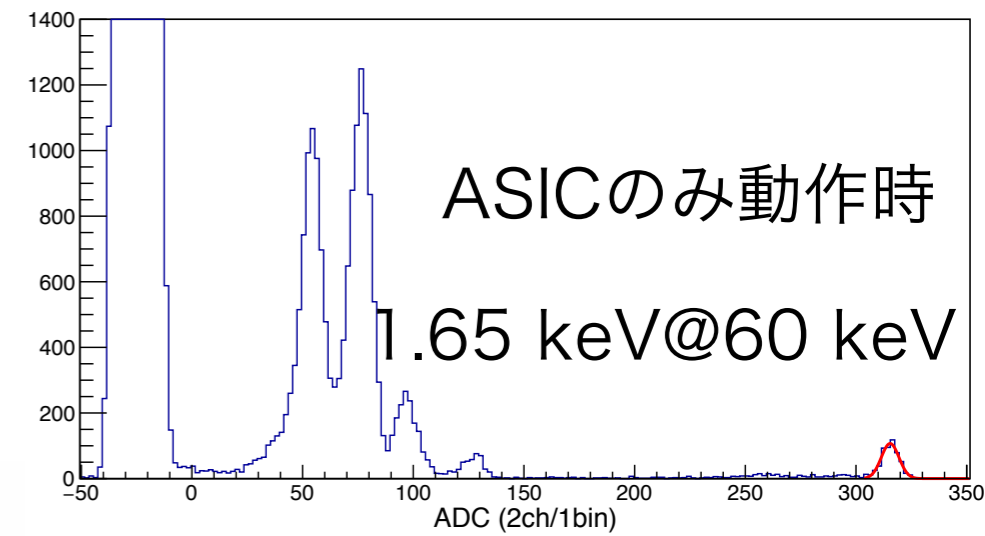
大型素子(640×640) 大型化+ストリップ電極構造

- トリガ取得 ストリップ電極にASICを接続

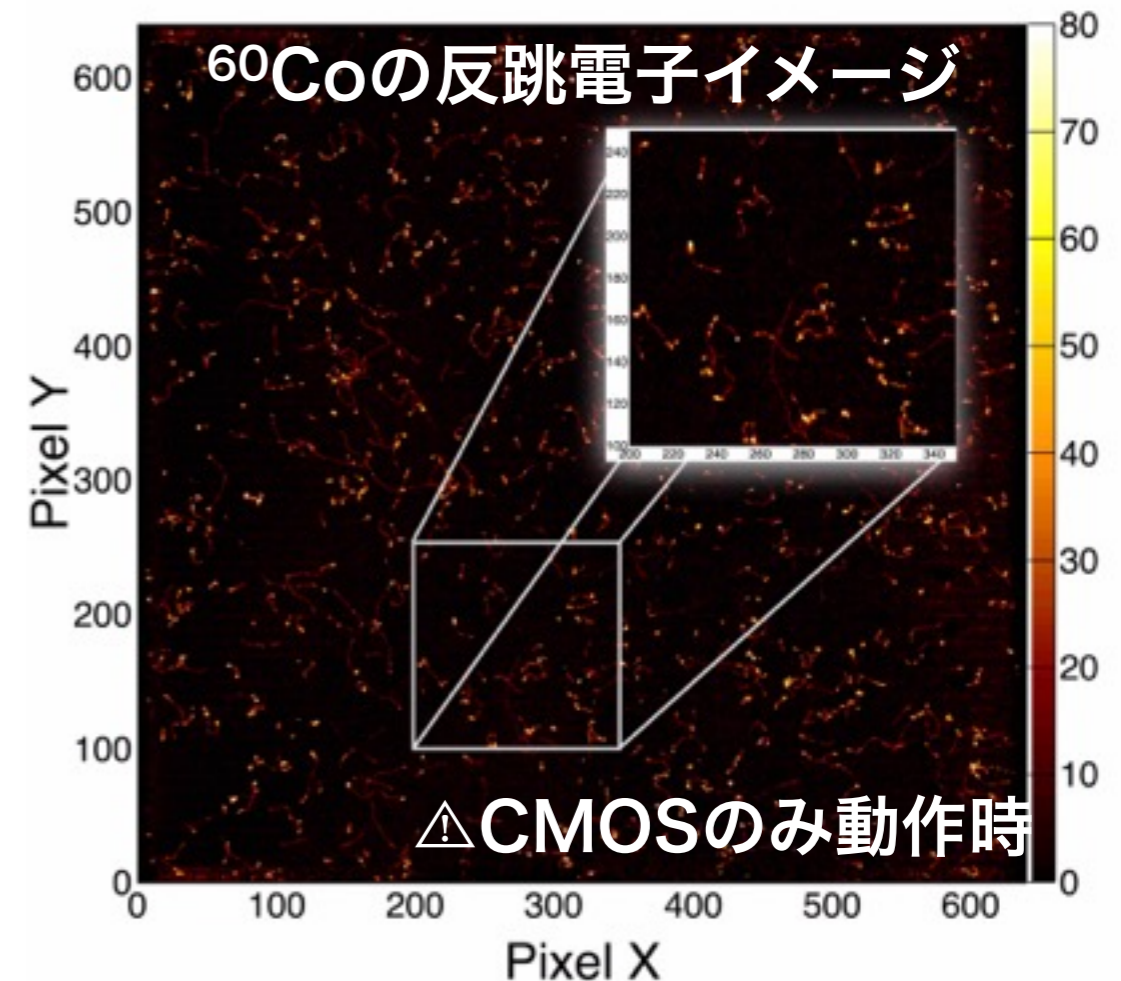
- 以下のような読み出しシステムを構築

- ① CMOS回路・ASIC同時に動かす
- ② ASICイベントにフレーム番号を対応付け

241Amのストリップ電極
エネルギースペクトル



← Data/Signal
← Power
← Reference Voltage



両面同時読み出しの実証と性能評価

エネルギー分解能 - 2.10 keV@59.5 keV (左図)

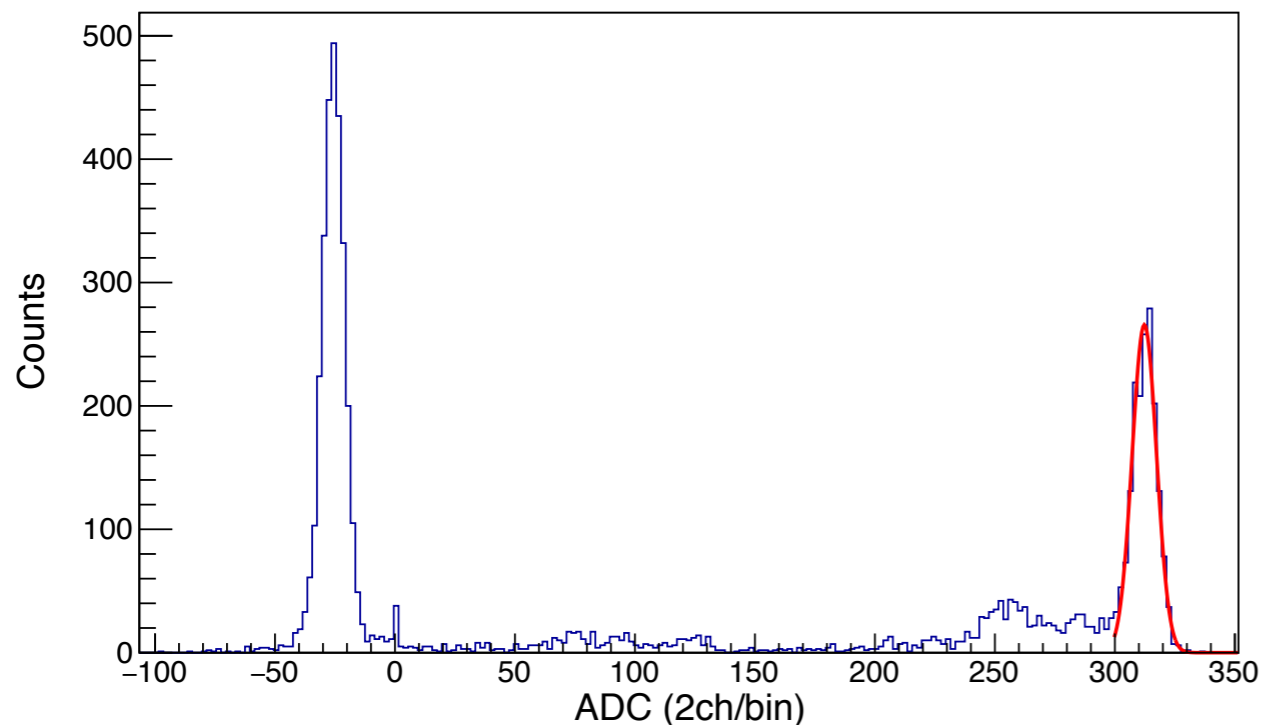
トリガ取得実現

- 電子飛跡のイメージとASIC側での対応イベントの取得確認 (^{60}Co の測定、右図)

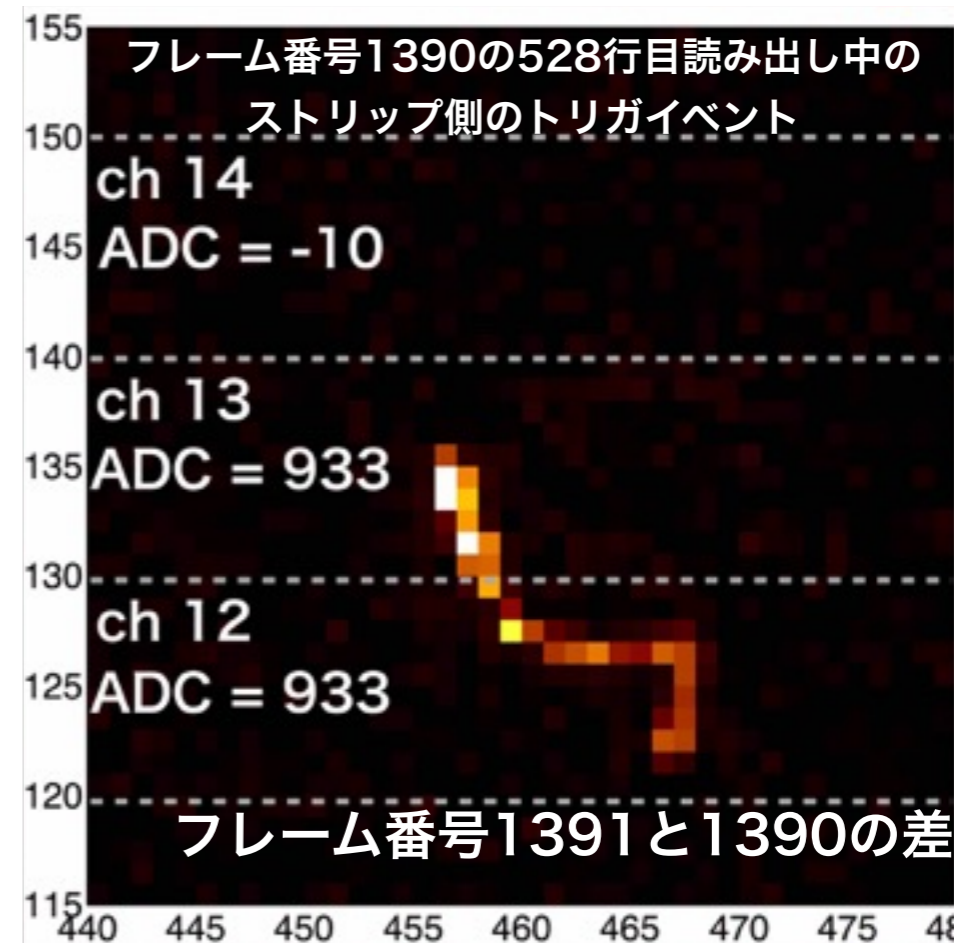
課題 デッドタイム大

CMOS回路からASICへのノイズ

- CMOS回路の読み出し行の切り替えのタイミングで、ASIC側にノイズがかかる



同時読み出し時のストリップ電極の ^{241}Am スペクトル



まとめ 将来展望

- Si素子とCMOS回路を組み合わせたSi-CMOS素子を開発
 - 20 umの位置分解能を実現
- CMOSイメージからエネルギー取得・電子運動方向測定方法を開発
- ストリップ電極化+ASICにより、大型素子でトリガ取得を実証
 - 電子追跡型コンプトンカメラとして試作に使用可能
- しかし CMOSからASICへのノイズでデッドタイムが大

今後の展望

- CdTe検出器と組み合わせて、電子追跡型半導体コンプトンカメラの試作
- ノイズ発生の発生原因を調査、素子の読み出し方法・素子構造へ反映
- 電子のCMOSイメージへのレスポンスを調べる
 - チャージシェアの調査+ピクセルサイズを超えた位置分解能の向上