

シリコンドリフト検出器と GSOシンチレータを用いた コンプトンカメラ

岩崎 田原

目次

1. 実験の目的
2. 実験原理
3. 使用装置
4. 前実験
5. 本実験
6. まとめ

1. 実験の目的

シンチレータとシリコン検出器で簡単なコンプトンカメラを作りガンマ線のイメージングを行う。

2. 実験原理

コンプトン散乱の原理

光子と(自由)電子による弾性散乱
エネルギー保存則 & 運動量保存則

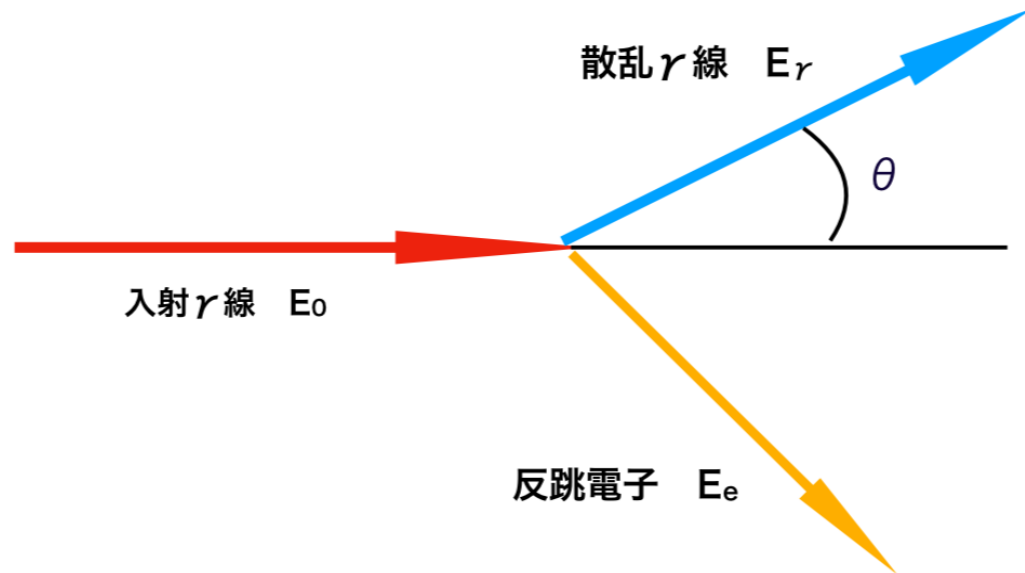
$$\rightarrow \theta = \cos^{-1} \left(1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_\gamma} - \frac{1}{E_e + E_\gamma} \right) \right)$$

θ : 散乱角

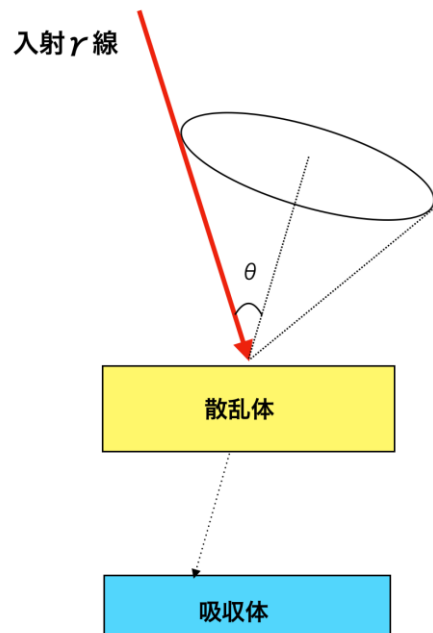
E_e : 反跳電子エネルギー

E_γ : 散乱ガンマ線エネルギー

$m_e c^2$: 電子の静止エネルギー-511keV

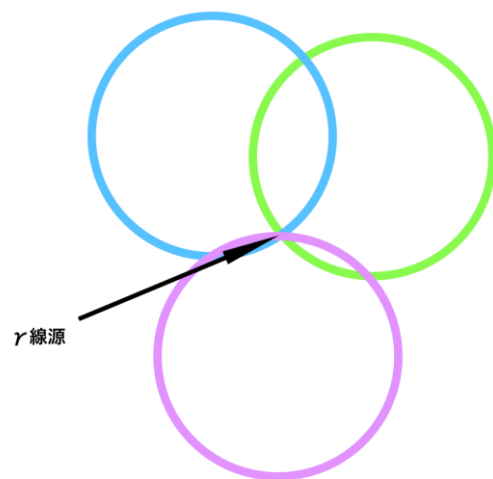


コンプトンカメラによる γ 線到来方向の決定



コンプトンカメラ

前段の検出器(散乱体)でコンプトン散乱を起こさせ、生じた反跳電子を、後段の検出器(吸収体)で散乱ガンマ線を同時に検出するガンマ線検出器



一つのガンマ線から θ が決まり、円環上(コンプトンコーン)に γ 線の到来方向を限定できる。
3つ以上の円環を重ね合わせて、 γ 線の到来方向を決定する

3. 使用装置

シリコンドリフト検出器(SDD)

- シリコンドリフト検出器とは？

同心円状の電極構造で中央の小さな陰極に効率よく電子を集める。

主な特徴

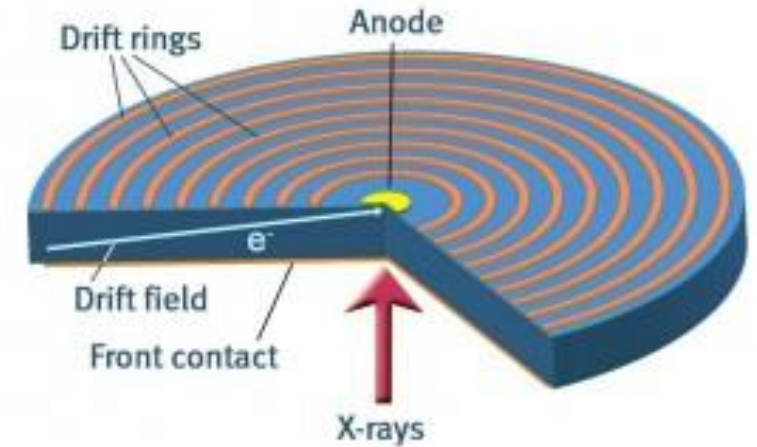
- 時間応答がはやい
- エネルギー分解能が高い
- 漏れ電流が小さく、冷却が比較的楽(液体窒素不要)
- 空乏層が短い

- Amptek社製XR-100SDD

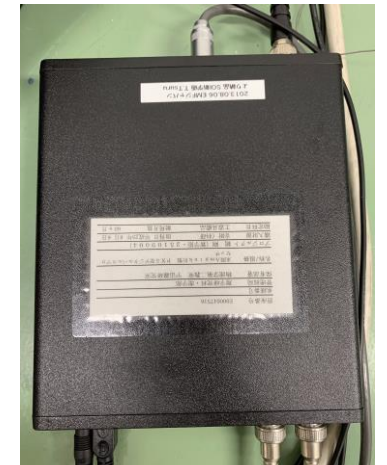
PX5がPreamplifier電圧供給、フィルター回路、Shaperの役割を兼ねる。

シリコンの厚さ 500 μm

シリコンの面積 25 mm^2

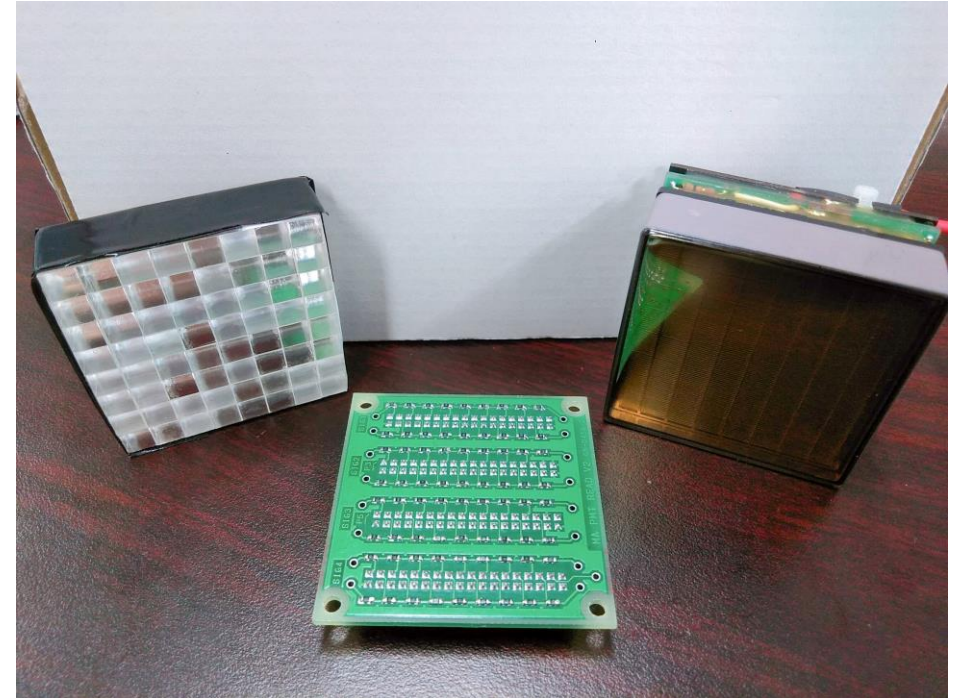


[Silicon Drift Detectors RAYSPEC](#)



シンチレータとその読み出し回路

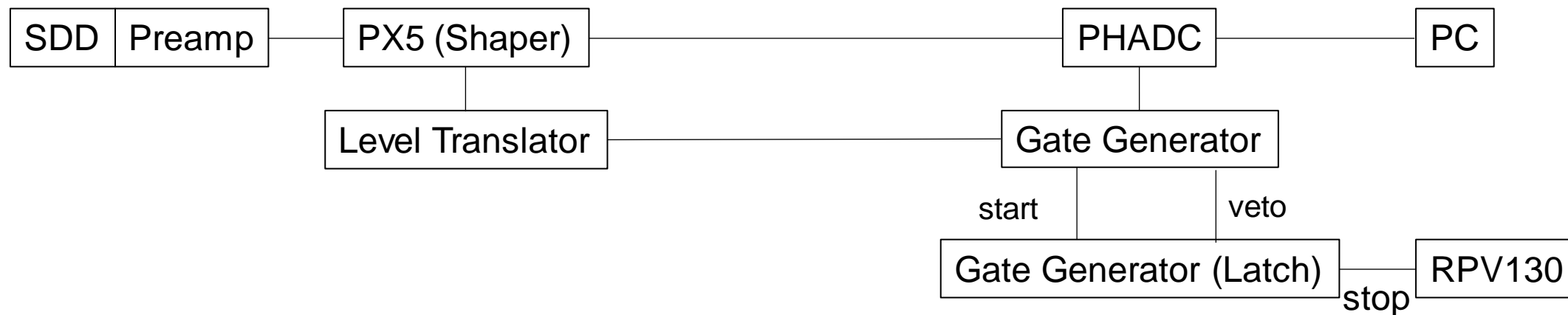
- GSOシンチレータ
6mm角 厚さ13mm 全64ピクセル
- マルチアノードPMT
浜松ホトニクスH8500
8×8チャンネルのアノード ゲイン 1.5×10^6
- 抵抗チェーン
PMTのアノードを抵抗で繋ぎ、4端から読み出し



4. 前実験

4.1. SDDのエネルギー較正

セットアップ

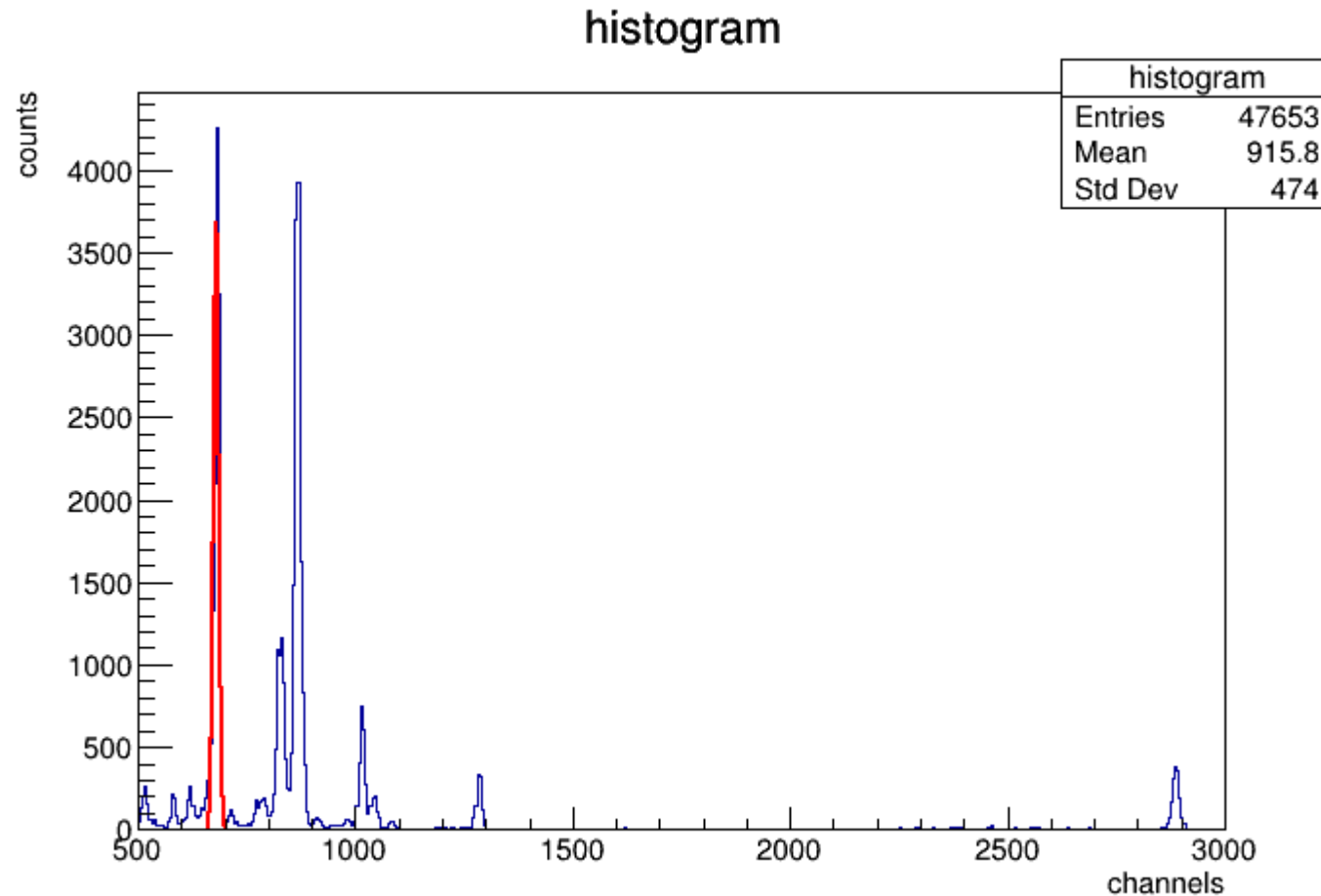


測定条件

- Preamplifier電圧 $\pm 8.5V$
- gain 5
- Gate幅 $10 \mu s$

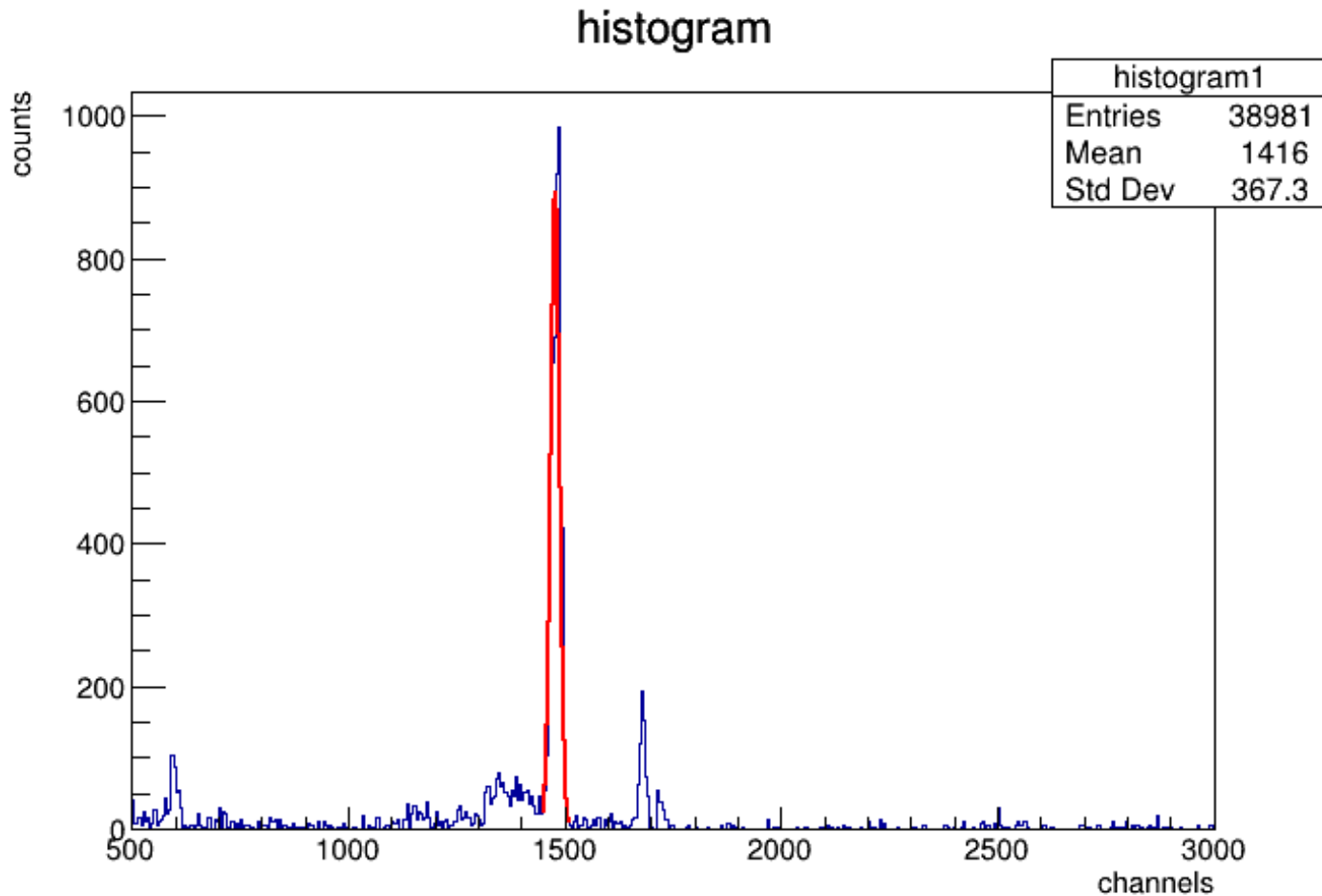
241Amのエネルギースペクトル

241Amの5つのピーク(13.9,17.9,20.8,26.3,59,5keV)をガウシアンでフィッティングした
フィッティング例 Am(13.9keV)



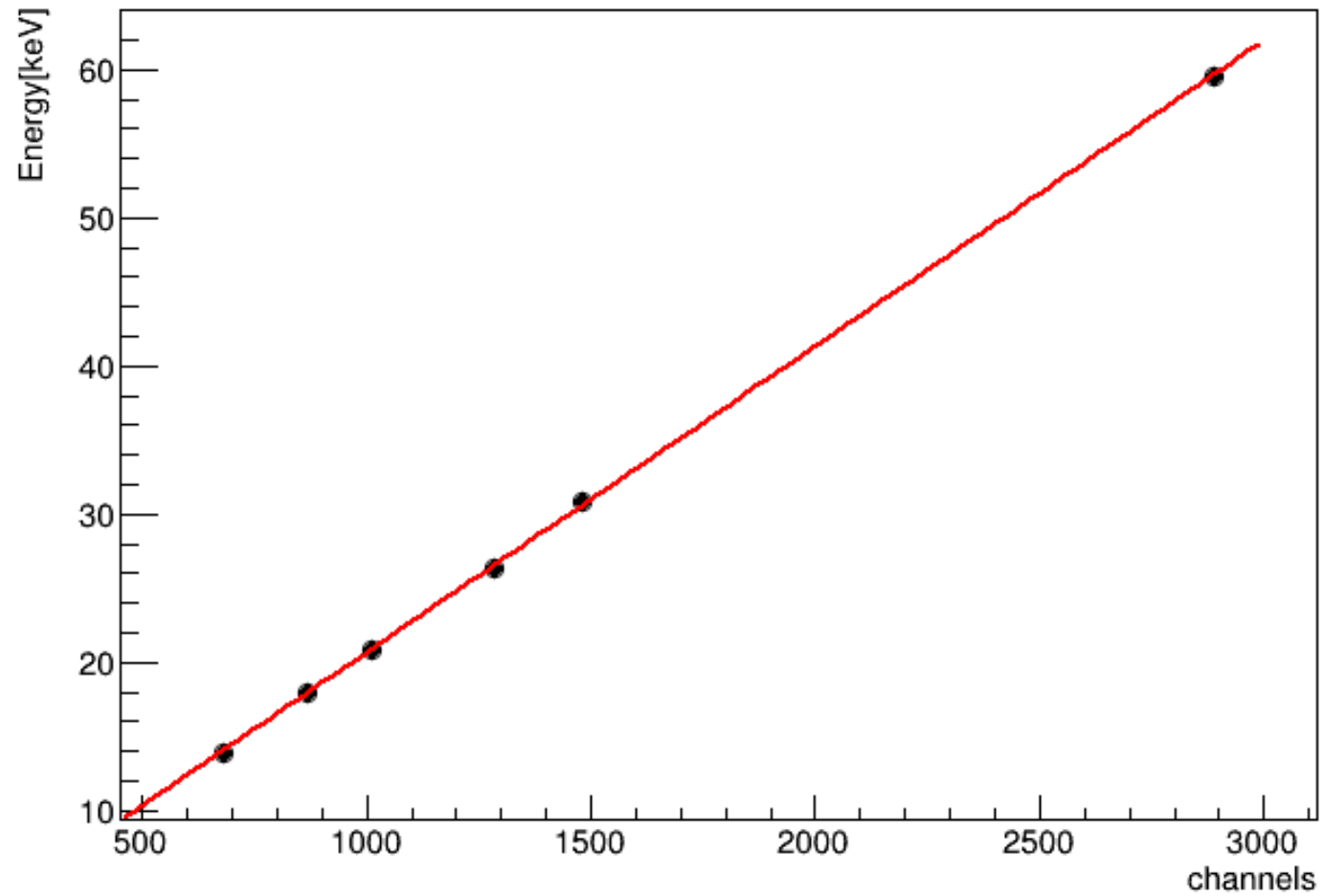
133Baのエネルギースペクトル

CsのK α 線(31keV)のフィッティング



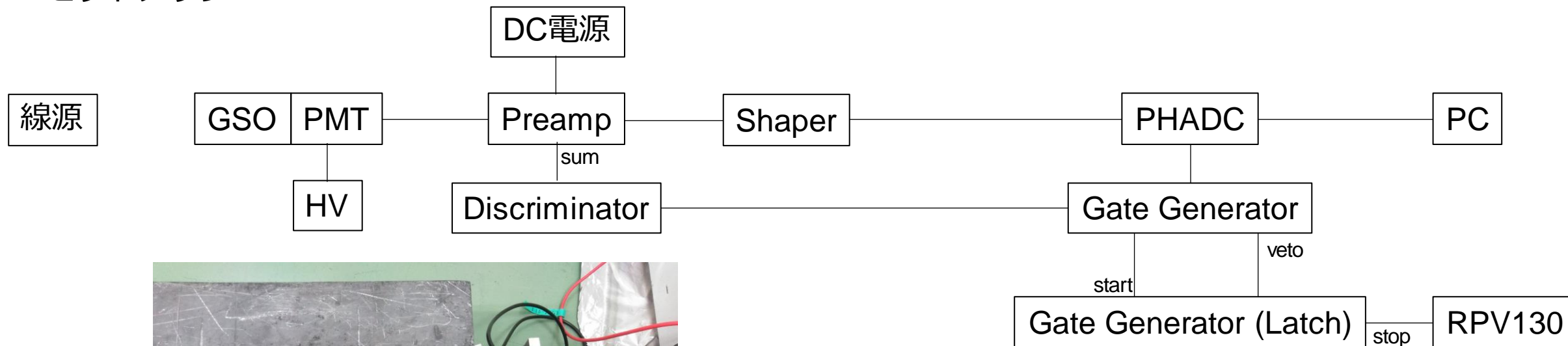
エネルギー校正

calibration



4.2. GSOシンチレータのエネルギー較正

セットアップ

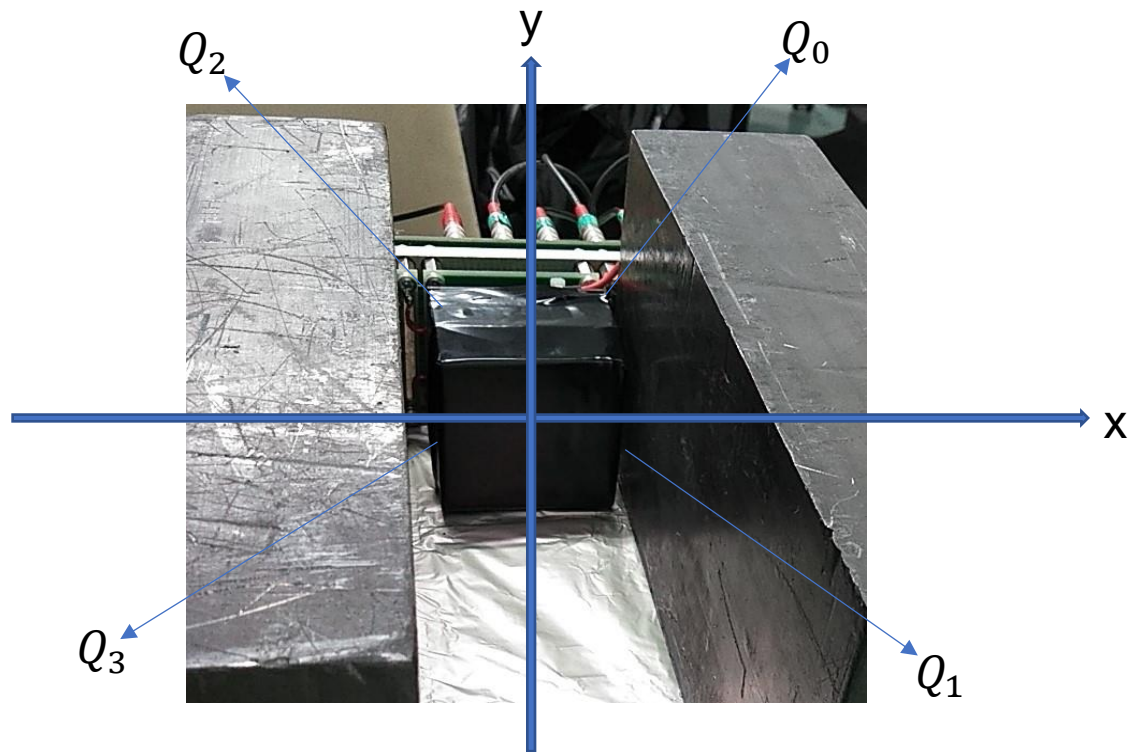


測定条件

- HV -930V
- Preamp 時定数 $5 \mu\text{s}$
- Preamp 電圧 $\pm 12.0\text{V}$
- Shaper 時定数 $0.2 \mu\text{s}$, ゲイン 0.5倍
- Discriminator スレッシュホールド電圧 -29.5mV
- Gate幅 $10 \mu\text{s}$

ガンマ線の入射位置の特定

シンチレータの中心を原点とする平面座標を導入
電荷をPMTの4端から読み出し
→電荷の重心を計算



電荷情報から全電荷 Q_{tot} とガンマ線の
入射位置 (x_γ, y_γ) を推定

$$x_\gamma = \frac{Q_0 + Q_1 - Q_2 - Q_3}{Q_{tot}}$$

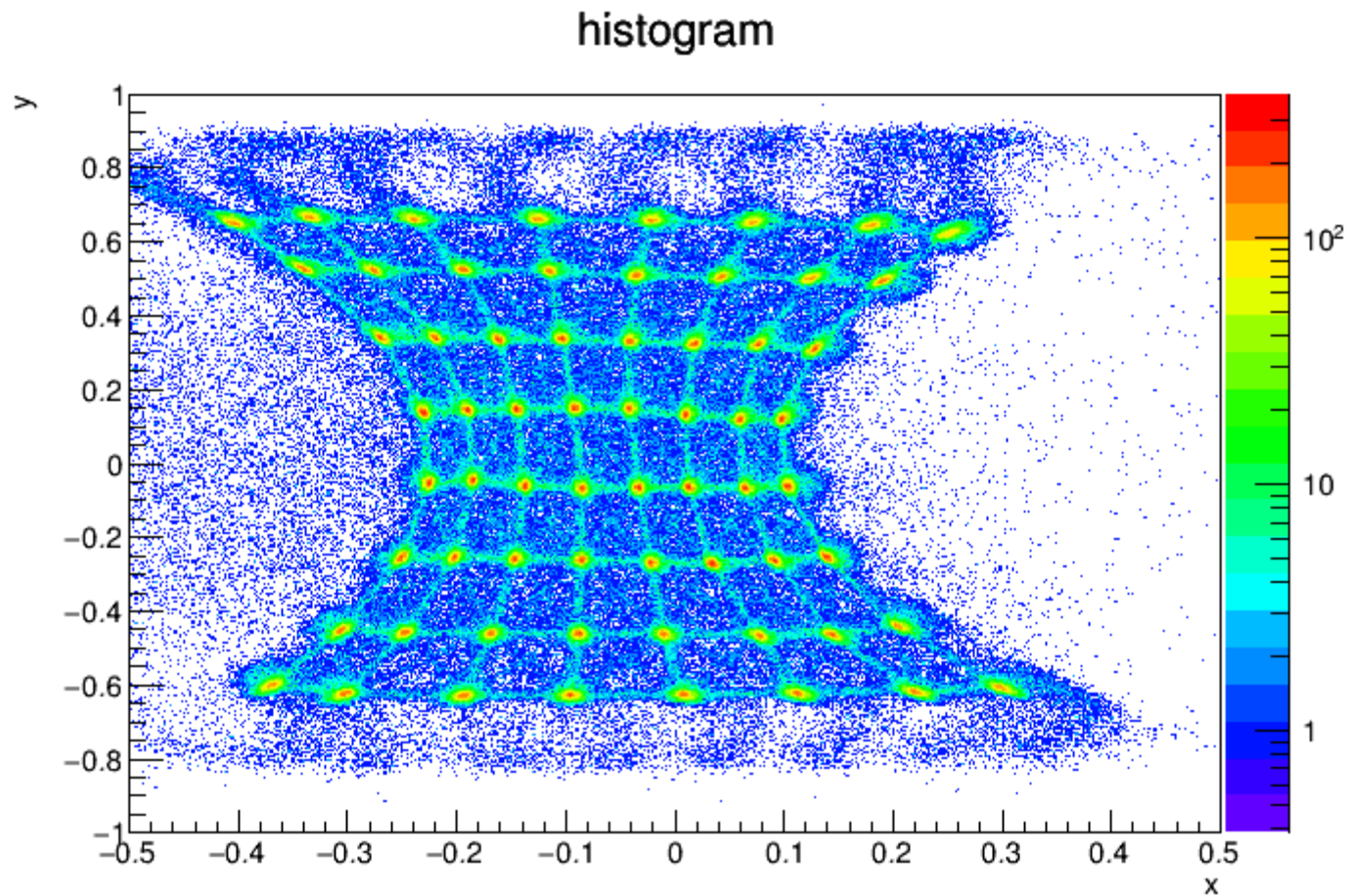
$$y_\gamma = \frac{Q_0 - Q_1 + Q_2 - Q_3}{Q_{tot}}$$

$$Q_{tot} = Q_0 + Q_1 + Q_2 + Q_3$$

2次元ヒストグラム

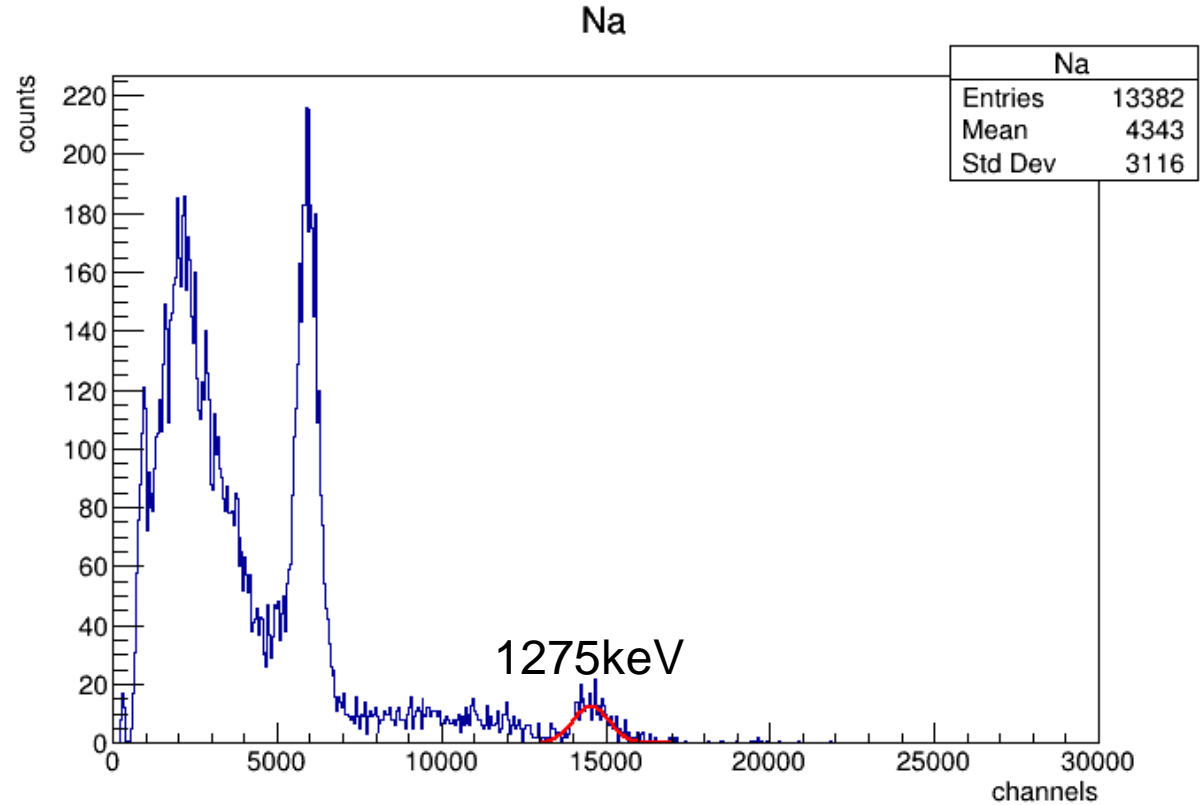
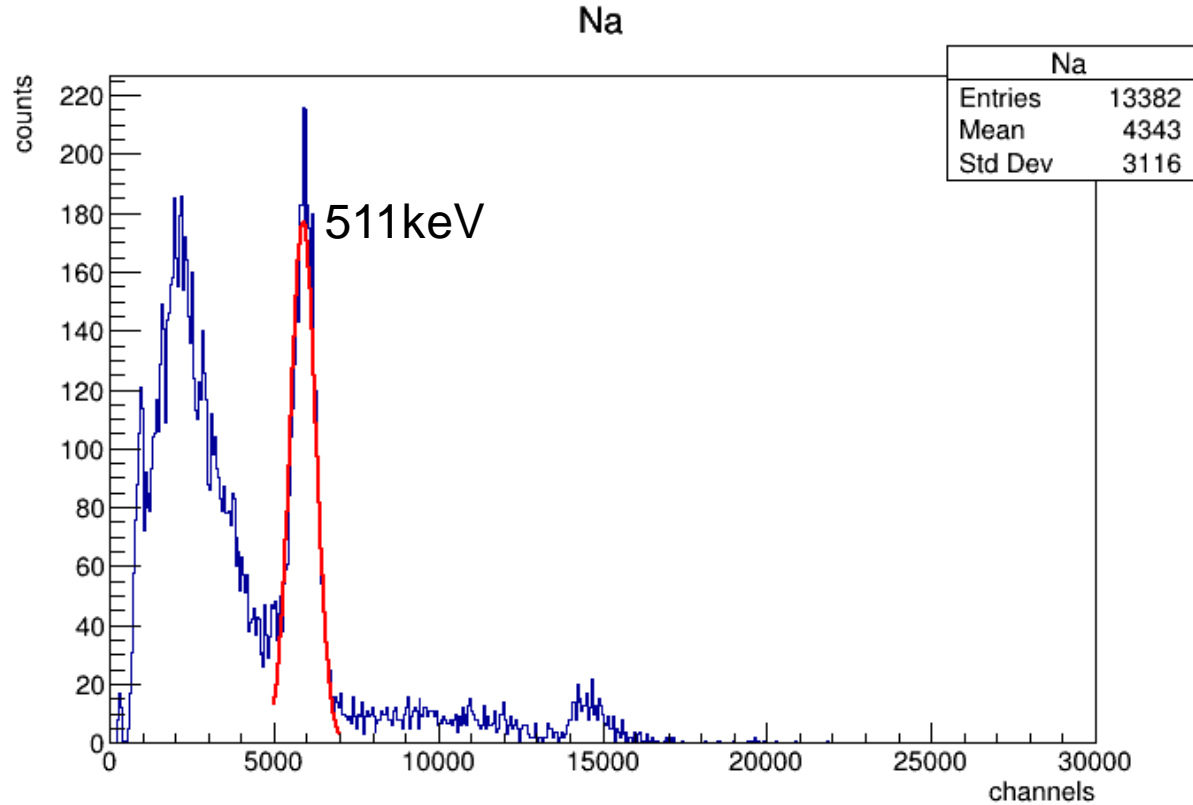
100万回の計測結果を2次元ヒストグラム化
(右図は線源 ^{22}Na の場合)

目測で各ピクセル範囲(矩形)を決定

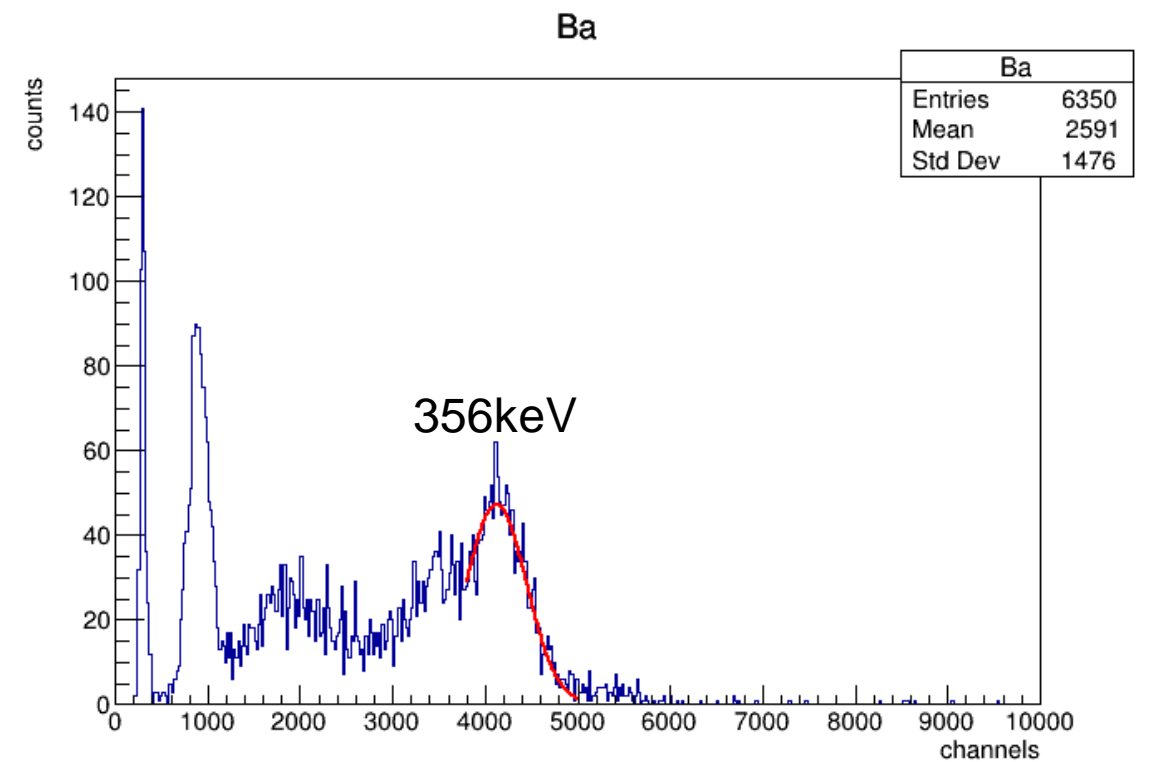
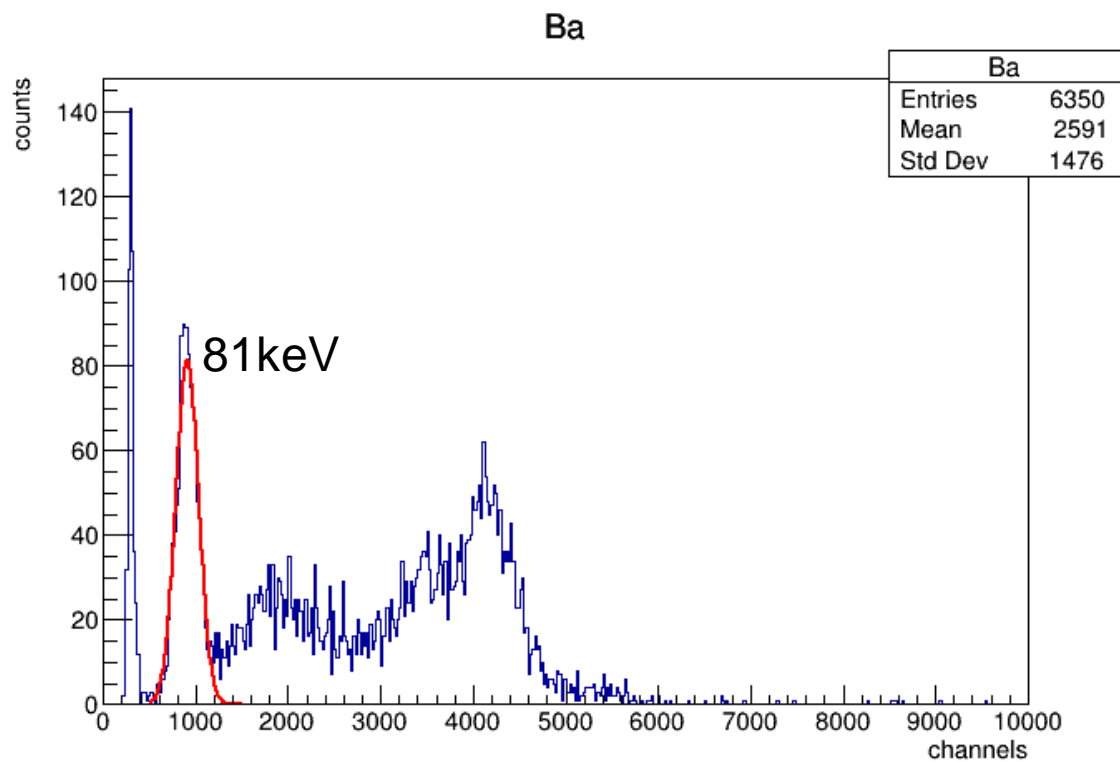


^{22}Na のエネルギースペクトル

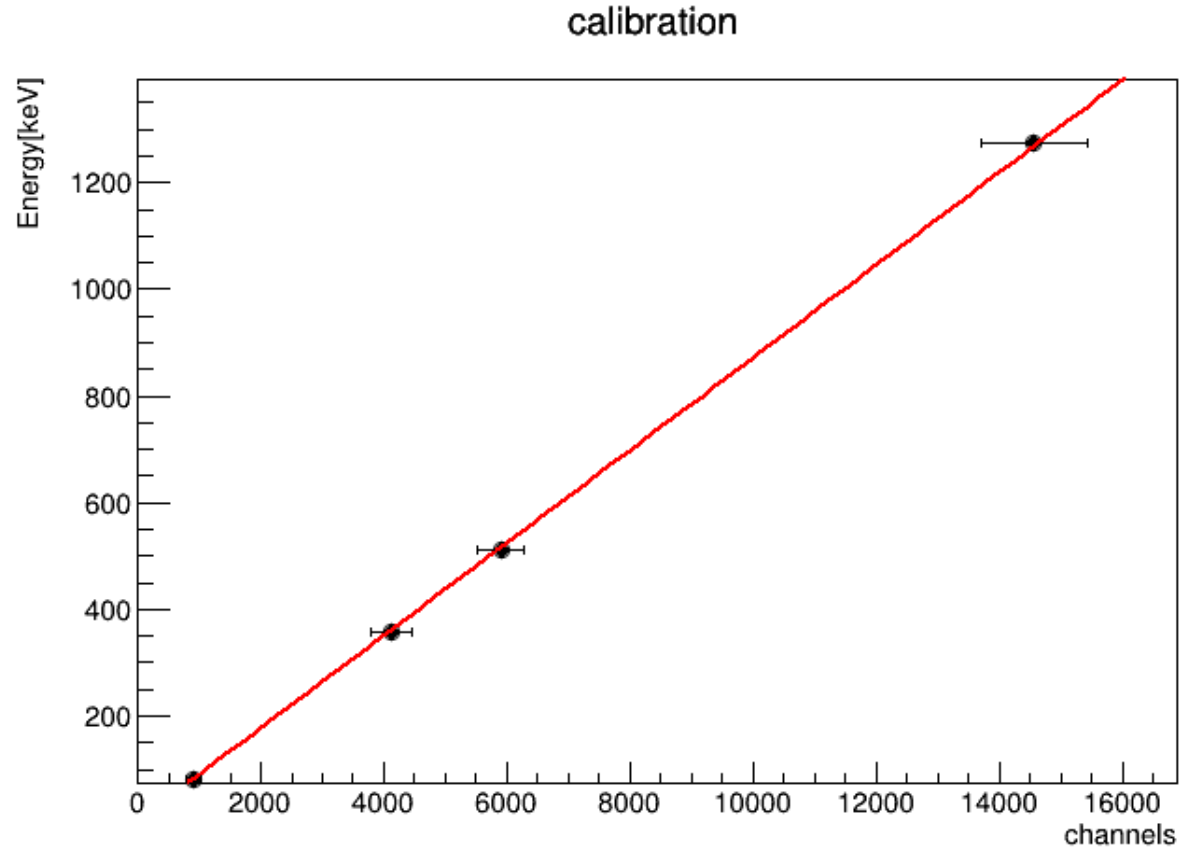
光電ピークをガウシアンでフィッティング→対応するチャンネル数を求めた。



133Baのエネルギースペクトル



エネルギー較正



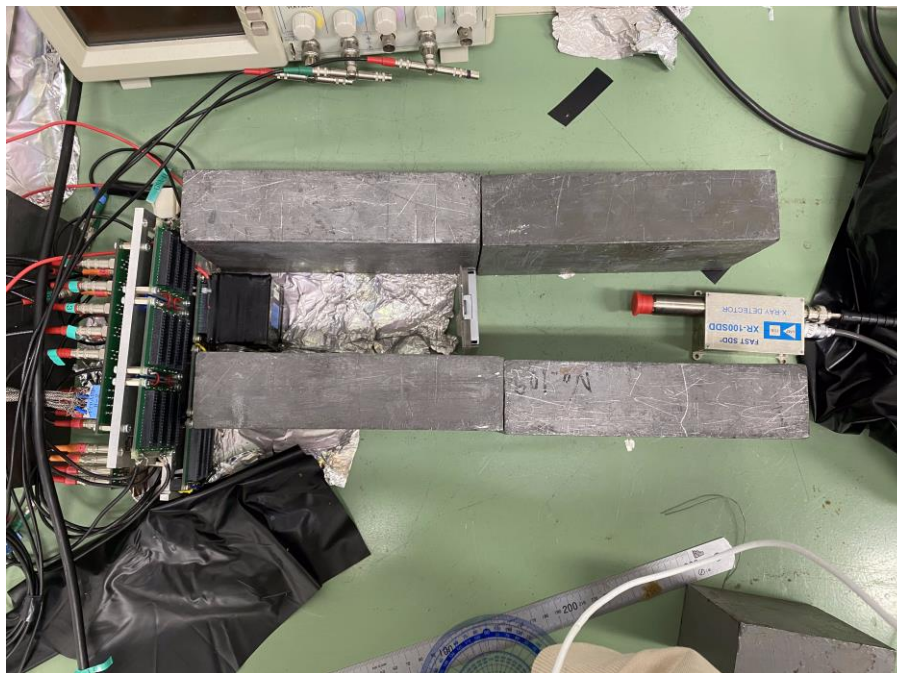
フィッティングによって求めたパラメータを
横軸：チャンネル数、縦軸：エネルギー(keV)と
してプロットし、一次関数でフィッティング

同様のことを全64ピクセルで行った。

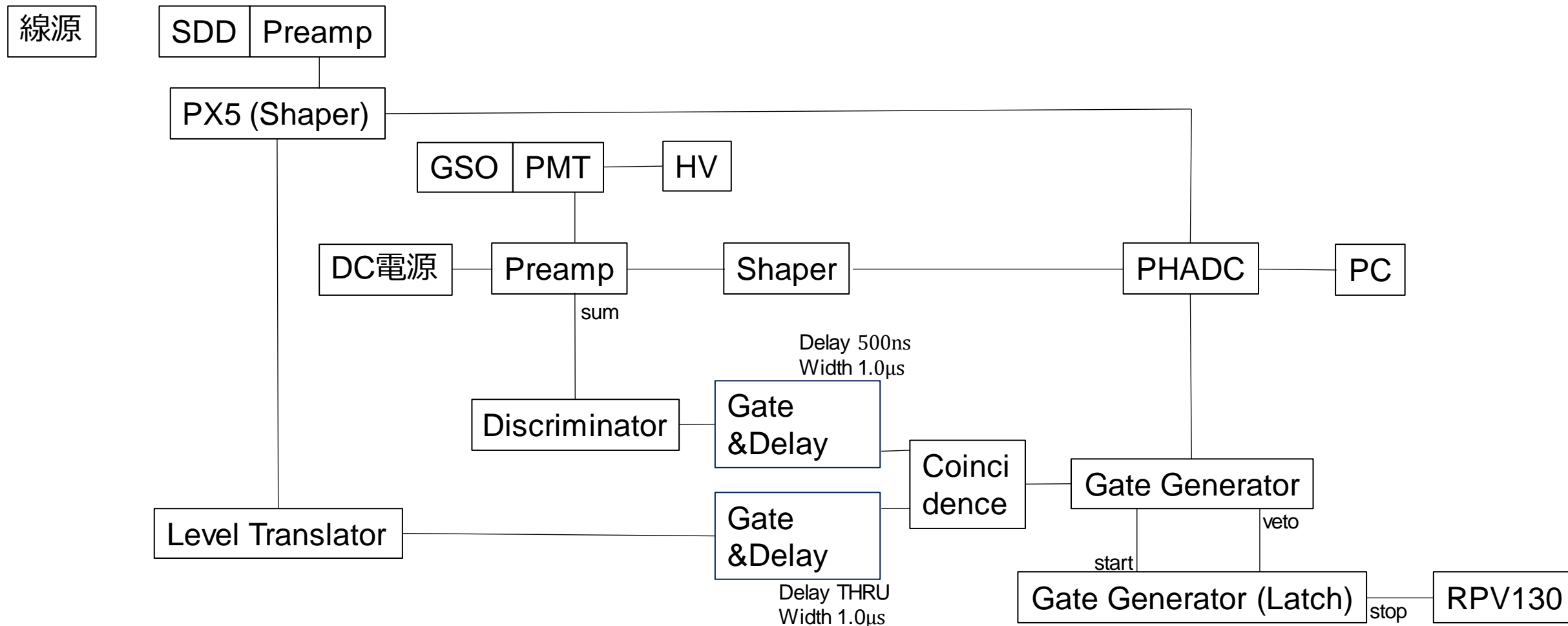
4.3 Coincidence

Coincidence が取れていることを確認するために、 ^{22}Na の β^+ 崩壊に伴う消滅放射線(511keV)と γ 崩壊で放出される γ 線(1275keV)を利用した

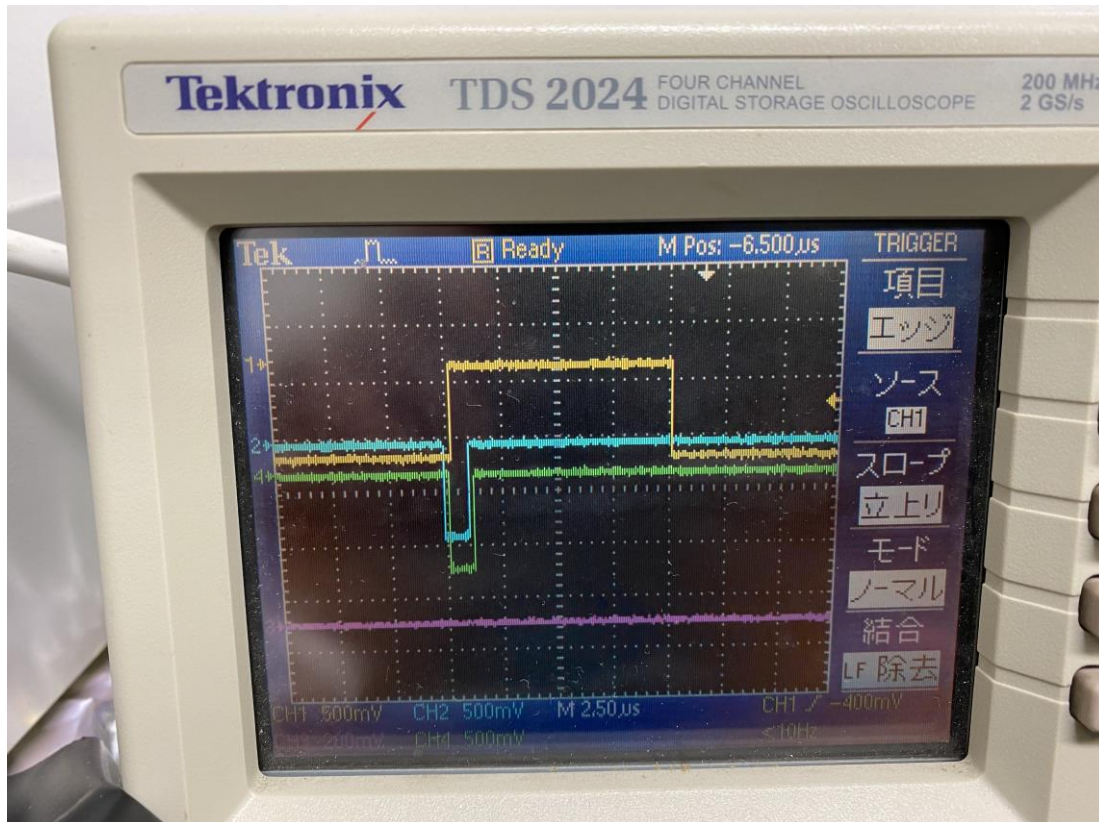
シンチレータとSDDを線源に対して対称におき同時計数を取る
→同時計数が取れていれば、1275keVのピークは(偶然同時計数を除き)なくなる



同時計数セットアップ



各ゲート出力の関係

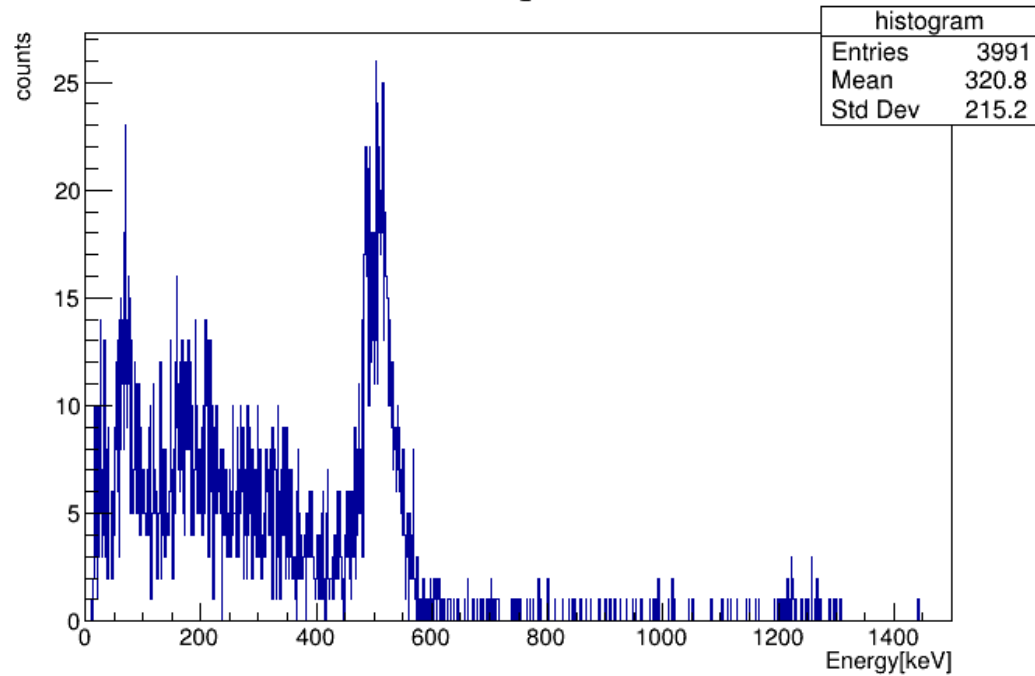


- 黄 Coincidence後のゲート(反転出力)ゲート幅 $10\mu\text{s}$
- 青 シンチレータ側のゲート $1.0\mu\text{s}$
- 緑 SDD側のゲート $1.0\mu\text{s}$

シンチレータのスペクトル比較

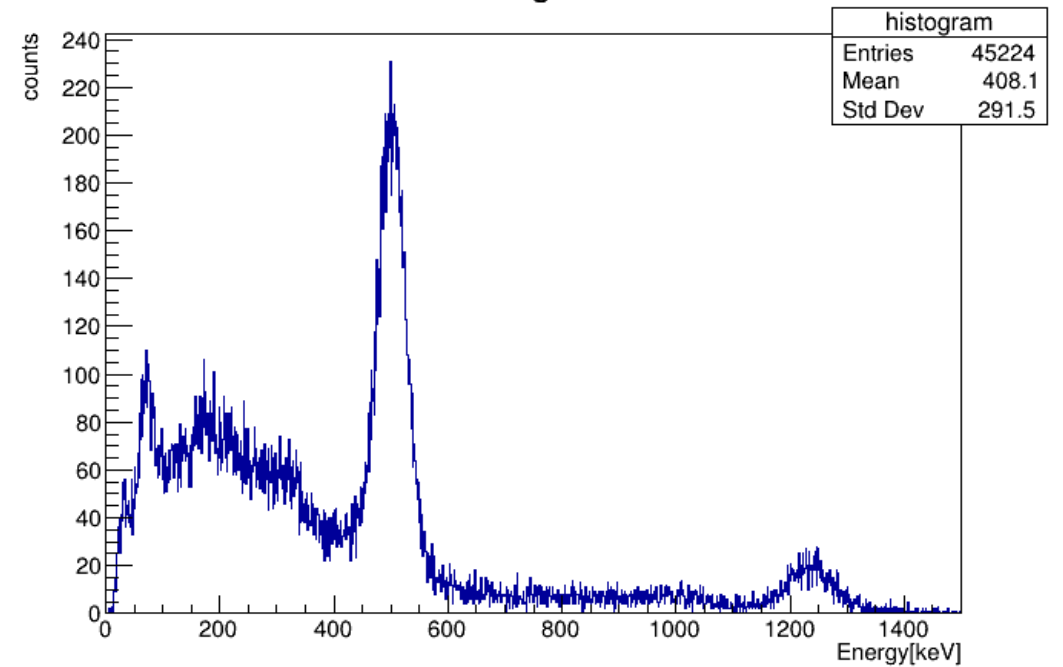
同時計数をとった場合

histogram



同時計数をとってない場合

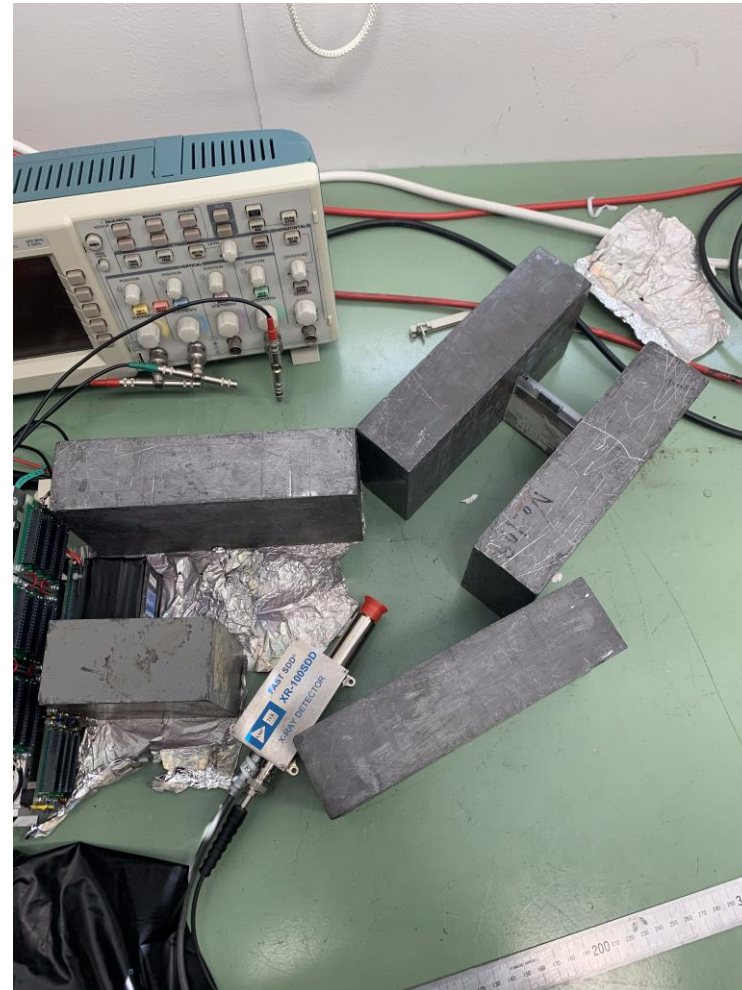
histogram



5. 本実験

コンプトン散乱の測定

線源に ^{133}Ba を用いてコンプトン散乱の測定を行った。
散乱角 45°



この上に暗幕を被せて測定を行った

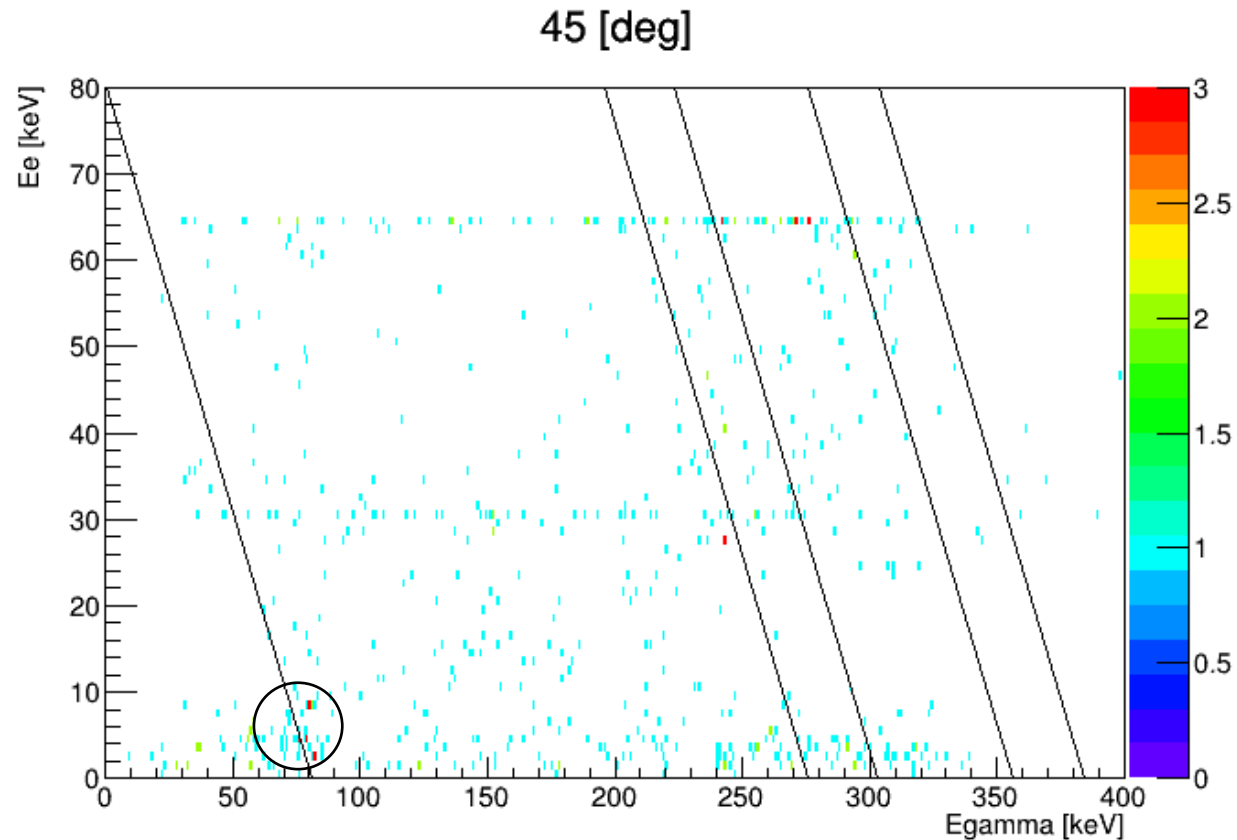
散乱角とエネルギーの対応

| 線源のエネルギー(keV) | 散乱角(deg) | 反跳電子エネルギー(keV) |
|---------------|----------|----------------|
| 81 | 30 | 1.68 |
| | 45 | 3.59 |
| | 60 | 5.95 |
| 356 | 30 | 30.4 |
| | 45 | 60.3 |
| | 60 | 92.0 |

散乱角45°

横軸に散乱ガンマ線のエネルギー、縦軸に反跳電子のエネルギーをとり、計測されたエネルギーを2次元ヒストグラム化

直線は左から $E_e + E_\gamma = 81, 276, 303, 356, 384$ keV



2次元ヒストグラム考察

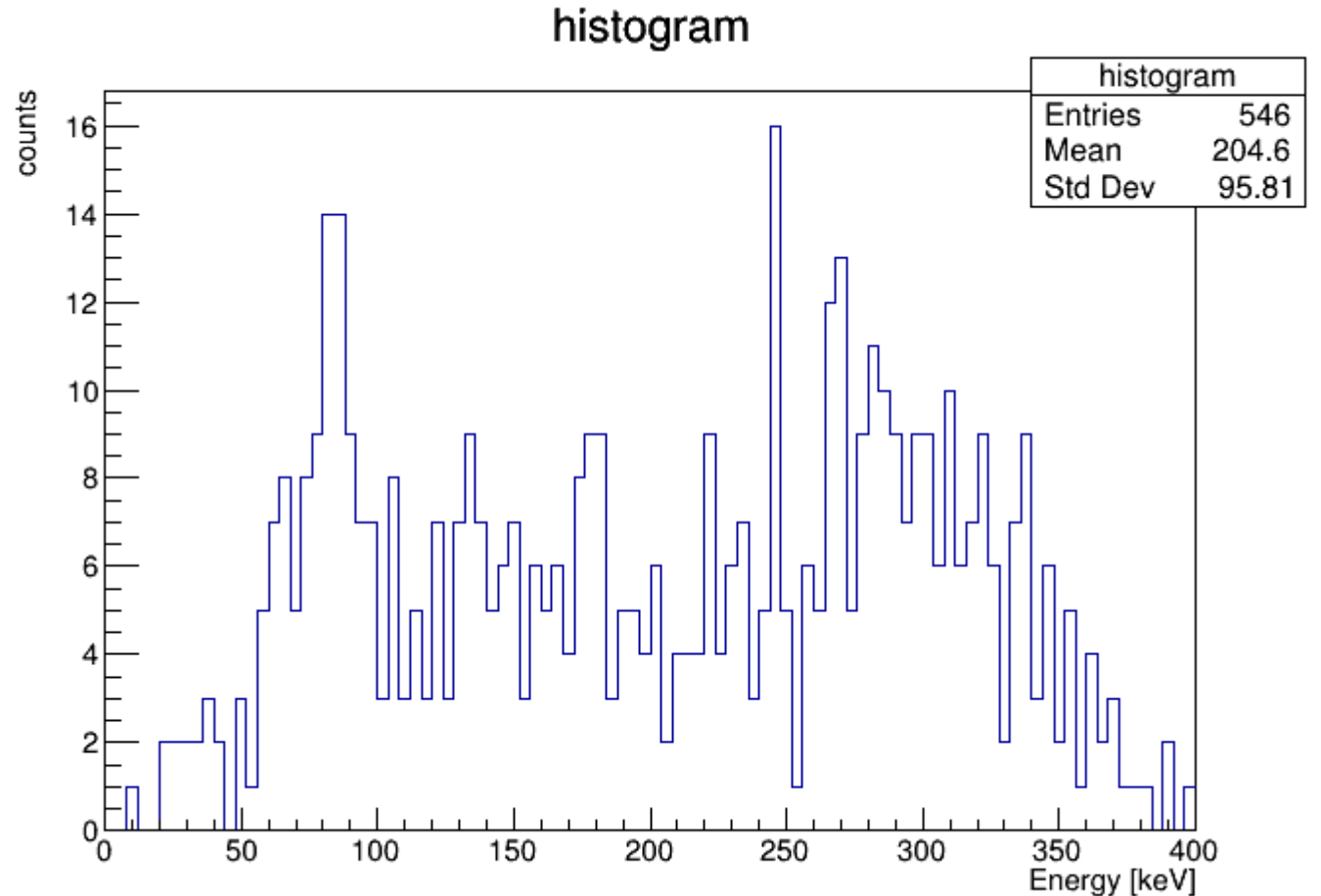
コンプトン散乱→エネルギー保存→イベントは直線上に乗る
角度指定したので、理想的にはそのうちの1点にイベントが集中

得られた2次元ヒストグラムの特徴

- 直線 $E_e = 64\text{keV}$ 付近→SDDのsaturation
- 和81keVの直線にはコンプトン事象と思しきイベントの集団
- 他の直線には(全イベント数が少ないこともあって)どこがコンプトン事象かを特定するのは困難

エネルギーの和とカウント数

横軸に測定された電子、散乱ガンマ線のエネルギーの和、縦軸にそのカウント数を取り、ヒストグラム化
→理想的には入射ガンマ線のエネルギーを中心とする分布になる

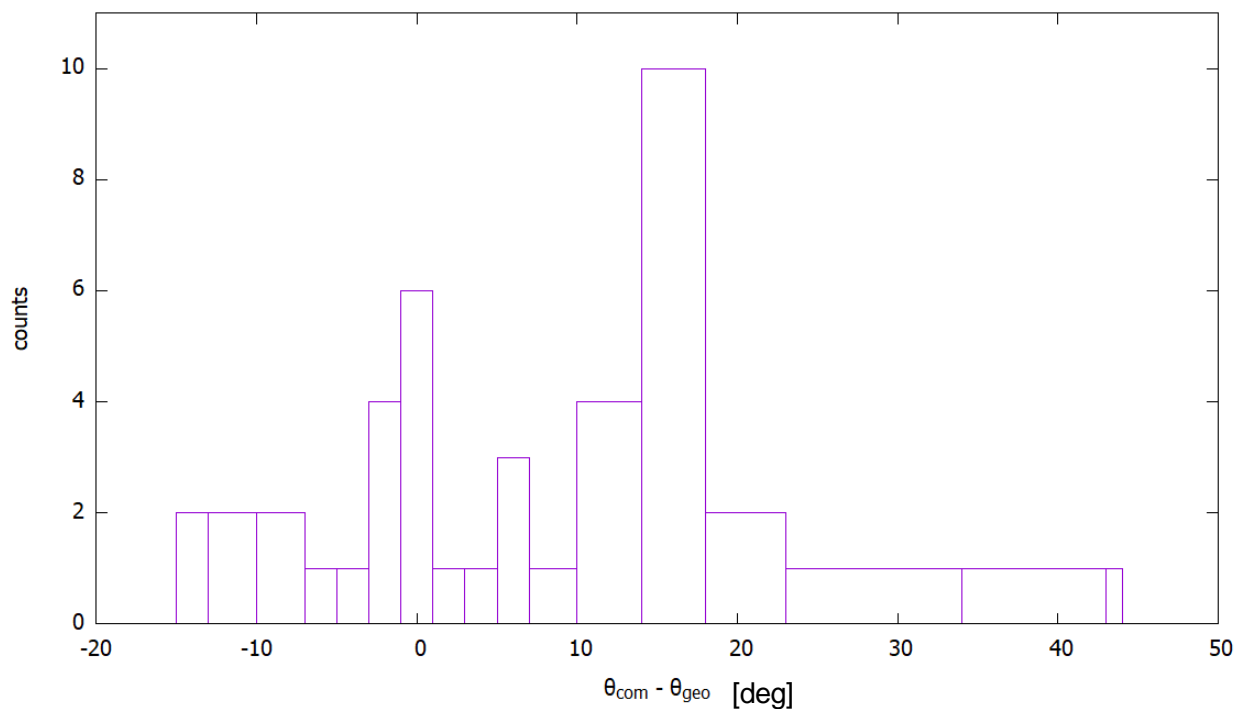


散乱角の決定

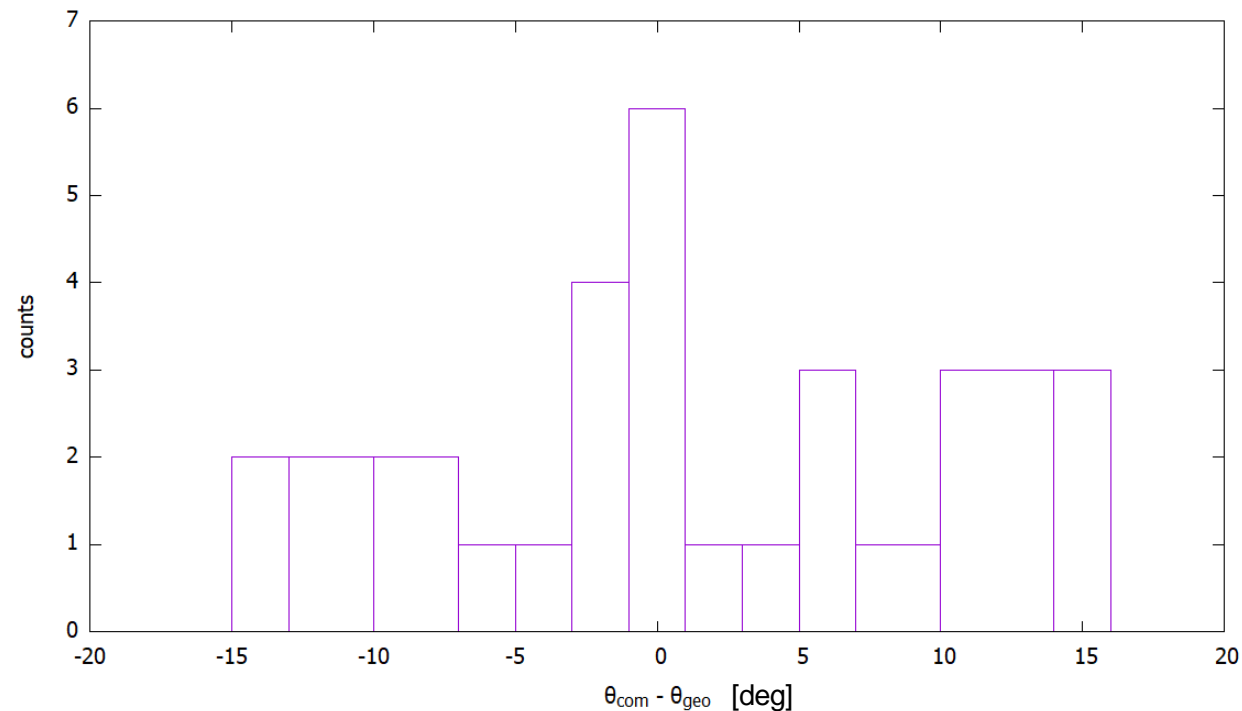
2次元ヒストグラムから81keVのガンマ線によるコンプトン事象を取り出し、
エネルギーから散乱角 θ_{com} を決定

同時に、シンチレータのピクセル、SDD、線源の位置関係から幾何学的に散乱角 θ_{geo} を計算
その差をヒストグラムにした

$E_e < 15\text{keV}$ となる事象



$E_e < 6\text{keV}$ となる事象



散乱角が適切に決定できない要因

- シンチレータのエネルギーの統計誤差

$$\theta = \cos^{-1} \left(1 - m_e c^2 \left(\frac{1}{E_\gamma} - \frac{1}{E_e + E_\gamma} \right) \right) \rightarrow \delta(\cos \theta) = m_e c^2 \left(-\frac{1}{(E_e + E_\gamma)^2} \delta E_e + \left(\frac{1}{E_\gamma^2} - \frac{1}{(E_e + E_\gamma)^2} \right) \delta E_\gamma \right)$$

- 位置分解能の限界

シンチのピクセル、シリコン、線源、いずれも点として扱ったことによる

- 電子の束縛エネルギーを無視できない

コンプトン散乱の式は自由電子との作用

実際は原子核の束縛エネルギーが(低エネルギーガンマ線ほど)無視できない

- $E_e = 7 \sim 10 \text{keV}$ 付近の事象

由来は不明

まとめ

- シリコンの厚さが小さく、高エネルギーのガンマ線の検出効率は低い
→81keVの再構成には数倍の測定時間が必要。イベント数が少なかった。
- 個々の事象からの散乱角の決定もうまくできなかったとは言えない。

ご清聴ありがとうございました