

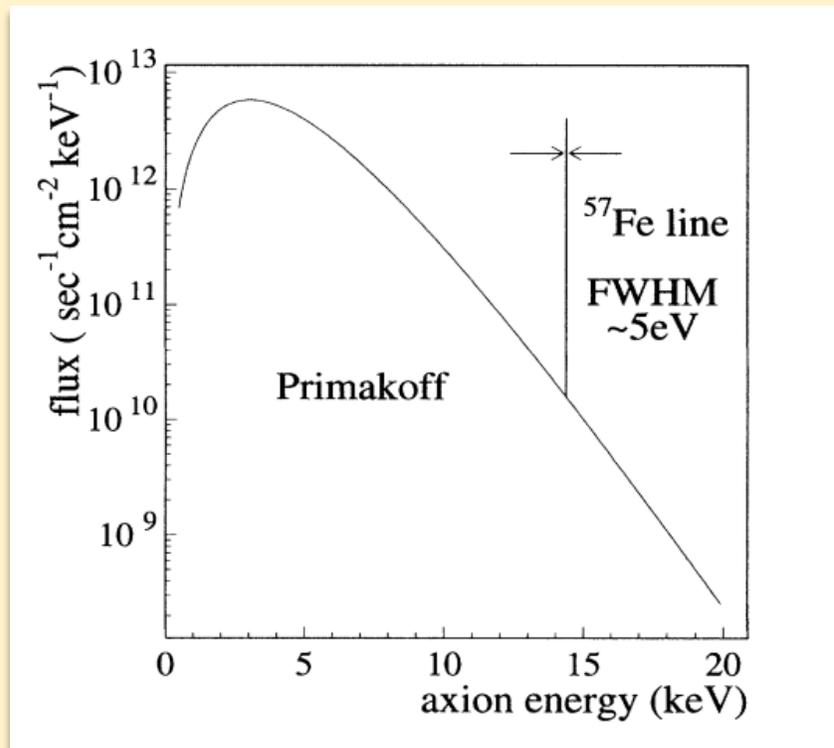
PINフォトダイオードによる Fe-57を用いたアクシオン探索

課題研究P6 穴澤・吉村

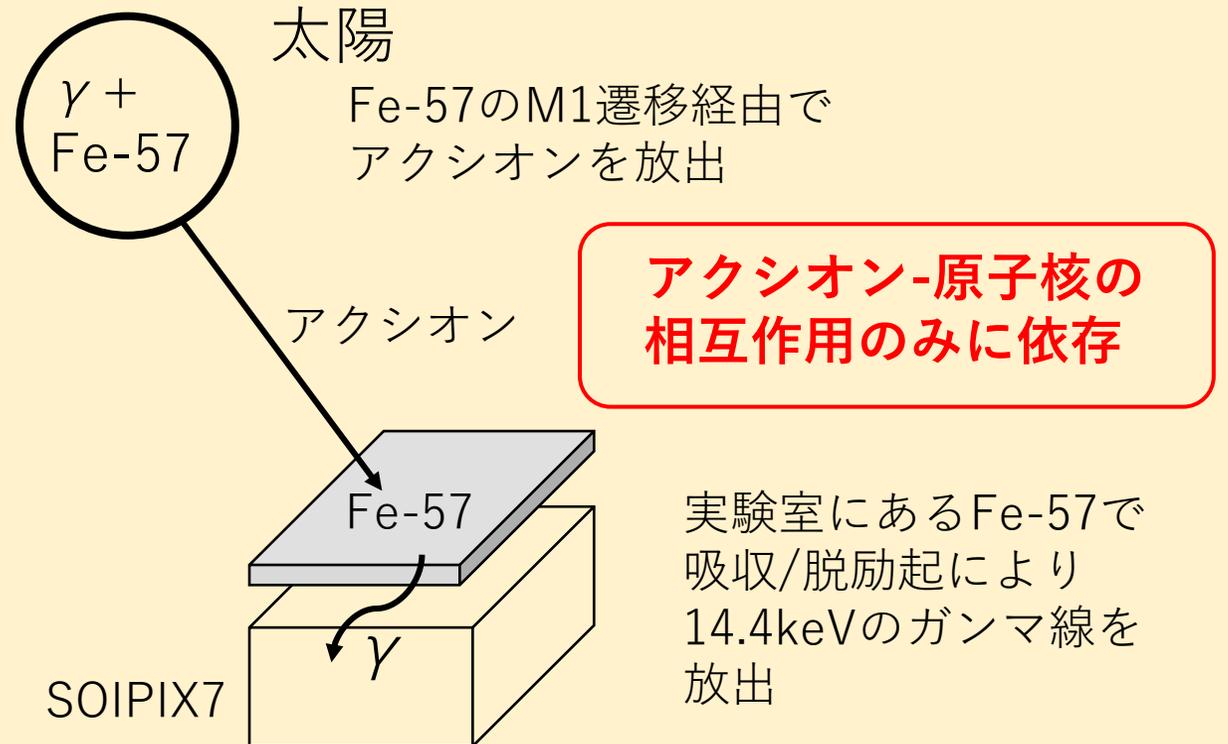
アクシオン

- 暗黒物質(ダークマター)の候補粒子の1つ

太陽アクシオンの予想スペクトル



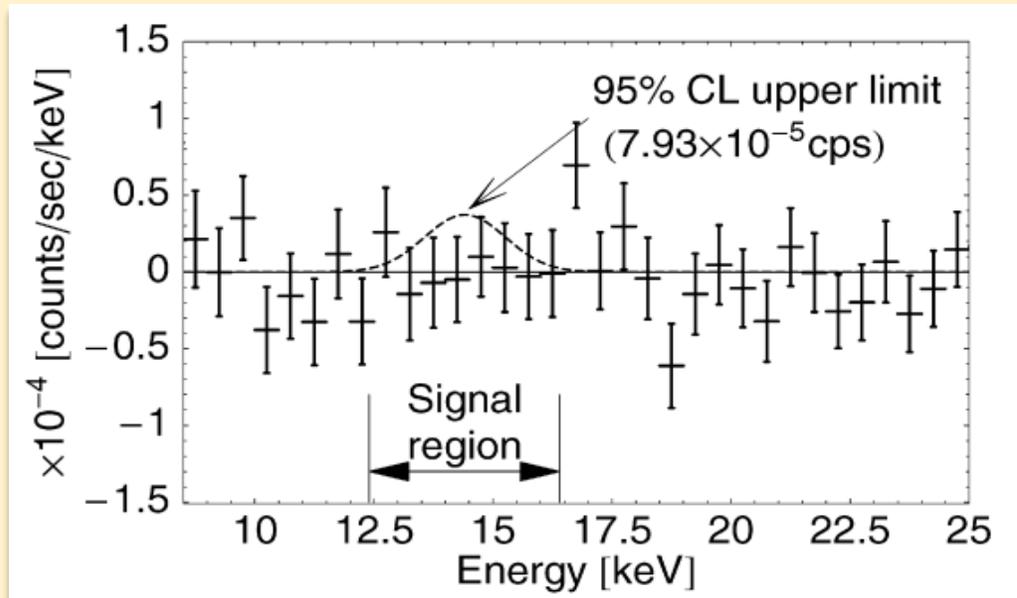
[S.Moriyama, 1995, Phys.Rev.Lett. 75, 18]



先行研究 (Fe-57+PINフォトダイオード)

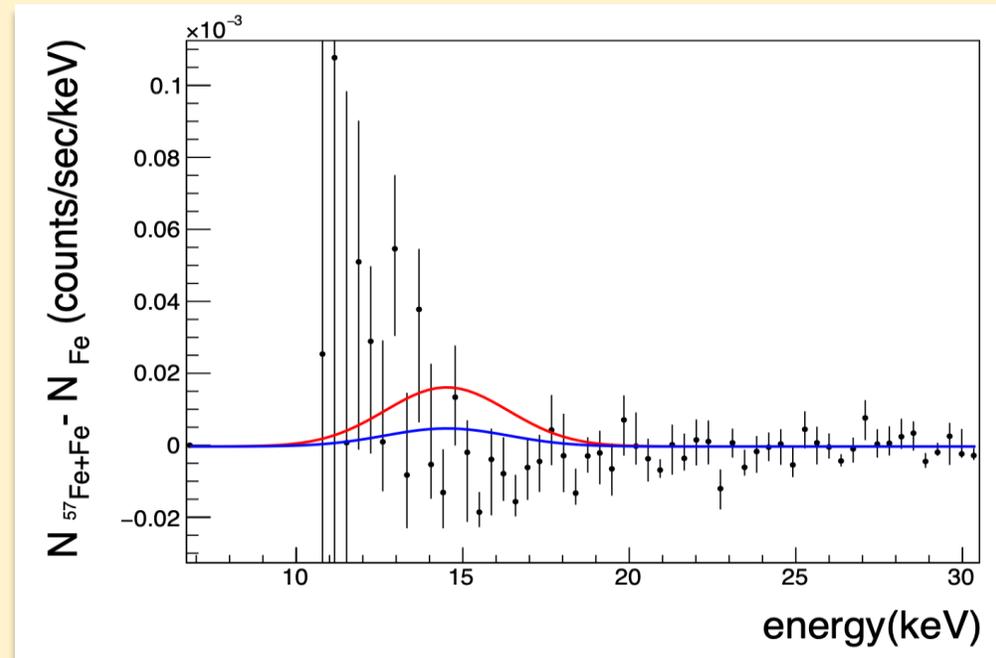
- Fe-57箔の測定データから、通常Fe箔の測定データを差し引いたもの

PINフォト × 2 [10^6 s] $\cdots m_A < 216$ eV



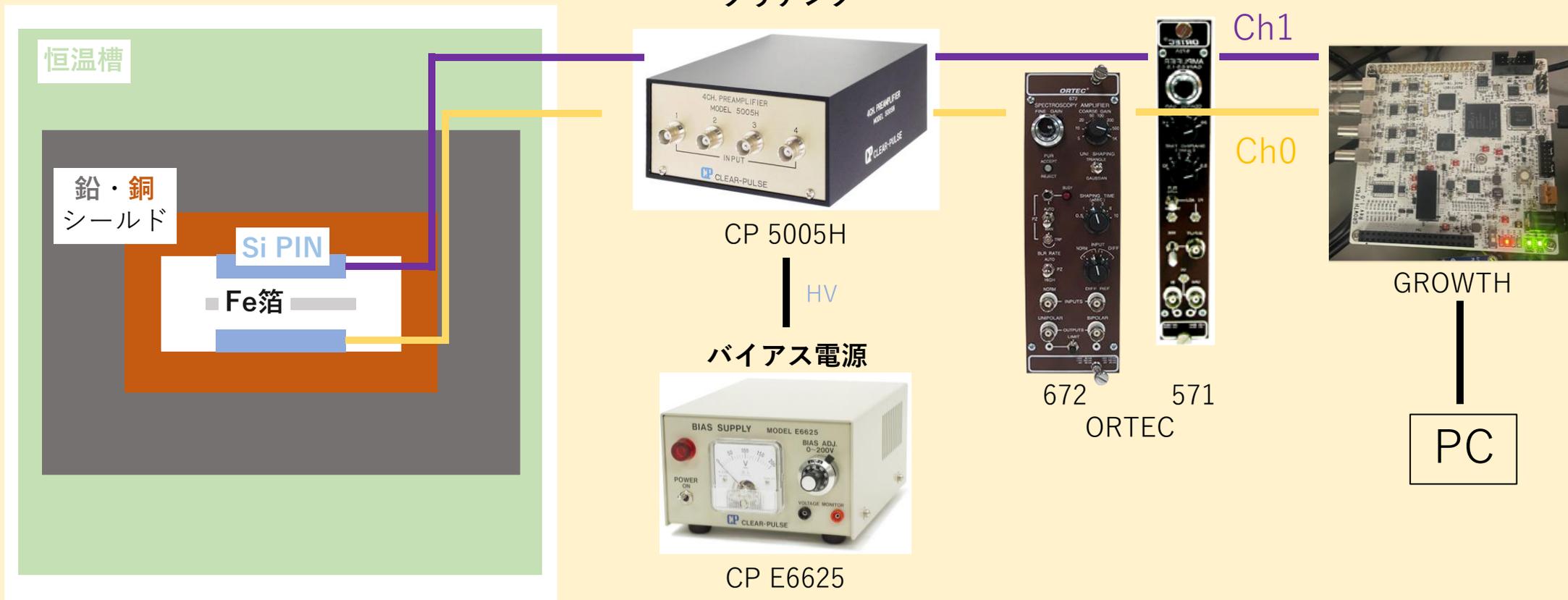
[T.Namba, 2007, Phys.Lett.B, 645,398]

PINフォト [10^4 s] $\cdots m_A < 428.3$ eV



[島田・乃一, 神戸大学2018年度卒業研究, 32]

実験セットアップ

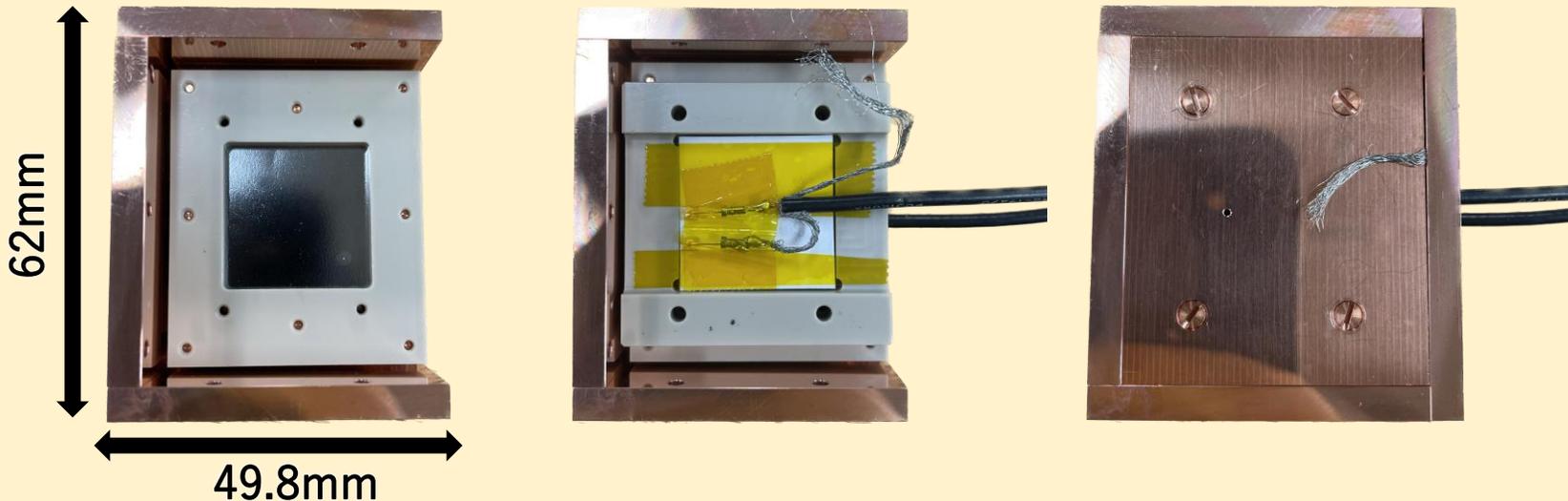
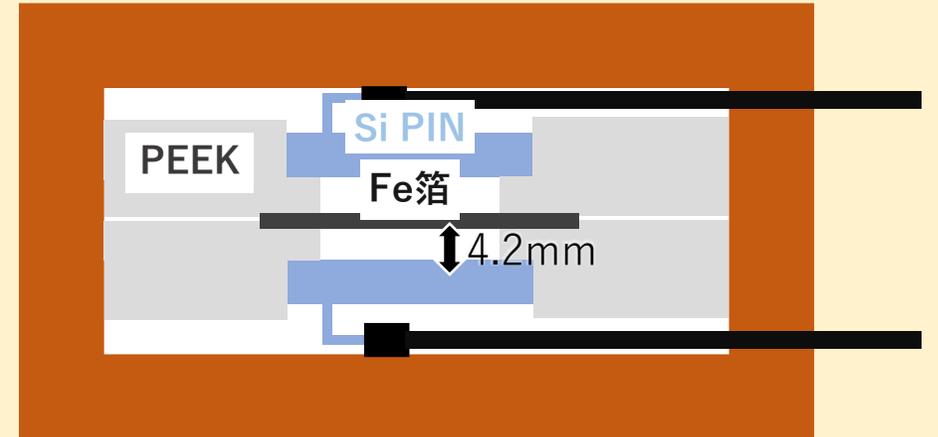


PINフォトダイオード・Fe箔

- PINフォトダイオード：S3204-09
- 通常Fe箔：30mm × 30mm × 0.02um
2枚重ね

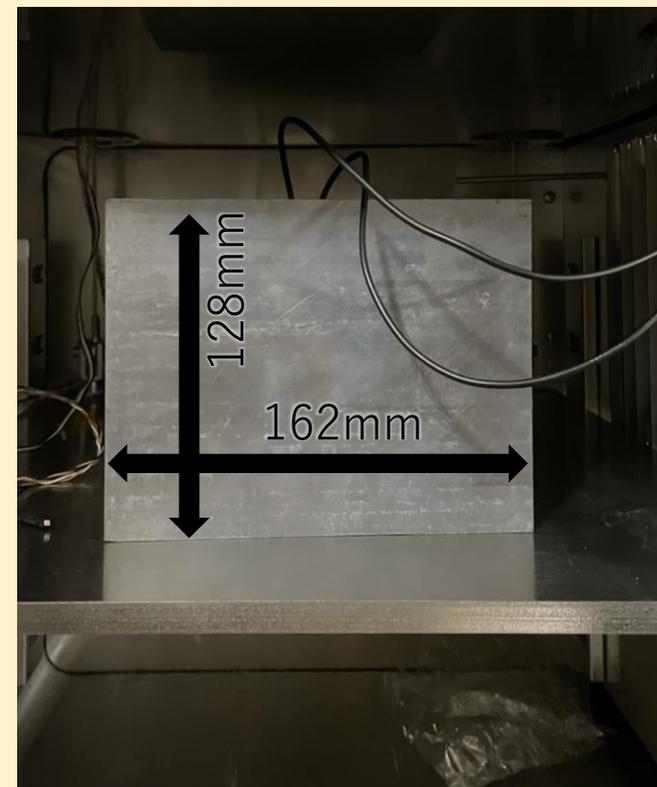
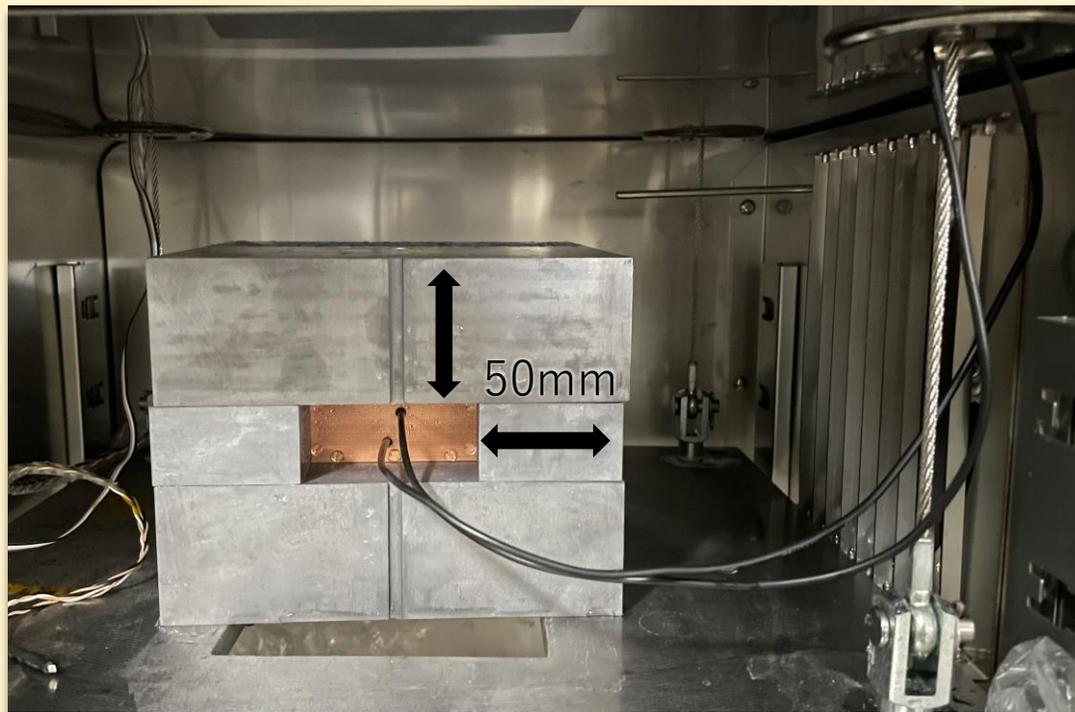
PD種類	受光面積[mm]	空乏層厚[mm]
S3204-09 × 2 (本実験)	18 × 18	0.3
S3584-06 × 2 (難波)	28 × 28	0.5
S3590-08 (島田・乃一)	10 × 10	0.3

C1020
(無酸素銅)



銅・鉛シールド・恒温槽

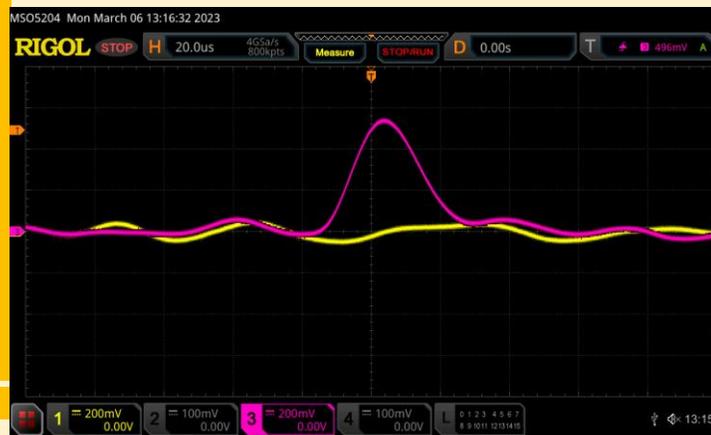
- C1020(無酸素銅)による厚さ5mmのシールド
- 純鉛による厚さ50mmのシールド
- 恒温槽(MC-812)：-60°C



プリアンプ・シェーピングアンプ

- プリアンプ：5005H（4chで増幅可能）
- シェーピングアンプ：571（上側のPD）
：672（下側のPD）

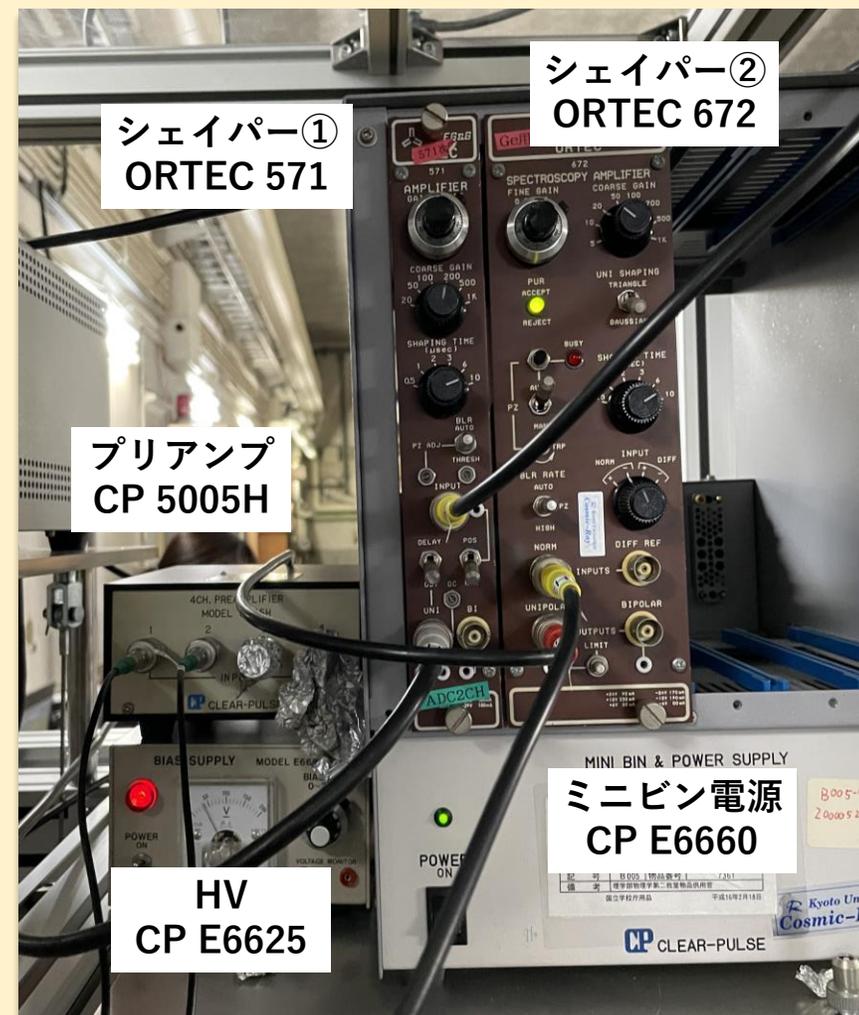
上側PD



下側PD

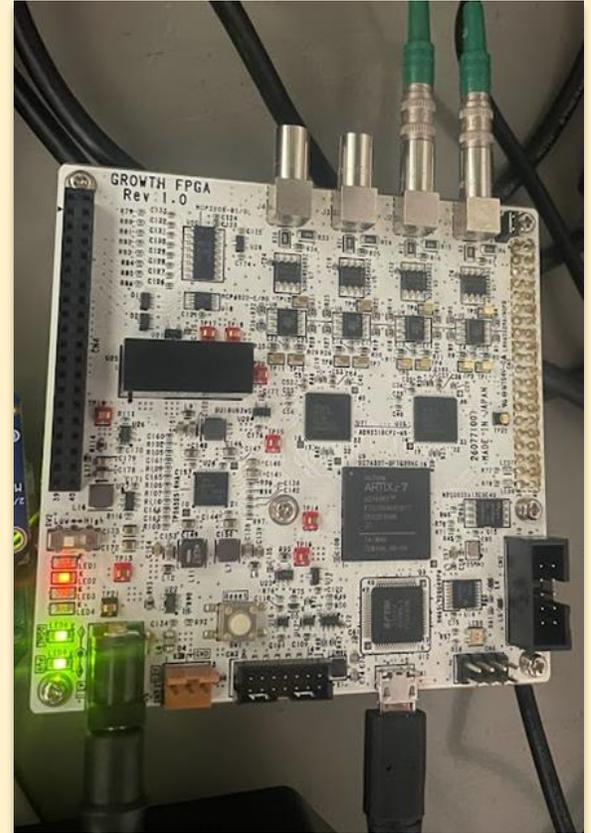


- Am-241による59.54keVの γ 線に対して約540mVを示した



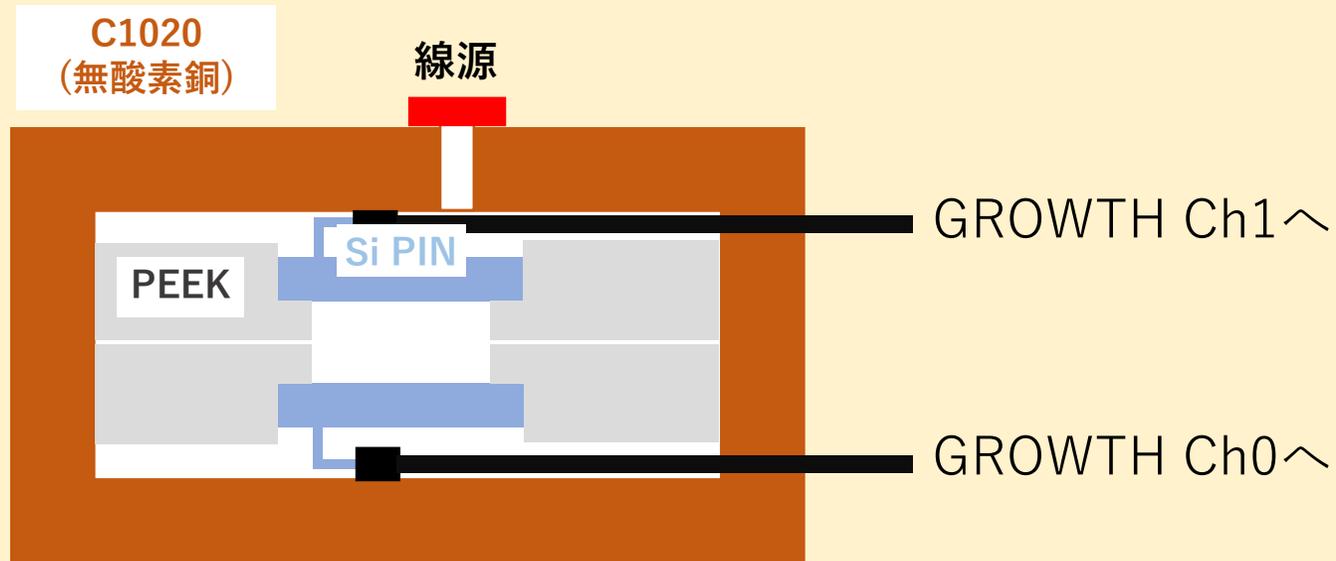
GROWTH-DAQボード

- 雷雲ガンマ線検出のために京都大学榎戸先生によって開発されたFPGAを備え、4ch同時に高速ADCを処理できるボード
- 50MHzでの波形取得が可能
⇒20nsごとにイベントを計測できる
- イベントごとにchannel情報、phaMax(最大波高値)などのデータが保存される



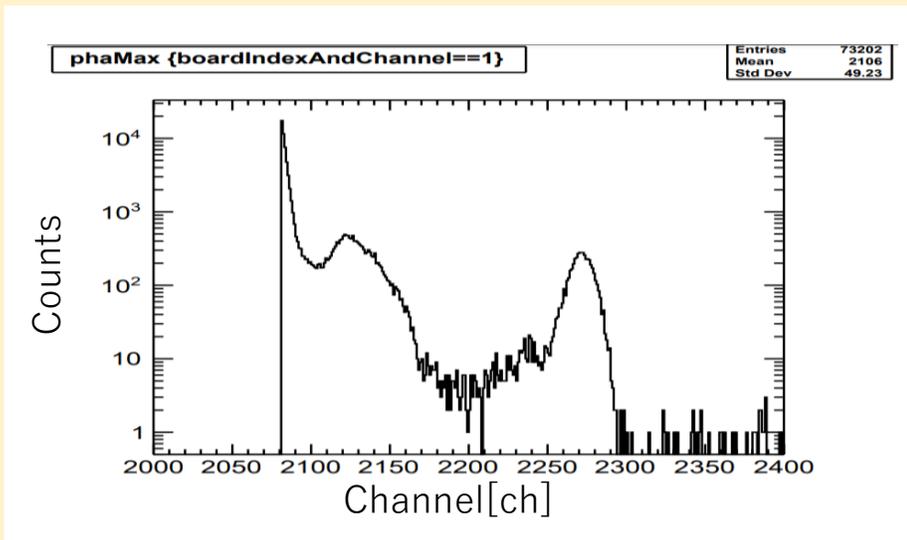
エネルギー較正

- GROWTH Ch0, 1のエネルギー較正
- Am-241(17.7keVのX線, 59.5keVの γ 線), Cd-109(22.1keVのX線)を測定
⇒得られたスペクトルをガウシアンでFitした

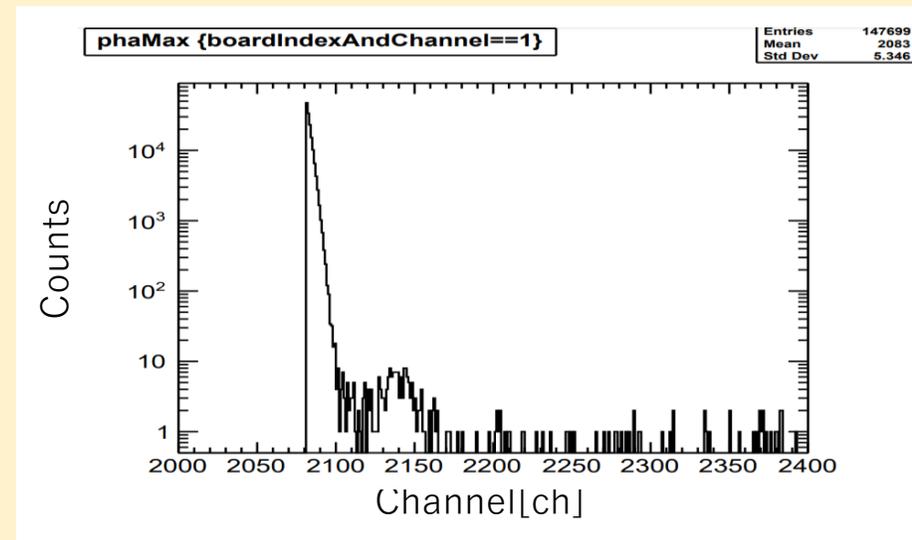
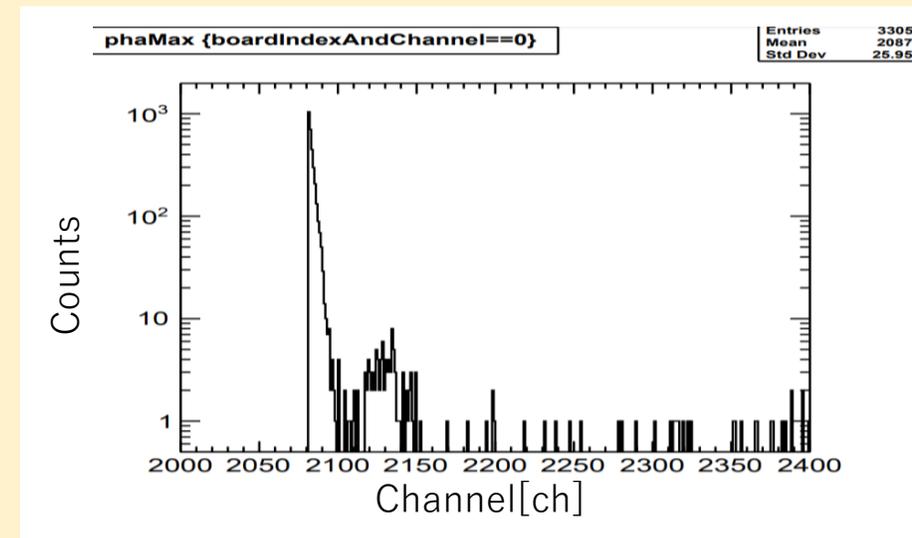
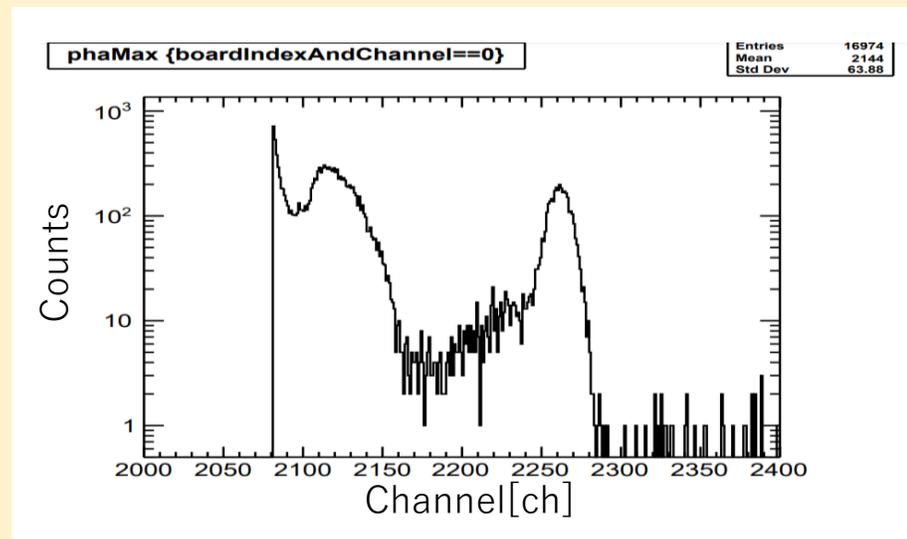


エネルギー較正

Am-241 (real time 500s)

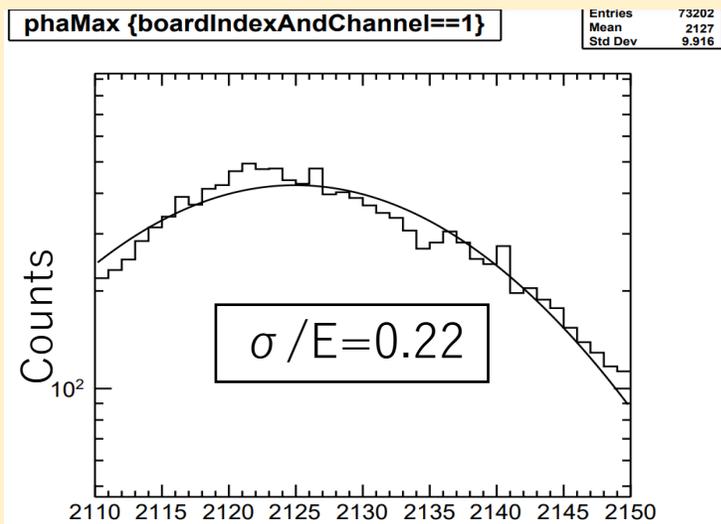
上側PD
(Ch1)

Cd-109 (real time 500s)

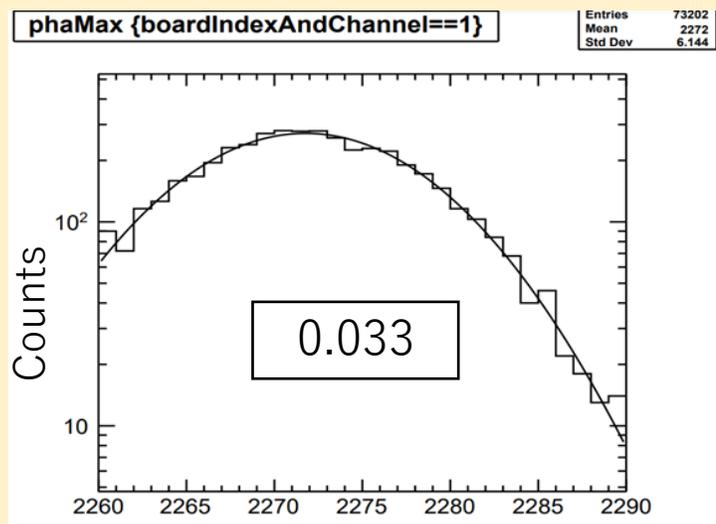
下側PD
(Ch0)

エネルギー較正

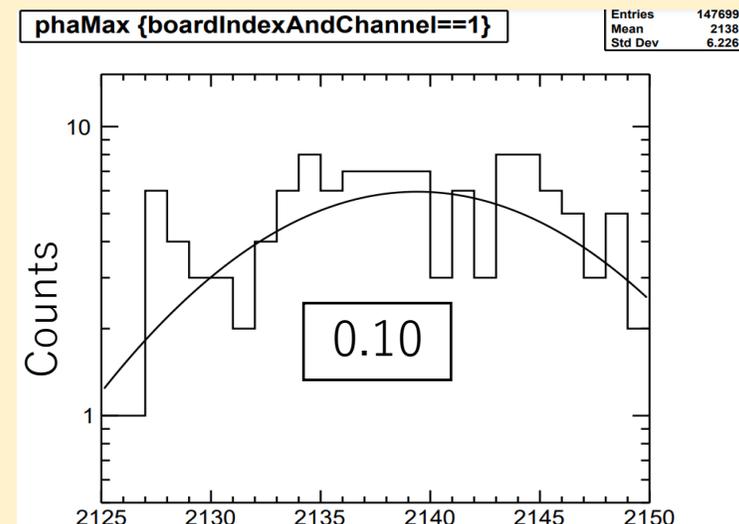
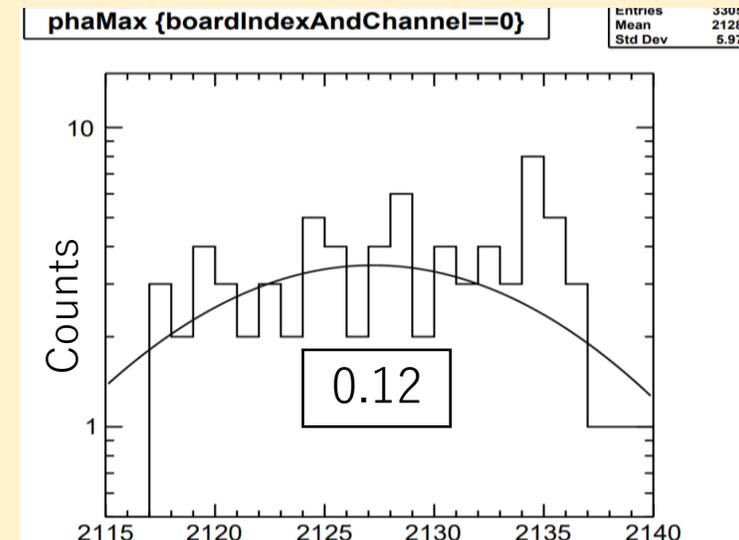
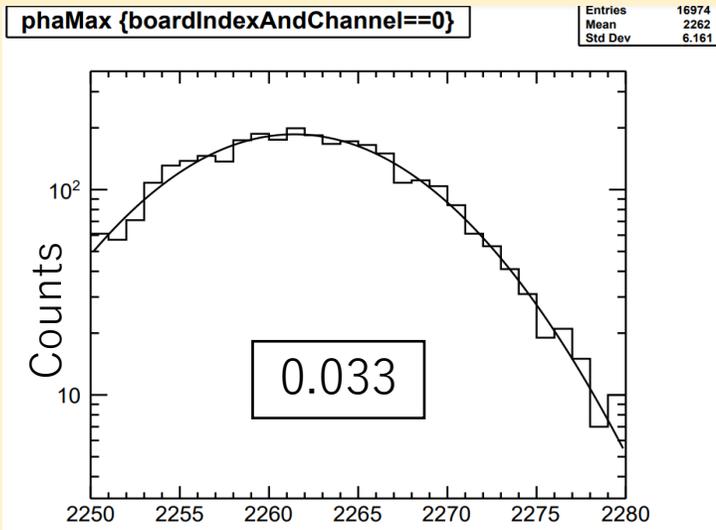
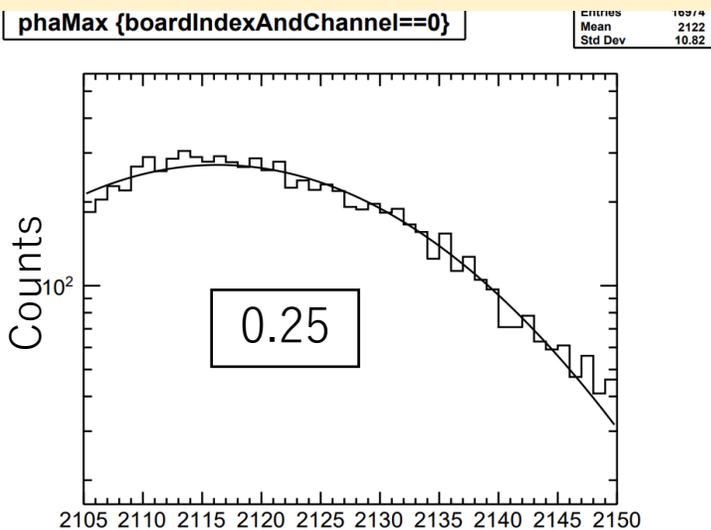
17.7keV (Am-241)



59.5keV (Am-241)

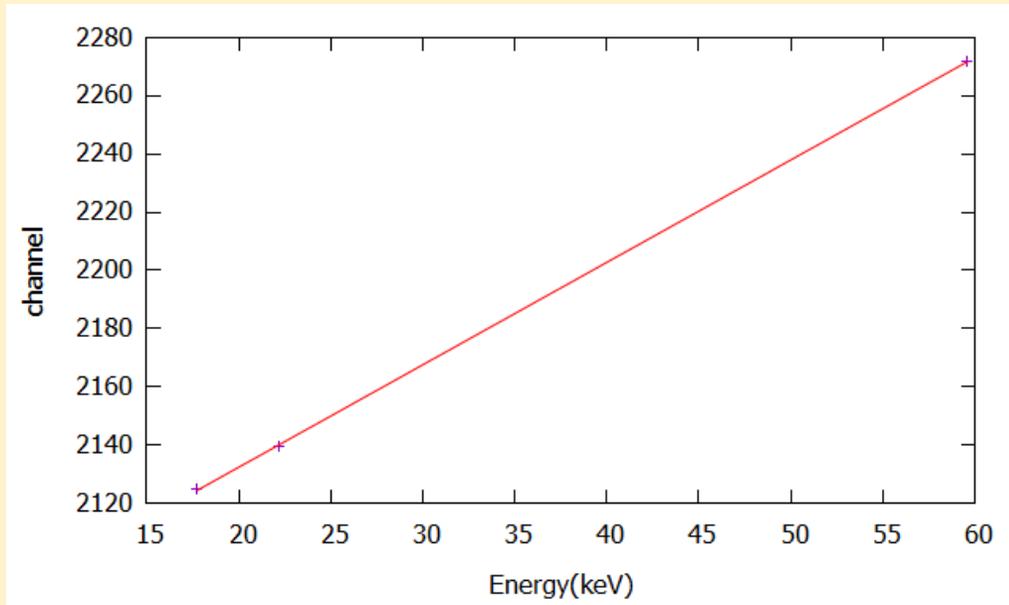


22.1keV (Cd-109)

上側PD
(Ch1)下側PD
(Ch0)

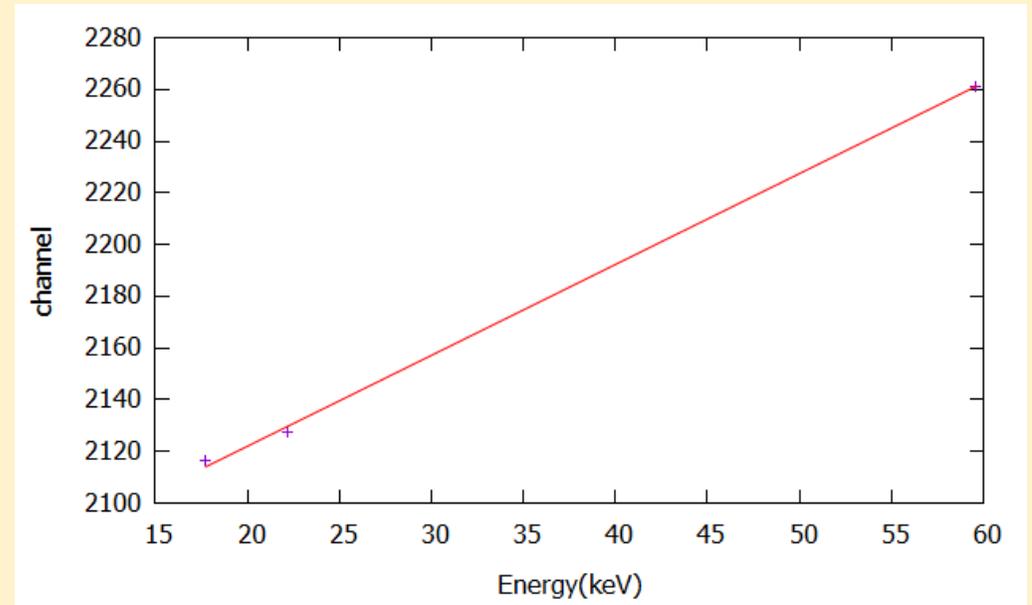
エネルギー較正

上側PD(Ch1)



$$[\text{ch}] = 3.52 \times [\text{keV}] + 2061.69$$

下側PD(Ch0)

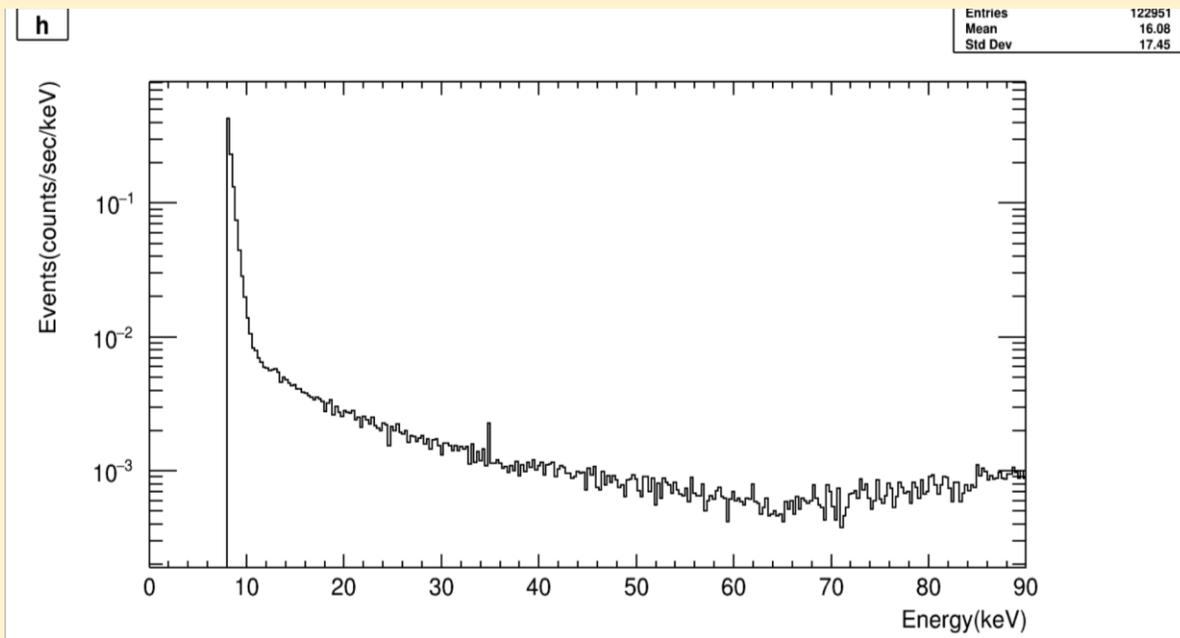


$$[\text{ch}] = 3.51 \times [\text{keV}] + 2051.69$$

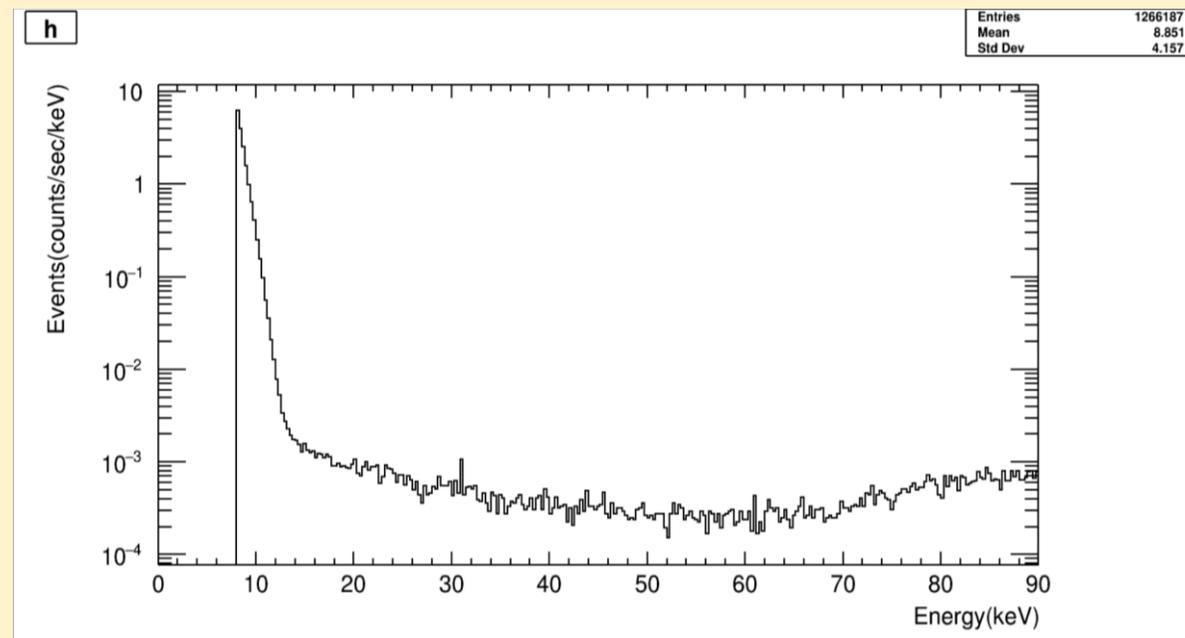
通常Fe箔測定

- 測定時間(real time) : 252,000s
- 測定環境 : -60°C

上側PD(Ch1)

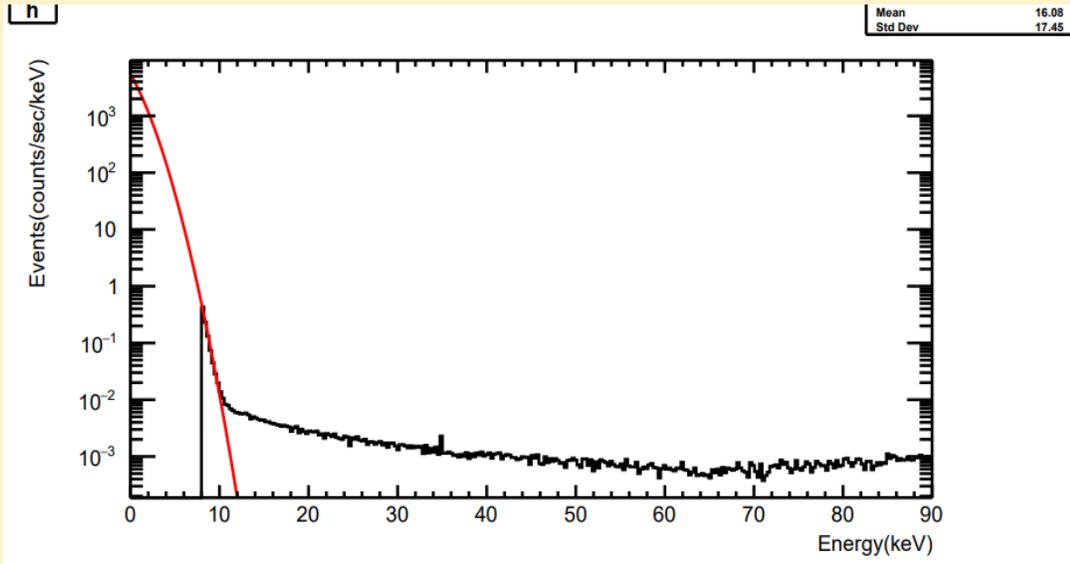


下側PD(Ch0)

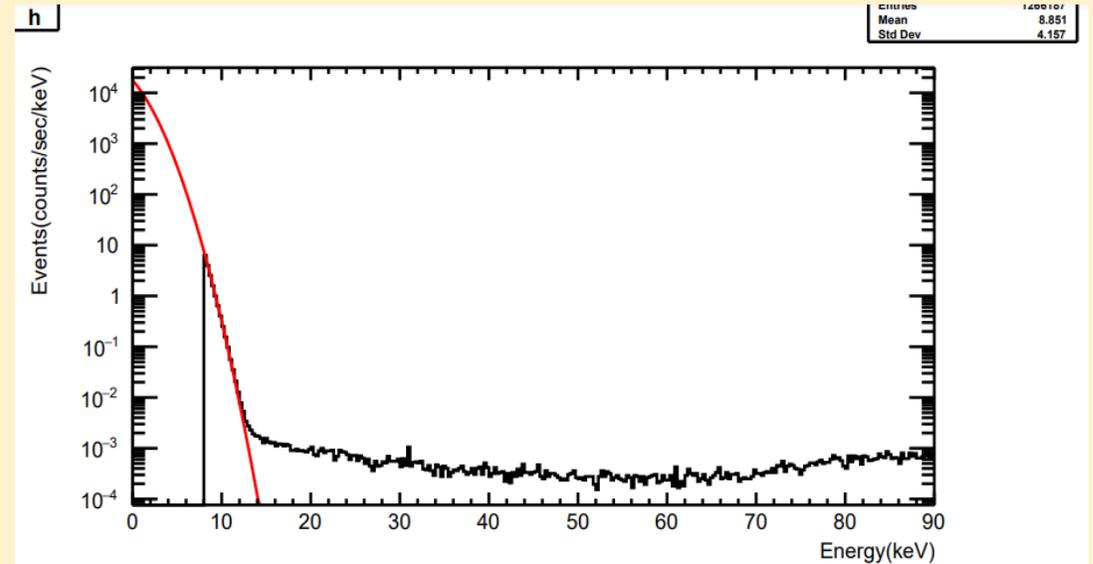


14 解析 (ホワイトノイズ除去)

上側PD(Ch1)



下側PD(Ch0)



14.4 ± 2σ keV(Signal region)におけるBG events

	Events [counts/day]	White noise	BG events [counts/day]
上側PD(Ch1)	3.97e+3	195	3.77e+3
下側PD(Ch0)	1.04e+4	6.82e+3	3.58e+3

解析 (BG rateの比較)

- BG rate[counts/day]: $R_{BG} = \frac{1}{\varepsilon} \int_{14.4-2\sigma}^{14.4+2\sigma} events \cdot dE$

$\pm 2\sigma$: Signal region (Am241の59.54keV)

ε : 検出効率 0.13/2 (L=4.2mm)

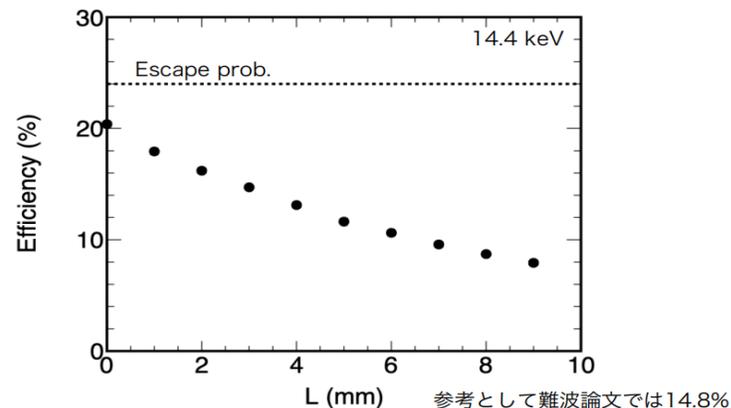
ISAI実験XRPIX(2枚)のシミュレーションを使う

$$\text{上側PD: } R_{BG\text{上}} = \frac{1}{0.065} \times 3.77 \times 10^3 = 5.80 \times 10^4$$

$$\text{下側PD: } R_{BG\text{下}} = \frac{1}{0.065} \times 3.58 \times 10^3 = 5.51 \times 10^4$$

- 本実験: $R_{BG} = R_{BG\text{上}} + R_{BG\text{下}} = \mathbf{1.13 \times 10^5}$
- 先行研究(難波さん): $R_{BG} = \frac{1}{0.148} \times 7.76 \times 10 = \mathbf{5.18 \times 10^2}$
 \Rightarrow 先行研究に対しBG rateが約200倍

検出効率のシミュレーション



アクシオンの質量

- アクシオンの事象数 N_γ

$$N_\gamma = (\text{{}^{57}\text{Fe} 箔測定値}) - (\text{通常Fe 箔測定値})$$

- アクシオンの地上での励起レート R_a

$$R_a = \frac{N_\gamma}{M_{57} \cdot \gamma_E \cdot \epsilon}$$

- R_a と崩壊定数 f_a の関係

$$R_a = 3.0 \times 10^2 \text{ day}^{-1} \text{ kg}^{-1} \left(\frac{10^6 \text{ GeV}}{f_a} \right)^4 C^4$$

- アクシオンの質量 m_a

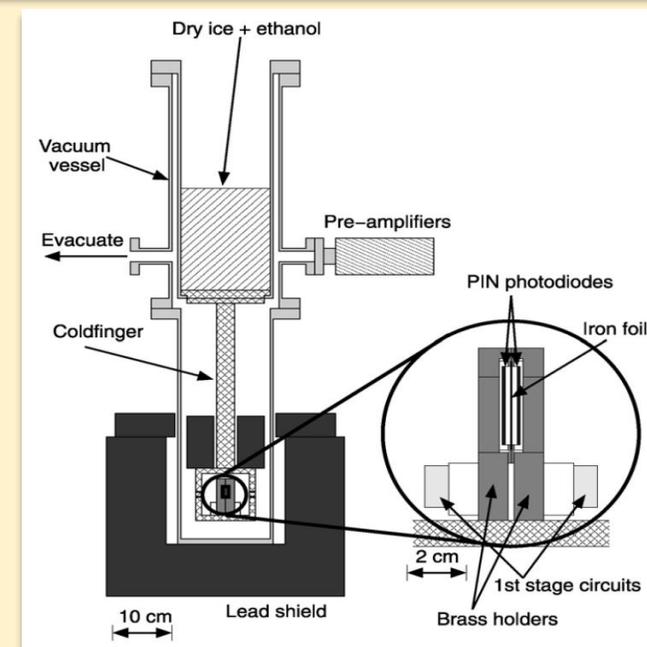
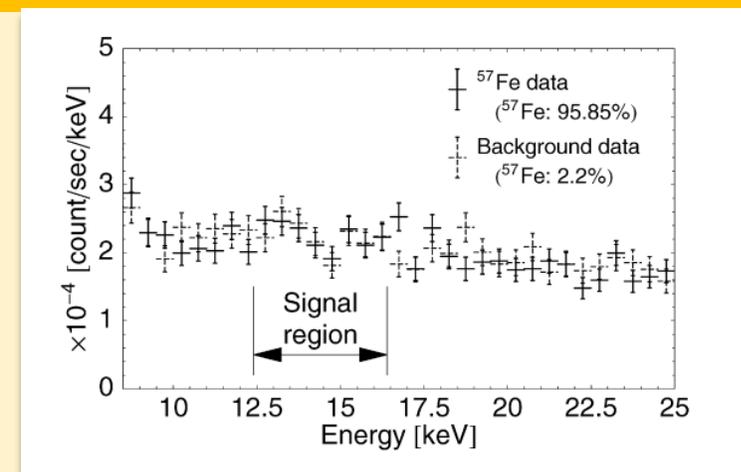
$$m_a = 1 \text{ eV} \frac{\sqrt{z}}{1+z} \frac{1.3 \times 10^7}{f_a / \text{GeV}}$$

N_γ の上限値(95%CL)の制限をかけることでアクシオン質量の上限を見積もることができる

N_γ : アクシオンの事象数
 M_{57} : Fe-57の質量
 γ_E : Fe-57からの14.4keV γ 線放出割合
 ϵ : 14.4keV γ 線検出効率
 C : 核構造のパラメータ
 z : アップクォークとダウンクォークの質量比

課題・改善点(先行研究と比較)

- 放射線BG rateが約200倍
 - 各binのevents[counts/day]が 10×2 倍
 - Signal region $\pm 2\sigma$ ($\sim 4.0\text{keV}$ と 2.0keV)が2倍
 $\Rightarrow 10 \times 2 \times 2 = 40$ 倍
 - 鉛の遮蔽率 (**10cm**と5cm)
- 検出効率 ($\sim 13\%$ と14%)
 - モンテカルロを振っていないので正確でない
 - PDの受光面積 (**$18 \times 18\text{mm}$** と $25 \times 25\text{mm}$)
 - PDと鉄箔の距離 (**4.2mm** と 2mm)
- エネルギー較正・分解能
 - 前段回路を用いると向上?
- Fe-57箔を導入できなかった
- 定量的な解析への見通しが甘かった

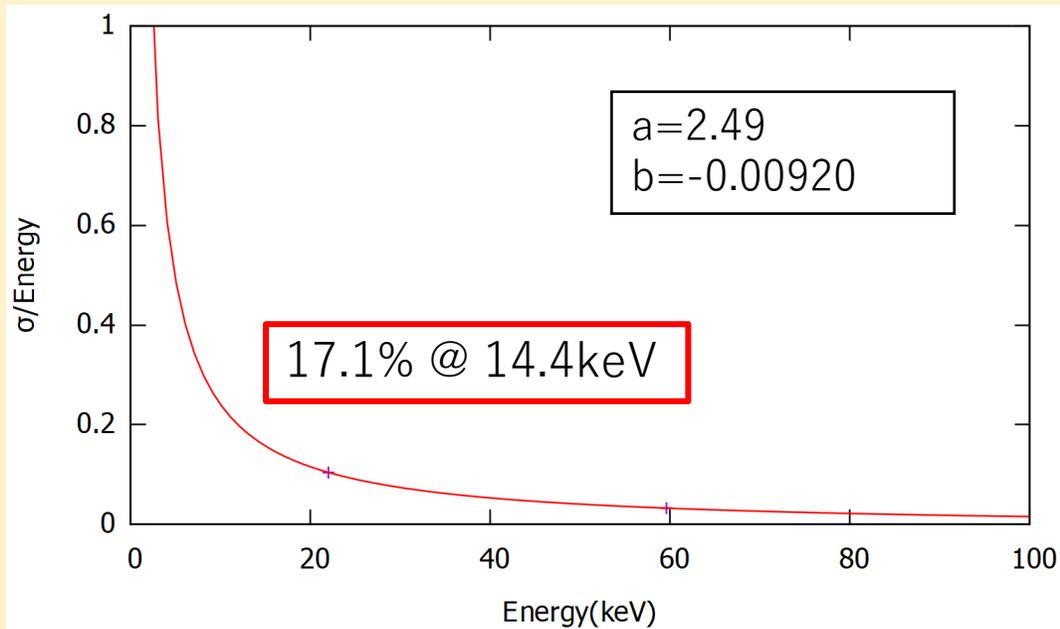




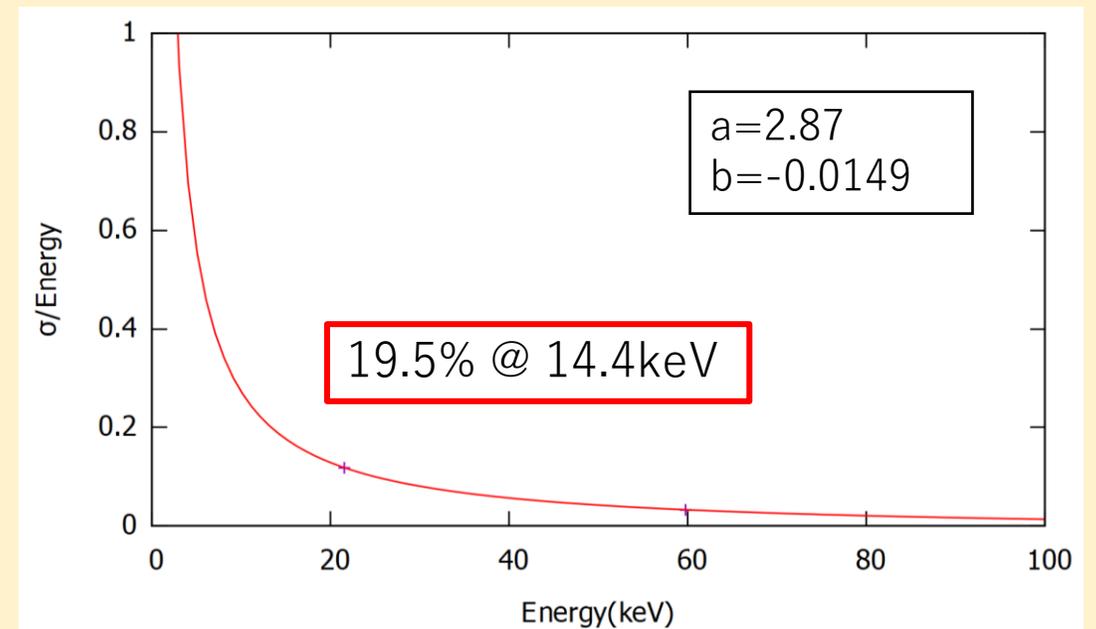
エネルギー分解能(島田さんのものに準ずると)

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{a}{E} + \frac{b}{\sqrt{E}} \text{ でfit}$$

上側PD(Ch1)



下側PD(Ch0)



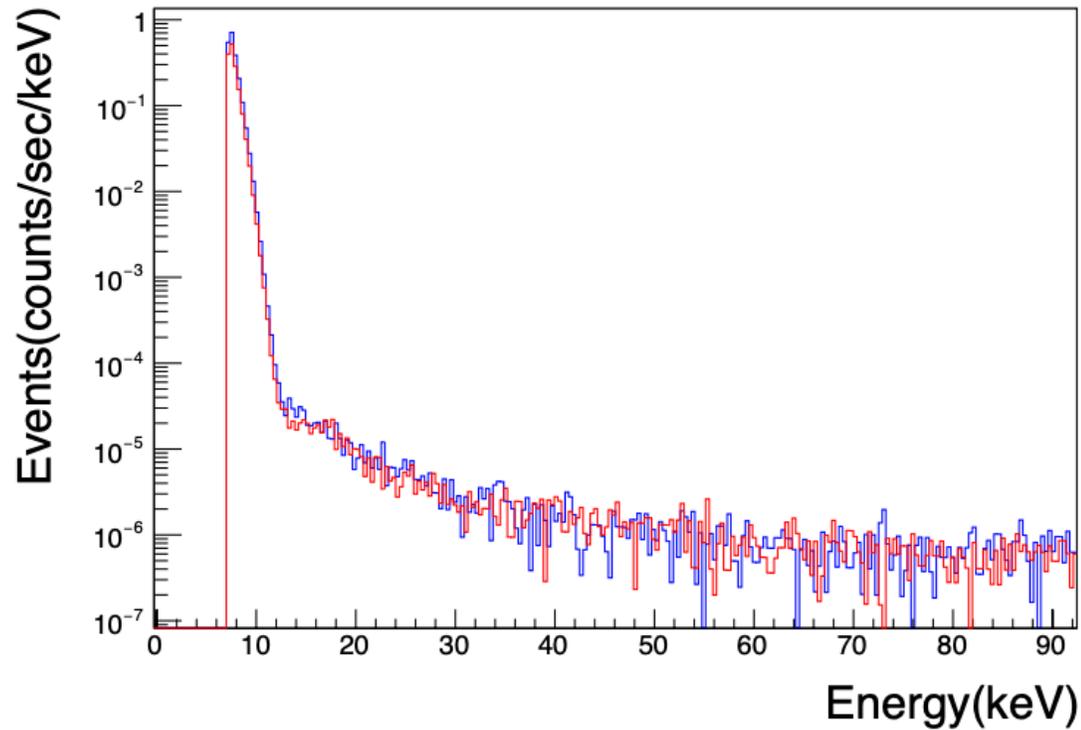


図 4.4 ^{57}Fe + 通常 Fe(singal:赤) のスペクトルと通常 Fe(background:青) のスペクトル。Threshold は 7.582 keV。

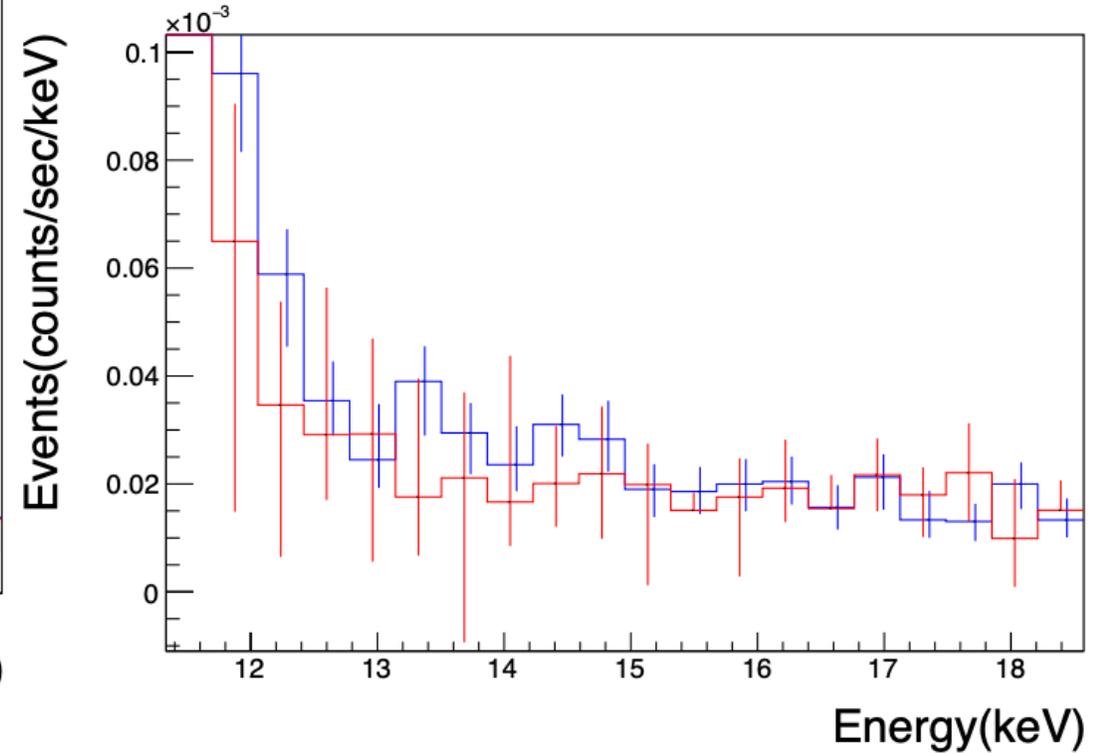


図 4.5 4.4 のグラフの 14.4 keV 付近のスペクトルデータ

鉛の遮蔽率

遮へい材の厚さと放射線の減衰値 (単位: cm)

核種 \ 遮へい材	鉛		鉄		コンクリート	
	半価層	1/10 価層	半価層	1/10 価層	半価層	1/10 価層
²⁴ Na	1.7	5.6	—	—	—	—
⁶⁰ Co	1.2	4.0	2.0	6.7	6.1	20.3
¹²⁴ Sb	1.4	4.5	—	—	7.0	23.0
¹³¹ I	0.7	2.4	—	—	4.6	15.3
¹³⁷ Cs	0.7	2.2	1.5	5.0	4.9	16.3
¹⁸² Ta	1.2	4.0	—	—	—	—
¹⁹² Ir	0.6	1.9	1.3	4.3	4.1	13.5
¹⁹⁸ Au	1.1	3.6	—	—	4.1	13.5
²²⁶ Ra	1.3	4.4	2.1	7.1	7.0	23.3

半価層: 放射線の強さ (線量率) を1/2に弱める遮へい体の厚さ。1/10価層: 放射線の強さを1/10に弱める遮へい体の厚さ。

「適用」 例えば、半価層の3倍の厚さがあれば、放射線の強さは、 $1/2 \times 1/2 \times 1/2 = 1/8$ に弱めることができる。

ICRP Pub.21, 体外線源からの電離放射線に対する防護のためのデータ(1971).