

2025年2月19日

# P6 SDなんちゃら最終発表

指導教員：鶴さん  
TA：出口さん  
坂本洸  
戸澤諄也





## 目次

- 01 研究の目的
- 02 実験原理
- 03 実験方法
- 04 実験結果
- 05 今後

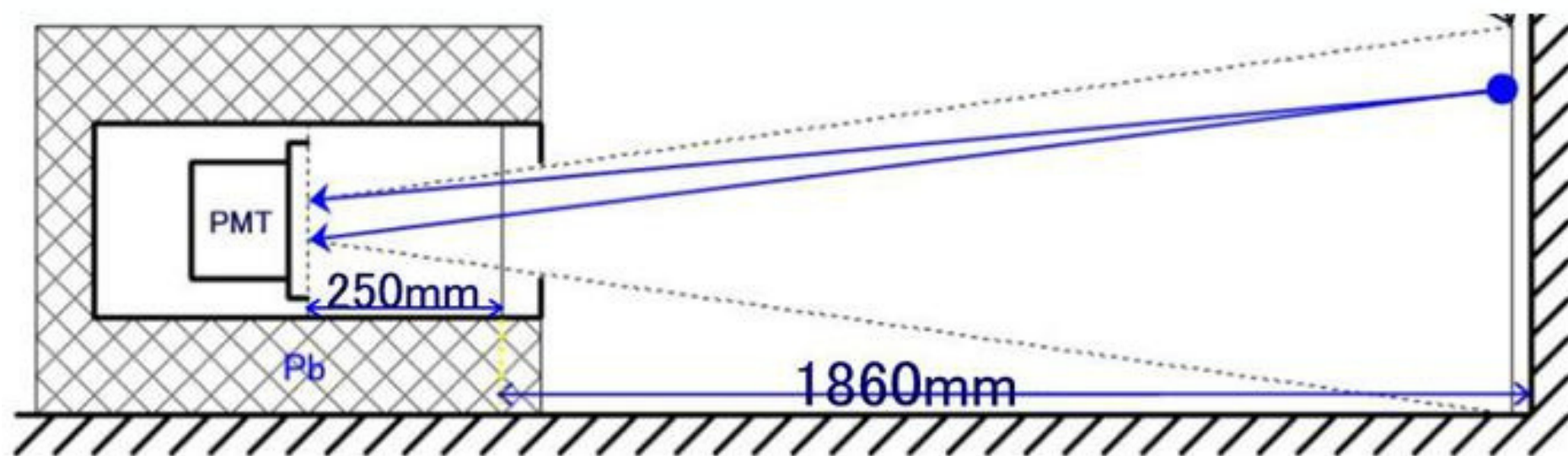
01

## 研究の目的

01

### 宇宙線の入射位置を知る

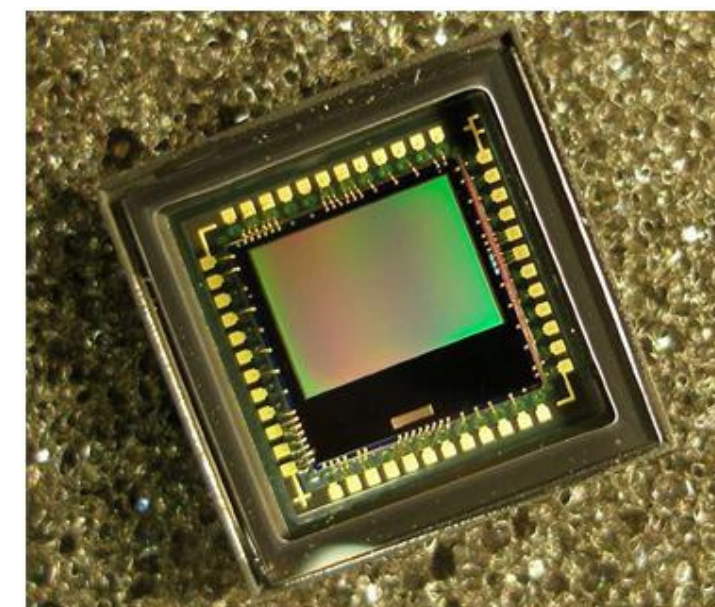
- シンチレータを大きく、またはPMTを小さくできれば入射位置が分かる
- 入射位置が分かれば、宇宙線の到来方向が分かる → 天文学ができる



02

### PMTの代わりにCMOS

- イメージングPMTでは、PMTのサイズは小さくないといけない
- CMOSではピクセルサイズが1/100になり、ピクセル数は1万倍
- 精密な撮像が可能になる

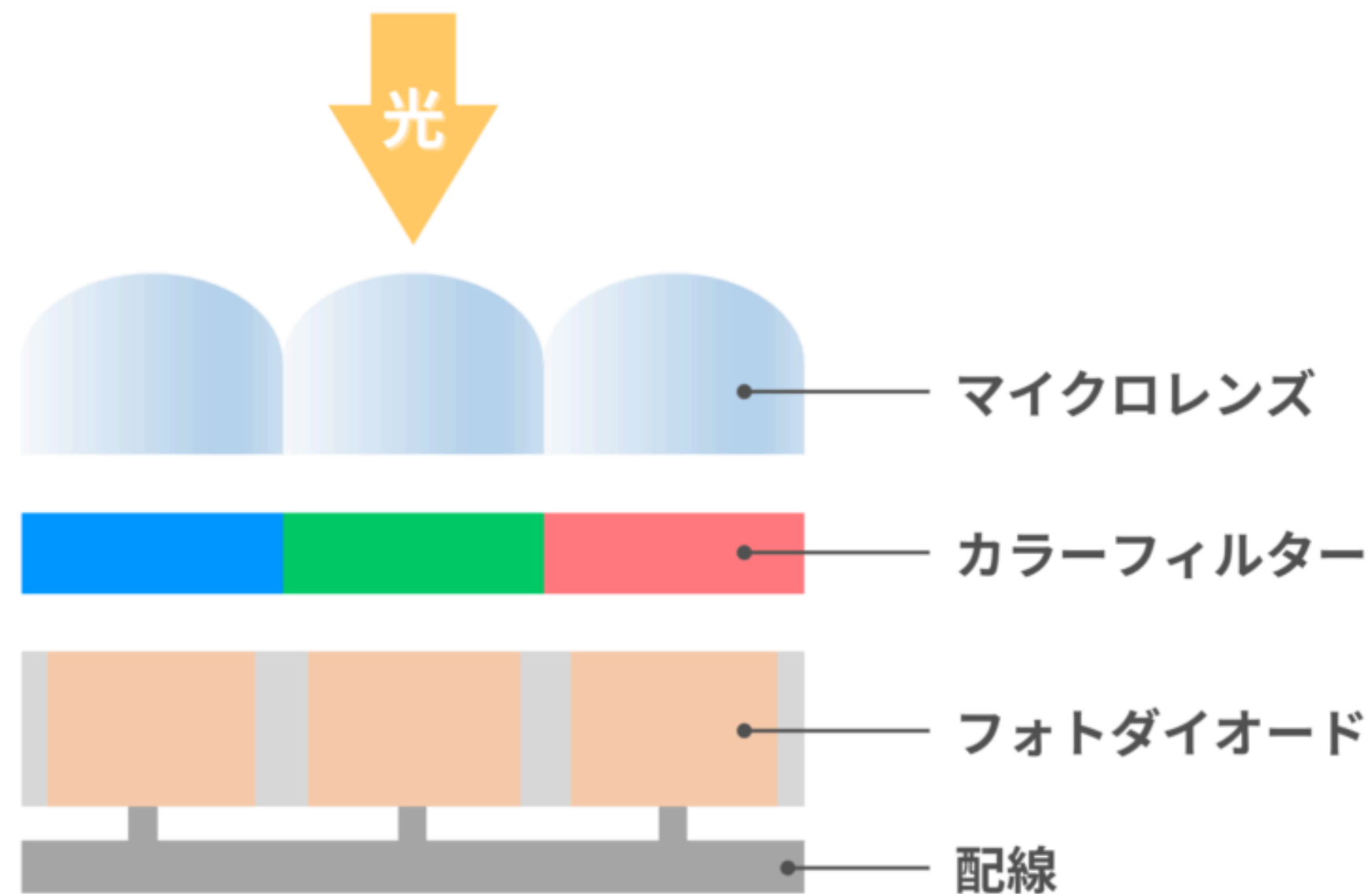


# 02

## 実験原理

### 〇イメージセンサー

レンズで集めた光をフィルターで色ごとに分離し、フォトダイオードで電荷に変換・転送することで光を電気信号に変換している



参考：<https://semi-journal.jp/basics/device/image-sensor/use.html>

# 02

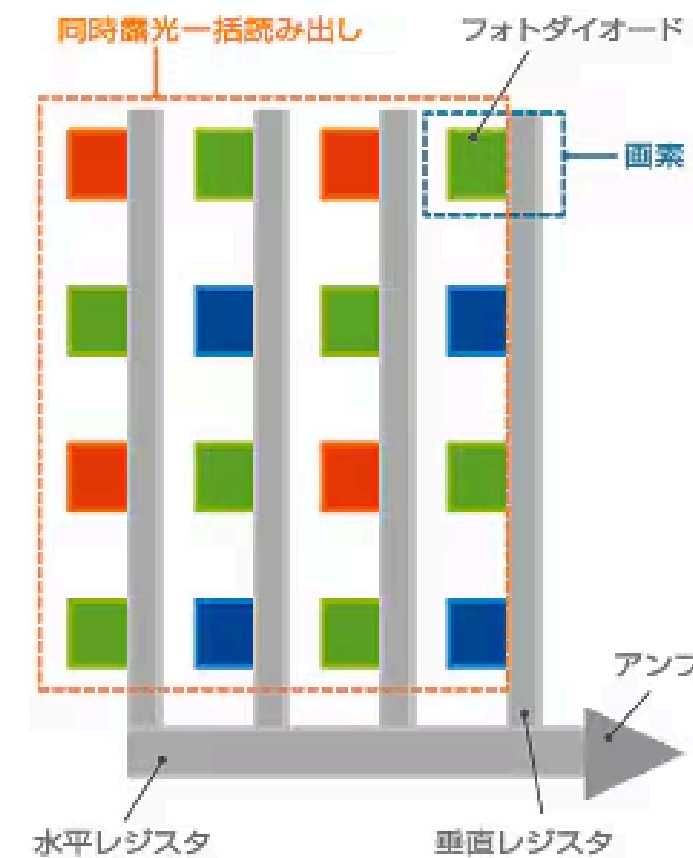
## 実験原理

### ○ CMOS

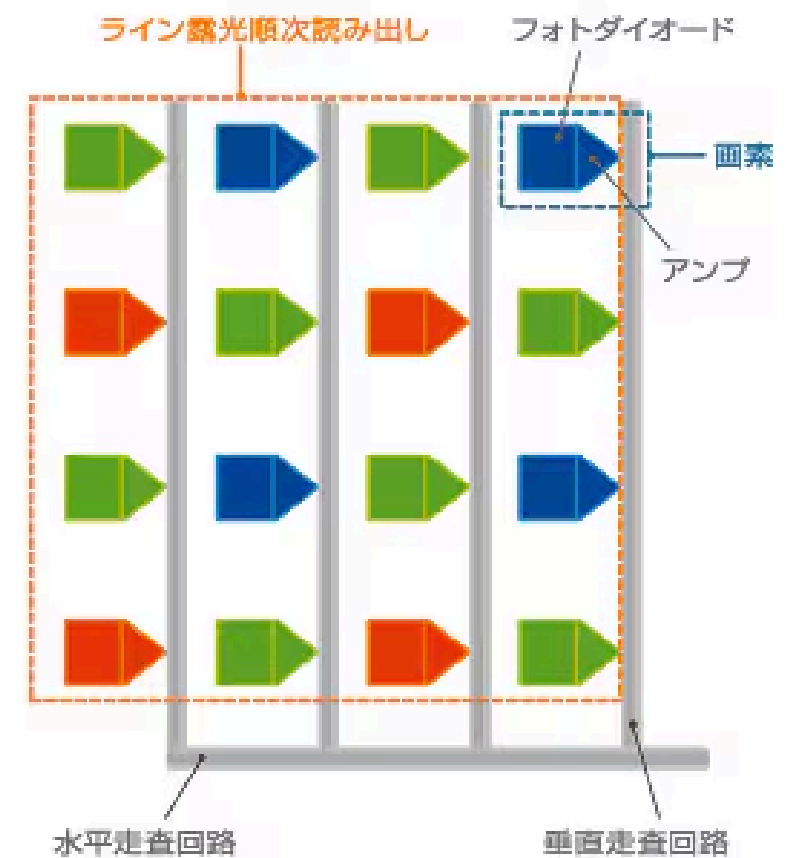
- フォトダイオード毎にアンプ（増幅器）がつく→低ノイズ
- CCDは電荷移動型（バケツリレー方式）だが、CMOSは各アンプの電圧を読むため何度でも同じ状態を読み出しできる（非破壊型）
- 受講面積が減るため効率が悪い

CCDとCMOSの構造の違い

< CCD >



< CMOS >



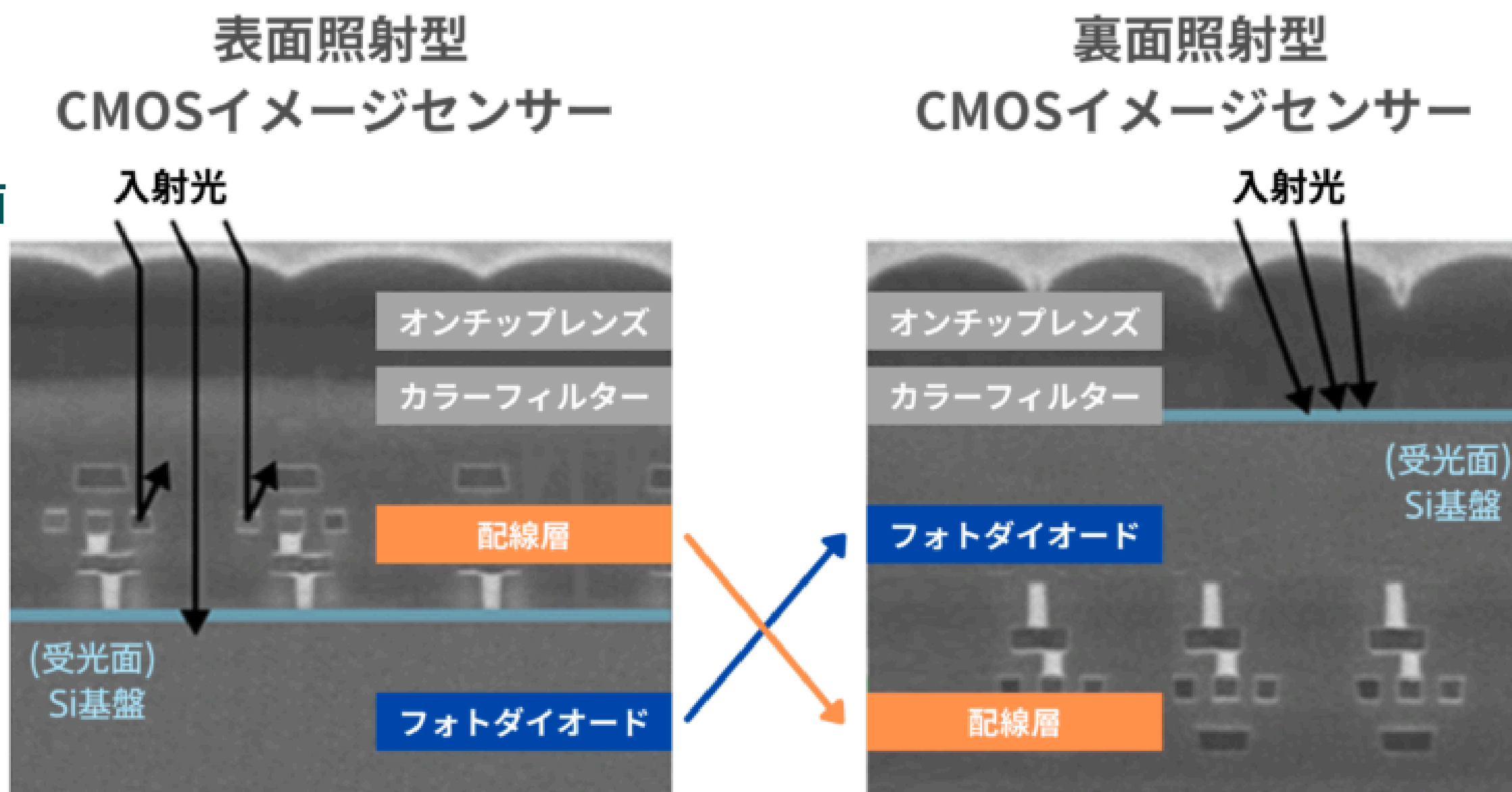
## ○裏面照射型 CMOSイメージセンサー (BI CIS)

フォトダイオードの直下に配線層が存在



配線金属により入射光が散乱されず、表面照射型よりも高感度になる

今回使用するカメラは裏面照射型



参考：<https://www.tdk.com/ja/tech-mag/knowledge/168>

# 02

## 実験原理

### ○ ダーク（暗電流）

光が無い状態でも、熱エネルギーによって電子が価電子帯から伝導帯に励起する→電流が発生

└ 温度依存性

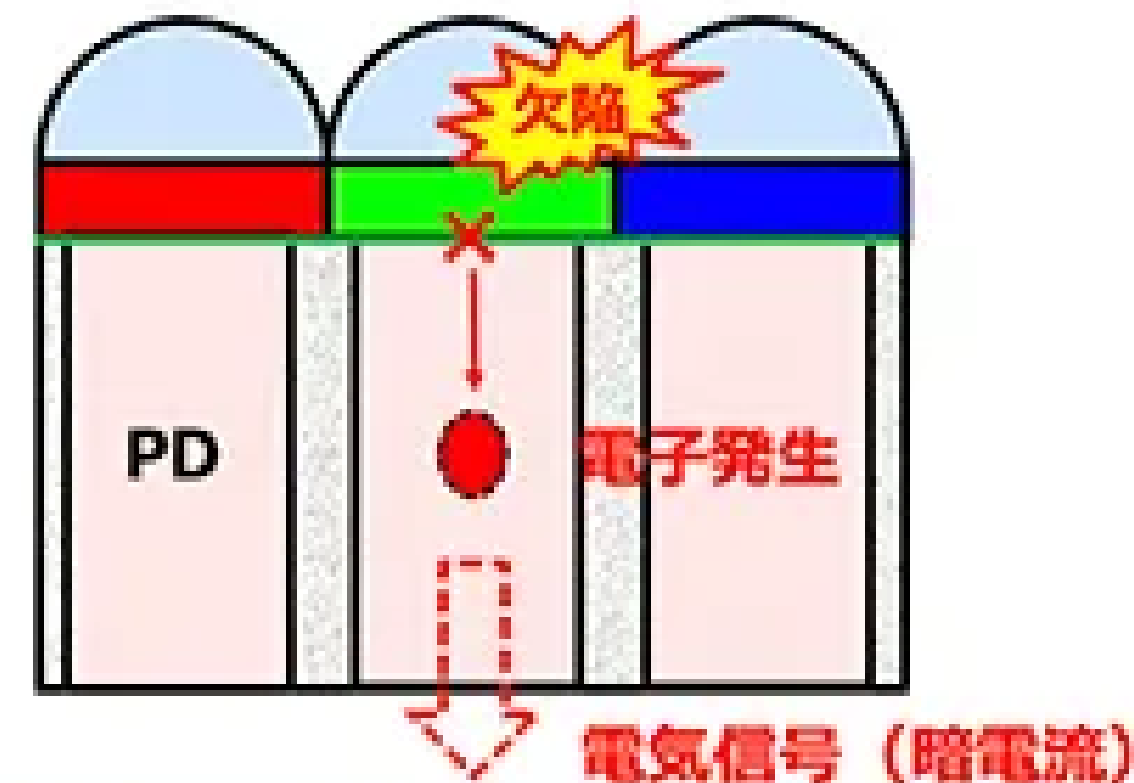
└ データのノイズの原因

↓↓↓

- ・ カメラの冷却
- ・ データの補正が必要

### ■ 光入射無し

光入射無し的时候は、電子発生無しが望ましい



欠陥を介した電子発生により、光入射が無い状態で電流が流れてしまう。

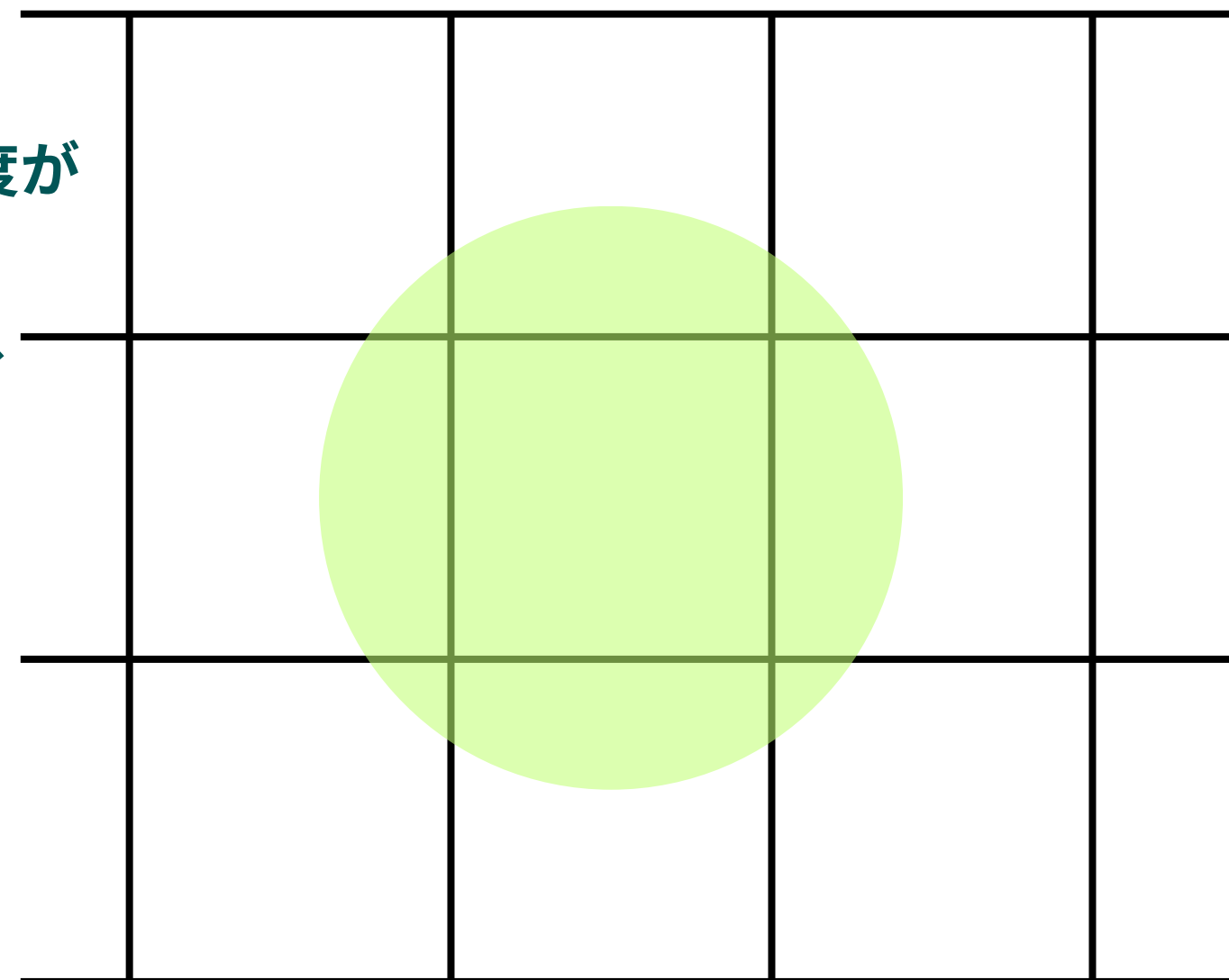
## ○ Charge Sharing

ピクセルの境界などにX線が入り込んだ際、複数のピクセルに輝度が分配されること。

この場合、分配されたピクセル分だけ足し合わせる必要があるが、ピクセル毎のノイズも足し合わされてしまう。

そのため、

- 足し合わせるピクセルは最小限にする
- 輝度値の閾値を設けてた足し合わせるようにする。これを「グルーピング」という。



## ○ リードノイズ

CMOSイメージセンサーが電荷を電気信号に変換し、それを読み出す際にピクセル毎で発生するノイズ

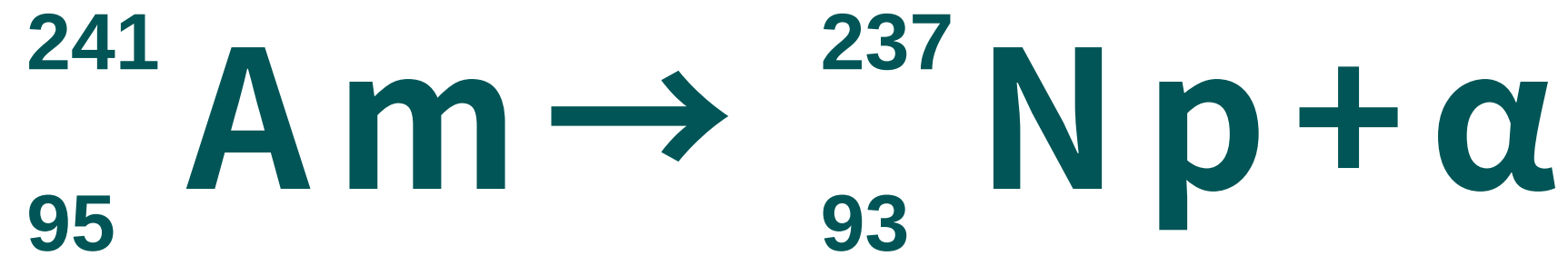


# 02

## 実験原理

### ○ 放射線源の放射素過程

Am241



α崩壊をしてネプツニウム-237になる。

半減期：432.2年

α線エネルギー：5.49MeV（84.5%）、5.44MeV（13%）、5.39MeV（1.4%）

→ 回りのプラスチックで全て吸収される

参考

<https://cnic.jp/knowledge/2611>

[https://www.kankyo-hoshano.go.jp/wp-content/uploads/2020/12/No30.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.kankyo-hoshano.go.jp/wp-content/uploads/2020/12/No30.pdf?utm_source=chatgpt.com)

## ○ 放射線源の放射素過程

### Am241

励起状態にあるネプツニウム-237がガンマ線（X線）を放出することがある。



X線エネルギー：

K $\alpha$ 1 (13.89[keV])

L $\beta$ 1 (17.16[keV])

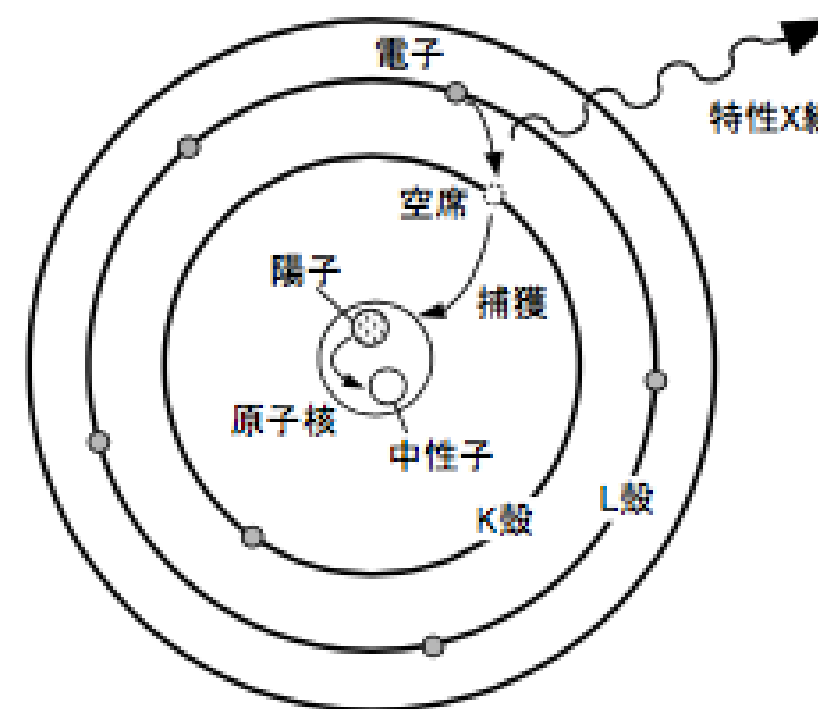
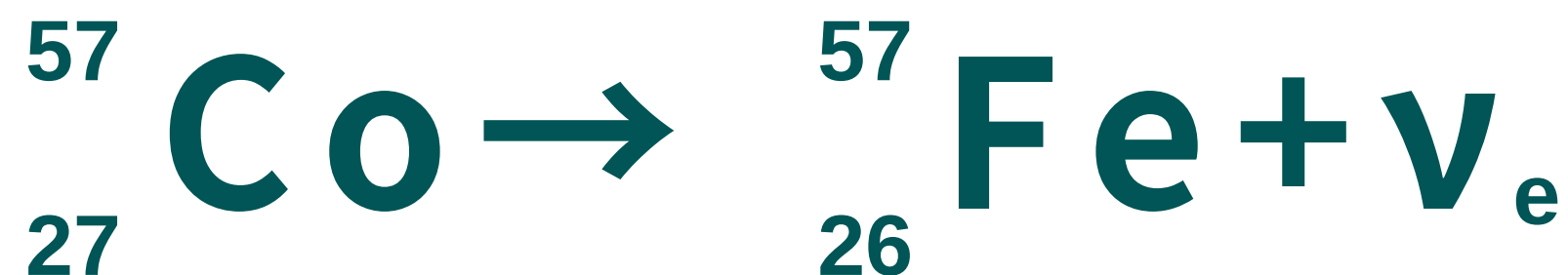
L $\beta$ 2 (16.98[keV])

## 02

## 実験原理

## ○ 放射線源の放射素過程

Co 57



電子捕獲を起こし、Fe-57に変化、ニュートリノが放出される。励起状態にあるFe-57からγ線が放出される。

半減期：271.8日

γ線エネルギー：122.1keV (85.6%)、136.5keV (9.2%)、14.4keV (8.3%)

参考

<https://cnic.jp/knowledge/2611>

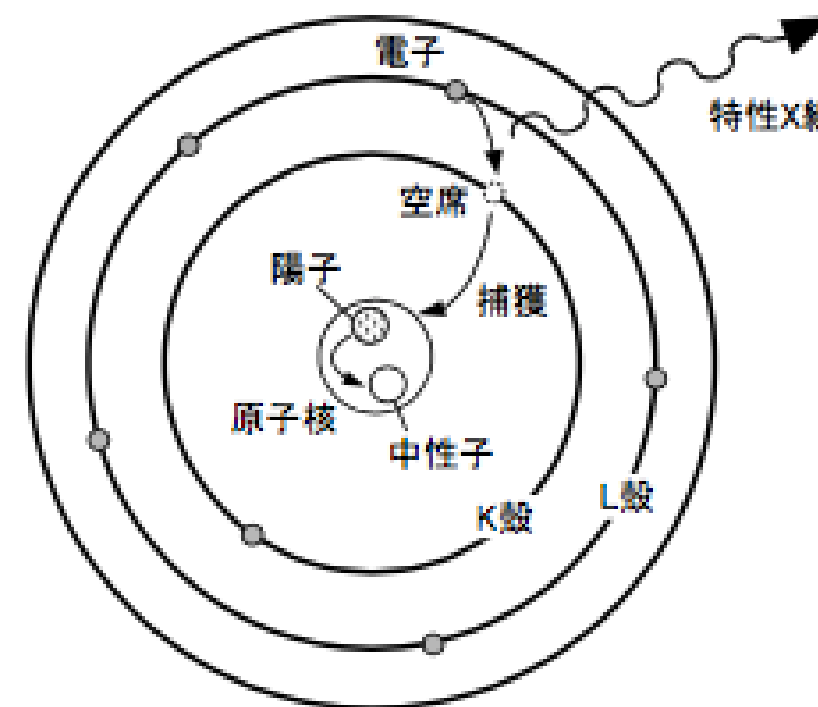
[https://www.kankyo-hoshano.go.jp/wp-content/uploads/2020/12/No30.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.kankyo-hoshano.go.jp/wp-content/uploads/2020/12/No30.pdf?utm_source=chatgpt.com)

## 02

## 実験原理

## ○ 放射線源の放射素過程

Fe 55



電子捕獲を起こし、Mn-55に変化、ニュートリノが放出される。励起状態にあるMn-55から特性X線(K $\alpha$ 線、K $\beta$ 線)が放出される。

半減期：2.737年

$\gamma$ 線エネルギー：5.899keV (K $\alpha$ 線)、6.49keV (K $\beta$ 線)

参考

<https://cnic.jp/knowledge/2611>

[https://www.kankyo-hoshano.go.jp/wp-content/uploads/2020/12/No30.pdf?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.kankyo-hoshano.go.jp/wp-content/uploads/2020/12/No30.pdf?utm_source=chatgpt.com)

# 03

## 実験方法

### (1)

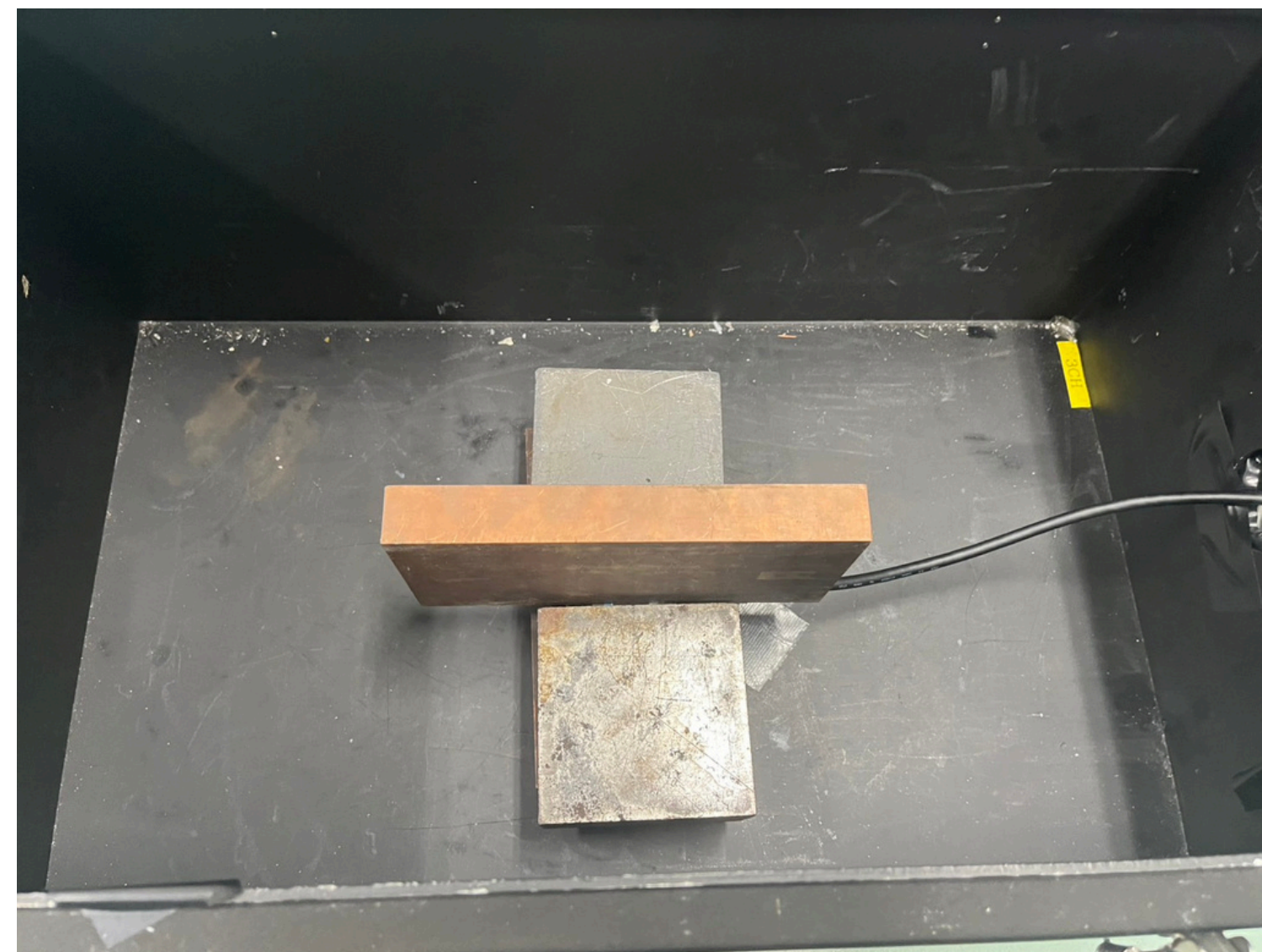
アルゴ DMK33UX265.WGを使用。  
P6部屋にあった黒い箱を暗幕として利用



# 03

## 実験方法

(2) カメラの上下左右を鉛で挟む (カメラの温度上昇を小さくするため)。



# 03

## 実験方法

- (3) なんにもつけない状態で10枚撮影する。設定は次。
- ゲイン5
  - 明度600
  - 露光時間0.9秒
- (4) 右図のように放射線源をカメラにつけ、10,000枚撮影する。  
用いる線源は
- Am241
  - Co57
  - Fe55



## ○ ダークの補正方法について

実験（3）で撮影した10枚のデータを使用する。

1. 各ピクセルごとに、10枚の輝度値の中央値をダーク初期値 $D_{xy}(0)$ とする。
2. 以下の漸化式に従って、 $n$ 枚目の画像ファイルの全ピクセルに対してダーク値 $D_{xy}(n)$ を定める。  
ただし、 $B_{xy}(n)$ は輝度値。

$$D_{(x,y)}(n+1) = D_{(x,y)}(n) + \frac{B_{(x,y)}(n) - D_{(x,y)}(n)}{8}$$

3. ローデータからダーク値を引き、これをダーク補正されたデータとした。



# 04

## 実験結果

### ○ グループピングについて

以下のようにグループピングを行う。

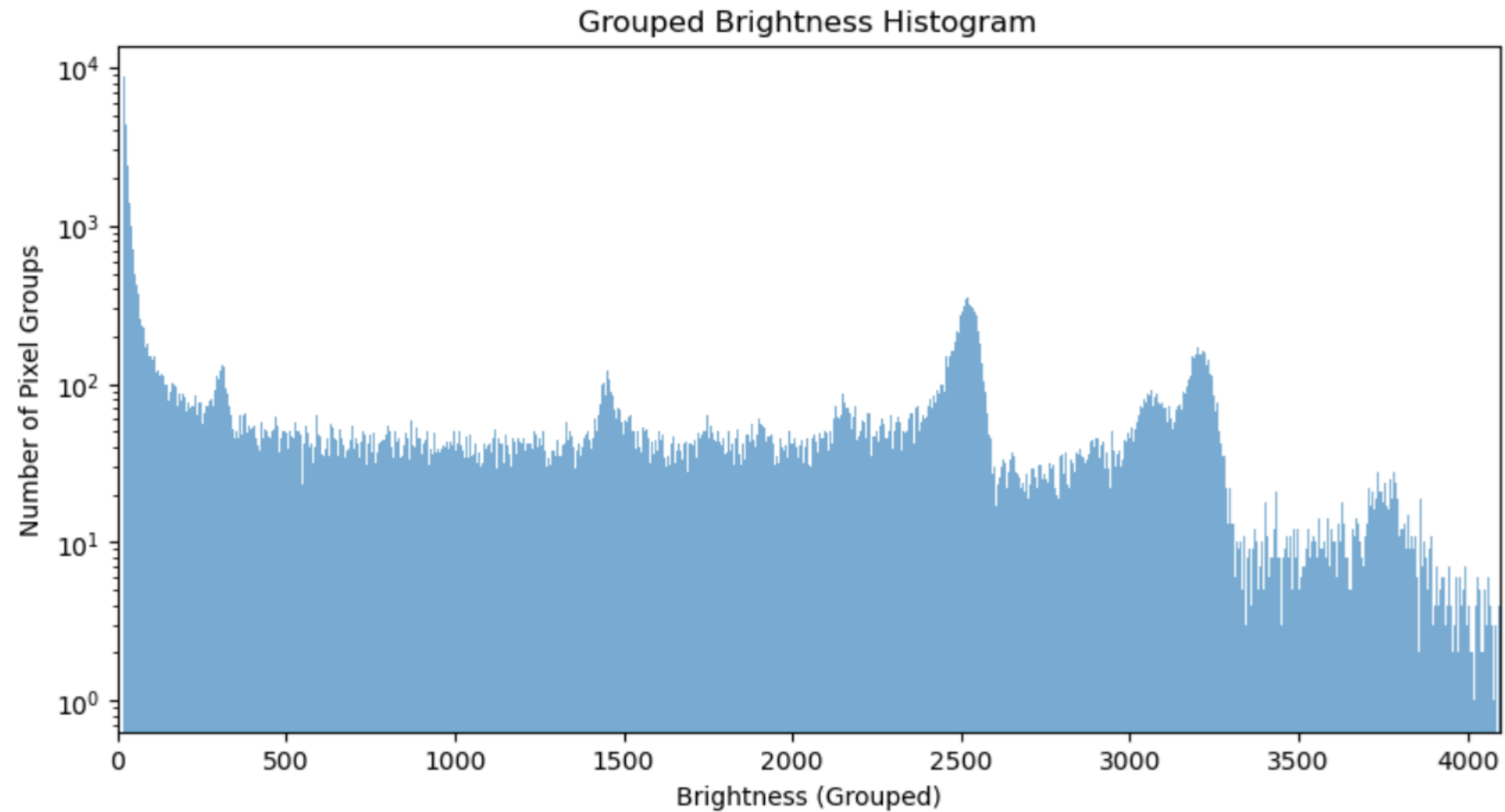
1. 輝度値が20以下であるものを「暗いピクセル」、20以上を「明るいピクセル」と定義する（輝度値は0~4095）。
2. データのピクセルを明るいピクセルと暗いピクセルに分類する。
3. ある明るいピクセルに対して、その周囲8マス内にほかの明るいピクセルが存在した場合、それらを同一グループとみなし、同一のグループ番号を割り当てる。
4. これをすべてのピクセルに対して行い、グループ内での輝度値の和を取る。

04

## 実験結果

### ○ ダーク補正されたデータのヒストグラム

Am-241



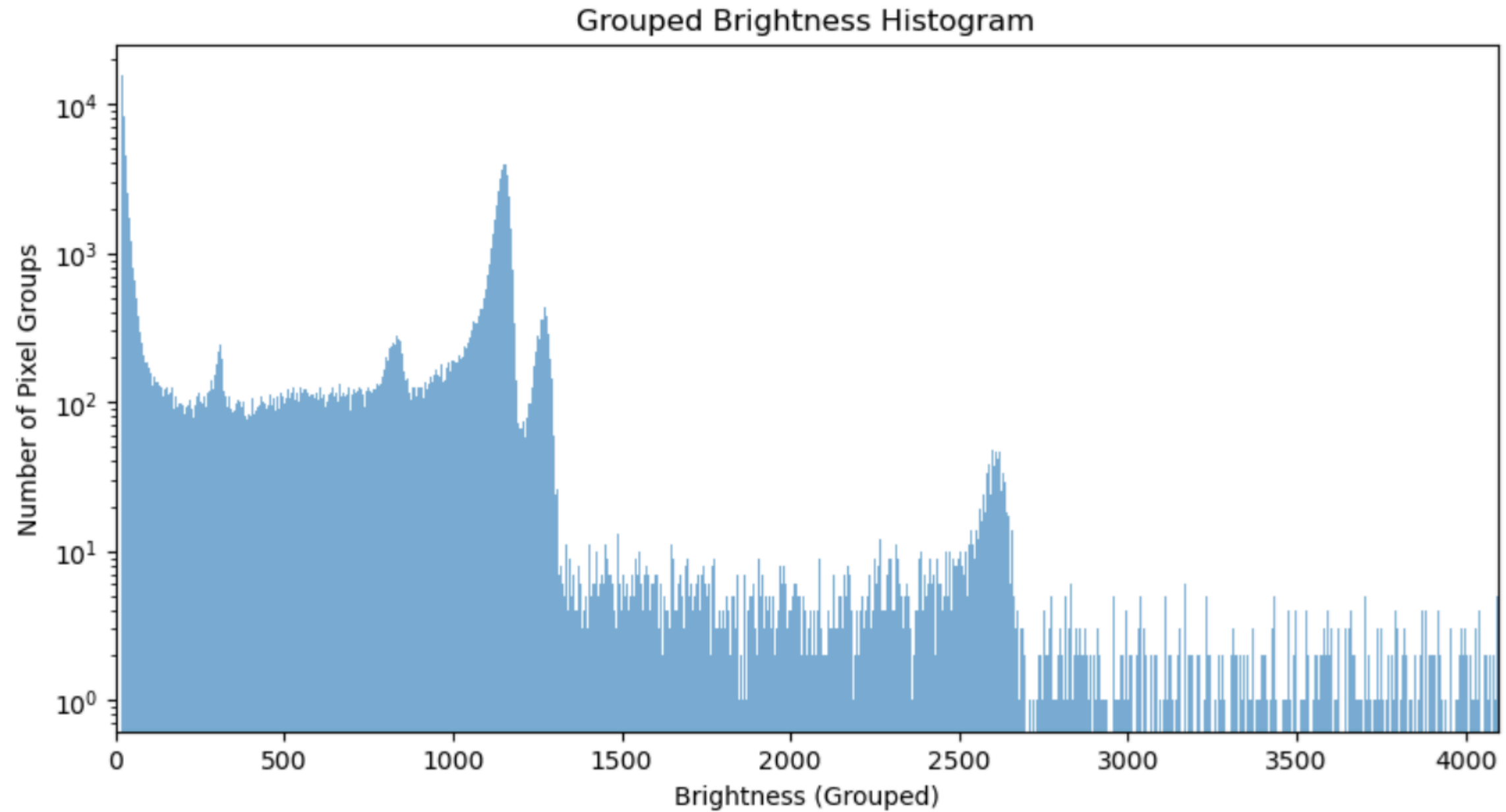
グループ化した輝度値の要素数: 293406

# 04

## 実験結果

### ○ ダーク補正されたデータのヒストグラム

Co-57



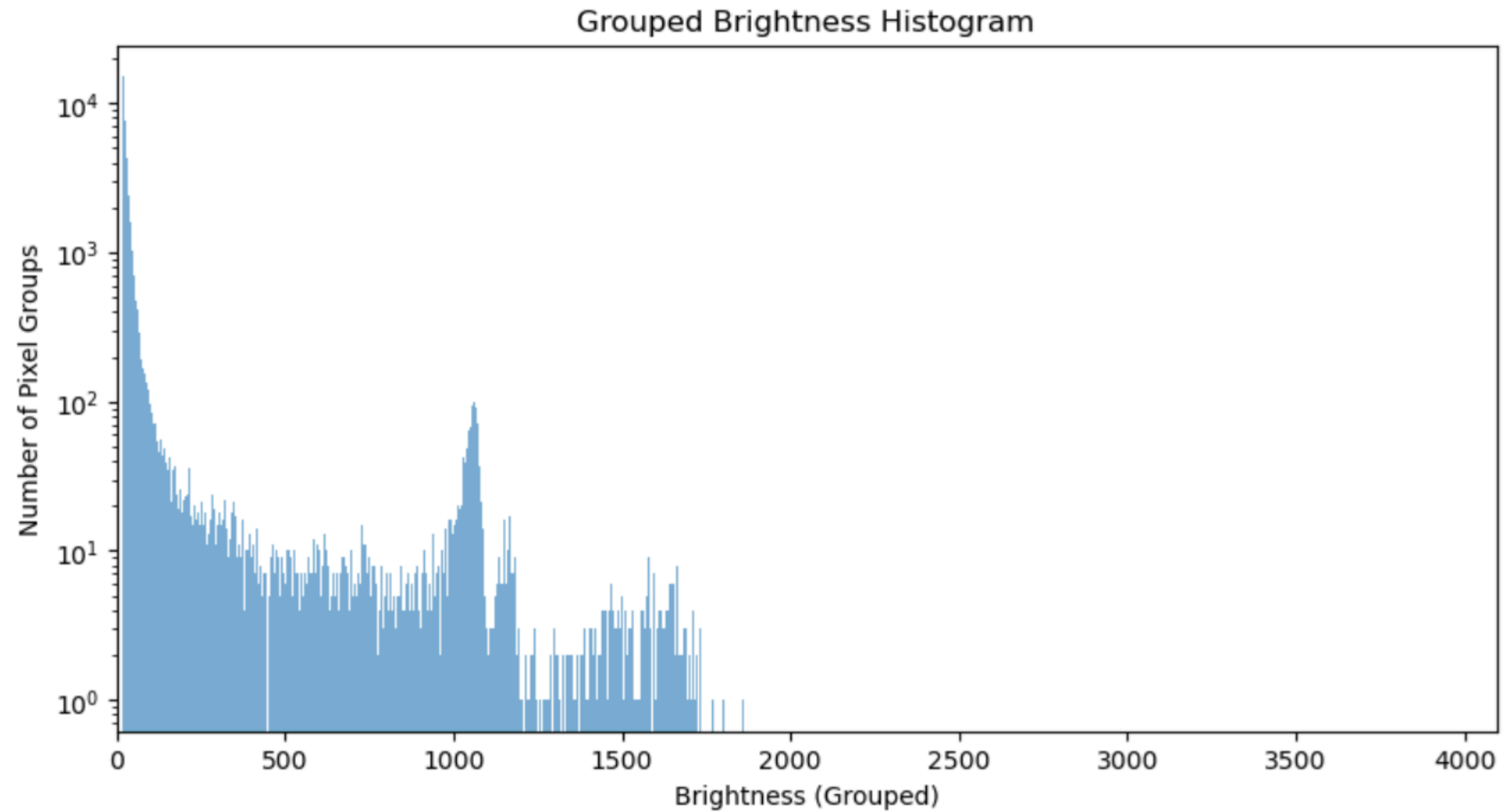
グループ化した輝度値の要素数: 509570

04

## 実験結果

### ○ ダーク補正されたデータのヒストグラム

Fe-55



グループ化した輝度値の要素数: 162863

# 04

## 実験結果

### ○ フィットティング

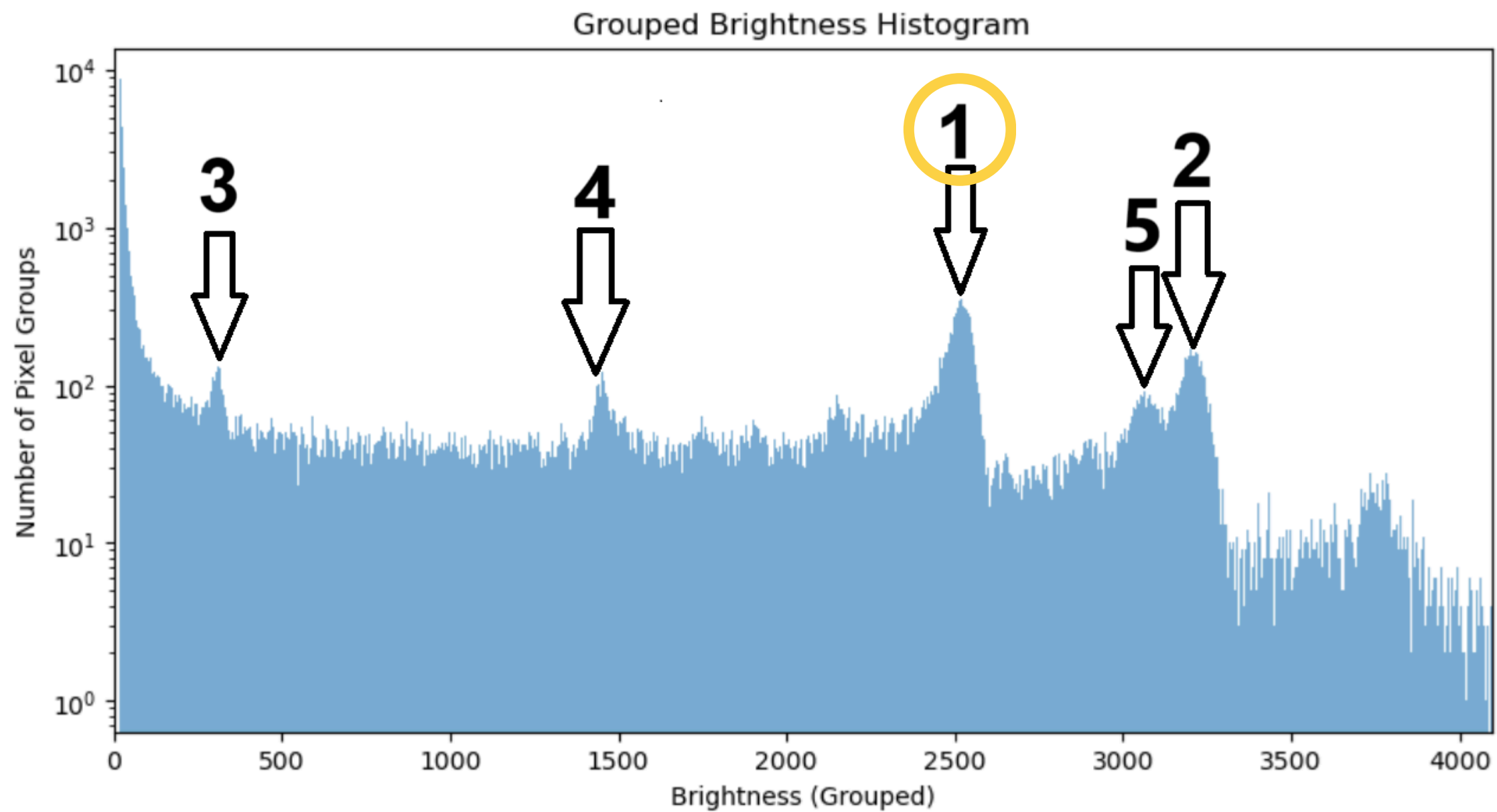
以下の式で各線源、各ピークをフィッティングする。

$$y = A \exp \left( -\frac{(x - x_0)^2}{2\sigma^2} \right) + C$$

04

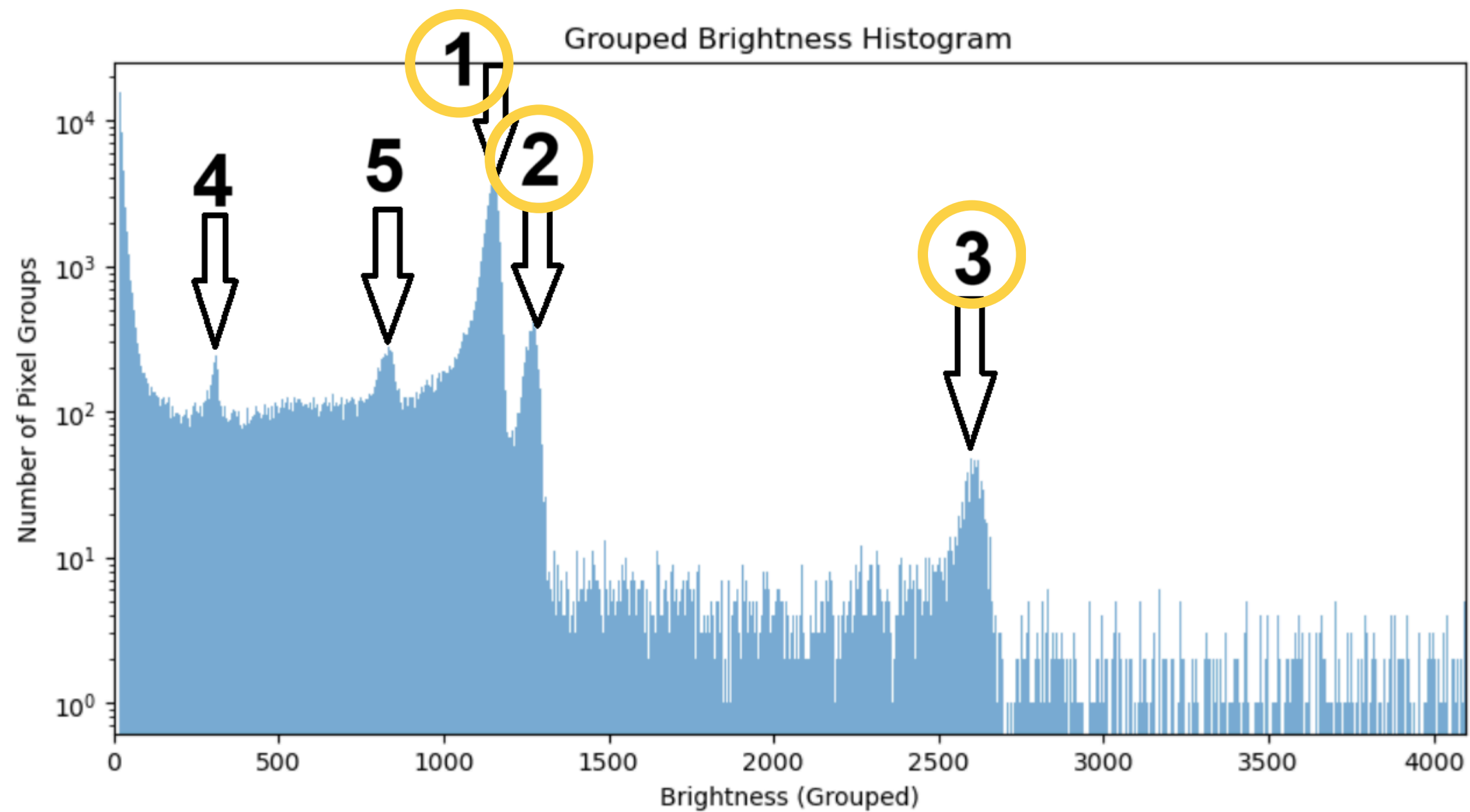
# 実験結果 ○ ヒストグラムのフィッティング

Am-241



## 実験結果 ○ ヒストグラムのフィッティング

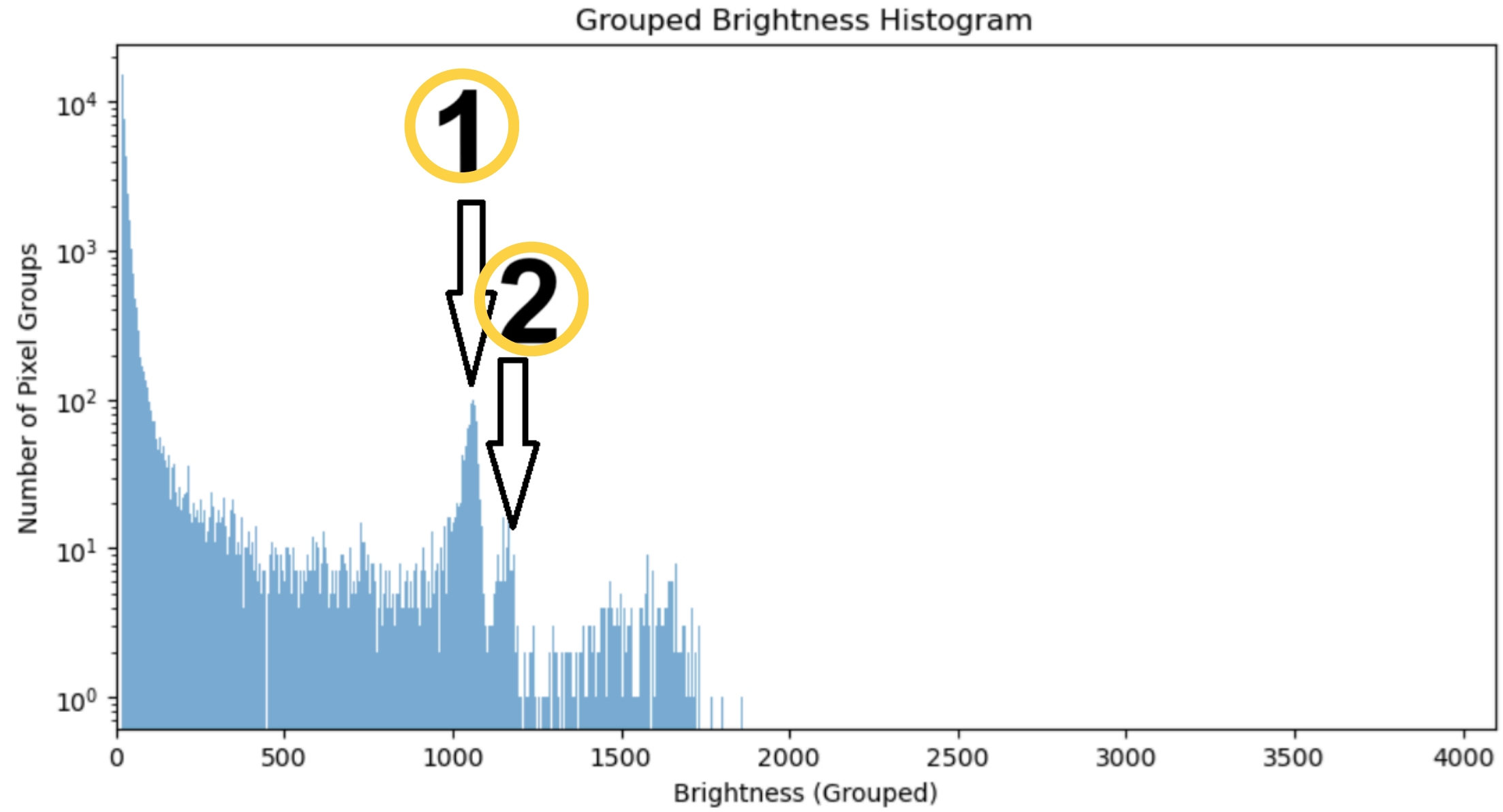
CO-57



04

# 実験結果 ○ ヒストグラムのフィッティング

Fe-55





## ○エネルギー校正

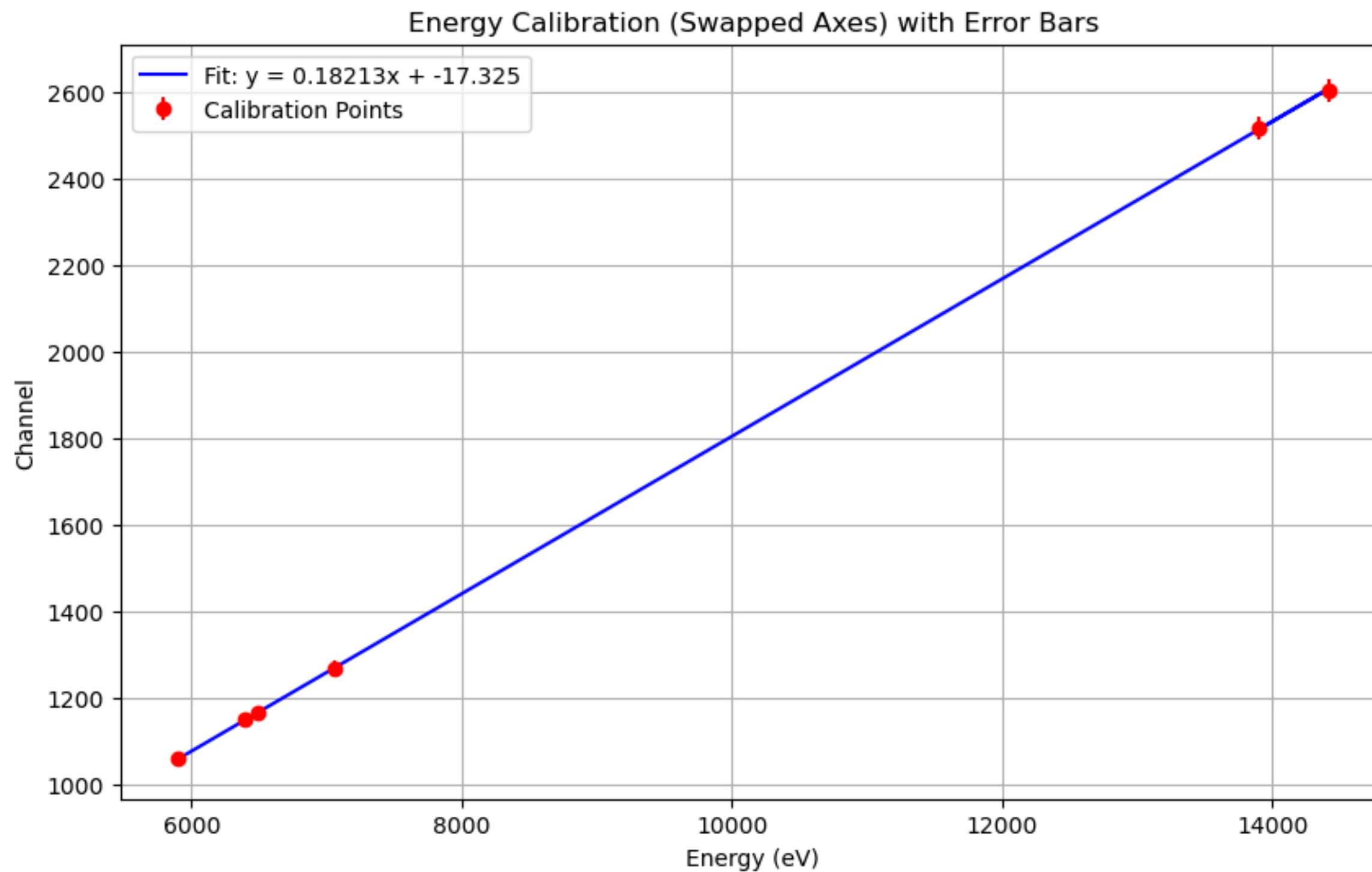
大きく表れた6つのピークを抜粋した。

線源ピーク番号	A	x_0	$\sigma$	C	文献値[keV]
Am-241_1	273.51	2517.17	28.18	66.02	13.894
Co-57_1	3602.62	1148.64	16.83	246.29	6.4
Co-57_2	315.29	1267.73	16.21	74.48	7.056
Co-57_3	36.98	2604.26	27.3	5.13	14.413
Fe-55_1	81.3	1058.86	14.23	14.32	5.899
Fe-55_2	7.01	1162.65	14.5	3.56	6.49

04

# 実験結果

## ○エネルギー校正



$$y = 0.18213x - 17.325$$

## 04

## 実験結果

## ○エネルギー校正

先ほど求めたエネルギー校正直線を用いて、各ピークのエネルギー値を計算した。それにより、ピークの種類の特特定ができた。

線源ピーク番号	x_0	$\sigma$	C	測定値[keV]	文献値[keV]	ピーク種類
Am-241_2	3209.02	28.2	45.79	17.71	17.16	Np L $\beta$ 1
Am-241_3	309.34	9.58	70.99	1.793	1.739	Si K $\alpha$
Am-241_4	1451.15	18.46	47.89	8.062	8.048	Cu K $\alpha$
Am-241_5	3068.15	26.16	55.35	16.94	16.98	Np L $\beta$ 2
Co-57_4	308.13	9.38	95.11	1.787	1.739	Si K $\alpha$
Co-57_4	829.59	17.84	125.23	4.650	4.661	Fe K $\alpha$ Escape



# 04

## 実験結果

### ○感度

$$\text{(感度)} = \frac{\text{(検出レート)}}{\text{(入射レート)}}$$

$$\text{(入射レート)} = \text{(実験日の放射能[Bq])} \times \text{(1崩壊あたりの放出割合)} \times \text{(全方位に対するセンサーの面積の割合)}$$

$$\text{(検出レート)} = \text{(x}_0 \pm 3\sigma \text{内のヒストグラム内の要素数)}$$

## ○感度の妥当性

センサーの空乏層の厚みが分かれば、感度を理論的に見積もることができる。

└カメラの可視光領域での分光感度曲線と理論的な量子効率曲線と比較することで空乏層の厚みを見積もる

$$QE = CCE (1 - R_{REF}) \left( 1 - e^{-x_{EPI}/L_A} \right)$$

$QE$ (Quantum Efficiency) : 量子効率

$CCE$ (Charge Collection Efficiency) : 電荷収集効率(理想的には1)

$R_{REF}$ (Reflection) : Siの反射係数

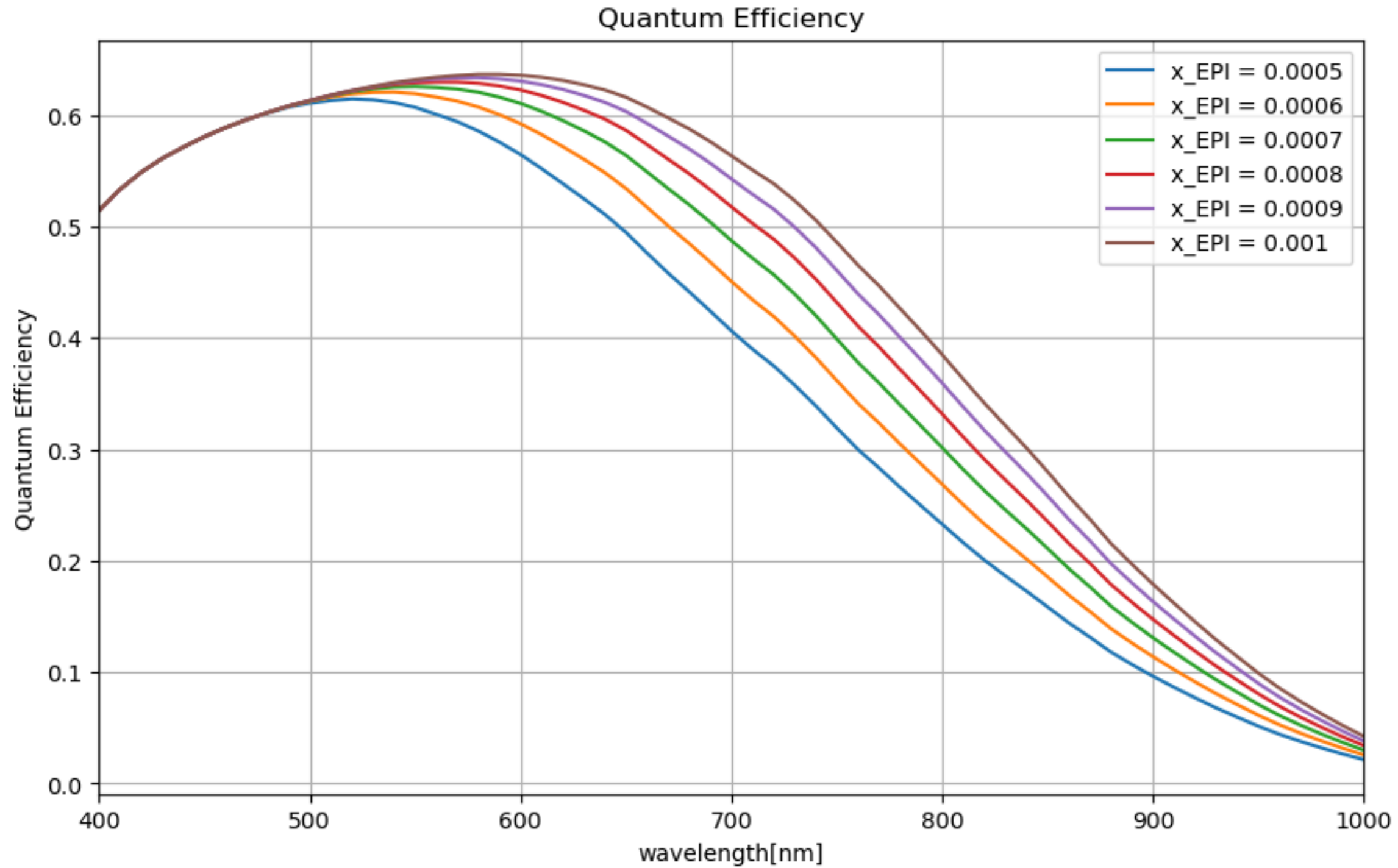
$x_{EPI}$ (Epitaxial) : エピタキシャル薄膜の厚さ

$L_A$ (Absorption length) : 吸収長

# 04

## 実験結果

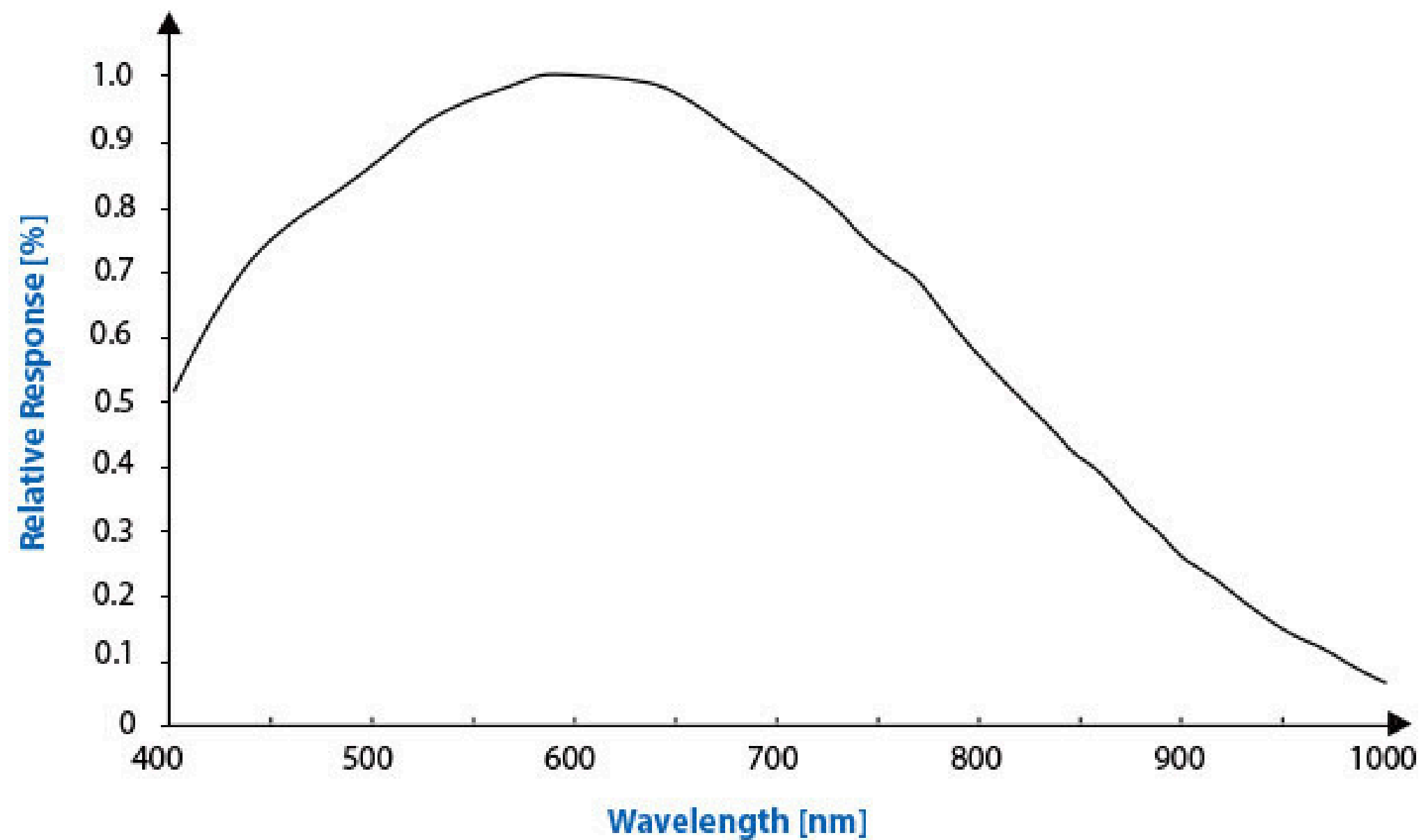
### ○感度の妥当性



04

## 実験結果

### ○感度の妥当性

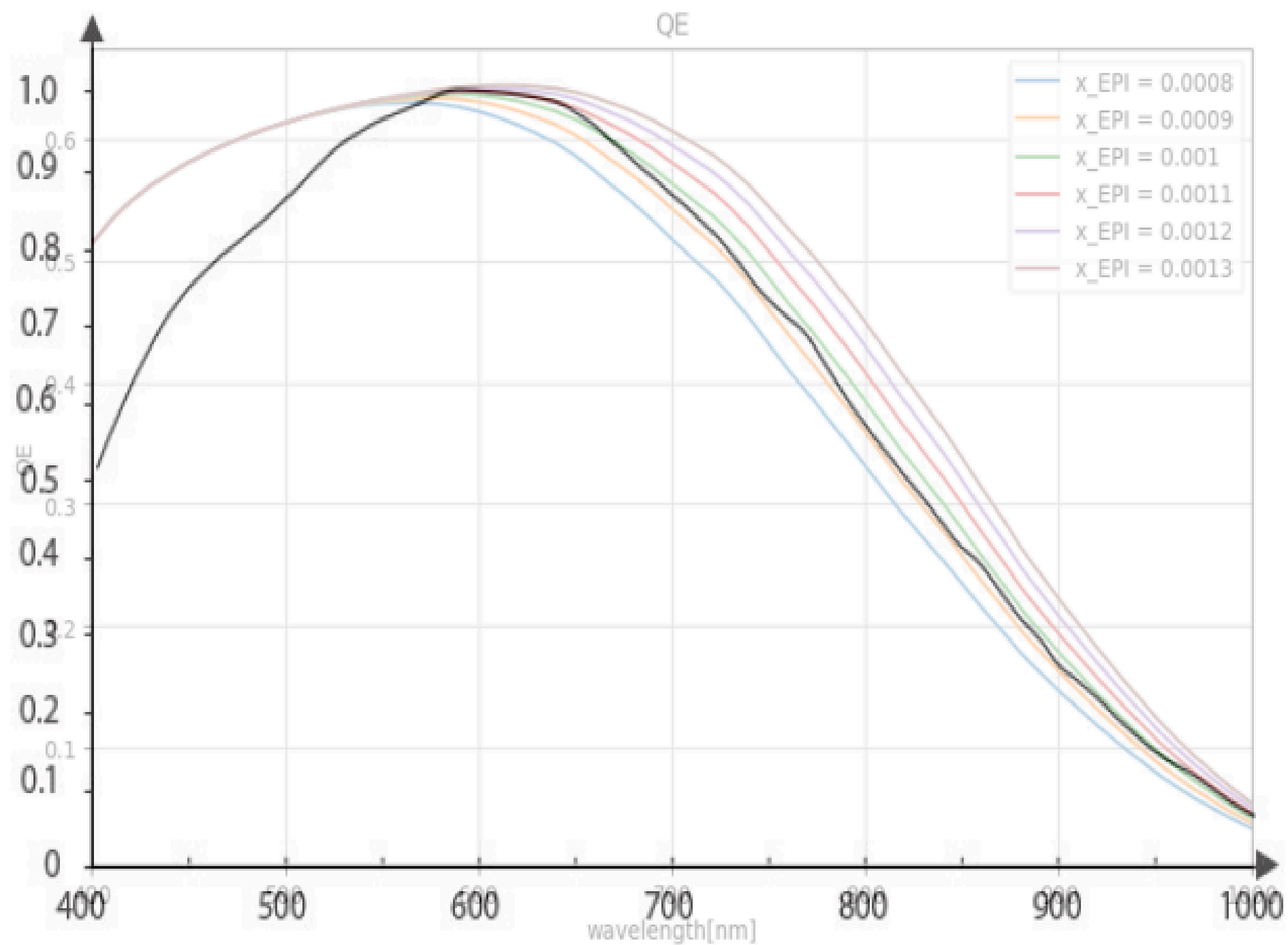


カメラの分光度曲線

# 04

## 実験結果

### ○感度の妥当性



重ねた図→どの曲線とも重ならない...



## ○感度の妥当性

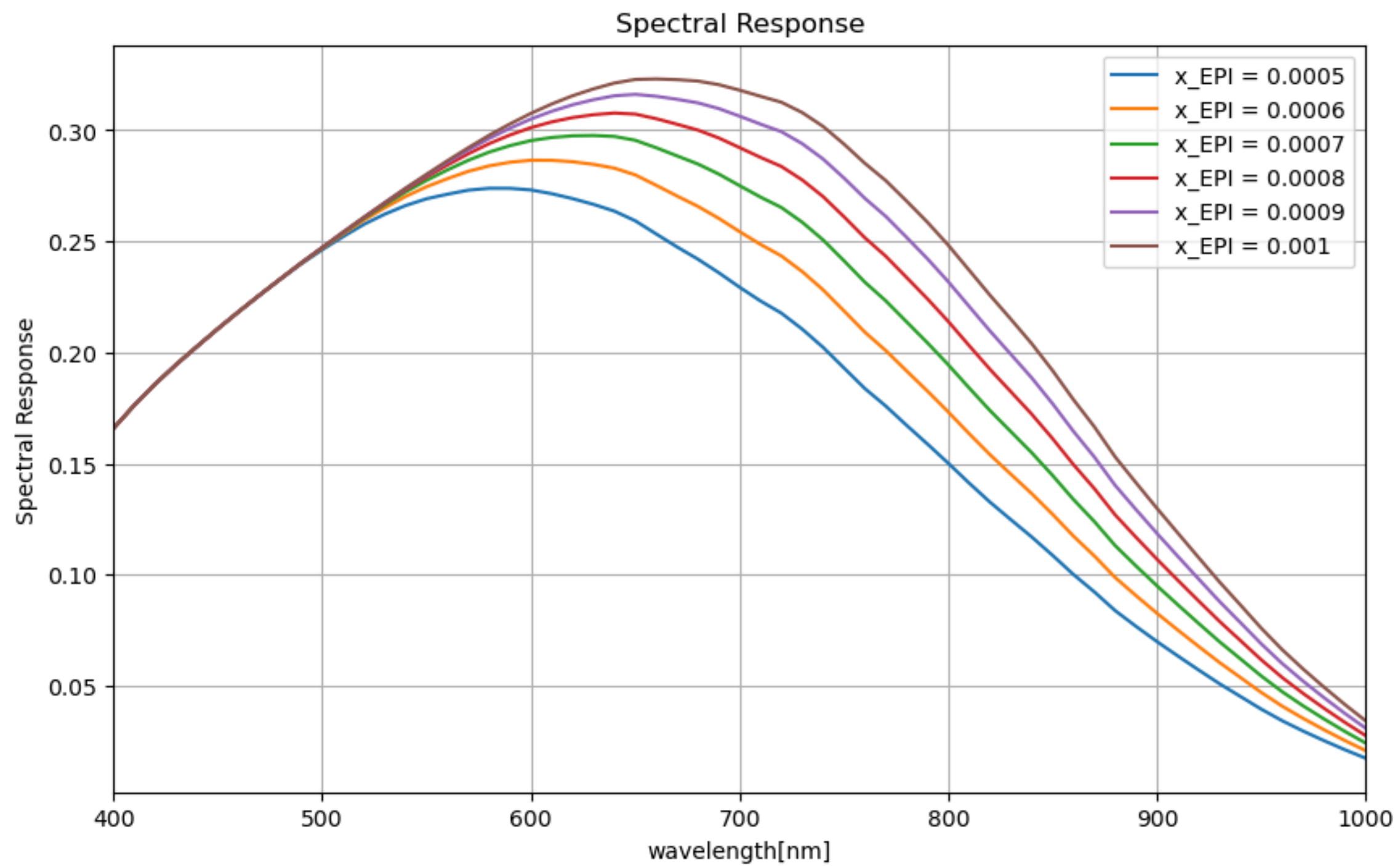
起業の提供している分光感度曲線は、縦軸にSR（Spectral Response：分光応答）の、相対的な比率をRR（Relative Response）を採用していると考えられる。

$$SR = \frac{q\lambda}{hc} \cdot QR = \frac{\lambda[\text{nm}]}{1239.8} \cdot QR$$

04

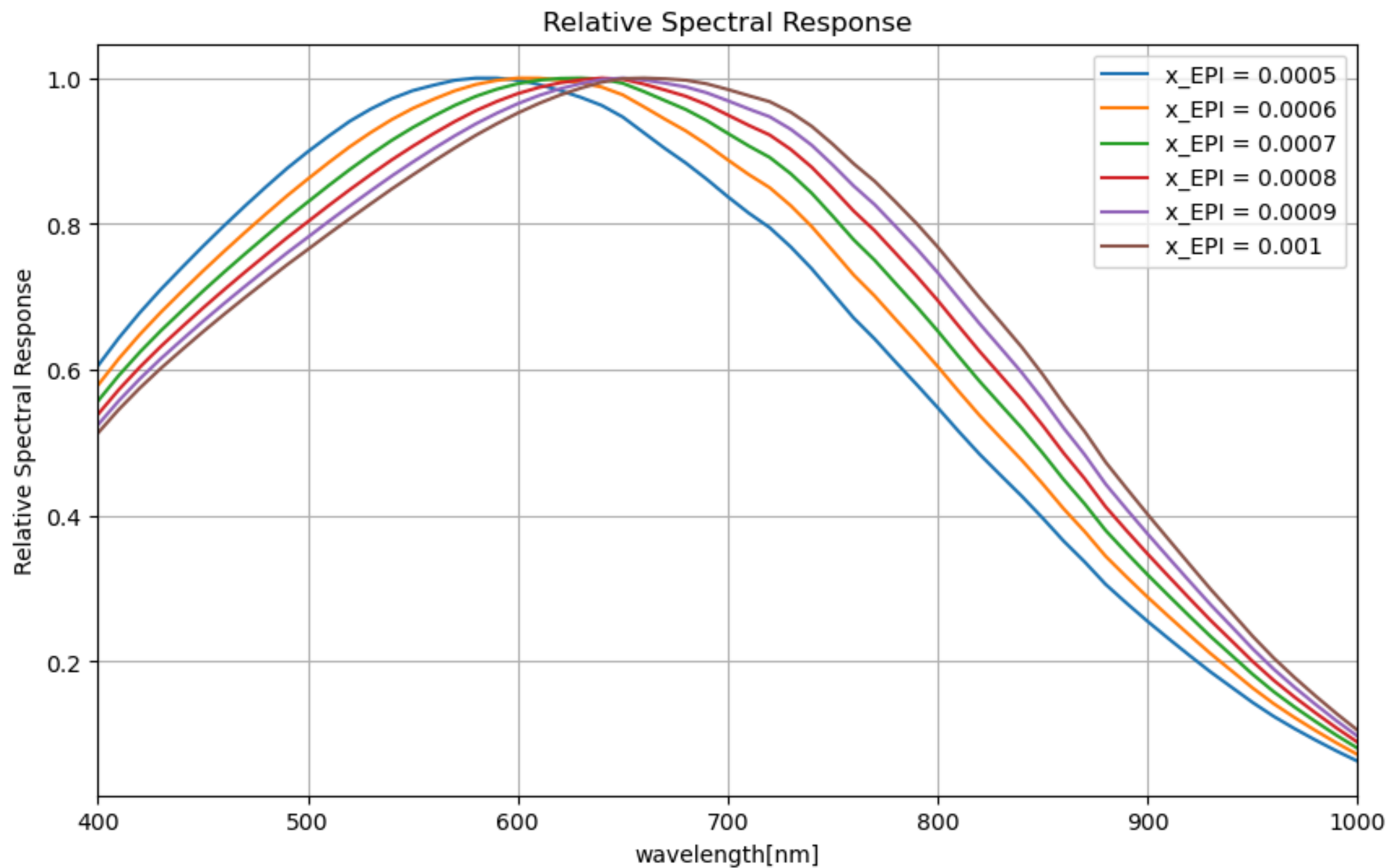
# 実験結果

○感度の妥当性



SR曲線

## ○感度の妥当性



各曲線のy座標をy軸最大値で割ったもので作成したRelative Response曲線

# 04

## 実験結果

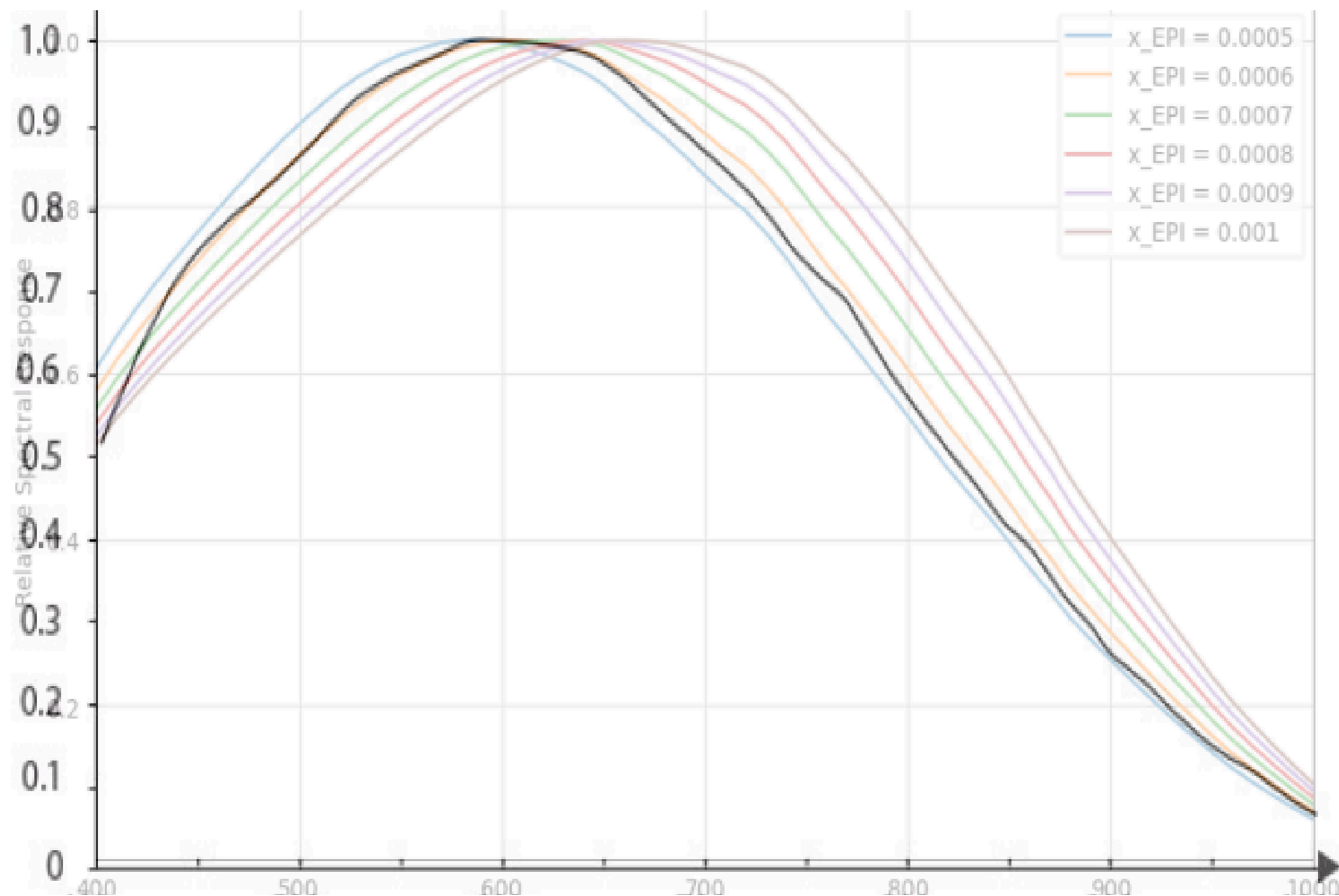
### ○感度の妥当性

短波長領域では、カバーガラスにより光は吸収されるので理論曲線よりも低く表れていると考えられる。(測定がカバーガラス付きのセンサーで行われているの仮定した。)

以上から、センサー空乏層の厚みは

≈6[μm]

と見積もることができた。



RRと測定値を重ねた図

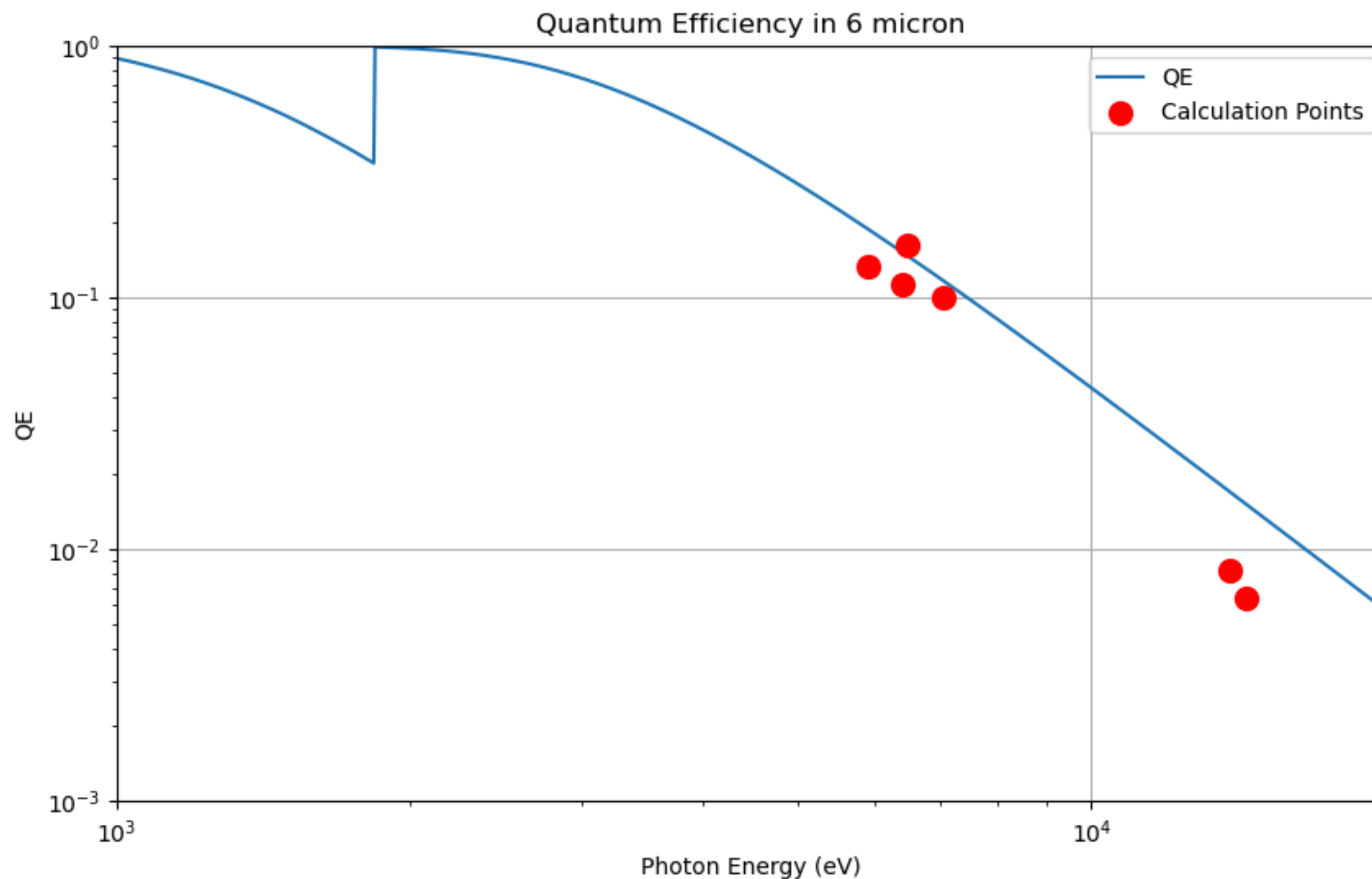
# 04

## 実験結果

### ○感度の妥当性

Si空乏層の厚みから理想的なQEが算出できる。

妥当な感度になったので、空乏層の厚みが  
6 $\mu$ m  
であることが



理論的なQEと感度



04

## 実験結果

### ○エネルギー分解能

実験値

$$FWHM = 2.355 \times 5.4904\sigma$$

理論値

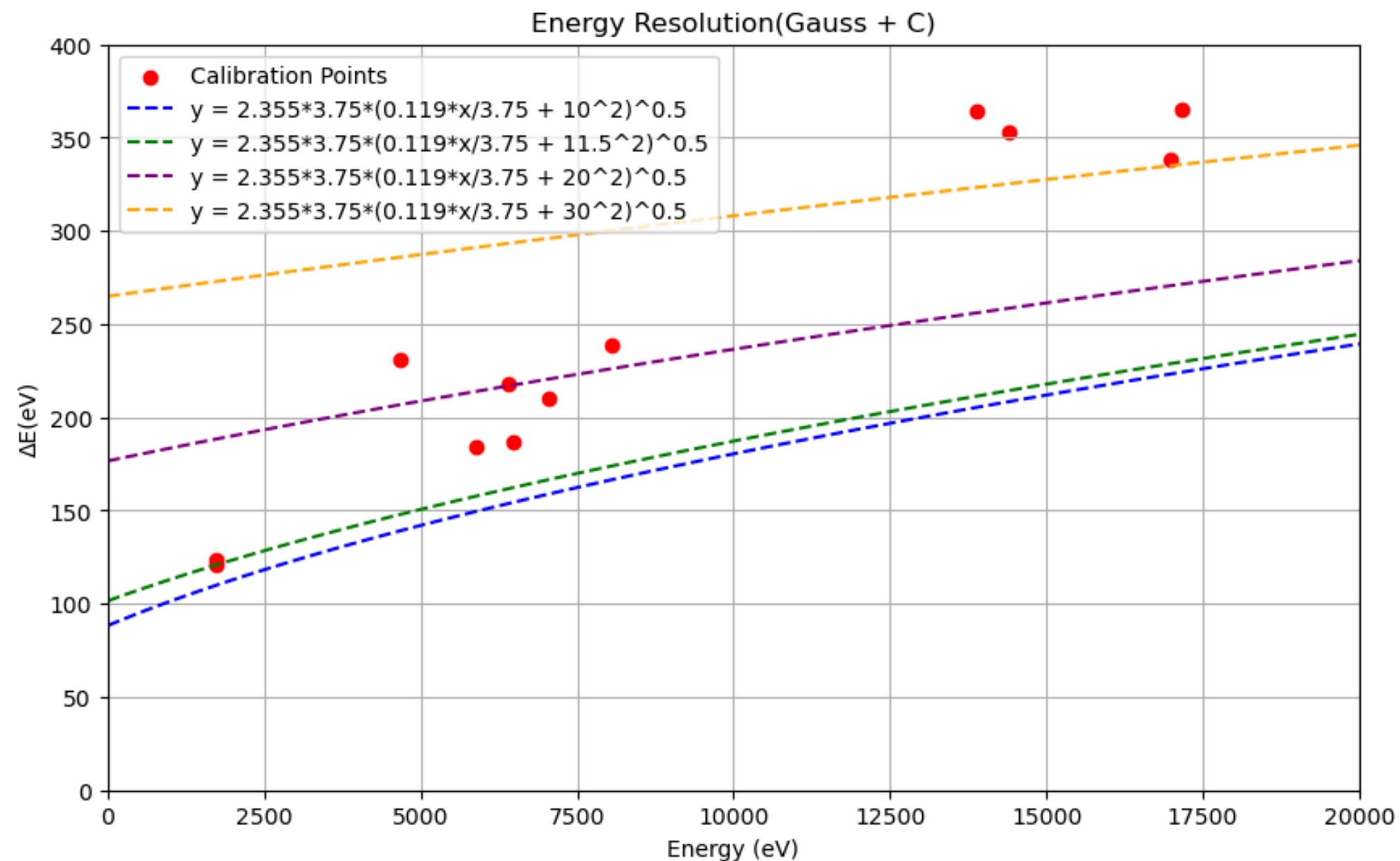
$$FWHM = 2.355 \cdot 3.75 \cdot \sqrt{0.119 \cdot \frac{x_0}{3.75} + (Readnoise)^2}$$

## ○エネルギー分解能

高エネルギーになればなるほどリードノイズが大きくなっている

↓

高エネルギーになればなるほど複数ピクセルにまたがり、読み出し時のノイズが大きくなる



リードノイズ=0,10,20,30の理論値と実験値

05

今後

## ○したかったこと

センサー部分にシンチレーターをとりつけ高エネルギー帯でも観測できるようにしたかったが、間に合わず...

