

---

---

# Compton散舌乱

---

課題演習A1 榎本観 小畑慶人 樫野幸将 佐野涼太郎  
鷺見響太郎 竹田大地

---

2018年度前期 課題演習 A1A2合同発表会

# 目次

1、導入と動機

2、実験セットアップ

3、測定 (Calibration)

4、測定 (Compton散乱)

5、結果

6、考察

7、まとめ

---

---

# 導入と動機

小畑

---

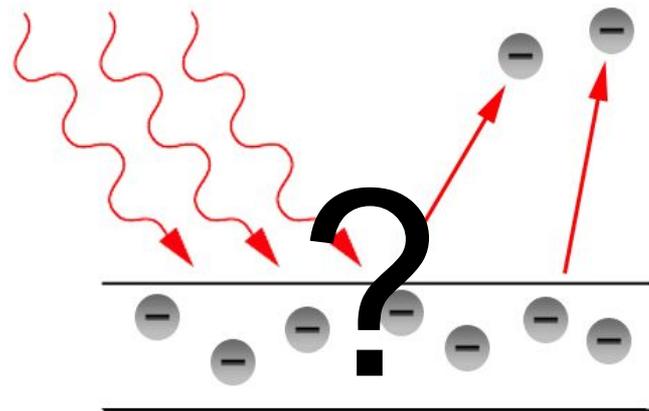
---

# 動機

光に波動性があることは知っている...

でも

**光の粒子性**は、あまり実感が湧かない。



ならば

実際に、光の粒子性を示す

# Compton散乱の実験

を自分たちでやってみよう！

# エネルギーと散乱角の関係式

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

この関係が成り立っていることを確かめ光に粒子性があることを確かめたい！

# 散乱モデル

- 光子のエネルギー

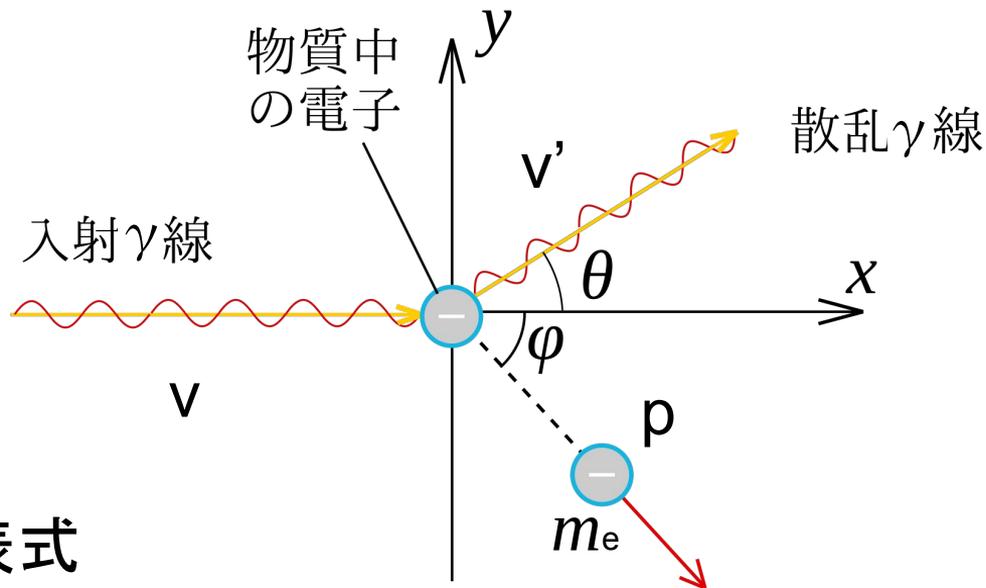
$$E = h\nu$$

- 光子の運動量

$$p = \frac{h\nu}{c}$$

- 相対論的なエネルギーの表式

$$E = \sqrt{c^2 p^2 + m^2 c^4}$$



## エネルギー保存則

$$h\nu + m_e c^2 = h\nu' + E_e$$

## 運動量保存則

$$0 = \frac{h\nu'}{c} \sin \theta - p \sin \phi$$

$$\frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} + p \cos \theta$$

# エネルギーと散乱角の関係式

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

この関係が成り立っていることを確かめ光に粒子性があることを検証したい！

# 目次

1、導入と動機

2、実験セットアップ

3、測定 (Calibration)

4、測定 (Compton散乱)

5、結果

6、考察

7、まとめ

---

---

# 実験セットアップ

— 榎野 —

---

---

# 実験概要

## 1. Calibration(校正)

ADCカウントとエネルギーの関係式を得る

## 2. Compton散乱

シンチレータ結晶内の電子によって散乱された $\gamma$ 線と

反跳電子のエネルギーを $\theta$ ごとに測定

# Calibration 方法

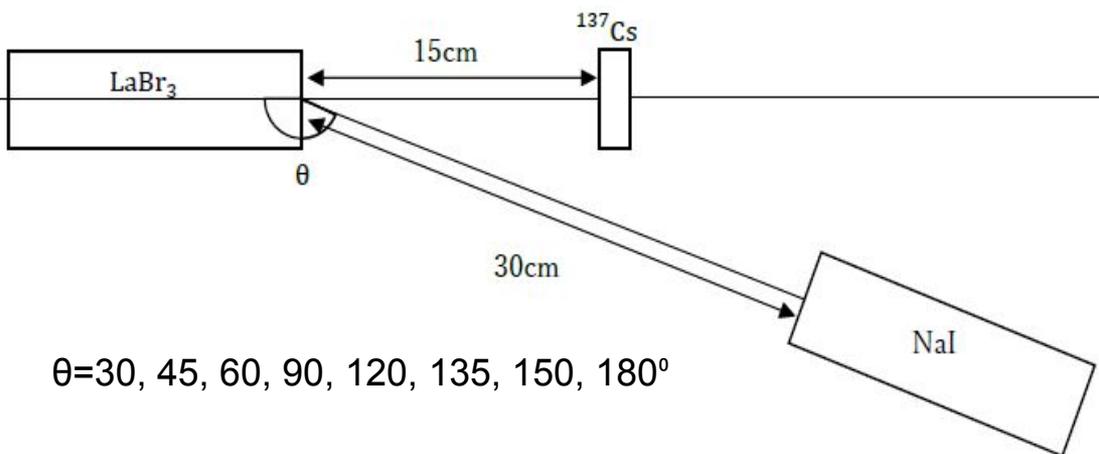
線源： $^{60}\text{Co}$ ,  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{57}\text{Co}$ ,  $^{22}\text{Na}$ , Pb特性X線

既知エネルギーとNaI,  $\text{LaBr}_3$ のADCカウントとの関係

Clock Generatorからの信号でADCカウント(Pedestal)を測定

# Compton散乱 方法

$^{137}\text{Cs}$ の $\gamma$ 線と $\text{LaBr}_3$ シンチ結晶内の電子のCompton散乱

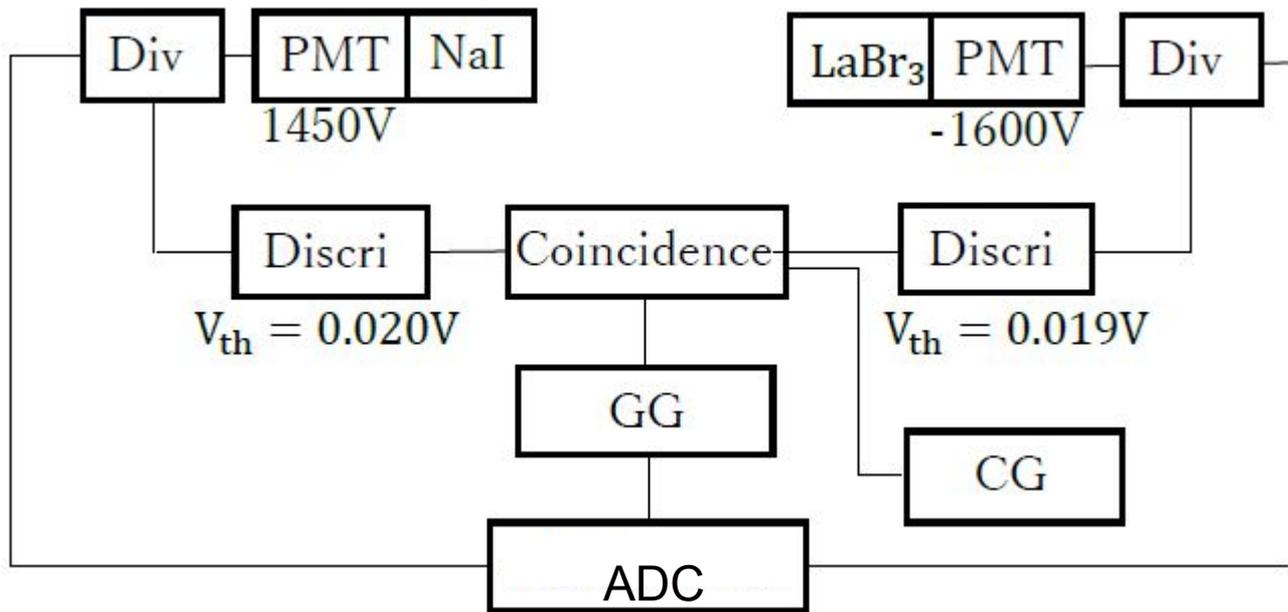


$\text{LaBr}_3$ の方が $\text{NaI}$ よりも  
低エネルギーを観測できる

→ $\text{LaBr}_3$ で電子のエネルギーを測定

Coincidenceを使って  
同時に信号が来たときのみ測定

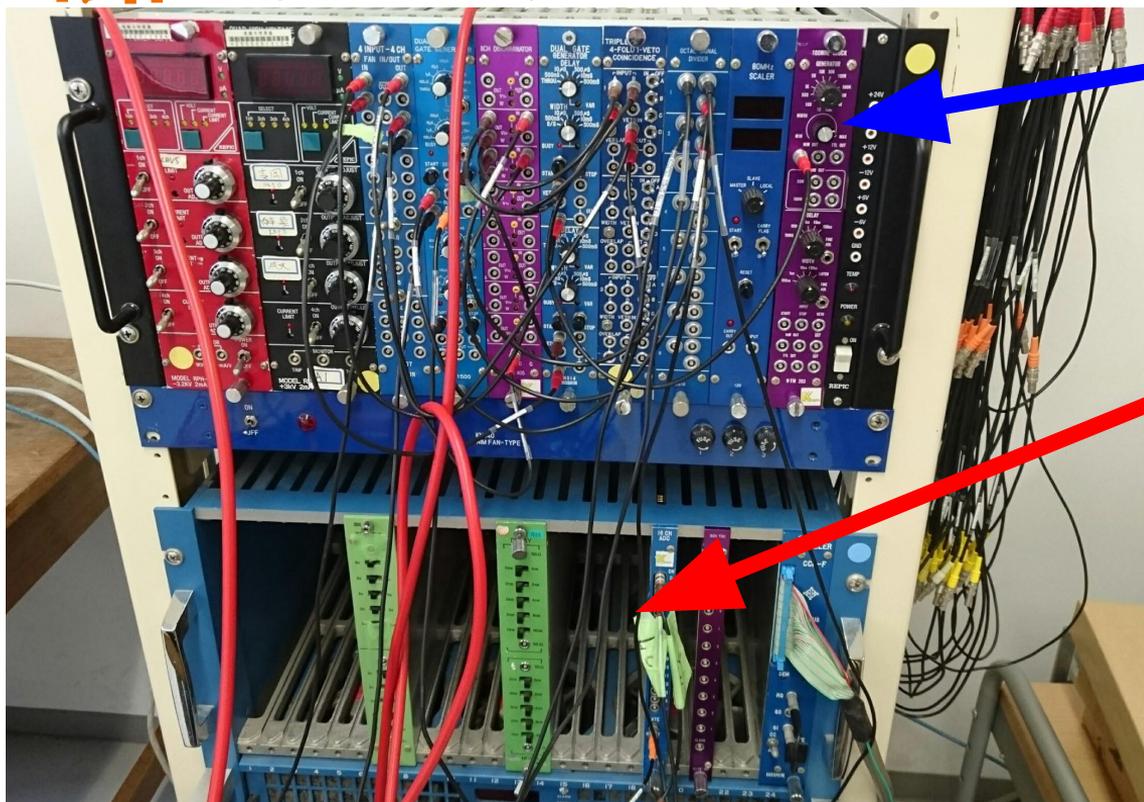
# 回路概略



Div = Divider  
Discri = Discriminator  
GG = Gate Generator  
CG = Clock Generator

ADCカウント= $I(t)$ の時間積分

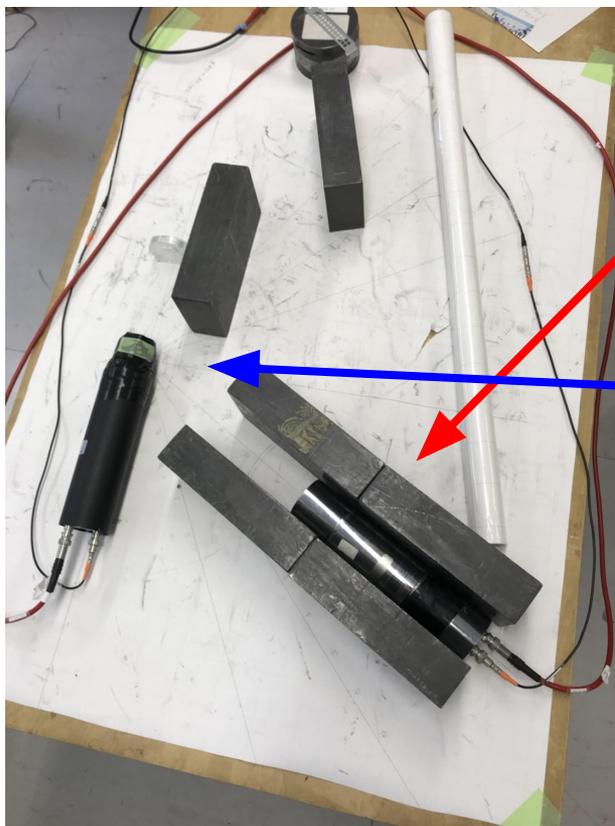
# 回路モジュール



NIM(論理信号)  
積分範囲を指定

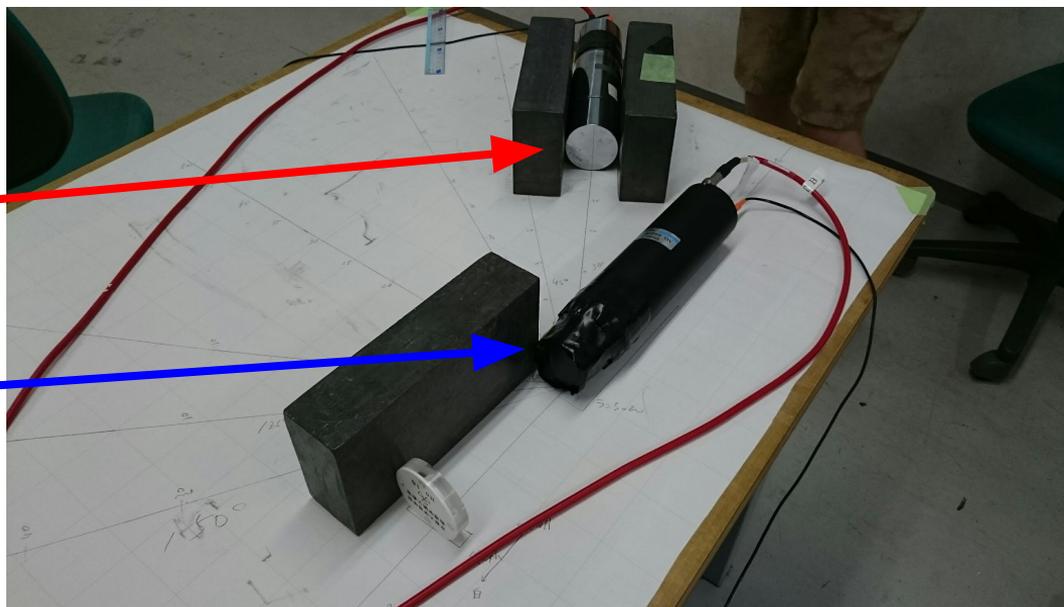
CAMAC  
(コンピュータ  
コントロール)  
電流を時間積分

# 鉛で直接入射する $\gamma$ 線を遮断



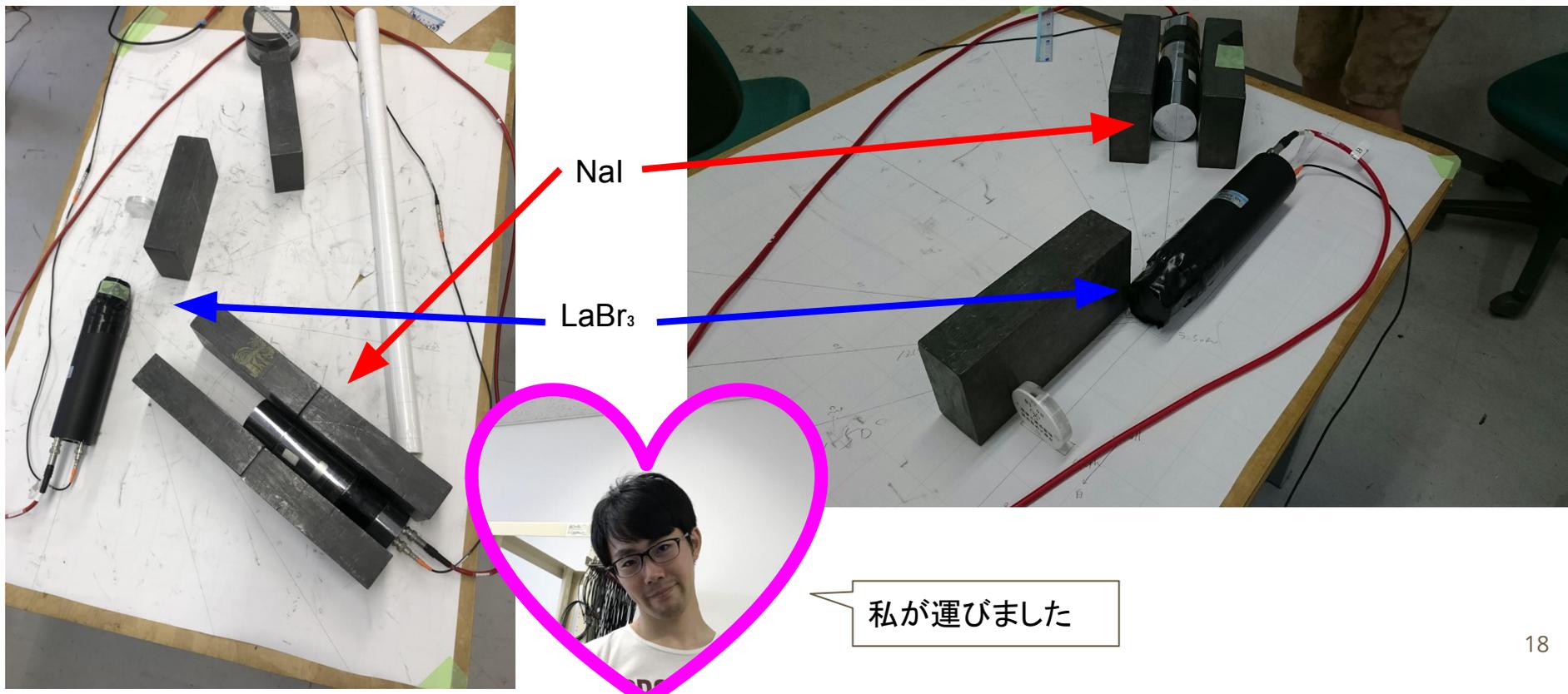
NaI

LaBr<sub>3</sub>



鉛で直接NaIに入射する $\gamma$ 線を遮断し、精度を上げる

# 鉛で直接入射する $\gamma$ 線を遮断



# 目次

1、導入と動機

2、実験セットアップ

3、測定 (Calibration)

4、測定 (Compton散乱)

5、結果

6、考察

7、まとめ

---

---

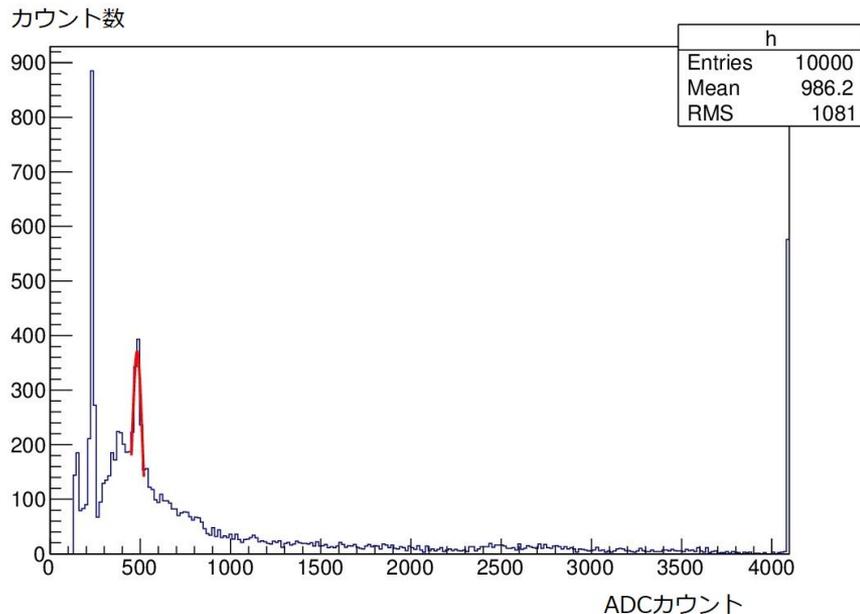
# 測定 (Calibration)

(榎本)

---

---

# キャリブレーションとは



縦軸カウント数、  
横軸ADCカウントのグラフを  
ガウシアンでフィッティング

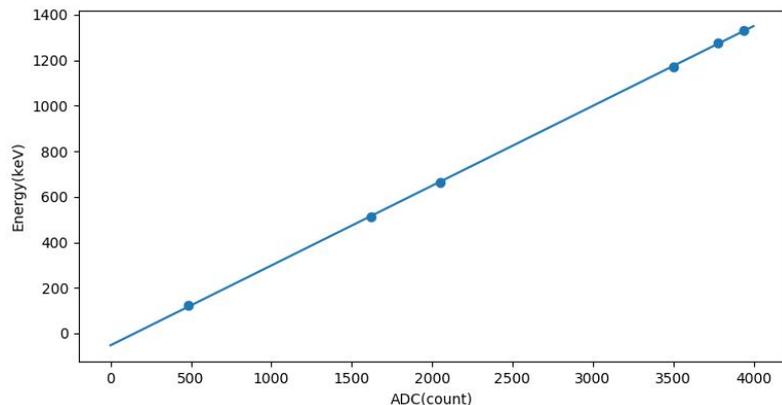
→

ピークのADCカウントと既知のエネ  
ルギー(keV)を別のグラフにプロット

→

一次関数でフィッティング

## LaBr<sub>3</sub>のADCカウント

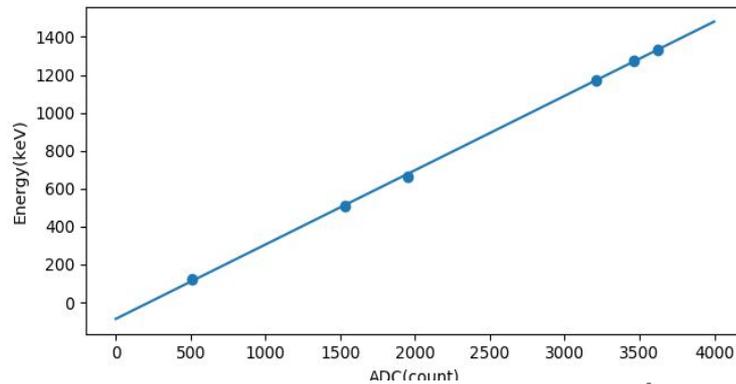


比例関係

$$a=0.346(\sigma_a=1.014\times 10^{-4})$$

$$b=-1.258(\sigma_b=1.059\times 10^{-1})$$

## NaIのADCカウント

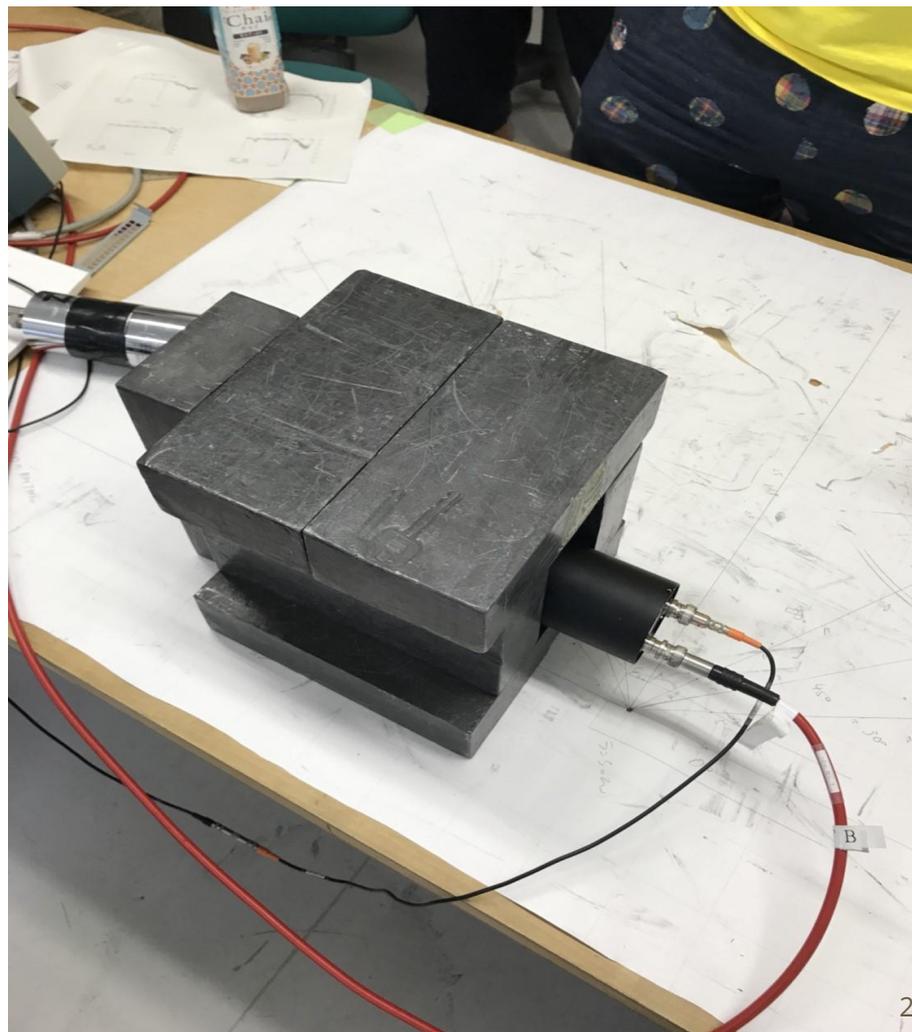


$$a=0.382(\sigma_a=2.723\times 10^{-4})$$

$$b=-2.303(\sigma_b=3.768\times 10^{-1})$$

## Pb特性X線の測定風景

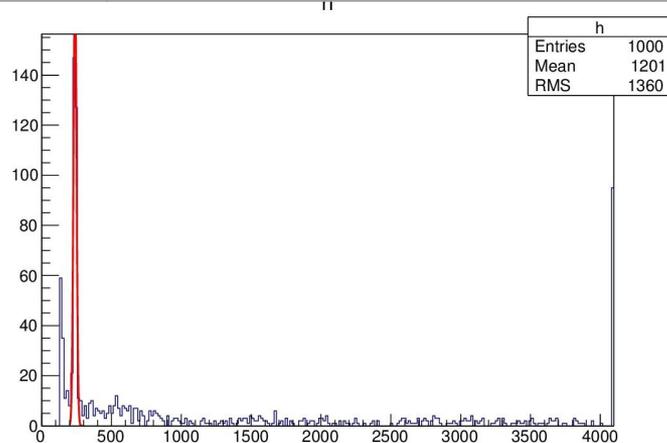
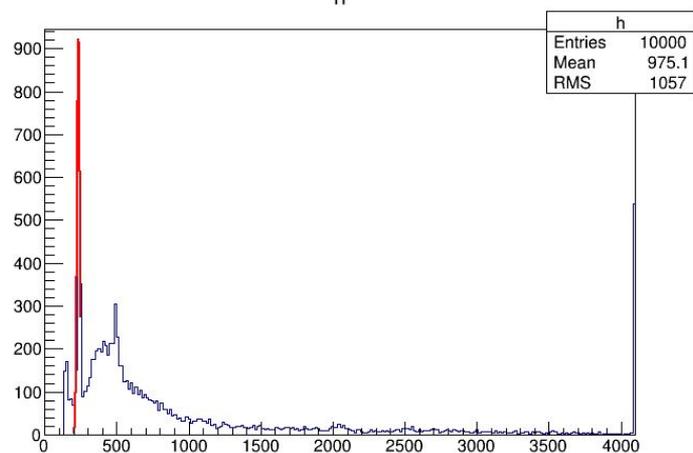
鉛ブロックにて外部からの放射線を遮断



# 謎のピーク

LaBr<sub>3</sub>で<sup>57</sup>Coの計測時

LaBr<sub>3</sub>で鉛の特性X線の計測時



両方とも意図しない部分にピークが出たため、  
これらはキャリブレーションに用いなかった

# 謎のピーク

LaBr<sub>3</sub>で鉛の特性X線で得たピークは238カウントであったため

Calibration結果を使ってエネルギーに変換すると、81.09keVとなった。

ところが、文献をさがしてもその付近にピークを持つような線源は見つからなかった。

参考(文献値)

<sup>44</sup>Ti 67.9keV

<sup>67</sup>Ga 93.3keV

<sup>67</sup>Cu 93.3keV

# 目次

1、導入と動機

2、実験セットアップ

3、測定 (Calibration)

4、測定 (Compton散乱)

5、結果

6、考察

7、まとめ

---

---

# 測定

— COMPTON散乱 —

---

---

# 手順 線源： $^{137}\text{Cs}$

- 1、Pedestalのピーク、標準偏差、ERRORの測定
  - 2、 $^{137}\text{Cs}$ のスペクトルのピーク、標準偏差、ERRORの測定
  - 3、Coincidenceのピーク、標準偏差、ERRORの測定
- この1～3を角度ごとに繰り返した。

# Pedestalとは？

: 実験室の温度、湿度などの要因により少しずつ変化する、エネルギー0の時のADCカウント

これを手順2、3で得られた生のデータから差し引くことで、その線源本来のADCカウントがわかる。

ところがその性質ゆえ...

⇒ 本実験の測定を行う度にその値を確認する必要がある。

逆にPedestalが安定していれば、実験として一応正しいことをやっているという証になる。

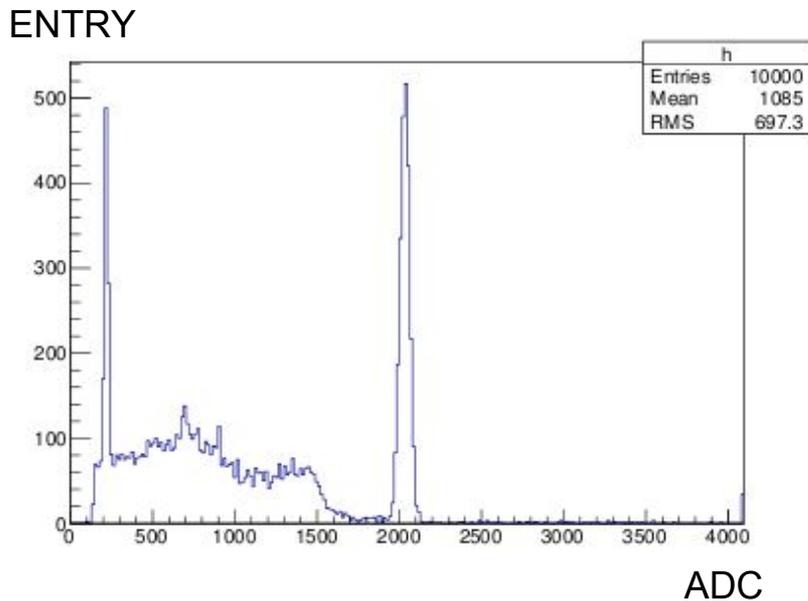
# なぜ？

PMTやシンチレーターから出てくる電子は温度依存

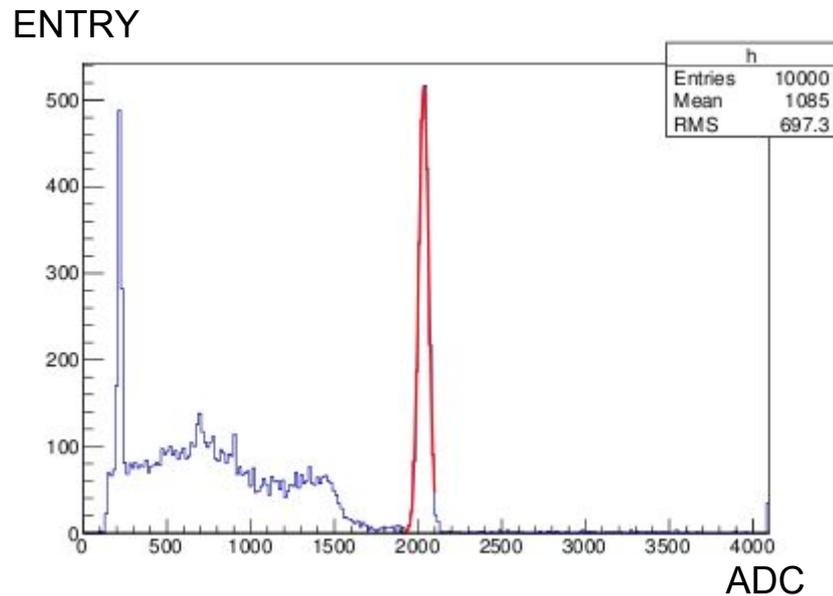


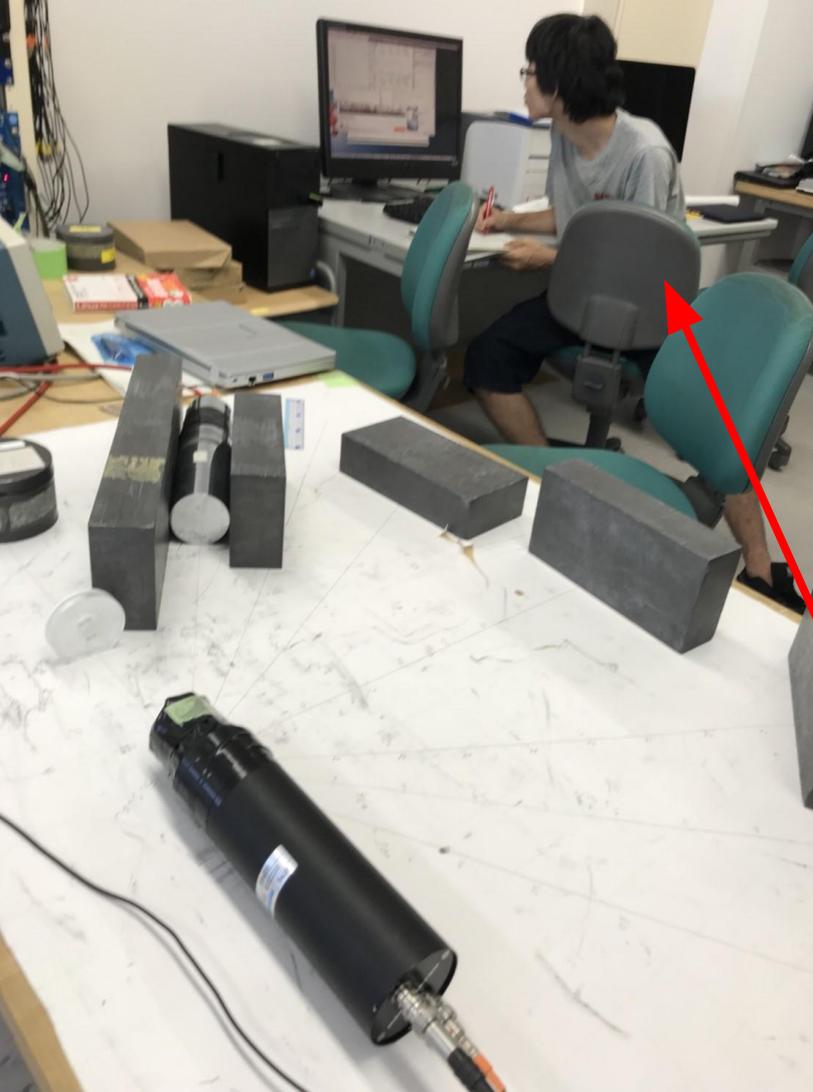
欲しいデータが温度に依存してしまう！

# $^{137}\text{Cs}$ の測定 ( $\theta = 180$ の場合)



Fitting



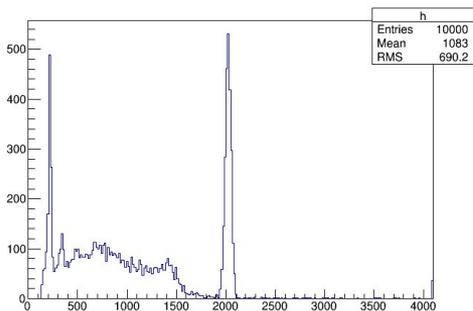


画用紙に角度を記入中

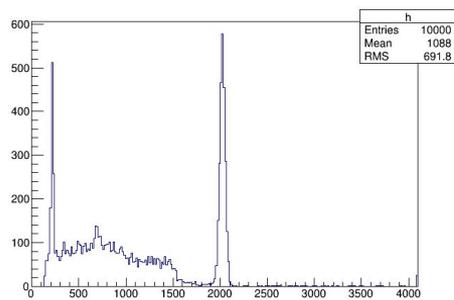
頑張っている私

# $^{137}\text{Cs}$ スペクトル

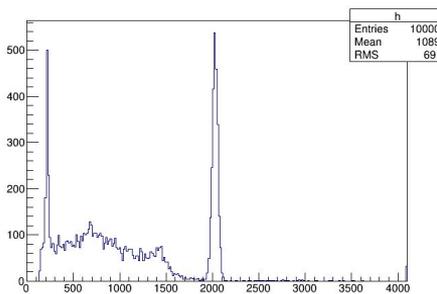
縦軸: ENTRY数 横軸: ADCカウント



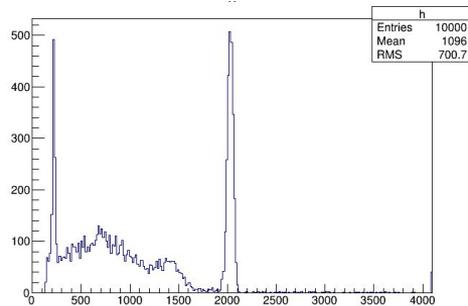
$\theta = 30^\circ$



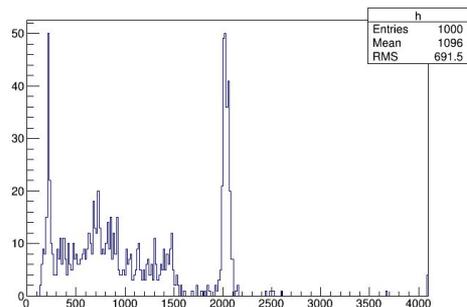
$\theta = 45^\circ$



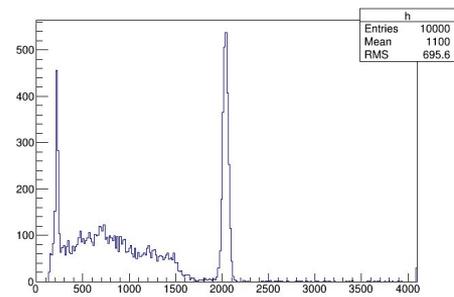
$\theta = 60^\circ$



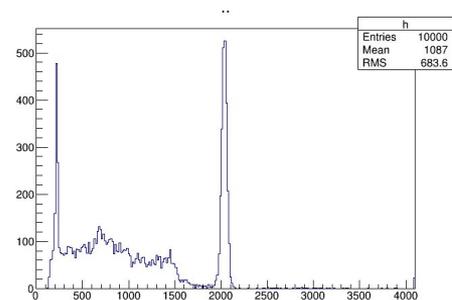
$\theta = 90^\circ$



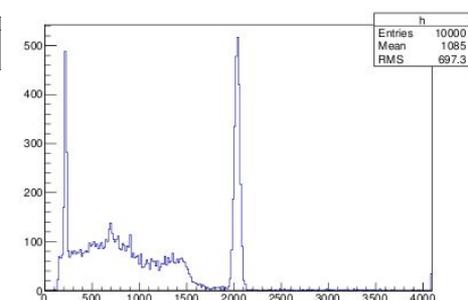
$\theta = 120^\circ$



$\theta = 135^\circ$



$\theta = 150^\circ$



$\theta = 180^\circ$

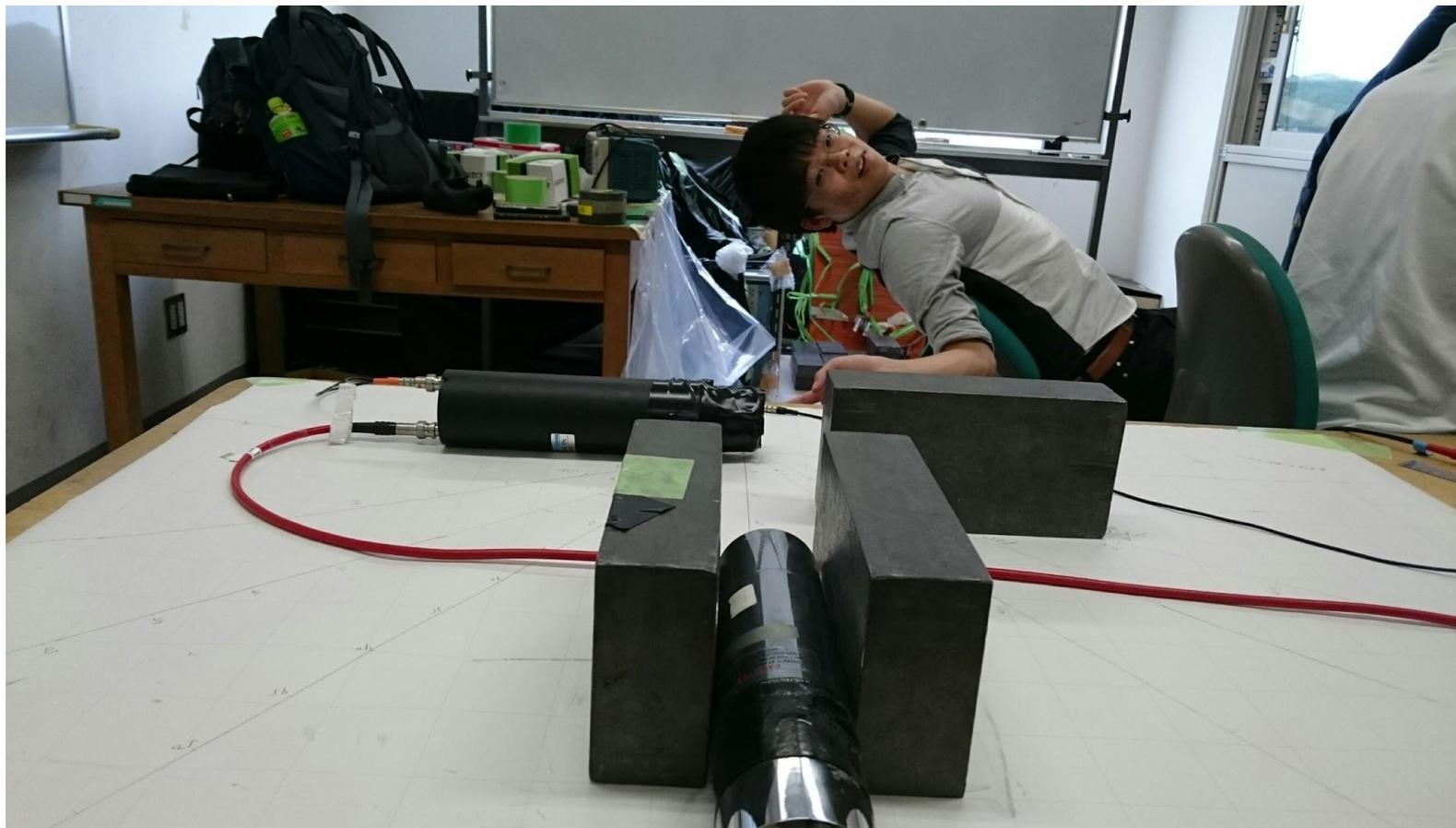
すべての角度において同じところにピークがある(安定している)

+

Pedestalも安定している

→ 本実験を通して  
Calibrationの式が安心して使える。

## Compton越しの竹田くん♡



# Coincidenceについて

CoincidenceとはLaBr<sub>3</sub>とNaIに同時に信号が入力されたときのみ信号を出力するモジュール

⇒頻繁に起こるものではないので、Coincidenceの測定は1000カウントで行った。

このときbin幅を4にしていると、グラフが細かくなりすぎてぼやけてしまったため、8に変更

⇒詳しくは考察にて。

# 目次

- 1、導入と動機
- 2、実験セットアップ
- 3、測定 (Calibration)
- 4、測定 (Compton散乱)
- 5、結果
- 6、考察
- 7、まとめ

# 結果

# エネルギー保存則の確認(再掲)

$$E_{\gamma} = \frac{662}{1 + (662/511)(1 - \cos \theta)} \quad [\text{keV}]$$

$$E_e = 662 - \frac{662}{1 + (662/511)(1 - \cos \theta)} \quad [\text{keV}]$$

ここに $\theta$ はgamma線の散乱角度

662は入射光子(gamma線)のkeVで, 511は電子の静止エネルギー(keV)

# エネルギー誤差評価の方法

## エネルギーの誤差評価の方法

$$(\text{Energy}) = ax + b$$

xはADCカウント  
a,bはcalibrationで得る定数

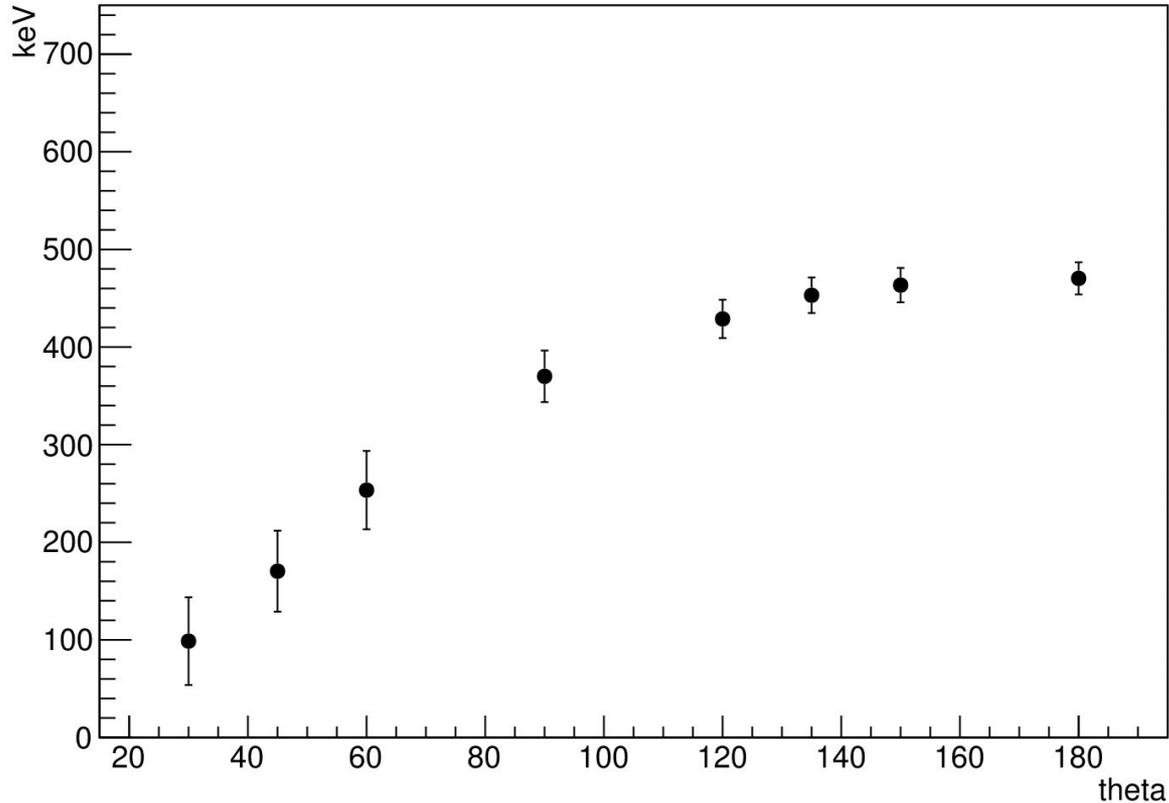
$$\sigma^* = \sqrt{x^2 \sigma_a^2 + a^2 \sigma_x^2 + \sigma_b^2}$$

この $\sigma^*$ を電子と $\gamma$ 線それぞれに  
対して計算する

$$\sigma_{\text{total}}^* = \sqrt{(\sigma_e^*)^2 + (\sigma_\gamma^*)^2}$$

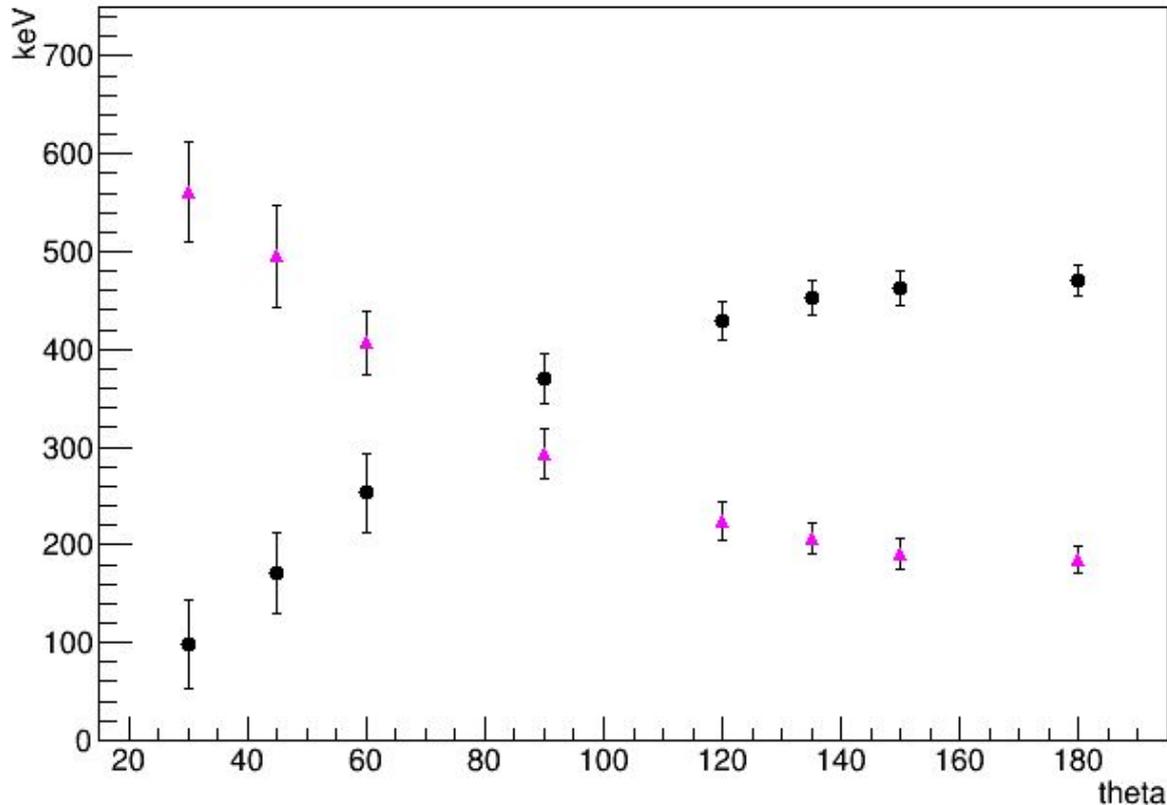
エネルギーの合計値の誤差

## Graph



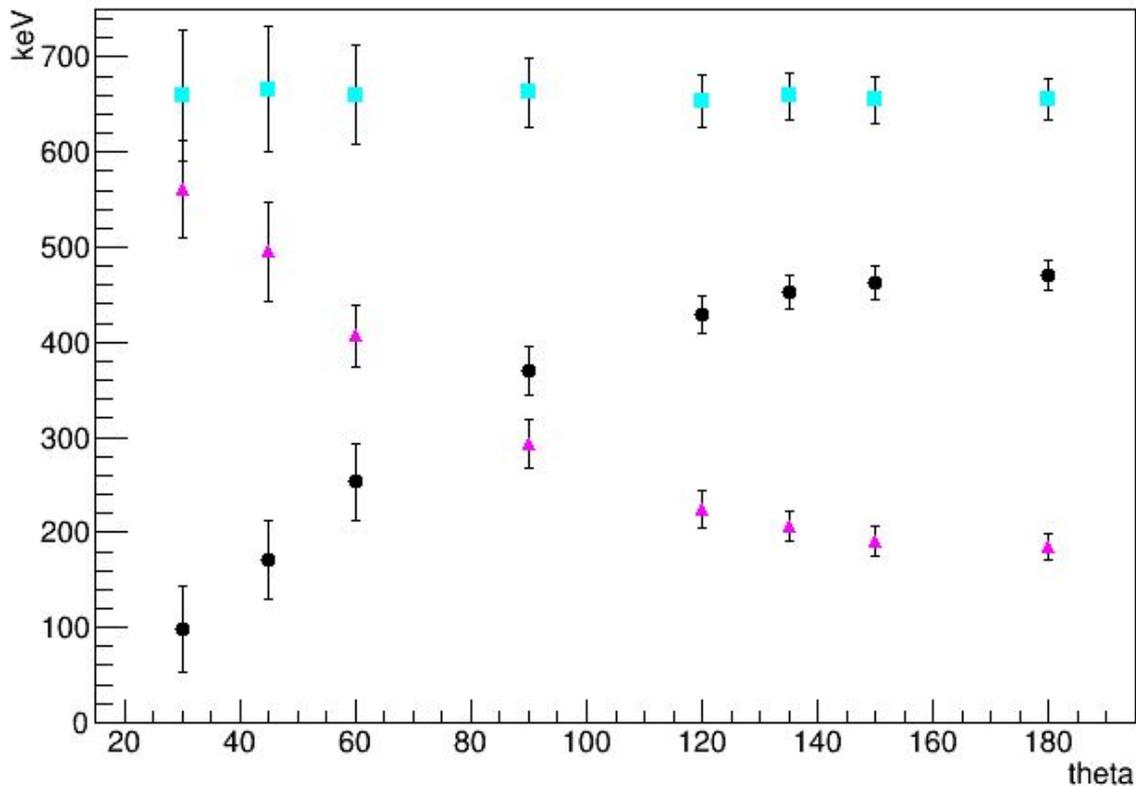
Compton散乱による反跳電子の運動エネルギーと角度の関係。  
エネルギーはCalibrationによってADCcountを変換したもの。  
エラーバーは、Fitの誤差とシンチレータどうしの向きからの誤差(角度が小さいほど大)による。

## Graph



Compton散乱の起きたシンチレータ (NaI)で計測して得られた散乱角とエネルギーの値。(先ほどのグラフに重ね書き)  
すなわち、放射線がCompton散乱を経て、なお残ったエネルギーを表すはず。

# Graph



同散乱角における、両者のエネルギー値の和をさらに重ね書きしたもの。  
この値は、Compton散乱する前の放射線のエネルギー、つまり線源である  $^{137}\text{Cs}$  の放射線エネルギー(662keV)そのものであることが期待される。

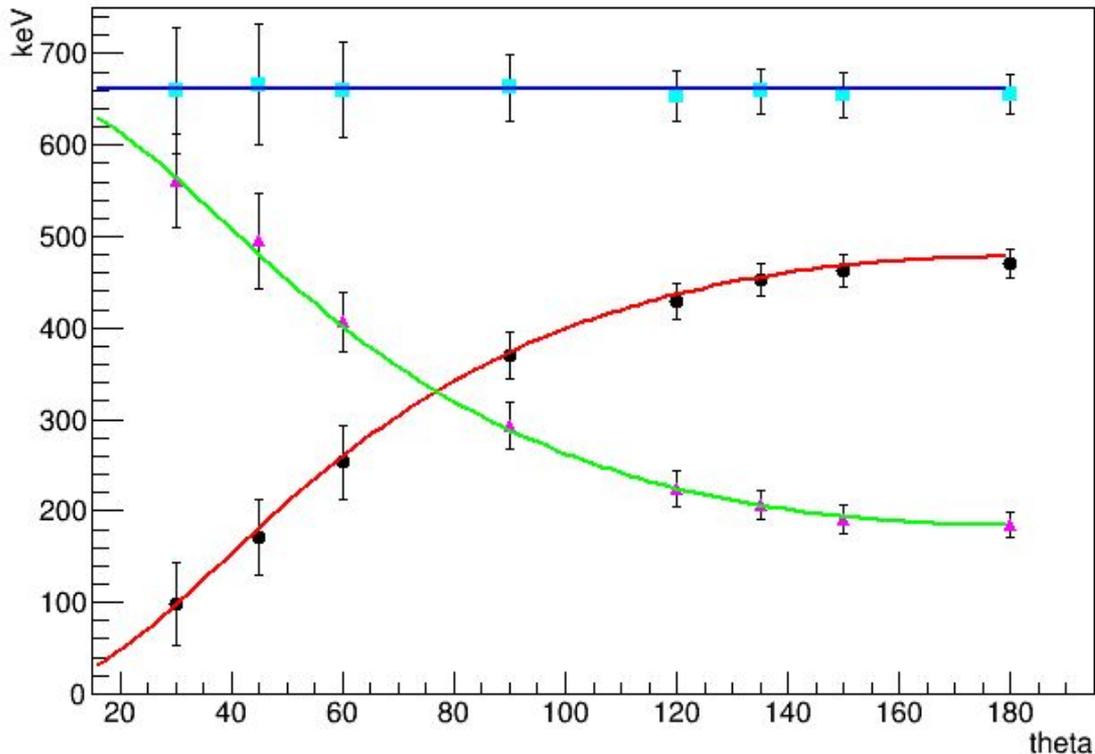
# 劇的！



BEFORE

AFTER

Graph



理論曲線を上書きしたもの。

- :  $^{137}\text{Cs}$ の支配的な放射線エネルギー
- : Compton散乱された電子のエネルギー
- : Compton散乱後に残った放射線(光子)のエネルギー

# 目次

- 1、導入と動機
- 2、実験セットアップ
- 3、測定 (Calibration)
- 4、測定 (Compton散乱)
- 5、結果
- 6、考察
- 7、まとめ

---

---

# 考察

---

---

竹田

# 実験方法に対する考察

理論曲線はfitした全ての点においてエラーバー上を通る。

→上手く行った理由を考えてみる

1. pedestalをこまめに測った
2. 1日でcalibrationからCompton散乱まで行った
3. bin幅を適切に取った

# 1. pedestalをこまめに測った

- Calibrationの最後
- 全ての角度において,測定の直前に

その日は(3桁まで)で毎回一定値であることが分かった。

## 2. 1日の間に測定

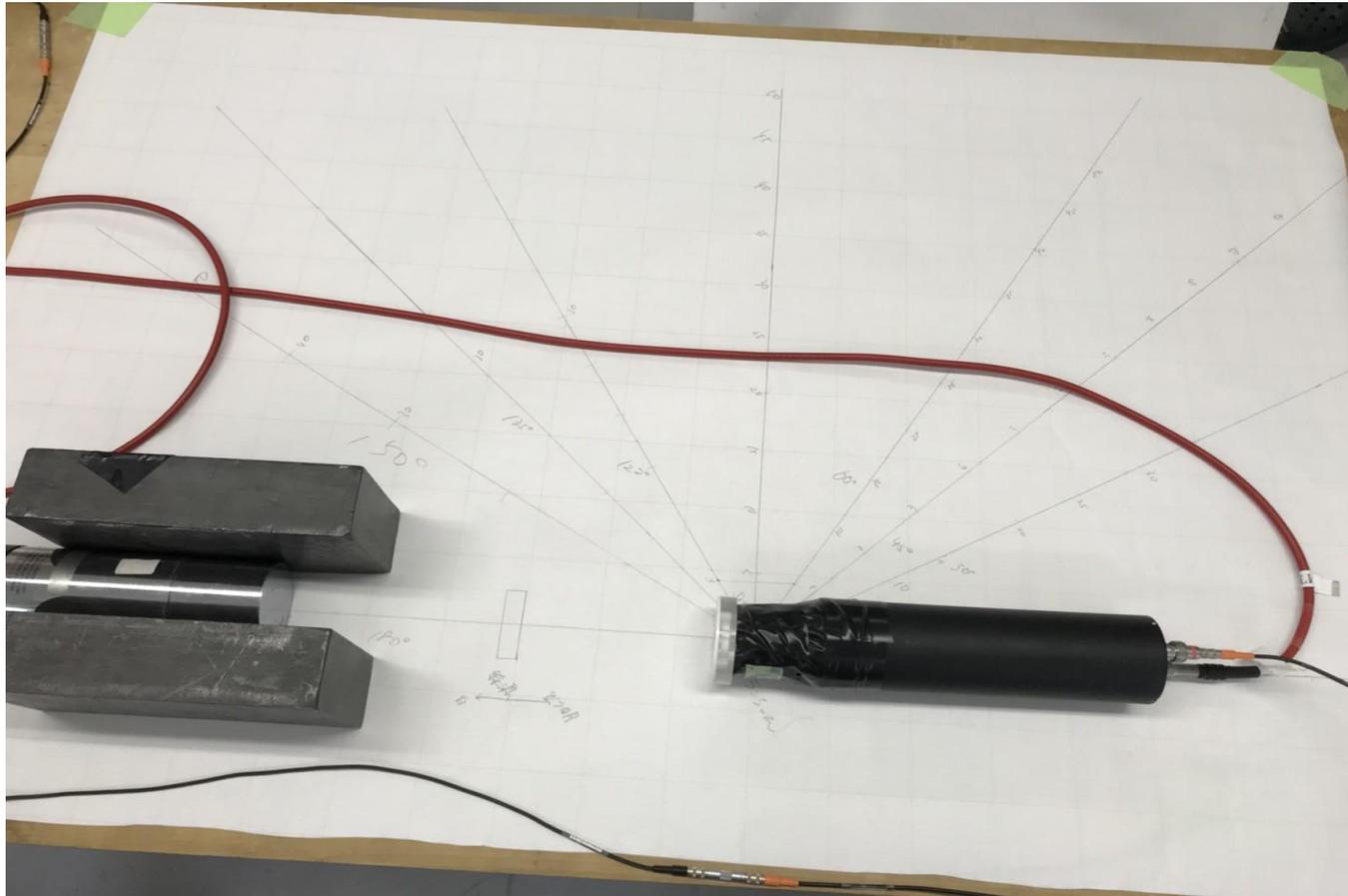
本実験に入るまでは, Calibrationなどを日をまたいで行った

→ pedestal値が変化したり, セッティングの微妙な変化により, Calibrationが上手くいかなかった。

本実験では夏休みの1日でCalibrationからCompton散乱測定まで全てを1日でやってしまう

→ Calibrationではセッティングを固定し, pedestal値も一定に。上手く直線でfittingもできた。

→ Compton散乱でもセッティングを正確にするため, 画用紙を用いた。



### 3. bin幅の困難とその解決1

- Compton散乱のピークをGaussianでfittingする際,はじめはbin幅が細かすぎることを気にしなかった。
- しかし、実はこれが測定誤差を大きくしていた。

→ bin幅が細かすぎると,ピークの付近で挙動の変化が激しくなってしまう。fitting範囲を選択する際に,系統誤差が大きくなってしまう。

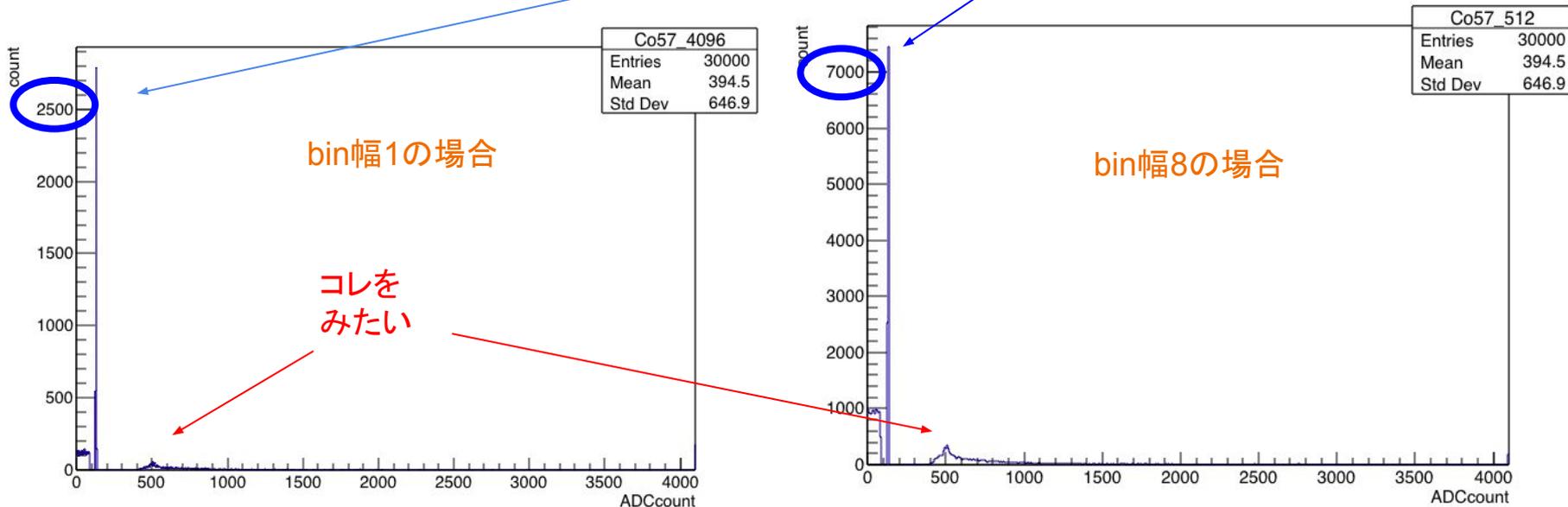
## 3 bin幅の困難とその解決2

では具体的にはどういう点で系統誤差が生じてしまうのか...

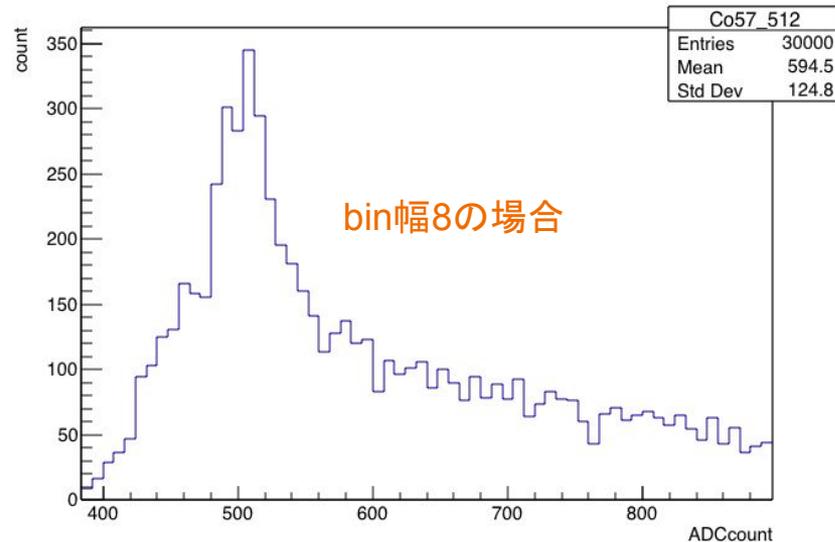
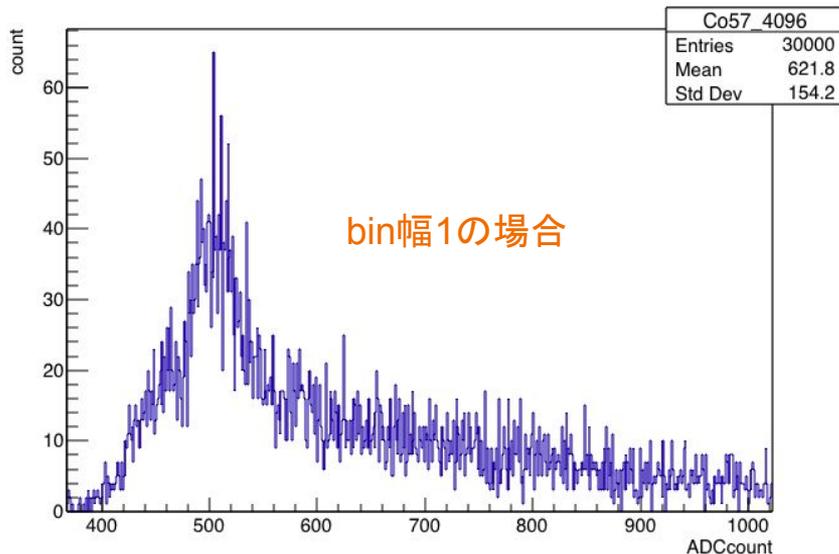
分かりやすいようにbin幅を1の場合と8の場合で紹介(説明のため極端な例にしています)

# 問題点1 bin幅が細かすぎる場合ピークがはっきりしない！

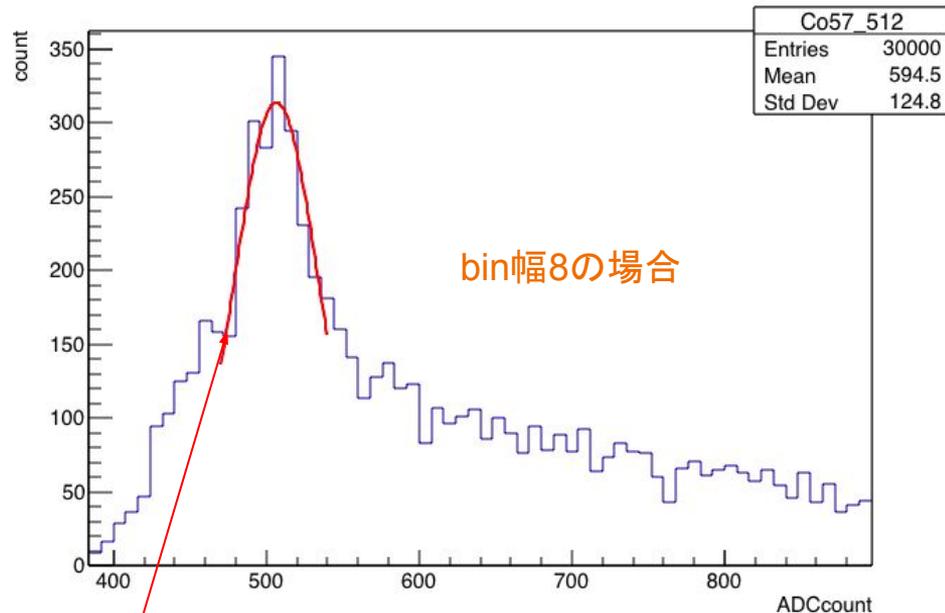
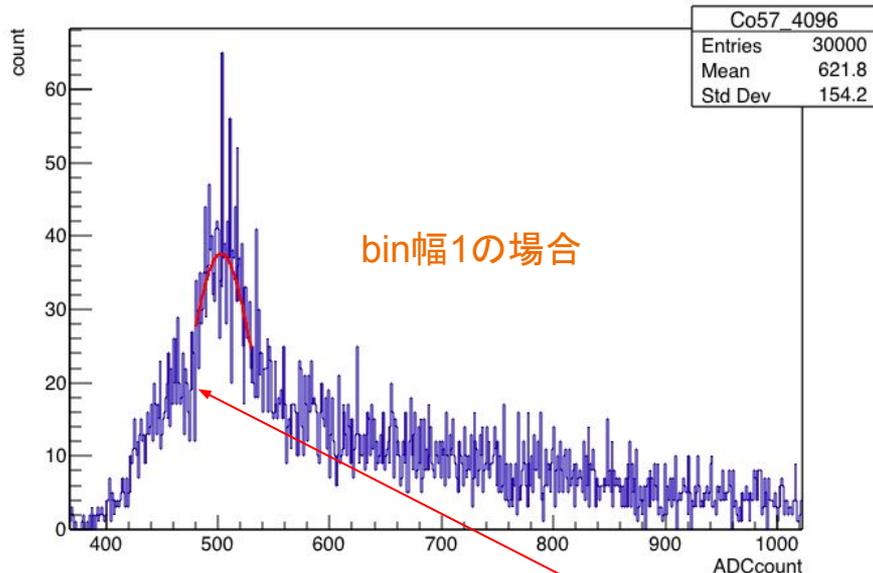
Co57の放射線



問題点2 zoomした際にピーク付近の凹凸が激しい  
→そもそもピーク付近でまわりより極端に低いbinがあつてはgaussianとして問題



### 問題点3 gaussianの形を視覚的に捉えにくくfittingの範囲が選びにくい



binに詰まってくれて山のはじまりが  
分かりやすい

問題点3 続き 凹凸の激しさのため, 平均値(mean)のエラーが大きくなる

今の例の場合...

bin幅 8 ==> meanエラー 0.90/sigmaエラー 1.38

bin幅 1 ==> meanエラー 1.57/sigmaエラー 3.33

# 目次

- 1、導入と動機
- 2、実験セットアップ
- 3、測定 (Calibration)
- 4、測定 (Compton散乱)
- 5、結果
- 6、考察
- 7、まとめ

# まとめ

この実験は

既知のエネルギー

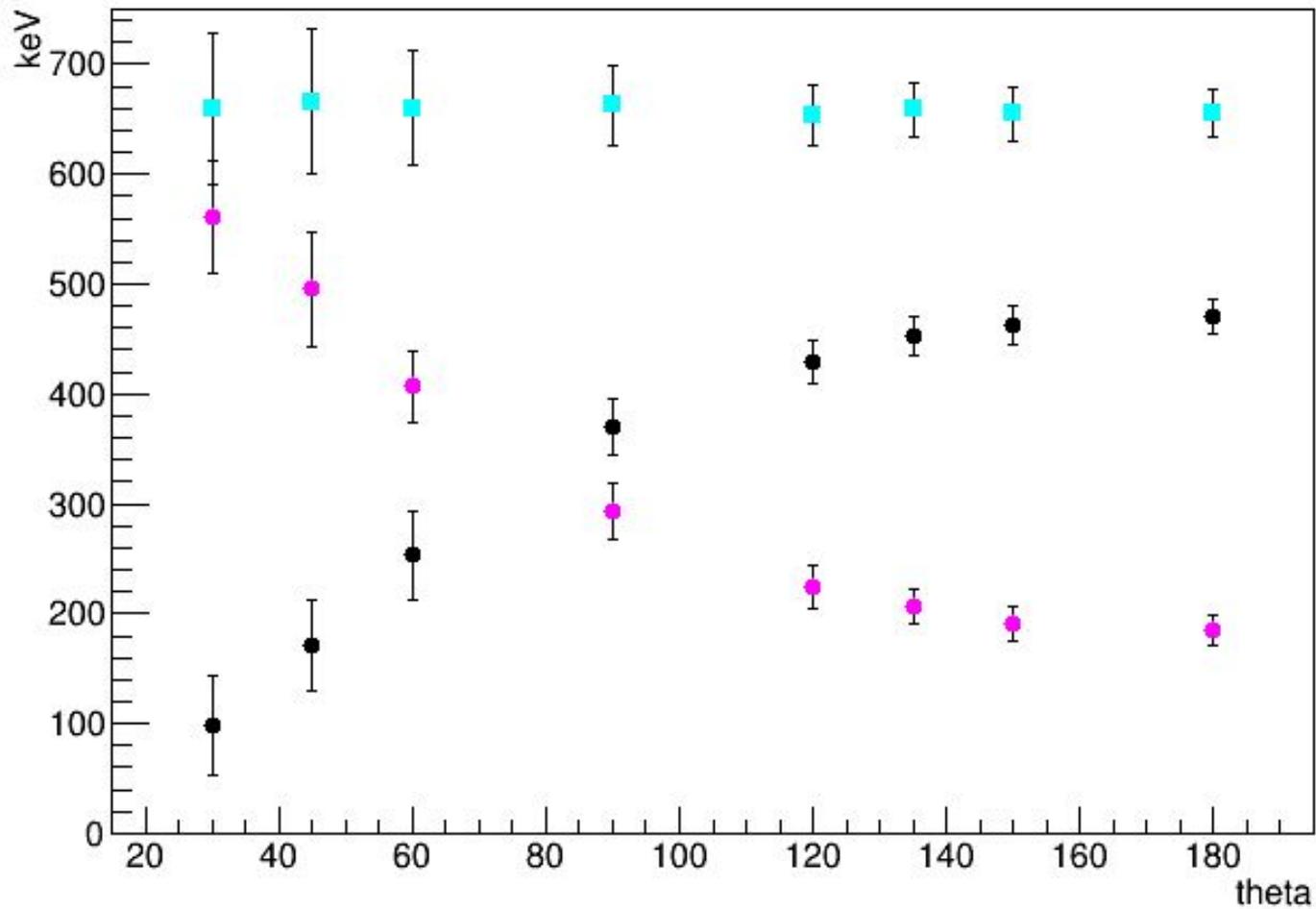
Pedestal測定

→ Calibration:  $(\text{Energy}) = a \times (\text{ADC Count}) + b$



**エネルギー** V.S. **角度** を視覚化！

# Graph



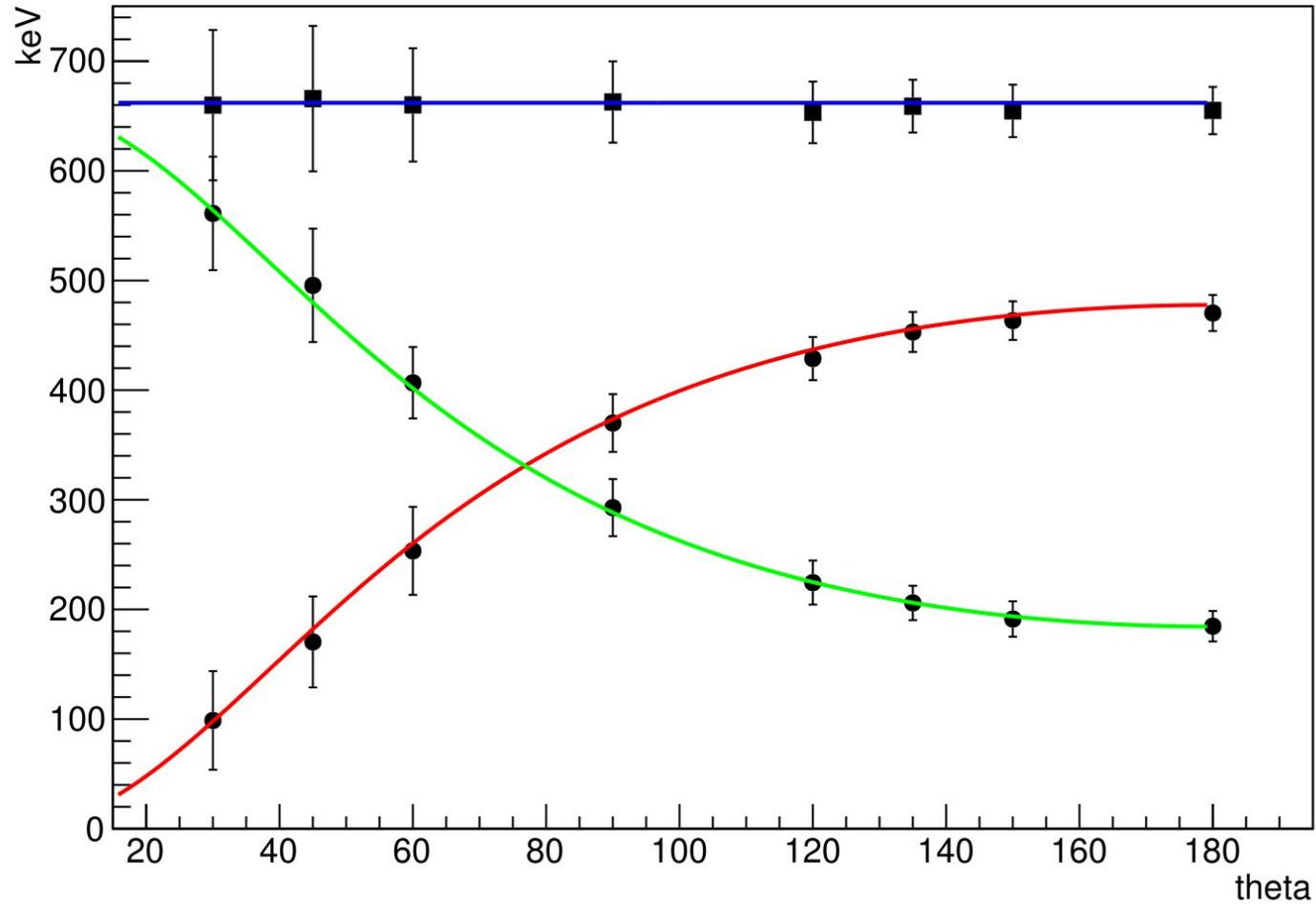
## さらに

教科書にあるようなCompton散乱の理論値

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2} (1 - \cos \theta)}$$

をグラフ上に乗せると...

# Graph



実験値は理論値と整合した！

つまり、理論の大元である

**光の粒子性**

が確認できた！