

# Violation of CHSH inequality



Ichikawa Shu Kobayashi Yujin Shimogama Shogo Yamada Taiki

# Oshinagaki



1. CHSH inequality
2. Experimental Principle
3. Experimental Setup
4. Data Analysis and Results
5. Discussion



# 1. CHSH inequality

# CHSH inequality

- ・隠れた変数理論は局所相関のみを許す
- ・量子力学には非局所的な相関(例: 量子もつれ)が存在する(EPR paradox)
- ・隠れた変数理論では次が成立する

## CHSH inequality

$$-2 \leq \langle \alpha\alpha' \rangle - \langle \alpha\beta' \rangle + \langle \beta\alpha' \rangle + \langle \beta\beta' \rangle \leq 2$$

本実験では  $\alpha = \pm 1$ : 線偏光の向き,  $\langle \alpha\alpha' \rangle$  は偏光の相関関数

# CHSH inequality

・量子力学では  $\langle \alpha\alpha' \rangle = -\cos 2\phi$  で

$$\langle \alpha\alpha' \rangle - \langle \alpha\beta' \rangle + \langle \beta\alpha' \rangle + \langle \beta\beta' \rangle = 2\sqrt{2}$$

となる場合が存在する

- ・CHSH不等式が守られる  $\rightarrow$  量子力学を否定
- ・CHSH不等式が破られる  $\rightarrow$  隠れた変数理論を否定
  
- ・パラポジトロニウムの2 $\gamma$ 崩壊とCompton散乱を利用して, keVのエネルギーを持つ現象でも量子力学が保証されることを確認したい!



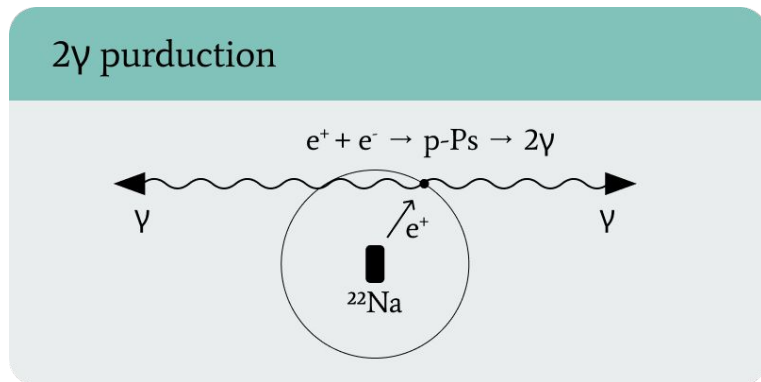
## 2. Experimental Principle

# Experimental Principle : 2 $\gamma$ production

- 511 keVの  $\gamma$  線を使用
- 二本の  $\gamma$  線は逆方向に生じる
- 2  $\gamma$  は量子もつれ状態にある

$$|2\gamma\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|xy\rangle - |yx\rangle)$$

$$\begin{cases} |x\rangle : x\text{軸方向の偏光状態} \\ |y\rangle : y\text{軸方向の偏光状態} \end{cases}$$



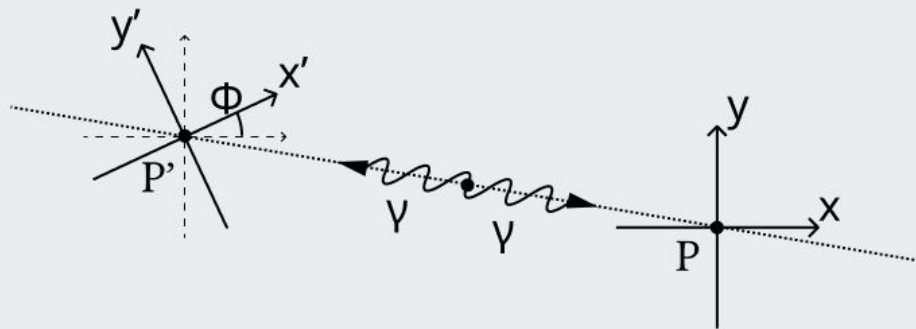
# Experimental Principle : Polarization measurement

- 二本の  $\gamma$  線の偏光を角度  $\Phi$  ズレた軸で測定し、偏光に関する相関関数  $\langle \alpha \alpha' \rangle$  求めたい

## 問題点

直接の偏光測定  
は難しい

## Configuration



# Experimental Principle : How to measure $\langle \alpha\alpha' \rangle$

- Klein-仁科の公式:  $\frac{d\sigma}{d\Omega}(\phi) \propto 5 - 4 \cos^2 \phi$

511 keVの入射光子の偏光面に対して角度 $\phi$ 方向に直角にCompton散乱するときの微分散乱断面積

- Compton散乱の角度分布  $P(\phi)$

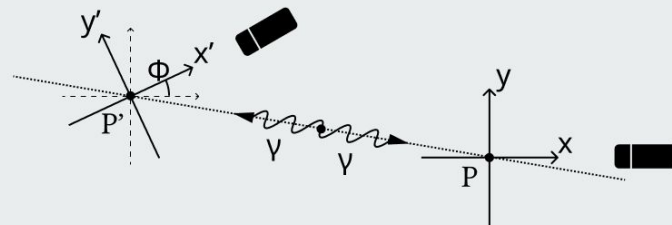
$\langle \alpha\alpha' \rangle$ を知っている!

$$P(\phi) \propto 9 + 4\langle \alpha\alpha' \rangle$$

量子力学では

$$P(\phi) \propto 9 - 4 \cos 2\phi$$

Experimental setup





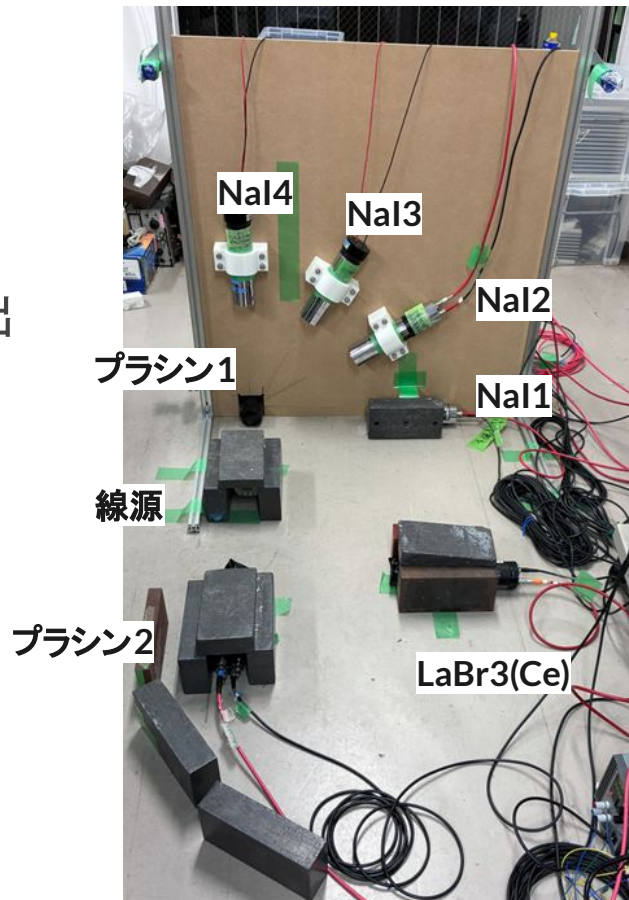
# 3. Experimental Setup

# Experimental Setup

- 装置

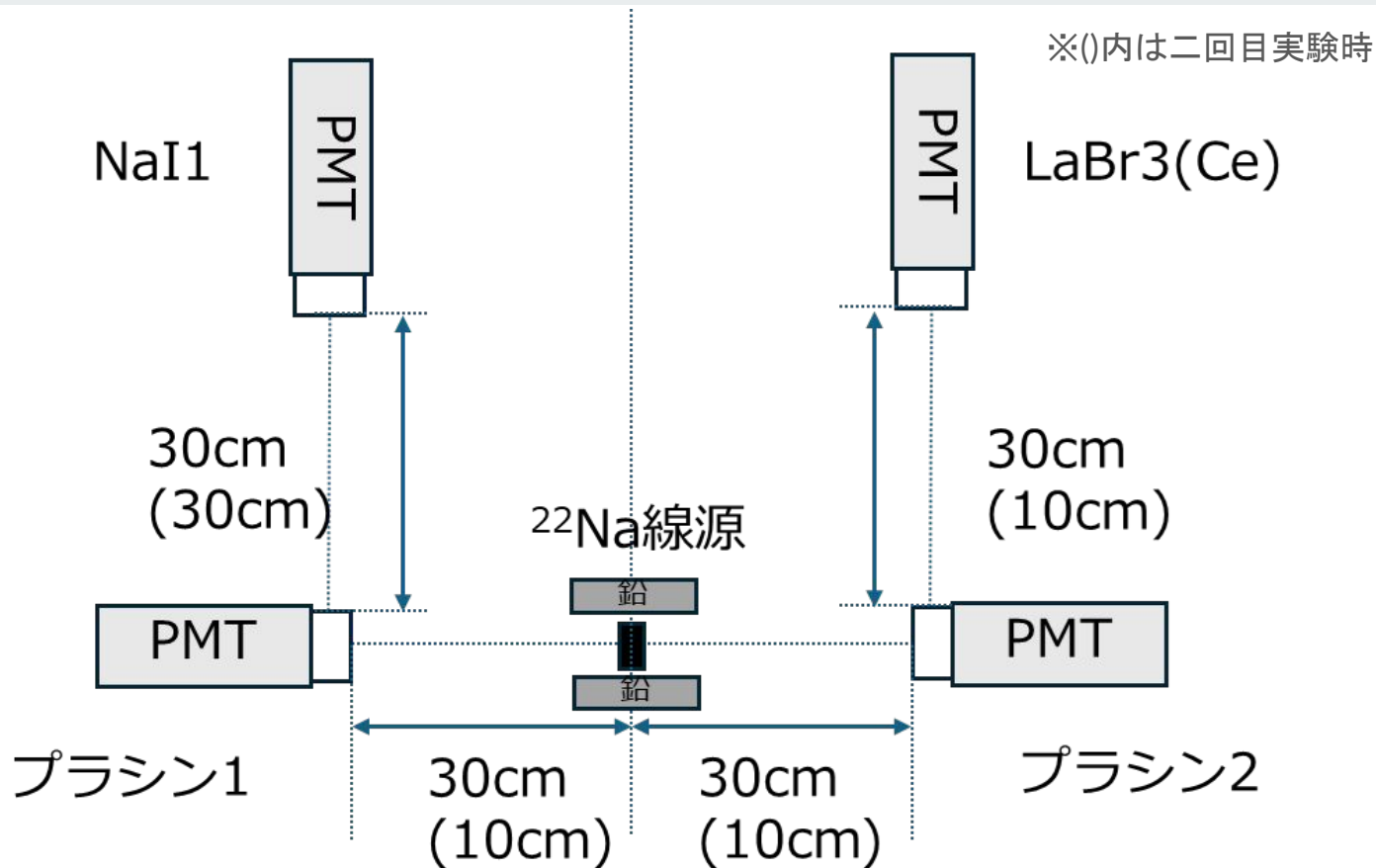
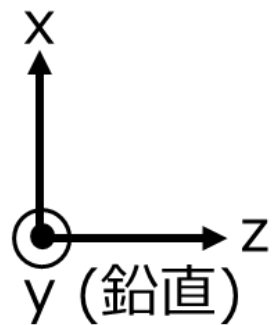
1.  $^{22}\text{Na}$ 線源から出る $e^+$ でPsを生成
2. p-Psの崩壊で $\gamma$ 線がback-to-backで放出
3. 入射 $\gamma$ 線がプラシンでCompton散乱し,  
NaI, LaBr<sub>3</sub>(Ce)で観測

NaIシンチレーター1~4  
プラシン1  
プラシン2  
LaBr<sub>3</sub>(Ce)シンチレーター  
↑ 4つのcoincidenceをとる



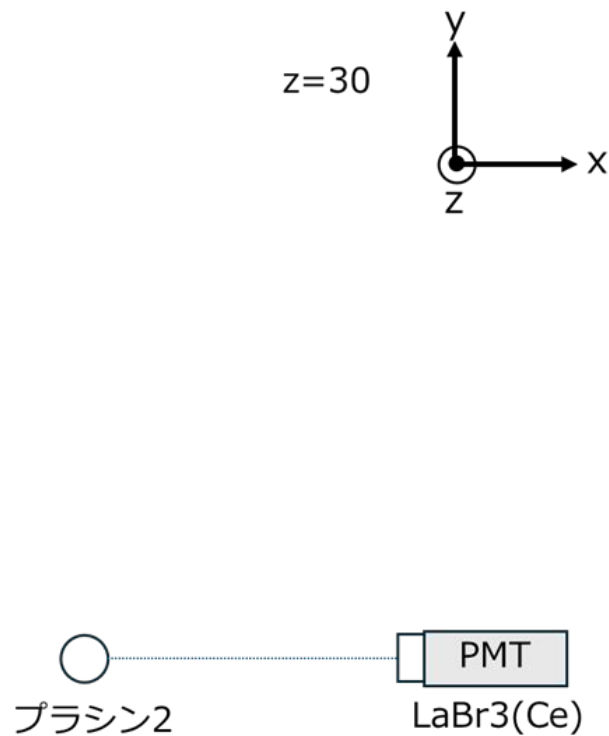
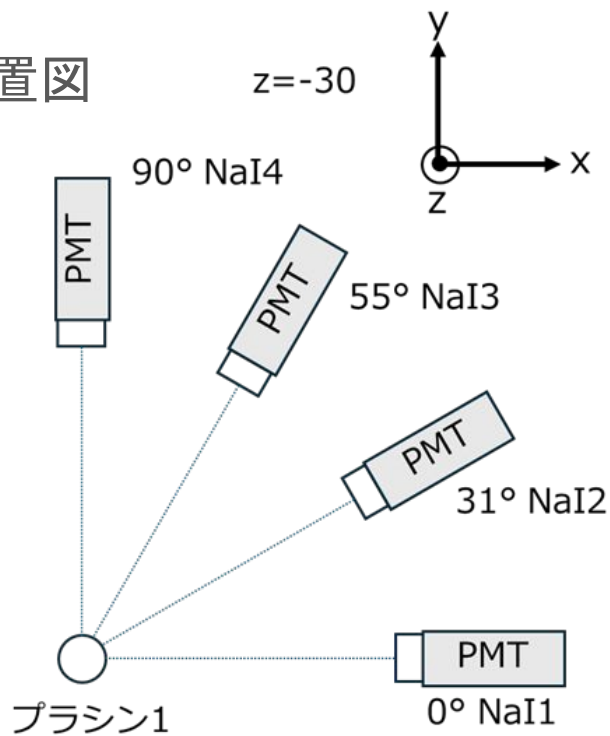
# Experimental Setup

- 装置図



# Experimental Setup

- 装置図



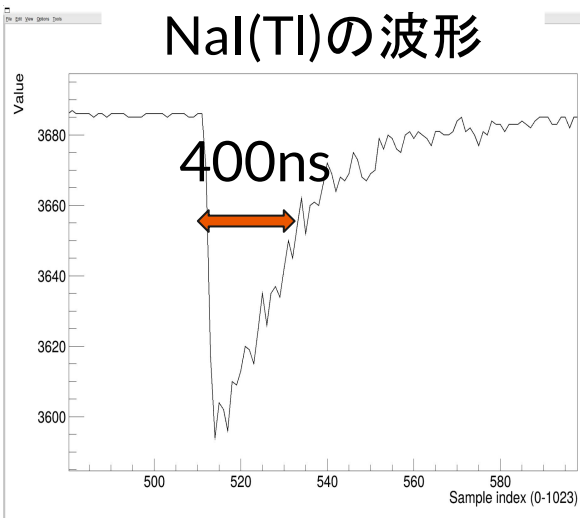


# 4. Data analysis and Results

# Data analysis and Results

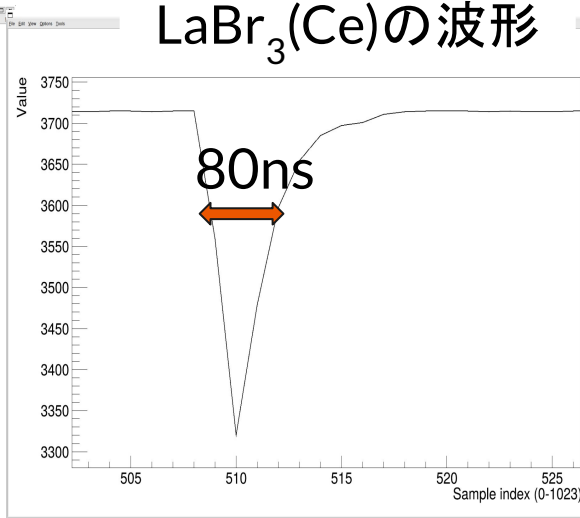
- エネルギー較正 (波形の積分値 (ADC) をエネルギーに変換)

NaI(Tl)の波形

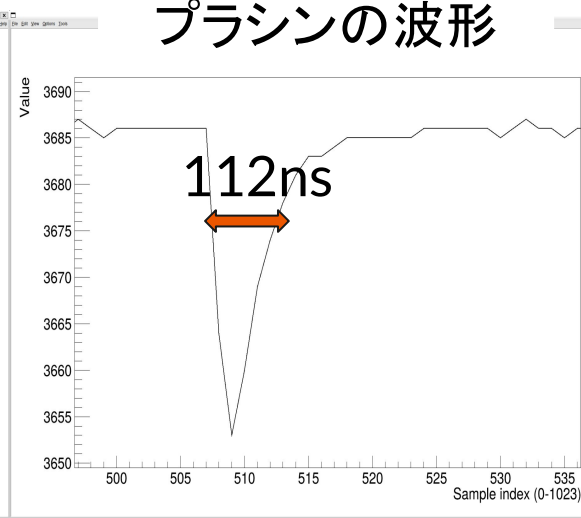


16ns/1sample

LaBr<sub>3</sub>(Ce)の波形



プラシンの波形



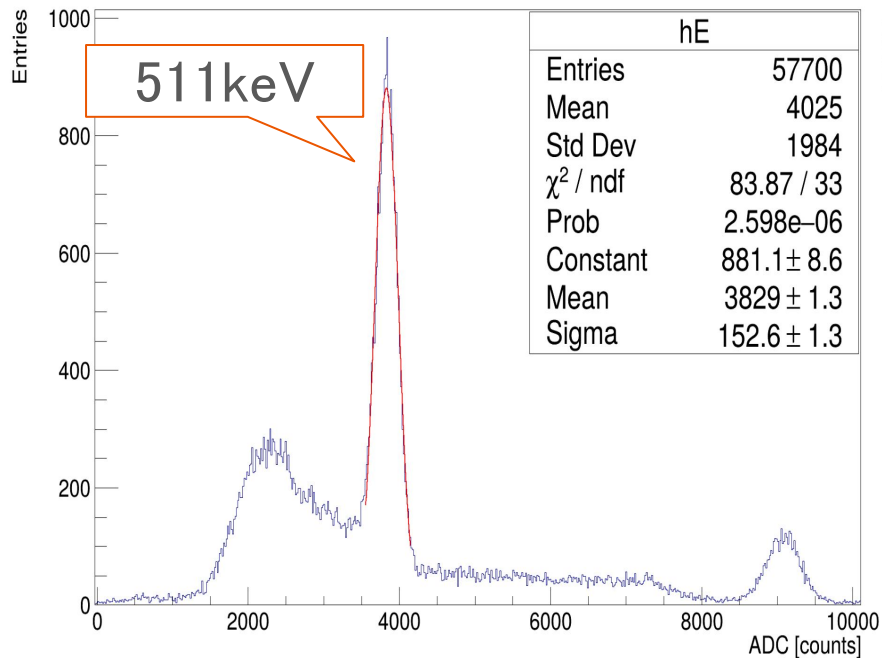
※横軸: 時間 (arb. unit)、縦軸: 電圧 (arb. unit)

それぞれのシンチレータで<sup>22</sup>Na 511keVと<sup>137</sup>Cs 662keVを使って較正する

# Data analysis and Results

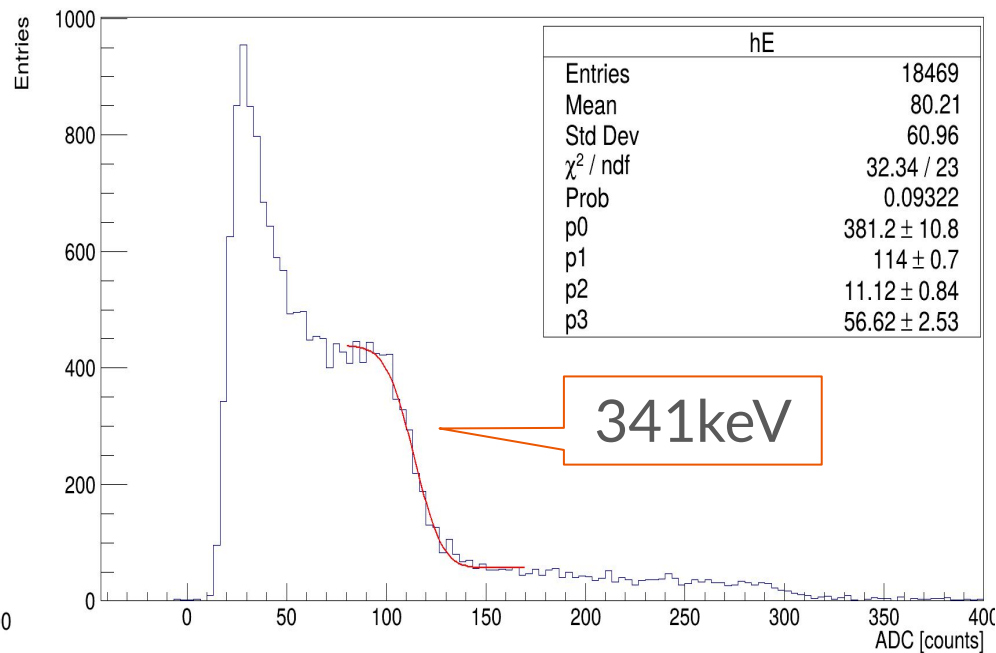
## ● エネルギー較正

Nal(Tl) ADC spectrum (22Na)



光電ピークをガウス関数

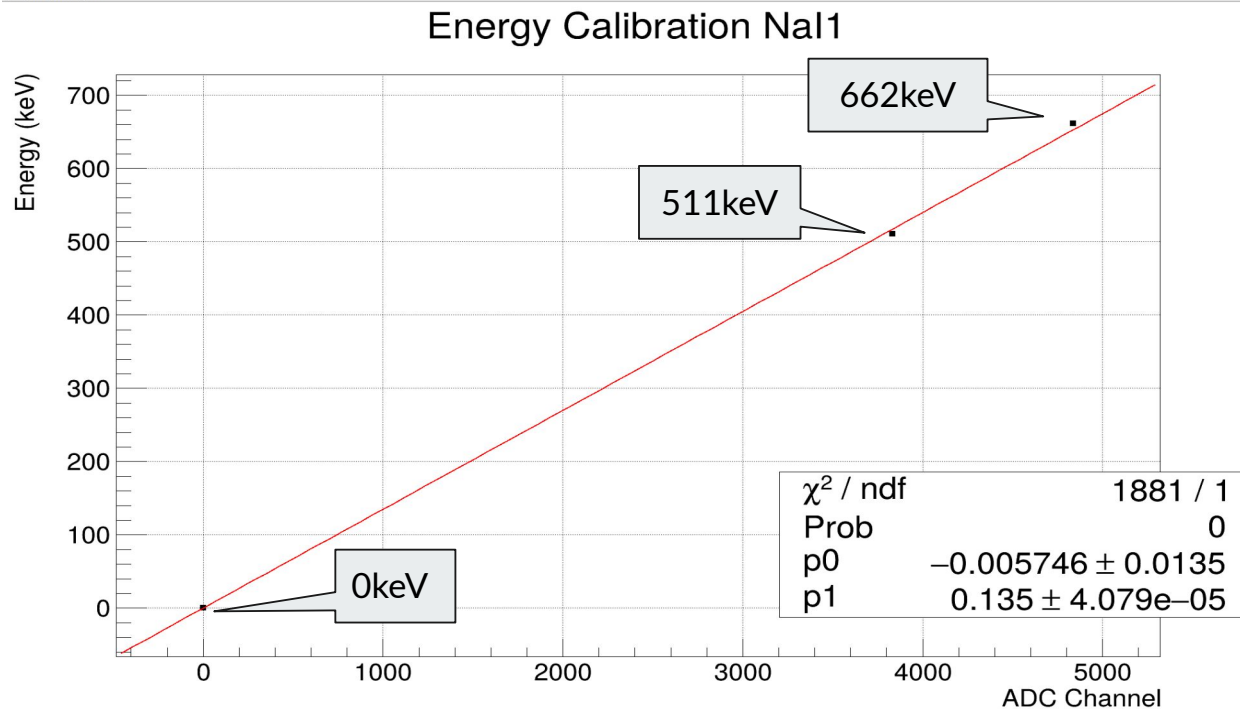
plastic ADC spectrum (22Na)



コンプトンエッジをガウスの誤差関数erf

# Data analysis and Results

## ●エネルギー較正



各シンチレータごとにADCとEnergyの関係を求める。

# Data analysis and Results

## ● 本実験の有効イベントの数え方

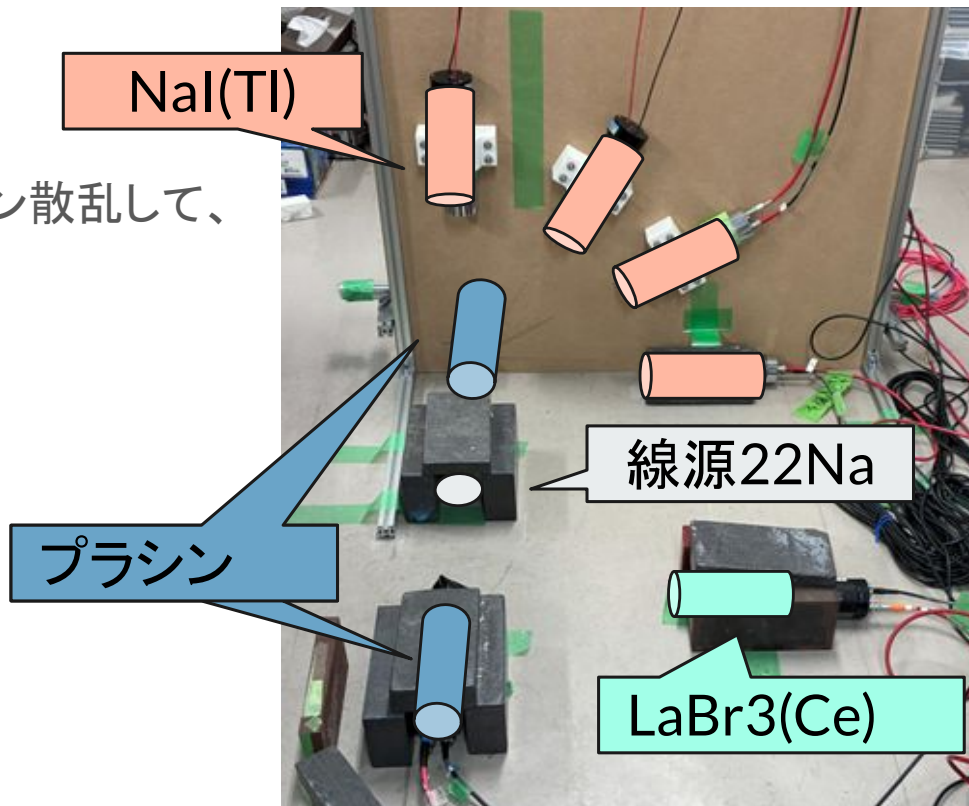
有効なイベントは、プラシンで90度コンプトン散乱して、  
NaI(Tl) and LaBr<sub>3</sub>(Ce)に入ってくるイベント。

→ プラシン×2: 256keVあたり

LaBr<sub>3</sub>(Ce): threshold~256keVあたり

NaI(Tl): 256keVあたり

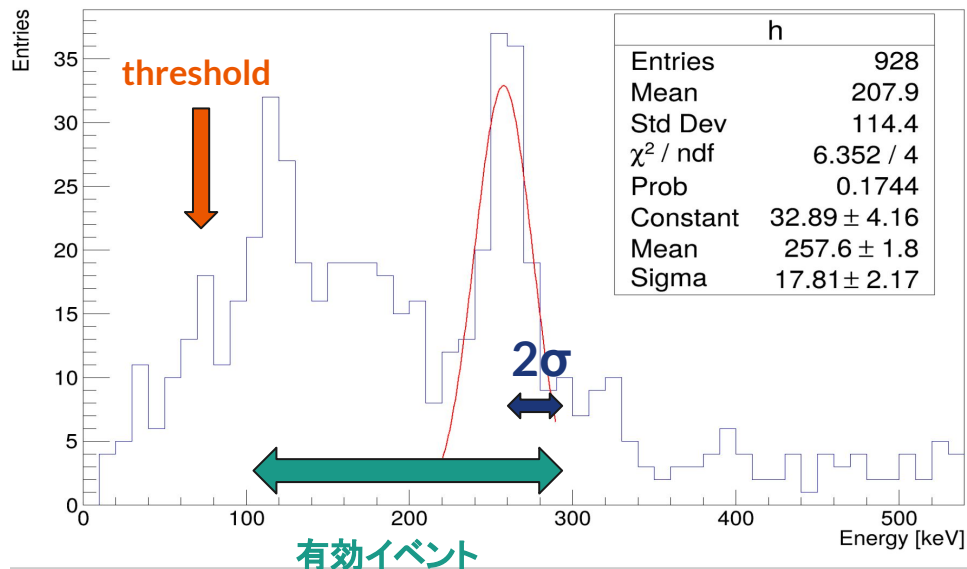
この4つのANDのイベントとする



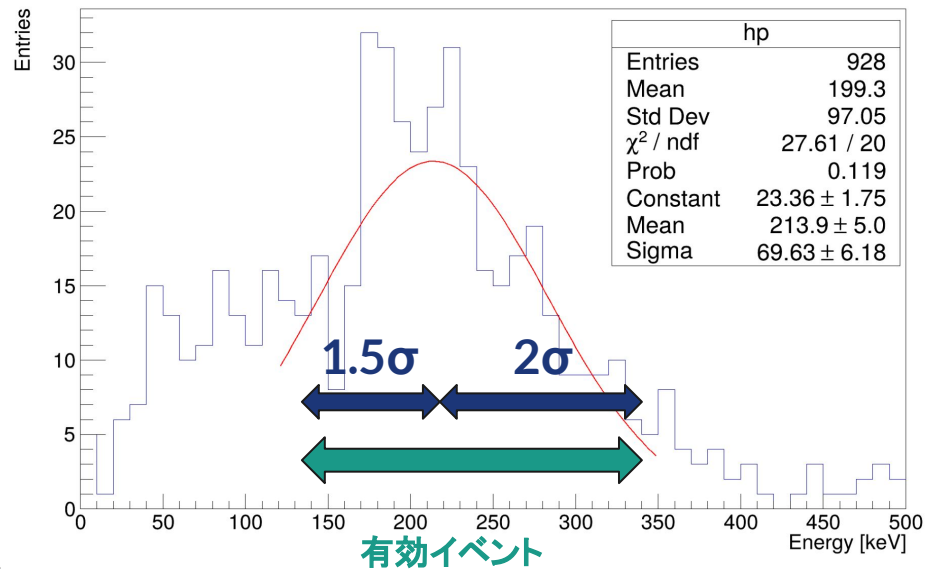
# Data analysis and Results

## ● 本実験の有効イベントの数え方

LaBr3 Energy Spectrum



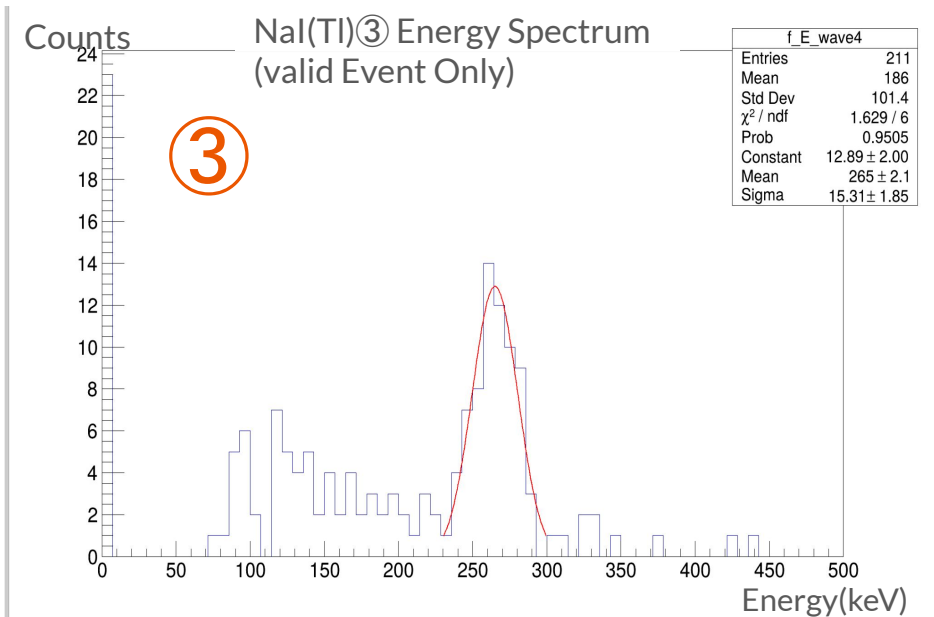
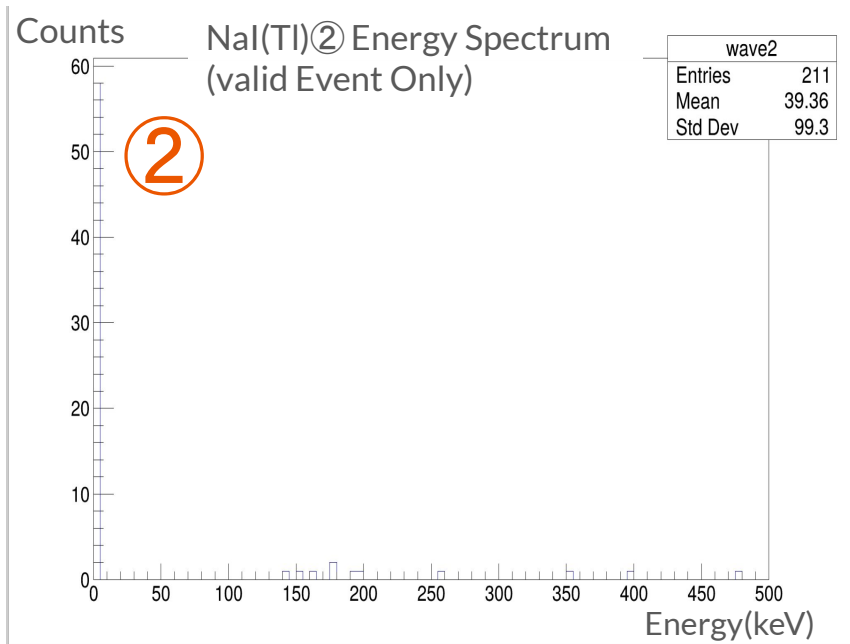
Plastic Energy Spectrum



# Data analysis and Results

## ● NaI(Tl)②(31°)、④(90°)のデータ取れてない問題

各NaI(Tl)の有効イベントのみのスペクトルを見ると、②(31°)、④(90°)にピークが見えない。  
(代表して取れてない②(31°)と、取れてる③(55°)のスペクトルがこちら↓)



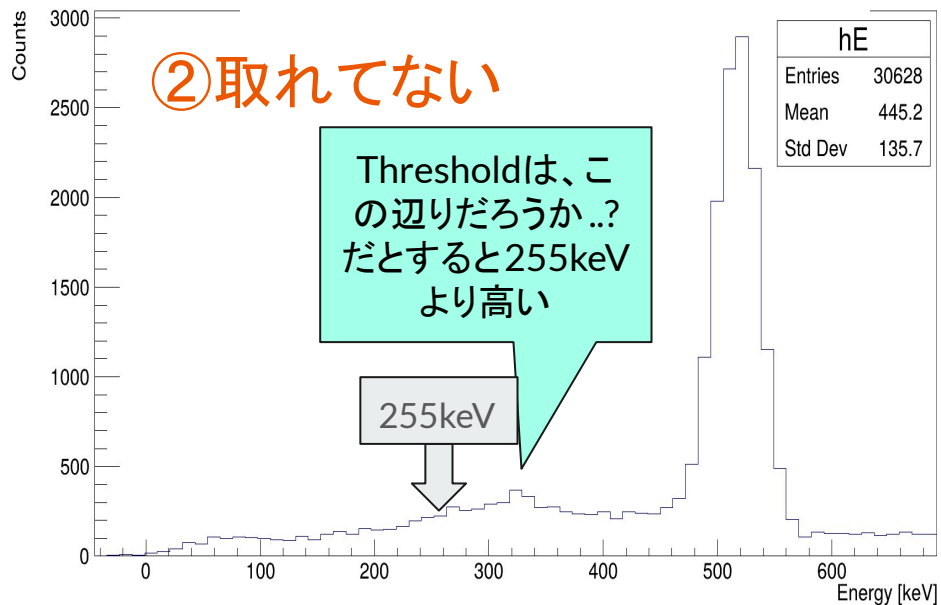
# Data analysis and Results

## ● NaI(Tl)②、④のデータ取れてない問題

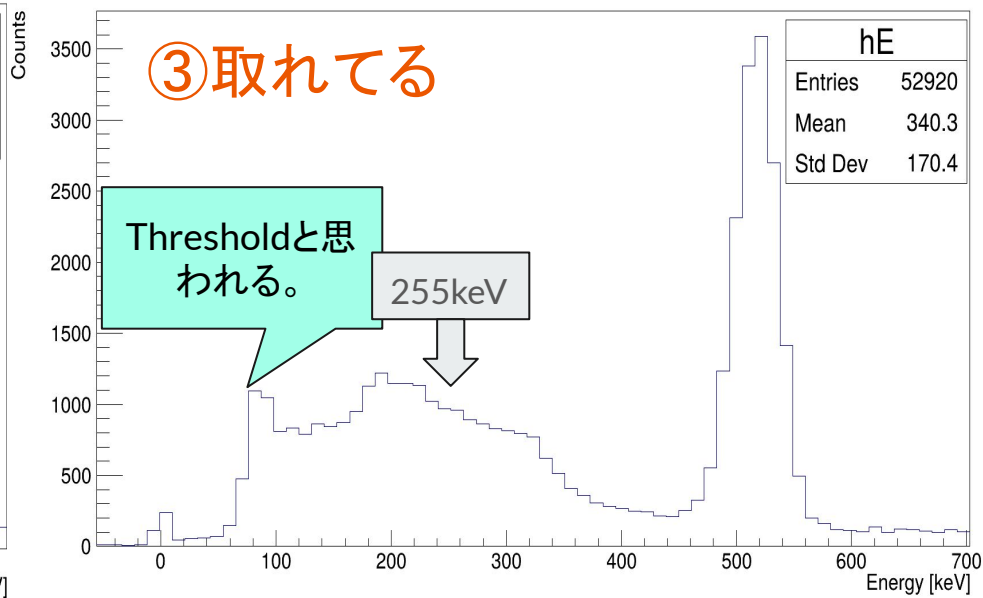
エネルギー較正の時のデータ。

②、④はThresholdが256keVよりも高く設定されているのではないか。

NaI(Tl)② Energy Spectrum (22Na)



NaI(Tl)③ Energy Spectrum (22Na)



# Data analysis and Results

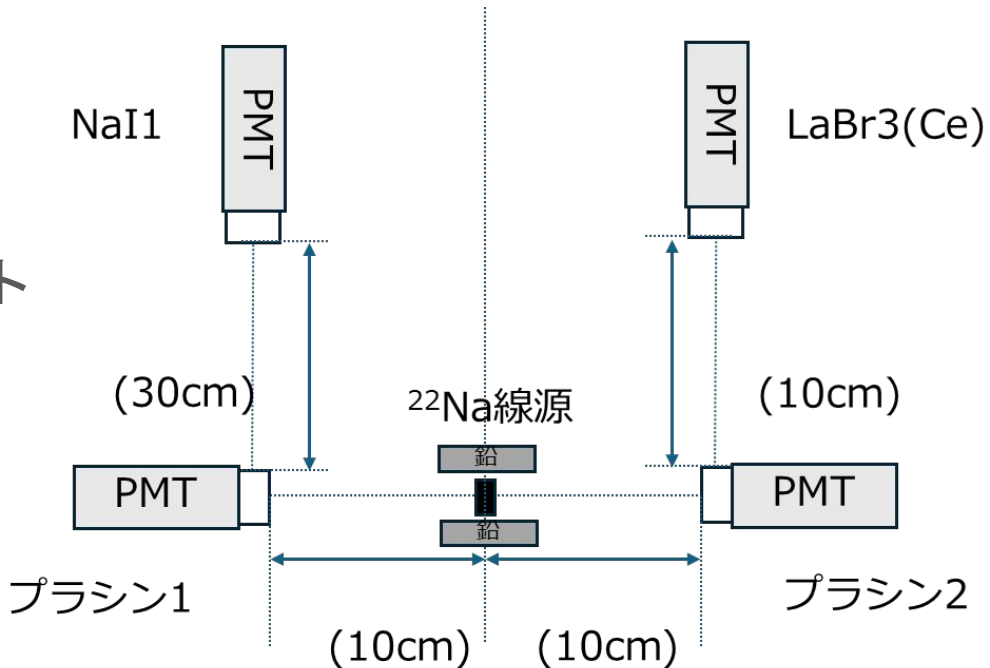
## ●再実験

thresholdが高すぎることを踏まえ、**PMTの電圧を上げて再実験。**

また、イベント数を稼ぐため、セットアップの変更をした。

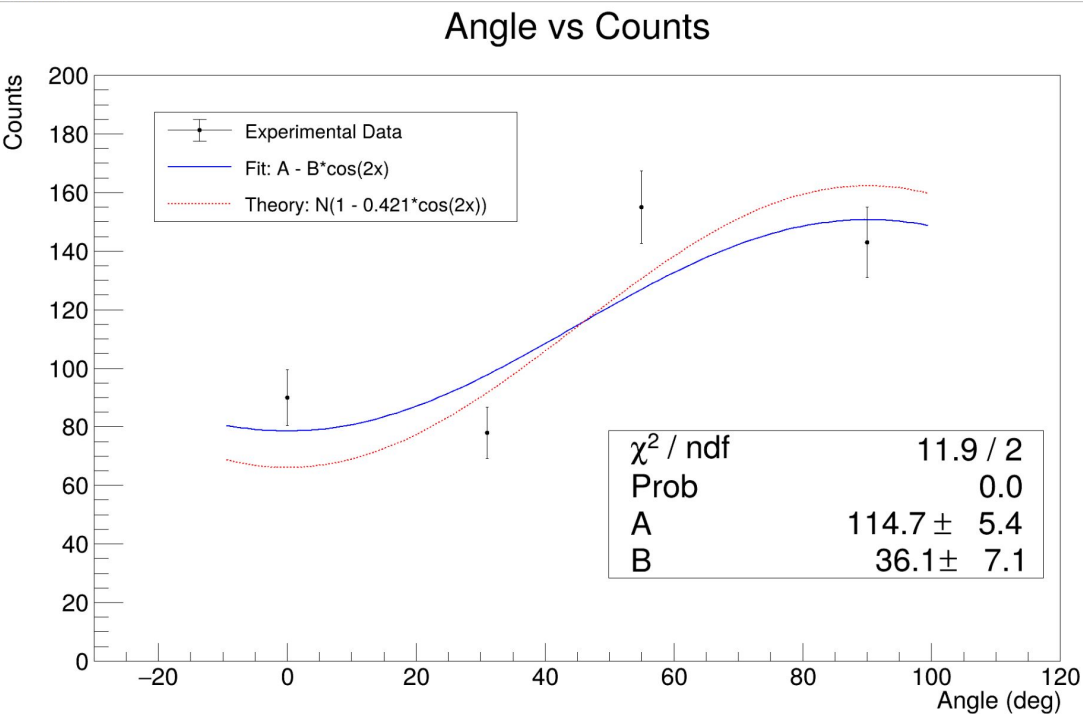
30cm → 10cm

(シミュレーションで  
角度分解能を考慮する)



# Data analysis and Results

## ● 各NaI(Tl)の有効カウント数



$$N \propto 1 - k \cos 2\phi$$

量子論:

$$k = 0.416$$

Fitting Result :

$$k = 0.31 \pm 0.06$$

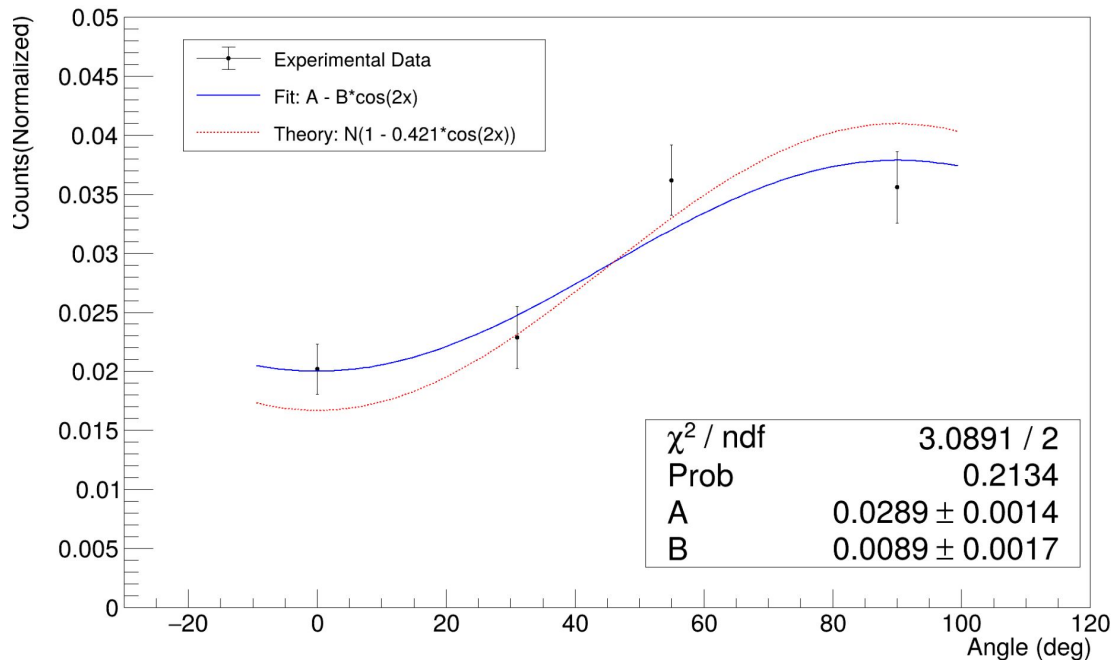
$N(0^\circ) > N(30^\circ)$ はcos  
に合わない。補正が  
必要。

# Data analysis and Results

## ● 各NaI(Tl)の有効カウント数

プラシン1とNaI(Tl)でコインシデンスをとった時の粒子数で規格化。

Angle vs Counts(Normalized)



$$N \propto 1 - k \cos 2\phi$$

量子論:

$$k = 0.416$$

Fitting Result :

$$k = 0.31 \pm 0.06$$

fittingはきれいに  
なったが、kに変更は  
なし。

# Data analysis and Results

## ●CHSH不等式の利用

$\langle \alpha \alpha' \rangle(\phi)$ : 真の相関関数

$E_{\text{obs}}(\phi)$  実験によって得られる薄まった相関関数

求めたいのはこれ!

$$|S| = |3\langle \alpha \alpha' \rangle(30^\circ) - \langle \alpha \alpha' \rangle(90^\circ)|$$

(量子力学だと 2.5)

Compton散乱の偏光識別能の低さ、および角度なまし効果により

$|\langle \alpha \alpha' \rangle| > |E_{\text{obs}}|$ が予想される。 $\langle \alpha \alpha' \rangle$ 計算し、CHSH不等式を利用したい。

# Data analysis and Results

点検出器:  $AB \sim 0.444$

実験 :  $AB \sim 0.416$

•  $\langle \alpha \alpha' \rangle$  の導出  $\langle \alpha \alpha' \rangle \times AB = E_{\text{obs}}$

$$E_{\text{obs}} = \frac{N(90^\circ) - N(0^\circ)}{N(90^\circ) + N(0^\circ)}$$

$A, B$ : 各アームでのCompton散乱による偏光識別能

$$A(\text{or } B) = \frac{\frac{d\sigma'}{d\Omega}(\phi = 90^\circ) - \frac{d\sigma'}{d\Omega}(\phi = 0^\circ)}{\frac{d\sigma'}{d\Omega}(\phi = 90^\circ) + \frac{d\sigma'}{d\Omega}(\phi = 0^\circ)} (\theta = 90^\circ)$$

$\frac{d\sigma'}{d\Omega}$  は検出器の大きさを考慮した「修正微分断面積」

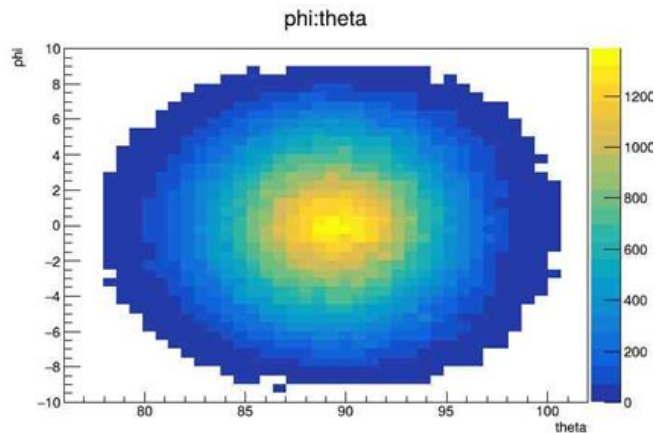
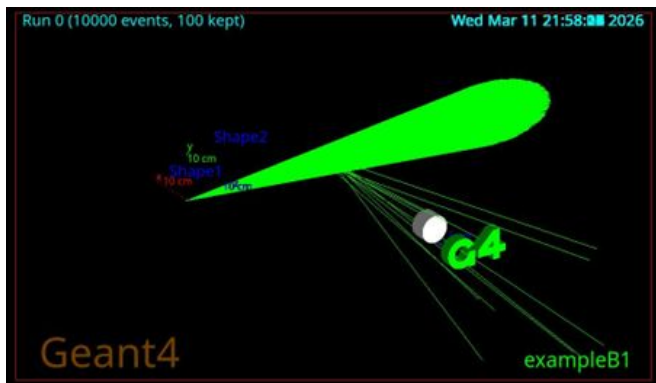
# Data analysis and Results

$$\frac{d\sigma'}{d\Omega}(\theta, \phi) = \iint W(\delta\theta, \delta\phi) \frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta + \delta\theta, \phi + \delta\phi) d\delta\theta d\delta\phi$$

## ● 角度なまし効果と修正微分断面積(Geant4シミュレーション)

検出器の大きさが有限であるため、ほしい角度からずれた角度の粒子も検出してしまう。

→ 角度のずれの分布  $W(\delta\theta, \delta\phi)$  を求める。



# Data analysis and Results

求めたいのはこれ！

$$|S| = |3\langle\alpha\alpha'\rangle(30^\circ) - \langle\alpha\alpha'\rangle(90^\circ)|$$

(量子力学だと 2.5)

- CHSH不等式の下限評価

以下の右辺が2を超えていればBellの不等式が破れる

$$|S| \geq \left| 3 \frac{N(31^\circ) - N(55^\circ)}{N(31^\circ) + N(55^\circ)} - \frac{N(90^\circ) - N(0^\circ)}{N(90^\circ) + N(0^\circ)} \right| \frac{1}{AB}$$

結果、

$$(\text{右辺}) = 2.3 \pm 0.5$$

※Nは規格化済みのものを使用



# 5. Discussion

# Discussion

## ● 結論

2.3±0.5という結果は、誤差を見なければ、2(古典の上限)以上であるが、誤差を含めると、CHSH不等式の破れをを結論づける望ましい結果は得られなかった。

- ・誤差が大きすぎる。→統計を稼ぐ
- ・量子もつれが壊れて、相関が弱まった可能性。→真空を引く？

装置全体を鉛で囲う？

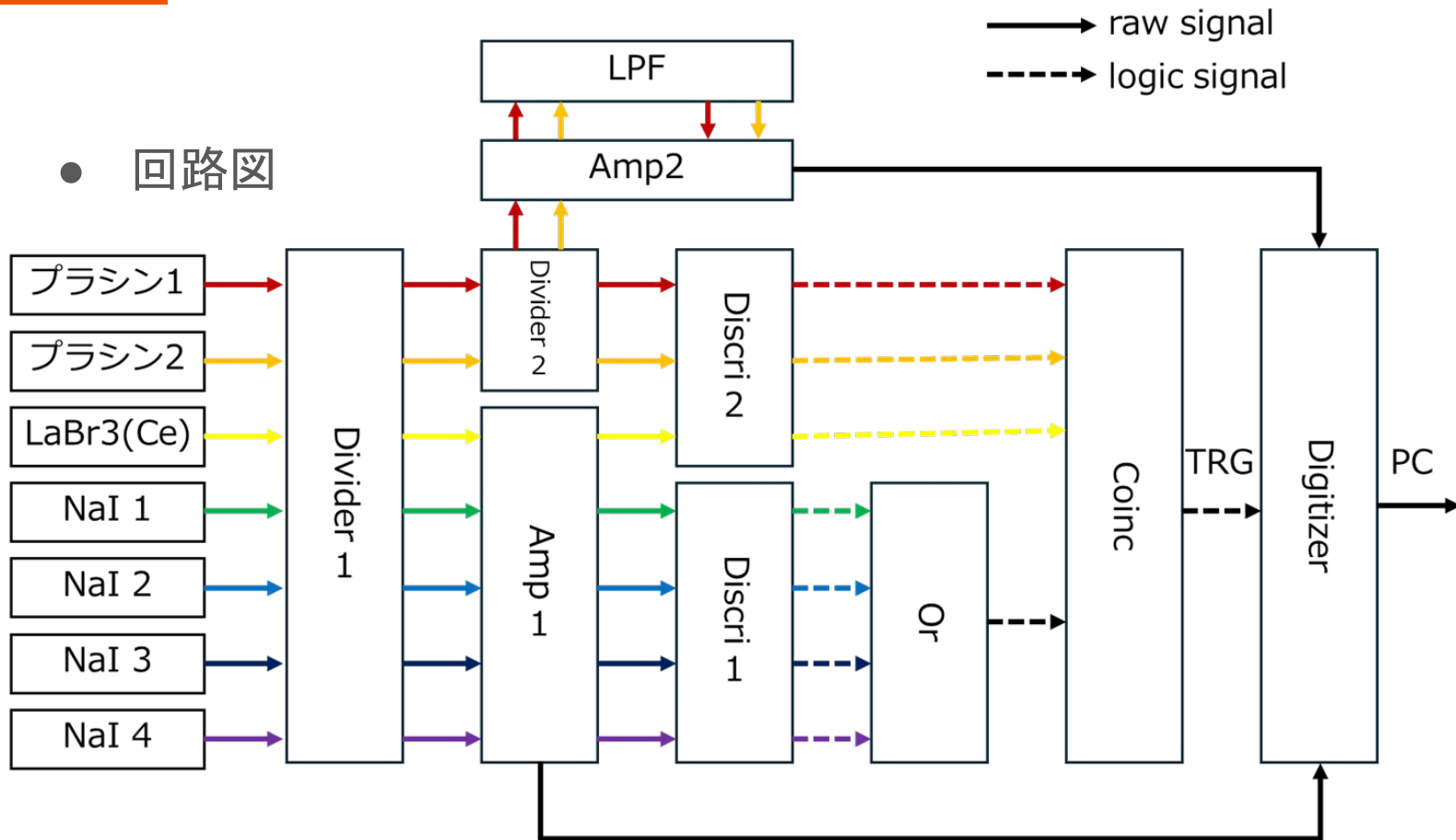
# Discussion

## ●反省

- ・角度刻みがCHSH不等式を最大限に破る刻み方でない。
- ・ $0^\circ \sim 180^\circ$  まで見るべきだった。(cosカーブの山を見るべき)
- ・Thresholdを見て、ほしいイベントが拾えているかを確認すべき だった。
- ・シミュレーションをするなら、角度分解能はある程度犠牲にし て、イベント数を稼ぐべきだった。

# Experimental Setup

- 回路図



# Proposals for improvement

コメントの残し方分からないからここに書く(左のスライド右クリックやで)♡

- Experimental Methodの情報が同じ問題  
回路図を一分で理解するのきついんじゃないか問題(俺が苦手すぎるだけかもやけど、、、実験の概要をつたえるだけなら他の手段あるかも知らん)
- 17ページのピークのディケイ時間400 ns, 80 ns, 112 nsは伝えるべき情報なの一(シンチレータごとの特性があって、波形ちゃんと取れてますよってというのが大事なんだと思うたぶん。)
- NaI(Tl)②、④の②とかの意味は口頭で説明してくれる感じ(装置図に書いてあるけど一応角度も併せて書いた方がいいか)
- 直接的な解決になるかわからへんけど、タイトルの「1.Bell's inequality」「2. Experimental principle」とかいるかな？