

ポジトロニウム消失事象におけるベルの不等式の破れの検証

電子光物理学研究センターB4

木村 佑斗, 堀田 健悟, 吉田 槇之介, 高津 大誠

実験の目的

ベルの不等式の破れを実験室内で確認

→量子力学が適当であることを簡単に確かめる

ベルの不等式

全スピン0の二つの光子対の状態

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle) \dots(1)$$

二つの光子は十分離れた地点PとQに存在

量子力学によると

地点Pでスピンを観測し,

- **+**なら地点Qでは**-**が観測される
- **-**なら地点Qでは**+**が観測される

...(2)

ベルの不等式

一方で、地点Qで観測される粒子の状態は

もう一方での観測によらずに1/2の確率で+か-が観測される

→地点PQでの観測の組み合わせとして両方+か-となりえる

→これは(2)と矛盾

隠れた変数が存在すればこの矛盾は説明可能

隠れた変数理論のもとで**ベルの不等式**が成立

CHSH不等式

ベルの不等式の一つが**CHSH不等式**

物理量として単位ベクトルの向きをx軸としたとき

x偏光なら+1, y偏光なら-1をとるとする

隠れた変数を ξ とし, PQでの測定値をそれぞれ

$$\alpha(\vec{a}, \xi) = \pm 1, \quad \beta(\vec{b}, \xi) = \pm 1 \quad \text{とする}$$

このとき α と β の相関関数は以下

$$\langle \alpha\beta \rangle = \int d\xi \rho(\xi) \alpha(\vec{a}, \xi) \beta(\vec{b}, \xi)$$

CHSH不等式

$\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{b}_3, \vec{b}_4$, をそれぞれ異なる単位ベクトルとする

$$\alpha_i = \alpha(\vec{a}_i, \xi), \beta_i = \beta(\vec{b}_i, \xi)$$

$$\alpha_1(\beta_3 - \beta_4) + \alpha_2(\beta_3 + \beta_4) = \pm 2$$

相関を取ると

$$| \langle \alpha_1 \beta_3 \rangle - \langle \alpha_1 \beta_4 \rangle + \langle \alpha_2 \beta_3 \rangle + \langle \alpha_2 \beta_4 \rangle | \leq 2$$

ベルの不等式の破れ

エンタングルした光子対の偏光を観測する

地点Pでの偏光面をx,yで地点Qでの偏光面をx',y'とし, x軸とx'軸のずれを ϕ とすると

$$|x\rangle = |x'\rangle \cos\phi - |y'\rangle \sin\phi$$

$$|y\rangle = |x'\rangle \sin\phi + |y'\rangle \cos\phi$$

相関関数は

$$\begin{aligned} \langle \alpha\beta \rangle &= \langle \psi | \alpha\beta | \psi \rangle \\ &= -\cos 2\phi \end{aligned}$$

ベルの不等式の破れ

これをCHSH不等式に代入, xy 面と $x'y'$ 面が平行とし \vec{a}_i (or \vec{b}_i)が \vec{a}_1 となす角を ϕ_i とすると

$$\begin{aligned} & | \langle \alpha_1 \beta_3 \rangle - \langle \alpha_1 \beta_4 \rangle + \langle \alpha_2 \beta_3 \rangle - \langle \alpha_2 \beta_4 \rangle | \\ &= | -\cos 2(\phi_3) + \cos 2(\phi_4) - \cos 2(\phi_3 - \phi_2) - \cos 2(\phi_4 - \phi_2) | \end{aligned}$$

これは $\phi_2 = \pi/4$, $\phi_3 = \pi/8$, $\phi_4 = 3\pi/8$ のとき

$$| -\cos(\pi/4) + \cos(3\pi/4) - \cos(\pi/4) - \cos(-\pi/4) |$$

最大で $2\sqrt{2}$ となりCHSH不等式を破る

ベルの不等式の破れ

Stuart J. FreedmanとJohn F. Clauserは

Caが基底状態に戻る時の2光子を用いた

陽電子対消滅で発生する511keVの γ 線には偏光板が存在しない

→他の方法を用いる必要がある

→コンプトンポラリメーターを用いた

コンプトンポラリメーター

クライン-仁科の式(偏光がある場合)

ここで

- k_0 = 入射 γ 線の波数
- k = 散乱 γ 線の波数
- α = 微細構造定数
- m_e = 電子の質量
- c = 光速
- ψ = 散乱面と偏光面のなす角度

$$\gamma = \frac{k}{k_0} + \frac{k_0}{k}$$

$$r_e = \frac{\hbar\alpha}{m_e c}$$

コンプトンポラリメーター

両方の散乱体でコンプトン散乱し、検出器に入る確率

$$P(\theta, \phi) = h \frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta, \psi_1) \frac{d\sigma}{d\Omega}(\theta, \psi_2)$$

からレートの式を求めると、量子力学, 隠れた変数ともに

コンプトンポラリメーター

ベルの不等式を破るなら、 $\langle \alpha\beta \rangle = -\cos 2\phi$ より

$R(\pi/8)+R(3\pi/8)$ は $\langle \alpha\beta \rangle$ に依存しないためcを取り除ける

なら、量子力学が正しいといえる

3 測定方法

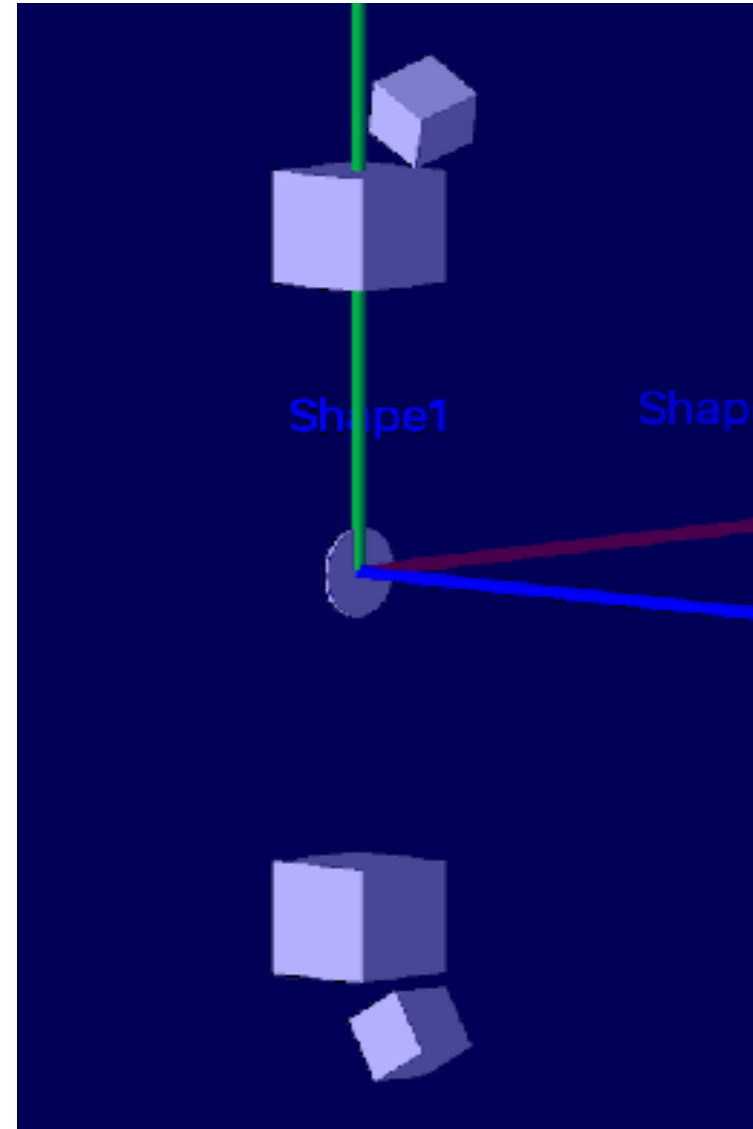
- ^{22}Na (e^+ 線源)
- ^{60}Co
- BSOシンチレータ ($\text{Bi}_3 \text{Si}_4 \text{O}_{12}$)
- プラスチックシンチレータ
- NIM/CAMACモジュール

3 測定方法

Compton Polarimeter

散乱角 $\theta=30^\circ$

下のBSOを固定し、上のBSOを θ 固定で回転させて測定。



3 測定方法 (シミュレーション)

Geant4 (ver.11.0.3)のexampleB1を書き換え、実際の測定を簡略化したセットアップ

DetectorConstruction

- 反対側のプラシンからの反射 γ 線がBSOに入らないように鉛で遮蔽。
- BSOは球に。

3 測定方法 (シミュレーション)

PhysicsList(物理法則)

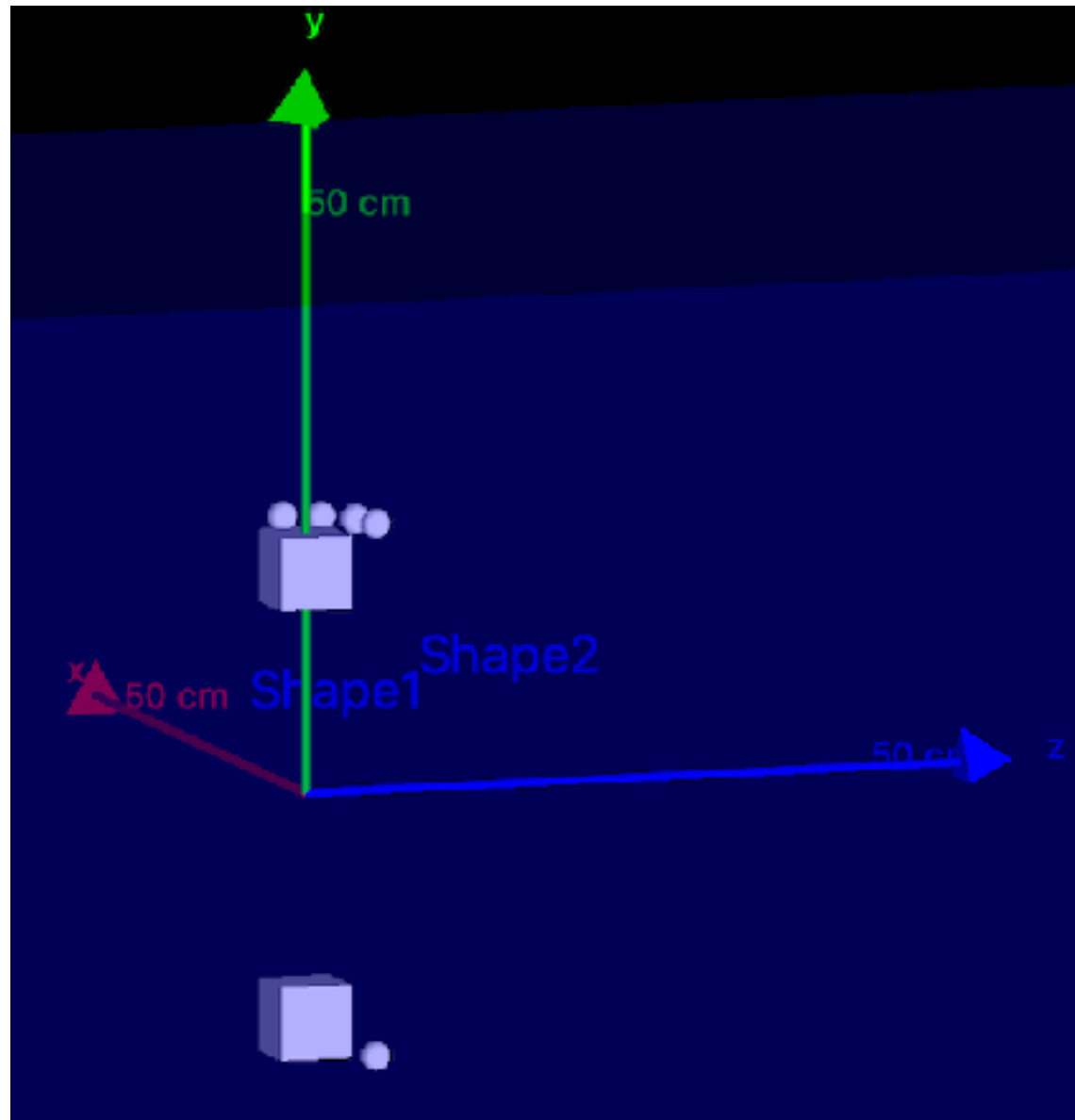
- ・ 偏光の効果を入れているG4EmLivermorePolarizedPhysicsを採用

PrimaryGenerator(入射粒子)

- ・ 511keVの γ 線を方向(0, 1, 0)と(0, -1, 0)にback to backで発射。
- ・ 偏光方向は $(\sin\theta, 0, \cos\theta)$ と $(\cos\theta, 0, -\sin\theta)$ に設定。 θ は 0° から 360° でランダムに選ばれる。

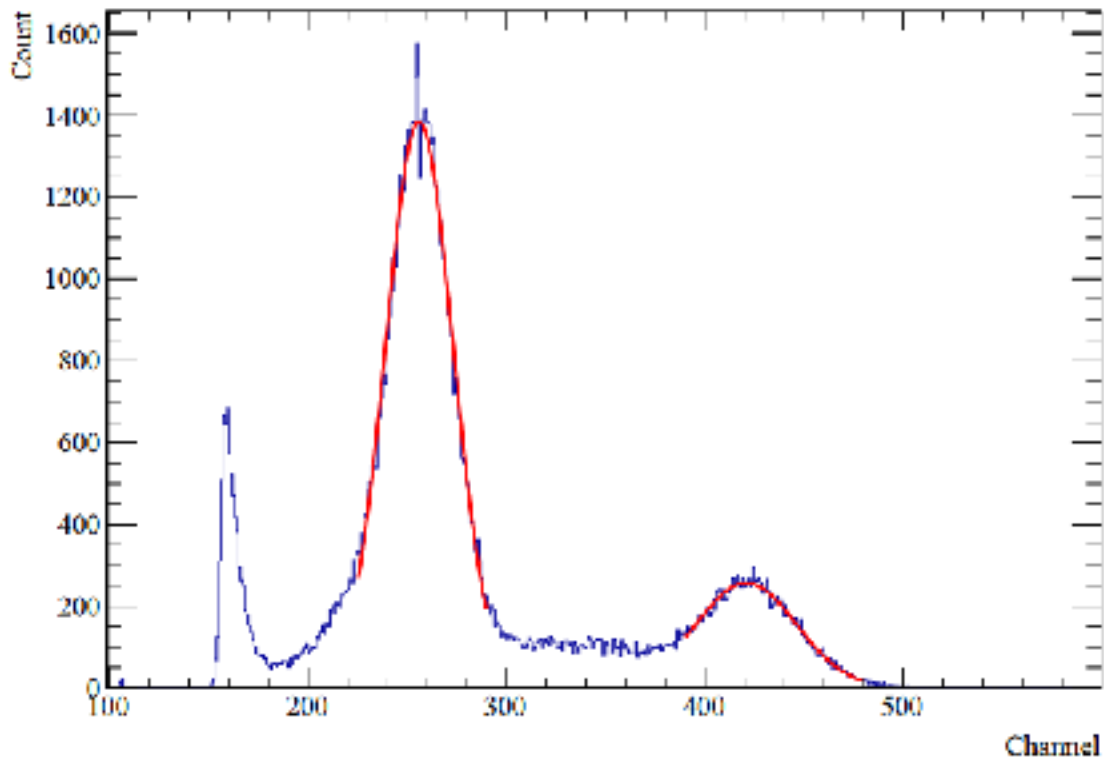
RunAction(1eventでやること)

- ・ 各 γ 線がBSOに落としたエネルギー(edep0, edep1)を記録。



BSOシンチレーターの測定結果(Na22)

CH3_Na22



511keV

係数 : 1385 ± 8

中央値 : 256.09 ± 0.09

σ : 16.95 ± 0.09

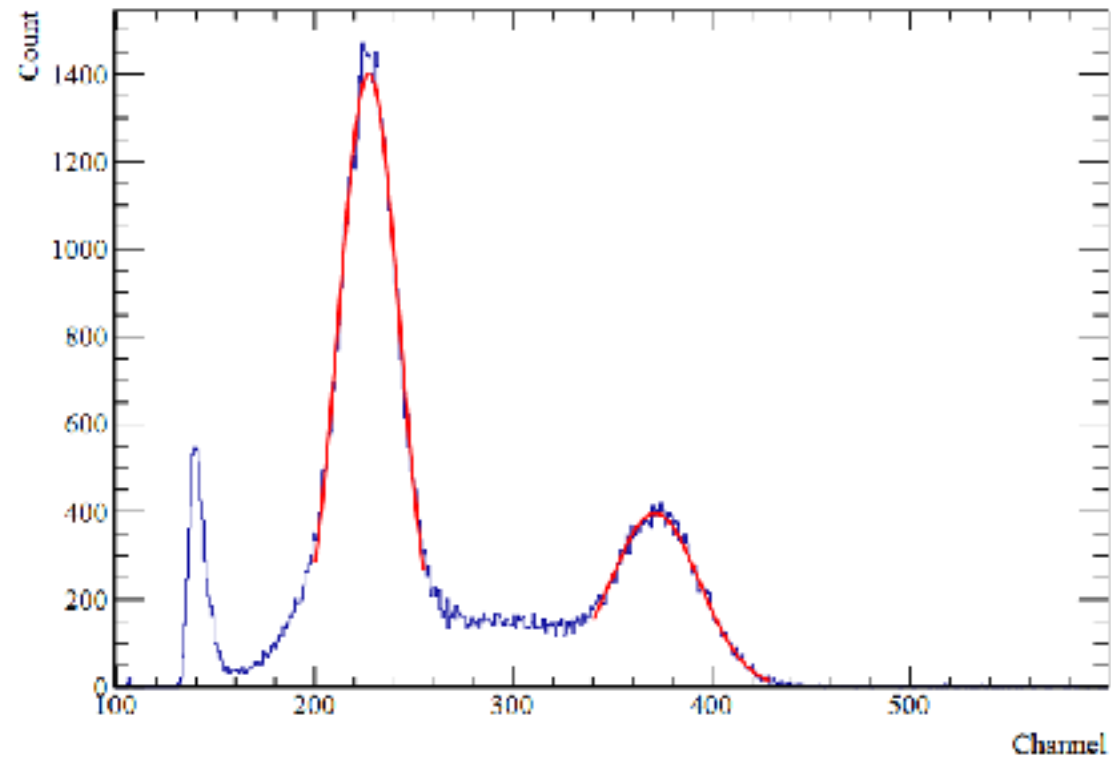
1274keV

係数 : 257 ± 3

中央値 : 420.8 ± 0.4

σ : 25.3 ± 0.3

CH4_Na22



511keV

係数 : 1375 ± 9

中央値 : 227.00 ± 0.08

σ : 15.6 ± 0.09

1274keV

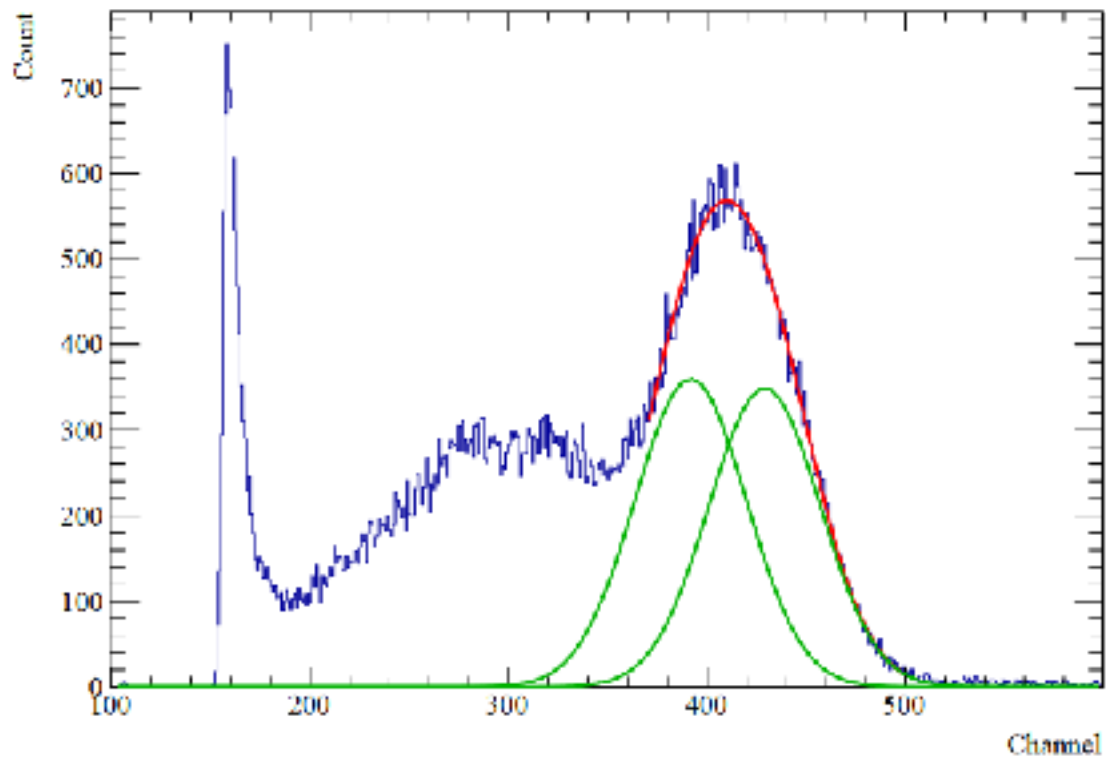
係数 : 396 ± 4

中央値 : 371.3 ± 0.3

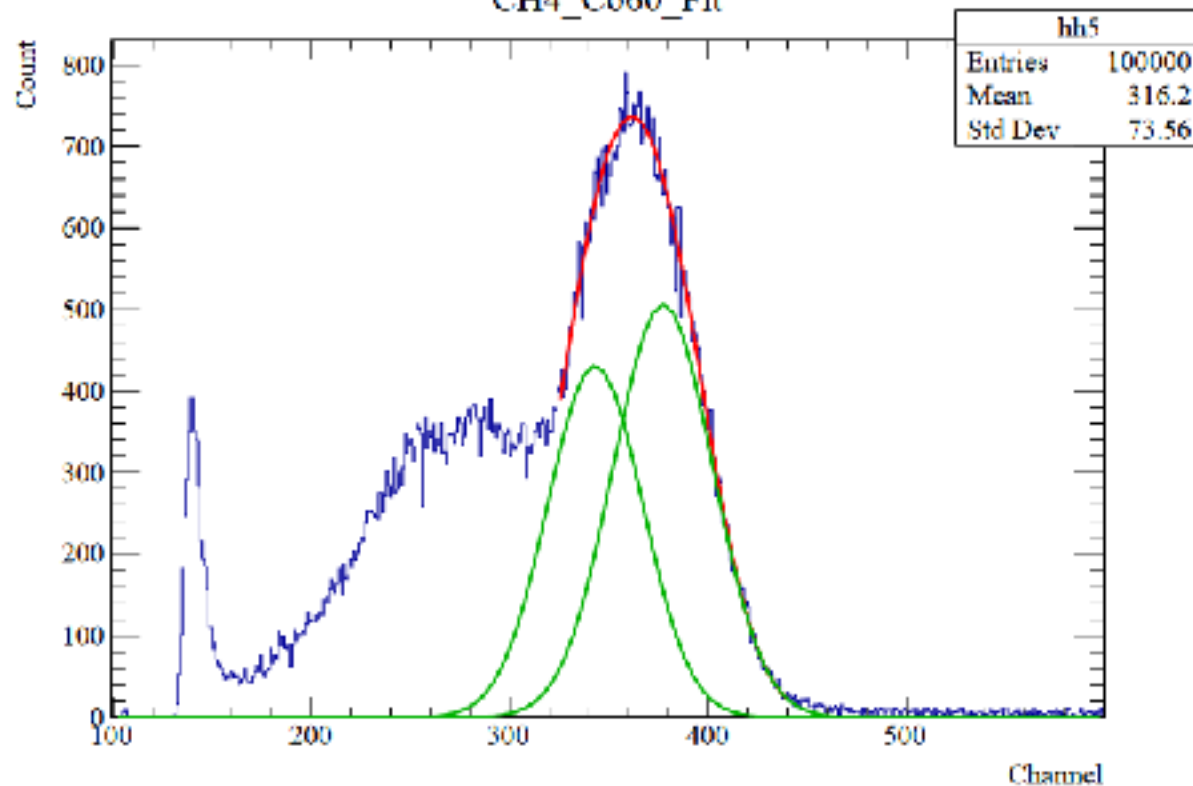
σ : 22.5 ± 0.2

BSOシンチレーターの測定結果(Co60)

CH3_Co60_Fit



CH4_Co60_Fit



1173keV

係数 : 360 ± 40

中央値 : 392 ± 2

σ : 28 ± 1

1333keV

係数 : 349 ± 26

中央値 : 429 ± 3

σ : 28 ± 1

1173keV

係数 : 430 ± 280

中央値 : 343 ± 13

σ : 24 ± 6

1333keV

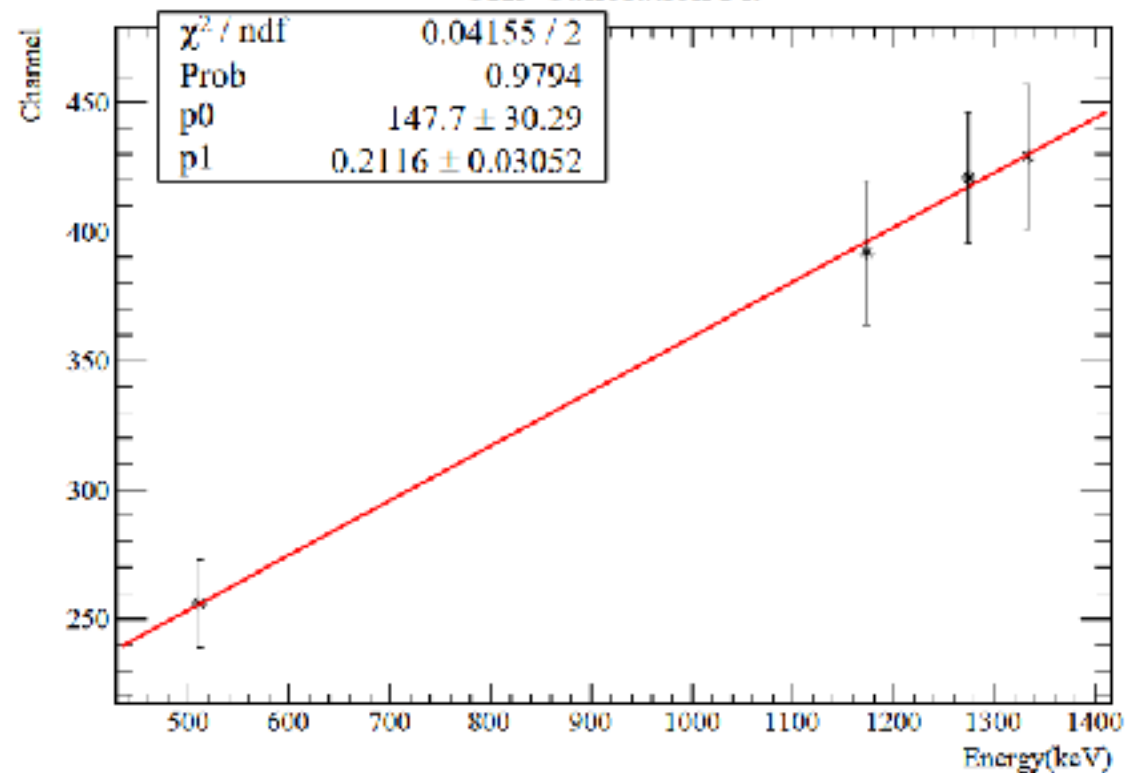
係数 : 500 ± 290

中央値 : 377 ± 12

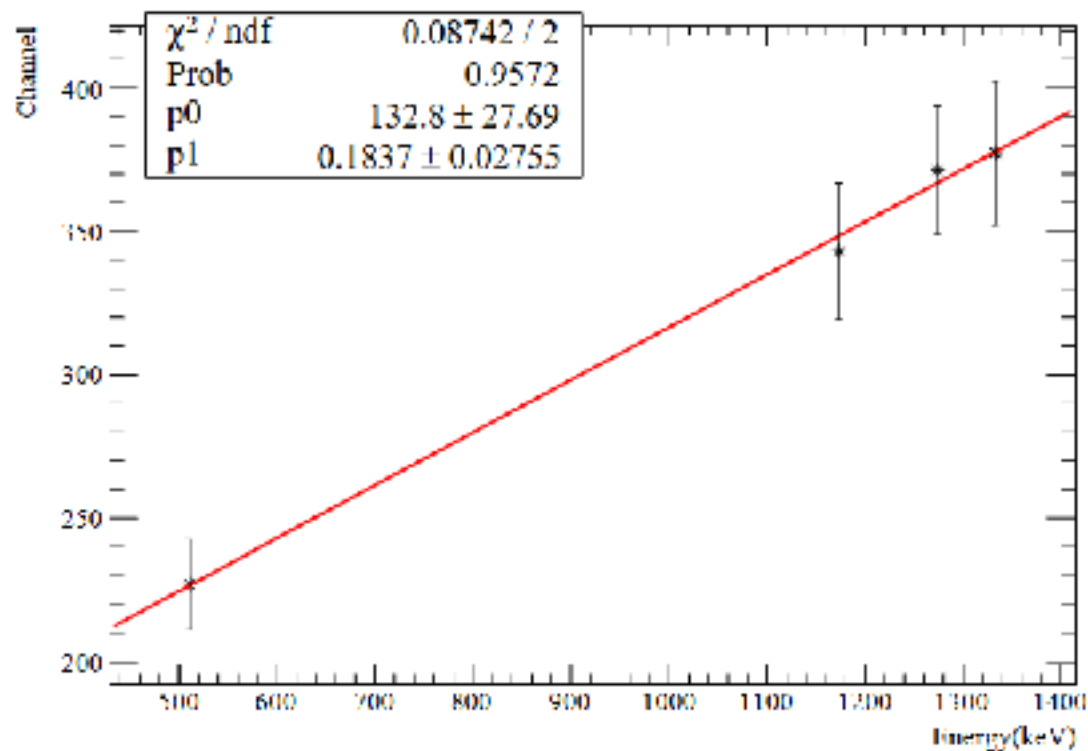
σ : 25 ± 3

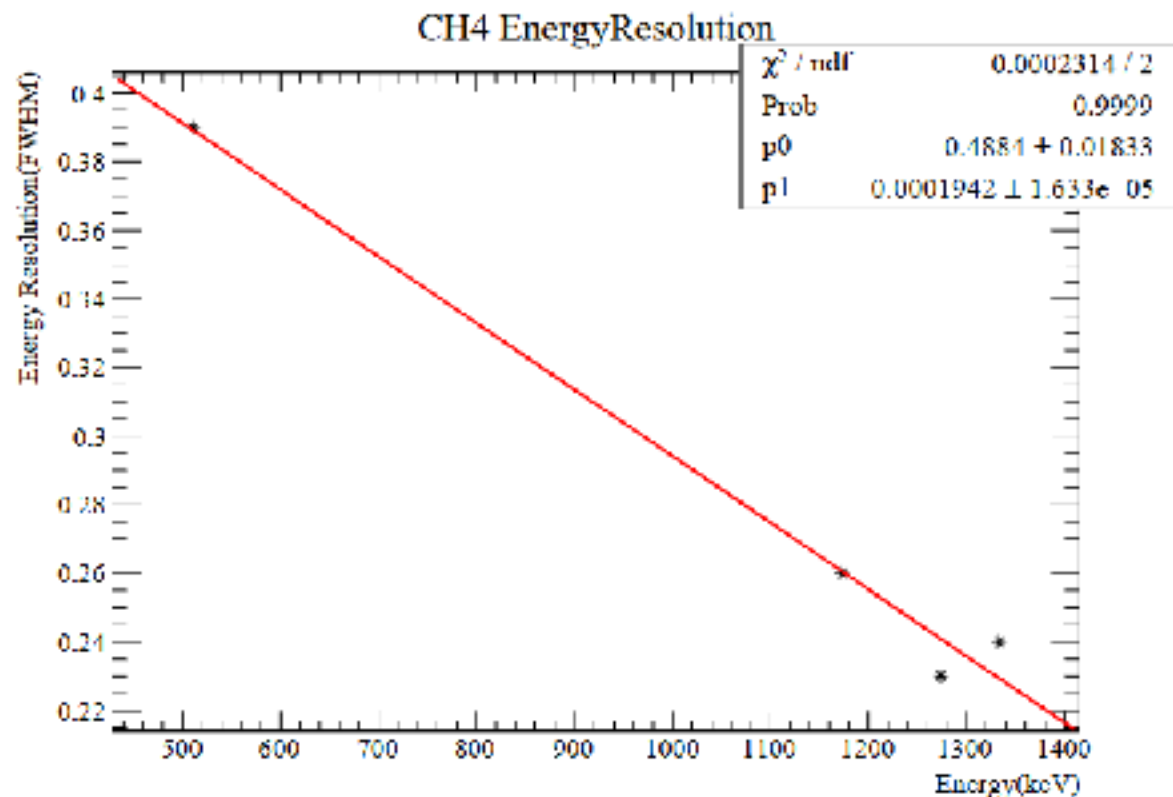
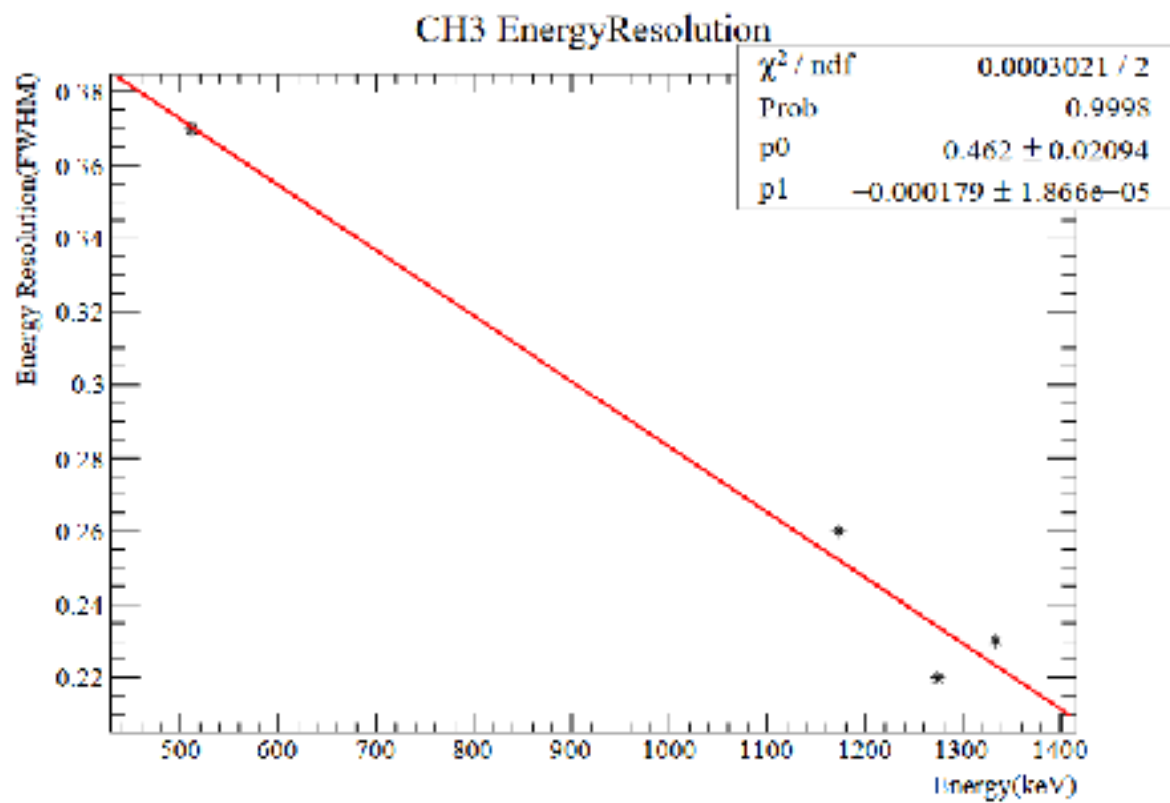
較正曲線

CH3 Calibration Fit



CH4 Calibration Fit



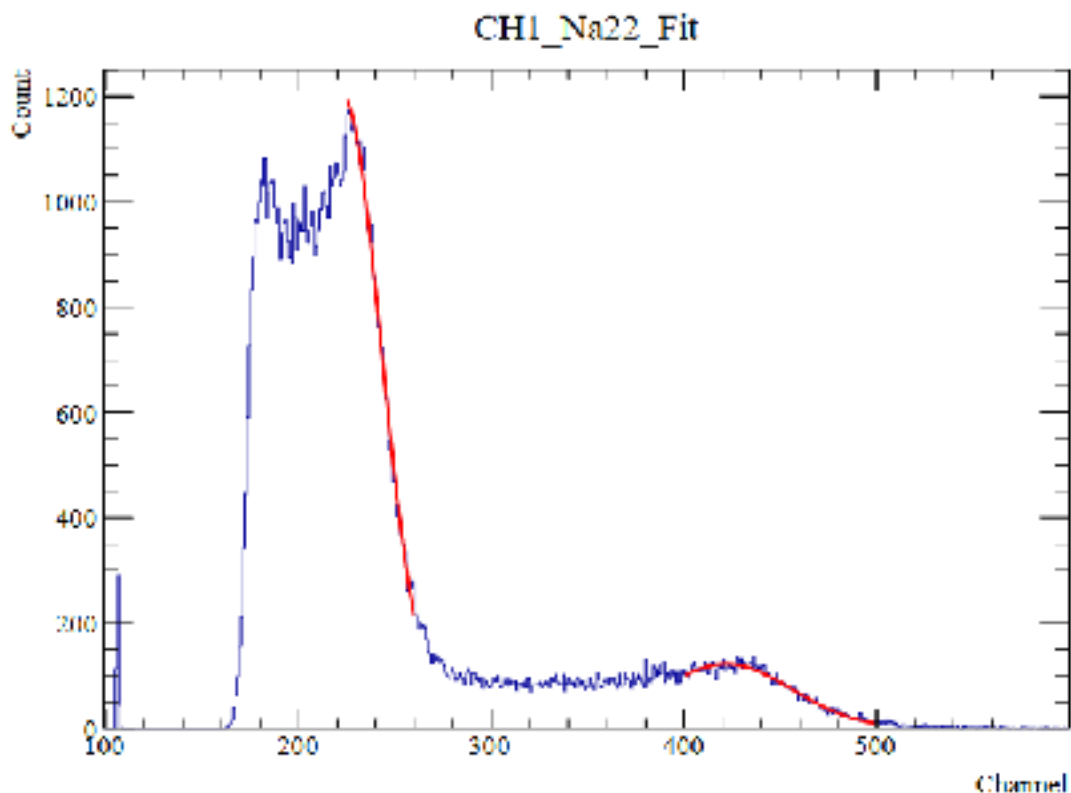


340.71keVでの σ

CH3 : 12.28

CH4 : 11.22

プラスチックシンチレーターの測定結果(Na22)



511keV

係数 : 1200 ± 25

中央値 : 223 ± 2

σ : 20.0 ± 0.7

(NDF = 100)

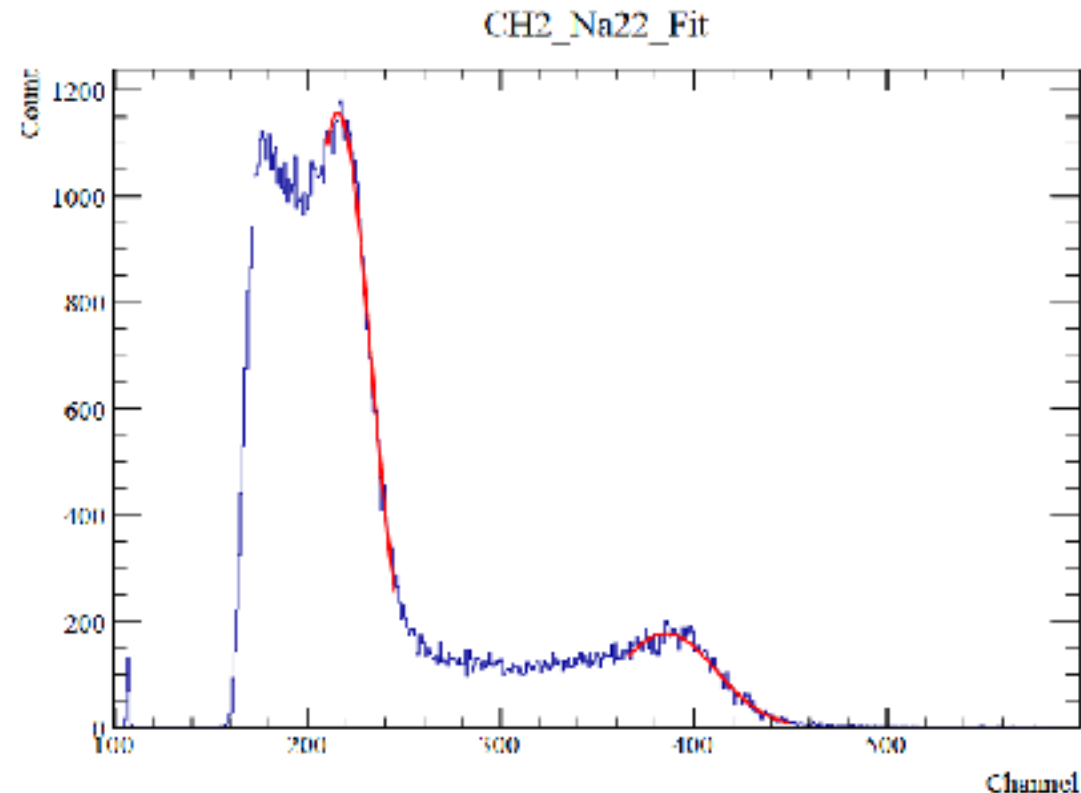
1274keV

係数 : 123 ± 2

中央値 : 422 ± 2

σ : 34.3 ± 0.8

(NDF = 100)



511keV

係数 : 1158 ± 8

中央値 : 215.7 ± 0.4

σ : 16.7 ± 0.3

(NDF = 100)

1274keV

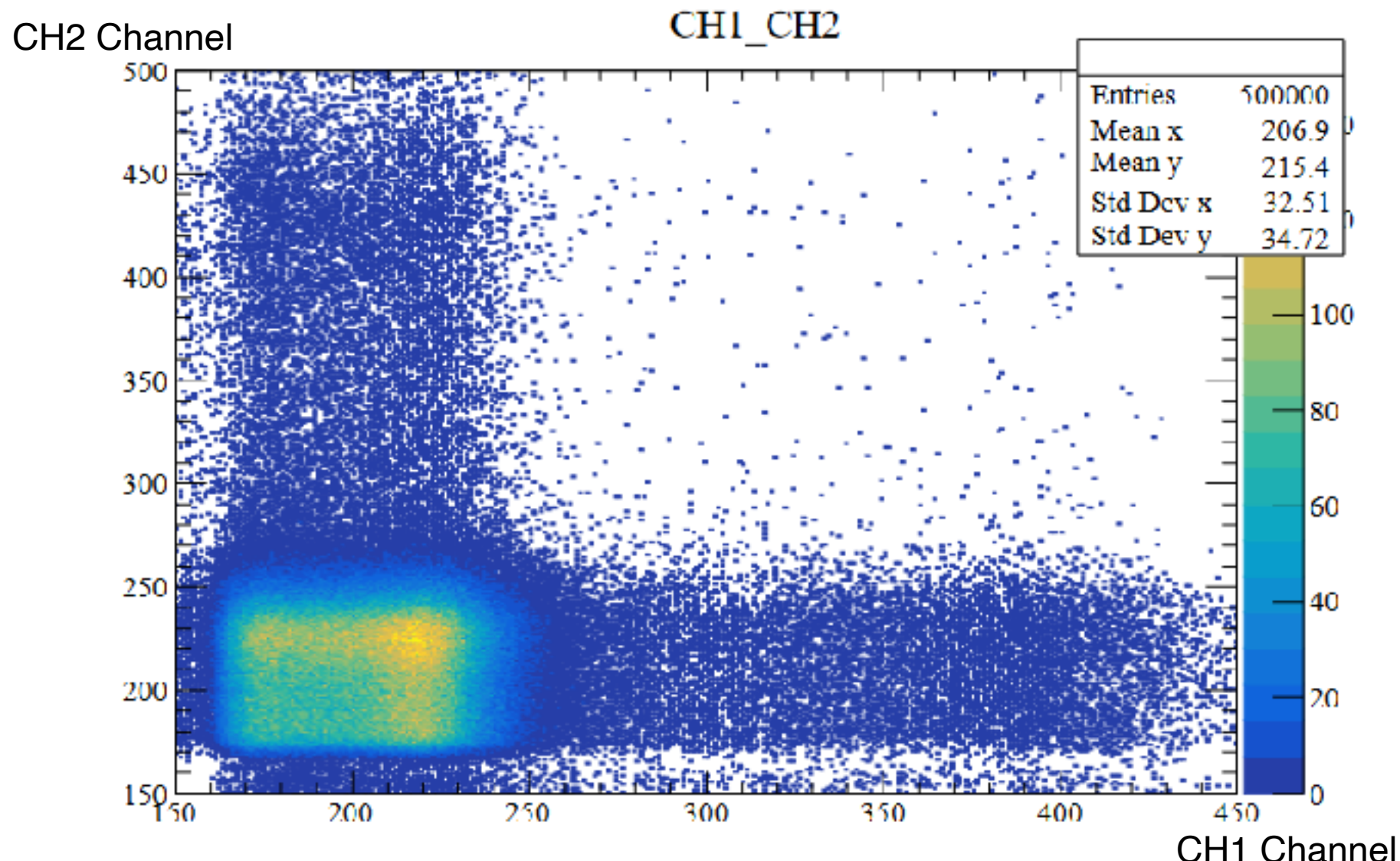
係数 : 177 ± 3

中央値 : 385.5 ± 0.7

σ : 26 ± 5

(NDF = 100)

Back to Backに γ 線が出ていることの確認



4コインシデンス測定

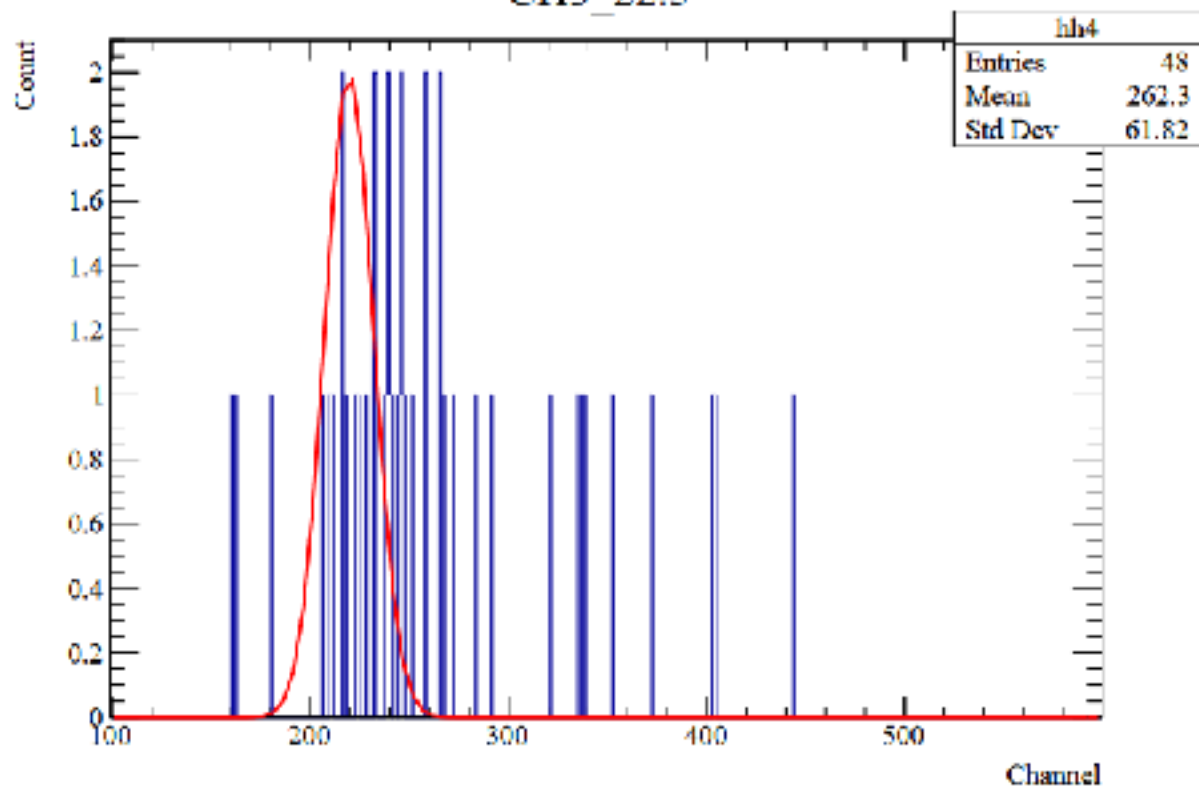
24時間測定でイベント数は

22.5°: 50イベント、67.5°: 48イベント

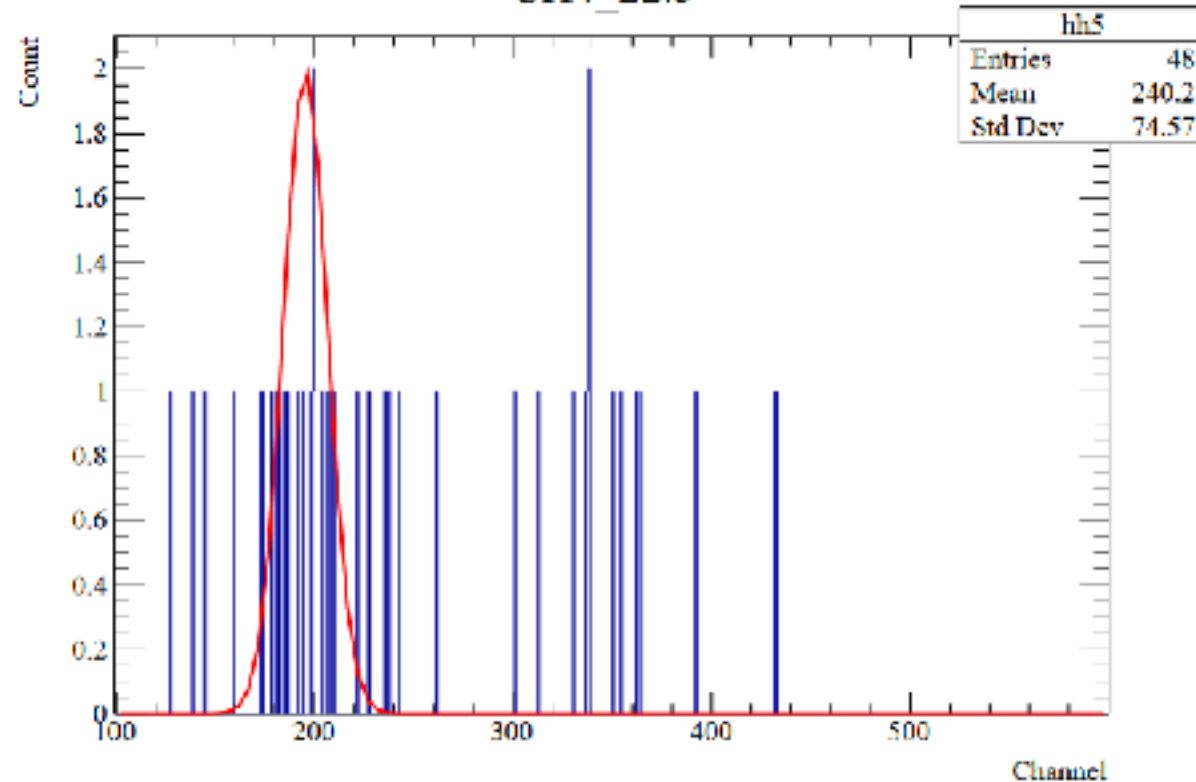
各CHのデータに対してカットを行った

BSOシンチレーター

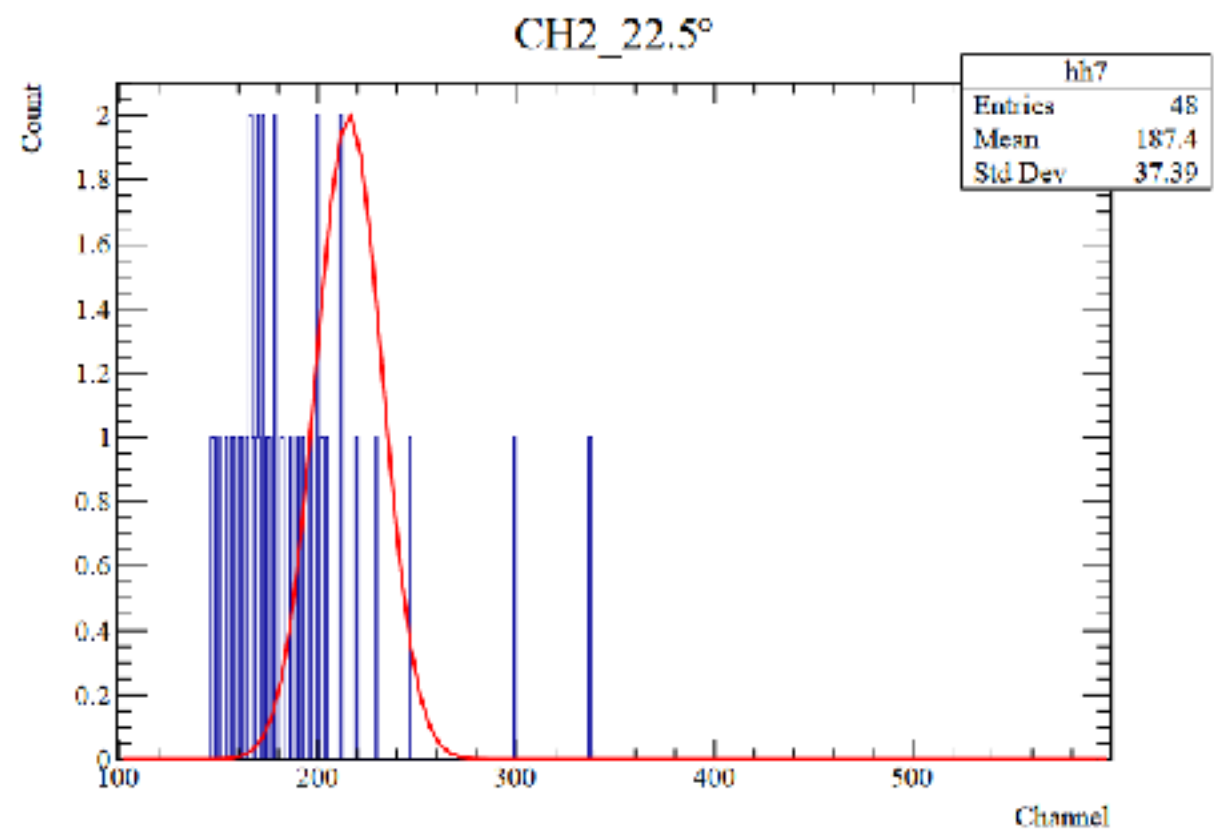
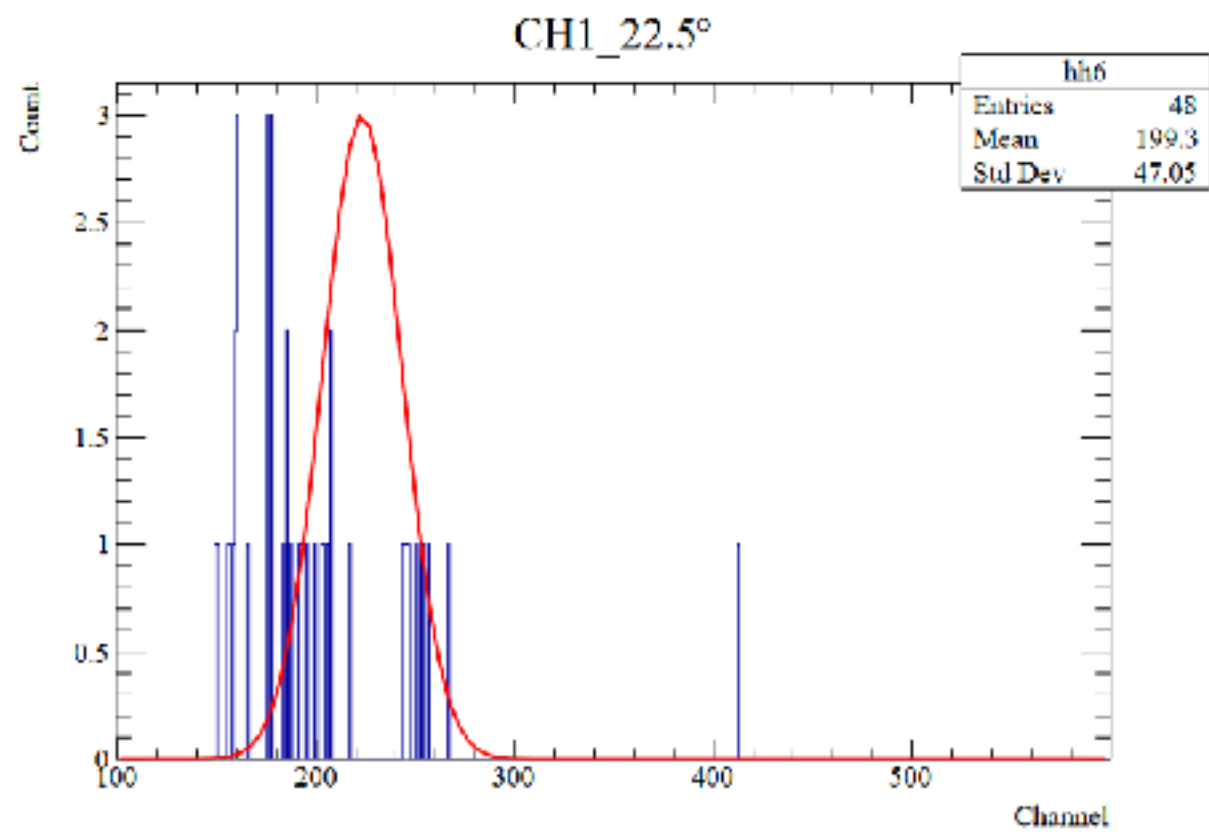
CH3_22.5°



CH4_22.5°



検出器の配置による散乱波長の広がりがある



ノイズとの区別がつかない

カットの結果、 22.5° は7カウント、 67.5° は9カウントとなり、
(3)は 29.4 ± 58.36 となった。

大きすぎる値を取っている上に誤差が非常に大きいため、
何かを示せたとは言えない

ベルの不等式を破るには

今回 22.5° と 67.5° の測定だけではベルの不等式の破れを示せなかった

→測定角度を増やして $\langle \alpha\beta \rangle = -\kappa \cos 2\phi$ をフィットし

$\kappa \geq 1/\sqrt{2}$ であることを示すことで破れを示せる

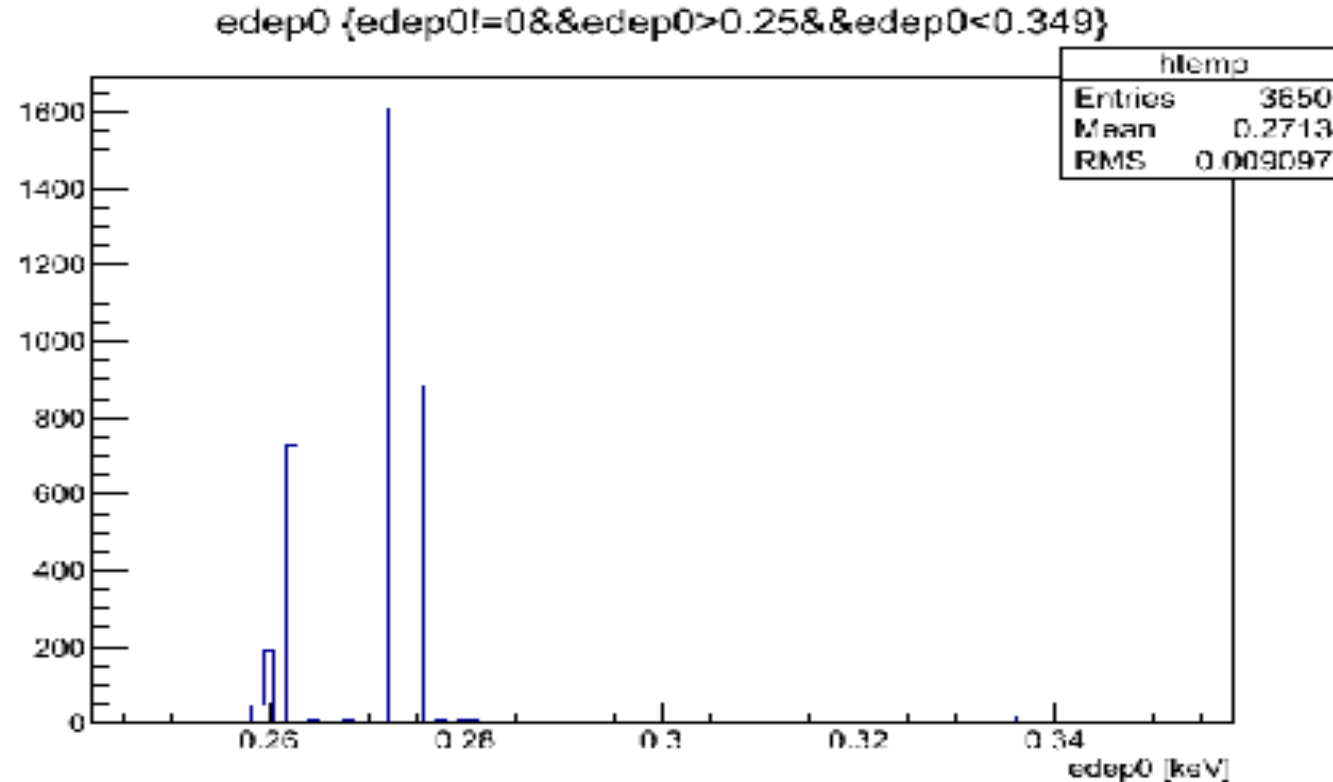
その他の改善点

- プラスチックシンチレーターのイベントを判別できるようにするために、TDCを用いる
- カウントレートの低いのでBSOの代わりに大きなシンチレーターを用いる(予定ではCsIシンチレーターを使うつもりだった)
- 測定時間を長く取る

6 シミュレーション結果

6 シミュレーション結果

- 511keVの γ 線が60°方向に散乱---->散乱後のエネルギーは約350keV



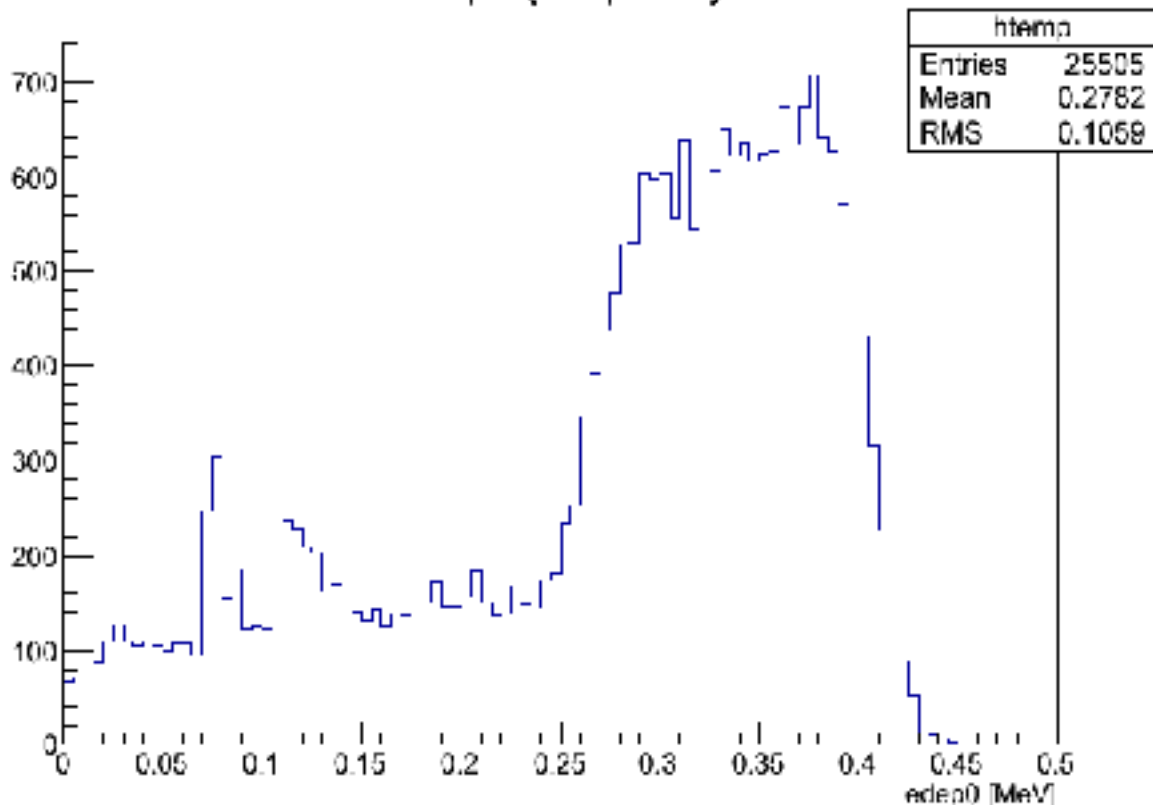
- Compton Polarimeterでは0.25MeVまでを有効イベントとすることに。

6 シミュレーション結果

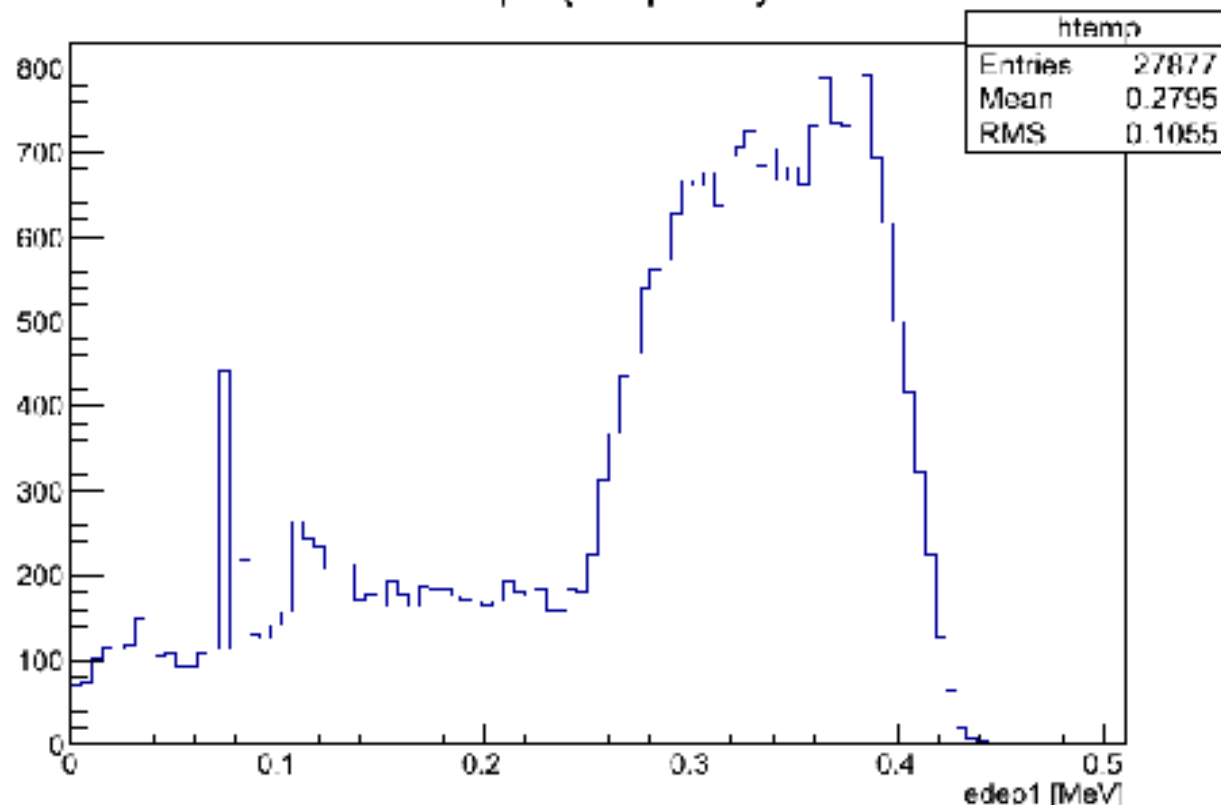
BSOのなす角（偏光面のなす角） ϕ

$\phi=135^\circ$ で得られたデータ

edep0 {edep0!=0}

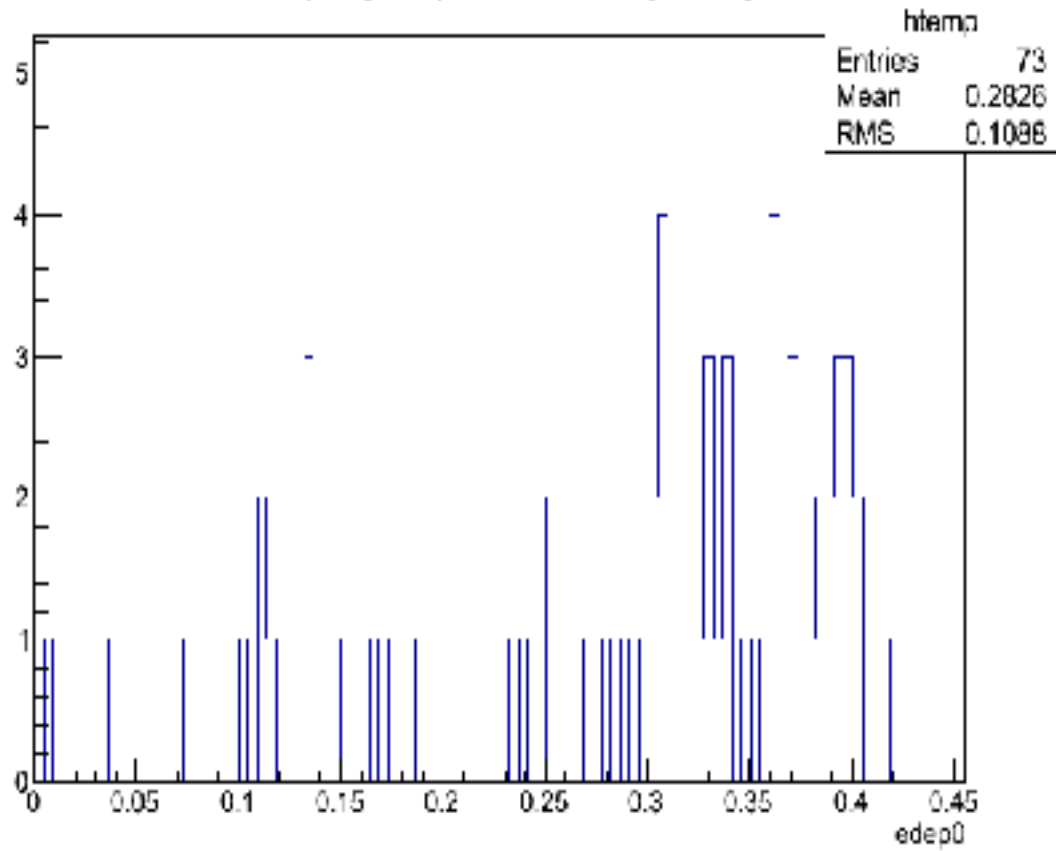


edep1 {edep1!=0}

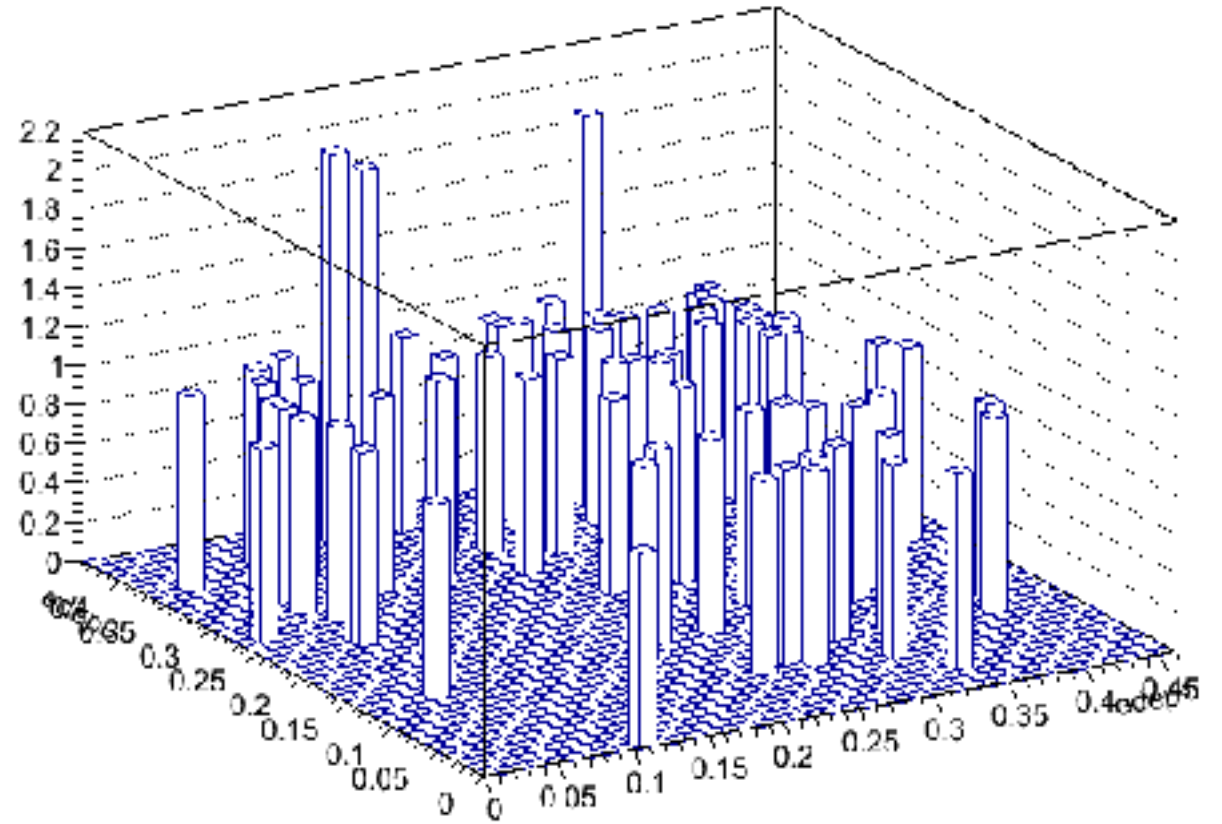


6 シミュレーション結果 $\phi=135^\circ$

edep0 {edep0!=0&&edep1!=0}

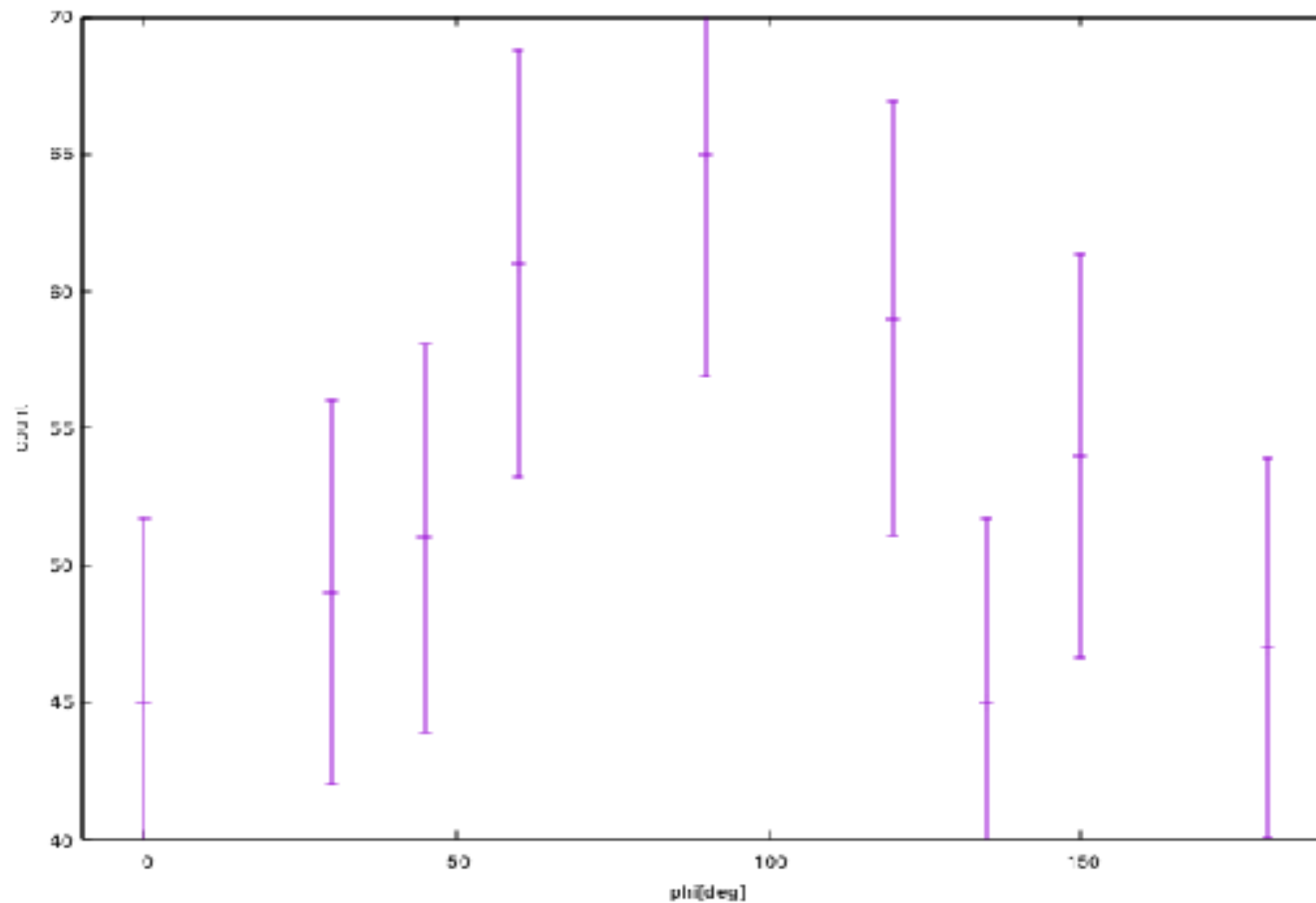


edep0:edep1 {edep0!=0&&edep1!=0}



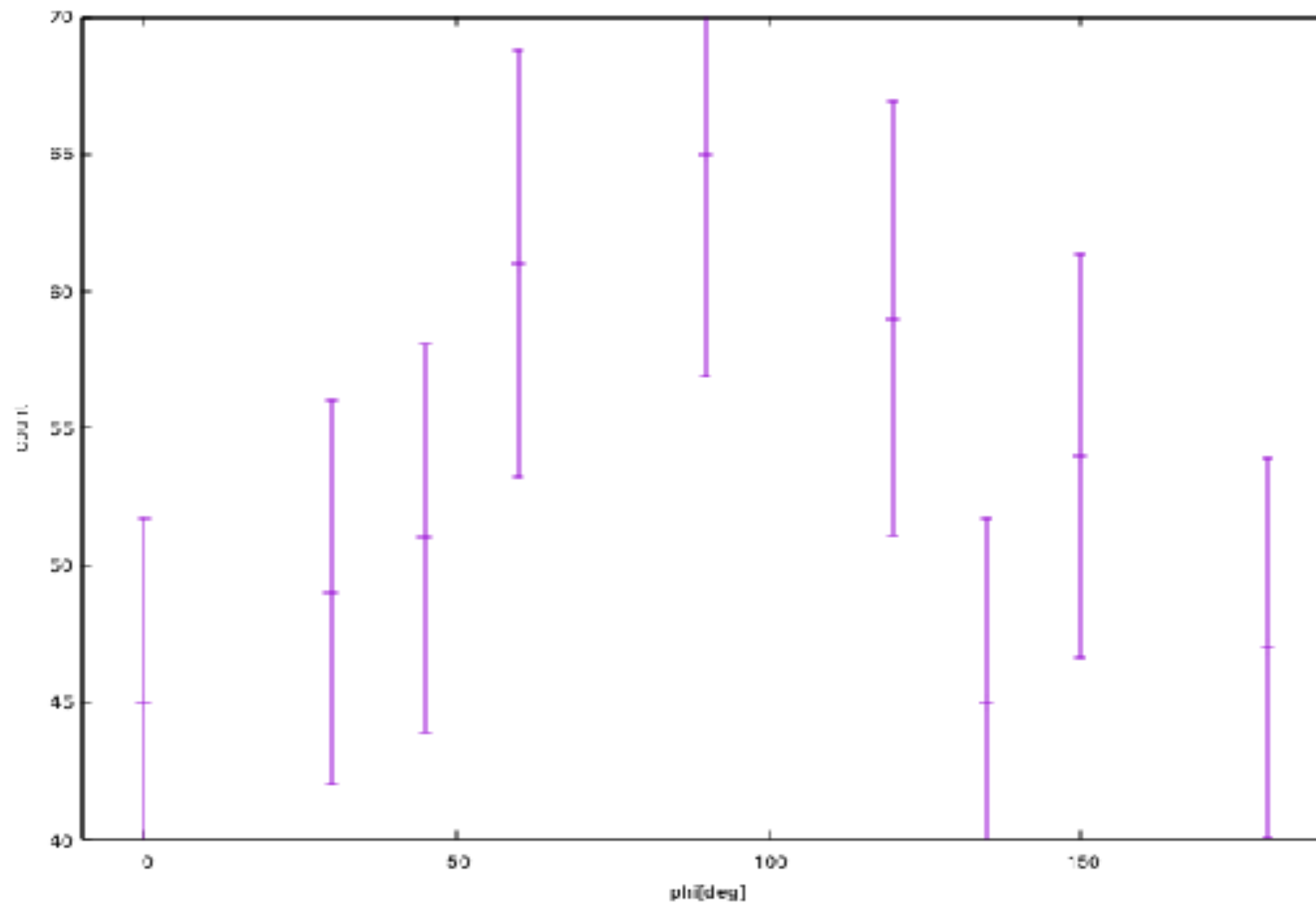
6 シミュレーション結果

- 上下BSOのコインシデン스의 ϕ 依存性



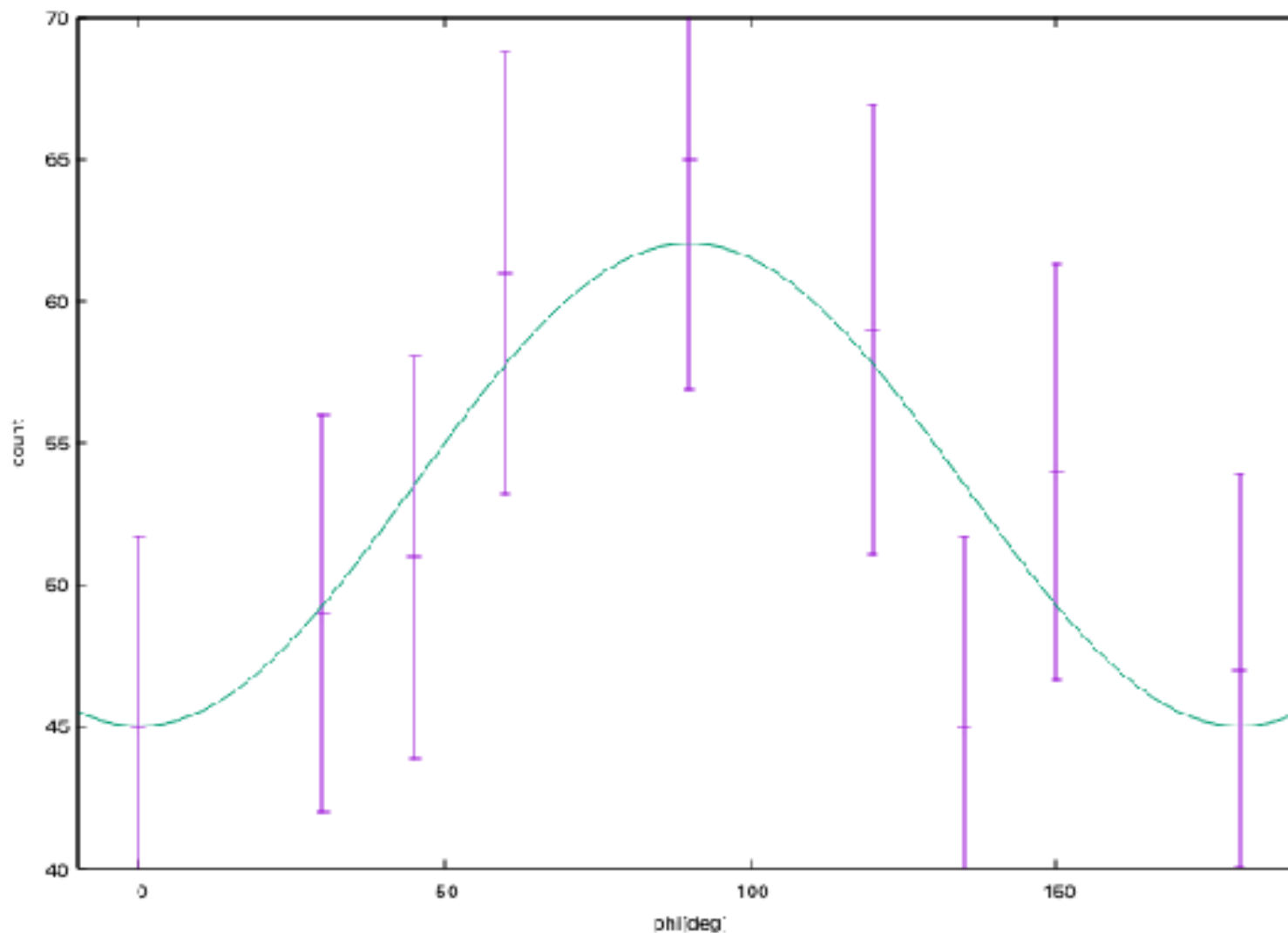
6 シミュレーション結果

- 上下BSOのコインシデン스의 ϕ 依存性



6 シミュレーション結果

$a \cdot (1 - 0.54 \cdot k \cdot \cos 2\phi)$ でフィット



結論

- BSOシンチレーターとプラスチックシンチレーターを用いてベルの不等式の破れを検証した
- 結果としてはイベント数が少なく極端な値が出た
- 複数の角度について測定すれば破れが見れると考えられる
- シミュレーションは誤差が大きかった