<ruby>ポジトロニウム</ruby>

Psの量子振動

井上篤生　大畠隆弘　蓑島淳

Menu

理論

実験

解析

結論

理論

担当：井上篤生

実験の当初の目的

1.ポジトロニウムの寿命測定

2.ポジトロニウムの崩壊曲線の振動の測定

3.超微細分裂の測定

ポジトロニウムの基礎

Ps：ポジトロニウム

電子と陽電子の束縛状態
スピン一重項状態と三重項状態が存在

$$|11\rangle = |\uparrow\uparrow\rangle$$

o-Ps $$|10\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle)$$ Spin1

$$|1-1\rangle = |\downarrow\downarrow\rangle$$

p-Ps $$|00\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)$$ Spin0

ポジトロニウムの基礎

Ps：ポジトロニウム

電子と陽電子の束縛状態
スピン一重項状態と三重項状態が存在

崩壊時間

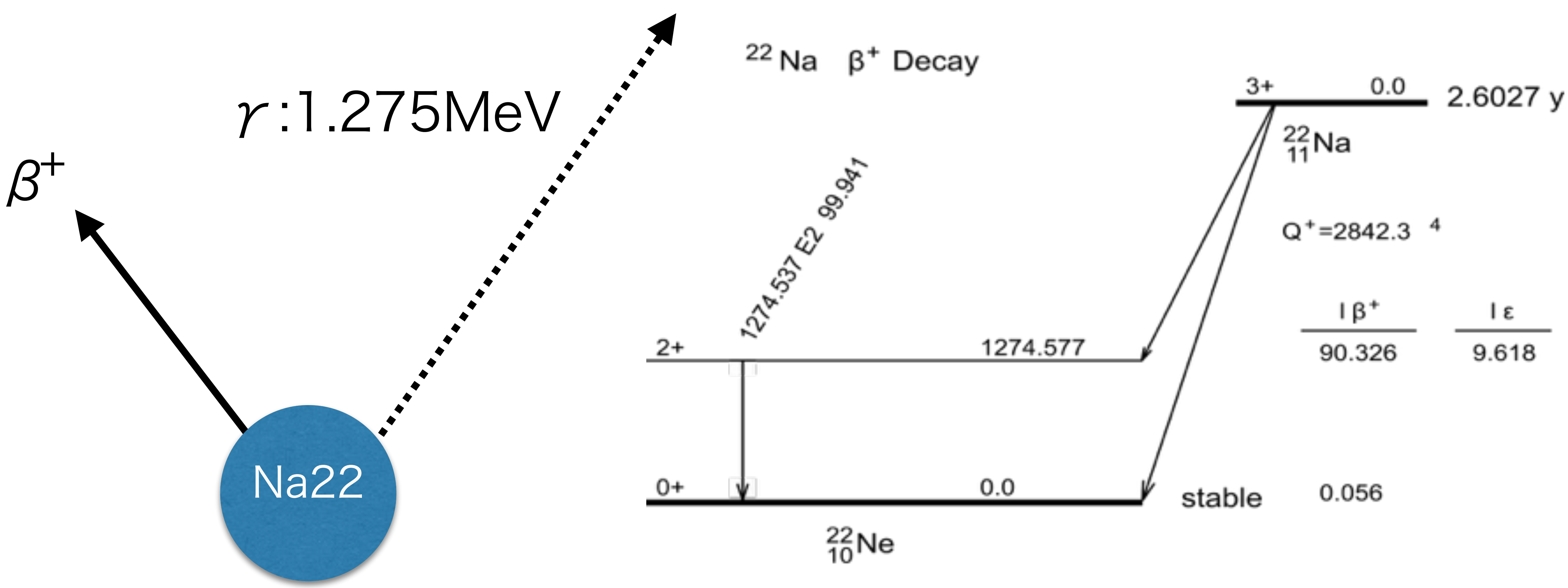
o-Ps	142 ns	こちらを観測する
p-Ps	125 ps	

ポジトロニウムの基礎

作り方

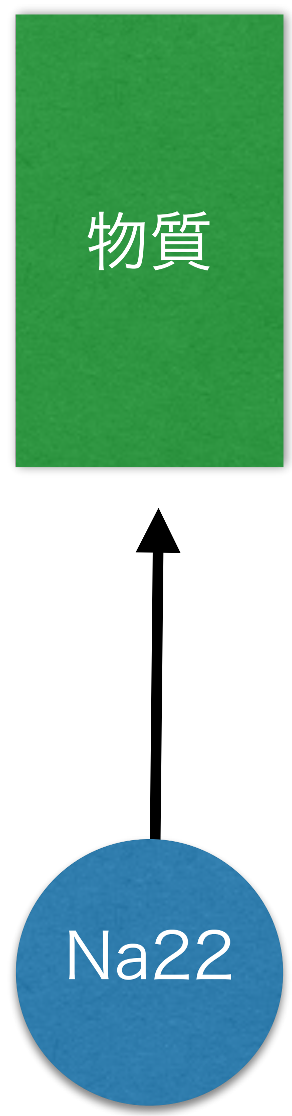
Na22の β^+崩壊を利用：

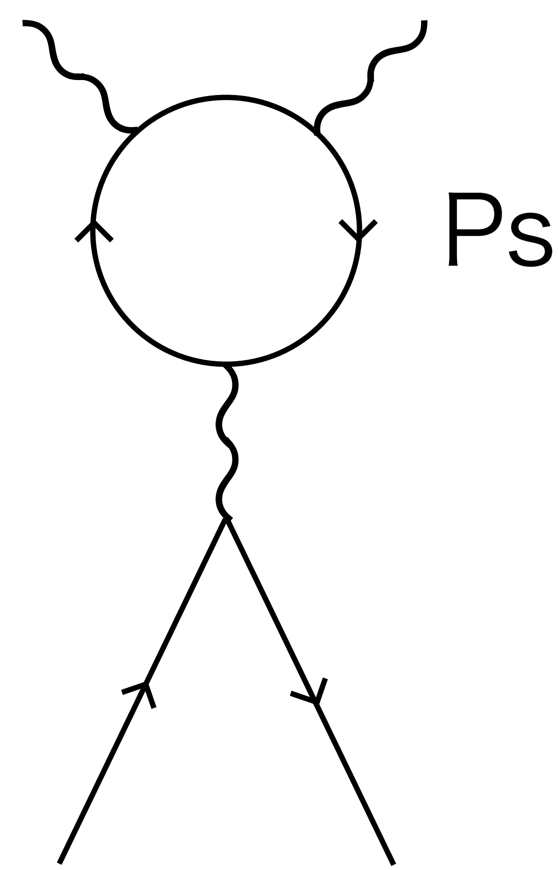
$$^{22}_{11}\mathrm{Na} \longrightarrow {}^{22}_{10}\mathrm{Ne} + e^+ + \nu_e$$



ポジトロニウムの基礎

物質にぶつけて物質中の電子と反応させて
ポジトロニウムをつくる
→角度分布から物質の性質などを調べられる





ポジトロニウムの崩壊

束縛状態を形成するには
陽電子は遅くなければならない

$\boxed{\text{場の理論＋NR-Schroedinger方程式のハイブリッドな理論を使う}}$

ポジトロニウムの状態ベクトル

$$|S, S_z\rangle = \int \mathrm{d}^3\boldsymbol{p}\tilde{\psi}(\boldsymbol{p})\sum_{s,s'}\sigma_{s,s'}a^\dagger_{\boldsymbol{p},s}b^\dagger_{-\boldsymbol{p},s'}|0\rangle$$

$\tilde{\psi}(\boldsymbol{p})$：Coulomb場中のSchroedinger方程式の解

ポジトロニウムの崩壊

電磁相互作用では荷電共役対称性が保存する
→対消滅後の終状態に制限がつく

状態ベクトルの荷電共役パリティ：

$$C|S, S_z\rangle = (-1)^{L+S}|S, S_z\rangle$$

終状態ベクトルの荷電共役パリティ：

$$C|n\gamma\rangle = (-1)^n|n\gamma\rangle$$

ポジトロニウムの対消滅には ***L* = *0*** のみがきいてくる

ポジトロニウムの崩壊

電磁相互作用では荷電共役対称性が保存する
→対消滅後の終状態に制限がつく

散乱振幅全体が荷電共役対称性を持つためには、

$$\text{o-Ps} \longrightarrow (2k+1)\gamma$$

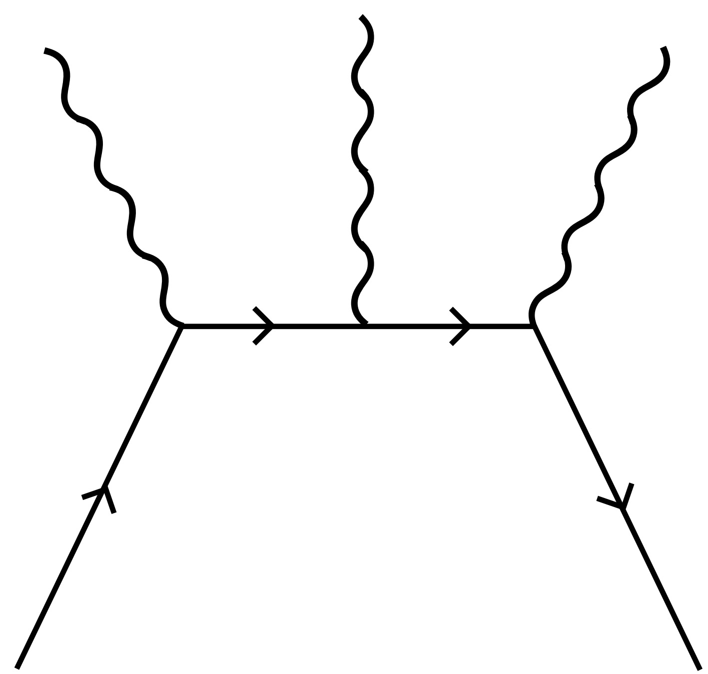
$$\text{p-Ps} \longrightarrow 2k\gamma$$

最低次はそれぞれ 3γ,2γ の崩壊

ポジトロニウムの崩壊

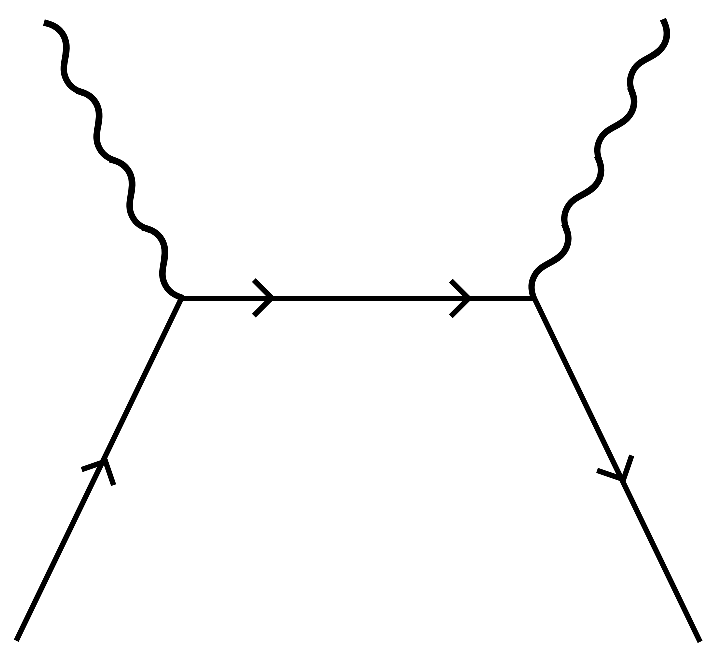
寿命の計算 次のFeynmanダイアグラムを計算すれば良い：

o-Ps

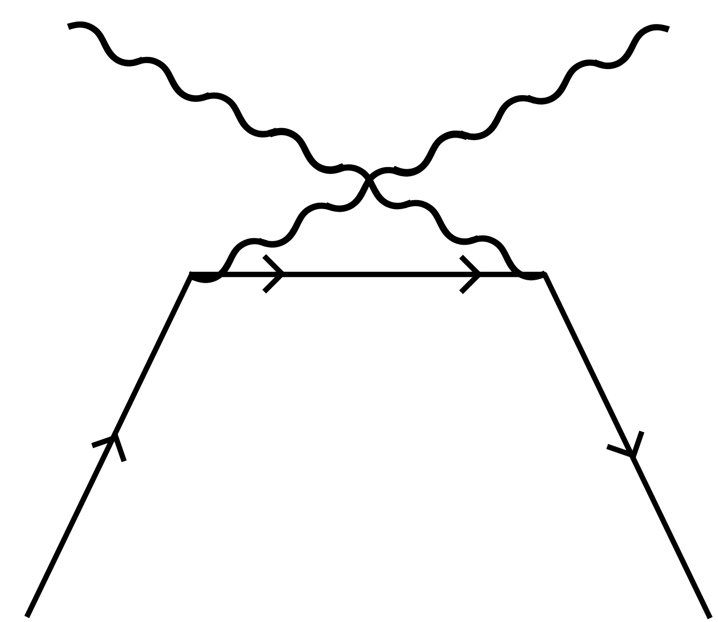


+ (permutations)

p-Ps



+



磁場によるエネルギーシフト

磁場をかけると状態の混合が起きる

$$|E_0\rangle = C_0^0|00\rangle + C_1^0|10\rangle$$

$$|E_1\rangle = C_0^1|00\rangle + C_1^1|10\rangle$$

$|11\rangle$, $|1-1\rangle$ はそのまま

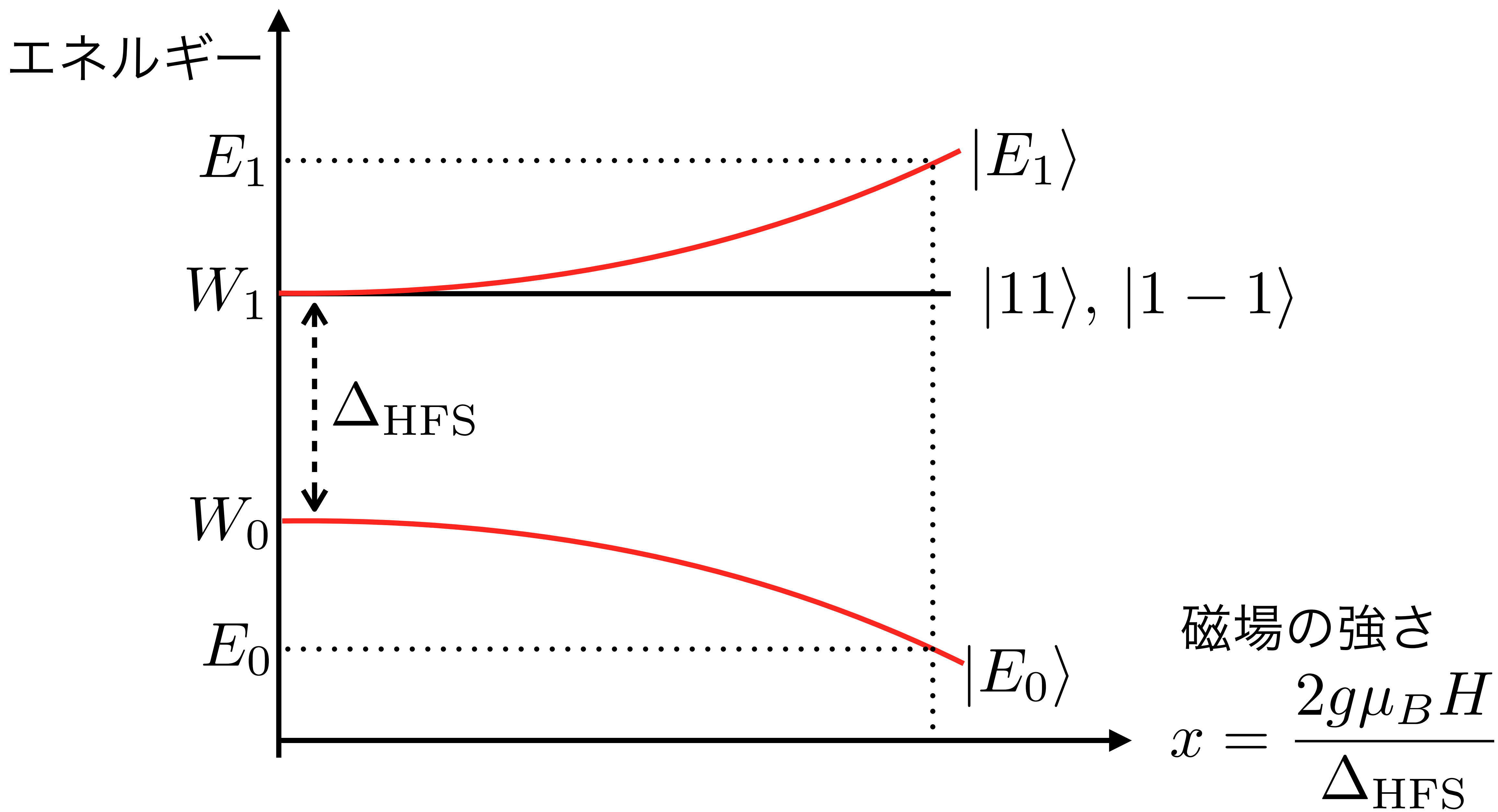
$$C_1^0 = -C_0^1 = \sqrt{\frac{1}{2}\left(1 - \frac{1}{\sqrt{1+x^2}}\right)}$$

$$C_1^1 = C_0^0 = \sqrt{\frac{1}{2}\left(1 + \frac{1}{\sqrt{1+x^2}}\right)}$$

磁場によるエネルギーシフト

ポジトロニウムの超微細構造

磁場によってエネルギー準位の縮退が一部とける



磁場によるエネルギーシフト

ポジトロニウムの超微細構造

磁場によってエネルギー準位の縮退が一部とける

$$E_0 = \frac{1}{2}(W_1 + W_0) - \frac{1}{2}(W_1 - W_0)\sqrt{1+x^2}$$

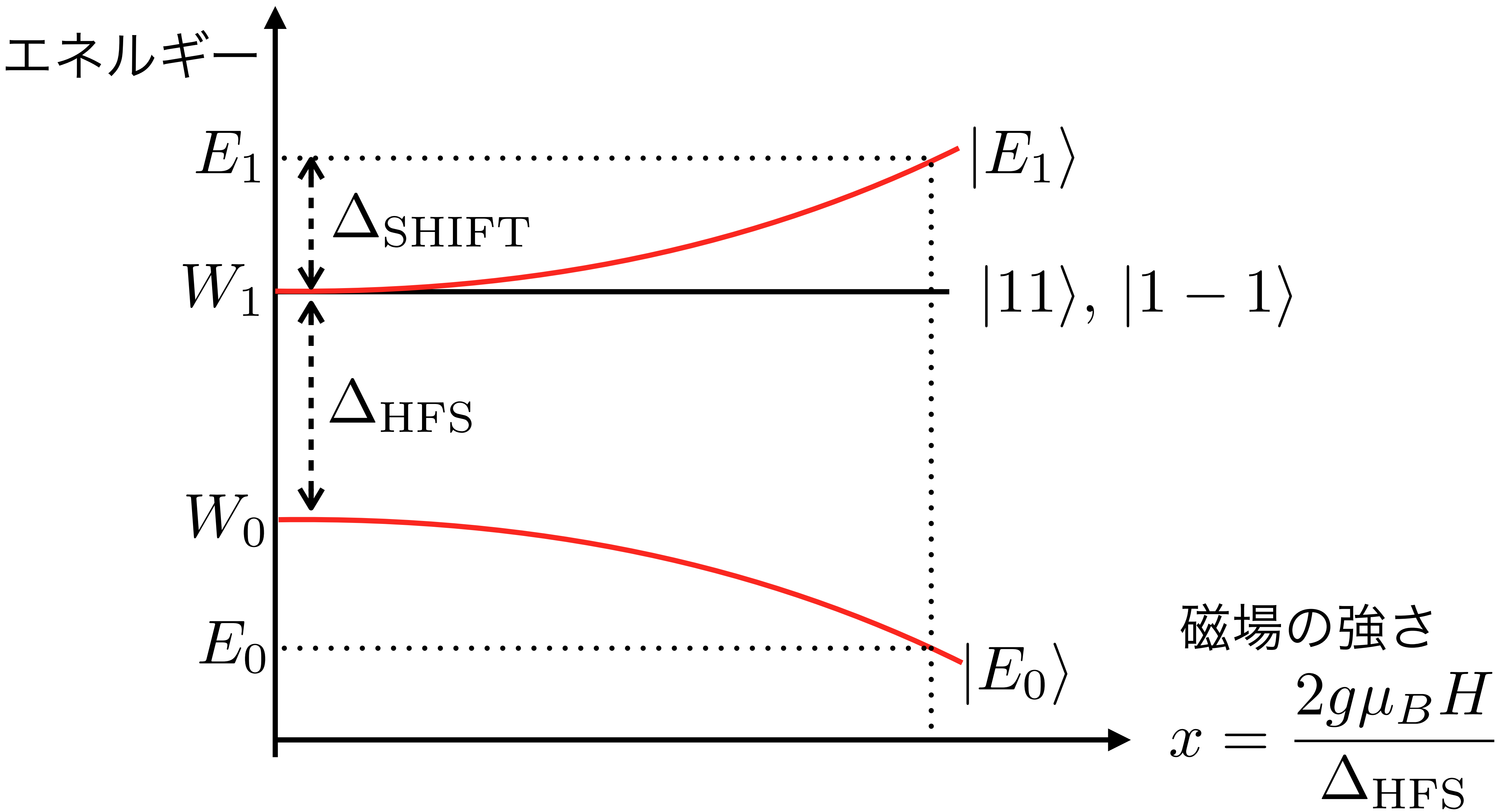
$$E_1 = \frac{1}{2}(W_1 + W_0) - \frac{1}{2}(W_1 - W_0)\sqrt{1+x^2}$$

$$E_2 = E_3 = W_1$$

$$\Delta_{\mathrm{SHIFT}} = E_1 - W_1 = \frac{1}{2}\Delta_{\mathrm{HFS}}(-1 + \sqrt{1+x^2})$$

Δ_{SHIFT} の測定によって Δ_{HFS} がわかる

磁場によるエネルギーシフト



Δ_{SHIFT} の測定によって Δ_{HFS} がわかる

磁場による振動

各時刻の崩壊の振幅の二乗

$$|M(t)|^2 = \sum_{m,n} M_n \rho_{mn}(t) M_n^*$$

$$= \frac{(4\pi)^3 e^6}{2m^2} \left[\frac{x^2}{4} F_{zz} e^{-\Gamma_0 t} + \left(1 - Px\cos\theta - \frac{x^2}{4}\right) F_{zz} e^{-\Gamma_1 t} \right.$$
$$\left. + (F_{xx} + F_{yy}) e^{-\gamma_2 t} + \underline{2P\sin\theta \left(F_{zx}\cos\Omega_1 t + \left(1 - \frac{x^2}{4}\right) F_{zy}\sin\Omega_1 t \right) e^{-(\Gamma_1+\Gamma_2)t/2}} \right]$$

$$\Omega_1 = E_1 - W_1 = \Delta_{\mathrm{SHIFT}}$$

$$\Gamma_1 = \frac{1}{4} x^2 \Gamma_s + \Gamma_t$$

$$\Gamma_2 = \Gamma_t$$

Γ_t ：三重項の崩壊幅

Γ_s ：一重項の崩壊幅

磁場による振動

3γ消滅の断面積

$$\mathrm{d}\sigma = \frac{|M(t)|^2}{(2\pi)^5 32 m^2 v}\delta(\boldsymbol{k}_1 + \boldsymbol{k}_2 + \boldsymbol{k}_3)\delta(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 - 2m)\frac{\mathrm{d}^3\boldsymbol{k}_1\mathrm{d}^3\boldsymbol{k}_2\mathrm{d}^3\boldsymbol{k}_3}{\omega_1\omega_2\omega_3}$$

$$\sigma \simeq (1 + h\sin\Omega_1 t)e^{-(\Gamma_1+\Gamma_2)t/2}$$

振動数 Δ_{SHIFT}で断面積は時間振動する

$$\Omega_1 = E_1 - W_1 = \Delta_{\mathrm{SHIFT}}$$

$$\Gamma_1 = \frac{1}{4}x^2\Gamma_s + \Gamma_t$$

$$\Gamma_2 = \Gamma_t$$

Γ_t ：三重項の崩壊幅

Γ_s ：一重項の崩壊幅

磁場による振動

$$h = 0.25P|\sin\theta\sin\alpha\sin 2\beta|$$

θ：陽電子の偏極と磁場のなす角

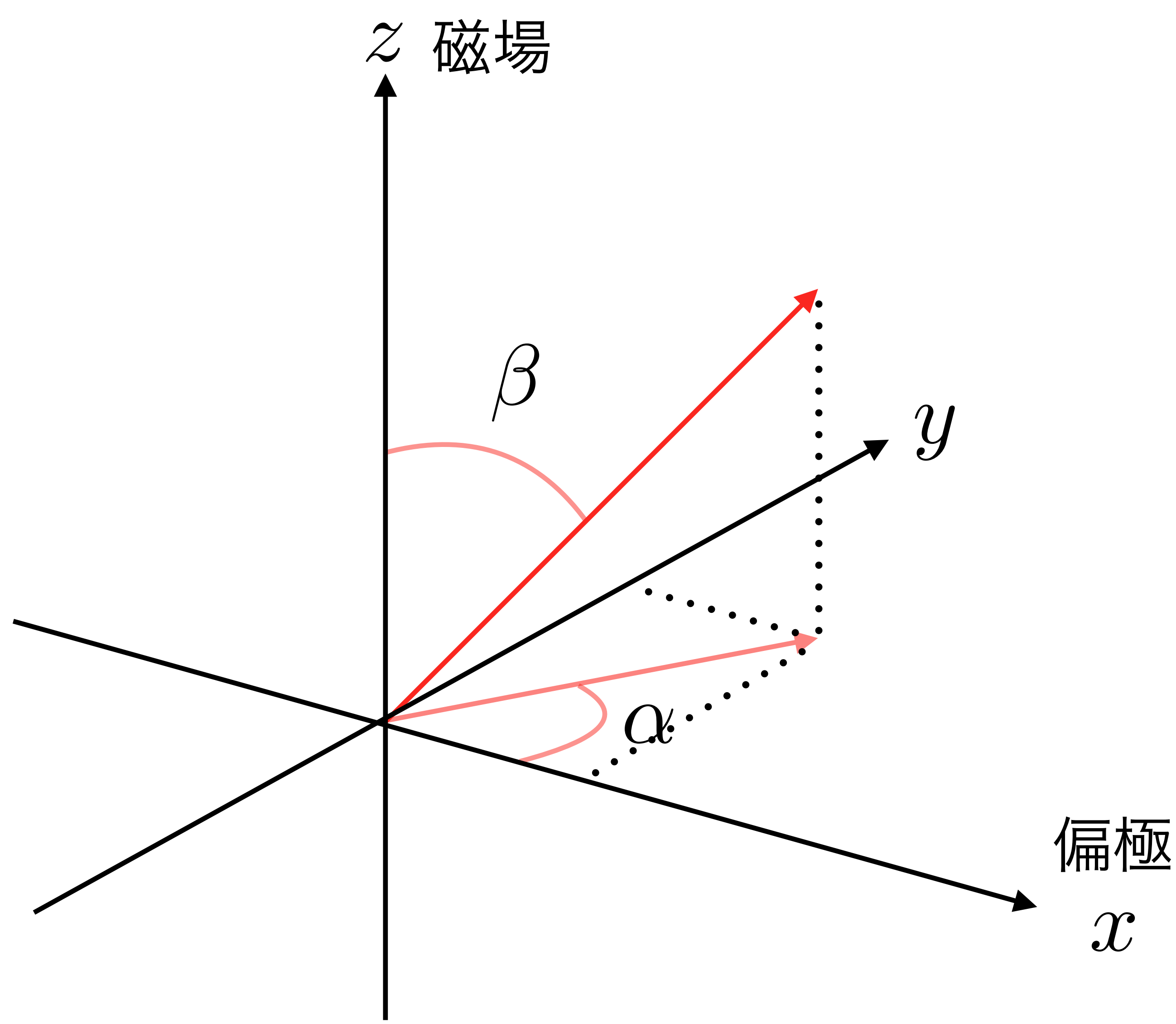
$\alpha,\ \beta$：検出器のある平面の法線ベクトルの方位角、極角

今回の実験では

$$\theta = 90^\circ$$

$$\alpha = 90^\circ$$

$$\beta = 45^\circ$$



まとめ

振動数 Δ_{SHIFT} で3γ消滅の断面積は振動する

$$\sigma \simeq (1 + h \sin \Omega_1 t) e^{-(\Gamma_1 + \Gamma_2)t/2}$$

Δ_{SHIFT} の値と磁場の値によって Δ_{HFS} がわかる

$$\Delta_{\mathrm{SHIFT}} = E_1 - W_1 = \frac{1}{2} \Delta_{\mathrm{HFS}} (-1 + \sqrt{1 + x^2})$$

Menu

理論

実験

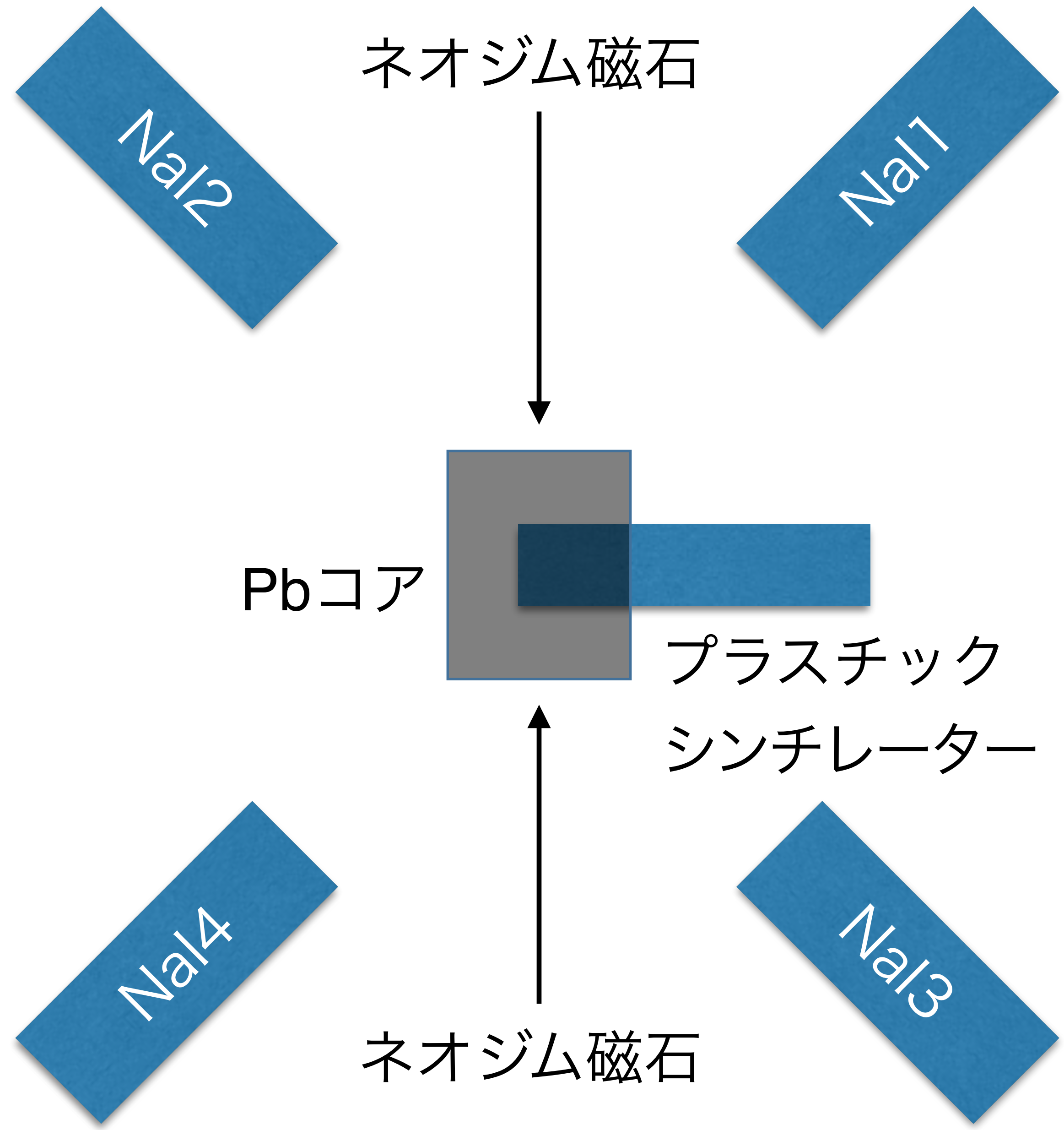
解析

結論

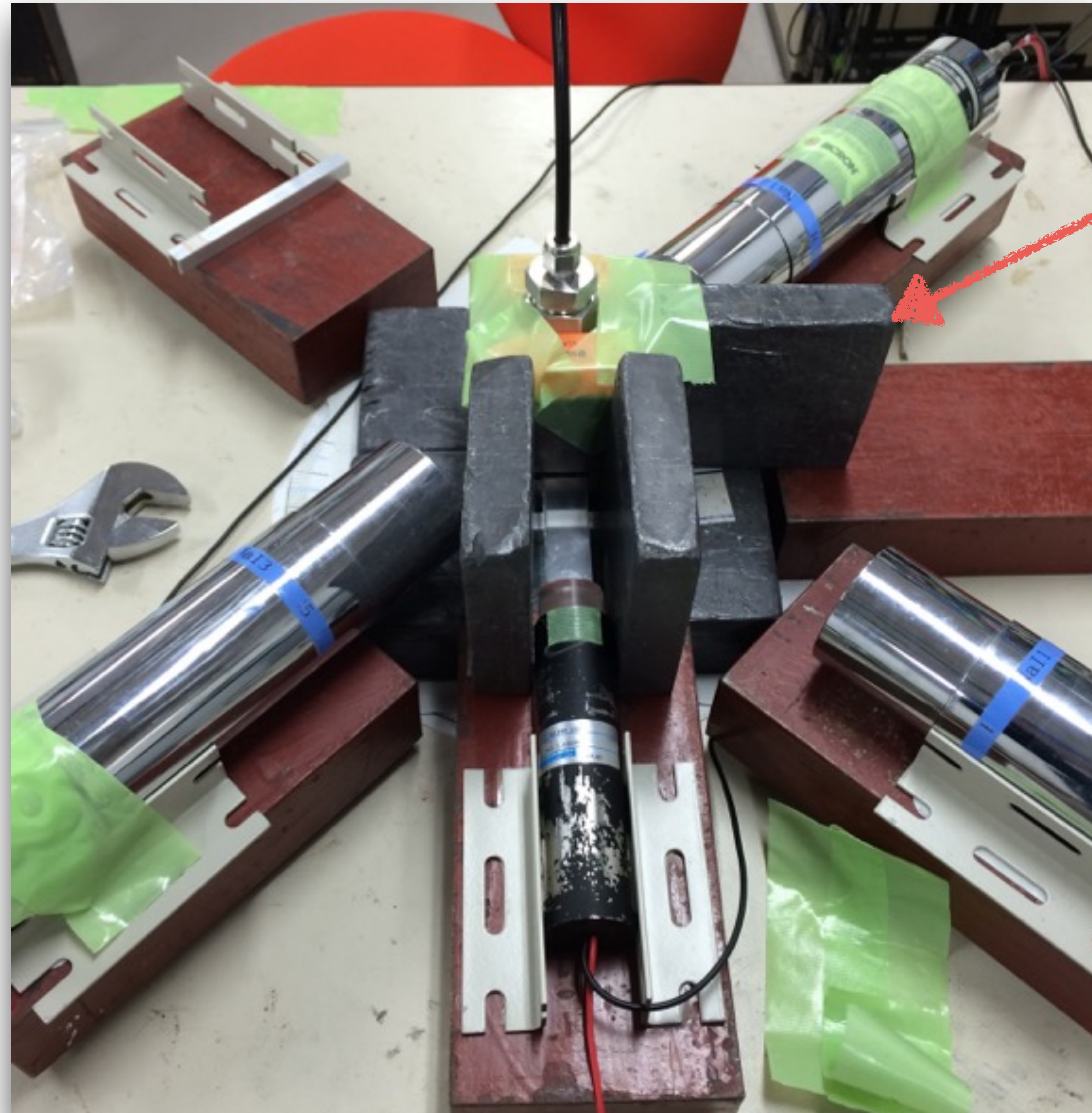
実験

担当：蓑島淳

外観



外観



NaIの間にも
鉛を置いた

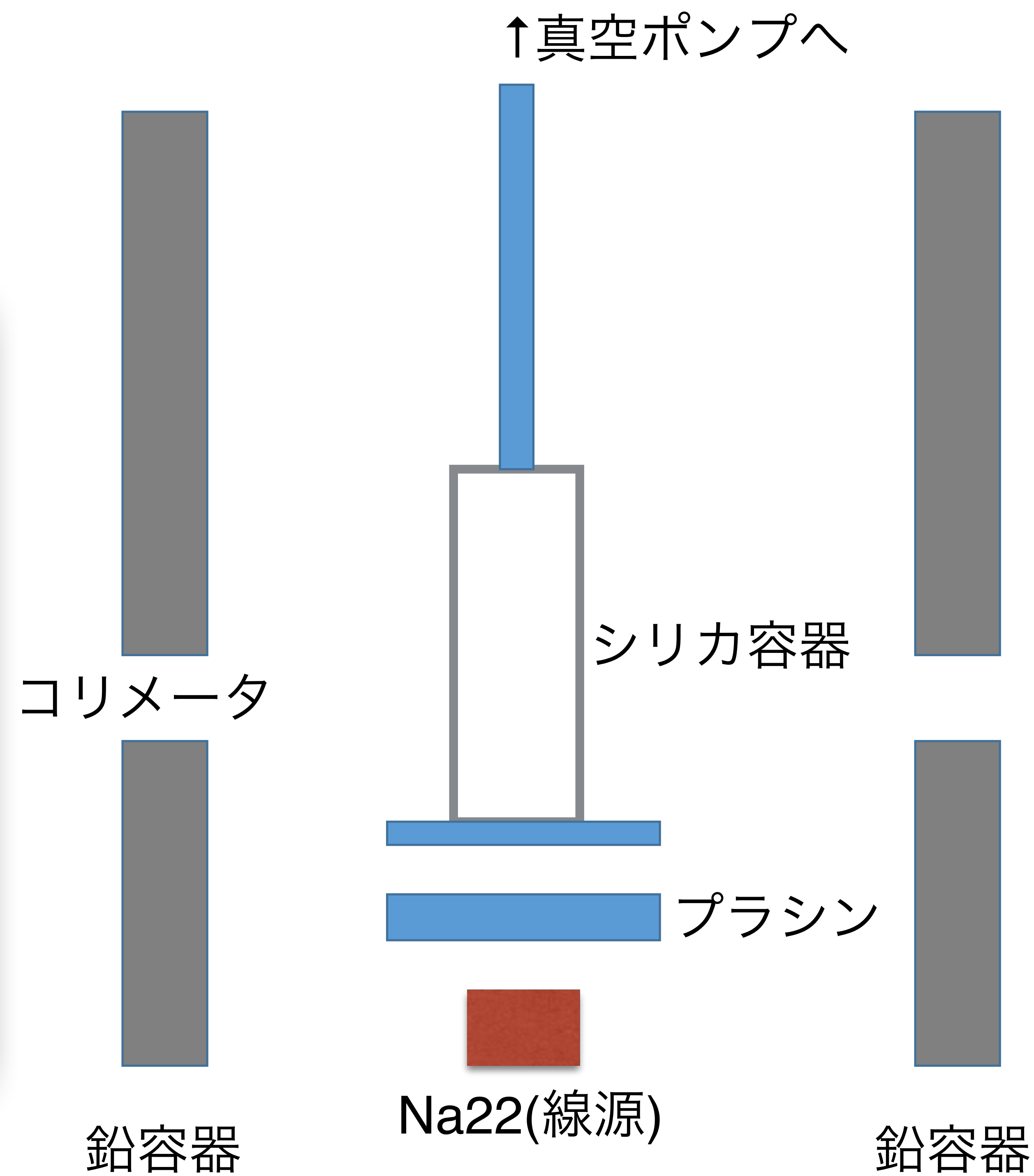
前年度からの変更（装置）

線源とNaIの間に何もなし

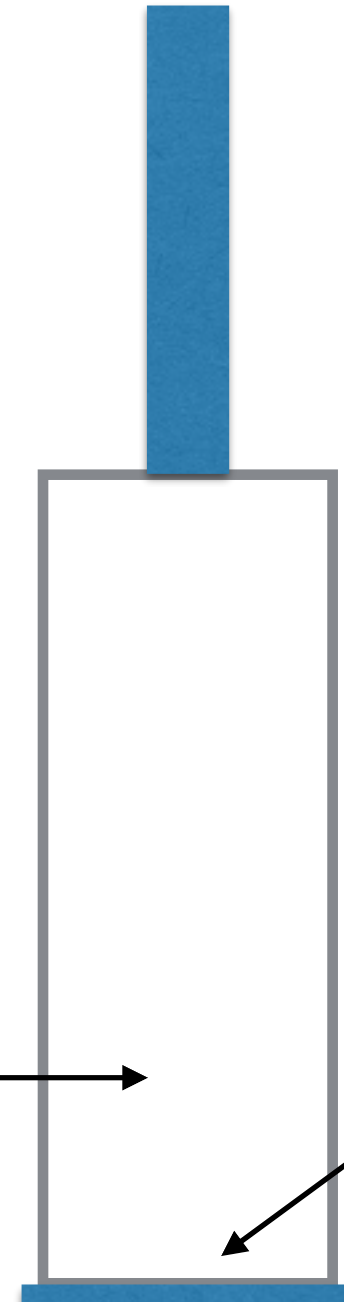
鉛容器を導入

Na22からNaIへ直接入るβ^{+}を遮蔽する

装置：Pbコア



装置：シリカ容器



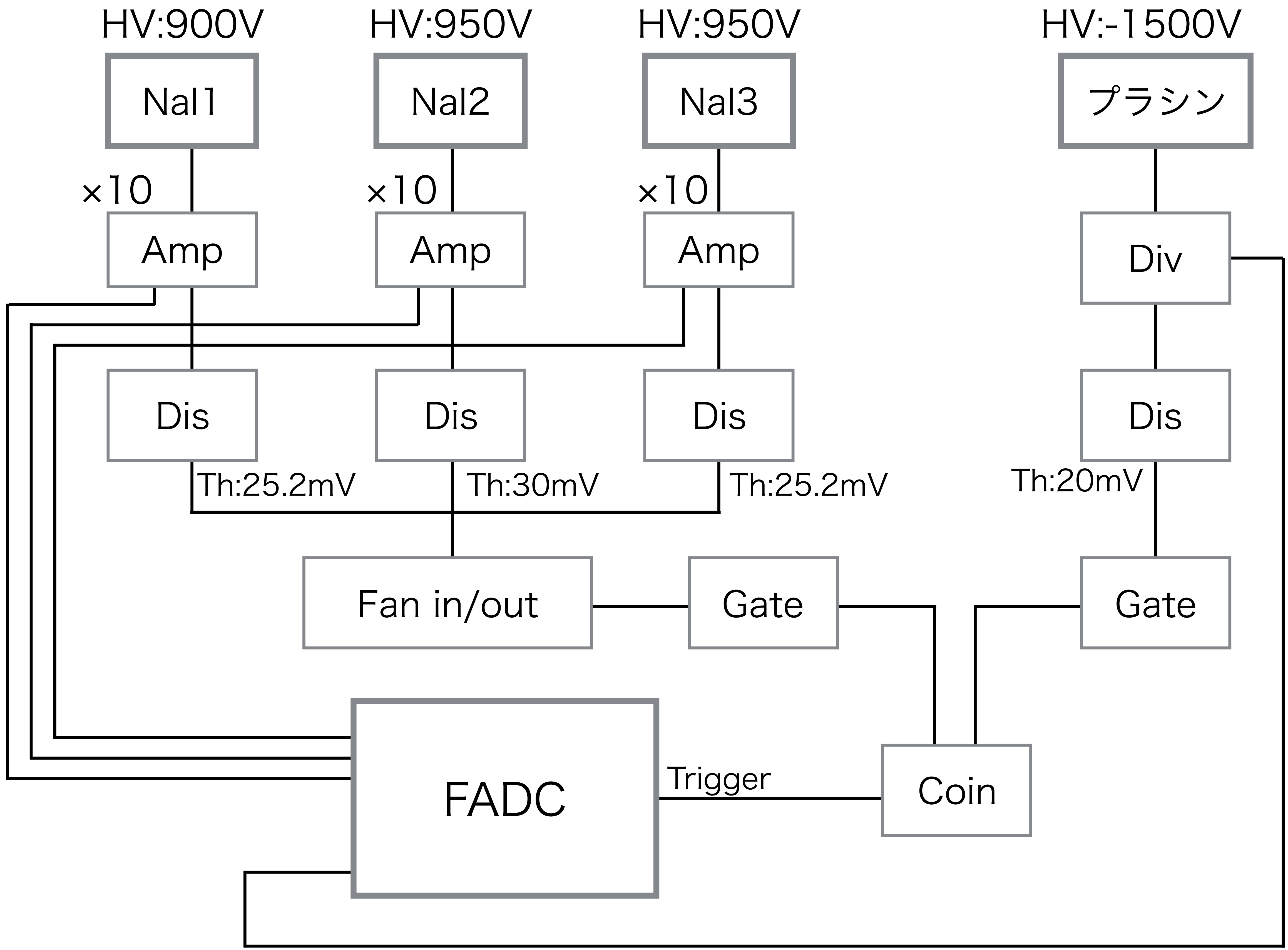
乾燥させたシリカパウダー

Na22からくる
陽電子を止めて
Psを形成させる

マイラーフィルム

β^+を止めないような
薄い蓋

論理回路



HV:900V
HV:950V
HV:950V
HV:-1500V
NaI1
NaI2
NaI3
プラシン
×10
×10
×10
Amp
Amp
Amp
Div
Dis
Dis
Dis
Dis
Th:25.2mV
Th:30mV
Th:25.2mV
Th:20mV
Fan in/out
Gate
Gate
FADC
Trigger
Coin

前年度との違い（回路）

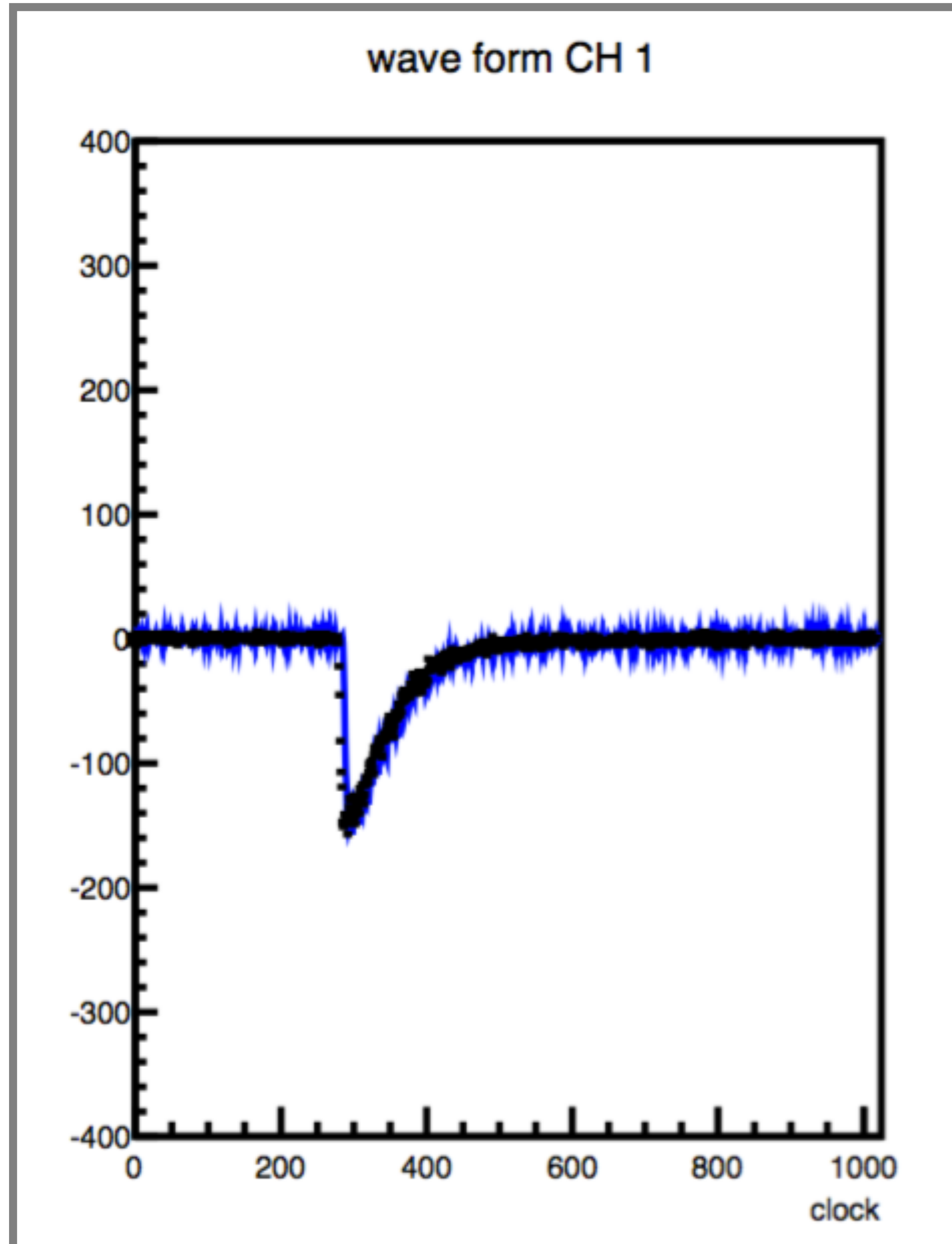
ADCでエネルギー、TDCで時間をそれぞれ測定

ADC、TDCをやめて、
FADCで波形データを
そのまま記録

前年度との違い（回路）

FADC

波形データから
β^+や崩壊γが
観測された時刻を
解析的に求めれば
Psの寿命が求まる

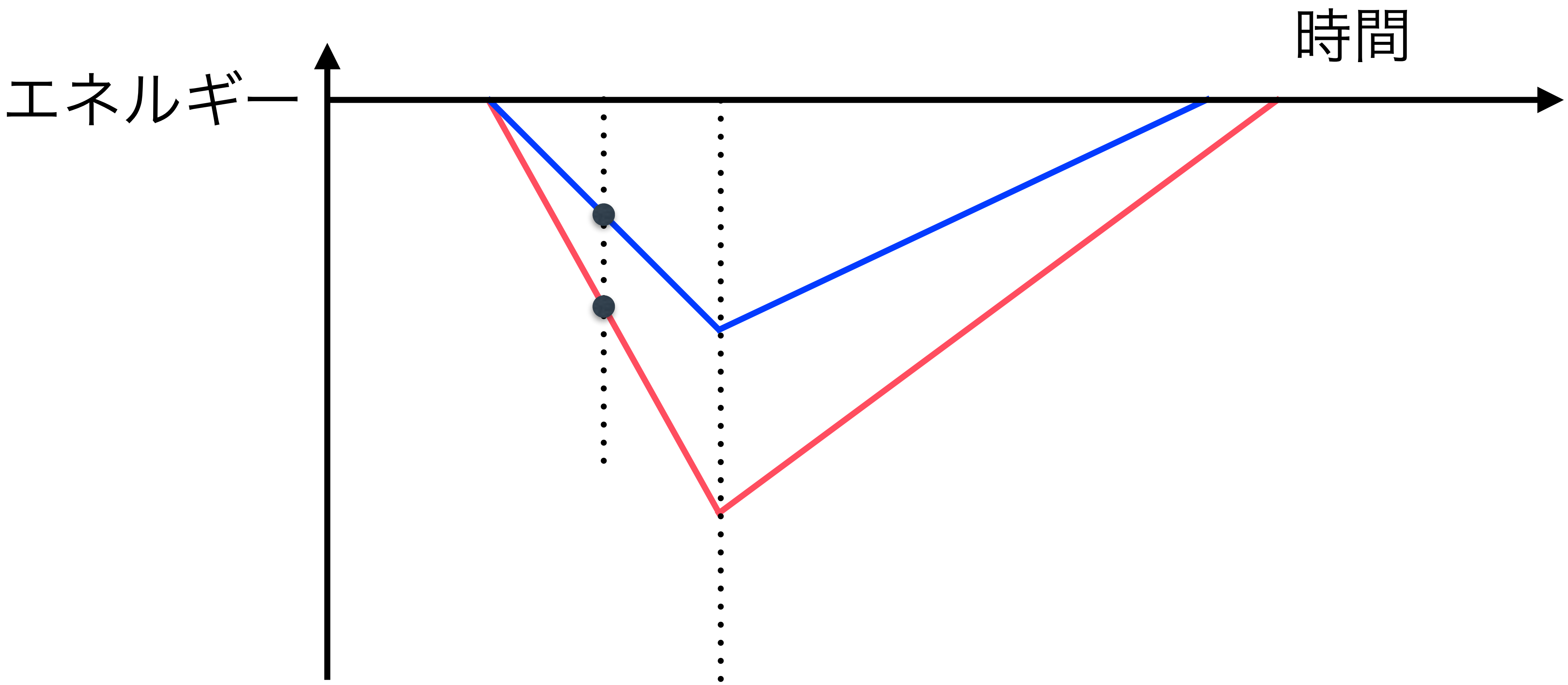


前年度との違い（回路）

FADC

波形の最小値と立ち下りの中点を到達時刻として採用

→到達時刻のエネルギー依存性を除去する



Menu

✓ 理論

✓ 実験

⇨ 解析

結論

解析

担当：大畠隆弘

較正：Calibration

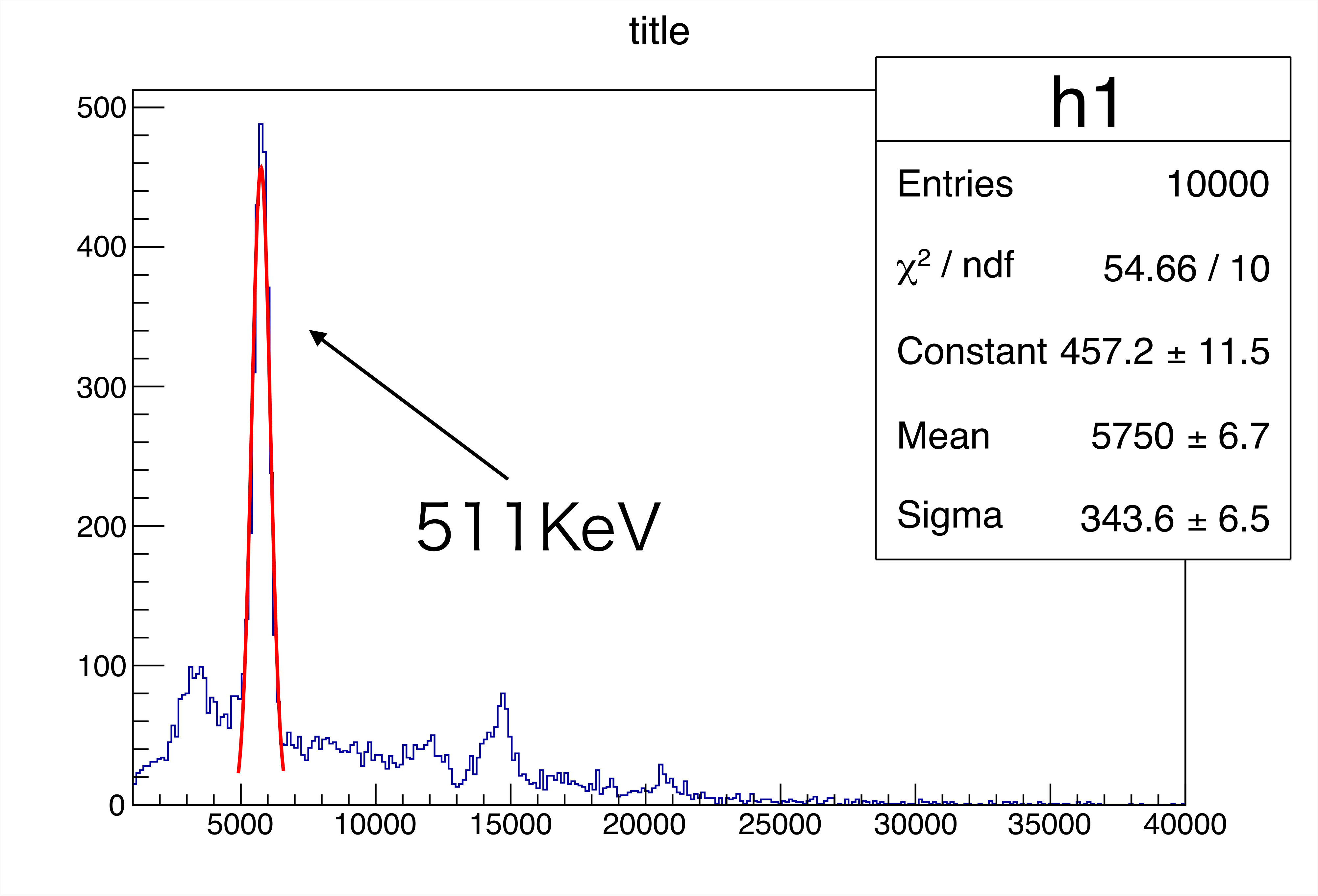
Calibrationを行って、

エネルギーとFADCのカウントの間の関係を求める

今回Calibrationに使った線源はこちら：

- Na22 : 511KeV(β+とNaI表面の金属のe-との対消滅のγ線),1.27MeV(線源からのγ線)
- Co60 : 1.17MeV(線源からのγ線) , 1.33MeV(線源からのγ線)
- Cs137 : 0.66MeV(線源からのγ線)

Na22_NaI1



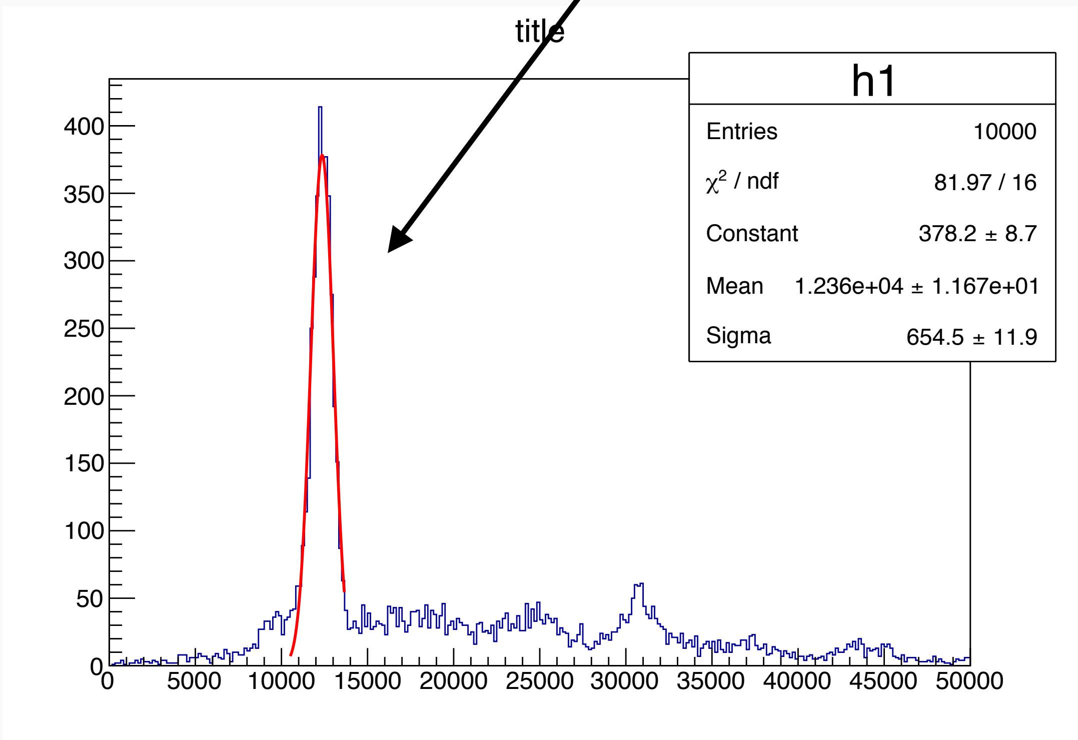
title
h1
Entries 10000
χ² / ndf 54.66 / 10
Constant 457.2 ± 11.5
Mean 5750 ± 6.7
Sigma 343.6 ± 6.5
511KeV
500
400
300
200
100
0
5000
10000
15000
20000
25000
30000
35000
40000

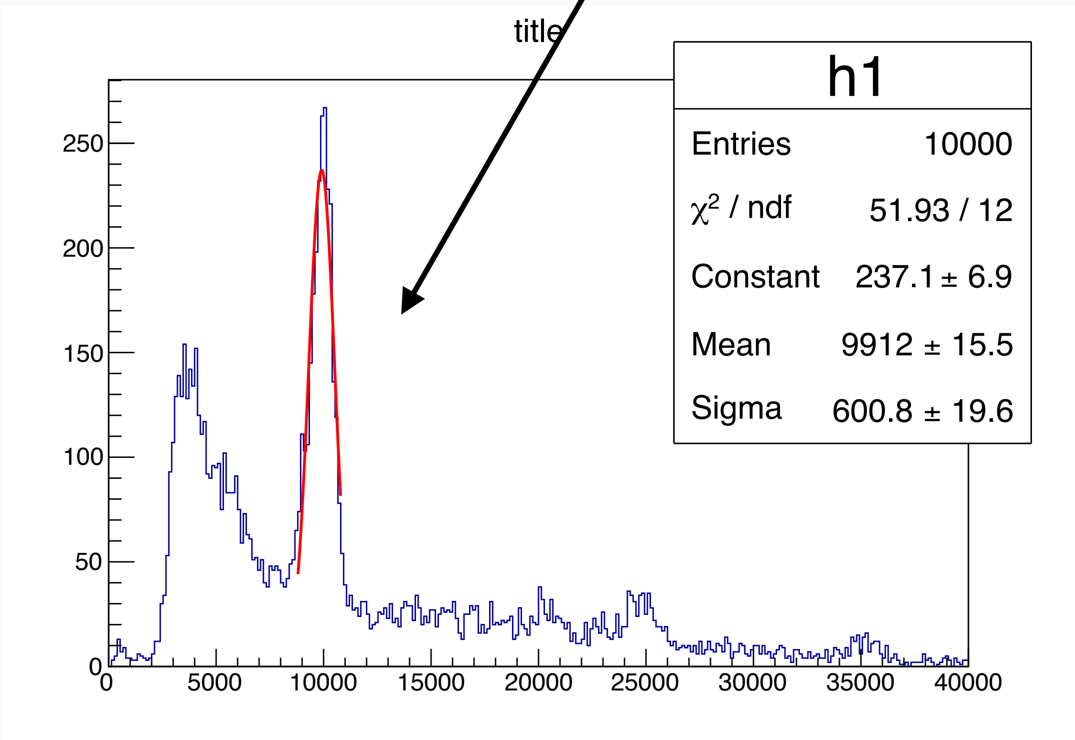
Na22_NaI2

Na22_NaI3

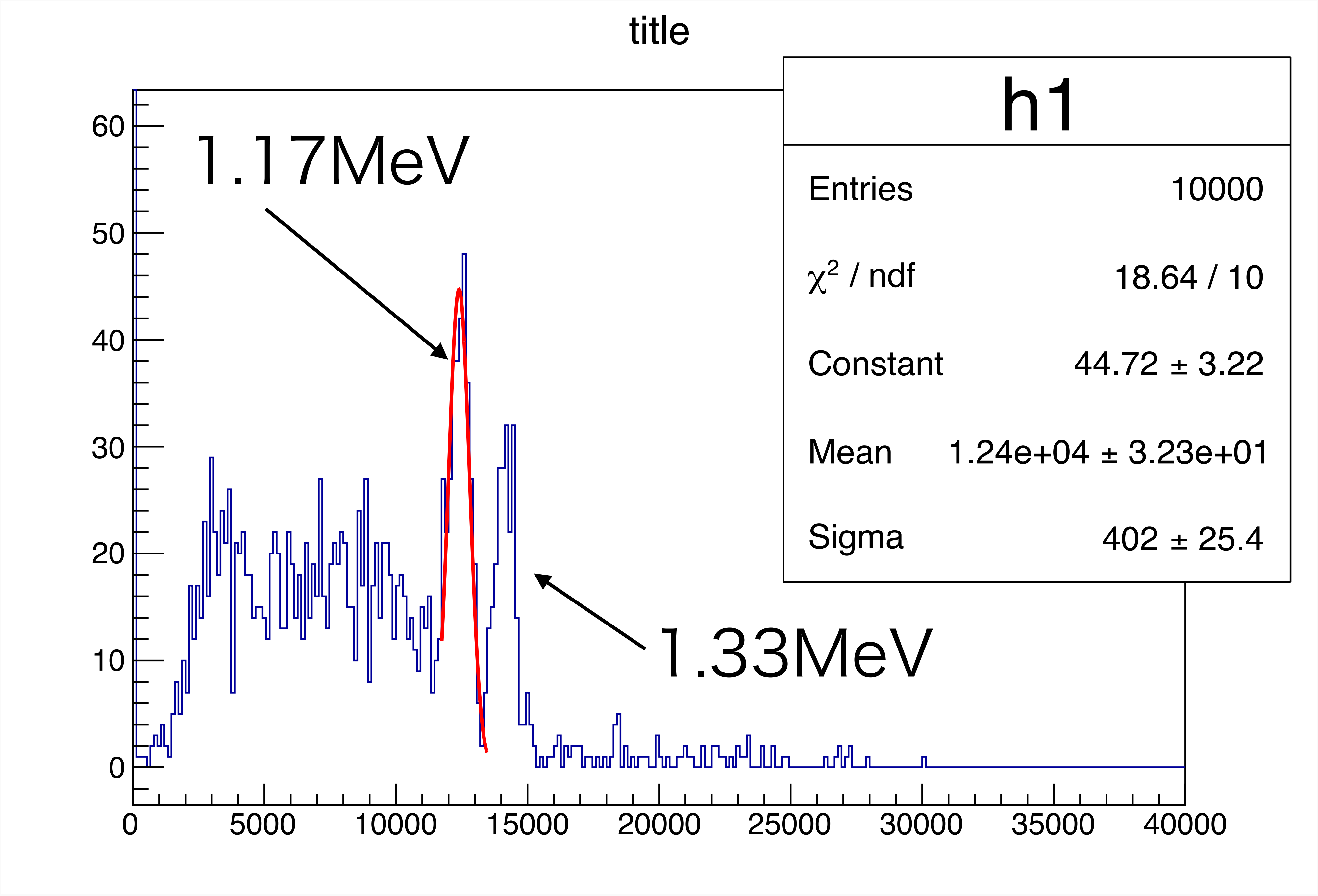
511KeV

511KeV





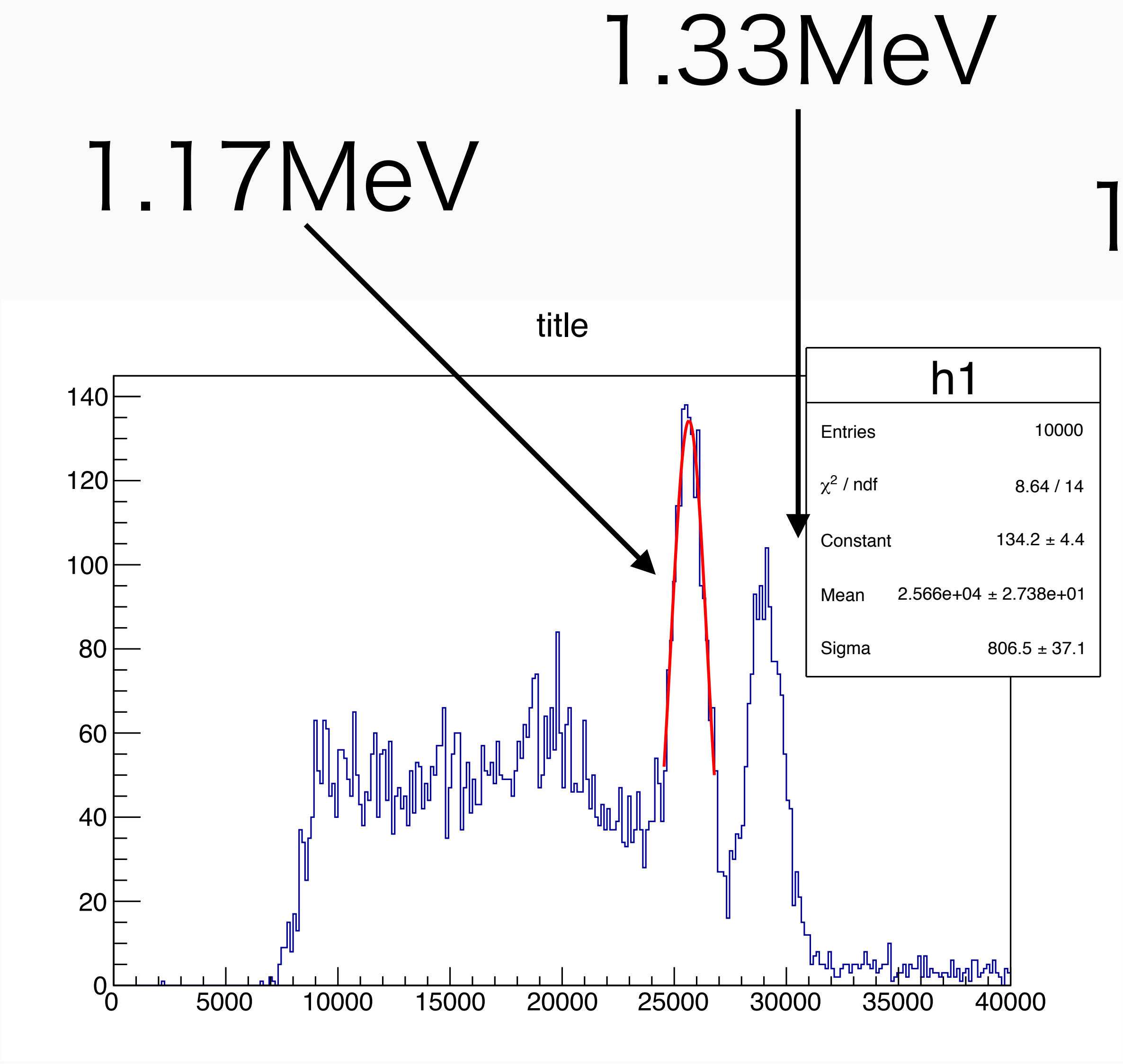
Co60_NaI1

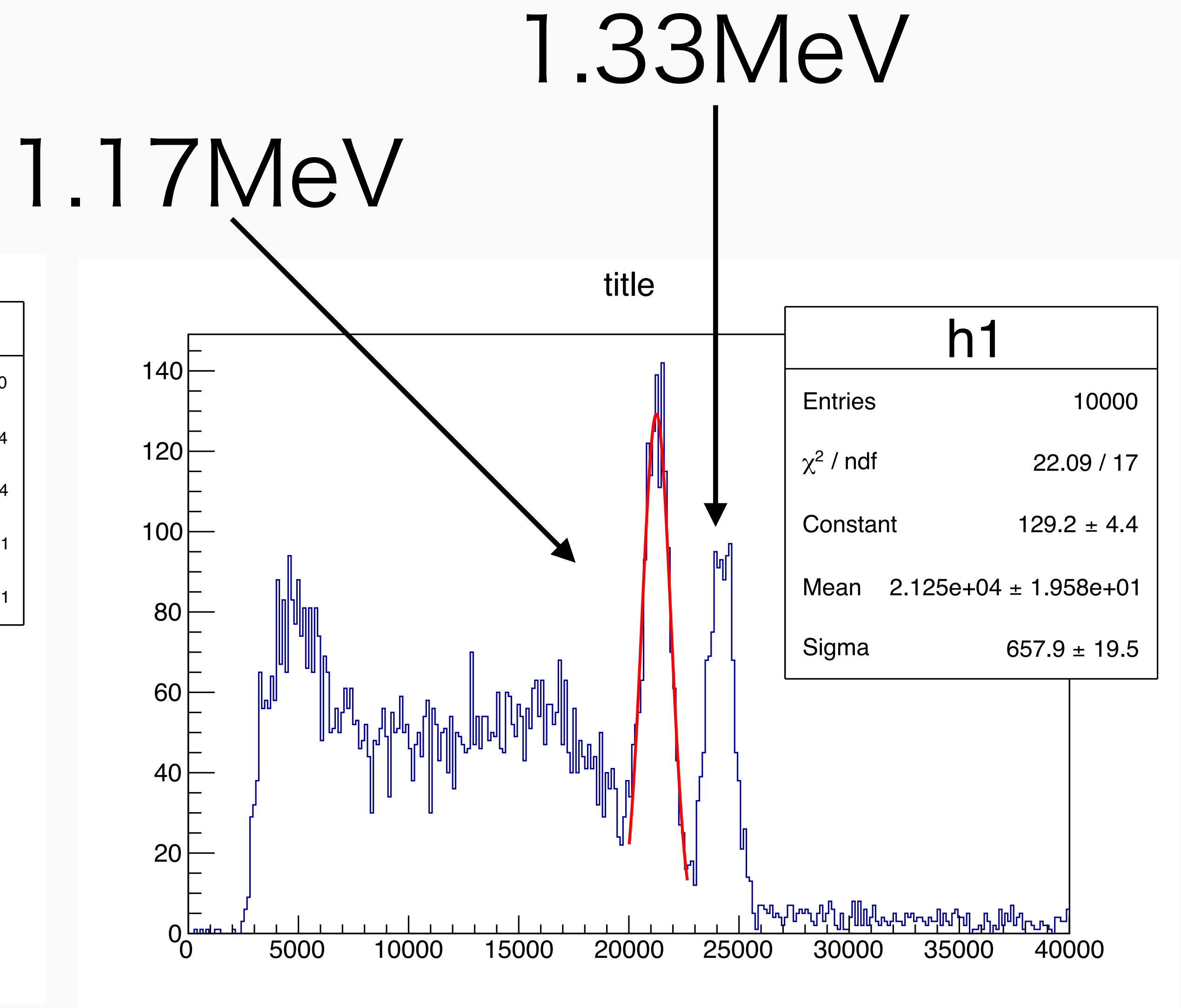


title
h1
Entries 10000
χ^2 / ndf 18.64 / 10
Constant 44.72 ± 3.22
Mean 1.24e+04 ± 3.23e+01
Sigma 402 ± 25.4
1.17MeV
1.33MeV
0
10
20
30
40
50
60
0
5000
10000
15000
20000
25000
30000
35000
40000

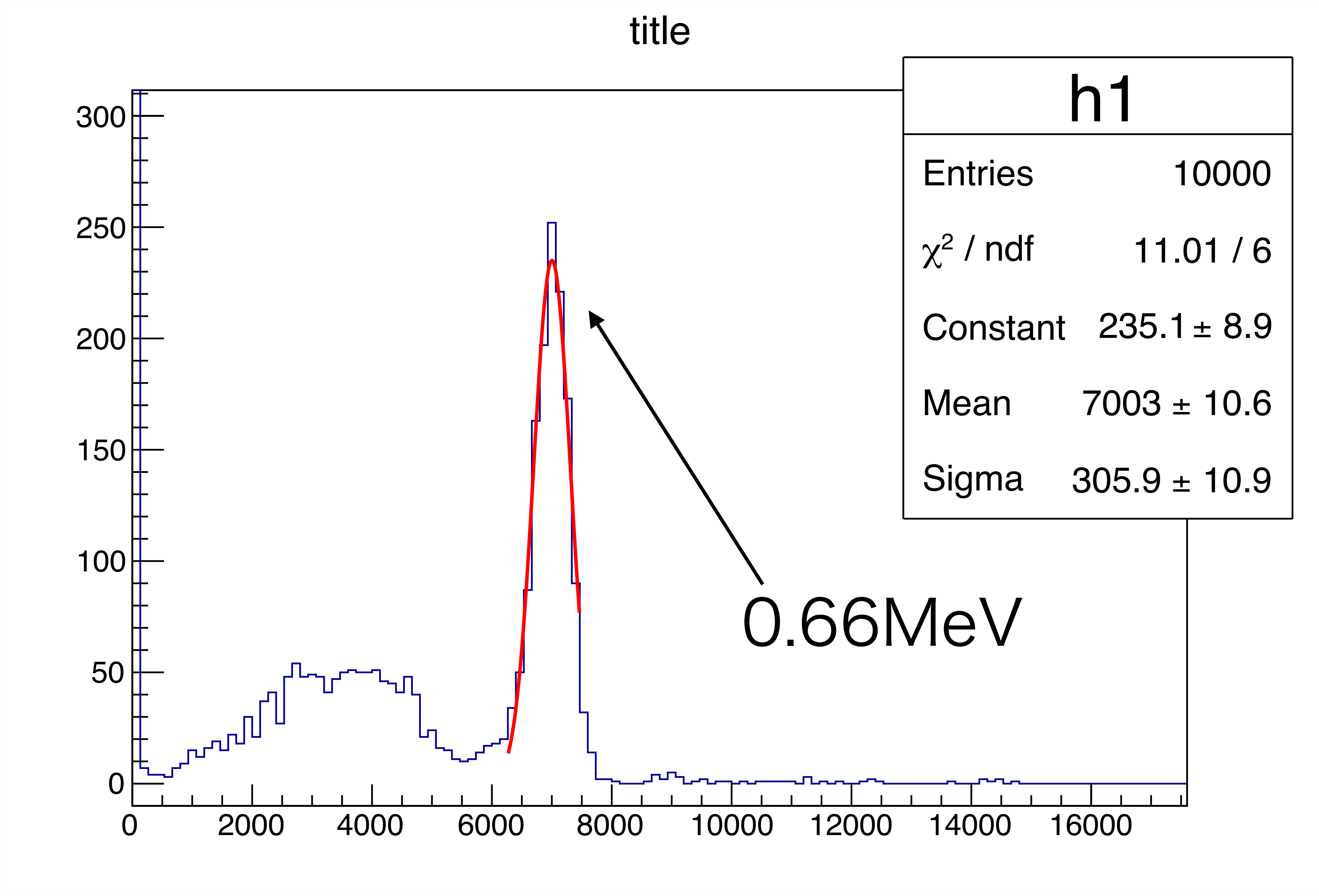
Co60_NaI2

Co60_NaI3





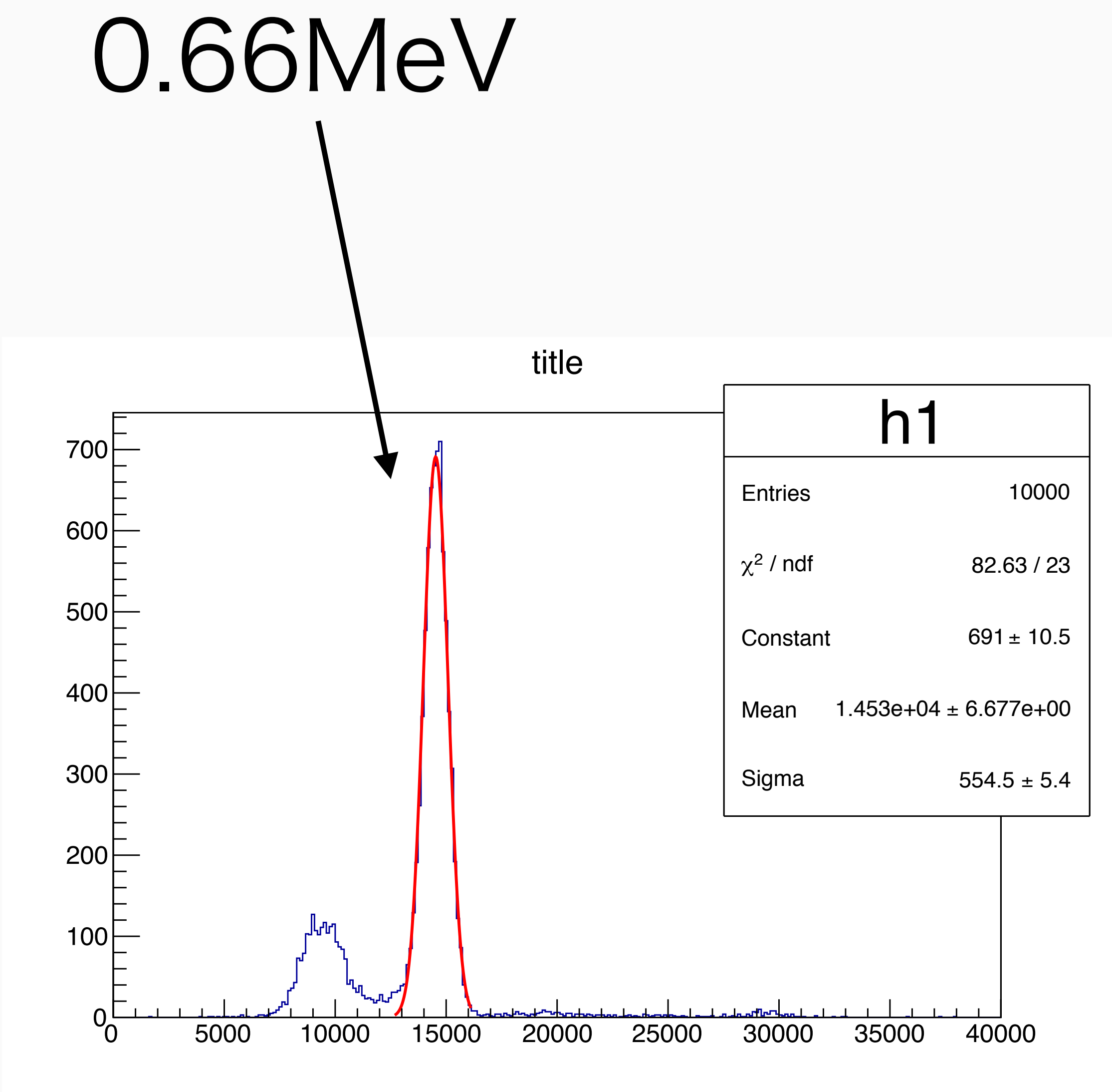
Cs137_NaI1

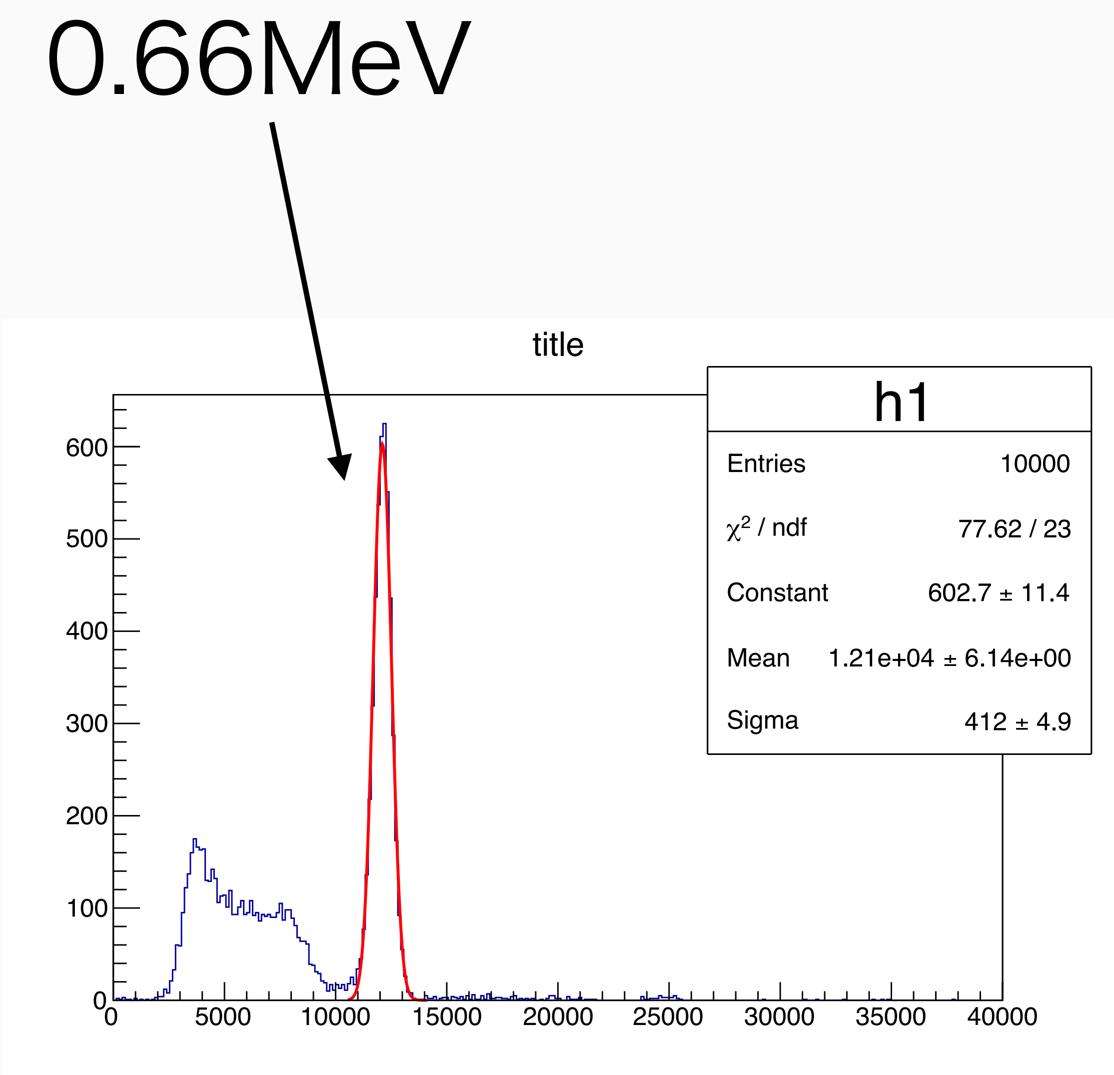


title
h1
Entries 10000
χ^2 / ndf 11.01 / 6
Constant 235.1 ± 8.9
Mean 7003 ± 10.6
Sigma 305.9 ± 10.9
0.66MeV
300
250
200
150
100
50
0
0
2000
4000
6000
8000
10000
12000
14000
16000

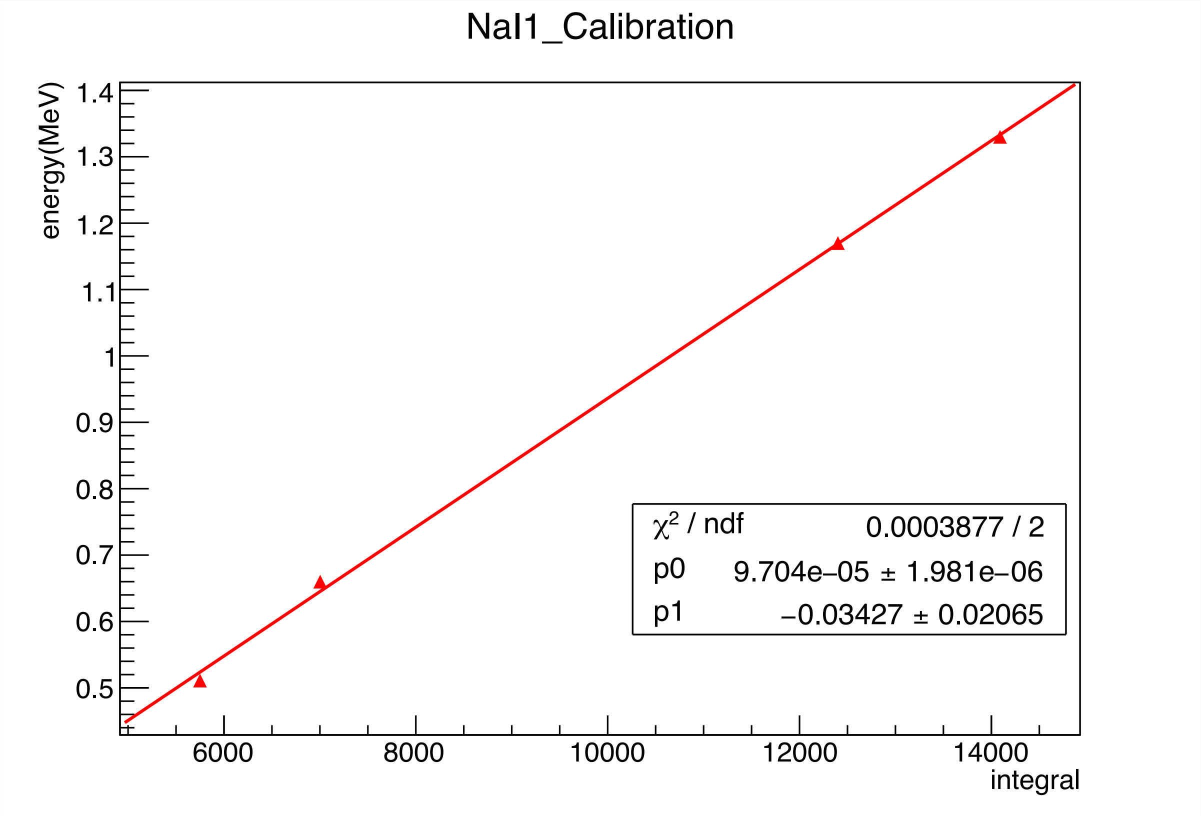
Cs137_NaI2

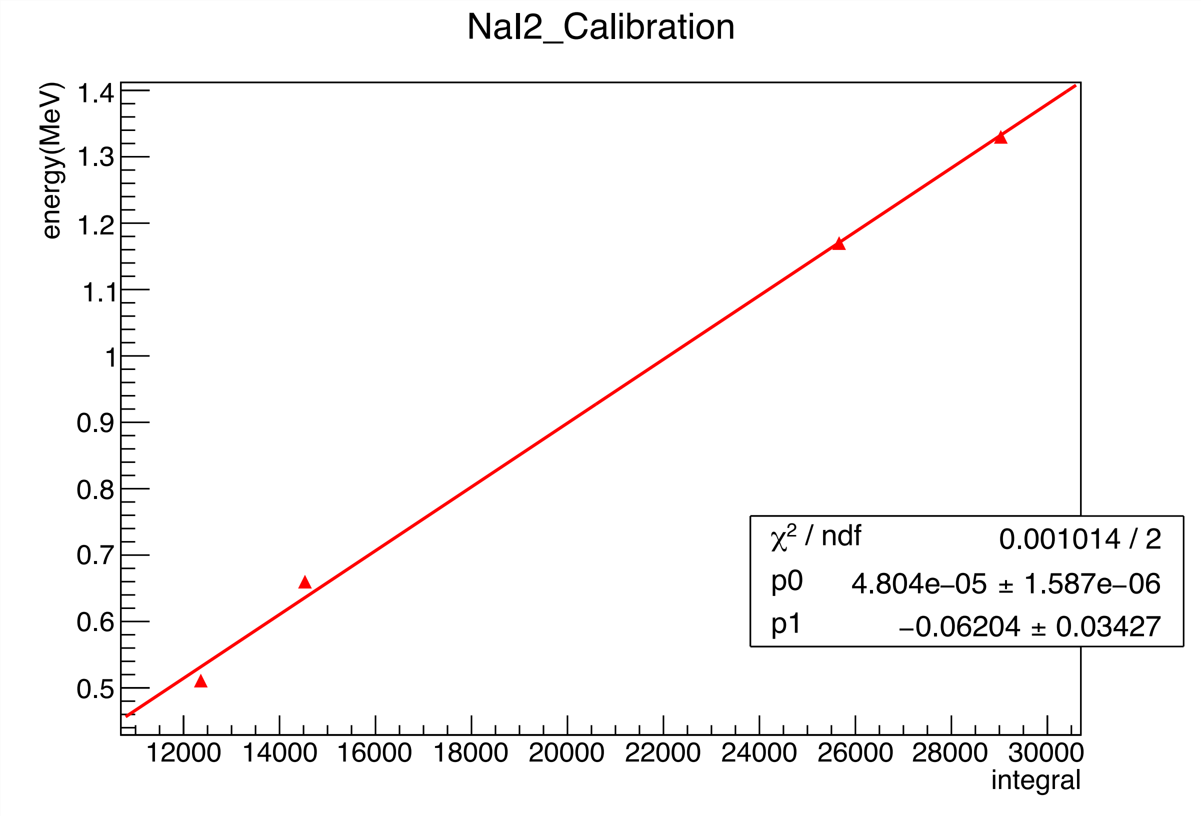
Cs137_NaI3

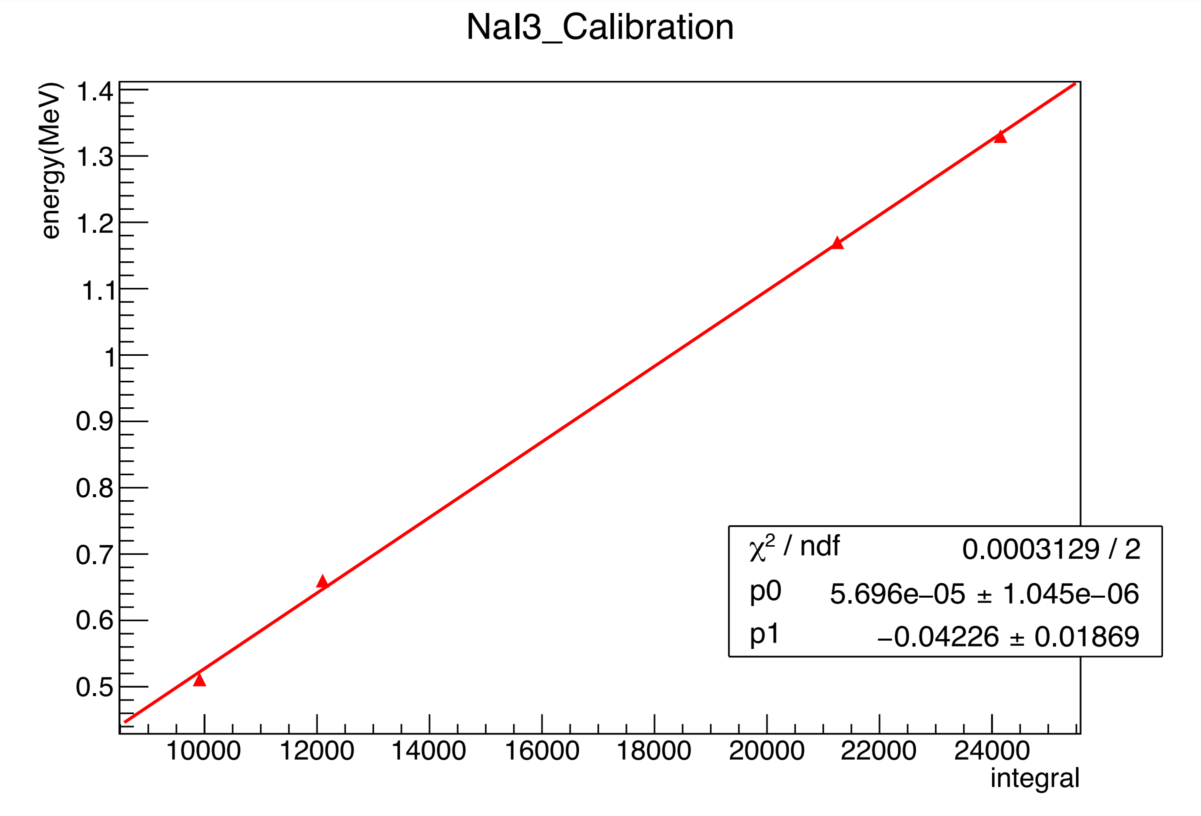




Calibration結果





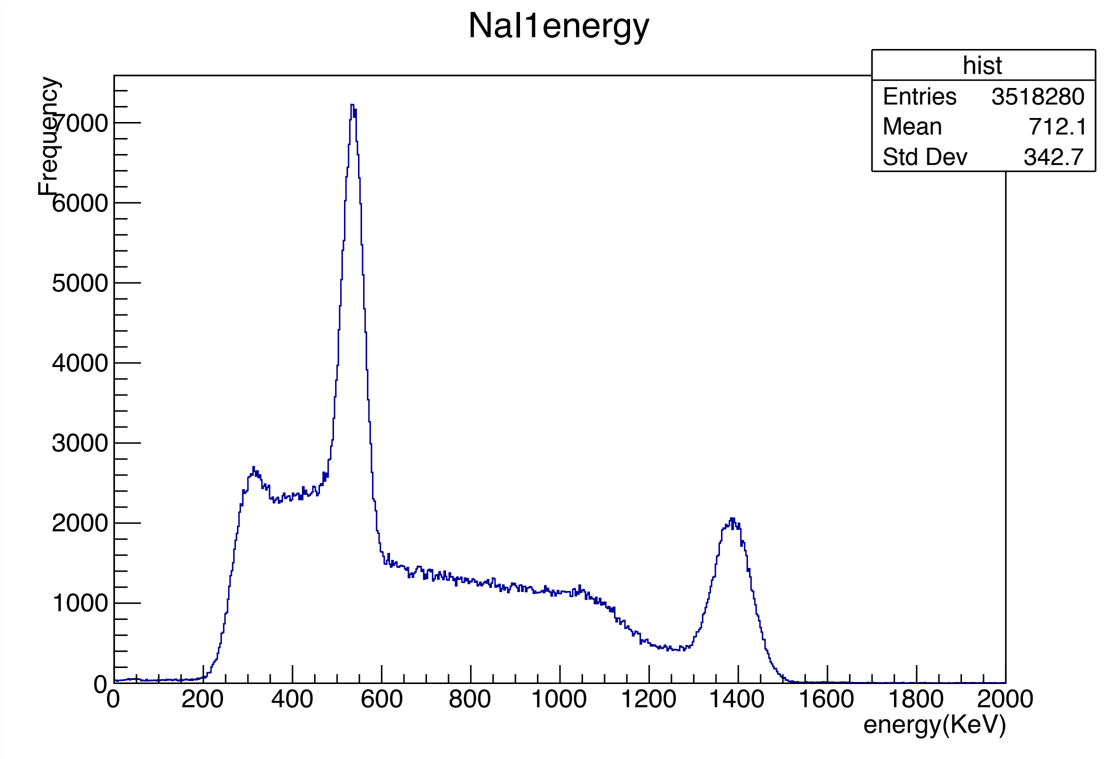


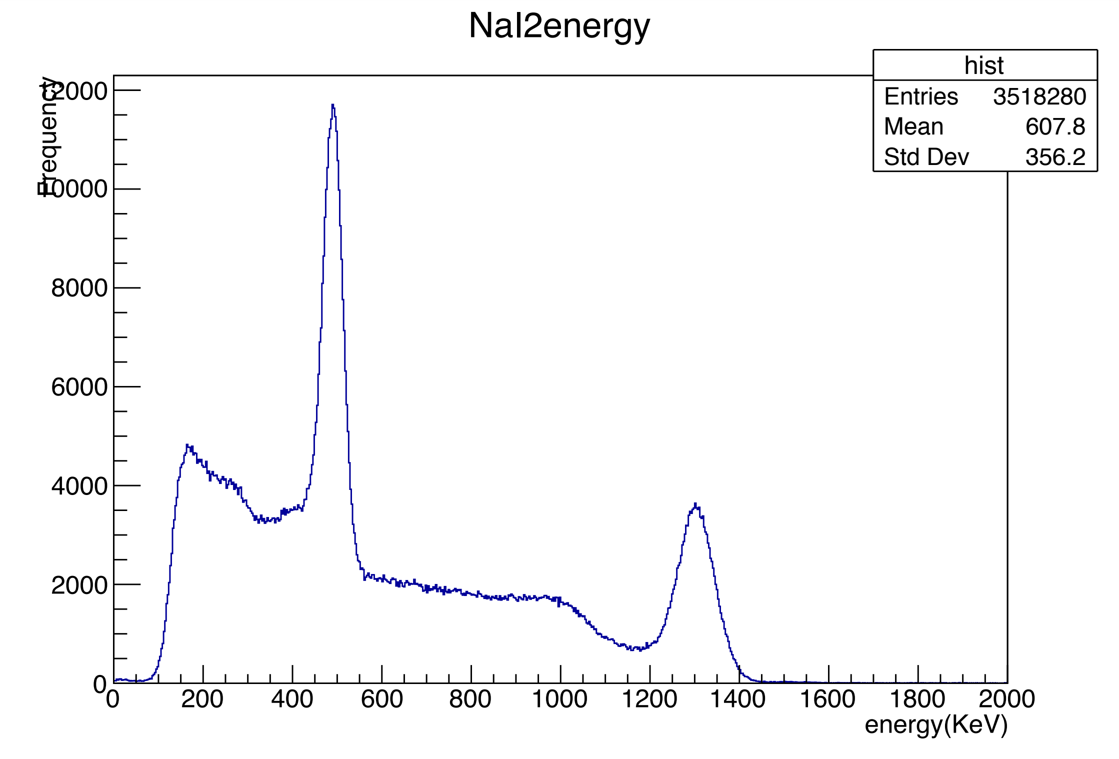
エネルギーのヒストグラム

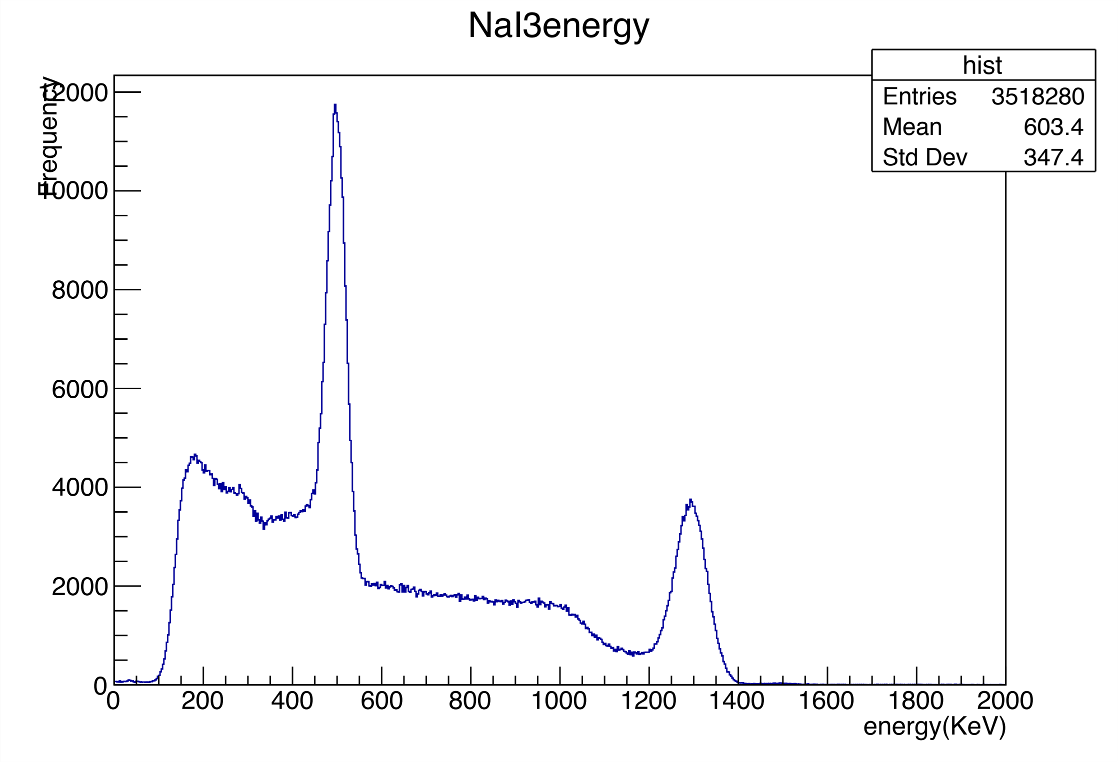
記録された信号のエネルギーのヒストグラムを見ることで、

関係のない粒子のデータをカッティングする。

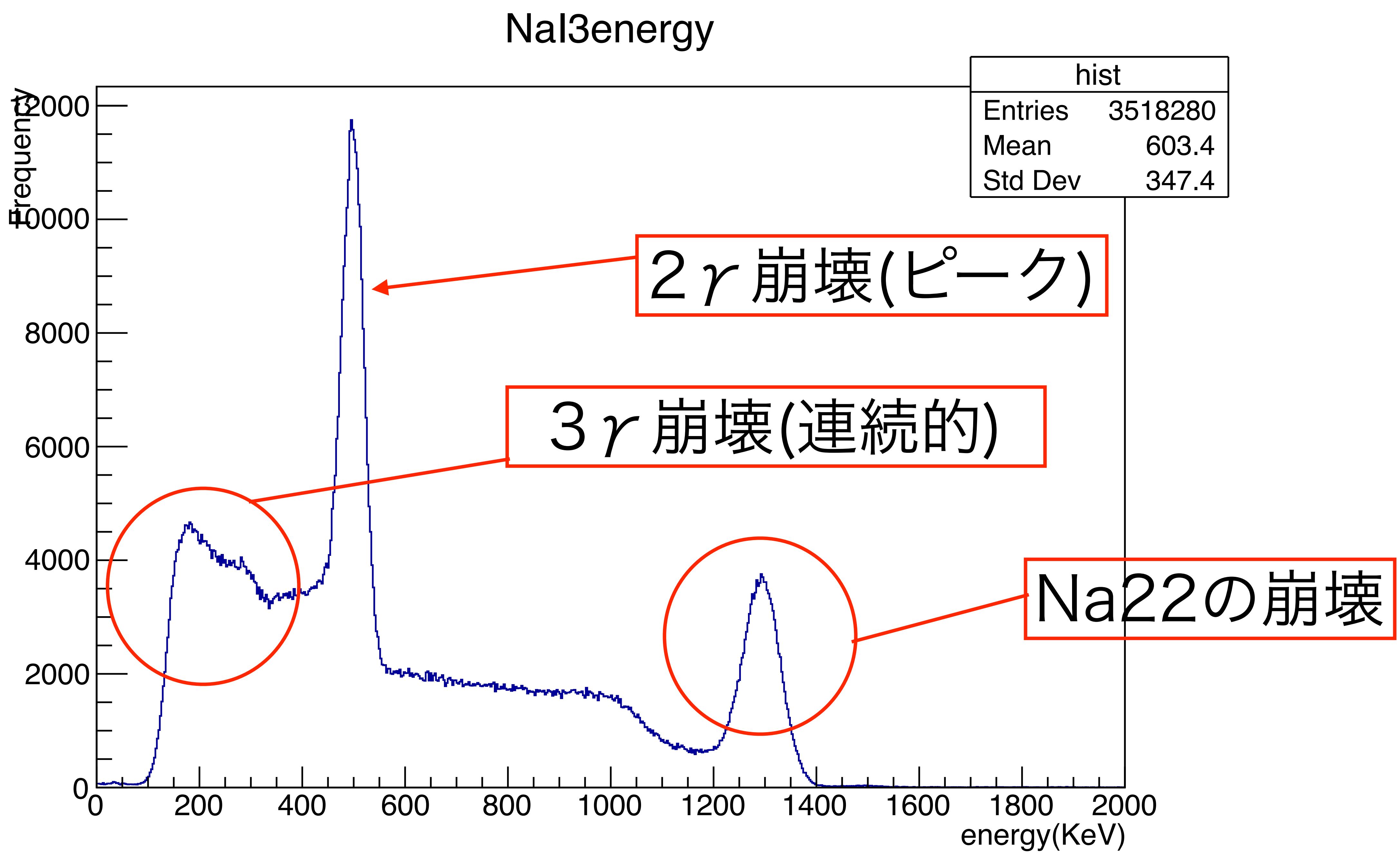
エネルギーのヒストグラム







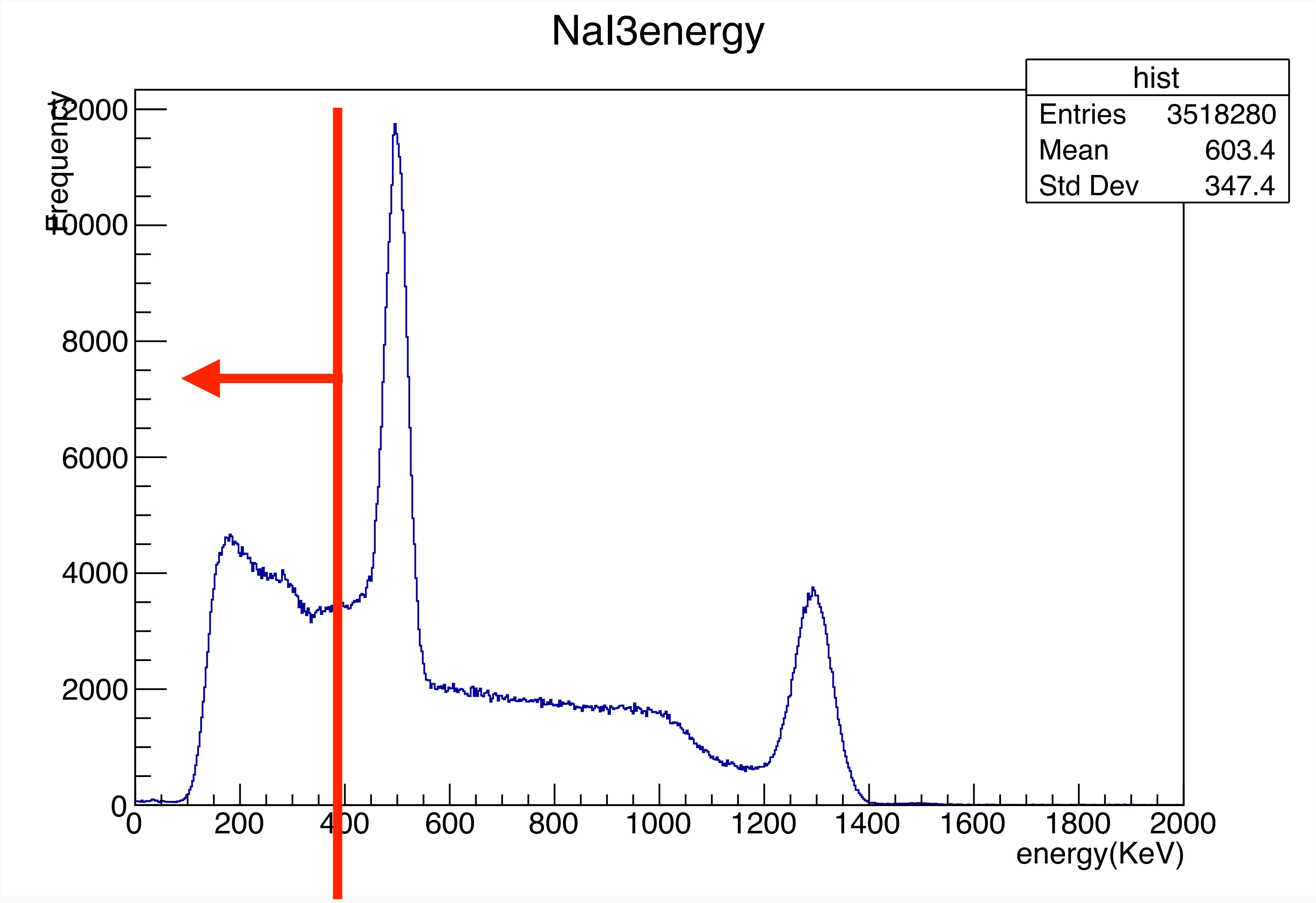
エネルギーのヒストグラムの解釈



エネルギーのヒストグラムの解釈

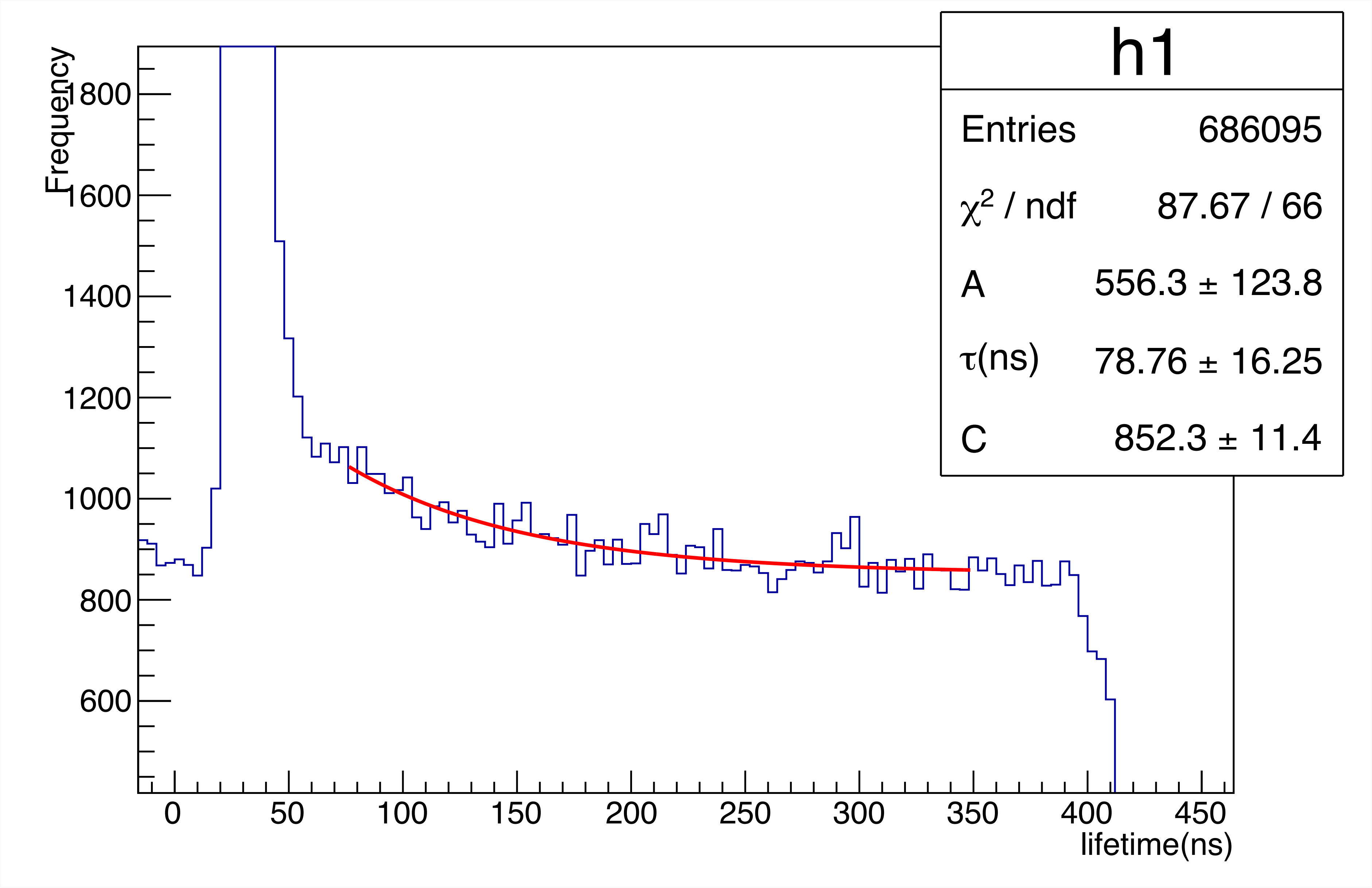
縦の赤線より
低エネルギーの
イベントを
解析する。

すると、
目的の3γ崩壊の
寿命を測ることが
出来るだろう



寿命曲線(NaI1〜3を合わせたデータ)

先程の、低エネルギーの信号のみを使って、
寿命を計算しヒストグラムにつめる：

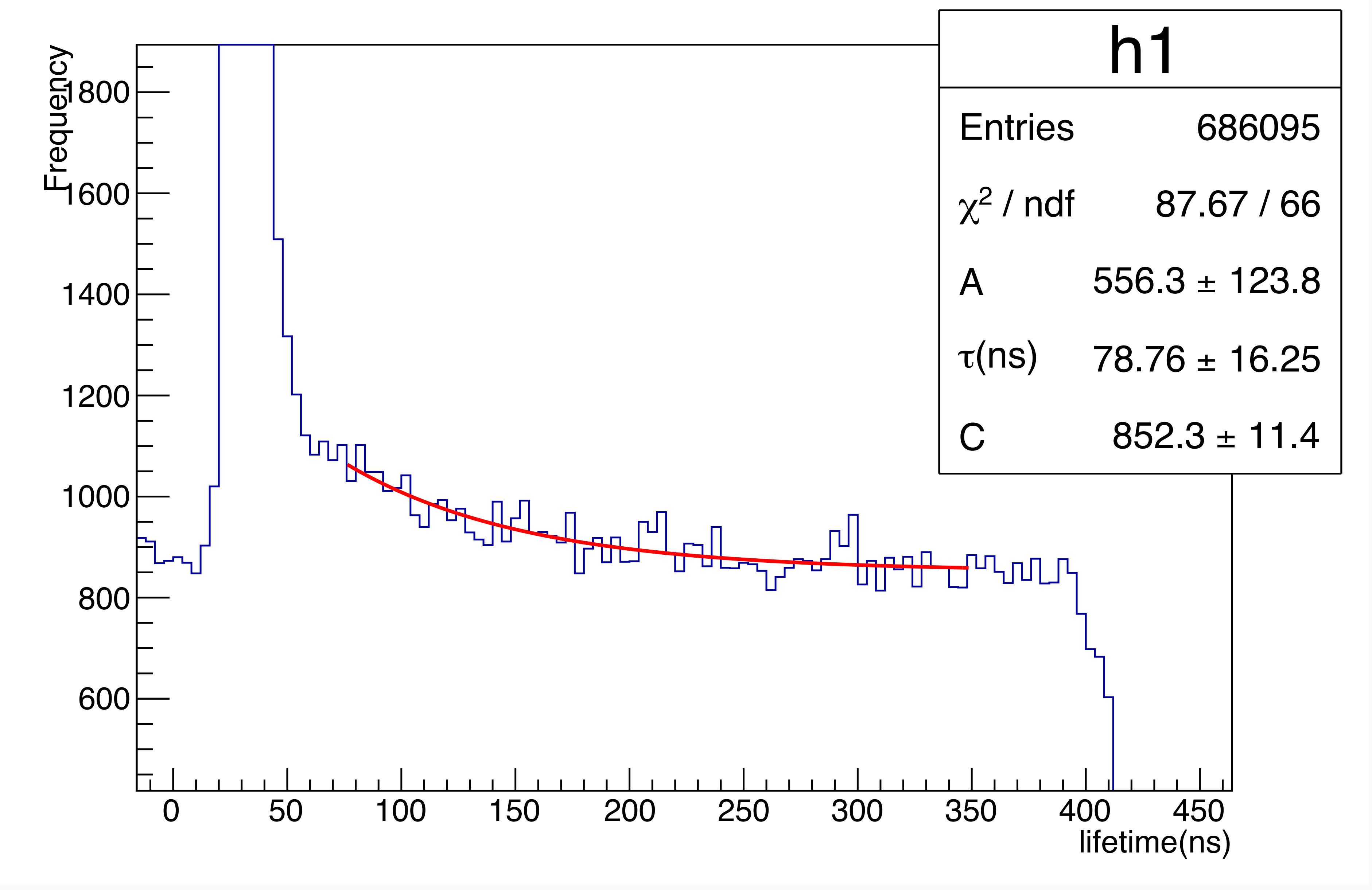


寿命曲線(NaI1〜3を合わせたデータ)

あまり**寿命曲線には見えないが**、

$$A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + C$$

でfittingすると、τ=79nsとなる。(O-Psの理論値は142ns)

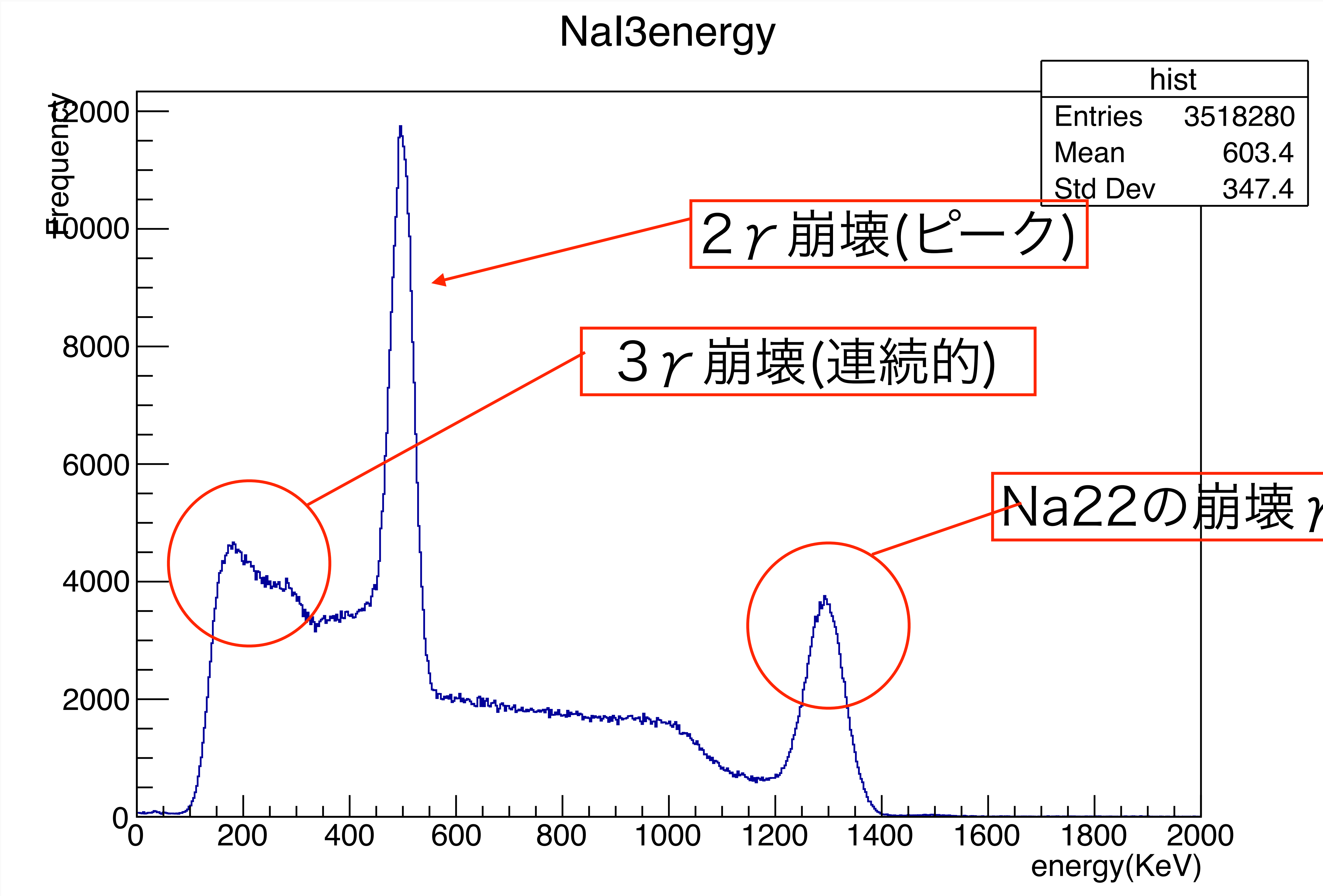


考察

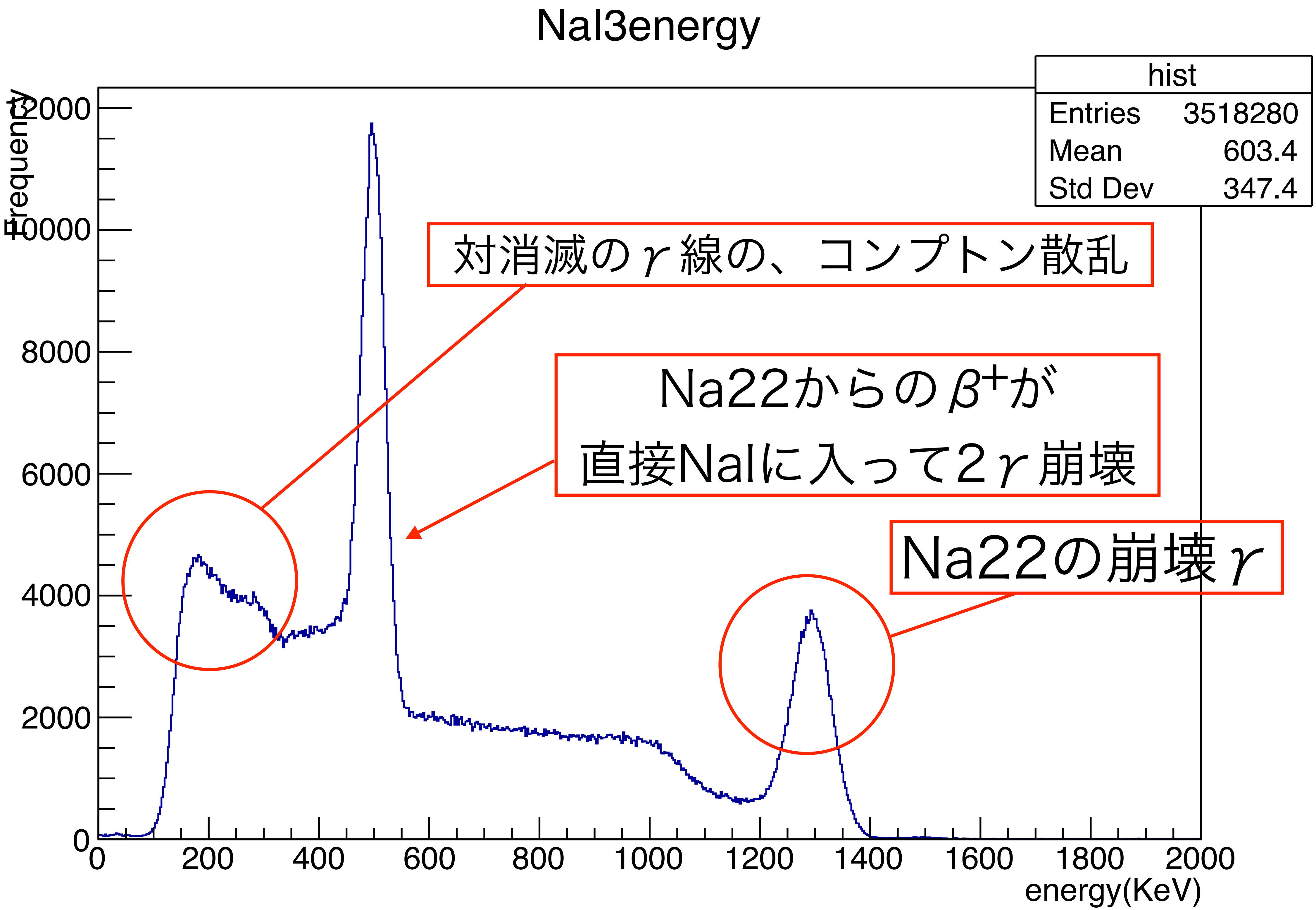
改善案としては、次のようなものが挙げられる。

- pick off補正をする。O-Psが途中でP-Psとなって崩壊してしまうことがあるので、見かけ上寿命が短くなるようだ。
- 真空引きを見直す。圧力計が信頼に足るものではなかった。

エネルギーのヒストグラムの先程の解釈



エネルギーのヒストグラムの他の解釈



どちらの解釈が正しいのか

- 線源を鉛容器で遮蔽していたので、$\beta+$は遮蔽されていて欲しい。
- しかし、Na22のγ線がエネルギーのヒストグラムに出ている以上、$\beta+$も遮蔽されていない、もしくは、鉛容器表面などで反射されてNaIに到達してる可能性がある。
- シリカゲルを一旦抜いて、測定して、同じヒストグラムになるようなら、ポジトロニウムではないということが言える(今度やる)。

量子振動の測定

無理

Menu

✓ 理論

✓ 実験

✓ 解析

⇨ 結論

結論

得られたo-Psの寿命は

$\boxed{78.76 \pm 16.25\ \mathrm{ns}}$

量子振動への道は遠い…

謝辞

市川さん、中桐さん、平本さん
一年間のご指導ありがとうございました

参考文献

Michael E. Peskin and Daniel V. Schroeder. An Introduction To Quantum Field Theory. Westview Press, 1995.

V G Baryshevsky, O N Metelitsa, and V V Tikhomirov.

Oscillations of the positronium decay γ-quantum angular distribution in a magnetic field.

J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.

2014年度P1レポート

http://www.slideshare.net/HemnAzeez/gamma-ray-spectrum-by-using-na-itldetector