

CANDLES実験における ^{208}Tl 背景事象 除去の為の波形弁別解析

大阪大学 M2 吉岡篤志

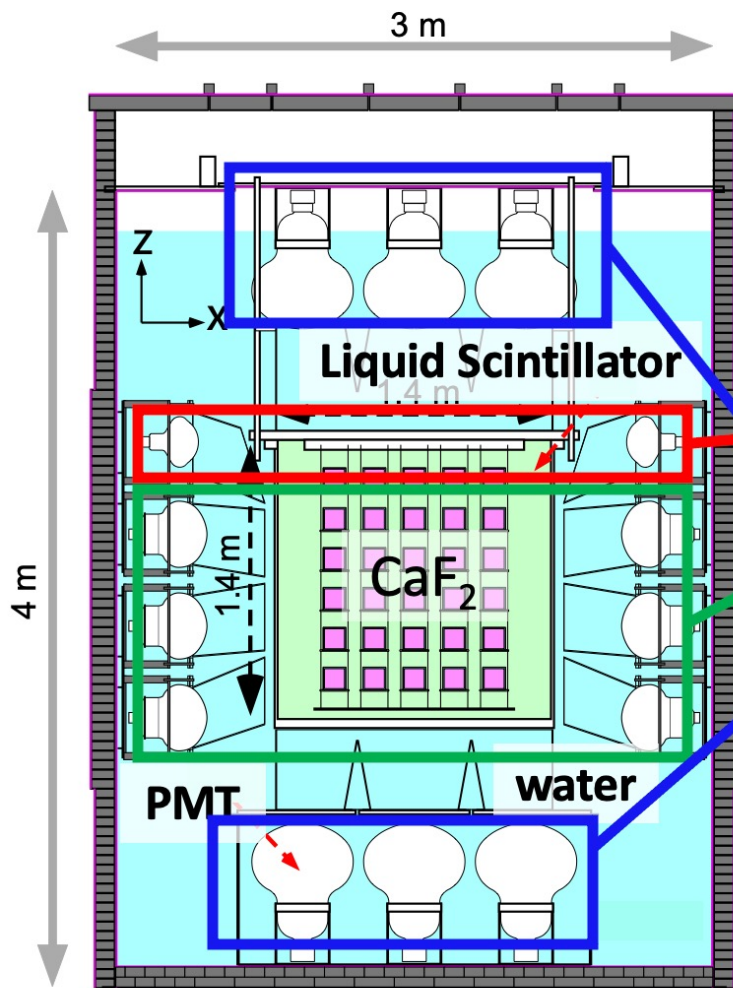
CANDLES実験

○CANDLES実験

CaF₂結晶を用いて、 $Q=4.27$ MeVの⁴⁸Caの
ニュートリノを含まない二重ベータ ($0\nu\beta\beta$)
崩壊事象を探索する実験。

CANDLES実験は、**波形**を用いて α 線や β 線の
情報を調査。

実験装置



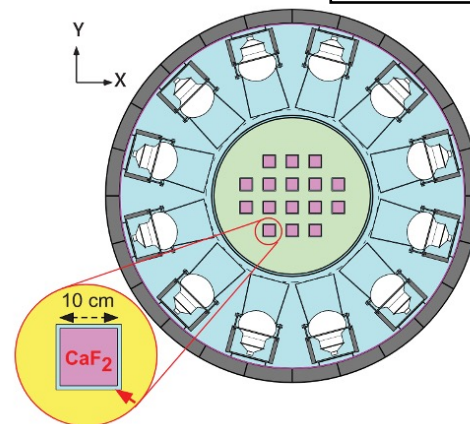
二重ベータ崩壊核： ^{48}Ca

CaF_2 結晶

16×6 層 = 96結晶

PMT 合計：62本

62本PMTの個々の信号を記録している
各PMTの種類によって信号の応答が異なる

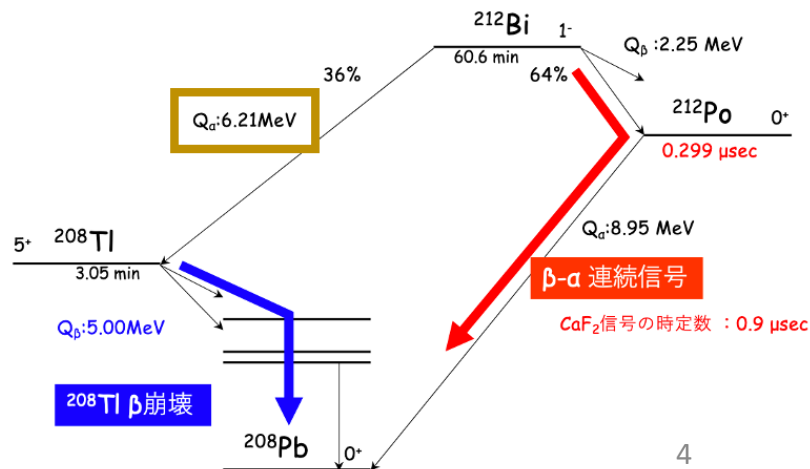
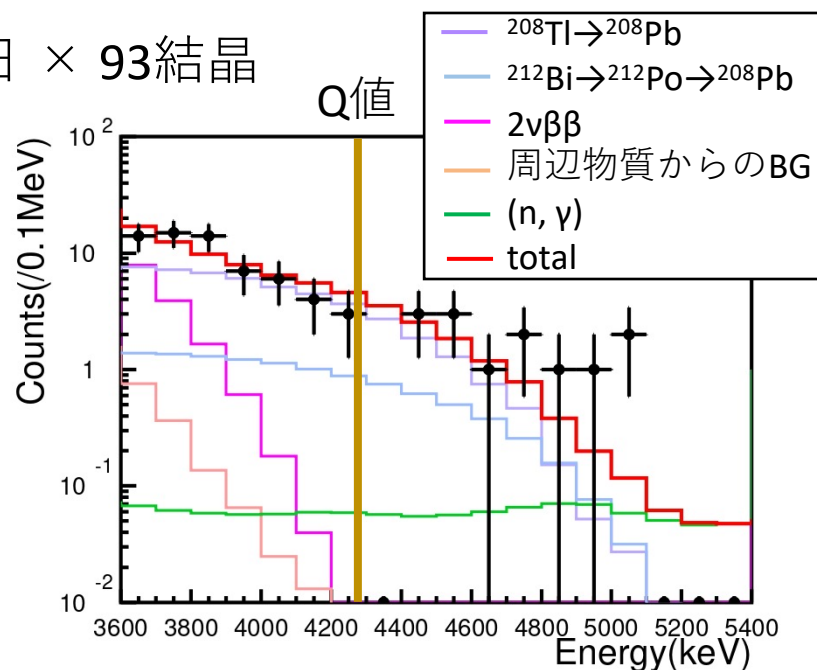


重大なバックグラウンド事象

$^{208}\text{Tl} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ の $\beta + \gamma$ 崩壊(紫色)
 が支配的で重大なBG。
 (Q値 : 5 MeV)

直前の ^{212}Bi の α 事象の同定を
 行うことで識別可能。

130.4日 × 93結晶



波形弁別 ; PSD

放射線の識別には、PSD(Pulse Shape Discrimination)の手法を用いる。

粒子の種類によって波形が異なることに基づいている。各の添字の信号らしさを示すパラメータである。

パラメータの種類 : PSD_{α} , PSD_{β} , $PSD_{\beta+LS}$

○基準波形に用いる事象

寿命 : 1.78 ms、 $Q_{\alpha} = 7.4$ MeV

純粋な α 事象 : $^{219}\text{Rn} \rightarrow ^{215}\text{Po} \rightarrow ^{211}\text{Pb}$ の後段 α 事象 ($E_{\alpha} = 2.2$ MeV)

純粋な β 事象 : 外部起因の ^{208}Tl の γ 線事象 $E_{\gamma} = 2.6$ MeV

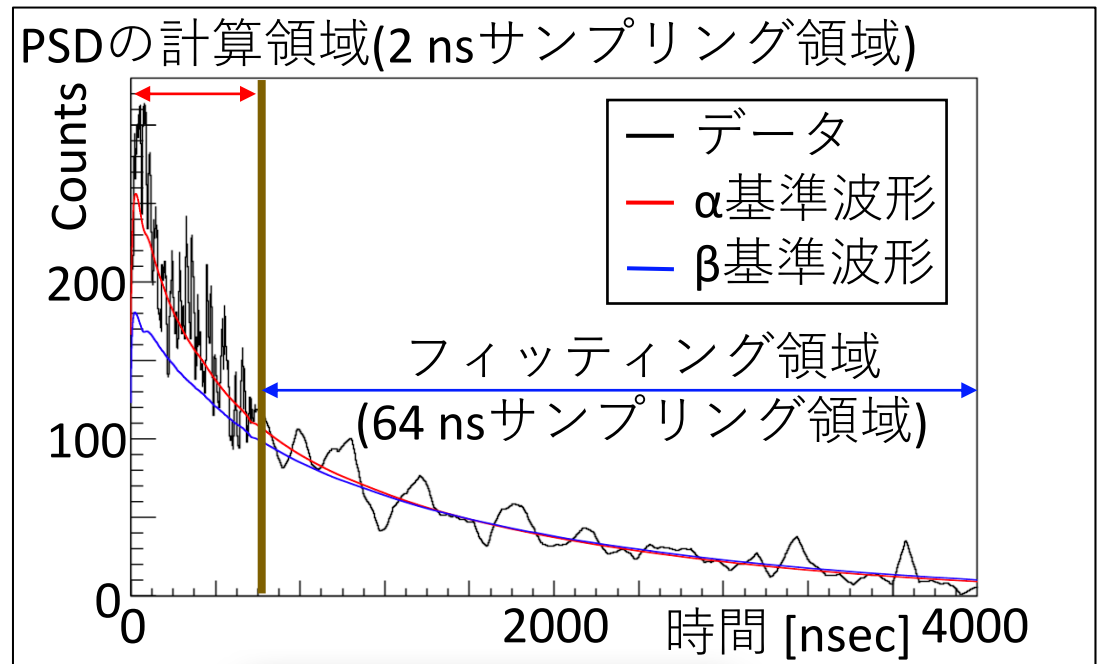
純粋なLS事象 : BGの γ 線がLSのみを発光させた事象

※LS : 液体シンチレータ

PSD_αの計算方法

α基準波形について
テールをフィット

計算領域で以下の式を用いて算出。



$$\text{PSD}_\alpha = \frac{1}{\text{dof}} \sum_i \left(\frac{\text{P.H.}_i - \overline{\text{P.H.}}_{\alpha_i}}{\sigma_{\text{P.H.}_i}} \right)^2$$

i : channel, dof: 自由度, $\overline{\text{P.H.}}_{\alpha_i}$: フィット後のα基準波形の波高,
 P.H._i : データ波形の波高, $\sigma_{\text{P.H.}_i}$: データ波形の波高のエラー

先行研究の改善点

解析の目標は、目的事象への感度の向上である。
先行研究において、既に**130日**のデータの解析を終えており、結果を出した。

その後、更に約**800日**の追加データを取得しており、統計的に感度を増やすことができています。

しかし、解析による**deadtime**が多く、 ^{232}Th 不純物が少ない結晶しか解析に利用できていなかった。

そこで、以下が求められる。

- ・ ^{208}Tl の**BG**の**低減**→解析に利用できる結晶の増加
- ・ 解析手法の改善→**deadtime**の低減

➡ 最尤法(Likelihood)の導入

先行研究での解析との違い

$^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{208}\text{Tl} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$ 事象に対するカット条件

$\alpha, \alpha+\gamma$ $\beta+\gamma$

○旧解析法

- 前段($^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$)
 $1480 < E < 1935 \text{ keV}$
 $\text{PSD}_{\text{diff}} < 0$
- 後段($^{208}\text{Tl} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$)
 $0 < dT < 18 \text{ min}$
 $\text{PSD}_{\beta} < 1.5$

○目指している新解析法(最尤法)

- 前段($^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$)
 $E, \text{PSD}_{\text{diff}}$
- 後段($^{208}\text{Tl} \rightarrow ^{208}\text{Pb}$)
 $E, \text{PSD}_{\text{diff}}$
 dT, dR

計6つのパラメータに可変カット

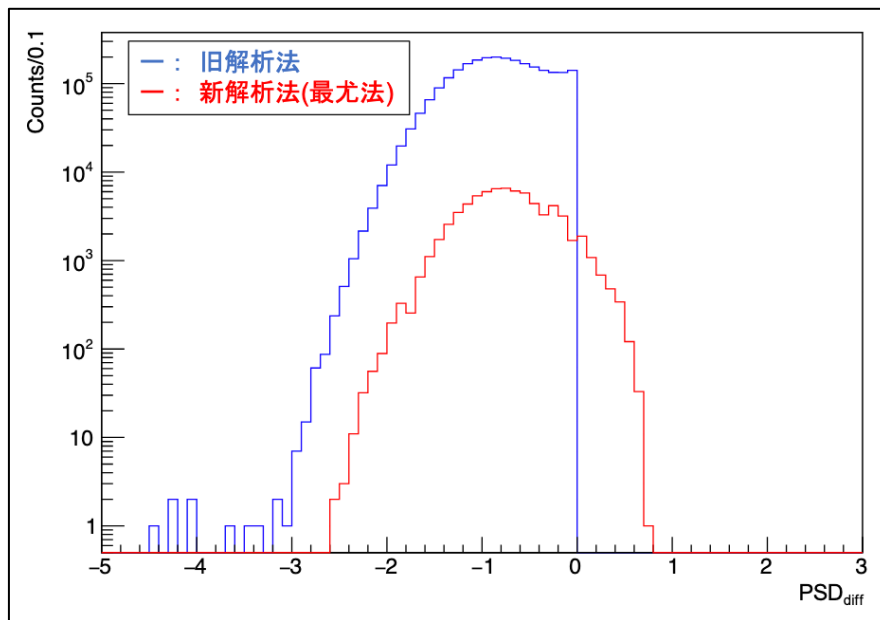
※現状は、前段の PSD_{diff} と dT と
前後段の E のみを独立に適用

$$\text{※ } \text{PSD}_{\text{diff}} = \text{PSD}_{\alpha} - \text{PSD}_{\beta+\text{LS}}$$

Likelihood解析

Likelihood解析により、 $\text{PSD}_{\text{diff}} > 0$ の α 線候補事象についても残すことができるようになった。

但し、これは $^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$ 崩壊を、純粹な α 崩壊である $^{215}\text{Po} \rightarrow ^{211}\text{Pb}$ 崩壊と等しく扱ったものである。



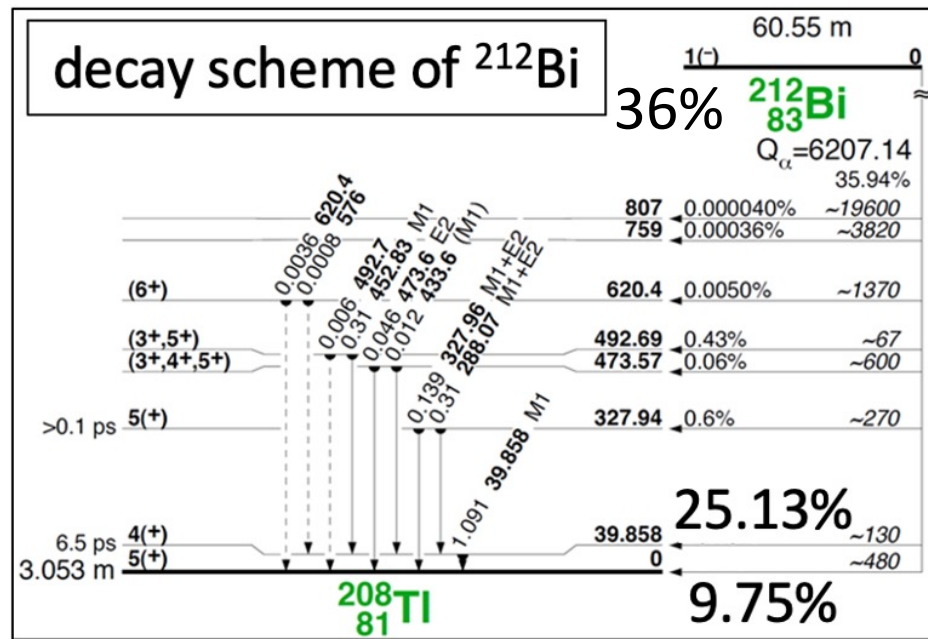
また、エネルギーや後段事象との時間差等の他のパラメータとの相関も取り入れることができていない。

$$\text{PSD}_{\text{diff}} = \text{PSD}_{\alpha} - \text{PSD}_{\beta+\text{LS}}$$

$^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$ 崩壊

これまでの解析では、
純粋な α 崩壊として取り
扱ってきた。

しかし実際は、 γ を含む
崩壊が存在する。



source : Table of Isotope

正しく識別する為には、 $^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$ 崩壊について
MCシミュレーションで再現する必要がある。

$^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$ 崩壊のMC作成に向けて

そこで、 $\alpha+\gamma$ 事象についてのMC波形の作成方法を確立させる。

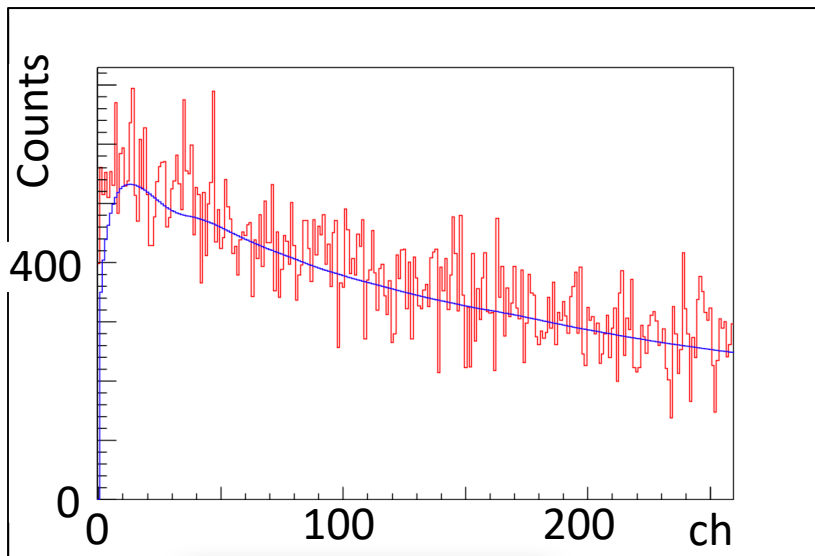
この時、MC波形がデータ波形でのPSD分布を再現する必要がある。

その為に、まずは純粋な α 事象、 β 事象について、データ波形のPSD分布を再現するようなMC波形を作成する。

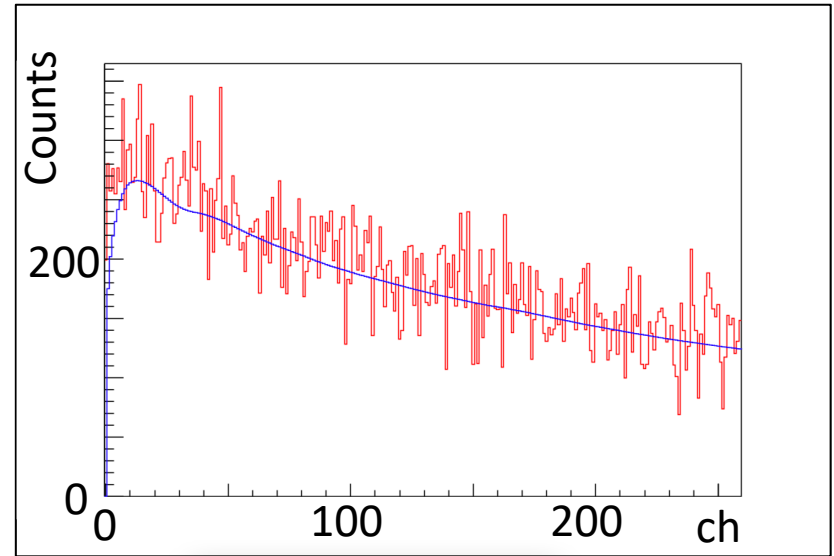
相関なしのMC波形

基準波形に対して、エネルギーに応じて期待波形を作成（青線）。

各chで、期待波形の波高に応じた $\sigma_{\langle P.H.i \rangle}$ でランダムに振り、シミュレーション波形を作成（赤線）。



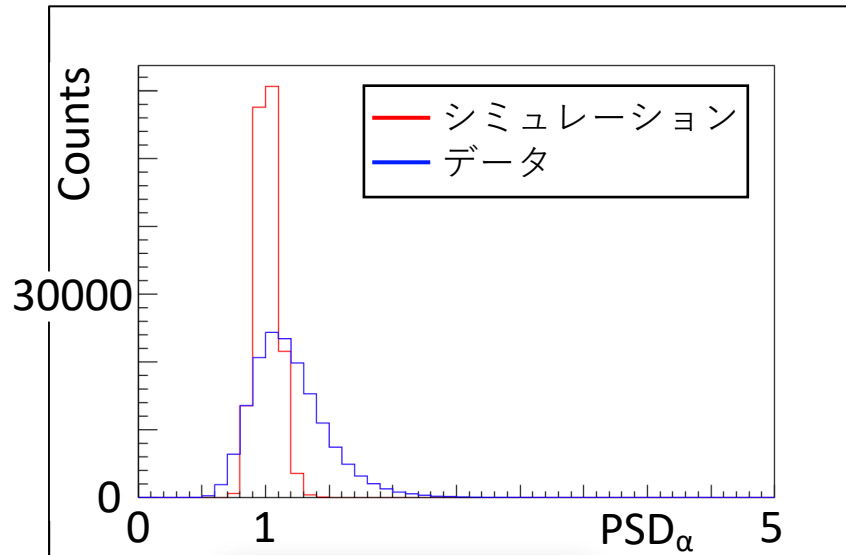
α 事象の一例



β 事象の一例

相関なしの場合のPSD分布

α 事象のPSD $_{\alpha}$ 分布



この方法では、PSDが実際よりもかなり小さく
なってしまい、PSD分布が全く合わない。

MC波形の作成方法 (～520 nsec)

基準波形情報とch間の相関を取り入れる為、以下のパラメータ p_i を導入。

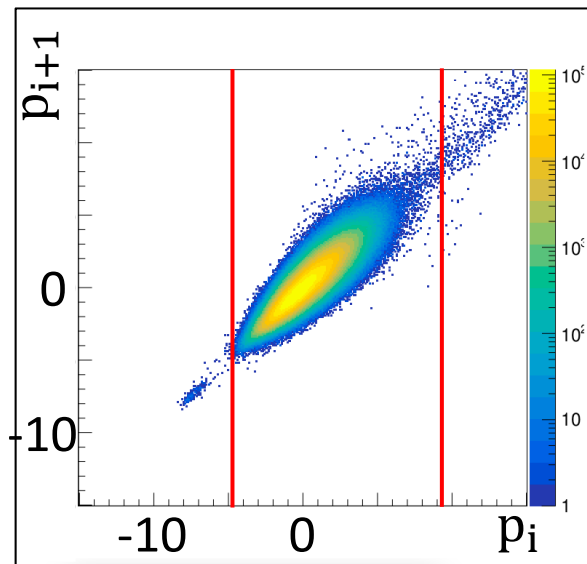
$$p_i = \frac{P.H._i - \langle P.H._i \rangle}{\sigma_{\langle P.H._i \rangle}}$$

$P.H._i$: データの波高、 $\langle P.H._i \rangle$: 波高の期待値、

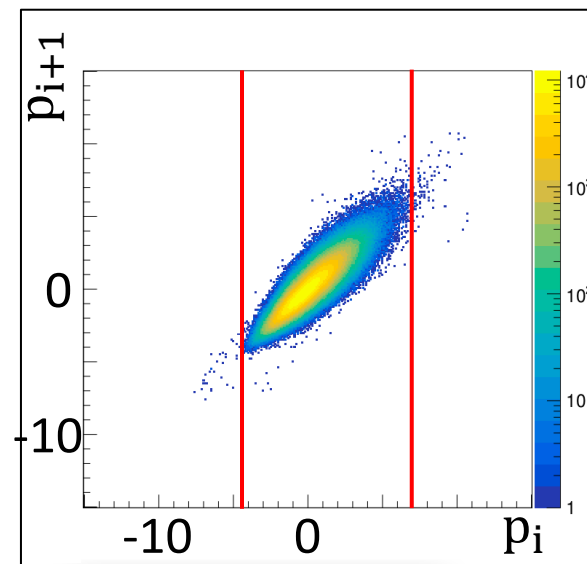
$\sigma_{\langle P.H._i \rangle}$: 波高の誤差

p_i は、データの波高が期待値からどれくらいずれているかを示すパラメータである。

MC波形の作成方法 (~520 nsec)



α 事象



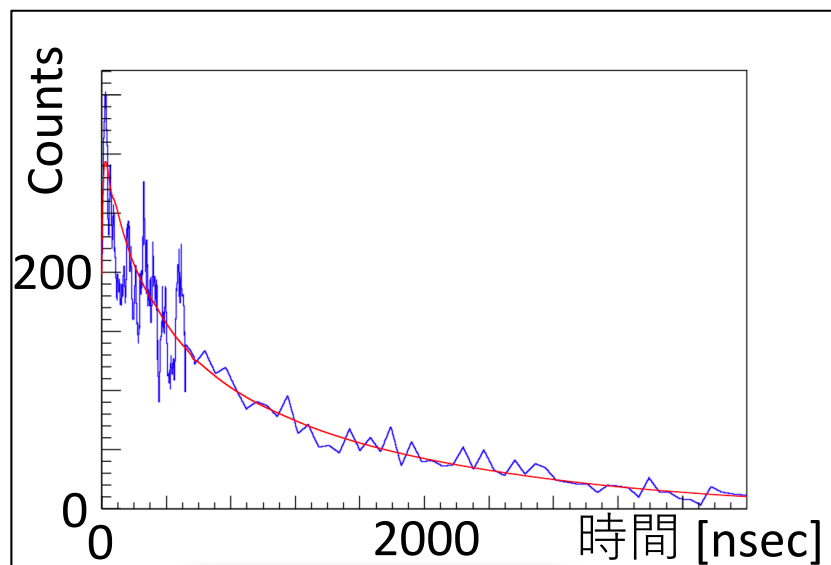
β 事象

上記の $p_i : p_{i+1}$ 2次元ヒストグラムを再現するようにシミュレーション波形を作成。

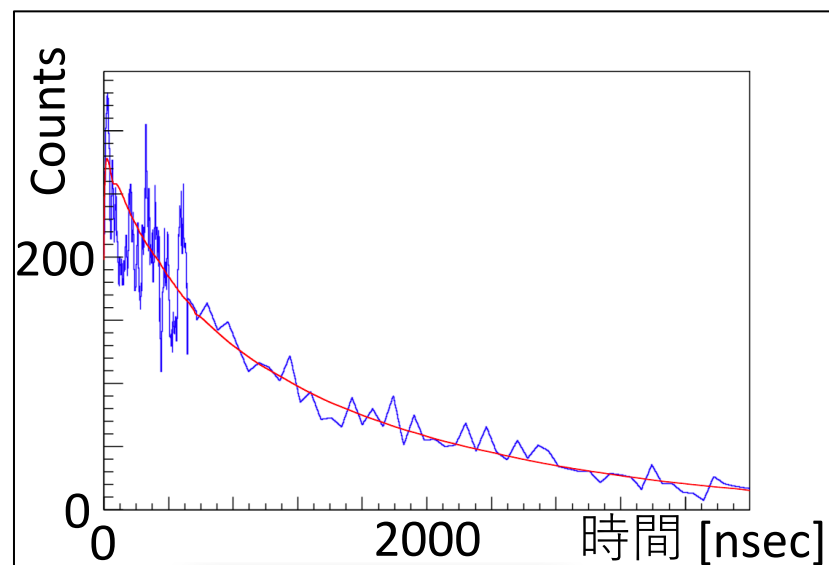
但し、カウント数の少ない両端は除外。

p_{i+1} から定義を用いて $P.H_{i+1}$ を逆算。

MC波形



α 事象の一例



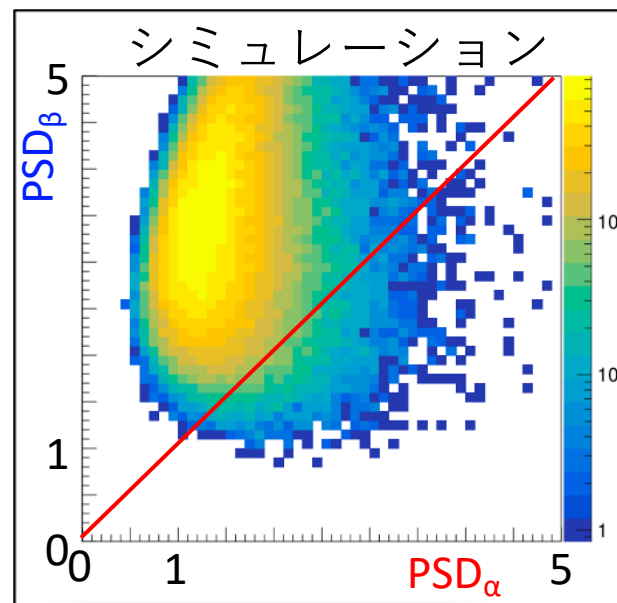
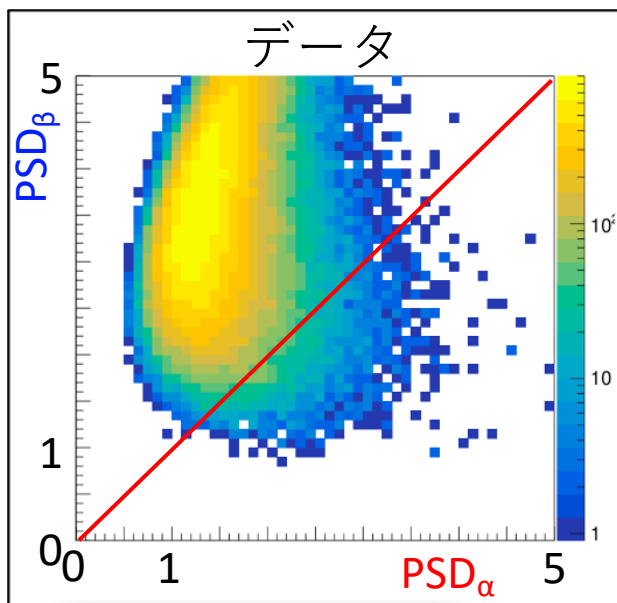
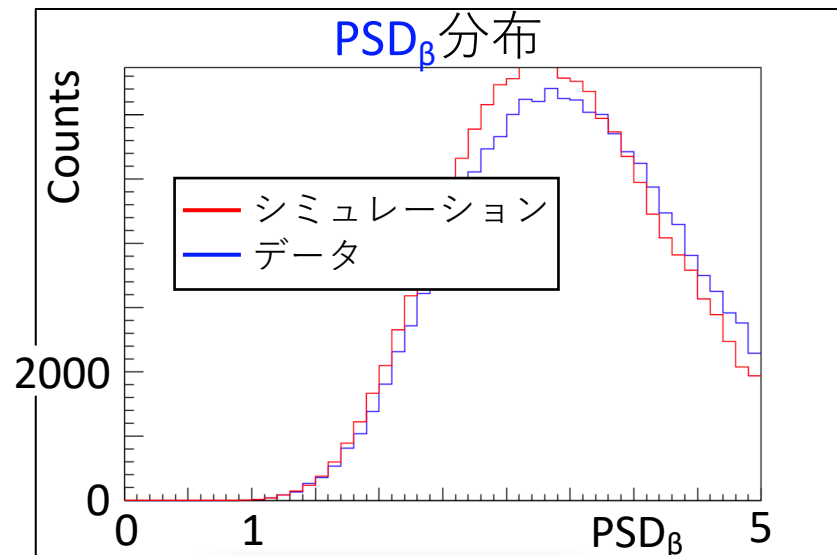
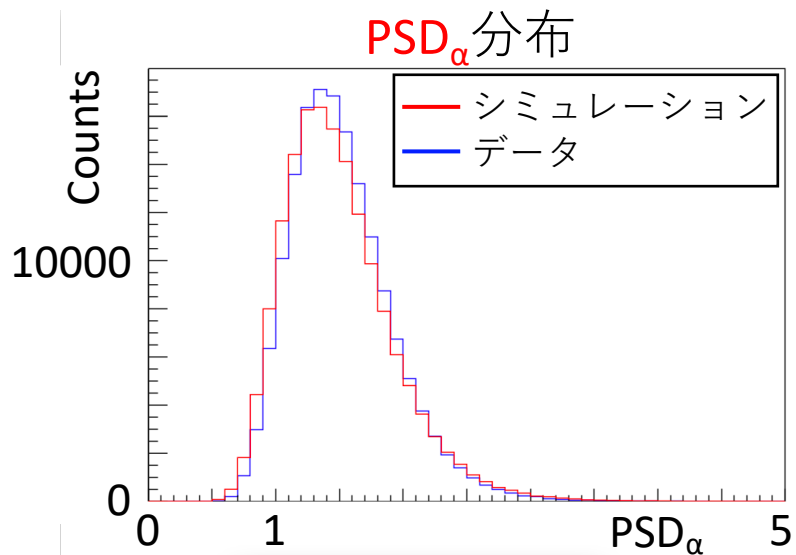
β 事象の一例

※テール部分については、相関なしで単純にふらつかせている。

これらのMC波形に対して、データ波形と同様の方法で、PSDを計算する。

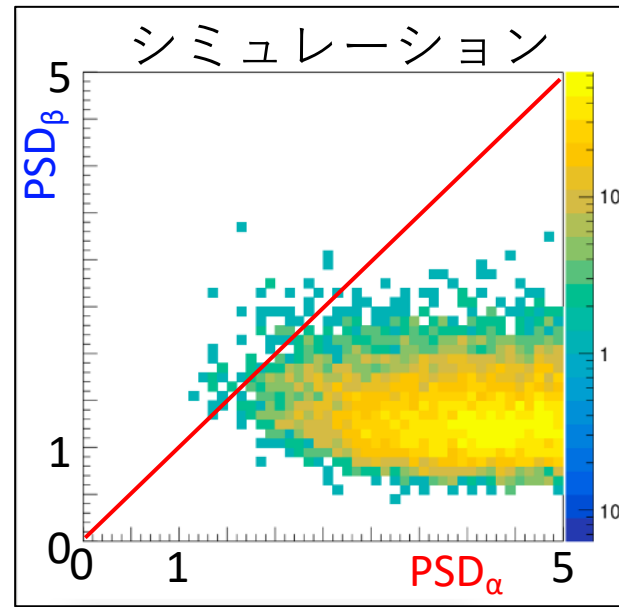
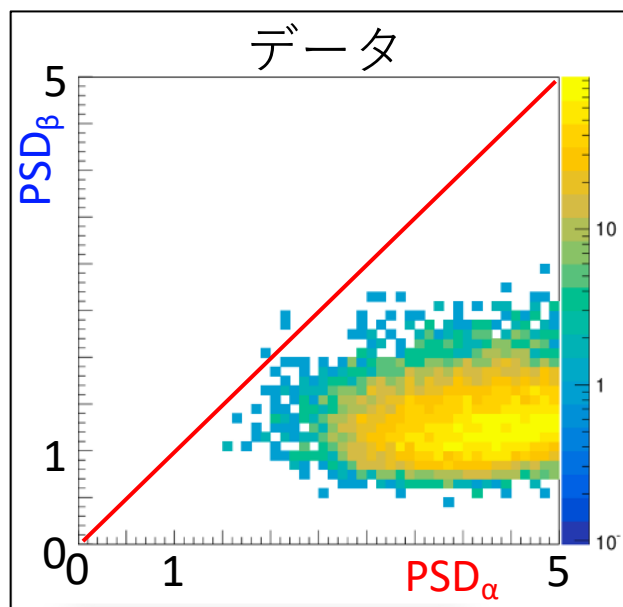
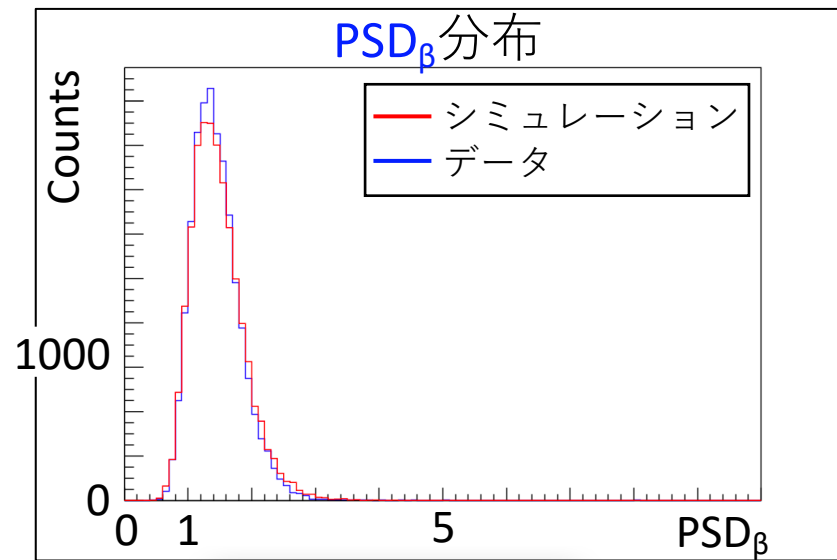
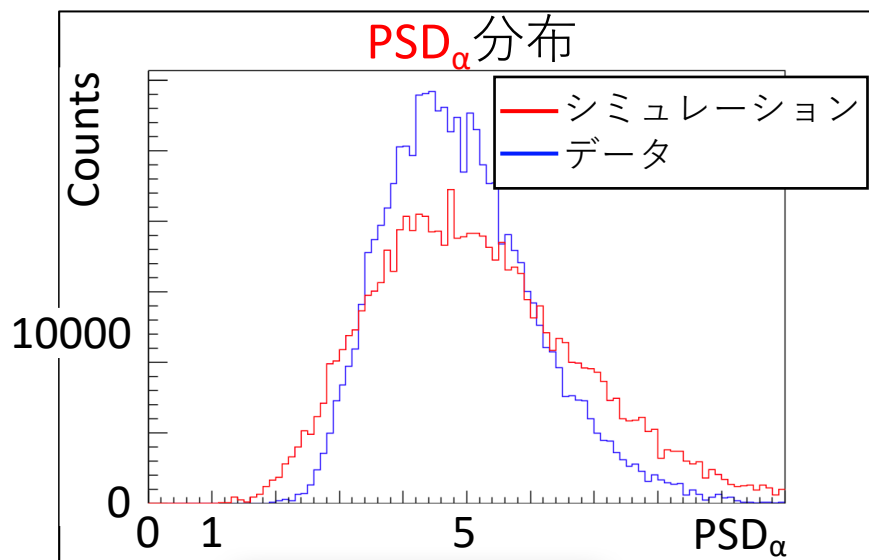
PSD分布の比較

純粋な α 事象のPSD分布



PSD分布の比較

純粋な β 事象のPSD分布



今後

- ①MC波形のPSD分布を改善する。
- ②別の方法として、共分散行列を用いたMC波形作成。
- ③LSについて、 α 、 β と同様に、MC波形を作成し、 $X+LS$ 事象をMC波形に取り入れる。
- ④ $^{219}\text{Rn} \rightarrow ^{215}\text{Po}$ の α 事象, $\alpha+\gamma(+LS)$ 事象のMC波形を作成し、 PSD_{α} , PSD_{β} , $\text{PSD}_{\beta+LS}$ を計算、データと比較。
- ⑤ $^{212}\text{Bi} \rightarrow ^{208}\text{Tl}$ のMC波形を作成し、PSDやエネルギー等の値を取り出し、Likelihood解析に組み込む。
- ⑥新解析による、BGの除去効率やlive timeの改善を定量的に評価する。

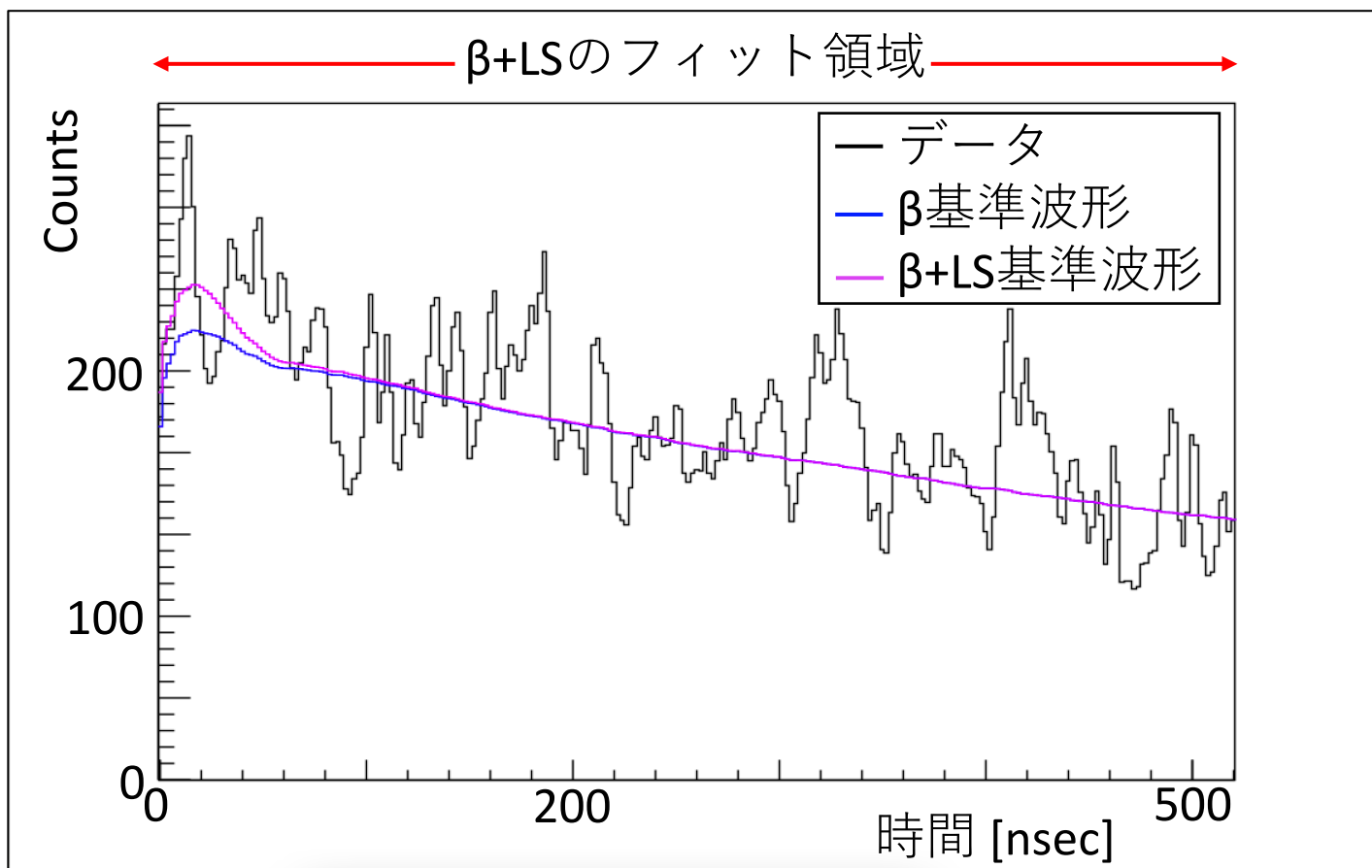
summary

- CANDLES実験 . . . ^{48}Ca の $0\nu\beta\beta$ 崩壊事象の探索実験
- 重大なバックグラウンド： $^{208}\text{Tl}\rightarrow^{208}\text{Pb}$ の $\beta+\gamma$ 崩壊
- 識別の為に波形弁別(PSD)を実行。
- ^{208}Tl BGの除去効率の評価にMCシミュレーションを使用。
- データ波形のPSD分布を再現するような
MCシミュレーション波形を作成。
- MC波形がデータ波形のPSD分布を再現できていない。
- Likelihood解析に $^{212}\text{Bi}\rightarrow^{208}\text{Tl}$ のMC波形から得られる値を組み込むことで、除去効率の向上を目指している。

Back up

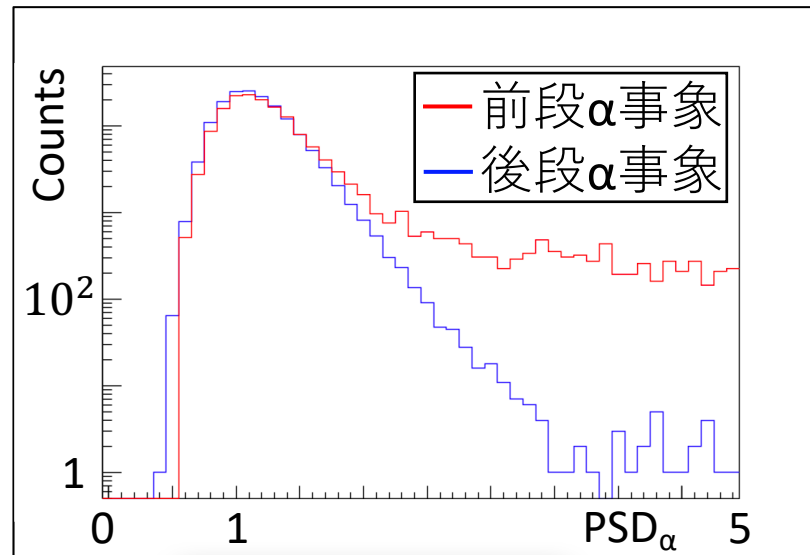
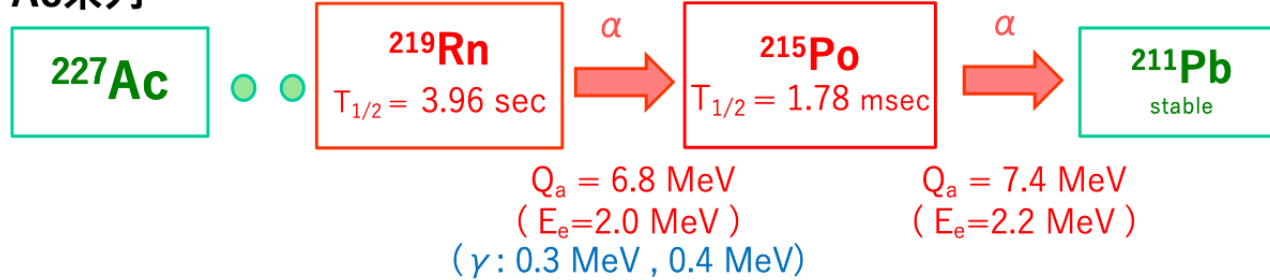
PSD _{β +LS}の計算方法

β 基準波形の規格化因子をPSD _{β} 計算時の値で固定し、520 nsecまでの領域で β +LS基準波形をフィットする。





Ac系列



図のように前段事象は γ を含む崩壊の為、 PSD_α が大きい事象も数多く存在する。

推定標準偏差 $\sigma_{P.H.i}$ の計算方法

$$\sigma_{P.H.i}^2 = \sum_j \sigma_{P.H.ij}^2$$

j : 10inch, 13inch, 20inch

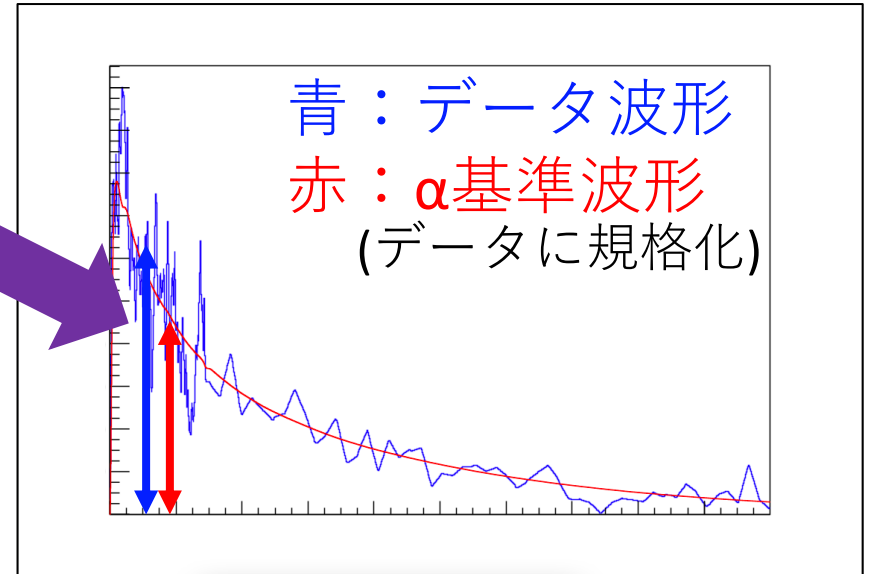
$$\sigma_{P.H.ij} = C_j \cdot \sqrt{P.H.ij}$$

P.H._{ij}: PMTの種類ごとの波高

統計による分散

X_i : データの波高
 $\langle X_i \rangle$: α 基準波形の波高
(波高の期待値)

純粋な α 事象について、各チャンネル、各イベントで調べる。



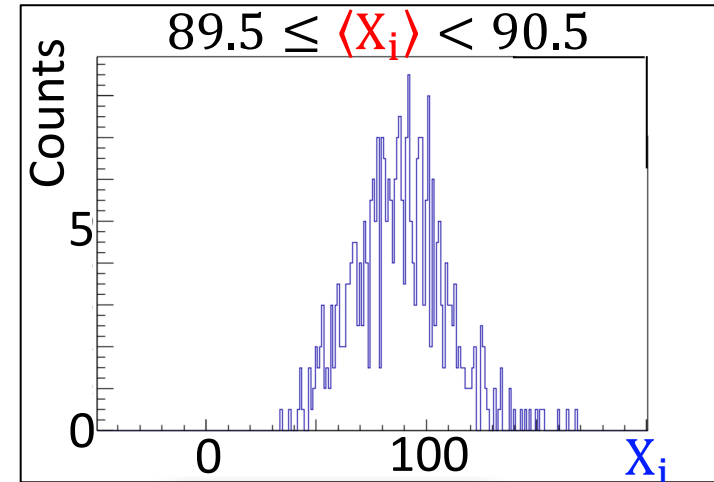
$\langle X_i \rangle$ が等しいような X_i を集める。

○統計による分散 (σ_i^2 に対応)

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_i^n (X_i - \bar{X})^2$$

X_i : データの波高, \bar{X} : X_i の平均

(例)



➡ これまで使用していたエラーと比較する。

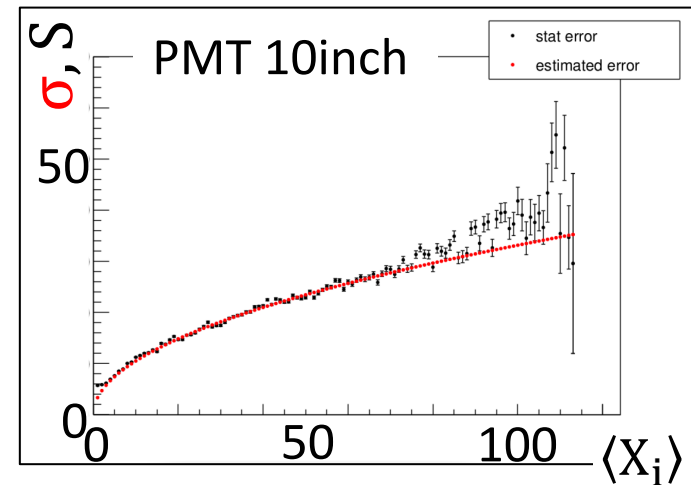
各データ点の標準偏差の評価

統計による標準偏差(S)と
推定標準偏差(σ)を比較。

○推定標準偏差(PSDの計算に使用)

$$\sigma = \sqrt{\frac{C \times \text{charge_1pe}}{\text{sigma_1pe}}} \cdot \sqrt{\text{波高}}$$

$$\text{charge_1pe} = 62.3, \text{ sigma_1pe} = 3.2$$

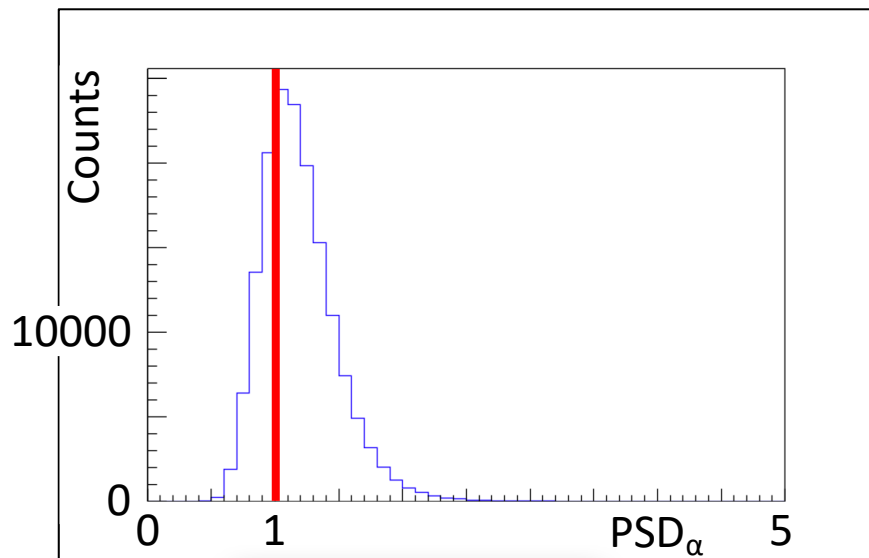


➡ 大きくはズレていない。

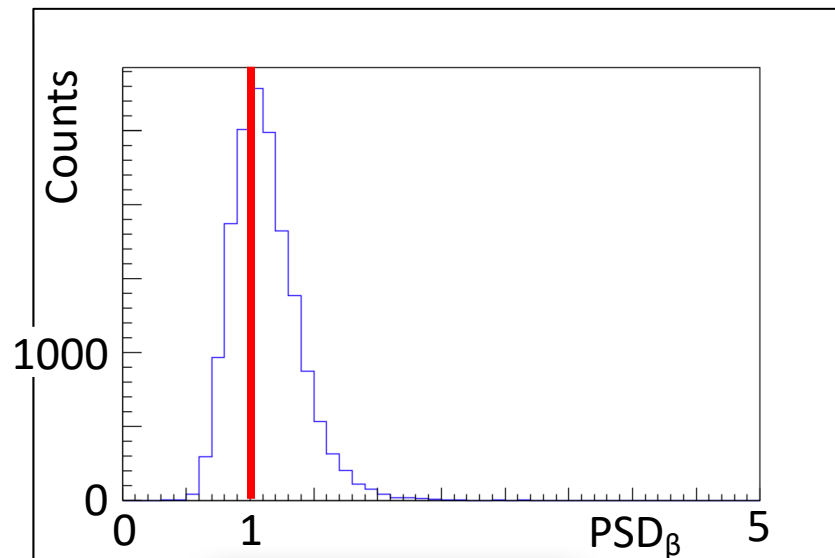
実データのPSD分布

$$\text{PSD}_\alpha = \frac{1}{\text{dof}} \sum_i \left(\frac{\text{P.H.}_i - \overline{\text{P.H.}}_{\alpha_i}}{\sigma_{\text{P.H.}_i}} \right)^2$$

純粋な α 事象の PSD_α 分布

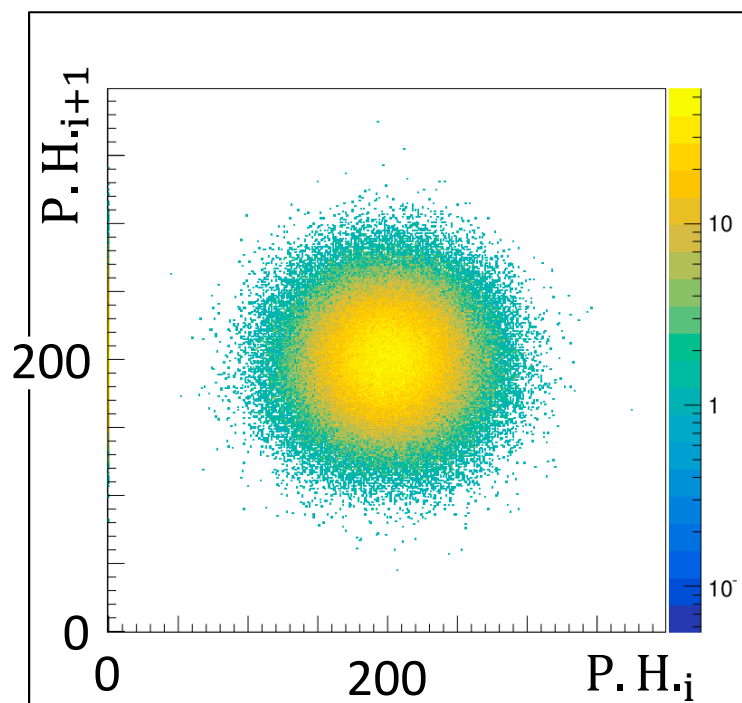


純粋な β 事象の PSD_β 分布

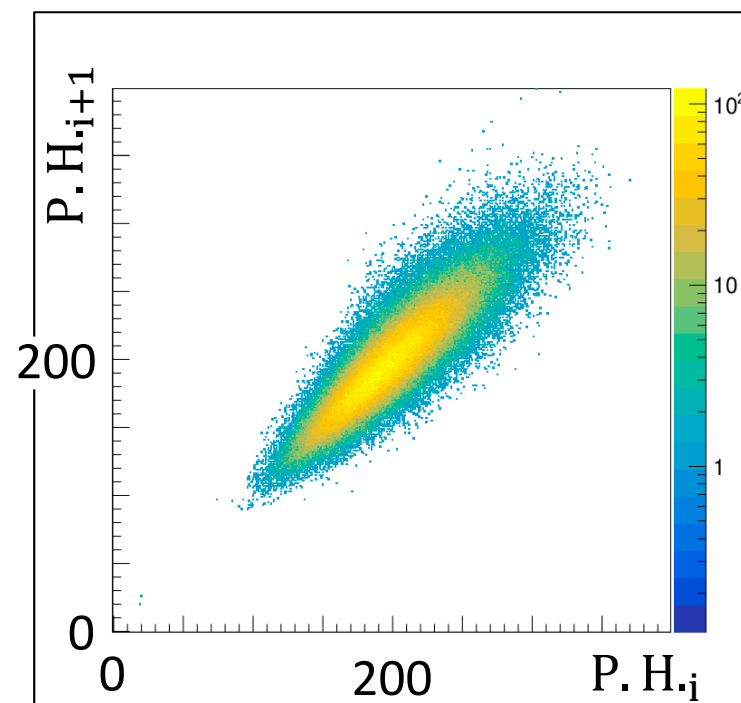


	純粋な α 事象の PSD_α	純粋な β 事象の PSD_β
平均	1.191	1.123
標準偏差	0.2962	0.2626

PSD分布が一致しない理由



シミュレーション

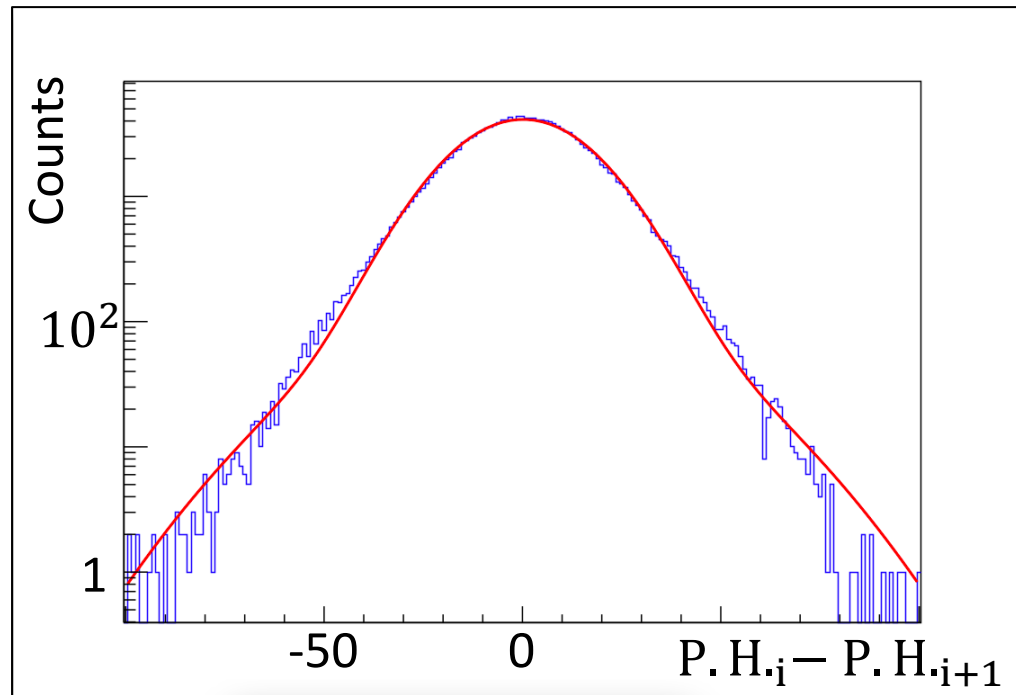


データ

図のように、データでは、隣のchとの強い相関がある為、これを取り入れる必要がある。

ch間の相関のみでの作成

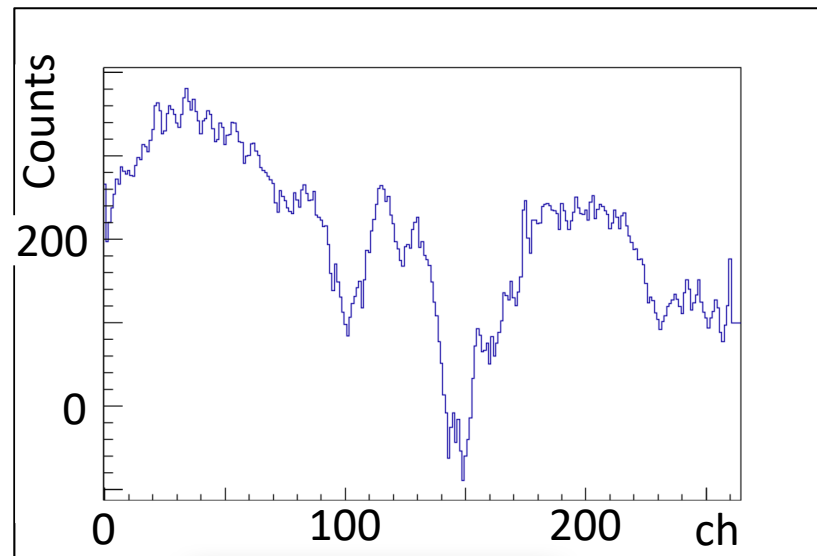
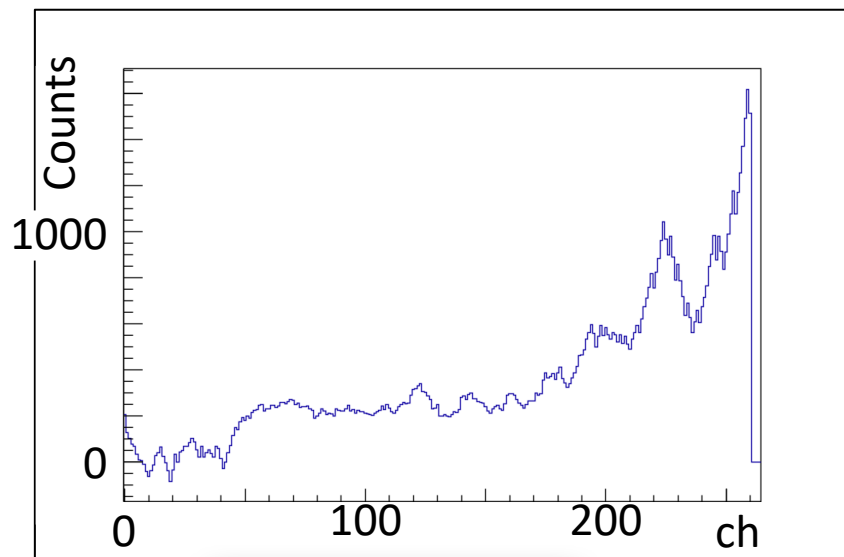
波高の期待値ごとに、次のchの波高との差を調査。



これらの分布に従うように、シミュレーション波形を作成。

ch間の相関のみでの波形

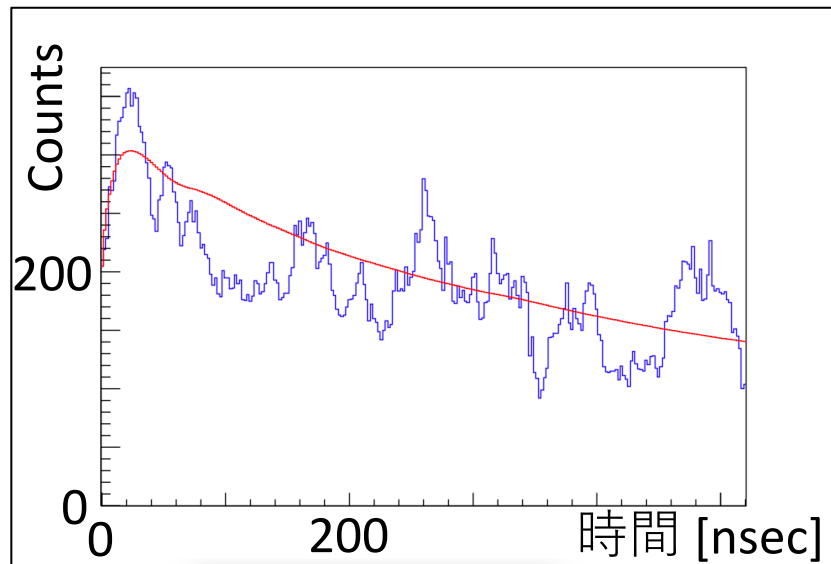
シミュレーション波形の一例



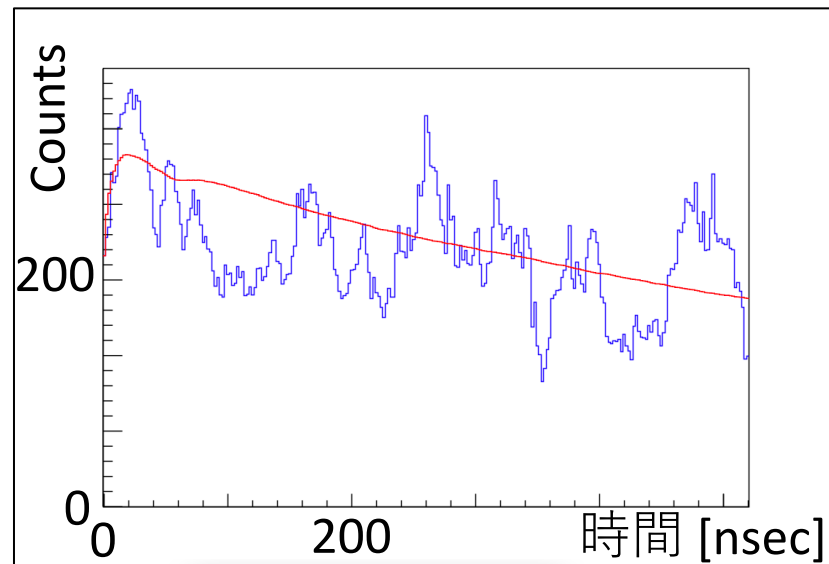
基準波形からかなり逸れてしまう。

→基準波形の情報を取り入れる必要有り。

MC波形 (~ 520 nsec)



α 事象の一例

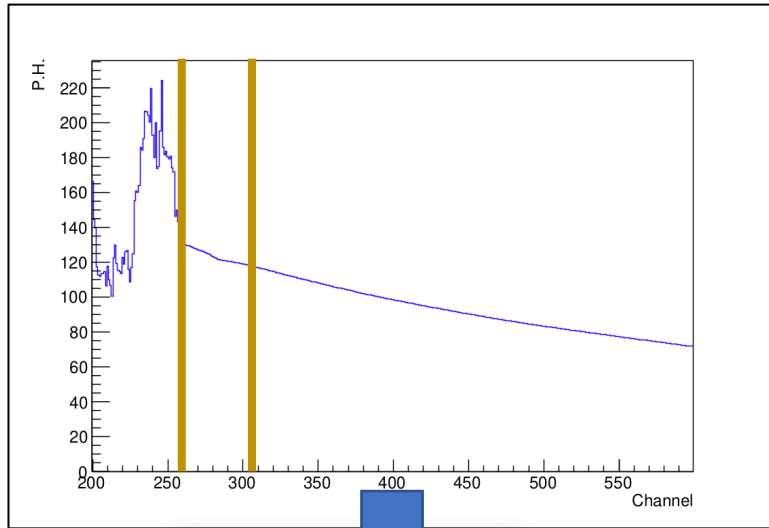


β 事象の一例

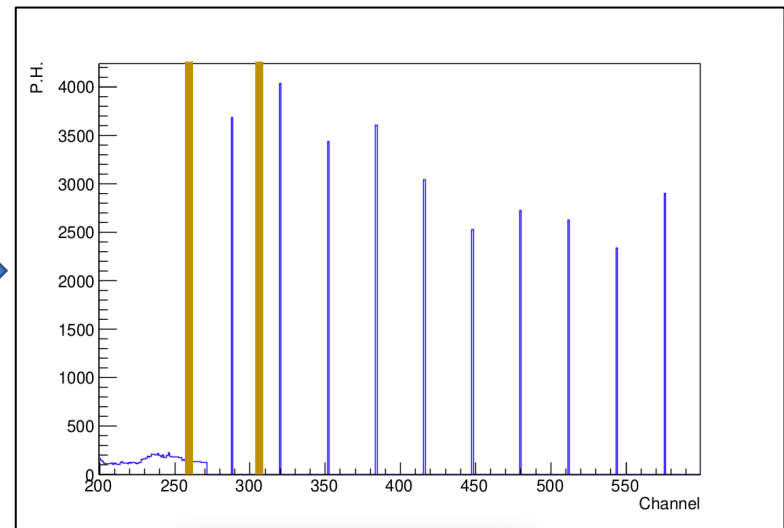
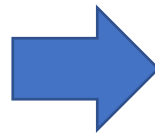
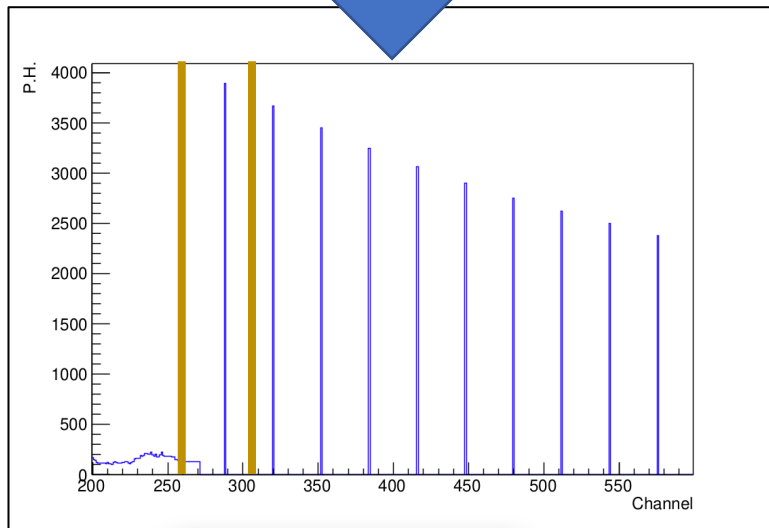
データの取得方法が途中から変化する為、

520 nsecまでのみ作成。

MC波形の作成方法 (テール部分)

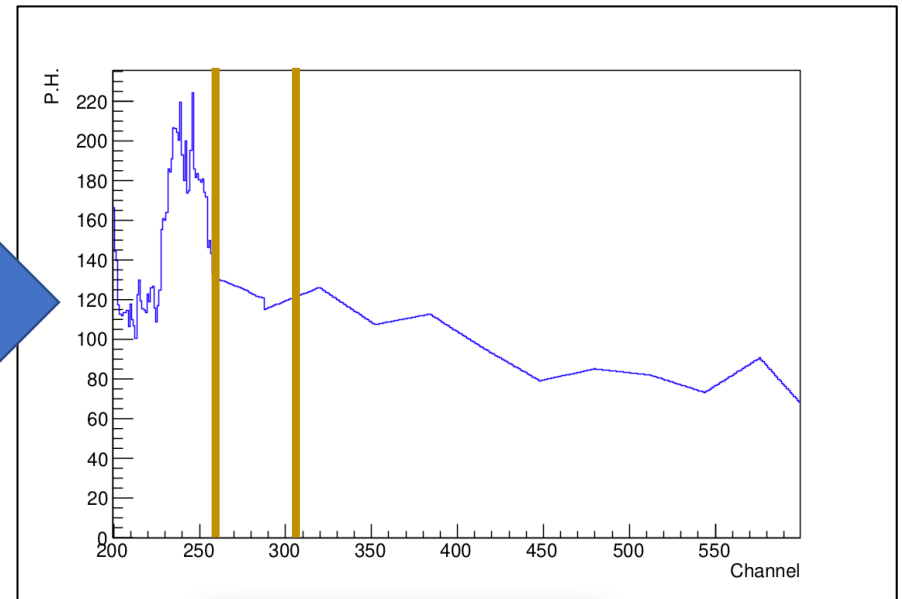
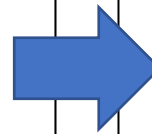
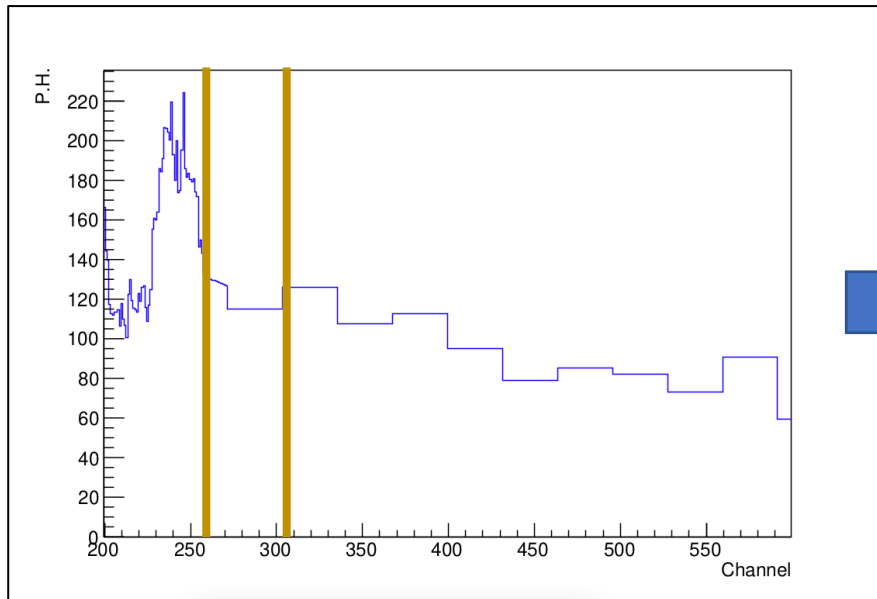


520 nsec以降について、期待波形を作成し、64nsecごとに合算して、その値をガウス関数で振らつかせる。
(データの取得方法を再現する為)

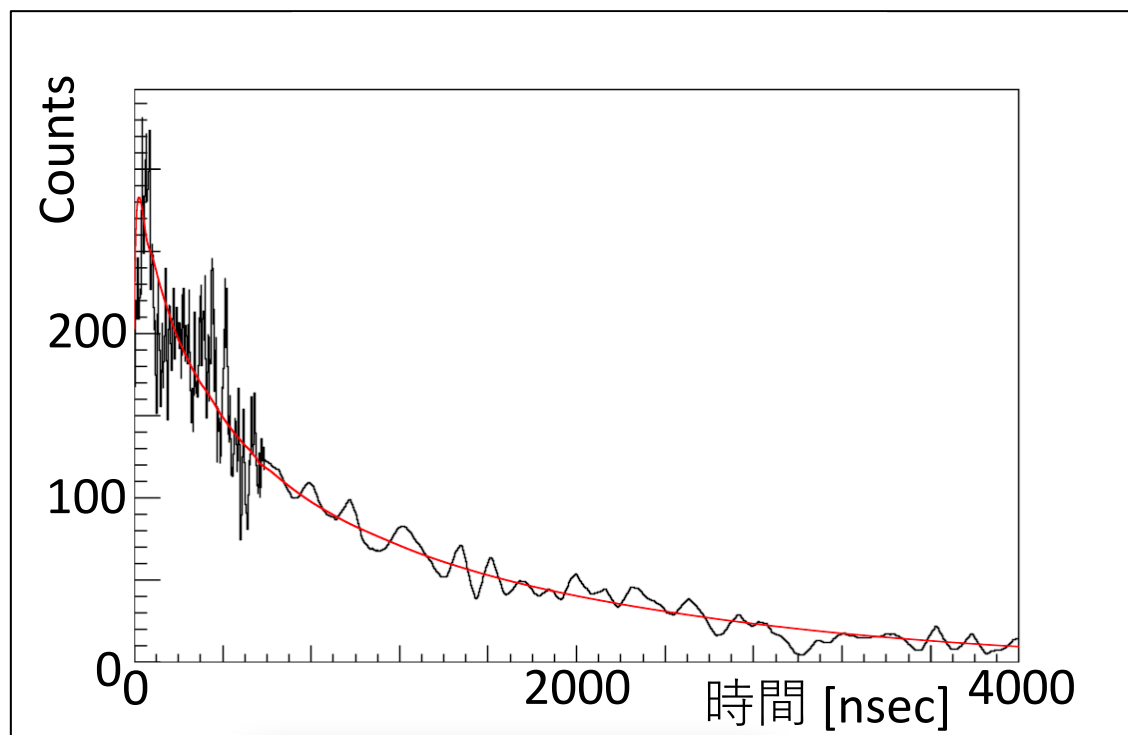


MC波形の作成方法 (テール部分)

振らつかせた値を32chに等分し、32chの中心を直線で繋いでゆく。



波高の期待値の計算方法



データ波形の4000 nsecでの積分値を計算

→積分値を用いて基準波形(データと同事象)を規格化

規格化した基準波形の波高をその波高の期待値とする