

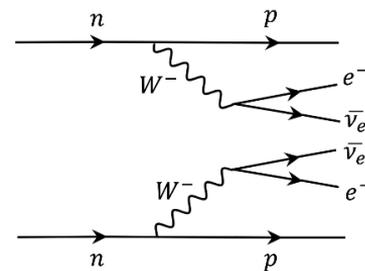
# 0 $\nu$ 2 $\beta$ 探索実験AXELにおける MPPC非線形性の揺らぎの シミュレーション

東北大学 素粒子実験（加速器）研究室  
渡辺夕子

2025年12月19日 MPGD&アクティブ媒質TPC合同研究会

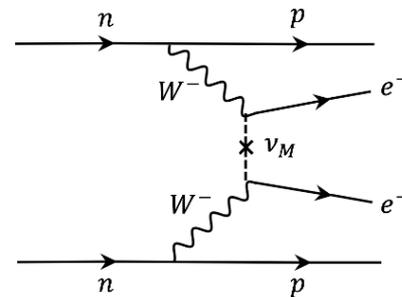
## 二重ベータ崩壊 ( $2\nu 2\beta$ )

原子核内の2つの中性子がほぼ同時に陽子に崩壊する現象。



## ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 ( $0\nu 2\beta$ )

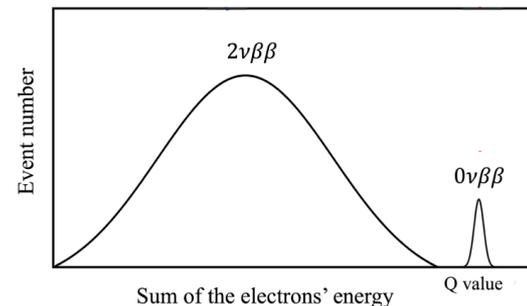
通常、二重ベータ崩壊では反電子ニュートリノが2個出るが、ニュートリノがマヨラナ粒子（粒子と反粒子が同一とみなせる粒子）であれば仮想的に対消滅し、電子のみが放出される過程があるはず。 $\rightarrow 0\nu 2\beta$



## なぜ0ν2βの探索が重要か

ニュートリノがマヨラナ粒子であれば、

- ・ ニュートリノの異常に軽い質量
  - ・ なぜ宇宙は物質優勢なのか
- を説明できる。

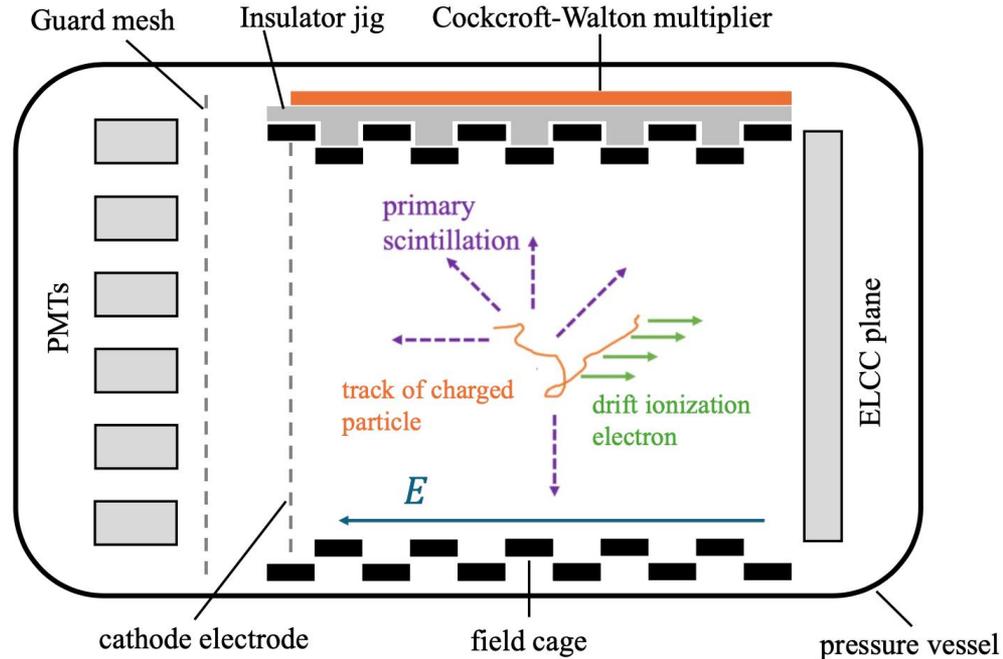


## 0ν2βの特徴

- ・ 非常に稀な現象 (136Xeでの半減期の下限 :  $3.8 \times 10^{26}$  year [1])
  - ・ 電子の運動エネルギーの和が一定になる。
- 大量の崩壊核・高い背景事象除去能力・高エネルギー分解能が必要。

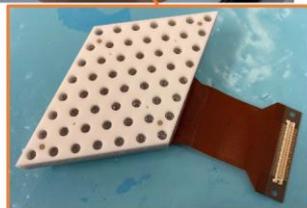
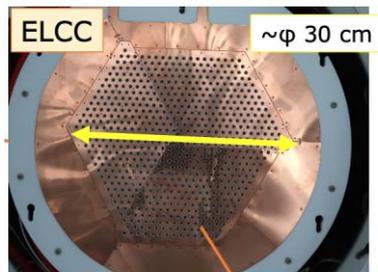
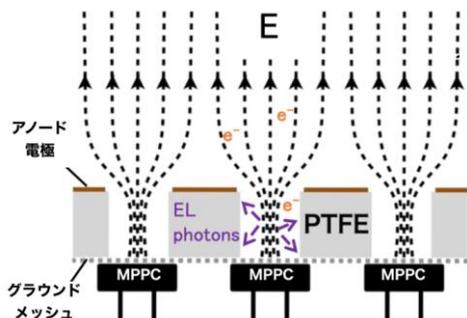
[1] KamLAND-Zen collaboration, [arXiv:2406.11438](https://arxiv.org/abs/2406.11438)

- ・ 高圧キセノンガスTPCを用いて $^{136}\text{Xe}$ の $0\nu 2\beta$ を探索する実験。
- ・ 8barの $^{136}\text{Xe}$ 濃縮ガスを圧力容器内に封入することで、大量の $0\nu 2\beta$ 崩壊核の測定が可能。
- ・ TPCにより3次元的に飛跡を再構築可能。→背景事象を除去
- ・ 独自の電離電子読み出し機構であるELCCにより高エネルギー分解能を実現。

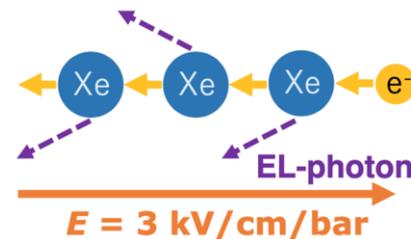


・ドリフトしてきた電離電子を、より強い電場(3kV/cm/bar)のかかったセルの中に引き込む。セル内でEL過程と呼ばれる過程を起こし、電離電子を多数の光子に変換しMPPCで読み出す。

・雪崩増幅だと増幅の初期揺らぎまで増幅されるが、EL過程では初期電子数に対して線形に増幅される。  
→高エネルギー分解能



## EL過程のイメージ図



・各セルでのMPPCの信号を足し合わせることで、荷電粒子が落としたエネルギー量を測定することができる。

- ・ ELCCからの信号はFEBと呼ばれるボードで読み出される。
- ・ FEBにはADCLとADCH2種類のADCがある。

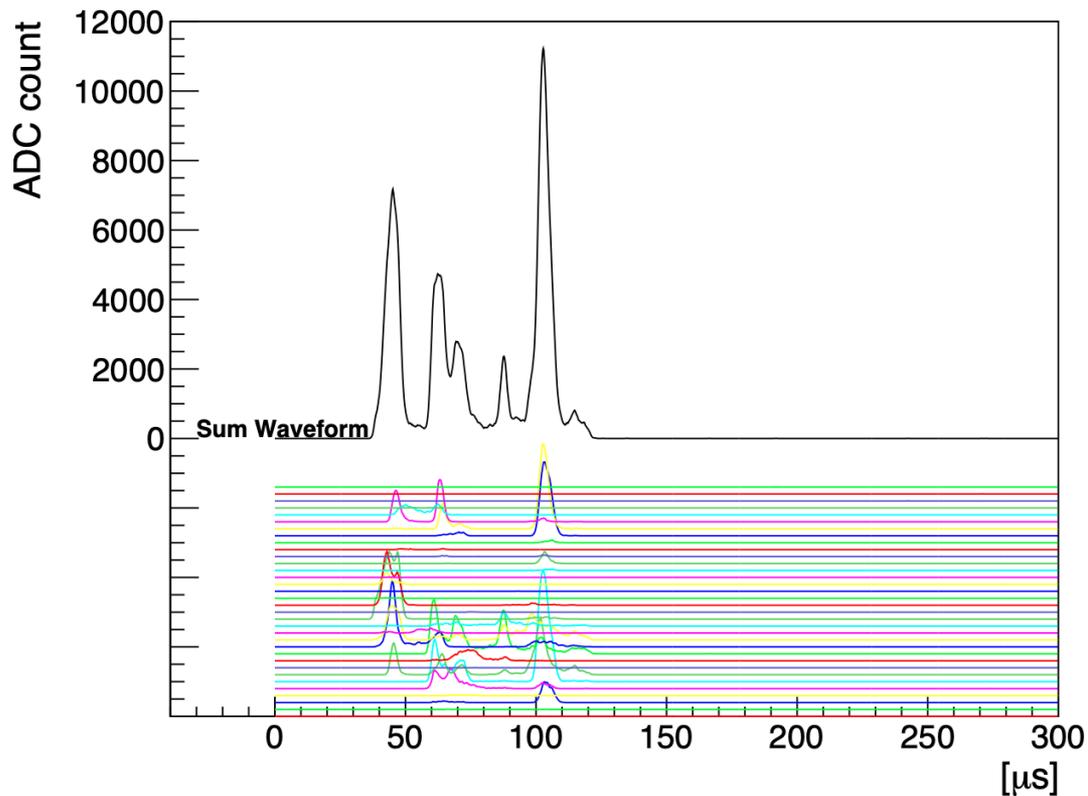


## ADCL

サンプリングレート：5MS/s EL信号(100 $\mu$ s程度)の読み出しに使われる。  
信号を5倍に増幅し、時定数220nsのサレンキー型ローパスフィルタに通し波形を鈍らせた後ADCLに入れる。  
→生波形の高い部分を取り逃がすことを防ぐ。

## ADCH

サンプリングレート：40MS/s ダーク信号(数10ns程度)の大きさを評価するために使われる。



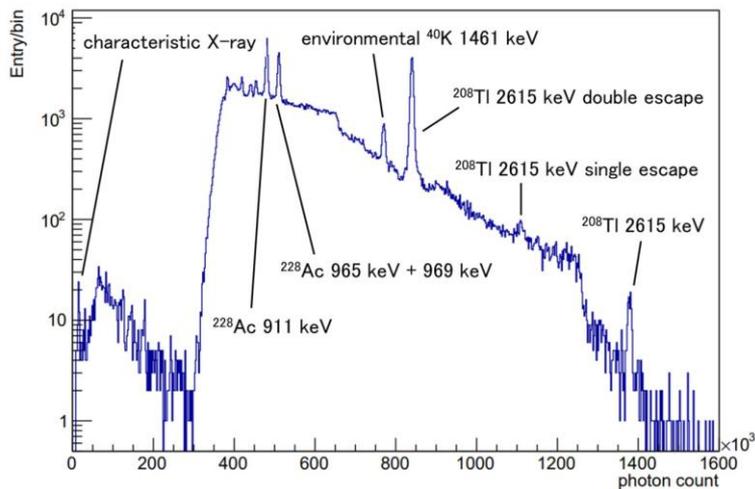
色付き：  
各ELCCからの波形

黒：  
全ての波形を足し合わせたもの

200ns間隔でサンプリングを行っている。

# 208Tlによる $\gamma$ 線イベントの測定

検出器上部にトリウムタングステン棒を置き、測定を行った。



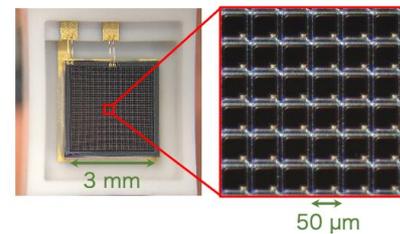
このデータからそれぞれの分解能を求め、 $0\nu 2\beta$ のQ値について内挿を行うと、 $\Delta E/E=0.67\%$

→未知の寄与が0.25%程度存在

2615keV  $\gamma$ 線イベントのエネルギー分解能の内訳

初期電離電子数の揺らぎ	0.25%
z座標の再構築の誤差	0.24%
EL光の発生と検出の揺らぎ	0.20%
ELゲインの校正の誤差	0.18%
時間依存性補正の誤差	0.18%
再結合による効果	0.17%
時間変動補正の時間ビンにおける変動	0.12%
ベースラインのオフセット	$\leq 0.11\%$
z依存補正の誤差	$\leq 0.06\%$
アタッチメントの揺らぎ	$\leq 0.02\%$
MPPC回復時間の正確性	$\leq 0.03\%$
ELゲインの位置依存性による効果	$\sim 0\%$
AxFEBにおける波形フィルタリング	$\sim 0\%$
合計推定量	0.52% ~ 0.54%
実測値	(0.67 $\pm$ 0.08)%

**MPPC** : 受光面に多数のガイガーモードAPDが敷き詰められたもの。  
AXEL実験では3600個/MPPC。



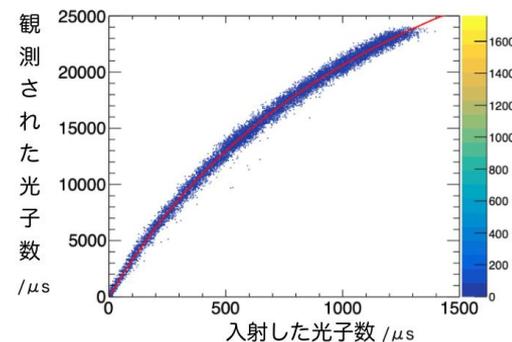
## MPPCの飽和による非線形性

あるピクセルで信号が出ると、元の状態に充電されて戻るまでに時間がかかる。（回復時間 → 72.9ns程度）

回復し切っていないピクセルに光子が入ることで本来よりもカウントが小さくなってしまう。（飽和）

MPPCが大光量下で飽和することによって非線形な応答が生じる。

**0v2βでは72.9nsの間に最大約1500個/MPPCの光子が入る。  
→回復できていないピクセルに光子が入る可能性が無視できない。**



単一ヒットの場合、左図のような指数関数で減衰する信号が出る。そうすると、信号の面積をゲインとみなせる。

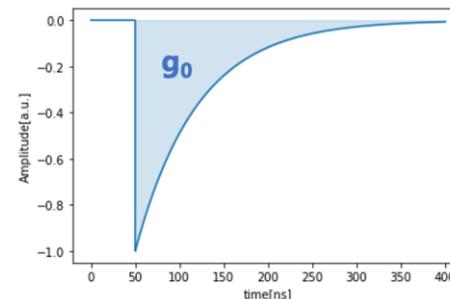
ヒットがあってからt秒後に再びヒットがあった場合、ゲインはオレンジの領域で表されるので、

信号が出てからt秒後のゲインgは

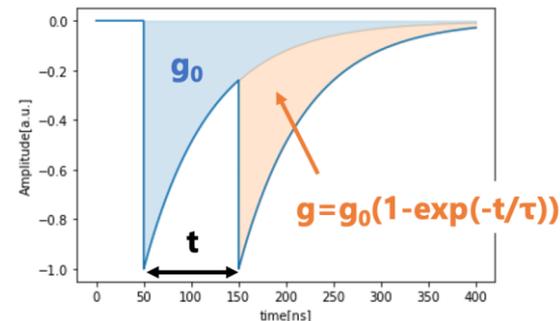
$$g = g_0(1 - e^{-t/\tau})$$

$g_0$  : 元のゲイン  
 $\tau$  : 回復時間

のように表せる。



単一ヒットの場合



連続ヒットの場合

## 補正方法 1 : 平均補正

- ・ 1ピクセル・1秒間あたりの平均光子数 :  $k = \frac{N_{\text{true}}}{N_{\text{pix}} \cdot \Delta t}$  [/(pixel · s)]  
( $N_{\text{true}}$  :  $\Delta t$ 秒間にMPPCに入射した真の光子数  $N_{\text{pix}}$  : ピクセル数 )

あるピクセルが光子を検出してから、 $t$ 秒後に再び光子を検出する確率が指数関数分布に従うとすると、平均ゲインは次のように計算できる。

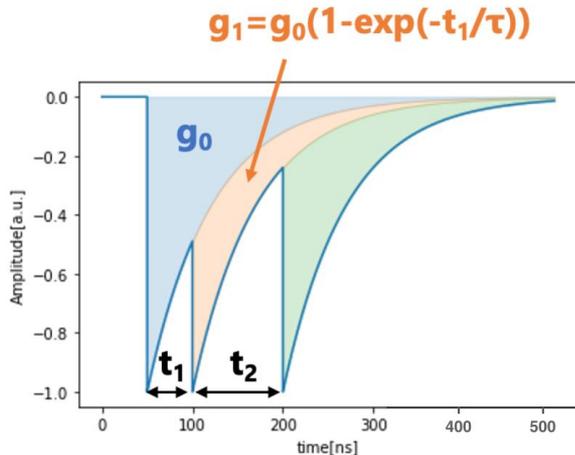
$$\langle g \rangle = \int_0^{\infty} k e^{-kt} g_0 (1 - e^{-t/\tau}) dt = \frac{g_0}{1 + k\tau}$$

観測光子数 $N_{\text{obs}}$ は、出力電荷を通常時のゲイン $g_0$ で割ることのできるため、 $N_{\text{obs}} = N_{\text{true}} \frac{\langle g \rangle}{g_0}$

$N_{\text{true}}$ について解いて、 $N_{\text{true}} = \frac{N_{\text{obs}}}{1 - \frac{\tau}{N_{\text{pix}} \Delta t} N_{\text{obs}}}$  この式を使って補正を行う。

$$= \frac{N_{\text{true}}}{1 + \frac{\tau}{N_{\text{pix}} \Delta t} N_{\text{true}}}$$

## 補正方法2：より厳密な補正



青による減衰量

$$g_0 \times \exp(-(t_1+t_2)/\tau)$$

オレンジによる減衰量

$$g_0 \times [\exp(-t_2/\tau) - \exp(-(t_1+t_2)/\tau)] + g_1 \times \exp(-t_2/\tau)$$

$$= g_1 \times \exp(-t_2/\tau)$$

→ 緑の面積  $g = g_0 - [g_0 \times \exp(-(t_1+t_2)/\tau) + g_1 \times \exp(-t_2/\tau)]$

同様に考えると、各時刻のNobsについて足し合わせていけば良いので、

$$g(t) = g_0 \left[ 1 - \int_0^\infty \frac{N_o(t-t')}{N_{pix}} \exp(-t'/\tau) dt' \right]$$

両辺に  $N_{true}/g_0$  をかけると

$$N_{obs}(t) = N_{true}(t) - \frac{N_{true}(t)}{N_{pix}} \int_0^\infty N_{obs}(t-t') e^{-t'/\tau} dt'$$

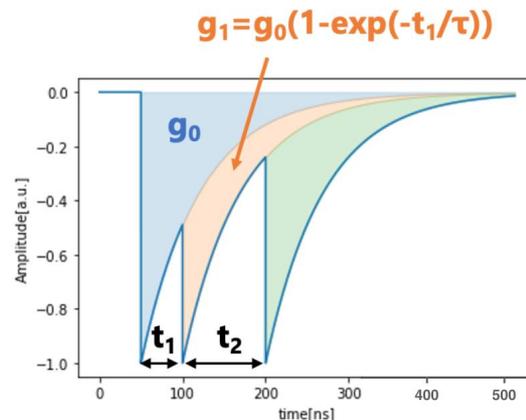
$$N_{true}(t) = \frac{N_{obs}(t)}{1 - \frac{N_{integral}(t)}{N_{pix}}} \left( N_{integral} \stackrel{\text{def}}{=} \int_0^\infty N_{obs}(t-t') e^{-t'/\tau} dt' \right)$$

このような関係式を使って補正を行う。

- ・ 厳密補正に対して、サンプリング間隔が十分大きいと近似したものが平均補正に対応する。

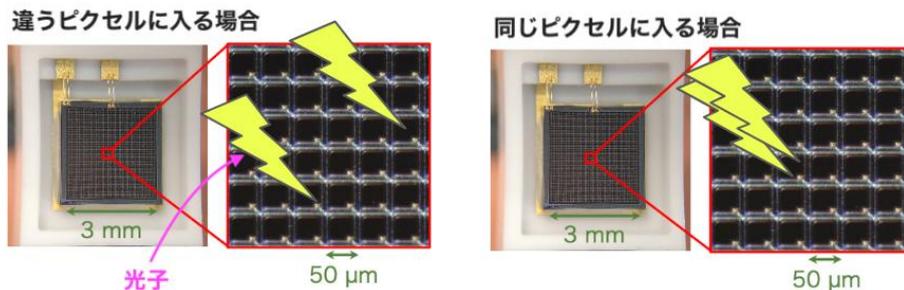
- ・ 厳密補正では細かいクロックでの情報が必要になってくる。

(連続でヒットしている様子が見えるくらい細かくなないと意味がない)



- ・ AXEL実験では、回復時間70nsに対して、サンプリングは200nsごとと荒いため平均補正を使用している。

回復していないピクセルに光子が入るかどうかは確率的な事象。→ 非線形性に揺らぎが生じる。



過去の研究よりエネルギー分解能に未知の寄与が0.25%程度あることが判明した。

その候補としてMPPCの非線形性の揺らぎが挙げられており、シミュレーションで寄与を見積もることにした。

2615keV  $\gamma$ 線イベントのエネルギー分解能の内訳

初期電離電子数の揺らぎ	0.25%
z座標の再構築の誤差	0.24%
EL光の発生と検出の揺らぎ	0.20%
ELゲインの校正の誤差	0.18%
時間依存性補正の誤差	0.18%
再結合による効果	0.17%
時間変動補正の時間ビンにおける変動	0.12%
ベースラインのオフセット	$\leq 0.11\%$
z依存補正の誤差	$\leq 0.06\%$
アタッチメントの揺らぎ	$\leq 0.02\%$
MPPC回復時間の正確性	$\leq 0.03\%$
ELゲインの位置依存性による効果	$\sim 0\%$
AxFEBにおける波形フィルタリング	$\sim 0\%$
合計推定量	0.52% ~ 0.54%
実測値	$(0.67 \pm 0.08)\%$

## シミュレーション方法

2.6MeVの電子を検出器の中心軸上でランダムに発生させ、最終的にMPPCでどのような出力が得られるかのシミュレーションを行った。

非線形性がある場合について補正を行った結果と、非線形性なしの結果を使い、後述の二つの方法で分解能を見積もった。なお補正式は厳密補正を使った。

$N_{true}$  : 非線形性なしの光子数/イベント

$N_{cor}$  : 非線形性ありを補正後の光子数/イベント

## 分解能の計算方法

① NcorとNtrueをそれぞれガウス分布にフィッティングし、二乗差として計算

$$\frac{\Delta E}{E} = \sqrt{\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{cor}^2 - \left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{raw}^2}$$

$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{cor} = \frac{2.355 \times \sigma}{N_{cor}}$$

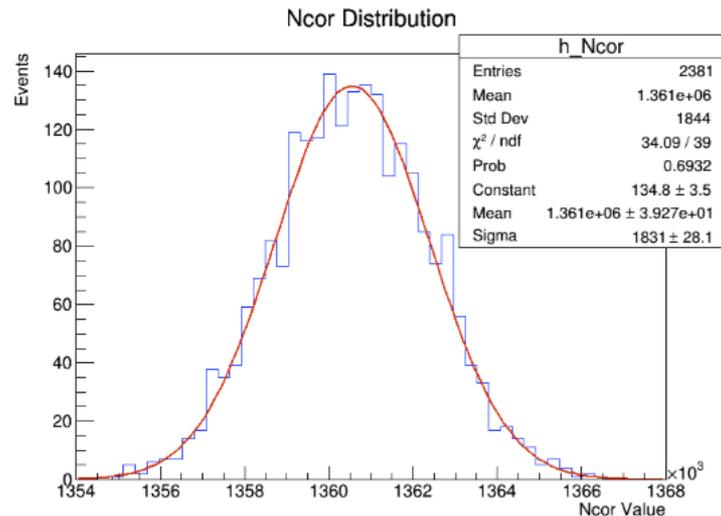
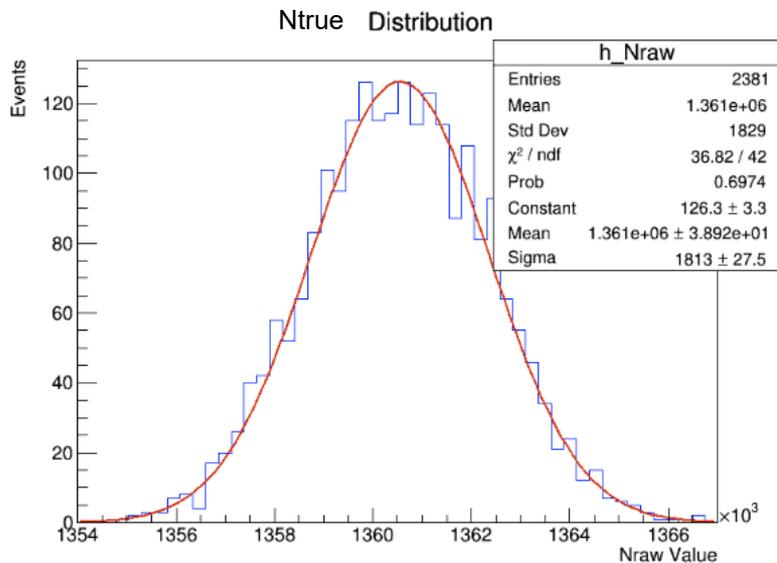
$$\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{true} = \frac{2.355 \times \sigma}{N_{true}}$$

② NcorとNtrueの差を取ることで計算

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2.355 \times \sigma}{N_{true}}$$

$\sigma$  : Ncor-Ntrue分布の標準偏差

## 結果（計算方法①）



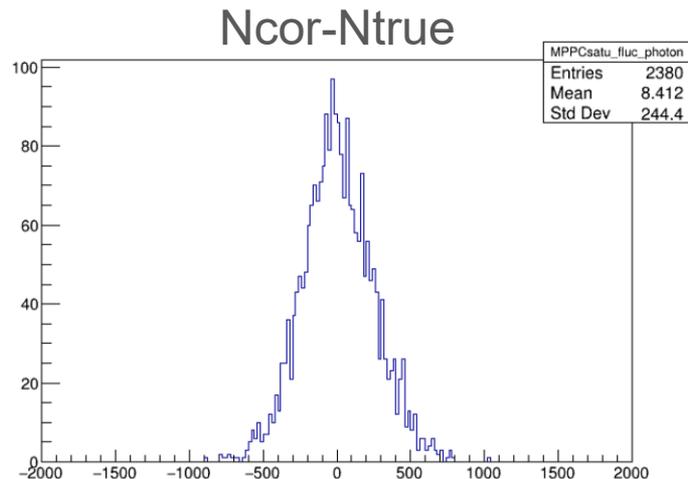
$\Delta E/E=0.044\%$   $\sigma$ が誤差の範囲で一致しており、この方法で求めた分解能は信憑性が低い。  
実際に誤差の伝播則から誤差を求めてみる。

$$f(\sigma_{cor}, \sigma_{true}) = \sqrt{\left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{cor}^2 - \left(\frac{\Delta E}{E}\right)_{true}^2} = \frac{2.355}{N} \sqrt{\sigma_{cor}^2 - \sigma_{true}^2} \quad \text{より}$$

$$\begin{aligned} \Delta f &= \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{cor}} \Delta \sigma_{cor}\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial \sigma_{true}} \Delta \sigma_{true}\right)^2} \\ &= \frac{2.355}{N \sqrt{\sigma_{cor}^2 - \sigma_{true}^2}} \sqrt{(\sigma_{cor} \Delta \sigma_{cor})^2 - (\sigma_{true} \Delta \sigma_{true})^2} \end{aligned}$$

$$\therefore \Delta E/E = 0.044\% \pm 0.049\%$$

## 結果（計算方法②）



$\Delta E/E=0.042\%$  (FWHM)

: 非線形性の統計揺らぎの分解能への寄与

こちらも誤差を求める。

ガウス分布の $\sigma$ の標準偏差は

$$\sigma(\hat{\sigma}) = \frac{\sigma}{\sqrt{2(n-1)}} \approx \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{2(n-1)}}$$

よって

$$\sigma(\Delta E/E) = \frac{2.355}{N} \sigma(\hat{\sigma}) = \frac{2.355}{N} \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{2(N-1)}}$$

~ **0.000026 %**

→計算方法②の方が圧倒的に正確

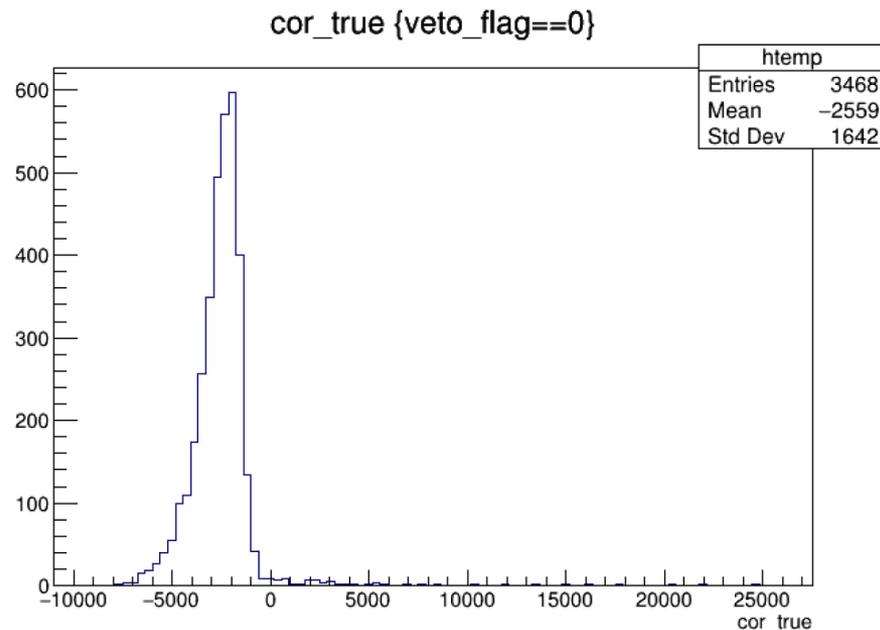
## 考察

- ・  $\Delta E/E=0.042\%$ は、未知の寄与0.25%を説明するには小さい。
- ・ 今回使用したデータはMPPCの生波形。実際にはフィルターで波形を鈍らせADC値に直した後、補正を行う。→ 補正の精度が悪くなり、分解能に影響する可能性がある。
- ・ フィルターをかけ、ADC値に直した後、実際に使う解析コードに通し光子数に直した結果について、同様に分解能を求めてみる。

## 結果

$\Delta E/E \sim 0.290\%$ (FWHM)

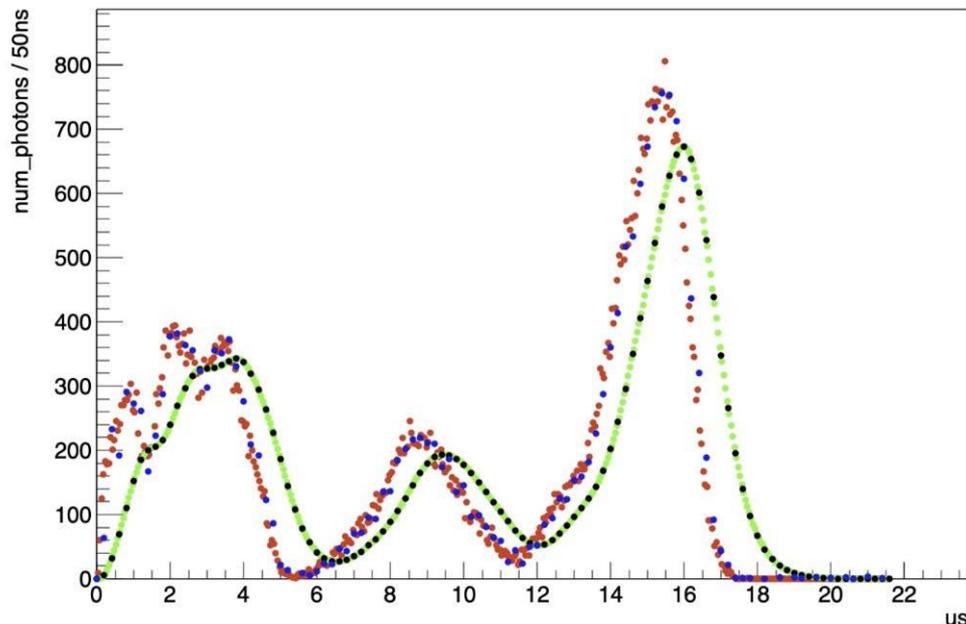
- ・ 分解能の値が大きくなり、未知の寄与に効いてくる可能性がある。
- ・ Ncor-Ntrue分布が中心から20%程度ずれた。



## 考察

- ・ filter・digitizeを施すことで、補正の精度が悪くなり、補正が足りなくなった可能性がある。
- ・ 非線形の揺らぎのシミュレーションでは厳密補正を使ったのに対して、解析コードでは平均補正を使用している。  
→平均補正の式が十分でない可能性がある。
- ・ 今後これらの検証を行う予定。  
(補正式の見直し・どの段階で分布がずれるか)

出力波形を逆畳みだし、フィルターをかける前の波形に戻すことができる。



赤：生波形

緑：フィルター後の波形

黒：緑をdigitizeした波形

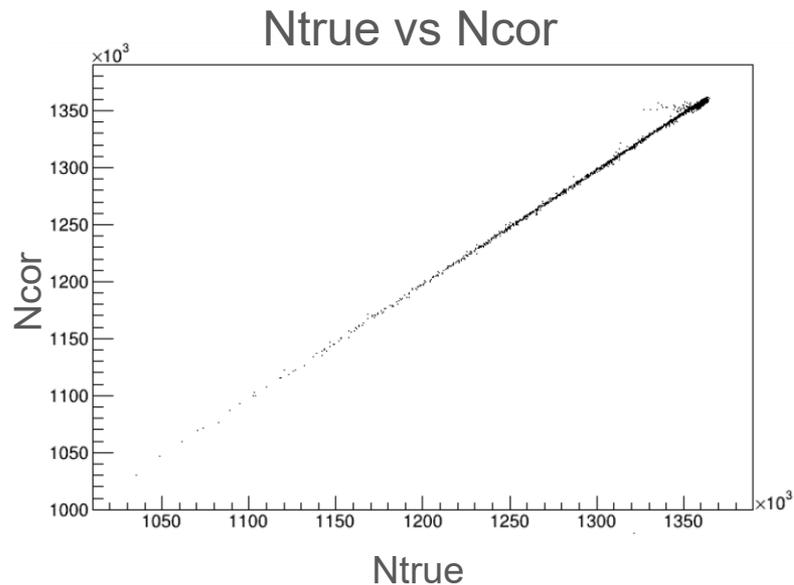
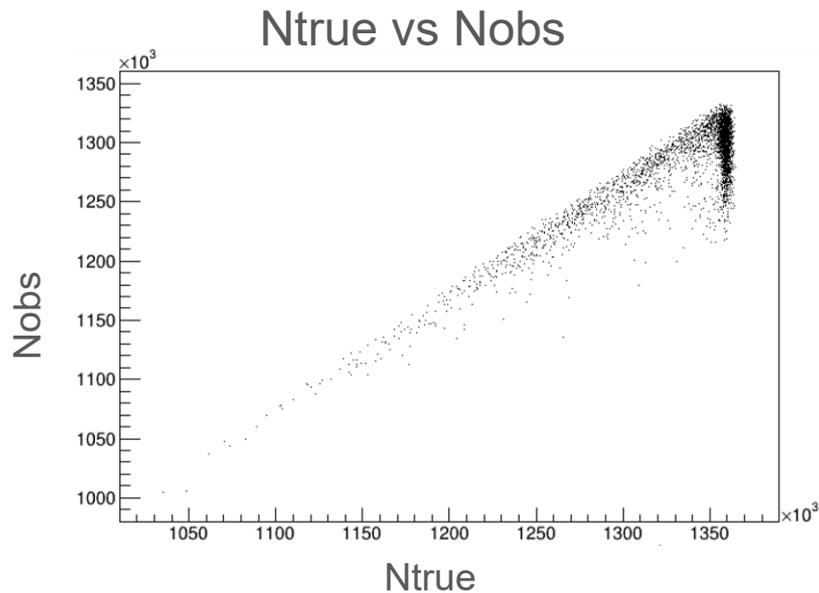
青：黒を逆畳み込みした波形

このように逆畳み込みを行った後にsaturation補正をすることでcor-trueの分布や分解能が改善する可能性がある。

- ・  $\gamma$ 線イベントの測定を行ったところ、エネルギー分解能について、実測値と推定値に0.25%程度の差があることがわかった。
- ・ 分解能への未知の寄与の候補としてMPPC非線形性の揺らぎが挙げられるため、シミュレーションで見積もりを行った。
- ・ 生波形データでは0.042%(FWHM)となり、未知の寄与を説明するには小さい。
- ・ filter・digitize後のデータでは0.29%(FWHM)となったが、cor-true分布が20%ずれた。
- ・ この挙動の原因を探るため、補正式の見直し、分布がずれるタイミングの特定、逆畳み込み後に補正を行うとどうなるかなどを検証する予定。



saturation補正が悪いのか、それ以前の処理が悪いのか調べるため、次のようなグラフをプロットした。



期待される振る舞いをしている。