

In situ high voltage generation in xenon gas time projection chamber and track pattern recognition for neutrinoless double beta decay search

(ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索のための、
キセノンガスTPC内での高電圧生成とトラックパターン認識)

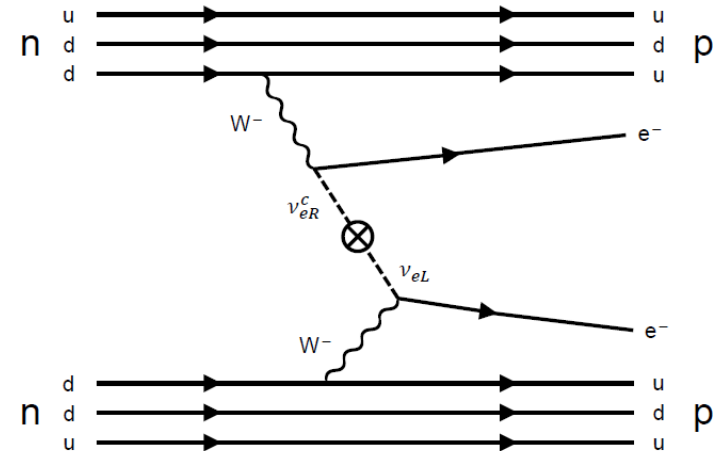
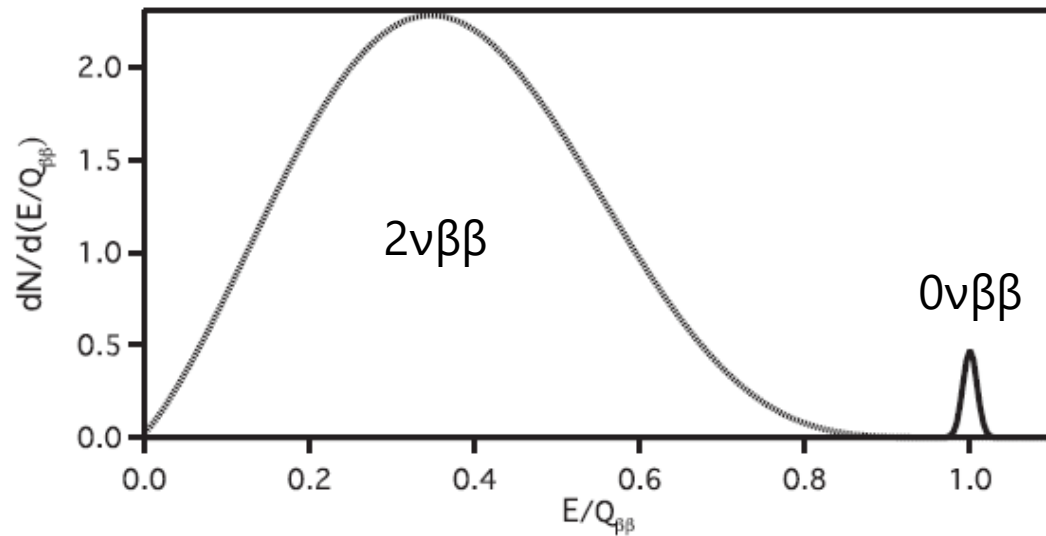
素粒子実験（加速器）研究室

秋山 晋一

- Introduction
- AXEL experiment
- Cockcroft-Walton multiplier による高電圧生成
- 機械学習を用いた信号-バックグラウンド識別
- Results/Discussion
- まとめ

- Introduction
- AXEL experiment
- Cockcroft-Walton multiplier による高電圧生成
- 機械学習を用いた信号-バックグラウンド識別
- Results/Discussion
- まとめ

- ニュートリノのマヨラナ性
 - 非常に軽いニュートリノ質量
 - 物質優勢宇宙
- ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊($0\nu\beta\beta$)
 - 起こるとしても非常に稀な事象 $> 3.8 \times 10^{26}$ years (90% C.L.) [1]
 - 2本の電子の運動エネルギーの和が崩壊のQ値に一致



[1] arXiv:2406.11438 [hep-ex]

- バックグラウンドの有無で、exposureに対する感度の伸びが変化

$$T_{1/2}^{0\nu} \propto (\ln 2) \varepsilon \frac{N_A}{A} M t$$

BG無の場合 Mtに比例

$$T_{1/2}^{0\nu} \propto (\ln 2) \varepsilon \frac{N_A}{A} \sqrt{\frac{M t}{b \Delta E}}$$

BG有の場合 sqrt(Mt)に比例

- 質量逆階層排除($\langle m_{\beta\beta} \rangle \sim 20 \text{ meV}$)を超えるために

位相空間因子

有効質量

$$\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu}} = G^{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

核行列要素

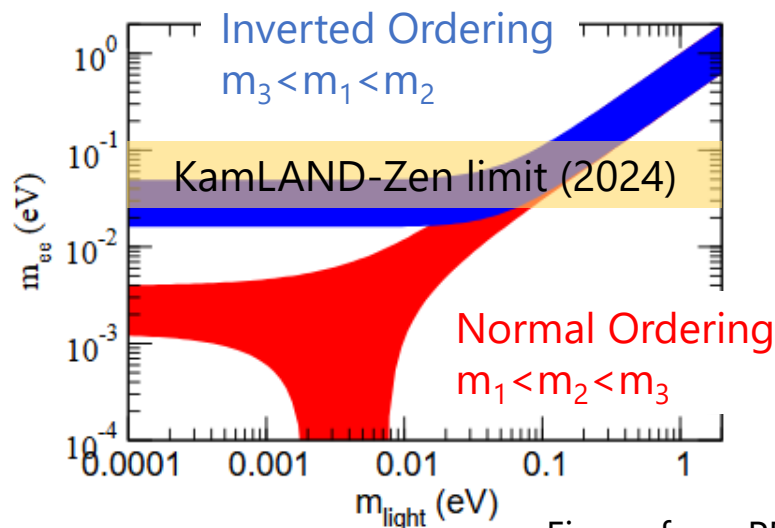
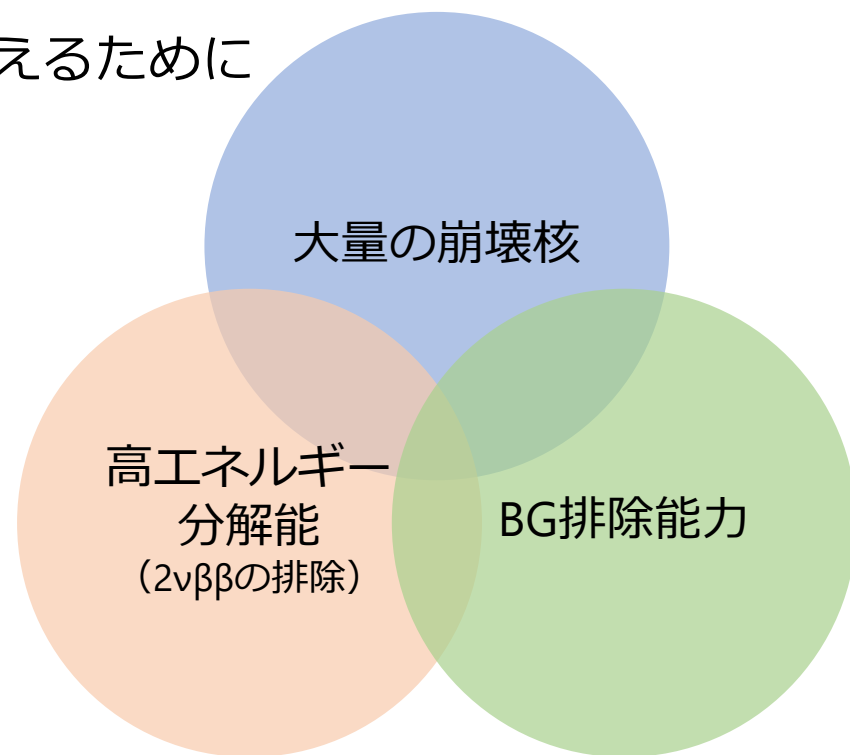
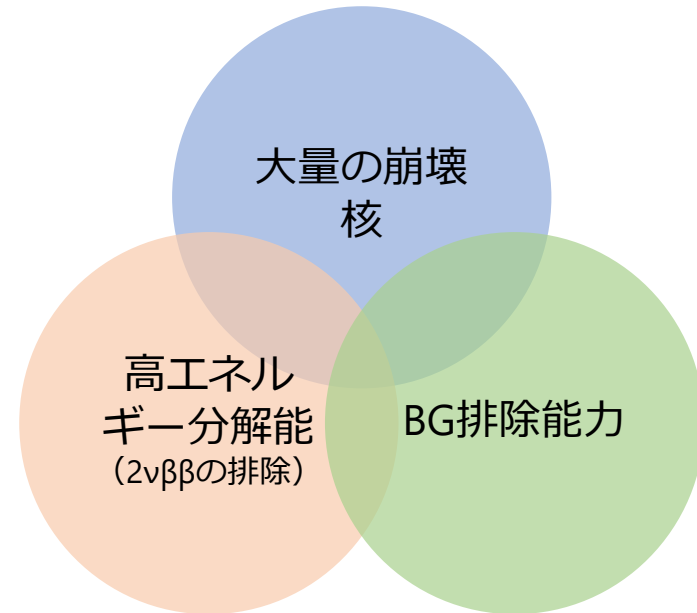
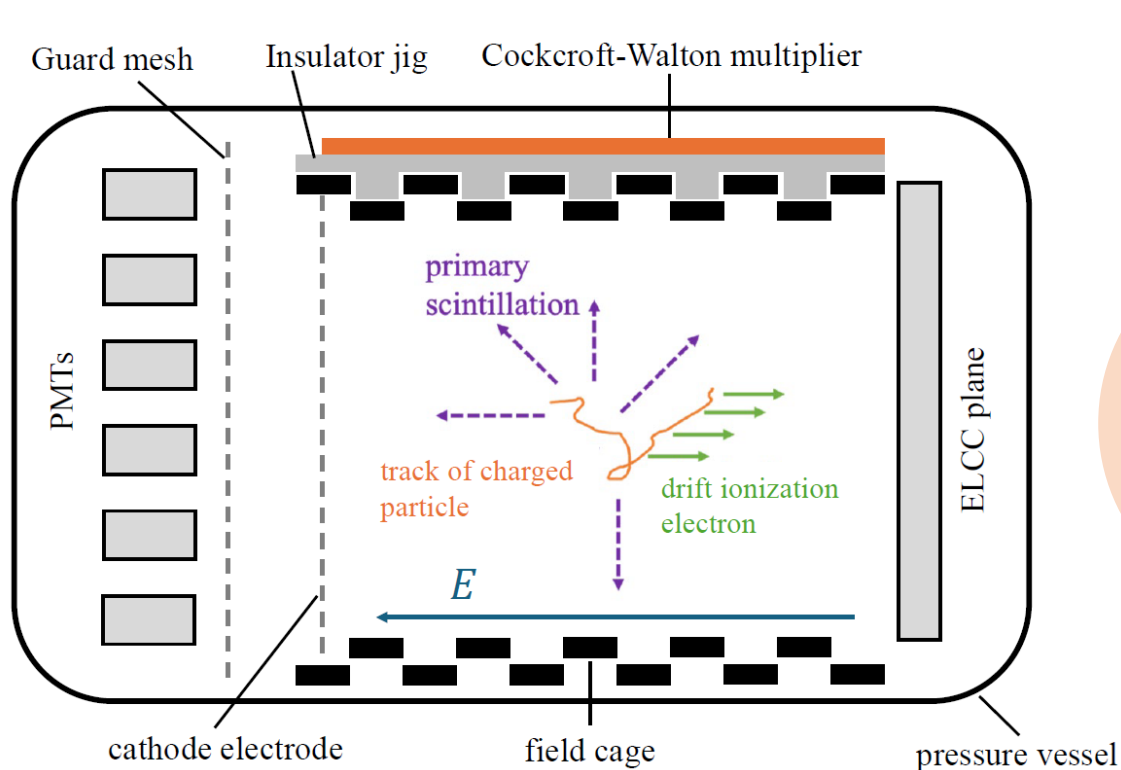


Figure from PDG 2025

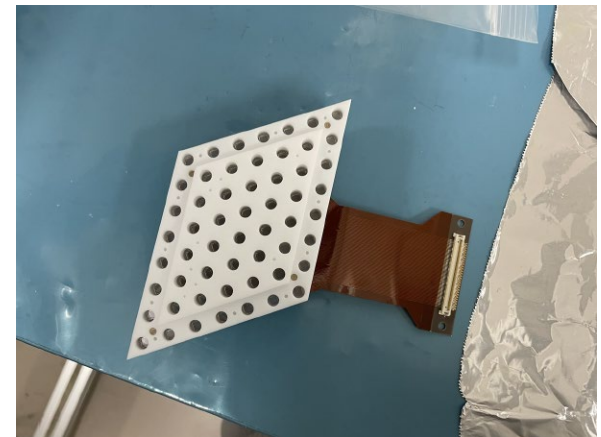
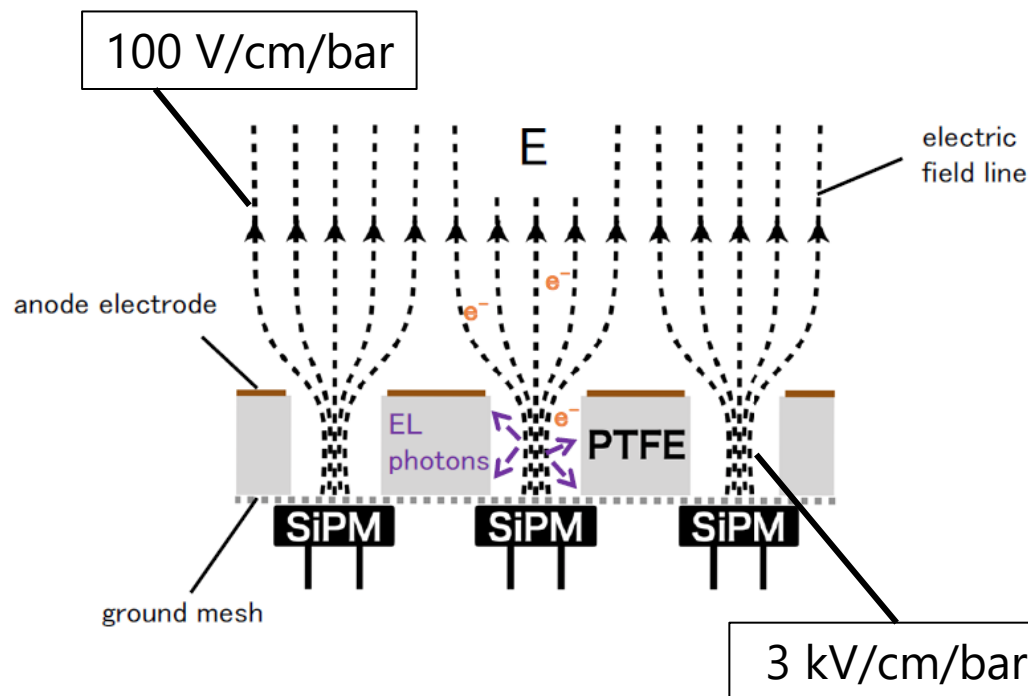


- Introduction
- AXEL experiment
- Cockcroft-Walton multiplier による高電圧生成
- 機械学習を用いた信号-バックグラウンド識別
- Results/Discussion
- まとめ

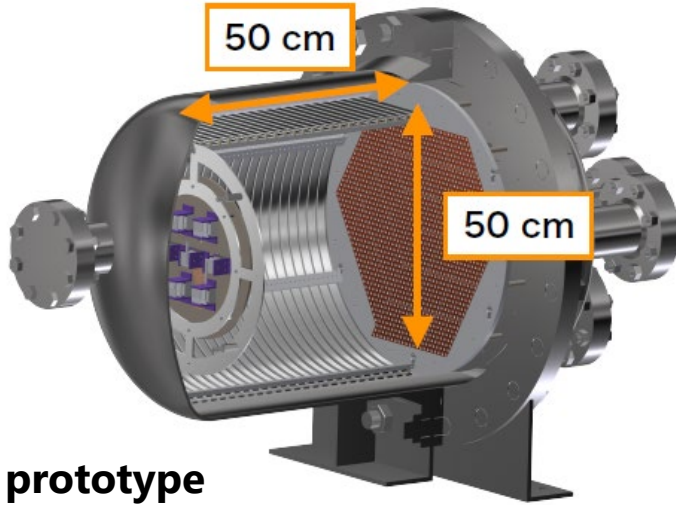
- 高圧キセノンガス Time Projection Chamberで ^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ を探索
 - キセノンガス → 大型化が容易
 - EL信号を利用 → 高エネルギー分解能
 - TPCによる3D飛跡再構成能力
- } 背景事象除去



- 電離電子を検出するセル状デバイス
- EL過程を用いて電離電子を光子に変換
 - 線形増幅過程のため、揺らぎが小さい
 - 発光位置依存性が小さい
 - ユニット構造で大型化が容易



ELCCユニット



180-L prototype

2018 -

- ~4.5kg @ 8bar
- phase-1 : 168ch
- phase-2 : 672ch
- 大型化技術
- Q値付近での分解能評価

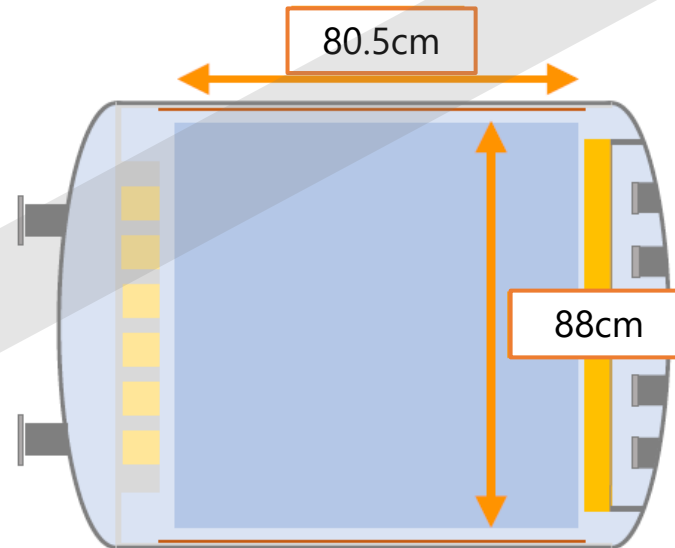
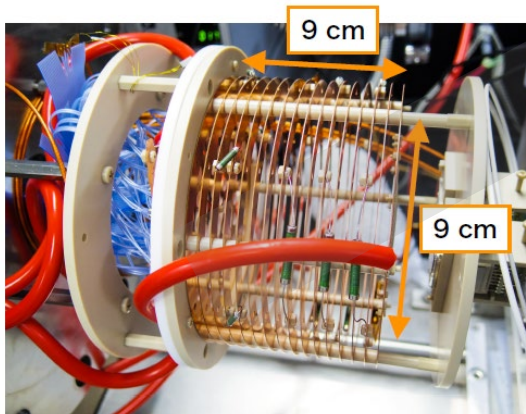
1t scale

140kg scale

10-L prototype

2014 - 2018

- 0.05kg @ 8bar
- ELCC コンセプトの実証



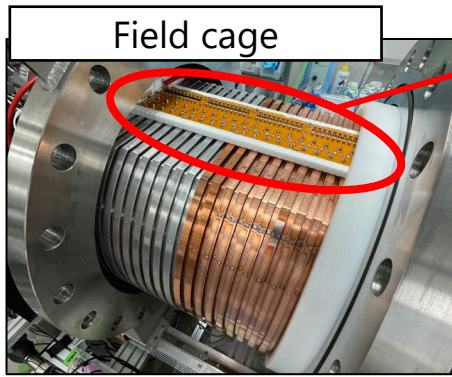
1,000-L detector

2025 -

- ~20kg @ 8bar
- 物理ラン
- 地下実験

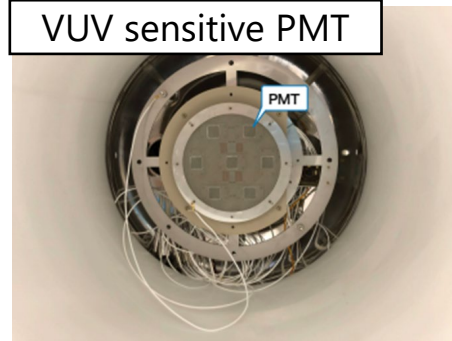
180L prototype detector

10

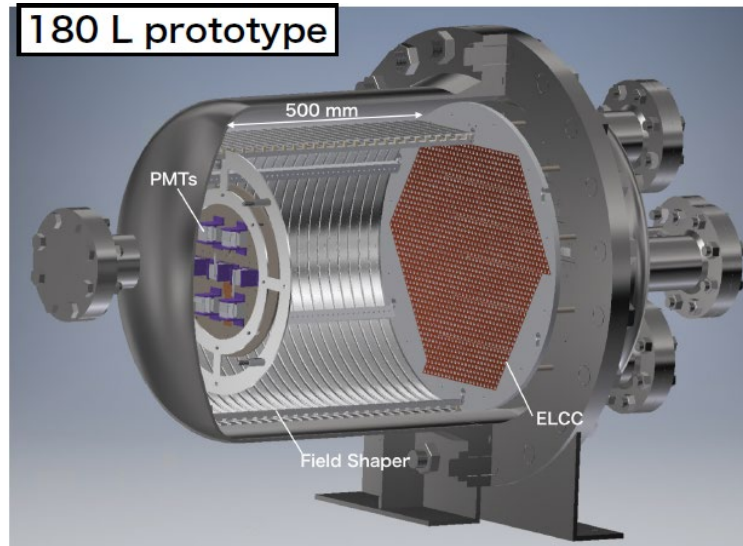


Field cage

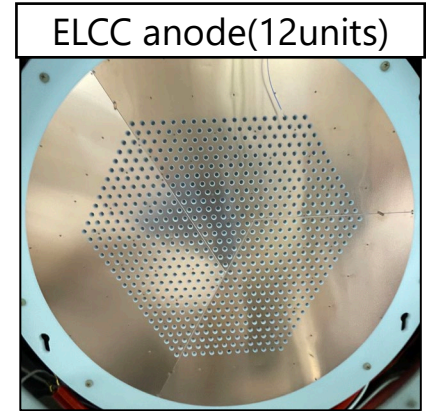
Cockcroft-Walton multiplier



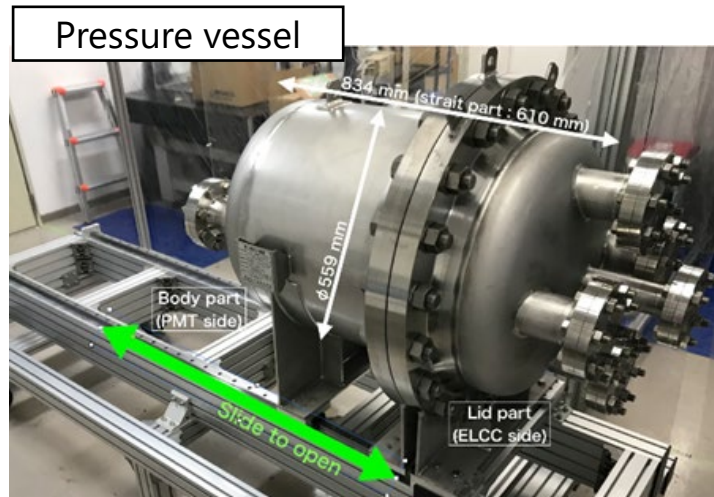
VUV sensitive PMT



180 L prototype

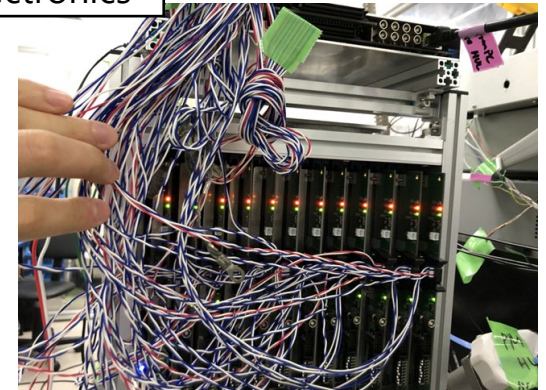
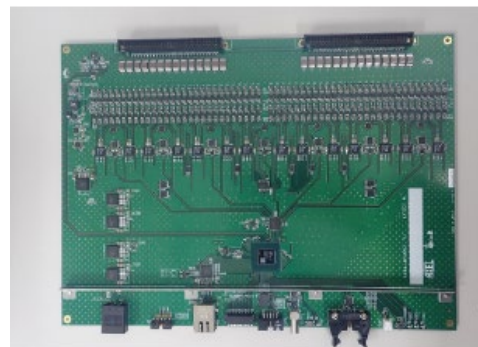


ELCC anode(12 units)



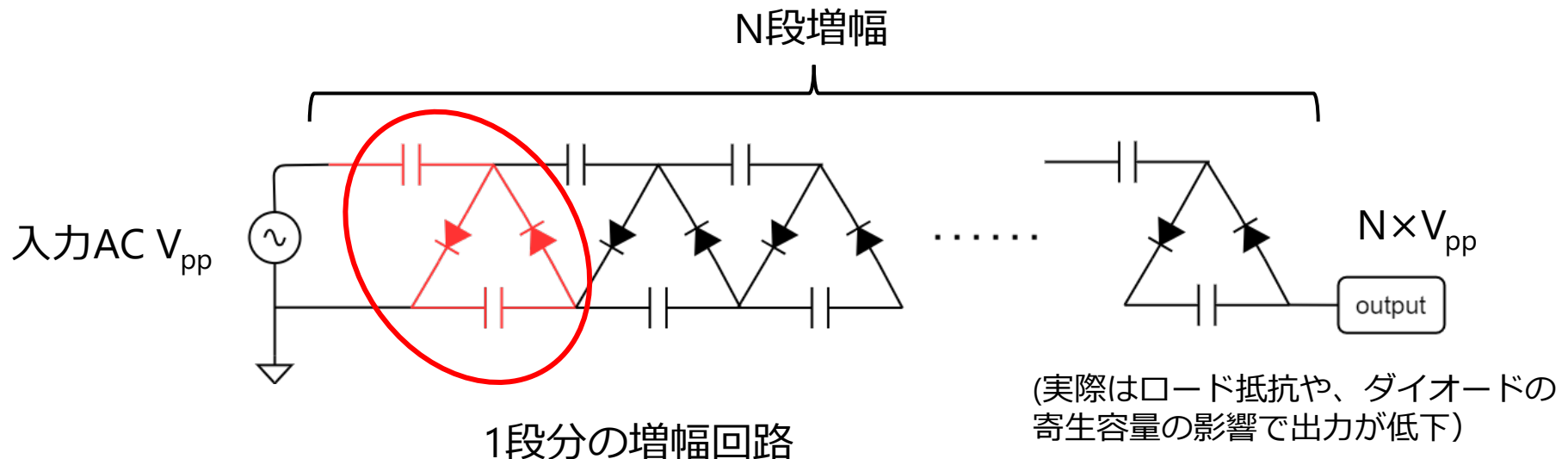
Pressure vessel

Front end electronics

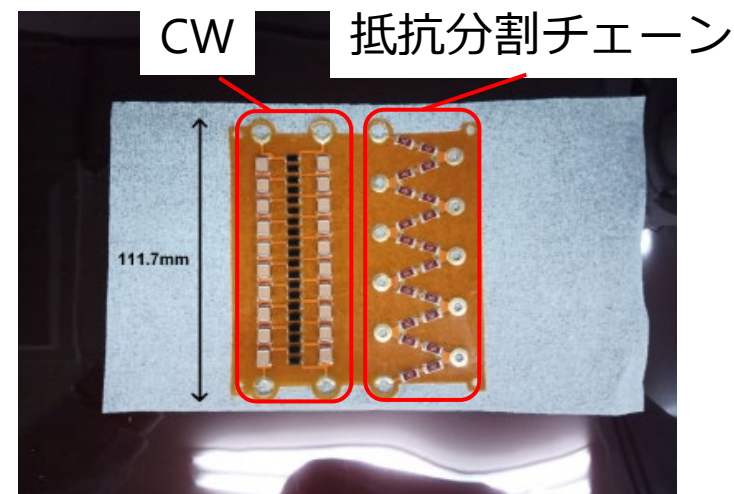
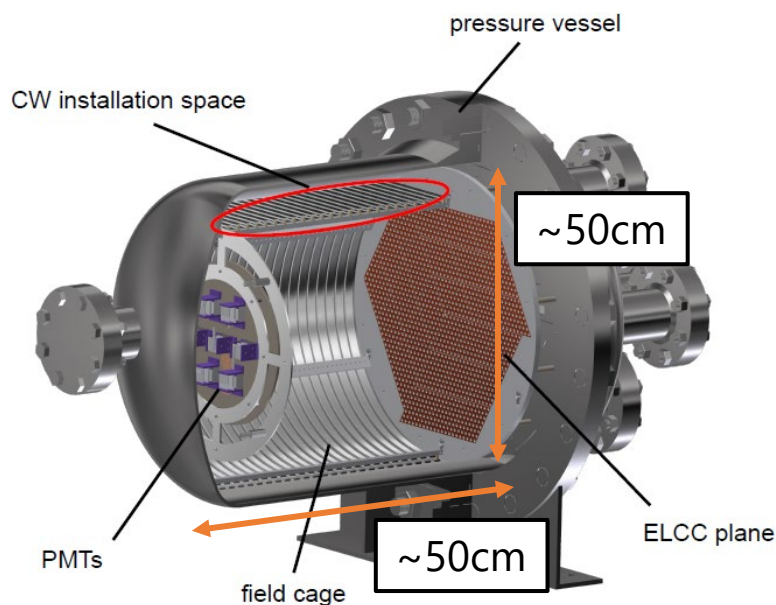


- Introduction
- AXEL experiment
- Cockcroft-Walton multiplier による高電圧生成
- 機械学習を用いた信号-バックグラウンド識別
- Results/Discussion
- まとめ

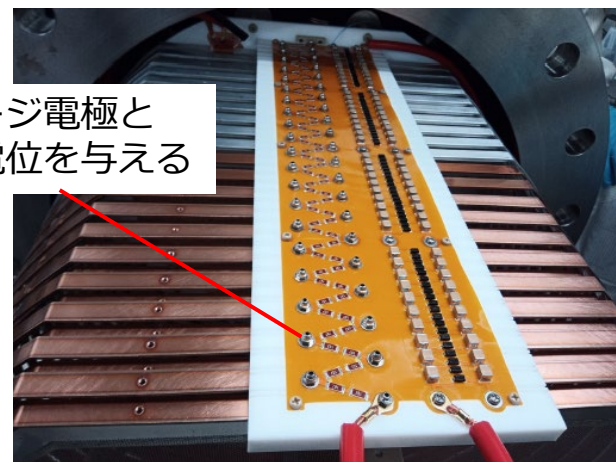
- TPCドリフト電場形成には高電圧（-45kV for 180L detector）が必要
- 圧力容器外部から導入するには、高耐圧フィードスルーが必要
→ 圧力容器内部で昇圧すれば、不要
- CW回路
 - 低圧AC入力を高圧DC出力に変換
 - 2個のコンデンサと2個のダイオードを1組として、積み重ねることによって線形に昇圧が可能 → スケールアップに適する
 - 理想的には、peak to peak 入力 V_{pp} に対して、N段増幅で出力 $N \times V_{pp}$ が得られる



- フィールドケージと圧力容器の隙間にインストールできるように、FPC上にコンパクトに実装
- フィールドケージに均等に分割された電位を与えるための抵抗分割チェーンも合わせて実装
- 10段/枚で、接続により多段化が可能



フィールドケージ電極と
ねじで接続し電位を与える



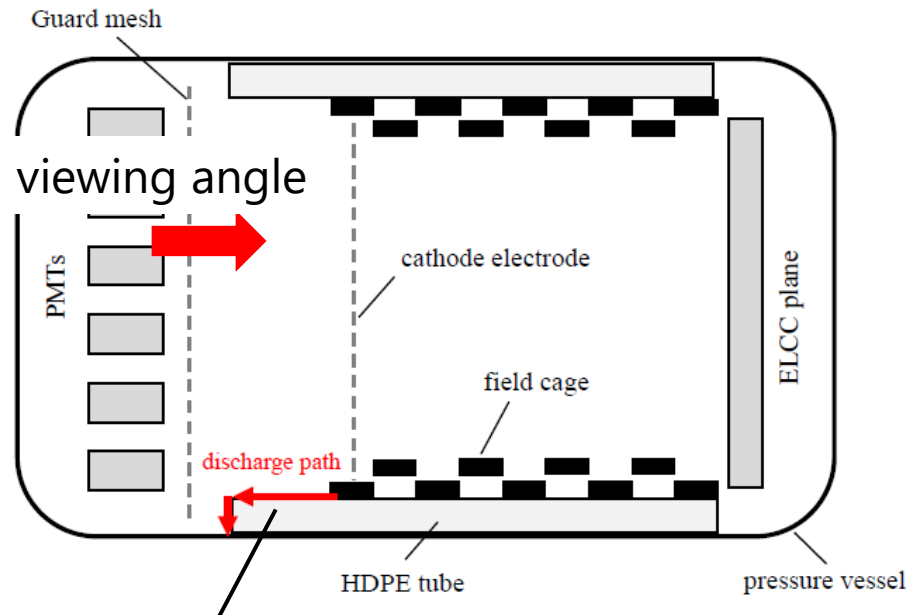
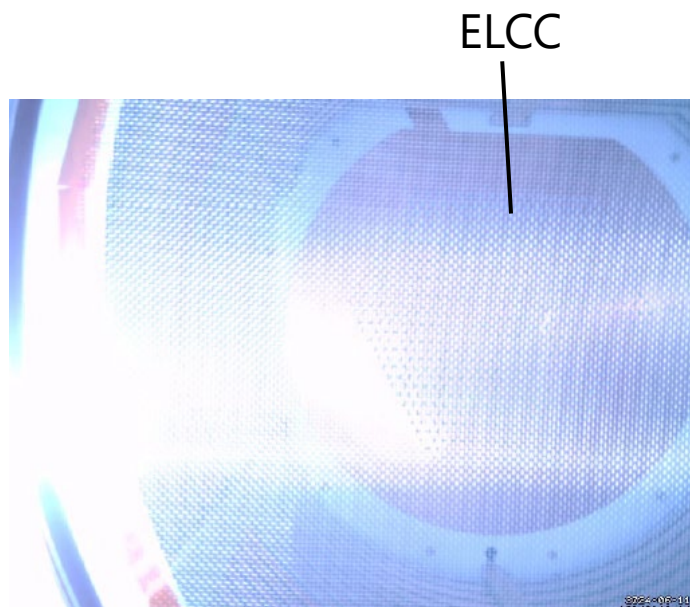
- FPCの沿面放電対策

- メチルシリコンレジン KR-251 によるコーティング
- 素子の定格電圧に近い 1900Vpp 入力で10分間無放電

- 180L検出器での放電事象

- PMT側に設置したカメラの動体検知で放電を検出
- HDPE絶縁筒の表面を伝って圧力容器に放電

→ 絶縁筒(HDPE)の表面に溝加工を施して放電距離を延長 } 設計電圧の90% (-34.3kV)
CW回路の昇圧をプログラム化し、時間をかけて昇圧 } の印加に成功

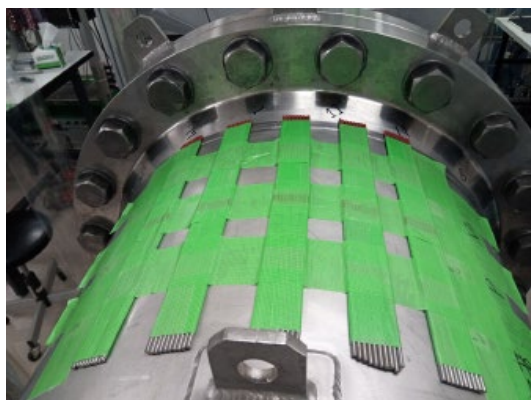
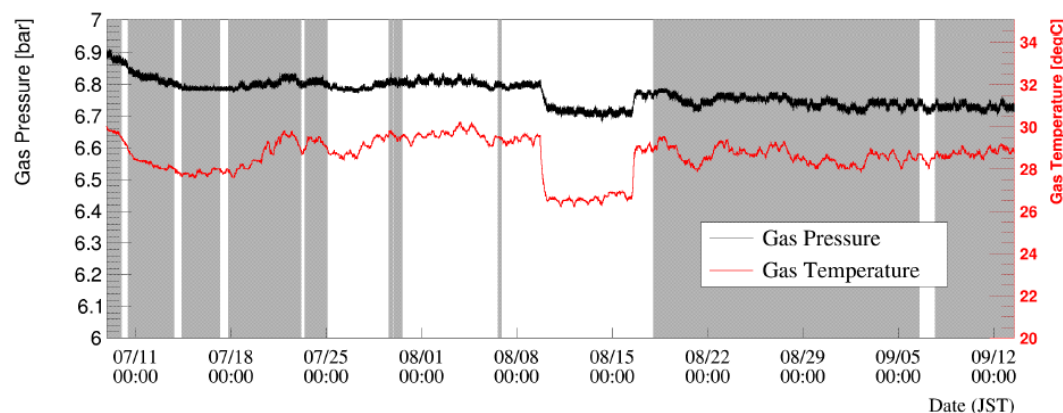
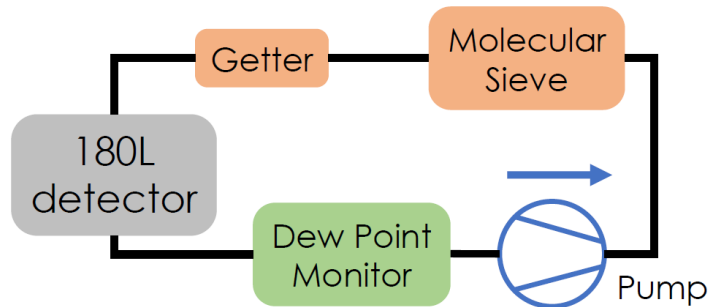


推定放電経路

180L検出器でのデータ取得

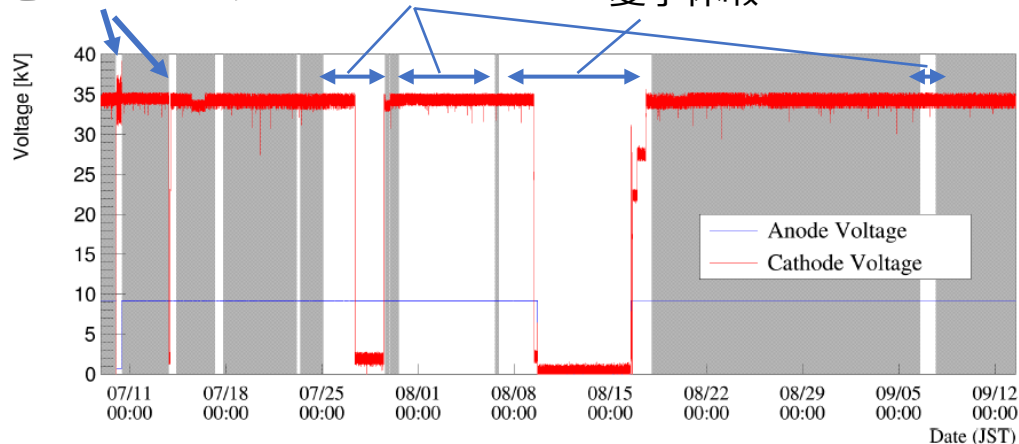
15

- トリウムタングステン棒（トリウム系列核種）をソースとして、積算で40日間のデータ取得を実施
- キセノン循環、純化
 - モレキュラーシーブ: H_2O , O_2 , CO_2 , etc
 - ゲッター: N_2

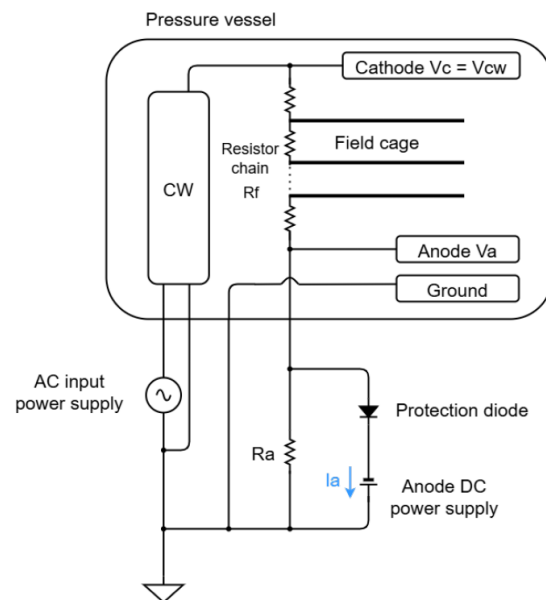
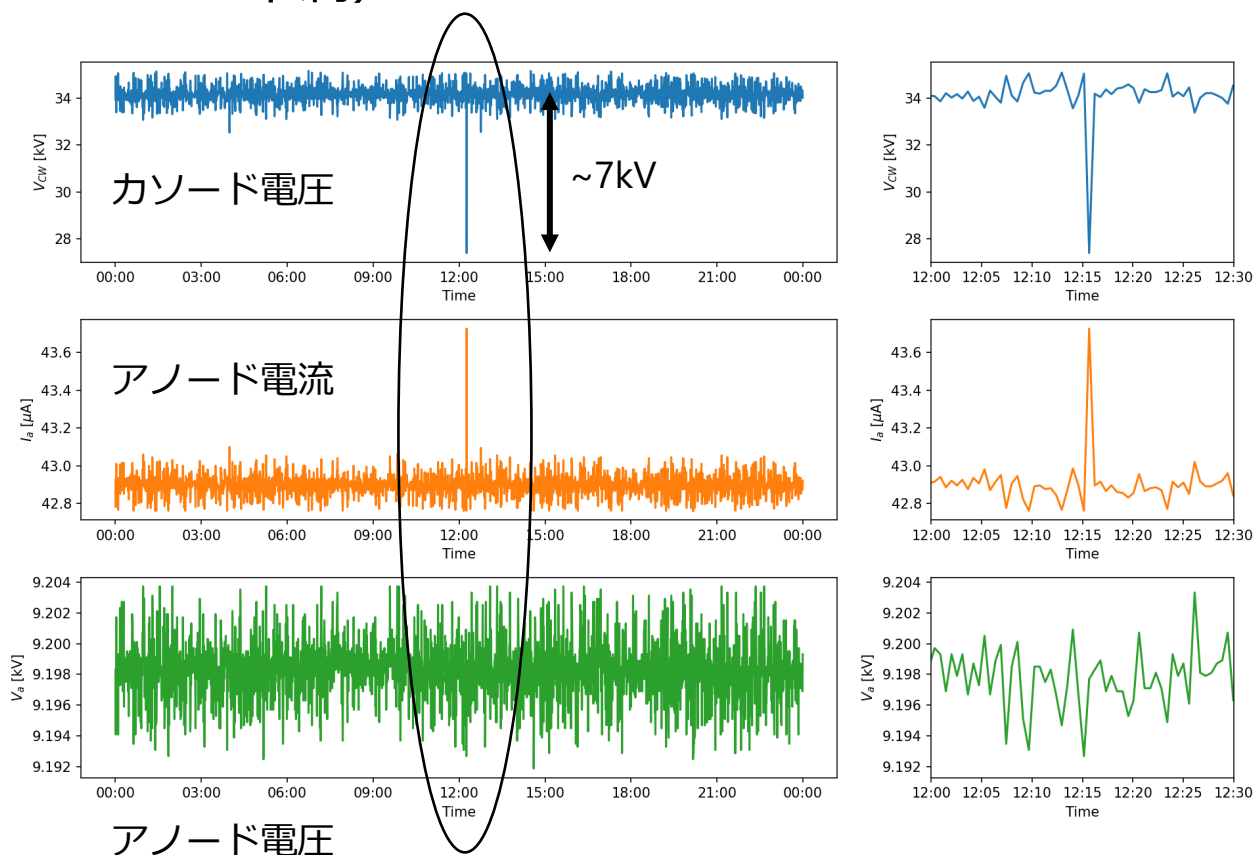


トリウムタングステン棒の設置状況

放電インターロック HDD容量整理 夏季休暇

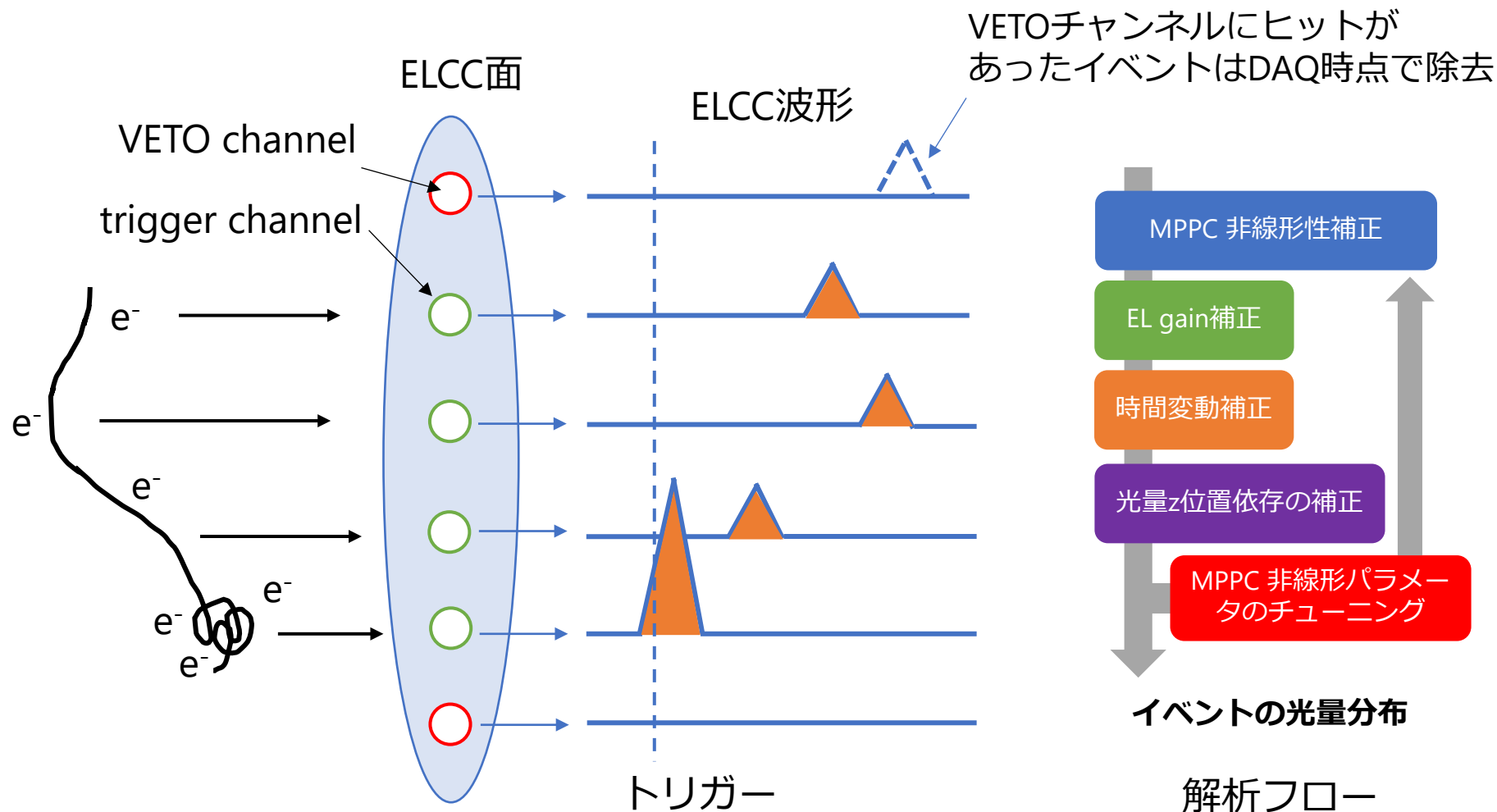


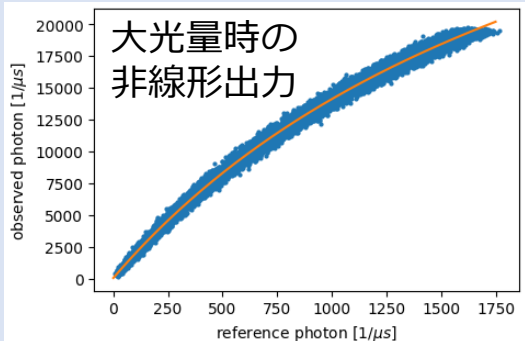
- CW出力電圧は、AnodeDC電源の電圧、電流モニター値から算出
- 放電に伴う瞬間的な電圧低下
 - 日に数回程度で、DAQの停止はなし
- CW回路へのAC入力の、MPPC信号ラインへの影響は見られず（1ADC count 未満）



$$V_{CW} = V_c = \left(1 + \frac{R_f}{R_a}\right) V_a + R_f I_a,$$

- ELCC波形の積分値が光量（エネルギー）に対応
- 各種の補正（MPPCの非線形応答等）を適用

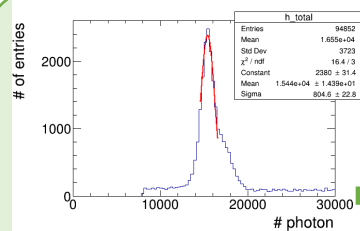




$$N_{\text{cor}} = \frac{N_{\text{obs}}}{1 - \frac{\tau}{\Delta t \cdot N_{\text{pixel}}} N_{\text{obs}}}$$

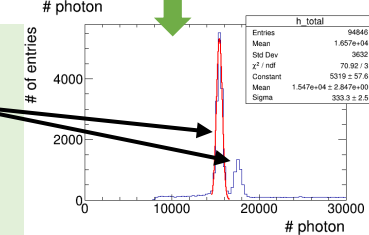
τ : 回復時間
(~70ns)

MPPC非線形性補正

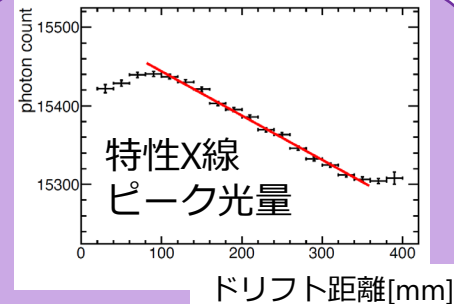


ch毎ゲイン補正

K_{α} K_{β} ピーク
($\Delta E = 4\text{keV}$)
が分離

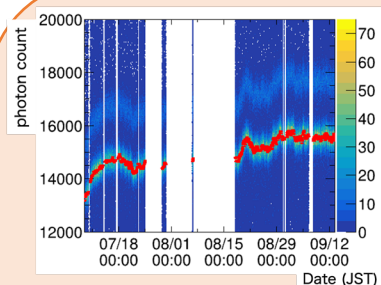


EL gain補正



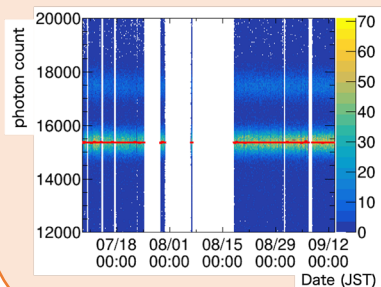
ドリフト距離長
→ attachmentによる信号減少

光量z位置依存の補正

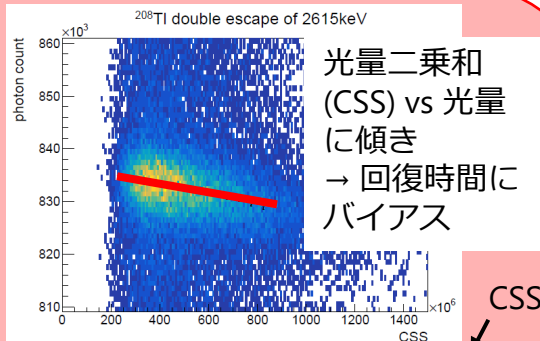


特性X線
ピーク光量
の時間変動

30min毎の
光量を揃える



時間変動補正



$$\sum_i r^i N_{\text{rec}}^i - N_{\text{true}} = \Delta k \sum_i r^i (N_{\text{rec}}^i)^2$$

真の光量からのずれ

$$k = \tau^{(')} / (\Delta t \cdot N_{\text{pixel}})$$

sampling 間隔
MPPC pixel数

MPPC非線形パラメータ
のチューニング

MPPC 非線形性補正

EL gain補正

時間変動補正

光量z位置依存の補正

MPPC 非線形パラメータ
のチューニング

イベントの光量分布

- 光電吸収ピークを線形+ガウシアンフィット
- Q値での分解能を内挿

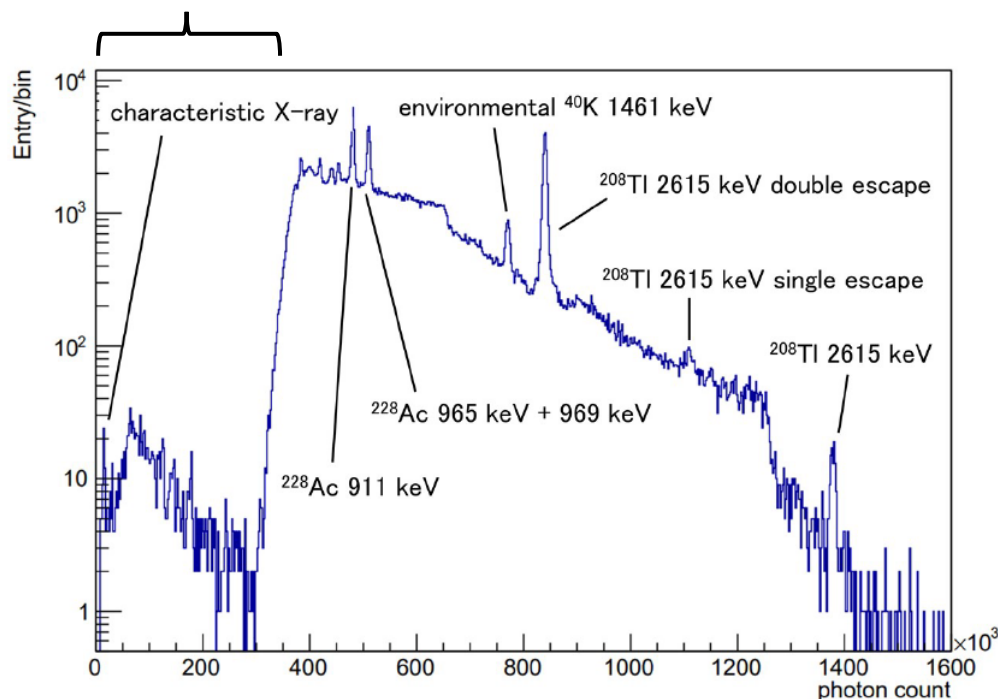
- **$(0.678 \pm 0.010) \% \text{ FWHM for } a\sqrt{E}$**
- $(0.788 \pm 0.077) \% \text{ FWHM for } a\sqrt{E} + bE^2$

統計誤差のみ

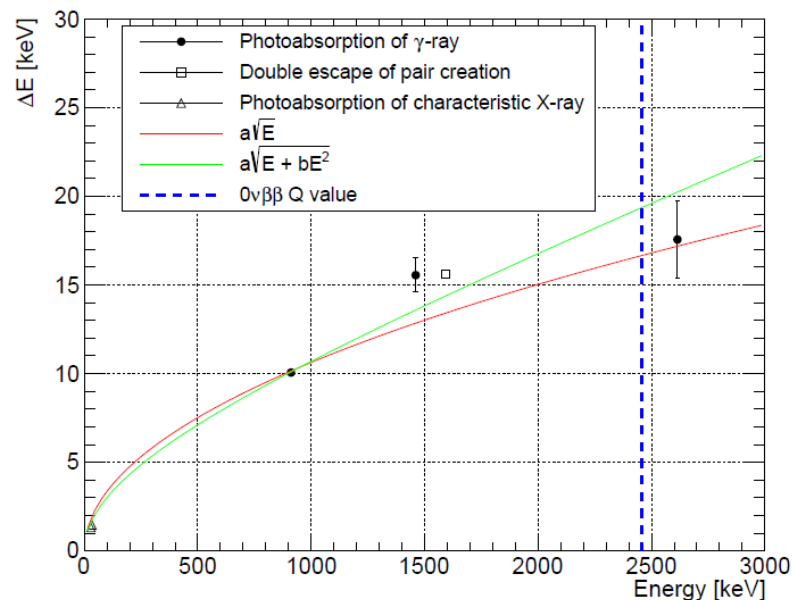
統計誤差 + E比例の系統誤差

CWを用いながら高エネルギー分解能を達成！ [1]

低エネルギー側はダウンサンプリング



イベント光量のスペクトル



分解能の内挿フィット

2615keVでのエネルギー分解能の内訳

20

- 設計電圧90%での運用による分解能の悪化(ELgain低下、再結合)は **0.18%**
- Unknownな寄与が 0.25%

	Contribution
Initial ionization	0.25%
Z mis-reconstruction	0.24%
Fluctuation of the EL generation and detection	0.20%
Error in EL gain calibration	0.18%
Error in time dependence correction	0.18%
Recombination	0.17%
Variation in time bin of time variation correction	0.12%
Offset of the baseline	$\leq 0.11\%$
Error in z dependence correction	$\leq 0.06\%$
Fluctuation of the attachment	$\leq 0.02\%$
Accuracy of the MPPC recovery time	$\leq 0.03\%$
Fluctuation of the MPPC nonlinearity	not yet evaluated
Estimation total	(0.52-0.54)%
Data total	(0.67 \pm 0.08)%

設計電圧
100%の場合
0.19 %

~ 0 %

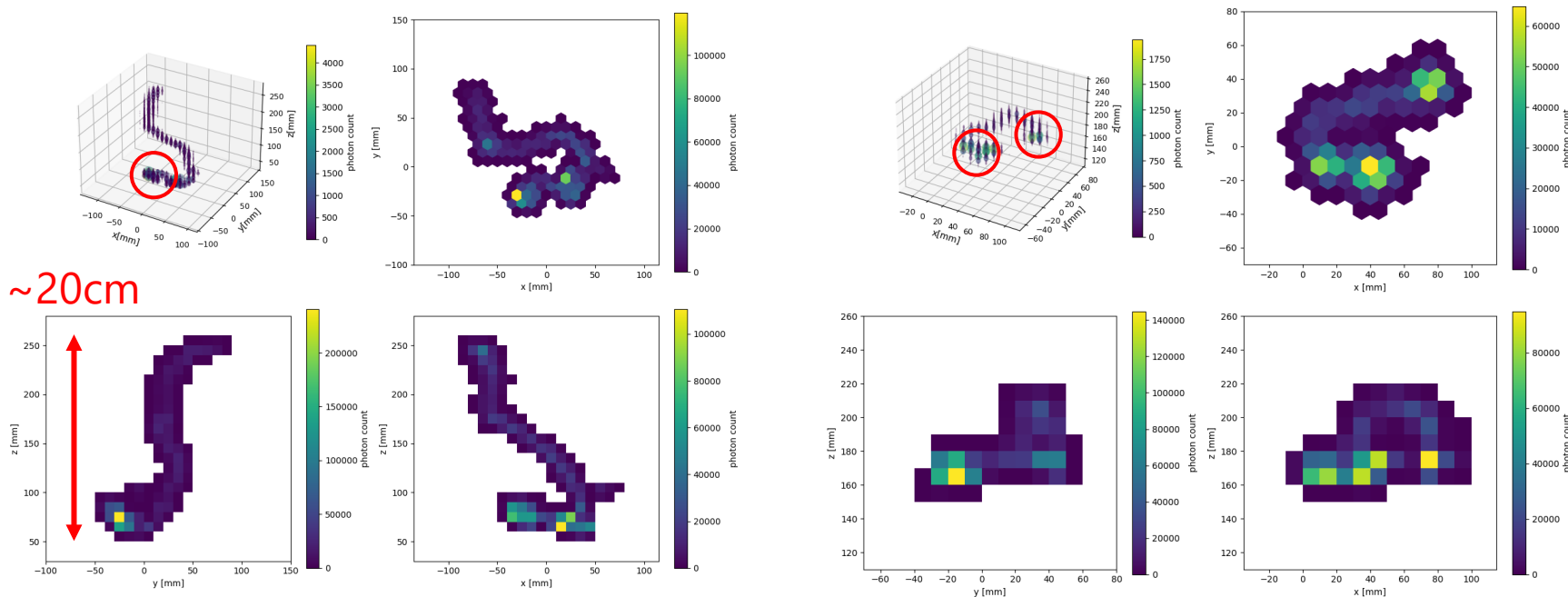
- 再構成されたトラック

- 2.6MeVでは xyz 各辺~20cm程度の広がり (6.8bar Xe に対するCSDA rangeは~50cm)

- 粒子数によるトラック終端の「blob」の違い

- 光電吸収イベント (1電子) はトラック終端のblobが**1個**
- ダブルエスケープイベント (1電子、1陽電子)はblobが**2個**

→ 飛跡情報を用いた $0\nu\beta\beta$ (2blob)とBG(1blob)の識別に利用

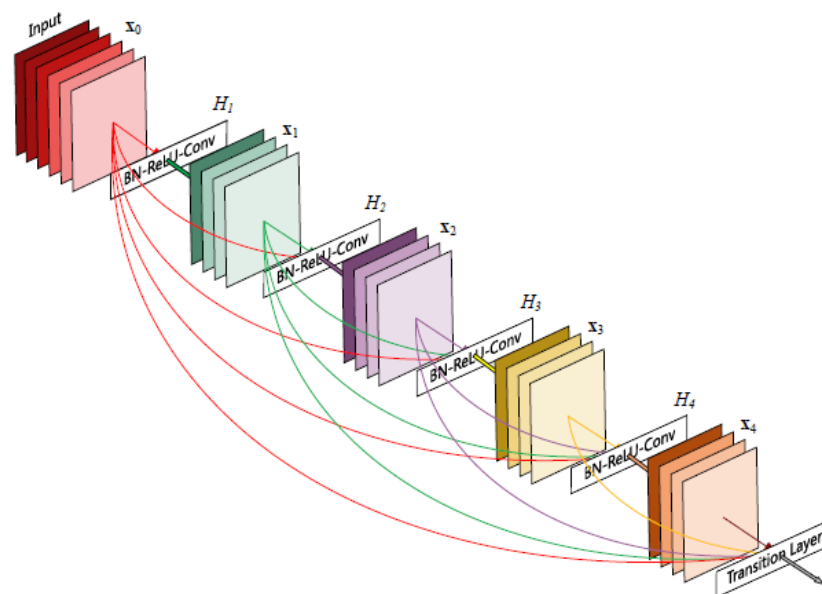
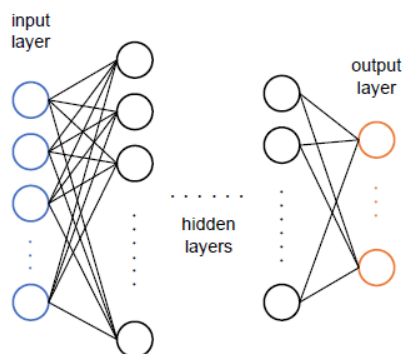
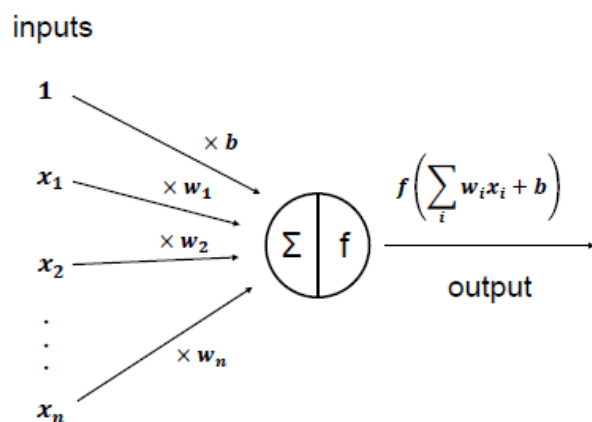


2615keVイベント

1593keVイベント
(ダブルエスケープ)

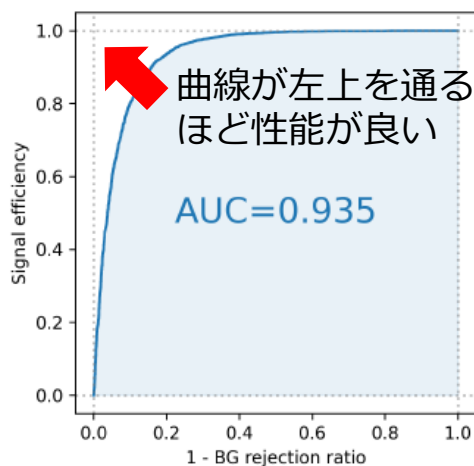
- Introduction
- AXEL experiment
- Cockcroft-Walton multiplier による高電圧生成
- 機械学習を用いた信号-バックグラウンド識別
- Results/Discussion
- まとめ

- 脳の神経細胞を模したネットワーク
- 各層のニューロンの線形結合 + 非線形関数の組み合わせ
- 線形結合の重みを調整することで (入力-出力) 関係を近似
- 本研究ではDenseNet[1] を3D化したものを使用
→ トラックを3次元格子データに変換してモデルへ投入



[1] arXiv:1608.06993 [cs.CV]

- モデルが出力する、信号(0vββ)、バックグラウンド確率と、正解ラベルをもとに評価
- Accuracy
 - データを正しく分類できた割合
 - 0vββとバックグラウンドの閾値は、確率0.5
- Receiver operating characteristic (ROC) curve
 - 閾値を変化させながら、True positive rate (Signal efficiency) と False positive rate (1-BG rejection ratio) をプロット
 - 理想的な場合、左上隅に張り付いたカーブになる
 - カーブ下の面積 Area Under the Curve (AUC) で評価



ROC曲線の例

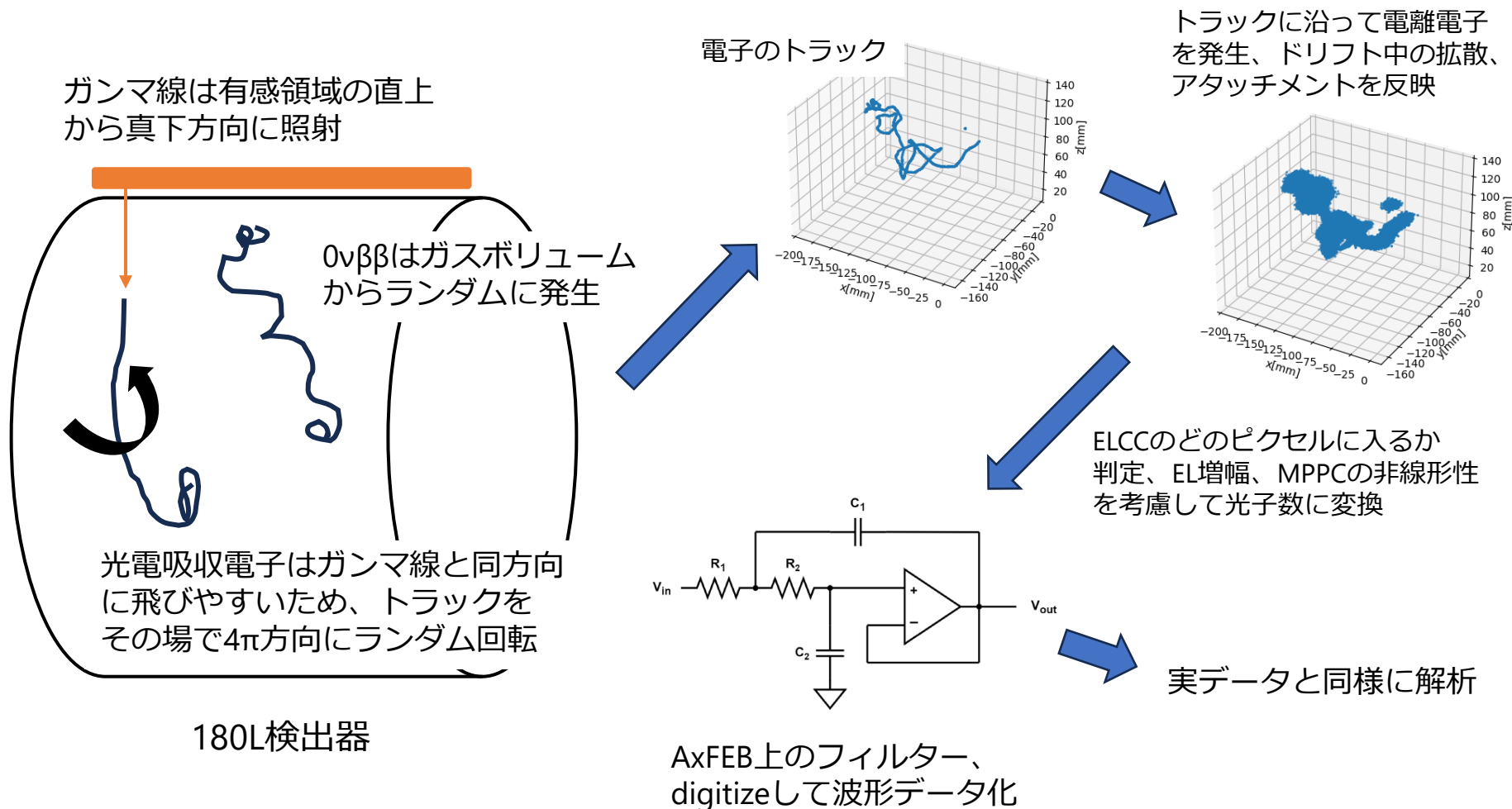
		モデルの出力	
		0vββ	BG
		Prediction	
		Positive	Negative
Label	Positive	TP	FN
	Negative	FP	TN
正解			

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{TP} + \text{TN}}{\text{TP} + \text{FP} + \text{TN} + \text{FN}}$$

$$\text{FPR} = \frac{\text{FP}}{\text{FP} + \text{TN}} = 1 - \frac{\text{TN}}{\text{FP} + \text{TN}}$$

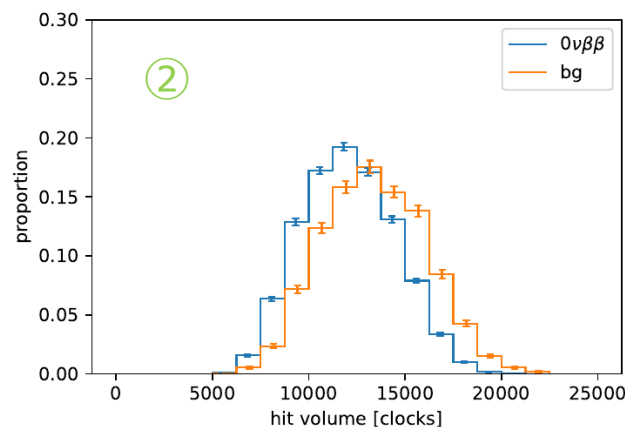
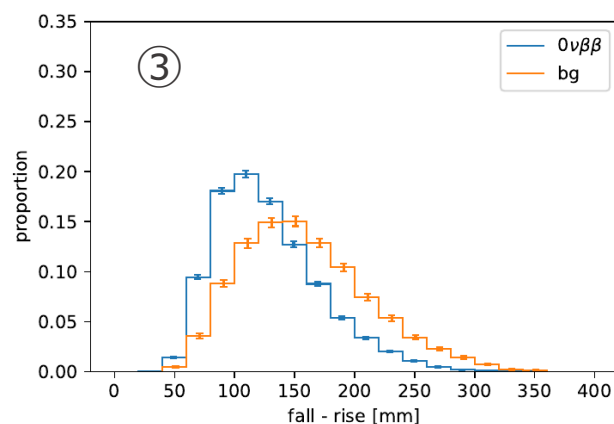
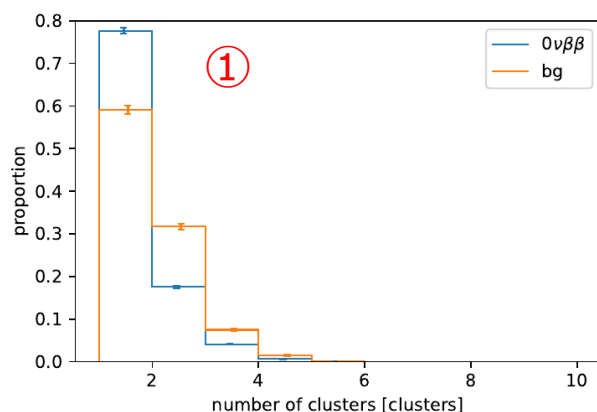
$$\text{TPR} = \frac{\text{TP}}{\text{TP} + \text{FN}}$$

- Geant4で $0\nu\beta\beta$ と γ 線由来のBGをGeant4を用いてシミュレーション
- 実測データと比較するために、 $0\nu\beta\beta$ 、 γ 線ともに、エネルギーは ^{208}Tl の2615keV に設定

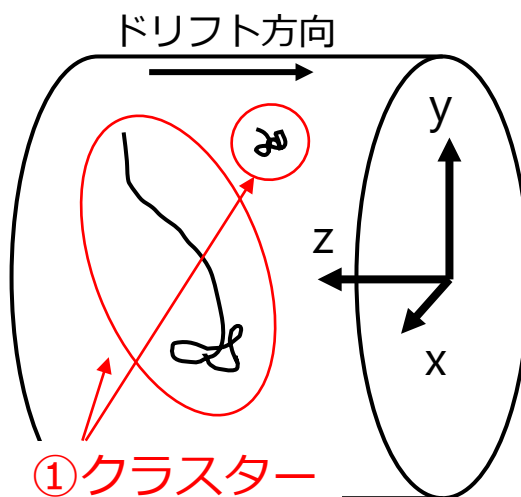


・ シミュレーションデータの $0\nu\beta\beta$ とBGの比較

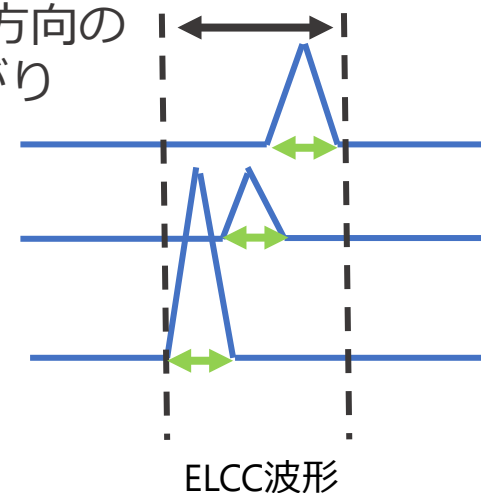
- ① クラスター数 : $0\nu\beta\beta < \text{BG}$ (コンプトン効果の有無、制動放射の頻度)
- ② トラック体積 : $0\nu\beta\beta < \text{BG}$ (電子の飛跡の長さ)
- ③ トラックのz方向の広がり : $0\nu\beta\beta < \text{BG}$ (電子の飛跡の長さ)



②全ヒットの
クロック数の合計
→トラック体積



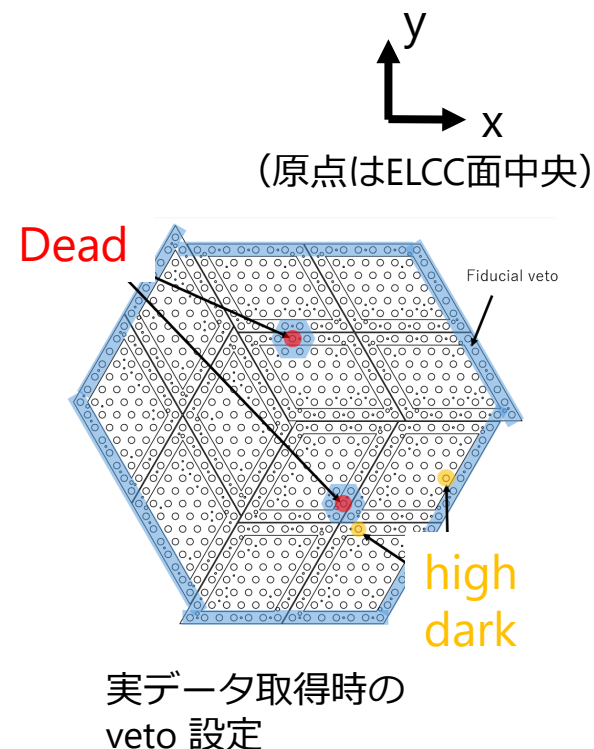
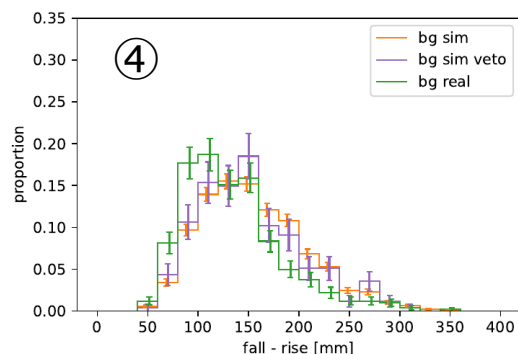
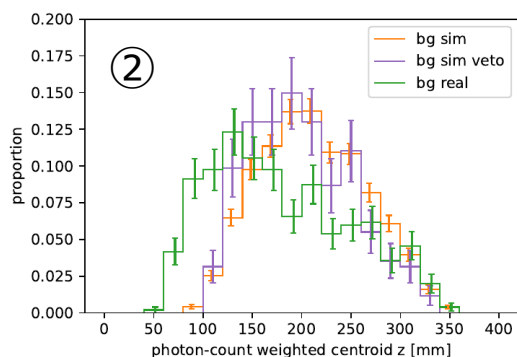
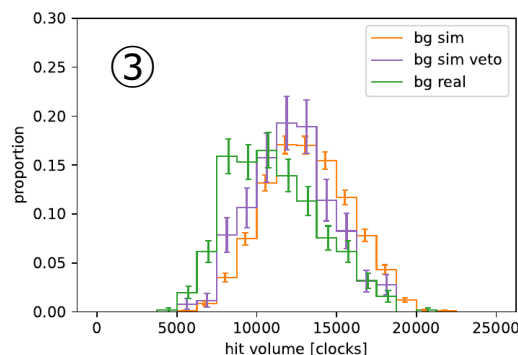
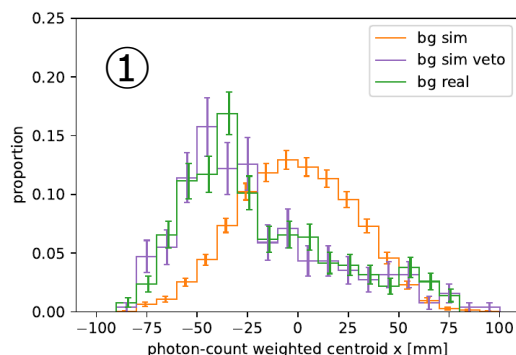
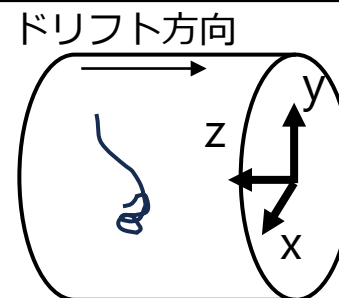
③ z方向の
広がり



- シミュレーションのBGと実データのBGの比較

- ① 光量のx方向重心：実データ < シミュレーション
- ② 光量のz方向重心：実データ < シミュレーション
- ③ トラック体積：実データ < シミュレーション
- ④ z方向の広がり：実データ < シミュレーション

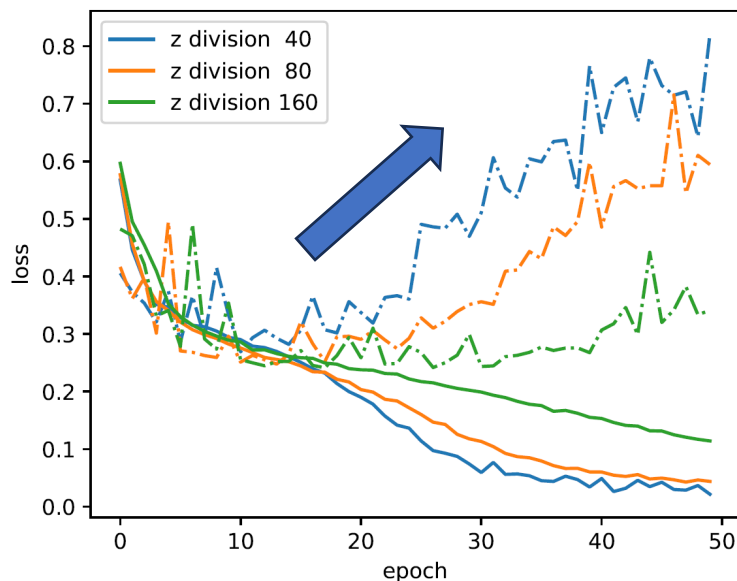
- シミュレーションデータから、dead周囲、high darkの veto にヒットのあるイベントを除去 → x方向重心は実データに漸近、トラック体積、z位置については一致せず



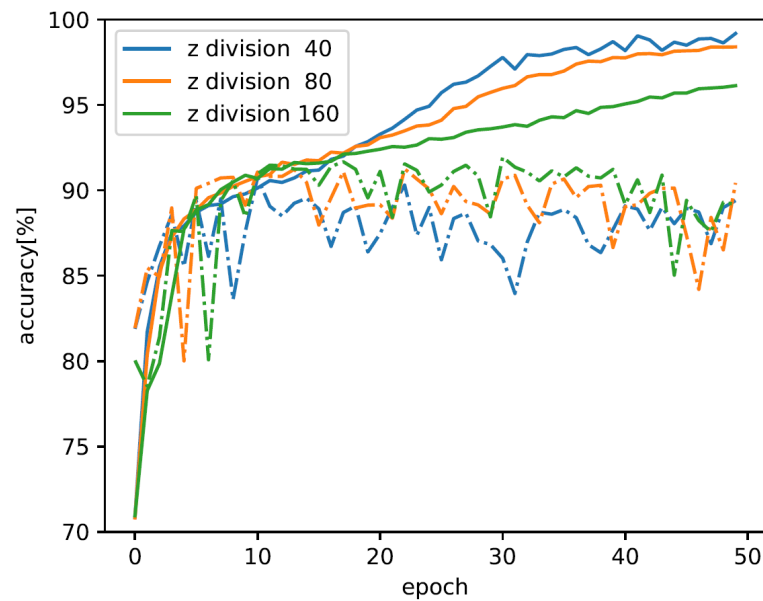
- Introduction
- AXEL experiment
- Cockcroft-Walton multiplier による高電圧生成
- 機械学習を用いた信号-バックグラウンド識別
- Results/Discussion
- まとめ

- トラックの光量の規格化方法、z方向の分割数を変化させながらトレーニングを実施
- バリデーションデータに対して、Accuracy **91.7%** を達成

10~20 epoch以降
で過学習傾向

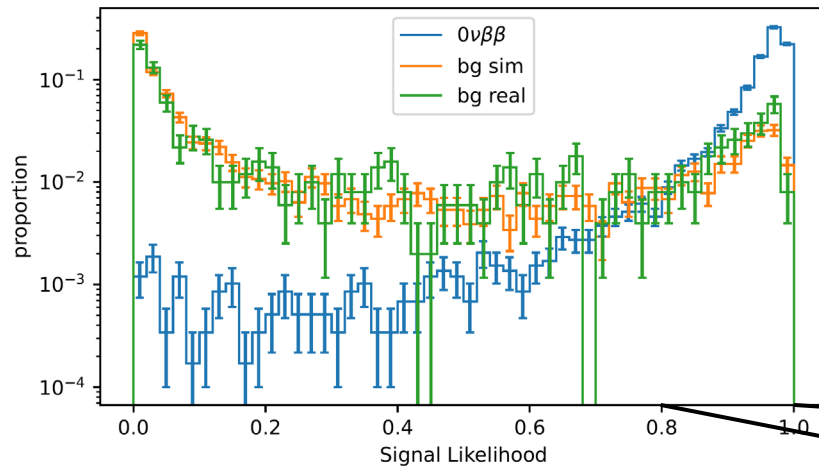


実線：トレーニングデータ
破線：バリデーションデータ



学習曲線（z方向の分割数）

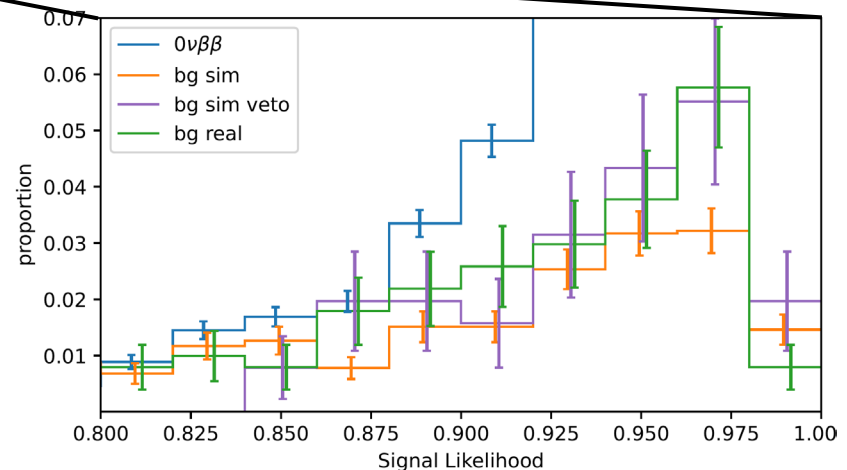
- モデルが出力する、「トラックがsignal ($0\nu\beta\beta$) である確率」の分布
- $0\nu\beta\beta$ は~1に、バックグラウンドは~0に分布するのが理想
- 実データ（バックグラウンド）の方が、signal likelihood が大きい領域の頻度が多い → validationデータへのveto適用により分布が漸近



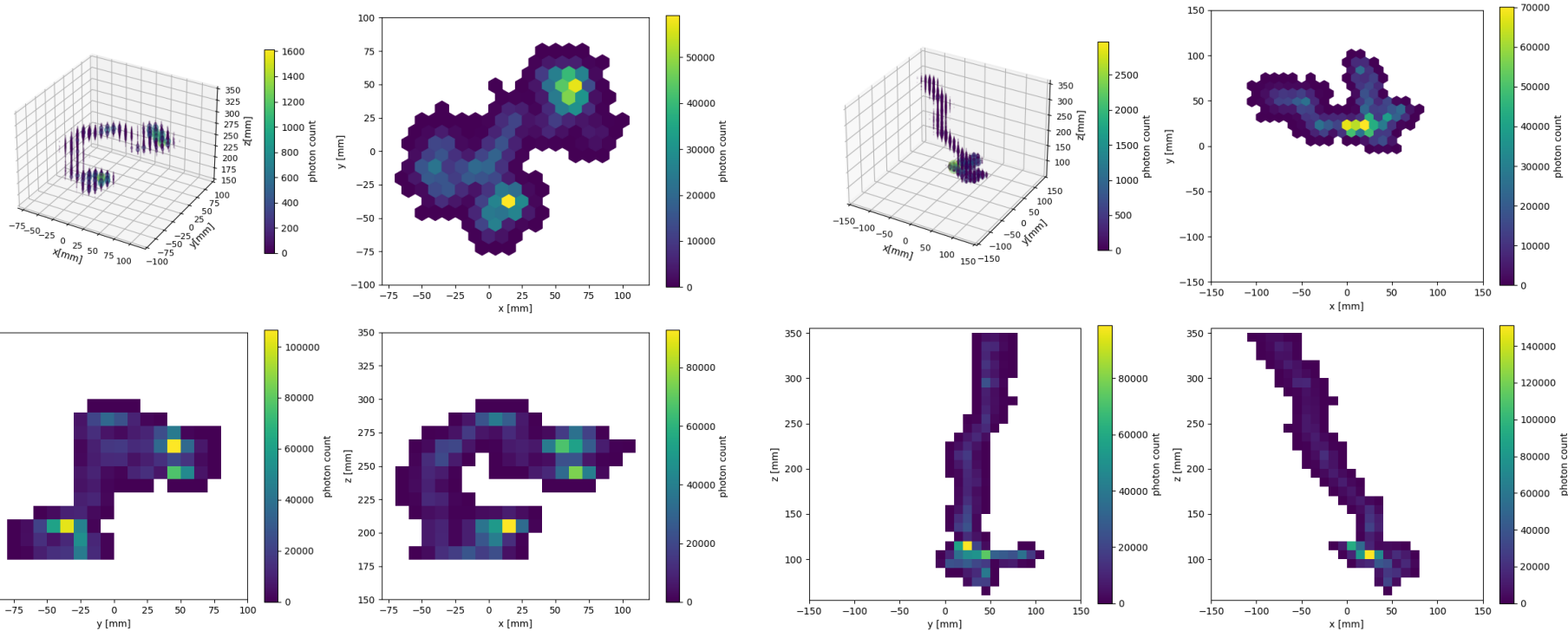
シミュレーション（橙）と
実データ（緑）にずれ

シミュレーション（橙）に
vetoを適用（紫）すると
実データ（緑）に漸近

→ vetoによる有感領域への
バイアスが分布を歪めた主要因



- BGイベントだが、2プロブのイベントや、 $0\nu\beta\beta$ だが1プロブに見えるイベントが見られる→自然な間違い方をしている



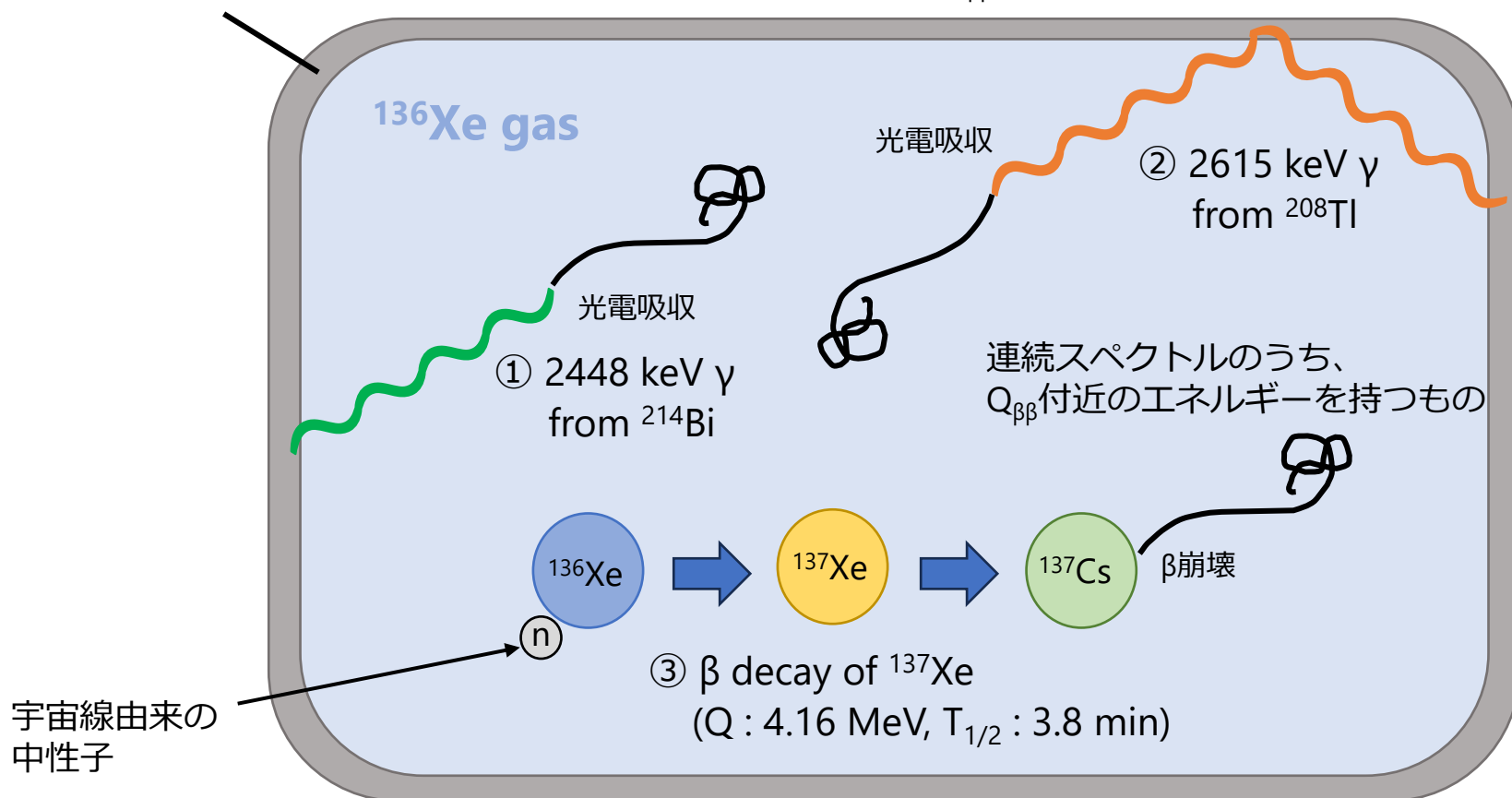
BGだが $0\nu\beta\beta$ ライクなイベント

$0\nu\beta\beta$ だがBGライクなイベント

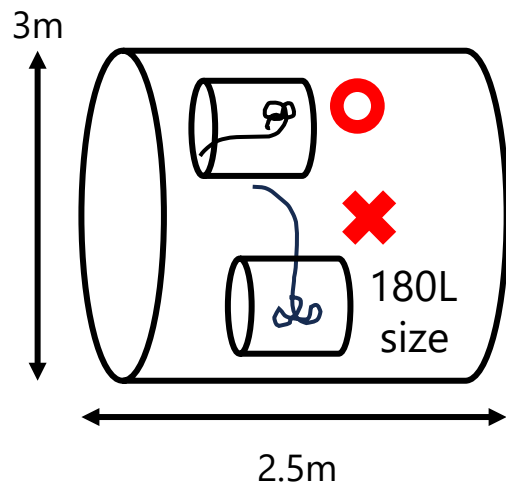
- 将来の1トン検出器での $0\nu\beta\beta$ 探索の感度を評価
- 3種類のバックグラウンド(^{214}Bi , ^{208}Tl , ^{137}Xe)を考慮

圧力容器には、ウラン系列 (^{214}Bi) 、
トリウム系列 (^{208}Tl) の放射性BGが含まれている

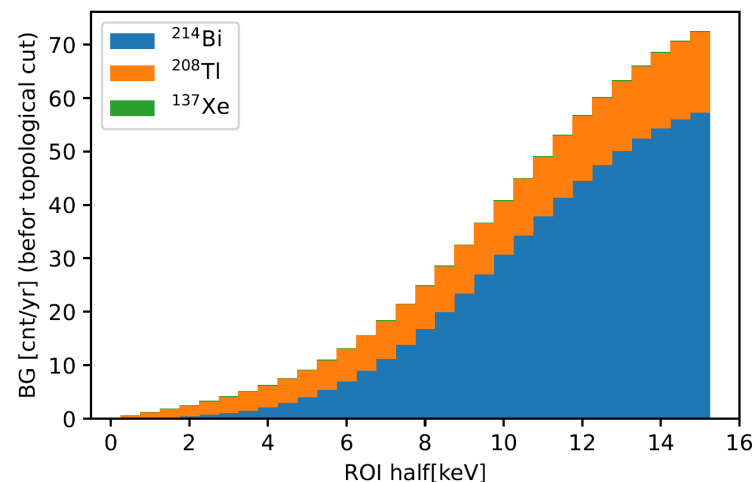
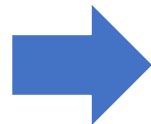
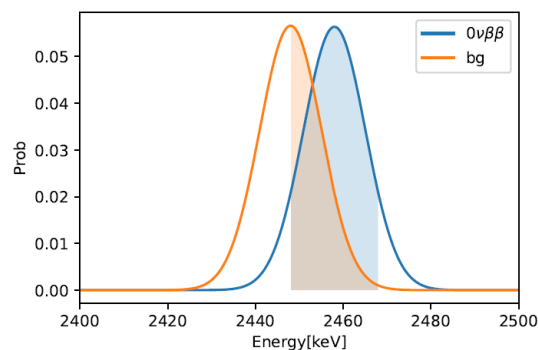
コンプトン散乱によってエネルギーを落とし、
 $Q_{\beta\beta}$ 2458 keV 付近のエネルギーを持つもの



Volume cut



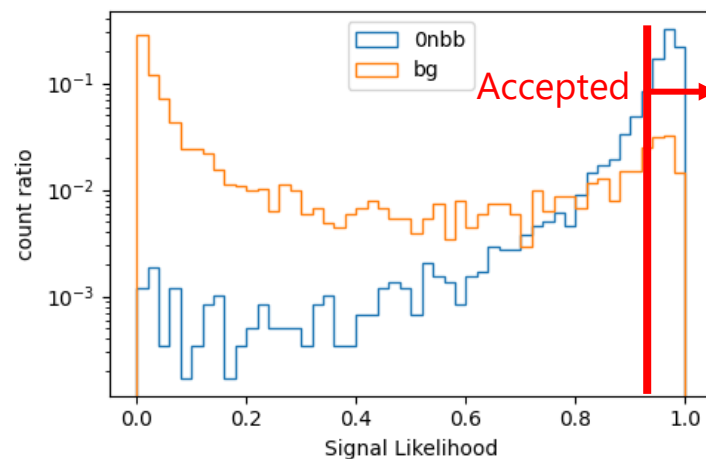
ROI cut



Topological cut (DL)

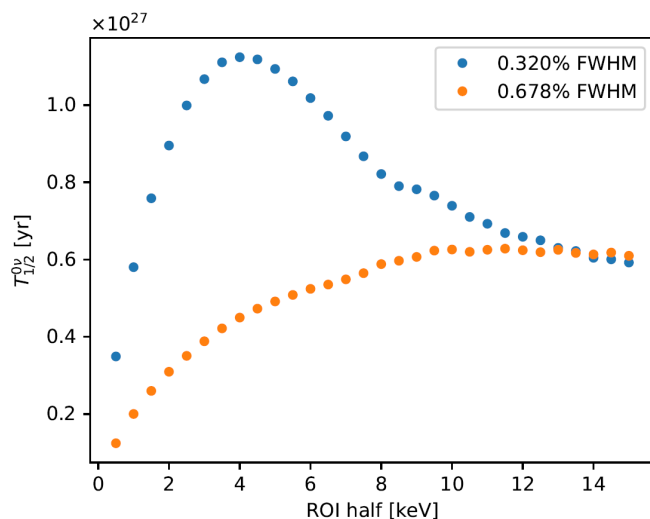


thresholdを変えながら
最大感度を評価



- 2種類の材質の圧力容器（SUS304, 無酸素銅）を仮定
- 本研究で得られたエネルギー分解能（0.678%）および、今後の改善を見込んだ分解能（0.320%）で評価
- 各ROI幅を仮定した場合の10年での探索感度

- SUS304
 - 9.61×10^{25} year (0.678% FWHM)
 - 3.57×10^{26} year (0.320% FWHM)
- 無酸素銅
 - 6.28×10^{26} year (0.678% FWHM)
 - 1.12×10^{27} year (0.320% FWHM)**



無酸素銅圧力容器でのROI幅に対する感度変化

	無酸素銅容器 0.320%分解能
片側 ROI 幅	4.0 keV
トポロジークット threshold	0.931
トポロジークット効率 $0\nu\beta\beta$	0.757
トポロジークット効率 BG	0.086
BG数 ^{214}Bi	2.2
BG数 ^{208}Tl	4.0
BG数 ^{137}Xe	0.033
信号上限値	5.3

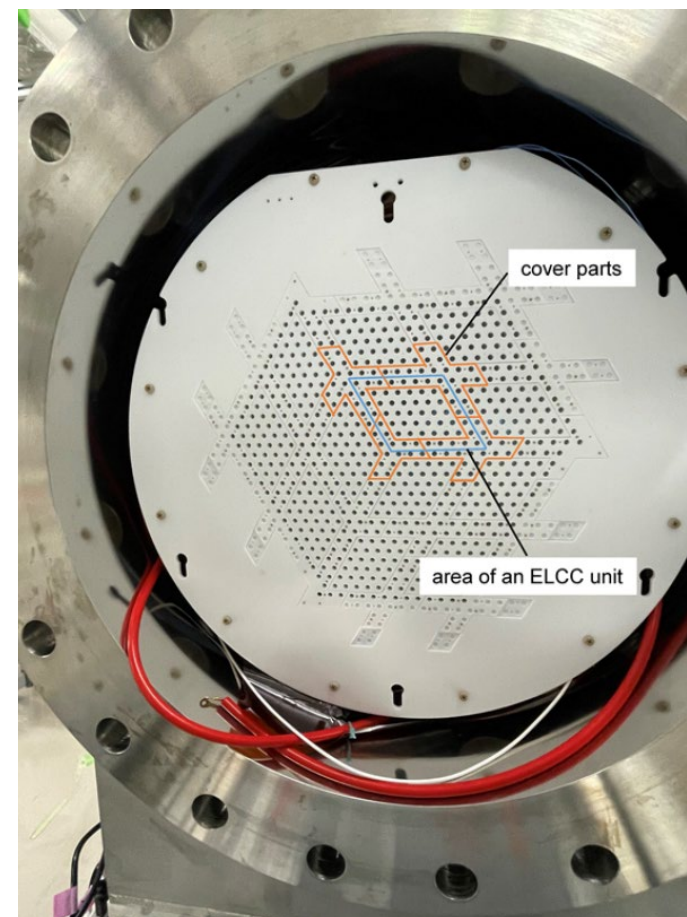
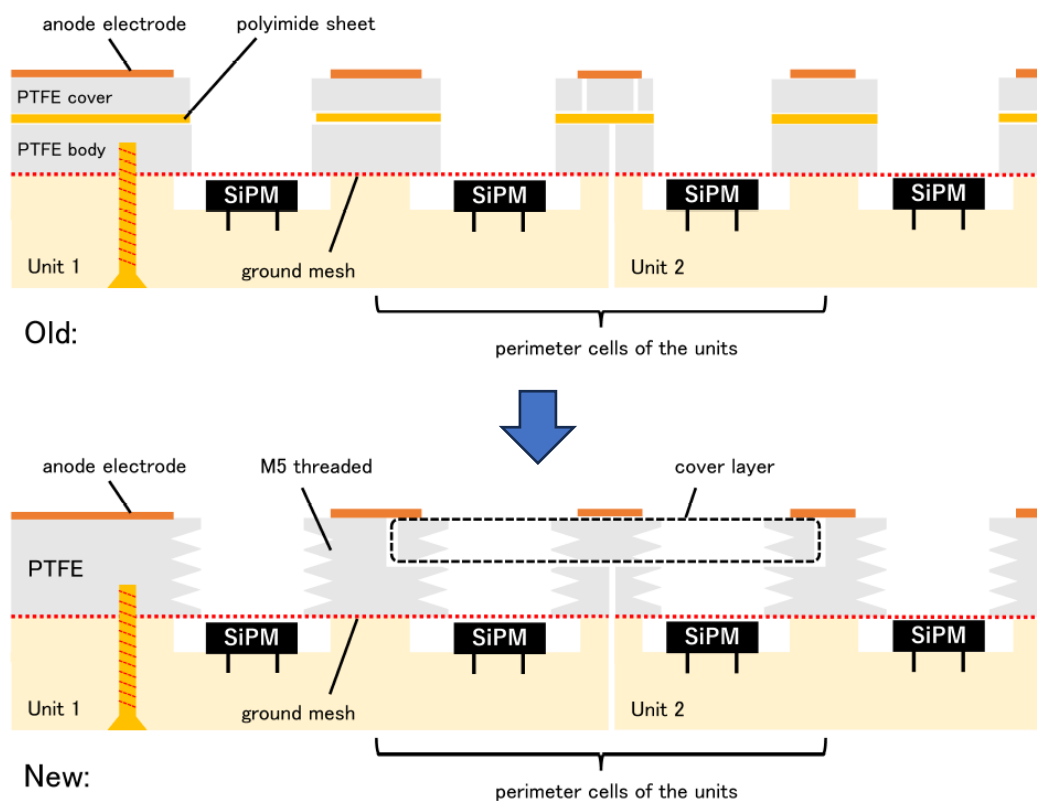
- Introduction
- AXEL experiment
- Cockcroft-Walton multiplier による高電圧生成
- 機械学習を用いた信号-バックグラウンド識別
- Results/Discussion
- まとめ

- ニュートリノのマヨラナ性の検証は、ニュートリノ質量、宇宙の物質・反物質非対称性を理解する鍵
- AXEL実験
 - 高圧キセノンガスTPCを用いた ^{136}Xe の $0\nu\beta\beta$ 探索
 - 大型化に向けた技術開発
- CW回路
 - 圧力容器内部での高電圧生成 → 高耐圧フィードスルーが不要、大型化に重要
 - 入力AC電源からのMPPC信号へのノイズの影響なし
 - 安定的に40日間のデータ取得を達成 → 出力モニターしながらの運用は世界初[1]
- DeepLearning
 - シミュレーションデータセットでDenseNetベースのモデルをトレーニング
 - 実データとの差異を検証 → Vetoによる分布変化、Z位置や体積は再現性が悪いがlikelihoodの分布は漸近
- 将来の1トン検出器での感度予想
 - SUS304、無酸素銅圧力容器、10年の観測期間
 - エネルギー分解能は実測ベース（0.678%）と改善見込み（0.320%）を仮定
 - バックグラウンド源として ^{214}Bi , ^{208}Tl , ^{137}Xe を考慮
 - DeepLearningによるトポロジークットを用いることで、 1.12×10^{27} year の感度が見込まれる

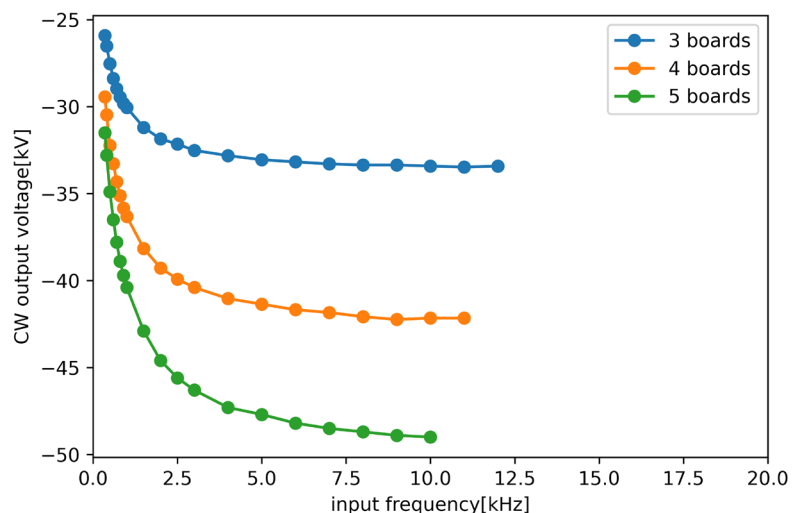
ELCC upgrade

38

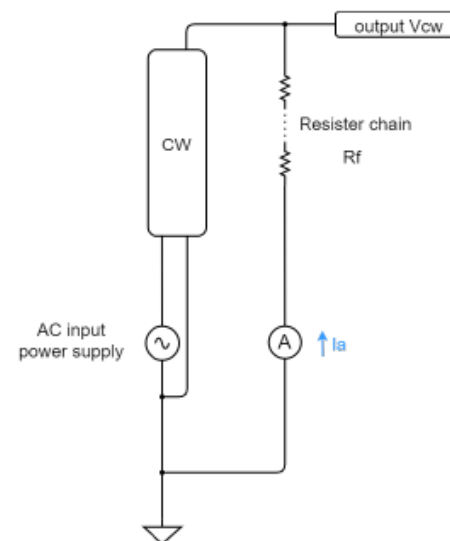
- タップ穴+ユニット辺縁を別パーツでカバーすることで放電経路を延長



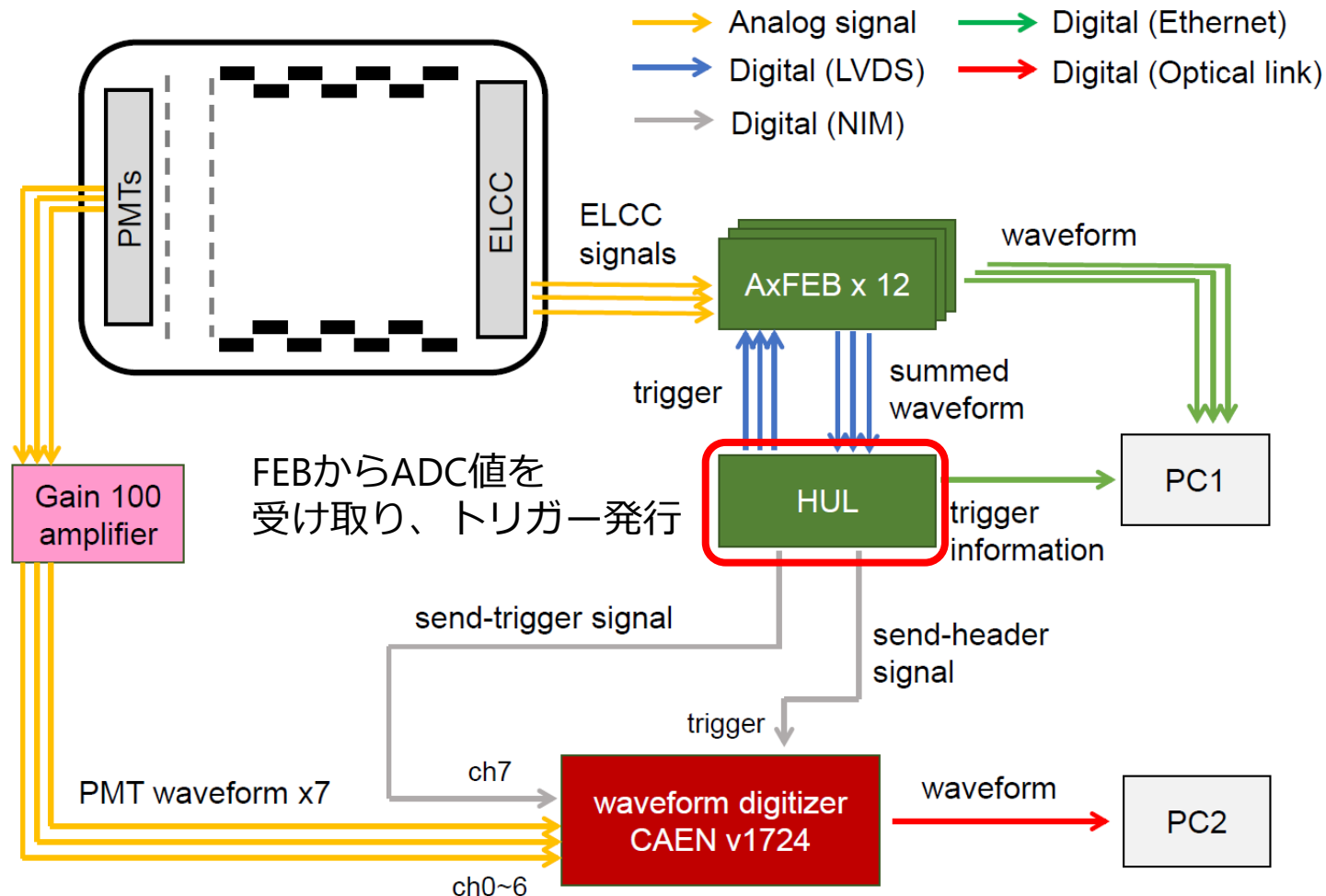
- 空気中で、昇圧試験を実施
 - 抵抗チェーンを流れる電流から出力電圧を算出
 - 多段化による昇圧を確認
 - 入力周波数増に従って出力電圧増
 - 周波数上昇に伴い、CWの入力に使用しているアンプが不安定化
- 容量性負荷による電流リミット、180L検出器での運用には問題なし

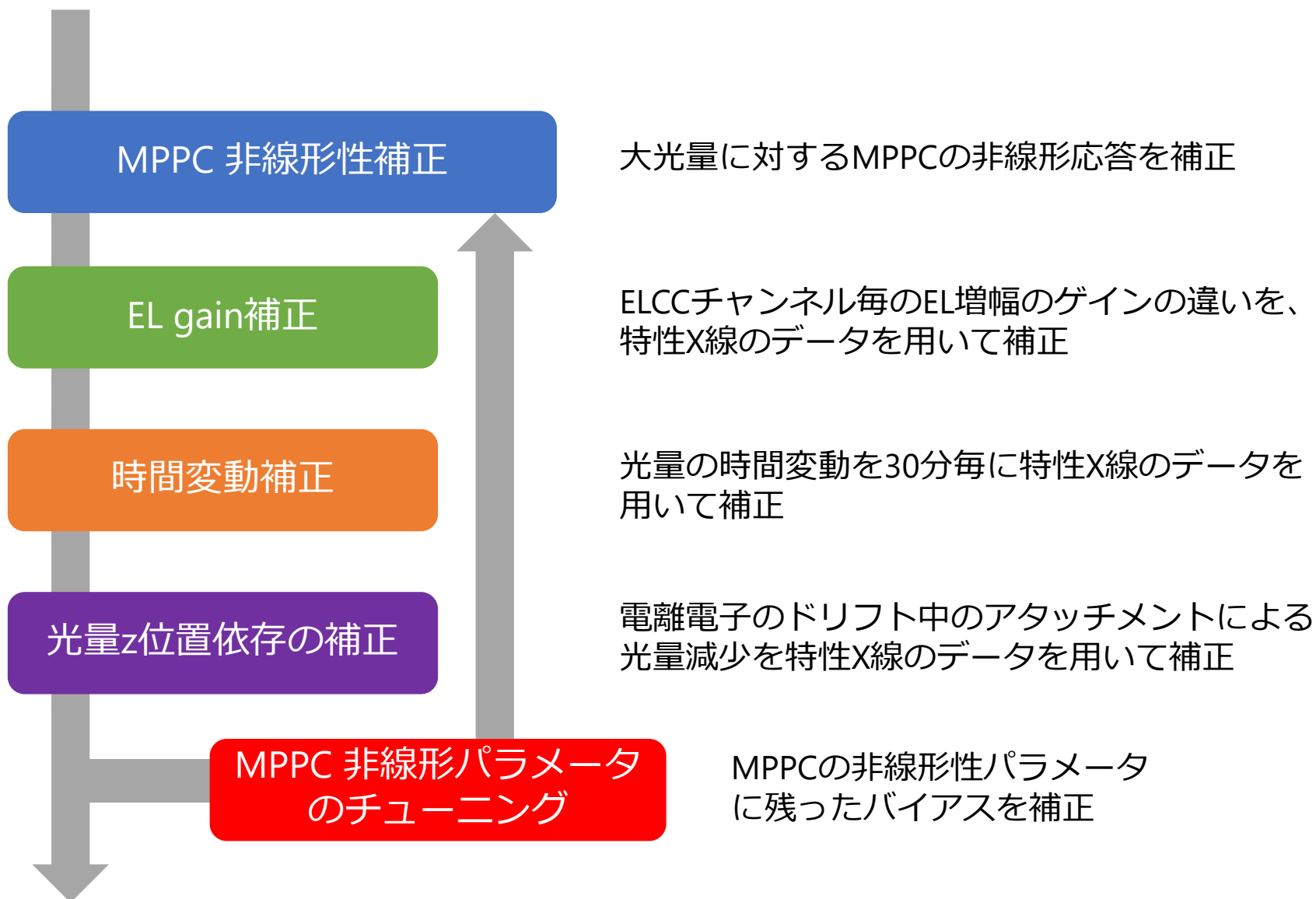


1200Vpp入力時のCW出力電圧

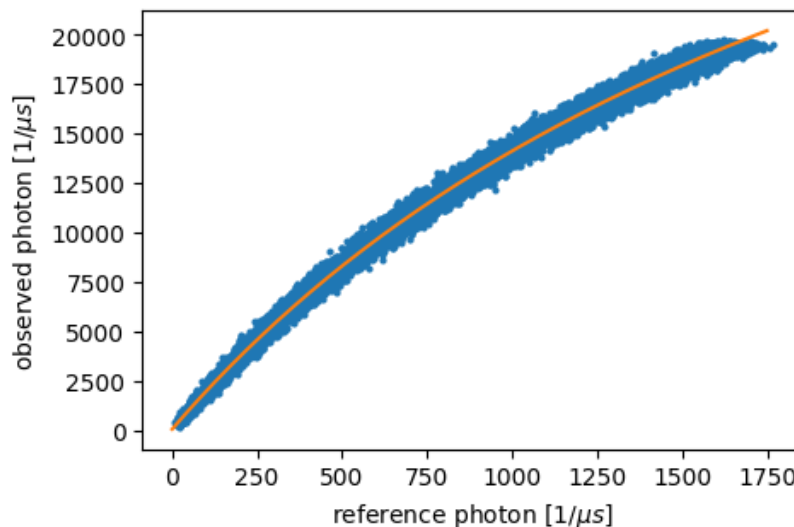


- ELCC波形のADC値合計がthresholdを超えるとトリガーを発行、波形を記録する
- fiducial trigger rate : 平均10.5Hz





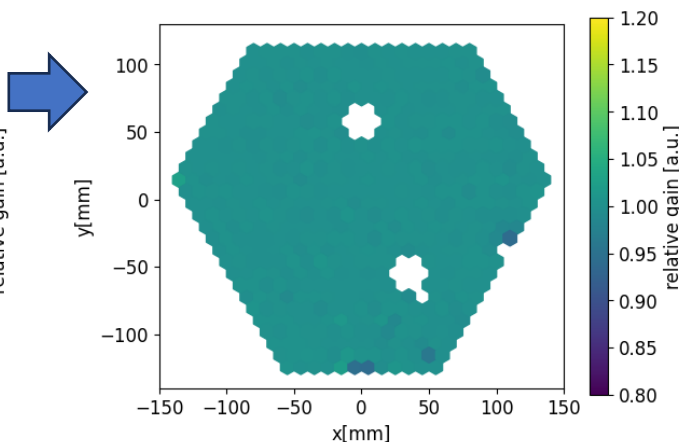
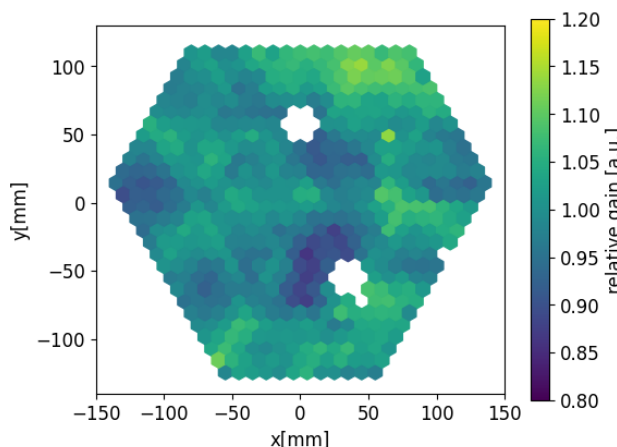
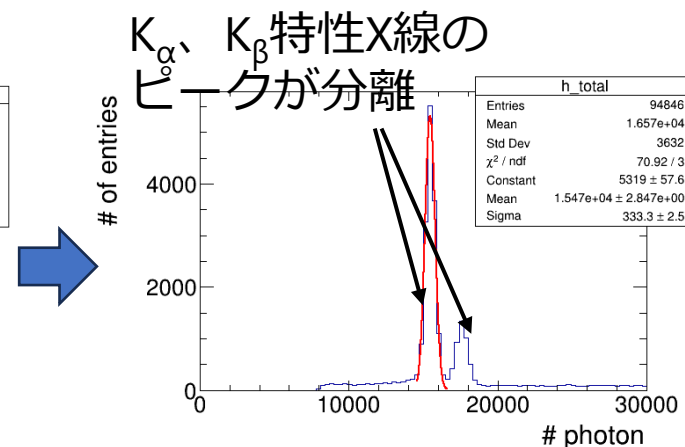
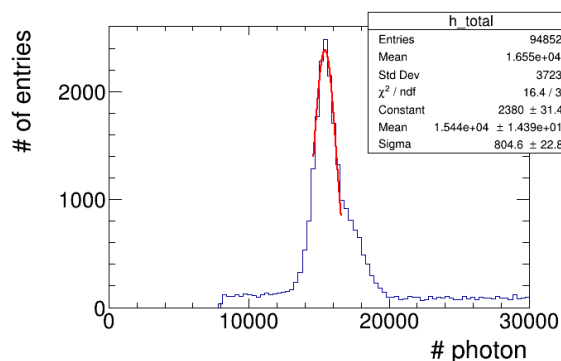
- 大光量時のMPPC出力信号の線形からのずれ
- LEDを用いたキャリブレーションで得た回復時間を使用



$$N_{\text{cor}} = \frac{N_{\text{obs}}}{1 - \frac{\tau}{\Delta t \cdot N_{\text{pixel}}} N_{\text{obs}}}$$

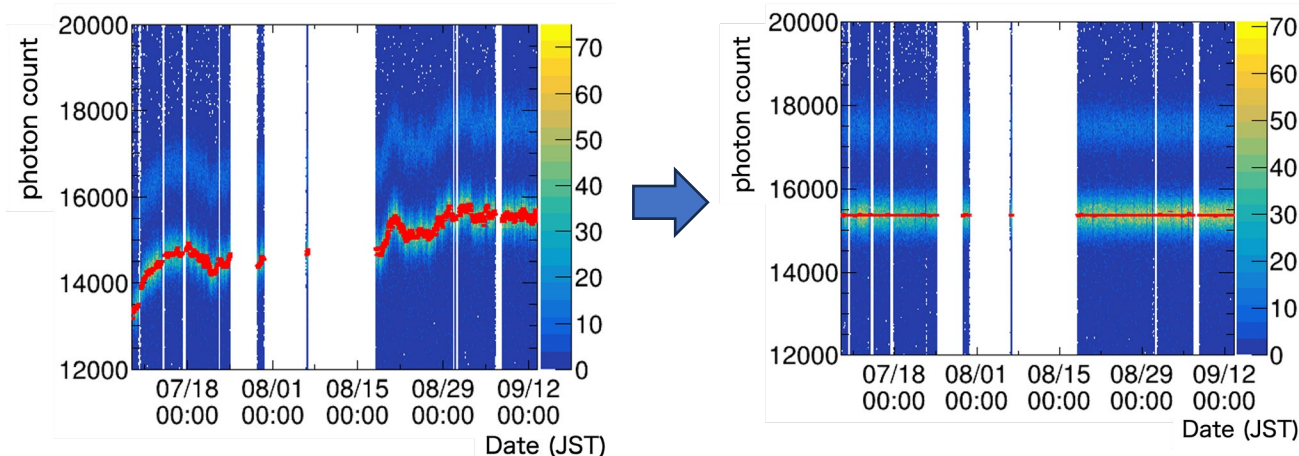
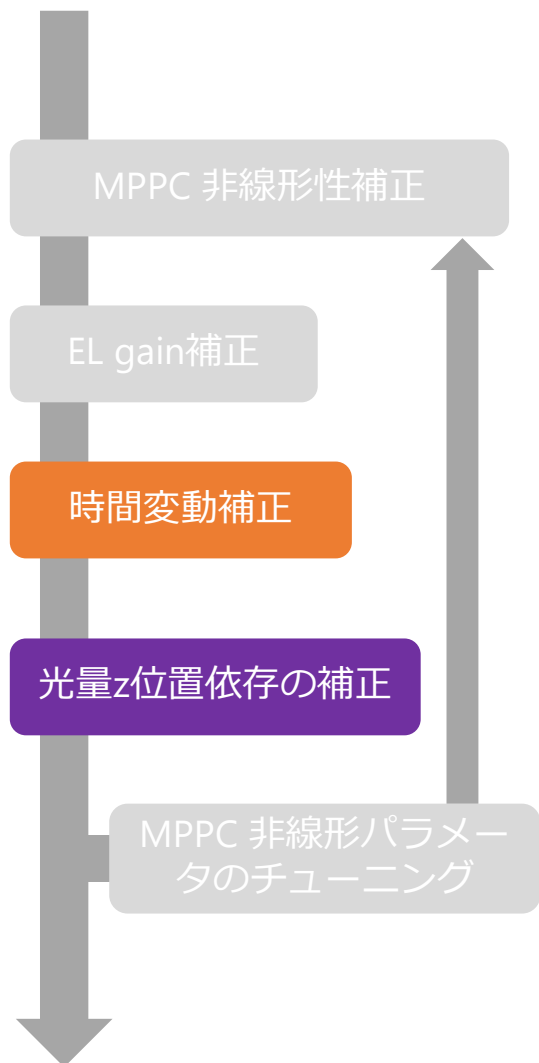
τ : MPPC回復時間
典型的な値（ $\sim 70\text{ns}$ ）

- ELCCチャンネル毎のEL増幅の違いを補正
- 各チャンネルの $K\alpha$ 線のピークが一致するように補正係数をかける

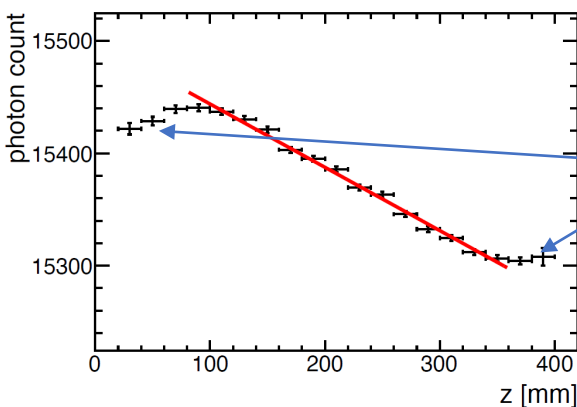


各チャンネルの相対ゲイン

- ガス純度等による光量の時間変動の補正
- attachmentの効果による光量のz位置依存性の補正



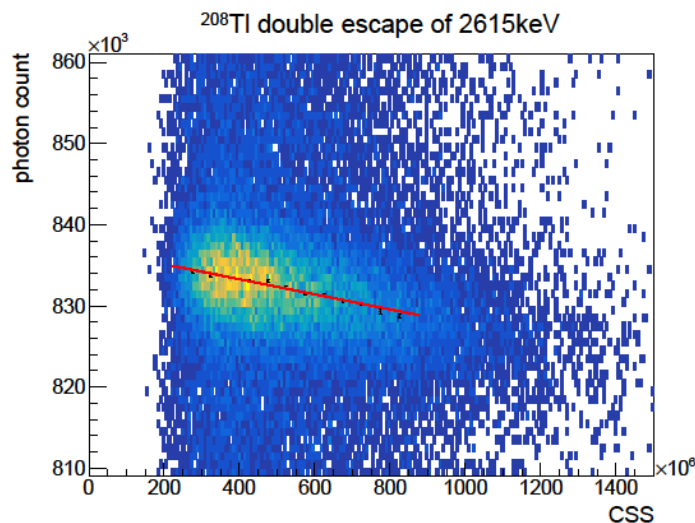
$K\alpha$ 特性X線ピークの時間変化



z 位置再構成のミス
MPPC非線形性補正の不足

$K\alpha$ 特性X線ピークのz位置依存性

- MPPC回復時間にバイアス→光子数 vs 各サンプリングの光子数の二乗和のプロットに傾き
- MPPC回復時間をシフトして再度非線形性補正からやり直す



非線形性補正後の光子数 $\sum_i r^i N_{\text{rec}}^i$

真の光子数 N_{true}

その他の補正係数 k

MPPC回復時間 $\tau^{(t)}$

サンプリング間隔 Δt

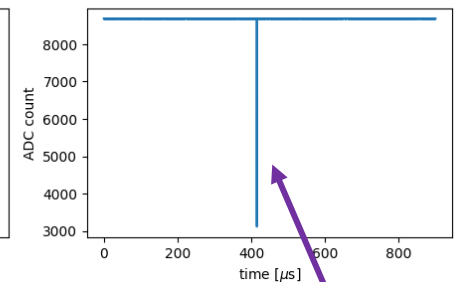
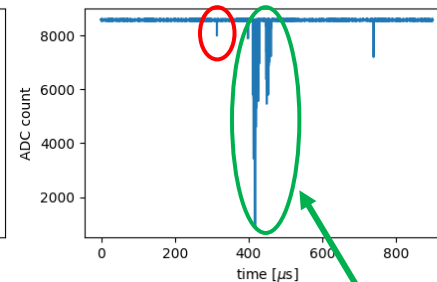
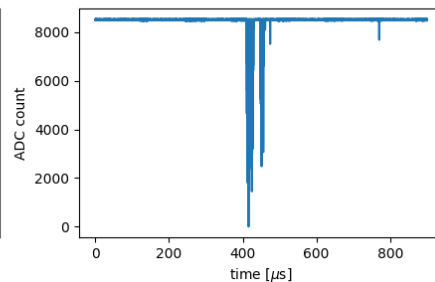
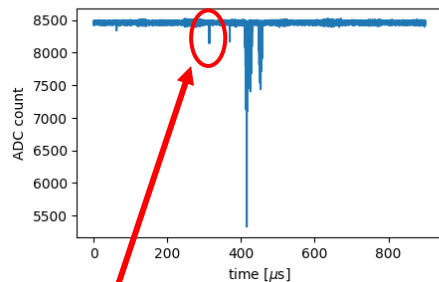
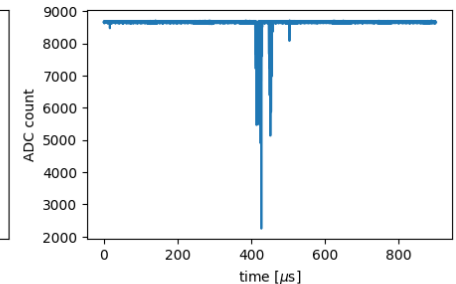
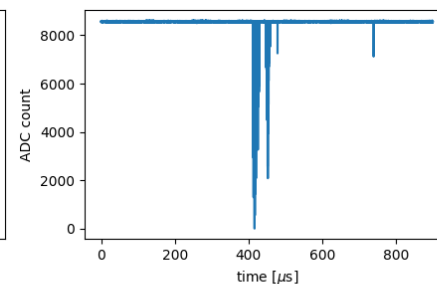
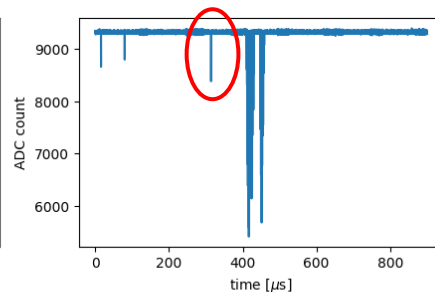
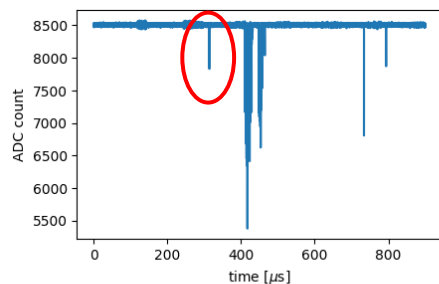
MPPCピクセル数 N_{pixel}

$$\sum_i r^i N_{\text{rec}}^i - N_{\text{true}} = \sum_i \frac{r^i N_{\text{obs}}^i}{1 - k' N_{\text{obs}}^i} - N_{\text{true}} \simeq \Delta k \sum_i r^i (N_{\text{rec}}^i)^2$$

$$k = \tau^{(t)} / (\Delta t \cdot N_{\text{pixel}})$$

CSS

- 幅400ns以下、他と1 μ s以上離れているヒット(scintillation-like hit)
- 100ns範囲で2個以上 coincidence しているクラスターが1個
- 複数トリガーが発行されていない
- シンチレーション光領域で EL-like hit がない



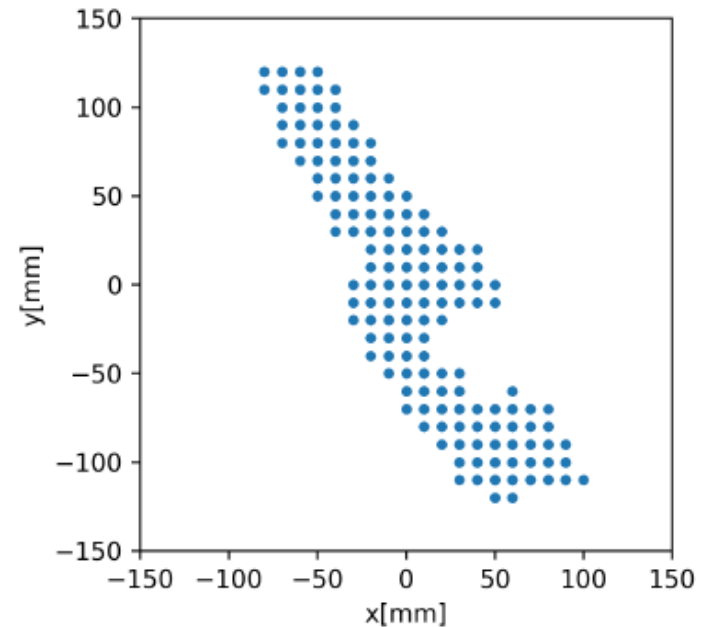
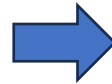
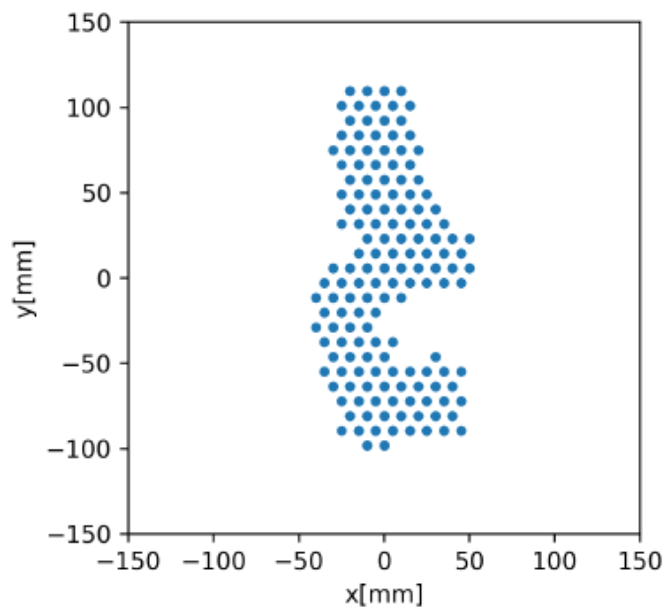
scintillation-like hit
(4 coincidence)

EL-like hit

trigger

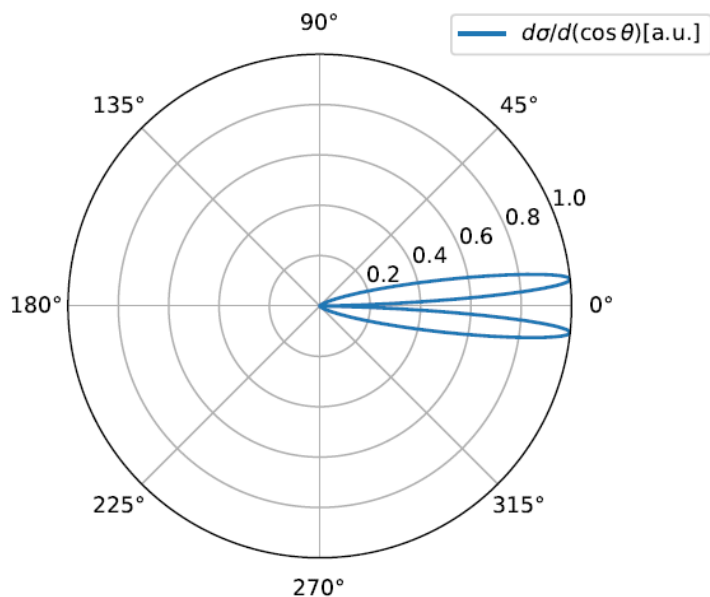
- ELCCの六角格子構造を、正方格子に変換

$$A_{\text{skew}} = \begin{pmatrix} 1 & \tan \frac{\pi}{6} & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad A_{y\text{-exp}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2/\sqrt{3} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

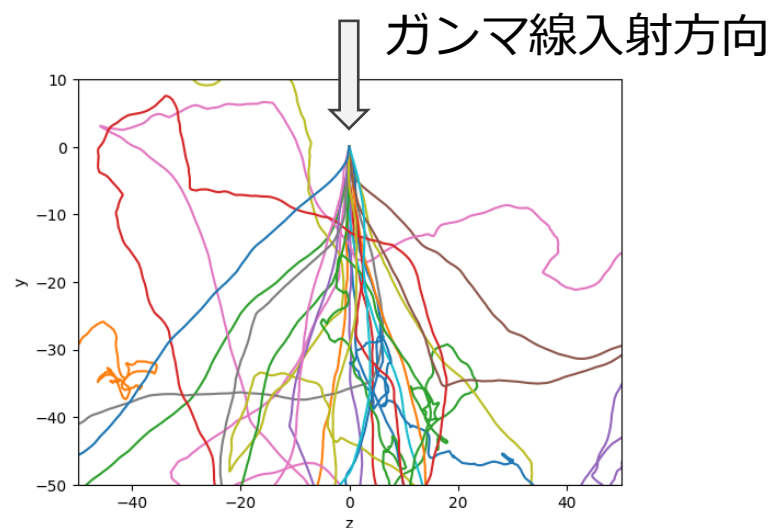


- Sauter-Gabrila distribution

$$\frac{d\sigma}{d(\cos\theta)} \sim \frac{\sin^2\theta}{(1 - \beta \cos\theta)^4} \left\{ 1 + \frac{1}{2}\gamma(\gamma - 1)(\gamma - 2)(1 - \beta \cos\theta) \right\}$$



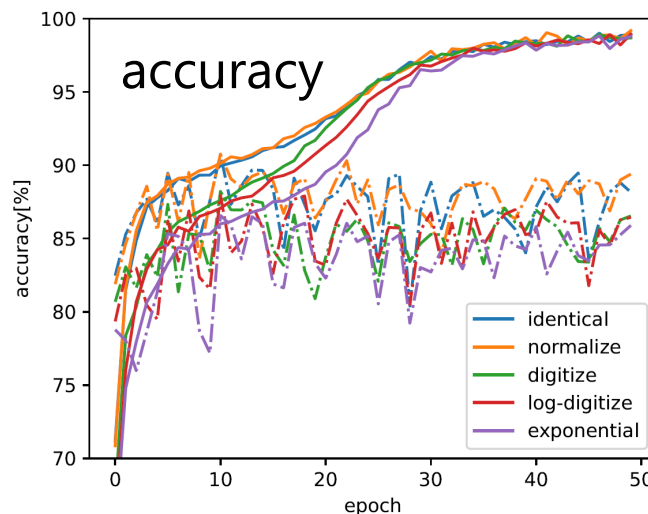
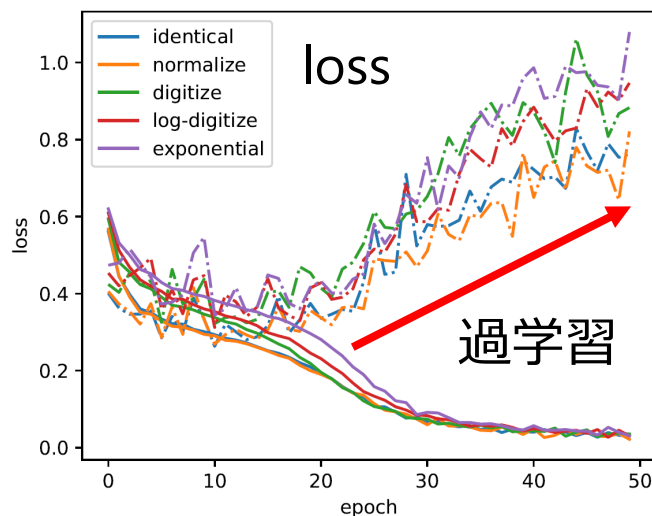
放出角度分布



光電吸収電子のトラック例
(シミュレーション)

- 光量の規格化手法の違いによる性能比較
- identical, normalize がその他に比べて若干良い傾向
- 10epoch以降で過学習傾向

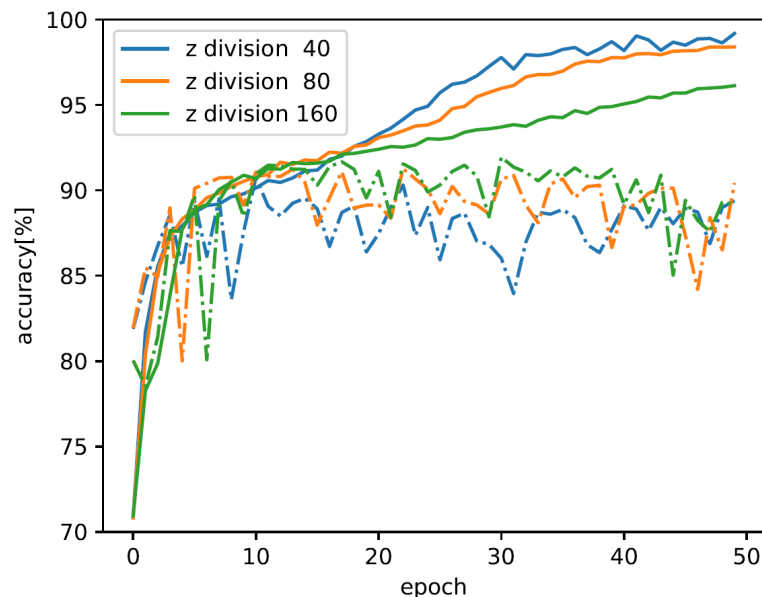
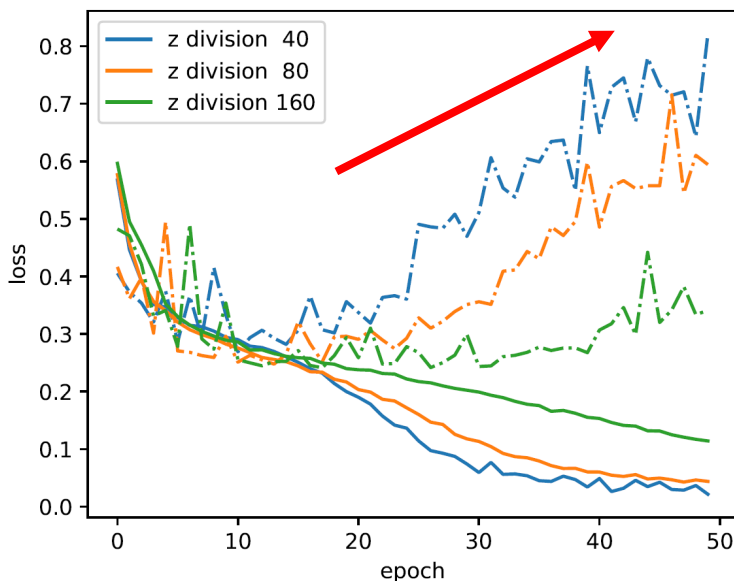
実線：トレーニングデータ
破線：バリデーションデータ



identical : 規格化しない
normalize : ボクセル光量を[0,1]に規格化
digitize : ボクセル光量を[0,1]に11段階で規格化
log-digitize : digitizeをログスケールで行う
exponential : ボクセル最大光量をPとして $\exp(P_{ijk}/P)/e$ (for $P_{ijk} > 0$)

- 規格化手法 normalize、z方向の分割数を増やした場合で性能比較
- 分割数を増やしたほうが性能が良いが、80と160分割は差が小さい
- 10~20epoch以降で過学習傾向、分割が多いほど過学習になりづらい

実線：トレーニングデータ
破線：バリデーションデータ

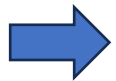


	Contribution
Initial ionization	0.25%
Z mis-reconstruction	0.24%
Fluctuation of the EL generation and detection	0.20%
Error in EL gain calibration	0.18%
Error in time dependence correction	0.18%
Recombination	0.17%
Variation in time bin of time variation correction	0.12%
Offset of the baseline	$\leq 0.11\%$
Error in z dependence correction	$\leq 0.06\%$
Fluctuation of the attachment	$\leq 0.02\%$
Accuracy of the MPPC recovery time	$\leq 0.03\%$
Fluctuation of the MPPC nonlinearity	not yet evaluated
Estimation total	(0.52-0.54)%
Data total	$(0.67 \pm 0.08)\%$

- 電離電子の生成数の揺らぎ
 - エネルギーE : 2615keV
 - W値 : 22.1 eV/ion pair
 - Fano factor : 0.13

$$N = \frac{E}{W}$$

$$\frac{\Delta N_{ini}}{N} = 2.355 \times \frac{\sqrt{FN}}{N} = 2.355 \times \frac{\sqrt{0.13 \times 2615 \times 10^3 / 22.1}}{2615 \times 10^3 / 22.1}$$



0.247%

- ウィンドウ内のアクシデンタルなシンチレーション光の数の平均: μ_{acc}
- イベント由来のシンチレーション光の検出効率: ε

シンチ候補数が0になる確率:

(シンチ光検出できない(1- ε) かつ accidentalが0 (poisson(0)= $e^{-\mu}$))

$$P(n = 0) = (1 - \varepsilon)e^{-\mu_{\text{acc}}} = 416/2081$$

シンチ候補数が1になる確率:

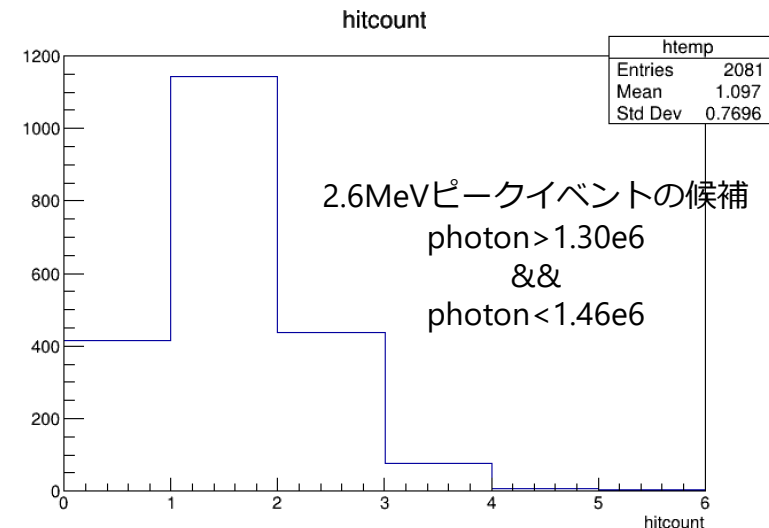
(シンチ光検出できない かつ accidentalが1) or (シンチ光検出 かつ accidentalが0)

$$P(n = 1) = (1 - \varepsilon)\mu_{\text{acc}}e^{-\mu_{\text{acc}}} + \varepsilon e^{-\mu_{\text{acc}}} = 1143/2081$$

- 方程式を解くと、 $\mu_{\text{acc}} = 0.4023$ 、 $\varepsilon = 0.701$ より、
mis-reconstruction確率は

$$(1 - \varepsilon)\mu_{\text{acc}}e^{-\mu_{\text{acc}}} / P(n = 1) = \mathbf{14.6\%}$$

$$\text{Poisson}(k) = \frac{\mu^k}{k!} e^{-\mu}$$



- z mis-reconstructionは $80 < z < 360$ で一様分布とする; 0~1.02%まで一様に変動
- 2.6MeV(mean: N)ピークの一部(p)が、Ndだけ光量変動とする
- このときのダブルガウシアン分散は

$$G(X) = (1 - p) \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(X - N)^2}{2\sigma^2}\right] + p \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left[-\frac{(X - N(1 - d))^2}{2\sigma^2}\right]$$

$$\langle X \rangle = (1 - p)N + pN(1 - d) = N(1 - pd)$$

$$\langle X^2 \rangle = (1 - p)(\sigma^2 + N^2) + p\{\sigma^2 + N^2(1 - d)^2\} = \sigma^2 + N^2(1 - 2pd + pd^2)$$

$$V(X) = \langle X^2 \rangle - \langle X \rangle^2 = \sigma^2 + N^2pd^2(1 - p)$$

- つまり分散の増分が $N^2pd^2(1 - p)$ なので、変動係数は $d\sqrt{p(1 - p)}$
- dmax=1.02%(attachmentによる最大変動) 、 p=14.6%で、dが0~dmaxで一様分布するとすれば

$$\Delta N_{\text{zmis}}/N = 2.355 \times 1.02\% \times \sqrt{0.146 \times (1 - 0.146)}/\sqrt{12} \sim \mathbf{0.244 \%}$$

- EL増幅を経てMPPCに検出される光子数の揺らぎ
- 平均ELゲイン $g \rightarrow 11.5$
- 電離電子数 $N_e = E / W$

$$\frac{\Delta N_{ELgain}}{N} = 2.355 \times \sqrt{\frac{1}{gN_e}} \sim \mathbf{0.202 \%}$$

本測定では設計電圧の90%印加だったが、
100%が印加できていたとすると、ELゲインは $12.8 \rightarrow \mathbf{0.192 \%}$

- 各チャンネルのELゲインの相対エラーを ϵ_{ch} 、光量を N_{ch} とすると、チャンネルの分解能への寄与は $\epsilon_{\text{ch}} N_{\text{ch}}$
- 各チャンネルからの寄与を独立とすれば、

$$\frac{\Delta N_{\text{ELcalib}}}{N} = 2.355 \times \frac{\sqrt{\sum_{\text{ch}} (\epsilon_{\text{ch}} N_{\text{ch}})^2}}{N} \sim 2.355 \times \bar{\epsilon} \frac{\sqrt{\sum_{\text{ch}} (N_{\text{ch}})^2}}{N}$$

$\bar{\epsilon}$: 各チャンネルでのELゲインの相対エラーの平均

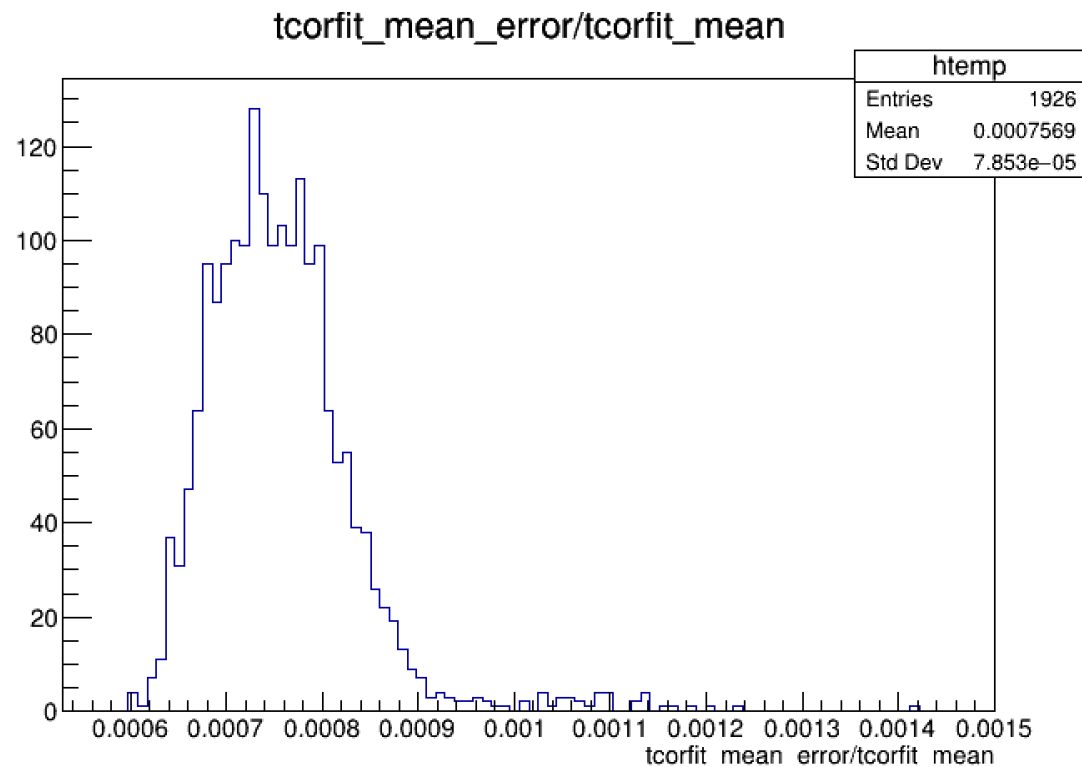
- $\bar{\epsilon}$: 0.5324 %
 - Mean of $\sum_{\text{ch}} (N_{\text{ch}})^2 / N^2$ in 2615keV FWHM: 0.02119
- $\Delta N_{\text{ELcalib}}/N \sim \mathbf{0.183 \%}$

※ $\frac{\Delta N_{\text{ELcalib}}}{N} = 2.355 \times \bar{\epsilon} \frac{1}{\sqrt{n_{\text{eff}}}}$ なので、

Effective number of hit channel: $n_{\text{eff}} = (\sum_{\text{ch}} (N_{\text{ch}})^2 / N^2)^{-1} \sim \mathbf{47.2}$

- 各time binにおけるK α ピークフィットのrelative error: 平均0.076 %
→ 誤差伝播より補正係数のerrorも0.076 %

$$\rightarrow \Delta N_{\text{tcor}}/N = 2.355 \times 0.076 = \mathbf{0.179 \%}$$

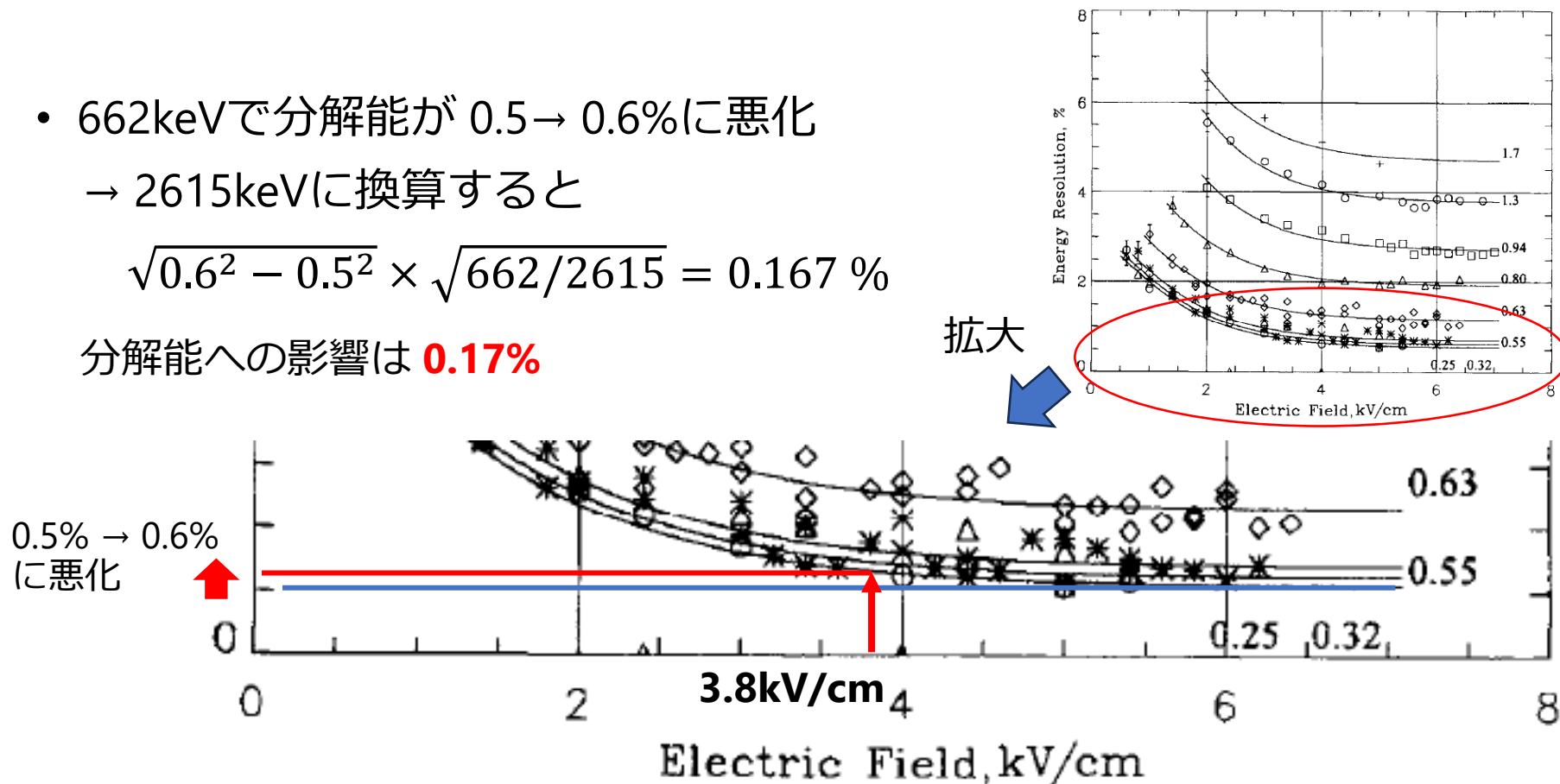


- Recombinationにより電離電子が失われる効果
- イオンチェンバーの分解能 vsドリフト電場 @662keVの文献[1]より推定
- 90V/cm/bar→0.25g/cm³(~42bar) で 3.8 kV/cm 相当

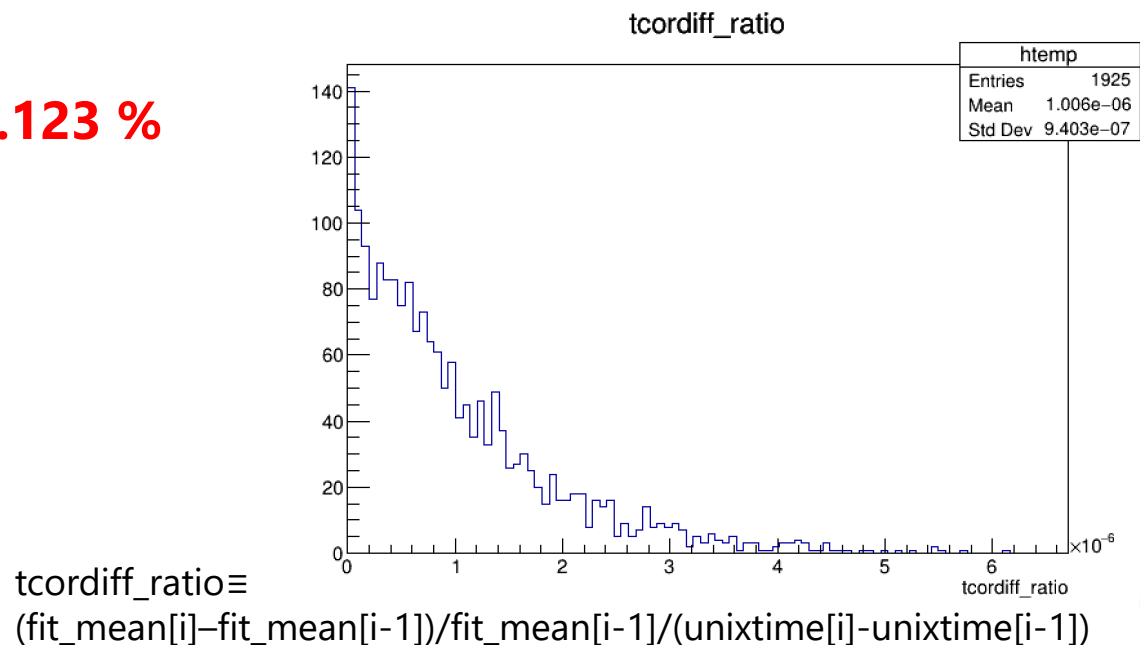
- 662keVで分解能が 0.5→ 0.6%に悪化
→ 2615keVに換算すると

$$\sqrt{0.6^2 - 0.5^2} \times \sqrt{662/2615} = 0.167 \%$$

分解能への影響は **0.17%**



- 時間変動補正に使用するtime bin (30min) 内での変動の影響
→ 隣り合うbinのフィット結果から、単位時間あたりの変動割合を計算
- 変動の平均は、 $1.006\text{e-}06$ [/sec]
→ 30min(=1800sec)で、0.18 %
- 変動が一様だとすると分解能への影響は、
 $\Delta N_{\text{tbin}}/N$
 $\sim 2.355 \times 0.18\% / \sqrt{12} = \mathbf{0.123 \%}$



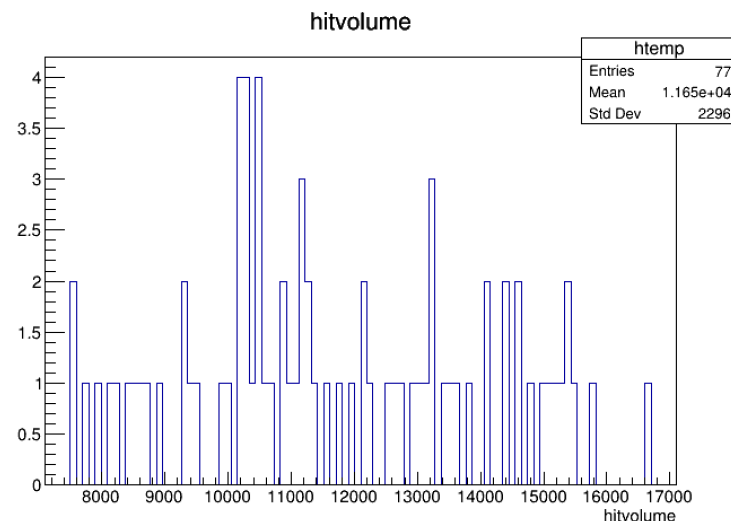
1. トラック体積の違いでオフセットの影響が変動

- ベースラインに1ADC countのoffsetがあると、トラック体積（ヒットの総クロック数）×offset分だけ、積分値がずれる
- 2.6 MeV (FWHM内)のhitvolume分布の標準偏差=2296
- 全チャンネルで同じ方向に1 ADC countのオフセットがあると、
 $2.355 \times (2296/0.9544)/1.379e6 \sim 0.41 \%$

※ 1 p.e.ゲインの平均値：0.9544, 2.6MeVピーク光量：1.379e6

- Effectiveなヒットチャンネル数 $n_{\text{eff}} \sim 47.2$ (ELgain補正のエラーより) を用いて

$$\Delta N_{\text{offset}}/N \leq 0.41\%/\sqrt{n_{\text{eff}}} \sim \mathbf{0.06 \%}$$



2. 同ヒットボリウムで、オフセットの値が異なることによる変動

- 2.6 MeV (FWHM内)のhitvolume分布の平均値=1.165e4
- オフセットの揺らぎ=1/√12 (幅1 ADCで一様分布)
- 全チャンネルで影響を受けると、

$$2.355 \times (1.165e4 \times 1/\sqrt{12}/0.9544) / 1.379e6 \sim 0.60 \%$$

※ 1 p.e.ゲインの平均値 : 0.9544, 2.6MeVピーク光量 : 1.379e6

- Effectiveなヒットチャンネル数 $n_{\text{eff}} \sim 47.2$ (ELgain補正のエラーより) を用いて

$$\Delta N_{\text{offset}}^2/N = 0.60\%/\sqrt{n_{\text{eff}}} \sim \mathbf{0.09 \%}$$

- 前ページと合わせて、 $\Delta N_{\text{offset}}/N \leq \mathbf{0.108 \%}$

- z補正にずれがあると、z重心×光量 vs 光量 に傾きが生じる

$$\rightarrow (4.24 \pm 0.69) \times 10^{-6} / \text{mm}$$

$$N_{true} = N_{obs}(1 + z/\lambda) \quad (z \ll \lambda)$$

$$N_{cor} = \sum_i r^i N_z^i = \sum_i r^i N_{obs}^i (1 + z^i/\lambda')$$

$$\begin{aligned} \Delta N &= \sum_i r^i N_{obs}^i \{ (1 + z^i/\lambda') - (1 + z^i/\lambda) \} \\ &= \left(\frac{1}{\lambda'} - \frac{1}{\lambda} \right) \sum_i r^i N_{obs}^i z^i \simeq \left(\frac{1}{\lambda'} - \frac{1}{\lambda} \right) \langle z \rangle N_{cor} \end{aligned}$$

N_{cor} : 全補正後の全光量
 N_{true} : 真の全光量
 N_{obs}^i : 補正前の各クロック光量
 N_z^i : z 補正のみ適用した各クロック光量
 r^i : z 補正以外の補正係数
 λ : 真の減衰長
 λ' : 補正に使用した減衰長
 $\langle z \rangle$: 光量の z 重心

- cm_z×photon @ 2.6 MeVの標準偏差

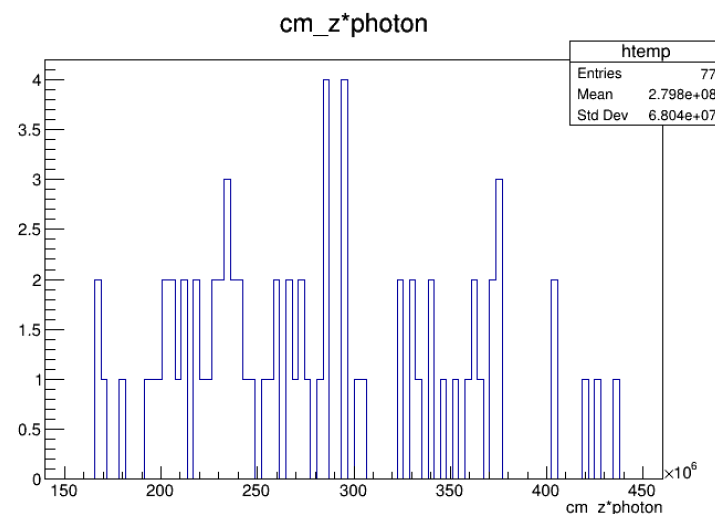
$$\rightarrow 6.804 \times 10^7 \text{ mm}$$

分解能への寄与は最大、

$$\Delta N_{zcorr}/N$$

$$\leq 2.355 \times 4.93 \times 10^{-6} \times 6.804 \times 10^7 / 1.379 \times 10^6 = \mathbf{0.06 \%}$$

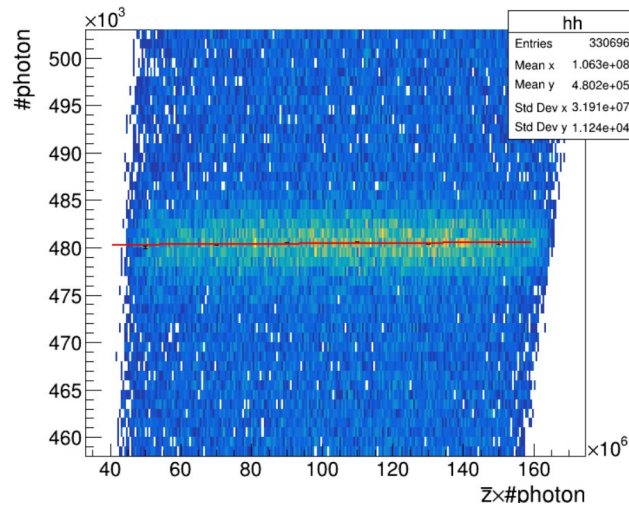
2.6MeV FWHM内
(1.374e6 < photon < 1.384e6)



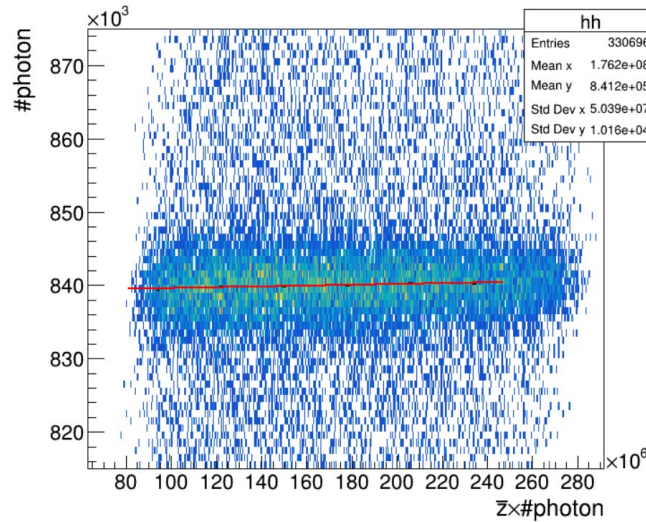
Error in z dependence correction

63

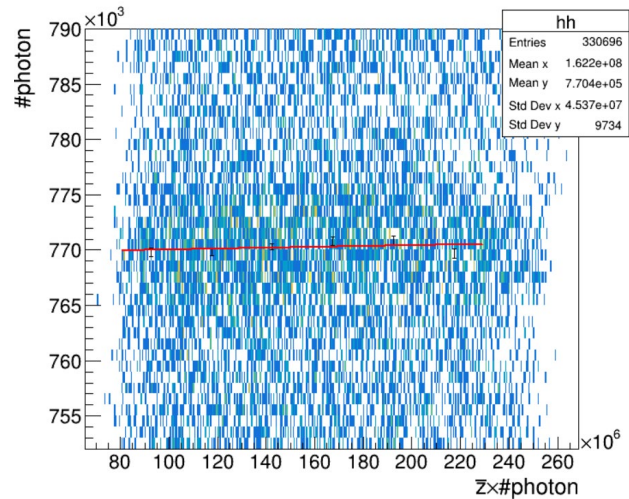
^{228}Ac : $(2.26 \pm 1.11) \times 10^{-6}$ [/mm]



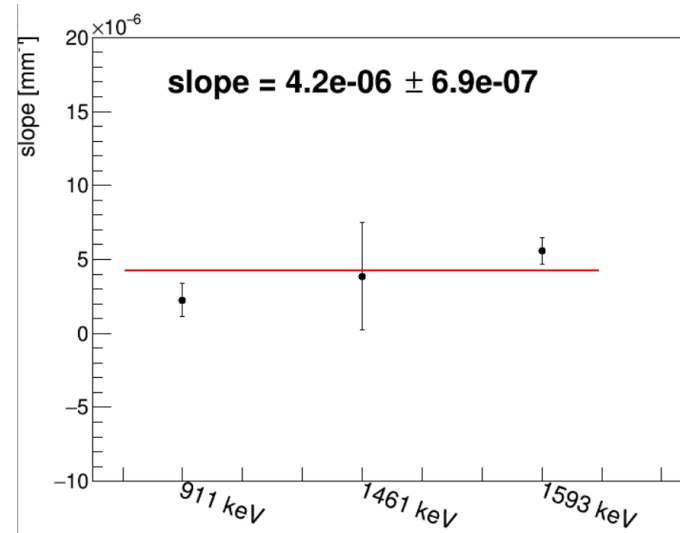
double escape: $(5.55 \pm 0.90) \times 10^{-6}$ [/mm]



^{40}K : $(3.86 \pm 3.65) \times 10^{-6}$ [/mm]



平均值



- 減衰長: 27503 mm

→ z cut の範囲($80 < z < 360$)で光量は最大
(360-80)/27503 ~ 1.02 %変動

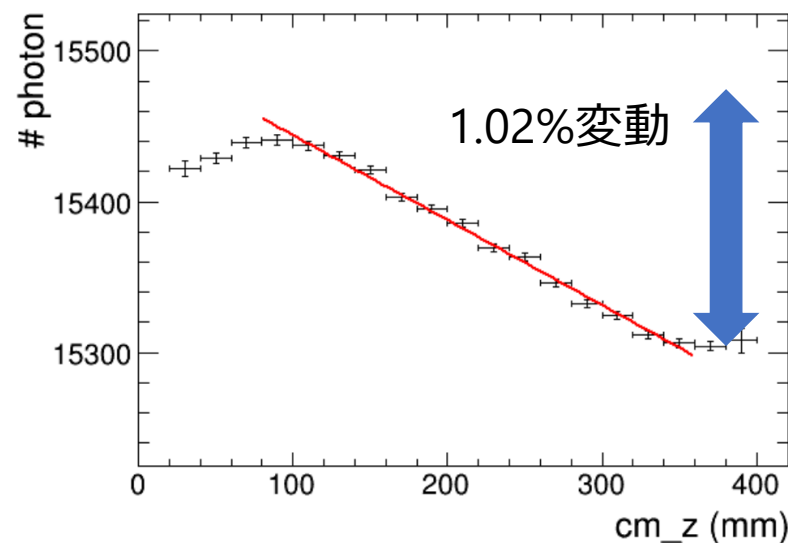
- 2615 keV: 1.379×10^6 photon

→ 影響は最大で、

$$\Delta N_{\text{att}}/N$$

$$= 2.355 \times \sqrt{(1.02\% \times 1.379 \times 10^6) / (1.379 \times 10^6)}$$

$$= \mathbf{0.020\%}$$



- 各MPPCの回復時間の誤差の影響は0.5ns以下であればnegligible
- MPPC回復時間のバイアス補正後でも残った CSS vs 光量 の傾き
 $\Delta\tau_{\text{mean}} = (0.60 \pm 0.15) \text{ ns} \rightarrow \Delta k = \Delta\tau / (200[\text{ns}] \times 3600) \leq 1.04 \times 10^{-6}$
- バイアスによる光量の変動は $\Delta k \times \text{CSS}$ 、2.6 MeV FWHM内でのCSSの標準偏差 = 1.959×10^8 、ピーク光量 = 1.379×10^6 なので

$$\Delta N_{\text{mppc-rec}} / N$$

$$\leq 2.355 \times 1.04 \times 10^{-6} \times 1.959 \times 10^8 / 1.379 \times 10^6$$

~ 0.034 %

- MPPCの非線形性は統計的なプロセス（同一ピクセルに光子が入射するか否か）であることによるゆらぎ

- $T_{1/2}^{2\nu} = 2.34 \times 10^{21} \text{ yr}$
- 1 トンの ^{136}Xe 原子核数 $N_0 = 1 \times 10^6 / 136 \times 6.02 \times 10^{23} = 4.4 \times 10^{27}$
- 年間 $2\nu\beta\beta$ 崩壊数 $\rightarrow \ln 2 / T_{1/2}^{2\nu} \times N_0 = 1.3 \times 10^6 / \text{yr}$
- ROIへの混入割合 [1]

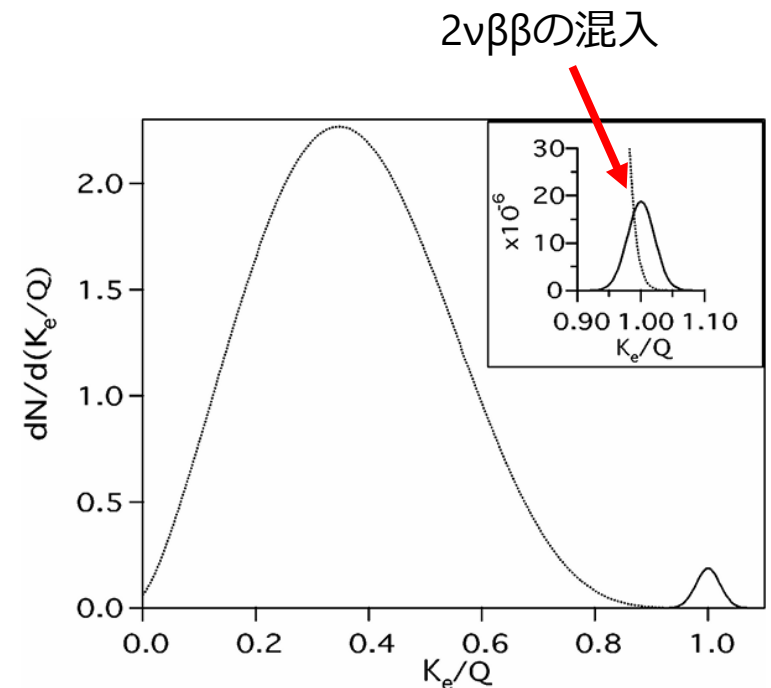
$$F = \frac{7Q\delta^6}{m_e}$$

m_e : 電子質量 511 keV

Q : $0\nu\beta\beta$ のQ値 2458 keV

δ : $\Delta E/Q$ Q値からのROI幅

- ROIとして $\Delta E = -12 \text{ keV}$ ($\delta = 0.5\%$)
 $\rightarrow F = 5.3 \times 10^{-13}$
- 混入イベント数は検出効率を無視しても
 $6.9 \times 10^{-7} / \text{yr}$ \rightarrow negligible
($\delta = 1\%$ でも $4.4 \times 10^{-5} / \text{yr}$)

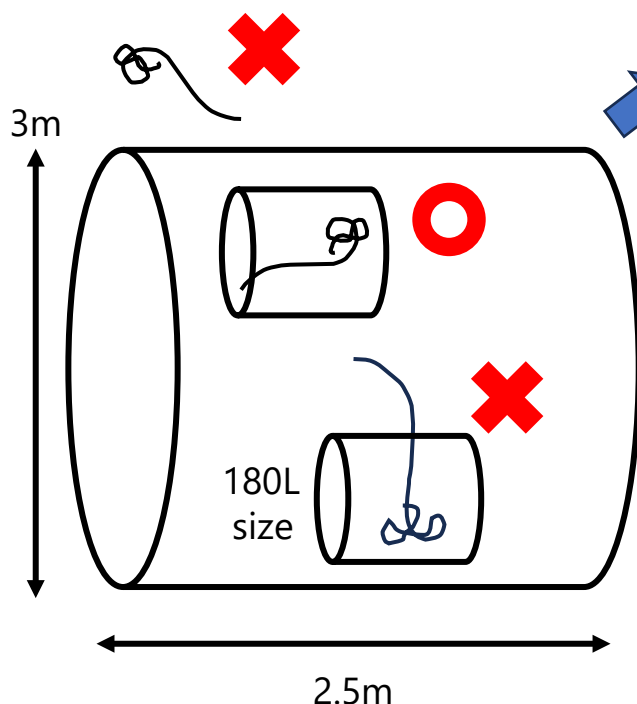


2電子の運動エネルギーの和のスペクトル例
(5%分解能) 点線 : $2\nu\beta\beta$ 、実線 : $0\nu\beta\beta$ [1]

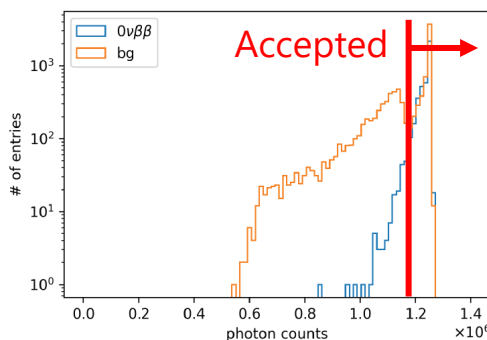
Background model (^{214}Bi)

68

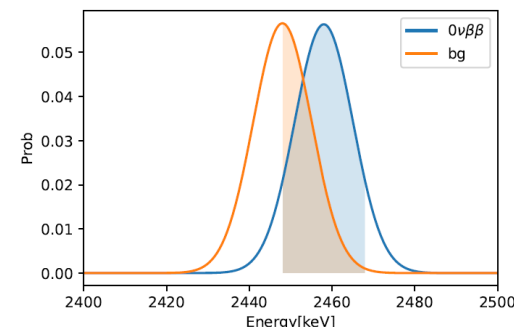
- BG源 : 27.8 トン圧力容器 (for 無酸素銅)
- ^{238}U 混入量 : 2.9×10^{-12} g/g \rightarrow 圧力容器の放射能は 1.0 Bq
- 2448 keV intensity : 1.545 % \rightarrow **4.9×10^5 γ /yr**
- 各種カット



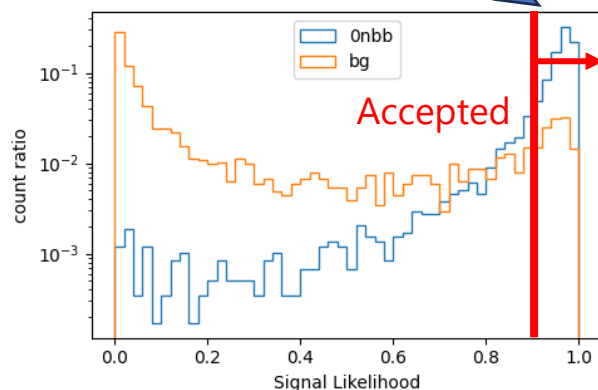
volume cut efficiency (simulation)
 $0\nu\beta\beta$: 33.33%
BG : 0.0263%



Multi cluster elimination
(コンプトンイベントを排除)
 $0\nu\beta\beta$: 99.3 %
BG : 75.1 %



Energy cut efficiency
(ガウス分布のROI範囲の面積)
ex: 0.678%FWHM, ± 10 keV ROI
 $0\nu\beta\beta$: 84.2%
BG : 49.8%

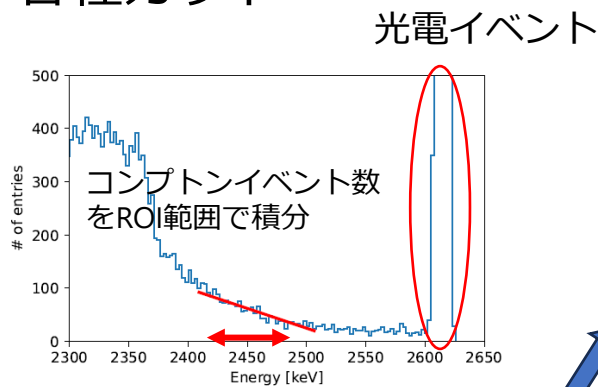


Topology cut efficiency
(signal likelihood threshold)
ex: likelihood threshold = 0.931
 $0\nu\beta\beta$: 75.7 %
BG : 8.6 %

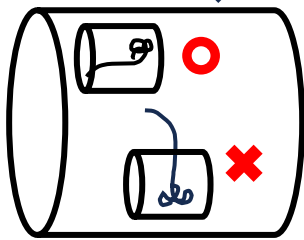
Background model (^{208}Tl)

69

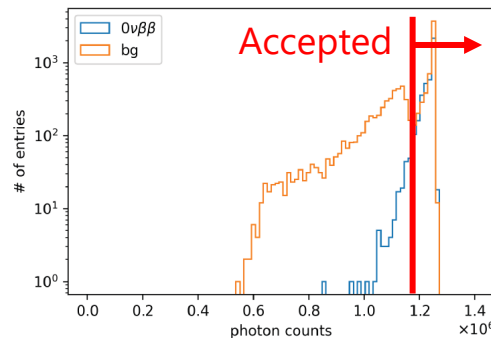
- BG源 : 27.8 トン圧力容器 (for 無酸素銅)
- ^{232}Th 混入量 : 2.4×10^{-12} g/g \rightarrow 圧力容器の放射能は 0.27 Bq
- 2615 keV intensity : 99.754 % \rightarrow **8.5×10^6 γ /yr**
- 各種カット



Compton ratio (simulation)
ex : $Q_{\beta\beta} \pm 5$ keV region
BG : $\times 0.47$ %

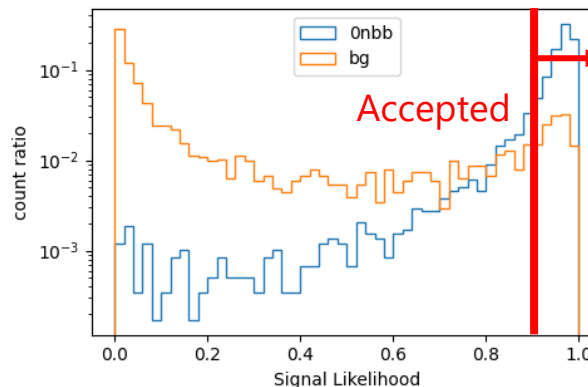


volume cut efficiency (simulation)
 $0\nu\beta\beta$: 33.33%
BG : 0.0263%



Multi cluster elimination
(コンプトンイベントを排除)

$0\nu\beta\beta$: 99.3 %
BG : 75.1 %



Topology cut efficiency
(signal likelihood threshold)
ex: likelihood threshold = 0.931
 $0\nu\beta\beta$: 75.7 %
BG : 8.6 %

Background model (^{137}Xe)

70

- BG源 : 1 トン ^{136}Xe gas
- ^{137}Xe rate : $7.91 \times 10^{-8} \text{ keV}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ [1]
- 上記論文での各種カットの割り戻し
 - fiducial cut : 0.829
 - topological cut : 0.548, 0.064
- 宇宙線 μ 強度補正 LNGS \rightarrow Kamioka $I(X_{\text{kamioka}}) / I(X_{\text{LNGS}}) = 5.01$

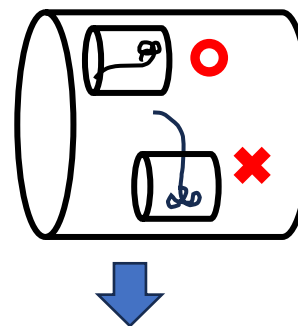
$$I(X) \sim A \left(\frac{X_0}{X} \right)^\eta \exp(-X/X_0) \quad [2]$$

A	: $(2.15 \pm 0.08) \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$
η	: $1.93^{+0.20}_{-0.12}$
X_0	: $1155^{+60}_{-30} \text{ m.w.e}$
X_{kamioka}	: 2700 m.w.e
X_{LNGS}	: 3800 m.w.e

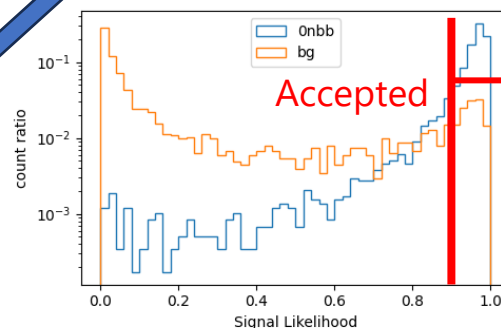
\rightarrow ^{137}Xe rate :

$$1.36 \times 10^{-5} \text{ keV}^{-1} \text{ kg}^{-1} \text{ yr}^{-1}$$

$$\times \text{ROI [keV]} \times 1000 [\text{kg}]$$



volume cut efficiency
(simulation)
 $0\nu\beta\beta$: 33.33%
BG : 29.1%



Topology cut efficiency
(signal likelihood threshold)
ex: likelihood threshold = 0.931
 $0\nu\beta\beta$: 75.7 %
BG : 8.6 %

[1] L Rogers *et al* 2020 *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* **47** 075001

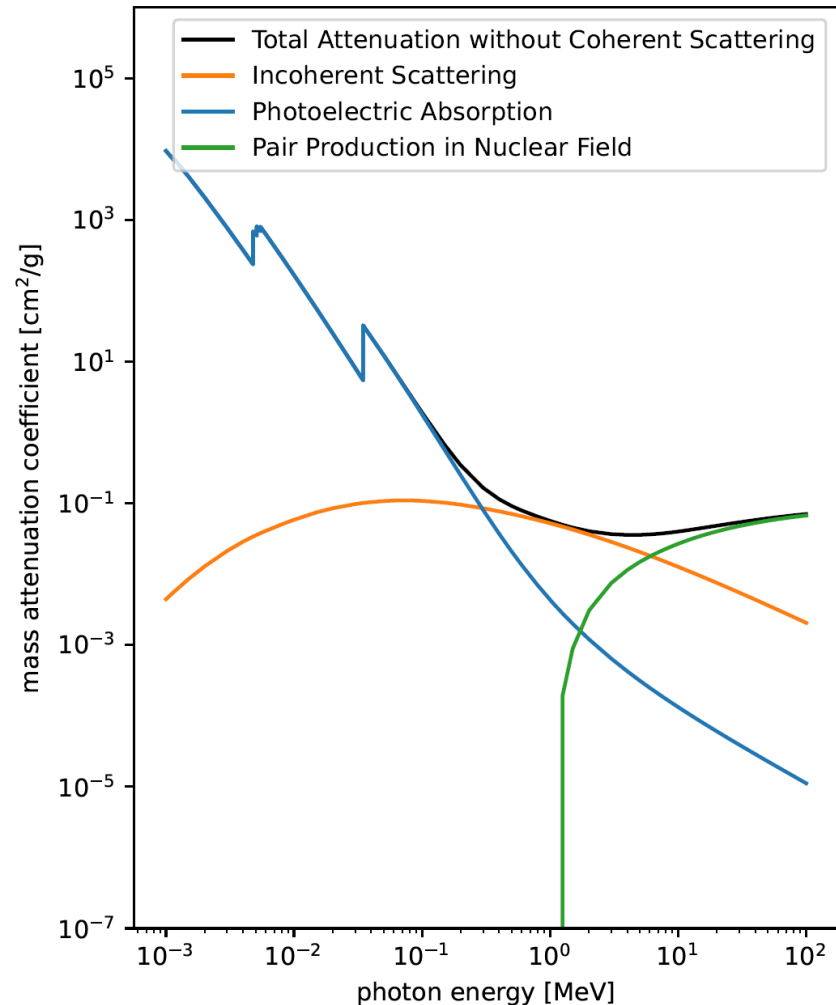
[2] Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2004. 54:361–412

- 質量減衰係数 $3.8 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{g}$ @2.6MeV

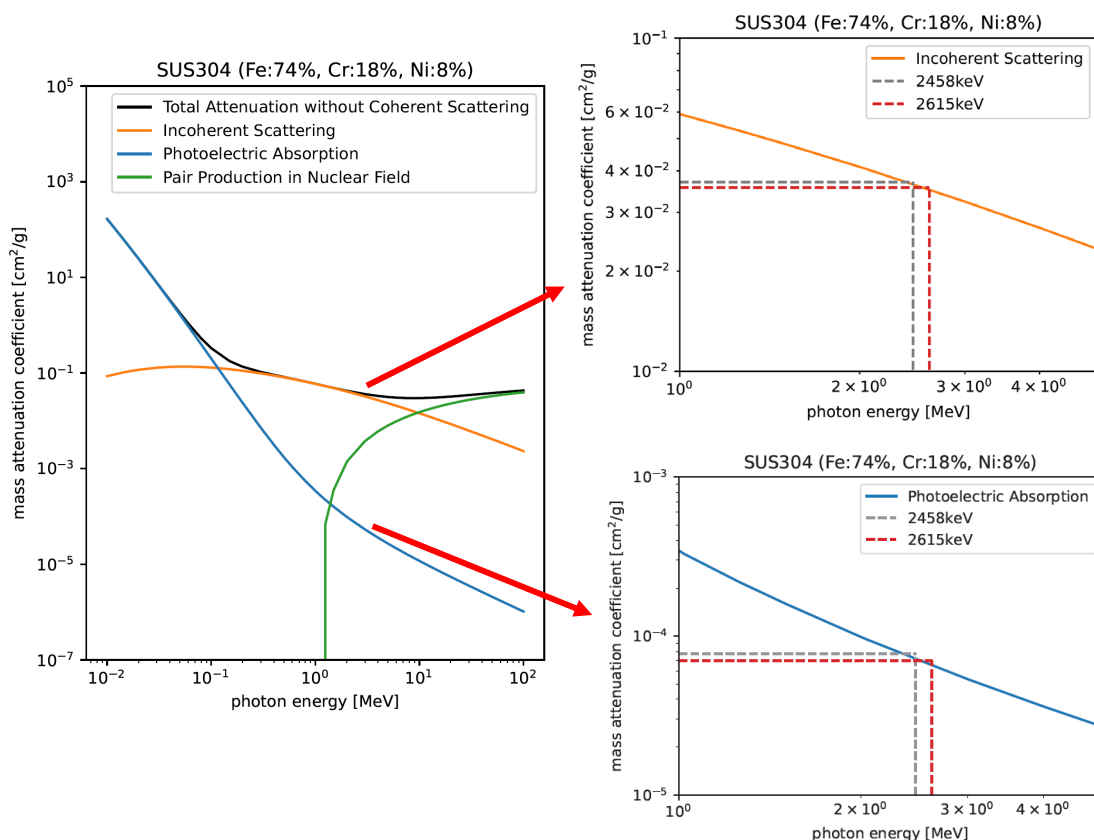
- Xenon 密度 (@300K)
 - $3.7 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^3$ @ 6.8 bar
 - $4.4 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^3$ @ 8 bar
 - $5.6 \times 10^{-2} \text{ g/cm}^3$ @ 10 bar

- 透過長(1/線減衰係数)

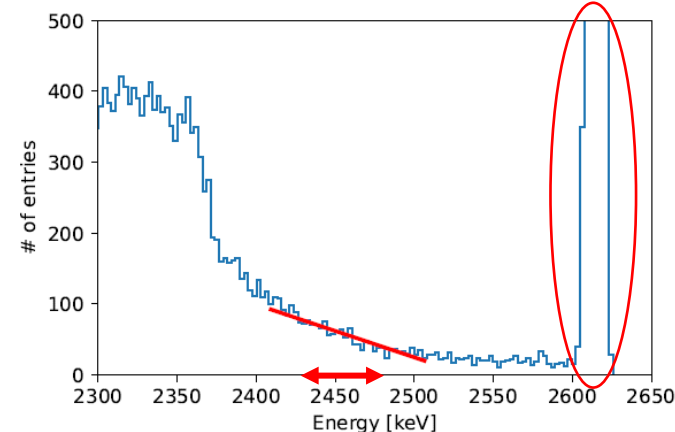
- 710 cm @ 6.8 bar
- 600 cm @ 8 bar
- 470 cm @ 10 bar



- ROI範囲のコンプトンイベント数/光電効果のイベント数を補正係数として使用
- 2448keVシミュレーションの光電ピークを2615keVとみなす（質量減衰係数の差はCompton scatteringで~4%、光電吸収で~10%）



光電イベント

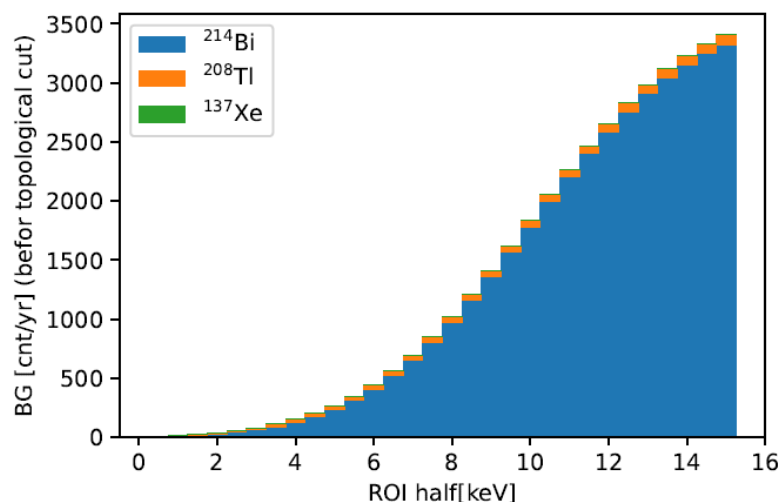


コンプトンイベント数
をROI範囲で積分

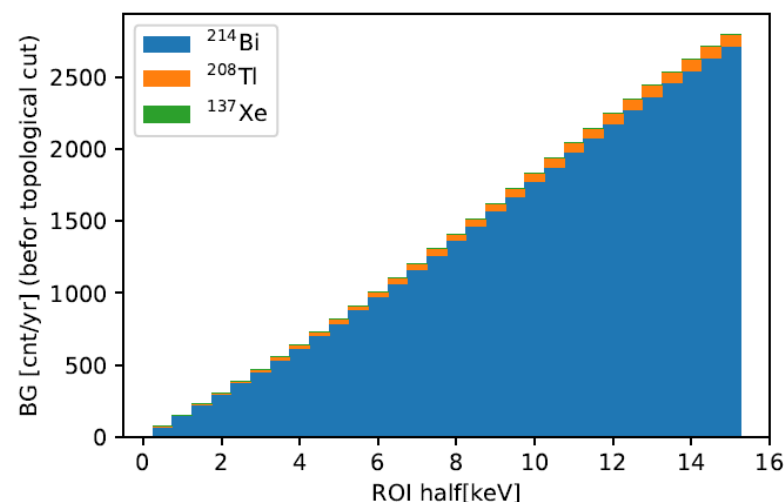
コンプトン/光電 = 0.47% @ $Q_{\beta\beta} \pm 5\text{keV}$

SUS

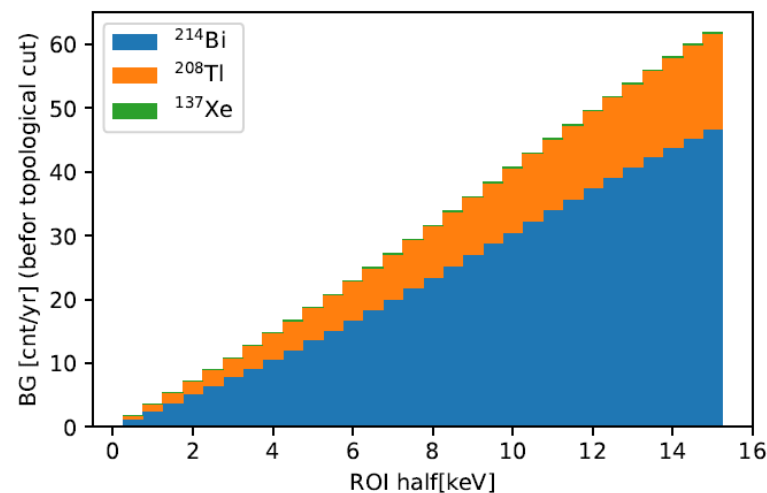
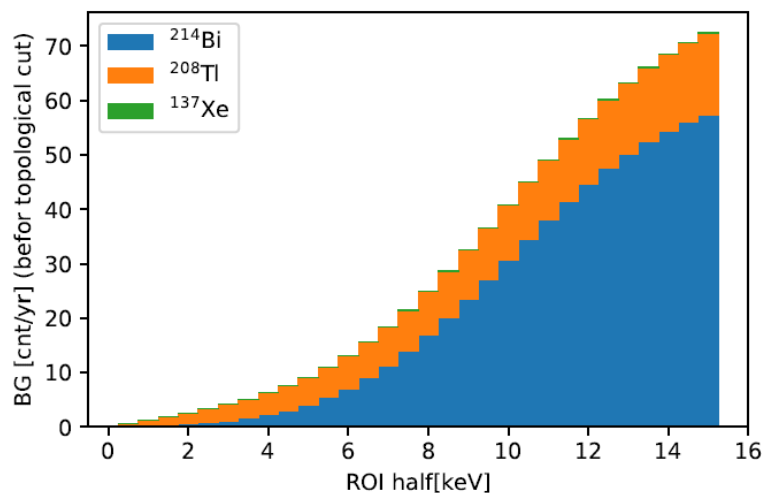
分解能 0.320%



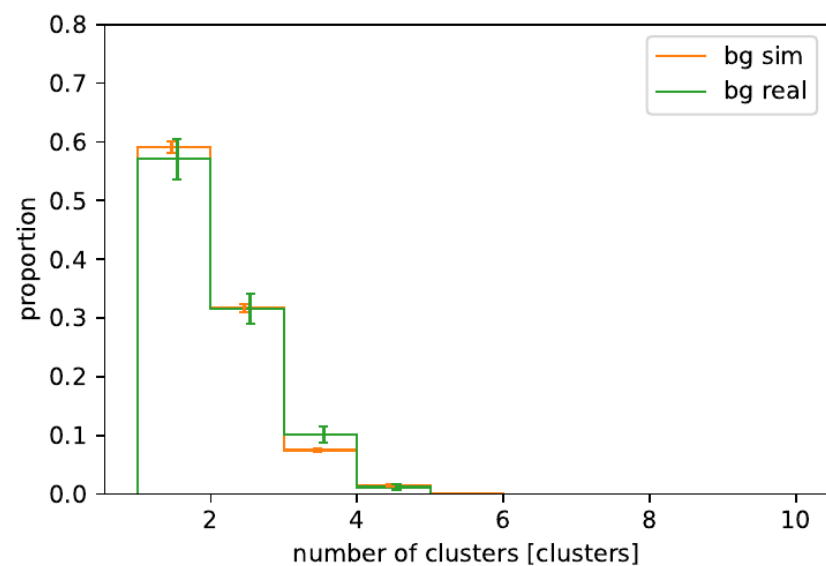
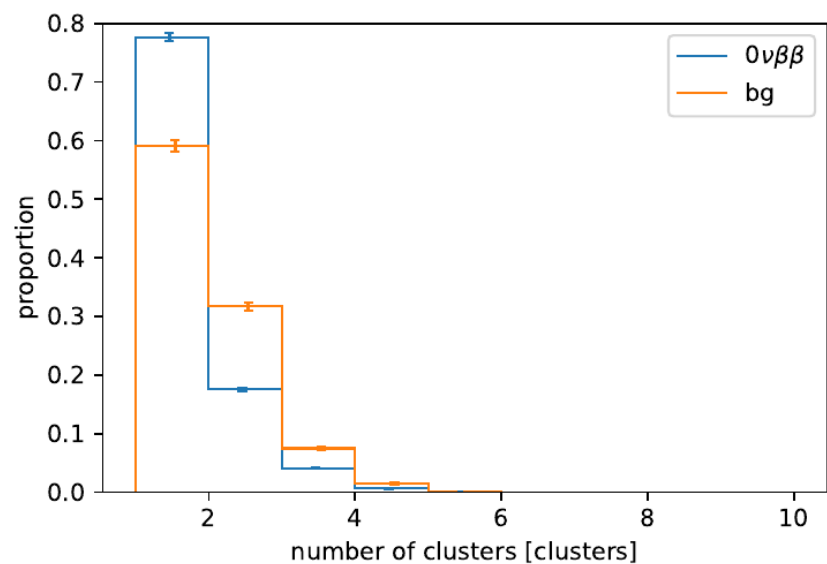
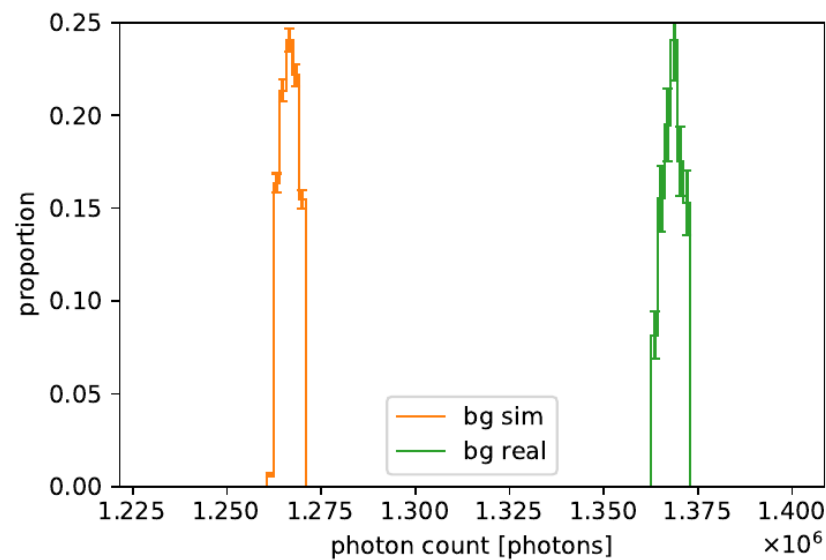
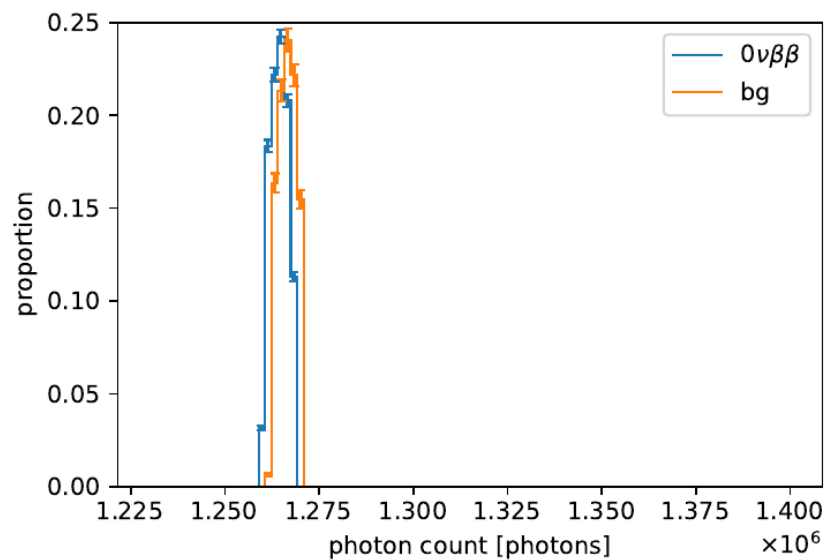
分解能 0.678%

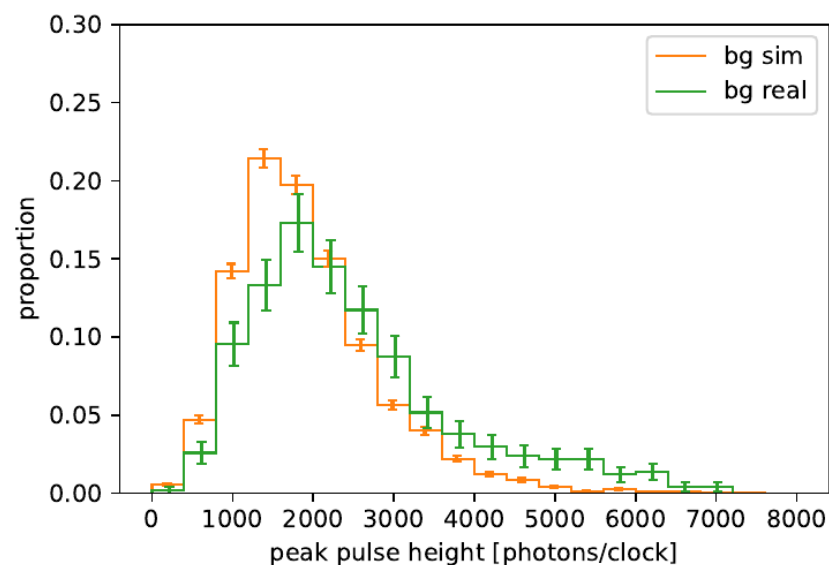
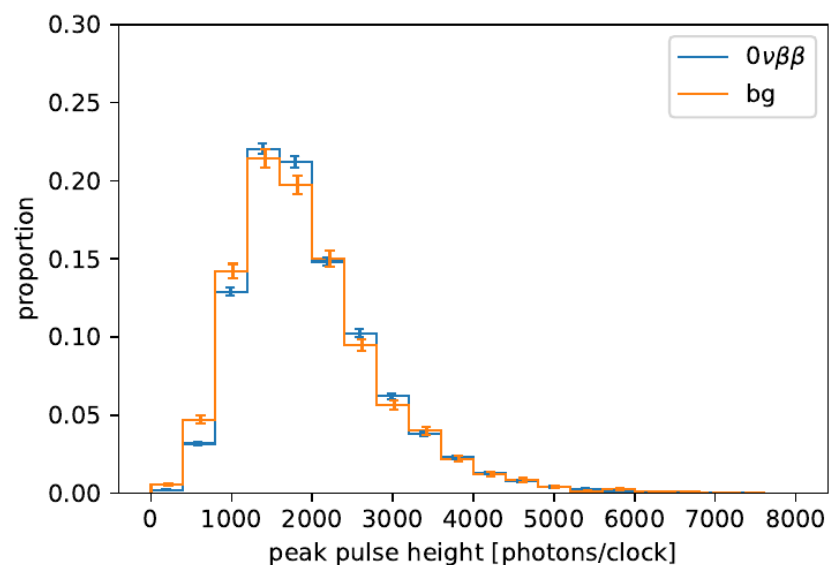
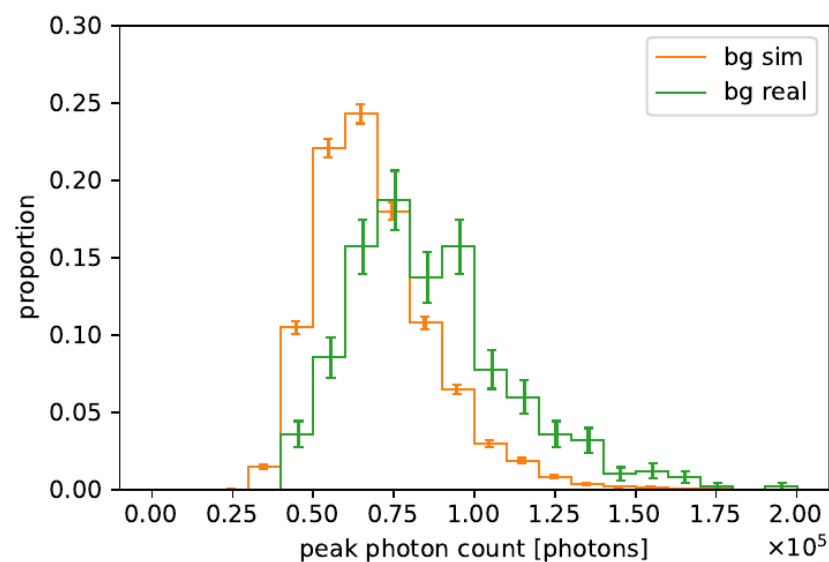
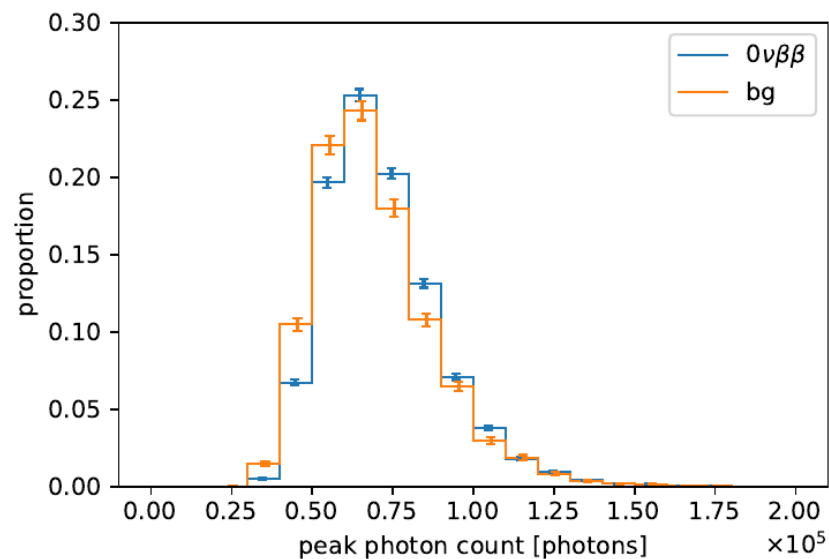


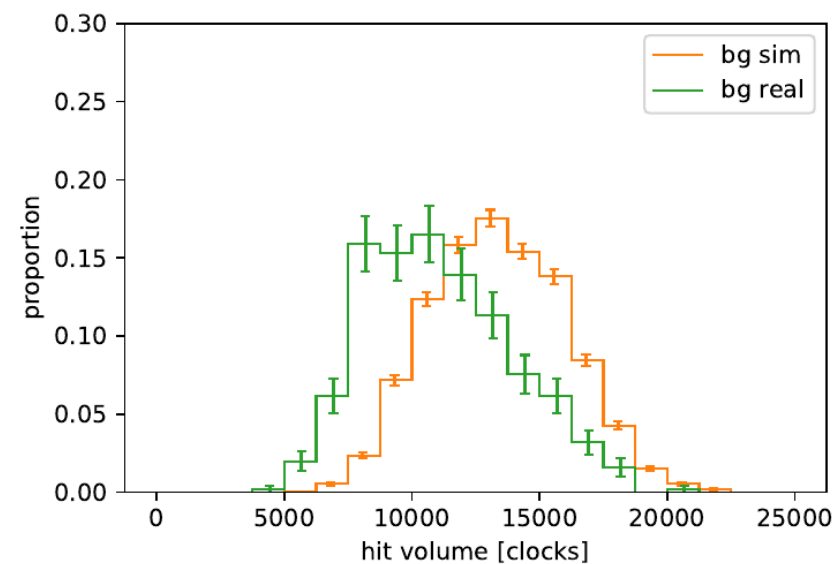
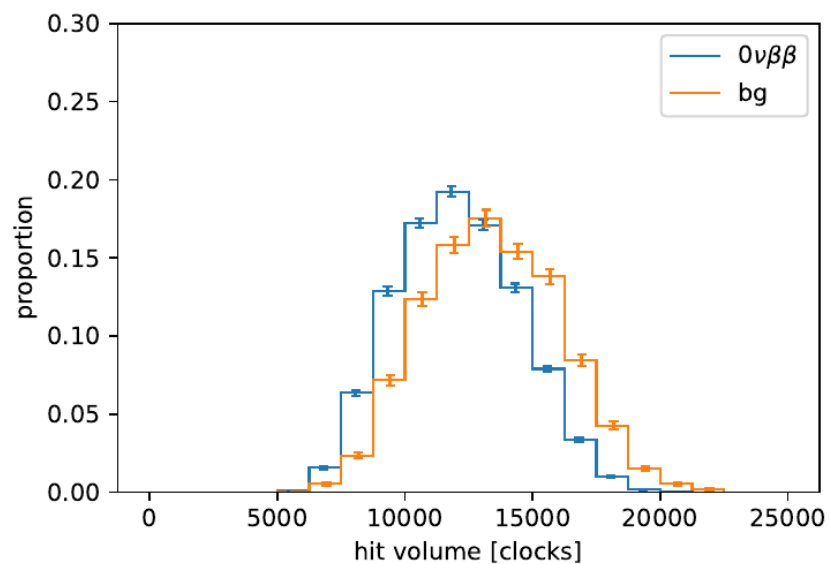
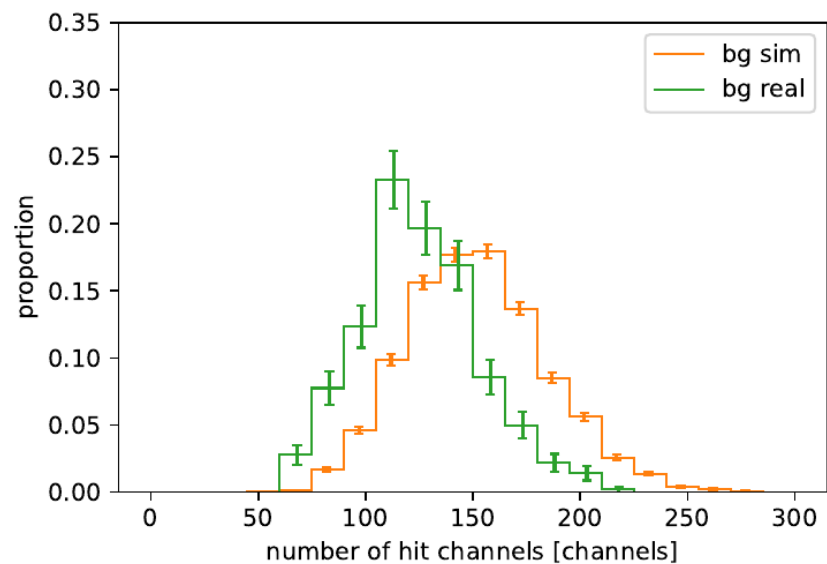
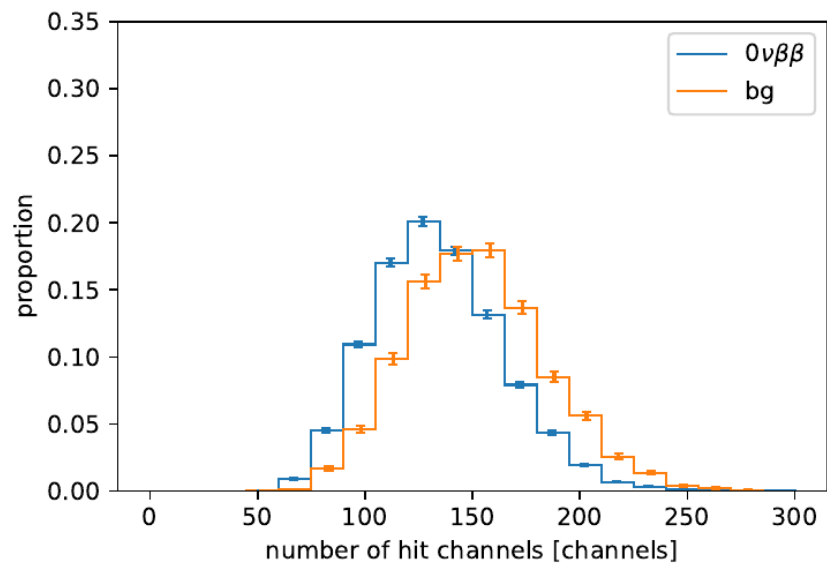
Cu

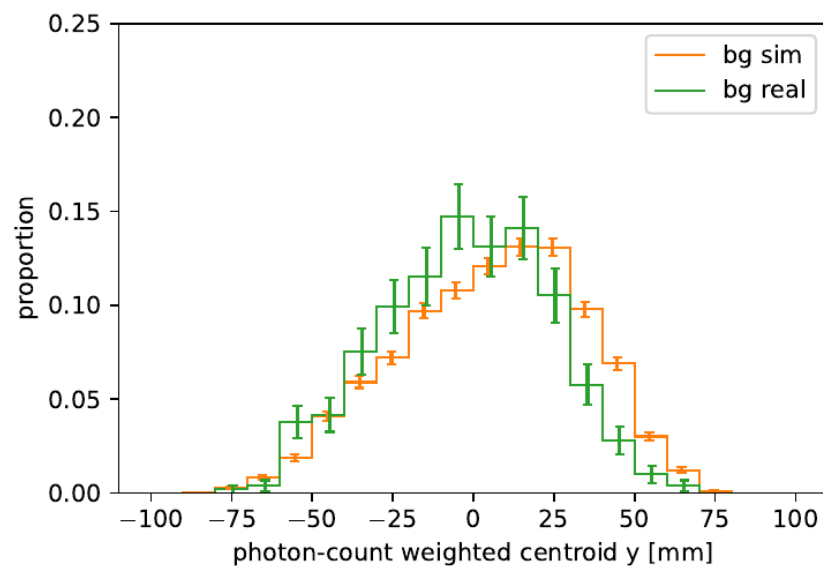
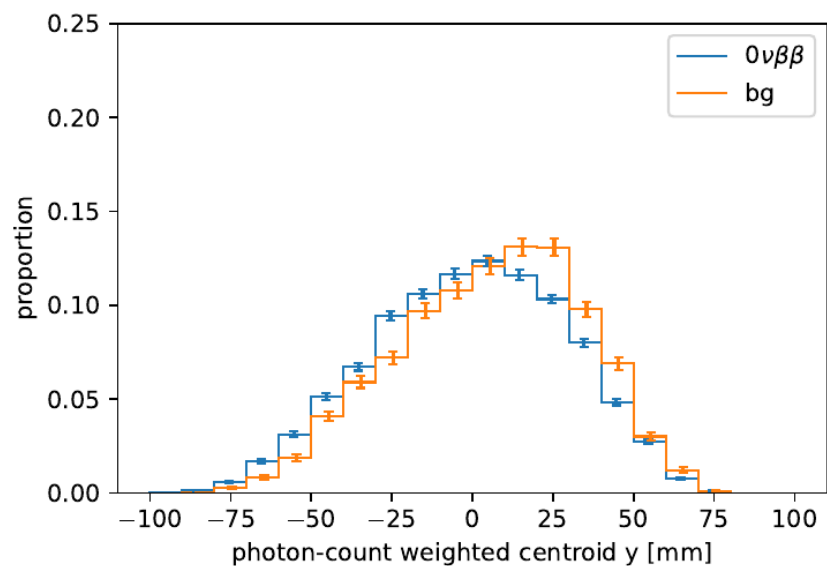
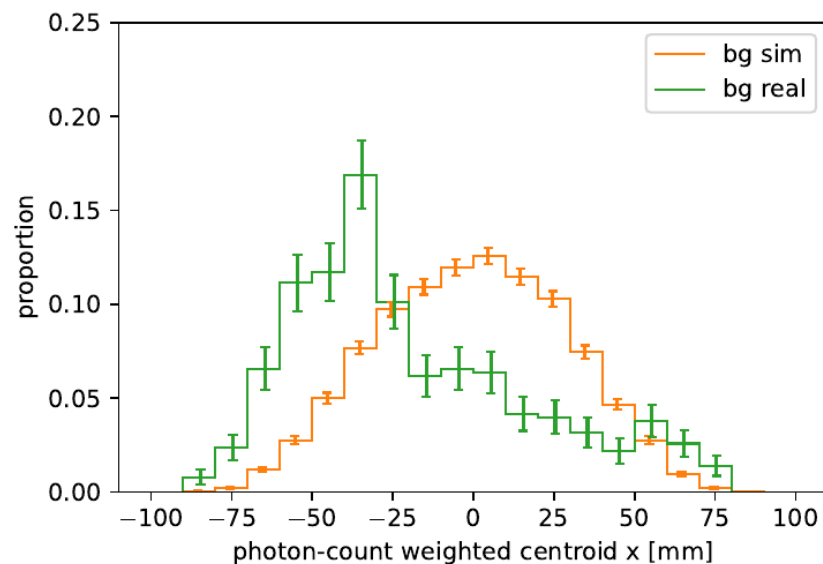
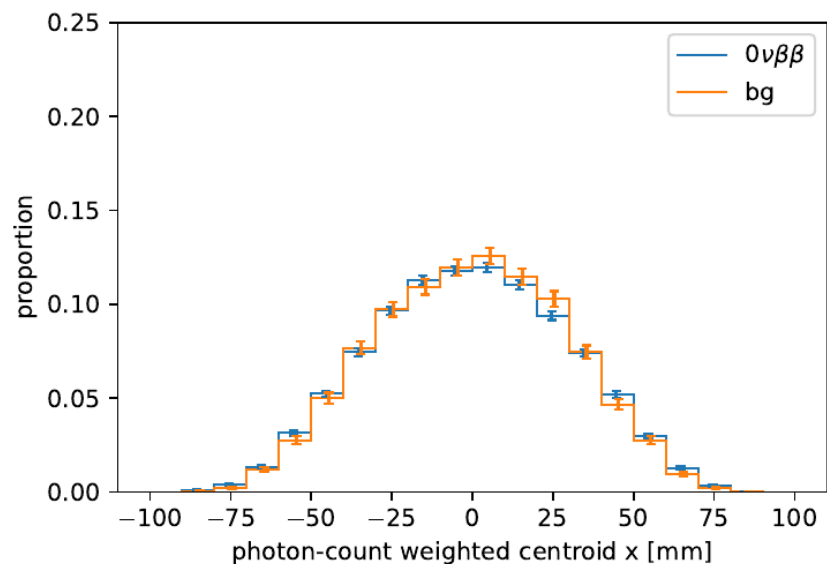


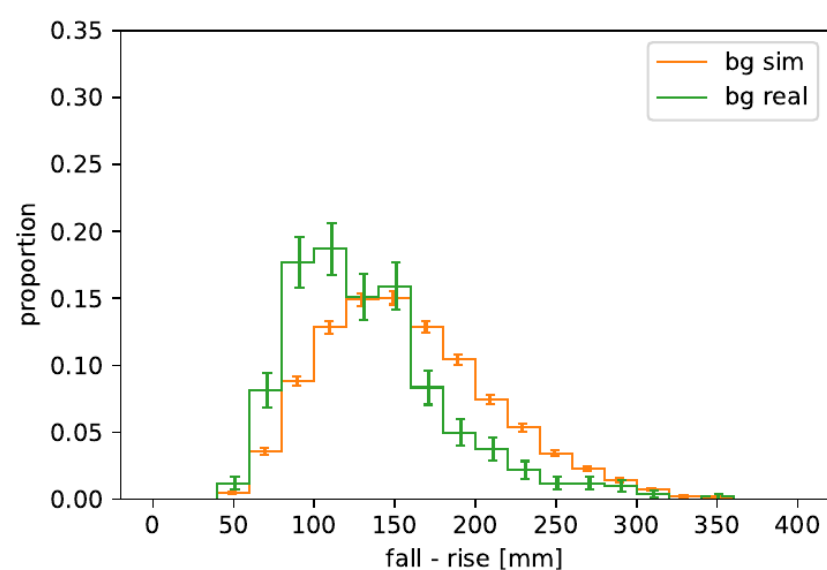
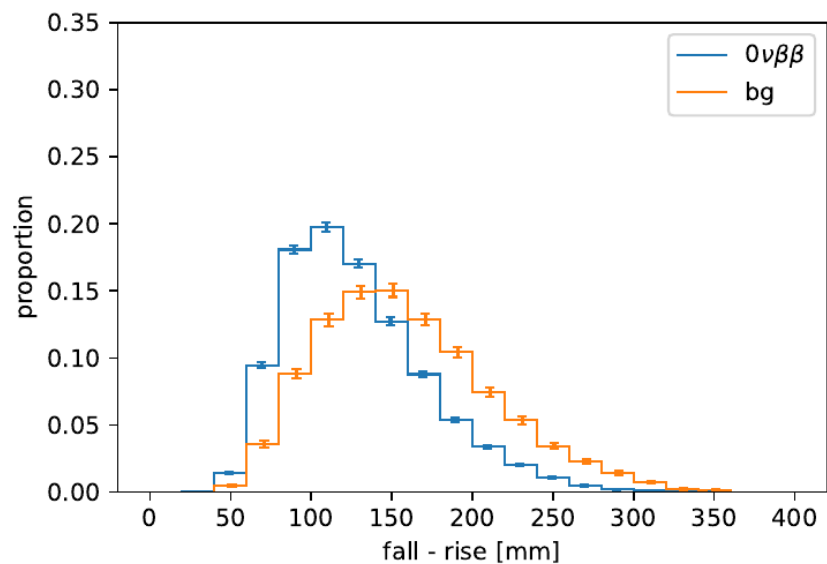
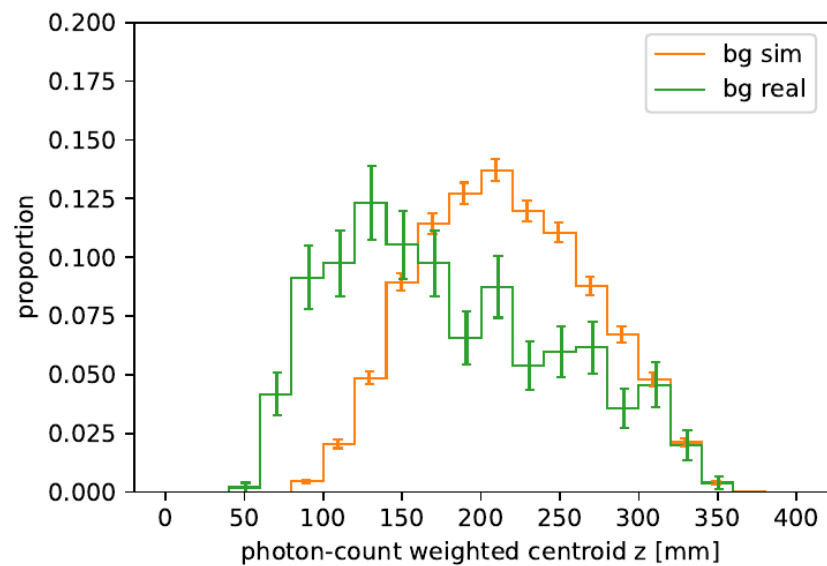
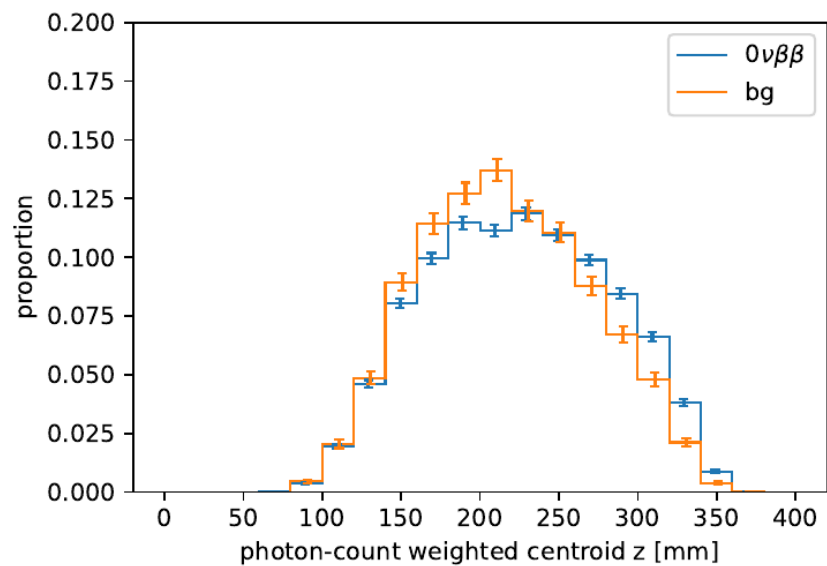
	無酸素銅 0.320%分解能	無酸素銅 0.678%分解能	SUS304 0.320%分解能	SUS304 0.678%分解能
片側 ROI 幅	4.0 keV	11.5 keV	2.5 keV	5.5 keV
トポロジークット threshold	0.931	0.909	0.926	0.956
トポロジークット 効率 $0\nu\beta\beta$	0.757	0.825	0.778	0.595
トポロジークット 効率 BG	0.086	0.112	0.094	0.051
BG数 ^{214}Bi	2.2	36	43	882
BG数 ^{208}Tl	4.0	12	15	32
BG数 ^{137}Xe	0.033	0.093	0.020	0.045
信号上限値	5.3	12	12	36
$T_{1/2}^{0\nu}$	1.12×10^{27}	6.28×10^{26}	3.57×10^{26}	9.61×10^{25}

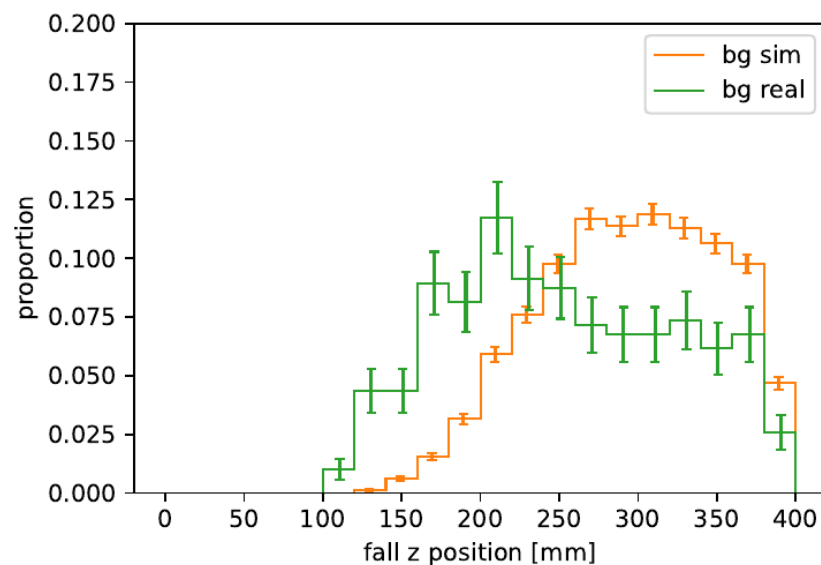
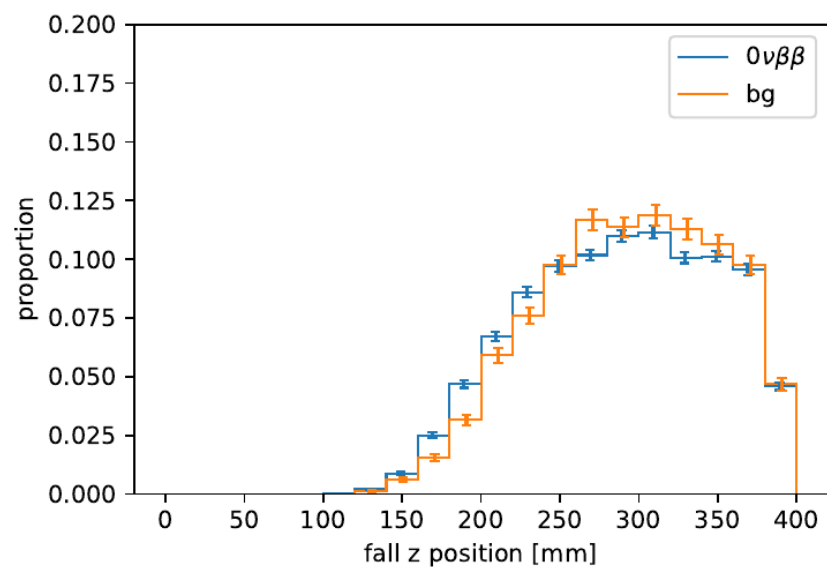
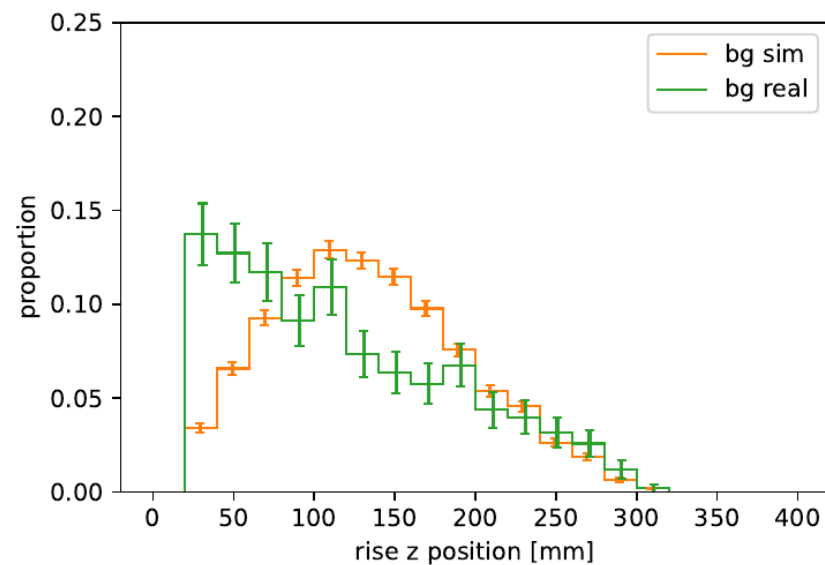
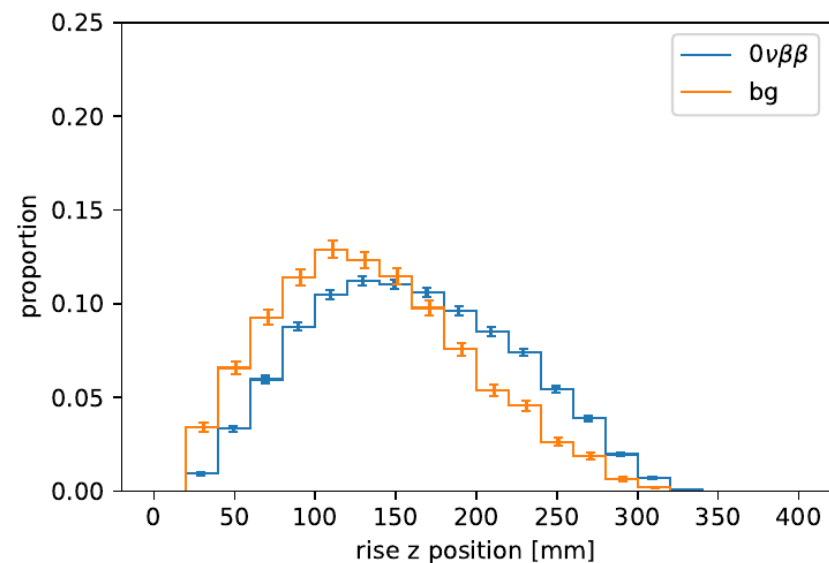


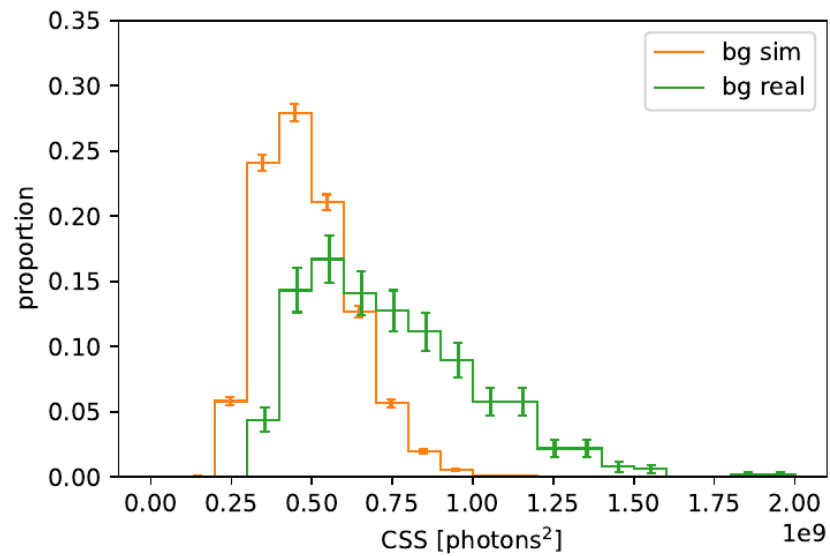
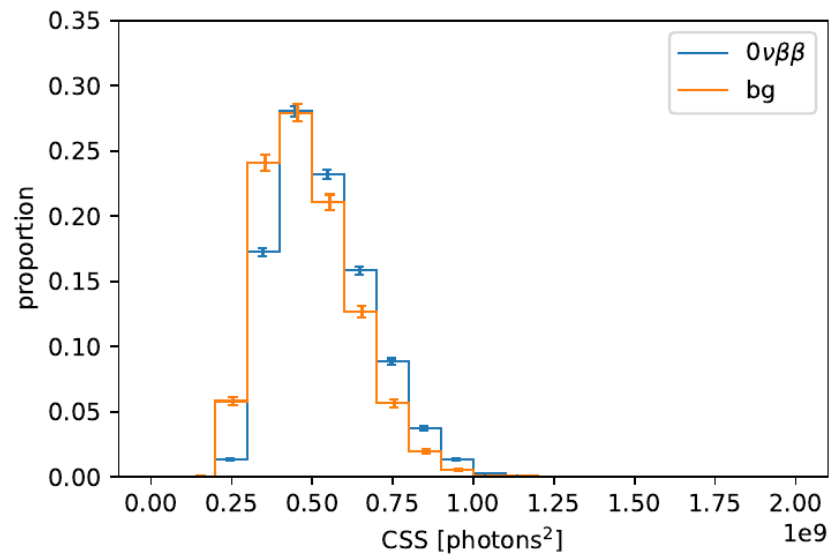


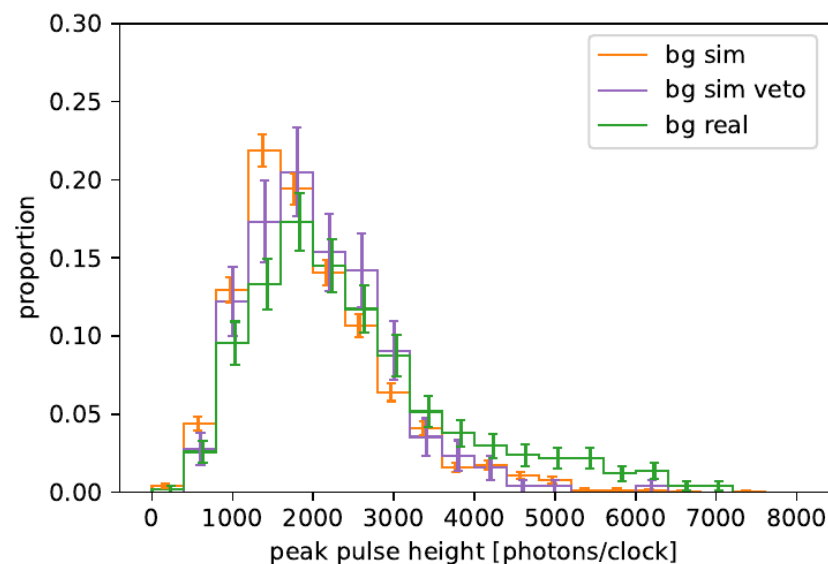
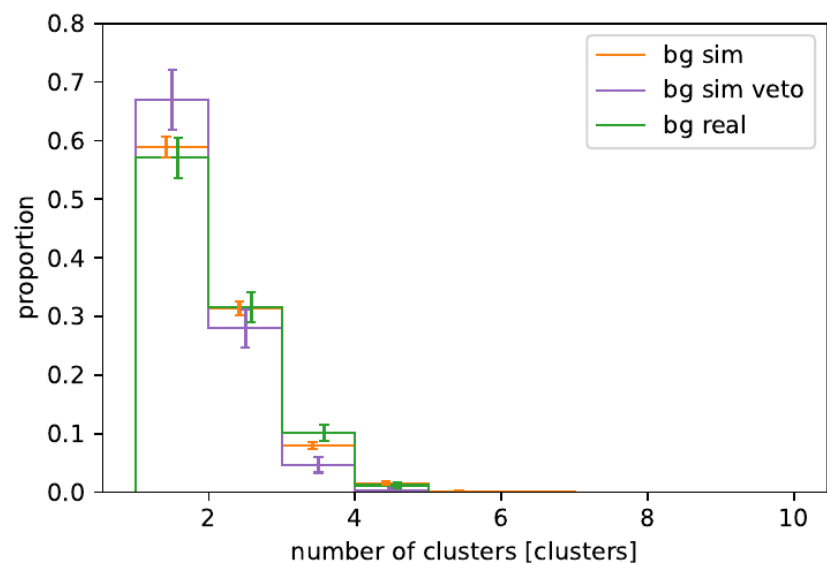
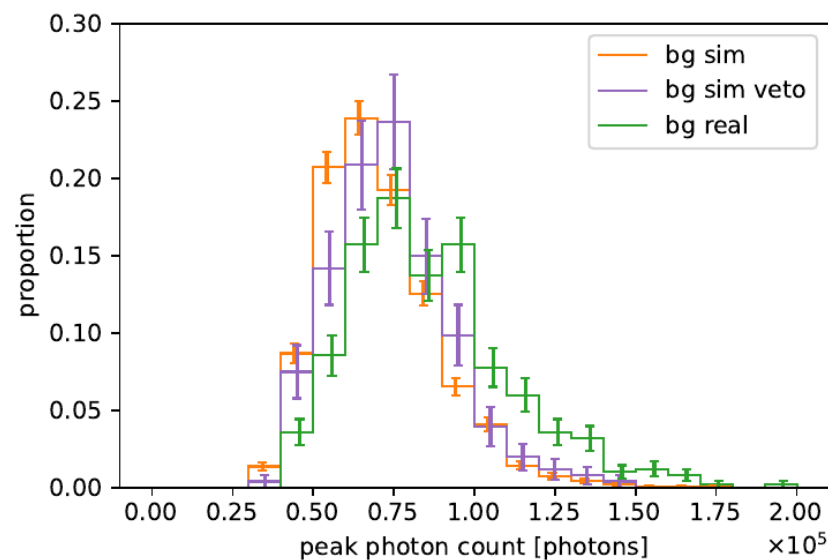
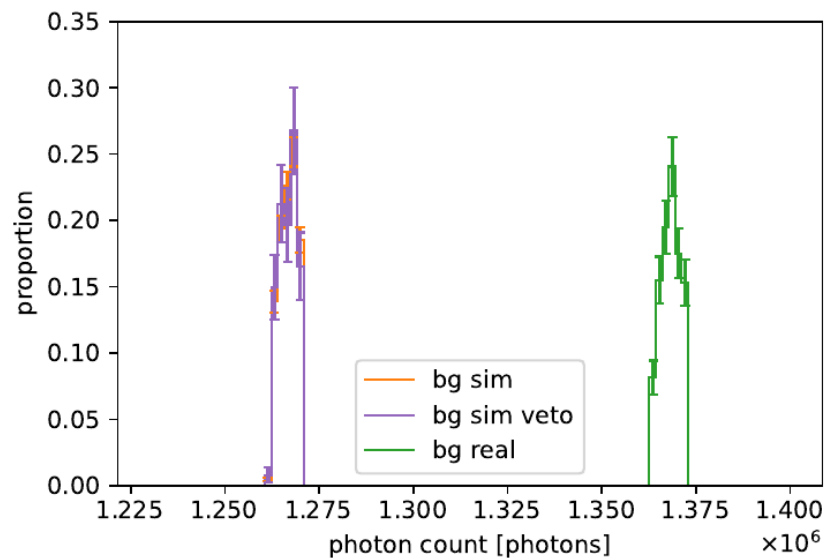


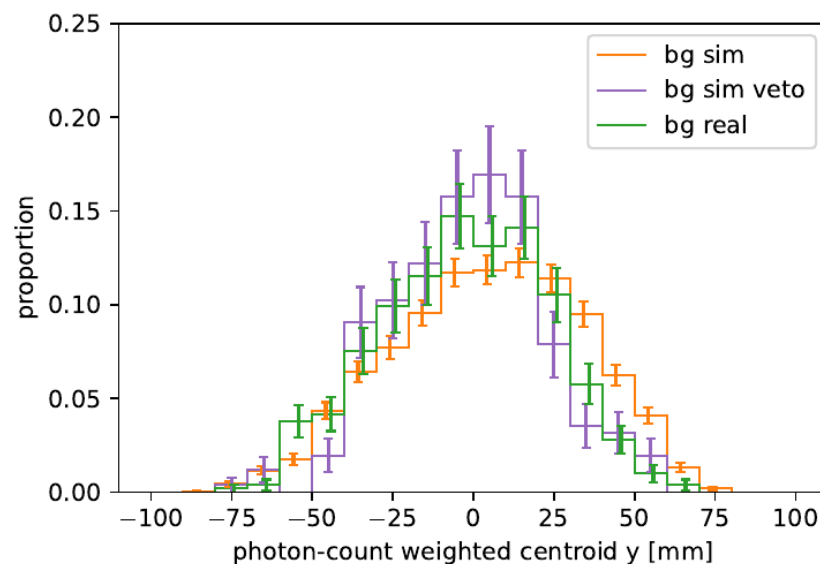
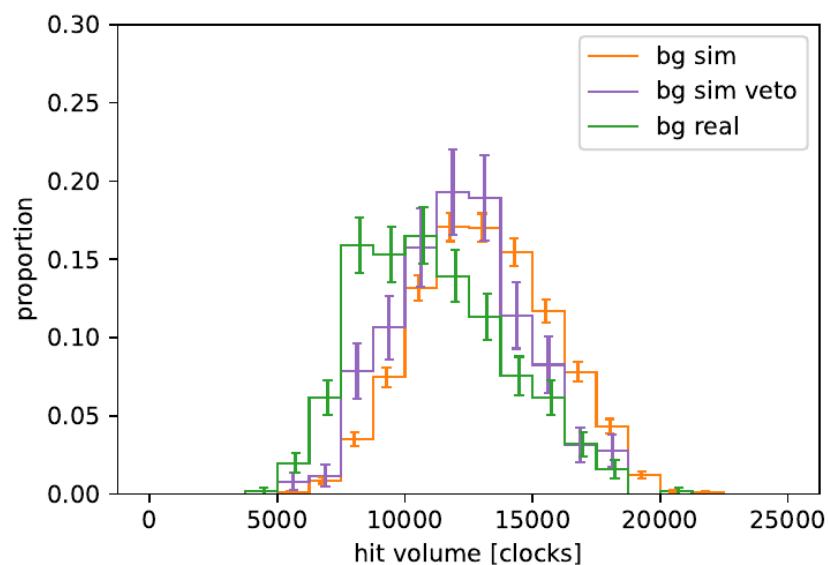
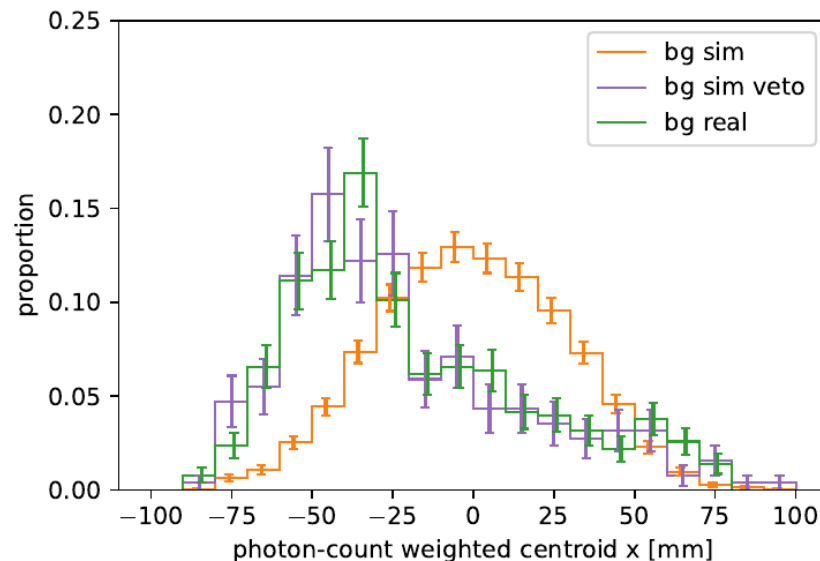
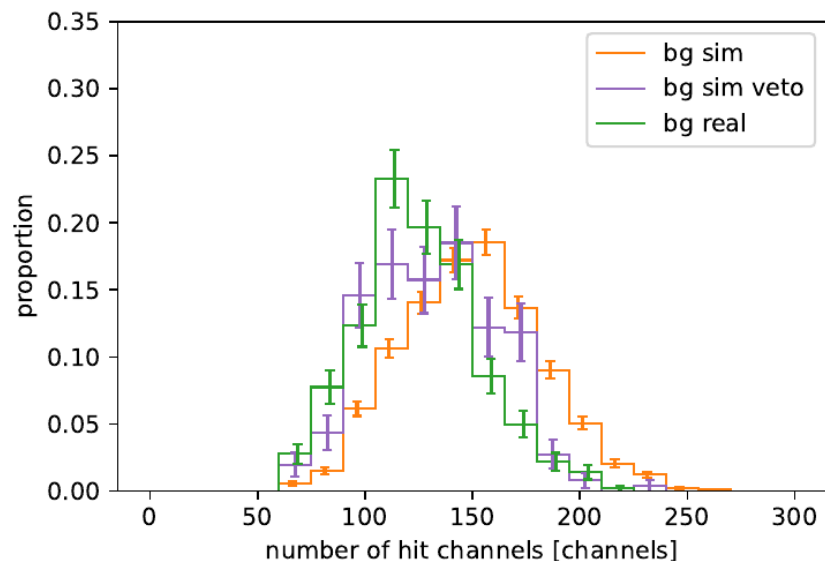


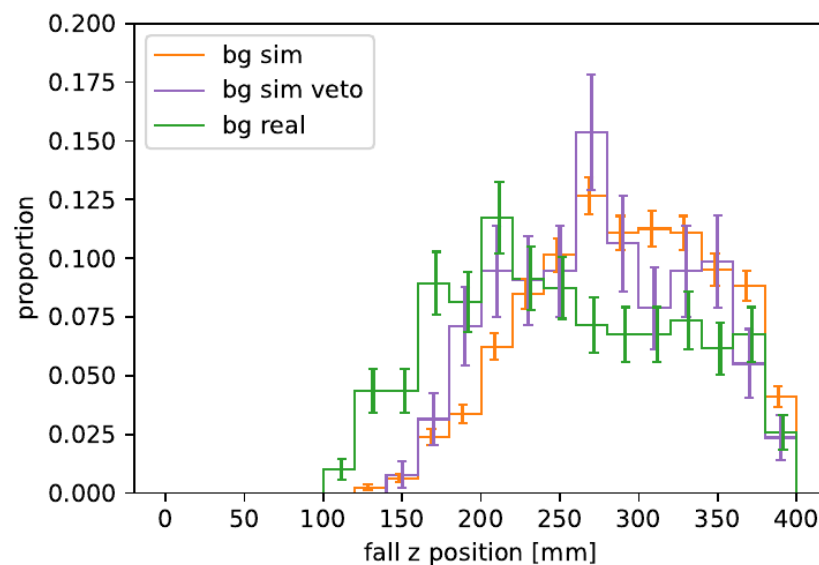
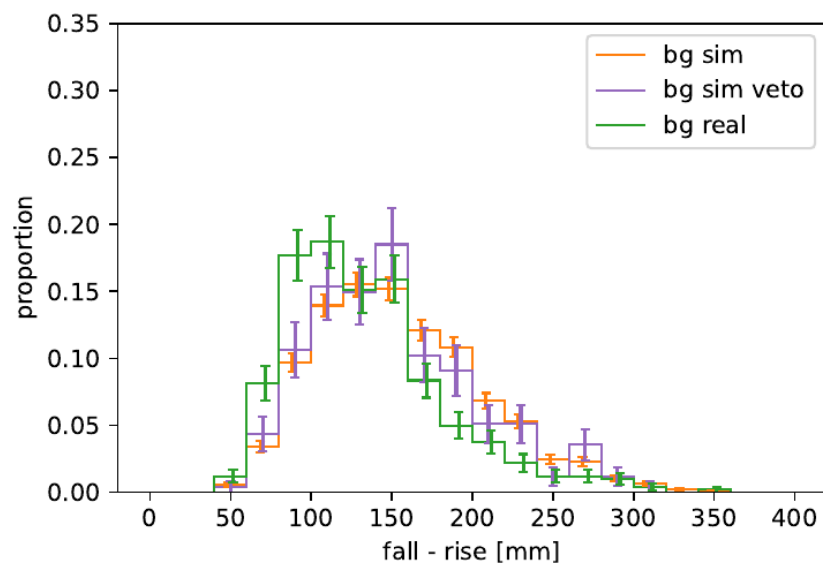
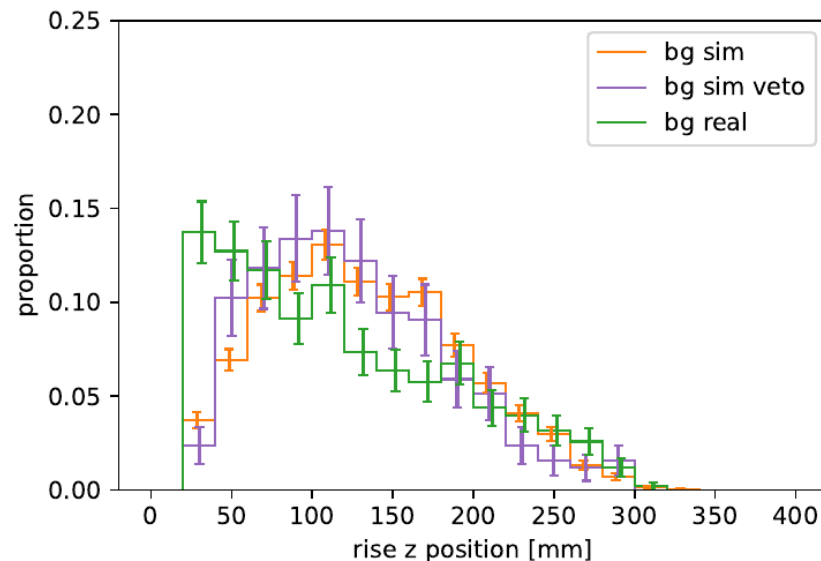
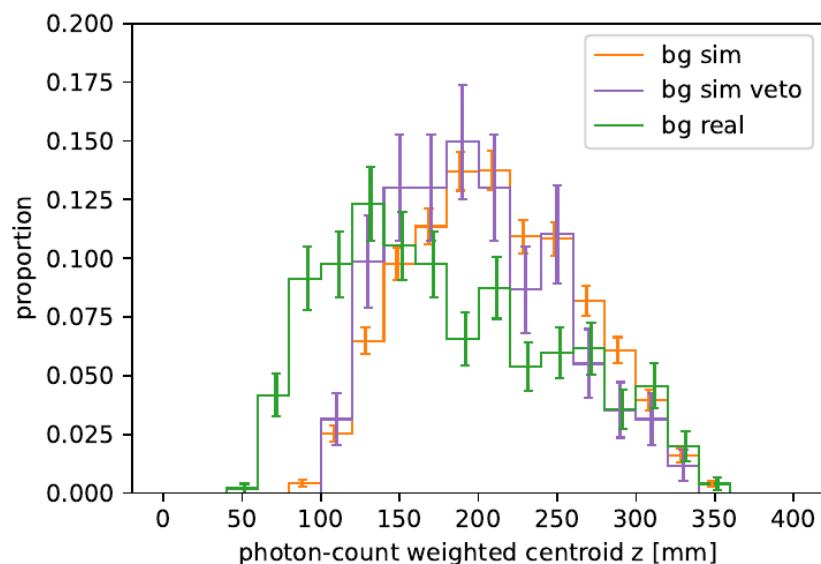


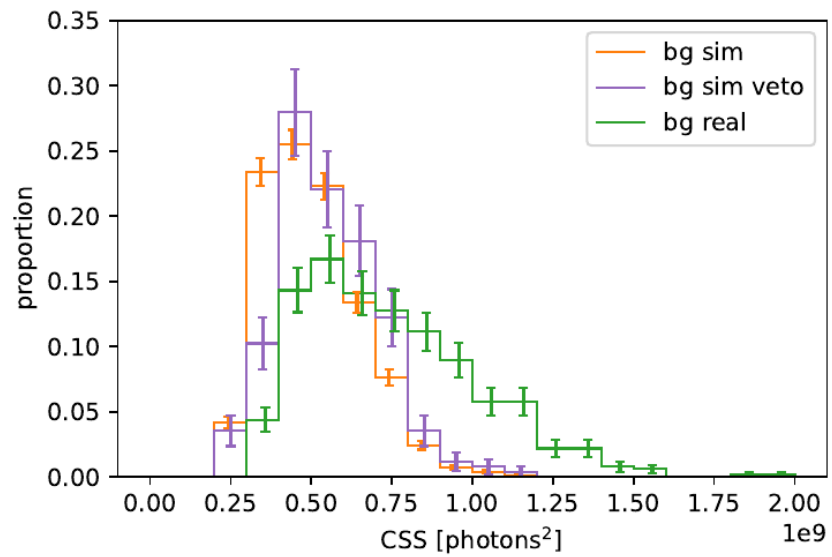


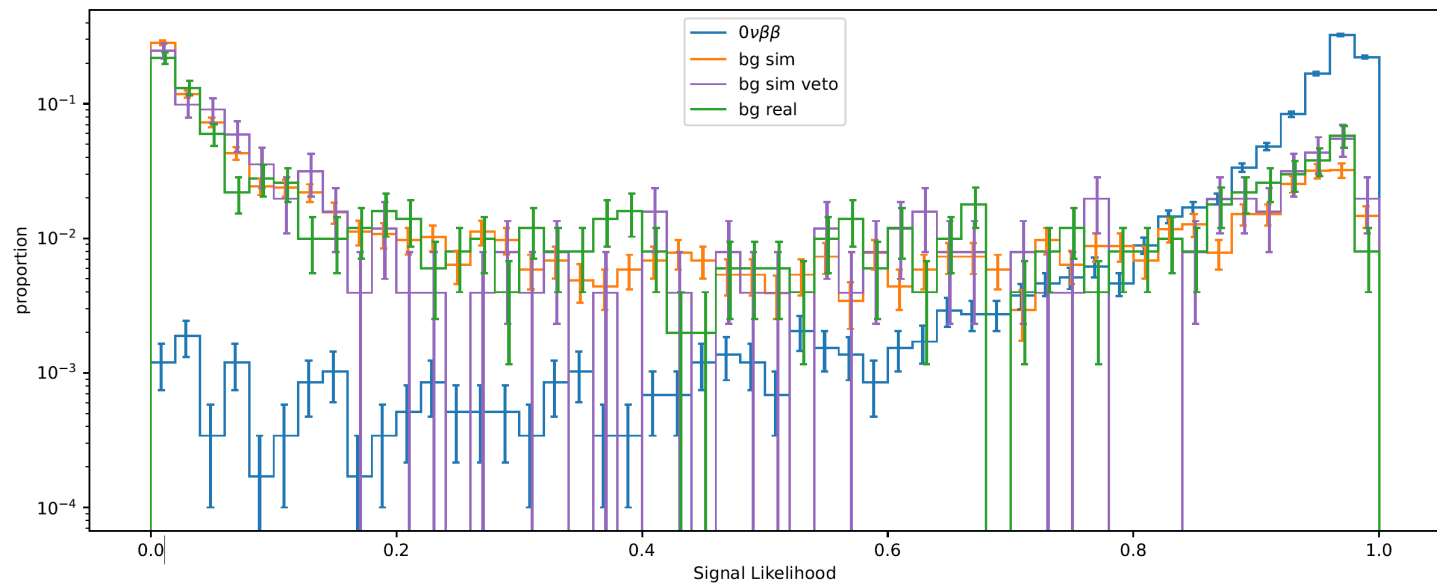
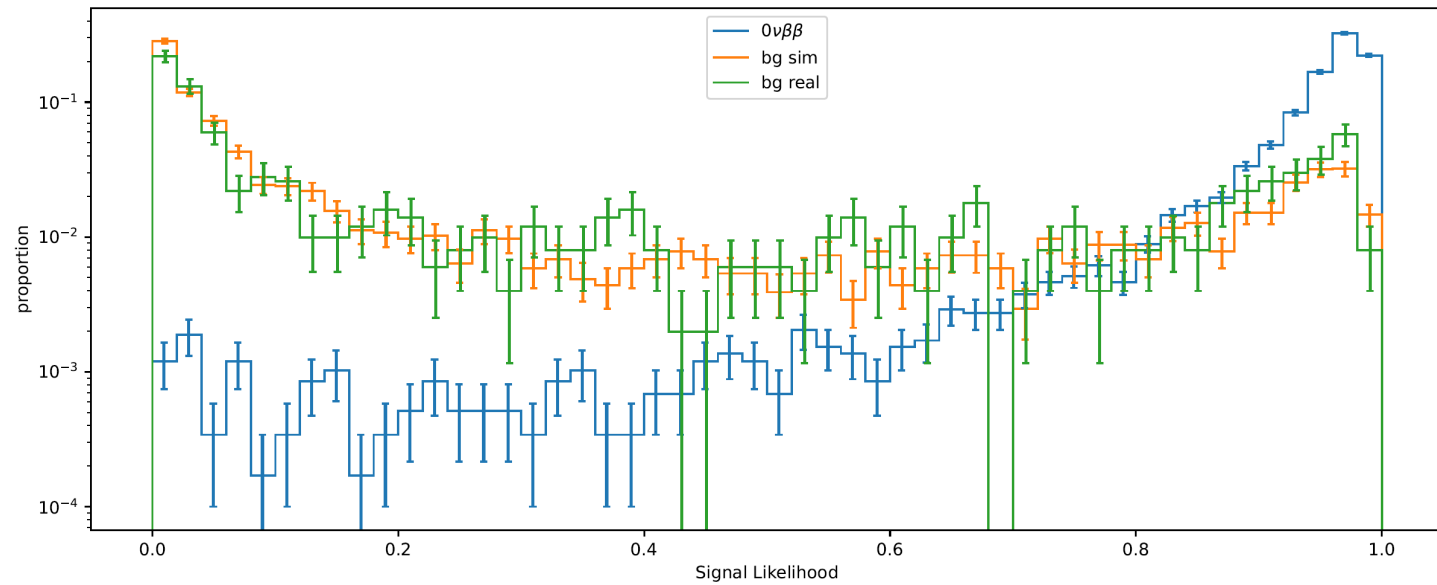


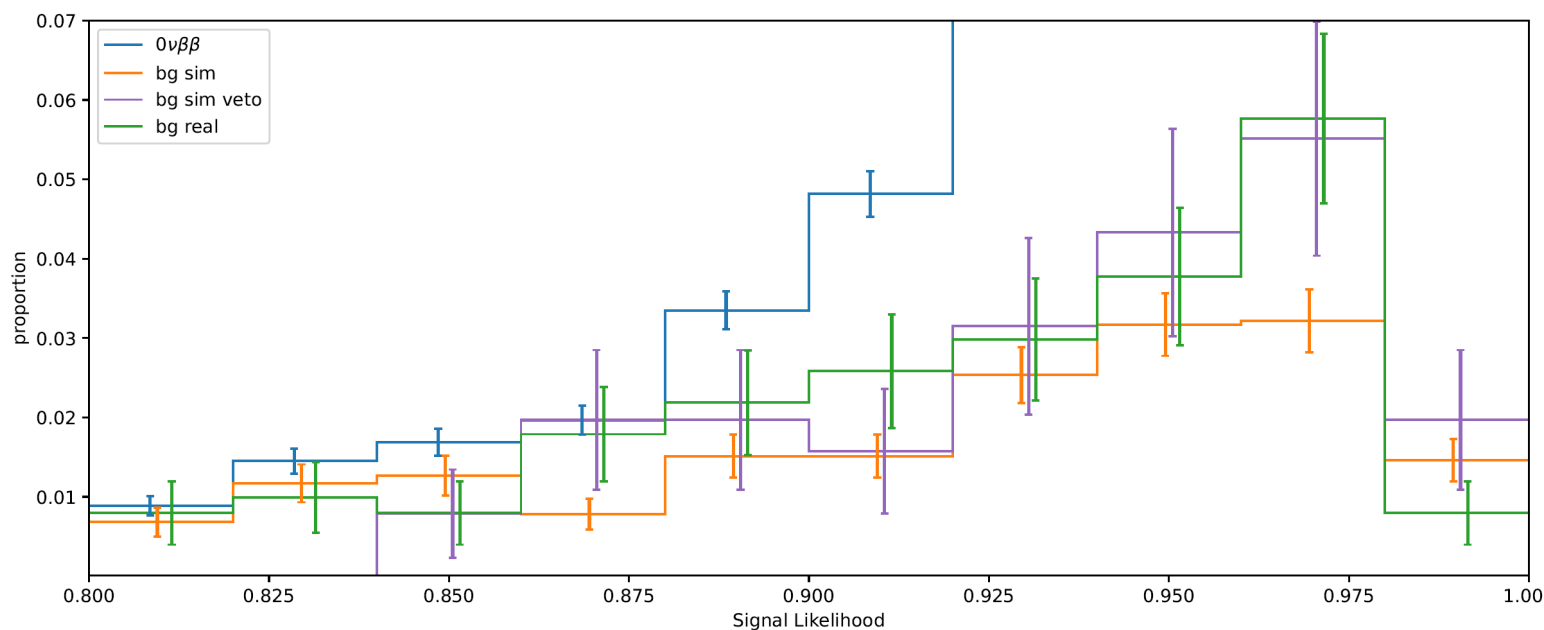












バックグラウンドの混入割合

	threshold = 0.90	threshold = 0.93	threshold = 0.95
validation	0.119±0.008	0.089±0.007	0.062±0.005
validation(veto)	0.165±0.026	0.130±0.023	0.094±0.019
実データ	0.159±0.018	0.119±0.015	0.085±0.013

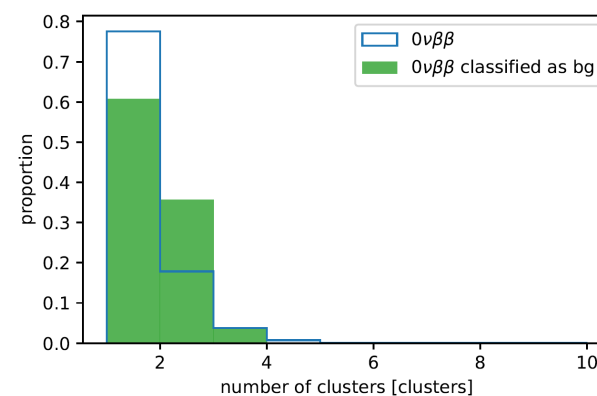
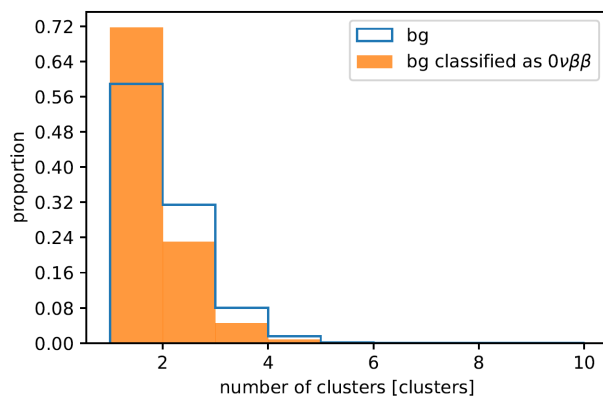
x1.3~1.4倍
程度



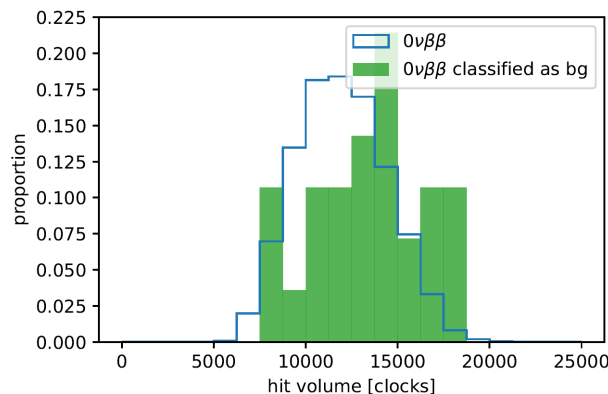
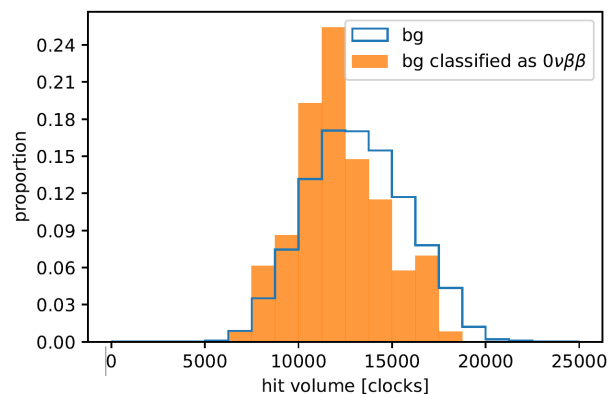
- BGなのに $0\nu\beta\beta$ (mimic)、 $0\nu\beta\beta$ なのにBG(oversight)と判定されたイベント
 - クラスター数が少ない
 - トラックの体積が小さい } $0\nu\beta\beta$ と判定されやすい傾向

→ 特に、実データでトラックの体積が小さいことが signal likelihood 分布の違いに影響している可能性

クラスター数



トラック体積



- 実データの方がトラック体積が小さい傾向

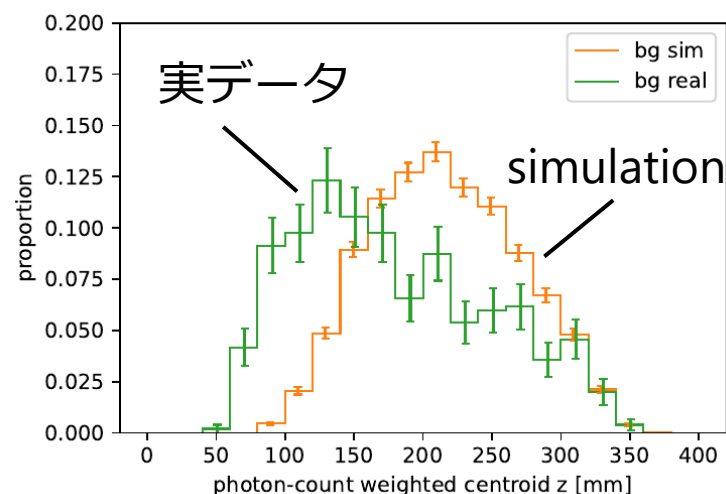
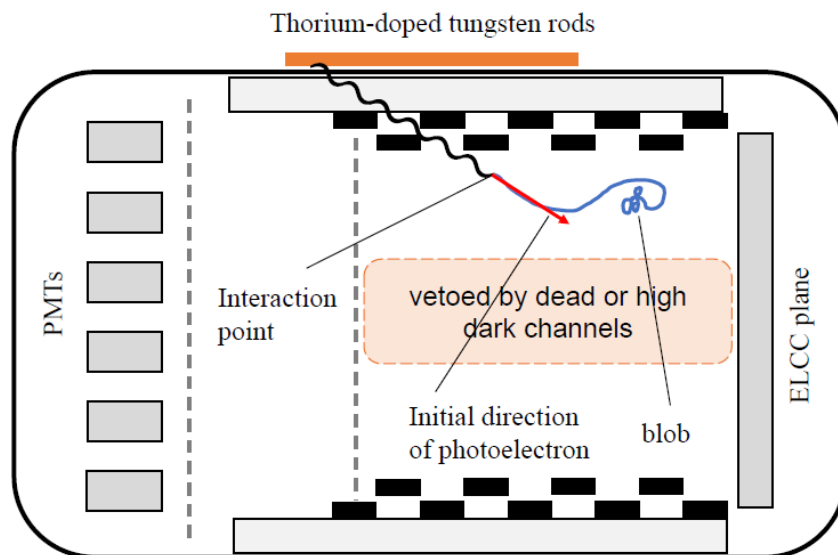
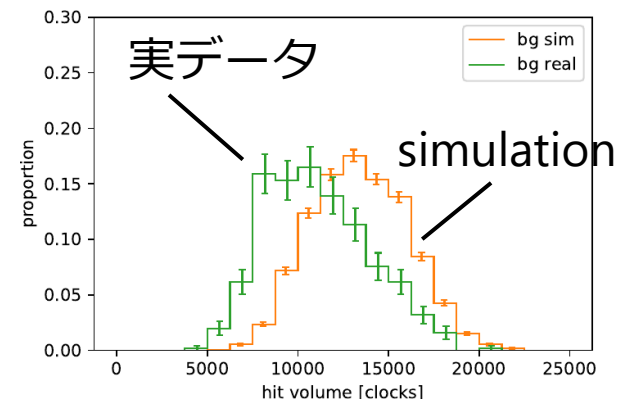
→ BGなのに $0\nu\beta\beta$ 判定されるイベント増

- 線源の位置、放出方向の違い

- 実データ → TPC有感領域のやや上方、等方的

- シミュレーション → TPC有感領域直上、真下方向

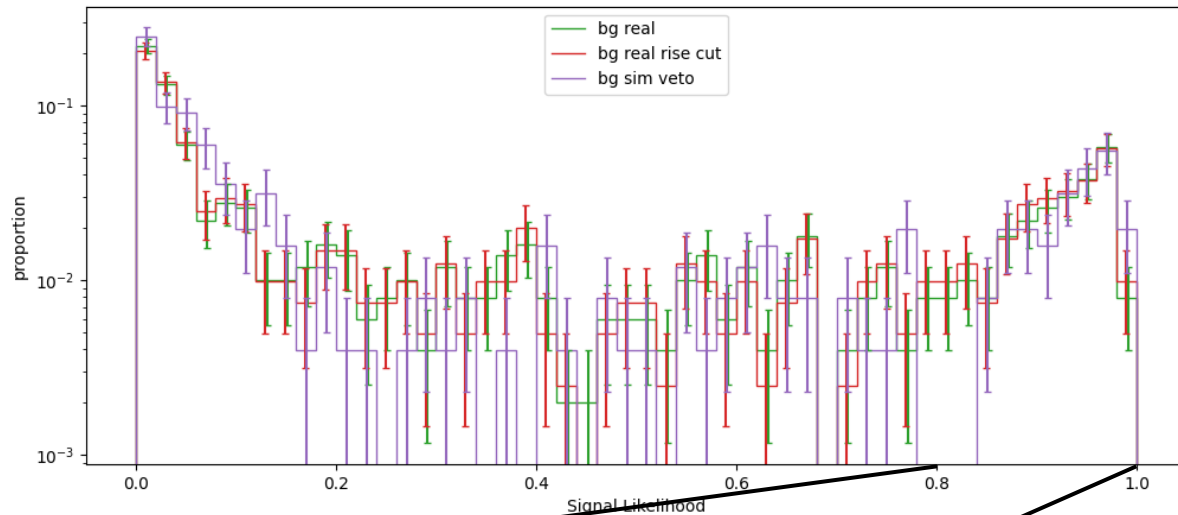
→ 光電効果の電子放出方向の角度依存性によって、実データではトラックの終端が low z 側にバイアス、ドリフト中の拡散小 → トラック体積小



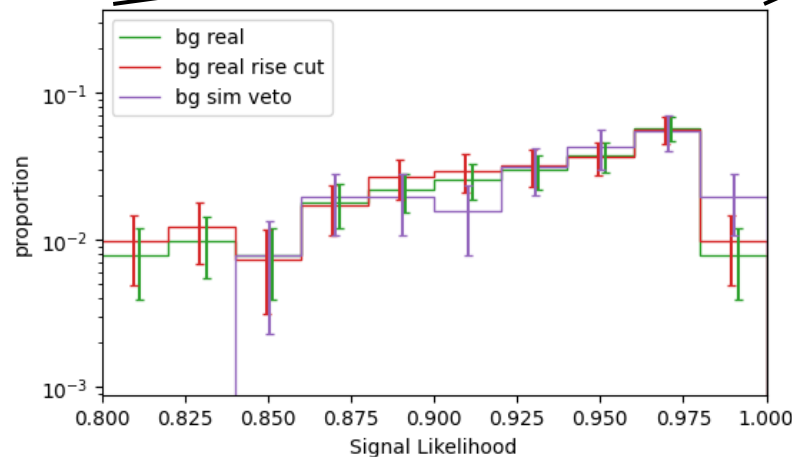
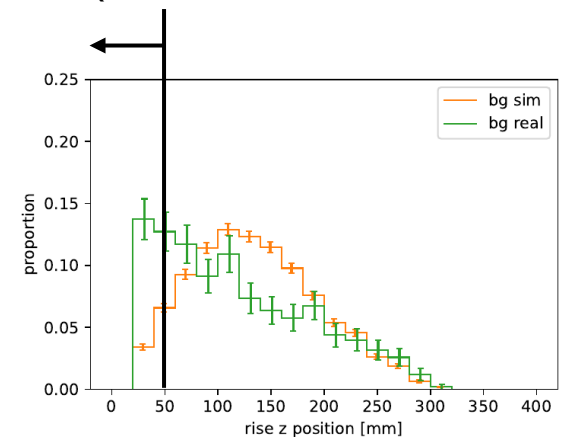
z方向の分布によるlikelihood histへの影響

90

- 実データのz位置の分布がシミュレーションと異なる影響
- 実データのトラックの最小z位置が小さいデータ(<50mm)をカットしたときのlikelihoodのふるまいを比較 → 有意な変動はみられず



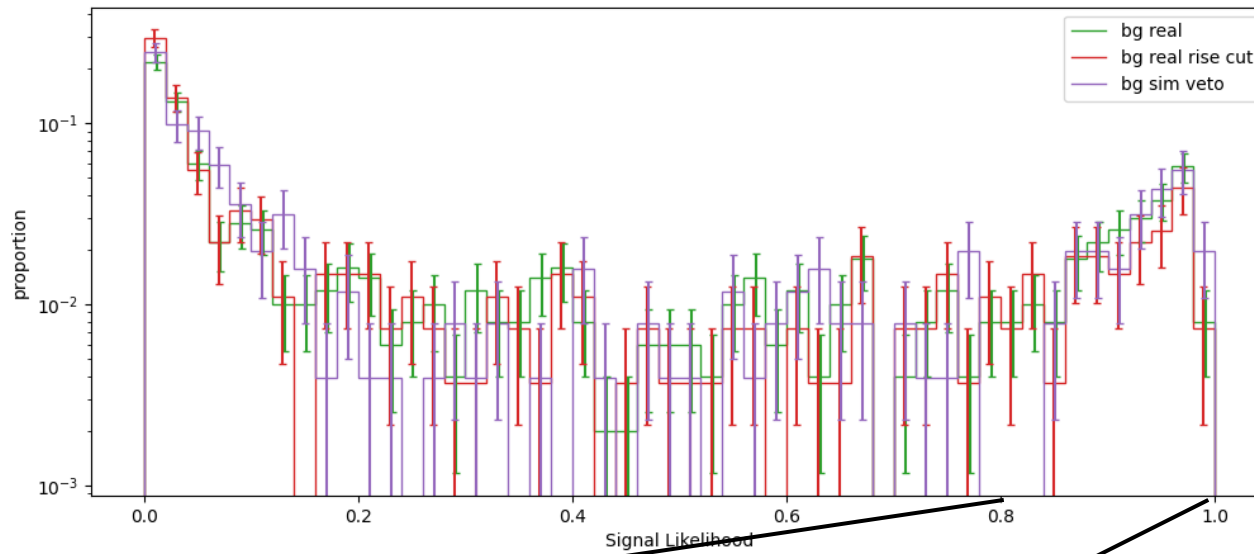
cut(実データ)



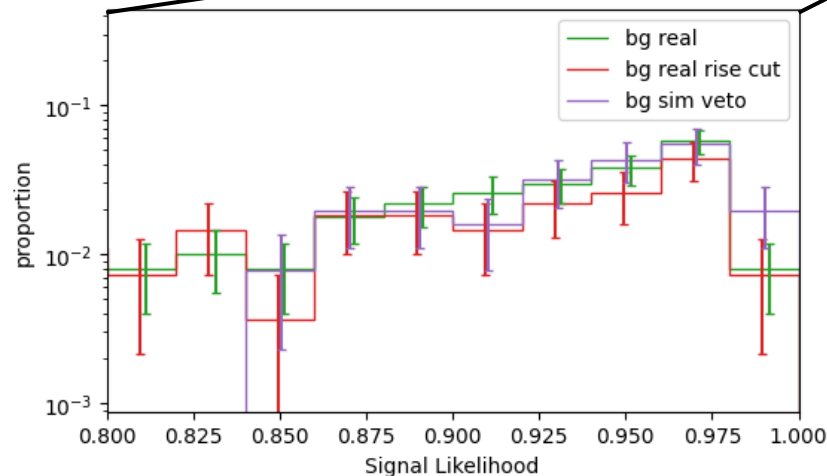
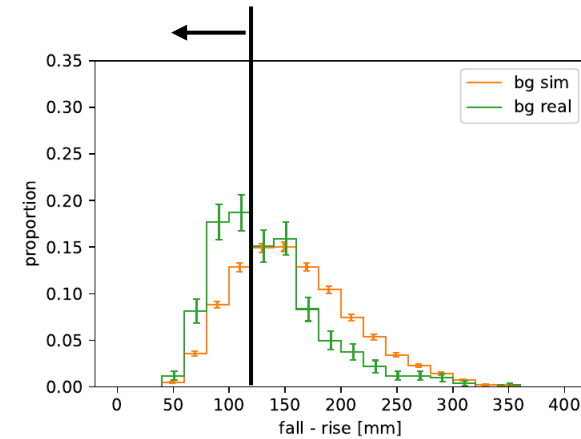
z方向の分布によるlikelihood histへの影響

91

- z方向の広がりについても比較 (<120mmをカット)
- 有意な変動はみられず

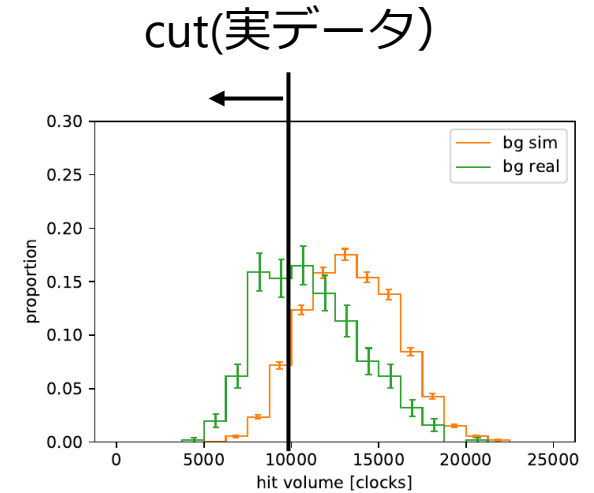
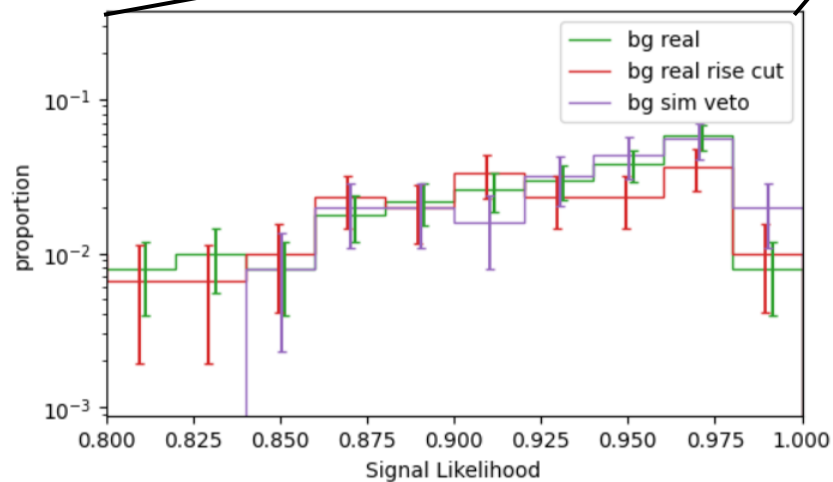
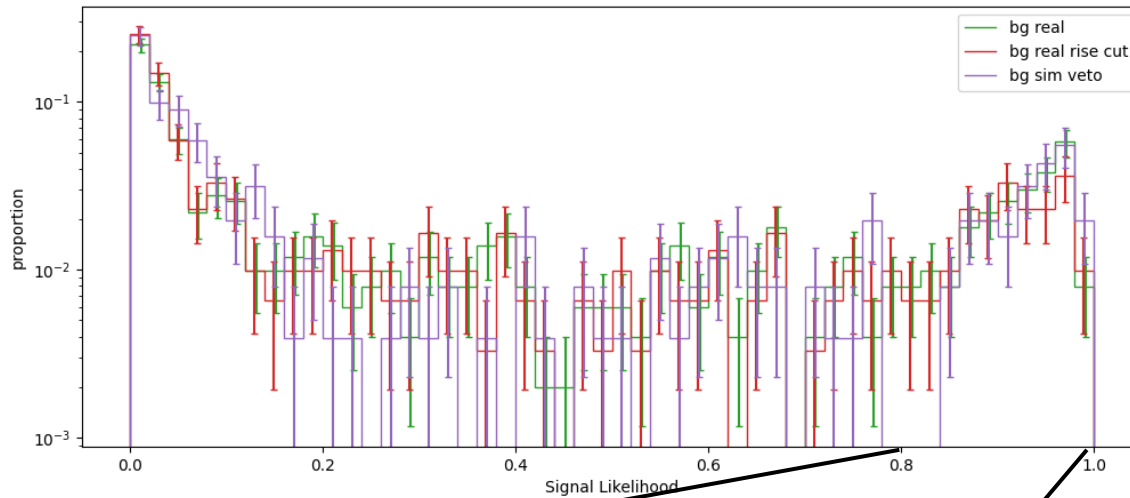


cut(実データ)



トラック体積によるlikelihood histへの影響 92

- トラック体積についても比較(<10000をカット)
- 有意な変動はみられず



- 実データの hitvolume が小さいことが、「BGなのに $0\nu\beta\beta$ と判定」イベントを増やす可能性がある
- validation データに対する hit volume と likelihood の分布でも、「BGなのに $0\nu\beta\beta$ と判定」（図右側のオレンジの点）は hit volume が小さい傾向が見られている
- 実データでは、hitvolumeの制限でlikelihood histogramには有意差が見られなかったが、データ量の不足の可能性も考えられる

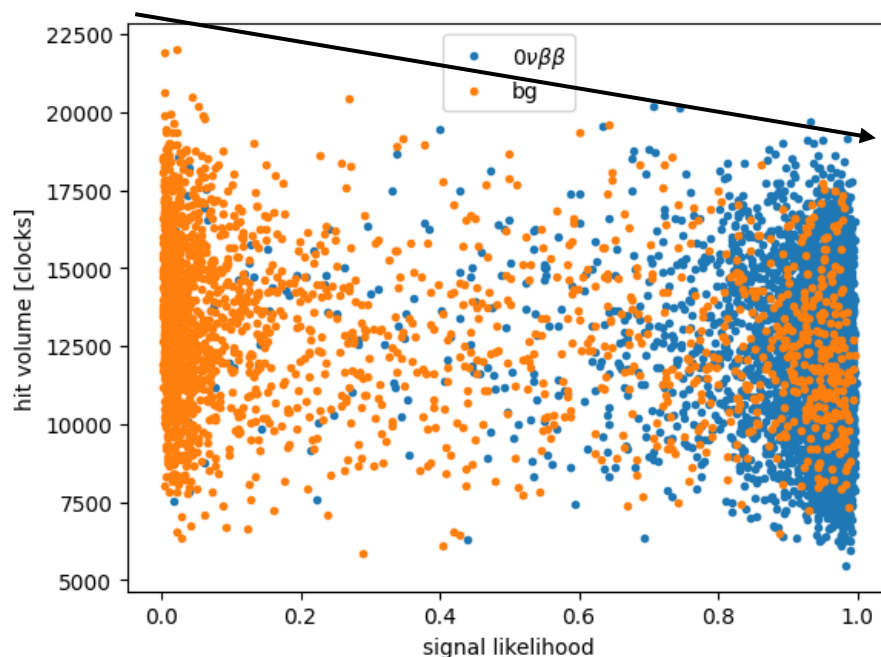



Table7.1: Breakdown of the energy resolution at 1836 keV listed in descending order.

Error in the time variation correction (Sec. 7.1.2)	0.32 %	→ 0%(統計増、安定測定)
Fluctuation of the number of initial ionization electrons (Sec. 7.1.1)	0.29 %	
Fluctuation of the EL generation and detection (Sec. 7.1.1)	0.24 %	→ 0.15% (光量2.6倍)
Error in the EL gain correction (Sec. 7.1.2)	0.23 %	→ 0%(統計増、安定測定)
Recombination (Sec. 7.1.1)	0.22 %	→ 0%(100%ドリフト電場)
Fluctuation of the MPPC non-linearity (Sec. 7.1.1)	0.18 %	
z mis-reconstruction (Sec. 7.1.4)	0.13 %	→ 0%(シンチ光効率UP)
Variation in time bin of time variation correction (Sec. 7.1.2)	$\lesssim 0.16$ %	
Error in the z -dependence correction (Sec. 7.1.2)	$\lesssim 0.11$ %	
Accuracy of the MPPC recovery times (Sec. 7.1.2)	$\lesssim 0.11$ %	
Offset of the baseline (Sec. 7.1.3)	$\lesssim 0.09$ %	
Fluctuation of the attachment (Sec. 7.1.1)	$\lesssim 0.02$ %	
Position dependence of the EL gain (Sec. 7.1.3)	0 %	
Waveform filtering in the FEB (Sec. 7.1.3)	0 %	
Estimation total	0.63 % to 0.67 %	→ 0.37 % to 0.44 %
Data total	(0.73 \pm 0.11) %	



0.32 % @ $Q_{\beta\beta}$

	Contribution	
Initial ionization	0.25%	
Z mis-reconstruction	0.24%	→0%
Fluctuation of the EL generation and detection	0.20%	→0.14%光量2.14倍
Error in EL gain calibration	0.18%	→0%
Error in time dependence correction	0.18%	→0%
Recombination	0.17%	→0%
Variation in time bin of time variation correction	0.12%	
Offset of the baseline	$\leq 0.11\%$	
Error in z dependence correction	$\leq 0.06\%$	
Fluctuation of the attachment	$\leq 0.02\%$	
Accuracy of the MPPC recovery time	$\leq 0.03\%$	
Fluctuation of the MPPC nonlinearity	not yet evaluated	
Estimation total	(0.52-0.54)%	→ 0.31-0.33%
Data total	(0.67±0.08)%	 0.32% @ $Q_{\beta\beta}$