

# 荷電レプトンフレーバーを破るミュー オンの崩壊 $\mu \rightarrow e\gamma$ の探索

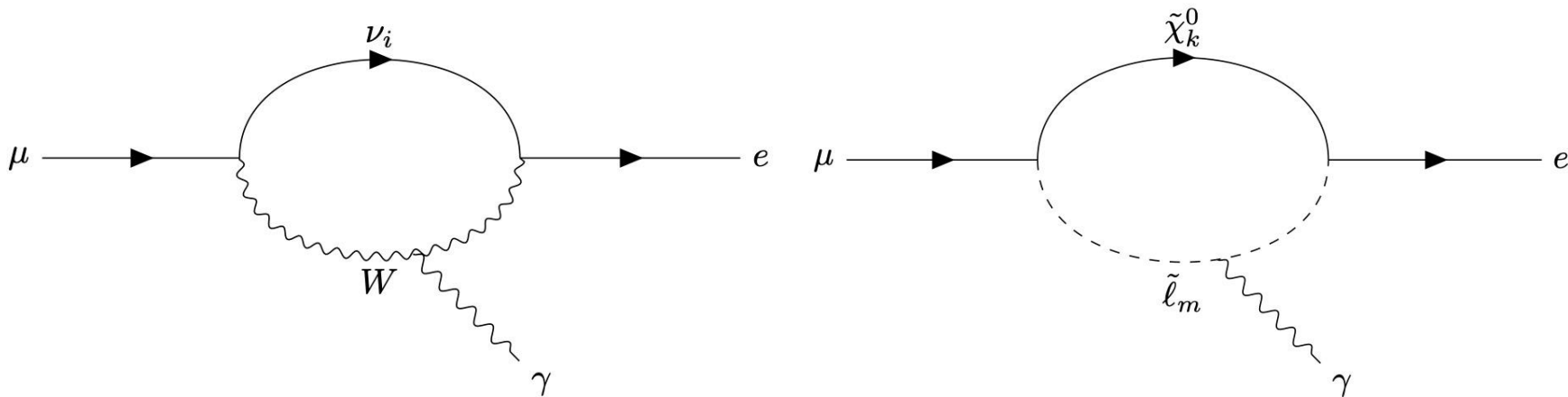
課題研究P2 京都大学理学部4年  
大杖、馬場、ソク、高井

# 目次

1. 理論
2. 実験装置
3. 予備実験
4. 本実験
5. 再構成
6. 解析
7. 結論
8. 今後の課題

# 1. 理論

$\mu \rightarrow e\gamma$  : フレーバー非保存、back to back、52.8MeV固定



SM + ニュートリノの混合

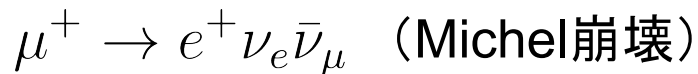
$$\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e\gamma) \ll 10^{-50}$$

SUSY: スレプトンの混合

$$\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e\gamma) \approx 10^{-13} \sim 10^{-11}$$

# 1. 理論

## ミューオンの崩壊系列



~100%、偶発BG

特徴的なスペクトル



1% ( $E_\gamma > 10\text{MeV}$ )

背景事象になる

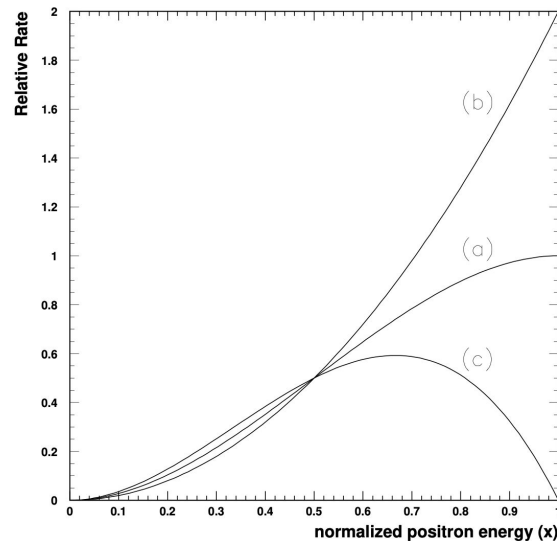


FIG. 2. Michel  $e^+$  energy spectrum of polarized  $\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$  decay with 100% muon polarization ( $P_\mu = 1$ ). (a)  $\cos\theta_e = 0$ , (b)  $\cos\theta_e = 1$ , and (c)  $\cos\theta_e = -1$ .

Kuno and Okada (1999)

## 2. 実験装置

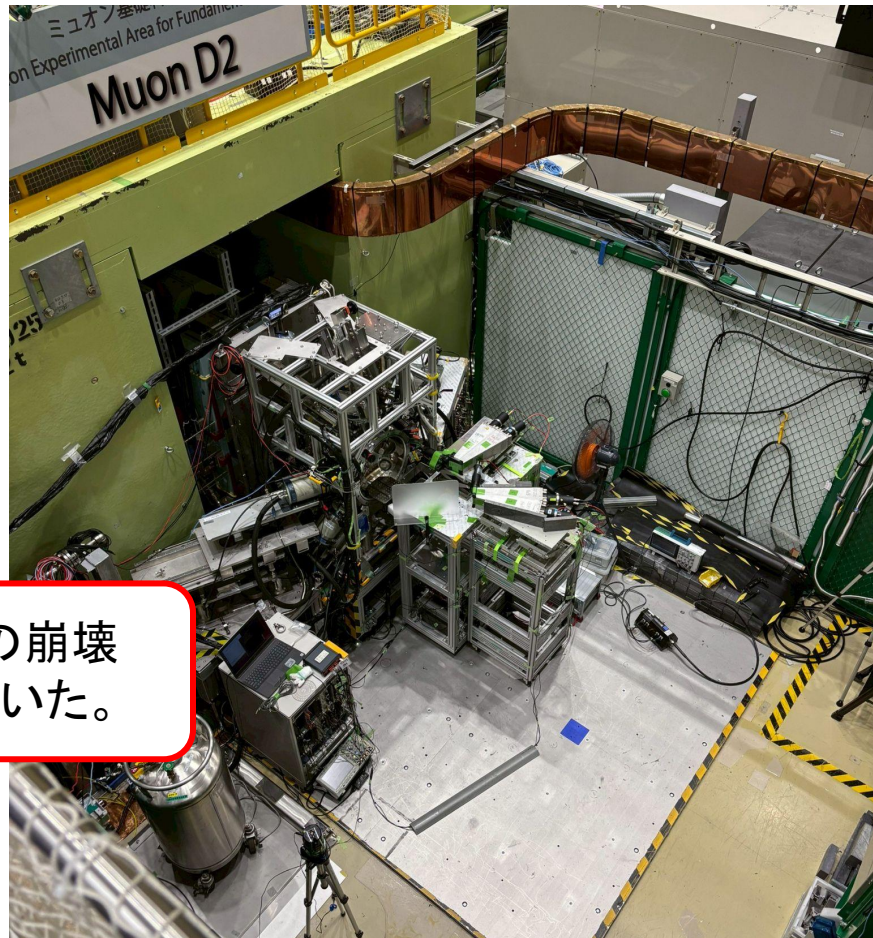
### 2-1. Muon D2

- ・大強度陽子加速器施設J-PARCの物質・生命科学実験施設MLFにおける、ミュオン基礎科学実験装置。
- ・利用者による実験装置の持ち込み可能。
- ・世界最強クラスのパルスミュオンビーム。

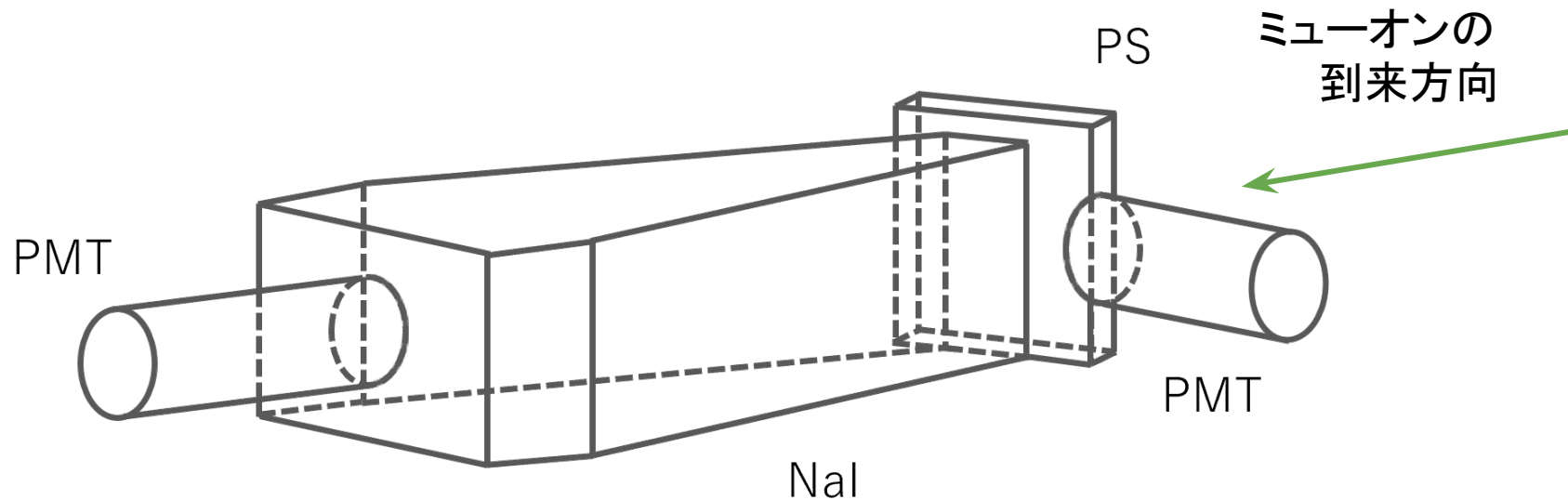
#### 【プロパティ】

- ・25 Hz, ダブルパルス
- ・強度  $5.0 \times 10^6 \mu\text{/s}$
- ・表面ミュオン 27.4 MeV/c  
崩壊ミュオン 正 20~100 MeV/c  
負 20~45 MeV/c

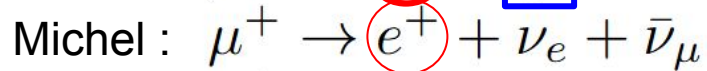
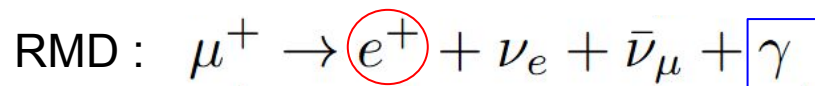
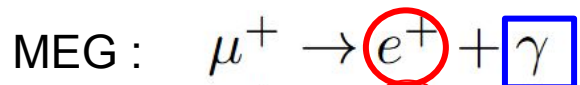
45 MeV/c 正の崩壊  
ミュオンを用いた。



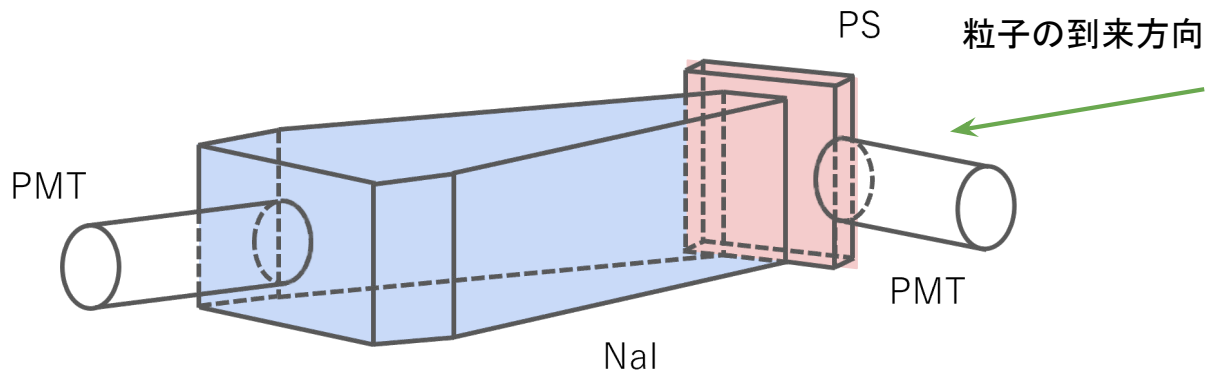
## 2-2. 検出器



陽電子(荷電粒子)、光子を区別し、エネルギーを測定する。



## 2-2. 検出器

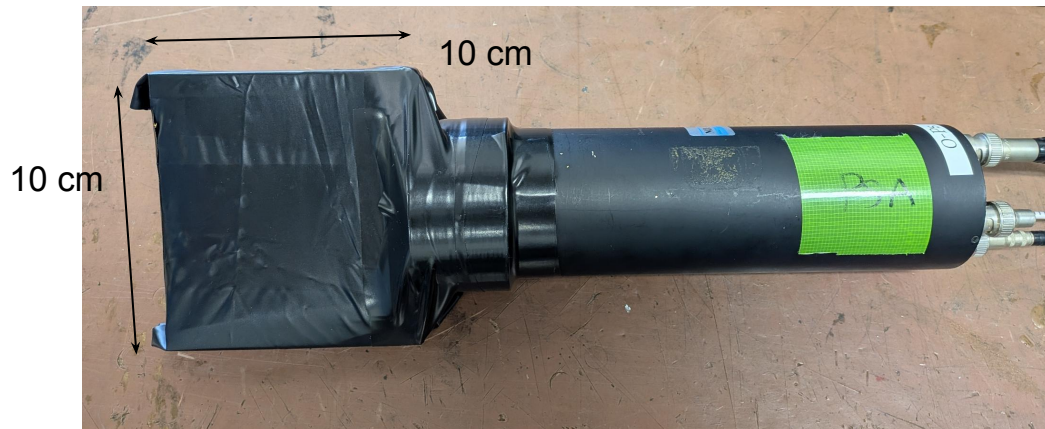


前段PSに反応

後段NaIに反応

あり	{	あり	→	陽電子などの荷電粒子	→	NaIでエネルギー測定
		なし	→	(非常に低エネルギーの荷電粒子)		
なし	{	あり	→	光子	→	NaIでエネルギー測定
		なし	→	×		

## 2-2. 検出器



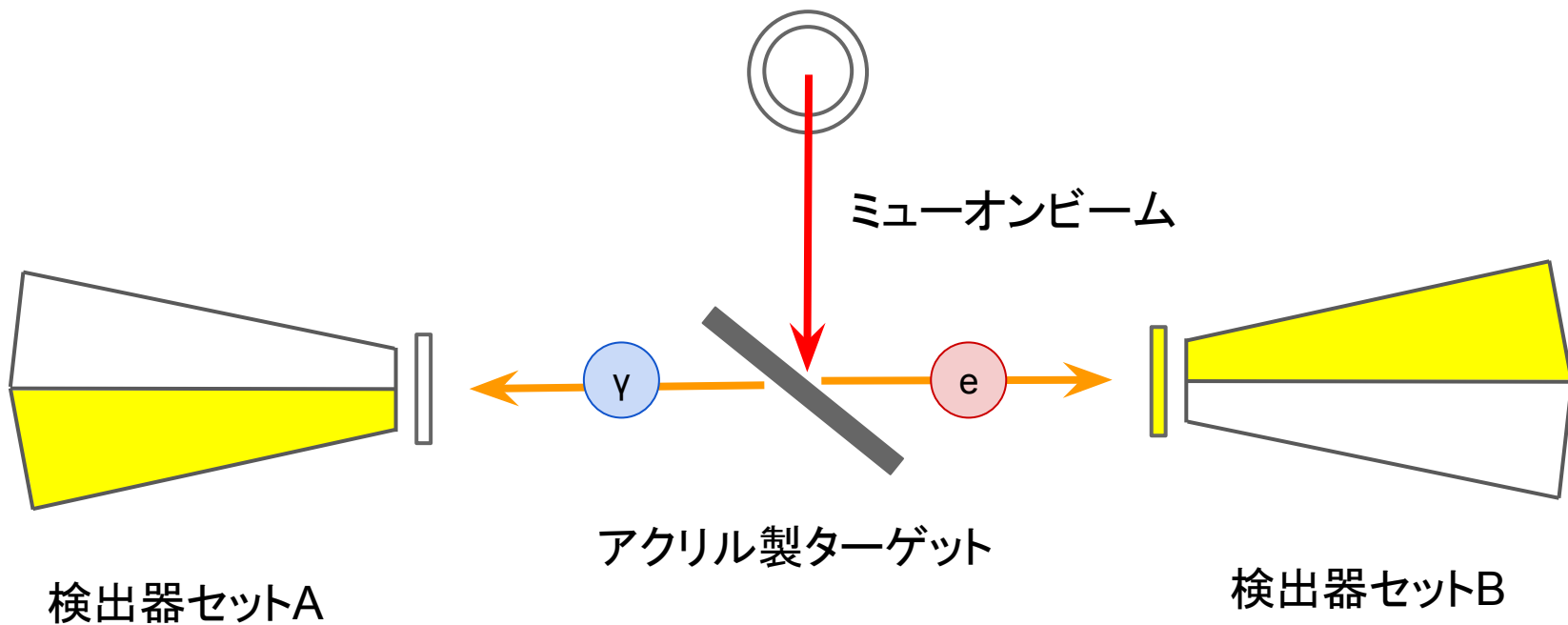
- ・NaI  
ICEPPより借用  
付属のPMTを使用



- ・PS 3Dプリンターでジョイントを作成しPMTを接着→遮光シートで遮光

## 2-2. 検出器

NaI 2つと、PSで1つの検出器セットとし、それを2セット用意。



## 3. 予備実験

3-1. NaIエネルギー分解能測定 → 解析窓決定と尤度解析に用いる。

3-2. NaIエネルギー較正 → 実験データをエネルギーに対応させる。

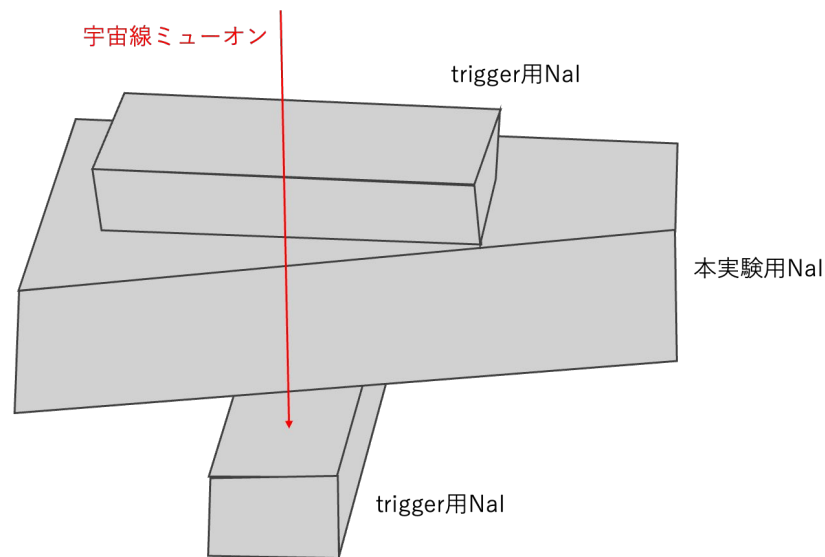
3-3. NaI時間分解能測定 → 尤度解析に用いる。

### 3. 予備実験

#### 3-1. NaIエネルギー分解能測定

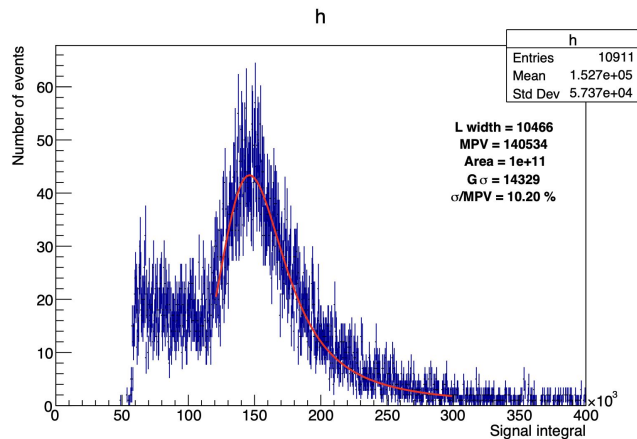
##### 【セットアップ】

上下のtrigger用NaIのcoincidenceから垂直入射の宇宙線ミュオンだけを取る。

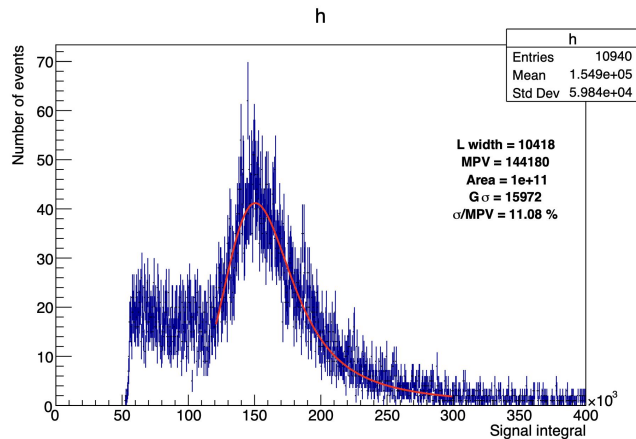


# 3-1. NaIエネルギー分解能測定

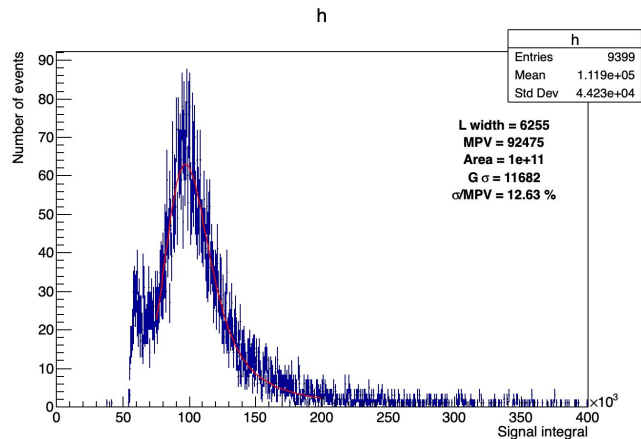
NaI\_A1



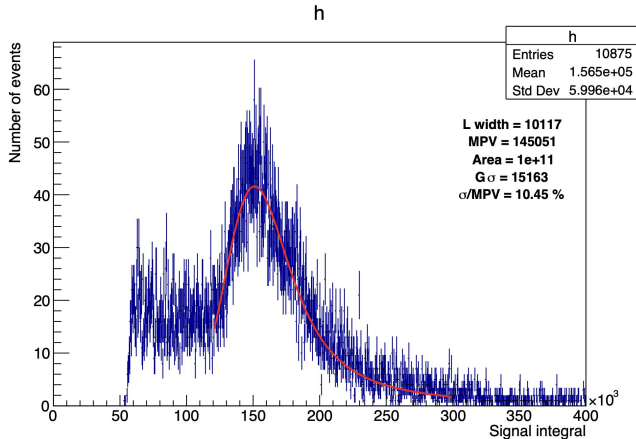
NaI\_A2



NaI\_B1



NaI\_B2



### 3. 予備実験

#### 3-2. NaIエネルギー較正

Na22 → 2点 (511 keV、1275 keV)

宇宙線ミュオン → 1点 (48.5 MeV)

の3点で較正。

【fitting parameters】

NaI\_A1

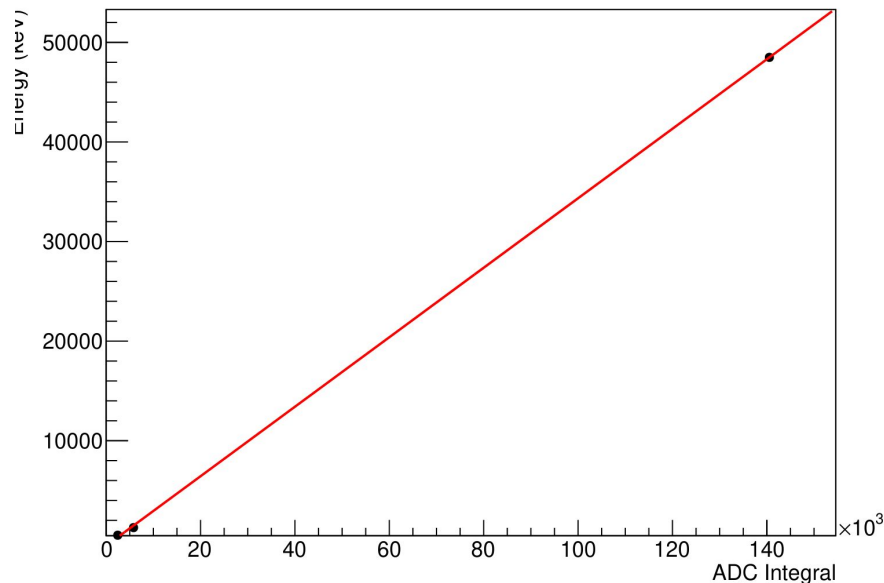
p0 = -543.525 +/- 208.124

p1 = 0.348942 +/- 0.00256251

**E = 0.348942 \* ADC - 543.525**

R<sup>2</sup> = 0.999946

Energy Calibration

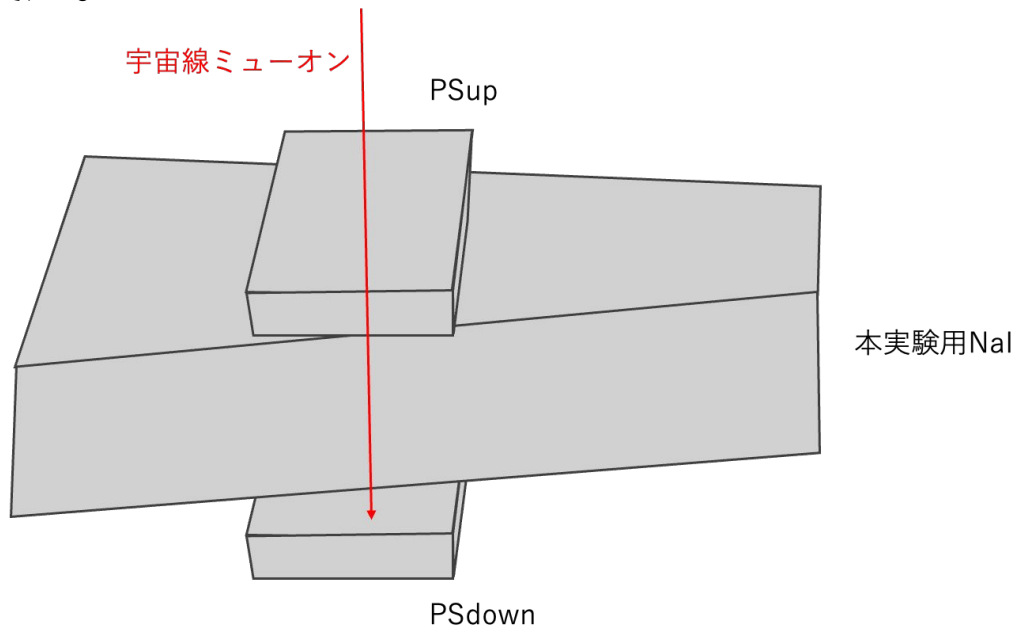


### 3. 予備実験

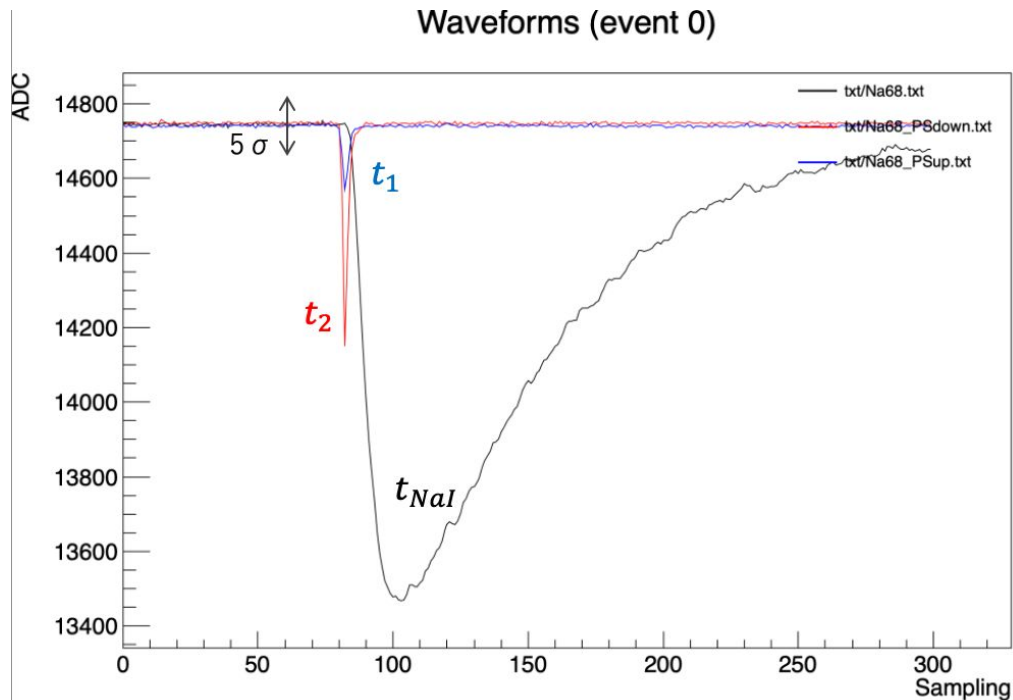
#### 3-3. NaI時間分解能測定

【セットアップ】

NaIより時間分解能が優れたPSを使用。



### 3-3. NaI時間分解能測定



$$T_{ref} = \frac{T_1 + T_2}{2}$$

$$T_{TB} = T_1 - T_2$$

$$\sigma_{ref} = \frac{\sigma_{TB}}{2}$$

$$\Delta T = T_{NaI} - T_{ref}$$

$$\sigma_{\Delta}^2 = \sigma_{NaI}^2 + \sigma_{ref}^2$$

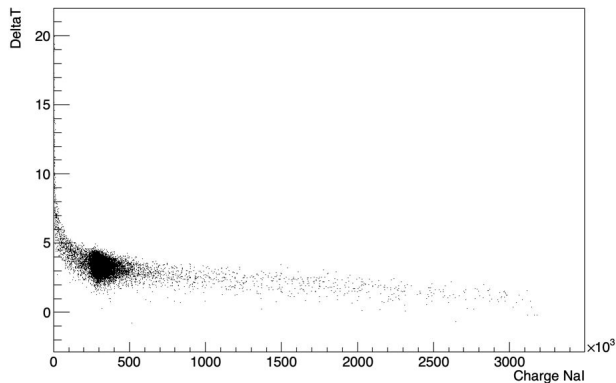
$\Delta T$  と  $T_{TB}$  のガウシアンフィットから  $\sigma_{NaI}$  測定

### 3-3. NaI時間分解能測定

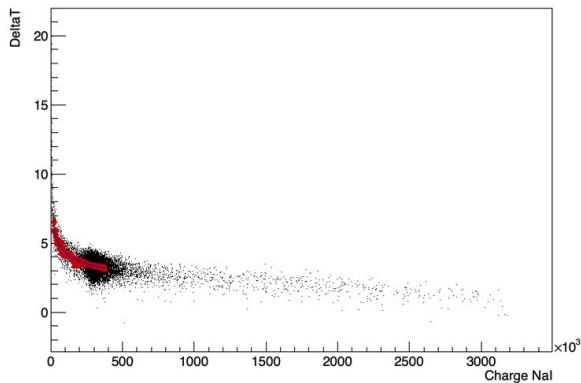
#### 1) TQ補正

$$\Delta t(A) = c_0 + \frac{c_1}{\sqrt{A}} + \frac{c_2}{A}$$

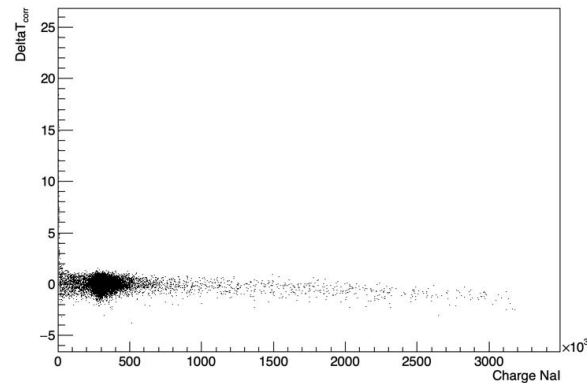
DeltaT vs Q0



DeltaT vs Q0



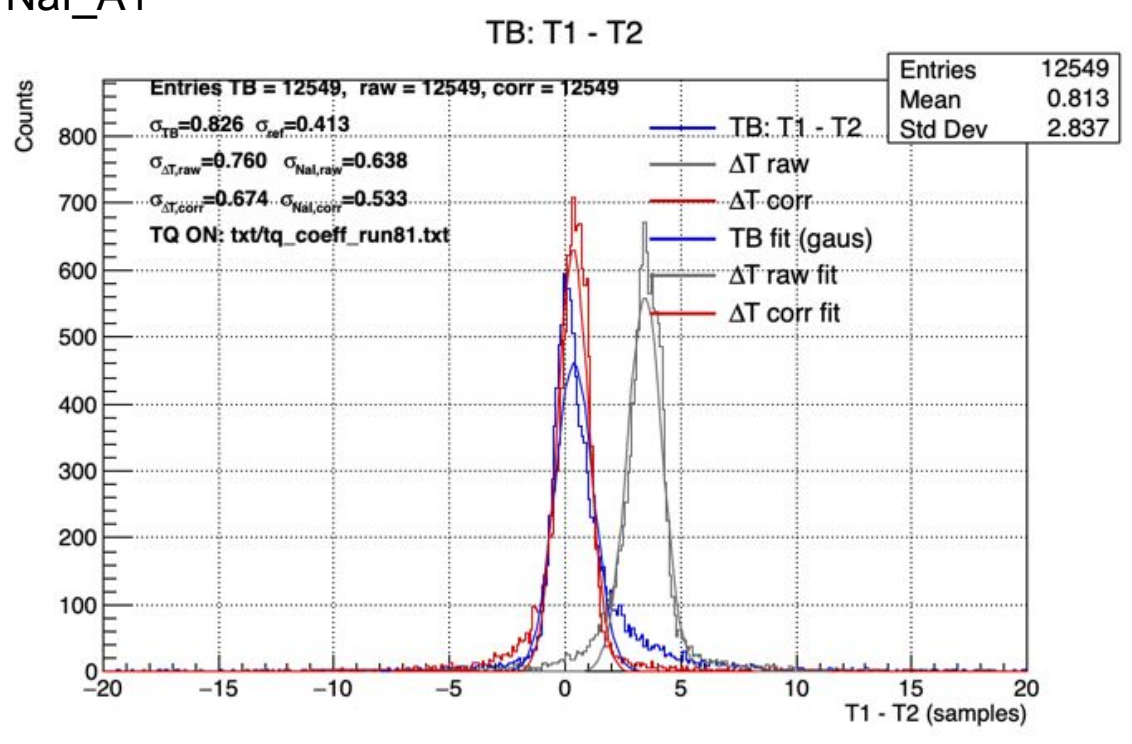
DeltaT<sub>corr</sub> vs Q0



### 3-3. NaI時間分解能測定

## 2) ガウシアンフィット (1sample 4ns)

NaI\_A1



NaI\_A1 : 2.132ns

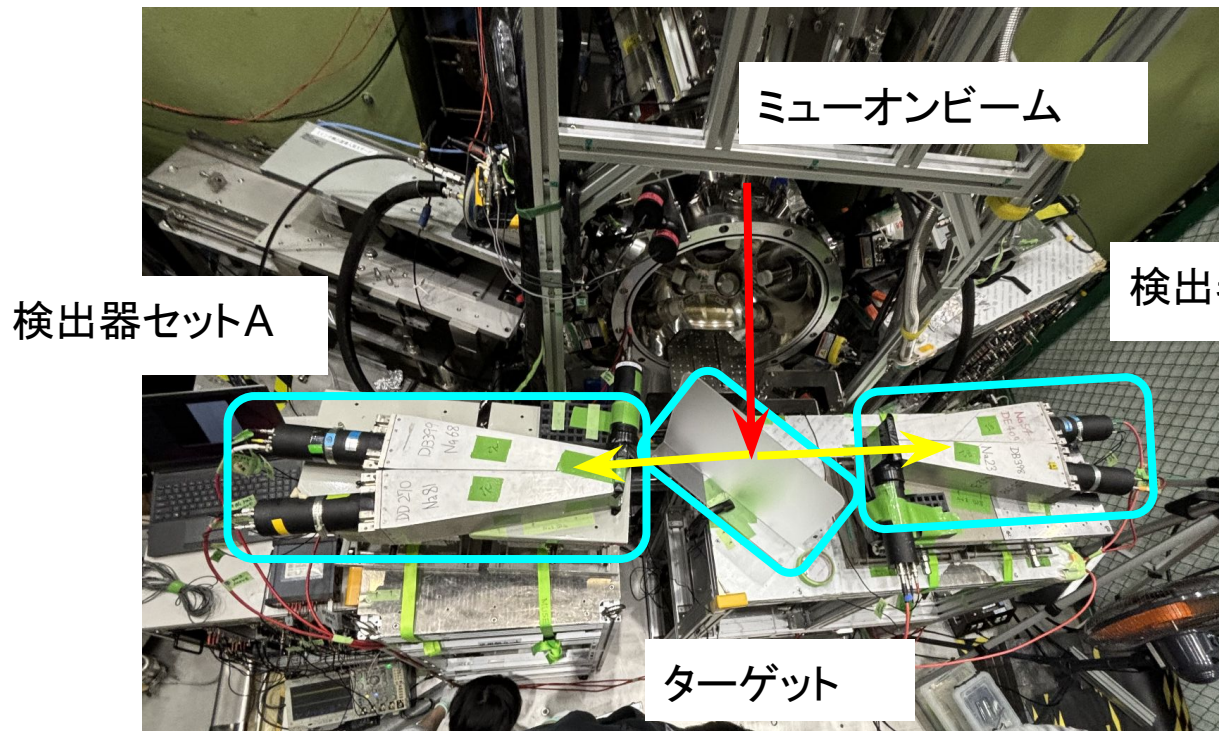
NaI\_A2 : 1.8ns

NaI\_B1 : 2.252ns

NaI\_B2 : 1.944ns

## 4. 本実験

### 4-1. セットアップ

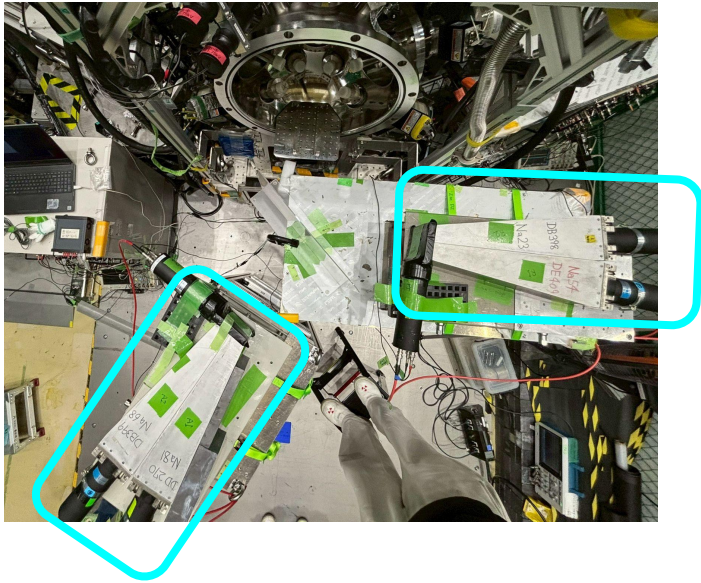


- ① 検出器セットを180°に配置し、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊のデータ取得。

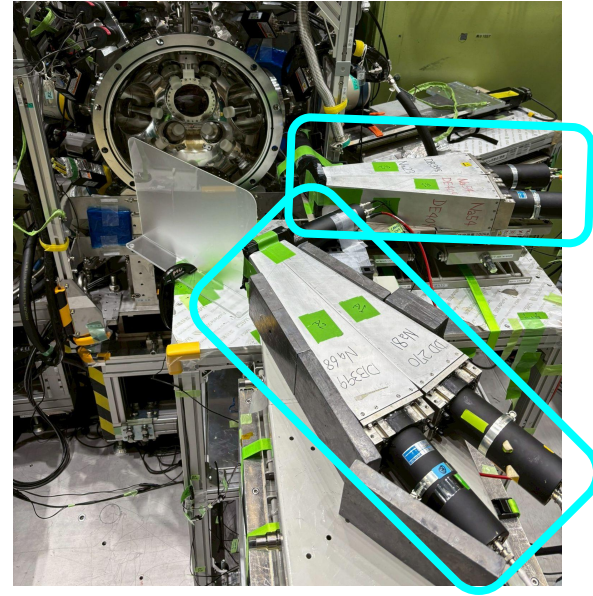
30分 × 7回

## 4-1. セットアップ

180°におけるRMDのバックグラウンド調査のため、120°、60°でデータを取得。

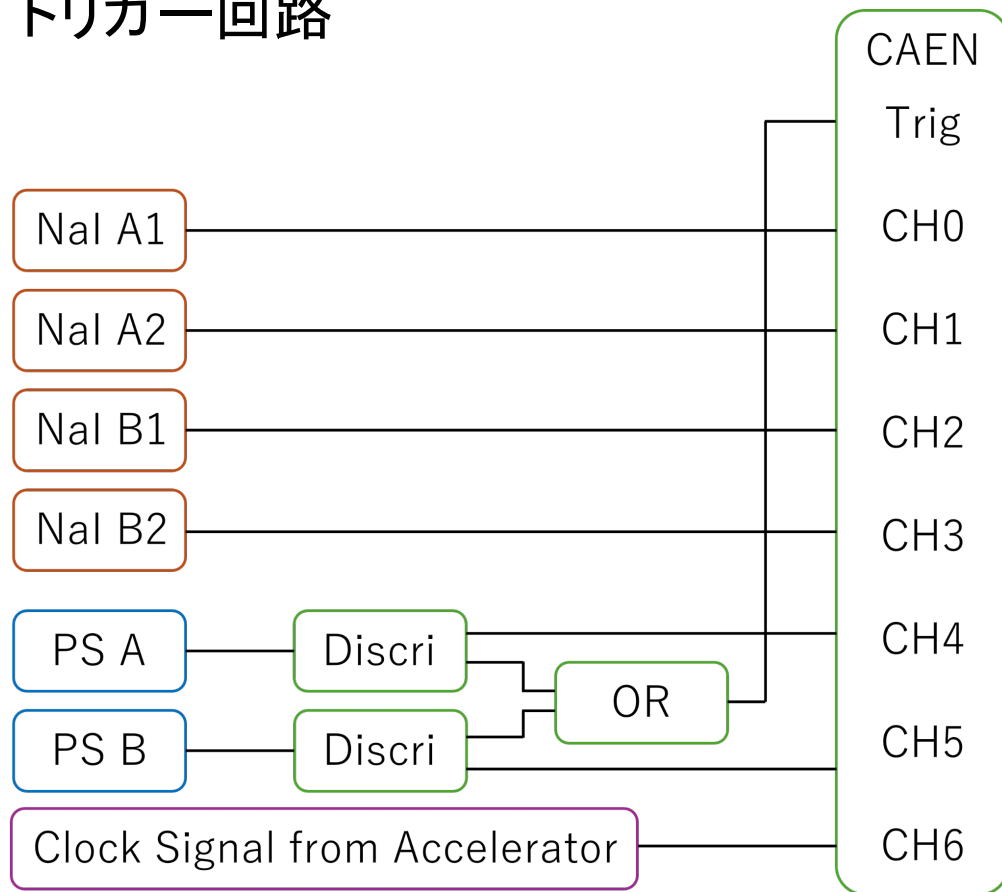


② 検出器セットを120°に配置し、  
RMDのデータ取得。  
30分 × 7回



③ 検出器セットを60°に配置し、RMDの  
データ取得。 30分 × 6回

## 4-2. トリガー回路



検出器セットA、Bのうち、少なくともひとつに陽電子(荷電粒子)が入ってほしい。

すなわち、光子 - 光子のデータは興味がない。

## 5. 再構成

5-1. 単一パルスの抽出

: NaIのパルスのエネルギーと時刻

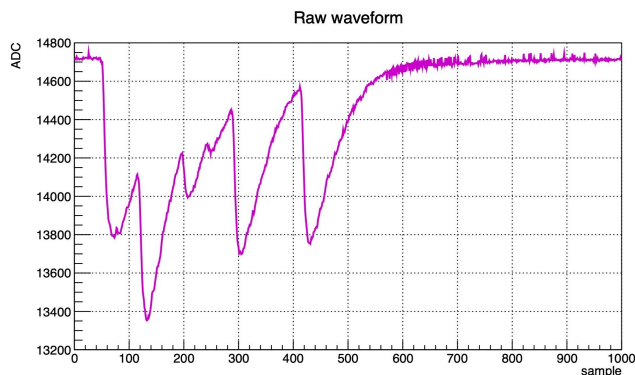
5-2. 同一崩壊事象の判定

: 隣り合うNaIのエネルギーをまとめる

5-3. 粒子種の判定

: PSの情報を反映する

5-4. 陽電子とガンマ線のペアリング : 異なるセットの情報を組み合わせる



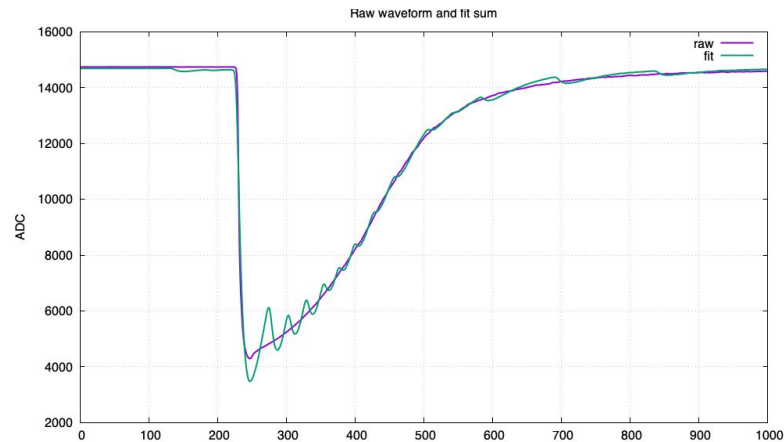
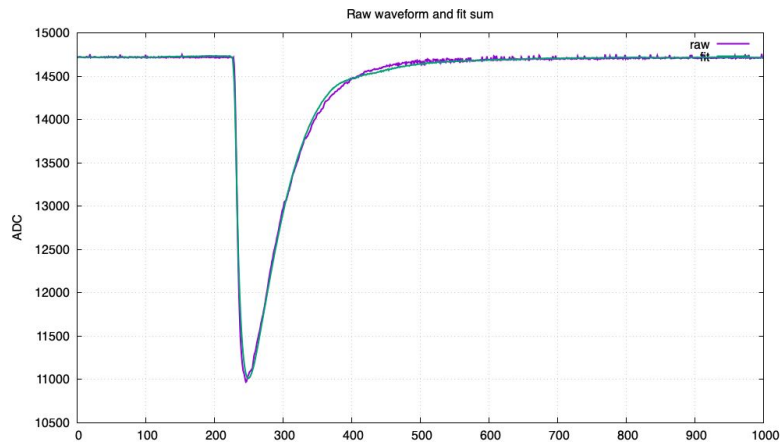
$$\rightarrow (E_e, E_g, t, \phi_e, \phi_g)$$

## 5. 再構成

### 5-1. 単一パルスの抽出

パルス波形の仮定:  $f(t) = - \sum_k h(t - k) e^{-k^2/\sigma^2}$

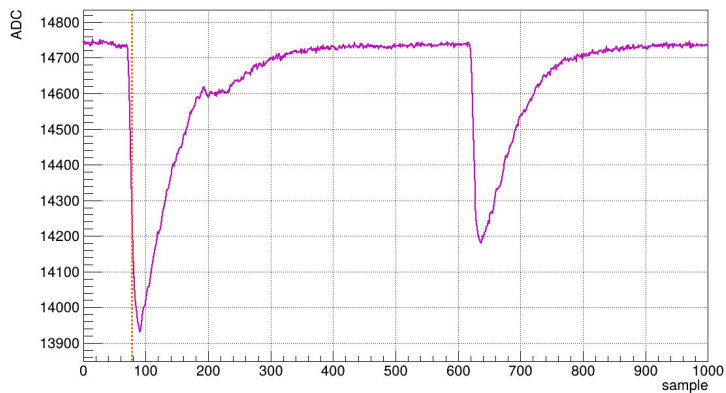
$$h(t) = e^{-(t-t_0)/\tau_1} - e^{-(t-t_0)/\tau_2}$$



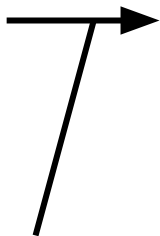
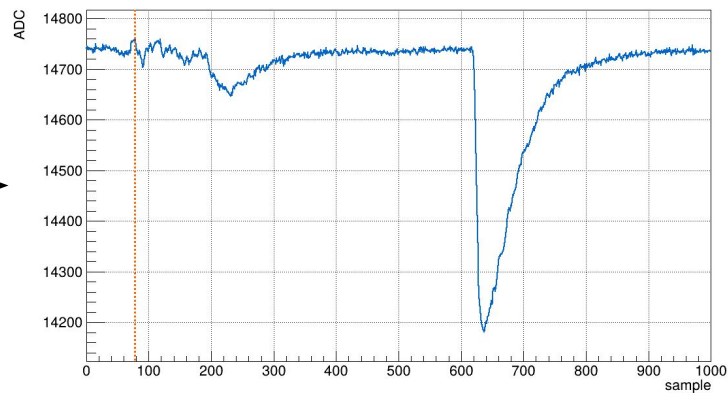
※ 過学習の例

# 5-1. 単一パルスの抽出

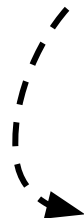
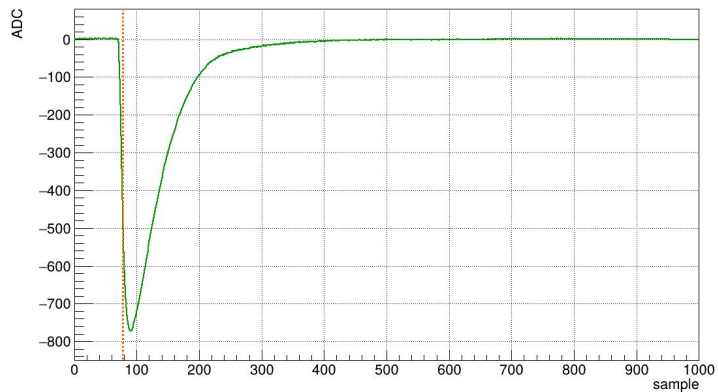
run1 event5 NaI\_A1 raw waveform



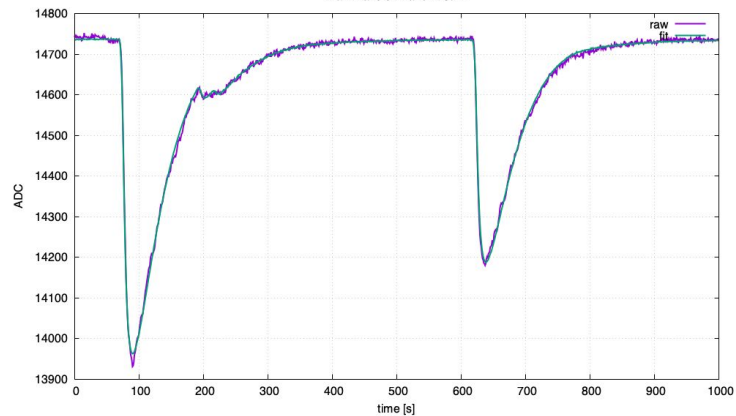
run1 event5 NaI\_A1 raw - fit component



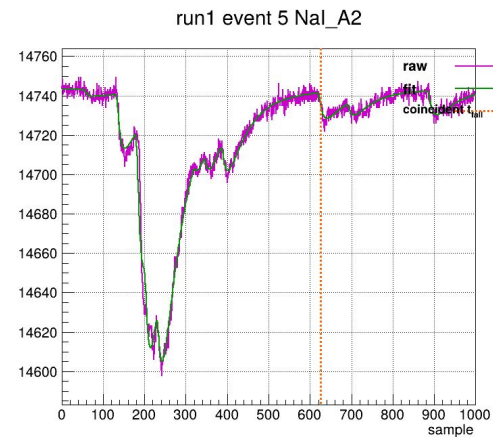
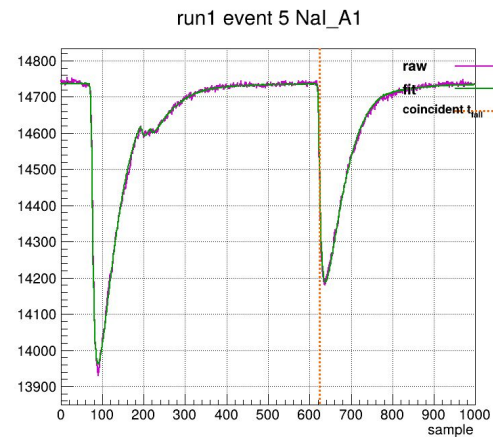
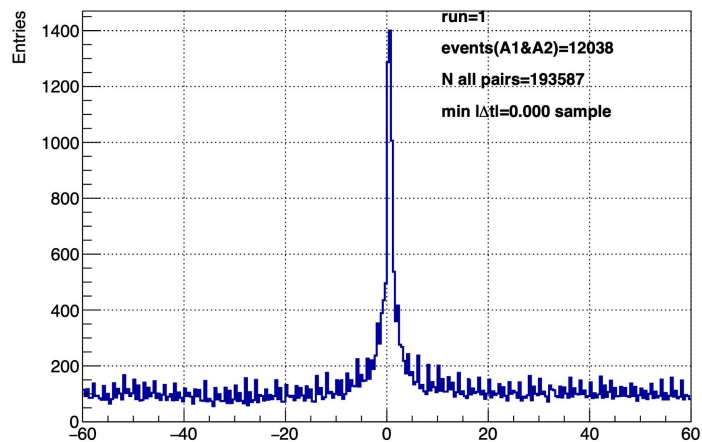
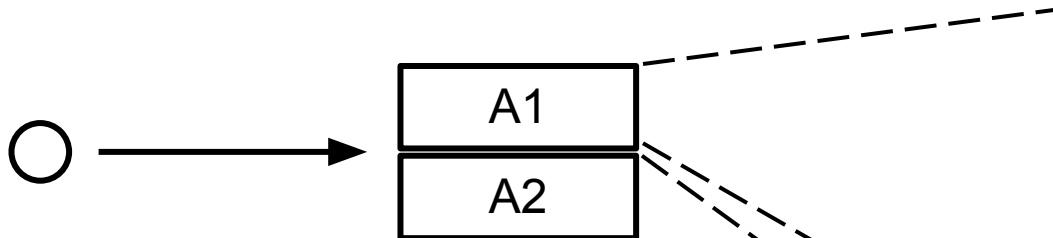
run1 event5 NaI\_A1 fit component (max pulse)



Raw waveform and fit sum

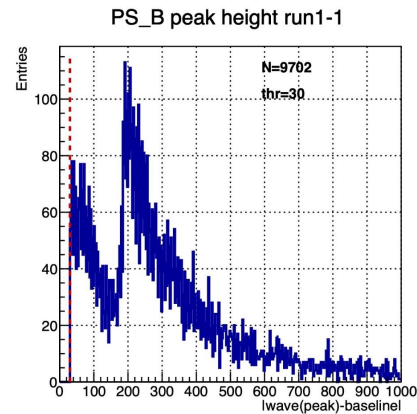
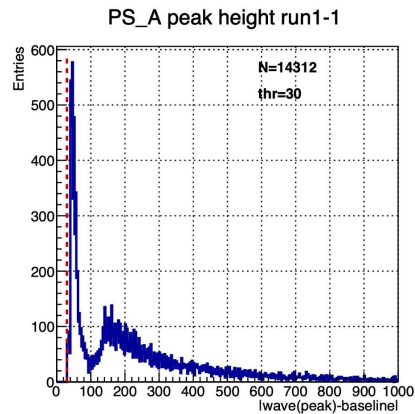
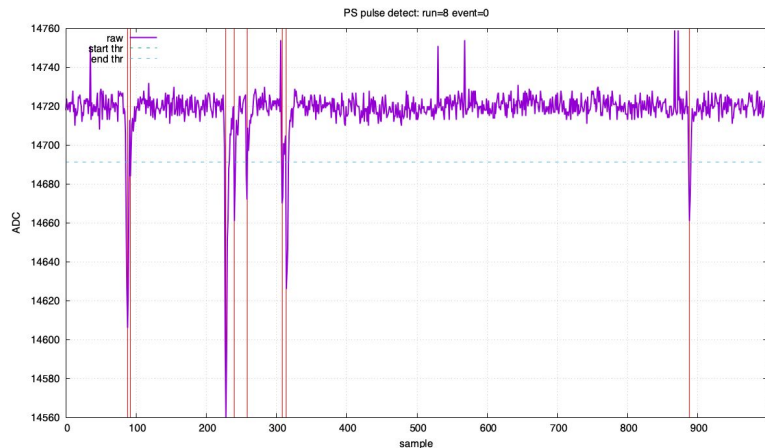


## 5-2. 同一崩壊事象の判定



モジュールの同時判定: 5 samples (20ns)

## 5-3. 粒子種の判定



PSのピーク閾値: 100

NaIとPSの同時判定: 10ns

同一セットのNaIで両方鳴った場合のみ。

run	e	$\gamma$
180°	1,591	123,628
120°	8,135	222,021
60°	3,720	112,787

## 5-4. 陽電子とガンマ線のペアリング

セットA、Bの同時判定: 500ns

BG外挿のため、時間差のサイドバンドも見る。

全ての組み合わせを考える。

run	ペア数
180°	334
120°	919
60°	325
total	1,578

## 6. 解析

6-1. 全データと解析窓

6-2. 偶発バックグラウンド解析

6-3. 尤度関数

6-4. 有効停止ミュオン数の見積もり

6-5. 最尤解析と信頼区間

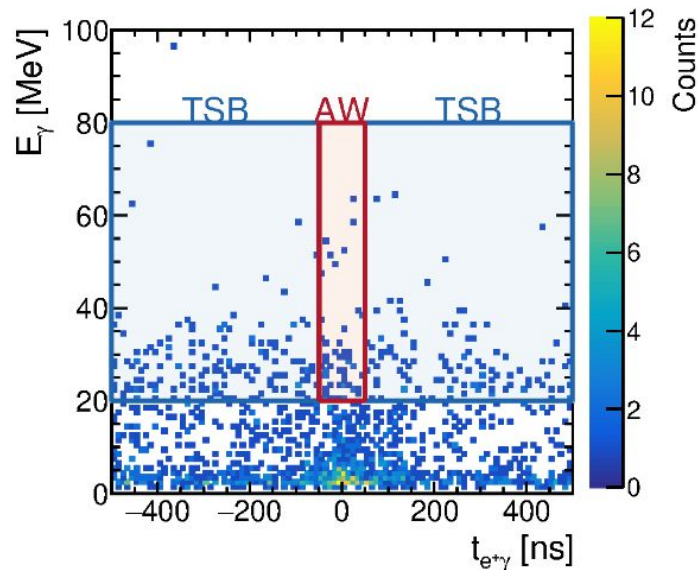
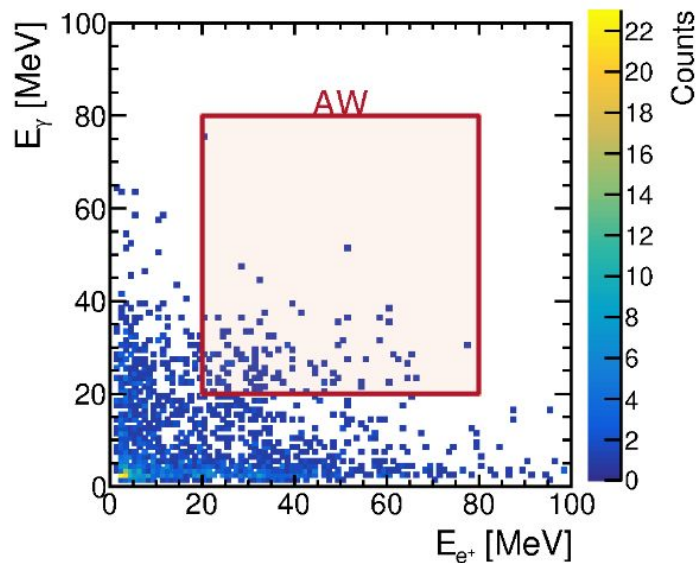
6-6. 結果

$$\{(E_{e^+}, E_\gamma, t_{e^+\gamma}, \phi_{e^+}, \phi_\gamma)_i\}_{i=1}^{N_{\text{obs}}}$$



$$\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma)$$

## 6-1. 全データと解析窓



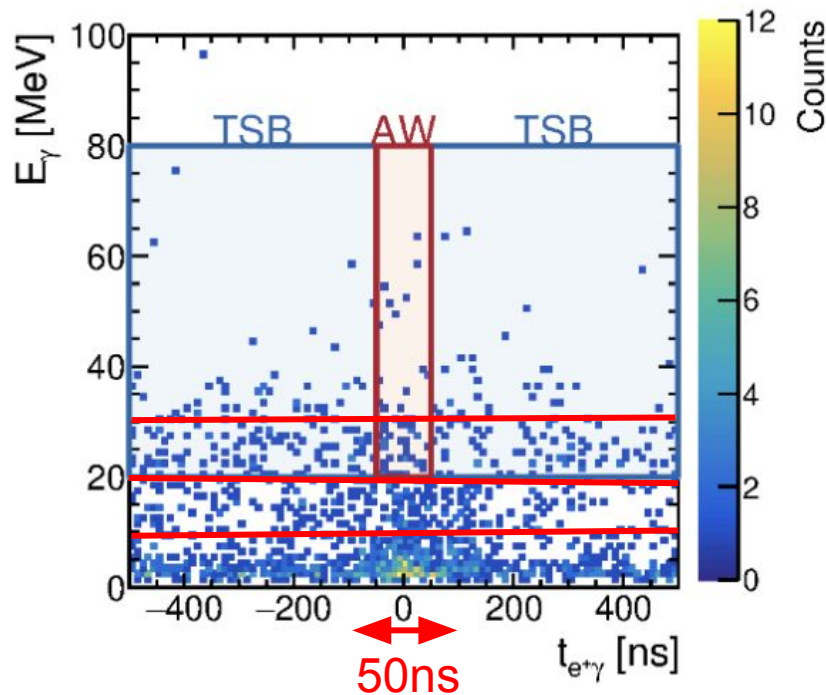
$$AW = \left\{ \mathbf{x} \left| \begin{array}{l} 20.0 \text{ MeV} < E_{e^+} < 80.0 \text{ MeV}, \\ 20.0 \text{ MeV} < E_\gamma < 80.0 \text{ MeV}, \\ -50.0 \text{ ns} < t_{e+\gamma} < 50.0 \text{ ns}, \\ \theta_{e+\gamma} = 120^\circ \text{ or } 180^\circ \end{array} \right. \right\}$$

全事象数**1578** AW内の事象数**18**

## 6-2. 偶発バックグラウンド解析

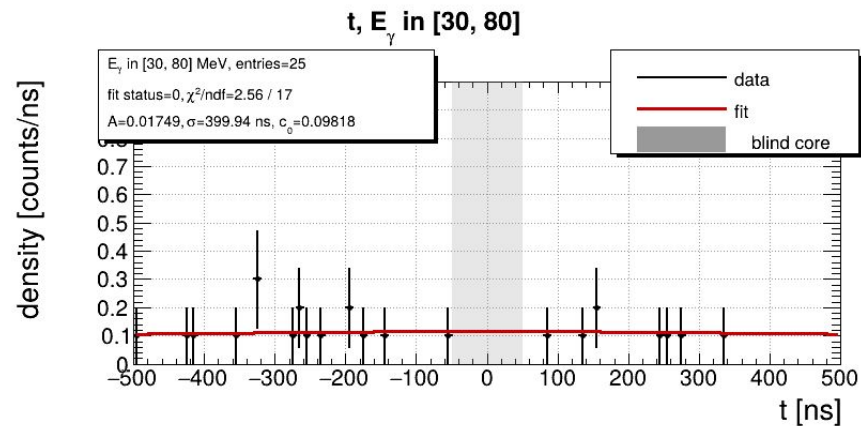
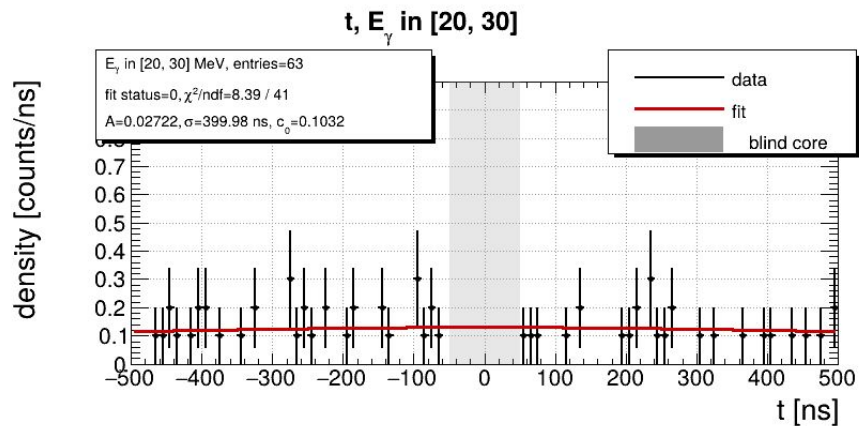
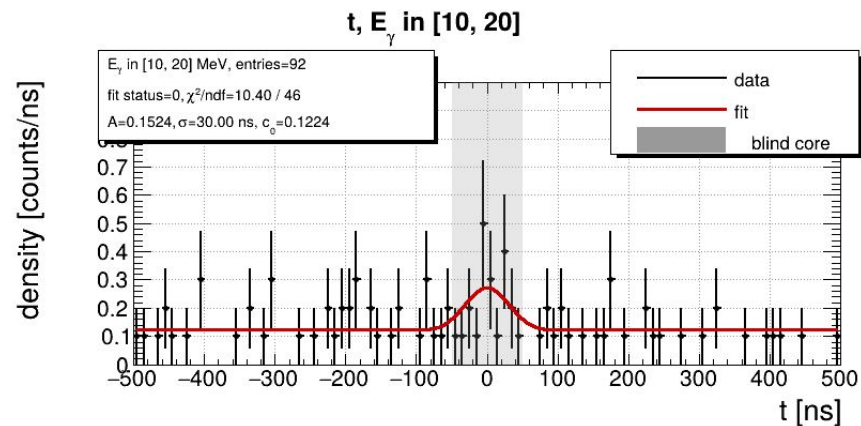
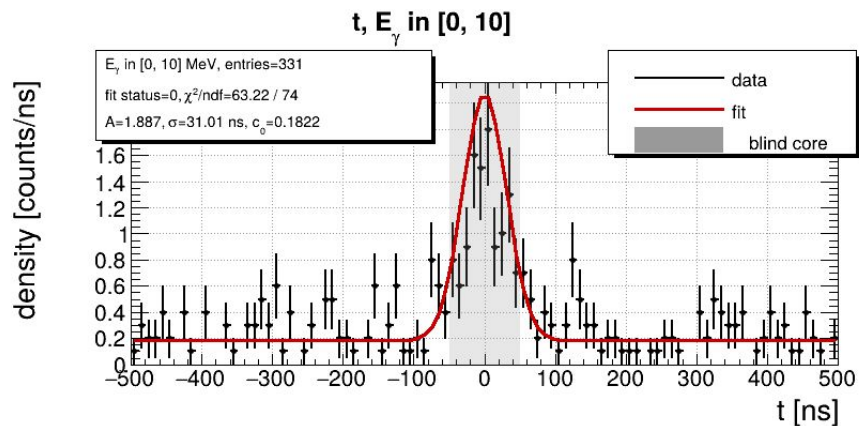
時間ヒストに幅  $\sim 50\text{ns}$  のピークが見られる。

- ・シグナル or RMDに由来するピークなら、幅はNaIの時間分解能 $\sim 3\text{ns}$ のはず。
- ・ビームのパルス構造に由来するピーク？
- ・ピークの幅は $E_\gamma$ で異なるので、 $E_\gamma$ ごとにピークをTSBでガウシアンフィットする。



TSBのデータからAW内のACC事象数、時間構造を予想する。

## 6-2. 偶発バックグラウンド解析



## 6-2. 偶発バックグラウンド解析

・フィットした時間構造: 
$$p_{t,\text{ACC}}(t; E_\gamma) = A(E_\gamma) \exp\left(-\frac{t^2}{2(\sigma(E_\gamma))^2}\right) + C(E_\gamma)$$

・比: 
$$R(E_\gamma) = \frac{\int_{\text{AW}} p_{t,\text{ACC}} dt}{\int_{\text{TSB}} p_{t,\text{ACC}} dt}$$

・AW内の予想ACC数: 
$$N_{\text{ACC}}^{(\text{pred})}(E_\gamma) = R(E_\gamma) N^{(\text{data})}(E_\gamma)$$

結果: AW内のイベント18に対し、

$$N_{\text{ACC}}^{(\text{pred})} = 10.1275 \pm 8.7521$$

これは尤度の制約項に使われる。

## 6-3. 尤度関数

$$L(N_{\text{sig}}, N_{\text{RMD}}, N_{\text{ACC}})$$
$$= e^{-(N_{\text{sig}} + N_{\text{RMD}} + N_{\text{ACC}})} C(N_{\text{ACC}})$$
$$\times \prod_{i=1}^{N_{\text{obs}}} \left( N_{\text{sig}} p_{\text{sig}}(\mathbf{x}_i) + N_{\text{RMD}} p_{\text{RMD}}(\mathbf{x}_i) + N_{\text{ACC}} p_{\text{ACC}}(\mathbf{x}_i) \right)$$

**Poisson項の指数部分**

**制約項**  
ACC予想数による  
ガウシアン制約

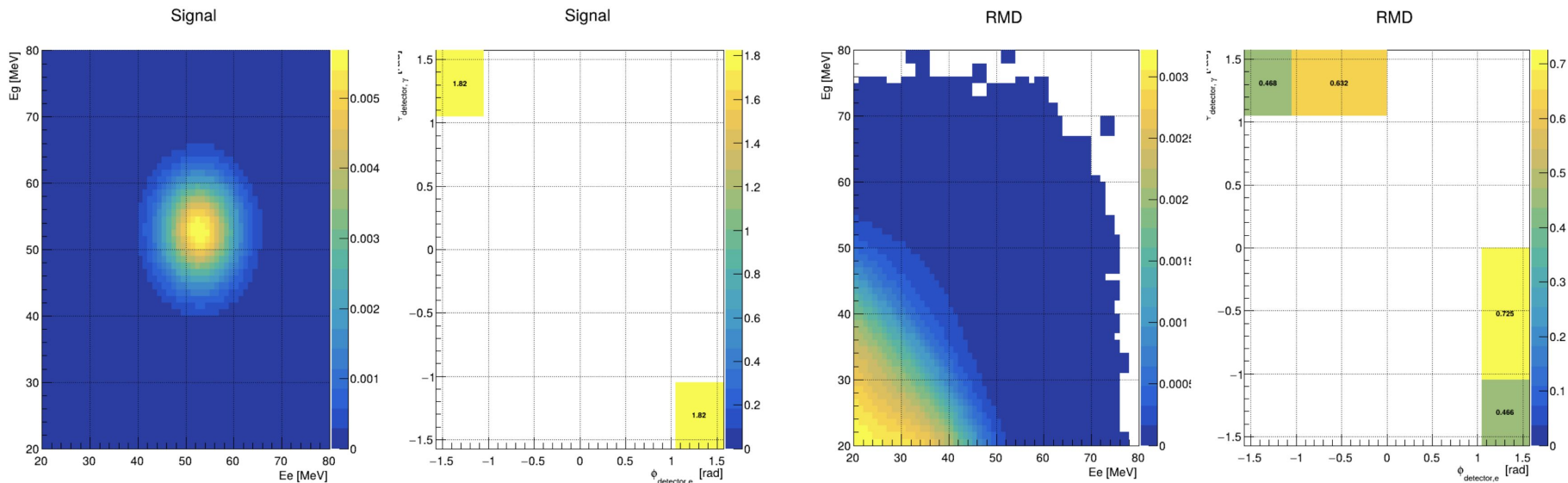
$$C(N_{\text{ACC}}) = \exp \left( -\frac{1}{2} \left( \frac{N_{\text{ACC}} - N_{\text{ACC}}^{(\text{pred})}}{\Delta N_{\text{ACC}}^{(\text{pred})}} \right)^2 \right)$$

**確率密度関数 (PDF)**

## 6-3. 尤度関数

### 確率密度関数 (PDF)

signal PDF	各観測量に対する検出器応答の積
RMD PDF	標準模型でのRMDの運動学分布と検出器応答の畳みこみ
ACC PDF	TSBから構成 $p_{\text{ACC}}(\mathbf{x}) = p_{e^+}(E_{e^+}, \phi_{e^+})p_{\gamma}(E_{\gamma}, \phi_{\gamma})p_{t,\text{ACC}}(t; E_{\gamma})$



## 6-4. 有効停止ミュオン数の見積もり

定義:  $B(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) \equiv \frac{N_{\text{sig}}}{N_{\mu}^{\text{eff}}}$

**有効停止ミュオン数**  
もし $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊が100%だったときの検出数

$N_{\mu}^{\text{eff}} = N_{\mu}^{\text{stop}} \times \kappa^{\text{sig}}$

停止ミュオン数

**Geant4シミュレーションで求めた検出効率**

- ・立体角
- ・AWカット
- ・エネルギーデポジット、ゆらぎ

$N^{\text{data}} = N_{\mu}^{\text{stop}} \times \kappa^{\text{Michel}}$

$$\rightarrow N_{\mu}^{\text{eff}} = N^{\text{data}} \times \frac{\kappa^{\text{sig}}}{\kappa^{\text{Michel}}} = 1709 \pm 26$$

## 6-5. 最尤解析と信頼区間

### 【Feldman-Cousins法】

統計検定量

$$\lambda(\mathcal{B}) = \frac{L(N_{\text{sig}}, \hat{\theta}(N_{\text{sig}}))}{L(N_{\text{sig}}^{\text{data}}, \hat{\theta}(N_{\text{sig}}^{\text{data}}))} \quad (\text{profile-likelihood ratio})$$

$p(\mathcal{B}_{\text{test}}) = P(\lambda_{\text{MC}} < \lambda_{\text{obs}} \mid \mathcal{B}_{\text{test}})$  を各テスト分岐比ごとに計算。

$$N_{\text{sig}}^{\text{MC}} \sim \text{Poisson}(\mathcal{B}_{\text{test}} \cdot \mathcal{N}(N_{\mu}^{\text{eff}}, \Delta N_{\mu}^{\text{eff}}))$$

$$N_{\text{RMD}}^{\text{MC}} \sim \text{Poisson}(\hat{N}_{\text{RMD}})$$

$$N_{\text{ACC}}^{\text{MC}} \sim \text{Poisson}(\hat{N}_{\text{ACC}})$$

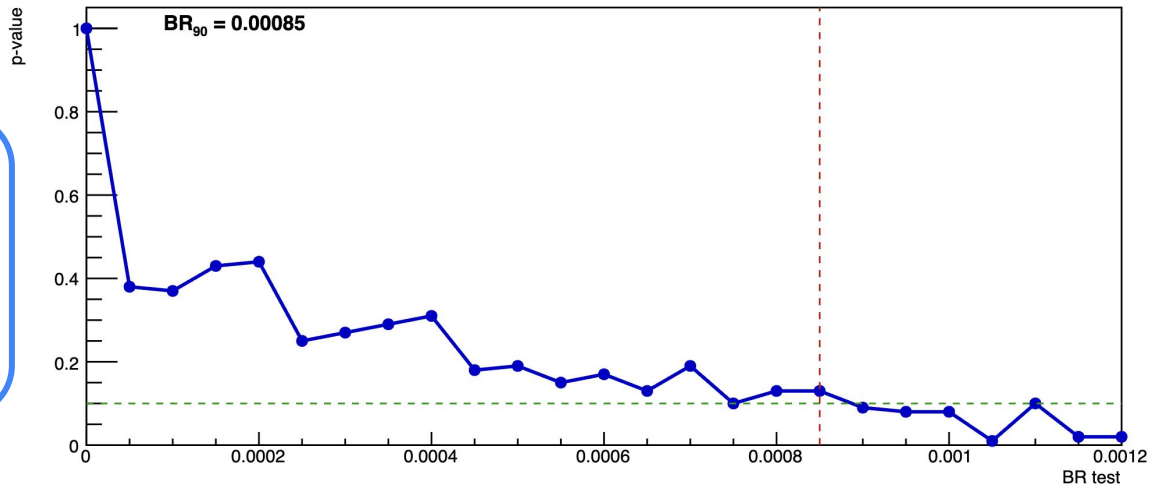
に従いモンテカルロ生成。

## 6-6. 結果

### 【 $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊の分岐比】

Best Fit

$$N_{\text{sig}} = 1.06 \times 10^{-8},$$
$$N_{\text{RMD}} = 1.657 \pm 1.814,$$
$$N_{\text{ACC}} = 15.325 \pm 4.954$$



分岐比の90%上限値

$$\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma) < 8.5 \times 10^{-4}$$

## 6-6. 結果

### 【RMDの分岐比】

RMDのAW内有効分岐比  
 $(1.22111 \pm 0.00035) \times 10^{-3}$

標準模型による予測:

$$N_{\text{RMD}}^{(\text{pred})} = \frac{\kappa^{\text{RMD}}}{\kappa^{\text{sig}}} \times N_{\mu}^{\text{eff}} = 2.0866 \pm 0.0322$$

MCシミュレーションで計算した比

実験結果:

$$N_{\text{RMD}} = 1.657 \pm 1.814$$

→ 実験結果は標準模型と矛盾しない。

## 7. 結論

- ・NaIとPSを組み合わせた自作検出器を作成し、J-PARC MLFのMuon D2において  $\mu \rightarrow e\gamma$  探索実験を行った。
- ・波形の生データから物理量を再構成し、1578個の  $e\text{-}\gamma$  ペアから AW 内の18事象を得た。ACCをTSBから推定し、プロフィール尤度比を統計検定量とするFC法で  $\mu \rightarrow e\gamma$  分岐比上限を評価した。
- ・有意な  $\mu \rightarrow e\gamma$  シグナル超過は観測されず、**90% CL** で  $B(\mu \rightarrow e\gamma) < 8.5 \times 10^{-4}$  を得た。一方、RMD のAW内有効分岐比は標準模型期待と整合した。

## 8. 今後の課題

### 実験

- ・パルスビームに伴うpileupの削減 (装置ジオメトリとビームプロファイルの最適化)。
- ・ビーム広がり・陽電子混入・周辺散乱を含めたジオメトリの最適化。

### 解析

- ・PDFの精密化 (nuisance parameter, 応答行列の非対角成分)。
- ・有効停止ミュオン数の見積もりの高精度化。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々にご指導・ご支援をいただきました。

中家さん、木河さんには、実験の方向性や解析方法についてご指導いただいただけでなく、J-PARC での実験にも同行していただき、多方面にわたりご支援をいただきました。また、実験実施にあたっての各種事務手続きにおいても多大なご支援をいただきました。

大谷さん、青柳さんには、実験準備や解析の各段階で多くの助言とサポートをいただきました。

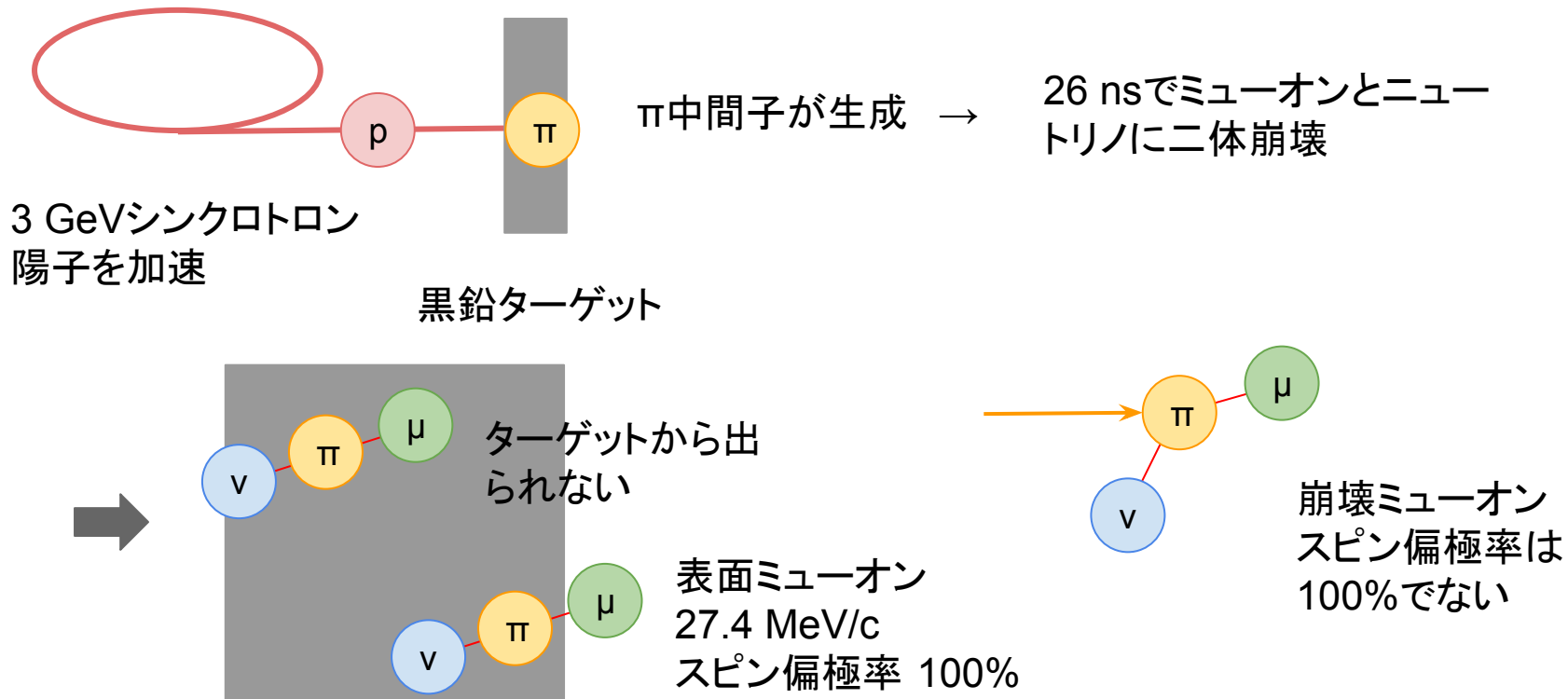
また、J-PARC では梅垣さんをはじめ現地の皆様に大変お世話になりました。

さらに、ICEPP で NaI シンチレータをお貸しくださった方にも深く感謝申し上げます。

Backup

## 2-1. Muon D2

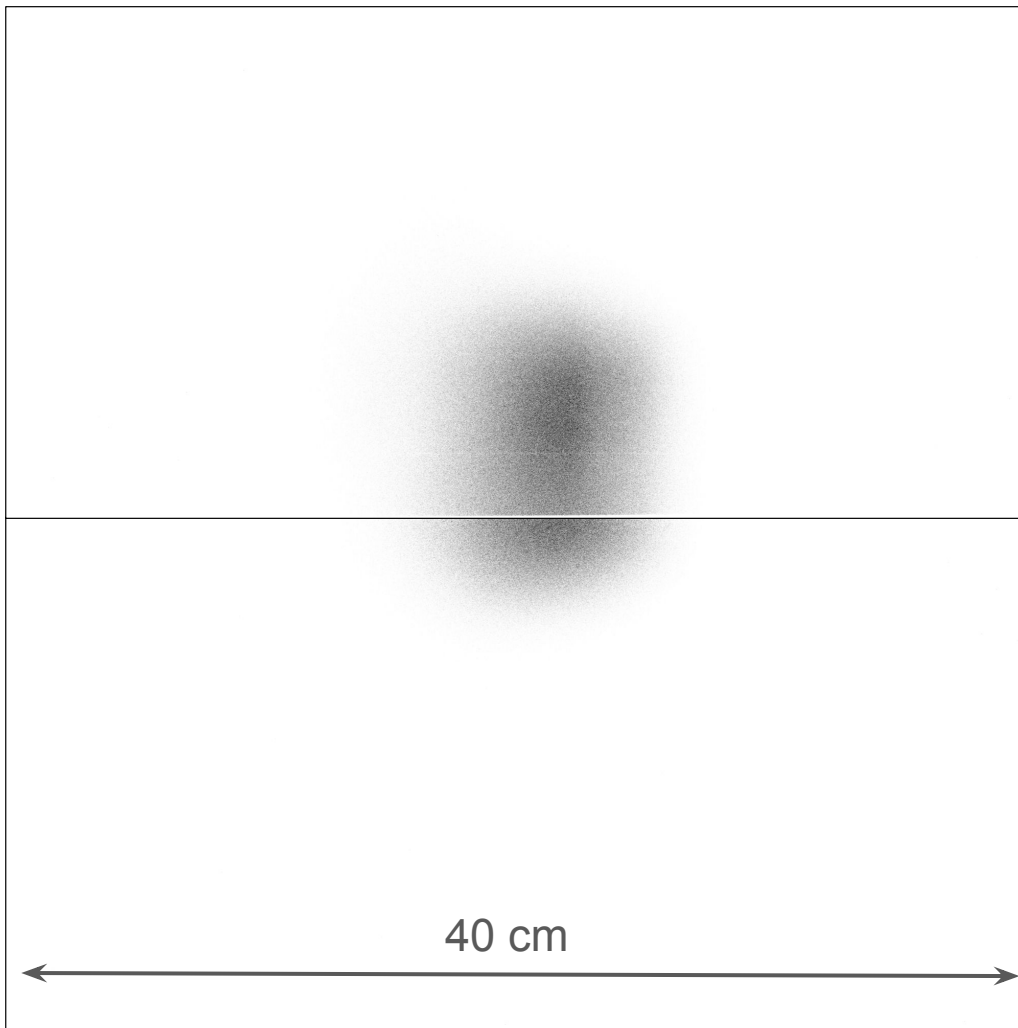
### 表面ミュオン/崩壊ミュオン とは



# ビームプロファイル

20 cm

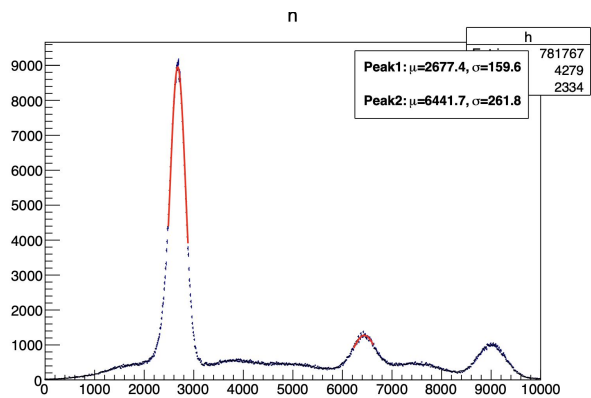
40 cm



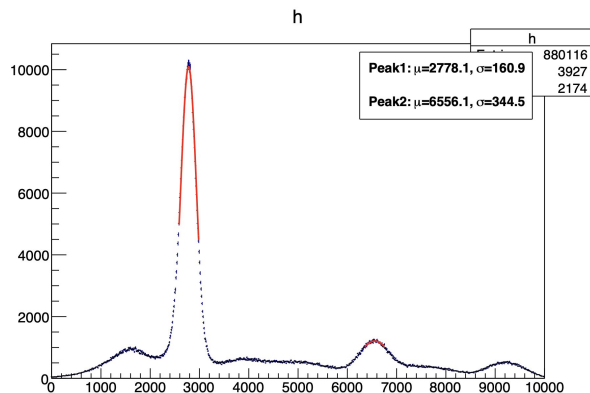
# 予備実験一NaI位置依存性

NaIの上にNa22線源を置いてそれを動かしながら測定

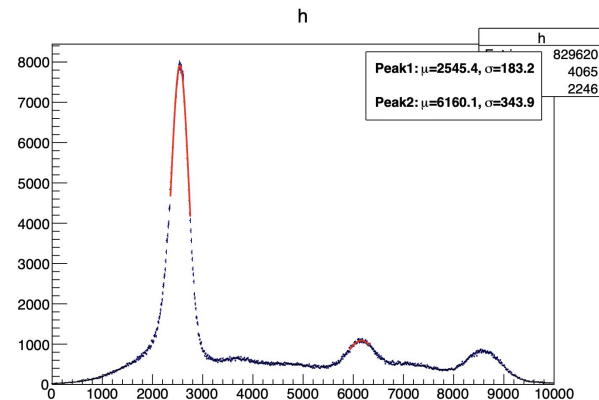
NaI\_A2



center



narrow



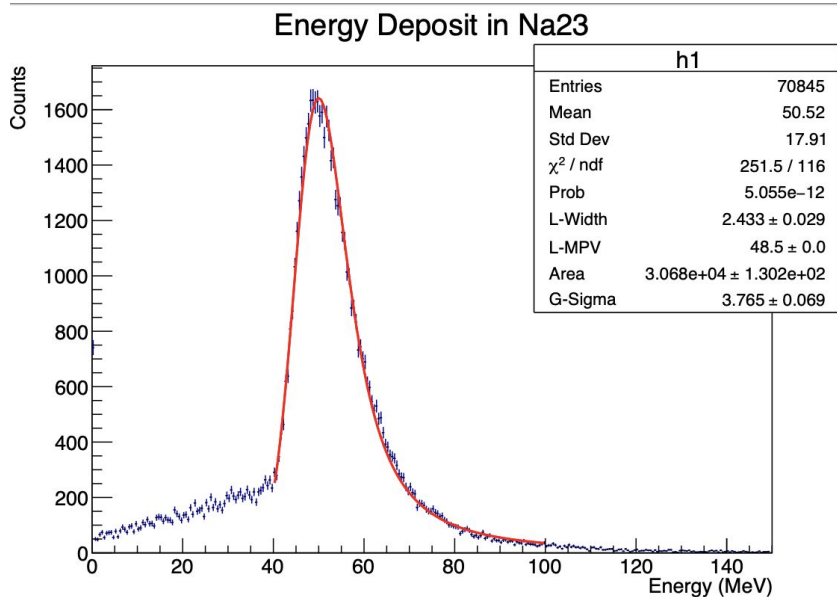
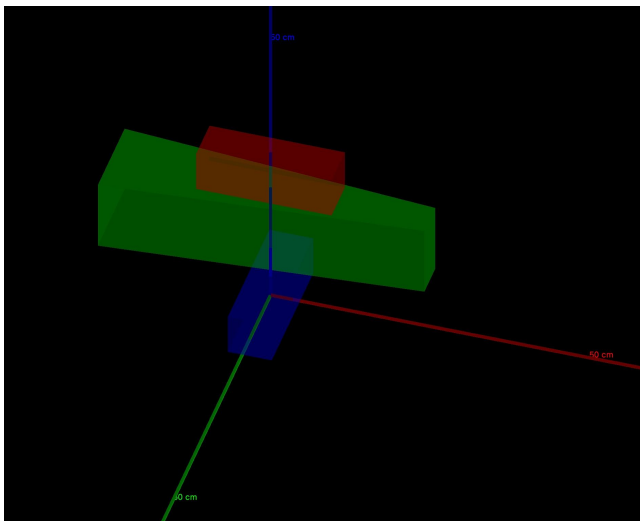
wide

# 予備実験ーNaIエネルギー-calibration

NaIcenterの2点と宇宙線の1点で3点線形フィットすることでエネルギー-calibrationを行う

宇宙線の場合はGeant4のシミュレーションでエネルギーを決める。

## Geant4のシミュレーション



# 予備実験—NaI時間分解能

時間の決め方のチェック

threshold crossing

$$\mu = \frac{1}{nPre} \sum_{i=0}^{nPre-1} v_i$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{nPre} \sum (v_i - \mu)^2}$$

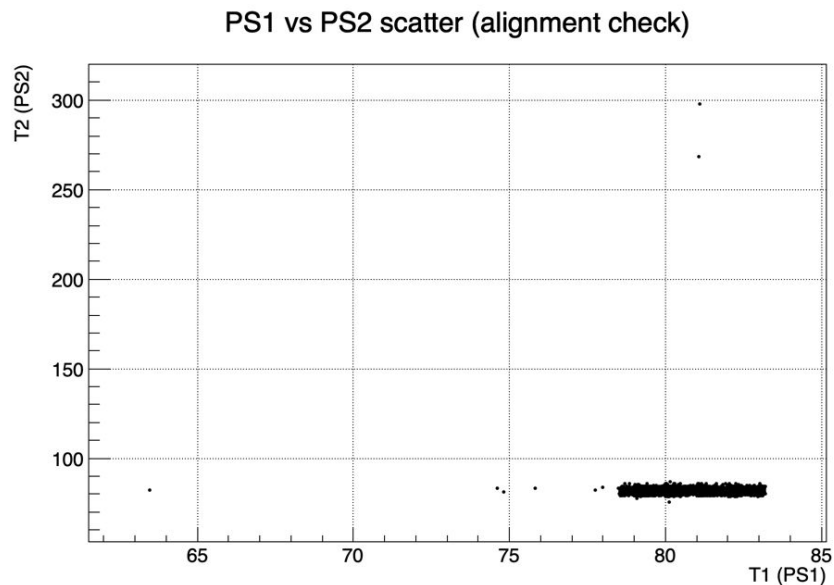
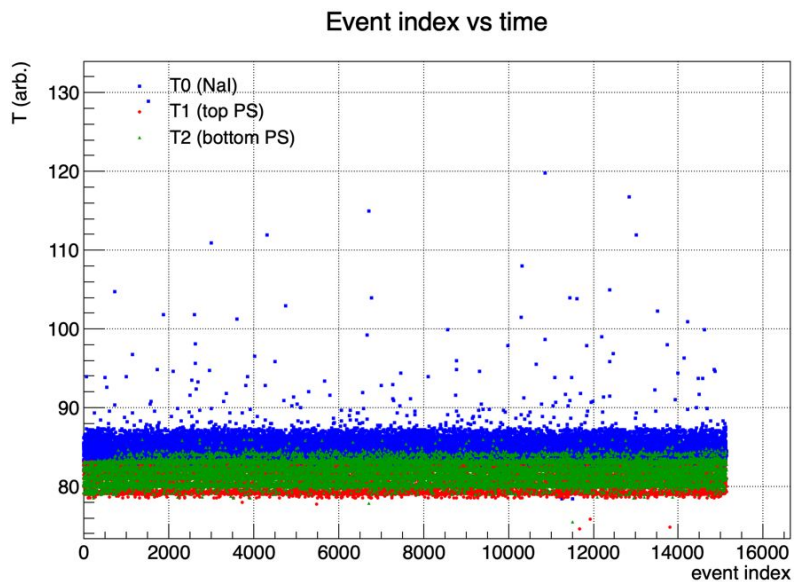
$$v_i < thr$$

$$t = (i - 1) + \frac{thr - v_{i-1}}{v_i - v_{i-1}}$$

$$thr = \mu - nsigma(5) \times \sigma$$

# 予備実験一NaI時間分解能

事前チェック(check\_alignment)



# 再構成

同一セットで両方のみ→

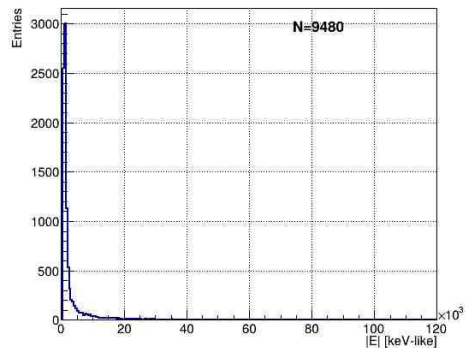
run	e	γ
180°	1,591	123,628
120°	8,135	222,021
60°	3,720	112,787

同一セットで片方+両方→

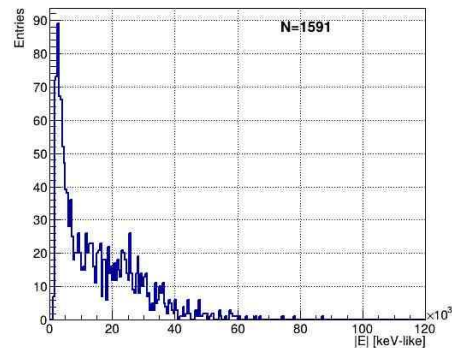
run	e	γ
180°	11,071	1,440,227
120°	43,884	2,556,343
60°	18,442	1,373,184

# 再構成

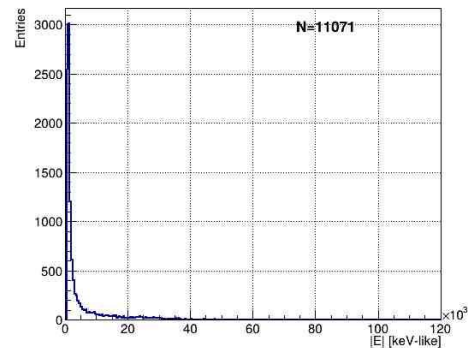
positron single run1-7



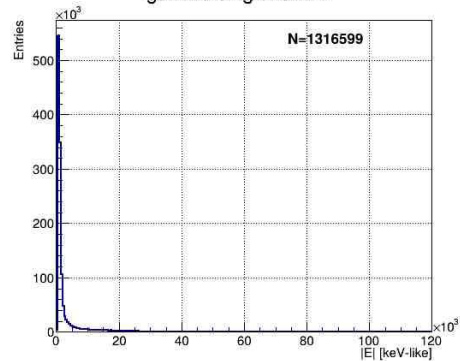
positron double run1-7



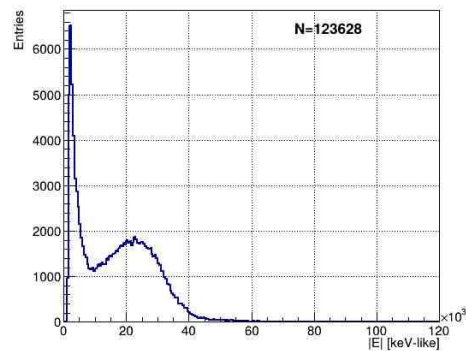
positron single+double run1-7



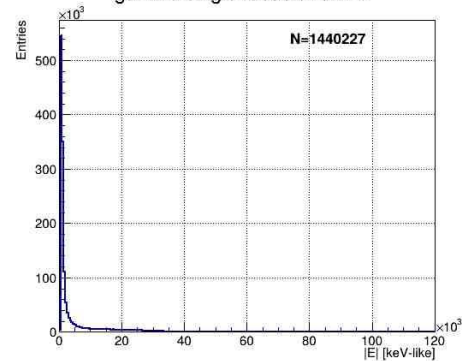
gamma single run1-7



gamma double run1-7

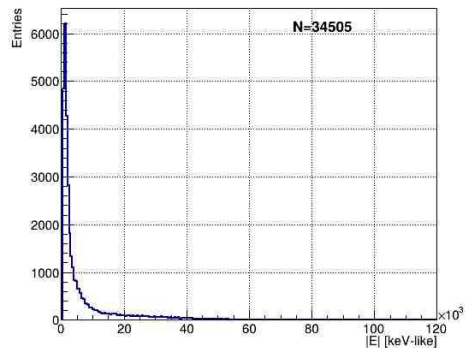


gamma single+double run1-7

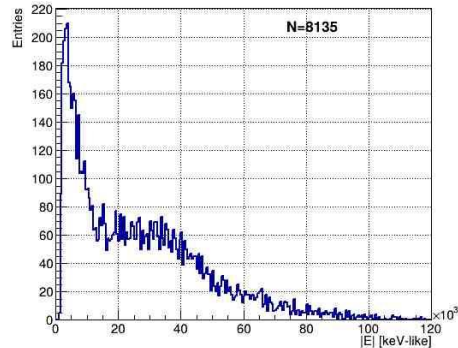


# 再構成

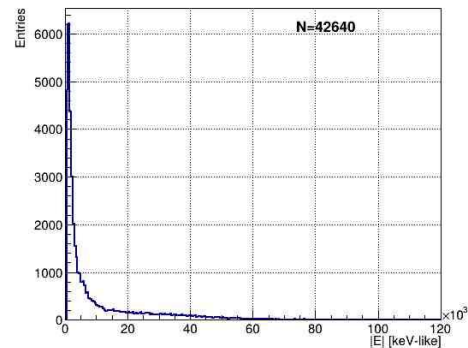
positron single run8-14



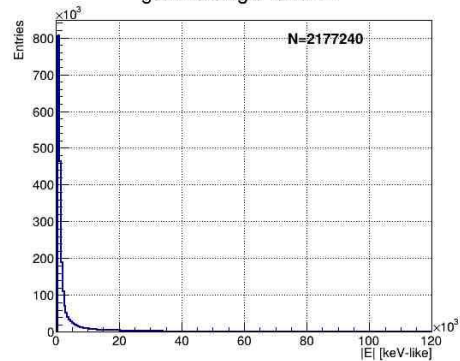
positron double run8-14



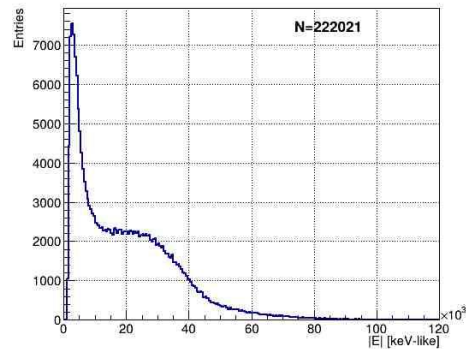
positron single+double run8-14



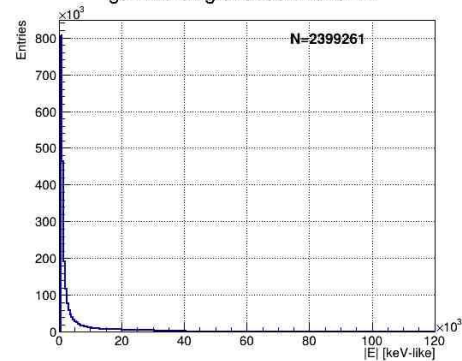
gamma single run8-14



gamma double run8-14

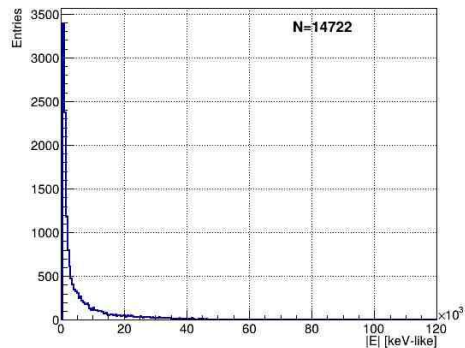


gamma single+double run8-14

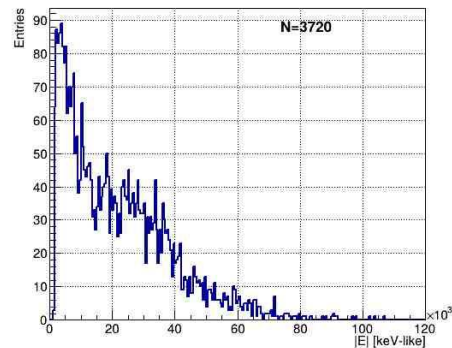


# 再構成

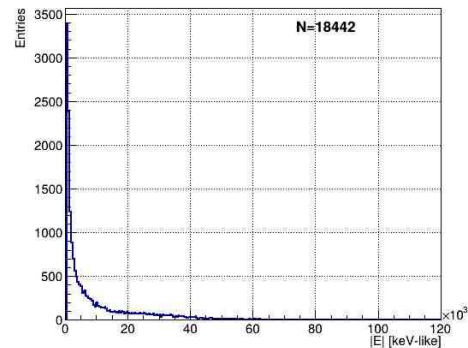
positron single run15-20



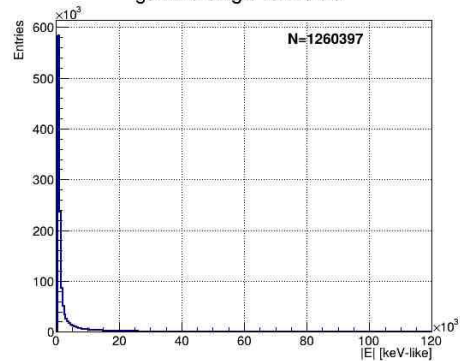
positron double run15-20



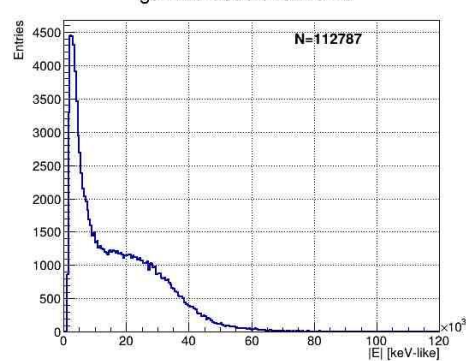
positron single+double run15-20



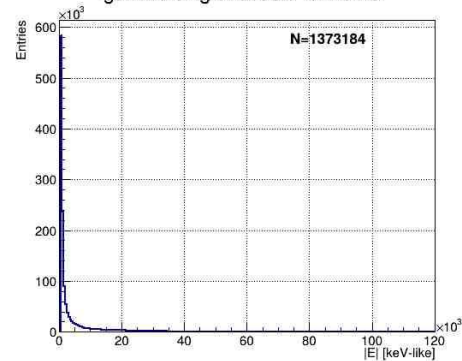
gamma single run15-20



gamma double run15-20

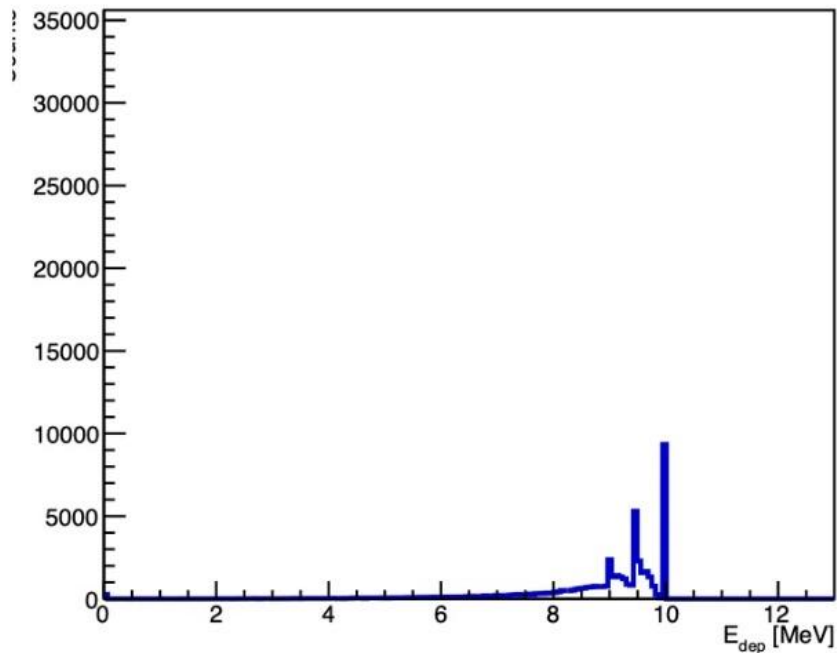


gamma single+double run15-20

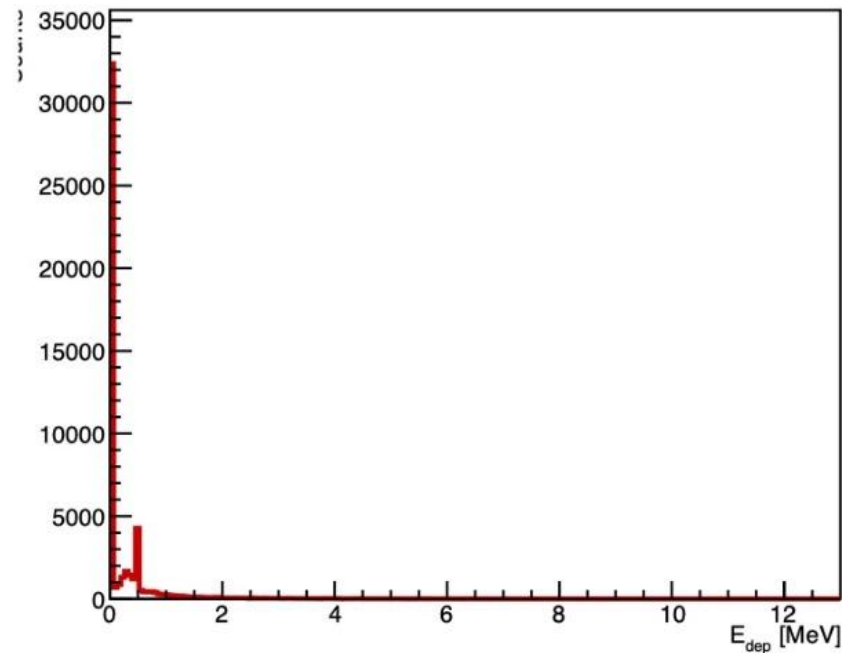


# 再構成: 一方のNaIの中央

NaI-A,  $E_{\text{beam}} = 10.0 \text{ MeV}$

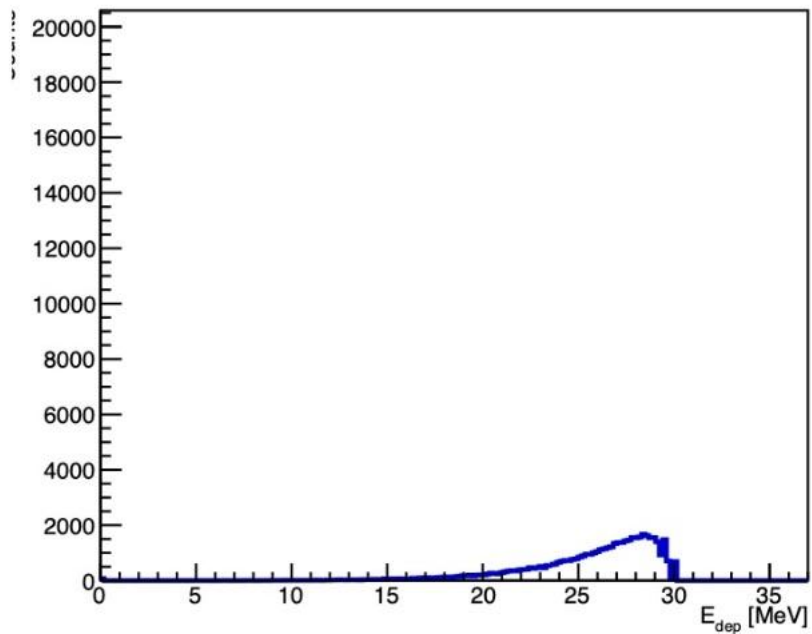


NaI-B,  $E_{\text{beam}} = 10.0 \text{ MeV}$

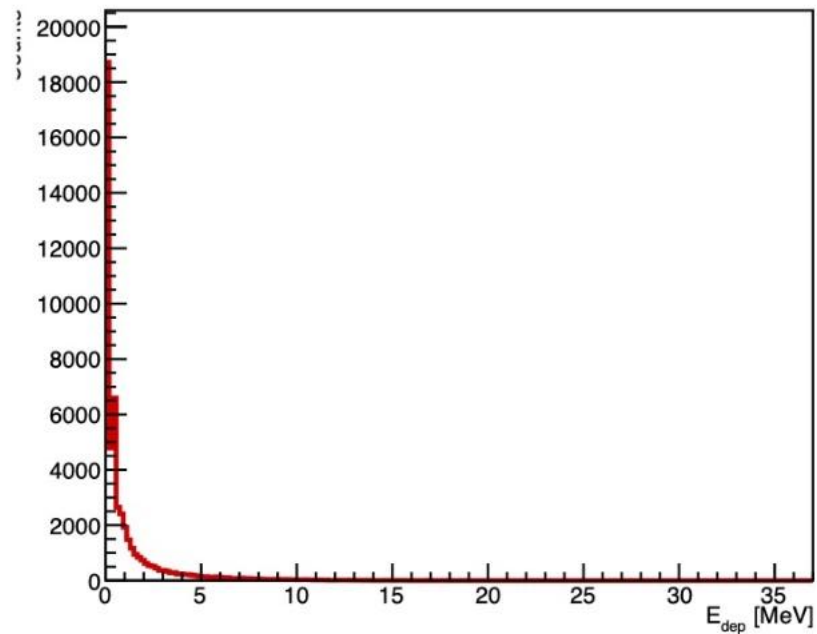


# 再構成：一方のNaIの中央

NaI-A,  $E_{\text{beam}} = 30.0 \text{ MeV}$

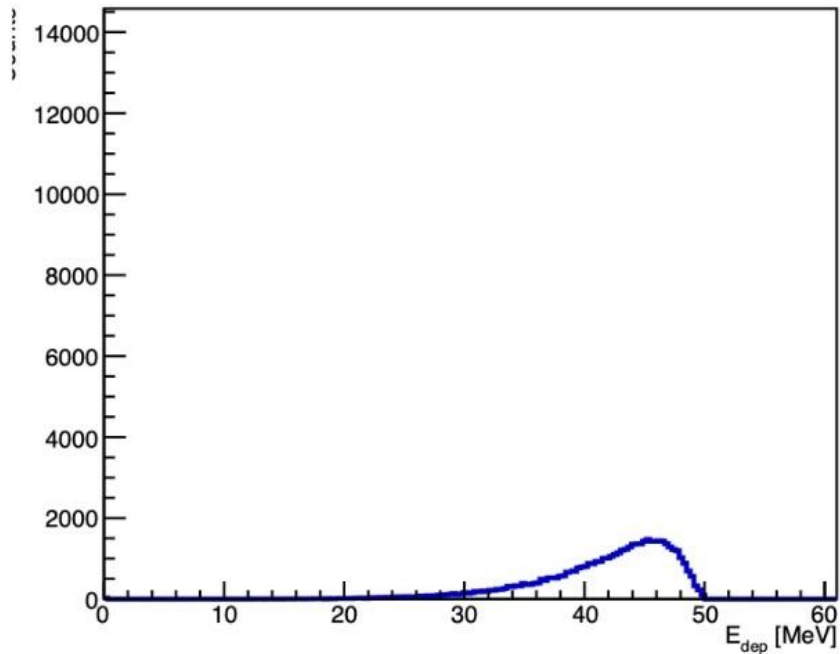


NaI-B,  $E_{\text{beam}} = 30.0 \text{ MeV}$

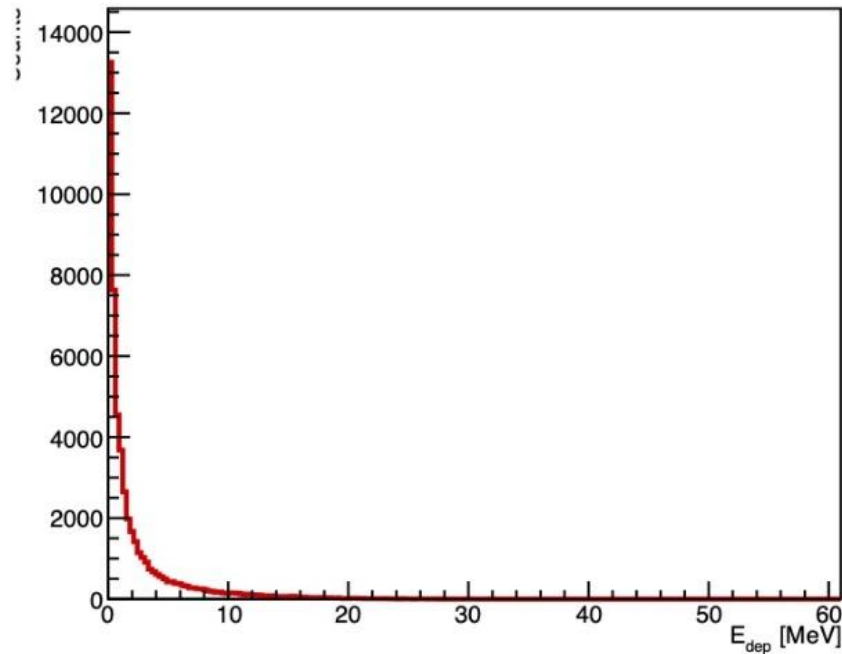


# 再構成: 一方のNaIの中央

NaI-A,  $E_{\text{beam}} = 50.0 \text{ MeV}$

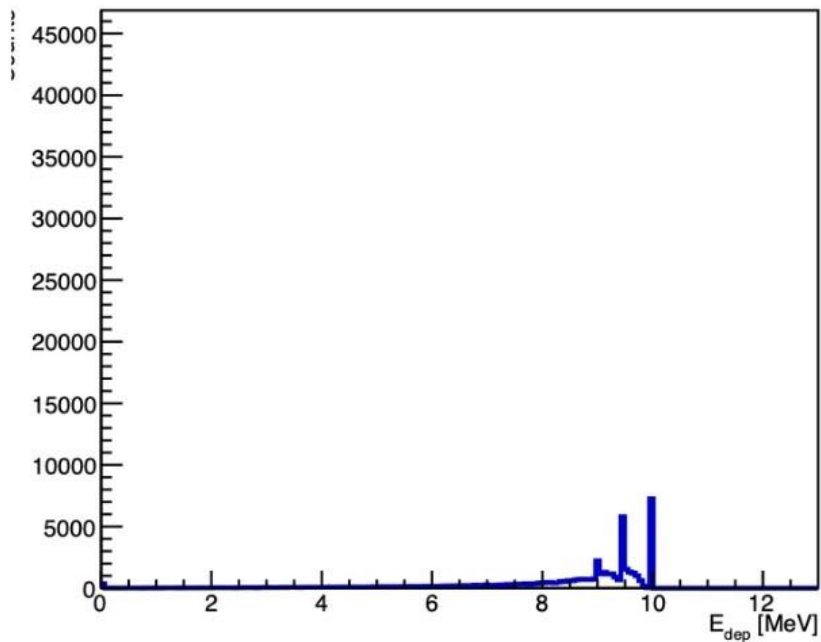


NaI-B,  $E_{\text{beam}} = 50.0 \text{ MeV}$

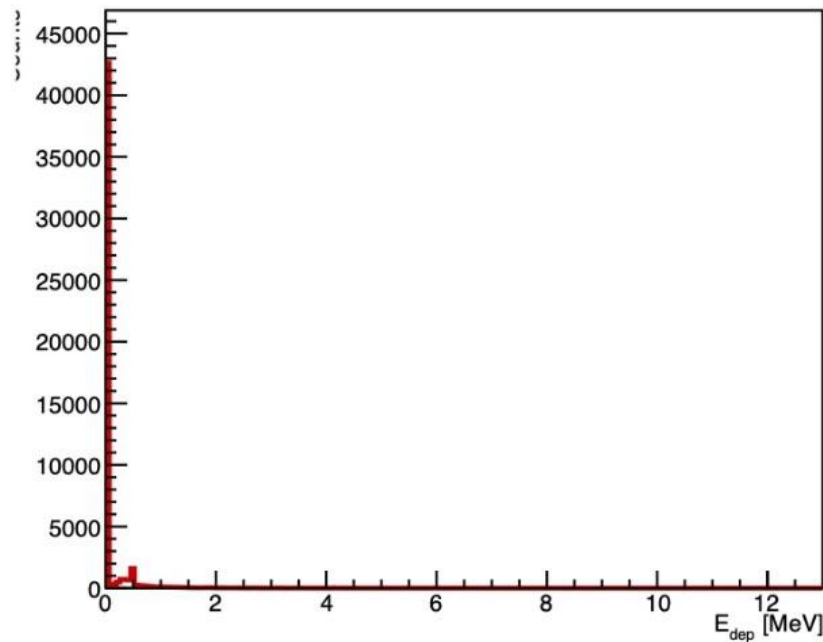


# 再構成: 一方のNaIの外側

NaI-A,  $E_{\text{beam}} = 10.0 \text{ MeV}$

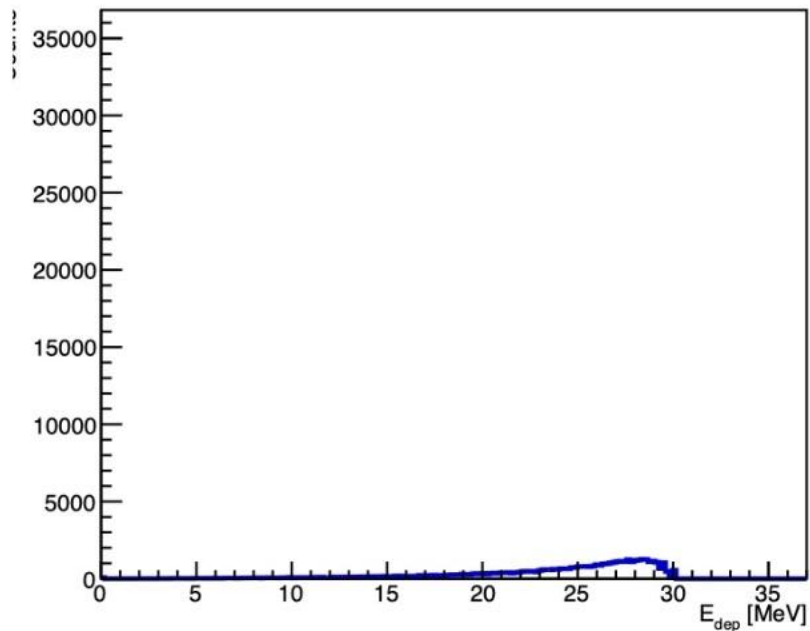


NaI-B,  $E_{\text{beam}} = 10.0 \text{ MeV}$

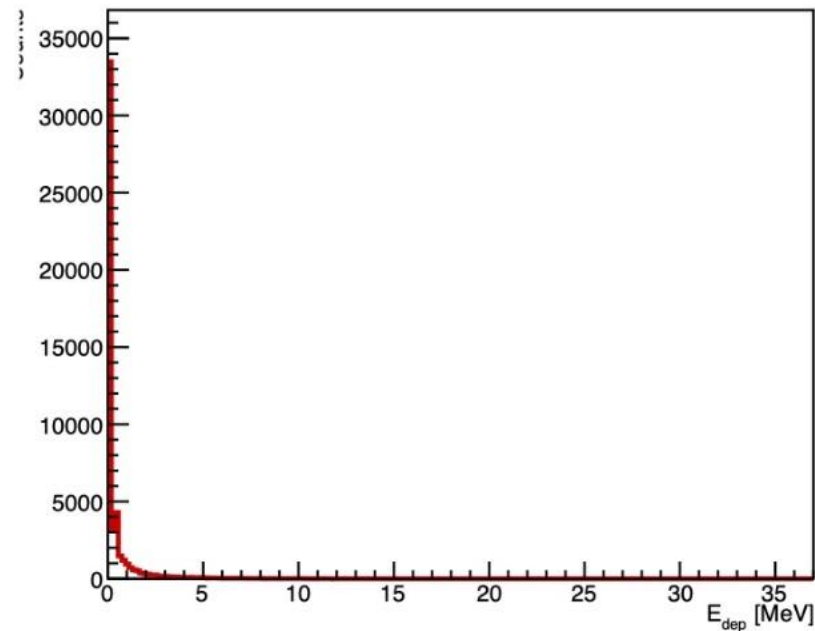


# 再構成: 一方のNaIの外側

NaI-A,  $E_{\text{beam}} = 30.0 \text{ MeV}$

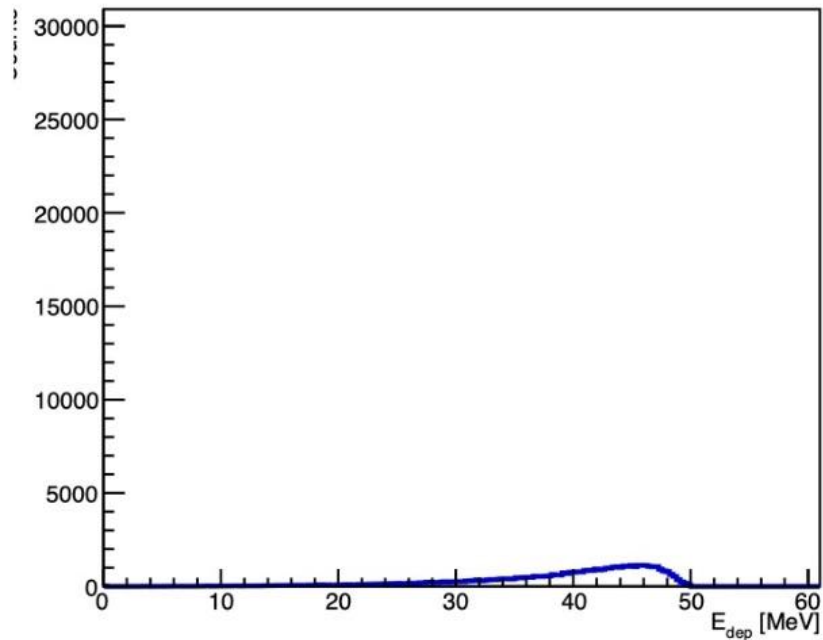


NaI-B,  $E_{\text{beam}} = 30.0 \text{ MeV}$

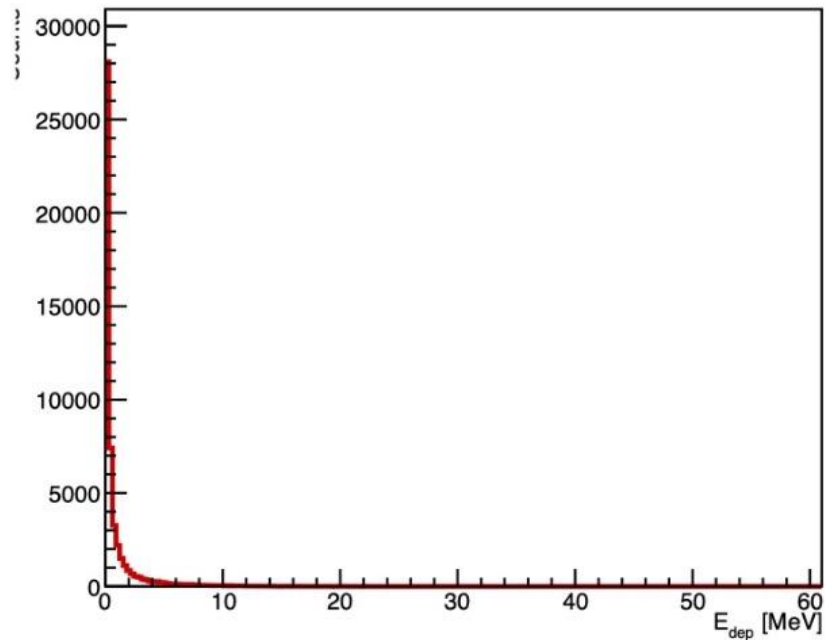


# 再構成: 一方のNaIの外側

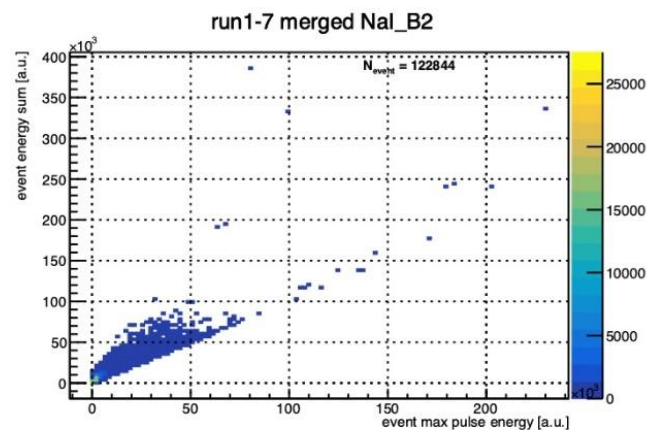
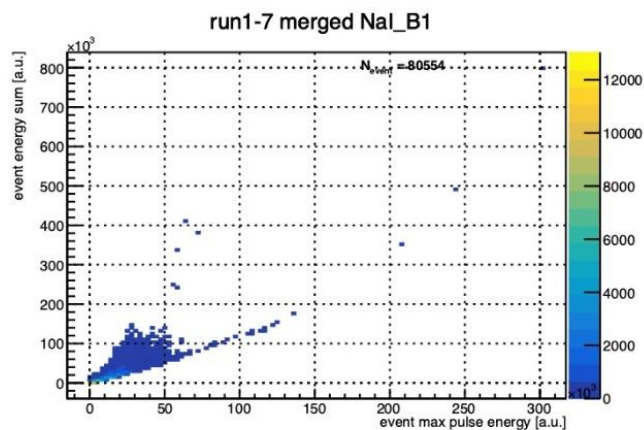
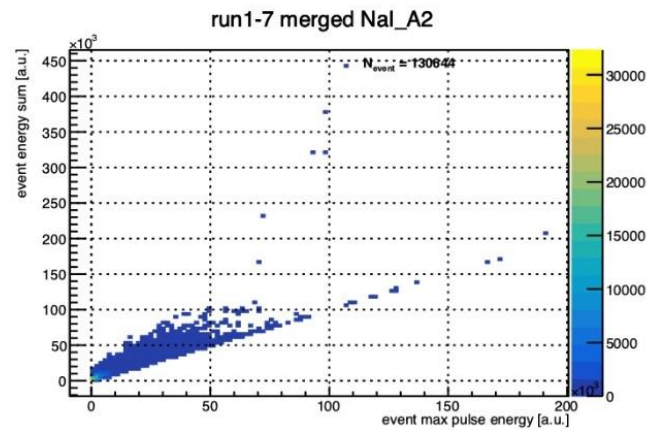
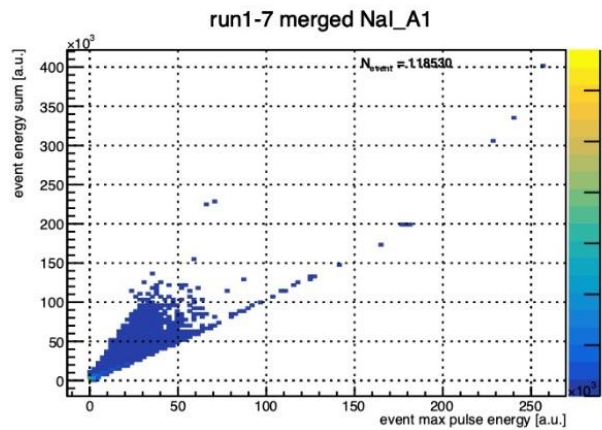
NaI-A,  $E_{\text{beam}} = 50.0 \text{ MeV}$



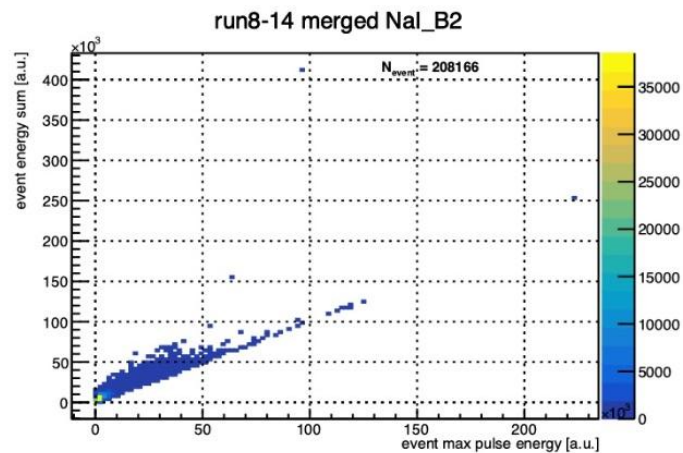
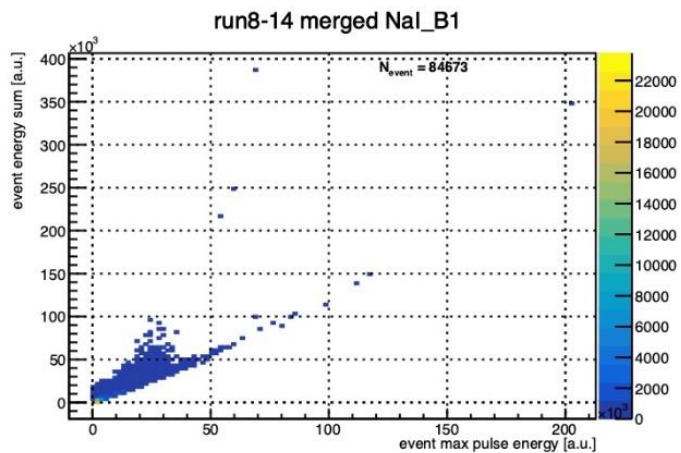
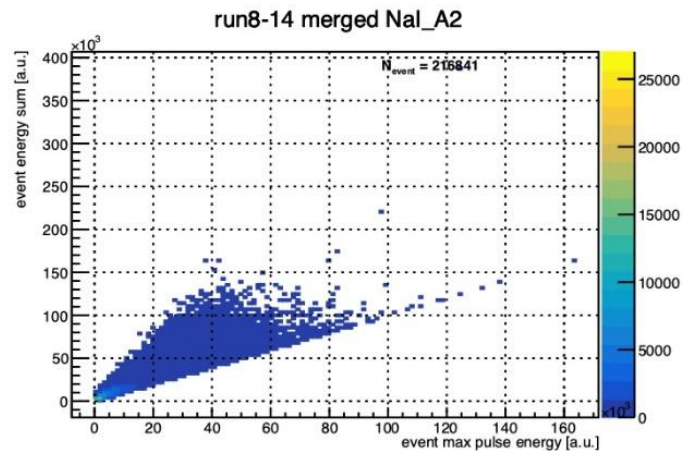
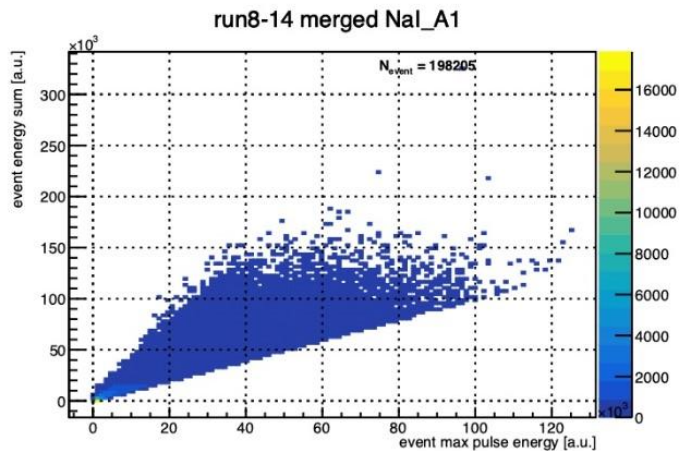
NaI-B,  $E_{\text{beam}} = 50.0 \text{ MeV}$



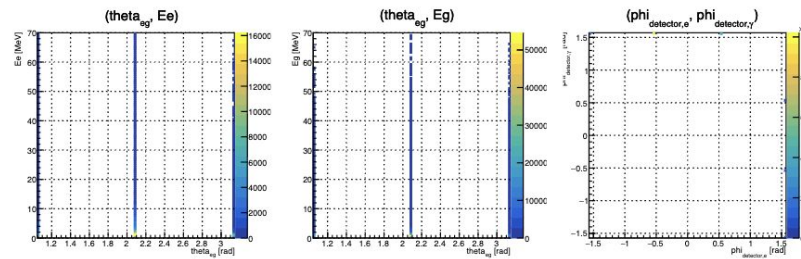
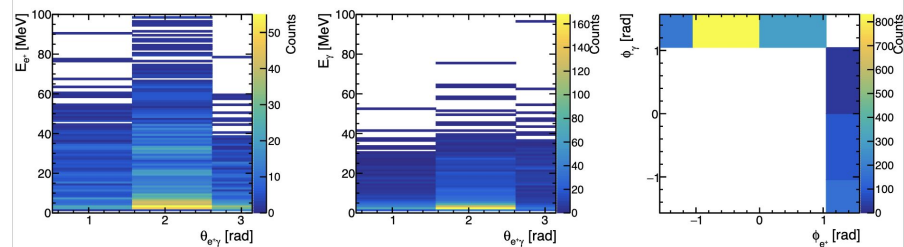
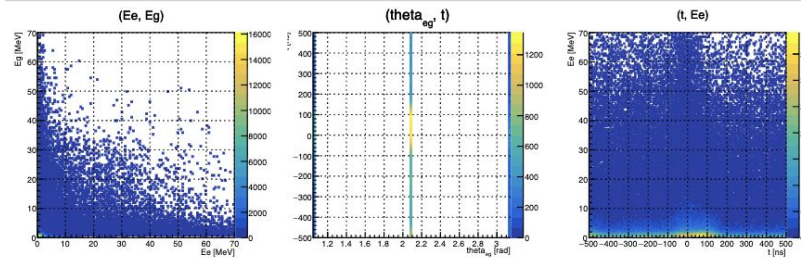
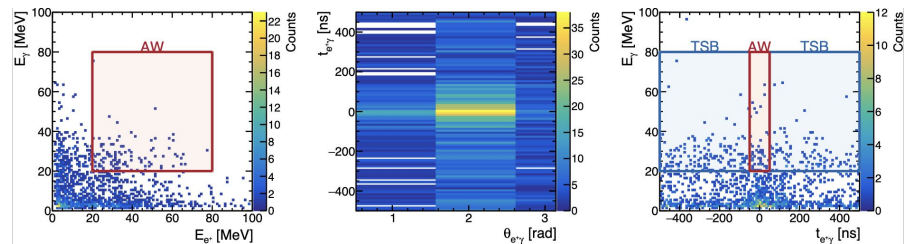
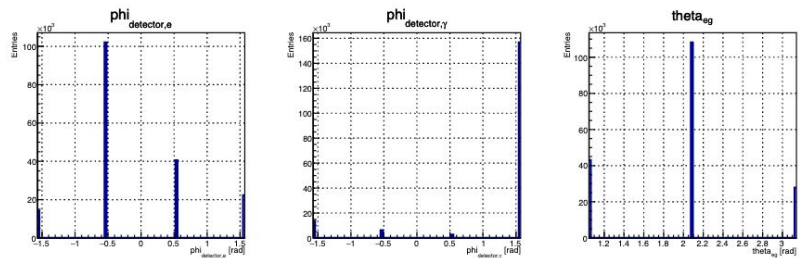
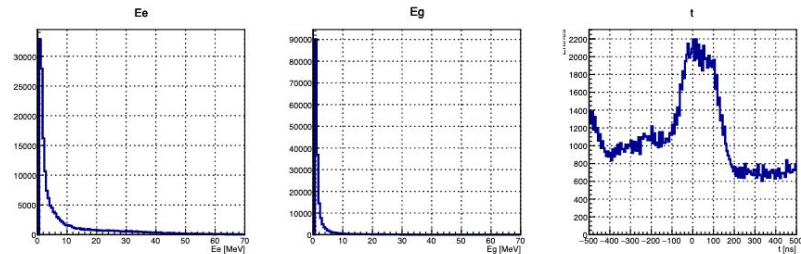
# 再構成



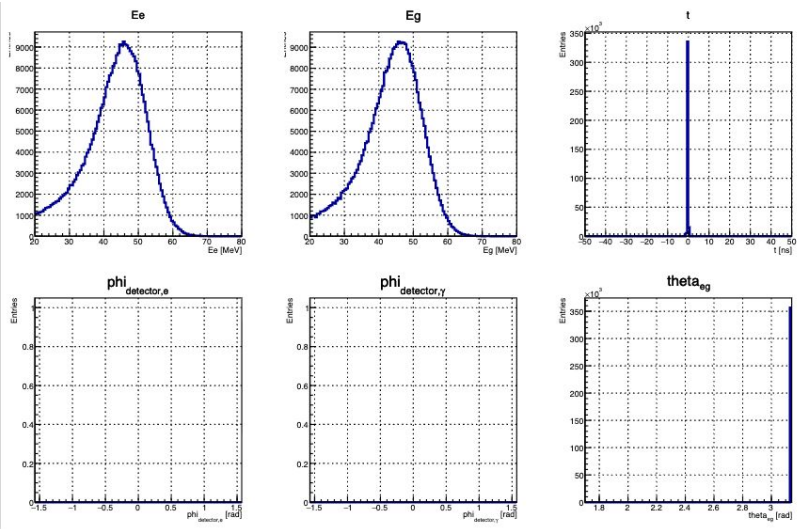
# 再構成



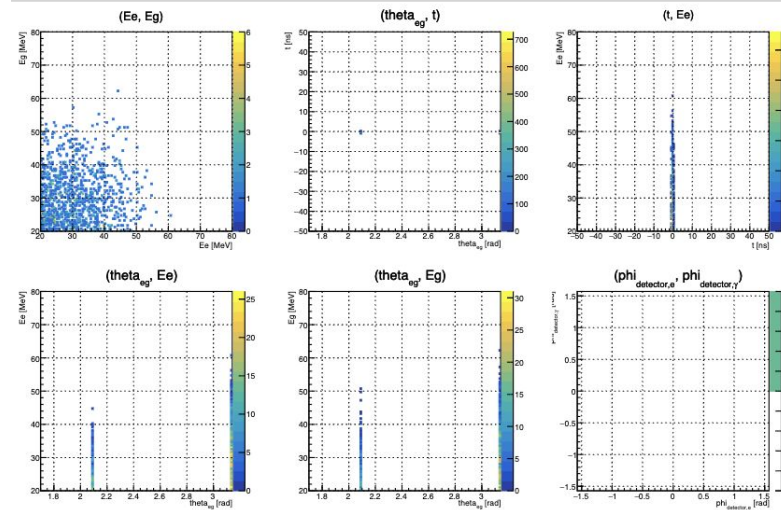
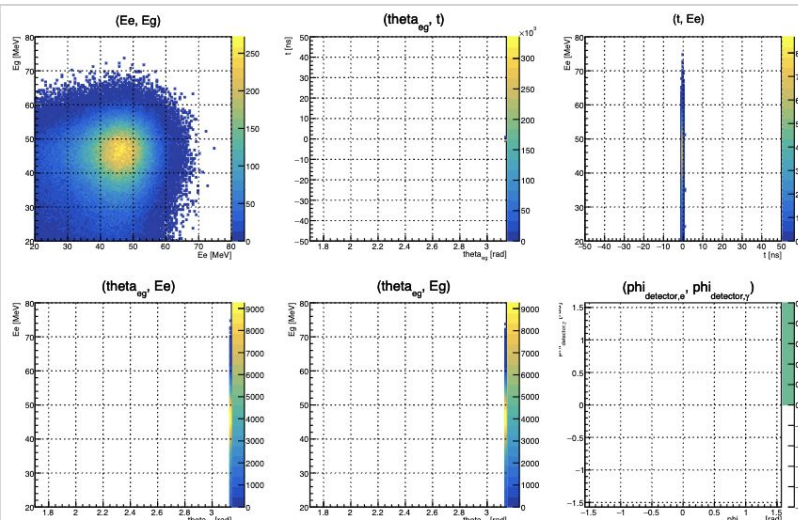
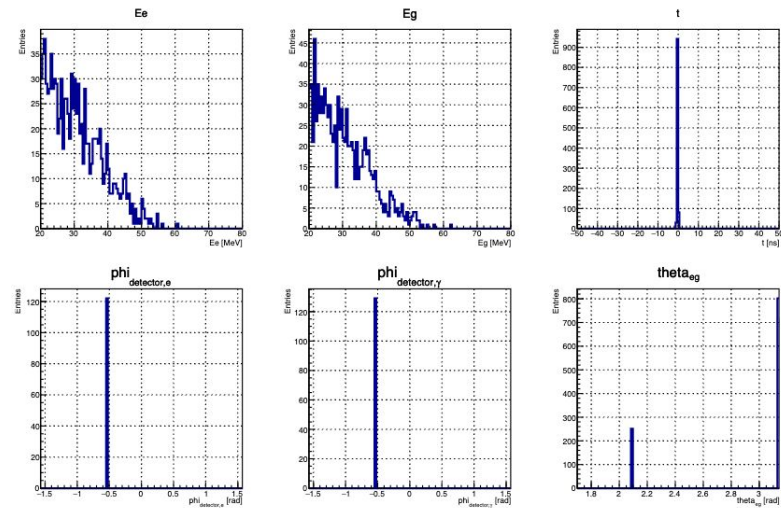
# 解析



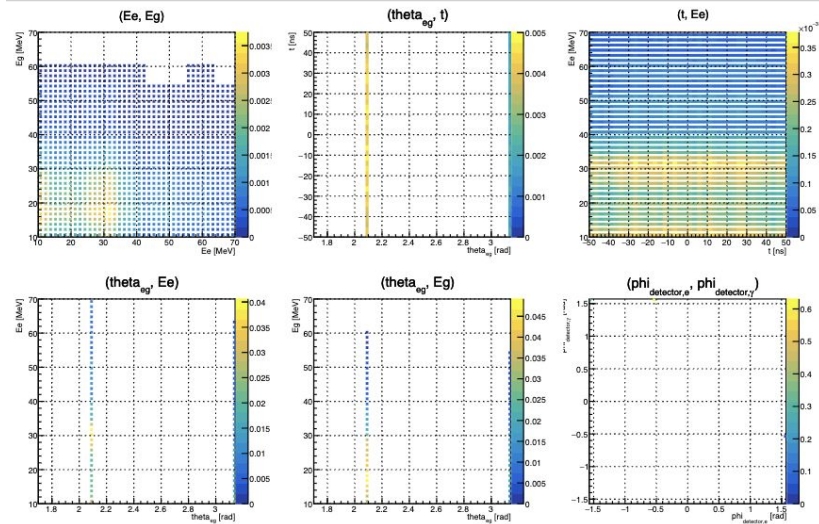
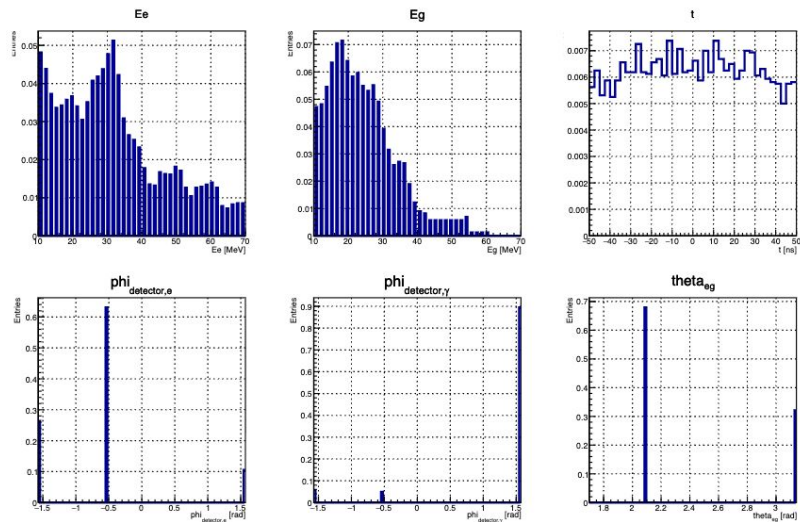
sig



RMD

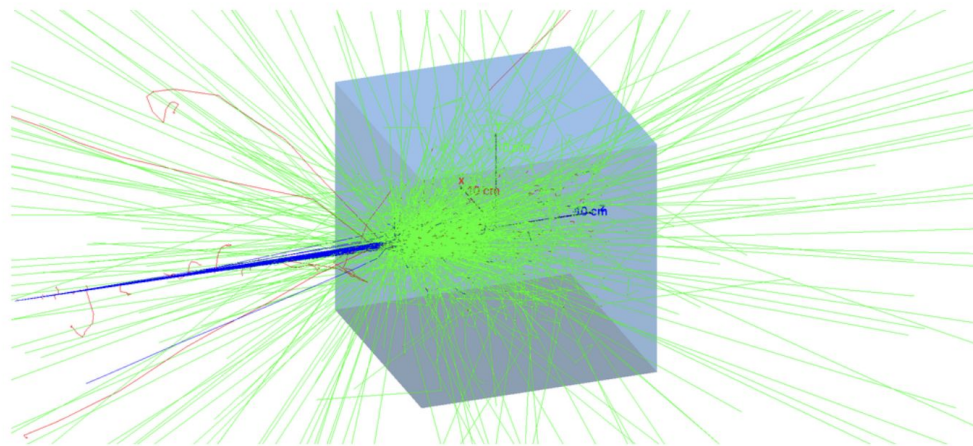


# ACC

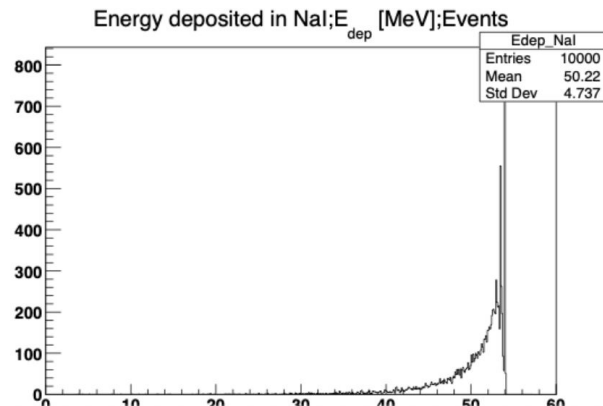


a=24cm

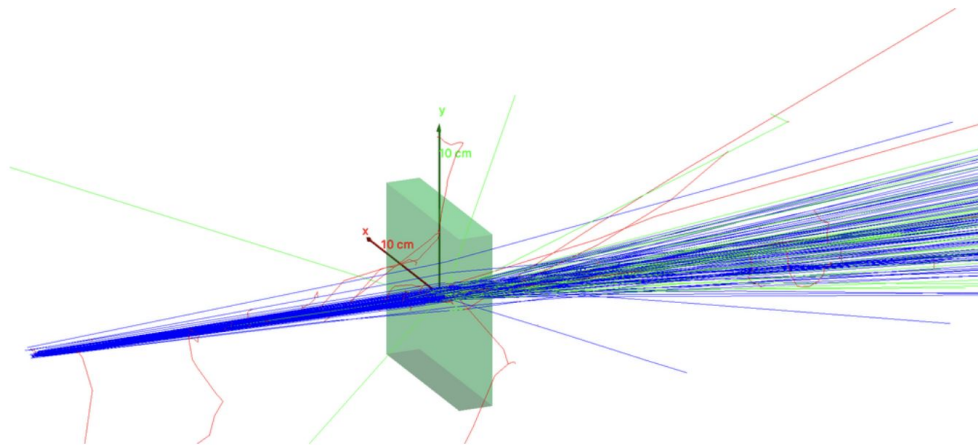
陽電子100発



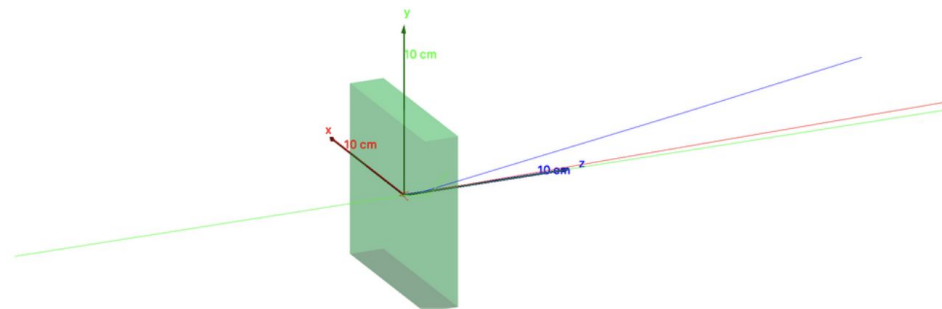
NaI中で落とした陽電子のエネルギーのヒストグラム



陽電子100発

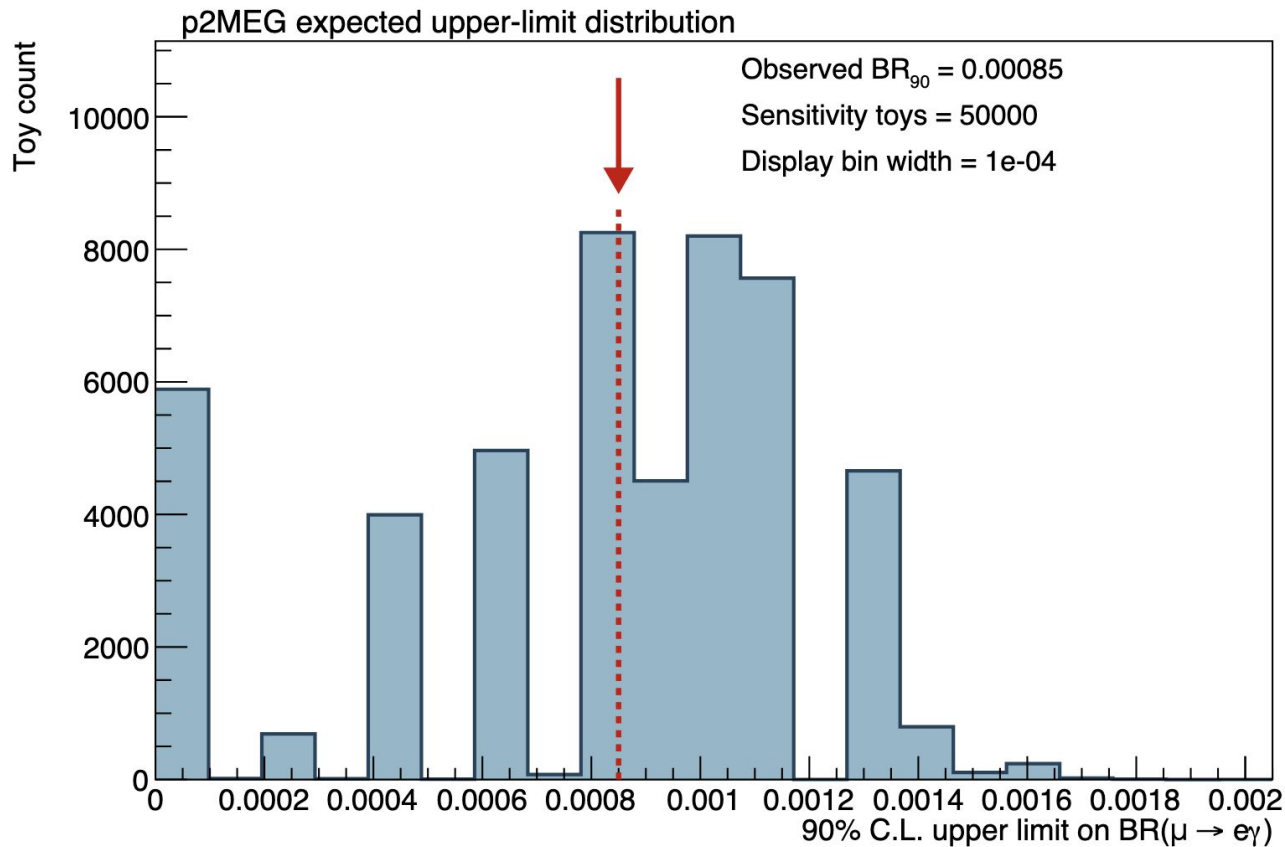


$\gamma$ 線100発



感度

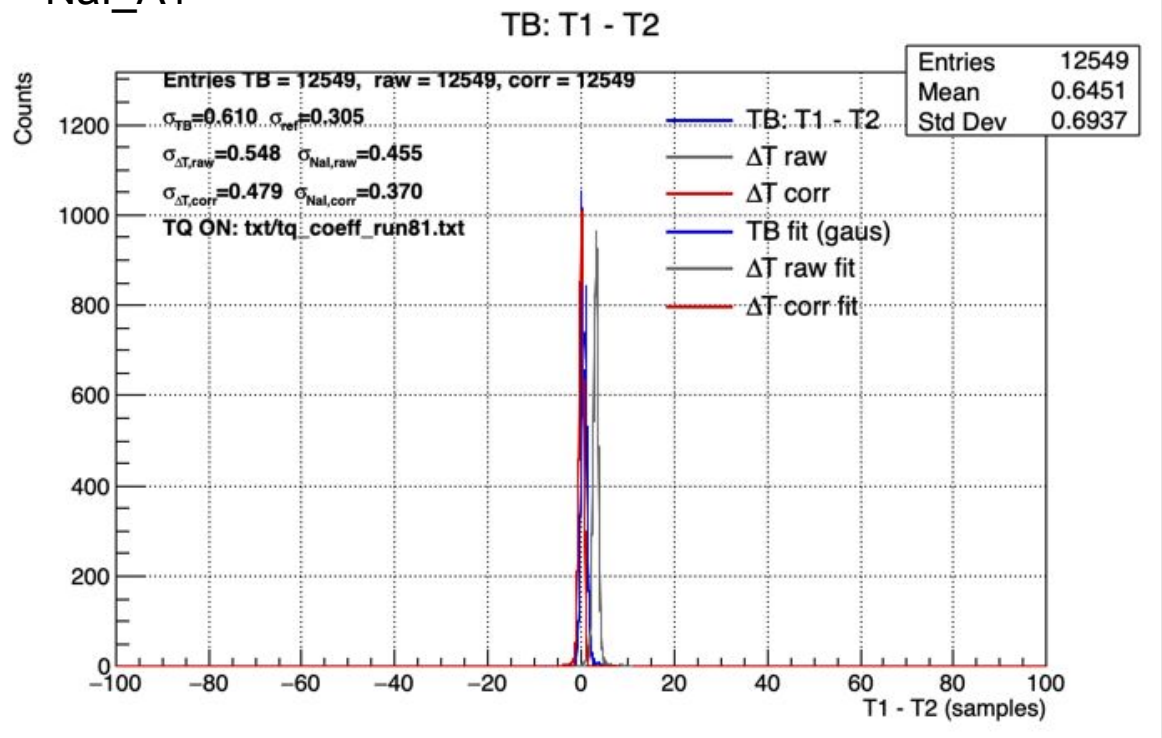
$$\text{BR}_{90}^{\text{sens}} = \text{median}(\text{BR}_{90}) = 9.3 \times 10^{-4}$$



### 3-3. NaI時間分解能測定

## 2) ガウシアンフィット (1sample 4ns)

NaI\_A1



NaI\_A1 : 1.48ns

NaI\_A2 : 1.328ns

NaI\_B1 : 1.812ns

NaI\_B2 : 1.456ns