

ミューオニウムの生成と 真空への引き出し

2018年度 課題研究P2

富永貴弘 辻川吉明 中川耕太郎 西田森彦

1. 目的

実験の目的

- 標準模型において、レプトンフレーバー保存則を破る

Muonium ($e^- \mu^+$) \rightarrow Anti-Muonium ($e^+ \mu^-$) 転換は禁止されている。

- いくつかの beyond standard model では有限の断面積を预言する。
- この転換を探索し、その上限を与えることをモチベーションとして実験を計画した。
- この転換が起こるためには真空 (<10Pa) への引き出しが必要。

今回の実験の目的

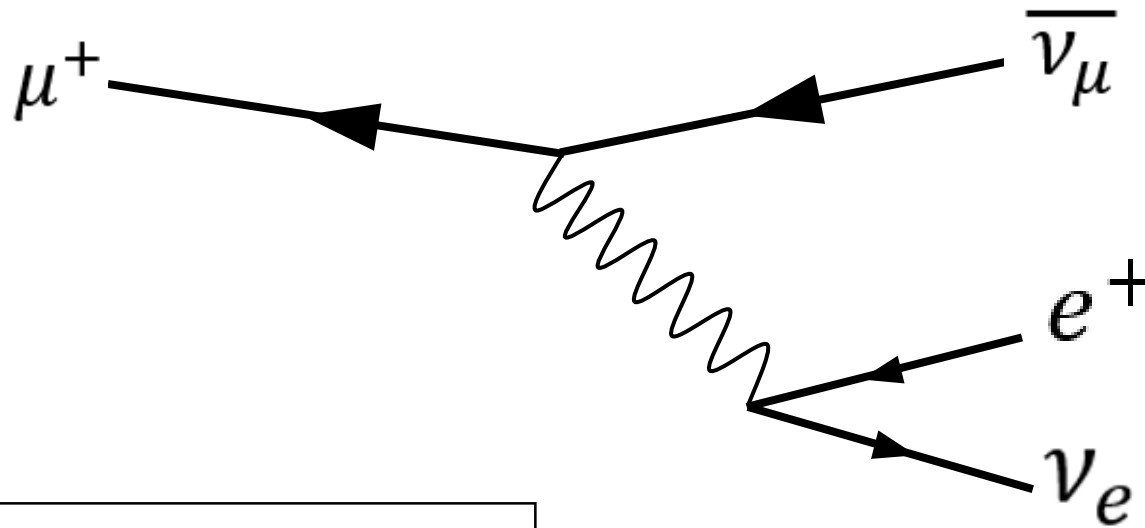
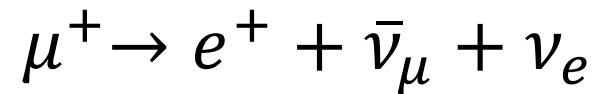
- ① Muの生成率の確認
- ② 真空への引き出し

2. 原理

2.1. ミュオンの基本的な性質

ミュオンの崩壊

- ミュオンは弱い相互作用によって次の崩壊を起こす

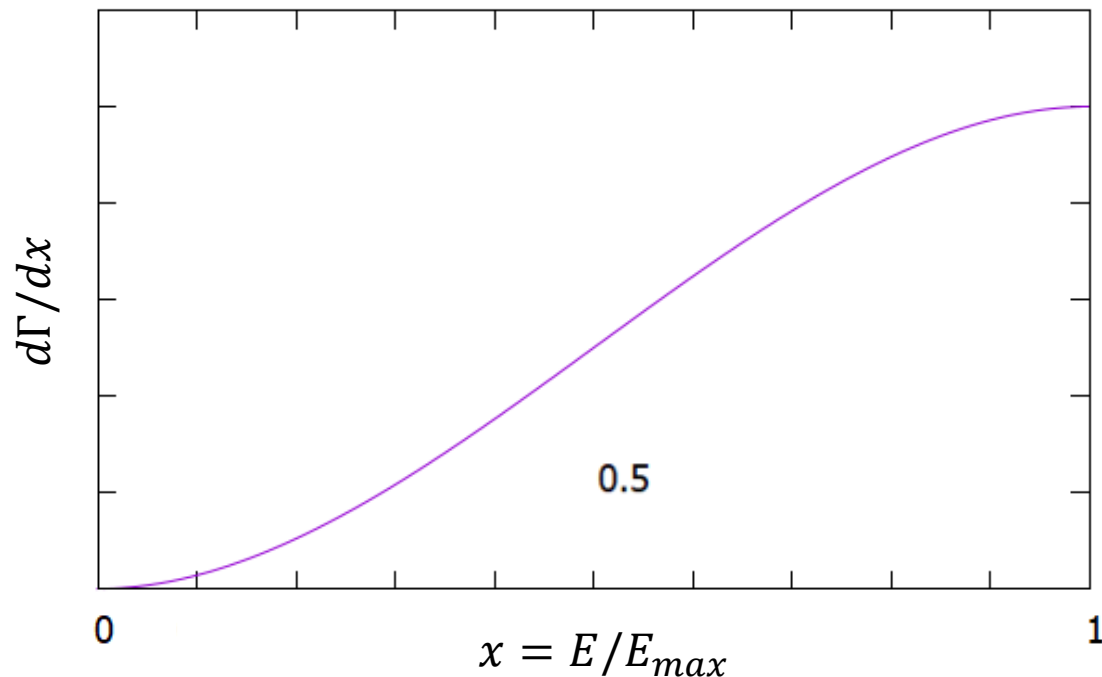


μ^+ の崩壊のファインマン図

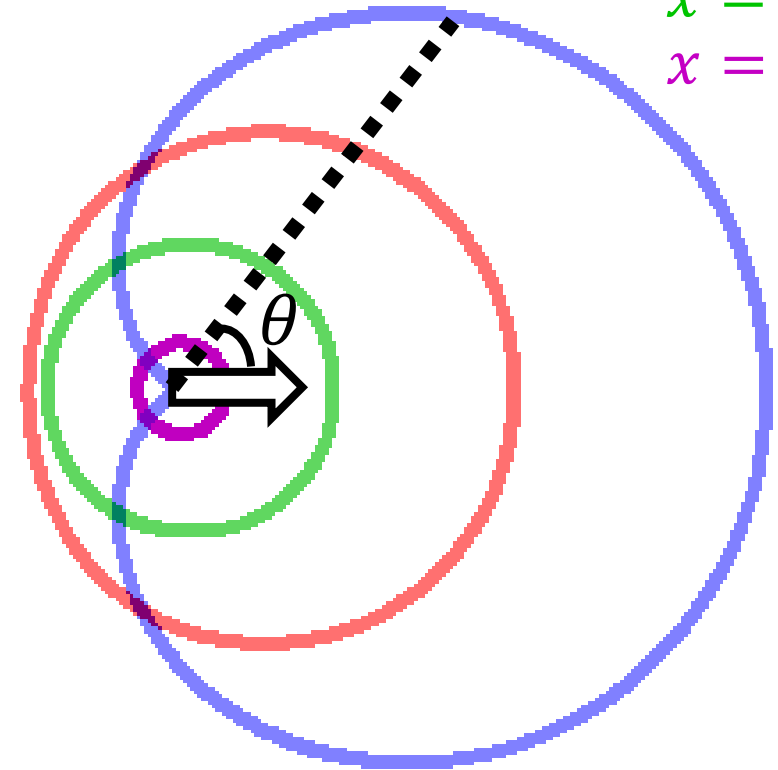
ミュオン崩壊の特徴

断面積：

$$\frac{d^2\Gamma}{x^2 dx d(\cos\theta)} \sim (3 - 2x) - \cos\theta(1 - 2x)$$



$x = 1$
 $x = 0.75$
 $x = 0.5$
 $x = 0.25$



高エネルギーの e^+ ほど
スピンの向きに崩壊しやすい

2.2. μ SR / mSR

Muon Spin Rotation (μ SR)

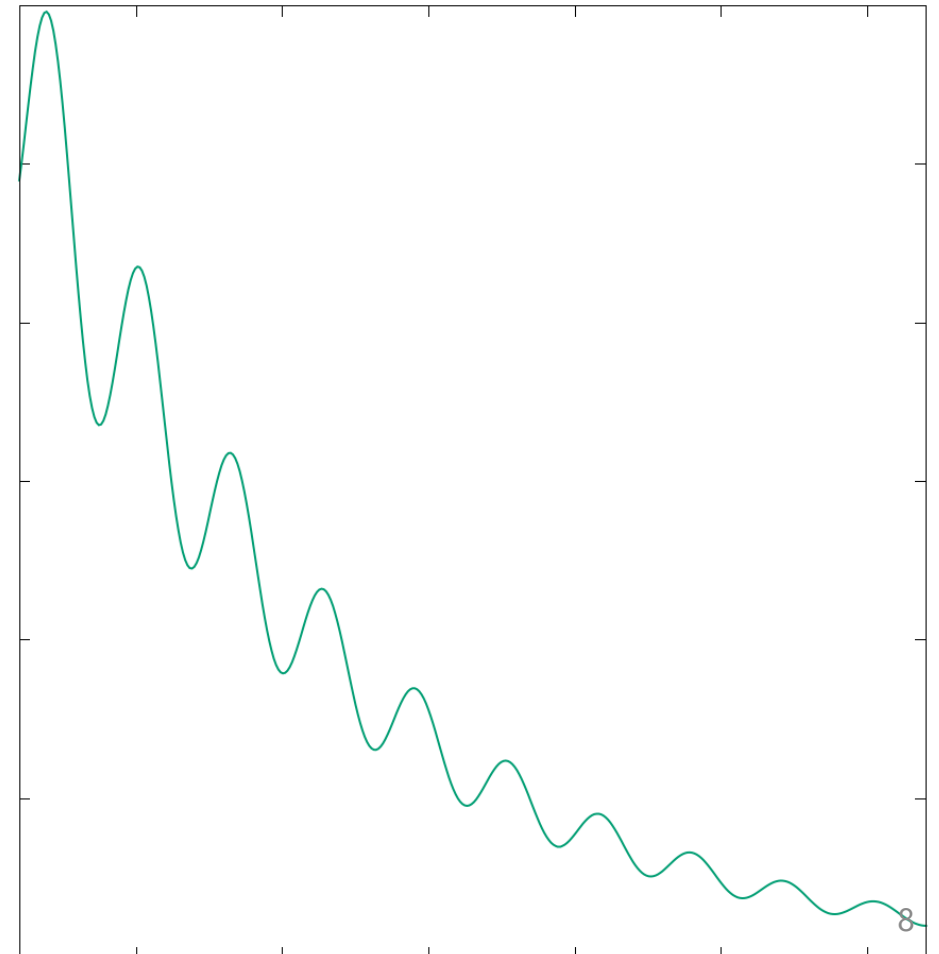
- μ^+ は磁気モーメントを持ち、ラモア歳差運動する。 $(\omega_\mu = \gamma_\mu B)$
- θ_0 で観測する場合、 e^+ の時間変化は

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \left(1 + \frac{1}{3} \cos(\theta_0 - \omega t)\right)$$

指数関数的な減衰 + 振動

となる。

予測される e^+ カウント数の時間変化



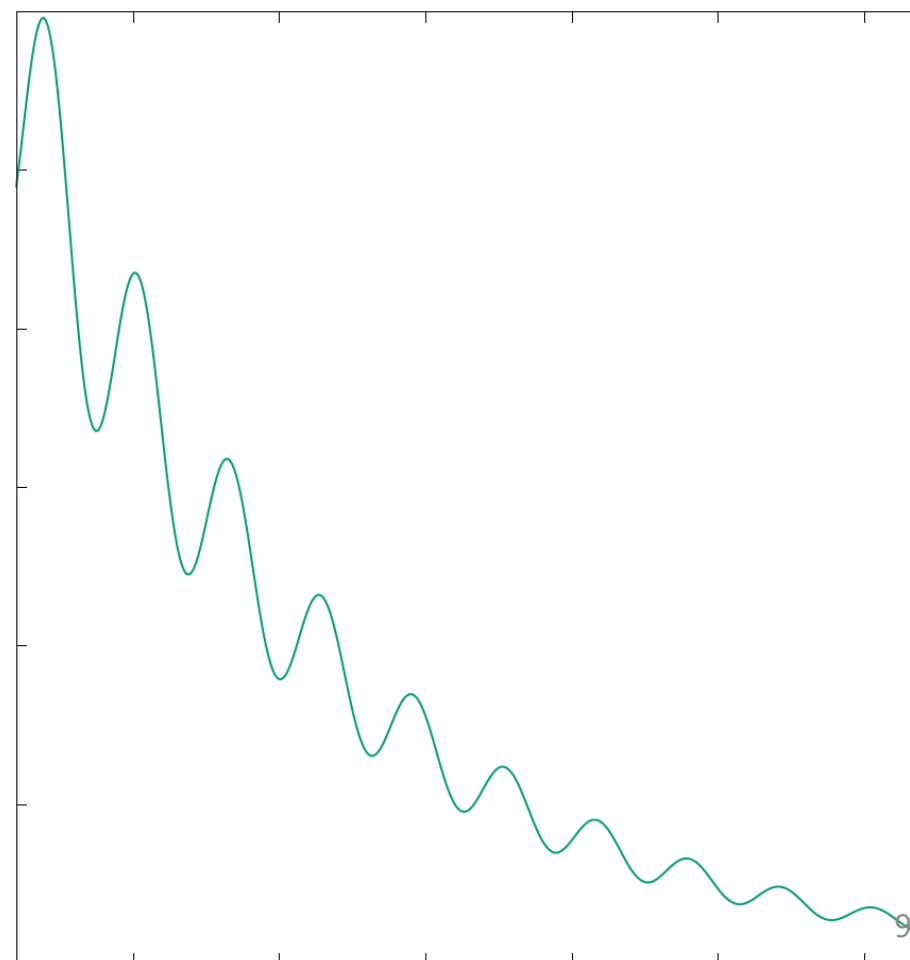
muonium Spin Rotation (mSR)

- μ^+ と e^- の束縛系である Mu も、
低磁場のとき角振動数

$$\omega_{\text{Mu}} \approx \frac{\gamma_e}{2} B \approx 103\omega_{\mu}$$

で振動

予測される e^+ カウント数の時間変化



Asymmetry

- θ の位置の検出器でのカウント数 :

$$C(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau_\mu}} [1 + A_\mu \sin(\theta + \omega_\mu t - \phi_\mu) + A_{\text{Mu}} \sin(\theta + \omega_{\text{Mu}} t - \phi_{\text{Mu}})]$$

- $\theta = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$ に置いた検出器でのカウント数 $C_{L,R}$ は

$$C_{L,R}(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau_\mu}} [1 \pm A_\mu \cos(\omega_\mu t - \phi_\mu) \pm A_{\text{Mu}} \cos(\omega_{\text{Mu}} t - \phi_{\text{Mu}})]$$

- Asymmetry :

$$F(t) = \frac{C_L(t) - C_R(t)}{C_L(t) + C_R(t)} = A_\mu \cos(\omega_\mu t - \phi_\mu) + A_{\text{Mu}} \cos(\omega_{\text{Mu}} t - \phi_{\text{Mu}})$$

を計算して振幅 A_μ, A_{Mu} を求める。

Muonium (Mu) の生成率

- スピンなどを考慮→生成されたMuの半分がmSRに寄与
- Muの生成率は、

$$R = \frac{2A_{\text{Mu}}}{A_{\mu} + 2A_{\text{Mu}}}$$

で与えられる。

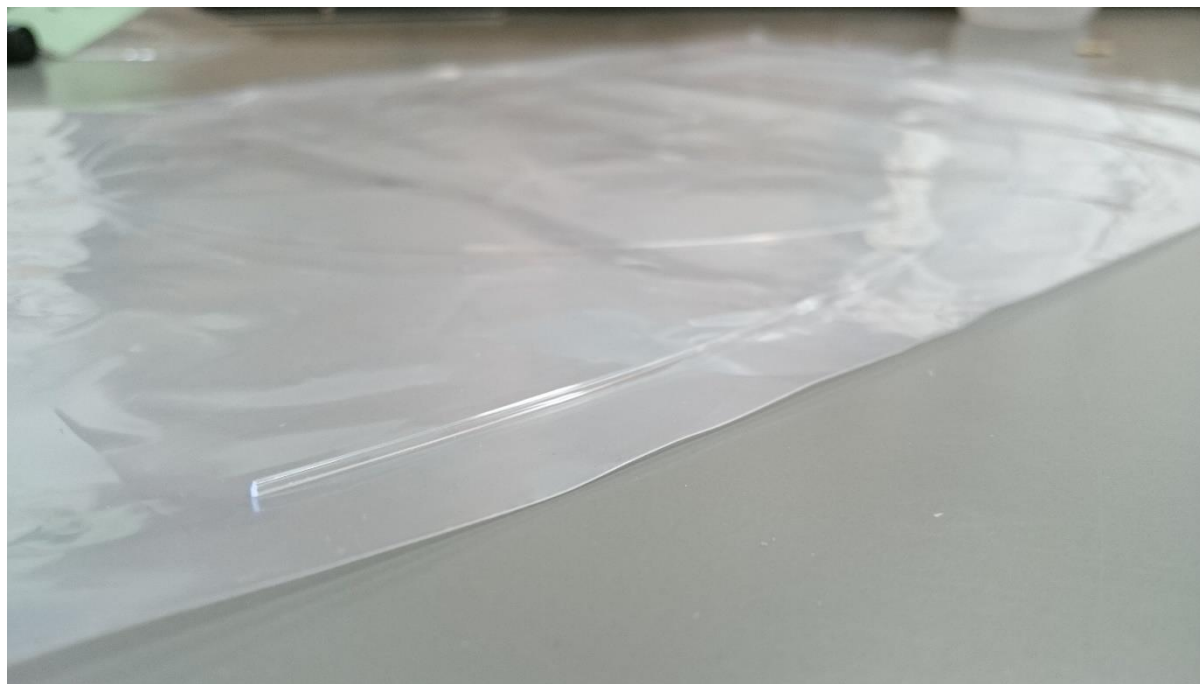
2.3. トラッキング

e^+ のトラッキング

- Muが真空中に引き出されたことを確認したい
- Mu (の中の μ^+) が崩壊したときに出る e^+ をトラッキングし、崩壊位置を再構成する

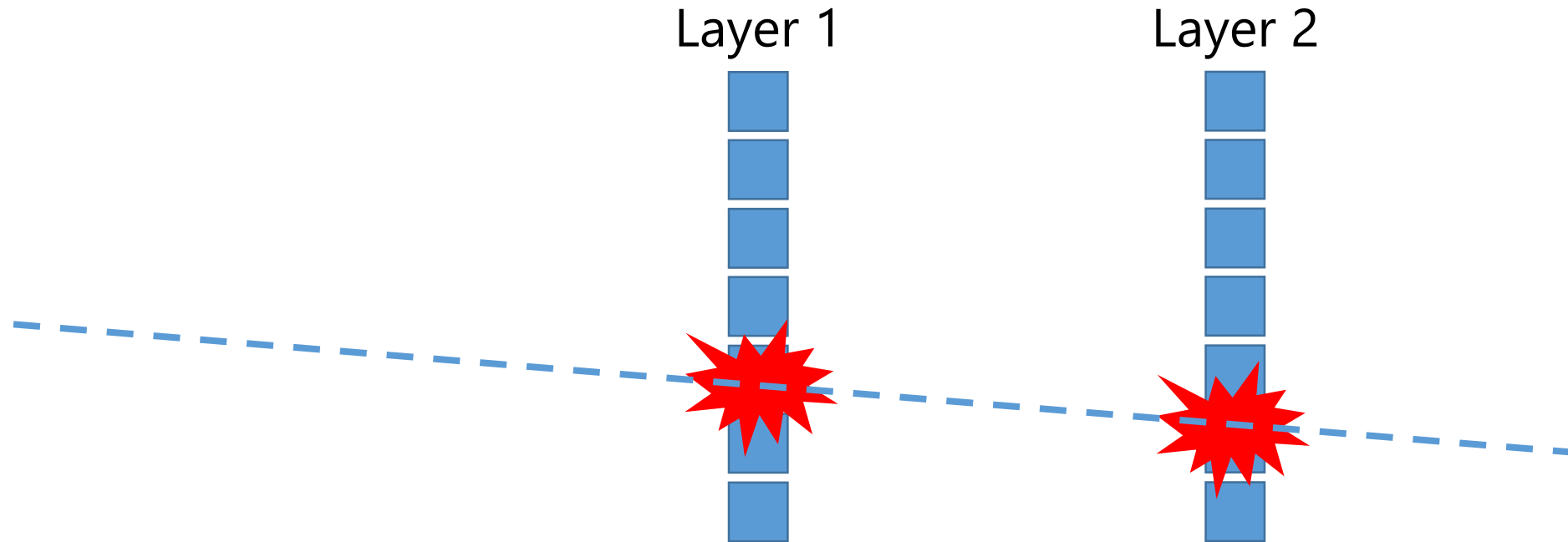
Scintillating Fiber

- プラスチックシンチレータの機能をもつ1mm角の光ファイバー
- 荷電粒子が通過するとシンチレーション光が光ファイバーの原理で伝搬される



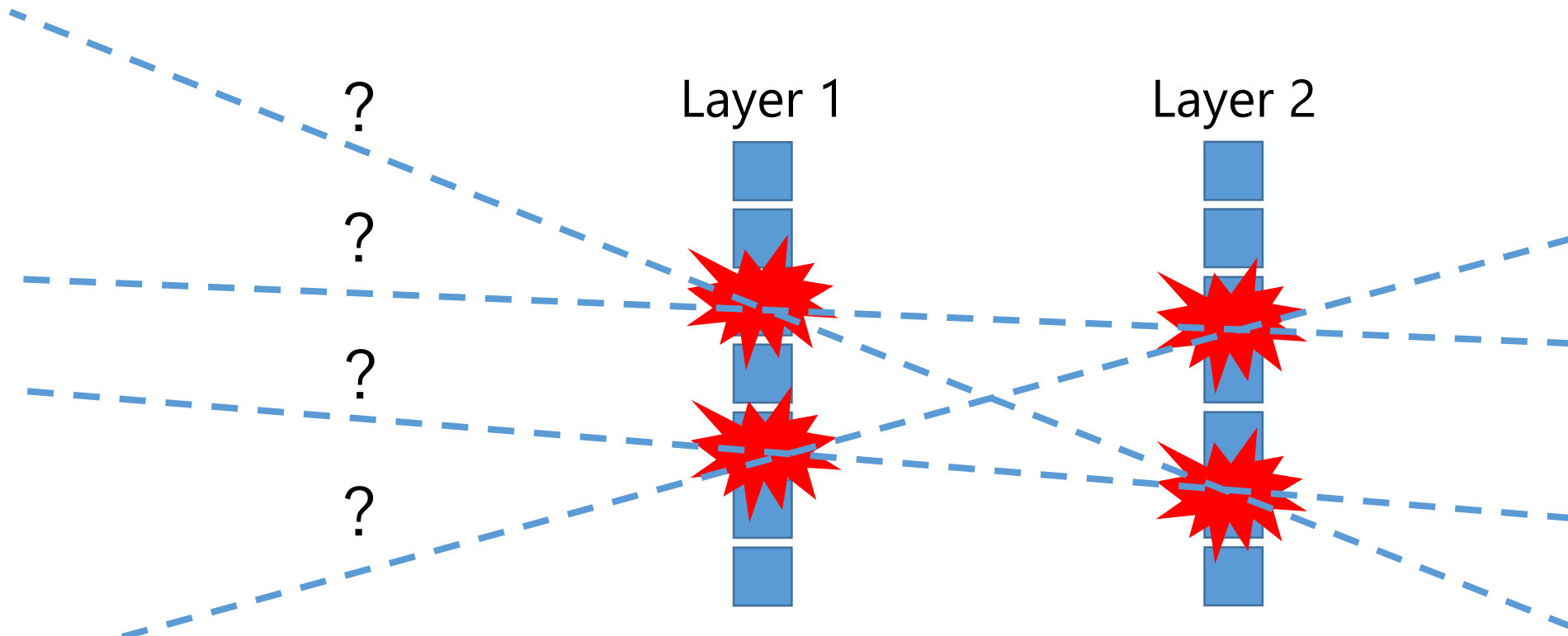
Scinti-Fiberによる e^+ の1次元トラック

- Scinti-Fiberを一行に並べることで荷電粒子の通過位置の1次元情報を知らせることができる
- 同一方向に並べた Fiber array を2層用意することで（1次元）直線トラックが可能



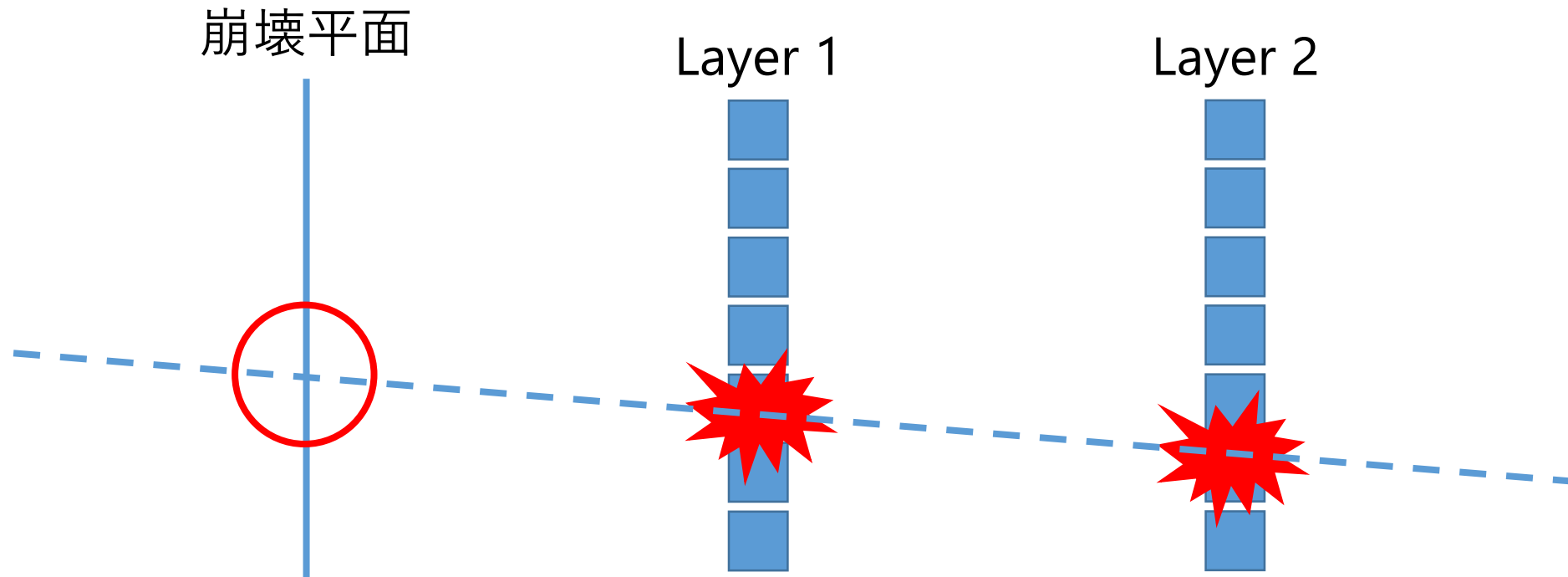
複数の e^+ が通過した場合

- 原理的に正しくトラックできない
- トラックの立体角やビーム強度を制限してカウントレートを抑制する必要性あり



μ^+ 崩壊位置の再構成

- 崩壊位置がある平面内にあると仮定すると一直線上に定まる
- μ^+ の崩壊位置の1次元情報を再構成できる



3. 装置と手順

3.1. 装置の全体像

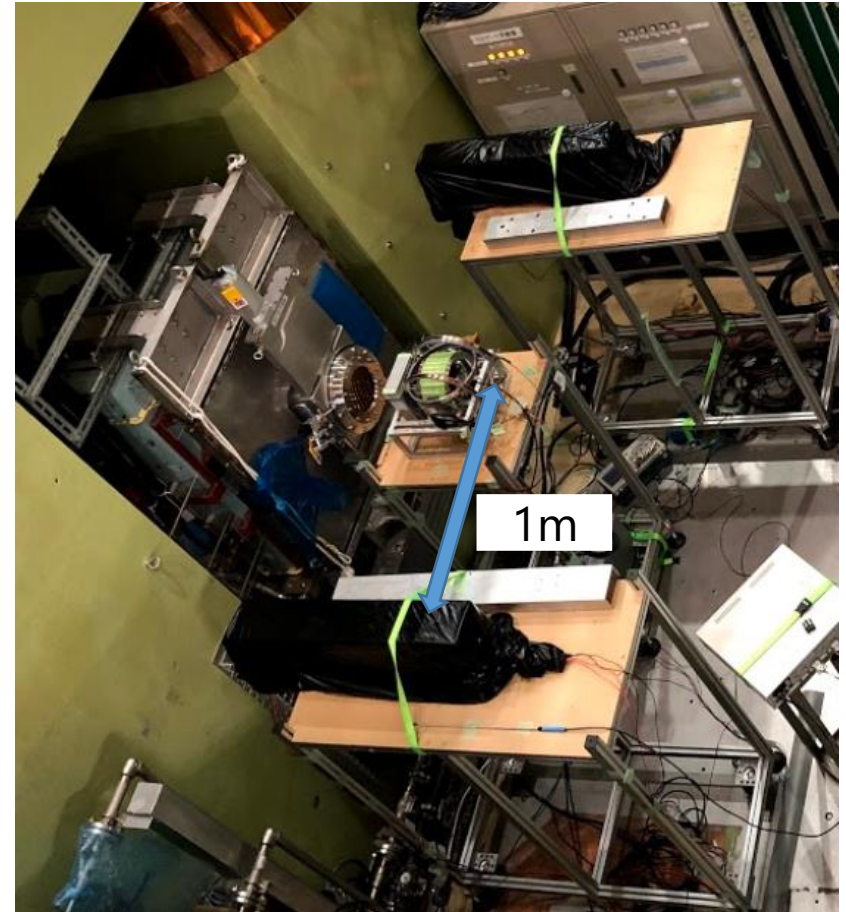
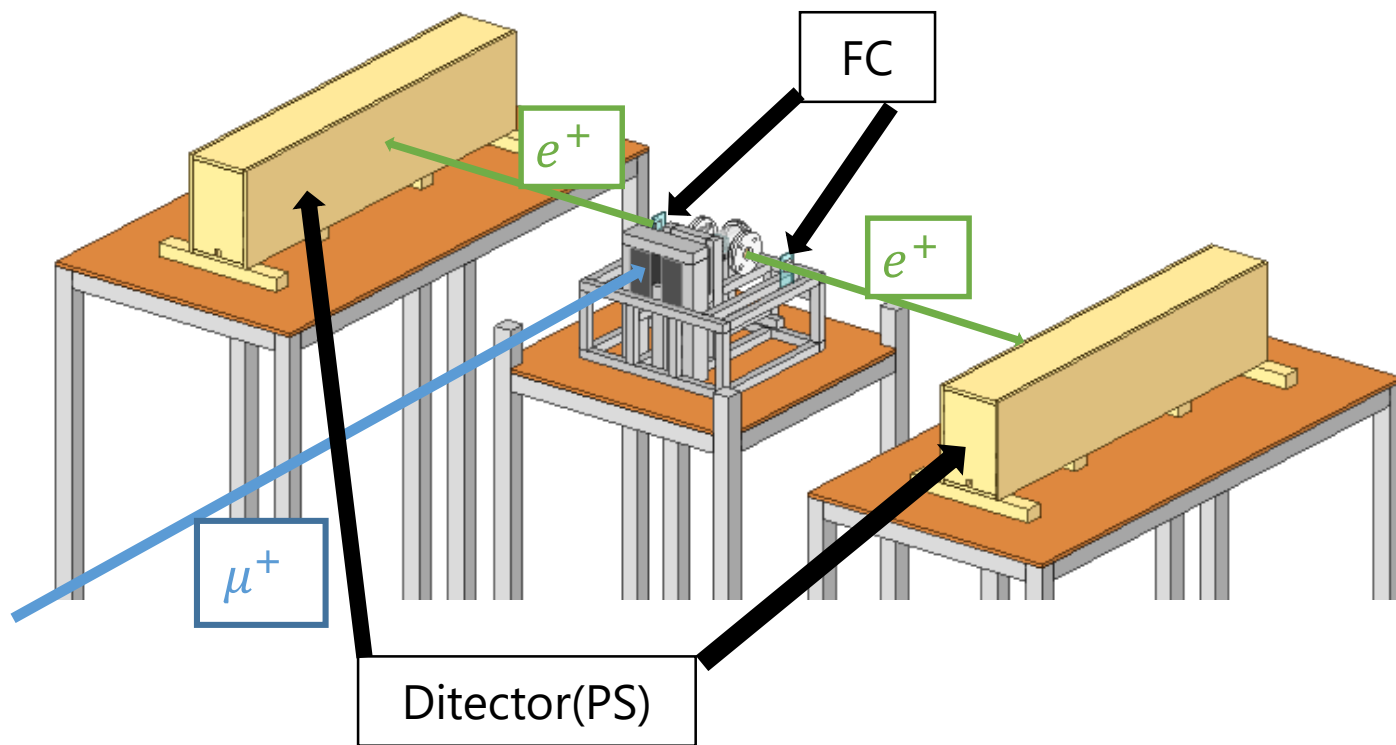
加速器科学インターンシップ

- KEKが行っている、
加速器科学インターンシップ
を利用させてもらった。
- MLFミュオンビームD2ラインを
2/15昼~2/18朝の間専用使用
(ビームタイムは17日9時-18日7時)

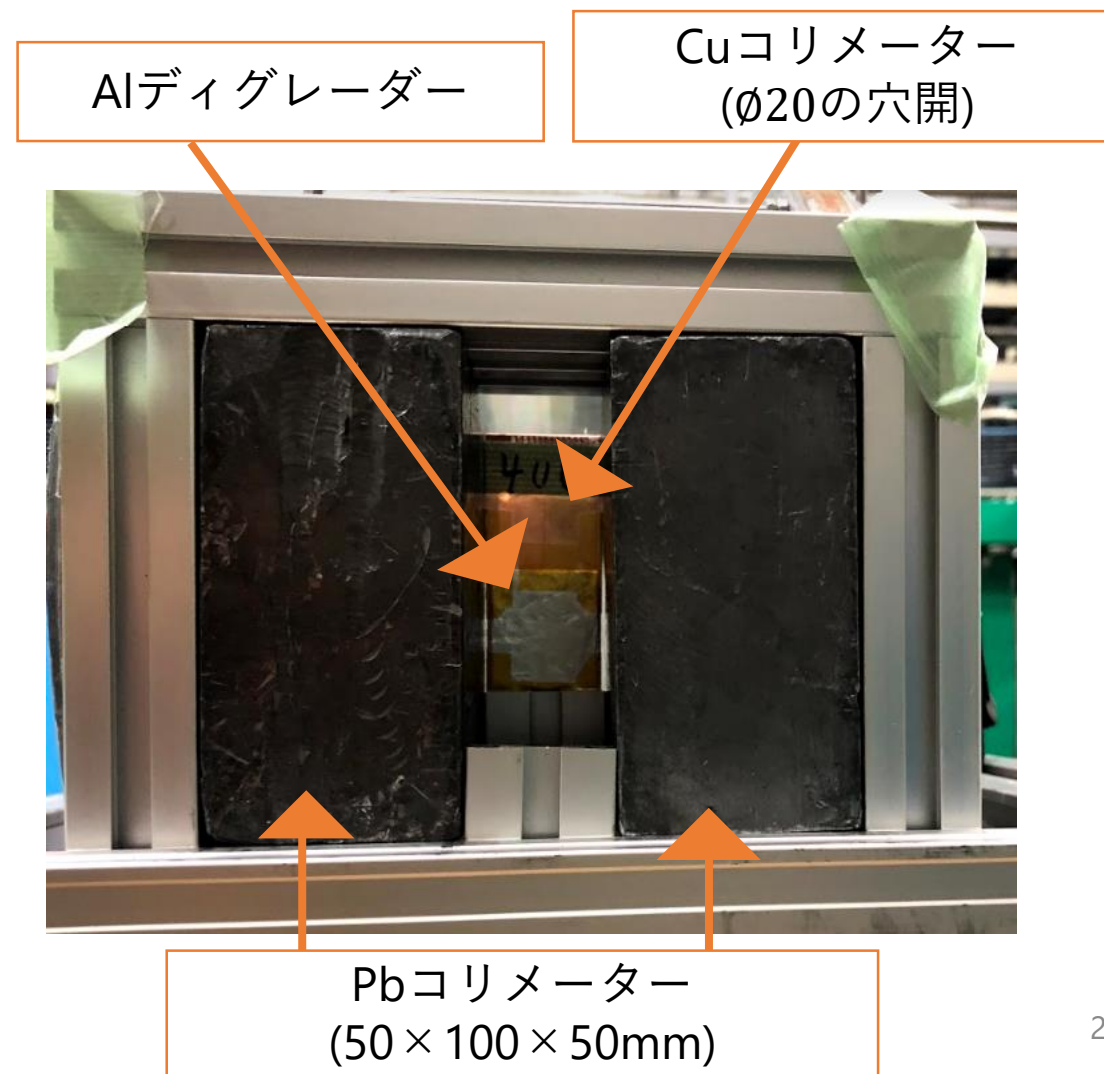
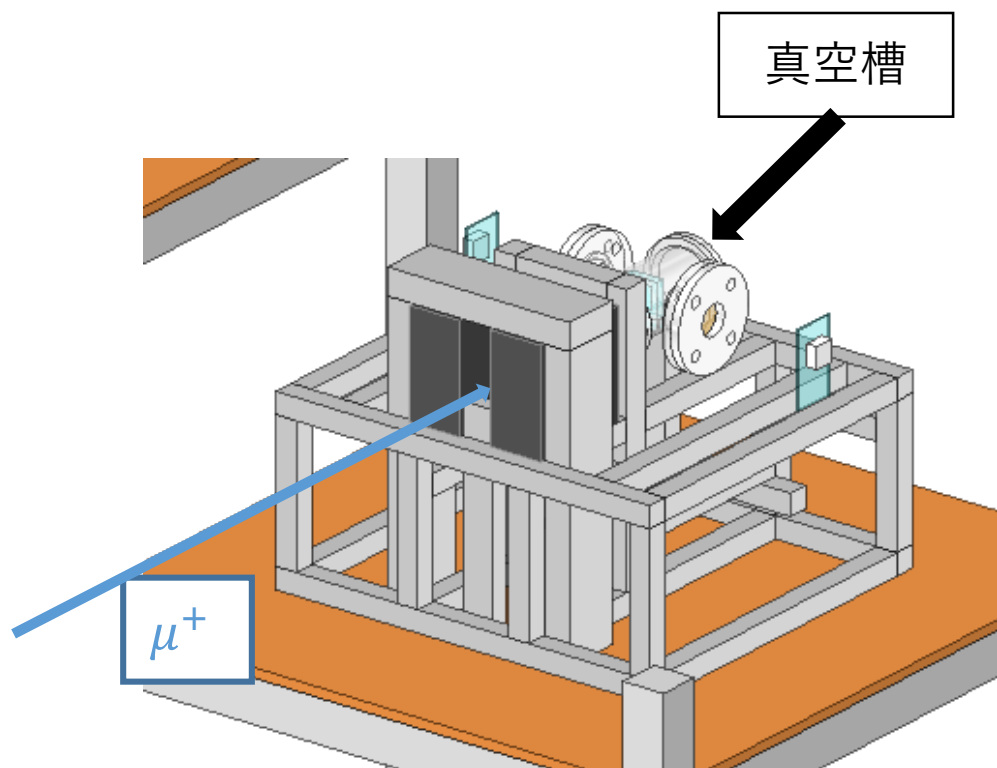


セットアップ

全体のセットアップ

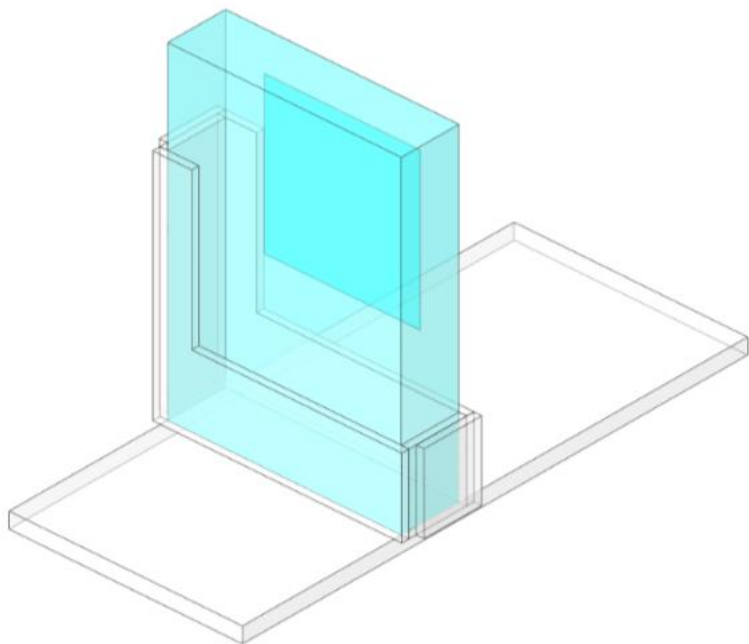


ターゲット周り

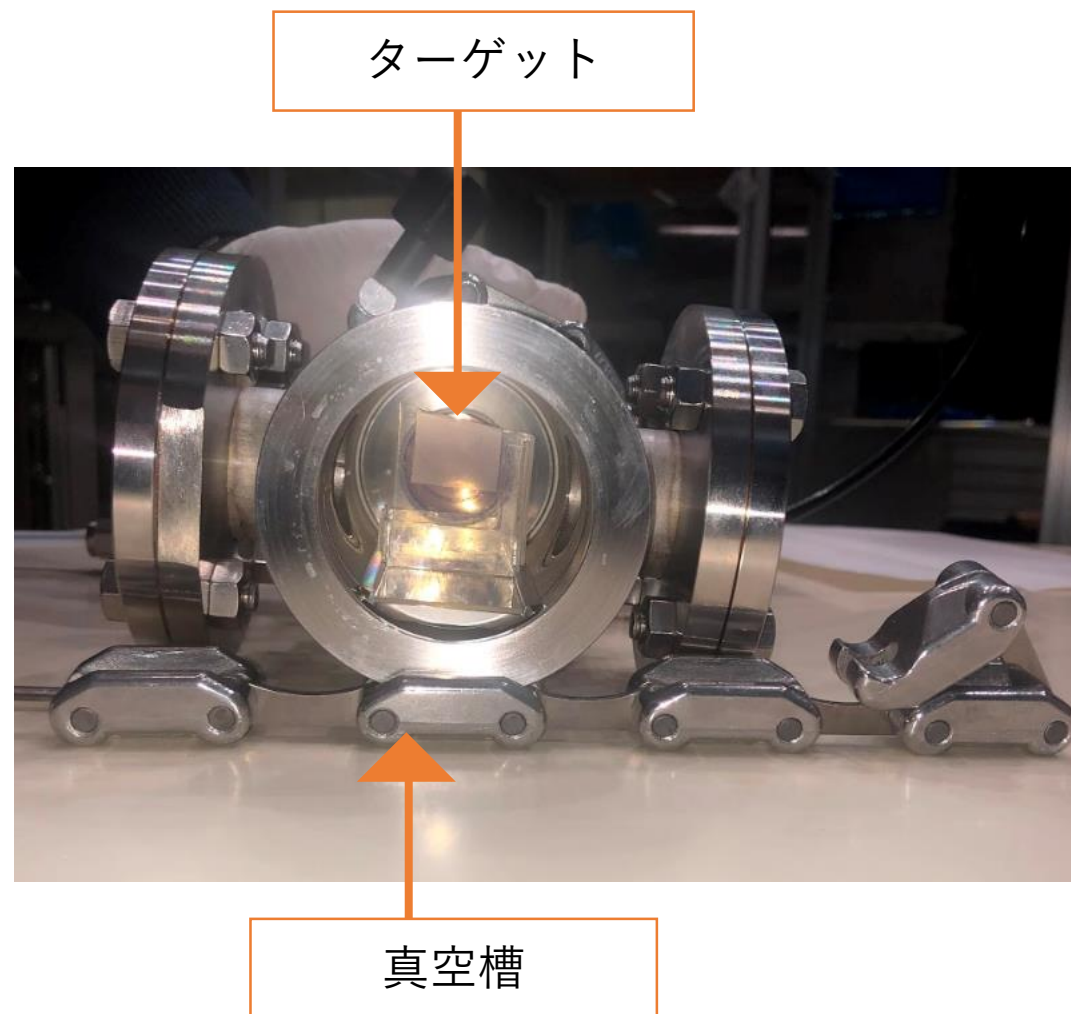


ターゲット

加工aerogel(30×42×8mm)



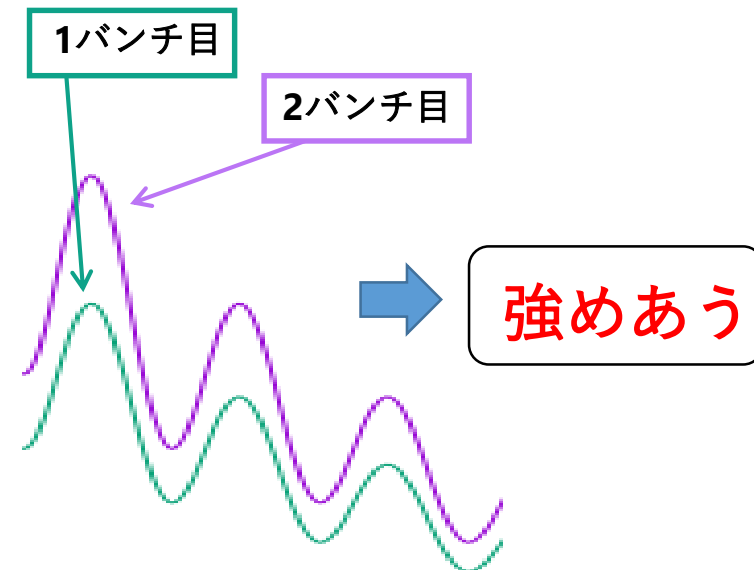
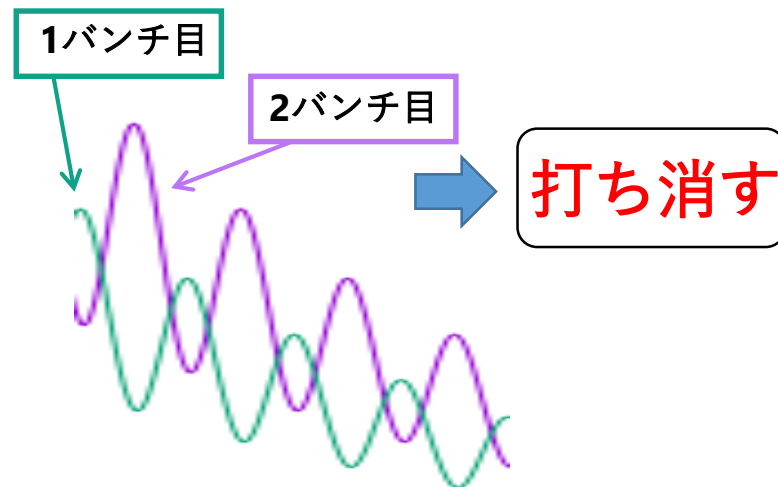
(KEK 三部さんよりお借りしました)



3.2. 磁場装置

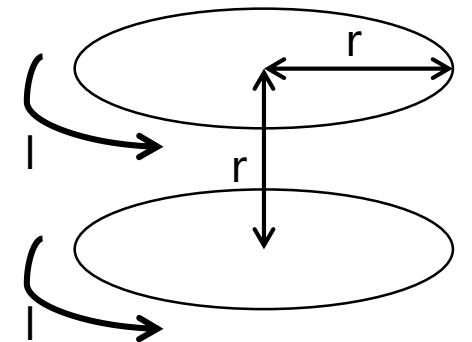
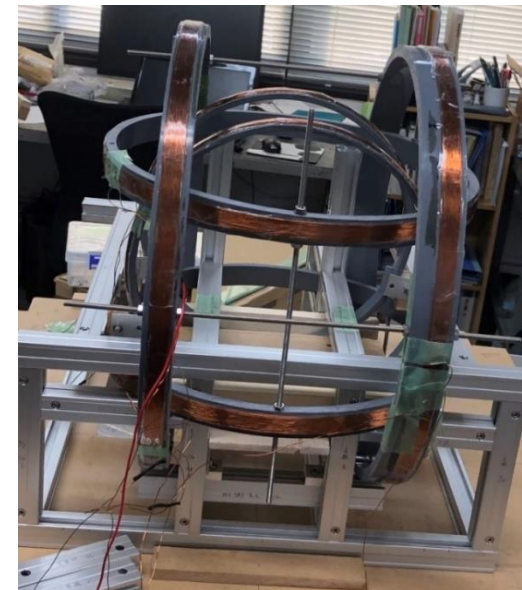
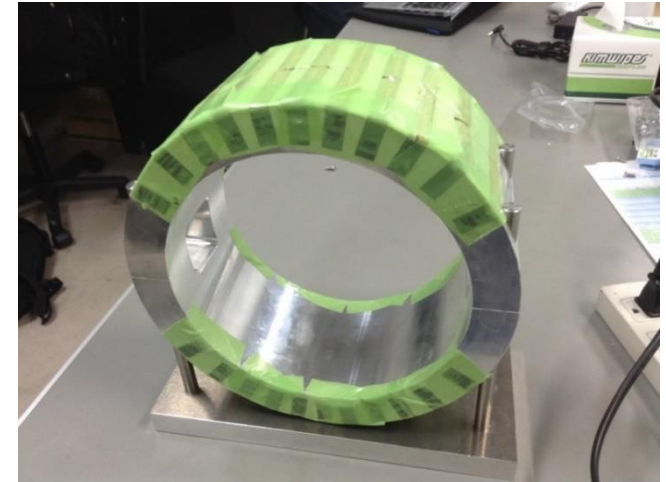
バンチ間隔に振動周期を合わせる必要性

- それぞれシンチレーターで測定できるぐらいの振動数になるような磁場を設定してやる必要がある
- 今回使うビームは2バンチ
- バンチ間隔に合った磁場が必要



磁場印加装置 (dipole・ヘルムホルツコイル)

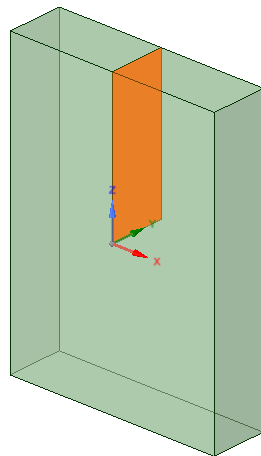
- μ SR
 - **dipole**
 - 要求磁場：123.5Gauss
 - 内径184mm / 外径236mm / 長さ100mmの溝のあるアルミ製の磁石固定台を作成
- mSR
 - 三軸ヘルムホルツコイル (**HC**)
 - 要求磁場：1.20Gauss
 - 呼び径 200 / 250 / 300 mmの塩ビの外周にエナメル線を40回巻いた



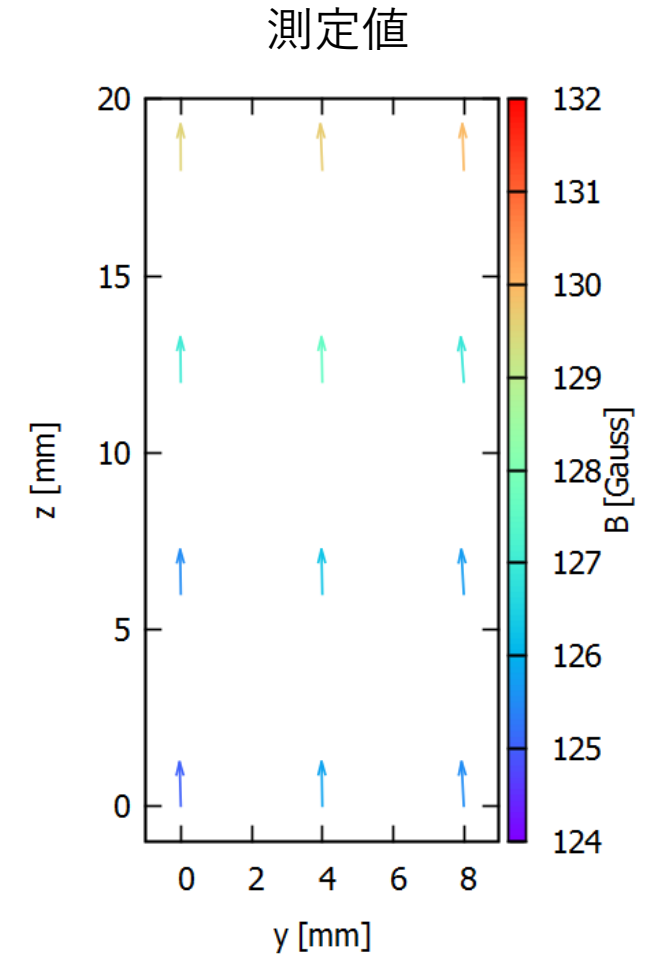
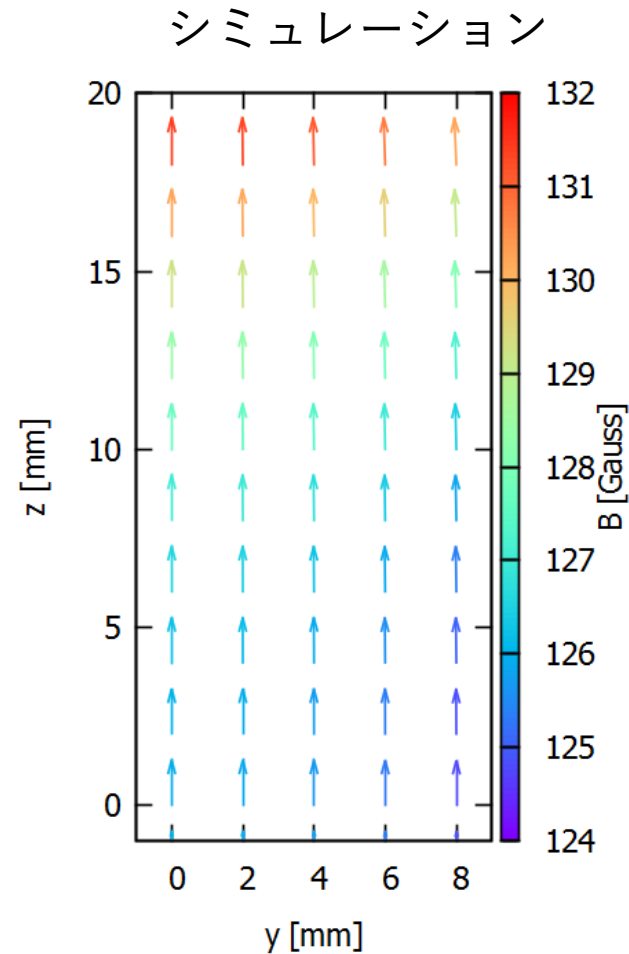
ヘルムホルツコイル
の概念図

dipoleの一様性

- シミュレーション：
 - 永久磁石の作る磁場を3次元で計算
- 測定：
 - 磁気プローブを使用

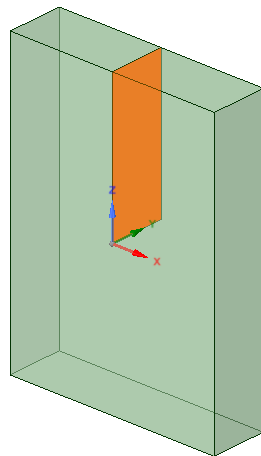


ターゲットの概念図

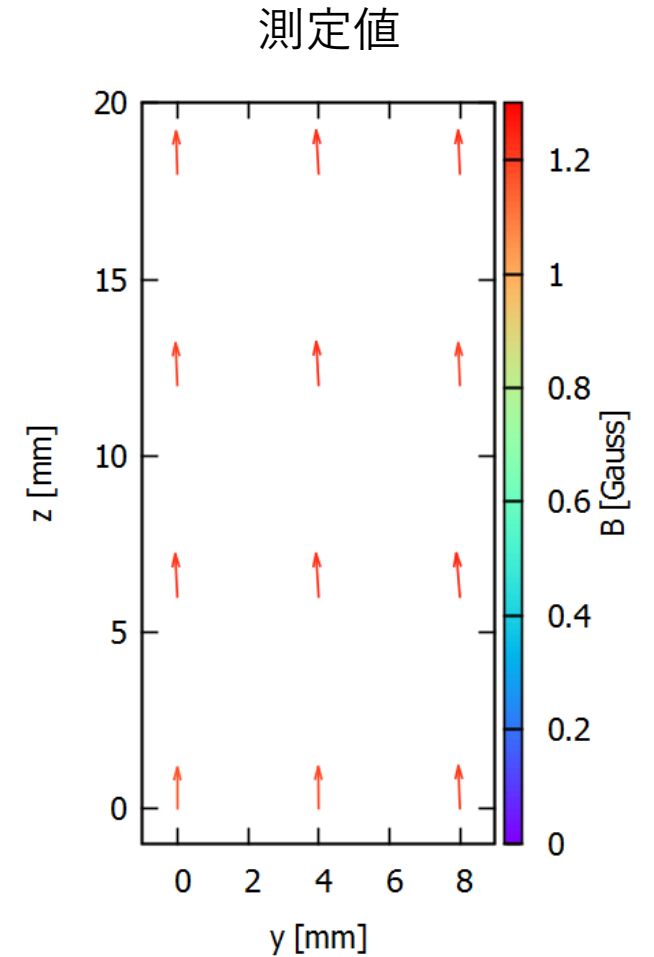
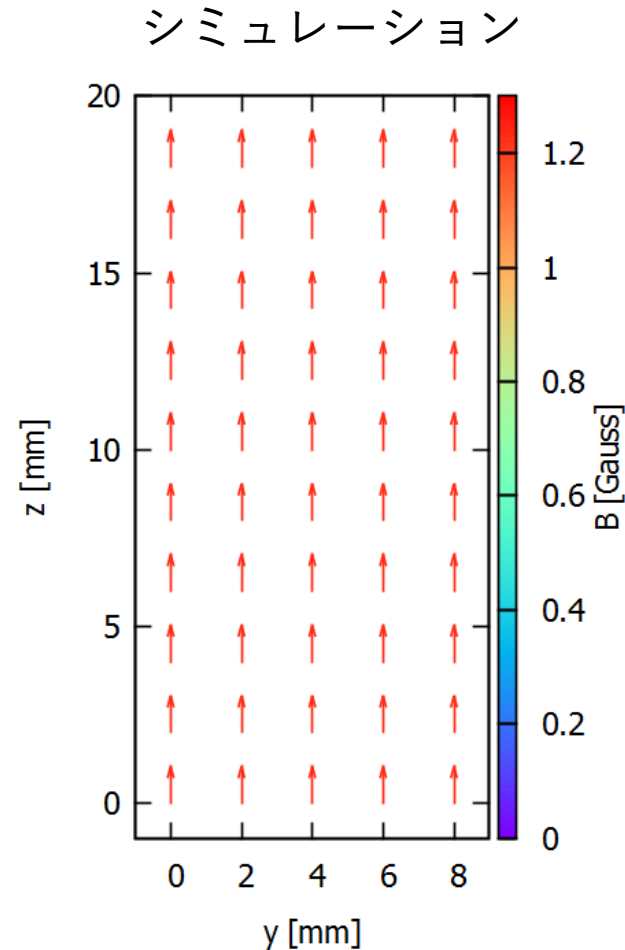


HCの一様性

- シミュレーション：
 - 円形電流の作る磁場を3次元で計算
- 測定：
 - dipoleと同様



ターゲットの概念図



3.3. 検出器 / DAQ

PS検出器

- 縦横 20cm 奥行12cm × 2セット
- ターゲットの近くには $2 \times 2 \times 0.4$ cmのfingerカウンターを設置

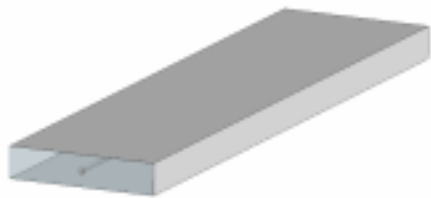


Figure : PS板

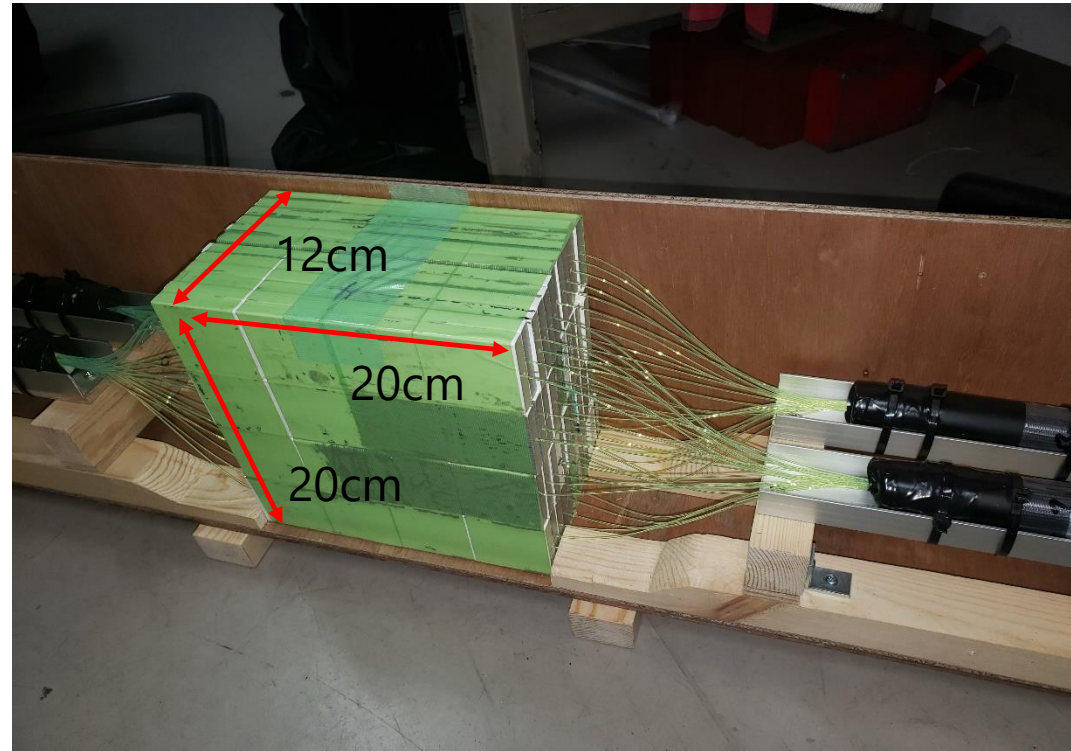


Figure : PS検出器

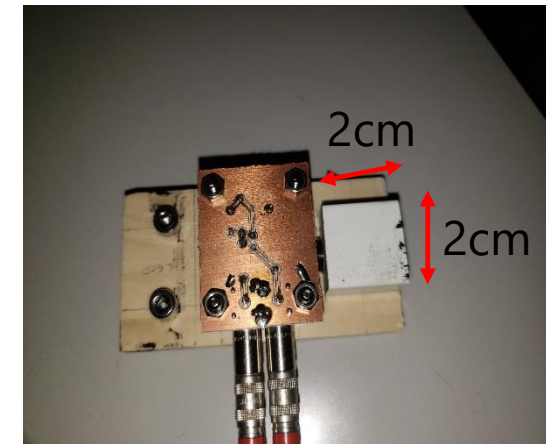
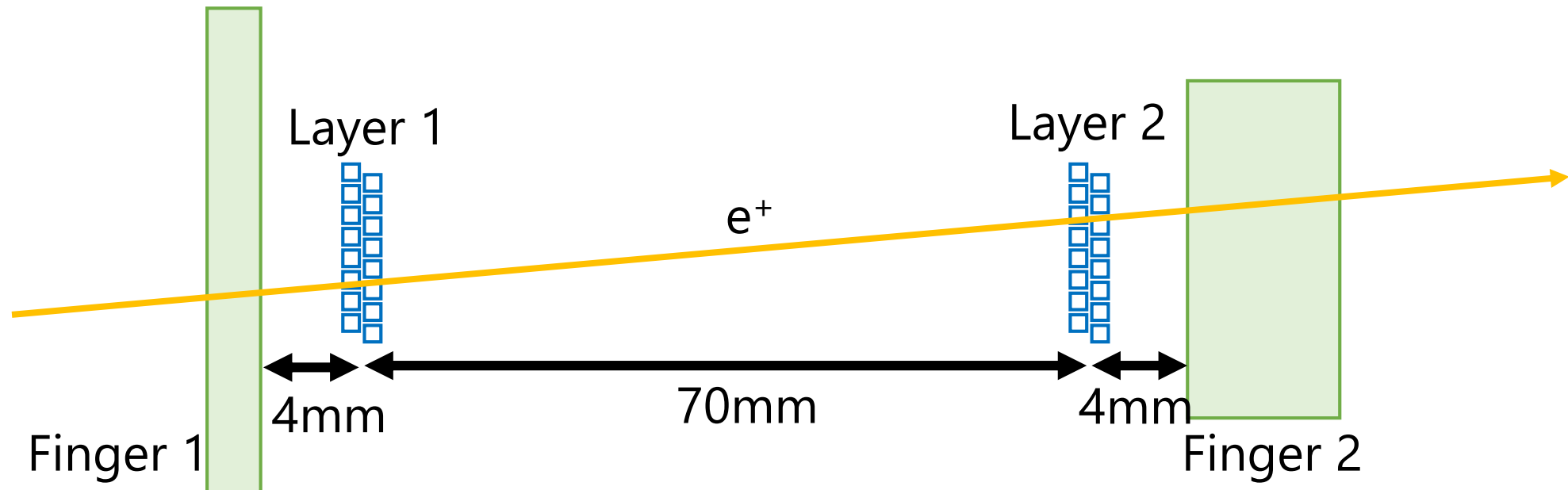


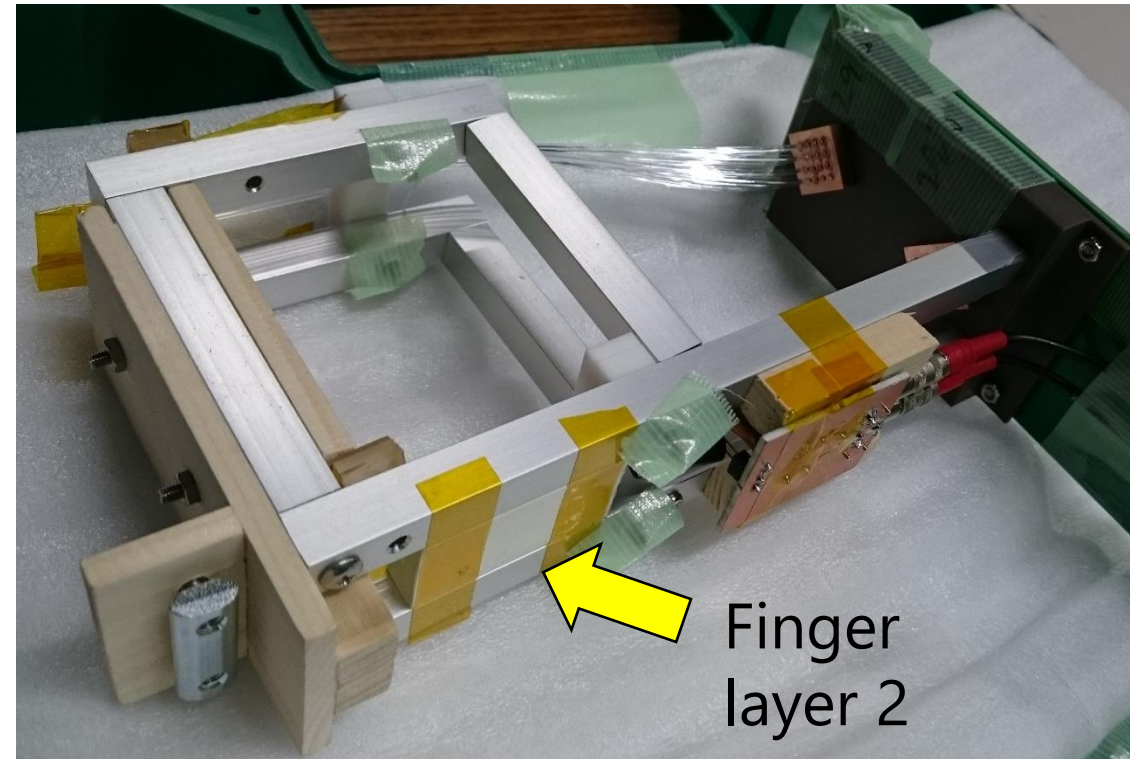
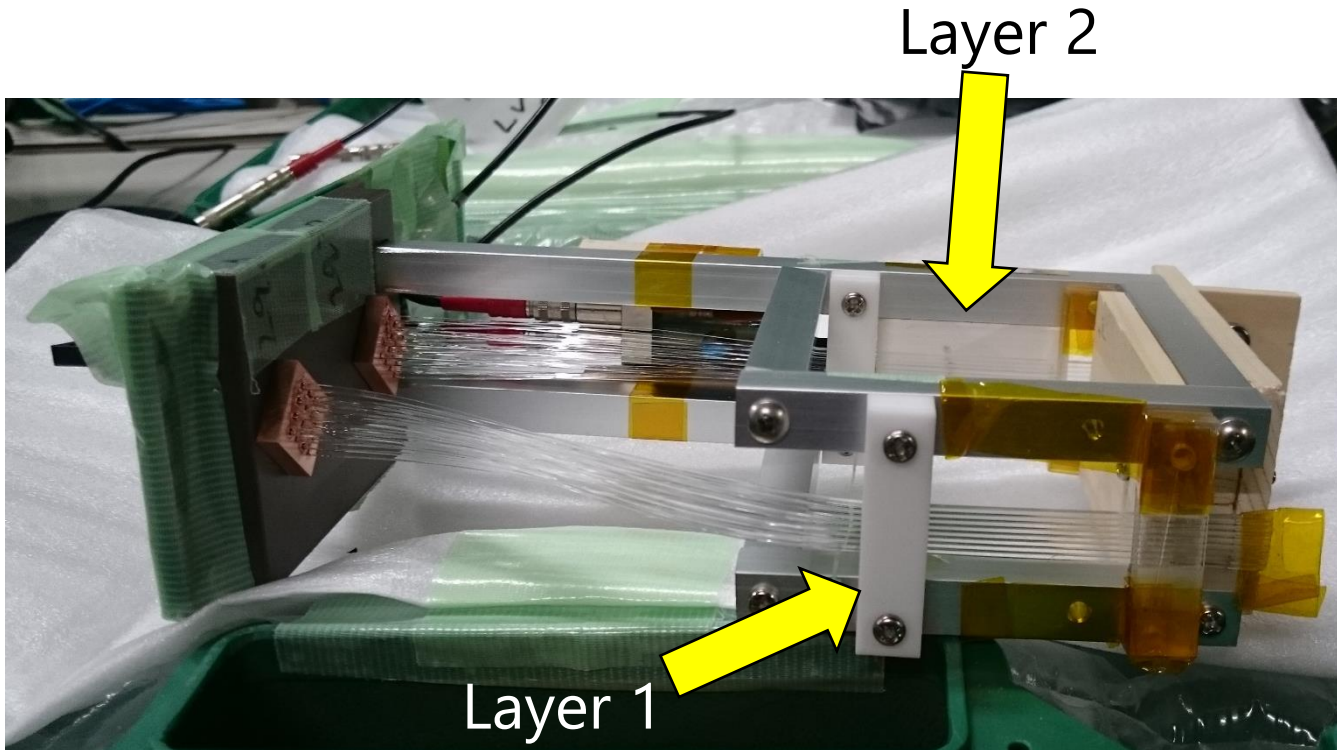
Figure : fingerカウンター

ファイバーの配置

- 8本のファイバーを並べたものを0.5mmずらして2枚重ねる
- これを70mm離して2層設置
- 前方に 40mm (W) x 20mm (H) x 3mm (T)、後方に 20mm (W) x 40mm (H) x 10mm (T) のフィンガーを設置



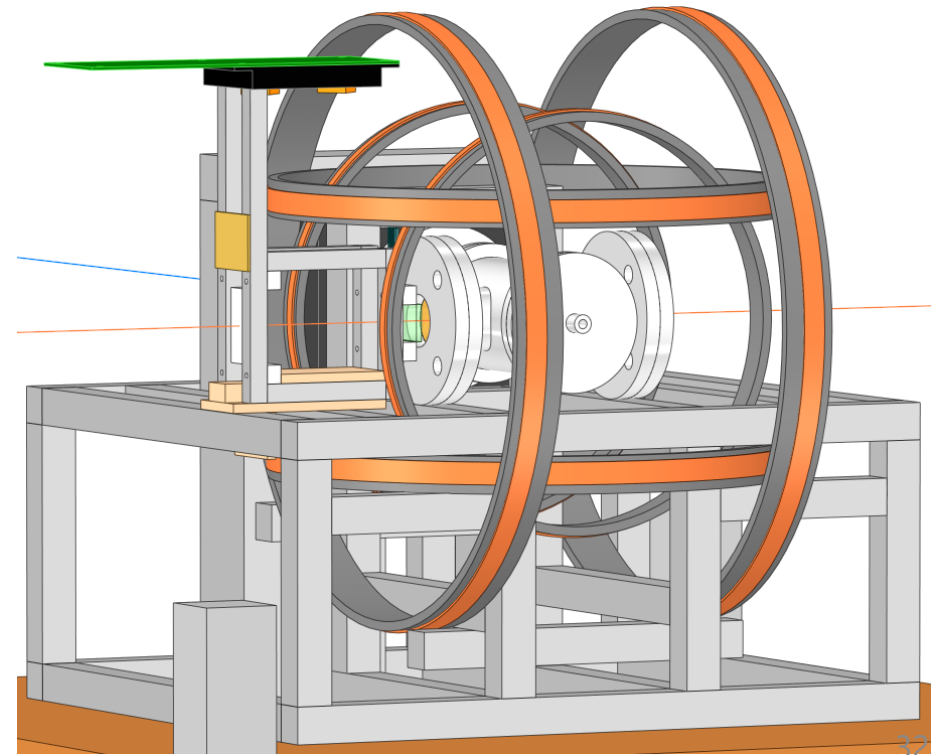
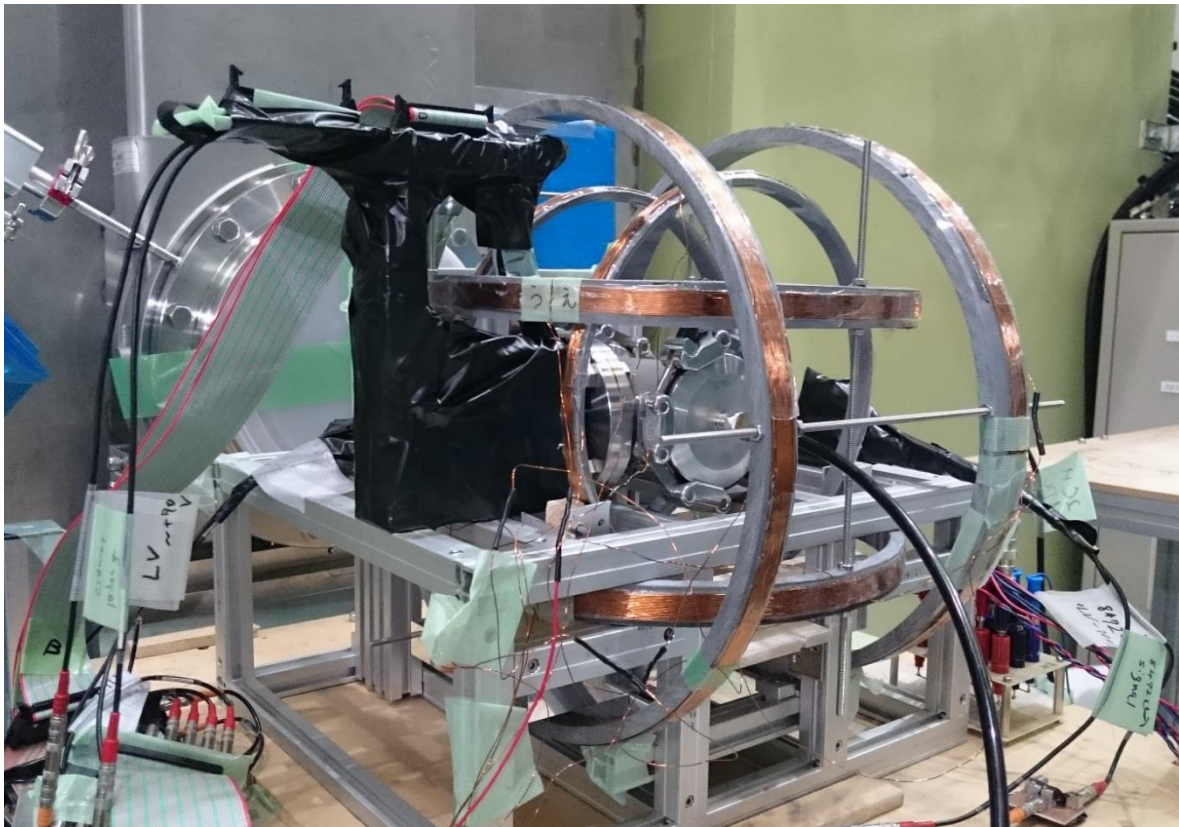
トラッカー全体像



- 全体を遮光シートで巻いたあと、finger layer 1をテープで貼り付けた

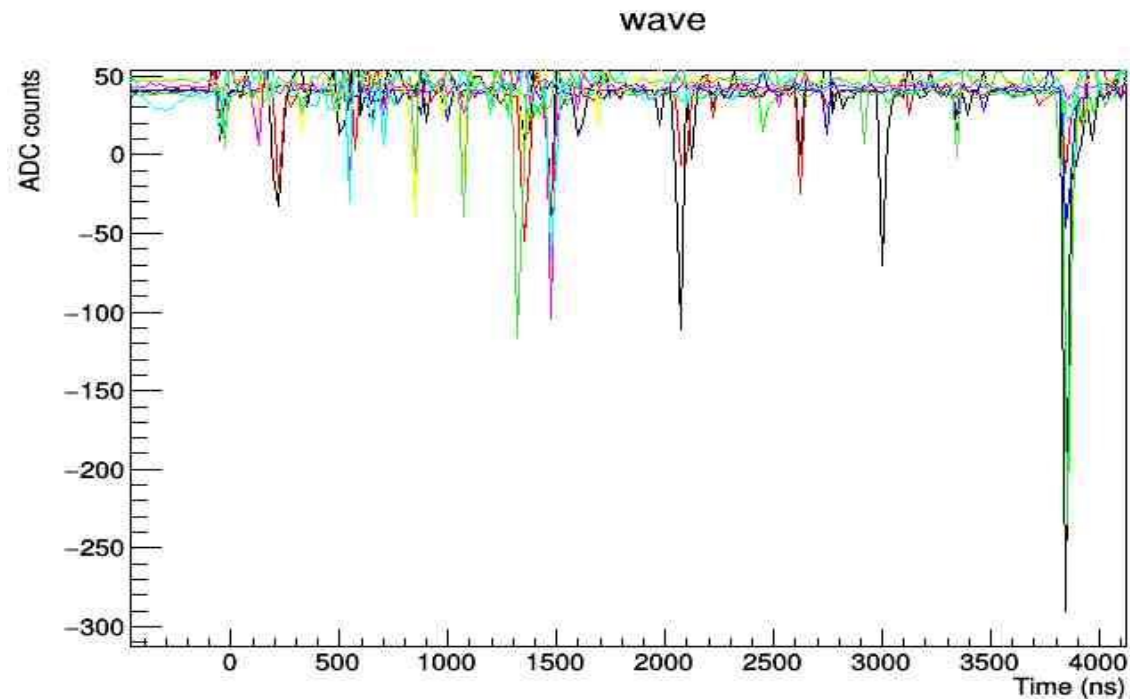
トラックアーの設置

- レコフレームにネジ止め
- 設置の精度は0.5 mm程度



FADC

- FADC(ADC-SiTCP V2)
 - 波形をそのまま記録できる
 - 16channel 12bit 40MS/s であり、これを 3 枚使用
 - 外部トリガにはbeam triggerをかける



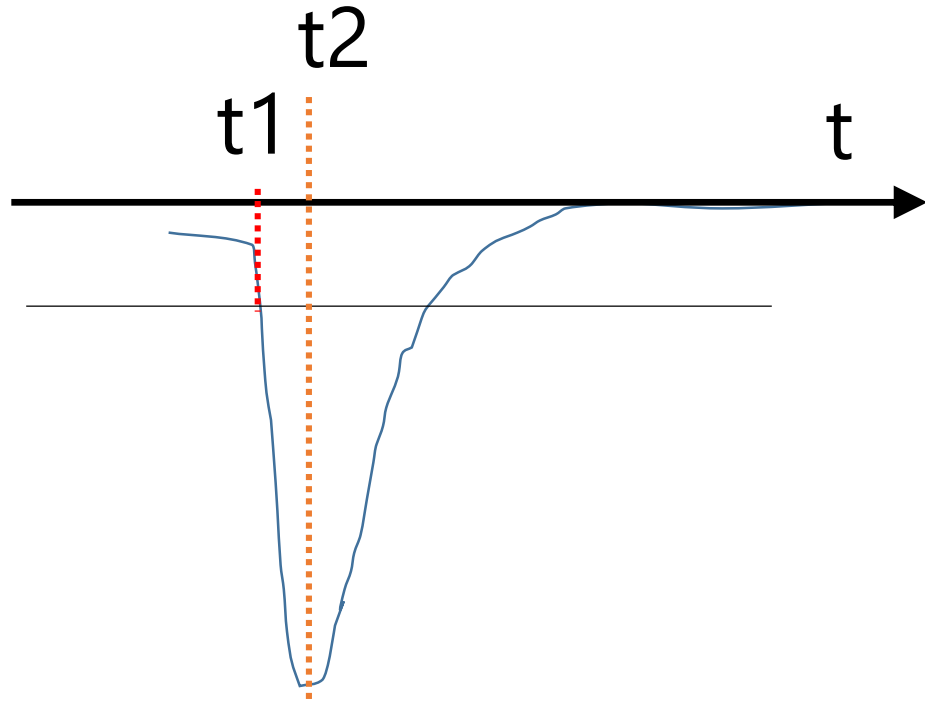
本実験の手順

時刻	内容	イベント数	磁場 [Gauss]
9:50 -	本実験の準備		
21:18 -	μ SRテスト		123.5
26:15 -	μ SR	60000	123.5
27:30 -	mSR	55000	1.20
30:20 -	Tracking	30000	1.20

4. 解析と考察

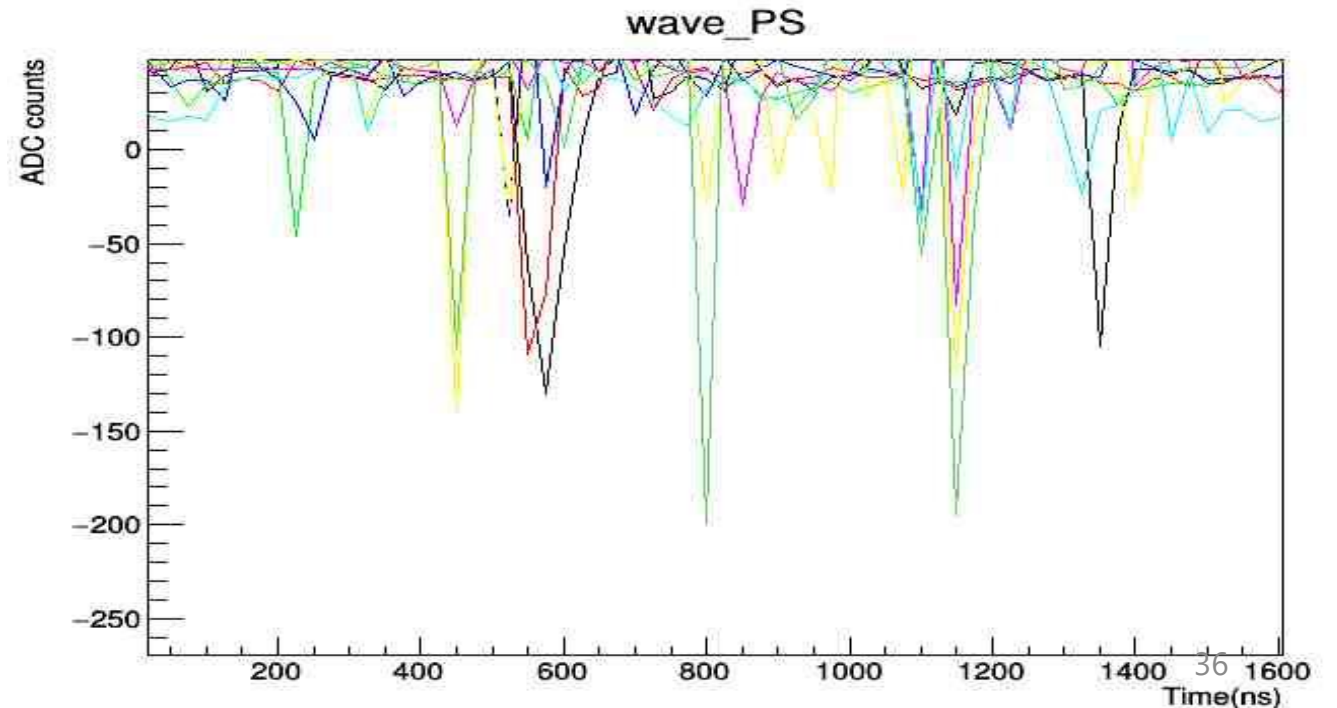
4.1. μ SR / mSR 解析

解析方法



上はイメージ。実際は25ns毎の点となる。
またPSは上図のようなnegative signalであるが、fingerはpositive signalである。

- Threshold を横切った時をt1、signalの peakの時をt2として、tをt1とt2の平均として出しこれを解析に用いる。
- 波形を見るとパイルアップはほとんど見られなかった。



イベントセレクション

- 高energyの e^+ の方がAsymmetryが見やすい
- Simulationの結果を見るとPS前とPS後の両方で検出される時、低エネルギーのものはcutされていることがわかる。
- 次の条件をすべて満たすPS前の時間分布を用いる
 - fingerとのcoincidenceがとれる。
 - PS後のどちらかのchとcoincidenceがとれる。

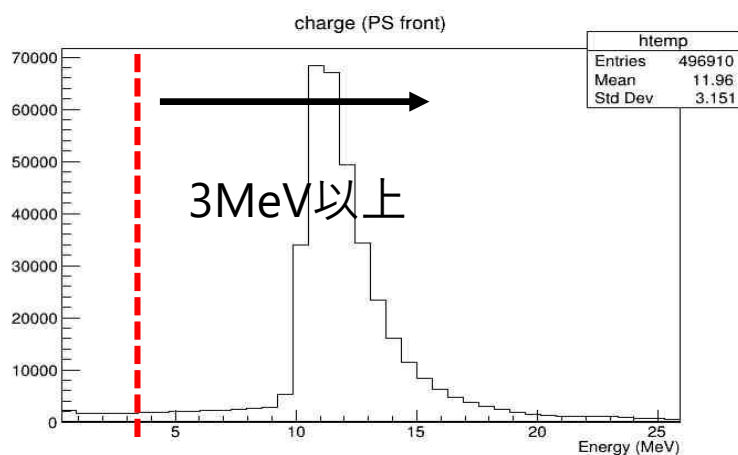


Figure:simulation PS前のcharge

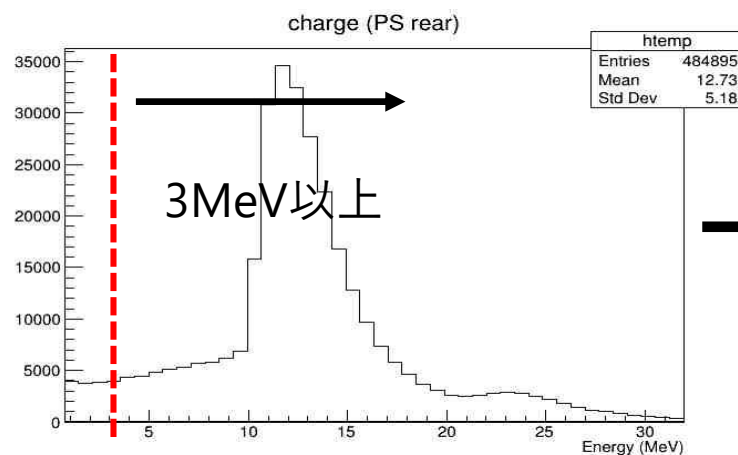


Figure:simulation PS後のcharge

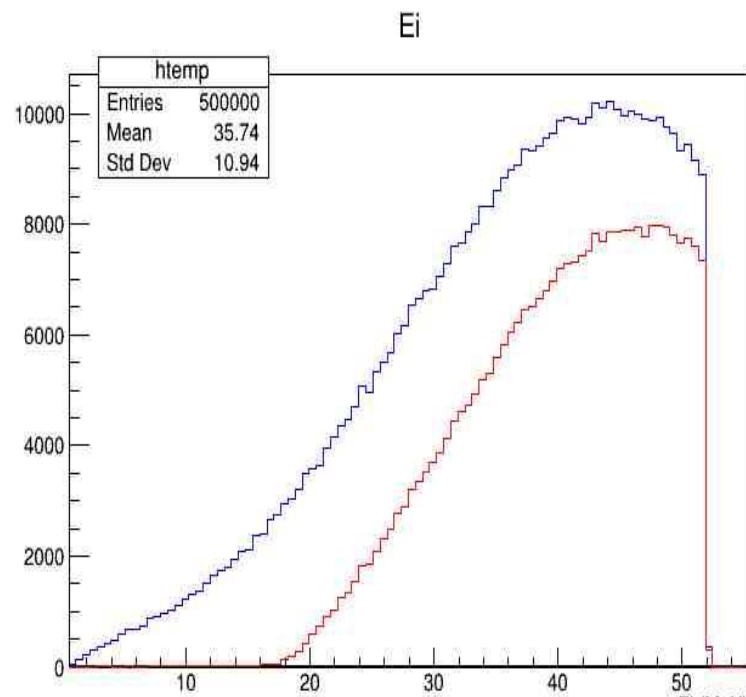
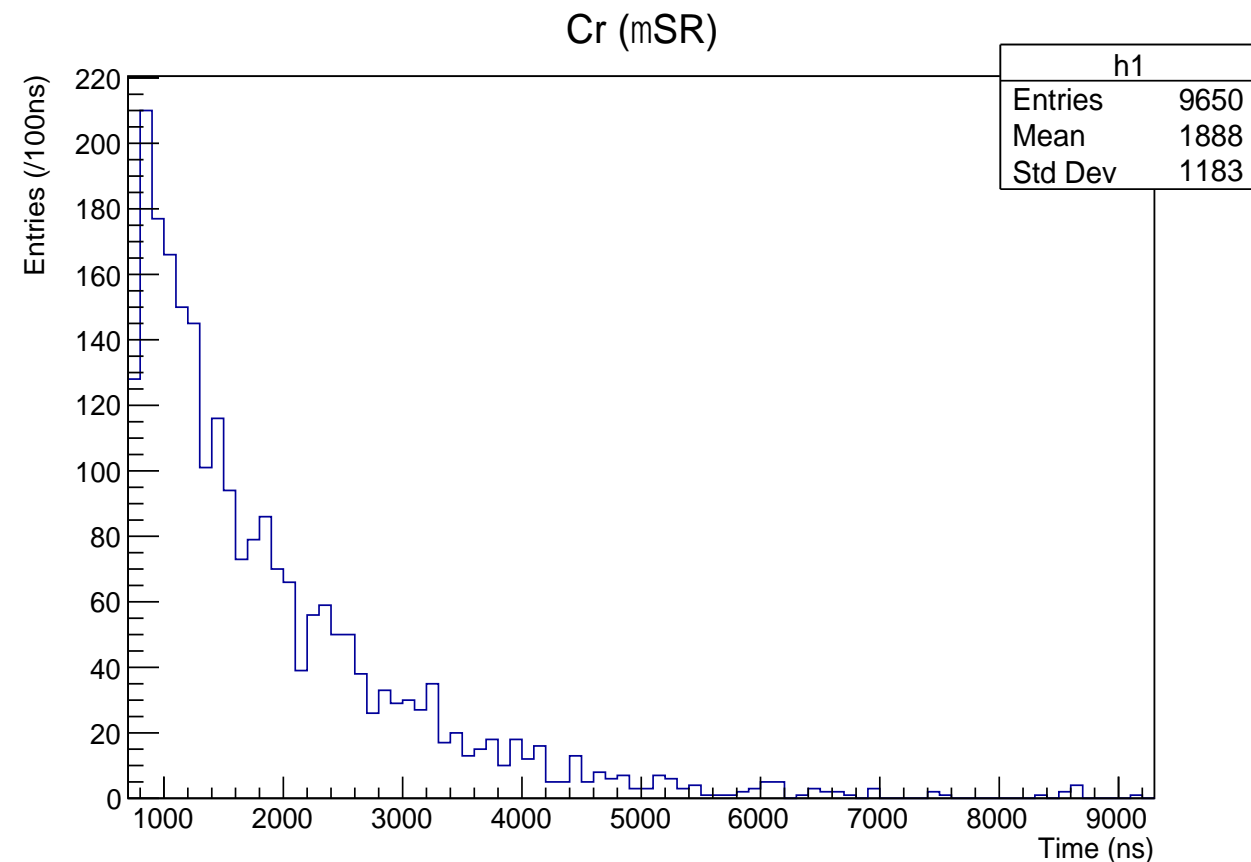
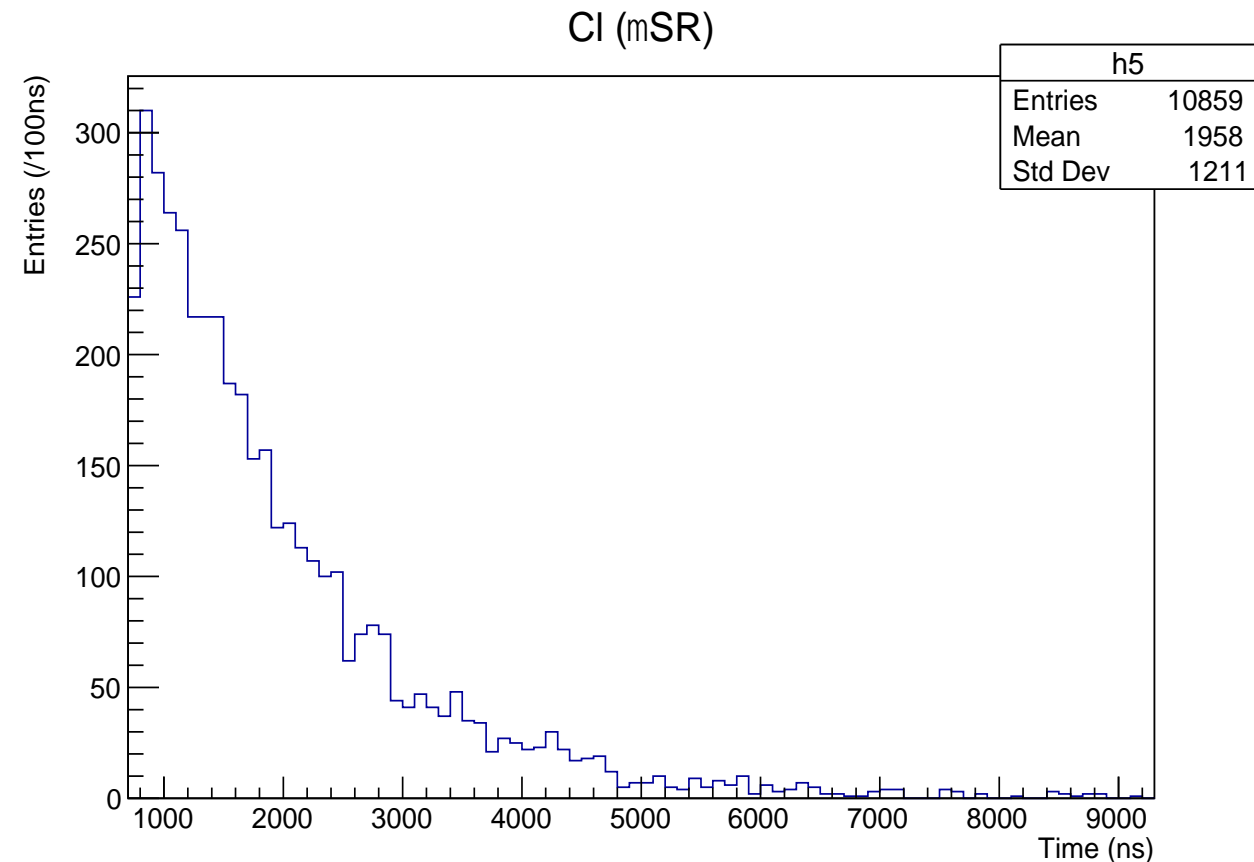


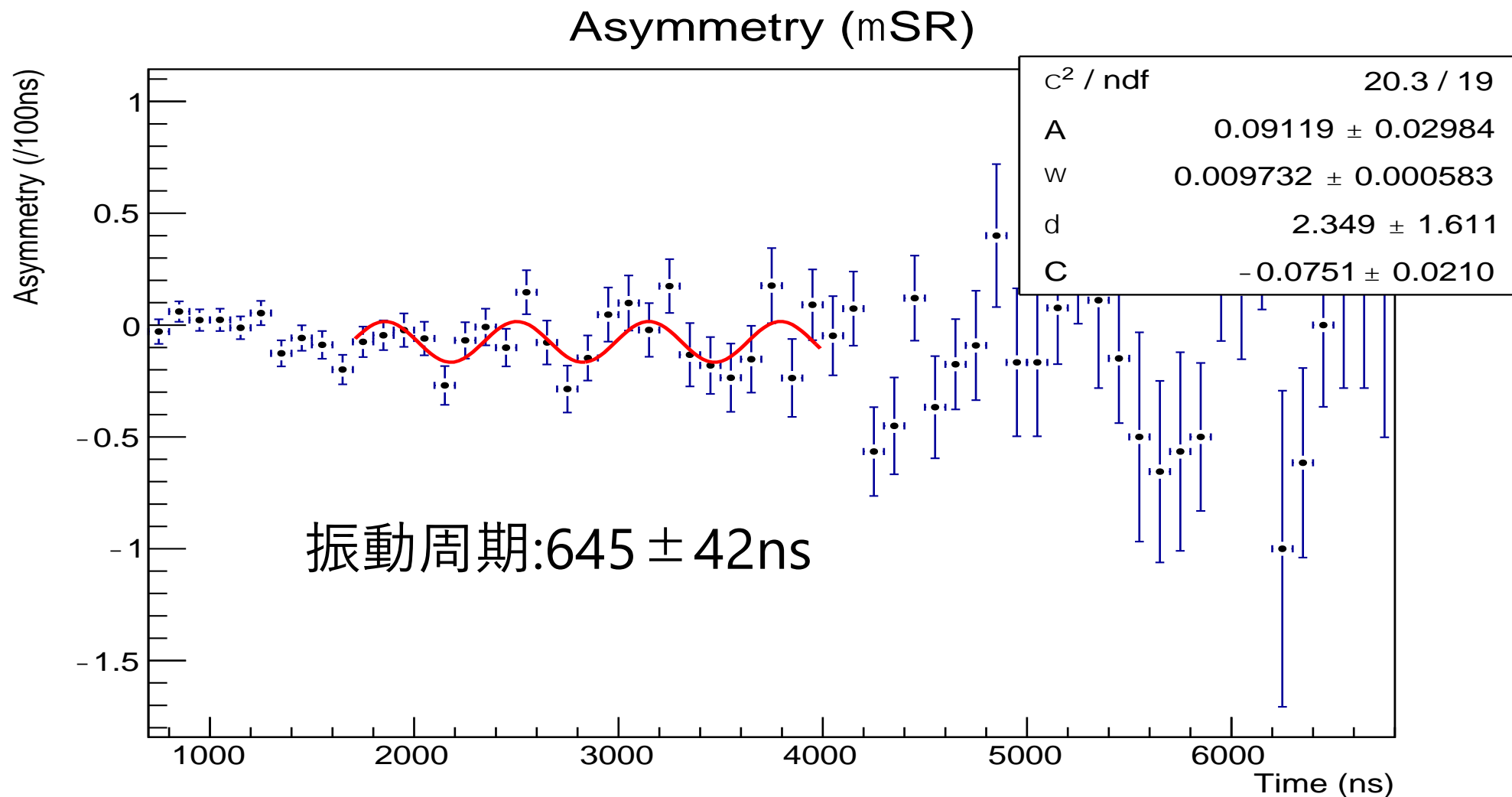
Figure:simulation イベントセレクション後の e^+ の E_i

μ SR

- μ のSpin Rotationを見るため、磁場 123.5 Gauss にした時のデータで解析を行った。
- 時間分布は左右でそれぞれ次のようになった。

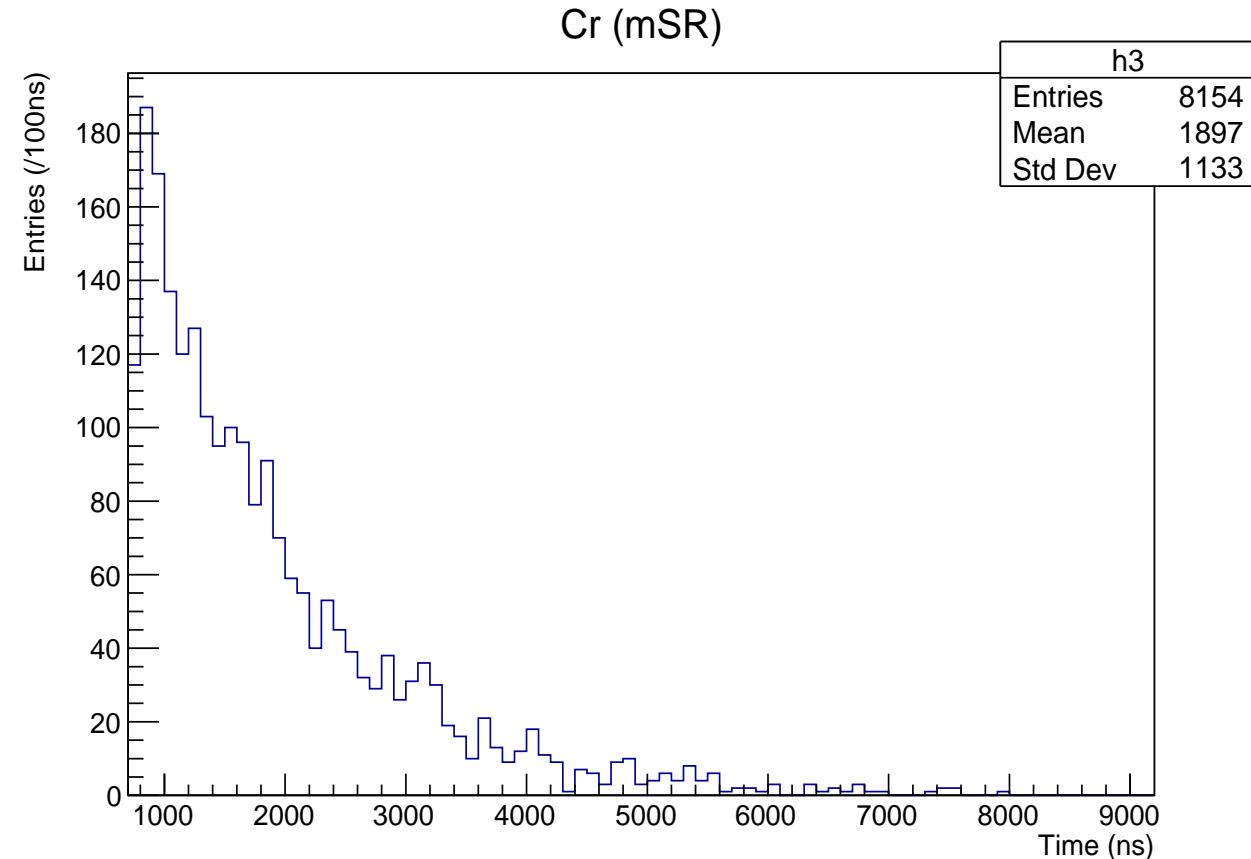
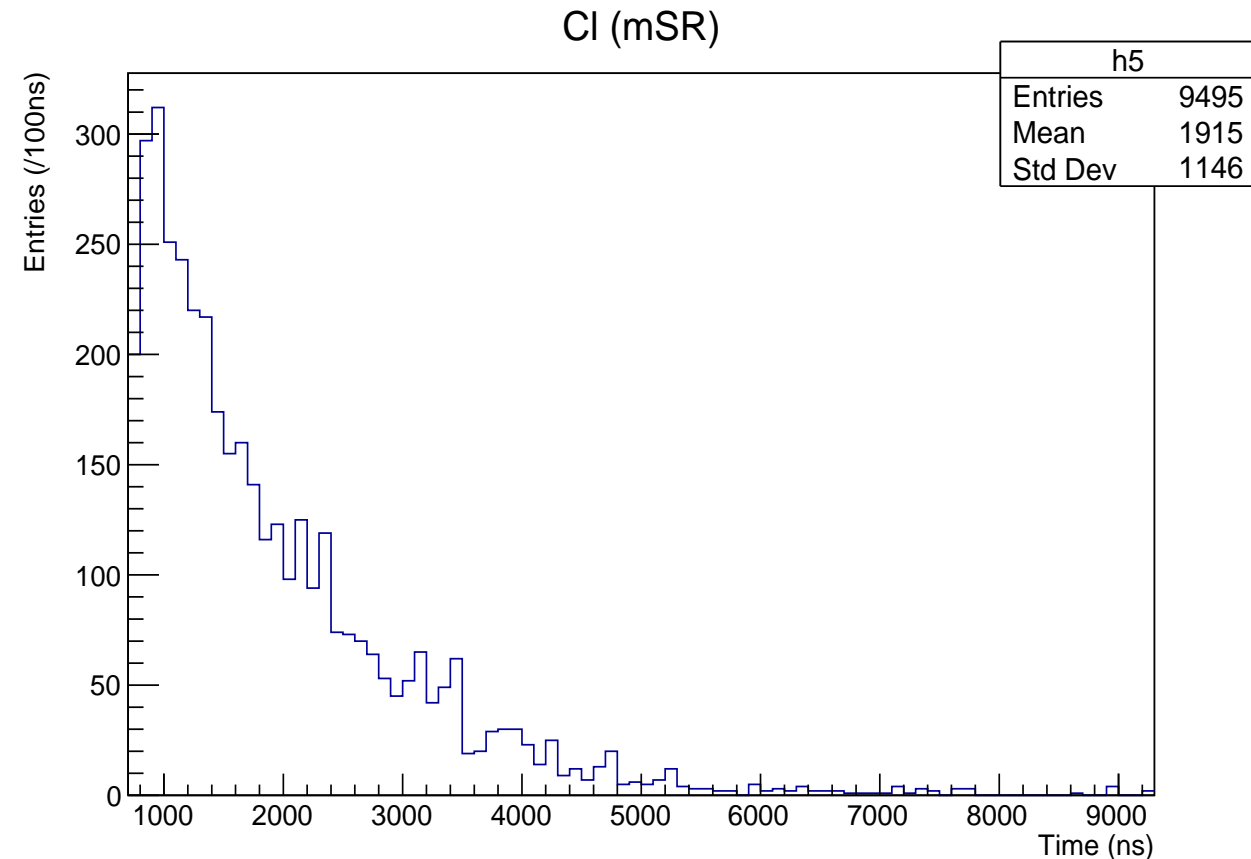


- 先の時間分布から出したAsymmetryが以下の図で、下の関数でfitした
fit関数: $f(t) = A \sin(\omega t + \delta) + C$

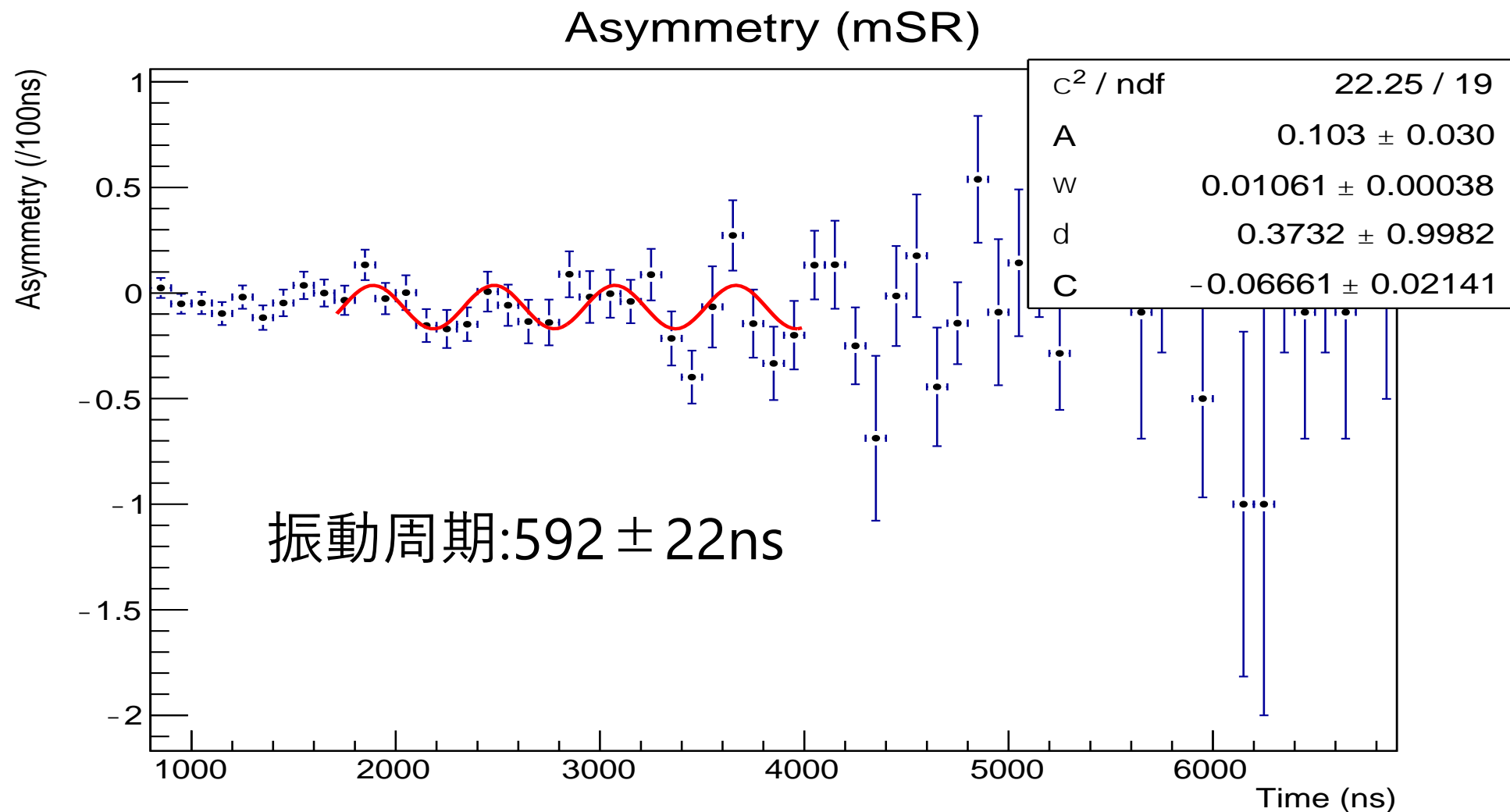


mSR

- muoniumのSpin Rotationを見るため、磁場 1.20 Gauss にした時のデータで解析を行った。
- 時間分布は左右でそれぞれ次のようになった。



- 先の時間分布から出したAsymmetryが以下の図で、下の関数でfitした
fit関数: $f(t) = A \sin(\omega t + \delta) + C$



muoniumの生成率

- μ SRのAsymmetryのfit結果から、 $A_{\mu} = 0.091 \pm 0.030$
- mSRのAsymmetryのfit結果から、 $A_{Mu} = 0.103 \pm 0.030$
- これらから求まるmuoniumの生成率は

$$69.3 \pm 9.4 \%$$

(誤差はfit結果の誤差から誤差伝搬の式を用いて導出した。)

考察 – μ SR/mSR

- 結果の考察

振動周期に関しては、設定磁場とconsistentな値となった。

先行研究で求めたMuoniumの生成率は $59.7 \pm 0.6\%$ である。

この値と誤差の範囲でconsistentな値にはなったが、そもそも誤差が大きい。

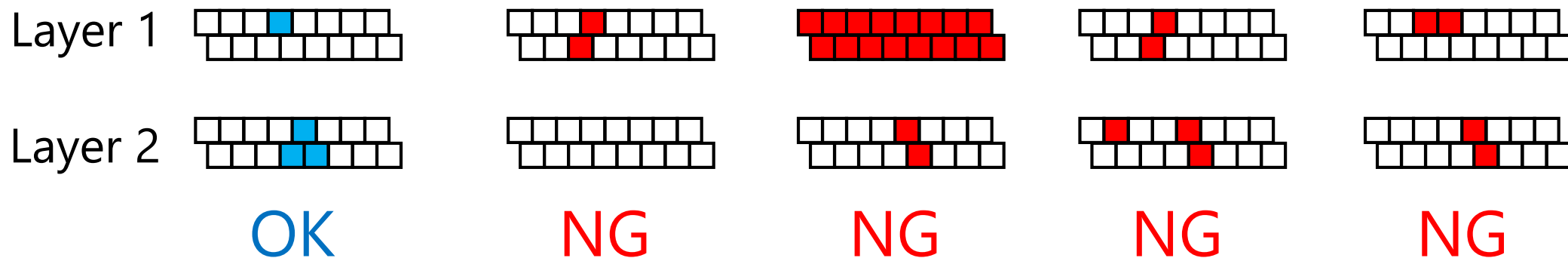
- 誤差が大きい

→coincidenceをとった後の時間分布の統計量が少なかったことに由来する。これはtarget内で止まった μ が少なかったことを意味する。Degrader、collimator、beamの調整が甘くtargetで止めることができなかつたため。

4.2. トラッキング解析

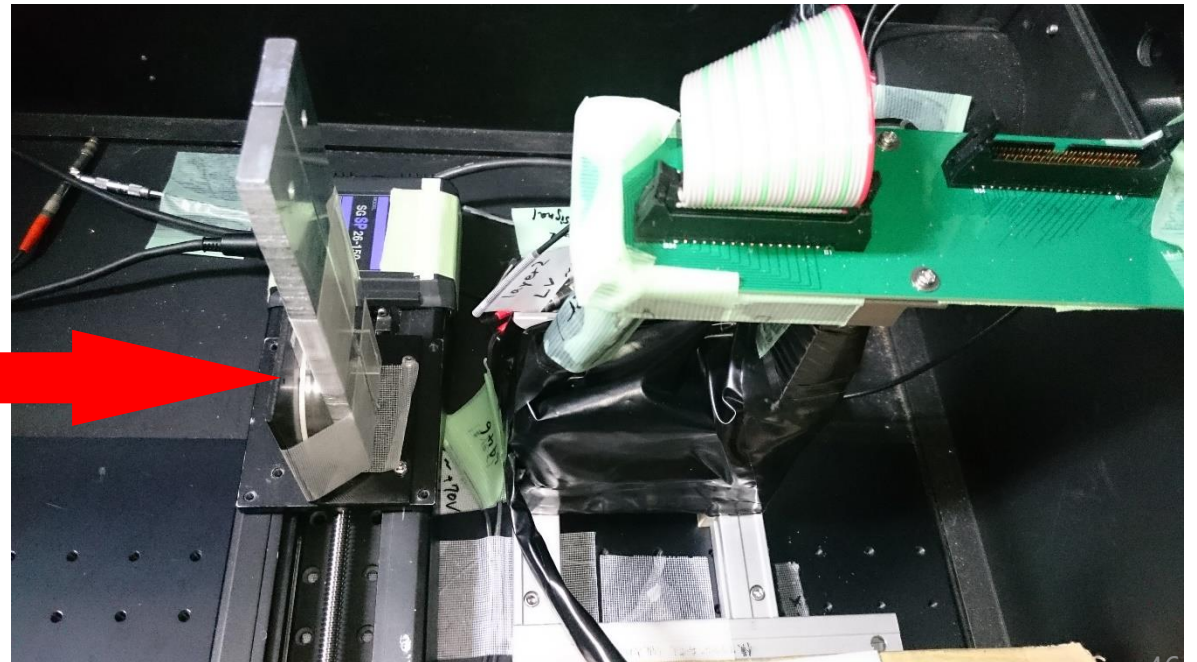
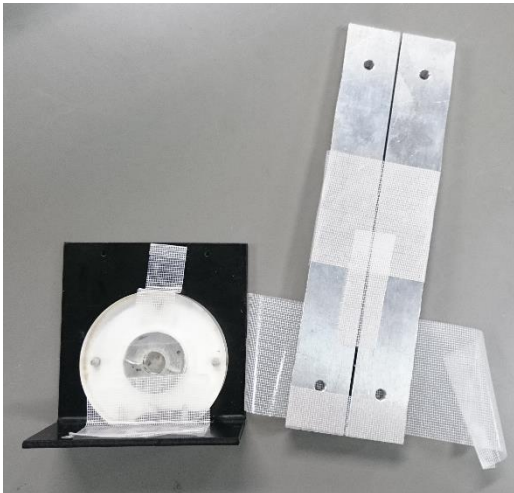
Event Selection

- 以下の条件をすべて満たすときのみ位置の再構成を行う
 - Figer1, 2がどちらも鳴っている
 - Layer 1で鳴っているファイバーの数が1~3個
 - Layer 2で鳴っているファイバーの数が1~3個
 - Layer 1中で鳴っているファイバーの配置が連続している
 - Layer 2中で鳴っているファイバーの配置が連続している



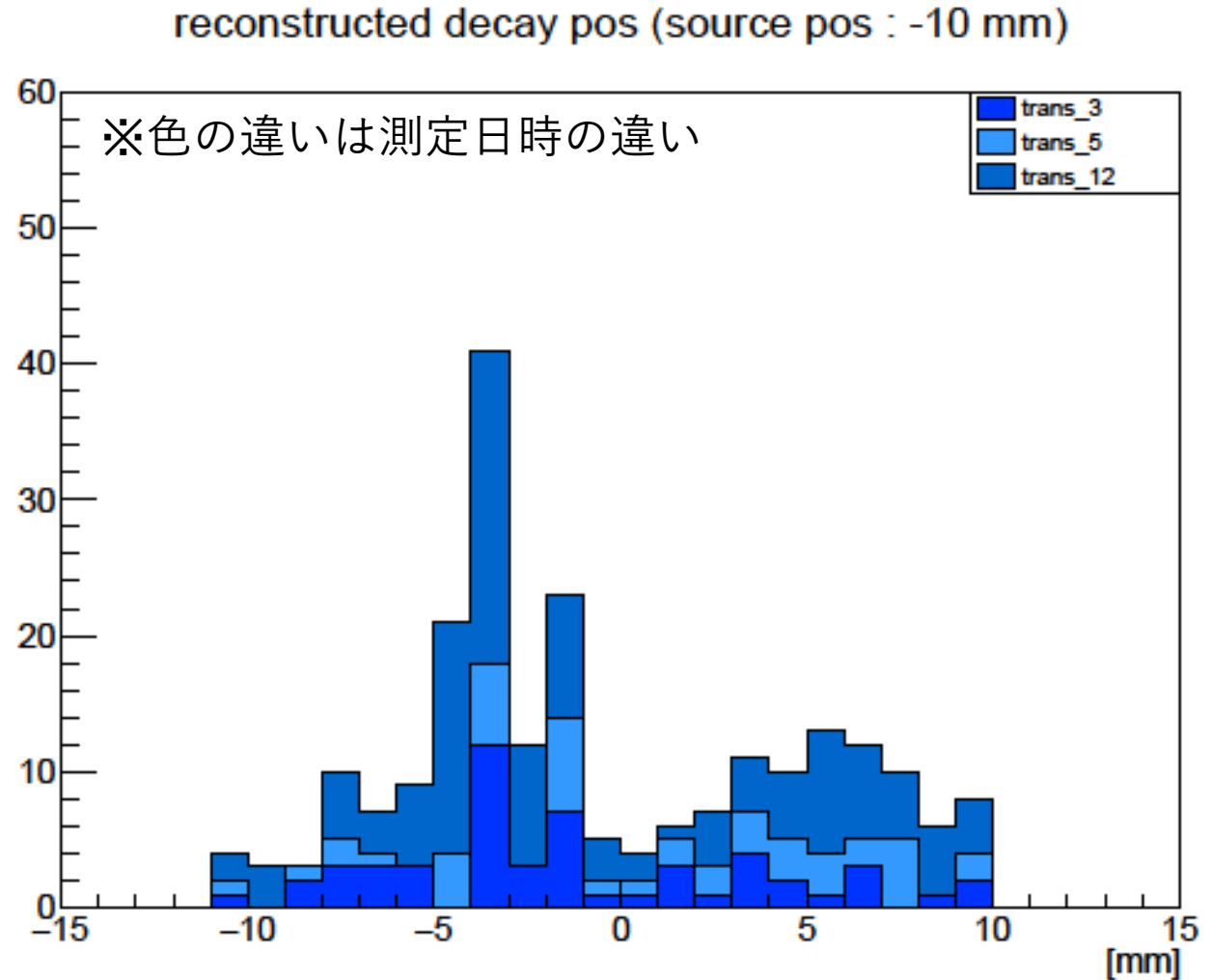
可動ステージによる予備実験 セットアップ

- 暗箱内にファイバートラッカー、Sr90線源を設置
- 線源にAl板で作製した幅1mmのスリットを貼り付けた



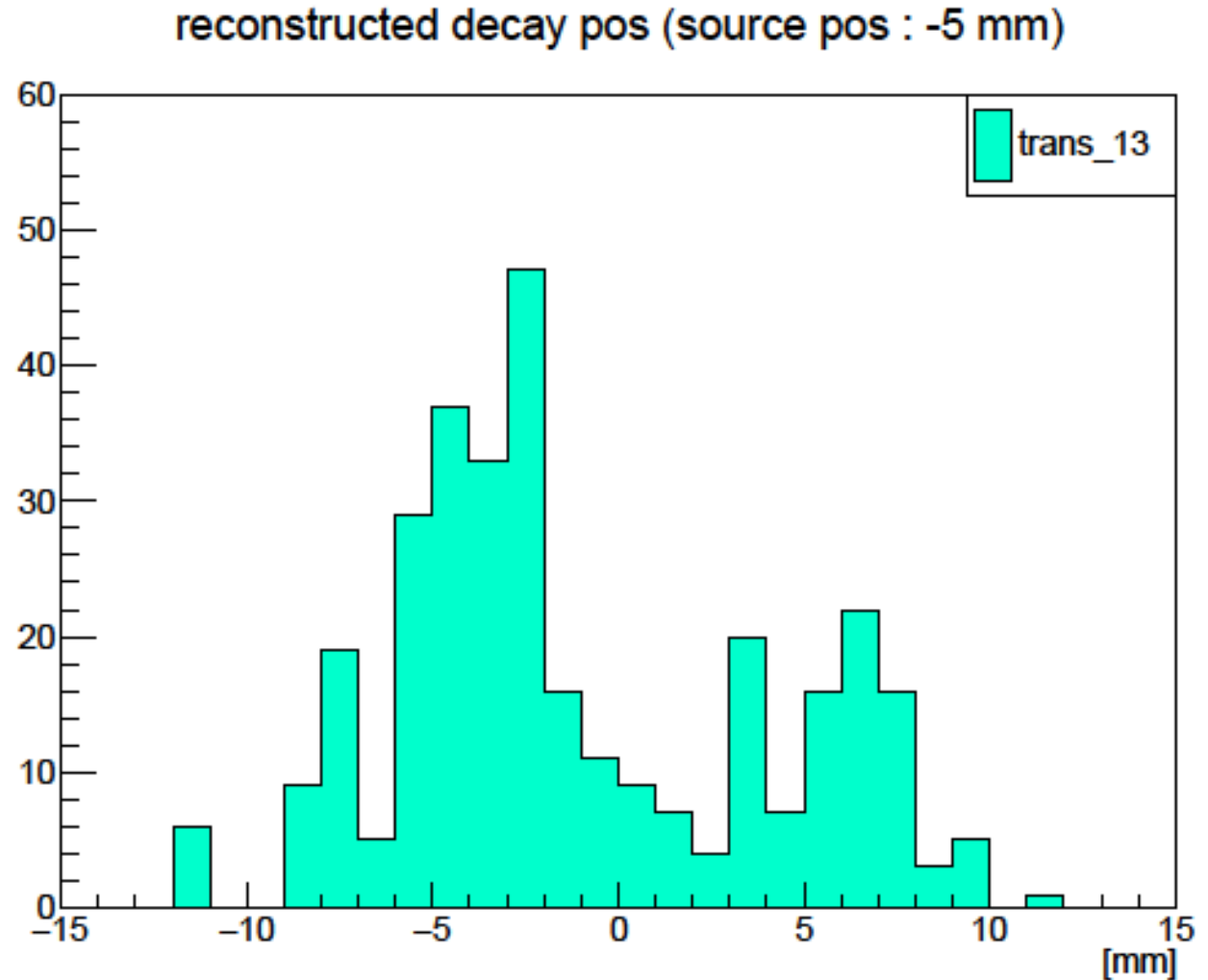
可動ステージによる予備実験 結果

- 線源位置 : -10 mm



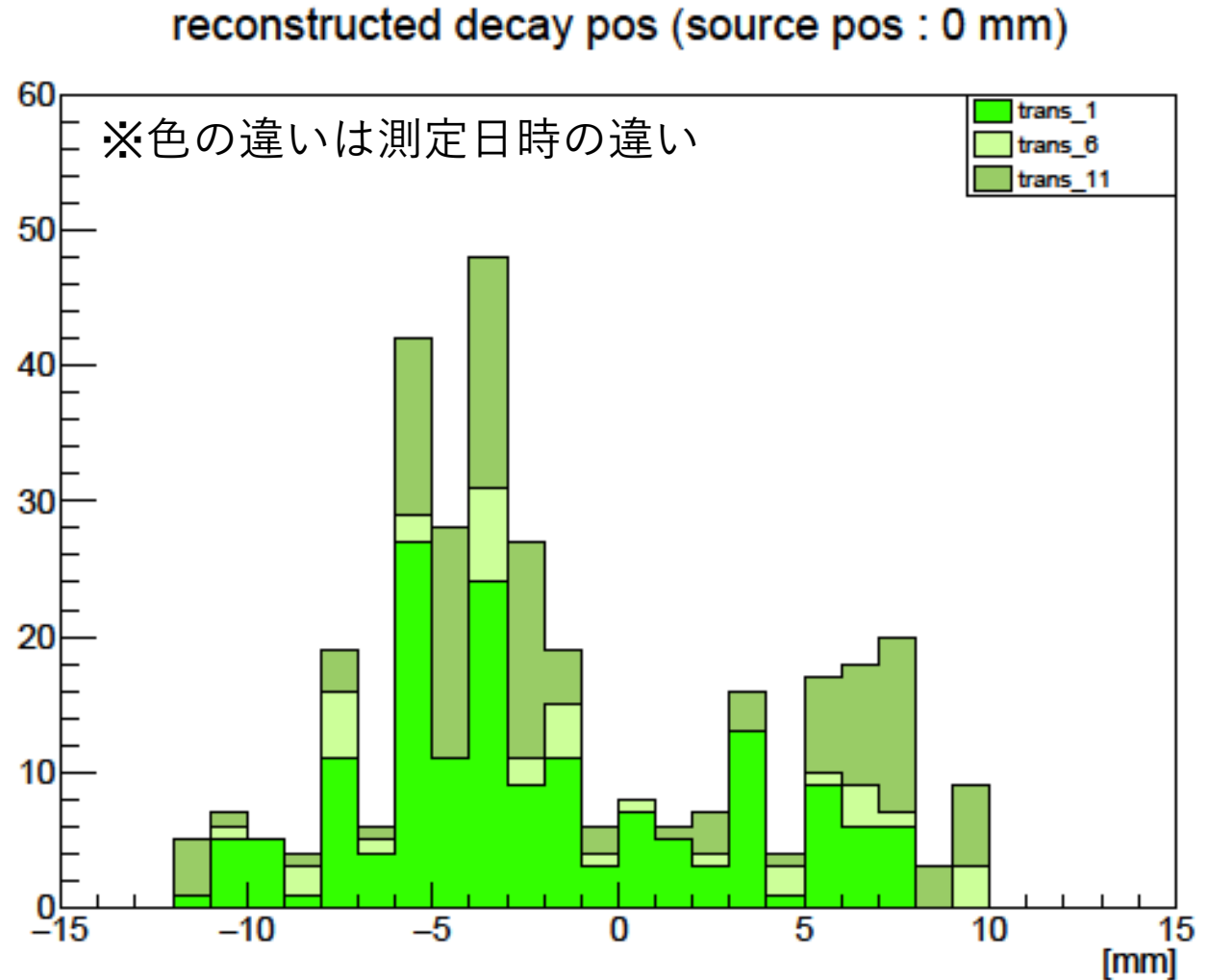
可動ステージによる予備実験 結果

- 線源位置 : -5 mm



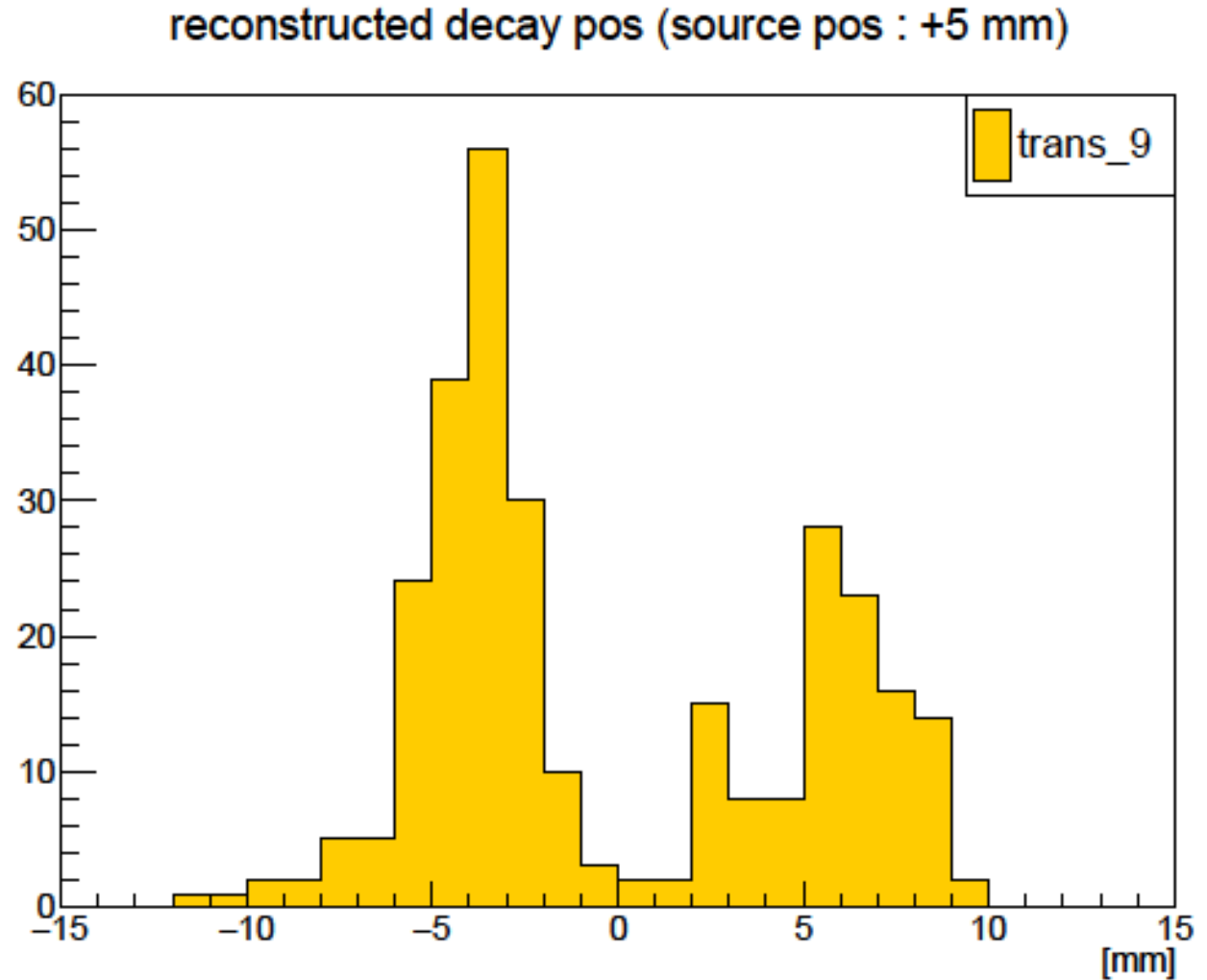
可動ステージによる予備実験 結果

- 線源位置 : 0 mm



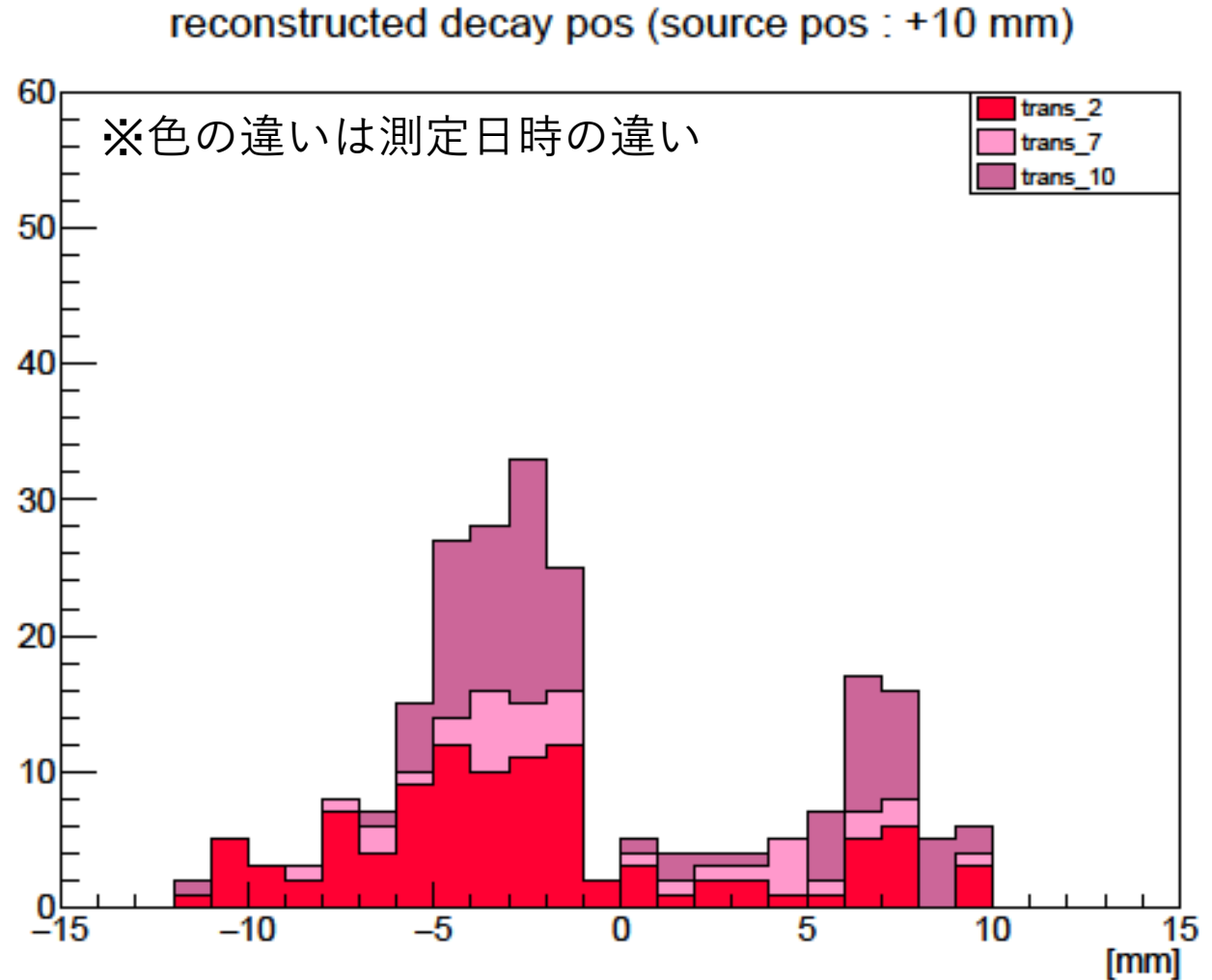
可動ステージによる予備実験 結果

- 線源位置 : +5 mm

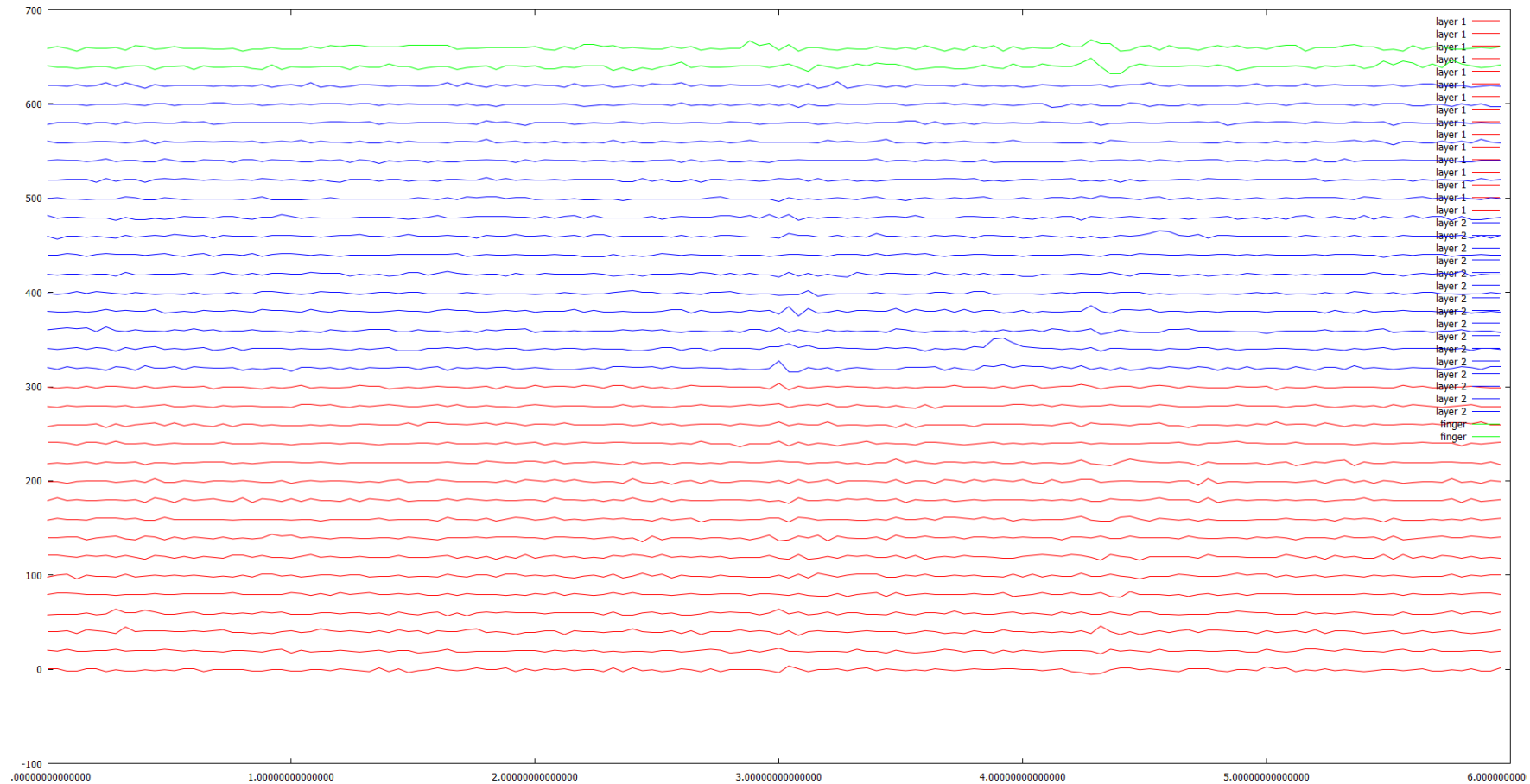


可動ステージによる予備実験 結果

- 線源位置 : +10 mm

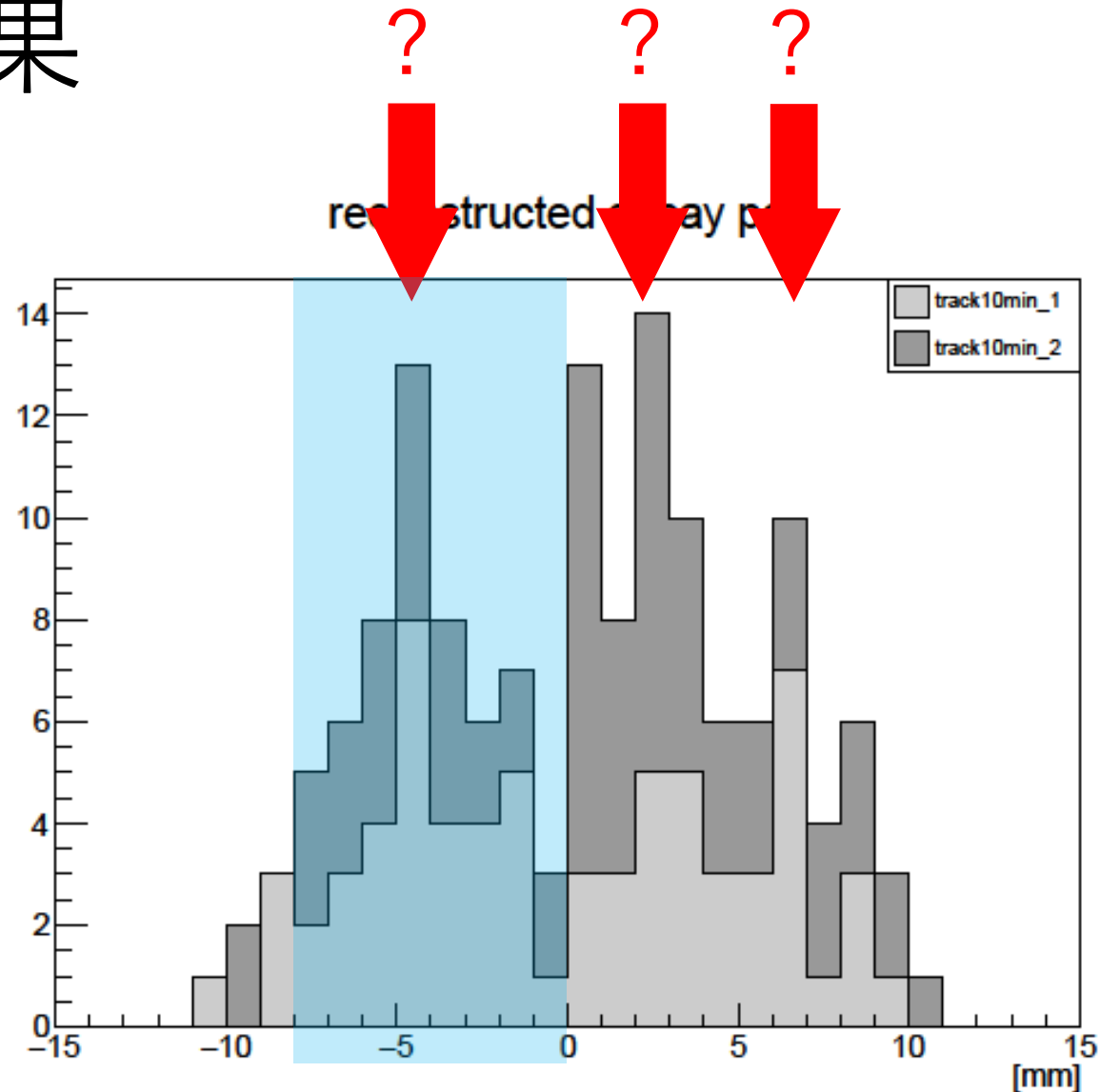


予備実験 波形の例



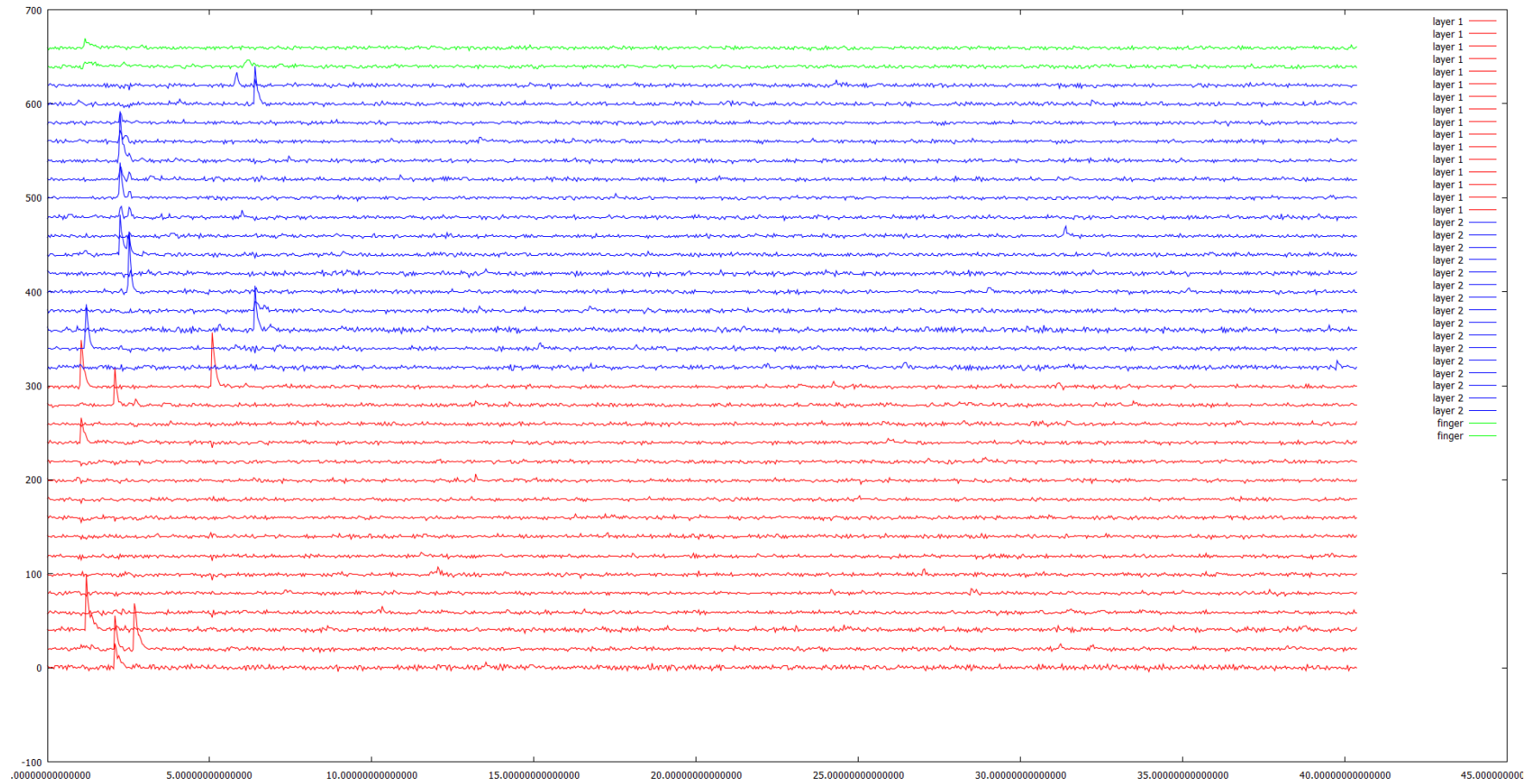
崩壊位置の再構成結果

- ピークのようなものが見える
 - 本当に e^+ がよく飛んできている？
 - 特定のファイバーの efficiency が高い？
- この結果だけでは判別できない



エアロゲル領域

本実験 波形の例



反省と改善案

- ファイバーごとに efficiency がばらついていた
 - ばらつきを抑える
 - ファイバーを両側読み出しにする
 - ばらつきを考慮した解析を行う
 - 宇宙線で較正
- 多重散乱の影響が評価できていない

5. 結論

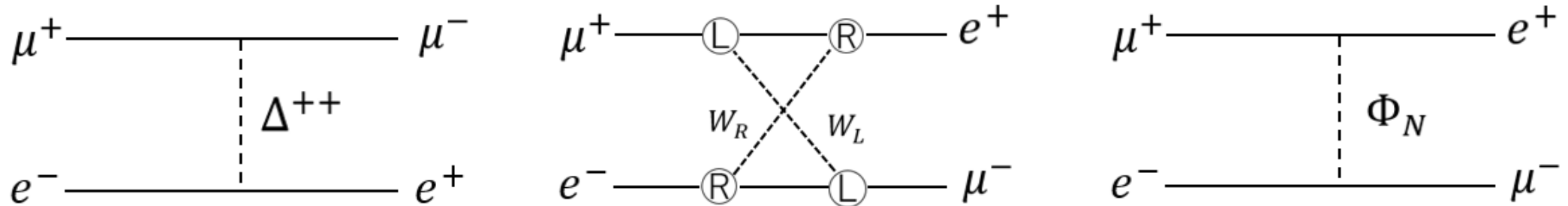
結論

- 要求される精度で磁場をコントロールすることができた
 - 絶対値 0.01 Gauss 精度、7% の一様性
- ミュオン・ミュオニウム振動が見え、ミュオニウム生成率を求めることができた。しかし、その誤差が大きくターゲットで静止する μ^+ が予想より大幅に少なかったためと考えられる
- トラッキングによる μ^+ の崩壊位置の再構成結果はefficiencyのばらつきに埋もれた
 - ファイバーを両側読み出しにする、宇宙線較正をするなど改善の余地あり

予備スライド

(補足) $Mu \rightarrow \overline{Mu}$ 転換

- いくつかの beyond the standard model
 - Doubly charged Higgs boson Δ^{++}
 - Heavy Majorana neutrions
 - Neutral scalar Φ_N

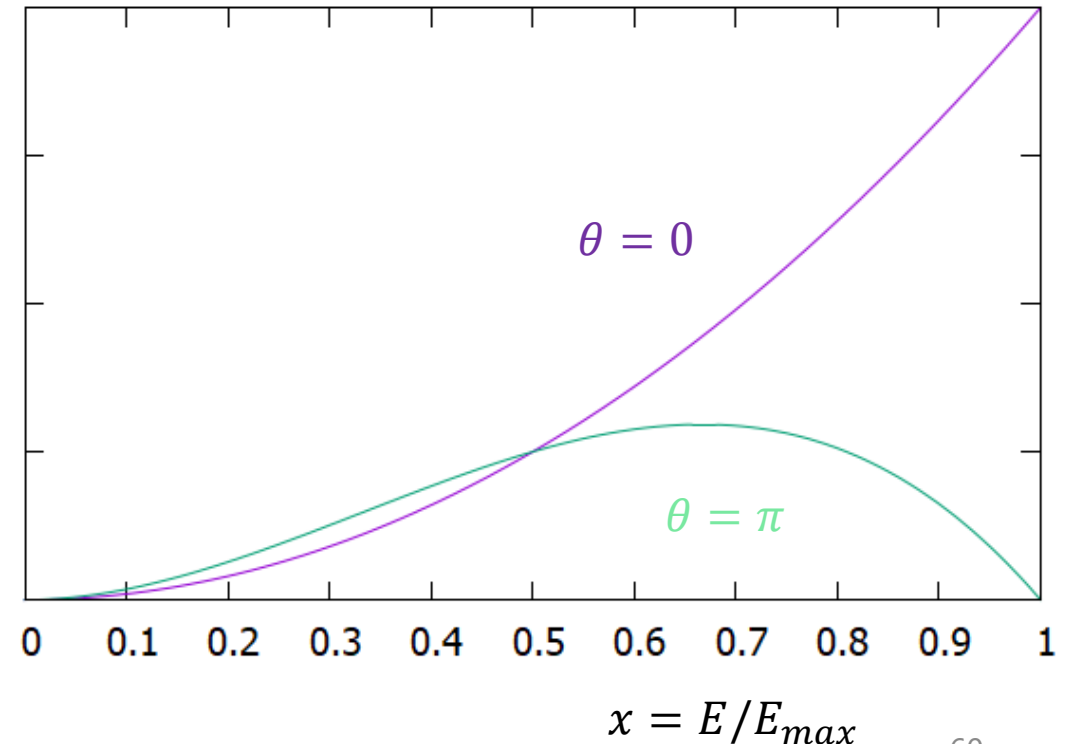


(補足) ミュオンの崩壊

$$\frac{d^2\Gamma}{x^2 dx d(\cos\theta)} \sim (3 - 2x) - \cos\theta(1 - 2x)$$

$\theta = 0$ と $\theta = \pi$ での図

$x > 0.5$ ($E > 0.5E_{max} \approx 25$ MeV)
でP対称性の破れが表れやすい



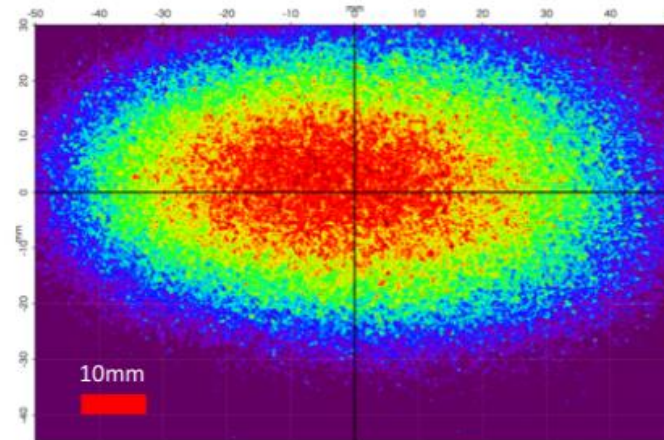
(補足) 表面ミュオン

- 炭素原子核に陽子を衝突させ、パイオンを生成
- 表面付近に静止した π^+ の崩壊 ($\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$)から、100%スピ
ン偏極の μ^+ を得る

ビーム性能

エネルギー	4.1MeV
エネルギー分布	~15%
パルス幅	~100ns
ビーム強度	$3 \times 10^7 / s$
バンチ数	2

● D2-Ndecay-30MeV-680mm(Chamber Center)



$$f(x) = Z_0 + A \cdot e^{\left[\frac{-1}{2(1-\text{cor}^2)} \left(\left(\frac{x-x_0}{\sigma_x} \right)^2 + \left(\frac{y-y_0}{\sigma_y} \right)^2 - \frac{2 \cdot \text{cor} \cdot (x-x_0)(y-y_0)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \right) \right]}$$

$$\sigma_x = 33.3037 \pm 0.6658$$

$$\sigma_y = 19.6668 \pm 0.2517$$

(補足) ミュオニウムとは？

- ミュオンが電子を一つ束縛した状態
- これらの系の全ハミルトニアンは、ゼロ磁場で超微細相互作用エネルギーを ω_0 として

$$H = -\omega_0 S_Z^\mu S_Z^e .$$

- その固有関数は
 - $|1,1\rangle = |++\rangle$
 - $|1,0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+-\rangle + \beta|-+\rangle)$
 - $|1,-1\rangle = |--\rangle$
 - $|0,0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+-\rangle - |-+\rangle)$
- で与えられる

(補足) mSR (muonium Spin Rotation)

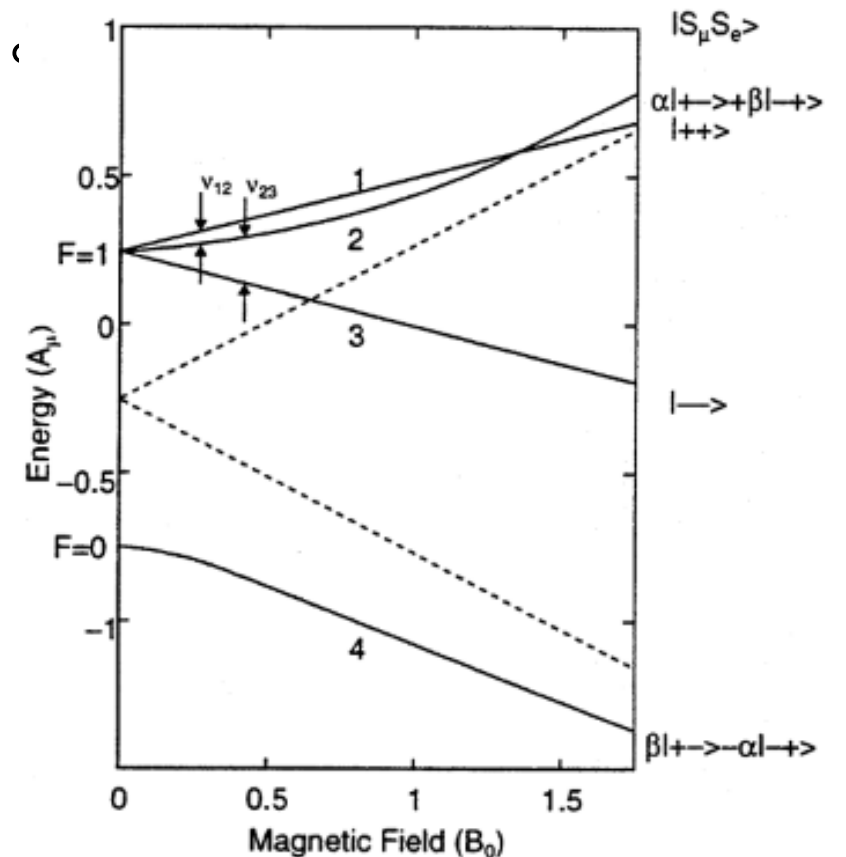
- $|1,0\rangle$ と $|0,0\rangle$ は超微細相互作用により、 $\omega_0 (\simeq 2\pi \times 4\text{GHz})$ で振動, 偏極が失われる、
- 低磁場の時、 $|1,1\rangle$ と $|1,-1\rangle$ がそれぞれ、

$$\omega_{\pm} = \frac{\gamma_e \pm \gamma_{\mu}}{2} B \simeq \frac{\gamma_e}{2} B$$

の角振動数で周期運動する。

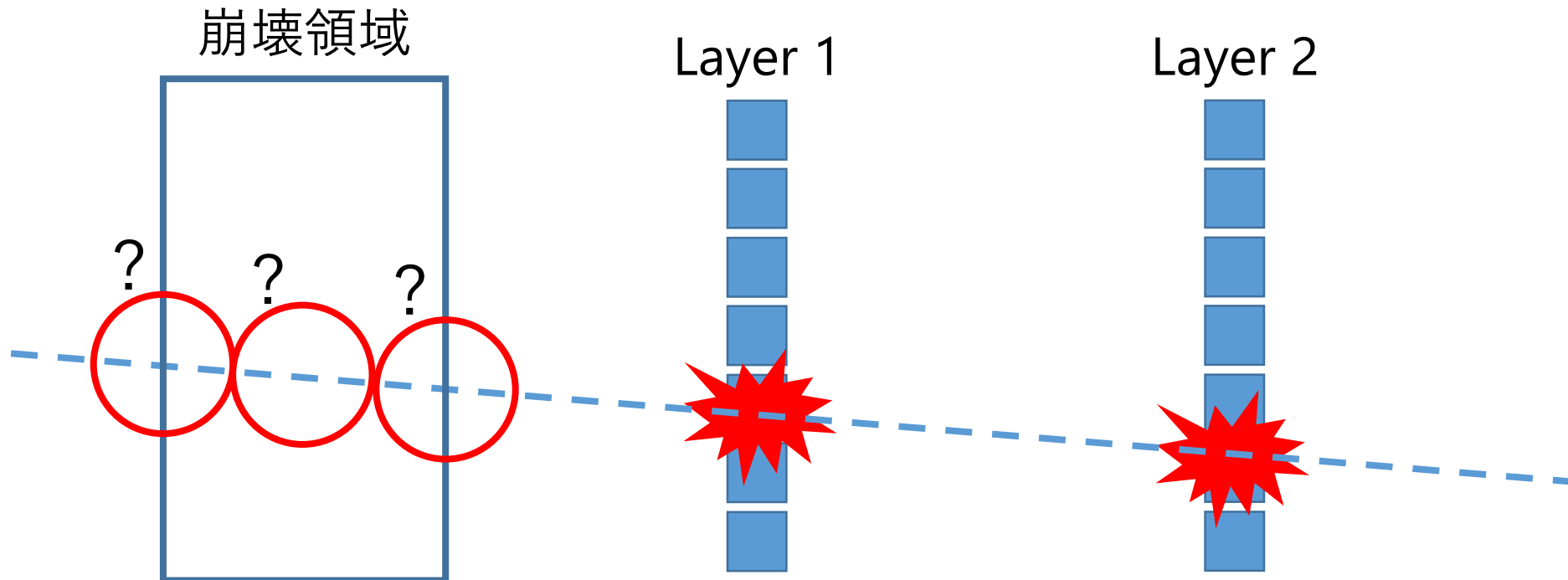
- これは実効的な磁器回転比が $\frac{\gamma_e}{2} (\simeq 103\gamma_{\mu})$ になったことに相当

Fig : Muのエネルギー(注)



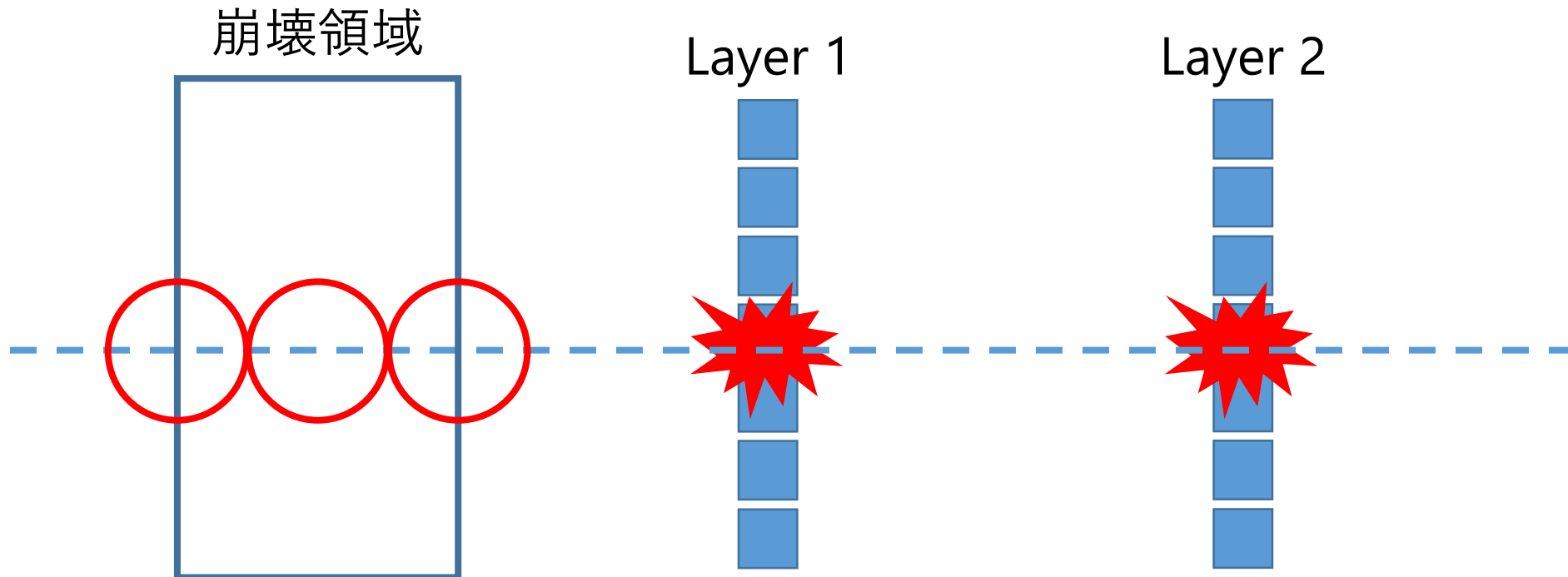
(補足) 入射角度によるズレ

- 崩壊位置は必ずしも一平面上にない
- Fiber array への入射角度が大きいと、再構成位置にズレが生じる

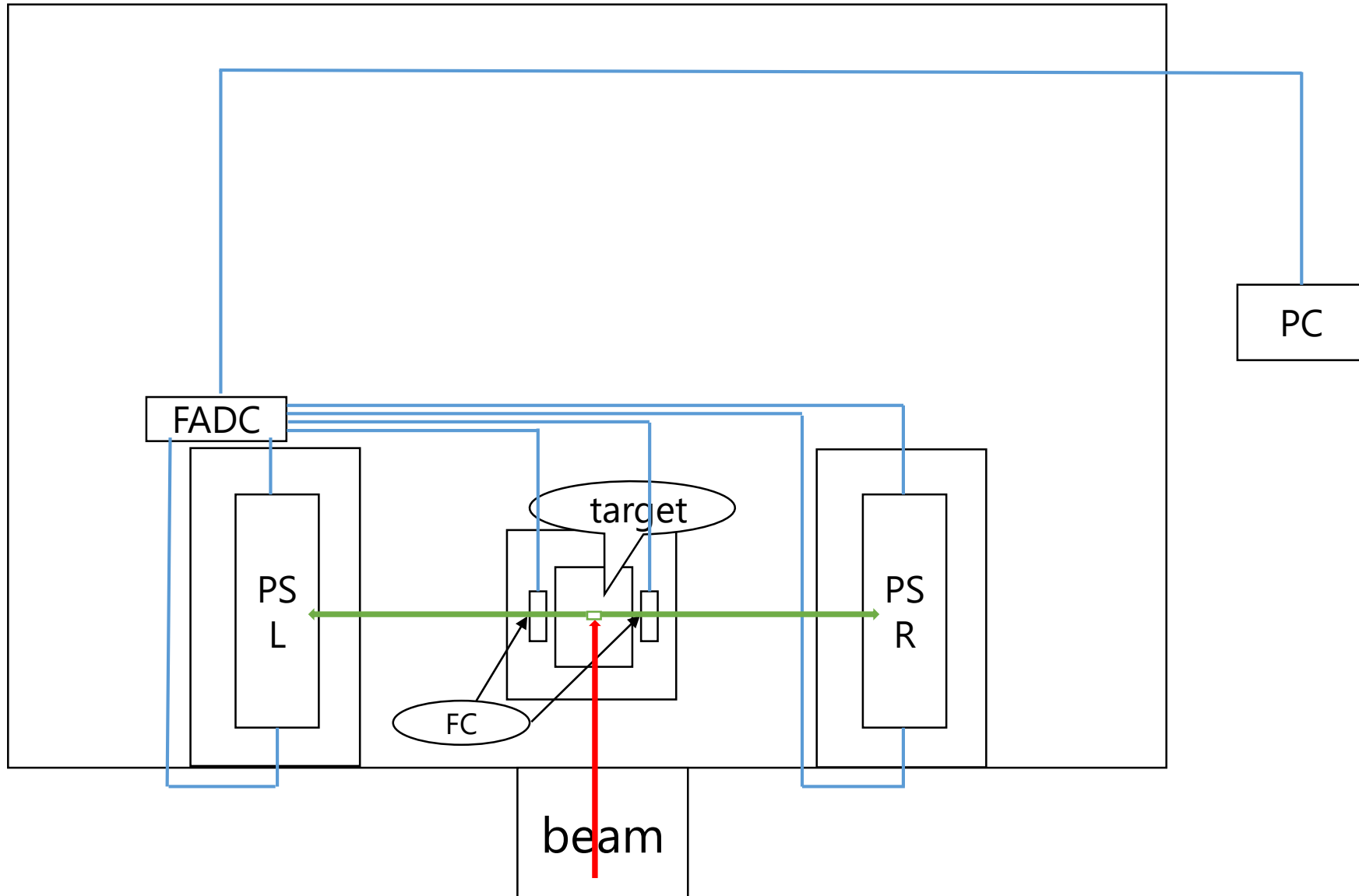


(補足) 入射角度によるズレ

- Fiber array に垂直に入射したイベントのみ選別することで解決できる
 - ただしカウントレートは大幅に低下する

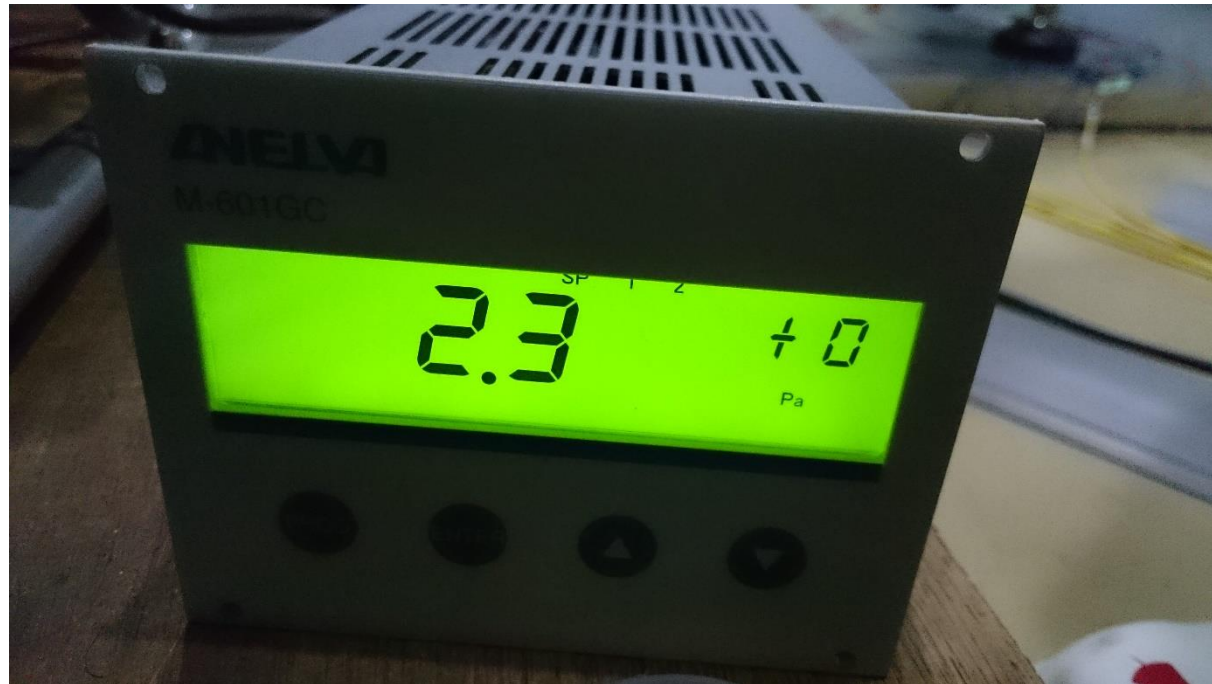


(補足) Set up



(補足) 真空ポンプ

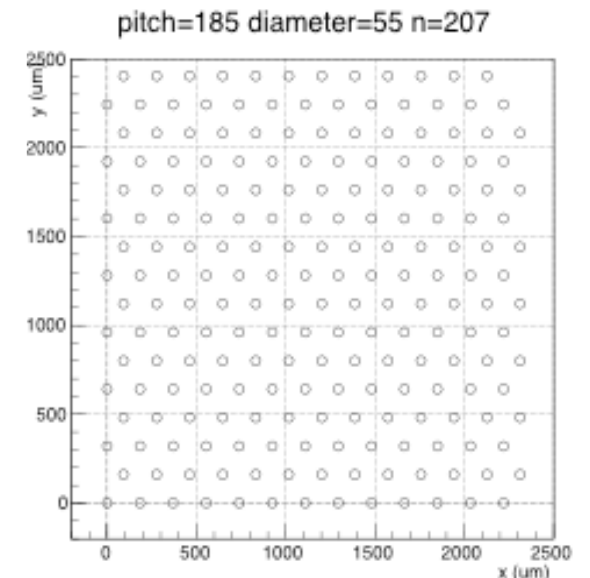
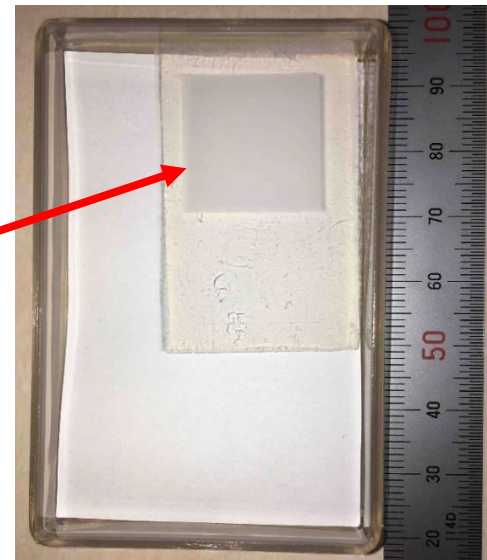
- MLFでお借りしたドライ真空ポンプ(右図)
(ANSTE IWATA ISP250C)
- 真空到達度は十分($< 10\text{Pa}$)



(補足) ターゲット本体

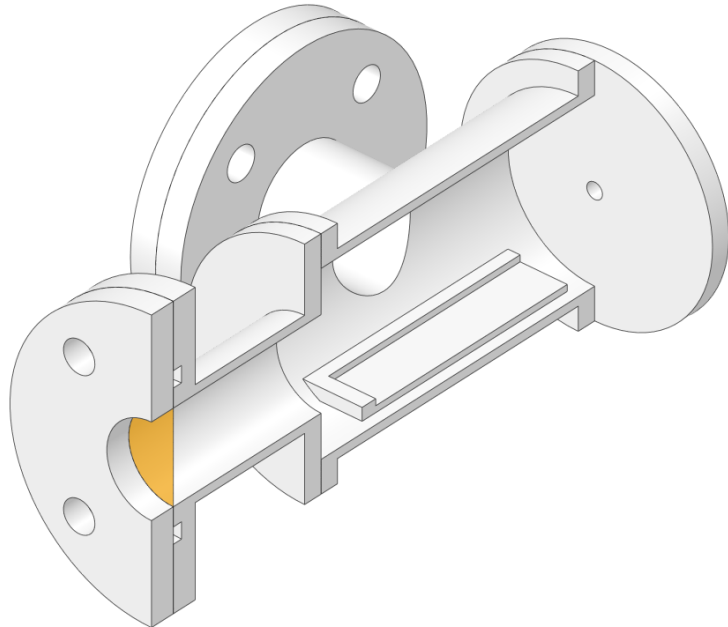
- SiO₂エアロゲル 42mm (H) x 30mm (W) x 8mm (T)
- 下流側表面 20mm x 20mm の領域にレーザー加工がなされている
 - 直径 55 μ m、ピッチ 185 μ m
 - 生成したMuが真空中に5~10倍放出されやすくなることが報告されている
 - PTEP 091C01 (2014) <https://academic.oup.com/ptep/article/2014/9/091C01/1530603>
 - KEK 三部さんよりお借りした

加工領域



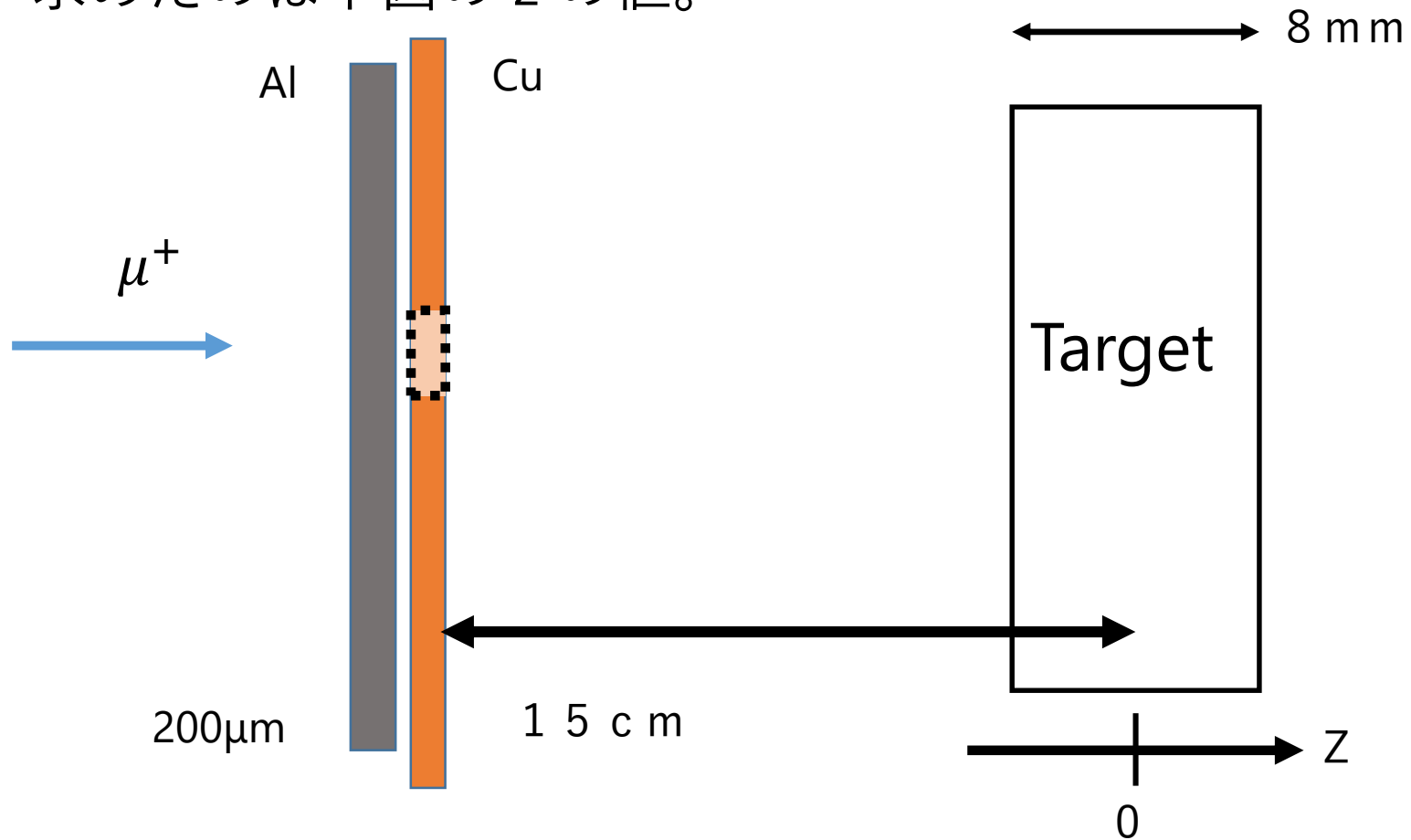
(補足) 真空槽

- カプトン箔をフランジで挟み込んで窓を作製
 - μ^+ の入射窓、崩壊 e^+ の観測窓 x2
- 内部にターゲット挿入用の床がある
- サイズはdipole磁石（後述）の大きさとlimitされる



Degraderの厚み決定

Geant4で本番セットアップでのミュオンの崩壊位置の分布図を作成した。
求めたのは下図の z の値。



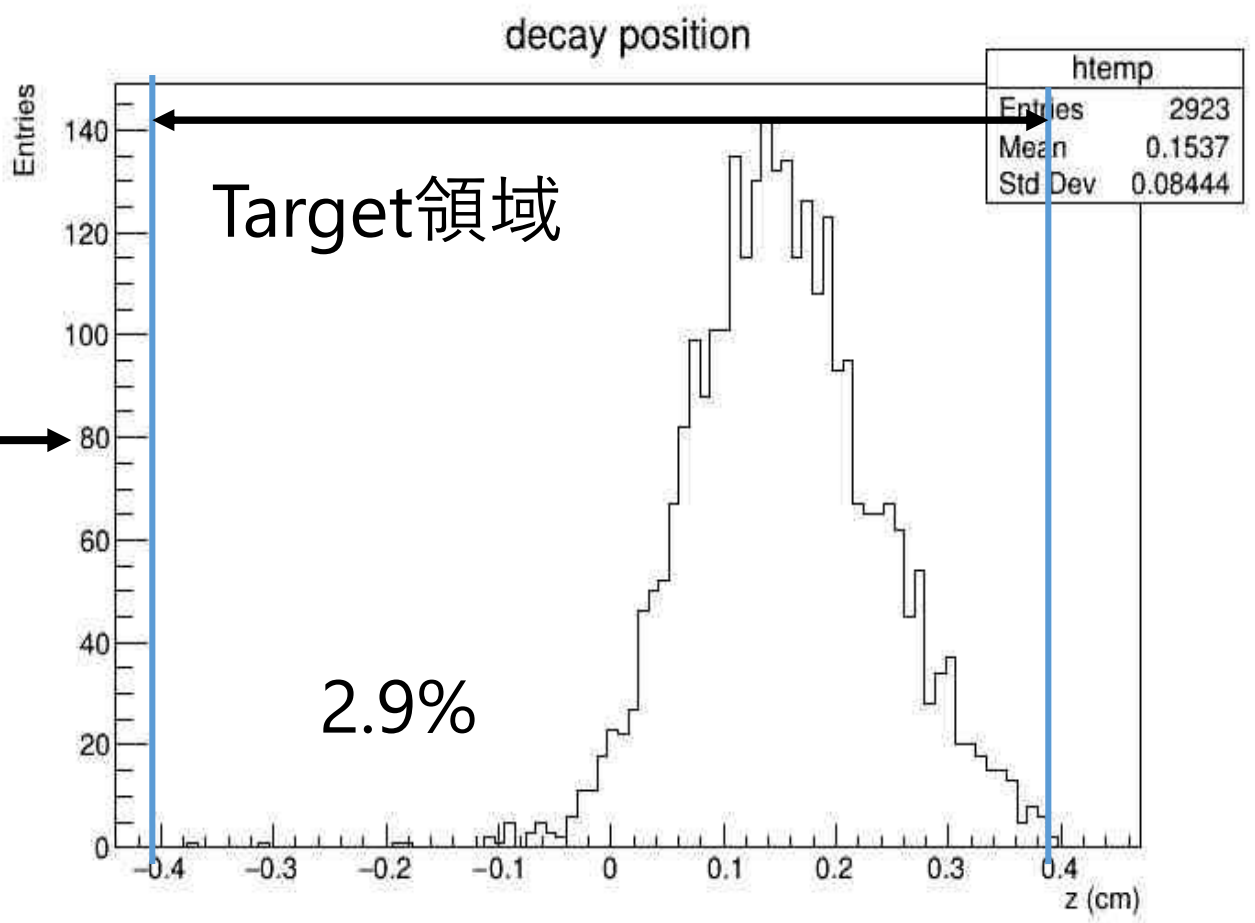
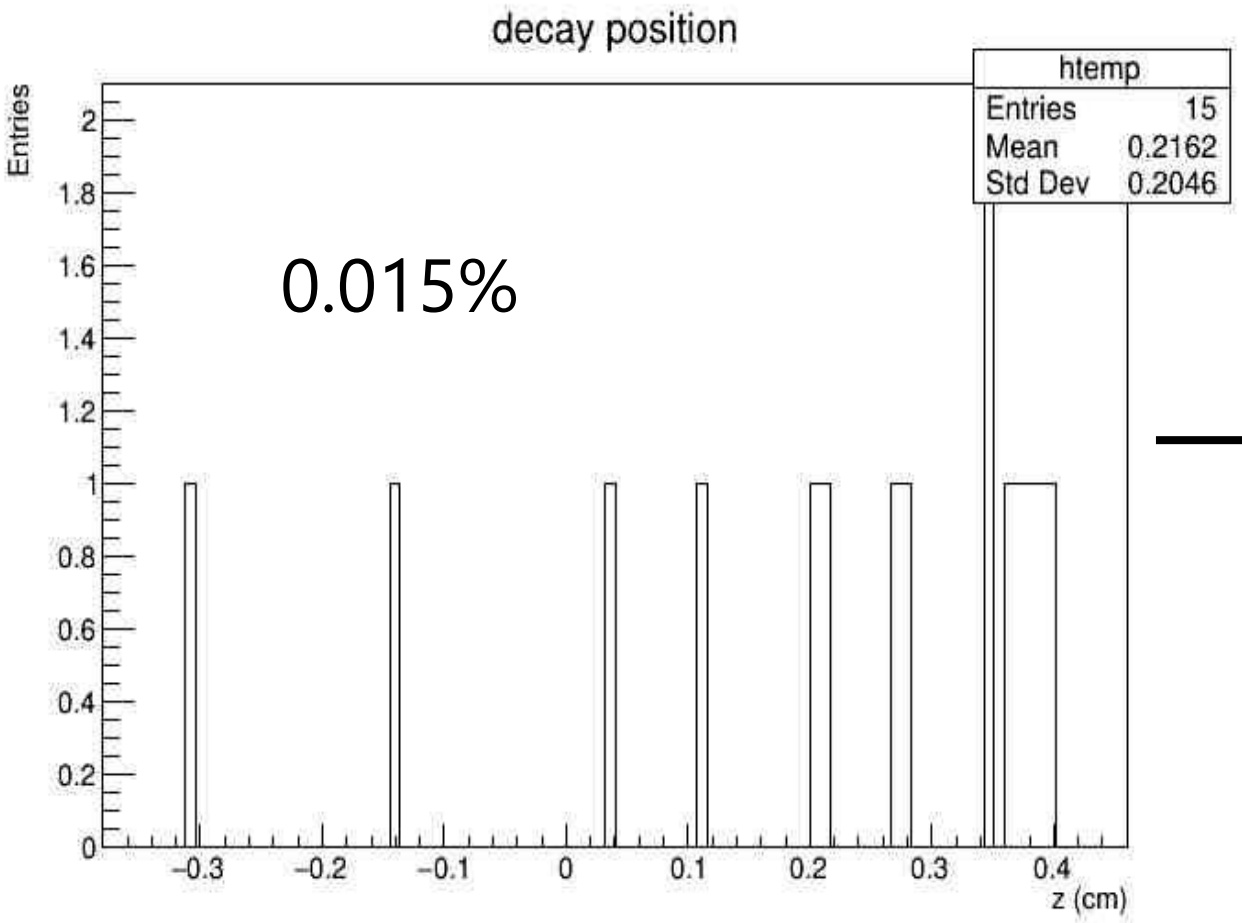
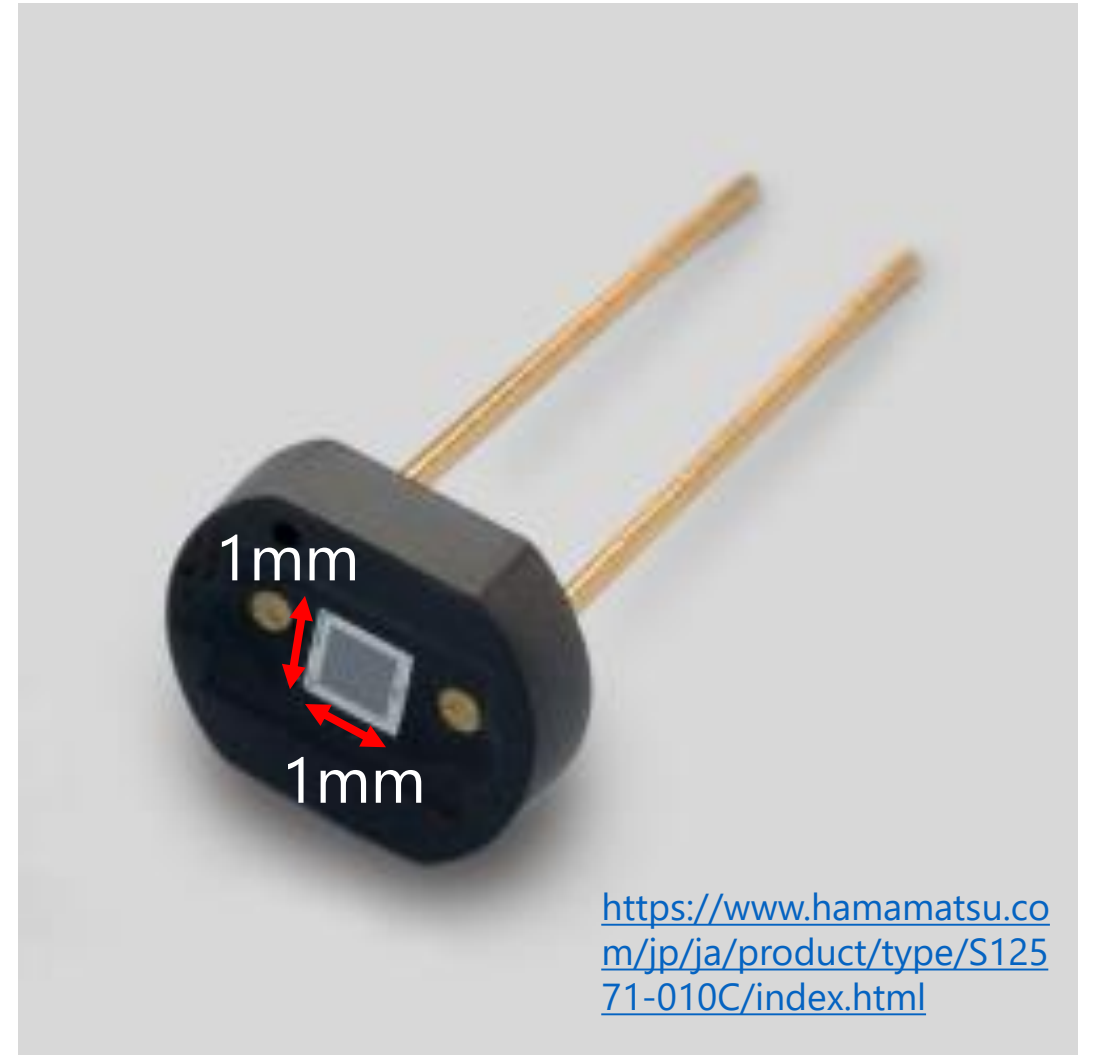


Figure : degraderなし

Figure : degrader厚さ200 μ m

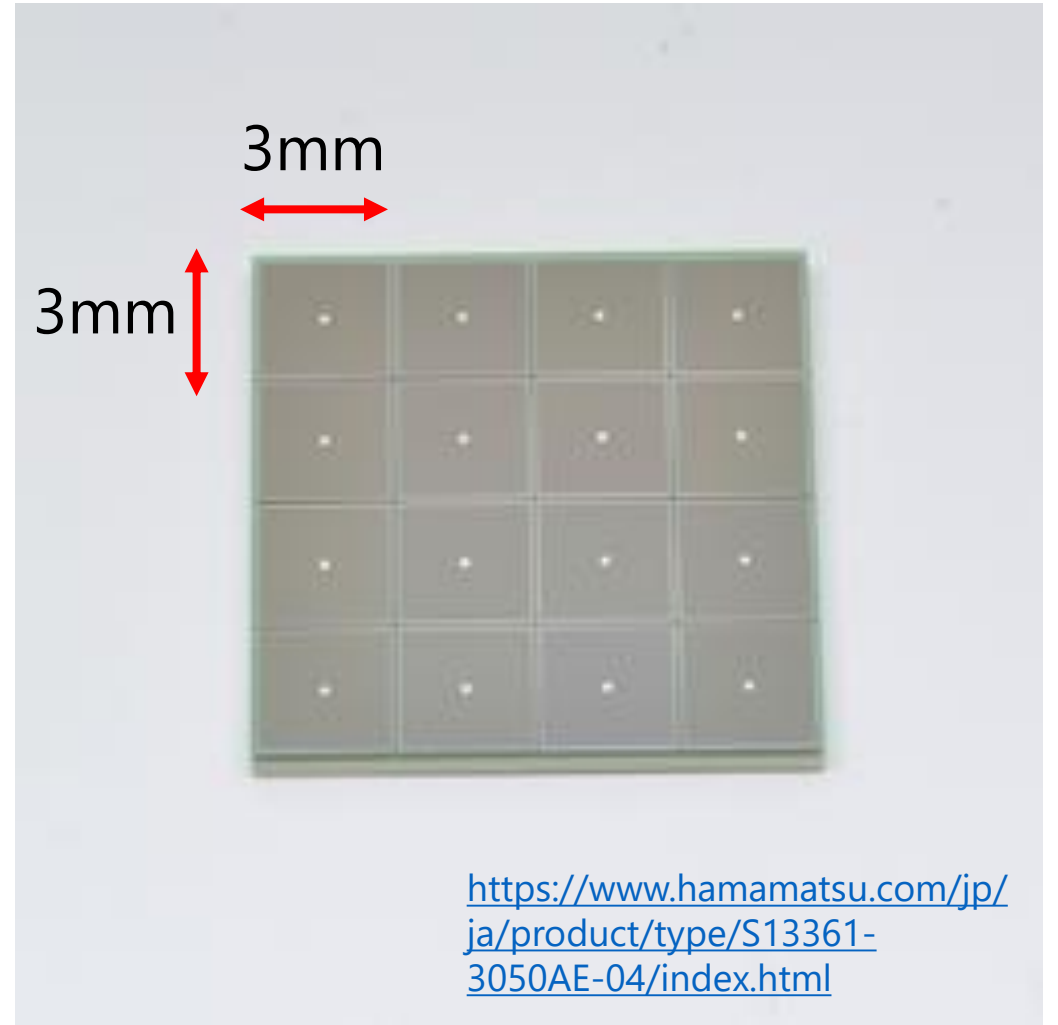
(補足) フィンガー用MPPC

- 浜松ホトニクス製 1ch MPPC
- $V_b \cong 68V$
- 計4枚使用
 - μ SR用の左右の検出器に1枚ずつ
 - ファイバートラッカーに2枚



(補足) 16ch MPPC

- 浜松ホトニクス製 16ch MPPC array
- $V_b \cong 51V$
- 2枚 (合計32ch) 使用



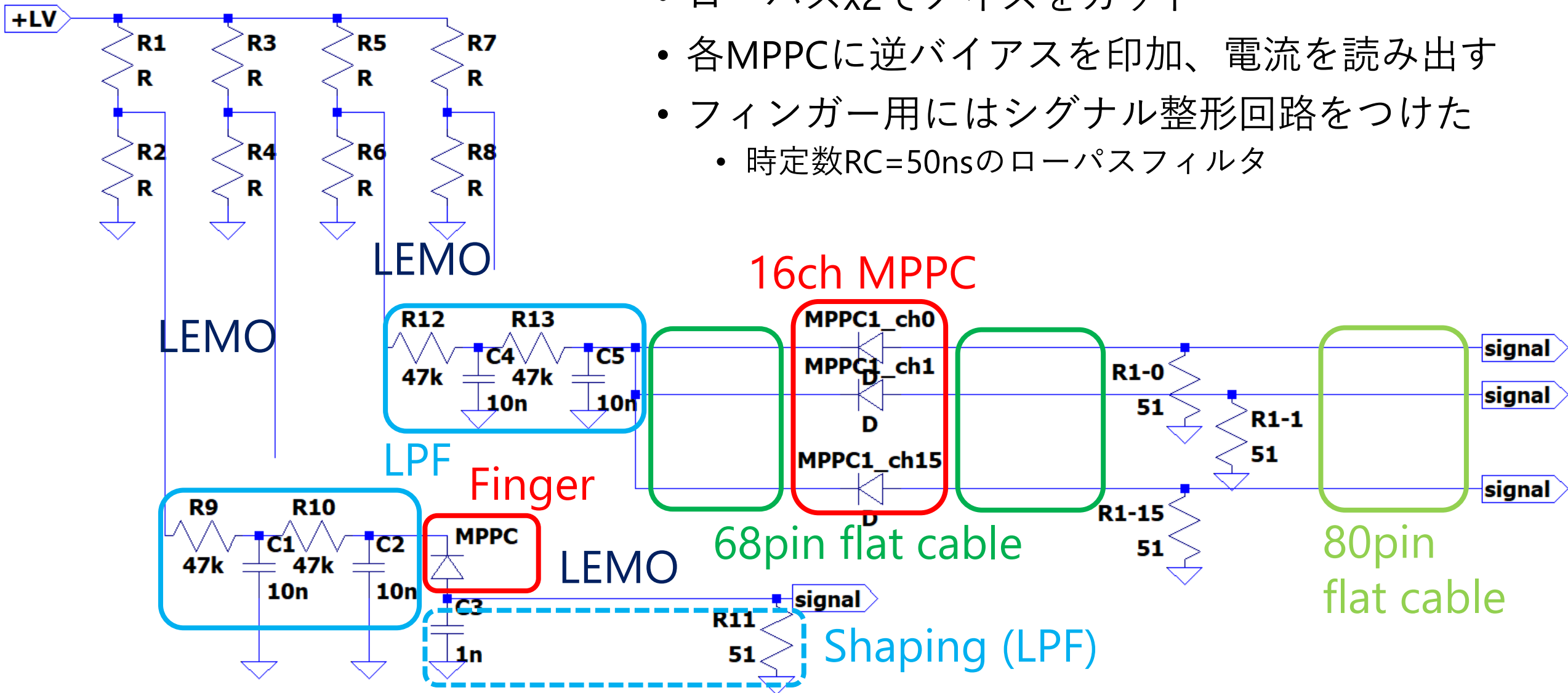
(補足) 電源装置 (Low Voltage, LV)

- 松定プレシジョン製 PL-120-0.6
- マルチメータで測りながら0.1Vの精度で調整可能



(補足) 回路図

- LVを2chないし4chに分配
 - 可変抵抗による抵抗分割により各chでLVを微調整可能
- ローパスx2でノイズをカット
- 各MPPCに逆バイアスを印加、電流を読み出す
- フィンガー用にはシグナル整形回路をつけた
 - 時定数 $RC=50\text{ns}$ のローパスフィルタ



(補足) MPPCゲイン測定

セットアップ

- 暗箱の壁面にLED、反対側の壁面にMPPCを固定
- ClockのNIM信号を適当に減衰させてLEDを光らせる
 - $\sim 1\text{p.e.}$ 程度の明るさに設定
- 同じClockで適当な長さのgateを作りADCに入れる

ゲインの算出

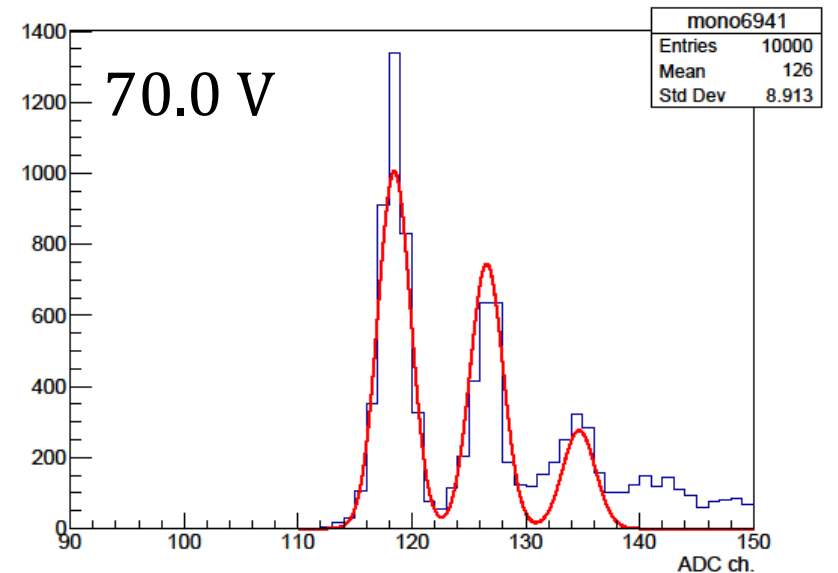
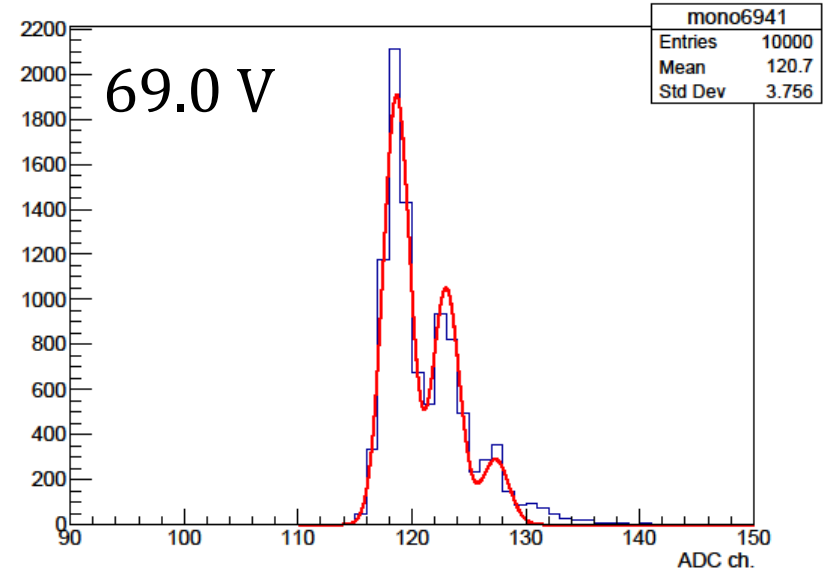
- $V = 69.0, 70.0$ V のときの ADC ch. をヒストグラム化

- 0~2 p.e. を Gaussian で fit

$$f(x) = N \sum_{n=0}^2 \frac{\lambda^n}{n!} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x - (p + ng)}{\sigma} \right)^2 \right]$$

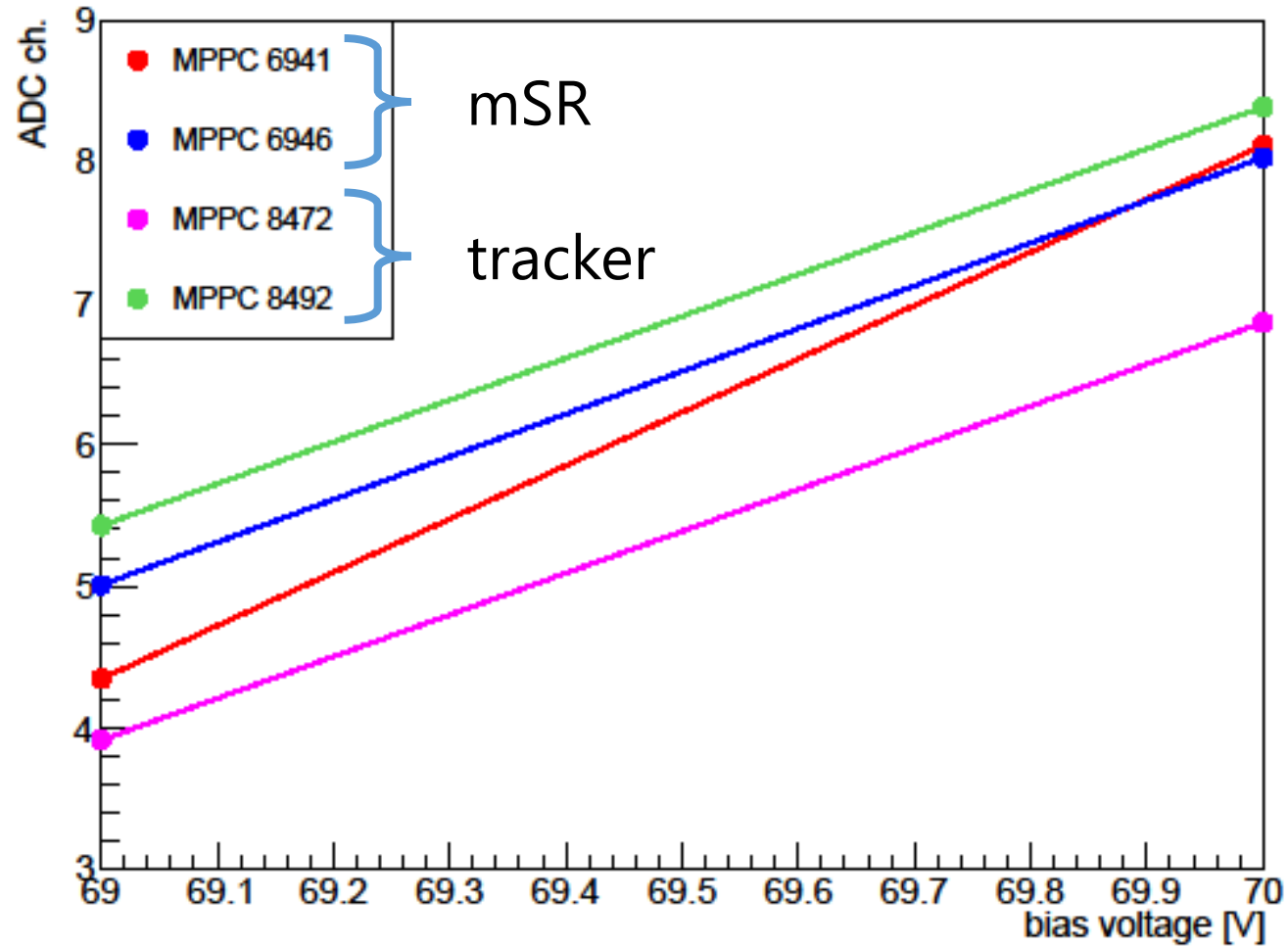
- ピーク位置の差 $g(V)$ を線形で fit

$$g(V) = a(V - V_B)$$



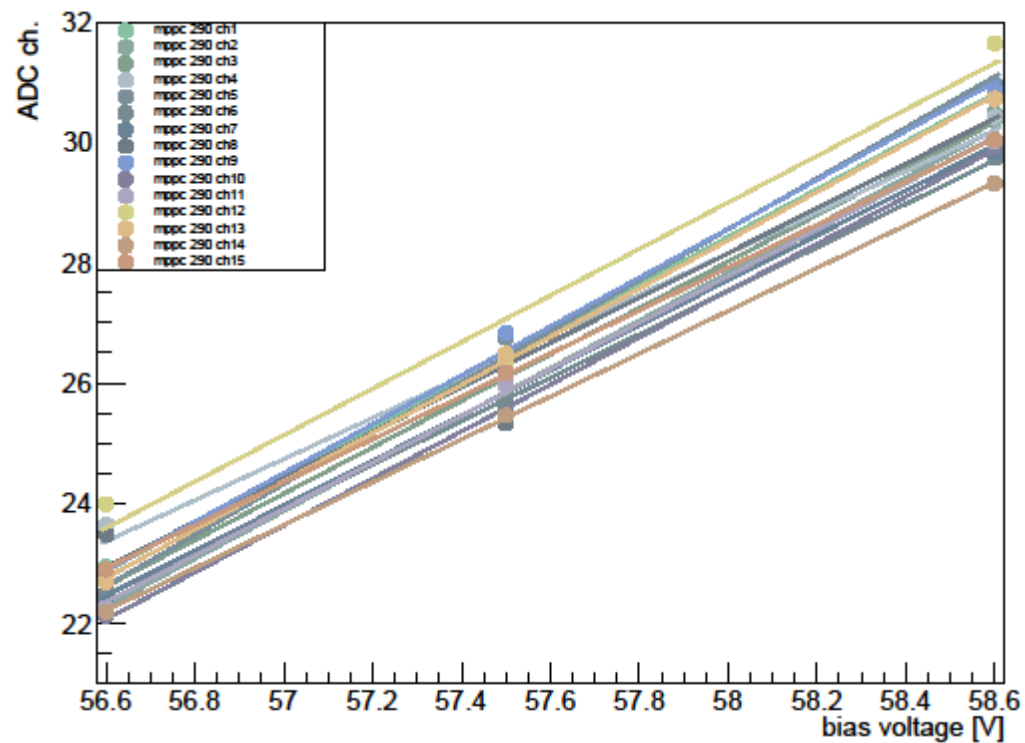
ゲインカーブ (フィンガー)

gain curve

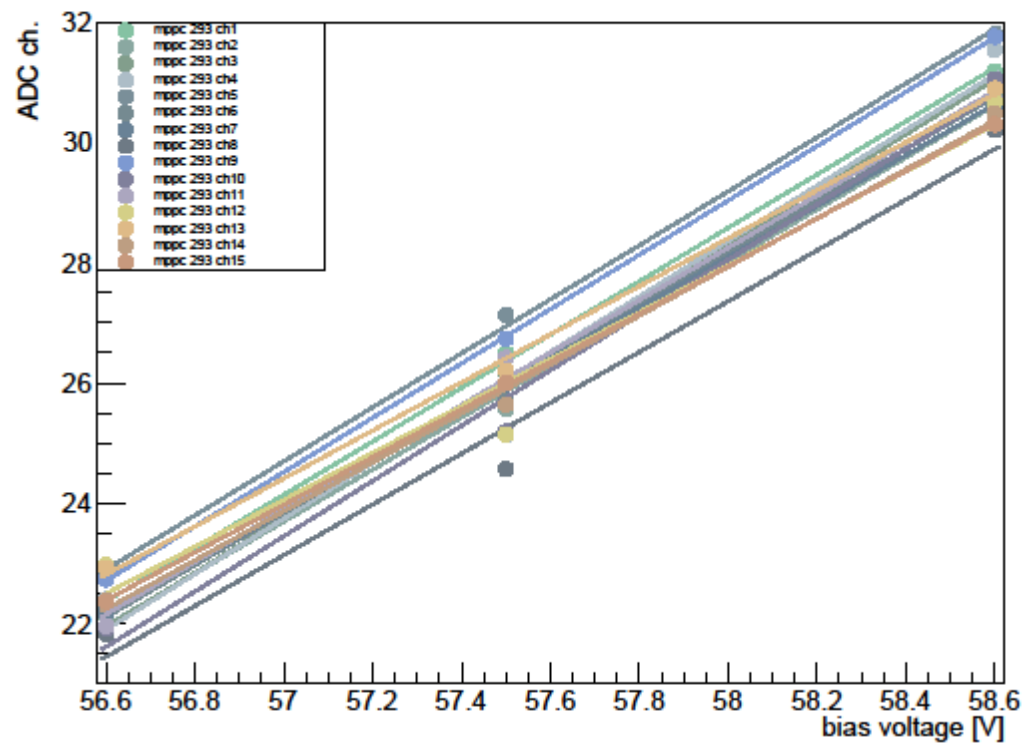


ゲインカーブ (16ch)

gain curve (mppc 290)



gain curve (mppc 293)



(補足) 電圧値メモ

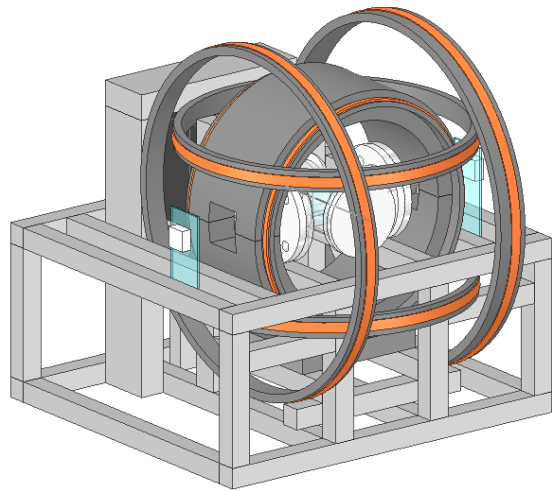
- L 70.3V
- R 69.8V

- Finger1 70.5V
- Finger2 70.5V
- Layer1 58.5V
- Layer2 58.4V

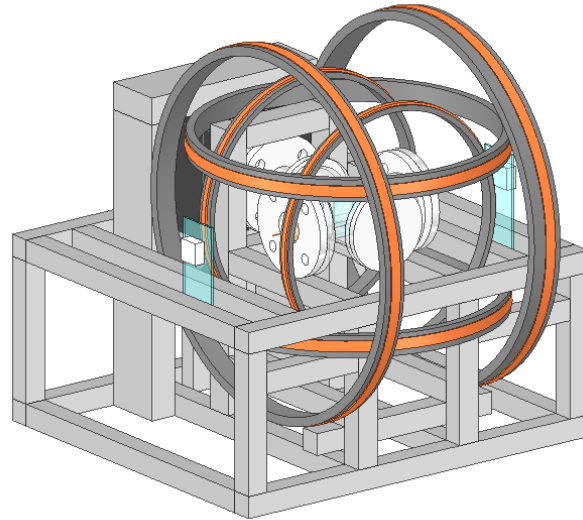
おまけ

各実験時の装置の状態

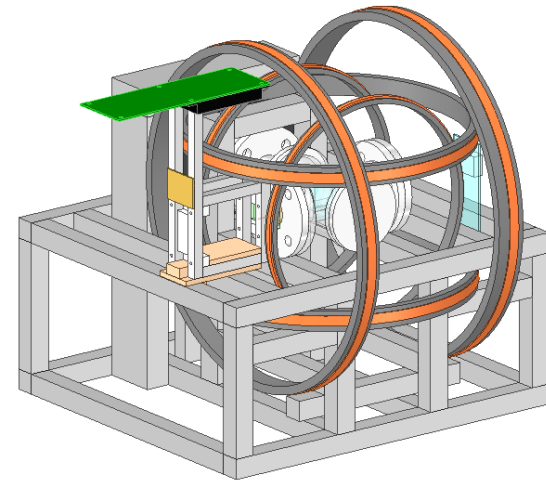
μ SR



mSR



Tracking

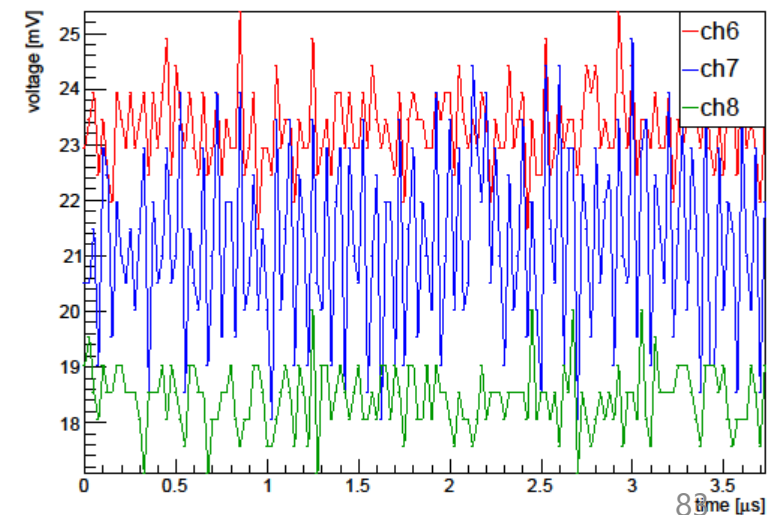
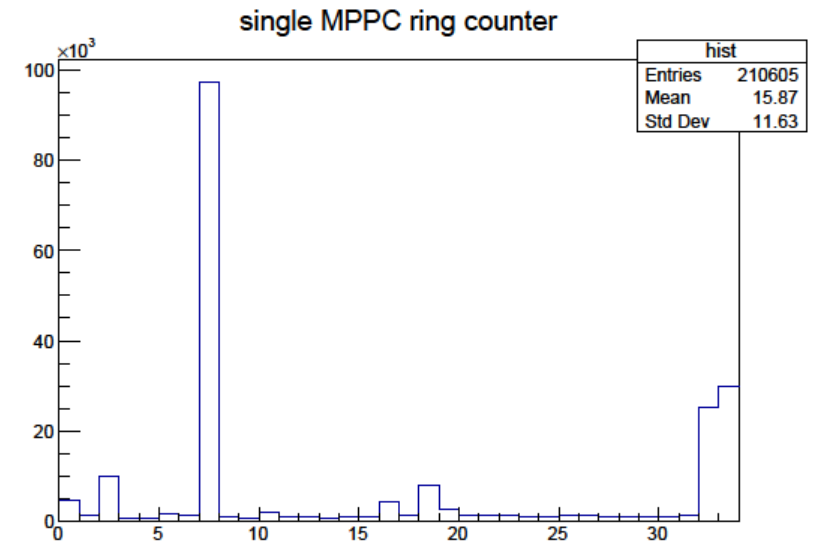


(補足) Baseline と Threshold の決定 (初期案)

- 各ch.ごとに150データ点中はじめの10点を平均して Baseline とする
- Threshold は一律 Baseline + 2.5mV

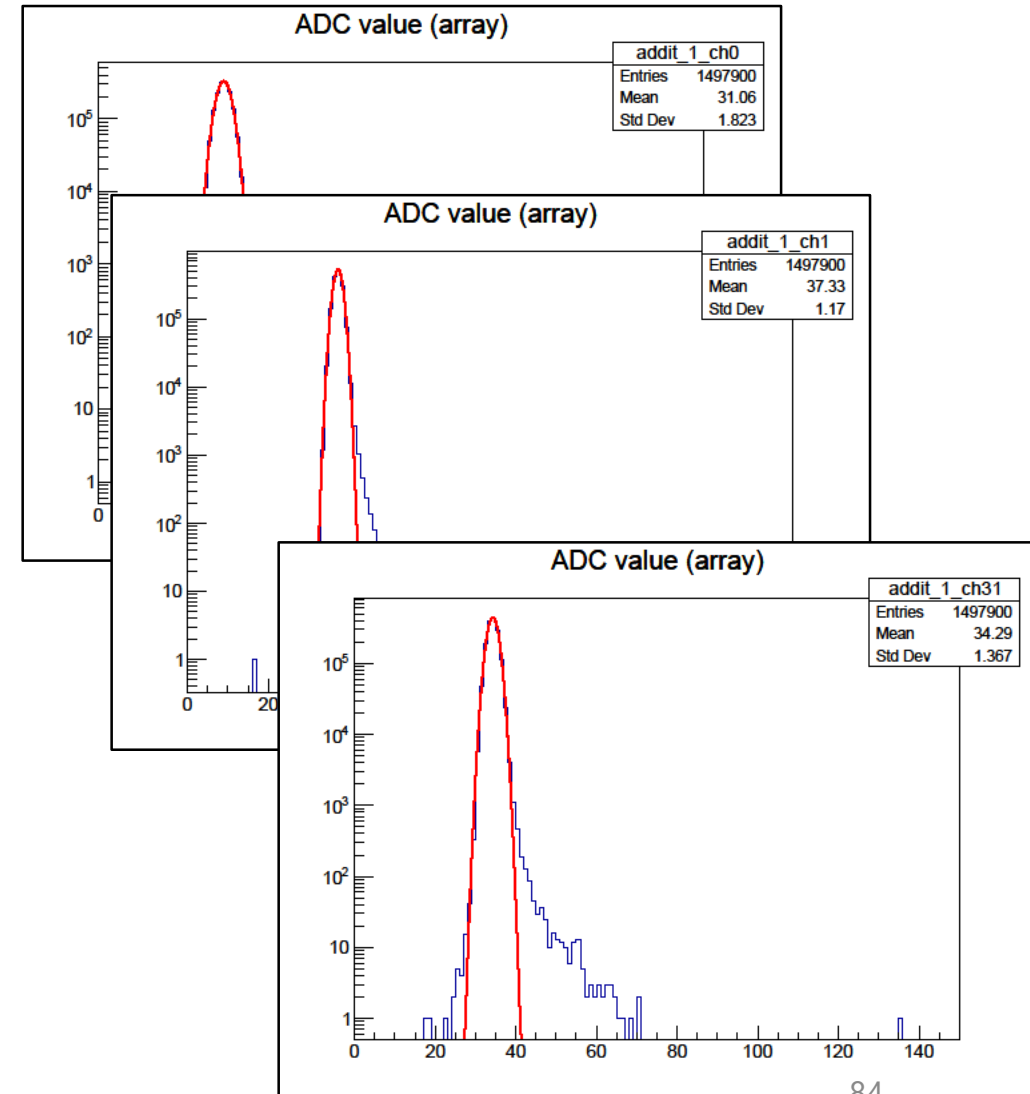
➤ ch.7 が鳴りすぎている

- 詳しく見てみたところ ch.7 は Baseline のノイズが他より大きい
- 特定の ch. が鳴りすぎることは、後述のイベントの選択の段階で問題となる
- Threshold 決定方法を見直す必要あり



(補足) Baseline と Threshold の決定 (改善案)

- FADCで記録した電圧値を ch. ごとにヒストグラム化
- Baseline のゆらぎを Gaussian と仮定
 - (sin的なノイズが大きい場合などには破綻するが.....)
- この Gaussian の中心を Baseline とする
- Threshold は Gaussian の σ を用いて次のように決定：



(補足) Baseline と Threshold の決定 (改善案)

- ch. i ($i = 0, \dots, 31$) のベースラインのゆらぎ $3\sigma_i^{\text{FADC}}$ をゲイン g_i で割って光子数 (に比例する値) $3\sigma_i^{\text{photon}}$ に変換:

$$3\sigma_i^{\text{photon}} = 3\sigma_i^{\text{FADC}} / g_i$$

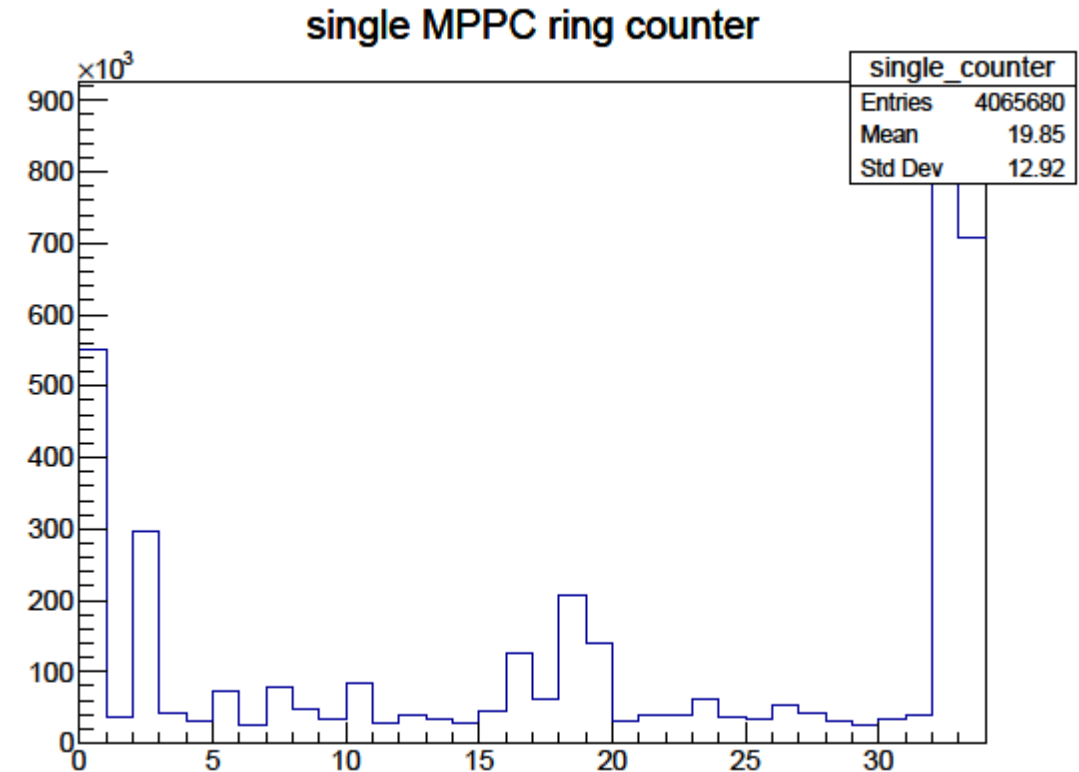
- $3\sigma_i^{\text{photon}}$ の32ch中での最大値を求め、再びFADCの電圧値に変換して Threshold とする:

$$V_i^{\text{Thre.}} = g_i \left(\max_{i=0, \dots, 31} 3\sigma_i^{\text{photon}} \right)$$

- Noisy な ch. の影響を抑えつつ、平等に threshold をかけることができる

(補足) Baseline と Threshold の決定 (改善案)

- ch.7 が鳴りすぎる問題は解決された
 - Fiber の磨き具合などによる efficiency を反映している？
 - あるいは本当によく鳴っている？
 - この実験結果だけでは判別不能



(補足) Coincidenceのとり方

- どちらかの finger の電圧値が threshold を下から上に切ったとき、適当な長さの window を作る
 - Finger 同士の時間差 window : 25ns
 - Finger と Fiber の時間差 window : 100ns

↓ Coincidenceと判定される例

t [ns]	-75	-50	-25	0	25	50	75
Finger 1	0	0	0	1	0	0	0
Finger 2	1	0	0	1	0	0	0
Fiber i	0	0	1	0	0	1	0

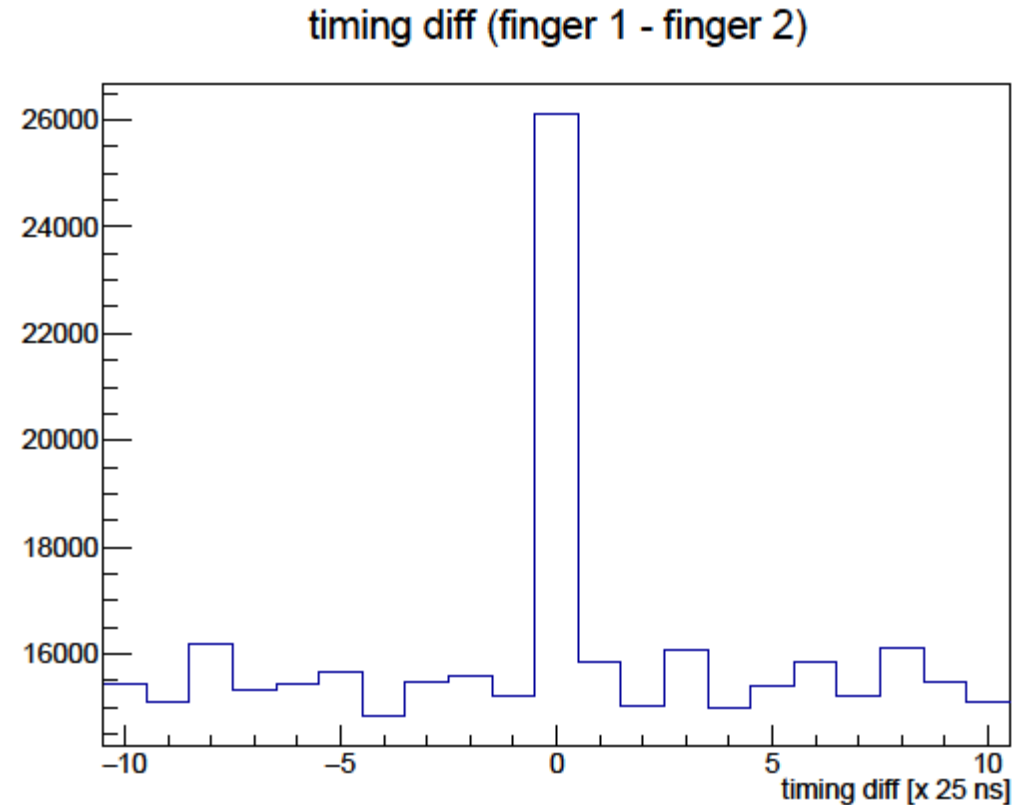
↓ Coincidenceと判定されない例

t [ns]	-75	-50	-25	0	25	50	75
Finger 1	0	0	0	0	1	0	0
Finger 2	0	0	0	1	0	0	0
Fiber i	0	0	0	0	0	1	0

- Window の長さの決め方は次スライド

(補足) Coincidence window (finger)

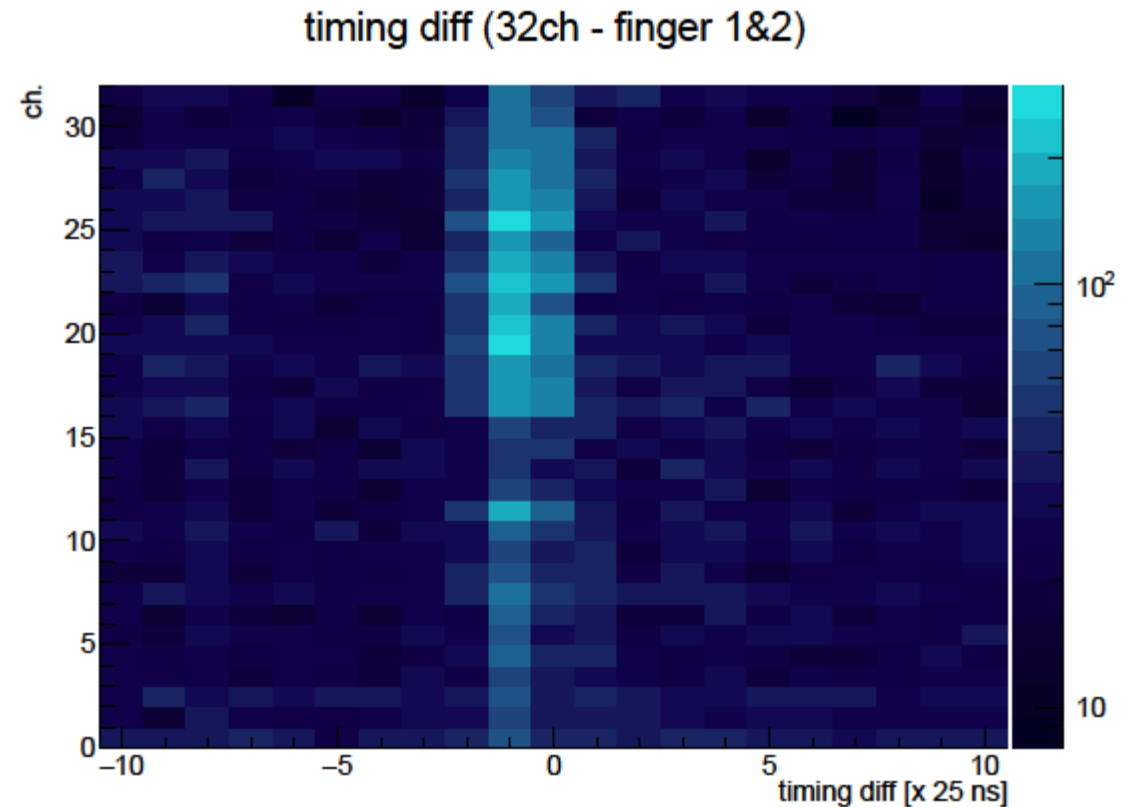
- 1, 2層目の finger が threshold を切ったタイミングの時間差をヒストグラム化
 - ピークは十分鋭い
- 本当に coincidence する場合は時間差0



(補足) Coincidence window (fiber)

- 32ch MPPCについても同様に時間差をヒストグラム化：
(32ch が Thre. を切った時刻) -
(finger 1, 2 が coincidence した時刻)

➤ -50 ~ +25 ns の範囲に分布



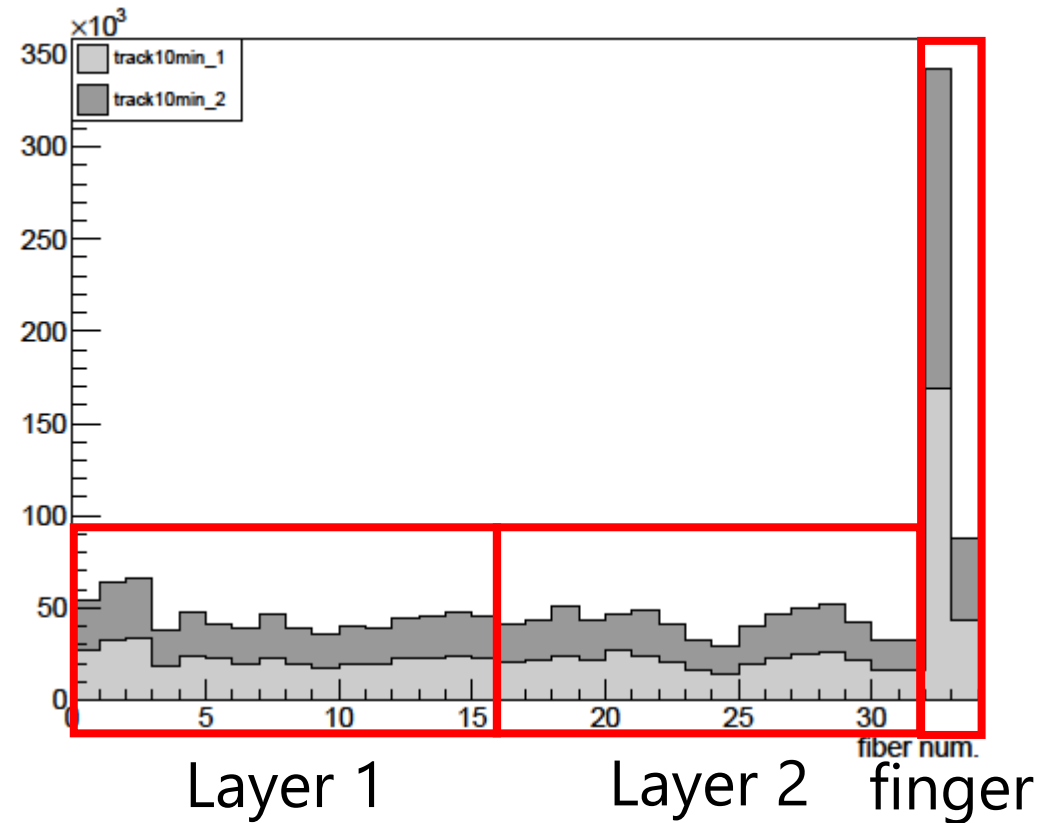
(補足) 垂直トラック

- Fiber arrayに対して e^+ の飛跡に角度がついていると、崩壊位置を正しく再構成できない場合がある
 - 崩壊位置が（トラックカーから見て）奥行方向に広がっている場合
- Fiber arrayに対して垂直に入射したもののみを選別
 1. Fiber 1, 2がどちらも鳴っている
 2. Layer 1で鳴っているファイバーの数が1~3個
 3. Layer 2で鳴っているファイバーの数が1~3個
 4. Layer 1中で鳴っているファイバーの配置が連続している
 5. Layer 2中で鳴っているファイバーの配置が連続している
 6. Layer 1とLayer 2で、鳴っているファイバーの配置が同一

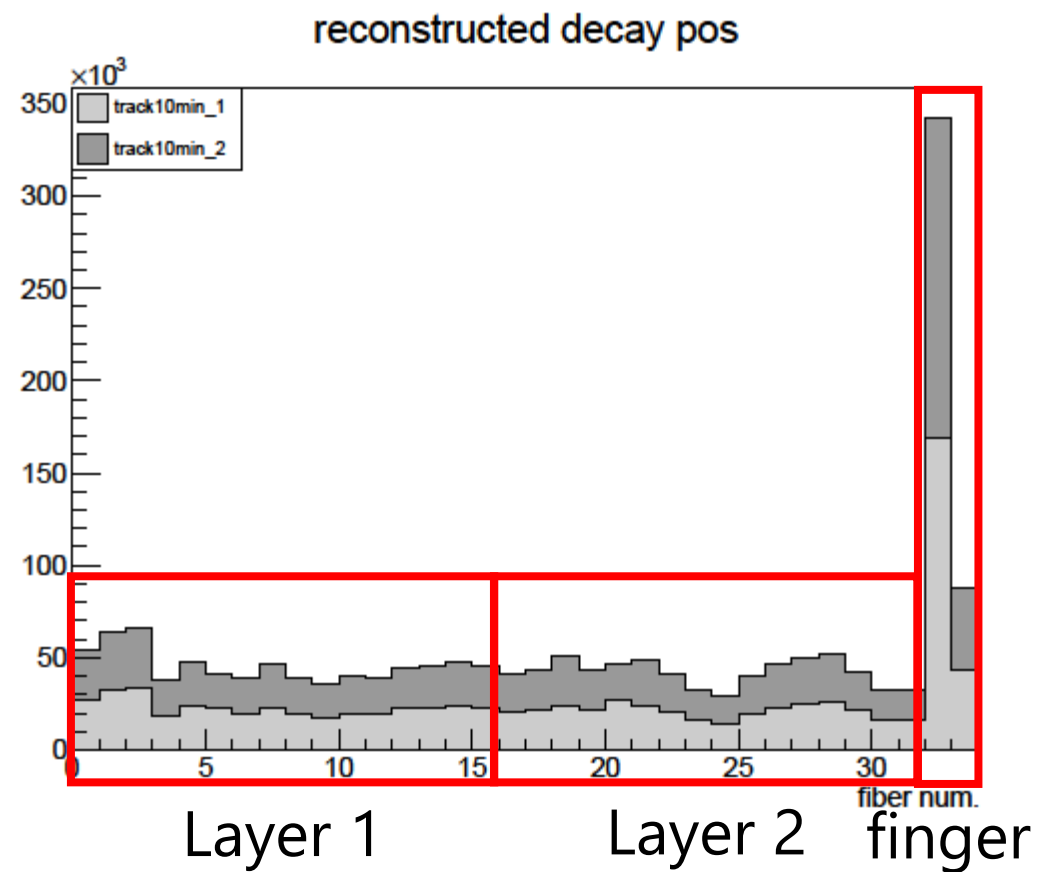
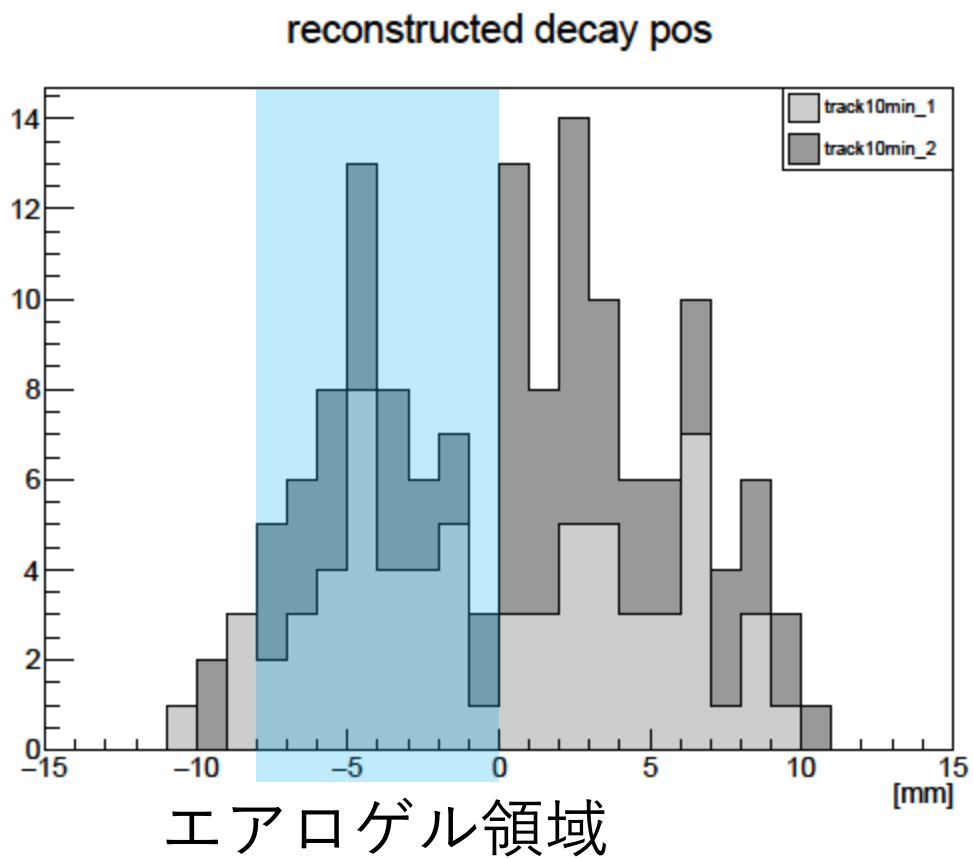
(補足) 解析結果のバリエーション

各ch.が鳴った回数

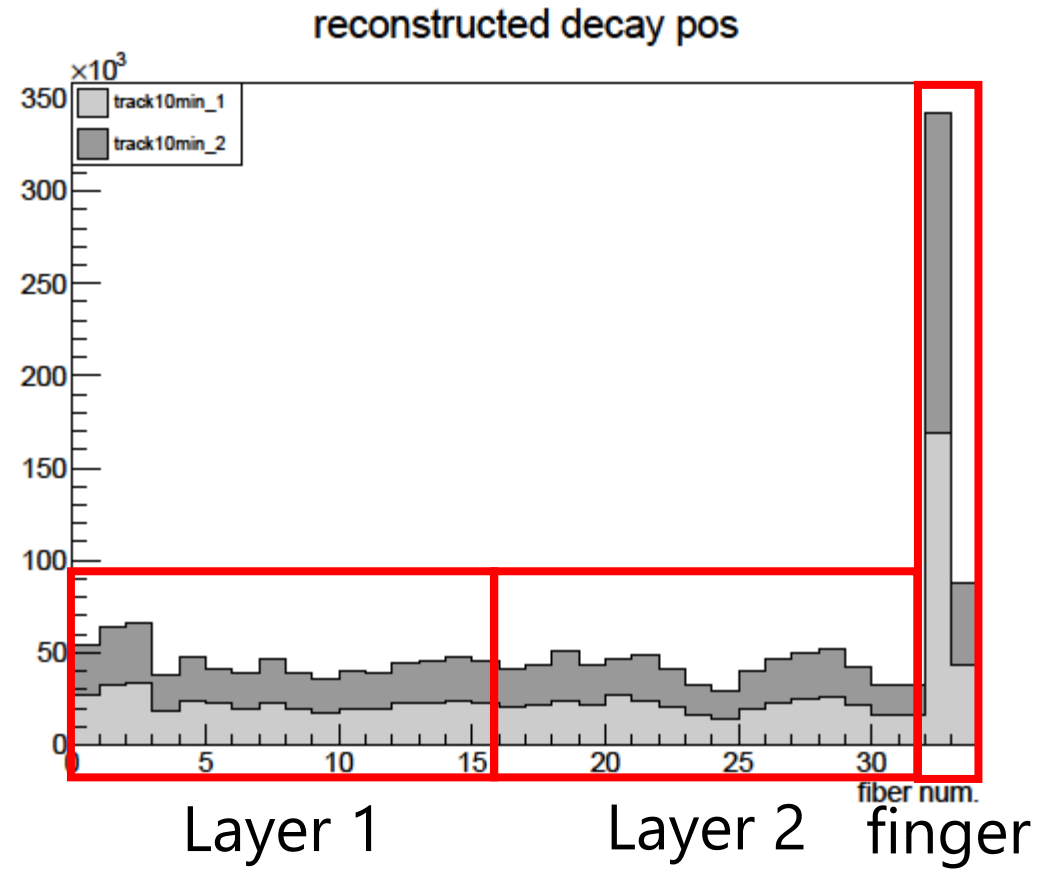
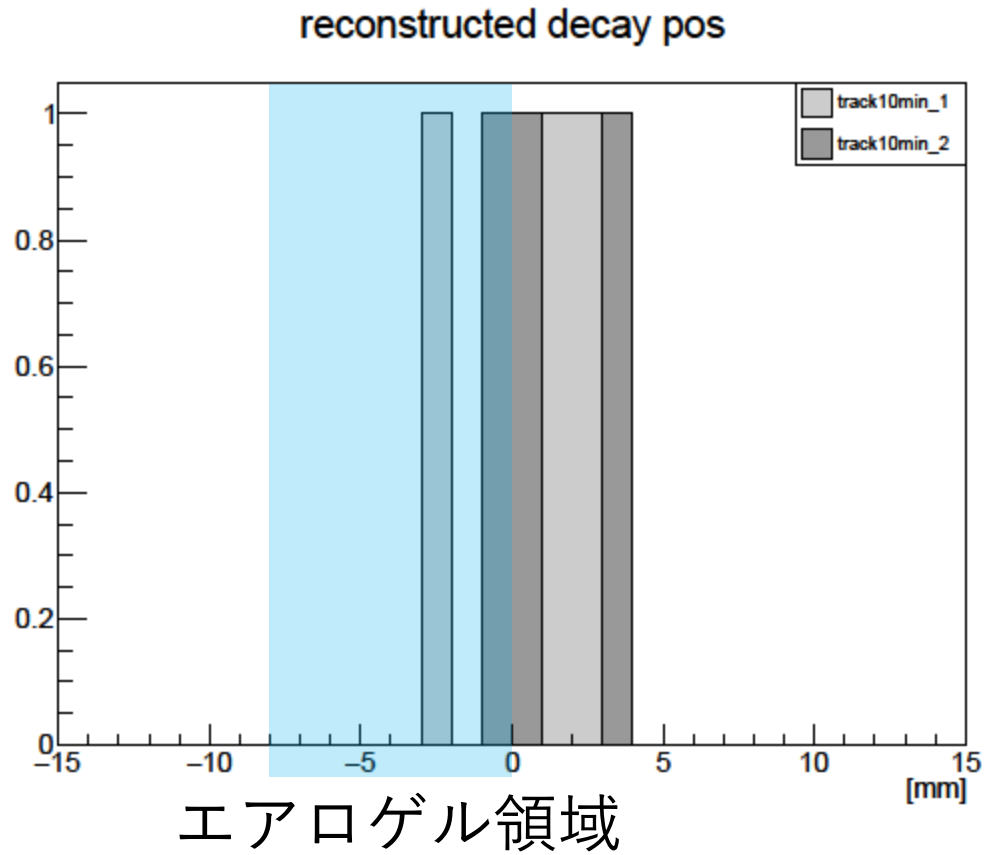
- 各MPPCの鳴った回数をヒストグラム化（coincidenceなし）



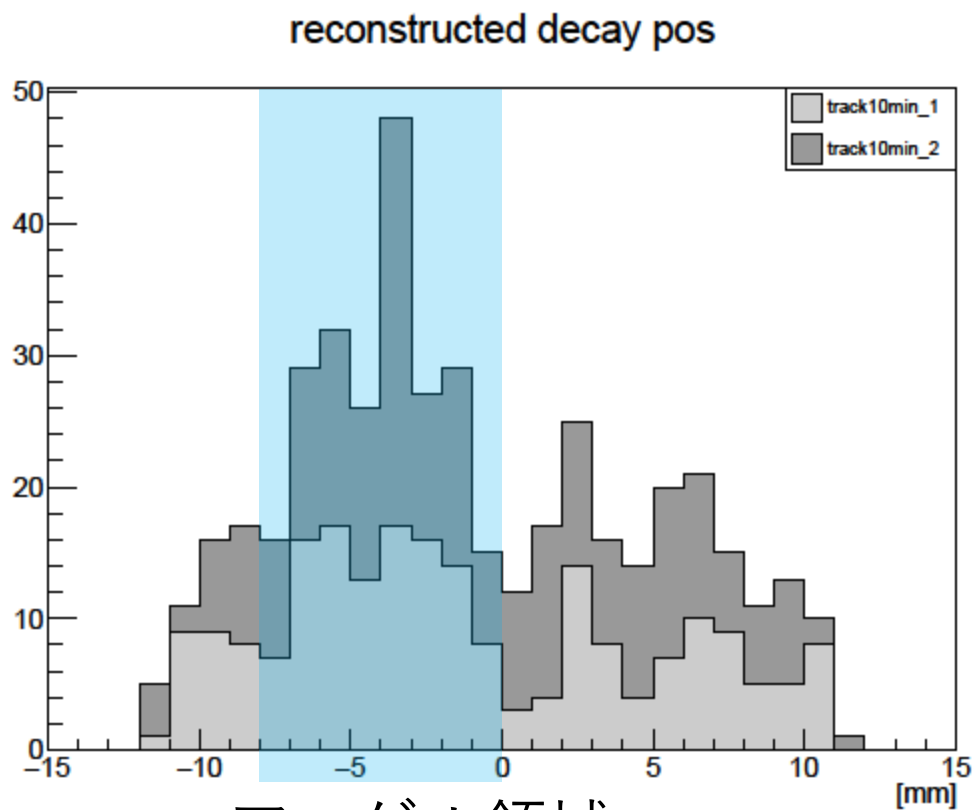
3 σ



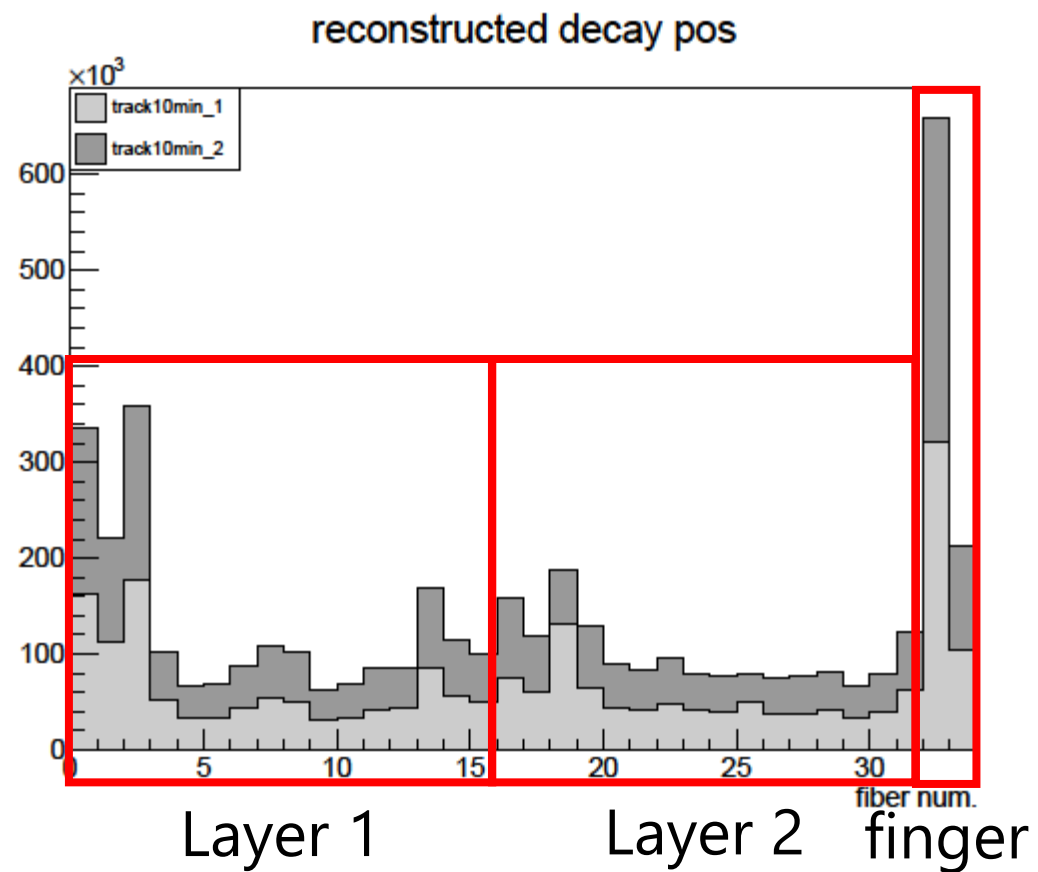
3 σ 垂直トラック



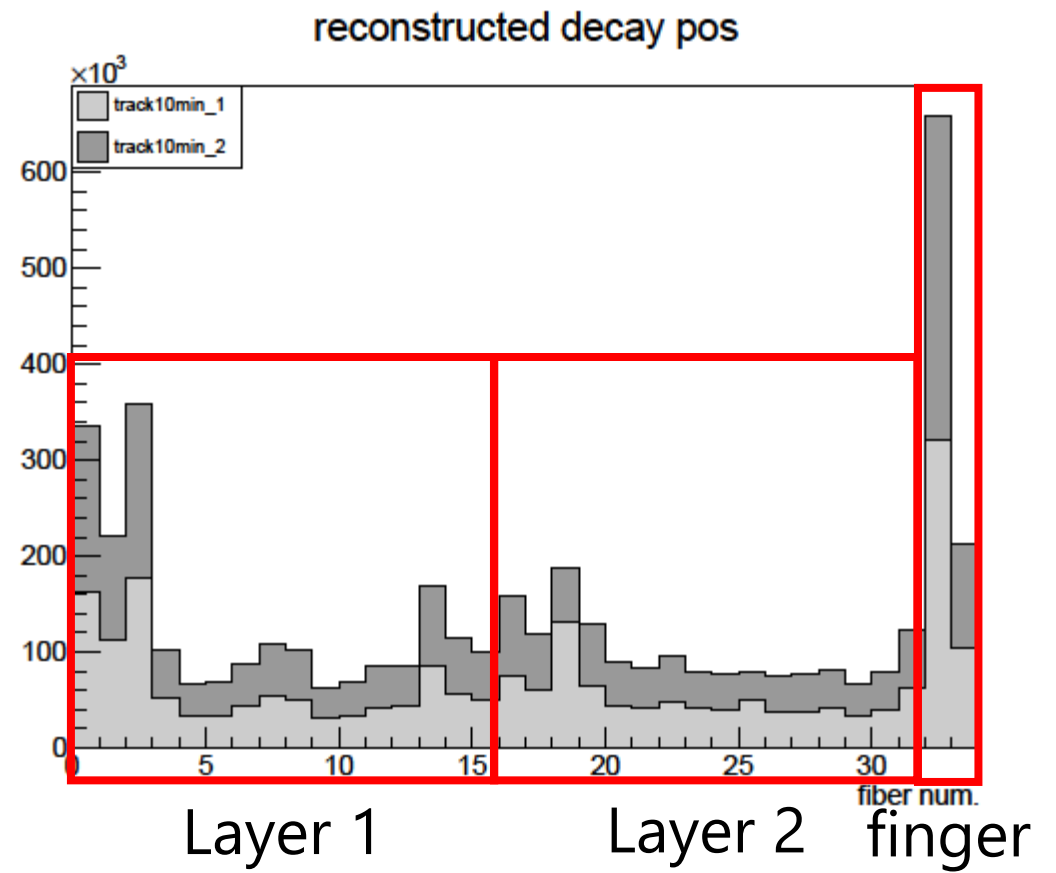
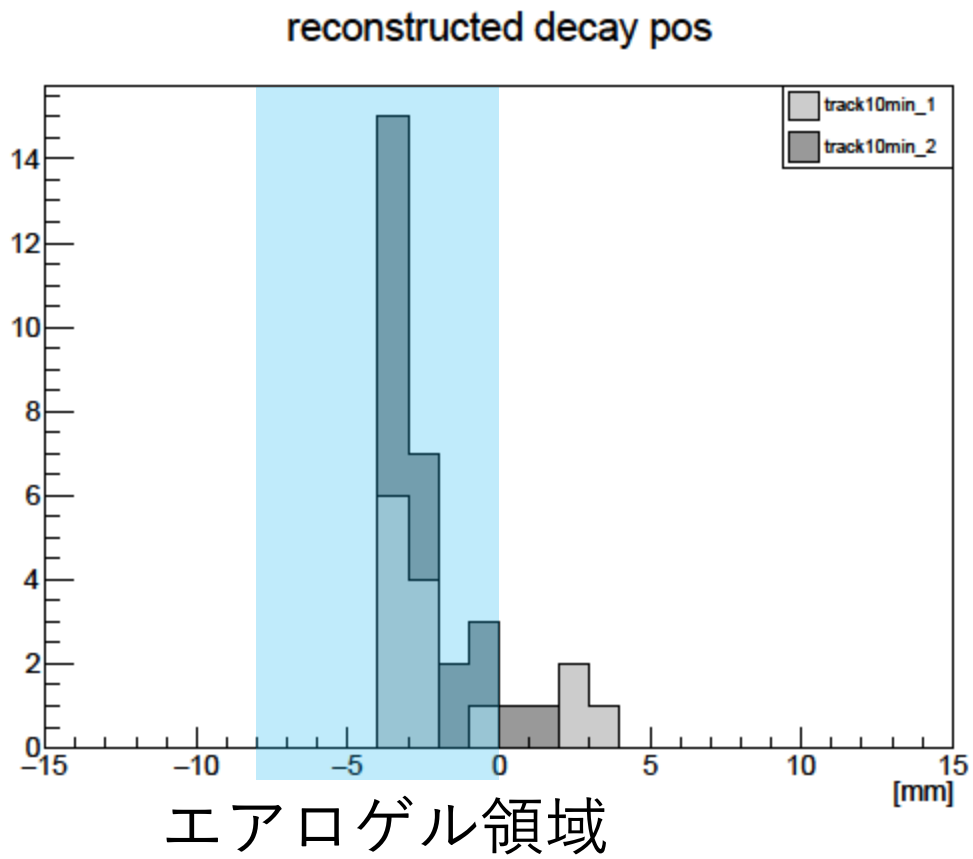
2 σ



エアロゲル領域



2 σ 垂直トラック



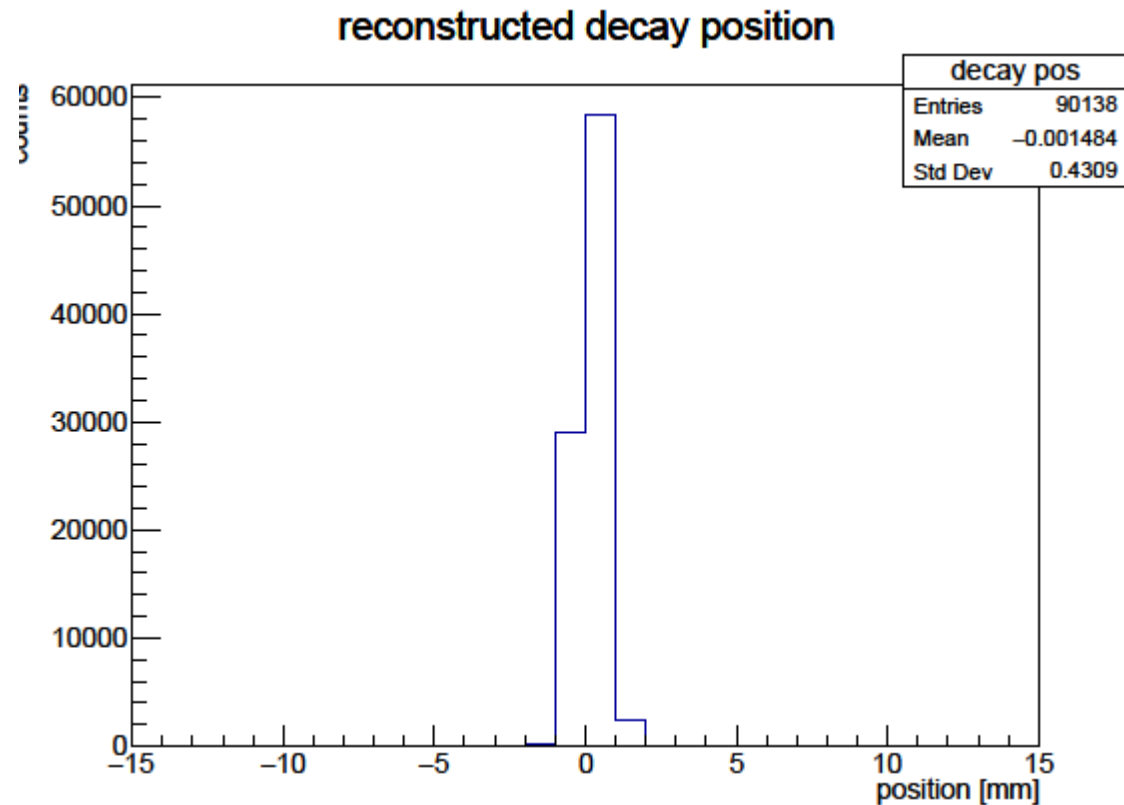
(補足) Toy MC

Toy MC セットアップ

- 一様分布で崩壊点を決定
 - $x = 0$ (e^+ の進行方向)
 - $|y| < 0.5\text{mm}$ (トラッキングする方向)
 - $|z| < 2.5\text{mm}$ (鉛直方向)
- 等方的に直線を発射
- 各ファイバー中を通った距離を保存： d_i
- 全ch.に同一の Threshold を設定： $d_i > d^{\text{Thre.}} = 0.1\text{mm}$

Toy MC 結果

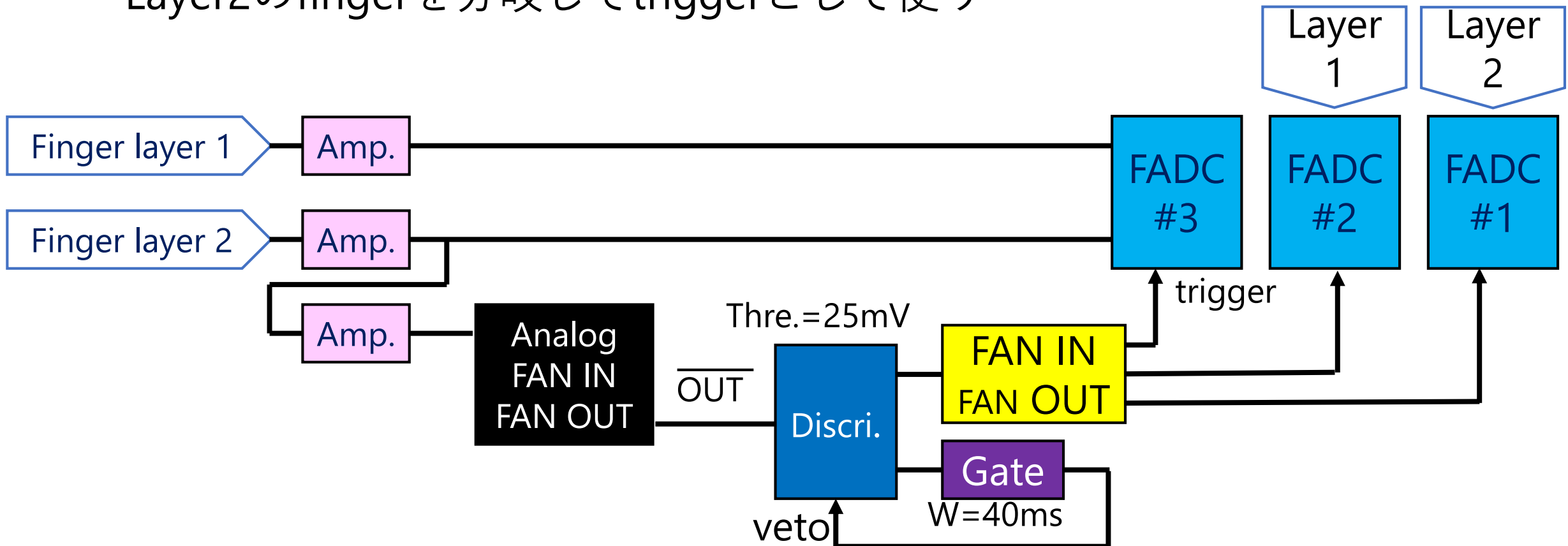
- $\pm 1\text{mm}$ 程度広がる



(補足) 予備実験

予備実験 セットアップ (回路)

- Layer2のfingerを分岐してtriggerとして使う



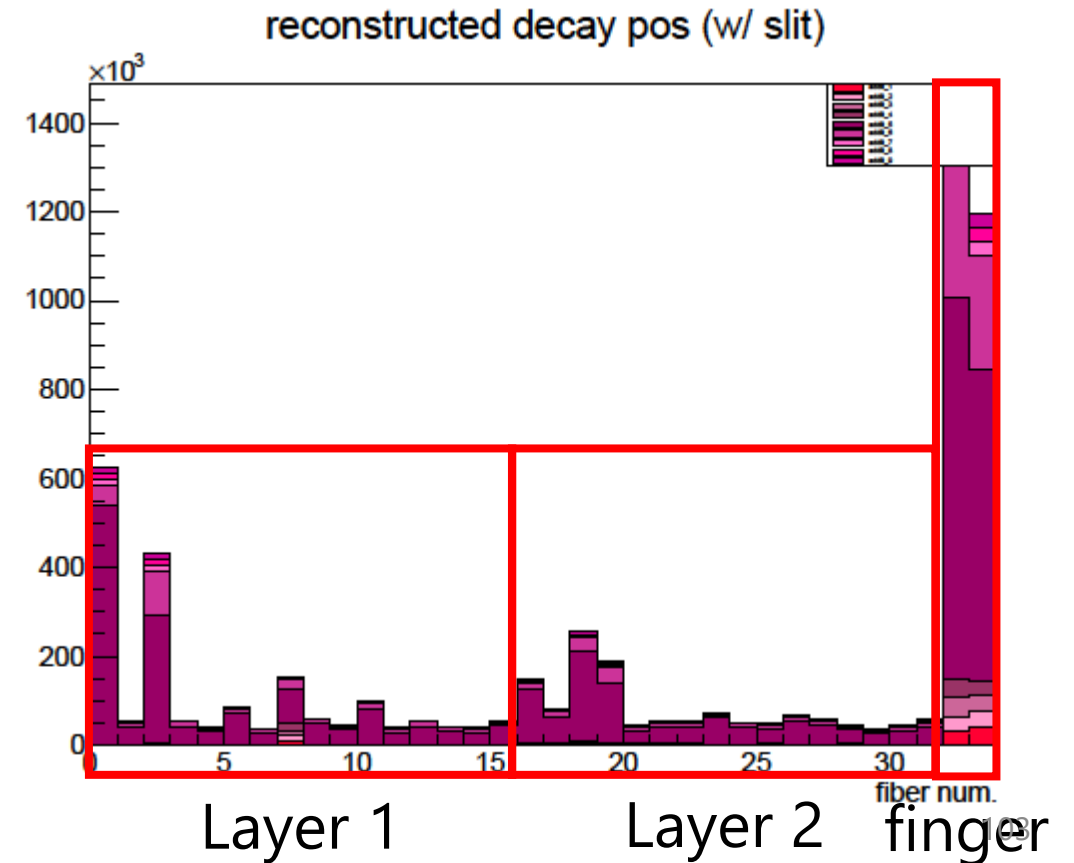
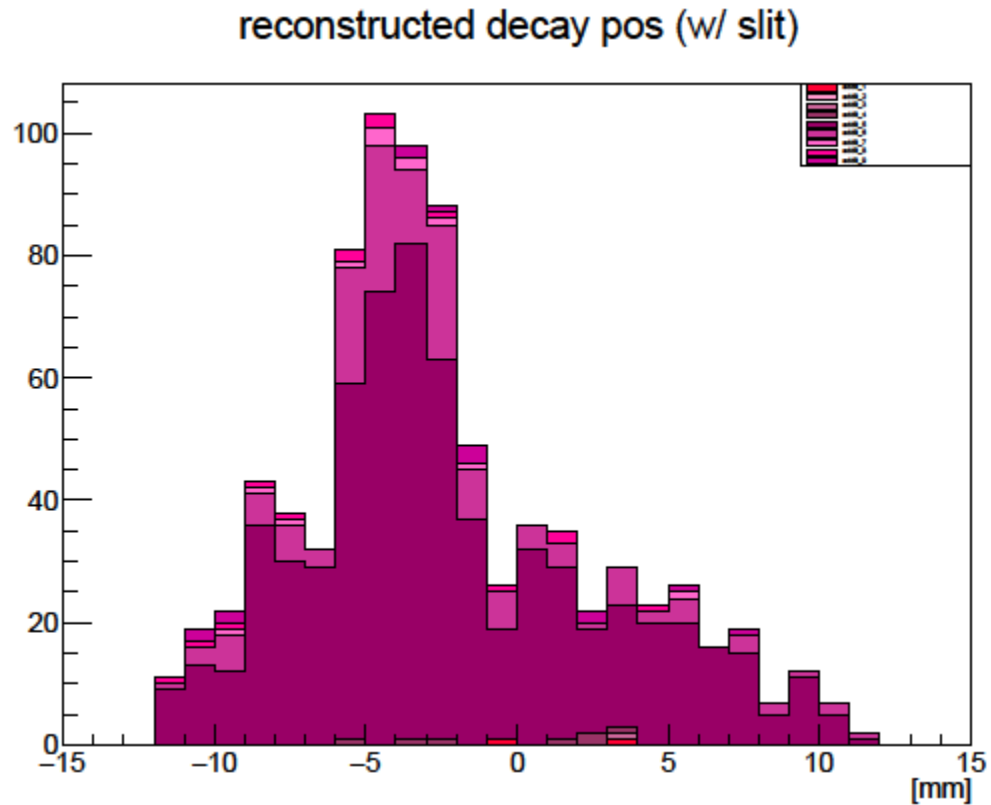
予備実験 セットアップ (DAQ)

- トリガーを中心に $3.75\mu\text{s}$ (150データ点) の波形を約6Hzで取得

day	#	イベント数	測定時間 (概算)
1	1	10000	30min
	2	10000	30min
	3	10000	30min
	4	10000	30min
	5	200000	10h
2	6	60000	3h
	7	10000	30min
	8	10000	30min
	9	10000	30min
	計	330000	16.5h

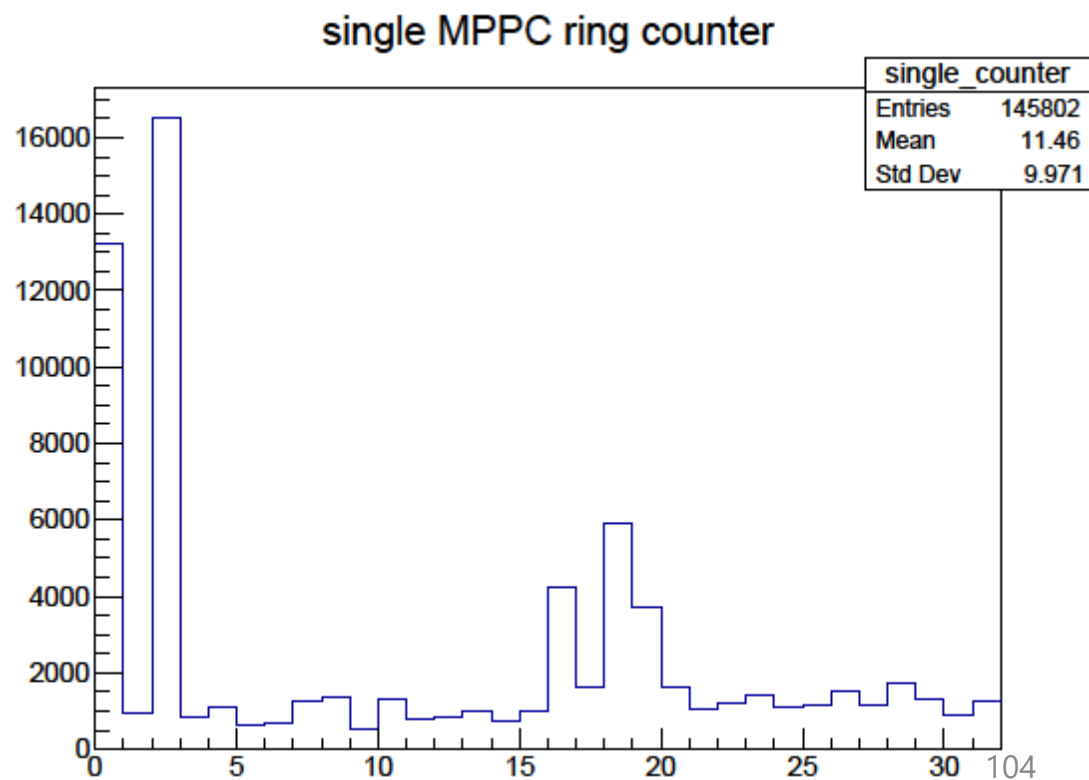
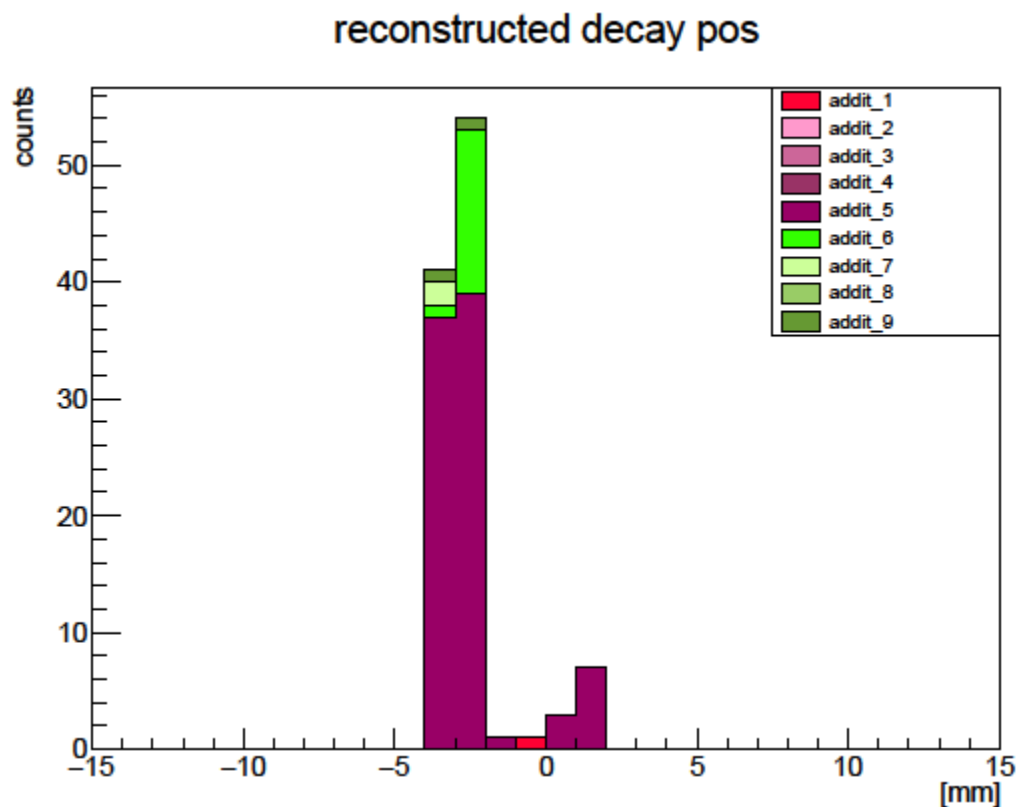
崩壊位置の再構成 - 結果

- -4mmにピーク？ Efficiencyを反映しているだけ？



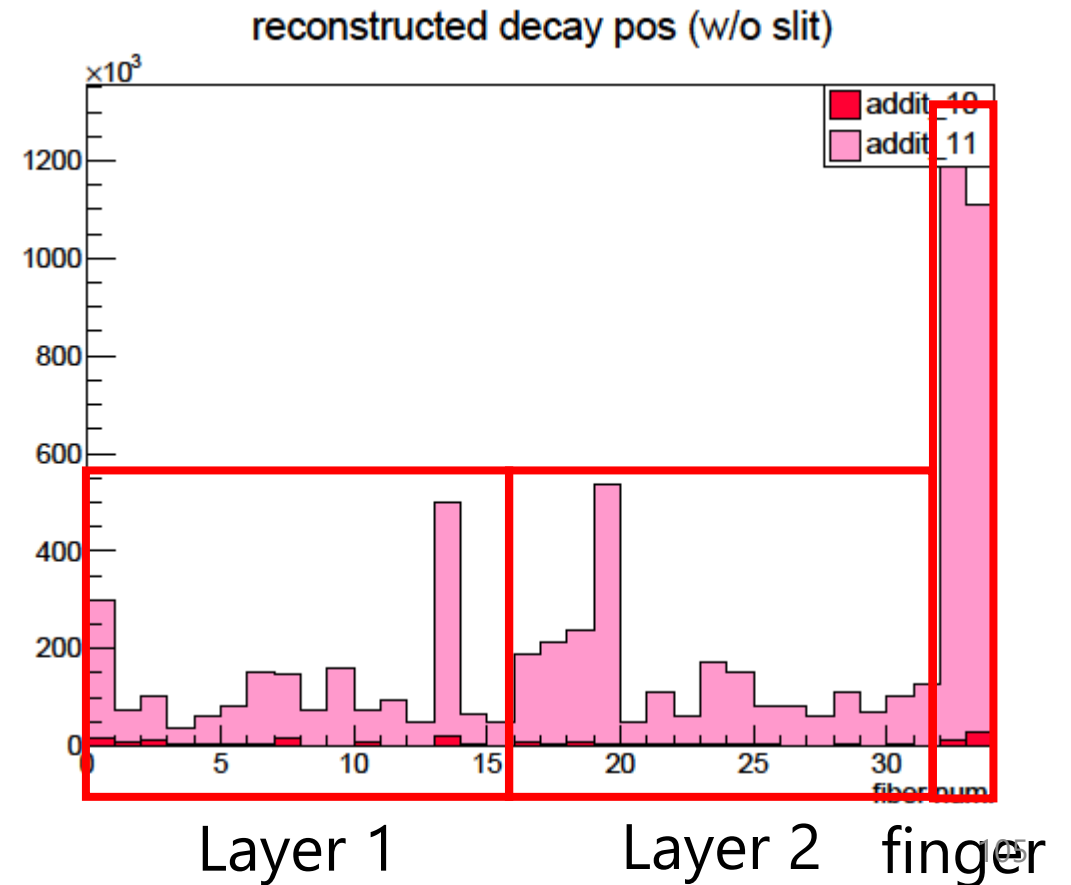
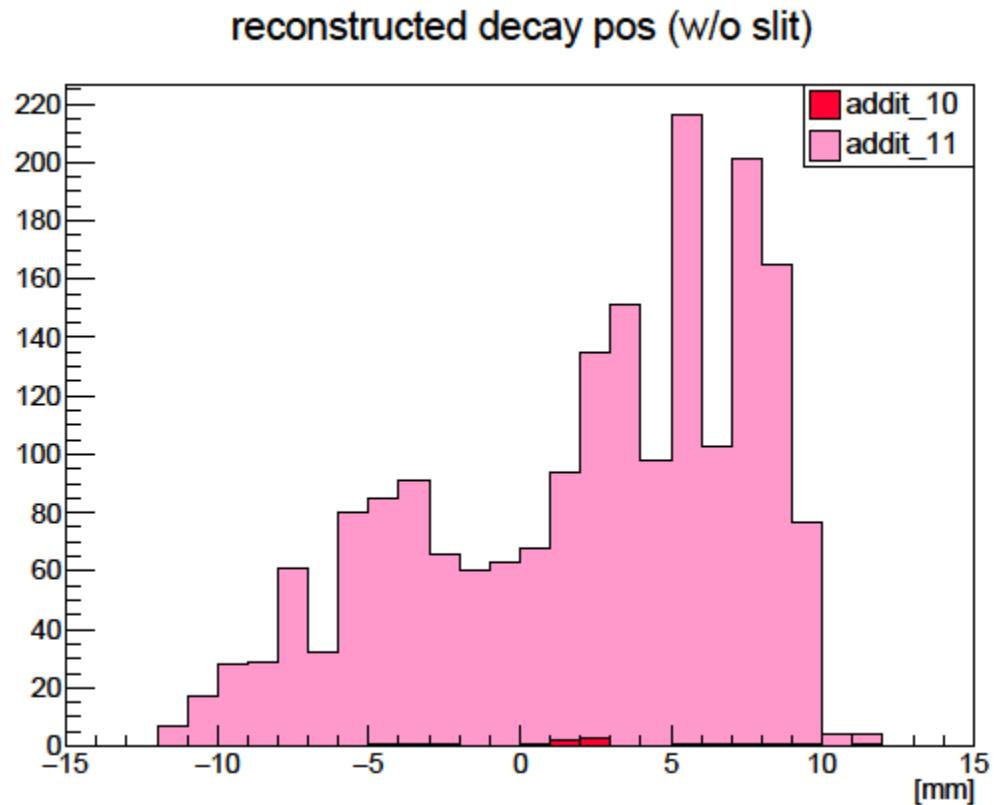
(補足) 垂直トラック - 結果

- -3mmにピーク？ Efficiencyを反映しているだけ？

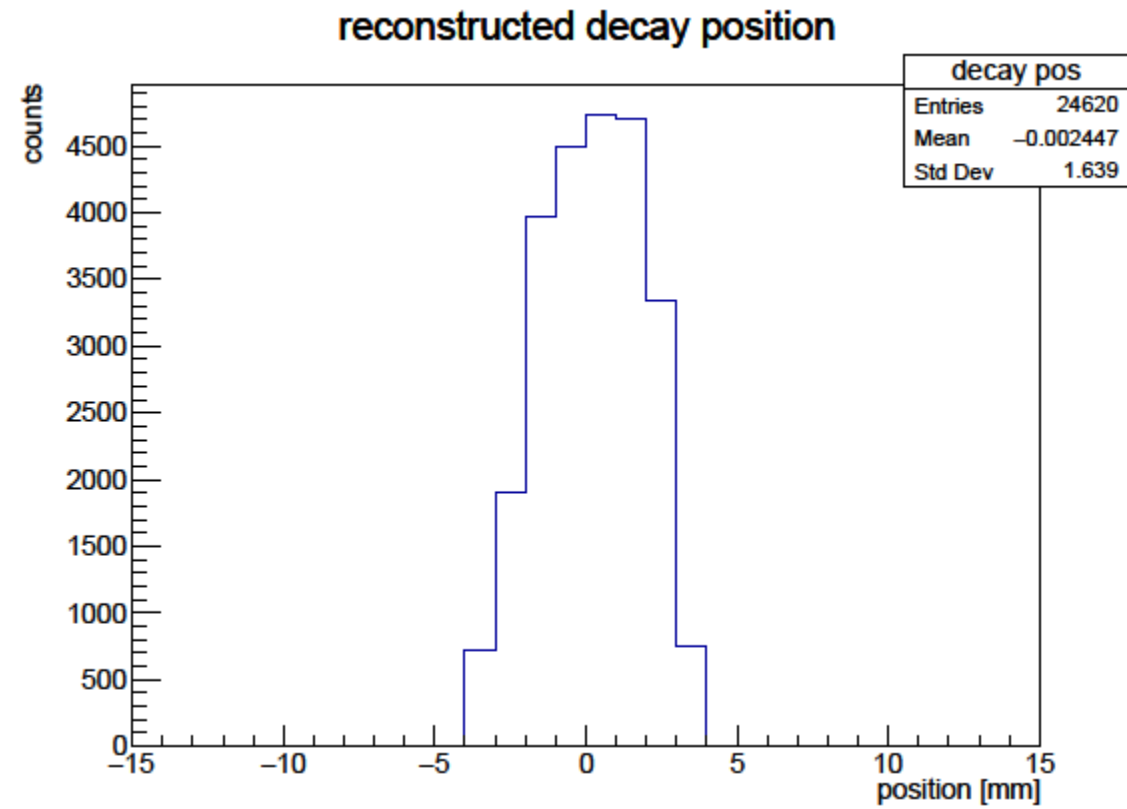


線源の位置を変えた場合

- 30cm離してスリット無し線源を置いた (310000 events)

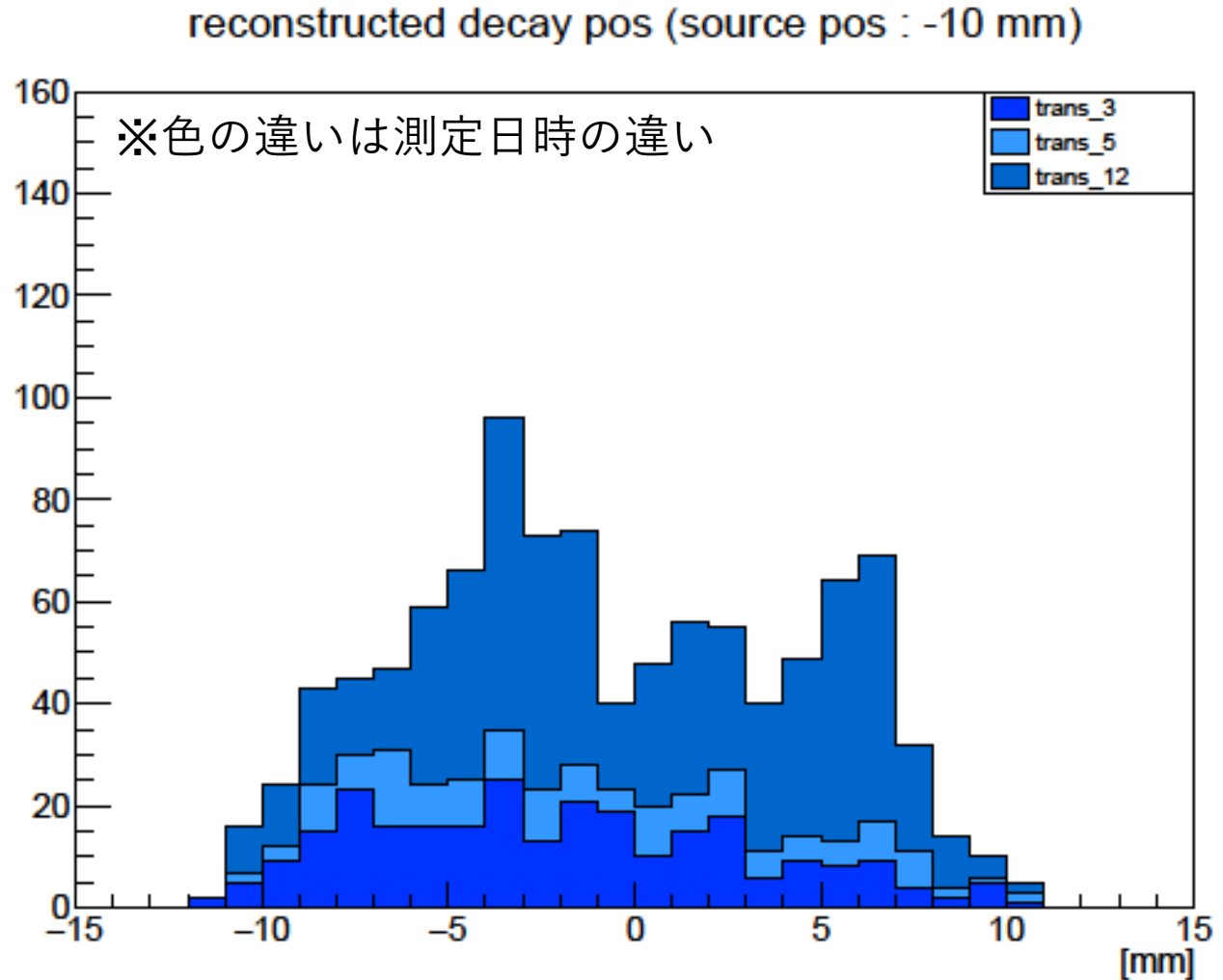


- 対応するToy



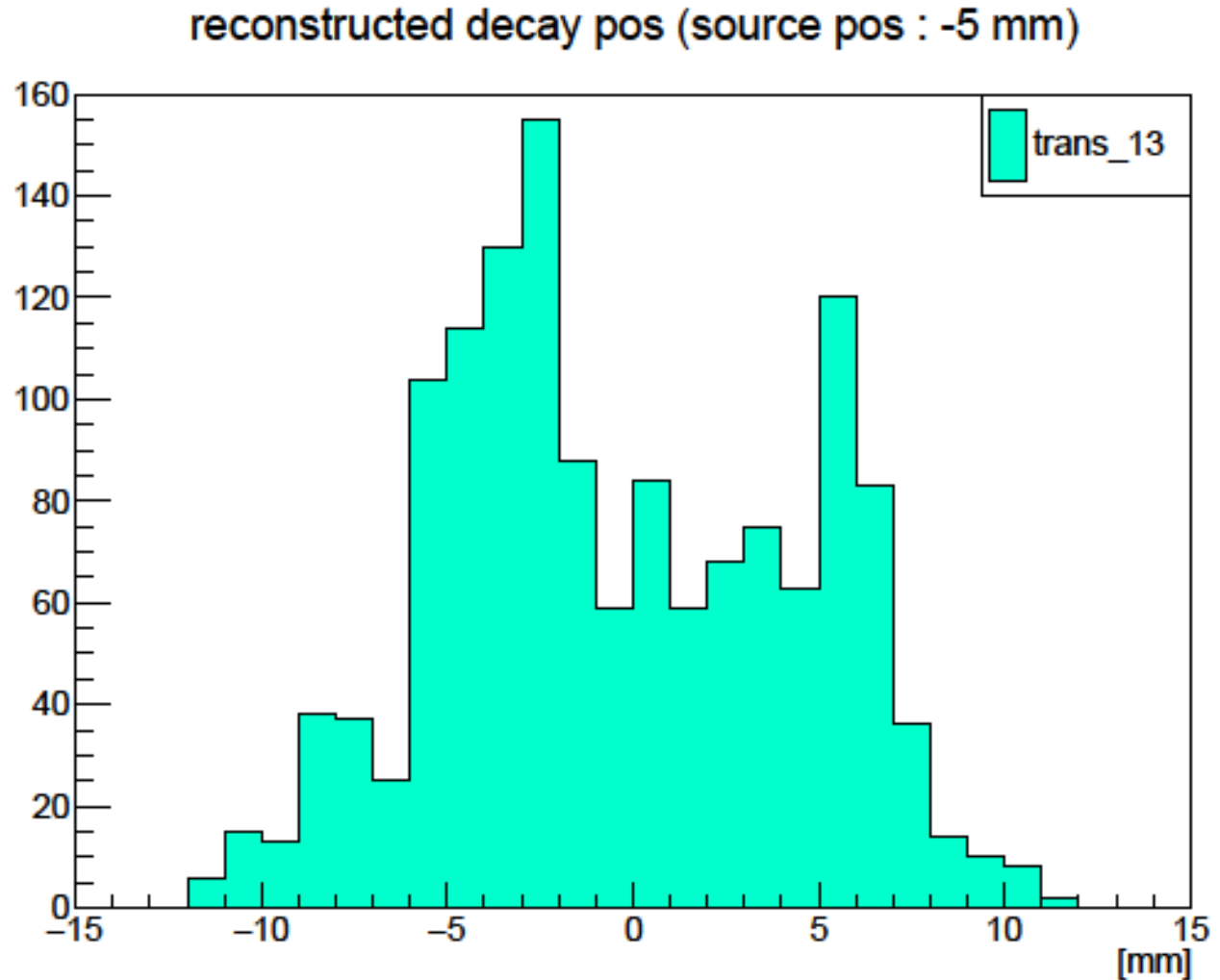
(補足) 可動ステージによる予備実験

- 線源位置 : -10 mm
- Thre. = $\min\{2\sigma\}$



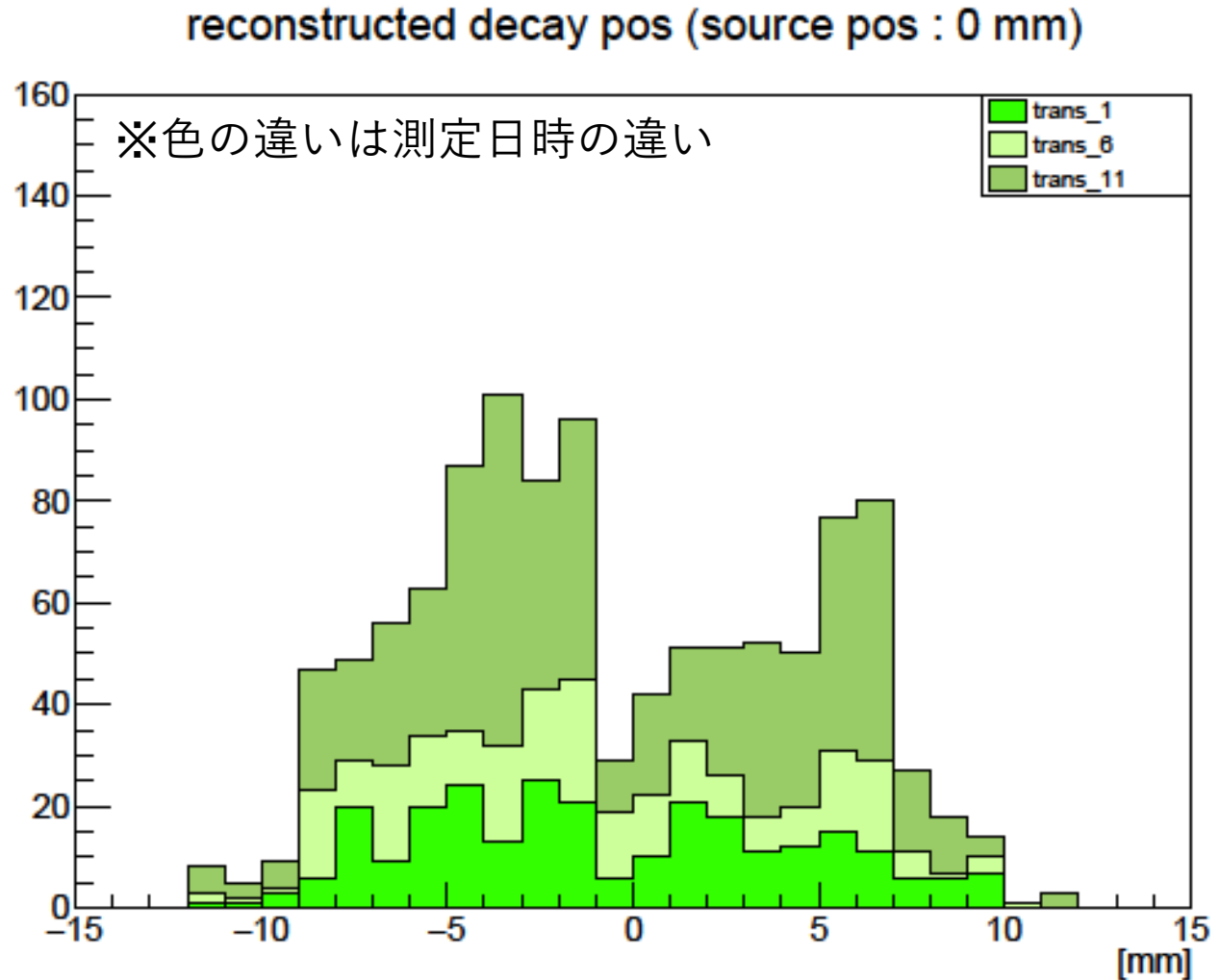
(補足) 可動ステージによる予備実験

- 線源位置 : -5 mm
- Thre. = $\min\{2\sigma\}$



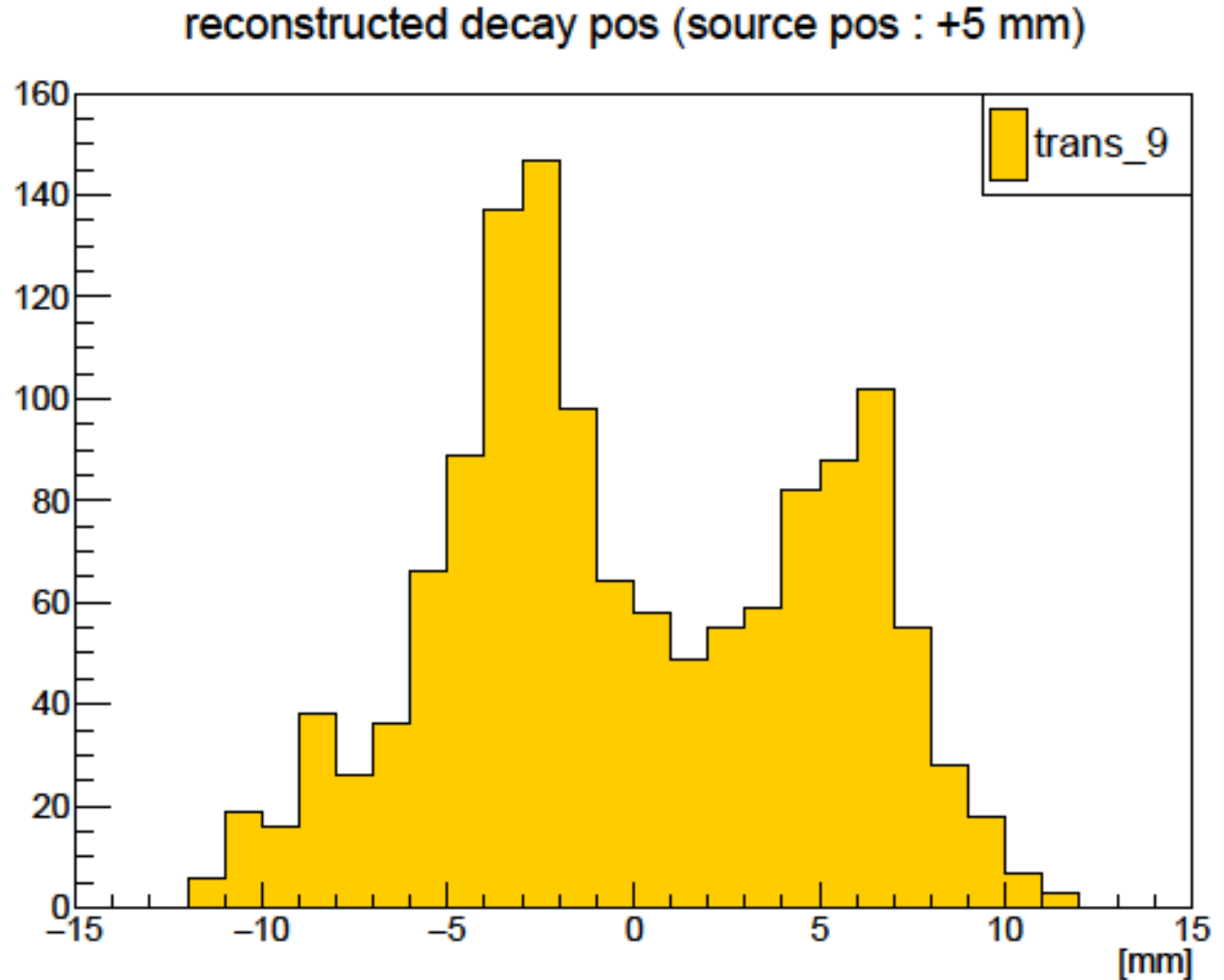
(補足) 可動ステージによる予備実験

- 線源位置 : 0 mm
- Thre. = $\min\{2\sigma\}$



(補足) 可動ステージによる予備実験

- 線源位置 : +5 mm
- Thre. = $\min\{2\sigma\}$



(補足) 可動ステージによる予備実験

- 線源位置 : +10 mm
- Thre. = $\min\{2\sigma\}$

