

ミューオンの質量測定

南條研究室

廣瀬 松田 石井

イントロダクション

ミューオンの質量を測定する

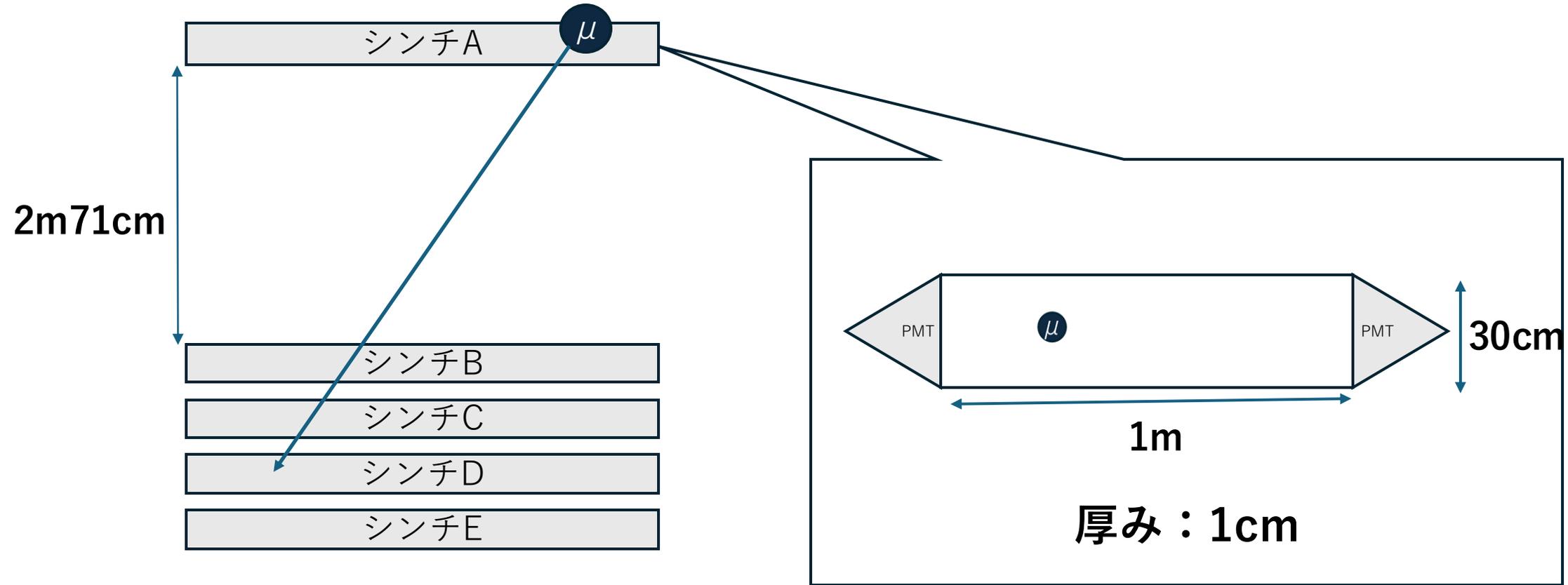
測定原理

$$E = K + m = \gamma m$$

なので、ミューオンの質量は下のよう求められる。

$$m = \frac{K}{\gamma - 1}$$

セットアップ



セットアップ

$$m = \frac{K}{\gamma - 1}$$

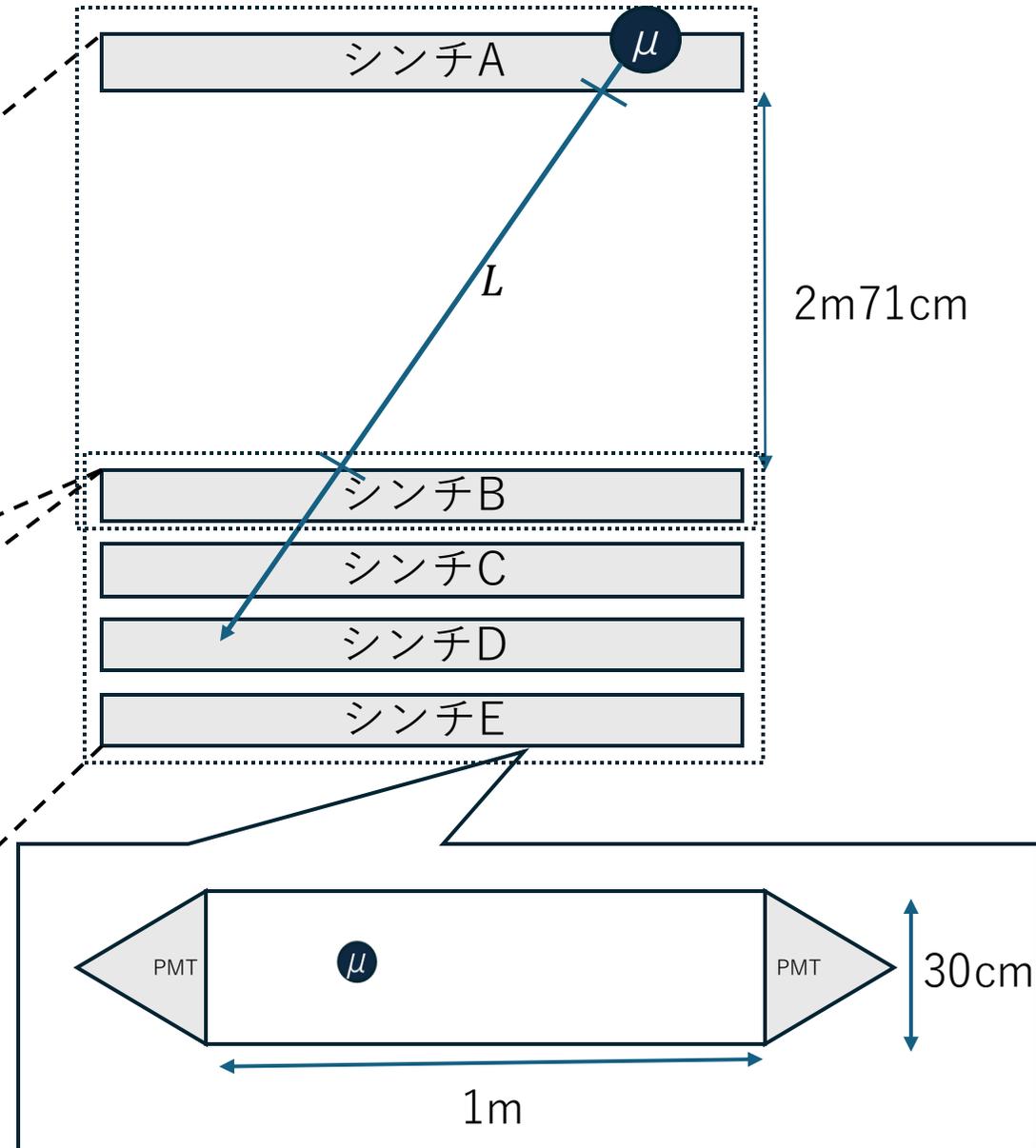
• γ

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{L}{TOF \times c}\right)^2}}$$

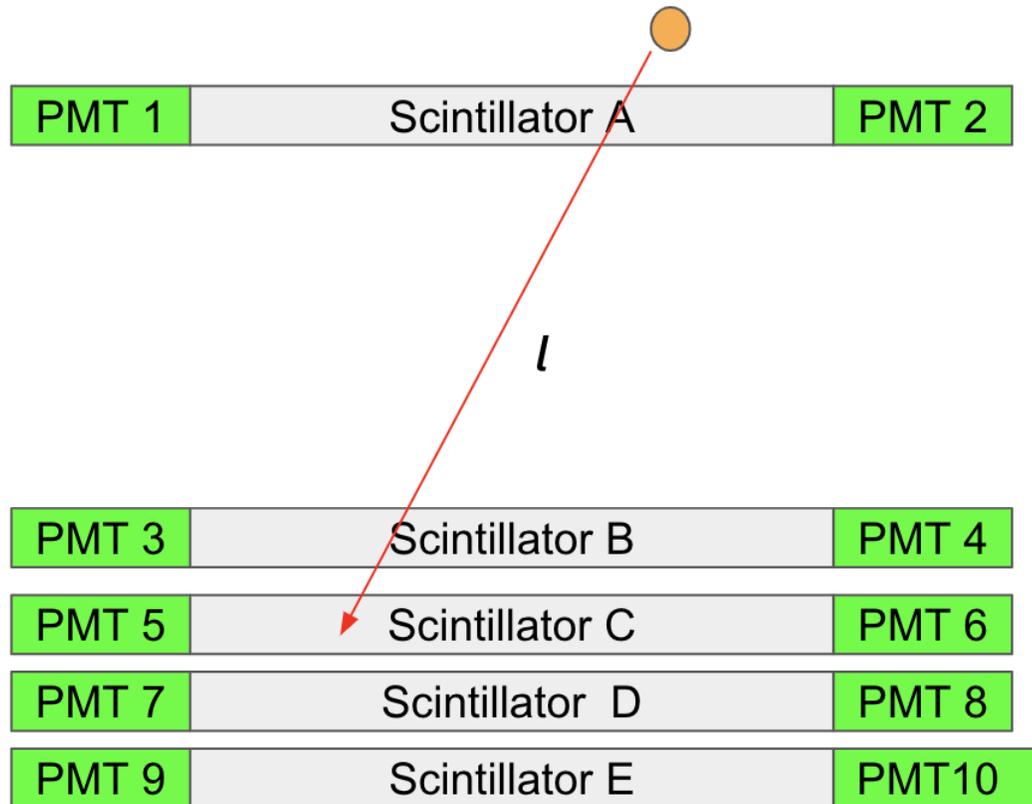
TOF \Rightarrow
シンチA,B間を
進むのに時間

• 運動エネルギー K

止まるまでにシンチで落としたエネルギー



DAQで探す事象

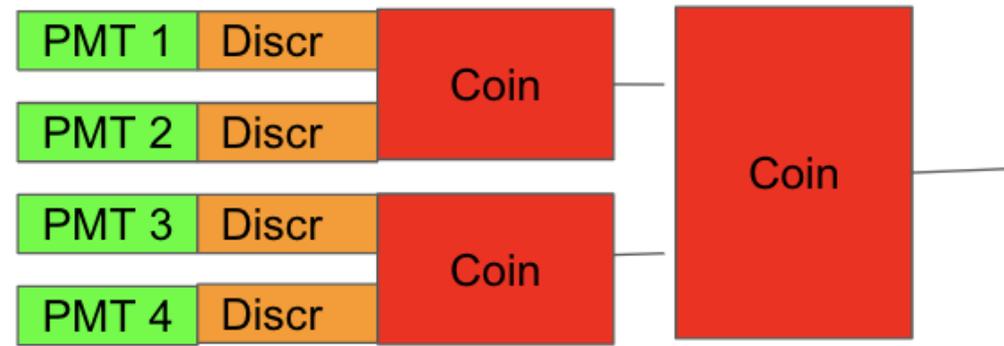


探す事象：シンチC、Dで止まる μ

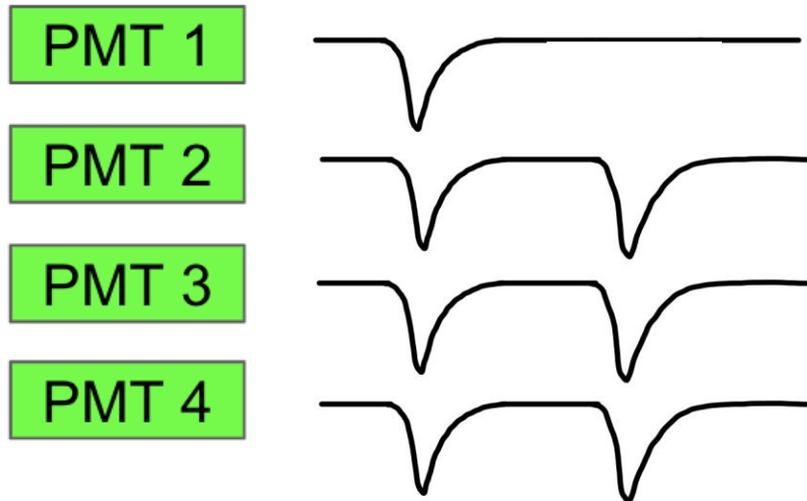
→シンチA,Bを通過している

→PMT 1、2、3、4が波形を出す

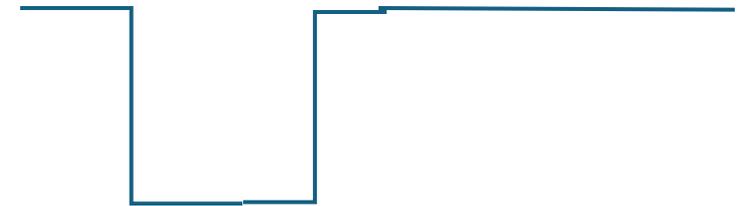
事象を選別するロジック回路



入力信号



出力信号

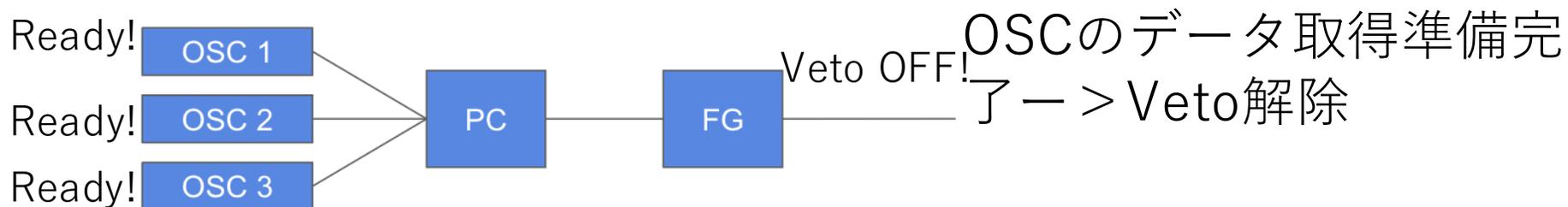


オシロの同期

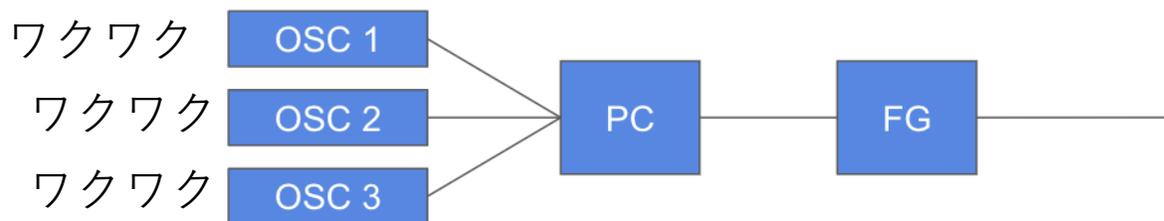
1. 初期状態



2. データ取得開始



3. トリガー待ち



4. データ保存後 1 に戻る

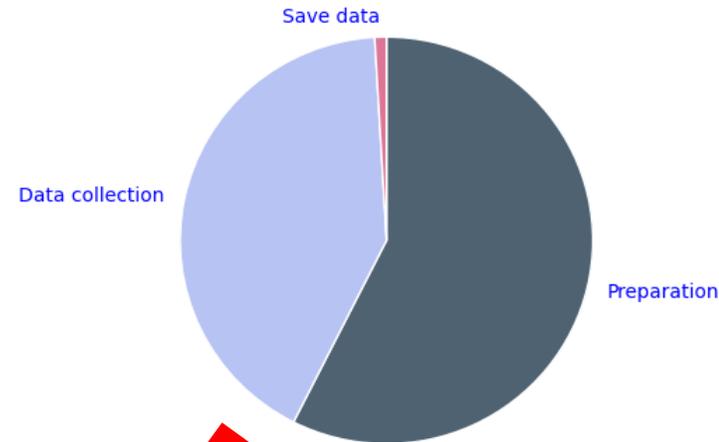
コインシデンスレートとDAQレート

- Coin rate: 1Hz
- DAQ イベント保存レート 0.39Hz

- ボトルネックプロセス：オシロとの通信
- 問題：オシロの遅い通信速度 **×** Sequentialな通信処理

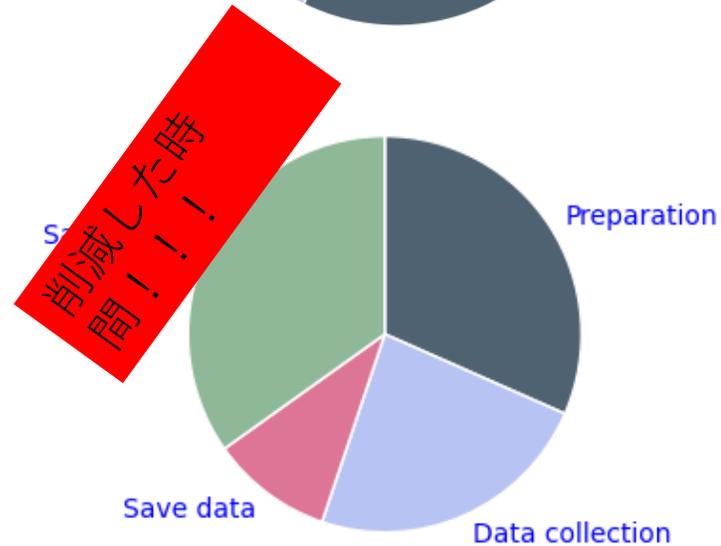
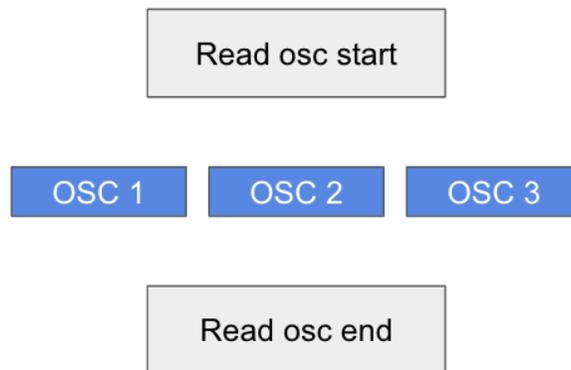
DAQレート改善に向けた通信の並列化

改善前



0.39Hz

改善後
(並列化後)



0.69Hz

データ量

1/16 ~ 2/6 (22日)

データ量 : 545895

γ

γ の測定方法

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \beta = \frac{L}{c \times TOF}$$

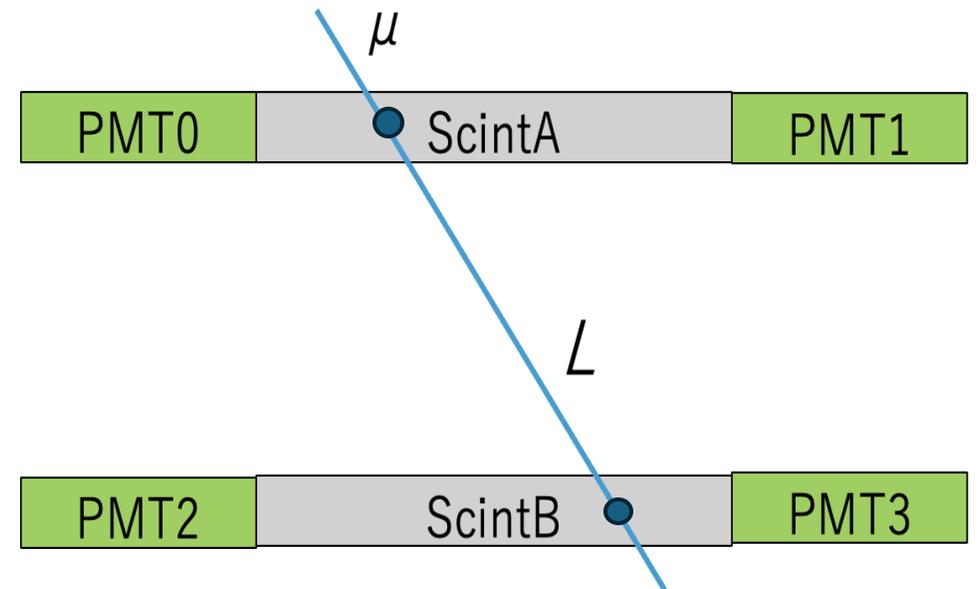
時間(TOF)Tに必要な情報

- ・シンチレータをミューオンが通過した時間

距離 L に必要な情報

- ・シンチレータをミューオンが通過した位置

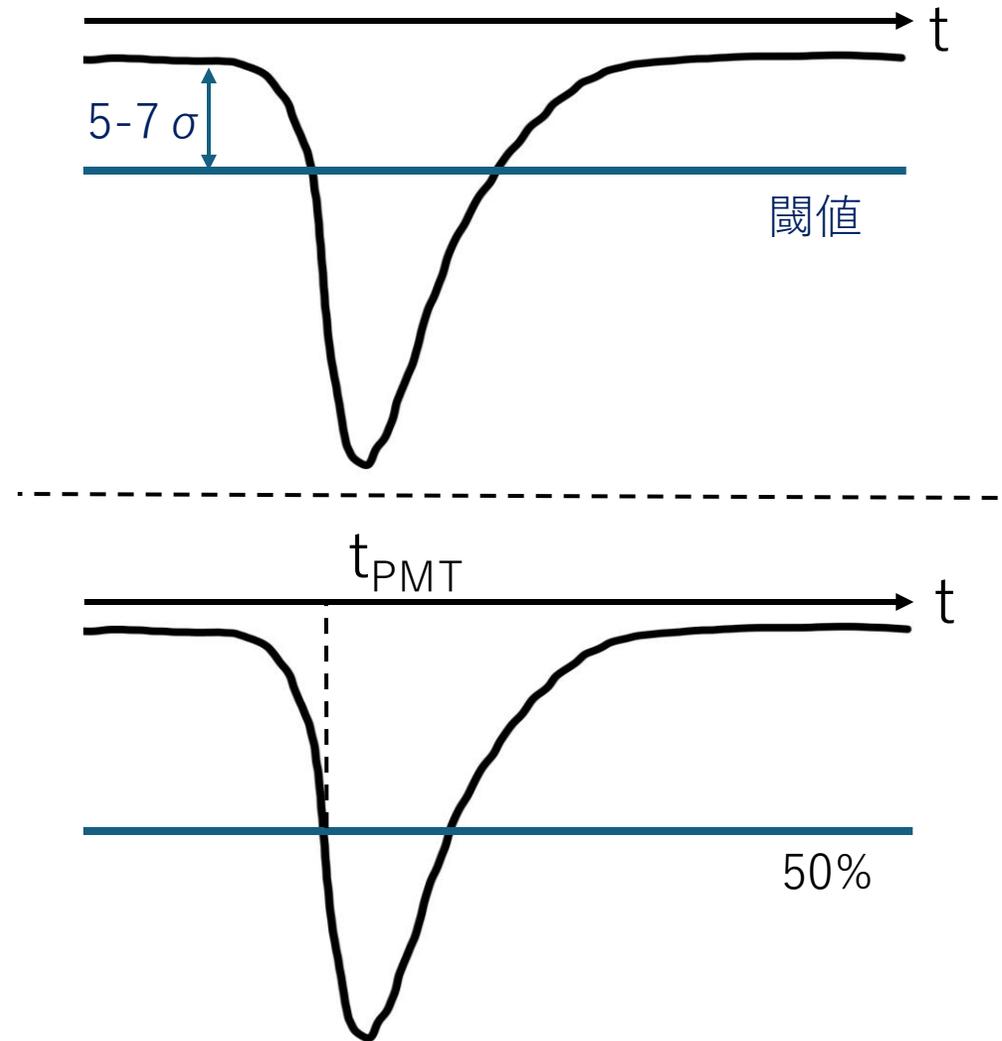
→これをオシロスコープの波形から取得



波形解析

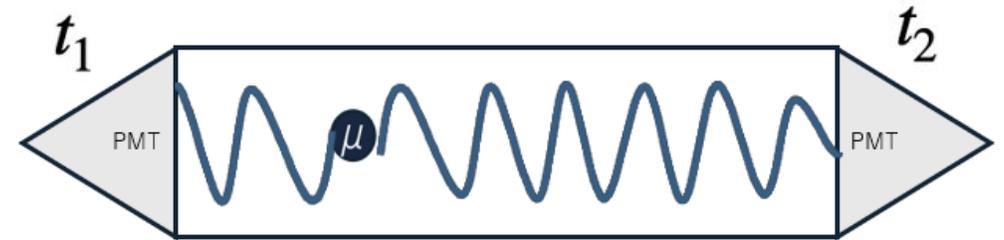
パルス：
PMTごとの閾値を超えているもの

パルスのタイミング：
50% constant fraction
(ピークの50%に達するタイミング)



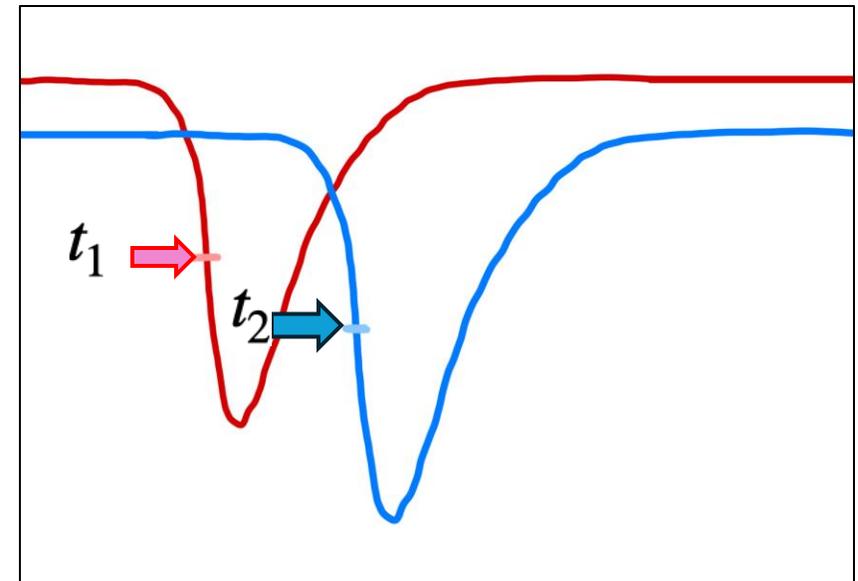
両読シンチレータの波形解析

シンチレータのヒット：
両端のPMTにパルスがある

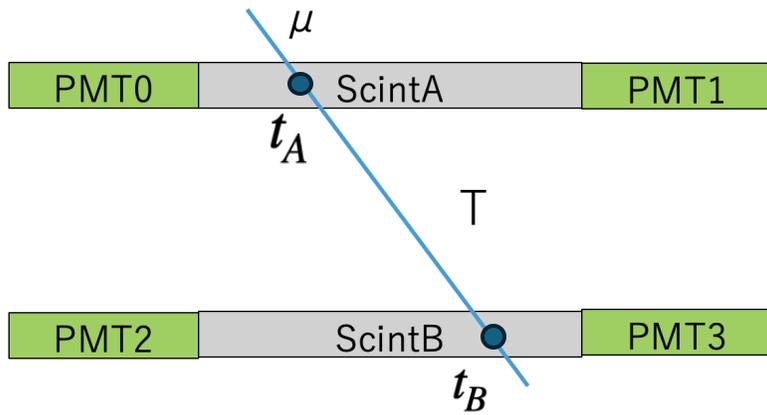


ミューオンのヒット位置によって
 t_1 、 t_2 の値が変わる

シンチレータのヒット時間： $(t_1 + t_2)/2$



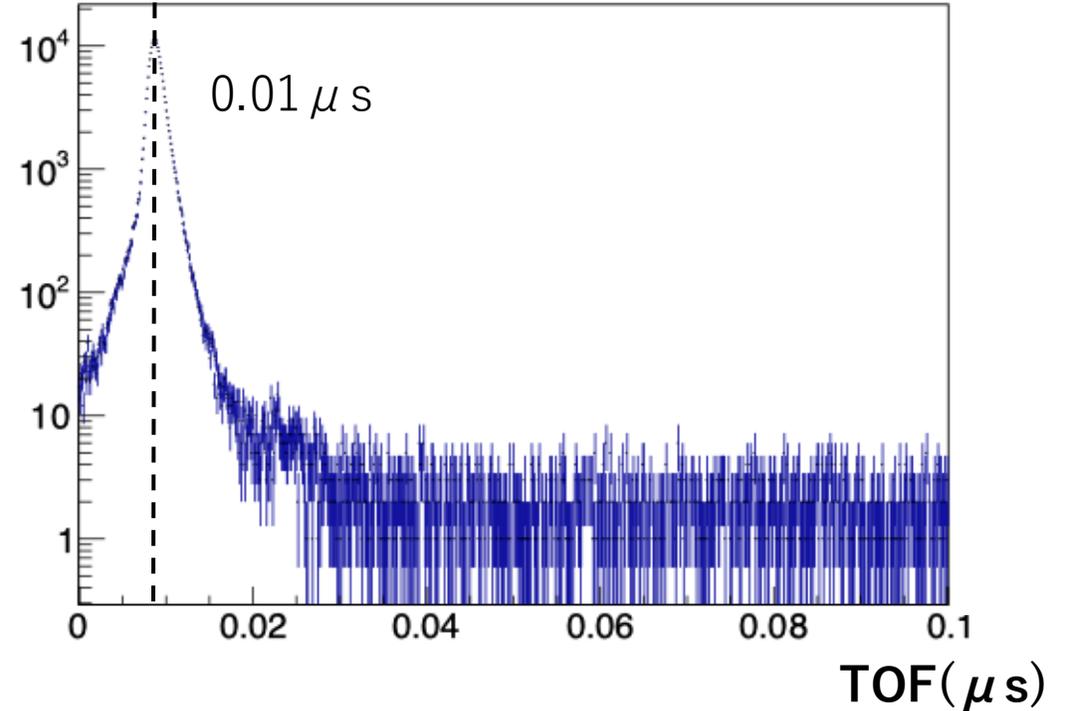
TOF測定



$$T = t_B - t_A - T_0$$

T_0 : ケーブルなどでの時間差の補正項
($L=0$ での時間差測定で補正)

TOF

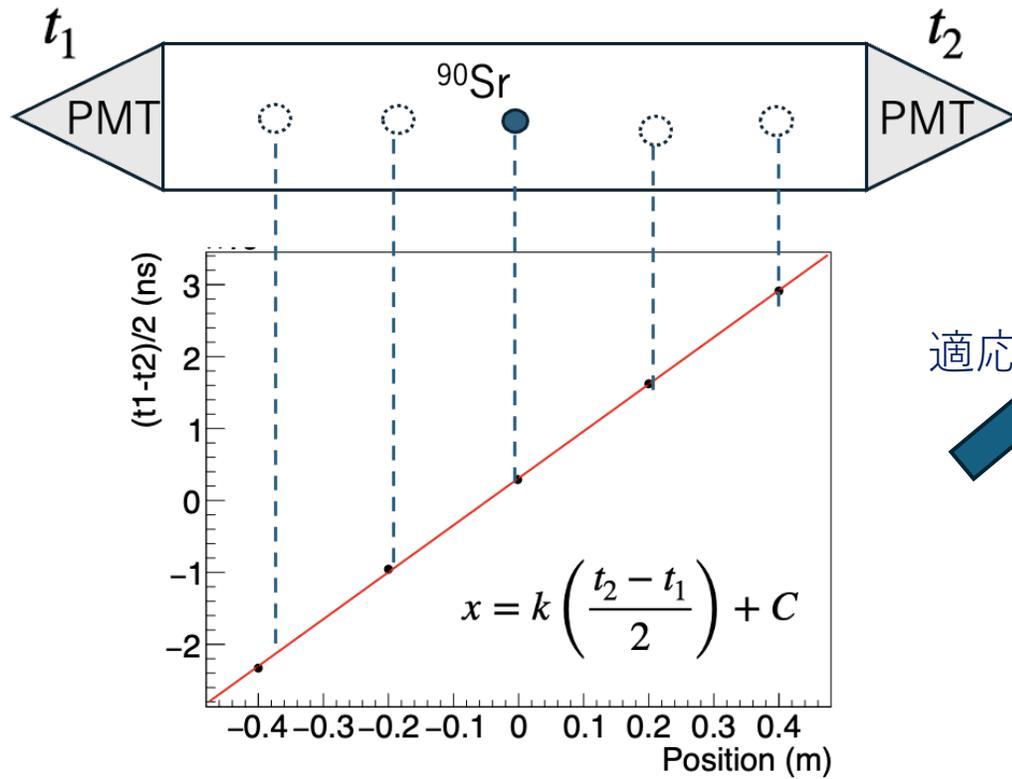


$$L/c \simeq 0.01 \mu s \quad L = 2.71 \text{ m}$$

ミューオンの速度 \doteq 光速

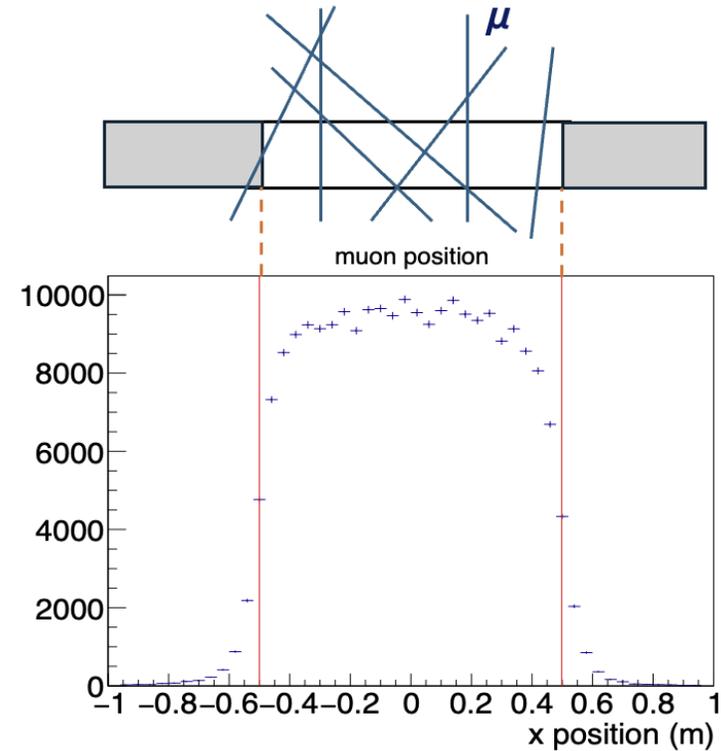
位置測定

位置較正



適応

較正式の適応



シンチレータの範囲にヒットがある
→較正できている

Δy 補正

- Y軸方向のヒットポジション

PMTでの時間差からは判別がつかない

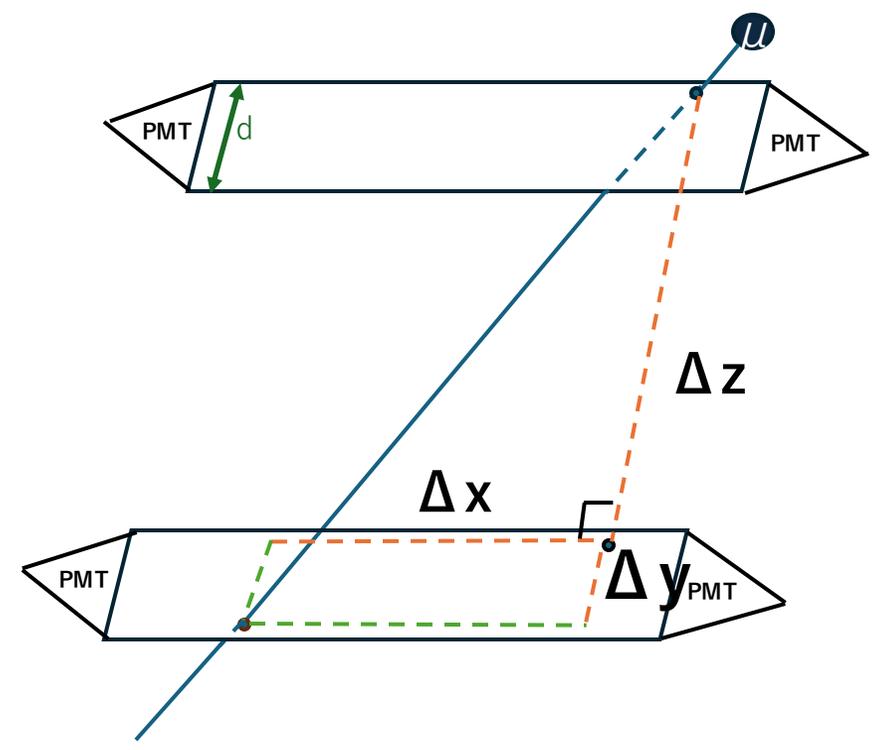
$$L = \sqrt{\Delta z^2 + \Delta x^2 + \Delta y^2}$$

↓
分からない

$\Delta y = 0$ とすると距離を短く推定してしまう



シンチA,Bでのy軸方向の変位
 $\Delta y^2 = (y_A - y_B)^2$
 の**期待値**で補正



シンチのy方向の幅 $d = 30[\text{cm}]$

$$|\Delta y^2| = \frac{1}{d^2} \iint_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} dy_A dy_B (y_A - y_B)^2$$

$$= \frac{d^2}{6} \quad \beta \text{ 約1\%の補正}$$

γ 結果

- シンチA,B間での時間差

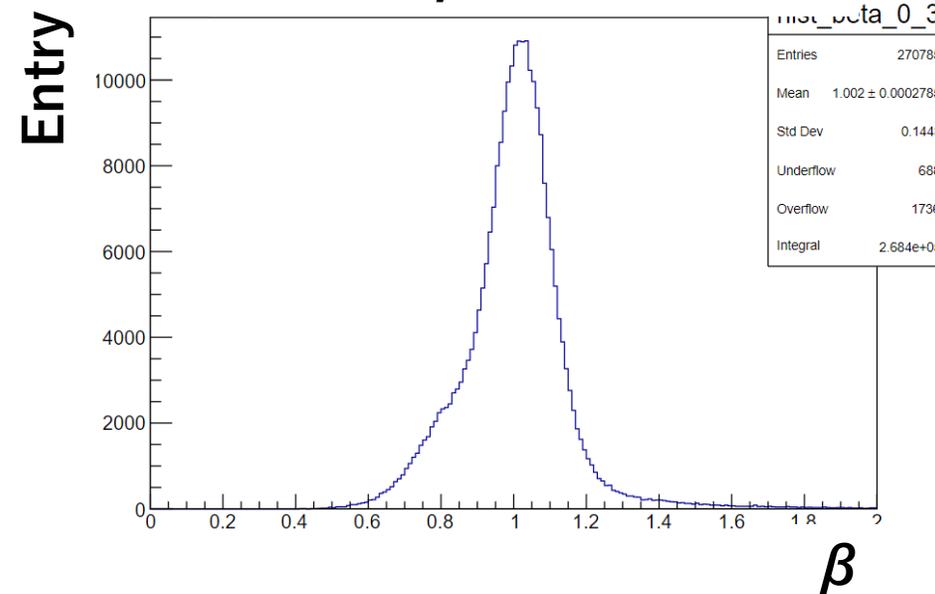
→ 時間**TOF**

- シンチA,B内での位置

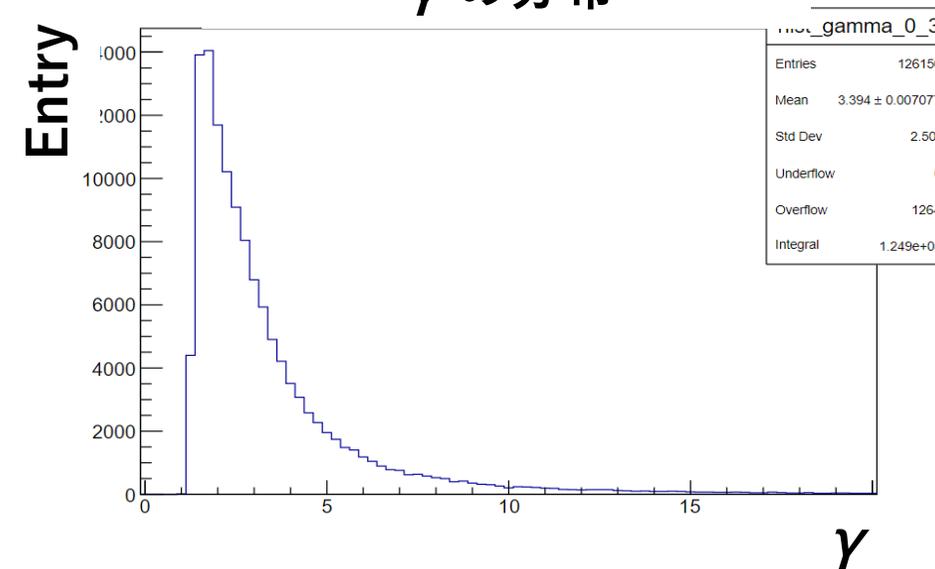
→ 距離**L**

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{L}{TOF \times c}\right)^2}}$$

β の分布



γ の分布



運動エネルギー

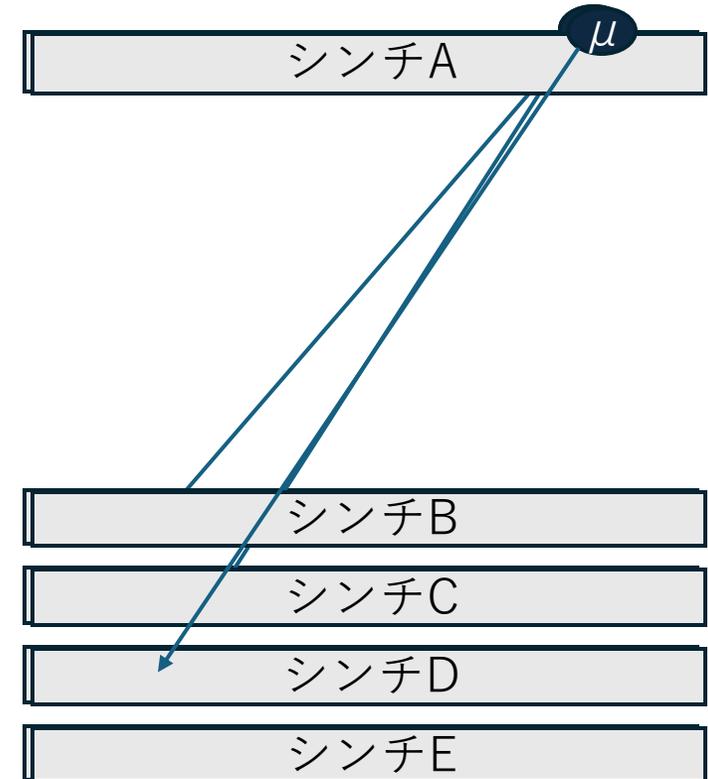
ミューオンの運動エネルギー

ミューオンの運動エネルギー K_{muon}



ミューオンが止まるまでに落とした
エネルギー

- ミューオンがシンチで落とす平均的なエネルギーを使ってエネルギー較正する。



$$K_{muon} = K_{muon} - \Delta E_B - \Delta E_C - \Delta E_D$$

エネルギー較正

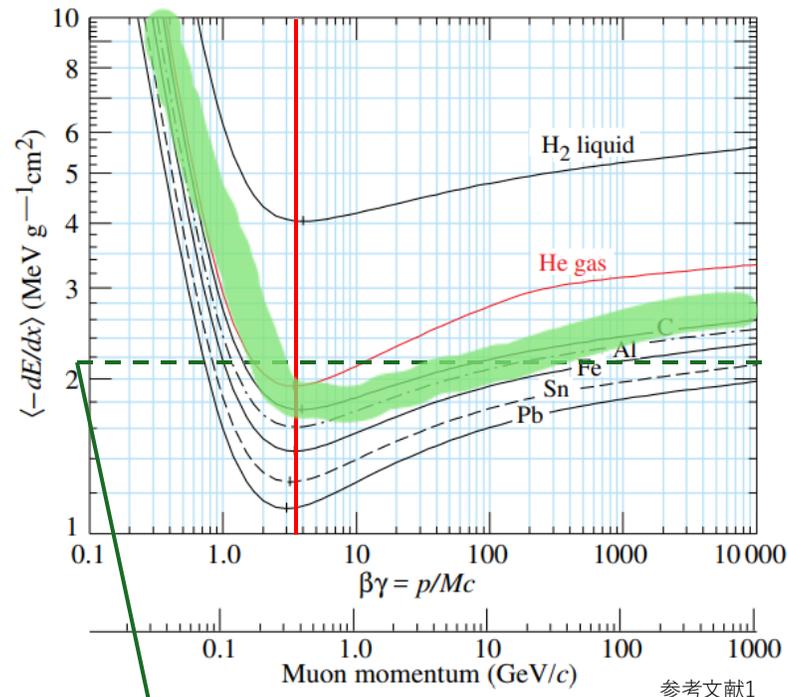
- 落とすエネルギーの平均値は $mip(\beta\gamma > 3.5)$ を超えるとほぼ一定

- 平均的に落とすエネルギーを波高分布の平均値と対応づける。

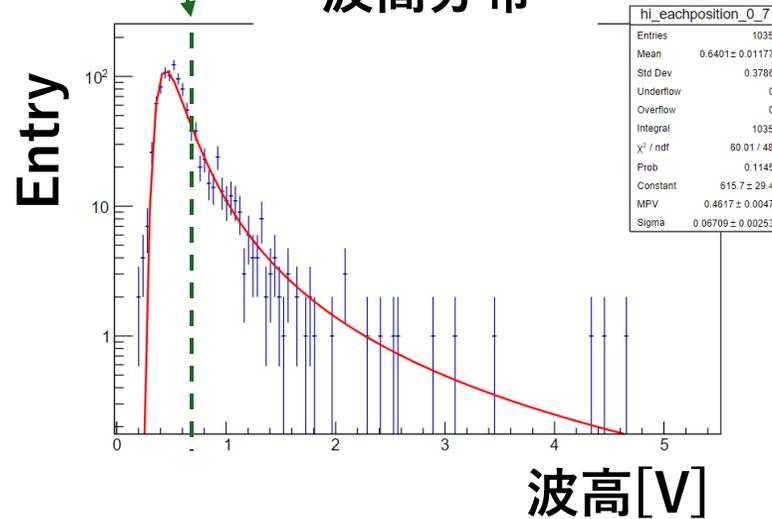
- イベント条件

$\beta\gamma > 3.5$ & 経路が垂直に近い

炭素



波高分布



位置と波高の関係

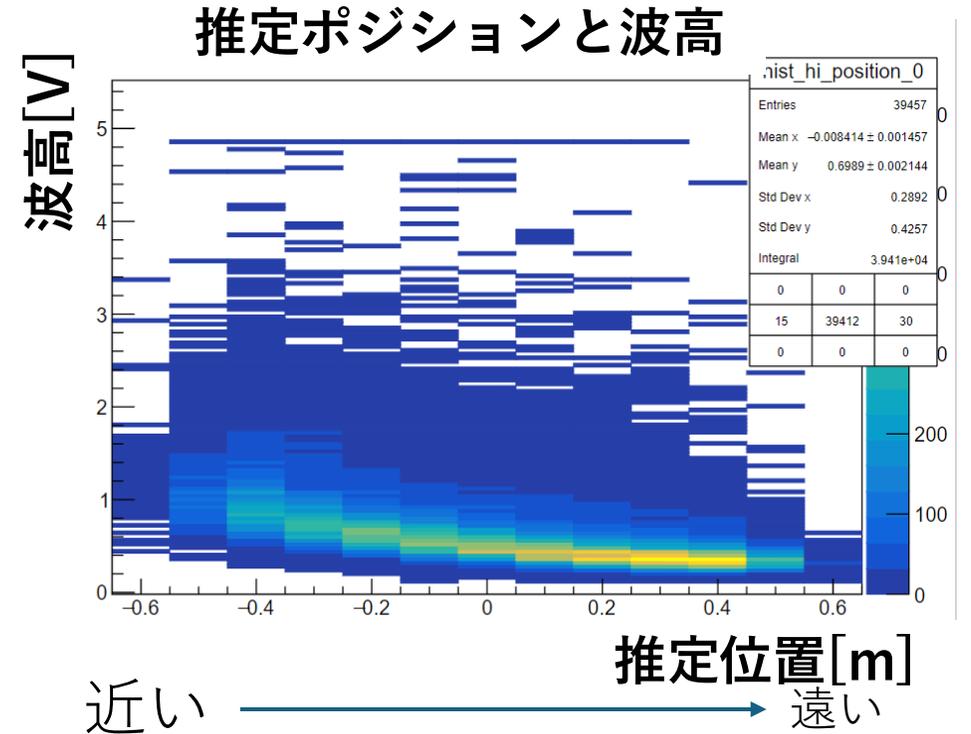
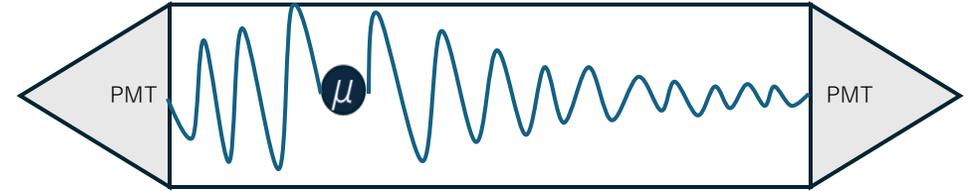
- ミューオンのヒット位置とPMTとの距離によって波高が**減衰**



推定位置ごとに
エネルギー較正する

- シンチで落としたエネルギー

$$\Delta E_{scint} = \frac{\Delta E_{PMT1} + \Delta E_{PMT2}}{2}$$



較正結果

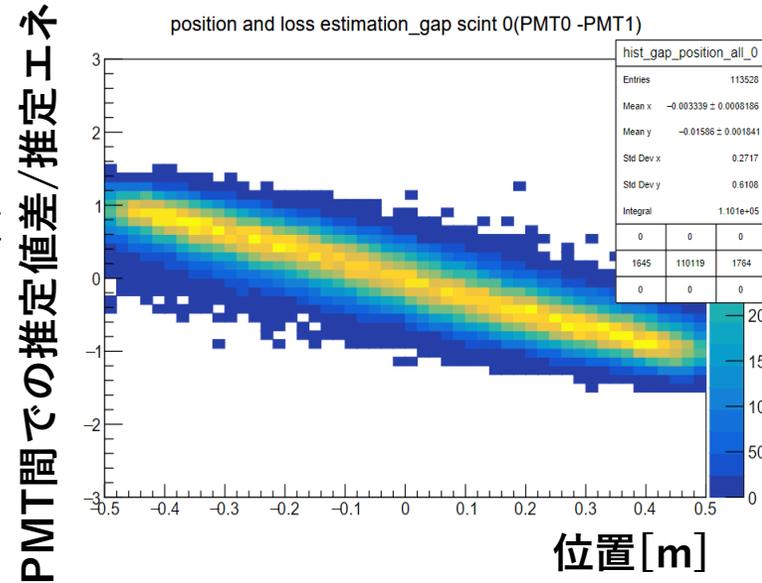
- シンチで落とすエネルギーは一緒



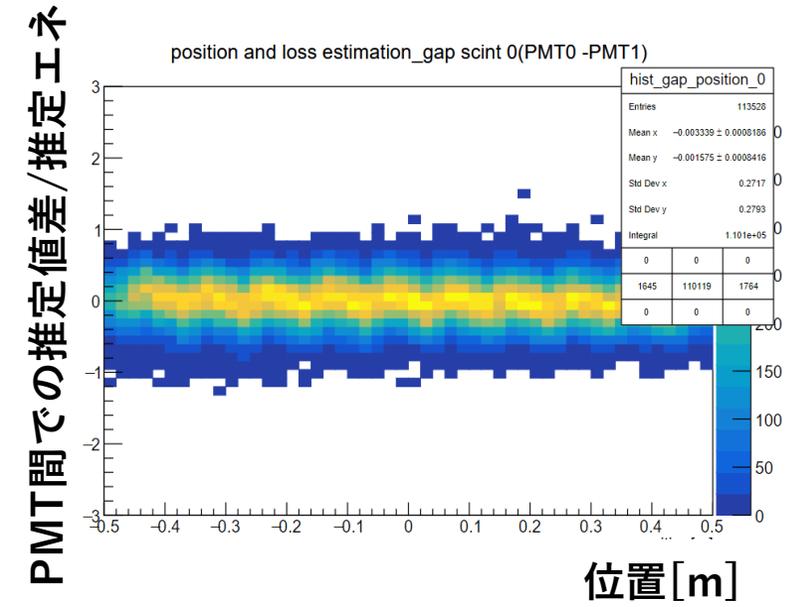
PMT間で同じエネルギーを推定してほしい

- 位置の影響を考慮できている
- エネルギー測定の精度を上げることができた

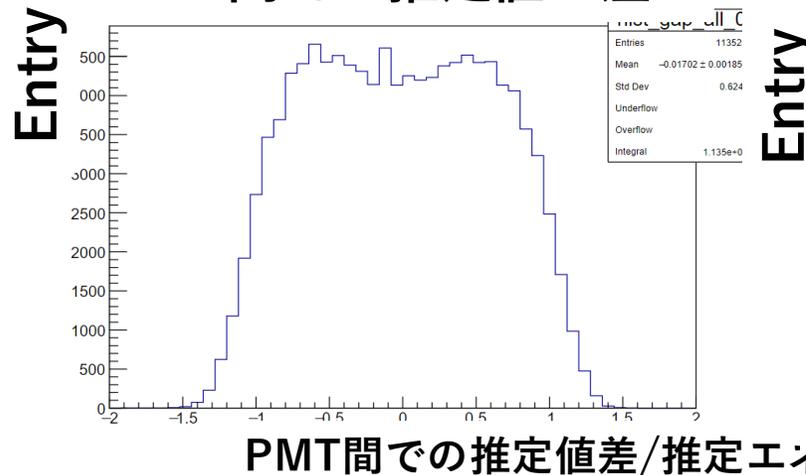
位置考慮なし較正



位置考慮あり較正



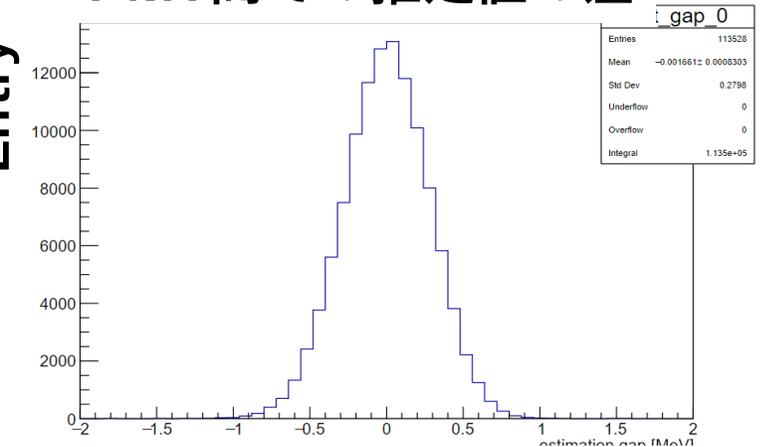
PMT間での推定値の差



PMT間での推定値差/推定エネ

標準偏差0.62

PMT間での推定値の差



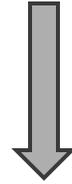
PMT間での推定値差/推定エネ

標準偏差0.28

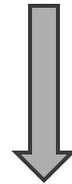
ミューオン質量測定のためのEvent Selection

質量を求めるためにはその粒子の持つ運動エネルギーが必要

$$(m = K/\gamma - 1)$$



セットアップ内でエネルギーを全て落として止まった事象を選別



ミューオンの崩壊で出てきた電子を要求

Stop Muon

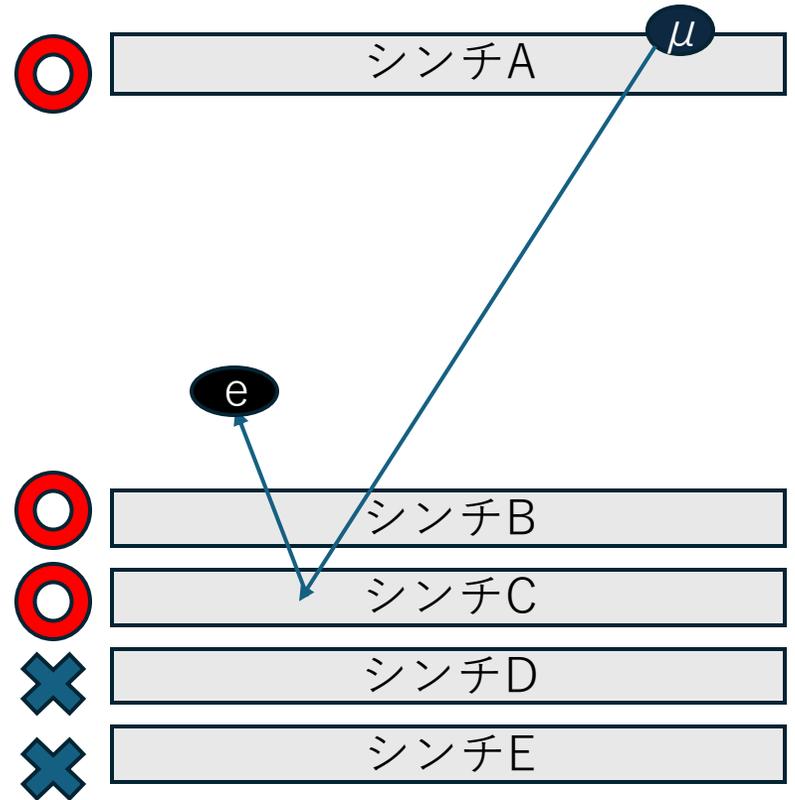
両端のPMTにトリガータイミングにパルスがあるかを確認



連続でパルスがあり、それ以降パルスがなくなった事象
= ミューオンが止まった可能性がある



ミューオンが崩壊して出てきた電子のパルスを探す



Electron from decay

★でトリガータイミング後シンチレータにパルスがある
→電子の候補



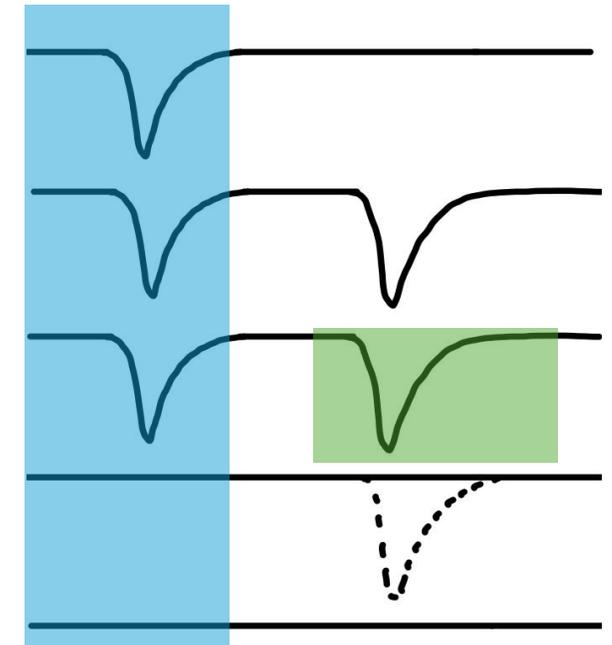
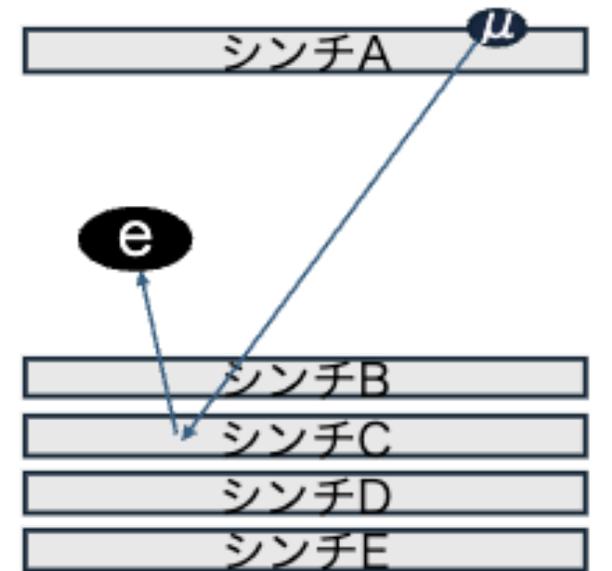
★の上または下のシンチレータで電子の候補と同時にパルス



★とその上下で同時にヒットがある = ミューオンらしい
として省く



★でのミューオンの位置と電子がでた位置が同じ事象



トリガー

Electron from decay

★でトリガータイミング後シンチレータにパルスがある
→電子の候補



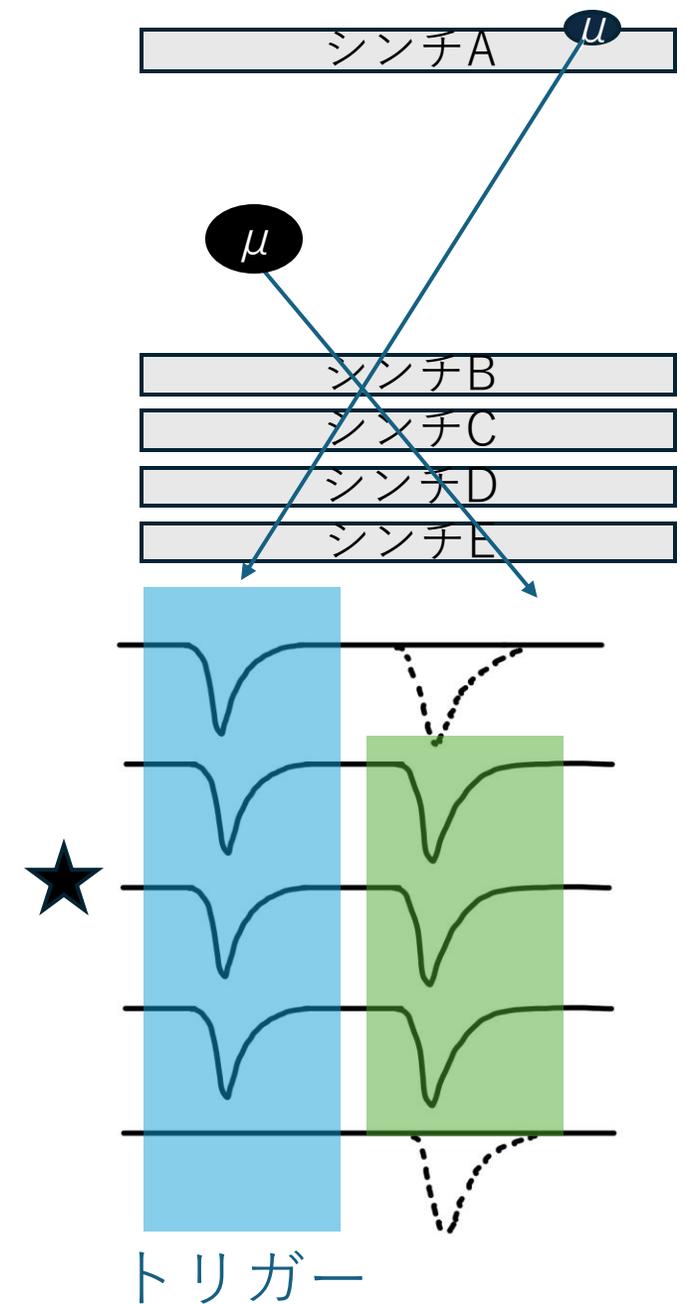
★の上または下のシンチレータで電子の候補と同時にパルス



★とその上下で同時にヒットがある = ミューオンらしい
として省く



★でのミューオンの位置と電子がでた位置が同じ事象



Electron from decay

★でトリガータイミング後シンチレータにパルスがある
→電子の候補



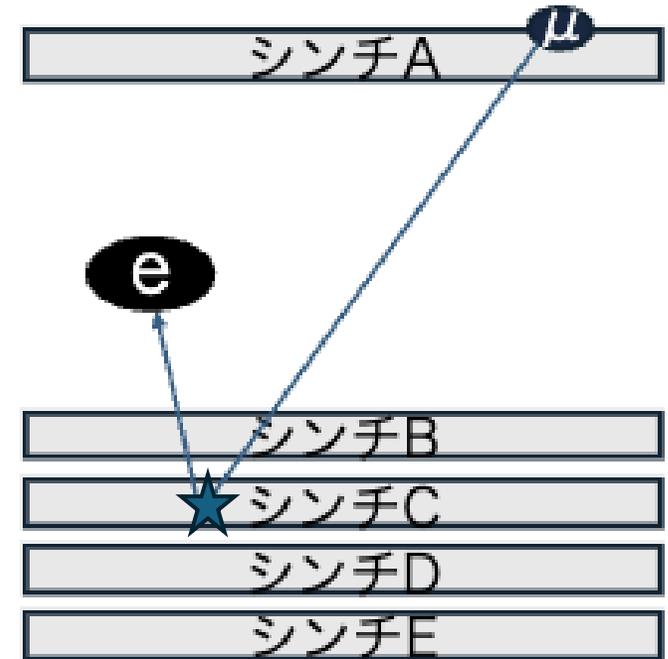
★の上または下のシンチレータで電子の候補と同時にパルス



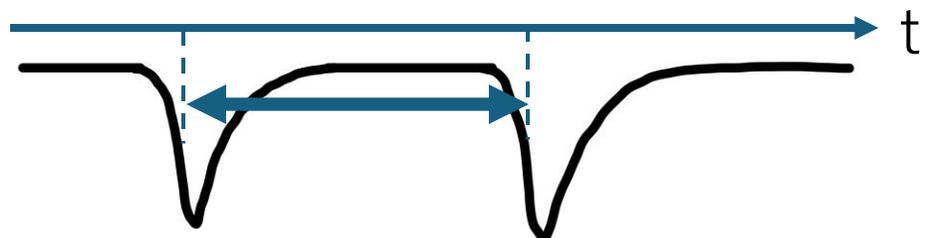
★とその上下で同時にヒットがある = ミューオンらしい
として省く



★でのミューオンの位置と電子がでた位置が同じ事象



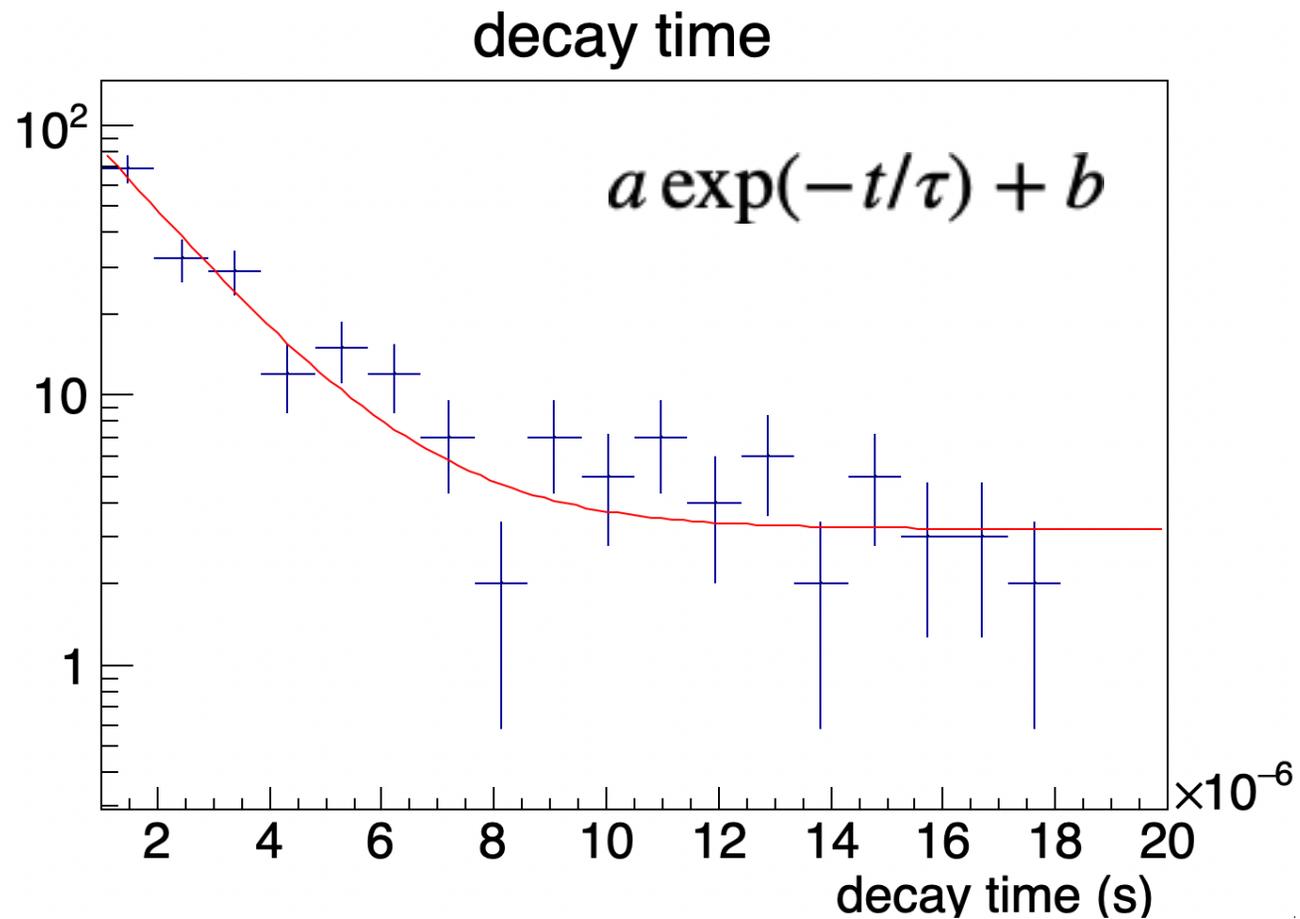
寿命曲線



測定した寿命 : $1.7 \pm 0.3 \mu\text{s}$

PDG : $2.1969811 \pm 0.0000022 \mu\text{s}$

ミュオンが止まっている！



Simulationで解析の仮定の影響を考える

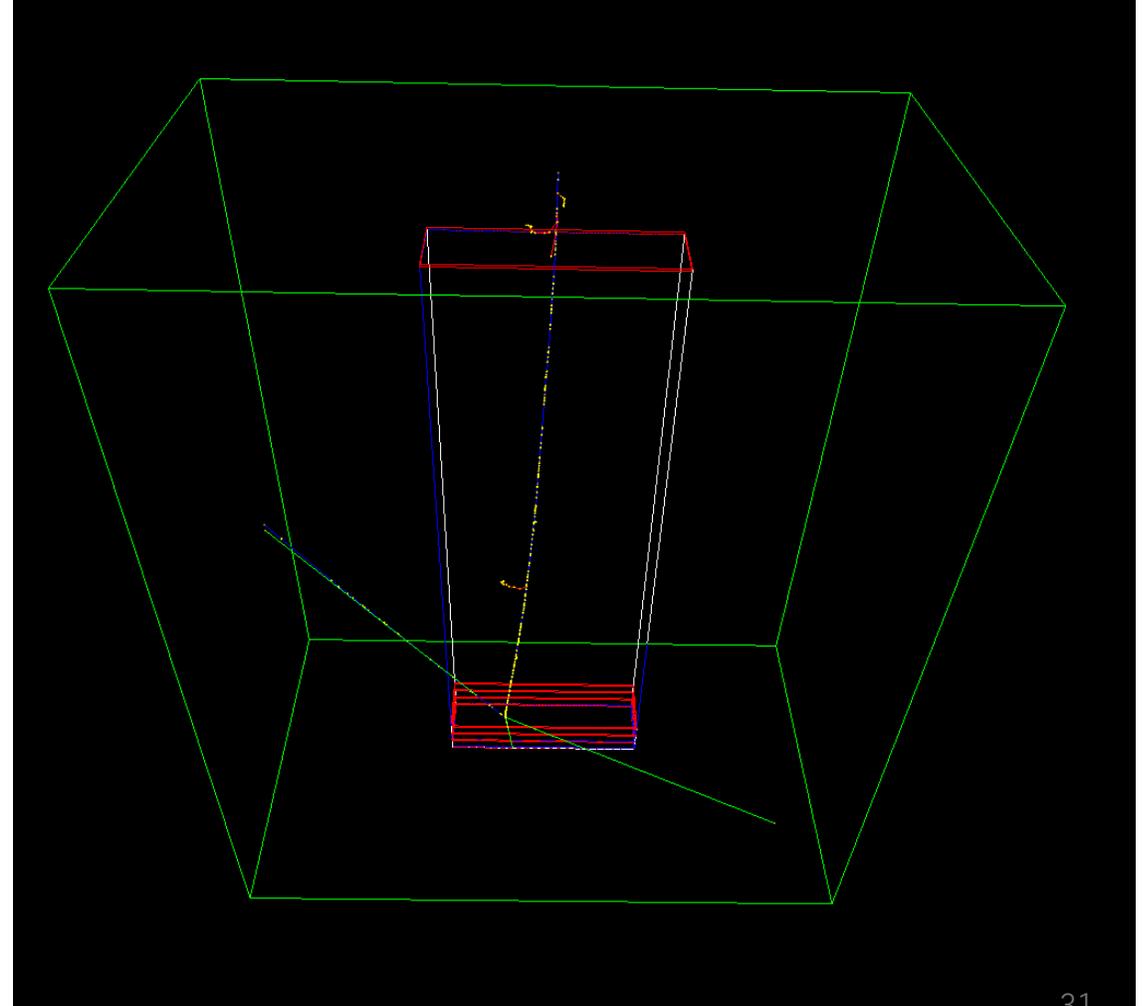
$$m_{\mu} = \frac{K}{\gamma - 1}$$

質量の誤差→K、 γ の誤差

解析での仮定

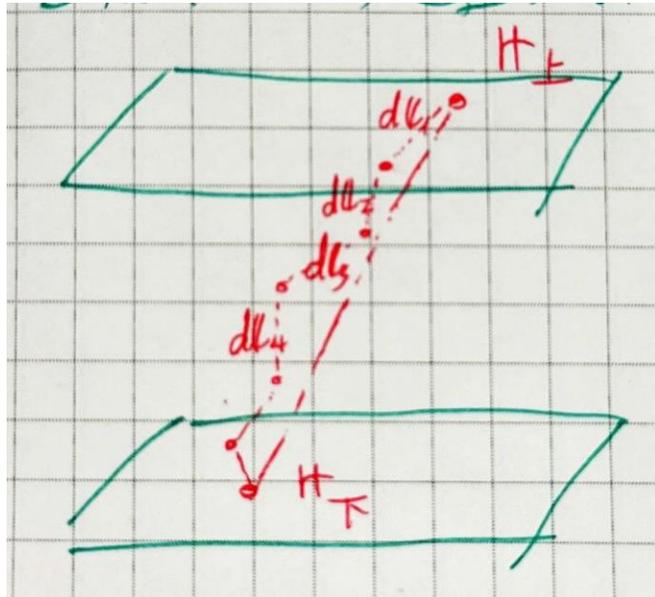
- μ の飛跡は直線
- 空気でのE損失は0

→仮定と系統誤差の関係を見たい



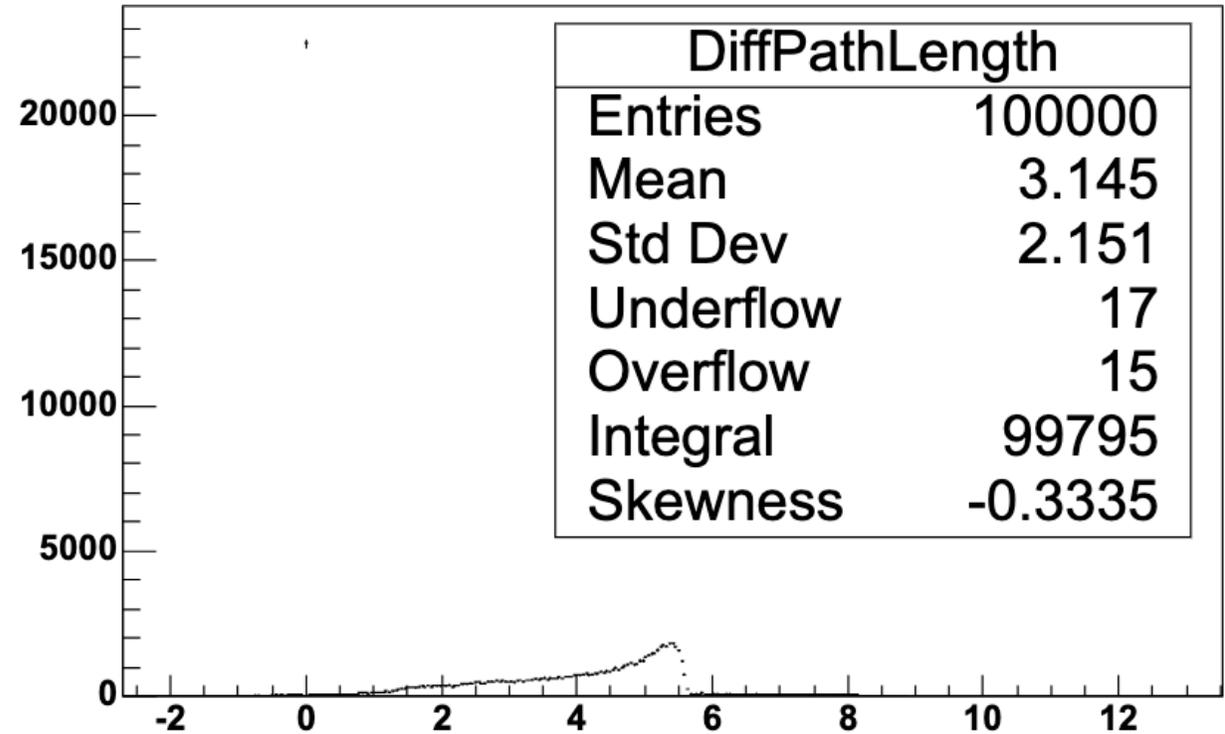
μ の空気中での飛程の比較

予想された飛距離とシミュレーション飛距離の分布



$$L_{estimated} = |\vec{r}_{上} - \vec{r}_{下}|$$

$$L_{simulated} = \sum_i d\vec{l}_i$$



予想された飛距離とシミュレーション飛距離の差[cm]

垂直入射25MeV mu+ 100000 event

崩壊寸前のmuが落とすエネルギー

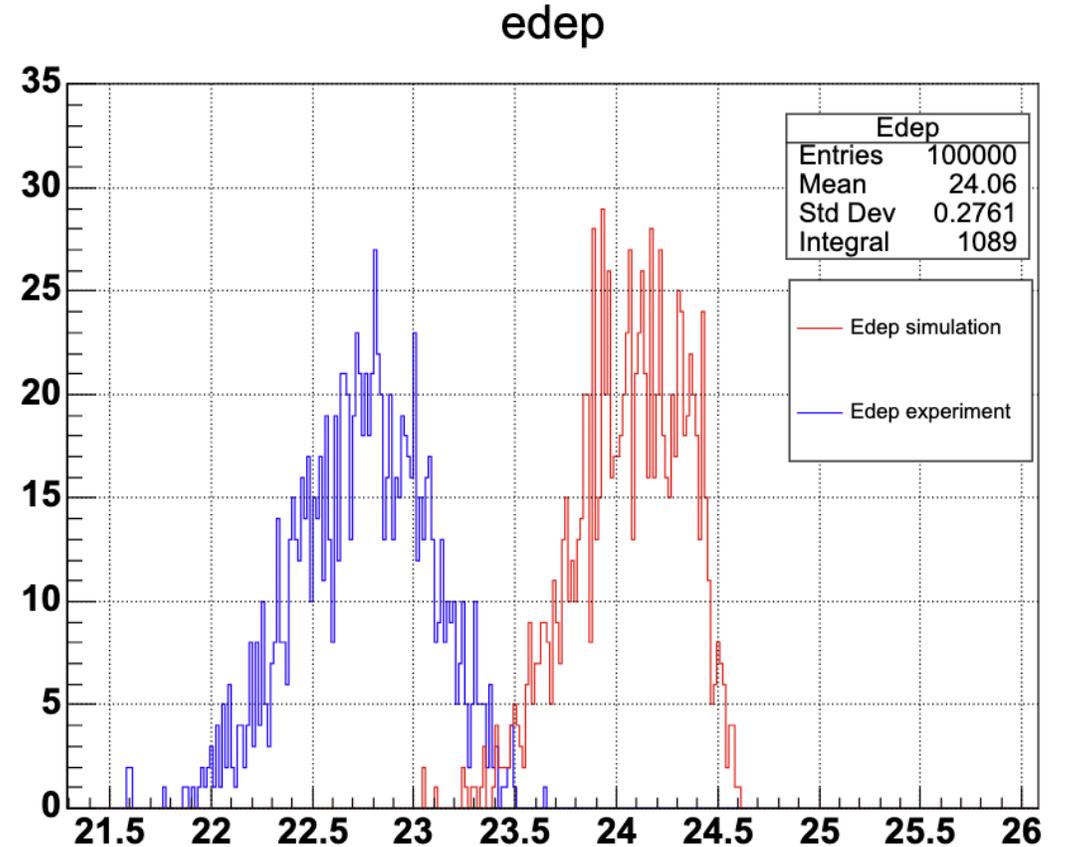
実験：シンチレーターでのエネルギー損失のみを加算

$$K_{exp} = \sum E_{dep \text{ at scint}}$$

$$K_{sim} = \sum E_{dep \text{ at scint}} + \sum E_{dep \text{ at air}}$$

$$\overline{K_{exp}} = 22.74 \text{ MeV}$$

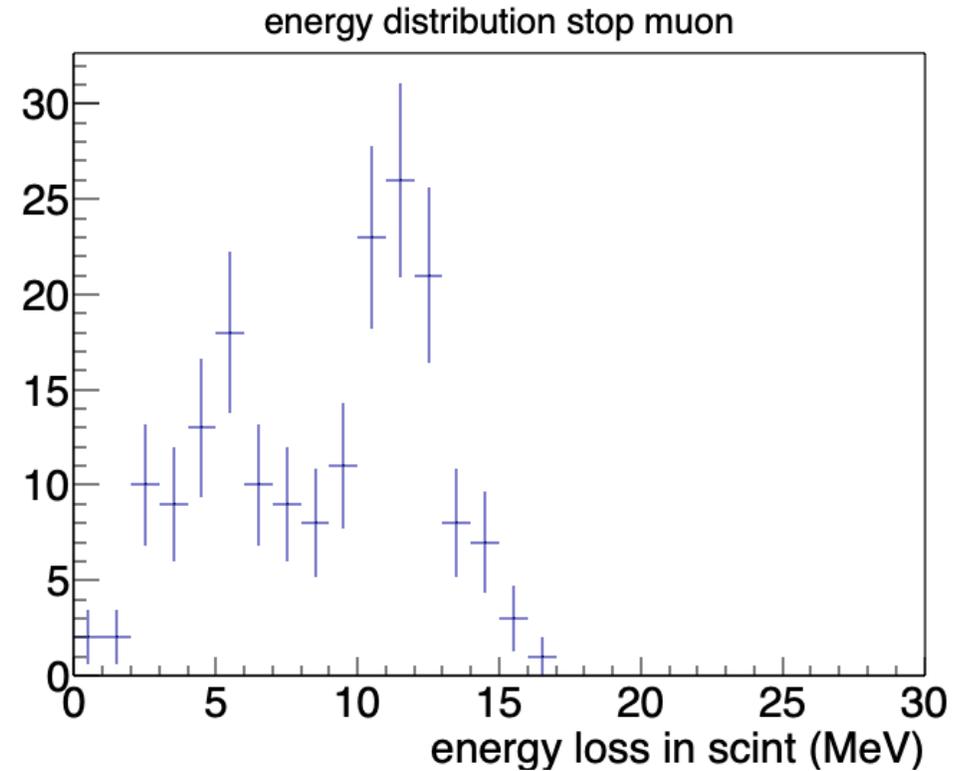
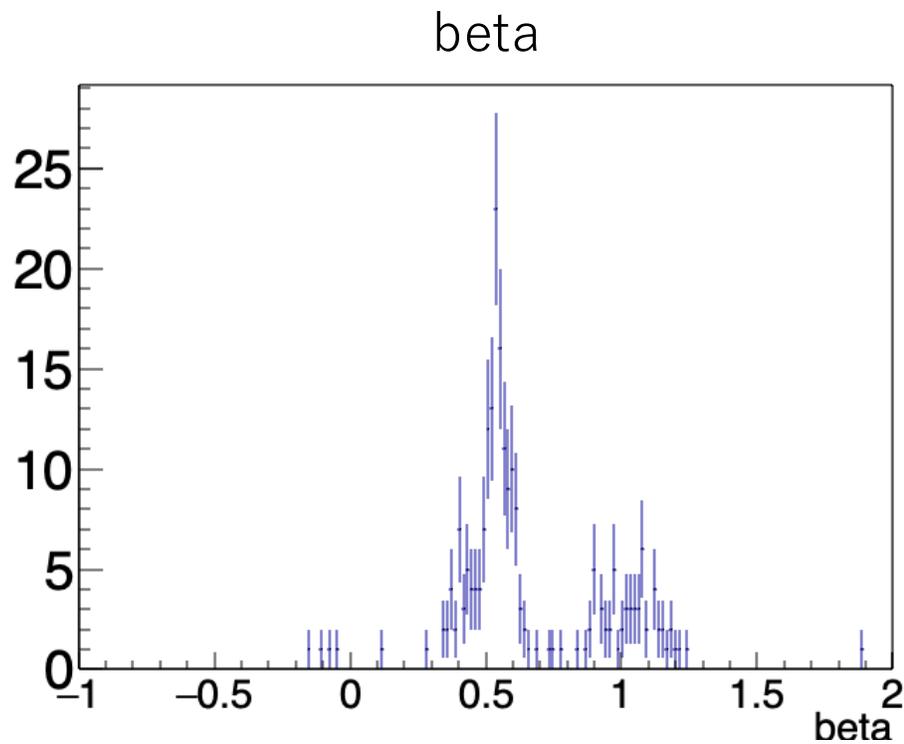
$$\overline{K_{sim}} = 24.06 \text{ MeV}$$



系統誤差

- TOFの平均：16.83 ns
- 平均飛行距離：2.71 m
- Lの間違えることで質量に0.4%(3.145/271 cmを用い γ の誤差の割合を出すことで) の系統誤差
- Kの間違えることで質量に割合-5% (22.74-24.06)/24.06の系統誤差

選別したイベントの β と運動エネルギー



止まっていない事象もあるが、ミュオンが止まっている事象があるだろう

宇宙線ミュオンの質量

質量：

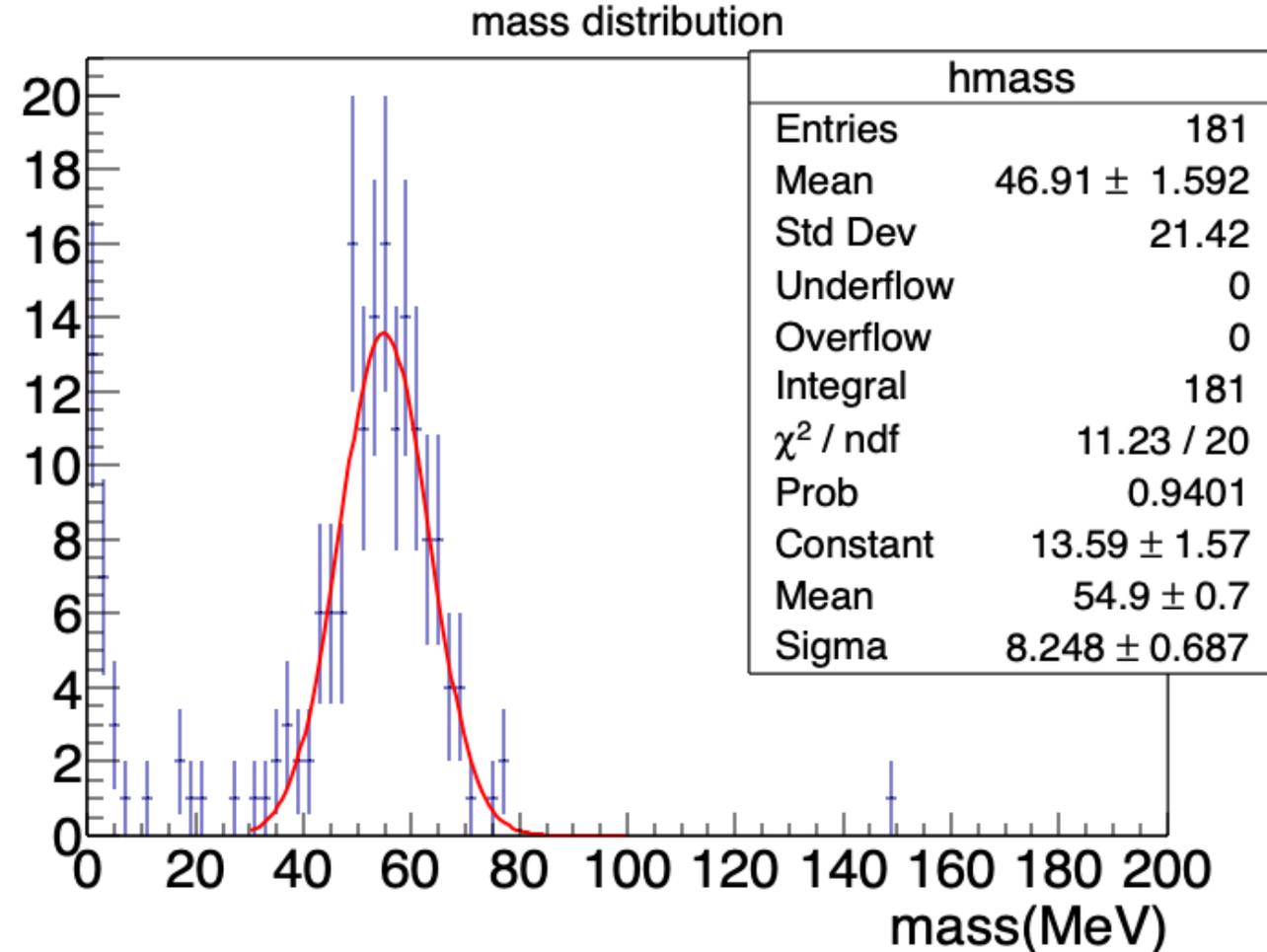
$54.9 \pm 0.7(\text{stat}) \pm 2.7(\text{sys}) \text{ MeV}$

PDGよりも

小さい値になった

見積もれていない

大きな系統誤差の存在を示唆



結論

- プラスチックシンチレータを用いて
ミュオンの質量測定を行った
- 2枚の両読のプラスチックシンチレータを離して置き、
そこでTOFと距離を求めて γ を得た
- MIPのミュオンを使って位置ごとにエネルギー較正
- 崩壊して出てくる電子を見ることでミュオンが止まったことを保証
- 実際にPDGの値よりも小さい、 $54.9 \pm 0.7 \text{ MeV}$ となった



Back Up



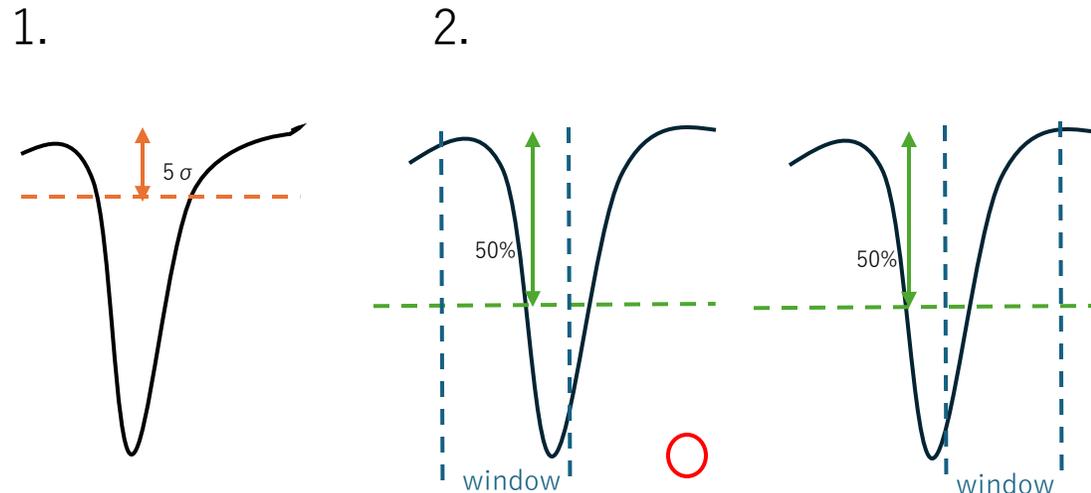
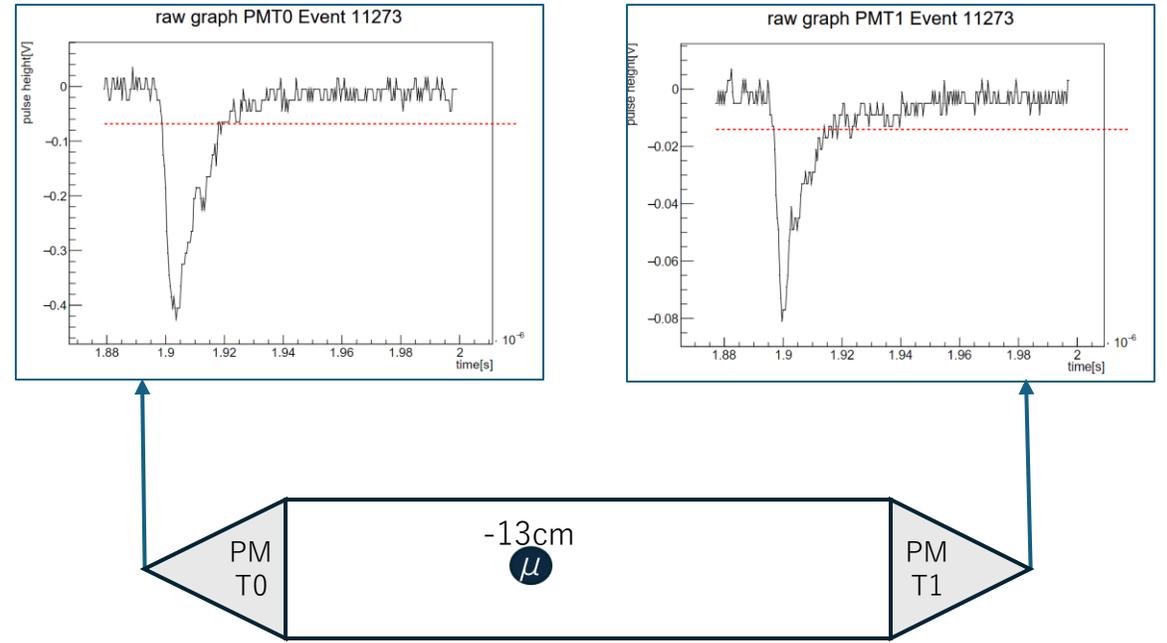
Δy の期待値の求め方

$$\frac{1}{d^2} \iint_{-\frac{d}{2}}^{\frac{d}{2}} dy_A dy_B (y_A - y_B)^2$$

エネルギー較正

ミューオン候補の事象選別

1. baselineから 5σ 以上下がったものをpulseとする
2. イベントの中で最もpulse heightが高かったものがトリガータイミング付近にきている。
3. ①をシンチ内のPMT2つともが満たしている。
4. そのイベントのTOFから推定される γ が $\gamma > 3.5$



シンチが大きいいため、ミューオンのヒット位置とPMTとの距離によって波高が**減衰**してしまう

位置ごとにエネルギー較正

経路が垂直に近い

- 変位につく誤差

$$\sigma_{\Delta x} = \sqrt{\sigma_{x,scintA}^2 + \sigma_{x,scintD}^2} \approx \sqrt{2}\sigma_x$$

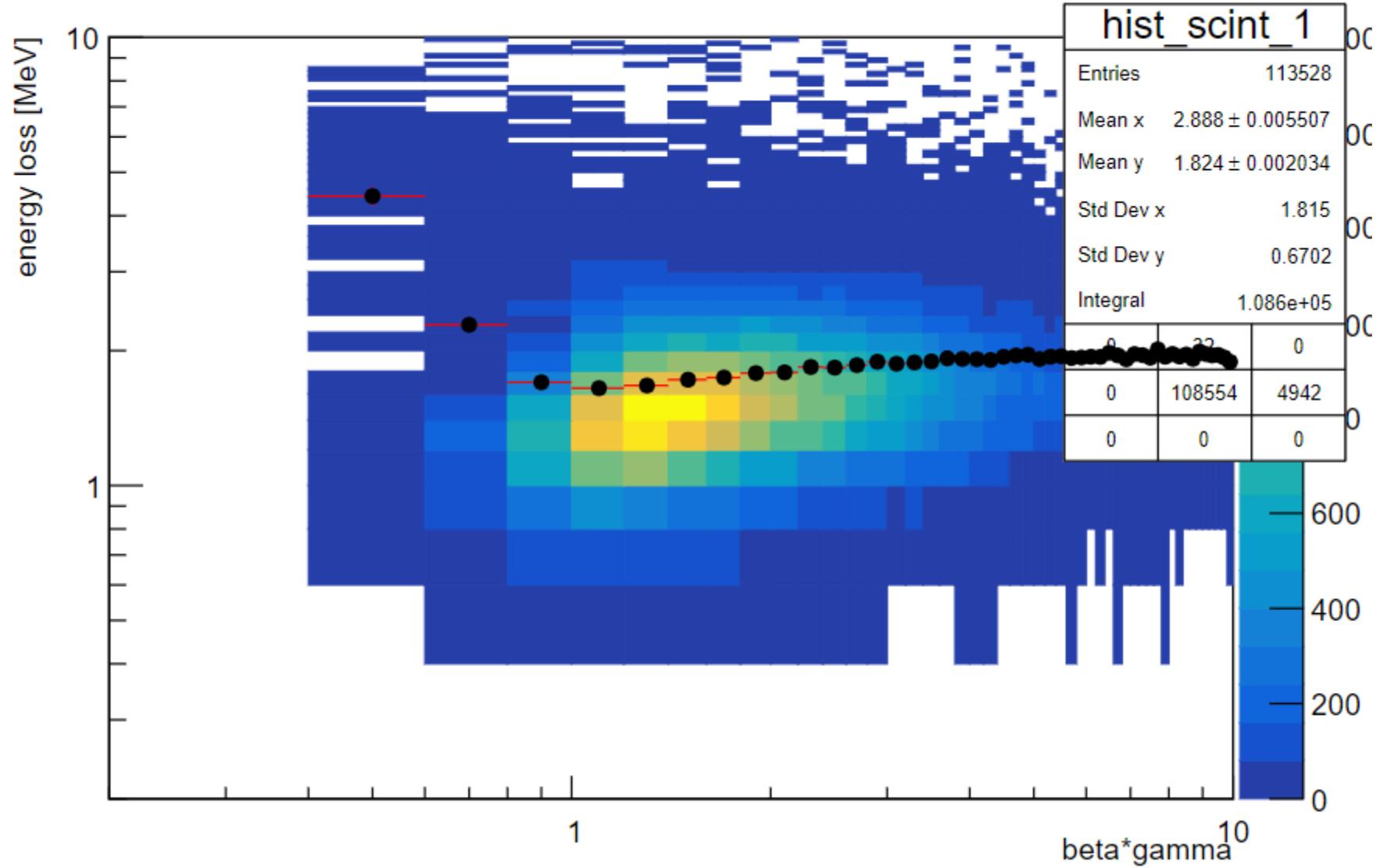
- 上下のシンチとの変位

$$\Delta x = x_{scintN} - x_{scintN+1} \text{が} \\ 2 \times \sqrt{2} \times 13\text{cm以下}$$

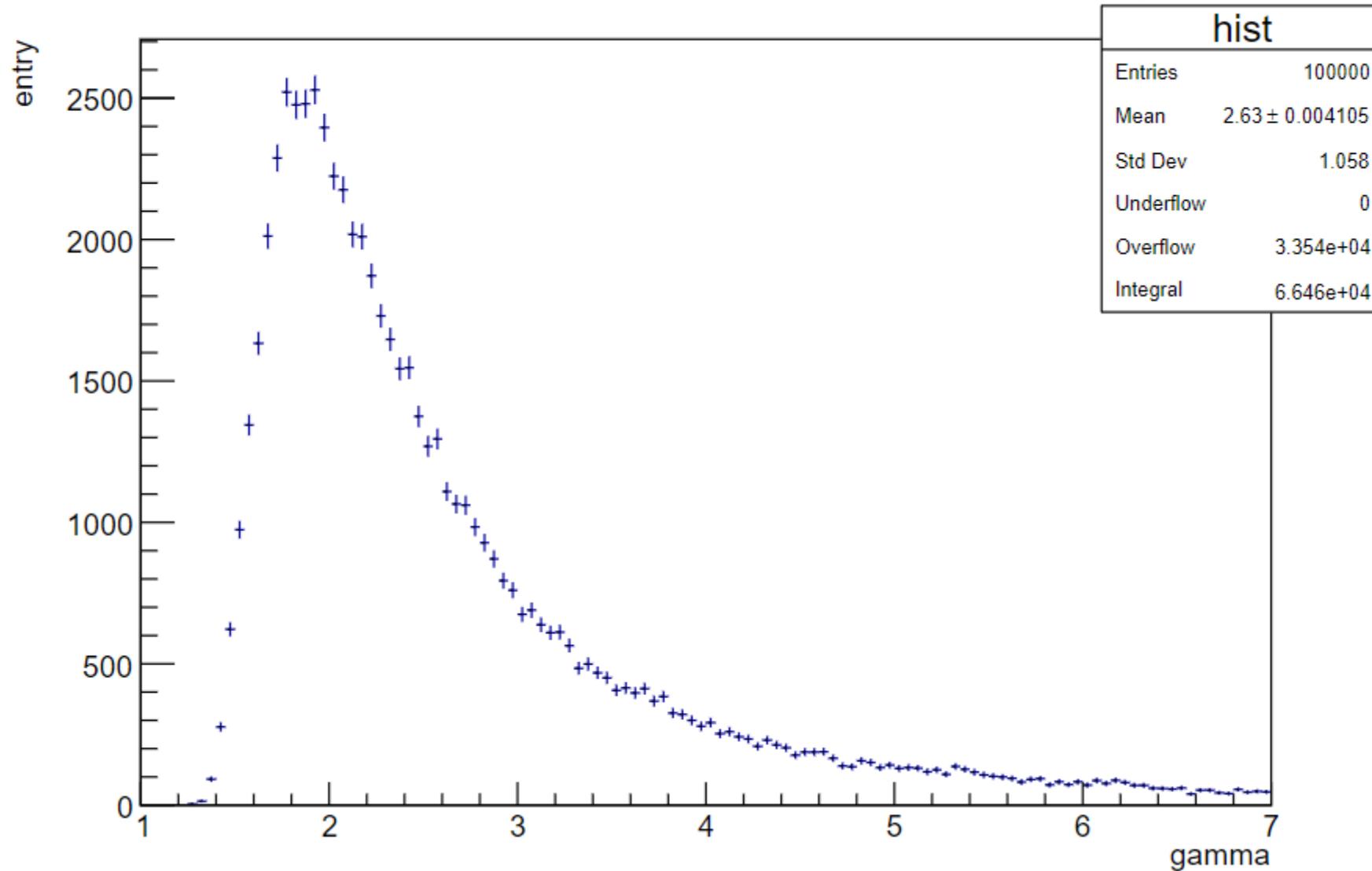
- シンチAとDの変位

$$\Delta x = x_{scintA} - x_{scintD} \text{が} \\ 2 \times \sqrt{2} \times 13\text{cm以下}$$

hist beta*gamma and energy loss scint 1



gamma shift dis=3[m] gamma=3 sigma=1.2[ns]



位置較正

シンチレーションカウンタの上に ^{90}Sr

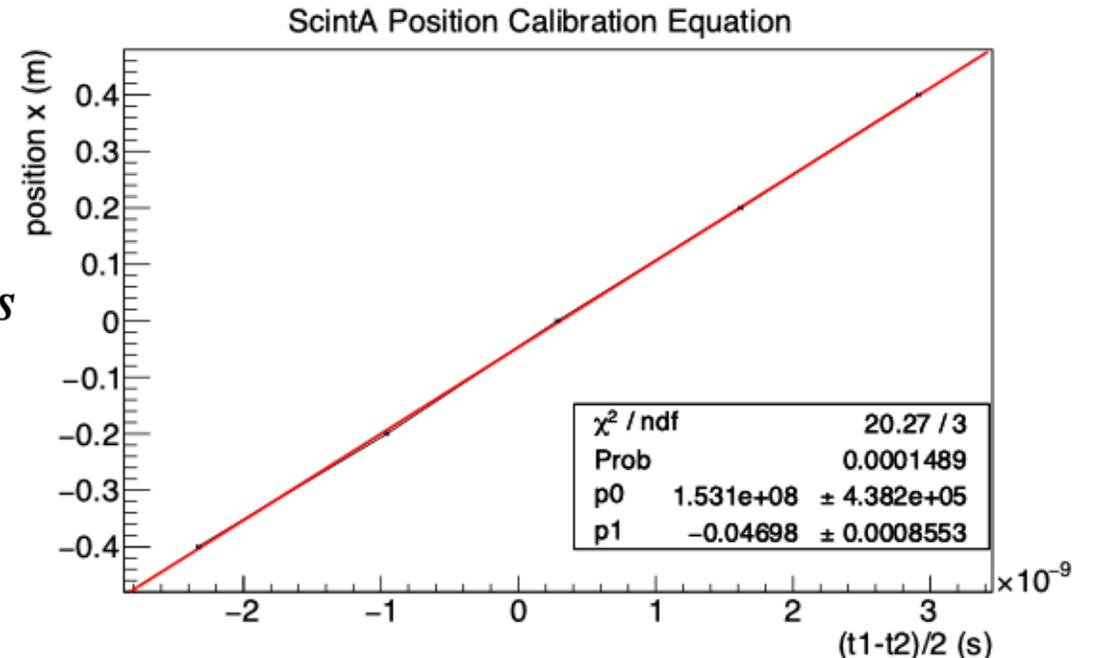
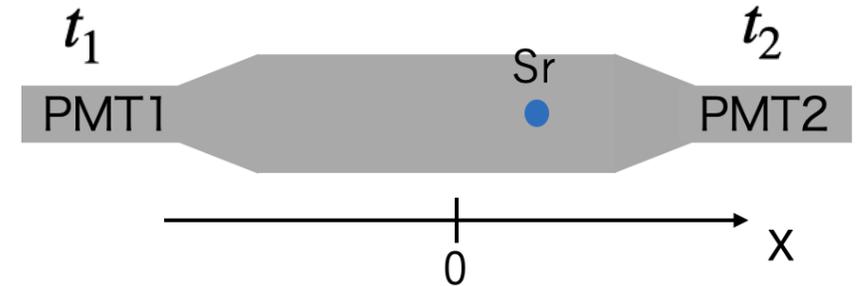
$$x = -40, -20, 0, +20, +40 \text{ cm}$$

トリガー：PMT1とPMT2

$$\text{較正式} : x = k \left(\frac{t_2 - t_1}{2} \right) + C$$

実際の較正式： $k = (1.531 \pm 0.004) \times 10^8 \text{ m/s}$

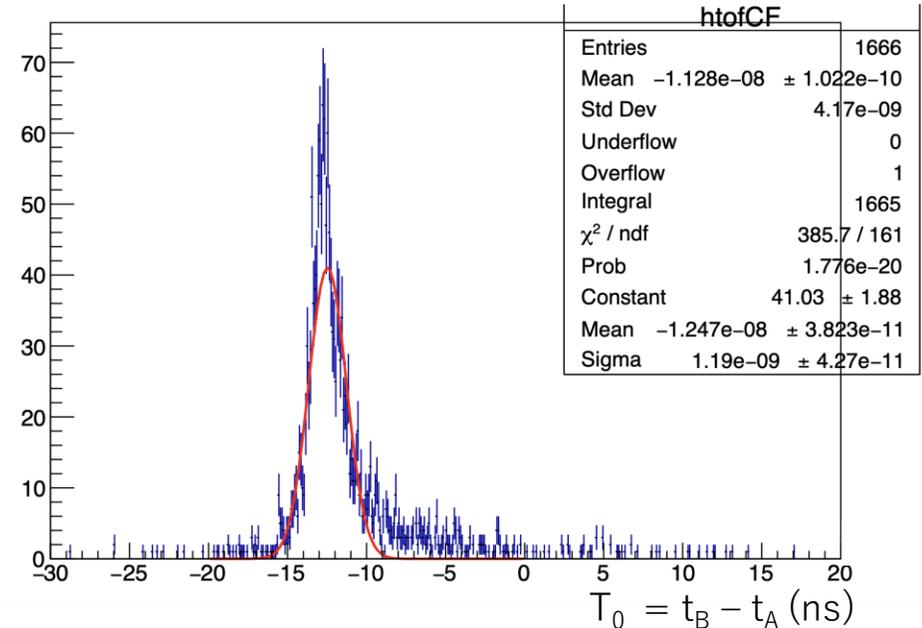
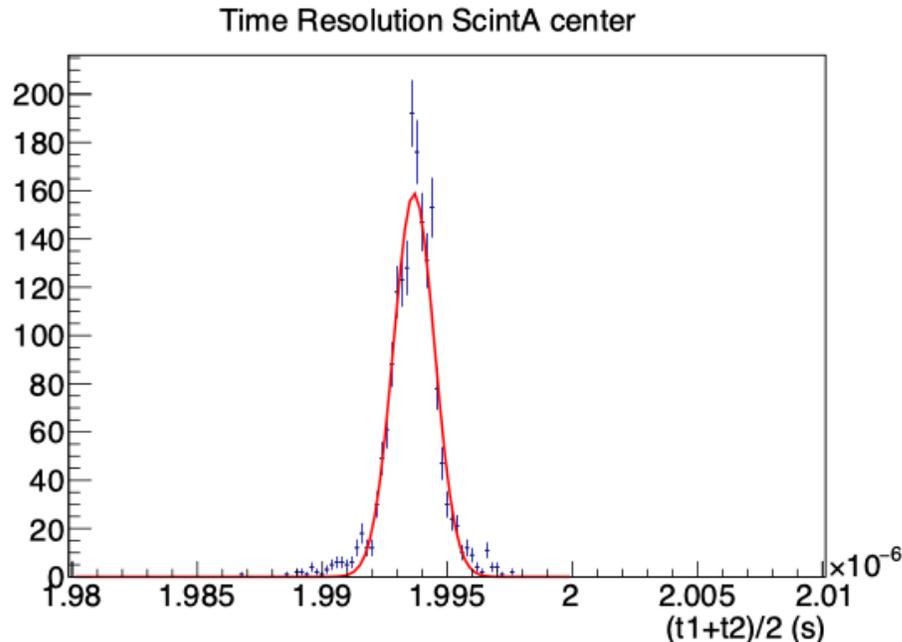
$$C = (-4.70 \pm 0.08) \times 10^{-2} \text{ m}$$



シンチレータの時間分解能

^{90}Sr 線源で測定したシンチレータの時間分解能： $(8.2 \pm 0.2) \times 10^2 \text{ ps}$

TOFの精度： $\sqrt{2} \times (8.2 \pm 0.2) \times 10^2 \text{ ps} = (11.6 \pm 0.3) \times 10^2 \text{ ps}$



(シンチレータの時間分解能)

^{90}Sr 線源で測定したシンチレータの時間分解能： $(8.2 \pm 0.2) \times 10^2 \text{ ps}$

TOFの精度： $\sqrt{2} \times (8.2 \pm 0.2) \times 10^2 \text{ ps} = (11.6 \pm 0.3) \times 10^2 \text{ ps}$

$$\beta \text{ の精度} : \frac{\sigma_\beta}{\beta} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{T}\right)^2}$$

$$\gamma \text{ の精度} : \frac{\sigma_\gamma}{\gamma} = \frac{\gamma\beta}{1 - \beta^2} \sigma_\beta$$

位置分解能

較正式： $x = k \left(\frac{t_2 - t_1}{2} \right) + C$

位置分解能： $\sigma_x \simeq k \sigma_t$ $\sigma_t = \frac{\sigma_{t_1} + \sigma_{t_2}}{2}$

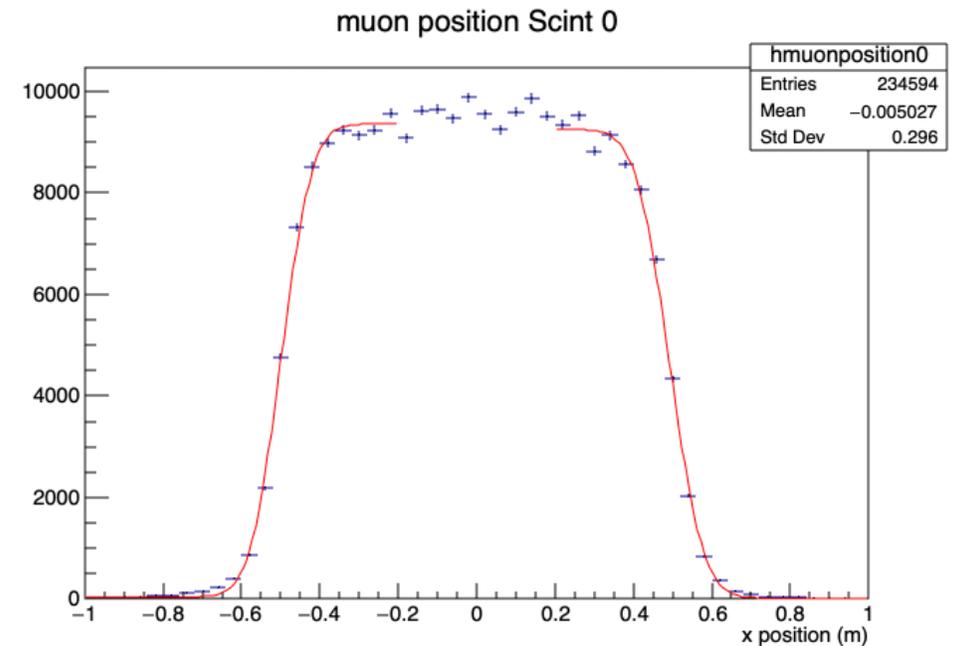
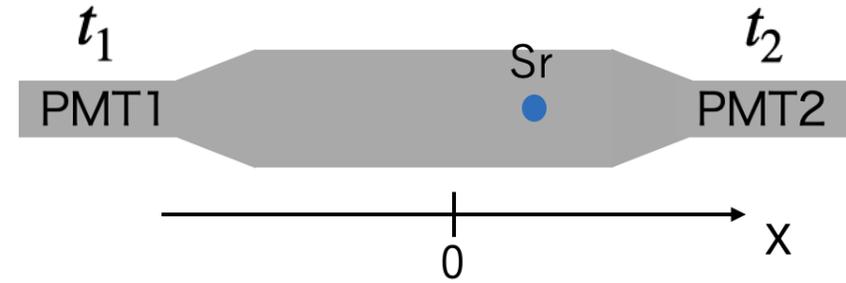
→ $1.531 \times 10^8 \text{ m/s} \times 820 \text{ ps} = 13 \text{ cm}$

較正式を使って、ミューオンの位置を推測

$\text{Erf} \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right)$ でフィッティング

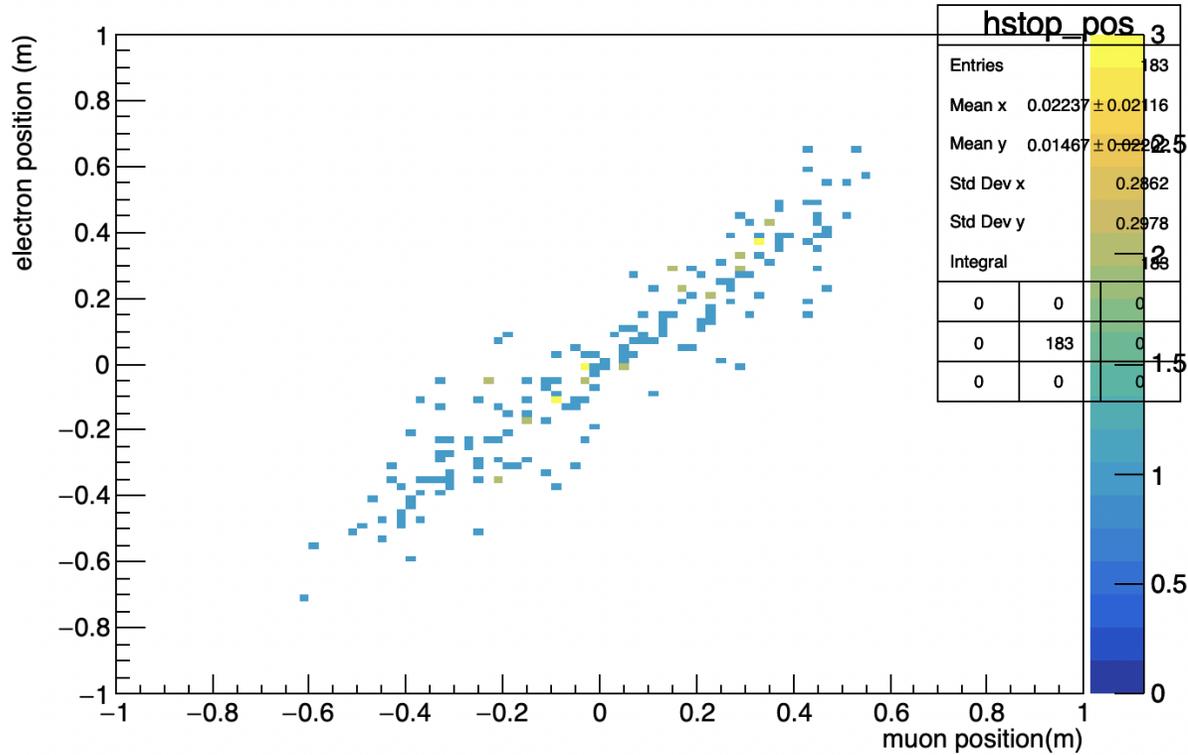
→ $9.61 \pm 0.12 \text{ cm}$, $8.80 \pm 0.13 \text{ cm}$

ミューオンで測定した方が時間分解能がよい

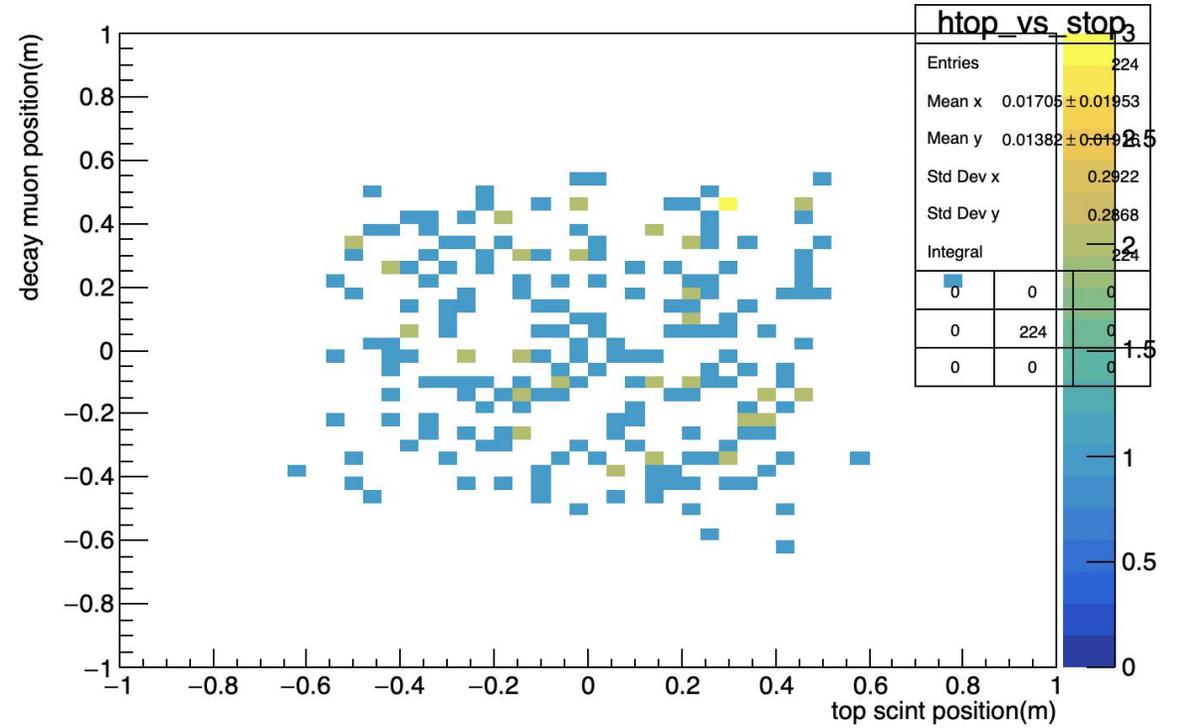


decayした位置

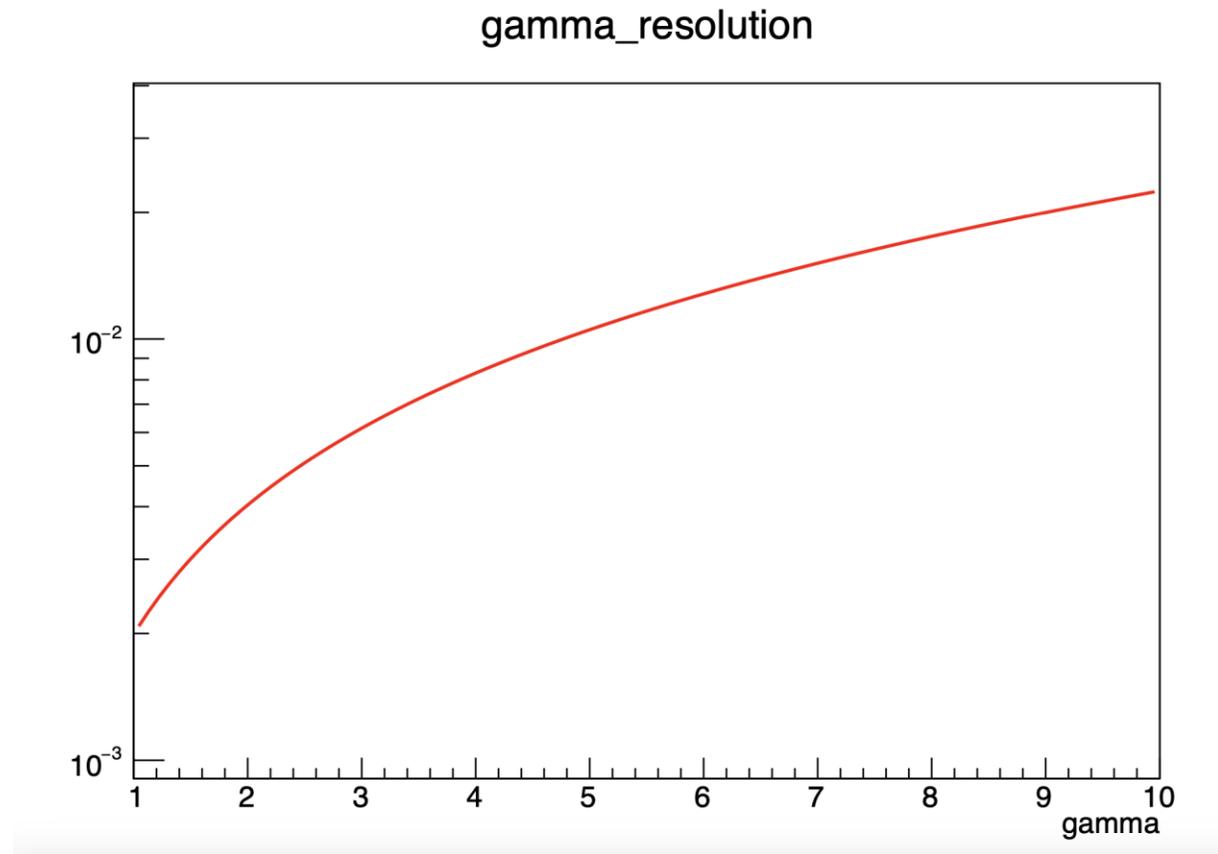
stop position muon vs electron



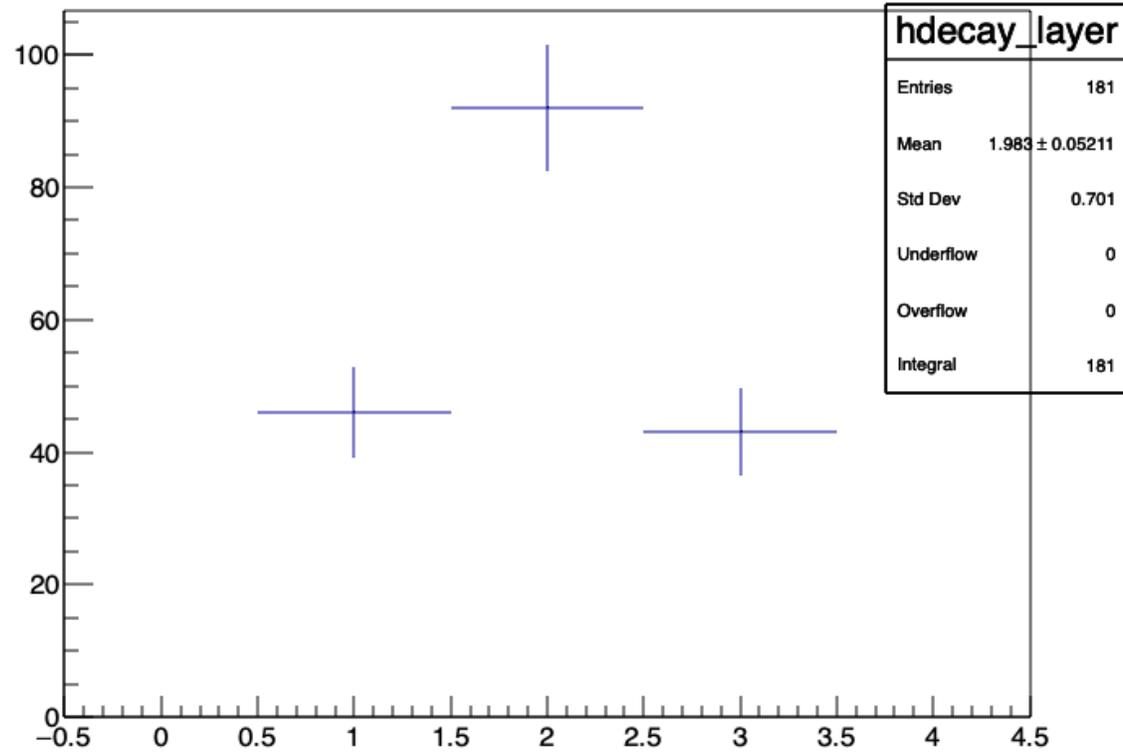
top vs stop



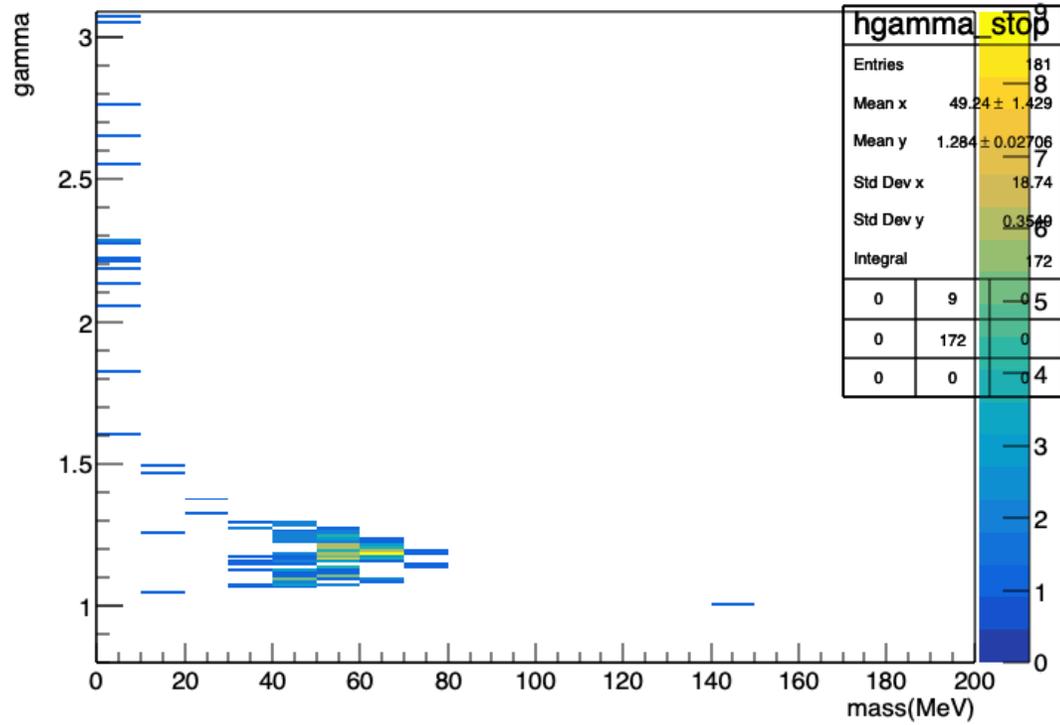
γ 誤差



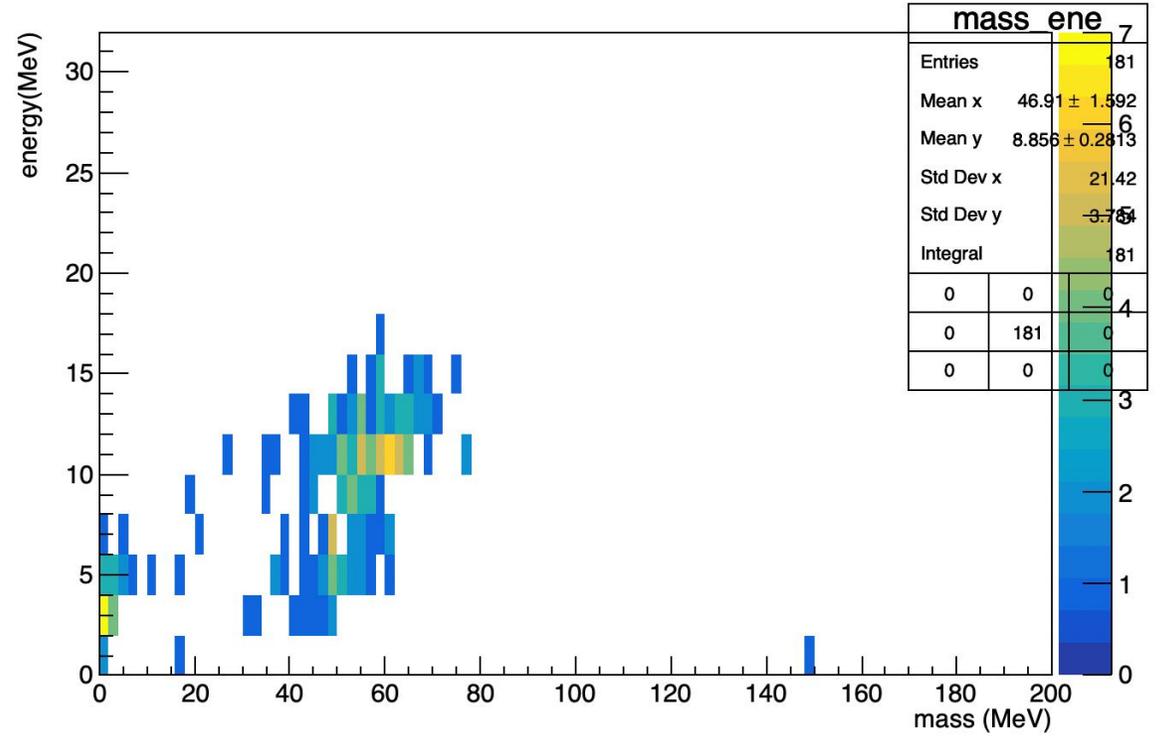
decay layer: decay layer



stop muon gamma



mass vs energy

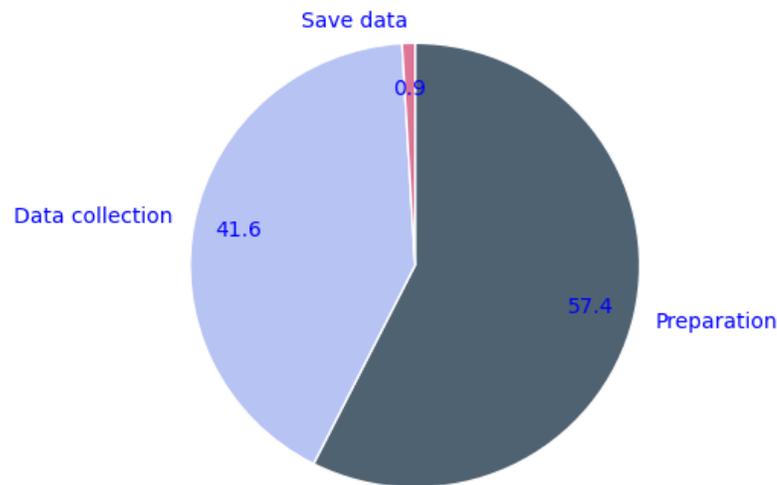


DAQの各プロセスの所要時間

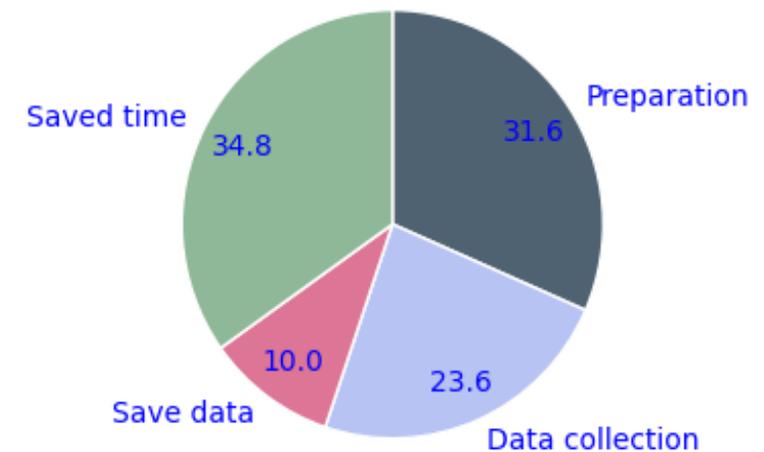
Q: 1Eventあたりの各プロセスの時間の割合は？

A:

- 宇宙線 μ 500Event



並列化前のDAQ



並列化後のDAQ

DAQの並列化の効果は？

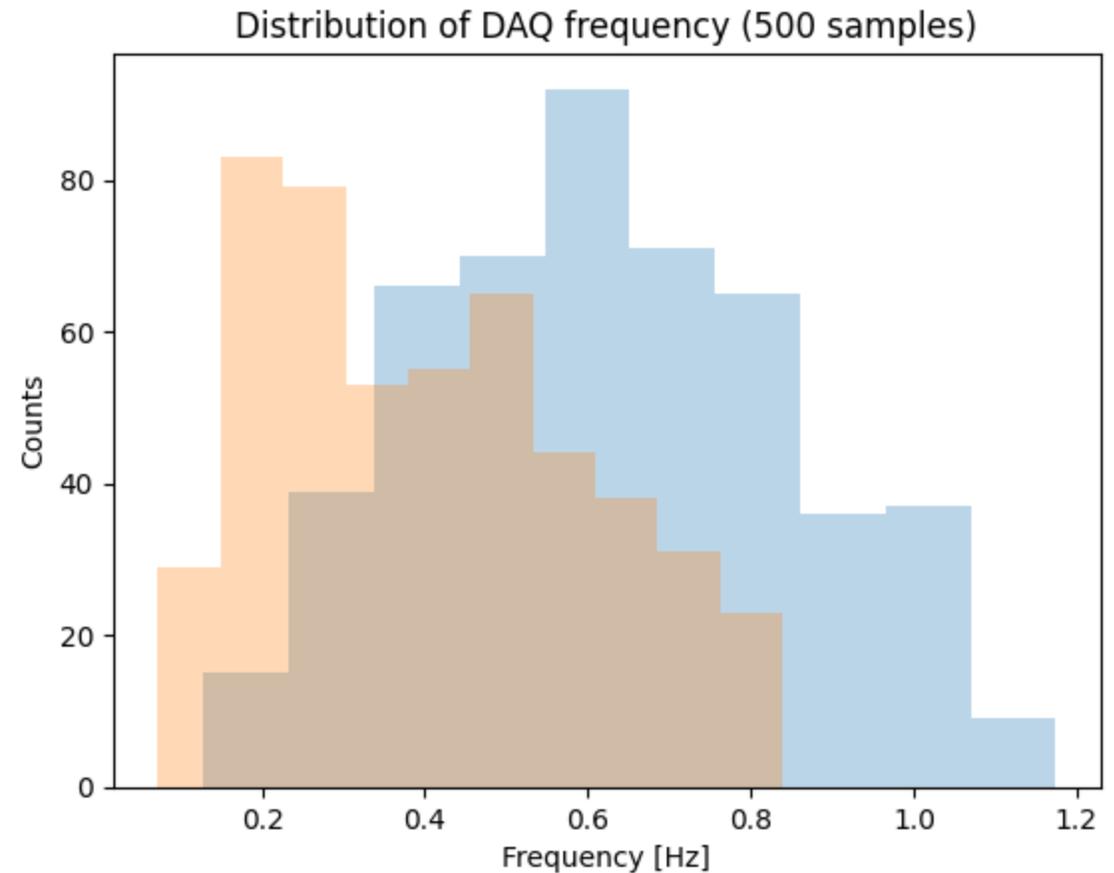
Q: 1秒あたりの取得イベント数の分布の変化は？

A:

- 宇宙線 μ 500Event

並列化前のDAQの平均 0.39 Hz

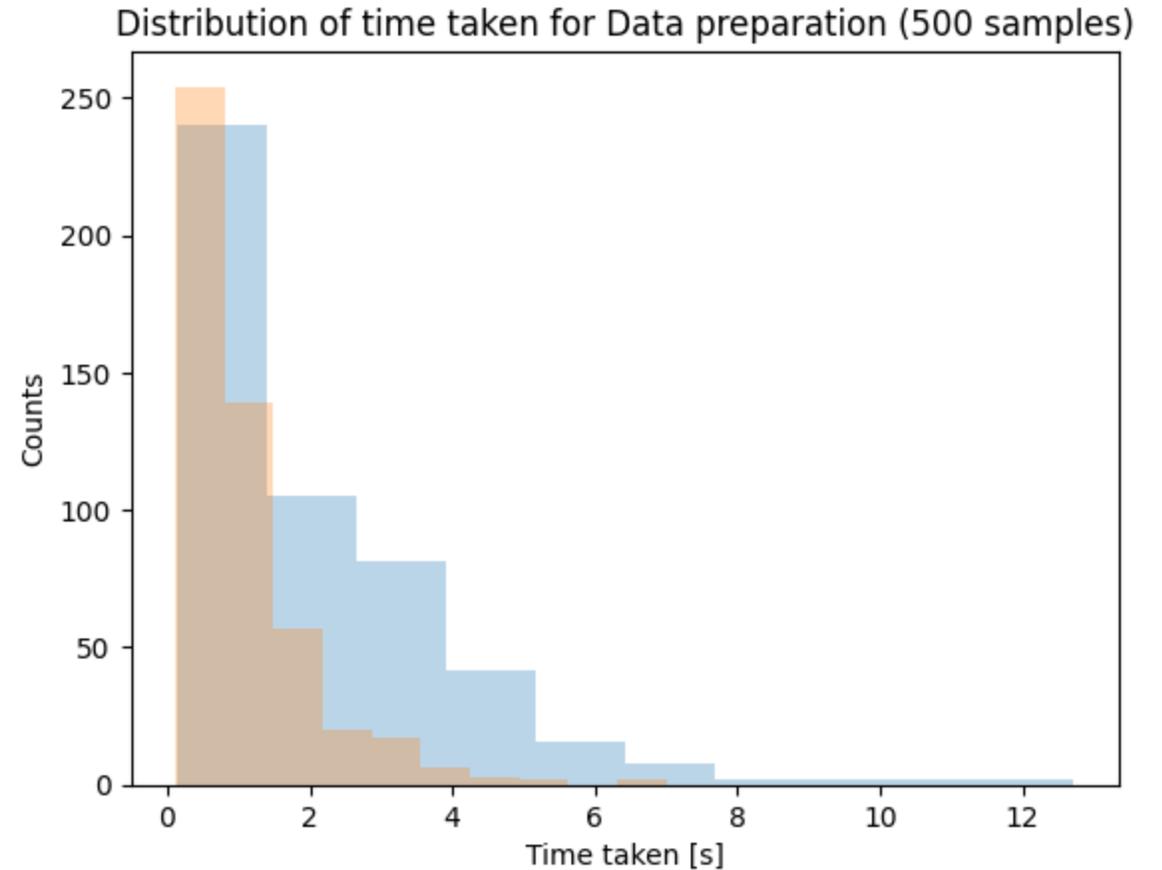
並列化後のDAQの平均 0.64 Hz



DAQの並列化の効果は？

Q: データ取得の準備に必要な時間の分布の変化は？

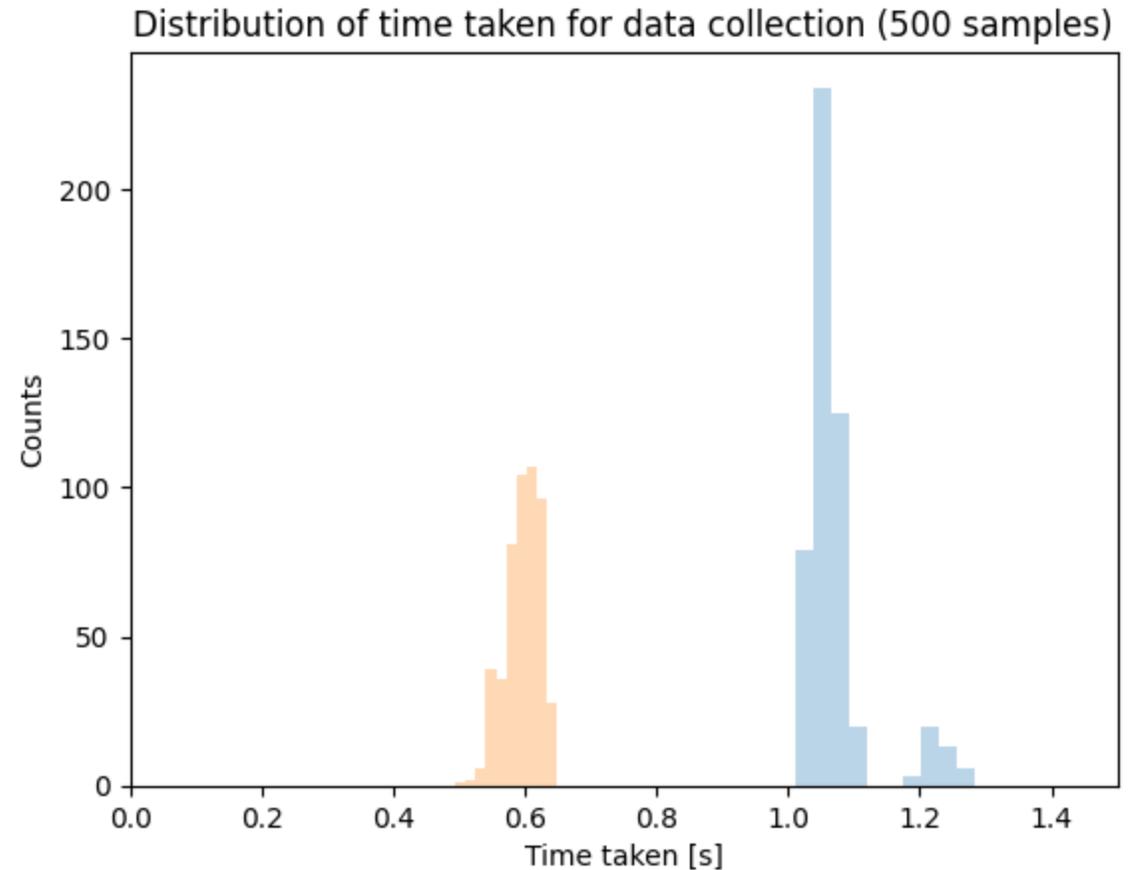
A: 並列化後のDAQ
並列化前のDAQ



DAQの並列化の効果は？

Q: データ取得に必要な時間の分布の変化は？

A: 並列化後のDAQ
並列化前のDAQ



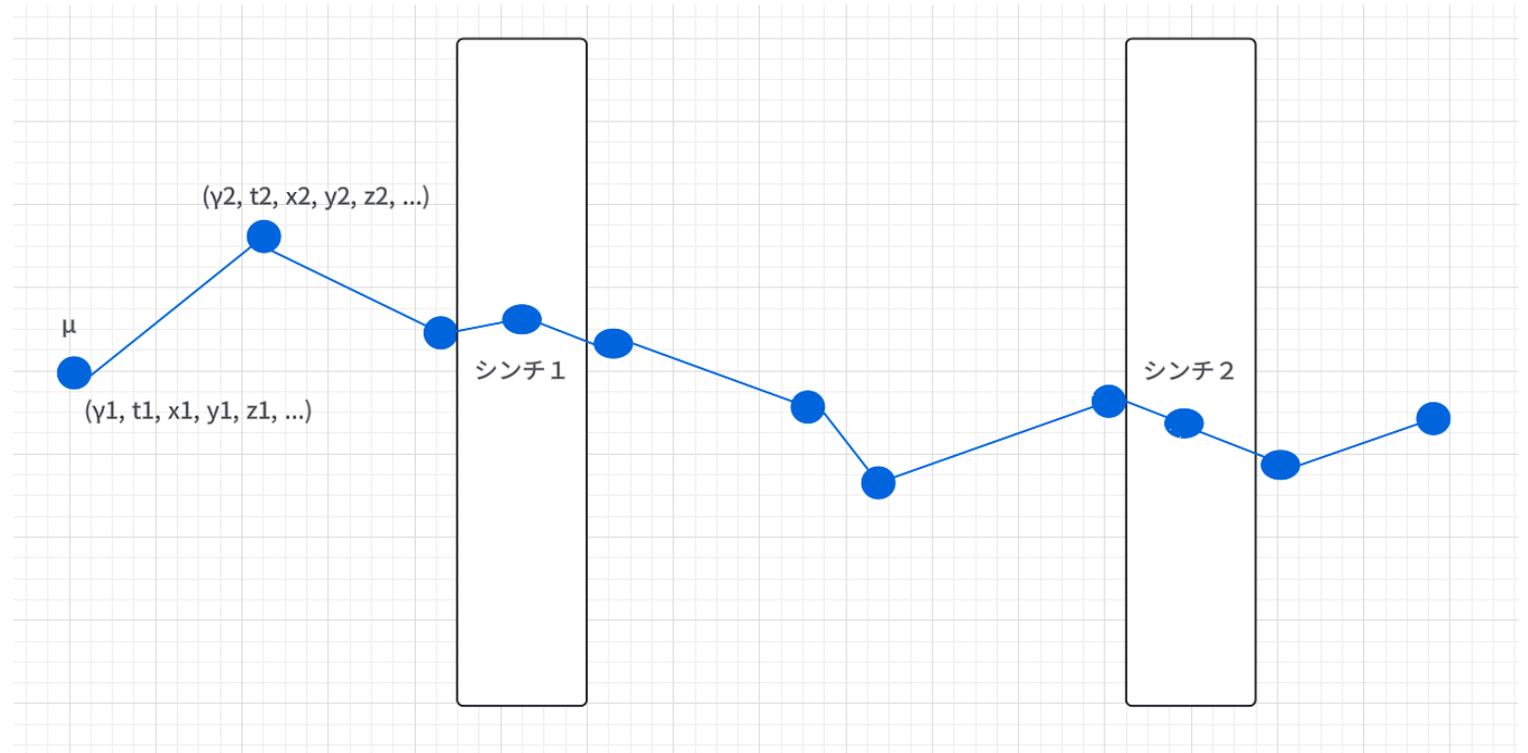
どうやってE損失と γ をシミュレーションで求めている？

使用 Simulator :



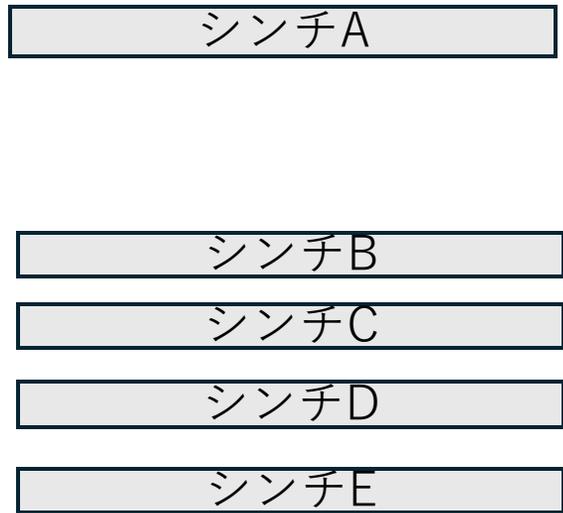
粒子の軌跡を逐次的 (Step by step) にモンテカルロ法で生成

- 位置
 - 時間
 - γ
 - エネルギー損失
- を求めることができる！



Geant 4 で生成される軌跡の概略図

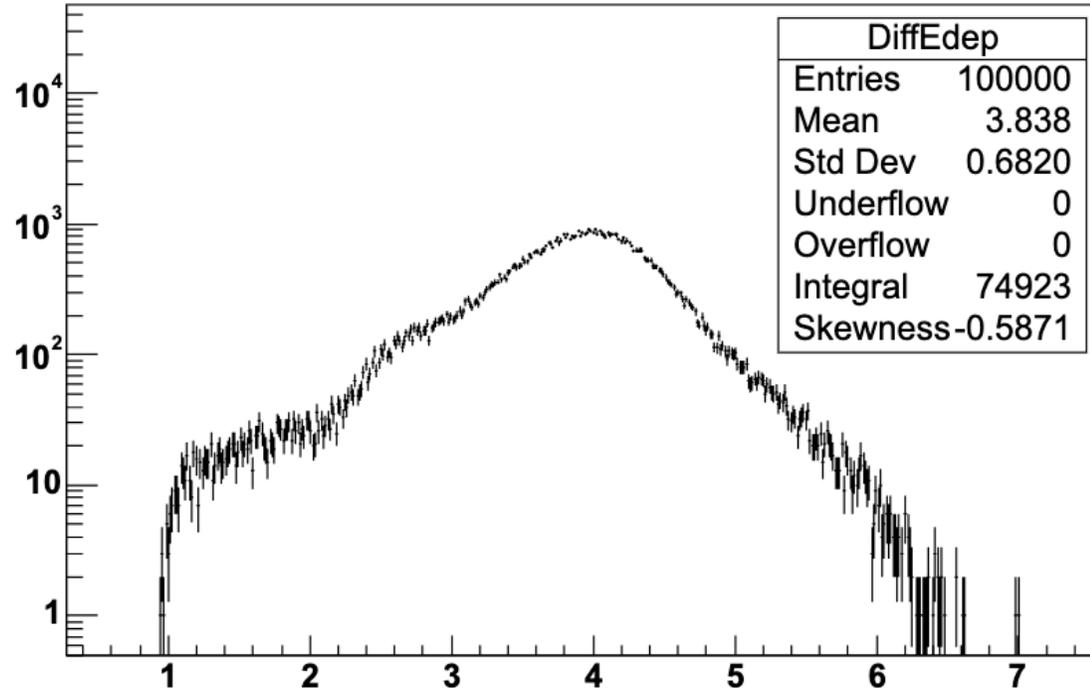
μ の空気でのE損失



$$E_{estimated} = \sum E_{dep\ in\ scint}$$

$$E_{simulated} = \sum E_{dep\ in\ scint} + \sum E_{dep\ in\ air}$$

空気によるE損失の分布



空気によるE損失[MeV]

空気ですと平均E = 3.838MeV
力学的エネルギーの15%が空気に落とされる

γ のシミュレーション結果の考察

ミューオンのエネルギー：2.5 MeV

(実験系内で崩壊するエネルギー)

入射方向：鉛直

入射位置：最上部シンチ直上

空気による減速を無視

$$\overline{\gamma_{sim}} = 1.179$$

$$\overline{\gamma_{exp}} = 1.025$$

$$\frac{1}{\overline{\gamma_{sim}} - 1} : \frac{1}{\overline{\gamma_{exp}} - 1} \sim 40 : 5.6$$