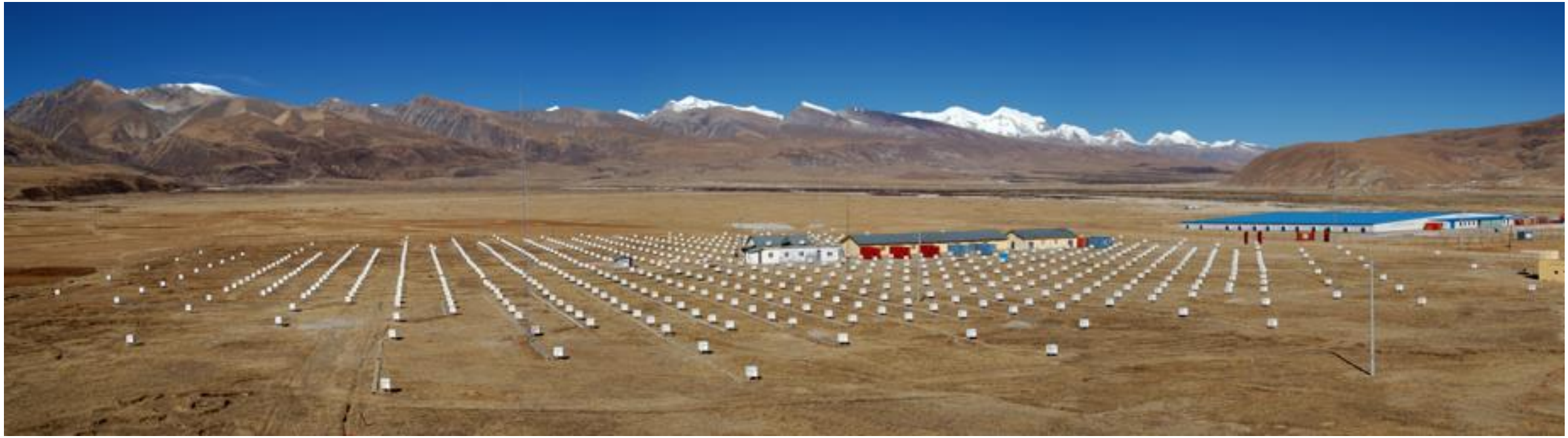


ミューオン寿命測定と荷電パイオンの検出

超高エネルギー宇宙線グループ

三上晴也　寺下慧　室田湧葵

山里菜穂子　岩本康希

目次

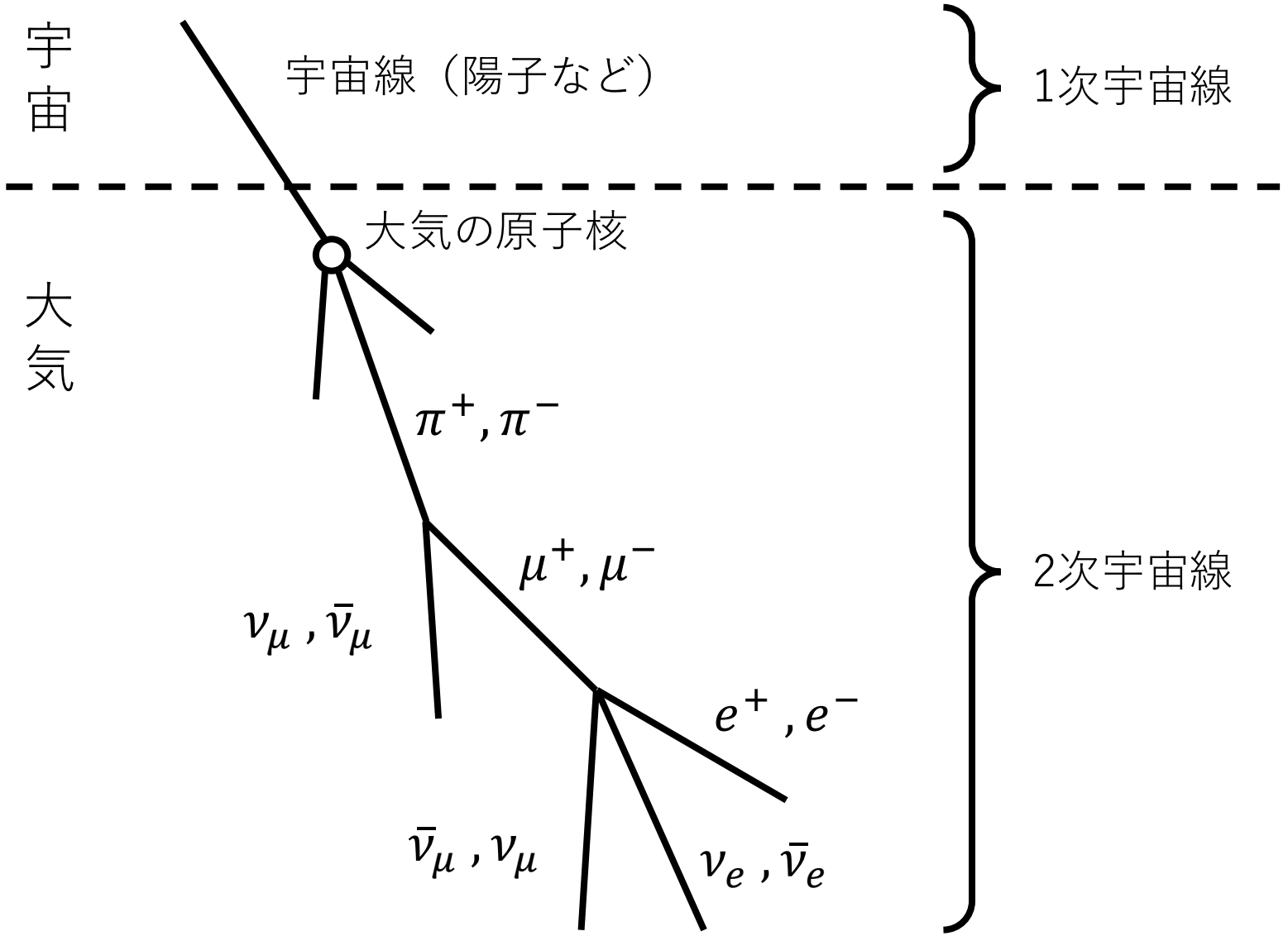
1. 目的
2. 背景
3. 測定方法・測定装置
4. プロジェクト”τ”
5. プロジェクト”μ”
6. プロジェクト”π”
7. まとめ

実験目的

- ミューオンの寿命測定
- パイオンの観測

実験原理・観測方法

〈背景　2次宇宙線の形成〉



荷電パイオンの崩壊

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

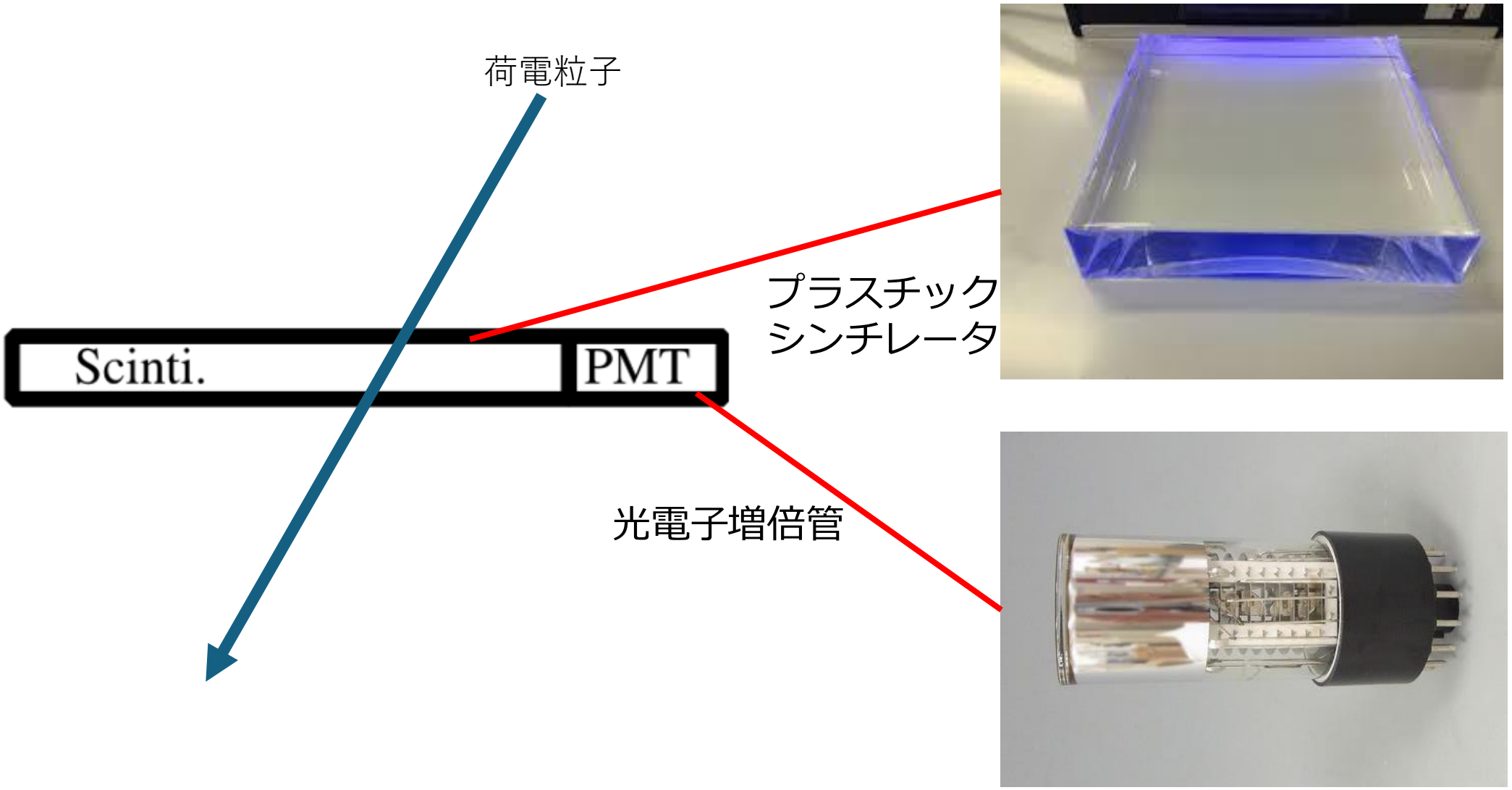
ミューオンの崩壊

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

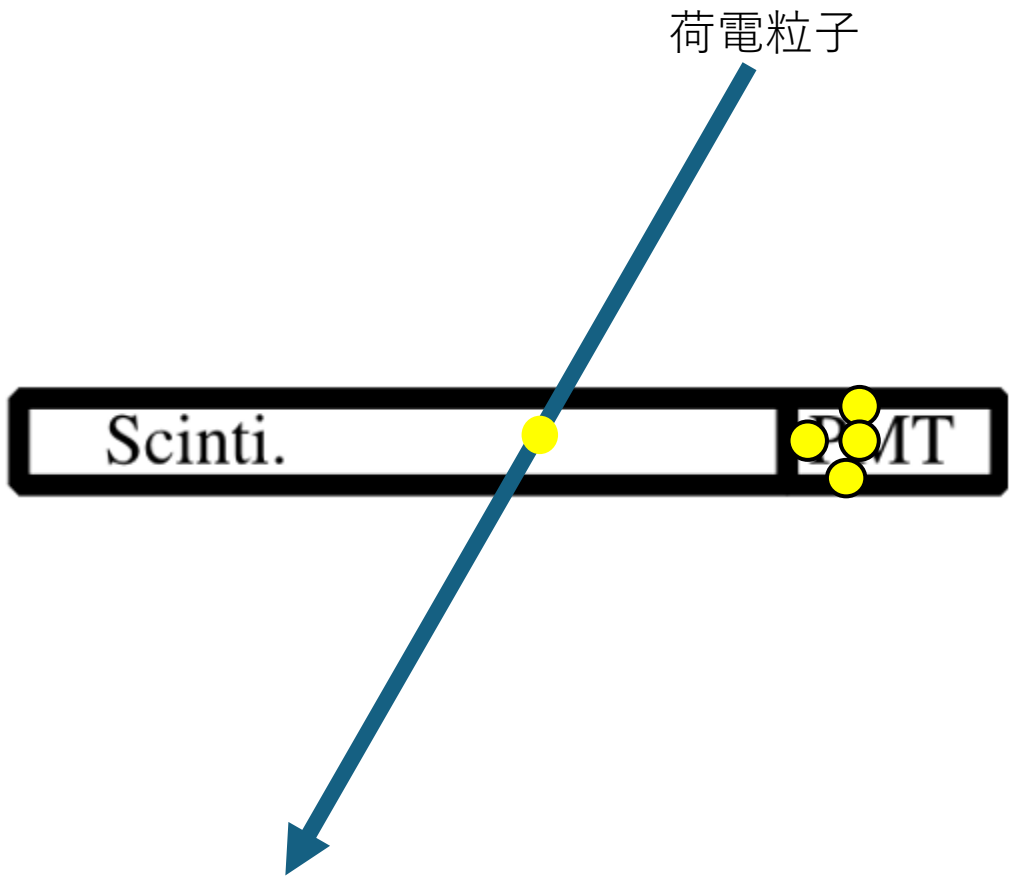
$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

荷電パイオンはミューオンに
ミューオンは電子に崩壊

観測方法・観測装置



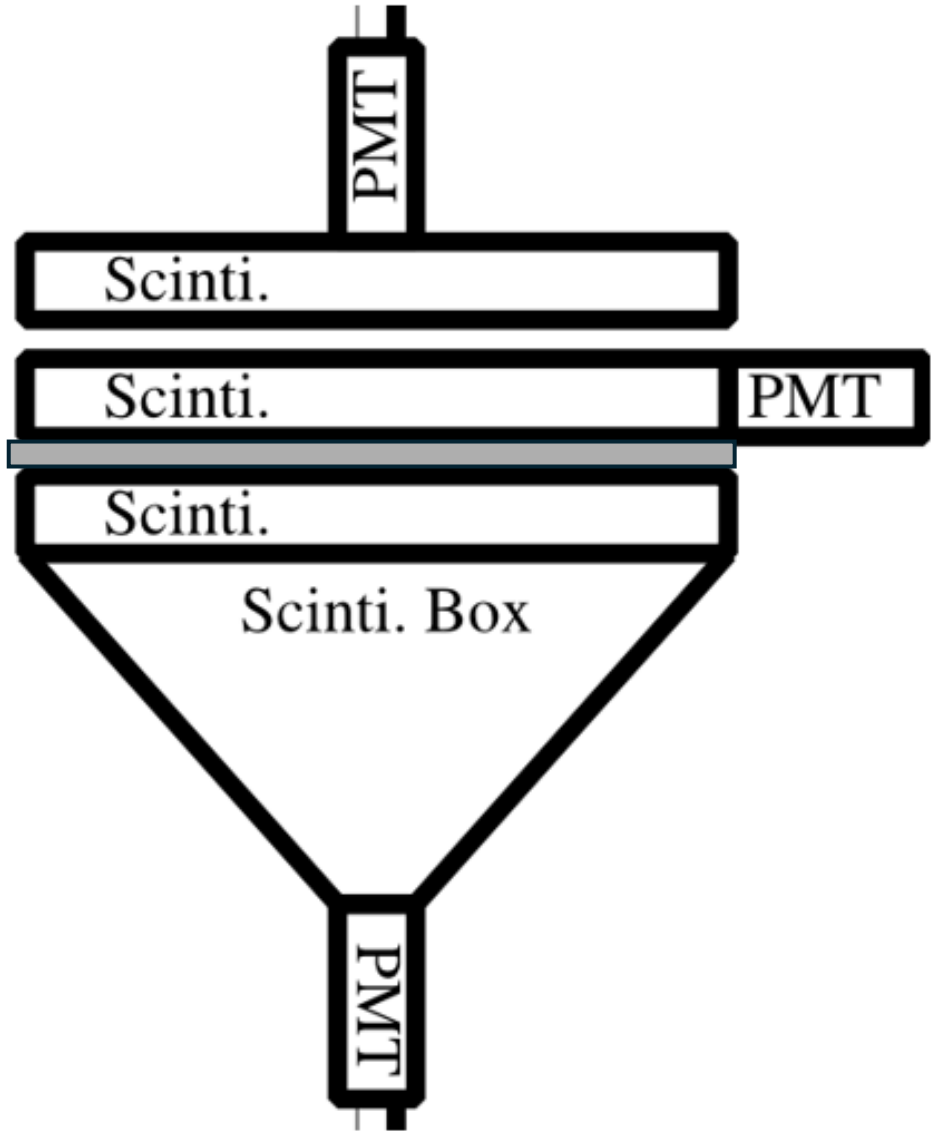
観測方法・観測装置



・プラスチックシンチレータ
　荷電粒子が通過する際、微弱な光を発する樹脂製の検出器

・光電子増倍管
　光を電子に変換し、電気信号として増幅

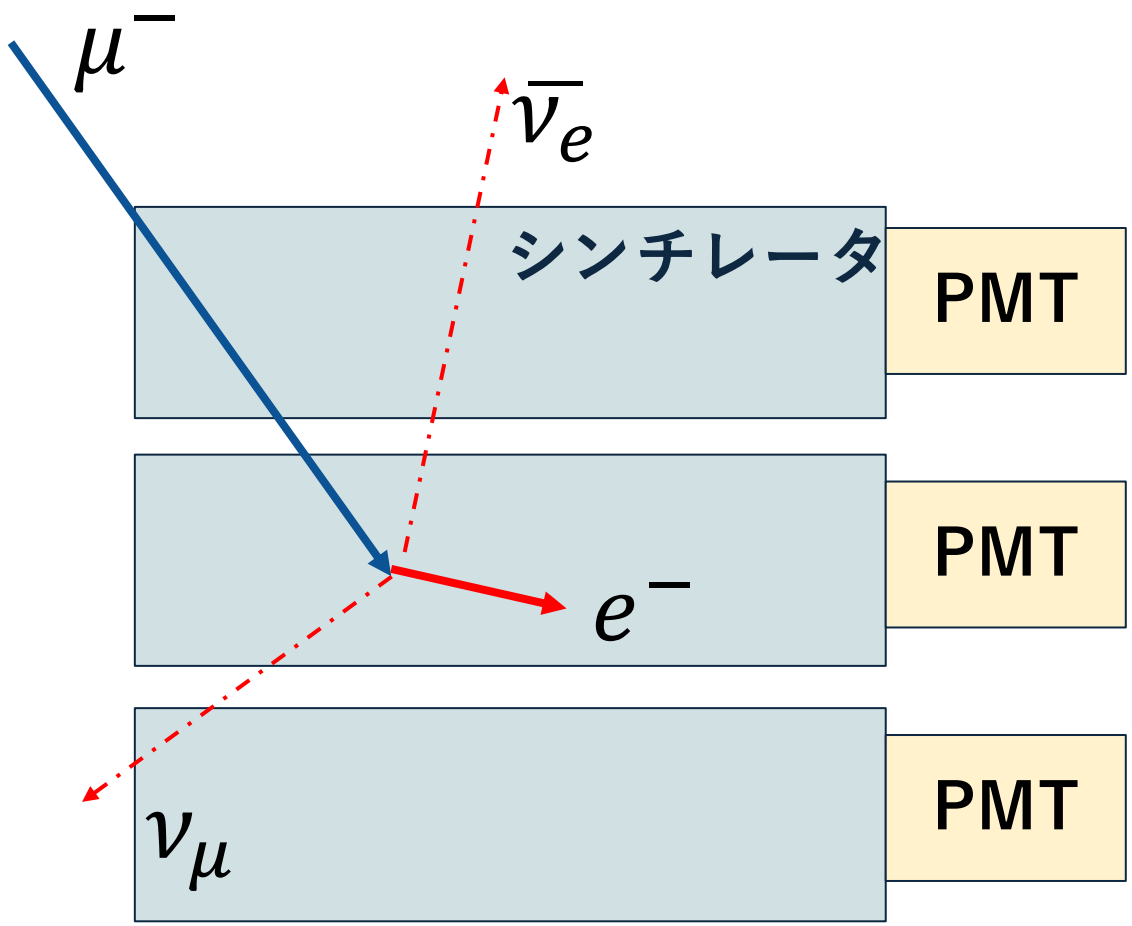
観測方法・観測装置

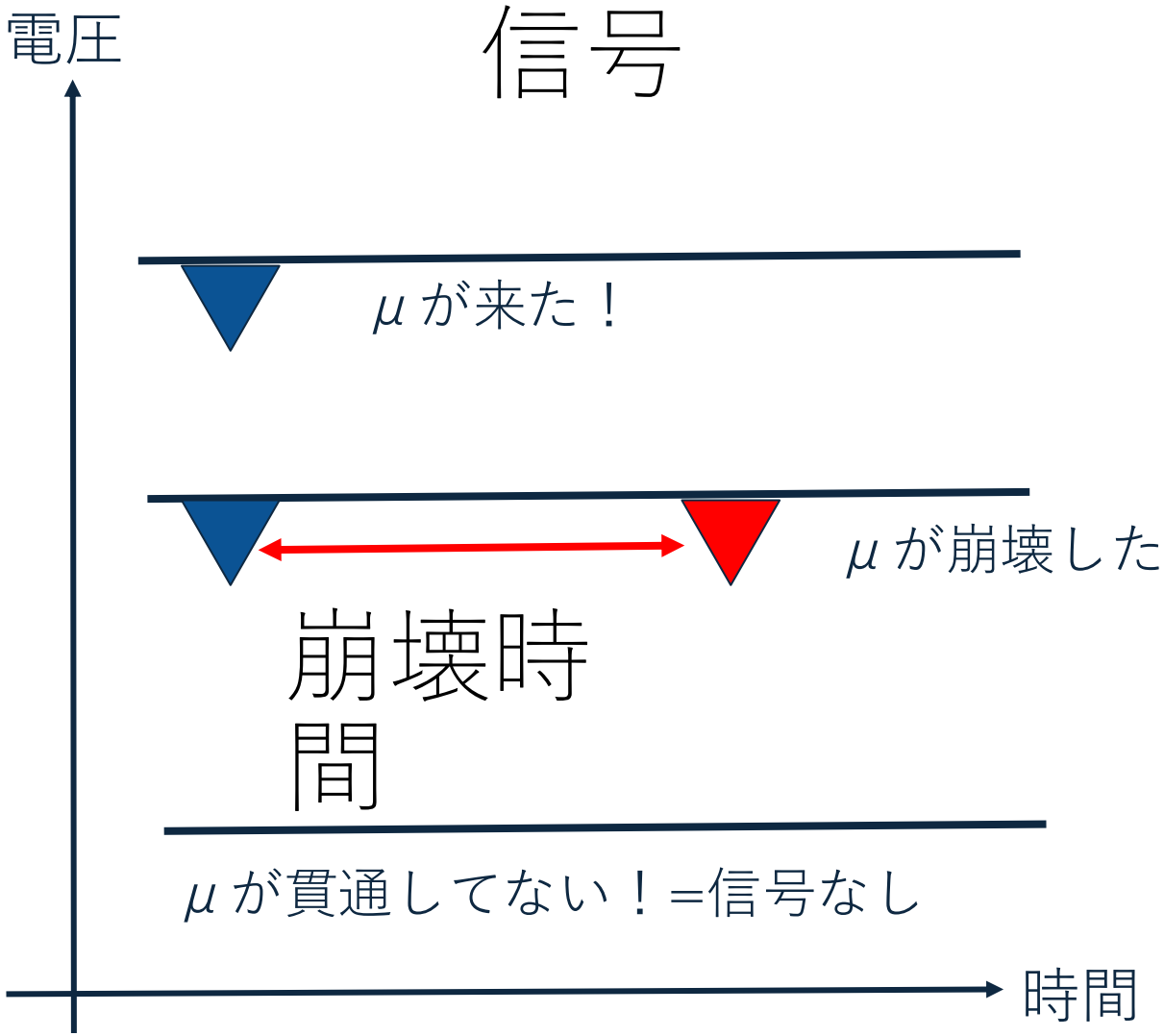


シンチレータを3層設置
　一辺70cmの正方形
　厚み：3cm
　間隔：3cm

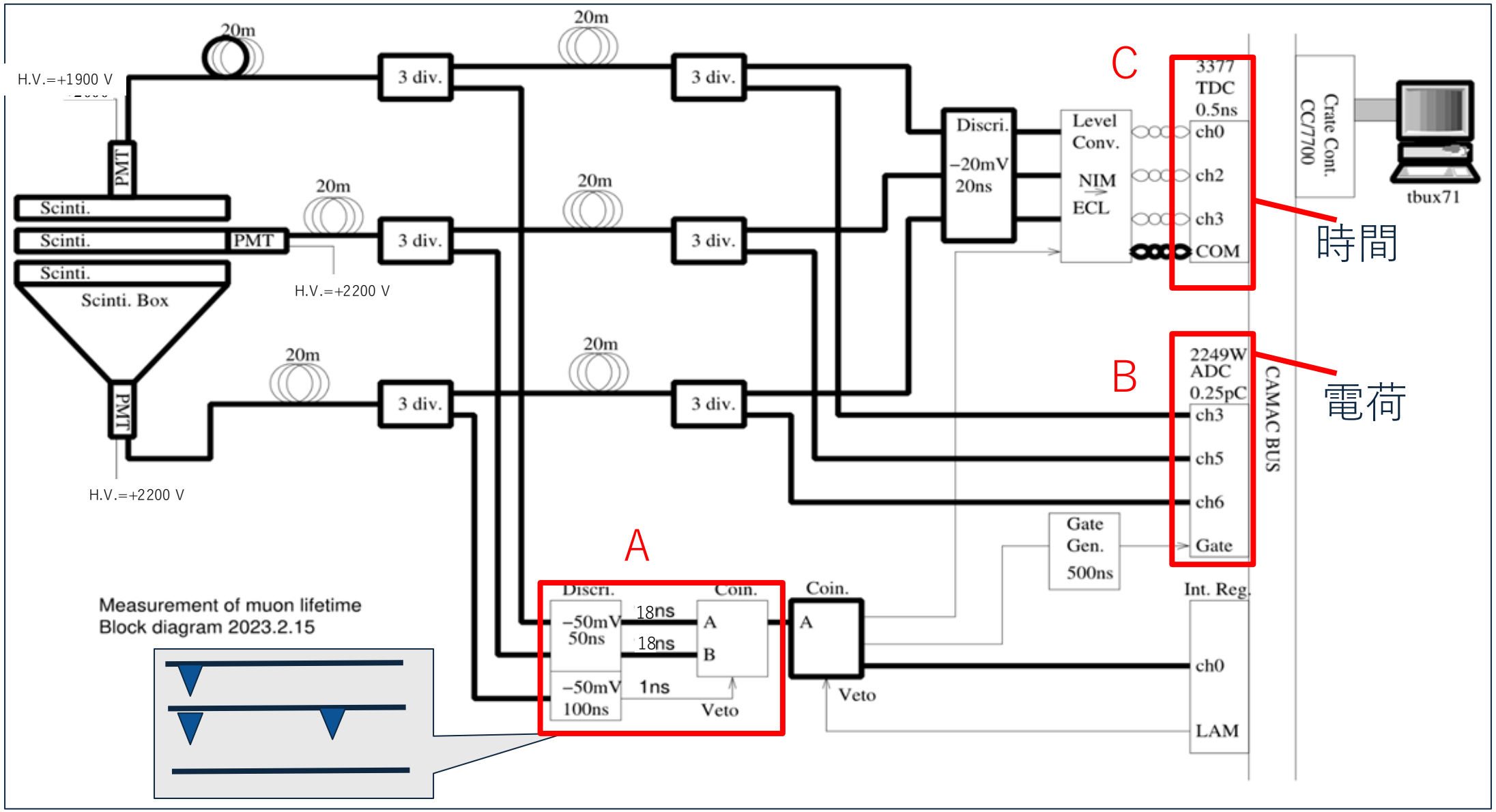
崩壊率を上げるため、
中層と下層の間に厚み3cmの
アルミ板を挿入
→途中からなしでも測定

観測方法・観測装置


μ^-
$\bar{\nu}_e$
シンチレータ
PMT
PMT
PMT
e^-
ν_μ


電圧
信号
μが来た！
μが崩壊した！
崩壊時間
μが貫通してない！=信号なし
時間

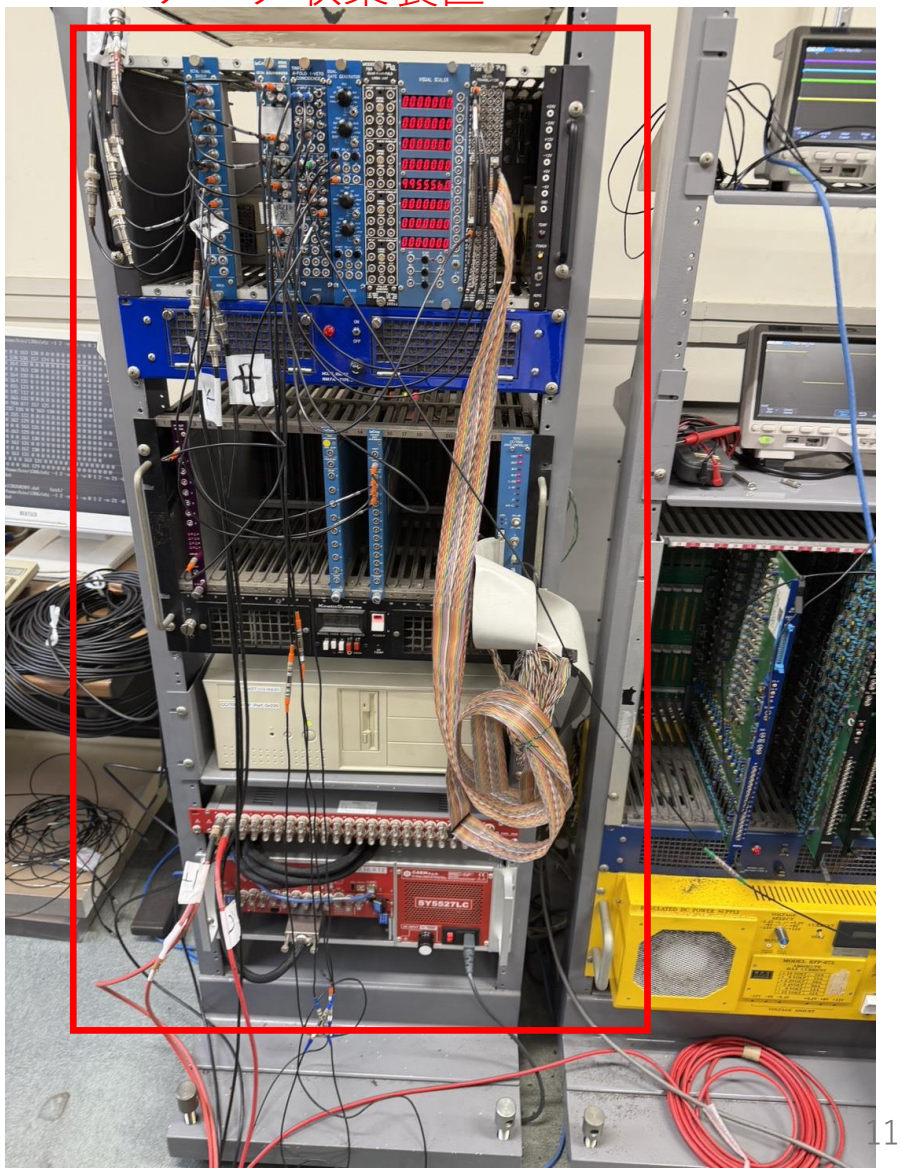
観測方法・観測装置


20m
H.V.=+1900 V
3 div.
PMT
Scinti.
Scinti.
Scinti.
Scinti. Box
PMT
H.V.=+2200 V
PMT
H.V.=+2200 V
Discri.
−20mV
20ns
Level
Conv.
NIM
ECL
C
3377
TDC
0.5ns
ch0
ch2
ch3
COM
Crate Cont.
CC/7700
tbux71
時間
B
2249W
ADC
0.25pC
ch3
ch5
ch6
Gate
CAMAC BUS
電荷
Gate
Gen.
500ns
A
Discri.
−50mV
50ns
−50mV
100ns
18ns
18ns
1ns
Coin.
A
B
Veto
Coin.
A
Veto
Int. Reg.
ch0
LAM
Measurement of muon lifetime
Block diagram 2023.2.15

観測方法・観測装置



データ収集装置



観測方法・観測装置

2026年3月9日～３月11日：アルミあり

3月11日：アルミなし、下層シンチレーターの
Vetoなしで測定→3つ透過するミューオンを測定

3月11日～3月13日：アルミなし

～プロジェクト "τ"～

ミューオンの寿命測定

ミューオンの寿命

仮定
時刻tでの粒子数N(t)に対する変化量dNは、単位時間dtあたり、常に一定(-1/τ<0)である（崩壊確率が単位時間あたりに一定）。

$$\frac{dN(t)}{N(t)} = \frac{-1}{\tau}dt$$

$$\frac{dN(t)}{dt} = \frac{-N(t)}{\tau}$$

$$N(t) = N(0)e^{\frac{-t}{\tau}}$$

N(0)：初期の粒子数
τ：ミューオンの寿命（平均崩壊時間）

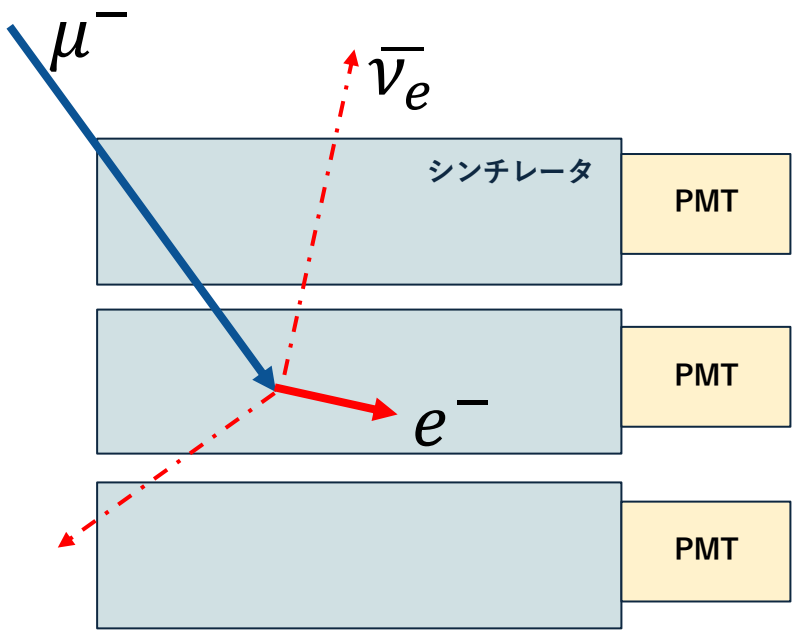
粒子数N(t)は指数関数的に減少する。

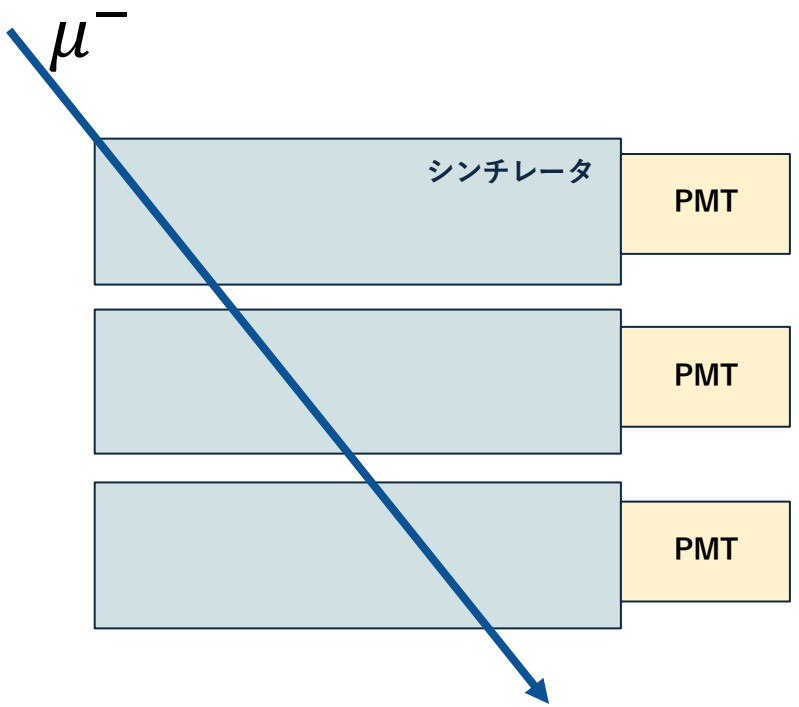
プロジェクト“τ"

測定方法

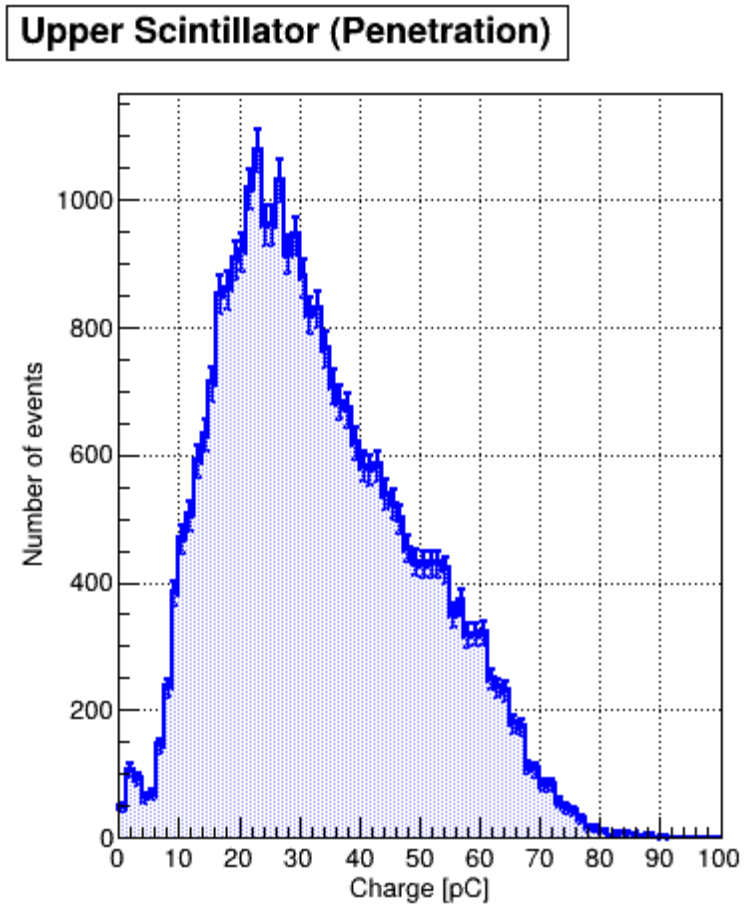
1. Al板あり
　①中シンチで停止するミューオンを測定　②中シンチを通過するミューオンを測定

2. Al板なし

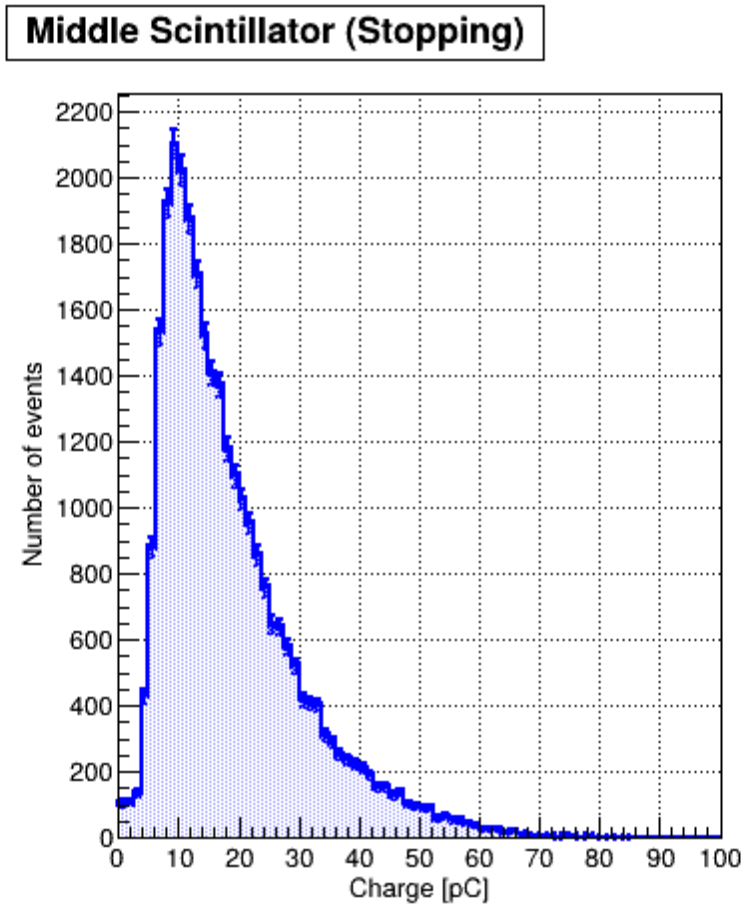




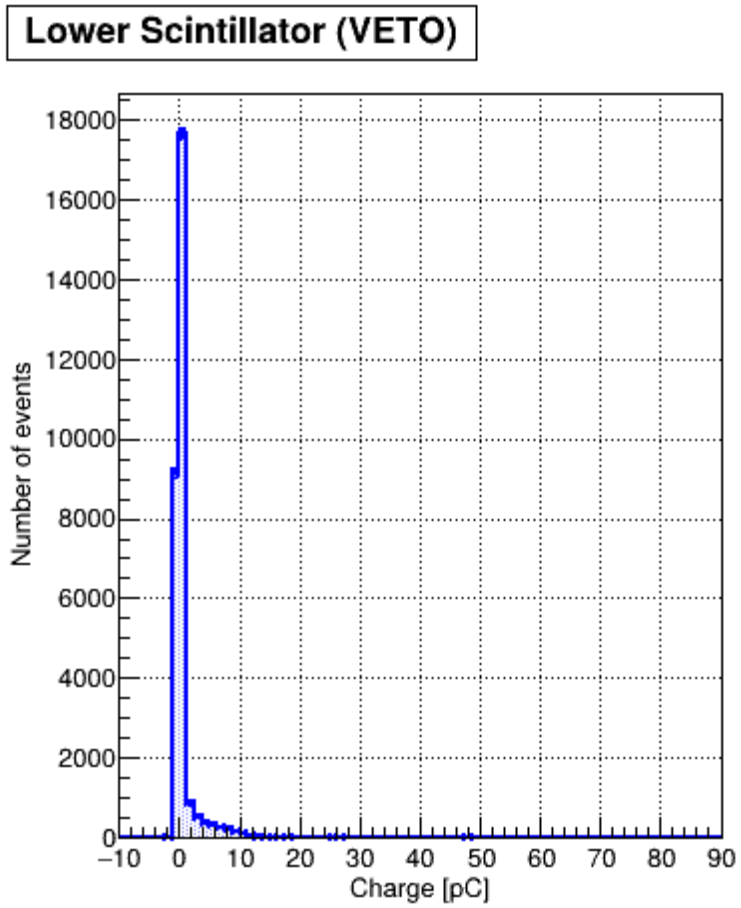
〈中シンチで停止する場合の電荷分布（上・中・下）〉



上シンチ： 信号あり

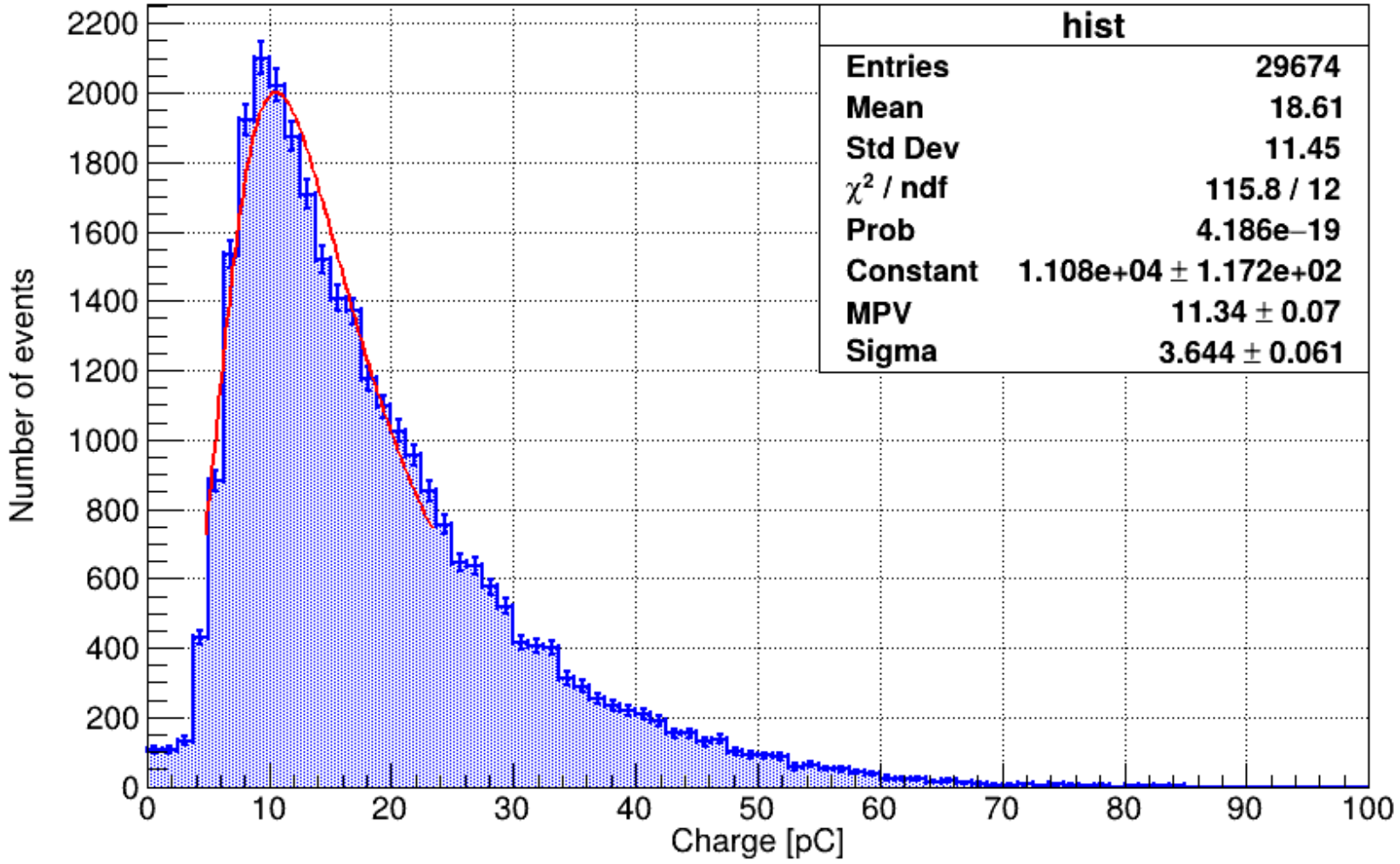


中シンチ： 信号あり



下シンチ： 信号なし

〈中シンチの電荷分布 （中シンチで停止）〉

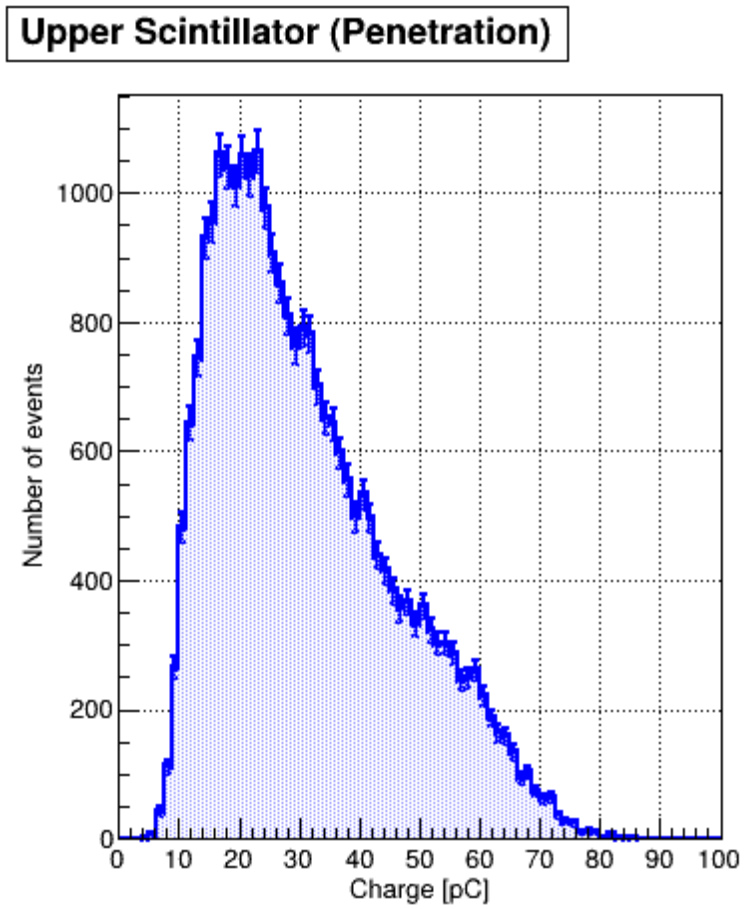


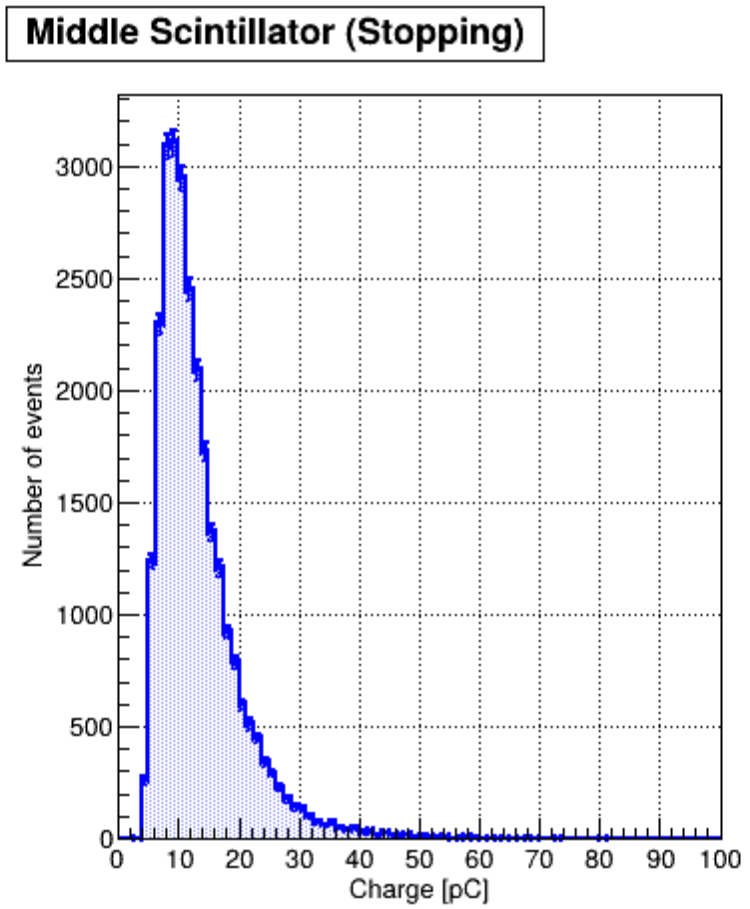
中シンチの電荷分布 （停止）

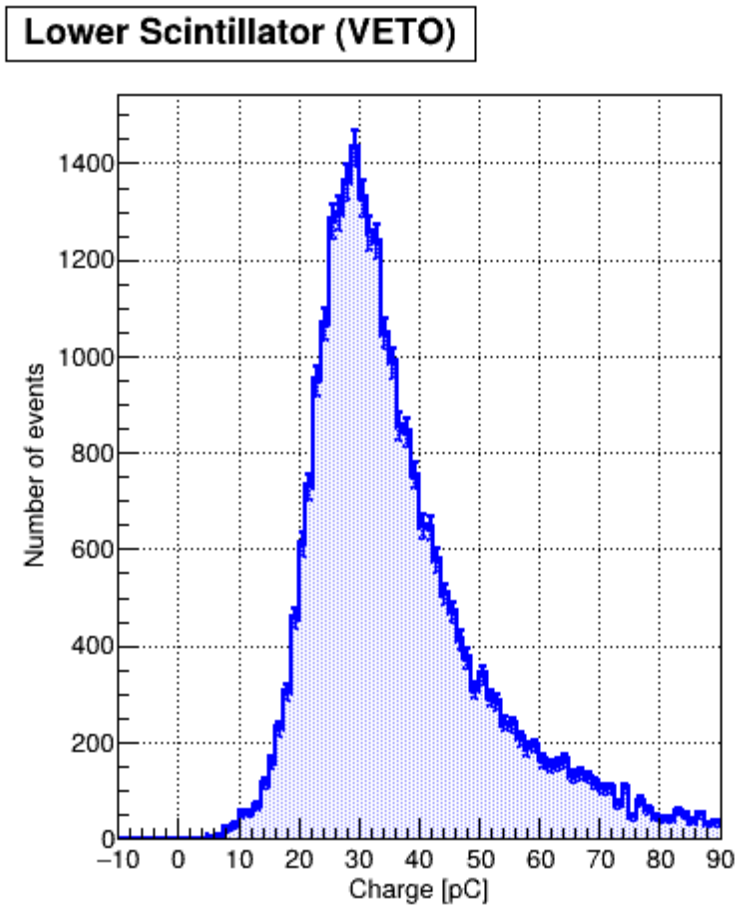
中シンチで停止する
μ による電荷量

電荷の最頻値（MPV）
11.34 pC

〈中シンチを貫通する場合の電荷分布（上・中・下）〉





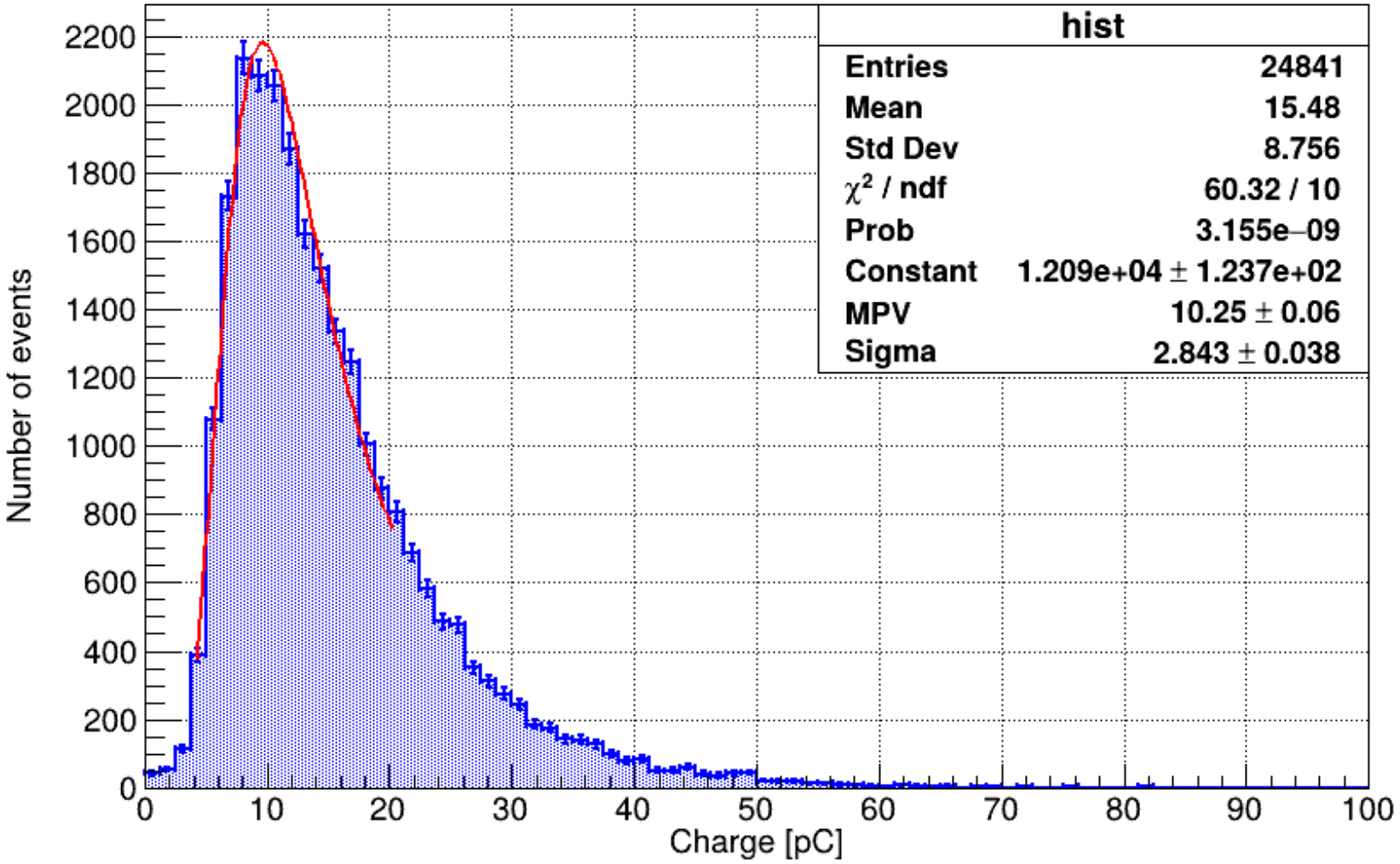


上シンチ： 信号あり

中シンチ： 信号あり

下シンチ： 信号あり

〈中シンチの電荷分布 （中シンチを貫通）〉



中シンチの電荷分布 （貫通）

上・中・下シンチを貫通する
μ による電荷量

電荷の最頻値（MPV）
10.25 pC

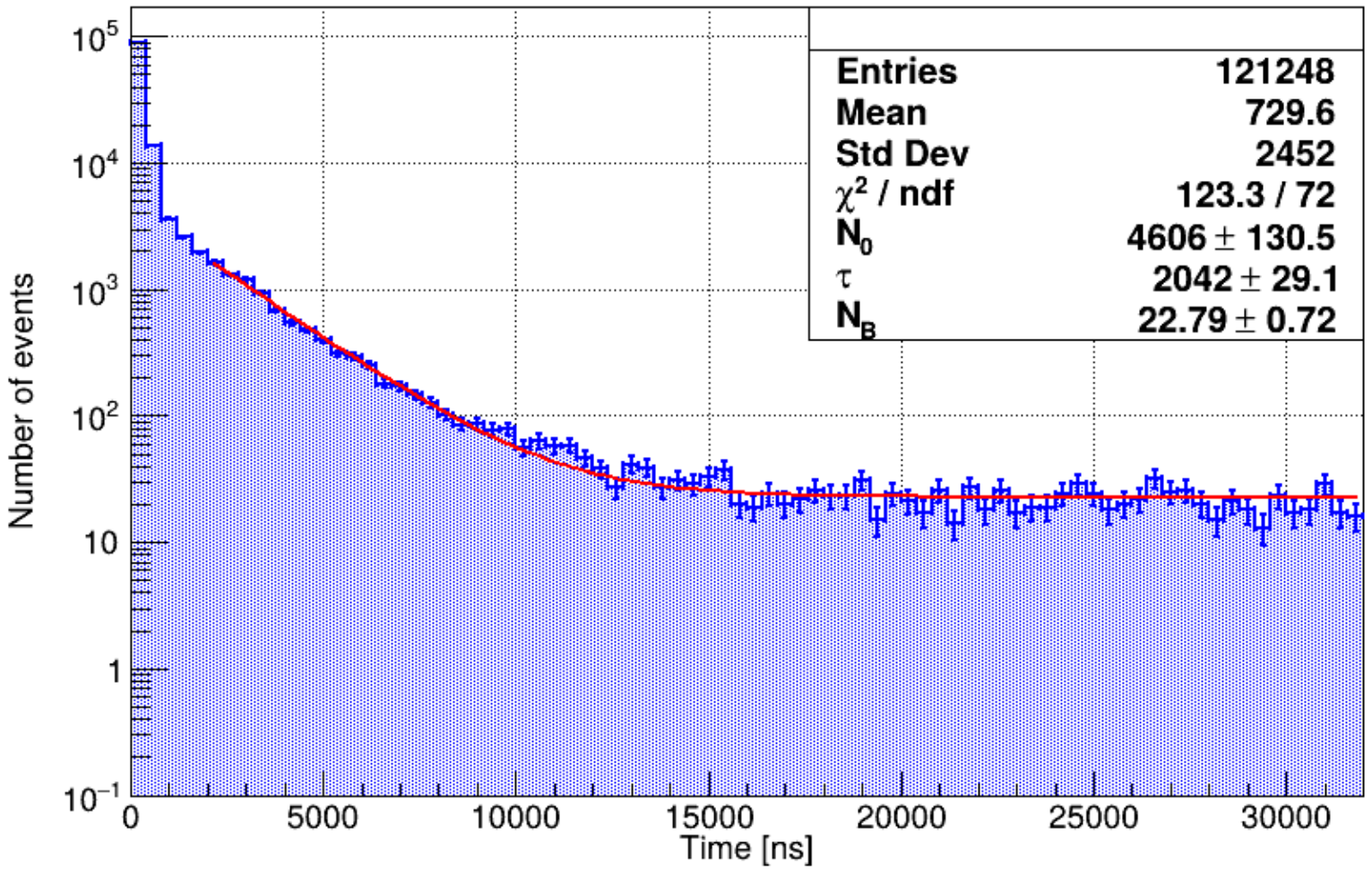
〈停止・貫通の比較（MPV）〉

μがシンチレータを通過した信号の大きさ

中シンチで停止 （11.34 pC） ＞ 中シンチを貫通 （10.25 pC）

ミューオンは停止する時の方が多くの
エネルギーを落とす

〈μ 崩壊の時間分布フィット〉



μ 崩壊時間分布 （中シンチ, Al板あり）

フィット関数

$$f(t) = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + N_B$$

パラメータ

N_0：初期イベント数

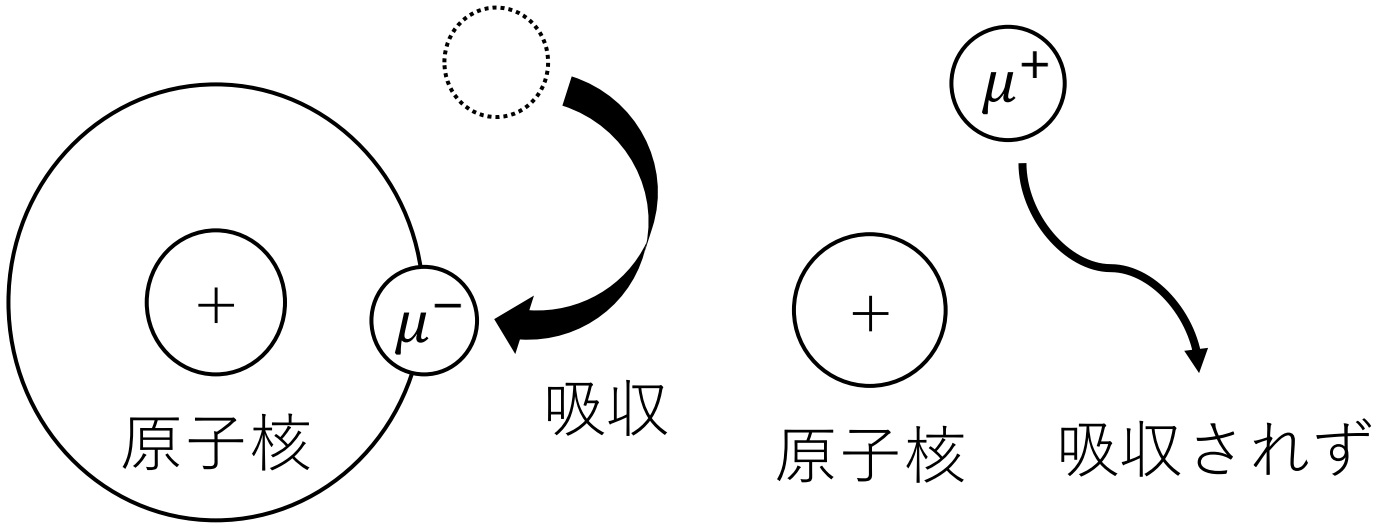
N_B ： バックグランド数

τ ： ミューオンの寿命

フィット範囲：$[2, 32]\ \mu s$

$$\tau = 2.04 \pm 0.3\ \mu s$$

〈μ^+ と μ^- の寿命の比較〉



物質中における μ^- の寿命 (τ_-)

原子番号 Z	原子	寿命 /ns
6	C	2028(2)
13	Al	864(2)

予想

1. μ^+ の寿命 $>$ μ^- の寿命
2. τ_+ は物質の種類によらない
3. μ^- はアルミ中では炭素中より早く崩壊 ($\tau_{-,\mathrm{C}} > \tau_{-,\mathrm{Al}}$)

フィッテイングによって
μ^- の寿命　τ_- を導出＋比較
（Al板あり or なし）

〈μ^+ と μ^- の違いを考慮したフィッティング関数〉

・2つの指数関数（＋バックグランド）の重ね合わせで
フィット

$$N\{t \sim (t+\Delta t)\} = N_+\left\{1-\exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_+}\right)\right\}\exp\left(-\frac{t}{\tau_+}\right) + N_-\left\{1-\exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_-}\right)\right\}\exp\left(-\frac{t}{\tau_-}\right) + N_B$$

μ^+ の項

μ^- の項

バックグランド

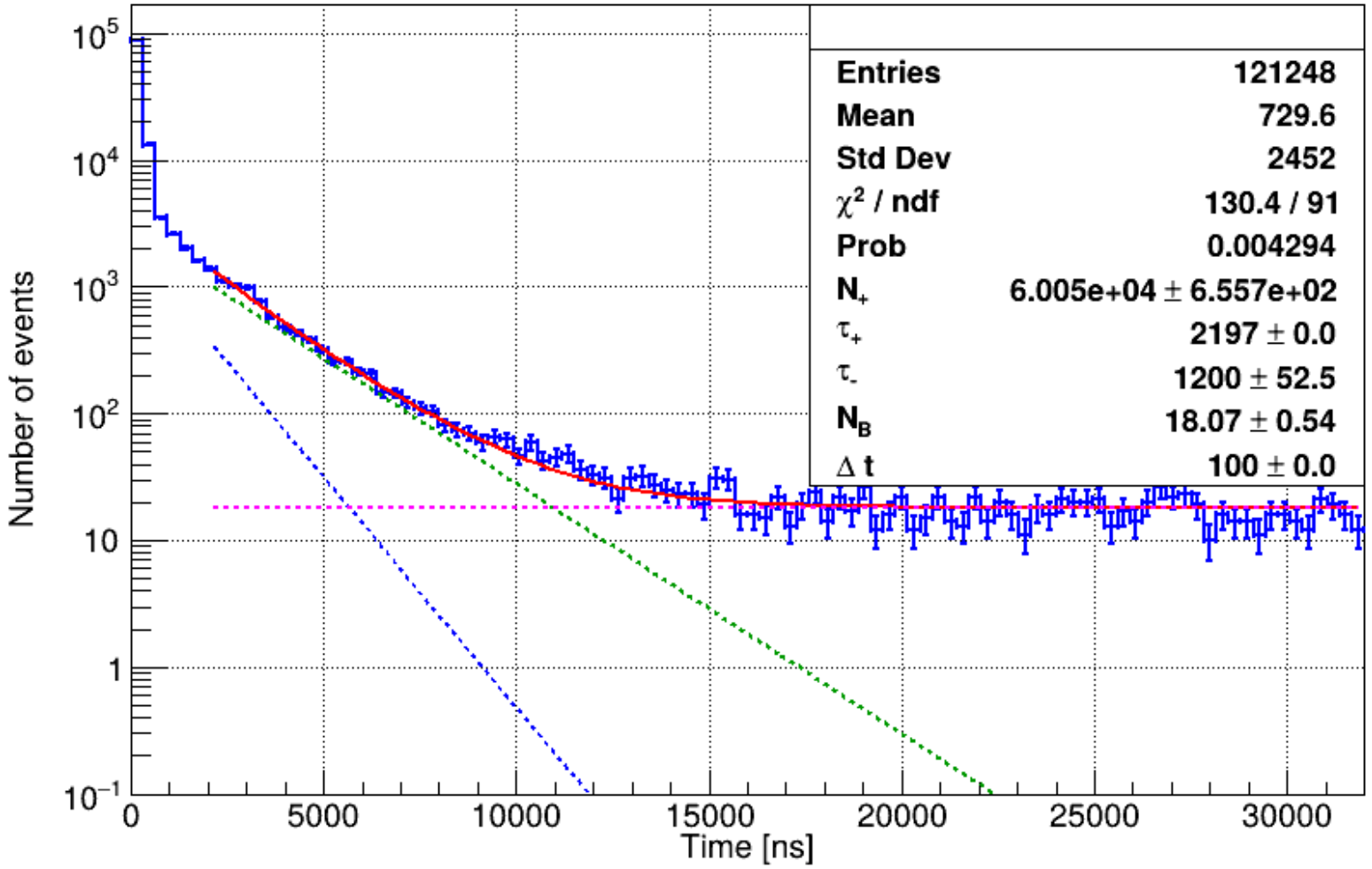
t から $t+\Delta t$ までの区間におけるイベント数

1. τ_+ を 2197 ns に固定　　2. μ^+/μ^- を 1.3 に固定（μ^+/μ^- は 1.2 ~ 1.4 の値をとる）

パラメータの数は3つ（ N_+ , τ_- , N_B ）

- 参考：スーパーカミオカンデ実験における宇宙線ミューオンの電荷比とスピン偏極度の測定

〈μ 崩壊時間分布 （AI板有, 新フィット）〉



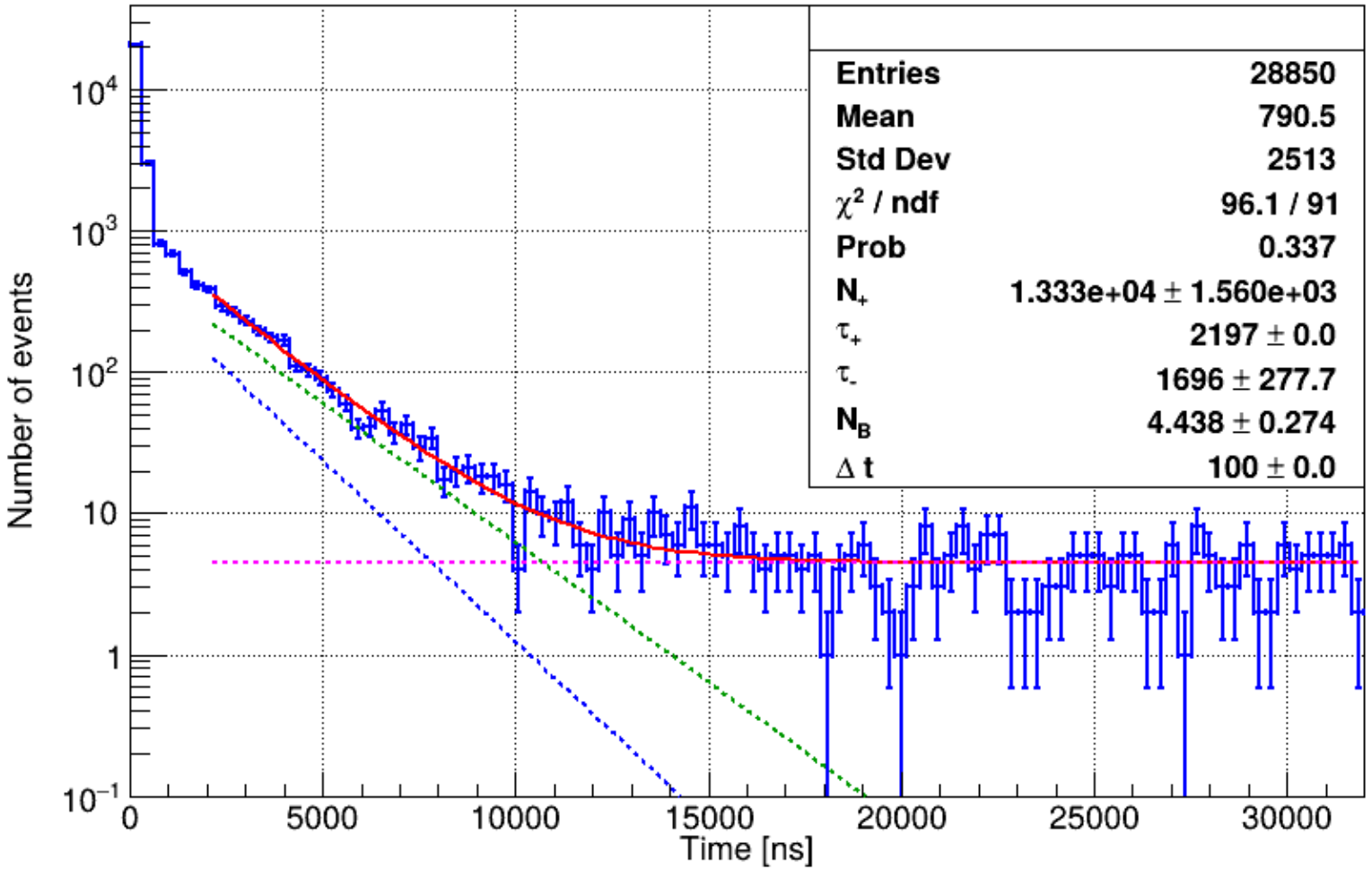
μ 崩壊時間分布 （AI板あり）

- 青破線： μ^- の成分
- 緑破線： μ^+ の成分
- 赤破線： BGの成分

- アルミ板ありの場合

$\tau_- = 1.20 \pm 0.5\ \mu s$

〈μ崩壊時間分布 （Al板無, 新フィット）〉



μ崩壊時間分布 （Al板なし）

・アルミ板なしの場合

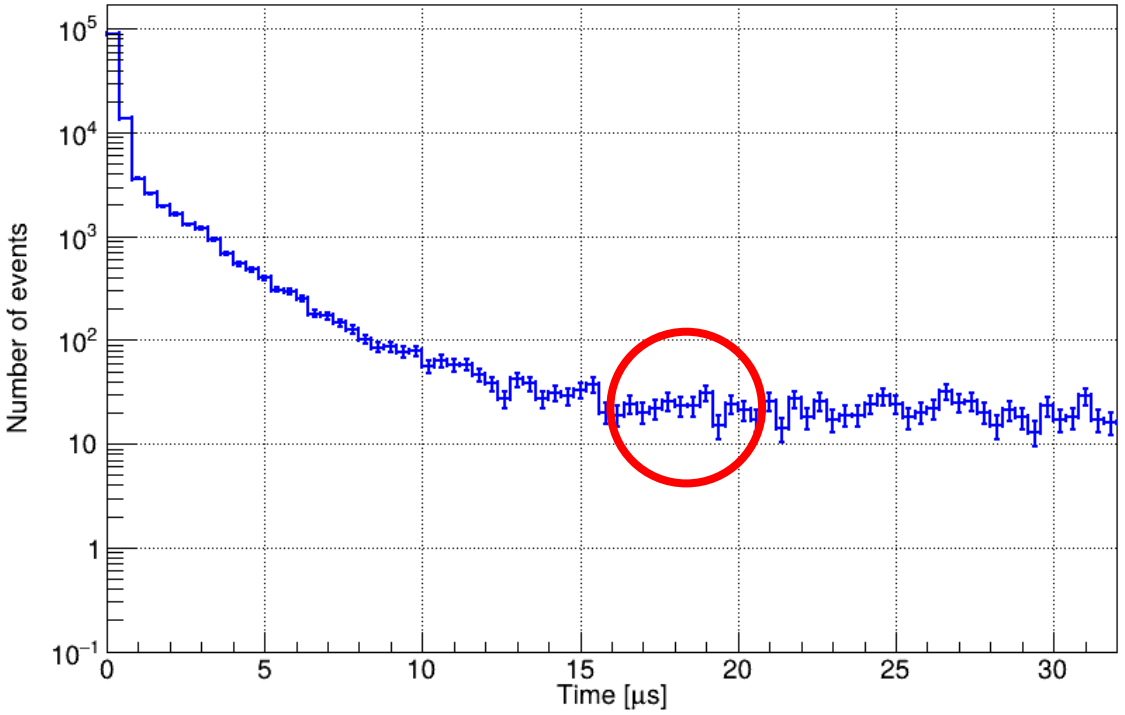
$\tau_- = 1.70 \pm 0.28\ \mu s$

μ^-の崩壊時間

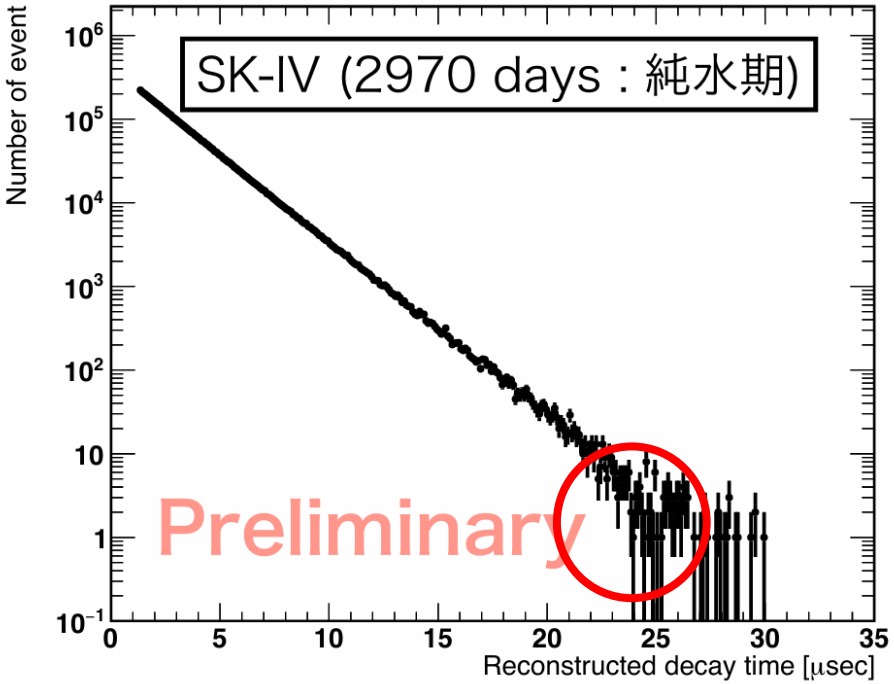
Al板なし＞Al板あり

原子番号 Z	原子	寿命 /ns
6	C	2028(2)
13	Al	864(2)

〈バックグランドについて〉



今回の測定データ（AI板なし）



カミオカンデのデータ

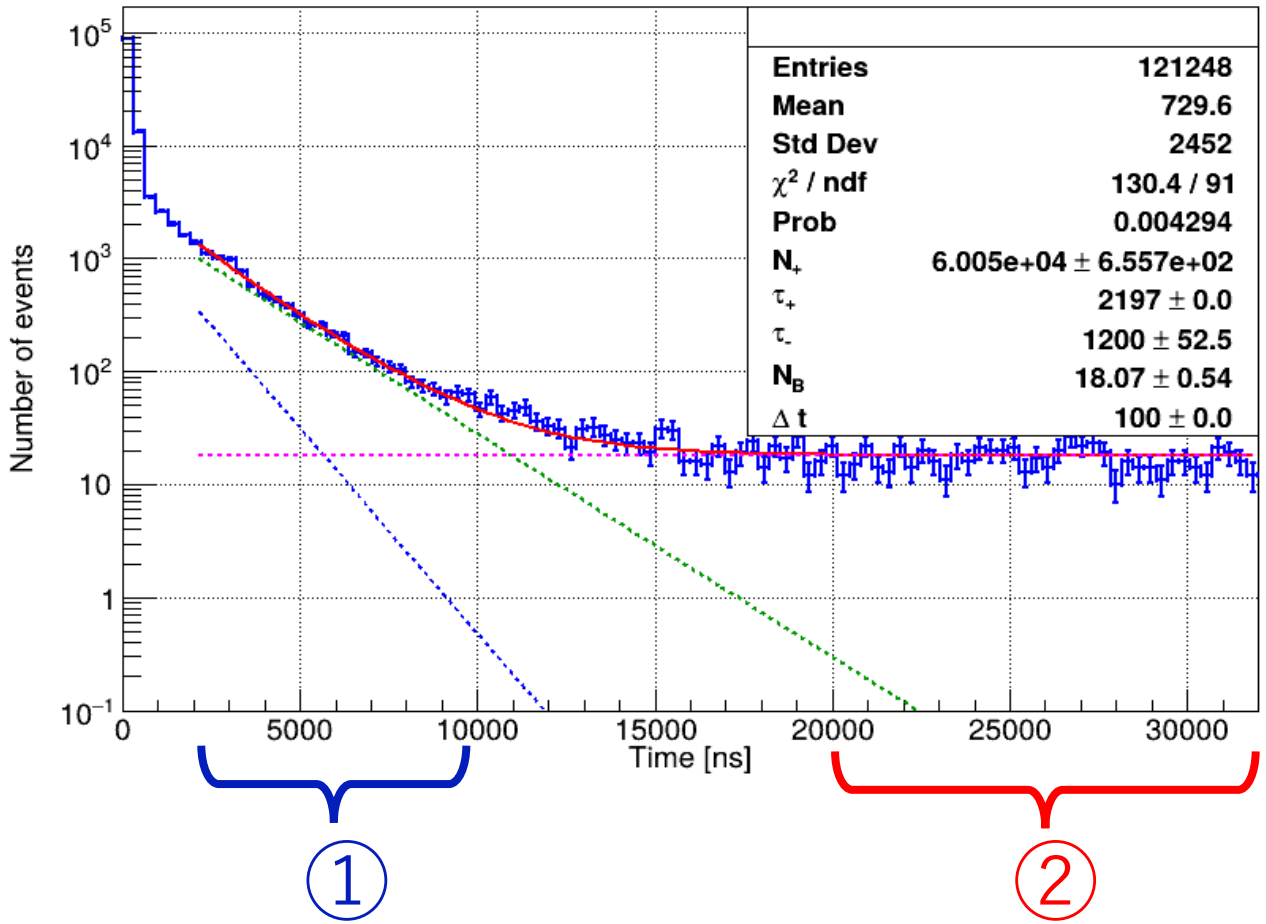
出典：スーパーカミオカンデ実験における宇宙線ミューオンの 電荷比とスピン偏極度の測定（日本物理学会2023春季大会）

バックグランドの影響
- 今回： $16\,\mu s$ 付近で顕著
- SK： $24\,\mu s$ 付近まで現れず

➡ 何とかして BGを減らしたい

〈閾値によるバックグランド除去（方法）〉

中シンチで停止　（11.34 pC）
中シンチを貫通　（10.25 pC）
} 閾値： 10.8 pC に設定 ➡ より μ の崩壊らしき信号を抽出



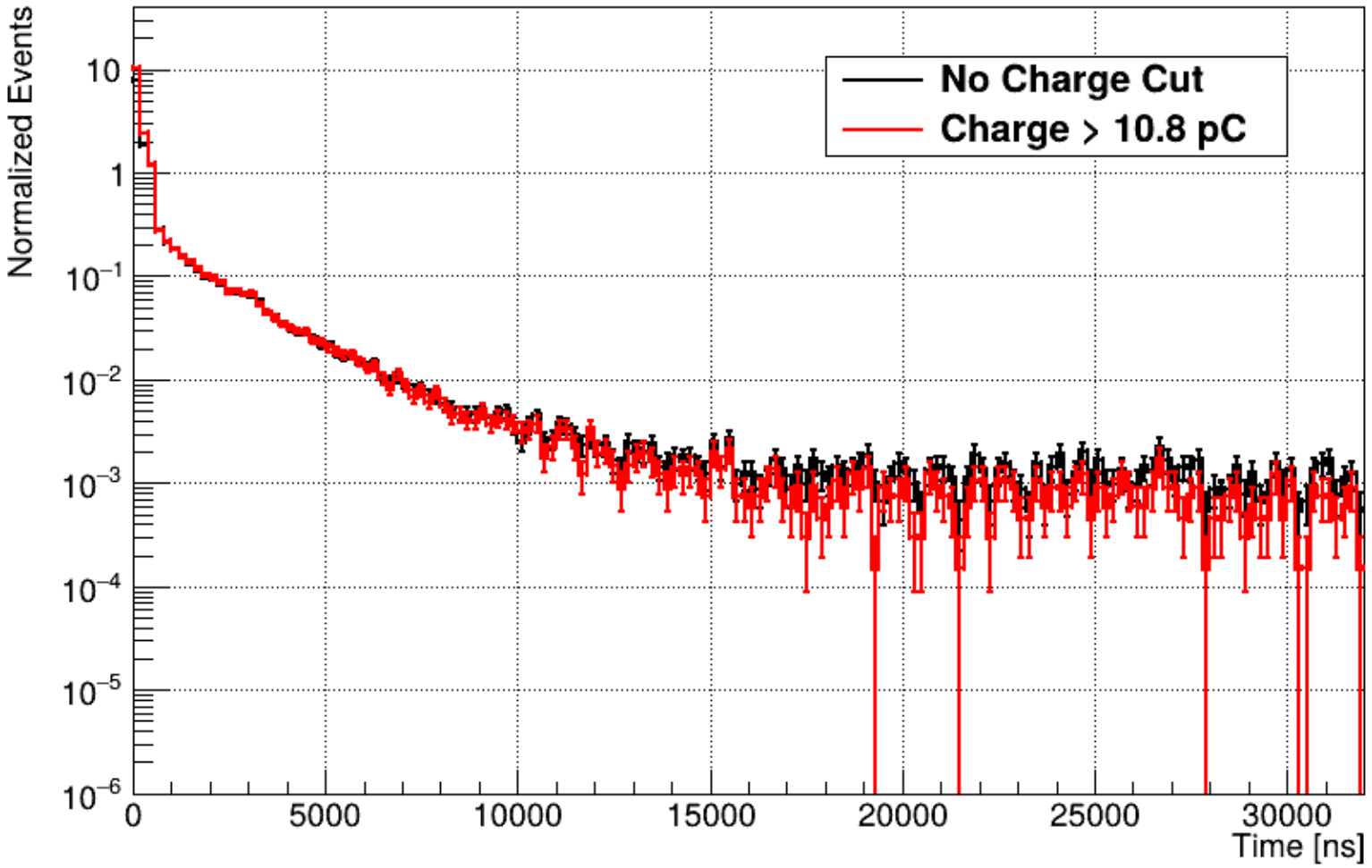
①の領域（$2 \sim 10\ \mu s$）
μ のシグナルの影響が強い

②の領域（$20 \sim 32\ \mu s$）
BGの影響が強い

②のイベント数/①のイベント数
⇒BGのレートを導出

閾値設定前後で
BGのレートを比較

〈閾値によるバックグランド除去（結果）〉



μ 崩壊時間分布 （閾値あり・なし）

閾値なし

$2 \sim 10\ \mu s$ 領域： 9088 イベント

$10 \sim 32\ \mu s$ 領域： 631 イベント

⇒ BGレート: 6.94 %

閾値あり

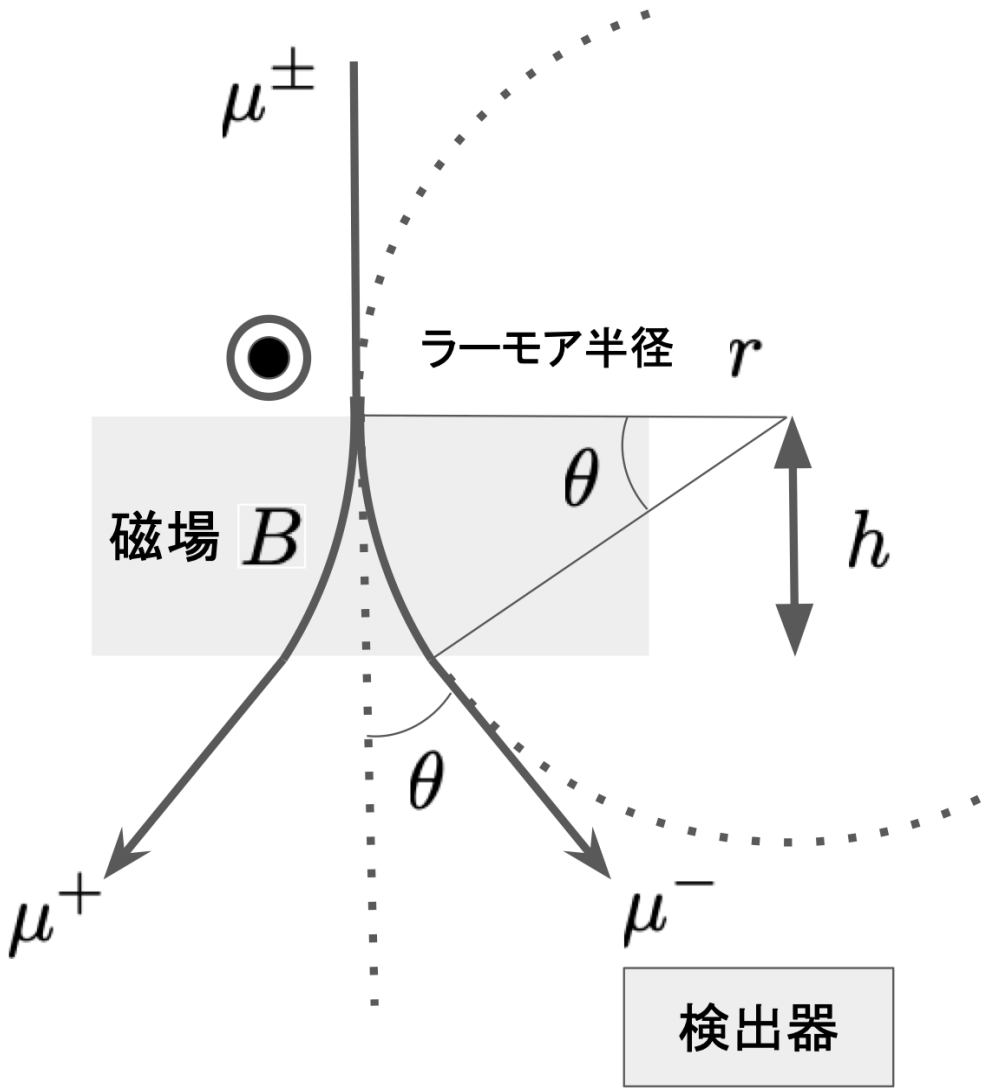
$2 \sim 10\ \mu s$ 領域： 6646 イベント

$10 \sim 32\ \mu s$ 領域： 286 イベント

⇒ BGレート: 4.30 %

閾値を設定することで
BGを減らすことが可能

2022年の先行研究　磁場によってμ⁺とμ⁻を分けて測定したい



ミューオンのエネルギー E と磁場 B、角度 θ の関係

磁場中の荷電粒子に対する運動方程式より　$\left(\gamma \equiv \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}}\right)$

$$\gamma m \frac{v^2}{r} = evB \quad \Rightarrow \quad r = \frac{\gamma m v}{eB} = \frac{p}{eB} \qquad (1)$$

ラーモア半径 r を幾何学的に導出

$$\frac{h}{r} = \sin\theta \quad \Rightarrow \quad r = \frac{h}{\sin\theta} \qquad (2)$$

(1) = (2) より

$$\frac{p}{eB} = \frac{h}{\sin\theta} \quad \therefore \quad B = \frac{pc}{ehc}\sin\theta$$

2022年の先行研究　磁場によってμ^+とμ^-を分けて測定したい

30MeVのミューオンをを20度曲げるのに
必要な磁場の大きさ

$$B = \frac{pc}{ehc}\sin\theta$$

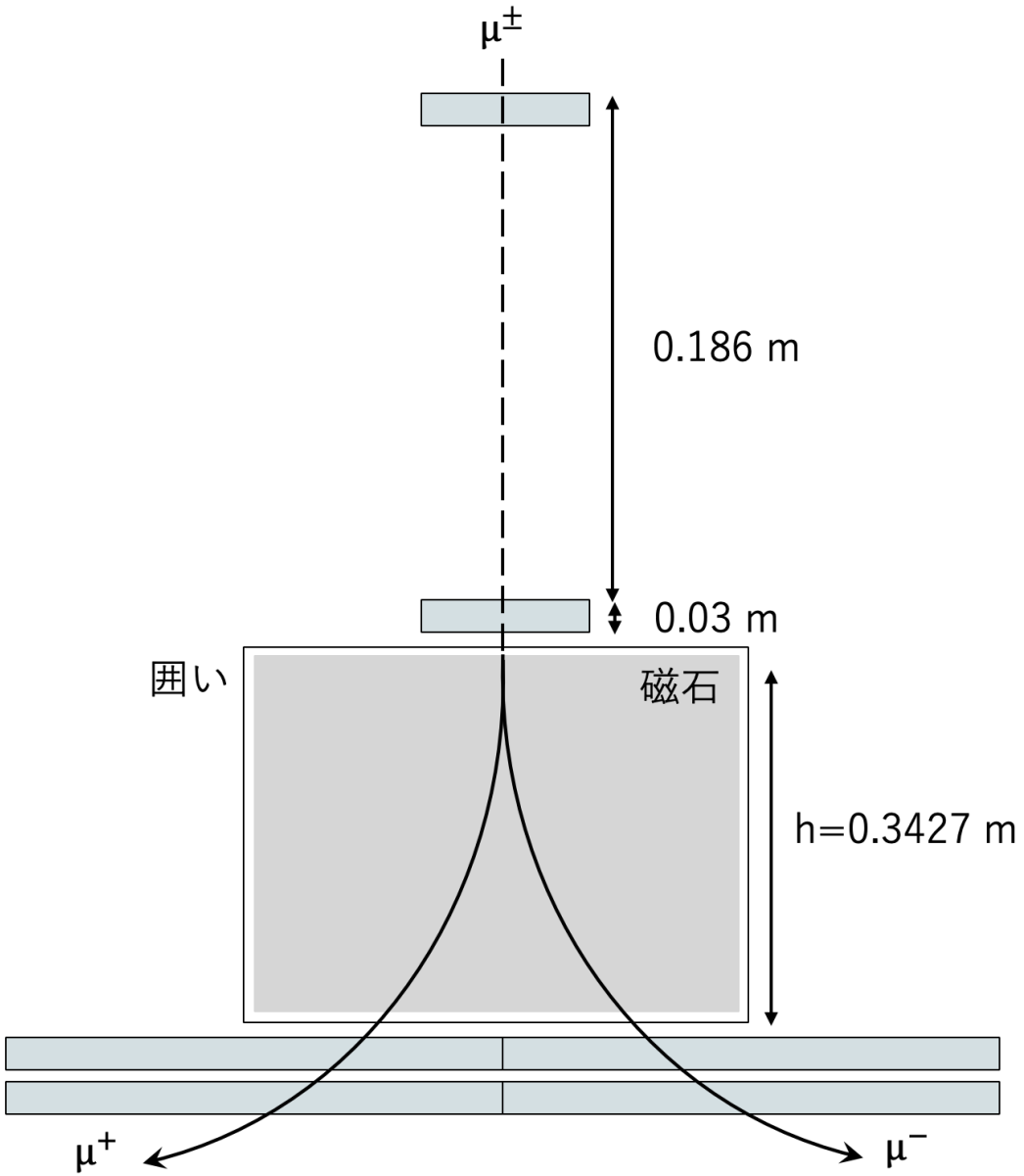
半径			
pc[J]	mc^2[J]	c[m/s]	e[C]
4.81E-12	1.60E-11	3.00E+08	1.60E-19
θ(degrees)	θ(rad)	箱の長さ[m]	r[m]
20	0.349	0.5	1.46
必要なB[T]			参考1eV->J
0.07	30 MeV = 4.81E-12 J		1.60E-19

先行研究のデータを元に、実際に磁石を使って再現できるか考える

磁石は0.1[T]を用いる、ミューオンは20度曲げるとすると、必要な磁石の大きさは、

$$h = \frac{pc}{ecB}\sin\theta = 0.3427\ \mathrm{m}$$

2022年の先行研究　磁場によってμ⁺とμ⁻を分けて測定したい



- PMTとシンチに磁場の影響が行かないよう、磁石に囲いをつける
  - 内側：5mm程度の鉄板
  - 外側：パーマロイシート（ニッケルと鉄の合金）

- 横や斜め方向からのμをなくすため、立体角30度となるように上シンチの上にもう1個シンチを置く
- 実際にこの方法で実験を行うなら、鉄板の重さがあるため磁石を支える台を入れなければならない

→今後に期待です！

～プロジェクト"μ"～

ミューオンのエネルギー

〈停止・貫通の比較（MPV）〉（再掲）

μがシンチレータを通過した信号の大きさ

中シンチで停止（11.34 pC）＞中シンチを貫通（10.25 pC）

具体的にどれくらい？

ミューオンは停止する時の方が多くの
エネルギーを落とす

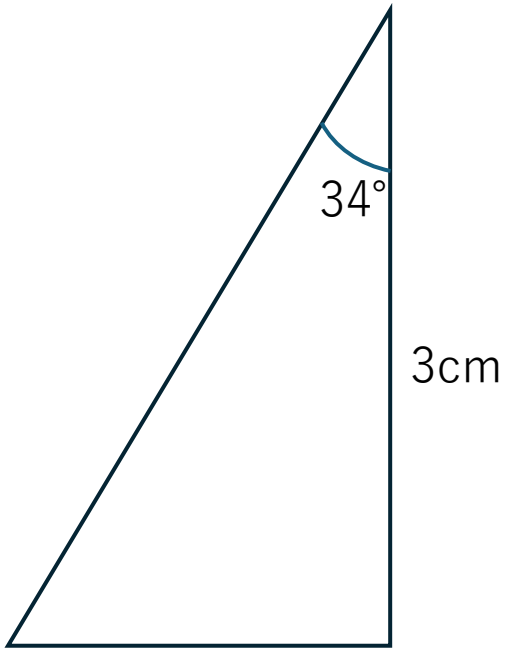
プロジェクト“μ"

アルミ板の有無で、
通過する粒子のエネルギー損失の変化を調べる

エネルギー損失から、
真ん中の層でどのくらい通過してから
崩壊したのか平均値を用いて議論する

プロジェクト“μ”

地上に届くミューオンは
真上からくるものだけではない
計算すると、平均天頂角34°から飛来



実際の通過するミューオンの
シンチレーター内での平均進行距離

$$3cm \times \frac{1}{\cos 34°} \approx 3.62cm$$

プロジェクト“μ"

Bethe-Blochの式から、
高エネルギーのミューオンの運動エネルギーは
1cm通過するごとに2MeV落ちる

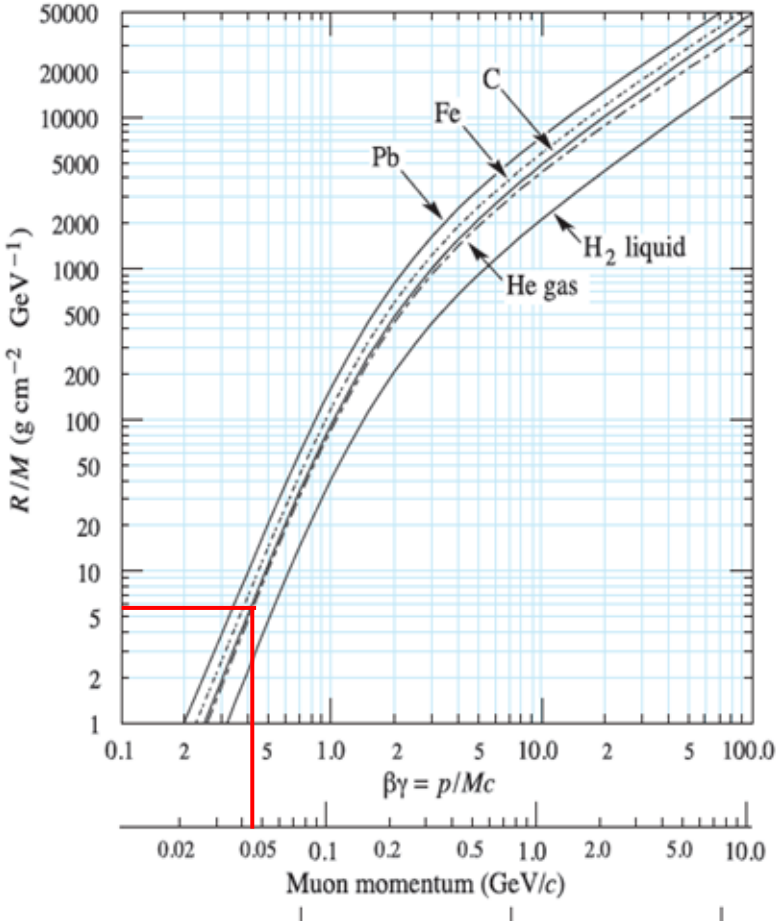
↓

ミューオンが通過するときの信号
(10.25±0.06)pCは
ミューオンの運動エネルギー
3.62 × 2 = 7.24MeV失ったことに対応

プロジェクト“μ"

アルミを置いていないとき
ミューオンが二層目で崩壊した時の
信号(13.0 ±0.2) pCは
運動エネルギー(9.3±0.2)MeVに対応
これは運動量(45.2 ± 0.2)MeV/cに対応

右図から、
真ん中のシンチレーターを(0.58±0.4)cm
通過して崩壊している



出典:Review of Particle Physics

～プロジェクト"π"～

パイオンの検出

プロジェクト"π"　目的

目的
荷電パイオンが来てるはずだから見てみたい！

寿命
　μ : 2200 ns　(=2.2 μs)
　π : 26 ns

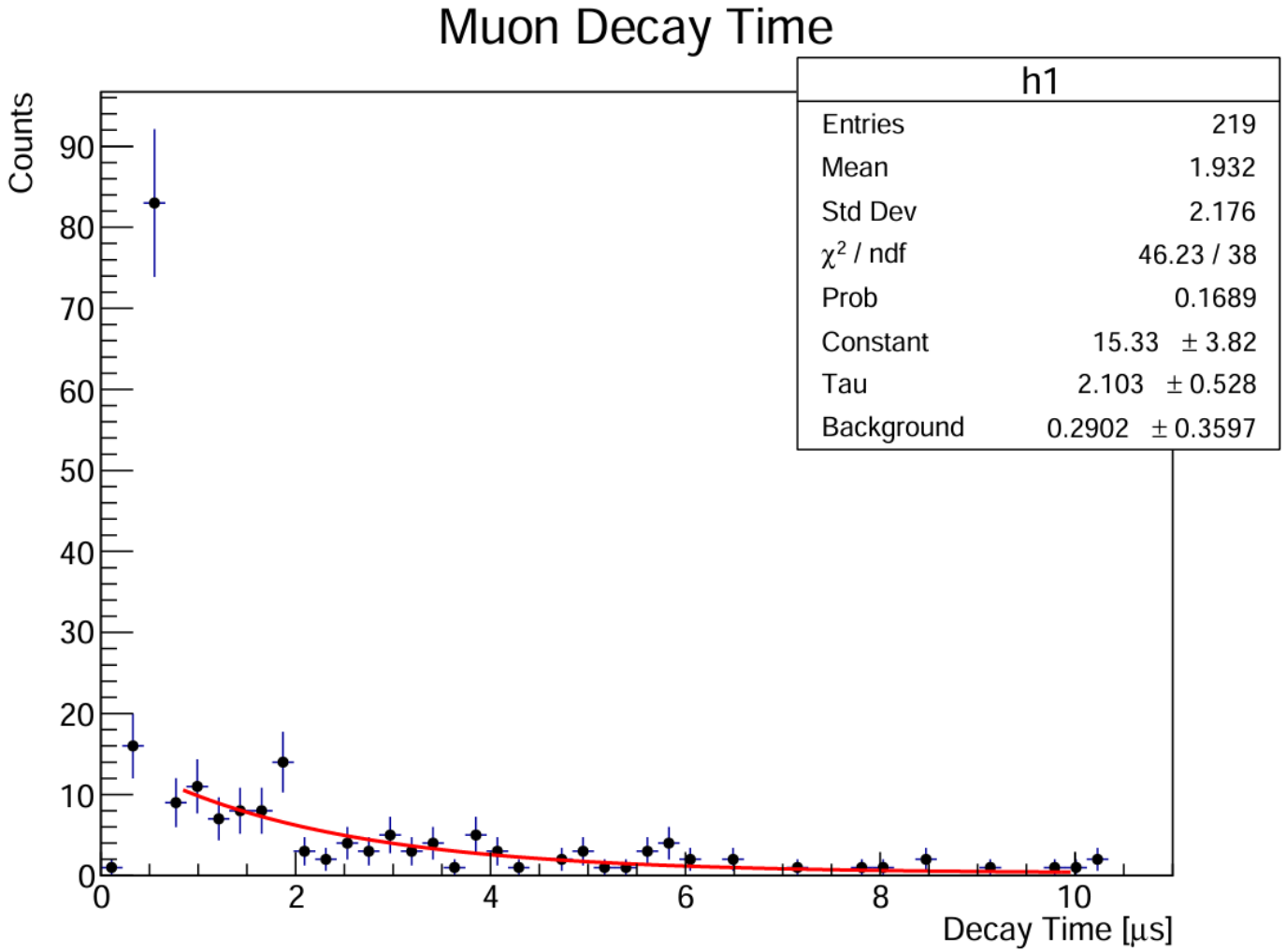
信号波形の幅　≧　26 ns

波形を直接見るしかない
今年は測定できなかったため、去年の波形データを解析した

プロジェクト"π"

波形データ(Al_3cm)

- 去年の波形データでのミューオンの崩壊時間

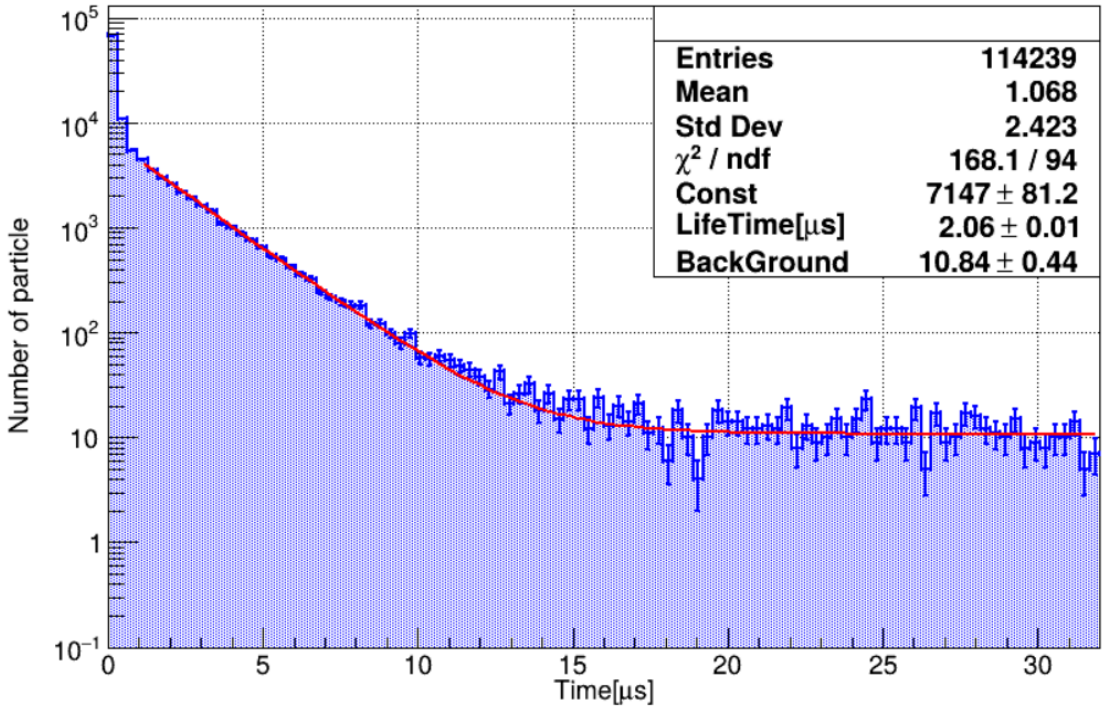


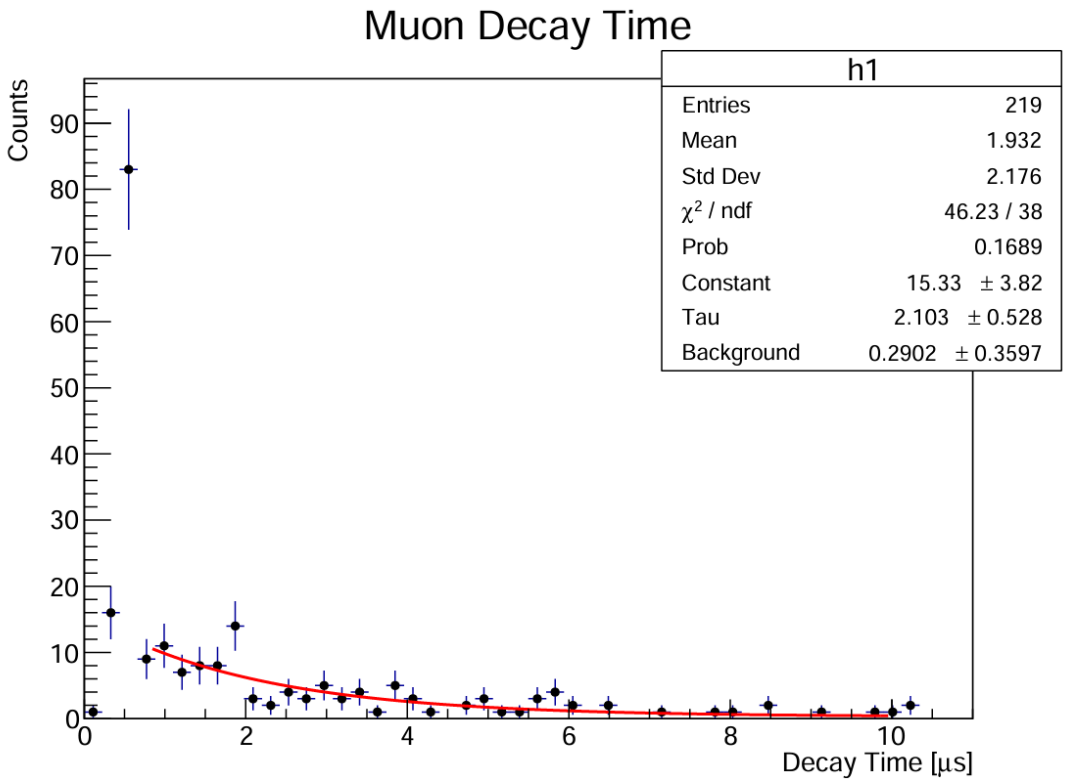
Constant : 初期イベント数
Tau : ミューオンの寿命

0.6μs付近にアフターパルスがある
→フィット範囲
[0.8 , 10]μs

ミューオンの寿命
$\tau = 2.1 \pm 0.5$ μs

プロジェクト"π"



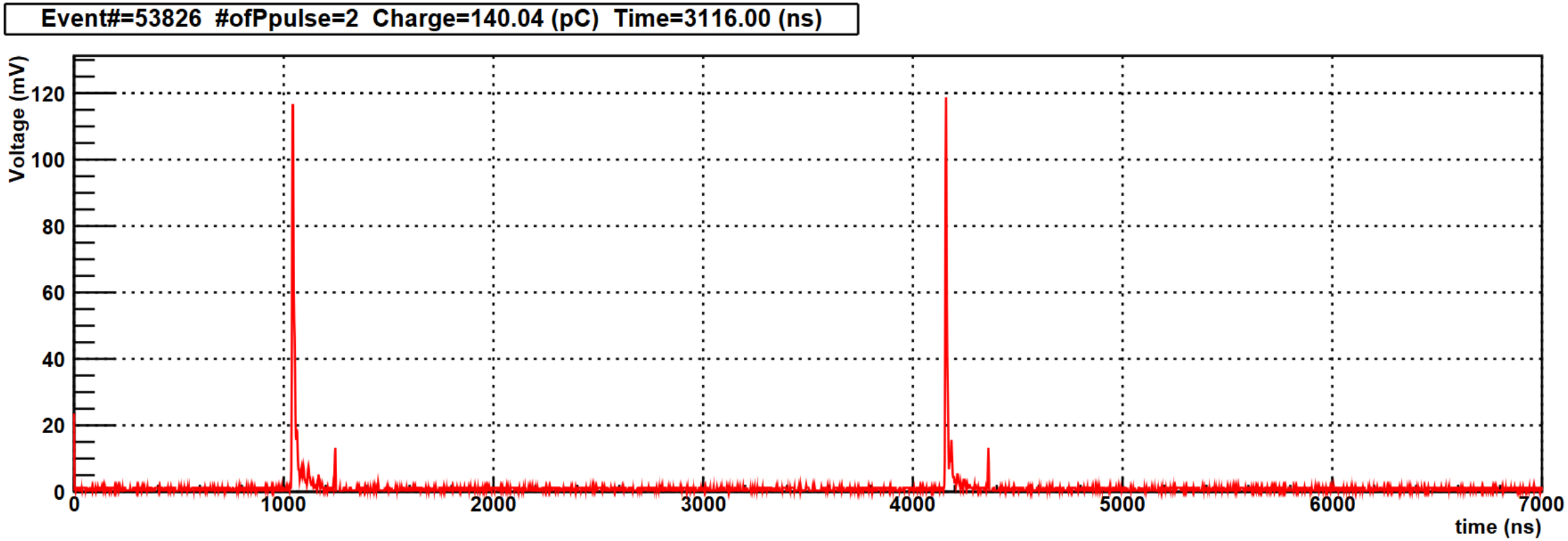


去年の波形での崩壊寿命＞今回求めた寿命
両者とも範囲内で τ =2.2 μsに一致している

（統計量の差、実験環境は完全には一致していない）

プロジェクト"π"　解析手法

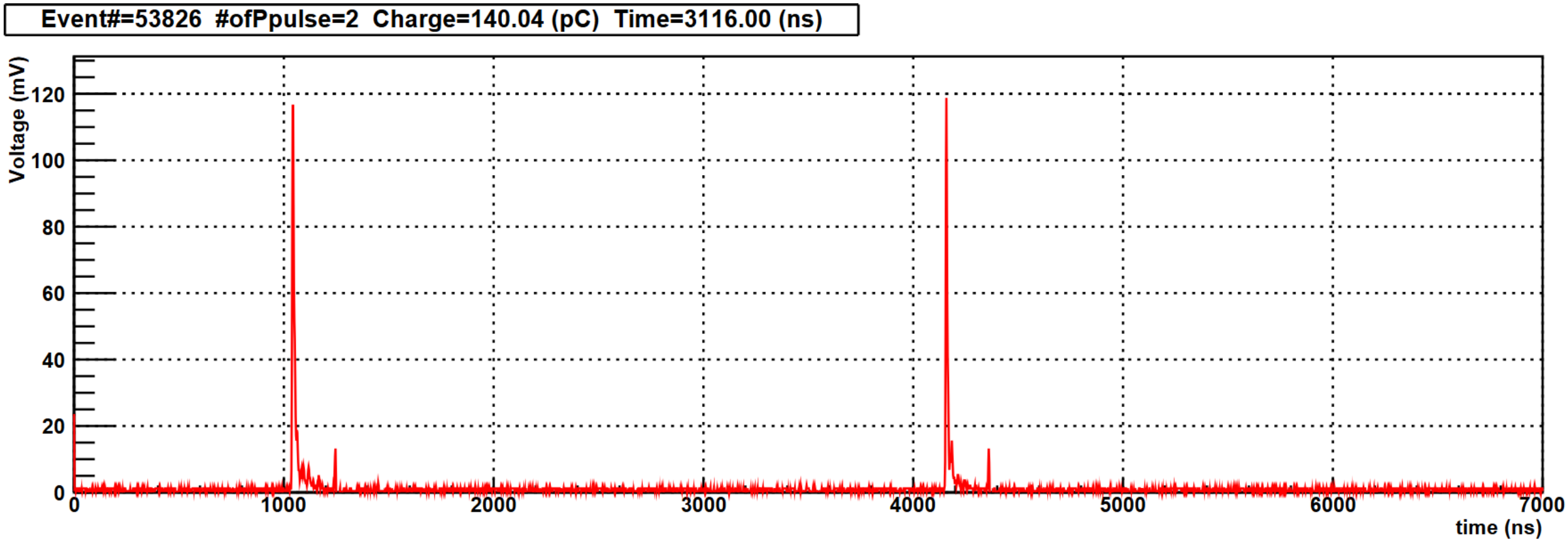
中シンチの波形



μ　　e

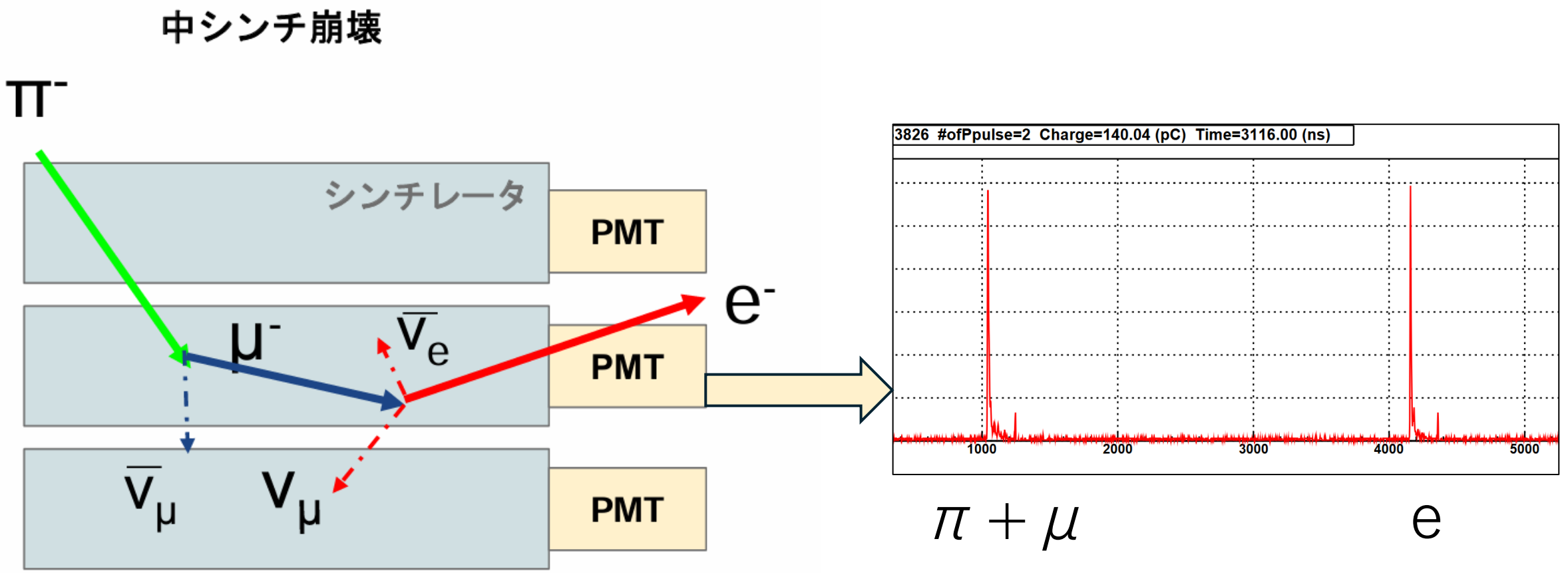
プロジェクト"π"　解析手法

中シンチの波形



$\pi + \mu$?　　e

プロジェクト"π"　解析手法



プロジェクト“π” 解析手法

Moyal Distribution でフィッティング

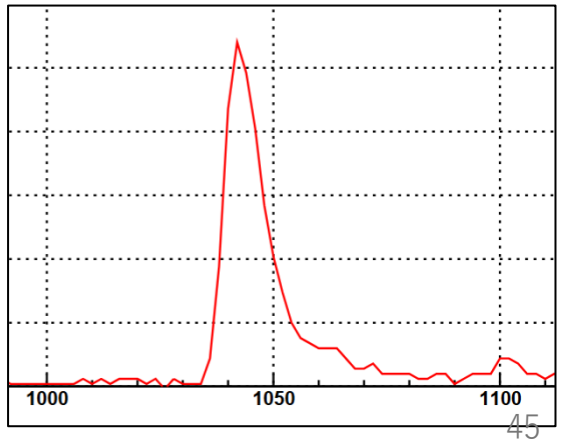
$$M(t;\mathrm{Area},m,\sigma)=\frac{\mathrm{Area}}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left[-0.5\left(\frac{t-m}{\sigma}+\exp\left(-\frac{t-m}{\sigma}\right)\right)\right]$$

Area: パルスの積分電荷量（エネルギーに比例）

m (Mean): パルスのピーク位置

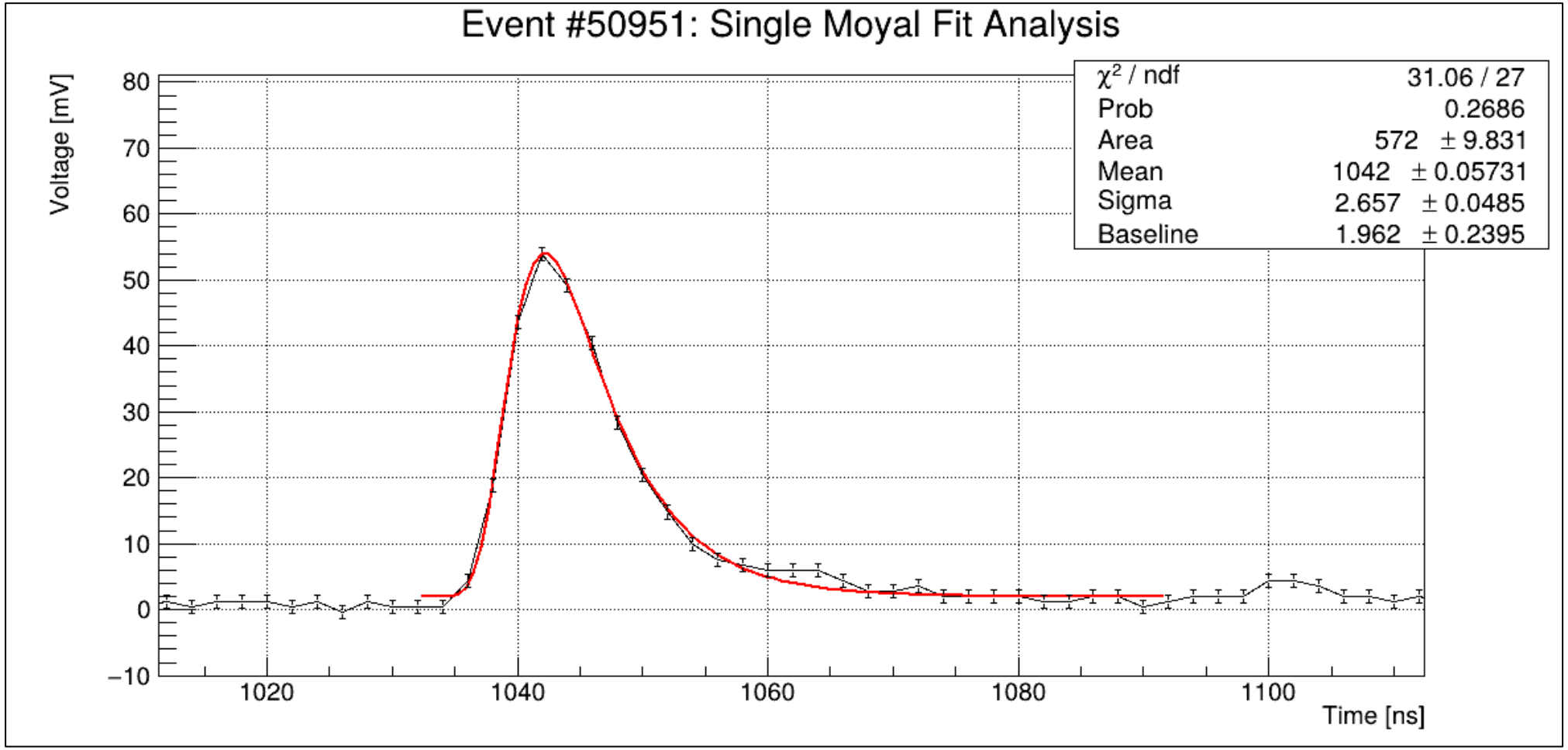
σ (Sigma): パルスの鋭さ

典型的な波形

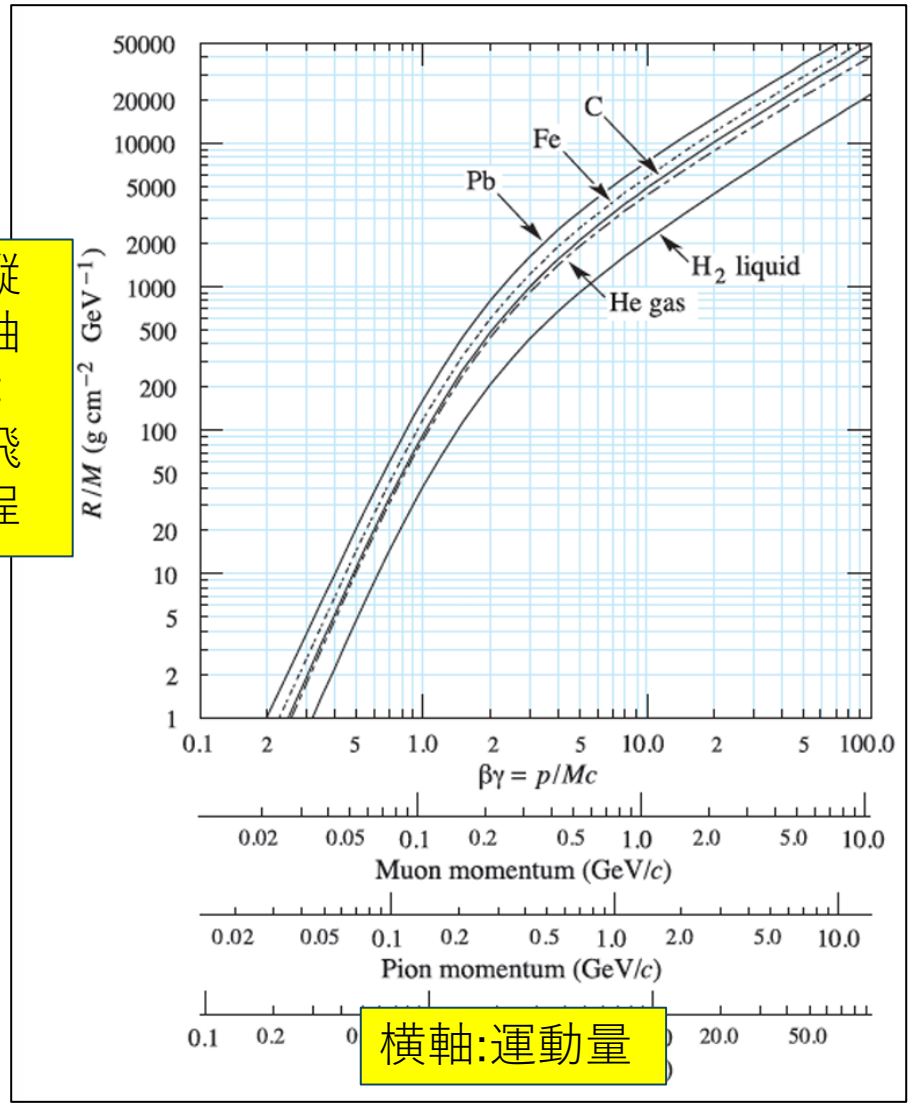


プロジェクト“π” 解析手法

典型的な波形をフィッティングしてみた



プロジェクト“π” 解析手法



出典:Review of Particle Physics

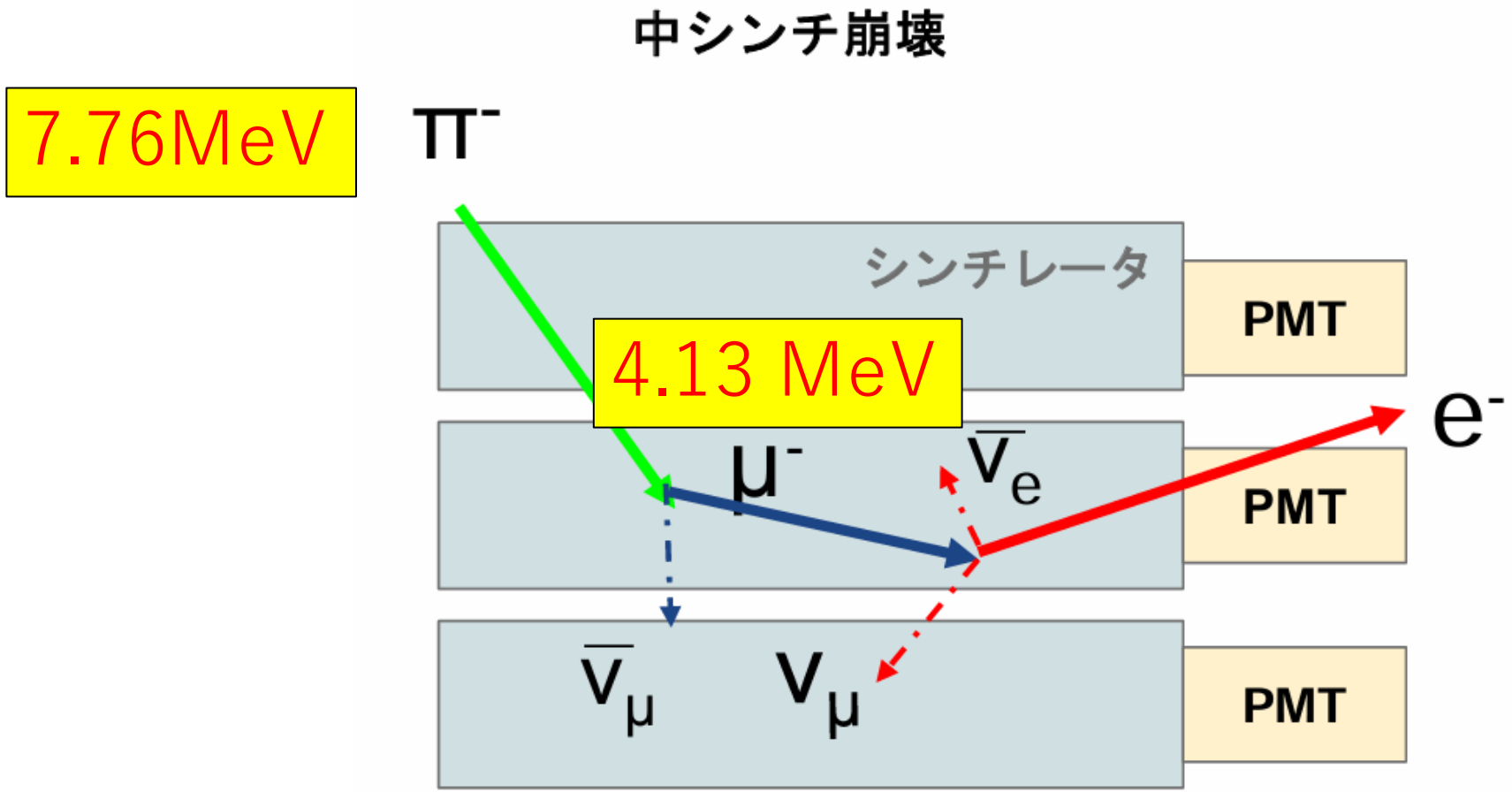
パイオンらしい信号とは？

- π が3 cmのシンチで止まる条件
  →π の最大運動エネルギー　7.76 MeV

- μ は止まったπ から生まれるとする
  →μ の運動エネルギー　4.13 MeV

信号の積分電荷の比(π / μ)
→7.76 / 4.13 = 1.88

プロジェクト"π"　解析手法



信号の積分電荷の比(π / μ)

→7.76 / 4.13 = 1.88

プロジェクト“π” 解析手法

Moyal Distribution ２個でフィッティング

$$M(t;\mathrm{Area},m,\sigma)=\frac{\mathrm{Area}}{\sqrt{2\pi}\sigma}\exp\left[-0.5\left(\frac{t-m}{\sigma}+\exp\left(-\frac{t-m}{\sigma}\right)\right)\right]$$

フィッティング関数

$$f(t)=\underbrace{M(t;\mathrm{Area}_\pi,m_\pi,\sigma)}_{\pi\text{の波形}}+\underbrace{M(t;\mathrm{Area}_\mu,m_\mu,\sigma)}_{\mu\text{の波形}}+\mathrm{Offset}$$

- σは共通とした

プロジェクト“π” 結果

中シンチの波形データ219イベントをフィッティング
+上手くいかないものは目視でフィッティング

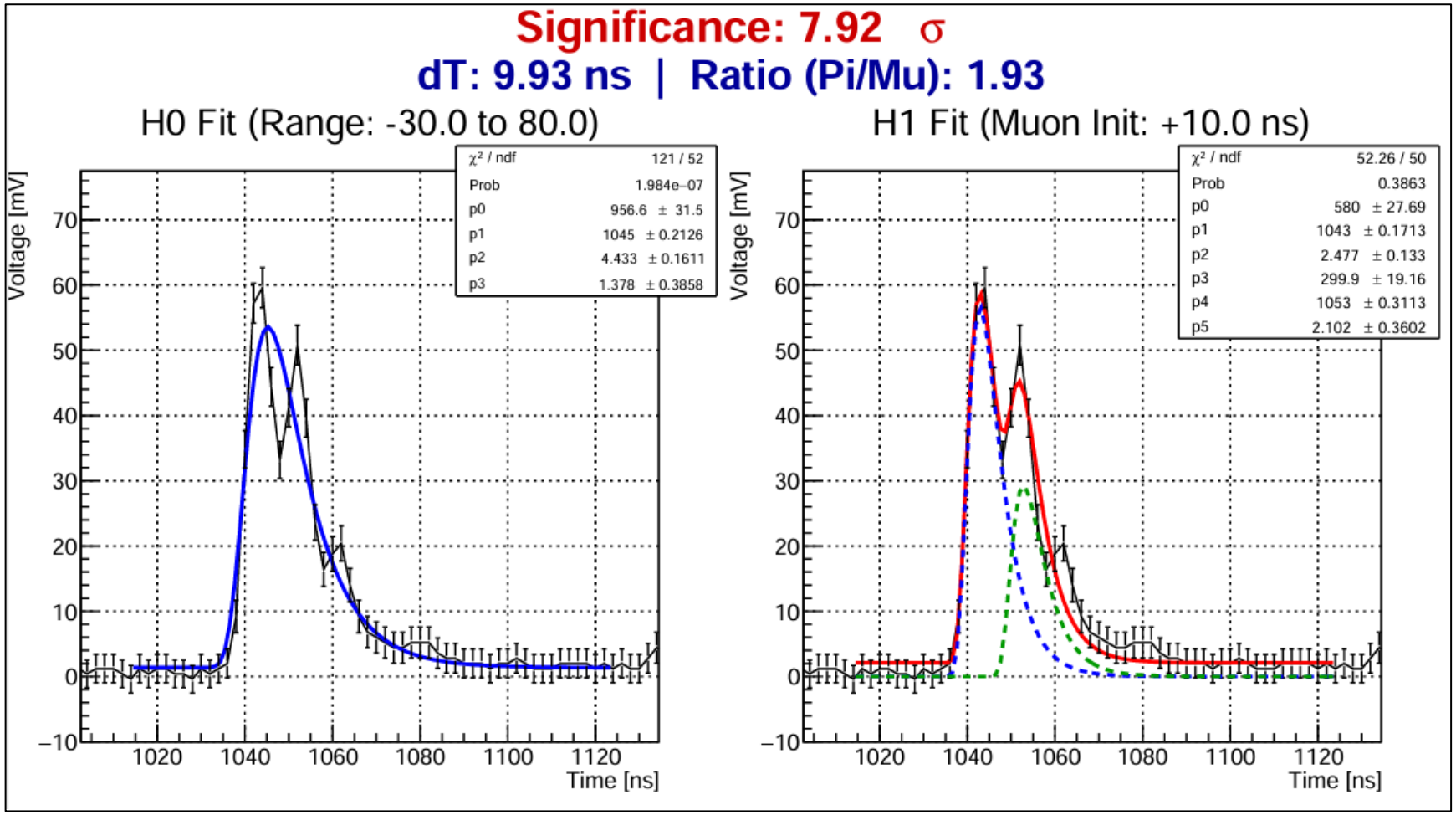
→14イベント、フィッティングできた

結果

πらしきイベントが2つ見つかった

プロジェクト“π” 結果

π、発見！？



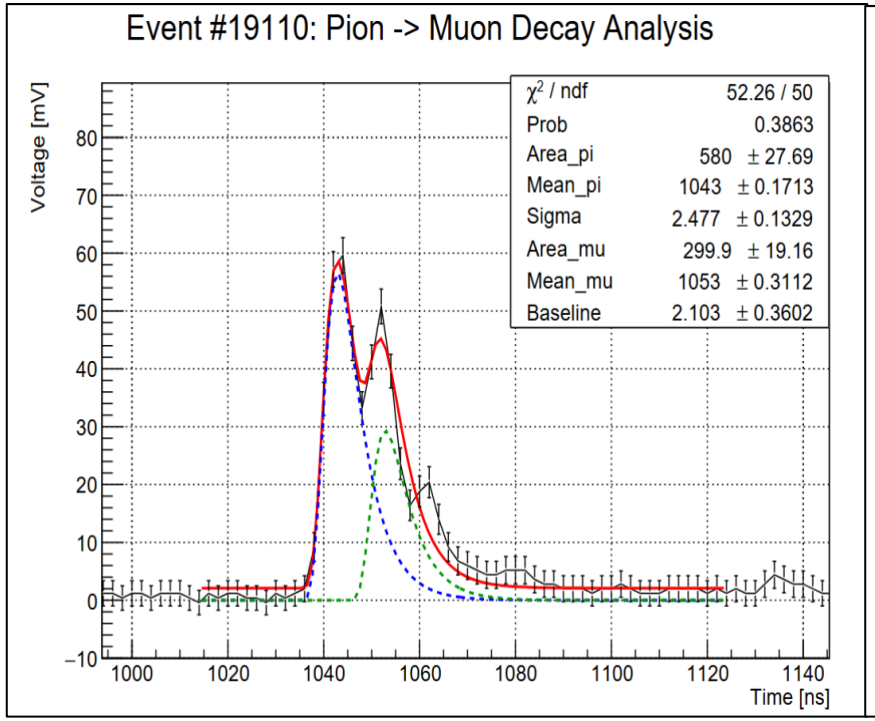
有意差 7.92 σ で
2パルスあることが分かった

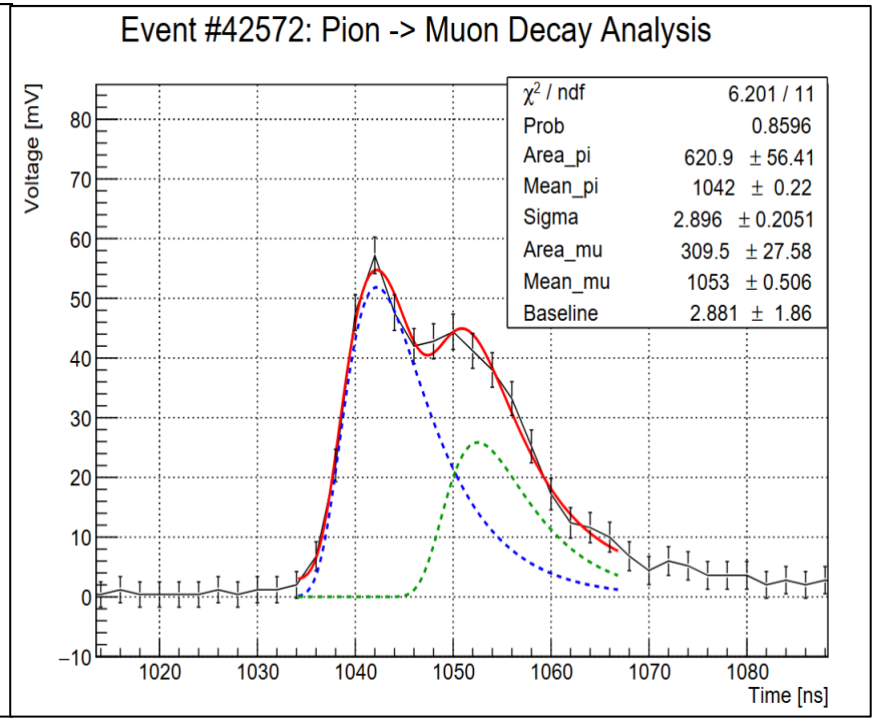
崩壊時間: 9.93 ns
（πのうち、32.8%が崩壊する時間に相当）

積分電荷の比: 1.93
理論:1.88
誤差 2.4%
→πと考えて妥当

プロジェクト“π” 結果

さらに、プロジェクト"μ"と比較





第２パルスの
積分電荷量
＝6.00 pC, 6.19 pC

4.1 MeVのミューオンの積分電荷量
(実験)
＝ 5.80 ± 0.03 pC

πその1

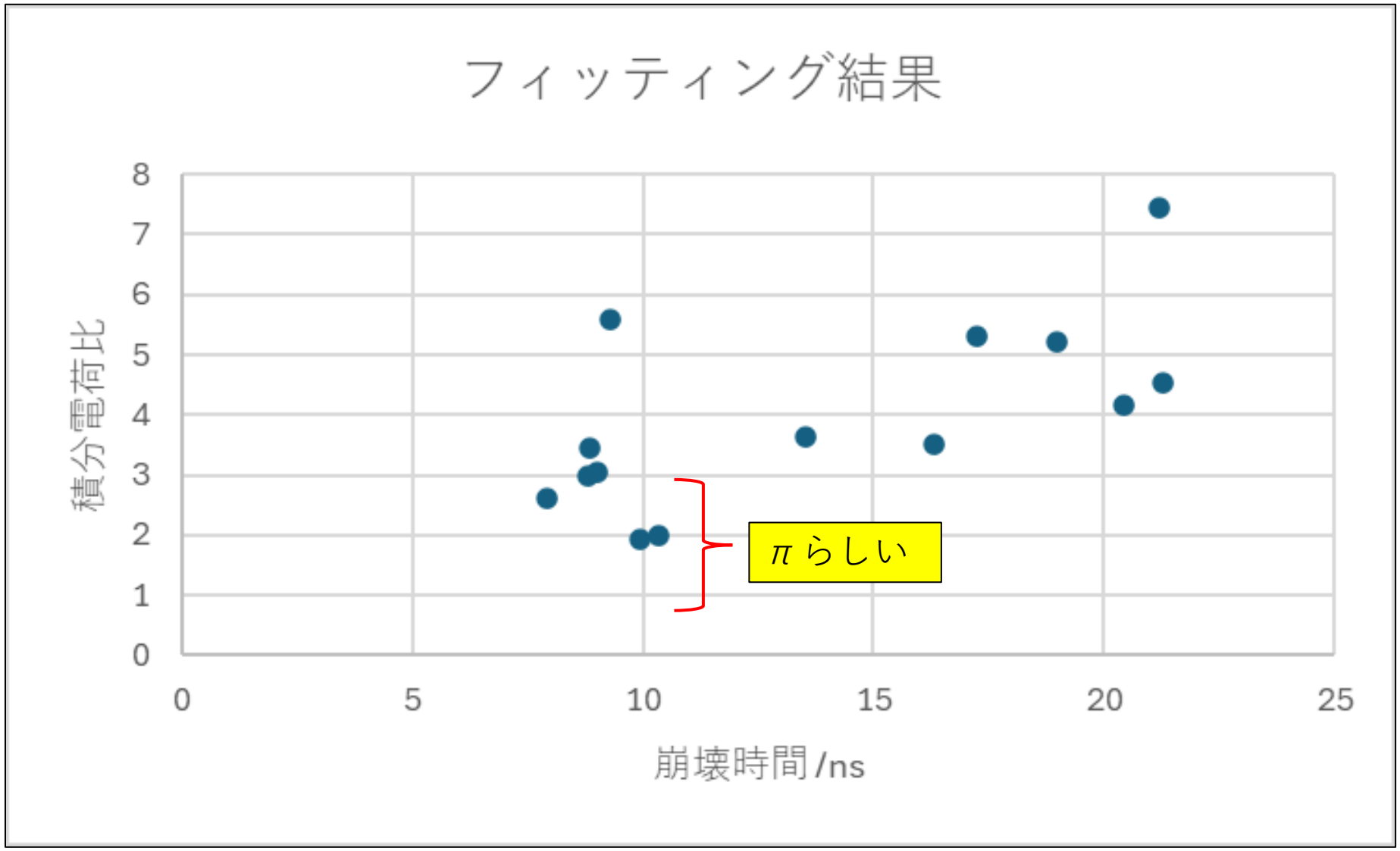
崩壊時間　　: 9.93 ns
積分電荷量比:1.93

πその2

崩壊時間　　:10.33ns
積分電荷量比: 2.01

→πらしい

プロジェクト“π” 結果



まとめ

プロジェクト"τ"（寿命測定）

1. ミューオンは停止する時の方が多くのエネルギーを出すことが分かった
2. μ^+とμ^-を分けてフィッテイングしてτ_-の評価を行った
3. 電荷の閾値を設定することでBGレートを減らせると分かった

プロジェクト"μ"（μのエネルギー）

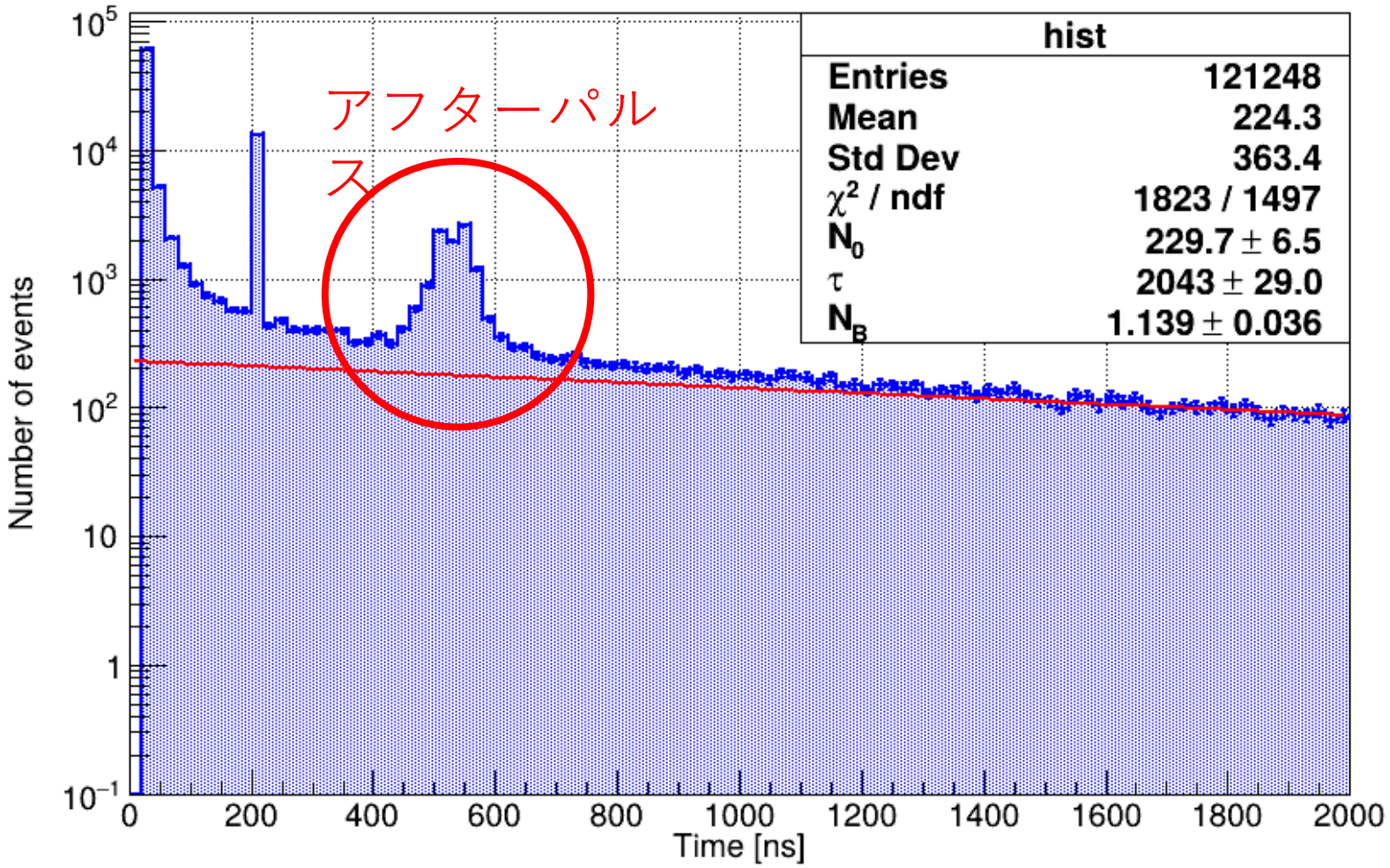
・2つ目のシンチレーターに入ってすぐ崩壊したμが多いことが示唆された

プロジェクト"π"（πの検出）

・πらしい信号を２つ発見
・Moyal Distribution でフィッティングできた
・積分電荷量の比、第二パルスの積分電荷量、崩壊時間からπらしさを評価できた

バックアップ

〈フィット範囲の設定〉

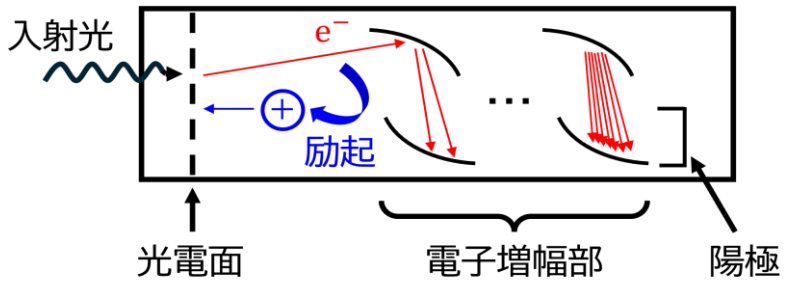


μ 崩壊時間分布 （0 ~ 2000 ns）

・フィット範囲について

短い時間領域
⇒ μ の崩壊ではない信号 多

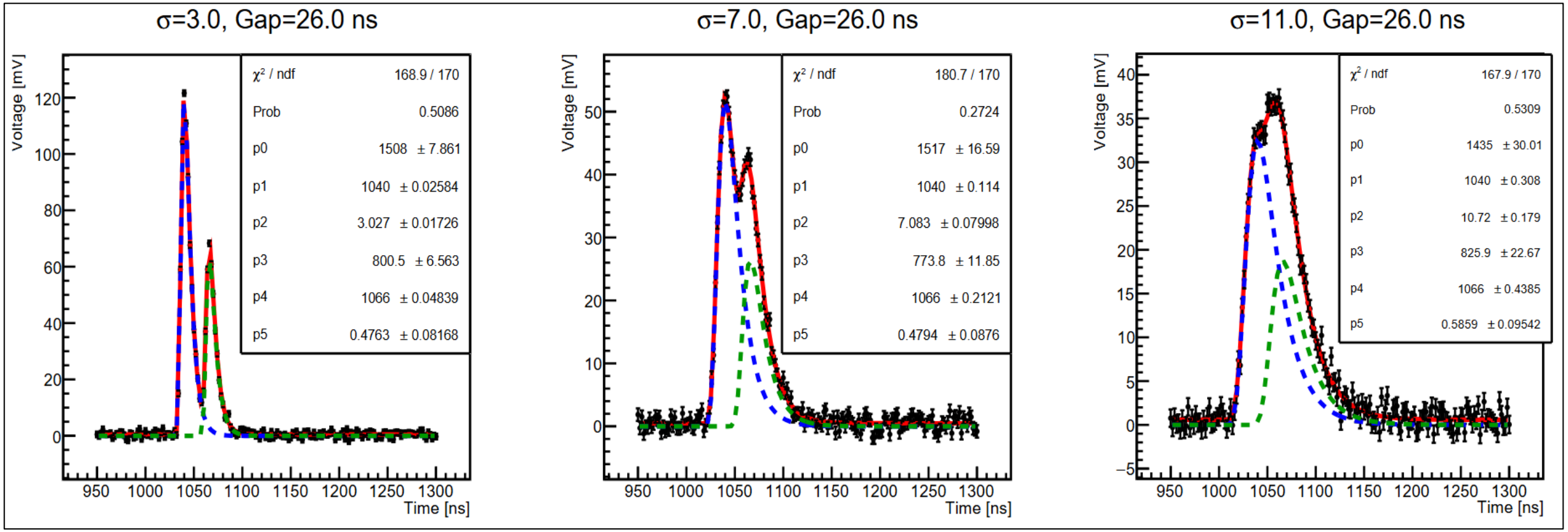
例）アフターパルス
PMT内の残存ガスが励起
⇒2つ目の信号に



短い時間領域
（0 ~ 2 μs ）を除外

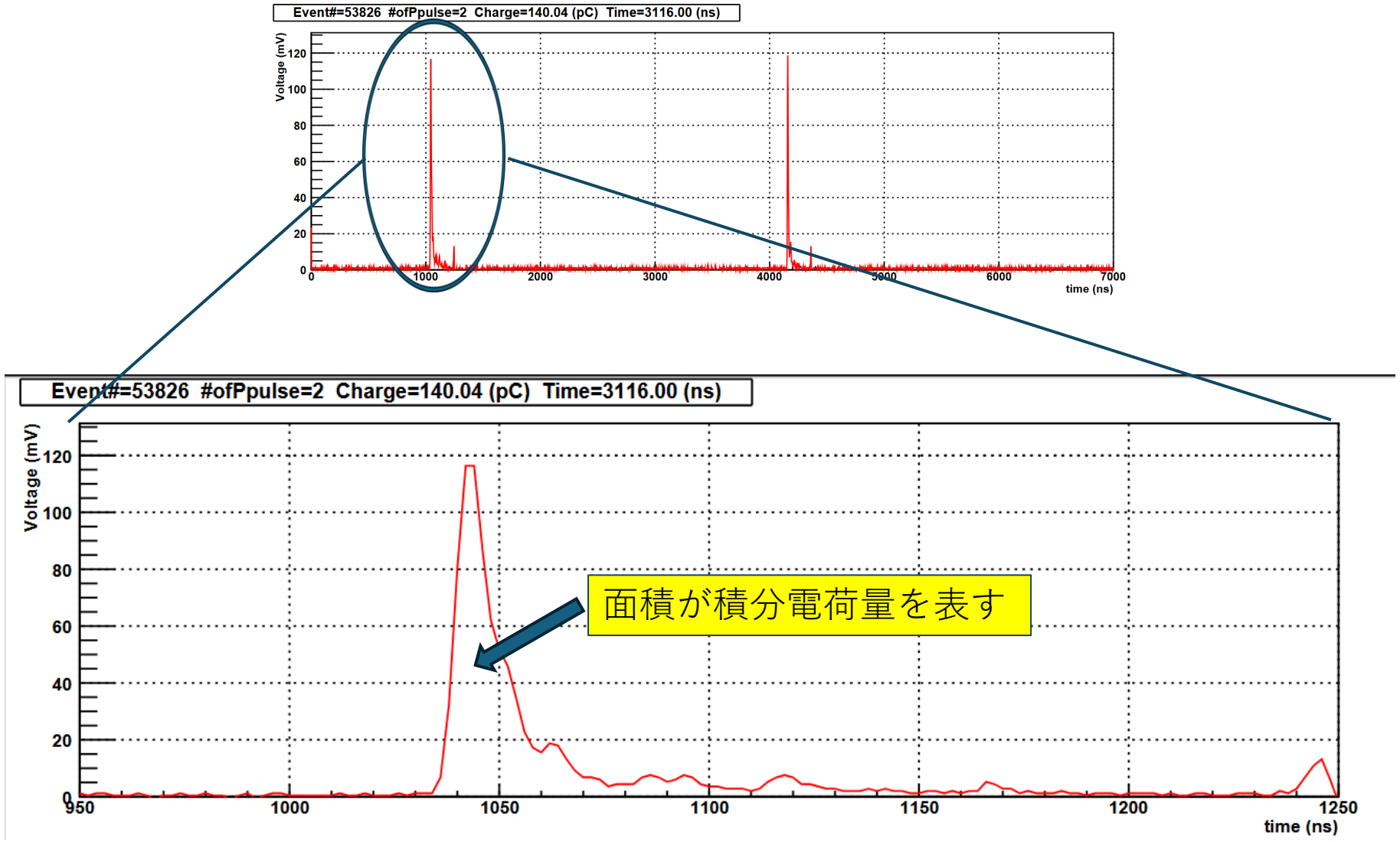
プロジェクト“π” 解析手法

デモ波形を作ってみた



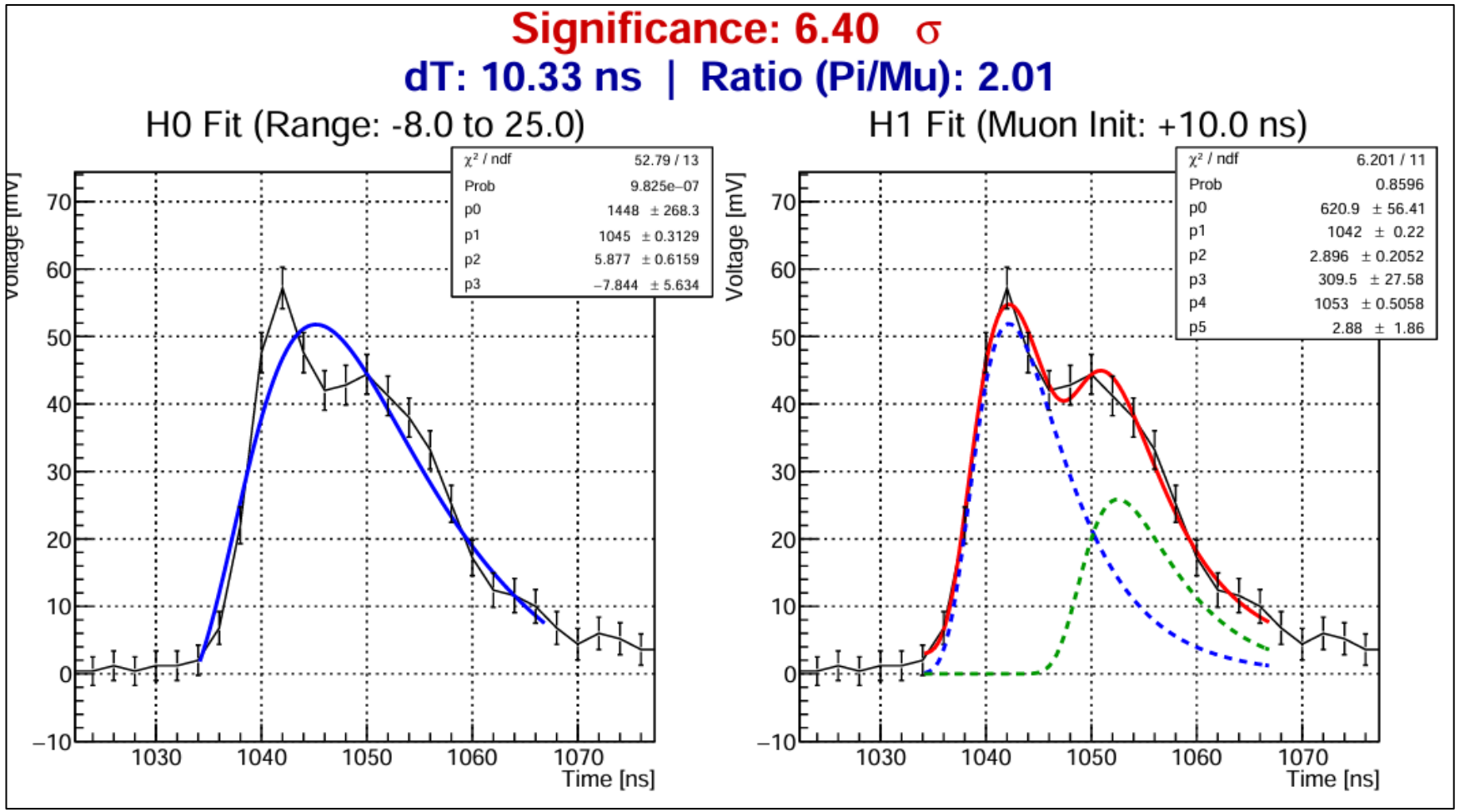
分離できている　　M字型　　一体化している

プロジェクト"π"　解析手法



プロジェクト“π” 結果

π、発見！？その２



有意差 6.40 σ で
2パルスあることが
分かった

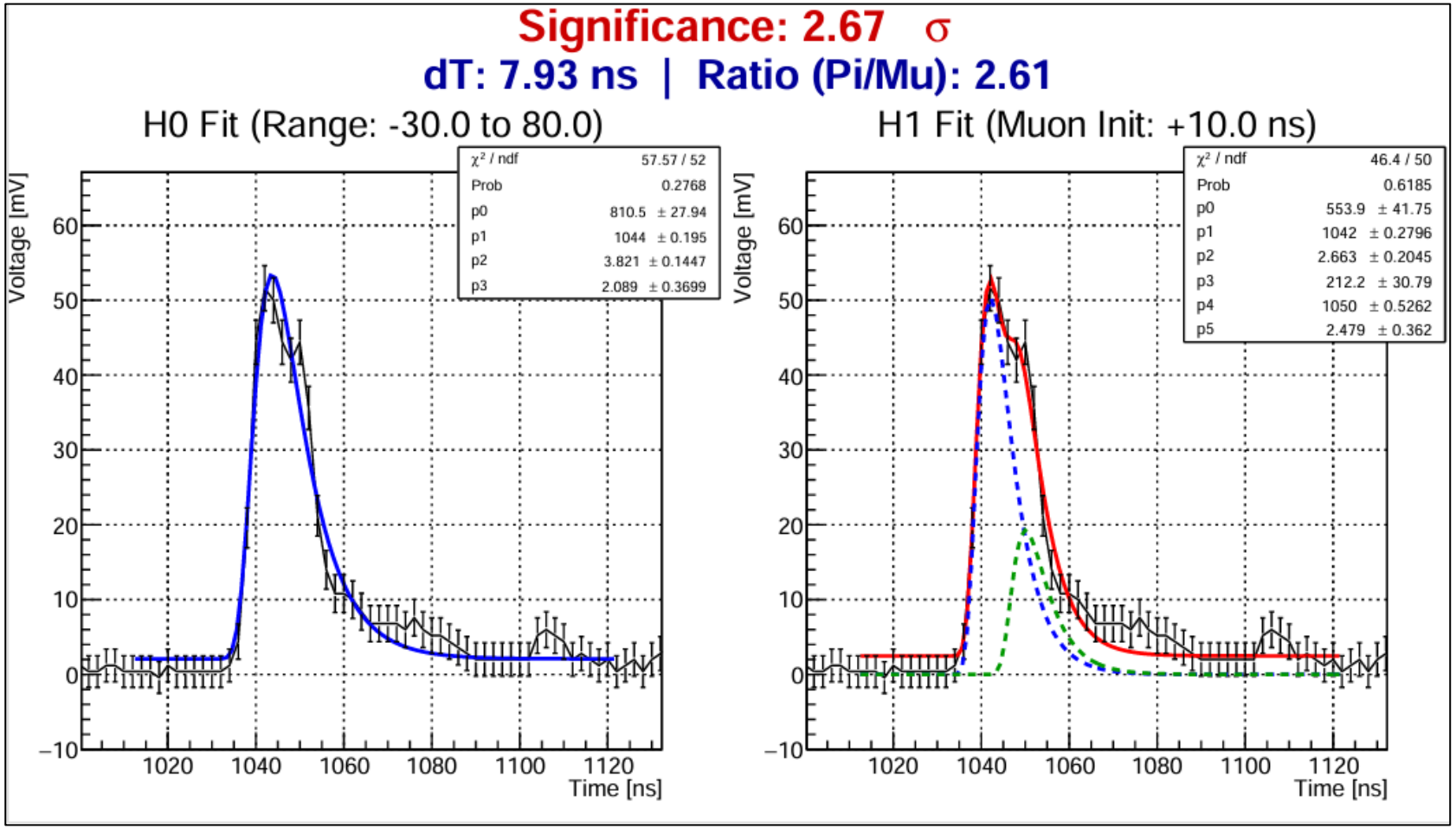
崩壊時間: 10.33 ns
（πのうち、32.7%
が崩壊する時間）

積分電荷の比: 2.01
理論:1.88
誤差 6.9%

→πと考えて妥当

プロジェクト“π” 結果

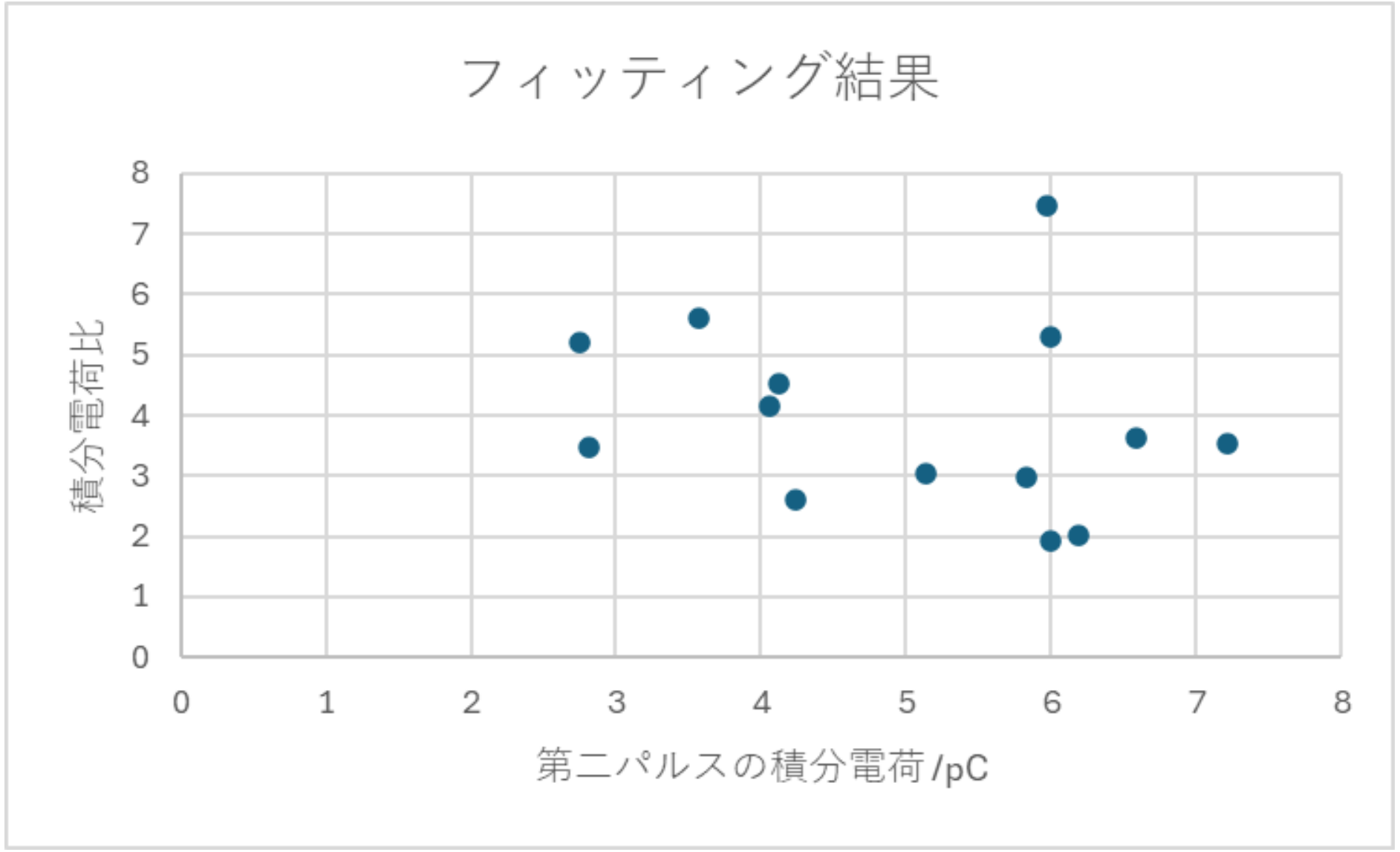
おまけ：ほぼ重なった2ピークも見分けることができた



ピーク間の時間:
7.93 ns

有意差 2.67 σ で
分離できた

プロジェクト“π”　結果



プロジェクト“π” 考察

誤差の議論

・フィッティングの誤差
・入射角度の影響（シンチ3cmの仮定）
・シンチの素材はC（炭素）だけではない
・２つの信号は、光った場所が違う
(4.1 MeVのμは約1cm進む　0.12 ns)

→定量的にπらしい範囲を決める方法を考えたい

改善方法とfuture plan

・高所で実験する
　→πのレート上昇が見込める
　→πの寿命を測定できる

・時間分解能が良いオシロ、PMT、シンチを使う
　→目視の選別とフィッティング精度向上

参考文献

1.「ミューオン寿命測定と荷電パイオンの検出」角谷 爽　加藤 舜都　田中 真　平谷 紘大　真鍋 小春
2.「光電子増倍管とシンチレータを用いたミューオン測定(+a)」プロジェクト研究　ガイダンス資料
3.D. Veberič (Pierre Auger Coll.), Proc. 33rd ICRC (Rio de Janeiro), 0633, 2013.