

ミューオンの寿命測定と パイオンの探索

超高エネルギー宇宙線グループ

芋生有紀 大宮海南登 加納舞 高田教汰郎 遠山和希

目次

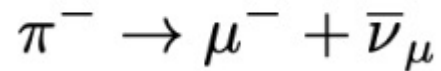
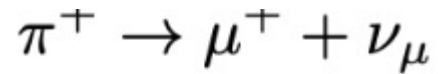
1. 目的
2. 背景
3. 方法・理論
4. ミューオンの寿命測定
5. パイ中間子探索
6. まとめ・展望

目的

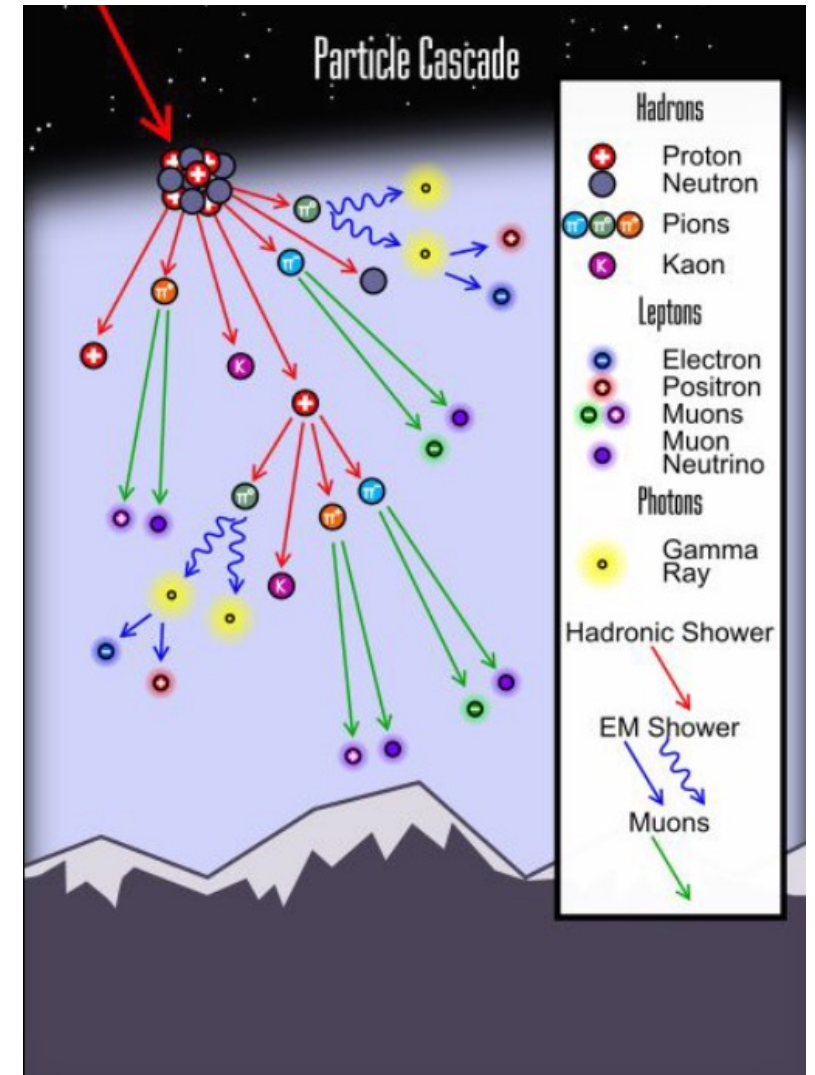
- ① 三層のシンチレーション検出器を用いて ミュー粒子（ミューオン） の寿命を測定する。
- ② 荷電パイ中間子(パイオン)を探査する。

背景 ～ミューオンの生成まで～

- ・ 宇宙線が大気と衝突する過程でミューオンやパイオンを生成（空気シャワー現象）
- ・ パイオンの崩壊によってミューオンが生成



- ・ 地上でのミューオンの頻度（1個/手のひら/秒）



背景 ～ミューオンについて～

- ミューオンの崩壊によって電子が生成

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

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

- ミューオンの質量

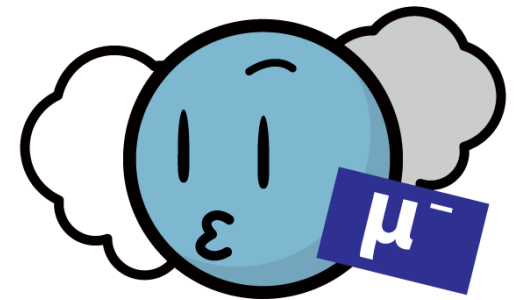
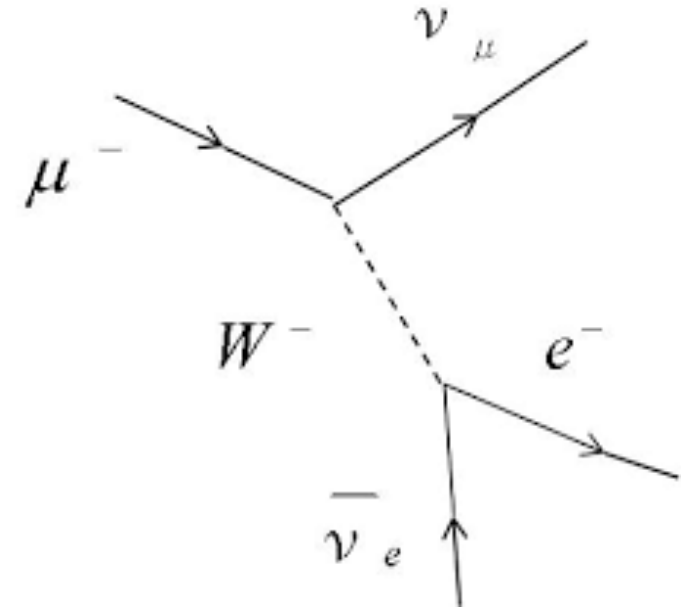
$$105.66 \text{ MeV}/c^2 \quad (\sim 1.89 \times 10^{-28} \text{ kg})$$

(電子の約200倍)

- ミューオンの寿命

$$2196.9803 \pm 0.0022 \text{ ns}$$

Webber et al., PRL, 106, 041803 (2011)



背景 ～パイオンについて～

- ・パイオンの質量

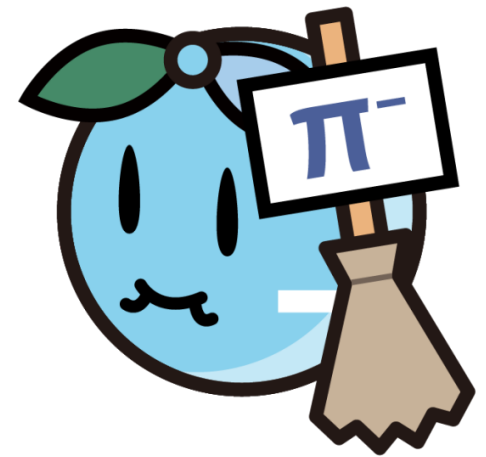
139 MeV/c²

- ・パイオンの寿命

(26.033 ± 0.0005) ns

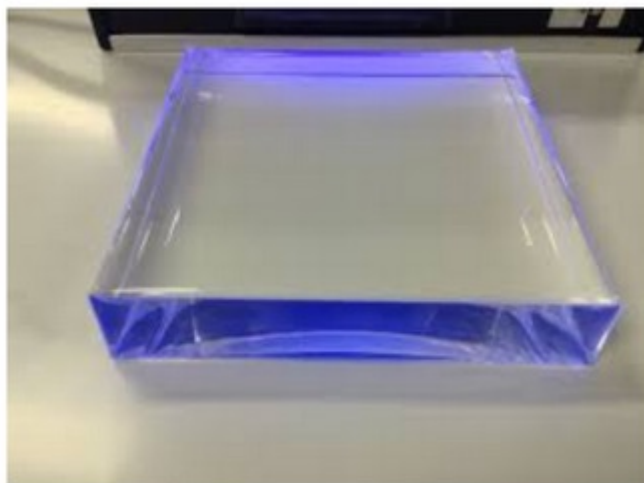
PARTICLES, FIELDS, GRAVITATION, AND COSMOLOGYより

- ・ ミューオンはパイオンの寿命の100倍長い！

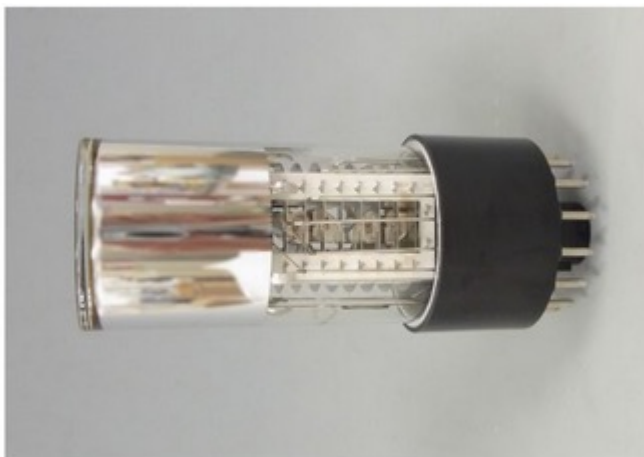


方法・論理 ～検出装置～

有機シンチレーター
(プラスチックシンチレーター)

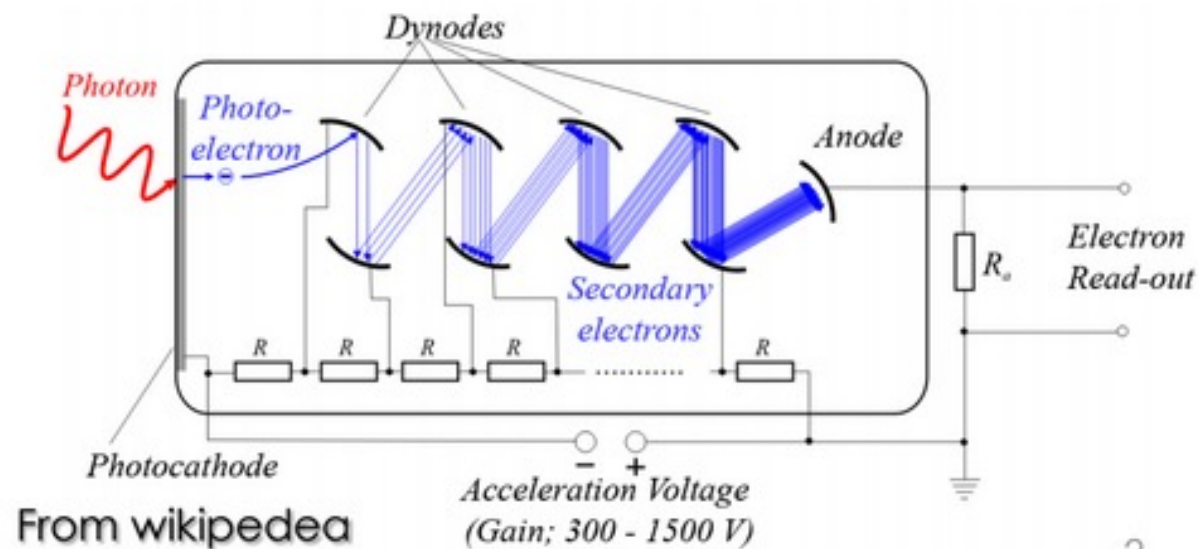


PMT(光電子増倍管)



蛍光剤(p-ターフェニル[C18H14])を混ぜた
プラスチック素材 (ポリビニルトルエンなど)

→ **荷電粒子**が通過すると
シンチレーション光(～420nm)を放射

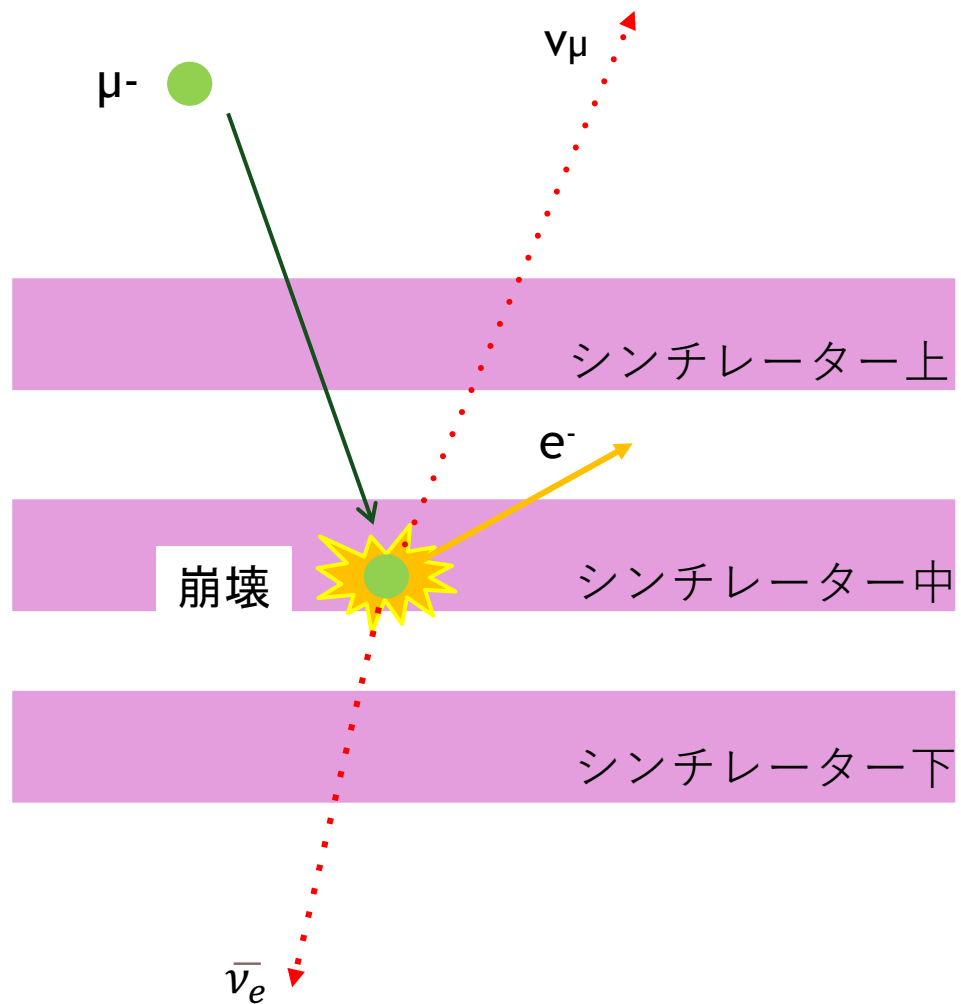
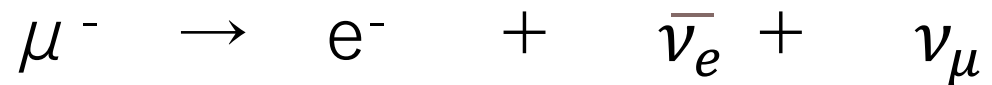


方法・論理 ～検出装置～

PMT(光電子増倍管)に信号以外の光が入らないように遮光シートで覆って測定を行う。



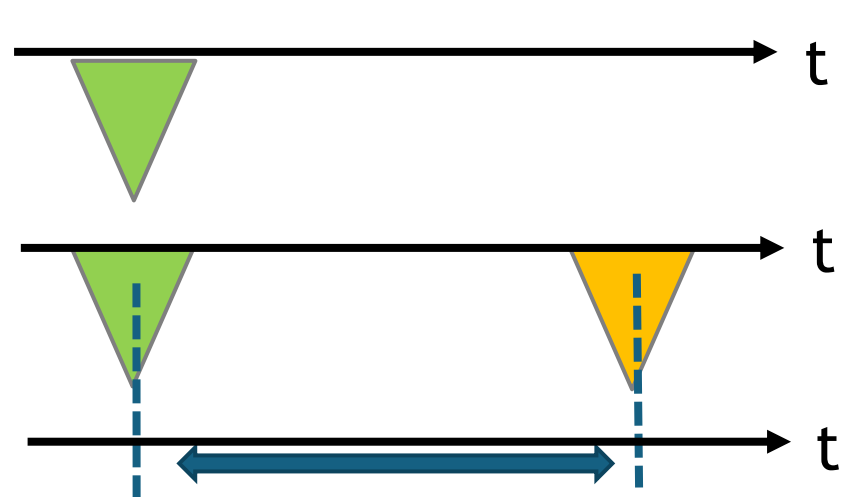
方法・理論 ～検出装置(概念図)～



獲得する電気信号

ミューオンの信号

電子の信号



ミューオンの
崩壊寿命

方法・論理 ～電気信号でデジタルデータ取得～

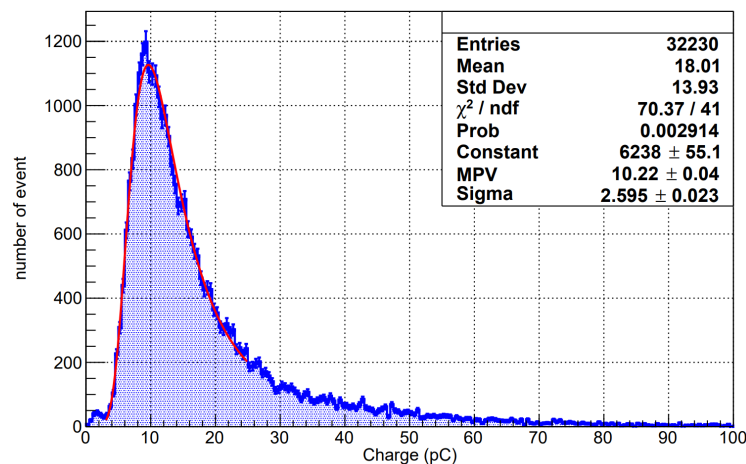
ADC

光電管からの**電荷量**をデジタル化してデータ取得する

ADCの取得した電荷量は、ミューオンのシンチレーターにおける、エネルギー損失に比例する

ミューオンがシンチレーターを通った際に落としたエネルギーが分かる。

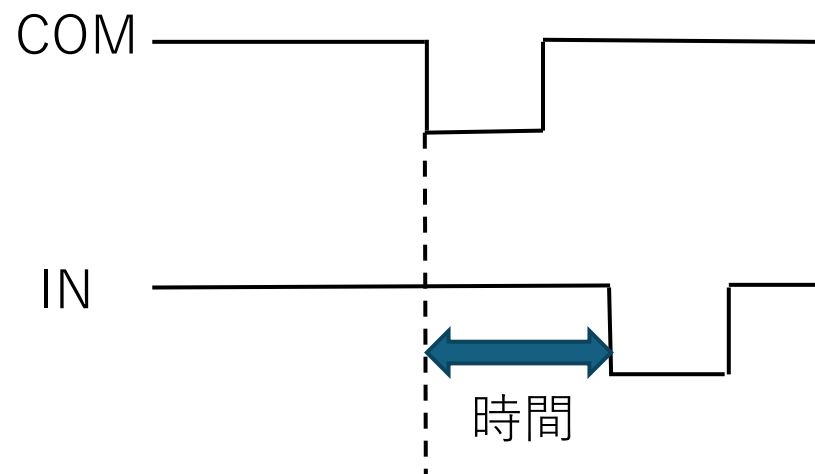
Mid Scintilator



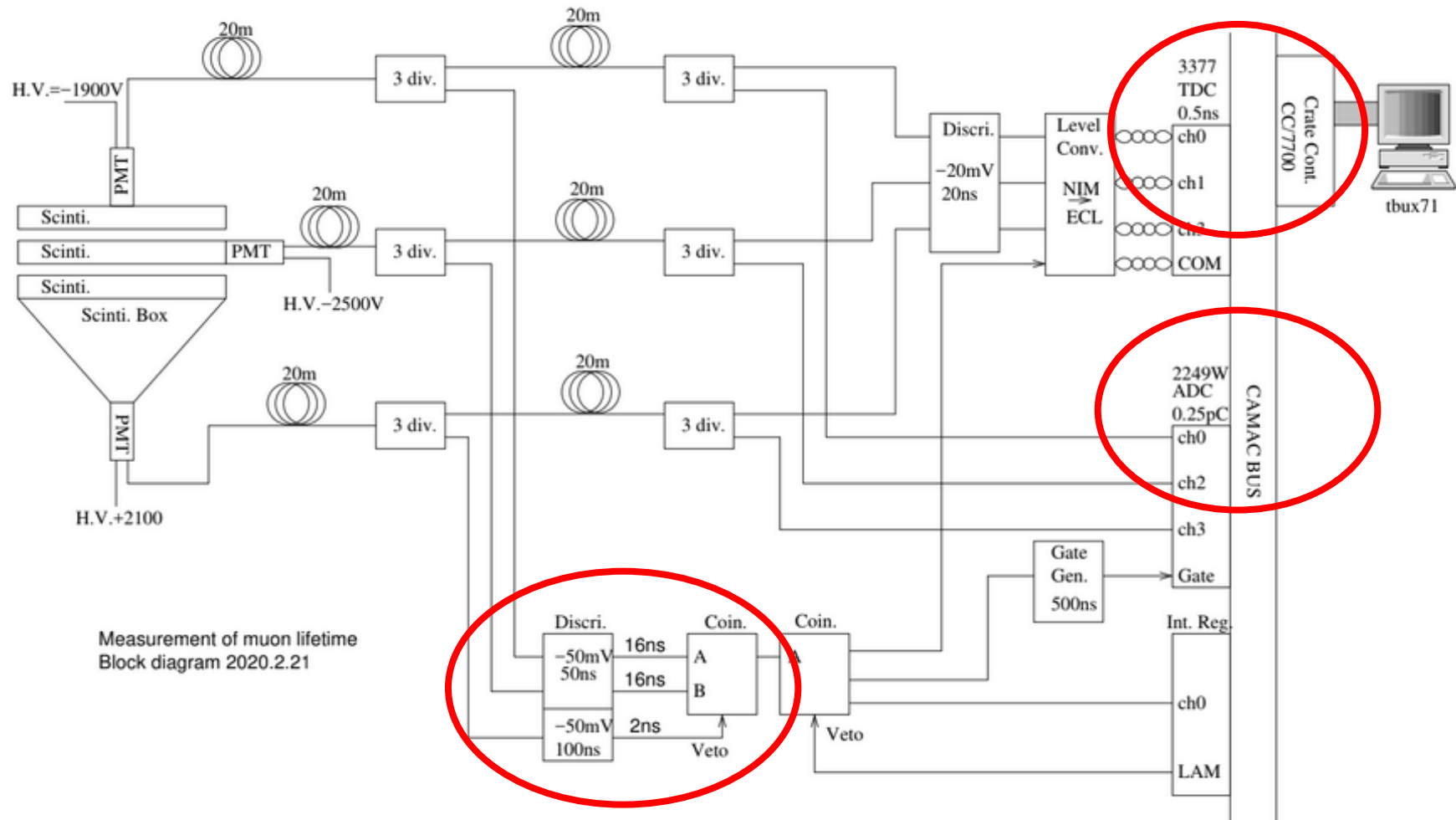
TDC

COMに信号が入ってからINに信号が入るまでの**時間**をデジタル変換する

これを用いてミューオンの寿命のデータをデジタルに取得できる



方法・論理 ～装置～



COM信号(トリガー信号)からの**時間**(TDC)を測定

Gate信号内の**電荷量**(ADC)の測定

ミューオン崩壊を満たすようなトリガー
→ADC Gate と TDC COM

解析方法 ～ミューオンの崩壊時間～

- ある一定時間のうちにミューオンが崩壊する確率は常に一定
- このとき、崩壊時間の分布の式は指数関数に従う

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

N : 時刻 t で残っている粒子数

N_0 : 初期時刻の粒子数

τ : 粒子の寿命

解析準備

- 3/5~3/7の3日間における中シンチレーション検出器ハードウェアでの総トリガー数→32300events
- ソフトウェアによる選別でさらに4840eventsまで厳選

ミューオンの寿命 ～結果～

fittingの式は、

$$N = A \exp(-t/\tau) + \text{const}$$

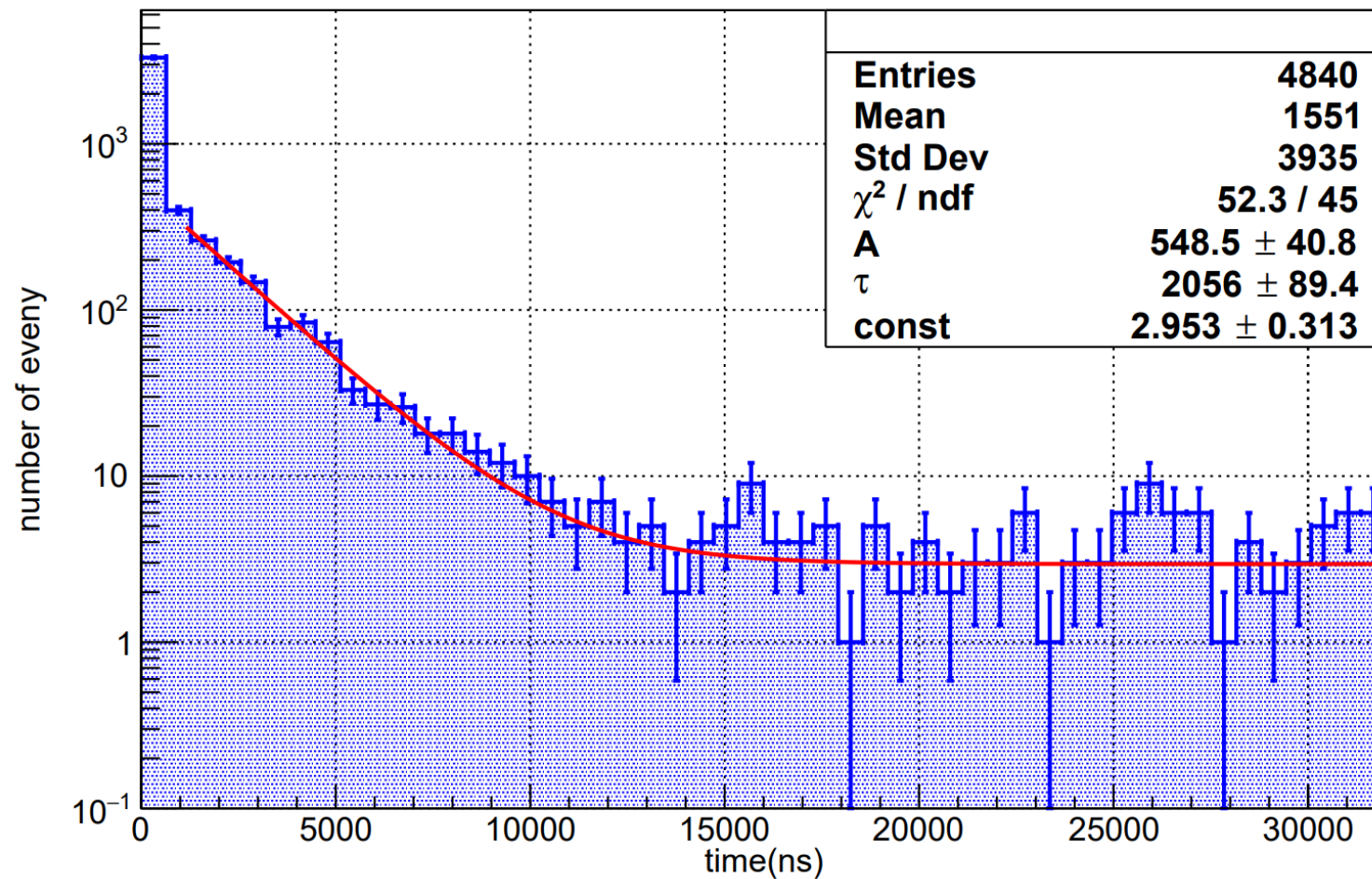
第一項: μ の崩壊,

第二項: ランダムコインシデンス

$$\text{const} = 2.953 \pm 0.313$$

$$\tau = 2056 \pm 89.4 \text{ (ns)}$$

TDC



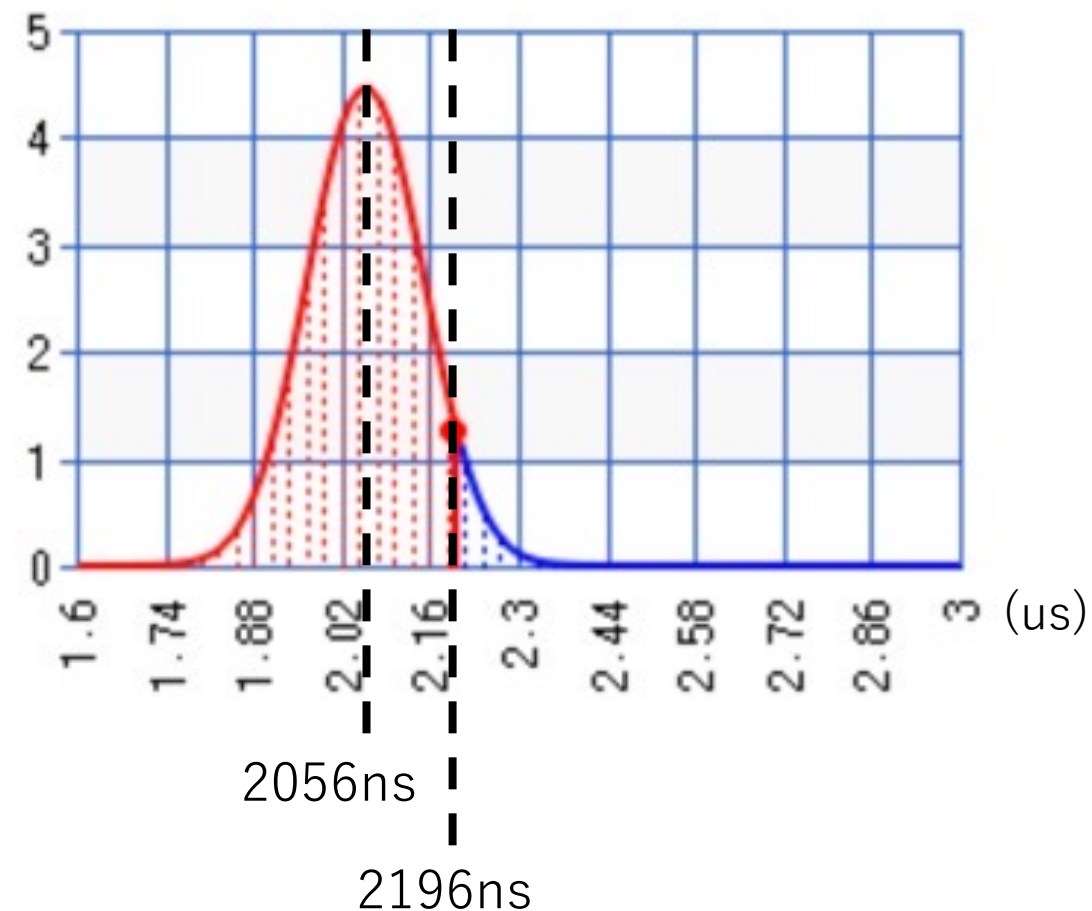
ミューオンの寿命 ～考察～

- ・ 本測定で求めたミューオンの寿命は 2056 ± 89.4 ns

- ・ 一方で文献値は 2196.9803 ± 0.0022 ns

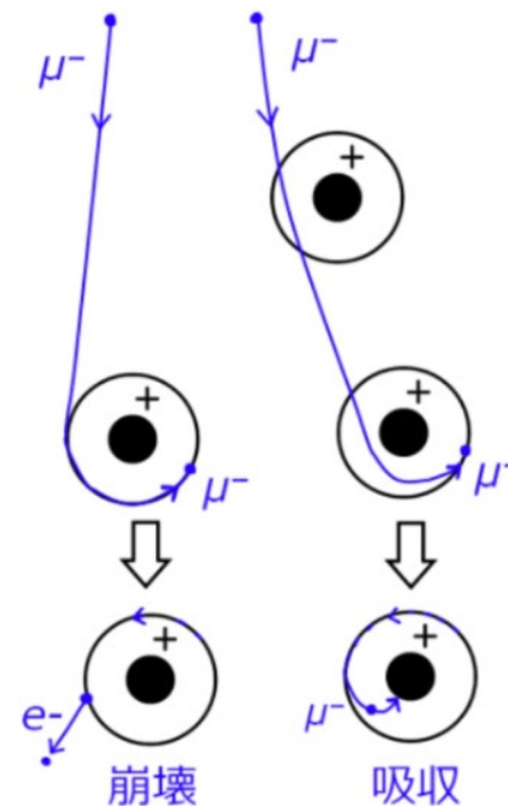
→我々の結果は文献値よりも
 $1.6\sigma \approx 88.36\%$ の統計的有意度で小さい

⇒ 5.82% の確率で我々が測定した
 2056 ± 89.4 nsに到達できる可能性がある。



ミューオンの寿命 ～考察～

- ミューオンは μ^+ と μ^- の2種類が存在する
 - μ^- は原子核内の陽子に引き付けられ原子核に吸収される
- ↓
- μ^- の崩壊現象が減るので、見かけ上のミューオンの寿命時間が短くなる
 $\tau_{\mu^-} = 2020\text{ns}$ (炭素中)

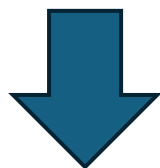


目次

1. 目的
2. 背景
3. 方法・理論
4. ミューオンの寿命測定
5. パイ中間子探索
6. まとめ・展望

パイ中間子の探索

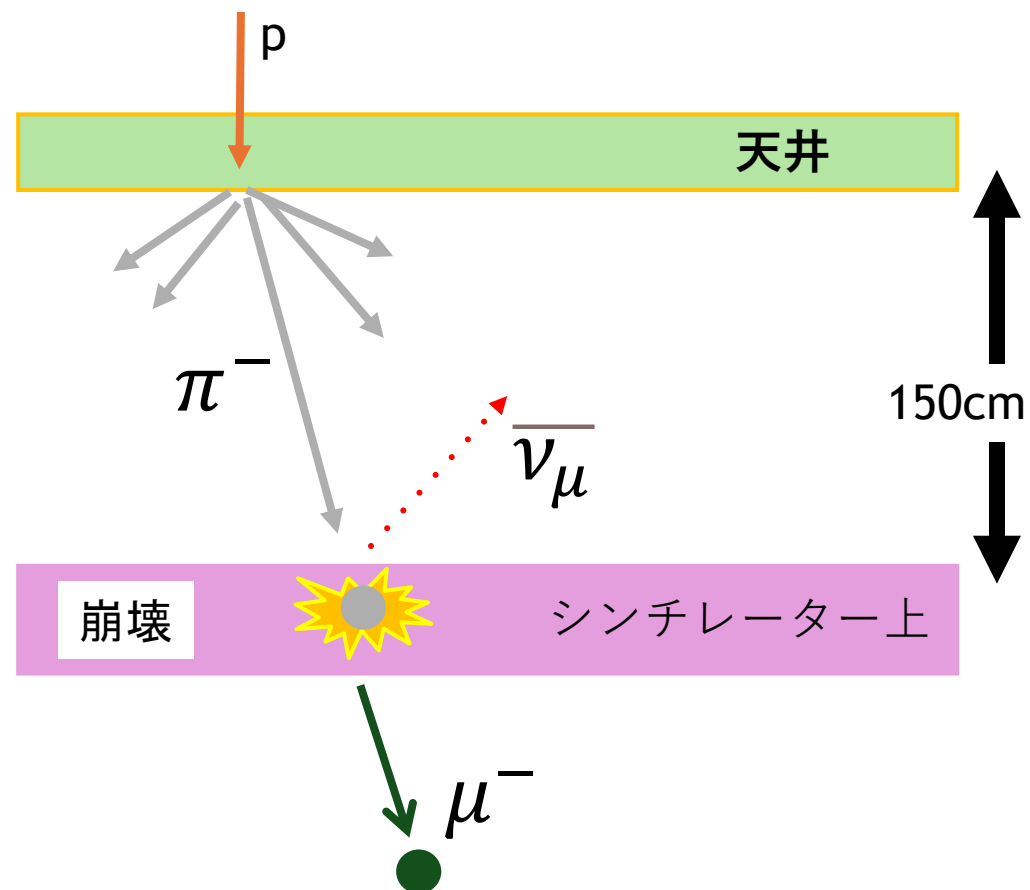
ミューオンのTDC解析を踏まえ、
パイオンもTDC解析で確認できる？



パイ中間子の崩壊寿命は26ns
空気シャワー中で生じたパイ中間子を
測定するは困難
(例えば、1GeVのパイ中間子でも
数十メートルしか飛ばない。)



ハドロンが天井の原子核にぶつかって崩壊して
生じたパイオンなら測定ができる！？



パイ中間子の探索

上シンチレータを約3cm進んで停止する

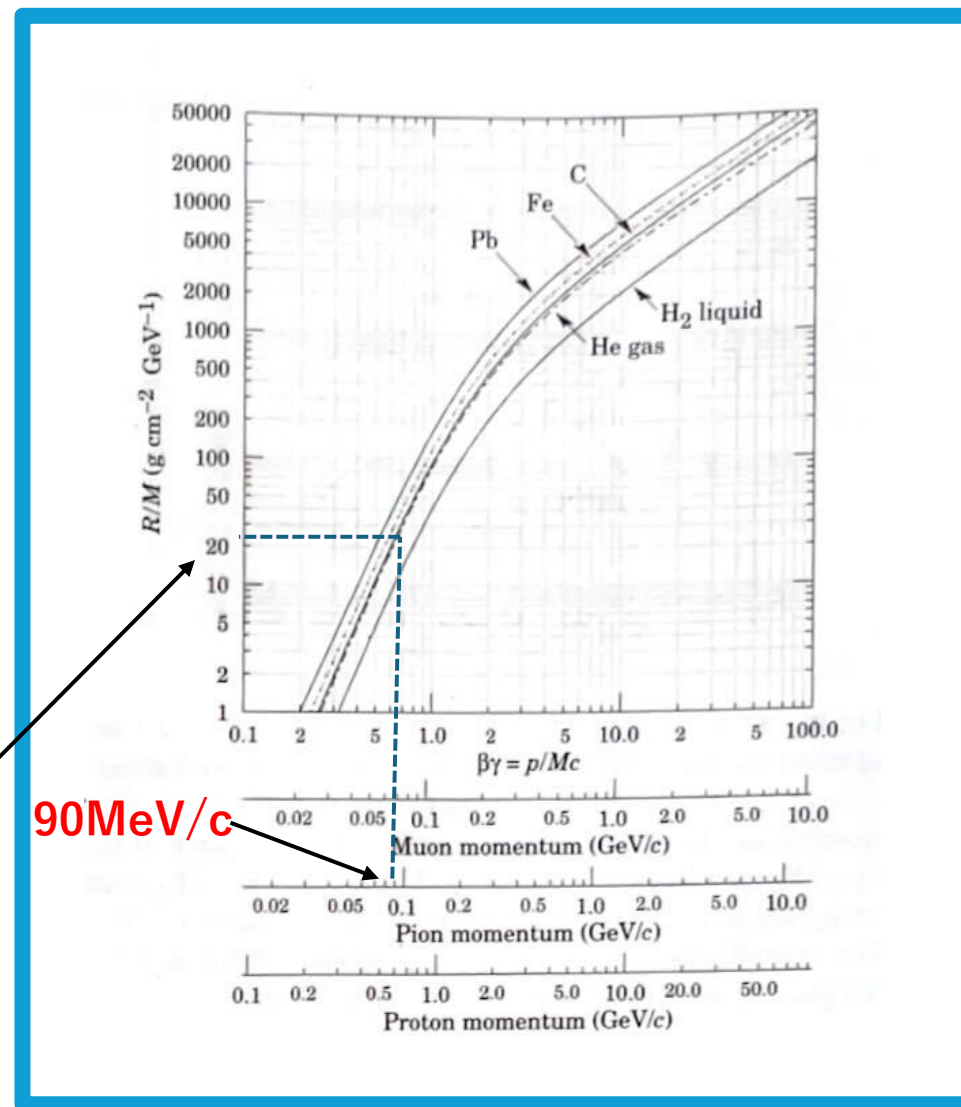
荷電パイ中間子の運動量は**90MeV/c**

→速さは**光速の約54%**

→荷電パイ中間子の速さは **15cm/ns**

$$1(\text{g/cm}^3) \times 3\text{cm}/139\text{MeV} \\ \doteq 23(\text{g/cm}^2/\text{GeV})$$

パイオンの質量：139MeV
シンチの密度：1g/cm³



<粒子の運動量と物質中における飛程の関係>

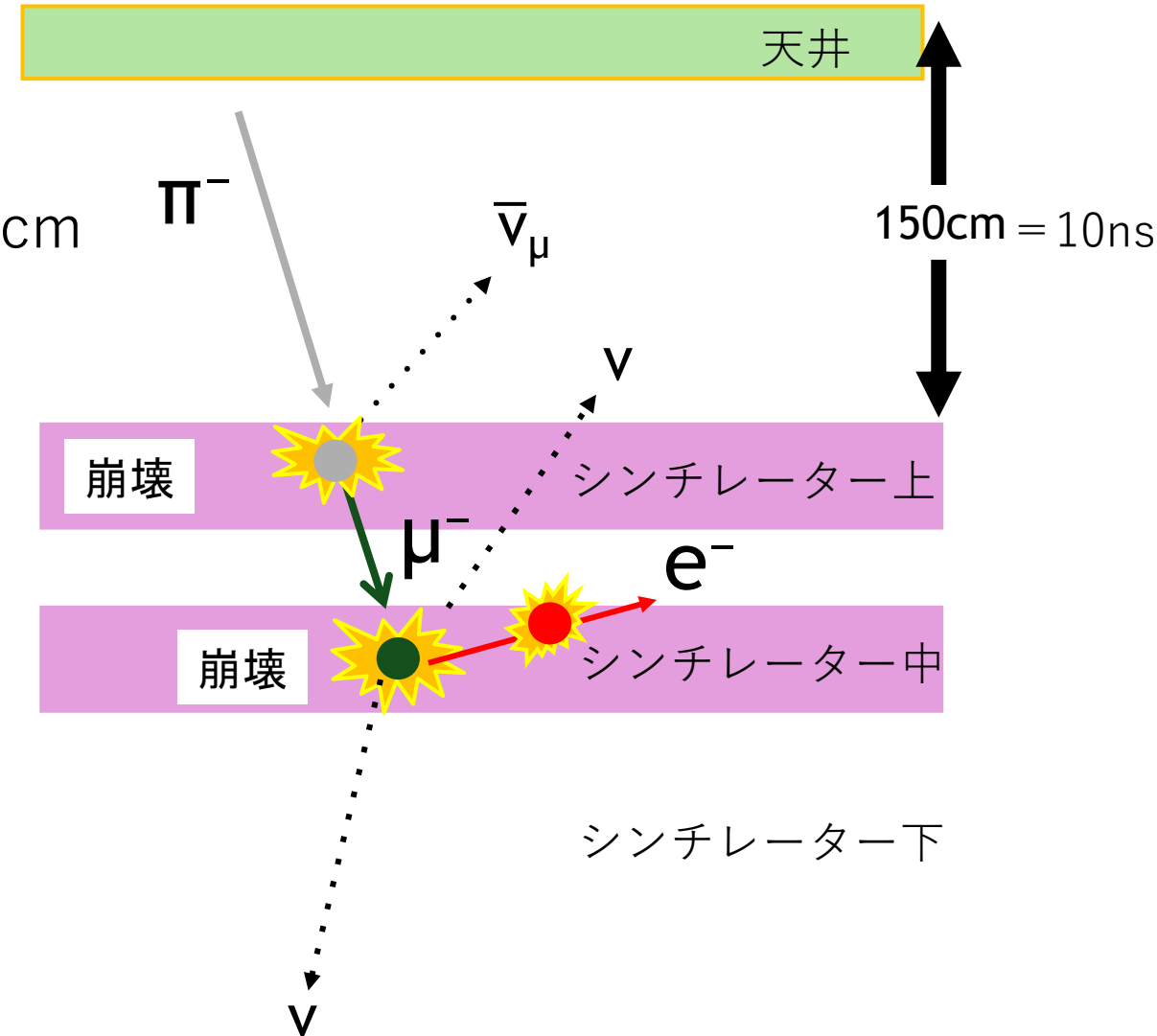
パイ中間子の探索 ～解析～

天井から上シンチレーターまでの距離は約150cm

↓
シンチレーター到達にかかる時間は10ns

↓
パイ中間子の崩壊寿命26nsより小さい

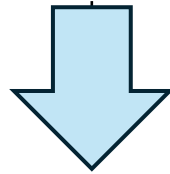
↓
測定可能！



測定条件はミューオンの寿命観測と同じ

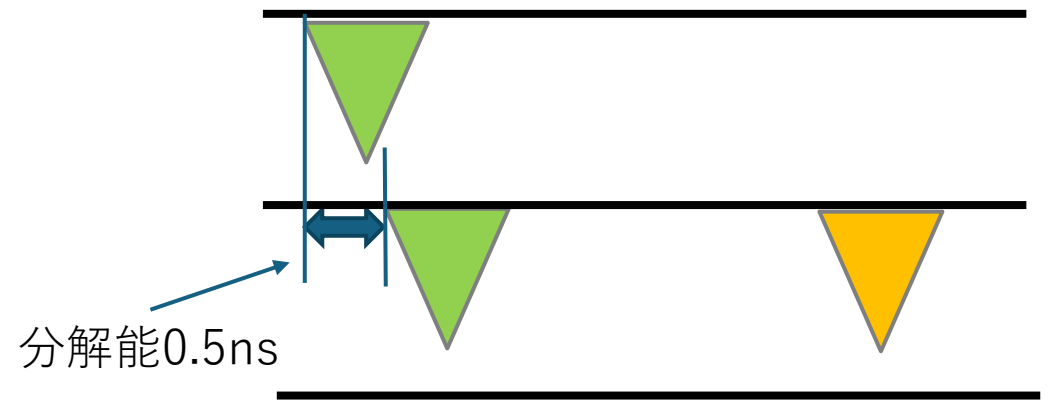
ただし

TDCの1回の信号幅（継続時間）は50ns
→パイ中間子の崩壊寿命より長い

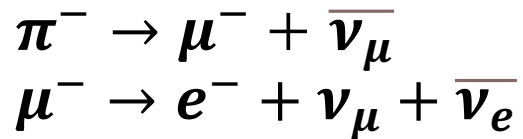


上の1回目と中の1回目の信号の時間差を
パイ中間子の寿命と捉える。
(TDCの分解能は0.5ns)

獲得する電気信号



パイ中間子の探索 ～解析～



- ミューオンの侵入は(理想的に)同時
→上1回目と中1回目の時間差は σ の小さいガウス分布に従うと予想
- フィッティングにおいて、パイオン崩壊による指数関数の項を追加

今回はパイオンの“観測自体”が目的

→**予め寿命を26nsと設定**して

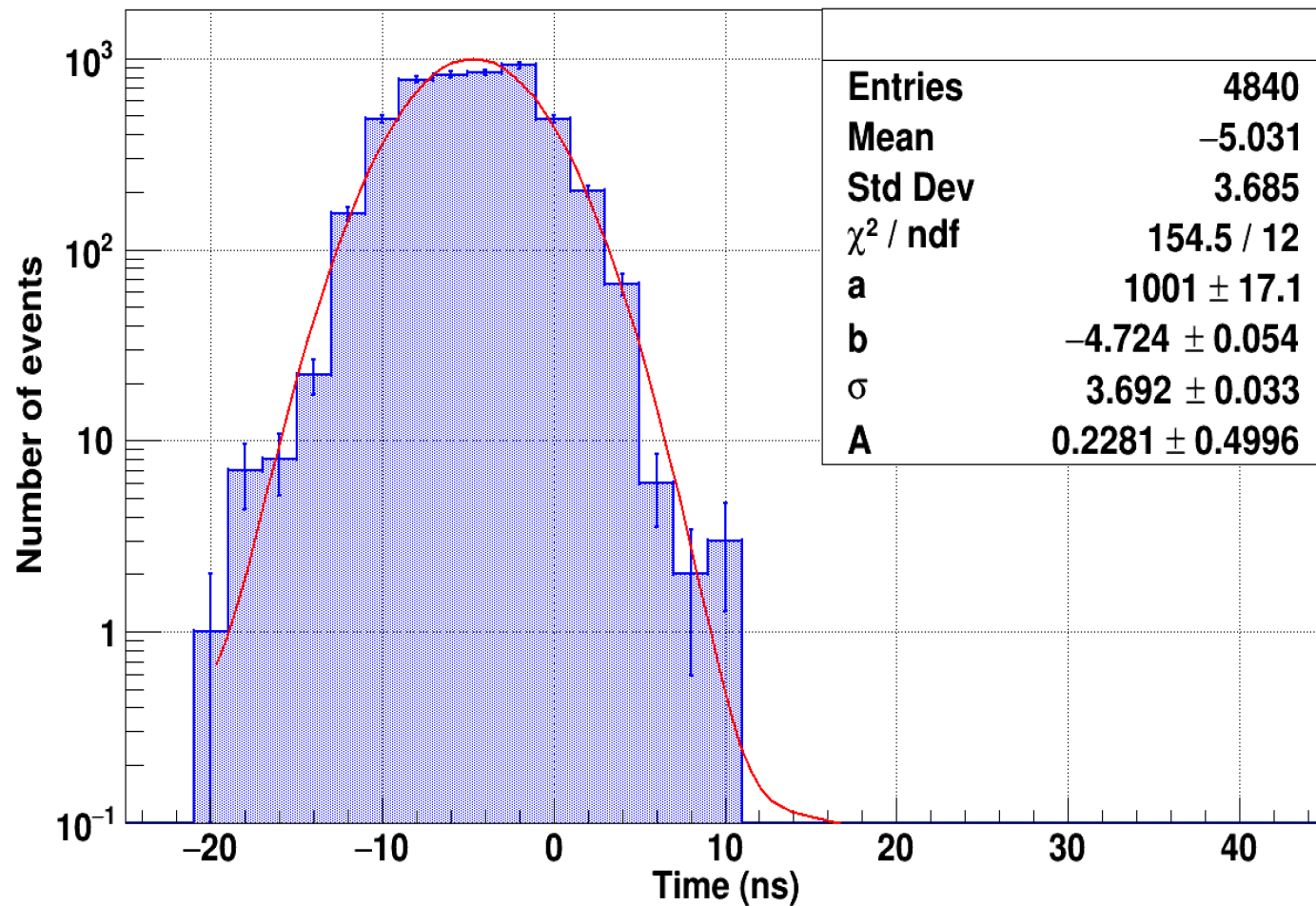
フィッティングを行った。

$$N_\pi = a \exp\left[\frac{-(x-b)^2}{2\sigma}\right] + A \exp\left[\frac{-(x-b)}{26\text{ns}}\right]$$

ガウシアン

指数関数

pion life time



パイ中間子の探索 ～解析～

- ミューオンの項

$$a \exp \left[\frac{-(x-b)^2}{2\sigma} \right]$$

で $\sigma = 3.7 \pm 0.03$

→パイオン寿命測定には十分な分解能

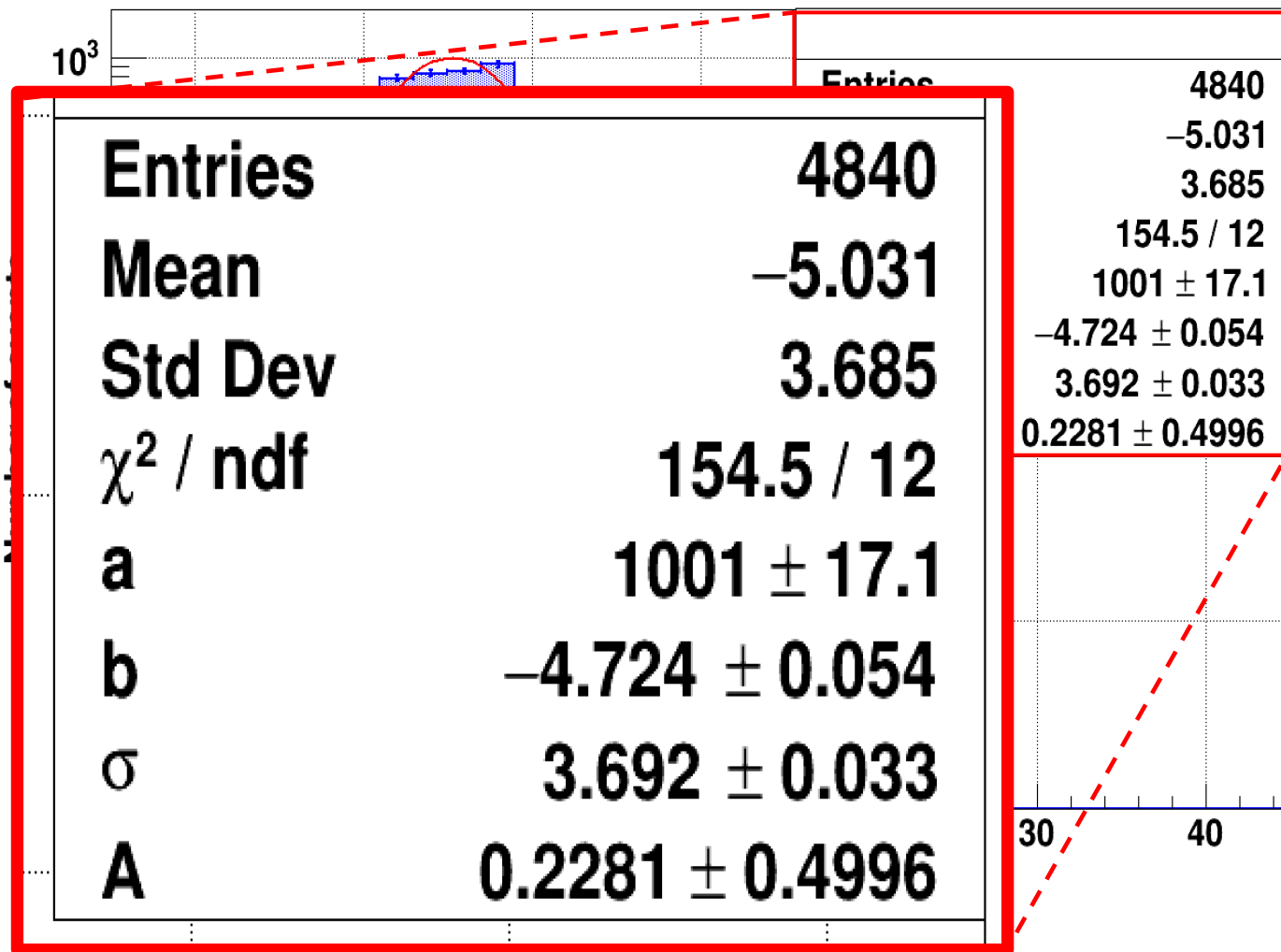
- パイオンの項

$$A \exp \left[\frac{-(x-b)}{26} \right]$$

係数 $A = 0.23 \pm 0.50$ は 0 event と矛盾しない

→ 観測されたとはいえない

pion life time



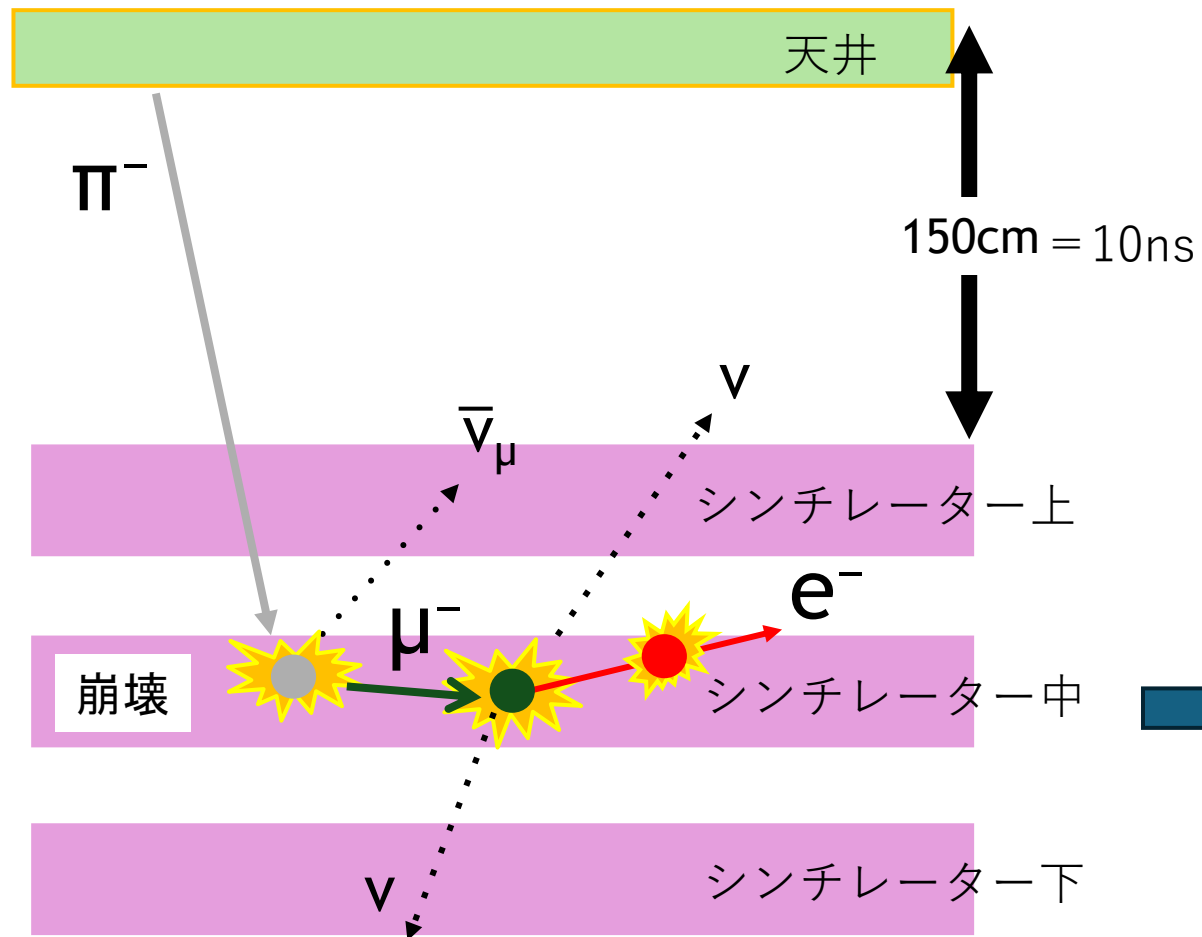
パイ中間子の探索 ～方針～

TDC解析ではパイ中間子らしきものを確認することができなかった。

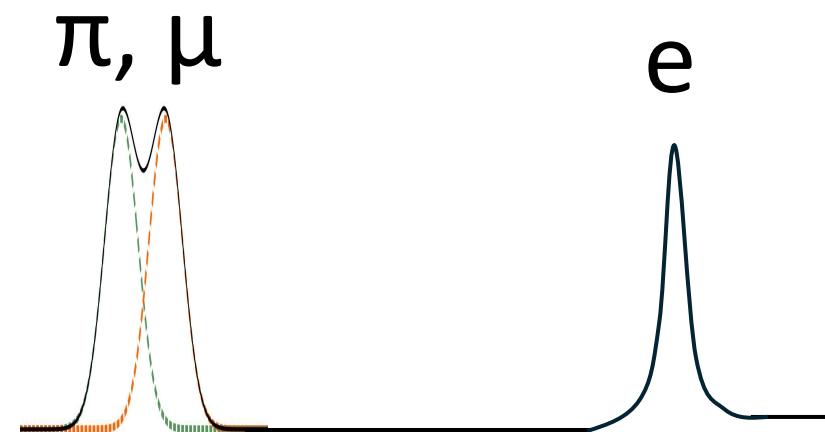
→実際のアナログ波形を目視で確認してみよう

→オシロスコープで解析だ！！

パイ中間子の探索 ～方法～



取得したいのはこのような波形



崩壊寿命

π : $\sim 26\text{ns}$

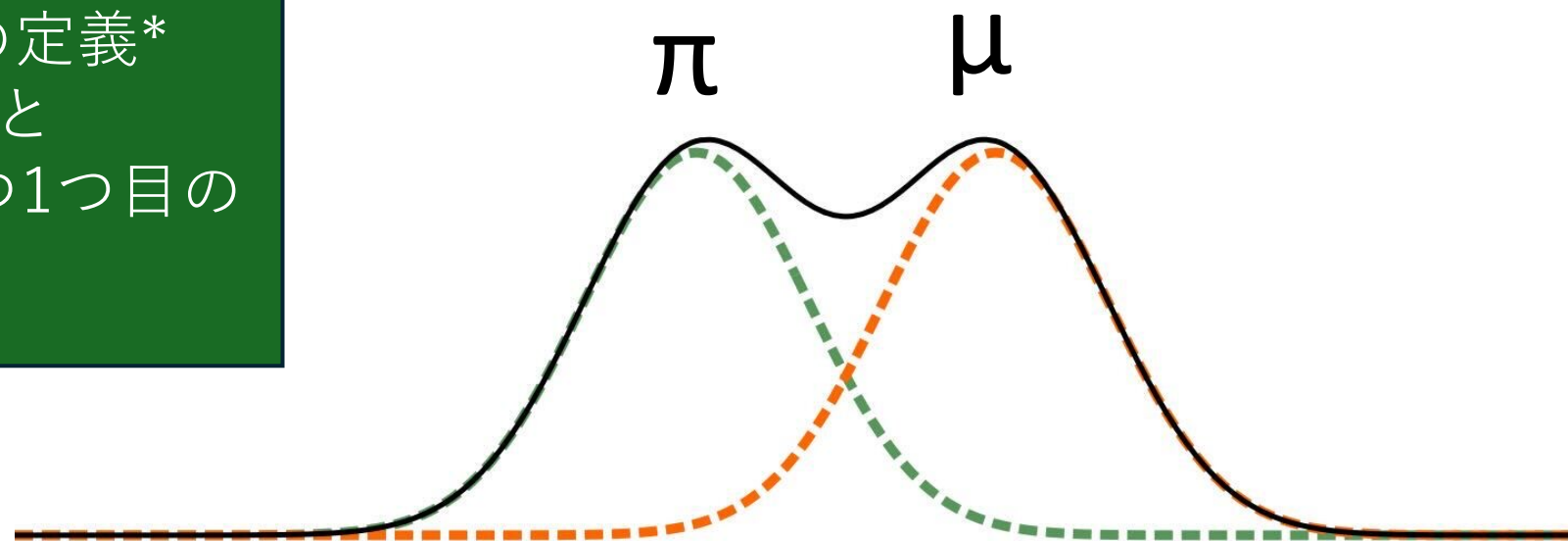
μ : $\sim 2200\text{ns}$

パイ中間子の探索 ～方法～

目視で確認すべきはこのような波形

目視の対象とするデータの定義

- ① パルスが2つ以上あること
- ② ①を満たしていて、かつ1つ目のパルスに谷があること



パイ中間子の探索 ～解析～

- 取得した波形の総数: 92798 events

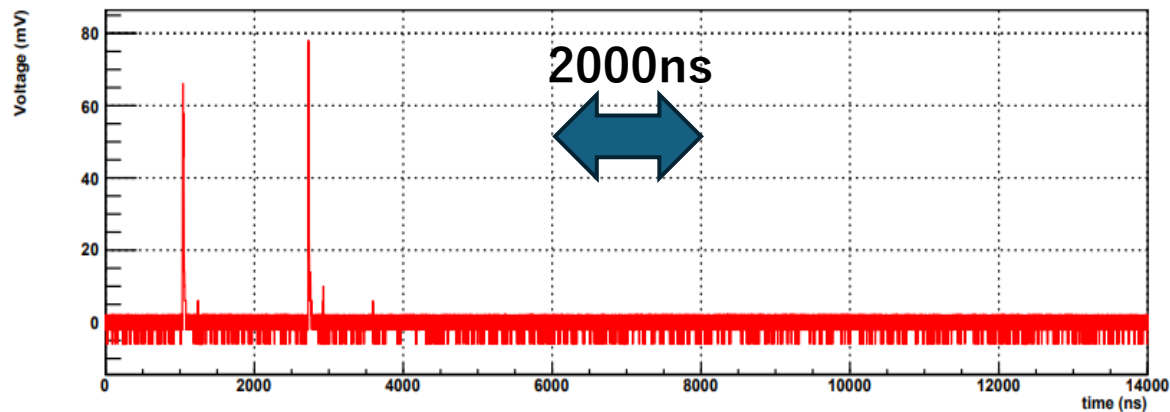
前述の定義に沿うようなデータを抽出するプログラム

- ① **閾値50 mVを超えたパルスが二つ以上ある波形を選出:**
92798 events \Rightarrow 753 events
- ② **目視で最初のパルスに谷があるものを選出:**
753 events \Rightarrow 24 events

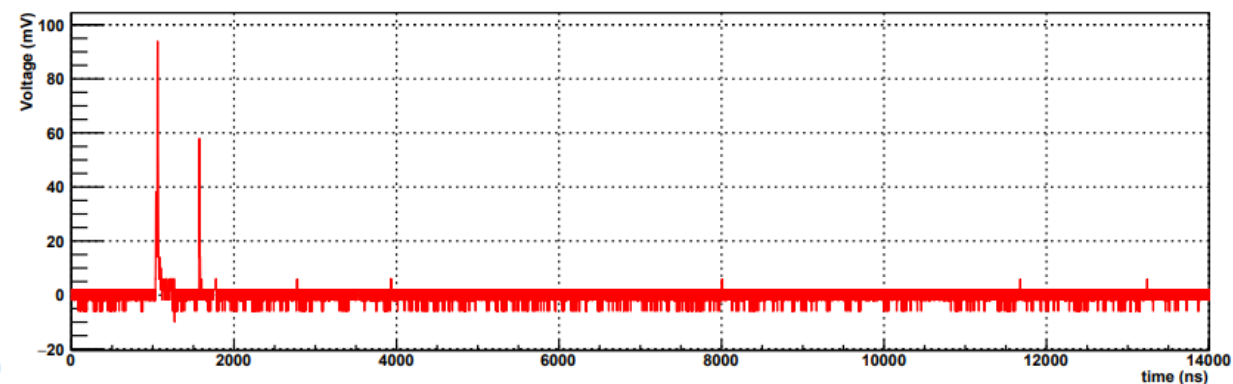
パイ中間子の探査-解析

先ほどの**定義①**をに沿うようなデータを抽出すると、以下のようなパイオン由来候補の波形が確認できた。

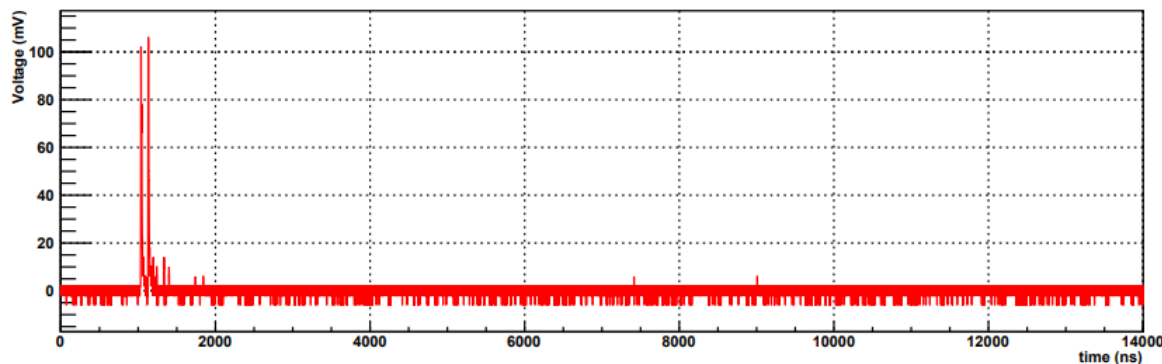
Event#=0004 #ofPpulse=2 Charge=340.80 (pC) Time=1687.00 (ns)



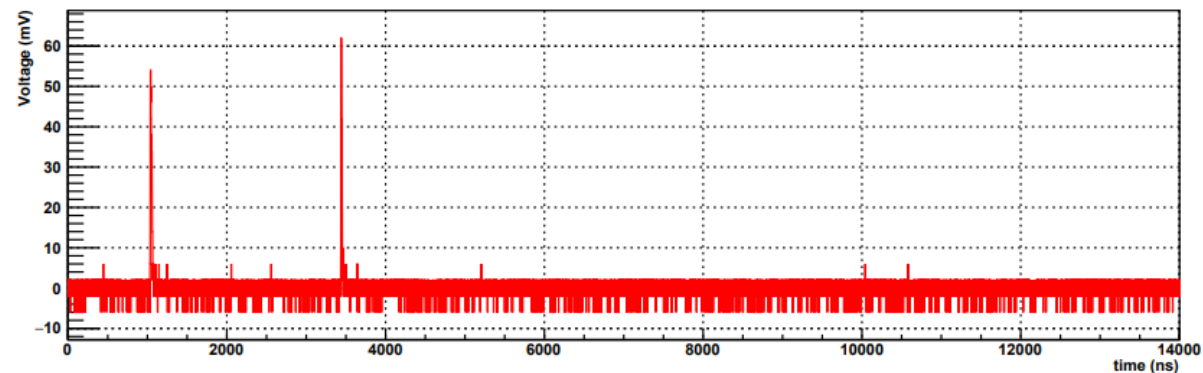
Event#=4901 #ofPpulse=2 Charge=423.04 (pC) Time=535.00 (ns)



Event#=62795 #ofPpulse=2 Charge=408.52 (pC) Time=93.00 (ns)

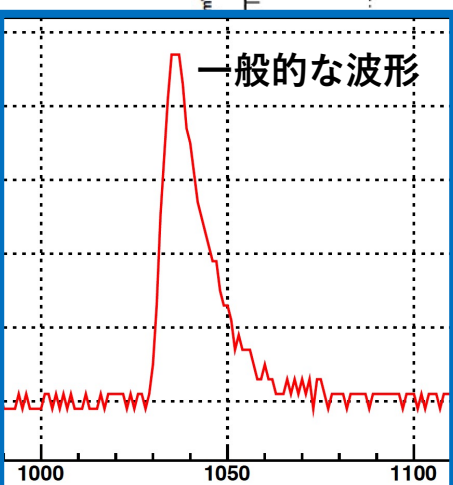
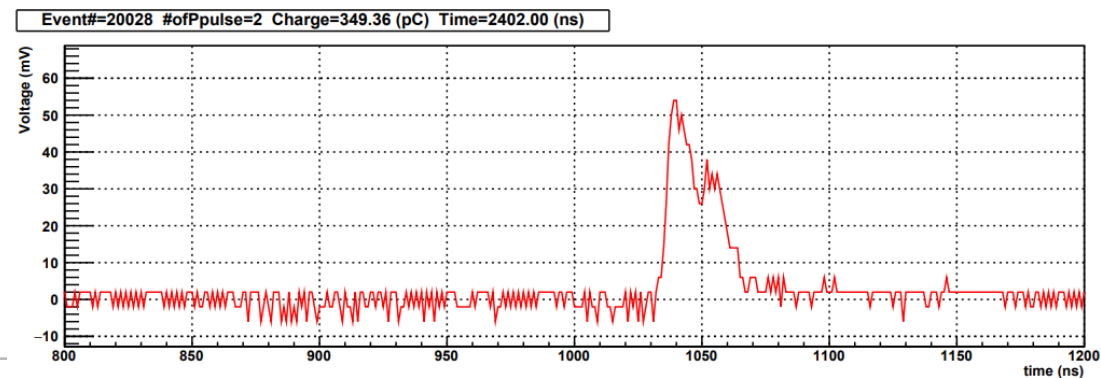
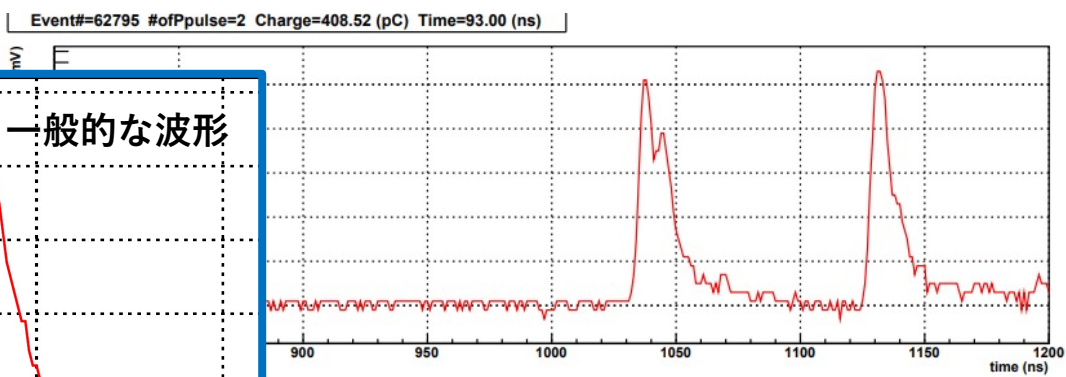
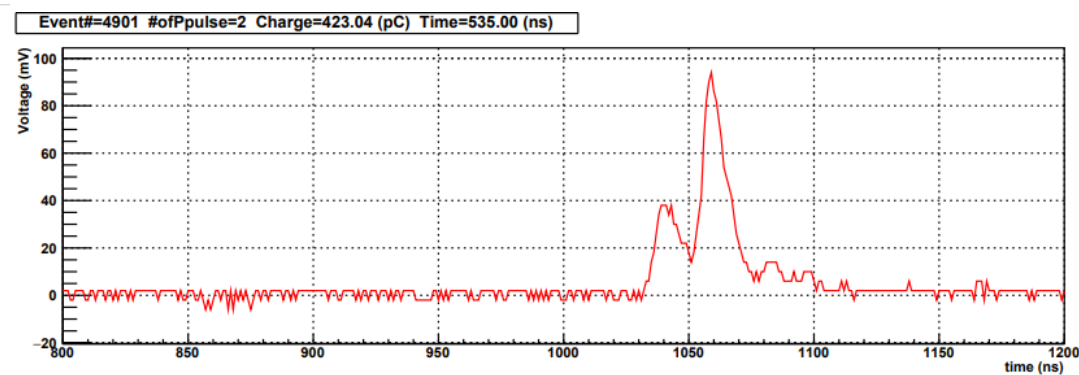
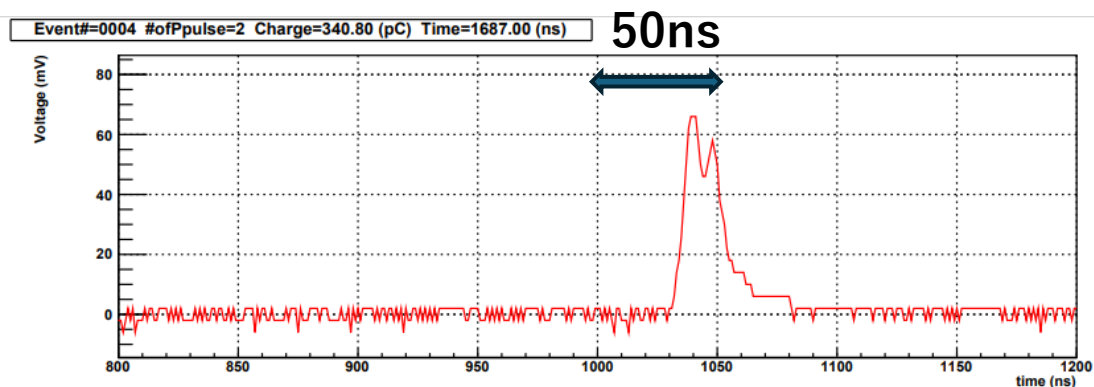


Event#=20028 #ofPpulse=2 Charge=349.36 (pC) Time=2402.00 (ns)



パイ中間子の探索 ～結果～

前述の**定義②**に沿うようなデータを抽出すると、以下のようなパイオン由来候補の波形が確認できた。



オシロスコープでパイオン候補が確認できた！

パイ中間子の探索 ～考察～

- ①TDCを用いた解析(デジタルデータ)がうまくいかなかった原因
→シンチレーター内で発生した光が記録される時間の場所依存性、シンチレーターに貼付されている反射シートによる乱反射で生じる光の継続時間、十分とは言えないデータ数
- ②より高度な解析でパイオンを見つけられるかもしれない。
解析プログラムの改善と観測データの増加によってより正確かつ多くの π - μ 崩壊の波形が得られる。
→パイ中間子の寿命の確認などの応用が期待される。

まとめ

- ・ ミューオンの寿命を測定した。
- ・ パイ中間子をTDC解析を用いて探査したが、パイ中間子を検知、または寿命の測定をするためには断定できない検出法であった。
- ・ オシロスコープを用いて、パイ中間子が存在するであろう時間において2つのパルスを選別することに成功した。

今後の展望

パイオンをより検出するために.....

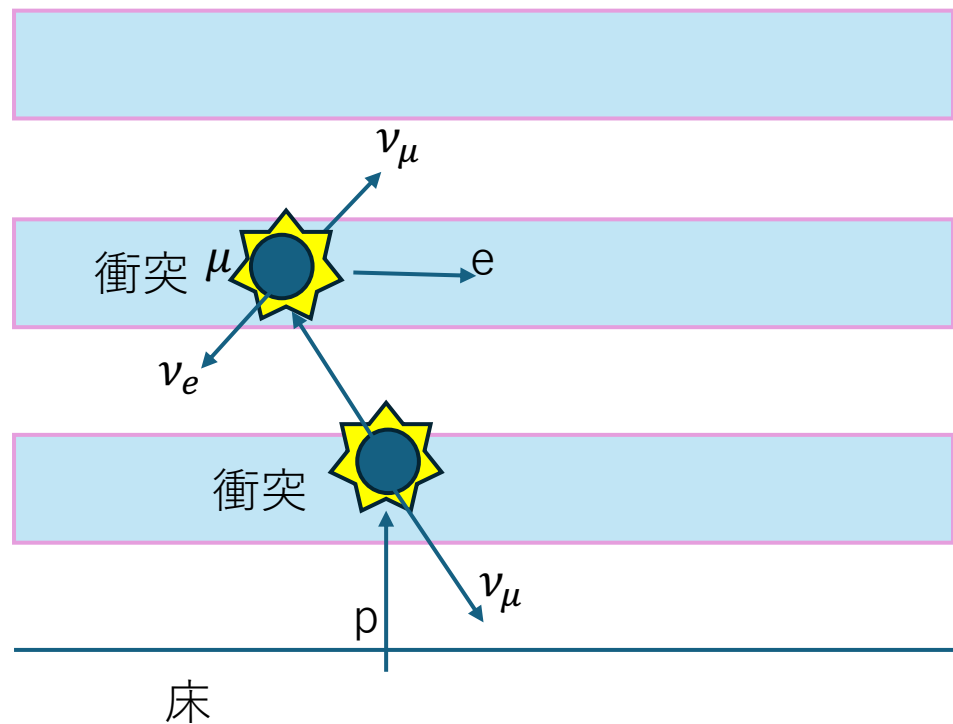
上向きに測定する！

上向きだと嬉しいこと

パイオンのエネルギー小



パイオンが崩壊するイベント増



ご清聴ありがとうございました



パイ中間子の探索 – 補助資料①

前述の定義に沿うようなデータを抽出するプログラム

閾値1：15 mV 波形の始めを記録

閾値2：50 mV 一定以上の大きさを波と認識

閾値3：最大の75%

→1と3の時間が20 ns以上のものを取り出す
(一定以上の電圧の波の継続時間に注目)

9万 event から171 eventに

補足資料②：パイオンの寿命測定

