

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

角谷 爽 加藤 舜都 田中 真 平谷 紘大 真鍋 小春

前説 パイオンの発見

2

wikipedia 間違ってる！！！！

歴史 [編集]

19

(i

Me

セ

こ

乾

た。

気球を回収後、

これらの業績が1949年に湯川秀樹および1950年にセシル・パウエルがノーベル物理学賞を受賞した。

電磁相互作用の寿命も短い π^0 の同定は容易ではなかったが、後の1950年、カリフォルニア大学のサイクロトロンを使った実験で、 π^0 が2つの光子への崩壊を観察することにより、その存在が実験的に証明された。

0. 目的

1. ミューオン寿命測定

1-1. 背景

1-2. 観測方法

1-3. 結果

1-4. 考察

2. パイオンの観測

2-1. 背景

2-2. 検出方法(その1, 2)

2-3. 結果(その1, 2)

3. まとめ、今後の展望

0. 目的

ミューオン寿命測定：

ミューオンの寿命を精度よく測定する

パイオンの観測：

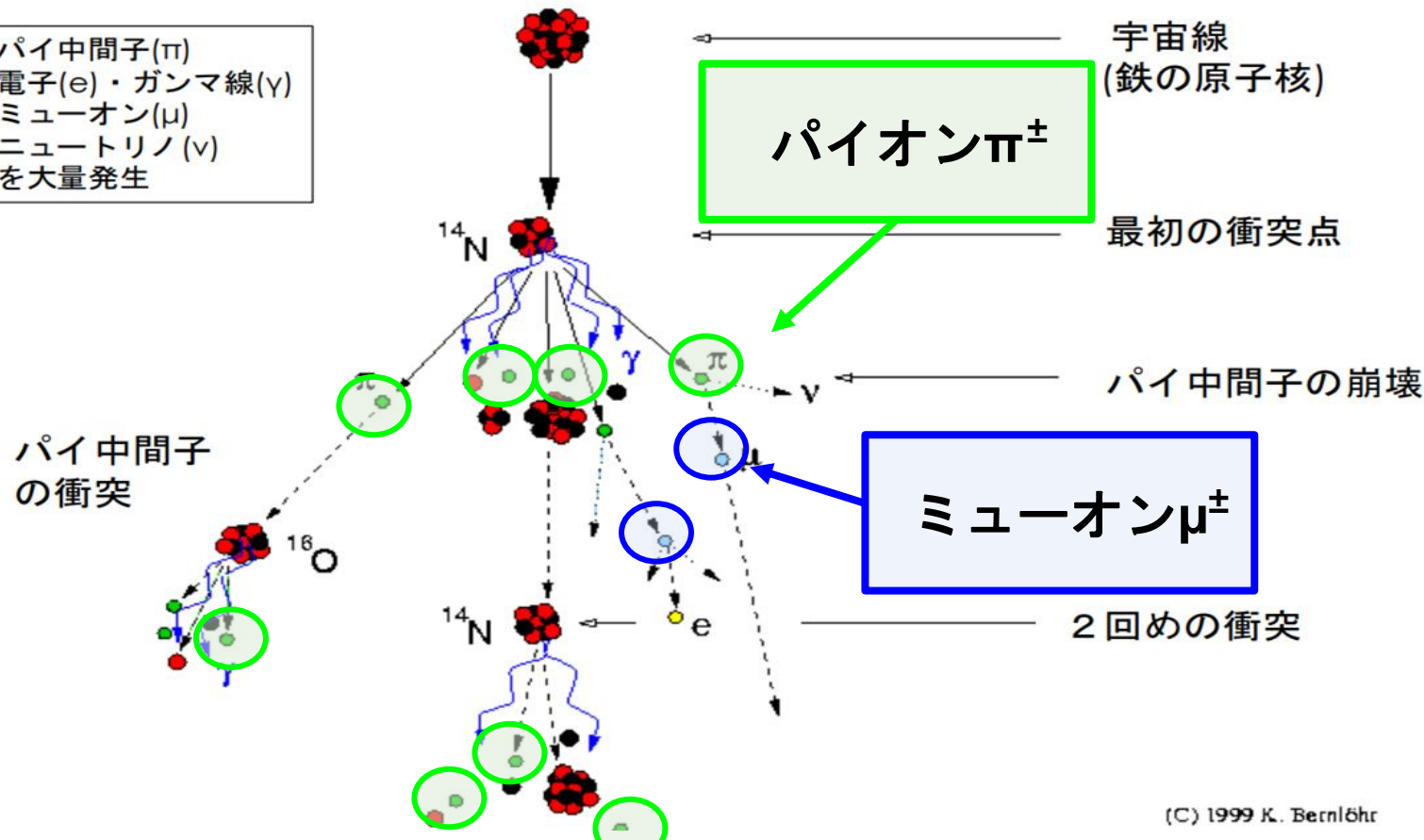
地上でパイオンを検出し、寿命を測定する

ミューオン寿命測定

1-1. 背景 大気中の二次粒子の生成

6

パイ中間子(π)
電子(e)・ガンマ線(γ)
ミューオン(μ)
ニュートリノ(ν)
を大量発生



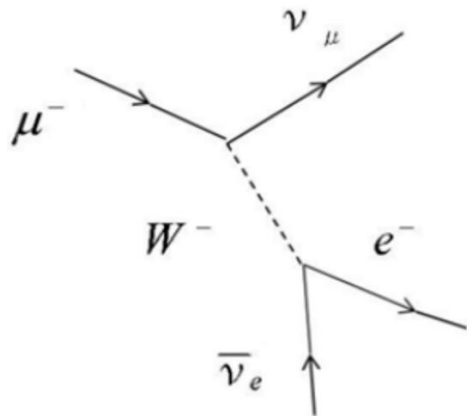
1-1. 背景 ミューオンの生成

7

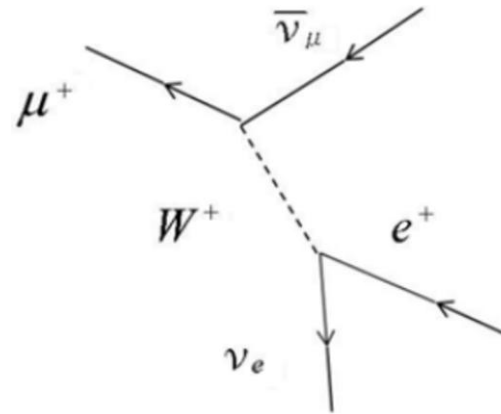
ミューオンは崩壊して、**電子(陽電子)**を放出する

この**電子(陽電子)**を検出する

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



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



1-1. 背景 ミューオンの寿命の定義 8

仮定

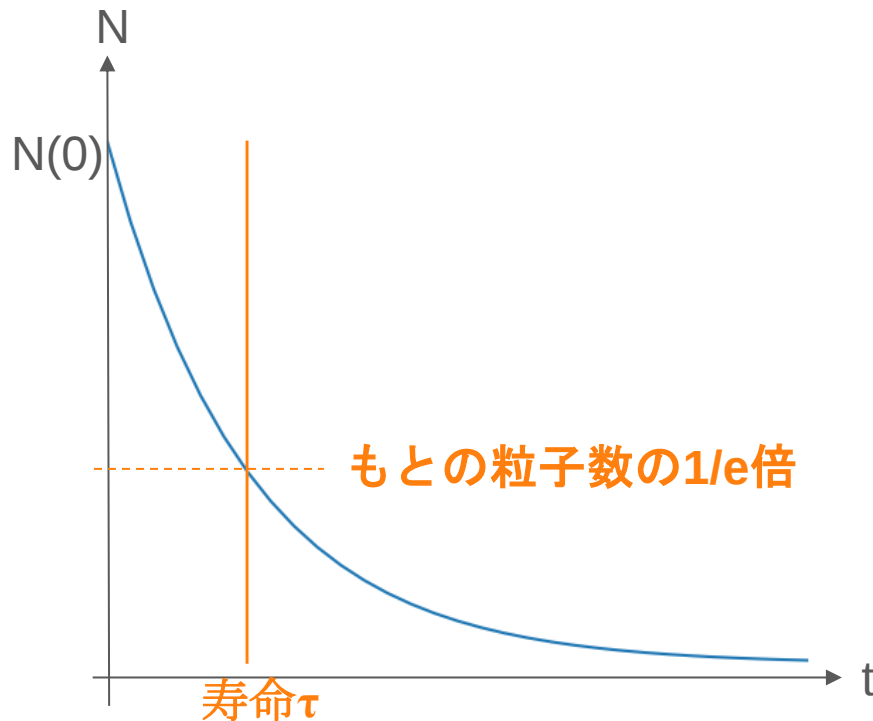
時刻 t における粒子数 $N(t)$ に対する変化量 dN は、
単位時間 dt 当たり、常に一定($-1/\tau < 0$)である

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

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

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

時々刻々と粒子数 $N(t)$ は減少する

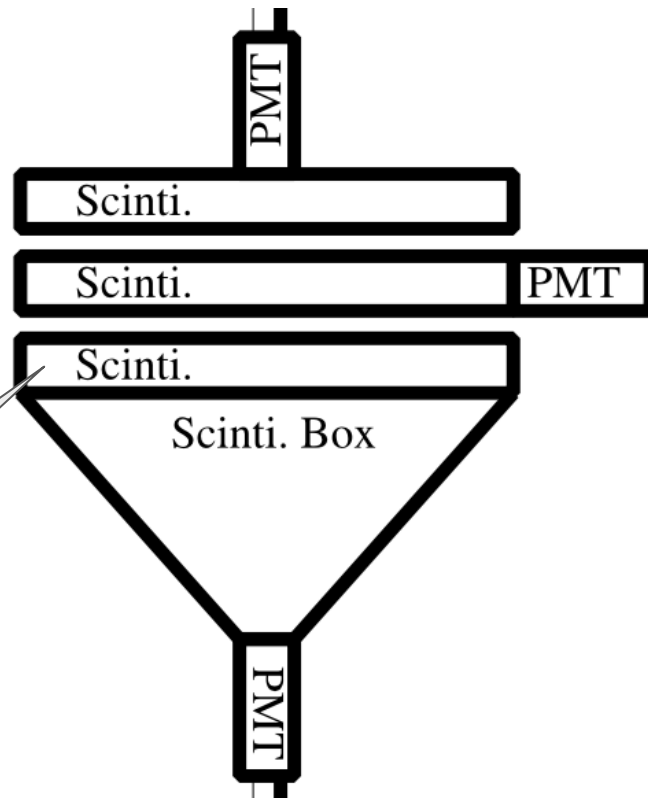
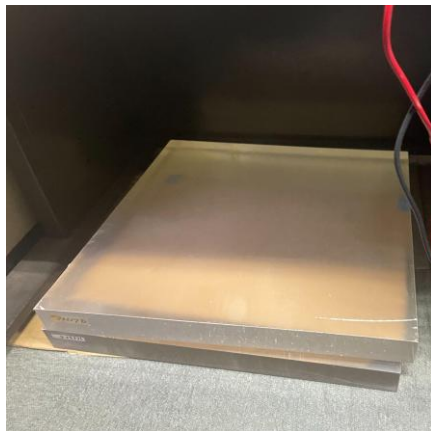


1-2. 観測方法 装置

プラスチックシンチレータ:

→ 荷電粒子が通過すると シンチレーション光(
~420nm)を放射

それをPMT(光電子増倍管)で検出する

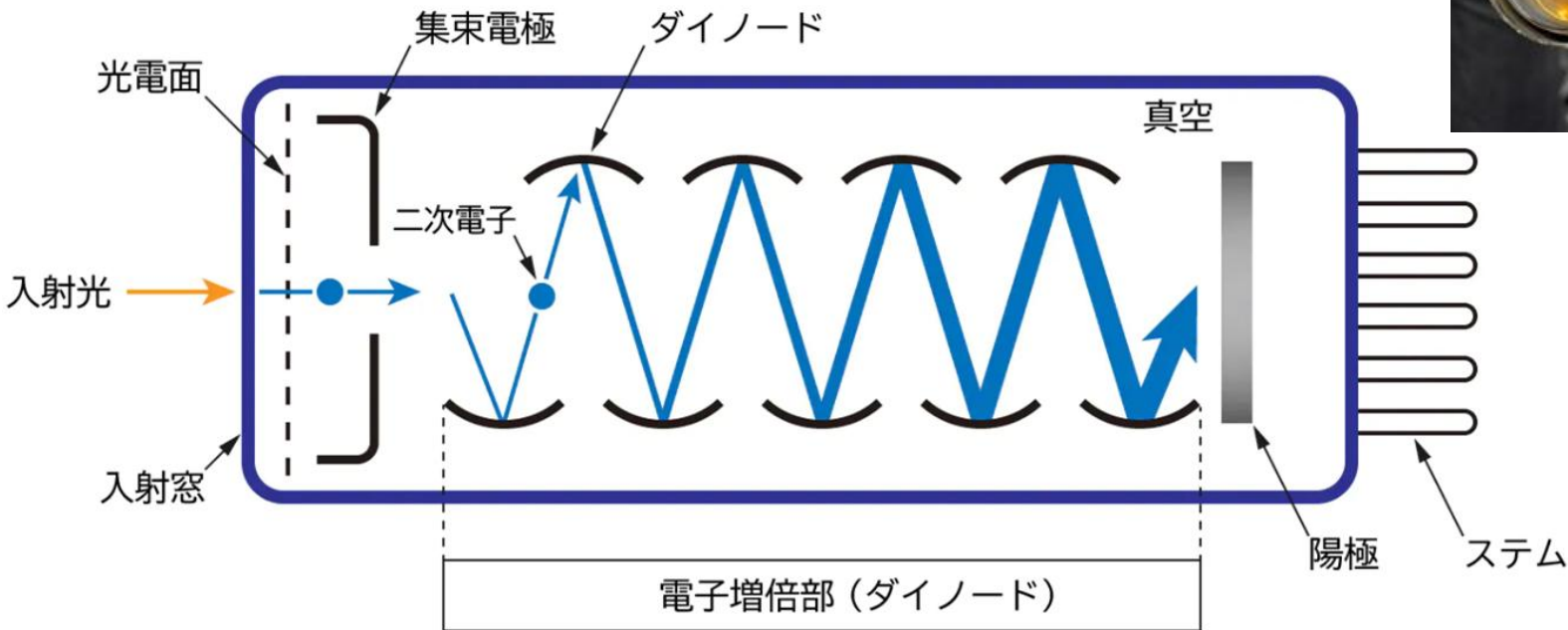


1-2. 観測方法 測定原理

10

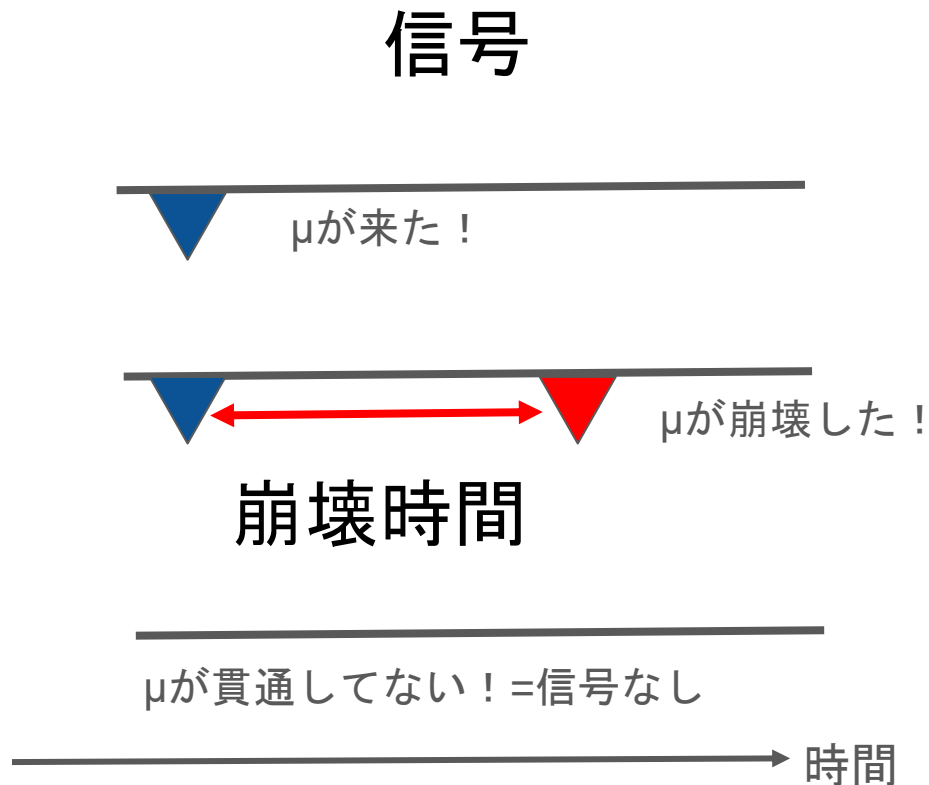
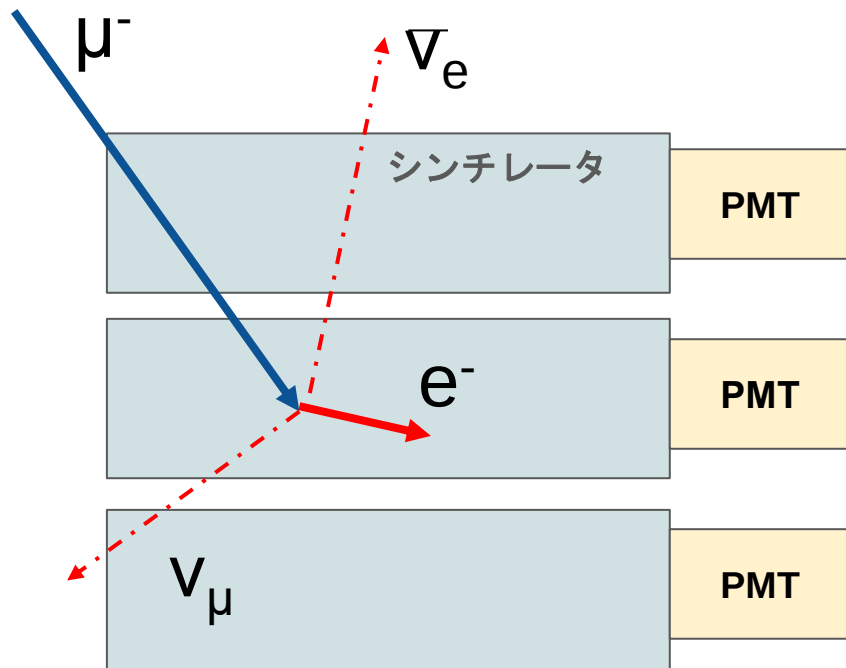
PMT:

→光子を電気信号に変換して検出する

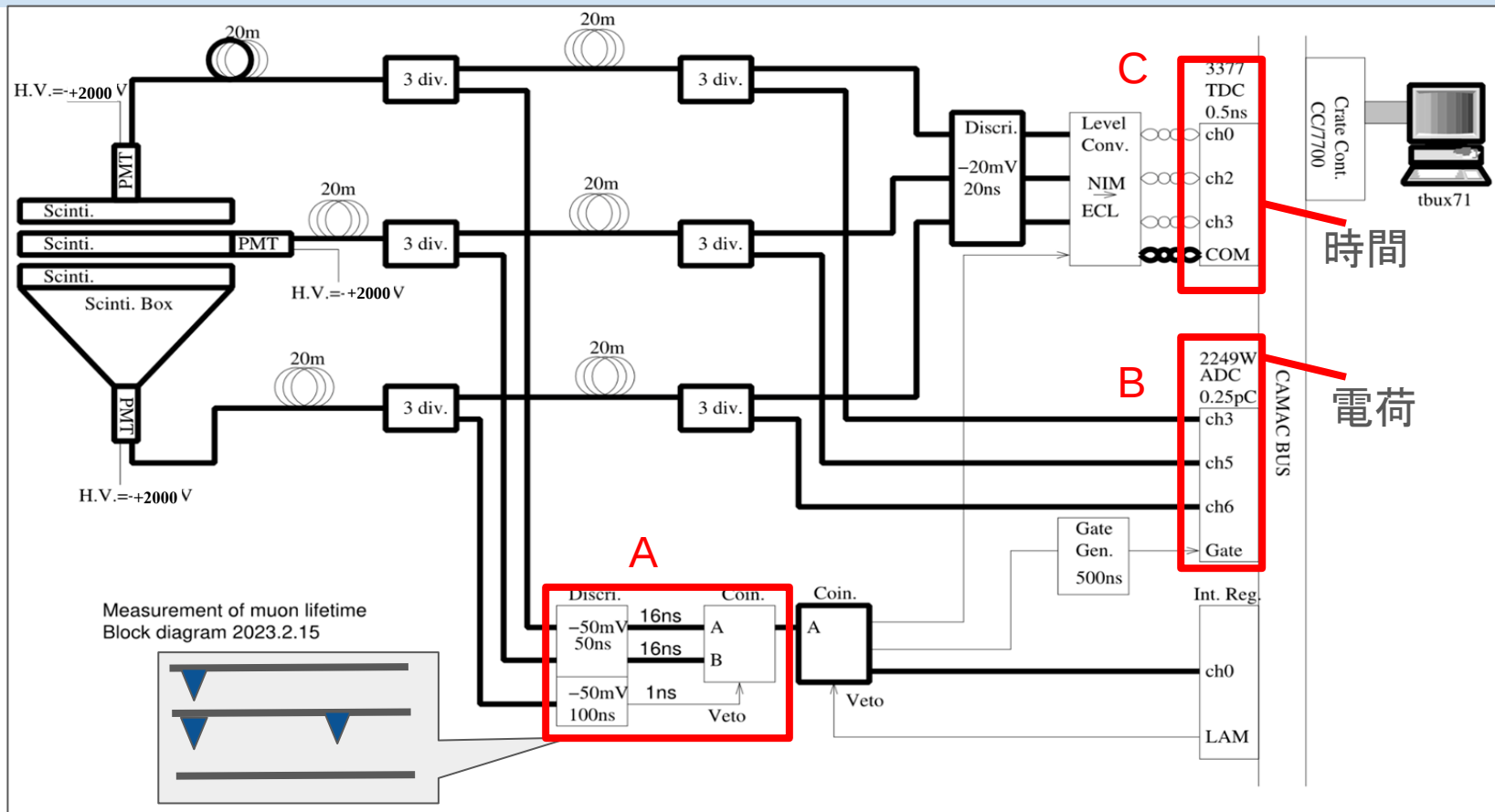


1-2. 観測方法 測定原理

11

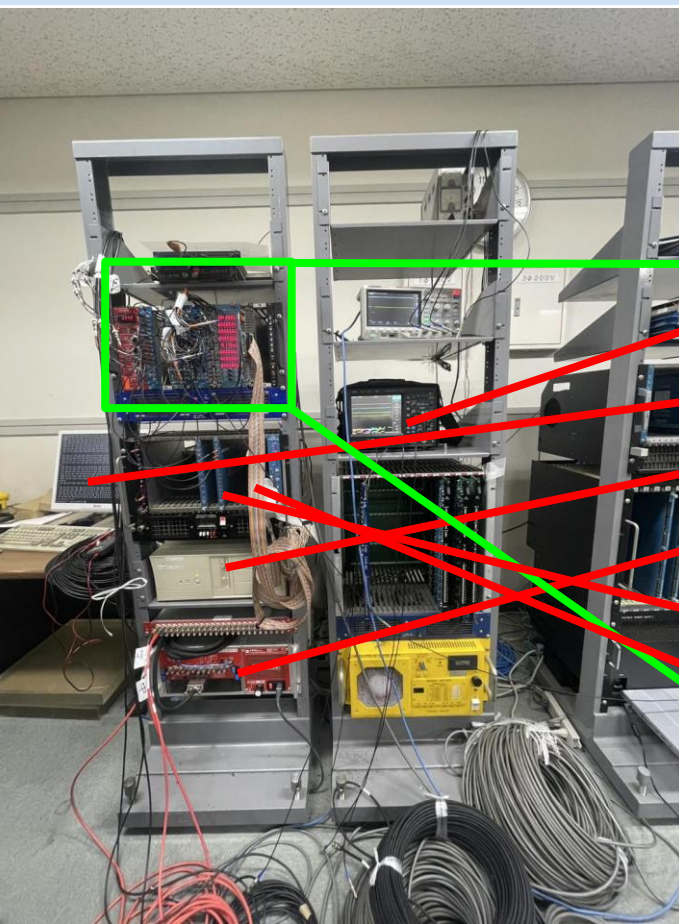


12



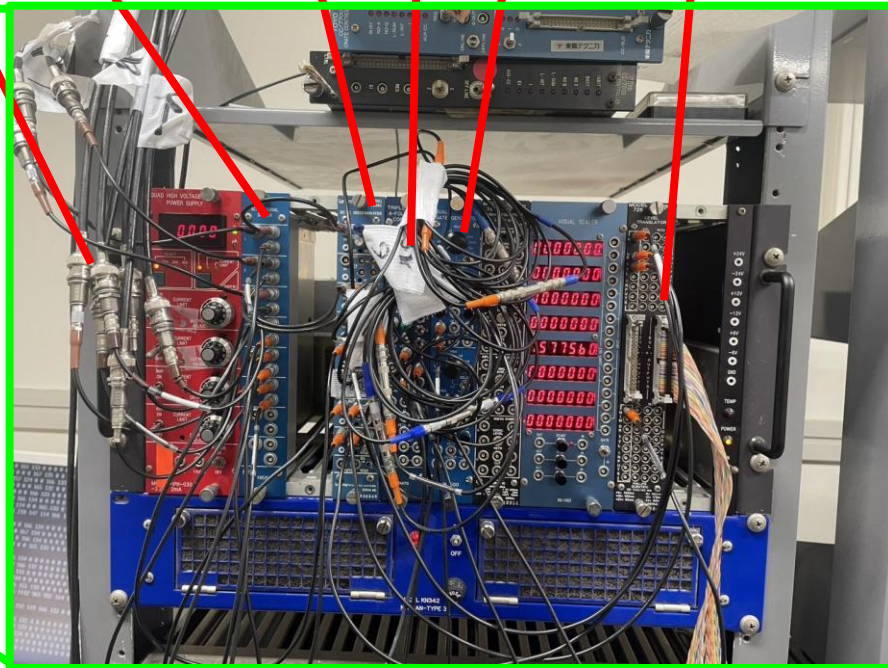
1-2. 観測方法 装置

13



ディスクリミネーター
PMTからの信号ケーブル
コインシデンス
3端子デバイダー
ゲート・ジェネレータ
レベルコンバーター

オシロスコープ
CAMAC用のPC
CAMAC
高電圧電源
ADC
TDC



1-3. 結果 取得したデータ数

14

2日間の測定で、前述のように、ハードウェアによって条件を課して、選別し
取得したデータの総エントリー数は、353,815 イベント

ここからソフトウェアで崩壊時間測定に適した条件をかけ、
エントリー数を **8,304** イベントまで選別した

1-3. 結果 ミューオンの寿命

15

Fittingの式は、

$$N = A \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) + \text{const.}$$

- const. : 右図の Random coincidence
- A: 右図の Initial Counts
- τ は右図の Lifetime

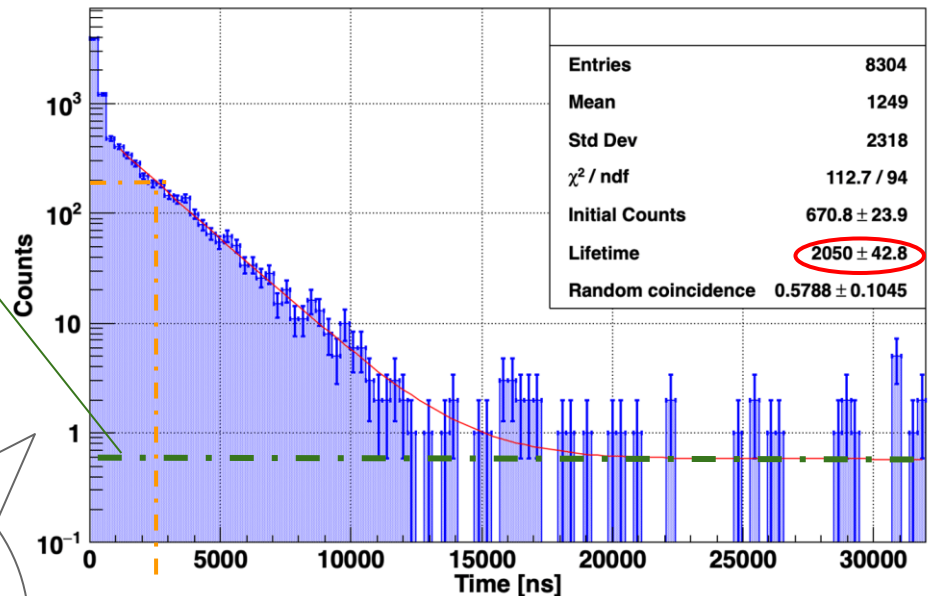
本実験でミューオンの寿命は

$$\tau = 2050 \pm 42.8 \text{ [ns]}$$

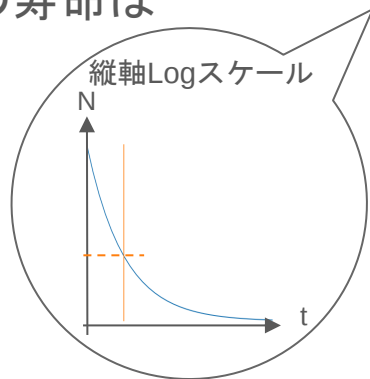
と測定できた

TDC8_M - TDC6_M

(横軸崩壊時間、縦軸カウント数のLogスケール)



寿命 τ

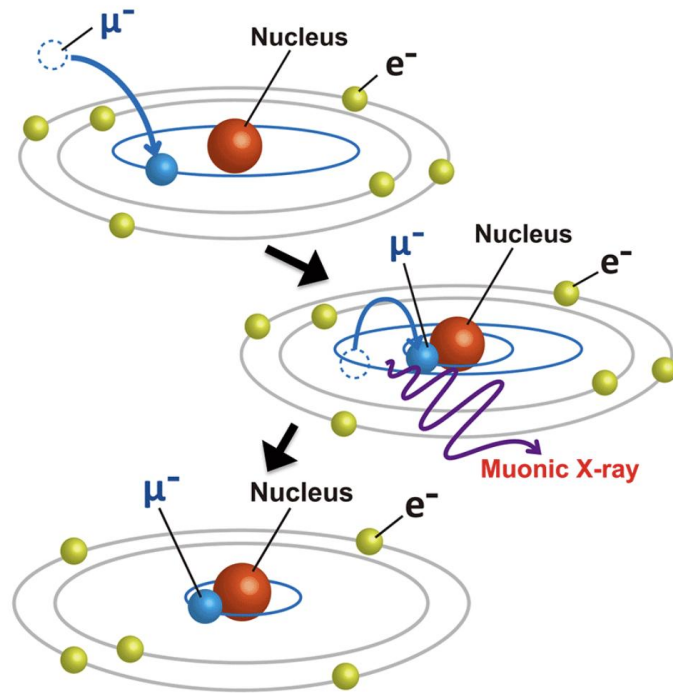


1-3. シンチ中で予測されるミューオンの寿命

μ^+ と μ^- は真空中では寿命が同じだが、シンチレータ(炭素など)中では μ^- が原子核に吸収され、統計の見かけ上全体としてミューオンの寿命が短く見える。

- ・ μ^+ と μ^- の数量の比($\mu^+/\mu^-=1.3$)
- ・ 炭素中の μ^+ と μ^- の寿命; 2197[ns],2020[ns]

→文献値から本実験で予測される寿命
2120 [ns] になる



出典: J-PARK. "Muon experiment"

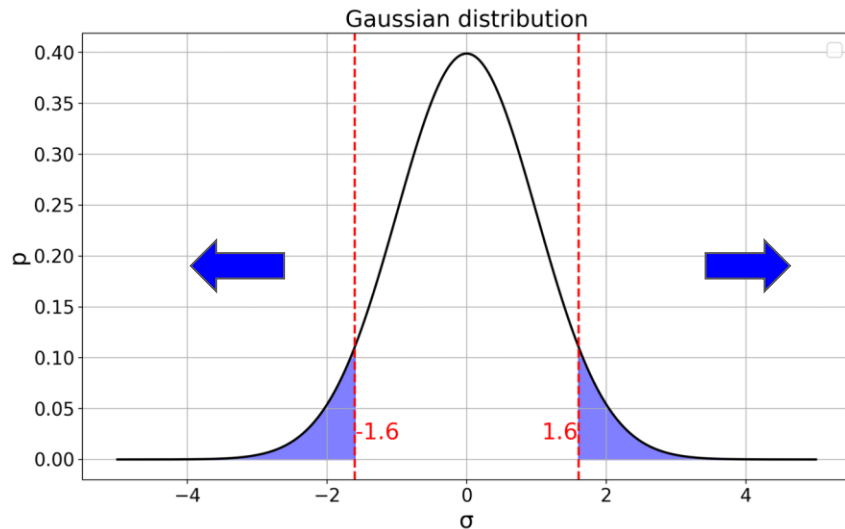
1-3. 結果 ミューオンの寿命

17

本実験→ 2050 ± 42.8 [ns]

文献値からの見積もり→
 2120 [ns] $\pm$ (無視できる誤差)

文献値との統計誤差は、約 1.6σ となった.



文献値からの見積もりが正しいとしたら、
約10 % の確率で本実験の結果が得られる.

1-4. 考察 寿命がずれる原因

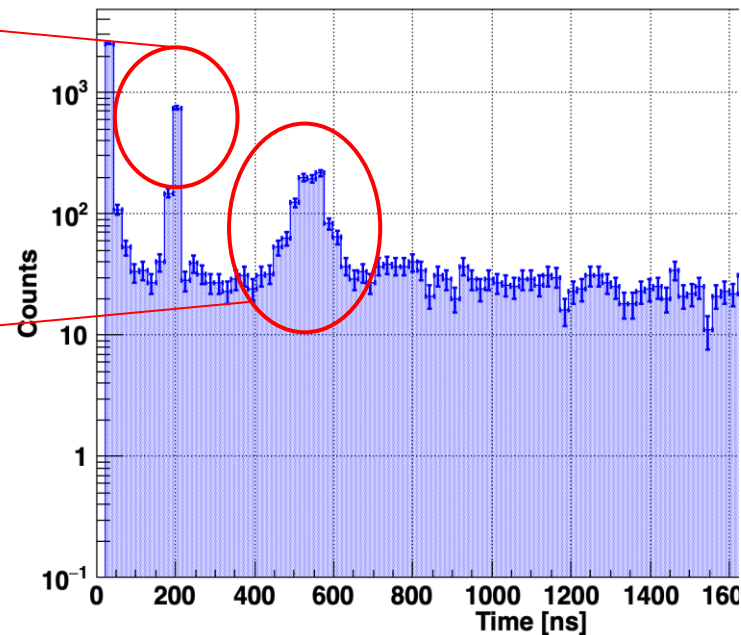
18

- ・ 機械的なノイズ (信号の反射)

(今回はfitting範囲から外した 1 例がこれ)

- ・ アフターパルス

PMT内の気体分子に光電子が衝突して、イオン化したものが光電子の役割を果たし遅れて信号を出す。
→ これらを避けてfittingしたが、もっと滲み出てるE_{max}...

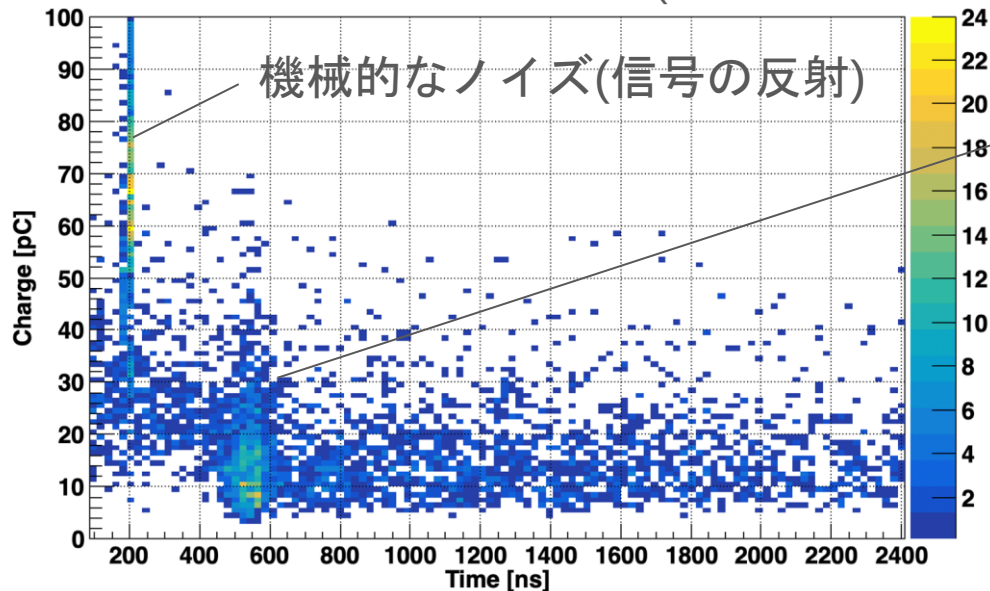


1-4. 考察 ノイズ

19

Decay Time vs Charge in Middle Scintillator

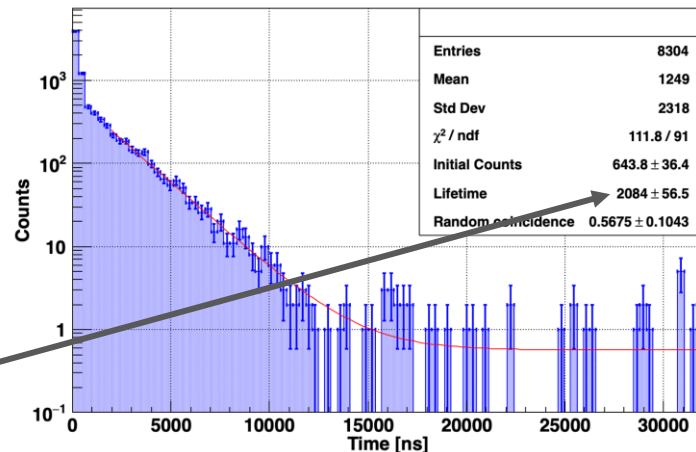
(横軸崩壊時間の時の観測された電荷、色の濃淡はCounts)



アフターパルスは10pCくらいの低いChargeを中心に分布していることがわかる

1800 ns くらいまでアフターパルスの影響が
滲み出しているとして1800 ns以上でfitting
すると... 2084 ± 56.5 [ns]
ただ、予測値より短めに出ることは変わらず

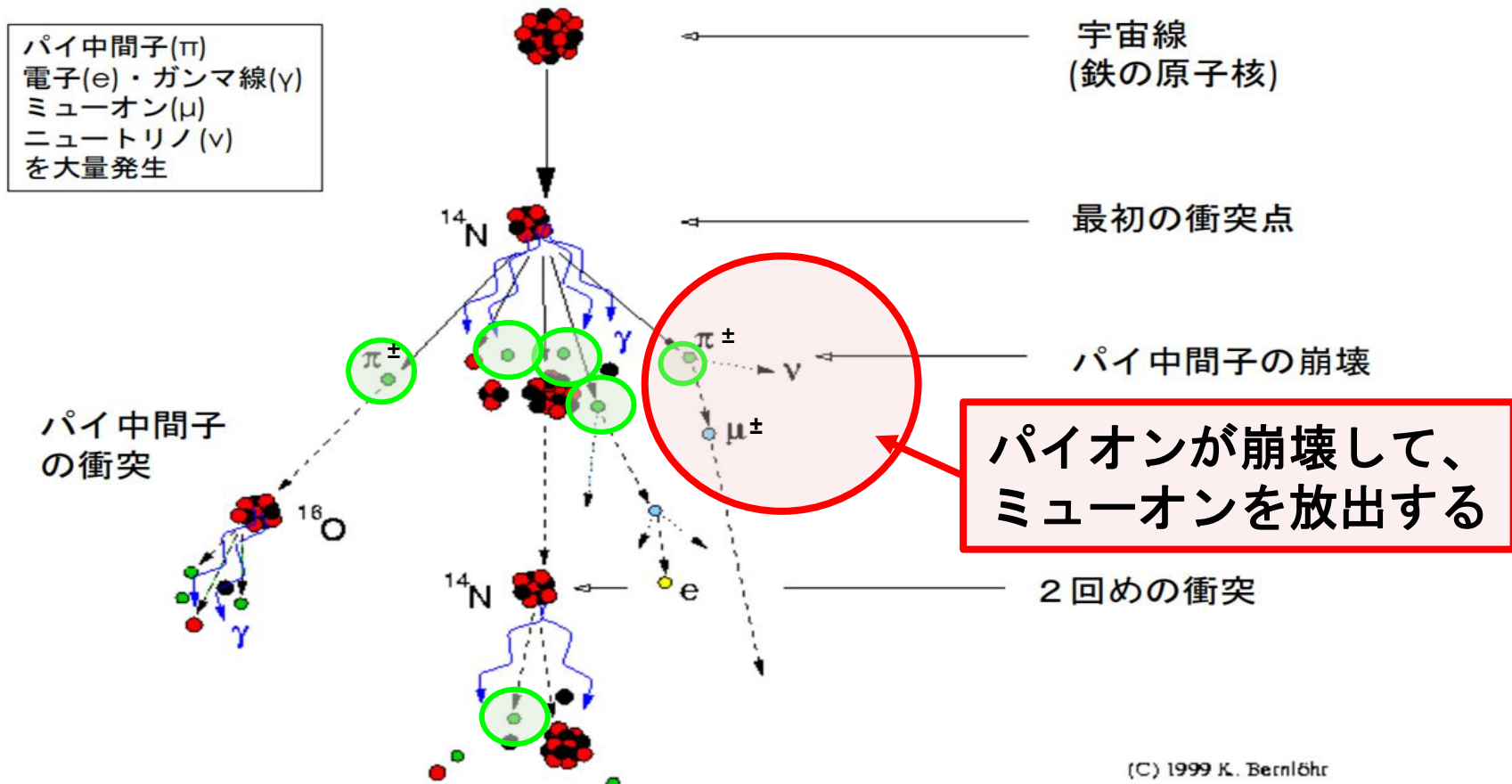
TDC8_M - TDC6_M



荷電パイオンの検出

2-1. 背景 パイオンの性質

21



2-1. 背景 観測できるパイオン数の見積もり

22

TABLE 5. SUMMARY OF RESULTS OBTAINED IN AN EXAMINATION OF IRON-LOADED EMULSIONS EXPOSED FOR 40 DAYS AT THE PIC DU MIDI, 2,800 M.; AND AT COCHABAMBA, BOLIVIA, AT 5,500 M. AT 2,800 M., EMULSION THICKNESS, 50 μ ; VOLUME OF EMULSION EXAMINED, 3.5 C.C. AT 5,500 M., EMULSION THICKNESS, 100 μ ; VOLUME OF EMULSION EXAMINED, 1.1 C.C.

	At 2,800 m.		At 5,500 m.	
	Estimated total	Number per c.c. per diem	Estimated total	Number per c.c. per diem
Mesons of all types	917 $\pm$ 70		269 $\pm$ 25	
(a) π -mesons	117 $\pm$ 20	0.8 $\pm$ 0.2	40 $\pm$ 20	0.9 $\pm$ 0.5
(b) σ -mesons	122 $\pm$ 20	0.9 $\pm$ 0.2	46 $\pm$ 9	1.0 $\pm$ 0.2
(c) μ -mesons arising from the decay of π -mesons at rest	117 $\pm$ 20	0.8 $\pm$ 0.2	40 $\pm$ 20	0.9 $\pm$ 0.5
(d) Number unaccounted for	561 $\pm$ 100	4.0 $\pm$ 0.7	143 $\pm$ 40	3.3 $\pm$ 0.9
(e) Number of nuclear disintegrations giving 5 or more charged particles		10.5		

・ 5,500mでの π -mesons のレート: 40日で約0.9コ/cm³

σ -mesons(?)含めると約1.9コ/cm³

・ (地上付近でのproton鉛直強度/5500m付近でのproton鉛直強度)
=約1/100

・ 今回の実験日数: 約2日

・ 今回の検出器: 5000cm² × 3cm (厚さ)

見積もれるパイオンのレート: 2日間で

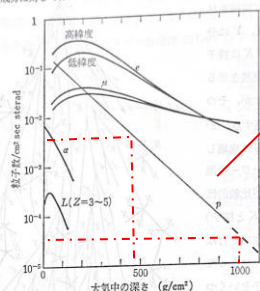
$$1.9 \times \frac{2}{40} \times \frac{1}{100} \times 5000 \times 3 \approx 14$$

→ O(10) 個くらいのパイオン取れそう!

(天井にあたってパイオンが放射、遮蔽されることも考えると

見積もりの過程からもわかるように検出可能くらいしか言えない...)

nの値は、粒子の種類によっても高度によっても異なる。地上で μ 成分に対しては $n \approx 2$ 、電子に対しては $n \approx 3$ 、 N 成分に対しては $n \approx 8$ である。



6-3 図 宇宙線の成分の鉛直強度を大気中の深さの関係として表したもの。

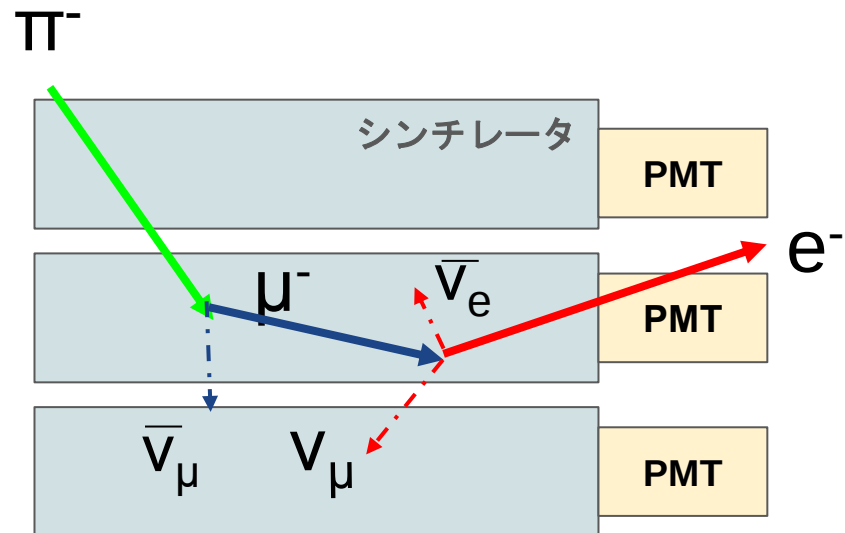
μ : 10 MeV 以上の μ 電子
 π : μ 中間子
 p : 400 MeV 以上のプロトン
 σ : σ 粒子
 L : Li, Be, B の原子核

これはいろいろな実験値をまとめたもので非常に正確な値を示すものではない。

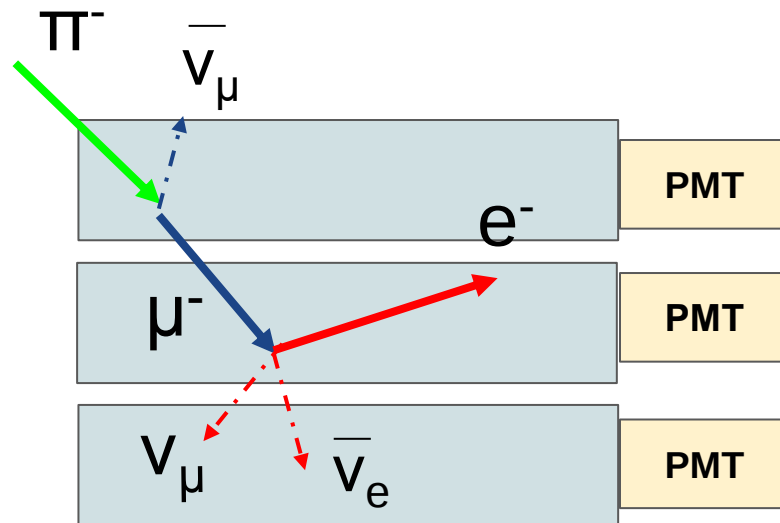
2-1. 背景 生じ得る現象

23

中シンチ崩壊



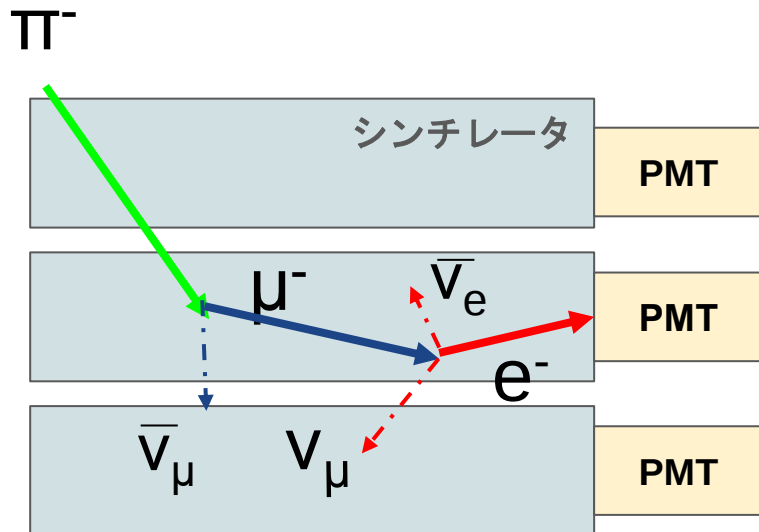
上シンチ崩壊



2-2. 検出方法 その1

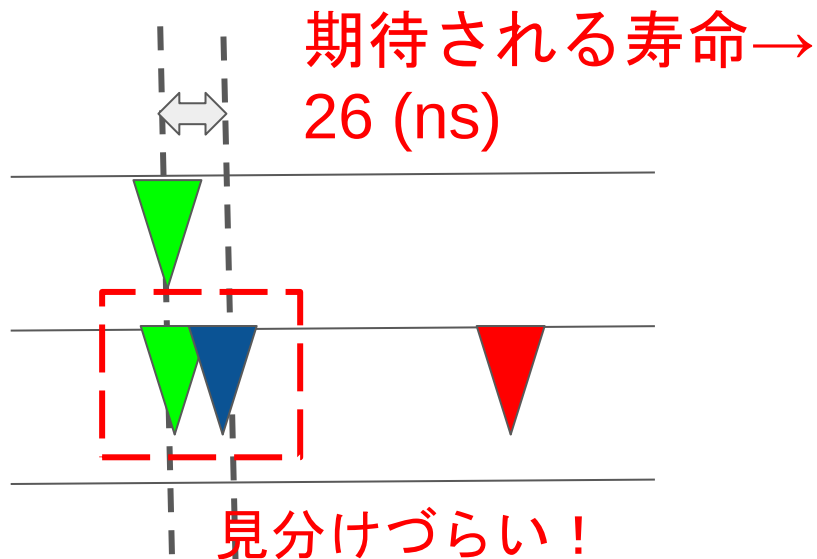
24

中シンチ崩壊



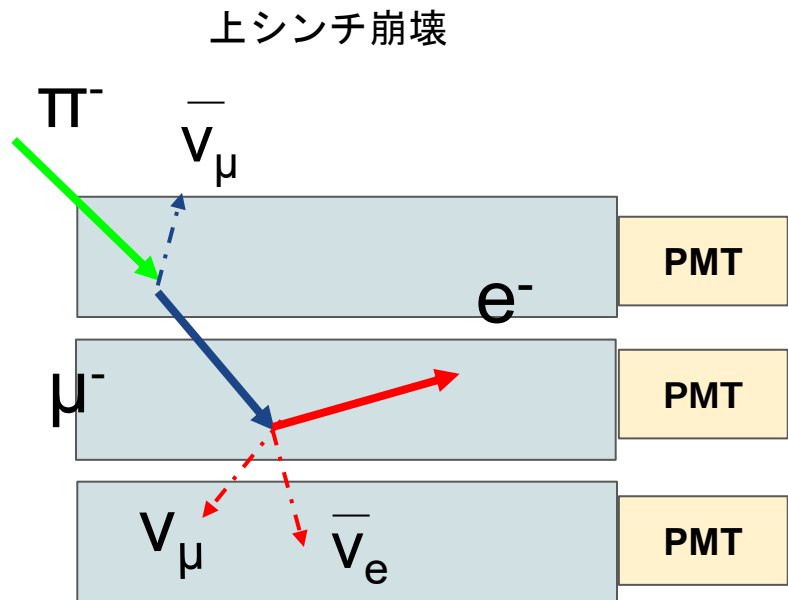
信号

この幅がパイオンの崩壊時間



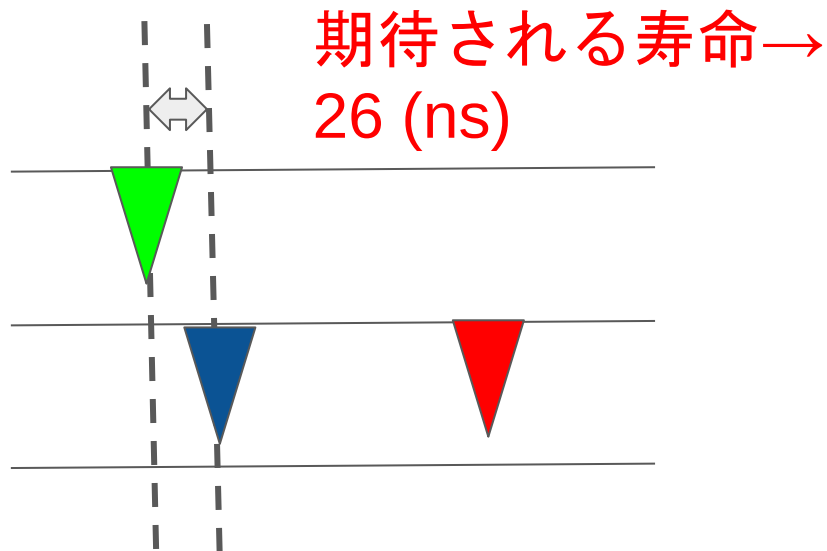
2-2. 検出方法 その1

25



信号

この幅がパイオンの崩壊時間



2-2. 検出方法 その1

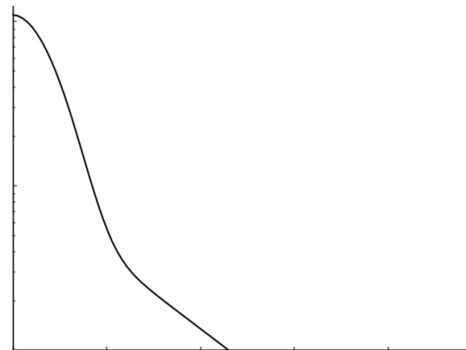
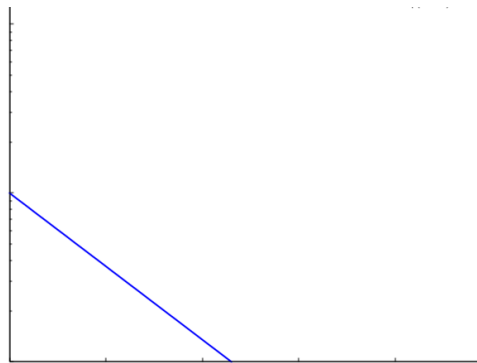
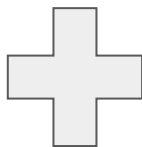
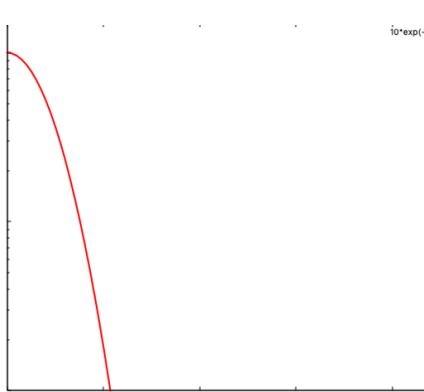
26

ガウシアン
(ミューオン)

指数関数
(崩壊パイオン)

$$N = a \exp \left[\frac{-(t - b)^2}{2\sigma} \right] + A \exp \left[\frac{-(t - b)}{\tau} \right]$$

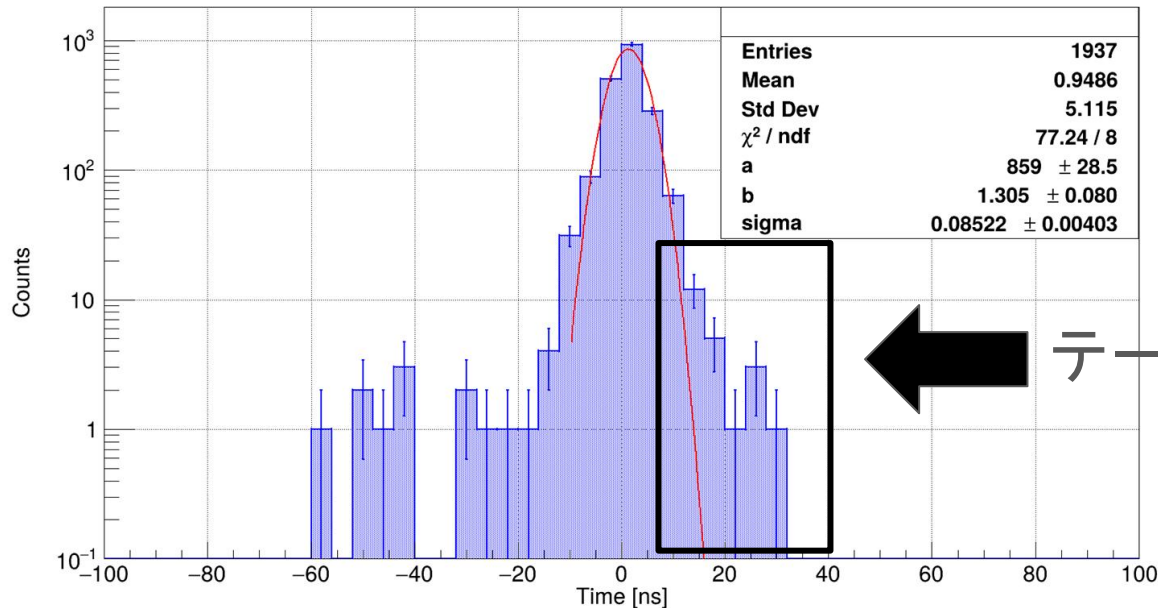
26nsになって欲しい！！



2-3. 結果その 1

27

ガウシアン(ミューオン)のみでフィッティング

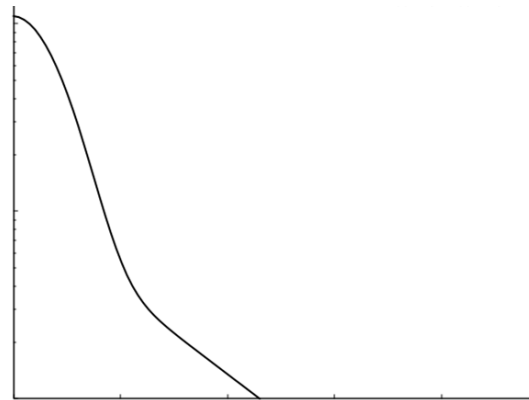
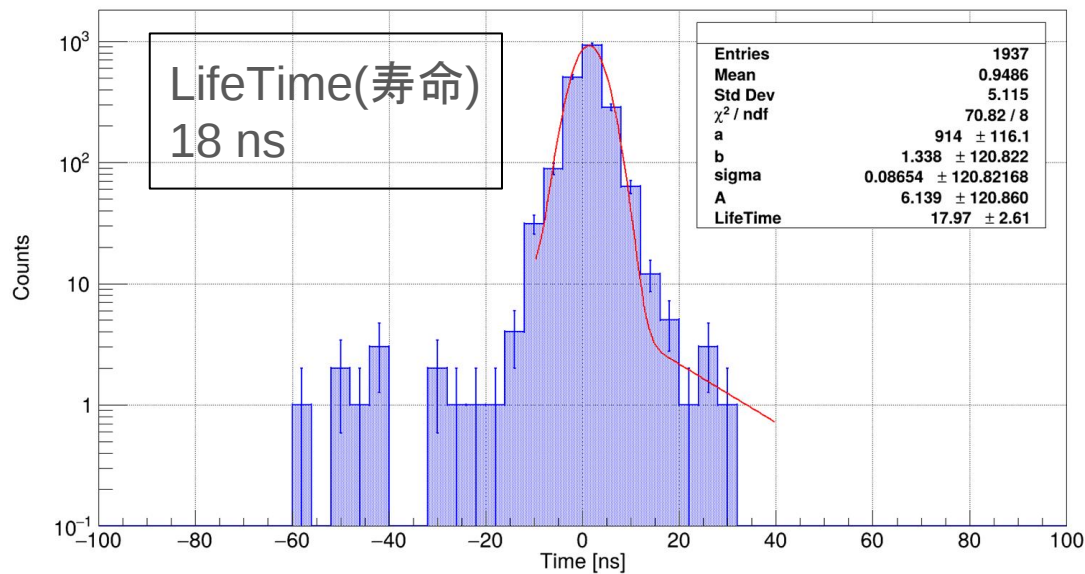


← テールがある！！

2-3. 結果その 1

28

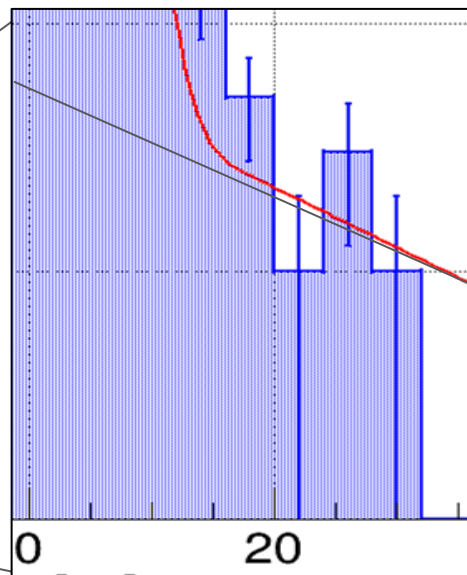
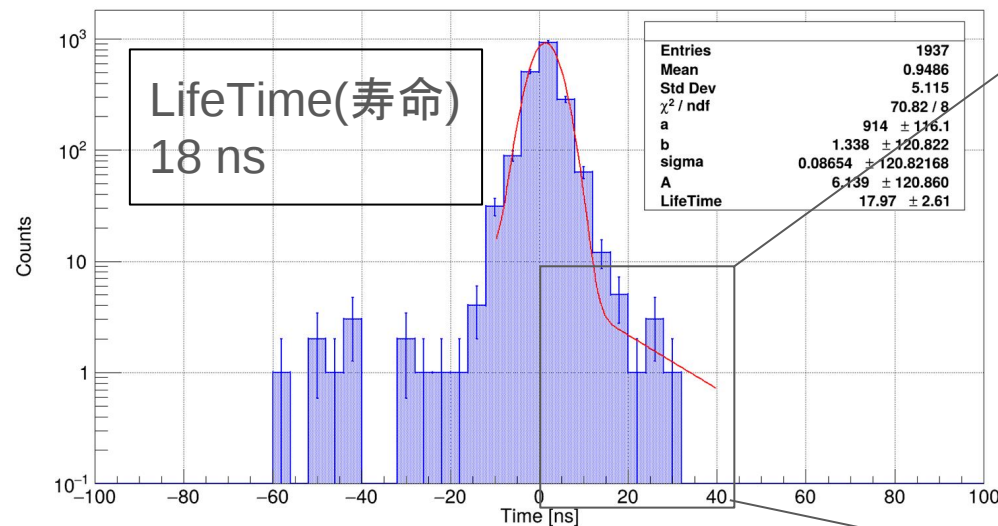
ガウシアン(ミューオン)+指数関数(パイオン)でフィッティング



2-3. 結果その1

29

ガウシアン(ミューオン)+指数関数(パイオン)でフィッティング



パイオン
候補事象→

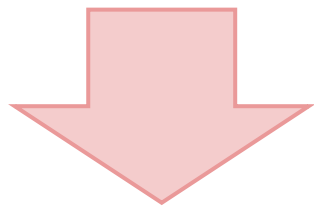
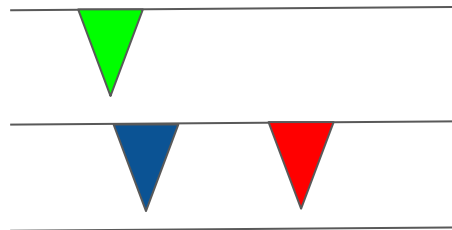
11個ぐらい
 $\approx O(10)$

2-3. 結果

30

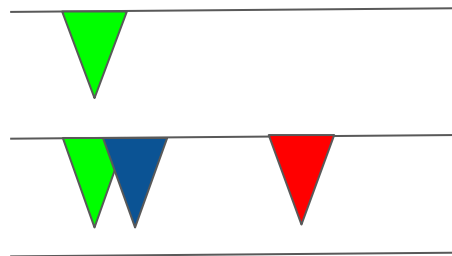
その 1 :

上のシンチで崩壊するパイオンの解析から
パイオンが検出できることは期待できる！



その 2 :

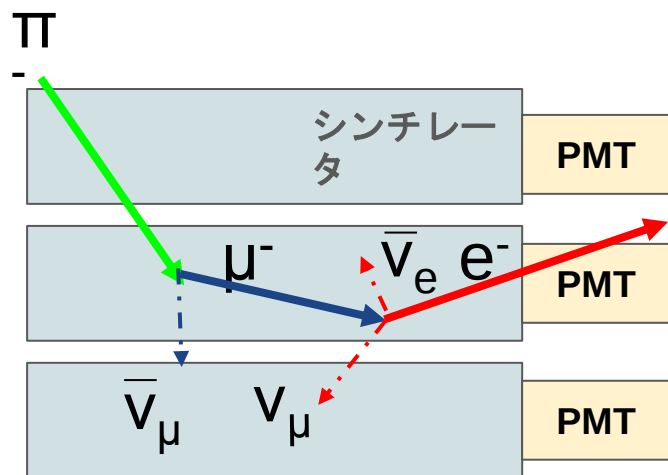
中のシンチで崩壊するパイオンの波形から
パイオンの信号そのものを探してみよう！



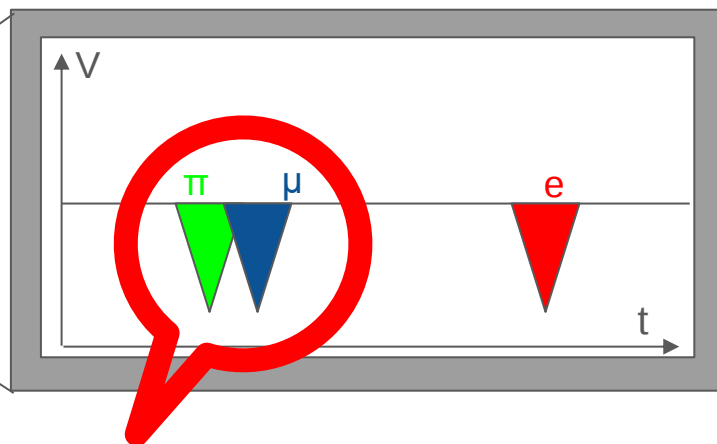
2-2. 検出方法 その2

31

個々のパイオンの信号/特徴を見るには？ → 波形を見てみる！



オシロスコープの波形(中シンチ)

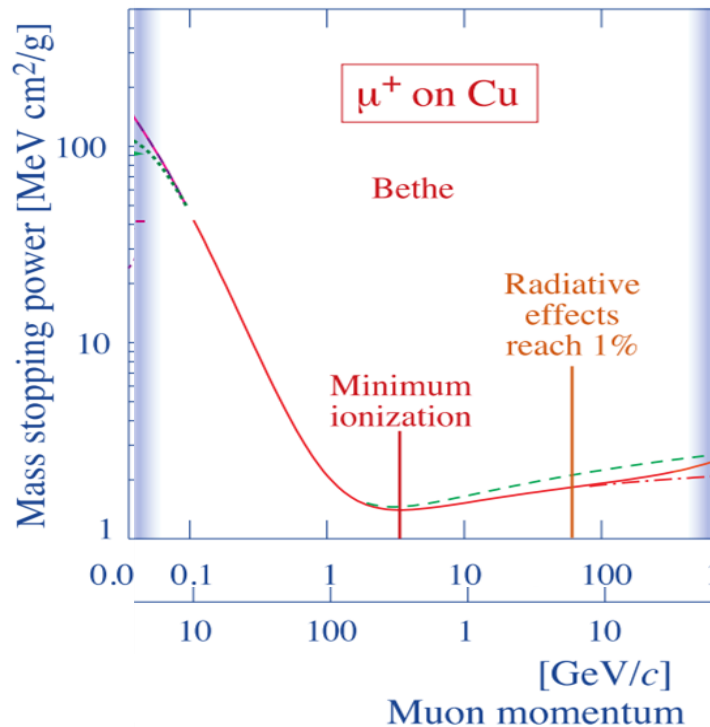


この波形を見つける！

2-2. 検出方法 その2 パイオンらしさの検証

32

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}}{I^2} - \beta^2 \right] \quad \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2}$$



Bethe-Blochの式から、
シンチで止まる粒子の最大の**エネルギー**→
見たい信号に許される最大の**電荷**
を求める

止まる信号の 最大電荷 [pC]	パイオン	ミューオン	電子
	68.74	68.88	99.44

2-2. 検出方法 その2

33

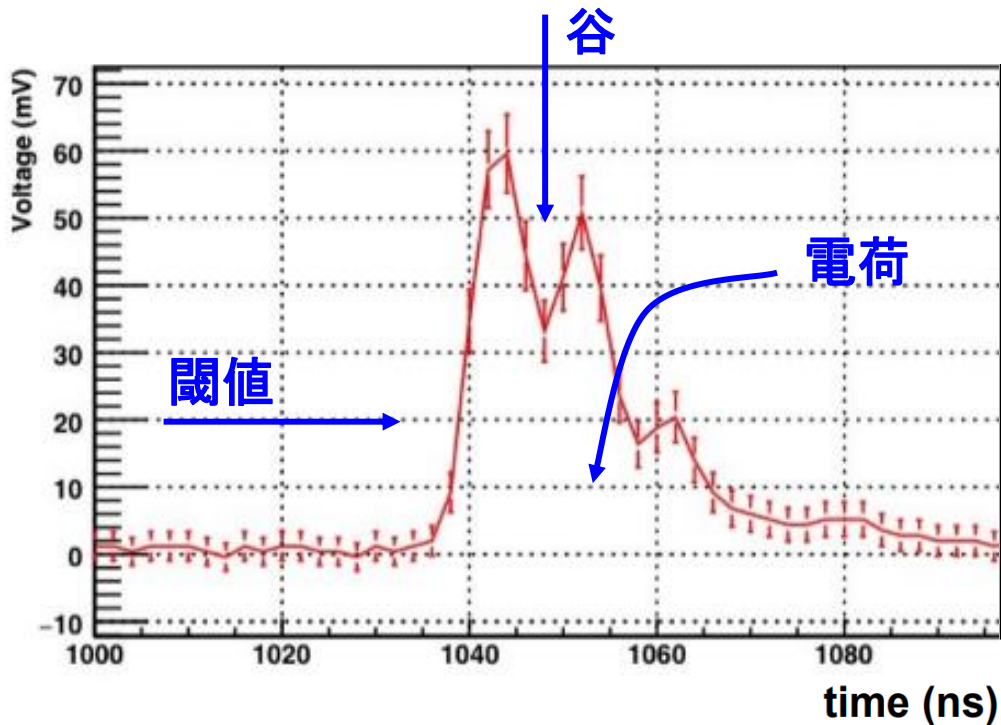
パイオンのデータが満たすべき条件：

- (1) **閾値**20[mV]を超えたパルスが2つ以上 ノイズ除去
- (2) 目視で最初のパルスに**谷**があるもの パイオン崩壊判定
- (3) 最初のパルスの**電荷**が68[pC]未満 パイオンらしさ

2-3. 結果その2 パイオン候補の波形

34

条件を満たす波形(6個)

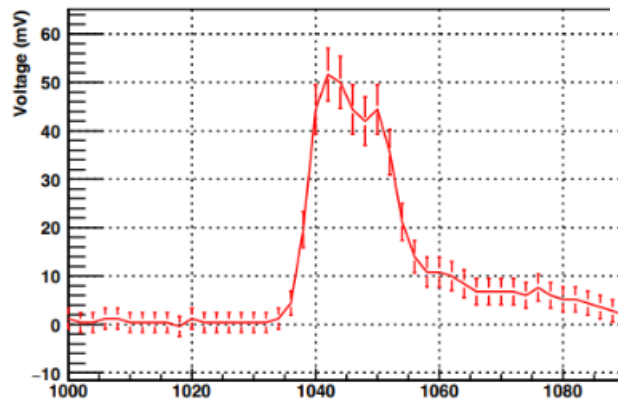
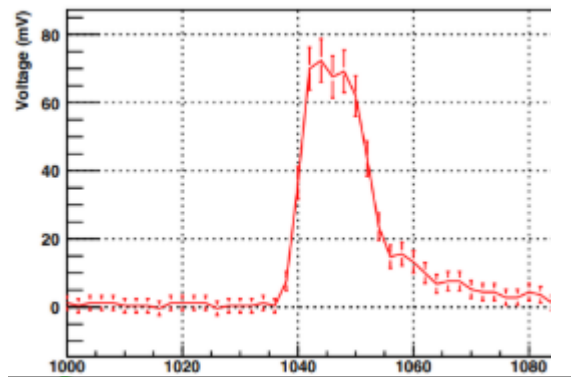
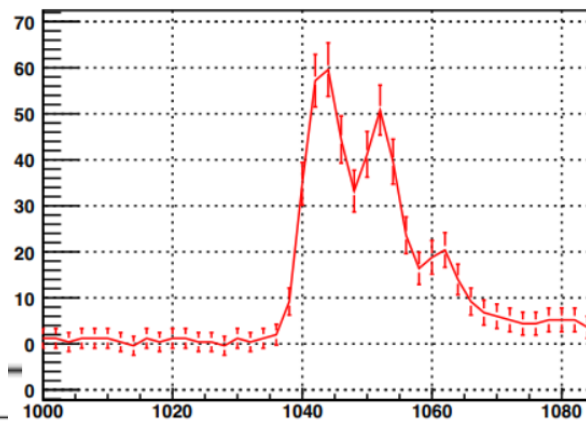
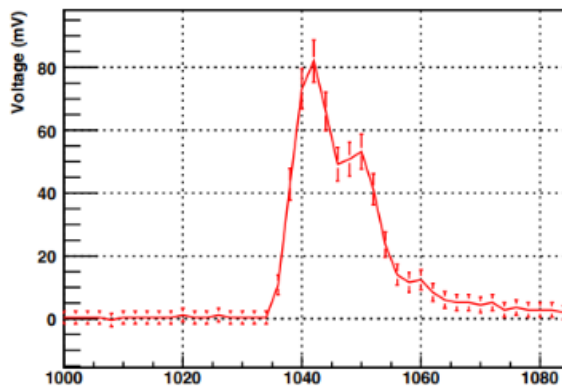


条件満たさない例



2-3. 結果その2 パイオン候補の波形

35



2-3. 結果

36

中シンチの波形探索から、
パイオンらしい波形が**6個**見つかった！

→予測されるパイオンの個数 ≈ 10 個と近い！

3. まとめ

37

ミューオン寿命測定

実験値[ns]	文献値[ns]
2050 ± 42.8	$2120 \pm (\text{誤差})$

→ 1.6σ で一致

(ずれる原因)

- ・ 反射
- ・ アフターパルス

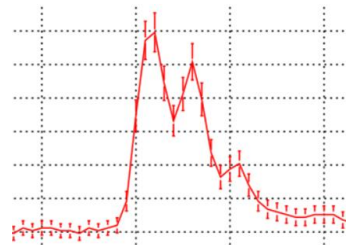
パイオンの探索

上シンチ崩壊

実験値[ns]	文献値[ns]
17.67 ± 2.91	$26 \pm (\text{誤差})$

中シンチ崩壊

→パイオンの候補を6つ発見！



3. 今後の展望

38

ミュオン寿命測定

●反射信号防止

インピーダンス整合が取れるようにケーブルを改善

●アフターパルス防止

PMTを新品に交換

過去のデータから除去する目安作製？

●データ量増加

データ取得日数を増やす

パイオンの探索

●パイオンらしさの指標を増やす

寿命、質量、電荷などを測定

●波形解析方法の改善

谷のある波形を見分けるプログラム作製

●データ量増加

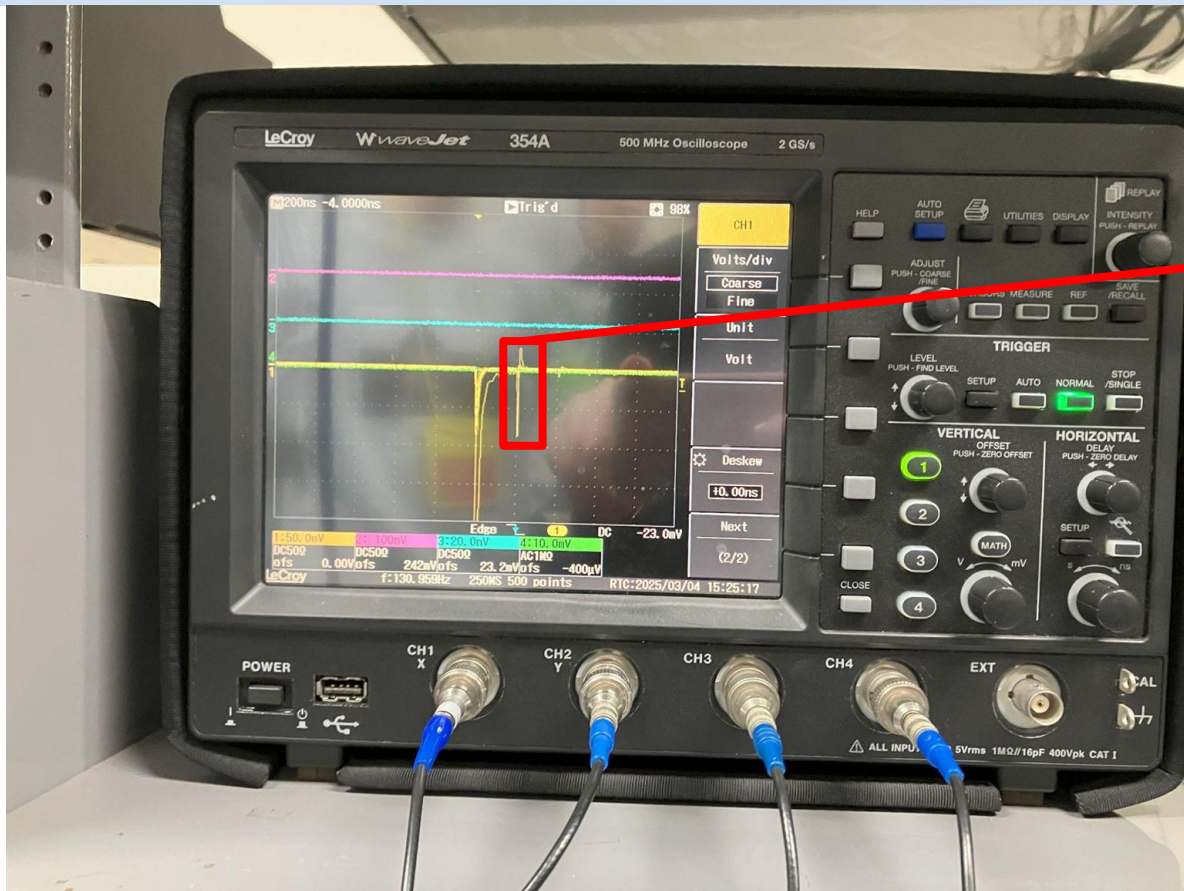
データ取得日数を増やす

ありがとうございました

補足集

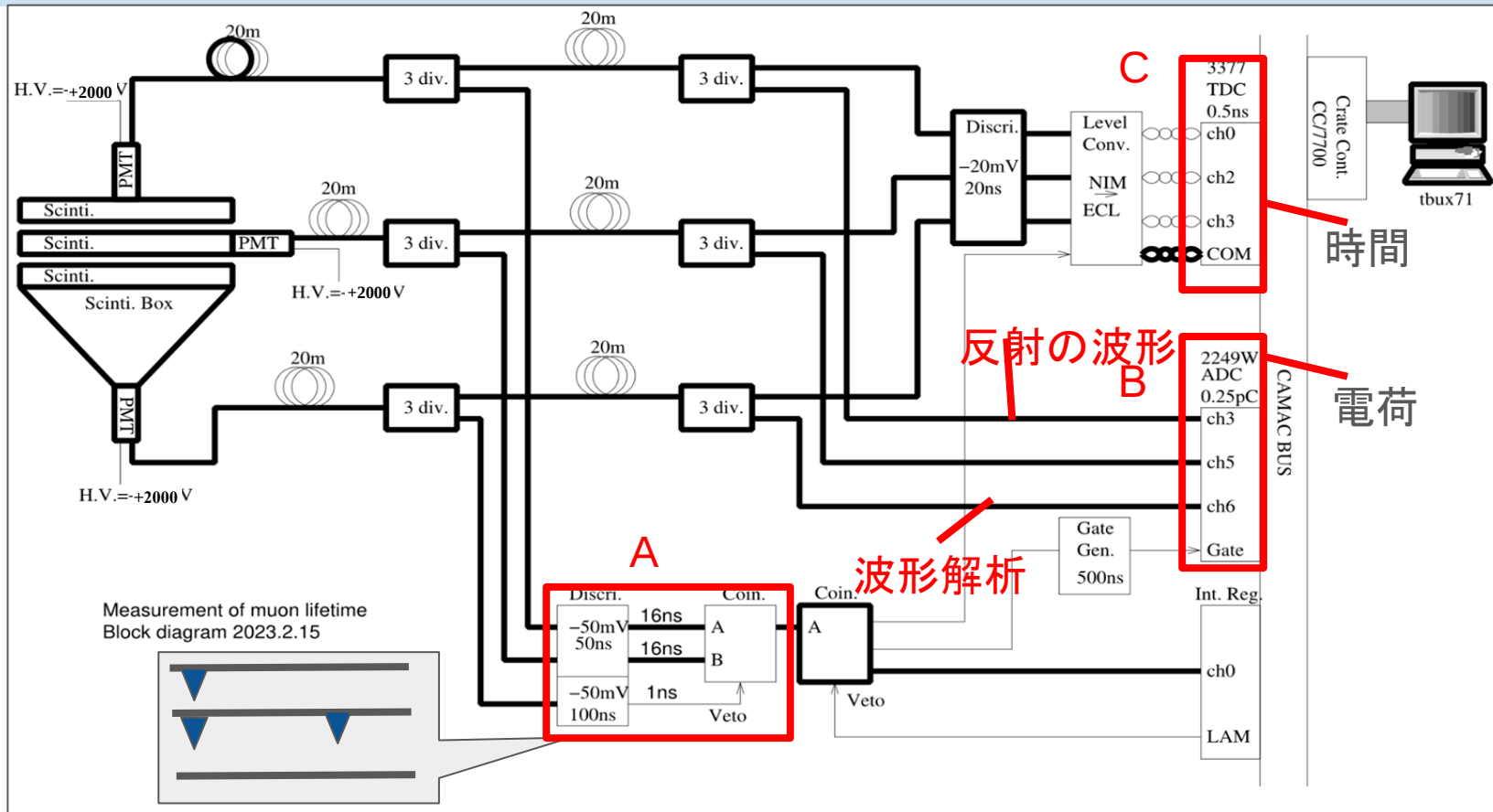
補足. 測定方法 機械的なノイズ

41



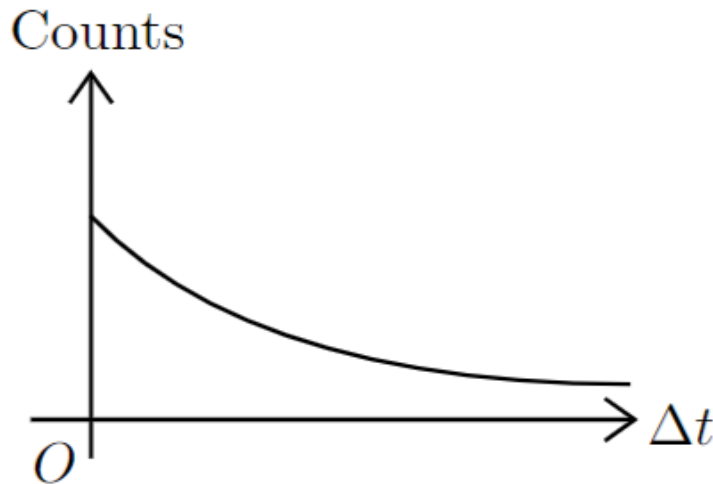
反射

1-3. 波形の場所



補足. ミューオンの寿命の定義

測定では、1つずつのミューオンの寿命をプロットするように、結果が得られるので、次のようなグラフになる



補足. ミューオンの寿命の定義

仮定

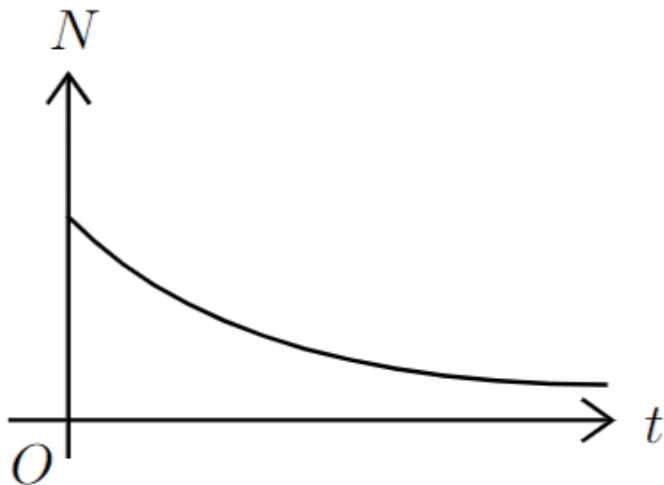
時刻 t における粒子数 $N(t)$ に対する変化量 dN は、
単位時間 dt 当たり、常に一定($-1/\tau < 0$)である

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

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

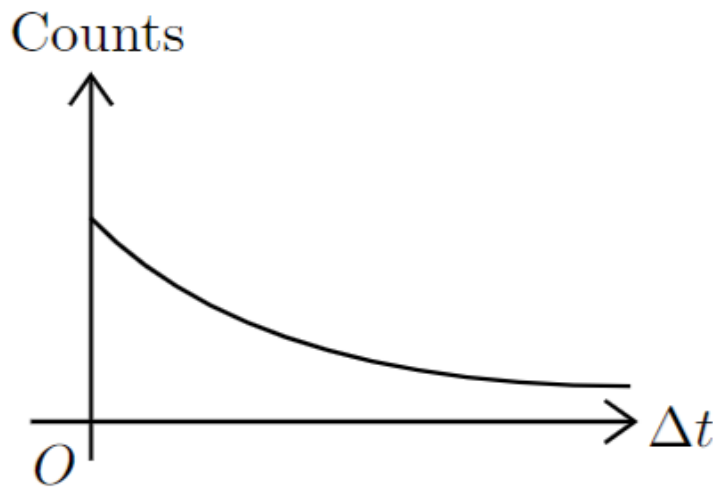
$$N(t) = N(0)e^{-\frac{t}{\tau}}$$

時々刻々と粒子数 $N(t)$ は減少する



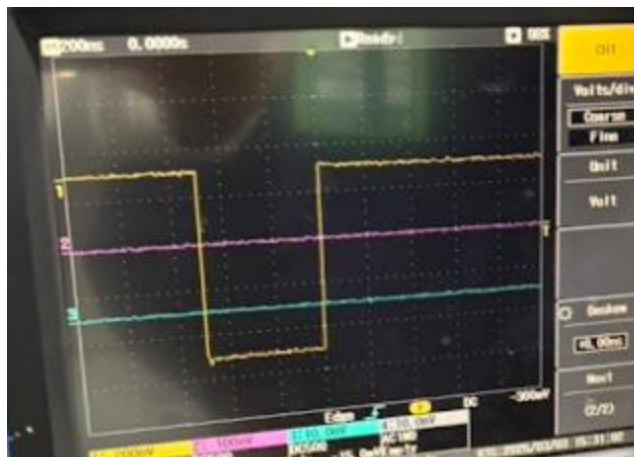
補足. ミューオンの寿命の定義

測定では、1つずつのミューオンの寿命をプロットするように、結果が得られるので、次のようなグラフになる



補足. 測定方法 データのデジタル 化

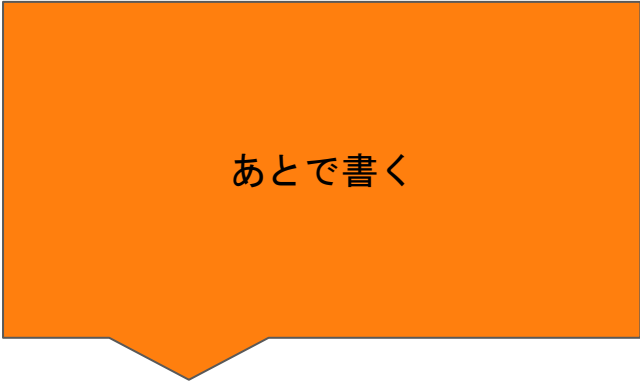
46



なにこれ？

1-3. 観測方法 装置

電荷量と測定の妥当性について

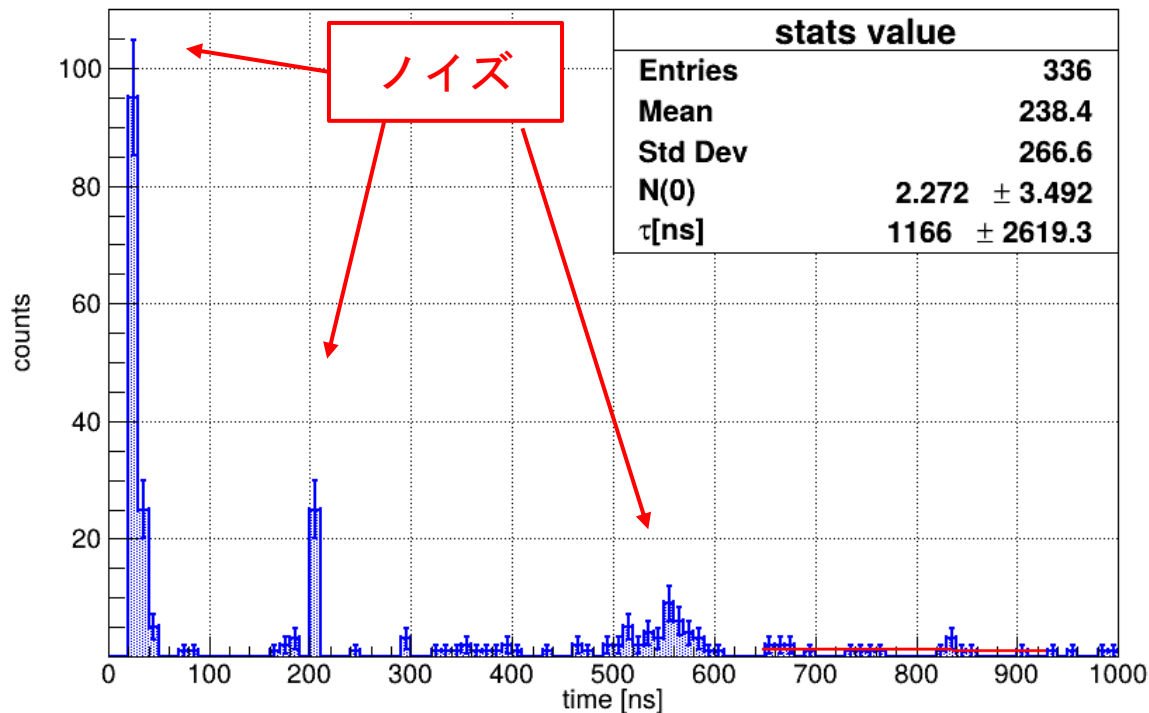
A large orange rectangular box with a black border and a pointed bottom edge, containing the text "あとで書く".

あとで書く

1-2. 測定方法 ノイズの処理

48

muon decay curve



まだやってない

フィッティング範囲を調整
ノイズの影響を減らす

Backup

- ・ フィッティング範囲の理由

最小値、最大値、パラメータ (bkg)

- ・ 色々な系統誤差

リングング(0ns付近)、反射(200ns付近)、

アフターパルス(500~600ns)

- ・ 条件付け

統計誤差、系統誤差

1-5. 考察 μ^- と μ^+ の寿命差

→→シンチレータ(炭素)中では、 μ^- の寿命が短くなる

→→2100ns ぐらいには小さくなる

(分けてフィッティングは、データもっと多くないと無理)

2-3. 結果 パイオンらしさの検証

- ・ Bethe-Blochの式から飛程とエネルギーの関係を計算し、見たい信号(パイオン、ミューオン、電子)などのそれぞれのエネルギー範囲を求める(たぶんok) (あと、飛程とエネルギーの関係のグラフを作る)
 - ・ シンチ~PMTでのエネルギー→電荷pCの変換係数を求め、それぞれの信号に許される電荷の範囲を見積もる(なんかできそう)
 - ・ 見つけたパルスの電圧を時間積分し、求めた電荷の範囲と一致するかを見る→何 σ でパイオンの信号といえそうかを検証
- (あとは、ミューオンの寿命測定の数値も、電荷と整合性とれないものを除くなどしてちょっと改善できるかも??)

2-3. 結果 パイオンらしさの検証

エネルギー損失から、飛程の計算をする。

Bethe-Blochの式： $dE/dX = (v\text{の式})$ ①

全エネルギーの式： $E = (v\text{の式})$ ②

を用いて、②で $v = (E\text{の式})$ を作り①に代入して、

$dE/dX \times \Delta X = \Delta E$ (エネルギー損失)

を計算する。ここで求めた ΔE を使って、新しく E を

$E = E - \Delta E$

と再定義して、同じことを繰り返す。この新しい E が、

$E < \text{静止エネルギー}$

となったら止まるとする。

(Bethe-Blochの式は、静止直前では適用できないので、ある程度のところになったら止まるという近似をする)

ミューオンの飛程は、止まるやつは、パイオンからランダムに放出されるとして、 $\cos\theta$ の平均 $2/\pi$ を使って、 $3\text{cm}/(2/\pi)$

エネルギーと電荷の対応を見る。

中シンチレータを突き抜けるミューオンは、データより、12pCの信号を発する。

このミューオンはほぼ最小電離損失(2MeV/cm)だとする

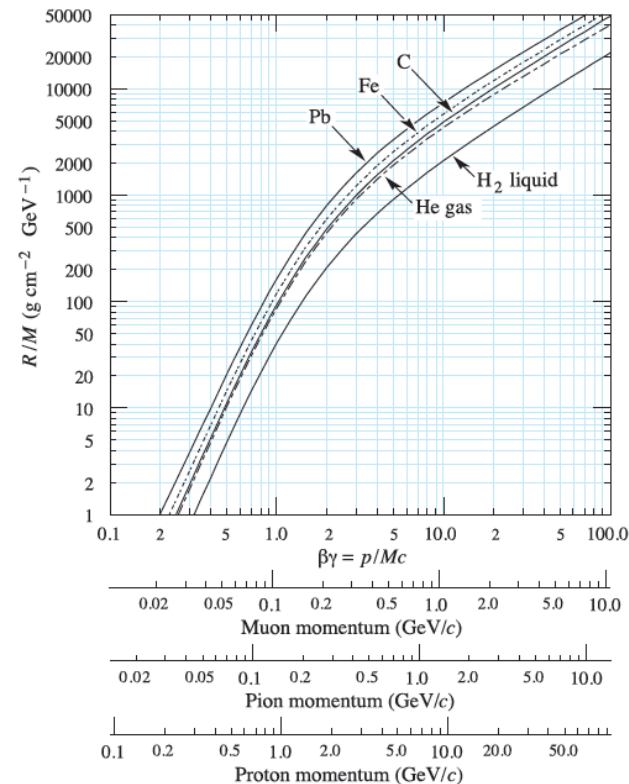
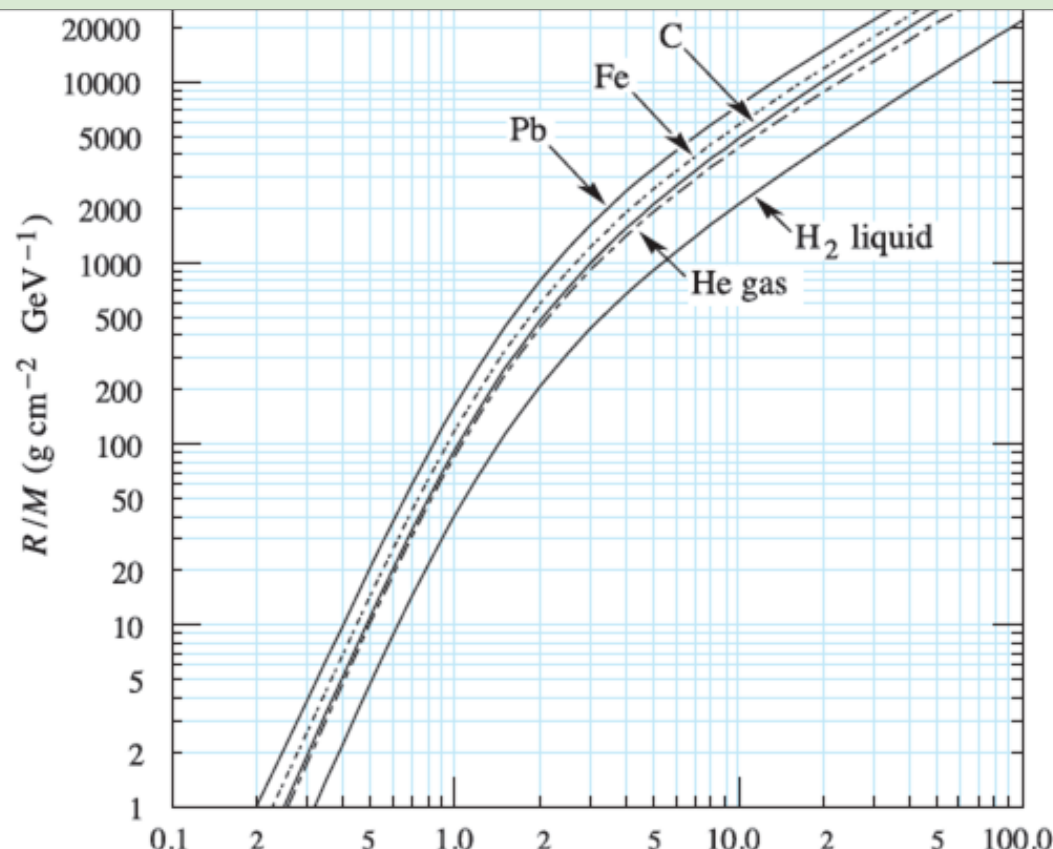
このミューオンの飛程は、天頂角分布 $\cos^2\theta$ を使って、 $3\text{cm}(1/\sqrt{2})$ とする。

以上より、突き抜けミューオンのエネルギー：電荷は
8.485 MeV/c² : 12 pC

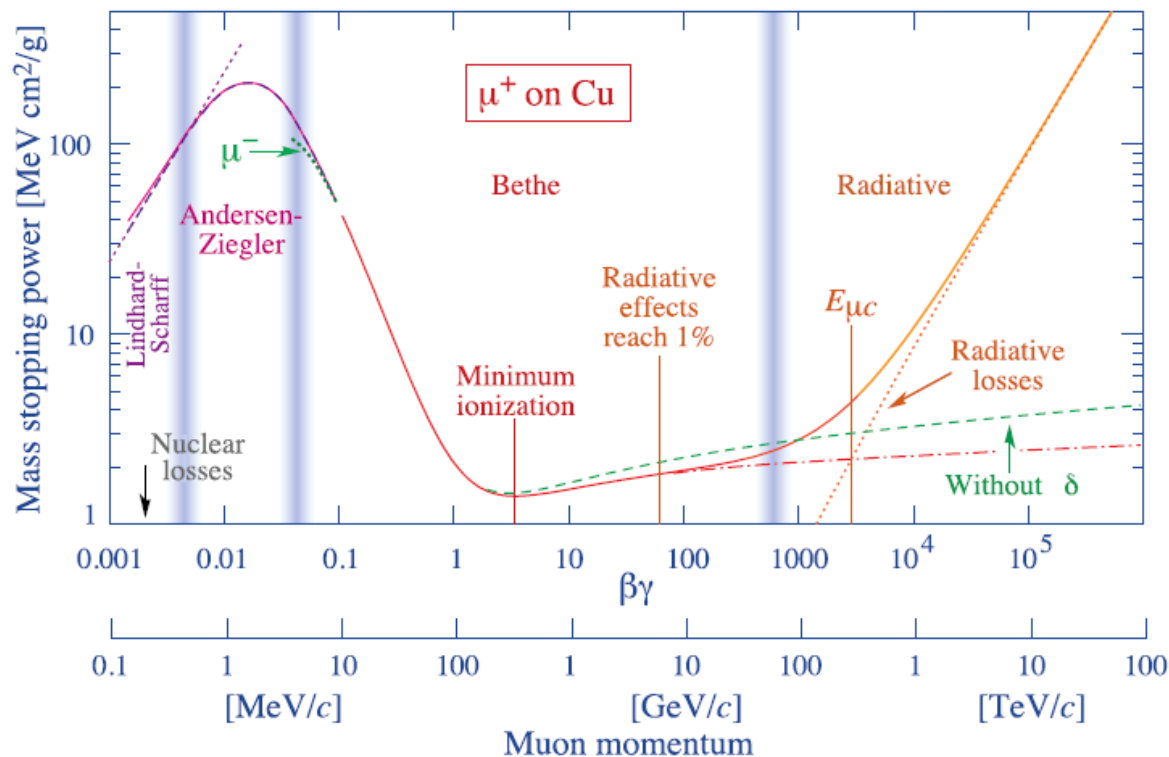
とわかる。この比を使って、止まるやつのエネルギーから許される電荷を求める

- ・ pion : 68.74 pC graphから : 133.51 pC
- ・ muon : 68.88 pC graohから : 119.15 pC
- ・ electron : 99.44 pC

2-3. 結果 パイオンらしさの検証



$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{max}}{I^2} - \beta^2 \right] \quad \frac{\text{MeV}}{\text{g/cm}^2}$$



2-4. 考察

55

期待されるパイオンの個数：14個

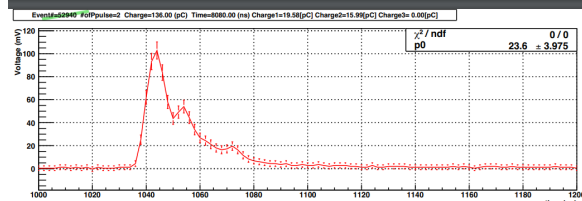
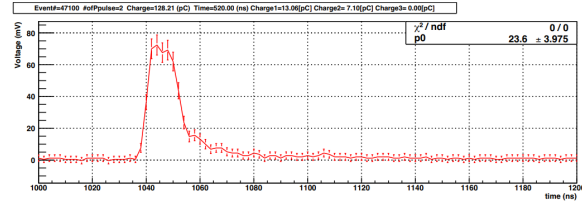
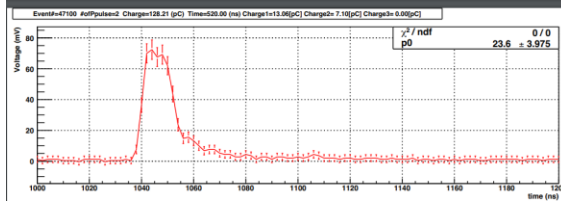
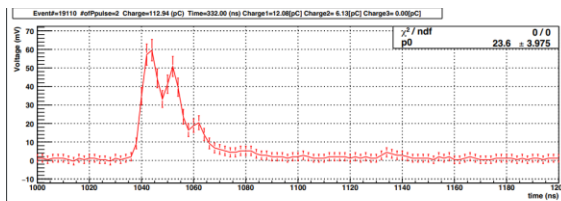
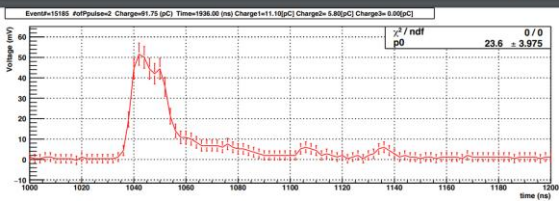
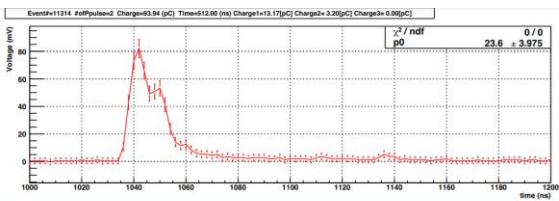
探索されたパイオンの個数：6個

→もっとたくさんデータがあれば、パイオンっぽいデータだけを集めて、寿命の頻度分布を作れる？その頻度分布からミューオンと同様にパイオンの寿命も測れるし、見つけているのがパイオンかどうかの判断基準にもなる？

データがあるのがたいてい1000個くらいだから

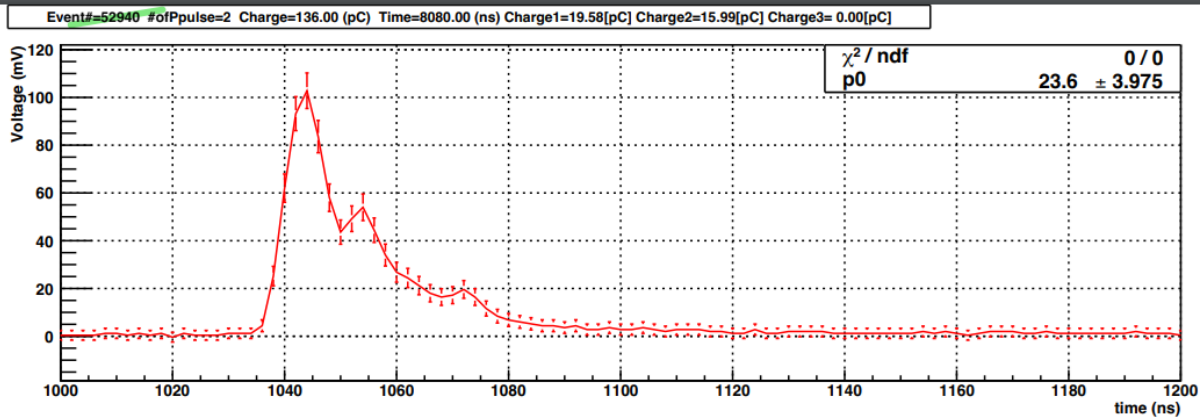
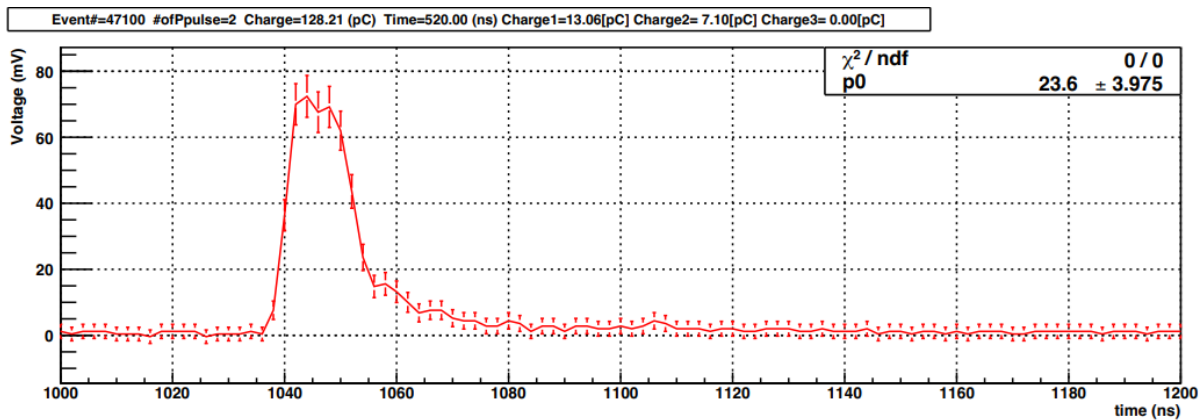
2-4. 考察

56



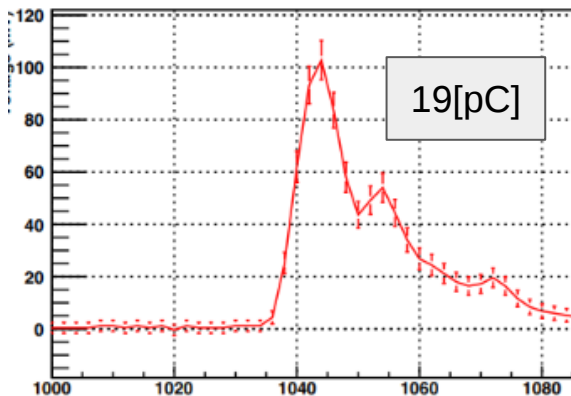
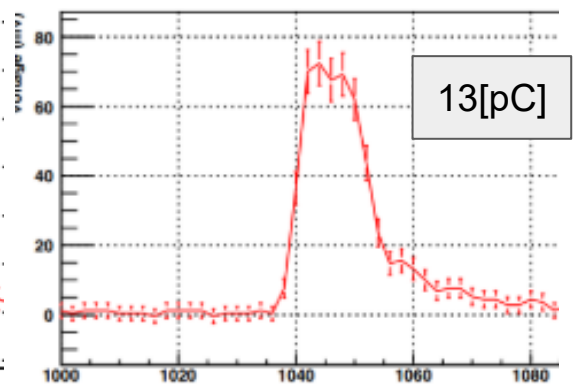
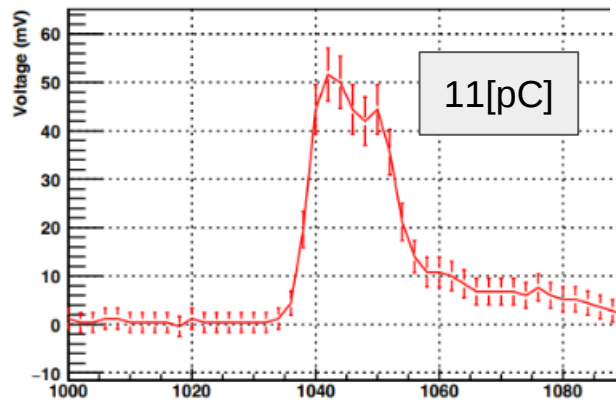
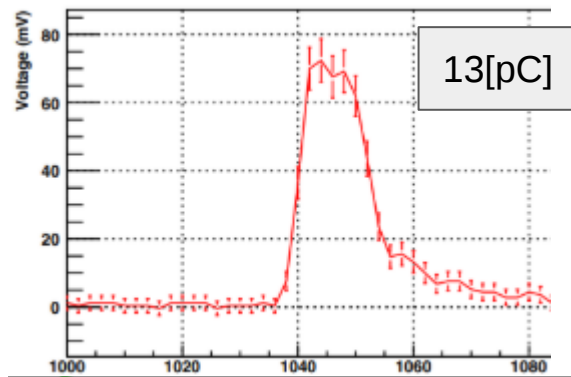
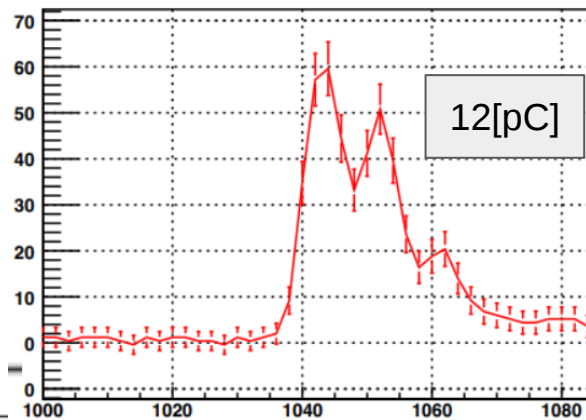
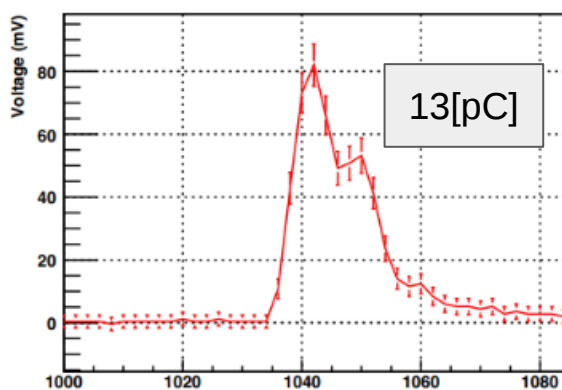
2-4. 考察

57



2-3. 結果その2 パイオン候補の波形

58



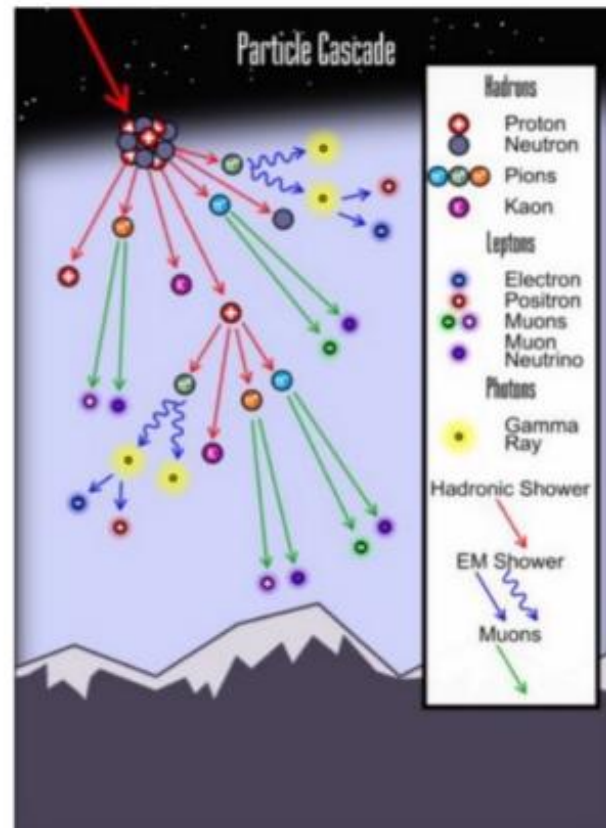
背景 ～ミューオンの生成まで～

- ・ 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

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

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

- ・ 地上でのミューオンの頻度（1個/手のひら/秒）

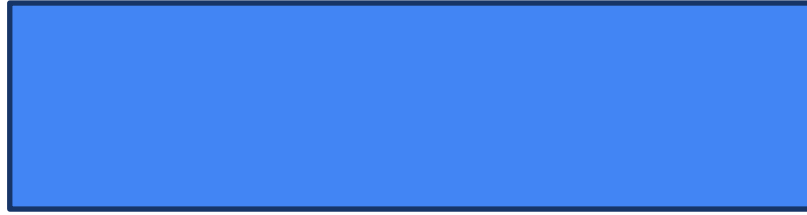


2-4. 考察

60

全体：54530個

選別後：6個



以降、日ごとの記録

Day1

確認1：シンチレータとPMTの構造の確認

確認2：シンチレータからの信号確認(電圧変化の大きさと信号の減衰時間)
※部屋の電気をつけている時と消している時とでの信号の大きさの変化を確認→変化していなかった

確認3：配線を組む(欲しい信号(上と中シンチだけの信号)を抽出する仕組みの理解)→・discrの意味(生の信号を方形波に変換)・delayの意味(下シンチの信号がある場合、確実に信号を消すために上と中シンチより早くcoinに信号を送り、NANDをとる)

・LAMの理解(LOOK AT ME：パソコンで信号を処理しているときに、次の信号が来ることを阻止する)

・generatorの理解(積分範囲の指定、具体的には、、、?)、20mの意味(ADCのTrigger信号をsignalより早くするため、、、)

確認4：下駄の測定(ミュオンの信号が1Hzくらいの頻度であるのに対し、100Hzの頻度の人為的な信号をだして、ミュオンの信号がない時の電圧を測定、具体的な測定方法確認)

確認5：データ取得

確認6：解析方法の確認

Day2

課題1 アフターパルス(光電子増倍管の分子)

上PMTの電圧[V]	計算者	信号取り入れる条件	アフターパルスの範囲[ns]	全体の信号数	アフターパルスの信号数	アフターパルスの信号割合
2000	田中	$8U > 0, 8M > 0, 6M > 0, 4M = 0, 8L = 0$	$400 < x < 600$	5800 くらい	850 くらい	14% くらい
1900	田中			339	46	13% くらい

アフターパルスのでる時間から原因分子の同定をできる？→計算で質量同定、、？

課題2(高電圧の調整)

リングングが大きすぎて、discrで0とみなすべき信号を1とみなしてしまう
→電圧を2100[V]から1900[V]に変換して実験し直す、、アフターパルスのノイズも小さくなる、、？

課題3-1 fit範囲を絞った理由(6000[ns]以降を無視した理由)

→エラーバーが大きいからって理由だと、 χ^2 乗フィッティングを使っているため、良くない？

1binに対するデータ量に基準を設けて、その基準を満たさないデータは消すってことの方が良い？

課題3-2 データ選別条件

→各人のデータ選別条件と理由

名前	データ選別条件	測定範囲	

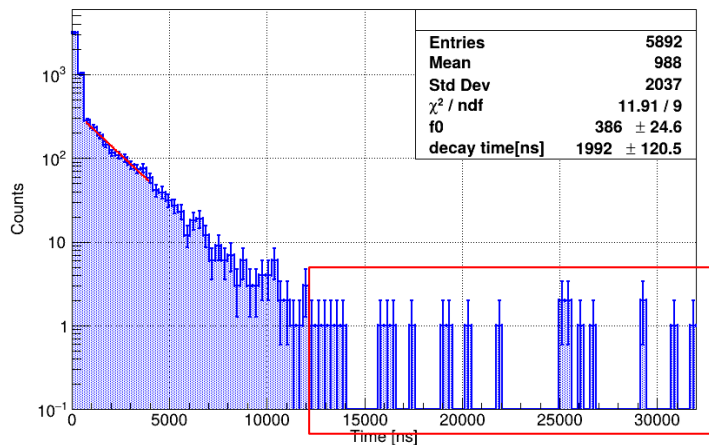
課題4 インピーダンス不整合による反射信号による

200[ns]あたりに、信号があるから、fittingするときは無視、

課題5 chance coincidence?

15000~30000 ぐらいの範囲の粒子数？が多すぎる

muon decay time distribution



Day3

課題1 3/3-3/5までのデータの解析

→統計量が増えたことで、寿命の値は昨日($\frac{3}{4}$)より良くなった？具体的な値は>

TDCの各データに対するADCのデータ(電荷量)を算出

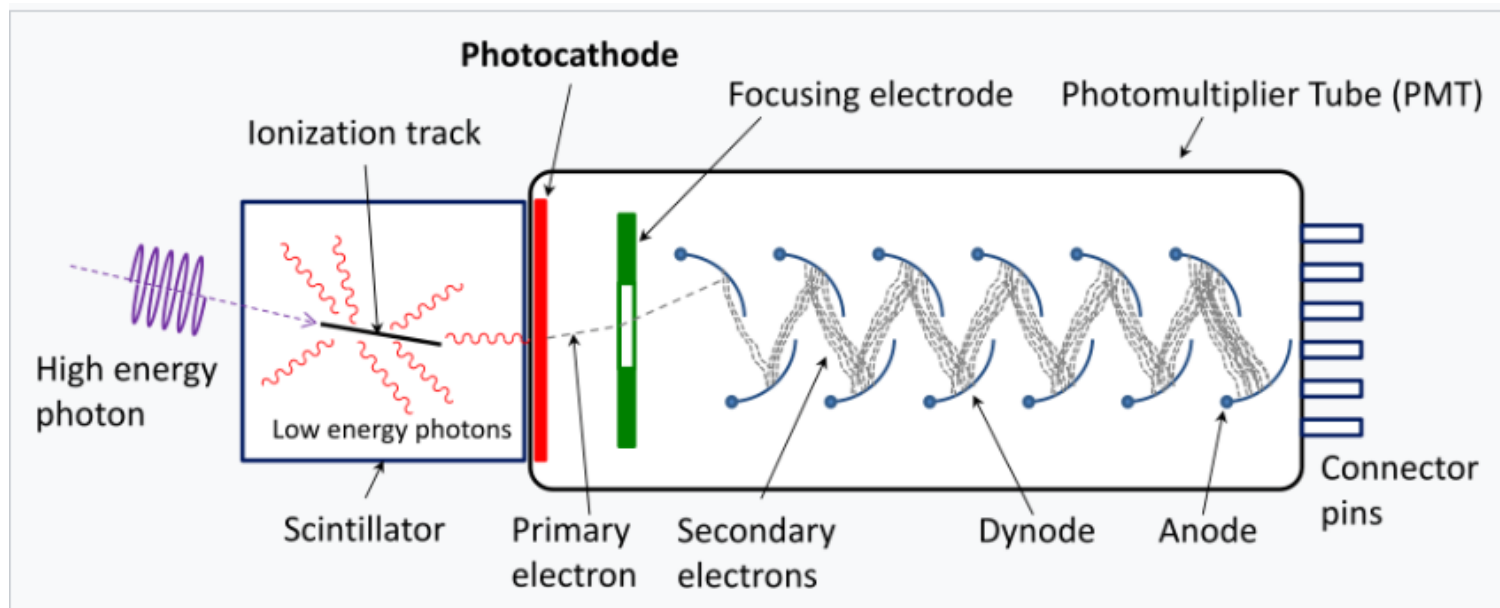
→アフターパルスの影響をADCのデータを用いて小さくすることができる？

課題2 アルミを挟む

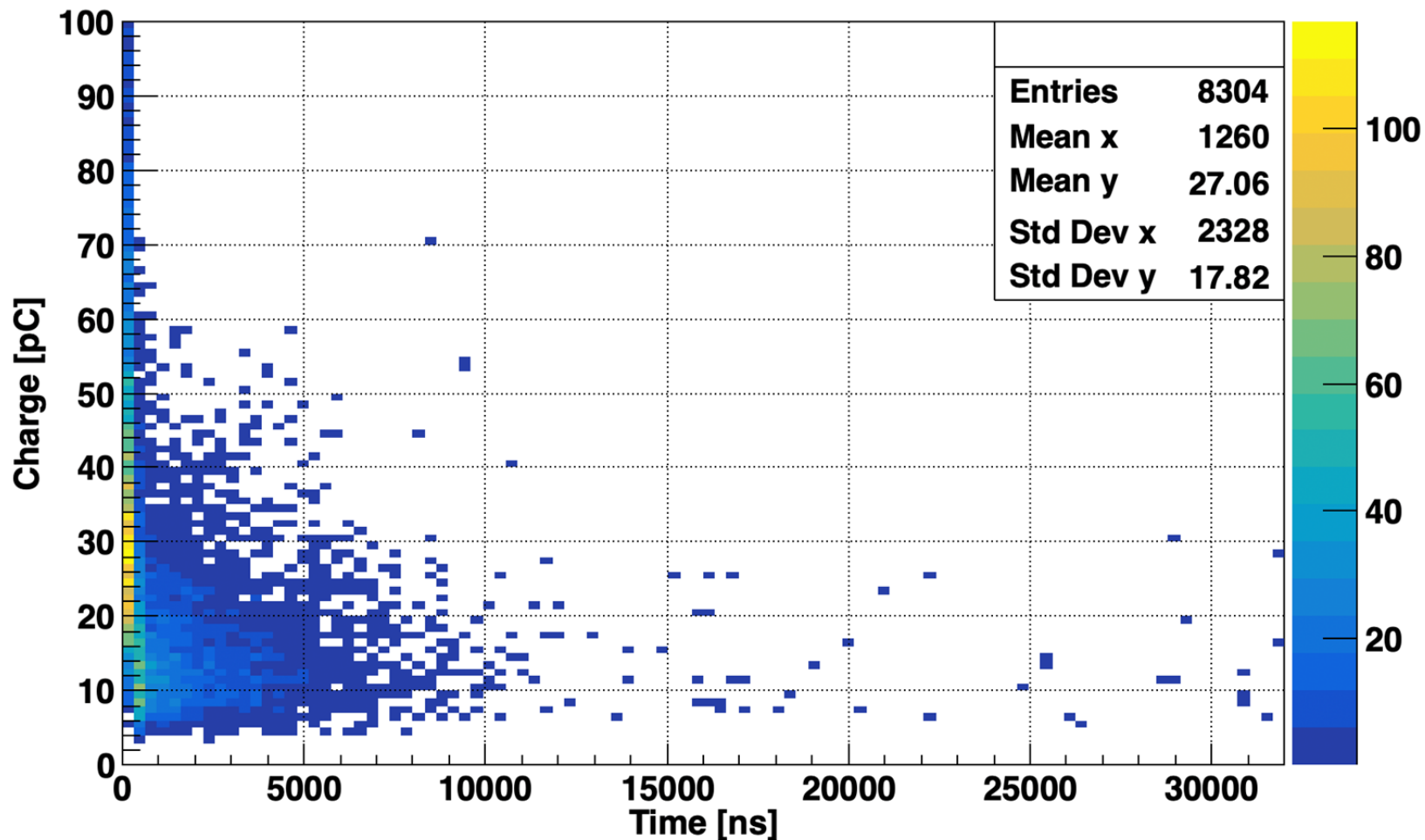
Day3

課題3

課題2 アルミを挟む



Decay Time vs Charge in Middle Scintillator



2-1. 背景 パイオンの性質

上空でパイオンは崩壊する

→稀な現象の観測になる！！！！

