

超高エネルギー宇宙線



超高エネルギーグループ

仁木敦也、西津美咲、松本有起、田邊結

目次

1. 目的
2. 背景
3. 観測方法
4. オシロスコープでの確認
5. 結果
6. 考察
7. 追加実験
8. まとめ

よろしくお願いします



1. 目的

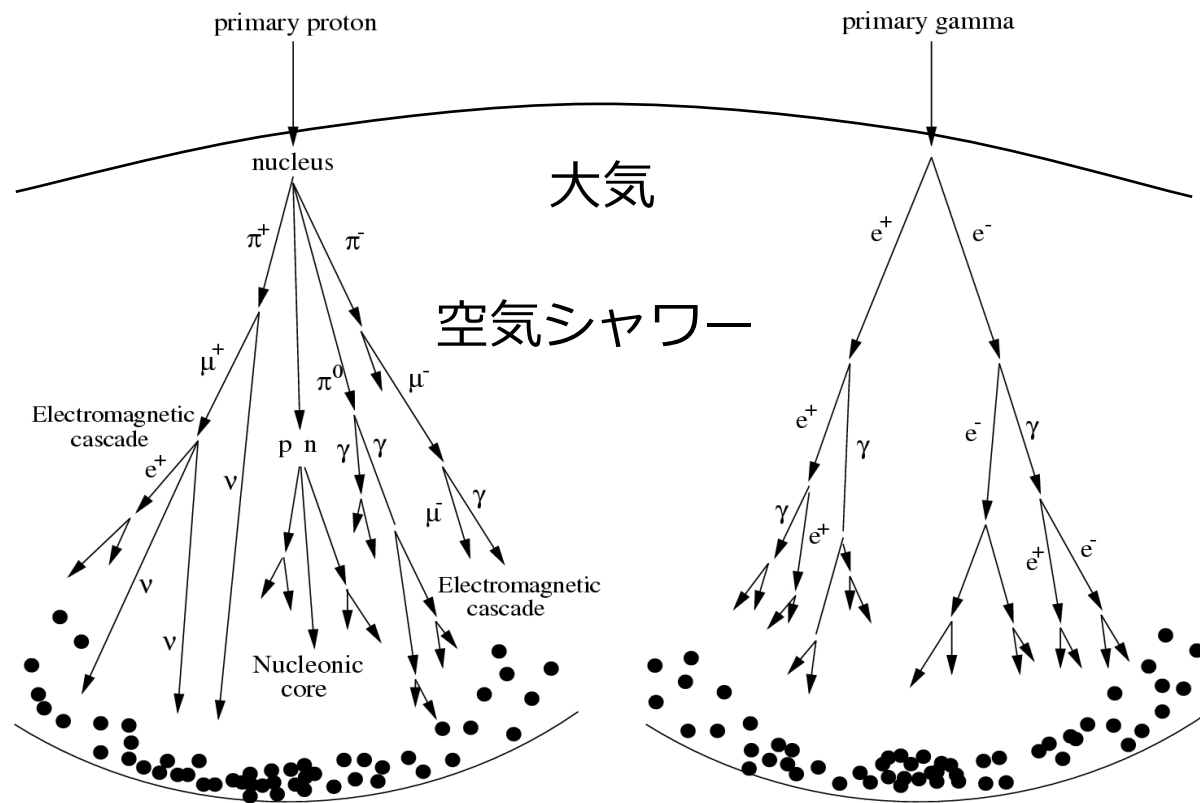
地表に降り注いでいるミュオンの寿命を光電子増倍管 (PMT) とシンチレーターを用いて測定する



2.背景 ミューオンの由来

TeV陽子、ヘリウム...

TeVガンマ線



空気シャワー中に含まれるミューオン数

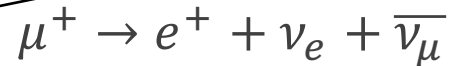
100TeV陽子
~50個

100TeVガンマ線
~1個

ミューオンについて

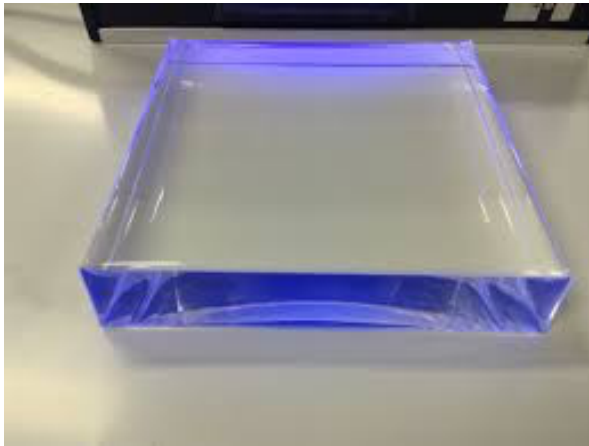
- ・ ミューオンの質量は約 $106\text{MeV}/c^2$ ($\sim 1.89 \times 10^{-28}\text{kg}$)
→ 1番軽い不安定な（崩壊する）粒子 → 大量に作られる
- ・ スピン $1/2$ を持つ
- ・ 寿命は約 $2.2\mu\text{s}$... ?
- ・ 不安定な粒子としては2番目に長い寿命を持つ

計測したい!!!



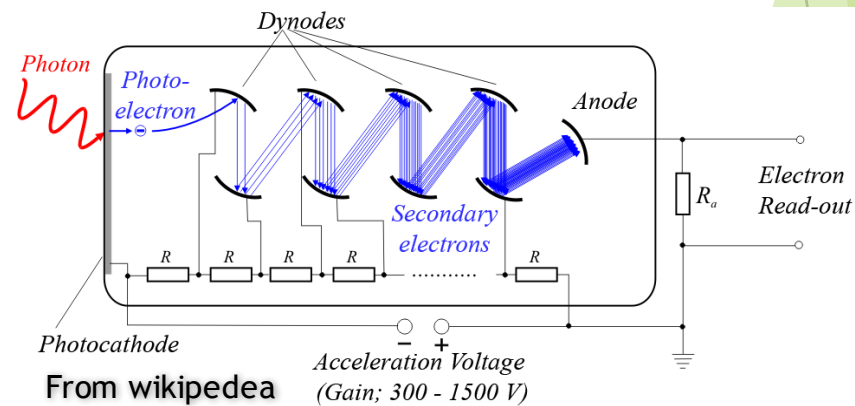
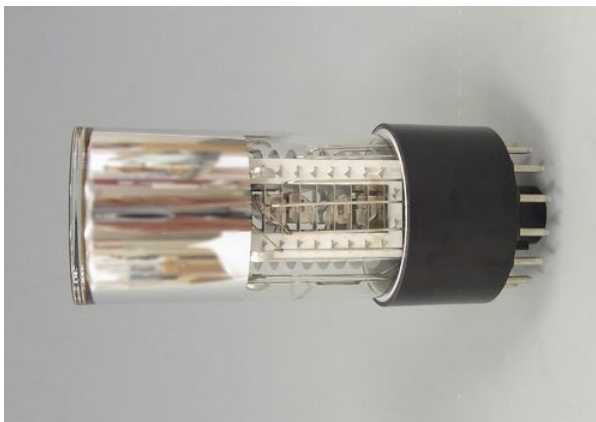
3.観測方法

光電子増倍管(PMT)と シンチレータ



- ✓ 有機シンチレータ(プラスチックシンチレータ)
 - 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)

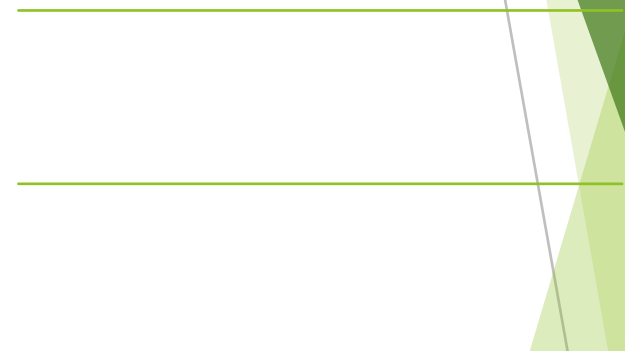
→ 荷電粒子が通過すると
シンチレーション光(〜420nm)を放射



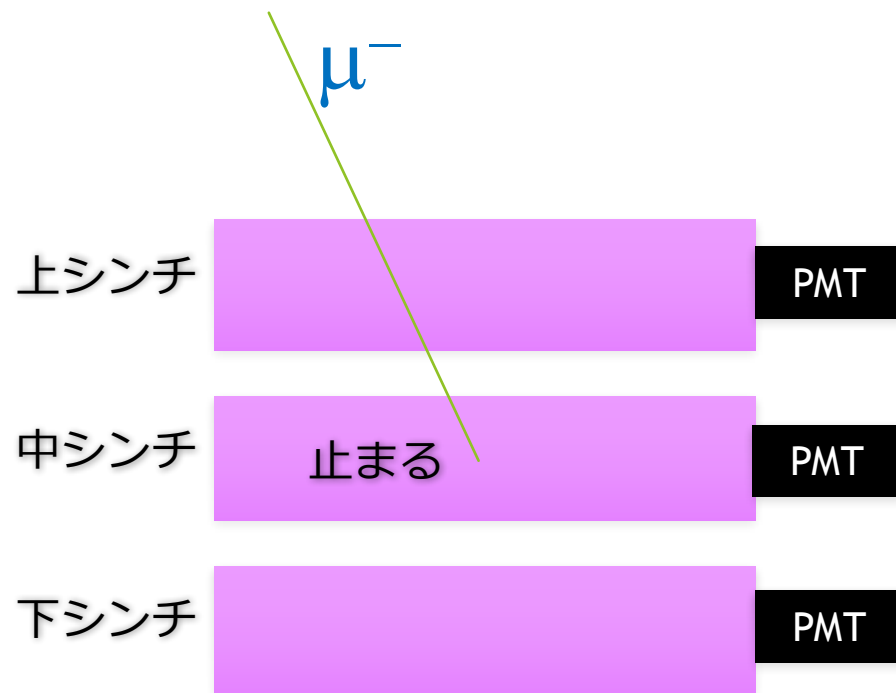
ミューオン寿命測定



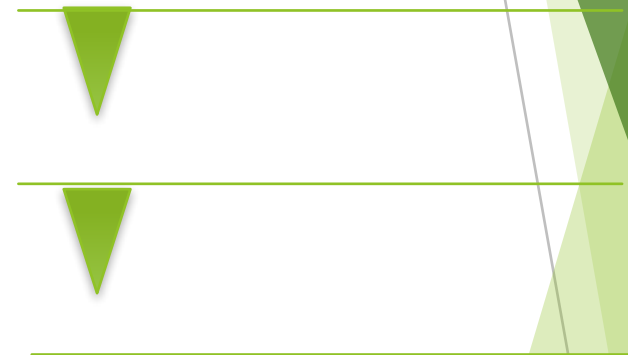
信号



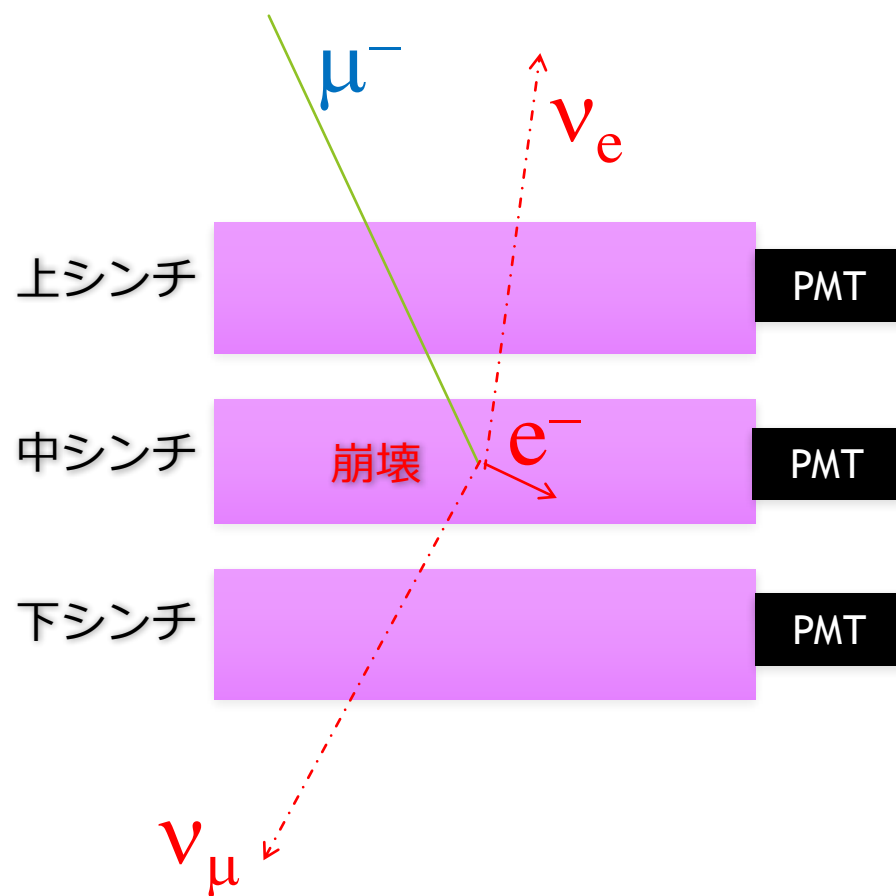
ミューオン寿命測定



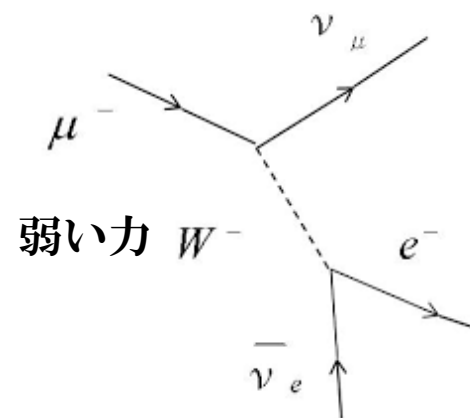
信号



ミューオン寿命測定

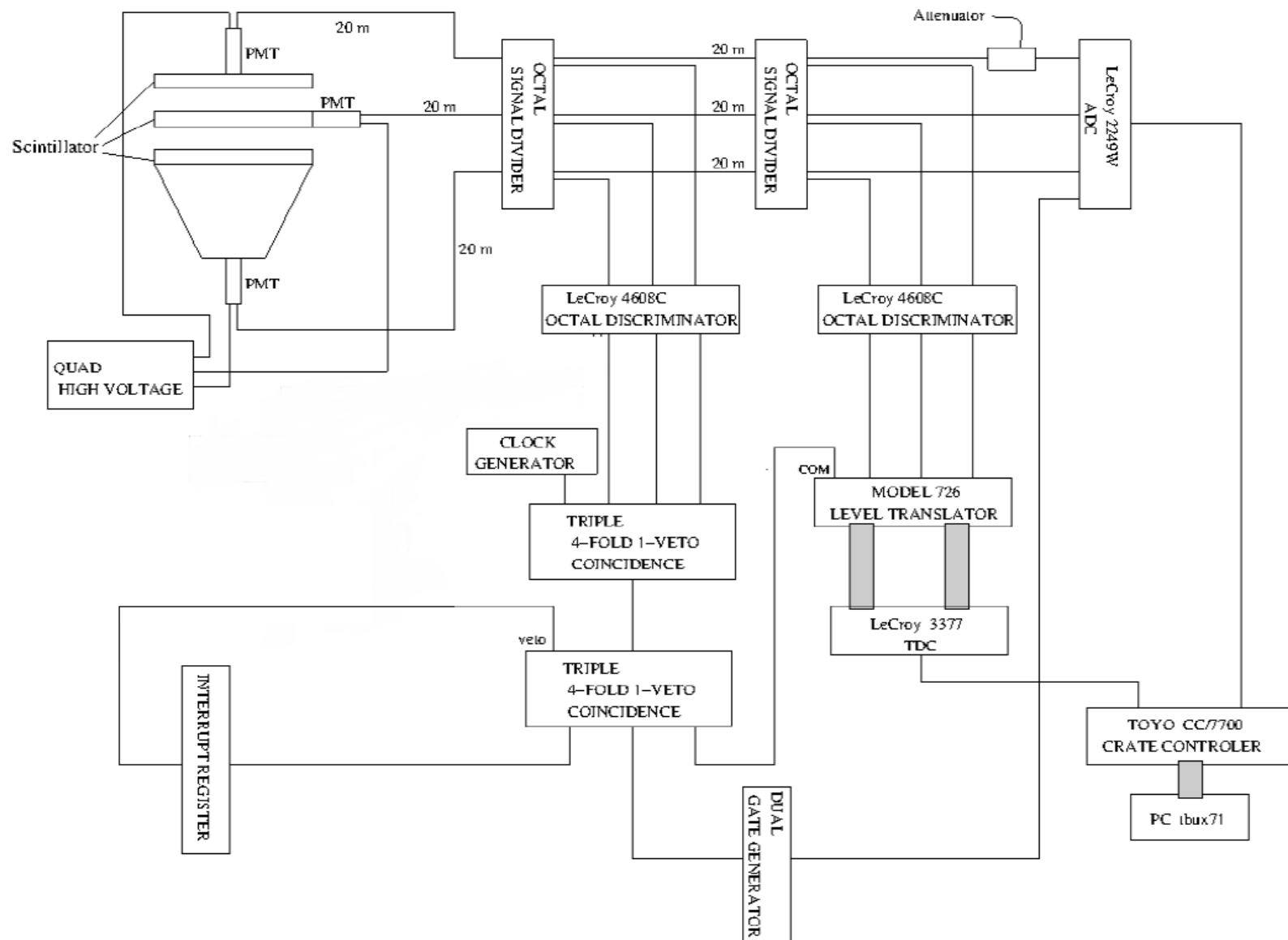


信号

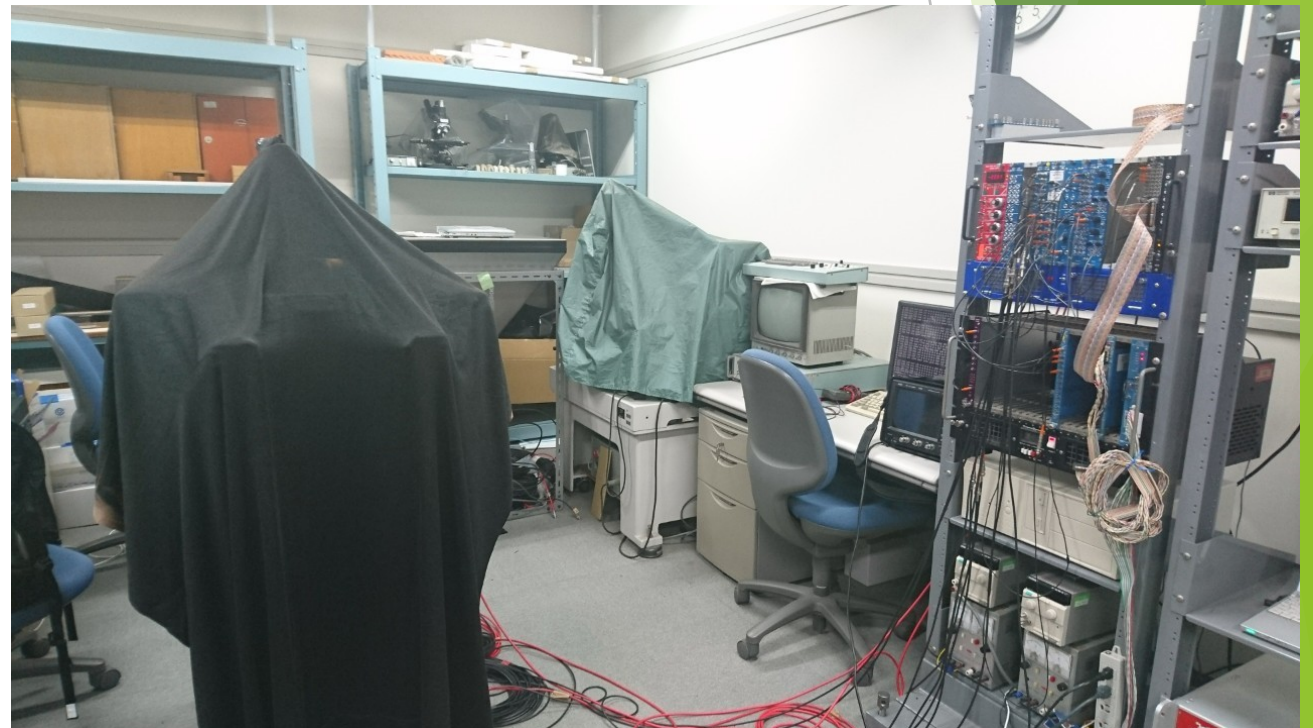
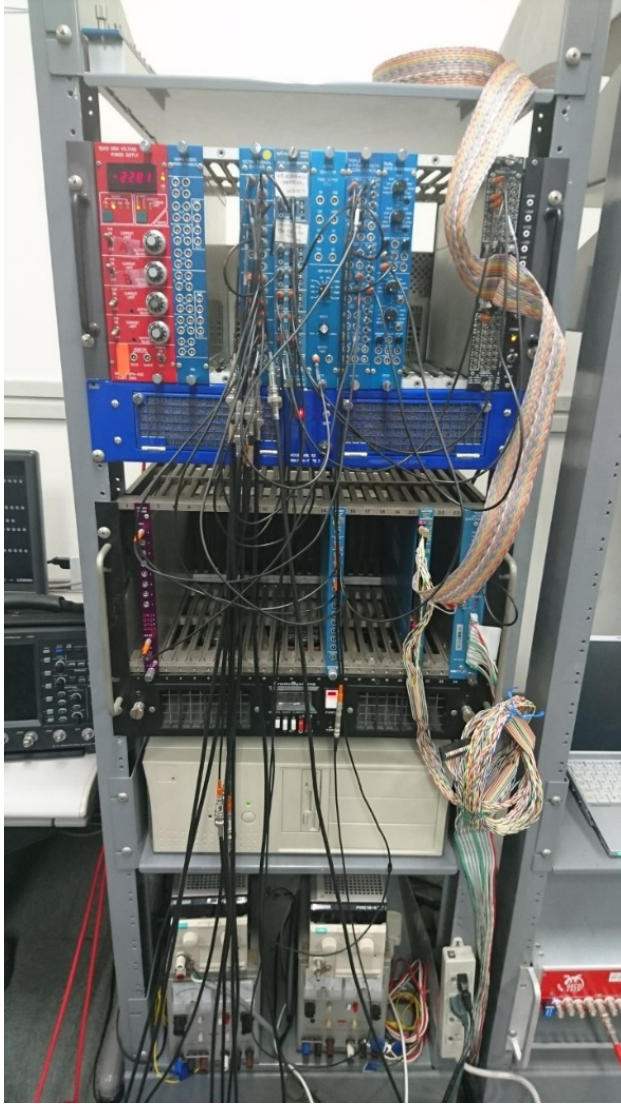


作業風景





実験装置

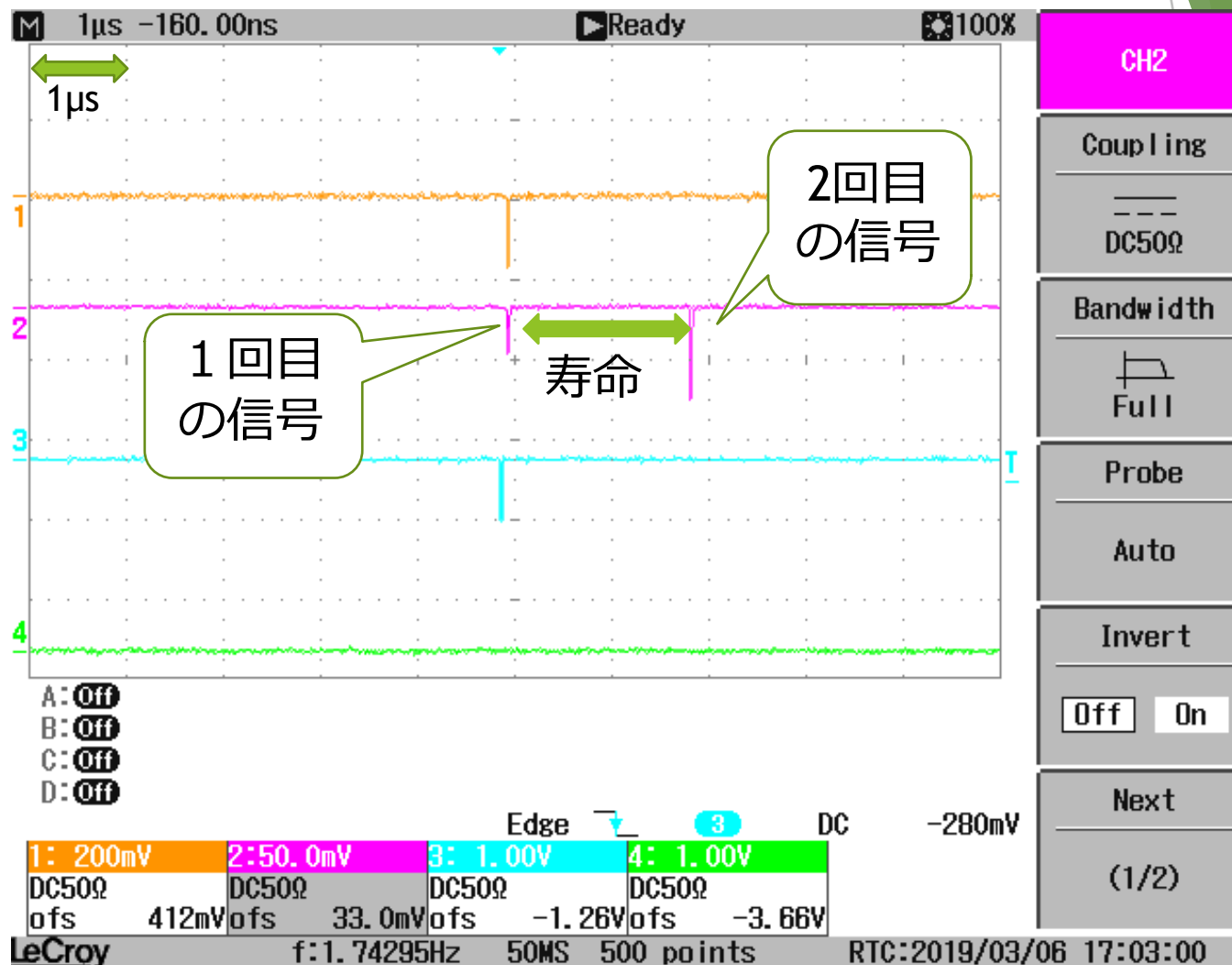


4. オシロスコープでの確認

上シンチ

中シンチ

トリガー

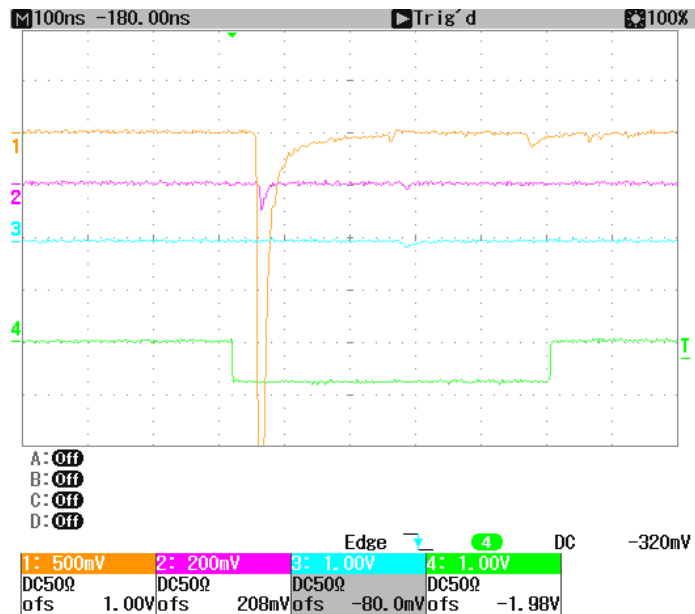


先ほどの回路でデータはデジタル化して解析できるようになっている

▶ ADC

フォトマルからの電気信号をデジタル化して取得する。

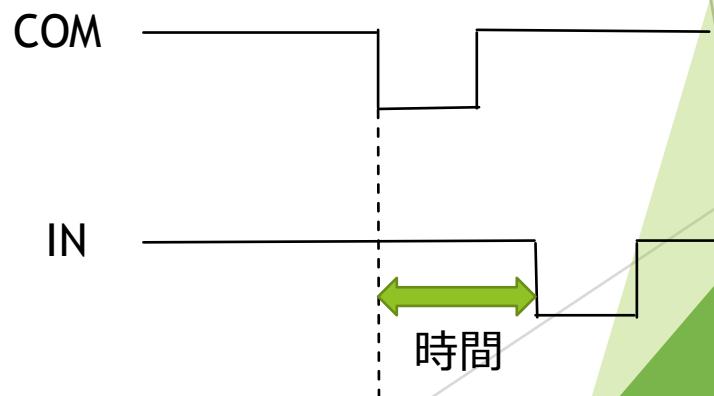
ADCの取得した電荷量はミュオンのエネルギー損失に比例するので、これによりミュオンがシンチレーターを通った際に落としたエネルギーが分かる。



▶ TDC

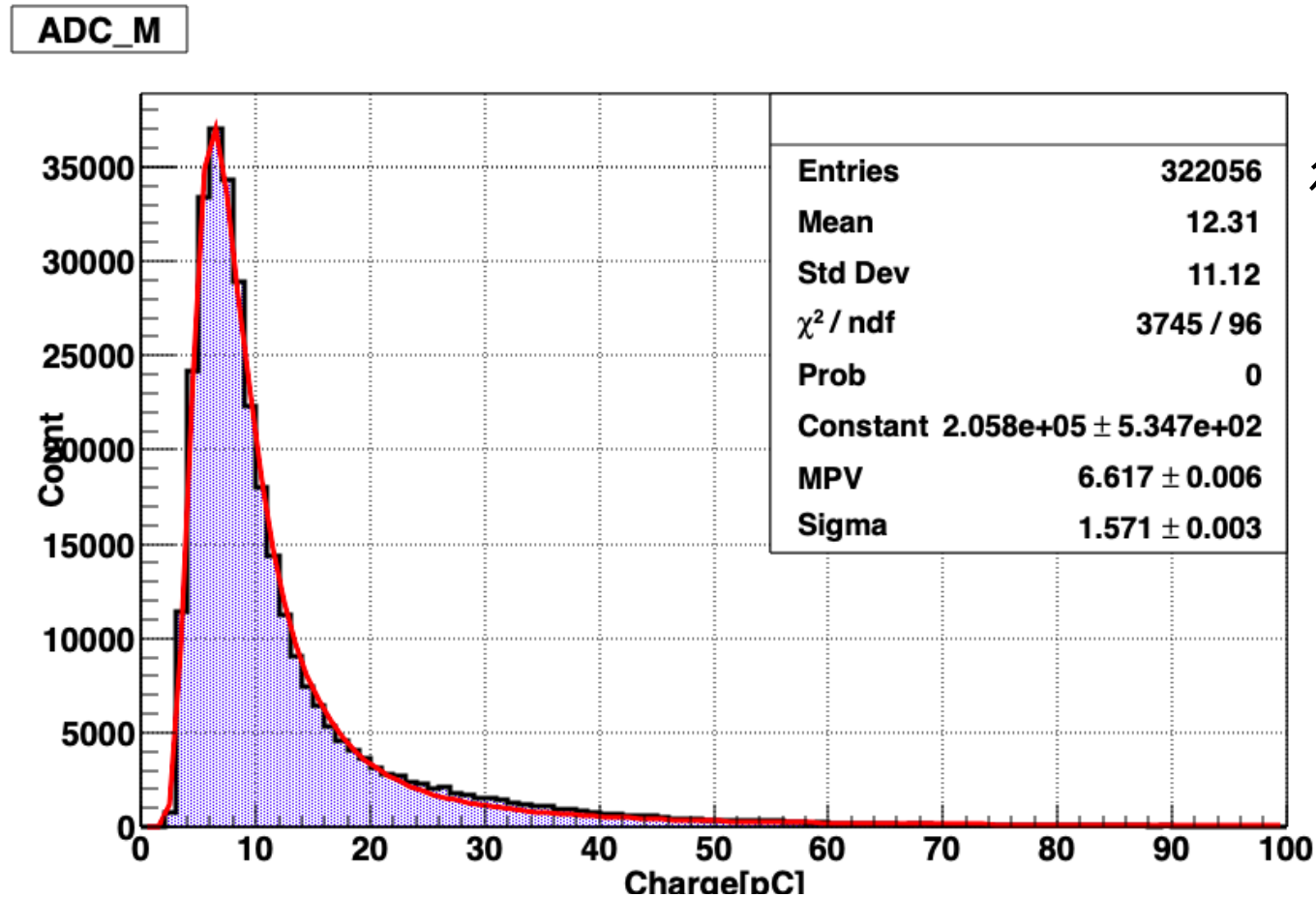
COMに信号が入ってからINに信号が入るまでの時間をデジタルに変換する。

これを用いてミュオンの寿命のデータをデジタルに取得できる。



5.結果

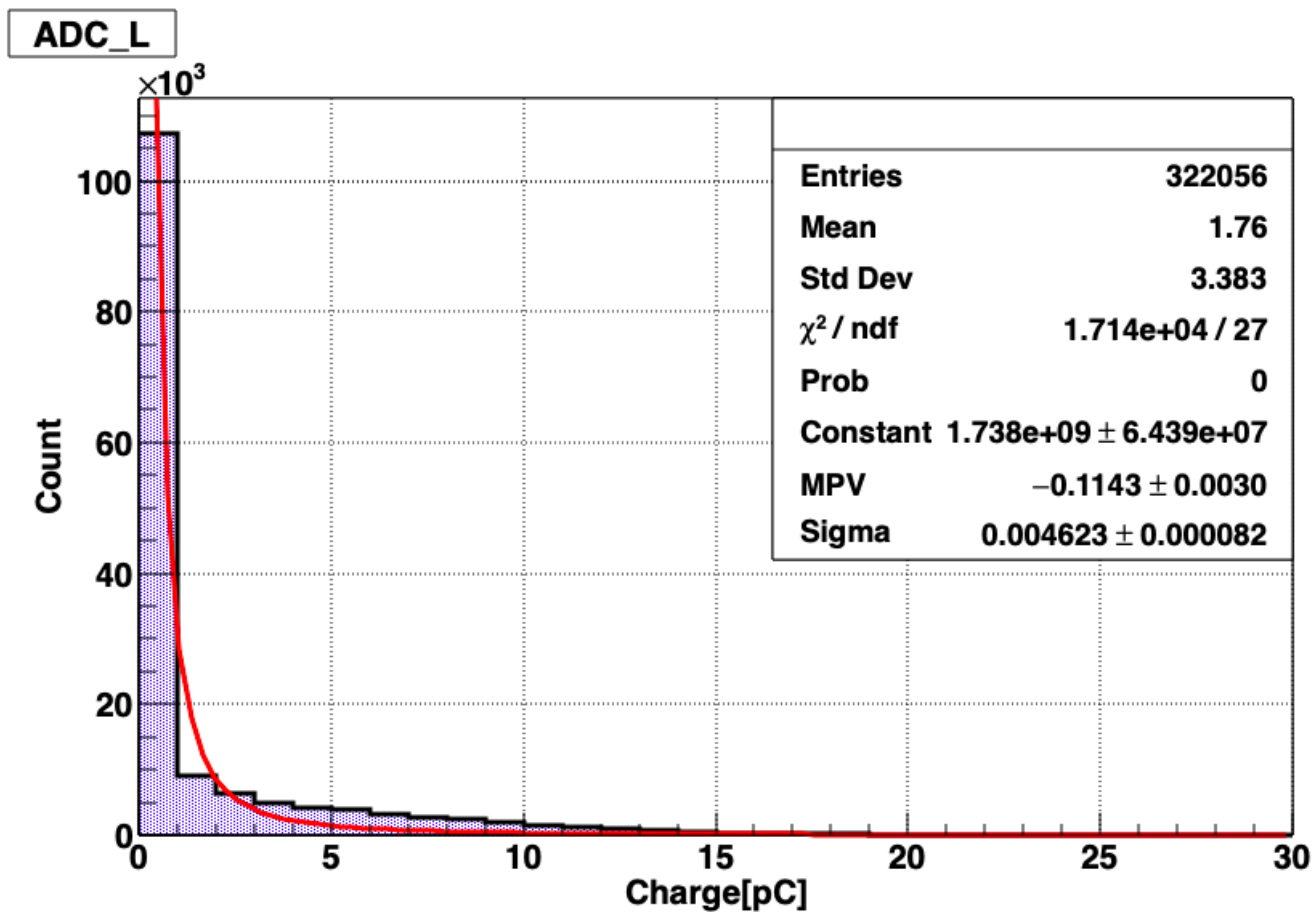
- ▶ Mid scintiでのADCの測定結果(ミューオンの落としたエネルギーの分布)



ランダウ分布に従っている事がわかった

ミューオンが
Mid scintiで観測できた！

► Low scintiでのADCの測定結果(ミューオンの落としたエネルギーの分布)



Low scintiではノイズはあるが電荷量はない

Low scintiでミューオンは計測されていない

Mid Scintiで計測したTDCの測定結果

単位時間当たりに崩壊する粒子数は以下の通り

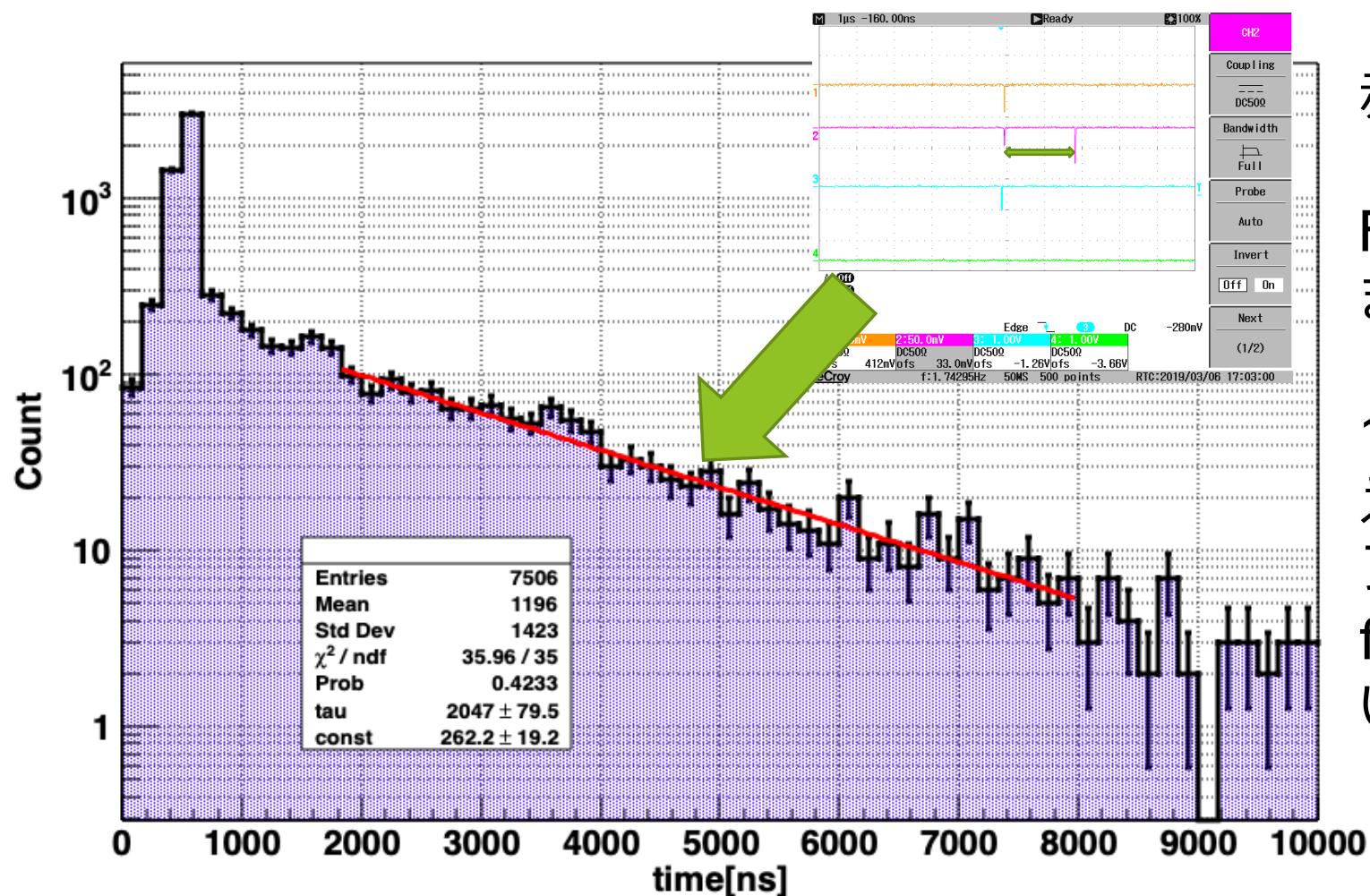
$$N = Ae^{-\frac{t}{\tau}} \quad (N : \text{count} \quad \tau : \text{寿命})$$

$$\therefore \log N \propto -\frac{t}{\tau}$$



寿命は直線になる傾きが分かれば寿命がわかる！傾きをfittingして求める。

► Mid scintiで計測したTDCの測定結果(片対数グラフ)



赤線がfittingした直線

Fittingは $2\mu\text{s}$ から $8\mu\text{s}$ までで行なっている

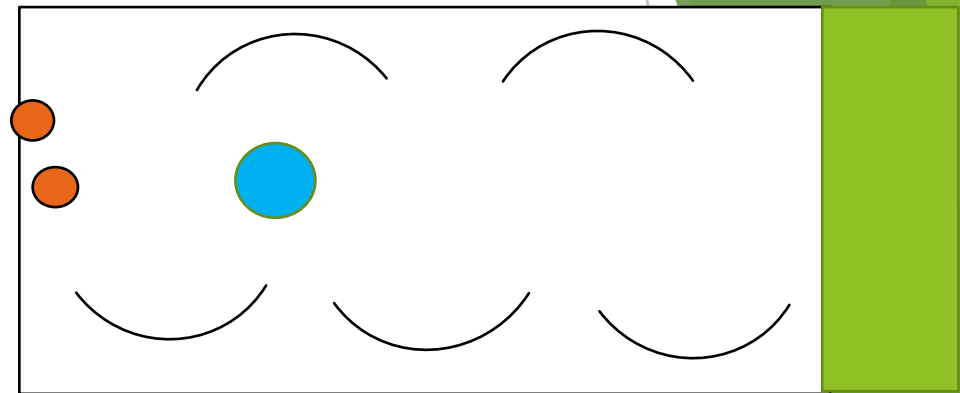
$1\mu\text{s}$ 以下でピークが見えている、これはアフターパルスなのでfitに含めてはいけない

PMTのアフターパルス

光電面から光電子が放出
↓
光電子増倍管中の
気体分子に衝突
↓
気体分子がイオンになる
↓
イオンが電場には加速され光電面に衝突
↓
衝突で光電子が放出



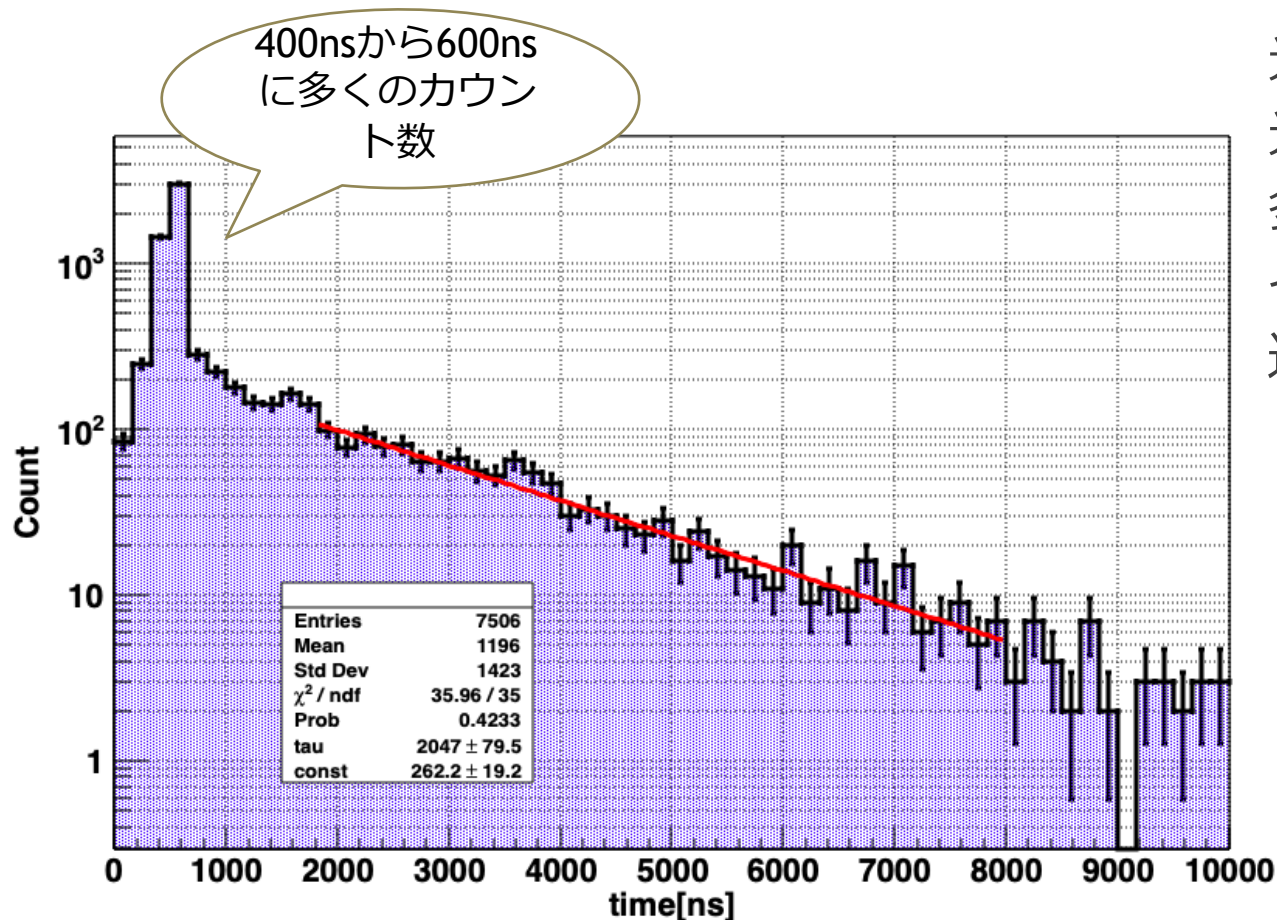
光電面



放出された光電子による信号が

アフターパルス

400ns~600nsの変化について



光電子管の経年劣化を考慮する上で
光電子管内の気体が酸素と窒素が
多数を占めると考え、
イオンの質量と電荷を用いて
運動方程式を解き時間を算出
(オーダー計算)

$$t(s) = \left(\frac{2mx}{qE} \right)^{\frac{1}{2}}$$

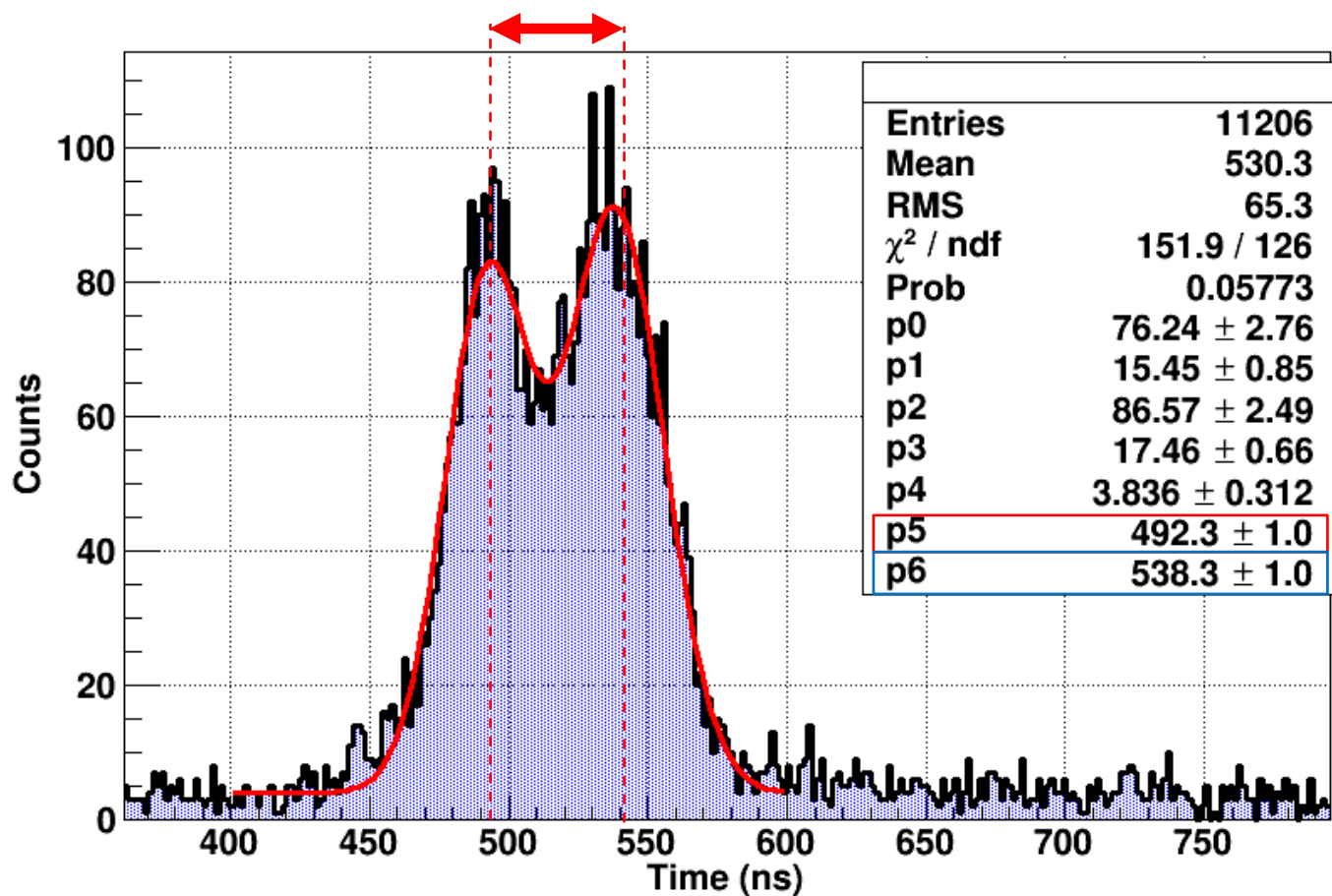
x:衝突距離(m)

$$t_{O_2} = 814 \text{ (ns)}$$

$$t_{N_2} = 761 \text{ (ns)}$$

差は約50nsである。

1000ns以下に注目するとピークが
2つあり、この差は約50nsである
→酸素と窒素によるアフターパルスの影響と判断



アフターパルスの頻度F

$$F = \frac{\text{アフターパルスの総数}}{\text{全イベント数}}$$

$$= \frac{4500}{750600}$$

$$= 0.0059$$

およそ0.60%である。

ヒストグラムによるFittingの結果

Fitした結果ミューオンの寿命は

$$\tau = 2.047 \pm 0.080(stat.) \mu s$$

と測定できた。誤差はfitの際の統計誤差である。

ミューオンの寿命は $2.19703 \pm 0.00004 \mu s$ であることが知られており、今回の結果は統計誤差のみで考えて 2σ の範囲で一致する。



ちょっと小さくない???

5. 考察

ミューオンの寿命の系統誤差

ミューオンは正電荷の μ^+ と負電荷の μ^- の二種類
 μ^- は原子核に引きつけられ原子核に吸収される



μ^- の寿命は見かけ上短くなる



測定したミューオンの寿命は実際よりも小さくなる！

観測されるミューオンの寿命の期待値

今回使ったシンチレータをカーボンとすると μ^- と μ^+ の個数の比は1 : 1.25と分かっているので μ^- の見かけ上の寿命を $\tau^- = 2.0 \mu s$ とすると理論的には

$$N(t) = Ne^{-\frac{t}{\tau}} + 1.25Ne^{-\frac{t}{\tau}}$$

のように崩壊していく。

今回の実験のデータ数ではうまくFitできなかった

観測されるミューオン寿命の期待値を単純に加重平均で考えると $2.111 \mu s$ となると考えられる

→ 測定結果($\tau = 2.047 \pm 0.080(stat.) \mu s$)はミューオンの寿命の期待値を測定していたと考えられる

このように考えると 1σ の範囲で測定結果と一致する

ミューオンの寿命の測定(解決法)

アルミニウムでは μ^- の寿命 $\tau^- = 0.81 \pm 0.06 \mu s$

→ アルミニウムはミューオンをよく吸収する(原子番号が大きいほど原子核に吸収されやすい)



アルミニウムをシンチレーターに挟めば μ^+ だけ測定できる、正しいミューオンの寿命の測定ができる

その他の系統誤差

TDCで寿命を測定していた

TDCのレゾリューションは0.5 ns/countであると思って計算



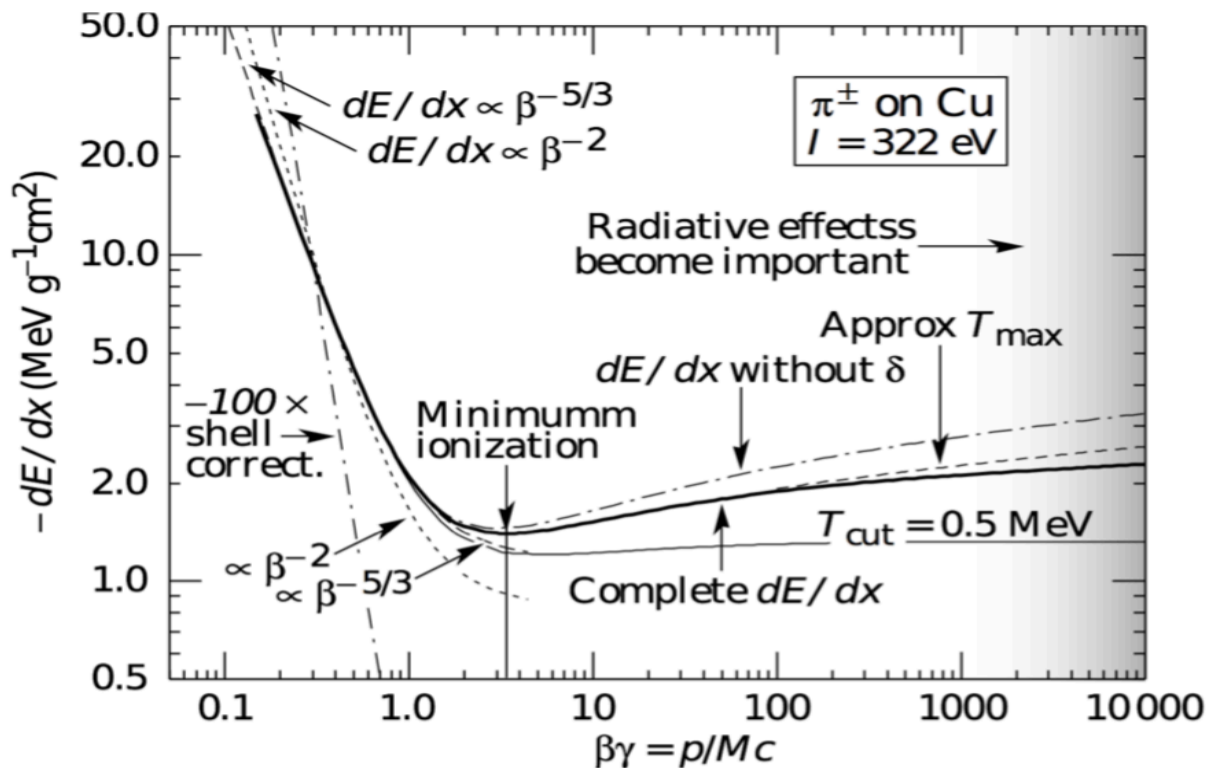
本当？ 誤差の要因になる

時間がなかったので測定していません

6. 追加実験

Bethe-Blochの公式を用いた判定

► Bethe-Bloch's formula



粒子のエネルギーの大きさとエネルギー損失についての公式

Bethe-Blochの公式を用いた判別方法

エネルギーが小さいとエネルギー損失が大きい

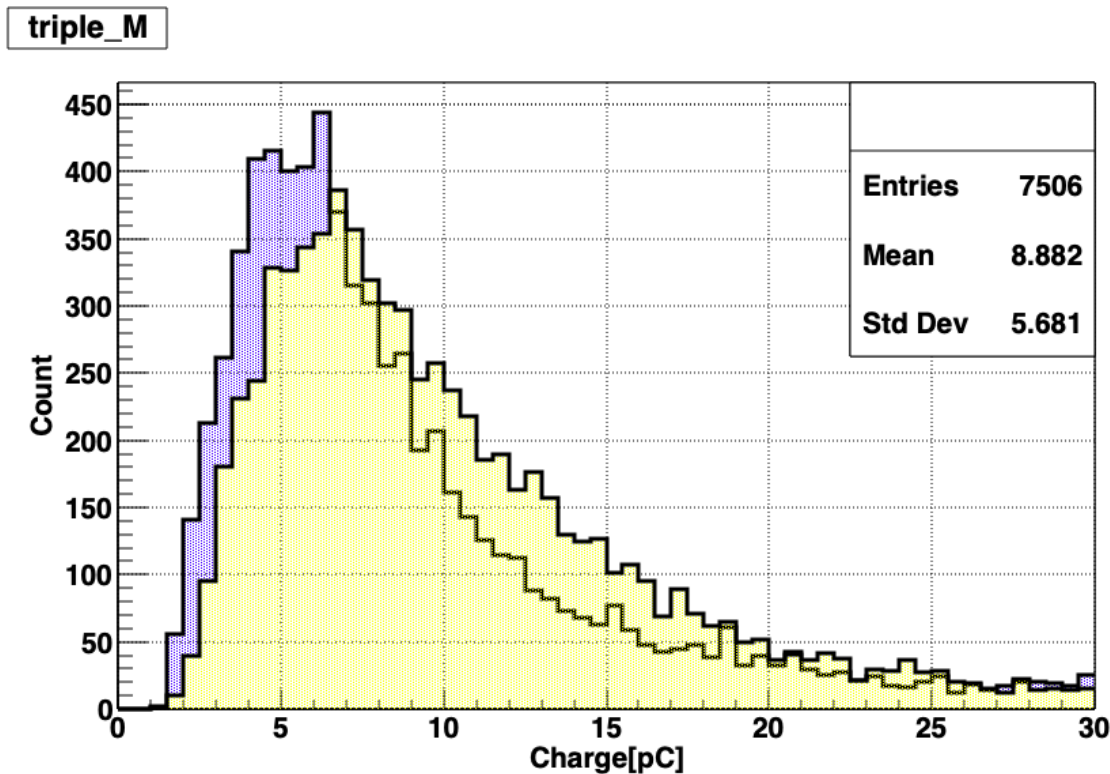
⇒ 止まったミュオンはシンチレータに大きいエネルギーを与えるはず

この性質を使ってミュオンが2枚目のシンチレータで崩壊したかが判断できるのでは？



3枚のシンチレータを通過したミュオンを測定して、エネルギー損失(ADCの結果)を比較する

Bethe-Blochの公式を用いた判別方法 (測定結果)



青色：2枚目で崩壊するイベント
黄色：3枚を通過するイベント

黄色の方が右に偏っている
⇒ エネルギー損失が大きい???

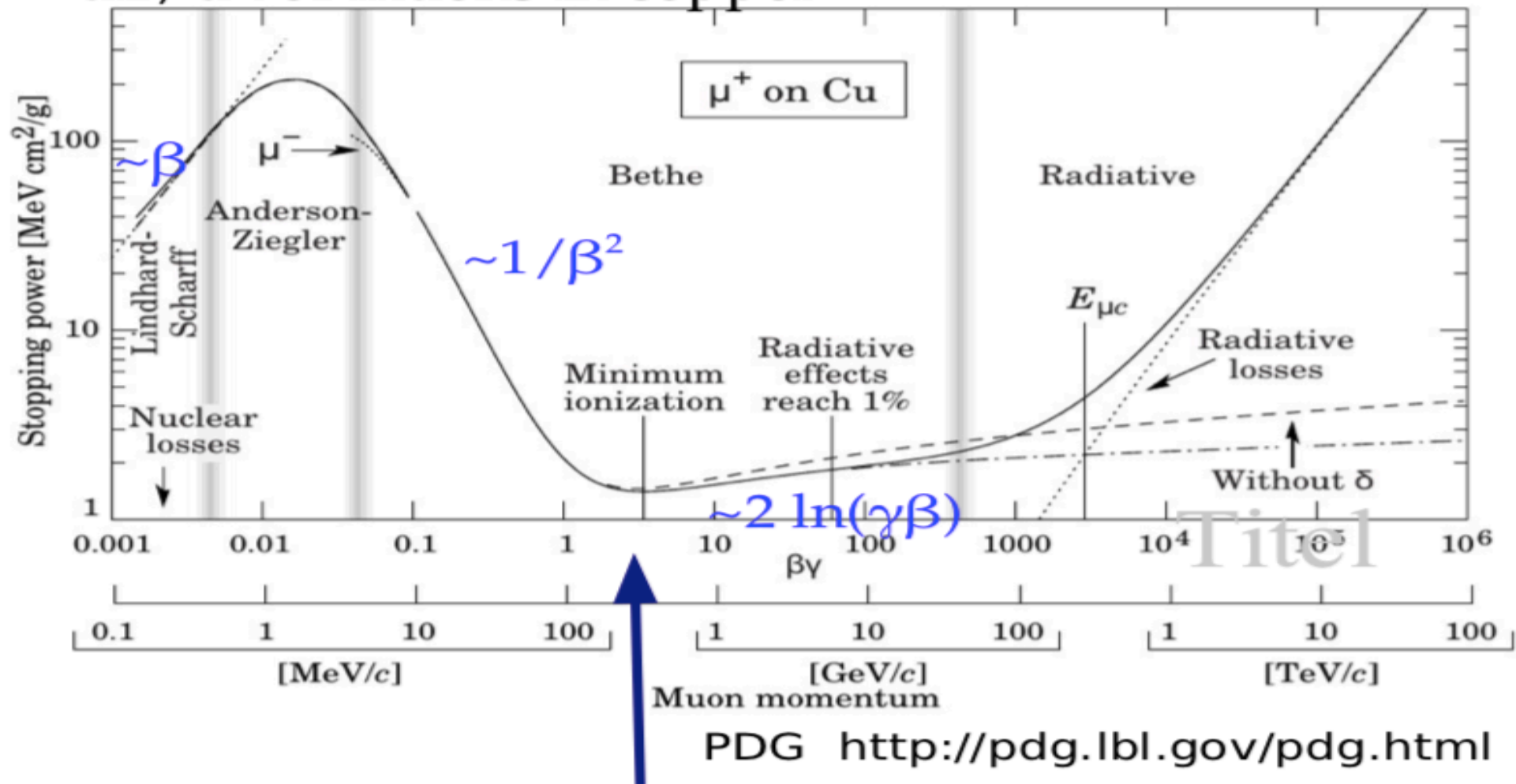
Bethe-Blochの公式を用いた判別方法 (結果の解釈)

ミューオンが止まる($\beta = 0$)ときではBethe-Blochは成り立たない

代わりにMeV領域ではAnderson-Zieglerの公式というものがあるらしいがこれでは同じような判定はできない

結果としてBethe-Blochの公式というのが一定のエネルギー領域でしか成り立たないことを見ただけか

dE/dx of muons in copper



8.まとめ

- ・ ミューオンが観測できた
- ・ ミューオンの寿命は $\tau = 2.047 \pm 0.080(stat.) \mu s$ と測定された
- ・ 系統誤差を考えてより精度の良い方法があるということを示した

ご清聴頂きありがとうございました

