

2021 超高エネルギー宇宙線

μ^+ 寿命の測定
と
フェルミ結合定数の決定

河井 力 陳 夏姫 三橋 康平 山崎 壮一郎

目次

- ▶ 目的
- ▶ 背景
- ▶ 観測方法
- ▶ 結果
- ▶ 考察
- ▶ まとめ

よろしく
おねがいします！



2021年 目的

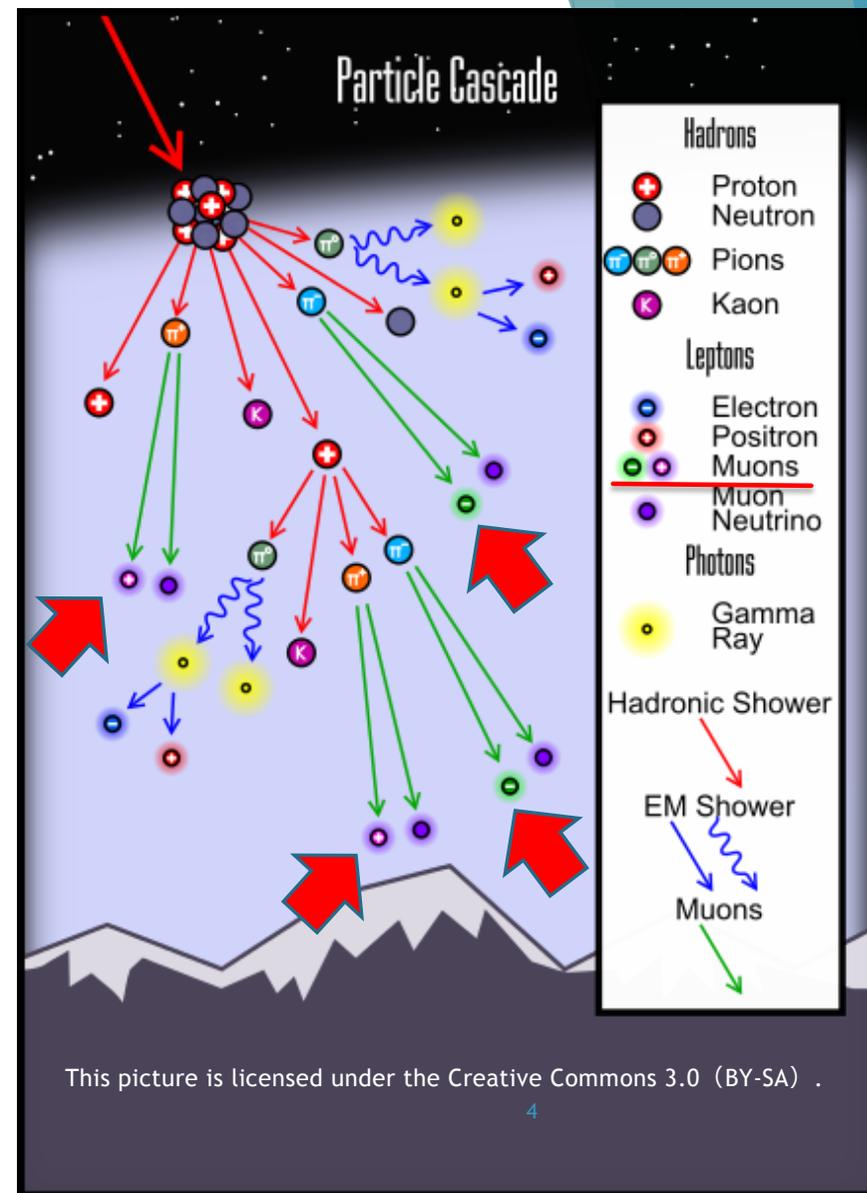
- ▶ 原子核吸収のためにアルミニウム（3 cm）、鉛（5 mm）を
中シンチと下シンチの間に入れて寿命の測定をする。
- ▶ μ^- の影響を小さくすることで μ^+ の寿命を求める。
- ▶ **ミュオンの寿命からフェルミ結合定数を算出する。**

	radiation length	物質中での μ^- の寿命
アルミニウム	8.897 cm	864 ns
鉛	0.5612 cm	80 ns



背景：ミューオンの飛来

- 宇宙から飛来した宇宙線が大気と衝突する過程で発生
- 地表に達する宇宙線の約7割はミュー粒子。
- 地上では手のひらぐらいの面積あたり
毎秒1個ほど降り注いでいる。



ミューオンについて

- ▶ ミューオンの質量 $105.66 \text{ MeV}/c^2$ ($\sim 1.89 \times 10^{-28} \text{ kg}$)
(電子の約200倍)
- ▶ スピン $1/2$
- ▶ 寿命 約 $2.20 \mu\text{s}$?
- ▶ 崩壊 $\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$
 $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$
- ▶ 物質との相互作用は強くない

電荷 Charge	スピン Spin	世代 Generation		
		I	II	III
+2/3	1/2	u up	c charm	t top
		d down	s strange	b bottom
-1/3	1/2	e electron	μ muon	τ tau
		ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino
-1	1/2			
0	1/2			

クォーク
Quarks

レプトン
Leptons



<https://higgstan.com/>

ミューオン崩壊について

μ粒子崩壊の時間的振る舞いは指数関数法則に従うことが知られている。

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

N : 時刻 t で残っている粒子数

N_0 : 初期時刻の粒子数

τ : 粒子の平均寿命

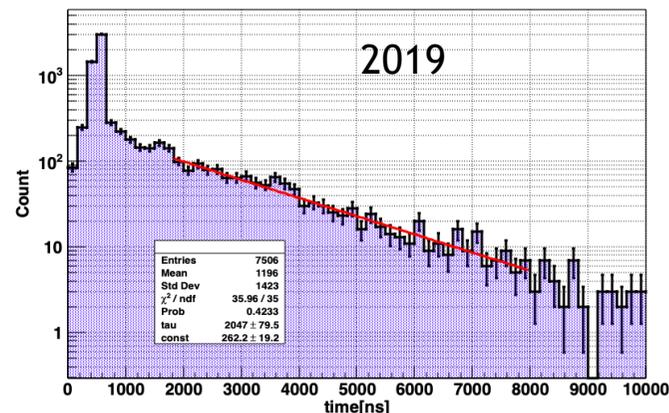
これを微分することで、単位時間当たりの崩壊数を表すことができる

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

先行研究【2019年】で得られた結果

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

(誤差はfitの統計誤差)

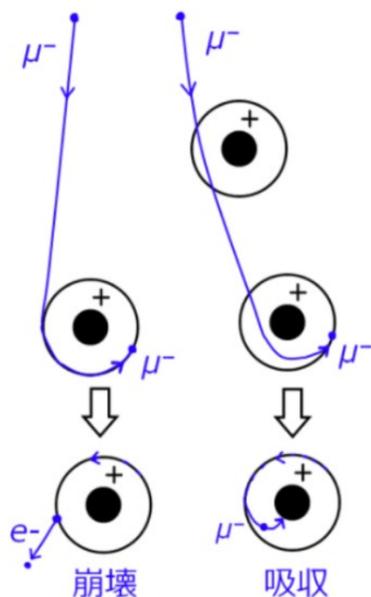


文献値でのミュオンの寿命は $2.1969803 \pm 0.0000022 \mu\text{s}$
2019の結果は統計誤差のみで 1σ (片側84%) の範囲で一致しない。



2019で測定されたミュオンの寿命は実際よりも小さくなった

原子核捕獲による μ^- 寿命の変化



μ^-e の崩壊の平均寿命を τ 、 dt 時間内に吸収される確率を dt/τ_a とする
原子核捕獲による μ^- の崩壊と吸収を込みにして dt 内に μ^- が消滅する確率

$$dt\left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_a}\right)$$

μ^- の見かけ上の寿命 τ^- は

$$\frac{1}{\tau^-} = \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_a}$$

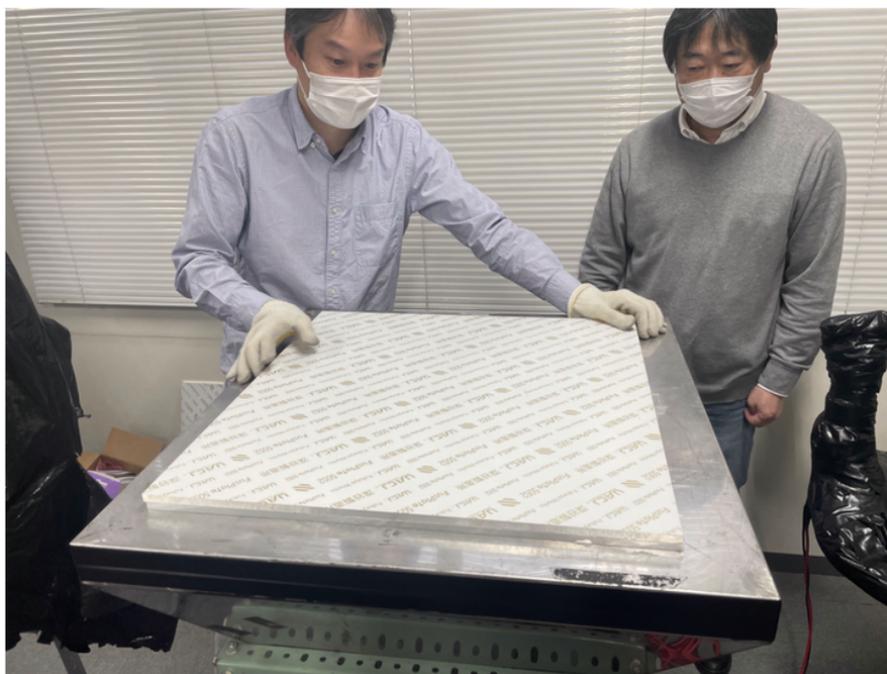
消滅する μ^- とその内崩壊によるものとの比

$$f = \frac{\tau^-}{\tau}$$

μ^+ は吸収がないため τ^+ については τ のみである。

- 物質の原子番号が大きいほど原子核による吸収の割合が増加する。
- μ^- 粒子が原子核に吸収される確率は Z^4 に比例する

観測の様子

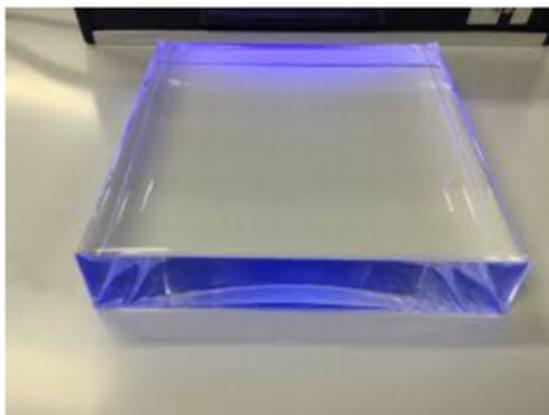


PMT(光電子増倍管)に
信号以外の光が入らないように
黒いビニールと布で覆う



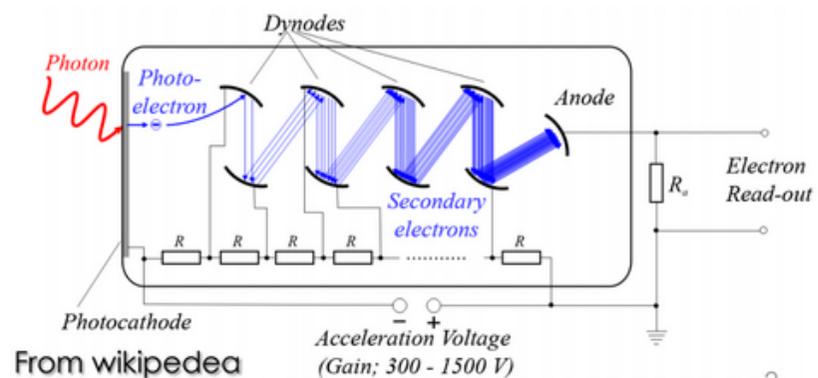
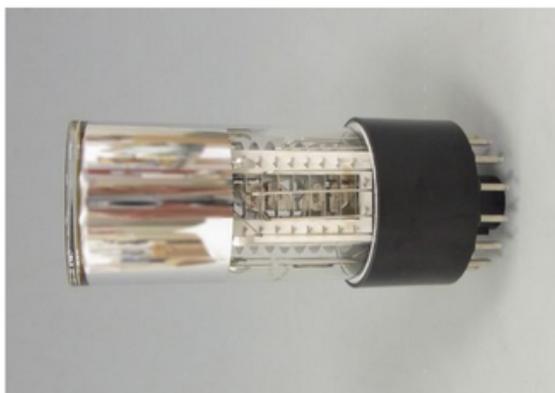
取得したデータを共有し、オンラインで解析しました

光電子増倍管 (PMT) とシンチレーター

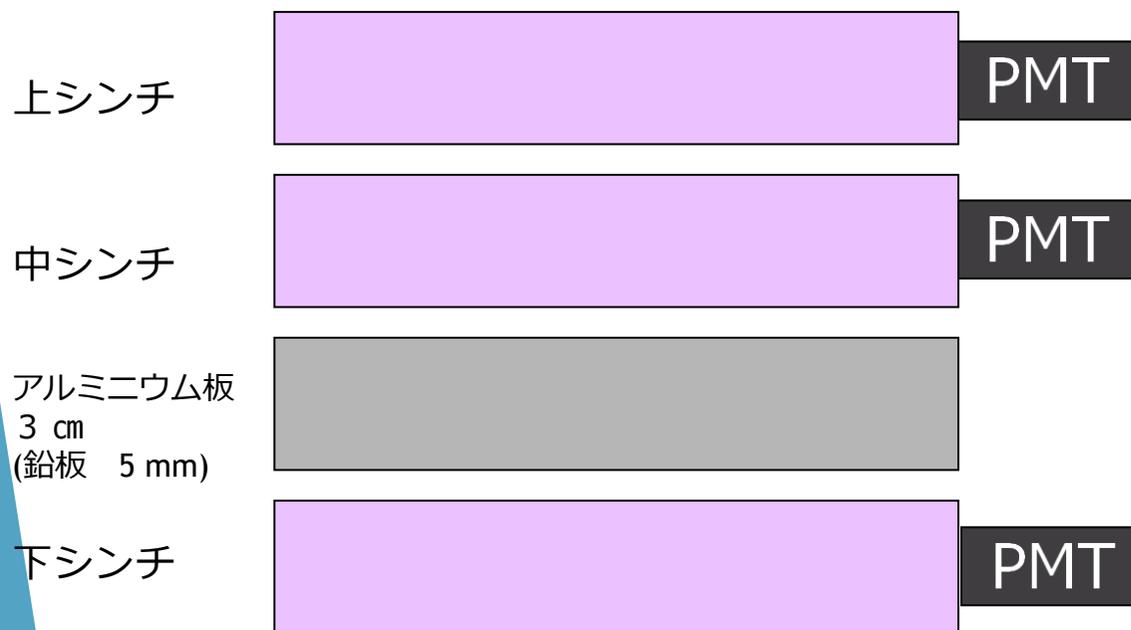


有機シンチレーター (プラスチックシンチレーター)
蛍光剤(p-ターフェニル[C₁₈H₁₄])を混ぜた
プラスチック素材 (ポリビニルトルエンなど)

→荷電粒子が通過するとシンチレーション光(〜420nm)を放射
300個/1 cm程度の光子を放射



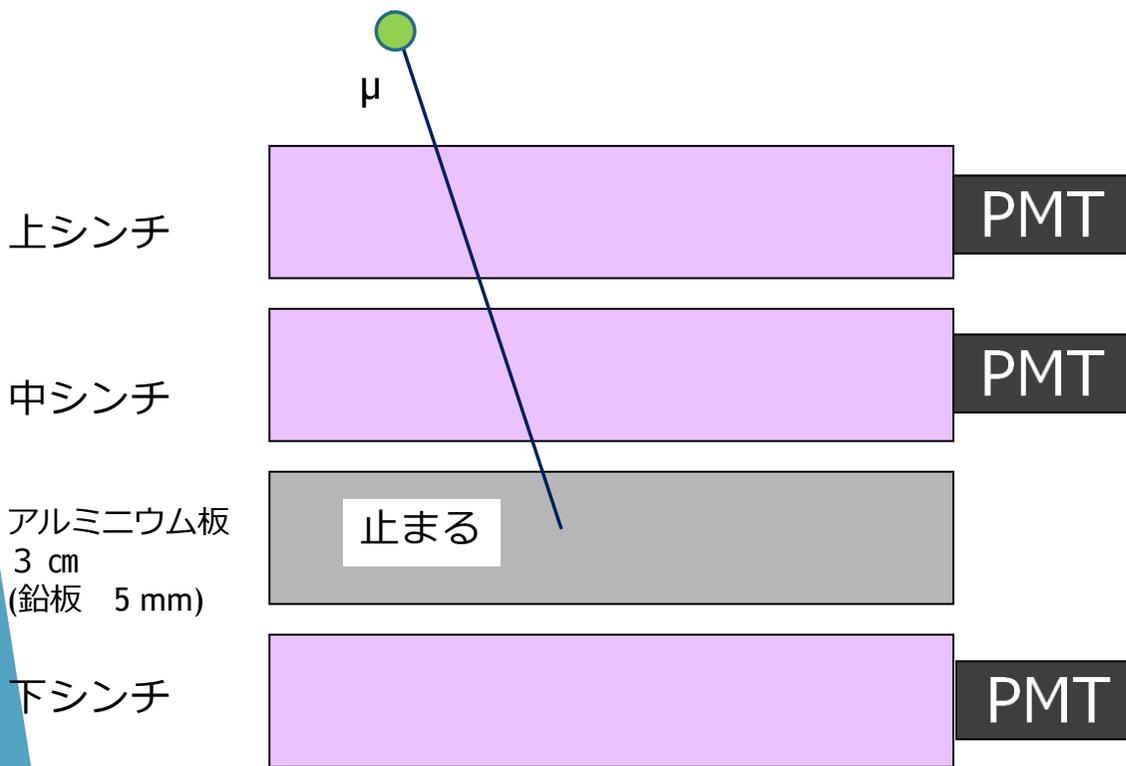
ミューオン寿命の測定法



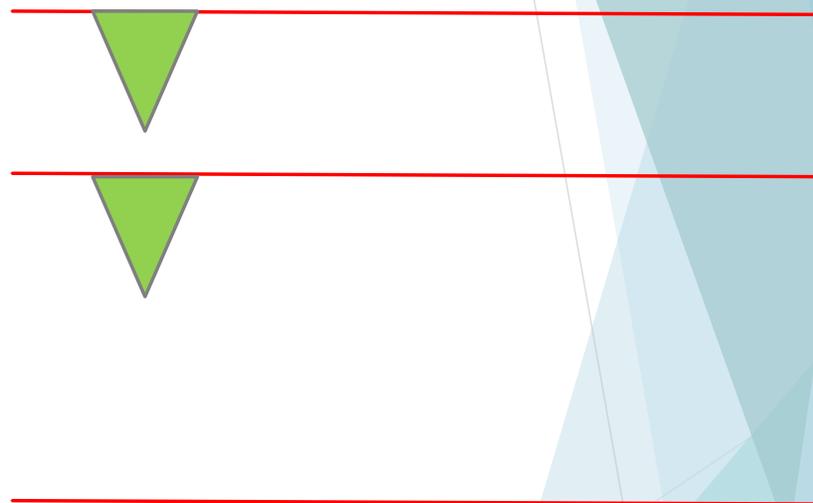
信号



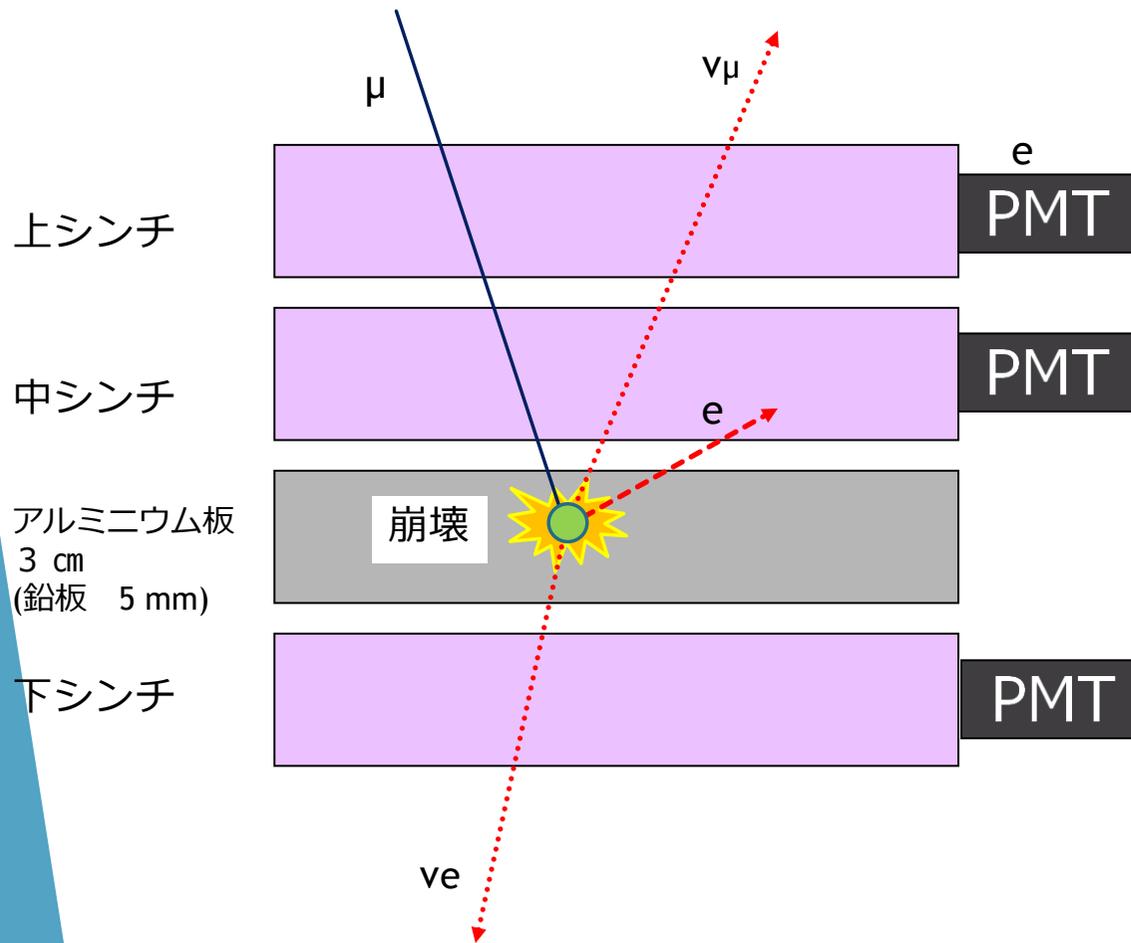
ミューオン寿命の測定法



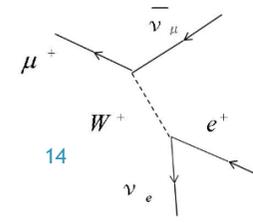
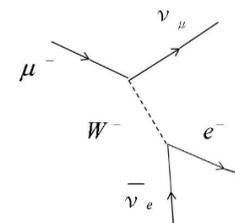
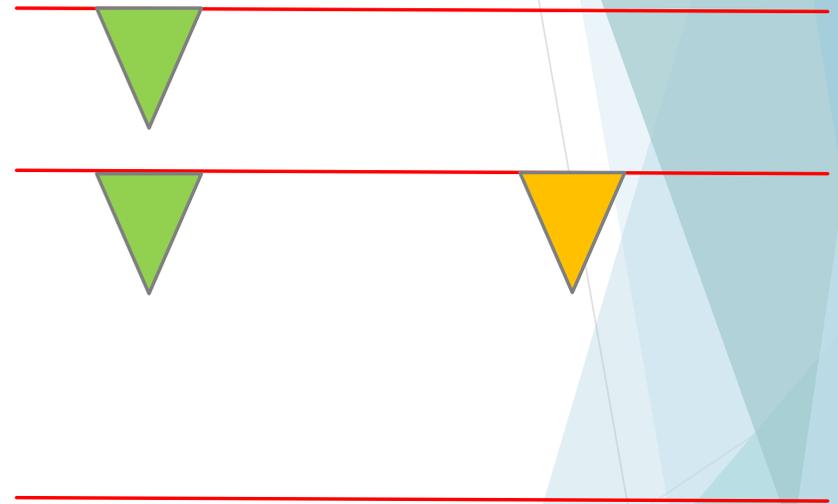
信号



ミューオン寿命の測定法

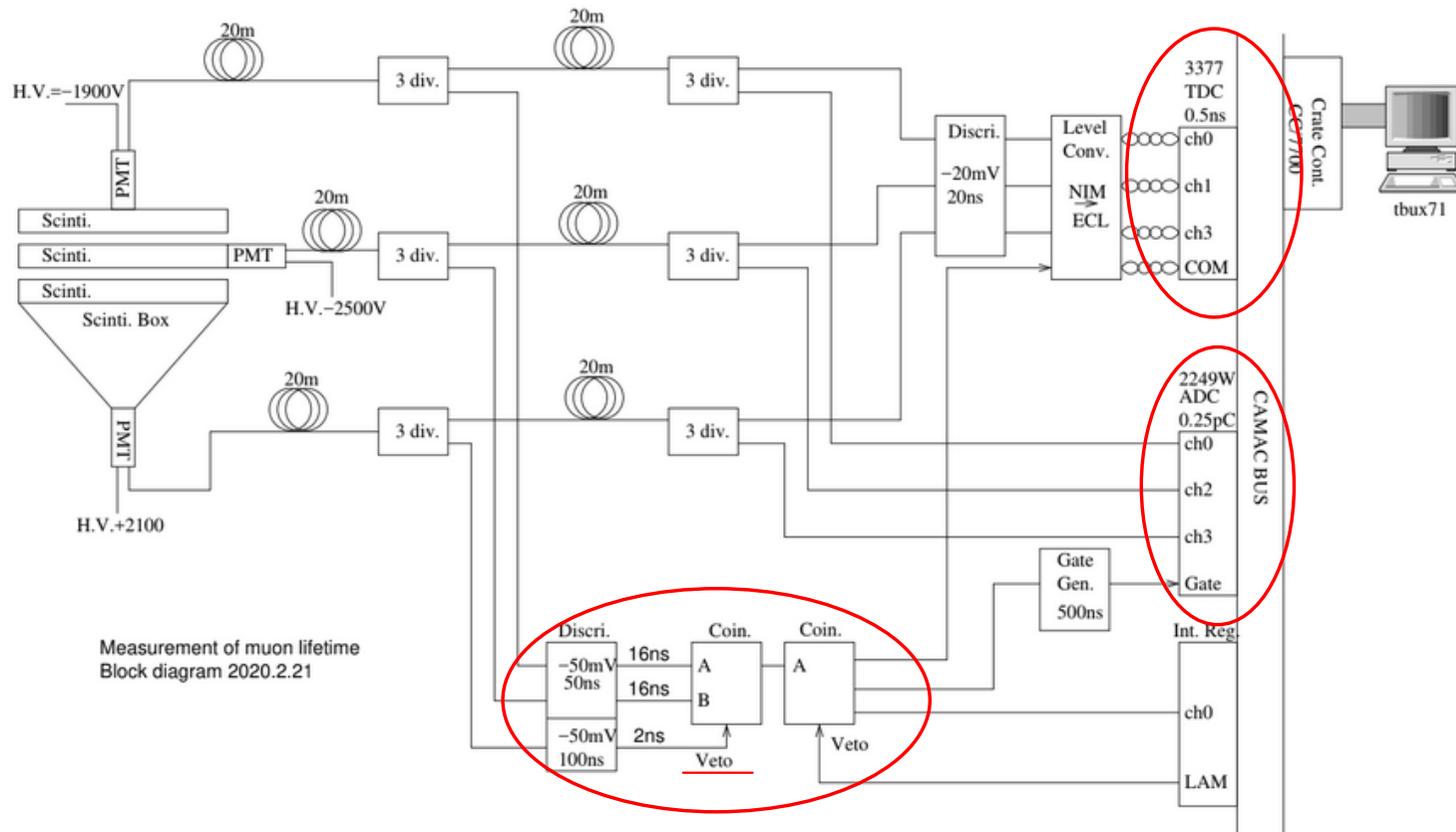


信号



▶ ミューオン寿命測定 ブロックダイアグラム

Gate信号内の電荷量(ADC)と
COM信号(トリガー信号)からの相対時間(TDC)を測定



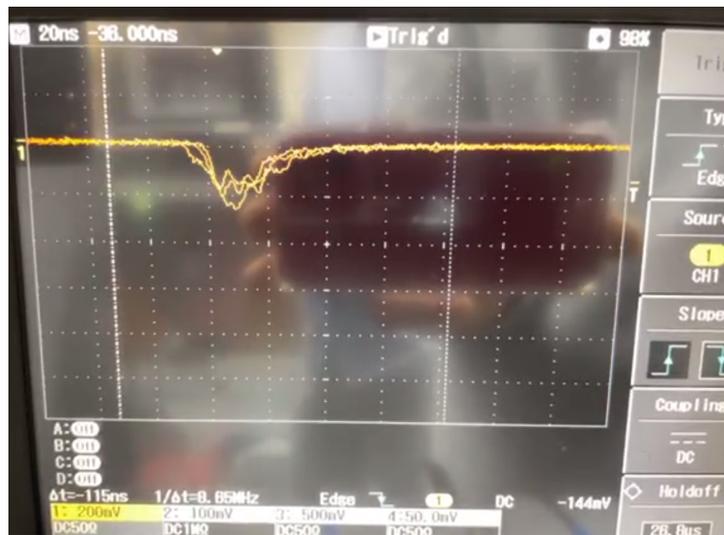
ミューオン崩壊を満たすようなトリガー から ADC Gate と TDC START COM (右上)

回路による信号のデジタル化

▶ ADC

PMTからの電気信号をデジタル化して取得する。

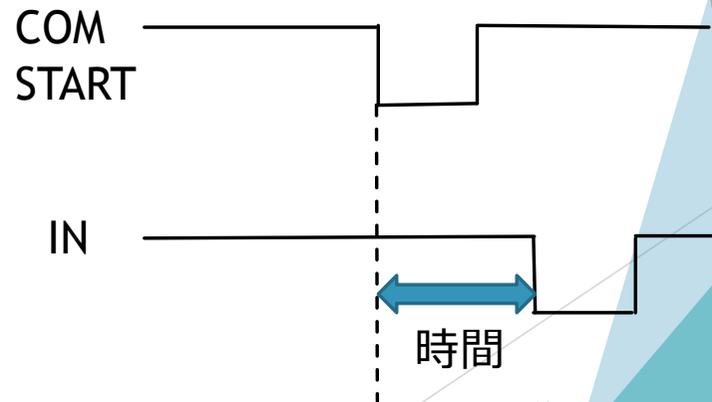
ADCの取得した電荷量はミュオンのエネルギー損失に比例するので、これによりミュオンがシンチレータを通った際に落としたエネルギーが分かる。



▶ TDC

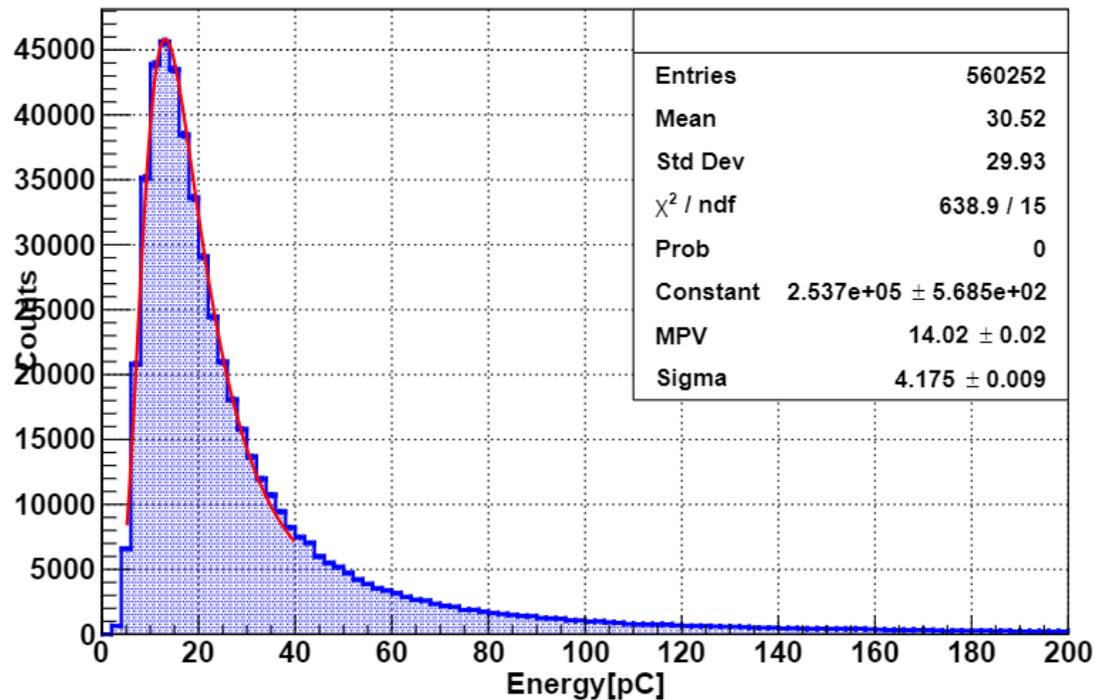
COMに信号が入ってからINに信号が入るまでの時間をデジタルに変換する。

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。

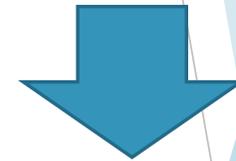


ミューオンの飛来 ランダウ分布

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



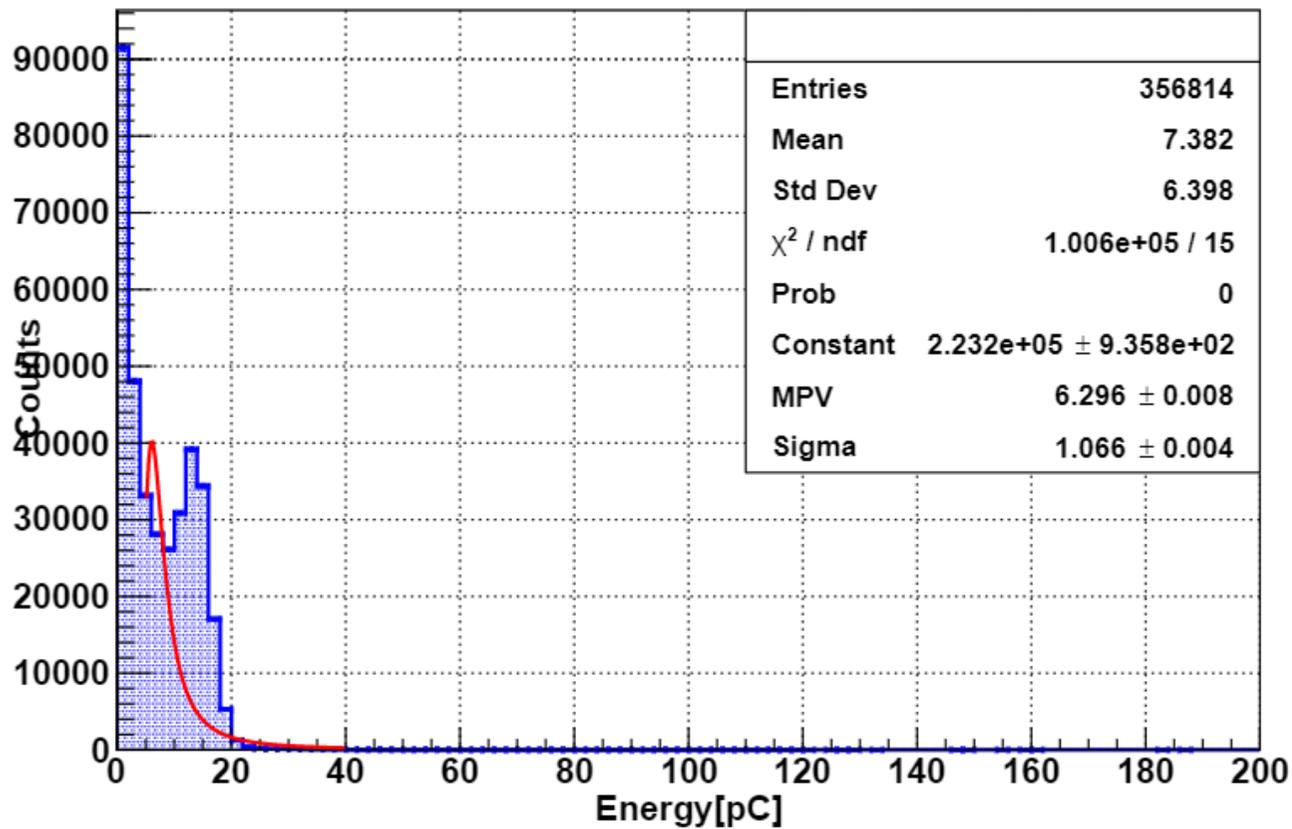
ランダウ分布に従っていることが分かった



ミューオンが
Upper scintiで観測できた！

ミューオンの飛来 ランダウ分布

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



Low scintiでは一部
偶然同期されたミューオンが
観測された

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)

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

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

▶ 2019年度の先行研究の結果と考察

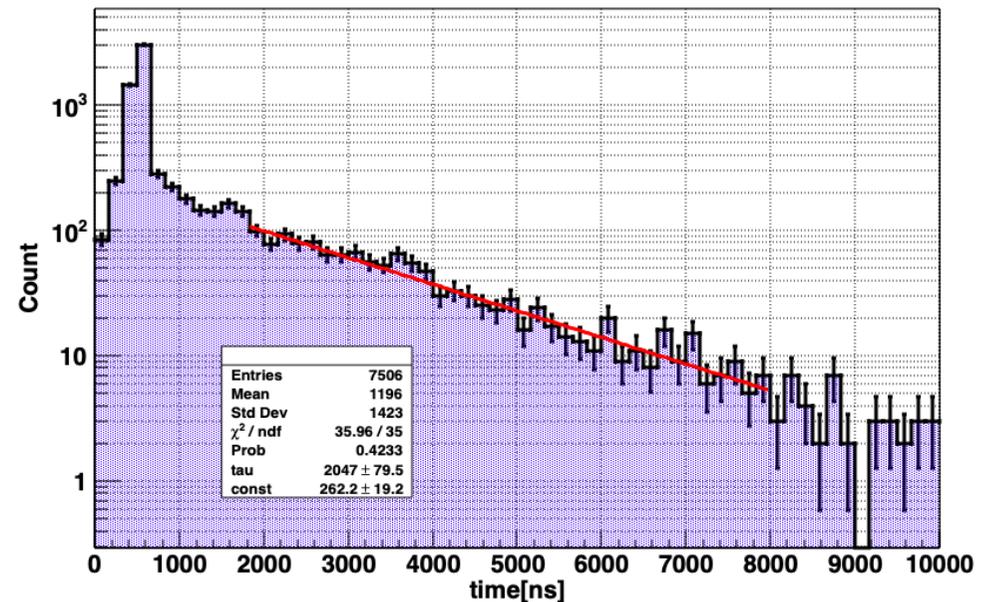
結論)400ns~600nsにおいてアフターパルスが検出されていた。

理由)経年劣化として光電管内に大気の大部分の構成要素である
酸素と窒素がアフターパルスの要因の気体分子と仮定。

↓

アフターパルスのピークが2つあり、
その差が約50nsと推測された。

実際のデータにおいても確認された。



アフターパルスについて

光電面から光電子が
放出

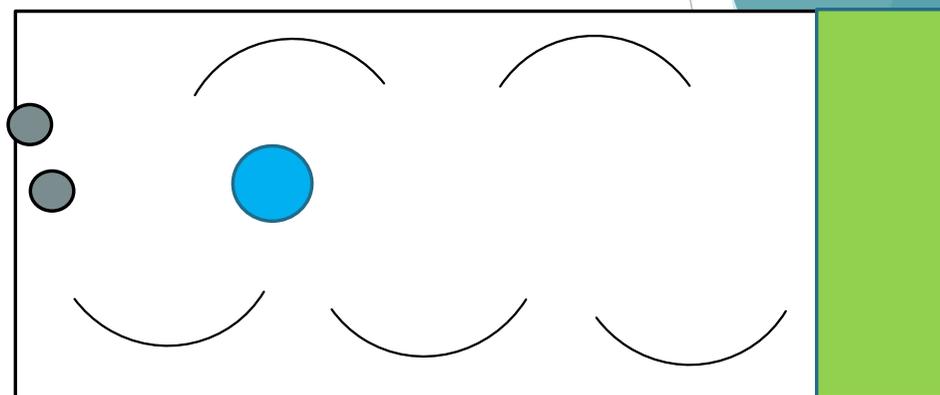
↓
光電子増倍管中の
気体分子に衝突

↓
気体分子がイオンに
なる

↓
イオンが電場に加速
され光電面に衝突

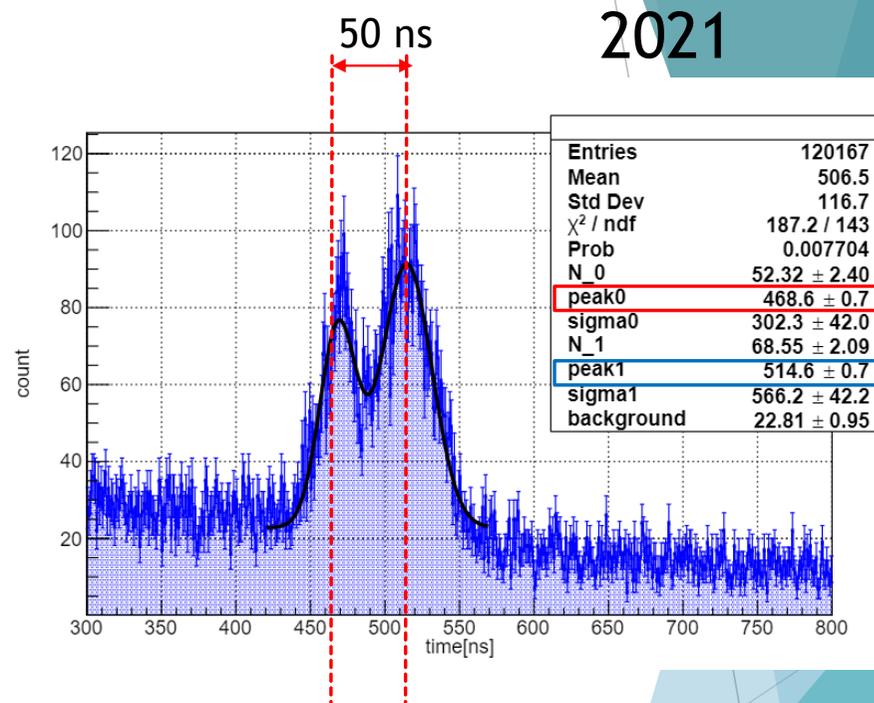
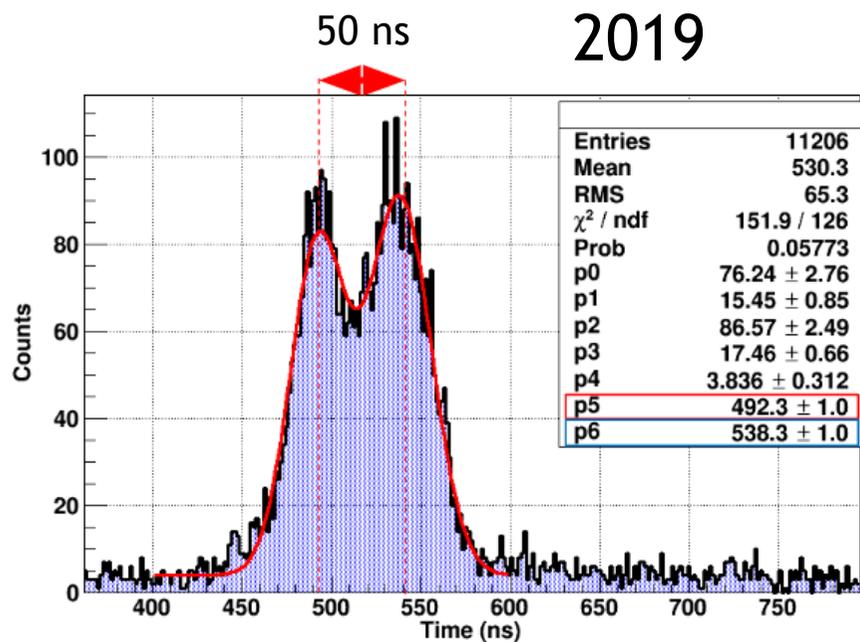
↓
衝突で光電子が放出

光電面



検出された電子がアフターパルスとして観測される。

アフターパルスの確認



2019、2021の観測共に
400ns~600nsの範囲にピークが
2つ認められ、
その差が約50nsである。

→PMT経年劣化による酸素と窒素による
アフターパルスと判断

※数 μs までで観測されるアフターパルスの成分もある。

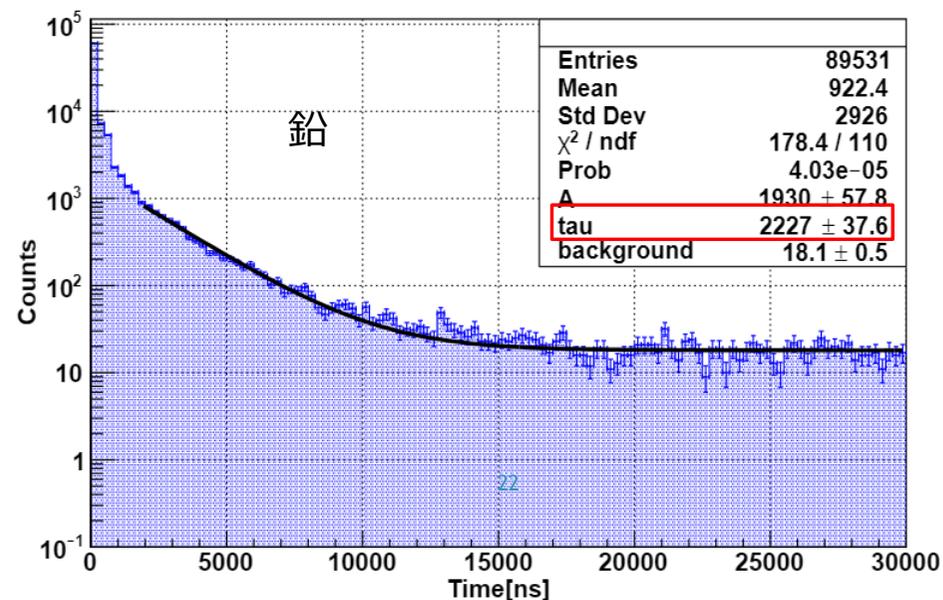
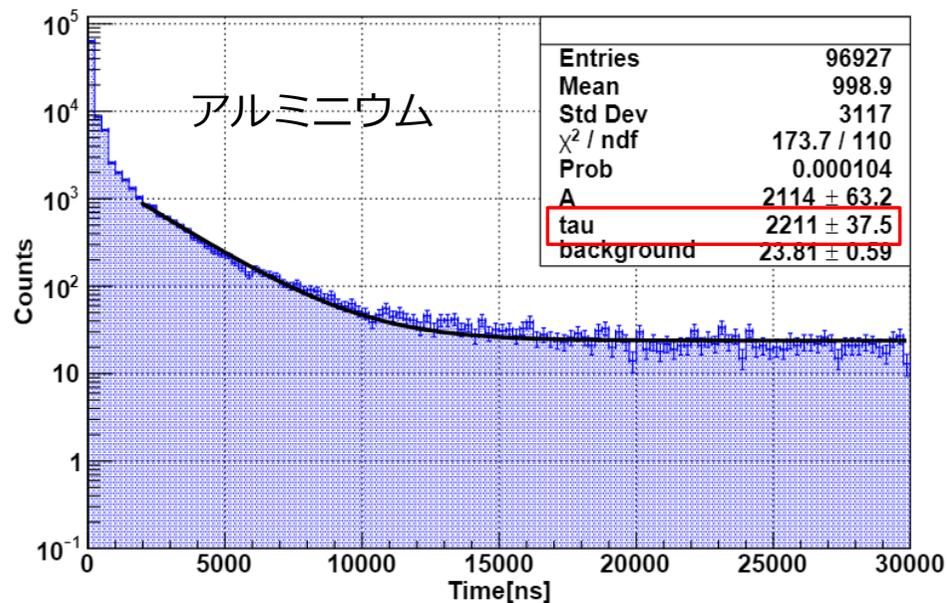
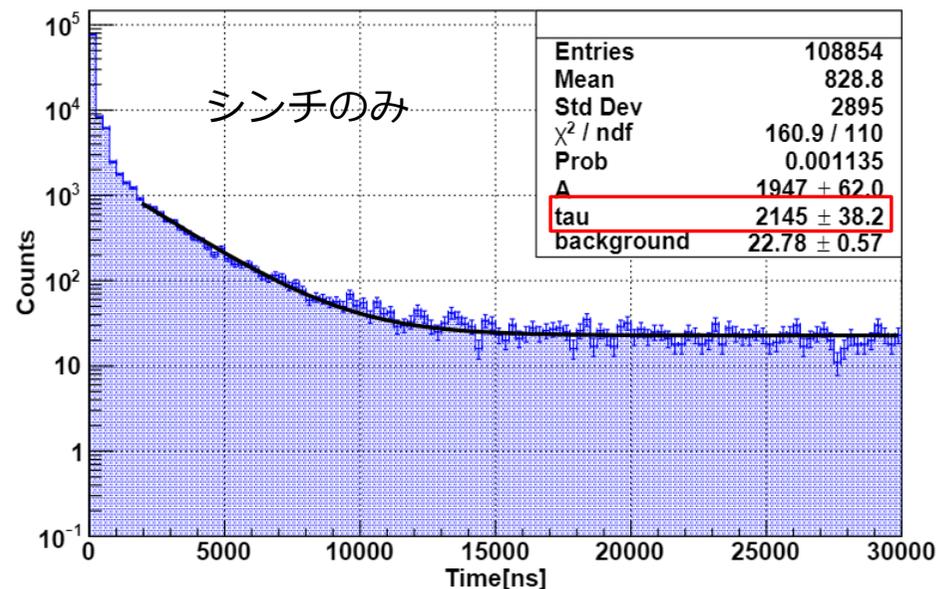
結果

1つのexp関数でのFit

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

条件

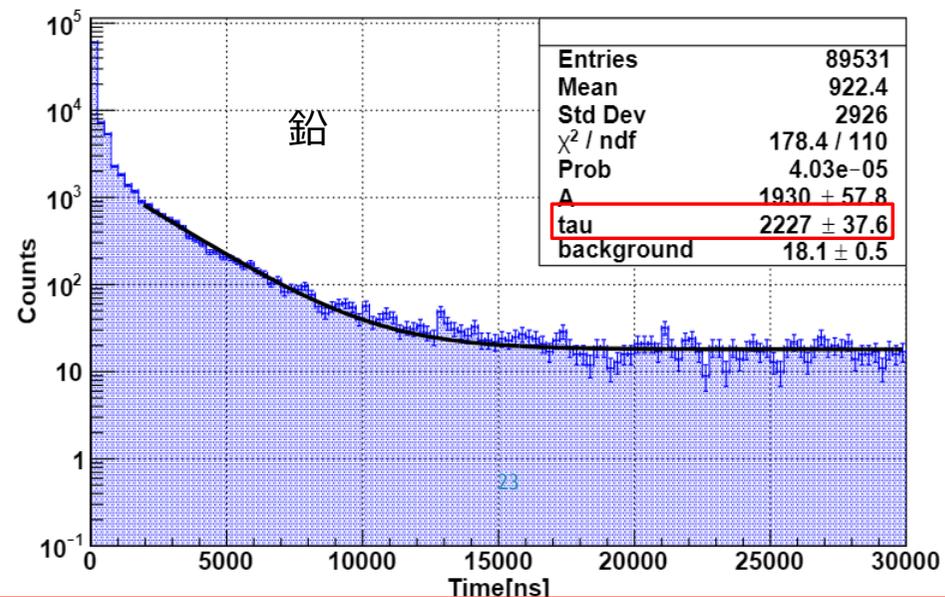
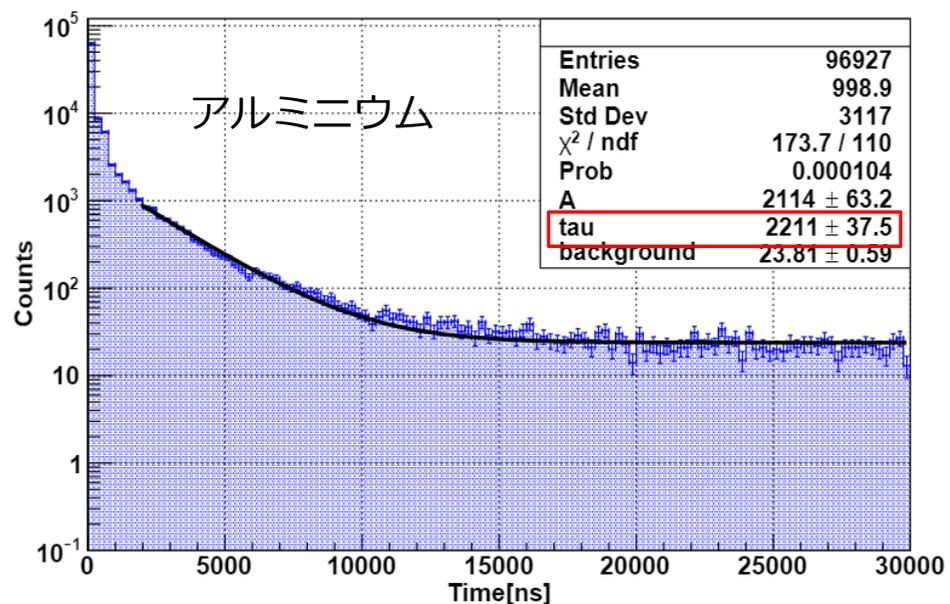
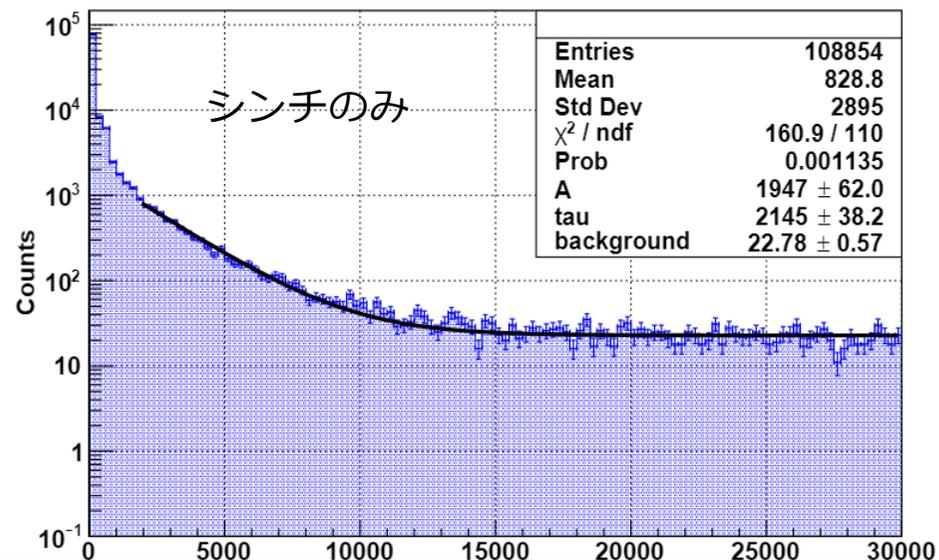
- Fitにはexp関数を1つ用いる
- TDC信号が上シンチで1つ、中シンチで2つ、下シンチで0個のものを取り出す



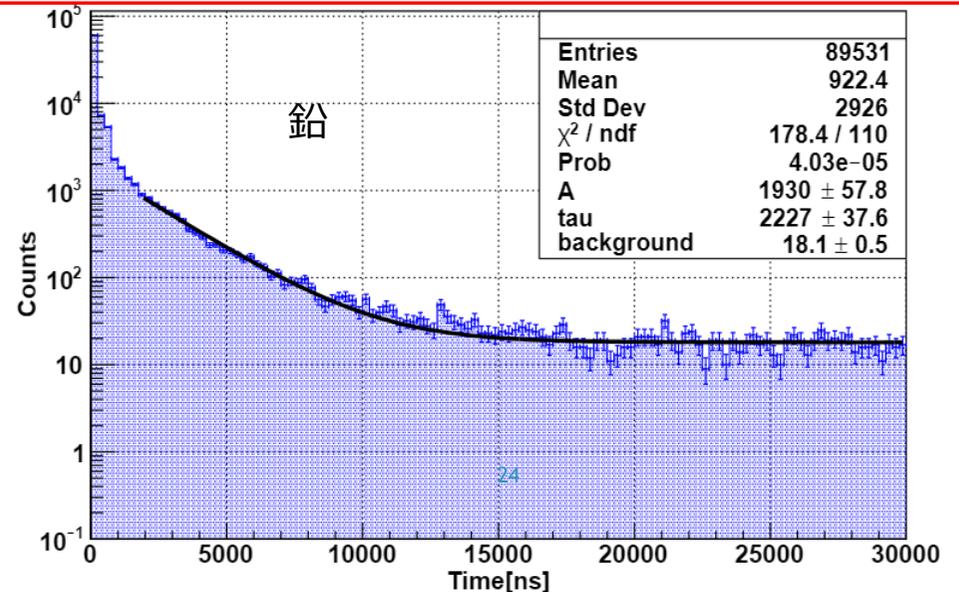
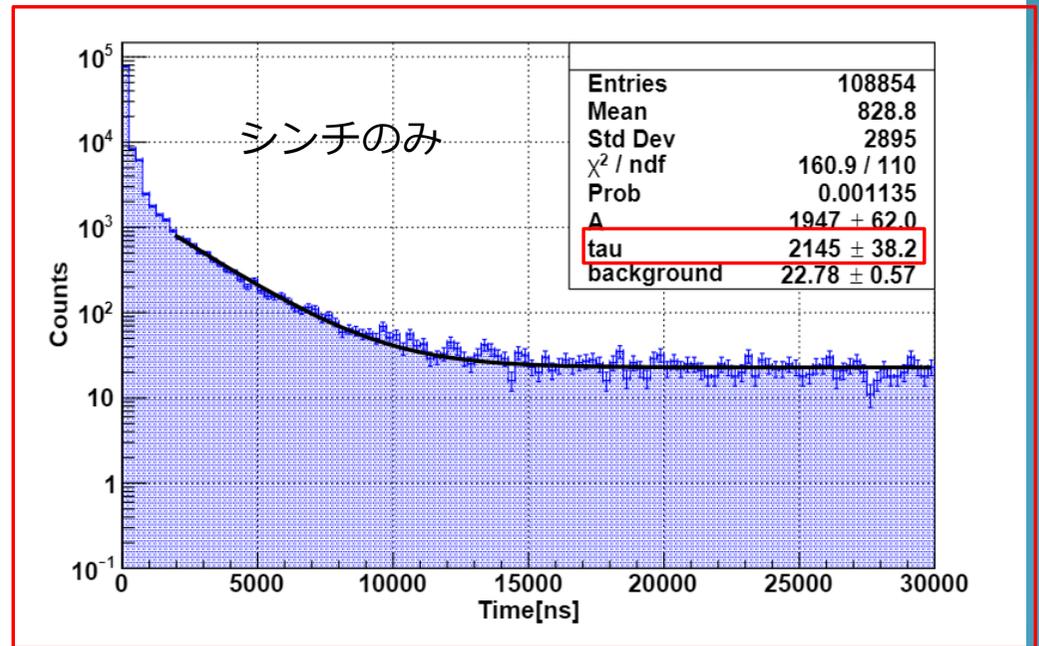
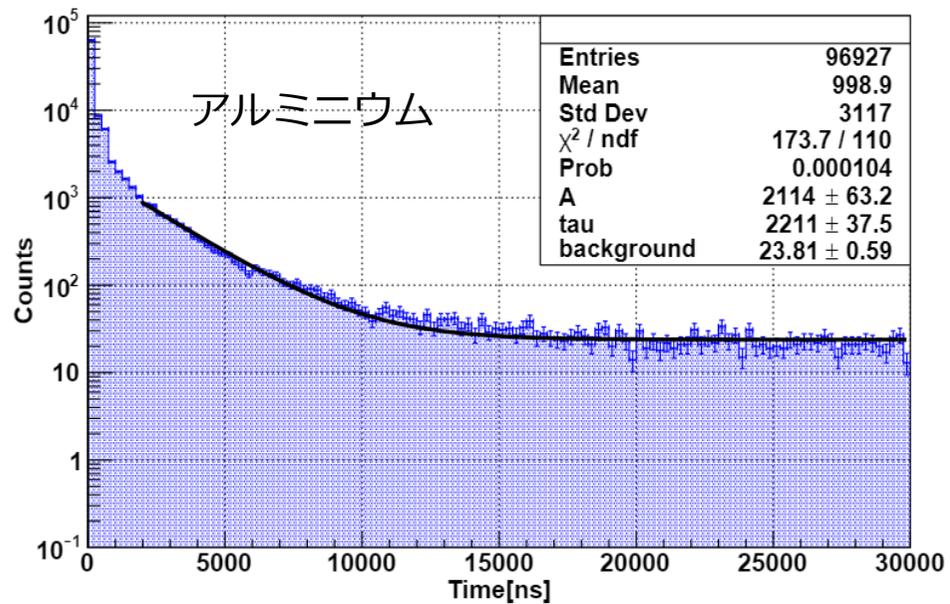
鉛とアルミニウムで適当な結果が得られた。
(1 σ で寿命が一致)

アルミニウム 2211 \pm 37.5 ns
鉛 2227 \pm 37.6 ns
シンチのみ 2145 \pm 38.2 ns

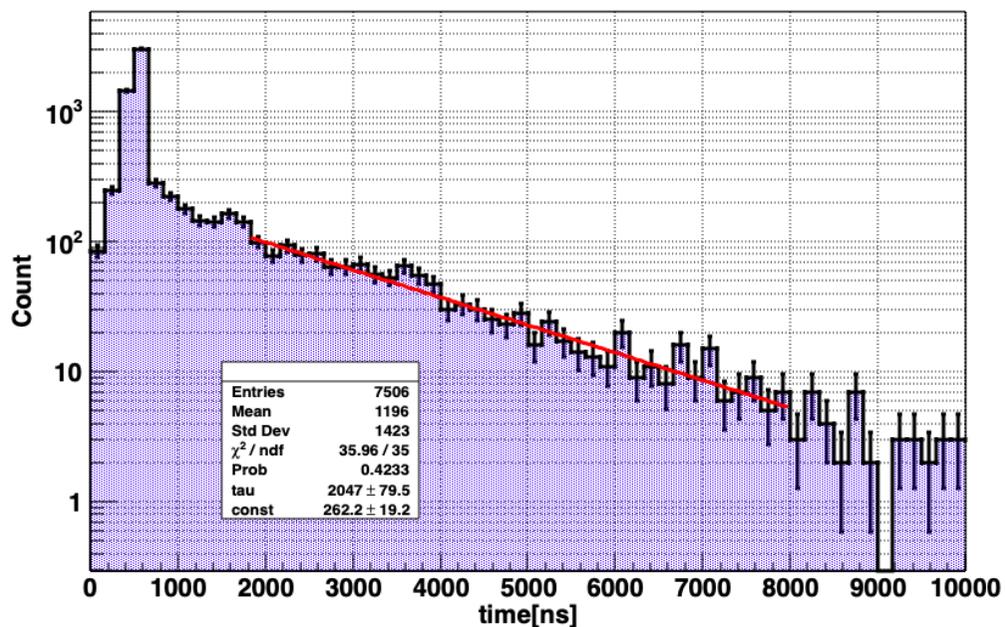
μ^- の寿命は鉛中で80 ns、アルミニウム中で864 nsとシンチレーター中の寿命と比較して非常に短いためグラフの左側に集約され μ^+ のみの寿命が測定できた



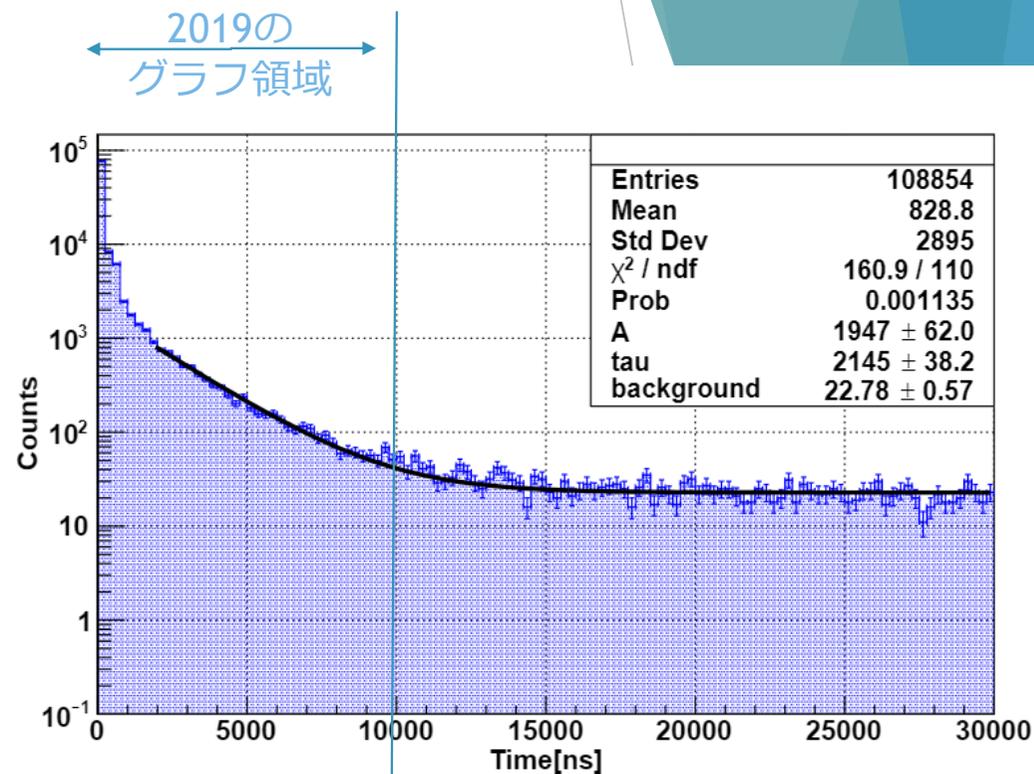
シンチ中でのミュオン崩壊の
理論値 (2111 ns) には1 σ で一致



Mid scintiで計測したTDCの測定結果の比較 (シンチのみ)



2019



2021

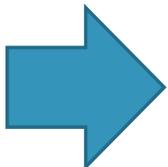
10000 nsまでは同じものが得られた

2021はより良い結果が得られた

バックグラウンドについて

- ▶ 今回はFit関数に定数項(back ground)を導入した。
- ▶ 定数項である為、頻度としては時間に依存しない。
→**頻度としては一定**
- ▶ BackgroundをFit範囲のビン数(120個)において積分する。
→ $18.1 \times 120 = 2127$ (回)
- その後選別後のデータの数で割り、back groundのデータに対する割合を求める。
→ $2127 / 89531 = 0.02425... \cong 0.024$
- トリガー 1 回について記録する時間は $30 \mu\text{s}$ 、よってbackgroundのHzは、

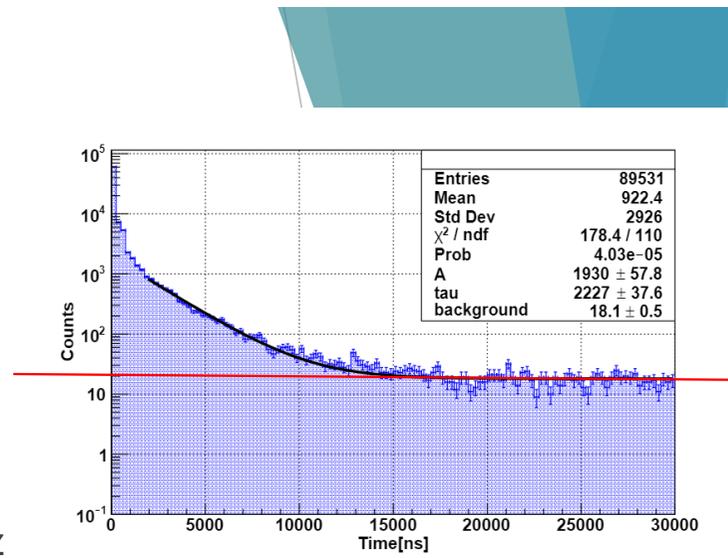
$$\frac{1}{30 \times 10^{-6}} \times 0.024 = 800 \text{ Hz}$$



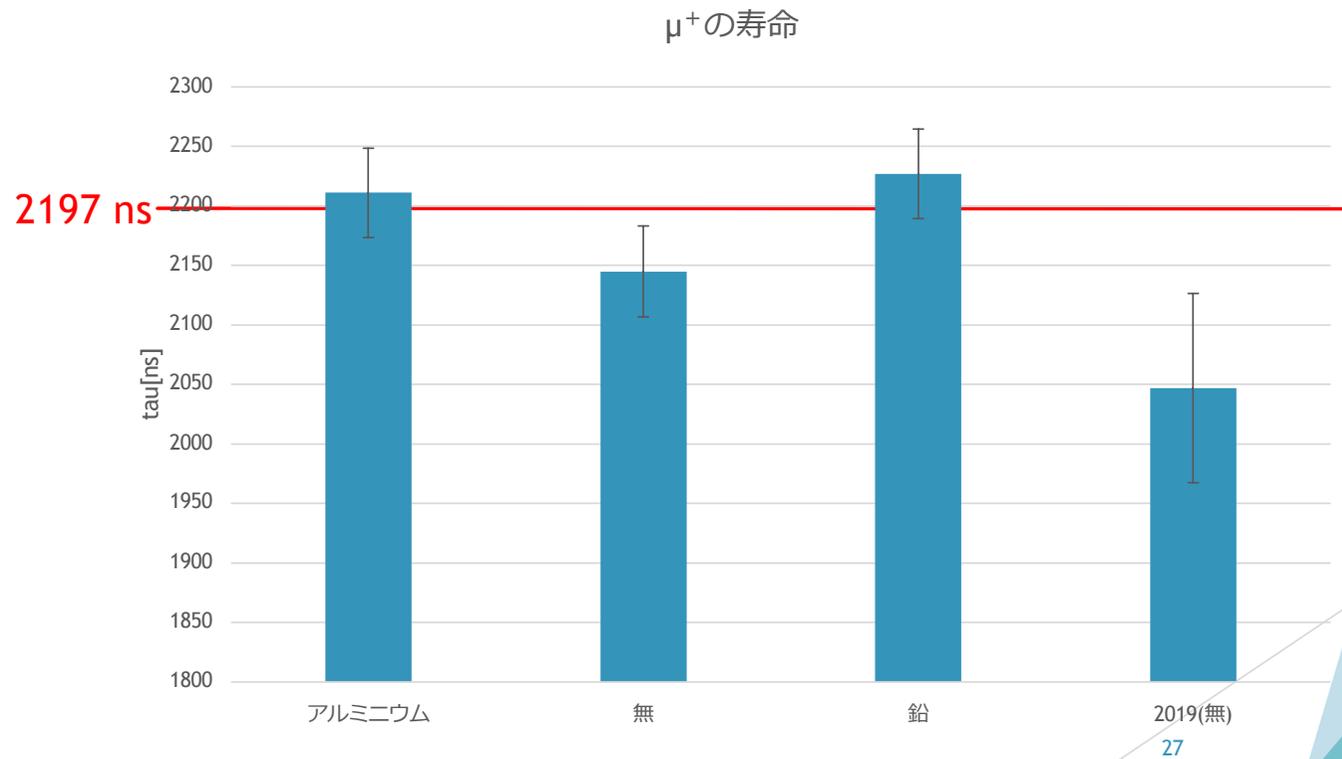
結論)約800Hz

可能性

- ほぼ横から中シンチを叩いた μ 粒子
- 中シンチ内を通った自然放射線
- PMTを直接叩いた何か
- 単なるPMTの不調
- シンチ内の不純物



1つのexpでFitした時の寿命



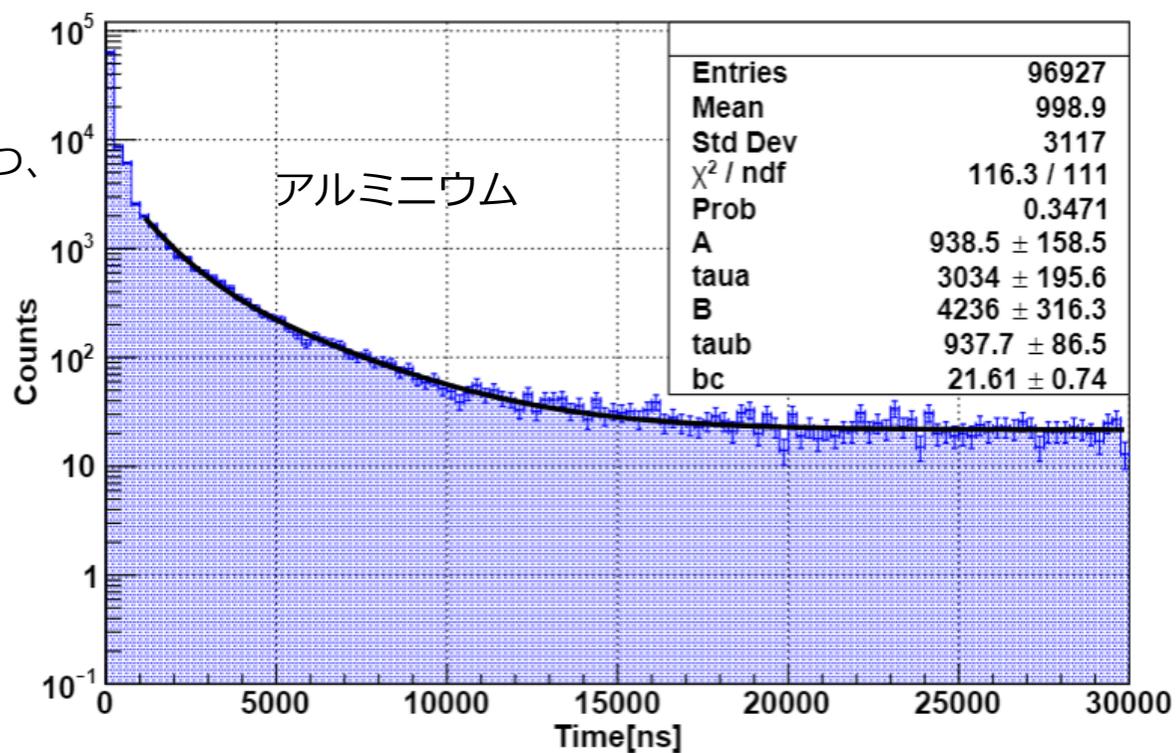
2つのexp関数でのFit

条件

- Fitにはexp関数を2つ用いる
- TDC信号が上シンチで1つ、中シンチで2つ、下シンチで0個のものを取り出す
- τ^- の効果を見たいためアルミニウムで1000 nsをFitting開始にしている

期待値

taua 2197 ns
taub 864 ns



AIのAとBの比の考察

- ▶ 空気シャワー中の $k \equiv \mu^+/\mu^-$ は 1.26 ± 0.15 Agafonova et al., arXiv:1311.6995

$$\frac{dN_{Collapse}}{dt} = \frac{1.26N}{\tau^+} \exp\left(\frac{-t}{\tau^+}\right) + \frac{N}{\tau^-} \exp\left(\frac{-t}{\tau^-}\right)$$

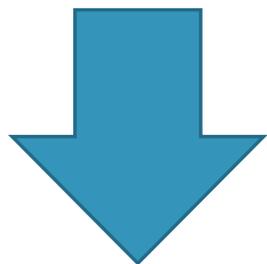
- ▶ 一方フィッティングの式は

$$A \exp\left(\frac{-t}{\tau^+}\right) + B \exp\left(\frac{-t}{\tau^-}\right) + C$$

なので、

$$A : B = \frac{1.26}{\tau^+} : \frac{1}{\tau^-} \simeq 0.496 : 1$$

- ▶ $A = 938.5 \pm 158.5, B = 4236 \pm 316.3$ で、大きくなりすぎてしまった



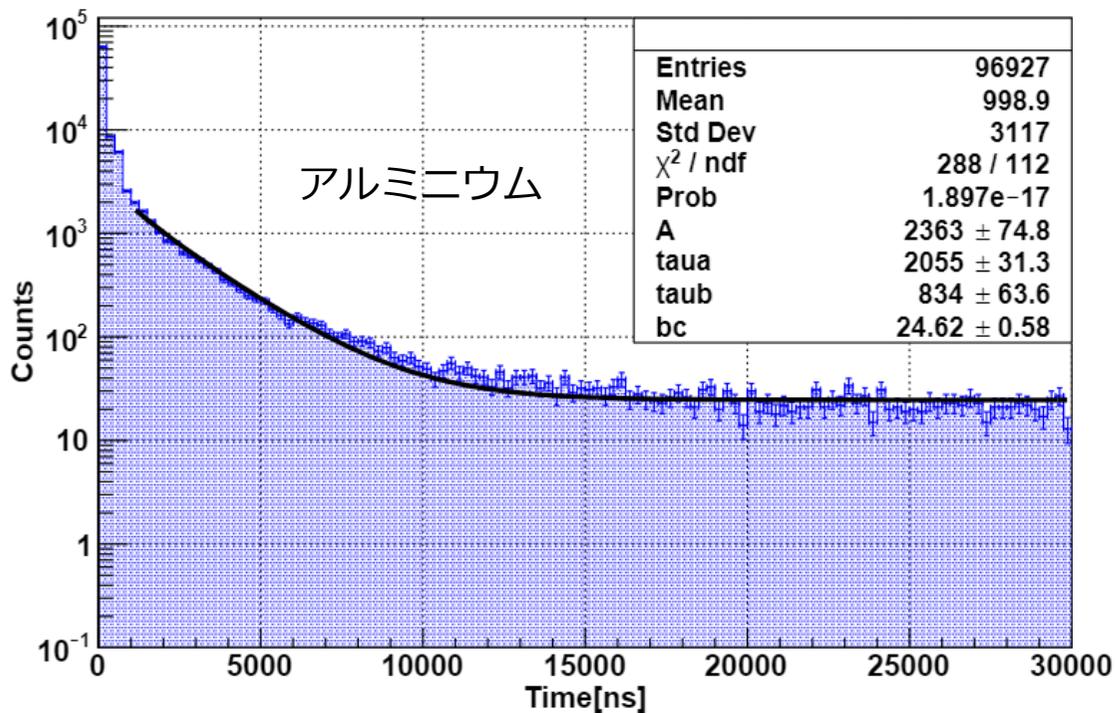
$$A/B = 0.22 \pm 0.05$$

- ▶ 2つのexp関数でのフィッティングでは表しきれない何かが潜んでいそう

A:Bを固定してFitしてみる

$$A : B = \frac{1.26}{\tau^+} : \frac{1}{\tau^-} \simeq 0.496 : 1$$

アルミニウムでは μ^+ と μ^- がグラフ上で差別化されているため、2成分を用いてFitができそう

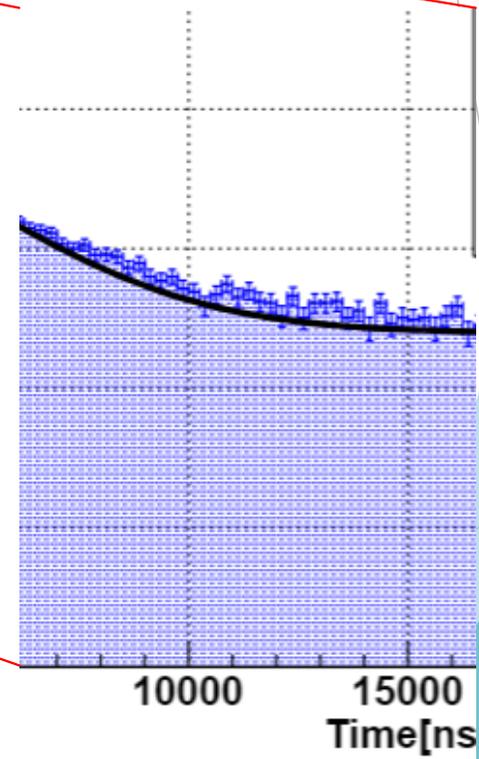
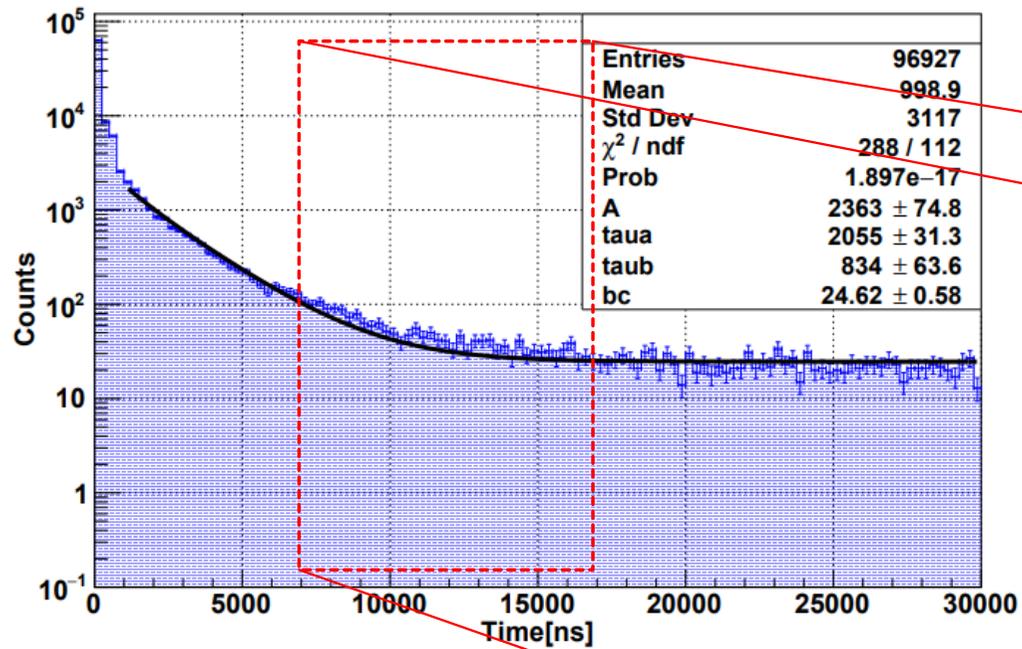


Fitが
うまくいかなかった

τ^+ 2055 \pm 31.3 ns
 τ^- 834 \pm 63.6 ns

期待値
 τ^+ 2197 ns
 τ^- 864 ns

10000 ns付近のFitとズレについて



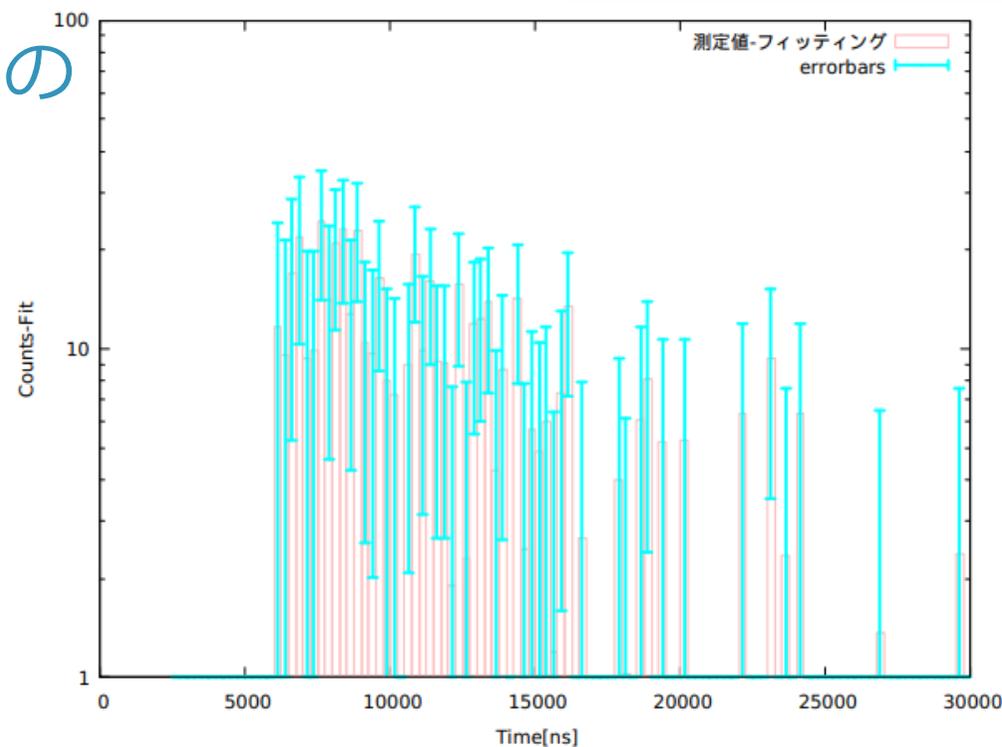
AIの生データから フィッティング結果を引いたもの

6000 ~ 17000 ns に何かが見えた



新粒子の存在！？

ではなく、数 μ s 付近でのアフターパルスによりデータが急峻になった影響で、バックグラウンド手前のデータがうまくフィッティングされなかったと考えられる

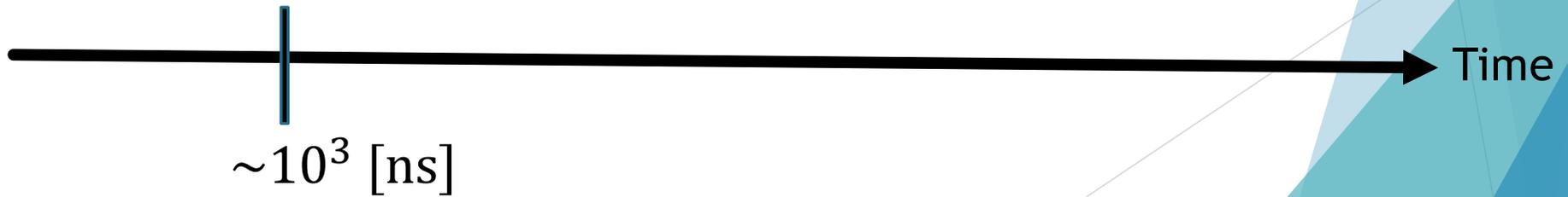


黒線：本来のFit関数。

青い領域：アフターパルスの遅い成分。

赤線：影響を受けたFit関数。

(青い領域は誇張して描写)



フェルミ理論

- ▶ B崩壊をうまく説明するためフェルミが電磁相互作用からの類推で提唱した。
- ▶ 今回観測する μ 粒子のB崩壊においては、ラグランジアン of 相互作用項は次のようになる。

$$-\mathcal{L}_I = \frac{G_F}{\sqrt{2}} [\bar{\nu}_\mu \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \mu] [\bar{e} \gamma_\mu (1 - \gamma^5) \nu_e]$$

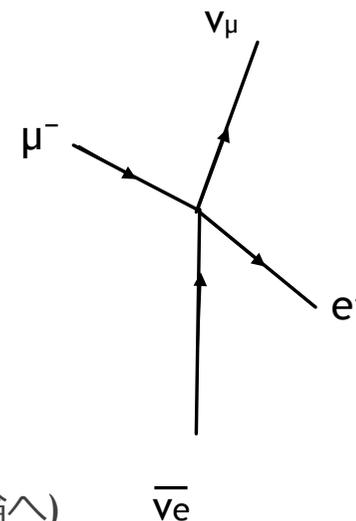
(中間状態の仮想粒子wボソンを考えておらず、100GeV程度以上の高エネルギー領域では破綻するがそれ以下のエネルギー領域では崩壊現象をうまく記述できる。→電弱統一理論へ)

- ▶ これをもとに全崩壊率 Γ を最低次で計算すると次のようになる。

$$\Gamma = \frac{G_F^2 m_\mu^5}{192\pi^3} f\left(\frac{m_e^2}{m_\mu^2}\right)$$

(ここで $f(x) = 1 - 8x + 8x^3 - x^4 - 12x^2 \log x$)

これによりミューオンの寿命 $\tau (=1/\Gamma)$ が求まればフェルミ結合定数を求めることができる。



- ▶ フェルミ結合定数はWボソンの質量 m_W 、弱い相互作用の結合定数 g と次の様な関係がある。

$$\frac{G_F}{(\hbar c)^3} = \frac{\sqrt{2}}{8} \frac{g^2}{m_w^2}$$

- ▶ またヒッグス場の真空期待値 v と

$$v = (\sqrt{2}G_F/(\hbar c)^3)^{-\frac{1}{2}}$$

という関係を持つ。

→フェルミ結合定数を精度よく求めることで標準模型の基本的なパラメータの値を求めることができる。

寿命からフェルミ結合定数を決定する。

- ▶ 電子、ミューオンの質量は文献値を用いる

ミューオンの寿命は今回鉛を挟んだ時に求められた

$\tau = 2227 \pm 37.6$ [ns] を用いる。

電子、ミューオンの質量の誤差は寿命の誤差より小さいとして無視する。

これらを先のフェルミ結合定数の表式に代入すると、

$$G_F^2 = \frac{192\pi^3}{\tau_\mu m_\mu^5} \left(f \left(\frac{m_e^2}{m_\mu^2} \right) \right)^{-1} \quad (1)$$

$$= 1.336(22) \times 10^{-10} [\text{GeV}^{-4}] \quad (2)$$

よって、

$$G_F = 1.156(10) \times 10^{-5} [\text{GeV}^{-2}]$$

と求まる。

文献値 $G_F = 1.1663818(7) \times 10^{-5} [\text{GeV}^{-2}]$ Webber et al, PRL 106, 041803 (2011)

まとめ 今後

目的： μ^- の原子核捕獲特性を使い μ^+ の寿命の測定

▶ まとめ

μ^+ の寿命 (1関数Fit)	アルミニウム	$2211 \pm 37.5 \text{ ns}$) 1σ の範囲で一致	文献値	2197 ns
	鉛	$2227 \pm 37.6 \text{ ns}$			
	シンチのみ	$2145 \pm 38.2 \text{ ns}$			

フェルミ結合定数 $G_F = 1.156(10) \times 10^{-5} [\text{GeV}^{-2}]$

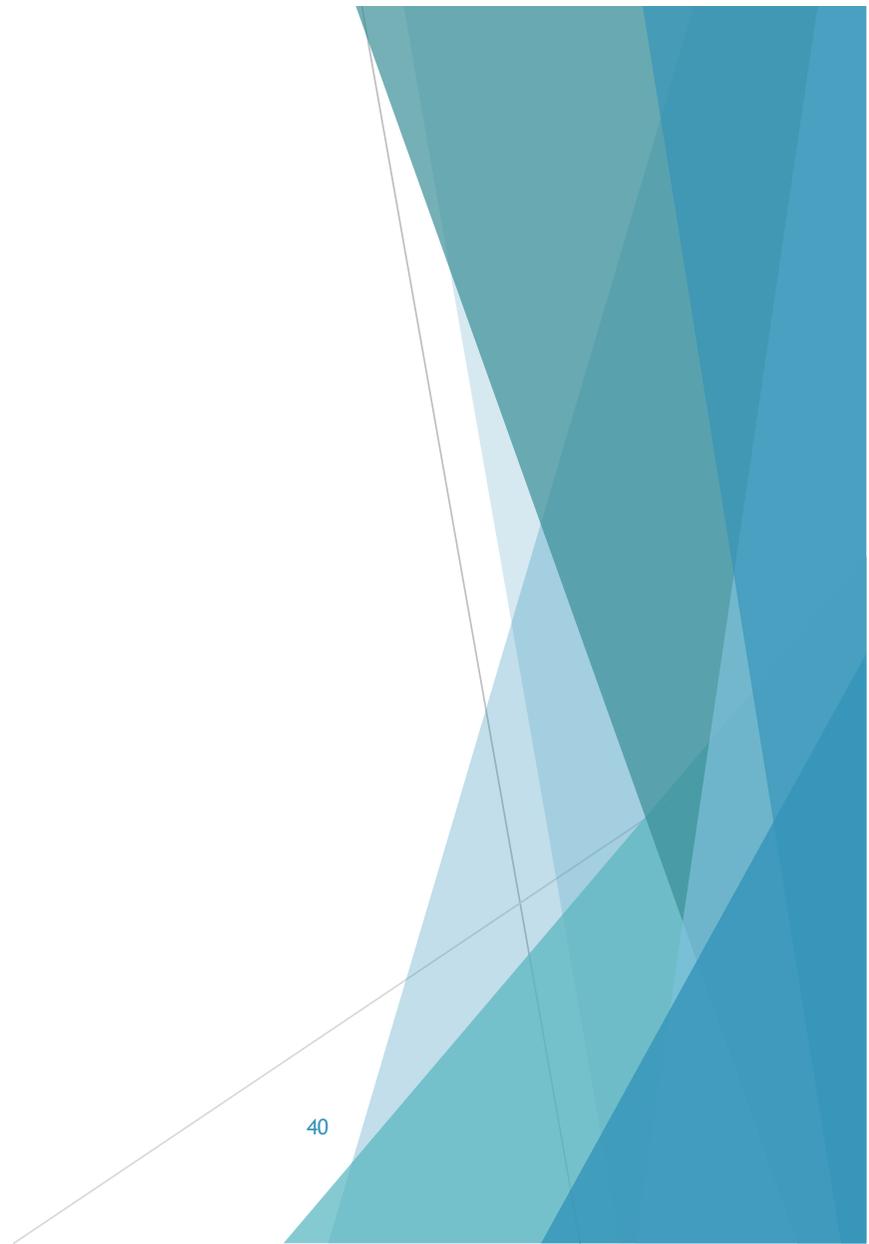
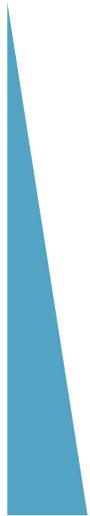
アルミニウムの2成分Fitがうまくいかなかったのは アフターパルスが影響

▶ 今後

PMTを交換することでアフターパルス、Fitのズレを減らせる



ご清聴頂きありがとうございました



40

2つのexp関数でのFit

条件

- Fitにはexp関数を2つ用いる
- TDC信号が上シンチで1つ、中シンチで2つ、下シンチで0個のものを取り出す
- τ の効果を見たいためアルミニウムでは1000 nsをFitting開始にしている

