

# 宇宙線ミュオンの観測を通じた ミュオンの寿命測定

石井大貴 佐藤寛太 西野純矢 長谷川瑠巳

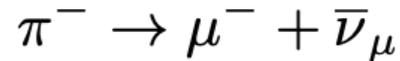
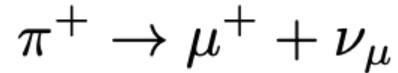
# 目次

1. 背景
2. 昨年の先行研究(2021)
3. 目的
4. 測定方法
5. 測定結果
6. 考察
7. まとめ
8. 今後の展望

# 1. 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

・パイ中間子の崩壊によってミューオンが生成



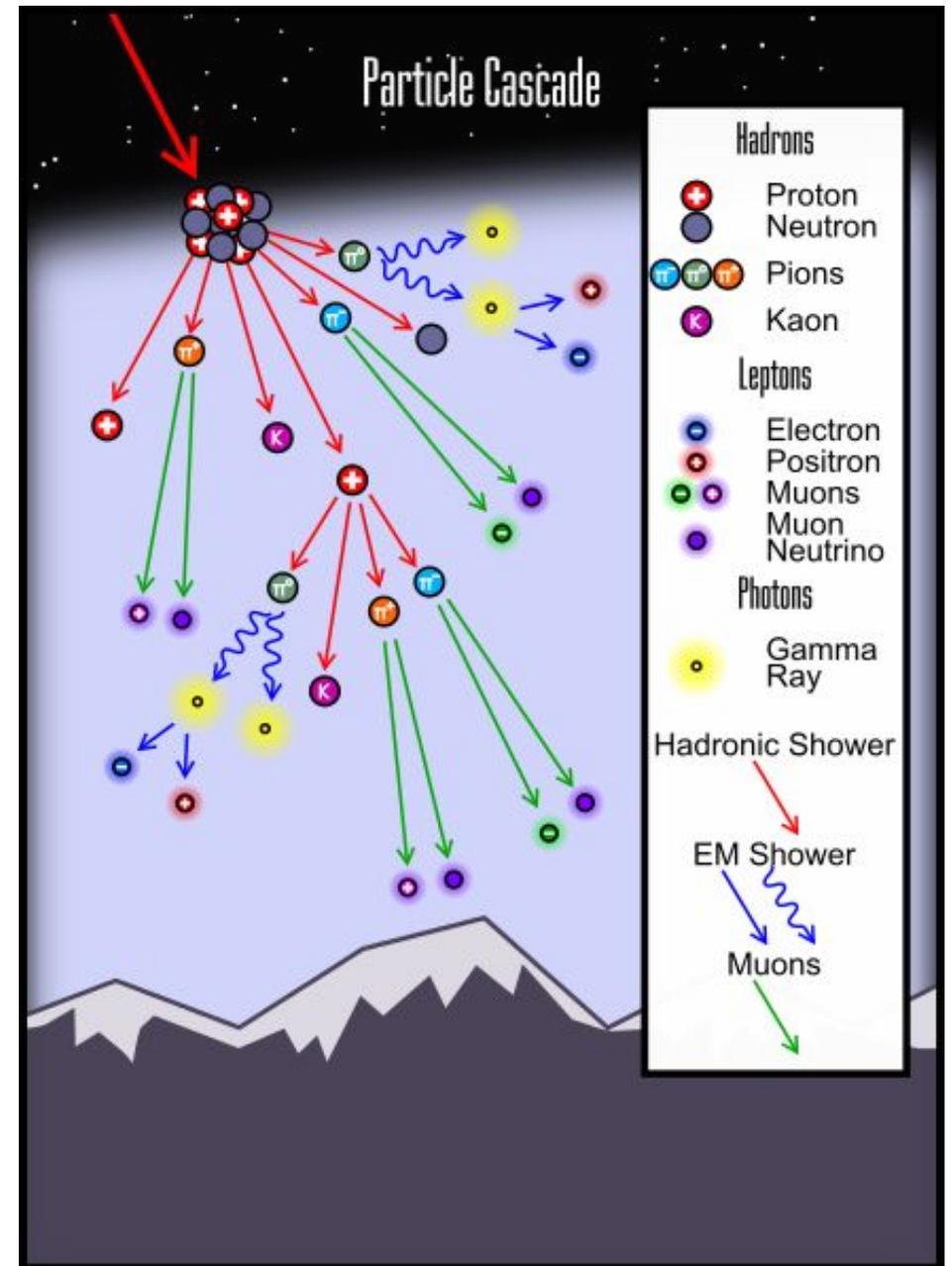
・地表に達する宇宙線の約7割はミューオン。

・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。

・空気シャワー中のミューオンの数

100TeV陽子 ~50個

100TeV $\gamma$ 線 ~1個



# 1. 背景 ミューオンについて

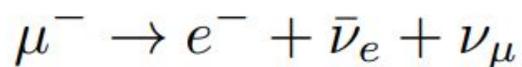
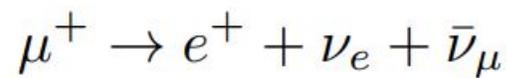
ミューオンの質量  $105.66 \text{ MeV}/c^2 (\sim 1.89 \times 10^{-28} \text{ kg})$   
 (電子の約200倍)

スピン  $1/2$

寿命  $2196.9803 \pm 0.0022 \text{ ns}$

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

崩壊



物質との相互作用は強くない



		世代 Generation		
電荷 Charge	スピン Spin	I	II	III
クォーク Quarks	$+2/3$	u up	c charm	t top
	$-1/3$	d down	s strange	b bottom
レプトン Leptons	$-1$	e electron	<b><math>\mu</math> muon</b>	$\tau$ tau
	0	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino

<https://higgstan.com/>

# 1.背景 ミューオン崩壊について

$\mu$ 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

$\tau$ : 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

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

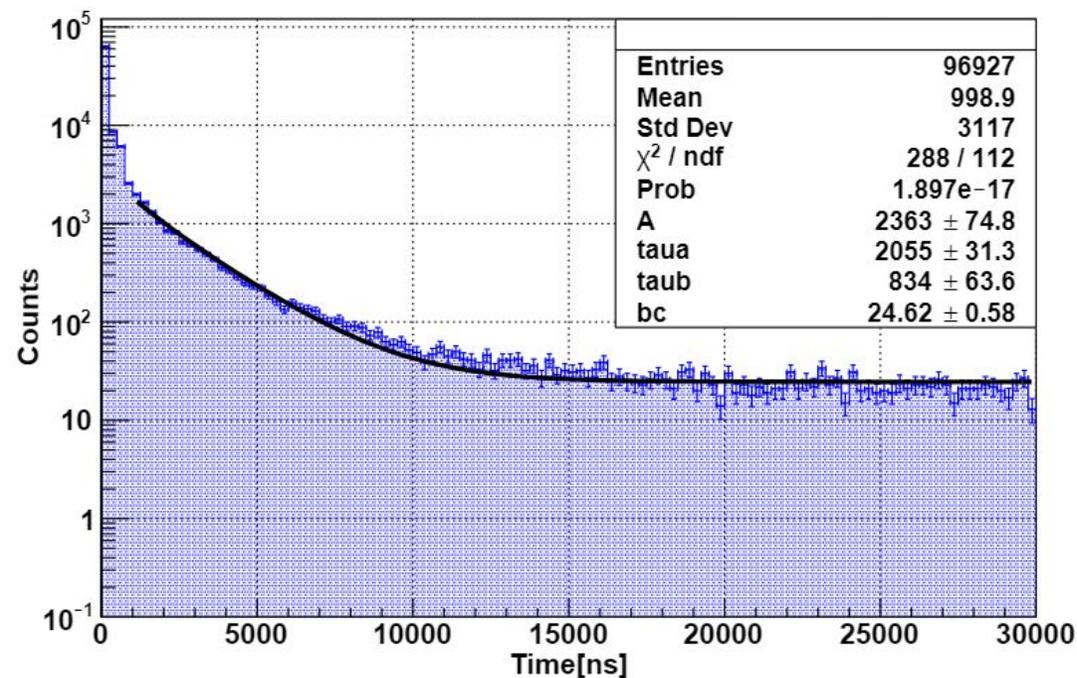
## 2. 去年の先行研究

$\tau^+ = 2055 \pm 31.3$  (stat.) ns (誤差はfitの統計誤差)

期待値 :  $\tau^+$  2197 ns

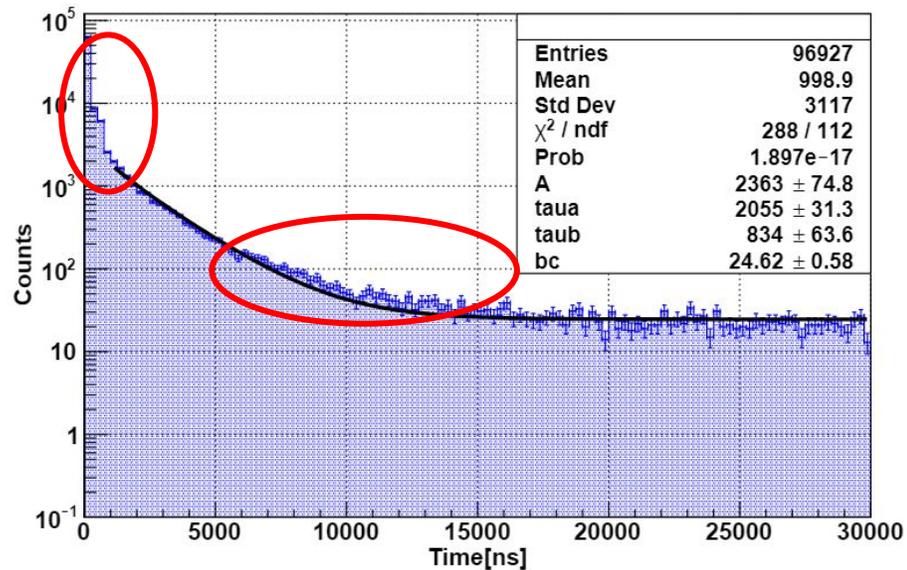


2成分のFitが上手くいかず  
測定されたミュオンの寿命は  
実際よりも小さくなった



## 2. 去年の先行研究

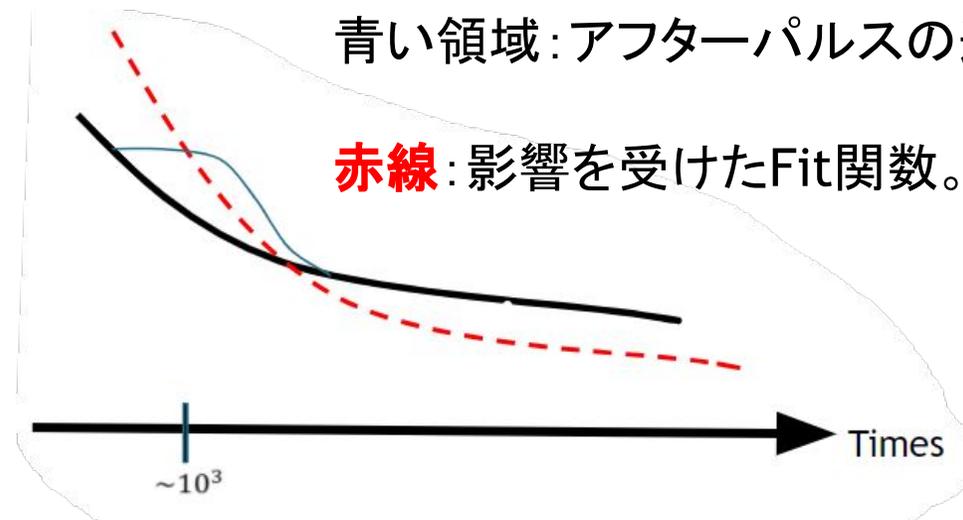
本来のFit関数がアフターパルスにより影響を受けてしまう。



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。



⇒ 光電子増倍管を交換することによってアフターパルスを減らす

## 2. 去年の先行研究

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

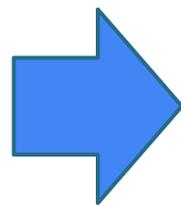
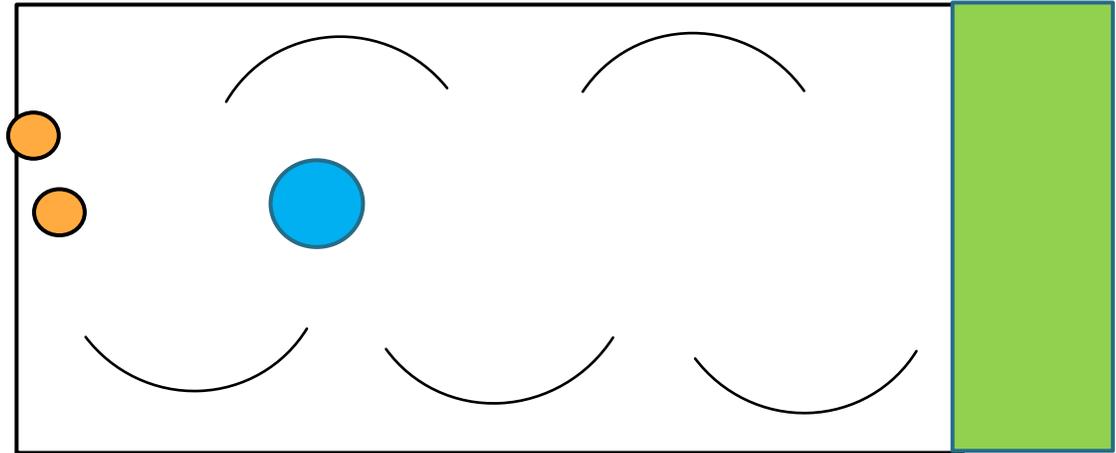


イオンが電場に加速さ  
れ光電面に衝突



衝突で光電子が放出

光電面

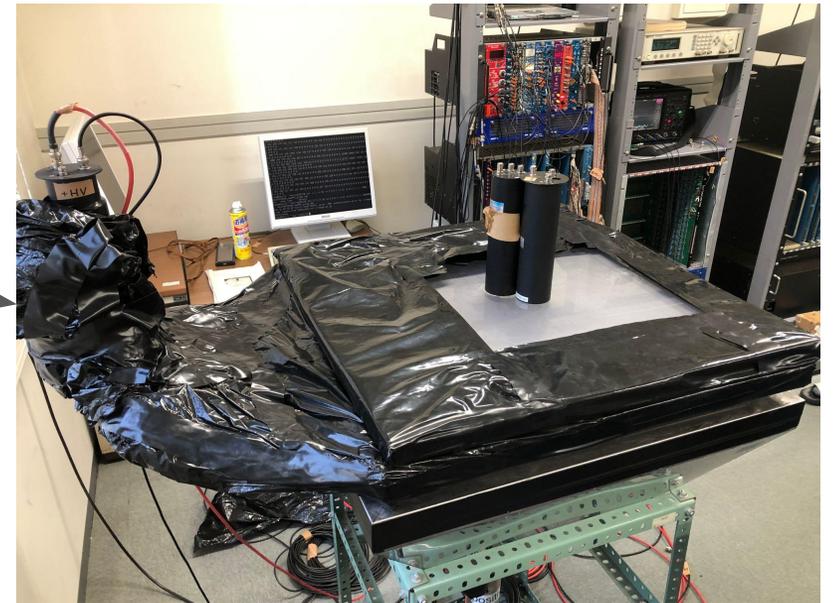


検出された電子がアフターパルスと  
して測定される。

### 3. 目的

アフターパルスの多いPMTを交換し  
ミューオンの寿命を再測定する

中センチのPMT



# 4.測定方法

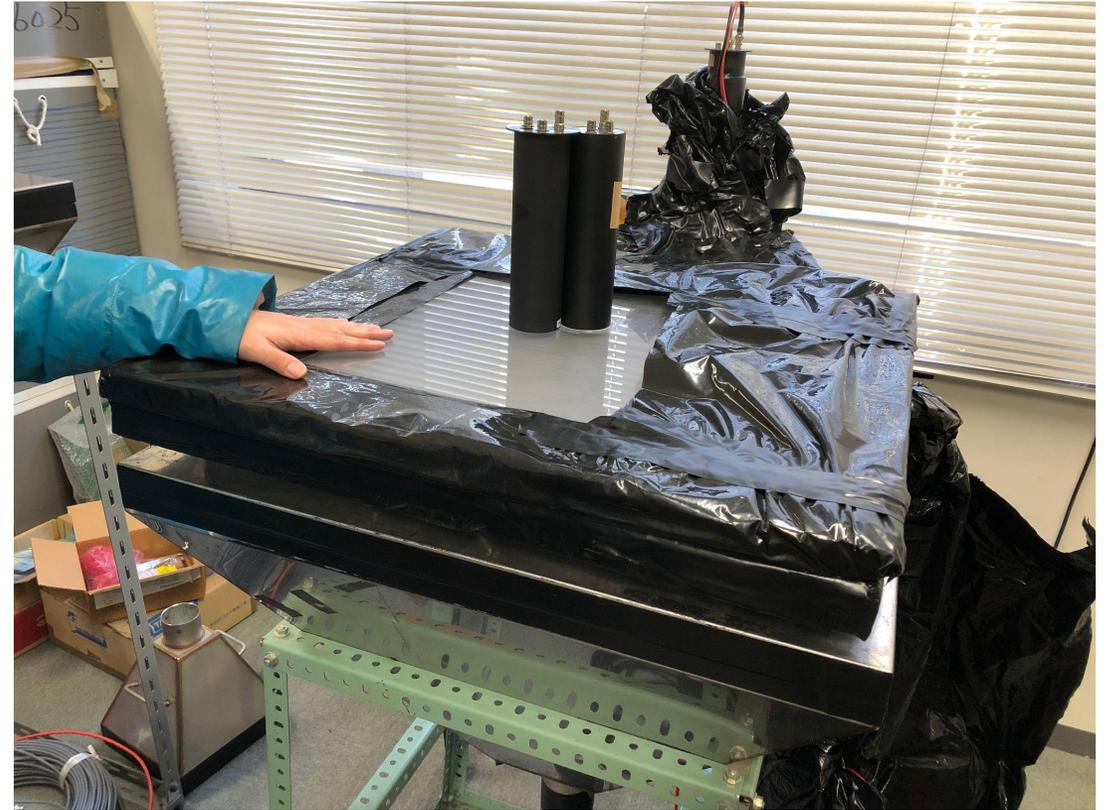
3つのシンチレーターと  
光電子増倍管を用いて測定



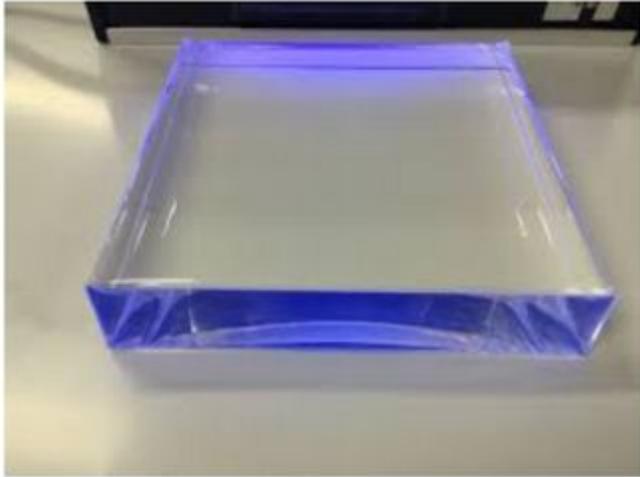
ミュオンが崩壊したイベントのみ抽出



崩壊時間を測定

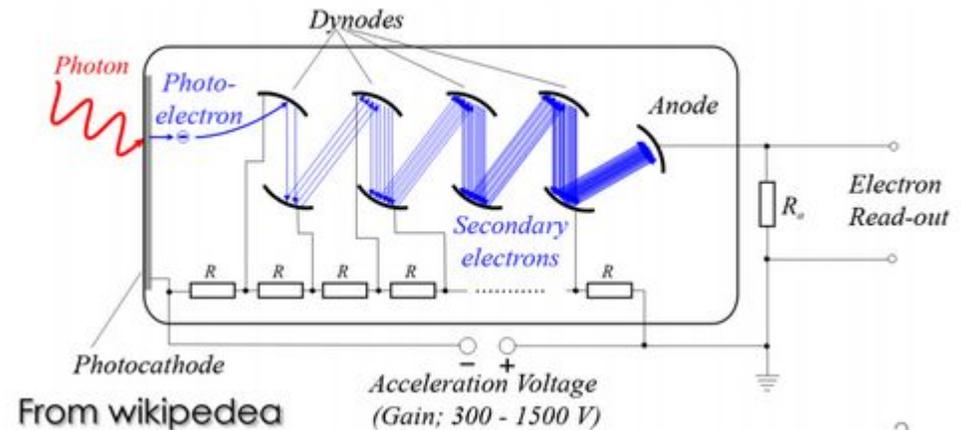
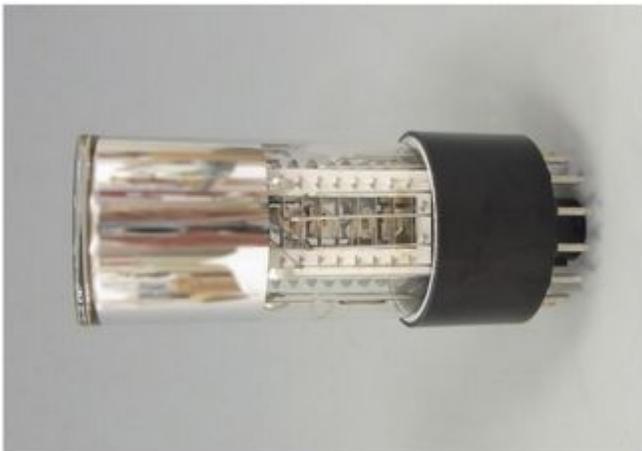


## 4.測定方法 光電子増倍管(PMT)とシンチレーター

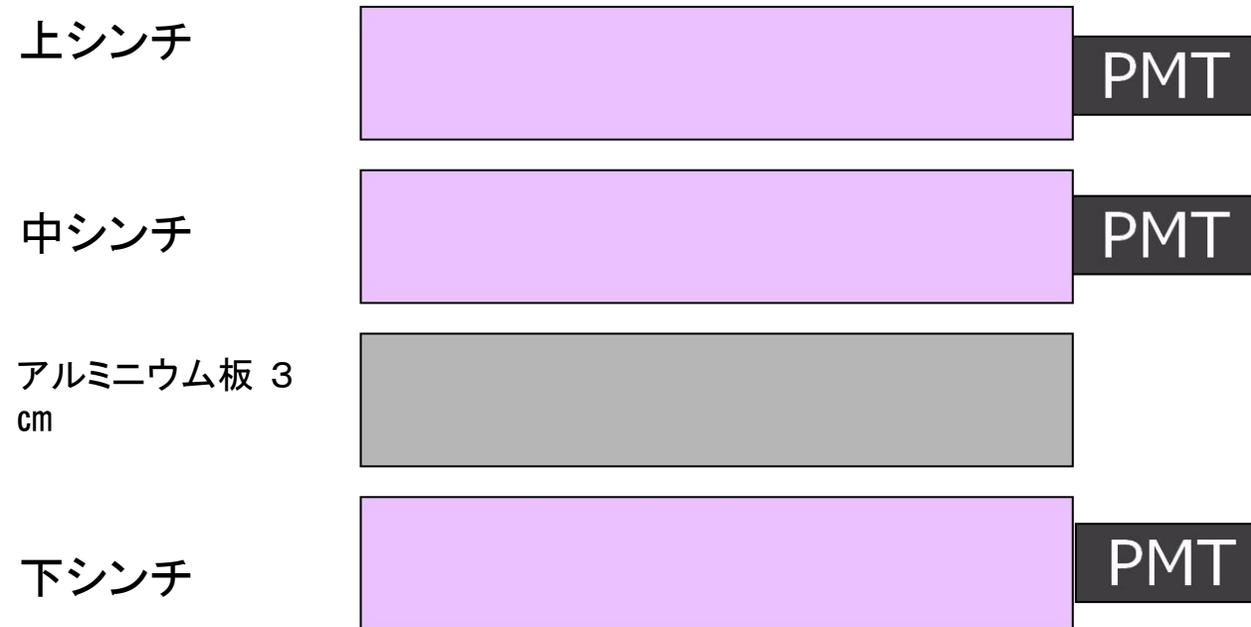


有機シンチレーター(プラスチックシンチレーター)  
蛍光剤(p-ターフェニル[C<sub>18</sub>H<sub>14</sub>])を混ぜた  
プラスチック素材(ポリビニルトルエンなど)

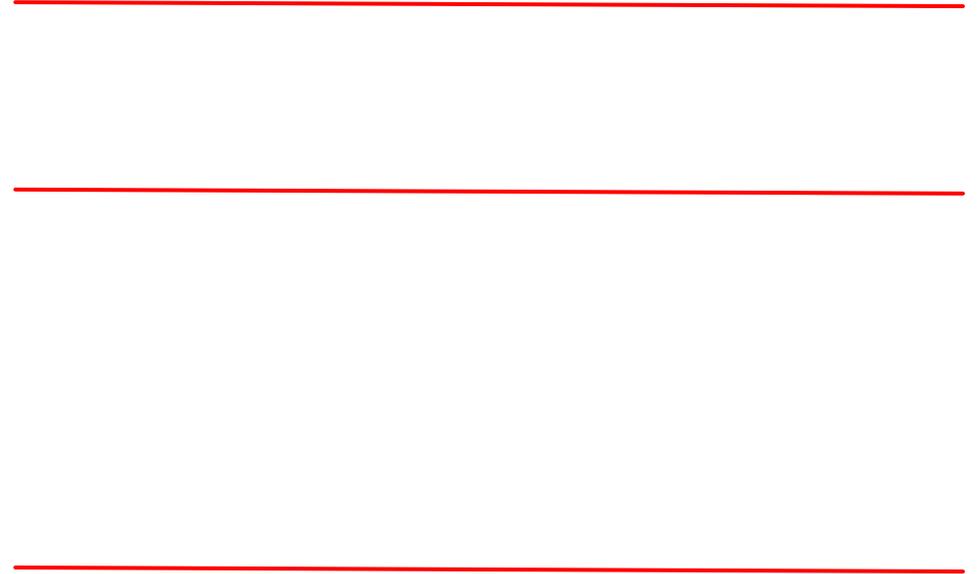
→荷電粒子が通過するとシンチレーション光(～420nm)を放射  
300個／1 cm程度の光子を放射



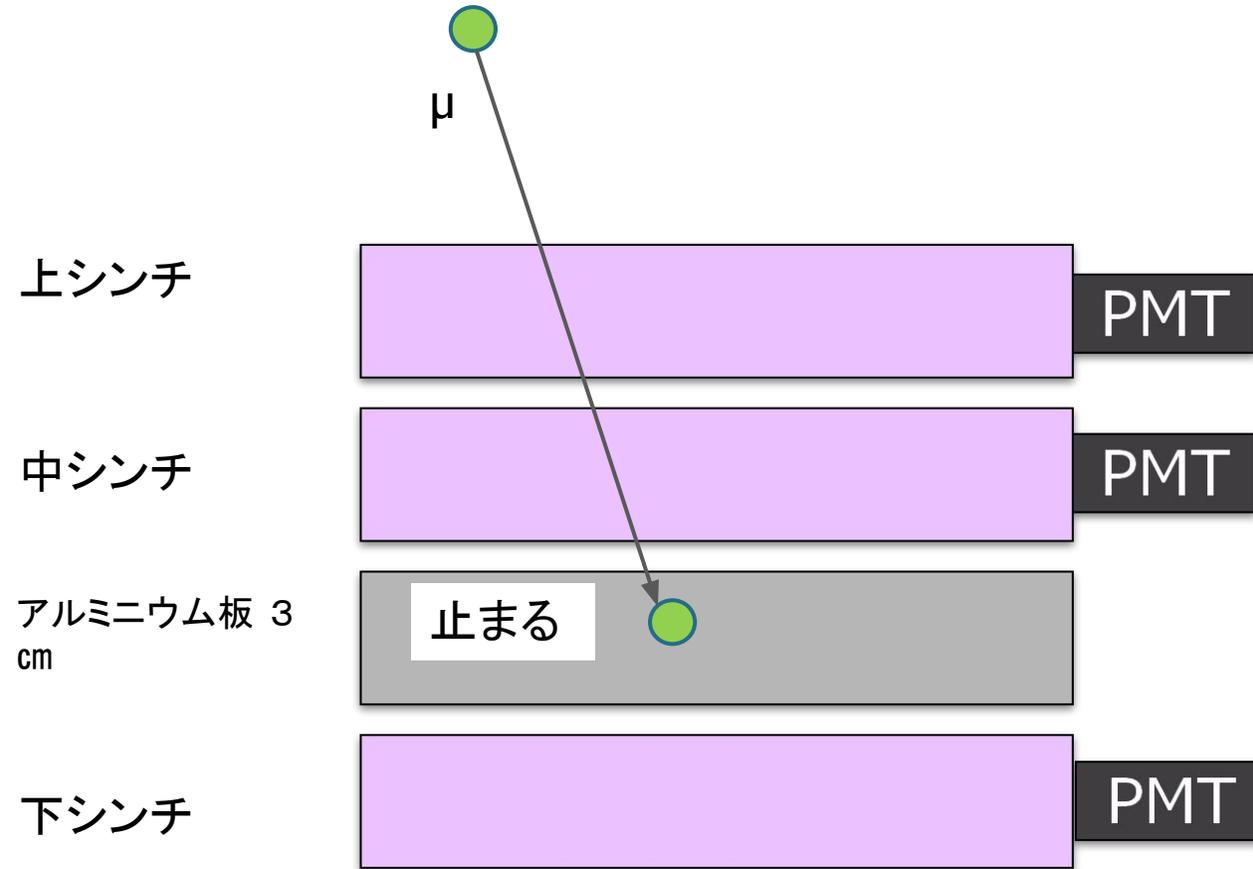
## 4.測定方法 ミューオン寿命の測定法



信号



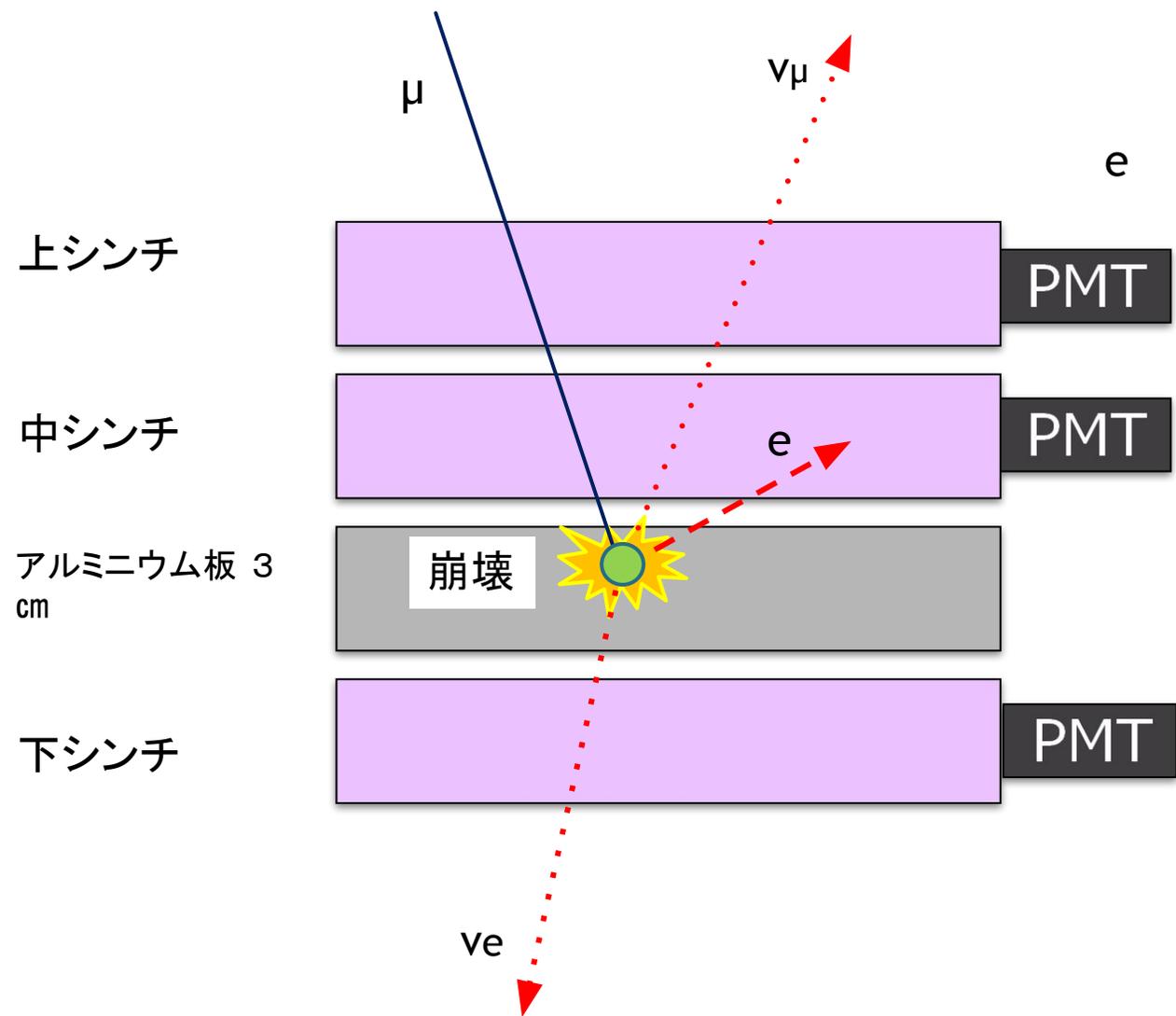
# 4.測定方法 ミューオン寿命の測定法



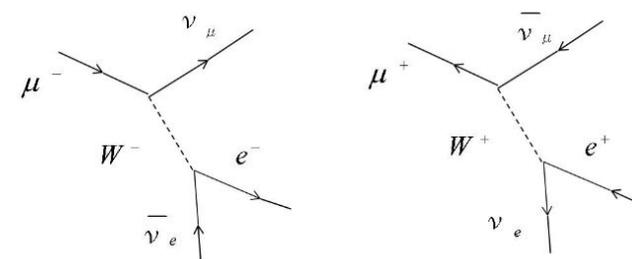
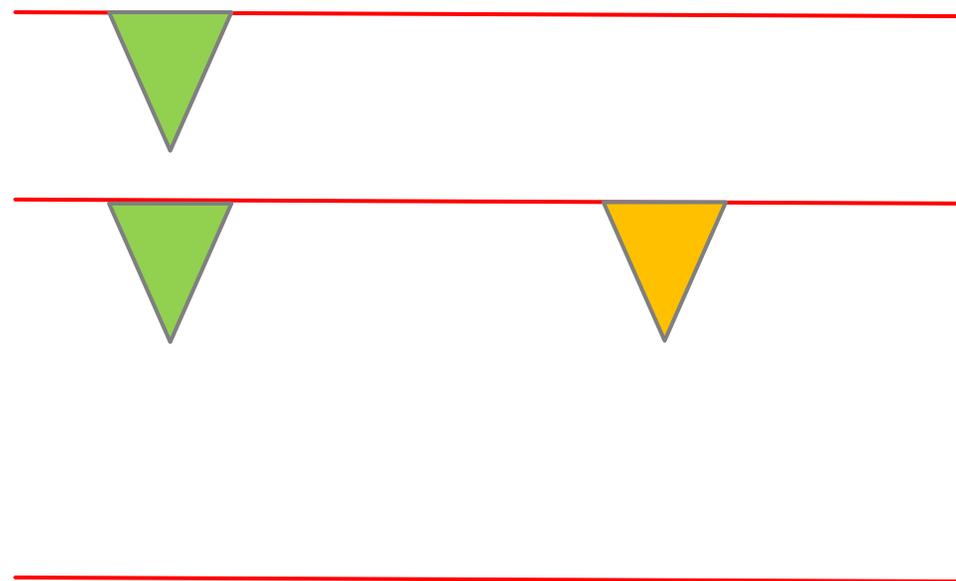
信号



# 4.測定方法 ミューオン寿命の測定法

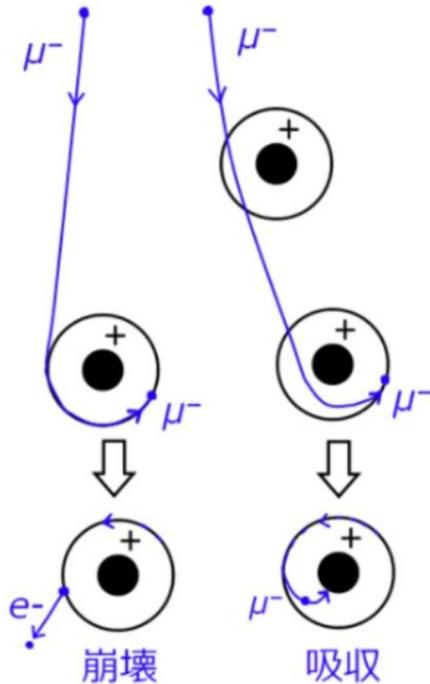


信号



# 4.測定方法 原子核捕獲による $\mu^-$ 寿命の変化

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



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

$\mu^-$ の見かけ上の寿命 $\tau^-$ は

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

消滅する $\mu^-$ とその内崩壊によるものとの比

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

$\mu^+$ は吸収がないため $\tau^+$ については $\tau$ 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。

・ $\mu^-$ 粒子が原子核に吸収される確率は $Z^4$ に比例する

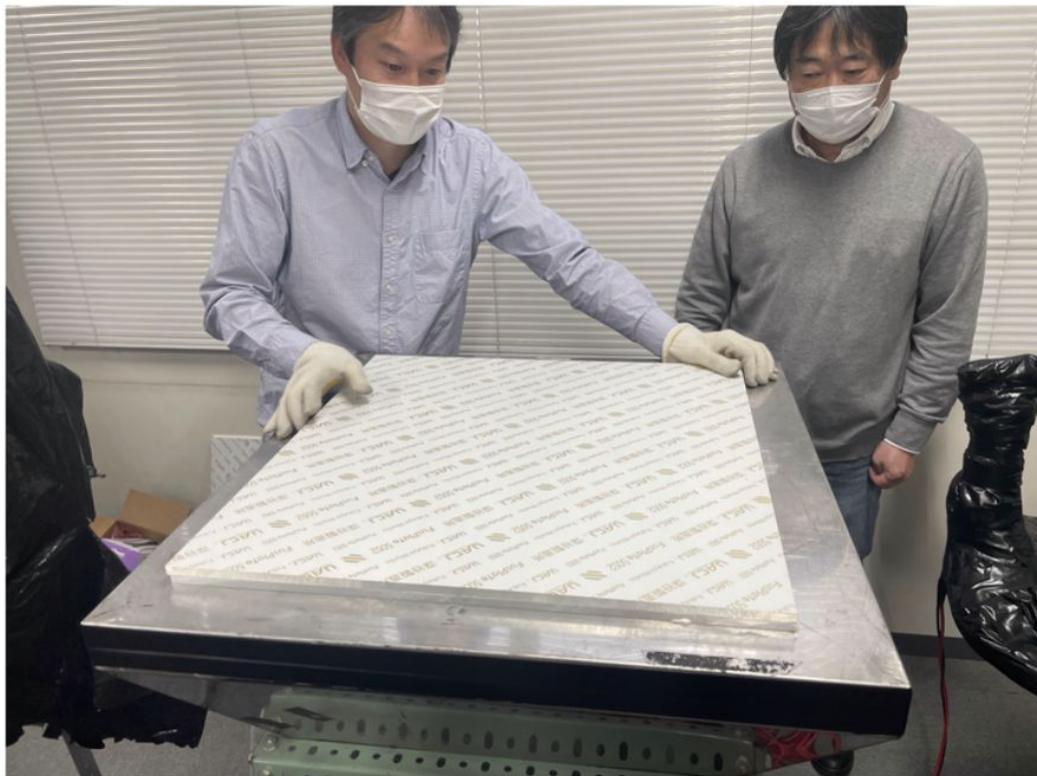
## 4.測定方法 原子核捕獲による $\mu^-$ 寿命の変化

$\tau$ :  $\mu^-$  の見かけ寿命、 $P_{\text{decay}}$ :  $\mu^-$  の崩壊の確率

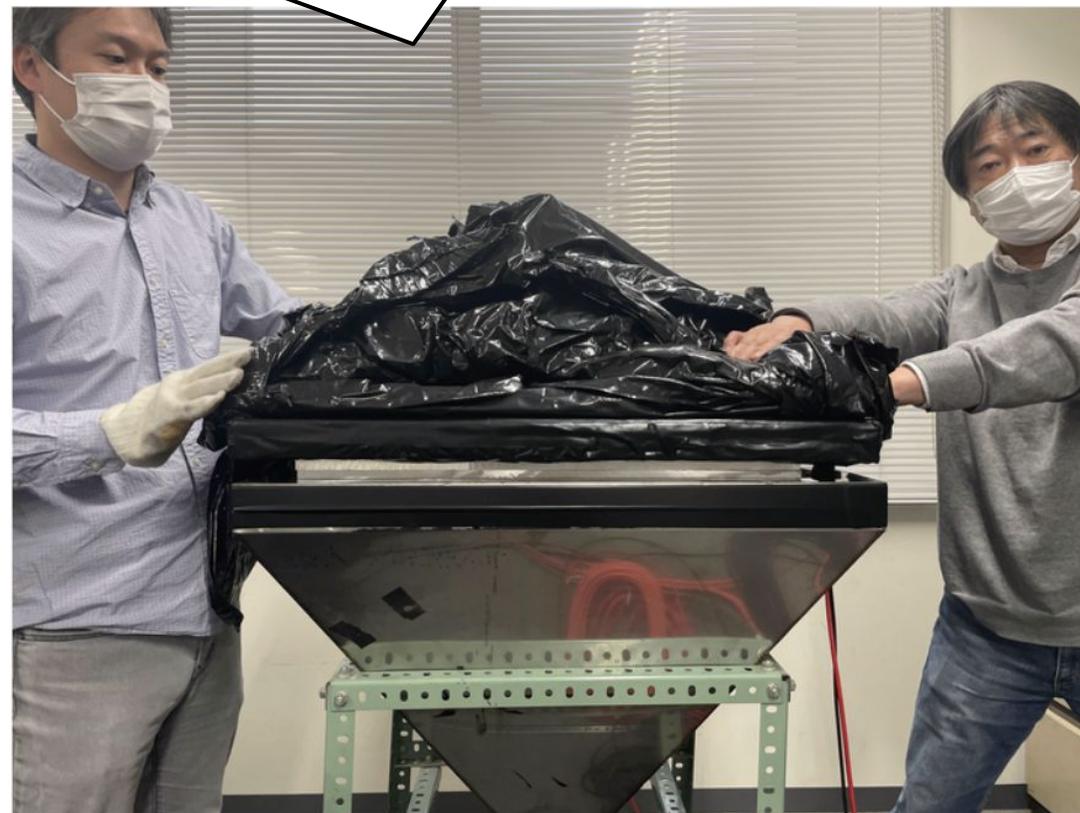
	$\tau^-$ (ns)	$P_{\text{decay}}$
Al	864	0.4
シンチレーターC	2026	0.92

引用元: B Vulpescu et al 2001 J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 27 977

## 4.測定方法 測定の様子



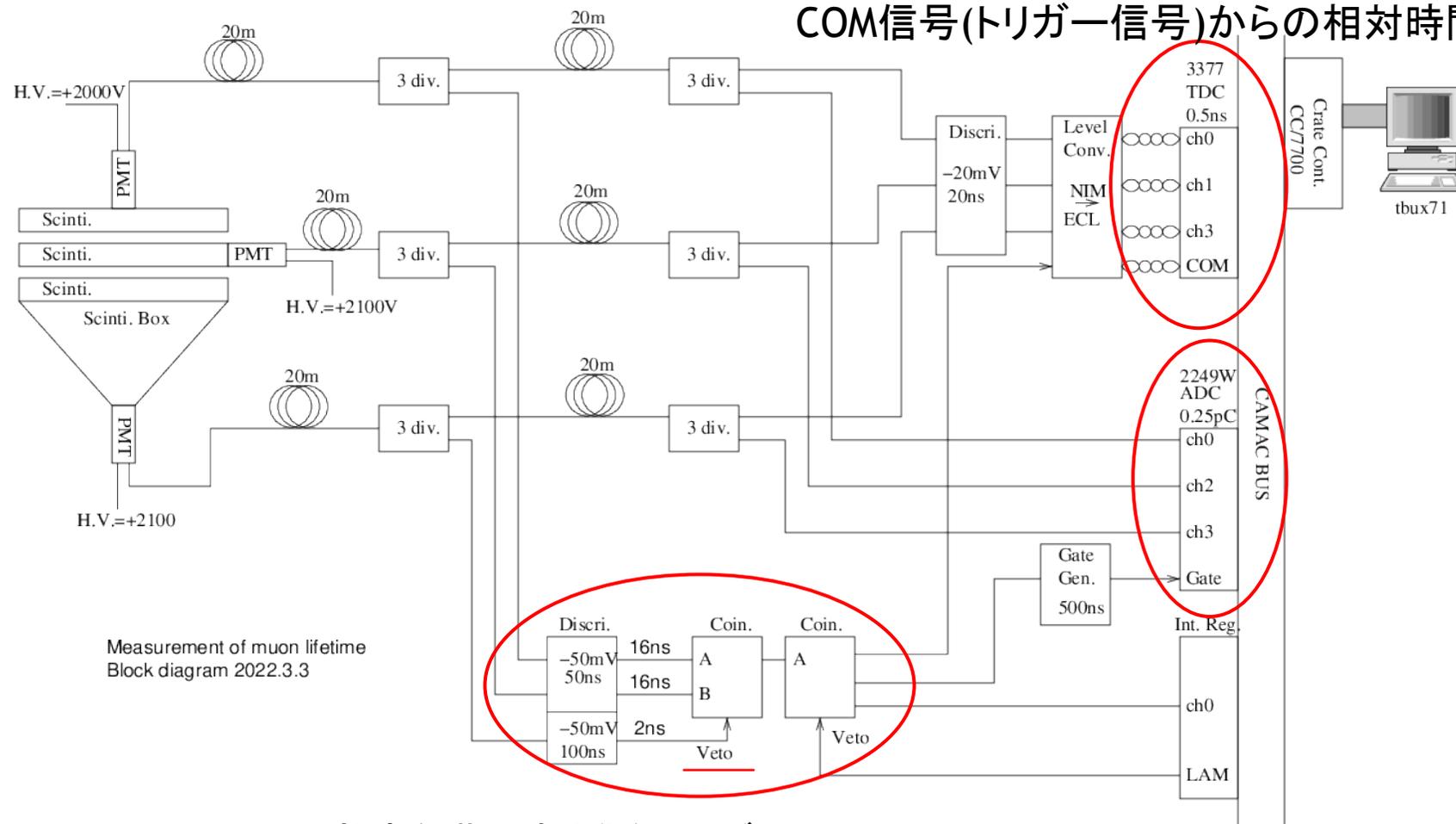
PMT(光電子増倍管)に  
信号以外の光が入らないように  
黒いビニールと布で覆う



取得したデータを共有し、オンラインで解析

# 4.測定方法 (ミュオン寿命測定)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



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

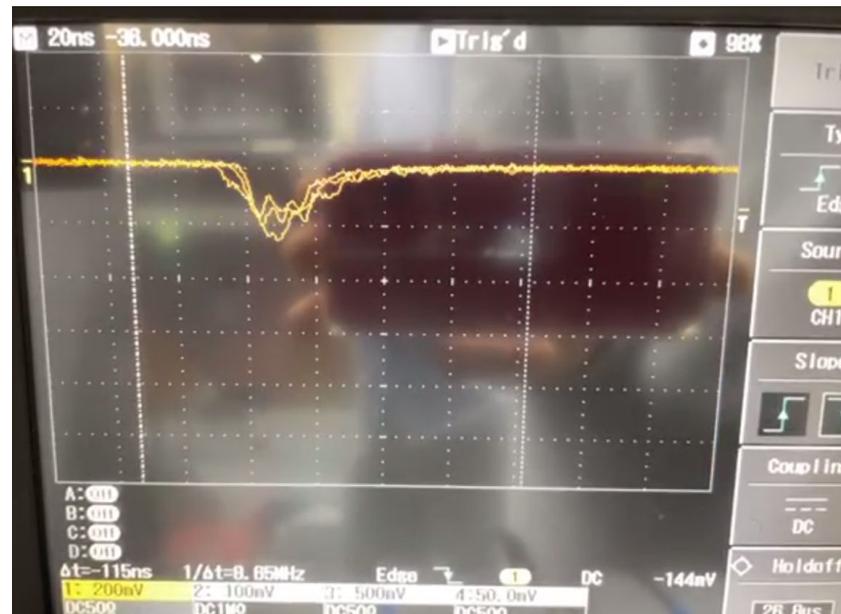
## 4.測定方法 回路による信号のデジタル化

### ADC

フォトマルからの電気信号をデジタル化して取得

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

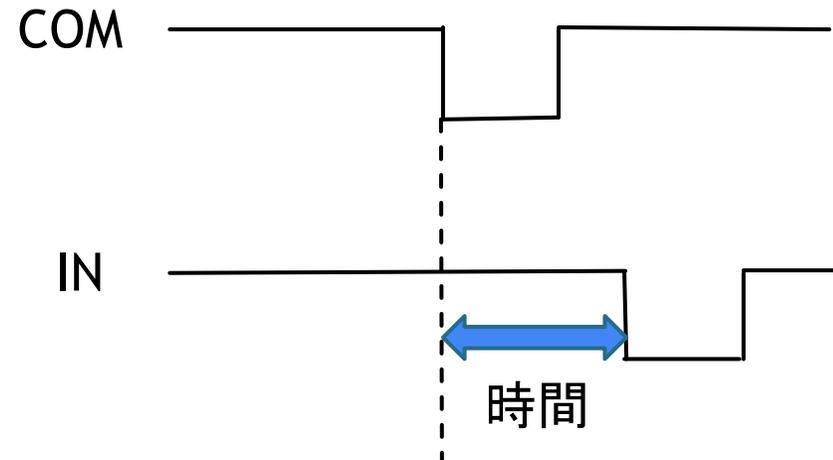
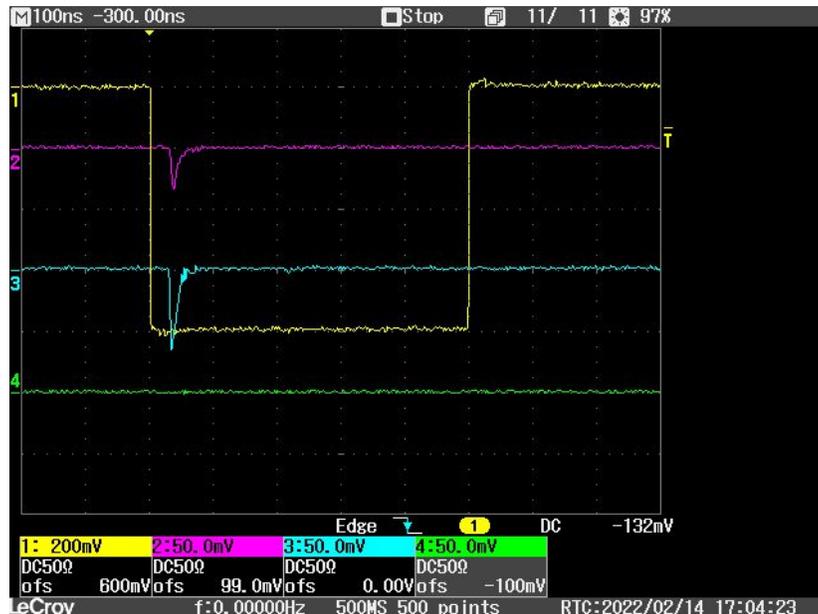
ミュオンがシンチレーターを通過した際に落としたエネルギーが分かる



# 4.測定方法 回路による信号のデジタル化

## TDC

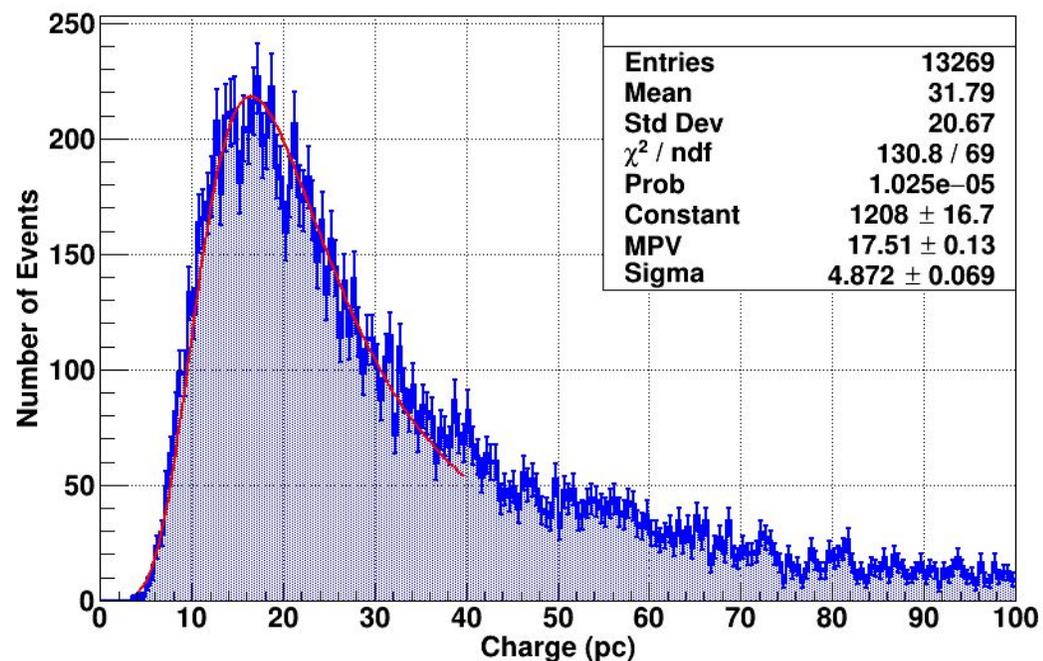
COMに信号が入ってからINに信号が入るまでの時間をデジタルに変換  
ミューオンの寿命のデータをデジタル値として取得



# 5. 測定結果 ランダウ分布(AI有無の比較\_2022年)

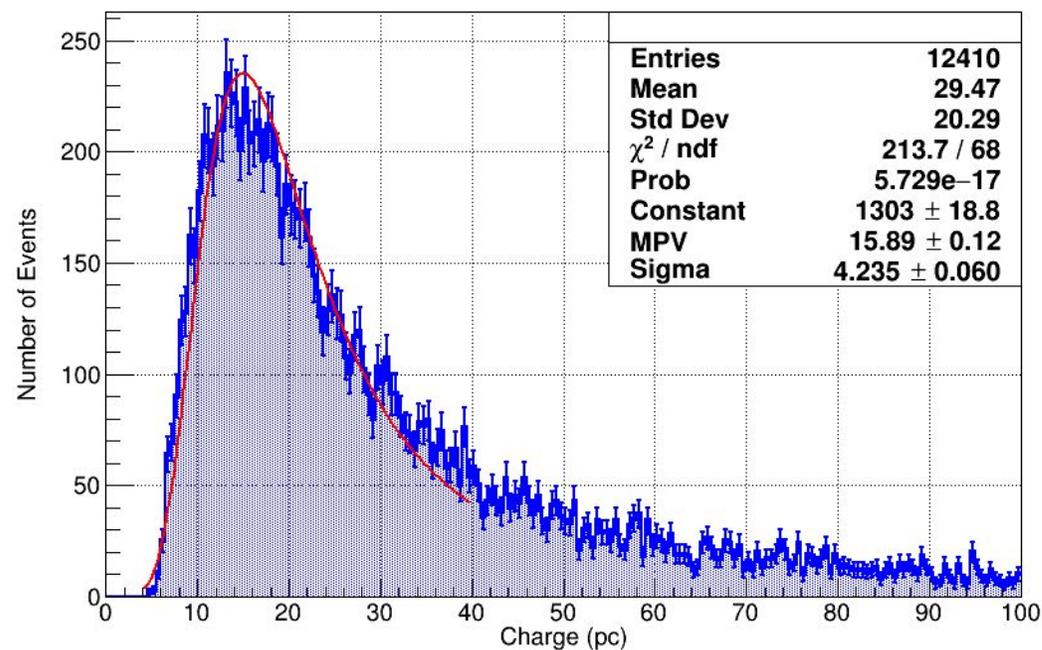
## AI あり(2022年)

Upper Charge



## AI なし(2022年)

Upper Charge



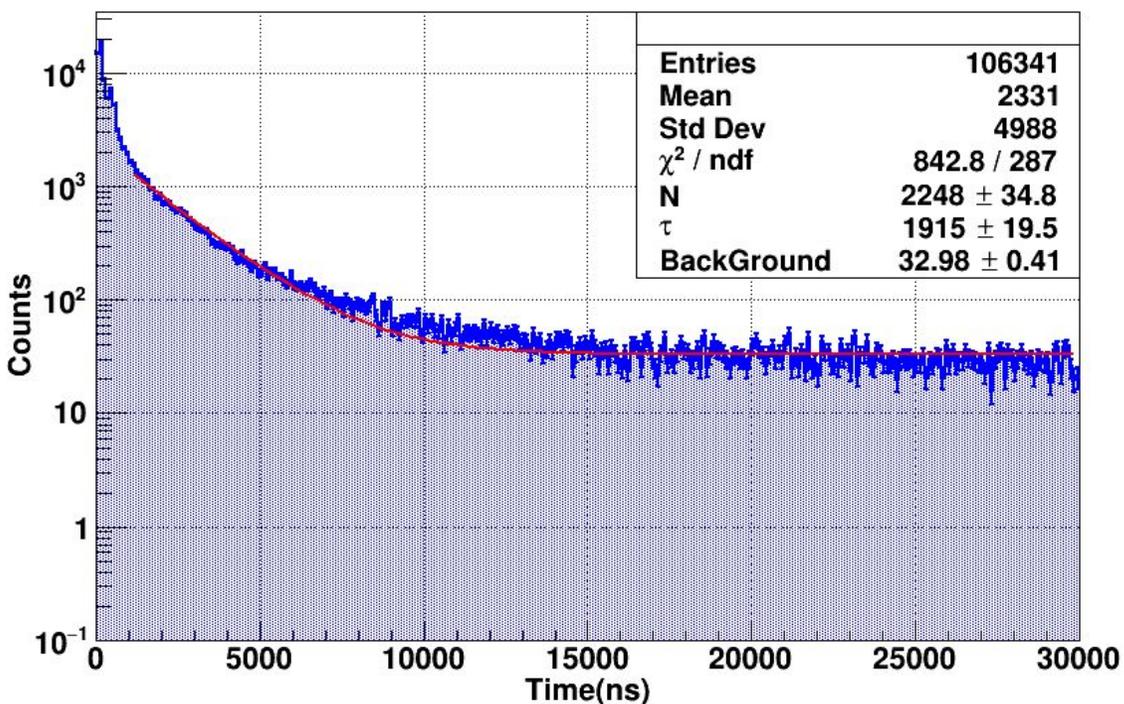
# 5. 測定結果 1つのEXP関数でフィット(AI有り\_2021と2022の比較)

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

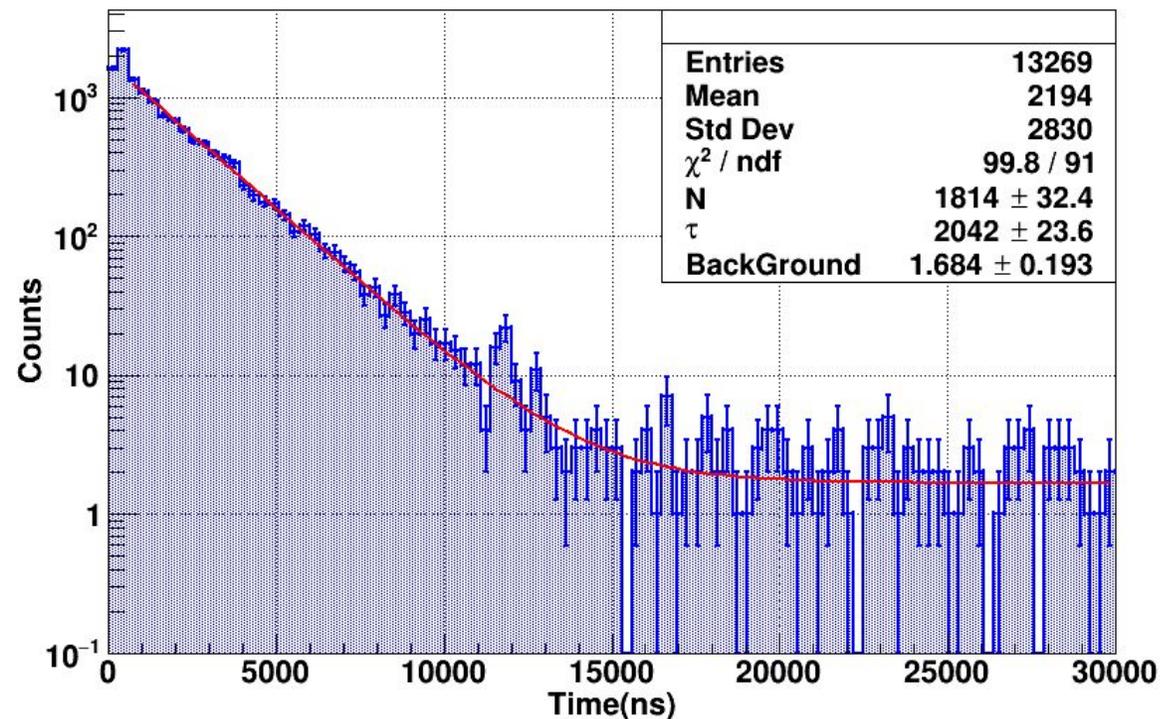
AIあり (2021年)  $\tau = 1915 \pm 19.5$  [ns]

AIあり (2022年)  $\tau = 2042 \pm 23.6$  [ns]

Decay Time



Decay Time



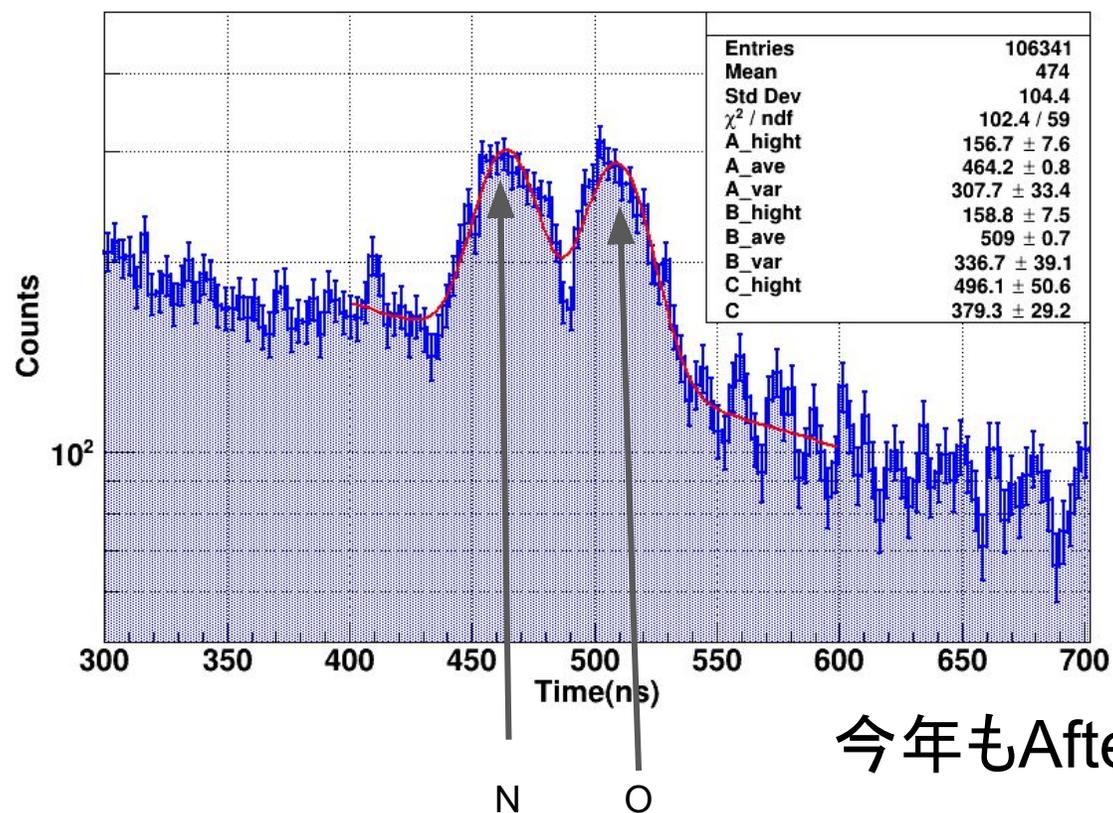
# 5. 測定結果 After pulse 比較

$$A_1 \exp\left\{-\frac{(t - A_2)^2}{A_3}\right\} + B_1 \exp\left\{-\frac{(t - B_2)^2}{B_3}\right\} + C_1 \exp\left(-\frac{t}{C_2}\right)$$

2つのGaussianと1つのexpでfit

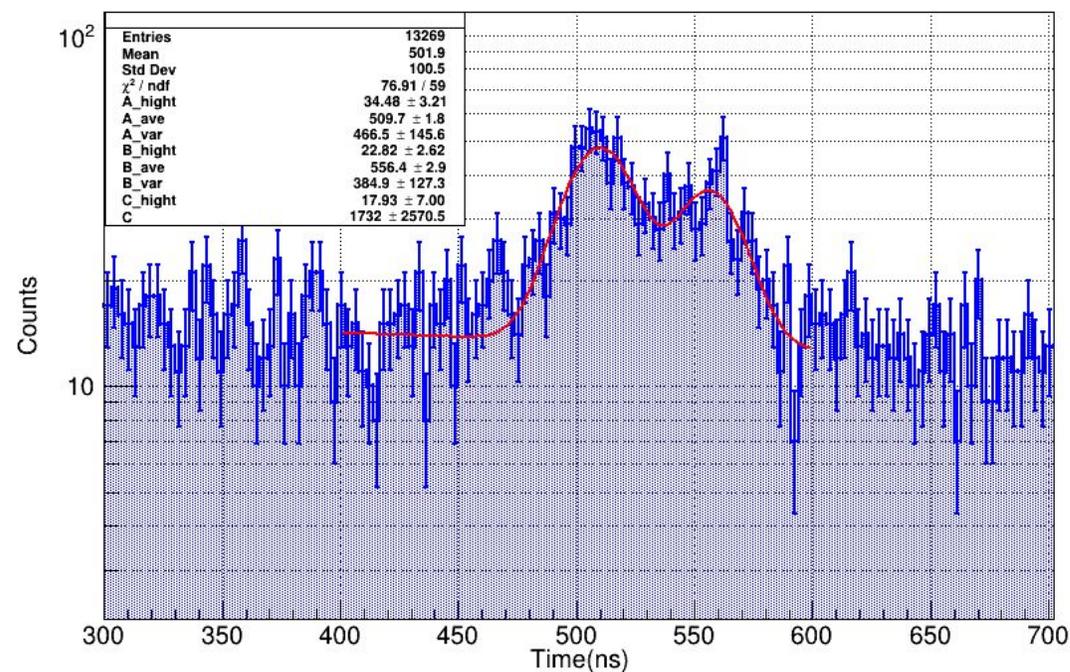
AIあり 2021年

Decay Time



AIあり 2022年

Decay Time



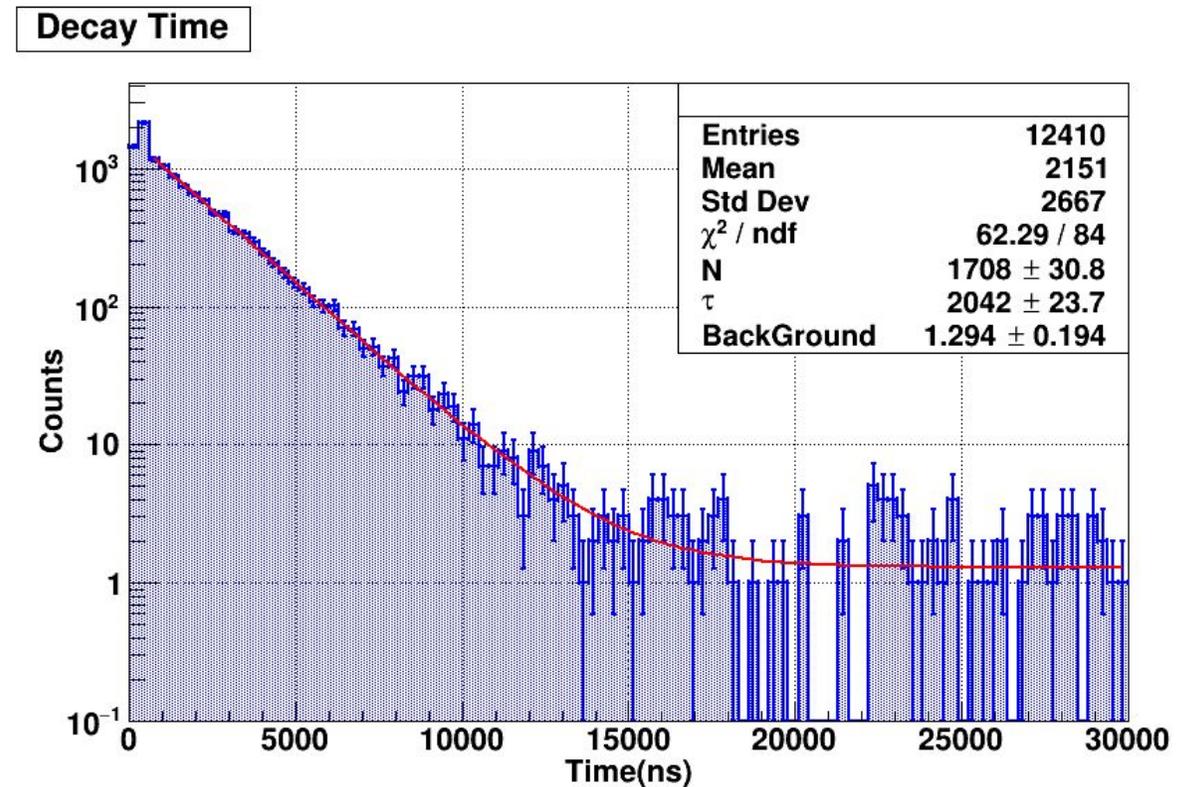
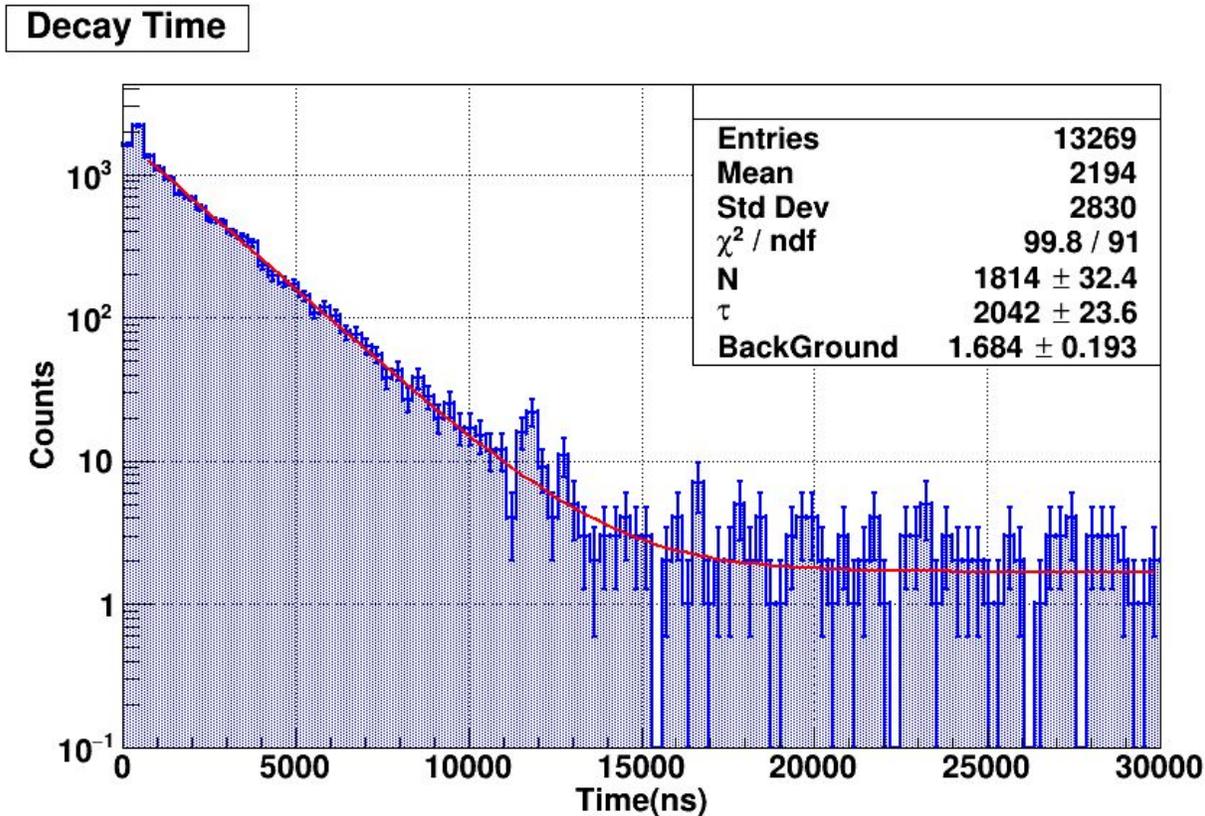
今年もAfter pulseは見えた

# 5. 測定結果 1つのEXP関数でフィット(AI有無の比較\_2022年)

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

AIあり(2022年)  $\tau = 2042 \pm 23.6$  [ns]

AIなし(2022年)  $\tau = 2042 \pm 23.7$  [ns]



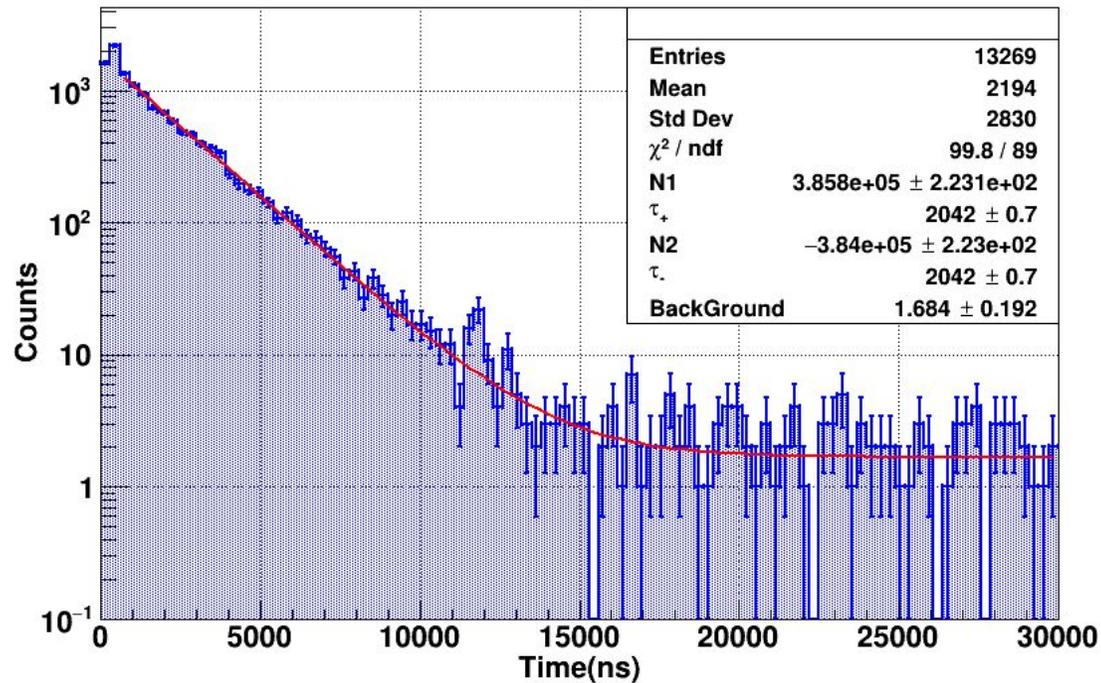
# 5. 測定結果 2つのEXP関数でフィット(AI有無の比較\_2022年)

$$N_+ \exp\left(-\frac{t}{\tau_+}\right) + N_- \exp\left(-\frac{t}{\tau_-}\right) + BG$$

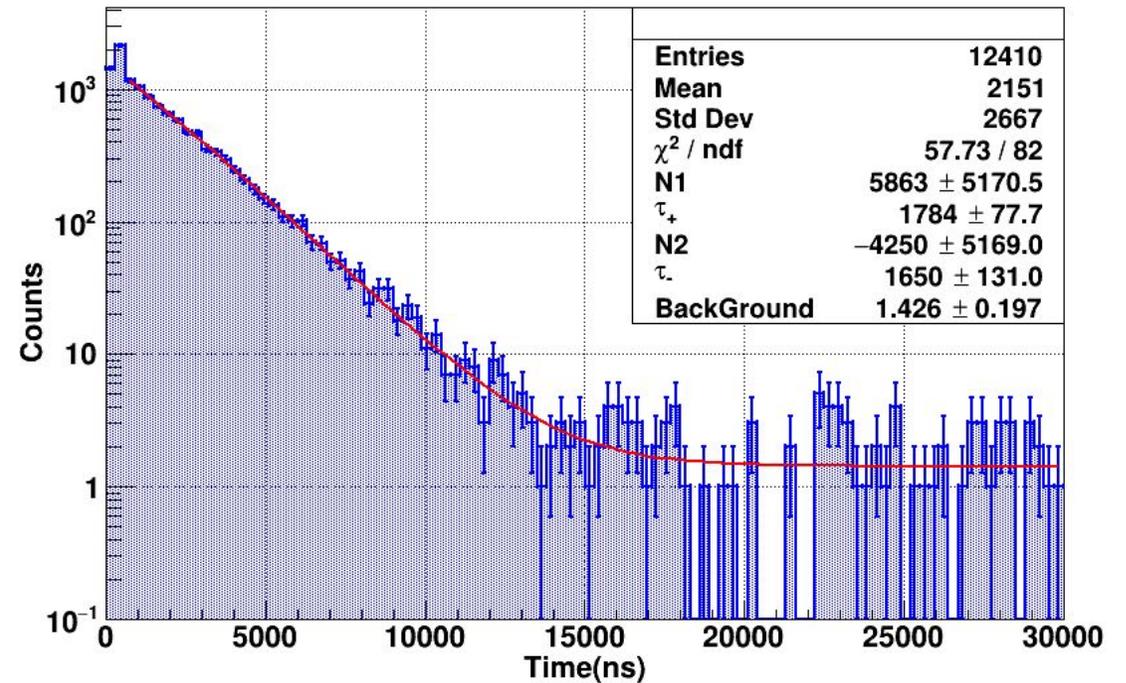
AIあり(2022年)  $\tau_+ = 2042 \pm 0.7$  [ns]  
 $\tau_- = 2042 \pm 0.7$  [ns]

AIなし(2022年)  $\tau_+ = 1784 \pm 77.7$  [ns]  
 $\tau_- = 1650 \pm 131.0$  [ns]

Decay Time



Decay Time



# 5. 測定結果 $\mu^+$ と $\mu^-$ の比を1.26に固定

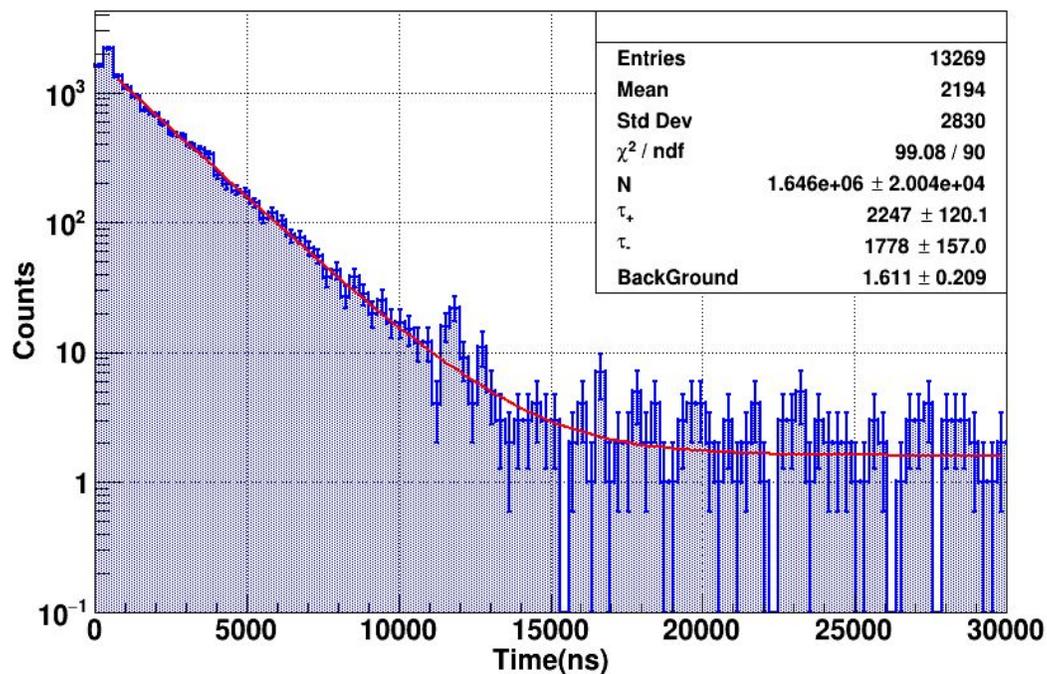
$$N \left\{ \frac{1.26}{\tau_+} \exp\left(-\frac{t}{\tau_+}\right) + \frac{1}{\tau_-} \exp\left(-\frac{t}{\tau_-}\right) \right\} + BG$$

1.26は小田稔さんの教科書から引用

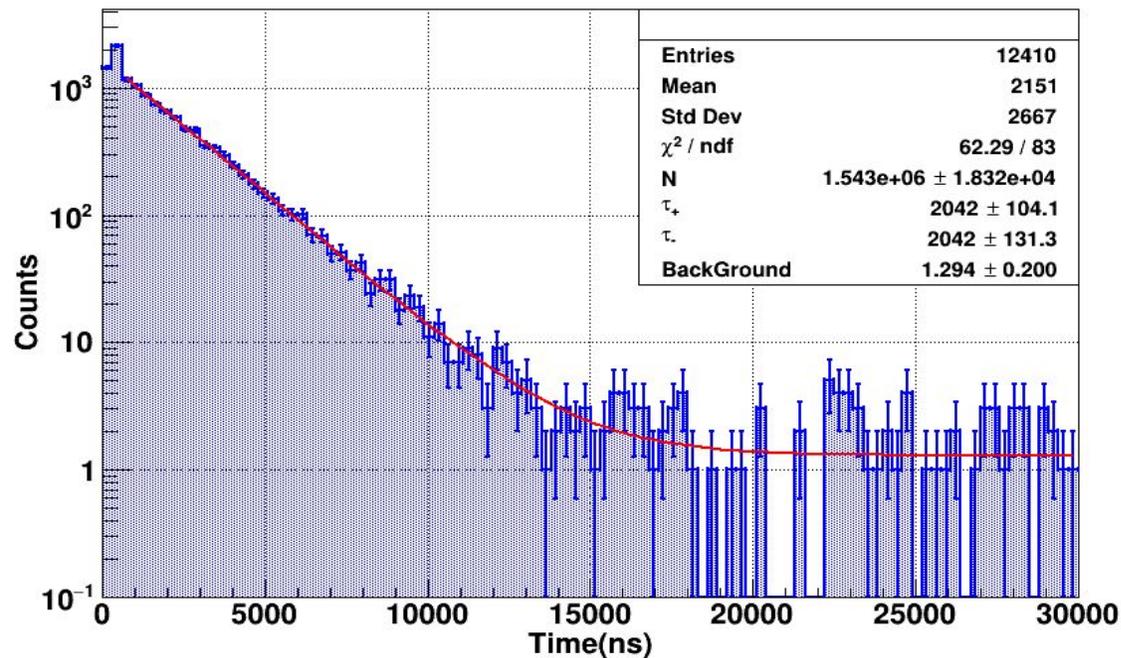
AI あり(2022年)  $\tau_+ = 2247 \pm 120.1$  [ns]  
 $\tau_- = 1778 \pm 157.0$  [ns]

AI なし(2022年)  $\tau_+ = 2042 \pm 104.1$  [ns]  
 $\tau_- = 2042 \pm 131.3$  [ns]

Decay Time



Decay Time



# 5. 測定結果 時定数の一つを固定 (AI: $\tau_- = 864$ [ns], C: $\tau_- = 2026$ [ns])

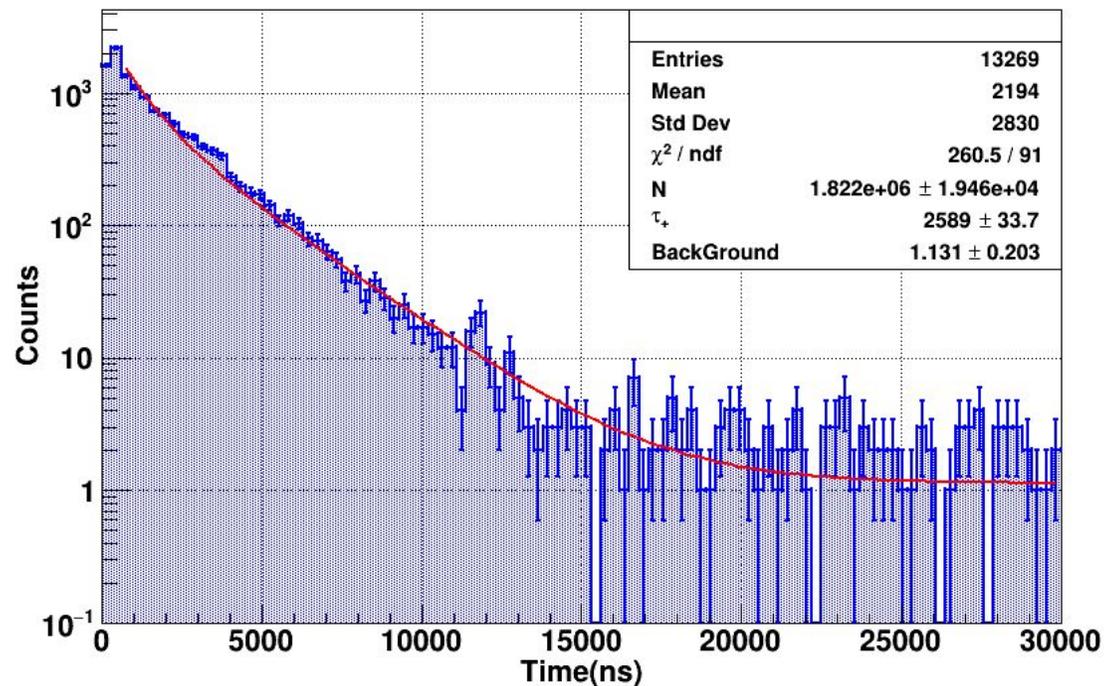
$$N \left\{ \frac{1.26}{\tau_+} \exp\left(-\frac{t}{\tau_+}\right) + \frac{1}{864 \text{ [ns]}} \exp\left(-\frac{t}{864 \text{ [ns]}}\right) \right\} + BG$$

$$N \left\{ \frac{1.26}{\tau_+} \exp\left(-\frac{t}{\tau_+}\right) + \frac{1}{2026 \text{ [ns]}} \exp\left(-\frac{t}{2026 \text{ [ns]}}\right) \right\} + BG$$

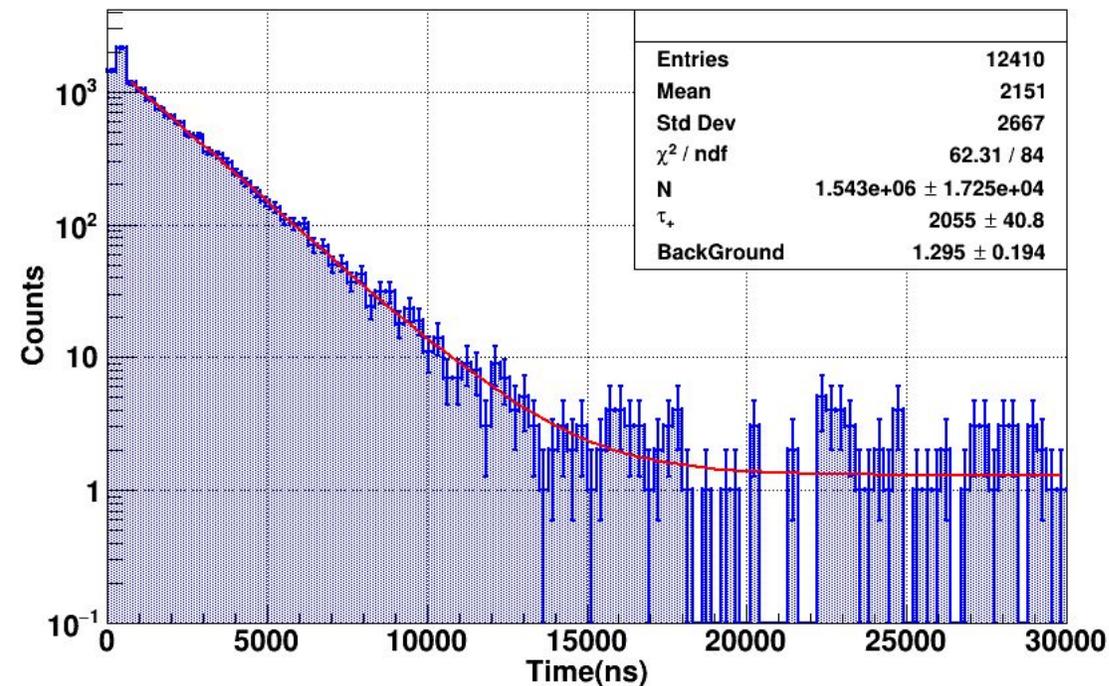
AI あり (2022年)  $\tau_+ = 2589 \pm 33.7$  [ns]

AI なし (2022年)  $\tau_+ = 2055 \pm 40.8$  [ns]

Decay Time



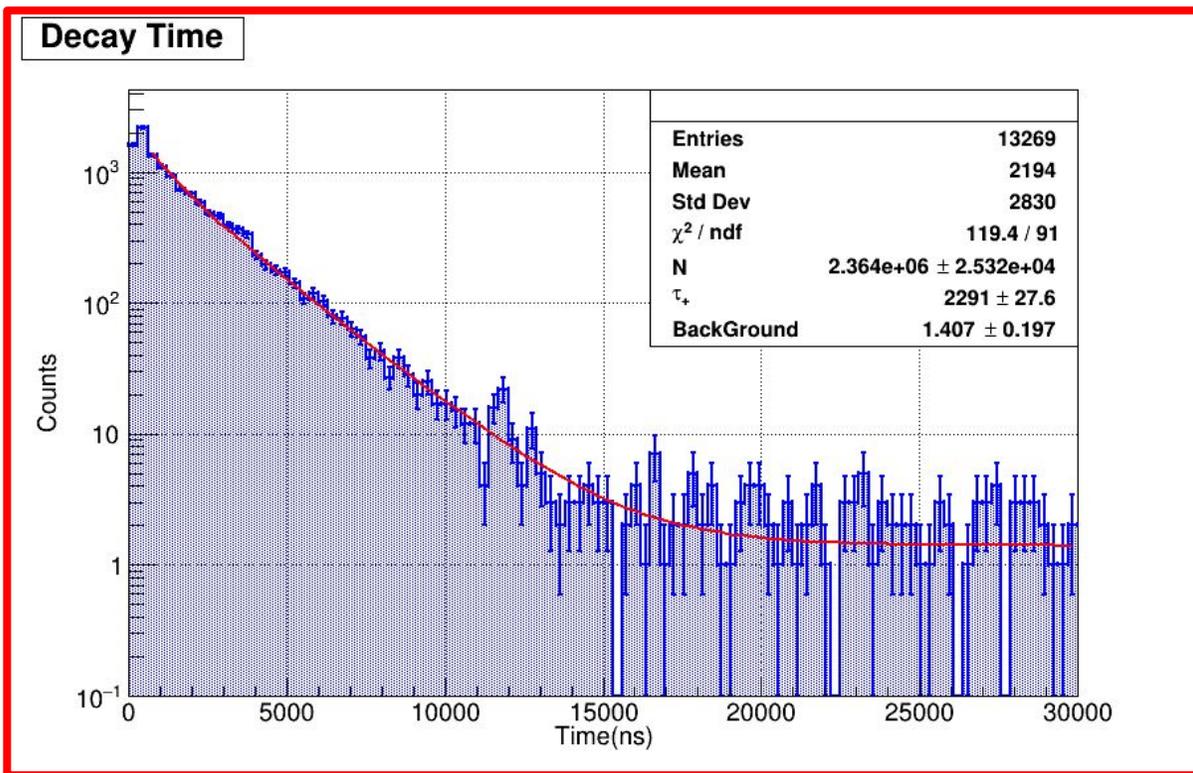
Decay Time



# 5. 測定結果 吸収体の原子による崩壊率の固定(AI:0.4,C:0.92)

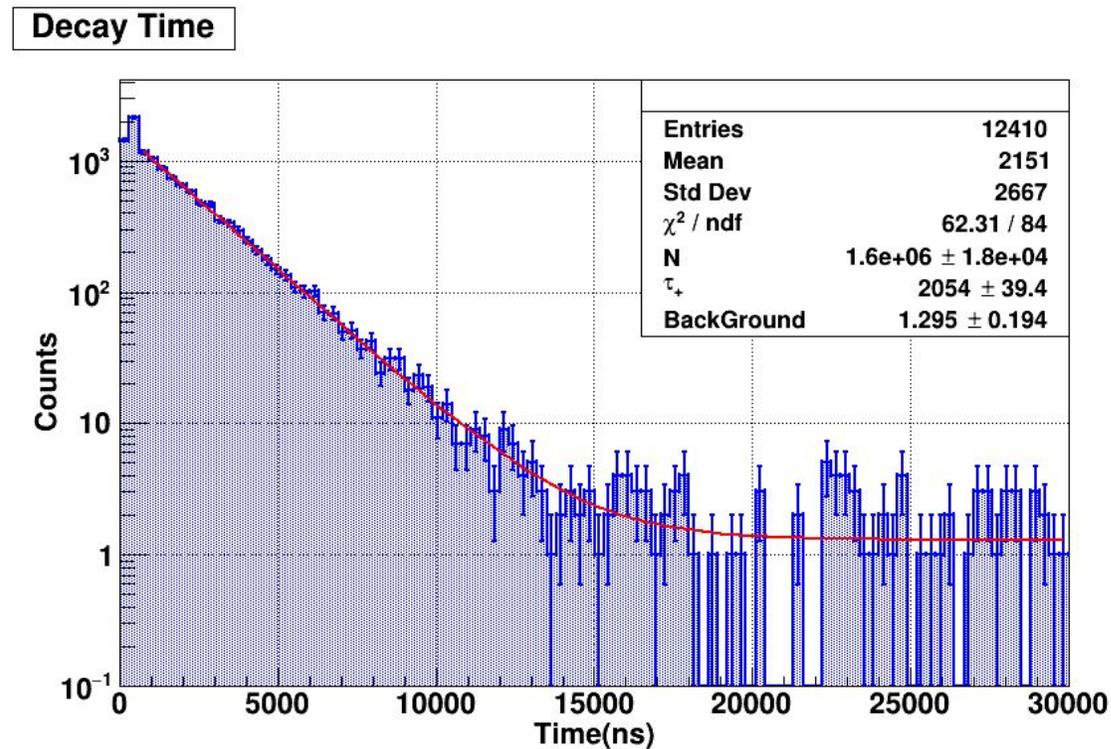
$$N \left\{ \frac{1.26}{\tau_+} \exp\left(-\frac{t}{\tau_+}\right) + 0.4 \times \frac{1}{864 \text{ [ns]}} \exp\left(-\frac{t}{864 \text{ [ns]}}\right) \right\} + BG$$

AI あり(2022年)  $\tau = 2291 \pm 27.6 \text{ [ns]}$

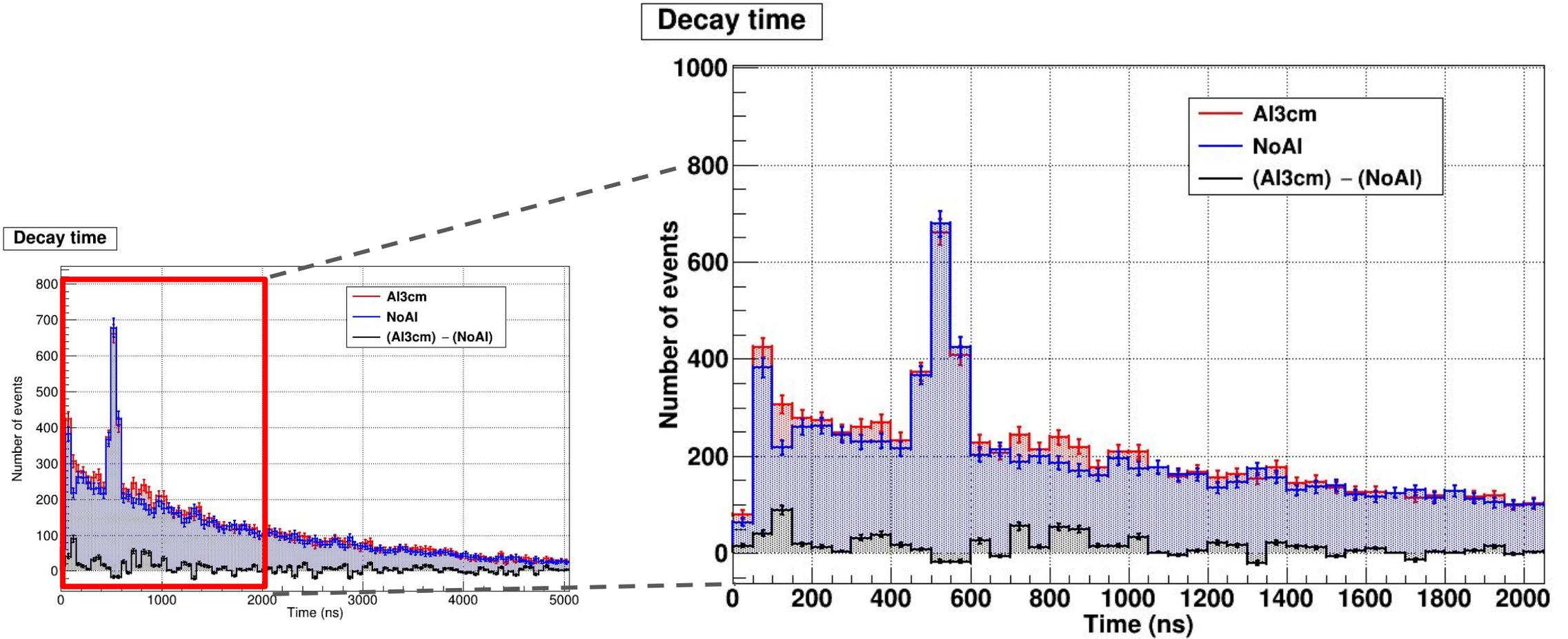


$$N \left\{ \frac{1.26}{\tau_+} \exp\left(-\frac{t}{\tau_+}\right) + 0.92 \times \frac{1}{2026 \text{ [ns]}} \exp\left(-\frac{t}{2026 \text{ [ns]}}\right) \right\} + BG$$

AI なし(2022年)  $\tau = 2054 \pm 39.4 \text{ [ns]}$

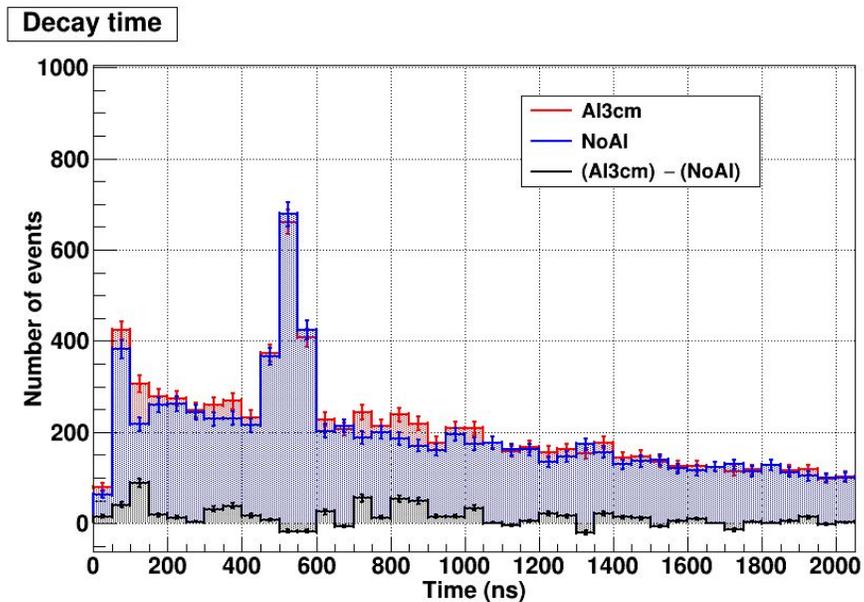


# 5. 測定結果 AIの有無の比較結果



# 5. 測定結果 統計処理と誤差評価

n1: AIあり  
n2: AIなし



誤差			
n1(600<x<2000)	n2(600<x<2000)	n1-n2	
4583	4246	337	
$\sqrt{n1}$	$\sqrt{n2}$	$\sqrt{(n1+n2)}$	<b>Sigma</b>
67.7	65.2	94.0	<b>3.59</b>

## 6. 考察

- ・PMTの交換によってfitが改善
- ・アフターパルスは今年も見えた。消すことができないことが分かった。
- ・ゲインを下げているのでその効果を考える必要がある。
- ・理論値を入れ、変数を固定し $\mu+$ の寿命を計算した。  
→ 統計誤差と系統誤差を考慮することで誤差範囲に入らずとも誤差付近の値に
- ・理論値を入れても矛盾しなかった。
- ・早い成分が消え、 $\mu+$  の fit がうまくできた。→まとめ

## 7. まとめ

- PMTの交換によってfitが改善された

2021年( $2055 \pm 31$  [ns]) 2022年( $2291 \pm 28$  [ns])

予想値( $2196.9803 \pm 0.0022$  [ns]) *Webber et al., PRL, 106, 041803 (2011)*

- $\tau^+$ の理論値に近づいた。

- $\mu^-$ の早い成分が  $3.6\sigma$  統計的有意性が見えた。

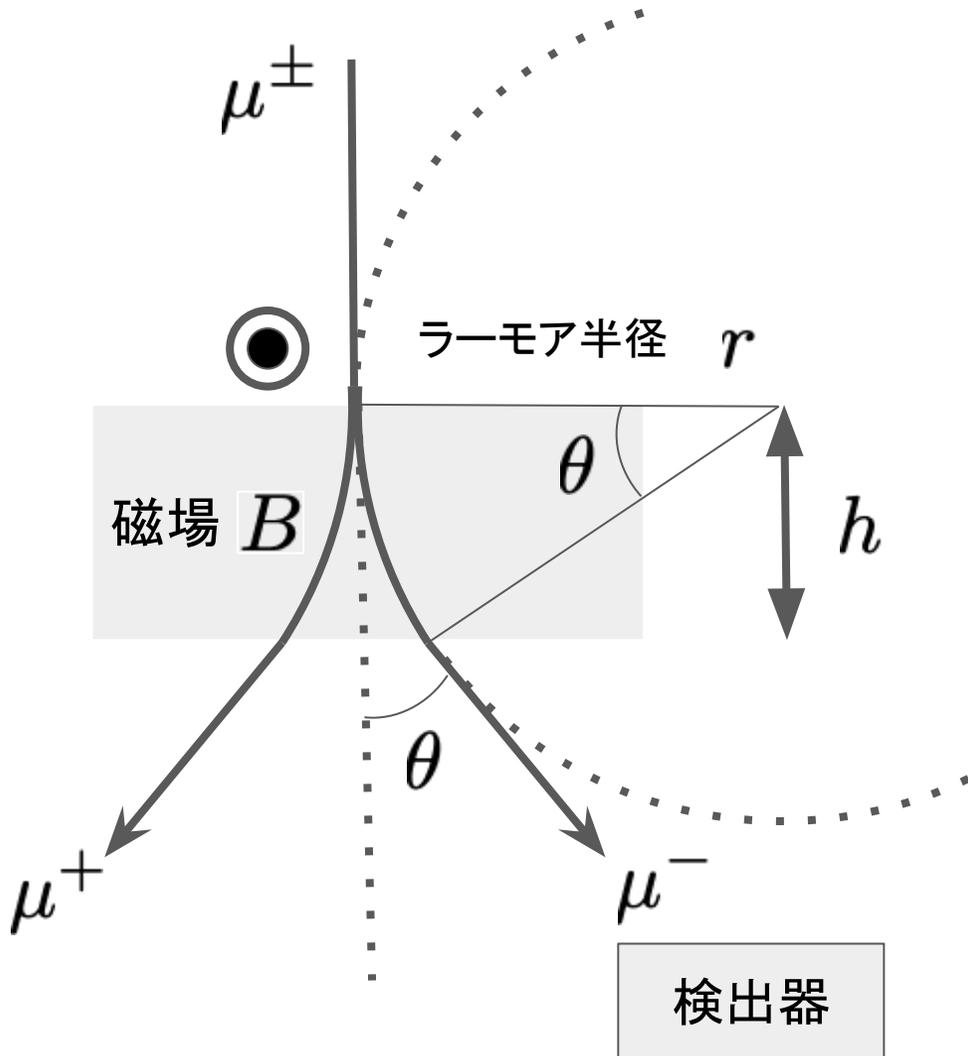
- ヒストグラムのbin幅の違いにより生じる系統誤差まで考慮すると、

$2291 \pm 28$ (統計誤差)  $\pm 37$ (系統誤差) =  $2291 \pm 65$  [ns] (2022年)

これは誤差範囲には入っていないが、予想値にかなり近づいた。

## 8. 今後の展望 磁場によって $\mu^+$ と $\mu^-$ 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 $\theta$ の関係



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

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

ラーモア半径  $r$  を幾何学的に導出

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

(1) = (2) より

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

## 8. 今後の展望

30MeVのミュオンをを20度曲げるのに  
必要な磁場の大きさ

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

市販に最大1.4[T]のネオジム  
磁石バーが販売されている



充分実現できそう！！

半径			
pc[J]	mc <sup>2</sup> [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

# 2022年度 終わり

ご清聴ありがとうございました！

# 0. 予備

```
[0]*exp(-x/[1])+[2]
[0]*exp(-x/[1])+[2]*exp(-x/[3])+[4]
[0]*((1.26/[1])*exp(-x/[1]))+(0.4/864)*(exp(-x/864)))+[2]
[0]*((1.26/[1])*exp(-x/[1]))+(0.92/2026)*(exp(-x/2026)))+[2]
]
```

```
[0]/[1]*exp(-x/[1]) + [2]
[0]/[1]*exp(-x/[1]) + [0]/[2]*exp(-x/[2]) + [3]
1.26*[0]/[1]*exp(-x/[1]) + [0]/[2]*exp(-x/[2]) + [3]
1.26*[0]/[1]*exp(-x/[1]) + [0]/864*exp(-x/864) + [2]
1.26*[0]/[1]*exp(-x/[1]) + 0,4*[0]/864*exp(-x/864) + [2]
```

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

$$N_+ \exp\left(-\frac{t}{\tau_+}\right) + N_- \exp\left(-\frac{t}{\tau_-}\right) + BG$$

$$N \left\{ \frac{1.26}{\tau_+} \exp\left(-\frac{t}{\tau_+}\right) + 0.4 \times \frac{1}{864 \text{ [ns]}} \exp\left(-\frac{t}{864 \text{ [ns]}}\right) \right\} +$$

$$N \left\{ \frac{1.26}{\tau_+} \exp\left(-\frac{t}{\tau_+}\right) + 0.92 \times \frac{1}{2026 \text{ [ns]}} \exp\left(-\frac{t}{2026 \text{ [ns]}}\right) \right\}$$

# 0. 予備 アフターパルスに二つの山がある理由

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気中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。

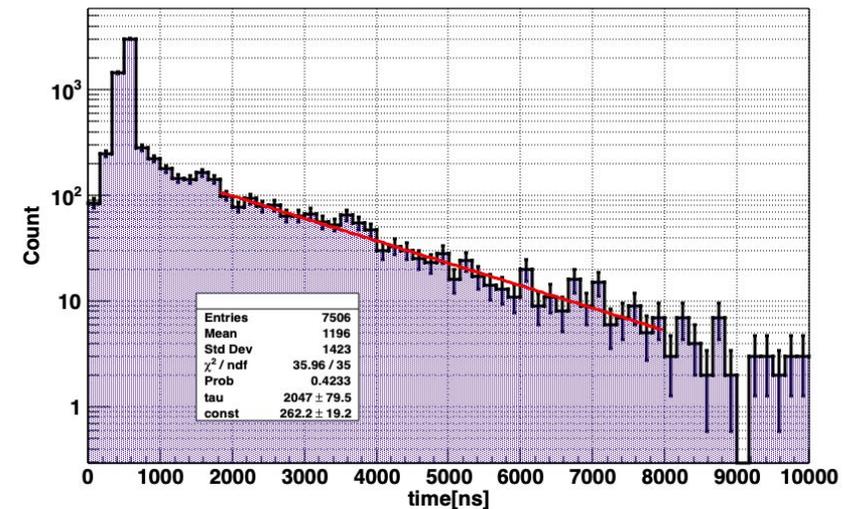
イオンの質量と電荷を用いて  
運動方程式を解き時間を算出  
(オーダー計算)

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

x:衝突距離(m)

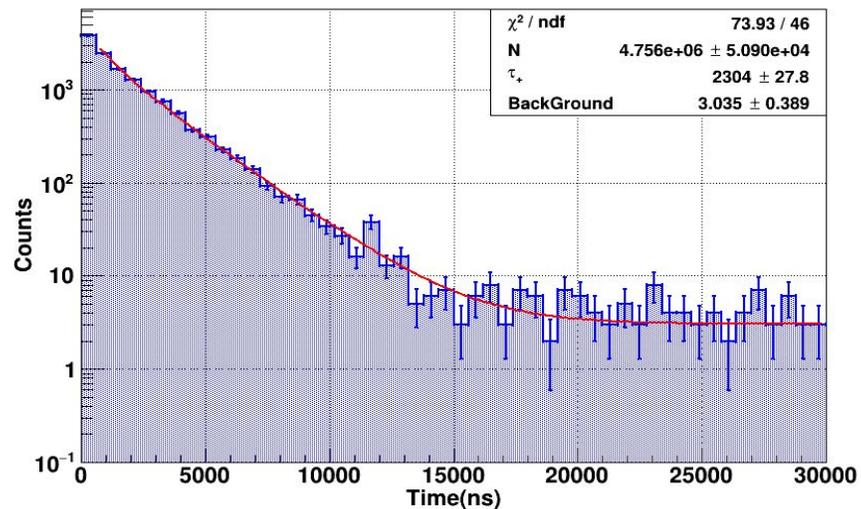
$$t_{O_2} = 814 \text{ (ns)}$$

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

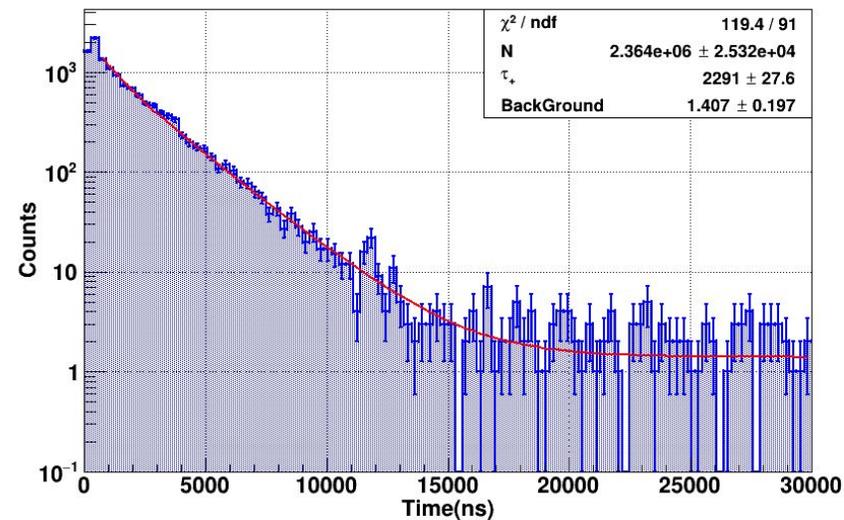


# 0. 予備 binの変化 系統誤差の導出

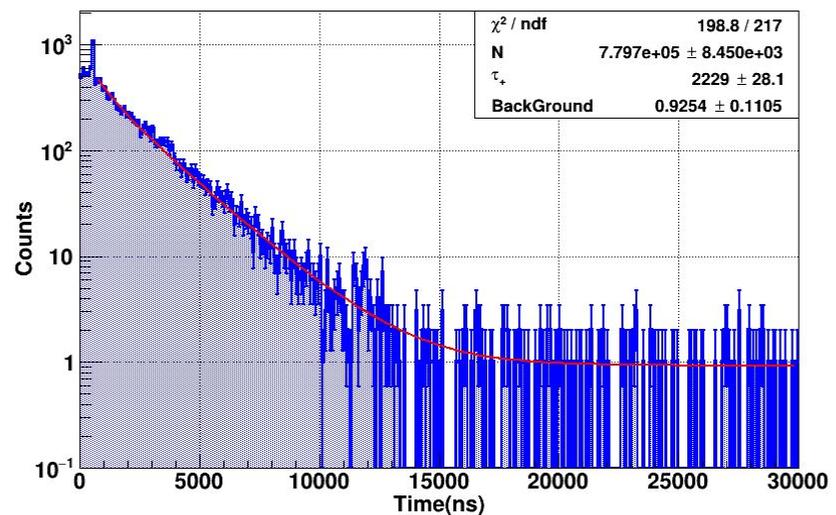
Decay Time bin 50のとき



Decay Time bin 100のとき



Decay Time bin 300のとき



# 0. 予備

標準偏差と言われ、データのバラつき具合を表す量。

- $\pm\sigma$ の範囲に収まる統計的な確率は、約68%
- $\pm 2\sigma$ の範囲に収まる統計的な確率は、約95%
- $3.6\sigma$ の上側確率は、0.017%

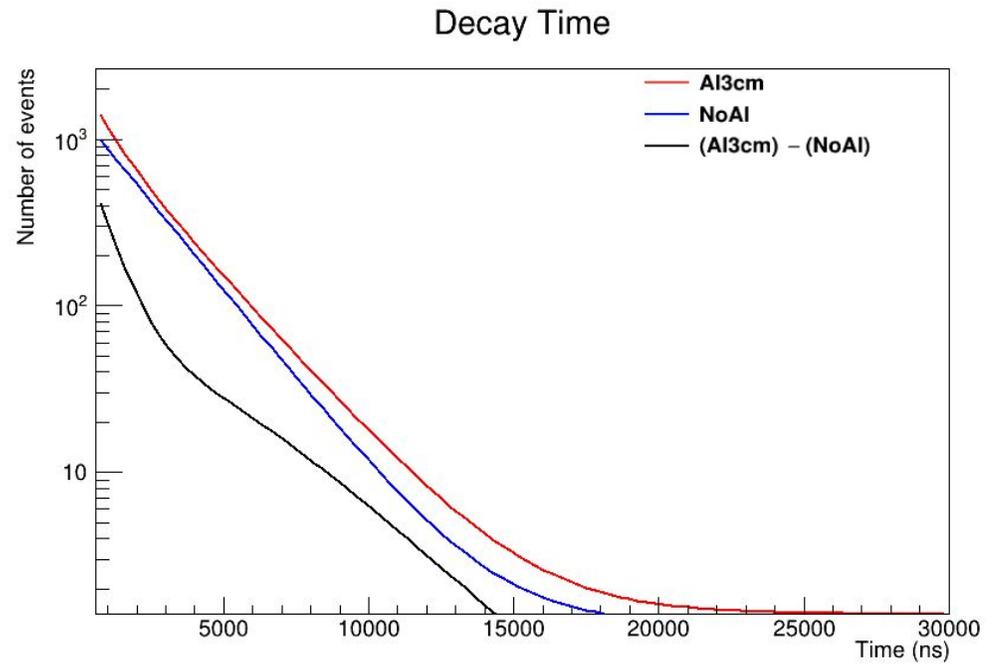


- $2\sigma$ の範囲に収まらないのでは、統計的には、
- 今回の実験では、アルミの結果は十分信頼出来る。

# 0. 予備

ヒストグラムの比較(0~2000)

## Fit関数の比較



# 聞かれそうな質問

# ダイアグラムの細かな説明

3 div. [3端子デバイダー]: 入力信号を2つに分ける。電圧も半分になるので注意。

Discri.[ディスクリミネータ]: NIMモジュール。ある電圧閾値を超えた信号があったとき、NIM信号を出す。

出力信号の幅を調整可。アナログ信号からロジック信号 (0,1のレベル信号)へ変換。

Coin. [コインシデンス]: NIMモジュール。スイッチONの複数の入力信号のAND信号を出力する。但し、

Veto入力がある時は出力しない。出力信号の幅を調整可。

Level Converter [レベルコンバータ]: NIMモジュール。NIM・ECL・TTLの信号のレベルを変換する。

Gate Generator [ゲートジェネレータ]: NIMモジュール。比較的幅の広い信号出す。主にADCの積分時間

幅(ゲート幅)を決める信号を生成する。

H.V. [ハイボルテージ・サプライ]: NIMモジュール。PMTに高電圧(~2000V)を供給する。

TDC [LeCroy 3377 マルチヒットTDC(Time-to-Digital Converter)]:

CAMACモジュール。COM信号からch入力信号までの時間を測定する。最大8エッジまで測定可能。1カ

ウント分解能 = 0.5ns。入力信号はECLレベル。

# ダイアグラムの細かな説明

ADC [LeCroy 2249W チャージADC (Analog-to-Digital Converter)]:

CAMACモジュール。ゲード信号のある間の ch入力信号の積分電荷量を測定する。

Int. Reg. [インターラプト・レジスタ]: CAMACモジュール。ch入力信号があると即座にLAM(Look At Me)信号をハイレベルにする。計算機からの指示で、LAMを解除(ローレベルに)することができる。計算機がデータ取得の処理中に次の信号が入らないよう制御するために使われる。

CAMAC Cont. [CC/7700 カマック・コントローラ]: CAMACモジュールと計算機の間を制御するモジュール。

NIMレベル: 1(ハイ) $\rightarrow$ 0.8V、0(ロー) $\rightarrow$ 0V (シングルエンド信号:片方は常に0V)

ECLレベル: 1(ハイ) $\rightarrow$ 0.8V、0(ロー) $\rightarrow$ -1.8V (差動信号:ハイとローの差をとる)