

μ 粒子の寿命及び 生成電子のエネルギースペクトラムの測定

奈良女子大学

人間文化研究科 物理科学専攻 1回生

高エネルギー物理学研究室

皆吉遥 市川真有 永松えりな

もくじ

μ 粒子の寿命及び 生成電子のエネルギースペクトラムの測定

1. μ 粒子の寿命測定

原理

セットアップ

結果

考察

2. 生成電子のエネルギースペクトラム測定

もくじ

μ 粒子の寿命及び
生成電子のエネルギースペクトラムの測定

1. μ 粒子の寿命測定

原理

セットアップ

結果

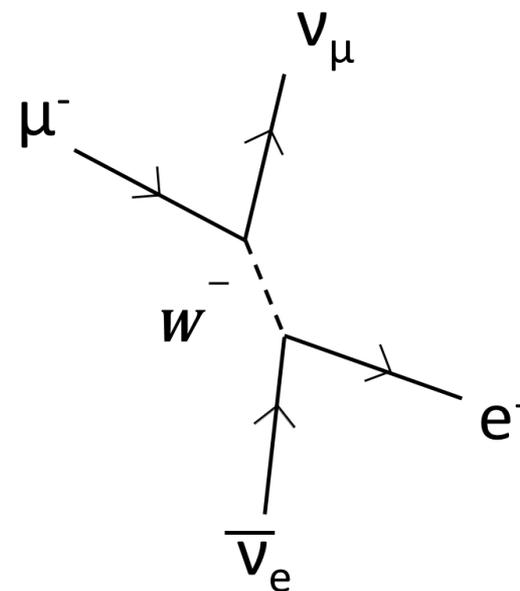
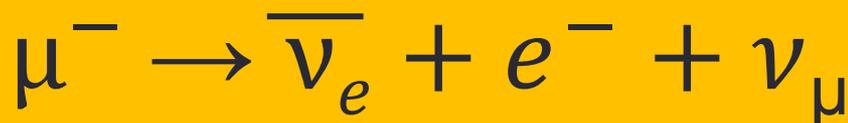
考察

2. 生成電子のエネルギースペクトラム測定

μ 粒子の崩壊

二次宇宙線として降ってきた μ 粒子が

{
 電子
 反電子ニュートリノ
 ミューニュートリノ
 }
 へ崩壊する



左式のパインマン図

★本実験では、シンチレータ内で静止した μ 粒子を用いて、その寿命(τ)と、崩壊した際に生成される電子のエネルギー分布を測定した。

μ 粒子の寿命の測定方法

ある時間 t に存在する粒子の個数 dN

$$dN = -\lambda N(t) dt$$

積分して整理すると

$$N(t) = N_0 \exp^{-\lambda t}$$

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

➡ 単位時間あたりの崩壊数

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

N_0 個すべての粒子の生存時間を足しあげたもの L

$$L = \int_0^{\infty} t N(t) \lambda dt$$

$$= \int_0^{\infty} t N(t) \lambda dt$$

$$= \left[-\frac{1}{\lambda} N_0 e^{-\lambda t} \right]_0^{\infty}$$

$$= \frac{N_0}{\lambda}$$

$$\tau = \frac{L}{N_0} = \frac{1}{\lambda}$$

★この実験式を用いて寿命 τ を求める。

もくじ

μ 粒子の寿命及び
生成電子のエネルギースペクトラムの測定

1. μ 粒子の寿命測定

原理

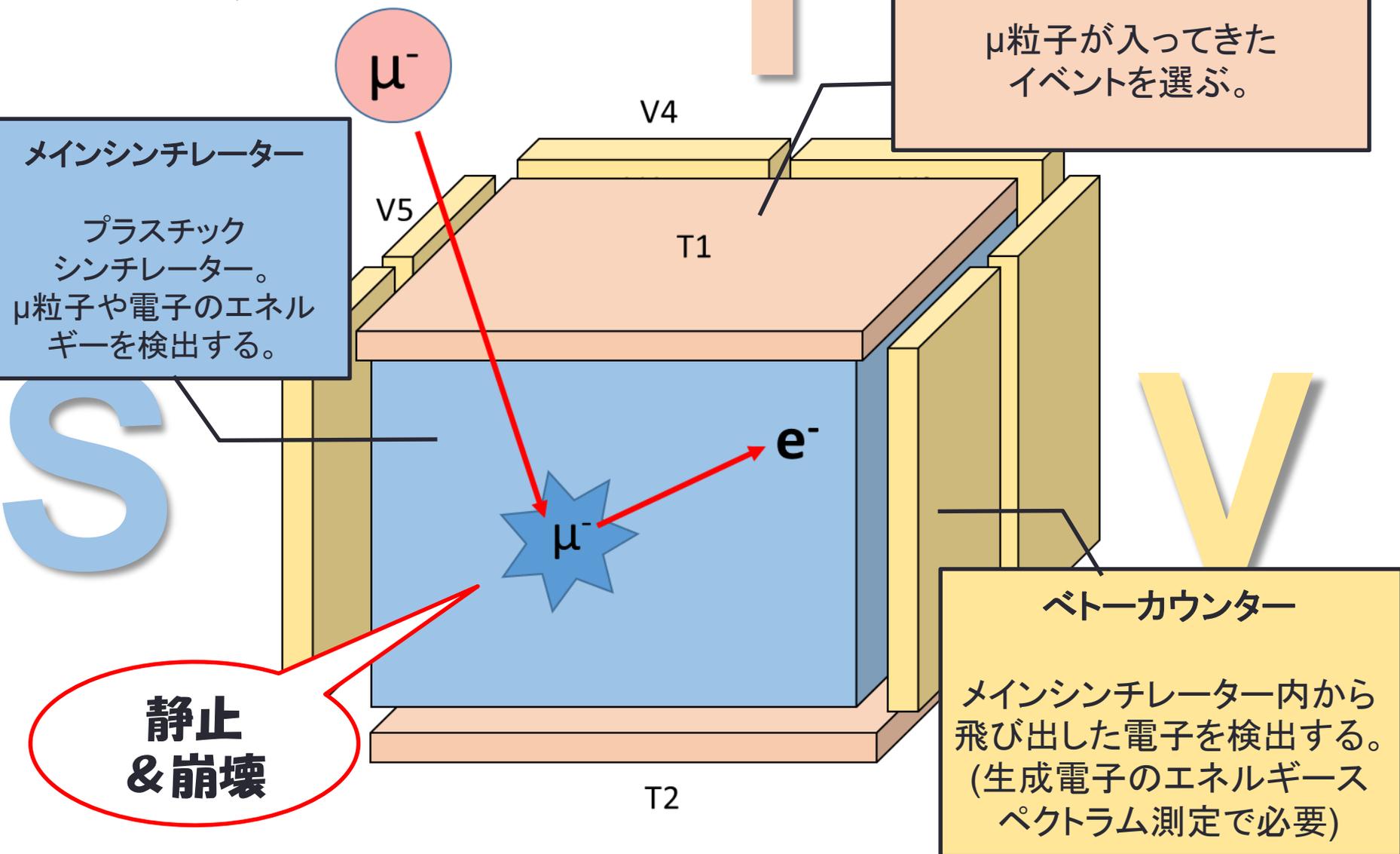
セットアップ

結果

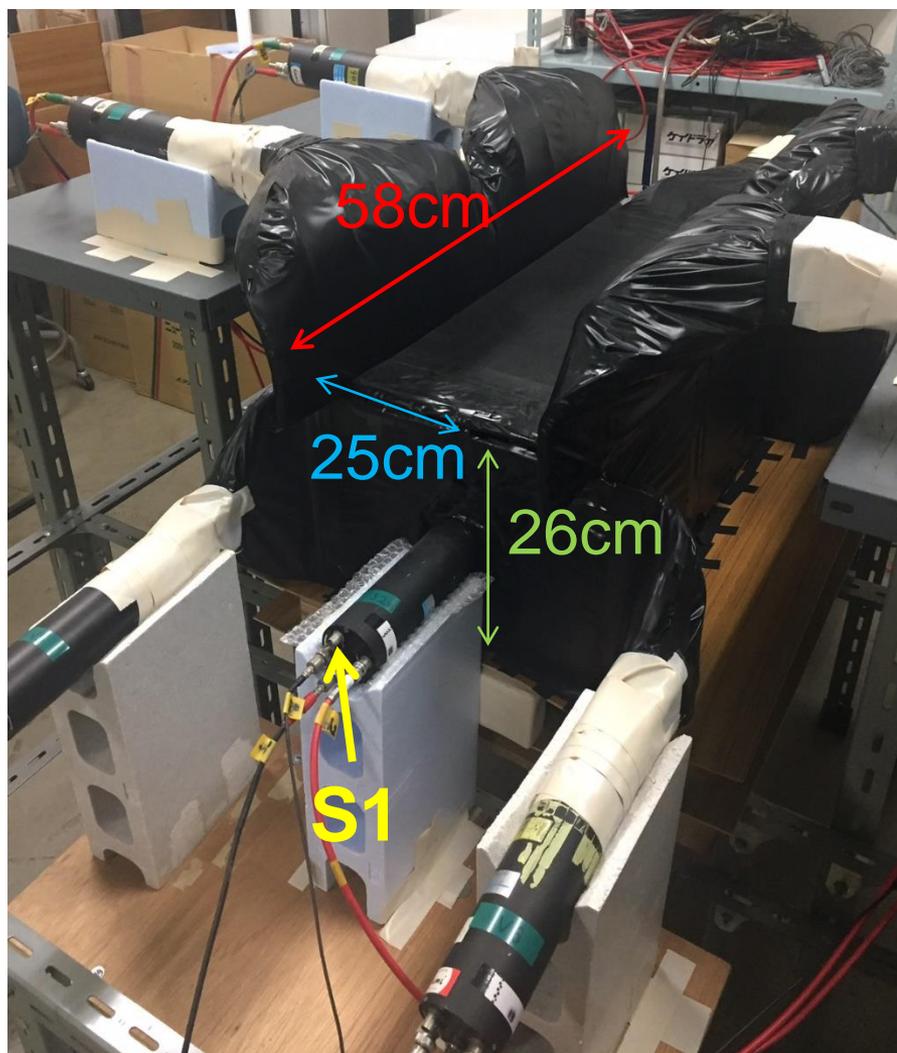
考察

2. 生成電子のエネルギースペクトラム測定

測定装置



実際の測定装置



縦 : 58cm
横 : 25cm
高さ : 26cm

★S1は、メインシンチレーターに直接つながっている光電子増倍管

★実験で使用したのと同じくみのシンチレーションカウンター

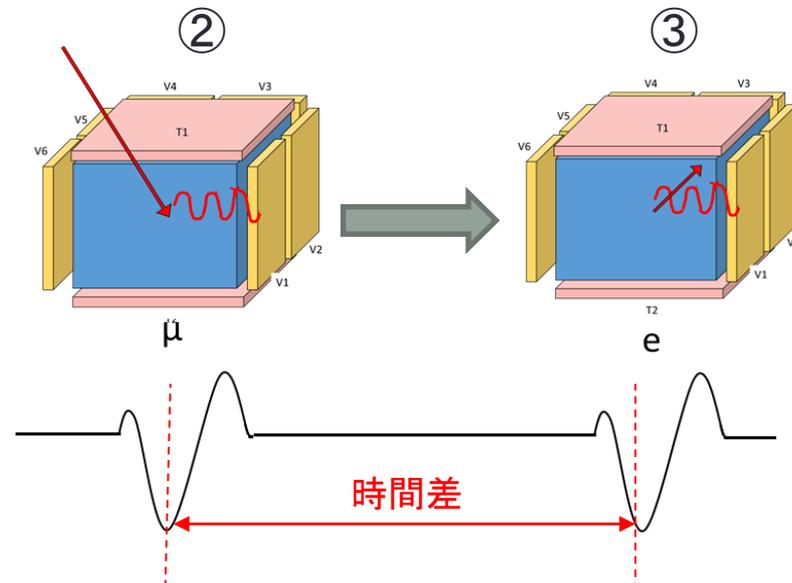


プラスチックシンチレーター ライトガイド 光電子増倍管

寿命測定の手順

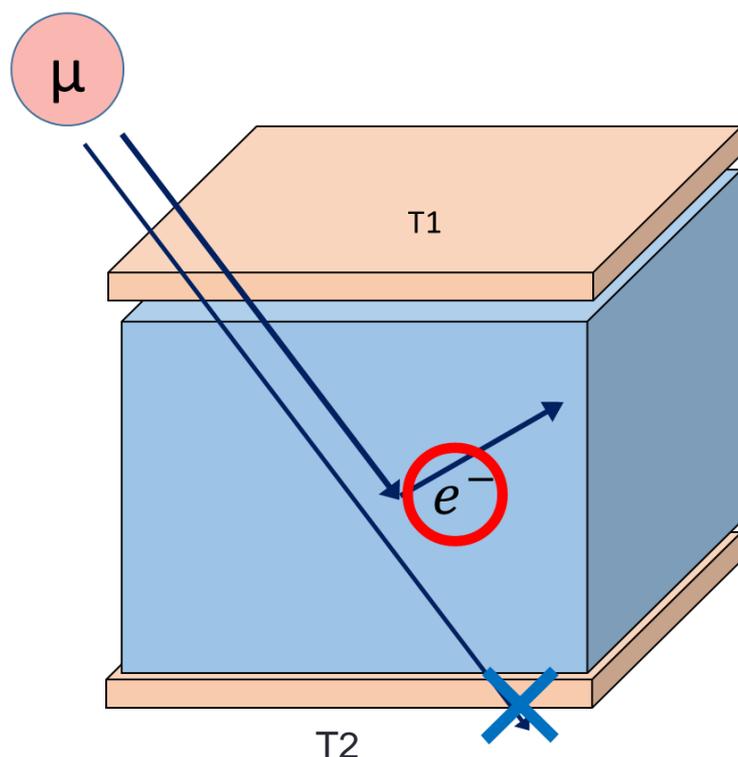
- ① μ 粒子がメインシンチレータ内で止まったイベントを選ぶ
- ② μ 粒子がメインシンチレータに入った瞬間の μ 粒子がつくるパルスを測定
- ③ 静止した μ 粒子が崩壊して、内部で生成された電子がつくるパルスを測定

この二つのパルスの
時間差をTDCで測定
すれば
寿命がわかる！！



イベントの選定

★トリガーカウンター T1: μ 粒子が入ってきたイベントがわかる



μ 粒子がメインシンチレーターを貫通せず、内部で静止して電子を生成するものだけを選ぶ

★選定条件

- ① T1とS1が μ 粒子について同時に反応
 ➡ (宇宙線) μ 粒子が入射した
- ② S1が電子について反応
 ➡ 内部で電子が生成されている

入射した μ 粒子のうち、静止したものは全体の1%であった
 静止した μ 粒子の数は一日当たり約8000個であった

もくじ

μ 粒子の寿命及び
生成電子のエネルギースペクトラムの測定

1. μ 粒子の寿命測定

原理

セットアップ

結果

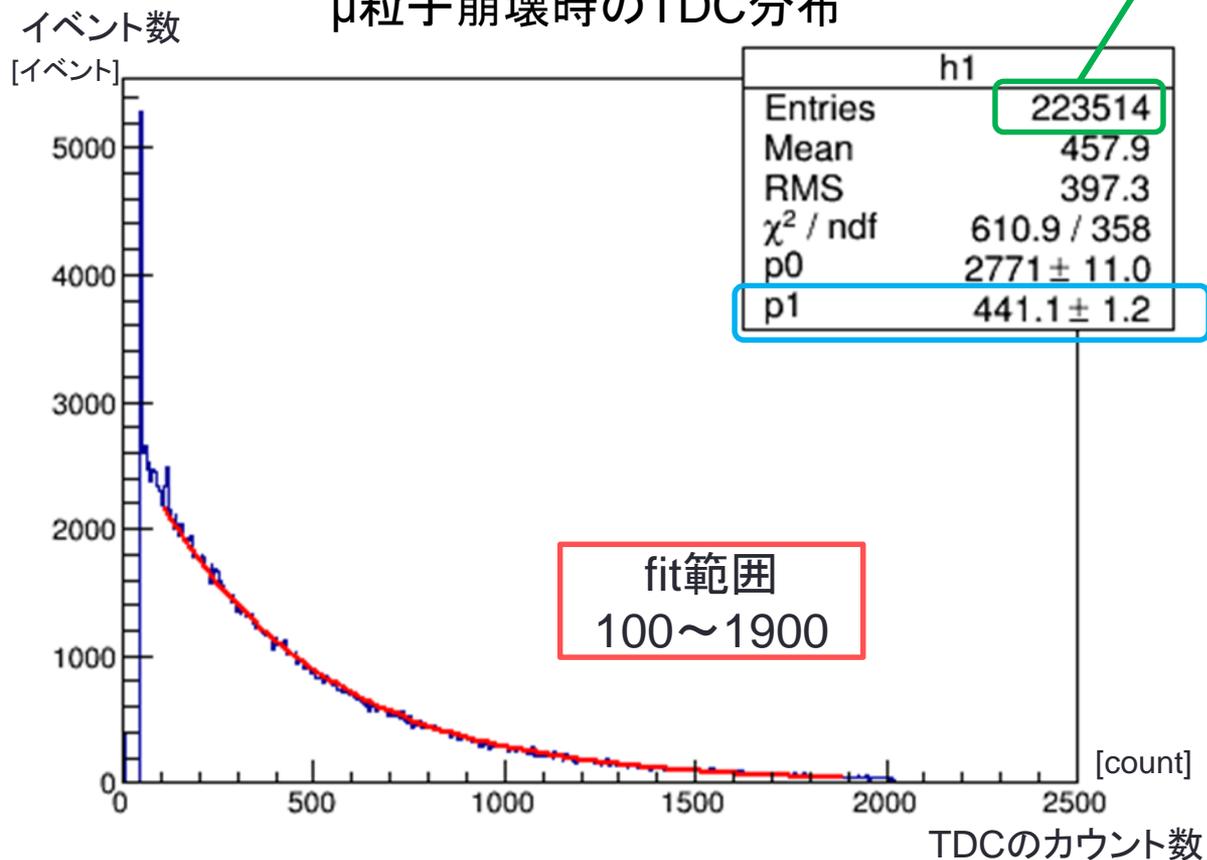
考察

2. 生成電子のエネルギースペクトラム測定

μ粒子のTDC分布

エントリー数: 22万イベント
測定期間: 約一ヶ月
(昼夜休まずに)

μ粒子崩壊時のTDC分布



寿命の式

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

(τ = 平均寿命)

Fitした式

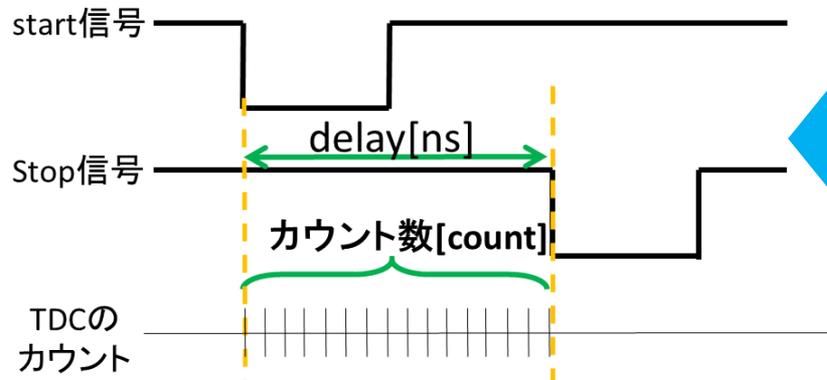
$$f(t) = p_0 \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right)$$

$$p_1 = 441.1 \pm 1.2 \text{ [count]}$$

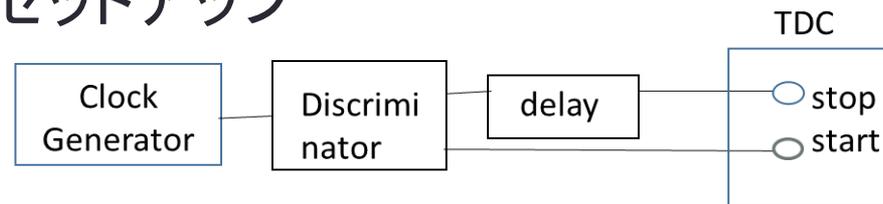
★上記の式でfitして、寿命を測定。

★単位[TDCcount]。時間に変換するためにTDCの時間較正を行う

Delayを用いたTDCカウント数の較正 (キャリブレーション)



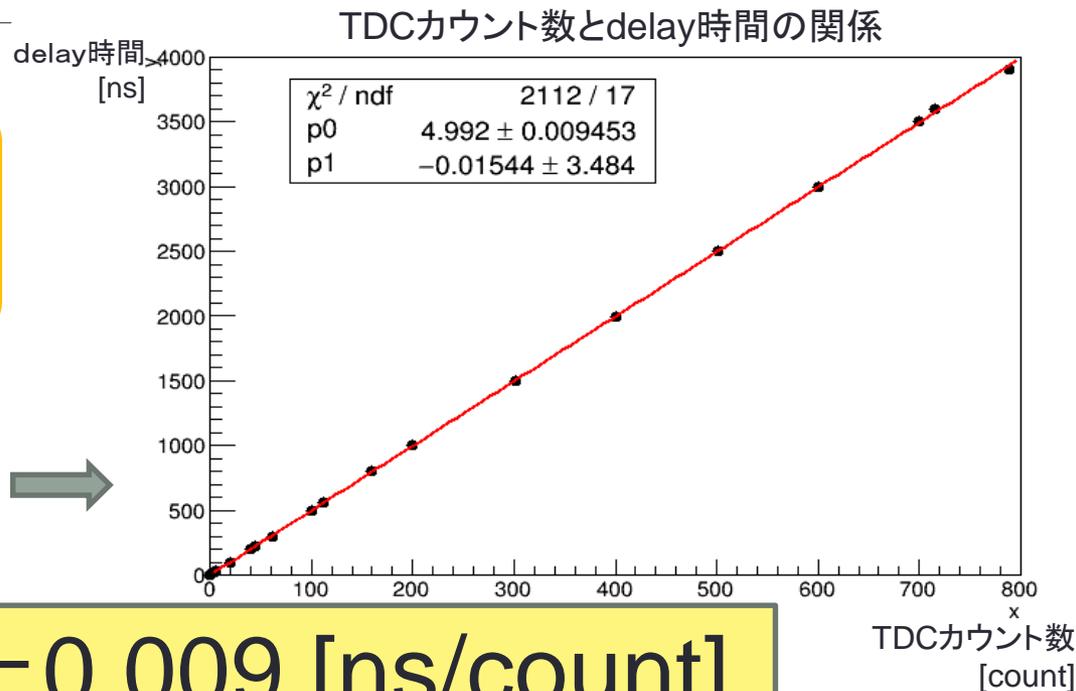
セットアップ



TDCはstart信号が入ってから
stop信号が入ってくるまでの間、
一定の時間間隔でカウントを刻む

つまり

カウント数と測定時間(スタートからストップまでの時間)が
比例関係にあることがわかる



傾き $\alpha = 4.992 \pm 0.009$ [ns/count]

寿命の測定結果

μ 粒子の寿命を τ とすると τ [ns] = p_1 [count] \times α [ns/count]

実験値から得た
 p_1 の値と
時間較正の値

$$\begin{aligned} &= 441.1 \times 4.992 \\ &= 2202.0 \text{ [ns]} \\ &= 2.202 \text{ [\mu s]} \end{aligned}$$

τ の相対誤差

$$\begin{aligned} \frac{\Delta\tau}{\tau} &= \sqrt{\left(\frac{\Delta\alpha}{\alpha}\right)^2 + \left(\frac{\Delta p_1}{p_1}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{0.009}{4.992}\right)^2 + \left(\frac{1.2}{441.1}\right)^2} \\ &= 3.3 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

τ の誤差 $\Delta\tau$

$$\Delta\tau = 3.3 \times 10^{-3} \times 2.202 = 0.007 \text{ [\mu s]}$$

測定結果 $\tau = \underline{2.202 \pm 0.007} \text{ [\mu s]}$

★利用したサンプル数
22万イベント

★精度 0.3%

もくじ

μ 粒子の寿命及び
生成電子のエネルギースペクトラムの測定

1. μ 粒子の寿命測定

原理

セットアップ

結果

考察

2. 生成電子のエネルギースペクトラム測定

文献値との比較

★実験結果と世界平均を比較

Journal of Physics G Nuclear and Particle Physics 2010によると、
文献値は

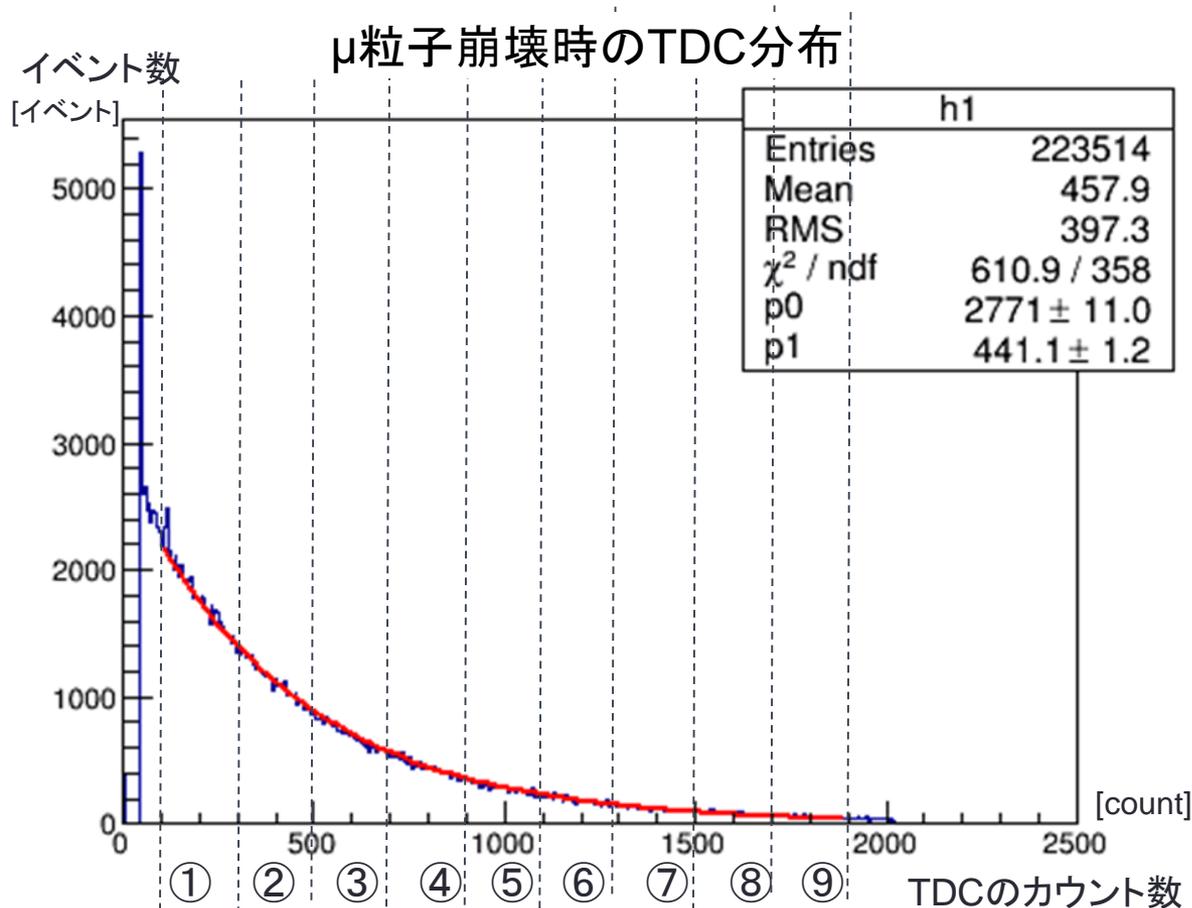
$$\tau_{\text{PDG}} = 2.197034 \pm 0.000021 [\mu\text{s}]$$

本実験の実験値

$$\tau = 2.202 \pm 0.007 [\mu\text{s}]$$

なのでPDGの値と誤差(0.3%)の範囲内で一致している

Fit範囲と寿命の関係



寿命の理論式

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

(τ = 平均寿命)

Fitした式

$$f(t) = p_0 \exp\left(-\frac{t}{p_1}\right)$$

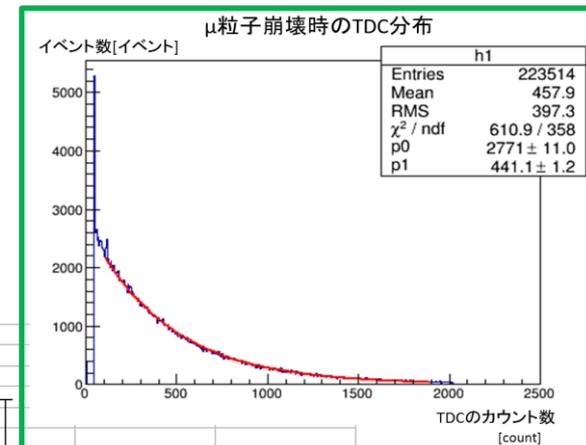
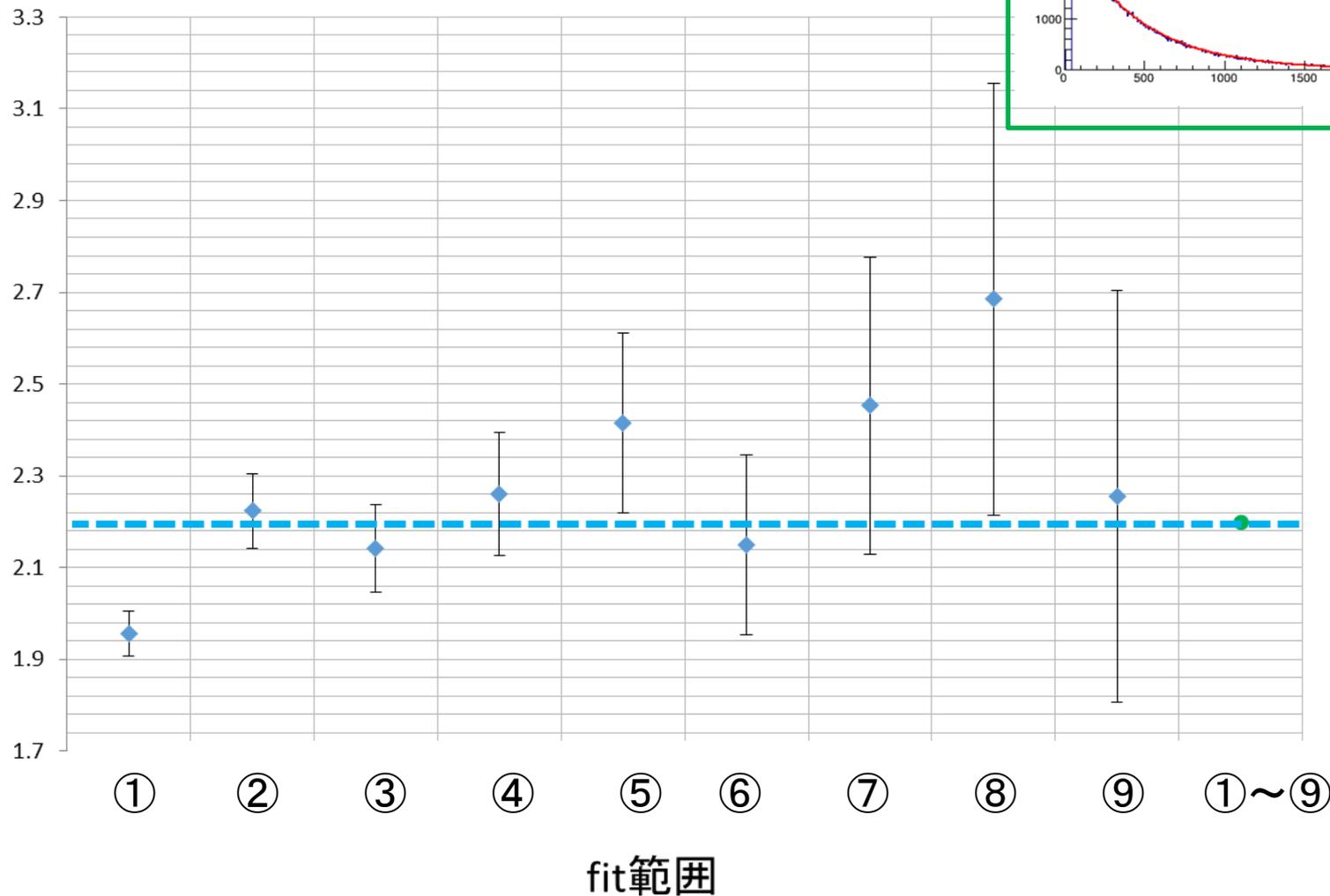
p1の値はfit範囲に
依存しないはず



TDCのカウント数が
100～1900の範囲で
200カウントずつのブロック
に分けてfitを確認

Fit範囲と寿命の関係

寿命 τ [μ s]



Fit範囲と寿命の関係

寿命 τ [μ s]

3.3

3.1

スムーズに変化していない
構造が混ざっている

2.7

2.5

2.3

2.1

1.9

1.7

①

②

③

④

⑤

⑥

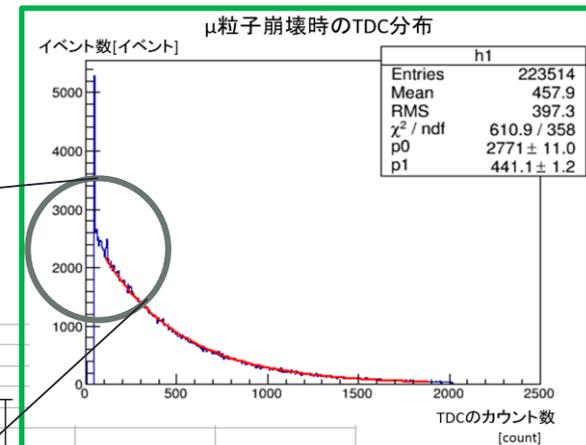
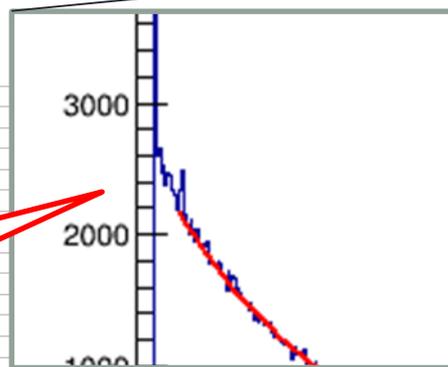
⑦

⑧

⑨

①~⑨

fit範囲

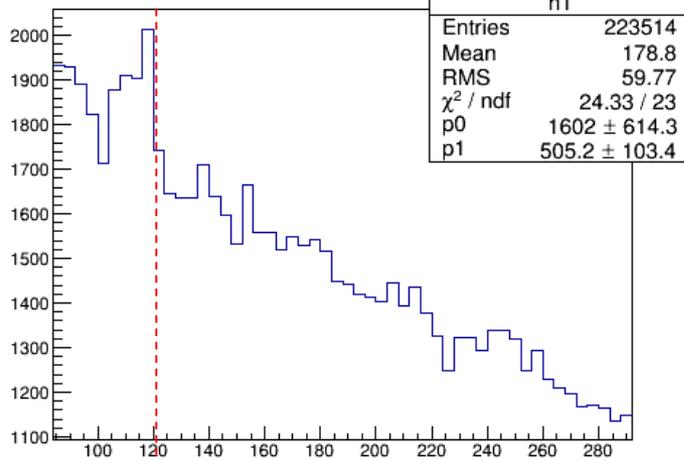


気になる構造を除いた結果

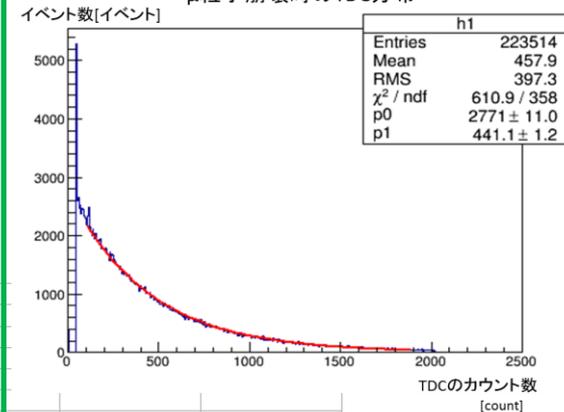
寿命 τ [μs]



p2_nashi



μ 粒子崩壊時のTDC分布



fit範囲

もくじ

μ 粒子の寿命及び 生成電子のエネルギースペクトラムの測定

1. μ 粒子の寿命測定

原理

セットアップ

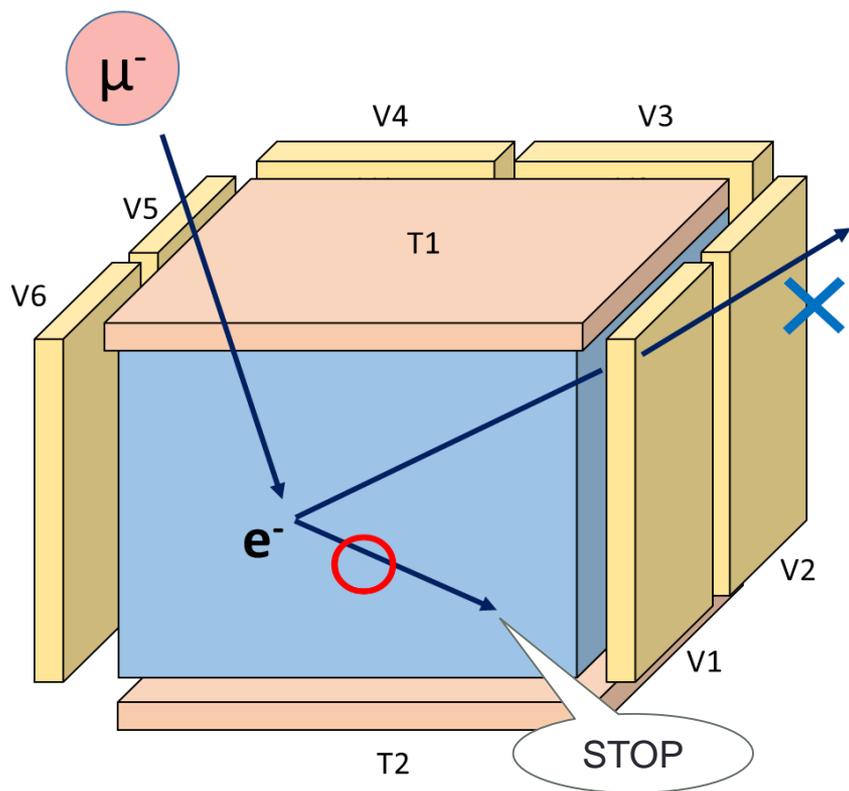
結果

考察

2. 生成電子のエネルギースペクトラム測定

イベント選定

★ベトーカーンター :メインシンチレーターから飛び出した電子を観測する
 μ 粒子がメインシンチレーター内で崩壊し、且つ生成される電子が外に飛び出さない
 イベントが欲しい

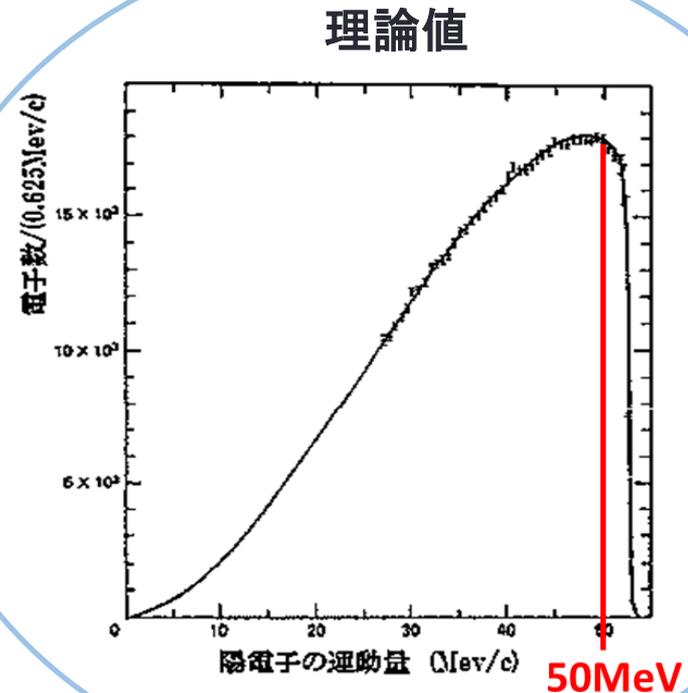
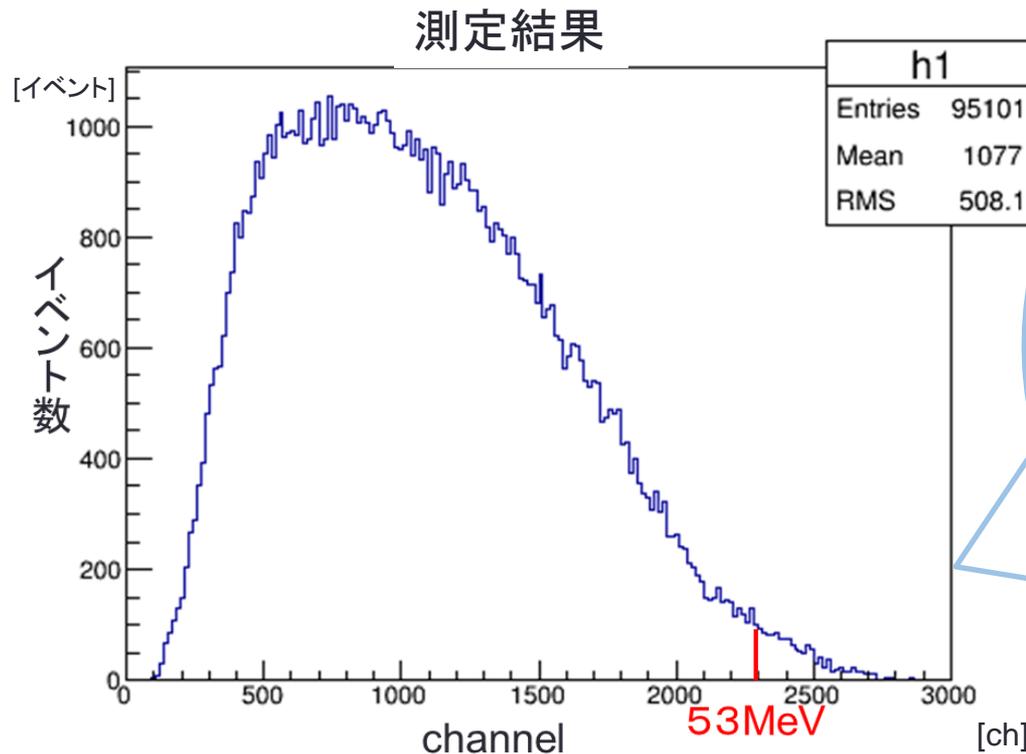


★選定条件

- ① μ 粒子の寿命を図る時と同じ条件
 - ➡ μ 粒子が入射し、メインシンチレーター内で静止して崩壊した
- ② ベトーカーンターが反応していないもの
 - ➡ 電子がベトーカーンターを通過していない

電子のエネルギー分布

比較



★エネルギースケールを較正するために、貫通した μ 粒子のシグナルを用いた。それによると、2300chあたりが53MeVに相当する。

★電子の最大エネルギーは μ 粒子の質量エネルギーの1/2(=52MeV)となる。

★測定したエネルギー分布は理論から予想される分布と大きく異なっている。

★原因として電子の全エネルギーをシンチレーターが検出できていないと思われる。原因究明のためにGeant4によるシミュレーションを始めた。

Geant4による1イベントのシミュレーション

赤 → 荷電粒子 (μ^- 、 e^-)

緑 → 電荷をもたない粒子
(ν_e 、 ν_μ 、 γ)

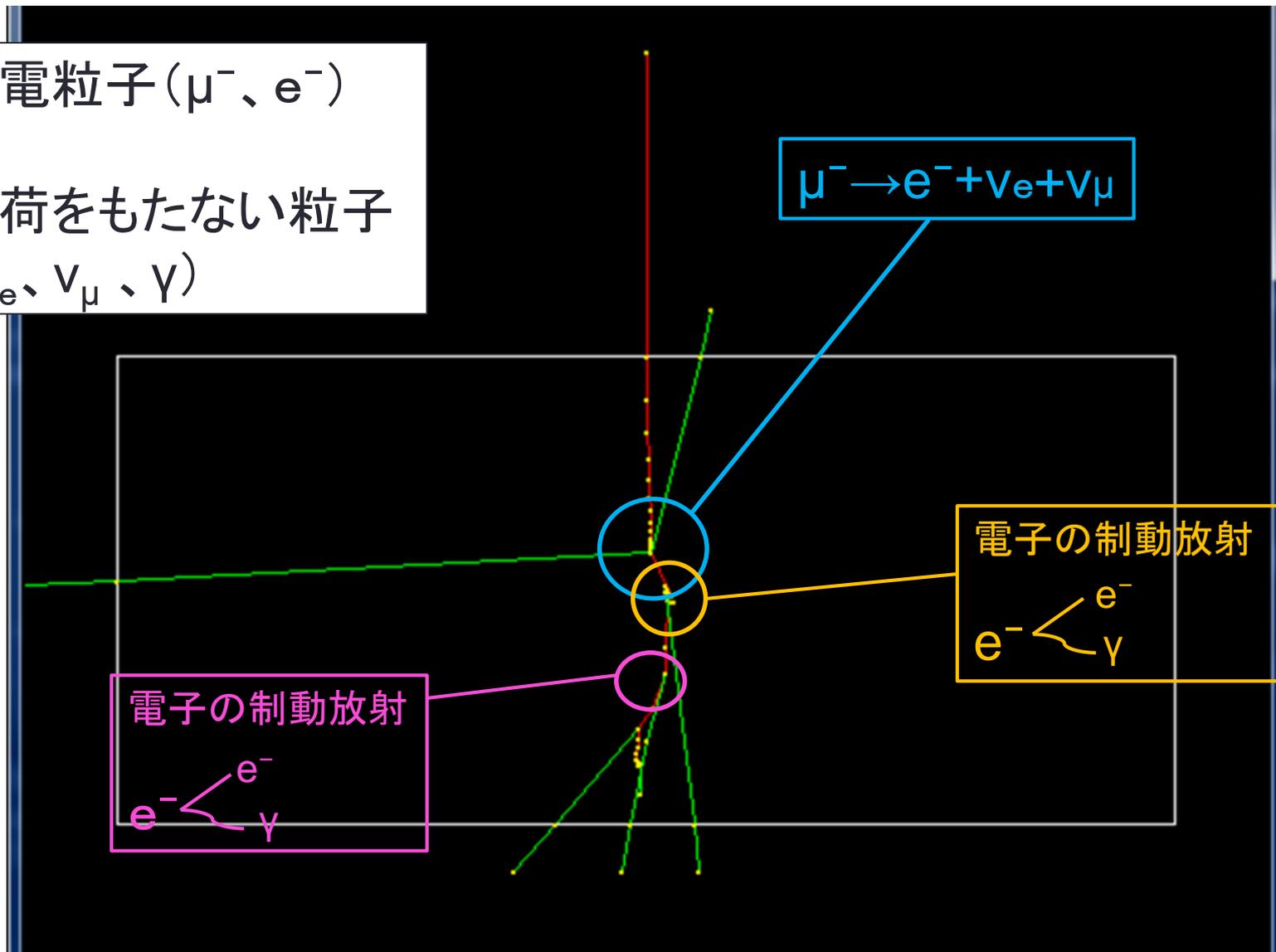
$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_e + \nu_\mu$

電子の制動放射

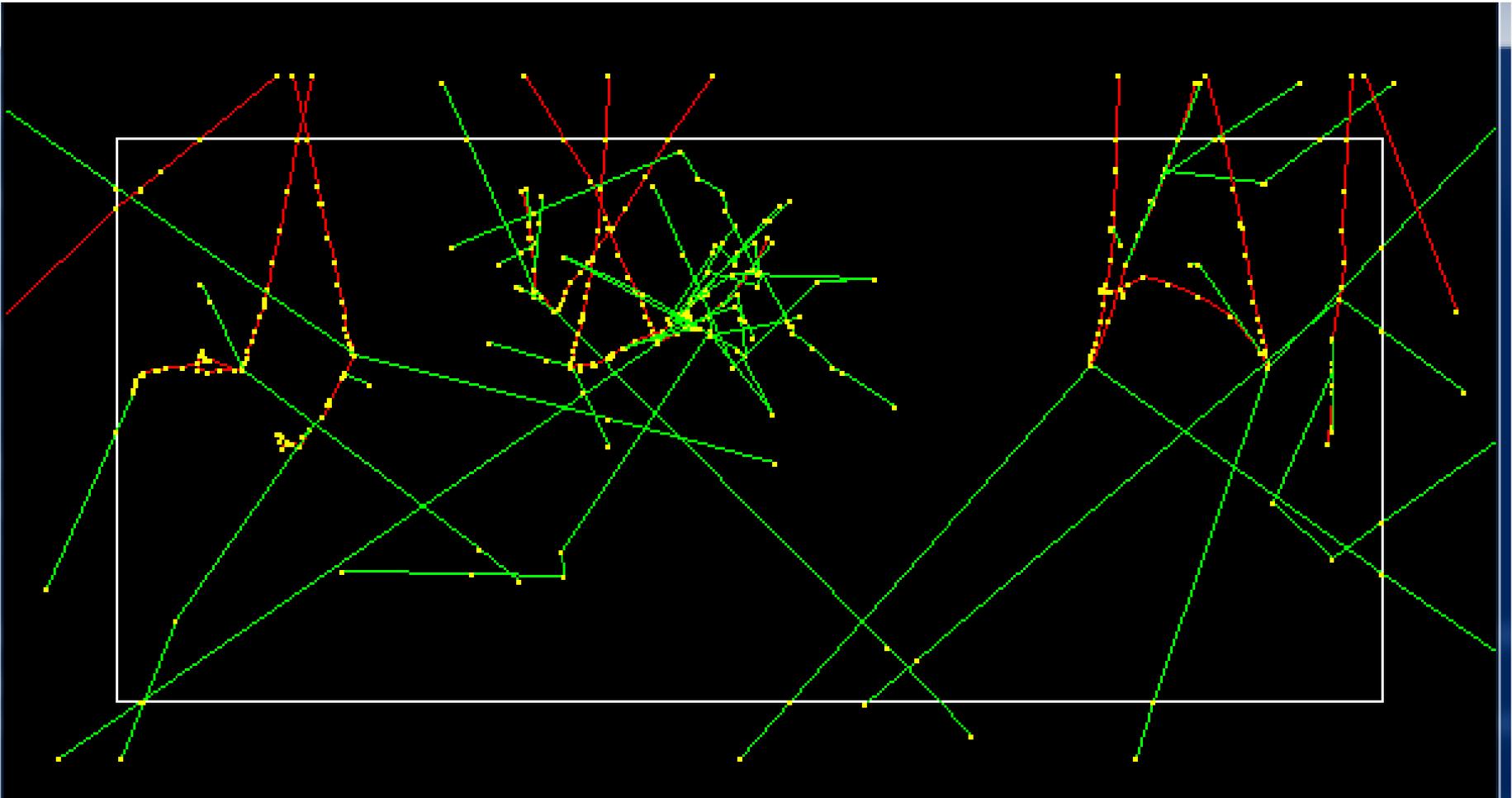
$e^- \rightarrow \begin{cases} e^- \\ \gamma \end{cases}$

電子の制動放射

$e^- \rightarrow \begin{cases} e^- \\ \gamma \end{cases}$



打ち込む μ 粒子にランダムな入射位置 & 角度 の情報を追加した際のシミュレーション



まとめ

- ・本実験で得られた μ 粒子の寿命は $2.202 \pm 0.007 \mu\text{s}$ で文献値と誤差の範囲内で一致した。
- ・測定した生成電子のエネルギー Spektrum は理論から予想されるエネルギー分布と大きく違っていた。
 - ➡ 原因は、プラスチックシンチレーター内で電子が制動放射を起こし、そこで生成された光子がシンチレーター外に逃げていくためと予想される。シミュレーションプログラム(GEANT4)を使って検討中。

ご清聴ありがとうございました

補足

スライド

μ粒子の寿命の理論式

$$\Gamma = \tau_{\mu}^{-1} = \frac{G_F^2 m_{\mu}^5}{192\pi^3} F(x) \left(1 + \frac{3}{5} \frac{m_{\mu}}{M_W^2}\right) [1 + \delta_{EW} \text{ (高次の補正項)}]$$

静止μ粒子崩壊時の電子のエネルギー分布

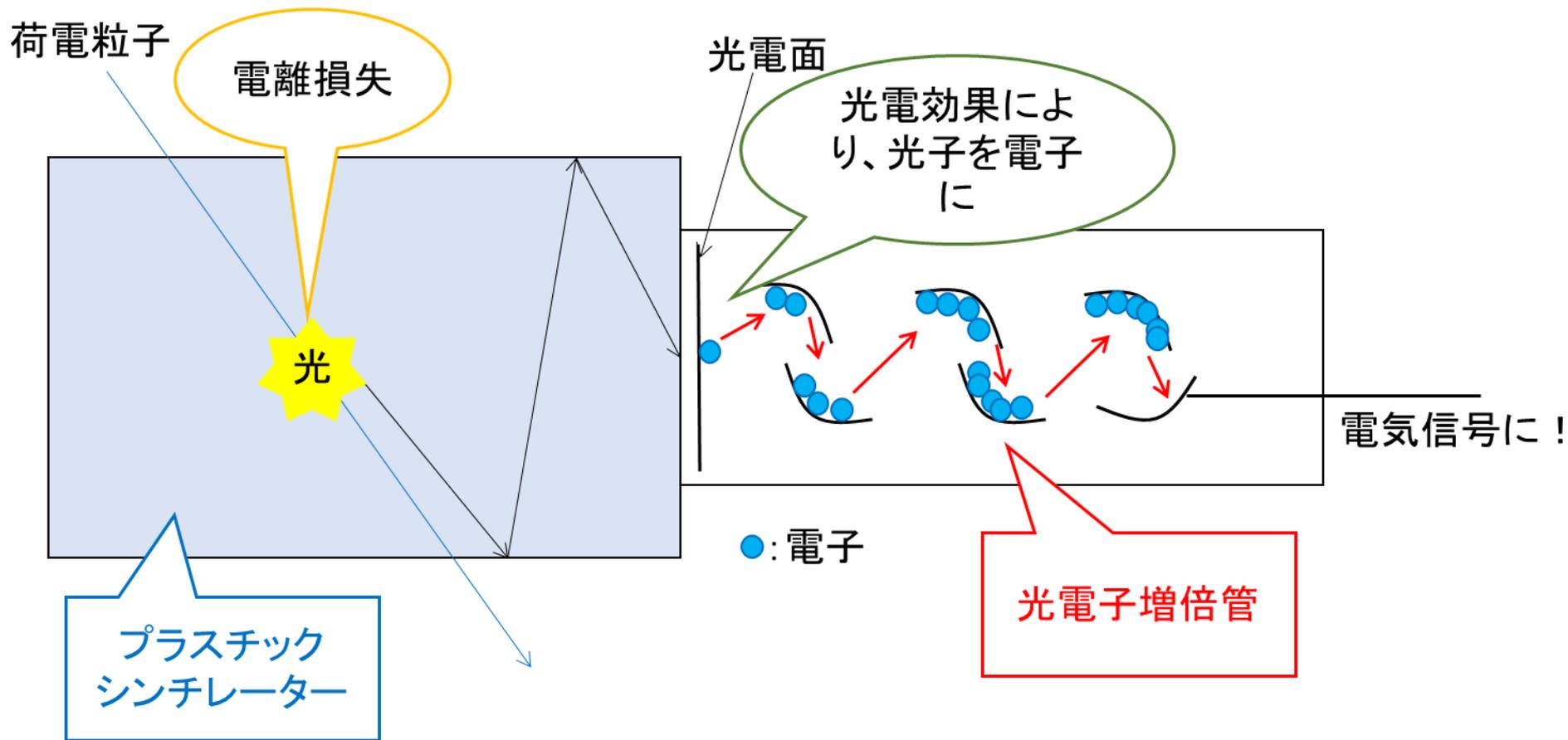
$$\frac{dN}{dE} = \frac{d\Gamma}{dE} = \left(\frac{G_F}{\sqrt{2}}\right)^4 \frac{m_{\mu}^2 E^2}{2h(4\pi)^3} \left(1 - \frac{4E}{3m_{\mu}c^3}\right) \dots (*)$$

ここで

$$x = \frac{m_e^2}{m_{\mu}^2}$$

$$F(x) = 1 - 8x + 8x^3 - x^4 - 12x^2 \ln(x) = 0.999813$$

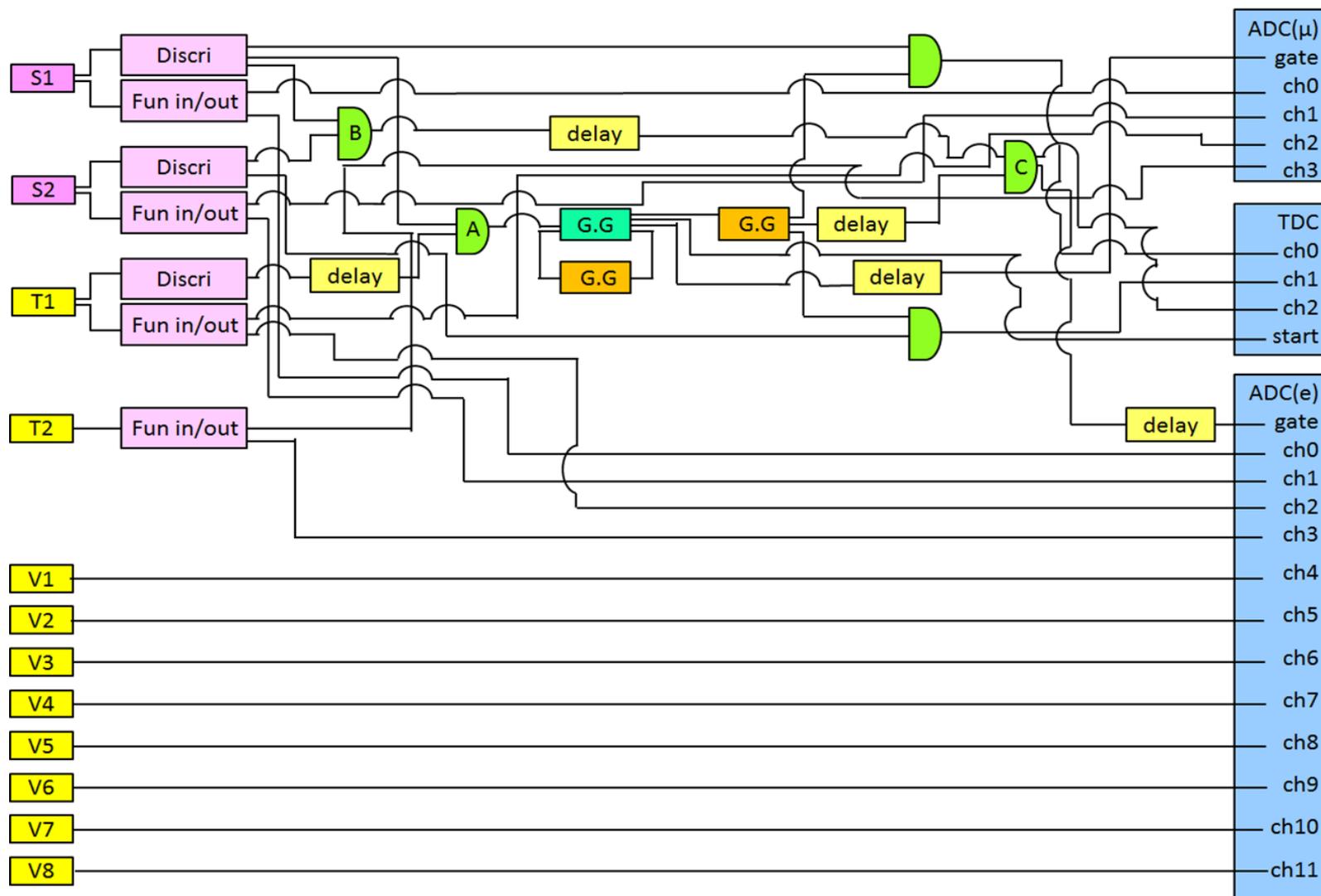
シンチレーションカウンター



本実験で使用した各CHのHV(V)

カウンター	CH	HV(V)	カウンター	CH	HV(V)
S1	1	2050	V3	7	1870
S2	2	2050	V4	8	2440
T1	3	2250	V5	9	2400
T2	4	1770	V6	10	2030
V1	5	1970	V7	11	2210
V2	6	1660	V8	12	2025

セットアップの全体図



μ 粒子の寿命測定

測定で得た生データについて

例. イベント数10回の時

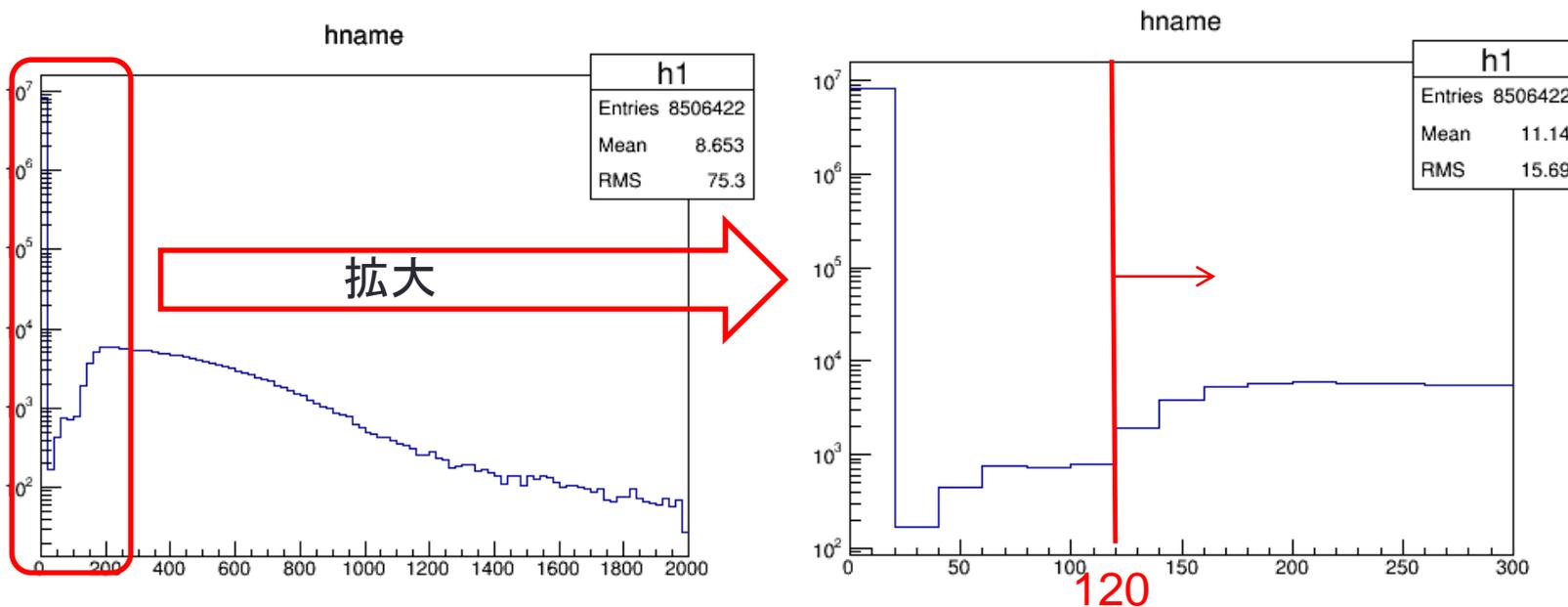
	実行したイベント数	ADC(e)のS1,S2,T1,T2,V1~V8の値														TDCのS1,S2,stop信号の値					
-1	1	1142	917	817	264	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4263	11	4263
-1	2	1594	1112	1237	85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4262	12	4263
-1	3	828	735	756	86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4259	11	4259
-1	4	623	804	922	86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4259	11	4259
-1	5	1842	1694	747	352	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4261	12	4262
-1	6	2017	982	765	378	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4259	11	4258
-1	7	594	416	971	87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4262	4263	4263
-1	8	1105	1521	699	87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4260	11	4260
-1	9	918	962	1530	86	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4264	11	4264
-1	10	593	991	645	381	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4422	4422	4422

イベント数

ADC(μ)のS1,S2,T1,T2の値

イベント選定について

μ 粒子がメインシンチレーター内で崩壊し、電子を放出する
 \Rightarrow ADC(e)で取得したS1の値が一定値以上のイベント

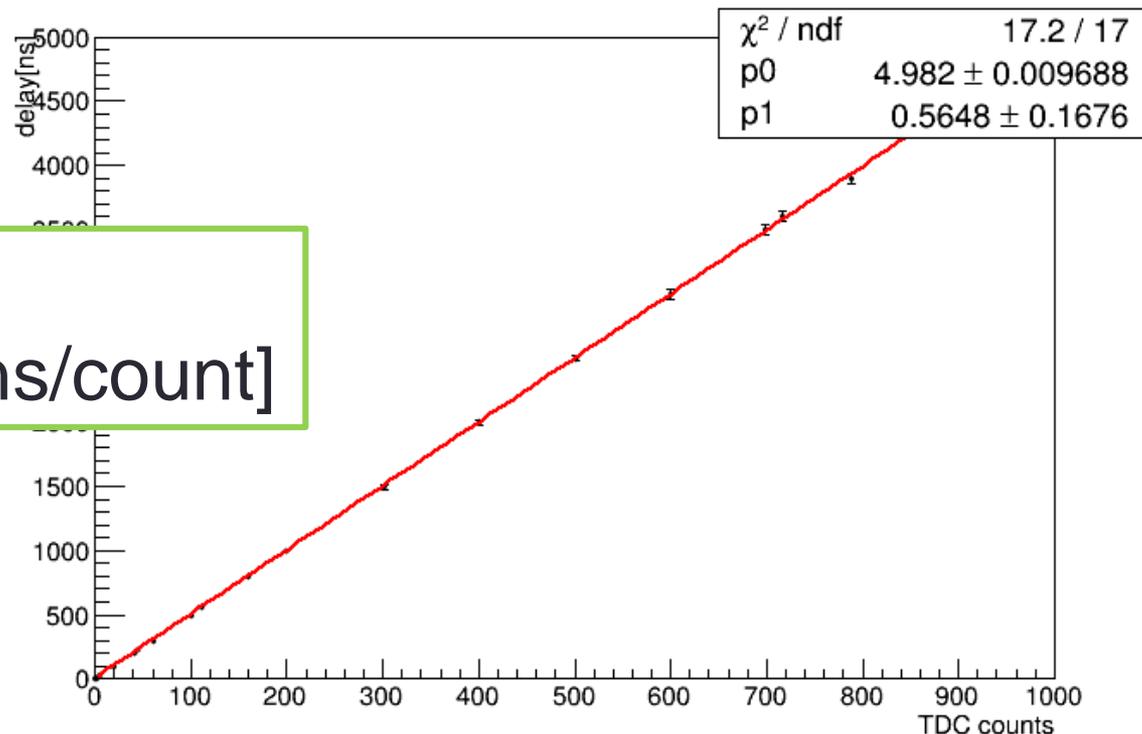


★120以上のときカウンターが鳴っているとみなした

TDCの時間較正

TDC時間較正

delay[ns]	0	10	20	30	100
TDCのカウント数	0.196	1.867	3.909	5.975	19.798
delay[ns]	200	225	300	500	560
TDCのカウント数	40.528	45.097	61.378	100.097	111.835
delay[ns]	800	1000	1500	2000	2500
TDCのカウント数	159.985	199.947	300.934	400.617	501.403
delay[ns]	3000	3500	3600	3900	
TDCのカウント数	600.497	698.905	715.813	788.194	



傾き

$$\alpha = 4.982 \pm 0.0097 [\text{ns/count}]$$

電子の エネルギースペクトラム

選別結果

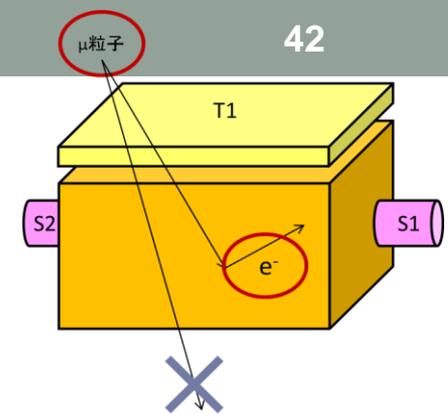
収集した全イベント数 8594212 イベントのうち、
選定条件1～3を満たしたイベント数は95101イベントであった。

割合は、

$$\frac{95101}{8594212} \times 100 = 1.11(\%)$$

である。

ADCのエネルギー較正



電子のエネルギースペクトラムを測定しているADCについてのエネルギー較正を行う

↓そのために

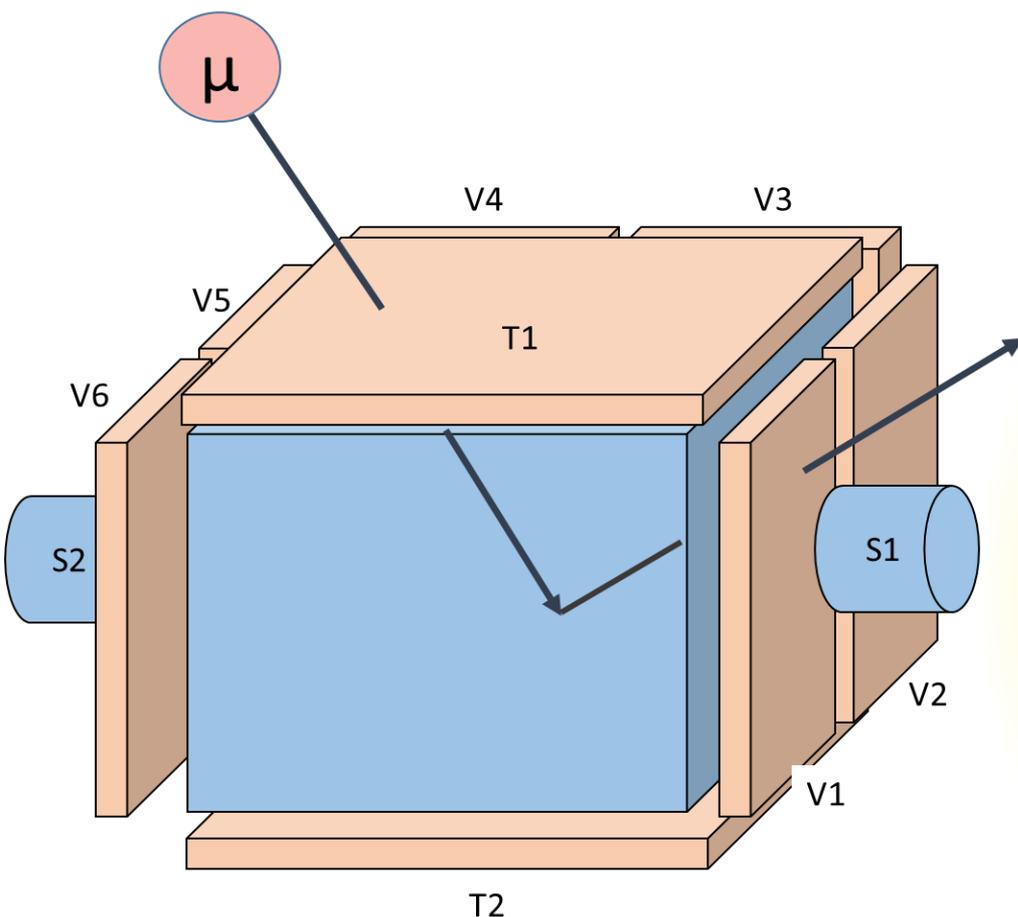
「 μ 粒子が崩壊せずにメインシンチレーターを通過したイベント」を用いて測定を行う

なぜなら・・・

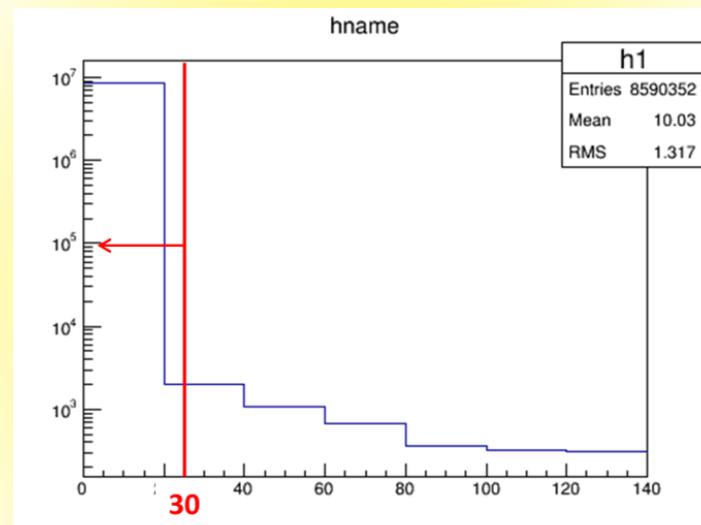
メインシンチレーターを垂直に貫通した μ 粒子のエネルギー損失は、計算から求めることができるから！

イベント選別について

3. 放出された電子がメインシンチレーター内にとどまっている
 ⇒ベトーカーンターがある一定値以下(=鳴っていない)イベント



ベトーカーンターは、
 T1, T2, V1~V8のカウンター



カットの例(T2)

各CHのペDESTALの値

ADC(μ)		ADC(e)					
S1	109	S1	58	V1	55	V5	65
S2	98	S2	63	V2	63	V6	64
T1	89	T1	56	V3	57	V7	66
T2	85	T2	60	V4	63	V8	80

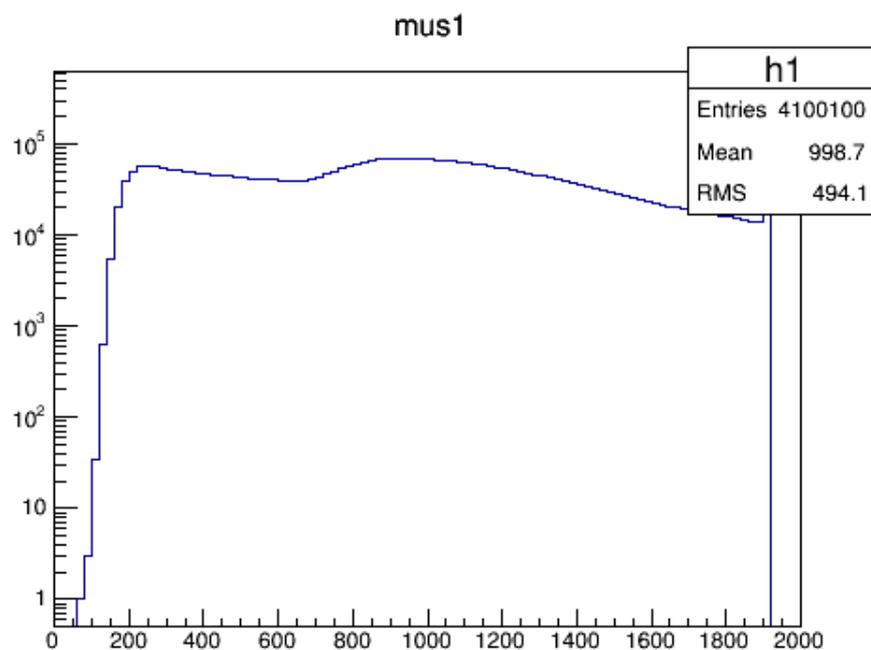
各カウンターのADC分布

4,100,100イベント

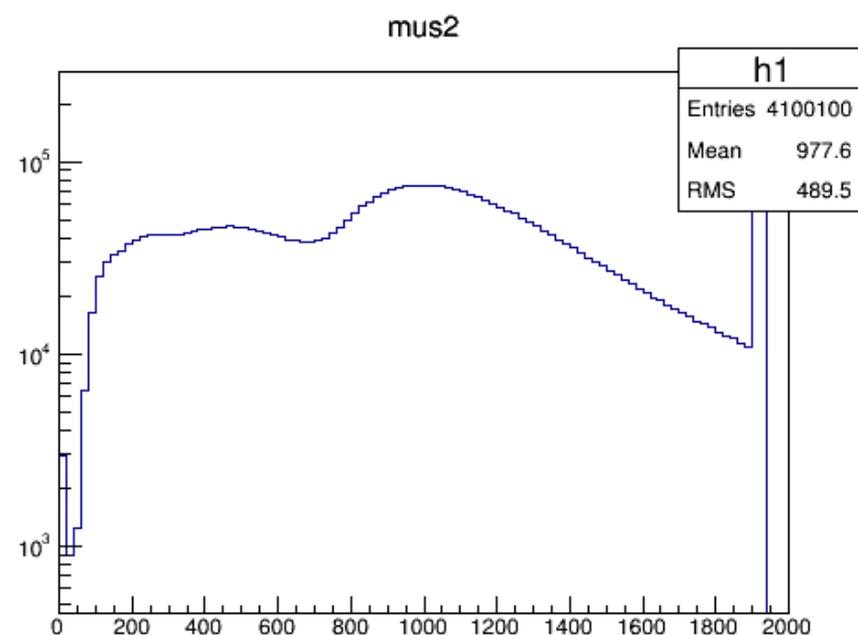
横軸:ADCのCH数 縦軸:エントリー数(対数表示)

ADC(μ)で取ったデータ

S1



S2



各カウンターのADC分布

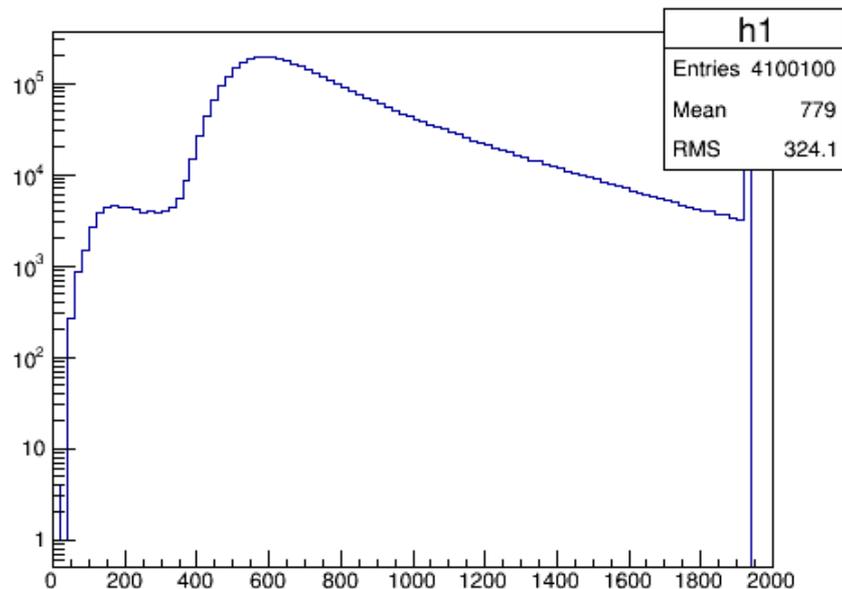
4,100,100イベント

横軸:ADCのCH数 縦軸:エントリー数(対数表示)

ADC(μ)で取ったデータ

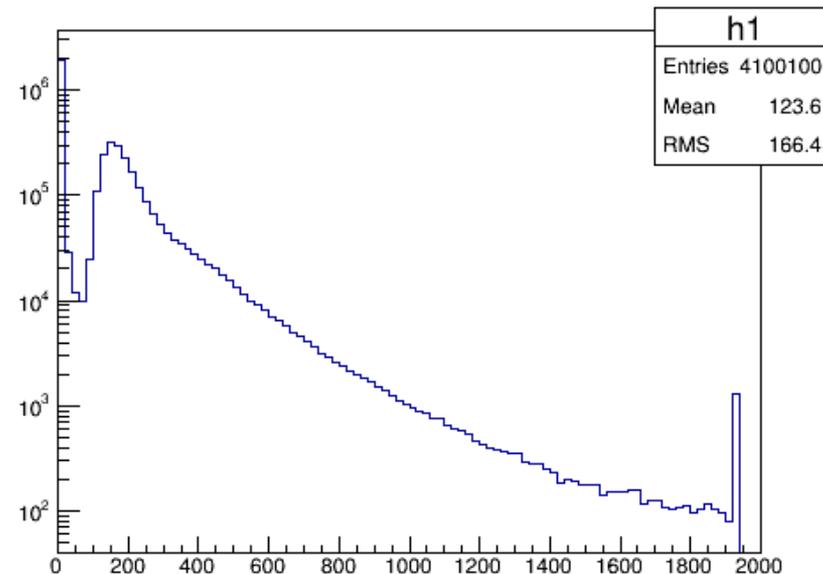
T1

mut1



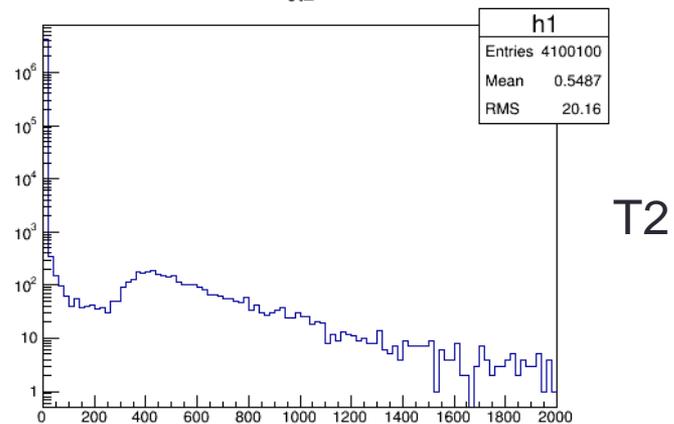
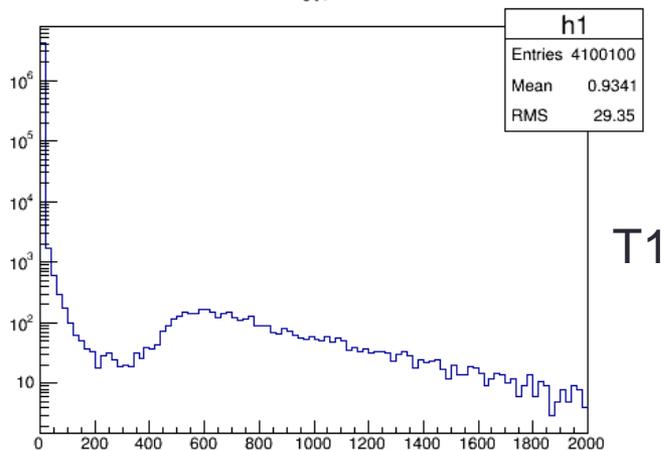
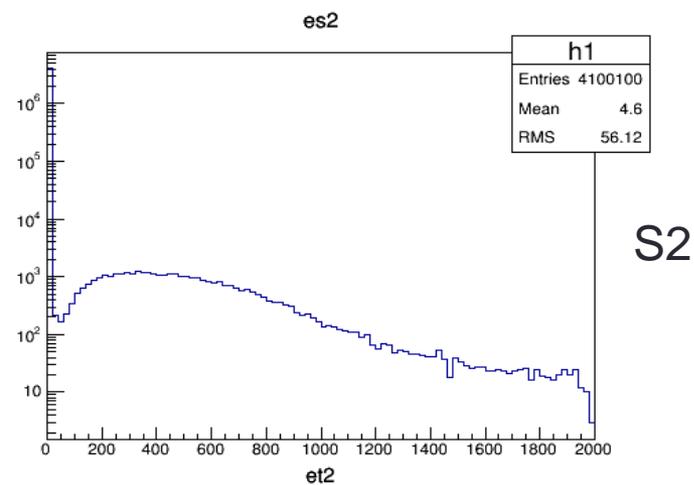
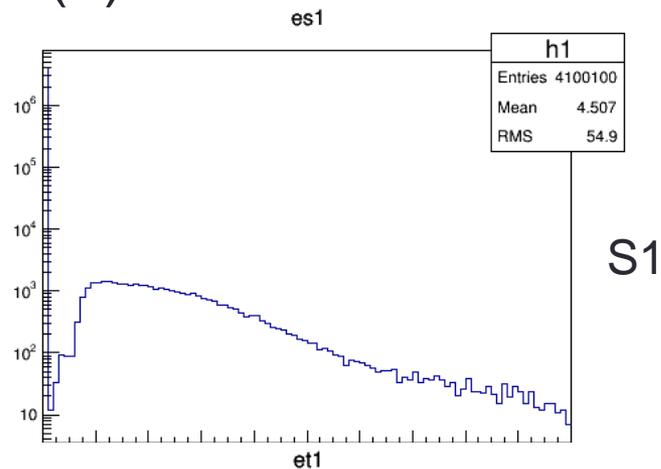
T2

mut2



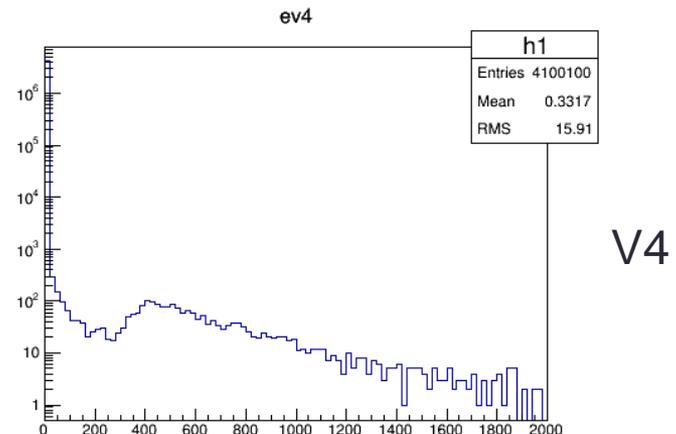
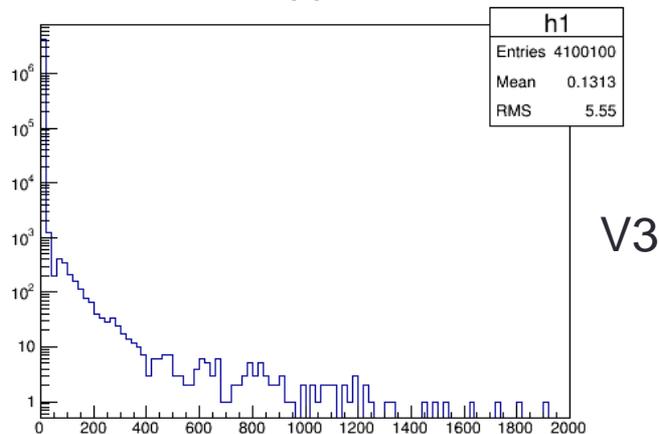
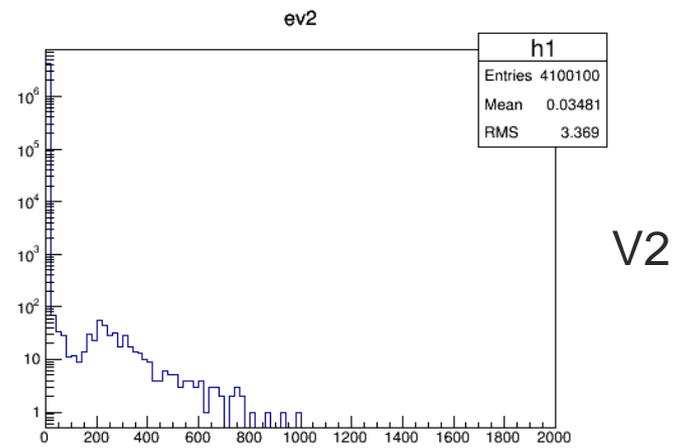
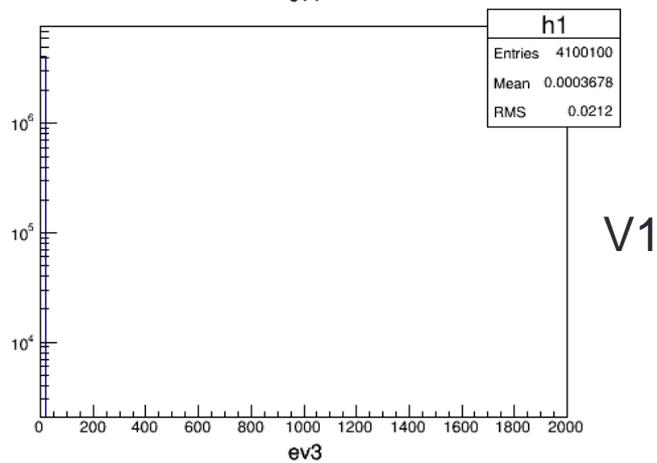
各カウンターのADC分布

4,100,100イベント
ADC(e)で取ったデータ



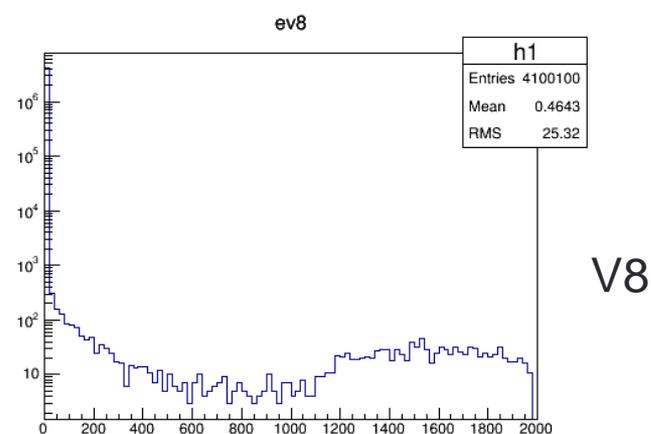
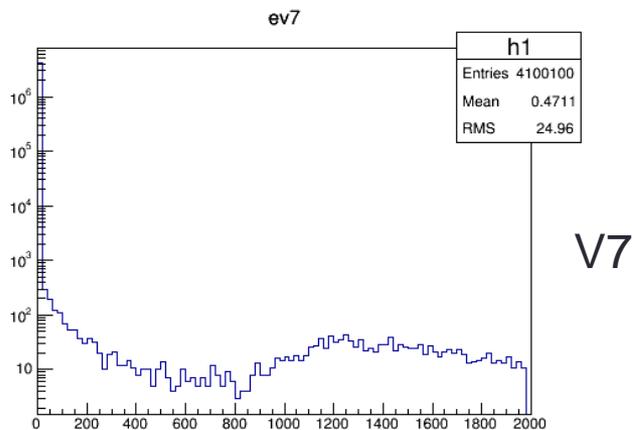
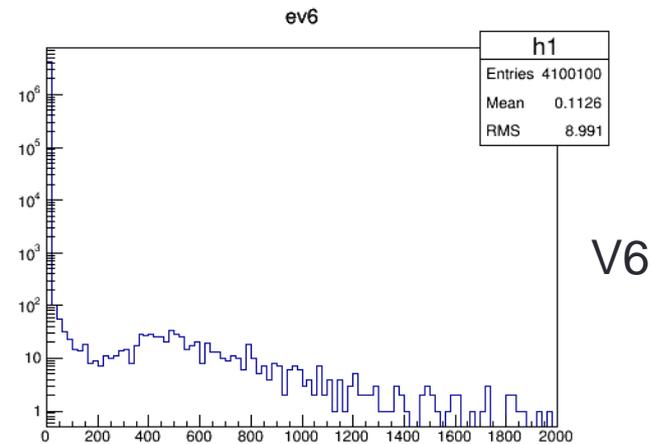
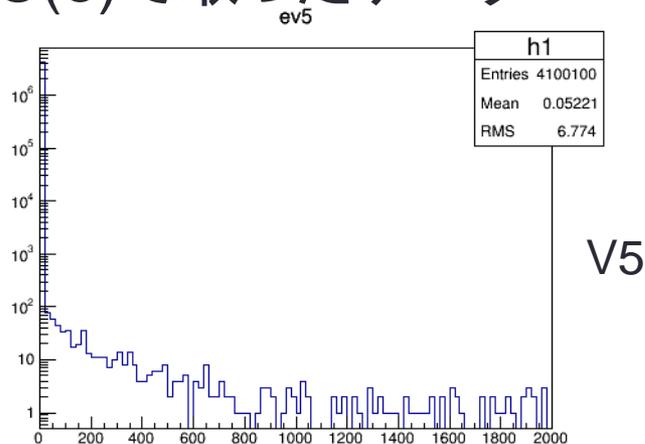
各カウンターのADC分布

4,100,100イベント
ADC(e)で取ったデータ

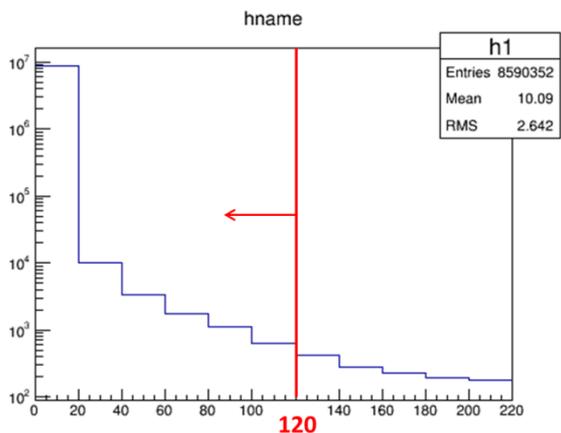


各カウンターのADC分布

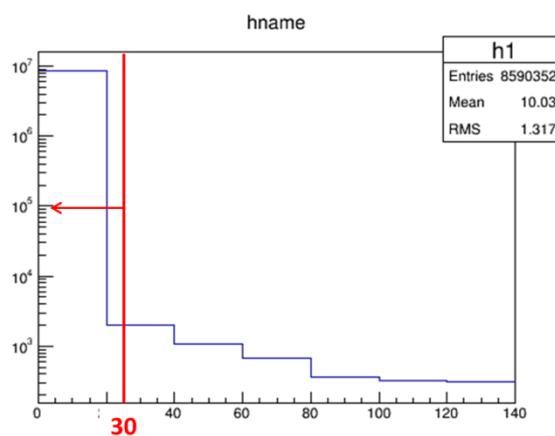
4,100,100イベント
ADC(e)で取ったデータ



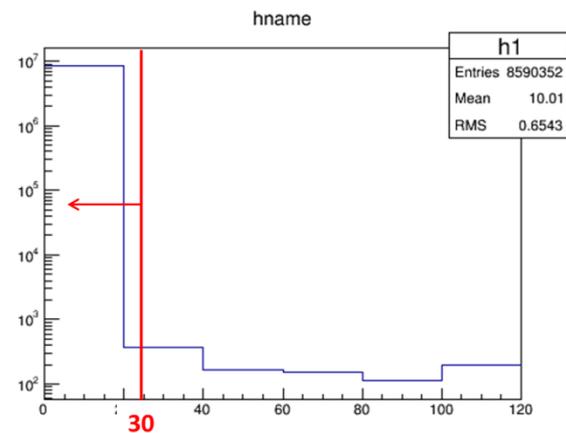
各カウンターの選定条件の具体的な値



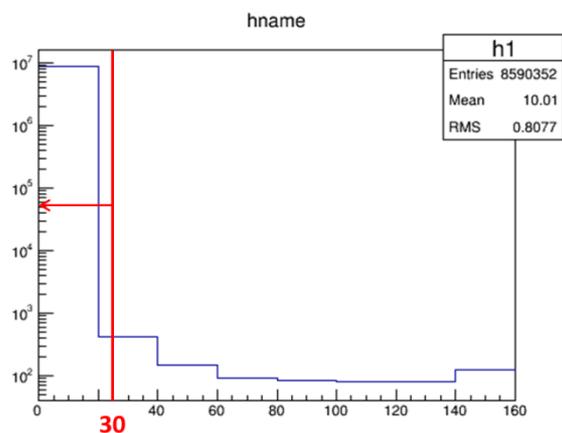
T1



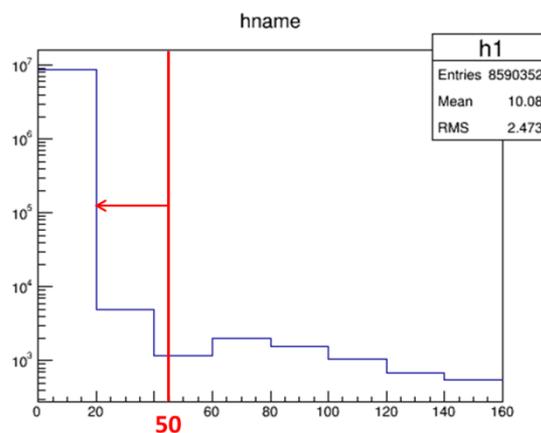
T2



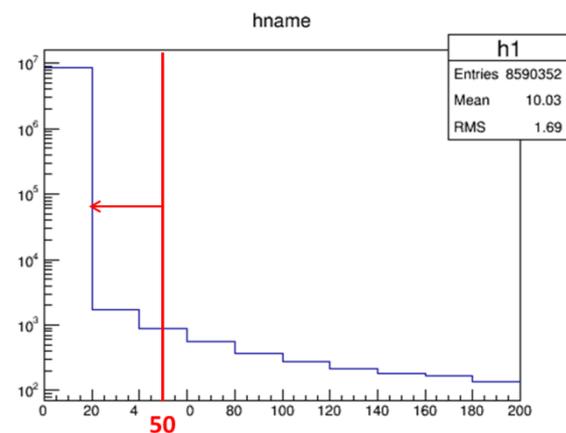
V1



V2

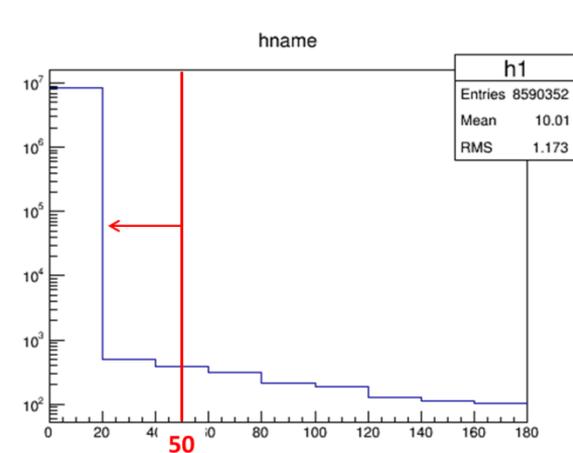


V3

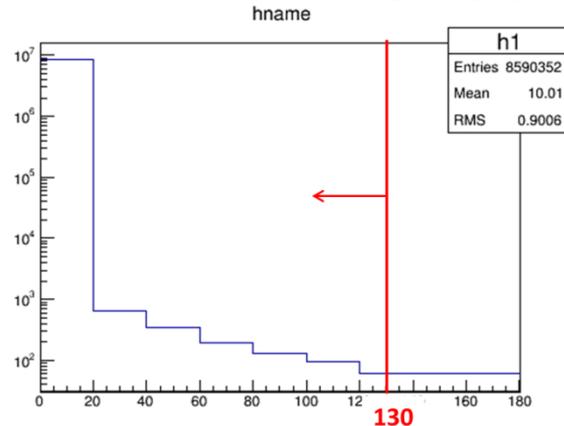


V4

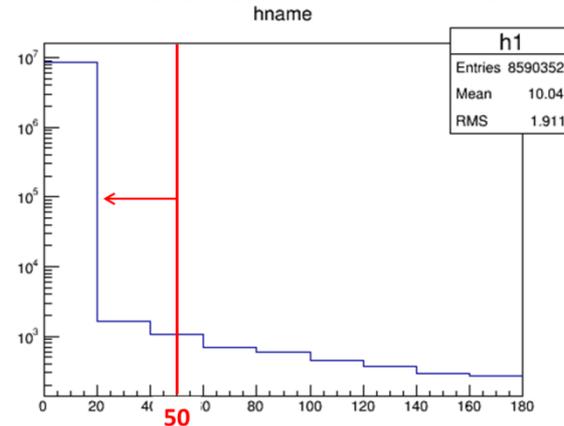
各カウンターの選定条件の具体的な値



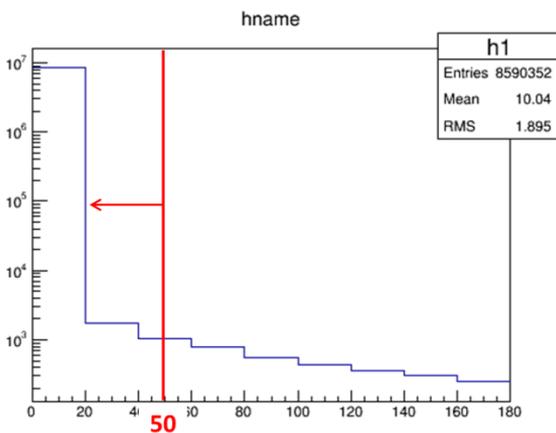
V5



V6



V7



V8

T1	T2	V1	V2	V3
120	30	30	30	50
V4	V5	V6	V7	V8
50	50	130	50	50

★この値を下回るイベントを選定した

メインシンチレーター内での μ 粒子のエネルギー損失

μ 粒子の強度
 $J(\theta) = J(0) \cos^2 \theta$

プラスチックシンチレーターに垂直に入射する
 μ 粒子のエネルギー損失は

$$\Delta E [\text{MeV}] = \frac{dE}{dx} [\text{MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}] \times \rho [\text{g}/\text{cm}] \times t [\text{cm}]$$

で求められる。

粒子に対する厚さ1[g/cm]
 あたりのエネルギー損失

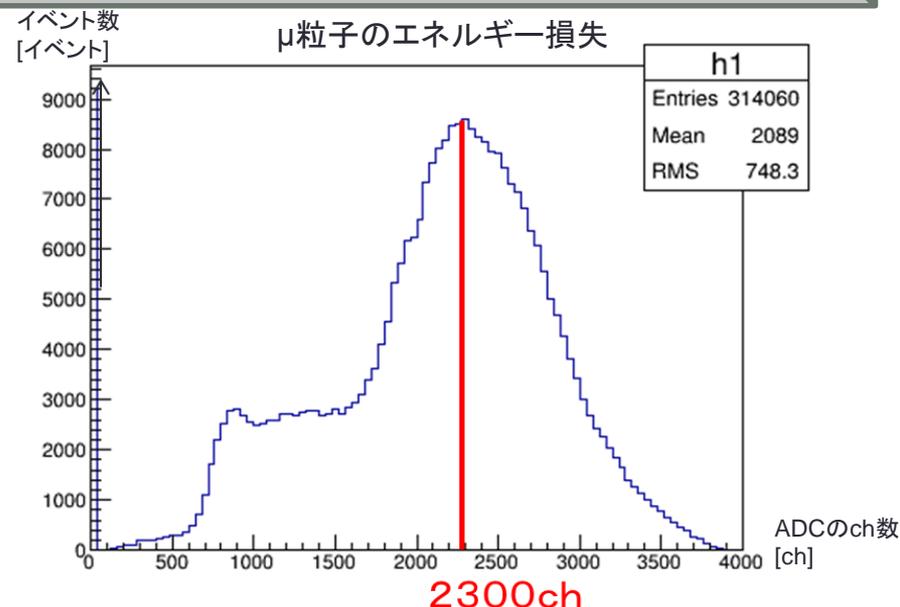
物質の密度

メインシンチレータの厚さ

それぞれの値を代入すると
 $\Delta E = 1.936 \times 1.06 \times 26 = \underline{53.3} [\text{MeV}]$



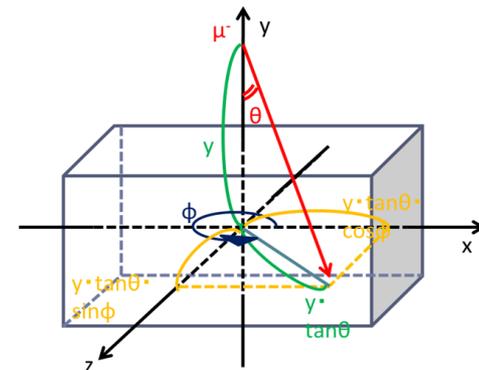
★ADCの2300ch付近が約53MeV
 であることが分かった



GEANT4

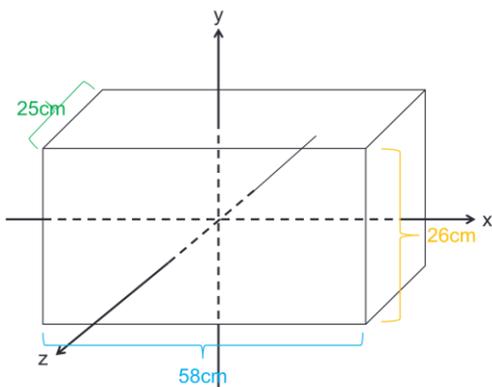
シミュレーションの設定

3. 入射粒子の進行方向の設定



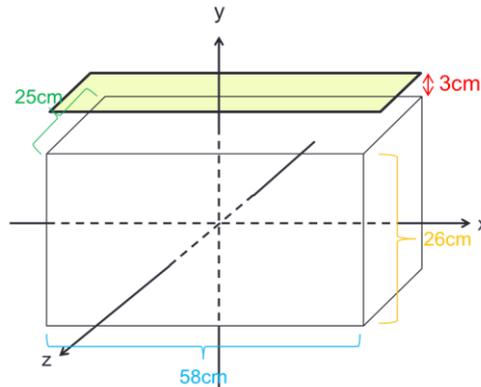
θ : $\cos^2 \theta$ に従う分布
 ↑ 計算で求めると飛来する μ 粒子の個数は $\cos^2 \theta$ に従う
 Φ : $0^\circ \sim 360^\circ$ の間での一様分布

1. 検出器の設定

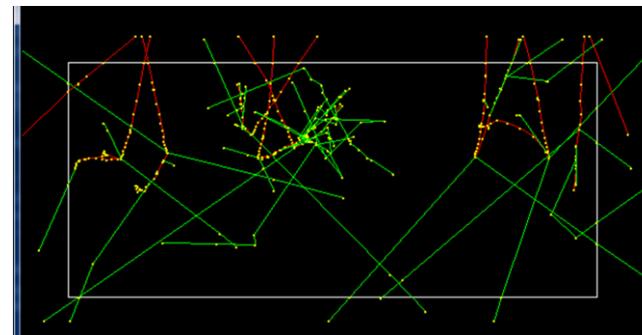
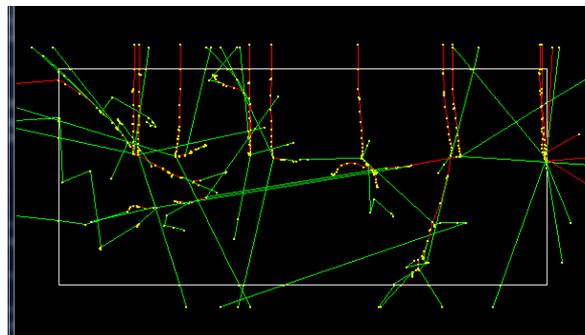


左の図のようにx軸、y軸、z軸を設定し、各辺の長さも設定

2. 入射粒子の位置設定



検出器の真上の高さ3cmのx-z平面で一様乱数を発生させ、入射粒子の位置を設定した。



宇宙線の入射角

検出器の設定

強度 $J(\theta)$

…単位面積、単位時間、単位立体角当たりの
粒子の個数

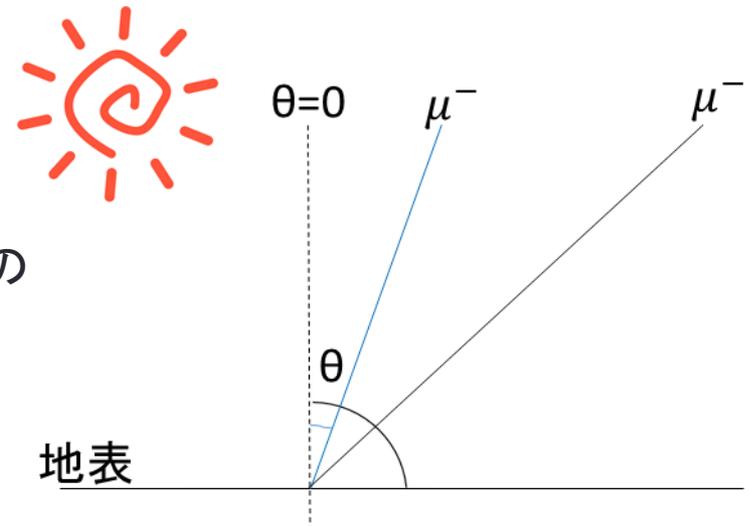
μ 粒子の強度 $J(\theta)$ は、

$$J(\theta) = J(0) \cos^2 \theta$$

と表される

$$J(0) = 0.83 \times 10^{-2} (\text{個}/\text{cm}^2 \cdot \text{sec} \cdot \text{sr})$$

⇒鉛直方向からくる μ 粒子の強度



μ 粒子の個数 $J(\theta)$ は $\cos^2 \theta$ に比例する