

# 2024年度：宇宙線と素粒子の実験 (ミュー粒子実験) 第三回

## 本日の予定

1. ミュー粒子の寿命の導出
2. 検出器のエネルギー較正、分解能(復習)
3. 崩壊電子のエネルギー分布の導出、理論

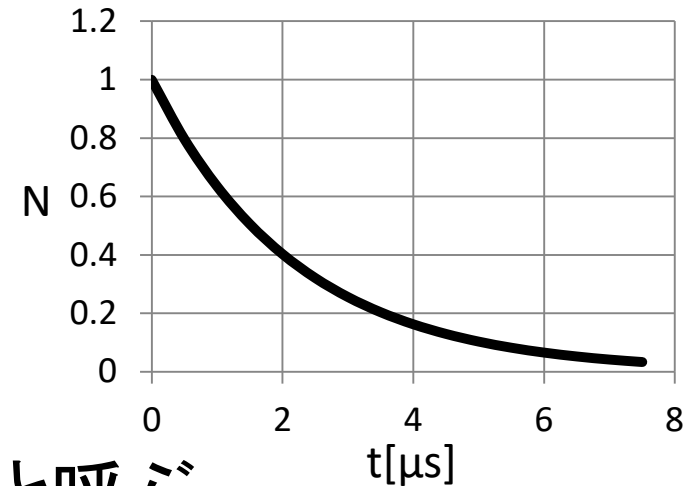
## 粒子の寿命

# 粒子の寿命とは？

テキスト  
4(ア)

- 時間 $t$ における粒子の個数 $N$ は下の式で表される。

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



- ここで、定数  $\tau$  を“**粒子の寿命**”と呼ぶ。
- これは、粒子が単位時間あたり**一定の割合**で崩壊(減少)することを示している。

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{1}{\tau}N = -\frac{N_0}{\tau} \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

- 微小な時間  $t-\Delta t/2 \sim t+\Delta t/2$  に崩壊する粒子数は

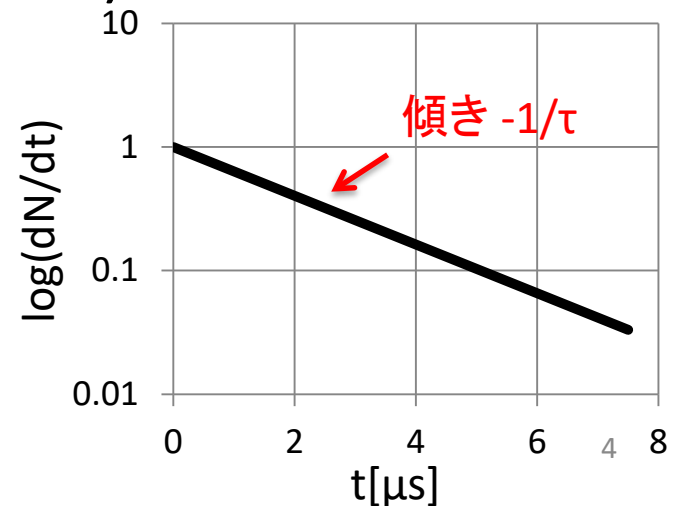
$$\frac{dN}{dt} \cdot \Delta t = -\frac{1}{\tau} N \cdot \Delta t = -\frac{N_0}{\tau} \cdot \Delta t \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

と表す事ができる。対数を取って整理すると、

$$\log\left(\frac{dN}{dt} \cdot \Delta t\right) = \log N + C_1 = -\frac{t}{\tau} + C_2$$

と  $t$  に対する直線になる。 $(C_1, C_2)$  は定数

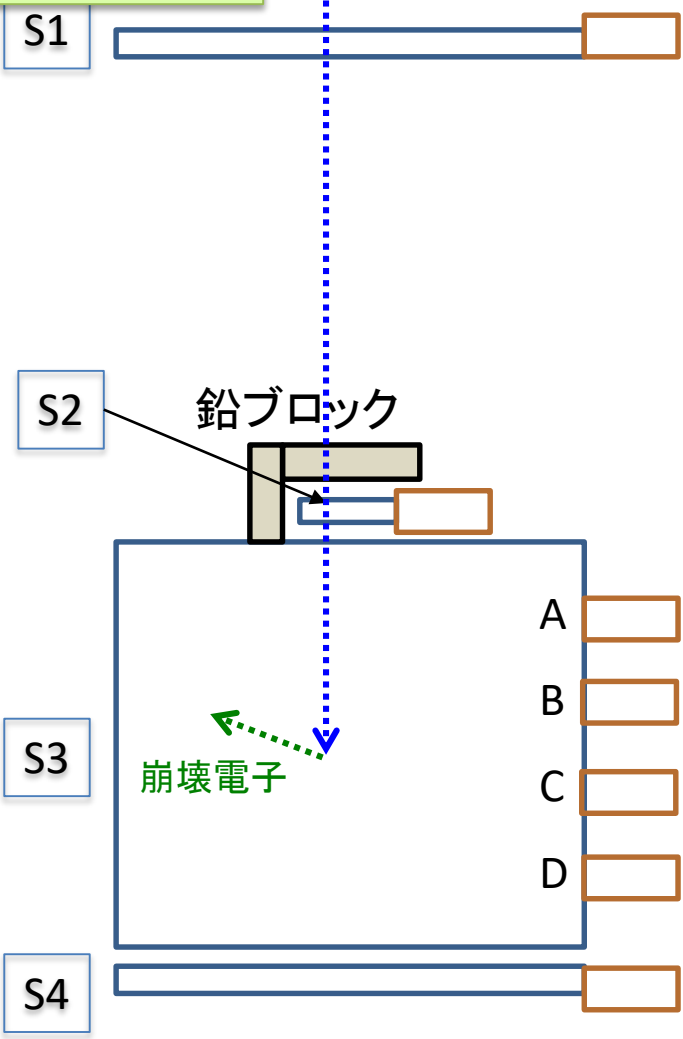
- 微小な時間の崩壊数の  $\log$  を取ることで、その傾きとして寿命を測定できる。



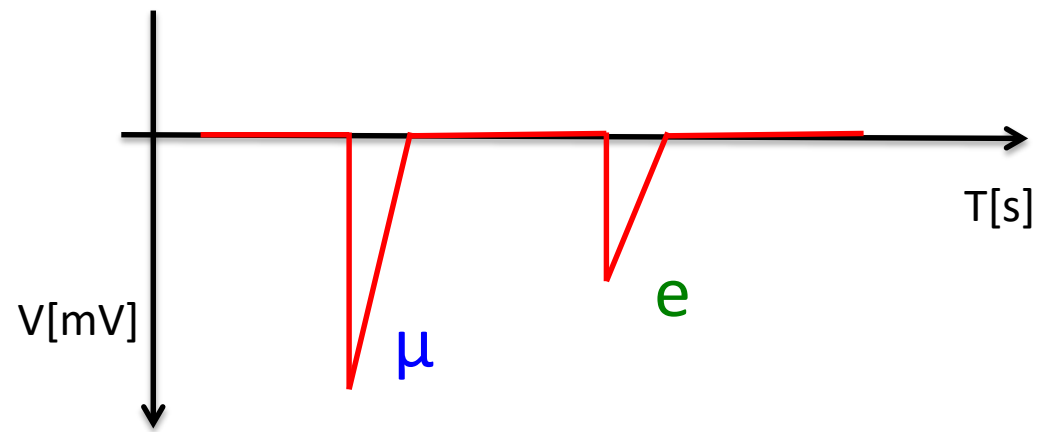
# $\mu$ 粒子の寿命の測定 (実験1のデータ)

テキスト  
3 実験1

宇宙線ミュー粒子



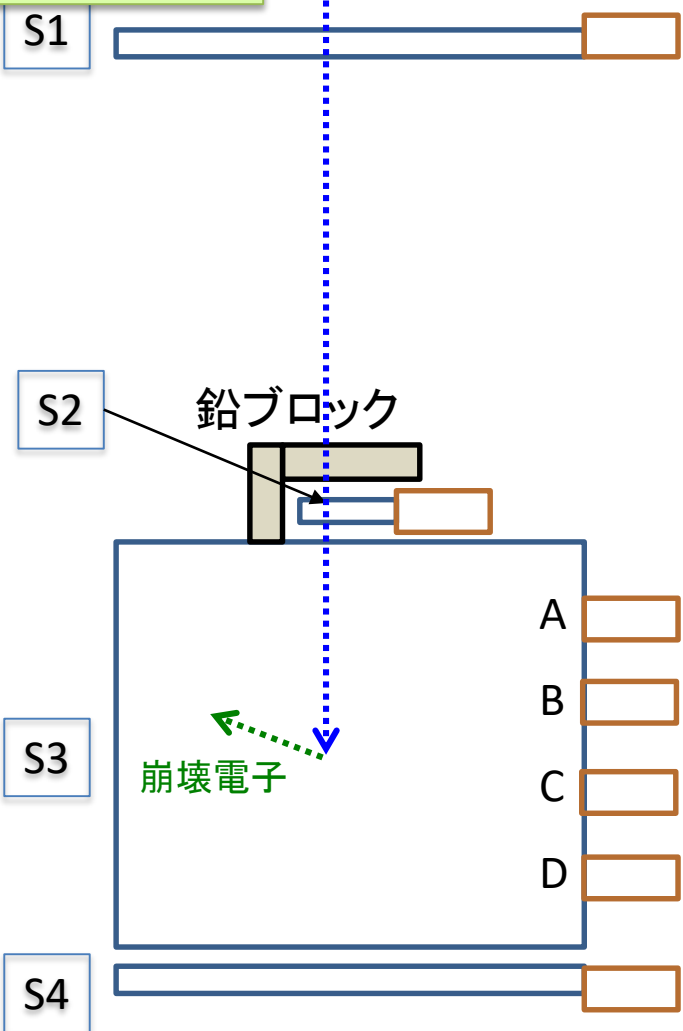
実験1 (S1 S2 S3  $\bar{S4}$ ) で得られるS3の信号



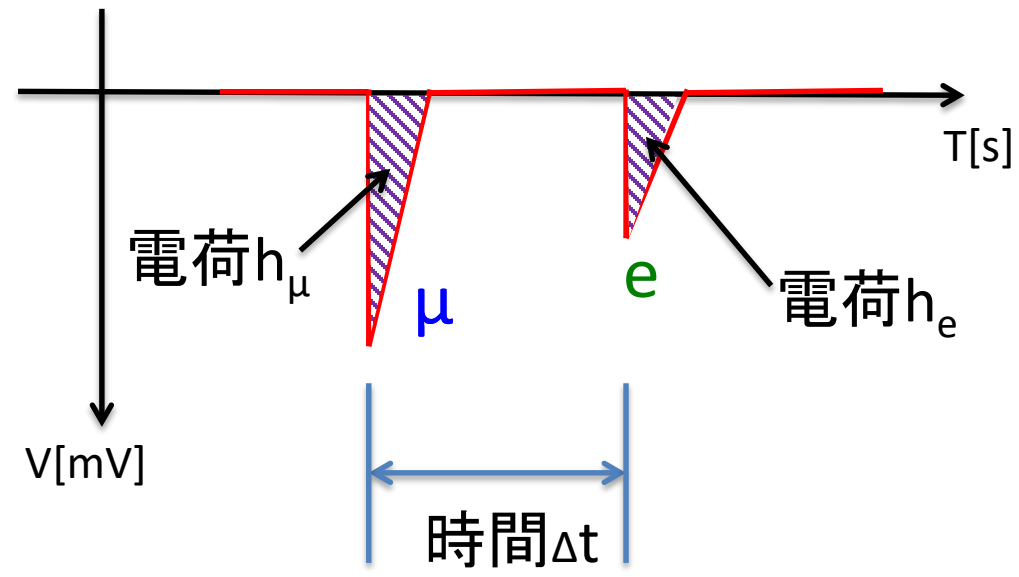
# μ粒子の寿命の測定 (実験1のデータ)

テキスト  
3 実験1

宇宙線μ粒子



実験1 (S1 S2 S3 S4) で得られるS3の信号



μ-e間の時間情報Δtと崩壊電子の数を用いて、寿命を測定する。  
。(解析は来週)

# データ解析の準備

- 解析プログラムの実行
  - 実験1をすべて選んで解析をして、ファイルをコピーする
- 各自のPCに、解析プログラムの出力をコピーして下さい。
  - 2022a, c, e, g, i, k, m, ... <---- 実験1
  - 2022b, d, f, h, j, l, n, .. <---- 実験2
- 実験1の「MuonDecayTime.txt」をエクセルなど表計算ソフトに読み込んでください。

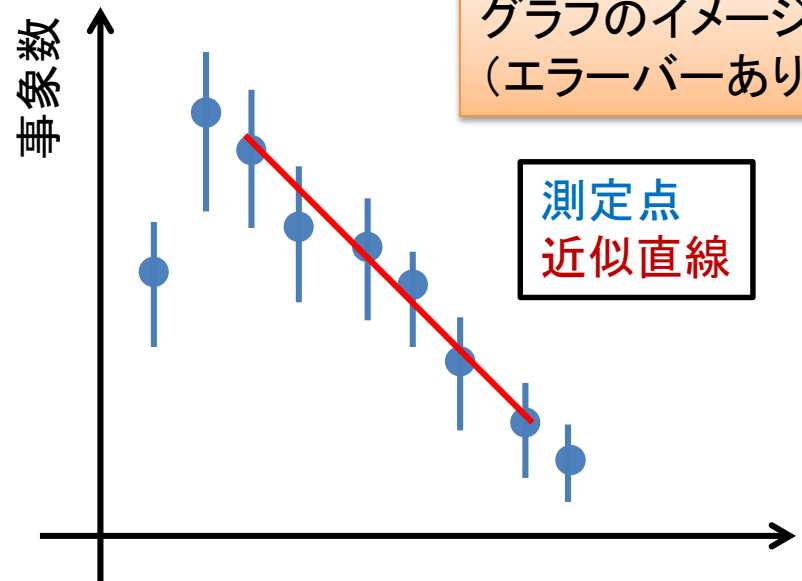
# 実験1: MuonDecayTime.txt

0.05	165
0.15	307
0.25	328
0.35	317
0.45	200
0.55	0
0.65	280
0.75	327
0.85	254
0.95	252
1.05	291
1.15	302
1.25	203
1.35	221
1.45	186
1.55	173

0.0~0.1 [ $\mu\text{s}$ ]に  
165事象あった

0.1~0.2 [ $\mu\text{s}$ ]の中心値  
( $\Delta t=0.15[\mu\text{s}]$ )

0.0~0.1 [ $\mu\text{s}$ ], 0.1~0.2 [ $\mu\text{s}$ ],  
..., 4.9~5.0 [ $\mu\text{s}$ ]のように、  
0~10マイクロ秒の時間帯  
を100分割して、それぞれ  
の時間帯に観測された  
事象数





# 実験1: ElectronEnergy.txt

「実験2」のMuonEnergy.txtの電荷( $h\mu$ )分布のグラフをPCの表計算ソフトで作成する。  
エラーバー不要。

光電子増倍管の熱雑音の寄与分の事象数  $N_{BG}$ を求める

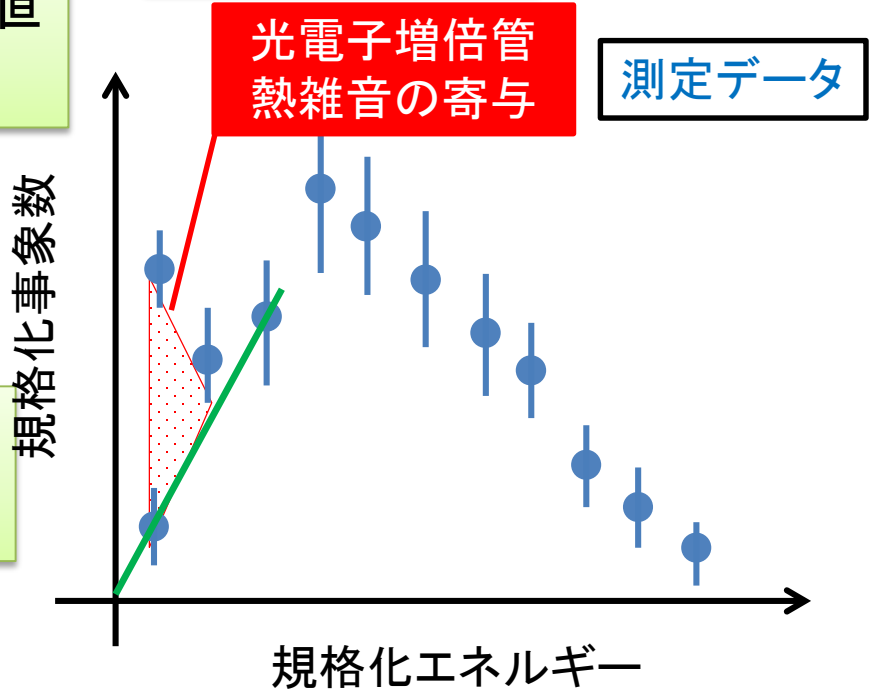
# Electron charge [pC]	Events
0.3	0
0.9	286
1.5	
...	
...	
...	
...	
...	
29.7	

0.6 ~ 1.2 [pC] の中心値  
( $h_e = 0.9$  [pC])

29.4 ~ 30.0 [pC] の中心値

0 ~ 30 [pC] の電荷  $h_e$  を等間隔で50分割して、それぞれの電荷領域に観測された事象数。

グラフのイメージ  
(エラーバーあり)



# 1. ミュー粒子寿命の導出

- 表計算ソフトで「**実験1: MuonDecayTime.txt**」のデータを取り込む
  - **最初の1点は、2点目に比べて、低く出ているはずですよ。理由を考え下さい**
- 事象数から熱雑音寄与  $N_{BG}/100$  を引く
- 2点ずつ事象数を足し合わせる
  - 足す際には最初の1点は必ず除く。
- 片対数用紙に  $0.2\mu\text{sec}$  区切りでプロットする。
  - 横軸は、 $0\sim 7\mu\text{sec}$  にする。縦軸は対数にする。
  - **グラフには事象数=0以外の全ての点をプロットする。**  
(事象数=0のデータは削除する)

# 実験1 : MuonDecayTime.txt

0.05 165

0.15 307

0.25 328

0.35 317

0.45 200

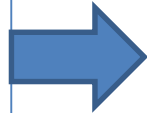
0.55 0

0.65 280

0.75 327

0.85 254

.....



**0.05 165**

最初の点は使わない

$N_{BG}/50$

0.20 632=307+328-3.0

0.40 514=317+200-3.0

0.60 277=0+280-3.0

0.80 578=327+254-3.0

.....

# 1. ミュー粒子寿命の導出

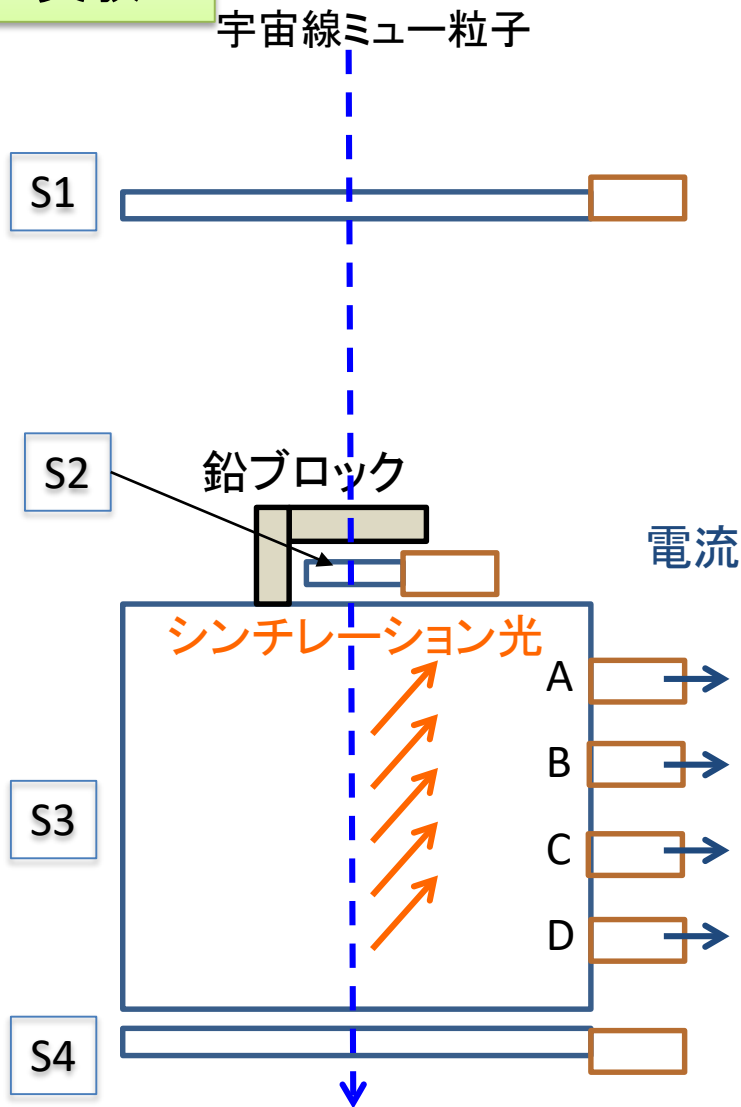
- 表計算ソフトで「**実験1: MuonDecayTime.txt**」のデータをプロットする。
- エラーバー(誤差棒)をつける。(テキスト4.(ウ))
- 横軸は、0～10  $\mu\text{sec}$  にする。縦軸は対数にする。
- グラフには**事象数=0以外の全ての点をプロットする。**  
(事象数=0のデータは削除する)
- 表計算ソフトで近似直線(0.7～8  $\mu\text{sec}$ )を引いて、寿命の計算を行う。有効数字2桁。(テキスト4.(イ))
- (直線を引く際には最初の1点は必ず除く。)

グラフが書けて、寿命が求まったら、教員またはTAに見せて下さい。

# 2. エネルギー較正・分解能

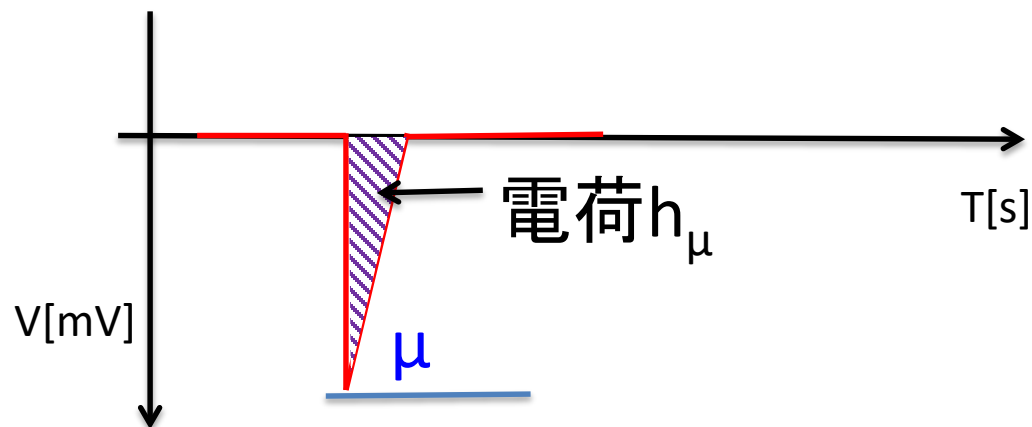
第2回

テキスト  
3 実験2



本実験の検出器は、シンチレータに粒子が与えたエネルギー(粒子のエネルギー損失  $E_\mu$ )を光  $\rightarrow$  電流に変換して読み出す。

実験2 (S1 S2 S3 S4) で得られるS3の信号

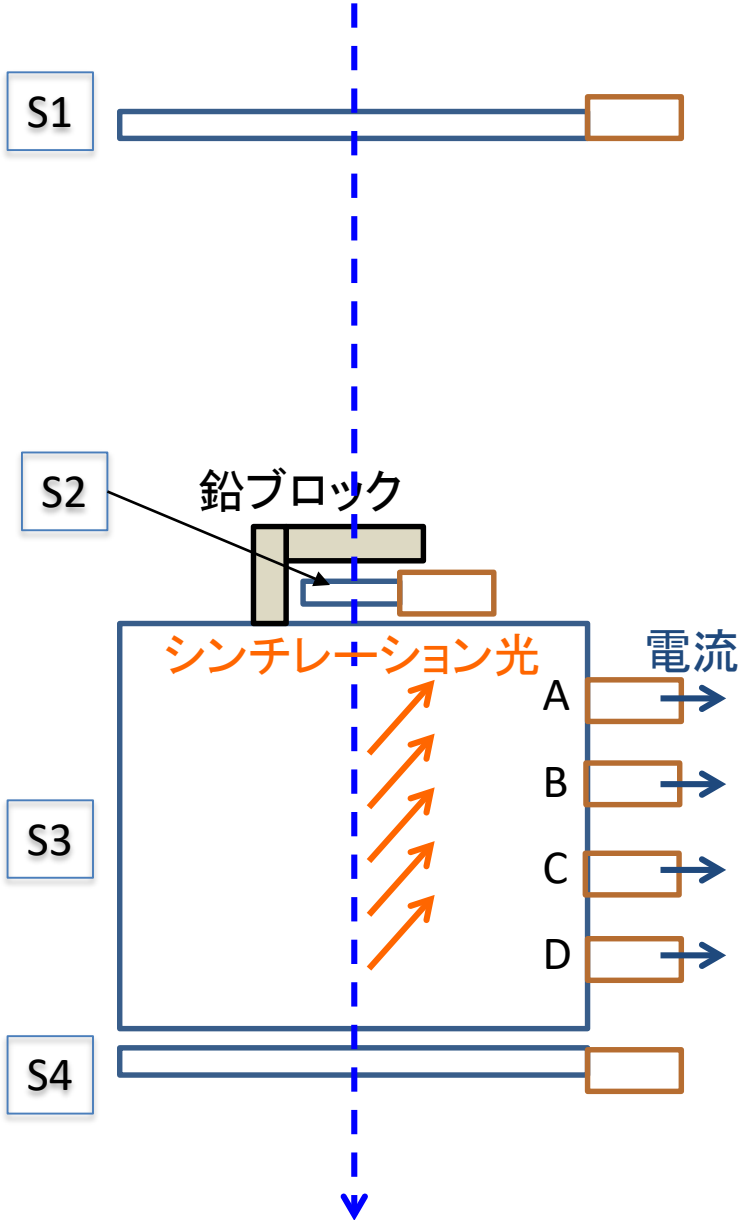


電荷はエネルギーに比例する。

$$E_\mu = \alpha \times h_\mu$$

係数  $\alpha$  を求めることを較正という。

ミュー粒子



ミュー粒子がシンチレータを電離し、  
エネルギー $E_\mu$ を損失する



電離した分子個数が $E_\mu$ に比例



電離分子がシンチレーション光を放出  
光子数が $E_\mu$ に比例



光電子増倍管カソード面で、光電効果に  
より電子(光電子)が放出

光電子数 $N_{p.e.}$ が $E_\mu$ に比例



光電子増倍管で電子が $M$ 倍に増幅  
出力電荷 $Q = q_e \cdot M \cdot N_{p.e.}$ が $E_\mu$ に比例

# 3. エネルギー較正・分解能

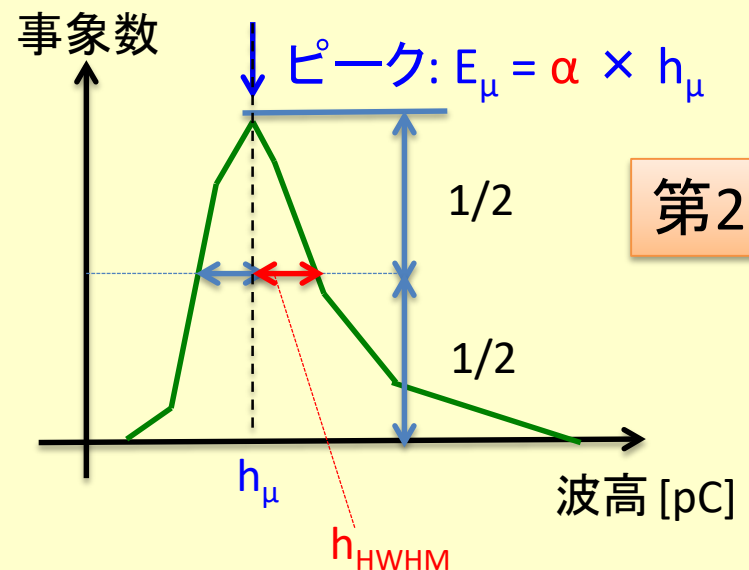
1. 「実験2」のMuonEnergy.txtの電荷( $h_\mu$ )分布のグラフをPCの表計算ソフトで作成する。エラーバー不要。
2. エネルギー( $E$ )の較正定数( $\alpha$ )を求める (測定値 $\rightarrow$ MeVに変換する係数、 $h_\mu = \alpha h_\mu$ )
3. 半値半幅を用いた、エネルギー分解能を求める
  1. 分解能 = 半値半幅 / ピークの $h_\mu$  (単位:%)
  2. 概算でよい。(手で補助線引くなど可)

波高はエネルギーに比例する。

$$E_\mu = \alpha \times h_\mu$$

第2回

係数  $\alpha$  を求めることを較正という。



# 3. 崩壊電子のエネルギー分布

テキスト  
4(イ)

## ■ $\mu^-$ 粒子の崩壊における電子のエネルギー分布

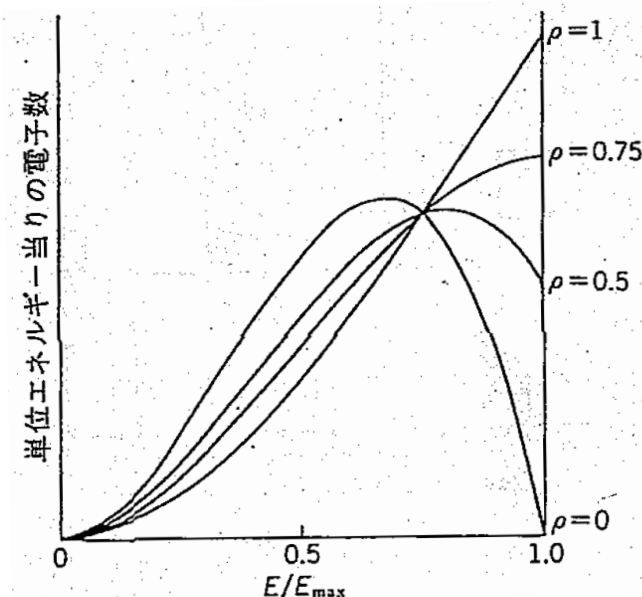
$$P(x)dx = \begin{cases} 4x^2 \left\{ 3(1-x) + \frac{2}{3}\rho(4x-3) \right\} dx & 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & x < 0, x > 1 \end{cases}$$

■  $x = \frac{E}{E_{max}}$  :  $E$  はエネルギー、 $E_{max}$  は理論的最大エネルギー

■  $1 = \int P(x)dx$

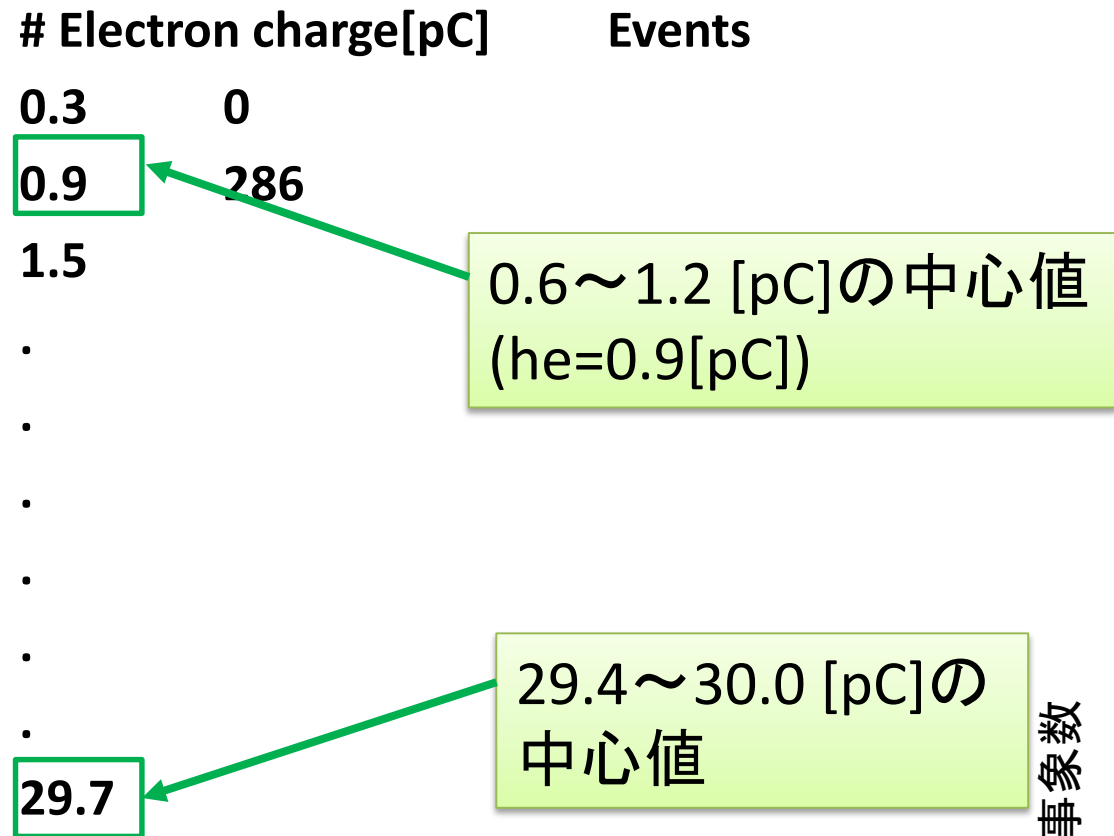
## ■ $\rho$ : ミツシエルパラメータ

現在までの実験の結果は  $\rho \approx 0.75$  という値を与えており、 $\mu$  粒子の崩壊においては、電子とニュートリノおよび反ニュートリノが放出されることが確かめられている。このことはまた、 $\mu^-$  は電子と同符号のレプトン数をもつ粒子であることも示している。



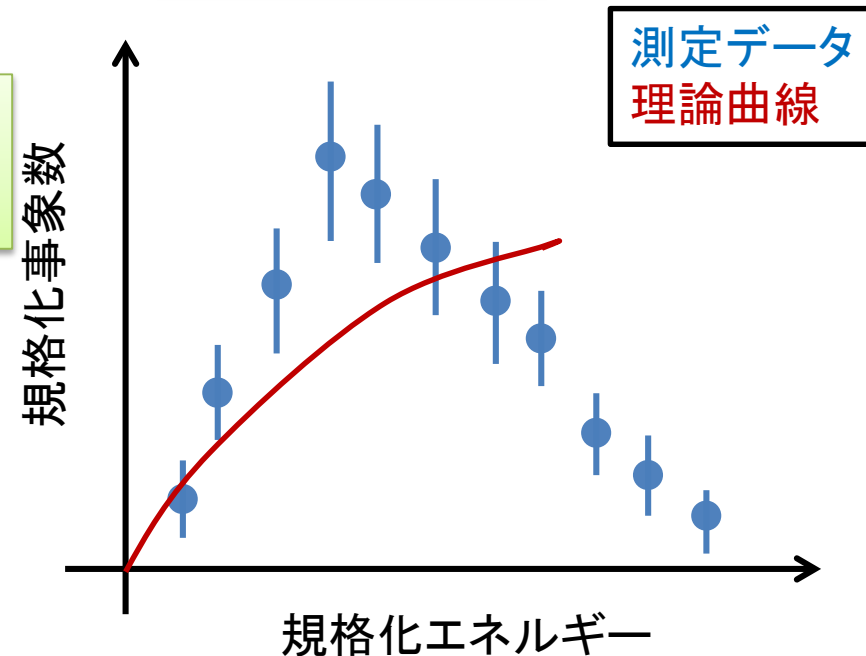


# 実験1: ElectronEnergy.txt



0~30[pC]の電荷 $h_e$ を  
等間隔で50分割して、  
それぞれの電荷領域  
に観測された事象数。

グラフのイメージ  
(エラーバーあり)



# 3. 崩壊電子のエネルギー分布

- 「実験1」のElectronEnergy.txtの波高( $h_e$ )分布から、縦軸を規格化した事象数(エラーバー付き)、横軸を規格化したエネルギー $E_e = \alpha \times h_e$ のグラフをPCの表計算ソフトで作成する。規格化は、テキストp.5のグラフとあわせる。
  - 横軸は、崩壊電子の理論的最大エネルギー( $E_{max}$ )を1とする。範囲は0~1.5にする。
  - 縦軸は $P_i = P(x_i)dx = n_i/N$
  - さらに、理論値のグラフも同じ図に(線で)書き込む。

グラフが得られたら、教員またはTAに見せる。

# レポートの書き方の確認

- 本日解析したデータは、電子ファイルで、またはプリントアウトして、持ち帰る。
- テキスト(p.14,15)をよく読んでレポートを作成する。
  - 今回、項目の確認をする。
  - 不安なところは今のうちに質問する
- あらかじめレポートを仕上げて来て、4日目の授業開始直後に提出しても良い。
- 提出の際には内容の説明を行う。
- 不十分な場合には修正をする。
- 4日目終了(18:30)までに必ず提出する。

本日は、これで終了です。お疲れ様でした。