

2025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

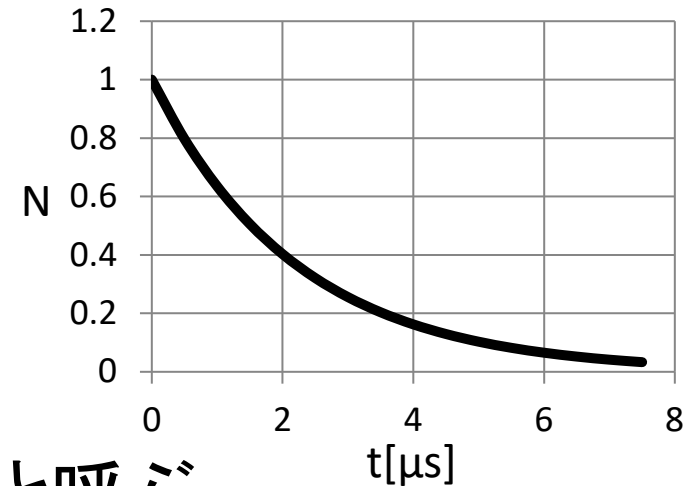
粒子の寿命

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 τ 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

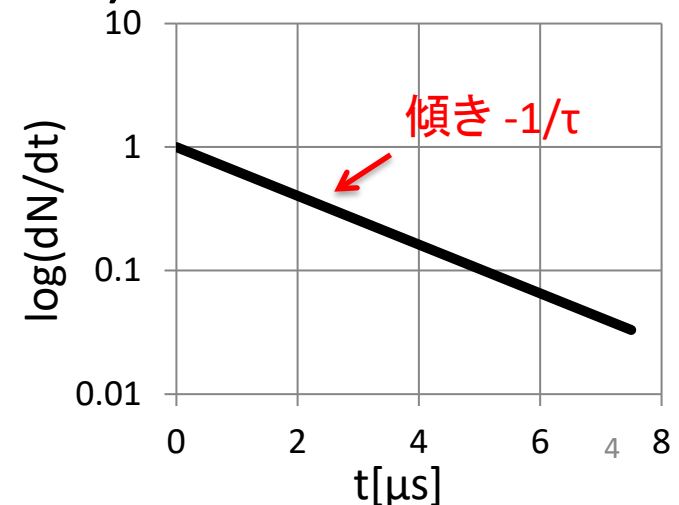
$$\frac{dN}{dt} \cdot \Delta t = -\frac{1}{\tau} N \cdot \Delta t = -\frac{N_0}{\tau} \cdot \Delta t \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$$

と表す事ができる。対数を取って整理すると、

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

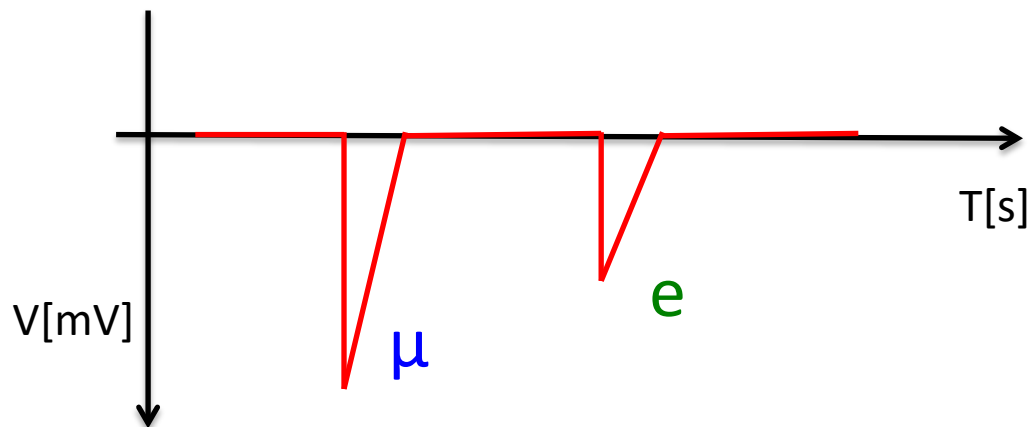
と t に対する直線になる。 (C_1, C_2) は定数

- 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。



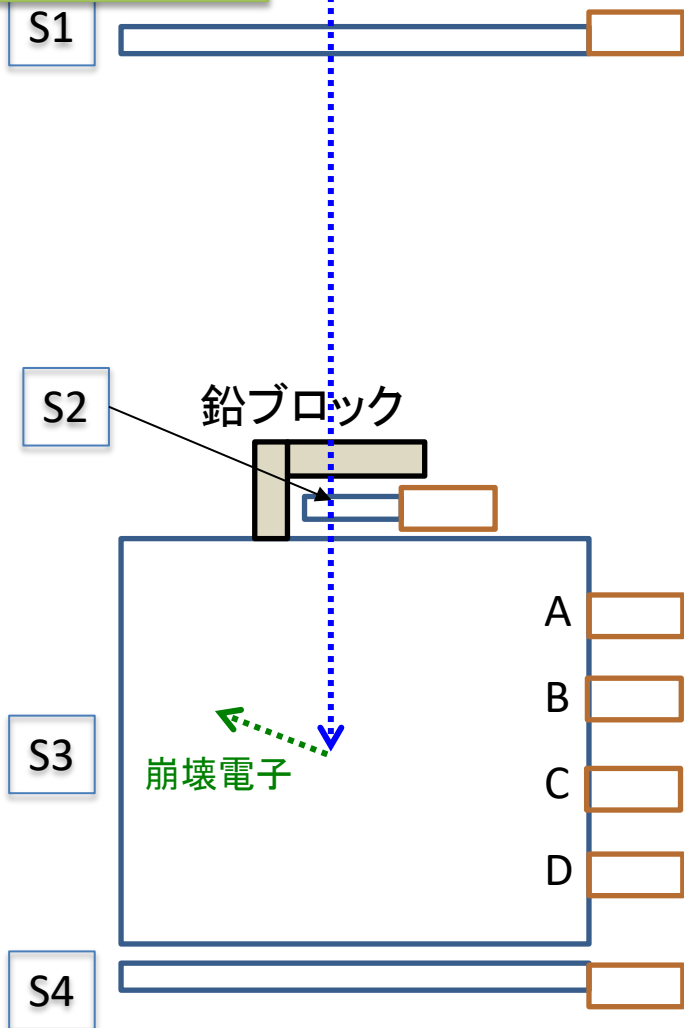
μ 粒子の寿命の測定 (実験1のデータ)

実験1 (S1 S2 S3 $\bar{S}_4$) で得られるS3の信号



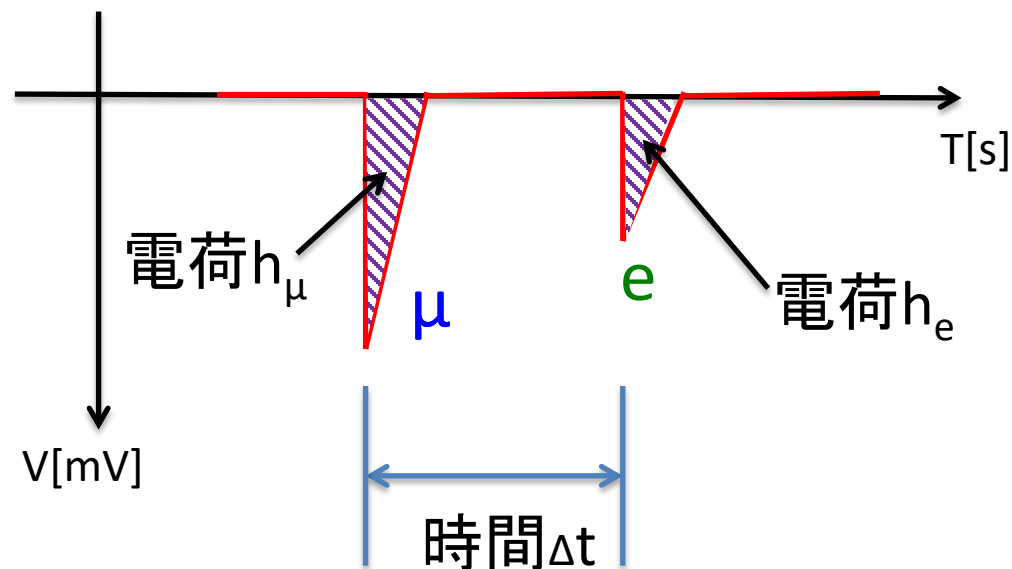
テキスト 3 実験1

宇宙線ミュー粒子



μ 粒子の寿命の測定 (実験1のデータ)

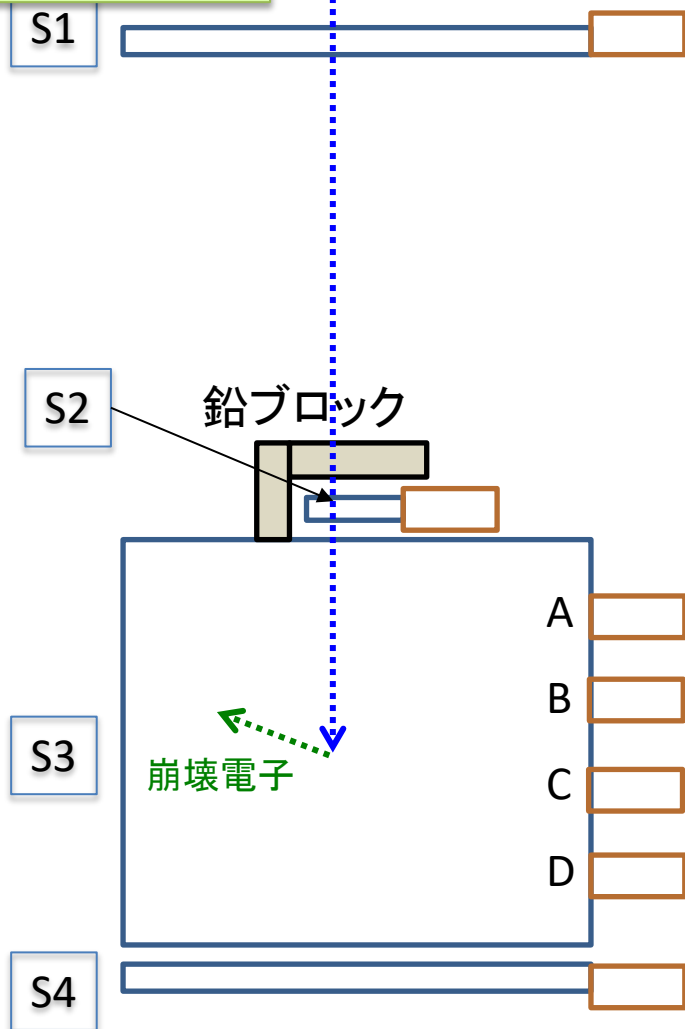
実験1 (S1 S2 S3 $\bar{S4}$) で得られるS3の信号



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)

テキスト 3 実験1

宇宙線ミュー粒子



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。

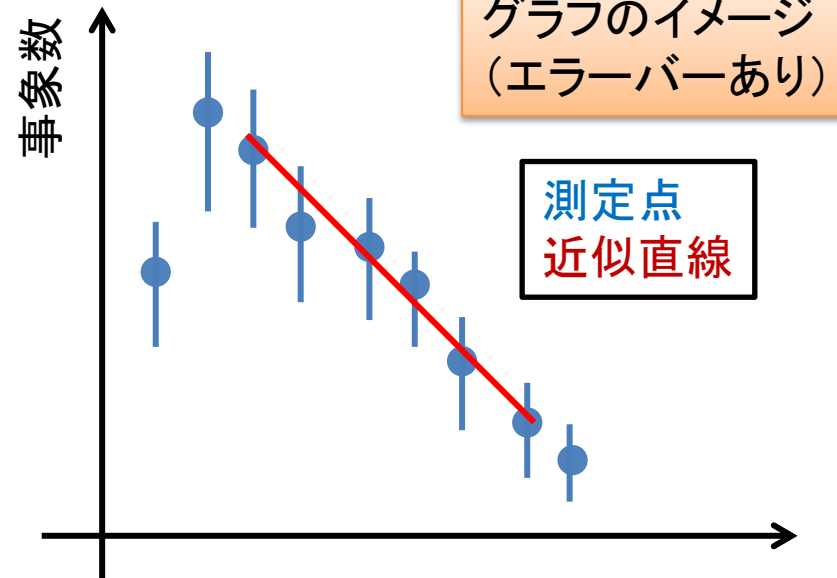
実験1: MuonDecayTime.txt

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 [μs]に
165事象あった

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

0.0~0.1 [μs], 0.1~0.2 [μs],
..., 4.9~5.0 [μs]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])

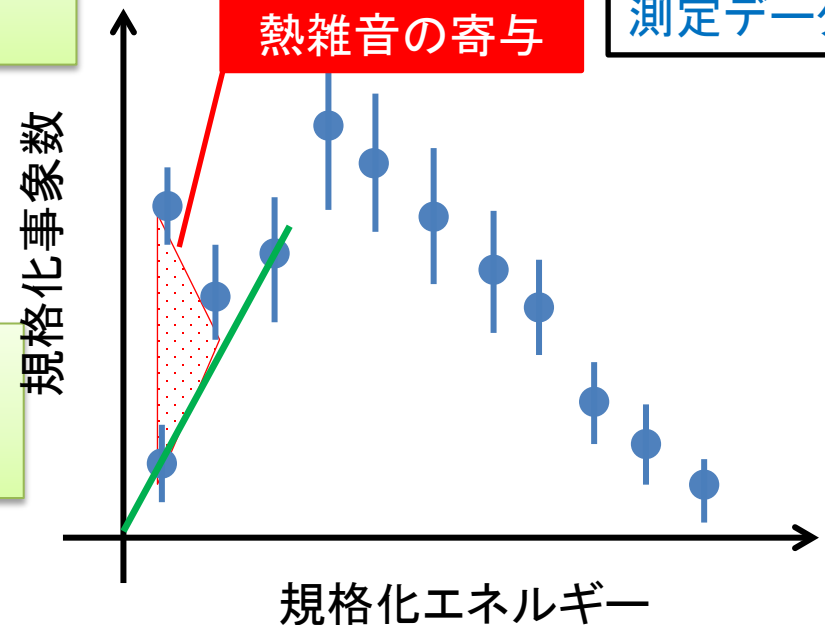
29.4~30.0 [pC]の
中心値

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)

光電子増倍管
熱雑音の寄与

測定データ



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。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、 $0\sim 10\mu\text{sec}$ 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)

実験1 : MuonDecayTime.txt

0.05 165

0.15 307

0.25 328

0.35 317

0.45 200

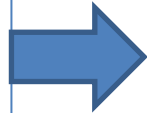
0.55 0

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

- 片対数グラフに「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 μsec 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。
- 片対数用紙に目で見たと近似直線を引いて、傾きから寿命の計算を行う。(テキスト4.(イ))
 - 直線を引く際には1～8 μsec の範囲で行う。有効数字2桁。
- エラーバーを考慮して、近似直線の変化しうる範囲を見積り、寿命の誤差を見積もる。有効数字2桁。

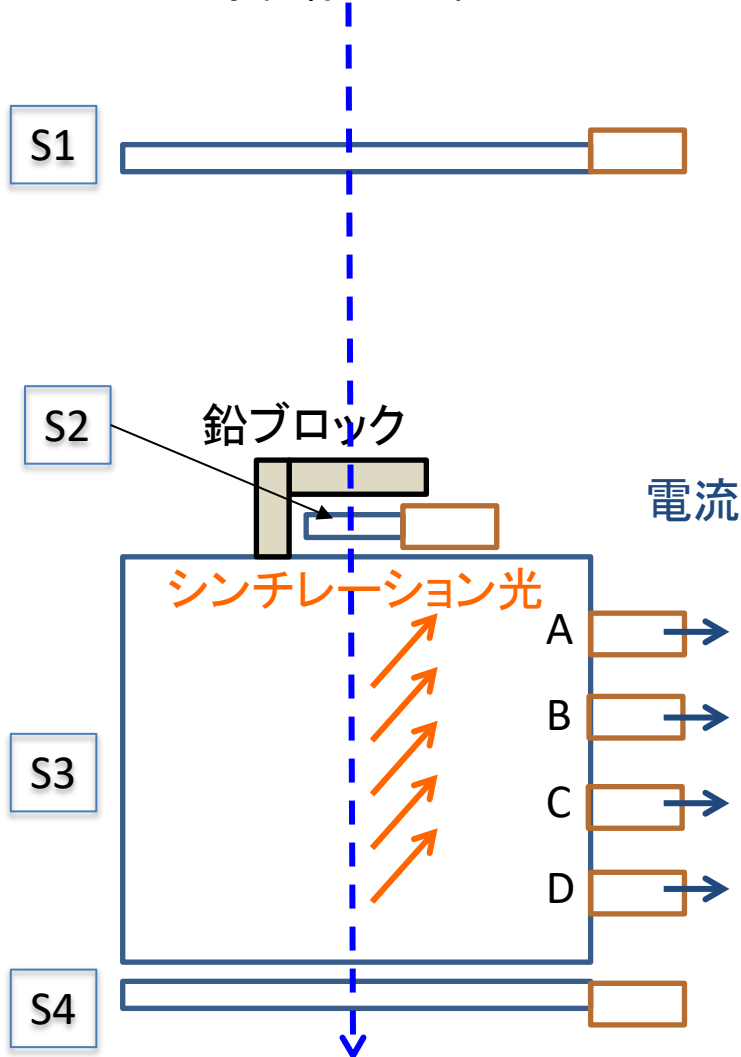
グラフが書けて、寿命が求まったら、教員またはTAに見せて下さい。

2. エネルギー較正・分解能

第2回

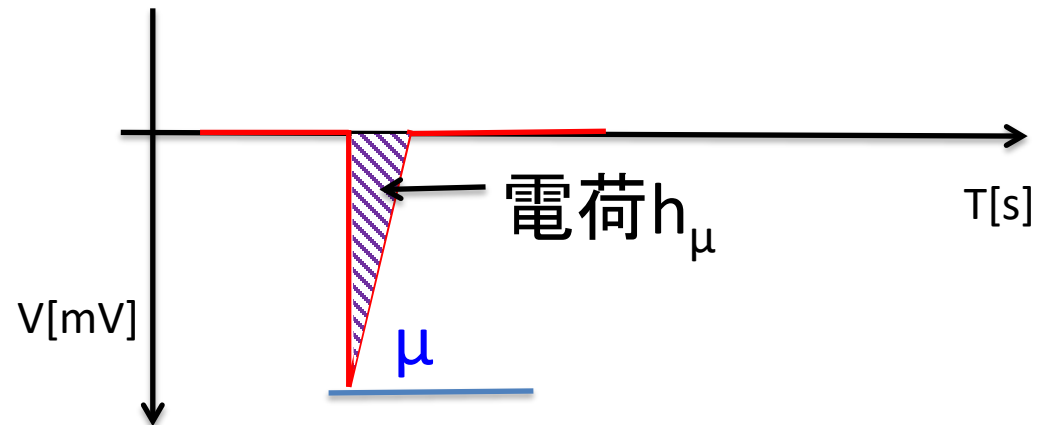
テキスト
3 実験2

宇宙線ミュー粒子



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_μ)を光 → 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

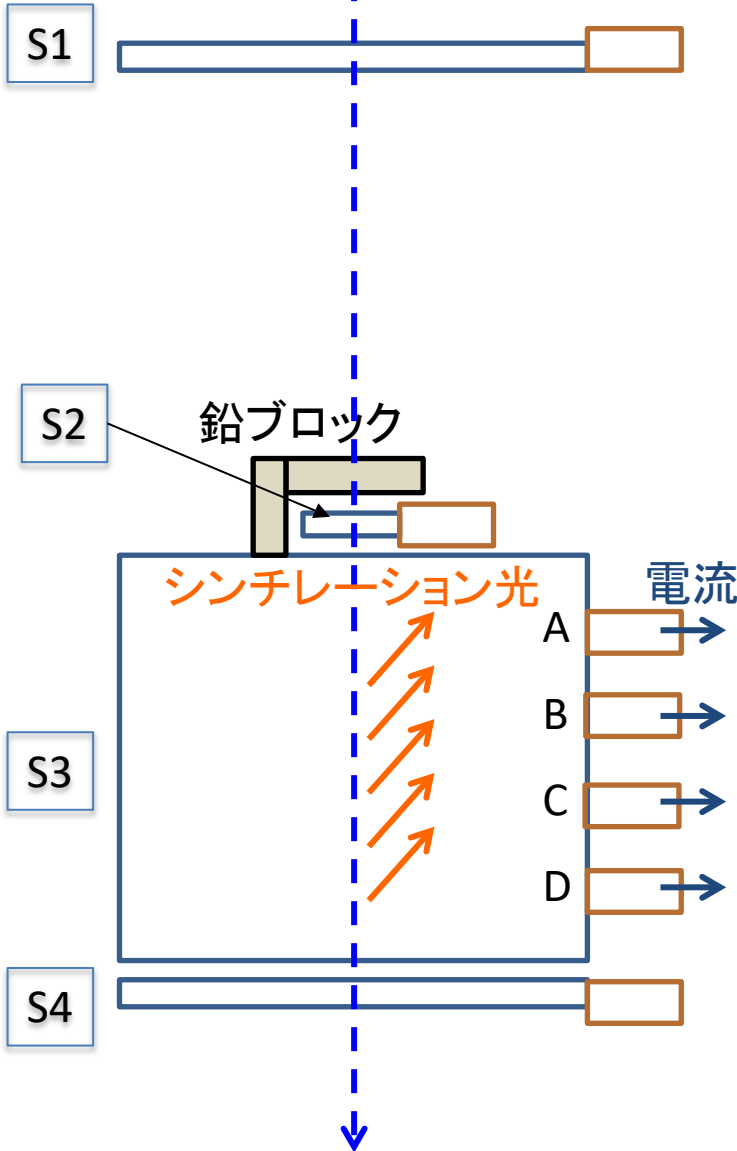


電荷はエネルギーに比例する。

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

係数 α 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_μ を損失する



電離した分子個数が E_μ 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_μ 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_μ 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_μ に比例

3. エネルギー較正・分解能

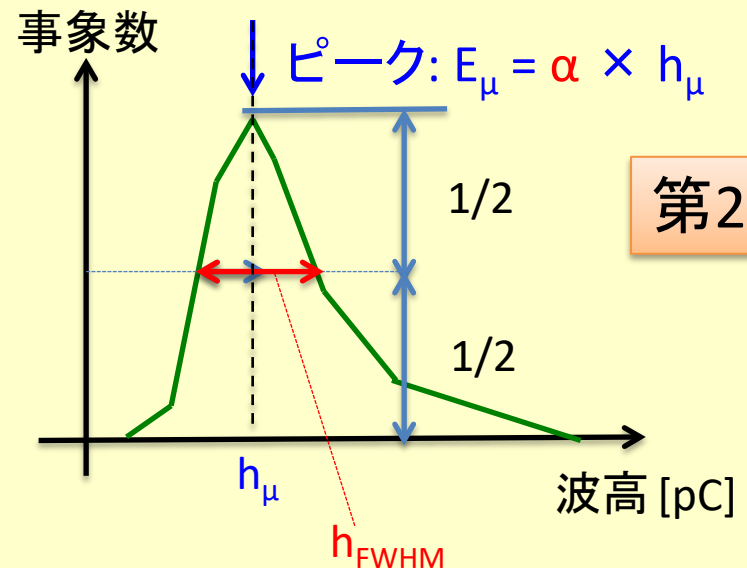
1. 「実験2」のMuonEnergy.txtの電荷(h_μ)分布のグラフをPCの表計算ソフトで作成する。エラーバー不要。
2. エネルギー(E)の較正定数(α)を求める (測定値 $\rightarrow$ MeVに変換する係数、 $h_\mu = \alpha h_\mu$)
3. 半値半幅を用いた、エネルギー分解能を求める
 1. 分解能 = 全値半幅 / ピークの h_μ (単位:%)
 2. 概算でよい。(手で補助線引くなど可)

波高はエネルギーに比例する。

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

第2回

係数 α 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)

■ μ^- 粒子の崩壊における電子のエネルギー分布

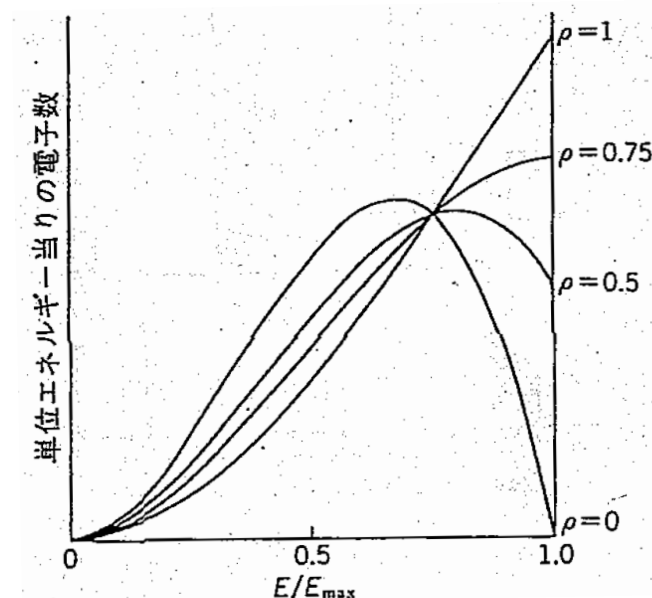
$$P(x)dx = \begin{cases} 4x^2 \left\{ 3(1-x) + \frac{2}{3}\rho(4x-3) \right\} dx & 0 \leq x \leq 1 \\ 0 & x < 0, x > 1 \end{cases}$$

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

■ $1 = \int P(x)dx$

■ ρ : 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、 μ 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、 μ^- 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

Electron charge[pC] Events

0.3 0
0.9 286

0.6～1.2 [pC]の中心値
($he=0.9$ [pC])

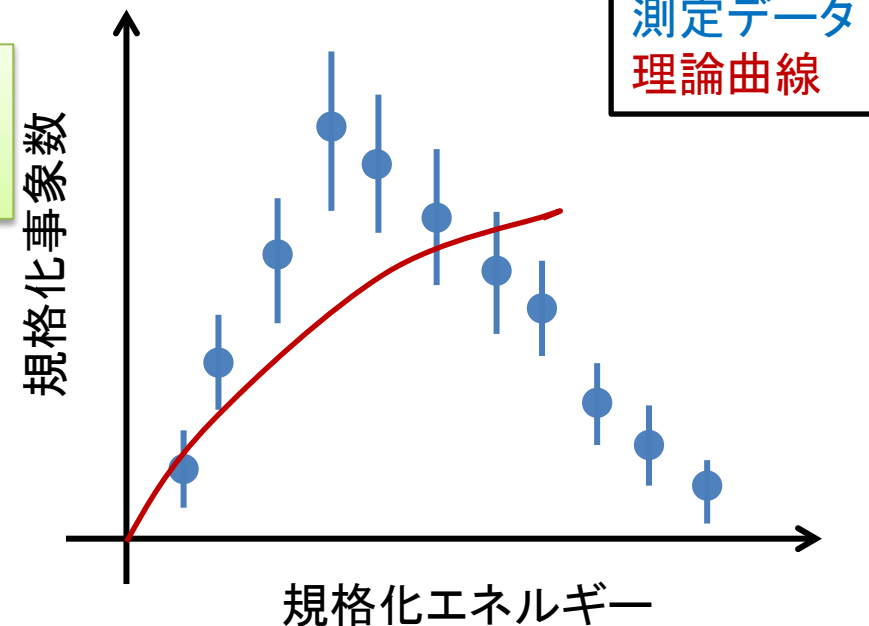
1.5
.
.
.
.
.
.
.
.
.

29.7

29.4～30.0 [pC]の
中心値

0～30[pC]の電荷 he 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 $P_i = P(x_i)dx = n_i/N \cdot \Delta x$
 - 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週目終了(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。