

授業で使用するスライドは、以下に置きます：

[http://hep-www.px.tsukuba.ac.jp/~doraemon/class/explII/explII\\_sjis.html](http://hep-www.px.tsukuba.ac.jp/~doraemon/class/explII/explII_sjis.html)

(大文字と小文字は区別あり)



# 物理学実験II 素粒子テーマ

---

## 2回目

# HVカーブの続き

- 3つのPMTのHVカーブ・HV設定値が決定していない班は、はじめに完了する。
- 光漏れチェックもぜひ実施してください。

# 今回の内容

- 発表会について、レポートの書き方についての説明
- 自然単位系についての解説
- タイミング・カーブを取り、回路のディレイを設定する
- パルスカウンターのテスト
- ミュー粒子寿命の実験セットアップを完了、データ取得を開始
- 解析の準備
  - PCを持っている人は、VNC Viewerをインストールする。
  - 持っていない人は教室のLinuxを借りて、使い方に慣れる

---

# 自然单位系

# 素粒子で使う単位系

- 毎日扱う量に大きな指数がついているのはメンドクサイ:
    - 陽子質量 =  $1.672\,621\,777(74) \times 10^{-27}$  kg
    - 電子質量 =  $9.10938291(40) \times 10^{-31}$  kg
  - エネルギーの単位:
    - $1\text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19}\text{ J}$ : 素電荷(電子など、 $e = 1.602 \times 10^{-19}\text{ C}$ )を1 Vの電位で加速したときに粒子が得るエネルギー。
- ⇒ 質量に対しても使い勝手のよい単位を考える。

# 素粒子で使う単位系

- 毎日扱う量に大きな指数がついているのはメンドクサイ:
  - 陽子質量 =  $1.672\,621\,777(74) \times 10^{-27}$  kg
  - 電子質量 =  $9.10938291(40) \times 10^{-31}$  kg
- エネルギーの単位:
  - $1\text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19}\text{ J}$ : 素電荷(電子など、 $e = 1.602 \times 10^{-19}\text{ C}$ )を1 Vの電位で加速したときに粒子が得るエネルギー。  
⇒ 質量に対しても使い勝手のよい単位を考える。
- 相対論
  - $E = Mc^2$  (正確には、 $E = \sqrt{(Mc^2)^2 + (pc)^2}$ )
  - $E$ : eVで測っているなので、質量 $M$ も $eV/c^2$ という単位を使う。

# 質量単位の換算

( $eV/c^2 \Leftrightarrow \text{kg}$ )

エネルギー(仕事)の定義

$$E [\text{J}] (= W [\text{J}]) = f [\text{N}] \cdot l [\text{m}]$$
$$\Rightarrow 1 [\text{J}] = 1 [\text{N} \cdot \text{m}]$$

ニュートンの運動方程式

$$f [\text{N}] = m [\text{kg}] \cdot \frac{\partial^2 x}{\partial t^2} [\text{m/s}^2]$$
$$\Rightarrow 1 [\text{N}] = 1 [\text{kg} \cdot \text{m/s}^2]$$

- $1 [eV/c^2] = 1.602 \times 10^{-19} [\text{J}/c^2]$   
 $= 1.602 \times 10^{-19} [\text{N} \cdot \text{m}] \times 1/(3.000 \times 10^8 [\text{m/s}])^2$   
 $= \left(\frac{1.602}{3.000^2}\right) \times 10^{-19-2 \times 8} \left[\left(\text{kg} \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) \cdot \text{m}\right] \times \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]^{-2}$   
 $= 1.780 \times 10^{-36} [\text{kg}]$
- $1 [\text{kg}] = 5.618 \times 10^{35} [eV/c^2]$
- ~~$\text{Me} = 0.511 \text{ MeV}/c^2$ ,  $\text{M}\mu = 106 \text{ MeV}/c^2$ ,  $\text{M}\text{p} = 0.938 \text{ GeV}/c^2$~~

# 自然単位系

- $E = Mc^2$ : 質量はエネルギーの一形態!!
  - 質量( $eV/c^2$ )をエネルギーと同じ $eV$ で測る。  
⇒ 光速 $c$ を基準単位に選ぶ
- 自然単位系では、 $c = \hbar = 1$ とおく。
  - 速度は、 $c$ を基準として無時限化:  $\beta = \frac{v}{c}$
  - 質量はの単位は、 $eV/c^2 \Rightarrow eV$
  - $\hbar$  [ $J \cdot s$ ]が無次元  $\Rightarrow$  時間の次元は[エネルギー $^{-1}$ ]
  - [ $m/s$ ]が無次元  $\Rightarrow$  長さと同時間と同じ単位
- 距離 = 時間 = (エネルギー) $^{-1}$

量子力学の計算では $\hbar$ が必ず出る



# 自然単位系の量をMKSに変換する

- 変換定数を使って次元が合うようにする:

- $c = 3.0 \times 10^8 [m/s]$

- $\hbar c = 197 [MeV \cdot fm]$

- $\hbar = 6.58 \times 10^{-22} MeV \cdot s$

$eV/c^2 \Leftrightarrow kg$ と同様に示せる、  
各自試してください

- 例題:

- 100 MeV(原子核物理のビームエネルギー)のエネルギーを長さに変換すると:

$$\text{長さ} = \frac{197 [MeV \cdot fm]}{100 [MeV]} = 2 [fm]$$

←原子核の直径: 水素  $\sim 2 fm$ , 銅  $\sim 10 fm$

# 自然単位系の量をMKKSに変換する

- 変換定数を使って次元が合うようにする:

- $c = 3.0 \times 10^8 [m/s]$

- $\hbar c = 197 [MeV \cdot fm]$

$eV/c^2 \Leftrightarrow kg$ と同様に示せる、各自試してください

- $\hbar = 6.58 \times 10^{-22} MeV \cdot s$

- 例題 2

- LHC実験の重心系エネルギー14TeVでは、どのくらいのスケールで物質をさぐっているか？

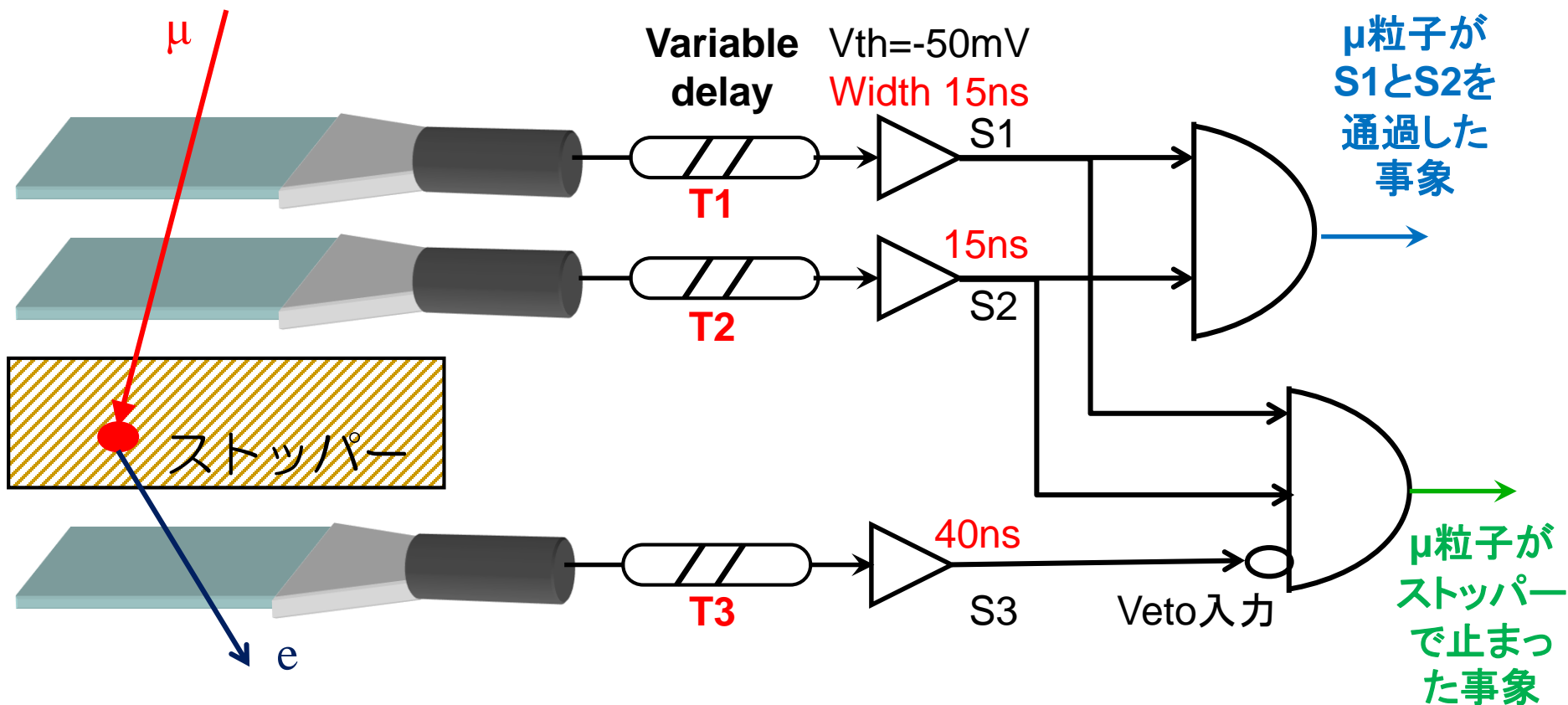
$$\text{長さ} = \frac{\hbar c}{14 \text{ TeV}} = \frac{197 \times 10^6 \text{ eV} \times \text{fm}}{14 \times 10^{12} \text{ eV}} \sim 10^{-5} \text{ fm}$$

原子核よりさらに5桁くらい小さなスケール。

---

# タイミングカーブ パルスカウンターのテスト

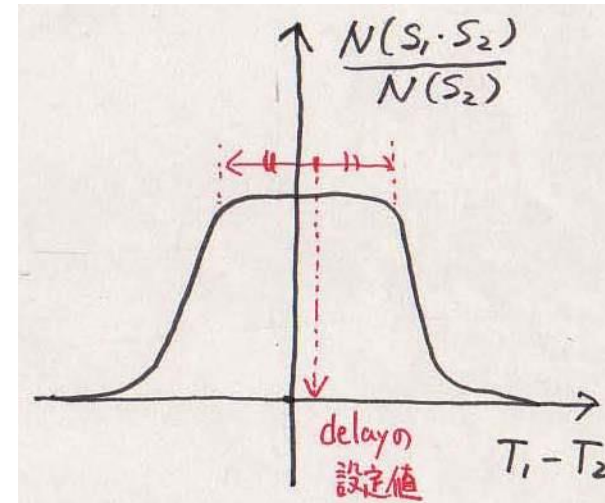
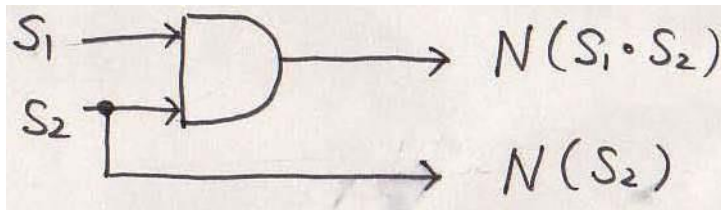
# セットアップ



- 前回設定したHV, Discriminatorの $V_{th}$ を使う。
- Discriminatorの出力パルス幅は,それぞれ15ns, 15ns, 40ns

# Coincidence カーブ

## S1とS2のタイミング

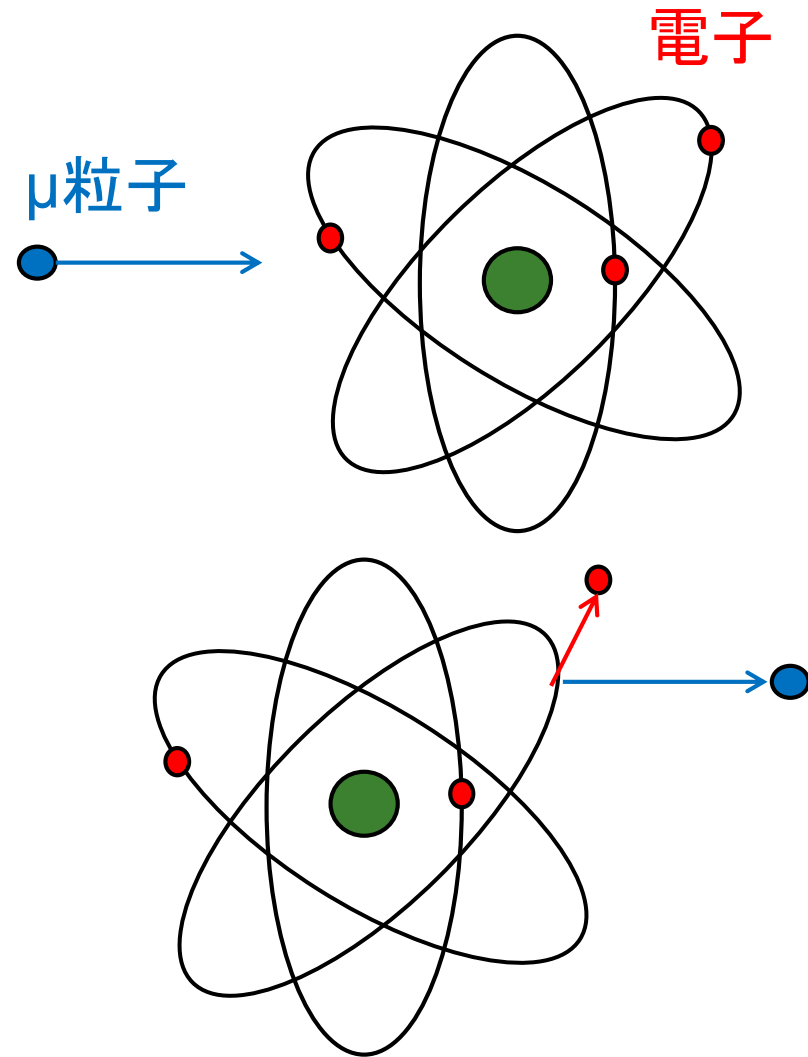


- 突き抜け $\mu$ 粒子を使ってS1とS2のタイミングを合わせる
- 平らな部分の高さ
  - $N(S_2) \sim S_2$ のNoise + MIP
  - $N(S_1 \cdot S_2) \sim \text{MIP}$

$$\Rightarrow \frac{\text{MIP}}{\text{MIP} + \text{Noise}}$$

# μ粒子と物質の相互作用

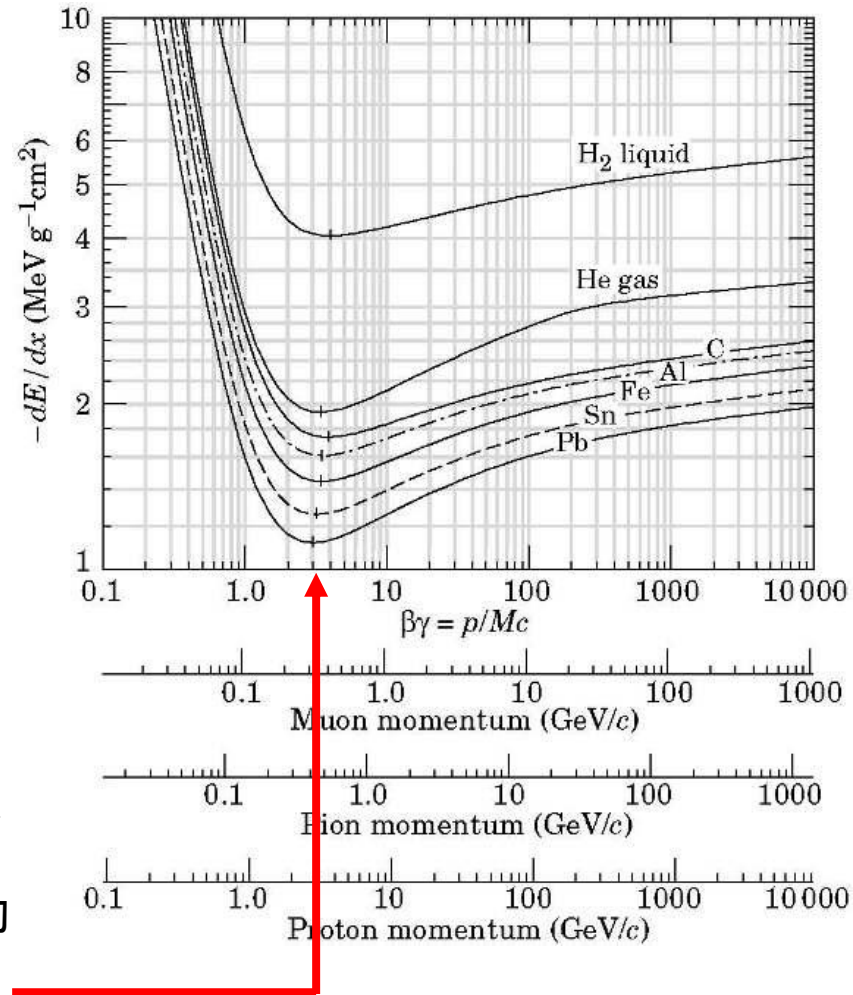
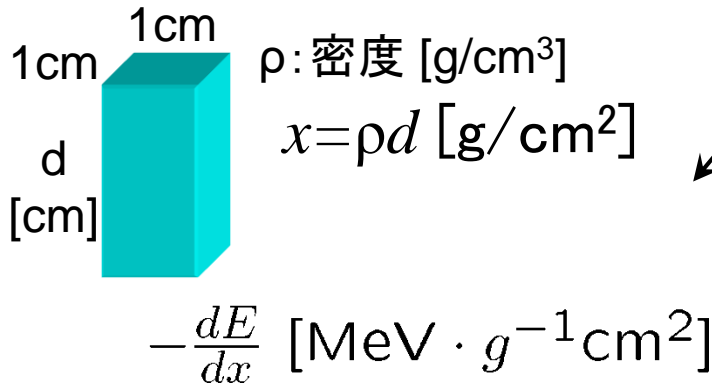
- μ粒子が高いエネルギーをもって入射するとき：
  - 電子は雲状に広がって分布しており、μ粒子は電子と散乱する。
- 電子はμ粒子に比べて質量が小さい
  - $m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$ 、 $M_\mu = 106 \text{ MeV}/c^2$
- 電子を弾き飛ばし(原子をイオン化)したあともミュー粒子はエネルギーを失うだけでほとんど方向を変えずに突き進む。
  - 弾性散乱



# 荷電粒子と物質の相互作用

- 電磁相互作用(主にイオン化)
- 物質の厚さの単位は $g/cm^2$

- 最小電離作用粒子(Minimum Ionizing Particle, MIP)

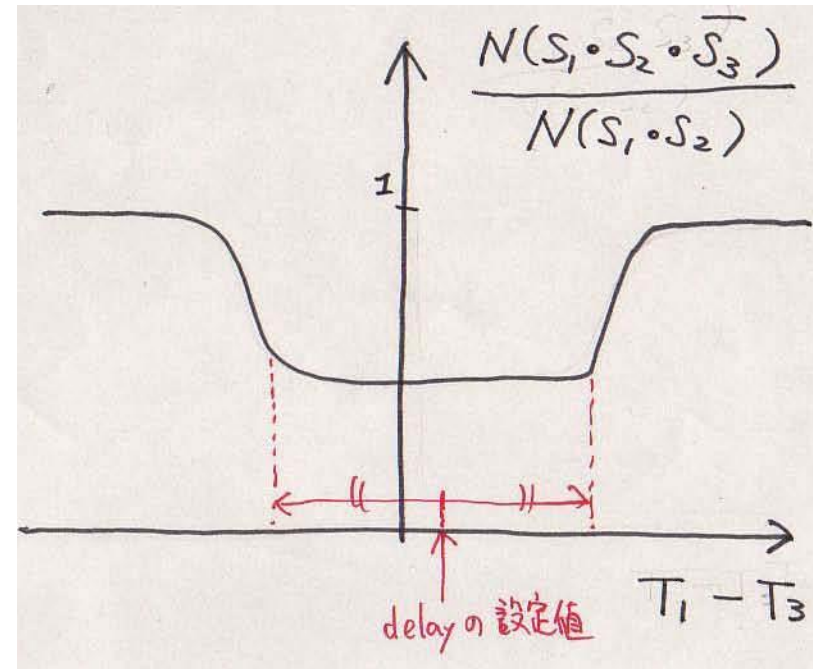
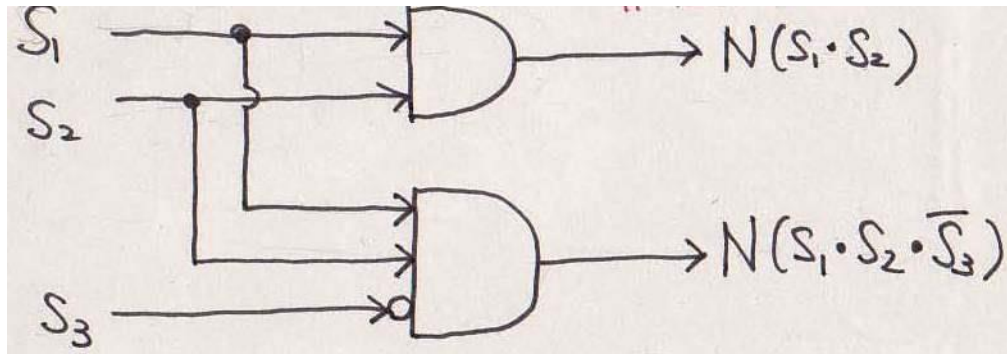


荷電粒子が物質を通過する際のエネルギー損失 $-dE/dx$ (=物質に落とすエネルギー)は、 $\mu$ 粒子の場合 $\sim 300 MeV/c$ で最小. それ以上の運動量を持つ粒子では、ゆっくり上昇(あまり変わらない).

**Minimum Ionization Particle (MIP)**

# VETO カーブ

## S1, S2とS3のタイミング



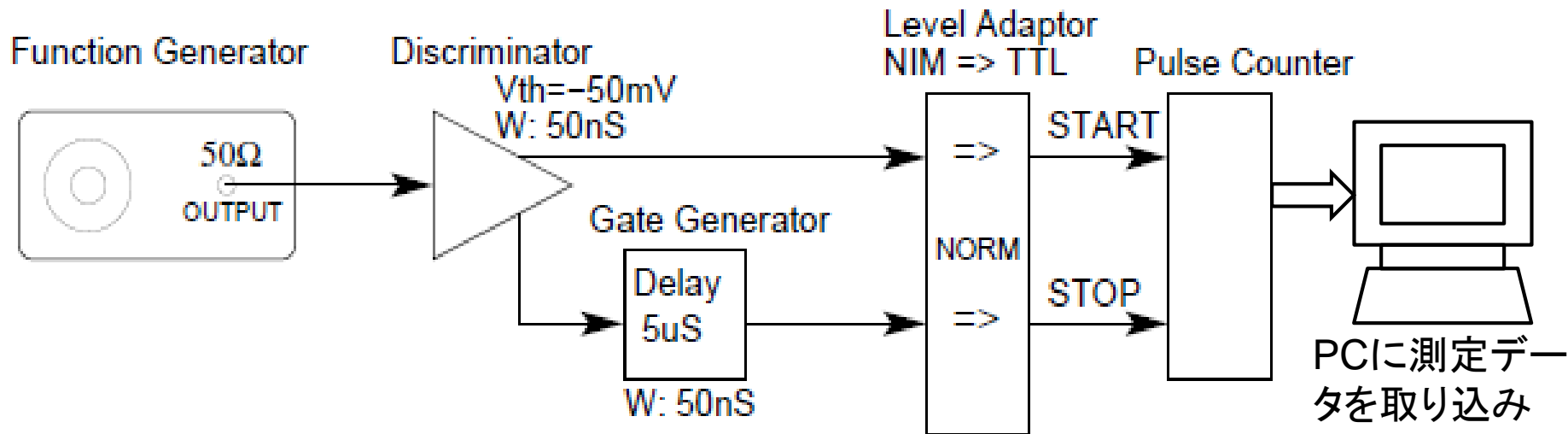
- 宇宙線 $\mu$ 粒子を使ってS1, S2とS3のタイミングを合わせる
- S1とS2のタイミング( $T_1 - T_2$ )はCoincidenceカーブで得た値を使う
  - $T_1$ を変更するときは,  $T_2$ も同時に変更し **$T_1 - T_2$ は不変に保つ**
- 平らな部分の高さ
  - $N(S_1 \cdot S_2)$  ~ 突き抜け+Stopped
  - $N(S_1 \cdot S_2 \cdot \text{NOT } S_3)$  ~ Stopped

$$\Rightarrow \frac{\text{Stopped}}{\text{突き抜け+Stopped}}$$



# パルスカウンターのテスト

- 本実験では、パルス・カウンタで $\mu$ 粒子の崩壊時間を測定する。
- パルス・カウンタが正しく動作していることを確かめる。



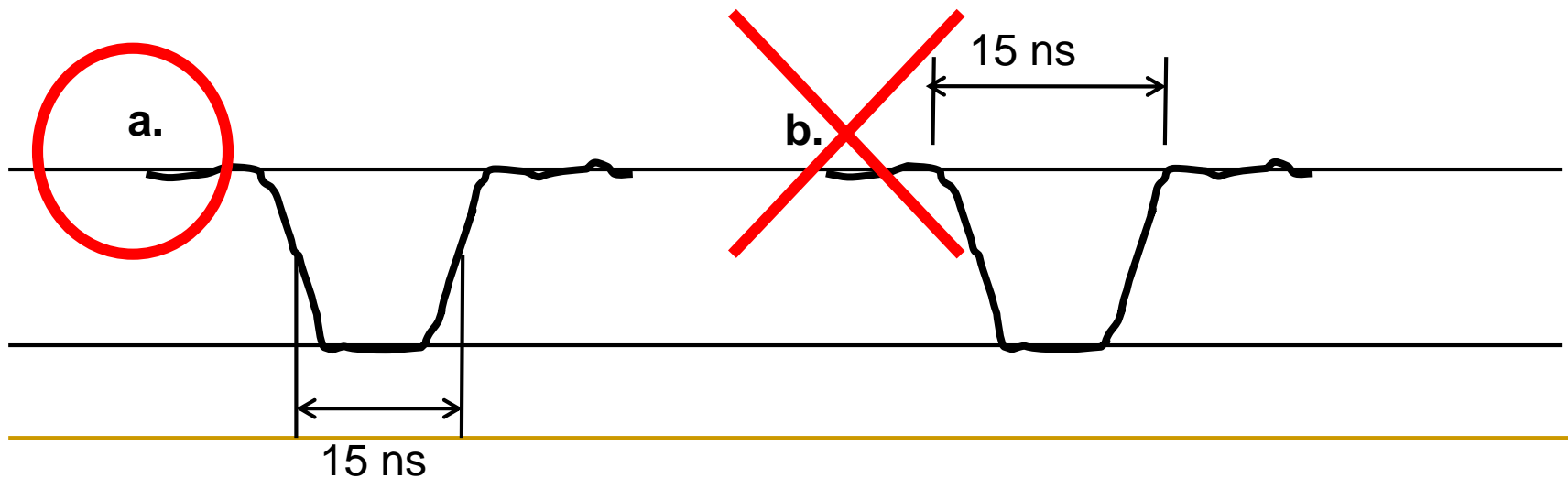
- 測定された時間データが、ディレイの設定値と一致しているかどうか確かめる。

# 注意事項

- 今日作るCoincidenceカーブとVetoカーブは、それぞれ印刷または保存しておく。
- 今回セットアップしたタイミングは、次回以降でそのまま使用する。
  - **ディレイ設定したあとでは、モジュール・配線は一切変更しないこと！！**

# ディスクリミネータの出カパルス幅

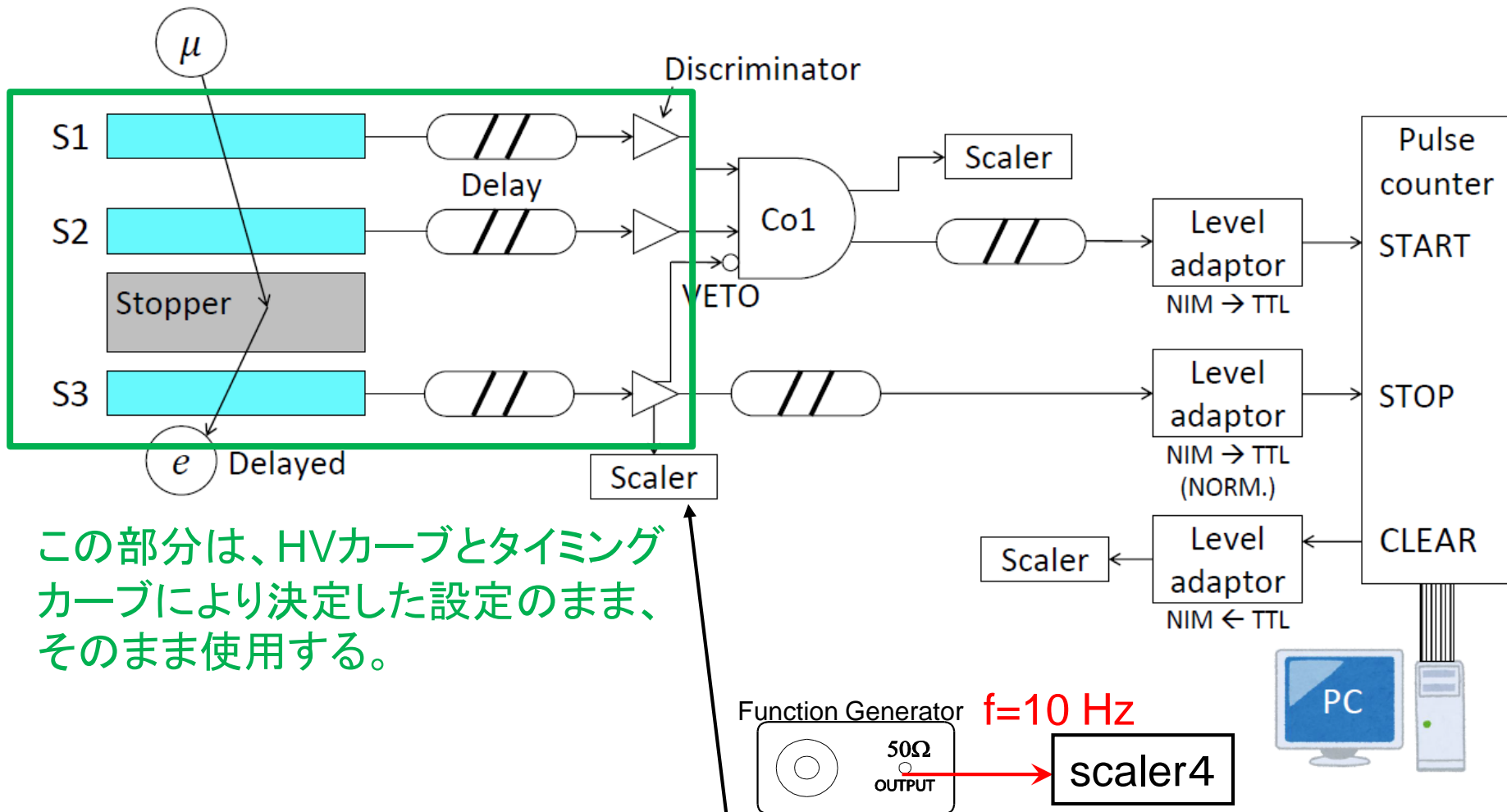
- 前回、ディスクリミネータのアウトプット・パルス幅を15 nsに調整した。
  - パルス幅を再確認し、必要なら直すこと。
- テキストには15nsと書いてあるが、これは下図bのことではないので注意。
- パルスが短すぎると信号が正しく処理されないこともある(毎年多いセットアップ・ミス)。



---

# ミュー粒子寿命測定の設定アップ を組む

# 寿命測定回路

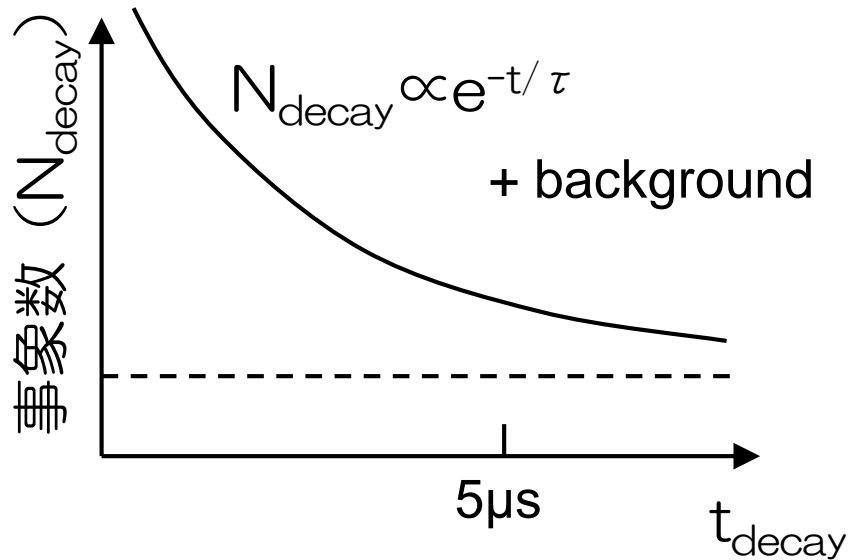


scalerは1週間で桁あふれをおこす場合は、carry outを使って桁数を増やすこと

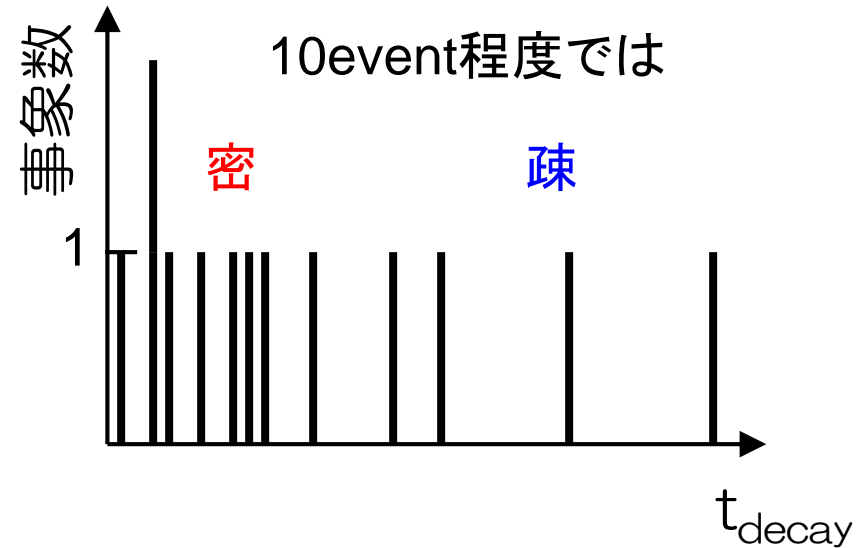
# 測定開始

時刻 $t$ において単位時間あたりに崩壊する $\mu$ 粒子の数

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



予想される分布



30分くらいしてこのような分布  
が出てくればOK

# オンラインモニター

- 寿命分布は、ほぼリアルタイム(~10min程度の遅延あり)でweb上で見ることができます。

<http://hep-www.px.tsukuba.ac.jp/~exp3/>



- 日々チェックして、DAQがちゃんと動いているか確認。  
異常がある場合は、担当教員・TAへ連絡してください。

