

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/expII/expII_sjis.html

(大文字と小文字は区別あり)



実験II 素粒子テーマ

担当教員： 佐藤

連絡先： 自然学系棟D208 (x4270)

ksato@hep.px.tsukuba.ac.jp

TAに確認する事項

- DAQ・解析PC
 - データはクリーンアップしてありますか？
 - リブートしましたか？
 - 設定は大丈夫ですか？
- モジュール
 - ディレイモジュールの整備はしましたか？
 - 壊れているBNCケーブルを交換のこと
- TA出勤簿は毎回授業前に捺印のこと。

対面受講での注意事項

- 体調が悪い場合（高体温、風症状がある場合）は、メールで私に連絡してください。
 - オンライン受講に振り替えて受講してもらうことになります。
- ラップトップPCの持参を強く推奨します。

素粒子テーマ 春C スケジュール

第1回:

素粒子物理概説

μ 粒子寿命測定法の理解

同軸ケーブルとインピーダンス, NIM モジュール機能の理解

シンチレーション・カウンターの理解, HV カーブの測定

第2回:

タイミング・カーブの測定, パルスカウンターのテスト

寿命測定回路のセットアップ, 寿命データ収集開始*

ROOT を用いた μ 粒子寿命測定データの解析プログラム作成

↓ ミュー粒子データ取得

第3回:

寿命データの解析

発表会の準備

発展課題への取り組み(大統計データサンプルの解析やATLAS 実験データを使ったZ 粒子質量測定など)、

第4回:

発表・討論

レポート作成のための資料作成等、自由時間

レポート提出

全体の内容をまとめて作成すること。第4回目の1週間後(水曜の23:59)が期限。

成績評価に関して

評価：出席点4点，成績点10点（発表3点，レポート7点）

レポート：

手書き・ワープロどちらでもよい。

自分の言葉でやったことを纏めること。

以下は大幅減点の対象とする。

- テキストの丸写し
- 友達のレポートを丸写し

素粒子の標準理論

素粒子物理学とは

物質を細分化していくと何に行き着くか？

それ以上分けられない物質は？

⇒ 物質の究極の構成要素＝素粒子

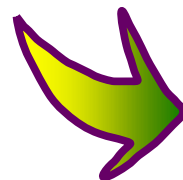
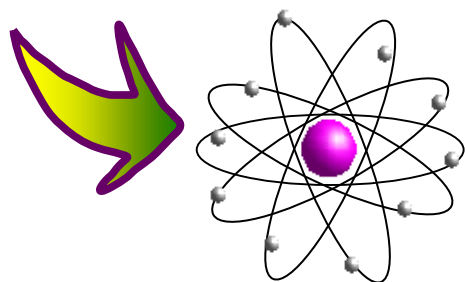
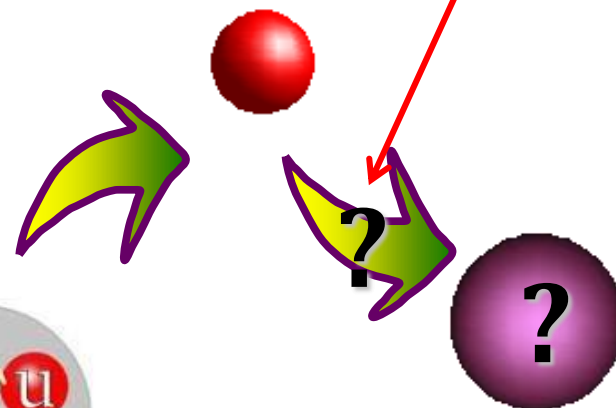
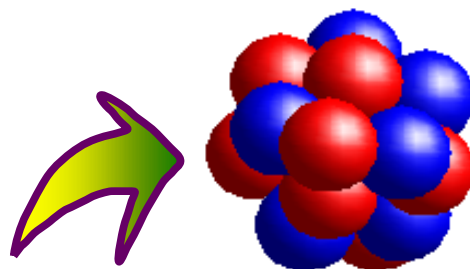
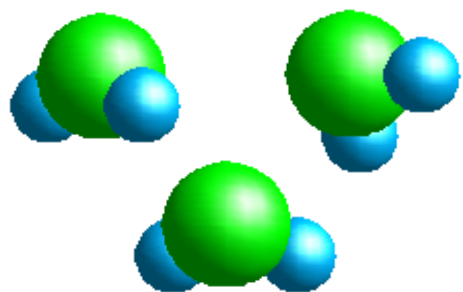
時空の構造、対称性はどうなっているか？

クォークは現在知られている最小の物質構成要素。クォークに内部構造はあるのか？

水の分子 10^{-7}cm

原子核 10^{-12}cm

クォーク $\leq 10^{-16}\text{cm}$



酸素原子 10^{-8}cm

陽子 10^{-13}cm

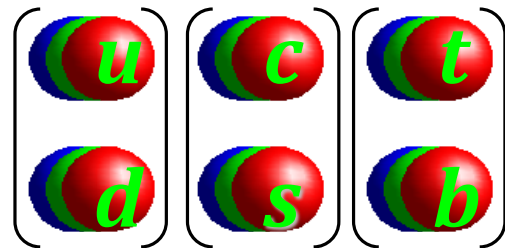
陽子: uud, 中性子: udd

クォーク同志にどう
いう力(相互作用)
が働いているの
か？

素粒子標準模型 (*Standard Model*)

- フェルミオン ... 半整数スピン (spin 1/2), 物質の基本構成要素
 - クォーク ... カラー荷 (RGB) を持つ (強い相互作用をする)
 - レプトン ... カラー荷を持たない
- ボゾン ... 整数スピン (spin 0, 1, ...)
 - ゲージボゾン ... 相互作用を媒介する
 - ヒッグス粒子 ... 素粒子に質量を与える

クォーク



+2/3

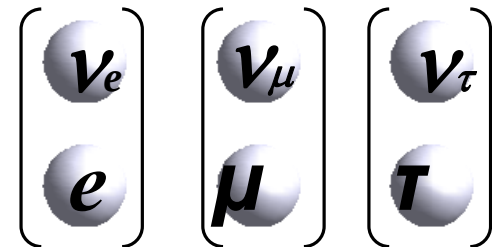
+1/2

-1/3

-1/2

... 強い相互作用
電磁相互作用
弱い相互作用

レプトン



0

+1/2

... 弱い相互作用

-1

-1/2

... 電磁相互作用, 弱い相互作用

電荷 (e) I_3

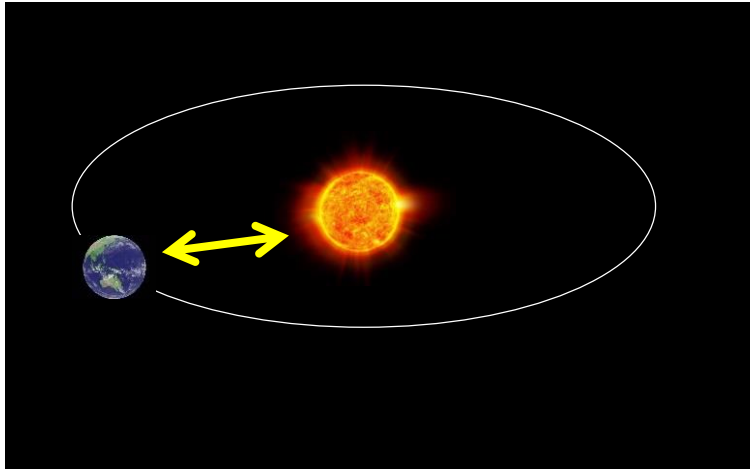
+ 上の粒子の反粒子

現在の素粒子物理(標準理論)

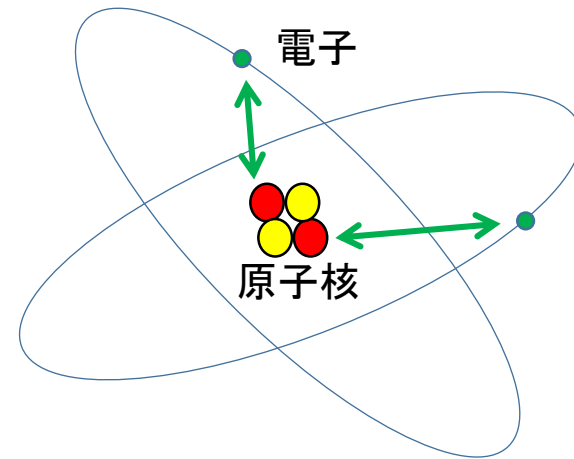


力とは何だろうか？

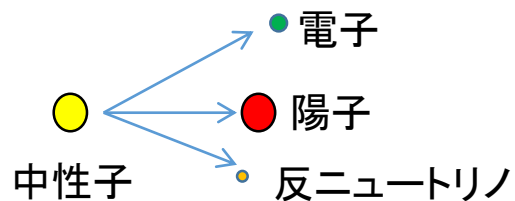
重力



電磁気力

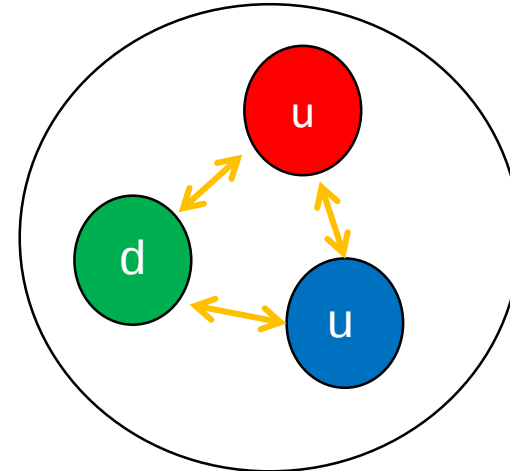


弱い力



β 崩壊

強い力



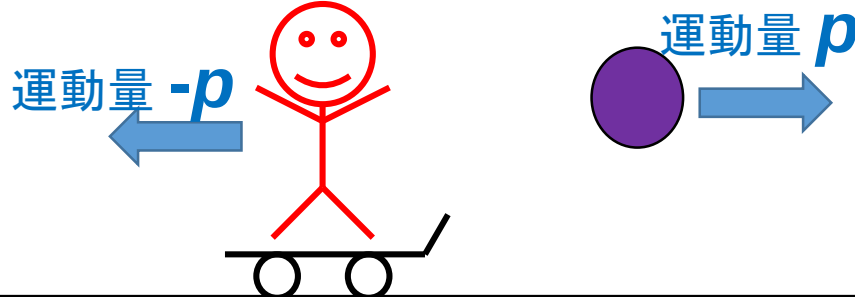
(現代物理学の理解) 物質を構成する粒子の間に働く力は、素粒子によって媒介されている

素粒子が力を媒介するって、どういうこと？

- 地面との摩擦がない状況で、キャッチボールをすると...



ボールを投げた反動で、ボールと反対方向に動く



ボールを受け取った反動で、ボールと同じ方向に動く

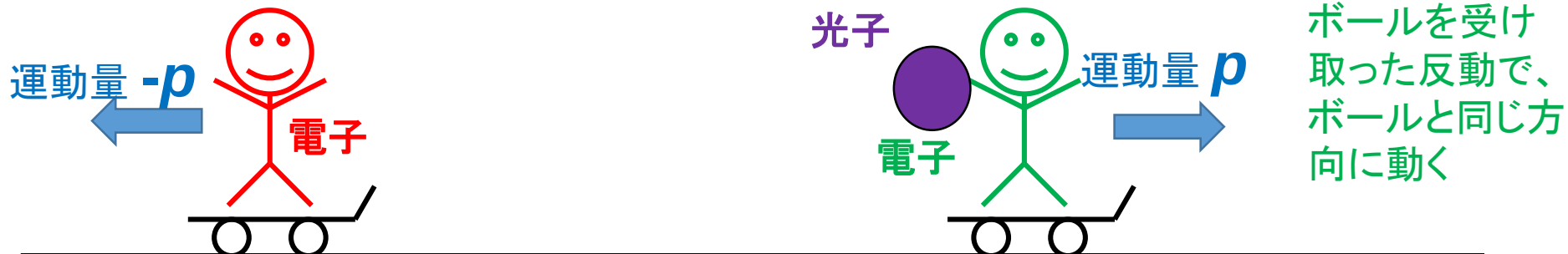
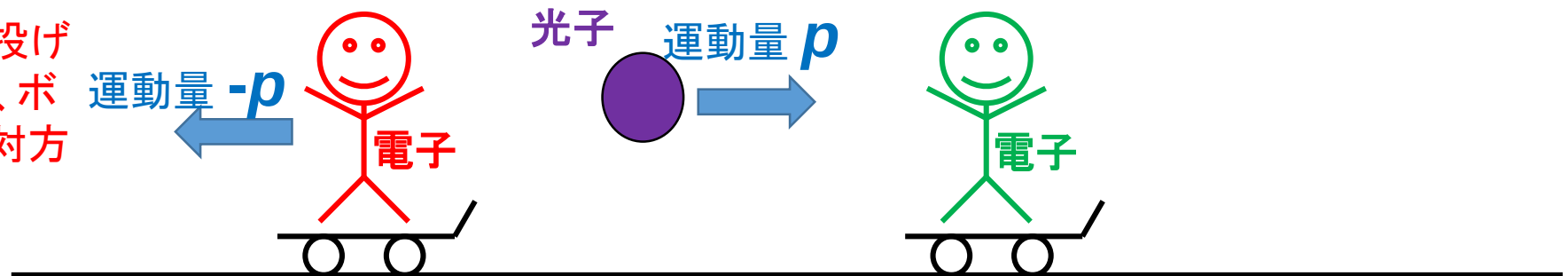
素粒子が力を媒介するって、どういうこと？

電磁気力による電子どうしの散乱

- 地面との摩擦がない状況で、キャッチボールをすると...



ボールを投げた反動で、ボールと反対方向に動く

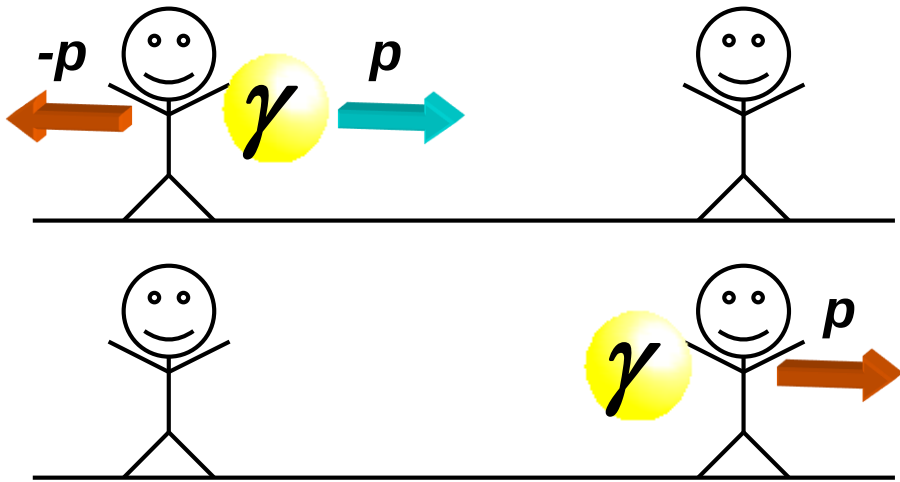


ボールを受け取った反動で、ボールと同じ方向に動く

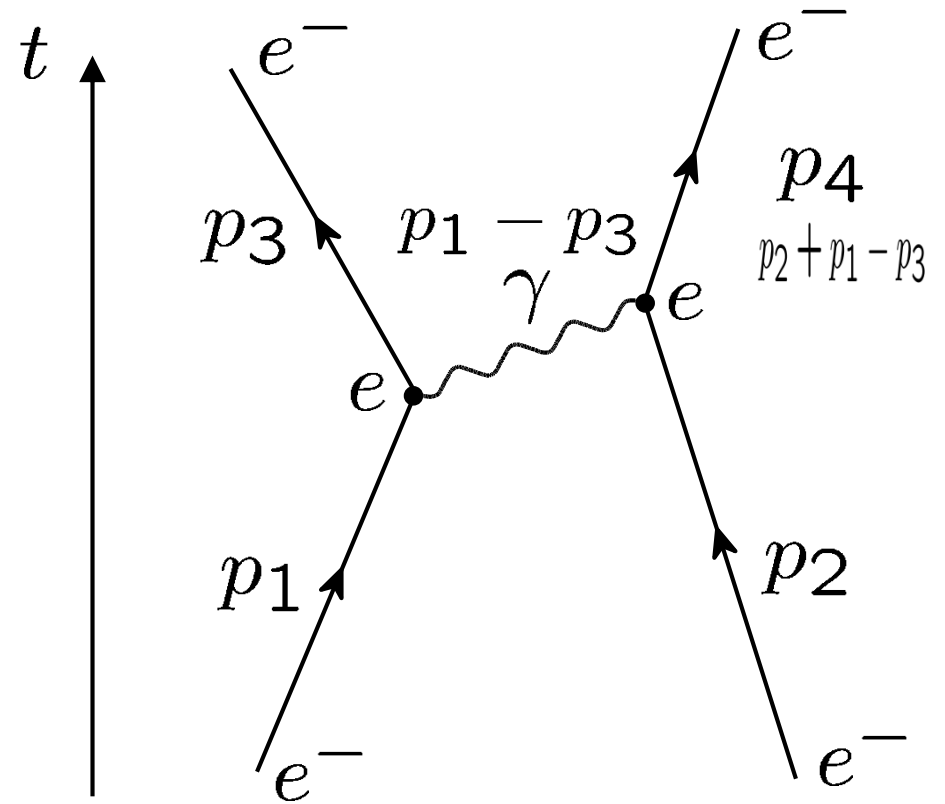
素粒子物理学では、電子同士の電磁相互作用は、光子をキャッチボールして起こる、と理解している。

素粒子の相互作用と崩壊

相互作用＝ゲージボゾンの交換



ゲージボソンを介して運動量がやり取りされている.



電子と電子の電磁相互作用の
ファインマン図

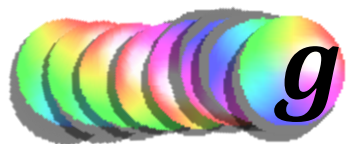
ゲージボゾン(力を媒介する粒子)



弱い相互作用を媒介
(ウィークボゾン)

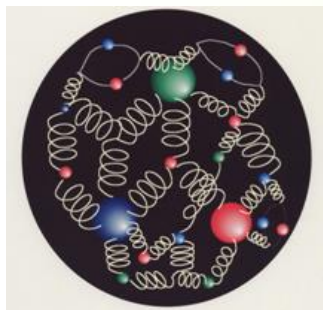


電磁相互作用を媒介
(光子)



強い相互作用を媒介
(グルーオン)

素粒子ではない例



陽子 (uud), 中性子 (udd)

… バリオン(クォーク3つで構成)

π 中間子: $\pi^+(u\bar{d})$, $\pi^0\left(\frac{u\bar{u}-d\bar{d}}{\sqrt{2}}\right)$, $\pi^-(\bar{u}d)$

… メソン(クォーク・反クォークで構成)

反粒子

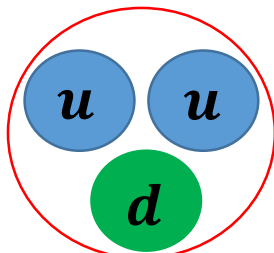
- 全ての粒子に対して、反粒子がある
 - 質量その他の性質が粒子と全く同じで、電荷だけ反対。

粒子

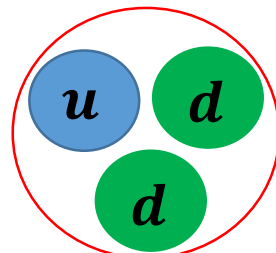
u	c	t	$+2/3$
d	s	b	$-1/3$
			電荷
ν_e	ν_μ	ν_τ	0
e^-	μ^-	τ^-	-1

反粒子

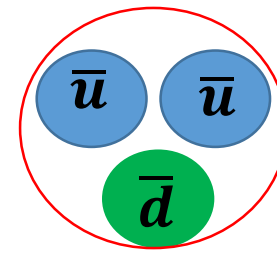
$\bar{u}$	$\bar{c}$	$\bar{t}$	$-2/3$
$\bar{d}$	$\bar{s}$	$\bar{b}$	$+1/3$
			電荷
$\bar{\nu}_e$	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_\tau$	0
e^+	μ^+	τ^+	+1



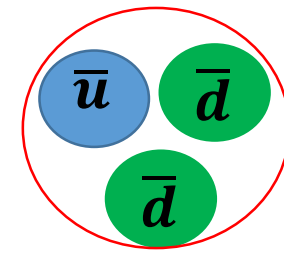
陽子
電荷+1



中性子
電荷0



反陽子
電荷-1



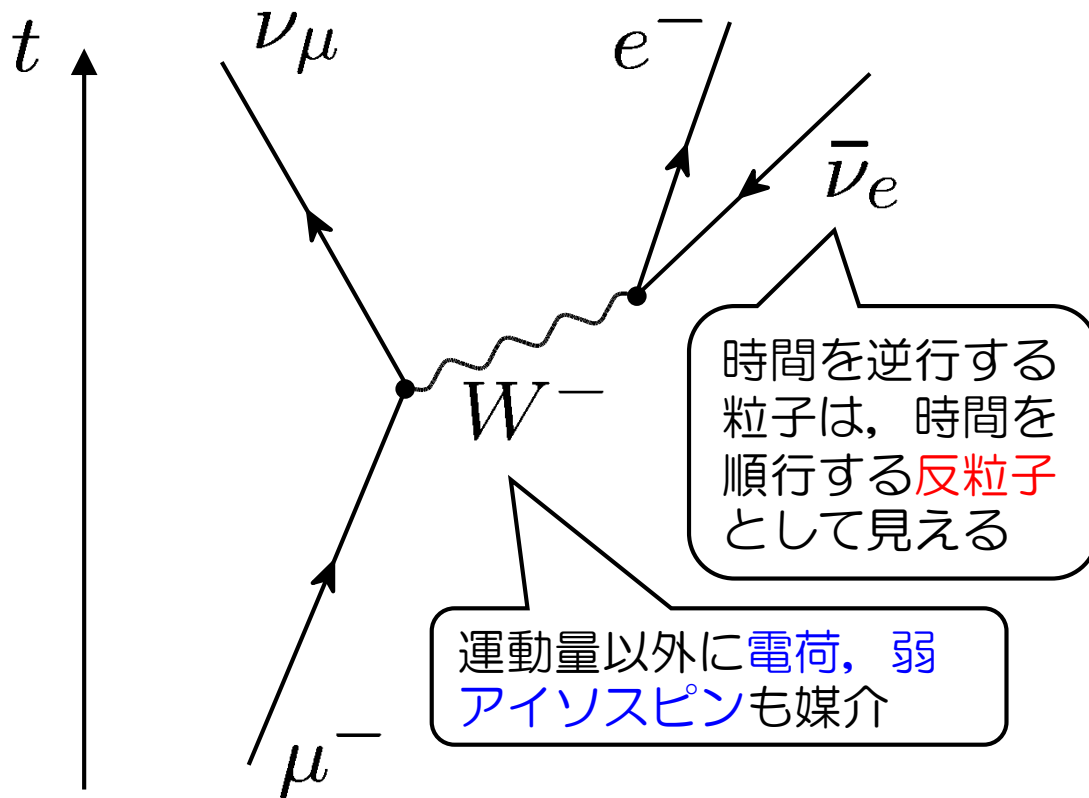
反中性子
電荷0

ミュー粒子の崩壊と寿命の測定 原理

μ 粒子の崩壊

$$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$$

$$\mu^+ \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu$$



$\mu^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\mu$ のファインマン図

弱アイソスピン: (I, I_3)

		I_3	Q
$\begin{bmatrix} \nu_e \\ e \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{bmatrix}$	$+1/2$	0
		$-1/2$	-1

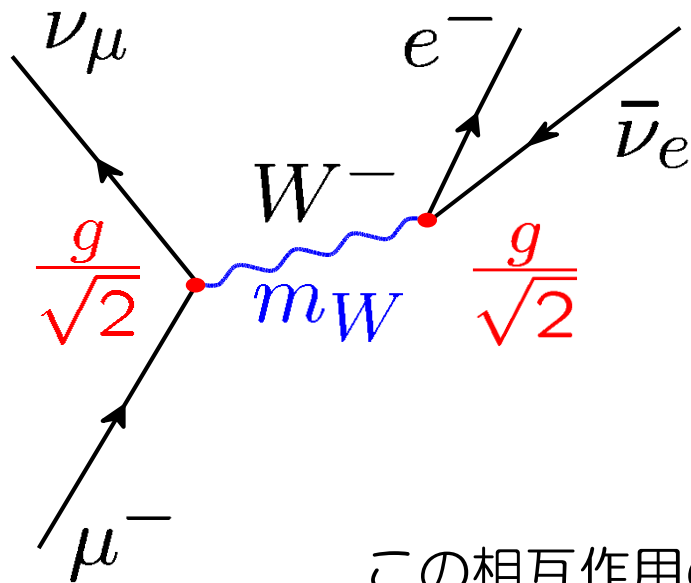
W^- は, $I_3 = -1$, $Q = -1$ を運んでいる (μ^- から持ち去った) と解釈できる.

素粒子の崩壊

//

素粒子の相互作用の一形態

μ 粒子の崩壊と寿命



g ...弱い相互作用の結合定数
(Wボゾンとフェルミオンとの結合定数)

m_W ...Wボゾンの質量

この相互作用の確率（崩壊確率 ω ）は、上のパラメータを用いて相対論的量子力学により計算される.

$$\omega = \frac{G^2 (m_\mu c^2)^5}{192 \pi^3 \hbar^7 c^6}$$

$$G = \frac{\sqrt{2} g^2 (\hbar c)^2}{8 (m_W c^2)^2}$$

$\tau \equiv 1/\omega$: 寿命

崩壊確率が高い $\Leftrightarrow$ 寿命が短い
崩壊確率が低い $\Leftrightarrow$ 寿命が長い

➔ 寿命を測定すると崩壊確率が得られる.

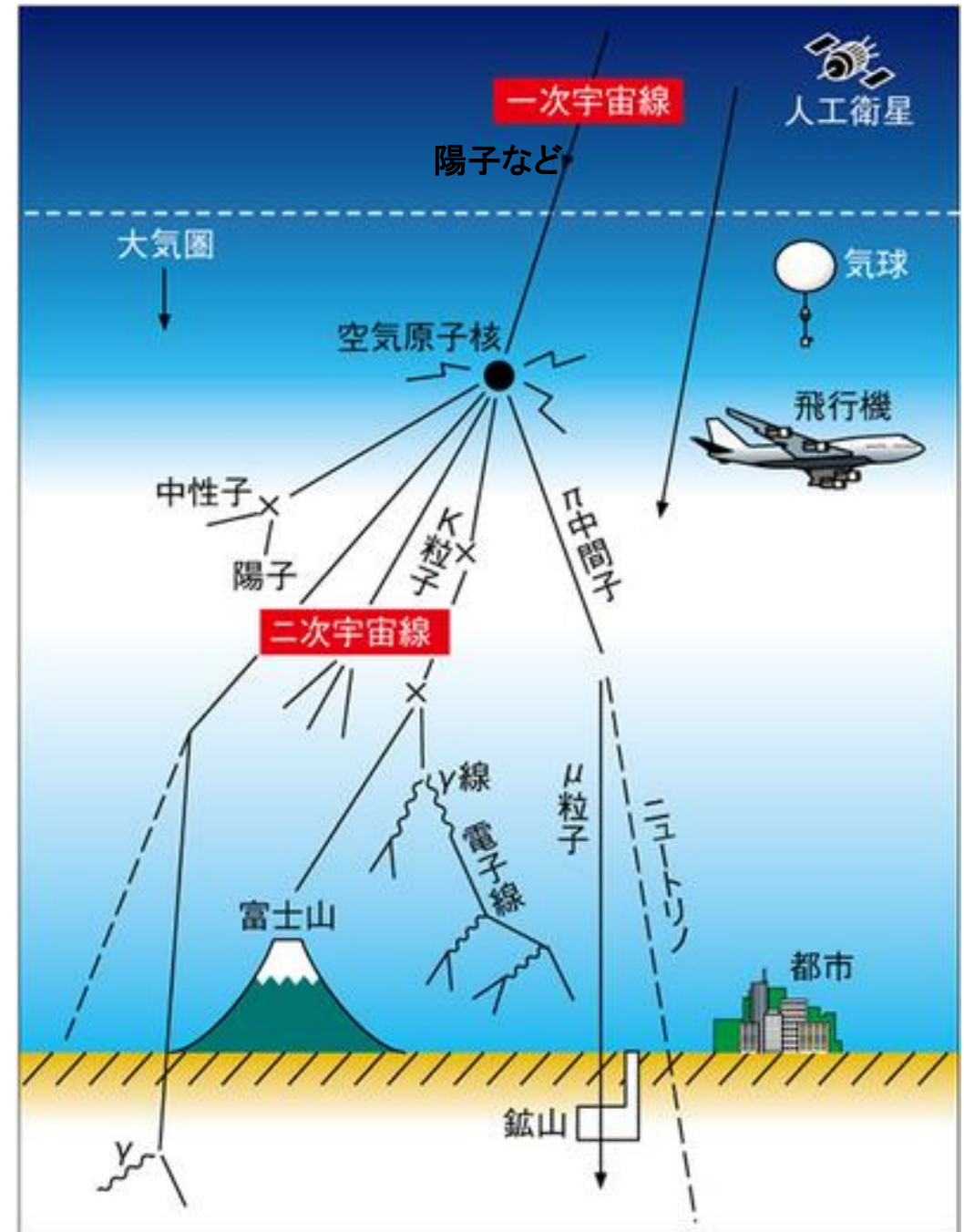
2次宇宙線の μ 粒子

- 宇宙からは高エネルギーの粒子が降ってきている。(宇宙線)
- 1次宇宙線は大気と反応し、2次宇宙線を生成する。 μ 粒子も2次宇宙線として生成される。
- 本実験では、2次宇宙線として降ってくる μ 粒子を観測し、これらの崩壊を測定する。

- ミュー粒子の寿命は 2.2μ 秒なので、光速で飛んだとしても、600mくらいしか飛べないはず。

$$3 \times 10^8 [m/s] \times 2.2 \times 10^{-6} [s] \\ \sim 600 [m]$$

成層圏の厚さ10kmを超えて降ってくるのはなぜだろう？



崩壊確率と寿命

ω : 1個の μ 粒子が単位時間あたりに崩壊する確率

$t=0$ で N_0 個存在した μ 粒子の時刻 t での個数を $N(t)$ とすると

$$-\Delta N(t) = \omega N(t) \Delta t$$

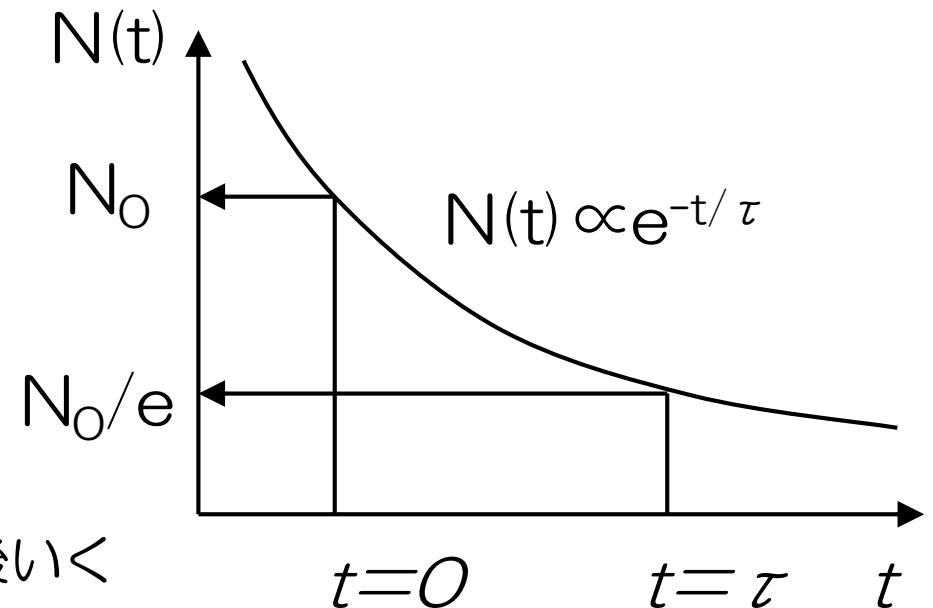
$N(t)$ の μ 粒子のうち Δt の間に崩壊をおこす数

$$\frac{dN(t)}{dt} = -\omega N(t)$$

$$\begin{aligned}\Rightarrow N(t) &= N_0 e^{-\omega t} \\ &= N_0 e^{-\frac{t}{\tau}}\end{aligned}$$

$\tau \equiv 1/\omega$: 寿命

$t=0$ において N_0 あった μ 粒子が t 時間経過後いくつになっているか調べればよいが...



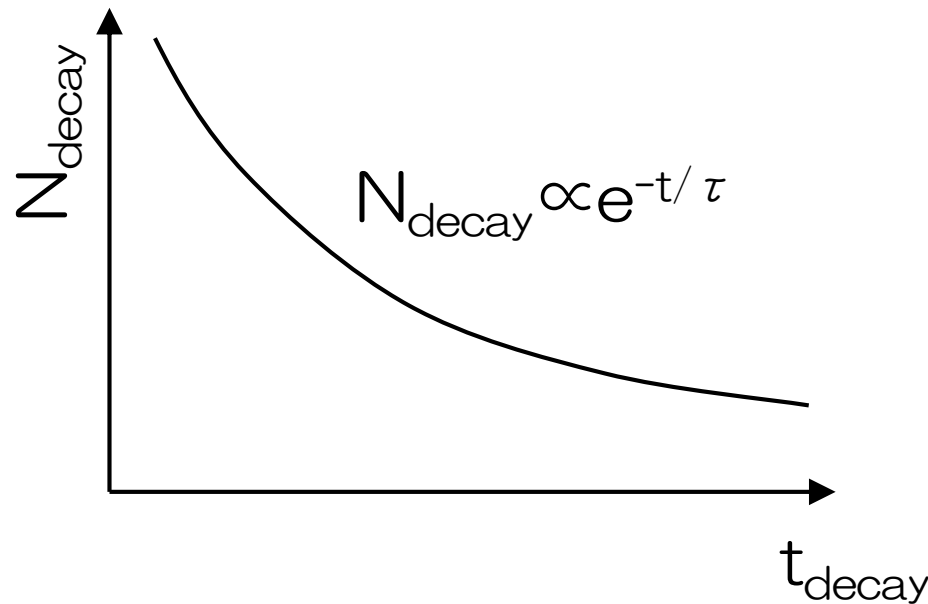
寿命測定原理 1

実際に測定できるのは：

時刻 t において単位時間あたりに崩壊する μ 粒子の数

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

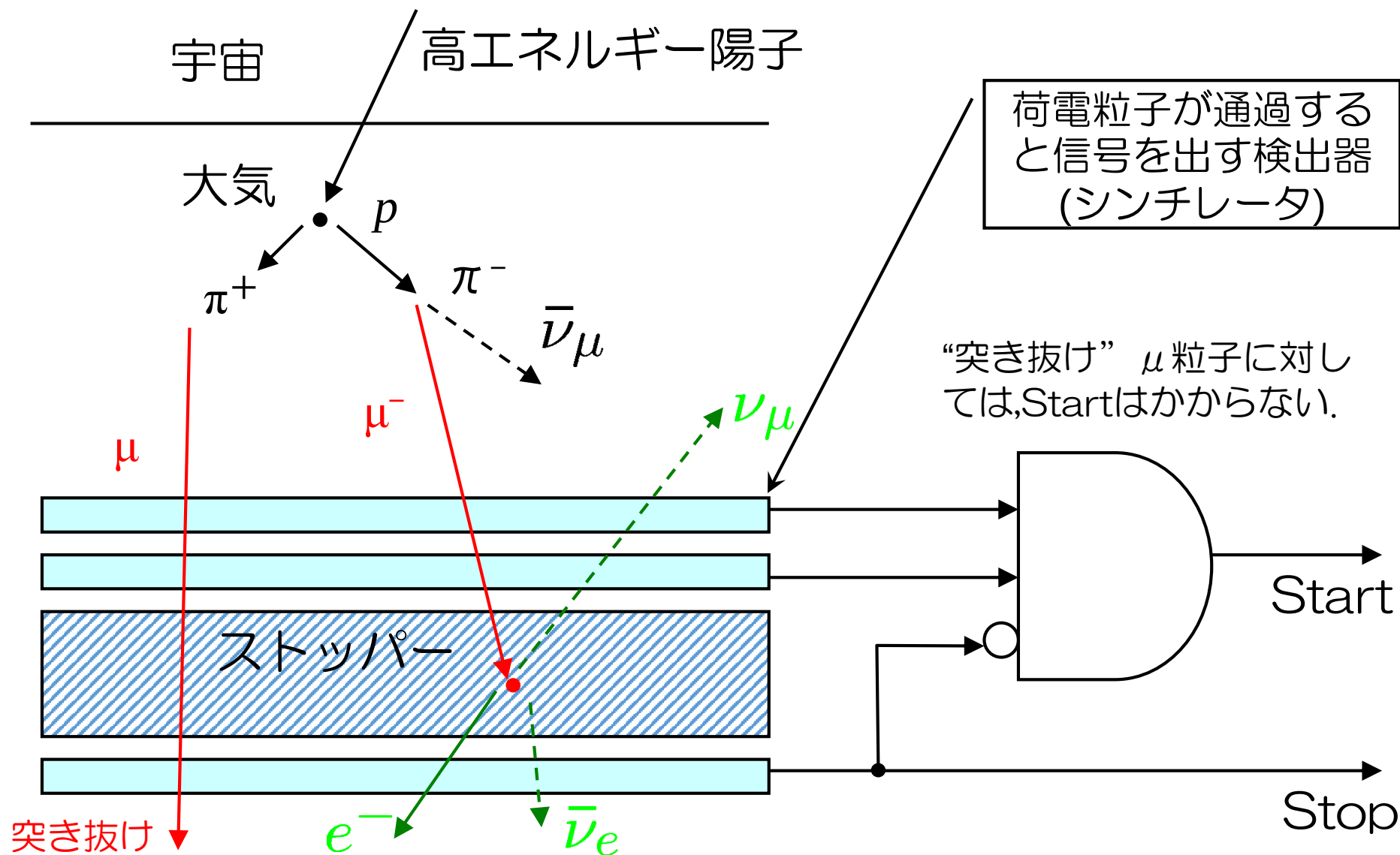
$\propto$ ある1個の μ 粒子が時刻 t において崩壊する確率



μ 粒子の寿命は,ある μ 粒子を捉えて($t=0$),それがいつ崩壊するか($t=t_{\text{decay}}$)という時間分布を測定することにより求めることができる.

寿命測定原理2

二次宇宙線の μ 粒子を金属板のストッパーに捉え、 $t=0$ とし、その μ 粒子の崩壊でできた電子(陽電子)を観測した時刻を t_{decay} とする。



NIMモジュールの機能

ここでは、ケーブルやモジュールの機能を概説する。
今日の前半(3時ごろまで)では、モジュールの機能を確認する実習を行う。

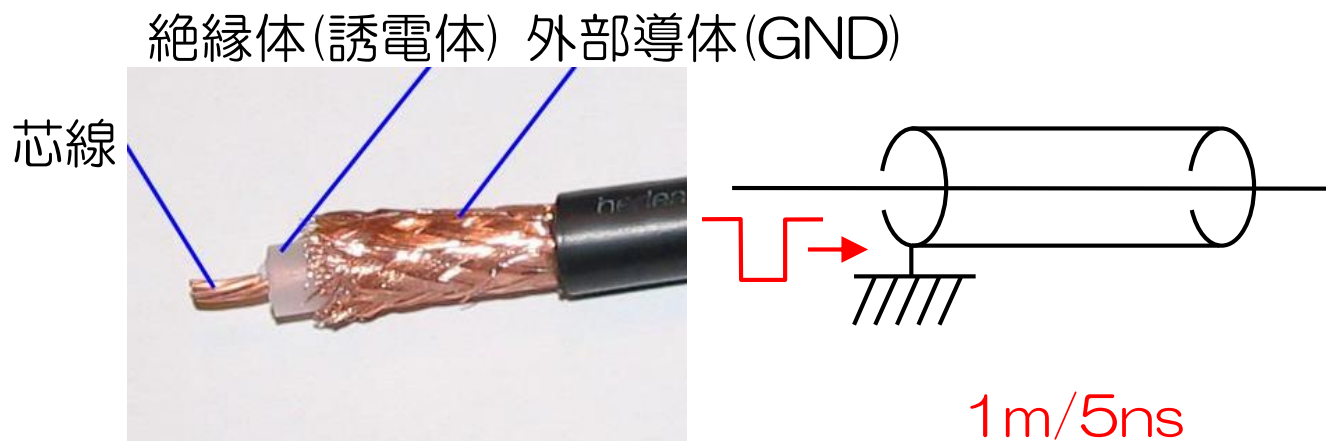
補助単位

•k(キロ)	10^3	■ m(ミリ)	10^{-3}
•M(メガ)	10^6	■ μ (マイクロ)	10^{-6}
•G(ギガ)	10^9	■ n(ナノ)	10^{-9}
•T(テラ)	10^{12}	■ p(ピコ)	10^{-12}
		■ f(フェムト)	10^{-15}

(テキストP6の脚注)

- 電子の質量：511 keV (~ 0.5 MeV)
- トップクォークの質量： ~ 170 GeV
- 光が1mを進む時間： ~ 3 ns
- 光が1 μ sの間にすすむ距離は？

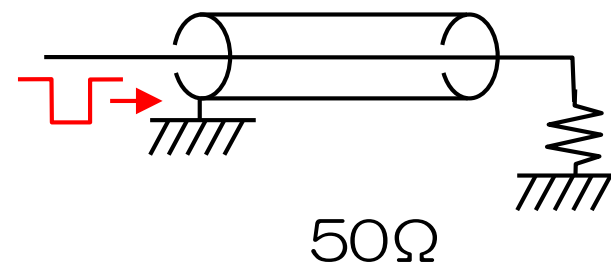
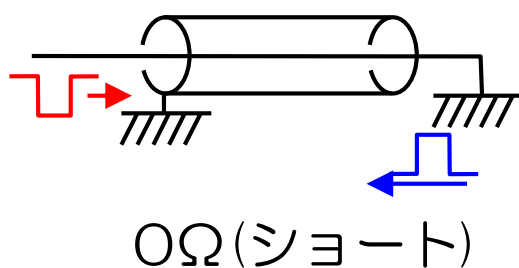
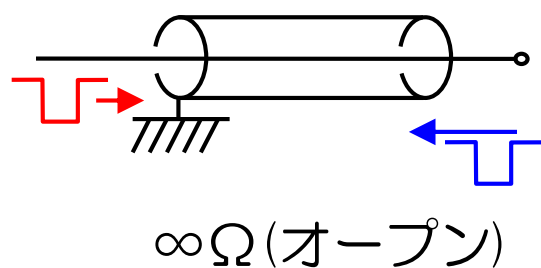
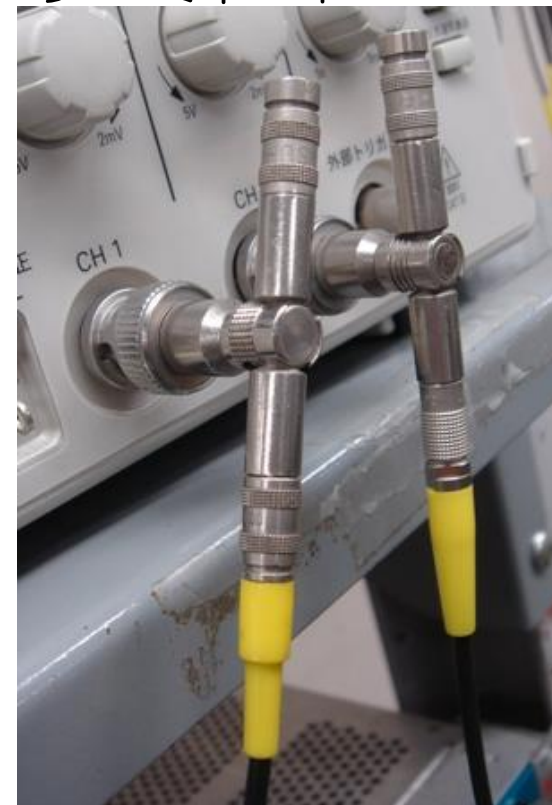
同軸ケーブル



1m/5ns
20cm/1ns



オシロスコープでの
ターミネート



インピーダンスマッチングを取らないと反射がおこる(付録Aを参照のこと).

同軸ケーブルの長さ と 減衰長

- P12の実験で、以下を求めてみよう:

- ケーブルの長さ ℓ (m)
- 減衰長 λ (m)

$x(m)$ のケーブルを通過してきた信号は、 $100 \times e^{-\frac{x}{\lambda}} \%$ に減衰する。

同軸ケーブル

- 同軸ケーブル内の信号伝搬速度
 - 1mを伝搬するのに5nsかかる。
 - $2 \times 10^8 (m/秒)$ ~ 高速の0.6倍
- P12の実験で、以下を求めてみよう:
 - ケーブルの長さ $\ell (m)$
 - 減衰長 $\lambda (m)$

$x(m)$ のケーブルを通ってきた信号は、 $100 \times e^{-\frac{x}{\lambda}} \%$ に減衰する。

- 自然界の多く(減衰)現象は、 $I = A \times e^{-\frac{x}{\lambda}}$ の形になっている。

$$dI = -\left(\frac{1}{\lambda}\right) I \cdot dx$$

減少する量はそのときどきに残っている I の量に比例

- 例:
 - ケーブル中の信号の減衰
 - 溶液中の光の透過
 - 粒子の寿命

同軸ケーブル(2)

- 同軸ケーブル内の信号伝搬速度
 - 1mを伝搬するのに5nsかかる。
 - $2 \times 10^8 (m/秒) \sim$ 高速の0.6倍
- P12の実験で、以下を求めてみよう:
 - ケーブルの長さ $\ell(m)$
 - 減衰長 $\lambda(m)$

$x(m)$ のケーブルを通ってきた信号は、 $100 \times e^{-\frac{x}{\lambda}} \%$ に減衰する。

- ケーブルを $\lambda(m)$ 進むと、信号は $\frac{1}{e} = \frac{1}{2.718} \sim 0.37$ 倍 になる。
 - ケーブルを $n\lambda(m)$ 進むと、信号は $\frac{1}{e^n}$ 倍になる。
- 信号が半分になる長さ $\lambda_{1/2}$ は:

$$\frac{1}{2} = e^{-\frac{\lambda_{1/2}}{\lambda}}, \quad \lambda_{1/2} = \lambda \cdot \ln 2 = 0.3010 \cdot \lambda$$

- 原子核の寿命を τ と書くとき、半減期 $\tau_{1/2}$ は:

$$\tau_{1/2} = \tau \cdot \ln 2 = 0.3010 \cdot \tau$$

NIM信号

- NIM規格

- 回路モジュールの機械的・電氣的仕様
- 素粒子・原子核実験で主に使用される

- 論理信号(ON/OFF, 1/0, T/F)

- 電流で定義

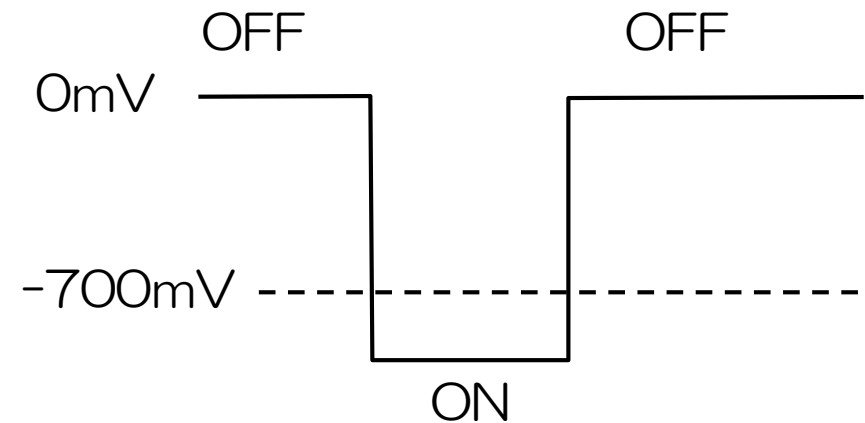
- OFF: $\sim 0\text{mA}$
- ON: $< -14\text{mA}$

- 50Ω ターミネートで見た場合

- OFF: $\sim 0\text{mV}$
- ON: $< -700\text{mV}$

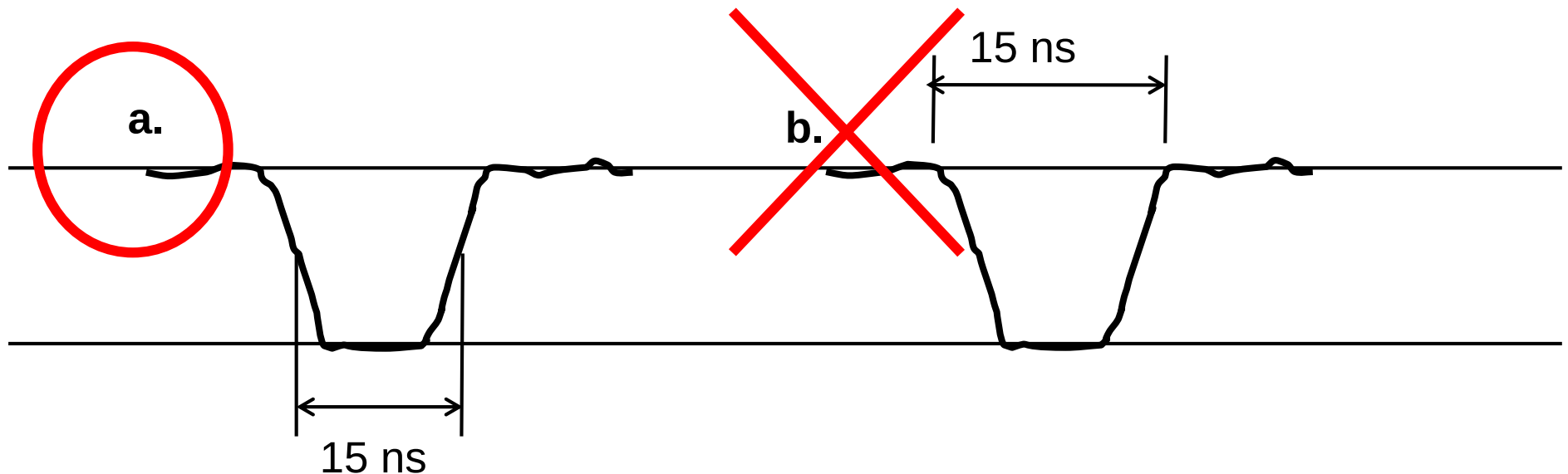
- ⇔ TTL信号(電圧で定義)

- OFF(Low): $< 0.8\text{V}$ ON(High): $> 2.0\text{V}$

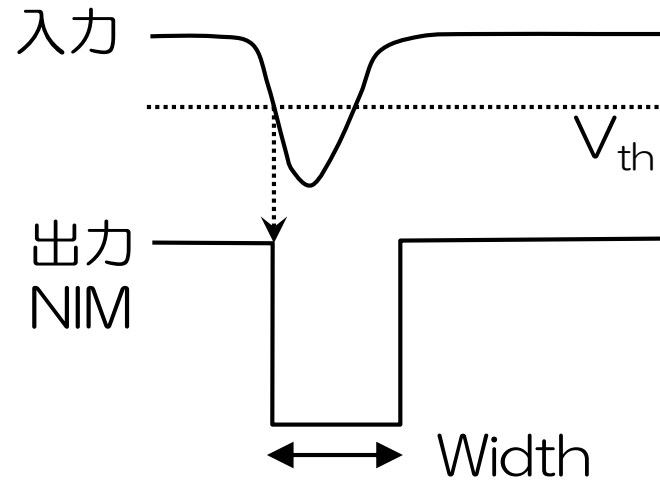


ディスクリミネータの出力パルス幅

- ディスクリミネータのアウトプット・パルス幅を15 nsに調整する。
- 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)。



Discriminator (ディスクリミネータ)



- 入力インピーダンス
 - 50Ω
- 設定パラメータ
 - threshold(しきい値)
 - 出力パルス幅



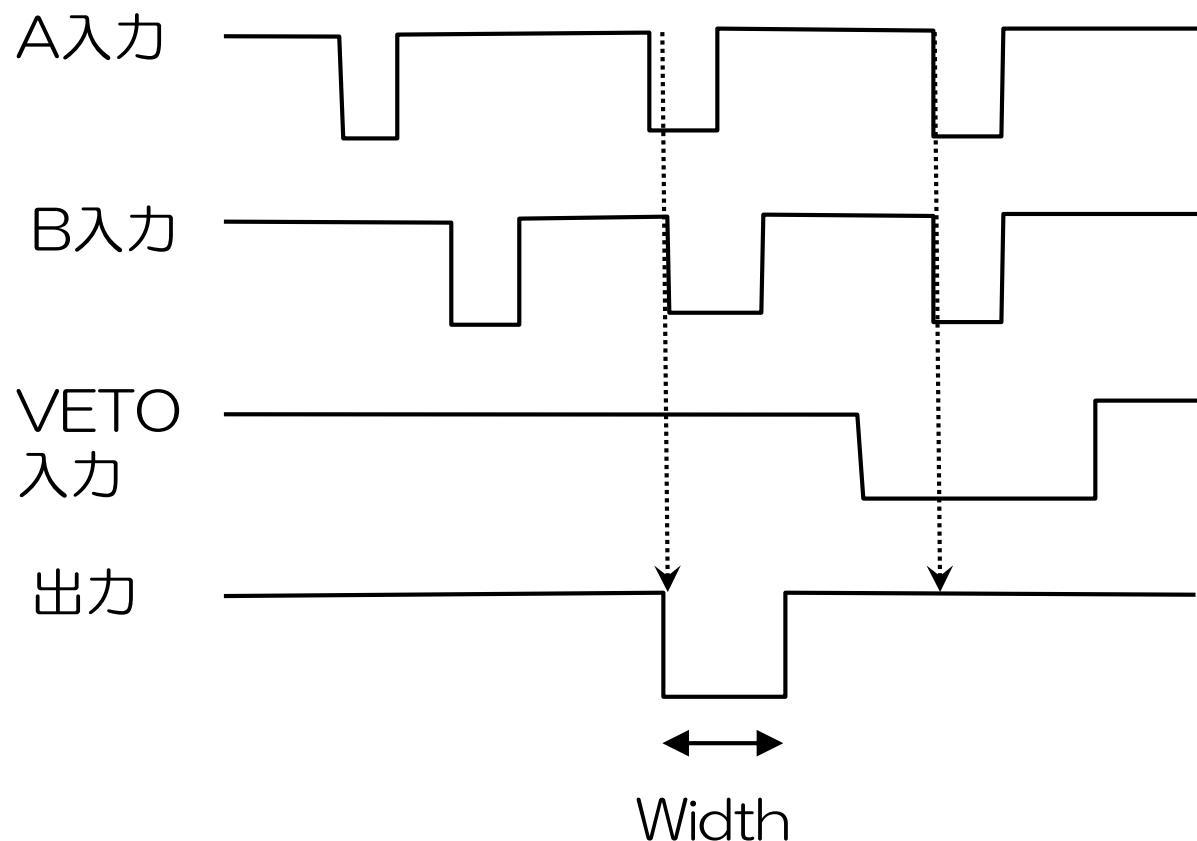
出力端子が白線で結ばれている場合は、内部でつながっている。

(出力インピーダンスを 50Ω にしたいときなどに使用)

Coincidence (コインシデンス)



ロジックに参加させる
ためのスイッチ

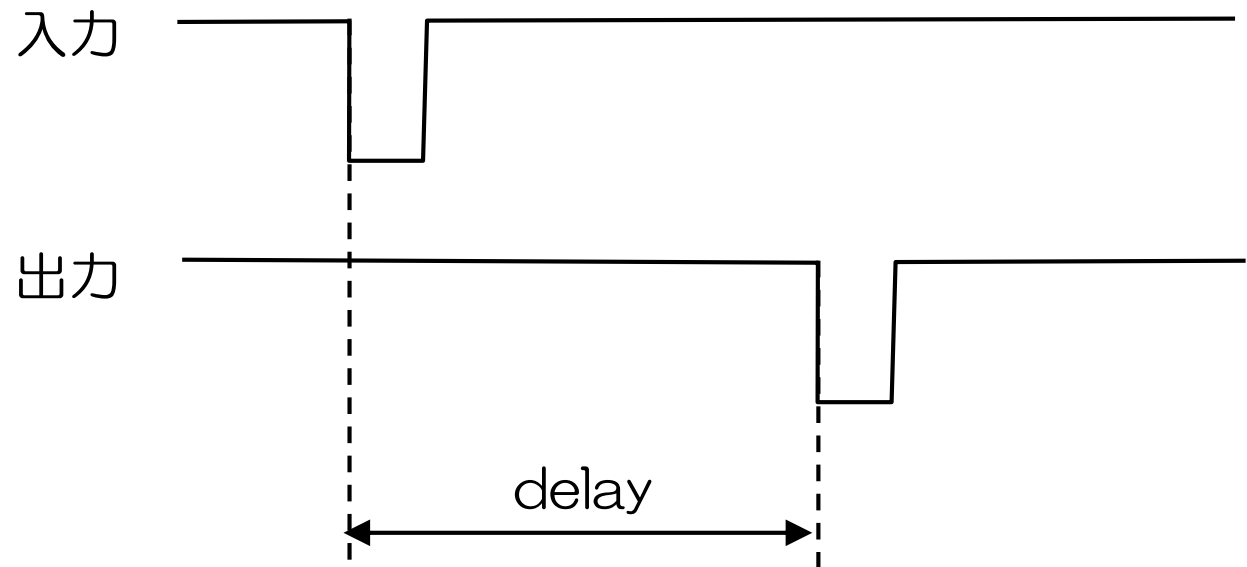


VETO入力がある間は出力が禁止される。

Variable Delay



- Cable によるdelay
 - 電源不要
 - Input/Outputの区別はない
 - NIM信号である必要はない
 - スイッチの切り替えで1~31nsまで1ns毎に調節可能

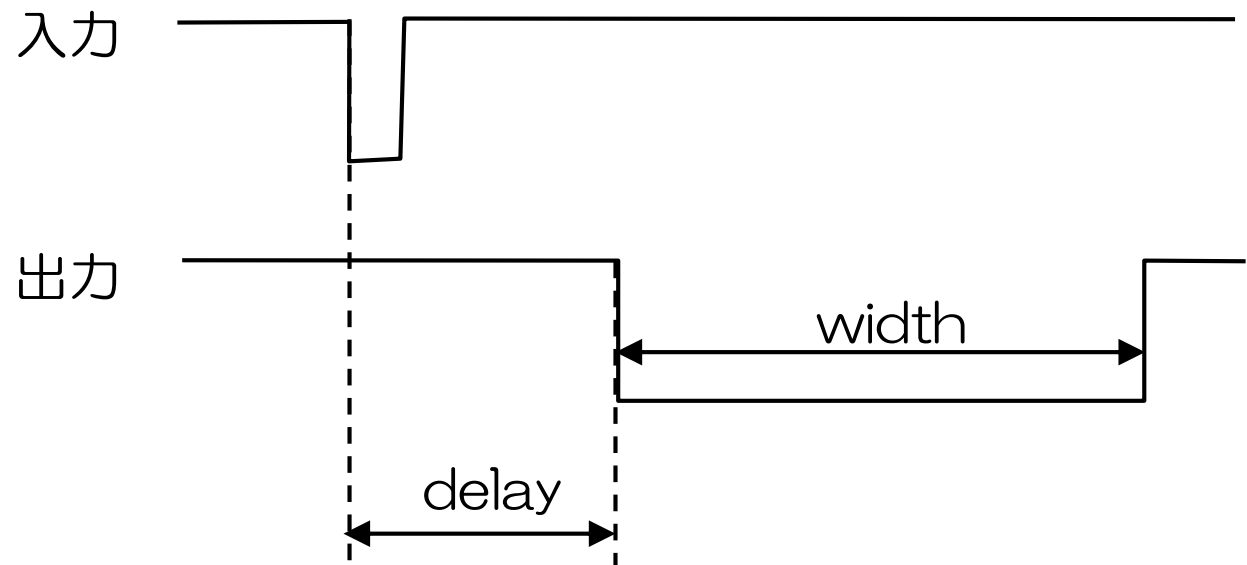


Gate Generator (Gate & Delay type)

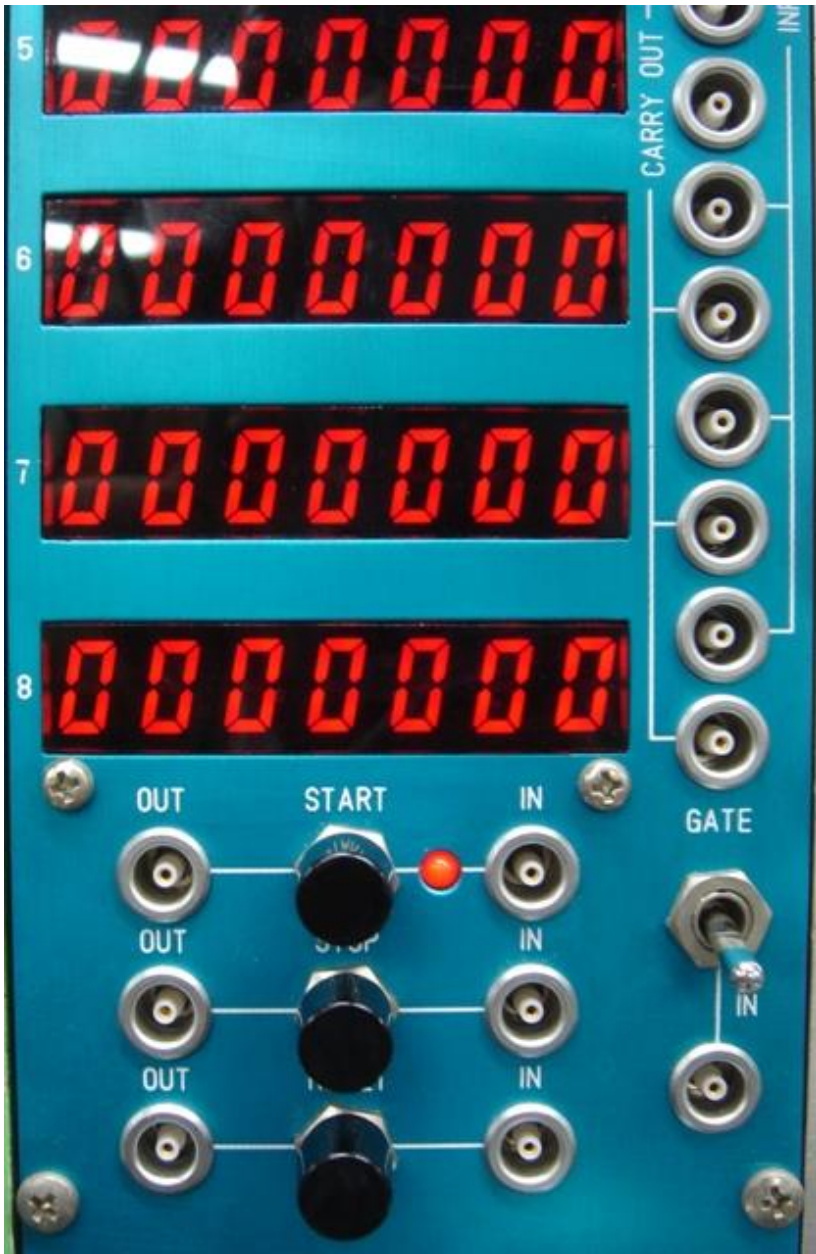


- 入力信号からあるdelay,widthをもったNIMゲートを出力する.
- Delay,Widthの値は調整可能

ダイヤルでレンジを切り替え,
このネジで微調整する



Scaler



- NIMパルスの数をCount
- Start/Stop/Resetボタン
 - 8チャンネル共通動作
- 桁あふれが起こるとCarry outからNIMパルスを出力
 - Carry outを次のチャンネルへ入力することで桁を増やすことができる.

オシロスコープ

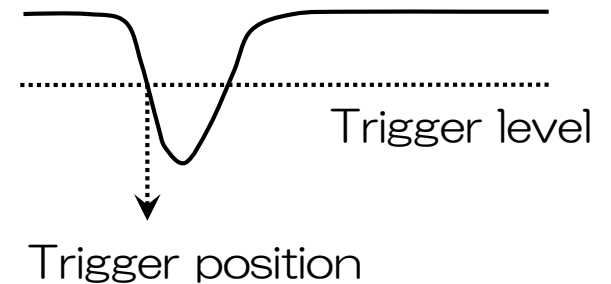
• Trigger

繰り返し波形を見る際に時間軸の基準を与える
(波形と同期を取る)

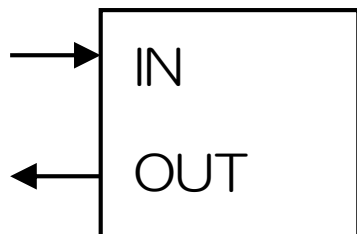
- トリガーソース: Ch1, Ch2, Ext, Line ...
- トリガーレベル
- スロープ: $\uparrow$ (立上り +), $\downarrow$ (立下り -)

Trigger slope: -

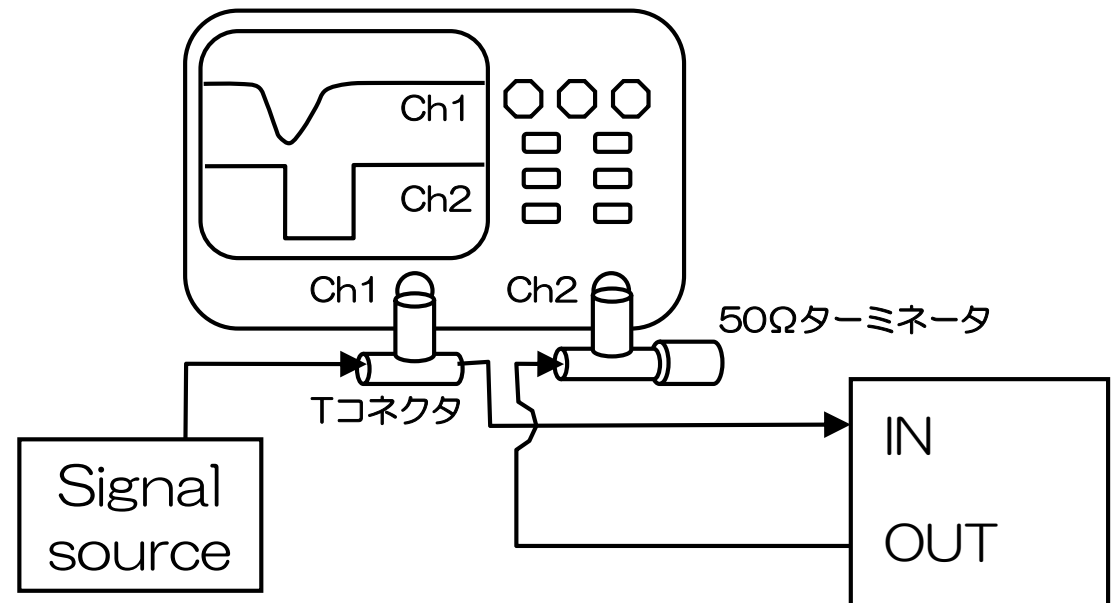
Signal source



IN/OUTを持つモジュール
の機能を調べたいとき

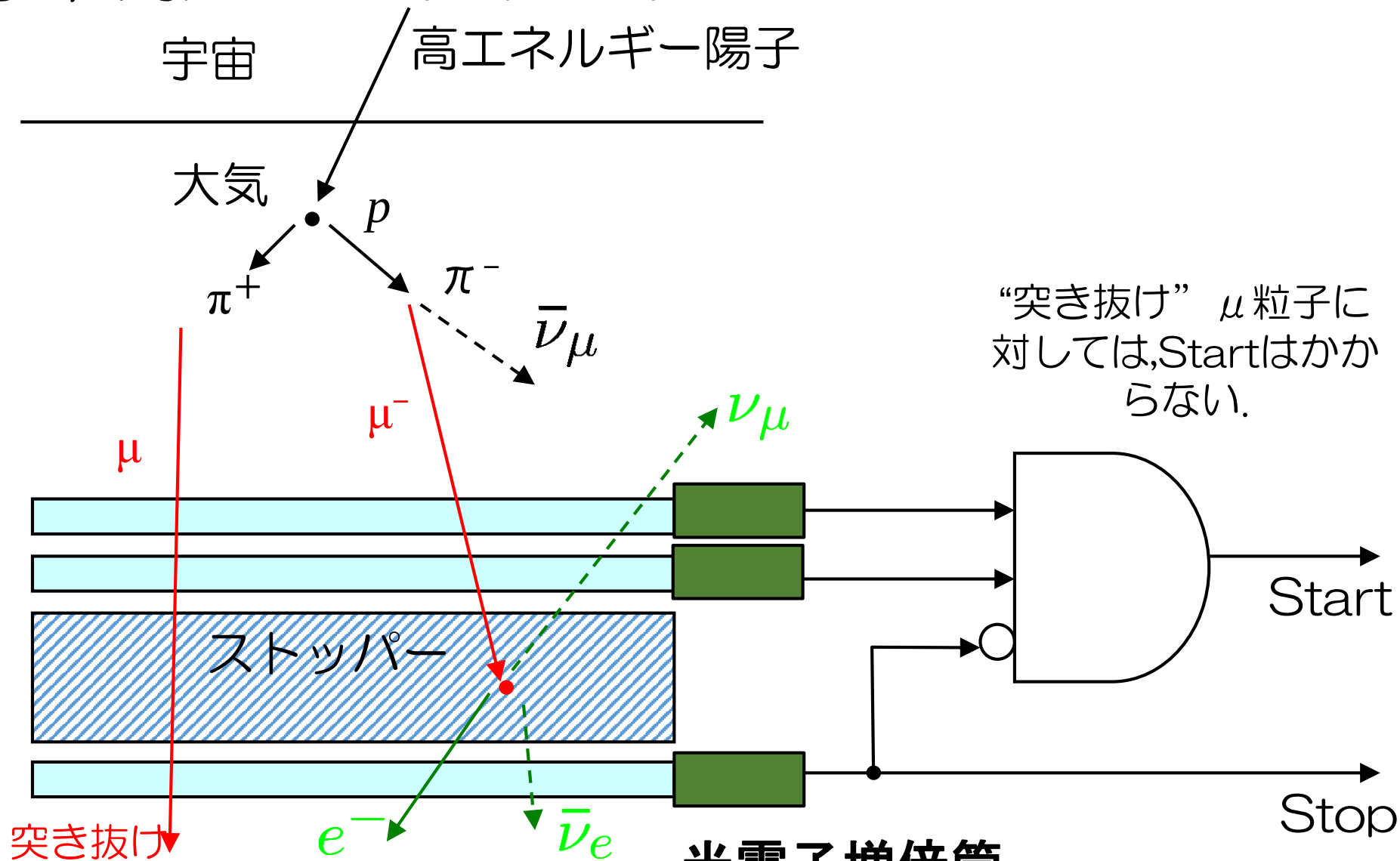


T-connectorを使って右のよう
に接続し,モジュールへの
IN/OUTをオシロスコープの
Ch.1/Ch.2で観察する.



シンチレーターと光電子増倍管

寿命測定の設定アップ

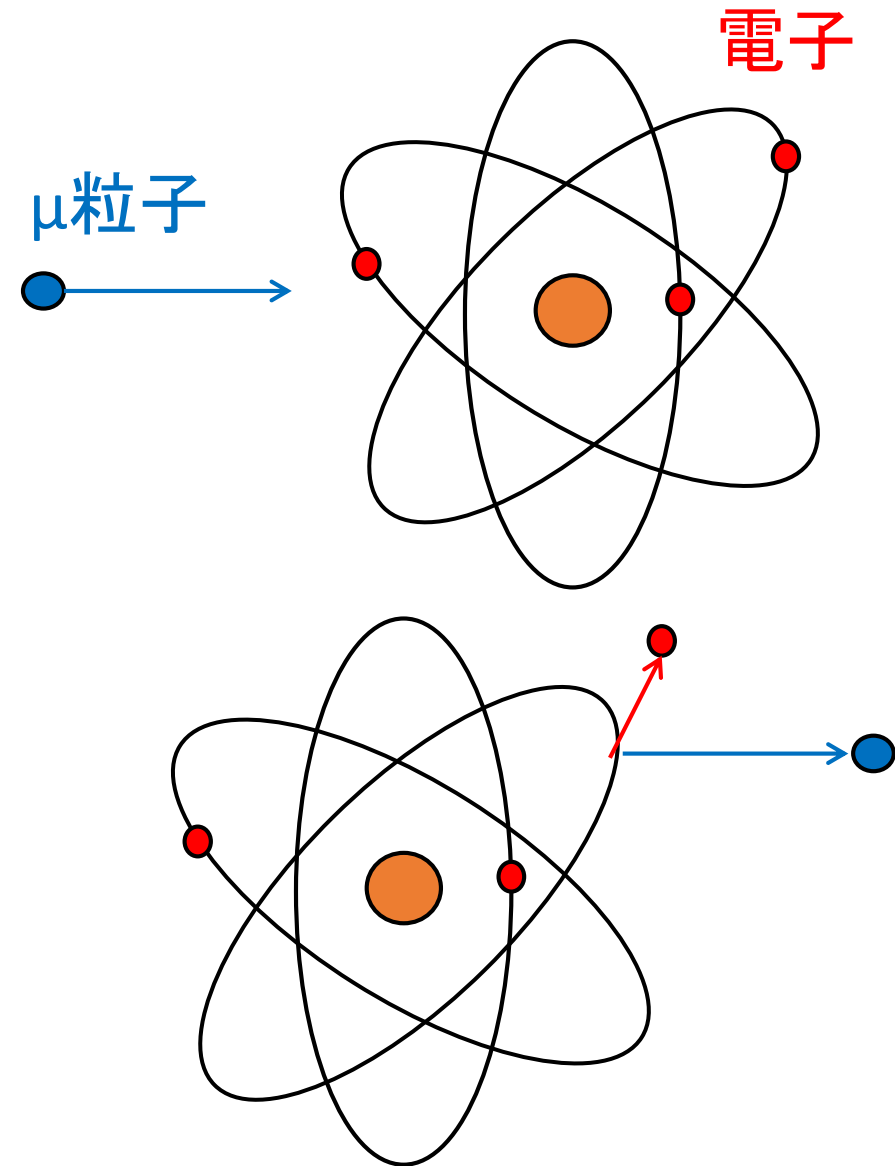


シンチレータ:
荷電粒子が通過すると、
紫外光を発光する

光電子増倍管:
シンチレータの発光を検出し、
電気信号を出力する

μ粒子と物質の相互作用

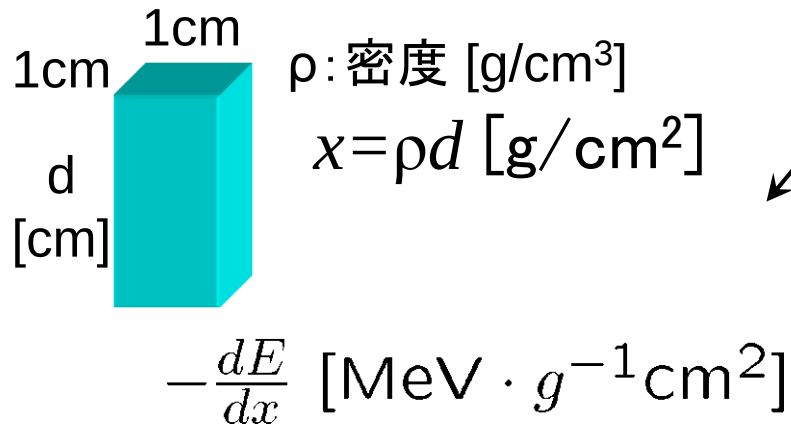
- μ粒子が高いエネルギーをもって入射するとき：
 - 電子は雲状に広がって分布しており、μ粒子は電子と散乱する。
- 電子はμ粒子に比べて質量が小さい
 - $m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$ 、 $M_\mu = 106 \text{ MeV}/c^2$
- 電子を弾き飛ば（原子をイオン化）したあともミュー粒子はエネルギーを失うだけでほとんど方向を変えずに突き進む。
 - 弾性散乱



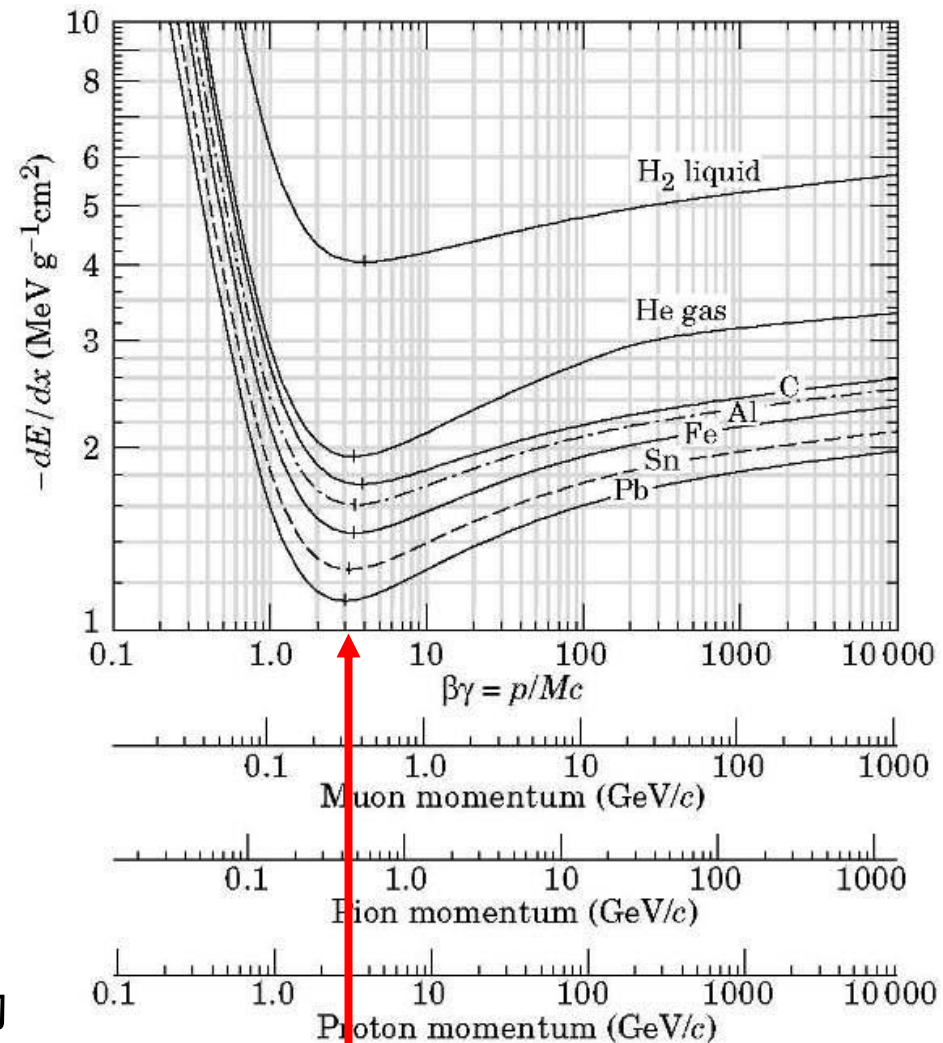
荷電粒子と物質の相互作用

- 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**)



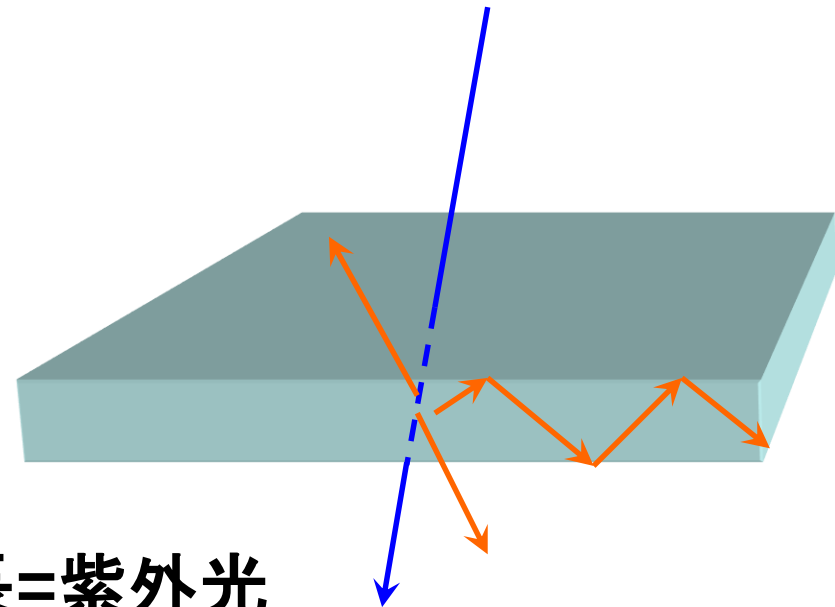
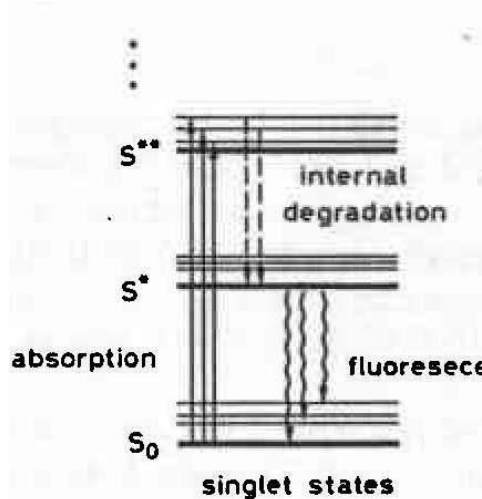
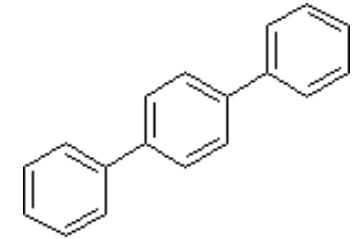
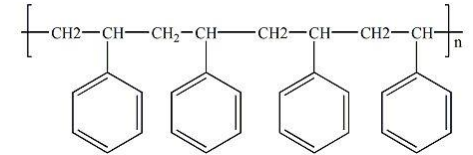
荷電粒子が物質を通過する際のエネルギー損失 $-dE/dx$ (=物質に落とすエネルギー)は, μ 粒子の場合 $\sim 300\text{MeV}/c$ で最小. それ以上の運動量を持つ粒子では, ゆっくり上昇(あまり変わらない).



Minimum Ionization Particle (MIP)

プラスチックシンチレータ

- MIPによって物質へ落とされたエネルギーを可視光へと変換する
 - 基材: ポリスチレン(C_8H_8)_n, ポリビニルトルエンなど
 - 密度: 約1g/cm³
 - 蛍光剤: p-ターフェニル($C_{18}H_{14}$)など(～10g/l)
 - π 軌道電子の準位
 - 第一励起状態から基底状態へ落ちるときに発光
 - 波長変換剤: 紫外光→可視光(青色)



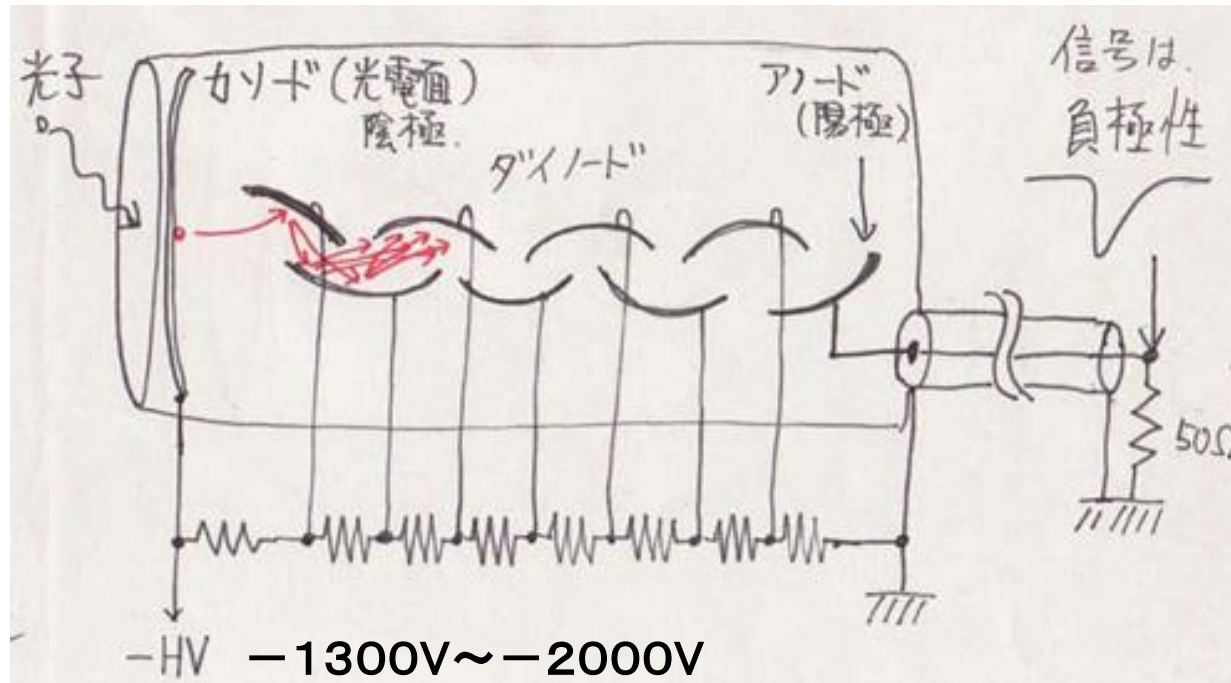
数eV $\Rightarrow$ O(100nm)の波長=紫外光

分子の励起にかかる時間: 数p秒

基底状態に戻るのににかかる時間: 数n秒

光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube: PMT、フォトマル、光電管)

・可視光域の光子を検出し電気信号として出力



- 光電面で光電効果(光子→電子)
 - 量子効率: ~25%
- ダイノードで二次電子数を増幅
 - H7195では、12段のダイノードによる増幅
 - 一段あたり2~3倍, 12段では, $10^5 \sim 10^6$ 倍
 - 増幅率は印加電圧に依存
- アノード(電流を収集する電極)で電荷を収集

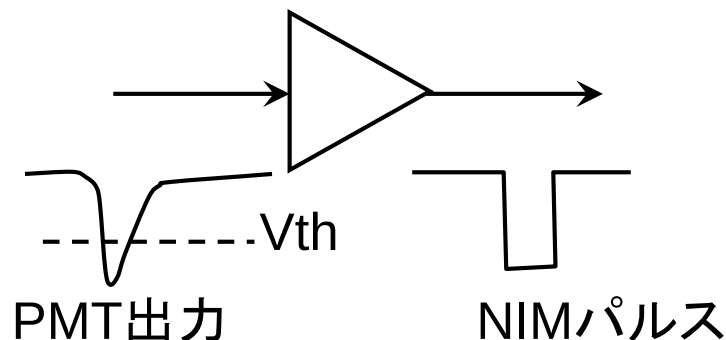
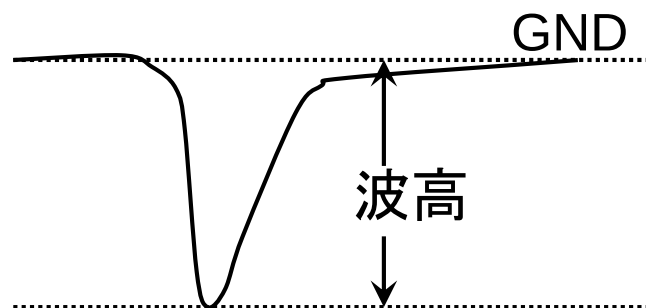
今回の課題：HVカーブの測定

- μ 粒子を測定する際のバックグラウンド
 - 光電子増倍管の熱ノイズ(熱電子)
 - 光電子増倍管の光電面から、熱によって励起された電子(熱電子)が出てきて電気信号を出す。
 - 環境放射線
 - 大気中、地殻中(や建物の壁など)に含まれる放射性同位体が発する環境放射線でも、シンチレータは発光する。
- これらのバックグラウンドをうまく落としながらデータをとるための工夫をする必要がある。

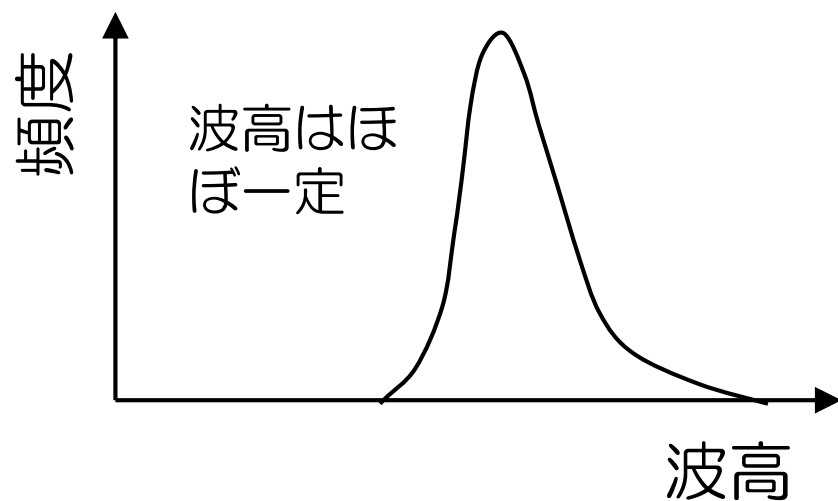
HVカーブ（検出効率のHV依存性）の測定

ディスクリミネータ

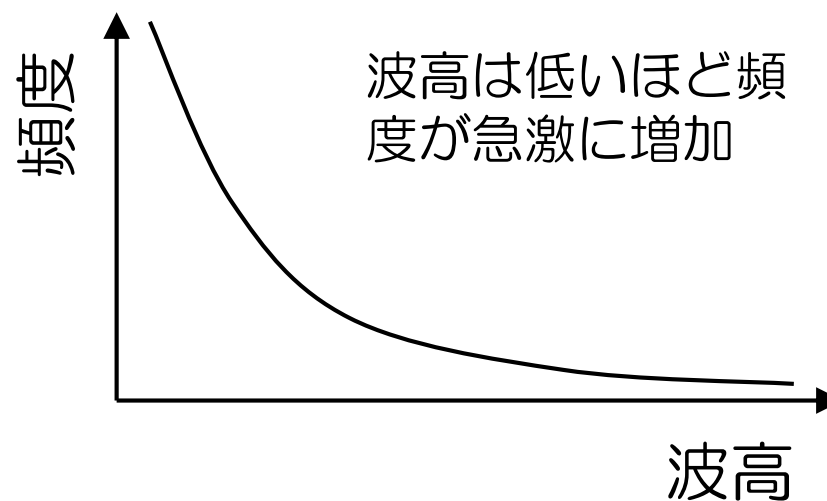
PMT出力



MIP信号: 荷電粒子(μ 粒子)のMIP
通過に対する信号の波高分布



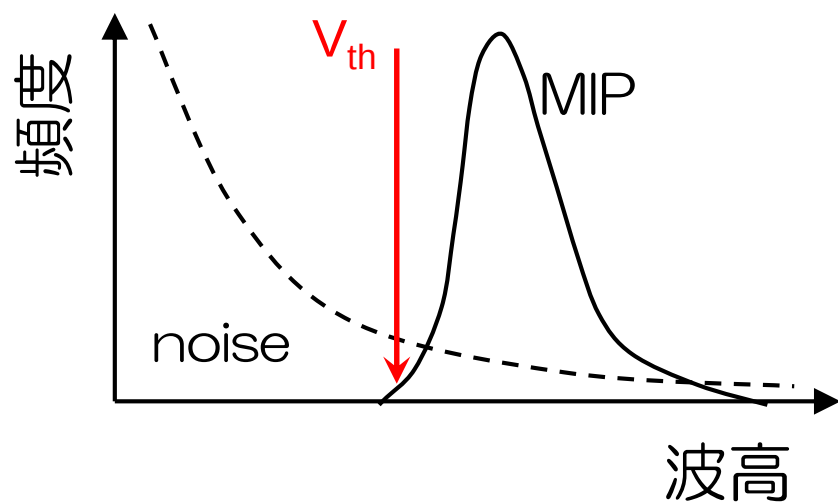
バックグラウンド: PMT内部の熱電子
等によるノイズの波高分布



HVカーブの測定 (2)

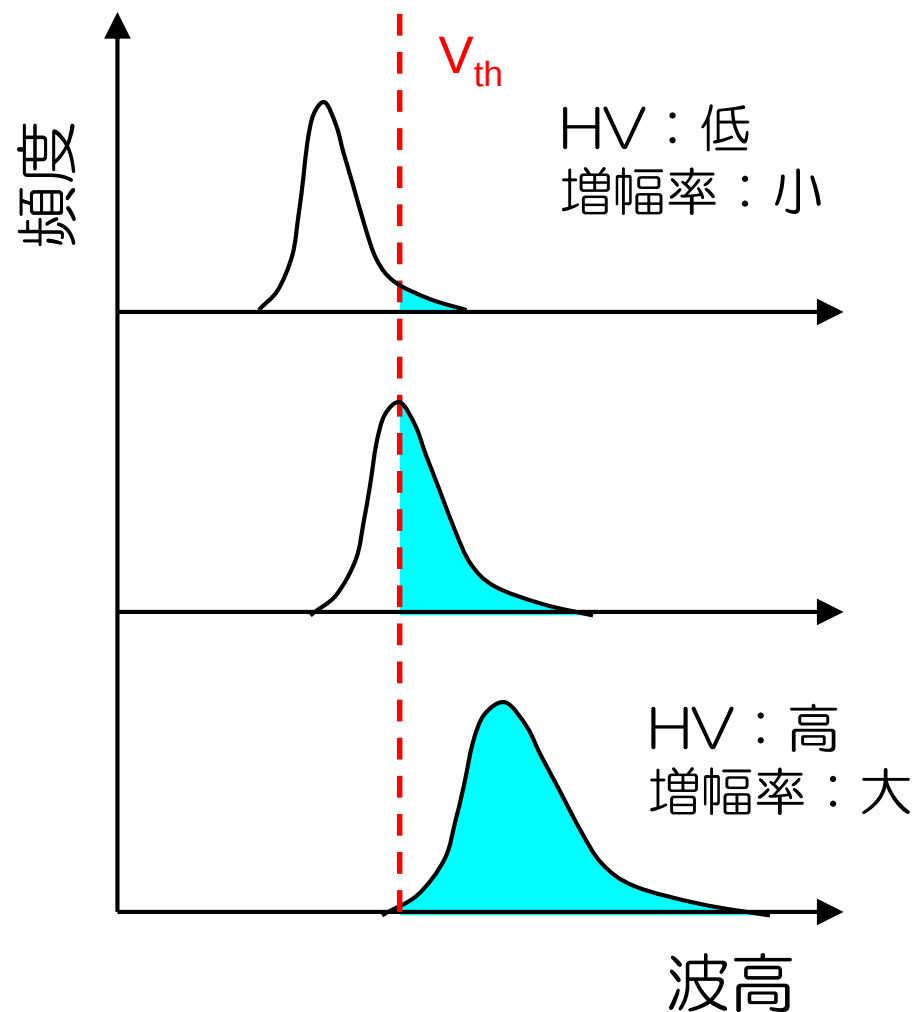
discriminatorのVthは

- 信号をできるだけ拾う
 - ノイズをできるだけ落とす
- 位置にあるのが望ましい

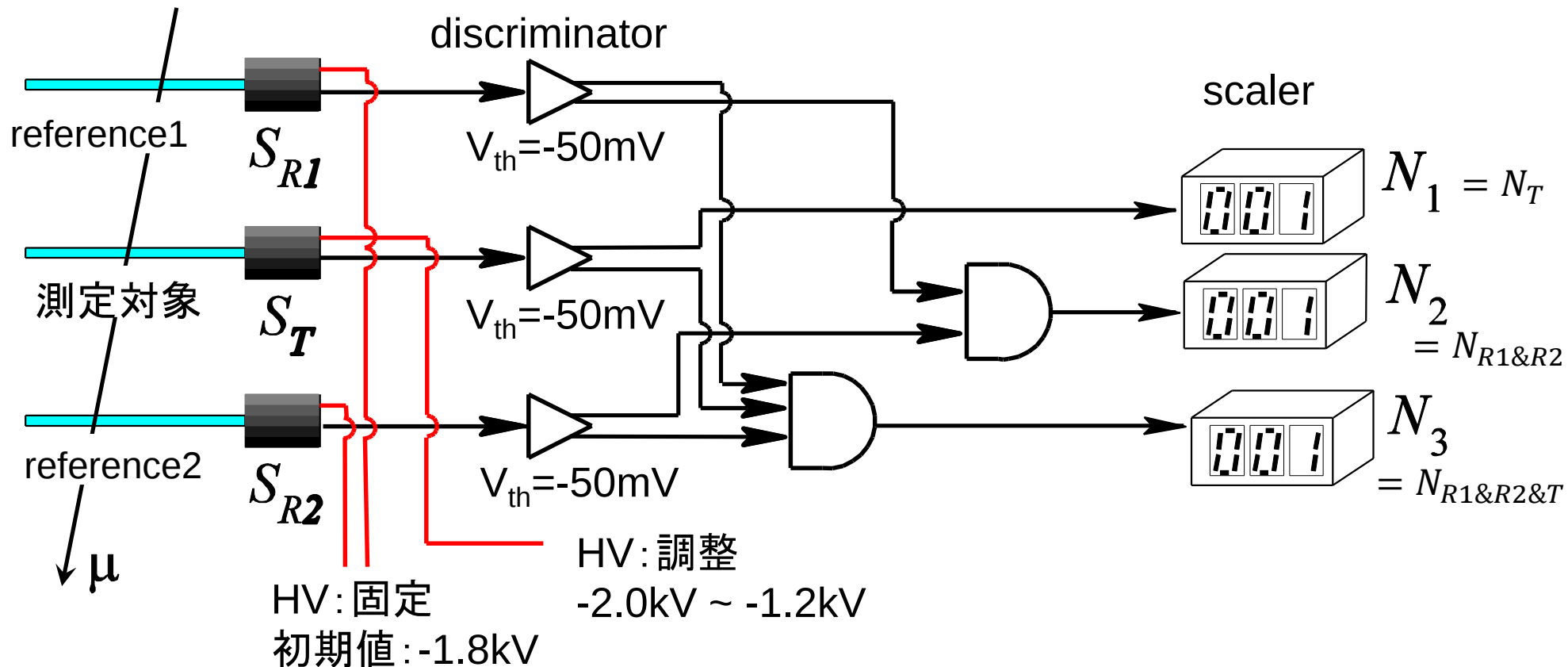


PMTの増幅率を調整する

- 増幅率(すなわちHV)を変更しつつ, MIP信号の検出効率を測定する



検出効率測定のためのセットアップ



$$N_1 = N_T$$

カウンターTが鳴った回数 (=MIP信号, またはノイズを検出した数)

$$N_2 = N_{R1\&R2}$$

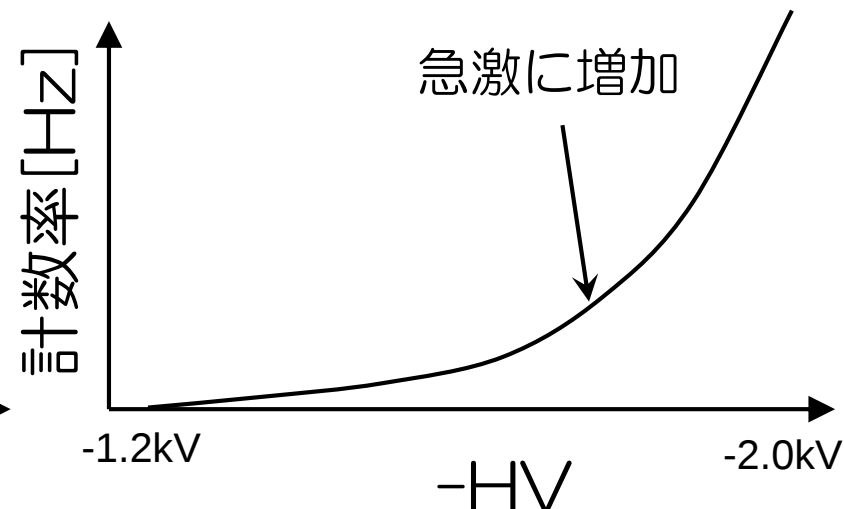
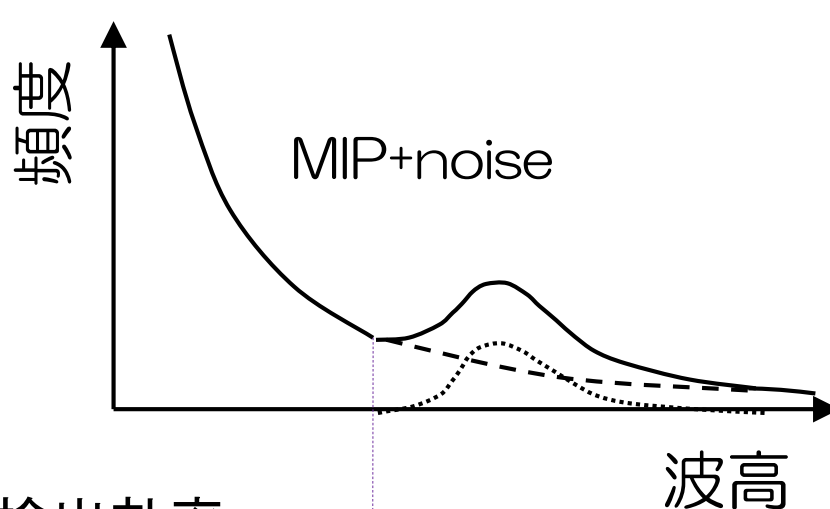
カウンターR1,R2が**同時に**鳴った回数. R1,R2の間に位置するTを荷電粒子が通過した数にほぼ等しい。

$$N_3 = N_{R1\&R2\&T}$$

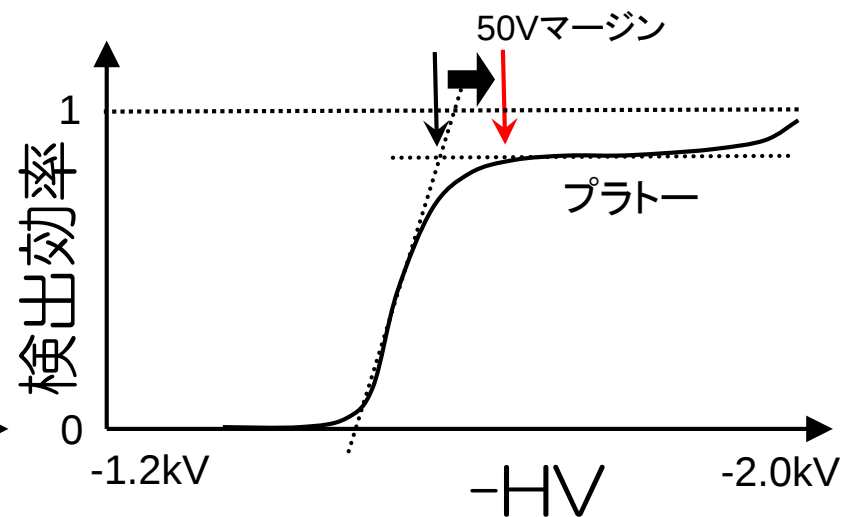
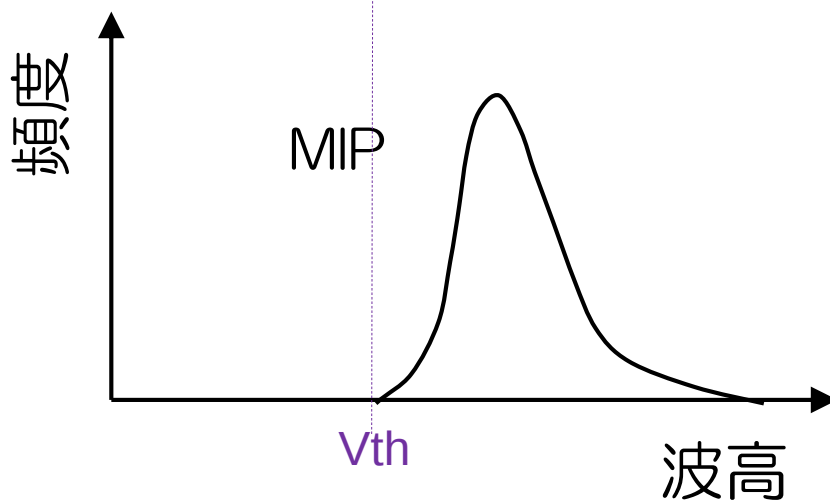
カウンターR1,R2が同時にMIP信号を検出した時にカウンターTも同時に信号を検出した数。Tを荷電粒子が通過したときにTがそれを検出した数にほぼ等しい。

計数率および検出効率のHV依存性

$N_1 / \Delta t \cdots$ MIP信号+ノイズの計数率(Rate[Hz])



$N_3 / N_2 \cdots$ 検出効率



プラトー(plateau)に達したところから50Vのマーヅンをとる.

測定データの統計誤差

■ 事象数N … Poisson分布

- 偶発事象
- 発生確率一定
- 期待値(平均値)が μ の時

$$P(N; \mu) = \frac{\mu^n e^{-\mu}}{n!}$$

分散 : μ

- ★ μ は, 一般には不明. 観測量であるNを母数 μ の推定値として使う(Nが大きいときは, ほぼ正しい)

$$N \pm \sqrt{N}$$

- ★ 計数率 $N_1/\Delta t$ の統計誤差

$$\frac{N_1}{\Delta t} \pm \frac{\sqrt{N_1}}{\Delta t}$$

■ N回試行してM回成功 … 二項分布

- 成功確率 p のとき

$$P(M; N, p) = \binom{N}{M} p^M (1-p)^{N-M}$$

分散 : $Np(1-p)$

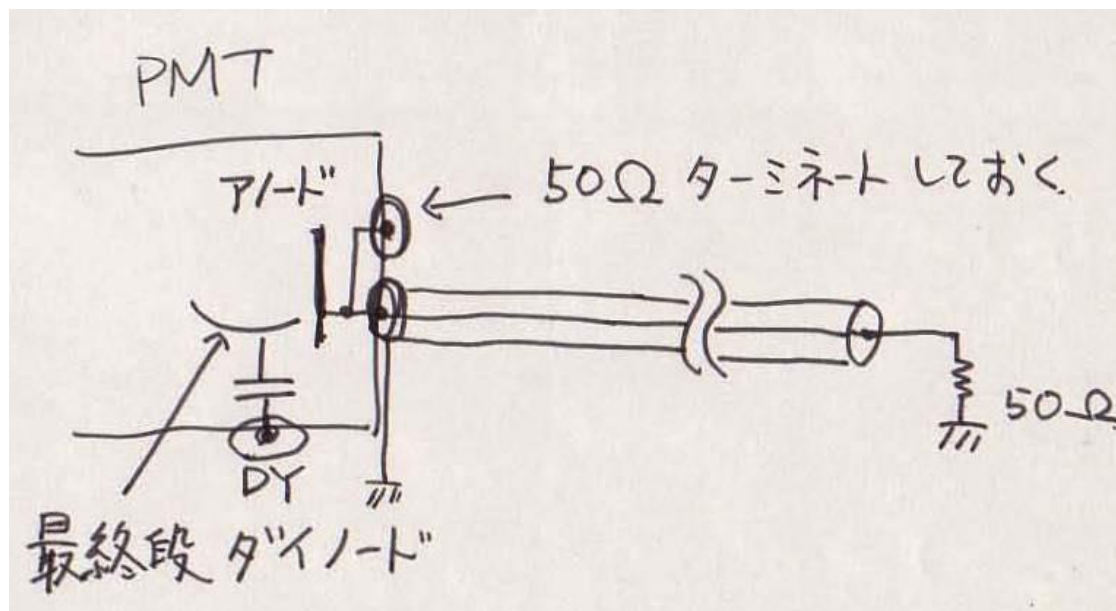
- ★ p は, 一般には不明. 観測量である M/N を母数 p の推定値として使う(M, N が大きいときは, ほぼ正しい)

$$M \pm \sqrt{N \cdot \frac{M}{N} \cdot \left(1 - \frac{M}{N}\right)}$$

- ★ 検出効率 ϵ の統計誤差

$$\epsilon = \frac{N_3}{N_2} \pm \frac{\sqrt{N_2 \cdot \frac{N_3}{N_2} \cdot \left(1 - \frac{N_3}{N_2}\right)}}{N_2}$$

PMT出力端子



高圧電源(REPIC RPH-030)



フロントパネル

リアパネル

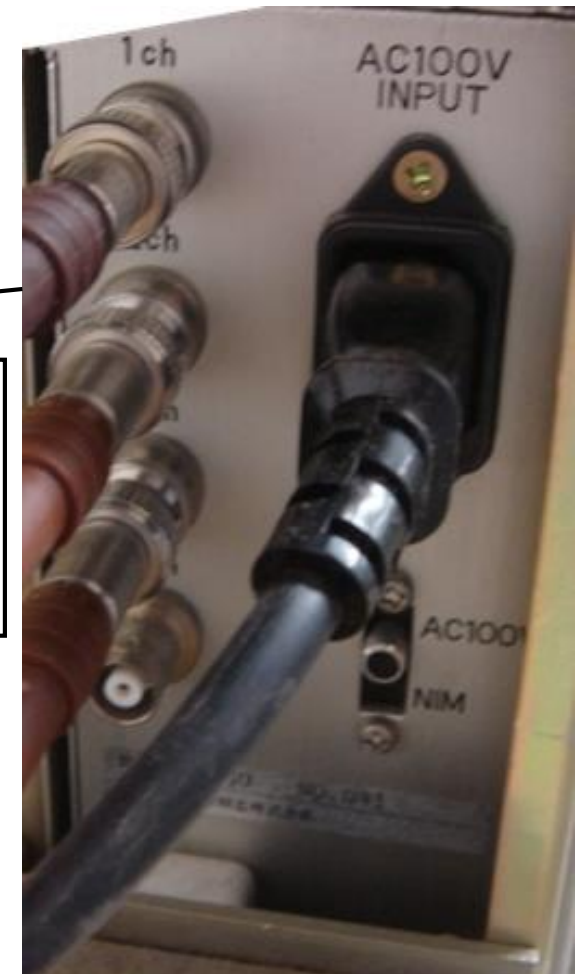
1~4ch
を選択

高圧ケーブルのタグ
を確認しHVのチャ
ンネルとPMTとの対
応を確認しておく。

モニターする量（電圧・
電流・電流上限値）を切
り替える

スイッチは引き
ながら倒す

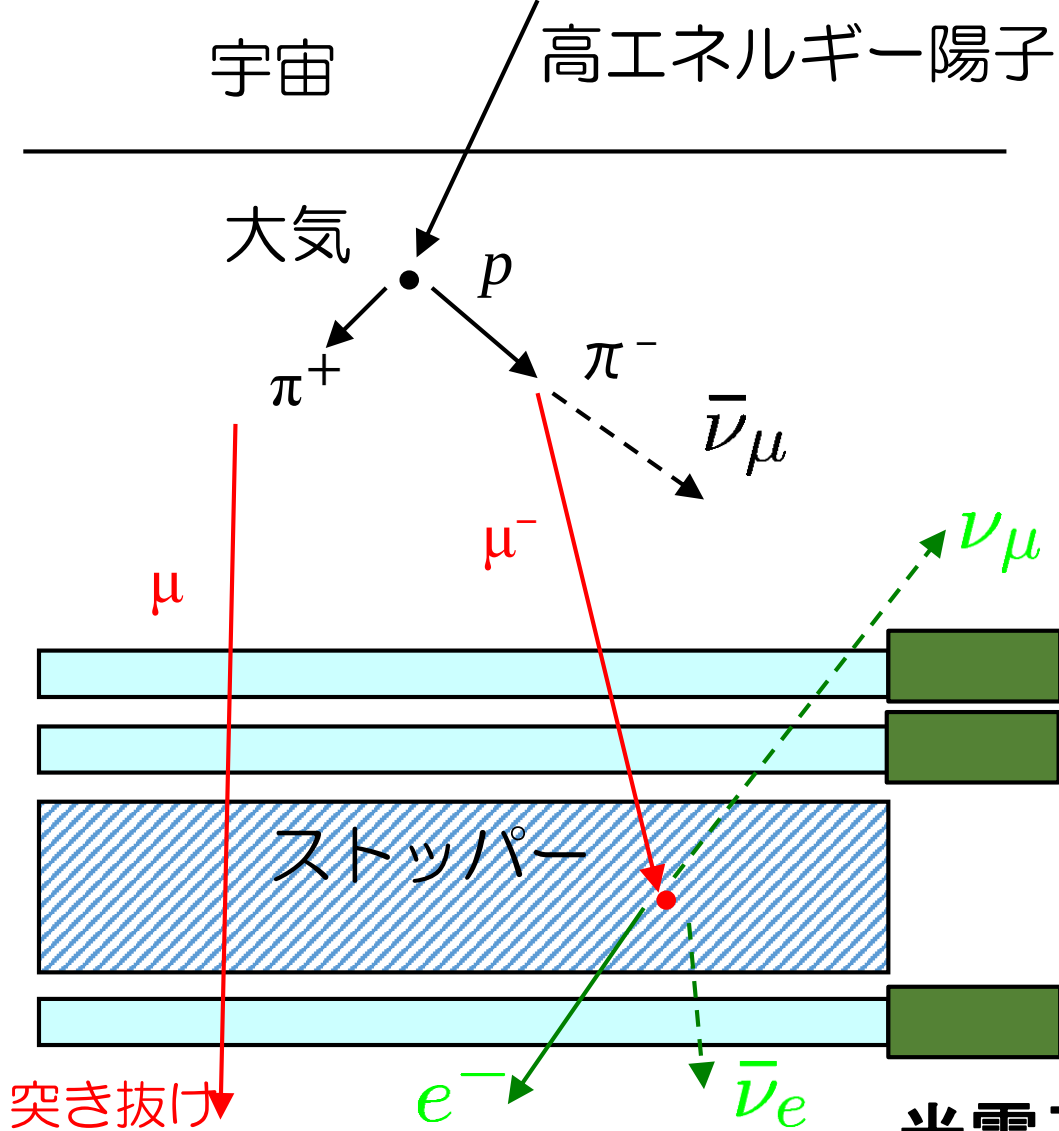
メインスイッチ



測定結果の保存

- 各グループで、光電子増倍管3本に関して以下を作成する。
 - 検出効率のHV依存性
 - 計数率のHV依存性

寿命測定の設定アップ



3つのシンチ+PMTのHV設定を決めたら:
設定HV値でのノイズ(Hz)がもっとも少ないシンチをストップ用(下)に決める。

“突き抜け” μ 粒子に対しては, Startはかからない。

シンチレータ:
荷電粒子が通過すると、紫外光を発光する

光電子増倍管:
シンチレータの発光を検出し、電気信号を出力する

ライトリークのチェック

- HVが決まったら、PMTの計数率を：

- 覆いなし
- ブラックシートでシンチ+PMTを覆って

の2通りで測定する

- 覆いをして計数率が増える場合、ライトリーク(光漏れ)がある。
- 懐中電灯を使いながら、リーク箇所を探し、ブラックテープで補修しておく。

バックアップ

物質中を通過する μ 粒子

