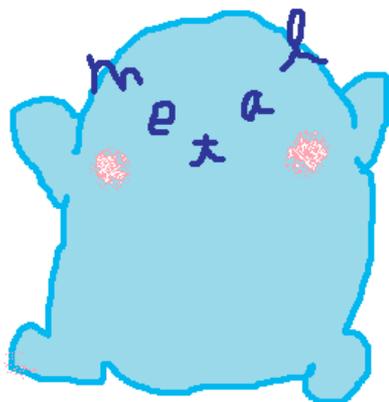


# メタルパッケージ光電子増倍管 の特性の評価

高エネルギー物理学研究室

磯村 明那

平山 明子



# 発表の流れ

- 1. 実験の目的
- 2. 測定原理  
宇宙線/ADCについて/TDCについて/TOFについて
- 3. セットアップ
- 4. 測定・解析
- 5. 考察



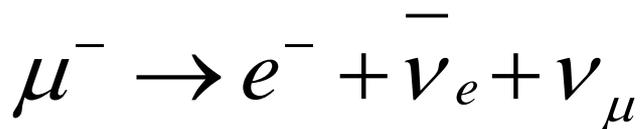
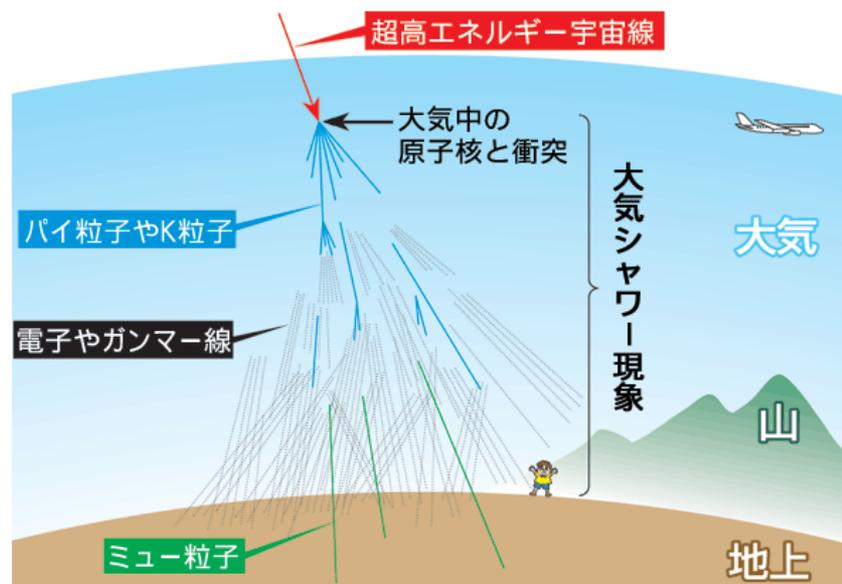
# 1 実験の目的

- メタルパッケージ型光電子増倍管の特性を理解し、その時間分解能と位置分解能の測定を試みる。
- 素粒子物理学の実験的研究である高エネルギー物理学の基礎的な実験技術を習得する。

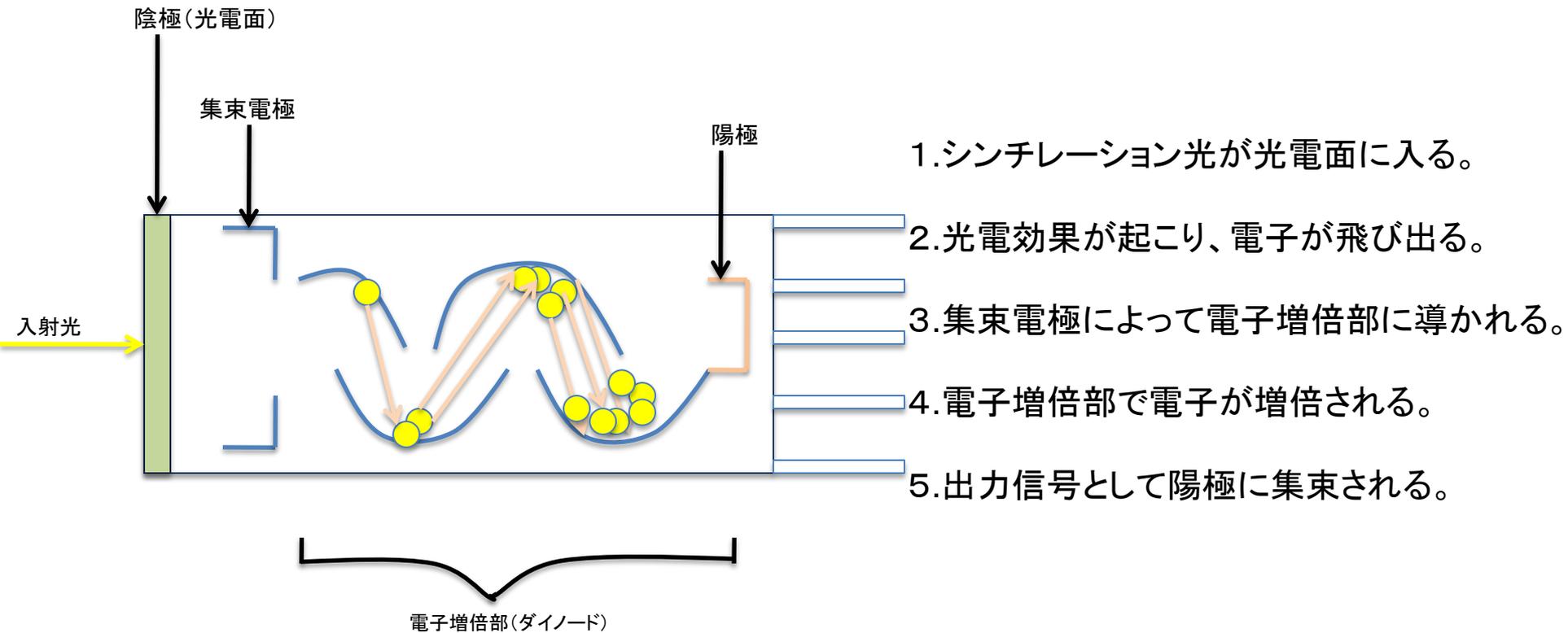
# 2 測定原理

## 2.1 宇宙線について

- 宇宙線とは地球外起源の高エネルギー放射線である。地球の大気に突入する以前の宇宙線を一次宇宙線、それが地球の大気や土で発生するものを二次宇宙線という。
- 一次宇宙線は陽子が約90%を占めており、二次宇宙線の約75パーセントを $\mu$ 粒子が占めている。



## 2.2 光電子増倍管について



## 2.3 メタルパッケージ光電子増倍管とは

- 従来のダイノードに比べてダイノード間が短く、高速応答を実現している。
- コンパクトな形状である。

浜松ホトニクス RU7400U型

光電面種類 BA

トランジットタイム 5.4ns

陽極、陰極間の最大電圧 1000V

(本実験ではすべての光電子増倍管に800Vをかけた)

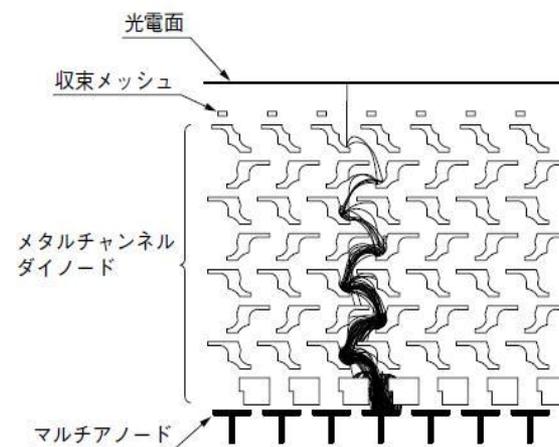
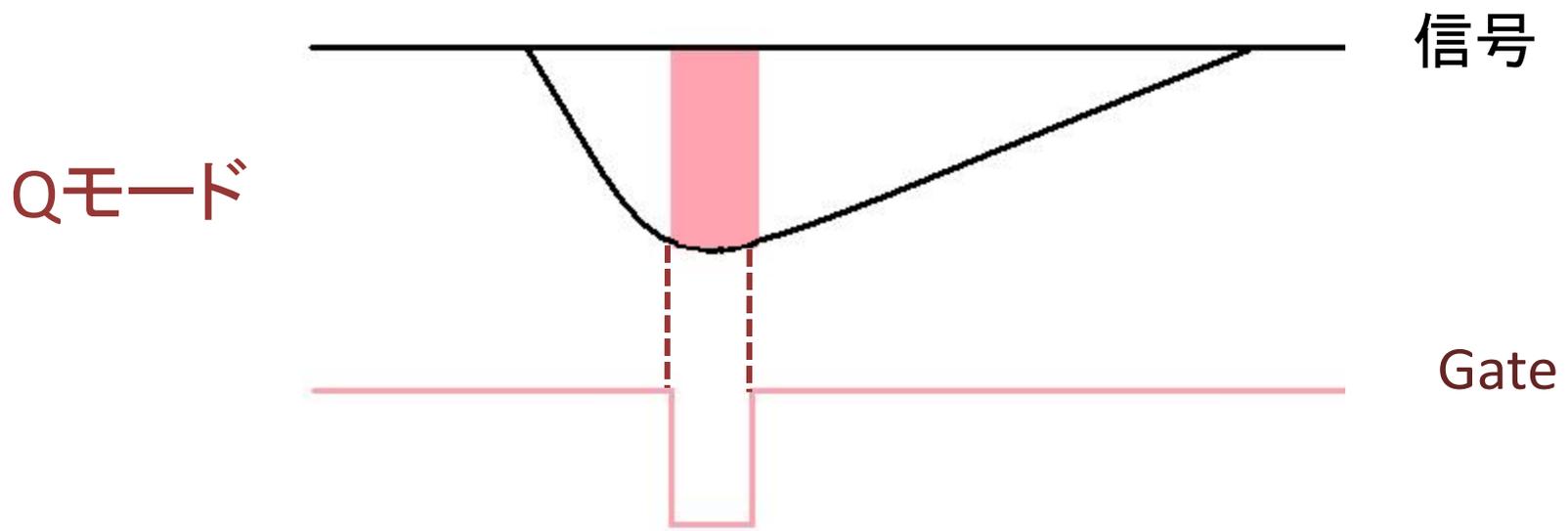


図 9-2 電極構造及び電子軌道図

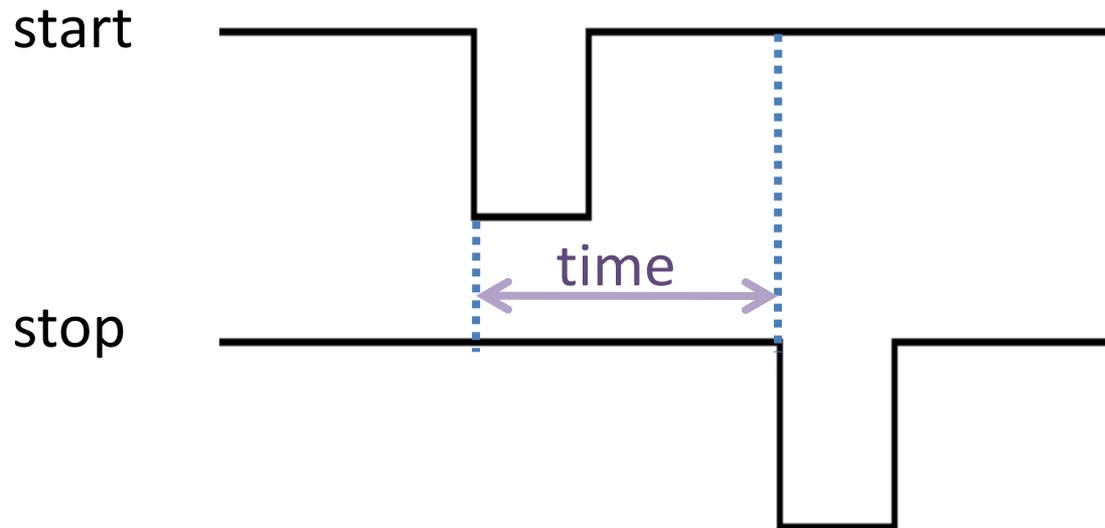
## 2.4 ADCのQモード

- Gateパルス間の電圧信号を時間積分するモード。



## 2.5 TDCについて

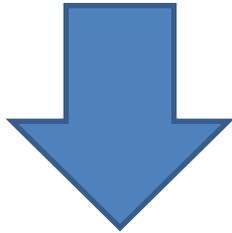
- 本実験で使用しているTDCは、下図のようにstart信号からstop信号までの時間を測定している。



\* 今回使用したTDCはREPIC社のRpc-060型(25ps/countselect)である。

## 2.6 TOFについて

- TOFとは、一定の運動量をもった粒子（素粒子や原子核）が、一定の距離を通過するのに要する時間である。これは、粒子判定などに利用されている。
- 粒子判定を正確にするには、光電子増倍管の時間分解能が優れている必要がある。



光電子増倍管の時間分解能を知ることが大切！！

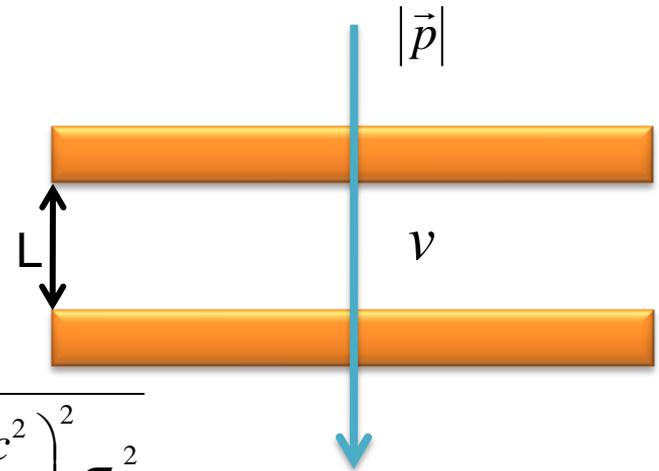
# \* 粒子の識別について \*

粒子が速度 $v$ で距離 $L$ を通りぬける時にかかる時間 (TOF)を $t$ とする。

$$t = \frac{L}{v} \quad \beta = \frac{v}{c} = \frac{L}{ct}$$

$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + (mc^2)^2$$

$$\begin{aligned} mc^2 &= \sqrt{E^2 - \vec{p}^2 c^2} \\ &= |\vec{p}c| \sqrt{\left(\frac{E}{pc}\right)^2 - 1} \\ &= |\vec{p}c| \sqrt{\frac{1}{\beta^2} - 1} \\ &= |\vec{p}c| \sqrt{\left(\frac{ct}{L}\right)^2 - 1} \end{aligned}$$

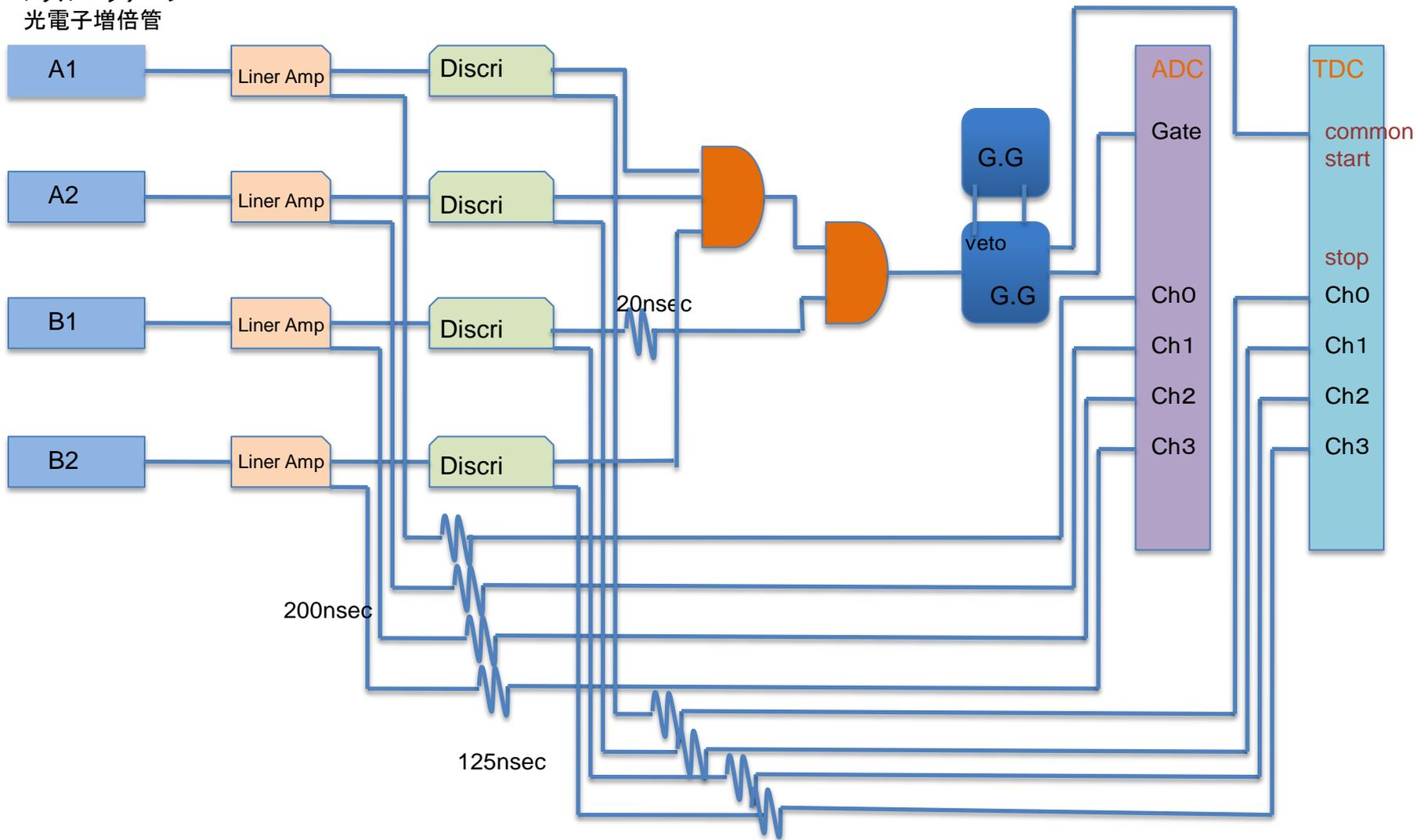


$$\begin{aligned} \sigma_{mc^2} &= \sqrt{\left(\frac{\partial mc^2}{\partial t}\right)^2} \sigma_t \\ &= \frac{|\vec{p}c| \cdot \frac{c}{L} \left(\frac{c}{L} t\right)}{\sqrt{\left(\frac{ct}{L}\right)^2 - 1}} \sigma_t \end{aligned}$$

$\sigma_{mc^2}$ が $\sigma_t$ (時間分解能)に比例している  
ので $\sigma_t$ が小さいことが粒子の識別を  
する上で重要である。

# セットアップ図

メタルパッケージ  
光電子増倍管

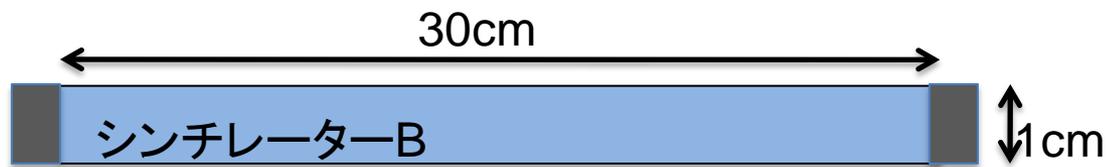


# 使用したモジュールについて

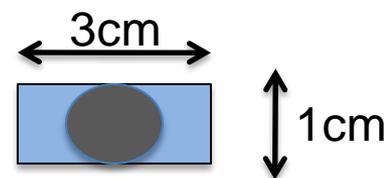
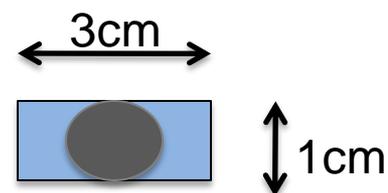
- シンチレーター  
放射線が当たると、その時だけ蛍光を発する物質。
- 光電子増倍管  
光エネルギーを電気エネルギーに変換し、電流を増倍させる装置。
- リニアアンプ  
信号を増幅させる装置。
- ディスクリミネーター  
しきい値よりも大きなシグナルが入力されたときにパルスを出す装置。  
本実験でのしきい値は50mV,widthは20nsecである。
- コインシデンス  
複数のパルスが同時に入力された時にパルスを出力する。
- ゲートジェネレーター  
入力された信号のパルスの幅を調節したり、Delayされたりする装置。本実験でのGate幅は100nsecである。
- ADC  
アナログ信号をデジタル信号に変える装置。
- TDC  
スタート信号からストップ信号までの時間を測る装置。

# シンチレーターのセットアップ

メタルパッケージ  
光電子増倍管

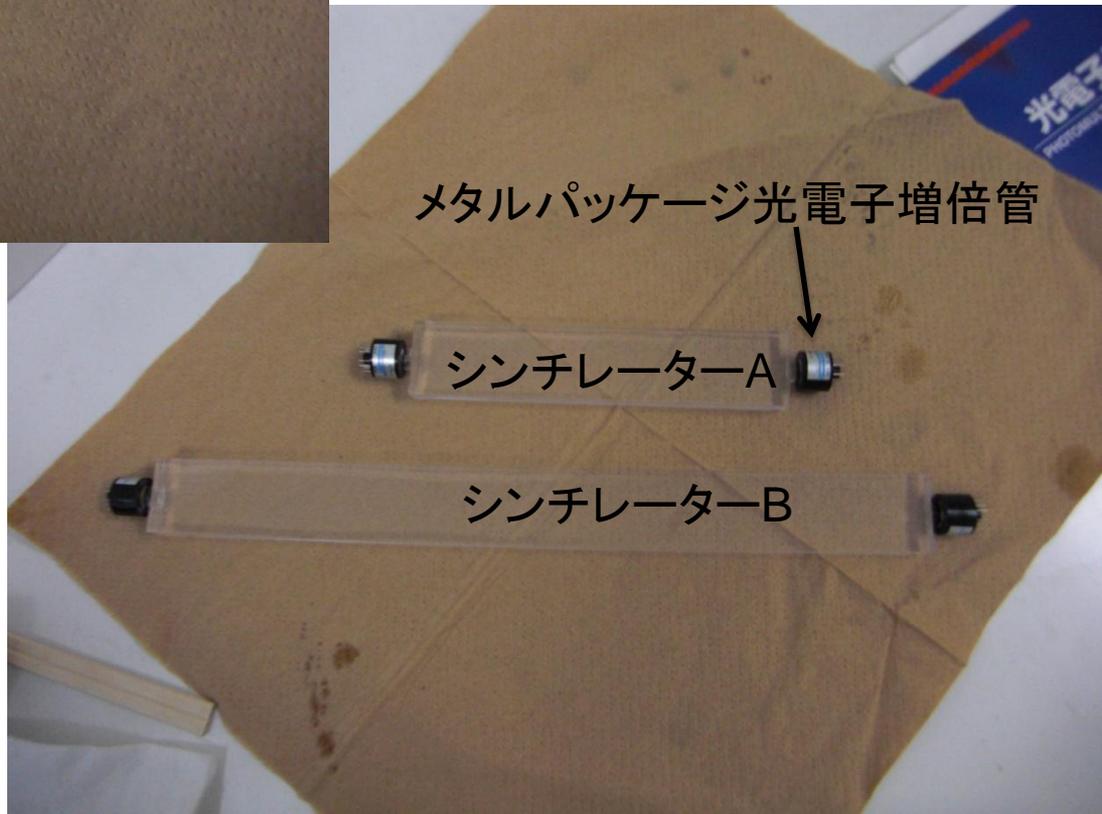


側面



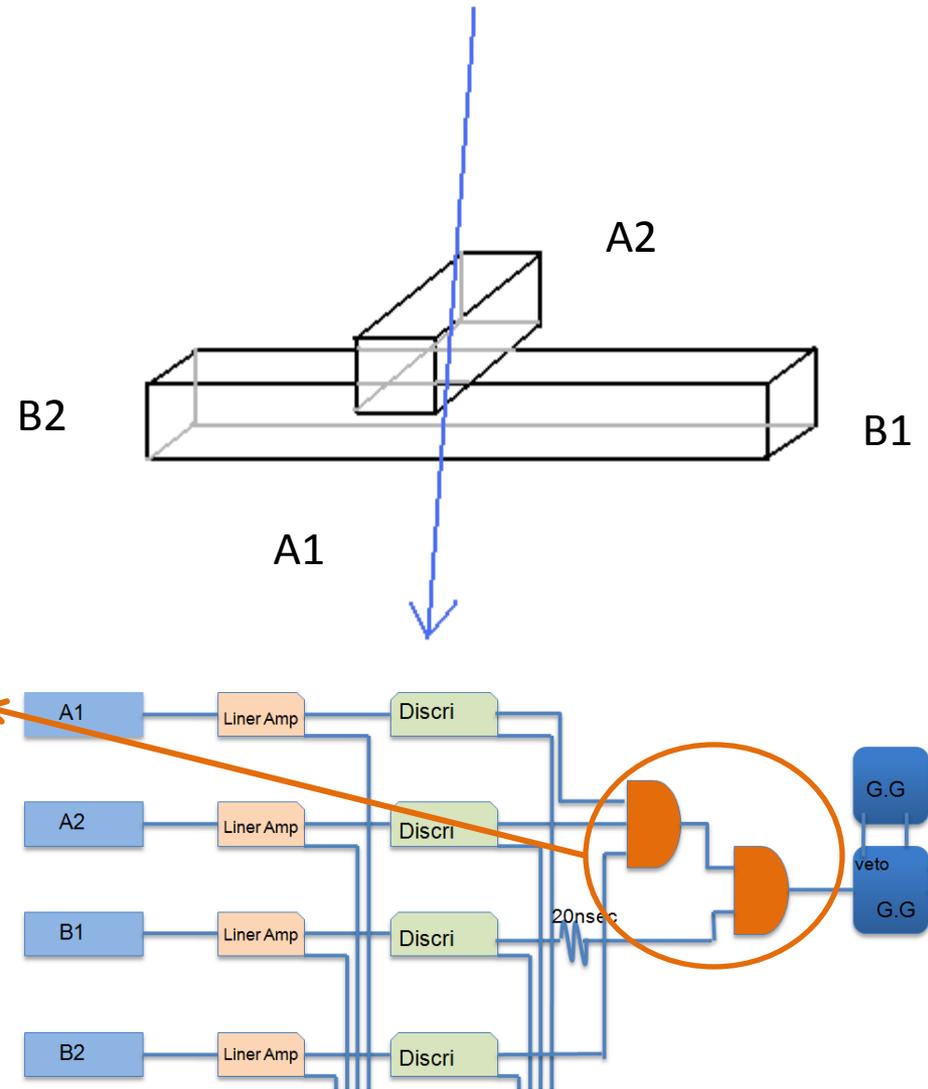
正面

本実験ではプラスチックシンチレーターを用いた。



# 反応の選別

- A1,A2,B1,B2のコインシデンスを取ることで、シンチレータAを通過してシンチレータBを通り抜けた宇宙線のデータを得ることができる。
- B1のみを遅らせてコインシデンスを取ることで、ADCのGateとTDCのStartのタイミングをB1で決めている。

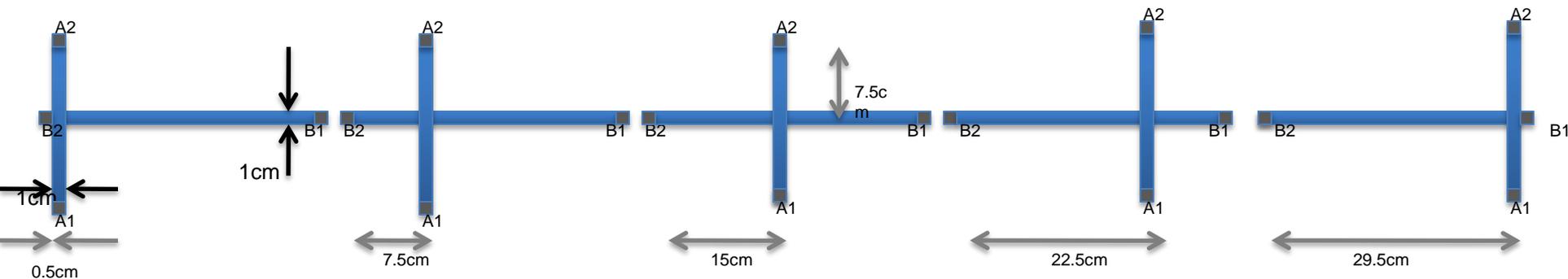
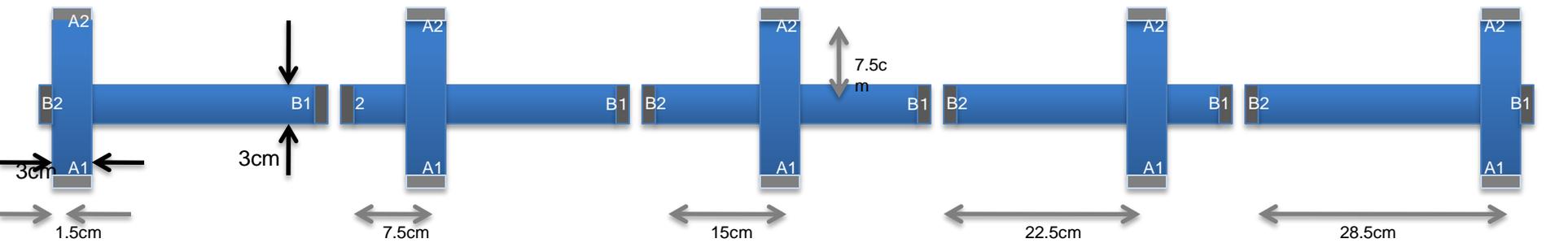


# 4 測定・解析方法

- ①CAMACでデータ化した情報をUNIXに送る
- ②ADC,TDCの値を読み出してヒストグラムにする
- ③TDCの値の補正する
- ④補正したTDCの値からシンチレーター内を走る光の速さ $v$ を求める
- ⑤求めた速さ $v$ から宇宙線の通過位置を求める  
→位置分解能
- ⑥補正したTDCの値からTOFを求める  
→時間分解能

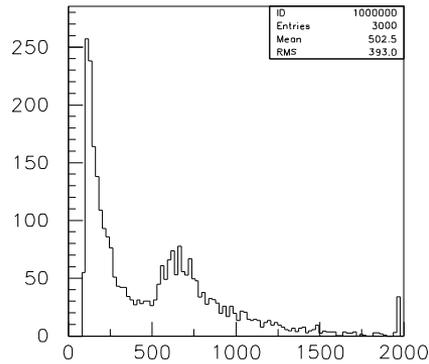
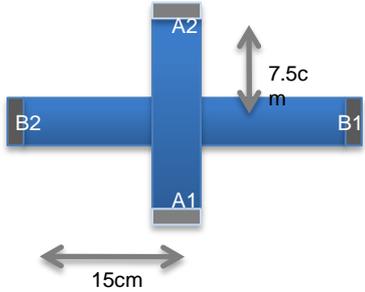
# シンチレーターA、シンチレーターBの 配置

真上からみた図

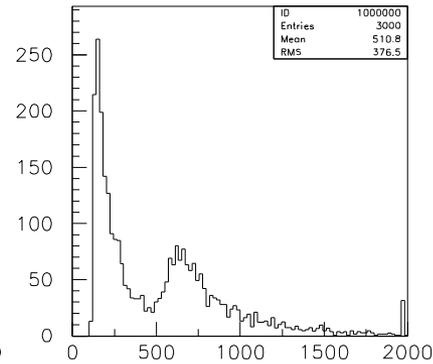


10種類の配置で測定

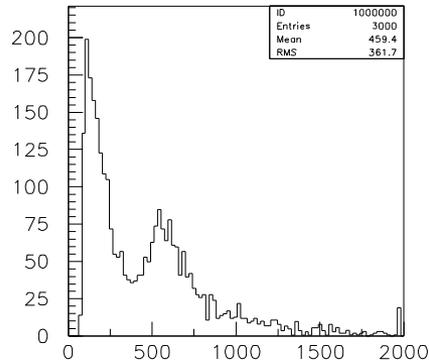
# 4.1 ADCの値を読み出してヒストグラムにする



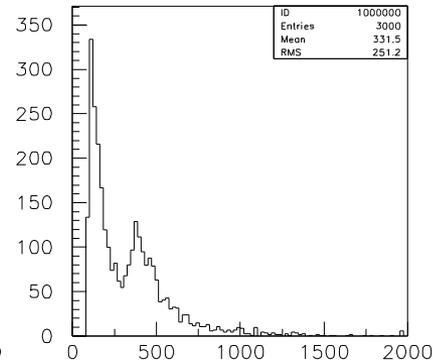
A1ADC



A2ADC



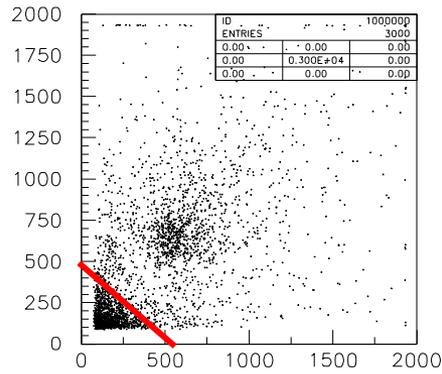
B1ADC



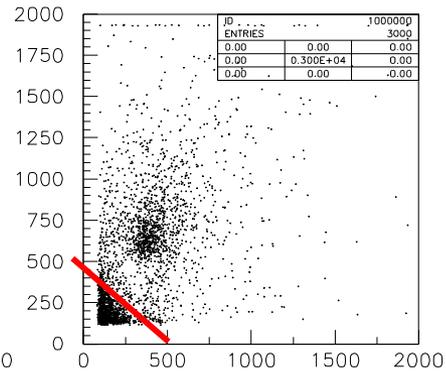
B2ADC

# \* ノイズの除去 \*

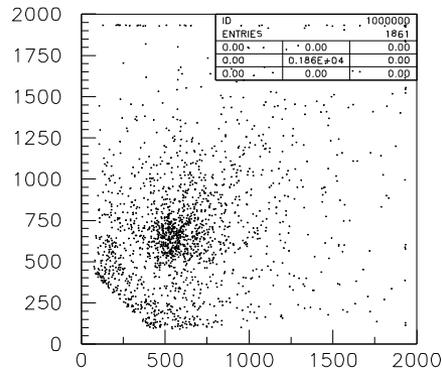
A1ADC



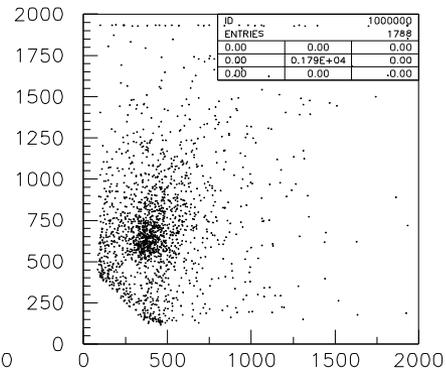
A2ADC



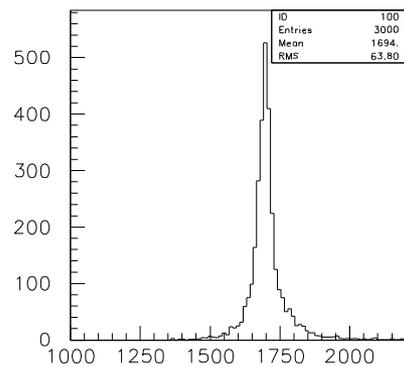
B1ADC



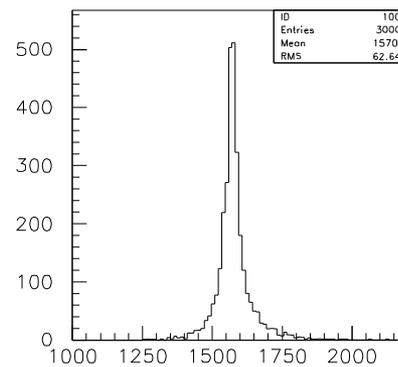
B2ADC



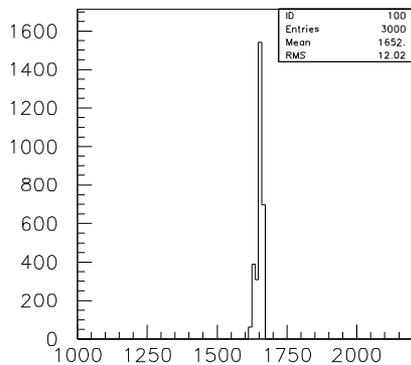
## 4.2 TDCの値を読み出してヒストグラムにする。



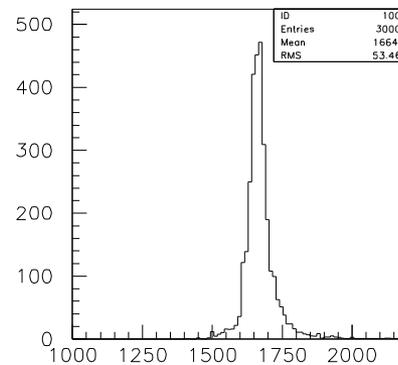
A1TDC



A2TDC

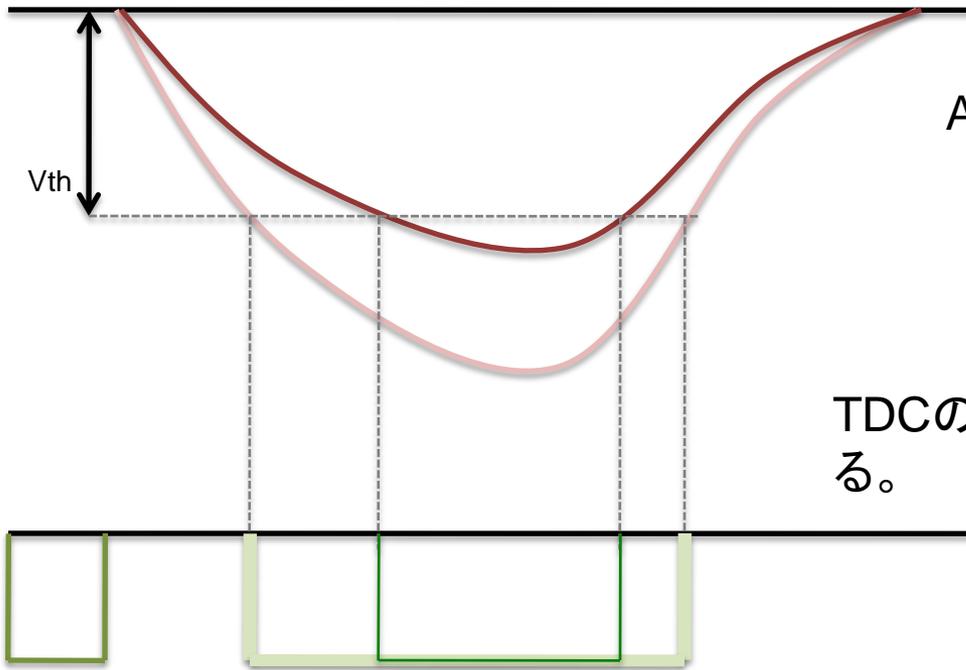


B1TDC

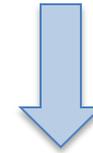


B2TDC

# 4.3 TDCの補正①



ADCの値の違いによりTDCの値がばらつく



TDCの値がADCの値に依存しないように補正をする。

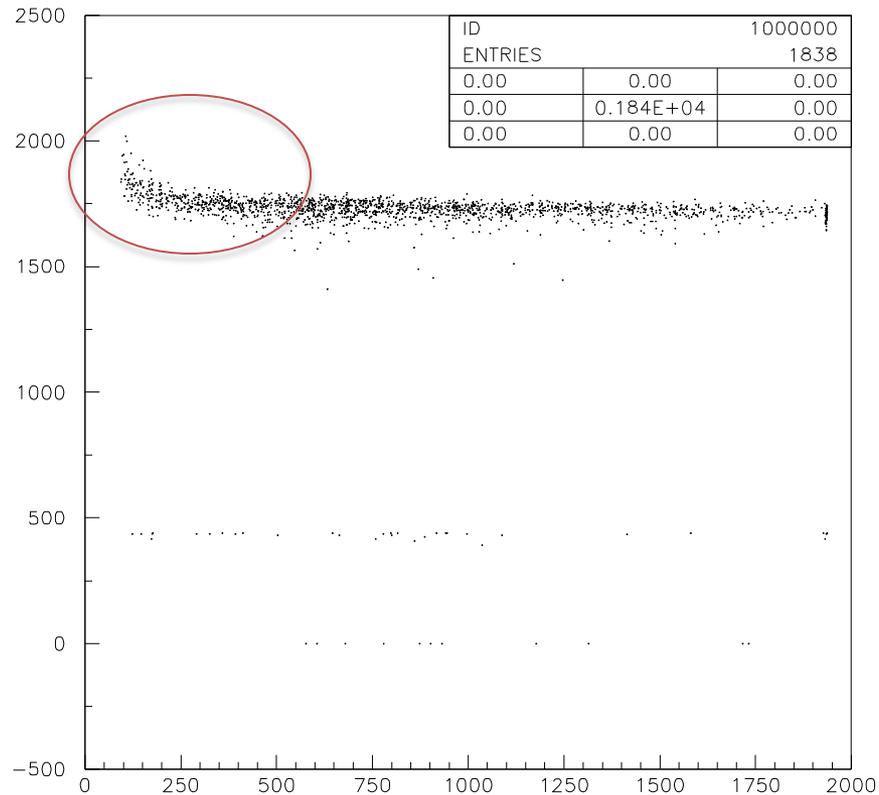
ADCの値が大きい方のTDCの値

ADCの値が小さい方のTDCの値

# TDCの補正②

特にADCが小さい値の時、TDCの値が曲線を描いている。

TDCの値



ADCの値

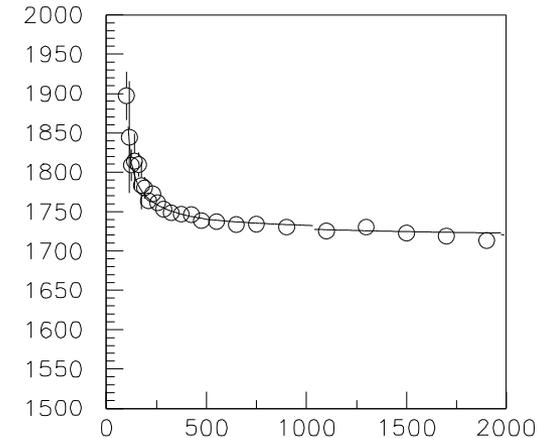
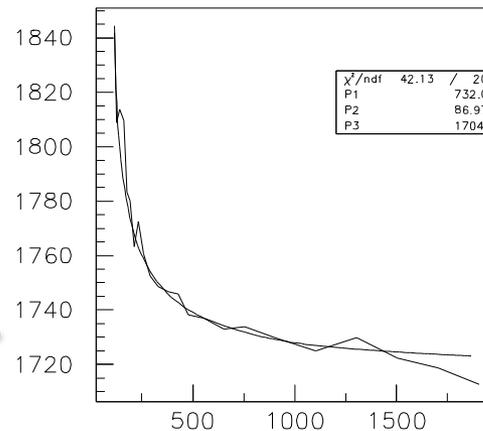
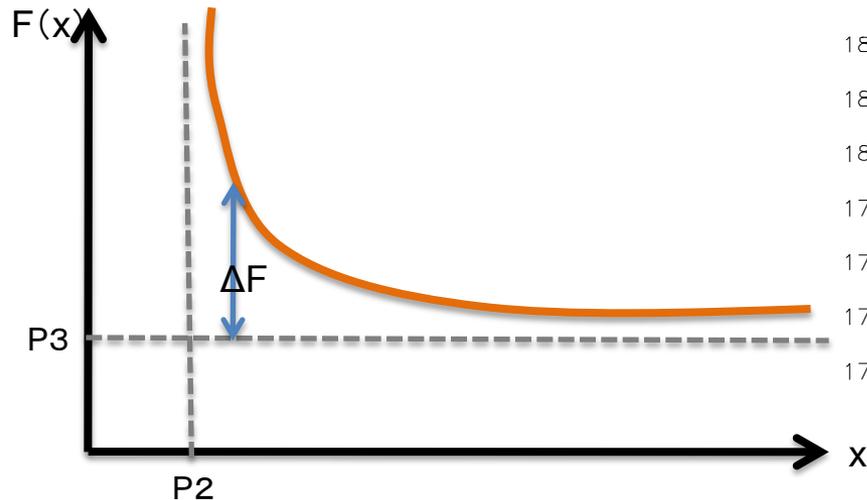
# TDCの補正③

曲線を補正するために

- 1, ADCの値を細かく分割し、各区間のTDCの値をガウス分布でFitする。
- 2, Fitして得られた各区間の中心点をグラフにプロットする。
- 3, プロットしたグラフを関数でFitする。

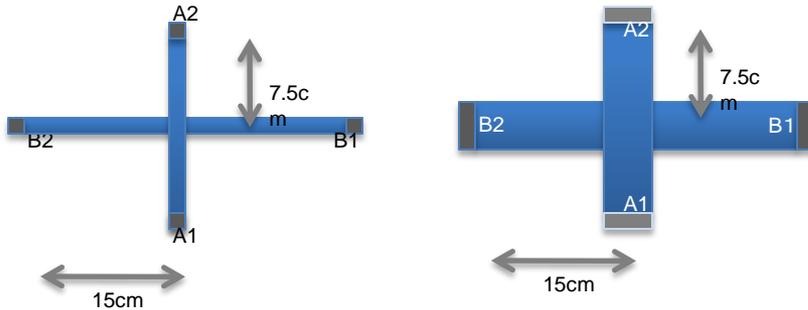
関数とは

$$F(x) = \frac{P1}{\sqrt{x - P2}} + P3$$



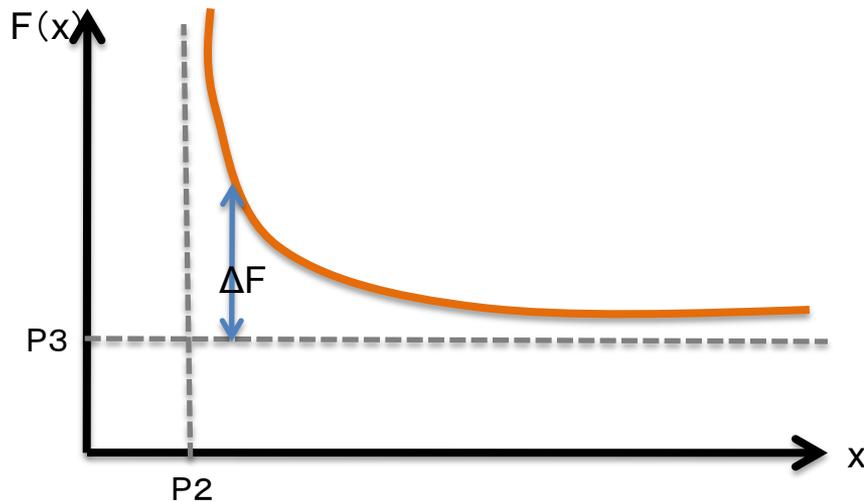
# TDCの補正④

4,これらによって得られたP1、P2、P3を用いてTDCの値を補正する。



本実験ではA1、A2は左図の配置のもの  
B2は右図の配置のものを使用。

	A1	A2	B2
P1	732.0	743.4	171.4
P2	86.97	102.2	100.3
P3	1704	1591	1645



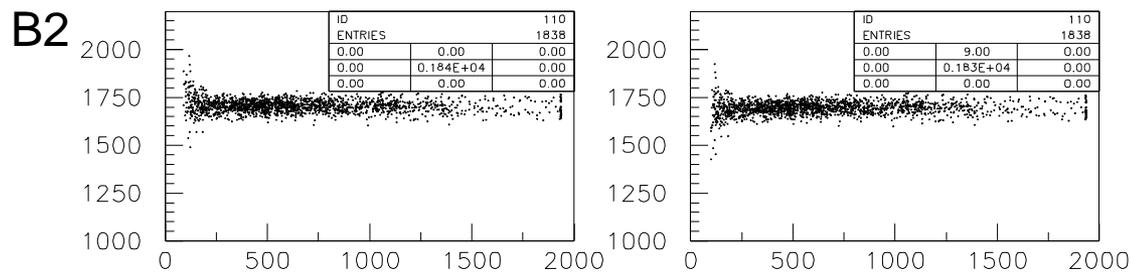
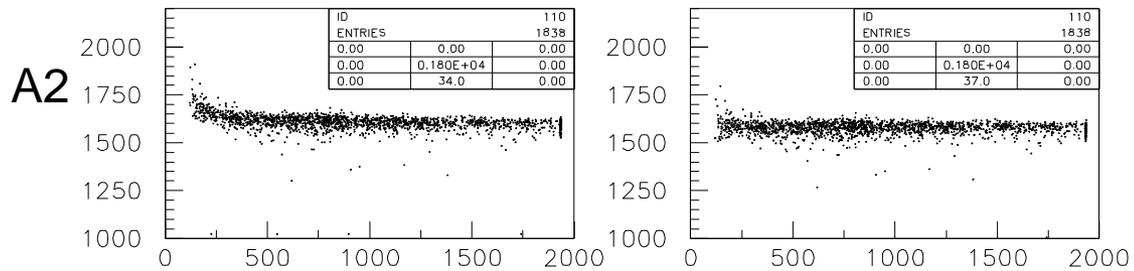
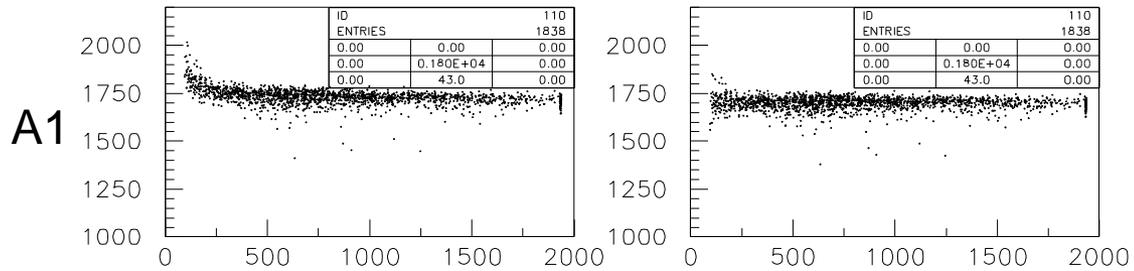
$$\Delta F = F(x) - P3 = \frac{P1}{\sqrt{x - P2}}$$

TDC補正後 = (TDC生データ) - ΔF

# TDCの補正⑤

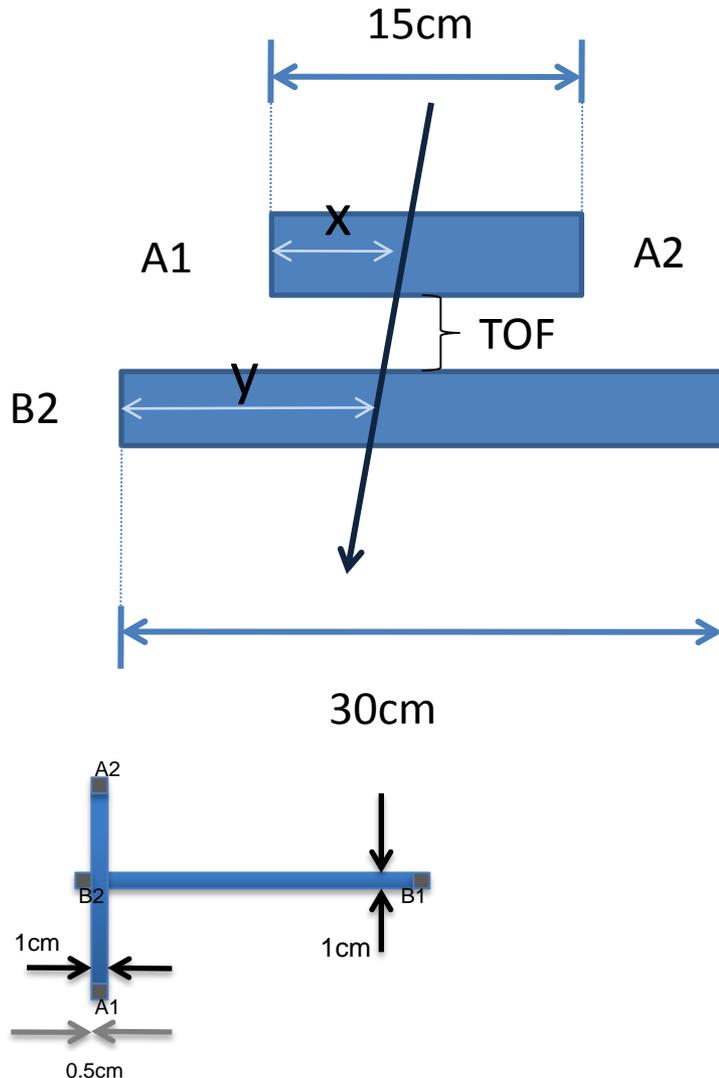
補正前

補正後



縦軸 TDCの値  
横軸 ADCの値

# 4.5 シンチレーター内の光の速度 $v$ を求める



シンチレーター内の光の速度を $v$ とする。  
 $B1, B2$ で観測された $TDC$ の値をそれぞれ  
 $B1TDC, B2TDC$ とすると

$$B2TDC \times 25 \times 10^{-12} = \frac{y}{v} + T_{off} + TOF \dots \textcircled{1}$$

$$B1TDC \times 25 \times 10^{-12} = \frac{30 - y}{v} + T_{off} + TOF \dots \textcircled{2}$$

② - ①より、

$$(B1TDC - B2TDC) \times 25 \times 10^{-12} = \frac{(30 - 2y)}{v}$$

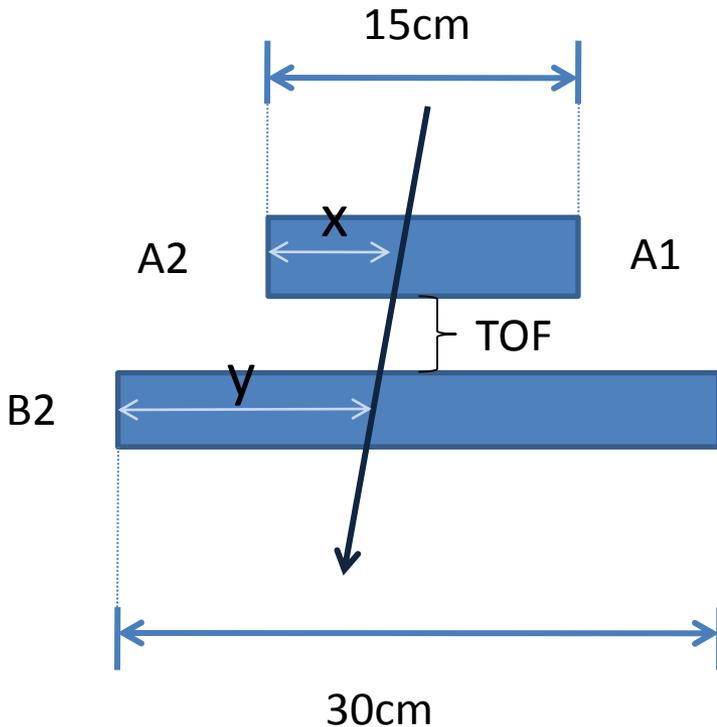
$$\Leftrightarrow v = \frac{(30 - 2y)}{(B1TDC - B2TDC) \times 25 \times 10^{-12}}$$

この式に左図の $TDC$ の値と $y$ の値を代入すると、

$$v = 17.9 [cm / nsec]$$

# 4.6 TOFの計算

光がシンチレータ内を走る速度を $v$ ,  
シンチレータ間を粒子が飛行する時間  
を $TOF$ とする。



$A1, A2, B1, B2$ で観測された $TDC$ の値を  
それぞれ $A1TDC, A2TDC, B1TDC, B2TDC$   
とすると、

$$A2TDC \times 25 \times 10^{-12} = \frac{x}{v} + T_{off} \dots \textcircled{3}$$

$$A1TDC \times 25 \times 10^{-12} = \frac{15-x}{v} + T_{off} \dots \textcircled{4}$$

$$B2TDC \times 25 \times 10^{-12} = \frac{y}{v} + T_{off} + TOF \dots \textcircled{5}$$

$$B1TDC \times 25 \times 10^{-12} = \frac{30-y}{v} + T_{off} + TOF \dots \textcircled{6}$$

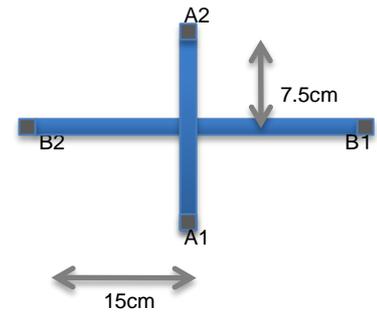
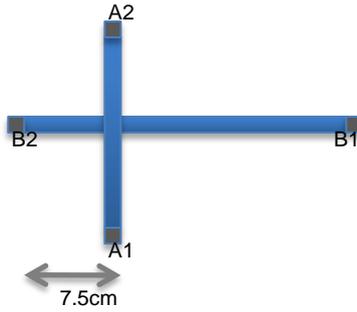
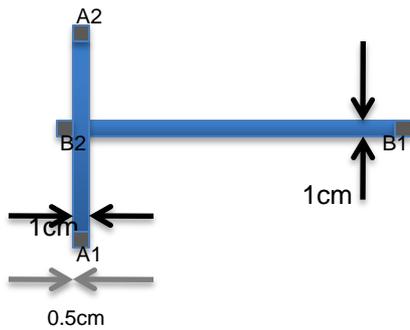
となる。

**B1** ここで、 $(\textcircled{5} + \textcircled{6}) - (\textcircled{3} + \textcircled{4})$ により $T_{off}, x, y$ を  
消去すると、

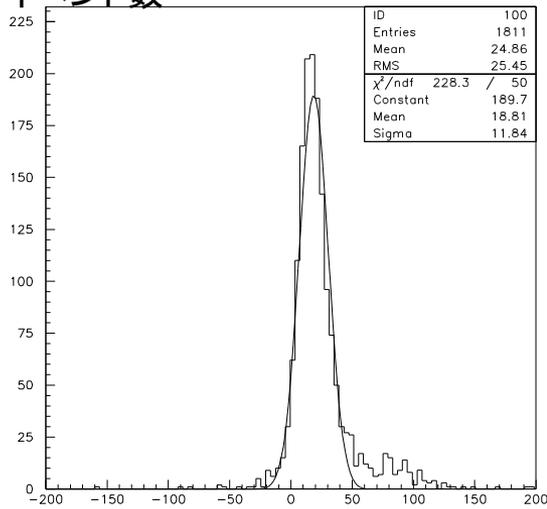
$$TOF = \frac{\{(B1TDC + B2TDC) - (A1TDC + A2TDC)\} \times 25 \times 10^{-12}}{2} + \frac{\left(\frac{15-30}{v}\right)}{2}$$

となる。

# \* TOFの分布① \*

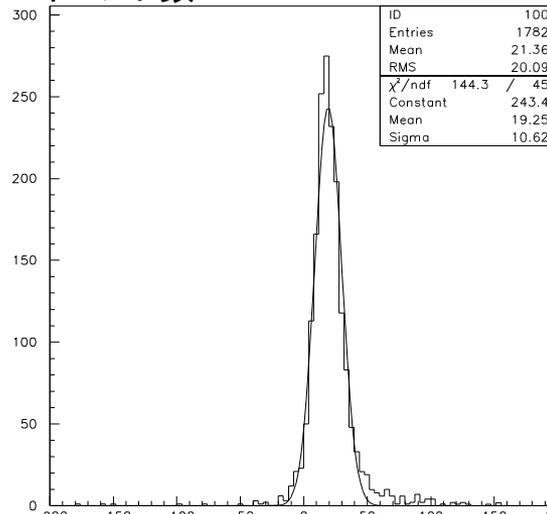


イベント数



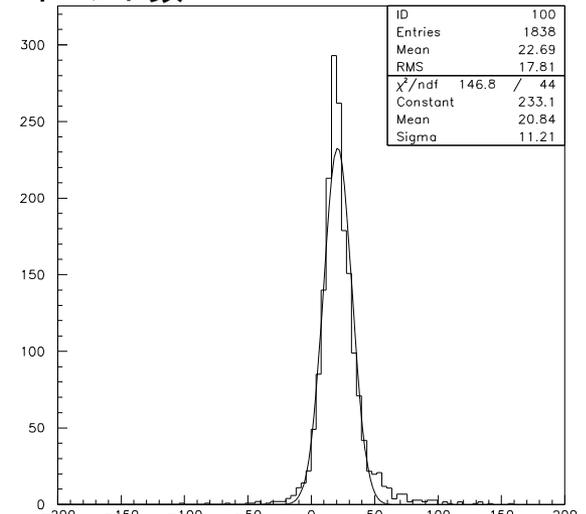
$\frac{TOF}{25(p\text{ sec})}$

イベント数



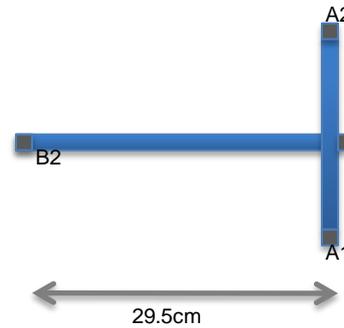
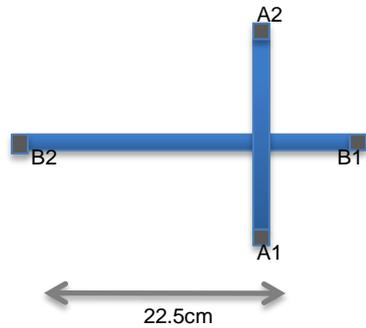
$\frac{TOF}{25(p\text{ sec})}$

イベント数

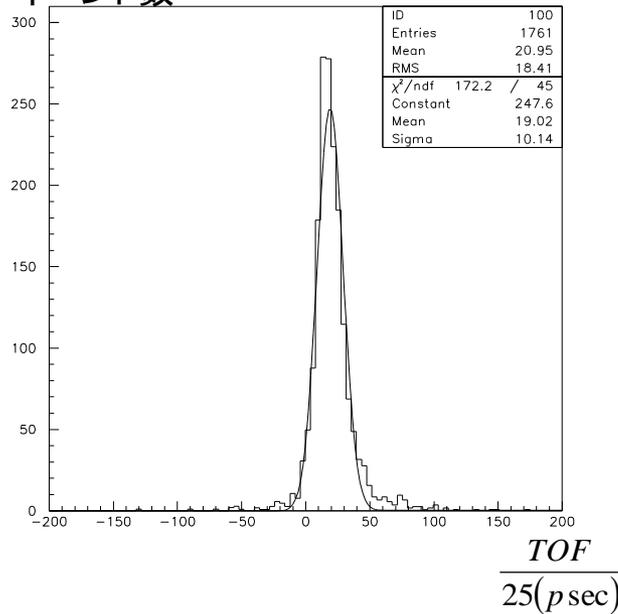


$\frac{TOF}{25(p\text{ sec})}$

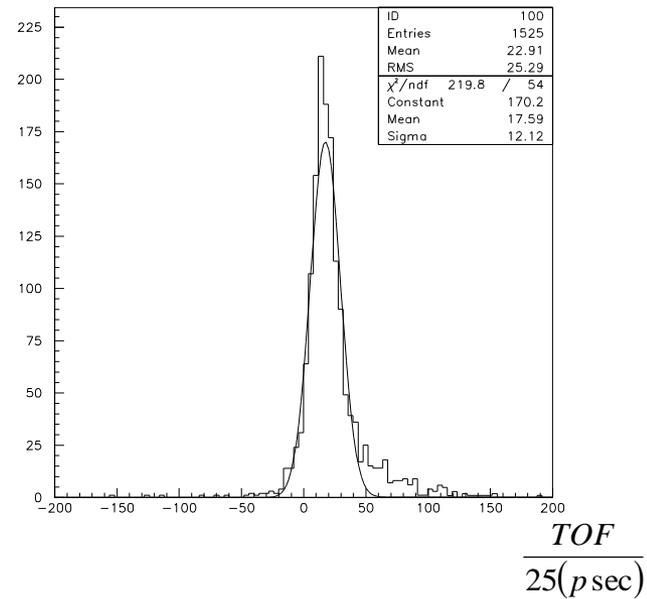
# \* TOFの分布② \*



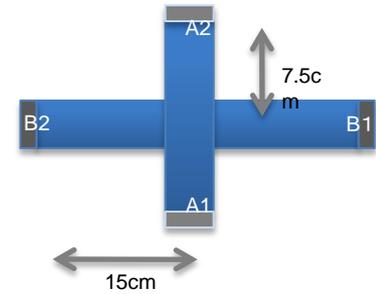
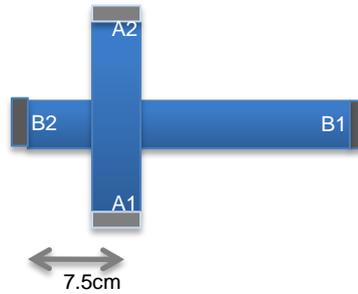
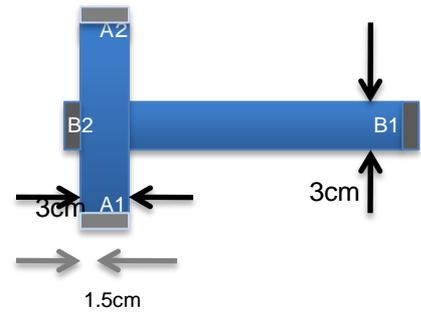
イベント数



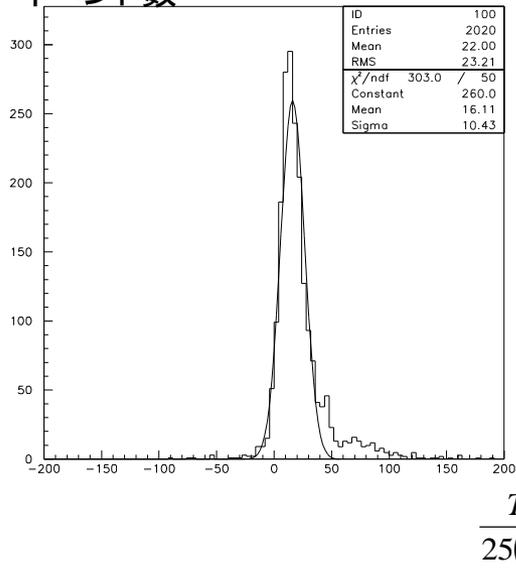
イベント数



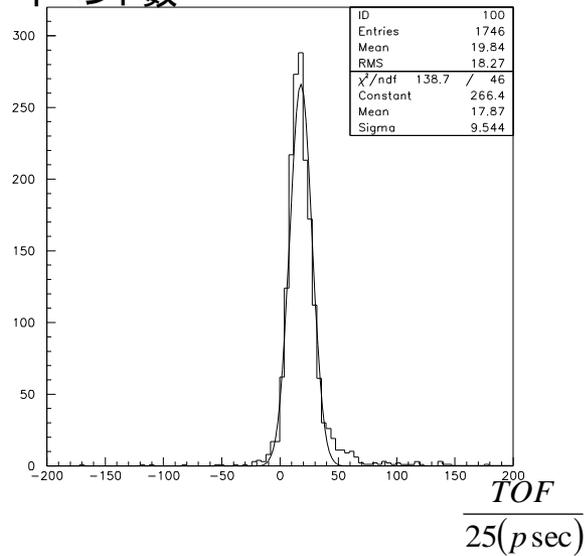
# \* TOFの分布③ \*



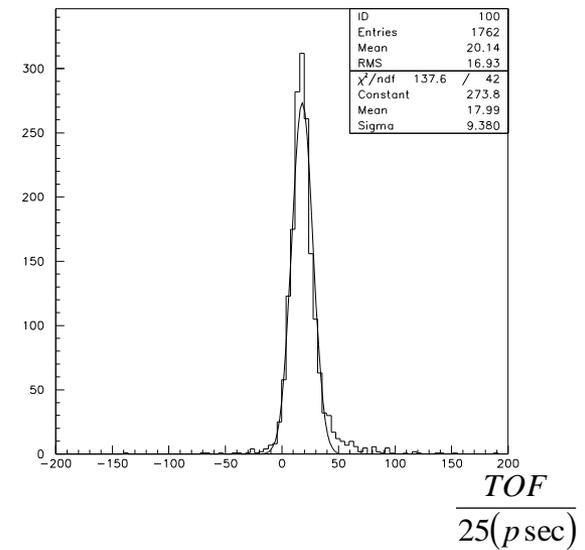
イベント数



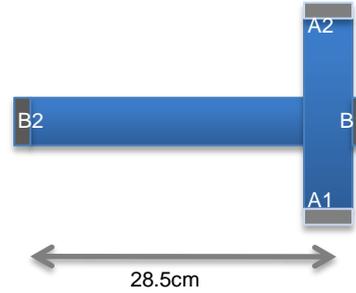
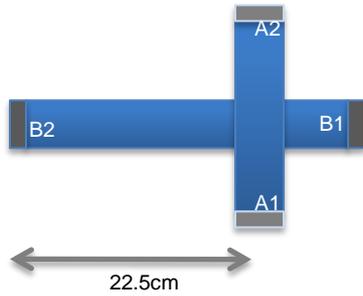
イベント数



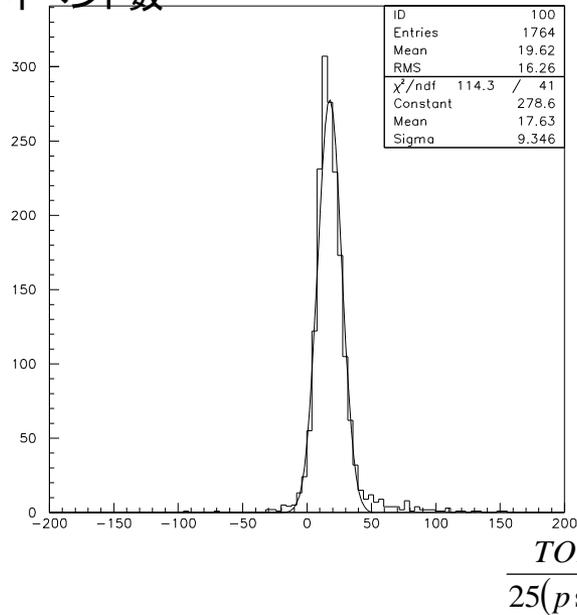
イベント数



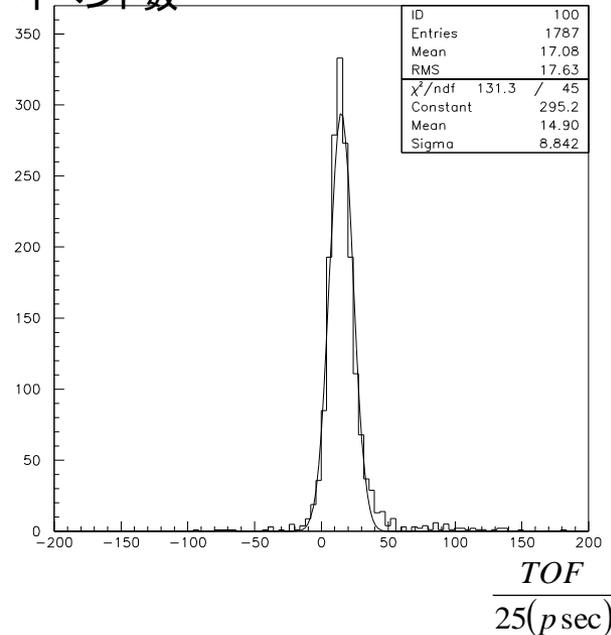
# \* TOFの分布④ \*



イベント数



イベント数



# 4.7 結果 TOF

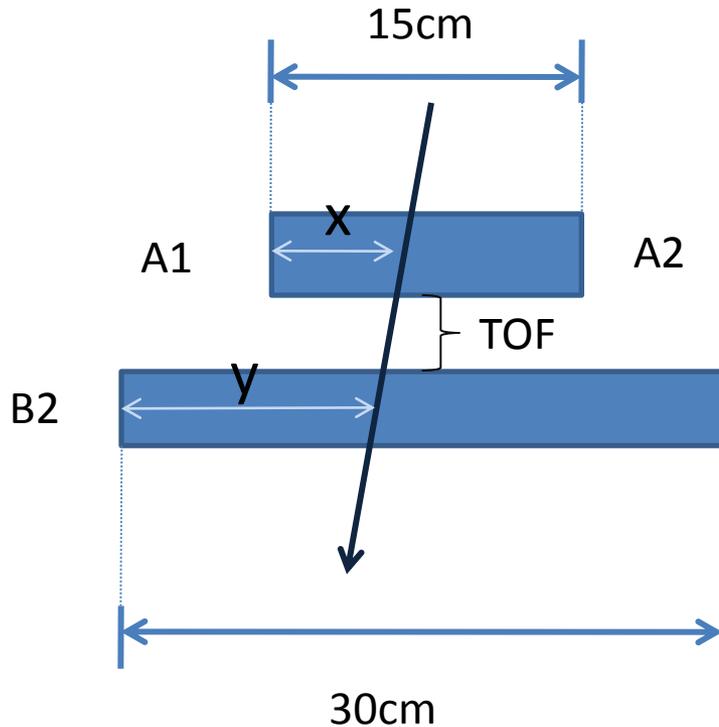
宇宙線の入射部分が3cm × 3cm

B1からの距離[cm]	TOF[psec]	分散(時間分解能)[psec]
1.5	403.8	260.8
7.5	446.8	238.6
15.0	449.8	234.5
22.5	440.8	233.7
28.5	372.5	221.1

宇宙線の入射部分が1cm × 1cm

B1からの距離[cm]	TOF[psec]	分散(時間分解能)[psec]
0.5	470.3	296.0
7.5	481.3	265.5
15.0	521.0	280.3
22.5	475.5	253.5
29.5	439.8	303.0

## 4.8 宇宙線が通過した位置の計算



シンチレーター内の光の速度を $v$ とする。  
 $B1, B2$ で観測される $TDC$ の値をそれぞれ  
 $B1TDC, B2TDC$ とすると、

$$B2TDC \times 25 \times 10^{-12} = \frac{y}{v} + T_{off} + TOF \dots \textcircled{7}$$

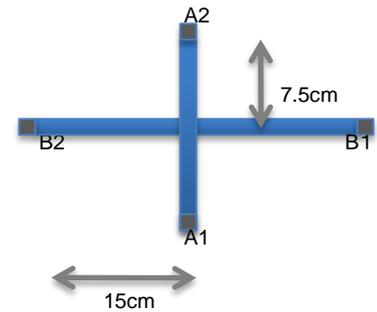
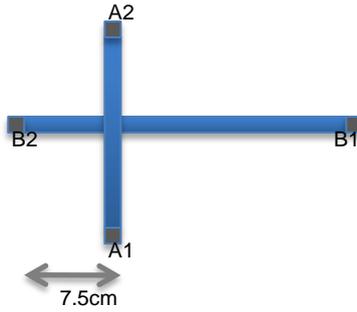
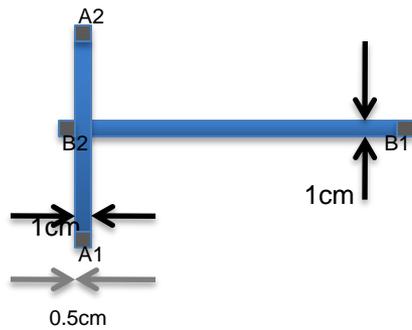
$$B1TDC \times 25 \times 10^{-12} = \frac{30 - y}{v} + T_{off} + TOF \dots \textcircled{8}$$

⑧ - ⑦ より、

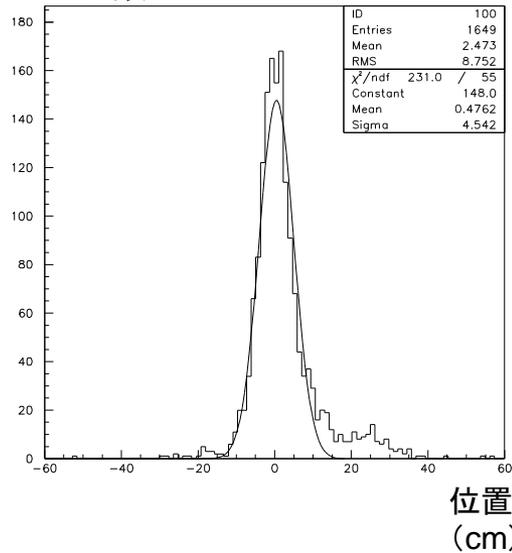
$$(B1TDC - B2TDC) \times 25 \times 10^{-12} = \frac{30 - 2y}{v}$$

$$\Leftrightarrow y = \frac{30 - v\{(B1TDC - B2TDC) \times 25 \times 10^{-12}\}}{2}$$

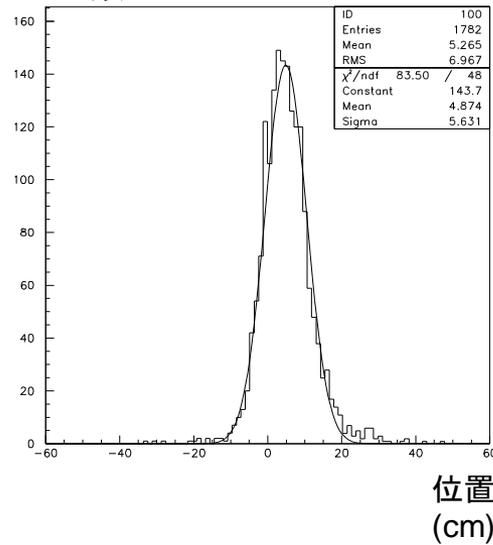
# \* 位置の分布① \*



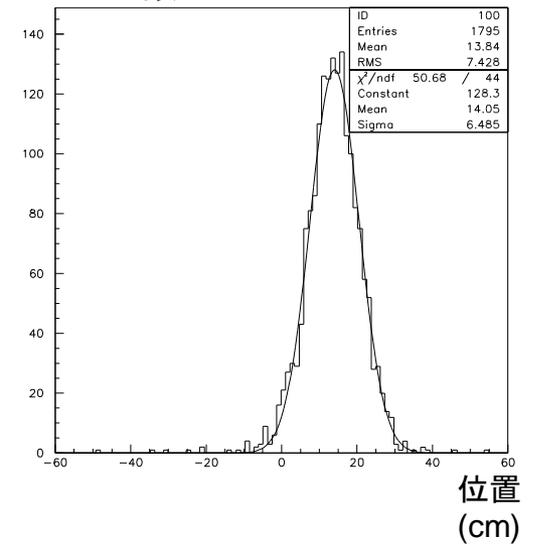
イベント数



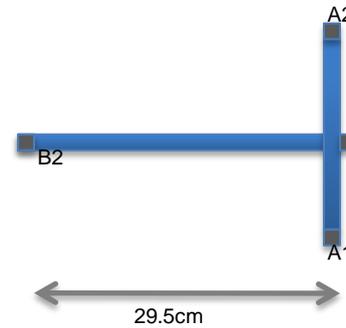
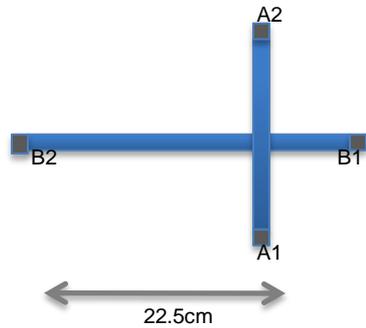
イベント数



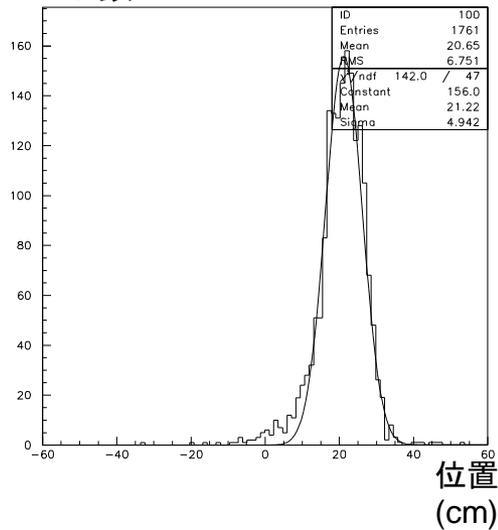
イベント数



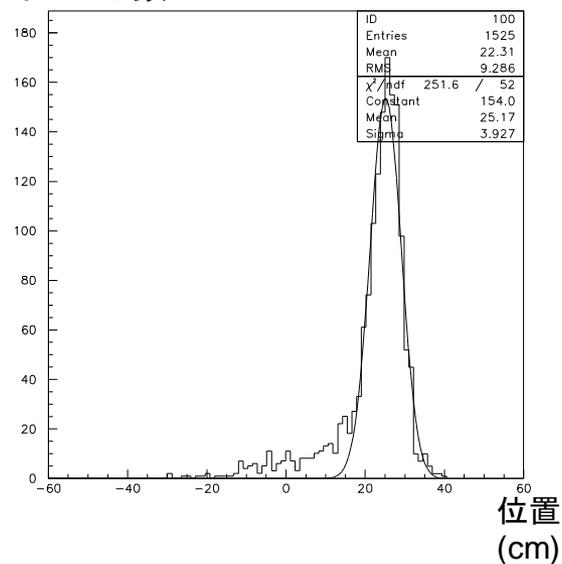
# \* 位置の分布② \*



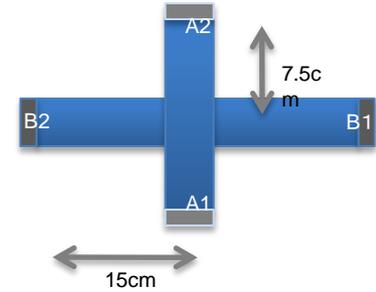
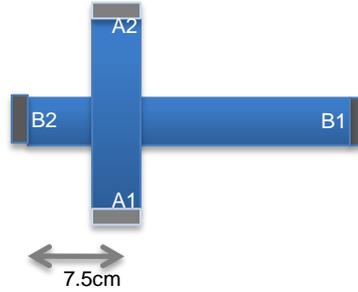
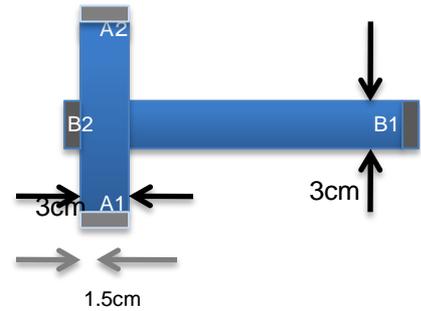
イベント数



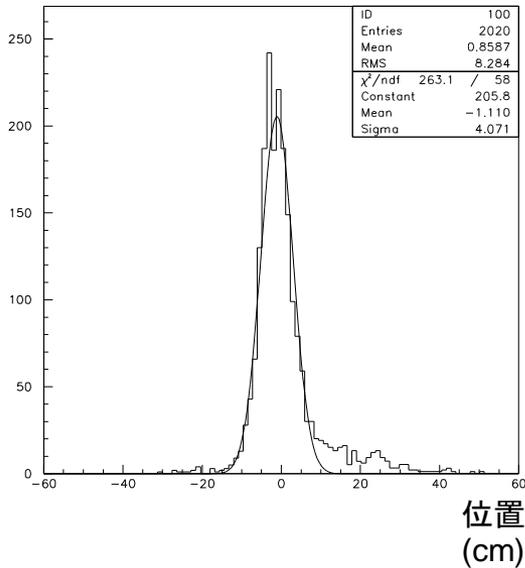
イベント数



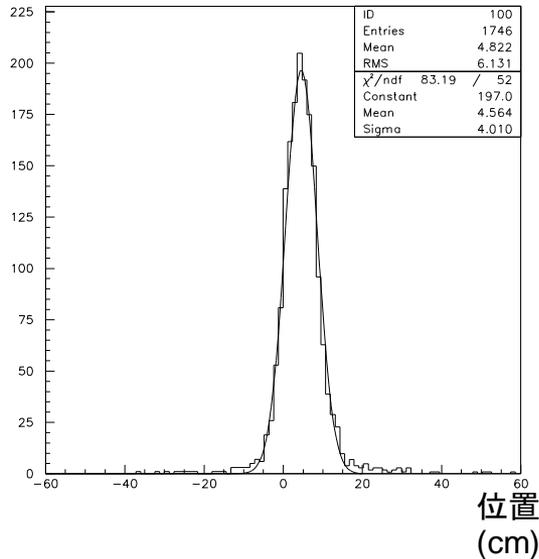
# \* 位置の分布③ \*



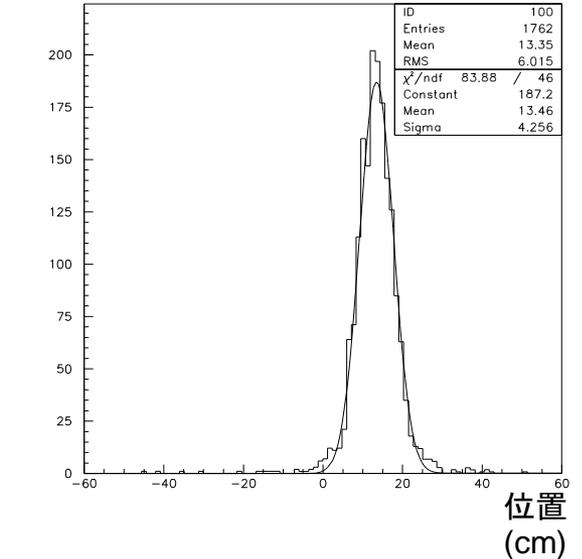
イベント数



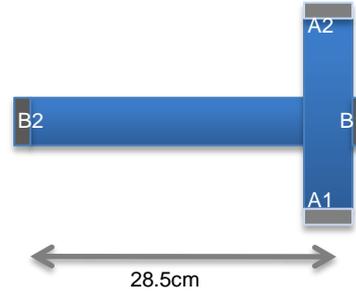
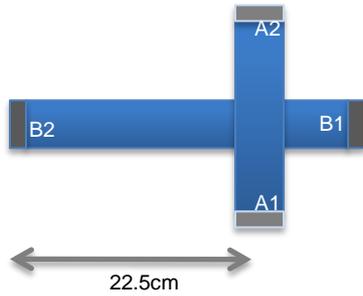
イベント数



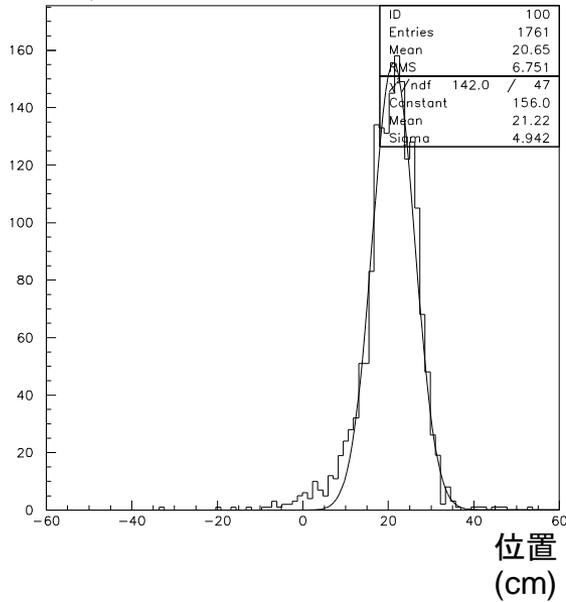
イベント数



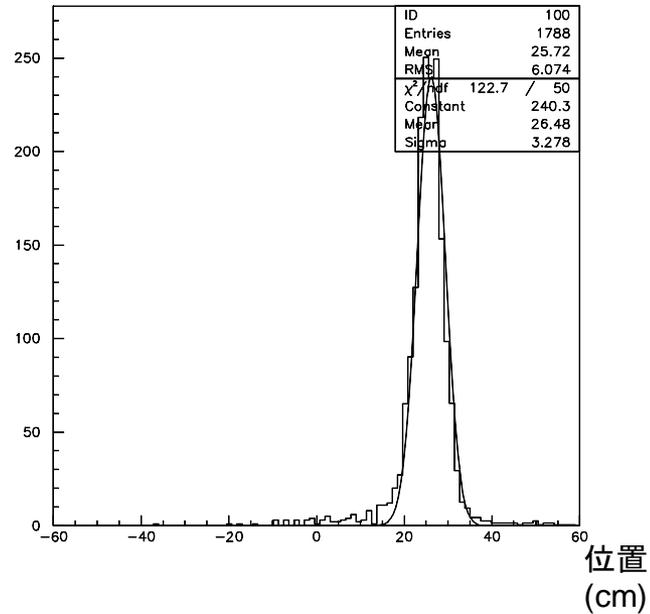
# \* 位置の分布④ \*



イベント数



イベント数



## 4.9 結果 位置の算出

宇宙線の入射部分が3cm × 3cm

B2からの距離[cm]	計算上のB2からの距離[cm]	分散(位置分解能)[cm]
1.5	-1.104	4.065
7.5	4.557	4.003
15.0	13.46	4.254
22.5	21.68	3.961
28.5	26.48	3.278

宇宙線の入射部分が1cm × 1cm

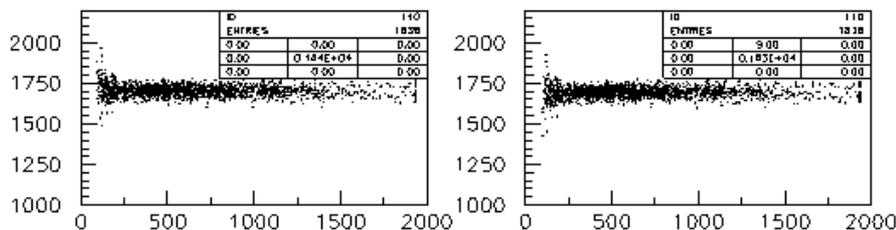
B2からの距離[cm]	計算上のB2からの距離[cm]	分散(位置分解能)[cm]
0.5	0.4556	4.456
7.5	4.846	5.608
15.0	14.05	6.448
22.5	21.24	4.917
29.5	25.18	3.975

# 5 考察

- すべての時間分解能が300psec程度内に収まった。
- 本来、時間分解能はどの位置でも同じであるべきだ。  
しかし、実験結果では位置によりばらつきが見られる。  
**この原因を考える。**

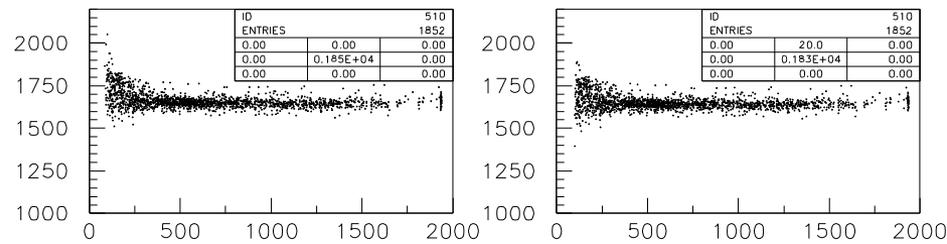
①B2TDCの値の補正が適切にできていないものがある。

補正が適切にできていないB1TDC



補正前

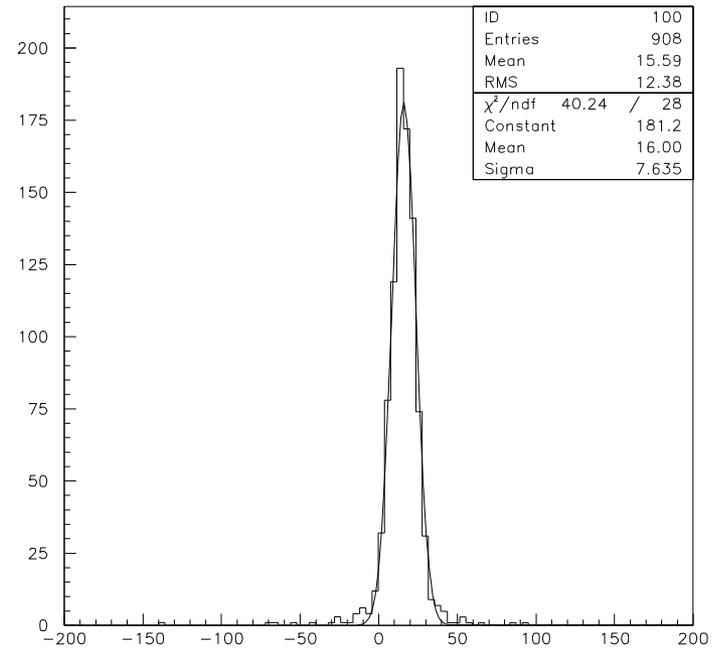
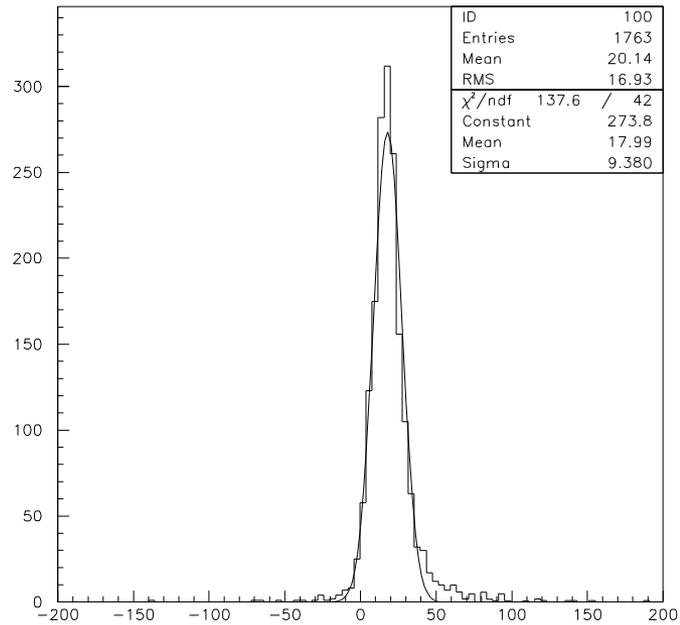
補正後



補正前

補正後

比較的値がそろっているB2TDC>400の範囲でTOFの分布を見る。



B2TDC>400

## B1TDC > 400 に範囲を限定すると

宇宙線の入射部分が3cm × 3cm

B2からの距離[cm]	時間分解能(限定前)[psec]	時間分解能(B2TDC>400)[psec]
1.5	260.8	207.6
7.5	238.6	202.4
15.0	234.5	182.9
22.5	233.7	202.9
28.5	221.1	189.0

宇宙線の入射部分が1cm × 1cm

B2からの距離[cm]	時間分解能(限定前)[psec]	時間分解能(B2TDC>400)[psec]
0.5	296.0	244.1
7.5	265.5	234.0
15.0	280.3	239.3
22.5	253.5	220.6
29.5	303.0	245.4

- B2TDCの補正ができていないことがわかる。  
原因→ノイズの除去ができていないの  
ではないか。

②データ数が少ない。

\* 今後の課題 \* \* \*

データ数を増やすことにより、より精度を上げる。

ご清聴ありがとうございました。

