

RPC(高抵抗板検出器)の作成と その性能評価

山中卓研 2006年3月10日 B4

加藤舞子 佐藤和史 四宮新也

目的

- ☆ 数mmの位置分解能を実現できる検出器として、
RPC (Resistive Plate Chamber: 高抵抗板検出器)
を作成し、今後の実験に活かす。
- ☆ 作成したRPCの動作特性および分解能を測定し、
その性能を評価する。

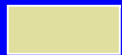
前期実験： μ の寿命測定

図のようなセットを組み、
Cu で μ を止める。

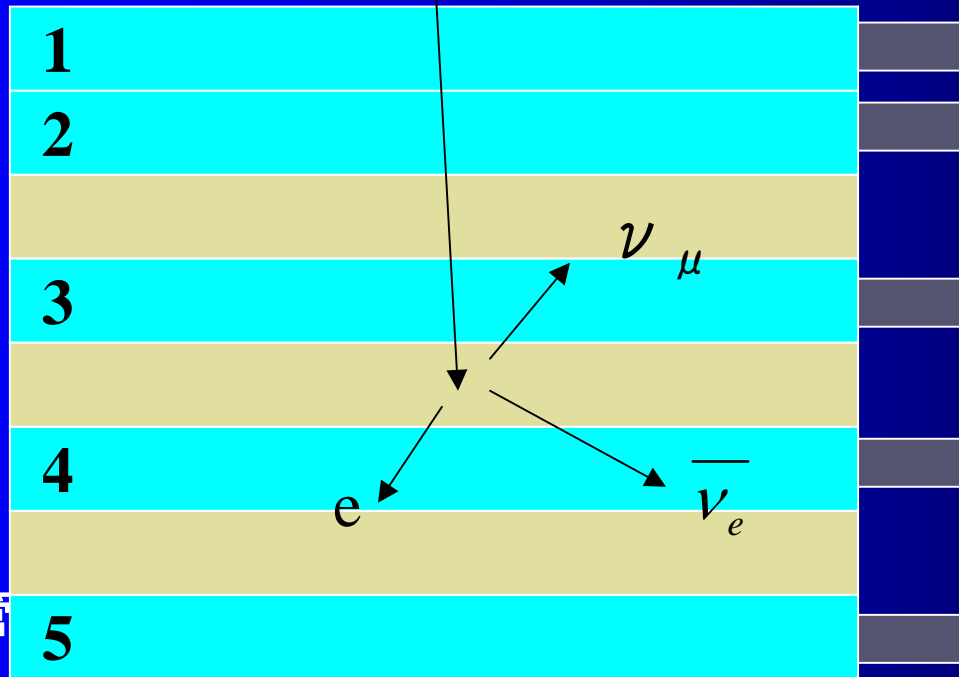
Plastic
Scintillator
($34 \times 25 \times 1$ [cm])



Cu plate
(1cm)



光電子増倍管



μ が止まってから
崩壊して e を放出す
るまでの時間を
TDCで測定する。

この装置では
50~160Mevの運動
量の μ を止めること
ができる。

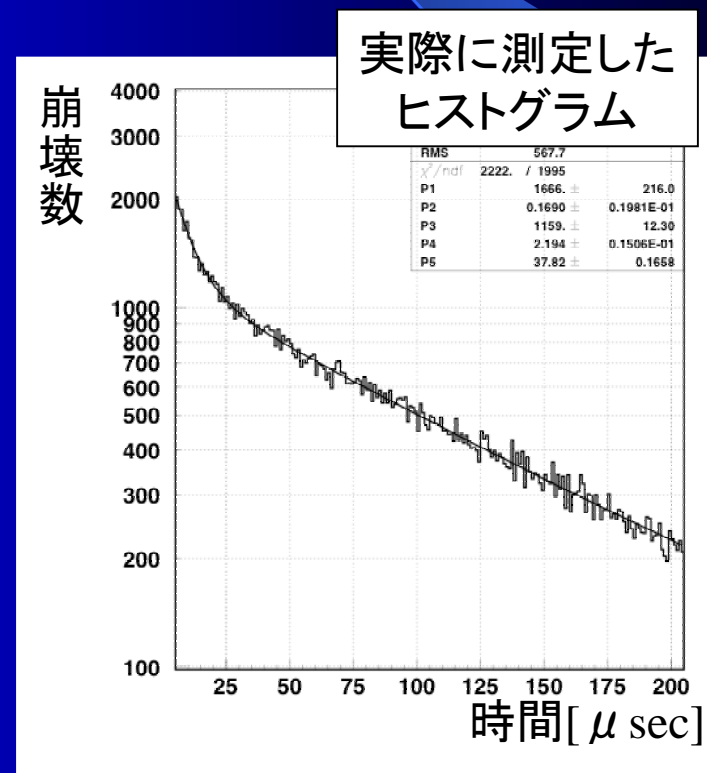
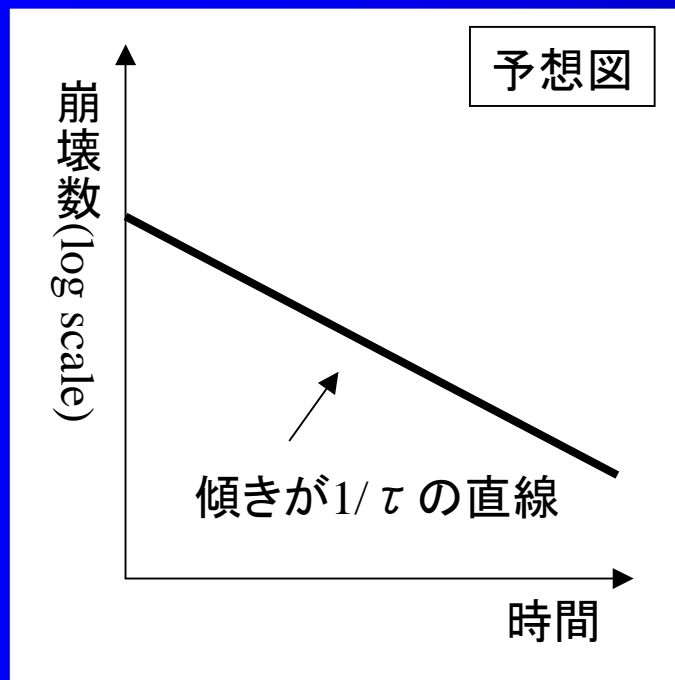
前期実験：測定データ

粒子の崩壊率は、

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{N_0}{\tau} \exp\left[-\frac{t}{\tau}\right]$$

と表せるので Δt あたりの崩壊数 ΔN を時間についてプロットすれば、左図のように log スケールでは直線状のグラフを得るはず。

しかし、実際に測定した結果は右図のように傾きの違う2つの線が見えた。



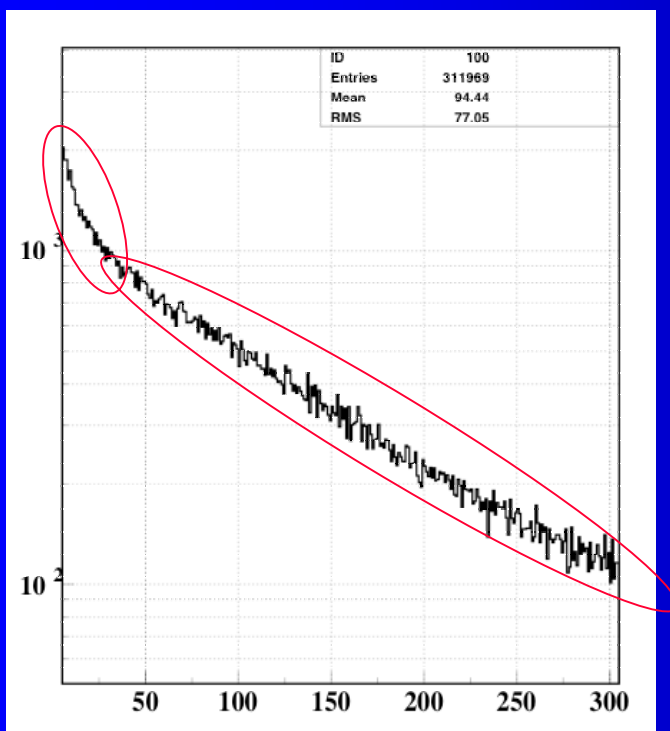
これは μ^- が原子核捕獲によって素早く消えてしまったためと考えられる。

前期実験: fitting

そこで

$$y = P_1 \times e^{-\frac{t}{P_2}} + P_3 \times e^{-\frac{t}{P_4}} + P_5$$

という式でfittingしてみると...



TDCカウント(\propto time)

$$\chi^2 = 2222/1995 = 1.114$$

$$P_1 = 1159 \pm 8.136 \quad (\propto \mu^+ \text{の個数})$$

$$P_2 = 2.192 \pm 0.01116 \mu s \quad (\mu^+ \text{の寿命})$$

$$P_3 = 1665 \pm 87.96 \quad (\propto \mu^- \text{の個数})$$

$$P_4 = 0.1690 \pm 0.007998 \mu s \quad (\mu^- \text{の寿命})$$

$$P_5 = 37.82 \pm 0.1640$$

μ^+ の寿命が $2.192 \mu s$ 、
 μ^- の寿命が $0.1690 \mu s$ となった。

前期実験：寿命と数の比

文献値との比較

μ の寿命 : $2.19703 \pm 0.00004 \mu\text{s}$ (*1)
: **$2.192 \pm 0.012 \mu\text{s}$** (今実験値)

μ^- のCu中での寿命

: $164.0 \pm 2.3 \text{ ns}$ (*2)
: $163.5 \pm 2.4 \text{ ns}$ (*3)
: **$169.0 \pm 8.0 \text{ ns}$** (今実験値)

μ^+ と μ^- の数の比

$\mu^+ : \mu^- = 1.1 \sim 1.4 : 1.0$ (*1; $P=1 \sim 100 \text{ GeV}$)

$\mu^+ : \mu^- =$ **$0.70 : 1.0$** (今実験値;

$P=50 \sim 160 \text{ MeV}$)

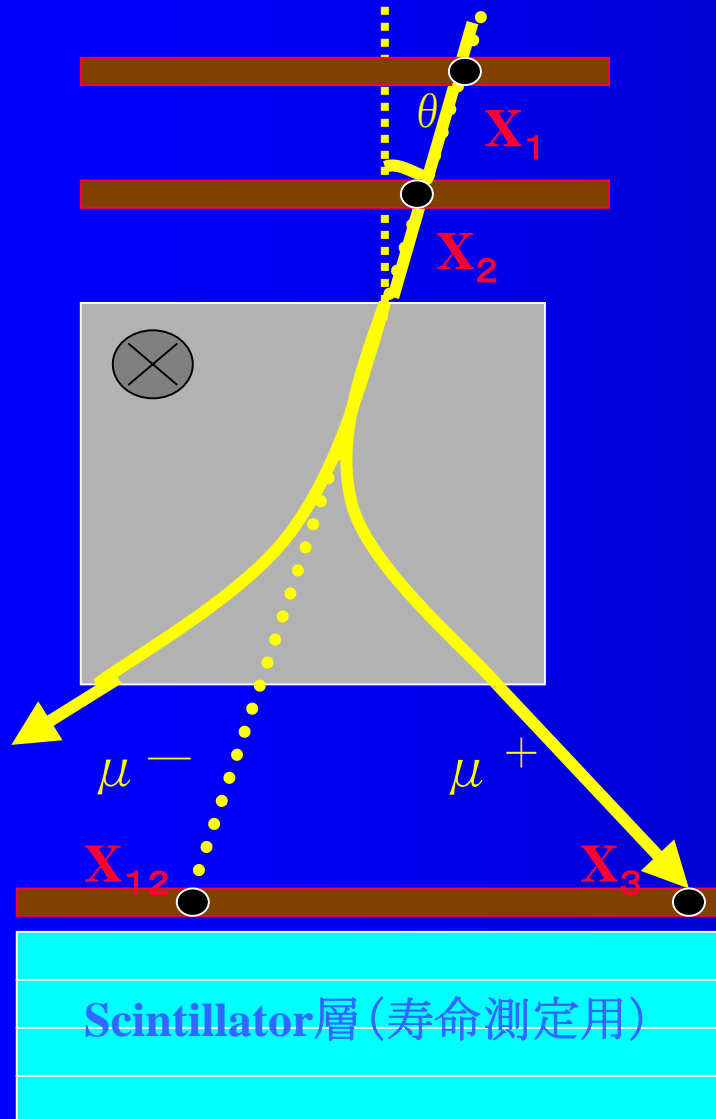
*1: PHYSICS LETTER BOOK

*2: T.A.Filippas, P.Pabit, R.T.Siegel, and R.E.Welsh, Phys.Lette.6,118 (1963)

*3: M.Eckhause, R.T.Siegel, R.E.Welsh and T.A.Filippas, Nucl.Phys.81,575 (1966)

RPC作成の動機

そこで μ^+ と μ^- を分別し、前期実験と独立な方法でそれぞれの数を数えようとした。



☆荷電粒子の軌道が磁界中で曲がることを利用すると、 μ^+ と μ^- を分けることができる。

上の2枚から予想される3枚目の到達点 $X_{1,2}$ と実際の信号 X_3 の位置関係から電荷の正負が判別出来る。

この方法で実験するためにはある程度の位置分解能を出せる検出器が必要になる。

⇒今回は比較的構造が簡単で材料が手に入り易いRPCを作ることにした。

RPCに要求される分解能 σ_r

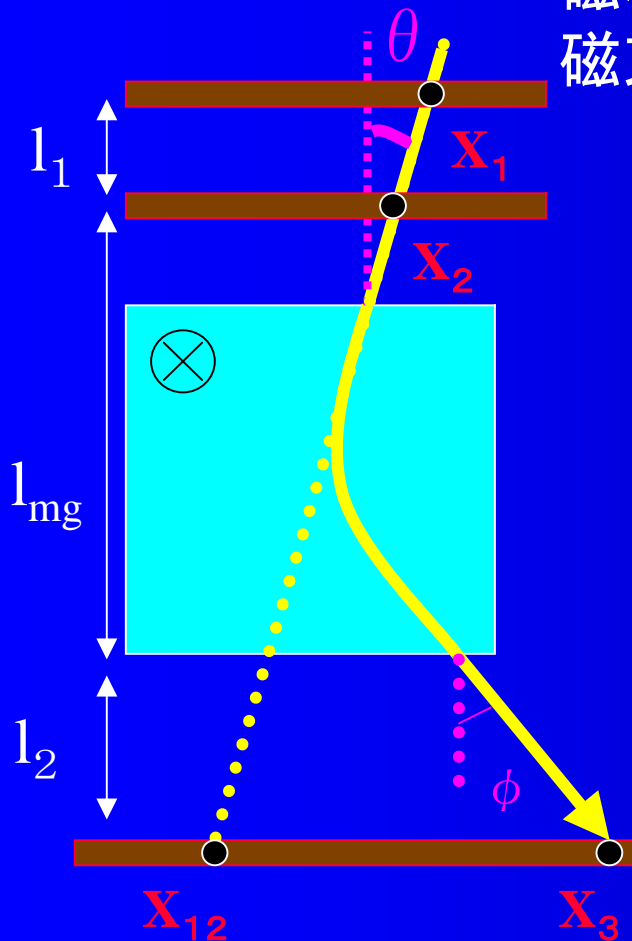
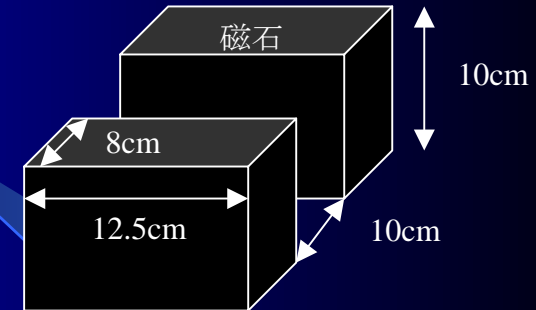
判別に必要な分解能 σ_r はどの程度だろうか。

磁石

磁場領域: $10 \times 12.5 \times 10\text{cm}$

磁束密度: 平均0.4T

\Rightarrow 一定と仮定



$$x_{12} = x_2 - (l_{mg} + l_2) \tan \theta$$

$$x_3 = x_2 + r(\cos \theta - \cos \phi) + l_2 \tan \phi$$

(θ, ϕ : 入射角と出射角 r : 曲率半径)

多重散乱による誤差 σ_{ms} を考慮すると、

$(X_3 - X_{12})$ の誤差 σ は、

$$\sigma = \sqrt{2 \left\{ 1 + \frac{l_{mg} + l_2}{l_1} + \left(\frac{l_{mg} + l_2}{l_1} \right)^2 \right\} \sigma_r^2 + \left(\frac{l_{mg} + l_2}{\cos \theta} \right)^2 \sigma_{ms}^2}$$

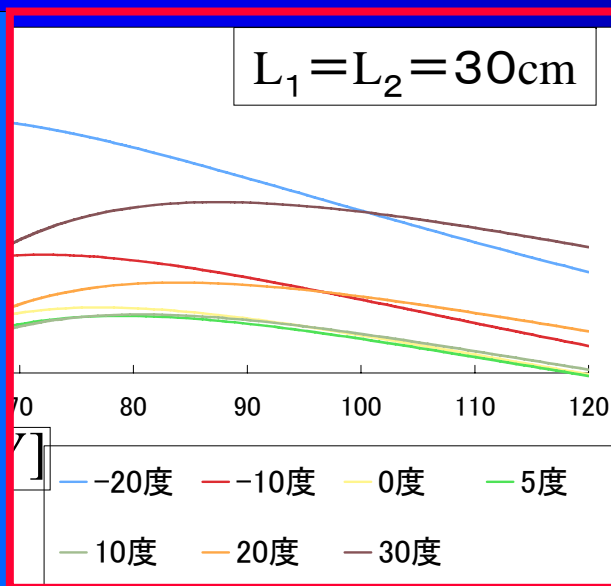
運動量p・入射角 θ

X_3 と X_{12} の位置関係を 2σ で判別する条件

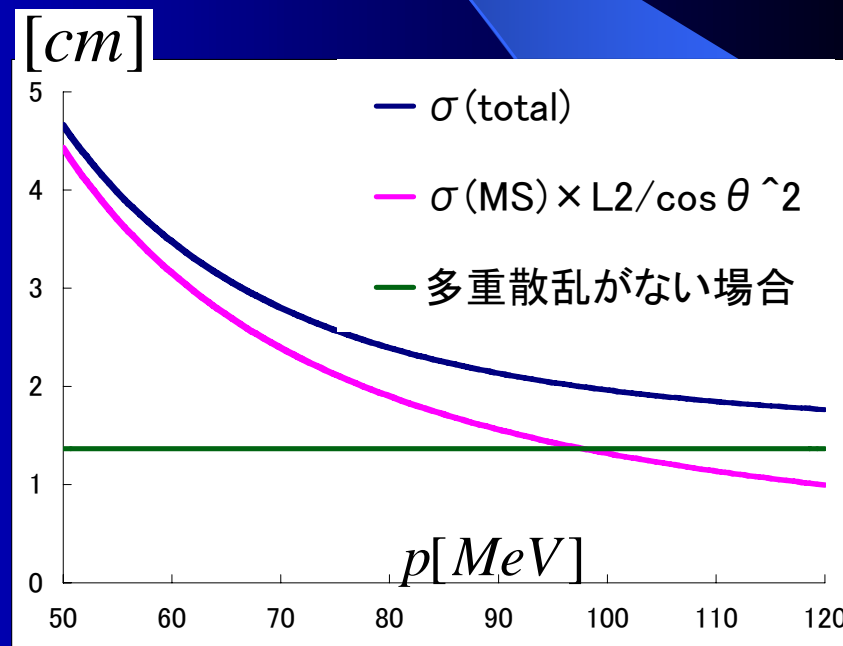
$$\Rightarrow (X_3 - X_{12}) \div \sigma \geq 2 \quad (\text{この左辺を} f \text{とおく})$$

fの変数は、入射角 θ μ の運動量p RPCの配置位置 l_1, l_2 分解能 σ_r

f[cm]



- θ が0~10度ではfが小さい
⇒通過する磁石領域が最短

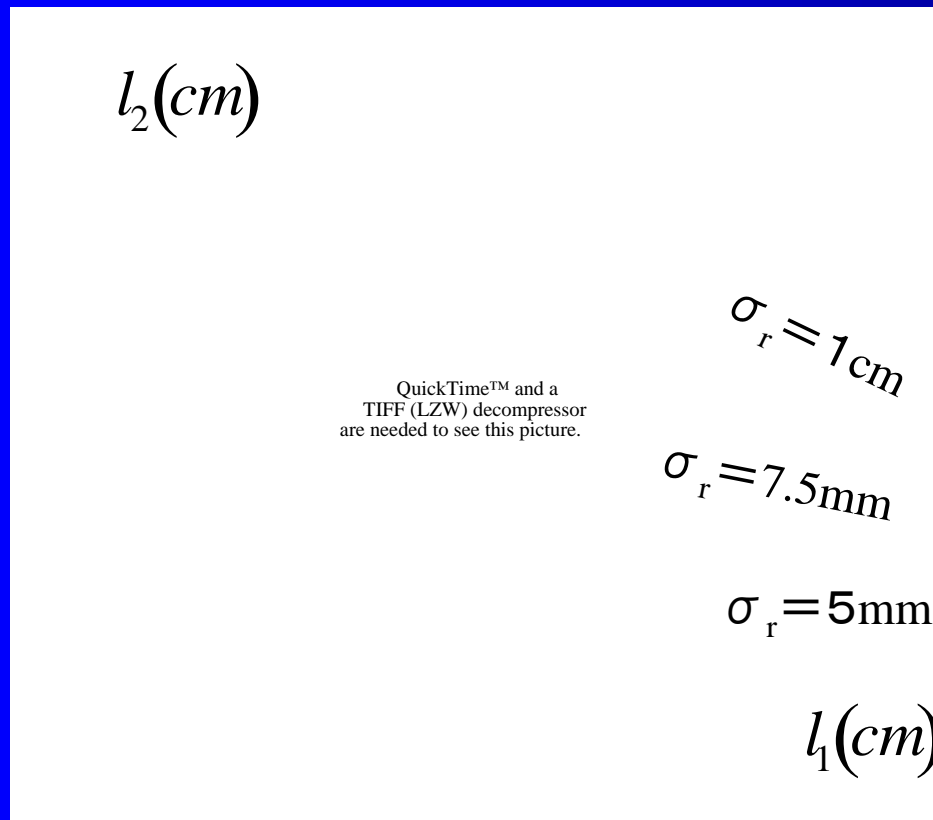


- p→高 ⇒ f→滑らかに減少。
⇒曲がりにくいから
- p→低 ⇒ f→急激に変化
⇒多重散乱

⇒ $p = 120\text{MeV}$, $\theta = 0$ について見積もればよい

必要な分解能・装置の高さ

$f=(X_3-X_{1,2})-2\sigma=0$ の値を l_1, l_2 について2次元プロットすると...



装置全体の高さは最小で

$$\sigma_r = 5mm : L_{total} \approx 70cm$$

$$\sigma_r = 7.5mm : L_{total} \approx 100cm$$

$$\sigma_r = 1cm : L_{total} \approx 120cm$$

今回は5mmの分解能に
挑戦！

⇒何発のデータが見込めるかシミュレーション

Simulation

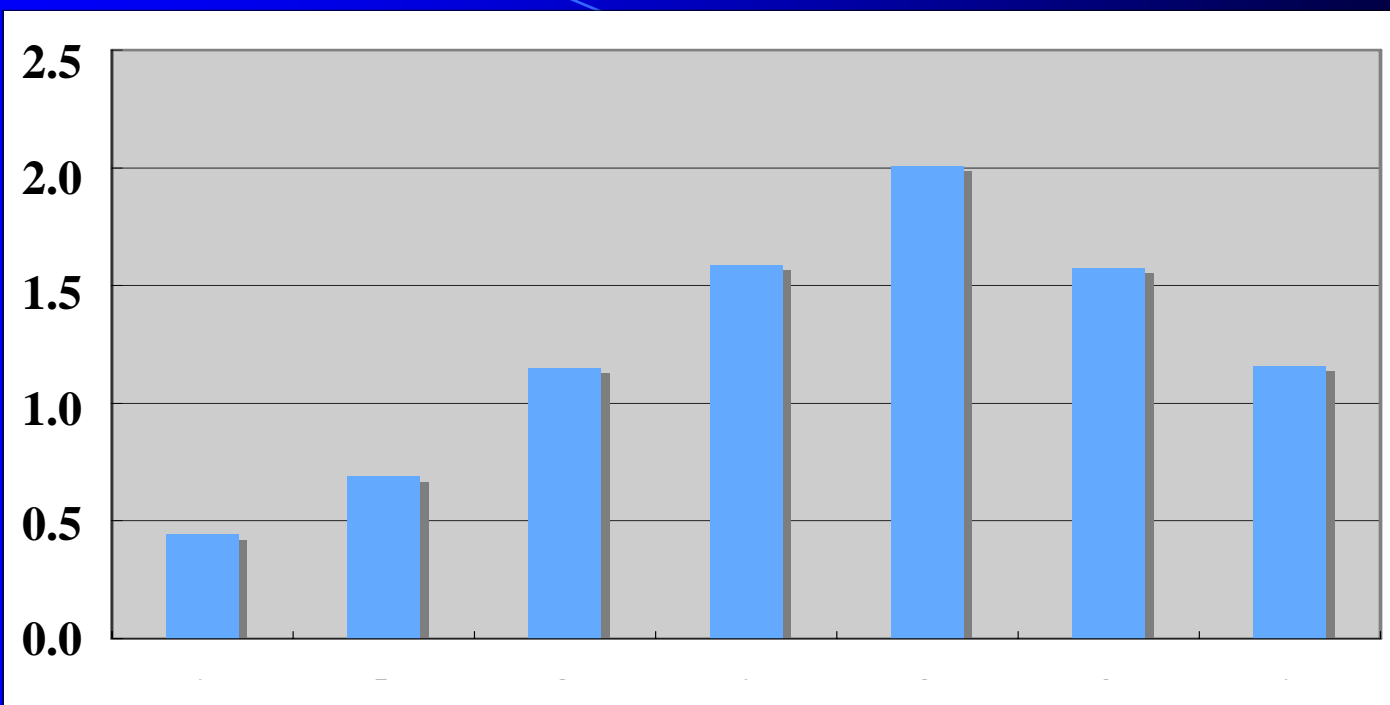
そこで

1. μ は単位面積あたりに一様に降ってくる。
2. 天頂角分布は単位立体角あたり $\cos^2 \theta$ に比例する。
3. μ の運動量は70~120Mevで、運動量分布はこの範囲では一様である。

以上のことを仮定して得られるデータ数をsimulateしてみる。

Simulation2

検出効率(%)

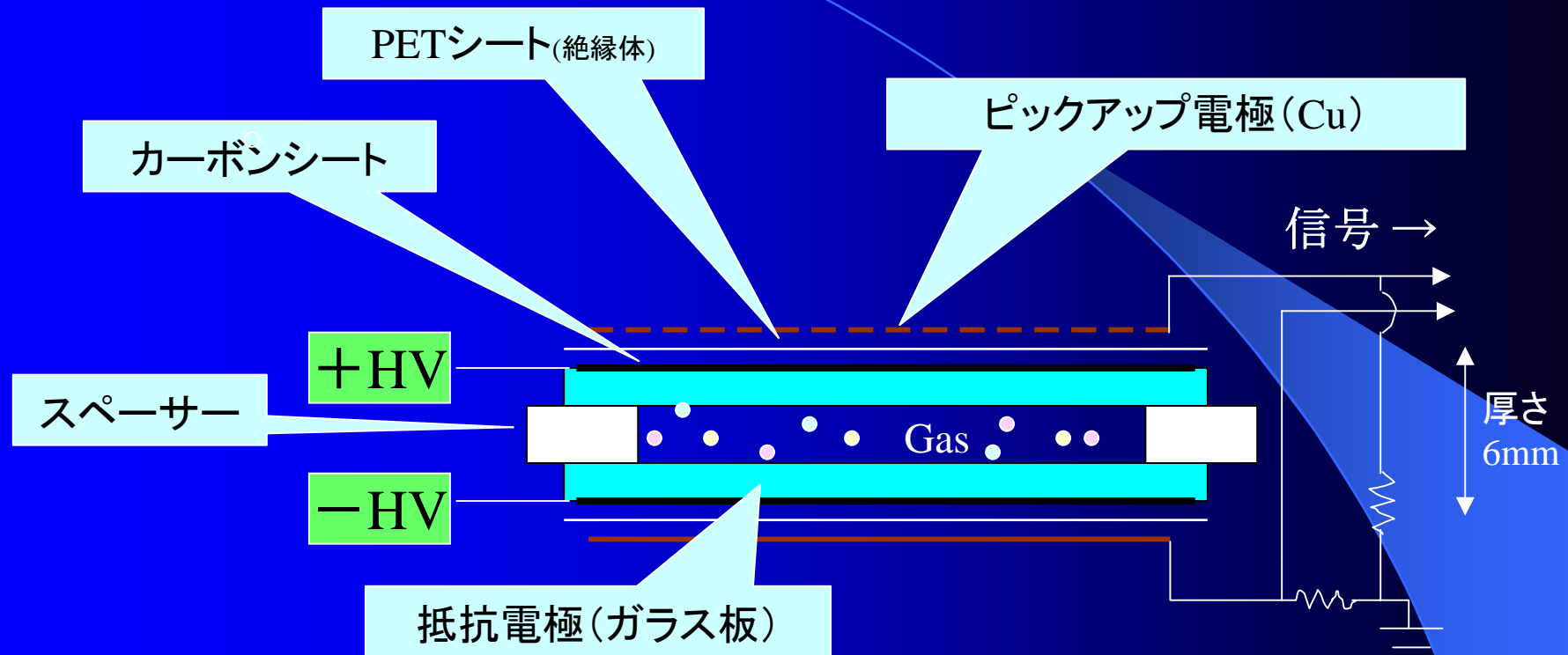


$L_1(\text{cm})$	50.0	45.0	40.0	35.0	30.0	25.0	20.0
$L_2(\text{cm})$	19.9	21.1	22.9	25.0	29.2	40.4	75.0

$L_1=L_2=30\text{cm}$ で約**2%**。

前期実験では、500万sで30万countなので同じ時間測定できれば約**1500count**は見込める。

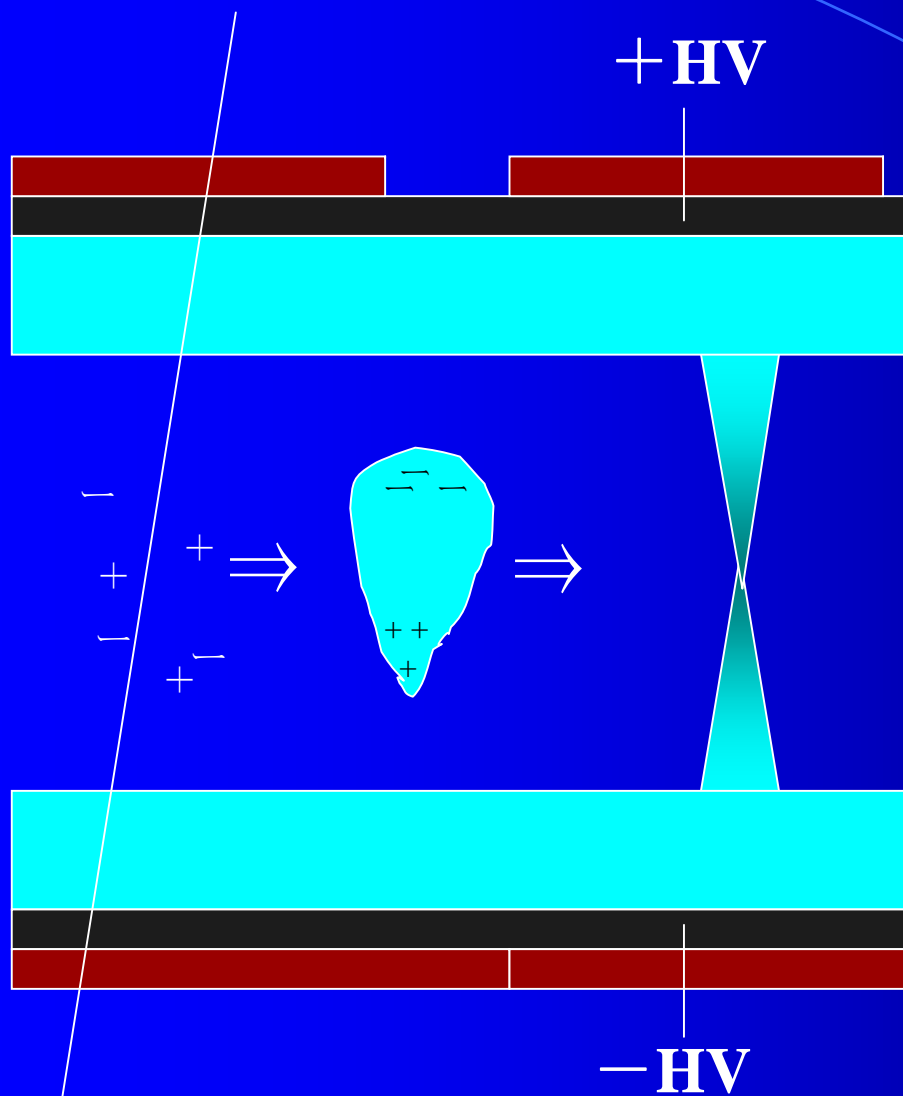
RPCの構造



- ・RPCとは、スパーク(放電)を利用した Gas Chamber の一種。
- ・高い電気抵抗率($10^{10} \sim 10^{13} \Omega \text{ cm}$)を持つ抵抗電極に数kVの電圧をかけて荷電粒子がChamber内を通過する際に引き起こされるスパークの位置をピックアップ電極で読み出すと、粒子の通過位置を決定できる。

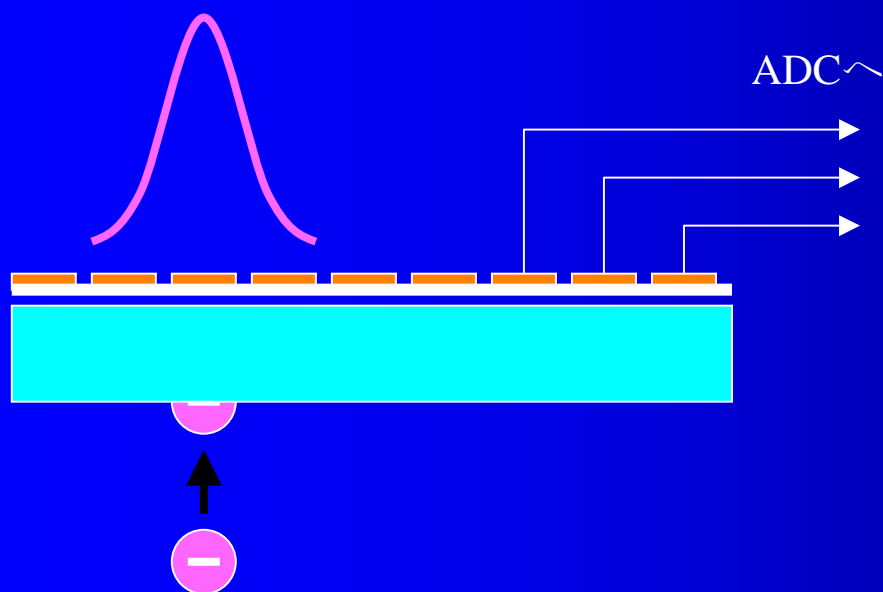
今回作成したRPCの大きさ・・・40cm×40cm(うち、検出領域は20cm×20cm)

動作原理



- ①荷電粒子が通過場所のガスをイオン化する。
- ↓
- ②発生した電子が印加電圧によって加速され電子なだれ(アバランシェ)を引き起こす。
- ↓
- ③なだれの先端の高い電場部分に、分子から出る紫外線による光電離で電子が発生。さらなる電子なだれ(ストリーマー)に成長し、放電する。
- ↓
- ④近くのピックアップ電極に電流信号が誘起される。

信号の読み出し



ピックアップ電極はストリップ状に配置されており、それぞれがADCにつながっている。

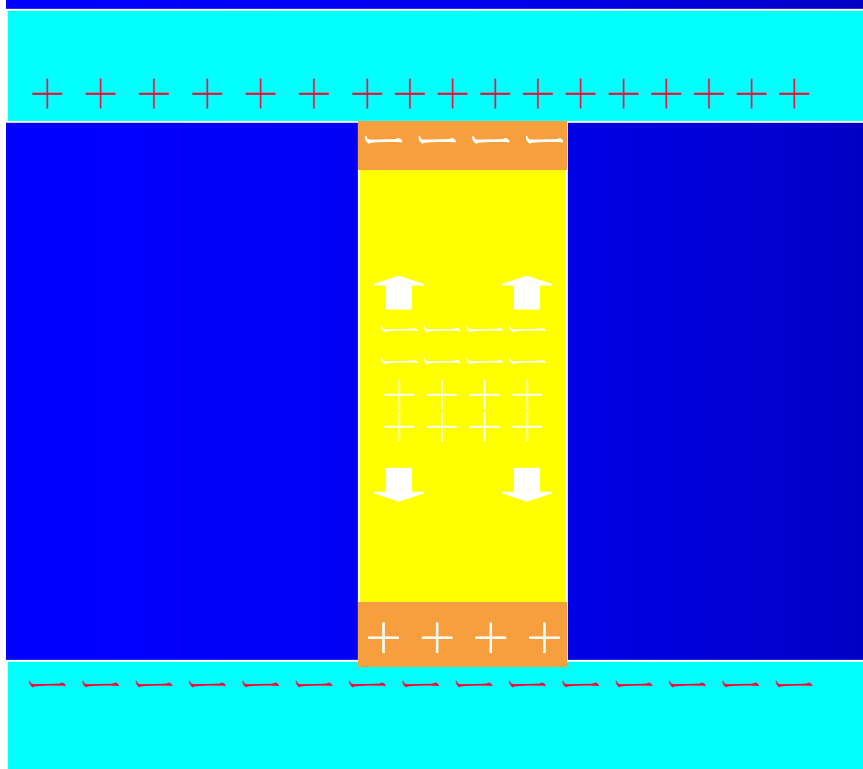
放電が起こると、近くのピックアップ電極に電荷が誘起され、それをADCで読み込む。

複数の電極から信号が出た場合は、信号の大きさを重みとして重心をとる。

ストリーマの直径は十分小さい(数百 μm)ので、位置分解能はストリップ幅によって決まる。

なぜ『高抵抗板』なの？

RPCの **抵抗電極** は高い電気抵抗率 ($10^{10} \sim 10^{13} \Omega \text{cm}$) を必要とする。



電極の電気抵抗率が高いと、放電の起こった場所 (数 mm^2) の電極表面の電荷が一時的に消滅し、その部分の電場も消える。

そのためイオンや励起されたガス分子が残っていても**連続放電を起こさない**。

また、この**電圧の降下を横に拡げない**効果もある。

⇒今回は入手の手軽さ、高い耐久性等の理由で
ガラス ($\sim 10^{12} \Omega \text{cm}$) を使用する

ただし、この電場の回復に $\sim 1 \text{sec}$ かかるため高レートの測定には向かない。

ガスの成分

今回使用するガスの成分は...

アルゴン: 30%
イソブタン: 8%
フロン-134a: 62%

各成分の主な働きは次の通り

アルゴン : 主な働きをするガス。
荷電粒子によって電離され電子なだれを引き起こす。
励起されて紫外線を発光し、ストリーマを発生させる。

イソブタン : 紫外線を吸収し、ストリーマの拡大を抑える。

フロン : 電子を捕獲し、ストリーマの拡大を抑える。

出来上がり

こうして3枚のRPCが完成した。



生写真

●材質

抵抗電極 : 2mm厚ガラス

スペーサー : 2mm厚アクリル板

ピックアップ電極 : 35 μ m厚銅テープ

●サイズ

面積(ガラス) : 40cm \times 40cm

(検出領域) : 20cm \times 20cm

ストリップの数 : 40本

ストリップ間隔 : 5mm

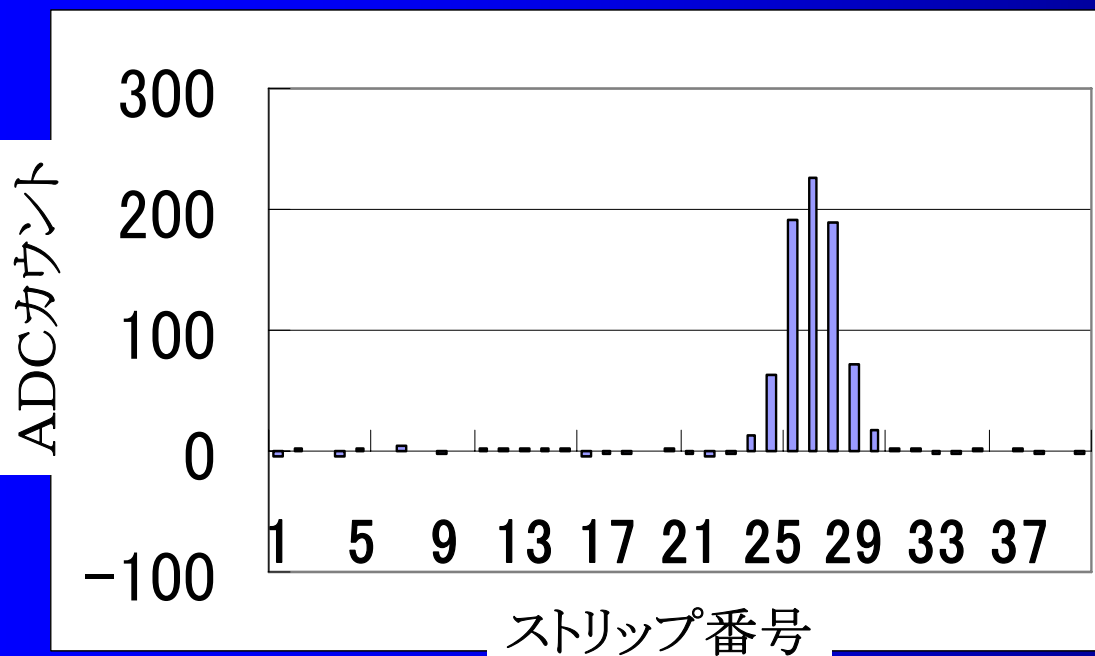
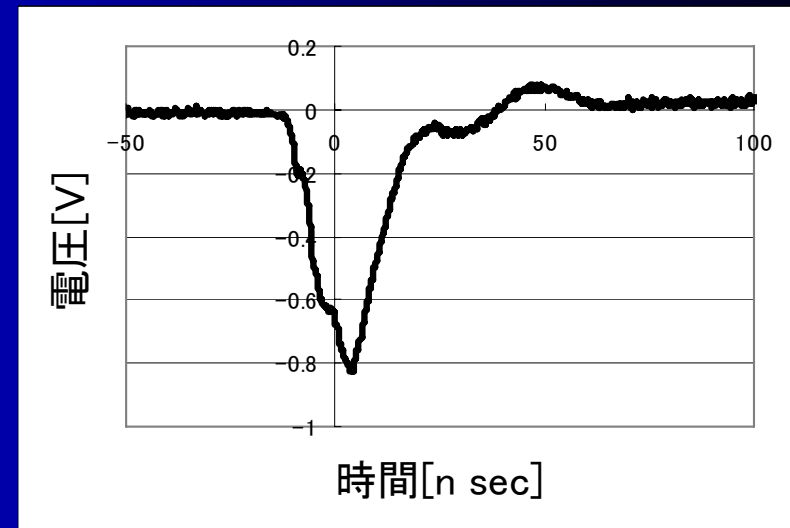
(内) 銅テープ幅4mm、ギャップ
1mm)

Gas層の厚さ : 2mm

実際の信号の形

右図: ストリップ1本の信号
(抵抗電極間の電圧10kV)

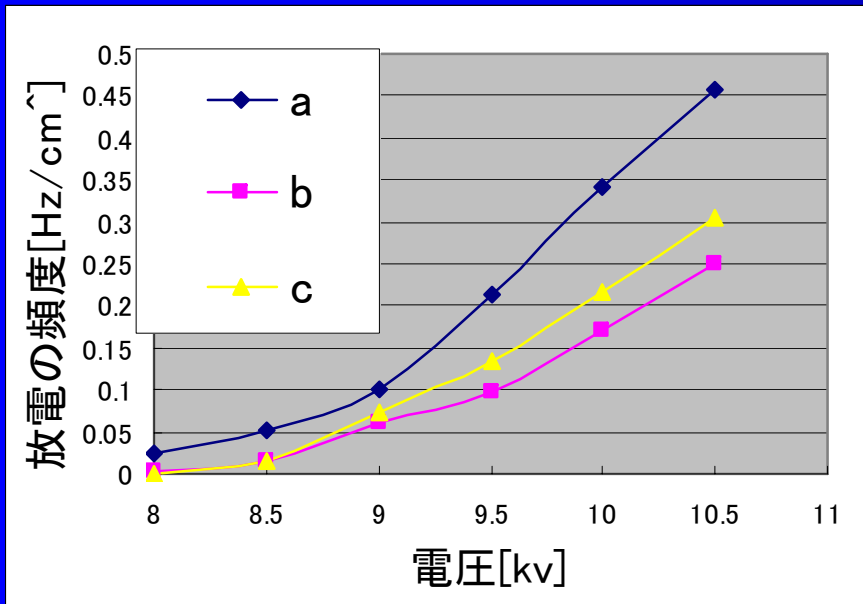
出てくる信号は大きさが1V、
幅40nsec程度。



クラスターの幅はストリップ
5本程度が多かった。

偽の放電

の降ってくる頻度(0.08Hz/cm²)よりも明らかに多くの信号が見られた。RPCの内部では、荷電粒子が通過していないときでもランダムに放電が起こって偽の信号を出している。RPCは前述の通り、放電の起こった場所(数mm²)は一時的(≒1秒)に不感領域となる。この偽の放電が多ければ検出効率が下がる恐れがある。そこでこの偽の信号の頻度を測定してみた。



すると左図のような結果が得られた。抵抗電極間に電圧を10kVかけたときに0.3Hz/cm²程度であった。

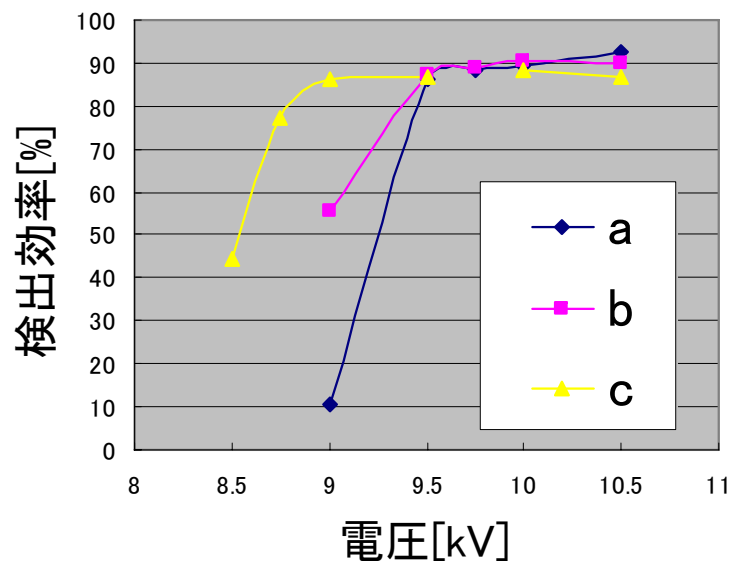
この程度の頻度であれば不感領域は全検出領域の1%程なので、この偽の放電による検出効率への影響は大きい。

動作電圧と検出効率

次に検出効率の測定を行った。

右図のように2枚のplastic scintilaterを検出領域より少し狭い範囲で重ねて置き、その上にRPCを載せて、scintilater2枚のコインシデントと、RPCを含めた3枚のコインシデントの信号数の比を測定した。

装置



左図はRPC3枚のプラトー曲線を測定したもの。3枚ともプラトー領域では90%程度の検出効率を持っている。

このグラフから、RPCを作動させる際の抵抗電極間の電圧として**10kV**を採用した。

検出効率を決める要因

標準状態のガスが1cmあたりでイオン化される個数は

アルゴン・・・29.4個

イソブタン・・・46個

フロン・・・0個

* detectors for particle radiation p.15

今回のガスの混合比およびガス層の厚さから、1つの荷電粒子が通過したときに作られるイオンは平均約2.6個。

これをポアソン分布だと仮定すると、1つもイオンが作られない、つまりストリーマが形成されない確率は7.4%である。

これは先程の検出効率の値(90%)とよく合致している。

⇒検出効率の改善には、電離されるガスの個数を増やすことが鍵

(RPCを実際に使用しているBelle実験では2枚重ねて使用することで検出効率を上げている。)

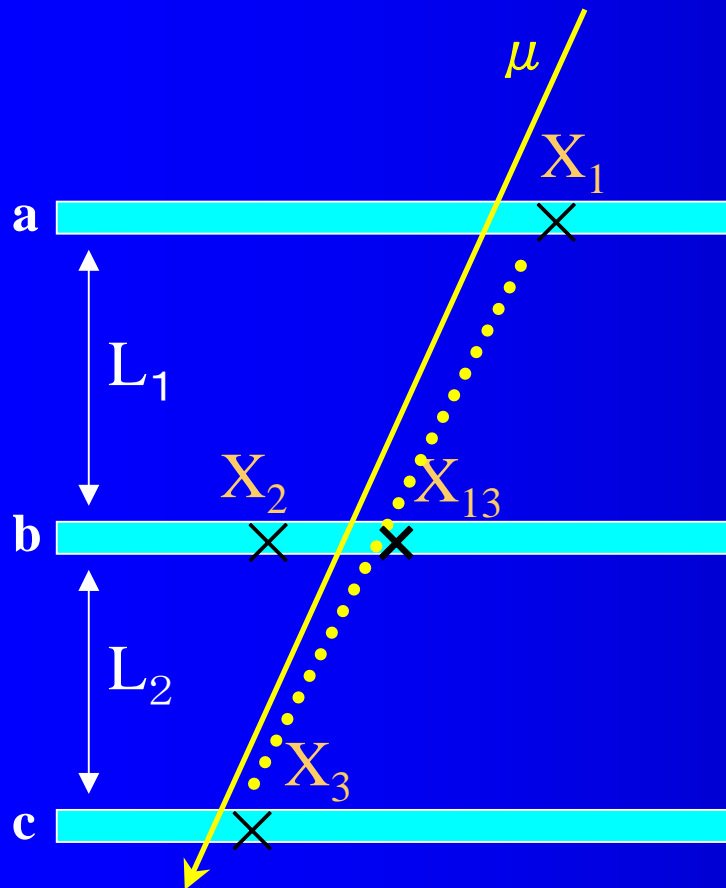
位置分解能 ～測定原理～

分解能を測るには実際に粒子を入射させ、その入射位置と出てきた信号とを比べればよい。
が、しかし 使える荷電粒子の線源は宇宙線ミュオンだけ

⇒ランダムに降ってくるので入射位置が判らない

そこで、次のような方法を考えた。

RPC3枚を上下に並べ、1枚目と3枚目の信号から2枚目でのミュオンの通過地点(X_{13})を予測し、実際に2枚目が出した信号(X_2)と比べるのである



RPC間の距離を L_1, L_2 として

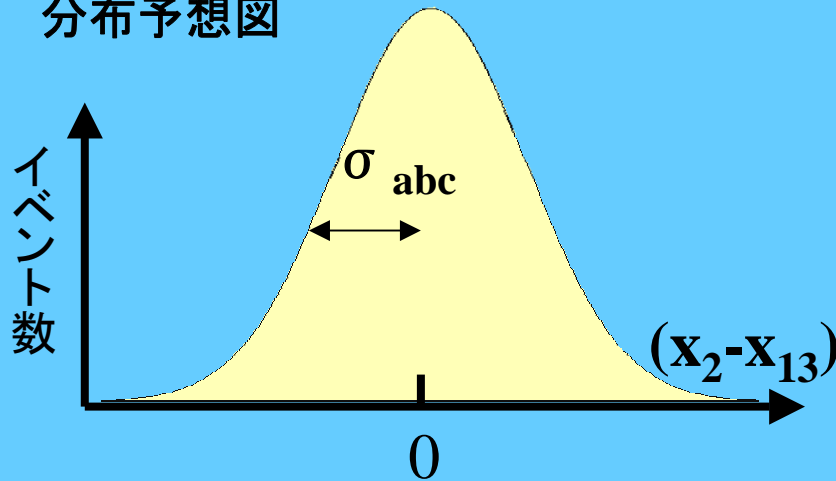
$$X_2 - X_{13} = X_2 - \frac{L_2}{L_1 + L_2} X_1 - \frac{L_1}{L_1 + L_2} X_3$$

この式から、 $X_2 - X_{13}$ を測定した際の誤差 σ は、各々の分解能を $\sigma_a, \sigma_b, \sigma_c$ とすると、

$$\sigma_{abc} = \sqrt{\left(\frac{L_2}{L_1 + L_2} \sigma_a\right)^2 + (\sigma_b)^2 + \left(\frac{L_1}{L_1 + L_2} \sigma_c\right)^2}$$

位置分解能 ～測定原理～(2)

分布予想図



すなわち、 $X_2 - X_{13}$ を多数回測定し、そのヒストグラムを作れば、この σ_{abc} の分散を持つ分布が得られるはず。

この測定をRPCの順番を入れ替えて3回行えば、独立な3つの式を得る。
これを解けば3枚のRPCの分解能 $\sigma_a, \sigma_b, \sigma_c$ が解る。

$$\begin{pmatrix} \sigma_{bac}^2 \\ \sigma_{abc}^2 \\ \sigma_{bca}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & A_2 & A_1 \\ A_2 & 1 & A_1 \\ A_1 & A_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_a^2 \\ \sigma_b^2 \\ \sigma_c^2 \end{pmatrix}$$

ただし

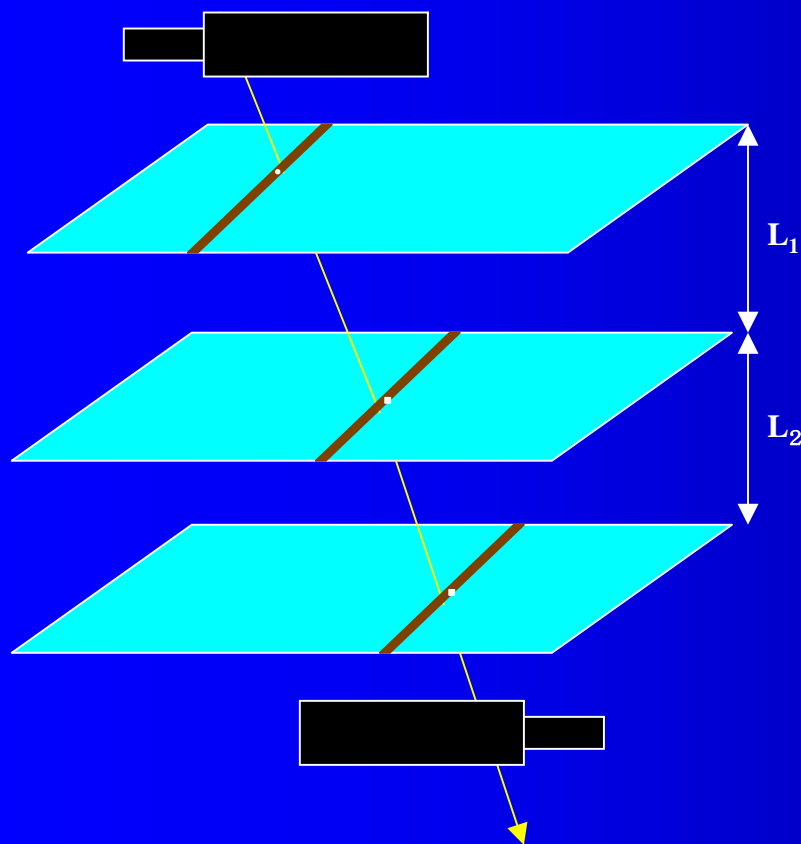
$$A_i = \left(\frac{L_i}{L_1 + L_2} \right)^2 \quad (i=1,2)$$

Set up

Scintillator (5 × 10 cm) を上下に設置し、この2枚でゲート信号を作る。

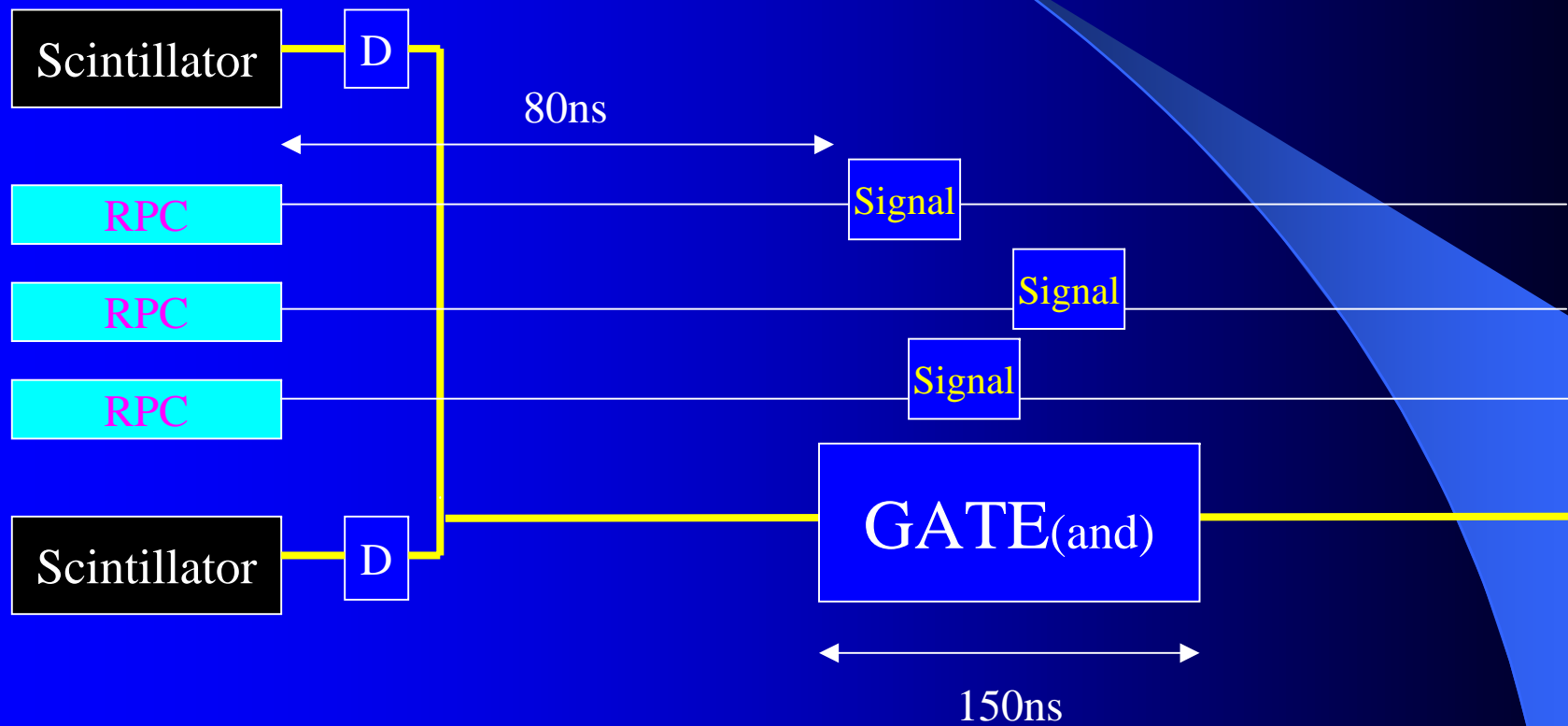
分解能の測定には、RPCの中央部付近のストリップを16本使用した。

RPC間の距離の値は以下の通り。



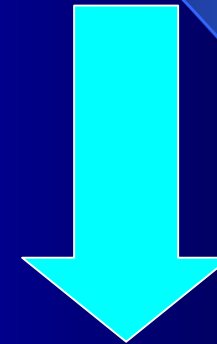
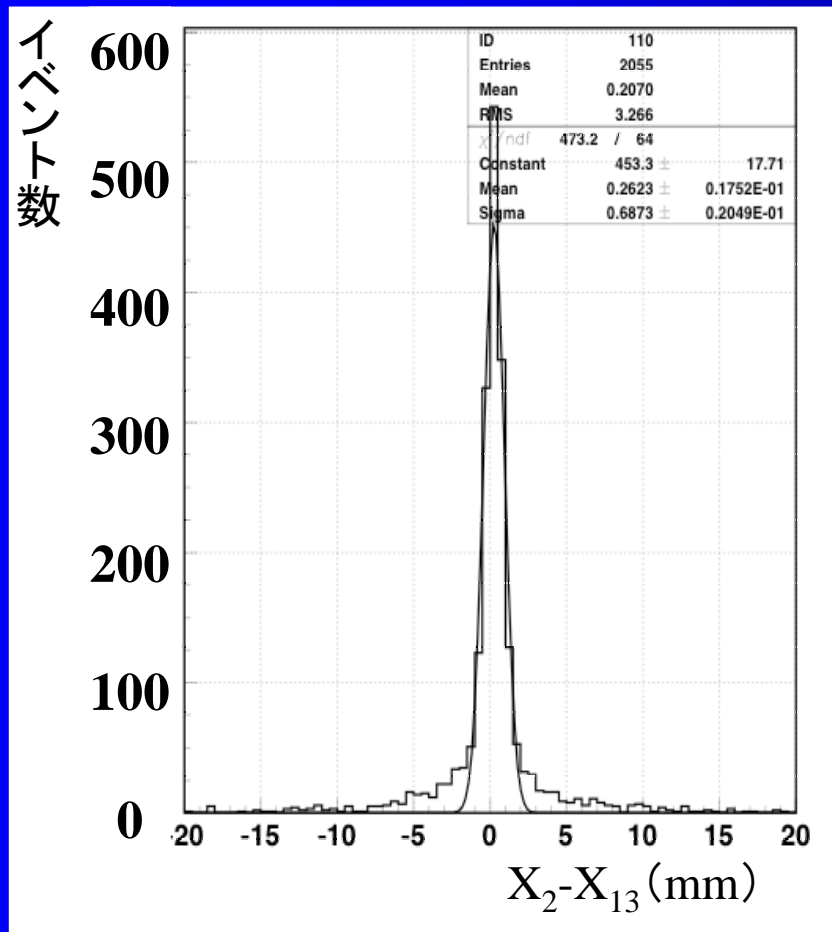
	L_1 [mm]	L_2 [mm]
1回目	62.0	54.4
2回目	43.1	63.2
3回目	54.3	55.0

回路図



生データ

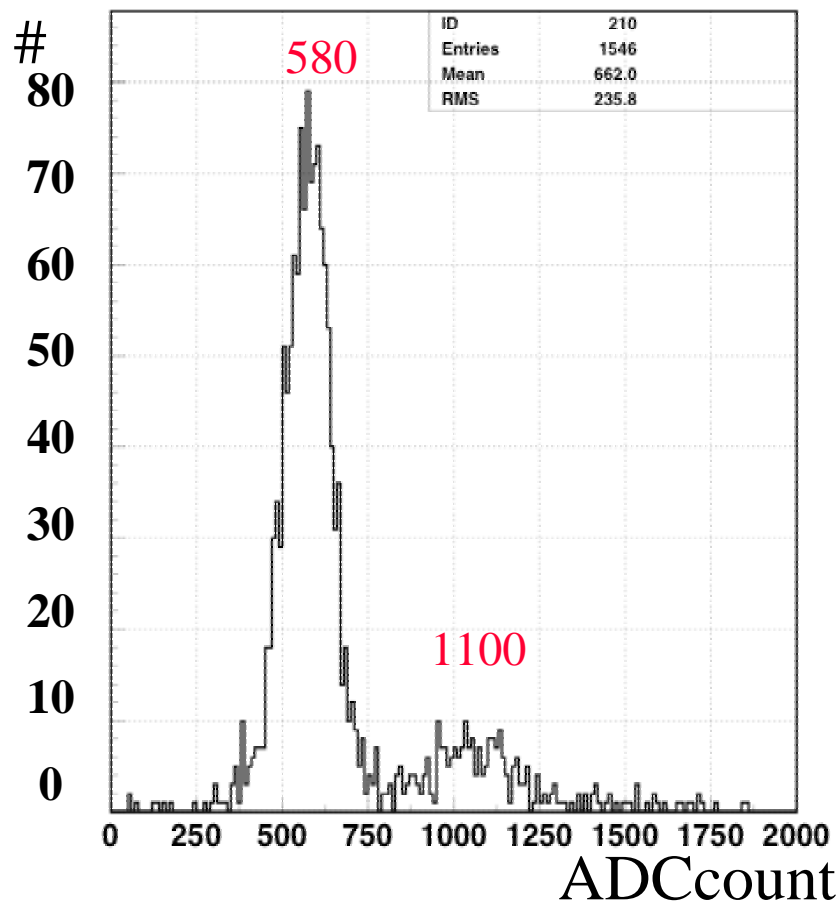
細いピーク部分はいまよくフィット出来ているが裾の部分があまりよくない。



何か別の成分が紛れ込んでいる。

幅の広い成分の原因

原因として同時に2個の放電が起こった場合があげられる。



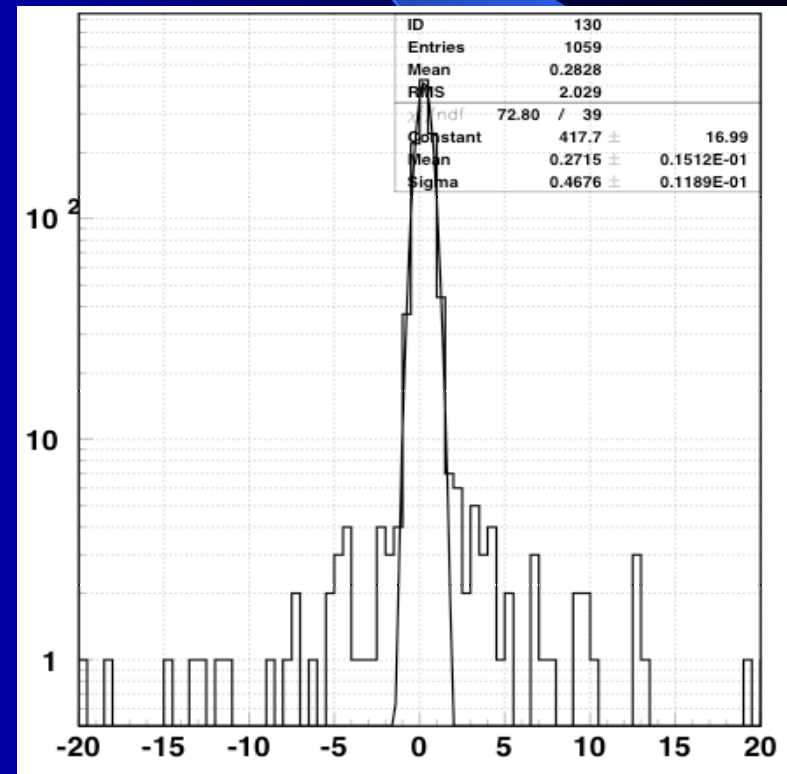
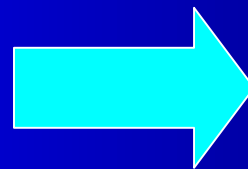
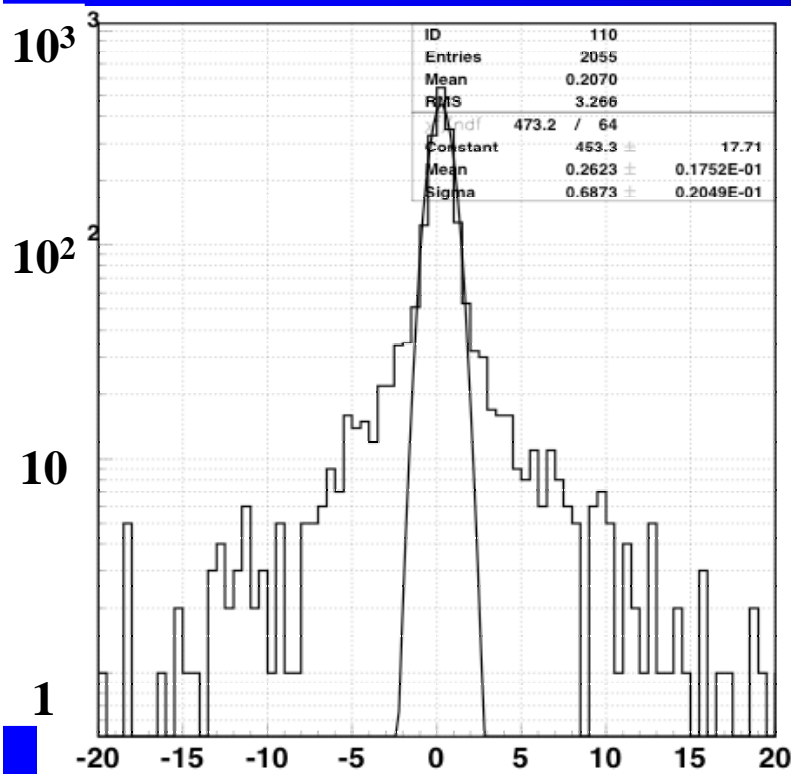
明らかにピークが二つあり、それらは約2倍の値を示している。そこでこの右のピークをカットすることにした。

解析

すると、下図のように大幅に幅の広い成分をカットすることができた。
パラメータの変化は以下の通りである。

- ・ σ 0.6873mm  0.4676mm
- ・ χ^2 7.39  1.87

ただし、イベント数も2055から1059と大幅に減少してしまった。



解析2

同様に残りの2回の測定にも
カットをかける。

$$\sigma_{abc} = \dots\dots\dots 0.614 \pm 0.015 \text{mm}$$

$$\sigma_{bac} = 0.468 \pm 0.012 \dots \text{mm}$$

$$\sigma_{bca} = 0.539 \pm 0.012 \text{mm}$$

この結果を、先程の式

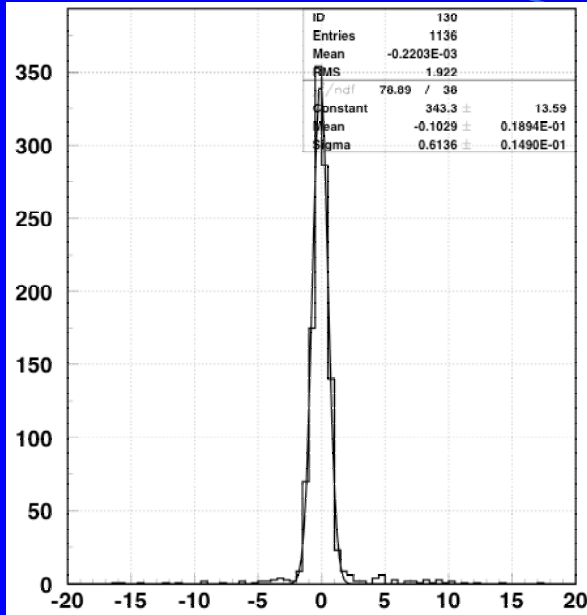
$$\begin{pmatrix} \sigma_{bac}^2 \\ \sigma_{abc}^2 \\ \sigma_{bca}^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & A_2 & A_1 \\ A_2 & 1 & A_1 \\ A_1 & A_2 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_a^2 \\ \sigma_b^2 \\ \sigma_c^2 \end{pmatrix}$$

に用いて解くと

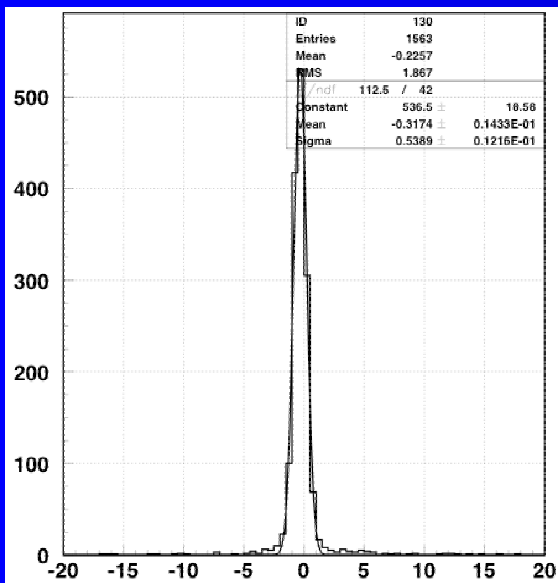
$$\sigma_a = 0.56 \pm 0.02 \text{mm}$$

$$\sigma_b = 0.31 \pm 0.04 \text{mm}$$

$$\sigma_c = 0.44 \pm 0.02 \text{mm}$$



2回目



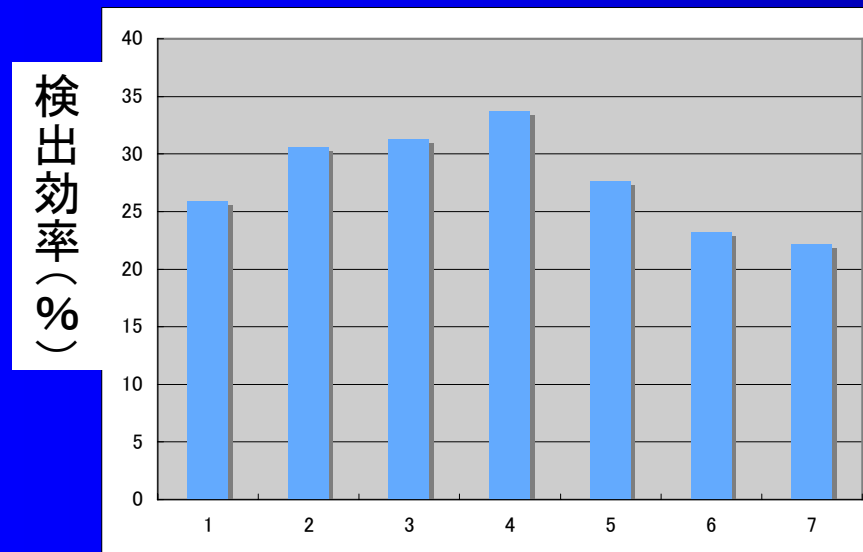
3回目

結論

- 電圧特性は9.5kV付近でプラトー領域となった。
よって使用の際の電圧は10kVに決定した。
- 検出効率は90%程度であった。
⇒ 荷電粒子が通過した際、ガスが電離されるか否かが要因。
- 分解能は
 - $\sigma_a = 0.56 \pm 0.02 \text{mm}$
 - $\sigma_b = 0.31 \pm 0.04 \text{mm}$
 - $\sigma_c = 0.44 \pm 0.02 \text{mm}$
- 位置の揺らぎの分布は予想されたGaussianと、裾を。このうち、幅の広い成分は同時に2発の放電が起こったものと推定され、適切なカットにより取り除くことができたが、使えるデータ数も減ってしまった。

Simulation

今回、時間の都合上当初予定していたミュオンの電荷を判別し寿命を測定する実験はできなかった。作成したRPCを用いてこの実験を行っていた場合についてシミュレーションしてみよう。



$L_1(\text{cm})$	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	7.0	8.0
$L_2(\text{cm})$	10.0	5.3	3.9	3.1	2.6	2.3	2.1

今後の改善点

・DoubleGaussianの幅の広い成分は、カットによって除去できるが使えるデータ数も減ってしまう。よってその原因と考えられる、放電が2発同時に起こる事象を減らす工夫が必要である。

①電圧の値を適性にする

今回の測定では3枚のRPCに一律に10kVの高めの電圧をかけていた。

3枚個別にプラトー領域にギリギリ入る程度の電圧をかけることで必要以上のストリーマーの拡大を防げるのではないか。

②ガスの混合比を考える

紫外線を吸収しストリーマーを抑える効果があるイソブタンの割合を増やせば、無駄な放電を抑えられると考えられる。しかし、イソブタンは可燃性のガスなのでこれ以上濃度を高くすると発火の可能性がある。なのでガスの混合比を変えることはできない。

おいしいRPCの作り方(仮)