

2004 年度 卒業論文

Thin Gap Chamber におけるワイヤー 間クロストークの測定

小野 峻

00S2011A

目次

- 1 目的
 - 2 Thin Gap Chamber とは
 - 2.1 内部構造
 - 2.2 動作原理
 - 3 セットアップ
 - 3.1 ガス系
 - 3.2 読み出し
 - 4 Geant4 によるシミュレーション
 - 5 実験
 - 5.1 各チャンネルの計数率
 - 5.2 H.V カーブ
 - 5.3 ADC 分布
 - 5.4 クロストーク
 - 6 結果
 - 7 考察
 - 8 謝辞
- 参考文献
- 付録
- 付録

1. 目的

Thin Gap Chamber(TGC)とは厚さ約 3mm の空間にワイヤーを等間隔に張り高電圧をかけて荷電粒子を測定する装置である。今回の実験では、TGC を使用しその特性および各ワイヤー間でのクロストーク(1つのワイヤーでパルスが観測されたときの周囲のワイヤーの振る舞い) を測定することを目的とした。

2. Thin Gap Chamber とは

2.1 内部構造

TGC は多線式比例計数箱(Multi Wire Proportional Chamber)と呼ばれるものの一種であり、その構造は陰極となる 2 枚の平行板の間に高電圧をかけた陽極ワイヤーを何本も並行に張り巡らしたものである。また内部にはガスが流してある。

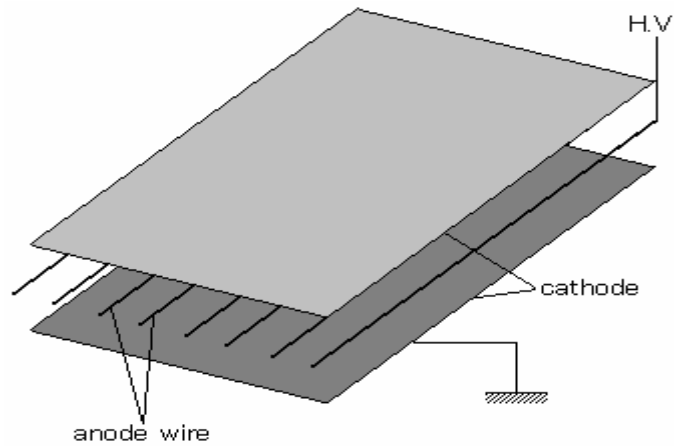
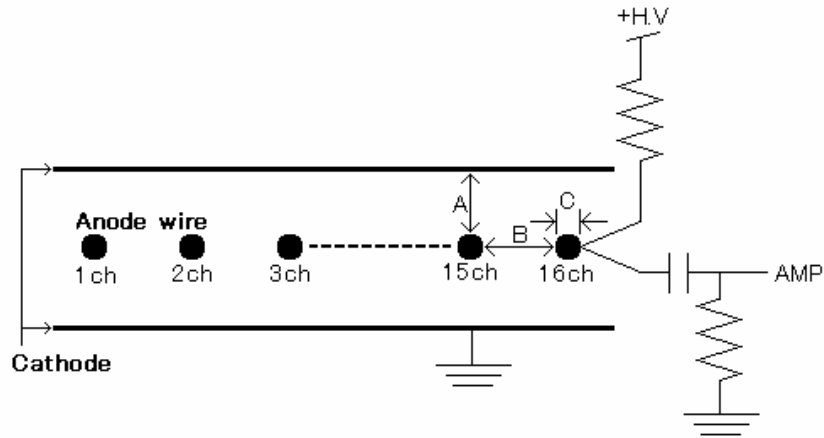


図 2-1:TGC の構造



図 2-2:TGC の外観



ワイヤー本数	16本
陽極-陰極間距離 A	1.4mm
ワイヤー間距離 B	1.8mm
ワイヤー直径 C	50 μ m

図 2-3:TGC の断面図及び各部のパラメータ

2.2 動作原理

TGC 内部を正の荷電粒子が通過すると電磁相互作用により内部のガス分子を電離させ、粒子の軌跡にそってイオン電子対が生成される。ここで生成された電子はワイヤーにかけられた高電圧によりワイヤー方向へと移動していく。電子はワイヤー近傍で加速され他のガス原子を電離させるのに十分なエネルギーを得て、周囲の原子を電離させてしまう。この繰り返しによって、雪崩的に多くの電子が生成される。この現象をガス増幅という。ガス増幅の割合は $10^4 \sim 10^6$ 程度であり微弱な信号であっても非常に大きなパルスを観測することができる。

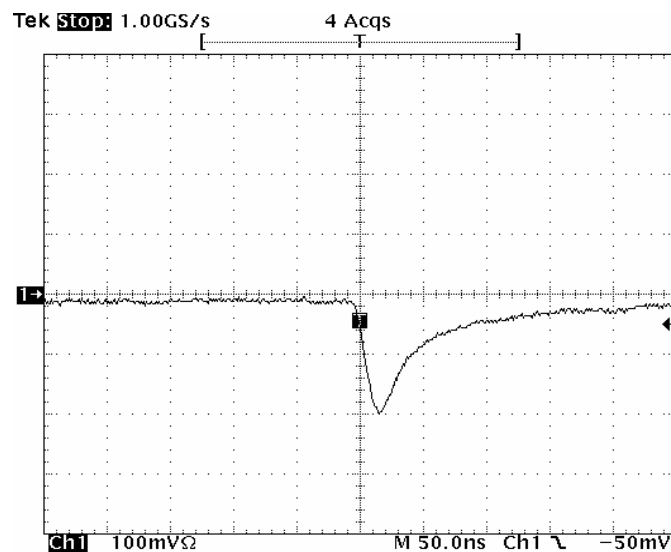


図 2-4:TGC 出力パルス (AMP 増幅後)

次に粒子が通過したときに生成されるパルスの大きさについて説明する。CO₂ ガスにおいて一つのイオン電子対を作るのに必要な平均のエネルギーは $W = 32.9[eV]$ である。この値は電離以外に励起等の作用があるため、CO₂ のイオン化エネルギーよりも高くなっている。次に荷電粒子の単位長さあたりの平均エネルギー損失 E は Bethe-Bloch の公式より $\Delta E = 3.3 \times 10^3 [eV / cm]$ が得られる。

よって 1cm あたりに生成される平均電離電子数 n は、

$$n = \frac{\Delta E}{W} \cong 100$$

TGC の厚さ 3mm、ガス増幅によって 10^6 倍されるとすると最終的な生成電子数 N は、

$$N = 100 \times 0.3 \times 10^6 = 3.0 \times 10^7$$

素電荷を $e = 1.6 \times 10^{-19} [c]$ とすると最終的な電荷量 Q_0 は、

$$Q_0 = Ne = 4.8 \times 10^{-12} [c]$$

この電荷が次に示す RC 回路に流れたときに観測される電圧 V を計算する。

$$V = \frac{Q_0}{C} e^{-\frac{t}{RC}}$$

よってこれにより生成されるパルス電圧の最大波高は $C = 2200 [pF]$ とすると、

$$V = \frac{Q_0}{C} = \frac{4.8 \times 10^{-12}}{2.2 \times 10^{-9}} = 2.2 \times 10^{-3} [V] = 2.2 [mV]$$

この後 AMP により 160 倍に増幅されて出力される。

3. セットアップ

3.1 ガス系

TGC 内部に流すガスの流れの図を以下に示す。

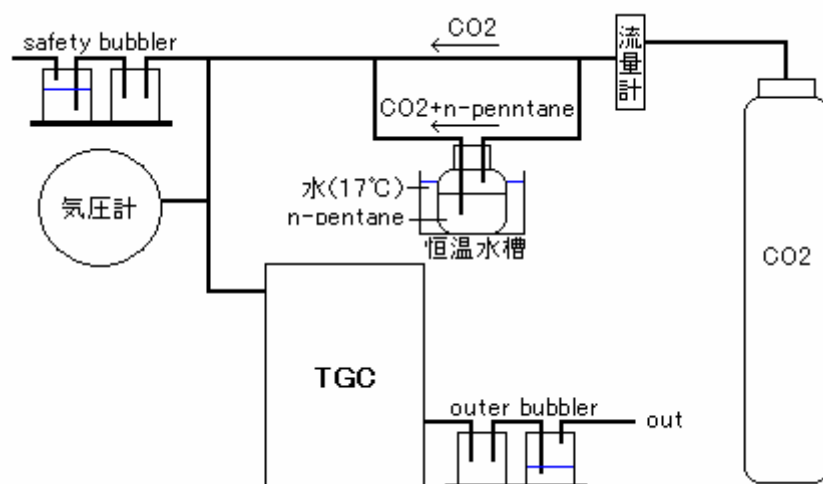


図 3-1:ガス系

今回の実験では、内部に流すガスは CO_2 のみと $\text{CO}_2+\text{n-pentane}(\text{C}_5\text{H}_{12})$ の二種類を使用する。 CO_2 ガスを使用する理由としては、電離によって電子が生成されたとき他のガス分子に吸収され検出効率が下がるのを防ぐため電子親和力が低いガスを用いなければならないことによる。また、 n-pentane を用いる理由としては、

- ・ 粒子が入射したときに励起されたガス分子が基底状態に戻るときに放出される紫外線を吸収させる。
- ・ 2種類のガスの混合によって増幅率が増大する。(荷電粒子との相互作用により励起状態へと移行したガス分子 A が他のガス分子 B との衝突の際に、A の励起ポテンシャルが B のイオン化エネルギーより高ければ B の分子が電離し、電子が放出され電子数が増大する)

n-pentane は常温で液体であるため、 CO_2 との混合はバブリング法を用いる。混合時の温度を 17 に保つことにより、蒸気圧の関係から CO_2 と n-pentane の混合比を 55:45 にする。また混合後は n-pentane が再び液化するのを防ぐため、ガスのパイプに沿って約 20 の水の流れるパイプを設置し、周囲に保温材を巻いておく。

3.2 読み出し

今回読み出しで使用したモジュールは大きく分けて NIM と CAMAC の 2 種類がある。NIM は Nuclear Instrument Modules の略であり、検出器の電源や AND, OR 等の論理回路、そして Discriminator 等のデジタルパルスを作るモジュールがある。NIM で作られるパルスは規格で決められており論理レベル「0」が 0[mV]、論理レベル「1」が -780[mV]となっている。CAMAC は Computer Automated Measurement and Control standard の略であり、ADC や TDC などのモジュールで電荷量や時間等のデータをコンピュータを用いて取得する為に使用する。プログラムは c 言語を用いる。今回使用したモジュールを説明しておく。

Discriminator

入力したパルスの内、電圧の波高が一定のしきい値(Threshold)を超えたときに NIM レベルのデジタルパルスを出力するモジュール。Threshold の値と出力パルスの幅を調節することができる。

Gate generator

入力されたデジタルパルスの幅や出力のタイミングを自由に調節することができるモジュール。

Fan in out

入力された複数のパルスの OR を出力するモジュール。

ADC

Analog to Digital Converter の略でゲートパルスが入力されている間に、入力されたアナログパルスを積分しその電荷量を出力するモジュール。出力は 0.25[pC]を 1count として出力し、最大で 2048count まで測定できる。ADC の測定値は基準点を 0[V]よりずらしてあるため、パルスがなくても 0 以上の値をとる(pedestal)。このため、実際のパルスの電荷量は ADC count から pedestal の値を差し引いたものとなっている。

測定時の信号の読み出し図を図 3-2 に示す。

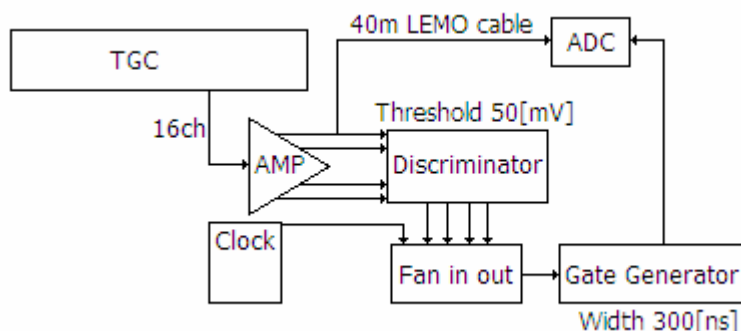


図 3-2: 読み出し系

4. Geant4 によるシミュレーション

Geant4 を使用して、TGC 内で荷電粒子が落とすエネルギー分布を調べた。今回のシミュレーションでは、エネルギー0.5[MeV]の線(電子)が厚さ2.8[mm]のチェンバー内で落とすエネルギーを CO₂ と CO₂+n-pentane それぞれについて調べた。

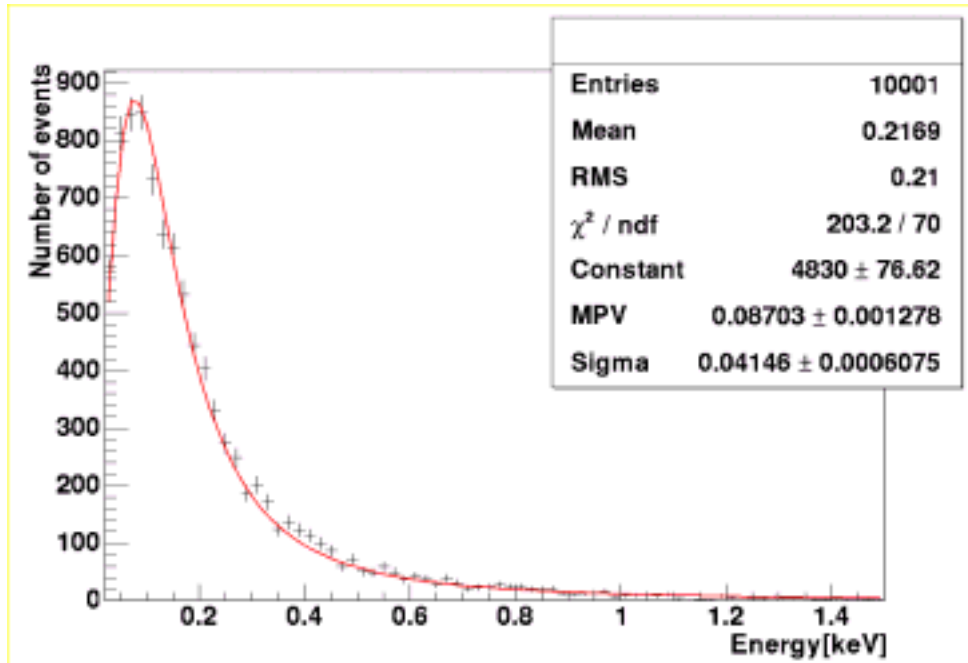


図 4-1:エネルギー分布(CO₂)

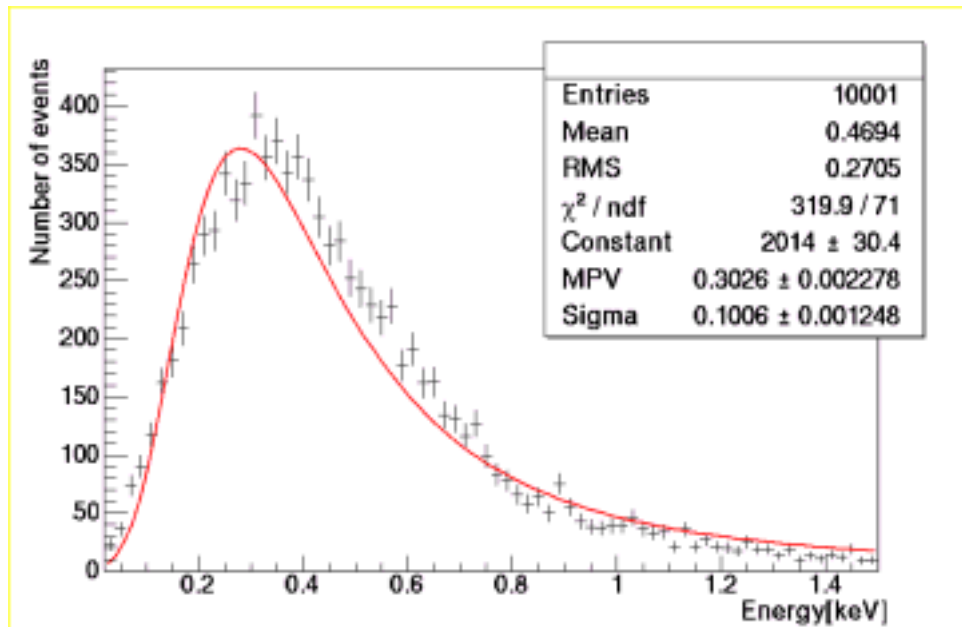


図 4-2:エネルギー分布(CO₂+n-pentane)

図中の赤線は landau 分布で fitting したものである。

粒子が十分に厚い物質層を通るとき、エネルギー損失は gauss 分布の形をしている。しかし、薄い物質層や気体中を通過する場合は粒子の衝突回数が少なくなるため gauss 分布からはエネルギー損失の低い方へ大きくずれる。この確率分布は landau 分布と呼ばれる。

ガスが変化したことによる影響としては、

- 密度が上がったため、粒子の衝突回数が多くなり TGC 内に落とすエネルギー量が増えたためピーク値が移動した。
- 密度が上がったため、エネルギー損失の変動が大きくなり分布の幅が広がった。

CO₂と CO₂+n-pentane の間で分布のピーク MPV と幅 Sigma のそれぞれの比は、

	(CO ₂):(CO ₂ +n-pentane)
MPV	87:303
Sigma	41:101

次に、測定器を 1.8mm 間隔の 3 本の strip に分割し一つの strip に粒子が入射した際の両隣の strip に落とすエネルギーを測定した。一つの strip に粒子が入射した場合に周囲の strip にエネルギーを落とす割合を図 4-3,4-4 に示す。

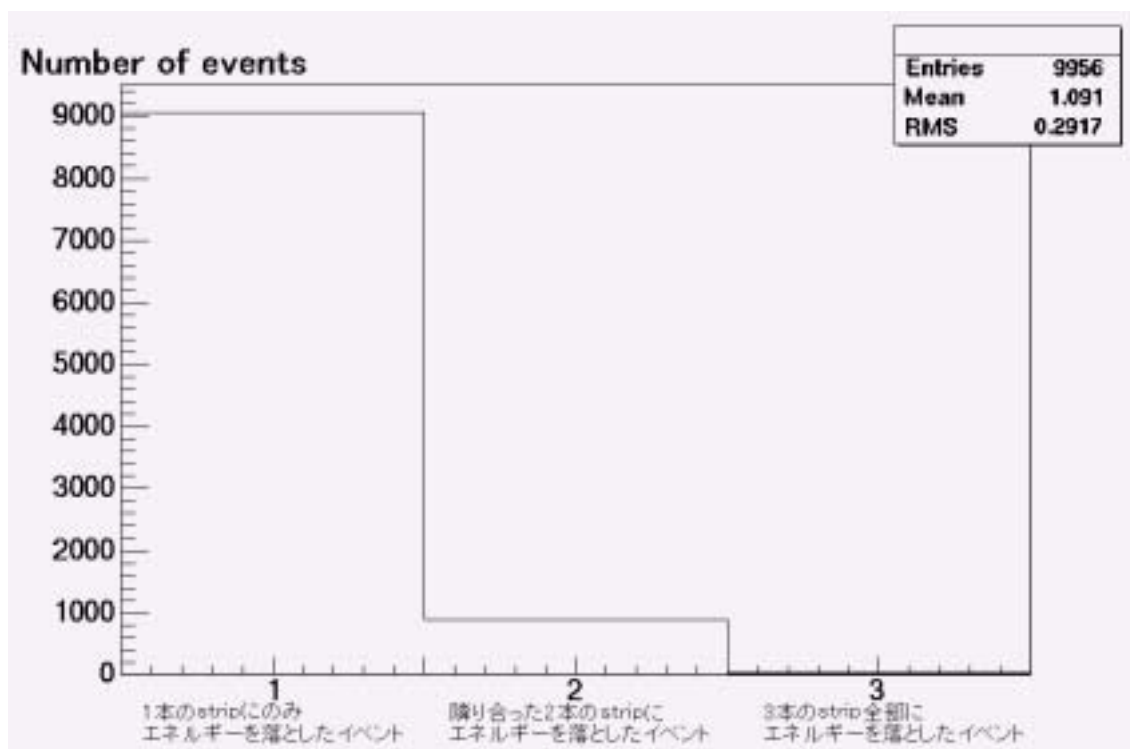


図 4-3:3 本の strip にエネルギーを落とす割合 1

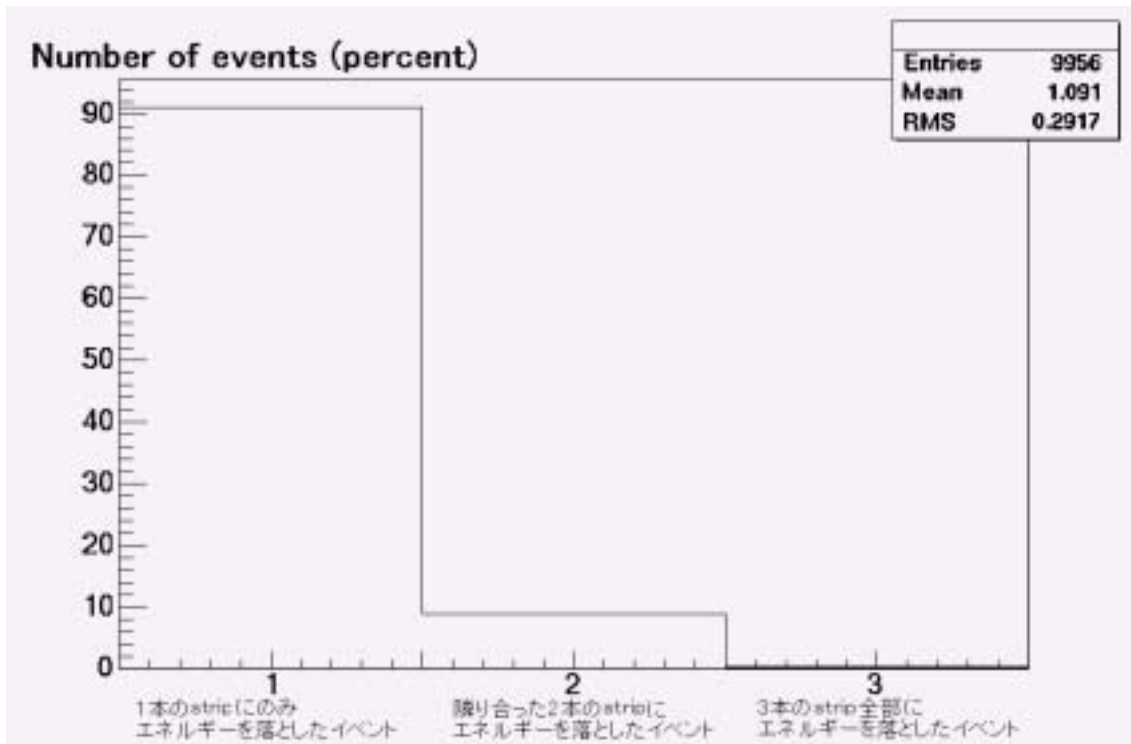


図 4-4:3 本の strip にエネルギーを落とす割合 2

図 4-4 は図 4-3 を 100 で normalize したもので、縦軸がパーセントを表している。図 4-4 より隣り合った 2 本の strip にエネルギーを落とすイベントは全体の約 8.9%、3 本全部に落とすイベントは 0.1%程度であった。

5. 実験

5.1 各チャンネルの計数率

2台のTGCそれぞれについてH.V2.8[kV]での各ワイヤーの計数率を測定する。線源は使用せず、CO₂ガスのみを使用しそれぞれ10分間測定をおこなった。

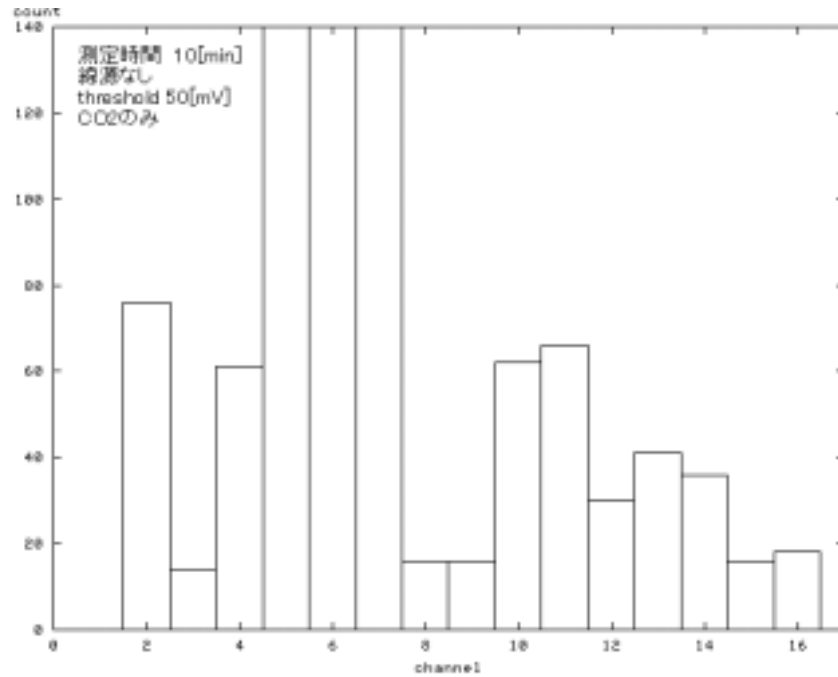


図 5-1:TGC1 の計数率

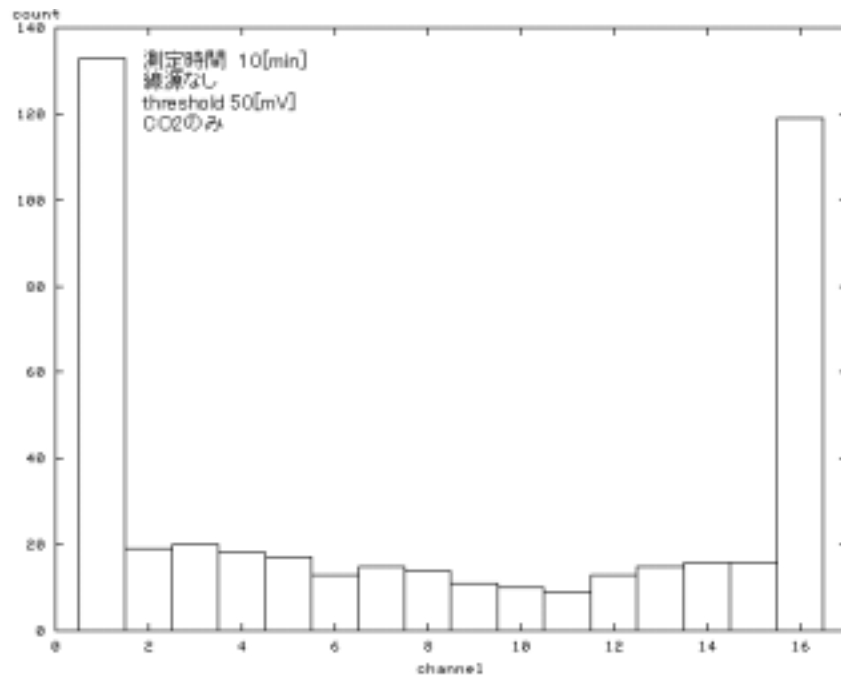


図 5-2:TGC2 の計数率

TGC1 については、それぞれのワイヤーについて計数率に大きな差ができています。特に 5, 6, 7ch については 1000 カウント付近まで計数率が上がってしまいノイズが非常に多かった。このノイズの原因については、外部からの影響であれば全てのワイヤーにノイズが混入するはずであり、またアンプを交換後もほとんど同じ挙動を示したことから、TGC 内部に原因があると思われるが、詳しい原因は不明である。

TGC2 については、端のワイヤーを除いてほぼ一様に 10 ~ 16 の値を示している。宇宙線が単位面積あたり 1 分間に 1 個の割合で降ってくると仮定した場合 10 分間あたりの計数率は 14.4 個と予測され、端のワイヤー以外はほぼ予測値と一致している。両端のワイヤー (1, 16ch) の計数率が高くなる原因として、次の理由が考えられる。

1. 端のワイヤーの外側の空間が内側に比べて約 15mm と大きく空いているため、他の内側にあるワイヤーに比べて多くの粒子を捕らえる。
2. 内側にあるワイヤーは両側のワイヤーから電場を受けるが、端のワイヤーは片側からしか電場を受けず電場の強さが内側に比べ大きくなるためガス増幅の割合が変化しパルスが大きくなり感度が上がる。

両端のワイヤーについても予測値を計算すると 127.2 個となる。TGC2 の 1, 16ch の計数率は 132count と 118count であり、両端のワイヤーに関しても予測値と一致していると思われる。

TGC1 はノイズが多いため、以下の実験では TGC2 を使って実験をおこなった。

5.2 H.V カーブ

CO₂ ガスのみで 線源を使用し、各ワイヤーについて印加電圧を変化させて一分間あたりのパルス数を計測した。

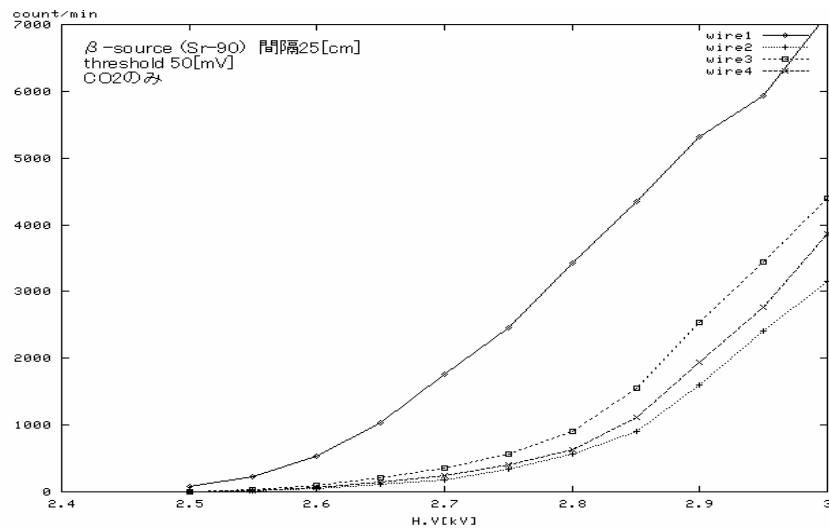


図 5-3:1 ~ 4ch の H.V カーブ (CO₂)

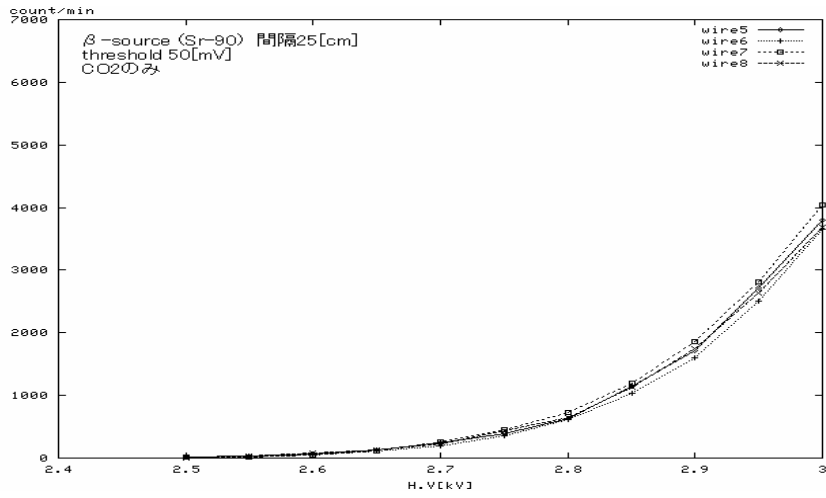


図 5-4:5 ~ 8ch の H.V カーブ (CO₂)

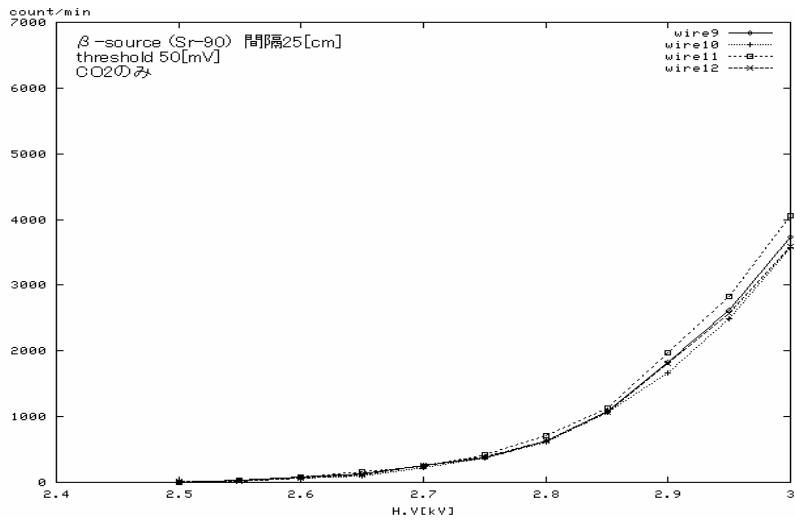


図 5-4:9 ~ 12ch の H.V カーブ (CO₂)

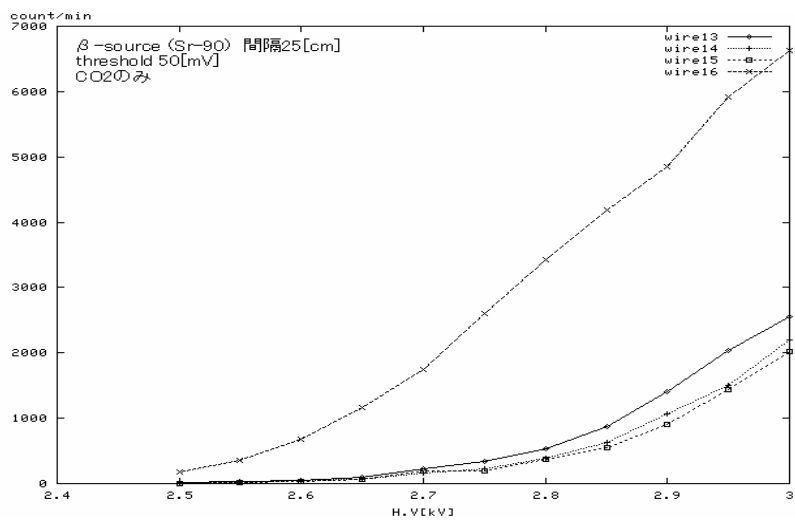


図 5-5:13 ~ 16ch の H.V カーブ (CO₂)

端のワイヤー以外は曲線はほぼ同じ形状であるが全体的に外側から内側にかけて計数率が上がっている。この実験で使用した TGC は中心に直径3cm程度の薄い部分があるために TGC 内部に侵入する 線の数が多いためである。

3.0[kV]以下ではプラトーは見られなかった。H.Vを3.0[kV]以上にするTGC内部で放電が始まってしまい計測はできなかった。

次に 線源(Am-241)、 線源(Na-22)を使用して H.V カーブを測定し、それぞれ比較する。

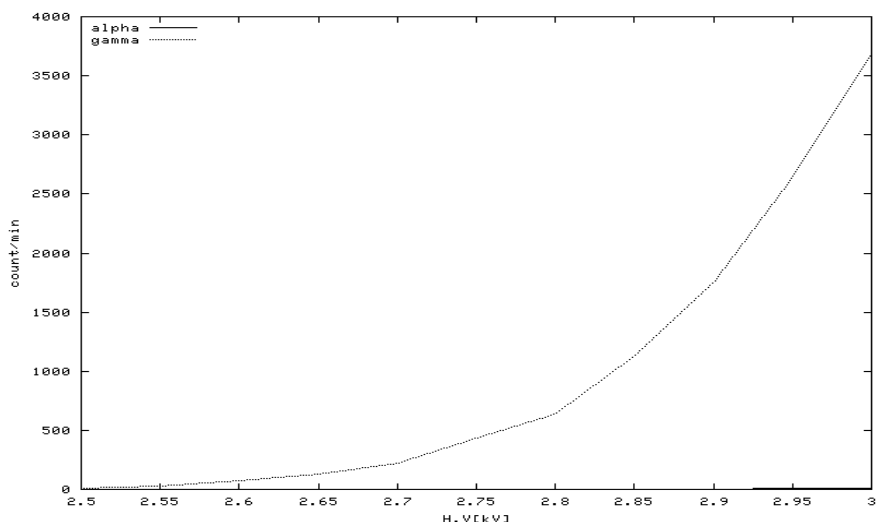


図 5-6: , 線の H.V カーブ(CO₂)

線は途中で停止してしまうものが多く、ほとんど計測できなかった。、線は計数率の差以外の違いは見られなかった。

次に CO₂+n-pentane で 線源を使用して各ワイヤーについて H.V カーブを計測する。

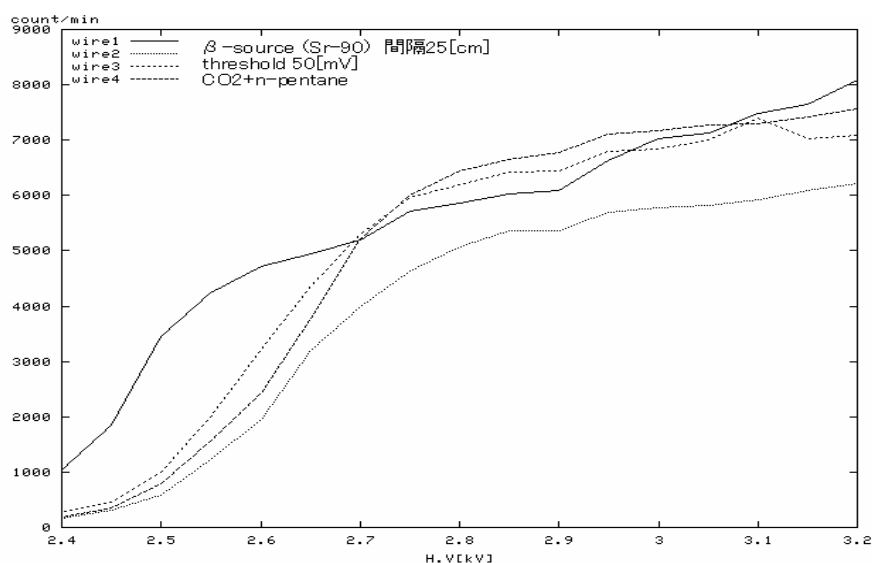


図 5-7:1 ~ 4ch の H.V カーブ(CO₂+n-pentane)

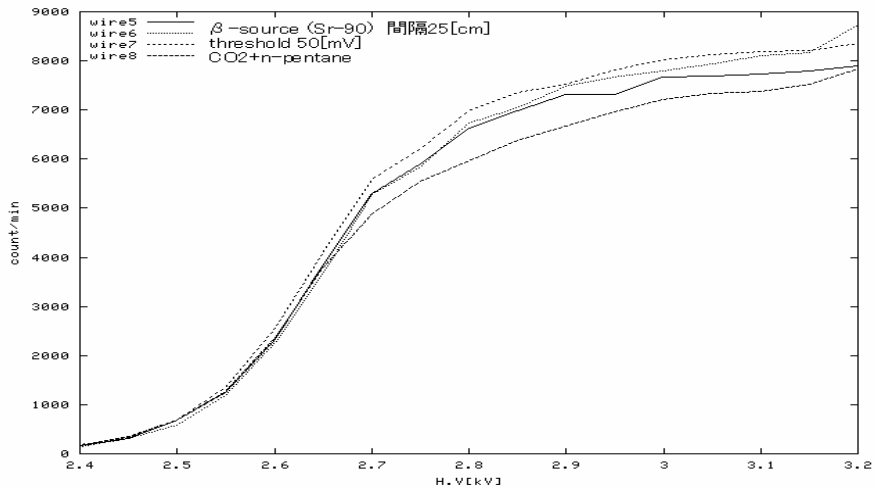


図 5-8:5 ~ 9ch の H.V カーブ (CO₂+n-pentane)

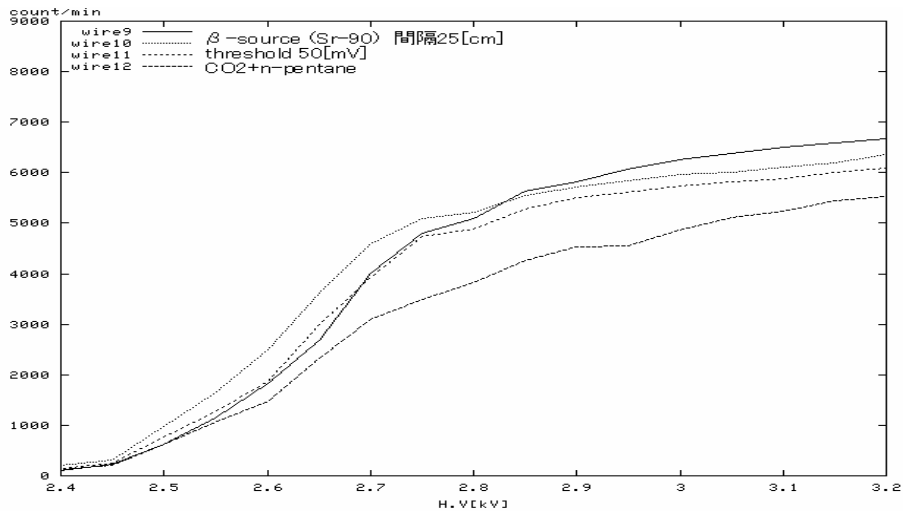


図 5-9:10 ~ 12ch の H.V カーブ (CO₂+n-pentane)

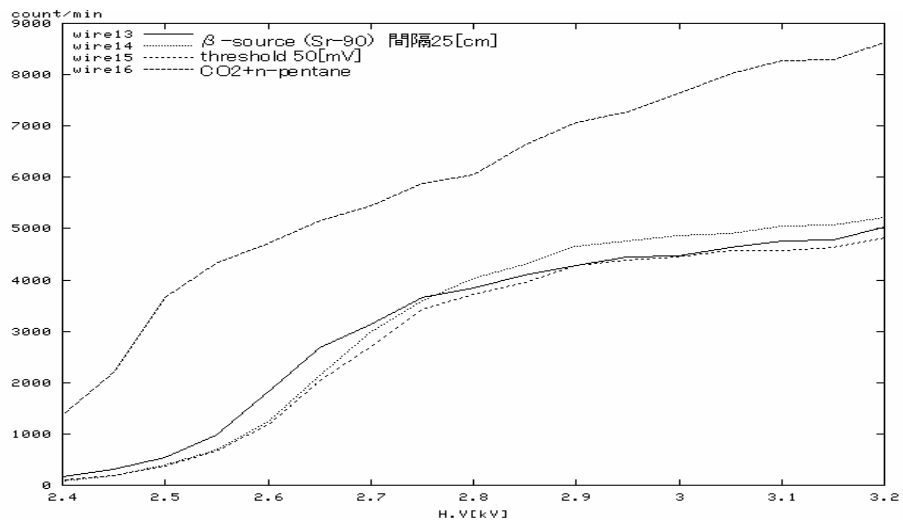


図 5-10:13 ~ 16ch の H.V カーブ (CO₂+n-pentane)

n-pentane を加えたことによりガス増幅率が大きくなったため、TGC の感度が上がり H.V カーブが電圧の低い方へずれプラトーが出てくる。H.V 自体は 3.8[kV]あたりまでかけることができる。

次に、線に関して同様に混合ガスでの H.V カーブを測定する。

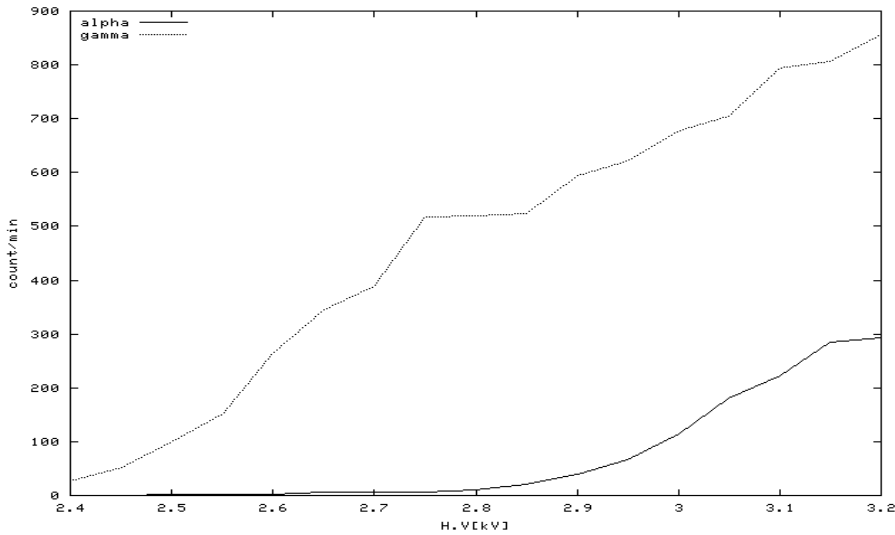


図 5-11: 線の H.V カーブ (CO₂+n-pentane)

5.3 ADC 分布

今まで使っていたチェンバーが急に電圧がかからなくなったため(電圧をかけるとすぐに電流が流れ始め current limit を超えてしまう。詳しくは付録 参照)、ここからは別のチェンバーを使用する。

8ch を使って、4 本のワイヤーの OR を取ったものをゲートとして CO₂ ガスのみと CO₂+n-pentane それぞれの ADC 分布を測定する。H.V は 2.9[kV]線源は TGC から 25[cm] の位置に設置した。

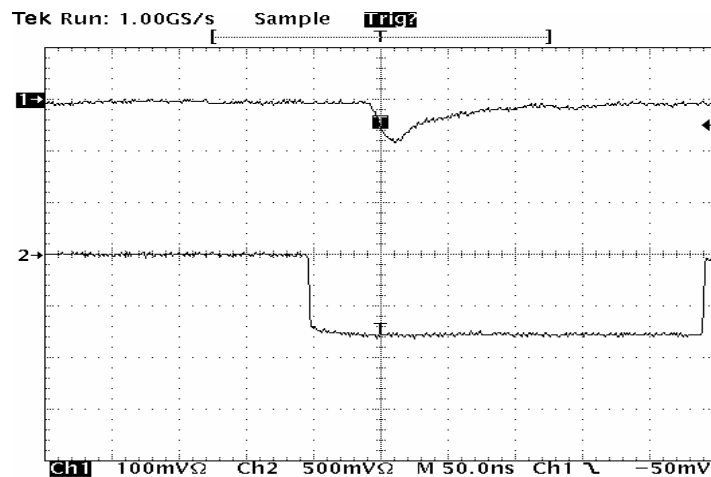


図 5-12:ADC 測定時のパルスとゲート

使用した線源はSr-90,Na-22の2種類。Fe-55は反応がなく測定不可能だった。2枚目の図は1枚目の図の pedestal と overflow をカットして landau 分布でフィッティングしたもの。

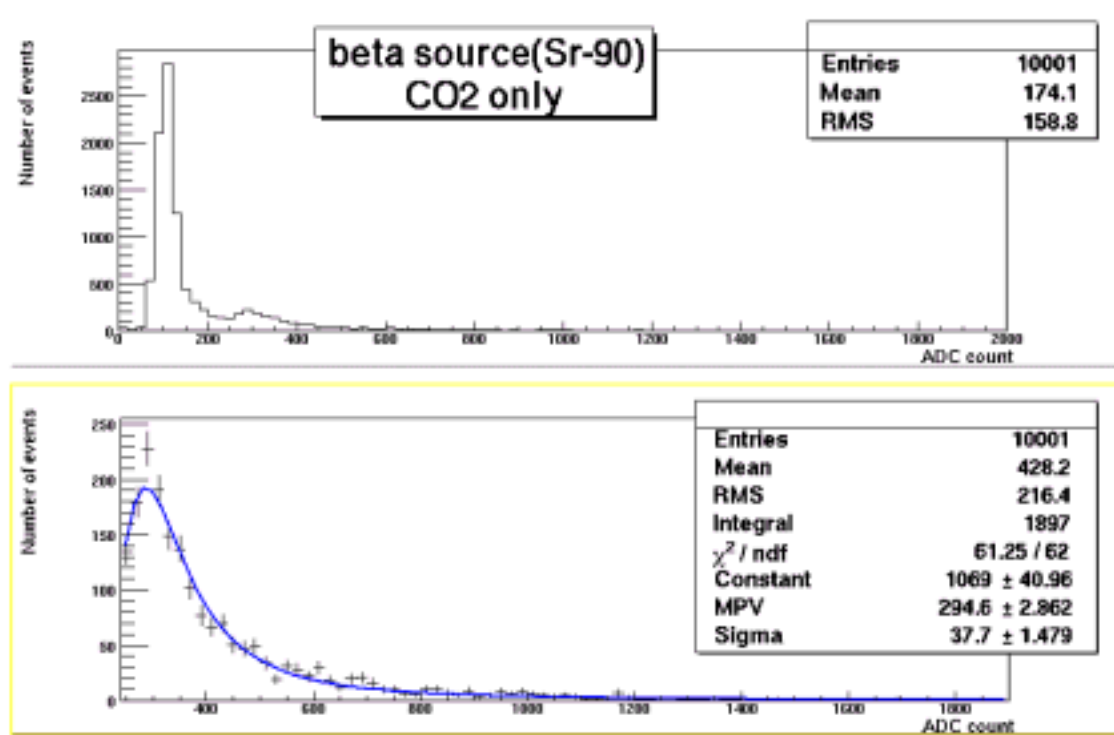


図 5-13: 線の ADC 分布(CO₂)

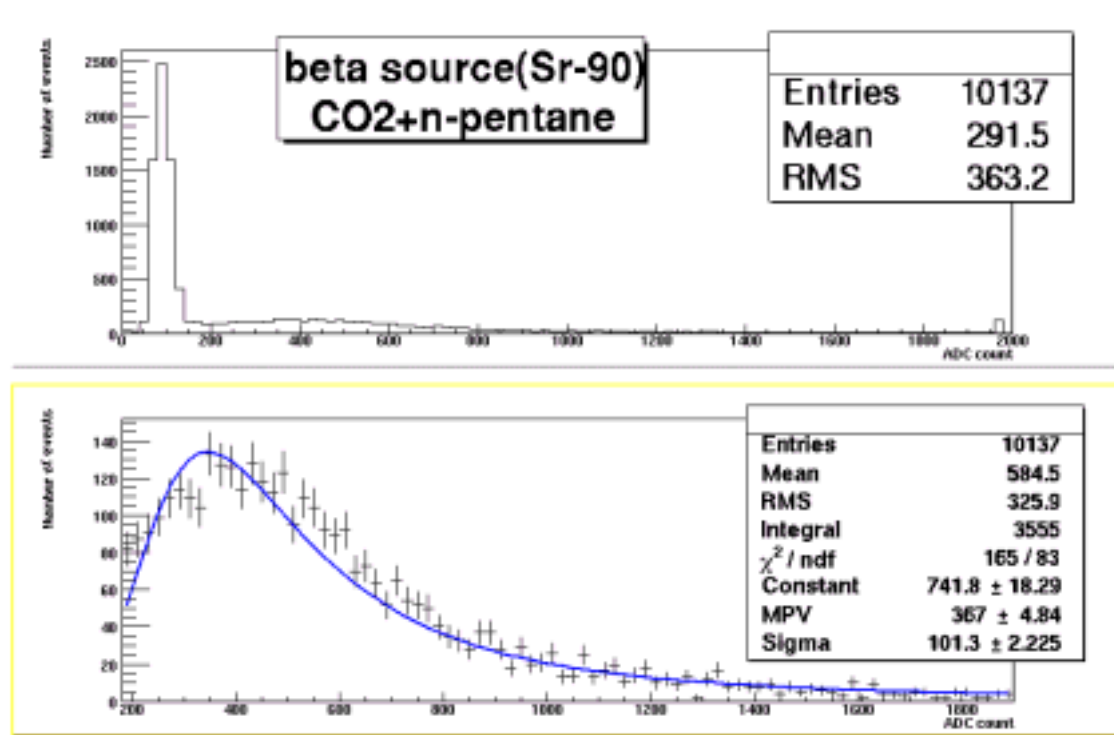


図 5-14: 線の ADC 分布(CO₂+n-pentane)

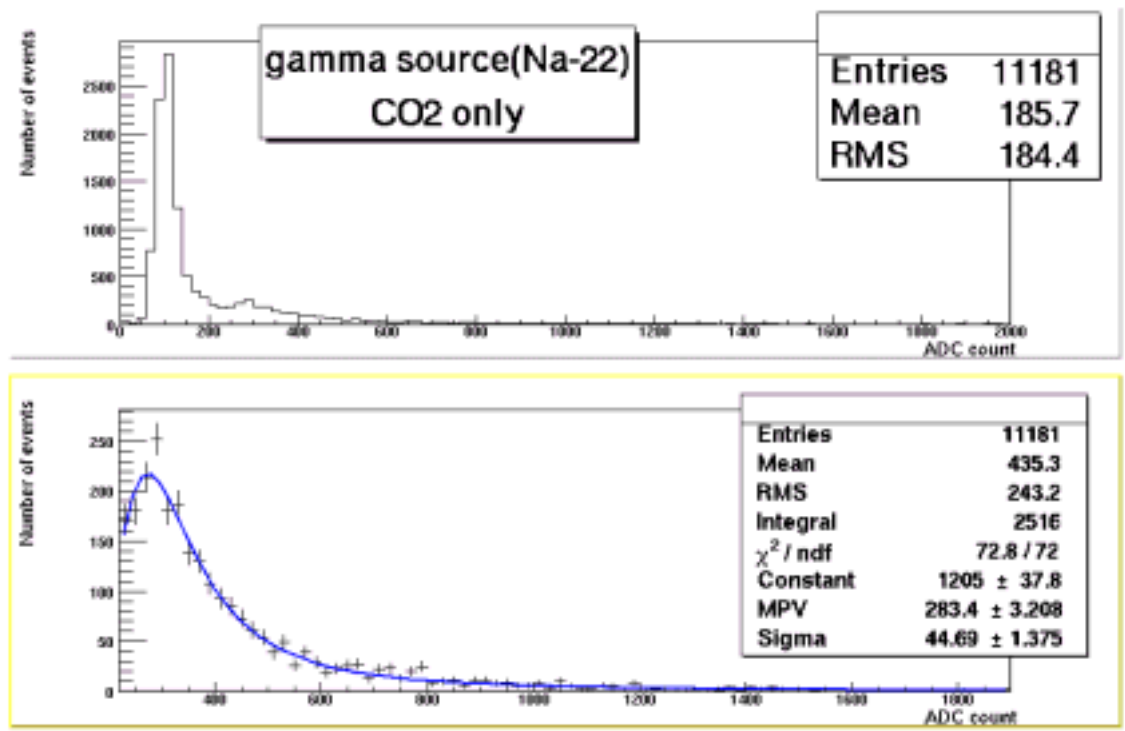


図 5-15: 線の ADC 分布(CO₂)

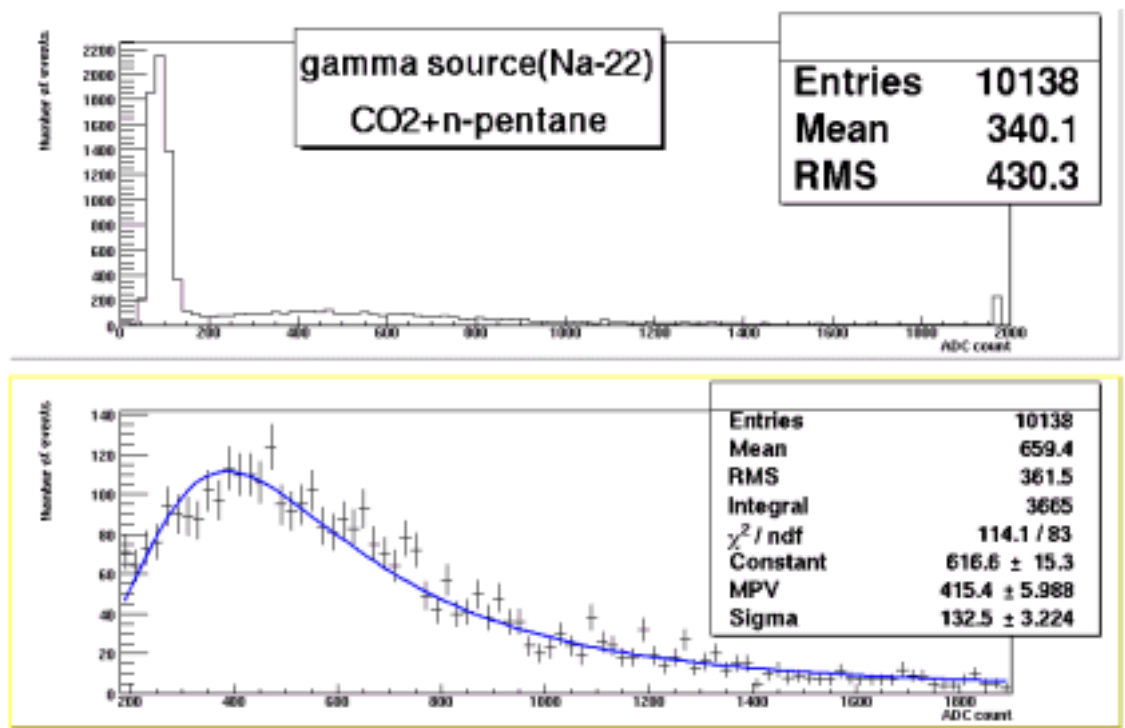


図 5-16: 線の ADC 分布(CO₂+n-pentane)

、線ともシミュレーションの場合と同様に CO₂ に比べ CO₂+n-pentane のほうが分布のピークがエネルギー損失の高いほうへ移動し、また分布の幅が広がっている。線について

CO₂とCO₂+n-pentaneの間で分布のピークMPVと幅Sigmaのそれぞれの比は、

	(CO ₂):(CO ₂ +n-pentane)
MPV	188:274
Sigma	38:101

5.4 クロストーク

8chのワイヤーに注目して、荷電粒子が通過したときの周囲のワイヤーへ与える影響(クロストーク)について測定した。

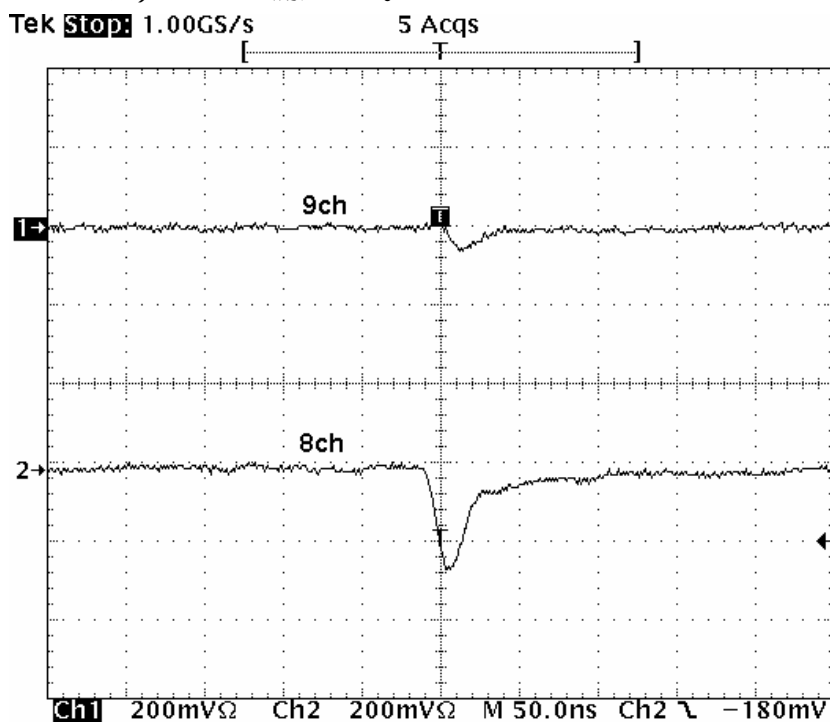


図 5-17:8ch 付近を粒子が通過したときの 9ch の挙動

9chのクロストークは8chのパルスが観測されてから、10~50[ns]遅れて観測される。

以下の測定では放射線源に 線源 Sr-90 を使用し、TGC 内部に CO₂ ガスを流した状態で測定をおこなった。

始めに 8ch をゲートとして 6,7,8,9,10ch で観測されるパルスの ADC を測定し、それぞれのワイヤーと 8ch との相関を調べた

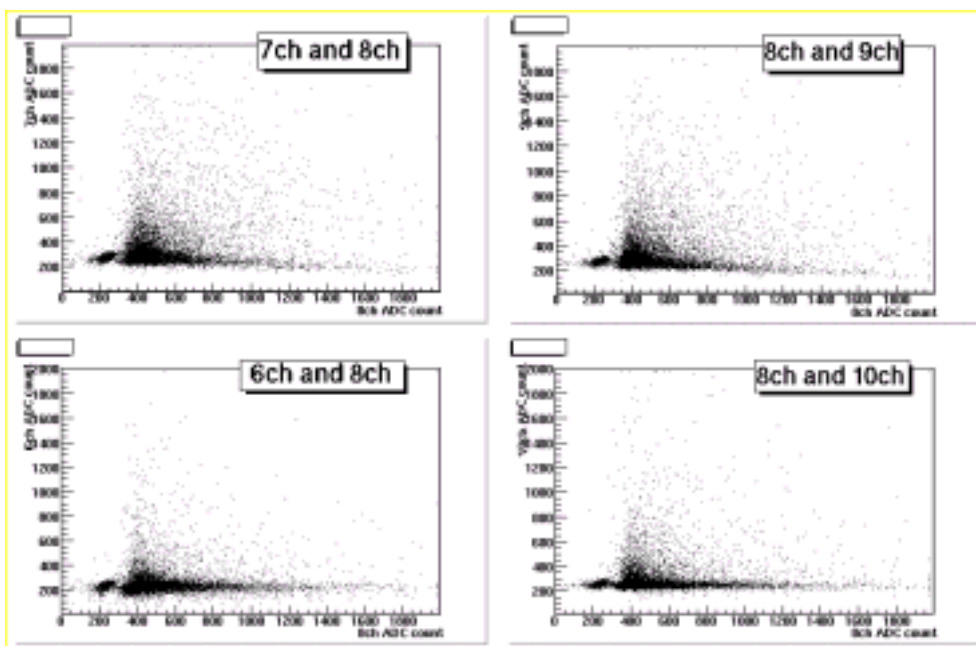


図 5-18:8ch と 6,7,9,10ch の相関

各チャンネルとも 8ch との間に強い相関は見られなかった。次に 7,8,9ch に注目して、350count を threshold としてそれ以上の値をもったイベントを反応があったと考え選別する。まず各チャンネルに反応があったイベントの割合を示す。

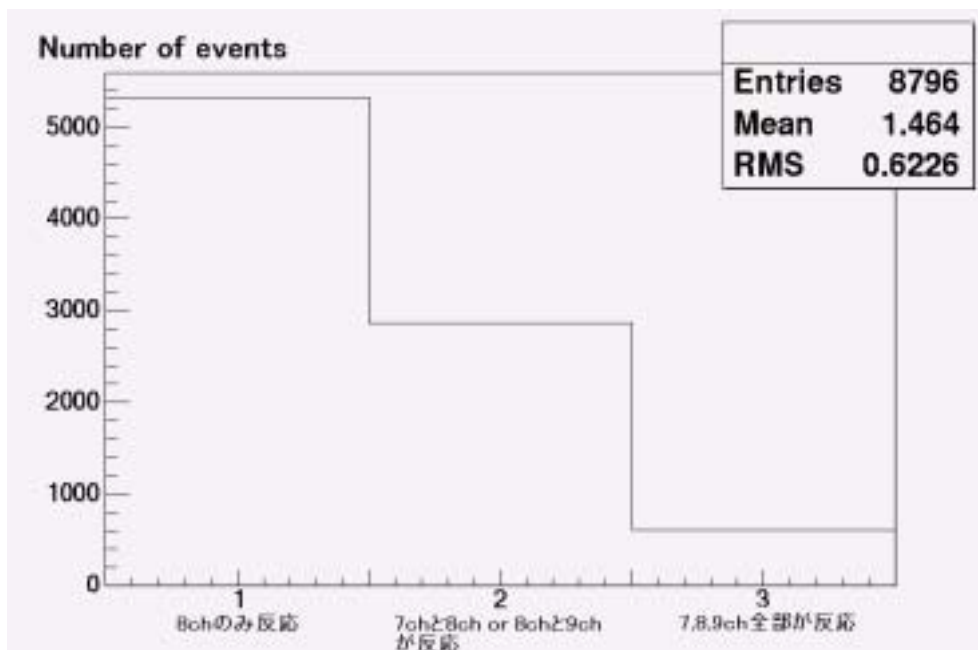


図 5-19:7 ~ 9ch で threshold を超えたイベントの割合 1

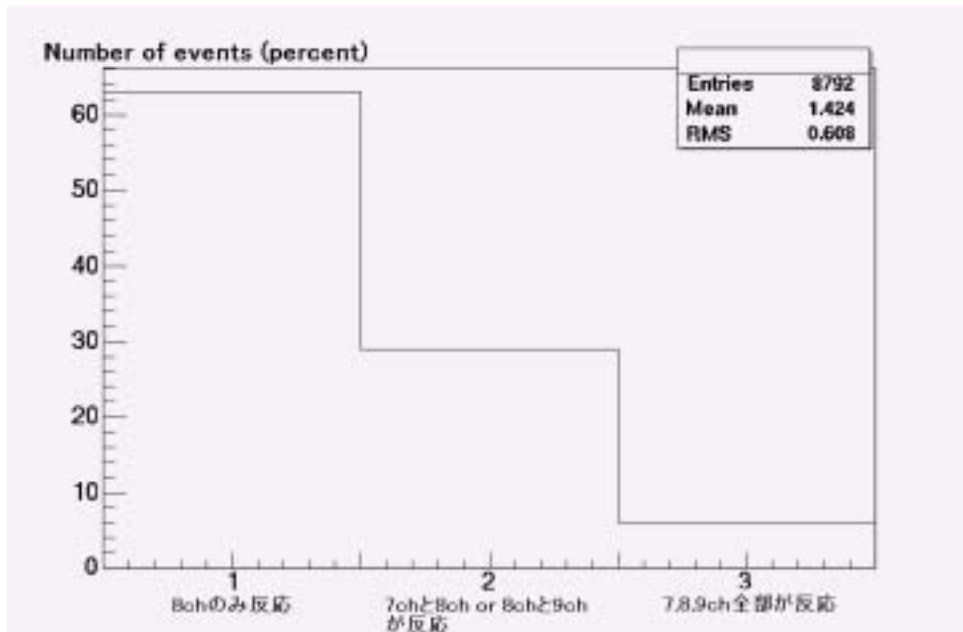


図 5-20:7~9ch で threshold を超えたイベントの割合 2

図 5-19,5-20 のヒストグラムで、1 のピンが 8ch のみに反応があったイベント、2 のピンが 7,8ch または 8,9ch が反応したイベント、3 のピンが 7,8,9ch 全部が反応したイベントを表している。また図 5-20 は図 5-19 を 100 で normalize したもので、縦軸がパーセントを表している。

次に 7,9ch の相関関係を見てみる。

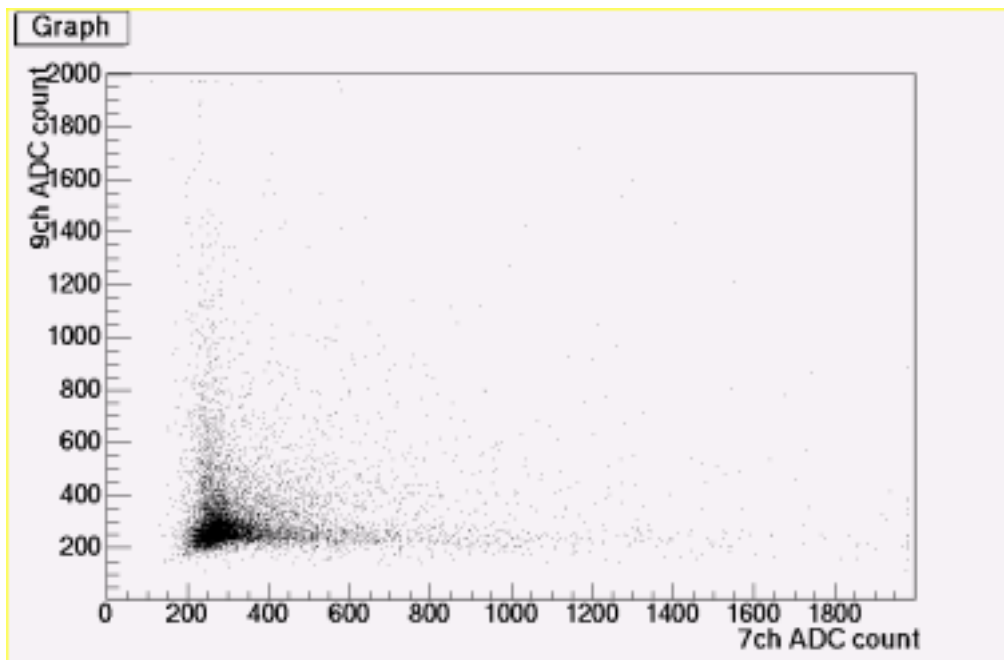


図 5-21:7ch と 9ch の相関 (選別前)

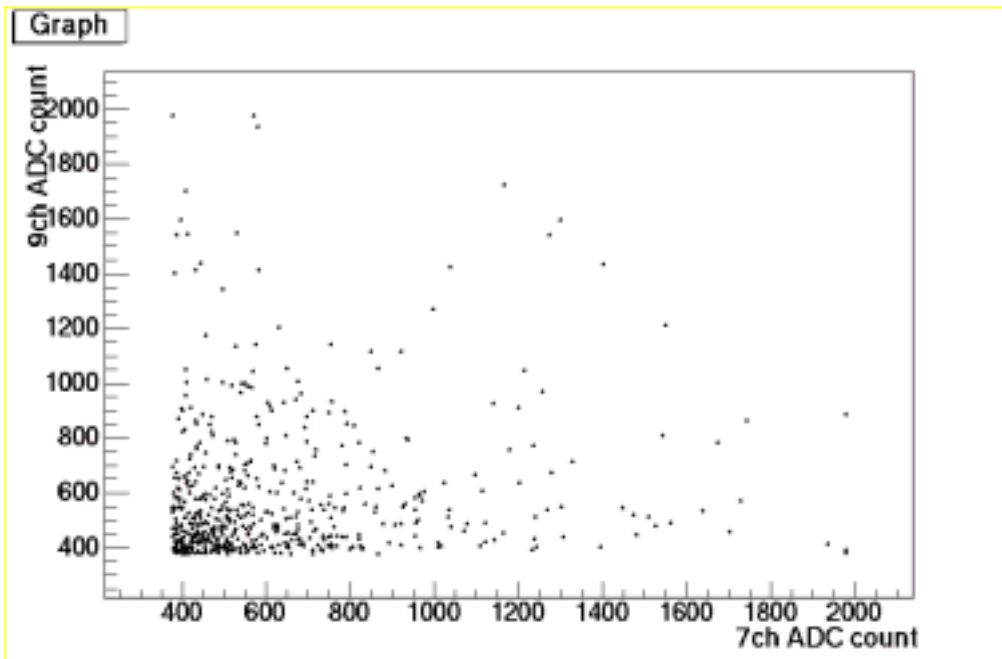


図 5-22:7ch と 9ch の相関 (選別後)

図 5-21 が全イベントの相関図で、図 5-22 が 7,8,9ch とともに反応があったイベントを選別後の相関図を表している。

次に TDC を使用して、7,8,9ch の中で 8ch に一番早く反応があったイベントの選び、粒子が 8ch 付近を通過したときのイベントを選別した。

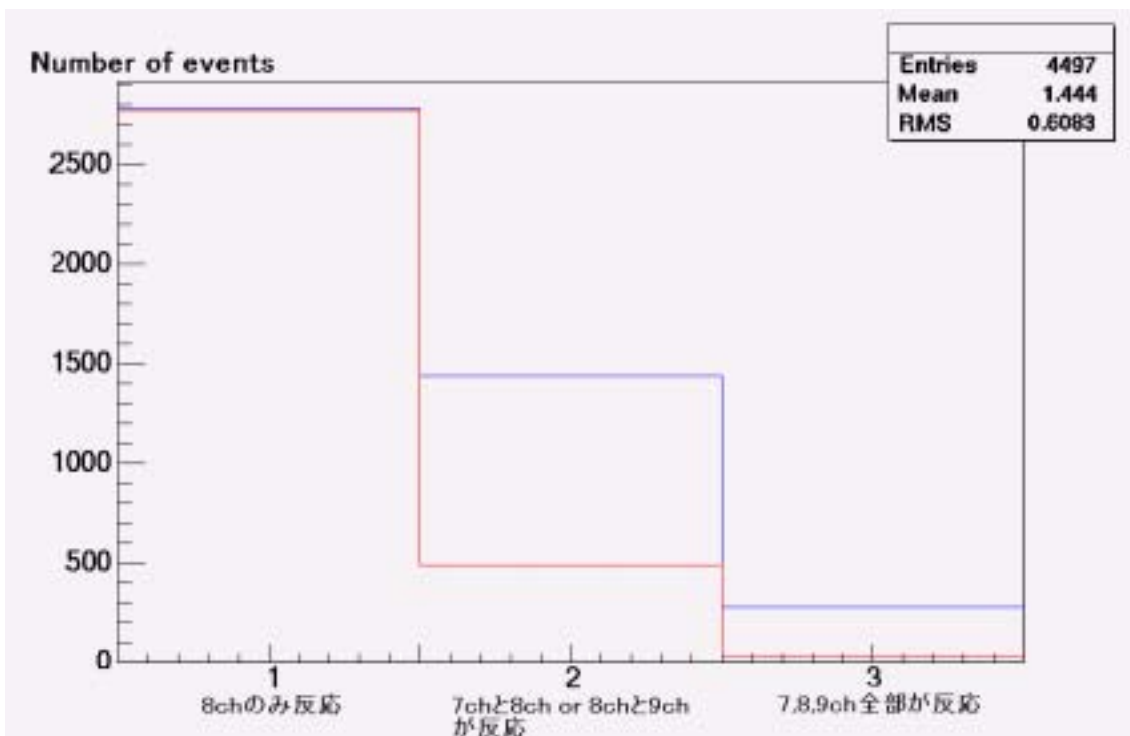


図 5-23: 7~9ch で threshold を超えたイベントの割合 3

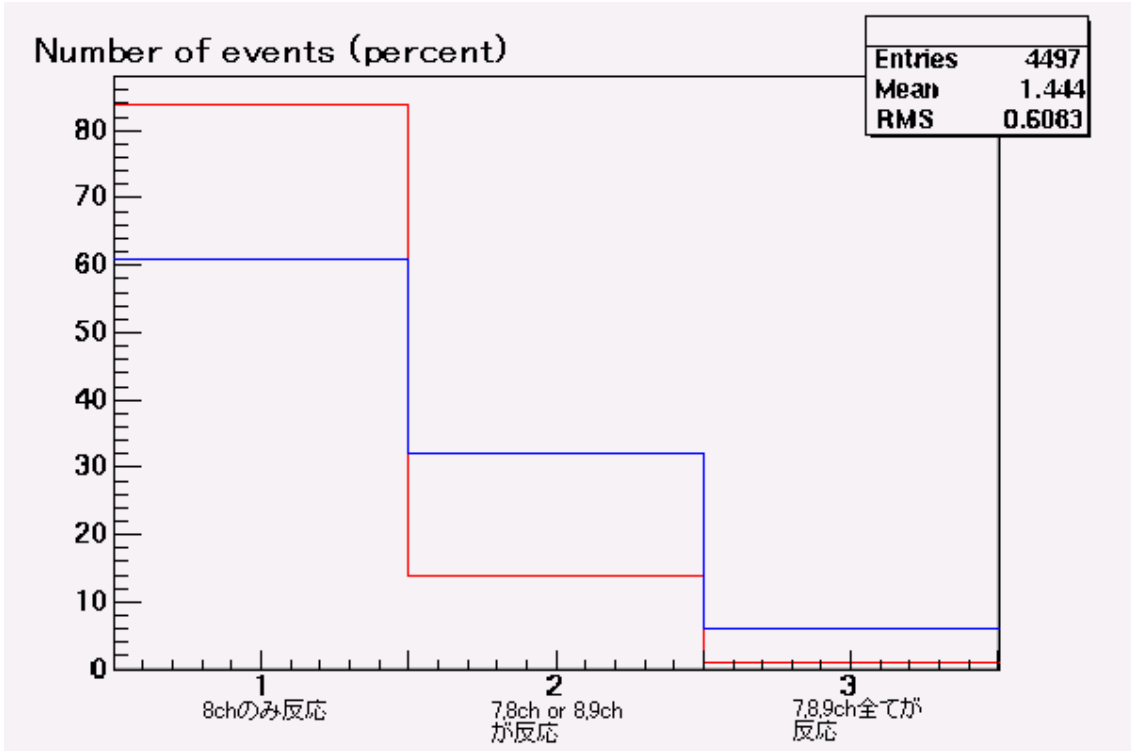


図 5-24: 7~9ch で threshold を超えたイベントの割合 4

図 5-22、5-23 で赤線のヒストグラムは青線のヒストグラムの内 8ch が一番早く反応したイベントを選別したものである。

次に 6~10ch についても同様に反応があったイベントの割合を示す。

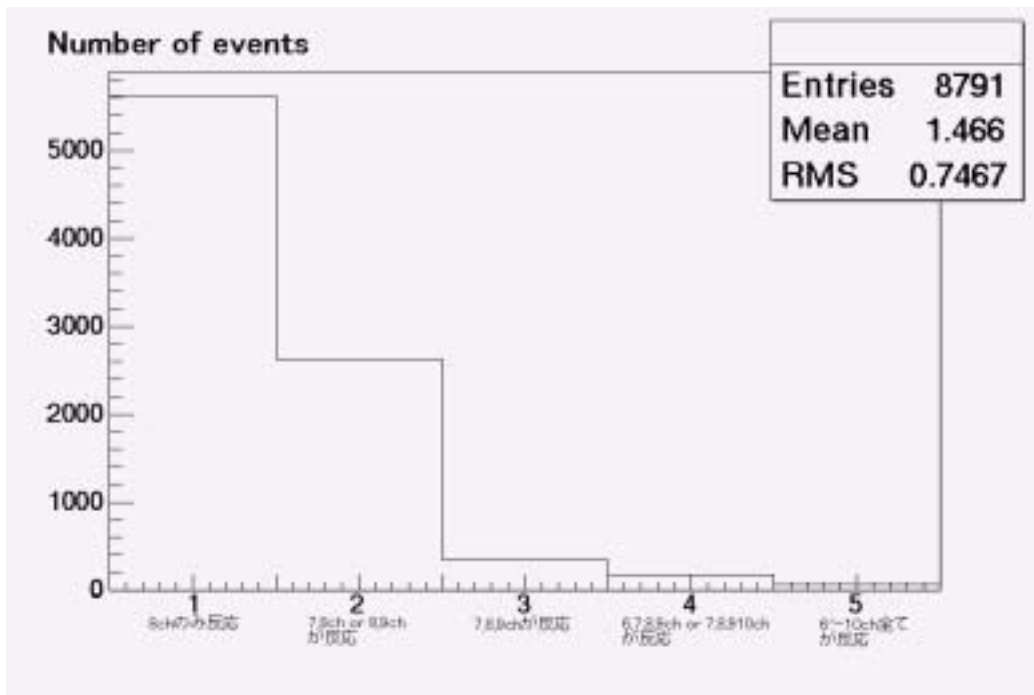


図 5-25:6~10ch で threshold を超えたイベントの割合 1

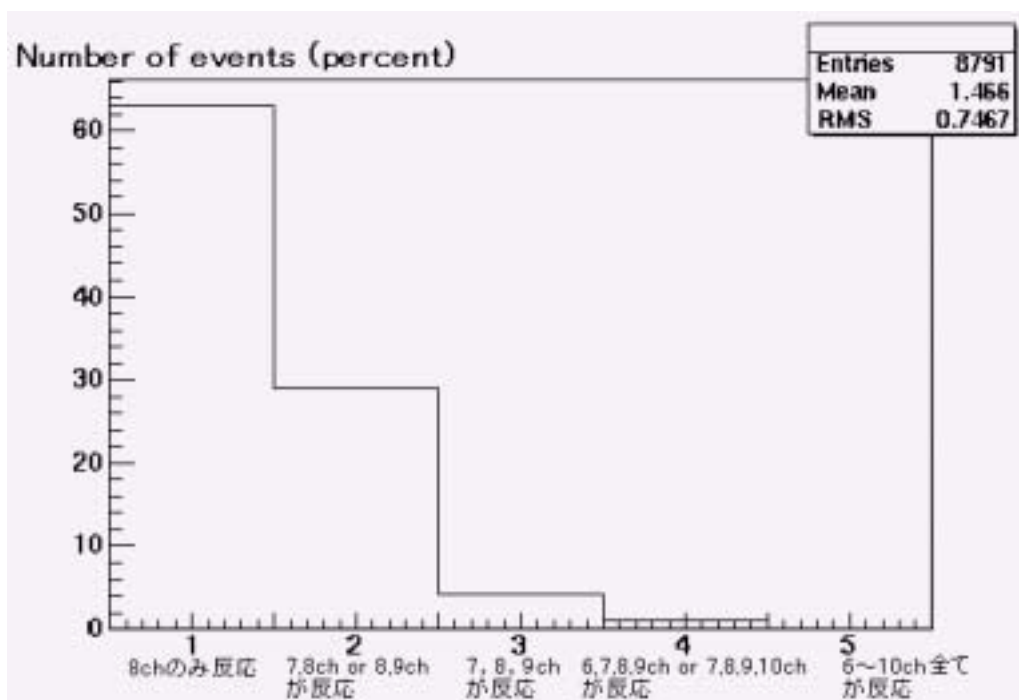


図 5-26: 6~10ch で threshold を超えたイベントの割合 2

1~3までのピンは前の図と同じで、4のピンは6~9chまたは7~10chに反応があったイベント、5のピンは6~10ch 全てに反応がイベントとなっている。また図 5-24 は図 5-23 を 100 で normalize したもので、縦軸がパーセントを表している。

続いて、このときの6,10chの相関図を示す

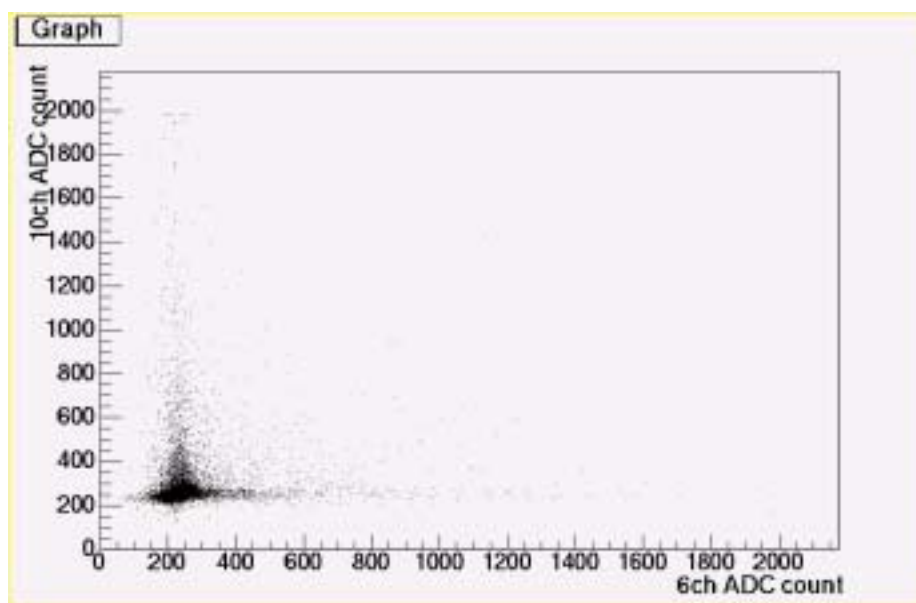


図 5-27:6ch と 10ch の相関(選別前)

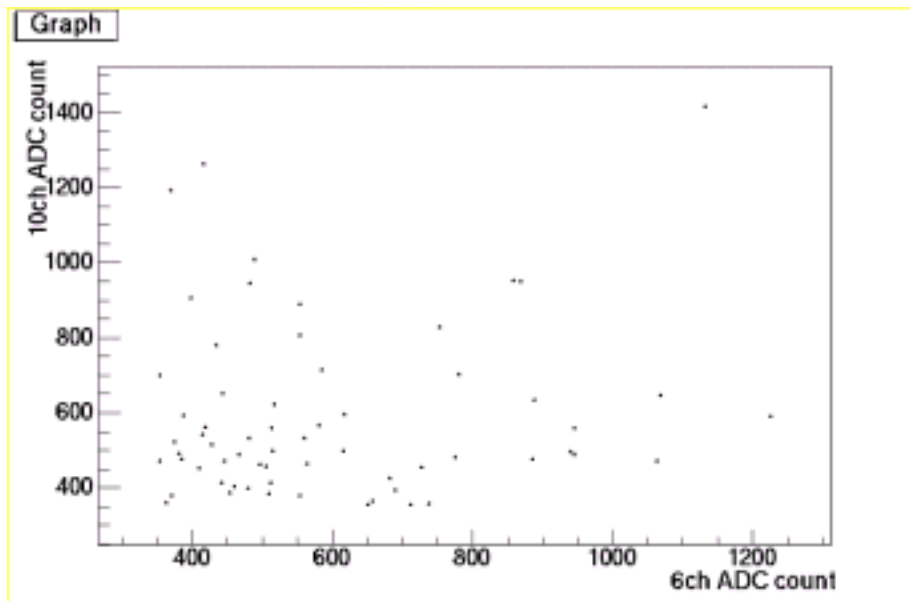


図 5-28:6ch と 10ch の相関(選別後)

図 5-25 が全イベントの相関図で、図 5-26 が 6 ~ 10ch とともに反応があったイベントを選別後の相関図を表している。

6.結果

次のような結果が得られた。

- ADC 分布は 線、線とも CO₂ のみの場合よりも CO₂+n-pentane のほうが分布のピークがエネルギー損失の大きいほうへ移動し、分布の幅が広がる。線について CO₂ と CO₂+n-pentane の間での分布のピーク値 MPV と幅 Sigma それぞれの比をシミュレーションと測定値で比較すると、

	シミュレーション	測定値
MPV	87:303	188:274
Sigma	41:101	38:101

Sigma の比はシミュレーションと測定値でほぼ一致しているが、MPV の比は大きくずれてしまった。

- 7,9ch、6,10ch とともに threshold を超えたイベントに強い相関は見られない。
- 7,8,9 の3つのチャンネルが反応するイベントは全体の6%程度
- 4つ以上のチャンネルが反応するイベントは全体の1%以下となっている。
- 隣り合った二つのチャンネルが反応するイベントが全体の約30%と他に比べ非常に多くなっている。

7.考察

今回の測定では、2つのチャンネルが同時に反応したと思われるイベントが全体の約30%と非常に多くなっている。この原因として考えられるのは、

- I. 荷電粒子とガス分子の衝突時、高エネルギーの電子(線)が生成され隣のワイヤー付近まで飛んでしまう。
- II. 荷電粒子が入射時に斜めに入射したために内部で生成された電子が2本のワイヤーにひかれてしまう。

実験では、放射線源を TGC から 25cm の位置におき測定をおこなったので、II の原因による影響は低いと思われる。

図 5-23 より 8ch 付近に線が入射したときに 7ch、9ch でパルスが観測される割合は約14%であった。図 4-4 よりシミュレーションで一つのワイヤー領域に電子が入射したとき、隣のワイヤー領域まで飛んでしまう線の発生率を測定すると約8.9%であり、実験値のほうが発生率が大きくなってしまったので、上記の二つ以外の原因があるのかもしれない。

また、3本のワイヤーが同時に反応するイベントが5%近くある。この原因としては粒子の通過により生成された電子によって付近のワイヤーに電荷が誘起されたのではないと思われるが、詳しい理由はわからない。4本以上のワイヤーが反応するイベントは1%以下であり、ノイズが原因だと考えられる。

8.謝辞

本研究にあたり、適切な指導をして頂いた竹下徹教授に深く感謝致します。また多くの助言、指導をして頂いた研究員の宮崎由之氏に深く感謝いたします。最後に実験器具の使用方法等をご助言いただいた D1 の中川義徳に厚く御礼申し上げます。

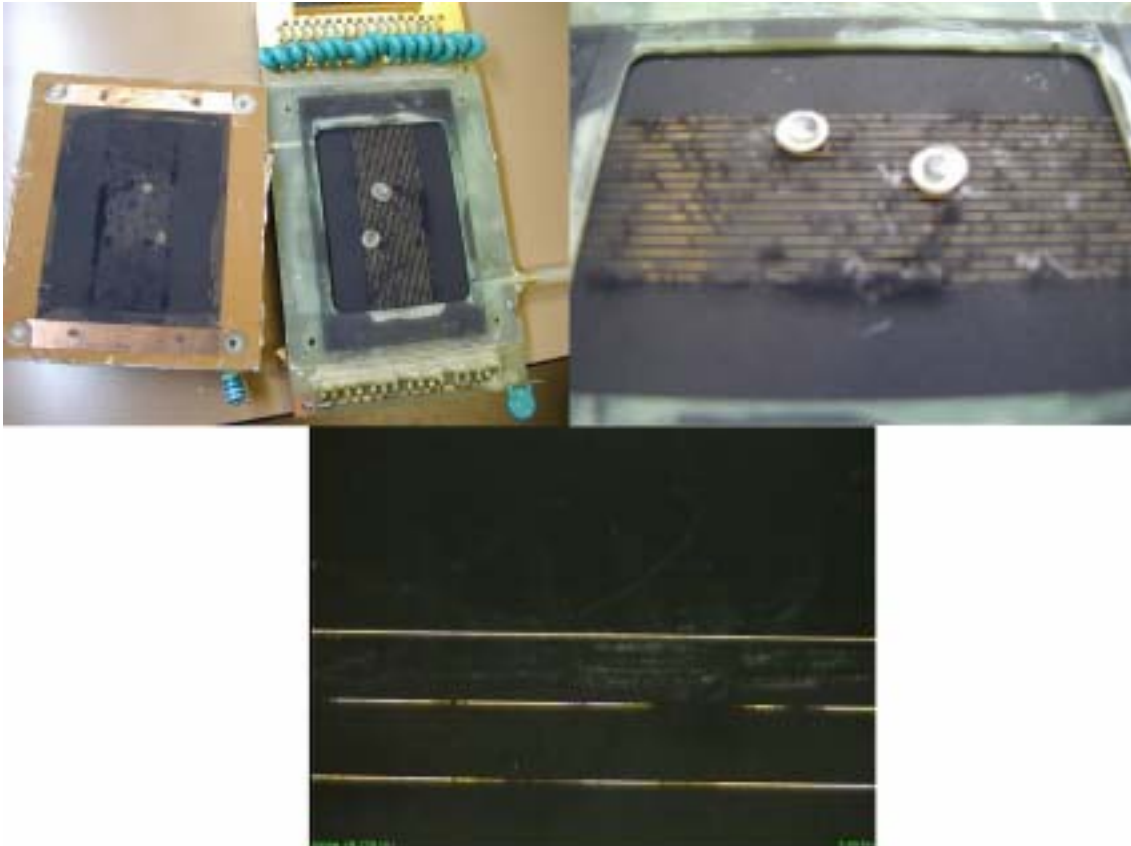
参考文献

- [1]江成祐二 信州大学・卒業論文
「Thin Gap Chamber のボタン型サポートによる影響について」
- [2]中川義徳 信州大学・卒業論文
「Thin Gap Chamber に於ける端ワイヤーの特性について」
- [3]水橋徹 信州大学・卒業論文
「Thin Gap Chamber の ceramic carbon support による signal への影響」
- [4] 三浦功, 菅浩一, 俣野恒夫 ; 著 裳華房
「放射線計測学」
- [5] 福井崇時 ; 著 共立出版
「粒子物理計測学入門」

付録

今回の実験で、使用した TGC の一つが途中で使用不可能になってしまった。H.V をあげていくと電流が流れ始めてしまうので、何らかの理由により短絡したのではないかと思われる。実際にテスターを使って調べてみたところ、TGC の電源部分とグラウンドの間の抵抗値が本来ならば になるはずであるが、70[k Ω]程度の値が見えた。

そこで、TGC を解体してみて内部で何が起きているかを調べた。



一番端のワイヤーにカーボンが付着している。おそらくここで放電がおき短絡してしまったのではないだろうか。端のワイヤーは片方からしか電場を受けないため、他のワイヤーに比べて電場が大きくなることによる影響だと思われる。また黒くなった部分が他の部分に比べ細くなっているように見えたが、カーボンを削り取って拡大してみたところ太さはほとんど同じであり、メッキ部分も取れていなかったため単にカーボンが堆積しただけのようである。

付録

今回の実験では、Geant4 によるシミュレーションを行い測定結果と比較してみた。ここで、Geant4 の動かし方及びソース等の変更箇所を載せておく。

1. 環境設定

SOHZA にログイン後、環境設定ファイルをコピー

```
cp /home/hasegawa/bashrc $HOME/.bashrc
```

一度ログアウトして、再びログインする。

適当な名前の作業ディレクトリを作成(ここでは G4)

```
mkdir G4
```

.bashrc を編集して、G4WORKDIR を変更する。

```
vi .bashrc
```

```
export G4WORKDIR=$HOME/G4
```

この環境変数を有効にする。

```
..bashrc
```

作業ディレクトリに入り環境設定を有効にする。

```
cd $G4WORKDIR
```

```
$G4INSTALL/Configure
```

G4 内に、env.sh と env.csh ができるのでこれを使用して環境設定をおこなう。

```
..env.sh
```

2. 実行形式の作成

Geant4 を始動させる前に以下のことを必ずおこなう。

```
..bashrc
```

```
cd G4
```

```
export PATH=/usr/local/bin:${PATH}
```

```
..env.sh
```

Geant4 には example があり、ExampleN02 がガスチェンバー、ExampleN03 がサンドイッチ型カロリメーターとなっている。ここでは、例として N03 をおこなう。まず N03 のソースをコピーする。

```
cd G4
```

```
cp -rp $G4INSTALL/example/novice/N03 .
```

次に N03 をコンパイルする。

```
cd N03
```

```
gmake clean
```

gmake

これで実行形式が作成される。

3. 実行

ExampleN03 を実行する。

\$G4WORKDIR/bin/Linux-g++/exampleN03

Fukui renderer の window が開くので、OK を押すとカロリメーターの図が出てくる。

この後 terminal に Idle>が出てくるので、run1.mac を実行する。

/control/execute run1.mac

これでイベントが実行される。

終了するときは、

exit

で終了する。

4. 変更箇所

今回 TGC のシミュレーションをやるにあたって本来ならば N02 を使用するべきだが実行できなかったため、N03 のカロリメーターを一層のみで、Absorber を空気としシンチレータ部分の厚みを調整して使用した。実行時での変更点を以下に示す。

1. home/yuko0421/raid0/geant4.4.0/examples/novice/N03/src/ExN03EventAction.cc の中身をソース内の ExN03EventAction.cc にコピーして、カロリメーター内の energy deposit をファイルに保存できるようにしておく。
2. ExN03DetectorConstruction.cc 内でレイヤー数、gap の厚み、gap, absorber の物質などを変更する。また、Gap 内を満たす物質(CO2,n-pentane)を作っておく。
3. ExN03PrimaryGeneratorAction.cc 内で粒子の入射位置を設定する。
4. run1.mac で粒子の種類、エネルギー、イベント数を設定する。