

卒業研究

線と 線に対する Thin Gap Chamber の動作研究

信州大学理学部物理科学科  
高エネルギー物理学研究室所属

01S2003

石原千鶴枝

2005年3月

# 目次

1	目的	2
2	放射線の物質との相互作用	3
2.1	線の物質との相互作用 . . . . .	3
2.2	線の物質との相互作用 . . . . .	3
2.3	電子の平均エネルギー損失量 . . . . .	5
3	放射線測定器 Thin Gap Chamber (TGC)	8
3.1	MWPC の構造 . . . . .	8
3.2	TGC の構造 . . . . .	9
3.3	TGC の動作原理 . . . . .	11
3.4	TGC の改良 . . . . .	12
4	実験	15
4.1	実験目的 . . . . .	15
4.2	実験方法 . . . . .	15
5	結果	18
6	考察	20
	謝辞	21
	参考文献	22
	付録	23

## 1 目的

Thin Gap Chamber (TGC) とは LHC 加速器での ATLAS 実験で用いられる、ミューオンを検出するトリガーチェンバーである。このテスト用小型 TGC を用いて  $Fe^{55}$  の線源から放射される線と  $Sr^{90}$  の線源から放射される線を測定し、比較することで  $Sr^{90}$  の線のエネルギー損失量の小さいことを確かめる。

## 2 放射線の物質との相互作用

放射線とは、高いエネルギーを持った電磁波や粒子線のことで、一般的には高エネルギーであることが条件とされるが中性子線に限ってはどんなに低エネルギーであっても放射線扱いとなる。主に以下の四つにカテゴライズされる。

- 高速電子
- 電磁波（ $\gamma$ 線，X線）
- 荷電重粒子
- 中性子

このうち、今回の研究で関係してくるのは、電子線と電磁波である。

### 2.1 線の物質との相互作用

線は原子がベータ崩壊した際に放出される電子、または陽電子の流れことである。

荷電粒子が物質を通過すると、物質の分子と励起、電離、ラザフォード散乱、制動放射線へのエネルギー転換など、様々な相互作用を起こす。このうちラザフォード散乱と制動放射線へのエネルギー転換の相互作用はごくわずかである。

**励起** 荷電粒子が相互作用する分子にエネルギーを与え、分子中の電子がエネルギー準位の高いほうに遷移する現象である。この状態は不安定なので  $10^{-11} \sim 10^{-10}$  秒でもとの状態に戻る。その時放射される光子で、分子が電離されることがあるので測定の妨げにならないよう防ぐ必要がある。

**電離** 荷電粒子が分子にイオン化エネルギー以上を与え分子が陽イオンと電子に分かれる現象である。荷電粒子が物質を電離させながら走ると軌跡にはイオン対が生成される。

今回使用した  $Sr^{90}$  線源は最大エネルギー 546keV と 2,284keV の  $\beta$  線を放出する。

### 2.2 線の物質との相互作用

線とは光子の流れ（電磁波）のことで、物質と光電効果、コンプトン散乱、電子対生成の3つの相互作用を起こす。

**光電効果** 入射光子のエネルギー  $h\nu$  が原子内の束縛電子を、そのエネルギー順位からたたきだすのに十分な大きさを持つ場合、光子の全エネルギーは電子に吸収され、電子はイオン化エネルギー（結合エネルギー）分  $I_0$  を引いた、運動エネルギー  $K$  をもって原子の外に飛び出す。このときの電子を光電子と呼ぶ。

$$K = h\nu - I_0 \quad (1)$$

コンプトン散乱 さらに 線のエネルギーが高くなると、束縛電子の結合エネルギーを無視でき、自由電子として、散乱現象が起きる。エネルギーと運動量の保存則より、散乱された光子のエネルギー  $h\nu$  は

$$h\nu = \frac{h\nu_0}{1 + \frac{h\nu_0}{m_0c^2} (1 - \cos\theta)}$$

ここで  $\nu_0$  は入射 線の振動数で、 $\theta$  は 線の散乱角である。  
反跳電子の運動エネルギー  $T$  は

$$\begin{aligned} T &= h(\nu_0 - \nu) \\ &= \frac{h\nu_0}{1 + \frac{m_0c^2}{h\nu_0(1 - \cos\theta)}} \end{aligned}$$

したがって反跳電子の最大エネルギー  $T_{max}$  は  $\theta = 180^\circ$  のときの

$$T_{max} = \frac{h\nu_0}{1 + \frac{m_0c^2}{2h\nu_0}}$$

電子対生成 さらに 線のエネルギー  $h\nu$  が  $2m_0c^2 = 1.022[MeV]$  以上になると、原子核のクーロン場の中で完全に消滅し、陽電子と電子の対を生成する。

吸収物質  $CO_2$  での、 線のエネルギーに対する全質量吸収係数曲線を図 1 に示す。今回使用した 線源  $Fe^{55}$  は、主に 5.89keV の光子を放出する。したがって主に光電効果による相互作用が効いてくる。

これらの相互作用によって生成された電子が、物質と電離などの相互作用をすることでイオン対を生成する。

$Cs^{137}$  の 線源の場合、662keV の 線を放出するが、その場合主にコンプトン散乱によって物質と相互作用する。散乱角度によって電子のエネルギーが変化するため、もともとできた電子のエネルギーを特定しにくい。対して、 $Fe^{55}$  の 線源は光電効果による相互作用が主になるので、生成される光電子は、イオン化エネルギーを差し引いた一種類のエネルギーしか持たないので、もともとできた電子のエネルギーを特定しやすい利点がある。

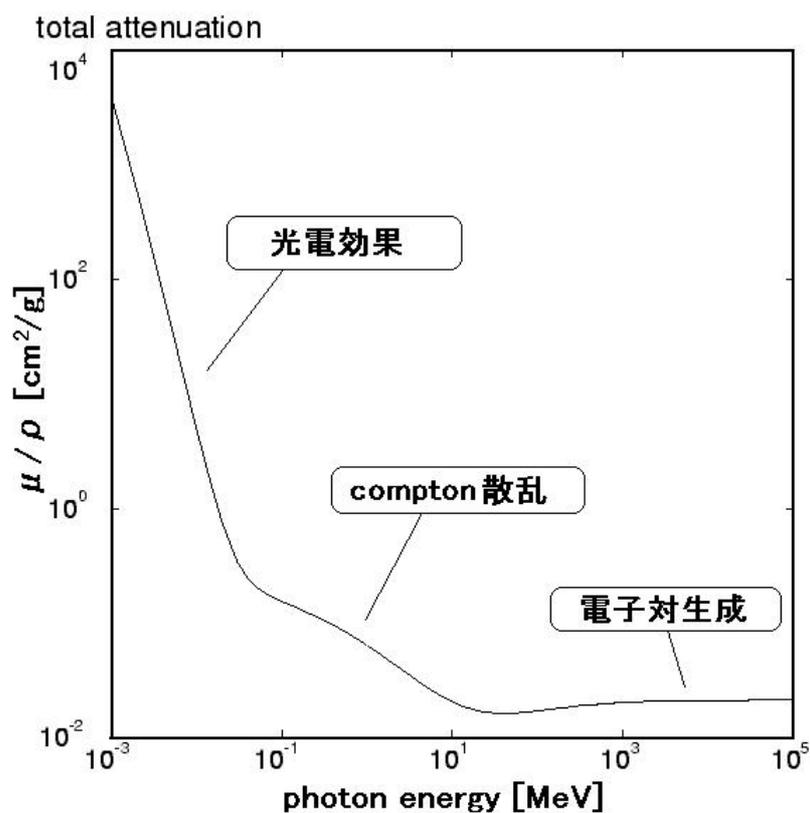


図 1: 吸収物質  $CO_2$  のときの全質量吸収係数

### 2.3 電子の平均エネルギー損失量

線や、光子の光電効果によってできた光電子などが物質に入射すると、散乱を受け、そのエネルギーの一部を物質の原子に与えて、入射電子は減速する。そのときの電子の単位長当りの平均エネルギー損失量、または物質の阻止能は、Bethe-Bloch の式より

$$S \equiv \left( -\frac{dE}{dx} \right) \simeq \frac{2C(2m_0c^2)}{\beta^2} \left( \ln \frac{(E + m_0c^2)^2}{I^2} \beta^2 \frac{E}{m_0c^2} - \beta^2 \right) \quad (2)$$

$$: 2C(m_0c^2) = 0.1536 \left( \frac{Z\rho}{A} \right)$$

$E$  : 電子のエネルギー

$m_0c^2$  : 電子の質量

I : 吸収物質原子のイオン化ポテンシャル

$$\beta^2 : \frac{v^2}{c^2} = \frac{2E}{m_0 c^2}$$

Z : 吸収物質の原子番号

$\rho$  : 吸収物質の密度

A : 吸収物質の質量数

電子の持つエネルギーが分かれば、物質中での飛行距離が求められ、その飛跡に生成されるイオン対の数も求められる。

図 2 は  $CO_2$  中での電子のエネルギーに対する、エネルギー損失量である。このときのイオン化ポテンシャル I は 96.2eV である。

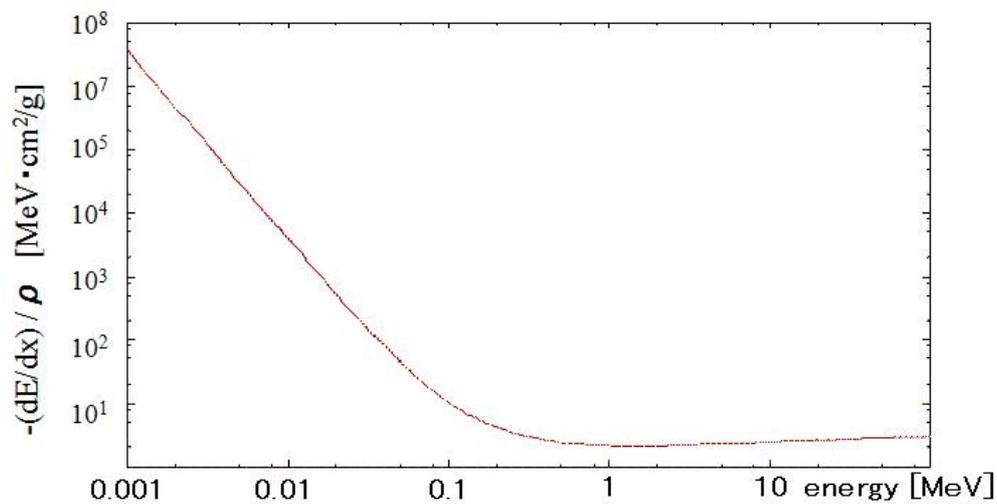


図 2:  $CO_2$  中での電子の平均エネルギー損失量

$Fe^{55}$  の線が  $CO_2$  中で光電効果を起こした場合、 $CO_2$  イオン化エネルギー  $W = 32.9eV$  であるので、光電子のエネルギーは式 1 より

$$\begin{aligned} E &= h\nu - W \\ &= 5.89 \times 10^3 - 32.9 \\ &= 5.86[keV] \end{aligned}$$

となる。生成された光電子はガスを電離、励起させながら走る。そのときのエネルギー損失量は式 2 より

$$\begin{aligned} S &= \frac{2C(2m_0c^2)}{\beta^2} \left( \ln \frac{(E + m_0c^2)^2}{I^2} \beta^2 \frac{E}{m_0c^2} - \beta^2 \right) \\ &= 5.57 \times 10^{-2}[MeV/cm] \end{aligned} \quad (3)$$

したがって  $CO_2$  中を 1.1mm 走ることができる。

また、 $Sr^{90}$  の線源の場合、エネルギーが連続分布しているので、最大エネルギー 546keV と 2284keV の中間値、273keV と 1142keV として、エネルギー損失量を計算すると、  
273keV の場合は

$$S = 3.23 \times 10^{-3} [MeV/cm] \quad (4)$$

したがって  $CO_2$  中を 84cm 走ることが出来る。

1142keV の場合は

$$S = 3.01 \times 10^{-3} [MeV/cm] \quad (5)$$

したがって、 $CO_2$  中を 3.8m 走ることが出来る。

### 3 放射線測定器 Thin Gap Chamber (TGC)

#### 3.1 MWPC の構造

TGC は多線式比例計数箱 (MWPC) の一種であり、図 3 のような構造になっている。

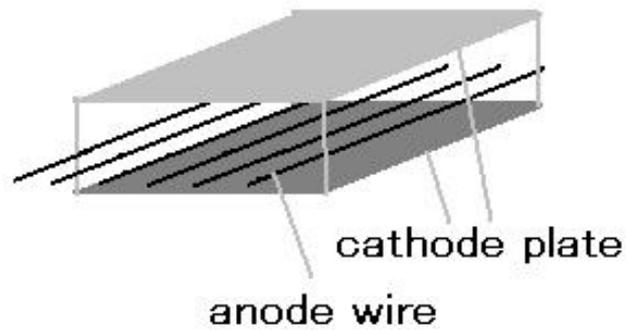


図 3: MWPC の構造

二つのカソードの間にアノードワイヤーがいくつも張られていて、その空間にはガスが封入されている。荷電粒子が入射すると、中のガスを電離させ、イオン対ができる。ワイヤー付近の電界で電子が加速されガス増幅を起こす。その電荷量をワイヤーを介して測定する装置である。TGC はアノードワイヤーとカソード面との間が狭いことが特徴付けられる。

### 3.2 TGC の構造

今回使用した TGC はテスト用小型なもので、ワイヤーの数は 16 本で、縦 10cm 横 20cm 程度の大きさである。上から撮った写真を以下の図 4 に示す。下の写真から確認できるように、横に付いているチューブによって常にガスを流し続ける。

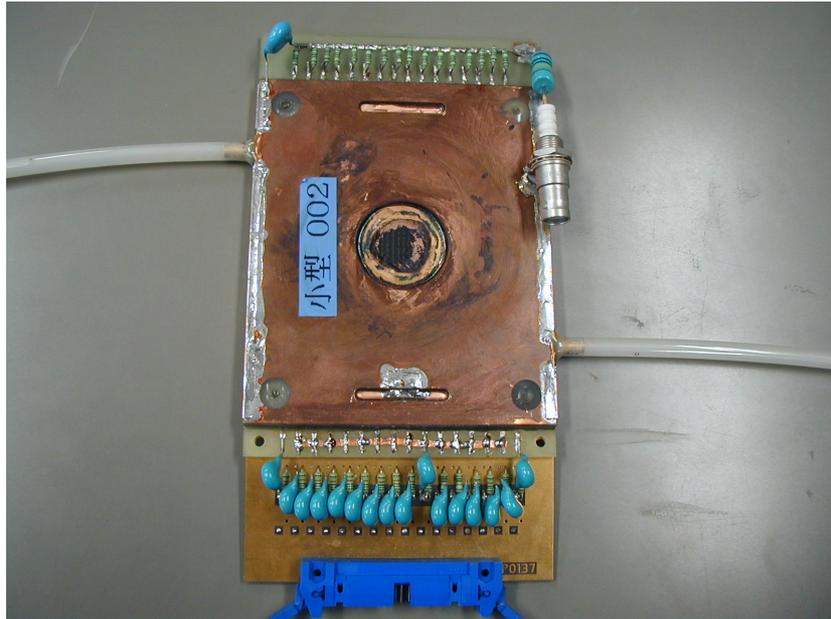


図 4: TGC の外観写真

ワイヤーのある、有感領域の断面図 5 と各パラメータ表 1 を示す。陰極板は銅 (Cu) とガラスエポキシ樹脂 (FR4) を合わせた形になっていて、内側のガラスエポキシ樹脂には導電性はないので、表面にカーボンが塗られており、それが陰極となる。図 4 で確認できるように、放射線を置くための壁が薄くなった放射窓があるので、その部分の断面図を描いてある。

Cu 壁 $t_1$	30[ $\mu\text{m}$ ]
FR4 壁 $t_2$	200[ $\mu\text{m}$ ]
wire の直径 $2a$	50[ $\mu\text{m}$ ]
wire 間の距離 $S$	1.8[mm]
wire と cathode の距離 $L$	1.4[mm]

表 1: TGC の各パラメータ

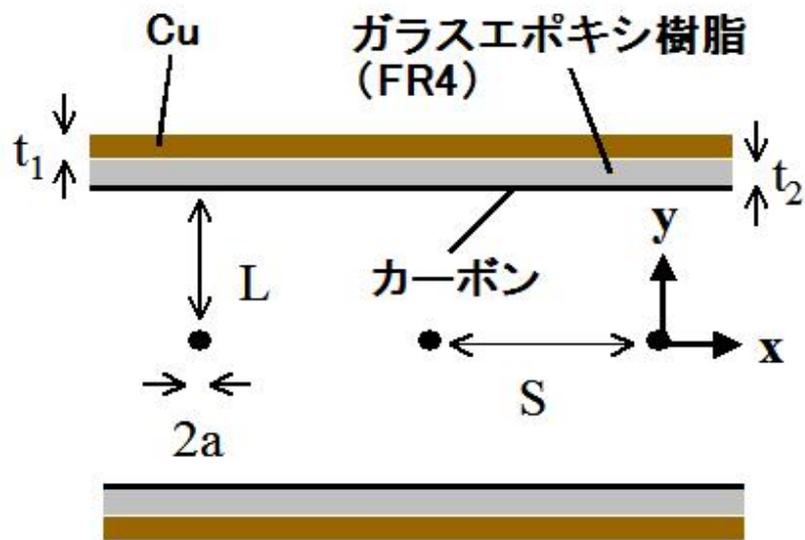


図 5: TGC の断面図

TGC 断面の電位の様子を以下の図 6 に示す。ワイヤー付近の電位が急激に上がっているのがわかる。

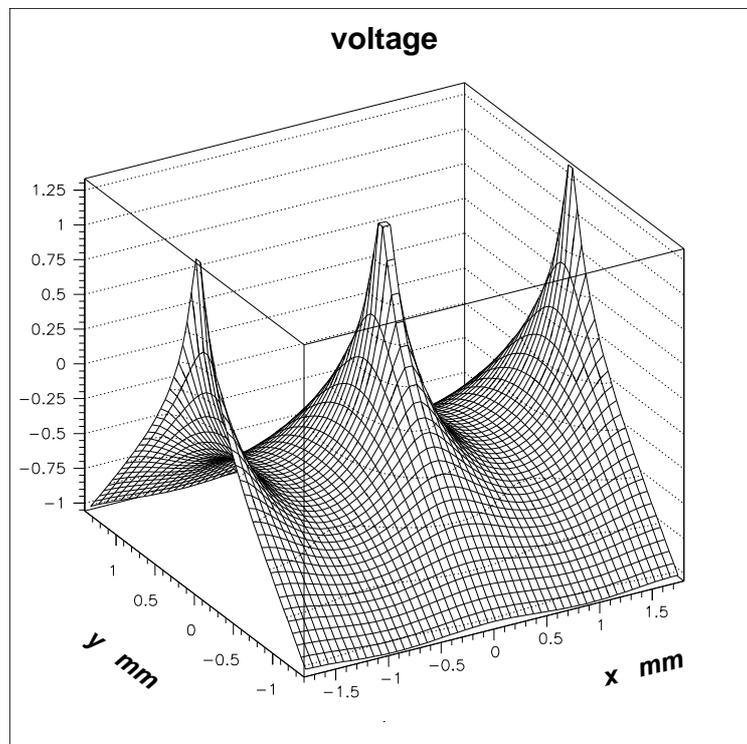


図 6: TGC 内の電位構造

### 3.3 TGC の動作原理

ワイヤーに 3.0kV 前後の電圧をかける。

簡単な概念図を以下の図 7 に示す。

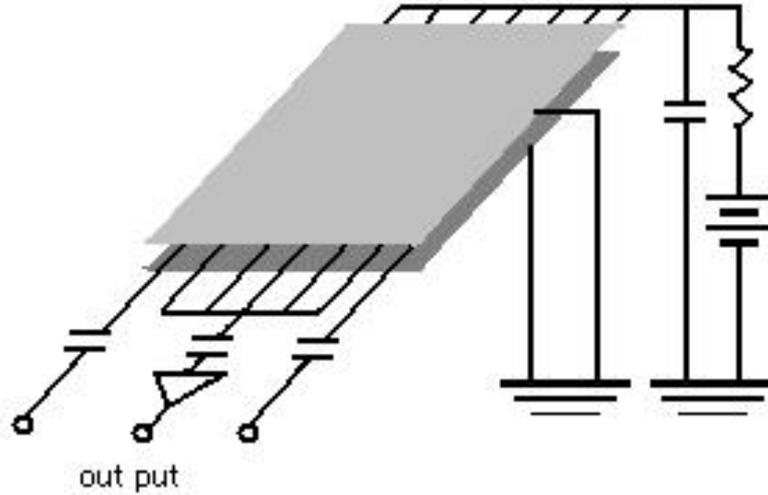


図 7: TGC の概念図

有感領域内に荷電粒子が入射すると、封入されているガスを電離させ、ワイヤー付近の電界で加速された電子はガス増幅を起こし、ワイヤー付近に多くの電子を作る。そのときできる信号をアンプで大きくし、オシロスコープで下の図 8 のような信号を得る。

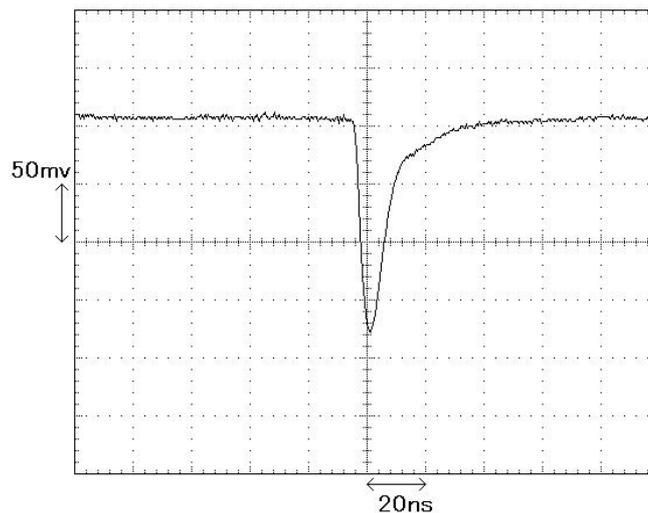


図 8: TGC で得られるオシロスコープでの信号

### 3.4 TGC の改良

今回使用した 線源 Fe55 は主にエネルギー 5.89keV で、強度約  $6.9 \times 10^4$ Bq の光子を放出するが、そのほとんどが TGC の壁に吸収されてしまう。各物質での全質量吸収係数を図 9 に示す。

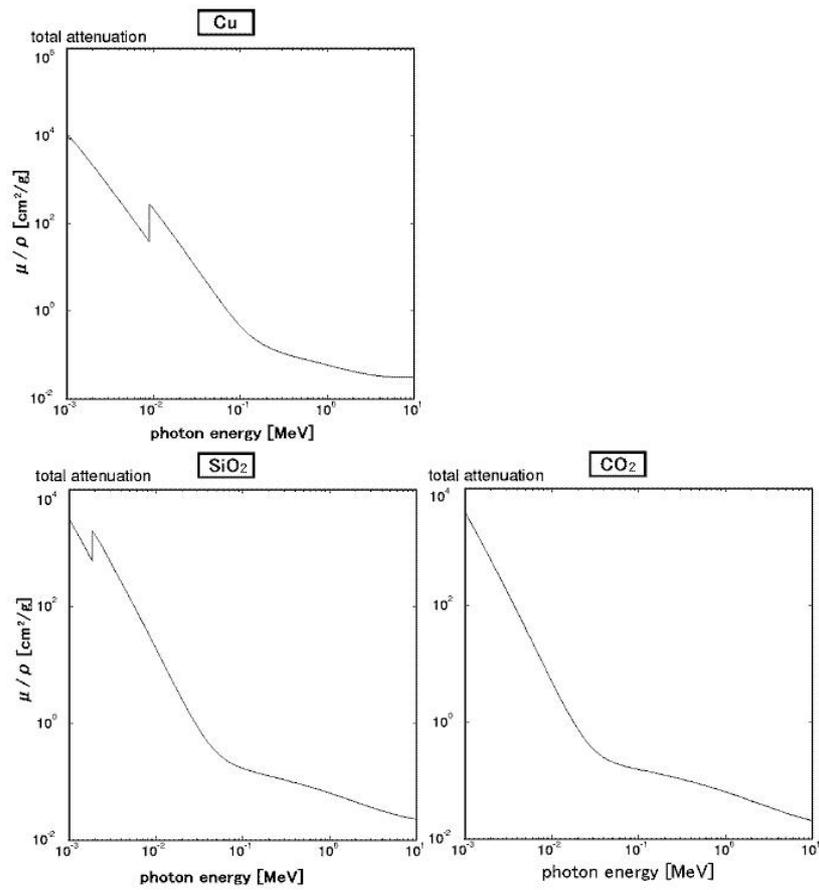


図 9: 各吸収物質での全質量吸収係数

吸収物質を通り抜けた強度  $I$  は

$$I = I_0 \exp\left(-\frac{\mu}{\rho} \rho t\right) \\ = I_0 \exp(-\mu t)$$

$I_0$  : 入射強度

$\rho$  : 吸収物質の密度

$\mu$  : 線吸収係数

$t$  : 吸収物質の厚み

で計算できる。よって、密度  $\rho$  が  $8.96\text{g/cm}^3$  として TGC 壁の Cu を通り抜ける光子数は、1 秒間当り

$$\text{Cu の線吸収係数 } \mu_c[\text{g/cm}^3] : 1.09 \times 10^3$$

$$\text{Cu の厚み } t_c[\text{cm}] : 3.0 \times 10^{-3}$$

$$I = I_0 \exp(-\mu_c t_c) \\ = 6.9 \times 10^4 \times \exp(1.09 \times 10^3 \times 3.0 \times 10^{-3}) \\ = 2.6 \times 10^3$$

となる。さらにガラスエポキシ樹脂 (FR4) を通り抜ける光子は、 $\text{SiO}_2$  として、密度  $\rho$  が  $2.70\text{g/cm}^3$  として計算すると

$$\text{SiO}_2 \text{ の線吸収係数 } \mu_s[\text{g/cm}^3] : 2.38 \times 10^2$$

$$\text{SiO}_2 \text{ の厚み } t_s[\text{cm}] : 2.0 \times 10^{-2}$$

$$I = I_0 \exp(-\mu_s t_s) \\ = 2.6 \times 10^3 \times \exp(2.38 \times 10^2 \times 2.0 \times 10^{-2}) \\ = 22.4$$

通り抜けた光子が  $\text{CO}_2$  と相互作用する数は、密度  $\rho$  が  $1.83 \times 10^{-3}\text{g/cm}^3$  として

$$\text{CO}_2 \text{ の線吸収係数 } \mu_c[\text{g/cm}^3] : 4.48 \times 10^{-2}$$

$$\text{CO}_2 \text{ の厚み } t_c[\text{cm}] : 2.8 \times 10^{-1}$$

$$\begin{aligned} I &= I_0 (1 - \exp(-\mu_c t_c)) \\ &= 22.4 \times 10^3 \times (1 - \exp(4.48 \times 10^{-2} \times 2.8 \times 10^{-1})) \\ &= 0.22 \end{aligned}$$

バックグラウンドとして宇宙線などが、0.5Hz ほどの計数がされる中、放射線とバックグラウンドとの区別が出来ず、測定できない。したがって、放射窓の Cu の部分を酸で溶かし、取り除くことにした。そうすると、10 倍以上の検出が期待できる。

また、TGC は MWPC として、通過粒子の位置測定を目的としたものだが、今回の実験では、 $Fe^{55}$  の検出を目的としているため、より検出しやすいよう、2 ~ 15 ch のワイヤーをグルーピングして、7 ch のみ測定する。1 と 16 ch は端ワイヤーとしての特異性が認められるので、測定には含まないようにした。

また、流すガスは  $CO_2$  と n-pentane を 55:45 の比率で混ぜたものを用いる。2 種類の混合気体になると、ガス増幅率が高くなり、また n-pentane は励起された電子が基底状態に戻るとき放出される紫外線を吸収させることができる。

## 4 実験

### 4.1 実験目的

$Fe^{55}$  の線は TGC 有感領域内でガスと光電効果を起こし、光電子を作る。生成された光電子はガスを電離させながら走る。 $CO_2$  中で起こした場合、式 3 より  $5.57 \times 10^{-2} \text{MeV/cm}$  なので  $CO_2$  中を 1.1mm 走り、そのとき平均 178 個のイオン対を作る。

また、 $Sr^{90}$  の線源の場合は、式 4、5 より、合わせて、TGC 有感領域内 2.8mm 間に平均 53.1 個のイオン対を作ることになる。すなわち  $Fe^{55}$  の方が  $Sr^{90}$  より約 3.35 倍多くの電子を作ることになる。

TGC によって検出した  $Fe^{55}$  と  $Sr^{90}$  の放射線が作る信号の大きさを測定し、比較してエネルギー損失量の違いを求めることが本実験の目的である。

### 4.2 実験方法

まず TGC の放射窓に放射線源を置く。実験装置のセットアップの概念図を図 10 に示す。

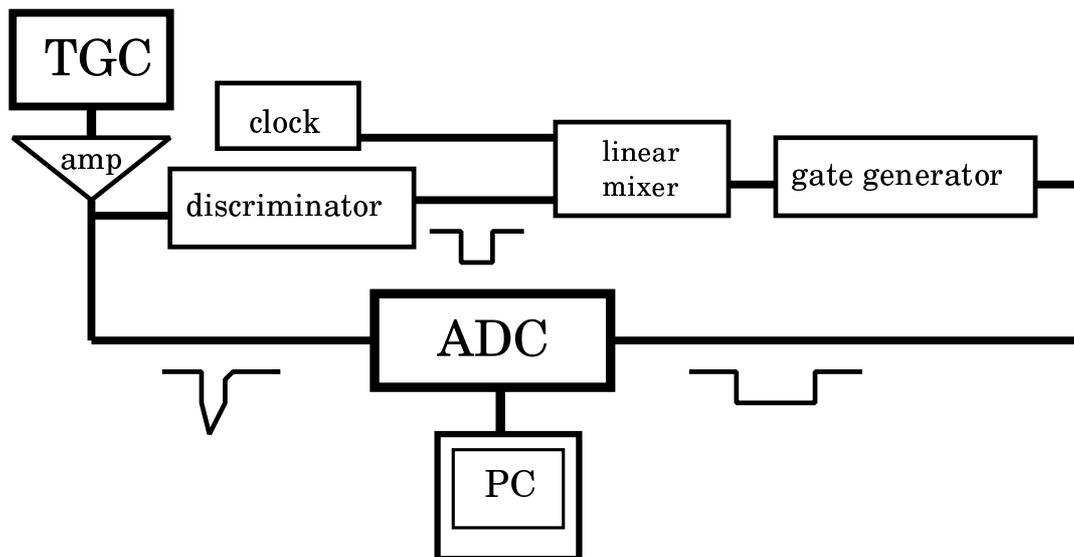


図 10: TGC のセットアップ

TGC で検出できた信号から電荷量を求めるには、ADC (Analog to Digital Converter) 測定器を用いる。ADC 測定器とはあるタイミングに流れてきたパルスを積分により、数量的に測定する CAMAC のモジュールである。そのタイミングを示すパルスをゲートパルスと呼ぶ。ゲートはセルフトリガーとして、TGC から流れてきた信号を  $V_{th}$  を  $-34\text{mV}$  にした Discriminator に通してデジタル化し、Gate generator で幅を調節して ADC に入れる。

一方アナログ信号は、ケーブルを長くしてゲートとタイミングを合わせるようにする。図 11 の

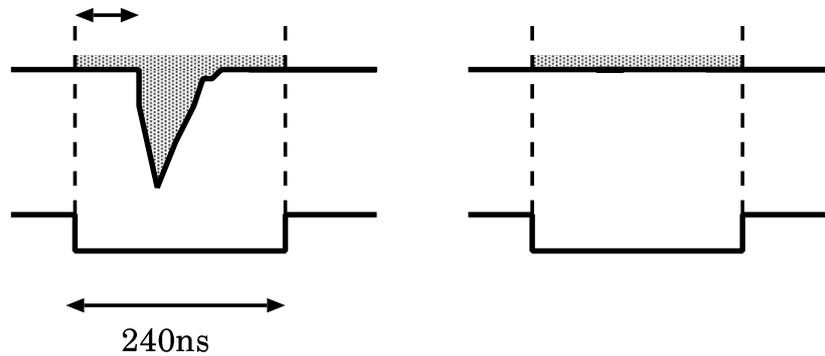


図 11: アナログ信号とゲートパルスのタイミング

左のようにゲートが開いた後、アナログパルスが入るまで 50ns 以上の時間差を置く。今回の実験ではゲートの幅を 240ns とした。

カウントされた電荷量は DAQ を通して、パソコンに出力される。

また注意する点は、ADC は積分で測定するため、0 をまたいでも問題のないよう、常に上げ底の状態に測定されている。したがって、パルスが入ってこない状態でも図 11 の右のように測定されている。これをペDESTAL と呼び、実際の電荷量を求めるときは、このペDESTAL 部分を引かなければならない。よって、ペDESTAL も一緒に測定するために、clock の出力も ADC に入れた。clock は実際測定される計数率の 1/10 程度の周波数にした。

つづいて TGC に流すガスのセットアップの概念図を図 12 に示す。

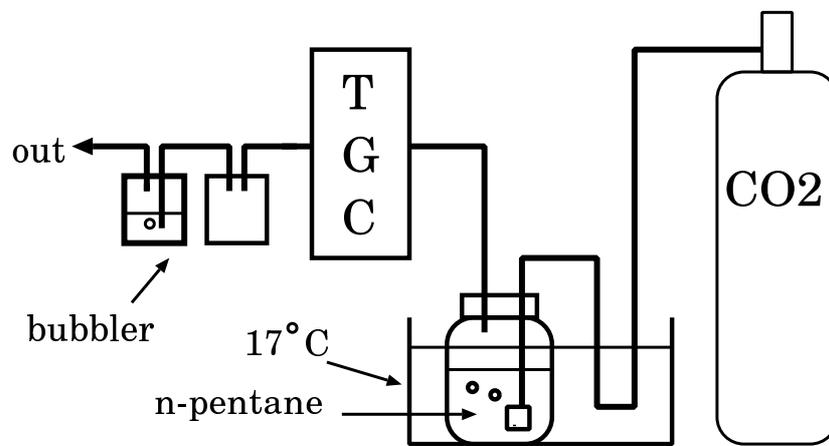


図 12: ガスのセットアップ

$CO_2$  のガスボンベから  $CO_2$  を流し、それを n-pentane の液体に通し混ぜ、気化させたものを TGC に流す。TGC を流れたあとは、空気が逆流しないため、また気圧を調節するためバブラーを設置した。

このような装置で、TGC に加える電圧を 2.8、2.9、3.0、3.1、3.2、3.3、3.4、3.5 [kV] と変えて、 $Fe^{55}$  と  $Sr^{90}$  の各放射線源の測定を行う。5000 ヒットしたときの ADC 分布をもとめる。

## 5 結果

TGC に加えた電圧 3.0kV のときの、各線源の ADC 分布図を図 13 に示す。

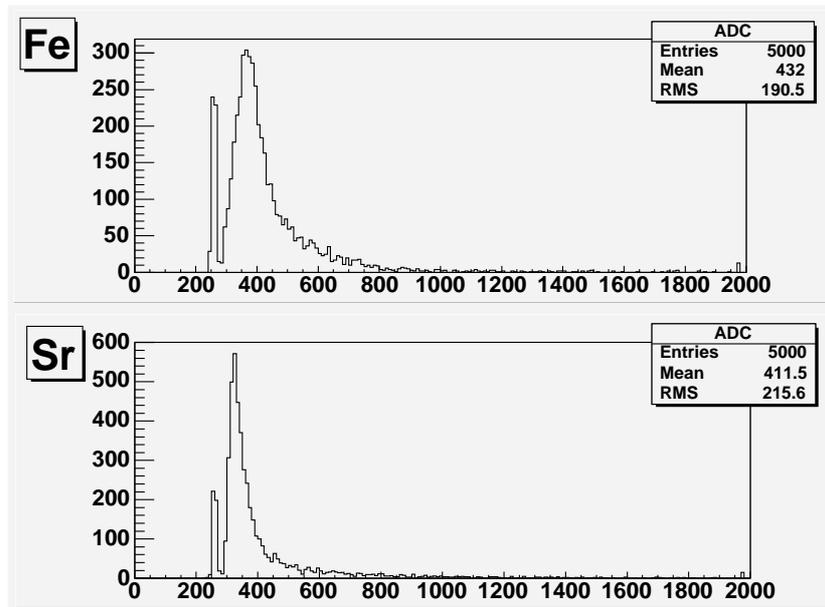


図 13: HV 電圧 3.0kV のときの ADC

左に立っている山がペDESTALである。右の山が流れてきた電荷量の分布となる。電荷量が多いほど、多くのエネルギーを損失したことになる。

十分に厚い物質層を通過するときはエネルギー損失の変動はガウス分布するが、今回の実験のように薄い物質層や気体中では、荷電粒子と吸収物質の衝突回数が少ないため、ガウス分布からずれてエネルギー損失量が高いほうに広がる。このような分布をランダウ分布と呼び、平均値はガウス分布と比べて小さくなる。

二つの分布図を比べると、 $Fe^{55}$  の方が若干高い位置にピークが見られる。

今回使用した ADC 測定器は最大約 500pC 測定でき、フルスケール 1980 カウントなので、1 カウント 0.25pC である。したがってオーバーフローした部分を削除した分布の平均値から、ガウスフィットしたペDESTALのピーク値を引いたものを、実際の電荷量に換算して、TGC に加えた電圧に対するプロットをした。(図 14)

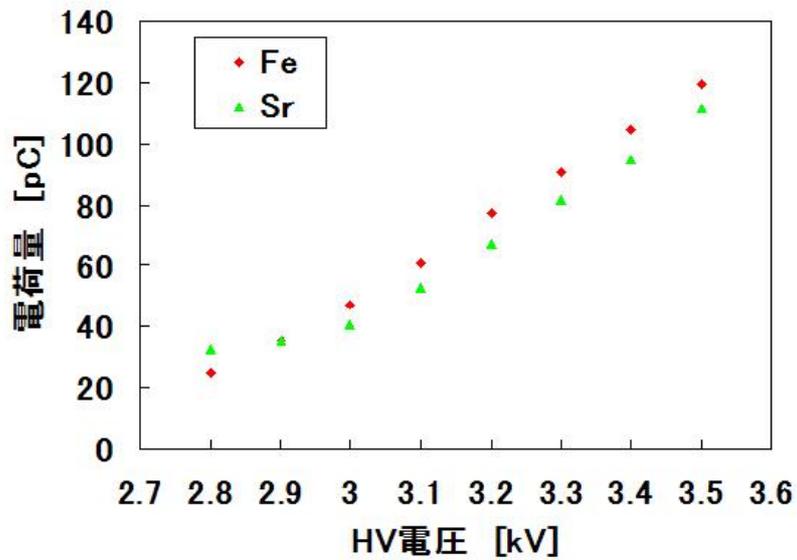


図 14: 各線源の電荷量の比較

3.0kV から、 $Fe^{55}$  の方が上回っていることがわかる。3.0~3.5kV の Fe の Sr に対する割合を平均すると

$$1.13 \pm 0.01 \text{ 倍}$$

となった。

## 6 考察

Fe も Sr の場合も、電圧を上げるとガス増幅率が上がり ADC 分布の平均値はほぼ比例して大きくなるのがわかる。

測定した電荷量の全体からすると、Fe の方が Sr より多くの電荷を作ることがわかる。しかし、理論値の 3.35 倍とはほど遠い 1.13 倍であった。その理由として考えられるのは、理論値計算においては、Sr の線のエネルギーは連続分布で、実際測定されているエネルギー値はわからなく、理論計算が正しくできないことが考えられる。また、実験においては、Fe の線は TGC の壁でも相互作用しやすく、そこで相互作用した光電子が TGC 有感領域内に入射したとすると、 $CO_2$  で相互作用する 5.86keV の電子より小さいエネルギーの電子が測定されることになり、小さいエネルギーだと、飛程距離も短く、作るイオン対も少なくなるので、理論値よりも少ない電荷量として測定されることになる。

今後の展望としては、エネルギーの特定ができる電子線を使い、TGC の壁を更に薄くすることで、より Fe と Sr の差ができて、Sr の線のエネルギー損失量が小さいことが確かめられると考えられる。

## 謝辞

本研究にあたり、全面的に御指導して頂いた竹下徹教授に深く感謝致します。実験装置の取り扱いや製作、実験の方針など様々なことに御助言、御足労頂いた D3 の大下英敏氏に深く感謝し、厚く御礼申し上げます。最後に、実験装置などの適切な御助言をして頂いた M2 の西山雅樹氏に深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] 山崎文男 『放射線』(共立出版株式会社, 1973)
- [2] Glenn F. Knoll 『Radiation Detection and Measurement』(JOHN WILEY & SONS)
- [3] 福井崇時 『粒子物理計測学入門』(共立出版株式会社, 1992)
- [4] 中川義徳 『卒業論文: Thin Gap Chamber に於ける端ワイヤーの特異性について』
- [5] 小野峻 『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』
- [6] 津野総司 『修士論文: ATLAS 実験ミュオントリガー検出器のバックグラウンド放射線に対する動作研究』

## 付録

$Fe^{55}$  での ADC 分布図 , 2.8 ~ 3.1kV

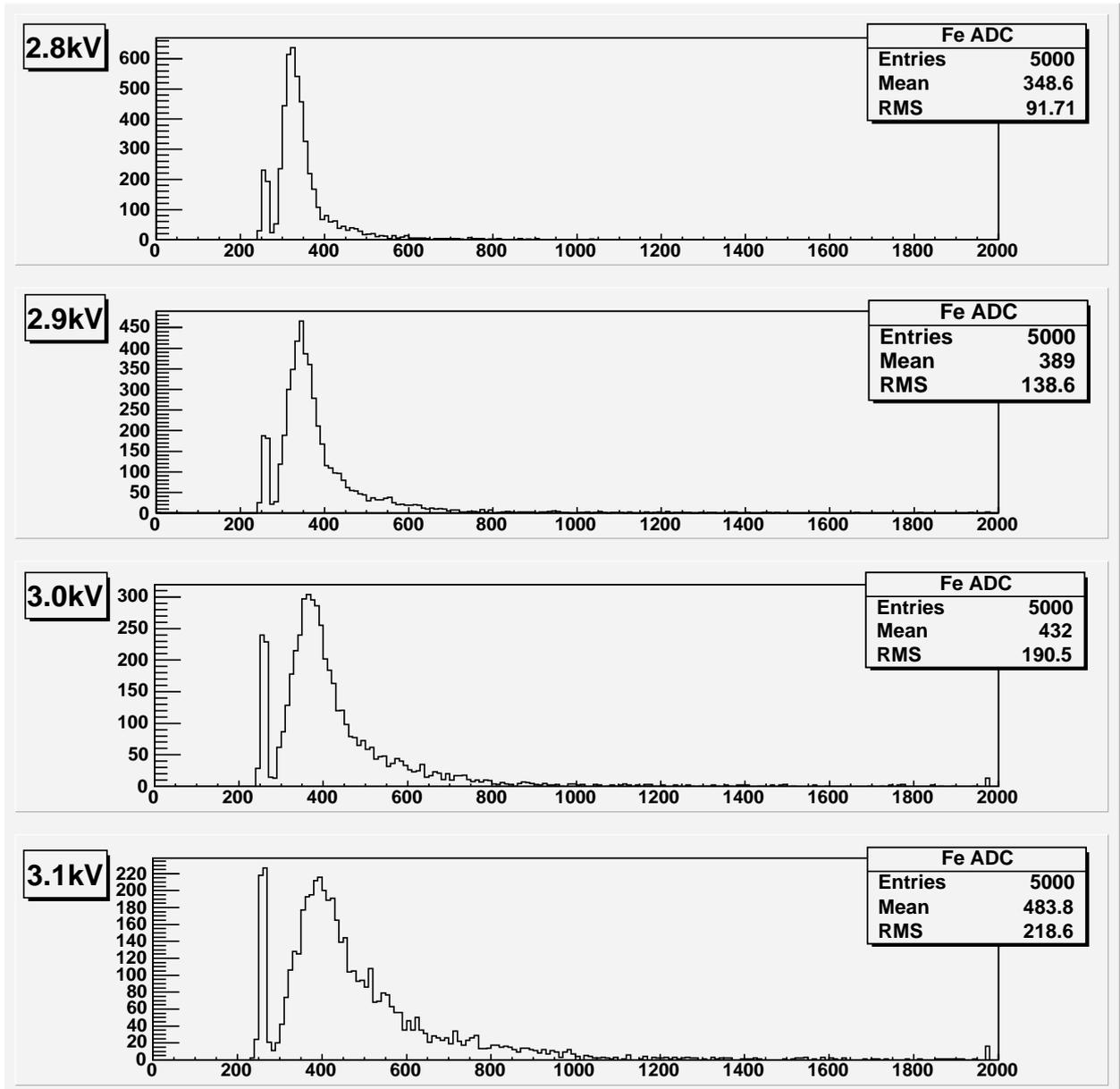


図 15:  $Fe^{55}$  , 2.8 ~ 3.1kV

$Fe^{55}$  での ADC 分布図 , 3.2 ~ 3.5kV

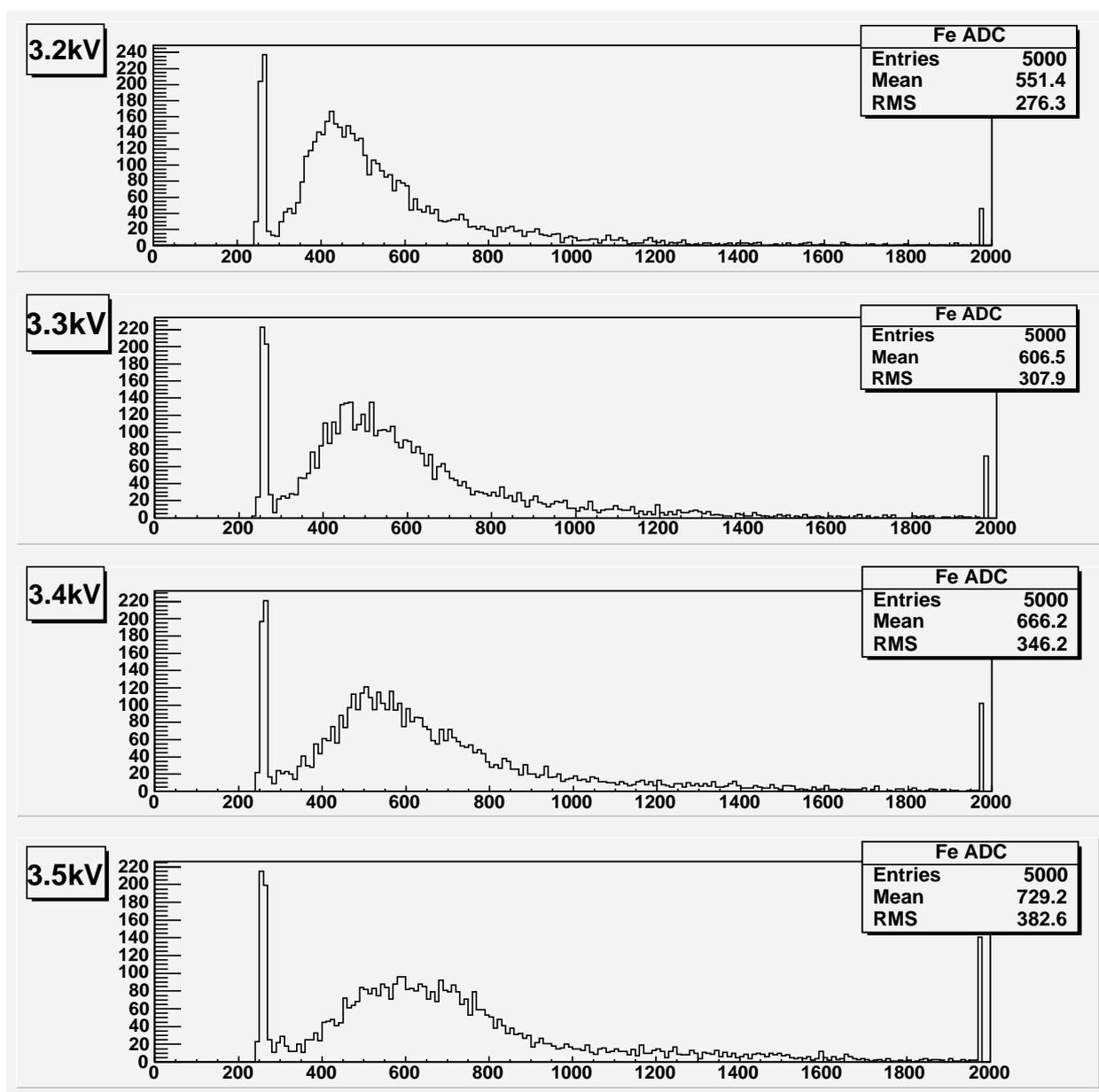


図 16:  $Fe^{55}$  , 3.1 ~ 3.5kV

$Sr^{90}$  での ADC 分布図, 2.8~3.1kV

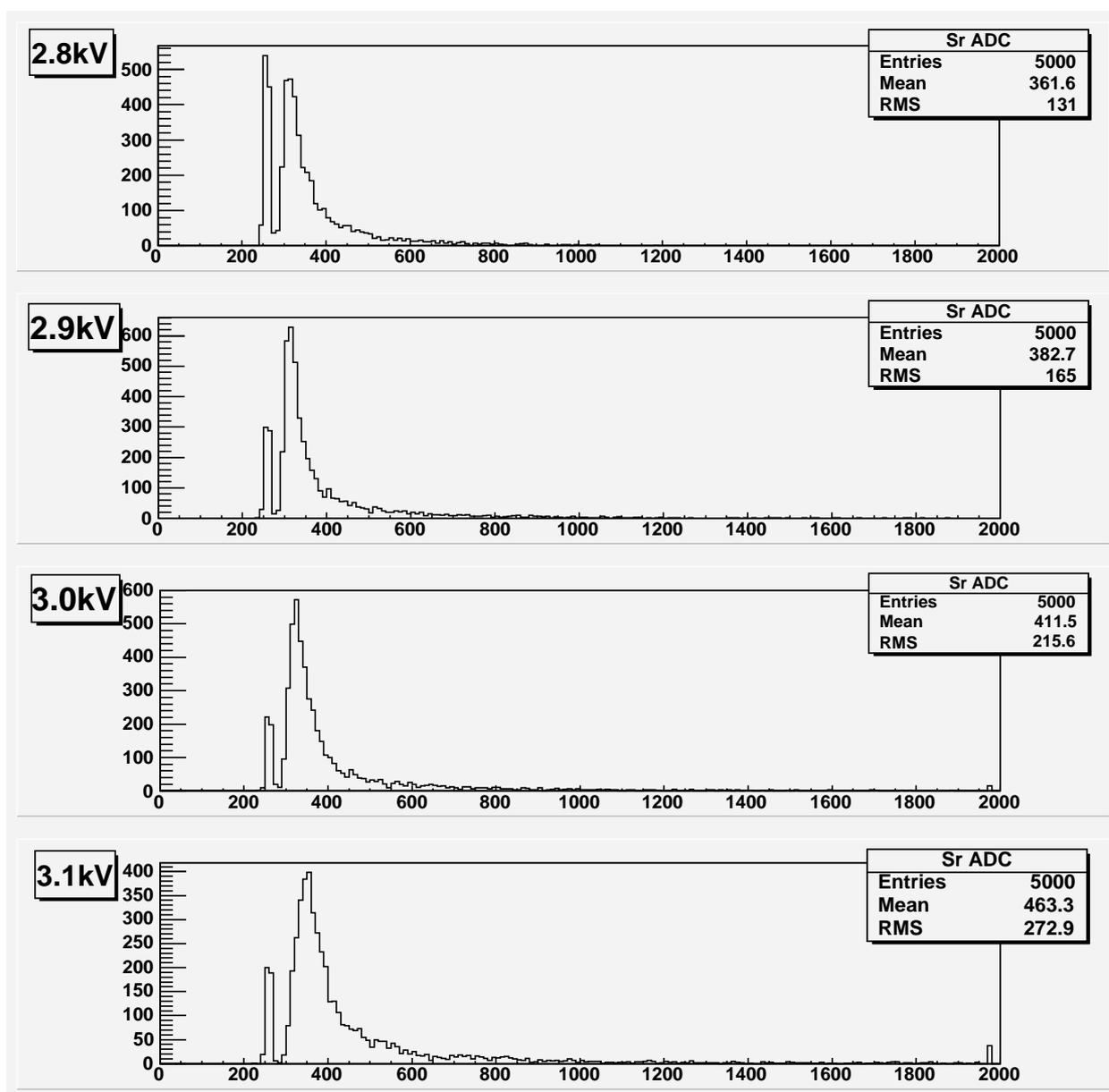


図 17:  $Sr^{90}$ , 2.8~3.1kV

$Sr^{90}$  での ADC 分布図 , 3.2 ~ 3.5kV

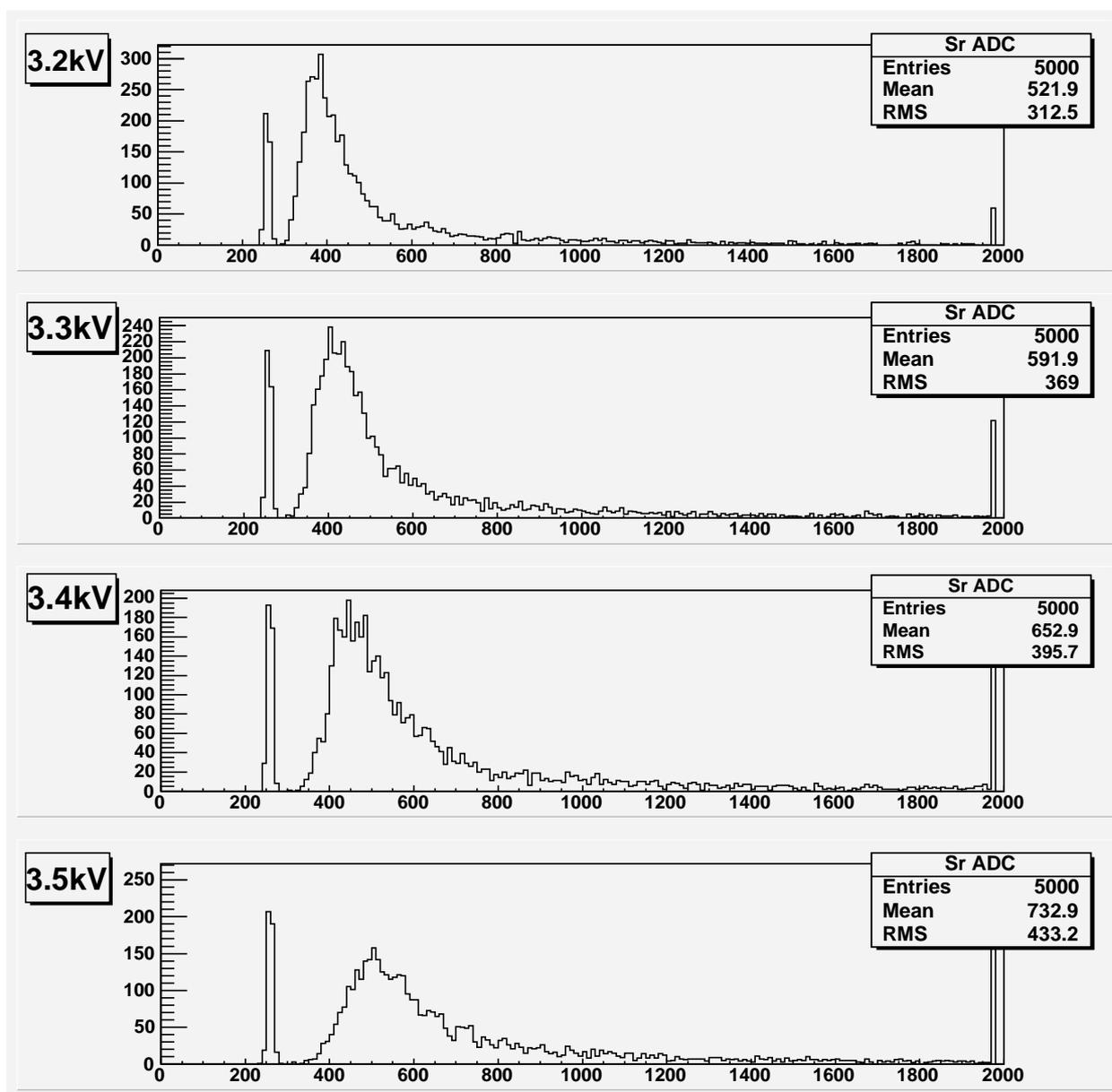


図 18:  $Sr^{90}$  , 3.1 ~ 3.5kV