

修士学位論文

ATLAS μ 粒子 Trigger 用 Thin Gap Chamber の信号特性に関する研究

神戸大学自然科学研究科物理学専攻

石脇 史猛

要旨

Thin Gap Chamber は Large Hadron Collider を用いた国際共同実験 ATLAS の End-cap Region において、 μ 粒子 Trigger 用の検出器として使用されることになっている。本稿では Thin Gap Chamber を Trigger 用検出器として用いる際に問題になる信号の特性として Cathode Strip Line の伝播時間の測定及び Multiplicity 測定実験の結果を報告する。これらの実験からは、Cathode Strip Line の伝播時間については 6.55 ± 0.04 [ns]、また Multiple Hit Event の割合は 2.5 % という結果を得た。

目次

1	Introduction	3
2	LHC の物理と ATLAS 検出器	6
2.1	LHC の物理	6
2.2	LHC	7
2.3	ATLAS	8
3	Thin Gap Chamber の構造とその動作原理	9
3.1	Thin Gap Chamber の構造	9
3.2	動作原理	11
3.2.1	Gas 増幅	11
3.2.2	CF_4 の特性	13
3.2.3	Anode Signal	14
3.2.4	Cathode Signal	16
4	Cathode Strip Line からの Signal の伝播時間の測定	19
4.1	目的	19
4.2	Micro Strip Line	19
4.3	実験方法	22
4.4	測定結果及び解析結果	24
4.5	考察	25
5	Multiplicity	26
5.1	目的	26
5.2	原因	26
5.3	測定方法	29
5.4	解析方法	33
5.5	解析結果	38
5.6	考察	44
6	まとめ	46

1 Introduction

素粒子物理学の目的は物質の究極的構造を解明することにある。このためには標準理論において質量の起源となる Higgs 粒子を見つけることが必要である。この発見は高い Luminosity、高い衝突 Energy が実現されてはじめて可能となる。これらの実現には素粒子物理学にとって測定器技術の発展が不可欠であることは言うまでもない。高 Luminosity、高 Energy での実験計画としては現在、CERN(欧州共同原子核研究機構)における LHC(Large Hadron Collider) 計画や日本を中心とする JLC(Japan Linear Collider) 計画などがある。このうちの LHC は近い将来 TeV 領域で素粒子物理学の研究ができる世界唯一の加速器である。この LHC を用いた実験グループに国際共同実験 ATLAS(A Toroidal LHC ApparatuS) があり、陽子陽子衝突実験用汎用測定器の建設を目指して、日本では神戸大学、東京大学、信州大学、KEK などがこれに参加している。

ところで、衝突反応で生成される Lepton は新粒子・新現象の発見に繋がる可能性が大きく、従って Hadron Collider の厳しい実験環境の中でも検知することが比較的優しい Lepton である μ 粒子に注目することは重要性が高い。その μ 粒子が関わる LHC の物理には、高精度の Tracking よりも μ 粒子の同定が重要であるものが多く、また厳しい Background 環境の中から μ 粒子を検出するためには、この μ 粒子に対する Trigger 用検出器が必要である。Trigger 用検出器とは、衝突反応によって生成した μ 粒子が飛んできたことを各検出器に知らせるための Signal(これを Trigger Signal と呼ぶ) を出すためのもので、この装置に対して ATLAS 実験からは

- Bunch Crossing Time($25ns$) に比べて十分良い時間分解能が必要
- Background Rate $\sim 1kHz/cm^2$ なる状況下でも動作可能
- p_T (横方向運動量) を Trigger 条件に組み込むために、 $\sim 1cm$ の位置分解能が必要

等の条件が要請されている。また、 μ 粒子に対して検出効率が高いことも必要である。1994 年、ATLAS は Endcap Region の μ 粒子 Trigger 用の検出器として Thin Gap Chamber を採用するという決定をした。Thin Gap Chamber は CERN での LEP を用いた OPAL 実験において Hadron Calorimeter として使用されてきたもので、高速の Signal を出し、高い Rate の放射線環境下でも動作することが知られている。この Thin Gap Chamber はその特徴を生かして、衝突型加速器における検出器では最外部に置かれ、必然的に大面積を占める μ 粒子に対する検出器として長期的に安定動作をする Chamber へと改良されつつある。

ここで、ATLAS の Outer System について触れておく。ATLAS の Outer System は Toroidal Magnet、Precision Muon Chamber、Muon Trigger Chamber から構成されていて、 μ 粒子 Trigger 用の検出器は以下の領域に分けて設置されることになっている。

1. Central Troid Magnet の Barrel 領域 ($|\eta| < 1.05$: Barrel Reagion)
2. Central Troid Magnet の後方の Endcap 領域 ($1.05 < |\eta| < 1.55$: Transition Reagion)
3. Endcap Troid の後方の領域 ($1.55 < |\eta| < 2.2$: Endcap Reagion)

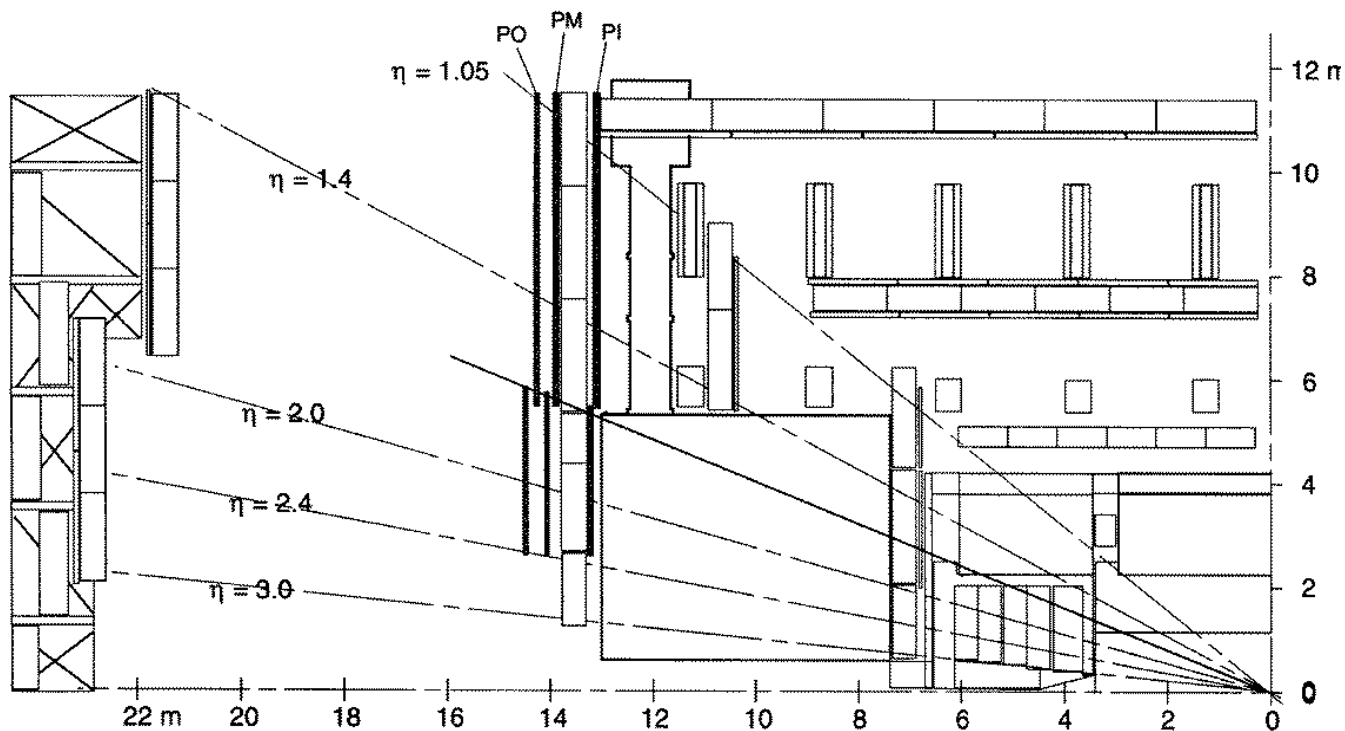


図 1: ATLAS 検出器の r-z 平面による断面図

このうち、TGC は主として Endcap 領域、Transition 領域用に使用される。これらの領域で TGC は

- Troidal Coil のすぐ外側 – Inner Plane(PI)
- PI から Z 方向に約 1 m 離れた位置 – Middle Plane(PM)
- PM から Z 方向に 30 cm 離れた位置 – Outer Plane(PO)

にある [図 1]。衝突事象から生じた μ 粒子に対する Trigger をこれらの Thin Gap Chamber を用いて発生させるのであるが、横方向運動量 p_T の大きさによってその Trigger の発生させ方が異なる。数 GeV/c 程度の low- p_T に対しては PM、PO に計 4 層ある Chamber のうちの 3 層に Hit があることを条件とし、これらを同時計数することで Trigger Signal を発生させる。数十 GeV/c 程度の high- p_T に対しては low- p_T に対する条件に加えて、3 層ある PI の Chamber のうちの 2 層に Hit があることを条件とし、これらを同時計数することで Trigger Signal を発生させる。

本稿は、この Thin Gap Chamber を LHC 実験において μ 粒子 Trigger 用の検出器として使用するために必要な研究の一環として、

- Cathode Strip Line の伝播遅延時間の測定
- Multiplicity の測定

に関する実験結果を報告することを目的とするものである。以下では、まず第 2 章で LHC の目指す Physics、LHC 及び ATLAS 検出器についての概要を述べる。次に、第 3 章では TGC の構造と動作原理について触れる。そして第 4 章では現在、Trigger Signal として読み出す可能性のある Cathode Strip Line について、放射線により作られた Signal を読み出すことによって、その伝播遅延時間を測定した実験について報告する。第 5 章では入射粒子の情報を誤認させる現象 (Multiplicity を伴う現象) について、Thin Gap Chamber がこれをどの程度もっているのかを見積もるための実験及び結果を述べる。そして、最後にこれらの実験のまとめ及び考察を行なうことにする。

2 LHC の物理と ATLAS 検出器

2.1 LHC の物理

LHC の最重要課題は、標準理論 (Standard Model、以下、SM と略す) において電弱相互作用での自発的対称性の破れの機構 (Spontaneous Symmetry-breaking Mechanism) の起源が何であるかを解明することである。様々な粒子の質量の起源が何であるかという問題はこれに深く関係しており、物理学の最も基礎的な問題のひとつとなっている。自発的対称性の破れにより Gauge Boson (W^\pm , Z^0) に対して有限の質量を与える過程で Higgs 粒子なるスピン 0 のスカラー粒子の存在が必須のものとして現れてくるにもかかわらず、この粒子は未だ発見されていない。現在、考えられている Higgs 粒子には SM で予想される SM Higgs boson (H)、最小限超対称性標準理論 (Minimal Supersymmetry Standard Model、以下、MSSM と略す) で予想される Higgs Boson (H^\pm, h, H, A) など、各理論で種々のタイプのものがある。この Higgs 粒子の探索しやすい Decay Mode はその質量によって異なるが、ATLAS において Background が少なく探索しやすい Decay Mode を、LEP で探索可能な質量領域を除いた $m_H > 80\text{GeV}$ で以下に列挙すると、SM Higgs [図 2] に対しては、

- $H \longrightarrow b\bar{b}$ $80 < m_H < 100\text{GeV}$
- $H \longrightarrow \gamma\gamma$ $90 < m_H < 150\text{GeV}$
- $H \longrightarrow ZZ^* \longrightarrow 4l^\pm$ $130\text{GeV} < m_H < 2m_Z$
- $H \longrightarrow ZZ \longrightarrow 4l^\pm, 2l^\pm 2\nu$ $m_H > 2m_Z$
- $H \longrightarrow WW, ZZ \longrightarrow l^\pm \nu 2jets, 2l^\pm 2jets$ $m_H < 1\text{TeV}$

これに加えて、MSSM Higgs に対しては、

- $A \longrightarrow \tau^+\tau^- \longrightarrow e\mu + \nu's \longrightarrow l^\pm + \nu's + hadron$
- $H^\pm \longrightarrow \tau^\pm \longrightarrow 2jets$

などがある。

これを一瞥しても分かるように、Lepton は Higgs 粒子の探索において重要度が大きい。

LHC では他にも重要な物理を対象にしており、例えば Heavy-quark System の研究や超対称性粒子の探索などがある。

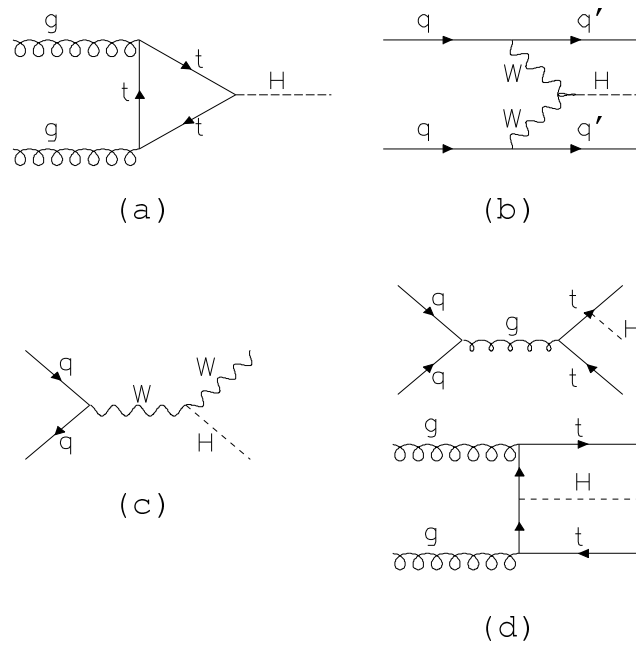


図 2: LHC での Higgs 粒子の生成過程 (a) $gg \rightarrow H$ (b) $qq \rightarrow W^+W^- \text{ or } ZZ \rightarrow Hqq$ (c) $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}H$ (d) $gg, q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}H$

2.2 LHC

LHC は現在実験が行なわれている LEP 用のトンネルを用いて建設される、全長 27 [km] の円形陽子加速器である。陽子-陽子衝突実験に関する LHC の主なパラメーターとしては、重心系の最大エネルギーが 14 [TeV]、Luminosity が最大 $1.0 \times 10^{34} [cm^{-2}s^{-1}]$ 、Bunch 間隔 (衝突間隔) が 25 [ns] などである。粒子加速等のために最大 8.4 [Tesla] を実現できる超伝導磁石を用いている。LHC を用いた実験グループとしては ATLAS、CMS、ALICE、LHB、GAJET、COBEX があり、このうち ATLAS、CMS が 1996 年 2 月現在、正式に承認されているものである。

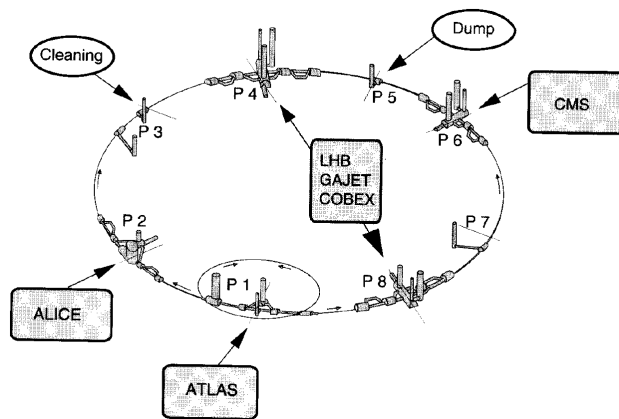


図 3: LHC

2.3 ATLAS

ATLAS 検出器は次のような要素から成り立っている。

□Inner Detector

衝突点付近の粒子の飛跡を検出するための測定器で、非常に高い位置分解能を要求される。ここには Silicon や GaAs を用いた Micro Strip Chamber、Straw Tube Tracker、Semiconductor Pixel Detector、Silicon や GaAs を用いた Semiconductor Tracking Detector が設置される。

□Calorimeter

衝突によって生成された電子や Photon を電磁シャワーを起こさせることによってその Energy を吸収するための E.M. Calorimeter や、 π などのハドロンをハドロンシャワーを起こさせることによってその Energy を吸収するための Liquid Ar Hadron Calorimeter、Scintillator Tile Calorimeter、衝突粒子の進行方向にでる jet などを捕まえる Liquid Ar Forward Calorimeter がある。これらは Barrel(検出器の胴体部) や Endcap(検出器の蓋) に設置される。

□Muon Detector

μ 粒子が寿命の長い粒子の中で物質との相互作用を起こしにくいという性質を利用して、最も外側に置かれる μ 粒子検出のための測定器である。ここには μ 粒子飛跡検出器として Monitored Drift Chamber、Cathode Strip Chamber、また検出器全体に対して衝突事象の生成を知らせる Trigger Signal を出すための検出器として Resistive Plate Chamber と Thin Gap Chamber がある。

□Superconducting Solenoid Coil

Z 方向に一様な磁場 (2 [Tesla]) を作る超伝導磁石である。Inner Detector での Particle ID のために用いられる。

□Superconducting Air Core Toroid Magnet

μ 粒子の運動量を測定するために Muon Detector の近くに設置される超伝導磁石である。これによって円形磁場を作っている。

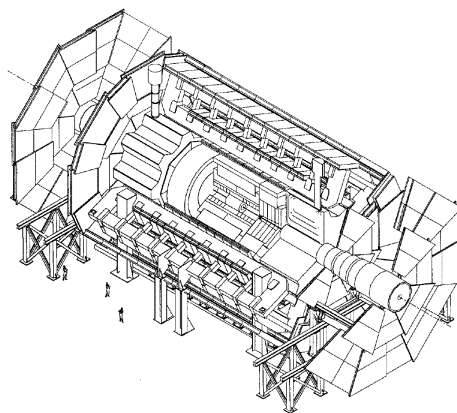


図 4: ATLAS 検出器

3 Thin Gap Chamber の構造とその動作原理

3.1 Thin Gap Chamber の構造

Thin Gap Chamber(以下、TGC と略す)の基本的な構造は一般的な Multi-Wire Proportional Counter(以下、MWPC)と同じで、2枚の平行な Cathode Plane の間に多数の Anode Wire を張ったものである。TGC の構造上の特徴は、一般的な MWPC に比べて Anode-Cathode 間の間隔が非常に薄いことにある。これが 'Thin Gap Chamber' の名前の由来である。この TGC は内部に Gas を封入して使用するもので、封入 Gas を入射粒子がイオン化することによって出てきた電離電子が、Anode-Cathode 間に電圧を印加することで形成された電気力線に沿って Anode Wire へ向かって進み、Anode Wire 近傍の強電場において電子雪崩が生成され、これによって誘起された Signal を読み出すようになっている。この Signal の特性を決定する要因は Chamber の構造パラメーター及び封入ガスであり、これらは目的に応じて選定しなければならない。TGC の Cathode Plane には

- Cathode 面に陽イオンが溜ることでこれが放電の原因とならないように、陽イオンに対して電子を与え、中性化することができる自由電子を多く持っていること。
- Cathode 面に陽イオンが衝突した際、中性化するため以外の電子が出て来ないようにするという理由、及び High Gain での動作の際には電子雪崩が大きくなり、Cathode 面との距離が短くなることで起こりやすくなる Photon との衝突による光電効果を起こさないようにするという理由から、仕事関数なるべく大きい物質であること。
- Anode Wire の誘起電荷に対する映像電荷 (これは Cathode Signal となる) が大きく現れるように抵抗値が大きいこと (小さいと Shield されてしまう)。

などの条件から 200 [μm] の厚さの G10 の上に高抵抗 ($\sim 1 [M\Omega/\square]$) の Carbon を塗付したものにしている。

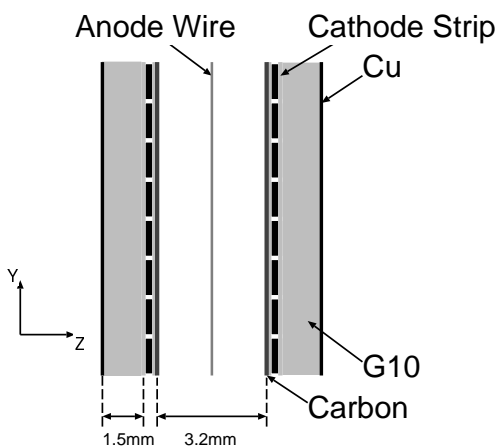


図 5: TGC の断面図:YZ 平面

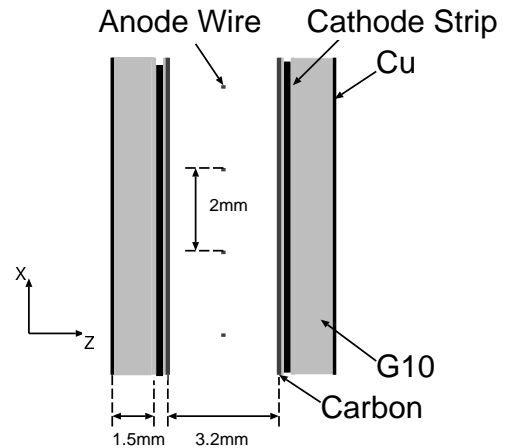


図 6: TGC の断面図:ZX 平面

また、Anode Wire には $50 \mu m\phi$ の金メッキされた Tungsten Wire を使用している。これは以下の理由による。一般に細い Wire 径の方がより高い電場を形成しやすいので、 $20 \mu m\phi$ 程度のかかなり細い Wire が良く使用されるが、Gain を大きくしようとするとき Anode Wire 近傍で生成された電子雪崩が Anode Wire を取り囲んでしまい、電子雪崩の成長を止めてしまうことになるので、High Gain を望むにはこの直径では好ましくない。更に、Wire 径が細いと切れ易いので、この観点から細過ぎるのは好ましくない。さて、TGC の Anode Wire の張力は $350 [g重]$ で、G10 基板にエッチング処理を施すことで残した Cu Strip Line に Wire を半田付けすることによって、その張力を一定に保っている。張力は隣合う Anode Wire 間ではたらく静電気力が引き起こす構造上の不安定性が小さくなる程度に大きく、Wire が切れてしまわない程度に小さくなるように選ばれた。また、TGC の寸法が大きい場合には Anode Wire が重力の影響でたるまないように、また上述の静電気力が引き起こす構造上の不安定性が大きくなるないように、G10 で作られた Wire Support が取り付けられている。同時にこの Wire Support は、TGC の Anode-Cathode Gap を保つという役割も担っている。最も端に位置する Anode Wire は Guard Wire と称し、 $70\sim 100 \mu m\phi$ の Wire を張力 $700\sim 1000 [g重]$ 程度で張って、端の電場の歪みを補正している。TGC の Anode-Cathode Gap、Anode Wire Spacing については、OPAL の Hadron Calorimeter 用に使用されている TGC ではそれぞれ $1.6 [mm]$ 、 $2.0 [mm]$ である。更に、Cathode Signal を読むために、上述の $200 [\mu m]$ G10 の Carbon 面とは反対の面に、Anode Wire と垂直方向の Cu Strip Line をエッチング処理によって作ってある。この上から静電シールドのために片面を銅メッキした $1.5 mm$ G10 基板を、銅面を外側にして接着している。また、TGC 製作用の接着剤にはすべてアラルダイトを使用している。Cathode 面となる Carbon 面、Cathode Strip Line となる Cu Strip Line、静電シールド用の Cu 面はすべて同一の電位となるように接続し、これを外部回路のグラウンドと共通化してある。

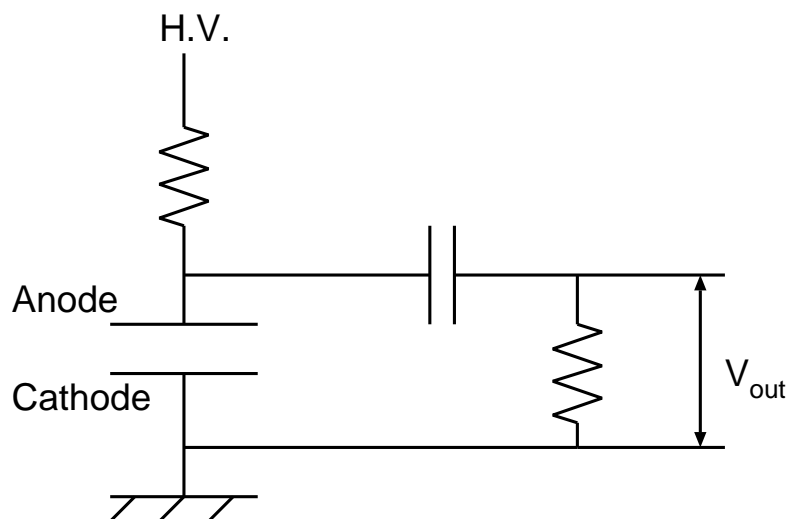


図 7: TGC の等価回路

3.2 動作原理

3.2.1 Gas 増幅

□ Proportional Mode

放射線が TGC 内に入射し、封入 Gas と相互作用して Gas 分子が電離されると、Chamber 内部に電場が形成されている場合には電子と陽イオンはそれぞれ電気力線に沿って進んで (Drift して) いく。このときの電離電子を一次電子という。一次電子が電場から Energy を受け取り、これが運動 Energy に転化されて分子との衝突を繰り返しながら Drift が進行していくが、この運動 Energy が Gas 分子のイオン化ポテンシャルよりも大きくなると、Gas 分子との衝突によって Gas 分子は更に電離され得る。これ以降の電離電子を二次電子という。Anode Wire 近傍では強電場が実現されているので、この領域では短い Drift で Gas 分子をイオン化するのに十分な運動 Energy となる。従って、Anode Wire 近傍では頻りにイオン対が生成され、ついには電子雪崩が形成される [図 8]。電子雪崩の成長は生成された陽イオン群が作る電場が印加電場を打ち消す程度にまでなると停止する [2]、[3]、[4]。

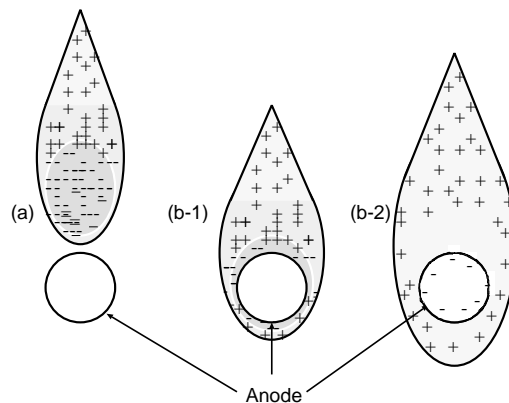


図 8: 電子雪崩の模式図:(a) 電子雪崩 (b-1) 電子雪崩が発達して Anode Wire を取り囲み (b-2) 電子が Anode Wire に吸われて陽イオン群のつくる電場が Anode Wire からの電場を打ち消し、電子雪崩の成長が止まってしまった図

一般に、電離過程において生成されたイオン対数の、一次電子数に対する比を Gas Gain と定義する。この Gas Gain はある程度定量的に扱うことができる。ある運動 Energy を持った 1 個の電子がある Gas 分子をイオン化した後に次のイオン化を起こすまでの距離の平均、いわゆる平均自由行程 (Mean Free Path) の逆数は、1 個の電子が単位長さ進んだ時に Gas 分子が電離されてできたイオン対の数と解釈できる。この値は First Townsend 係数 (α と表す) と呼ばれ、電場 E の Gas 圧 p に対する比に依存する。これらを考慮すると、Gas Gain は Gas 増幅過程の始点 r_1 と終点 r_2 を用いて

$$M = \text{Exp}\left(\int_{r_1}^{r_2} \alpha(E(r)/p) dr\right) \quad (1)$$

と書けることになる。ただし、 $r = 0$ は Anode Wire の中心軸と一致させている。

この Gas Gain が一次電子の個数に依らず一定の値であるような電場領域 E と Gas 圧 p が存在する。このような Mode は Proportional Mode と呼ばれる。

□ Limited Proportional Mode

Anode-Cathode 間への印加電圧 (High Voltage、以下 H.V と略す) を上げていき Gas Gain が大きくなっていくと、Mode は Proportional Mode からだんだんずれてきて、Gas Gain の値が一定でなくなってくる。これは次の理由によるものと考えられる。Gain が上がってくると陽イオンの数が大きくなるために陽イオン群のつくる電場が Anode Wire からの電場を弱めてしまい、Gas 分子を電離するのに必要な Energy を電子が電場から受け取りにくくなる。このような Mode を Limited Proportional Mode という。

□ Geiger Mode

一個の電子が Anode 近傍の増幅領域で電子雪崩を引き起こした際、イオン対に加えて多数の励起 Gas 分子が電子衝突によって作られる。この励起分子は数 ns 以下の間に可視光或は紫外線を放出して基底状態に戻る。この放出光 (Scintillation) は Gas 分子の Energy 準位に依存している。Scintillation が Gas 分子 (原子) や Cathode 面の分子 (原子) に光電吸収された場合、新しい電子が放出され、これが Anode 近傍で更なる電子雪崩を引き起こすことになる。これは Geiger 放電と呼ばれ、このような Mode を Geiger Mode という。この Mode においては電子雪崩が入射粒子によって作られた最初の電子の位置と無関係に生成され、多数の Anode に信号を出力することになる。この Mode の影響を抑えるために、位置検出を目的とする Gas Chamber では通常、Scintillation を吸収するための Quenching Gas を封入する。この Quenching Gas には分子内部に多数の振動・回転の Mode を持っている多原子の有機化合物 (炭化水素など) が使われる。TGC ではこれに $iso-C_4H_{10}$ や $n-C_5H_{12}$ を使用している。Geiger Mode ではこの Quenching Gas を封入する理由が Scintillation 吸収以外にもあり、以下のようなものである。もし電子雪崩生成時にできた陽イオンが大きな運動 Energy でもって Cathode 面と衝突すると、自分自身を中性化するための電子以外に Cathode 面から Photon を射出させたり、或いはもう一つ以上の電子をたたき出したりして再び電子雪崩を起こすことにつながる。この電子雪崩によって誘起された Pulse を After Pulse というが、これはより複雑な構造を持ち、かつより小さいイオン化ポテンシャルを持つ Gas を封入することで抑えることができる。この Gas を封入すると、先の陽イオンが Cathode に向かって Drift していく間にこの封入した Gas と多数回衝突を起こすが、イオン化ポテンシャルの差に応じて電荷が移動して陽イオンであったものは中性分子になり、中性であった分子は陽イオンになる。電荷移動を受けた陽イオンは Cathode に衝突したとき、持っていた Energy を Cathode から電子等を引き出すよりは自分自身の解離に費やす。有機化合物がこの性質を持つ Gas として適しており、この有機化合物は同時に Quenching Gas でもありうる [5]。

3.2.2 CF_4 の特性

CF_4 は炭化水素を混ぜることによって、放射線環境の厳しいところでの Drift Chamber の封入 Gas としてしばしば用いられる。Gas Chamber に対する CF_4 の主な特性としては

- エッチング効果を持つために、Anode Wire に化合物が付着し続けにくくなり、従って Gas Gain の劣化が見られない。
- 電子の Drift 速度が速いので、高速型の検出器を作ることができる。
- 電子の拡散定数が小さいために位置精度が比較的良い。

などが挙げられる [6]。

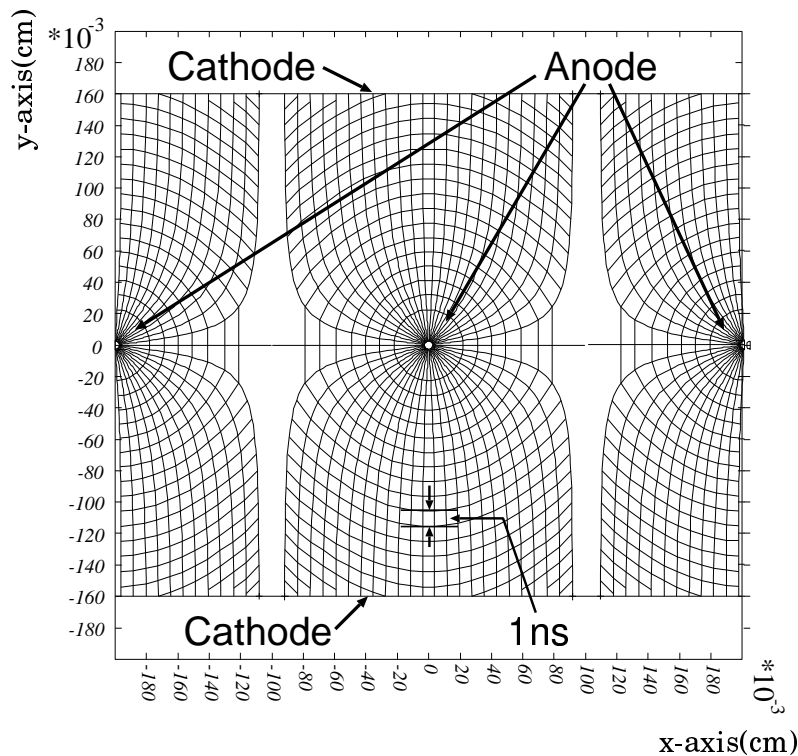


図 9: TGC 中での Drift Line

また、 CF_4 には電子を付着して負イオンを形成する性質がある [図 10]。これは F の電気陰性度が 4.0 とすべての原子のうちで最も大きく、従って CF_4 の電子親和力が非常に強いためである [6]。この性質のために、 CF_4 では初期 Cluster 中の電子が電気力線に沿いながら Anode に向かって Drift していく間で CF_4 に付着されてしまい、Anode 近傍の増幅領域に到達する電子の数が元の Cluster 中の電子の数より少なくなってしまう可能性がある。この効果は First Townsend 係数と同様に E/p に依存し、確率的に考えることができる。即ち、1 個の電子が 1 cm 進んだとき Gas との衝突過程において生成されたイオン対の個数が First Townsend 係数 α であるのに

対して、十分多い数の電子が1 cm 進んだときに Gas との衝突過程において CF_4 に付着されてしまったものの個数がもとの電子の個数の何 % かを示す値を η と表すと、電子付着の効果を含めた Effective First Townsend 係数は $\alpha - \eta$ となる。 CF_4 では E/p が 0 [V/(cm · Torr)] 付近から 45 [V/(cm · Torr)] 付近までの間 (大気圧下においては 1 [atm]=760 [Torr] を考慮して、0 [kV/cm] 付近から 35 [kV/cm] 付近の間) で $\alpha - \eta$ が負となり、電子付着の効果を受ける領域となっている [図 10]。TGC は内部の気圧を大気圧とほとんど同じである状態で動作させているので、H.V.=3.1[kV] では電子付着を受けやすい電場領域が大きく占めていることが分かる [図 11]。これは TGC の Efficiency の低下に大きく影響する。実際、'94 年の Beam Test[14] では $CF_4/iso-C_4H_{10}(80/20)$ 、 $H.V. = 3.1$ [kV] における Efficiency は 97.6 [%] であり、2.4 [%] の Inefficiency が存在することが明らかになった。これは CF_4 の電子付着の性質に起因するものと考えられるが、この場合の解決策として、TGC の構造パラメーター (Anode-Cathode Gap、Anode Wire Spacing) を違えたもので電子付着の効果が大きく影響する領域を減少させようとするものがあり、現在この試みがなされている。

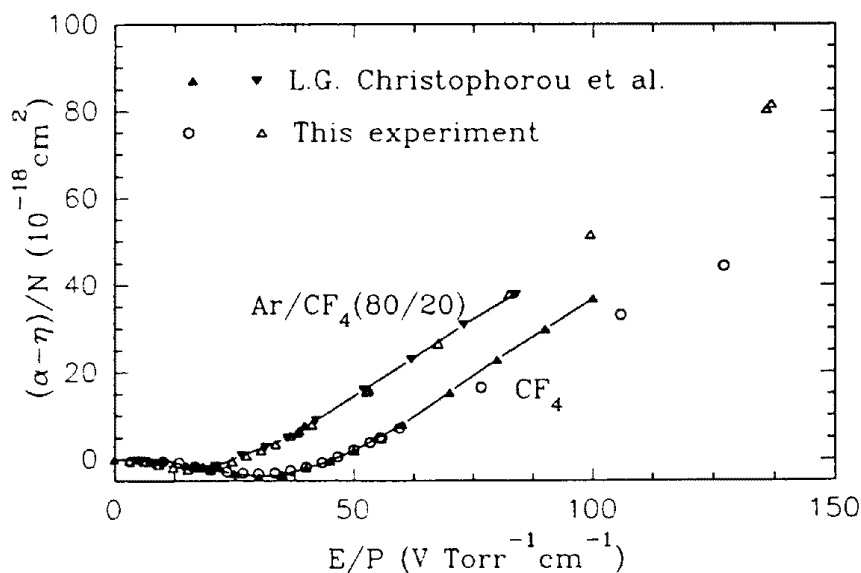


Fig. 7. Effective ionization coefficient $\bar{\alpha}$ for CF_4 and Ar/CF_4 .

図 10: 電子付着を考慮した場合の CF_4 などの First Townsend 係数 [7]

3.2.3 Anode Signal

Anode Wire で観測される MWPC の Signal は、Chamber 内で生成した電子雪崩中の陽イオンが Anode Wire 近傍の強い電場で Cathode に向かって移動したときに生じる誘起電荷である。この誘起電荷を定量的に議論するために、円筒電場の近似に基づいた一般論を述べる [8]。

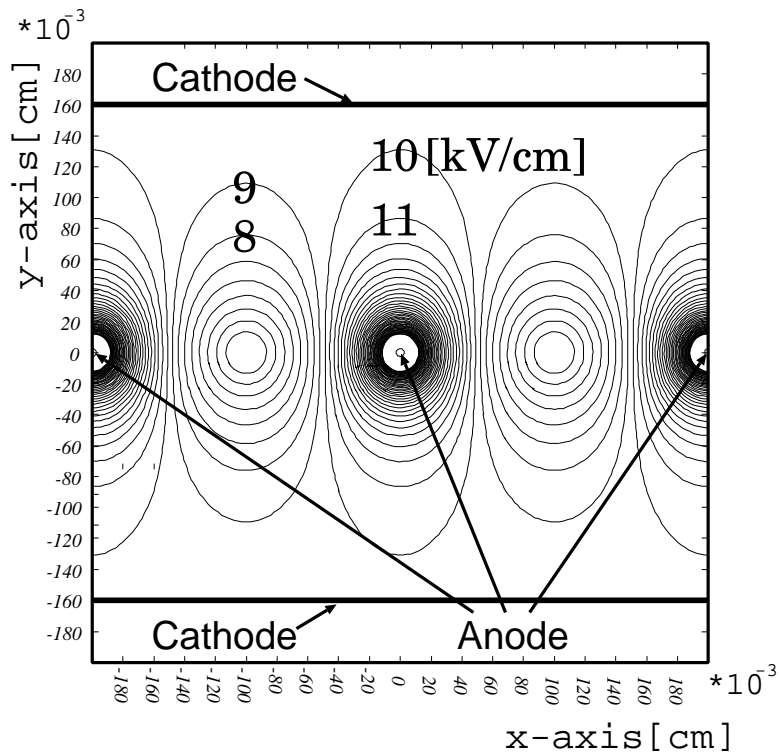


図 11: H.V.=3.1kV における TGC の等電場面

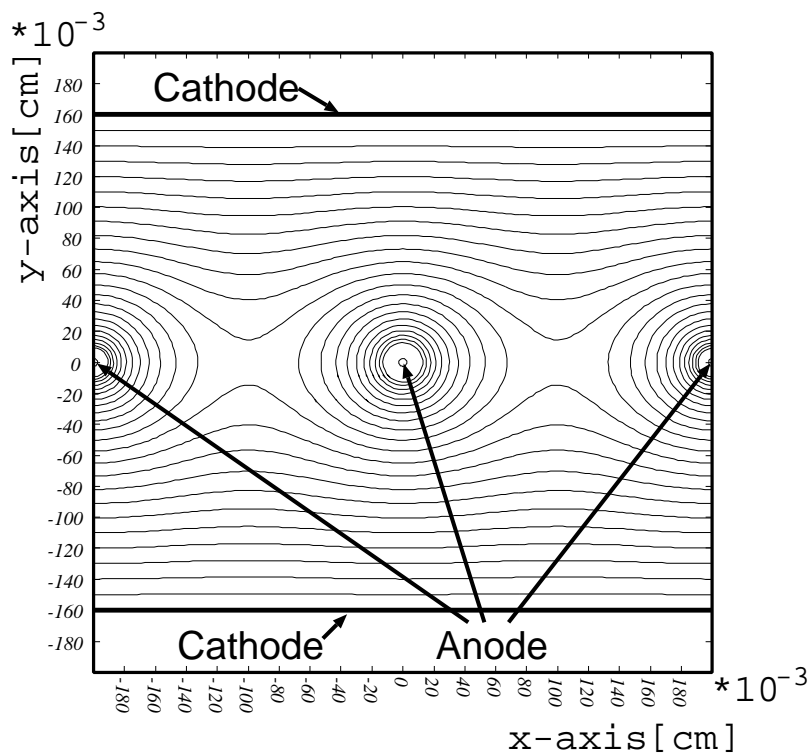


図 12: H.V.=3.1kV における TGC の等電位面

一般にいくつかの電極が存在する系の中に電荷が q であるような点電荷が (x,y,z) にあるとき、

ある特定の電極 i に誘起される電荷 Q_i は、

$$Q_i = qf_i(x, y, z) \quad (2)$$

と書ける。ここで、 $f_i(x, y, z)$ は点電荷 q の位置 (x, y, z) でのある関数である。この f_i を何らかの方法で求めてやれば Q_i が分かることになる。これに対して Green の相反定理を用いると、

$$f_i = \frac{V'(x, y, z)}{V'_0} \quad (3)$$

と書ける。ここで V'_0 は誘起電荷を観測する電極の Potential であり、また $V'(x, y, z)$ は他のすべての観測しない電極の Potential を 0 としたときの、点電荷 q が存在している位置 (x, y, z) における Potential である。ある電極に誘起される電荷の時間的変化は、与えられた電場の中における点電荷 q の運動を知れば求まる。従って、Anode Wire 近傍の電場に対して円筒電場の近似をすると、

$$r_+(t) = \left(\frac{2\mu^+ V_0}{\ln(r_2/r_1)} t + r_1^2 \right)^{1/2} \quad (4)$$

と表せる。ここで r_1 は Anode Wire の半径、 r_2 は Effective な円筒形 Counter の外形、 μ^+ は陽イオンの Mobility、 V_0 は Anode Wire への印加電圧である。また、Anode Wire での誘起電荷に対する関数 f_A は、Anode Wire 近傍においては

$$f_A(t) = 1 - \frac{\ln(r/r_1)}{\ln(r_2/r_1)} \quad (5)$$

と書ける。この $r_+(t)$ 、 $f_A(t)$ を Q_i の式に代入すると、

$$Q_A(t) = \frac{-Ne}{2\ln(r_2/r_1)} \ln \left\{ \frac{2\mu^+ V_0}{r_1^2 \ln(r_2/r_1)} t + 1 \right\} \quad (6)$$

という形になり、これが Anode Wire の誘起電荷の時間的変化となる。

3.2.4 Cathode Signal

Cathode Strip Line に誘起される電荷量 $\sigma(x)$ は Chamber 内に生成された電子雪崩が Anode Wire に誘起された電荷の映像電荷である。これは電気映像法によって計算できる。ただし、ここでは簡単に図 13 のような状況を考える。仮定として、電子雪崩の幅は考えないものとする [9]。

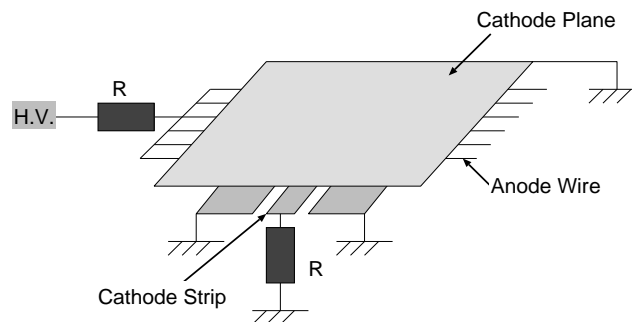


図 13: Cathode Strip

このとき、電子雪崩中の陽イオンを平行極板型コンデンサーの中間にある線電荷密度 λ の線電荷として考えることができる。線形の陽イオンの像は図 14 のように z 方向に $D/2$ の間隔で正負交互に現れる。電荷は $z = D/2$ にある。

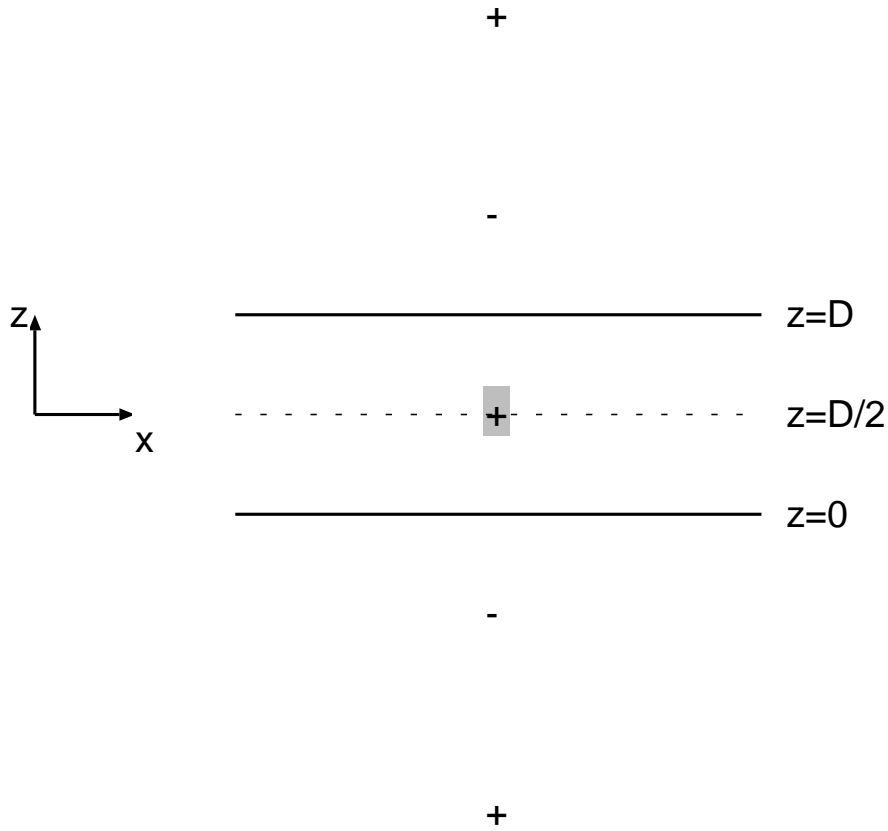


図 14: 平行極板コンデンサーの中心に電荷があるときの映像電荷

このとき、 $z = 0$ の面に対して $\pm z_k = \pm \frac{2k+1}{2}D$ ($k = 1, 2, 3, \dots$ ただし、 $z_0 = -D/2$) にある正負の映像電荷がつくる電場 $E_k^{(n)}(x)$ は面に対して垂直で、

$$E_k^{(n)}(x) = -\frac{\lambda}{\pi\epsilon_0} \frac{z_k}{x^2 + z_k^2} \quad (7)$$

である。ここで $z = 0$ の面に対して Gauss の法則を適用すると、 $z = 0$ での電場を $E^{(n)}$ とすれば、

$$\sigma = \epsilon_0 E^{(n)} \quad (8)$$

と書けるから、すべての映像電荷群によってできる電場を重ね合わせて $E^{(n)}$ を求め、これに z_k を代入することで、

$$\sigma(x) = -\frac{\lambda}{\pi} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \frac{(2k+1)D/2}{x^2 + (2k+1)^2 D^2/4} \quad (9)$$

$$= -\frac{\lambda}{2D} \frac{1}{\cosh(\pi x/D)} \quad (10)$$

が得られる。すると、幅が W で中心の座標が x であるような Cathode Strip に生成される電荷量は

$$P_0(x) = \int_{x-W/2}^{x+W/2} \sigma(x') dx' \quad (11)$$

となる。また、 σ を $-\infty$ から ∞ まで積分してやると、

$$\int_{-\infty}^{\infty} \sigma(x) dx = -\frac{\lambda}{2} \quad (12)$$

となり、Anode Wire の電荷の半分であることが分かる。

4 Cathode Strip Line からの Signal の伝播時間の測定

4.1 目的

ATLAS では TGC の Cathode に Strip Line を構成し、これを伝播する Signal を読み出して μ 粒子に対する Trigger とする可能性がある。Trigger 用の Signal に対してある長さの Signal Line 上での伝播時間の最大値と最小値の差と、Chamber 内部のガスの性質などによる Signal 自身の時間的なふらつきとを合わせたものが Bunch Crossing Time の 25 [ns] を越えた場合、Bunch ID を Trigger Logic に頼ることになる。従って、Cathode Strip Line からの Signal の伝播速度 (或は伝播時間) を測定することは、Bunch ID を効率良く行なうために必要な Cathode Strip Line の最大長の決定及び Trigger Logic の構成に対してひとつの指針を与えるものとなる。

4.2 Micro Strip Line

Micro Strip Line は電気回路用の基板に使用される伝送線路で、TGC の Cathode Strip Line はこの Micro Strip Line と形状が似ている。周波数 f [GHz] に依存した Micro Strip Line [図 15] の特性インピーダンスは

$$Z_0(f) = Z_0 \frac{\varepsilon_e(f) - 1}{\varepsilon_e - 1} \sqrt{\frac{\varepsilon_e}{\varepsilon_e(f)}} \quad (13)$$

と書ける。ただし、

$$\varepsilon_e = \frac{\varepsilon_r + 1}{2} + \frac{\varepsilon_r - 1}{2} F(W/h) - \frac{\varepsilon_r - 1}{4.6} \frac{t/W}{\sqrt{W/h}} \quad (14)$$

$$\varepsilon_e(f) = \left(\frac{\sqrt{\varepsilon_r} - \sqrt{\varepsilon_e}}{1 + 4F^{-1.5}} + \sqrt{\varepsilon_e} \right)^2 \quad (15)$$

$$F = \frac{4h\sqrt{(\varepsilon_r - 1)}}{\lambda_0} \left\{ 0.5 + \left[1 + 2\log\left(1 + \frac{W}{h}\right) \right]^2 \right\} \quad (16)$$

$$Z_0 = \begin{cases} \frac{\eta_0}{2\pi\sqrt{\varepsilon_e}} \ln(8h/W' + 0.25W'/h), & W/h \leq 1 \\ \frac{\eta_0}{\sqrt{\varepsilon_e}} [W'/h + 1.393 + 0.667\ln(W'/h + 1.444)]^{-1}, & W/h \geq 1 \end{cases} \quad [\Omega] \quad (17)$$

$$\eta_0 = 120\pi \quad [\Omega] \quad (18)$$

$$\begin{cases} W'/h = W/h + \frac{1.25}{\pi}(t/h)[1 + \ln(4\pi(W/t))], & W/h \leq 1/2\pi \\ W'/h = W/h + \frac{1.25}{\pi}(t/h)[1 + \ln(2(h/t))], & W/h \geq 1/2\pi \end{cases} \quad (19)$$

$$F(W/h) = \begin{cases} (1 + 12h/W)^{-1/2} + 0.04(1 - W/h)^2, & W/h \leq 1 \\ (1 + 12h/W)^{-1/2}, & W/h \geq 1 \end{cases} \quad (20)$$

である [10]。また、Micro Strip Line を伝播する Pulse の伝播速度は

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_e(f)}} [m/s] \quad (21)$$

$$c = 2.998 \times 10^8 [m/s] \quad (22)$$

と書ける。従って、単位長さ当たりの伝播時間は

$$t_p = \frac{1}{v_p} = \frac{\sqrt{\epsilon_e(f)}}{c} [s/m] \quad (23)$$

となる [11]。

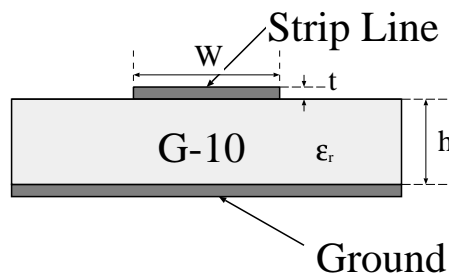


図 15: Micro Strip Line の断面図

図 16、17、18にこの式中の各変数間の関係をグラフに表したものを掲げる。ただし、図中に値を示していないパラメーターについては $W = 9.0 [mm]$ 、 $h = 1.5 [mm]$ 、 $t = 0.035 [mm]$ 、 $\epsilon_r = 4.5$ としている。

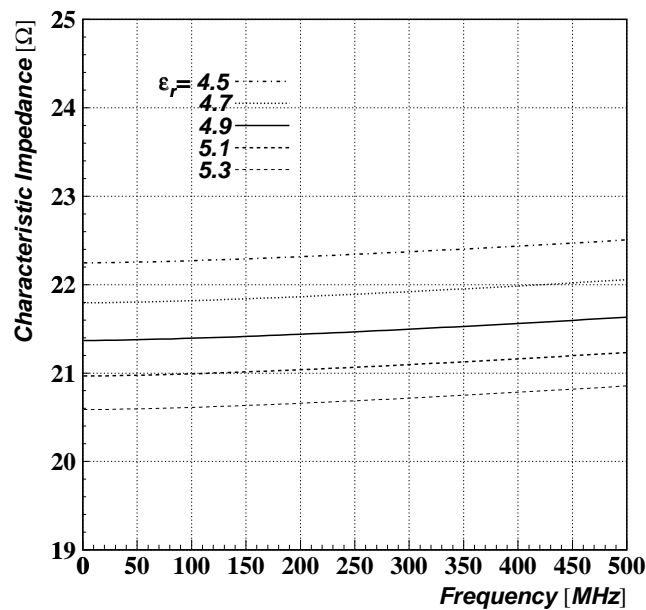


図 16: 周波数と特性インピーダンスの関係

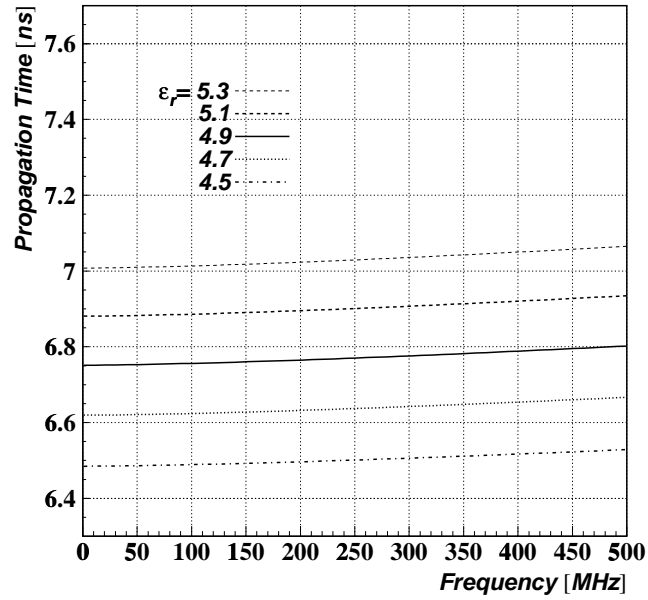


図 17: 周波数と伝播時間の関係

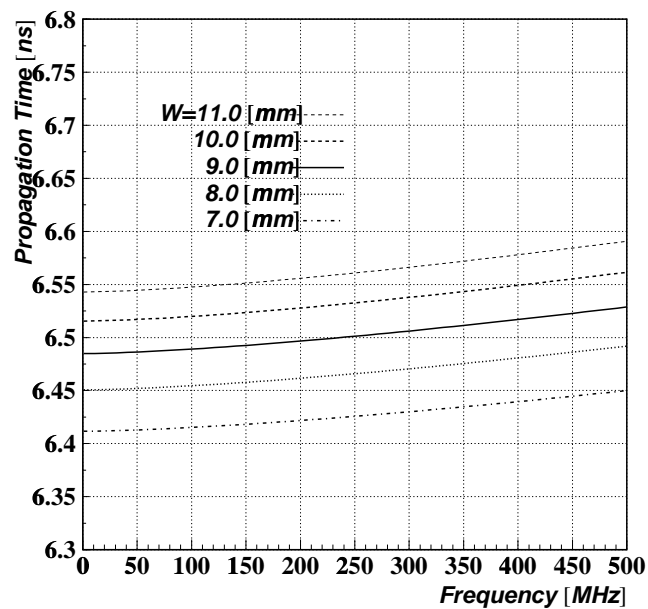


図 18: 周波数と伝播時間の関係

4.3 実験方法

実験に用いた TGC は大きさが $122\text{ [cm]} \times 74\text{ [cm]}$ で、有効面積は $119\text{ [cm]} \times 70\text{ [cm]}$ である。Anode Signal は 5 本ずつの幅 1 cm 分をまとめて読み出し、Cathode Strip は幅 1 cm で Anode Wire に直交している。また、 7 mm 幅の Wire Support が約 20 cm 毎に取り付けてある [図 19、20]。

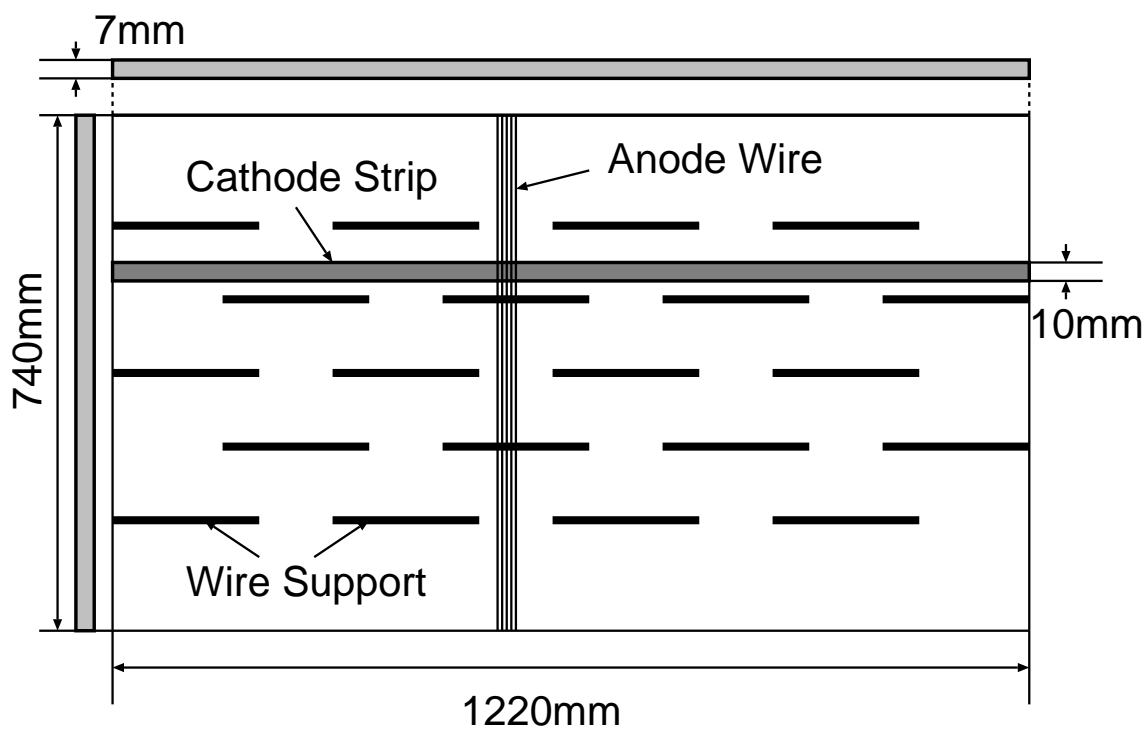


図 19: Large TGC

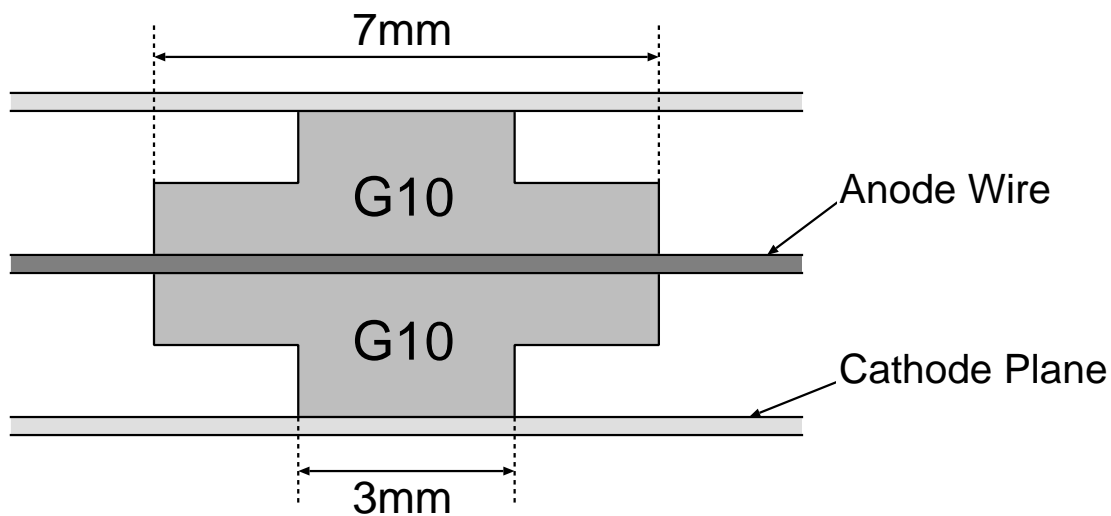


図 20: Wire Support

実験は次のようにして RI Source には ^{106}Ru を用い、これを中央に $2\text{ mm}\phi$ の穴が空いた Collimator に乗せて TGC に放射線を照射する。Cathode Strip Line の両側には Pulse Transformer を取り付け、ここから EG&G VT120C Amp.[表 1] を通して Digital Oscilloscope に入力する。Anode Signal は Photomultiplier Tube(PMT) 用 Amp. から Fan-in/Fan-out を通して Discriminator と Digital Oscilloscope に入力する。この Digital Oscilloscope は Sony/Tektronix 製 TDS644A で、 2 [Gsampler/s] 、 500 [MHz] の性能を持つ。また TGC をはさんだ Source の真下には $1\text{ [cm]} \times 1\text{ [cm]}$ の Scintillator が置いてあり、これに取り付けてある PM からの Signal Line を Discriminator に入力する。これら 2 つの Discriminator からの Signal を Coincidence Module に入力し、同時計数により発生させた Signal を Trigger Signal として Digital Oscilloscope に入力する。H.V. は ATLAS 実験における Background Rate の $\sim 1\text{ [kHz/cm}^2\text{]}$ においても安定でかつ十分な動作をすることで決められた 3.1 [kV] より 100 [V] 低い 3.0 [kV] 、封入 Gas は $\text{CF}_4/\text{iso-C}_4\text{H}_{10}$ (80/20) とし、同一の Cathode Strip Line 上で RI Source の位置を変えて DATA をとる。

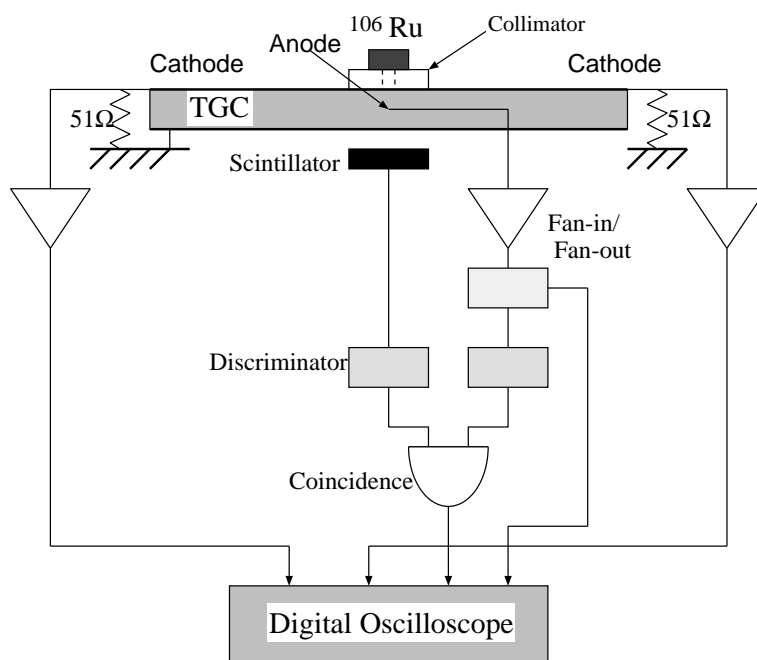


図 21: 測定システム

PERFORMANCE	ELECTRICAL AND MECHANICAL
Gain (10% gain tolerance on all versions): A Version 200, noninverting. B Version 200, inverting. C Version 20, noninverting. RISE TIME $\leq 1\text{ ns}$. NOISE $\leq 20\text{ }\mu\text{V}$ rms equivalent input noise. BANDWIDTH 10 to 350 MHz. OUTPUT RANGE 0 to -5 V with $50\text{-}\Omega$ load. INPUT BNC connector; input impedance $50\text{ }\Omega$. OUTPUT BNC connector; 0 to -5 V output with a $50\text{-}\Omega$ load. Output impedance $\leq 1\text{ }\Omega$, ac-coupled.	POWER REQUIRED $+12\text{ V}$, 50 mA (uses LEMO power connector that is compatible with accessory cable C-VT120). DIMENSIONS Aluminum housing $5.8 \times 5.1 \times 1.6\text{ cm}$ ($2.3 \times 2.0 \times 0.63\text{ in.}$). WEIGHT Net 0.2 kg (0.4 lb). Shipping 1.1 kg (2.4 lb). Optional Accessories C-VT120 cable assembly with connections between VT120 power input (LEMO) and Amphenol-type 17-80090 preamplifier power connectors that are compatible with other EG&G ORTEC NIM-standard modules.

表 1: EG&G VT120C 特性表 [12]

4.4 測定結果及び解析結果

解析は以下の方法で行なった。

1. Signal 以前で Data 取り込み開始点から 100 *Points* を平均してその Event の Ground Level を決定する。
2. Ground Level の補正を入れた Data に対して、Data Taking Points 500 *Points* のうちで最も値の低い Point を探し、これを Peak Point とする。
3. Pulse の立ち上がりの Point を Peak 以前の Peak×10 [%] と定義して、Peak に一番近い立ち上がり点を捜し出す。

結果は図 22に示すように 6.55 ± 0.04 [ns/m] となった。

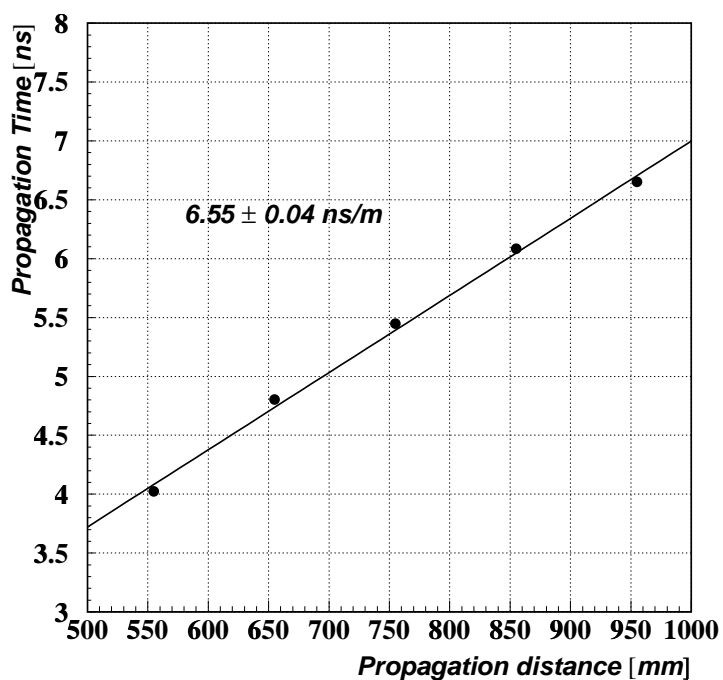


図 22: Cathode Strip Line における伝播時間の測定結果

図 23には典型的な Pulse の一例を示しておく。

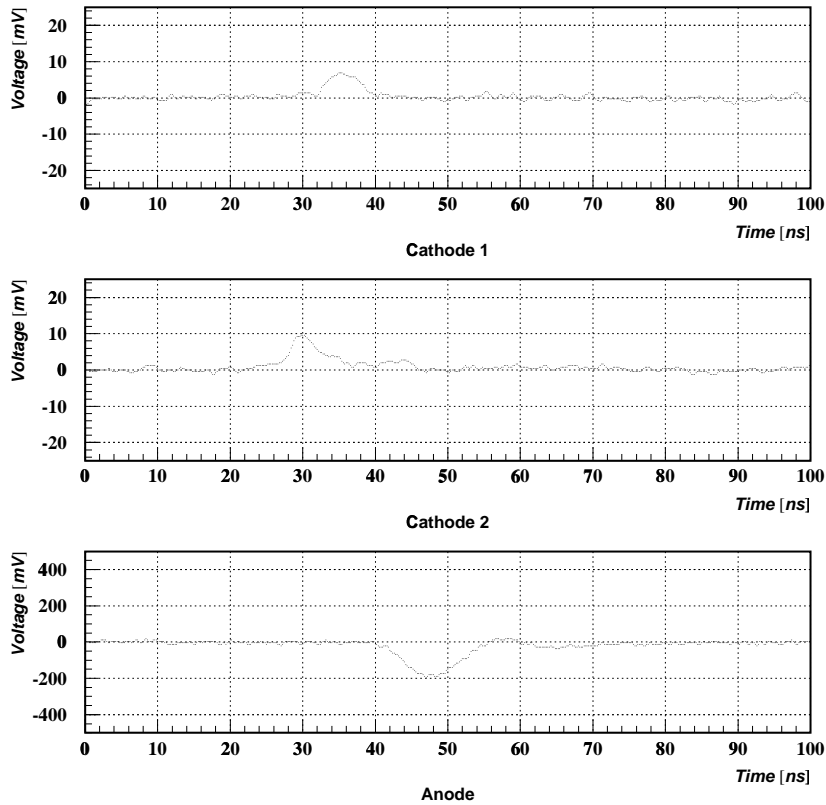


図 23: 典型的な Pulse の一例

4.5 考察

□Micro Strip Line 近似

Micro Strip Line での伝播時間はパラメーターである W, h, t, ϵ_r, f に依存するが、このうちの ϵ_r に関しては G10 及び FR4 では 4.0 ~ 5.3 程度の幅を持っている。例えばナショナルプリント配線用基板の G10 では 4.0 ~ 4.8 となっている [13]。これはメーカーによっても若干異なる。ここで Cathode Strip Line を Micro Strip Line で近似することを考える。今回の測定において、 W, h, t については $W = 9.0 [mm]$ 、 $h = 1.5 [mm]$ 、 $t = 0.035 [mm]$ と固定されているが、実験に使用した TGC に使われている G10 の ϵ_r については不明で、直接に測定はできなかった。しかし、この測定結果である $t_p = 6.55 \pm 0.04 [ns/m]$ を図 17 に見ると、周波数を 100 [MHz] としたとき $\epsilon_r \approx 4.5$ となる。この値で図 16 を見ると特性インピーダンスは約 22 [Ω] であることになる。本稿では触れていないが、以前 Cathode Strip Line の特性インピーダンスを測定したところ、ほぼこの程度の値であった。従って Micro Strip Line 近似は少なくとも大きく外れたものではないと言える¹。

¹詳しくは ATLAS Meeting '94/5/10 の私の発表用原稿か或いは'94/7/7 の三宅氏の発表用原稿を参照。

5 Multiplicity

5.1 目的

TGC では、入射粒子自身が持っている Energy の一部を内部の封入 Gas に与えることで叩きだされた電子が、Anode Wire 近傍において Gas 増幅することで Signal が生み出される。従って、Signal の出た Channel を知ることで、入射粒子の位置を割出すことができる。ところが、入射粒子が封入 Gas に対して Energy を与えた領域以外に Signal を出すことがあれば、TGC を位置検出器として用いることは困難になる。また、Trigger として用いる場合にも複雑な論理回路が必要となり、Time Jitter の観点からも好ましくはない。ここで、このような多数の Channel に対して Signal を出す現象を Multiple Hit と呼ぶことにする。'94 年の Beam Test[14] においては Multiple Hit が Anode 及び Cathode の両方に見られた。この章では構造上避けることのできない電氣的 Crosstalk をもつ Cathode は考えず、これがあっても非常に小さいと思われる Anode Wire のみに注目する。

5.2 原因

Multiple Hit に関して考えられる要因としては、例えば

- 電子雪崩が生成された Anode Wire 以外でこの電子雪崩から直接生じる Pulse
- 電氣的な Crosstalk
- Gas 増幅の際に発生する Scintillation と Gas との光電効果に続いて起こる電子なだれ
- Cathode 面の Carbon に Scintillation が光電吸収されることによって生じる After Pulse

などがある。

□After Pulse

これは

1. 増幅過程において Gas 分子から生じた Scintillation Photon が Cathode 面に当たって光電子を叩き出す。
2. Gas 分子の電離過程において生成した陽イオンやこの陽イオンから電荷移動を受けた分子が電氣力線に沿って Drift しながら Energy を大きくしていき、やがて Cathode 面と衝突してここから電子を受けとって電氣的に中性となるが、このとき Photon 或は電子が Cathode 面から飛び出す。

といった原因で出てきた電子が封入 Gas 分子を電離することで起こる。Cathode 面の Carbon は仕事関数が約 5 [eV](Photon の Energy にして $\lambda = 250$ [nm] に相当)[15] であるので、これ以下の Energy の Scintillation では光電吸収されず、Carbon の熱エネルギーに転化するなどして Scintillation Photon の Energy を吸収するはずである。ただし、電子雪崩の生成の過程で作られた陽イオンが Cathode 面に到達するまでの時間 (約 1 [μ s]) を考慮すると、先に挙げた 2 の過程はこの実験においては観測することができない (TDC の時間分解能をできるだけ上げるために、この最大測定時間を 100 [ns] としている理由から)。

□Scintillation による 2 次電子雪崩

ここで、 CF_4 に $iso-C_4H_{10}$ を添加する理由について触れておく。一般に、MWPC では 2 次電子雪崩を生成する原因となる Scintillation を消滅・吸収する目的で有機系化合物を添加する。これらの化合物では分子数の多い化合物ほど分子自身の内部に多くのモードを持ち得るために吸収能力に優れている。 $iso-C_4H_{10}$ は常温・常圧で気体 (沸点 $-11.7^\circ C$) でありかつ安定な分子である炭化水素の、特にアルカンのうちで最も分子数の多いものである。図 24 にある CF_4 の Scintillation の Spectral Distribution は $\lambda = 160$ [nm] に特徴的な Peak を持っているが、図 25 から分かるように $iso-C_4H_{10}$ の Transmission Curve には $\lambda = 170$ [nm] に Cutoff があり、丁度 CF_4 の Peak を消している。因みに、ここでいう Transmission の定義は

$$Transmission(\lambda, x, N) := \frac{I(\lambda, x, N)}{I_0(\lambda)} \quad (24)$$

$$I_0(\lambda) : \text{波長}\lambda\text{の入射Photonの個数} \quad (25)$$

$$I(\lambda, x, N) : \text{厚さ}x、\text{密度}N\text{の試料を通過した波長}\lambda\text{のPhotonの個数} \quad (26)$$

$$(27)$$

である。

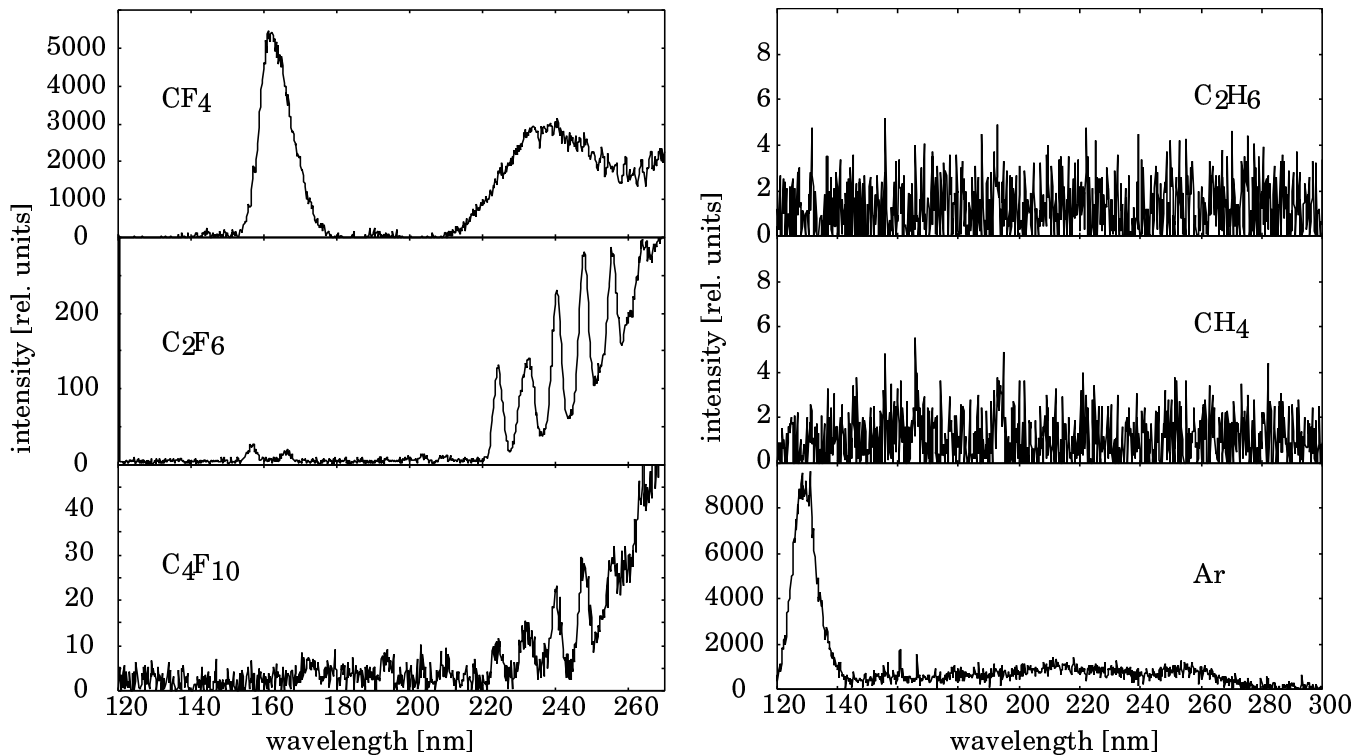


図 24: CF_4 などの Spectral Distribution[17]

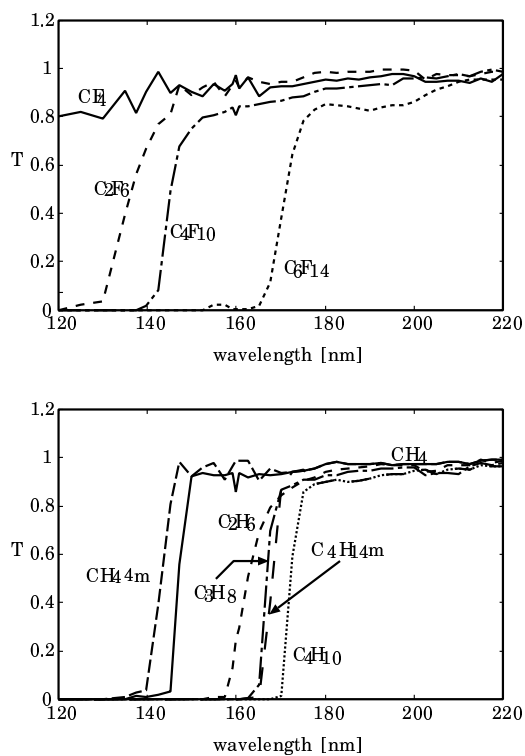


図 25: CF_4 、*iso*- C_4H_{10} などの Transmission Curve[17]

'95年、NIMに CF_4 のScintillationに関する論文が掲載された[16]。これは CF_4 のScintillationが CF_4 を電離させ、2次電子雪崩を生成し得るかどうかにあつての実験結果を報告してい

る。これによれば、

- CF_4 は相当数の Photon を放射する。 [表 2]
- $CF_4/iso - C_4H_{10}$ の Mixing rate が 80 : 20 である Mixing Gas では Photon の放射がかなり抑制されている。
- Gain が 5×10^5 のとき、 CF_4 からの Scintillation は再び CF_4 に光電吸収されて 2 次電子雪崩を生成し得る。
- $CF_4/iso - C_4H_{10}$ の Mixing rate が 80 : 20 である Mixing Gas では 2×10^6 の Gain でさえも 2 次電子雪崩は観測されなかった。

ということである。

The ratio of the number of emitted photons (over 4π) to electrons in an avalanche, measured in a double-stage parallel plate detector with different gas mixtures at 9 Torr. The systematic errors in the gain calibrations are of 20% and in the normalized light yield are of 50%

Gas	Average gain	Normalized light yield (photons/electrons)	Remarks
CF_4	1.5E6	0.30	165–600 nm
CF_4	1.5E6	0.10	Mylar window, cutoff at 300 nm
$CF_4/i-C_4H_{10}$ (80:20)	4.4E6	0.022	170–600 nm
$i-C_4H_{10}$	5E6	$\leq 5E-3$	170–600 nm

表 2: CF_4 などの Photon の射出の割合

この結果は一般に増幅過程を決定する検出器の幾何学的構造や Gas の圧力、更には検出器の Gain に依存しているものであるので、そのまま TGC に対して当てはめることはできない。従って、TGC を用いての Multiplicity 測定実験を行なう必要がある。

5.3 測定方法

実験に使用した TGC は小型のもので、これは Anode のみを読み出すことができ、Cathode Strip Line はない。大きさは外形が 10 [cm] × 10 [cm] で、そのうちの中央 3.2 [cm] × 6 [cm]

が Anode Wire Region となっている。Anode Wire には日本タングステン製の金メッキされた $50\ \mu\text{m}\phi$ タングステン Wire が張力 $350\ [g重]$ で $2\ [mm]$ 間隔で 14 本張ってある。これらの両側には $70\ \mu\text{m}\phi$ の Guard Wire が張力 $700\ [g重]$ で張ってある。 $200\ \mu\text{m}$ 厚の G10 の両面に銅が塗ってあるものの片面に Carbon を塗付し、この Carbon 面を Chamber の内側にしたものを Cathode 基板として使用した。Carbon の抵抗は $10\ \sim\ 20\ [\Omega/\square]$ である。実験は以下のようにして行なった。RI Source には ^{90}Sr を使い、 $1\ \text{mm}\phi$ 以下の Collimeter を通して TGC 中央のある Anode Wire 上に照射する。Collimeter の位置は特定の Anode Wire からの Signal を Discriminator に通して Scaler Counting し、Collimeter を Anode Wire に垂直に移動させたときその値が最大となる位置に決める。また TGC を挟んで、RI Source の下に $10\ [mm] \times 10\ [mm] \times 1\ [mm]$ の Scintillater を置いてこれを PMT(HAMAMATU 製 R647) を通して読み出し、RI Source を照射している Anode Channel からの Signal と PMT からの Signal との同時計数を行ない、これを Data Acquisition の Trigger とする。Anode Channel は読み出し可能な 12ch. のうちの 8ch. を読み出し、図 28 の System で Data Taking をする。測定はほぼ 1 気圧、気温 21°C 、Gas 流量 $20\ [cc/min]$ の下で、 $H.V = 3.1\ [kV]$ 、 $3.2\ [kV]$ 、 $3.3\ [kV]$ 、封入 Gas を $\text{CF}_4/\text{iso}-\text{C}_4\text{H}_{10}$ とし、この Mixing Rate を 80:20 および 85:15 とした全組合せについて行なった。

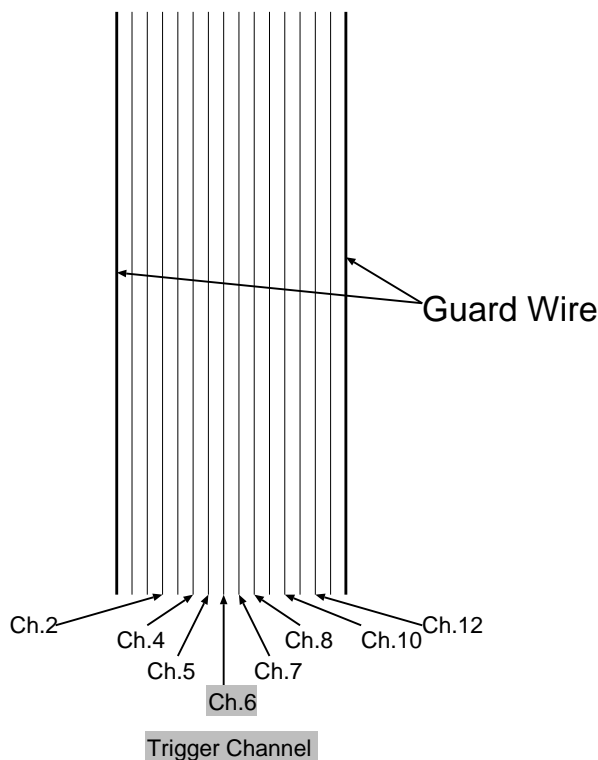


図 26: TGC の Anode Wire と Channel との対応

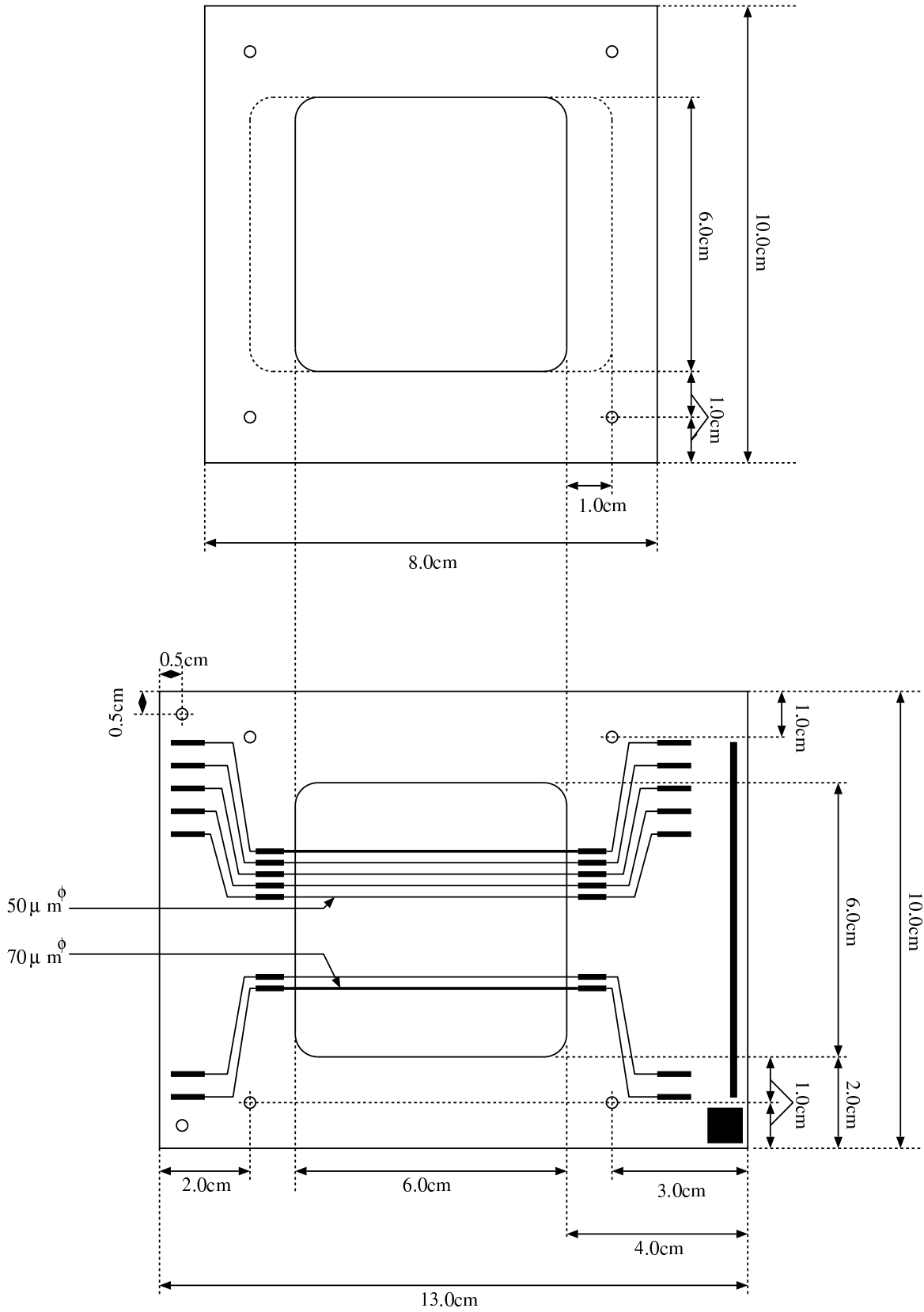


図 27: 実験で用いた TGC

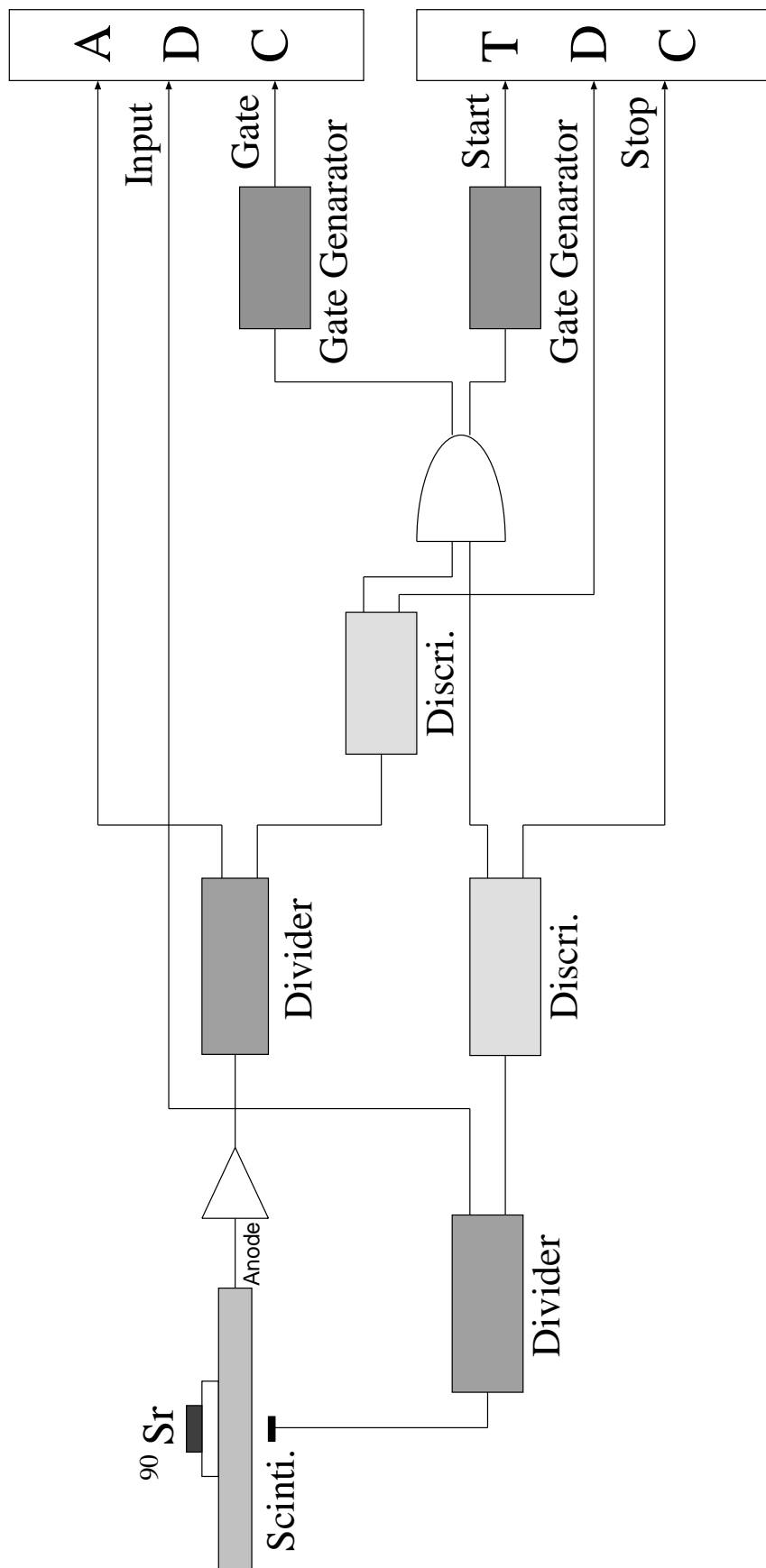


図 28: 測定システム

5.4 解析方法

□Event Selection

Event Selection は以下の様に行なった。

1. PMT の ADC 分布における Peak の ADC Counts を ADC_{peak} として、 $ADC_{peak} \times 0.7$ と $ADC_{peak} \times 1.9$ の範囲に ADC Counts があること [図 29]。これは 2 個以上の粒子が同時計数回路の時間分解能以下の間隔で TGC に入射したために、これを 1 個の粒子の入射としてしまうような Event を取り除くためのものである。PMT の ADC 分布における Peak を 1 個の入射粒子によるものの平均と考えて、その 2 倍弱の 1.9 倍のところで 2 個以上の入射粒子のある Event を Cut する。Peak の ADC Counts は Landau 分布による Fitting をすることで決定した。また、下限は Noise Event を取り除くためのものである。
2. TDC Counts が 2592 と 2600 の間にあること [図 29]。これは同時計数の Timing を PMT からの Signal の Timing としているために、TDC Counts がこの時間分解能の幅で収まるのが正常であるはずという理由からのものである。
3. RI Source を照射している Trigger Channel(Channel 6、図 31の 0 mm に属するものに相当) が全読み出し Channel のうちで最も早い TDC Counts を持っていること。これは先にあげた Multiple Hit の原因のいずれもが、粒子が入射して生成された電子雪崩を原因としているものであり、従ってある電子雪崩に続いて起こるものによる Signal はこの電子雪崩により誘起された Signal より遅い Timing で出てくるはずであるからである。
4. 各 Channel が Trigger Channel の TDC 分布の立ち上がり点 t_0 よりも遅い TDC Counts を持っていること [図 32]。これは TDC を Common Start によって動作させてあるためである。

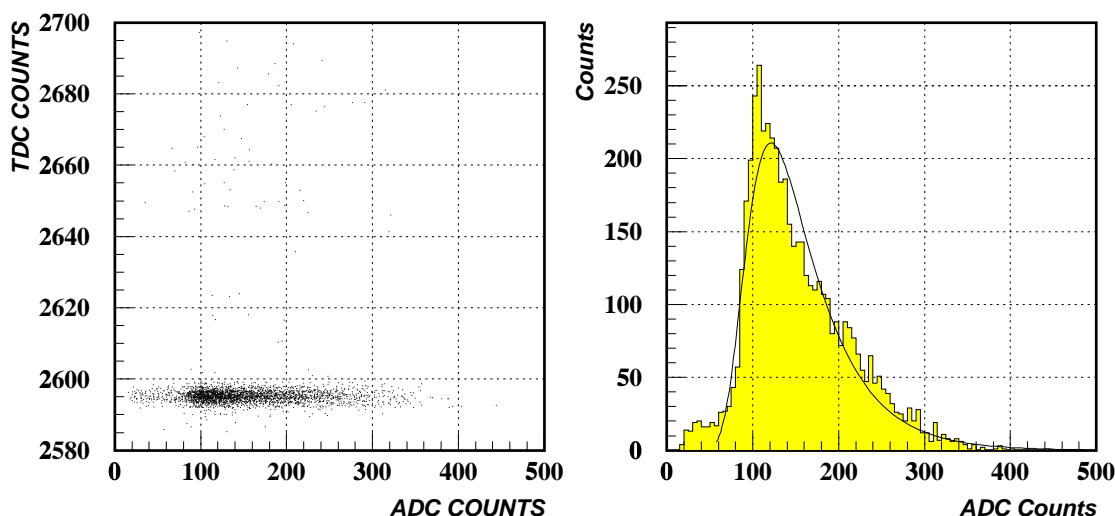


図 29: PM の TDC vs ADC の相関図と ADC 分布

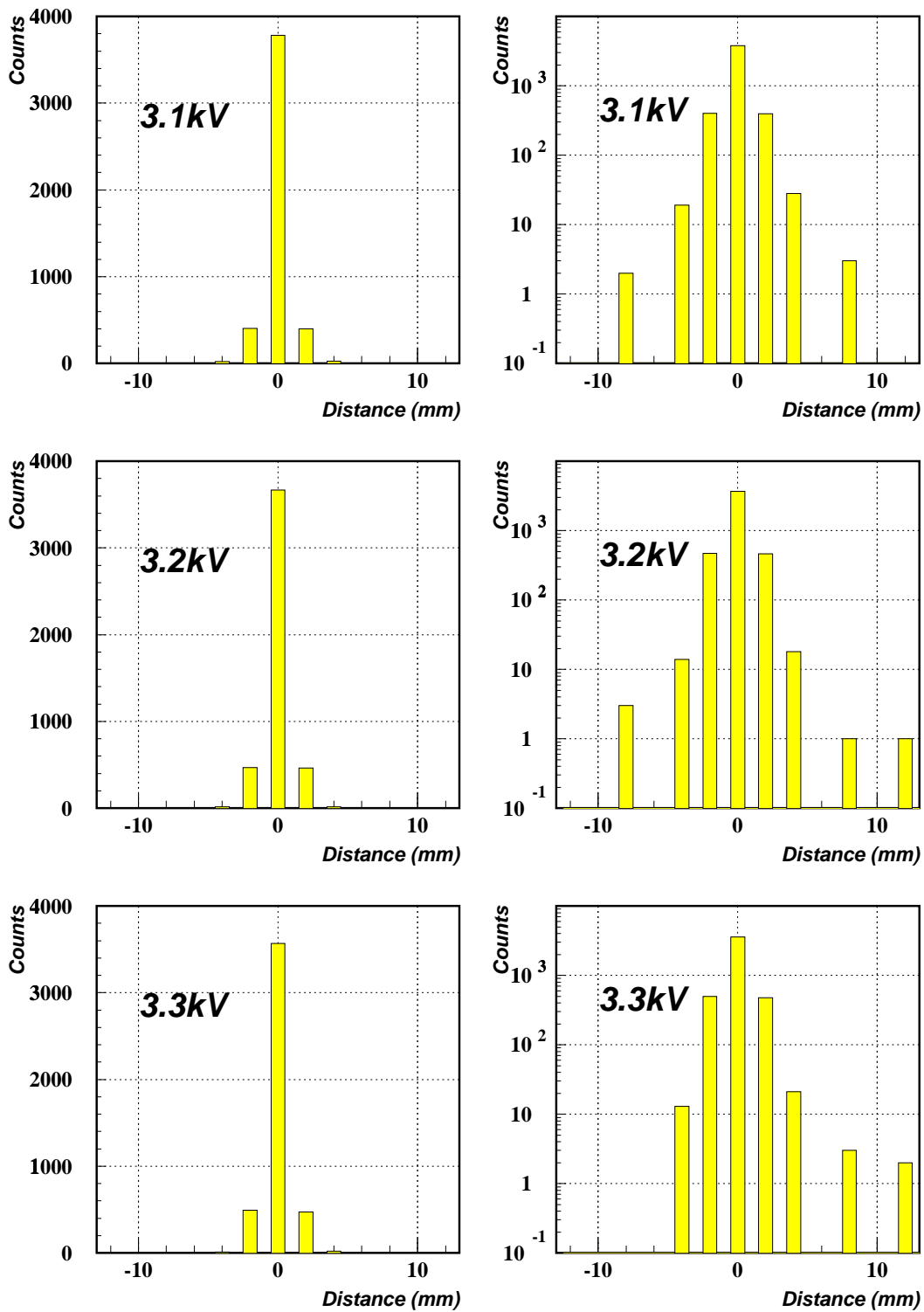


図 30: $CF_4/iso - C_4H_{10}(80/20)$ での Fist-Hit Channel の分布

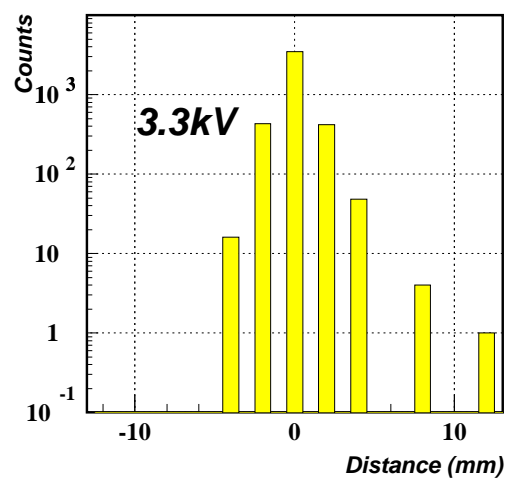
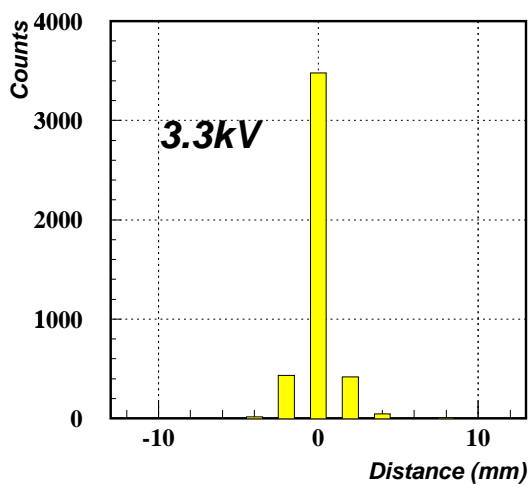
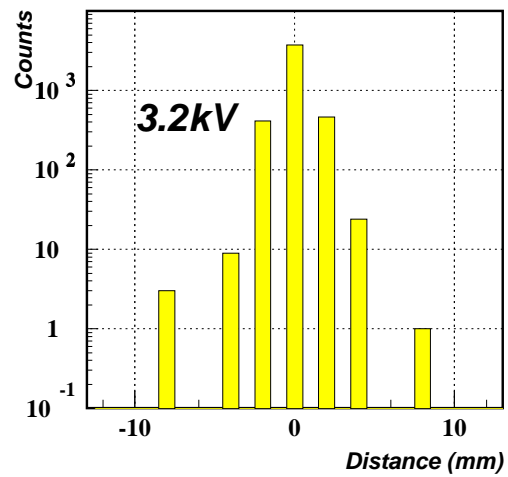
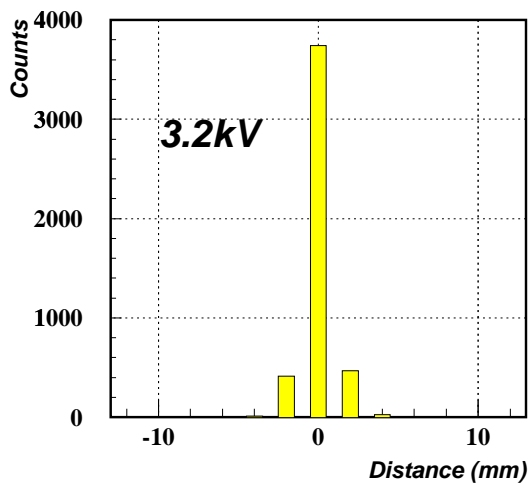
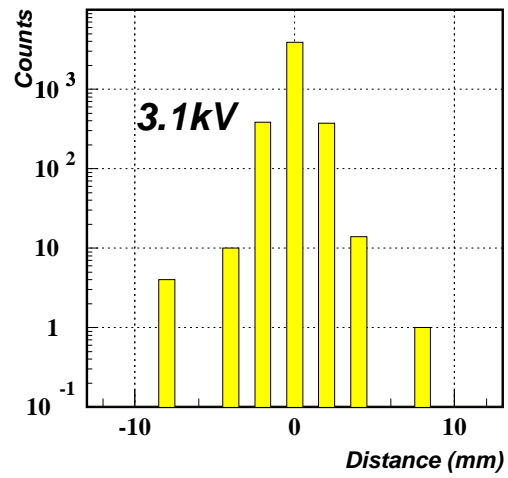
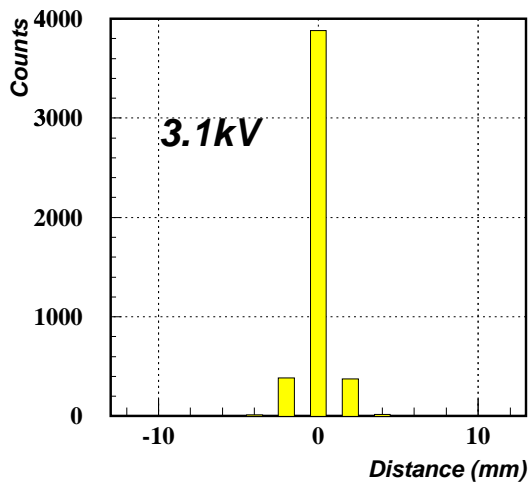


図 31: $CF_4/iso - C_4H_{10}(85/15)$ での Fist-Hit Channel の分布

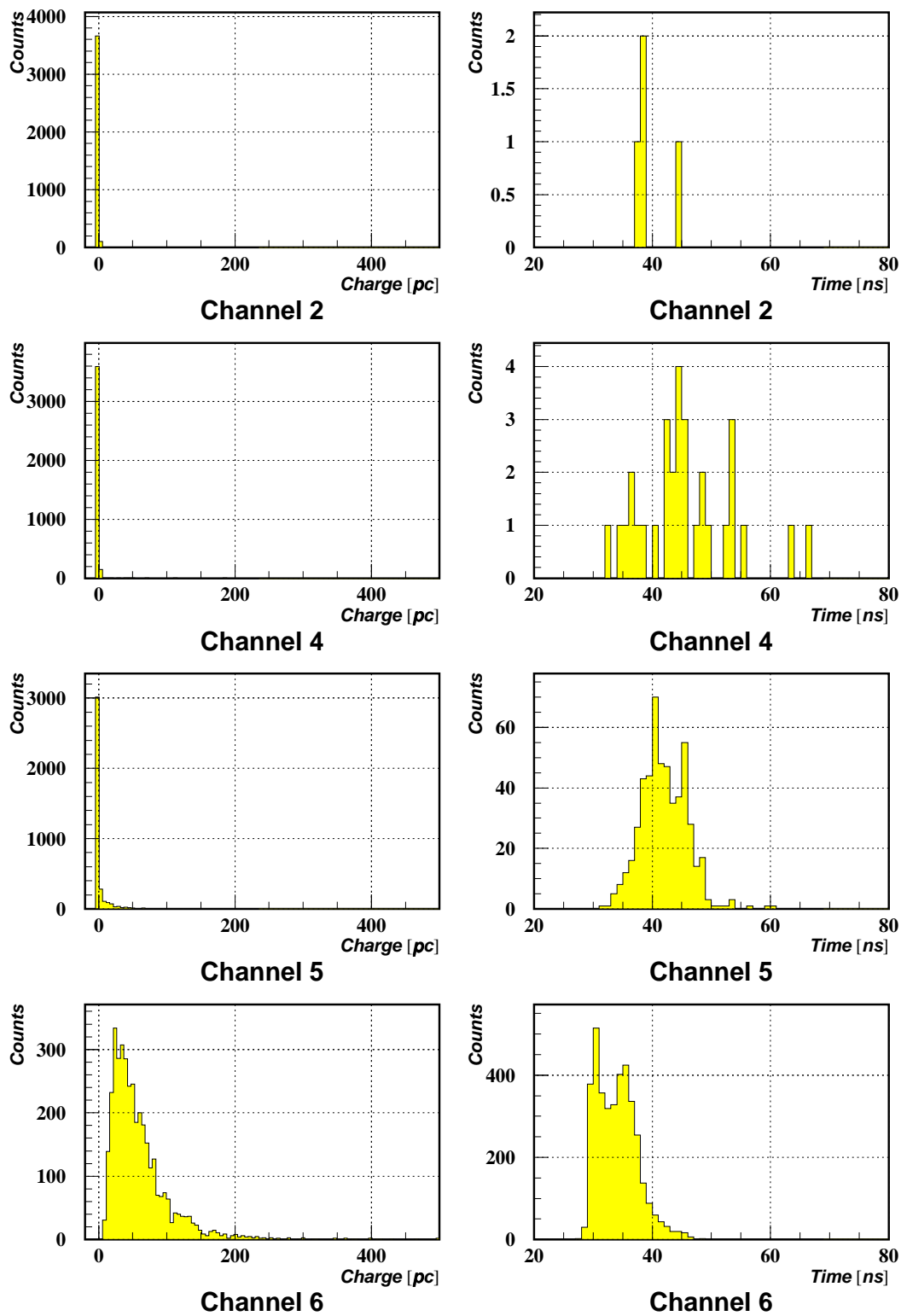


図 32: $CF_4/iso - C_4H_{10}(80/20)$ 、H.V.=3.1kV での TGC Channel 1~4 の ADC&TDC 分布

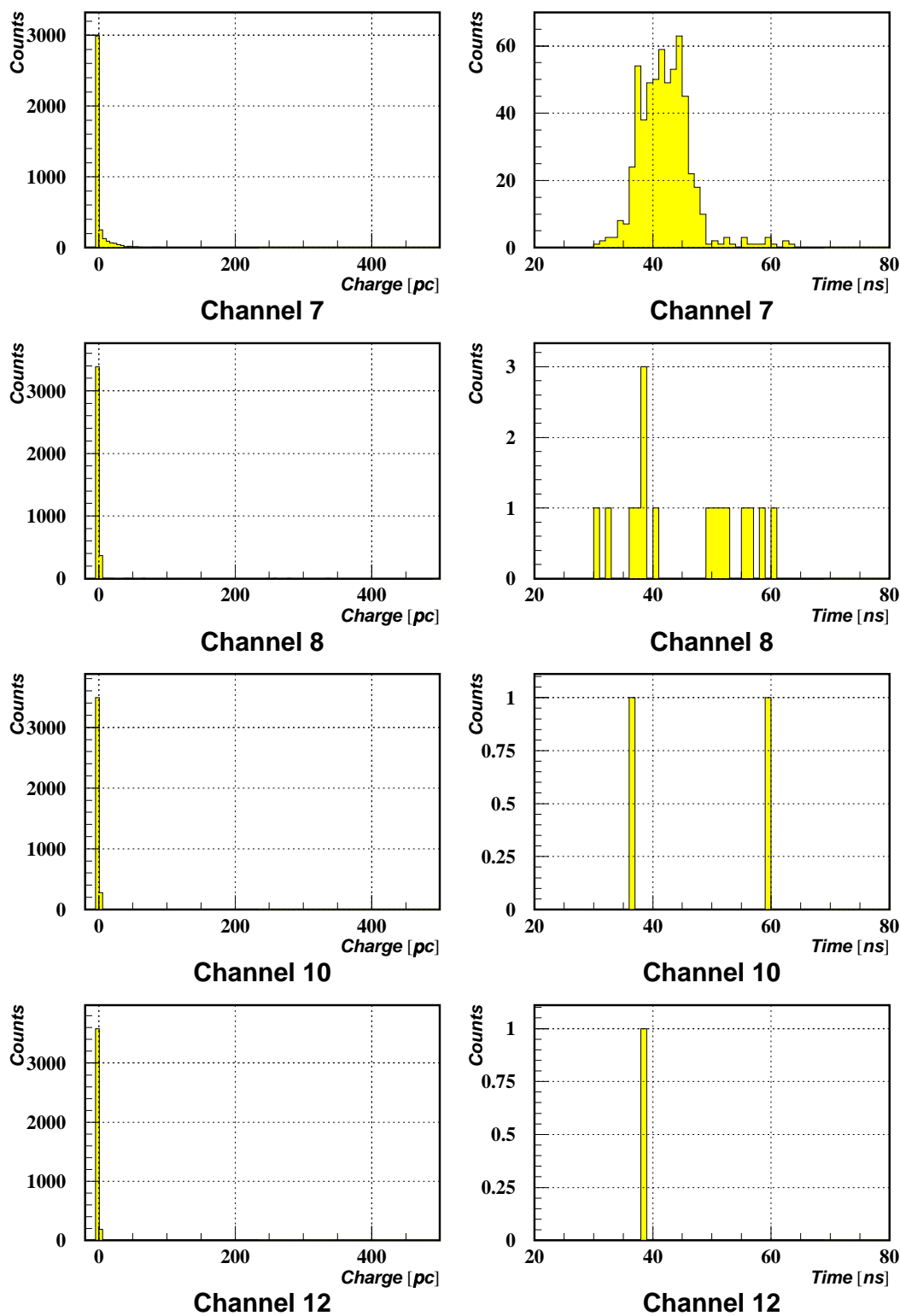


図 33: $CF_4/iso - C_4H_{10}(80/20)$ 、H.V.=3.1kV での TGC Channel 5~8 の ADC&TDC 分布

□Hit の条件

Amp. の後の Pulse Height が平均 $-200mV$ の Pulse に対して、平均 Pulse Height の 20% であ

る $-20mV$ に Threshold を設定し、これにかかった Signal を Hit Signal とした。(ただし、Amp. の後で Discriminator に入力する前において Divider で Pulse を 2 つに分割しているために、Discriminator に入力するときには $-200mV$ の Pulse に対しての Effective Pulse Height は半分の $-100mV$ である。従って、平均 Pulse Height の 20% は $-20mV$ ということになる。)

5.5 解析結果

一つの Event に対して Signal を出した Channel 数を横軸にして作った Histogram を図 34、35 に示す。

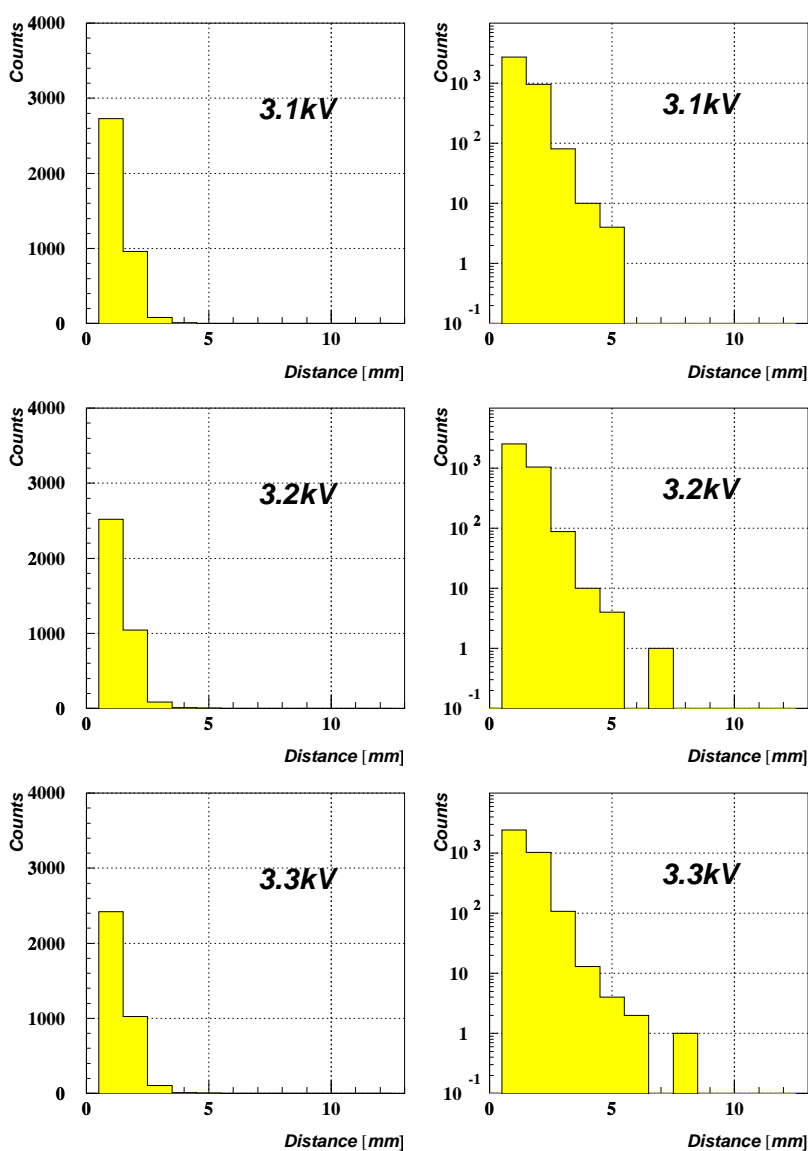


図 34: $CF_4/iso - C_4H_{10}(80/20)$ での Hit Channel Histogram

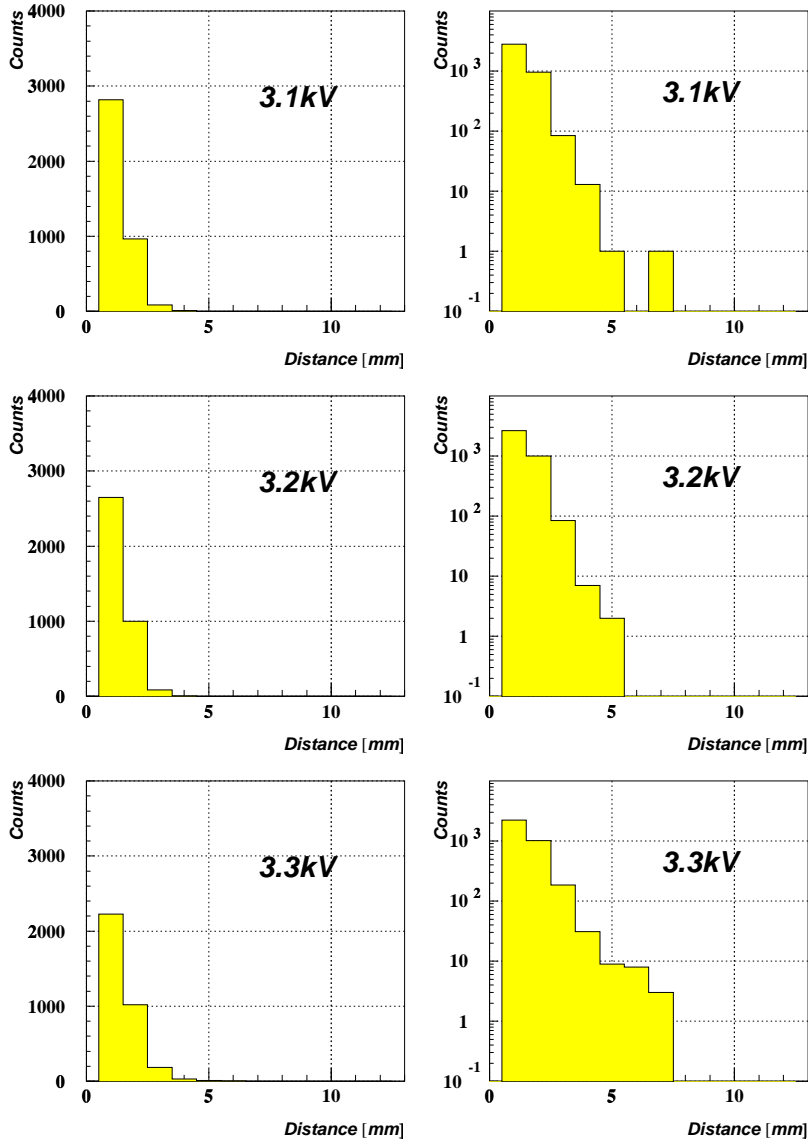


図 35: $CF_4/iso - C_4H_{10}(85/15)$ での Hit Channel Histogram

このうち、Hit Channel の数が 1 のものは入射放射線により生成した Single Hit である。また、Hit Channel の数が 2 のものについては入射放射線が隣合う 2 本の Anode Wire の Cover している領域で Primary Cluster を生成し、これら 2 本の Anode に対して Signal を発生させることがあるので、これを Multiple Hit とみなすことは不適當である。このことを考慮すると、Multiple Hit Event の割合 M を表す式は、

$$M := \frac{\sum_{m=3}^{m_0} H(m)}{N} \times 100[\%] \quad (28)$$

$$H(m) : \text{Hit 数が } m \text{ であるものの Entry 数} \quad (29)$$

$$(m = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8) \quad (30)$$

$$N = \sum_{m=1}^{m_0} H(m) : \text{全Entry数} \quad (31)$$

$$(32)$$

とするのが妥当である。H.V. を横軸にしてこれを Plot したものが図 36 である。ただし、ここでは上式における m_0 は 8 である。

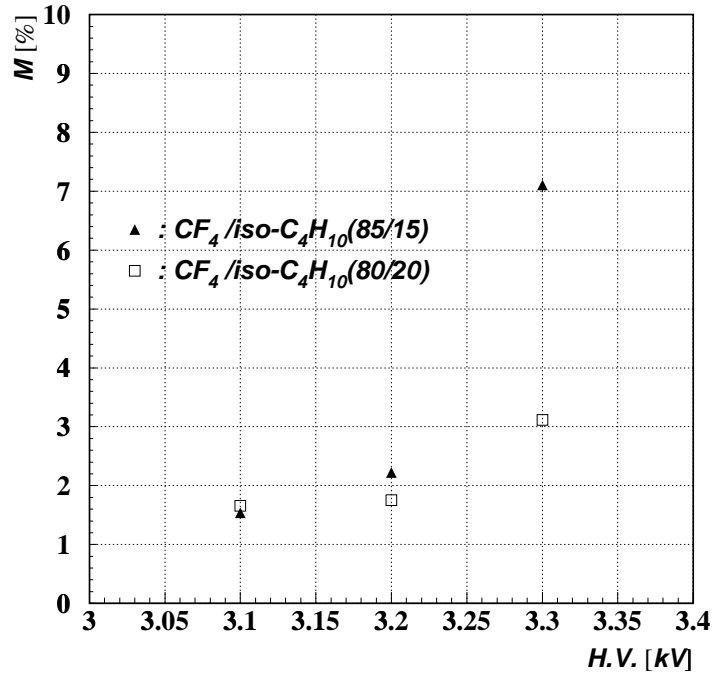


図 36: 各 H.V. での Multiple Hit Event の割合

このグラフから、 $H.V. = 3.1, 3.2$ [kV] のとき $CF_4/iso - C_4H_{10}$ の Mixing Rate が 80:20 のものと 85:15 のものは共に 3 [%] 以内であることが分かる。 $H.V. = 3.3$ [kV] のときには Mixing Rate が 85:15 のものは Multiple Hit が多くなるが、7 [%] 以内である。Mixing Rate が 80:20 のものは十分抑えられていて 3.7 [%] である。

次に、Signal の出た Channel を Count して作った Histogram を、Channel 6 からの距離 (mm) で各 Channel の位置を表したものを横軸にして図 37、38 に示す。

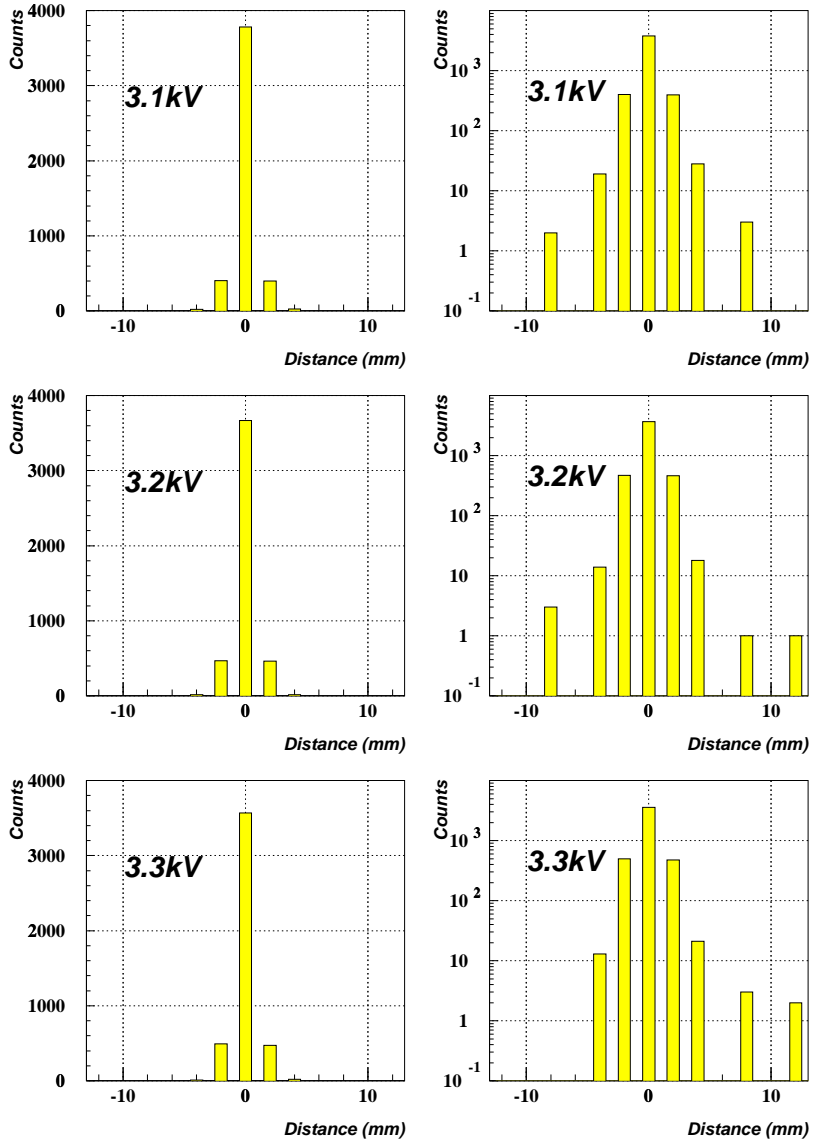


図 37: $CF_4/iso - C_4H_{10}(80/20)$ での Multiple Hit Histogram

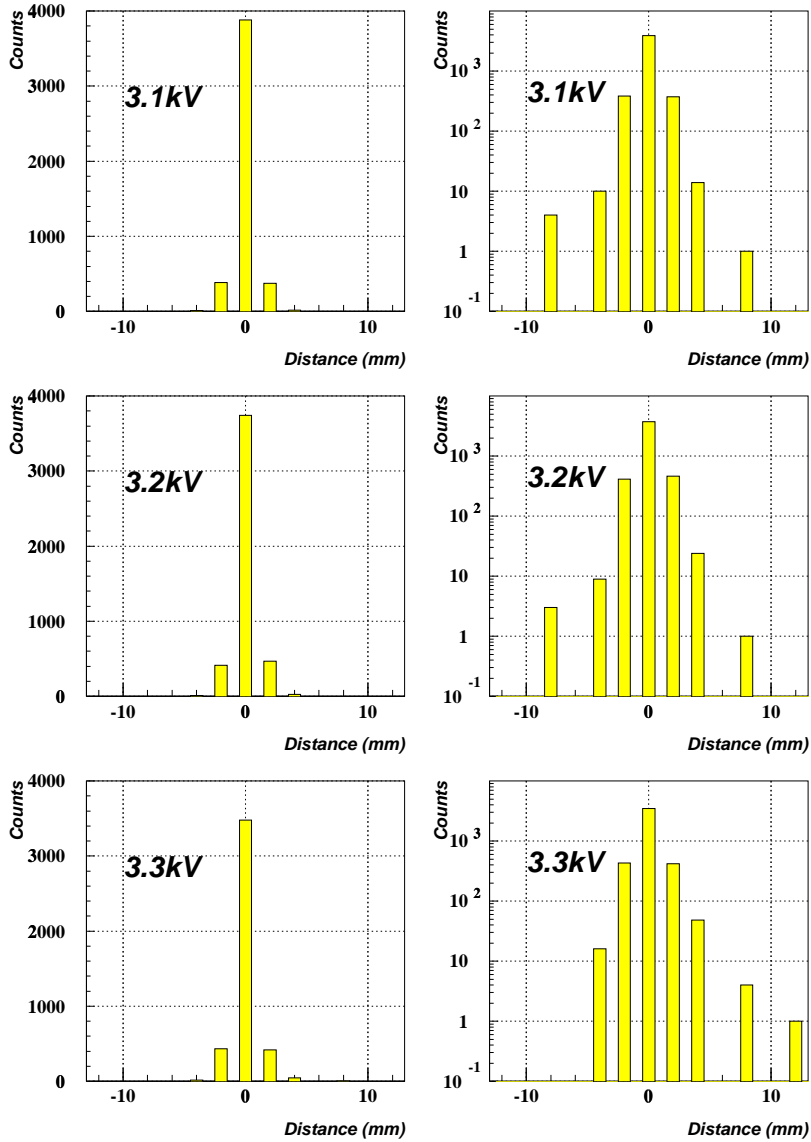


図 38: $CF_4/iso - C_4H_{10}(85/15)$ での Multiple Hit Histogram

ここでも、上で述べた注意から Trigger Channel の両隣の Channel は入射放射線によってできる '正しい' Signal の可能性があるので、これらを除いて各 Channel に Multiple Hit が現れる確率 $P(k)$ を定義する。

$$P(k) := \frac{N(k)}{N(6)} \times 100[\%] \quad (33)$$

$$N(k) : \text{Channel } k \text{ の Entry 数} \quad (34)$$

$$(k = 2, 4, 5, 6, 7, 8, 10, 12) \quad (35)$$

上の式中の分母は Trigger Channel である Channel 6 の Entry 数である。これを Plot したものが図 39、40 である。

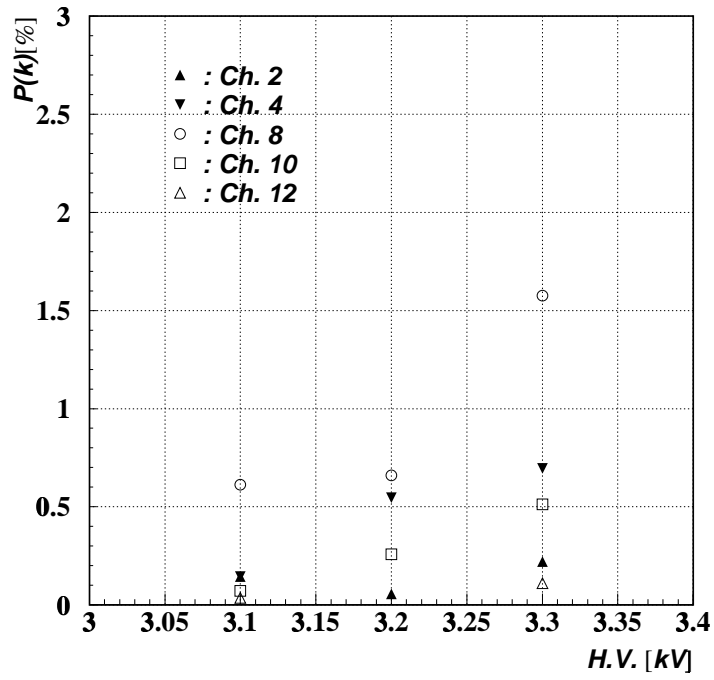


図 39: $CF_4/iso - C_4H_{10}(80/20)$ における各 H.V. での P(k)

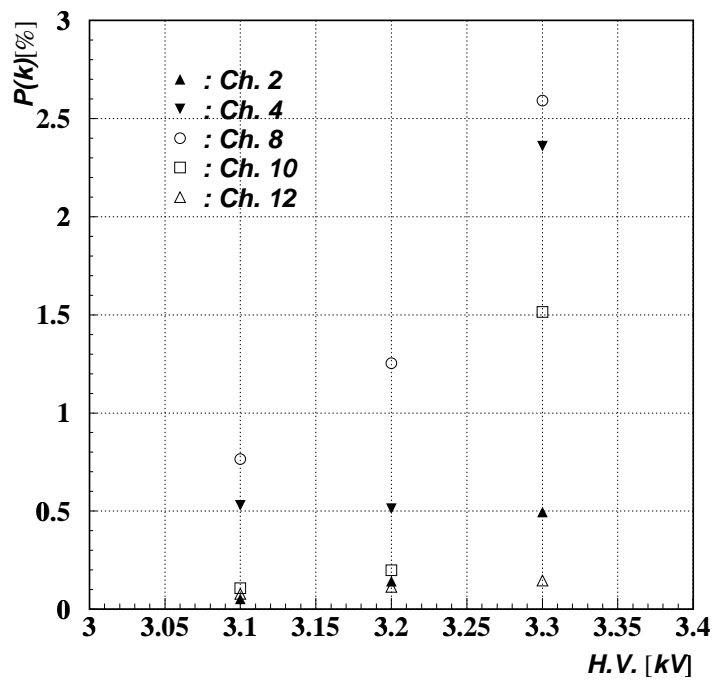


図 40: $CF_4/iso - C_4H_{10}(85/15)$ における各 H.V. での P(k)

5.6 考察

電気的な Crosstalk の各 Channel での見え方を議論するために、取った Data のうちで $CF_4/iso - C_4H_{10}(85/15)$ 、 $H.V. = 3.3 [kV]$ のものについて考えることにする。以下では、Channel k の TDC Counts を $t(k) [ns]$ と表す。まず、Trigger Channel である Channel 6 とその他の Channel との Scatter Plot[図 41] を見る。

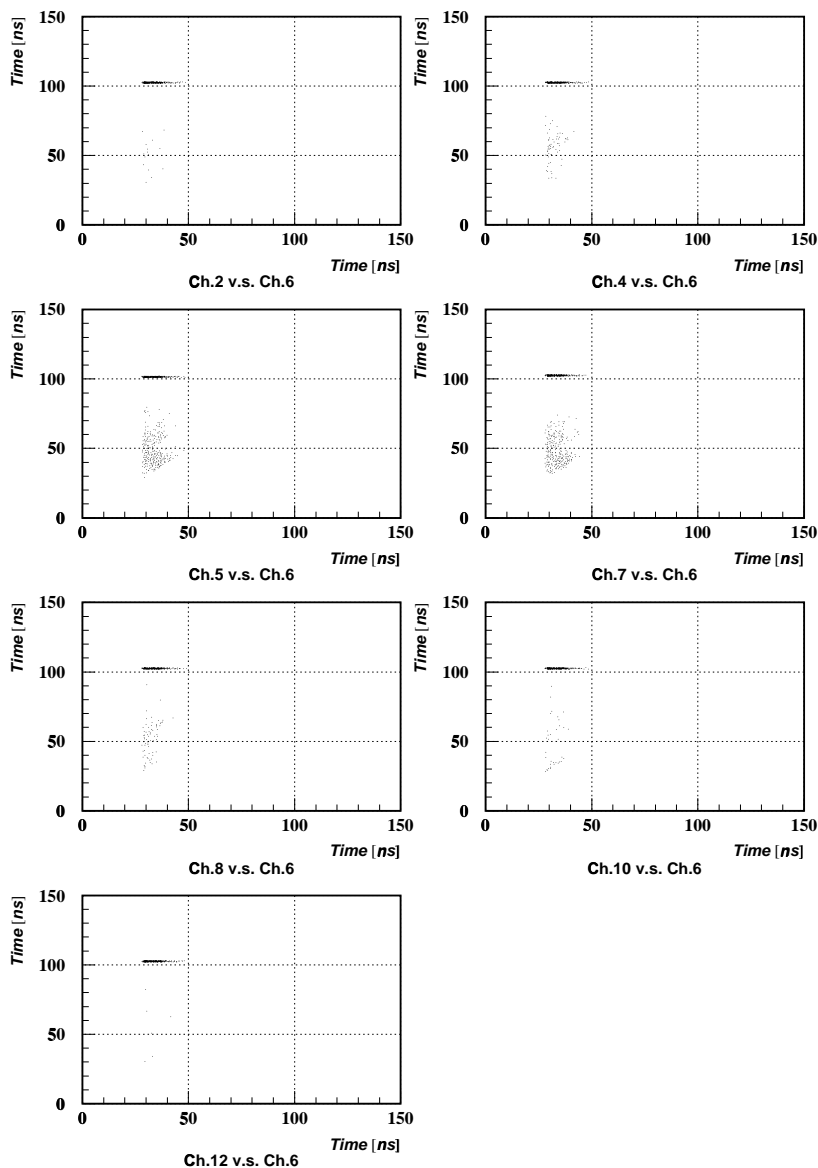


図 41: $CF_4/iso - C_4H_{10}(85/15)$ 、 $H.V.=3.3kV$ での $t(k)$ vs $t(6)$

この分布の右下で直線的に切れている部分は Channel 6 が Trigger Channel であるために生じるものである。また、 $t(k) = 100 [ns] (k \neq 6)$ の付近に $30 [ns] < t(6) < 50 [ns]$ 程度の幅で現れている部分は Channel k に Hit となるような Signal が出なかったものである。

□ 電氣的な Crosstalk

電氣的な Crosstalk について考えると、これは Trigger Signal との相関が必ずあるために Trigger Channel との Scatter Plot をとると直線的に見えるはずである。更に電氣的な Crosstalk は Trigger Channel の Signal とほとんど同時に現れるはずなので、 $t(6)$ とほとんど同じ値、即ち $t(k) = t(6)$ の直線に見えるはずである。このようなものは図 41 からは Channel 10 で見られる程度で、しかもこれは Channel 6 に対して対称な位置にある Channel 2 には見られないことから、TGC 内部に原因のあるものではない。 $t(k) - t(6)$ の Histogram である図 42 においては、電氣的 Crosstalk は 0 [ns] 付近のところに來ることになるが、これからも同様のことが分かる。従って、この実験からは電氣的な Crosstalk が Multiple Hit に対してほとんど影響しないと言える。

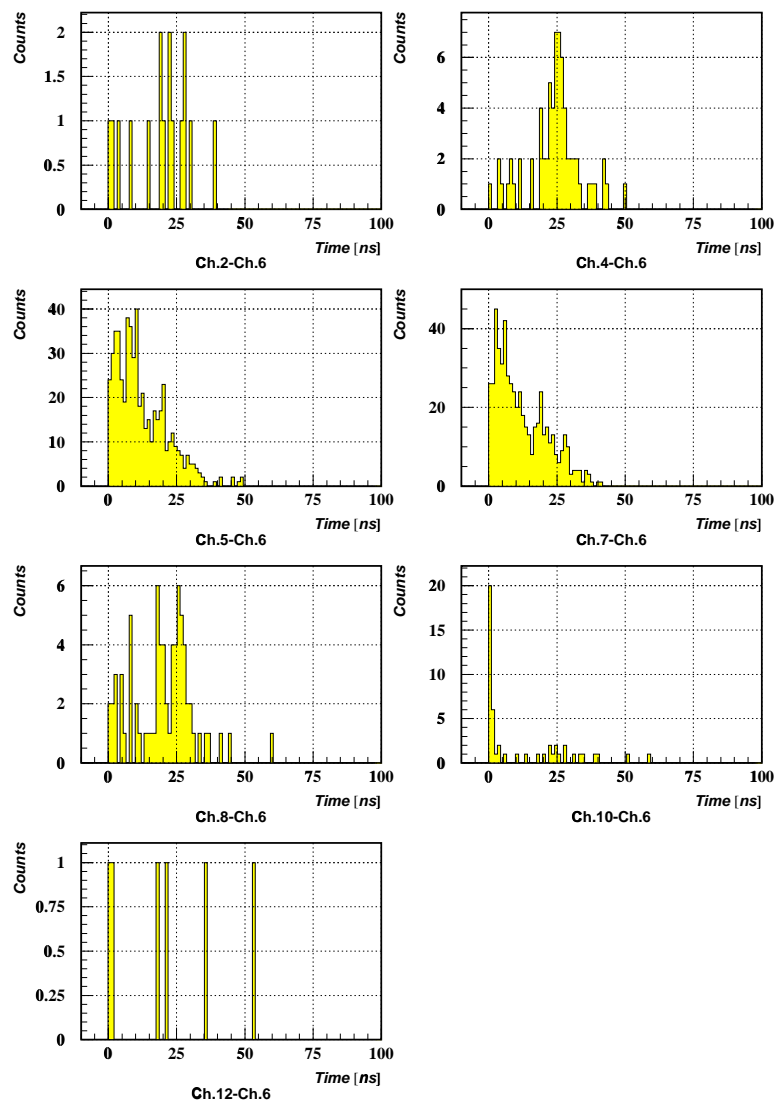


図 42: $CF_4/iso - C_4H_{10}(85/15)$ 、H.V.=3.3kV での $t(k)-t(6)$ の Histogram

6 まとめ

今回、封入ガスとして $CF_4/iso - C_4H_{10}$ を用いた場合に TGC が持つ性質に関していくつかの実験を行なった。

Cathode Strip Line からの Signal の伝播時間の測定を Large TGC を用いて行なったところ、 $H.V. = 3.0 [kV]$ において $6.55 \pm 0.04 [ns/m]$ という結果を得た。この結果を Micro Strip Line のものと比較するためには TGC に用いた G10 の誘電率 ϵ_r を測定しなければならないが、G10 の誘電率 ϵ_r の公称値を用いれば、この値のもつ幅の中に測定した TGC の Cathode Strip Line の伝播遅延時間は納まっている。

次に、Multiplicity 測定実験を行なったところ、 $H.V. = 3.1 [kV]$ において Multiple Hit Event の割合は 2.5 [%]、また各 Channel に Multiple Hit が出現する確率は全 Channel で 1 [%] 未満であることが分かった。従って、TGC に $CF_4/iso - C_4H_{10}$ (80/20) を用いた場合、1 Event で TGC から Signal の出る Channel 数は非常に少なく、また分布から判断して Trigger Channel から 1 [cm] の間に十分局所化されていると言える。

謝辞

本研究を進めるにあたり、適切かつ親切な御指導をして下さった神戸大学武田 廣教授、野崎 光昭助教授、川越 清以助教授、本間 康浩助教授、横山 千秋助手、小林富雄東京大学教授、竹下徹信州大学助教授の各々方に深く感謝の意を表します。本研究室の田中 秀治氏及び Weizmann Institute of Science の永井 康一氏には筆舌に尽くし難いほどの御指南及び叱咤、激励を賜わり、感謝の念に絶えません。また、本研究室福井 秀人氏、石井 恒次氏、中村 勇氏の御三方にも並なみならぬ御援助を頂きました。厚く御礼申し上げる次第であります。高エネルギー研究所助教授の大須賀 関夫氏には大変お世話になりました。最後に、東京大学長谷川 庸司氏、三宅 正明氏をはじめとする ATLAS Japan Muon Group の皆様に感謝致します。

参考文献

- [1] ATLAS Technical Proposal for a General-Purpose pp Experiment at the Large Hadron Collider at CERN, CERN/LHCC/94-43, LHCC/P2, Dec. 1994.
- [2] F. Sauli, Principles of Operation of Multiwire Proportional and Drift Chamber.
- [3] 福井 崇時、粒子物理計測学入門、共立出版
- [4] K. クラインクネヒト、粒子線検出器、培風館
- [5] Glenn F. Knoll、放射線計測ハンドブック、日刊工業新聞社
- [6] 中村 誠一郎、近藤 敬比古、KEK Report 95-11, Oct. 1995.
- [7] W.S. Anderson et al., Nucl. Instr. and Meth. A323(1992)273.
- [8] *Proceedings of the Symposium on High Energy Detectors*, KEK-79-31, Feb. 1980.
- [9] W. Blum, L. Rolandi, Particle Detection with Drift Chambers, Springer-Varlag.
- [10] Kai Chang, Handbook of Microwave and Optical Components volume 1, Wiley.
- [11] 宮本 幸彦、高周波回路の設計と実装、日本放送出版協会
- [12] EG&G ORTEC, Detectors & Instruments for Nuclear Spectroscopy, 91/92.
- [13] ナショナルプリント配線用銅面積層板カタログ、松下電工株式会社化工品事業部
- [14] Y. Arai et al., Nucl. Instr. and Meth. A367(1995)398.
- [15] 塚田 捷、表面物理入門、東京大学出版会
- [16] A. Pansky et al., Nucl. Instr. and Meth. A354(1995)262
- [17] HADES Proposal, May, 1994.

表一覽

1	EG&G VT120C 特性表 [12]	23
2	CF_4 などの Photon の射出の割合	29

図一覽

1	ATLAS 検出器の r-z 平面による断面図	4
2	LHC での Higgs 粒子の生成過程 (a) $gg \rightarrow H$ (b) $qq \rightarrow W^+W^-$ or $ZZ \rightarrow Hqq$ (c) $q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}H$ (d) $gg, q\bar{q} \rightarrow t\bar{t}H$	7
3	LHC	7
4	ATLAS 検出器	8
5	TGC の断面図:YZ 平面	9
6	TGC の断面図:ZX 平面	9
7	TGC の等価回路	10
8	電子雪崩の模式図:(a) 電子雪崩 (b-1) 電子雪崩が発達して Anode Wire を取り囲み (b-2) 電子が Anode Wire に吸われて陽イオン群のつくる電場が Anode Wire からの電場を打ち消し、電子雪崩の成長が止まってしまった図	11
9	TGC 中での Drift Line	13
10	電子付着を考慮した場合の CF_4 などの First Townsend 係数 [7]	14
11	H.V.=3.1kV における TGC の等電場面	15
12	H.V.=3.1kV における TGC の等電位面	15
13	Cathode Strip	16
14	平行極板コンデンサーの中心に電荷があるときの映像電荷	17
15	Micro Strip Line の断面図	20
16	周波数と特性インピーダンスの関係	20
17	周波数と伝播時間の関係	21
18	周波数と伝播時間の関係	21
19	Large TGC	22
20	Wire Support	22
21	測定システム	23
22	Cathode Strip Line における伝播時間の測定結果	24
23	典型的な Pulse の一例	25
24	CF_4 などの Spectral Distribution[17]	28
25	CF_4 、 $iso - C_4H_{10}$ などの Transmission Curve[17]	28
26	TGC の Anode Wire と Channel との対応	30
27	実験で用いた TGC	31
28	測定システム	32
29	PM の TDC vs ADC の相関図と ADC 分布	33
30	$CF_4/iso - C_4H_{10}(80/20)$ での Fist-Hit Channel の分布	34
31	$CF_4/iso - C_4H_{10}(85/15)$ での Fist-Hit Channel の分布	35

32	$CF_4/iso - C_4H_{10}(80/20)$ 、 H.V.=3.1kV での TGC Channel 1~4 の ADC&TDC 分布	36
33	$CF_4/iso - C_4H_{10}(80/20)$ 、 H.V.=3.1kV での TGC Channel 5~8 の ADC&TDC 分布	37
34	$CF_4/iso - C_4H_{10}(80/20)$ での Hit Channel Histogram	38
35	$CF_4/iso - C_4H_{10}(85/15)$ での Hit Channel Histogram	39
36	各 H.V. での Multiple Hit Event の割合	40
37	$CF_4/iso - C_4H_{10}(80/20)$ での Multiple Hit Histogram	41
38	$CF_4/iso - C_4H_{10}(85/15)$ での Multiple Hit Histogram	42
39	$CF_4/iso - C_4H_{10}(80/20)$ における各 H.V. での P(k)	43
40	$CF_4/iso - C_4H_{10}(85/15)$ における各 H.V. での P(k)	43
41	$CF_4/iso - C_4H_{10}(85/15)$ 、 H.V.=3.3kV での t(k) vs t(6)	44
42	$CF_4/iso - C_4H_{10}(85/15)$ 、 H.V.=3.3kV での t(k)-t(6) の Histogram	45