

2022 年度卒業研究
ガス TPC を用いた宇宙線ミューオンの飛跡観測

神戸大学理学部物理学科 粒子物理学研究室
水引 龍吾、光枝 慈喜、井上 陸、生井 凌太

2023 年 4 月 8 日

目次

1	序論 (担当: 水引)	1
1.1	ガス検出器の動作原理	1
1.2	MPGD と TPC	2
1.3	本論文の構成	3
2	実験で用いた装置説明	4
2.1	ガス検出器	4
2.2	DAQ(データ取得システム)	5
2.3	ガスゲイン測定実験における DAQ(担当: 水引)	5
2.4	μ 粒子測定実験におけるデータ取得システム (DAQ)	9
3	ガス検出器を用いた Ar および He のガスゲイン測定実験 (担当: 水引)	10
3.1	実験の内容と目的	10
3.2	ガスゲイン測定実験	10
3.3	^{55}Fe のスペクトル測定	11
3.4	He のスペクトルに見られた二つのピーク	12
3.5	クエンチャーとガスゲインの関係	25
3.6	He90% と He99% のゲインカーブ比較	26
4	ガス検出器における電子の雪崩増幅シミュレーション (担当: 光枝)	28
4.1	シミュレーションの目的	28
4.2	シミュレーションの手順	28
4.3	使用するソフトウェア	28
4.4	GEM のシミュレーション (Ar, C_2H_6)	31
4.5	μ -PIC のシミュレーション (Ar, C_2H_6)	36
4.6	実験との比較 (Ar, C_2H_6)	39
4.7	He, CO_2 混合ガスのシミュレーション	43
4.8	まとめ	49
5	ガス TPC を用いた宇宙線ミュオン飛跡測定 (担当: 井上陸)	50
5.1	実験の目的、概観	50
5.2	セットアップ	50
5.3	三次元飛跡	51
5.4	事象選別	52
5.5	エネルギー較正とガスゲイン	53
6	ガス TPC を用いた宇宙線ミュオン飛跡解析	57
6.1	目的	57

6.2	測定原理	57
6.3	使用した TPC の問題点	58
6.4	測定諸元	58
6.5	イベントの選定	59
6.6	測定結果	59
6.7	実験結果からの考察と改善点	66
7	結論	67
	謝辞	68
	参考文献	69

概要

本研究では三次元ガス飛跡検出器 (TPC) の増幅率評価及び磁場の印加による宇宙線ミュオンの位置分解能の変化の検証を行った。実験結果をシミュレーション結果と照らし合わせながら議論を進める。

1 序論 (担当: 水引)

素粒子実験においてガス検出器は放射線の検出に利用される。封入されたガスとの相互作用で荷電粒子を検出し、荷電粒子の落としたエネルギーや飛跡を調べることができる。本章ではガス検出器の動作原理について述べる。

1.1 ガス検出器の動作原理

荷電粒子検出の一連の流れを図 1.1 で模式的にあらわす。検出器内を荷電粒子が通過すると中性ガスが電離される。電離によって生じた電子は電場でドリフトされ、雪崩増幅を経て電気信号として読み出される。

1.1.1 雪崩増幅

検出器内で電離された電子は強い電場で加速されると周囲のガスを電離する。電離で生成された電子は電場で加速されて再びガスを電離する。このように、強い電場で電離を繰り返すことで大量の電子を生成する現象を雪崩増幅と呼ぶ。ガス検出器では、典型的に $10^3 \sim 10^4$ の増幅度が得られ、簡単な回路での読み出しを可能とする。

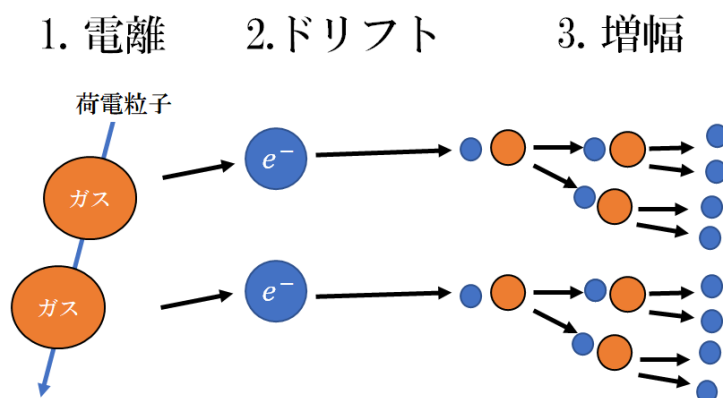


図 1.1 荷電粒子検出に至るまでの流れ

1.1.2 ガス増幅の理論

荷電粒子が進む微小距離 dx と荷電粒子と中性ガスとの衝突回数 dN は比例するので定数 α を用いて

$$dN = \alpha dx \tag{1.1}$$

と表される。ここで α は第一タウンゼント係数と呼ばれるガス固有の定数である。荷電粒子とガスが衝突すると電子が生成されると考え、初めの電子数を N_0 として式 1.1 を解くと電子数 N は

$$N = N_0 e^{\alpha x} \tag{1.2}$$

の式が得られ、雪崩増幅で電子の数が指数的に増加することがわかる。

1.1.3 Penning Ionization

雪崩増幅の過程においてガスとガスの相互作用で電子が生成されることがあり、Penning Ionization と呼ばれる。Penning Ionization は次のような反応で電子が生じる。A* を中性ガス原子 A の励起状態、B を A とは異なるガス原子あるいは分子とする。A* と B の衝突による反応



や



他にも光子とガスの反応で



といった反応で電子が生成される。生成された電子は雪崩増幅を経て、元の電子と同様に検出される。Penning Ionization がどれほどの頻度で発生し、検出される電荷にどれほど影響するかは 4 章のシミュレーションでも扱う。

1.1.4 実験で用いたガス

ガス検出器では一般的に中性ガスに少量のクエンチャーと呼ばれるガスを混合したものが用いられる。本研究では中性ガスとして Ar 及び He を用いた。クエンチャーは Ar に対しては C₂H₆ を、He には CO₂ を用いた。割合は中性ガスとクエンチャーが 9 : 1 で、気圧は 1atm で固定した。装置内では電離したガスの再結合や電離した電子がガスを励起させるなどして、可視光線や紫外線が発生する。これら発生した可視光線や紫外線は連続放電につながるため吸収する必要がある、その役割を果たすのがクエンチャーである。Ar ガス、He ガスそれぞれで発生する可視光線や紫外線の波長が異なるため、それに合わせてクエンチャーの種類を変えた。

1.2 MPGD と TPC

MPGD(Micro-Pattern Gas Detectors) とは、微細加工技術を利用した高性能ガス放射線検出器の総称である。金属線を用いたガス検出器と異なり、高頻度耐性に優れていて、コンパクトな検出器ながら 2 次元位置情報や時間情報を得ることができる [1]。また、TPC(Time Projection Chamber) とは飛跡検出器のひとつで、荷電粒子の 3 次元飛跡を取得可能な検出器である。ガスや液体を密封し、電場や磁場を印加して荷電粒子の 3 次元飛跡を取得する。

1.2.1 電子の拡散

本研究では電子の拡散を測定した。電子の拡散には縦拡散と横拡散の 2 つがあり、検出器内をドリフトする電子が原子核や電子の多重散乱で拡散された際、検出器内に印加した電場方向に現れる拡散が縦拡散、電場に

垂直な方向に現れる拡散が横拡散である。縦拡散はドリフト電子が生成されてから検出器に至るまでの時間の差異として、横拡散は検出器面上の位置の差異として検出される。

1.3 本論文の構成

本論文は1章を序章、2章で装置の説明を行う。3章以降は3つのセクションに分かれており、3章ではガスゲイン測定実験を、4章ではガスゲインのシミュレーションを、5,6章では宇宙線由来の μ -粒子を用いて検出器内の磁場の有無で、電子の拡散がどのように変化するかを測定する。ガスゲイン測定実験では飛跡測定実験に繋げるためHeガスを用いたガスゲインの測定を行い、ガスゲインのシミュレーションはGarfield++を用いた雪崩増幅シミュレーションで実験値との比較を行った。ドリフト電子の拡散を3次元飛跡測定が可能な μ -TPCを用いて測定する。

2 実験で用いた装置説明

2.1 ガス検出器

本研究では μ 粒子の飛跡を測定するために μ -TPC(micro-Time Projection Chamber) を用いた。 μ -TPC とは、三次元飛跡測定可能な MPGD(Micro-Pattern Gas Detectors) を読み出しとして持つガス検出器である。本研究では、特に MPGD の一種である GEM 及び μ -PIC を用いた。

2.1.1 GEM (Gas Electron Multiplier)

GEM とは、両面に金属電極を持つ薄い絶縁体に多くの細孔加工が施されたデバイスで、2枚の銅箔が液晶ポリマーを挟んでおり、図 2.1 のように穴が規則的に開いている。上下の電極間に電圧を印加することで穴の中に強い電場が形成され、雪崩増幅が起き、特に電極間の電位差を Δ GEM と呼ぶ。本研究で用いた GEM は厚さ $100\mu\text{m}$ の液晶ポリマーの上下に厚さ $5\mu\text{m}$ の銅電極が張り付けられており、直径 $70\mu\text{m}$ の穴が $140\mu\text{m}$ 間隔で配置されている。

2.1.2 μ -PIC (micro Pixel Camber)

μ -PIC とは直したカソードとアノードにより荷電粒子の x,y 方向の 2 次元位置情報の取得が可能なデバイスで、図 2.2 に示すようにカソードに囲まれて中央に露出したアノードに電圧を印加する。アノード近傍には強い電場が形成されて雪崩増幅が起きる。本研究で用いた μ -PIC は $10 \times 10\text{cm}^2$ の検出面に縦 256 個、横 256 個のピクセルがアノードとカソードのストリップにより形成されている。ピクセルの間隔は $400\mu\text{m}$ で、カソードに対してアノードに正の電圧を印加する。

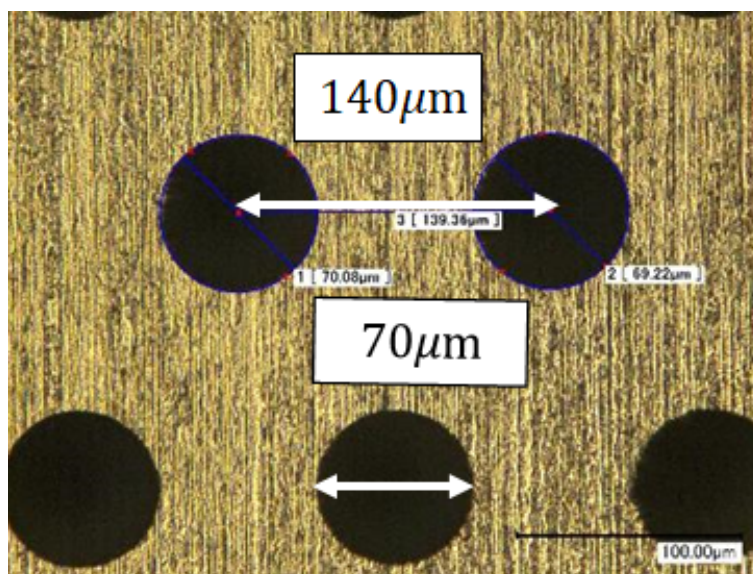


図 2.1 使用したガス検出器 (GEM) の写真 (上から撮影)

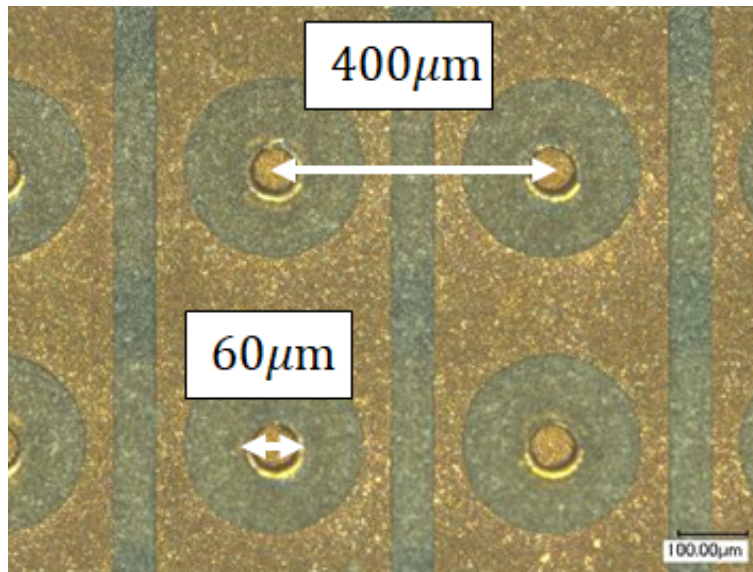


図 2.2 使用したガス検出器 (μ -PIC) の写真 (上から撮影)

2.1.3 μ -TPC (micro Time Projection Chamber)

μ -TPC は GEM や μ -PIC といった MPGD (Micro-Pattern Gas Detectors) を組み合わせてできた検出器である。本研究で用いた μ -TPC はドリフト空間、GEM、 μ -PIC からなるガス検出器で、三次元飛跡測定が可能である。荷電粒子が通過すると電子が生成され、電子がドリフトして電気信号として読み出される。 μ -PIC によって x-y の 2 次元平面を、シンチレータにより荷電粒子の通過タイミングを把握し、 μ -PIC が電気信号を検出するまでの時間差を測定して、電子のドリフト速度を用いて z 座標を割り出すことで 3 次元飛跡測定を行う。

2.2 DAQ (データ取得システム)

検出器からの信号を取得するシステムは DAQ と呼ばれる。本研究ではガスゲイン測定実験と μ 粒子の飛跡測定に分かれており、それぞれで異なる DAQ を用いたので、それぞれの DAQ の説明を行う。

2.3 ガスゲイン測定実験における DAQ (担当: 水引)

検出器は電子を直接検出して電荷の形で出力を行う。出力された電荷をチャージアンプで電圧に変換し、波形情報が取得可能な ADALM2000 を用いて測定した。図 2.3 は実験で使用した回路図である。検出器に高圧電源を用いて電圧を印加し、チャージアンプには直流電源で $\pm 2.5\text{V}$ の電圧を印加した。

2.3.1 チャージアンプ

入力を電荷、出力を電圧とする機器で、ガスゲイン測定実験では検出器から出力された電荷を電圧に変換する用途で用いた。チャージアンプが電荷を電圧に変換する際の性能は $3.1 \times 10^2 \text{ [mV/pC]}$ である。性能の測定は、パルスジェネレーターで生成した矩形波をコンデンサーに入力して電荷とし、出力電圧を測定すること

で確認した。本研究で用いたチャージアンプを搭載したボードは、256 チャンネルの入力に対して 4 チャンネルのアナログ出力を持ち、検出器の 256 本のストリップが 64 本ずつ束ねて出力される。

2.3.2 ADALM2000

ADALM2000 は、Analog Devices 社が発売しているアクティブレーニングモジュールで、入力された電圧値をデジタル値に変換する AD コンバータが内蔵されている。図 2.4 は実験で使用した ADALM2000 を撮影したものである。AD コンバータの性能は± 25V、12bit、100MSPS である。今回の実験では± 2.5V、10bit、100MHz に設定して測定を行った。ADALM2000 で取得した波形情報は PC で保存、解析を行った。

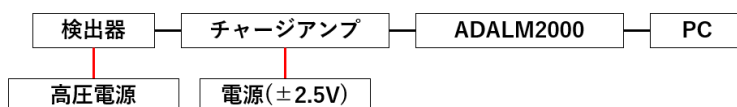


図 2.3 ガスゲイン測定実験で使用した回路図。

2.3.3 ADALM2000 の電圧値較正

ADALM2000 は AD コンバートを行い、アナログである電圧値をデジタル値に変換する。そのためパルスジェネレータによって決められた電圧を ADALM2000 に入力して、取得した波高分布のヒストグラムをガウシアンでフィッティングした。100mV のテストパルスで取得したヒストグラムの一例を図 2.5 に示す。得られたピークの中央値 (mean) で電圧と ADC 値の較正を行った。較正の結果、得られた電圧と ADC 値の関係は図 2.6 であり、得られた変換式は

$$mV = \frac{\text{デジタル値} - 5.68}{0.70} \quad (2.1)$$

である。



図 2.4 ガスゲイン測定実験で使用した ADALM2000

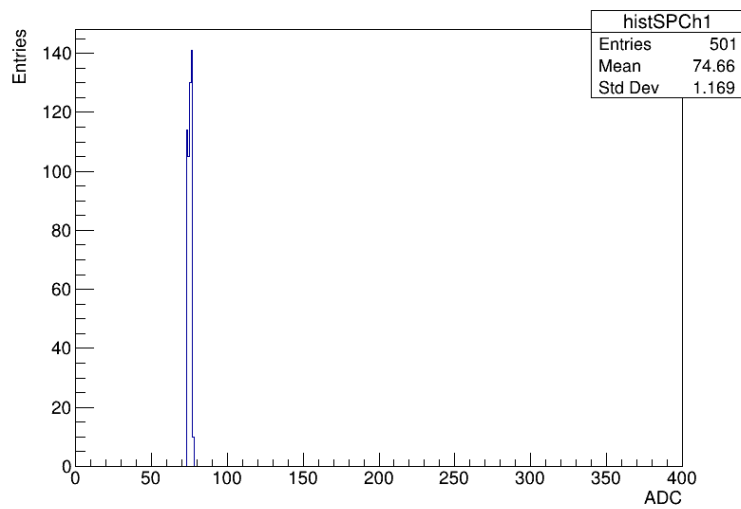


図 2.5 100mV のテストパルスで取得したヒストグラム。横軸は ADALM2000 の AD コンバータで取得したデジタル値

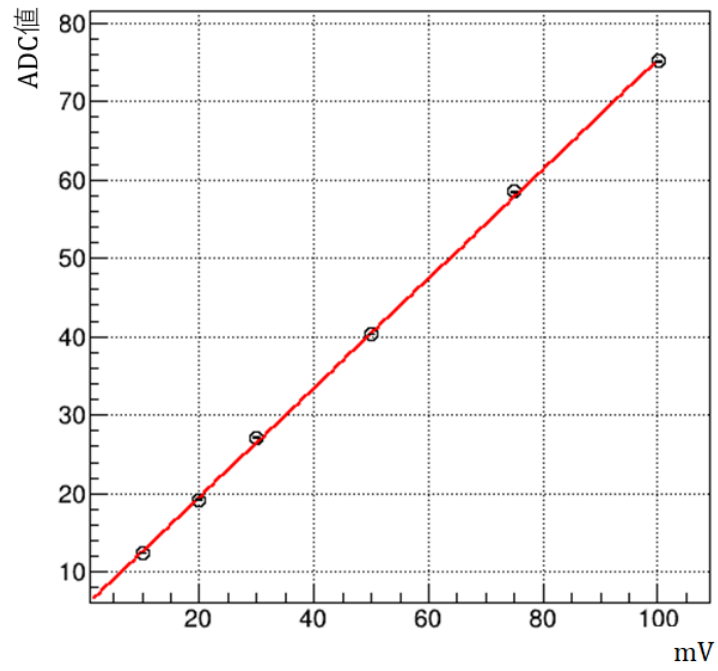


図 2.6 デジタル値と電圧のキャリブレーション

2.4 μ 粒子測定実験におけるデータ取得システム (DAQ)

本研究の μ 粒子測定では、 μ -PIC のアノード、カソードそれぞれ 256 本のストリップからの信号を検出する。データ取得システム (DAQ) では、ストリップで検出された電荷情報のトリガー時刻との時間差 (time of flight, TOF) と継続時間 (time over threshold, TOT)、ストリップ番号、さらには 128 ストリップ分をまとめた波形を記録する。この情報をもとにして解析を行い、信号の位置と時刻情報三次元の空間座標を再構成する。また、波形情報からエネルギー情報を求める。

各ストリップからの電荷情報は ASD (Amplifier Shaper Discriminator) チップを搭載した ASD ボードで処理される。1 枚の ASD ボードには 16 個の ASD チップが搭載されている。ASD チップの 4 つの入力それぞれに前置増幅器, 主増幅器, discriminator が搭載され、アナログ出力, デジタル出力がある。アノード、カソードそれぞれに 4 枚の ASD ボードを用いることで、アノード、カソードのストリップそれぞれ 256 本の読み出しを可能にしている。discriminator で処理されたデジタル信号は encoder に接続され、 μ -PIC のストリップごとの立ち上がりとしち下がりが記録される。また、カソードについては全てのストリップを 2 チャンネルにまとめて FADC (Flash Analogue Digital Converter) で波形情報が記録される。

図 2.7 はカソードの波形情報とアノード、カソードでの立ち上がりを飛跡とした図である。通常の波形情報は左の二本の波形で示される。これに対して、取得波形のダイナミックレンジを稼ぐために、減衰した波形も記録している。減衰した波形を右の 2 本で示す。波形情報の縦軸の clock の周波数は 10^8 Hz であり、外部トリガー (後述) が起動してからの時間情報である。

図中の青線が波形情報で、右図中の左の図がアノードで検出された x 方向の飛跡、右の図がカソードで検出された y 方向の飛跡である。

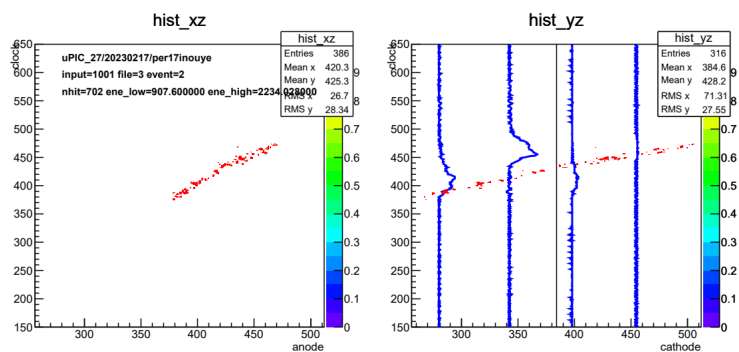


図 2.7 波形情報 (青線) とアノードとカソードで検出された飛跡 (それぞれ左図, 右図の赤点)

3 ガス検出器を用いた Ar および He のガスゲイン測定実験 (担当: 水引)

3.1 実験の内容と目的

ガス検出器の基本的な使い方や性能を学ぶために、ガスゲインの測定実験を行った。また、He ガスを用いた飛跡測定に繋げるため、He を使用したガス検出器の動作確認も合わせて行った。そのために Ar もしくは He をベースとしたガスでそれぞれのガスゲインを測定し、He に関してはクエンチャーの割合を変えて全体の増幅率とゲインカーブの取得を行った。

3.2 ガスゲイン測定実験

ガス検出器の基本的な性能評価のために印加電圧とガスゲインの関係を調べた。使用したガス検出器を上から撮影した写真を図 3.1 に、断面図を図 3.2 に示す。DRIFT は X 線とガスの反応、荷電粒子の通過によるガスの電離と、生成された電子を GEM までドリフトさせる空間で、長さ 1cm である。INDUCTION は GEM で生成された電子を μ -PIC に引き寄せる領域で、長さは 3mm である。

測定には ^{55}Fe の X 線を利用した。検出器の上部にある厚さ $100\mu\text{m}$ のポリイミド入射窓の上に線源を配置した。検出器内部にはガスが封入されており、ガス検出器からの電気信号はチャージアンプを通して電圧に変更した。高圧電源を用いて DRIFT 面、GEM、 μ -PIC に電圧を印加した。

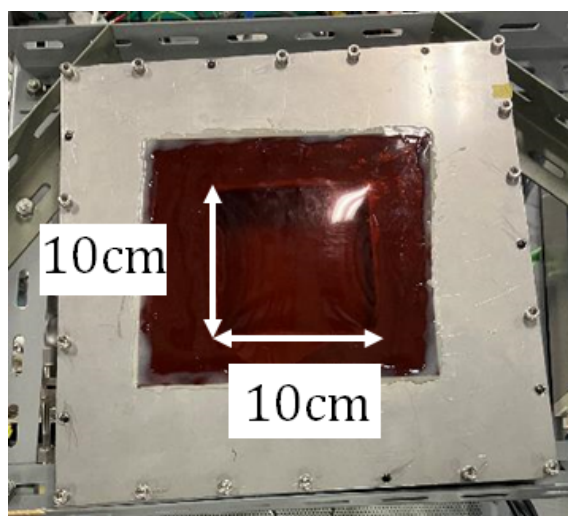


図 3.1 使用したガス検出器の写真 (上から撮影)

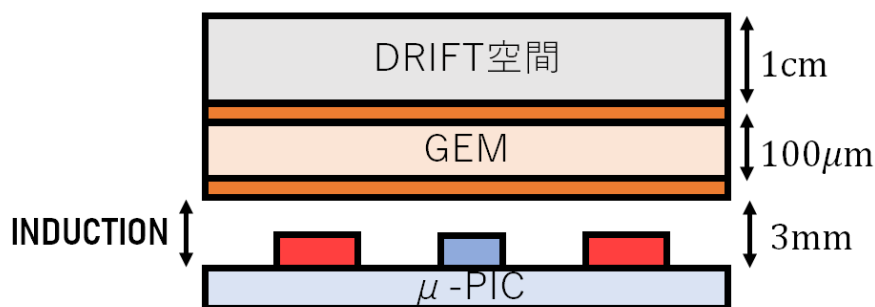


図 3.2 使用したガス検出器の断面図

3.2.1 ガスゲイン

ガスゲイン測定には ^{55}Fe の X 線に対応するピークの波高値を用いた。ガスゲインは次の式で与えられる。

$$G_{gas} = \frac{peak \times W}{X \times 1/(e \times AMP)} \quad (3.1)$$

peak は波高値 [mV]、X は ^{55}Fe の X 線のエネルギーである 5.9keV、W はガスを電離させるのに必要なエネルギーで Ar は 26eV、He は 41eV。e は電気素量 [C] で AMP は電荷を電圧に変換するアンプのスペックで 3.1×10^2 [mV/pC]。

3.3 ^{55}Fe のスペクトル測定

ガスゲイン測定に必要な 5.9keV のピークの位置を確認するために ^{55}Fe のスペクトル測定を Ar と He について行った。

3.3.1 Ar のスペクトルとピーク

Ar 混合ガスを用いて取得した ^{55}Fe のスペクトルの一例を図 3.3 に示す。設定電圧は表 3.1 をの通りである。"DRIFT" はドリフト面から GEM までの電位差を、"ΔGEM" は GEM の電極間の電位差を、"INDUCTION" は GEM と μ -PIC のカソード間の電位差を、" μ -PIC" は μ -PIC のカソードとアノードの電位差を表しており、正負はドリフト面から μ -PIC の方向を基準にしている。閾値は 20mV とした。メインピークとエスケープピークが見て取れる。Ar に ^{55}Fe の X 線が反応すると光電効果により最内殻電子が放出される。そして外殻の電子が最内殻に移動し、エネルギーが X 線もしくはオージェ電子で放出される。光電子とオージェ電子はガスを電離させるため 5.9keV のエネルギーを検出器内で消費する。しかし X 線は検出器の外に漏れ出ることもあり、その場合には光電子のエネルギーしか検出されず、小さなエネルギーとして観測される。これによりメインピーク (5.9keV) とエスケープピーク (2.9keV) の 2 つのピークが見られる。

3.3.2 He のスペクトルとピーク

He 混合ガスを用いて取得した ^{55}Fe のスペクトルの一例を図 3.4 に示す。設定電圧は表 3.2 の通りである。閾値は 20mV とした。He は低いガスゲインでは 1 つのピークしか見えず、ガスゲインが一定以上になるとピークが二つ観測された。以下、低電荷の小さい方のピークをピーク 1、電荷の大きい方のピークをピーク 2 と呼び、これらピークの解釈について次節で議論する。

表 3.1 Ar ガスにおける ^{55}Fe のスペクトル測定時の設定電圧

装置名	設定電圧 [V]
DRIFT	-200
Δ GEM	-410
INDUCTION	-200
μ -PIC	+485

表 3.2 He ガスにおける ^{55}Fe のスペクトル測定時の設定電圧

装置名	設定電圧 [V]
DRIFT	-300
Δ GEM	-450
INDUCTION	-400
μ -PIC	+485

3.4 He のスペクトルに見られた二つのピーク

He は Ar と異なり、電子は K 殻にしか存在しないためエスケープピークは発生せず、ピークは 1 つだけのはずであるが、図 3.4 で見られたように He での測定で 2 つのピークが観測された。設定電圧は表 3.3 を参照。図 3.5 に示す低ゲインで取得したスペクトルを比較すると、元々は 1 つのピークが 2 つに分かれたように見られた。

表 3.3 He ガスにおける ^{55}Fe の低ガスゲインスペクトル測定時の設定電圧

装置名	設定電圧 [V]
DRIFT	-720
Δ GEM	-480
INDUCTION	-800
μ -PIC	+550

原因を特定するためにいくつかの確認を行った。

3.4.1 印加電圧とピークの位置関係

図 3.6 はピーク電圧値と μ -PIC に印加した電圧の関係の図である。ピーク 2 が印加電圧に対して指数的な依存を示すのに対してピーク 1 は一定の値から増えない様子がわかる。

3.4.2 波形の確認

2つのピークの起源を調べるために、図 3.4 のスペクトル作成時に取得した波形情報を確認した。図 3.7 は波形すべてを重ねたもので、色が赤に近いほど重なりが大きい。図 3.8 はピークの高さが 0.5~0.8pC の領域の波形を、図 3.9 はピークの高さが 0.8~1.3pC の領域の波形を抽出したものである。ピーク 1 とピーク 2 の両者とも波形は正常で、何らかのノイズを観測していたり、回路が飽和現象を起こしている可能性は低いと思われる。

3.4.3 ストリップの確認

本測定で用いた読み出しボードには、ANODE の読み出しのストリップを 64 本束ねた読み出しチャンネルが ch0~ch3 の 4 つあり、使用していた ch0 に何らかの不具合があってピークが 2 つ見えている可能性を考えた。検証のために 4 つのチャンネルで波高分布を取得した。設定電圧は表 3.4 に示し、結果は図 3.10 に示す。各チャンネルで 2 つのピークが確認され、使用していた ANODE のチャンネルに不具合は見られないことが確認できた。

表 3.4 読み出しチャンネルごとの波高分布比較測定実験の設定電圧

装置名	設定電圧 [V]
DRIFT	-720
Δ GEM	-480
INDUCTION	-800
μ -PIC	+550

3.4.4 別の線源によるスペクトルの確認

He 混合ガスにおいて、2つのピークが装置由来であるか、線源由来であるかを確認するために、 β 線源である $^{90}\text{Sr}^{*1}$ や γ 線源の $^{137}\text{Cs}^{*2}$ を用いてスペクトルを表 3.5 の設定で取得した。

表 3.5 ^{90}Sr 及び ^{137}Cs のスペクトル測定実験

装置名	設定電圧 [V]
DRIFT	-720
Δ GEM	-480
INDUCTION	-800
μ -PIC	+550

*1 β 線の最大エネルギーは 0.55MeV

*2 γ 線のエネルギーは 662keV で特性 X 線のエネルギーは 30keV

図 3.11 は ^{90}Sr のスペクトルで、図 3.12 は ^{137}Cs のスペクトルである。放射線のエネルギーが高いこともあり、線源由来のピークを観測することはできなかったが、 ^{55}Fe のスペクトルで観測されたようなピーク 1 と同様の挙動をするピークは見られなかった。まだ検証できていない仮説に、 ^{55}Fe の X 線に近いエネルギーを持つ X 線によってピークが 2 つ見えた可能性がある。ピークが二つ見える理由、ガスゲインが十分高くないと二つのピークが分裂しない理由、ピーク 1 が動かなくなる理由などを本研究で説明することはできなかった。以降のガスゲイン測定実験では、ピーク 2 が印加電圧に対して指数関数的な依存性を示したため、ピーク 2 を 5.9keV のピークとみなした。

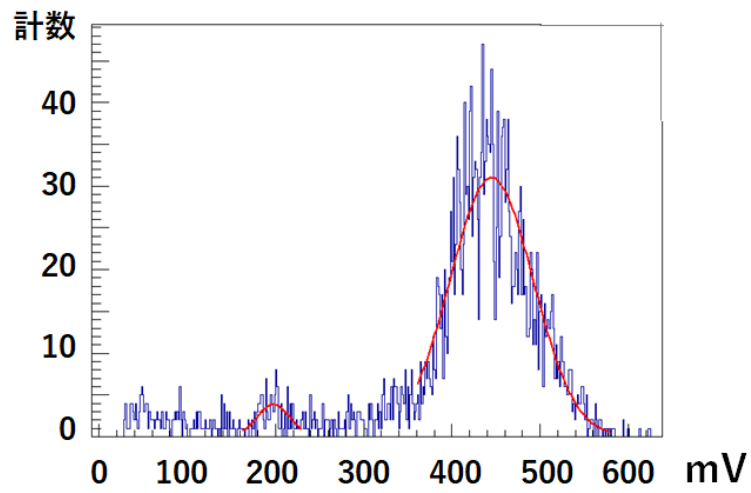


図 3.3 Ar 混合ガスで取得した ^{55}Fe のスペクトル

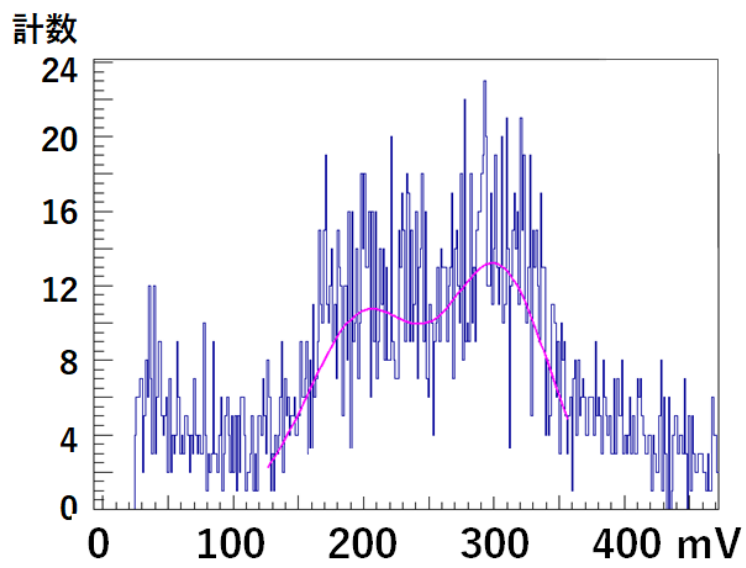


図 3.4 He 混合ガスで取得した ^{55}Fe のスペクトル

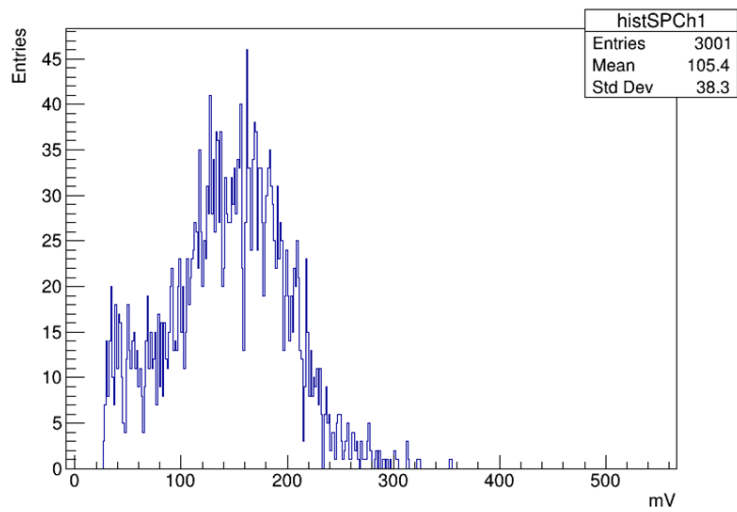


図 3.5 低ゲインで取得した ^{55}Fe のスペクトル (He)

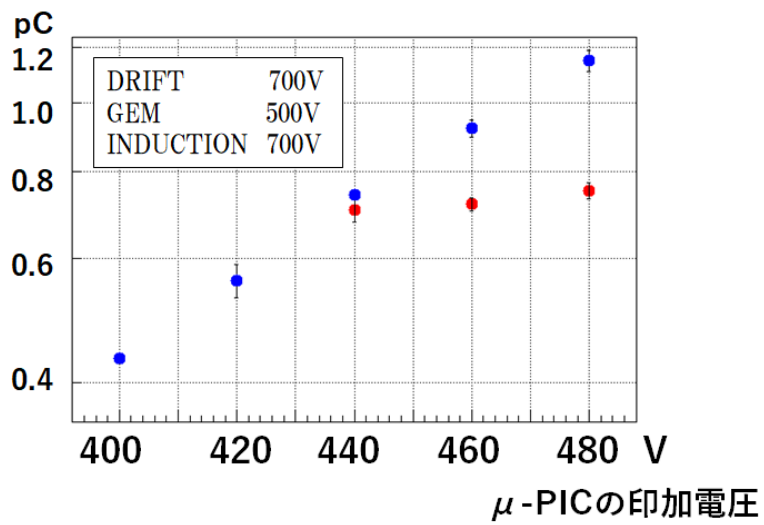


図 3.6 ピーク位置から算出した検出した電荷量と印加電圧の関係、420V 以下で赤点と青点が重なっている。

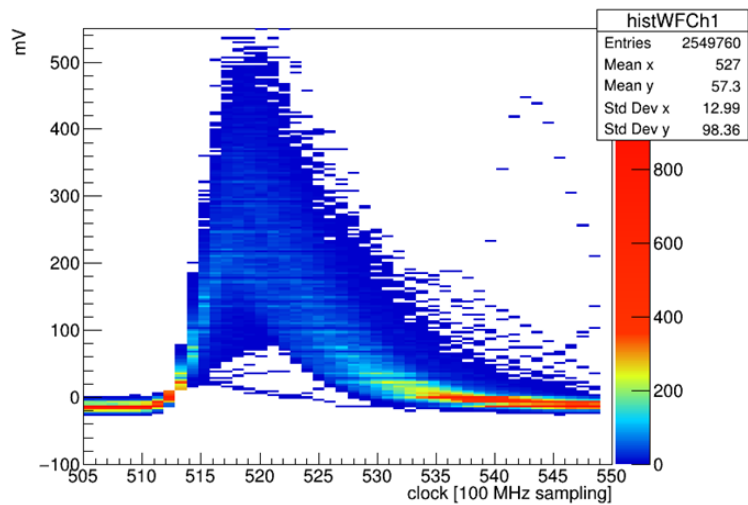


図 3.7 He で測定したスペクトル全体の波形分布

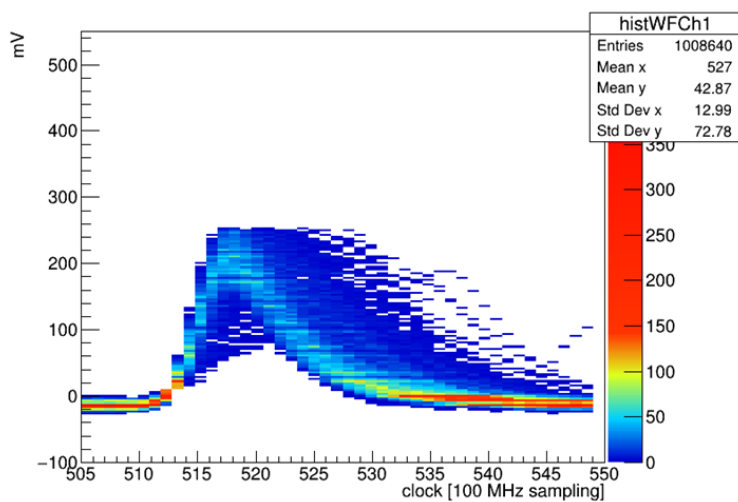


図 3.8 ピーク 1(低いほうのピーク) の波形分布。250mV 付近の波形が平らに見えるのは上限を決めてデータを選択したためである。

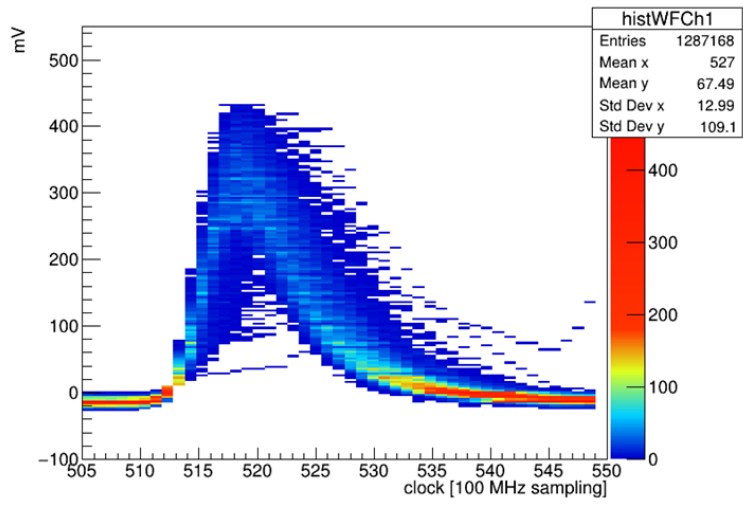


図 3.9 ピーク 2(高いほうのピーク) の波形分布

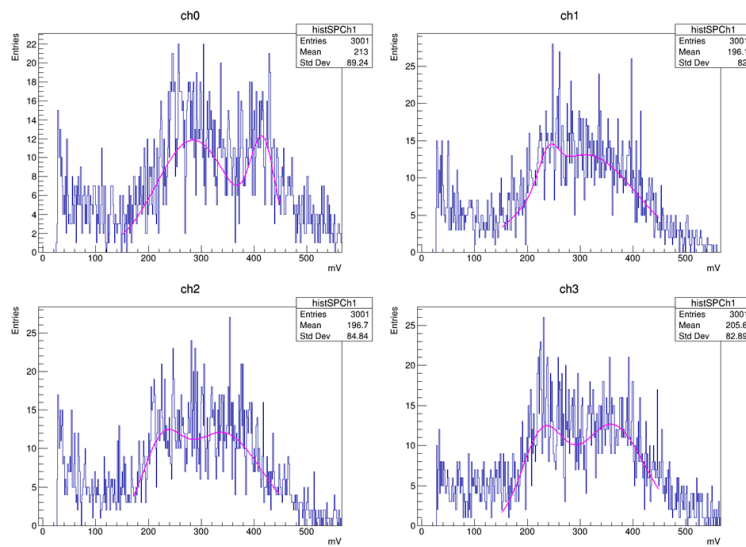


図 3.10 ANODE のチャンネルを変えて取得した ^{55}Fe のスペクトル

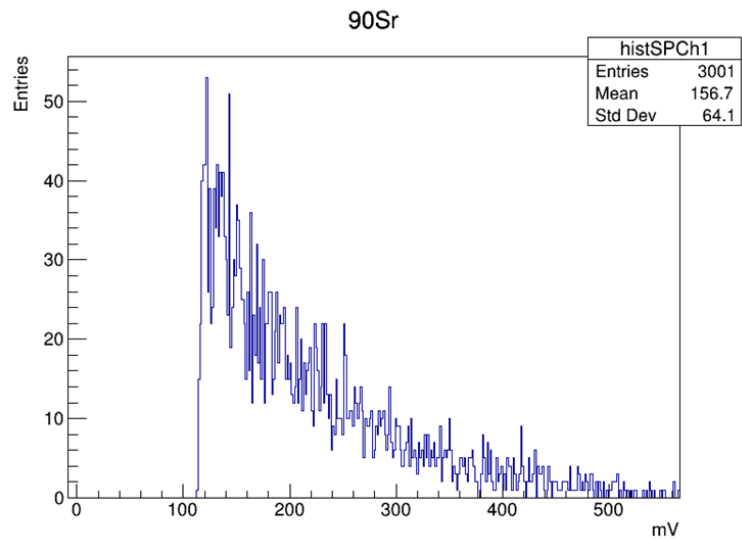


図 3.11 He 混合ガス下で取得した ^{90}Sr のスペクトル

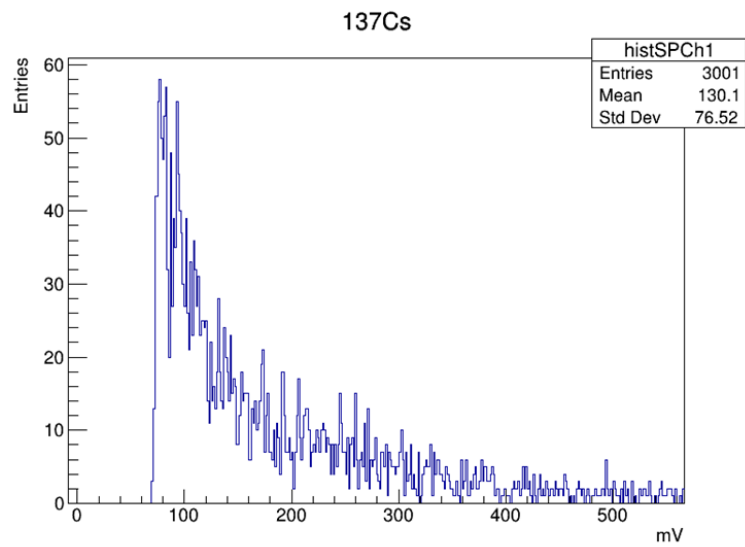


図 3.12 He 混合ガス下で取得した ^{137}Cs のスペクトル

3.4.5 GEM と μ -PIC のゲインカーブ

Ar 及び He について、ガスゲインの印加電圧依存の測定実験を行った。GEM と μ -PIC に印加する電圧を表のように変えて測定を行った。

表 3.6 ガスゲインの GEM 電圧依存性測定時の設定電圧 (Ar)

装置名	設定電圧 [V]
DRIFT	-250
INDUCTION	-350
Δ GEM	-350 ~ -425
μ -PIC	+485

表 3.7 ガスゲインの GEM 電圧依存性測定時の設定電圧 (He)

装置名	設定電圧 [V]
DRIFT	-300
INDUCTION	-400
Δ GEM	-435 ~ -475
μ -PIC	+485

表 3.8 ガスゲインの μ -PIC 電圧依存性測定時の設定電圧 (Ar)

装置名	設定電圧 [V]
DRIFT	-200
INDUCTION	-350
Δ GEM	-450
μ -PIC	+410 ~ +450

表 3.9 ガスゲインの μ -PIC 電圧依存性測定時の設定電圧 (He)

装置名	設定電圧 [V]
DRIFT	-300
INDUCTION	-400
Δ GEM	-500
μ -PIC	+475 ~ +530

GEM 電圧の依存性についての測定結果を図 3.13 に示す。Ar のガスゲインは 7500 から 41000 まで、He のガスゲインは 17000 から 30000 まで変化した。同様に μ -PIC 電圧の依存性について測定結果を図 3.14 に示す。Ar のガスゲインは 19000 から 36000 まで、He のガスゲインは 14000 から 27000 まで変化した。得られたガスゲインは指数関数的な挙動を示したため、それぞれ指数関数でフィッティングを行った。式 4.2 で定義されるパラメータ p_0, p_1 について、得られた値を表 3.10 に示す。

$$G_{gas} = \exp(p_0 \times V + p_1) \quad (3.2)$$

表 3.10 ゲインカーブの係数

装置	ガス	p_0	p_1
Δ GEM	Ar	$(2.41 \pm 0.01) \times 10^{-2}$	0.57 ± 0.03
Δ GEM	He	$(1.64 \pm 0.03) \times 10^{-2}$	1.8 ± 0.1
μ -PIC	Ar	$(1.63 \pm 0.02) \times 10^{-2}$	2.1 ± 0.1
μ -PIC	He	$(1.13 \pm 0.03) \times 10^{-2}$	3.5 ± 0.1

ガスゲインの電圧依存性について、傾きは Ar のほうが大きく、He で十分なガスゲインを得るには強い電圧が必要であり、He で Ar と同等のガスゲイン (10^4 程度) を得ることができた。Ar と He の両方で GEM、 μ -PIC とともに指数的に変化し、GEM と μ -PIC で雪崩増幅が発生していることが分かった。

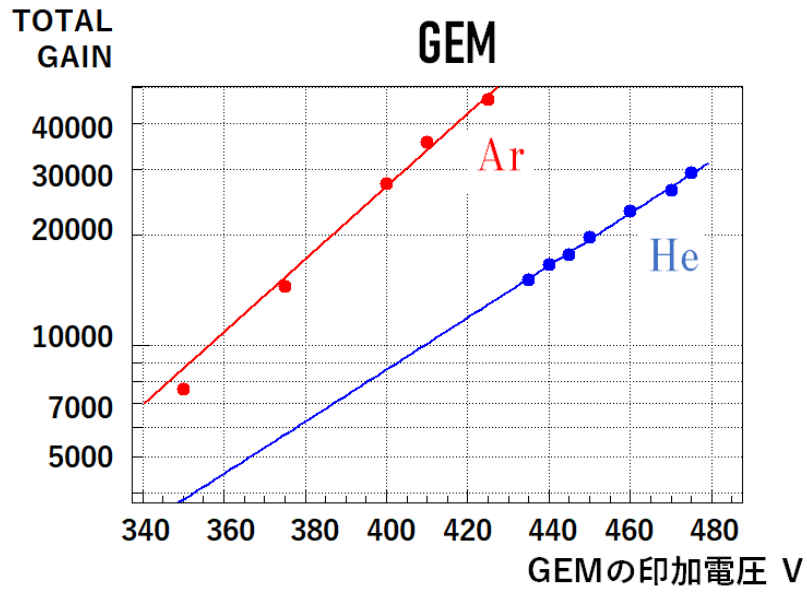


図 3.13 Ar ガスと He ガスで取得した Δ GEM の電圧依存の測定結果比較

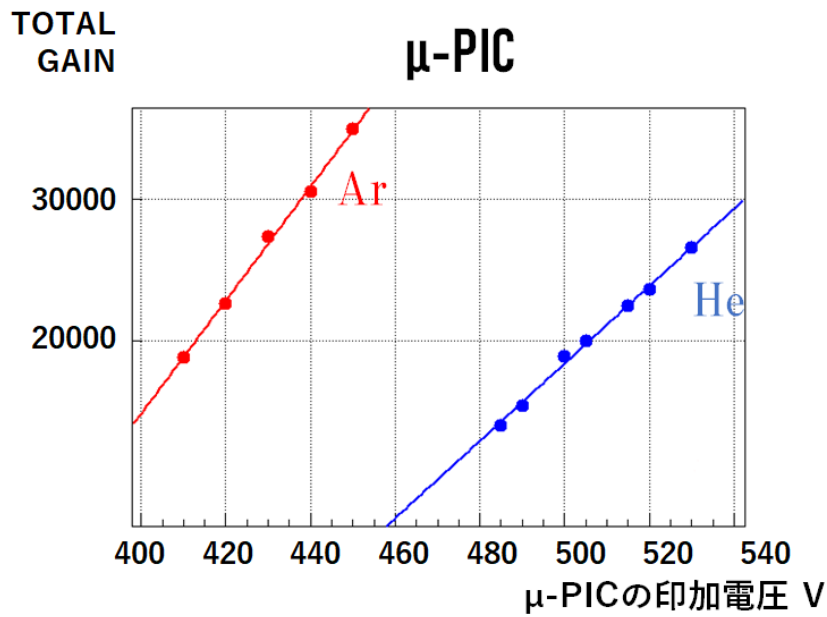


図 3.14 Ar ガスと He ガスで取得した μ -PIC の電圧依存の測定結果比較

3.4.6 DRIFT と INDUCTION の電圧依存性

DRIFT 電圧と INDUCTANCE 電圧を表 3.11~3.14 のように変えて Ar と He で比較測定を行った。DRIFT は電離によって生じた電子を、INDUCTION は GEM の増幅で生じた電子を μ -PIC で収集するために重要であり、十分電圧が強ければすべての電子を収集するため、一定の値に収束する。

表 3.11 ガスゲインの DRIFT 電圧依存測定時の設定電圧 (Ar)

装置名	設定電圧 [V]
DRIFT	-50 ~ -250
INDUCTION	-350
Δ GEM	-400
μ -PIC	+485

表 3.12 ガスゲインの DRIFT 電圧依存測定時の設定電圧 (He)

装置名	設定電圧 [V]
DRIFT	-150 ~ -900
INDUCTION	-400
Δ GEM	-500
μ -PIC	+520

表 3.13 ガスゲインの INDUCTION 電圧依存測定時の設定電圧 (Ar)

装置名	設定電圧 [V]
DRIFT	-200
INDUCTION	-200 ~ -450
Δ GEM	-450
μ -PIC	+485

表 3.14 ガスゲイン測定時の INDUCTION 電圧依存測定時の設定電圧 (He)

装置名	設定電圧 [V]
DRIFT	-500
INDUCTION	-230 ~ -1030
Δ GEM	-500
μ -PIC	+520

DRIFT、INDUCTION の電圧依存の測定結果を図 3.15 から図 3.19 に示す。DRIFT、INDUCTION ともに He は一定のガスゲインに収束するのに必要な電圧が Ar より大きかった。He のドリフト速度は Ar に比べて遅く、十分な電圧でドリフトさせないと GEM や μ -PIC に到達するまでに時間がかかり、ガスに電子が吸収される確率が上昇するため、He で DRIFT や INDUCTION のガスゲインが一定値に収束するために必要な電圧が Ar に比べて大きいと考察できる。

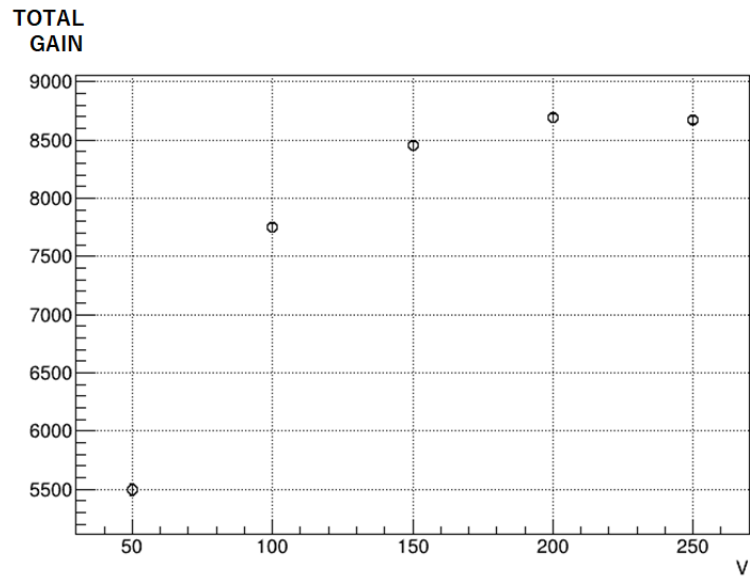


図 3.15 ガスゲインの DRIFT 電圧依存性の測定結果 (Ar)

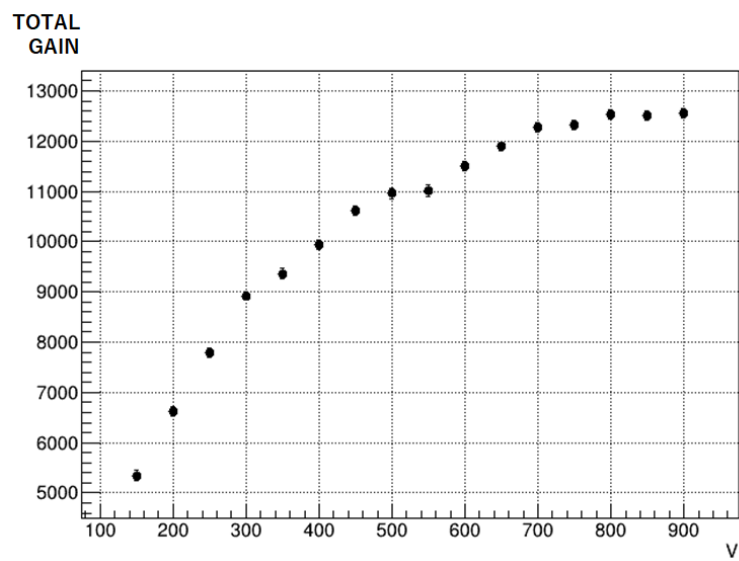


図 3.16 ガスゲインの DRIFT 電圧依存性の測定結果 (He)

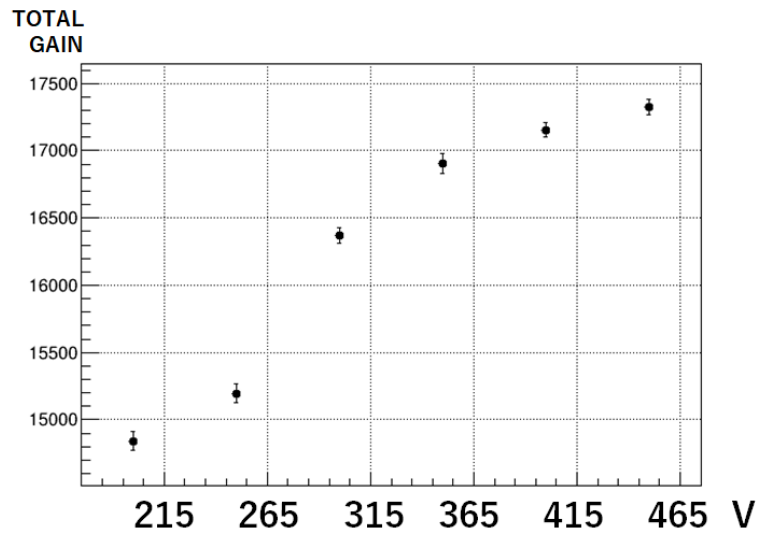


図 3.17 ガスゲインの INDUCTION 電圧依存性の測定結果 (Ar)

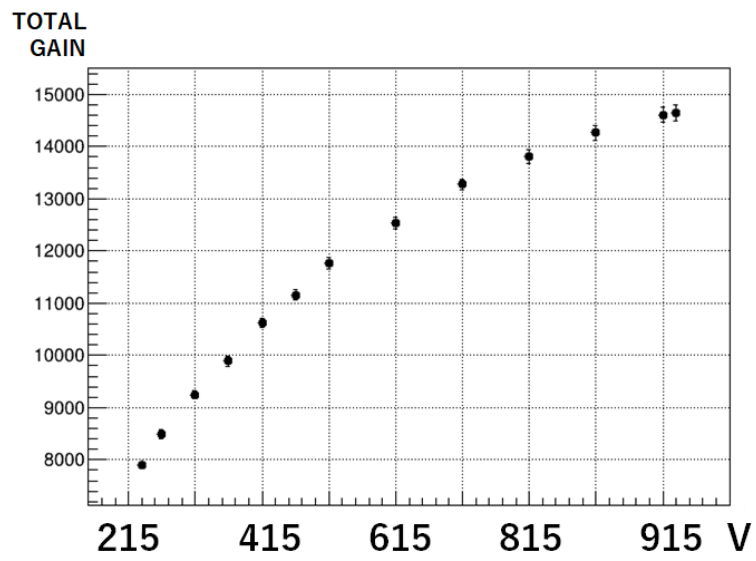


図 3.18 ガスゲインの INDUCTION 電圧依存性の測定結果 (He)

3.4.7 ガスゲイン測定実験まとめ

ガスゲイン測定実験により、Ar ガス、He ガスともに GEM と μ -PIC に印加する電圧を増加させるとガスゲインが指数的に増加し、雪崩増幅が起きていることを確認した。He は Ar と同等のガスゲインを得るのに必要な印加電圧が大きいことが分かった。He は W 値が大きく、電離させるのに必要なエネルギーが大きいためだと考えられる。

3.5 クエンチャーとガスゲインの関係

ガス検出器に使用する He ガスのクエンチャー (CO_2) の割合を変えてガスゲイン測定を行った。クエンチャーの割合が 6% から 14% までの各装置の設定電圧は表 3.15 である。

表 3.15 クエンチャーの割合とガスゲイン測定実験 設定電圧

装置名	設定電圧 [V]
DRIFT	-500
Δ GEM	-450
INDUCTION	-600
μ -PIC	+450

クエンチャーが 5% より少ないと、ガスゲインが大きくなり、アンプの出力限界に達したため設定をその都度変えて比較し、相対的なガスゲインの増加を調べた。

クエンチャーの割合が 6% 以下では直線的なふるまいが見られたのに対し、1~5% では急激にガスゲインが変化した。クエンチャーなしでは放電が激しく、測定不可能だった。5% 以上の直線的に見える部分は He の割合の変化でガスゲインが変化していると思われる。ガスゲインが 1~5% で急激に変化しているのは、クエンチャー不足により装置内の紫外線などが適切に吸収できず、ガスゲインが大きく見えたと考えられる。

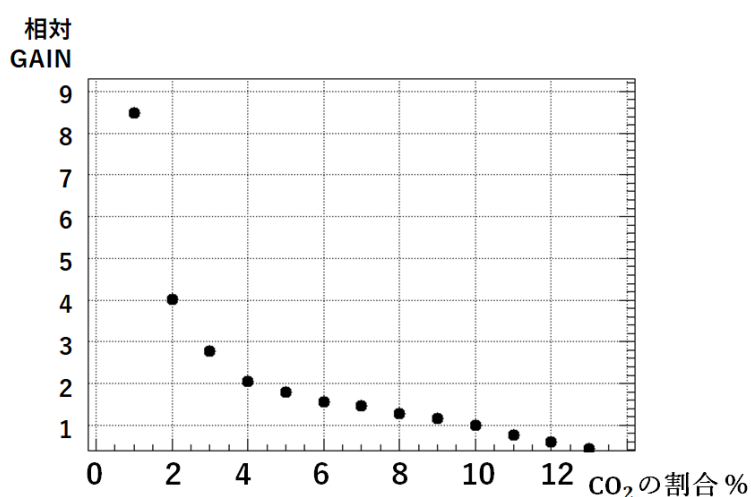


図 3.19 クエンチャーの割合と相対的なガスゲインの変化

3.6 He90% と He99% のゲインカーブ比較

クエンチャーの割合とガスゲインの関係が GEM によるものなのか、 μ -PIC によるものか、または両方によるものか確認するために、He の割合を 90% と 99% の場合で GEM と μ -PIC に印加する電圧を変化させてガスゲインの比較を行った。設定電圧は以下のとおりである。

表 3.16 ガスゲインの GEM 電圧依存性測定時の設定電圧 (He99%)

装置名	設定電圧 [V]
DRIFT	-640
INDUCTION	-600
Δ GEM	-330 ~ -370
μ -PIC	+410

表 3.17 ガスゲインの GEM 電圧依存性測定時の設定電圧 (He90%)

装置名	設定電圧 [V]
DRIFT	-300
INDUCTION	-400
Δ GEM	-435 ~ -475
μ -PIC	+485

表 3.18 ガスゲインの μ -PIC 電圧依存性測定時の設定電圧 (He99%)

装置名	設定電圧 [V]
DRIFT	-640
INDUCTION	-600
Δ GEM	-360
μ -PIC	+390 ~ +430

表 3.19 ガスゲインの μ -PIC 電圧依存性測定時の設定電圧 (He90%)

装置名	設定電圧 [V]
DRIFT	-300
INDUCTION	-400
Δ GEM	-500
μ -PIC	+485 ~ +530

GEM と μ -PIC の電圧依存性測定結果を図 3.20 と図 3.21 に示す。He90% と 99% の得られた結果をそれぞれ式 (4.3) でフィットした。フィッティングの結果を表 3.20 に示す。

$$G_{gas} = \exp(p_0 \times V + p_1) \quad (3.3)$$

表 3.20 ゲインカーブの係数

装置	He ガスの割合	p_0	p_1
Δ GEM	90%	$(1.64 \pm 0.03) \times 10^{-2}$	1.8 ± 0.1
Δ GEM	99%	$(2.24 \pm 0.04) \times 10^{-2}$	1.4 ± 0.1
μ -PIC	90%	$(1.13 \pm 0.03) \times 10^{-2}$	3.5 ± 0.1
μ -PIC	99%	$(1.81 \pm 0.04) \times 10^{-2}$	2.1 ± 0.2

GEM と μ -PIC の両方で 99% の傾きが 90% より大きかった。そのため 99% では大きなガスゲインが得られやすいことが分かり、He の割合が大きく、クエンチャーの割合が低い領域でガスゲインが大きくなる現象の原因は GEM や μ -PIC どちらかの原因ではないと確認できた。

また、実験中に He99% の混合ガスではたびたび放電が見られた。やはりクエンチャー不足による可視光線や紫外線の吸収不足により放電が発生しており、ガスゲインが大きくなる原因も同様に、クエンチャー不足

である可能性が高いと考えられる。

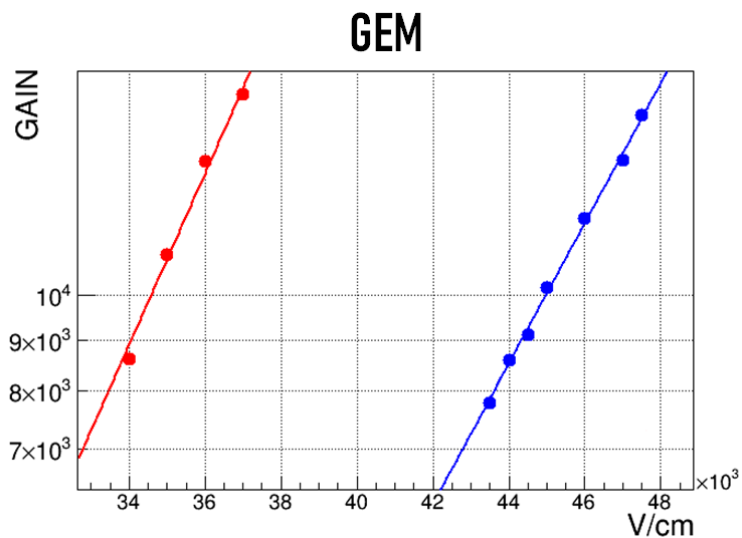


図 3.20 ガスゲインの Δ GEM 電圧依存性。He99%(赤) と He90%(青) のガスゲインの比較

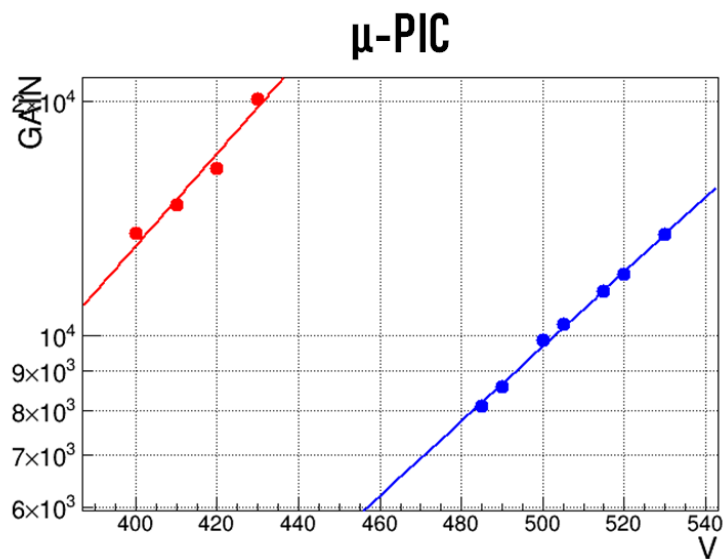


図 3.21 ガスゲインの μ -PIC 電圧依存性。He99%(赤) と He90%(青) のガスゲインの比較

4 ガス検出器における電子の雪崩増幅シミュレーション (担当: 光枝)

4.1 シミュレーションの目的

ガス検出器における電子の雪崩増幅の実験結果の理解、また雪崩増幅や電場などの視覚化によって現象への理解を深めるために雪崩増幅の計算機シミュレーションを行なった。

4.2 シミュレーションの手順

シミュレーションは次の手順で行った。

1. ジオメトリ^{*3}の作成
2. メッシュ化^{*4}
3. 電場解析
4. シミュレーションの設定・実行

4.3 使用するソフトウェア

ジオメトリの作成・メッシュ化のために Gmsh、電場解析では Elmer、シミュレーションでは Garfield++ というソフトウェアを使用した。

4.3.1 Gmsh

Gmsh^{*5}は有限要素法 (FEM: Finite Element Method) という数値解析手法のために対象を小さな領域 (メッシュ) に分割するツールである。構造解析や電磁場解析、流体解析など様々な場面で用いられる。

4.3.2 Elmer

Elmer^{*6}はメッシュ化した各パーツ (Physical Volume) の物理的な特性や電圧を設定し、電場計算を行うツールである。Gmsh によるメッシュ化の結果と先述の特性を記述した設定ファイル (sif ファイル) を入力とする。

4.3.3 Garfield++

Garfield++^{*7}はガスや半導体を媒体とした C++ で記述される検出器のシミュレーションツールである。Garfield++ では

- Magboltz^{*8}の設定

*3 装置の 3 次元構造を定義したデータ

*4 単純な形状 (平面の場合は三角形や四角形、立体の場合は四面体など) の集合に切り分けること

*5 <https://gmsh.info>

*6 <https://www.csc.fi/web/elmer>

*7 <https://garfieldpp.web.cern.ch/garfieldpp/>

*8 電磁場中の混合ガスにおける電子の Boltzmann transport equation を解くツール
<https://magboltz.web.cern.ch/magboltz/>

- ComponentElmer^{*9}の設定
- Sensor や Avalanche の設定
- root の設定

などを行う。

^{*9} Elmer の解析結果を Garfield++ から扱うクラス

本節では装置の各部、および印加する電圧を以下のように呼称する。



図 4.1 ガス検出器実験で使した装置の全体図

表 4.1 各部の呼称、および印加する電圧の呼称

	電極の呼称	印加する電圧の呼称
一番上の電極	ドリフト (面)	Drift
GEM 上面の銅板電極	GEM top	GEM top
GEM 下面の銅板電極	GEM bottom	GEM bottom
μ -PIC のアノード	Anode	Anode
μ -PIC のカソード	Cathode	Cathode

例えば μ -PIC のアノード自身とそこにかかる電圧を共に Anode と呼ぶ。

またこれ以外に GEM top と GEM bottom の電位差の絶対値を Δ GEM、Drift 面と GEM top の間にできる電場をドリフト電場、GEM bottom と Cathode の間にできる電場をインダクション電場と呼ぶ。

4.4 GEM のシミュレーション (Ar, C₂H₆)

「4.2 シミュレーションの手順」に従って GEM における電子増幅のシミュレーションを行った。

4.4.1 GEM のジオメトリ

GEM は図 4.2 のように液晶ポリマーが銅によって両側から挟まれ、等間隔に穴が空いている構造になっている。

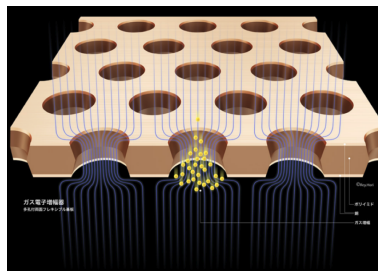


図 4.2 GEM の外観 [2]

今回実験で使用した GEM の各部の長さは表 4.2 の通りである。

表 4.2 GEM のジオメトリ

要素	長さ
GEM hole の半径	35 μm
銅極板の厚さ	5 μm
液晶ポリマーの厚さ	100 μm
ピッチ (GEM hole の中心間距離)	140 μm

またジオメトリは図 4.3、4.4 に示すような構造を作成し、繰り返し単位を定義した。(詳細は後述)

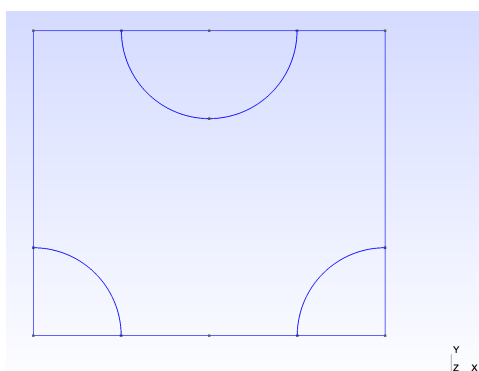


図 4.3 GEM の geo ファイルを Gmsh から開いた画像 (上から見たもの)

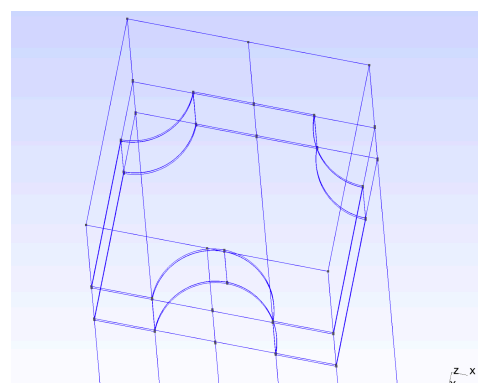


図 4.4 GEM の geo ファイルを Gmsh から開いた画像 (斜め上から見たもの)

4.4.2 メッシュ化

Gmsh を用いて Elmer 向けにメッシュ化した (図 4.5)。今回の GEM のシミュレーションでは対称性を考慮して定義した繰り返し単位当たり 24176 個の Tetrahedra(四面体) にメッシュ化された。

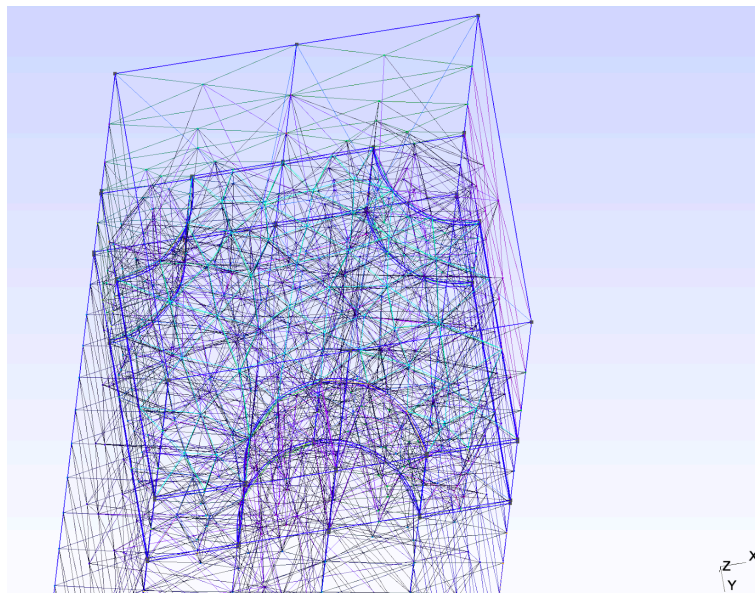


図 4.5 メッシュ化された GEM

4.4.3 Elmer による電場計算

Elmer の設定は表 4.3 に示す通りである。

表 4.3 Elmer の設定

パラメータ	設定値
ドリフト電場	181.82 V/cm
インダクション電場	1166.67 V/cm
Δ GEM	可変

この他に GEM の繰り返し構造を図 4.6 のように「横方向には反転させ、縦方向にはそのまま並べる」という境界条件を指定することで GEM 全体を表現した。

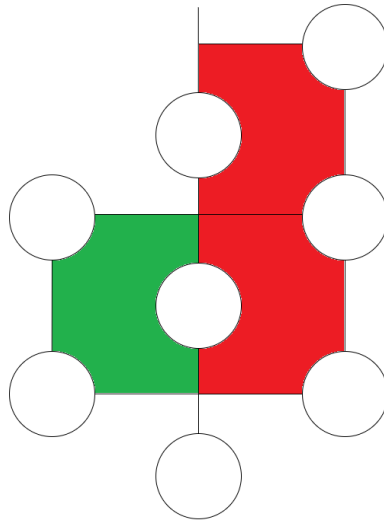


図 4.6 GEM の繰り返し構造
 緑色の部分が定義した GEM のジオメトリ。赤は反転したものを表す。

4.4.4 GEM の電場

図 4.7 は $\Delta GEM = 425$ [V] としたときの GEM の電気力線と電位を描画したものである。

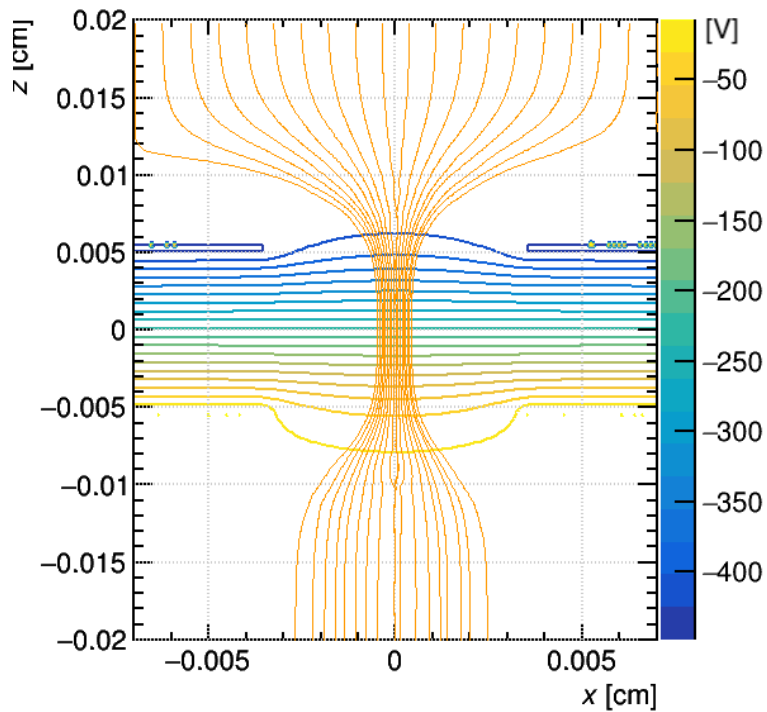


図 4.7 GEM の電気力線 (橙色) と等電位面 (グラデーション)

(※電圧は入力の際にドリフト面を 0 [V] として取り直しているが、電位差は実験の通りになるようにしている。)

この電気力線に沿って電子は GEM hole に吸い込まれ、内部の高電場で雪崩増幅を起こす。
 具体的な印加電圧は表 4.4 の通りである。

表 4.4 各電極にかかる電圧

印加部	電圧 [V]
Drift	-975
GEM top	-775
GEM bottom	-350
Anode	+485
Cathode	0

4.4.5 電子の雪崩増幅

図 4.8 に GEM hole における電子の雪崩増幅を視覚化したものを示す。領域の中央上部に置かれた電子がドリフトされ、増幅される様子を橙色の線で示している。電場が強い GEM hole の中心部分で雪崩増幅が起きていることがわかる。

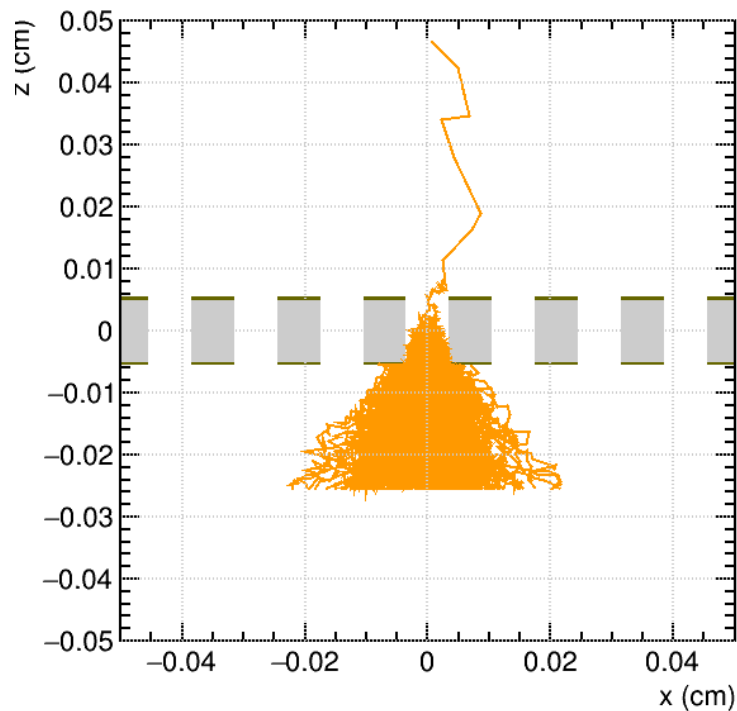


図 4.8 GEM における電子の雪崩増幅の様子

4.4.6 GEM GAIN

GEM に対して $\Delta GEM=430$ [V] の電位差を与えた上で GEM の上方で電子を発生させ、その 1 電子が GEM hole における雪崩増幅によっていくつの電子になるか (Number of amplified electrons) を 4000 回シ

ミュレーションしたものが図 4.9 である。

これを Polya-Eggenberger 分布

$$f(x) = \left(\frac{x(1+\theta)}{\bar{A}}\right)^\theta e^{-\frac{x(1+\theta)}{\bar{A}}} \quad (4.1)$$

でフィッティングした結果、 $\bar{A} = 8.6 \times 10^2$ が得られ、GEM GAIN = 8.6×10^2 が得られた。

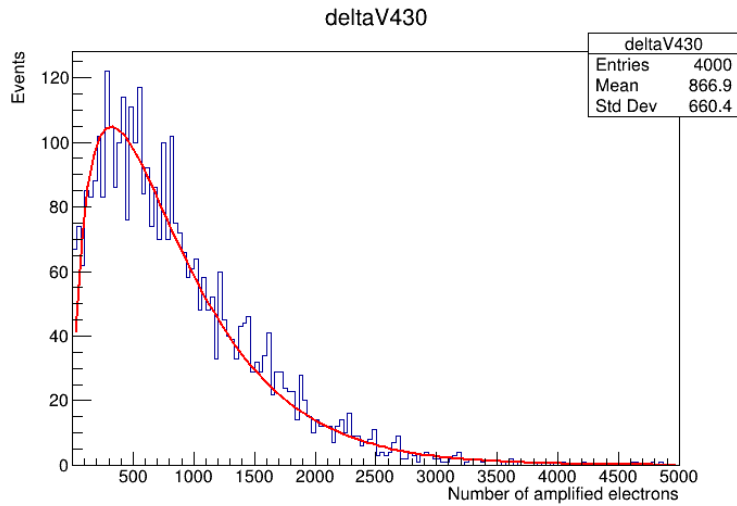


図 4.9 Δ GEM が 430 [V] のときに 1 電子が GEM によっていくつの電子に増幅されるかをシミュレーションしたヒストグラム

同様にして Δ GEM を 350, 375, 400, 410, 425 [V] とした際の GEM GAIN を Δ GEM に対してプロットすると図 4.10 のようになった。ここで Δ GEM は実験を行なった範囲とした。

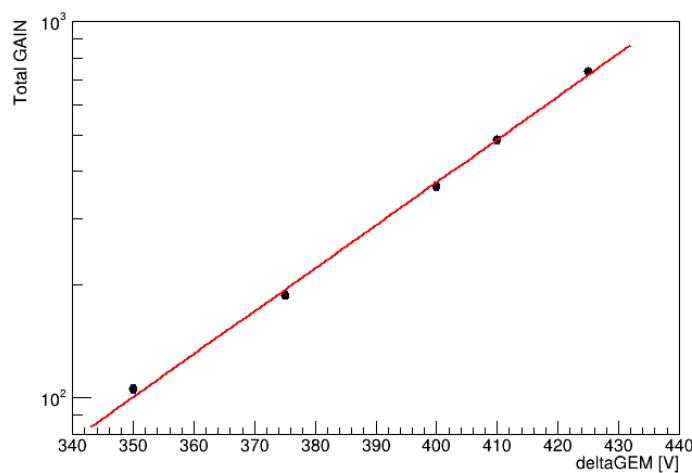


図 4.10 GEM GAIN の Δ GEM 依存

350 [V] \leq Δ GEM \leq 430 [V] において $O(10^2)$ 程度の GAIN が得られ、GEM GAIN は Δ GEM に対して

指数的に変化することがわかる。

また式 4.2

$$\text{GEM GAIN} = e^{p_0 \times \Delta \text{GEM} + p_1} \quad (4.2)$$

でフィッティングを行なったところ、式 4.3 のような結果を得た。

$$\begin{cases} p_0 = 0.02796 \pm 0.0002 \\ p_1 = -5.26020 \pm 0.0978 \end{cases} \quad (4.3)$$

4.5 μ -PIC のシミュレーション (Ar , C_2H_6)

続いて、 μ -PIC 近傍での電子増幅のシミュレーションを行なった。 μ -PIC の装置の外観は 4.11 の通りである。

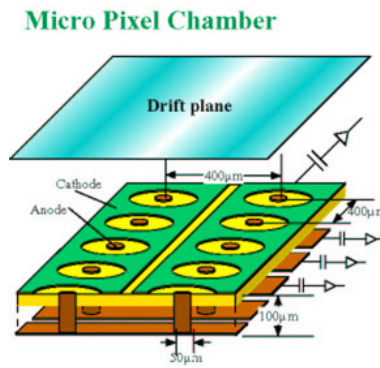


図 4.11 μ -PIC 外観 [3]

これに対して図 4.12 に示すようなジオメトリを作成、図 4.13 に示すようなメッシュ化を行なった。

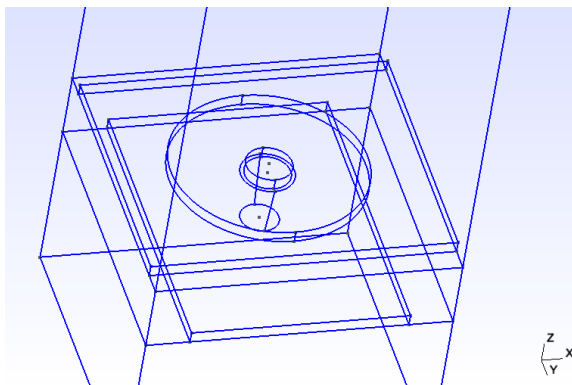


図 4.12 μ -PIC のジオメトリ

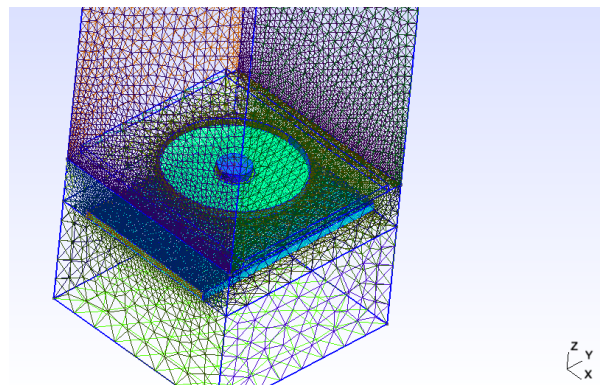


図 4.13 メッシュ化された μ -PIC

今回の μ -PIC のシミュレーションでは繰り返し単位当たり 402998 個の Tetrahedra(四面体) にメッシュ化された。

4.5.1 μ -PIC の電場

図 4.14 は Anode = 485 [V] のときの電気力線と電位を描画したものである。Anode 直上に電気力線が集中しているのがわかる。ここで、各パラメータは表 4.5 のように設定した。

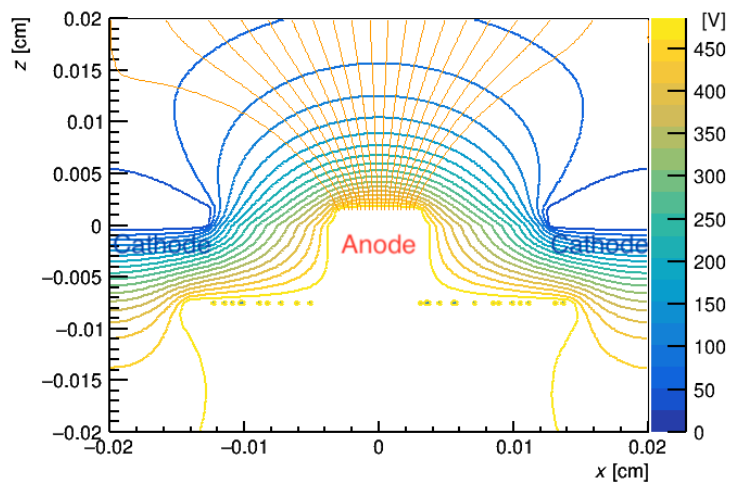


図 4.14 μ -PIC の電気力線 (橙色) と等電位面 (グラデーション)

表 4.5 各電極に設定した電圧

印加部	電圧 [V]
GEM bottom	-300
Anode	+485
Cathode	0

4.5.2 μ -PIC における電子の雪崩増幅

μ -PIC における電子の雪崩増幅を視覚化したものが図 4.15 である。電子の雪崩増幅は Anode 直上で起きて Anode に到達、電離によって生じた Ar^+ の多くは Cathode に向かうことがわかる。

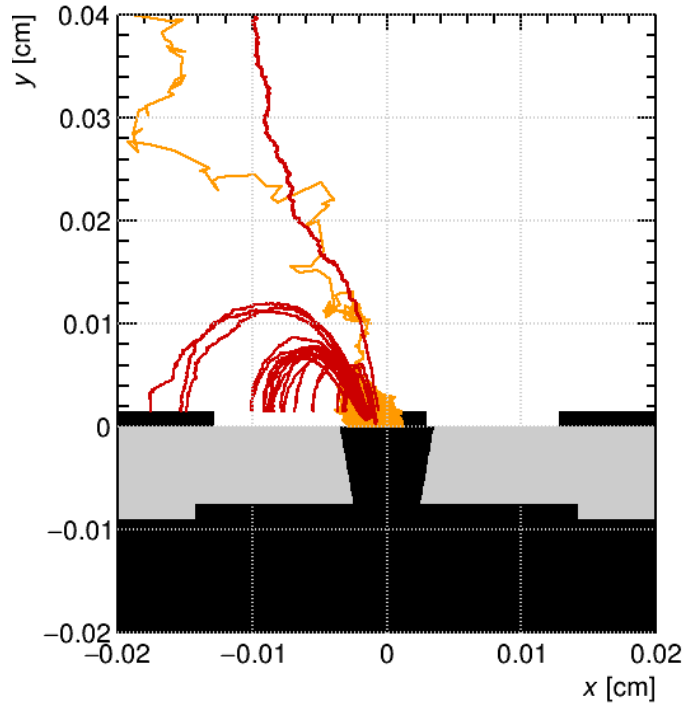


図 4.15 μ -PIC における電子の雪崩増幅の様子. (オレンジ: 電子、赤: Ar^+)

4.5.3 μ -PIC GAIN

μ -PIC 単体の GAIN の Anode 依存性についてシミュレーションしたものが図 4.16 である。4.4.6 節の GEM GAIN と同様、 μ -PIC GAIN (μ -PIC 単体の GAIN) は Anode に対して指数的に変化することがわかる。

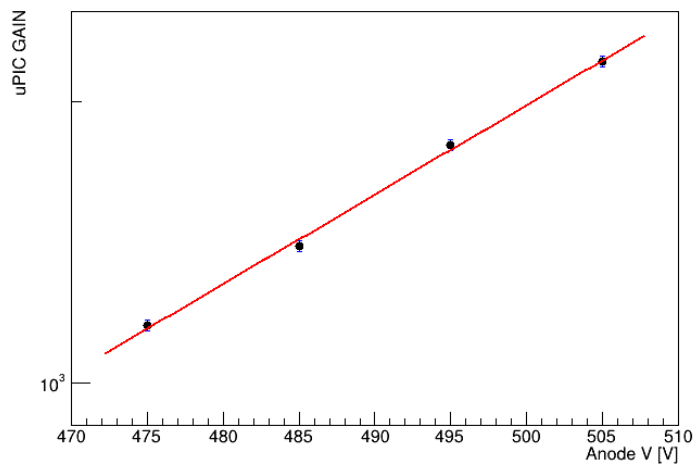


図 4.16 μ -PIC GAIN の Anode 依存性

ここで、 $470 \text{ [V]} \leq \text{Anode} \leq 510 \text{ [V]}$ において、 $\mu\text{-PIC GAIN}$ は $O(10^3)$ 程度である。
 また、式 4.4

$$\mu\text{-PIC GAIN} = e^{p_0 \times \Delta\text{GEM} + p_1} \quad (4.4)$$

でフィッティングを行なったところ、式 4.5 のような結果を得た。

$$\begin{cases} p_0 = 0.0221 \pm 0.0007 \\ p_1 = -3.4404 \pm 0.3201 \end{cases} \quad (4.5)$$

4.6 実験との比較 (Ar, C₂H₆)

「4.4 GEM のシミュレーション (Ar, C₂H₆)」、「4.5 $\mu\text{-PIC}$ のシミュレーション (Ar, C₂H₆)」で得られた GAIN を組み合わせ

$$\text{Total GAIN} = \text{GEM GAIN} \times \mu\text{-PIC GAIN} \quad (4.6)$$

とすることで Total GAIN(装置全体での GAIN) を計算し、3.4.5 節 3.3 で述べた実験結果と比較した。

4.6.1 ΔGEM 依存

Total GAIN の挙動を確認するために、まずは ANODE の値を固定し、Total GAIN の ΔGEM 依存性を確認した。設定は表 4.6 のようにした。GEM top の電圧を変えることで ΔGEM を変化させ、Drift はドリフト電場が保たれるように設定した。

表 4.6 各電極にかかる電圧

印加部	電圧 [V]
Drift	ドリフト電場の大きさが常に 181.82 [V/cm] になるように調整 (GEM top より常に 200 [V] 低い。)
GEM top	可変
GEM bottom	-350
Anode	+485
Cathode	0

結果は図 4.17 のようになった。

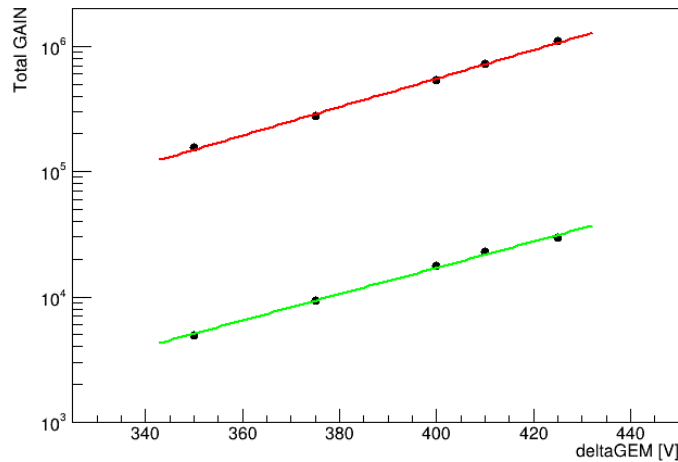


図 4.17 実験とシミュレーションの比較 (Δ GEM 依存)
赤: シミュレーション、緑: 実験

表 4.7 フィッティングパラメータ

	p_0	p_1
シミュレーション	0.0262	2.7580
実験	0.0241	0.0879

$$(\text{GEM GAIN} = e^{p_0 \times \Delta \text{GEM} + p_1})$$

図 4.17 及び表 4.7 から傾きは近い値になっているが、絶対値は 30 倍ほど異なっていることがわかる。

4.6.2 Δ GEM 依存の比較に関する解釈

傾きに関して、実験結果とシミュレーションの値が近いのは「雪崩増幅」の電圧依存性をうまくシミュレーションできているからだと考えられる。一方で絶対値のずれに関しては装置とシミュレーションに関してそれぞれ次の原因が考えられる。まず装置側に関して GEM に電圧をかける保護抵抗で電圧降下が発生し、想定した電圧がかかっていない可能性がある。具体的にはシミュレーションでフィッティングした式から計算すると、 Δ GEM が 26.5 [V] 下がると GAIN は半分になり、数十 [V] の誤差によって GEM GAIN は数倍変わり得る。次にシミュレーション側では Total GAIN の算出方法に問題がある可能性がある。「4.6 実験との比較 (Ar, C₂H₆)」の冒頭では Total GAIN を

$$\text{Total GAIN} = \text{GEM GAIN} \times \mu\text{-PIC GAIN}$$

としたが、この計算は「GEM で増幅されたすべての電子が μ -PIC の Anode 近傍で雪崩増幅したときの電子の総数」になっている。しかしインダクション電場 (GEM bottom と Cathode の間の電場) が強い場合で電子が Anode に向かう垂直線上にない場合、電子は Anode-Cathode 間の電場に曲げられずに Cathode に到達することがあり、Total GAIN は単純な積とならない可能性がある。

図 4.18 は GEM bottom と μ -PIC の間の空間に形成される電場を示したものである。図 4.18 から Anode 近傍では電気力線が曲がり Anode に集中しているが、インダクション空間 (GEM bottom と μ -PIC の間の空間) では一様な電場 (インダクション電場) が形成されていることがわかる。例えば電子のエネルギーが十分大きく、電子の運動量方向が Anode に向いていなかった場合、Anode 近傍の電場で曲げられずに Cathode に到達することが考えられる。

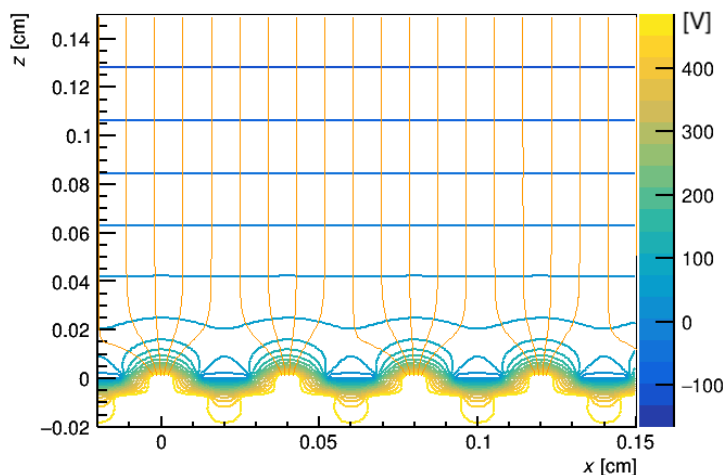


図 4.18 GEM bottom と μ -PIC の間の空間に形成される電気力線と等電位面 (グラデーション)

電子が Cathode に到達するかどうかは

- インダクション電場の強度
- 雪崩増幅した電子のエネルギー
- 雪崩増幅した電子の運動量方向

などに依存する。1 電子が Cathode に到達する確率を α とすると Total GAIN は

$$\text{Total GAIN} = (1 - \alpha) \times \text{GEM GAIN} \times \mu\text{-PIC GAIN}$$

となるが、今回の研究では α の値の定量評価には至らなかった。

一方でインダクション電場が弱い場合、GEM hole で雪崩増幅した後に電子が広がってしまい位置分解能の低下を引き起こしてしまうため、後の飛跡検出実験を考えると弱すぎても問題である。

4.6.3 Anode 依存

Total GAIN の Anode 依存性を見るために、 Δ GEM は固定し、GEM GAIN を一定とした。

また設定は表 4.8 のようにした。

表 4.8 Total GAIN の Anode 依存性を確認する際の各電極に設定した電圧

印加部	電圧 [V]
Drift	-1000
GEM top	-800
GEM bottom	-350
Anode	可変
Cathode	0

結果は図 4.19 のようになった。

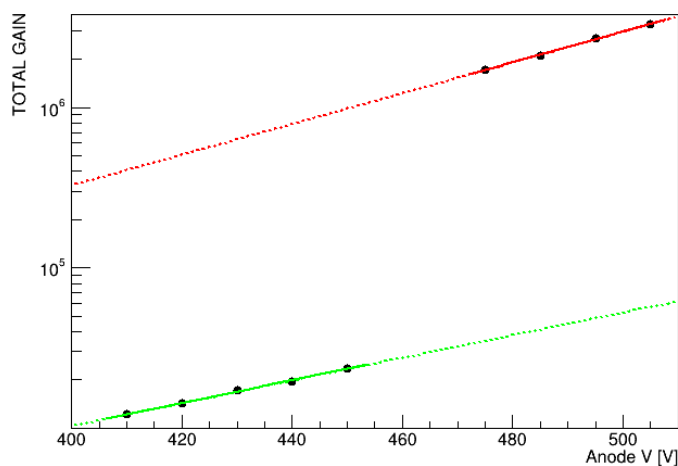


図 4.19 実験とシミュレーションの比較 (Anode 依存)
赤: シミュレーション、緑: 実験

表 4.9 フィッティングパラメータ

	p_0	p_1
シミュレーション	0.0221	3.8764
実験	0.0163	2.7373

$$(\text{GEM GAIN} = e^{p_0 \times \Delta \text{GEM} + p_1})$$

表 4.9 を見ると傾き p_0 は GEM のときほど合っておらず、絶対値は同様に 30 倍ほど異なっている。

4.6.4 Anode 依存の比較に関する解釈

傾きが GEM ほど合っていないのは、シミュレーションでの雪崩増幅過程に何かしらの問題があることが考えられる。特に実際の電場とシミュレーションの電場が同じでない可能性があると考えた。

図 4.20 は実際の μ -PIC をデジタルマイクロスコープで撮影したものである。

一方、図 4.21 はシミュレーションで使用した μ -PIC のジオメトリである。

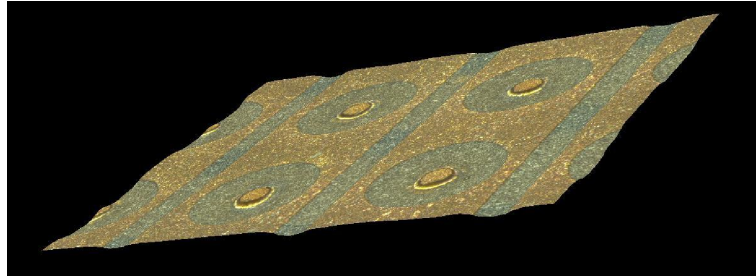


図 4.20 デジタルマイクロスコープで見た μ -PIC

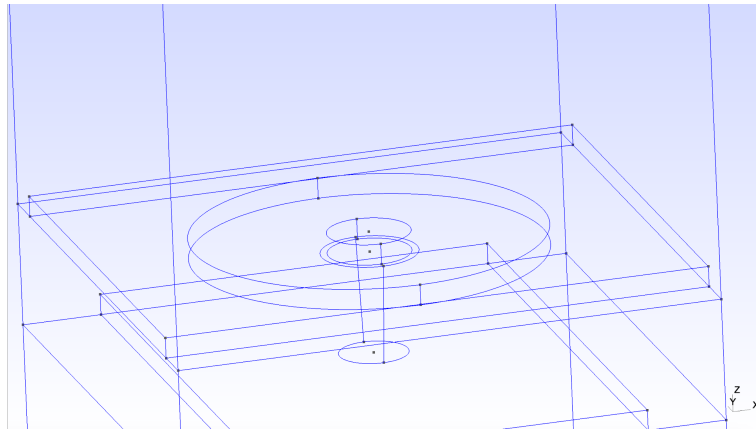


図 4.21 μ -PIC のジオメトリ

図 4.20 の方を見ると各部の接合部分がなめらかになって見える。実際の電場とシミュレーションの電場がわずかにずれていることによって、GEM のときほど傾きが合わなかった可能性が考えられる。

絶対値に関しては、こちらも GEM のときと同様に保護抵抗での電圧降下によって電極に想定した電圧がかかっていない可能性がある。また Total GAIN の計算に含まれる GEM GAIN 側のずれも同じく含まれている。

4.7 He, CO₂ 混合ガスのシミュレーション

4.7.1 Total GAIN のガス混合率依存

本節以前は Ar と C₂H₆ を 9:1 の比率で混合したガスを使用していたが、1.3 節にもあるように、後のミュオン飛跡測定等への使用を想定して He, CO₂ 混合ガスについてもシミュレーションを行なった。なお、4.7.3 節までのシミュレーション結果は 1.1.3 節で述べたペニング効果を考慮しないものを示し、4.7.4 節でペニング効果を考慮した場合について議論する。

Ar, C₂H₆ 混合ガスでは先行研究を参考に 9:1 の混合比率のガスを用いていたが、He, CO₂ については最適な混合比率が未知であったため、まず GAIN の混合比率依存についてシミュレーションを行なった。

He, CO₂ の混合比率が 9:1 のときに GEM と μ -PIC の雪崩増幅をシミュレーションした結果がそれぞれ図 4.22、図 4.23 である。

また混合比率をパラメータとして He の混合比率を横軸、Total GAIN を縦軸として表したものが図 4.24 である。

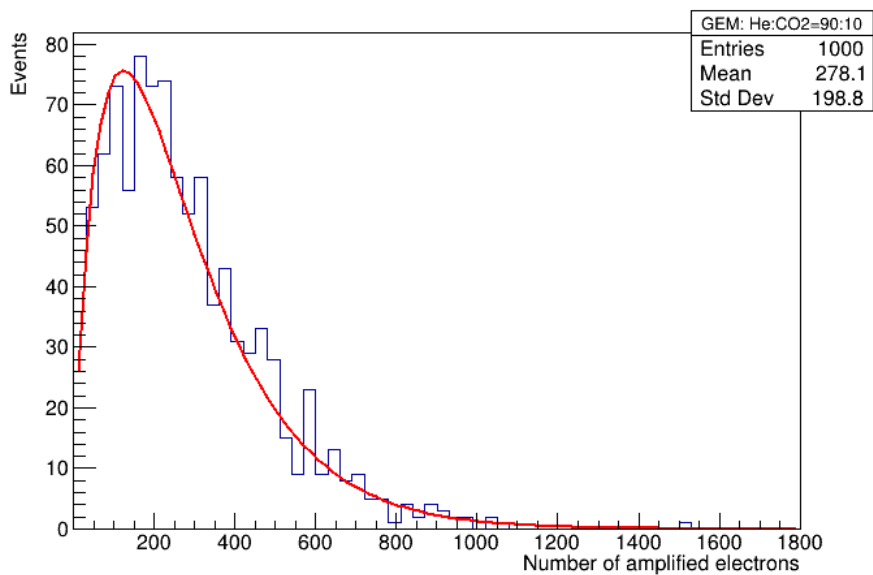


図 4.22 He:CO₂=9:1 のときの GEM での増幅率のヒストグラム

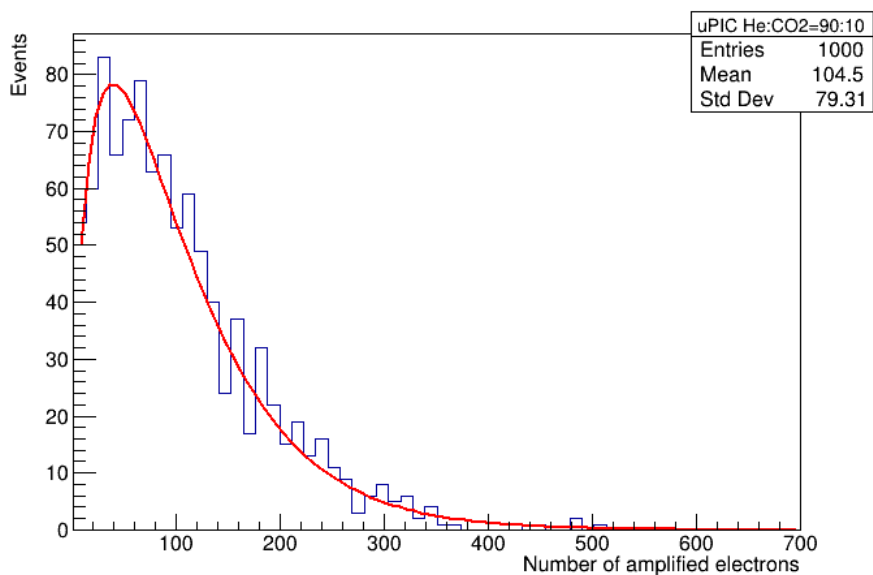


図 4.23 He:CO₂=9:1 のときの μ -PIC での増幅率のヒストグラム

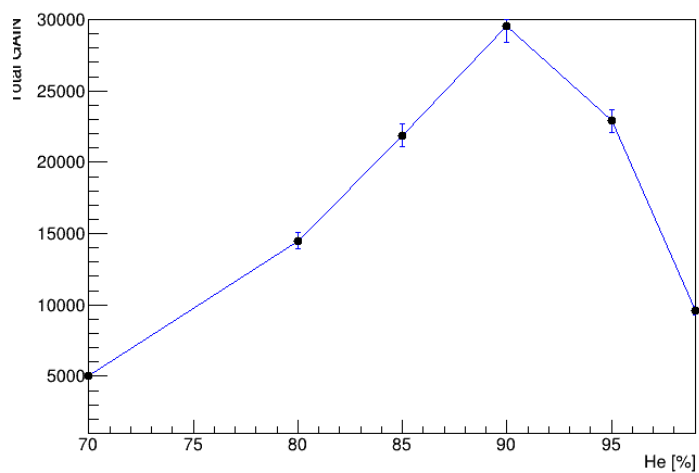


図 4.24 Total GAIN の混合比率依存

表 4.10 増幅率のガス混合比率依存測定の際に各電極に設定した電圧

印加部	電圧 [V]
Drift	-1600
GEM top	-1100
GEM bottom	-600
Anode	+500
Cathode	0

図 4.10 によると Total GAIN は He と CO₂ の比率が 9:1 の時にピークを持つ。

4.7.2 Total GAIN のガス混合率依存のシミュレーションと実験の比較

上記のシミュレーションを実験結果と比較したものが図 4.25 である。

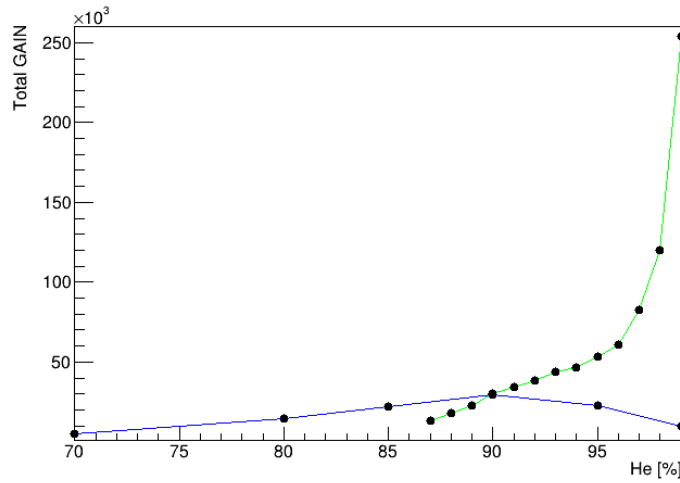


図 4.25 Total GAIN のガス混合率依存のシミュレーションと実験の比較

青色: シミュレーション、 緑色: 実験

90% 付近では Total GAIN のオーダー ($O(10^4)$) は一致しているが、90% を超えた部分から実験の方は急激に Total GAIN が増加したのに対して、シミュレーションでは減少に転じている。

実験における Total GAIN の増加については 3.5 節 3.4 で考察されているためここでは言及せず、シミュレーション側の 90% のピークについてのみ考察する。

4.7.3 GAIN のガス混合率依存のシミュレーションに対する考察

今回のシミュレーションの Total GAIN はほとんど第一タウンゼント係数によって決まると考えられるので、Garfield++ の内部でも使われている Magboltz によって混合比率ごとの第一タウンゼント係数を計算したところ図 4.26 のようになった。

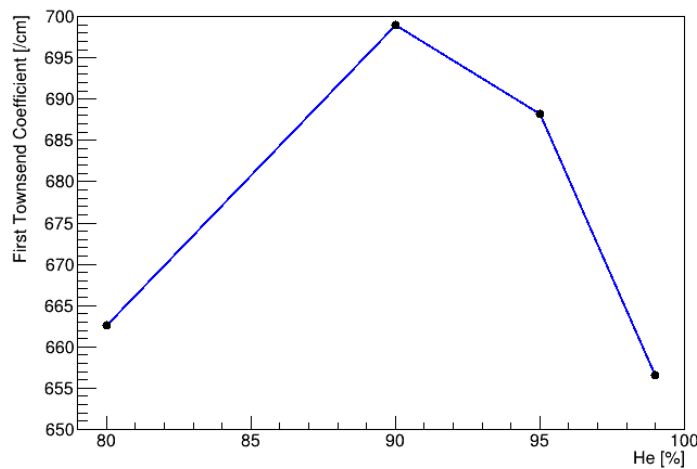


図 4.26 第一タウンゼント係数と混合比率

表 4.11 Magboltz への入力例

INPUT CARD	設定値
First card	2 20 0.00000
Second card	45 12 0 0 0 0
Third card	90.0000 10.0000 0.0000 0.0000 0.0000 0.0000 27.0000 760.0000
Fourth card	50000.000 0.000 0.000

(※上記は 2 種類の気体、45 番 (Helium 4) と 12 番 (CO₂) を 9:1 の比率で混合し、常温常圧において $\Delta GEM=500$ [V] の電位差が 100 [μm] = 0.01 [cm] の距離が空いた極板間にある (= 50000 [V/cm]) として実行する場合の入力例。より詳しい意味は Usage^{*10}を参照。)

こちらでも同様に He の割合が 90% の位置にピークができたため、この第一タウンゼント係数の影響を受けて Total GAIN も 90% の位置にピークを持ったと考えられる。第一タウンゼント係数が混合比率に対してなぜこのような値になるのか理解する (またこの値の妥当性を評価する) には、「混合気体における第一タウンゼント係数の計算方法」および「Magboltz の内部実装」を理解する必要があるが、実験側で「90% を超えたあたりから放電が頻発する」、「9:1 の混合比率で十分な Total GAIN が出る」ということがわかったためそこまでは立ち入らず、各印加電圧に対する装置の特性を調べる際は 9:1 にすることとした。

4.7.4 He, CO₂ 混合ガスにおけるペニング効果の影響

Garfield++ では Penning Ionization を起こす確率を rPenning というパラメータで表す。Ar, C₂H₆ 混合ガスについては実験的に rPenning=0.31 という値が既知であったためこれを使用した。[4]

He, CO₂ 混合ガスについては文献が見当たらなかったため、この値を変化させて GAIN を計算した。rPenning を 0.0 から 0.4 まで変化させた GAIN の ΔGEM 依存を図 4.27 に示す。Penning Ionization は励起状態にある希ガス原子が電子の放出を伴う反応を起こす現象であることから、rPenning が大きくなると Total GAIN も大きくなるという、想定通りの挙動が確認された。図 4.27 には、実験結果も合わせて示す。

*10 <https://magboltz.web.cern.ch/magboltz/usage.html>

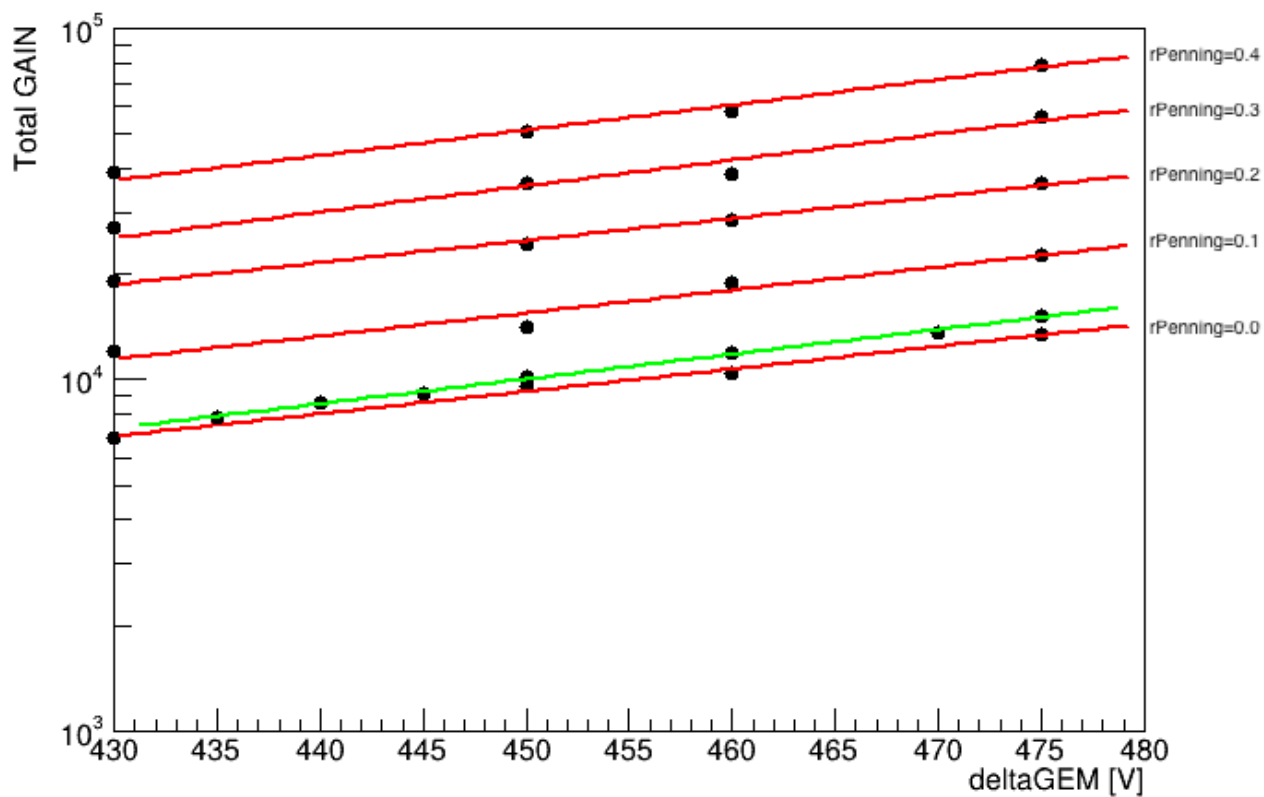


図 4.27 Total GAIN の Δ GEM 依存性の実験とシミュレーション比較

赤: シミュレーション (下から rPenning が 0.0, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4)、緑: 実験

表 4.12 各電極にかかる電圧

印加部	電圧 [V]
Drift	ドリフト電場の大きさが常に 181.82 [V/cm] になるように調整 (GEM top より常に 200 [V] 低い。)
GEM top	可変
GEM bottom	-400
Anode	+485
Cathode	0

図 4.27 のフィッティング結果は次の通り。

表 4.13 フィッティングパラメータ

rPenning	p_0	p_1
0.0	0.0147	2.5045
実際の実験における rPenning	0.0162	1.9068
0.1	0.0151	2.8415
0.2	0.0144	3.6269
0.3	0.0171	2.8028
0.4	0.0165	3.4201

$$(\text{GEM GAIN} = e^{p_0 \times \Delta \text{GEM} + p_1})$$

上記より実験とシミュレーションで傾きはそれなりに近く、傾きは rPenning に依らずほとんど一定ということがわかった。(すなわち Total GAIN の絶対値に効いてくる。) 実際の実験がわからないため、Ar, C₂H₆ 混合ガスのときのように「実験とシミュレーションがどの程度ずれているのか」は評価できない。しかし今後の展望として rPenning がわかっている Ar, C₂H₆ 混合ガスの実験とシミュレーションについて Total GAIN を一致させることができれば、逆に実験とシミュレーションの比較から He, CO₂ 混合ガスの rPenning を得られる可能性がある。

4.8 まとめ

Ar, C₂H₆ 混合ガス、He, CO₂ 混合ガスにおける電子の雪崩増幅のシミュレーション結果と実験結果との比較をまとめると以下の通りである。

- GEM GAIN の ΔGEM 依存性の傾きをシミュレーションから予測することができた。
- GAIN の μ -PIC 依存については GEM ほど一致した傾きは得られなかったが、ジオメトリを改善することでより正確に予測できる可能性がある。
- 絶対値に関しては実験側で「各部の電圧を測定し、電源電圧が正しく行き届いているかを確認」、シミュレーション側では「GEM のシミュレーションで増幅された電子の状態を記録しておき、それを μ -PIC のシミュレーションのインプットにすることで Total GAIN へのインダクション電場の寄与を追加する」ことによって改善が見込まれる。
- He, CO₂ 混合ガスにおける Total GAIN の混合率依存に関しては、実験とグラフの形は合わなかったが、混合気体の第一タウンゼント係数の計算方法および Magboltz の実装を理解することによって、なぜあのような形になるか分かる可能性がある。
- また上記を解決でき、シミュレーションによって高精度な予測ができるようになった場合には、実験との比較によって rPenning を得られる可能性がある。

5 ガス TPC を用いた宇宙線ミューオン飛跡測定 (担当: 井上陸)

5.1 実験の目的、概観

本研究では、ガス TPC を用いた宇宙線 μ 粒子の飛跡測定を行った。飛跡の再構成は、宇宙線 μ 粒子によるガス原子の電離によって発生したドリフト電子の位置情報を検出することによって行われる。ドリフト電子はガス原子と散乱を繰り返すことによって一定の速度 (ドリフト速度) で運動するが、散乱による実際の電離が発生した位置とのずれ (拡散) も発生する。本実験の目的はこの拡散を定量的に評価し、検出器の性能評価を行うことである。本章ではその準備として、飛跡検出のデータ取得、データ処理、さらに検出された位置情報から三次元飛跡解析を行う。また最小電離粒子と仮定したミューオンの単位長さあたりの期待されるエネルギー損失からエネルギー較正を行う。

5.2 セットアップ

5.2.1 セットアップ

図 4.1 に本測定のセットアップを示す。座標軸は $z = 0\text{cm}$ を GEM の表面として $z = 8\text{cm}$ がドリフト面、縦方向を y 軸として -5cm から 5cm 、奥行き方向を x 軸として -5cm から 5cm と取っている。2 枚のプラスチックシンチレータの同時計測によってトリガーを発行することで、ミューオンについてのデータが取得される。ガスで満たされた真空容器内の、検出領域をにミューオンが通過した際に、ミューオンがガス中の原子を電離させて発生した電子を一様電場によって μ -PIC に引き寄せ、検出する。拡散の測定において、横拡散 (xy 面での拡散) を測る際に、フィッティングした直線と実際のプロットとの残差の絶対値を利用するが、ほぼ xy 面上の飛跡である場合にはわずかなフィッティングとのずれで極端に残差が大きくなってしまいうため、斜め方向の飛跡を多く取るためにプラスチックシンチレータを斜めに重ねて配置している。

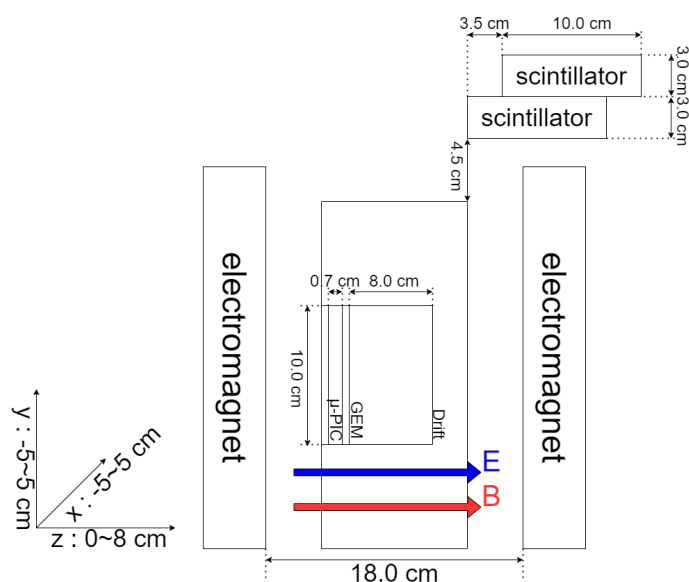


図 5.1 ガス TPC を用いた宇宙線 μ 粒子の飛跡測定のセットアップ

5.2.2 測定諸元

表 5.1 測定諸元

場所	電圧 [V]
Drift	-2500
GEM Top	-920
GEM Bottom	-500
Anode	520
ガス Ar : Ethane = 9 : 1 (1atm)	
測定時間 (磁場なし) 1.7×10^5 sec.	
測定時間 (磁場あり) 1.7×10^5 sec.	
トリガーイベント (磁場なし) 2.6×10^4 Event	
トリガーイベント (磁場あり) 1.5×10^4 Event	

磁場なしと磁場ありの二通りの測定を行っているが、ガスは交換されず電圧もそのままである。先行実験のガス増幅率測定実験と比較して、GEM はやや低め Anode は高めの電圧で測定することとした。トリガーされたのはそれぞれ 2.6×10^4 イベントと 1.5×10^4 イベントでそのうち、解析に使用できたのは 3697 イベントと 2289 イベントだった。何らかのエラーで読み取りができなかったのか、プログラムが何らかの理由でミューオンの飛跡でないかと判断したのかは不明である。

5.3 三次元飛跡

5.3.1 ドリフト速度

ドリフト速度はトリガーがかかってから、各ストリップで信号が閾値を超えた時間 (TOF; Time Of Flight) を用いて求めることができる。下図はミューオンと推定される事象の全飛跡の TOF のヒストグラムである。それぞれ赤線はアノード、青線はカソード、黒線はそれらの和である。

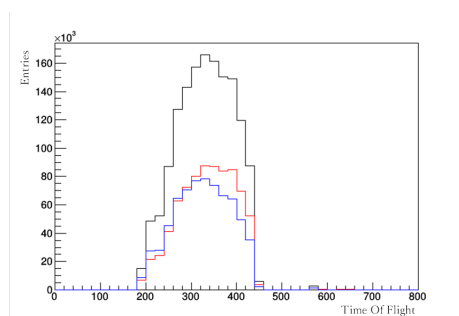


図 5.2 磁場なし測定での Time Of Flight のヒストグラム

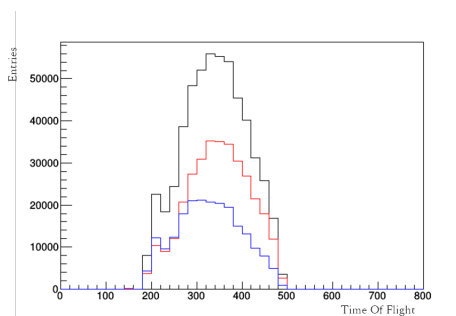


図 5.3 磁場あり測定での Time Of Flight のヒストグラム

ドリフト電子がチェンバー内 0 ~ 8.0 cm の距離を運動するのにかかった時間が TOF の幅に相当すると考えられる。この幅は両図ともおよそ 200 clock と読み取られ、clock の周波数が 10^8 Hz であることから、 $2.0 \mu\text{s}$ である。

従って、ドリフト速度 v_d は

$$v_d \simeq \frac{8.0}{2.0} = 4.0 \text{ cm}/\mu\text{s}$$

と求まる。

5.3.2 三次元飛跡

アノードとカソードそれぞれの clock から計算された z 座標について、同時計測を行うことでそれぞれのヒット点の三次元位置を決定することができる。同一トリガー事象についてこれらの点を組み合わせることで、三次元の飛跡を再構成することができる。

下図は例として8つのイベントについて描画したものである。今後、こうした一本の線とみられる飛跡をミュオン事象として解析の対象とする。また飛跡の長さについては x, y 方向はその端点の距離、 z 方向についてはアノードとカソードそれぞれから計算したものの長い方を選択し、三次元の距離として定義する。

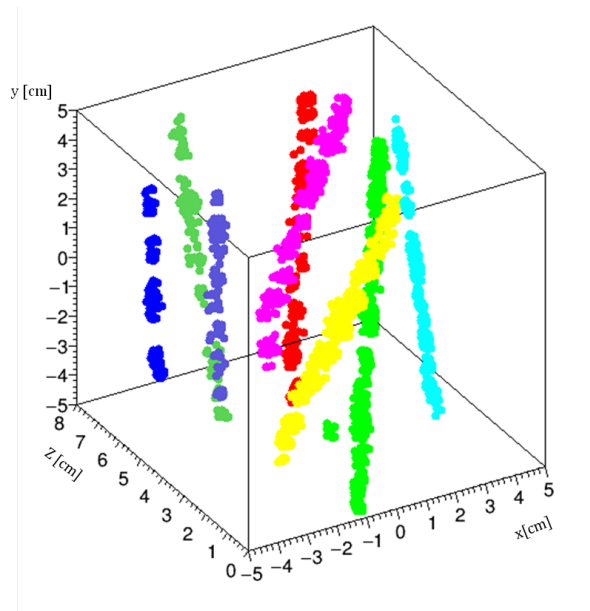


図 5.4 8 イベントのミュオン飛跡

5.4 事象選別

カソードのストリップを FADC で記録した波形情報を積分した $\sum ADC$ とエネルギー (keV) の変換係数 (calibration factor, CF) を求めてエネルギー較正とする。また、ミュオンは斜めに入射しその飛跡の長さは異なるため、先述の飛跡の長さで割って単位長さ (1cm) あたりの $\sum ADC$ とエネルギーで較正する。

単一のミュオン事象で測定するために、次の三種類の条件のいずれかを満たす事象については解析事象から除外した。

1. 複数のミュオンの飛跡

飛跡の長さで割ることで単位長さあたりの $\sum ADC$ に変換するが、この飛跡の長さは両端点の距離である。よって複数のミュオンの飛跡が記録された場合には飛跡の長さに対してエネルギーが大きく

なってしまうため除外した。

2. 途切れたミュオン軌跡

検出器中で、アノードストリップについて、放電や導通のために電圧をかけないストリップがあった。こうしたストリップをまたぐ事象は飛跡が途切れて観測され、エネルギーは飛跡の一部しか取得されなため除外した。

3. 環境ガンマ線などによるノイズ

まれに環境ガンマ線がチェンバー内に入り込み、短い電子の飛跡を残すと考えられるものがあったため、除外した。

条件 1,2 の具体的な例は図 5.5 に示すとおりである。100 イベント目視で判断した結果として以下の条件を設けた。

1. 同じ y 座標に対して、1cm 以上離れた複数の z 座標を持つ。
2. y 方向の飛跡が 1cm 以上途切れている。
3. $\sum ADC$ が 100 以下であるか、飛跡の長さが 6cm 以下である。

この結果、磁場なしについては 3697 イベントから 539 イベントが、磁場ありについては 2289 イベントから 89 イベントが選択された。

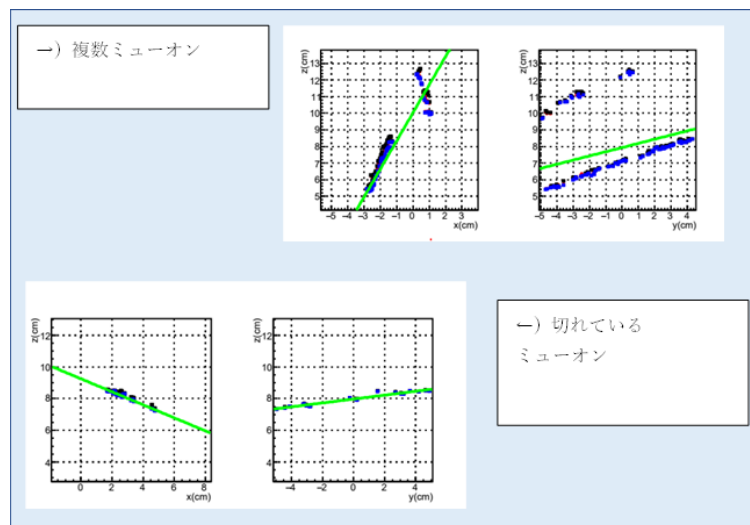


図 5.5 除外したイベントの例

5.5 エネルギー較正とガスゲイン

検出されたエネルギーを、理論的に求められる単位長さあたりのエネルギー損失と波形情報から得られる $\sum ADC$ を用いて較正する。

5.5.1 ミューオンが単位長さあたりに落とすエネルギー

MIP と仮定した場合の宇宙線ミューオンのエネルギーはおよそ数 GeV なので、アルゴンガスの阻止能は約 $2 \text{ MeVcm}^2/\text{g}$ である (※文献)。エタンも 1 割ほど混入しているが、概算としてこの数字をそのまま用いる。

アルゴンエタンガスの密度 1.73 kg/m^3 より、ミューオンが単位長さあたりに落とすエネルギー E_{loss} は

$$E_{loss} \simeq 3.5 \text{ keV/cm}$$

と与えられる。

5.5.2 エネルギー較正

高速荷電粒子がガス中でエネルギーを落としながら進むときのエネルギー損失は、ランダウ分布

$$p(x) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \exp(-t(\log t + x)) \sin \pi t dt$$

に従う。選択された事象のエネルギーヒストグラムをランダウ分布でフィットし、その MPV (Most Probable Value) を 3.5 keV/cm で割ることで、磁場なしの場合、磁場ありの場合ともに

$$CF \simeq 0.014 \text{ keV/ADC}$$

を得る。

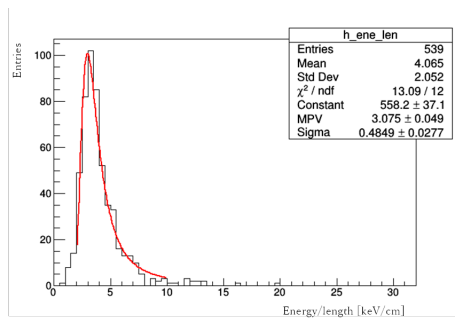


図 5.6 較正された 1cm あたりのエネルギーのヒストグラム (磁場なし)

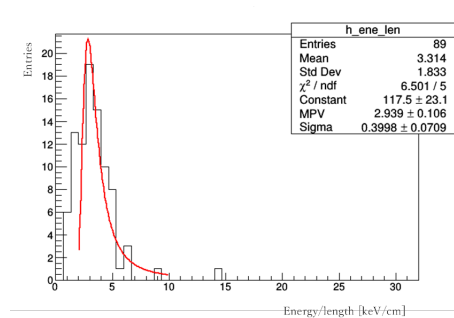


図 5.7 較正された 1cm あたりのエネルギーのヒストグラム (磁場あり)

5.5.3 ガスゲイン

検出器が検出した電荷 Q_{fadc} は次式で与えられる。

$$Q_{fadc} = \int V dt \times \frac{1}{R} = \sum \frac{ADC}{256} \text{ V} \times 10 \text{ ns} \times \frac{1}{50 \Omega}$$

FADC はダイナミックレンジ 1V が 8bit で出力されるので、 $\sum ADC$ を 256 で割る。10 ns は先述の clock 周期である。

ゲインは $G_{amp} = 160$ と G_{gas} の積であり、増幅されるのはミューオンのエネルギー損失 E_{loss} をガス中で一つのイオン対を生成するために必要なエネルギー W 値で割った数の電子なので、

$$Q_{FADC} = e \times \frac{E_{loss}}{W} \times G_{amp} \times G_{gas}$$

となる。ここで e は電気素量である。

ランダウフィットのエラー値を統計誤差として、 G_{gas} を求めると、磁場なしのとき

$$G_{gas} \simeq (6.0 \pm 0.1) \times 10^3$$

磁場ありのとき

$$G_{gas} \simeq (6.0 \pm 0.3) \times 10^3$$

となる。

3章で述べたゲイン測定実験の中で最も近い設定だったものは表2の通りである。

表 5.2 ゲイン測定実験との比較

場所	ゲイン測定実験	本実験
Drift	-1000	-2500
Gem Top	-800	-920
Gem Bottom	-350	-500
Anode	450	520
Gain	2.3×10^5	6.0×10^3

ゲイン測定実験で得られた次のゲインカーブの係数を用いて計算すると、

表 5.3 ゲイン測定実験で得られたゲインカーブの係数

場所	係数
Δ Gem	2.4×10^{-2}
μ -PIC	1.6×10^{-2}

$$G_{gas} \simeq 3.7 \times 10^4$$

が得られる。本測定ではゲイン測定実験と比して 16% 程度のガスゲインであった。

ドリフト領域はゲイン測定実験では 1cm、本実験では 8cm であったため、ドリフト領域の電場としては同程度である。増幅率が小さい原因としては事象選別の項でも述べた通りアノードの導通によりアノードの電圧がしっかり 520V かかっていなかった可能性が考えられるが未検証である。

5.5.4 エネルギースペクトラム

取得された μ 粒子候補事象について、エネルギー較正した結果を踏まえたエネルギースペクトラムと三次元飛跡の長さの分布、それらの二次元ヒストグラムを描画した。

図 5.8 から 5.11 にそれらを示す。磁場なしの二次元ヒストグラムではエントリーが多く μ 粒子候補事象と推定される場所も見られたが、磁場ありでは全体的に事象が少なく特徴を読み取ることは難しそうであった。

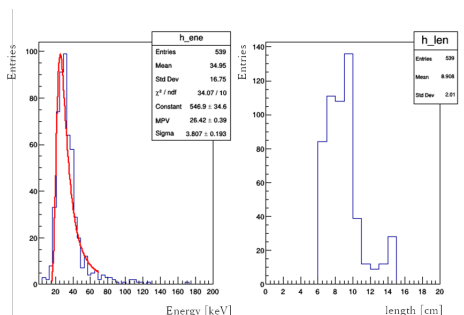


図 5.8 較正されたエネルギーのヒストグラムと飛跡の長さのヒストグラム (磁場なし)

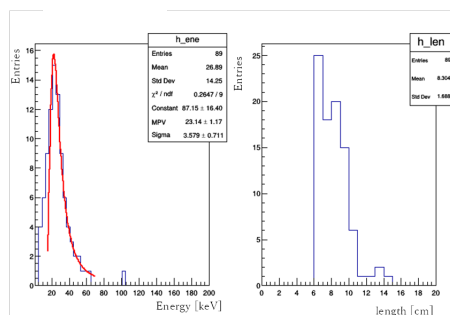


図 5.9 較正されたエネルギーのヒストグラムと飛跡の長さのヒストグラム (磁場あり)

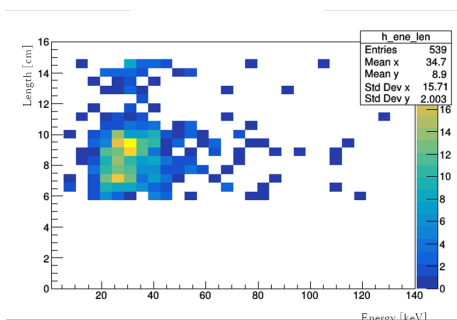


図 5.10 較正されたエネルギーと飛跡の長さの二次元ヒストグラム (磁場なし)

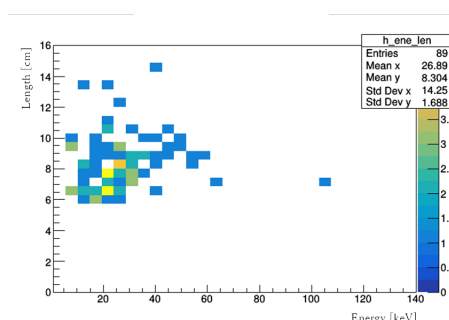


図 5.11 較正されたエネルギーと飛跡の長さの二次元ヒストグラム (磁場あり)

5.5.5 まとめ

本章ではマイクロ TPC による μ 粒子の 3 次元飛跡の再構成とエネルギー較正について述べた。先行して開始したガスゲイン測定実験と比較して増幅率が低いという問題はあったが、磁場なし、磁場ありともほとんど同じ結果で、安定して測定することができたと言えた。

6 ガス TPC を用いた宇宙線ミュオン飛跡解析

担当: 生井凌太

6.1 目的

電子がガス分子中をドリフトする際、媒体ガス分子への衝突により拡散を受け、飛跡の再構成を行った際の分解能が悪化してしまう。ここで、電場と平行な磁場を印加することにより、磁場に平行な方向の拡散 (以下縦拡散と呼ぶ) は変化しない一方で、磁場に垂直な方向の拡散 (以下横拡散と呼ぶ) が抑制できる。今回の実験はこれを実験的に検証することを目的とする。

6.2 測定原理

6.2.1 磁場による拡散抑制

電子が TPC 中をドリフトする際、媒体ガス分子への衝突によって拡散が起これ、飛跡の再構成を行う際の分解能が低下する。この現象における横拡散は、電場と平行な磁場を印加することで抑制することが可能である。原理は (図 6.1) に示す通りで、電子が電場に対して垂直な速度を持った場合、ローレンツ力によってらせん運動が起これ、横方向の拡散距離が減少する。

実験に先立って、この現象を定量的に確認するため、荷電粒子のガス中での挙動を Boltzmann 方程式を用いて計算を行う Magboltz を用いたシミュレーションを行った。結果は表 6.1 に示す通りである。ここで、拡散係数は粒子が 1cm ドリフトした際の拡散による変位を表し、拡散の大きさはドリフト距離の平方根に比例する。これにより、縦拡散係数に変化は無く、横拡散係数のみが減少していることが確認できる。

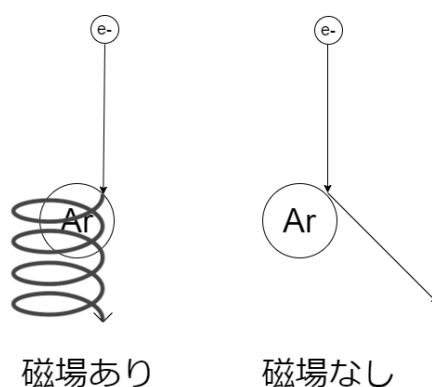


図 6.1 磁場による拡散抑制原理

表 6.1 シミュレーションによる拡散抑制の検証結果

	磁場なし	磁場あり
縦拡散係数 [$\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$]	335.5 ± 16.1	335.5 ± 16.1
横拡散係数 [$\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$]	484.4 ± 0.2	440.5 ± 0.5

6.3 使用した TPC の問題点

磁場印加の有無による拡散量の変化を調べるため、磁場中/非磁場中におけるガス TPC を用いた宇宙線ミュオンの飛跡測定を行ったが、当初、飛跡の再構成を行った際に図 6.2、図 6.3 に示すような端点付近で曲がった飛跡が多く見られた。

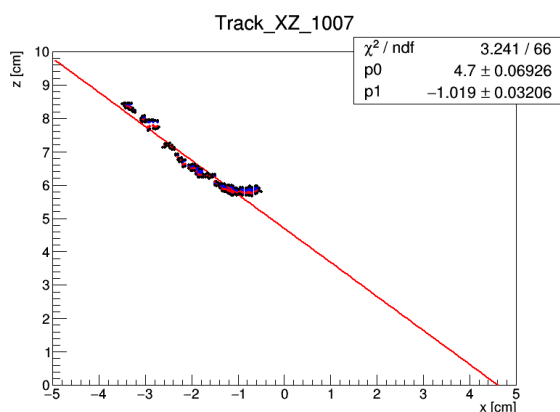


図 6.2 曲がった飛跡の例:xz 方向

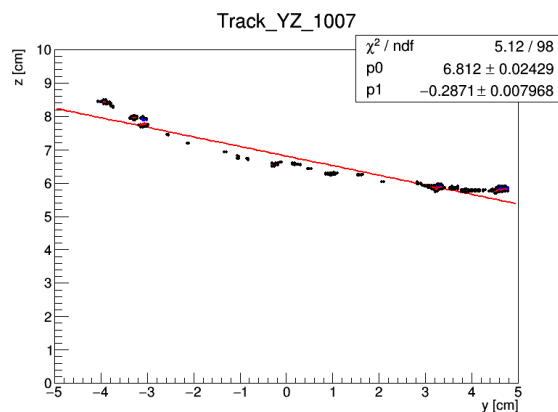


図 6.3 曲がった飛跡の例:yz 方向

これは、TPC の経年劣化により内部電場に歪みが発生し、電子が直線的にドリフトしなかったためであると考えられる。この問題を受け、絶縁シートの交換、電圧印加部分の銅板をアルミ箔で覆うなどの改修を行った。その結果、上記のような曲がった飛跡の割合を大きく減らすことができた。以下、改良後の検出器を用いて行った測定結果について議論する。

6.4 測定諸元

TPC 改修後の非磁場中/磁場中での測定条件を、表 6.2 に示す。

表 6.2 宇宙線 μ 粒子測定実験の測定諸元

	磁場なし	磁場あり
測定時間 [sec.]	1.7×10^5	1.7×10^5
トリガー数	2.6×10^4	1.5×10^4
ドリフト速度 [cm/ μ s]	4.0	4.0
Gain	7.0×10^3	7.0×10^3

この測定における energy vs. length の分布を図 6.4、図 6.5 に示す。なお、ノイズカットのため、Energy < 5keV のイベントは排除してある。この図から、磁場の有無による飛程、損失エネルギーの分布に大きな違いは見られず、ともに妥当なデータが取得されたと判断できる。

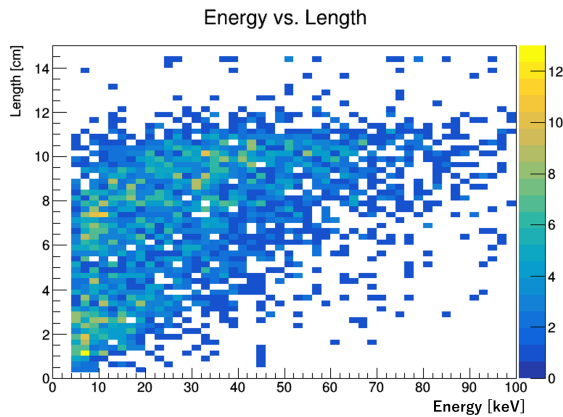


図 6.4 宇宙線 μ 粒子測定実験、磁場なしの条件下での energy vs. length 分布

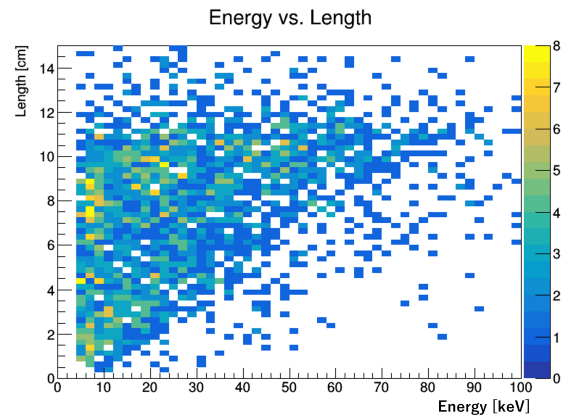


図 6.5 宇宙線 μ 粒子測定実験、磁場ありの条件下での energy vs. length 分布

6.5 イベントの選定

ミュオンの飛跡のみを選別するため、エネルギーピークから 2σ の範囲である $17\text{keV} < \text{Energy} < 42.6\text{keV}$ を満たし (図 5.8、図 5.9)、尚且つ飛跡の Fit 関数において残差の二乗和が 1cm^2 未満となるイベントを選定した。

これにより、解析に用いたイベント数は表 6.3 に示す通りとなった。

表 6.3 宇宙線 μ 粒子測定実験イベント数

	磁場なし	磁場あり
トリガー数	2.7×10^4	1.5×10^4
選定後	1.1×10^3	1.3×10^3

6.6 測定結果

6.6.1 拡散量の計算

選別されたイベントにおいて、yz 方向の飛跡に対して最小二乗法を用いて直線フィッティングを行った。直線フィットの例を図 6.6 に示す。この直線フィットの結果と測定された各点における残差を図 6.7 に示す通り定義した。得られた残差の絶対値をドリフト距離別にヒストグラムにし、中央値を 0 にとったガウシアンでフィッティングを行った (図 6.8 ~ 6.11)。その結果得られたガウシアン 1σ の値を実験的に得られた拡散量として定義する。

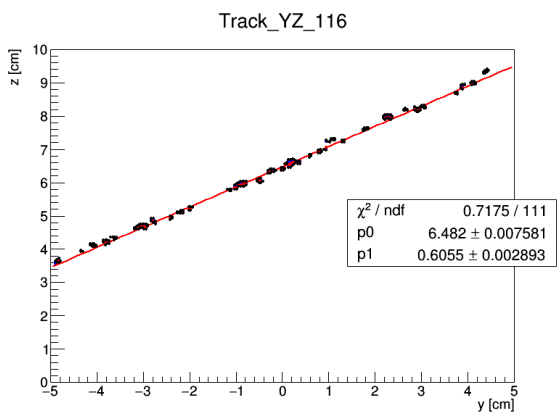


図 6.6 飛跡へのフィッティングの例

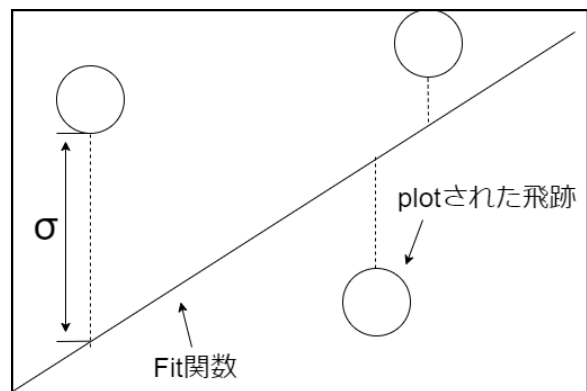


図 6.7 拡散量の算出方法

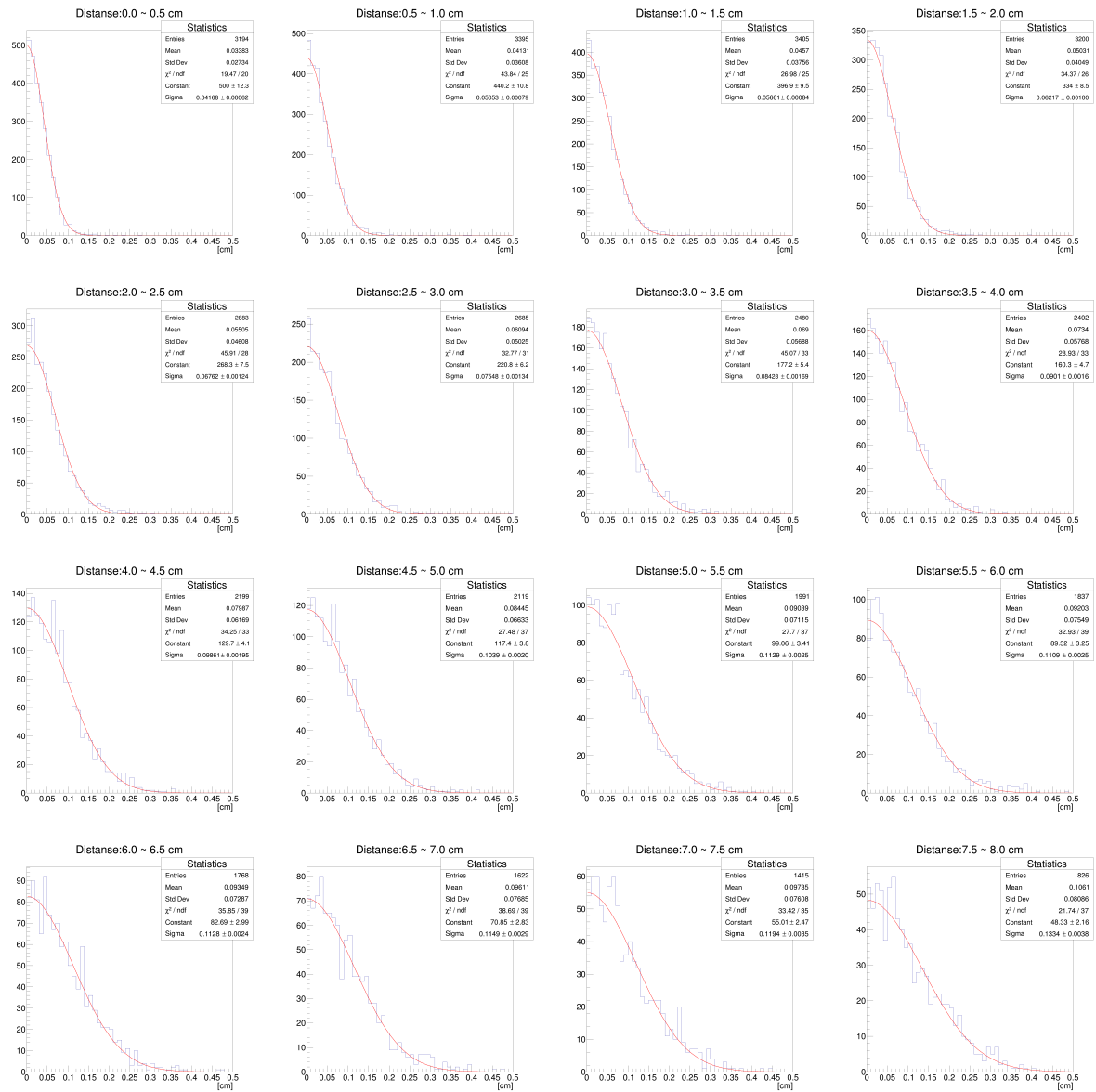


図 6.8 非磁場中における y 方向の距離別 σ 分布

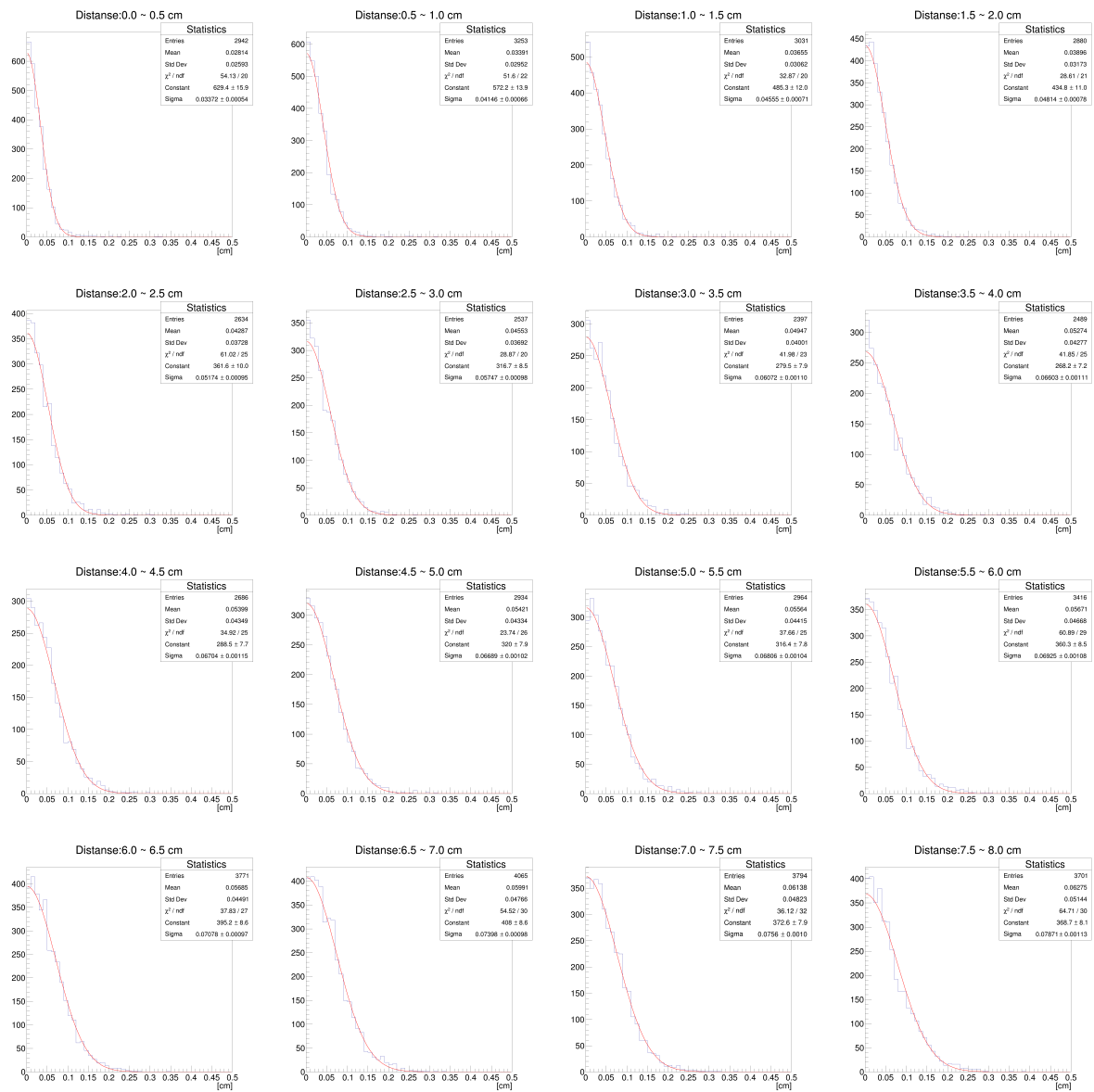


図 6.9 非磁場中における z 方向の距離別 σ 分布

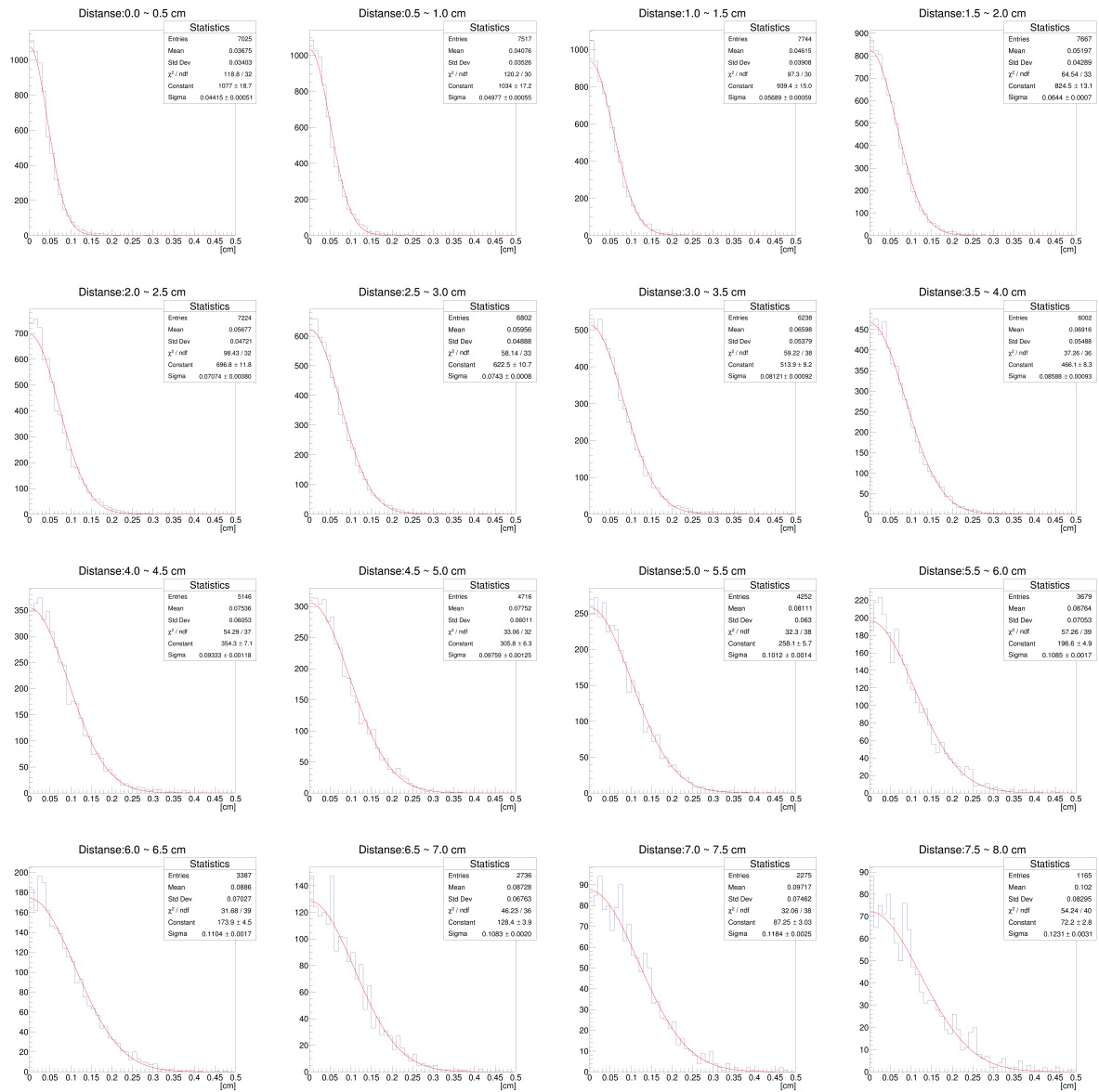


図 6.10 磁場中における y 方向の距離別 σ 分布

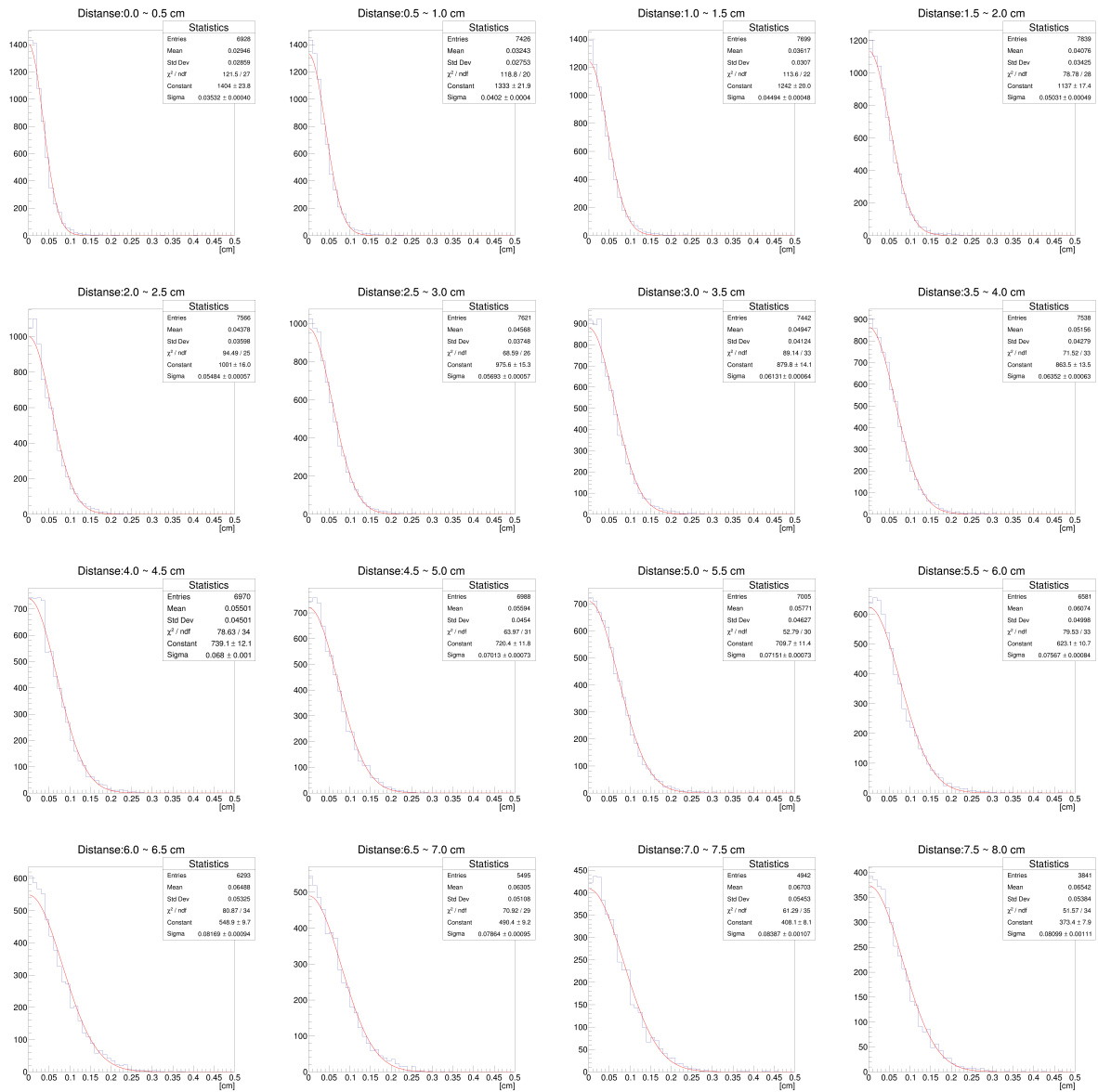


図 6.11 磁場中における z 方向の距離別 σ 分布

6.6.2 拡散係数

拡散量のドリフト距離依存を図 6.12、図 6.13 に示す。

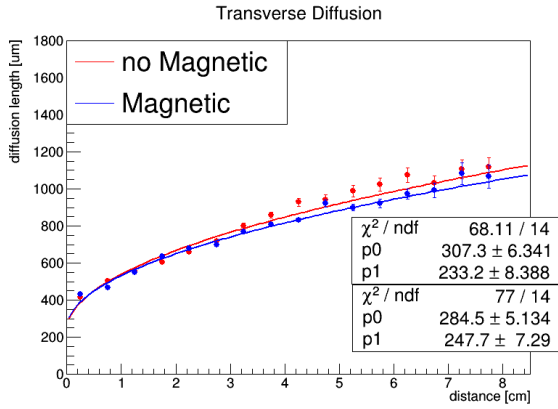


図 6.12 非磁場中/磁場中におけるドリフト距離と横拡散量の関係

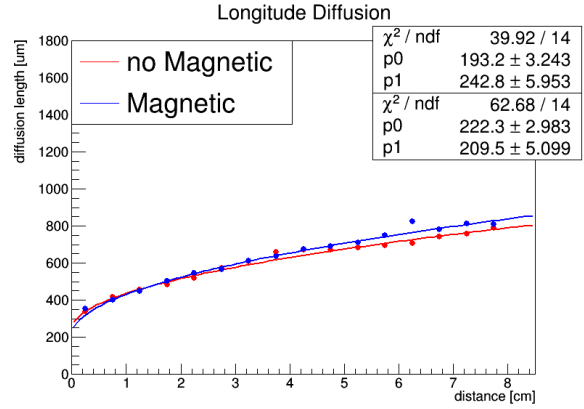


図 6.13 非磁場中/磁場中におけるドリフト距離と縦拡散量の関係

各フィッティング関数は

$$\text{横拡散量 (磁場なし)} : L_T(x) = (307.3 \pm 6.3) \times \sqrt{x} + (233.2 \pm 8.4) \quad (6.1)$$

$$\text{横拡散量 (磁場あり)} : L_{T_M}(x) = (284.5 \pm 5.1) \times \sqrt{x} + (247.7 \pm 7.3) \quad (6.2)$$

$$\text{縦拡散量 (磁場なし)} : L_L(x) = (193.2 \pm 3.2) \times \sqrt{x} + (242.8 \pm 5.9) \quad (6.3)$$

$$\text{縦拡散量 (磁場あり)} : L_{L_M}(x) = (222.3 \pm 3.0) \times \sqrt{x} + (209.5 \pm 5.1) \quad (6.4)$$

となった。拡散係数をまとめたものを表 6.4、表 6.5 に示す。

表 6.4 横拡散係数

	磁場なし	磁場あり
測定結果 [$\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$]	307.3 ± 6.3	284.5 ± 5.1
シミュレーション [$\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$]	484.4 ± 0.2	440.5 ± 0.5

表 6.5 縦拡散係数

	磁場なし	磁場あり
測定結果 [$\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$]	193.2 ± 3.2	222.3 ± 3.0
シミュレーション [$\mu\text{m}/\sqrt{\text{cm}}$]	335.5 ± 16.1	335.5 ± 16.1

磁場の印加によって横拡散量の最確値は 7.4% 減少しており、磁場の印加によって拡散量が抑制されていることが分かる。一方で、磁場の印加後の縦拡散係数の最確値には 15% の増加が見られる。

また、測定結果がシミュレーションの値よりも小さい値となっているが、これはアノードの数よりも多くの電子が生成されたことにより、あまり拡散を受けていない電子が先に検出され、それによって飛跡の再構成が

行われているためであると考えられる。

6.7 実験結果からの考察と改善点

今回の実験の目的であった磁場の印加による横拡散の抑制を確認することはできたが、縦拡散が不明な要因によって増加するという結果が得られた。この現象が磁場によって起こっている現象かどうかの検証方法として、印加磁場の大きさを変えることが考えられる。ローレンツ力は磁場に比例するため、横拡散係数の減少量は大きくなっていく一方で縦拡散係数は変化しないはずである。Magboltz による 160V/cm 電場中での印加磁場の大きさと拡散量のシミュレーション結果を図 6.14 に示す。縦拡散係数が磁場に依存していないようであれば、縦拡散の変化の原因は印加電圧の時間経過による変化等が考えられる。

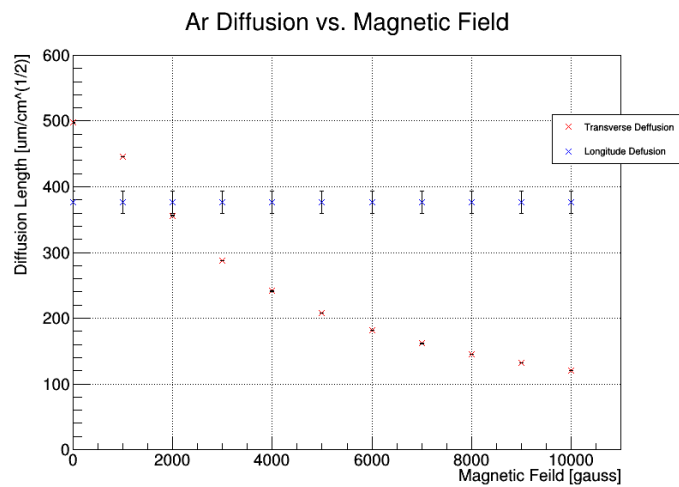


図 6.14 磁場の大きさと拡散量の関係

また、内部電場の歪みも解消しきれていないと考えられる。TPC 改修前の曲がった飛跡を用いて解析を行った場合の縦拡散、横拡散と移動距離の関係は図 6.15、図 6.16 に示す通りで、2.5cm 3.5cm 付近で減少に転じる部分があることが分かる。この傾向は、わずかではあるものの改修後の TPC でも見られた。

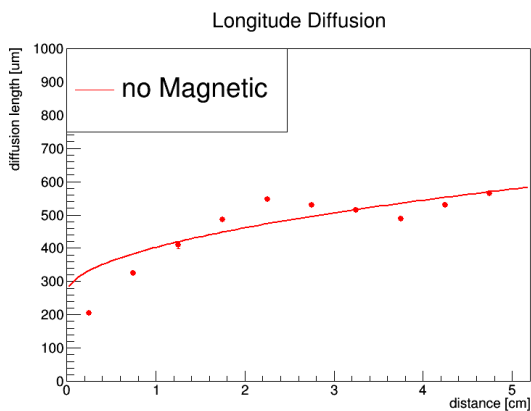


図 6.15 TPC 改修前の非磁場中における縦拡散

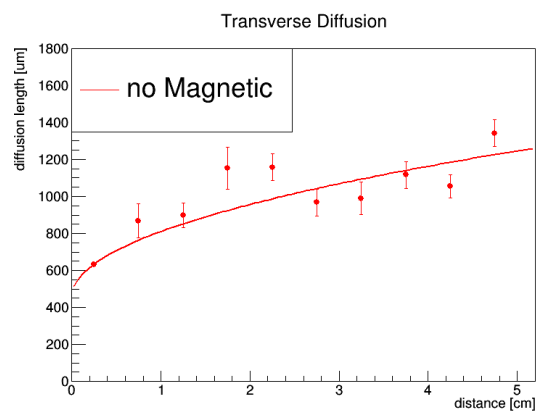


図 6.16 TPC 改修前の非磁場中における横拡散

7 結論

本研究ではガス検出器を用いたガスゲイン測定実験とそのシミュレーション、また μ 粒子の飛跡測定という2つの方向性の実験を同時並行で行った。ガスゲイン測定実験では Ar 混合ガスで ^{55}Fe のスペクトルがエスケープピークとメインピークの両方が確認でき、Ar、He の両方で GEM と μ -PIC の雪崩増幅を確認できた。また、He 混合ガスで Ar 混合ガスと同様のガスゲインを得ることができた。He 混合ガスで測定した ^{55}Fe のスペクトルには予想されなかった2つのピークが観測され、He 混合ガスのクエンチャーの割合を下げればガスゲインが大きくなることも確認できた。シミュレーションでも同様の混合ガス、希ガスでそれぞれゲインカーブを描くことができた。ゲインカーブの傾きはある程度実験と一致した結果が得られた一方、絶対値は30倍と異なった結果となった。ガスゲインの混合率依存については、実験とは全く異なった結果となり、計算方法やシミュレーションについてのさらなる理解が求められることとなった。 μ 粒子の飛跡測定では、Ar のみについて行ったが、三次元の μ 粒子の飛跡を復元し、落としたエネルギーからガスゲインを求めることもできた。しかし、ガスゲイン測定実験で得られた結果とは大きく異なった。拡散量の計算では磁場の印可によって横拡散が抑えられることが確認された。ここで行ったシミュレーションでは複数のドリフト電子のクラスターが単一のアノードに検出されることを想定しないため相対的に大きいものとなった。拡散量の電場依存性や磁場依存性を細かに測定することにより、深く調べる余地を残す結果となった。

謝辞

本研究を実施するにあたり、多くの方々にご協力いただきましたことを、この場にて深く感謝申し上げます。

まずは指導教員である身内賢太郎准教授に、本研究実施の機会を提供いただき、実験手法や理論について熱心にご指導いただいたことに感謝いたします。また、日々の実験において行き詰まった際には、何度も多大なるご助力をいただきました。研究員の東野聡氏にも、実験や解析結果の解釈について何度もアドバイスをいただきました。昨年先行研究をしておられた大藤瑞乃氏にも、装置や解析プログラムの扱い方について丁寧に教えていただきました。

さらに、粒子物理学研究室の皆様には、実験で悩んでいる際には相談に乗っていただき、新たな洞察を得ることが何度もありました。

最後に、本研究の実施にあたって多大なるご助力をいただいたすべての方々に心から感謝し、謝辞とさせていただきます。

参考文献

- [1] KEK 先端加速器推進部 <https://www.kek.jp/ja/Research/AAT/DTP/MPGD/>
- [2] KEK 測定器開発室. https://rd.kek.jp/lab_02_1.html
- [3] 神戸大学 大学院理学研究科 物理学専攻 粒子物理学研究室 <https://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/laboratory/micro/index.html>
- [4] Ö. Şahin, İ Tapan, E N Özmutlu and R Veenhof "Penning transfer in argon-based gas mixtures"
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/5/05/P05002>
- [5] Particle Data Group https://pdg.lbl.gov/2020/AtomicNuclearProperties/MUE/muE_argon_gas_Ar.pdf