

2023 年度卒業研究
ガス検出器を用いた KK-axion 探索実験

神戸大学理学部物理学科 粒子物理学研究室
曾根 貴将・河口 仁志・和田 伸一郎・鈴木 啓司

2024 年 4 月 3 日

目次

1	KK-axion	1
1.1	標準模型	1
1.2	The gauge hierarchy problem	1
1.3	Solar coronal heating problem	2
1.4	solar Kaluza-Klein axion	3
1.5	KK-axion の生成と崩壊	4
1.6	KK-axion 探索	5
2	BG 測定	6
2.1	目的	6
2.2	エネルギー較正	6
2.3	環境ガンマ線測定	7
2.4	シミュレーション	9
2.5	まとめ	9
3	ガス検出器を用いた KK-axion 探索のための基礎実験	10
3.1	実験の内容と目的	10
3.2	ガス検出器に関する理論	10
3.3	基礎実験で用いた装置	11
3.4	組み立ての様子	13
3.5	読み出し機器	18
3.6	読み出し機器の較正実験	19
3.7	検出器のガスゲイン測定	22
3.8	基礎実験のまとめ	27
4	KK-axion 探索実験のための検出器の性能評価	28
4.1	実験の目的	28
4.2	検出器	28
4.3	エネルギー較正実験	31
4.4	10keV 事象検出のデモンストレーション	38
4.5	まとめ	39
5	ガス検出器を用いた KK-axion 探索実験	40
5.1	目的	40
5.2	測定	40
5.3	シミュレーション	41
5.4	解析	44

6	結論	48
	謝辭	49
	参考文献	50

概要

本研究では、位置有感型ガス検出器 (TPC) を用いた KK-axion 探索を行った。太陽内部で熱的に生成される Solar Kaluza-Klein axion はダークマター候補の一つで、太陽からの重力的な捕獲を受けながら地球付近までその存在が達していると考えられている。本論文では、KK-axion の理論、background 測定、自作したガス検出器を用いた基礎実験、 μ -TPC を用いた KK-axion 探索実験とその解析結果について論じる。

1 KK-axion

担当: 曾根貴将

1.1 標準模型

素粒子物理学における標準模型は 1970 年代に定式化され、そのおよそ 40 年後の 2012 年にヒッグス粒子の発見により完成された。現在の標準模型は以下の表 1.1 にまとめた通りである。標準模型では表 1.1 の粒子の質量、電荷、スピンと粒子間の相互作用が説明でき、そこには電磁気力、弱い力、強い力、重力の 4 つの力が存在する。標準模型によりほとんどの物理現象を説明することができ、世界中で行われる様々な実験によりその正当性が示されてきた。しかしながら、未だに解決されていない問題もいくつか残っている。以下ではその代表的な 2 つの未解決問題と KK-axion との関係について述べる。

quarks	u	c	t
	d	s	b
leptons	e	μ	τ
	ν_e	ν_e	ν_e
gauge bosons	γ	W,Z	g
Higgs	H		

表 1.1: 素粒子物理学における標準模型

標準模型では、物質とその対をなす反物質が存在する。しかし、我々の宇宙は物質のみで構成されている。では、反物質はどこに行ってしまったのか。その答えは、宇宙初期のバリオン非対称性にある。これはバリオンの数が反バリオンよりわずかに多いことに端を発している。バリオンと反バリオンが対消滅を起こすと、そこには少しのバリオンが残るのである。この非対称性は弱い相互作用に関しては CP 対称性の破れとして実験的にも標準模型的にも実証済みである。

一方で、強い相互作用における CP 対称性の破れ、通称「The strong CP problem」は実験では確認されておらず標準模型からうまく整合性が取れていない。この問題の解決のために axion という新粒子の存在が提唱された。[1, 2, 3, 4]

1.2 The gauge hierarchy problem

4 つの力のうち重力は世間一般に最も親しみやすい力と言える。高校物理では最初に学ぶ力であるし、日常生活では常に地球の重力を感じている。しかしながら、素粒子のようなマイクロな世界では重力は他の 3 つの力に比べると極端に小さいことが分かっている。この理由は未だにわかっておらず、「the gauge hierarchy problem」と呼ばれている。ここでこの問題の解決策として空間と時間にさらに次元を追加する余剰次元理論が提唱されている。この余剰次元で運動する粒子を「Kaluza-Klein particle」と呼び、もしこの存在が確認されれば余剰次元理論の強い証左となりうる。

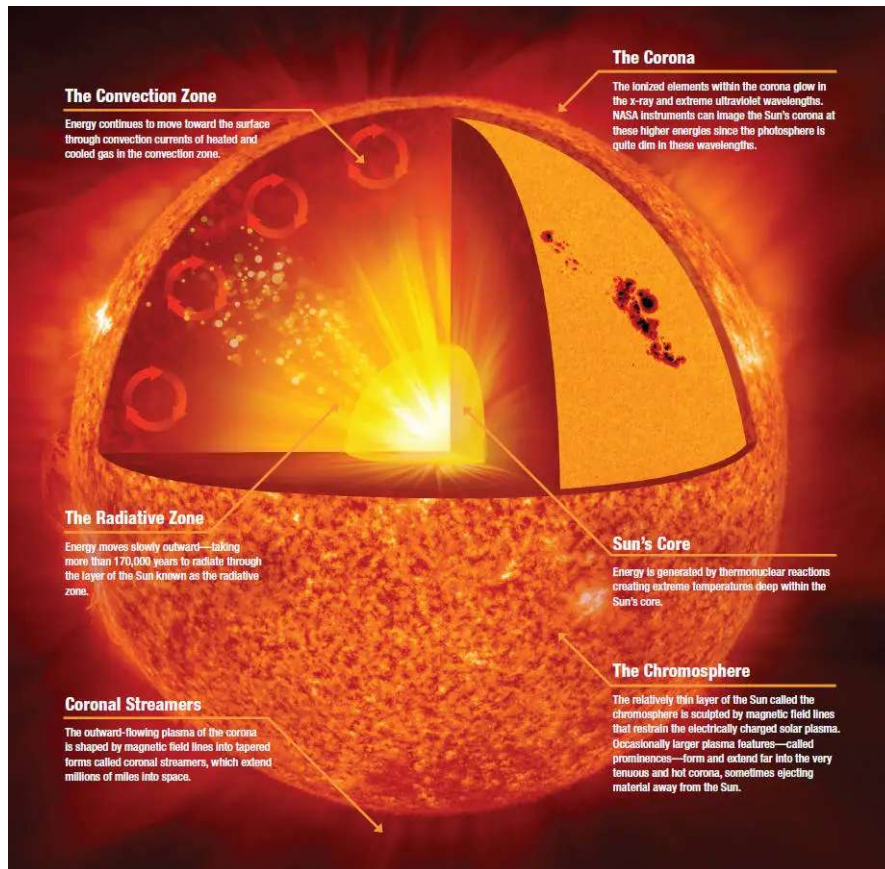


図 1.1: 太陽の構造 [5]

1.3 Solar coronal heating problem

ここで素粒子物理から少し話が逸れるが、太陽のコロナにおける温度が高すぎる問題と KK-axion の関係を見ていく。まず太陽の構造は図 2.3 の通りで、内側から中心核、光球面、彩層でその外側がコロナと呼ばれイオン化されたガスで構成されている。また温度は中心核が $1.57 \times 10^7 \text{K}$ 、彩層が $\sim 10^4 \text{K}$ 、そしてコロナが $\sim 10^6 \text{K}$ であり彩層の温度よりも 2 つオーダーが大きくなっている。この領域間で劇的に温度が上昇している原因は 70 年間解明されておらず、これを「the coronal heating problem」や「the solar corona problem」と呼んでいる。現在、この機構を説明する 2 つの有力な候補として「nanoflares」と「Alfven waves」があるが今回は割愛する [6, 7]。

3 つ目の候補として、Di Lella と Zioutas は KK-axion を提唱した。彼らの理論によると KK-axion は光子と相互作用し通常の solar axion と同様の過程 (the Primakoff effect と the photon coalescence) で生成され太陽から放出される。この太陽内部で熱的に生成される KK-axion が今回我々がターゲットとしている「solar Kaluza-Klein axion」である。以下では単に KK-axion と呼ぶ。

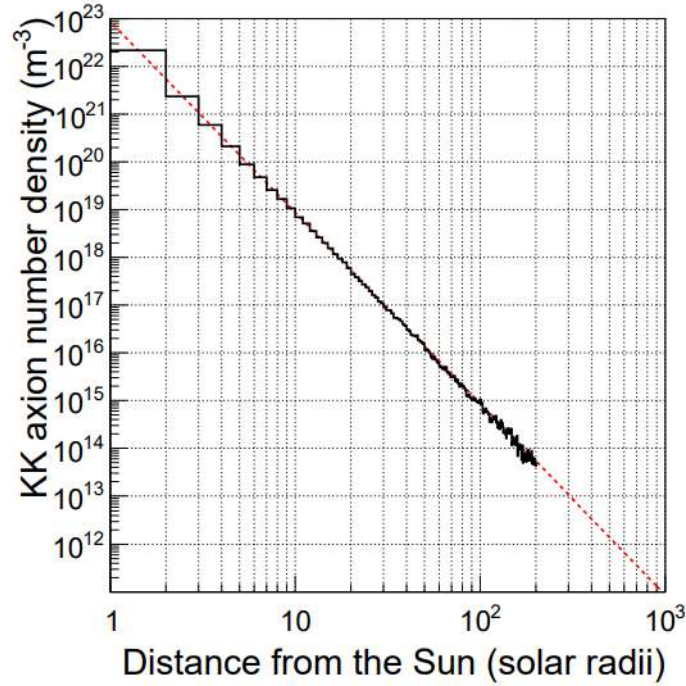


図 1.2: 太陽からの距離と axion の数密度の関係図。黒色のヒストグラムは [11] より引用。赤色の線は r^{-4} でフィットしたものの。横軸は太陽の半径で規格化している。[8]

1.4 solar Kaluza-Klein axion

KK-axion は KK 粒子の性質上、通常の axion よりも重く、その一部は非相対論的な粒子で太陽により重力的に拘束されている。Di Lella と Zioutas は X 線探査衛星により観測された太陽からの X 線放射の説明のために KK-axion と光子の結合定数を $g'_{a\gamma\gamma} = 9.2 \times 10^{-14} \text{GeV}^{-1}$ と理論的に予想した。KK-axion は太陽系の形成以来蓄積されており、シミュレーションによると現在の axion の密度と太陽からの距離の関係は図 1.2 のようになる。また KK-axion は photon coalescence と Primakoff effect により生成され、それぞれのエネルギースペクトルは図 1.3 と図 1.4 のようになる。ここで図の実線は $m_a = 5 \text{keV}$ 、破線は $m_a = 10 \text{keV}$ 、点線は $m_a = 15 \text{keV}$ の KK-axion に対応しており、 $g'_{a\gamma\gamma} = 10^{-10} \text{GeV}^{-1}$ と仮定している。さらに図 1.5 は重力により拘束されている axion のそれぞれの反応による質量の分布を表している。これらの図から、photon coalescence により生成される axion の数は Primakoff effect 由来のものより少ないが、重力により拘束された axion の数は photon coalescence 由来の方が遥かに多いことが分かる。Primakoff effect による axion への寄与が photon coalescence よりも 3 桁も小さいことから以下では photon coalescence により生成された axion のみを考えることにする。

2つの光子に崩壊する拘束された axion ($a \rightarrow \gamma\gamma$) の寿命は

$$t_a = \frac{64\pi}{g'^2_{a\gamma\gamma} m_a^3} \quad (1.1)$$

であり、ここで m_a は KK-axion の質量である。放出された光子は図 1.5 による生成率や拘束率、そして KK

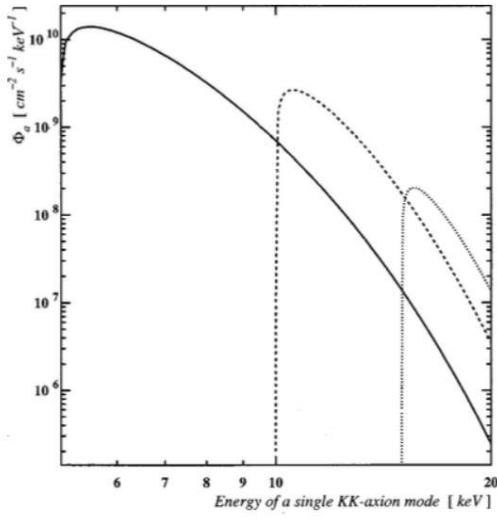


図 1.3: the photon coalescence におけるエネルギー スペクトル [9]

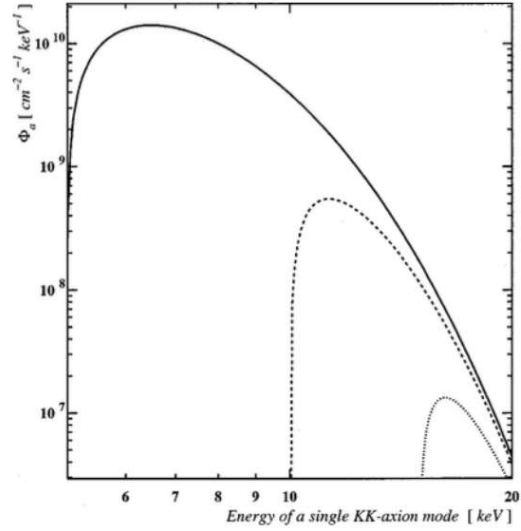


図 1.4: Primakoff effect におけるエネルギー スペクトル [9]

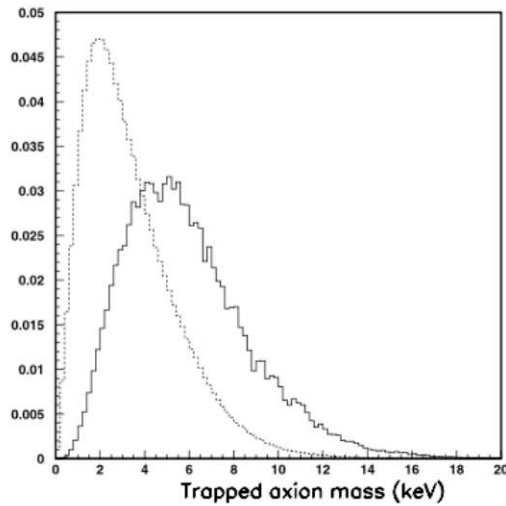


図 1.5: 重力で拘束された axion の質量分布 [11]。実線は photon coalescence、点線は Primakoff effect。縦軸は面積で規格化されている。

axion の崩壊率を考慮することで通常の X 線領域に属することが分かる。この X 線のエネルギーがコロナの温度 ($\sim 10^6 \text{K}$) に対応しており、前述の「coronal heating problem」の第 3 の解決策たる所以である。

1.5 KK-axion の生成と崩壊

KK-axion の生成と崩壊の 2 つの過程を紹介する。以下の図 1.6 と図 1.7 は 2 つの光子が axion になる過程とその逆反応のファインマンダイアグラムである。

まず図 1.6 は「Primakoff effect」と呼ばれる過程で、一方の光子が real photon、もう片方が virtual

photon(電磁場)として作用する。axion の生成は強い電磁場を持つ天体内等で起こるとされる。

次に、図 1.7 の 2 つの光子が合体して axion になる過程を「photon coalescence」と呼ぶ。後ほど説明するが、本実験ではこちらの過程で崩壊した 2 つの光子をターゲットにしている。

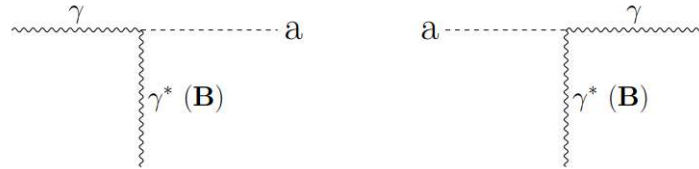


図 1.6: Primakoff 効果とその逆反応のファインマンダイアグラム [10]

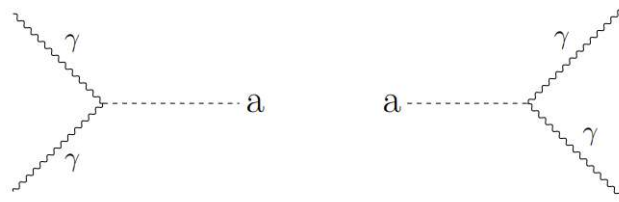


図 1.7: photon coalescence と axion の崩壊のファインマンダイアグラム [10]

1.6 KK-axion 探索

図 1.2 より地球上での axion の密度は $\sim 10^{14}\text{m}^{-3}$ である。結合定数 $g'_{a\gamma\gamma} = 9.2 \times 10^{-14}\text{GeV}^{-1}$ と地球上での axion の密度を考慮すると、KK-axion の質量スペクトルは図 1.8 のようになると予想されている。また、KK-axion 崩壊率は

$$R = (2.5 \times 10^{11}\text{m}^{-3}\text{day}^{-1}) \left(\frac{g'_{a\gamma\gamma}}{\text{GeV}^{-1}} \right)^2 \left(\frac{n_a}{\text{m}^{-3}} \right) \quad (1.2)$$

である。この式は [8] より引用した。

本実験では、地上での axion の数密度を $\sim 10^{14}\text{m}^{-3}$ と仮定しガス検出器での計測より崩壊率を計測する。ここから axion と光子の結合定数 $g_{a\gamma\gamma}$ を求めることで制限曲線を引き、先行実験との比較を行う。

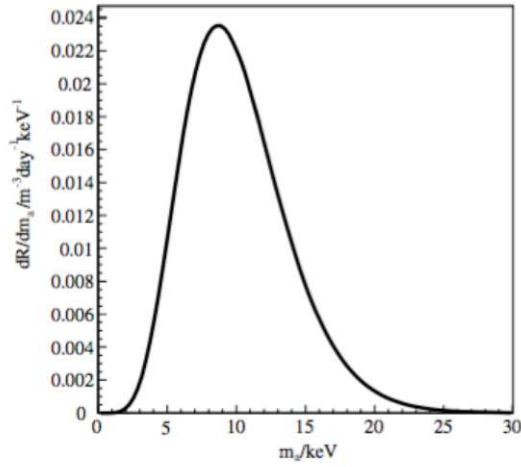


図 1.8: photon coalescence により生成された KK-axion の質量スペクトル。ここでは結合定数を $g'_{a\gamma\gamma} = 9.2 \times 10^{-14} \text{GeV}^{-1}$ 、axion の数密度を $\sim 10^{14} \text{m}^{-3}$ としている。[8]

2 BG 測定

担当: 曾根貴将

2.1 目的

KK-axion の探索における事象選別の理解のために、環境ガンマ線フラックスを測定した。本章では、NaI シンチレータでの計測と Geant4 を用いたシミュレーションを行い、環境ガンマ線のフラックスを算出することを目的とする。

2.2 エネルギー較正

環境ガンマ線の測定は NaI シンチレータを用いて行った。データ取得システムは以下の図 2.1 の通りである。

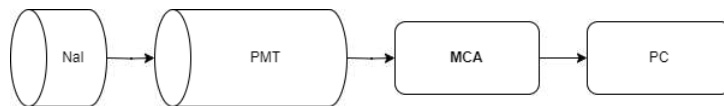


図 2.1: 環境ガンマ線測定のセットアップ

NaI NaI シンチレータ。有機シンチレータでエネルギー分解能に優れる。
PMT 光電子増倍管。NaI からの光信号が光電面で光電子を発生させる。光電子は内部の高電圧により加速され、多段の電極で増倍される。増幅された電子信号は最終的に $10^6 \sim 10^7$ 倍になり出力される。NaI とオプティカルグリースで接着しており、遮光のため周囲をブラックテープで覆っている。
MCA PMT からのアナログ信号をデジタル信号に変換する ADC。13bit の分解能を持つ。

MCA で取得したデータは ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs の 3 つの線源を用いてエネルギーを較正した。得られたスペクトル図 (図 2.2) とアナログ値とエネルギー値の関係 (図 2.3) はそれぞれ以下の様であり、これよりエネルギー ($energy$) とデジタル値 (ADC) の関係式は

$$ADC = 2.67 \times energy + 83.25 \quad (2.1)$$

となる。図 2.2 において、赤線が ^{22}Na 、青線が ^{60}Co 、緑線が ^{137}Cs を示している。

また、後のシミュレーションのために NaI シンチレータの分解能を以下の式 2.2 のように計算した。

$$resolution = \frac{\sigma}{energy} \quad (2.2)$$

各線源についての分解能とエネルギーの関係は図 2.4 のようになった。NaI シンチレータの分解能は 3 ~ 5% であり優れたエネルギー分解能を持つと言える。

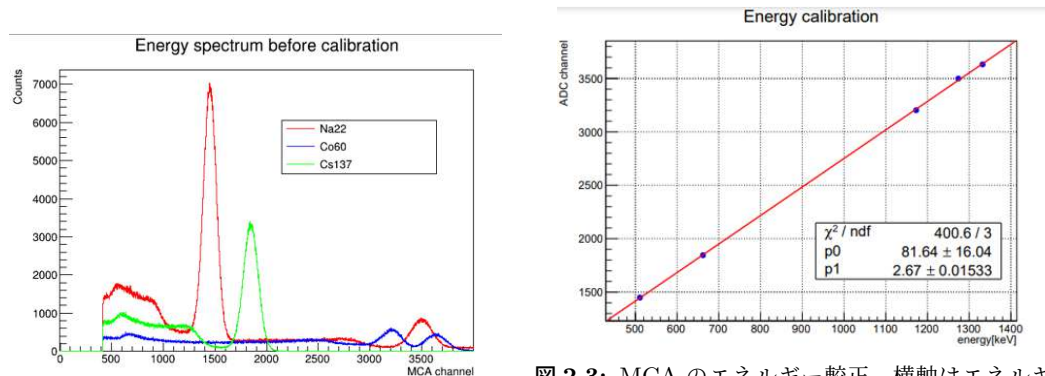


図 2.3: MCA のエネルギー較正。横軸はエネルギー [keV]、縦軸はデジタル値

図 2.2: ^{22}Na , ^{60}Co , ^{137}Cs のエネルギースペクトル

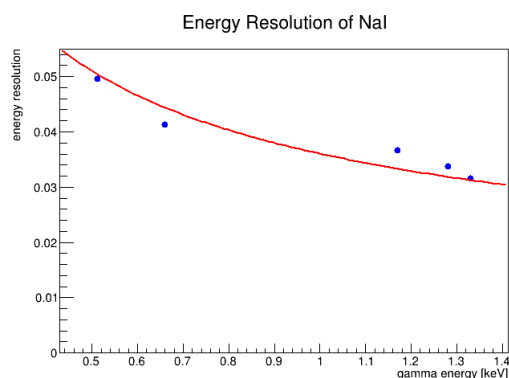


図 2.4: NaI シンチレータのエネルギー分解能。横軸はエネルギー、縦軸は式 2.2 より求めた分解能

2.3 環境ガンマ線測定

環境ガンマ線測定は図 2.1 のデータ取得システムを用いて行った。場所は自然科学総合研究棟 2F、周囲に誰もいない環境で 3 時間ほど計測した。得られたデータを式 2.1 を使ってエネルギー較正すると図 2.5 のようなエネルギースペクトルとなった。縦軸は後の計算のため、s/keV に規格化している。図 2.5 から各ピークの

核種を特定した。赤の丸は放射性同位体によるメインピークで、緑の丸はコンプトンエッジである。核種はそれぞれ ^{212}Pb 、 ^{40}K 、トリウム系列の ^{214}Bi 、 ^{228}Ac 、 ^{208}Tl に大別される。トリウム系列は、 ^{232}Th から壊変が始まり、6回の α 壊変と4回の β 壊変を繰り返し、最後は鉛の安定同位体 ^{208}Pb となるものをいう。

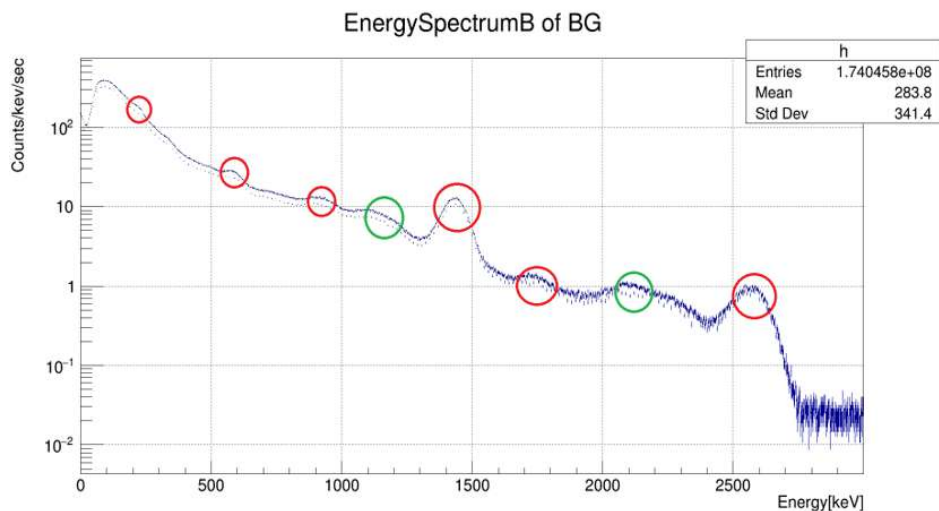


図 2.5: 環境ガンマ線のエネルギースペクトル。横軸はエネルギー、縦軸は /keV/sec に規格化している。

次に Flux 計算のために図 2.5 の各ピークの計数率を求めていく。ヒストグラムの各ピークは一次関数とガウス関数が足し合わされた形になっていると仮定してフィッティングを行い、ガウス関数部分だけを抽出する(図 2.6)。ガウス関数のみの部分の積分値を計数率として以下のように表にまとめた。

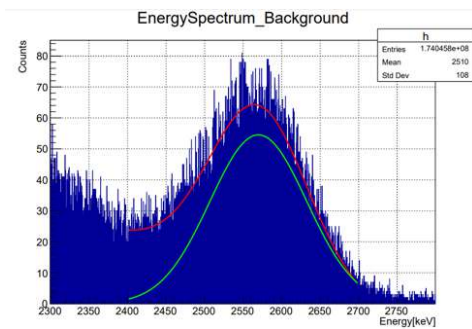


図 2.6: Tl のフィッティングの様子

表 2.1: 放射性同位体と計数率

環境ガンマ線源	^{214}Bi	^{228}Ac	^{40}K	^{214}Bi	^{208}Tl
エネルギー [keV]	609.3	911	1460.8	1764.5	2614.5
counts/sec	54.8 ± 7.4	40.2 ± 6.3	184 ± 14	4.1 ± 2.0	19.4 ± 4.4

2.4 シミュレーション

最後に Flux 算出のため、Geant4 [12] でのシミュレーションを行う。NaI シンチレータを模したジオメトリに 4π 方向から、各種ガンマ線を照射する。以下の図 2.7 と図 2.8 は、各種ガンマ線を 10000 発ずつ照射したときのヒストグラムとエネルギー分解能を考慮して再構成したヒストグラムである。

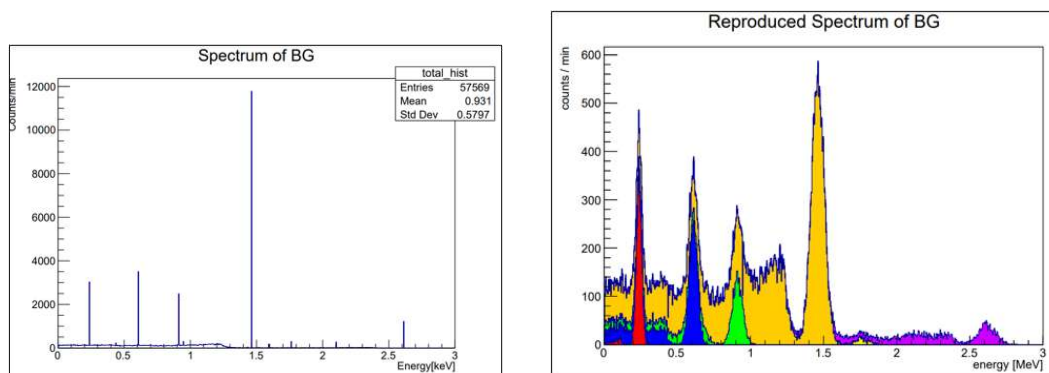


図 2.7: シミュレーションによる環境ガンマ線のエネルギースペクトル。横軸はエネルギー、縦軸は単位時間当たりのカウント数
 図 2.8: シンチレータの分解能を 3% として幅を持たせたエネルギースペクトル。横軸はエネルギー、縦軸は単位時間当たりのカウント数

図 2.7 の各ピークの位置の計数を求め、先の計数率と合わせて以下の式から Flux を計算する。

$$Flux = \frac{(counts/sec) \times peaknum/10000}{4\pi r^2} \quad (2.3)$$

表 2.2: 環境ガンマ線の Flux

環境ガンマ線源	^{214}Bi	^{228}Ac	^{40}K	^{214}Bi	^{208}Tl
エネルギー [keV]	609.3	911	1460.8	1764.5	2614.5
counts/sec	54.8	40.2	184	4.1	19.4
照射数	10000	10000	10000	10000	10000
Entries	7992	7136	6153	5962	5497
peak num	4646	3178	2028	1675	1142
Flux [$\text{/cm}^2 \text{/sec} \times 10^{-3}$]	1.44 ± 0.06	4.207 ± 0.006	33.75 ± 0.01	1.330 ± 0.001	5.853 ± 0.002

各核種と単位面積・時間当たりの Flux の表は表 2.2 にまとめた通りである。

2.5 まとめ

KK-axion 探索のバックグラウンドと考えられる環境ガンマ線の測定を行い、Geant4 シミュレーションより環境ガンマ線の Flux を求めた。シミュレーションではやや恣意的な操作をしてしまい、正確な計算ができなかったと言えない点が今回の反省点ではあるが解析やシミュレーションツールの良い勉強となった。

3 ガス検出器を用いた KK-axion 探索のための基礎実験

担当: 河口仁志

3.1 実験の内容と目的

ガス検出器の理解を深めるため、ガスチェンバーを自作した。基礎実験としての最終目標は自作したガスチェンバーのガスゲインを測定し、本実験用の印加電圧を決定することである。

3.2 ガス検出器に関する理論

3.2.1 ガス検出器の動作原理

図 3.1 は本研究と基礎研究で用いるガス検出器の模式図である。検出領域にはアルゴン-エタンガス (質量比 9:1) を 1 気圧で封入している。DRIFT 面上部から DRIFT 面を通して検出領域へ X 線を入射し、検出領域内で光電効果を起こす。光電効果によってはじき出された光電子によって検出領域内のアルゴンが電離され、電子が発生する。その電子を運搬、増幅し、ストリップに入った電荷情報を読み取る。図 3.1 において、本論文では drift 領域にかけられた電圧を drift、GEM の上下間にかけられた電圧を ΔGEM 、induction 領域にかけられた電圧を induction、 μ -PIC の cathode と anode 間の電位差を anode と表記することとする。

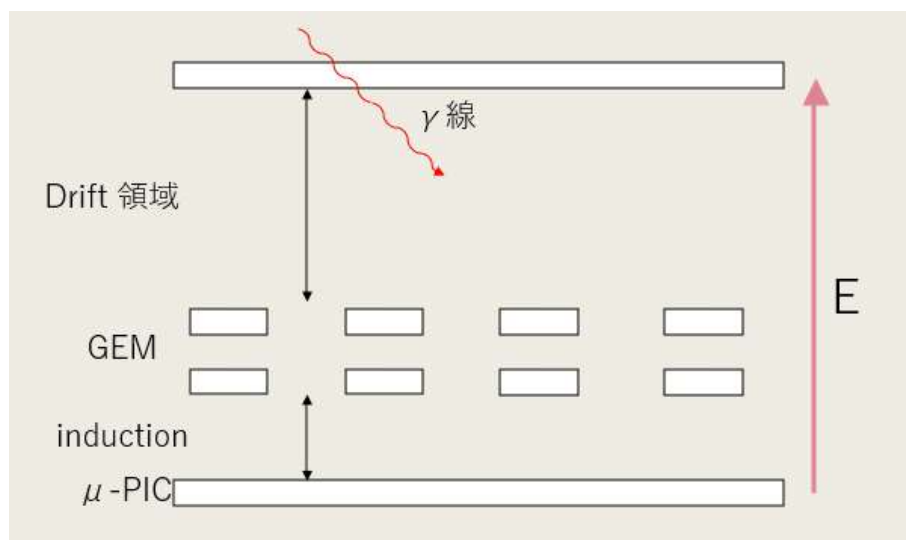


図 3.1: ガス検出器の概略図

3.2.2 雪崩増幅

自由電子は強い電場によって加速され、運動エネルギー E_k を得る。 E_k が気体分子のイオン化ポテンシャルより大きくなると、非弾性衝突により新たな自由電子が生じる。これを繰り返すことにより、電子は加速度的に増幅される。

3.3 基礎実験で用いた装置

3.3.1 GEM

GEM は絶縁体の表裏に銅箔が形成されたものに多くの細孔加工が施されたデバイスである。表裏の電極間に電位差を与えると、穴の中に強い電場が形成され、電子の雪崩増幅が起きる。基礎実験で用いた GEM は厚さ $100\mu\text{m}$ の液晶ポリマー (絶縁体) の表裏に厚さ $5\mu\text{m}$ の銅電極が形成されており、設計値で図 3.2 のような直径 $70\mu\text{m}$ の穴が $140\mu\text{m}$ 間隔で配置されている。図 3.7 は実際に用いた GEM の顕微鏡拡大写真であり、測定した結果、直径は $139\mu\text{m}$ 、中心間距離は $70\mu\text{m}$ であった。

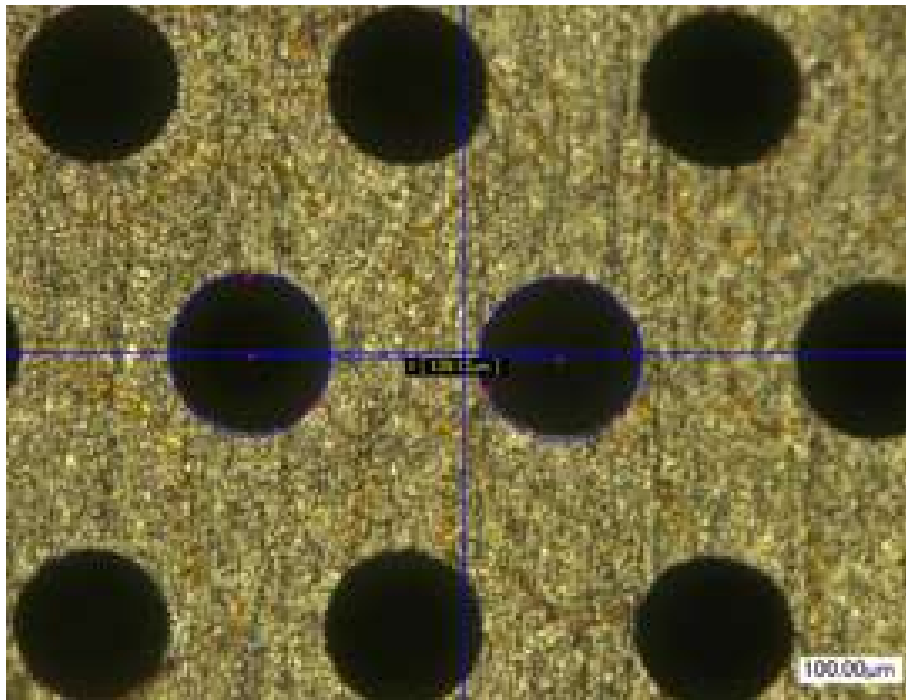


図 3.2: 実際に用いた GEM の顕微鏡拡大写真

3.3.2 μ -PIC

図 3.3 は μ -PIC の模式図である。 μ -PIC とは直行したカソードとアノードによって二次元位置情報の取得が可能な装置であり、高い位置分解能を持っている。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。その結果、カソード-アノード間には強い電場が形成され、電子の雪崩増幅が起きる。設計値では、 $10 \times 10\text{cm}^2$ 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接続されており、ピクセルの間隔は $400\mu\text{m}$ である。図 3.4 は実際に用いた μ -PIC の顕微鏡写真である。測定したところ、アノード直径は $80\mu\text{m}$ 、アノード中心間距離は $250\mu\text{m}$ 、カソード直径は $398\mu\text{m}$ であった。

Micro Pixel Chamber

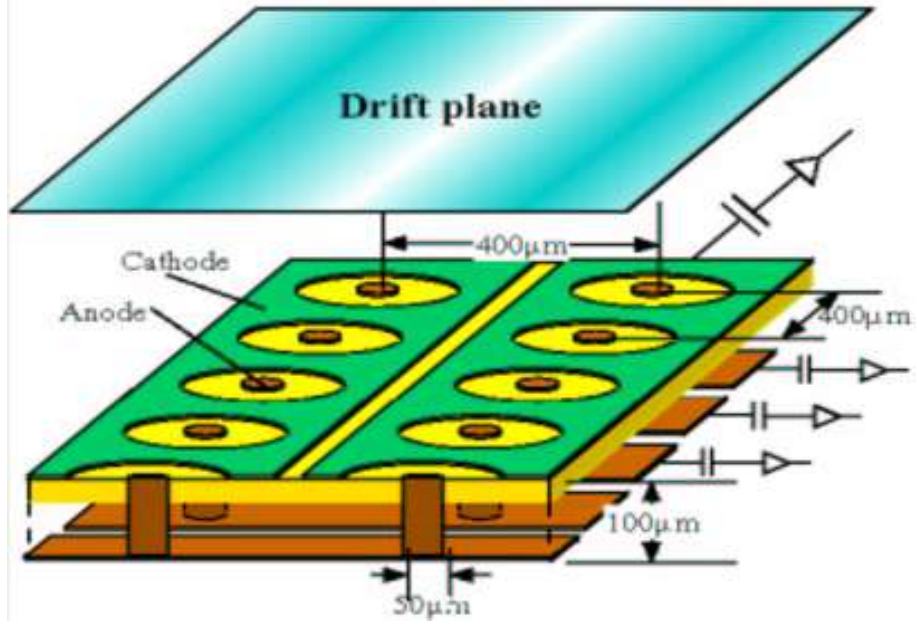


图 3.3: μ -PIC 模式图

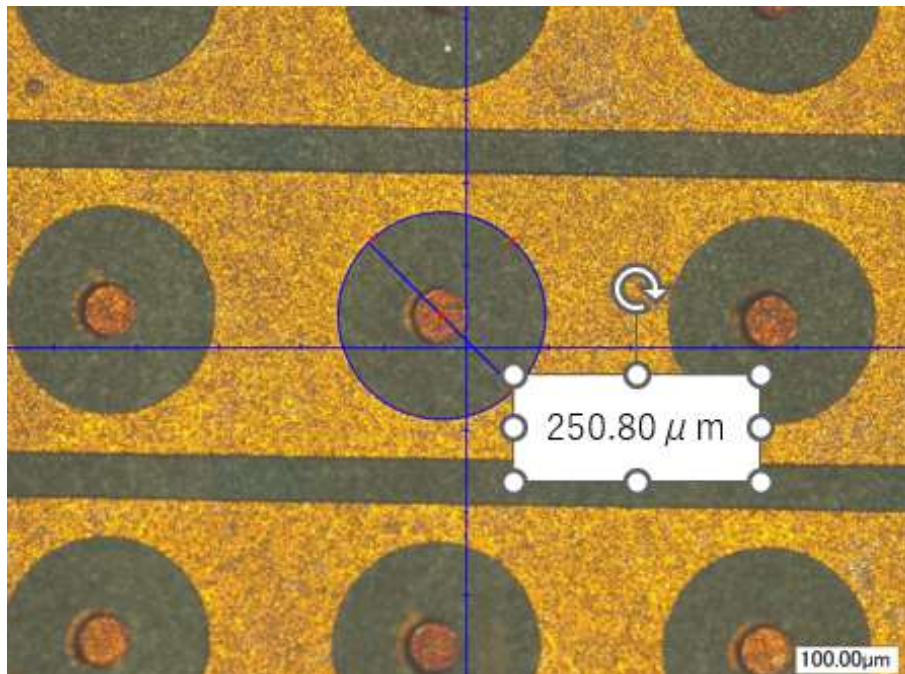


图 3.4: μ -PIC 顯微鏡写真

3.4 組み立ての様子

基礎実験のためのガス検出器を組み立てた際の様子について説明する。図 3.5 は組み立てた装置の概略図である。図 3.6～図 3.13 は組み立ての様子を表した写真である。

まず GEM 枠に GEM を貼り付ける (図 3.6、図 3.7 参照)。

その後その GEM 枠を μ -PIC 上部に取り付ける (図 3.8、図 3.9 参照)。

drift 面と GEM 枠の間にスペーサーを入れて空間をつくり、drift 面を取り付ける (図 3.10、図 3.11 参照)。

蓋を閉めて完成。図は検出器を上から見た図である (図 3.12、図 3.13 参照)。

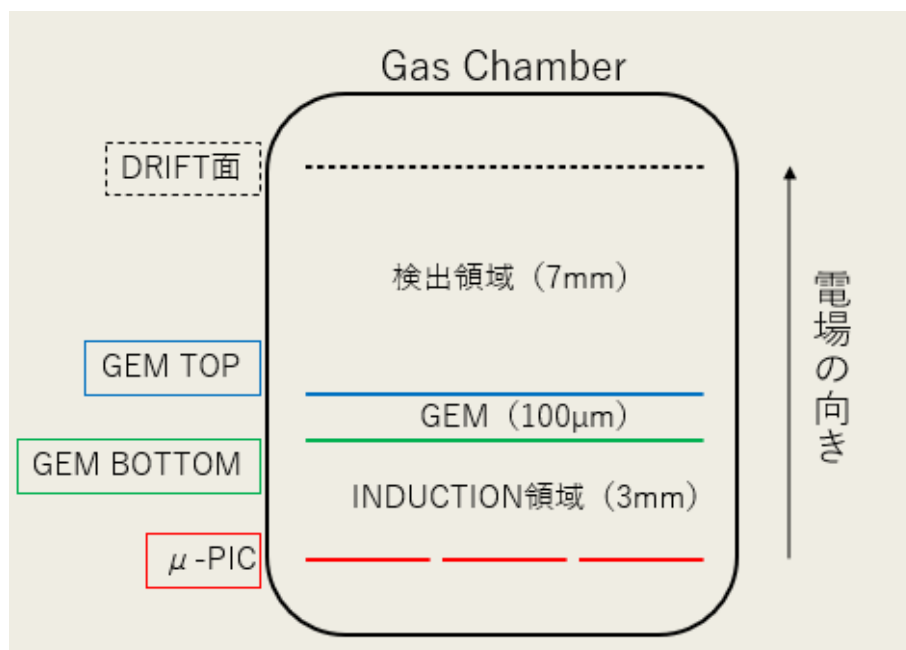


図 3.5: 基礎実験で使用した装置の概略図



图 3.6: GEM 枠



图 3.7: GEM

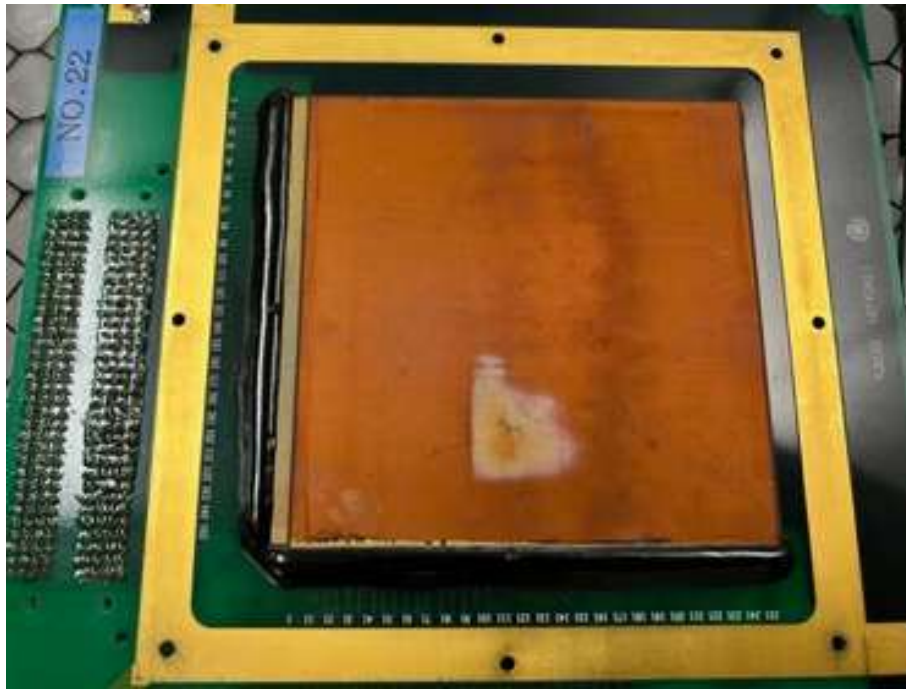


図 3.8: μ -PIC

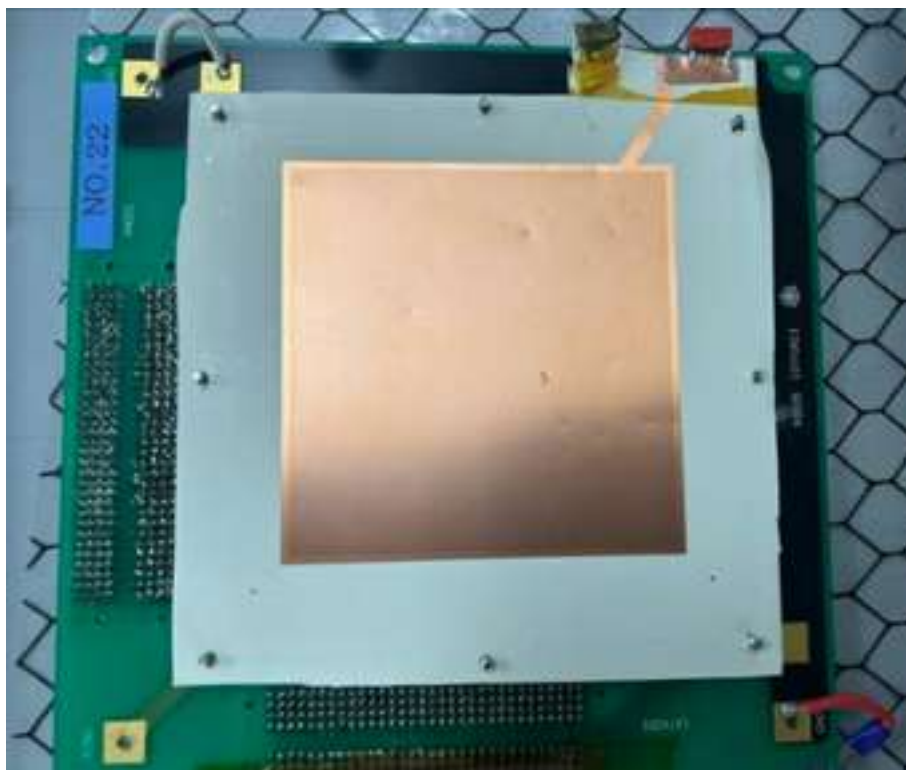


図 3.9: μ -PIC に GEM を取り付けた

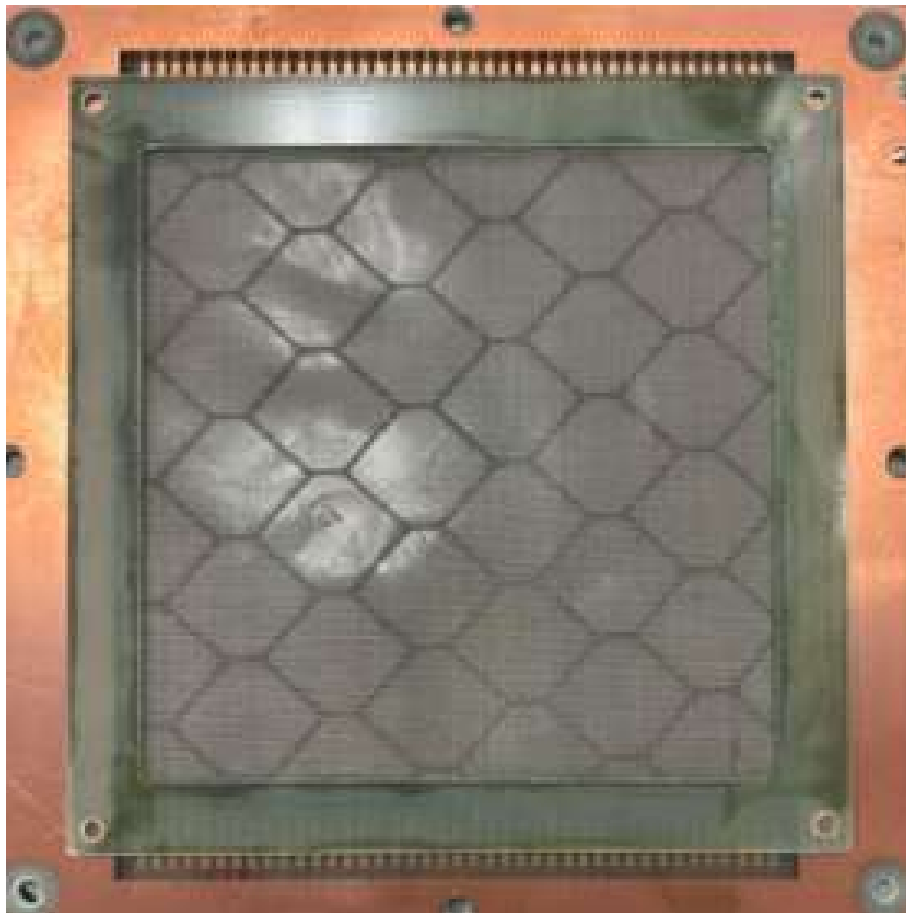


図 3.10: drift 面

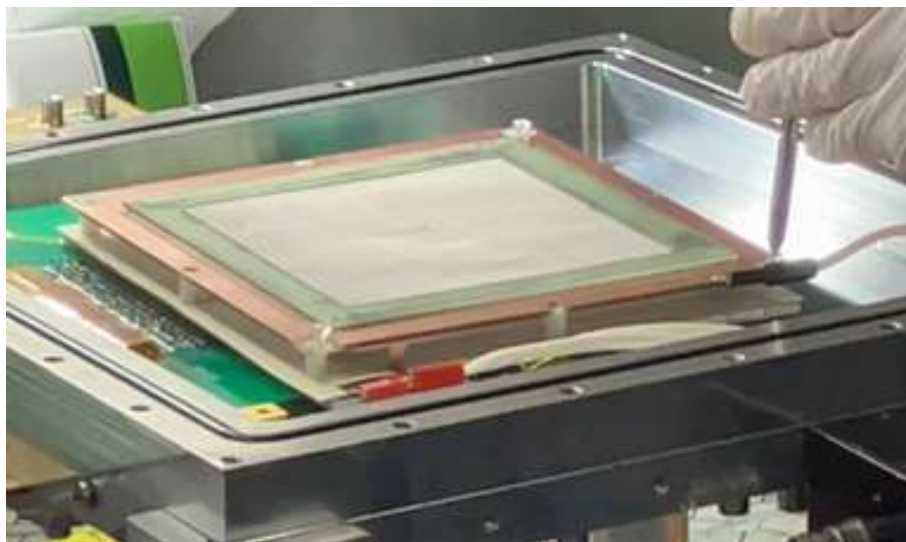


図 3.11: スペース取り付け

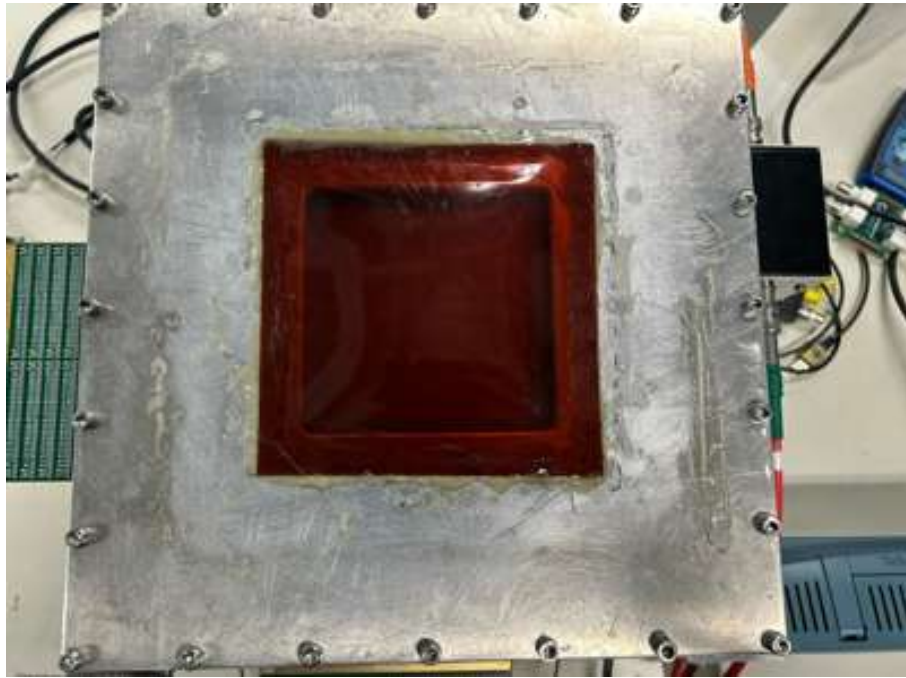


図 3.12: 完成した装置の平面写真



図 3.13: 完成した装置の全体写真

3.5 読み出し機器

基礎実験の回路図を図 3.14 に示す。検出器は電子を検出して電荷として出力を行う。出力された電荷をチャージアンプ (図 3.14 中の AMP) を用いて電圧値へと変換し、その電圧値を波形情報として記録することができる ADALM2000 を用いて測定した。

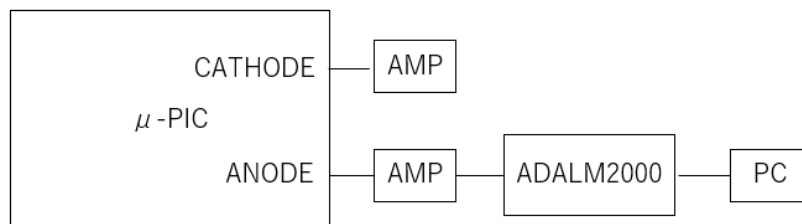


図 3.14: 読み出し機器回路図

3.5.1 チャージアンプ

入力された電荷情報を電圧に変換する機器である。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。

3.5.2 ADALM2000

ADALM2000 とは入力された電圧値 (アナログ値) を ADC 値 (デジタル値) に変換する機能が搭載された装置であり、波形情報を取得することができる。図 3.15 は実験で使用した ADALM2000 の写真である。性能は $\pm 25V$ 、12bit、100MSPS である。今回の実験では $\pm 2.5V$ 、10bit、100MHz で行った。取得した波形情報は PC で解析を行う。波形は 4000 クロック分取得した。



図 3.15: 実際に用いた ADALM2000 の写真

3.6 読み出し機器の較正実験

3.6.1 ADALM2000 の較正

ADALM2000 の較正にはパルスジェネレーターを用いた。パルスジェネレータから発生した矩形波を ADALM2000 に直接入れ、PC で解析を行った。50mV の矩形波を入力した際に取得された図 3.16 に示す。次に波形から以下の手法でスペクトルを得た。まず、図 3.16 の横軸の 0~500clock の範囲での ADC 値の平均をとる。その値を波形における ADC 値の最大値から引くことで、信号の波高を求めた。取得した 4000 個の波形についてこのような処理をし、波高のヒストグラムを作成した。得られたヒストグラムを図 3.17 に示す。以降、スペクトル図は上記の方法で得ることとする。

得られたスペクトル図に対してガウスフィッティングを行い、フィッティングした関数の mean 値で電圧値と ADC 値の較正を行った。

図 3.18 は、入力電圧と ADC 値の関係を示したものである。この図から得られた変換式は、ADC 値を ADC 、電圧を V [mV] として、

$$V = \frac{ADC - 1.579}{0.7991} \quad (3.1)$$

となる。

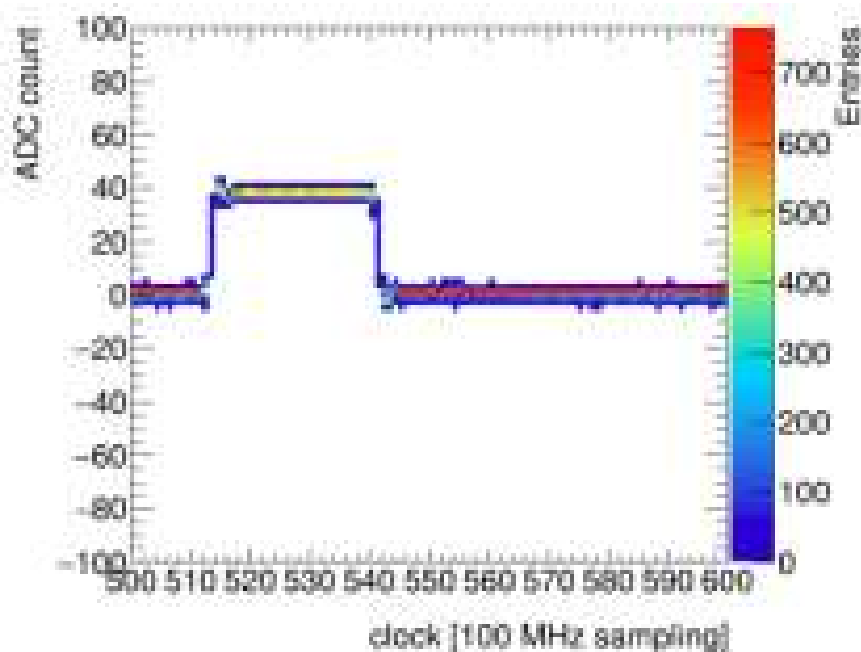


図 3.16: 50mV の矩形波を入力したときの波形

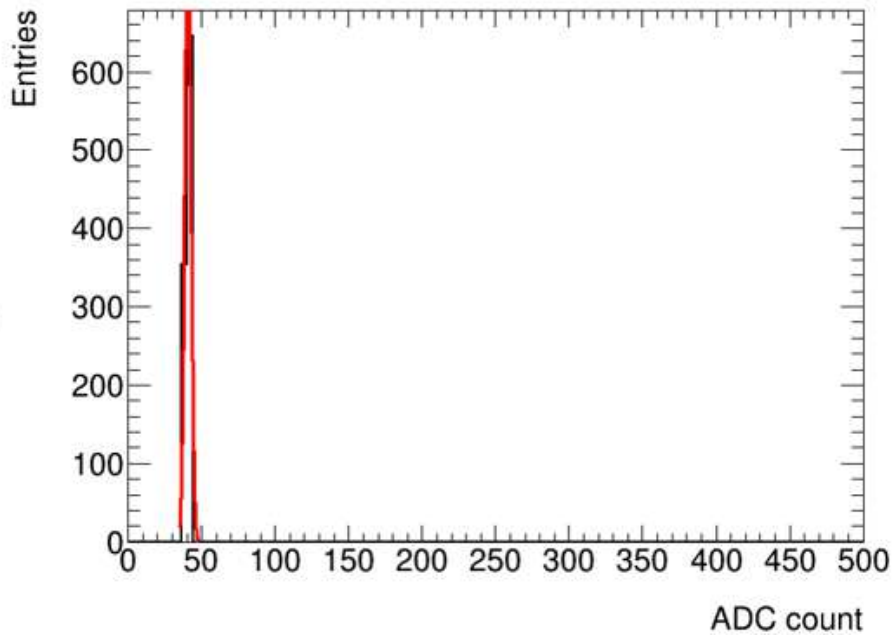


図 3.17: 50mV の矩形波を入力したときのスペクトル

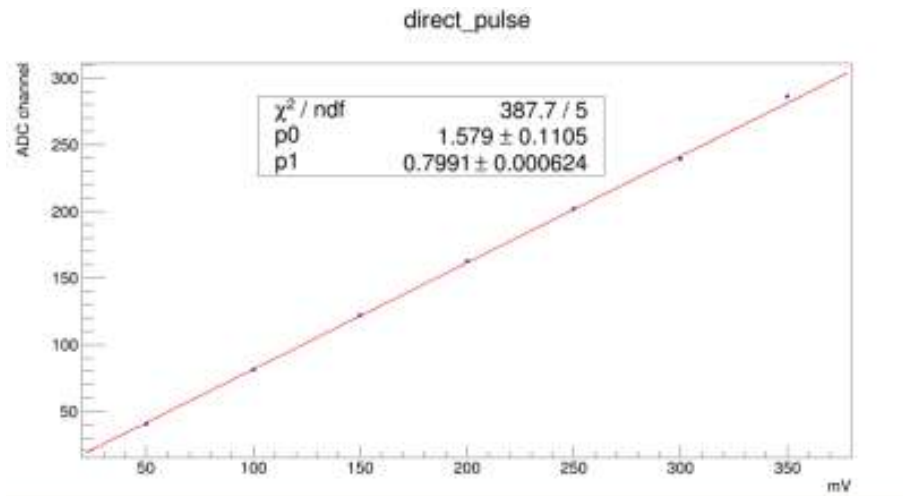


図 3.18: ADALM2000 の較正 (横軸は入力電圧、縦軸は ADC 値)

3.6.2 チャージアンプのゲイン測定

パルスジェネレーターを用いて矩形波を発生させ、1pF のコンデンサーに入力し、0.1~0.6pC の電荷としてチャージアンプに入力する。図 3.19 と図 3.20 は 0.6pC を入力したときの波形とスペクトル図である。ADALM2000 の変換式を用いて出力電圧を測定することでゲインを測定した。

入力電荷に対する ADC 値は図 3.21 のようになり、この図から得られた変換式は電荷を Q [pC]、出力電圧を V [mV] として、

$$Q = 221.7 \times V + 15.59 \quad (3.2)$$

となる。

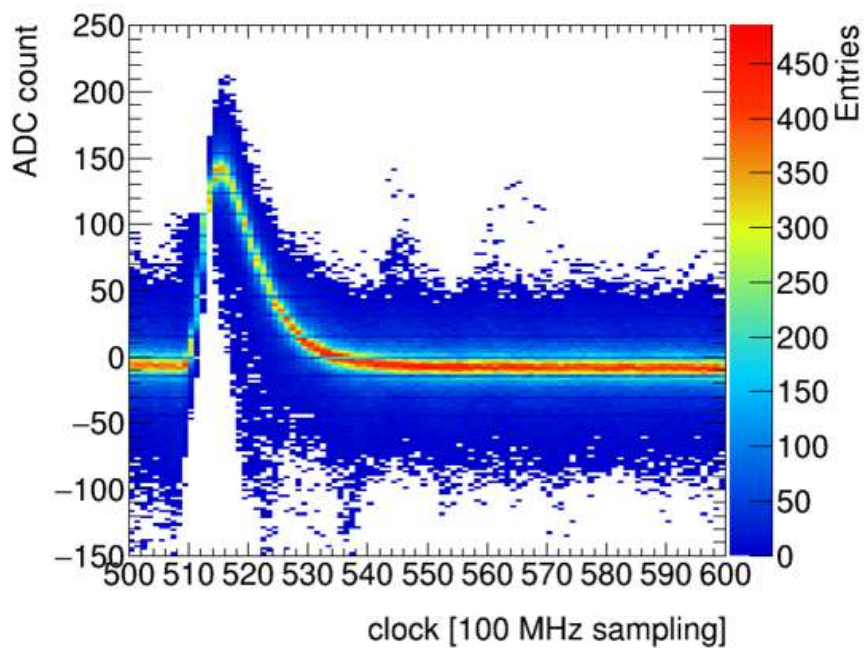


図 3.19: 0.6pC を入力したときの波形

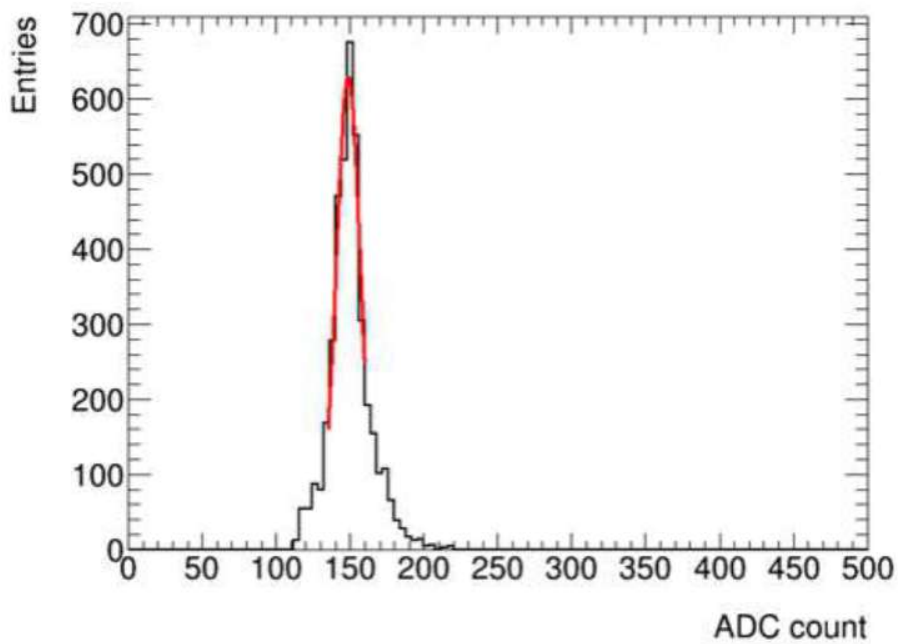


図 3.20: 0.6pC を入力したときのスペクトル

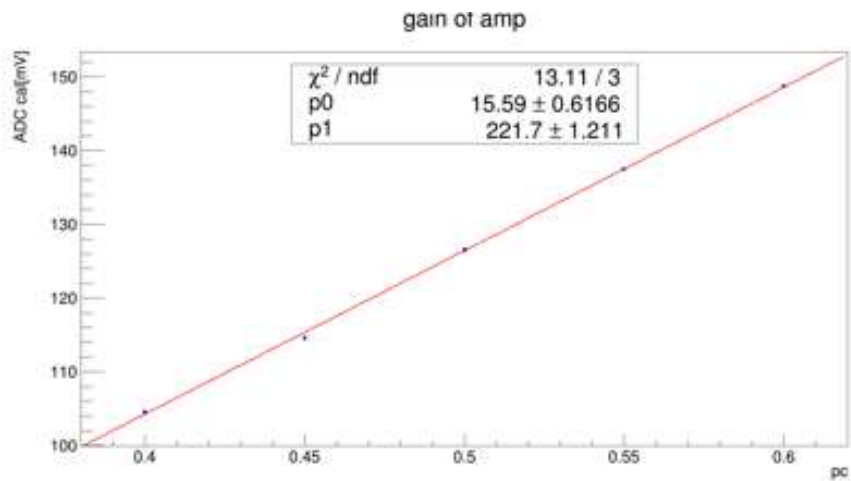


図 3.21: amp の gain

よって、チャージアンプのゲインは $2.22 \times 10^2 [\text{mV/pC}]$ と求まった。
また、ADALM2000 の較正式と合わせて、ADC 値と電荷の変換式は

$$Q = \frac{ADC - 1.579}{177.4} \quad (3.3)$$

となる。

3.7 検出器のガスゲイン測定

基礎実験の目的であるガスゲインの測定を ^{55}Fe 線源を用いて行った。

3.7.1 ^{55}Fe のスペクトル図

取得した ^{55}Fe のスペクトルの一例とその測定における設定電圧を図 3.22、表 3.1 に示す。

図 3.22 を見ると、エスケープピークとメインピークが見て取れる。アルゴン原子と ^{55}Fe の X 線が反応すると光電効果によって最内殻電子が放出される。それと同時に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として放出される。光電子とオージェ電子はガスをガスで電離させることで検出器内に 5.9keV のエネルギーを落とす。しかし X 線は検出器の外に漏れ出る可能性もある。その場合光電子のエネルギー (2.9keV) しか検出されない。よってエスケープピーク (2.9keV) とメインピーク (5.9keV) が見られる。解析ではメインピークをガウシアンでフィッティングした結果を用いた。

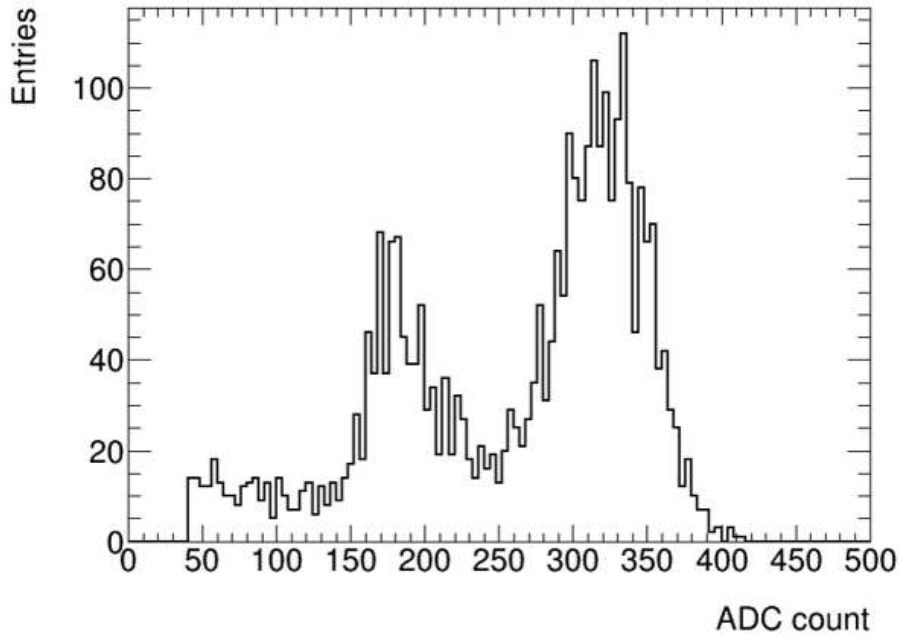


図 3.22: スペクトル図の一例

表 3.1: 設定電圧

装置名	設定電圧 [V]
drift	200V
Δ GEM	340V
induction	200V
anode	500V

3.7.2 ガスゲインの測定方法

$peak$ を波高値 [mV]、 E を落とされたエネルギー (基礎実験では ^{55}Fe 線のエネルギーである 5.9keV)、 W を Ar の W 値である 26eV、 e を電気素量 [C]、 AMP は測定したチャージアンプのゲインである $2.22 \times 10^2 \text{ mV/pC}$ とし、 G_{gas} を ^{55}Fe の γ 線の入射によって電離させられた電荷と読み出し機器からの出力電荷との比であるとすると、次式が成り立つ。

$$\frac{peak}{AMP} = \frac{E}{W} \times e \times G_{gas} \quad (3.4)$$

ここで求めたいガスゲイン G_{gas} について整理すると、

$$G_{gas} = \frac{peak \times W}{E \times e \times AMP} \quad (3.5)$$

が成り立つ。得られたスペクトルをガウシアンでフィッティングし、その mean 値を 3.5 式の $peak$ に代入することでガスゲインを得る。この作業を各電圧で行うことで、ゲインカーブを取得する。

3.7.3 ガスゲインの Δ GEM、anode 依存

図 3.23 と図 3.24 はそれぞれガスゲインの Δ GEM 電圧依存と anode 電圧依存である。表 3.2 と表 3.3 はそれぞれの設定電圧である。

得られたゲインカーブを見ると Δ GEM と anode 依存ではガスゲインが電圧の増加とともに指数関数的に増加していることがわかる。このことから GEM と μ -PIC では電子の雪崩増幅が起こっていることが確かめられた。また、図 3.23 において、390V より高い電圧ではサチレーションを起こし、理想的なガスゲインが得られていない事がわかる。

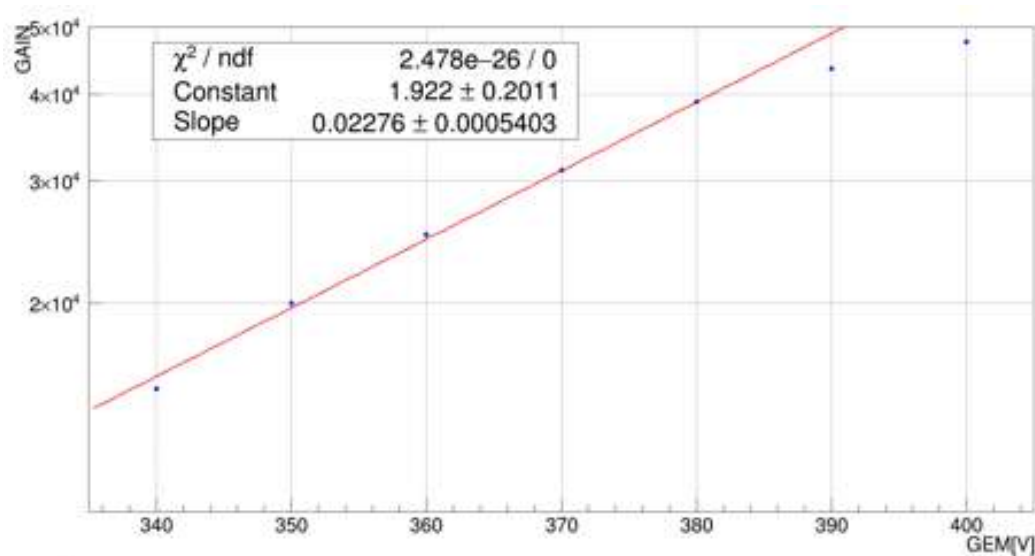


図 3.23: ガスゲインの Δ GEM 依存

表 3.2: ガスゲインの Δ GEM 依存測定時の設定電圧

装置名	設定電圧 [V]
drift	150V
Δ GEM	340~400V
induction	250V
anode	550V

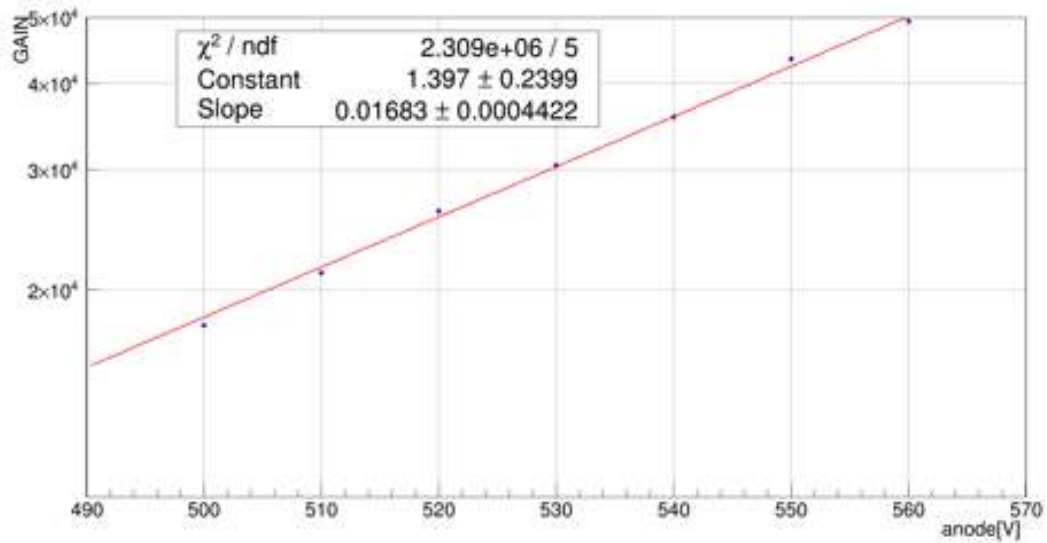


図 3.24: ガスゲインの anode 依存

表 3.3: ガスゲインの anode 依存測定時の設定電圧

装置名	設定電圧 [V]
drift	280V
ΔGEM	370V
induction	250V
anode	420~500V

3.7.4 ガスゲインの drift、induction 依存

図 3.25 と図 3.26 はそれぞれガスゲインの drift 依存と induction 依存である。表 3.4 と表 3.5 はそれぞれの設定電圧である。得られたゲインカーブを見ると、drift と induction では印加電圧の低い領域ではガスゲインは増加するが、ある一定の電圧以降ではほとんどガスゲインは変化していない。このことからこれら 2 つの領域では電子の運搬を主に行っていることがわかる。

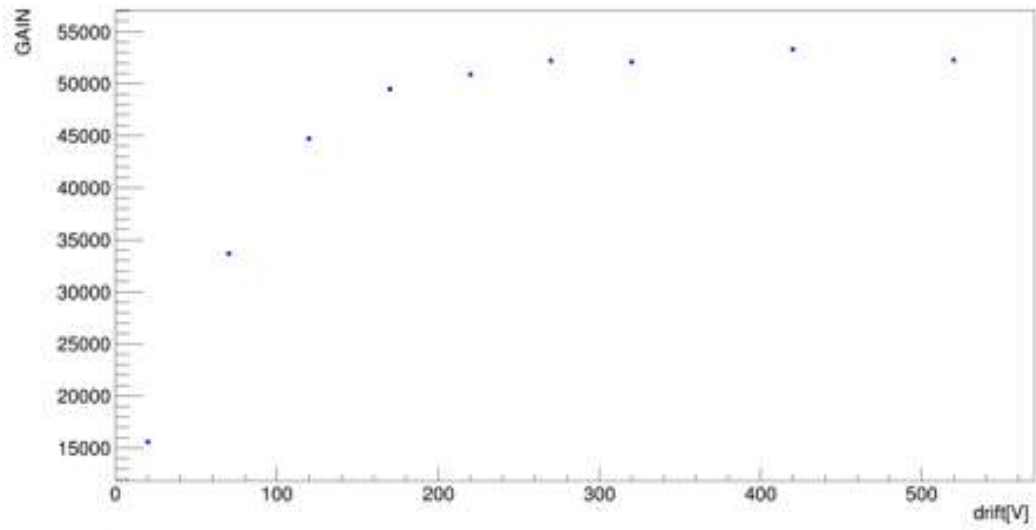


図 3.25: ガスゲインの drift 依存

表 3.4: ガスゲインの drift 依存測定時の設定電圧

装置名	設定電圧 [V]
drift	20V~550V
Δ GEM	380V
induction	250V
anode	550V

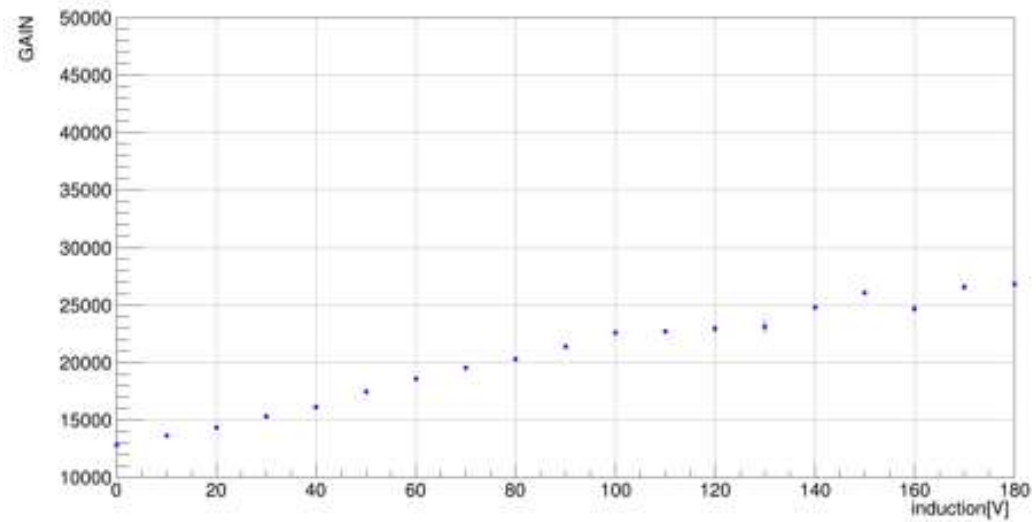


図 3.26: ガスゲインの induction 依存

表 3.5: ガスゲインの induction 依存測定時の設定電圧

装置名	設定電圧 [V]
drift	150V
Δ GEM	380V
induction	0V~180V
anode	550V

3.8 基礎実験のまとめ

基礎実験から検出器についての理解が深まった。基礎実験での目標は本実験で用いる電圧設定を得ることである。表 3.6 は、KK-axion 探索に必要なガスゲインを得るための設定電圧をまとめたものである。4 章では、表 3.6 の値を参考にして、本実験用のガス検出器に印加する電圧を決定する。

表 3.6: 基礎実験用のガス検出器の設定電圧

装置名	基礎実験用
検出領域の長さ	0.7cm
induction 領域の長さ	0.3cm
drift	150V
Δ GEM	400V
induction	130V
anode	540V
ガスゲイン ($\times 10^4$)	2.31 ± 0.05

4 KK-axion 探索実験のための検出器の性能評価

担当: 和田伸一郎

4.1 実験の目的

本研究の最終目標は KK-axion の探索である。そのため本章では、前半で宇宙線ミュー粒子のエネルギー損失からエネルギー較正を行う。そして後半で、前半の実験の結果を用いて 10keV 程度のエネルギー損失を示す粒子の測定を目指す。

4.2 検出器

4.2.1 検出器の構造

図 4.1 に宇宙線ミューオンを用いたエネルギー較正実験（以下、エネルギー較正実験）および KK-axion の探索実験で用いた検出器を示す。図 4.2 は基礎実験で用いた検出器である。図 4.3 にこれらの検出器の比較を模式図で示す。検出領域が 0.7cm から 8.0cm、induction 領域が 0.3cm から 0.7cm に変わっている。



図 4.1: 本実験で用いたガス検出器

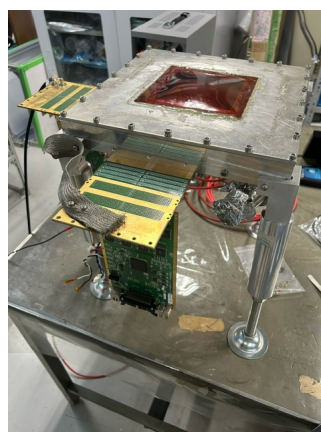


図 4.2: 基礎実験で用いたガス検出器

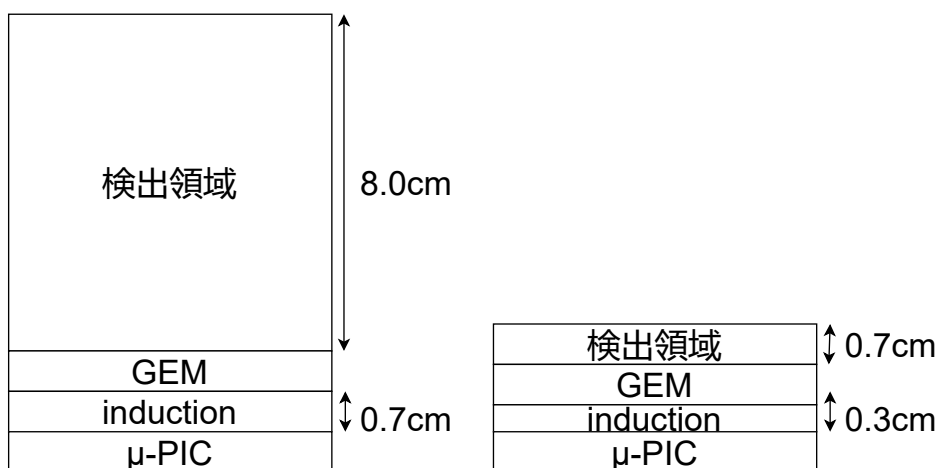


図 4.3: 基礎実験で用いた検出器 (右) と本実験で用いた検出器の模式図 (左)

座標系は図 4.4 に示す通り、縦軸が検出面からの距離、横軸は anode(cathode) の座標となっている。天頂は z 方向である。

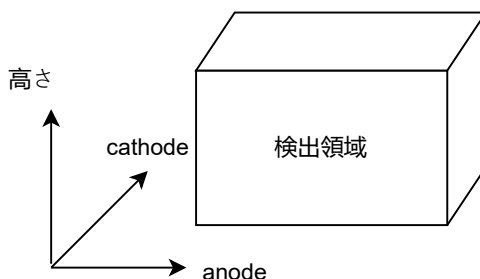


図 4.4: 座標系の定義

4.2.2 データ収集システム (DAQ)

ここで、本実験で用いたデータ取得システムについて説明する。

μ -PIC の anode, cathode それぞれに 256 本のストリップがあり、各ストリップで検出された電荷は 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 ボードにつき 16 個の ASD チップが搭載されており、また ASD チップには 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ことから、ASD ボード 1 枚あたり 64ch の信号が処理される。本実験では、ASD チップのデジタル信号は個別に出力し、アナログ信号は 32 本ずつまとめたものを出力した。この ASD ボードを anode, cathode それぞれに 4 枚使うことで全ストリップからの情報を処理している。個別に出力されたデジタル信号は FPGA を用いた座標演算装置 (encoder) に入力され、ストリップ番号と、そこでのトリガーのタイミングに対する信号の立ち上がり・立ち下がりが記録される。各ストリップでのトリガー信号が入力されてから立ち上がりまでの時間を Time Of Flight (TOF)、立ち上がりから立ち下がりまでの時間を Time Over Threshold (TOT) としている。また、cathode の信号は全アナログ信号を 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。encoder、FADC ともに 100MHz のクロックで動作している。^{*1}

図 4.5 に本システムで取得された典型的な飛跡の例を示す。図の縦軸は TOF、横軸はストリップ番号である。赤点は検出領域における anode (右図)、cathode (左図) それぞれのストリップから読み取った電子の発生位置である。青線は cathode の波形情報を示し、左 2 本の波形は通常の波形情報を示し、右 2 本の波形は取得波形のダイナミックレンジを稼ぐために、減衰した波形を示す。

図 4.6 に、本実験で用いたガス検出器のデータ取得システムを示す。trigger は encoder と FADC にかけており、エネルギー較正実験では外部 trigger として 2 枚のプラスチックシンチレータの同時計測信号、アクション探索実験では内部 trigger として anode の信号を discriminator に通したものをを用いている。

^{*1} 測定してわかったことだが、数値上は同じでも anode の threshold が cathode の threshold よりも高く出やすくなっているため、次年度以降は注意して実験を行うこと。

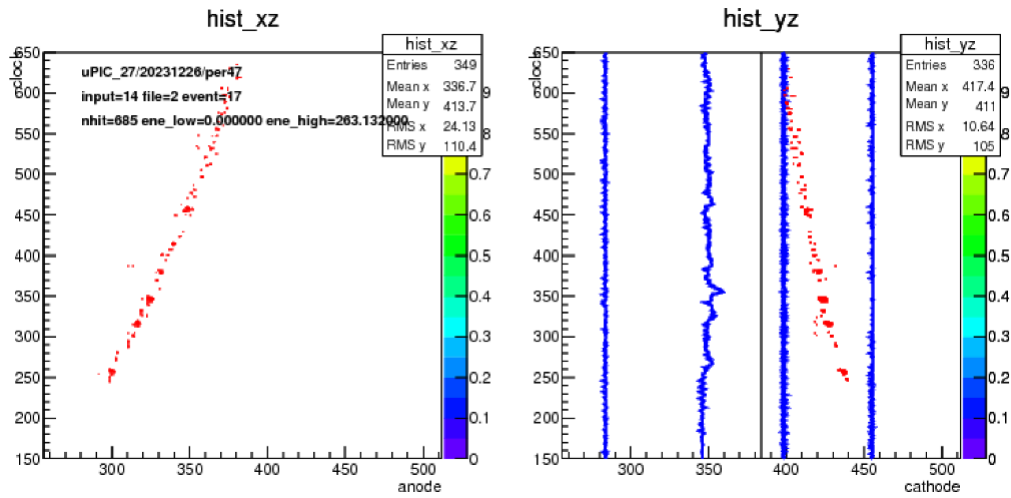


図 4.5: 左：anode で検出された飛跡, 右：cathode で検出された飛跡と波形

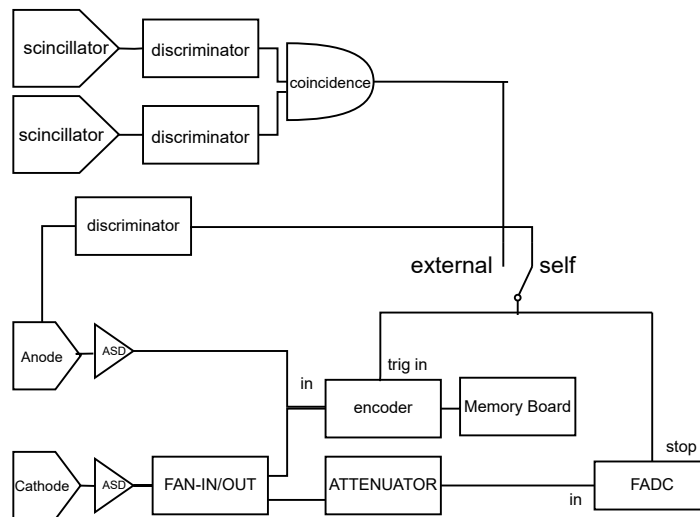


図 4.6: 本実験で用いたガス検出器のデータ取得システム

4.2.3 較正実験のためのトリガー設定

宇宙線ミュオントリガーの設定を決定するために、以下の測定を行った。

表 4.1 に示すような 2 枚のプラスチックシンチレータを準備し、それぞれ表に示す電圧および閾値をかけた。これらのシンチレータに対して、それぞれ単体での 60 秒間の計数、横並びにした時の同時計数および、間隔を 17.5cm 開けて上下に配した時の同時計数を測定した。結果を表 4.2 に示す。地表でのミュオンのフラックスはおよそ $0.1/cm^2/s$ 程度であることが知られており、重ねた時の計数率とオーダーがっており、正しく設定できたと考えた。

この結果より、エネルギー較正実験では scintillator 間が同様に約 20cm 離れていることから、イベントレートが測定結果と同じくらいになるように閾値を設定した。ただ、エネルギー較正実験では同様の HV を scintillator にかけても計数が上がらなかったため、1400V を 1550V、1800V を 1900V に変更した。

表 4.1: トリガーシンチレータの形状および設定

	scincillator1	scincillator2
面積	10.0cm × 10.0cm	12.0cm × 13.2cm
HV	1800V	1400V
discriminator trigger	30.4mV	30.4mV

表 4.2: 測定結果

計数	count
scincillator1(単体)	6261
sincillator2(単体)	1631
横並び	3
重ね (間隔 17.5cm)	11

4.3 エネルギー較正実験

4.3.1 測定

次に TPC のエネルギー較正を宇宙線ミュオンを用いて行った。この際、ミュオンの飛跡の長さは事象ごとに異なるため、単位長さ (1cm) あたりのエネルギーで較正した。

図 4.6 のスイッチを external に切り替えることで、2 枚のプラスチックシンチレータの信号の同時計測信号を trigger としてデータを取得した。表 4.3 はエネルギー較正実験における測定諸元を示している。

表 4.3: エネルギー較正実験の測定諸元

場所	電圧 [V]
drift	-2000
GEM Top	-700
GEM Bottom	-300
anode	525
anode(cathode) threshold	50.3mV
ガス Ar : Ethane = 9 : 1 (1atm)	
測定時間 6.63×10^4 sec.	
live time 6.58×10^4 sec.	
トリガーイベント 1.05×10^4 Event	

ガスは Ar, C₂H₆ 混合ガス (Ar : C₂H₆ = 9 : 1) を使用。ガス交換は 2023 年 12 月 26 日に行い、測定は 2024 年 2 月 2 日から 2024 年 2 月 3 日まで行った。

4.3.2 電荷の計算方法

検出した電荷 Q_{fadc} は

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

で与えられる。ここで、 ADC はそれぞれのクロックでの ADC 値である。FADC はダイナミックレンジ $1V$ が 8bit で出力されるので、 ΣADC を 256 で割り、clock 周期の 10 ns をかけ、さらに FADC の内部抵抗の 50Ω で割ることで電荷を求めている。

4.3.3 測定結果

図 4.5 に示された raw データから、ドリフト速度を $4\text{cm}/\mu\text{s}$ として、TOF にドリフト速度をかけることで z 座標を求め、立ち上がりを青点、立ち下がり黒点、TOT を赤破線で示すことで図 4.7 が作られる。飛跡が曲がっているのは、電場が歪んでいる影響だと考えられる。

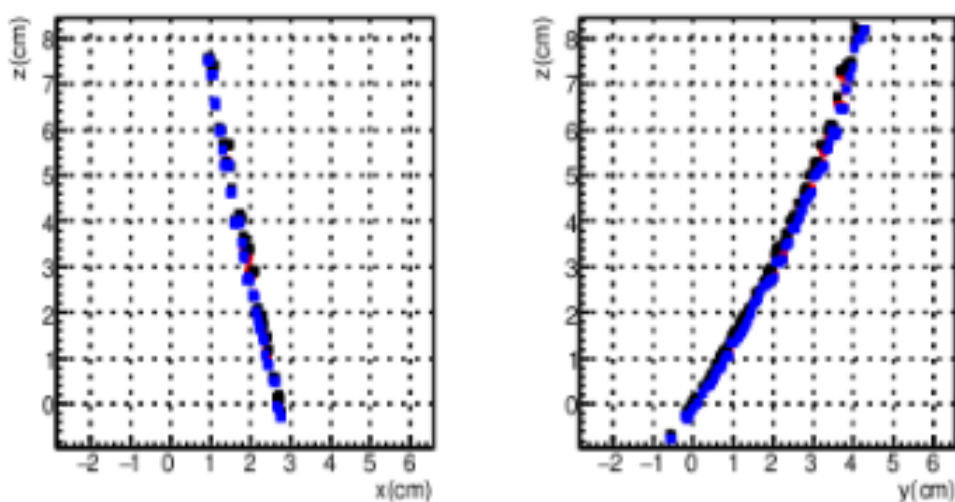


図 4.7: ミューオン飛跡

各ミューオンに対して Q_{fadc} と $length$ を計算し、ヒストグラムにしたものが図 4.8 と図 4.9 である。図 4.8 は 500ADC で、図 4.9 は 15cm でピークを取っていることがわかる。ここで、 $length$ の定義は、 x, y 方向はその端点同士を結んだ距離を、 z 方向は anode, cathode で測定したもののから長いほうの距離を選択し、三次元的な長さで定義した。図 4.10 は縦軸 $length[\text{cm}]$ 、横軸 Q_{fadc} の二次元ヒストグラムとなっている。この図から、 $length$ が 10cm から 17cm の所にミューオン事象が集中していることが分かる。

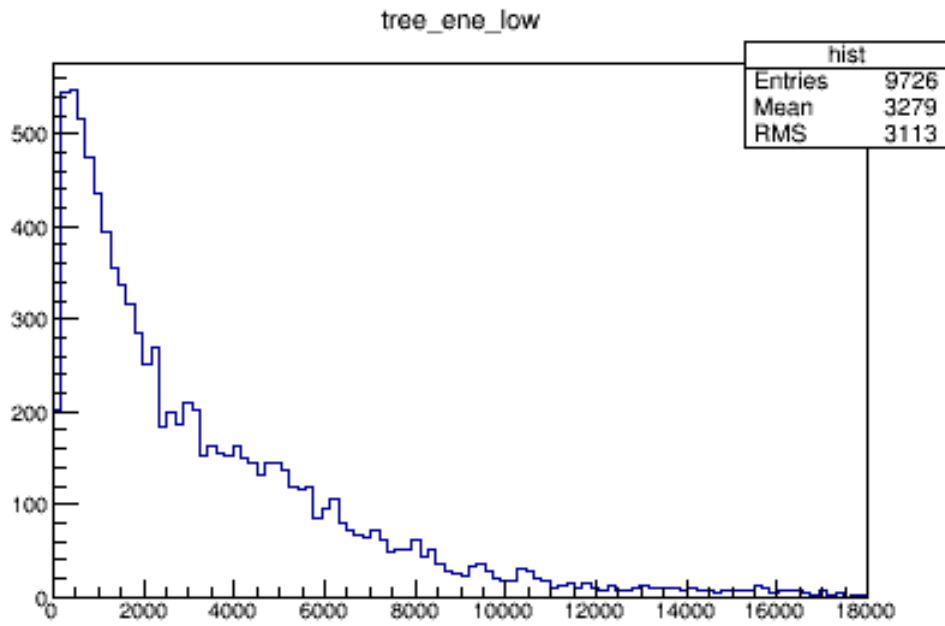


図 4.8: Q_{fadc} のヒストグラム

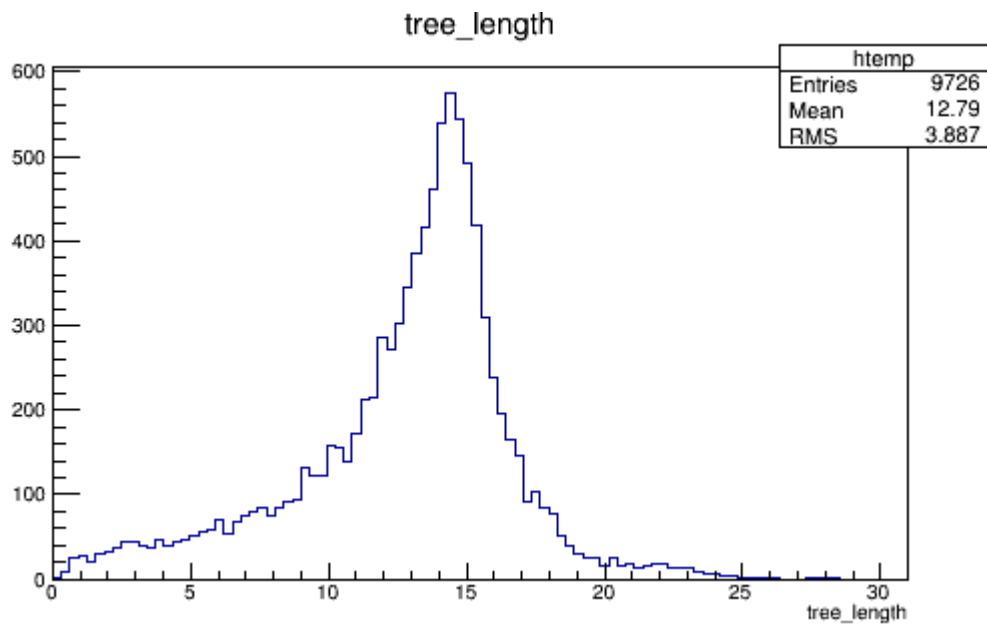


図 4.9: length のヒストグラム

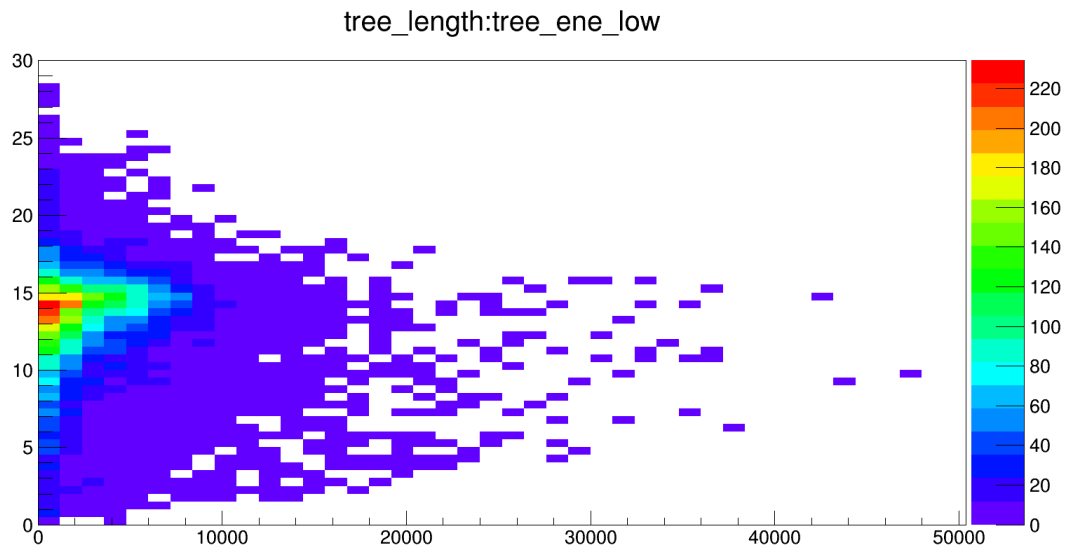


図 4.10: sumADC と length の二次元ヒストグラム

4.3.4 事象選別

単一のミュオン事象で測定するために、次の3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

飛跡の長さは両端点の距離によって決まる為、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いうため除外した。

2. 途切れたミュオンの飛跡

検出器中で、アノードストリップについて、ゲインが低い影響で電子を観測しにくいストリップがあった。このようなストリップをまたぐ事象は飛跡が途切れて観測され、飛跡の長さに対してエネルギーが小さくなってしまいうため除外した。

3. 環境ガンマ線などによるノイズ

まれに図 4.11 のように、ミュオンが電磁シャワーを起こす影響で短い飛跡が観測されたため除外した。

以上の条件を満たす基準を設定するために、200 事象を目視で確認し、表 4.4 のような基準を設定した。これらの基準を満たす事象を単一ミュオンとした。

図 4.12 は、事象選別後の dE/dx のヒストグラムである。

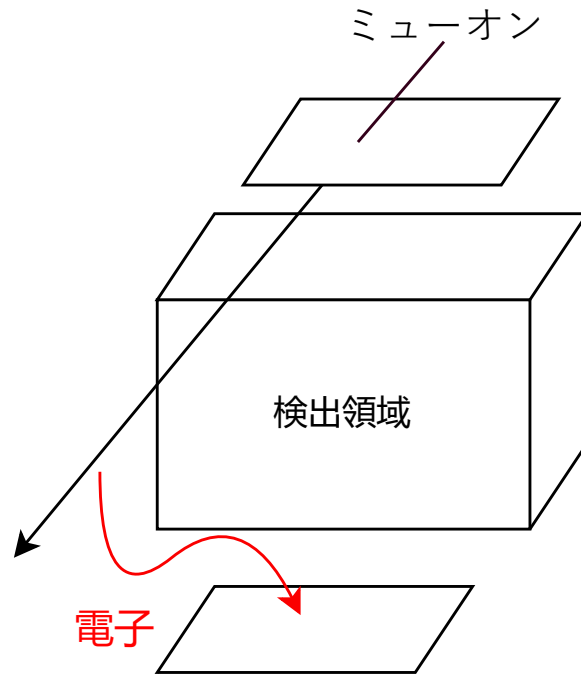


図 4.11: 短い飛跡を残す例

表 4.4: 選別基準

場所	条件
飛跡の長さ	$8\text{cm} < \text{length} < 16\text{cm}$
隣り合う測定点の距離	$\text{space} < 1.5\text{cm}$
TOT-sum	$\text{nhit} < 1350$
トリガーイベント (選別後)	$1.32 \times 10^3 \text{ Event}$

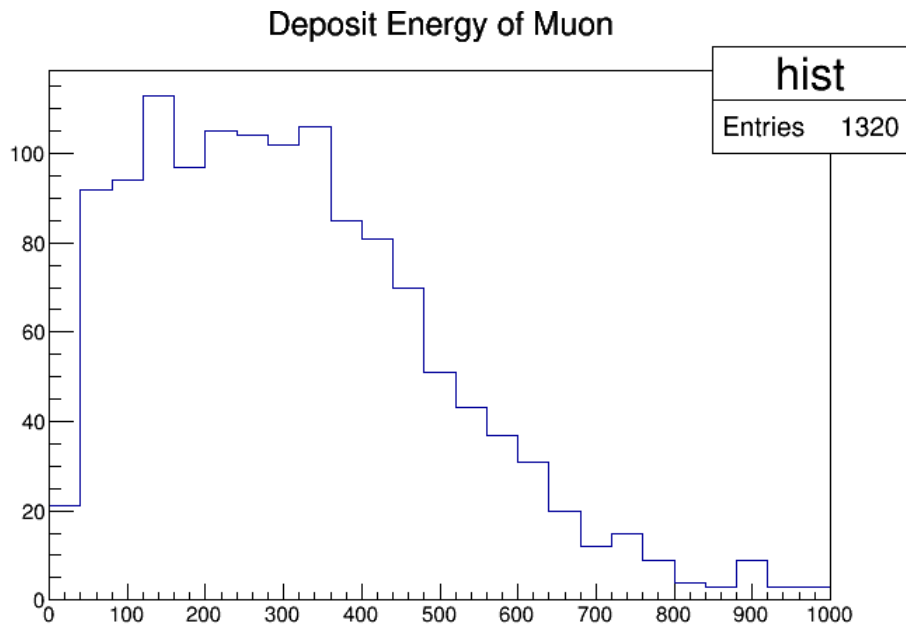


図 4.12: dE/dx のヒストグラム

4.3.5 ミューオンが単位長さあたりに落とすエネルギー

地表付近に到達する宇宙線ミューオンは Minimum Ionizing Particle(MIP) であり、そのエネルギー損失は約 $2 \text{ MeV} \cdot \text{cm}^2/\text{g}$ (Mean 値) であると考えられる [14]。また、 ArC_2H_6 ガスの密度は $1.74 \times 10^{-3} \text{ g/cm}^3$ であるため、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

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

と考えられる。

4.3.6 エネルギー較正

高速荷電粒子 (今回でいうミューオン) のガス中でのエネルギー損失 E_{loss} はランダウ分布

$$p(x) = \frac{1}{\xi} \phi(\lambda)$$

$$\phi(\lambda) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \exp(-t \log t - \lambda t) \sin(\pi t) dt$$

$$\lambda = \frac{x - x_0}{\xi}$$

に従う。式中 ξ は Sigma、 x_0 は MPV とそれぞれ定義し、図 4.12 に示したエネルギーヒストグラムを上記 3 つをフリーパラメータとしてランダウ分布でフィットした。その結果を図 4.13 に示す。

MPV はランダウ分布のピークの座標を示す。一方、Mean はフィットした関数の面積の x 軸に垂直な二等分線の x 座標である。そのため今回は区分求積法を用いてランダウフィットした関数を積分し、Mean を求め

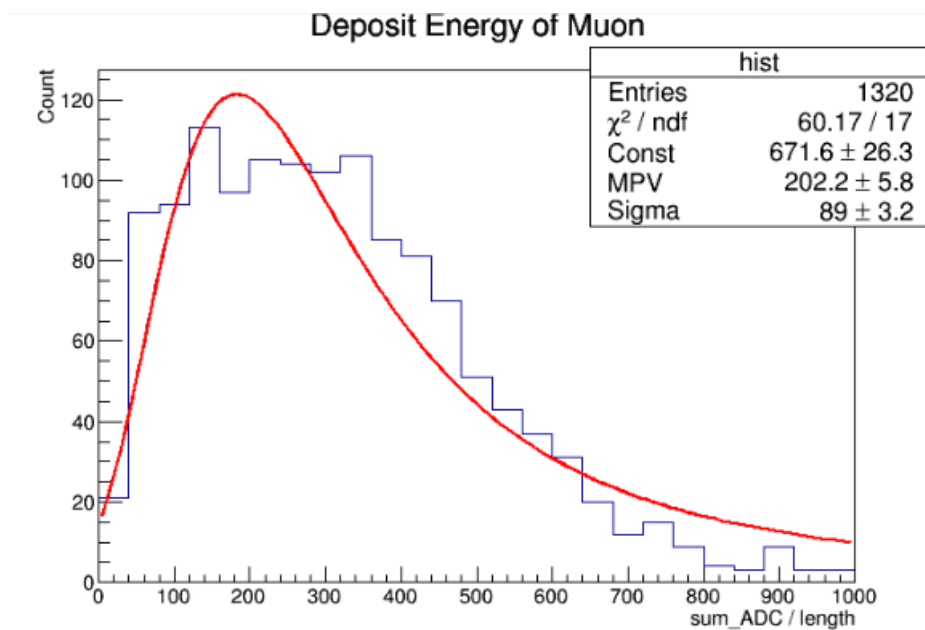


図 4.13: ランダウフィットしたヒストグラム

た結果

$$Mean = 318.2 \pm 9.1$$

を得た。その Mean を $E_{loss} \simeq 3.5 \text{ keV/cm}$ で割ることで calibration factor (CF)

$$CF \simeq 0.0112 \text{ keV}/\Sigma\text{ADC}$$

を得る。

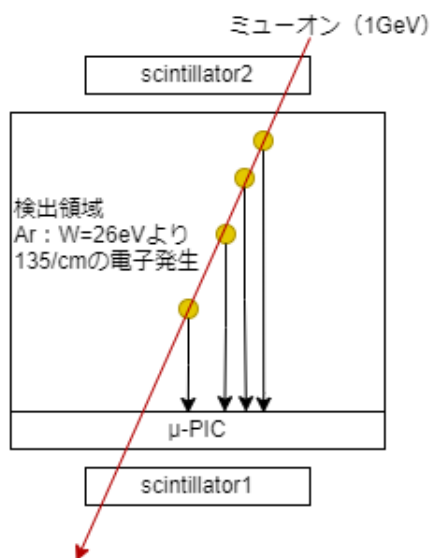


図 4.14: 電離の模式図

4.3.7 ガスゲイン

ミュオン通過で生成される電子数は、ミュ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 値で割った数で与えられるため、検出される電荷 Q_{fadc} は

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

となる。ここで G_{amp}, G_{gas} はそれぞれアンプとガスのゲイン、 e は電気素量である。

4.3.8 基礎測定との比較

ランダウフィットの Mean 値のエラーを統計誤差として、 G_{gas} を求めると

$$G_{gas} = (7.21 \pm 0.21) \times 10^4$$

となる。これと、基礎実験で求めた G_{gas} を比較したものが表 4.5 となる。

表 4.5: 基礎実験との比較

場所	基礎実験	本実験
検出領域	0.7cm	8.0cm
induction 領域	0.3cm	0.7cm
drift	-680V	-2000V
GEM Top	-530V	-700V
GEM Bottom	-130V	-300V
anode	540V	525V
ガスゲイン	2.31×10^4	7.21×10^4

本実験では基礎実験と比較して 3 倍のガスゲインであった。増幅率が高くなった原因として、基礎実験では GEM でサチュレーションを起こしていたことが原因と考えられ、また G_{amp} の値は去年のデータを使用しているため、その値による誤差も考えられる。

4.4 10keV 事象検出のデモンストレーション

検出器の性能評価の終段階として、較正実験で得られた結果を用いてエネルギー較正を行い、10keV 程度のエネルギーの事象の検出を試みた。較正実験とは異なり、図 4.6 のスイッチを self に切り替え、trigger を anode から入った discriminator の信号に変更している。表 4.6 はデモンストレーションでの測定諸元を示しており、線源を用いずに測定を行った。

図 4.15 に示す通り、約 8keV の粒子を測定することが出来た。この結果より、検出器は KK-axion 探索のために十分低いエネルギー閾値を有していると判断できる。

表 4.6: デモンストレーションでの測定諸元

場所	電圧 [V]
drift	-2000
GEM Top	-700
GEM Bottom	-300
anode	525
discriminator trigger	30.4mV
anode(cathode) threshold	50.3mV
ガス Ar : Ethane = 9 : 1 (1atm)	

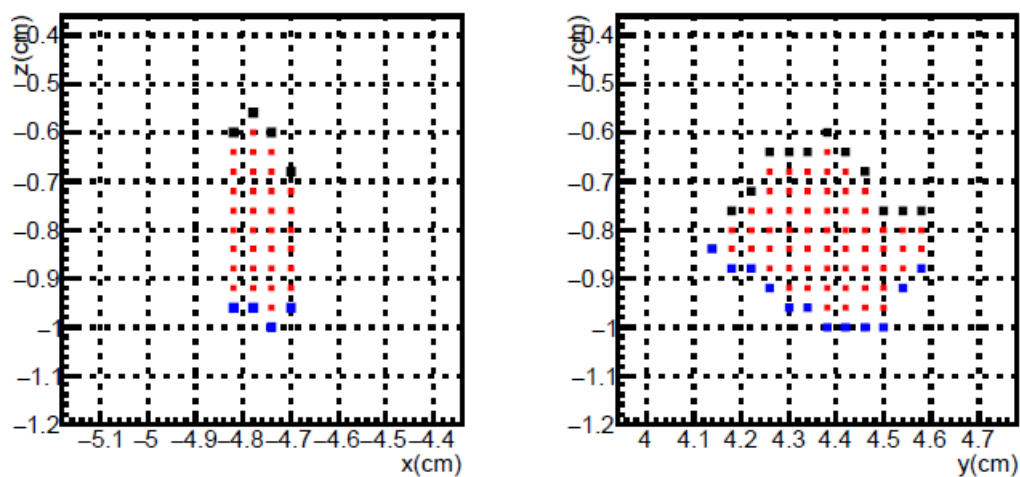


図 4.15: $E_{loss} = 7.8keV$ の粒子

4.5 まとめ

4章では、DAQを用いてエネルギー及び飛跡の情報を得ることで、数万イベントの中から調べたい粒子の反応を事象選別することが出来た。また、3章での基礎実験で得たガスゲインと比較して、本実験で用いたガス検出器の性能を調べることも出来た。ただ、時間が足りなかったことで、anodeのthresholdが高くなっていたのを直すことなく測定してしまったため、飛跡が途切れているものが多くなっていたことが較正実験での反省として挙げられる。

5 ガス検出器を用いた KK-axion 探索実験

担当: 鈴木 啓司

前章では、KK-axion 探索実験に向けて、検出器の性能を評価した。その結果をもとに、本章では実際に KK-axion 探索に取り組み、測定から得られたデータを解析した。

5.1 目的

本章の目標は、探索実験で得られたデータの中から、KK-axion の崩壊事象による信号のみを取り出すことである。解析に先立って、まず信号および BG についてのシミュレーションを行った。これにより、KK-axion の崩壊による事象であるとするための条件を設定し、その条件を満たす BG 由来の事象数を見積った。次に、実験により得られたデータを、シミュレーションの結果と合わせて解析することで、KK-axion の崩壊数の上限値を求めた。最後に、KK-axion と光子の結合定数 $g_{a\gamma\gamma}$ の上限値を設定し、本実験の成果と今後の展望について述べる。

5.2 測定

検出器のエネルギー較正をし、関心領域の事象が観測できることを確認したのち、KK-axion の探索実験を行った。ガス検出器に印加した電圧は表 4.6 の通りである。また、図 4.6 のスイッチは self に設定している。観測した事象ごとの Σ ADC の値に、4 章で求めた CF を掛けることで、事象ごとのエネルギー損失を求めた。図 5.1 は、KK-axion 探索実験で得られたエネルギースペクトルである。測定の Live Time は 5.3×10^4 sec であり、トリガーされた総事象数は 4.4×10^5 事象であった。

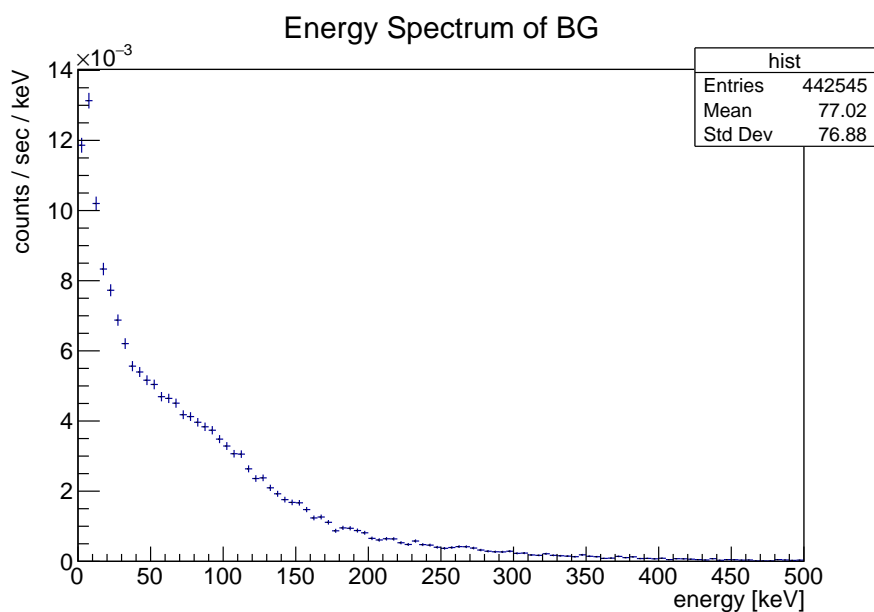


図 5.1: KK-axion 探索で得られたエネルギースペクトル

5.3 シミュレーション

5.3.1 KK-axion の信号シミュレーション

まず、KK-axion の崩壊が検出器内でどのように観測されるかを理解するためのシミュレーションを実施した。1 章にもあったように、KK-axion は崩壊時に 5keV 程度の光子を反対方向に放出する。放出された光子が光電効果を起こすと、光電子が放出される。TPC では荷電粒子の飛跡をとらえることができるため、今回のシミュレーションでは光電子の動きに焦点を当てる。

シミュレーションには Geant4 [12] というツールを用いた。まず、今回の実験で用いた TPC の幾何学的構造を再現したものを作成する。なお、封入ガスは、Ar と C₂H₆ を 9:1 の質量比で混合したものである。次に、TPC 検出領域の中心から、5keV の光子を x 軸の正の方向に 1000 発照射する。同様に、 x 軸の負の方向にも 1000 発照射する。Geant4 シミュレーションでは、光電子が発生した点の座標と、その光電子の動きが記録される。これらの情報から、2 つの光子の検出点間の距離と、光子が吸収されて発生した電子の飛程を計算することができる。図 5.2、図 5.3 はそれぞれ 2 つの光子の検出点間の距離、光電子の飛程のヒストグラムである。2 光子の検出点間の距離は 2cm 程度、光電子の飛程は 0.2mm 程度がピークとなっている。封入ガスの質量吸収係数および阻止能を考慮すると、これらの結果は妥当であるといえる。また、それぞれのヒストグラムで Entries が 1000 を下回っているのは、検出器内で反応せずに逃げていった光子が存在するためである。

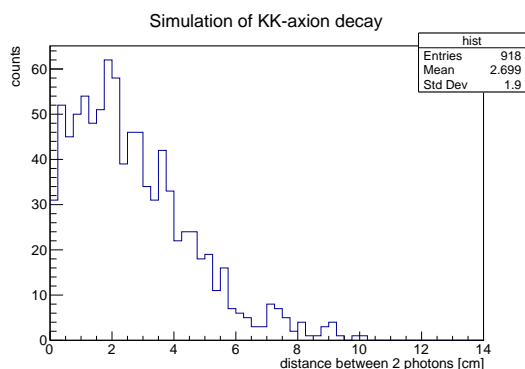


図 5.2: 2 つの光子の検出点間の距離

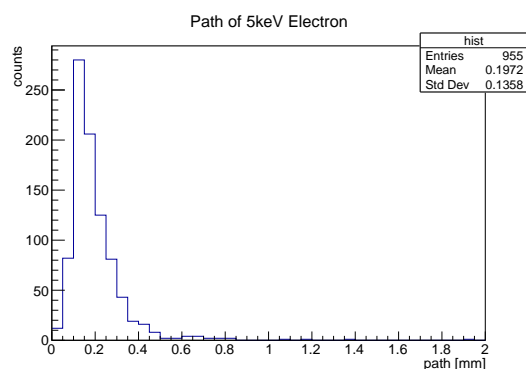


図 5.3: 光電子の飛程

以上のシミュレーションの結果から、KK-axion の崩壊事象を選別するために、以下の 3 つの条件を設定することにした。

条件 1) 検出器内で失ったエネルギーが 5keV から 15keV

条件 2) 2-Cluster 間の距離が 1cm 以上 6cm 未満

条件 3) 光電子の飛程は 1mm 以内 (ただし、実データにおいては 6mm 以内)

これらをまとめて KK-axion Criteria (以下 KC) と呼ぶことにする。条件 2 および条件 3 による信号事象の選択効率、それぞれ 68.5%、93.2% であった。図 5.4 は、KC を満たす KK-axion の崩壊事象の一例である。2-Cluster 間の距離は、3.71cm である。重なって 1 つの点に見えているが、実際には複数の点があり、光電子の飛跡となっている。図 5.4 の左側の Cluster を拡大したものが図 5.5 である。次節では、環境ガンマ線シミュレーションにより、KC を満たす BG 由来の事象数を見積もる。

Simulation of KK-axion Decay

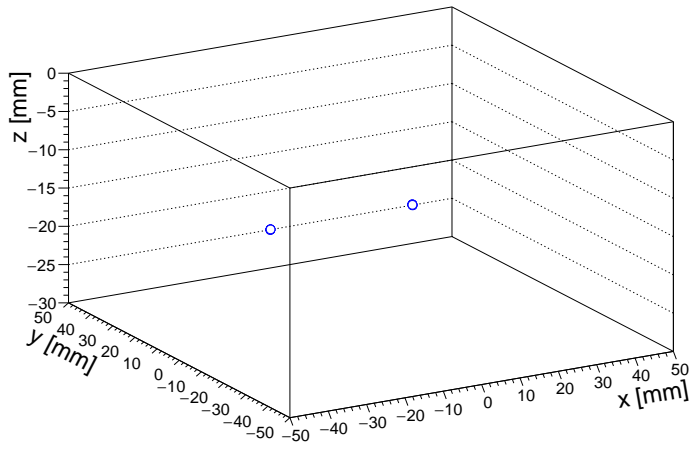


図 5.4: KK-axion の崩壊事象の 3 次元飛跡

Simulation of KK-axion Decay

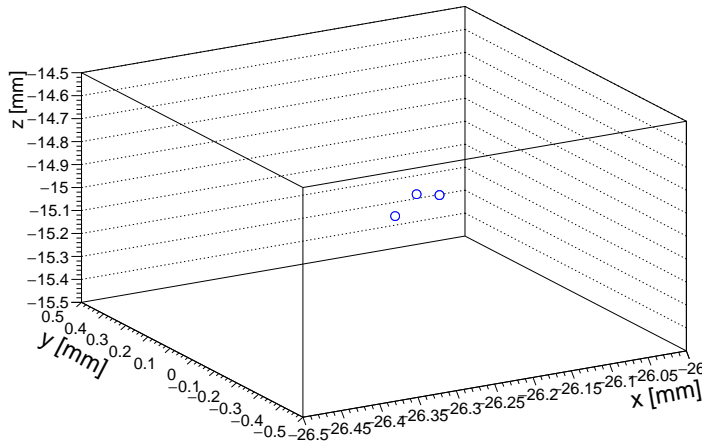


図 5.5: 図 5.4 の左側の Cluster の拡大図

5.3.2 BG 事象シミュレーション

前節では、KK-axion の崩壊事象をシミュレーションし、KC を設定した。しかし、KC を満たす事象は、KK-axion の崩壊事象のみであるとは限らない。この節では、KC を満たす BG 由来の事象がどの程度起こりうるかを評価する。

KC を満たす BG 由来の事象として、主に次の 2 つの事象が考えられる。1 つの環境ガンマ線が 2 回コンプトン散乱を起こす事象と、2 つの環境ガンマ線がそれぞれコンプトン散乱を起こす事象である。前者を Double、後者を Random と呼ぶことにする。また、Random におけるそれぞれのコンプトン散乱を Single と呼ぶことにする。図 5.6、図 5.7 はそれぞれの BG のイメージ図である。黒い枠は、TPC の検出領域を表している。

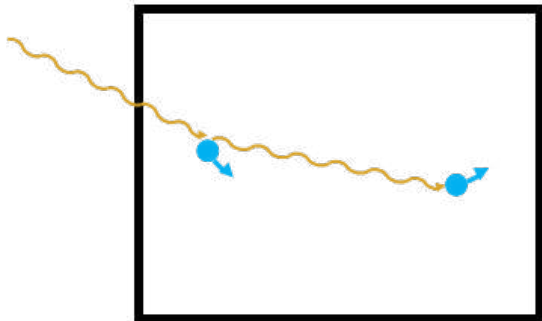


図 5.6: Double のイメージ図

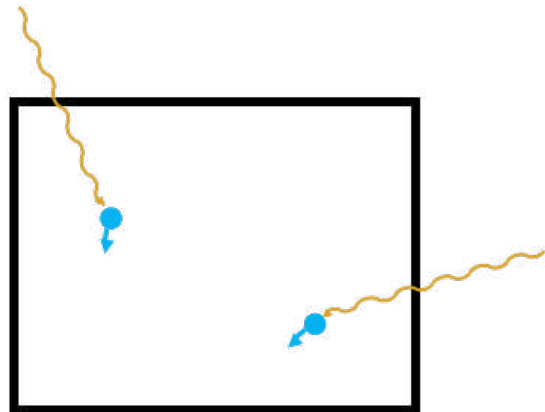


図 5.7: Random のイメージ図

これらの事象の計数率を見積もるために、環境ガンマ線シミュレーションを実施した。まず、決まったエネルギーを持つ5種類の環境ガンマ線と、連続成分を TPC に照射した。環境ガンマ線は、TPC 検出領域の中心から 20cm 離れたところから、検出領域の中心に向かって打ち込んだ。図 5.8 は、環境ガンマ線シミュレーションのようすを表したものである。次に、得られた光電子の飛跡情報をもとにして、Double および Single の条件を満たす事象数を求めた。最後に、2 章の BG 測定で得られた環境ガンマ線の Flux を用いて、Double と Random の計数率を導出した。

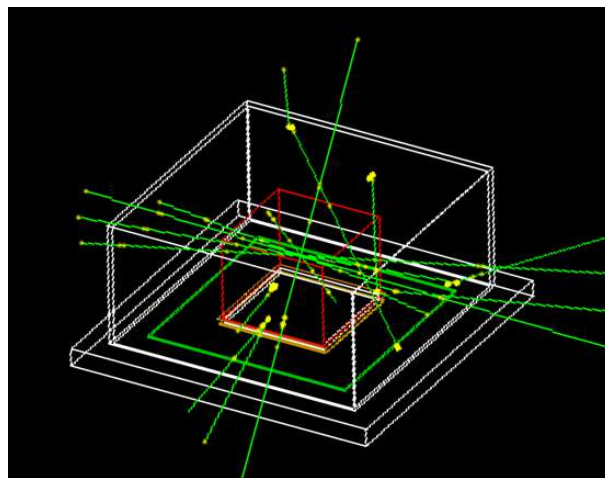


図 5.8: 環境ガンマ線シミュレーションの例

表 5.1 は、環境ガンマ線シミュレーションの結果をまとめたものである。Entries は、TPC 検出領域内で反応した数を示している。また、図 5.9 は、KC を満たす Double の 3 次元飛跡を描画したものである。エネルギー損失は 11.1keV で、2-Cluster 間の距離は 1.84cm である。

まず、表 5.1 の値を用いて、Double および Single の計数率を算出した。なお、計数率を求めるにあたり、2 章で求めた環境ガンマ線の Flux を用いた。それぞれの計数率は、表 5.2 に示している。

Random の計数率については、Single の計数率を用いて求めた。繰り返しになるが、Random とは、一定の時間幅の間に Single が 2 回起こる事象のことである。よって、Single および Random の計数率をそれぞれ

R_s 、 R_r とし、時間幅を T_{coin} とすると、 $R_r = R_s^2 T_{coin}$ で計算できる。今回は、 $T_{coin} = 2.0 \times 10^{-6}$ sec とした。これは、4章で述べられているように、電子が検出領域を 8cm ドリフトするのに要する時間である。

表 5.1: 環境ガンマ線シミュレーションの結果

環境ガンマ線源	^{214}Bi	^{228}Ac	^{40}K	^{214}Bi	^{208}Tl	連続成分
エネルギー [keV]	609.3	911	1460.8	1764.5	2614.5	—
照射数	100000	100000	1000000	100000	100000	6000000
Entries	277	412	6081	712	1061	13438
Double	0	0	0	0	0	6
Single	1	2	15	3	1	383

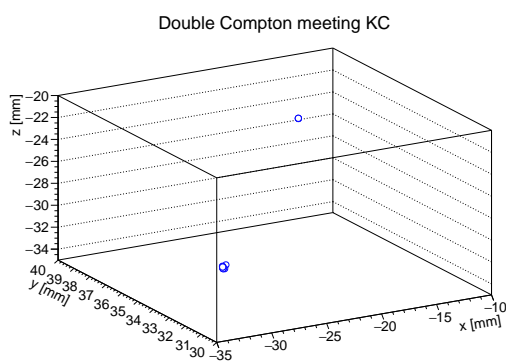


図 5.9: KC を満たす Double の 3次元飛跡

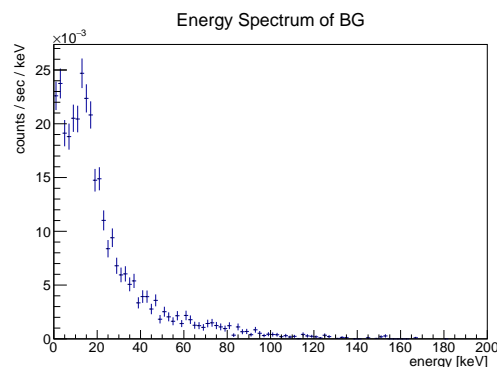


図 5.10: 環境ガンマ線シミュレーションから得られたエネルギースペクトル

表 5.2: 各 BG 事象の計数率

BG 事象	計数率 [sec^{-1}]
Double	1.9×10^{-4}
Single	1.3×10^{-4}
Random	3.6×10^{-10}

KK-axion 探索実験の Live Time は 5.3×10^4 sec であった。この値を表 5.2 の計数率にかけることで、BG 事象の計数を求めると、 (10 ± 4) 事象となった。なお、計数の誤差は、シミュレーションの統計誤差から求めた。

5.4 解析

5.4.1 Selection (事象選別)

この節では、KK-axion 探索実験で得られたデータを、前節で設定した条件にしたがって選別した。Selection を実施するにあたり、KC の 3つの条件を満たす事象を取り出すためのプログラムを作成した。なお、このプログラムではカットしきれなかった事象があったため、最後に Eye Scan(目視) によるカットを実行した。

図 5.11、図 5.12 はそれぞれ Selection を通過した事象の飛跡を xz 平面、 yz 平面に射影したものである。図 5.12 では、 xz 平面において Cluster は 1 つしか確認できない。これは、 yz 平面において確認される 2-Cluster の、 x 座標と z 座標がほぼ一致しているためであると考えられる。こうした事象も KC を満たすため、KK-axion の崩壊事象として扱うこととした。

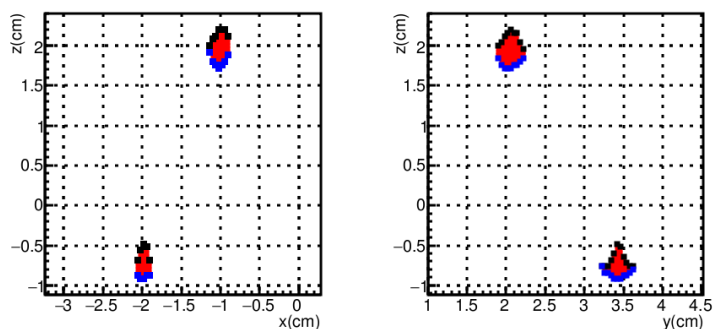


図 5.11: Selection を通過した事象の例①

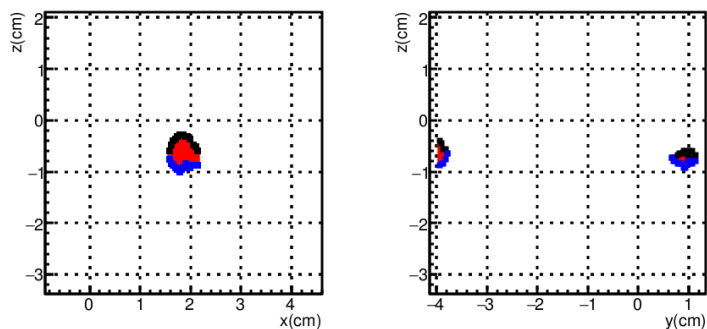


図 5.12: Selection を通過した事象の例②

一方、図 5.13 は、Eye Scan によってカットされた事象の一例である。これは、 xz 平面の $z=1(\text{cm})$ 付近に見えるはずの Cluster が見えていないため、除外している。Eye Scan による最終カットを通過したのは 17 事象であった。Selection の詳細については、表 5.3 にまとめている。

表 5.3: カットを通過した事象数

適用したカット	通過した事象数
なし	4.4×10^5
KC の条件 1	6.1×10^4
KC の条件 2,3	34
Eye Scan	17

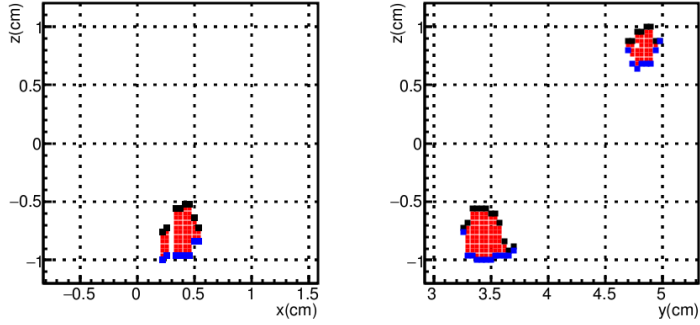


図 5.13: Eye Scan によってカットされた事象の例

5.4.2 $g_{a\gamma\gamma}$ の上限値の設定

前節で述べたように、KK-axion 探索実験で得られたデータのうち、KC を満たすものは 17 事象確認された。環境ガンマ線シミュレーションの結果を考慮すると、 (17 ± 4) 事象のうち (10 ± 4) 事象は、BG 由来の事象であると考えられる。以上から、KK-axion の崩壊の事象数を求めると、 (7 ± 6) 事象であった。

KK-axion の崩壊事象は極めて稀な事象であるため、その崩壊はポアソン分布に従うと仮定する。観測された事象が 7 事象であるとき、表 5.4 にあるように、期待値の信頼度 90% の上限値は 11.77 事象である。この値を用いて、KK-axion の崩壊率の上限値 R_{upp} を計算すると、

$$R_{upp} = \frac{11.77}{0.0008 \text{ m}^3 \times 0.612 \text{ day}} \simeq 2.4 \times 10^4 \text{ m}^{-3} \text{ day}^{-1} \quad (5.1)$$

と求められる。これを

$$R = (2.5 \times 10^{11} \text{ m}^{-3} \text{ day}^{-1}) \left(\frac{g_{a\gamma\gamma}}{\text{GeV}^{-1}} \right)^2 \left(\frac{n_a}{\text{m}^{-3}} \right) \quad (5.2)$$

に代入すると、任意の KK-axion の数密度 n_a に対する、KK-axion と光子の結合定数 $g_{a\gamma\gamma}$ の上限値を設定することができる。図 5.14 は、 $g_{a\gamma\gamma}$ の制限曲線をまとめて描画したものである。凡例にもあるように、図 5.14 の赤色の線は本研究による制限曲線である。以下に典型的な値を示しておく。

$$g_{a\gamma\gamma} < 4.9 \times 10^{-11} \text{ GeV}^{-1}, \quad \text{where } n_a = 4.0 \times 10^{13} \text{ m}^{-3} \quad (5.3)$$

図 5.14 の青色の線、緑色の線はそれぞれ先行研究である XMASS 実験 [15]、NEWS-G 実験 [16] における制限曲線である。また、図 5.14 中に、理論から予測される $g_{a\gamma\gamma}$ の値を紫色の点で示している。

このモデルに到達するためには、TPC の有効体積と測定時間を増やすことが必須である。それと同時に、BG の低減化を進めていく必要がある。具体的な策としては、TPC の周囲に鉛のシールドを設置し、環境ガンマ線を遮蔽することや、検出器内のガスを低圧にし、環境ガンマ線と反応しにくくすることが挙げられる。

表 5.4: ポアソン分布の期待値

事象数	下限値	上限値
0	—	2.30
1	0.105	3.89
2	0.532	5.32
3	1.10	6.68
4	1.74	7.99
5	2.43	9.27
6	3.15	10.53
7	3.89	11.77
8	4.66	12.99
9	5.43	14.21

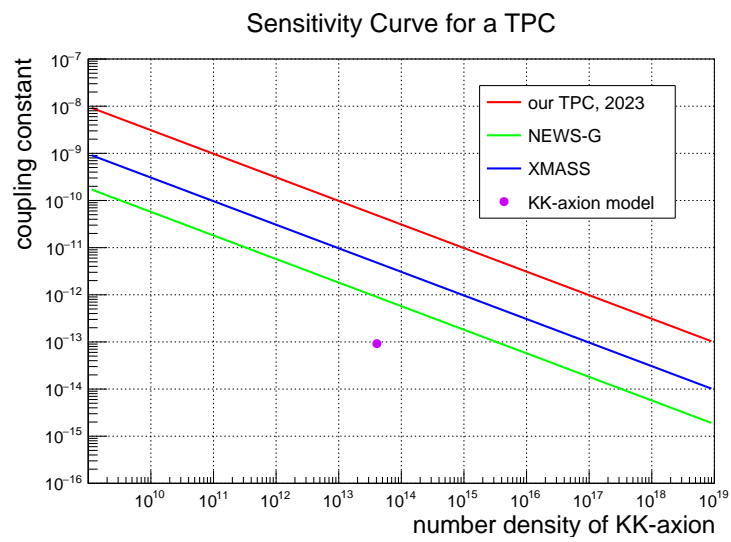


図 5.14: 本研究で得られた $g_{a\gamma\gamma}$ の制限曲線

6 結論

本研究では、ガス検出器を用いて KK-axion の崩壊事象をとらえることを目指した。そのための準備段階として、初めに NaI シンチレータを用いた環境ガンマ線測定を実施した。また、Geant4 を用いて環境ガンマ線と NaI の相互作用をシミュレーションすることで、環境ガンマ線の Flux が得られた。

次に、基礎実験として、ガス検出器のガスゲイン測定を実施した。これにより、GEM および μ -PIC におけるガスゲインが、印加電圧に対して指数関数的に増加していくことが確かめられた。また、本研究のターゲットである 10keV 付近のエネルギーを観測するために必要な印加電圧を調べることができた。

探索実験では、まず宇宙線ミューオンを用いてエネルギー較正を実施した。10keV 程度のエネルギーが観測できることを確認した後、KK-axion の探索実験に取り組み、得られたデータを解析した。まず、環境ガンマ線の Flux を用いて、KK-axion Criteria を満たす BG 由来の事象数をシミュレーションにより見積もった。次に、ガス検出器の飛跡情報を用いて、KC を満たす事象の数を求めた。これらの結果から、KK-axion と光子の結合定数 $g_{a\gamma\gamma}$ の上限値を設定することができた。及第点ではあるものの、測定時間を増やすことや、BG の低減化など、改善の余地は多く残った。

謝辞

本研究の遂行にあたり、多くの方々にご指導いただきました。ここに感謝の意を表したいと思います。

指導教員である身内賢太郎准教授には、実験が思い通りに進まないとき、幾度となく適切なお助力をいただきました。研究員の東野聡氏には、ガス検出器の理論からデータ取得システム、さらにはデータの解析手法について、基本的なところから丁寧にご指導いただきました。また、昨年ガス検出器を用いた研究をされていた生井凌太氏にも、解析プログラムについてご助言をいただきました。

最後に、我々の卒業研究に力を貸してくださったすべての方々へ御礼申し上げます。

ありがとうございました。

参考文献

- [1] A simple solution to the strong CP problem with a harmless axion
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0370269381905906>
- [2] On Possible Suppression of the Axion Hadron Interactions.
<https://inspirehep.net/literature/157263>
- [3] Weak-Interaction Singlet and Strong CP Invariance
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.43.103>
- [4] Can confinement ensure natural CP invariance of strong interactions?
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0550321380902096>
- [5] NASA/Jenny Mottar
<https://www.nasa.gov/image-article/anatomy-of-sun/>
- [6] Nanoflares and the Solar X-Ray Corona
<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1988ApJ...330..474P/abstract>
- [7] Solar coronal heating by Alfvén waves in bi-kappa distributed plasma
<https://academic.oup.com/mnras/article/491/2/2403/5651188>
- [8] Observational evidence for gravitationally trapped massive axion(-like) particles
<https://arxiv.org/abs/astro-ph/0207073>
- [9] Search for solar Kaluza-Klein axions in theories of low-scale quantum gravity
<https://arxiv.org/abs/hep-ph/0006327>
- [10] TikZ-Feynman: Feynman diagrams with TikZ
<https://arxiv.org/abs/1601.05437>
- [11] Solar axions in large extra dimensions
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1475-7516/2021/10/048>
- [12] Geant4
<https://geant4.web.cern.ch>
- [13] μ -PIC 模式図
<https://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/laboratory/micro/index.html>
- [14] muon の MPV 値
<https://arxiv.org/pdf/2205.06745.pdf>
- [15] Search for solar Kaluza-Klein axions by annual modulation with the XMASS-I detector
<https://academic.oup.com/ptep/article/2017/10/103C01/4582918>
- [16] Solar Kaluza-Klein axion search with NEWS-G
<https://arxiv.org/abs/2109.03562>