

2009年卒業論文

MicroMEGASの動作ガスの研究

神戸大学理学部物理学科 素粒子物理研究室
ATLASグループ
岡村 航

2009年3月13日

概要

2008年9月10日、スイスのジュネーブ郊外にある欧州原子核共同研究機構(CERN)にて、大型陽子陽子衝突加速器LHC(Large Hadron Collider)が稼働を開始した。LHC加速器は周長27kmのビームトンネル、8.4Tの超電導磁石を用いることで世界最高衝突エネルギー14TeVを実現し、ルミノシティは最高で $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ に達する。ATLAS実験はTeVエネルギー領域における素粒子物理の探る実験である。さらにこのLHCはアップグレードの予定があり、その際にはルミノシティは $10^{35}\text{cm}^{-2}\text{sec}^{-1}$ まで到達する予定であり、現在の検出器では高頻度入射粒子に対応できないため、さらに高頻度入射粒子にも耐えられる検出器の開発が必要になる。そこで、アップグレード後のSLHC(Super LHC)においてATLAS検出器・前方EndcapMuon検出器の1つとしてMicroMEGAS(MicroMESH Gaseous Structure)が採用候補として挙げられている。今回の実験では、MicroMEGASでMIP(Minimum Ionization Particle)粒子検出に必要な 10^4 以上の増幅率が得られるかを測定し、また動作ガスとしてArとCF₄をベースにしたガスにC₂H₆(エタン)を加えたものを用い、これらのガスの混合比による動作特性を調べた。

目次

第1章	LHC から SLHC へ	3
第2章	ガス検出器	6
2.1	粒子線の検出	6
2.1.1	荷電粒子の検出	6
2.1.2	光子の検出	7
2.2	ガス増幅	9
第3章	MicroMEGAS	10
3.1	MicroMEGAS について	10
3.2	MicroMEGAS の動作原理	10
3.3	MicroMEGAS の利点と問題点	11
第4章	実験のセットアップ	12
4.1	実験で用いた MicroMEGAS	12
4.2	データの流れ	13
4.3	サチレーション	14
4.4	線源 ^{55}Fe について	14
4.5	ガスについて	15
第5章	実験結果	16
5.1	ADC を用いた波高観測	16
5.2	波高分布とそのピーク	17
5.3	データ収集システムのキャリブレーション	18
5.4	増幅率	19
5.5	様々なガス比での比較	22
5.5.1	Ar の比率 (=90 %) を一定として C_2H_6 と CF_4 の比率を変えたガスを用いた実験	22
5.5.2	CF_4 の比率 (=10 %) を一定として Ar と C_2H_6 の比率を変えたガスを用いた実験	22
第6章	考察	23
第7章	まとめと今後の課題	26
7.1	まとめ	26
7.2	今後の課題	26
第8章	謝辞	27

目 次

1.1	LHC 加速器 [1]	3
1.2	ATLAS 検出器 [1]	4
2.1	Bethe-Bloch の式によるエネルギー損失 [2]	7
2.2	Pb に対する光子の吸収係数 [3]	7
2.3	1 次電子の陽極ワイヤー付近での雪崩増幅の様子 [4]	9
3.1	MicroMEGAS の概略図	10
3.2	MicroMEGAS の構造と増幅過程の様子 [7]	11
3.3	MicroMEGAS における電場の様子 [9]	11
4.1	使用した MicroMEGAS	12
4.2	data の流れの概念図	13
4.3	オシロスコープでの信号の様子	13
5.1	オシロスコープでの波形	16
5.2	波高分布	17
5.3	アンプ増幅前の電荷量と ADC 値の較正直線	18
5.4	波高分布	19
5.5	Ar:C ₂ H ₆ =90:10 ガスのゲインカーブ	21
5.6	Ar:C ₂ H ₆ :CF ₄ =90:x:10-x ガスのゲインカーブ	22
5.7	Ar:C ₂ H ₆ :CF ₄ =90-x:x:10 ガスのゲインカーブ	22
6.1	ガスごとの最大増幅率の変化	23
6.2	ガスごとの最大増幅率の変化	24

第1章 LHC から SLHC へ

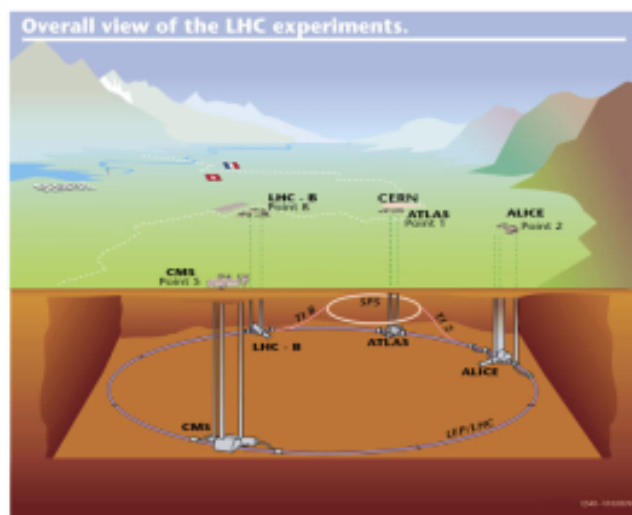


図 1.1: LHC 加速器 [1]

Large Hadron Collider(LHC) は、スイスのジュネーブ郊外にある欧州素粒子原子核研究機構 (CERN) において建設中の陽子・陽子衝突型の円形加速器である。2000年に終了した大型電子・陽電子衝突型加速器 LEP(Large Electron Positron Collider) で使用されたトンネル内に設置される。2008年9月に稼働が開始され、2009年の実験開始を目指している。LHCの主要パラメータを表 1.1 に示す。

主リング周長	26,658.87m	バンチ間隔	24.95nsec
入射エネルギー	450GeV	バンチ内陽子数	1.1×10^{11} 個
陽子エネルギー	7TeV	バンチの長さ (陽子)	77mm
High Luminosity(7年)	$10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$	衝突点でのビームの半径	$15.9 \mu\text{m}$
Low Luminosity(3年)	$10^{33} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$	ビーム衝突角度	$300 \mu\text{rad}$
Luminosity life	10 時間		

表 1.1: LHC 加速器のパラメータ [1]

陽子の質量は電子の質量のおよそ 2000 倍も大きいので、加速される時に円軌道の接続方向に放出されるシンクロトロン放射によるエネルギー損失、

$$\Delta E[\text{MeV}/\text{turn}] = \frac{4\pi\alpha\hbar c\beta^3\gamma^4}{3R} \propto \frac{1}{m^4} \quad (1.1)$$

は非常に少ない。そのため、LHC は LEP よりも遥かに到達エネルギーを高くでき、7TeV まで加速した陽子同士の正面衝突を起こし、重心系で 14TeV の世界最高エネルギーを実現する。ル

ミノシティは最大で $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ に達し、TeV 領域の物理の開拓を可能にしている。しかしその反面、陽子衝突は散乱断面積が大きく、その構成物質であるクォークやグルーオン同士の散乱によってジェット等のバックグラウンドが非常に多く生成される。その中から興味ある事象を選別することは難しい。このため、LHC に設置されている検出器は入射粒子数が高頻度な環境に耐え、研究目的の物理事象の選別ができることが要請される。図 1.1 から分かるように LHC のビーム衝突点は 4カ所あり、それぞれの地点に測定器を設置する。4 つの検出器は、大型汎用測定器である ATLAS(A Toroidal LHC ApparatuS) 検出器、ATLAS 検出器と同じ汎用測定器である CMS(Compact Muon Solenoid) 測定器、B 中間子の研究に特化した LHC-B 測定器、重イオン衝突実験用の Alice(A Large Ion Collider Experiment) 測定器である。

ATLAS 検出器は、直径 22m、長さ 44m の円筒形で、総重量はおよそ 7000t になる汎用検出器である。

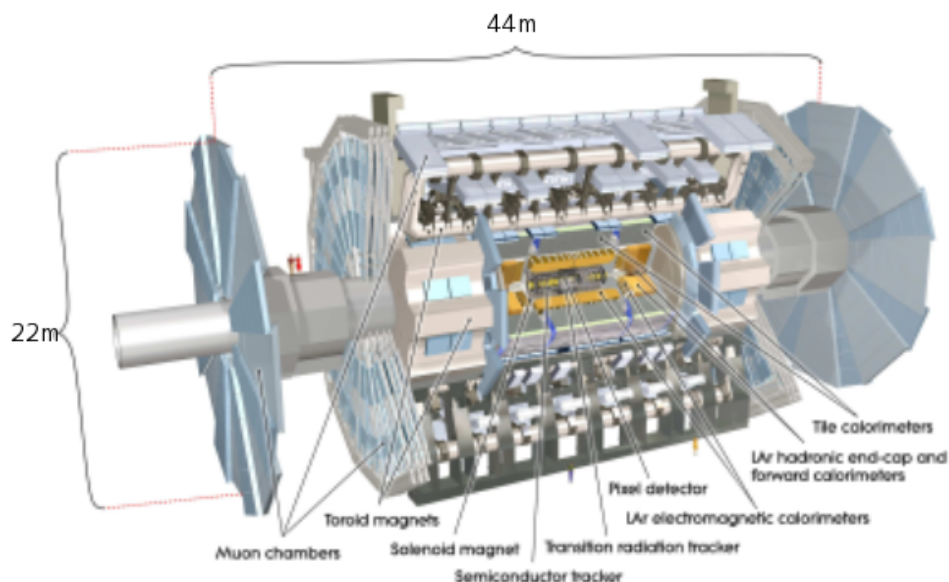


図 1.2: ATLAS 検出器 [1]

構成は各粒子の透過性の差異により、衝突点に近い方から内部飛跡検出器、電磁カロリメータ、ハドロンカロリメータ、 μ 粒子検出器と設置され、検出器の間には超電導磁石が設置される。

ATLAS 検出器には、LHC さらには SLHC の高いミノシティ環境に対応できる高速な応答と高い放射線耐性、内部飛跡検出器による荷電粒子の精密な運動量測定、全方位角と広範囲な擬ラピディティの測定有感領域、電磁カロリメータによる電子や光子のエネルギーと位置の高精度測定、及びハドロンカロリメータによる高精度なジェットと消失横方向エネルギー (E_T) の測定、 μ 粒子検出器による高精度な μ 粒子の運動量測定、高頻度のイベントを正確に処理するシステムなどが要求される。

ATLAS 検出器における座標系は、ビーム軸を z 軸にとり、これに垂直な方向を r 方向、ビーム軸回りを周回する方向に ϕ 方向をとった円筒座標系を採用する。また衝突点から引いた線とビーム軸のなす角度を θ とし、擬ラピディティを $\eta = -\ln(\tan(\theta/2))$ と定義する。

円筒形の ATLAS 検出器は、円筒の筒に相当する ($|\eta| < 1$) 領域をバレル、円筒の底面の円の中心(ビーム)付近より外側 ($1 < |\eta| < 1.9$) 領域をエンドキャップ、円の中心付近 ($|\eta| > 1.9$) 領域をフォワードと呼ぶ。

上述のように LHC のルミノシティは最大で $10^{34} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ であるが、将来的に $10^{35} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ まで到達させようという SLHC 計画が現在進められている。ATLAS 実験の目的は、標準理論の基本粒子であり唯一未発見である Higgs 粒子の探索、超対称性 (SUSY) 粒子の探索、トップクォークの物理、B 中間子での CP 非保存の研究など多岐に渡る。ルミノシティが高いほど Higgs 粒子の発見される崩壊モードも増え、多くのバックグラウンドの中から Higgs 粒子を発見する正確性も向上し、さらに同じ統計量を溜めるために要する時間が短縮されることが分かっている。したがって、このルミノシティの増大は、衝突型加速器実験において重要な目標課題となる。そのアップグレードにともない、検出器もさらなる高頻度な信号処理が要求される。LHC のアップグレード後 (SLHC)、MicroMEGAS は ATLAS 検出器の μ 粒子検出器として、 η の小さな領域、つまり前方 Endcap に配置しようとする提案が出されている。現在の ATLAS には、この前方 Endcap Muon 検出器に TGC (Thin Gap Chamber) がインストールされている。ビームパイプから近いこともあり、生成粒子の入射頻度は $100 \sim 1000 \text{Hz/cm}^2$ といわれ、この高頻度な信号を正確に処理する能力が要求される。そこで、高頻度に耐えられる MicroMEGAS が候補に挙がっている。

第2章 ガス検出器

2.1 粒子線の検出

ガス検出器において、測定しようとする高エネルギー粒子に関する位置やエネルギー、運動量などの情報は検出器内部の物質と起こる相互作用から得られる物理量を元に計算できる。ここでは荷電粒子と光子がそれぞれ物質との間での相互作用について述べる。

2.1.1 荷電粒子の検出

荷電粒子が物質中を通過すると、荷電粒子は物質の分子と相互作用する。そのため分子内の電子はより高いエネルギー準位に励起、または電離する。荷電粒子は電子に与えた分だけエネルギーを失う。この相互作用で、励起電子またはイオン対が作られる。イオン対は再結合により中性原子にもどる傾向を持っているが、再結合を抑制しイオン対を収集することが検出器の応答の基本である。

ガス中で荷電粒子が単位長さあたりに失うエネルギー（エネルギー損失）は

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 z^2}{m_0 v^2} NB \quad (2.1)$$

ここで、

$$B \equiv Z \left[\ln \frac{2m_0 v^2}{I} - \ln \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) - \frac{v^2}{c^2} \right] \quad (2.2)$$

とし、また v 、 ze 、 N 、 Z 、 m_0 、 e はそれぞれ、1 次粒子の速度および電荷、単位時間あたりの物質中の電子の個数、物質原子の原子番号、電子の静止質量および電荷である。

式 2.1 は「Bethe-Bloch の式」と呼ばれる。図 2.1 は Bethe-Bloch のエネルギー損失を入射粒子である μ 粒子の速度の関数で表わしたグラフである。これによると、あるエネルギーで最小値を持つことがわかる。つまりこの最小値付近のエネルギー帯の粒子は物質をよく透過するということである。言い換えれば、粒子検出では物質との相互作用を利用しているため、このエネルギー帯の粒子による出力は小さい。このような粒子を MIP (Minimum Ionization Particle) という。LHC または SLHC で検出したい粒子は GeV オーダーである MIP である。MIP は物質との相互作用しにくいいため、電離する電子あるいは生成されるイオン対の数が少ない。そのため、電子を増幅させて大きな信号に変換して検出する必要がある。MIP 検出器として要求される増幅率は 10^4 といわれている。

LHC や SLHC での Muon 検出に関して、高エネルギー Muon が重要な物理過程に関わっているため、Muon の検出には高い増幅率が必要である。

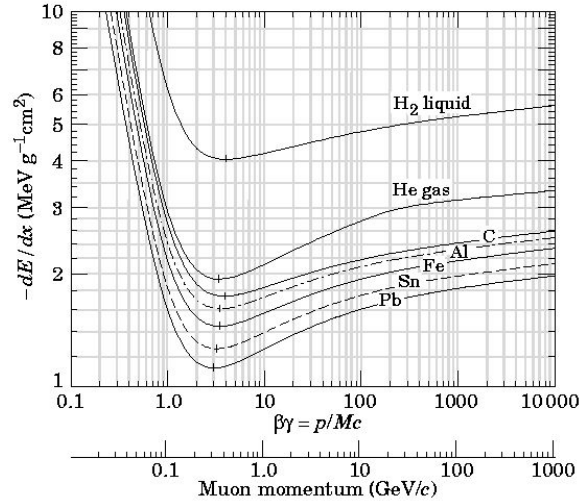


図 2.1: Bethe-Bloch の式によるエネルギー損失 [2]

2.1.2 光子の検出

光子と物質との相互作用は主に、光電効果、コンプトン効果、電子対生成がある。どの作用により光子が相互作用するかは、光子のエネルギーに大きく関係している。

光電効果はコンプトン効果、電子対生成に比べて比較的エネルギーが低い領域で、たとえば Pb では 500keV 以下で優勢である。それより大きくなるとコンプトン効果、1.022MeV を超えると電子対生成が優勢になる。

γ 線の強度は物質中では $e^{-\tau x}$ で減少する。これは光電効果、コンプトン効果、電子対生成が物質中で起こると γ 線が吸収されるからである。吸収係数 τ は $\tau = \tau_{\text{photon}} + \tau_{\text{comp}} + \tau_{\text{pair}}$ となり、Pb ではこれらの τ は図 2.2 のようになる。

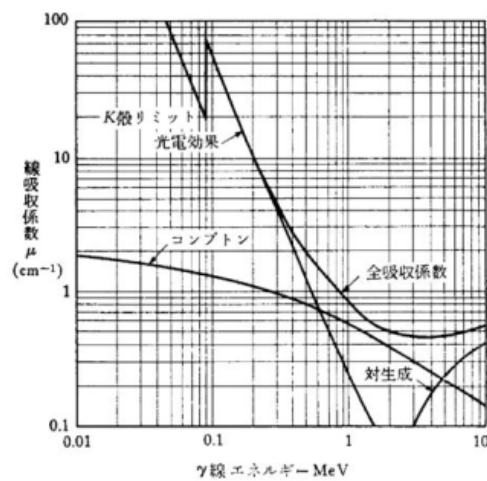


図 2.2: Pb に対する光子の吸収係数 [3]

・光電効果

エネルギー $h\nu$ の光子が原子に吸収されて光電子を放出する現象で、光電子は原子中での束縛エネルギー B_e だけ小さくなったエネルギー

$$E = h\nu - B_e \quad (2.3)$$

を持っている。

束縛エネルギーは、外側の殻ほど小さくなるが、光電効果の起こる確立は、束縛エネルギーが大きいほど、高くなる。したがって、一番内側の K 殻の束縛エネルギーより大きいエネルギーを持つ光子については、K 殻の電子が最も大きな寄与を持っていて、その K 殻電子との断面積は $Z^4 \sim Z^5$ に比例する。

つまり、 Z に大きく依存するということが、光電効果を行わせるには Z の大きな物質が有効になるので、 γ 線検出には十分考慮すべき点である。

今回の実験では 5.9keV という小さいエネルギーの X 線を用いたので、反応は光電効果が主で、他の作用はほぼ考えられない。

・コンプトン効果

光子と自由電子との散乱現象である。

入射光子、散乱光子および反跳電子のエネルギーをそれぞれ $h\nu$ 、 $h\nu'$ 、 E 、散乱光子および反跳電子の放出角をそれぞれ θ 、 ϕ とすれば、運動量保存則とエネルギー保存則から以下の式が成立する。

$$h\nu' = \frac{h\nu}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2}(1 - \cos \theta)} \quad (2.4)$$

$$E = h\nu - h\nu' = h\nu \frac{\frac{h\nu}{m_e c^2}(1 - \cos \theta)}{1 + \frac{h\nu}{m_e c^2}(1 - \cos \theta)} \quad (2.5)$$

コンプトン効果の断面積は、 Z に比例する。

・電子対生成

光子が電子と陽電子の対に転換される反応である。この反応は保存則により真空中では禁止されるが、物質中では原子核のクーロン場のおかげで可能となり、光子のエネルギーが $2m_e c^2 = 1.022\text{MeV}$ を超えるときに起こりうる。生成された電子と陽電子のエネルギーをそれぞれ E_- 、 E_+ とすると、

$$E_- + E_+ = h\nu - 2m_e c^2 \quad (2.6)$$

となる。

対生成の断面積は、 Z^2 に比例する。

荷電粒子や X 線、 γ 線がガス中を通過する時に、上記の入射粒子線とガス分子との相互作用によってガス分子が電離する事を利用した形式の放射線検出器は古くから利用され、現在でも多く利用されている。MicroMEGAS もこれに属する。

2.2 ガス増幅

入射粒子線はガス分子との電離作用により電子とイオン対のペアを生成する(1次電離)。ガス中の電場を大きくすると、自由電子は加速され大きな運動量を持つ。電子の運動エネルギーがガス分子の電離エネルギーより大きい場合、ガス分子に衝突するとガス分子を電離させ、イオン対が生成される(2次電離)。

2次電離で生成した電子も電場によって加速されるため、ガス分子に衝突するとさらに電離を起こし連鎖的に続いていく。この過程はタウンゼント型電子雪崩(Townsend avalanche)と呼ばれる。

単位長さあたりに電子の数が増加する割合は式(1.7)で表わされ、 α はガスに対する第1タウンゼント定数(first Townsend coefficient)と言われている。

$$\frac{dn}{n} = \alpha dx \quad (2.7)$$

また、

$$n = n_0 e^{\alpha x} \quad (2.8)$$

となる。ここで n_0 は1次電離により生成した電子の個数である。

図2.3に比例計数管やその応用であるMWPCなどのワイヤーチェンバーでの陽極ワイヤー近傍の雪崩増幅の様子を示す。1次電子が印加電圧によって加速されて、次々と2次電子を生成する。

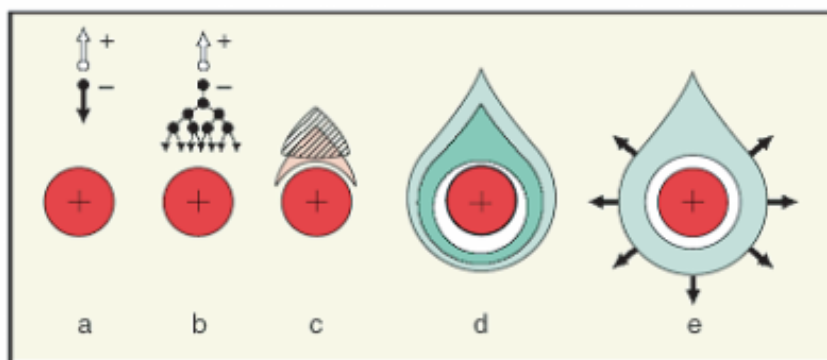


図 2.3: 1次電子の陽極ワイヤー付近での雪崩増幅の様子 [4]

第3章 MicroMEGAS

3.1 MicroMEGAS について

MicroMEGAS は、フランスの Y.Giomataris 氏 (Saclay 研究所)[5] が 1996 年に開発したもので、高頻度粒子線検出器である。DCP(Drift Cathode Plane)、MicroMesh、Anode Plane の 3 つの平行極板構造のガスフロー型検出器であり、MicroMesh を読み出し電極である Anode Plane と $50\mu\text{m}$ 程度のギャップで保持させることによりガス増幅に必要な高電場を形成する装置である。非常に高頻度な信号にも対応できるため SLHC の ATLAS・前方 Endcap Muon 検出器の採用候補にもなっている。

MicroMEGAS は CERN での COMPASS 実験 [6] に採用されており、すでに安定動作に成功している。ここでは $40\times 40\text{cm}^2$ に 30MHz のミュオン信号を処理し、360 の micro strip で $70\mu\text{m}$ の位置分解能を持つ。その他の実験にも採用されており、また採用候補にあがっている。

日本国内では、宮崎大学 [7]、佐賀大学 [8] などでも開発が行われている。

図 3.1 に MicroMEGAS の概略図を示す。

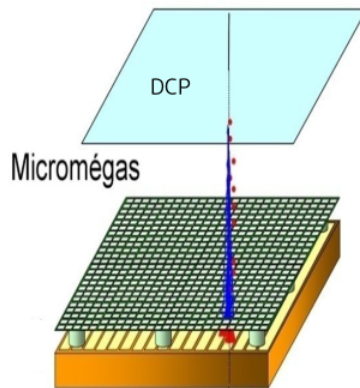


図 3.1: MicroMEGAS の概略図

3.2 MicroMEGAS の動作原理

図 3.2 に MicroMEGAS の構造と増幅過程、図 3.3 に電場の様子を示す。

Conversion gap(アノード・メッシュ間)での電場、Amplification gap(メッシュ・DCP間)での電場をそれぞれ E_{drift} 、 E_{amp} と定義し、 $E_{drift} \gg E_{amp}$ となるように DCP とメッシュにそれぞれマイナスの電圧を印加する。電場はいずれも上向きなので、生成された電子は下方へ、陽イオンは上方へ引きよせられる。メッシュは絶縁体の小さなスペーサーで支えられることにより、Amplification gap は非常に狭い空間となり、大きな電場を持たせられる。

入射粒子が Conversion gap にてガスをイオン化し、電子が生成されると、その電子はメッシュまでドリフトし、メッシュを通過後 Amplification gap にて電子雪崩(ガス増幅)を起こす。その際に生成された電子はアノードへ、陽イオンはメッシュに引きよせられ、その信号を読み取る。一般に信号はアノードから読み出されることが多いが、今回はアノード板を GND にしているため、メッシュから(正の)信号を読み出す。

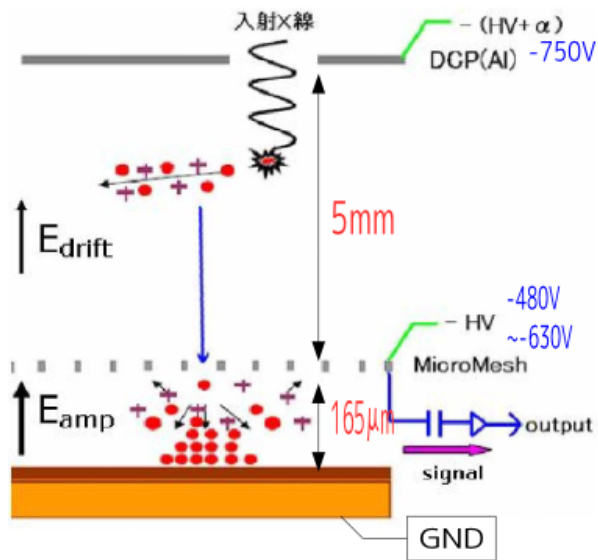


図 3.2: MicroMEGAS の構造と増幅過程の様子 [7]

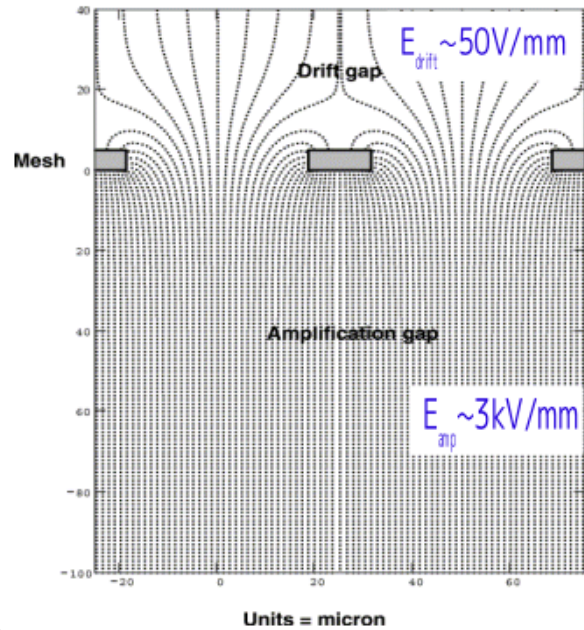


図 3.3: MicroMEGAS における電場の様子 [9]

3.3 MicroMEGAS の利点と問題点

MicroMEGAS には利点と問題点がいくつかある。

利点

- 信号形成過程において位置分解能を悪くするような余分な要素がないので、よい位置分解能が得られる。
- Amplification gap が非常に狭いので、不感時間が短くすると共に、低電圧で高電場を作り出せる。
- 構造が簡単なので製作が容易にできる。
- プリント基板技術を使用しているためいろいろな電極パターンが簡単に作成できコスト削減になる。

問題点

- 高電場が連続しているので、放電の成長を抑えるメカニズムに乏しく、大きなもので安定して動作させるのが難しい。

第4章 実験のセットアップ

4.1 実験で用いた MicroMEGAS

図 4.1 に今回使用した MicroMEGAS を示す。

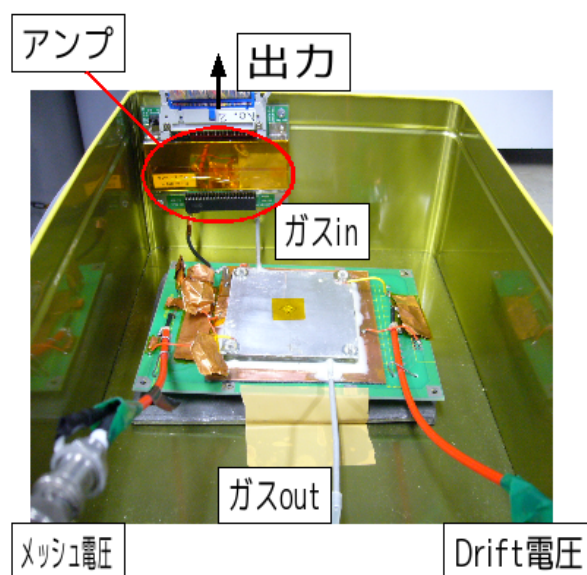


図 4.1: 使用した MicroMEGAS

今回使用したアンプは ASD と呼ばれ、KEK の佐々木修准教授が開発したものである。ATLAS 検出器の TGC に取り付けられるアンプとして採用されている。

- ・ DCP・メッシュ間 (Conversion gap) 距離 = 5mm
- ・ アノード・メッシュ間 (Amplification gap) 距離=165 μ m

に固定し、

- ・ DCP には 750V、
- ・ メッシュには 480V ~ 630V

負の電荷をそれぞれ印加する。

線源として ^{55}Fe を使用する。これは 5.9keV の X 線を放出する。ガスには希ガスに Ar、疑似パルスの原因となる紫外線を吸収するクエンチャーガスに C_2H_6 、 CF_4 を用いた。今回はこれらのガスの混合比を変えて、MicroMEGAS の動作特性を調べた。

4.2 データの流れ

MicroMEGAS からの信号の読み出しについて説明する。今回使用した MicroMEGAS はピクセル等に分割されていないため、信号の読み出しは1つである。

図 4.2 にデータの流れの概念図を示す。

MicroMEGAS からの信号はアンプを通し増幅された後、出力される。アンプから出力された信号は同じ大きさの2つの信号に分かれる。1つの信号はまず Discriminator へと送られる。この Discriminator はある一定の値(しきい値)を超えた信号がきた時だけ1つの矩形波を出力するようになっているので、ここでしきい値以下のノイズを除去することができる。この矩形波は次に Gate generator へと送られここで幅と波高を変え ADC に送られ、読み取りのためのゲートが作成される。この信号がトリガー信号となる。もう1つの信号はトリガー信号とタイミングを合わせるため、10m のケーブルで Delay をかけた後に、Attenuator へ送られる。Attenuator は ADC がサチュレーションした場合に信号の大きさを減衰させる装置である。その後、ADC に送られる。この信号が実際に計測する信号である。図 4.3 にオシロスコープで観測した信号の様子を示す。青線がトリガー信号で、紫線が Delay をかけた実際に計測する信号である。ADC(Analog to Digital Converter) はアナログ信号である電荷量をデジタル信号である ADC 値に変換するものである。ADC で観測された値は PC へと送られ記録される仕組みになっている。計測するイベントの数は任意に設定することができる。

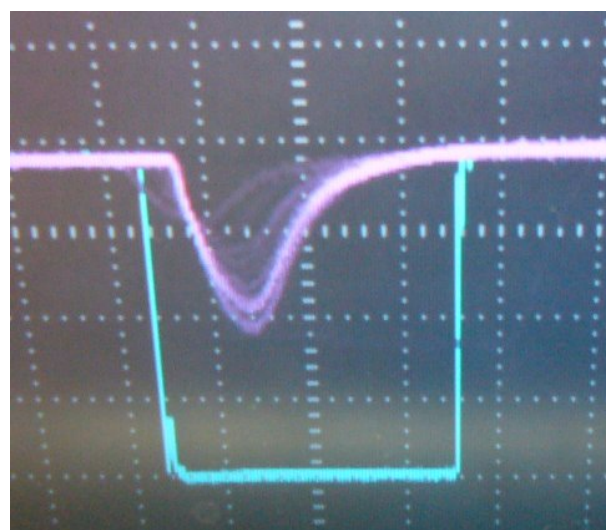
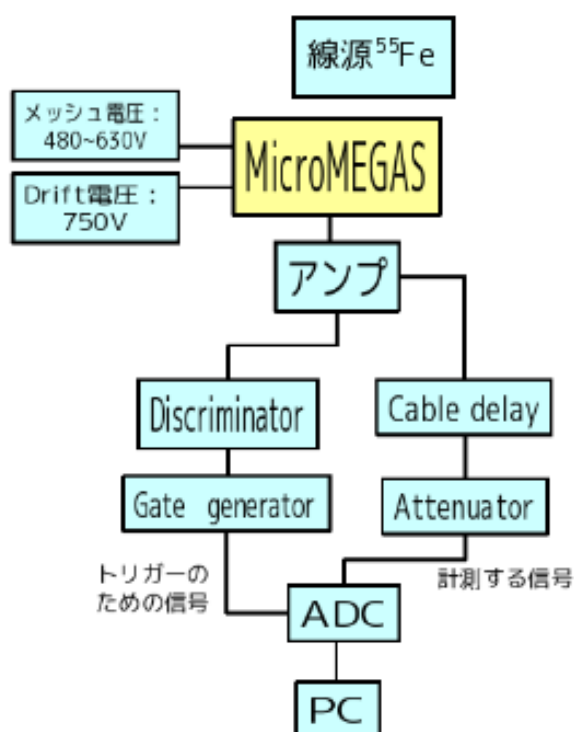


図 4.3: オシロスコープでの信号の様子

図 4.2: data の流れの概念図

4.3 サチレーション

ADCにもアンプにもそれぞれ出力できる値に限界がある。これを超えてしまうことをサチレーションという。

ADCがサチレーションした場合、信号をアテネーター (Attenuator) というものを通してADCに入れてやればよい。このアテネーターというのは単純に信号を $\frac{1}{2}$ 、 $\frac{1}{4}$ にしてくれる装置である。単位はdb(デシベル)で、1db($\frac{1}{1.21}$ 倍)、2db($\frac{1}{1.26}$ 倍)、4db($\frac{1}{1.59}$)、8db($\frac{1}{2.51}$ 倍)...のようにいくつかのスイッチがついている。これでADCのサチレーションを防ぐことができる。今回の実験ではアテネーターを通さない場合 (0db) と 8db の 2通りを使用した。

アンプがサチレーションするということはアンプに入力される電荷量が大きすぎることである。なので単純にアンプに入る前に信号を分割してやればよい。本来、MicroMEGASの1ch(チャンネル)につきアンプ1chが対応しているが、これを5chに分割する。そうすることでアンプの1chに入力される電荷量は $\frac{1}{5}$ となる。これでアンプのサチレーションを防ぐことができる。

4.4 線源 ^{55}Fe について

今回の実験では放射線源として ^{55}Fe を使用した。これは鉄の安定同位体 (^{56}Fe) より中性子が1つ少ない鉄の放射性同位体で逆 β 崩壊により ^{55}Mn になる。



このとき主にK殻から電子が奪われるので、外側の殻から電子が遷移するときに5.9keVのX線(Mn-K輝線)が放出する。

LHCまたはSLHCではMIPを検出できなければならないが、このMIPが数mmのAr(密度:1.78[kg/m³]、W値:26[eV/イオン対])を通過した時に生成される電子の数は「Bethe-Blochの式」(式1.1)より、約100個程度である。そして ^{55}Fe は5.9keVのX線を出し、そのエネルギー全てがイオン化に使われると考えると約200個の電子が生成されることになり、エネルギーデポジットが似ている。つまり、ガス検出器において ^{55}Fe での振る舞いが、MIPの振る舞いとほぼ同じとみなすことができる。

4.5 ガスについて

ガス増幅は移動速度がずっと遅いイオンよりも自由電子の移動に決定的に左右されるので、充填ガスとしては大きな電気陰性度を示さない種類のガスを選ばなければならない。また多原子分子では入射 X 線のエネルギーが分子の回転エネルギーに使われるため充填ガスは単原子であり、常温で気体である希ガスを選ぶ。また原子番号 Z が大きな物質ほど断面積が大きいことから、希ガスの中でも Ar や Xe が選ばれることが多い。

ガス増幅は電子と中性ガス分子の衝突で作られた 2 次電離に基づいている。この衝突は電離の他に単にガス分子を励起させるだけで、2 次電子を生成しないこともある。この励起分子はガス増幅に寄与せず、可視光あるいは紫外線を放出してその基底状態にもどる。このような光子は増幅率の比例性を失わせたり、疑似パルスを作ったりするので好ましくない。充填ガスに C_2H_6 や CF_4 のような多原子ガスを少量添加することにより、それが光子を吸収してそれ以上電離を起こさなくなり、この光子による効果を抑制することができる。この多原子ガスをクエンチャーという。今回使用したガスは希ガスに Ar、クエンチャーに C_2H_6 、 CF_4 を採用した。

炭化水素である C_2H_6 をクエンチャーとして用いることにはいくつかの問題点がある。

- 中性子バックグラウンドの問題

実際に ATLAS 検出器の Muon 検出器に MicroMEGAS が採用された時、ATLAS では数 kHz/cm² の中性子バックグラウンドにさらされる。クエンチャーに炭化水素を用いると、バックグラウンドとして検出器内に入射する中性子が炭化水素内の水素原子の陽子と衝突する際、陽子は中性子と質量がほぼ同じなのでぐらいの大きなエネルギートランスファーが起こる。その陽子は検出器内に大きなエネルギーを落とすので、大きな信号や放電を生み出す。よって検出したい MIP である μ 粒子ではなく中性子を誤って検出してしまう可能性がある。

- 放電による煤 (すす) の発生の問題

放電により炭化水素が煤 (すす) になり、それがアノードの上に降り積もってくといずれメッシュに到達する。このことで電極間が通電する可能性がある。

クエンチャーに CF_4 を用いることでこれらの問題による影響を少なくできる。今回の実験ではまず Ar: C_2H_6 =90:10 のガスを用いて増幅率を調べ、次に Ar: C_2H_6 : CF_4 の比率を変えたガスを用いて増幅率を調べ、最適なガスを調べる。

第5章 実験結果

5.1 ADC を用いた波高観測

図 5.1 に実際にオシロスコープで観測された波形を示す。(メッシュからの出力であるので正の信号として見えている。)ここで分かるように、波形というのは電圧と時間の関係式として出てくる。ADC 内では波形をゲートで定められた区間で時間積分している。

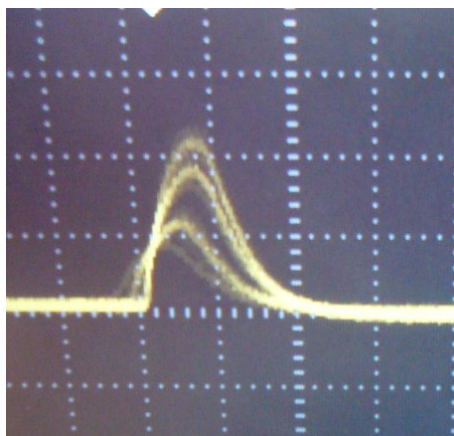


図 5.1: オシロスコープでの波形

横軸:時間 (/200nm)、縦軸:電圧 (/50mV)

まず

$$V = IR \qquad I = \frac{dQ}{dt}$$

より

$$V = R \frac{dQ}{dt}$$

両辺を時間で積分して

$$\int V dt = RQ$$

よって

$$Q = \frac{1}{R} \int V dt$$

となり、ADC の測定によって波高から電荷量が与えられる。そして 0.125[pC] を 1[Count] として出力するようになっている。今回の実験では、各測定点ごとに 10000 個のパルスによる波高分布を計測した。

5.2 波高分布とそのピーク

図 5.2 に ADC から出力された信号 (ADC 値) のヒストグラム (波高分布) を示す。ここでのガスは Ar:C₂H₆=90:10 であり、メッシュ電圧が 530V の信号である。図を見て分かるようにメインのピーク (光電ピーク) とエスケープピークがある。

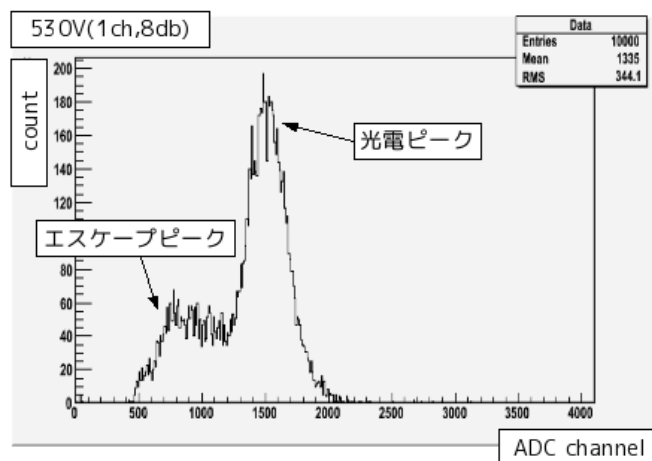


図 5.2: 波高分布

2つのピークがそれぞれ何を示しているのかを説明する。実際にガス室内では起こる反応というのは、5.9keVのX線がAr原子内に入射されると光電効果が起こり、K殻軌道電子の1つが原子外へ放出される。この放出された光電子のエネルギーは(2.3)式で求められるので、

$$E = h\nu - B_e = 5.90 - 3.20 = 2.70\text{keV}$$

となる。次の段階は、オージェ効果と特性X線放出の2つのケースがある。

・オージェ効果

内殻に空孔がある場合、空孔のある殻よりも外側の電子が遷移して空孔を埋める。その遷移によって得られたエネルギーは静電相互作用により他の電子に与えられ、その電子は原子から放出される現象をオージェ効果という。今回は、K殻に空孔があり、それを埋めるためにL殻から電子が遷移し、M殻の電子が原子から放出される。今度はL殻にできた空孔を埋めるためにM殻の電子が遷移し、同様にオージェ電子が放出される。これらのオージェ電子のエネルギーの合計は、放出した光電子のエネルギー分だけ小さくなった⁵⁵FeのX線のエネルギーに等しいので、

$$5.90 - 2.70 = 3.20\text{keV}$$

となる。

原子から放出されたオージェ電子は、光電子と同じようにAr原子と反応し、電子を増幅させる。そのため、検出されるエネルギーは、光電子とオージェ電子の運動エネルギーを足し合わせたもので、

$$2.70 + 3.20 = 5.90\text{keV}$$

すなわち入射してきたX線のエネルギーに等しいものになり、光電ピークを形成する。

・特性 X 線放出

K 殻にある空孔を埋めるために、最外殻の電子が遷移する。そのとき、オージェ効果と異なるが、得られたエネルギーが他の電子に与えられることなく、特性 X 線 (KX 線) として放出されることがある。この KX 線は Ar 原子には吸収されずに外に逃げる。これより光電効果によって出てきた光電子のエネルギー分である 2.7keV がエスケープピークを形成する。

これらが起こる割合はオージェ効果が 85 % で、特性 X 線放出が 15 % である。このように出てきた電子は Ar 原子を電離させて全エネルギーを失う。

5.3 データ収集システムのキャリブレーション

アンプに電流が流れ込んだ後、ADC でデータを収集するまで多くの装置を経由している。これらの装置や Delay のための長ケーブルによる波形の減衰などの影響を考慮するために、アンプ増幅前の電荷量と ADC 値の Linearity を調べる。

パルスジェネレーターを使って、数百 V の一定電圧の矩形波を 1pF のコンデンサーを介することで数 pC の電荷を作り出す。 $Q = CV$ より矩形波の電圧に対応する電荷が分かる。その信号をアンプを通して、実際に用いる装置を使って ADC 値を測定する。これにより電荷と ADC 値との較正直線が得られる。図 5.3 にアンプ増幅前の電荷量と ADC 値の較正直線を示す。

このグラフの方程式は

$$y = 16143x + 6 \quad \Rightarrow \quad x = \frac{y - 6}{16143} \text{ [pC]} \quad (5.1)$$

であり、ここで x はアンプへの入力電荷量で、 y は ADC 値である。この較正直線はアンプへの接続が 1ch、アテネーターが 0db の時の較正直線であり、1ch 8db、5ch 8db の時の較正直線も同様にして求める。結果だけ記すと、

$$1\text{ch } 8\text{db の場合} : y = 6484x + 10 \quad (5.2)$$

$$5\text{ch } 8\text{db の場合} : y = 1357x + 18 \quad (5.3)$$

となる。

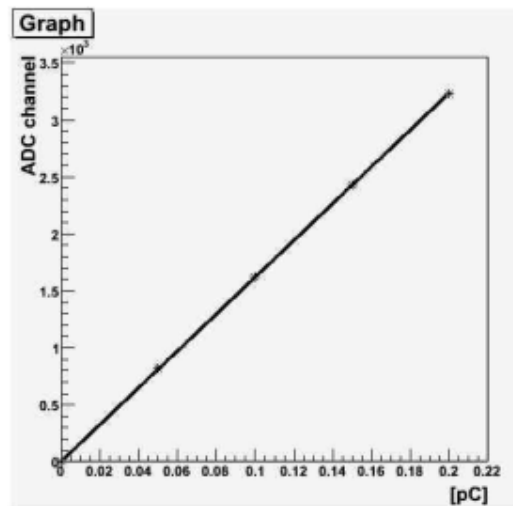


図 5.3: アンプ増幅前の電荷量と ADC 値の較正直線

5.4 増幅率

増幅率を求めるためには、ガス増幅前の電荷量と増幅後の電荷量が分かればよい。

$$(\text{増幅前の電荷量}) \times (\text{増幅率 } G) = (\text{増幅後の電荷量})$$

$$\rightarrow (\text{増幅率 } G) = \frac{(\text{増幅後の電荷量})}{(\text{増幅前の電荷量})} \quad (5.4)$$

まず増幅前の電荷量を求める。 ^{55}Fe の光電ピークのエネルギー 5.9keV と Ar の W 値が 26[eV/イオン対] であることから、増幅前の電子の個数は、

$$5.9 \times 10^3 \div 26 \sim 227 \text{ 個}$$

である。よって ^{55}Fe によって生成される電子の総電荷は、

$$1.60 \times 10^{-19} \times 227 = 3.63 \times 10^{-5} \text{ pC}$$

となる。

次に増幅後の電荷量を求める。ある任意のメッシュ電圧において、ADC のデータを取り、ヒストグラムにする。その得られたヒストグラムの光電ピークにガウスフィットをかけ、ADCmean 値を求める。図 5.4 に得られた波高分布の光電ピークにガウスフィットをかけたものを示す。この mean 値が光電ピーク (5.9keV のピーク) 値と定める。この作業を動作電圧範囲内で 10V おきに行った。これらの ADC 値を (5.1) 式のような較正直線を用いて増幅後の電荷量を求める。

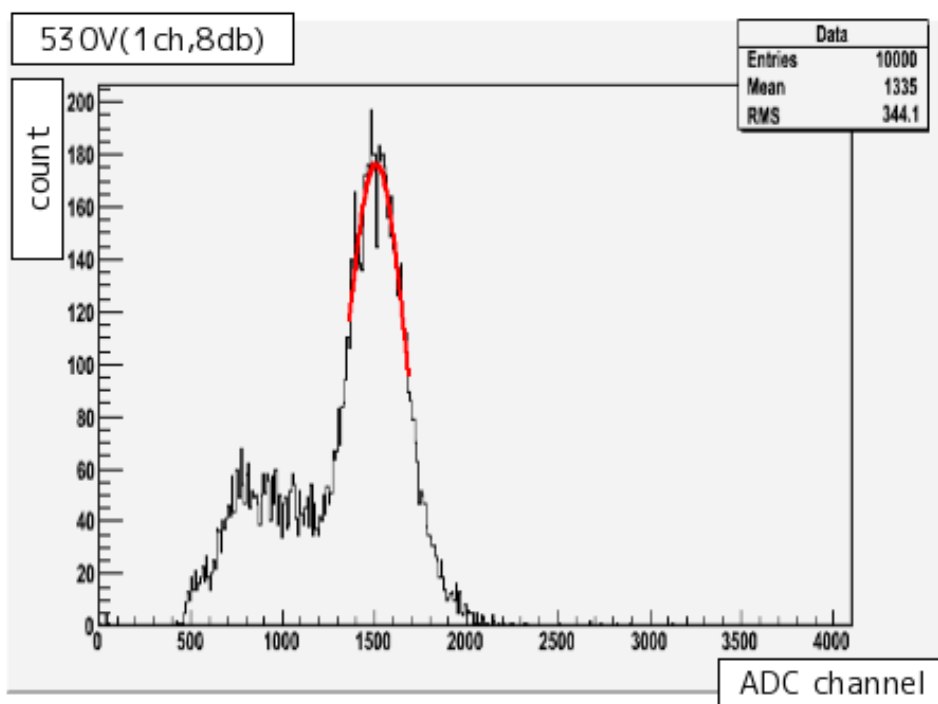


図 5.4: 波高分布

図 5.4 は Ar:C₂H₆=90:10 のガスを用いて、メッシュ電圧 530V、アンプへの接続が 1ch、アテネーターを 8db とした結果である。光電ピークの mean 値は 1484 であるので、(5.2) 式を用いると、増幅後の電荷量は、

$$\frac{1484 - 10}{6484} = 2.27 \times 10^{-3} \text{pC}$$

である。これと増幅前の電荷量が $3.63 \times 10^{-5} \text{pC}$ であるので (5.4) 式を用いると、増幅率 G は、

$$\begin{aligned} (\text{増幅率 } G) &= \frac{2.27 \times 10^{-3}}{3.63 \times 10^{-5}} \\ &= 6.26 \times 10^3 \end{aligned}$$

となる。Ar:C₂H₆=90:10 のガスでメッシュ電圧の動作電圧範囲 (-500V ~ -600V) での増幅率の結果を表 5.1 に示す。

メッシュ電圧 [V]	増幅率 G
-500	2.34×10^3
-510	3.24×10^3
-520	4.58×10^3
-530	6.26×10^3
-540	8.74×10^3
-550	1.10×10^4
-560	1.56×10^4
-570	2.18×10^4
-580	2.91×10^4
-590	4.13×10^4
-600	5.57×10^4

表 5.1: メッシュ電圧に対する増幅率

表 5.1 を見て分かるように、このガス (Ar:C₂H₆=90:10) での最大増幅率はメッシュ電圧が -600V の時の 5.57×10^4 である。ただし、メッシュ電圧が -600V 以上では放電が生じてしまい正しく実験を行うことができなかった。

図 5.5 に表 5.1 を元に増幅率をプロットしたもの示す。横軸がメッシュ電圧、縦軸が増幅率 G を \ln スケールにしたものである。

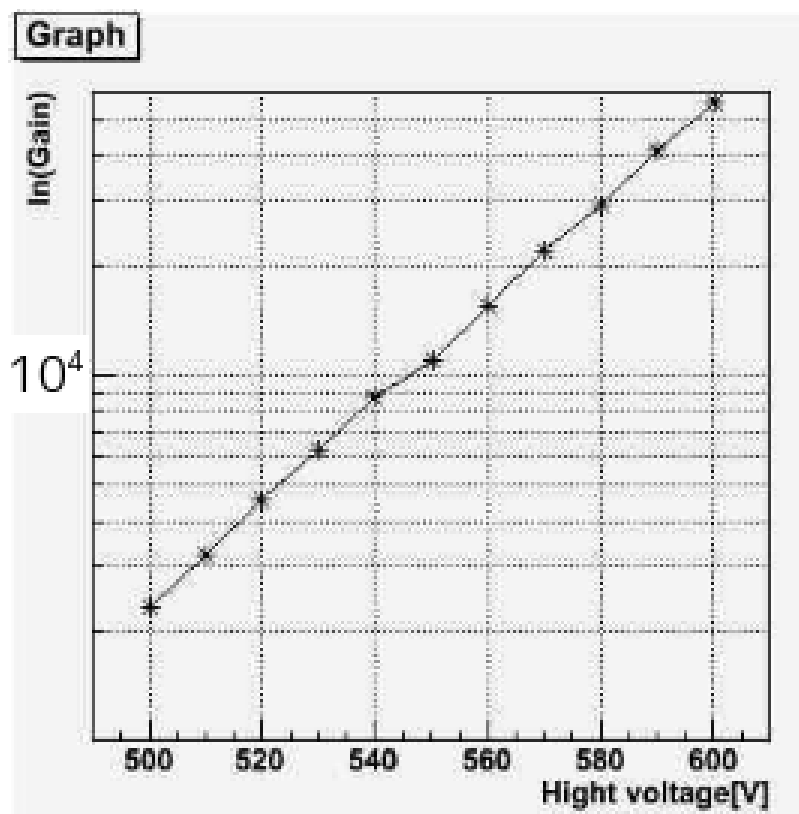


図 5.5: Ar:C₂H₆=90:10 ガスのゲインカーブ

図 5.5 を見ると、1 次関数でフィットできるように見える。これより比例計数領域であるとわかる。比例計数領域とは増幅後の電子数が一次電子数に比例している領域である。このことは波高分布で光電ピークとエスケープピークに違いがあることから分かる。

これらの結果より、Ar:C₂H₆=90:10 ガスでは MIP 検出の条件である増幅率 $G > 10^4$ を満たしている。よって増幅率の観点から見ればこのガスで MicroMEGAS は SLHC に適応できると言える。しかし、ガス中に C₂H₆ が 10 % も入っているので炭化水素をクエンチャーとして用いた時の問題はまだ残っている。そこで今回の実験ではクエンチャーとして C₂H₆ の代わりに CF₄ を用いる実験を行った。Ar の比率 (=90 %) を一定として C₂H₆ と CF₄ の比率を変える実験と CF₄ の比率 (=10 %) を一定として Ar と C₂H₆ の比率を変える実験の 2 つの実験を行った。

ガスの比率はガスクロマトグラフィによって精度よく測定される。

5.5 様々なガス比での比較

5.5.1 Arの比率(=90%)を一定としてC₂H₆とCF₄の比率を変えたガスを用いた実験

まず Ar の比率 (=90%) を一定として C₂H₆ と CF₄ の比率を C₂H₆:CF₄=10:0、8:2、5:5、2:8、1:9、0:10 と変化させていった。図 5.6 にそれぞれのガスでのゲインカーブを示す。

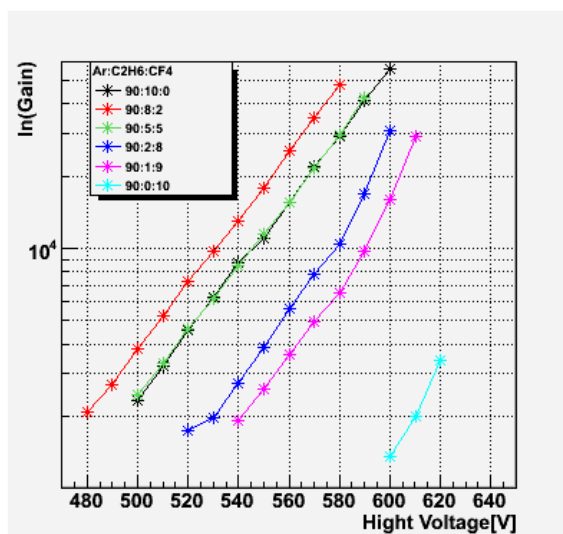


図 5.6: Ar:C₂H₆:CF₄=90:x:10-x ガスのゲインカーブ

5.5.2 CF₄の比率(=10%)を一定としてArとC₂H₆の比率を変えたガスを用いた実験

次に CF₄ の比率 (=10%) を一定として Ar と C₂H₆ の比率を Ar:C₂H₆=90:0、89.5:0.5、89:1、87:3、85:5、82:8 と変化させていった。図 5.7 にそれぞれのガスでのゲインカーブを示す。

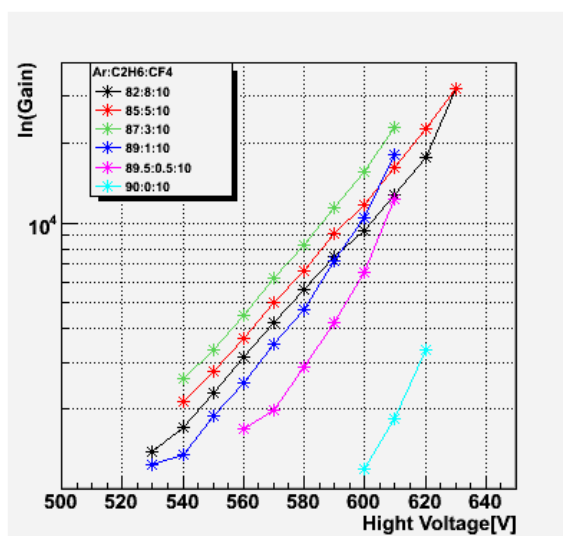


図 5.7: Ar:C₂H₆:CF₄=90-x:x:10 ガスのゲインカーブ

最大動作電圧以上の電圧を印加すると放電が生じてしまい正しく実験を行うことができなかった。

第6章 考察

表 6.1 に Ar の比率 (=90 %) を一定として C₂H₆ と CF₄ の比率を変えたガスを用いた実験でのそれぞれのガスの最大動作電圧と最大増幅率を示す。

Ar:C ₂ H ₆ :CF ₄	最大動作電圧 [V]	最大増幅率
90:10:0	-600	5.57×10^4
90:8:2	-580	4.77×10^4
90:5:5	-590	4.24×10^4
90:2:8	-600	3.09×10^4
90:1:9	-610	2.92×10^4
90:0:10	-620	3.43×10^3

表 6.1: ガスごとの最大動作電圧と最大増幅率

図 6.1 にそれぞれのガスでの最大増幅率をプロットしたものを示す。

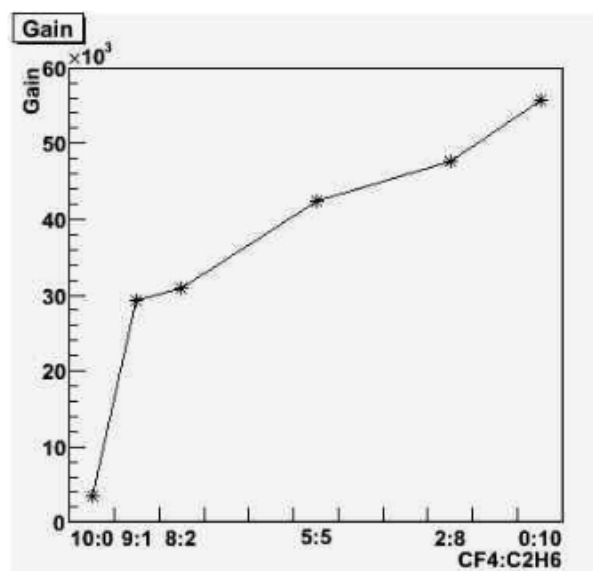


図 6.1: ガスごとの最大増幅率の変化

図 5.6 と図 6.1 を見ると、CF₄ のみをクエンチャーとして用いたガスより C₂H₆ を少量加えたガスの方が動作電圧範囲が広くなり、増幅率も非常に大きくなっていることが分かる。

表 6.2 に CF_4 の比率 (=10 %) を一定として Ar と C_2H_6 の比率を変えたガスを用いた実験でのそれぞれのガスの最大動作範囲と最大増幅率を示す。

Ar: C_2H_6 : CF_4	最大動作電圧 [V]	最大増幅率
82:8:10	-630	3.17×10^4
85:5:10	-630	3.24×10^4
87:3:10	-610	2.29×10^4
89:1:10	-610	1.80×10^4
89.5:0.5:10	-610	1.23×10^4
90:0:10	-620	3.34×10^3

表 6.2: ガスごとの最大動作電圧と最大増幅率

図 6.2 にそれぞれのガスでの最大増幅率をプロットしたものを示す。

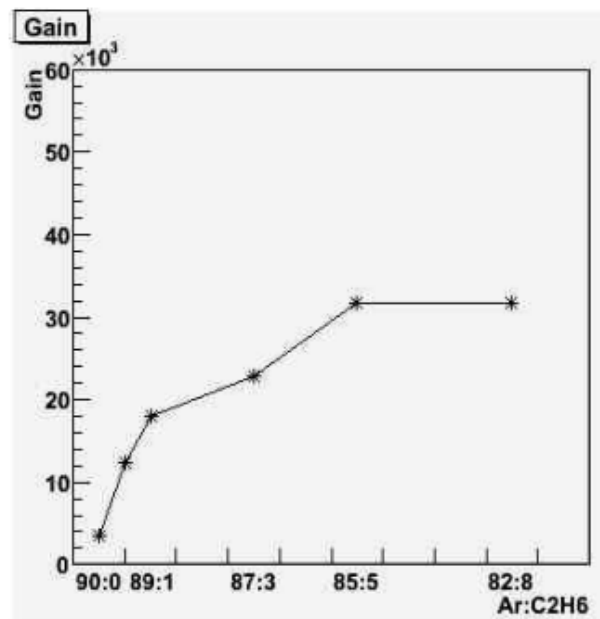


図 6.2: ガスごとの最大増幅率の変化

図 5.6 と図 6.2 を見ると CF_4 のみをクエンチャーとして用いたガスより C_2H_6 を少量加えたガスの方が動作電圧範囲が広くなり、増幅率も非常に大きくなるのが分かる。

2つの実験からクエンチャーに CF_4 のみを用いたガスでは動作電圧範囲も狭く、最大増幅率も小さい。しかし、 C_2H_6 を少量加えただけで動作電圧も広がり、最大増幅率も非常に大きくなるのが分かる。この理由の考察としては、ガス増幅を起こす領域は狭く高電場であるので2次電離は1次電離の時とは違い Ar だけではなく C_2H_6 や CF_4 もガス増幅に参与する。 C_2H_6 のイオン化エネルギーは CF_4 より低いイオン化しやすいので、 C_2H_6 はメッシュ電圧が低く Amplification gap の電場が小さい場合でもよくイオン化する。このため少量の C_2H_6 を加えただけでメッシュ電圧が低いところで動作電圧範囲が広くなり、増幅後の電子の数も多くなるので増幅率も高いものになる。しかし、図 5.6 をみると Ar: C_2H_6 : CF_4 =90:10:0 ガスを用いた場合より少量 CF_4 を加えた Ar: C_2H_6 : CF_4 =90:8:2 ガスの方が動作電圧範囲が低い領域にあることがわかる。この理由の考察としては、 CF_4 の方が C_2H_6 より反応断面積が大きいので、反応断面積の観点から見ると CF_4 の方

が C_2H_6 より電離しやすい。イオン化エネルギーと反応断面積、これらの兼ね合いから以上の実験のデータがでていいると考えられる。

第7章 まとめと今後の課題

7.1 まとめ

今回の実験では、LHCからのアップグレードであるSLHCのATLAS検出器・前方EndcapMuon検出器の採用候補であるMicroMEGASの動作ガスとしてArとCF₄をベースにしたガスにC₂H₆を加えたものを用い、これらのガスの混合比による動作特性を測定した。その結果クエンチャーとしてCF₄のみのガスでは動作電圧範囲が狭く、高い増幅率を得ることができなかったが、そのガスに少量のC₂H₆をクエンチャーとして加えるだけで動作電圧範囲が広くなり、MIP検出の条件である増幅率 $G > 10^4$ を満たす高い増幅率を得られた。数%のC₂H₆を加えるだけで高い増幅率が得られるので炭化水素をクエンチャーとして用いることで生じる問題の影響を非常に少なくできる。以上より、ArとCF₄をベースと下ガスに少量のC₂H₆(1%~2%)を加えたガスで十分にMIP検出に対応でき、適当である。

7.2 今後の課題

今後行うべきいくつかの課題がある。

高い増幅率を得るためにはメッシュに高い電圧をかける必要がある。しかし、放電が生じるため動作電圧が限られている。できるだけメッシュに高電圧を印加できるように、ガスの種類を変えて実験してみる必要がある。クエンチャーにイソブタンやジメチルエーテルを用いると高い増幅率が出るという他の実験からの報告がある。

また大型コライダー実験の検出器として実用するにあたって、どれだけの高頻度な信号を処理することができるかを検証する必要がある。SLHCの前方Endcap部分における信号の頻度は $100 \sim 1000[\text{Hz}/\text{cm}^2]$ といわれており、このような高頻度な信号処理に対応できなければならない。また実験ではMIP検出の条件を満たす十分に高い増幅率を得られたが、高増幅率での長時間の動作検証を行う必要もある。例として現状の $\mu\text{-pic}$ では 1.6×10^4 の増幅率を達成しているものの、長時間の安定動作を要請すると、 6×10^3 程度まで落ちることが確認されている。MicroMEGASでも同様のことが考えられる。SLHCに使用するためには最低でも数ヶ月または数年の時間耐久性が求められる。また配置位置は散乱角の小さな領域であるため、多量の放射能に耐えられる構造でなければならない。さらに大型化の必要もある。TGCは畳ほどの大きさであるが、その大きさと今回用いたMicroMEGASの大きさを考えると、画期的な大きさの改良が求められる。

第8章 謝辞

本実験を進めるにあたり、丁寧なご指導、助言をくださった指導教官の越智敦彦助教に深く感謝いたします。

ATLAS グループの川越清以教授、蔵重久弥准教授、山崎祐司准教授は物理全般、及び本研究において様々な助言、指導して頂き深く感謝しております。

また、本実験を行う上でスペースを共有した、高山嘉幸氏、田辺晃氏、宮崎一樹氏には多大な迷惑をかけた事をお詫びすると共に、協力して頂き深く感謝します。特に同期の宮崎一樹氏の協力によって、楽しく、そしてスムーズに実験を進める事ができ、深く感謝しています。また ATLAS グループの同期である吹田航一氏、谷和俊氏、徳永香氏の三人の協力や助力によって研究をスムーズに進めることができ、深く感謝しています。特に吹田航一氏とは研究以外にも大学生活で互いに助け合うことができ、私の大学生活をすごく有意義なものにすることができました。さらに解析にあたって C++ 言語や Unix 環境に不慣れな私に丁寧に助言してくださった岡田省吾氏、楠本彬氏はじめ、粒子物理研究室の皆様に深く感謝いたします。

参考文献

- [1] ATLAS HP 「<http://atlasexperiment.org/>」
- [2] Geant4-education HP 「<http://g4education.kek.jp/pages/viewpage.action?pageId=1605905>」
- [3] 三浦功、他: 「放射線計測」 裳華房、1960
- [4] G.Charpak: 「FiletáParticules」 Découverte、1972
- [5] Y.Giomataris: 「MICROMEAS:a high-granularity position-sensitive gaseous detector for high particle-flux environments」 CEA/DSM/DAPNIA/SED-C.E.-Saclay、1996
- [6] CERN HP: 「<http://wwwcompass.cern.ch>」
- [7] 池本尚之: 「宮崎大学における MicroMEGAS の開発」 宮崎大学、2006
- [8] 佐賀大学高エネルギー研究室 HP 「<http://yebisu.phys.saga-u.ac.jp/>」
- [9] Y.Giomataris: 「MICROMEAS:results and prospects」 CEA/Saclay
- [10] 岡村淳一: 「SLHC に向けた高頻度粒子線検出器 MicroMEGAS の試作」 神戸大学、2008
- [11] 桂華智裕: 「Micro Pixel Chamber(μ -pic) の安定性向上と高増幅率化に向けた研究」 神戸大学、2007
- [12] 道前武: 「メッシュ付き μ -pic の動作検証」 神戸大学、2007
- [13] 堀卓也: 「アトラス実験レベル1 ミューオントリガーのシミュレーションによる性能評価」 神戸大学、2008
- [14] 川村広和: 「比例計数管の製作と性能評価」 立教大学、2006
- [15] 杉本晃: 「最近の TPC ~ LC-TPC の現場から ~ 」 佐賀大学、2007