

2025 年度卒業研究  
ガス TPC とタンデム加速器を用いた  
陽子のエネルギー損失測定

神戸大学理学部物理学科 粒子物理学研究室  
奥 佑樹・佐村 航星・豊福 晟生・西川 麗

2026 年 3 月 6 日

## 目次

1	理論	3
1.1	原理	3
2	基礎実験 (担当：奥)	11
2.1	基礎実験の原理	12
2.2	セットアップ	13
2.3	実験結果	15
2.4	まとめ	18
3	Tandem 加速器における実験 (担当：豊福)	19
3.1	ビーム	19
3.2	チェンバー	20
3.3	データ取得	22
3.4	ビーム試験	23
3.5	実験状況のモニター	24
3.6	飛跡再構成	26
4	結果	29
5	Geant4 シミュレーション	34
5.1	シミュレーション条件	34
5.2	シミュレーション結果	35
5.3	比較とブラッグカーブ	37
6	考察	41
6.1	装置のアライメントの問題	41
6.2	膜の薄さについて	41
6.3	ガスゲインについて	42
7	結論	43
	謝辞	44
	参考文献	45

## 概要

荷電粒子が物質中に入射すると、物質原子との相互作用によりエネルギーを失いながら進行する。本研究では、神戸大学海事科学研究科のタンデム加速器を用い、アルゴンガス中における陽子のエネルギー損失、特に飛程終端でエネルギー損失が最大となる「ブラッグピーク」の実験的観測を目的とした。

検出器には、電子増幅器として GEM、位置検出器として  $\mu$ -PIC を備えたガス TPC (Time Projection Chamber) を用いた。事前のシミュレーション (SRIM) による検討に基づき、TPC 内のガスには Ar:CO<sub>2</sub> (混合比 9:1、1 気圧) を選定した。実験では、約 2.0~2.3 MeV に加速された陽子ビームを、直径 1 $\mu$ m の微細な入射孔を通じて TPC 内へ導入し、その飛跡とエネルギー損失を測定した。

取得データを解析し、Geant4 によるモンテカルロ・シミュレーションと比較を行った結果、陽子由来の飛跡の再構成には成功した。しかし、エネルギー損失と飛程の関係において、理論から予測される明確なブラッグピークの形状は確認されなかった。その要因として、微細な入射孔に対するビームアライメントの困難さによる散乱や、ガスゲイン不足等が示唆された。本論文では、エネルギー損失の理論、実験装置の構築、基礎実験、および実験データの解析結果について詳述する。

# 1 理論

## 1.1 原理

本節では、ガス TPC を用いた陽子のエネルギー損失測定の実理について述べる。まず、荷電粒子が物質中でエネルギーを失うメカニズムについて説明し、次にガス TPC による 3 次元飛跡検出の実理、および信号増幅の仕組みについて解説する。

### 1.1.1 荷電粒子のエネルギー損失とブラッグピーク

荷電粒子（本研究では陽子）が物質（アルゴンガス等）中を通過すると、物質中の原子と電磁気的な相互作用（クーロン力）を及ぼし合い、原子を電離または励起させる。この過程で荷電粒子は運動エネルギーを失う。荷電粒子が単位長さ  $dx$  進む間に失うエネルギー  $dE$  を阻止能（Stopping Power）と呼び、以下の式で表される。

$$S(E) = -\frac{dE}{dx} \quad (1.1)$$

図 1.1 は、陽子がアルゴンガス中を通過する際の実理図である。陽子がガス原子を電離させ、電子・イオン対が生成される様子を示している。

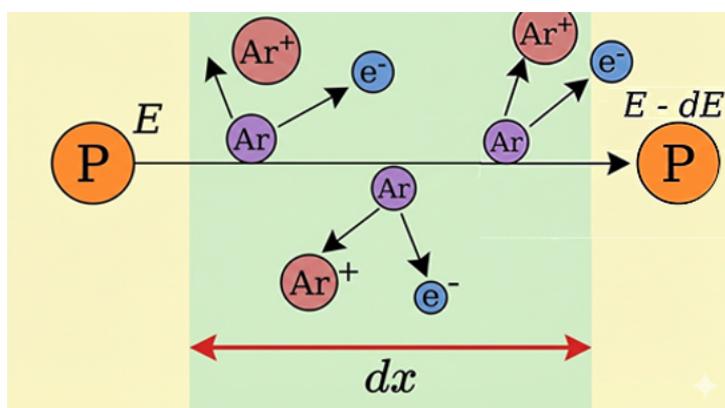


図 1.1: 陽子がアルゴンガス中を通過する際の実理図

比較的高いエネルギー領域における阻止能の実理式として、式 1.2 に示す Bethe-Bloch（ベーテ・ブロッホ）の式が広く知られている。この式によれば、阻止能は主に粒子の速度の 2 乗 ( $v^2$ ) に反比例する。

$$\left\langle -\frac{dE}{dx} \right\rangle = K z^2 \frac{Z}{A} \frac{1}{\beta^2} \left[ \frac{1}{2} \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 W_{\max}}{I^2} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right] \quad (1.2)$$

ここで、各パラメータは以下の通りである。

- $K$ : 係数 ( $4\pi N_A r_e^2 m_e c^2$ )
- $z$ : 入射粒子の電荷数
- $Z$ : 標的物質の原子番号
- $A$ : 標的物質の原子量 (質量数)
- $m_e$ : 電子の静止質量
- $c$ : 真空中の光速
- $\beta$ : 入射粒子の相対速度 ( $\beta = v/c$ ,  $v$  は粒子の速度)
- $\gamma$ : ローレンツ因子 ( $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$ )
- $W_{\max}$ : 1 回の衝突で電子に移行可能な最大エネルギー
- $I$ : 標的物質の平均励起ポテンシャル
- $\delta(\beta\gamma)$ : 密度効果による補正項

また、図 1.2 は上記の式を表したグラフである。

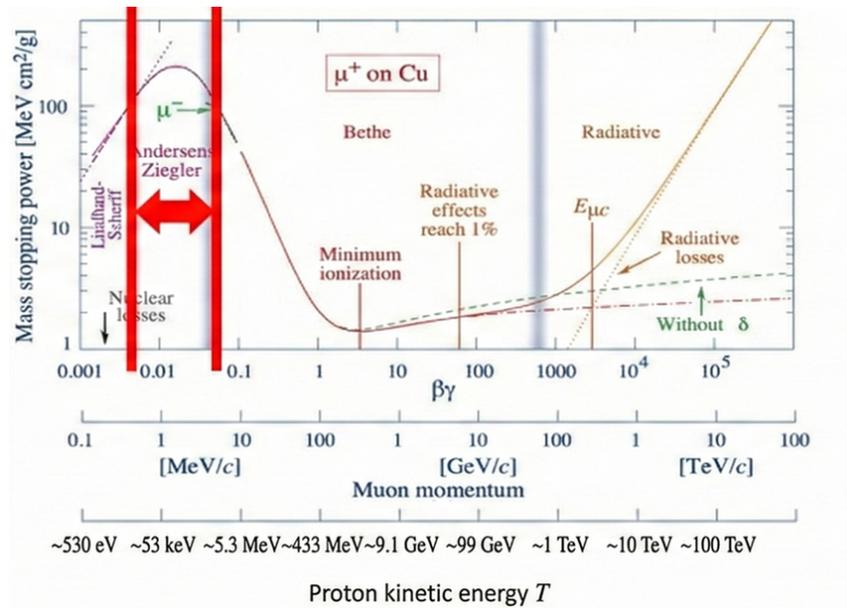


図 1.2: Bethe-Bloch の式を表したグラフ (文献 [2] を基に作成)

図 1.2 からわかるように、荷電粒子はエネルギーを失って速度が低下するにつれて、単位長さあたりのエネルギー損失が急激に増大する。図 1.3 は、イオンの物質中での飛程や阻止能を計算するシミュレーションソフト「SRIM (Stopping and Range of Ions in Matter)[3]」を用いて算出した、アルゴンガス中における陽子のエネルギーに対する阻止能の変化を示したグラフである。エネルギーが低下するにつれて阻止能が上昇し、あるエネルギーで極大値に達した後に急激に減少する様子がわかる。

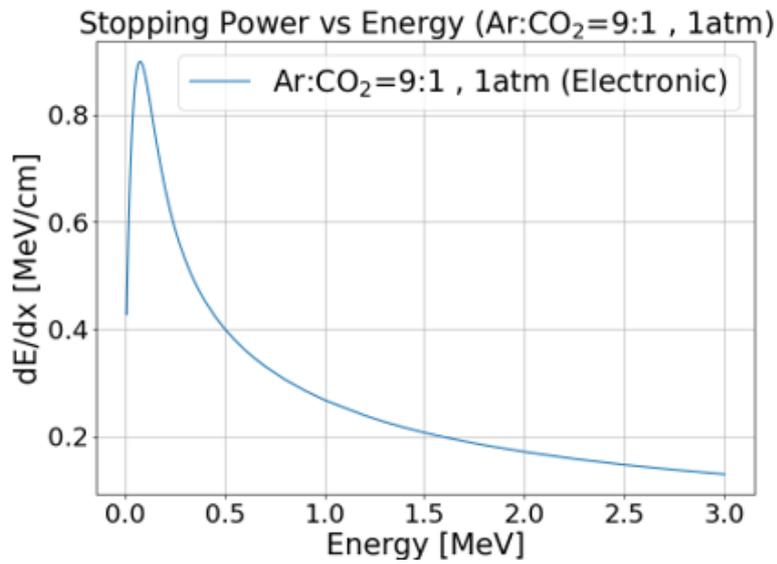


図 1.3: 陽子のエネルギーに対する阻止能の変化 (SRIM による計算結果)

また、図 1.4 は、同様に SRIM を用いて計算した、初期運動エネルギー 2MeV の陽子が物質中を進んだ距離に対する阻止能の変化を示したグラフである。陽子が物質中を進行してエネルギーを失い、停止する直前 (飛程の終端付近) においてエネルギー損失が最大となっている。

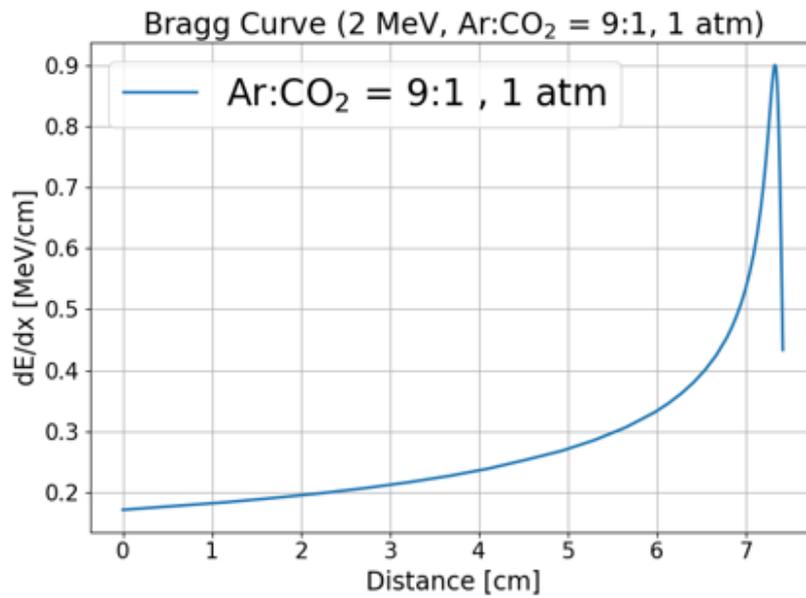


図 1.4: 陽子の進んだ距離 (飛程) に対する阻止能の変化 (SRIM による計算結果)

このように、荷電粒子が物質中で停止する直前にエネルギー損失が極大となる現象、およびそのピークを「ブラッグピーク (Bragg Peak)」と呼ぶ。本研究では、ガス TPC を用いて飛跡に沿ったエネルギー損失の推移を測定し、ブラッグピークの形状を実験的に観測することを目的とする。

### 1.1.2 陽子ビームとタンデム加速

■ビームライン全体図 図 1.5 は、神戸大学海事科学研究科のタンデム加速器から TPC までのビームライン全体の構成を示している。加速された陽子ビームは、前置チェンバーでビームの位置と強度をモニタリングされ、微細な入射孔を通じて TPC 内へ導入される。TPC 内部では、陽子の飛跡とエネルギー損失が測定される。

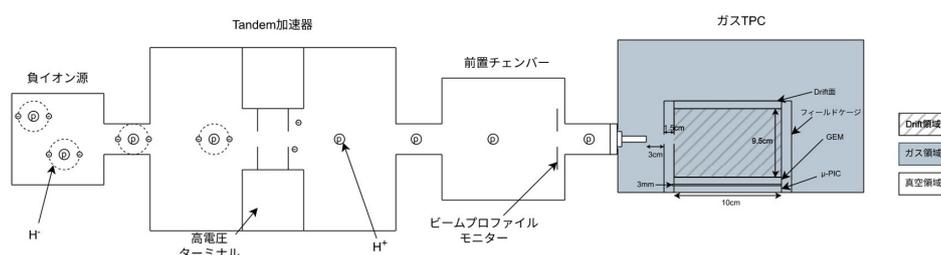


図 1.5: ビームライン全体図

### 1.1.3 タンデム加速器の原理

負イオン源から生成された負イオンは、タンデム加速器の高電圧部で加速される。加速された負イオンは、タンデム加速器の中心部にある窒素ガスを通過する際に、ガス分子との衝突により電子を失い、正イオン（陽子）へと変換される。変換された陽子は、再び高電圧部で加速され、最終的に 2.0~2.3MeV のエネルギーを持つビームとして出射される。図 1.6 は、タンデム加速器のイメージ図である。

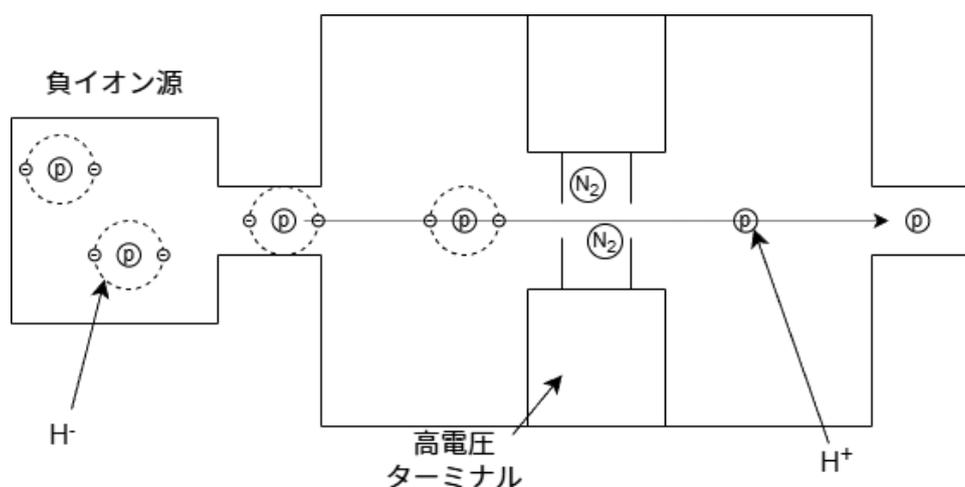


図 1.6: タンデム加速器のイメージ図

### 1.1.4 ガス TPC による 3 次元飛跡検出の原理

Time Projection Chamber (TPC) は、ガス容器内に均一な電場を形成し、荷電粒子の飛跡を 3 次元的に再構成できる検出器である。

■3 次元位置の決定 陽子がガス中を通過すると、その飛跡に沿ってガス原子が電離され、電子とイオンの対（電子・イオン対）が生成される。生成された電子（電離電子）は、TPC 内部に印加された均一な電場（ドリフト電場）によって、一定の速度（ドリフト速度  $v_{\text{drift}}$ ）で検出面（アノード方向）へと輸送される。図 1.7 に TPC による飛跡検出の原理図を示す。

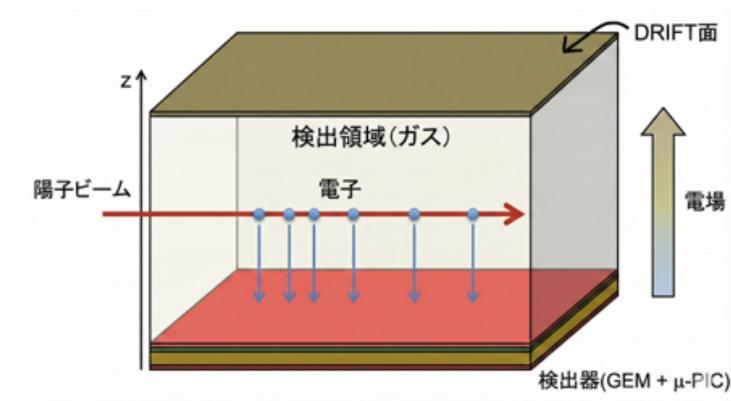


図 1.7: TPC 内部のイメージ図

検出面には 2 次元的位置検出器（本実験では GEM および  $\mu$ -PIC を使用）が設置されている。 $\mu$ -PIC は直交する短冊状の読み出し電極（ストリップ）を備えており、電子が到達した  $x, y$  座標を特定する。また、電子が生成されてから検出器に到達するまでの時間（ドリフト時間  $t$ ）を測定することで、電場方向 ( $z$  方向) の位置を以下の式により算出する。

$$z = v_{\text{drift}} \times t \quad (1.3)$$

ここで、 $v_{\text{drift}}$  はガス中の電子のドリフト速度である。TPC 内の電場を適切に設定することで、ドリフト速度を一定に保つことができるため、ドリフト時間から正確な位置情報を得ることが可能となる。これにより、 $(x, y, z)$  の 3 次元的位置の再構成が可能となる。

ただし、本実験では外部からの同期信号（外部トリガー）ではなく、検出器自身が信号を検出したタイミングをデータ取得の基準とするセルフトリガー方式を採用した。そのため、陽子が TPC 内を通過した正確な絶対時刻 ( $t = 0$ ) を特定することができない。したがって、得られる時間情報は各検出位置における相対的な到達時間差  $\Delta t$  となり、算出される  $z$  方向の情報も相対的な位置の差  $\Delta z = v_{\text{drift}} \times \Delta t$  となる。この結果、空間内の絶対的な 3 次元座標  $(x, y, z)$  ではなく、飛跡の 3 次元的位置の傾き（相対的な軌跡の形状）を再構成することになる。

なお、本実験で使用する陽子（約 2 MeV）の速度は光速の約 6.5% ( $v_p \approx 1.95 \times 10^7$  m/s) であるのに対し、電子のドリフト速度はおよそ  $1.0 \times 10^4$  m/s である。陽子の通過速度はドリフト速度に比べて速いため、陽子の飛跡上で生成された電子は、ほぼ同時に生成されたものとみなして解析を行うことができる。

■エネルギー損失の測定 TPCでは、検出される信号の総電荷量  $Q$  から、陽子が失ったエネルギー  $E$  を推定することができる。アルゴンガスの平均電離エネルギー（W 値）は約 26 eV である。陽子がエネルギー  $E$  を失った際に生成される初期電子数  $n$  は、

$$n = \frac{E}{26 \text{ eV}} \quad (1.4)$$

となる。検出器（GEM および  $\mu$ -PIC）による電子増幅率（Gas Gain）を  $G$  とすると、読み出される総電子数  $N$  は  $N = n \times G$  となる。したがって、検出される総電荷量  $Q$ （素電荷を  $e$  とする）は以下の関係になる。

$$Q = N \times e = \left( \frac{E}{26 \text{ eV}} \right) \times G \times e \quad (1.5)$$

上式を変形すると、エネルギー  $E$  は電荷量  $Q$  に比例することがわかる。

$$E = \frac{Q}{e \times G} \times 26 \text{ eV} \propto Q \quad (1.6)$$

この関係を用いることで、測定された電荷量からエネルギー損失  $dE/dx$  の情報を得ることができる。

しかし、測定された電荷量から正確なエネルギー損失を算出するには、既知のエネルギー損失を持つ宇宙線ミュオンなどを用いて、事前にこの比例係数を決定するキャリブレーション（エネルギー較正）を行う必要がある。本研究では、この事前のキャリブレーションを実施できなかったため、得られたエネルギー損失は絶対値（eV 等）ではなく、測定された電荷量  $Q$  に基づく相対的な値として評価を行った。

■電子雪崩の原理 GEM 内部及び  $\mu$ -PIC 近傍の強電場によって電子が加速され、ガス分子と衝突して新たな電子・イオン対が生成される。生成された電子もまた加速され、次々と衝突を繰り返すことで、電子の数は指数関数的に増大する。これを電子雪崩と呼ぶ。

微小距離  $dx$  の間に、電子 1 個あたり平均  $\alpha$  回の電離を起こす（ $\alpha$ ：タウンゼント係数）とすると、距離  $d$  だけ進んだ時の電子の総数  $N$  は以下の式で表される。

$$N = N_0 e^{\alpha d} \quad (1.7)$$

ここで  $N_0$  は最初の電子数である。この式から、GEM と  $\mu$ -PIC を通過することで電子数が大幅に増加することがわかる。

### 1.1.5 GEM による電子増幅

一次電離で発生した電子の数は非常に少なく（数 100 個/strip 程度、電荷 0.1fC、後述のプリアンプの出力電位 0.1mV 程度）、そのままでは電気信号として検出することが困難である。そのため、微細な構造を持つ Gas Electron Multiplier (GEM) や Micro Pixel Chamber ( $\mu$ -PIC) と呼ばれる素子を用いて電子雪崩を引き起こし、信号を増幅させる。図 1.8 と図 1.9 は、実際の GEM の写真とその拡大写真である。

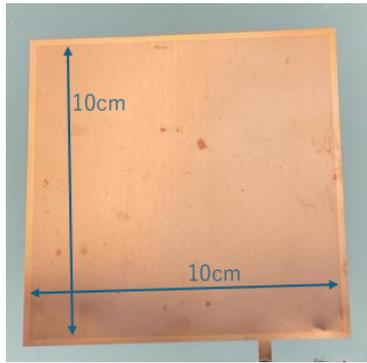


図 1.8: GEM の写真

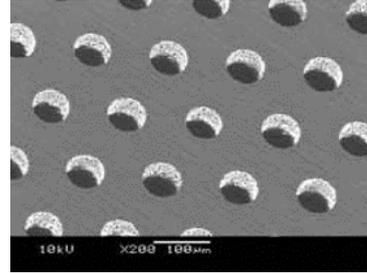


図 1.9: GEM の拡大写真 [4]

### 1.1.6 GEM の構造

GEM は、厚さ  $100\ \mu\text{m}$  程度の絶縁体（ポリイミドなど）の両面を銅箔でコーティングし、微細な貫通孔（ホール）を多数配置した構造を持つ。両面の銅箔間に電圧（数百 V）を印加することで、ホール内部に局所的な強い電場が形成される。本実験では、この GEM による増幅機能を利用して測定を行う。

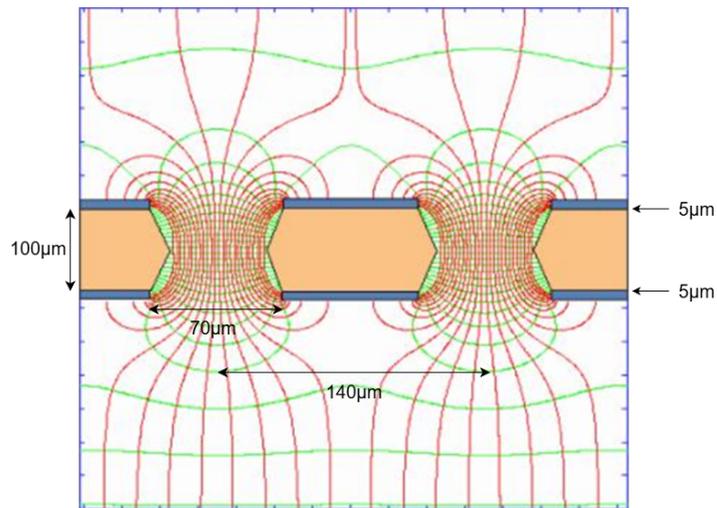


図 1.10: GEM の構造図 [5]

### 1.1.7 $\mu$ -PIC による信号読み出し

$\mu$ -PIC は、GEM で増幅された電子をさらに増幅しつつ、到達した電子の位置と信号強度を検出する 2 次元読み出し検出器である [6]。直交する短冊状に電極が配置された構造を持ち、到達位置の  $x$  および  $y$  座標を同時に特定することができる。図 1.11 は  $\mu$ -PIC の構造図であり、図 1.12 は電子が  $\mu$ -PIC に到達する際の断面図である。ドリフトしてきた電子は、電極間の強電場によってアノードに向かって雪崩増幅を起こしながら引き寄せられる。一方、その増幅過程で発生した陽イオンがカソードに向かって移動することで、カソード側にも信号が誘起される。これにより、アノードとカソードの両方から直交する 2 次元の信号を同時に読み取ることができる。

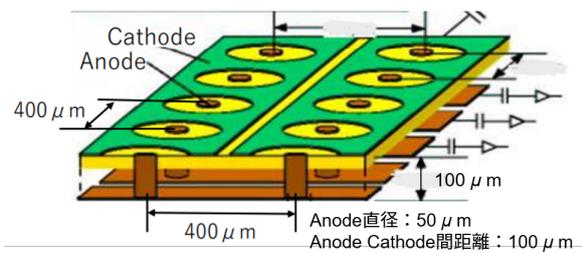


図 1.11:  $\mu$ -PIC の構造図

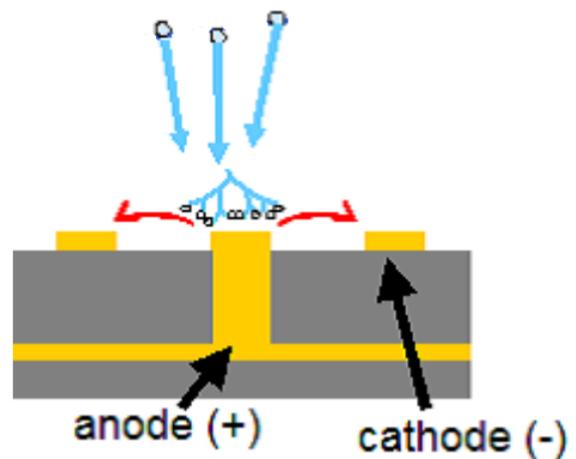


図 1.12:  $\mu$ -PIC の断面図

## 2 基礎実験 (担当：奥)

基礎実験としてテストチェンバー (図 2.1) と  $^{55}\text{Fe}$ (5.9keV の X線源) 線源を用いた基礎実験を行った。基礎実験では、いくつかの条件についてガスゲインの印加電圧依存性を調べた。1 組目は Ar:CO<sub>2</sub>=9:1 の 1 気圧と 0.8 気圧のガスである。2 組目は Ar:CO<sub>2</sub>=9:1、Ar:CO<sub>2</sub>=8:2 の 1 気圧のガスである。ガスゲインの印加電圧依存性を測定し、タンデム実験で必要とされる、 $10^4$  以上のゲインで安定動作するガスを見つけることを目的とした。

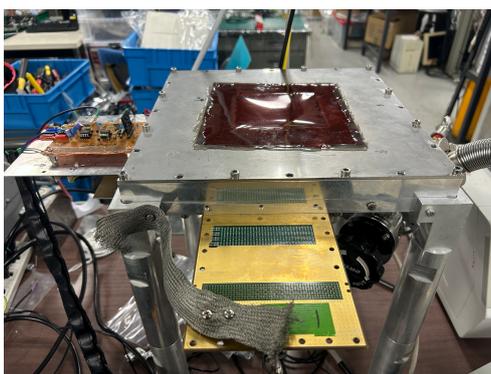


図 2.1: テストチェンバー

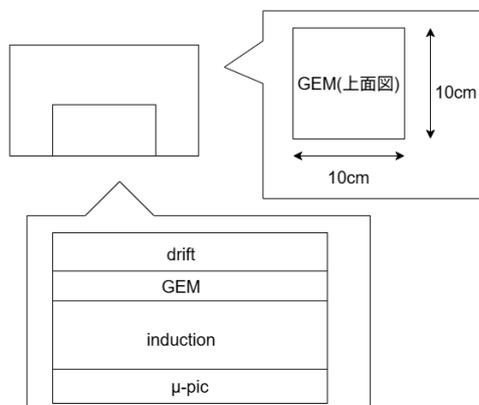


図 2.2: テストチェンバーの模式図

## 2.1 基礎実験の原理

チェンバー内に入射した X 線は主に気体中の Ar 原子と光電効果を起こし、合計で 5.9keV 分のエネルギーを持った電子を発生させる。これらの電子がガス中の Ar を電離させることで一次電子が発生する。Ar の特性 X 線 (3.0keV) が発生してチェンバー外まで逃げてしまい、その分のエネルギーを検出出来ないこともある。式??から分かるようにエネルギー損失が既知のものであれば検出される電荷量からガスゲインを測定することが出来る。微小距離  $dx$  の間に、電子 1 個あたり平均  $\alpha$  回の電離を起こす ( $\alpha$ : タウンゼント係数) とすると、距離  $d$  だけ進んだ時の電子の総数  $N$  は以下の式で表される。

$$N = N_0 e^{\alpha d} \quad (2.1)$$

ここで  $N_0$  は最初の電子数である。この式から、GEM と  $\mu$ -PIC を通過することで電子数が大幅に増加することがわかる。(西川)

## 2.2 セットアップ

基礎実験のセットアップは図 2.3 の通りである。 $\mu$ -PIC で検出されされた電荷信号をチャージアンプ (図 2.4) によって電圧信号に変換し、MCA(Multi Channel Analyzer)(図 2.5) で波形のピーク電圧をデジタル信号として記録する。Cathode 側の信号は今回は使用していない。

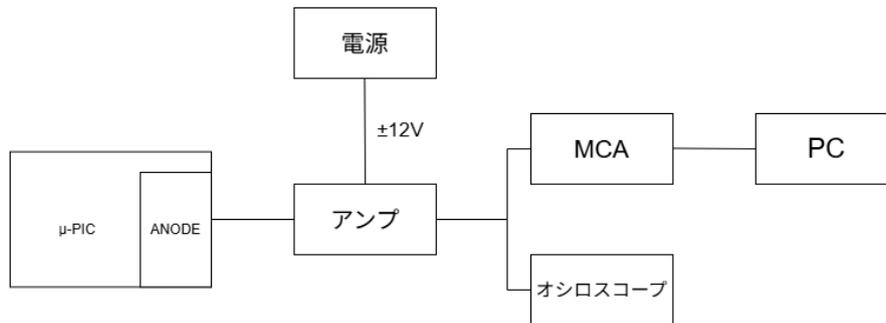


図 2.3: 基礎実験のセットアップ

入力される電荷信号を  $3.05 \times 10^2$  mV/pC の変換率で電圧信号に変換するチャージアンプを使用した。

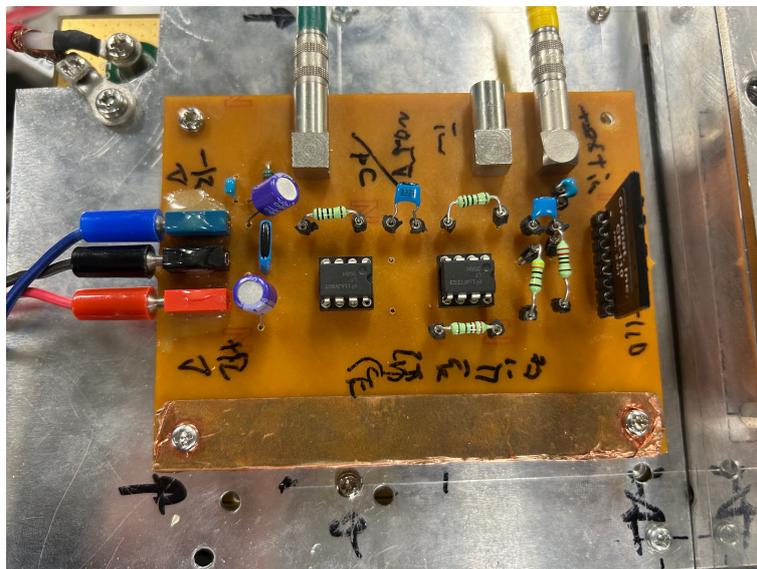


図 2.4: チャージアンプ

波形のピーク電圧をアウトプットレンジを 10V として 8192 分割でデジタル化して記録する MCA を使用した。



図 2.5: MCA

## 2.3 実験結果

使用したガスは  $\text{Ar} : \text{CO}_2 = 9 : 1$ 、0.8 気圧である。表 2.1 に示す実験条件でエネルギースペクトルを取得すると図 2.6 のようなスペクトルが得られた。このスペクトルに見られる、赤の線でフィットしてあるピークが 5.9keV に対応する。緑の線でフィットしてあるピークが、Ar の特性 X 線がチェンバーの外に逃げてその分が観測されなかった 2.9keV のピーク (エスケープピーク) である。今回は 5.9keV の方のピークの MCA 値と式 2.2 を用いてガスゲインを求めた。

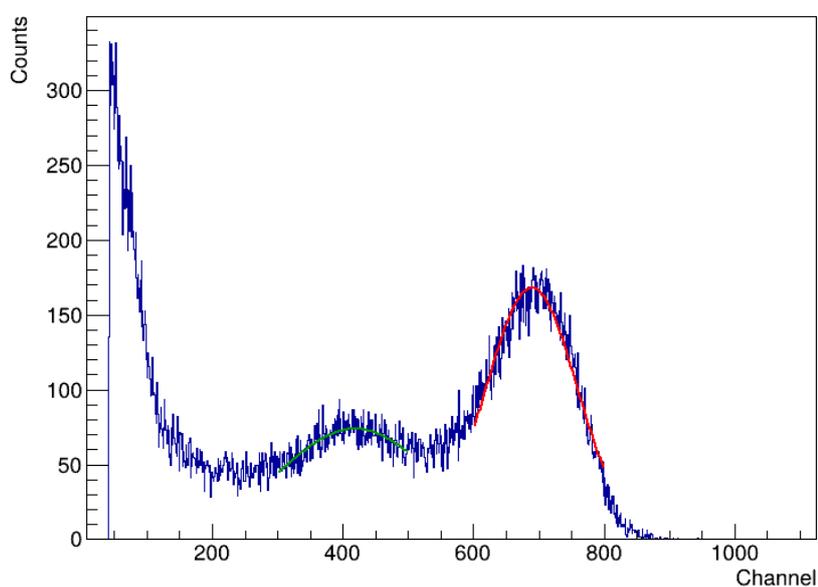


図 2.6: 表 2.1 の実験条件で取得されたエネルギースペクトル例

装置名	設定電圧 (V)
Anode	450
$\Delta$ GEM	-440
induction	-200
drift	-200

表 2.1: 印加電圧

$$Gain_{gas} = \frac{\frac{MCA_{peak(5.9 \text{ keV})} \times 10/8192 \text{ pC}}{G_{amp} \text{ mV/pC}}}{5.9 \text{ keV}/26 \text{ eV} \times 1.6 \times 10^{-7} \text{ pC}} \quad (2.2)$$

1組目の Ar:CO<sub>2</sub>=9:1 の1気圧と0.8気圧に関しては、表 2.2 の通り、 $\mu$ -PIC の Anode に印加する電圧を450V に固定して GEM 間に印加する電圧を変化させて測定を行った。得られたガスゲインは図 2.7 のようになった。表 2.3 の通りに GEM 間に印加する電圧を430V に固定して  $\mu$ -PIC の Anode に印加する電圧を変化させてガスゲインを求めると図 2.8 のようになった。いずれも印加電圧の増加に対してガスゲインが指数関数的に増加することが読み取れる。いずれの場合も0.8気圧ではゲインが10<sup>4</sup> に到達している。1気圧の場合、放電するまで電圧を更に上げることが出来る。よって Ar:CO<sub>2</sub>=9:1 の混合ガスは1気圧と0.8気圧が候補となり得る。

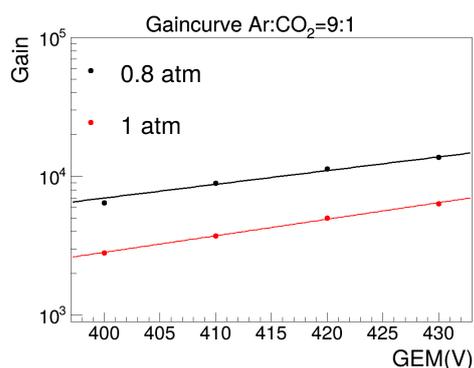


図 2.7:  $\Delta$  GEM 依存のゲインカーブ

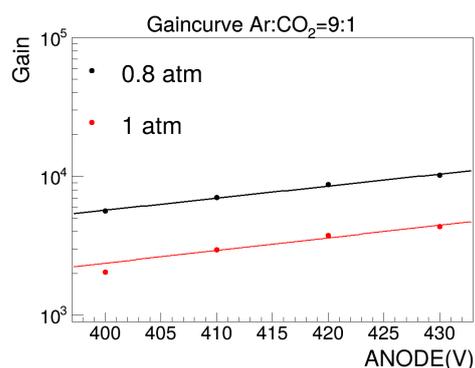


図 2.8: Anode 依存のゲインカーブ

装置名	設定電圧 (V)
Anode	450
$\Delta$ GEM	-400~-430
induction	-200
drift	-200

表 2.2:  $\Delta$  GEM 依存の変化を調べたときの印加電圧

装置名	設定電圧 (V)
Anode	400~430
$\Delta$ GEM	-430
induction	-200
drift	-200

表 2.3: Anode 依存の変化を調べたときの印加電圧

2組目の Ar:CO<sub>2</sub>=9:1、Ar:CO<sub>2</sub>=8:2 の1気圧のガスについて示す。表 2.4 の通り、 $\mu$ -PIC の Anode に印加する電圧を 450V に固定して GEM 間に印加する電圧を変化させ、ガスゲインを求めると図 2.9 のようになった。表 2.5 の通りに GEM 間に印加する電圧を Ar:CO<sub>2</sub>=9:1 の場合は 430V、Ar:CO<sub>2</sub>=8:2 の場合は、ゲインを十分に出すため 450V に固定した。 $\mu$ -PIC の Anode に印加する電圧を変化させてガスゲインを求めると図 2.10 のようになった。いずれも印加電圧の増加に対してガスゲインが指数関数的に増加することが読み取れる。Ar:CO<sub>2</sub>=9:1 の場合は、ゲインが 10<sup>4</sup> に到達している。Ar:CO<sub>2</sub>=8:2 場合、いずれも放電直前まで電圧を上げたが、ゲインが 10<sup>4</sup> に到達しなかった。よって、Ar:CO<sub>2</sub>=9:1 が候補となり得る。

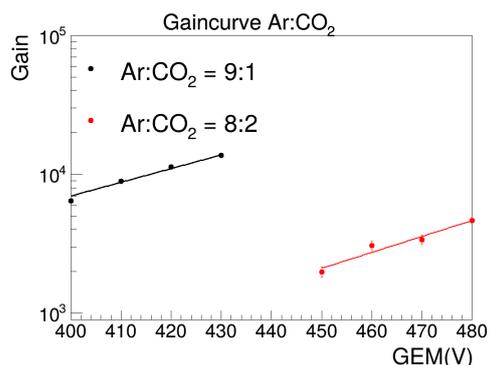


図 2.9:  $\Delta$  GEM 依存のゲインカーブ

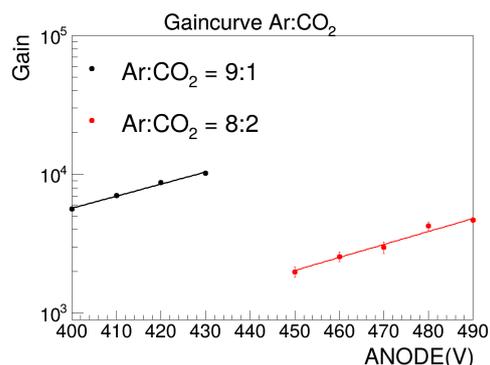


図 2.10: Anode 依存のゲインカーブ

装置名	設定電圧 (V)
Anode	450
$\Delta$ GEM	-400~-480
induction	-200
drift	-200

表 2.4:  $\Delta$  GEM 依存の変化を調べたときの印加電圧

装置名	設定電圧 (V)
Anode	400~490
$\Delta$ GEM	-430(Ar:CO <sub>2</sub> =9:1)、-450(Ar:CO <sub>2</sub> =8:2)
induction	-200
drift	-200

表 2.5: Anode 依存の変化を調べたときの印加電圧

## 2.4 まとめ

本基礎実験では、タンデム加速器実験において TPC で陽子のエネルギー損失を測定するため、チェンバー内に封入する Ar と CO<sub>2</sub> の混合ガスの最適な混合比および圧力を決定することを目的とした。テストチェンバーと <sup>55</sup>Fe の X 線源を用いてガスゲインの印加電圧依存性を測定した結果、いずれの場合も印加電圧の増加に伴いガスゲインが指数関数的に増加することが確認された。圧力依存性では Ar:CO<sub>2</sub>=9:1 の条件において 0.8 atm で比較的低い電圧でも高いゲインが得られ、1.0 atm でも電圧を上げることで約 10<sup>4</sup> のゲインに到達可能であった。混合比依存性では Ar:CO<sub>2</sub>=8:2 ではゲイン 10<sup>4</sup> に到達しなかったのに対し、Ar:CO<sub>2</sub>=9:1 では安定して高いゲインが得られた。以上より、TPC 実験に適したガス条件は Ar:CO<sub>2</sub>=9:1、圧力 0.8~1.0 atm であると結論づけられる。

### 3 Tandem 加速器における実験 (担当：豊福)

本実験は神戸大学海事科学研究科のタンデム加速器において 2026/1/12~1/16 の 5 日間で行われた。本論文で用いるデータは 2025/1/14 18:13~20:12 に測定したものである。本章では実際の実験で用いたガス TPC の構造やデータ取得の方法、実験条件を中心に述べたあと陽子の飛跡再構成を行う。本実験のビームラインの全体図を図 3.1 に示す。

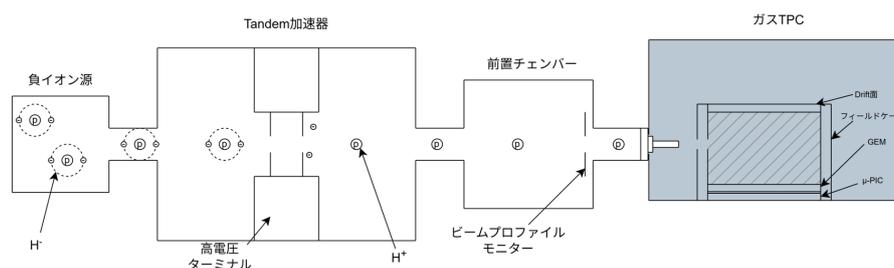


図 3.1: ビームライン全体図

#### 3.1 ビーム

タンデム加速器の構造や性能については 1.1.3 節で述べた通りである。今回の実験ではエネルギー 2.0~2.3 MeV で強度が 20 nA の陽子ビームを用いた。

加速した陽子のビームプロファイルは、前置チェンバー下流に設置した蛍光版をビームプロファイルモニターとして様子を確認した (図 3.2)。蛍光版はビームが当たると赤く光る。中心に直径 7.5 mm の穴が開いており、その先に TPC が接続されている。蛍光版にビームを当てながらフォーカス調整をしたのち (図 3.3)、TPC につながる穴へ位置を調整した (図 3.4)。

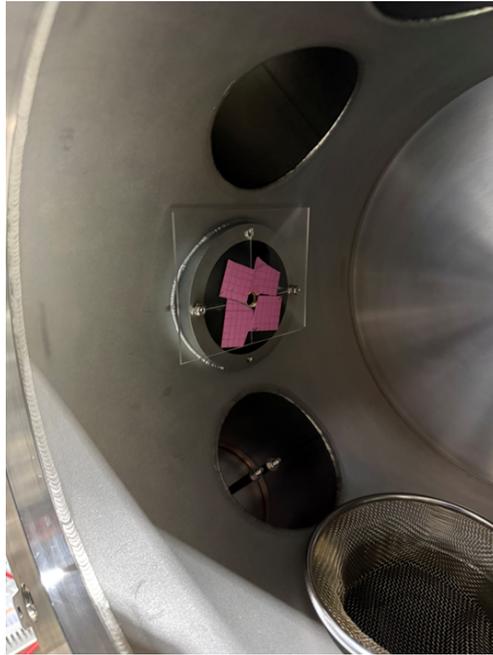


図 3.2: ビームプロファイルモニター

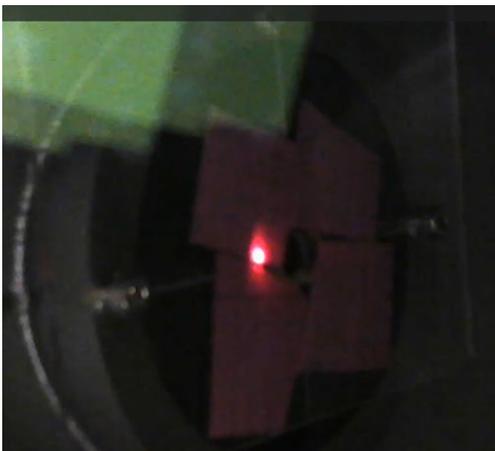


図 3.3: フォーカス調整後

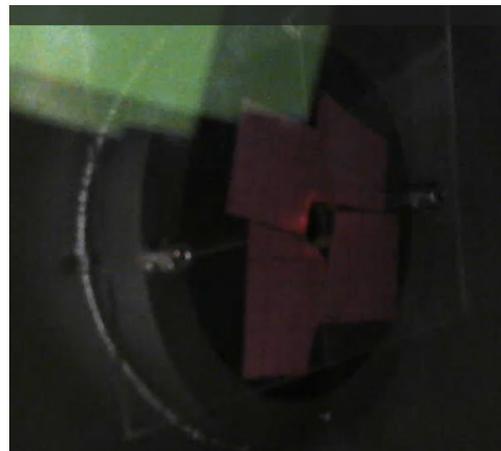


図 3.4: 位置調整後

## 3.2 チェンバー

チェンバーの構造については図 3.5 のとおりである。今回使用した GEM は厚さ  $100\ \mu\text{m}$  の液晶ポリマーと厚さ  $5\ \mu\text{m}$  の銅で作られたものであり、穴の直径は  $70\ \mu\text{m}$ 、穴の中心間の距離は  $140\ \mu\text{m}$  であった。 $\mu\text{-PIC}$  は anode, cathode がそれぞれ 256 ストリップ、各ピクセルの間隔が  $400\ \mu\text{m}$ 、anode 直径が  $50\ \mu\text{m}$ 、cathode 内径が  $250\ \mu\text{m}$ 、検出面が一辺  $10\ \text{cm}$  の正方形のものを使用した。チェンバー内には質量比 9 : 1 の  $\text{Ar} + \text{CO}_2$  を 1 気圧で封入し、DriftTop, GEMTop, GEMBottom,  $\mu\text{-PIC}$  の anode に電圧を印加した。また、 $\mu\text{-PIC}$  の cathode は高抵抗を介して接地されている。印加電圧とそれによって発生する電場は表 3.1、表 3.2 のように

なっている。Drift 領域は図 3.6 のように側面をフィールドケージで囲われており、電場が一定に保たれるようになっている。

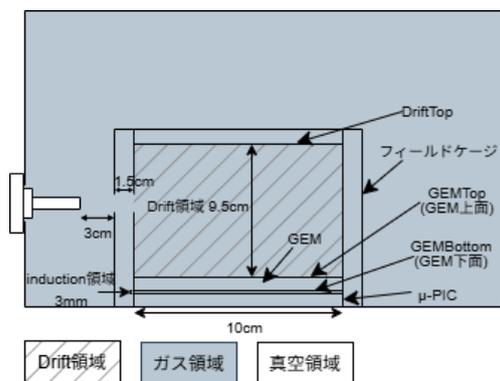


図 3.5: TPC の構造

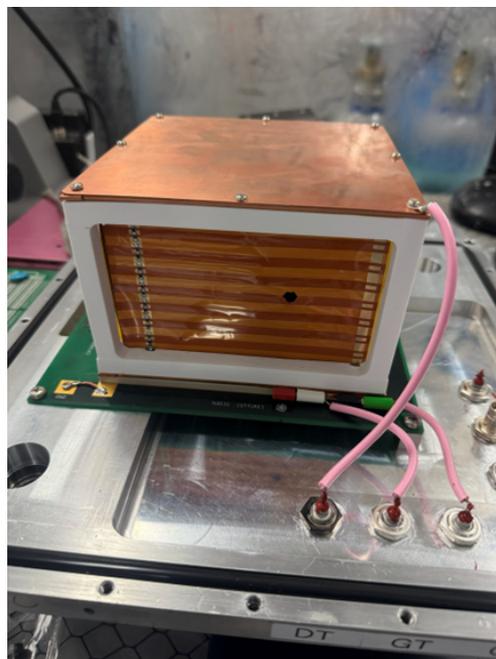


図 3.6: チェンバー内部の様子

装置名	設定電圧 (V)
anode	600
$\Delta$ GEM	-485
induction	-200
drift	-2515

表 3.1: 印加電圧

装置名	設定電場 (V/cm)
anode	-149k
$\Delta$ GEM	-48.5k
induction	-666
drift	-265

表 3.2: 各領域での電場

※ anode の電場は anode 近傍の大きさ

ビームラインの真空領域とガス領域の接続部は各領域の圧力を保ちつつ陽子ビームを通す構造でなければならない。今回は直径  $1 \mu\text{m}$  のストレート孔の空いた、厚さ  $10 \mu\text{m}$  のステンレス箔を TPC に接続するパイプの先に実装した (図 3.7, 3.8)。ステンレス箔を実装したパイプパーツのみ、さらにそれを実装したガス TPC を大気圧に対して真空引きした際には  $10 \text{ Pa}$  程度まで引くことができた。さらに、ステンレス箔とパイプは導電性接着剤によって電気的な接続を取り、ビーム照射時にステンレス箔がチャージアップするのを防いだ。パイプの長さは  $45 \text{ mm}$ 、内径は  $4.35 \text{ mm}$  であり、ビームは真空領域から穴を通過しガス領域を  $4.5 \text{ cm}$  進んだのち  $10 \text{ cm}$  の Drift 領域に入る構造になっている。



図 3.7: ステンレス箔の穴



図 3.8: ステンレス箔を実装したチューブ

### 3.3 データ取得

飛跡検出と各検出点で落としたエネルギーの算出のために取得すべきデータは、 $\mu$ -PIC の各ストリップに来た信号の電荷量と信号が来た時刻である。図 3.9 を見ると各信号の電荷量と各ストリップに来た信号がしきい値を越えた時間 (ToT:Time over Threshold) には相関があることがわかる。電荷量については各ストリップの電荷量が 128 ストリップのうち占める相対量がわかる ToT と、128 ストリップ分の電荷量の総和であるアナログ信号の面積から推定できる。信号の来た時刻はデジタル信号の立ち上がりとする。

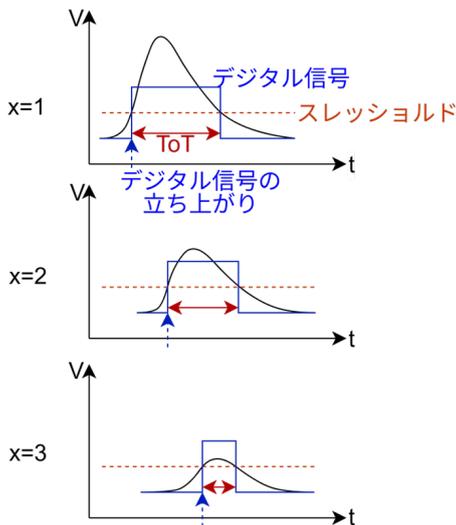


図 3.9: 得られるデジタル信号の模式図

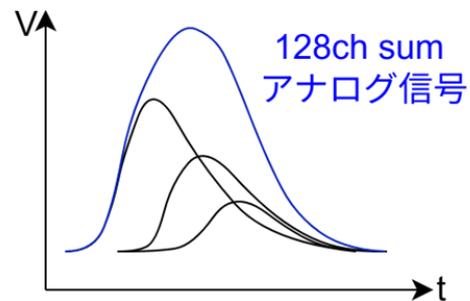


図 3.10: 得られるアナログ信号の模式図

anode, cathode のアナログ、デジタル両信号を記録するために構築した DAQ 回路の概略図を図 3.11 に示す。anode, cathode それぞれに接続された ASD ボード (Amplifier-Shaper-Discriminator) からそれぞれ

256ch のデジタル信号と 8ch のアナログ信号を取り出せる。anode のアナログ信号 8ch の OR を取ってトリガーとし、anode のどこかにヒットがありトリガーがスレッシュホールドを超えればそこから 1000clock 分の信号を記録する。cathode のアナログ信号は波形情報として FADC(flash analog-to-digital converter) で記録、anode、cathode のデジタル信号は Encoder で処理された後に Memory Board に書き込まれ、PC で保存する。

この DAQ 回路で実際に取得できる波形情報や各ストリップ信号の時間情報の例が図 3.12, 3.13 である。波形情報の面積から電荷量を求めたり、各ストリップ信号の時間情報から飛跡の再構成を行う。同じタイミングに信号が来た anode と cathode のストリップ位置を対応させることで 2 次元飛跡を得られる。

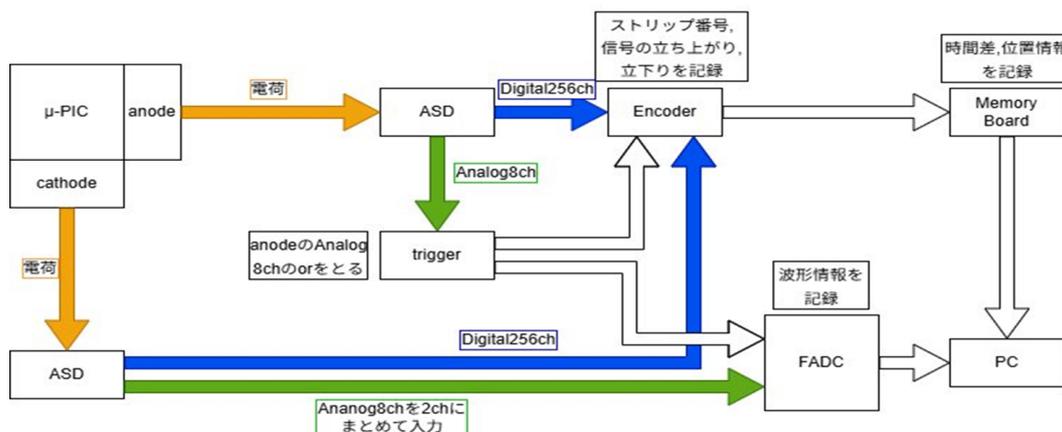


図 3.11: DAQ 回路概略図

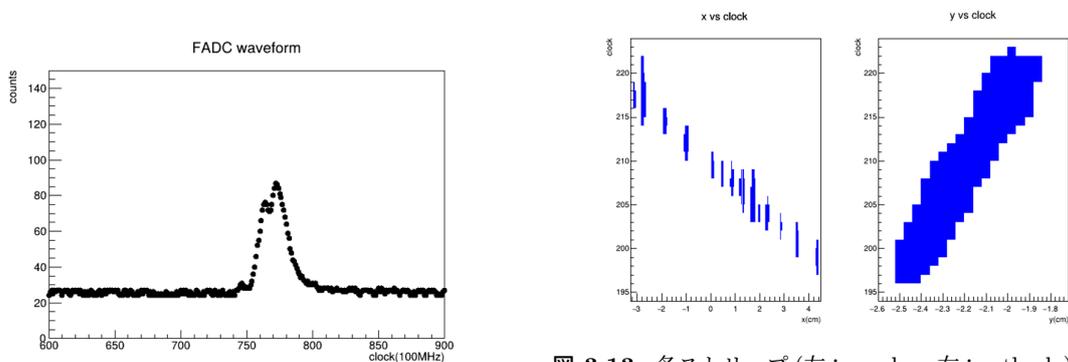


図 3.12: 波形情報の例

図 3.13: 各ストリップ (左: anode 右: cathode) に来た信号の時間情報の例

### 3.4 ビーム試験

実際のビーム試験での各エネルギーでの計測時間、live time、総トリガー数は、表 3.3 のとおりである。

ビームエネルギー	計測時間	live time	総トリガー数
2.0 MeV	18:13~18:25	777 sec	1841
2.1 MeV	18:38~18:56	1075 sec	5607
2.2 MeV	19:07~19:22	912 sec	2870
2.3 MeV	19:45~20:12	1595 sec	4795

表 3.3: 各ビームエネルギーでの計測時間、live time、総トリガー数

### 3.5 実験状況のモニター

計測中に大気圧、TPC 内と大気圧との差圧、電流値をモニターした。その様子を図 3.14, 3.15, 3.16 に示す。図 3.14 を見ると大気圧は 102.3 kPa でほぼ一定、図 3.15 を見るとチェンバー内と大気圧との差圧も 3.5 kPa でほぼ一定であるため計測中のガス圧は安定していたことがわかる。また、図 3.16 を見ると、 $\mu$ -PIC の anode にところどころ大きな電流が流れていたことがわかる。これは  $\mu$ -PIC の anode-cathode 間の放電によるものであり、この間は計測できない時間となってしまうが、信号のレートと比べれば十分に低いレートであるため影響はほとんどないと判断して実験を継続した。



図 3.14: 大気圧の時間推移



図 3.15: チェンバー内と大気圧との差圧の時間推移

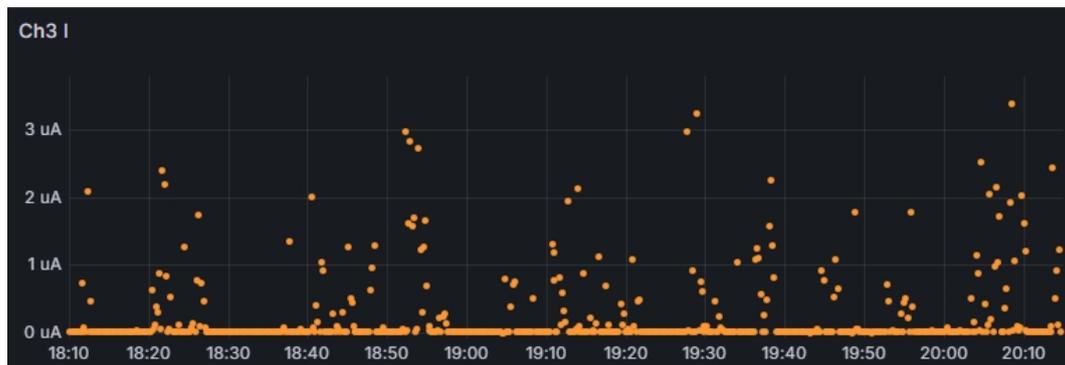


図 3.16: anode の電流値の時間推移

### 3.6 飛跡再構成

飛跡の再構成にあたってチェンバー内の座標を図 3.17, 3.18 のように設定する。ビーム軸の方向に  $y$  軸、それと直行して検出面と平行になるように  $x$  軸、検出面から Drift 領域に向かって  $z$  軸とした。検出領域の端は  $x, y = \pm 5$ 、入射孔の位置は  $(2, -5)$  である。

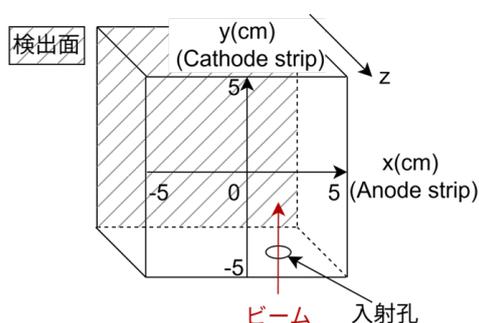


図 3.17: チェンバー内の 3 次元座標設定

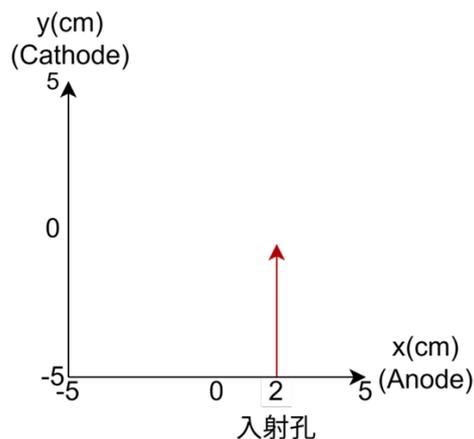


図 3.18: 入射孔の位置

2.0 MeV のビームを入射した実験における hitmap を図 3.19 に示す。この hitmap の横軸は各イベントの  $x$  座標の平均値、縦軸は各イベントの  $y$  座標の最大値である。 $y$  軸がビーム方向であるため、この hitmap は各イベントのビームが止まった位置をおおむね表していると考えられる。入射孔のある  $x = 2$  付近にヒットが集まっているためビーム由来の事象が見えていると判断した。

飛跡の  $z$  軸を較正するために Drift 速度が必要である。図 3.20 によると、今回の Drift 電場  $0.265\text{kV/cm}$  で質量比  $\text{Ar} : \text{CO}_2 = 9 : 1$ 、1 気圧のガス中ではドリフト速度が  $1.8\text{cm}/\mu\text{s}$  と読み取れる。

前述の 2.0 MeV 陽子ビーム照射実験のデータセットから陽子と思われる 1event を探し、 $x, y$  各座標と  $z$  座標のプロットを作成した (図 3.21)。 $z$  座標は前述の Drift 速度を用いて較正した。 $x$  座標が集中しており、ビーム軸方向である  $y$  軸方向に平行に広範囲にヒットがあることから陽子ビーム由来の event と判断した。

また、この 1event について  $xz$  平面の射影と  $yz$  平面の射影を組み合わせて 3次元の飛跡再構成を行った (図 3.22)。 $y$  軸に沿ってビームが進み、止まる直前に多くエネルギーを損失する様子がわかる。

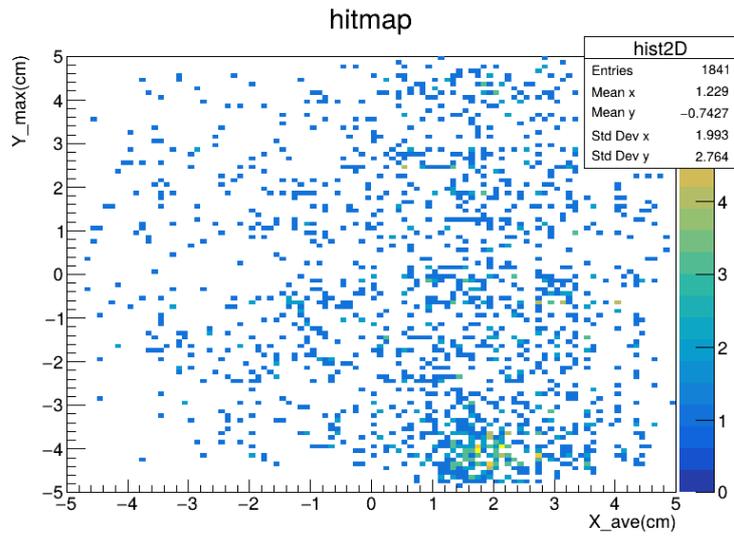


図 3.19: 2.0 MeV 陽子ビーム照射実験の hitmap

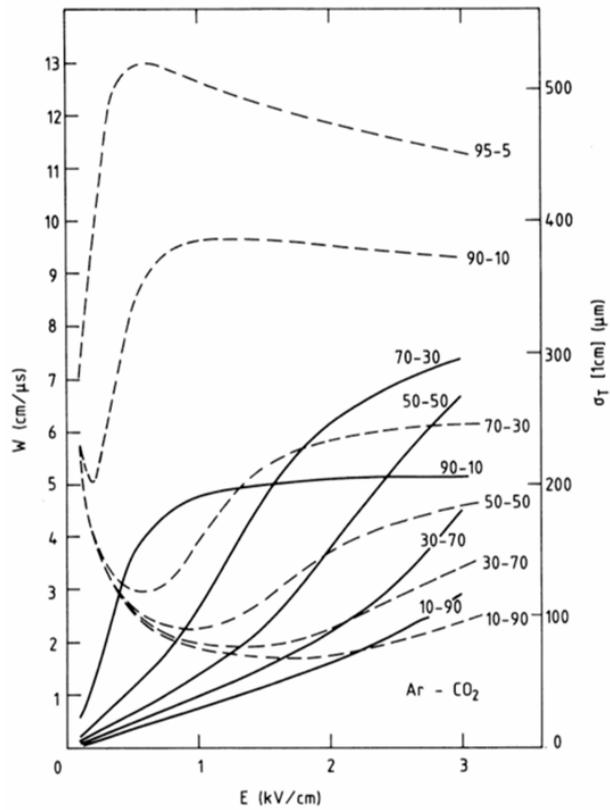


Fig. 34 Peisert and Sauli (1984)

図 3.20: 各 Drift 電場における Drift 速度 ([7] より引用)

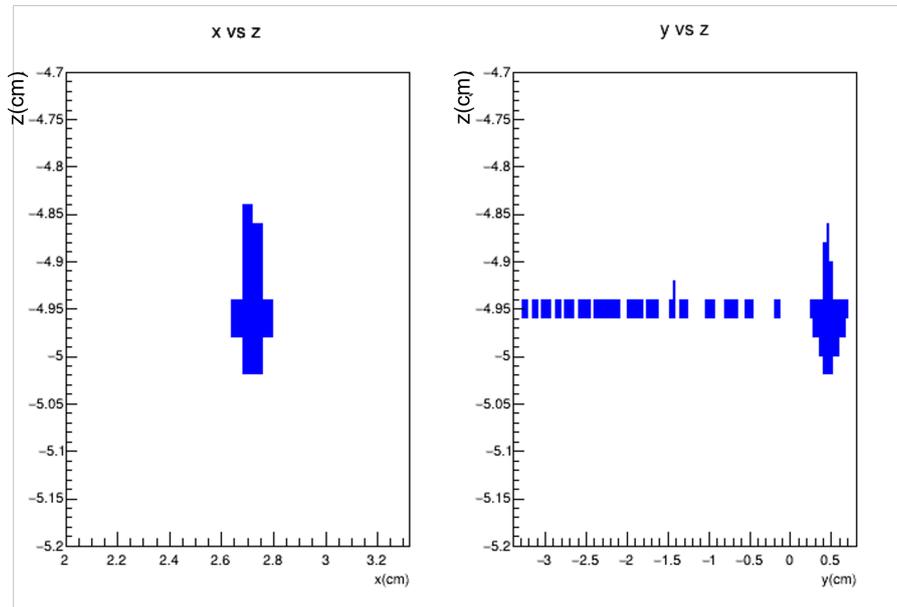


図 3.21: 陽子 levent の二次元飛跡

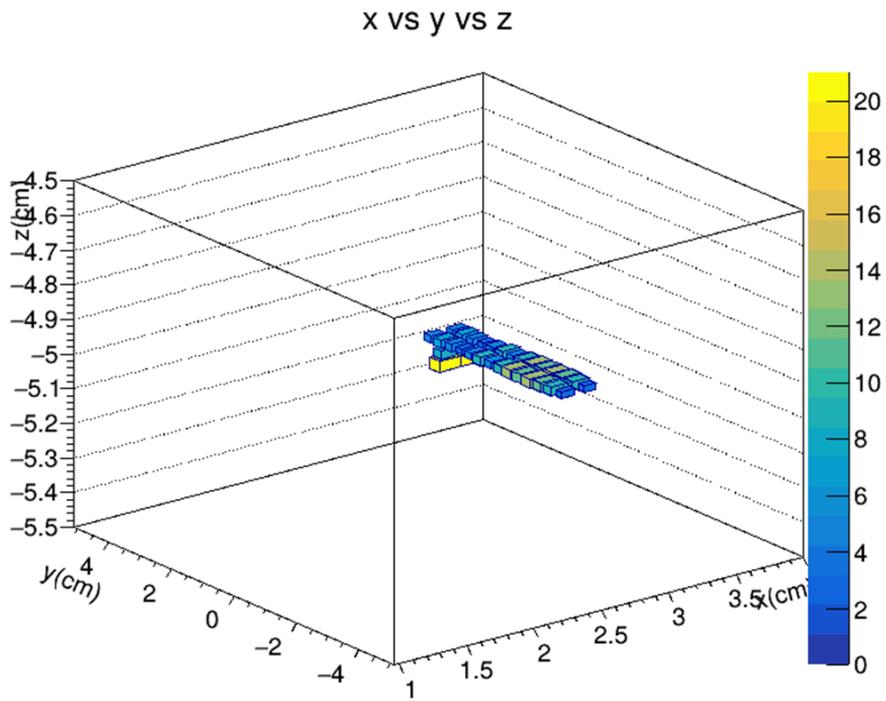


図 3.22: 陽子 levent の3次元飛跡

## 4 結果

前章で説明した実験方法に従って、TPC とタンデム加速器を用いた実験を行った。使用した陽子のエネルギーは 2.0, 2.1, 2.2, 2.3 MeV で、それぞれについてヒットマップと、飛程とエネルギーの関係性を調べた。

図 4.1 は各エネルギーのデータから得られたヒットマップ、図 4.2 は各エネルギーでの飛程とエネルギーの関係性のグラフである。左上、右上、左下、右下の順に 2.0、2.1、2.2、2.3 MeV の陽子のデータであり、各エネルギーでの計測時間やイベント数は表 3.3 に示した。また、図 4.3 は陽子の飛程がエネルギーによってどのように変わるかをシミュレーションした結果である。陽子のエネルギーが大きいくほどガス中での飛程は長くなるのが図 4.3 から確認でき、2.0 MeV と 2.3 MeV では 2cm 程度の差がある。このことから、二種類のグラフにはエネルギーの変化に対応したピーク位置の変化が確認されることが期待された。しかし各エネルギーのヒットマップを比較すると、 $y=-4$  前後に共通してピークを持つことが分かる。これはガス中の飛程に直すと約 5cm で、図 4.3 の結果から期待されるピーク位置とは異なる。また、図 4.1、図 4.2 共にこれ以外の明瞭なピークは確認できない。

実験結果についてより深く議論を進めるため、以降は最も大きなエネルギーを検出領域で落とすと考えられる 2.3 MeV のデータのみを用いて解析をした。

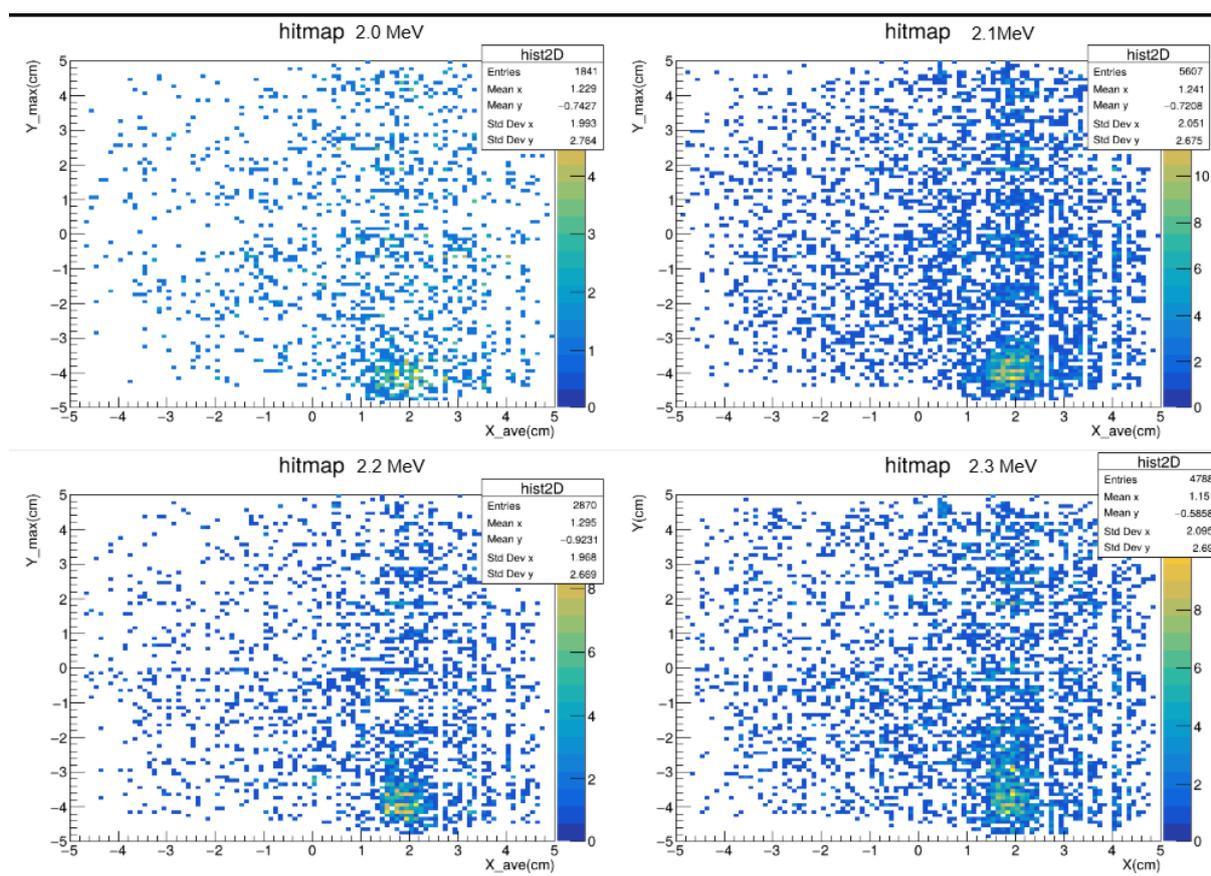


図 4.1: 各エネルギーのヒットマップ  
左上、右上、左下、右下の順に 2.0、2.1、2.2、2.3 MeV

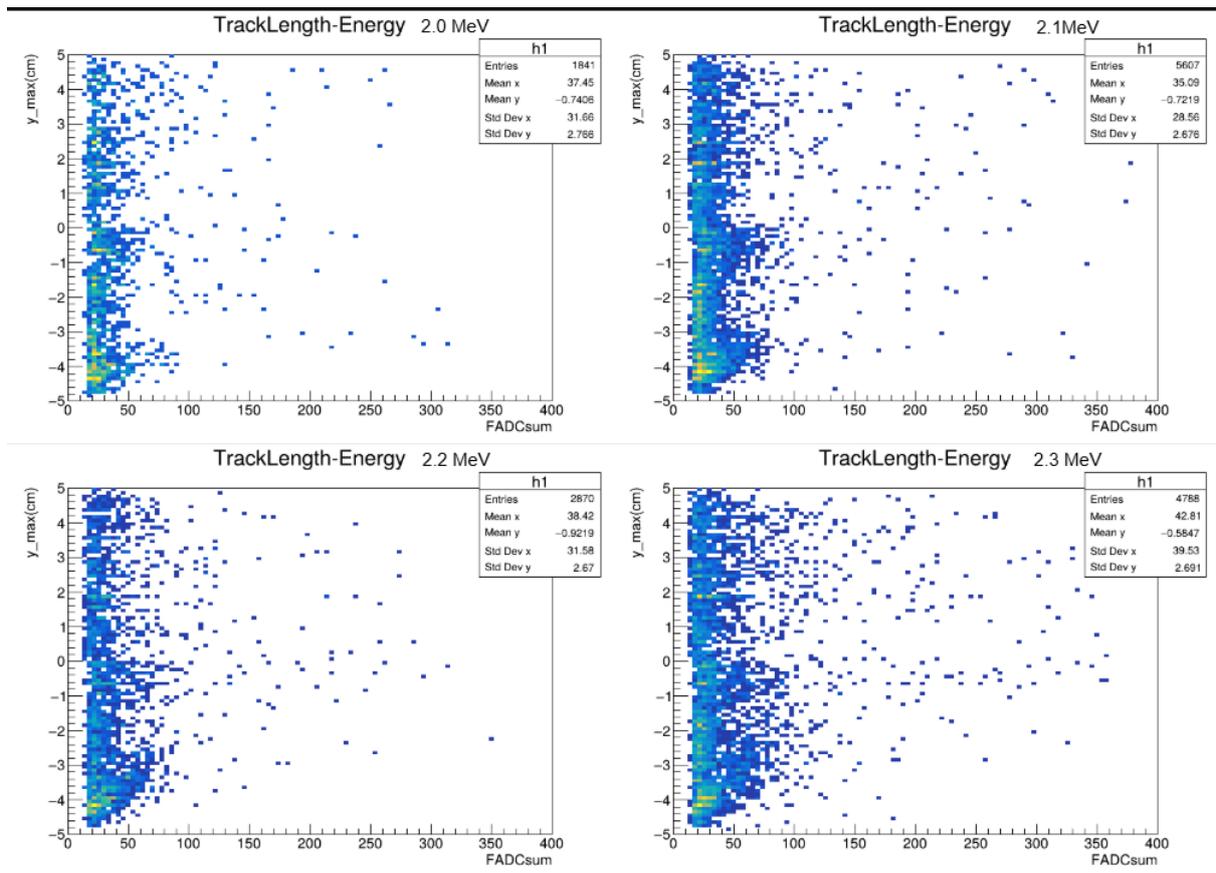


図 4.2: 各エネルギーでの飛程とエネルギーの関係  
左上、右上、左下、右下の順に 2.0、2.1、2.2、2.3 MeV

図 4.4 は 2.3 MeV のヒットマップである。4789 個の各イベントについて、ビーム方向に平行な  $y$  軸方向の座標の最大値とビーム方向に垂直な  $x$  軸方向の座標の平均値を二次元ヒストグラムにまとめたもので、各陽子が検出領域内のどこまで到達したかがおおよそ分かる。この図を見ると、検出領域の入り口である  $x=2$  周辺に信号が多く分布していることが分かり、ビーム由来の信号を検出できたと考えられる。一方で、期待された  $y=-1$  付近のピークは確認できない。

次に、図 4.5 に 2.3MeV における飛程とエネルギーの関係のグラフを示す。縦軸は図 4.4 と同様に  $y$  座標の最大値で、横軸は FADC 値の合計である。横軸はエネルギーに対応する値なので、検出領域での運動距離と、陽子のエネルギー損失の相関が分かる。検出領域内で進んだ距離が長いイベントほど多くのエネルギーを落とすと考えられるので、正の相関を持つようなプロットが期待される。しかし実際に得たグラフにはそのような傾向は見えない。

次に、図 4.6 に示した  $y$  座標の最大値のヒストグラムについて考察をする。縦軸はイベント数で横軸は  $y$  座標の最大値である。各陽子がどこまで到達して止まったかの分布を見ることができる。陽子由来の信号のみを効率的に得るために、 $x$  座標の平均値が  $1.5 \leq x \leq 2.5$  であるイベントだけを参照した。図 4.6 には  $y=-4$  にピークが見られ、 $y=-5$  から入射した陽子の多くがこの位置で止まっていることが読み取れる。このヒストグラムは位置情報のみの分布でありエネルギーの情報はないので、ここで見えるピークはブラッグピークそのも

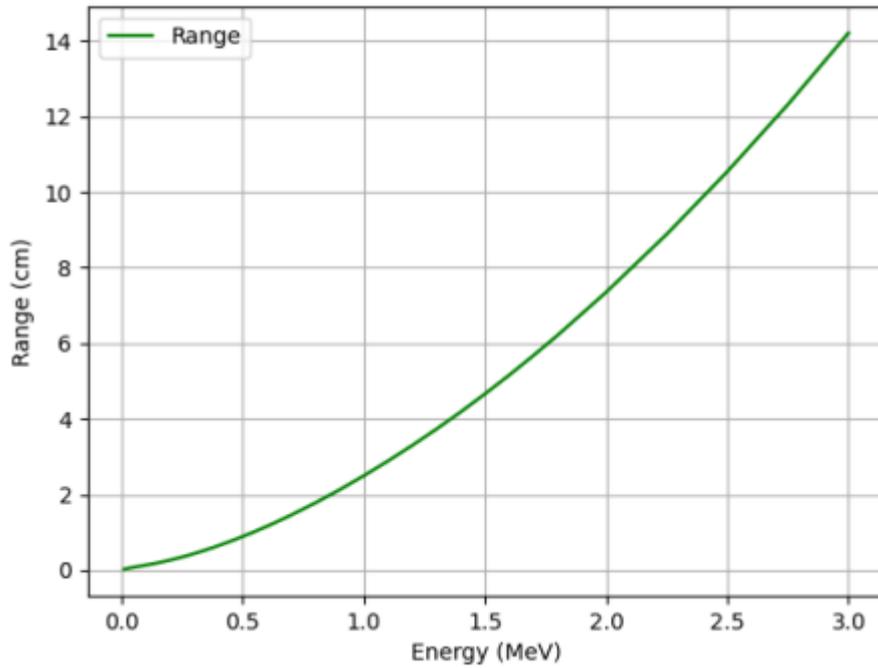


図 4.3: SRIM によるシミュレーション結果  
ガスには Ar + CO<sub>2</sub> の 9:1 混合ガスを 1 気圧で用いた

のではないが、多くの陽子が止まる位置では多くのエネルギー損失が起きることが予想されるので、ブラッグピークが形成される位置と関係があると考えられる。そのため、このヒストグラムに関しても  $y=-1$  にピークが来ることが期待されたが、やはり明瞭なピークは確認できない。

今回の実験では陽子由来と考えられるピークが見つかり、TPC を用いて陽子のエネルギー損失を測定することができたと考えられる。一方で、得られた結果には事前に期待されていたものと異なる点が見受けられた。次章では、実験結果が予想と異なるものになった原因について、シミュレーションを用いて探る。

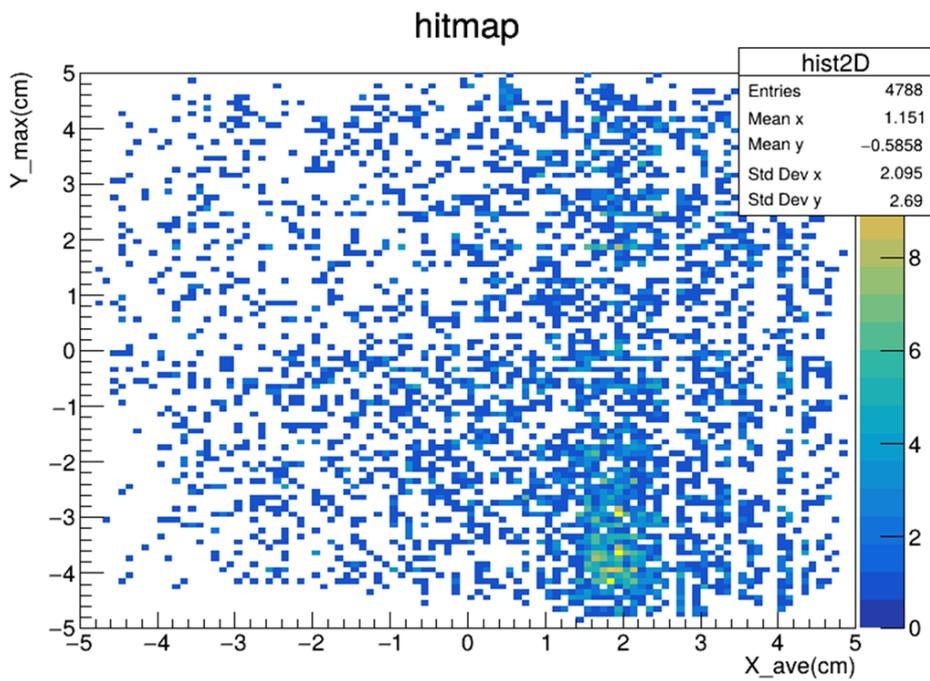


図 4.4: 2.3 MeV の陽子から得られたヒットマップ

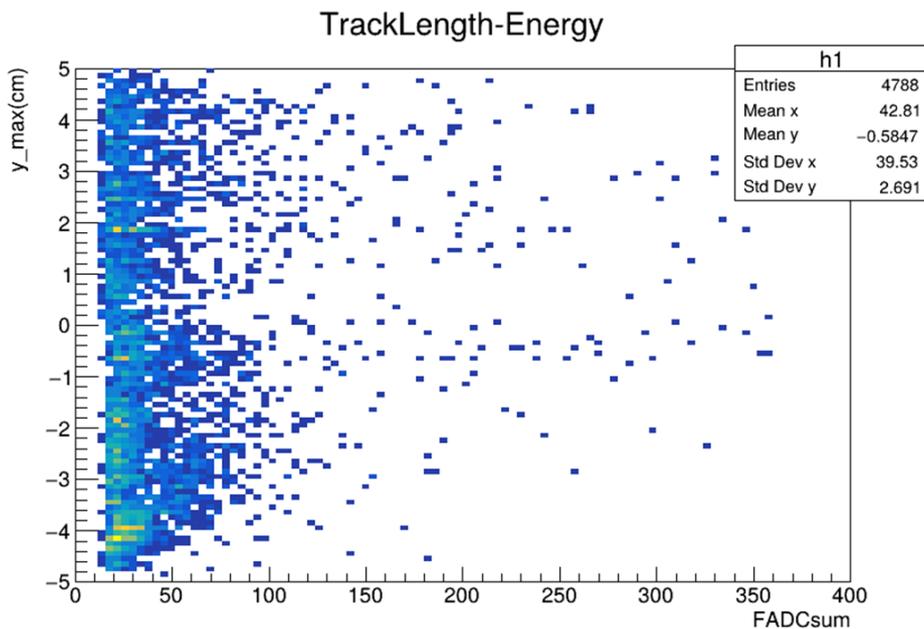


図 4.5: 2.3 MeV の陽子から得られた飛程とエネルギーの関係のグラフ

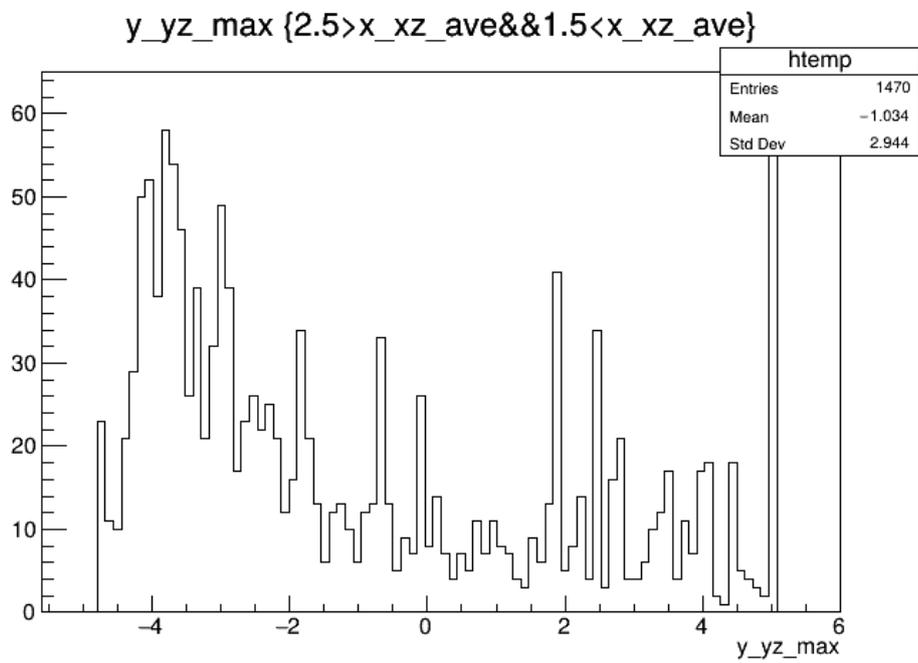


図 4.6: 2.3 MeV における  $y$  座標の最大値のヒストグラム

## 5 Geant4 シミュレーション

本実験では、使用するガスと陽子のエネルギーを決定するために SRIM を用いてシミュレーションを行った。さらに、実験で得られた結果について詳しく考察を行うために Geant4 を用いてシミュレーションを行い、その結果を実験結果と比較した。本章では Geant4 を用いて行ったシミュレーションについて述べる。

### 5.1 シミュレーション条件

Geant4 上で再現した検出器のジオメトリを図 5.1, 5.2 に示す。図中で白線で示されているのがチェンバー本体であり、外側は真空、内側はガス領域になっている。桃色の部分がフィールドケージであり、その内側の赤色の部分が検出領域である。それぞれ実験で用いたものと同じ寸法で再現している。また、図 5.2 中にあるようにビームと平行な平面を  $xy$  平面とし、原点は検出領域の中央、ビームの進行方向を  $y$  軸とした。この時、検出領域は  $-5.12\text{cm} \leq x \leq 5.12\text{cm}$ 、 $-5.12\text{cm} \leq y \leq 5.12\text{cm}$  の範囲である。

図 5.1 中の矢印はチェンバーに空けた入射孔を示しており、ここからステンレス製のチューブを通して陽子が入射する。図 5.2 中の赤矢印は陽子の入射方向を示している。チューブの先端、ガス領域と真空領域の境界にはステンレス製の薄膜がある。厚さが  $10\ \mu\text{m}$  で中央に直径  $1\ \mu\text{m}$  の孔が空いており、ここを通った陽子が検出領域に入射する。図 5.3 にその様子を示す。膜とフィールドケージの間は  $3.0\text{cm}$ 、フィールドケージと検出領域の間は  $1.5\text{cm}$  なので、陽子はガス中を  $4.5\text{cm}$  運動した後に検出領域に入る。

ガスは Ar と  $\text{CO}_2$  の 9:1 混合ガスであり、本実験と同じく  $1$  気圧とした。陽子のエネルギーは  $2.3\ \text{MeV}$  で、 $20\ \mu\text{m}$  の円状に一様に分布し、初速はパイプの軸方向とした。ステンレス膜の入射孔の直径が  $1\ \mu\text{m}$  であるため、入射する陽子の多くは膜に遮られ、一部だけが検出領域に入ると予想される。入射する陽子は  $100,000$  発である。

以上の条件で陽子のエネルギー損失を測定し、本実験と同様にヒットマップや飛程とエネルギーの関係、プ

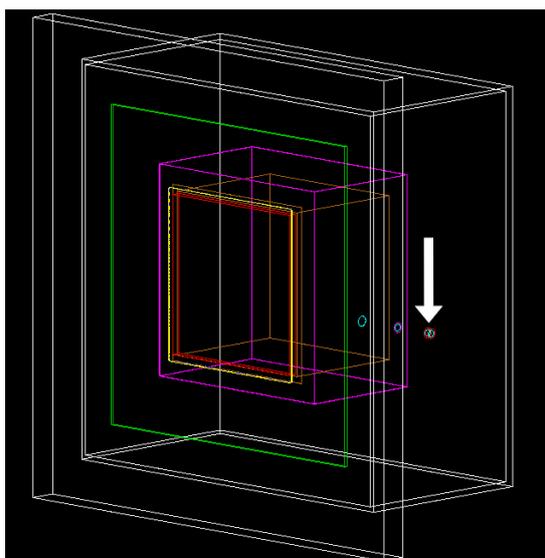


図 5.1: ジオメトリの全体像

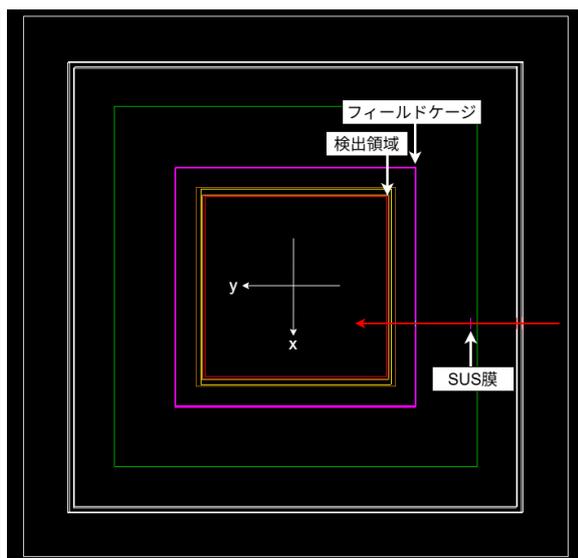


図 5.2: ジオメトリを正面から見た様子

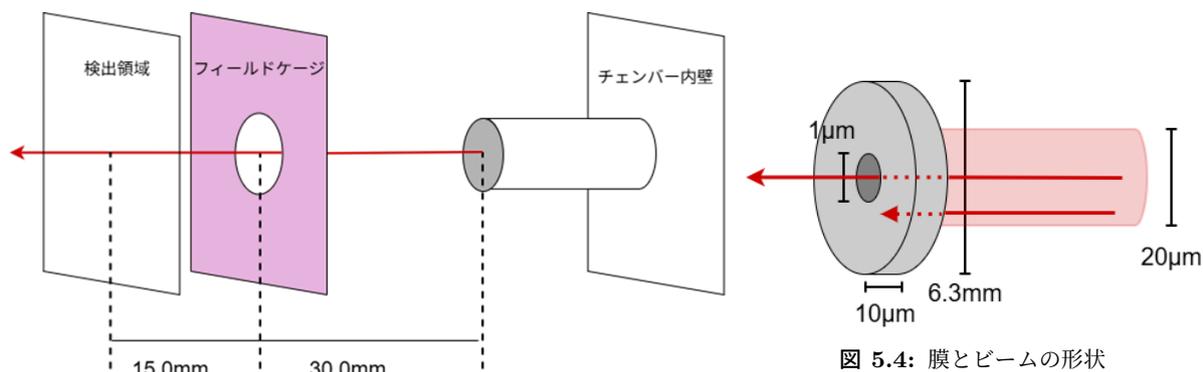


図 5.3: 入射孔周辺の構造の模式図

ラックカーブを得た。

## 5.2 シミュレーション結果

上記の条件で Geant4 シミュレーションを行った結果を以下に示す。

### ヒットマップ

図 5.5 はヒットマップである。実験結果と同様に、横軸が陽子の各ステップの  $x$  座標の平均値、縦軸が  $y$  座標の最大値を表している。ビームは  $(x,y)=(2,-5)$  から  $y$  軸正方向に入射したので、事前の SRIM によるシミュレーション結果から、検出領域に到達した陽子の多くは  $(x,y)=(2,-1)$  付近に到達しピークを形成すると予想されていた。図 5.5 のヒットマップにはこの予想と一致している位置に実際にピークができているのが確認できた。一方で、これとは別に検出領域の端、 $y=-5$  にもうひとつのピークができていたことも確認できた。

### 飛程とエネルギーの関係

図 5.6 は飛程とエネルギーの関係を表している。横軸が陽子の  $y$  座標の最大値、縦軸が陽子が検出領域で落としたエネルギーである。飛程が伸びるほど落とすエネルギーが大きくなり、かつ  $y=-1$  付近にピークができることが期待された。しかし実際に得られたシミュレーション結果には、ヒットマップと同様に  $y=-5$  付近にピークができていたことが確認され、こちらも事前の予想と異なる結果になった。

### ピーク位置についての考察

ここで、事前の予想に反して  $y=-5$  付近にピークができていた理由を探った。まず陽子の振る舞いを観察するために、実際の陽子の軌跡を描画したものを図 5.7 に示す。図中の黄色の線が陽子の軌跡であり、この図では 200 事象分の軌跡を描画した。図中右側の膜からガス領域に陽子が入っていることが確認できるが、その多くが検出領域の端で止まっていることが実際に確認できた。前述の通り入射孔の直径  $1\ \mu\text{m}$  に対しビームは直径  $20\ \mu\text{m}$  の一様分布であることから数百事象に一事象程度しか入射孔を通過できないはずであるので、このように多くの陽子が検出領域の端に来ることは予想に反した。一方で  $y=-1$  付近まで到達している陽子もごく少数存在していることから、このような適切に入射孔を通過した陽子とは別に、膜に遮られても止まることな

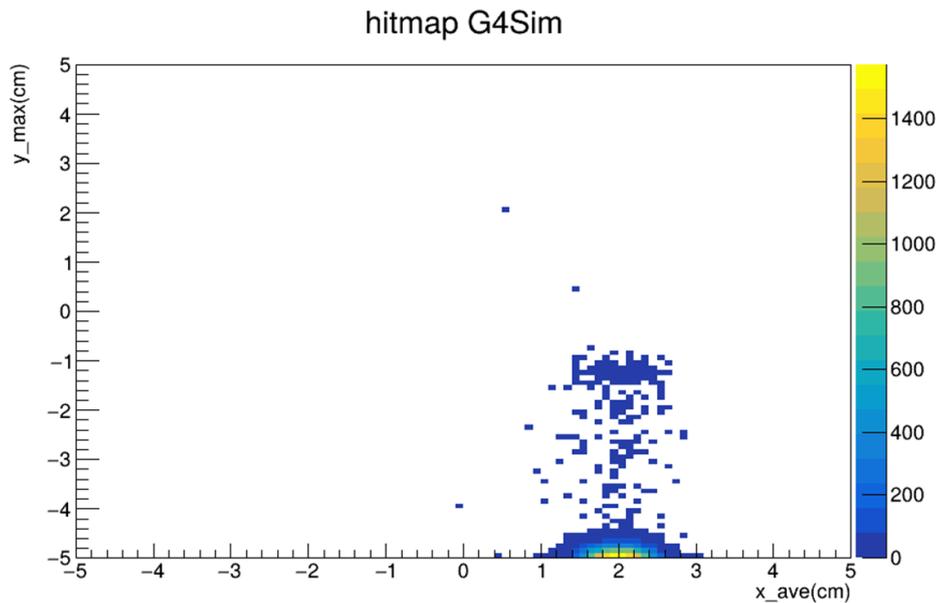


図 5.5: Geant4 で得たヒットマップ  
 ビームの軌道に沿って二つのピークが確認できる

く膜を貫通してしまった陽子が多数存在するのではないかと考えた。

このことを確かめるために、端で止まった陽子の各ステップの情報を確認したところ、確かに入射孔ではなく膜の部分を通過していることが分かり、その際におよそ 1 MeV 程度のエネルギーを失っていることが分かった。つまり膜で遮られるはずの陽子がそこで止まらずに膜を貫通して検出領域に到達してしまっており、このような陽子を作るピークが  $y=-5$  付近に見られたのだと考えられた。SRIM でもステンレス中での陽子の飛程を計算したところ、2.3 MeV の陽子では  $22 \mu\text{m}$  程度の飛程があることが分かった。膜の厚さは  $10 \mu\text{m}$  であるため、膜を貫通しても十分にエネルギーを持ったままであることが確かめられた。

このように、膜で止まると想定していた多数の陽子が貫通して検出されてしまったために、期待されるピークとは異なるピークが見えていたことがわかった。以後、入射孔を通過した陽子と膜を貫通した陽子をそれぞれ通過事象と貫通事象と呼称する。

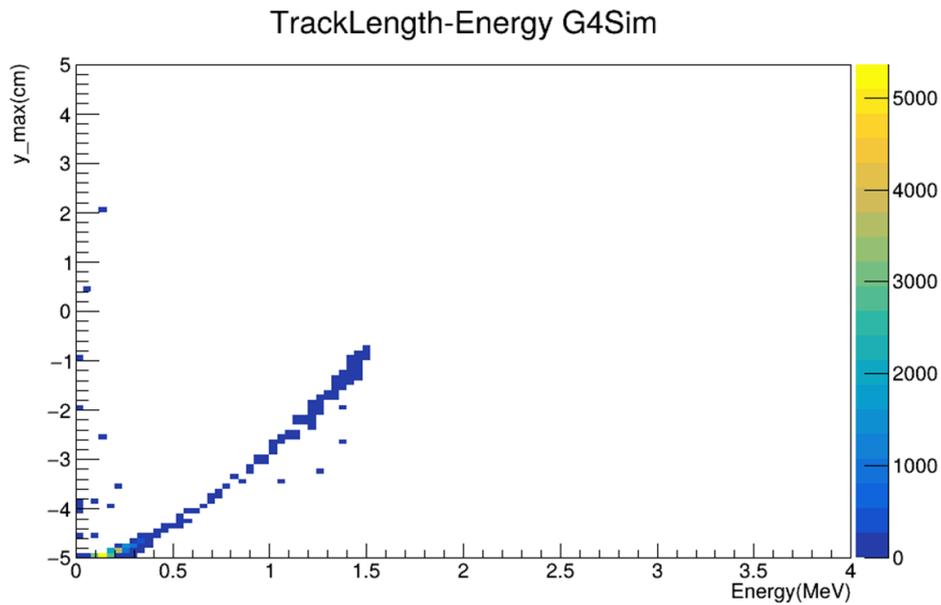


図 5.6: Geant4 で得た飛程とエネルギーの関係のグラフ

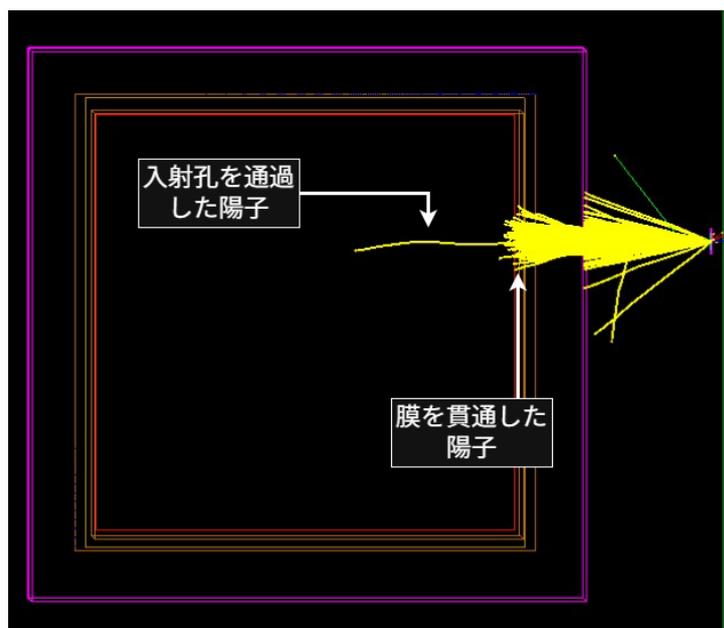


図 5.7: Geant4 シミュレーションでの陽子の飛跡

### 5.3 比較とブラッグカーブ

次に、実験で得られた結果とシミュレーションで得られた結果を比較した。図 5.8 はそれぞれのヒットマップを比較したものである。縦軸と横軸はどちらも陽子の y 座標の最大値と x 座標の平均値を表している。図中にあるように、貫通事象由来と考えられるピークが入射孔付近に共に見られる一方で、通過事象由来と考え

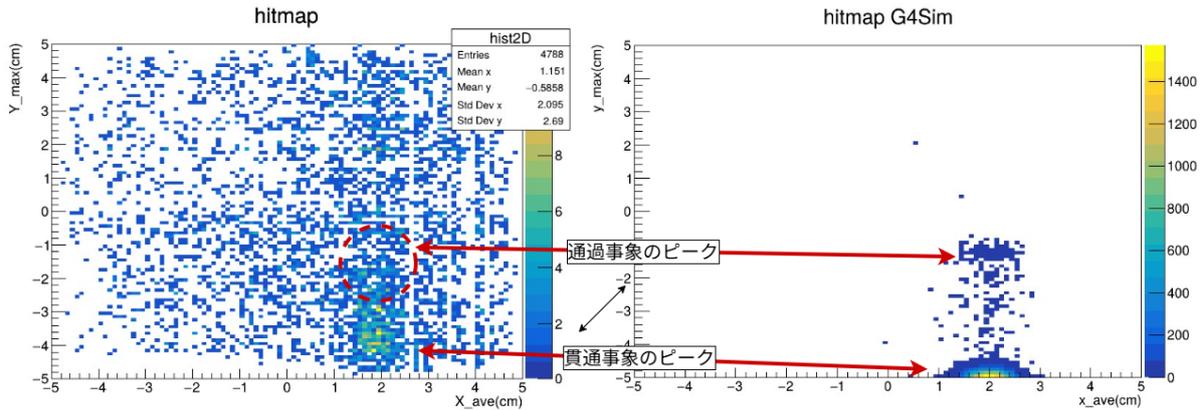


図 5.8: ヒットマップの比較  
左が実験結果 右がシミュレーション結果

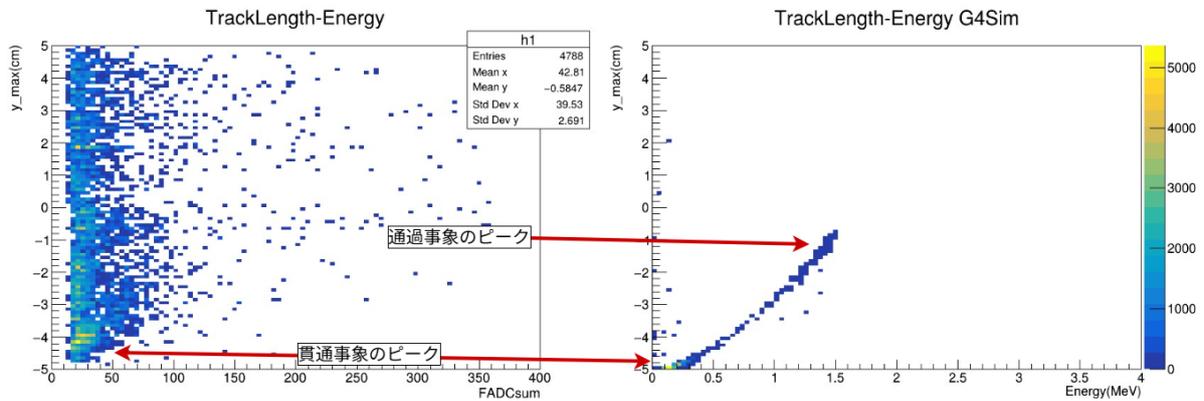


図 5.9: 飛程とエネルギーの関係の比較  
左が実験結果 右がシミュレーション結果

られるピークは実験結果の方には明瞭には確認できない。図 5.9 は飛程とエネルギーの関係の比較である。縦軸はどちらも陽子の y 座標の最大値で、横軸はシミュレーション結果では検出領域内で落としたエネルギー、実験結果ではそれに対応する値として ADC 値の合計を用いた。これについてもヒットマップと同様に、貫通事象由来と考えられるピークが入射孔付近に共に見られる一方で、通過事象由来と考えられるピークは実験結果のグラフには確認できない。

最後に、それぞれの結果から得た陽子のブラッグカーブの比較を行った。まず、それぞれのブラッグカーブを描画するための解析方法について述べる。実験結果について、縦軸の値は各イベントにおける ToT の値をそのイベントで信号を検出したストリップの数で割り、それを全イベントで座標ごとに平均を計算したものである。ToT は陽子が検出領域内で落としたエネルギーに対応する値であるため、1 ストリップあたりの ToT について平均値をとることで陽子のブラッグカーブを得ることができると考えた。さらに、より明確にブラッグピークを確認するために用いるデータにフィルタをかけた。具体的には、ヒットマップで信号が多く検出されている  $1.0 \leq x_{ave} \leq 3.0$ 、 $-5.0 \leq y_{max} \leq 2.0$  の範囲の信号だけを抽出して計算に用いた。なお、この y 座標の最大値の範囲は飛程に直すと  $4.5 \leq length \leq 11.5$  となる。シミュレーション結果について、Geant4 では陽子が検出領域内で落としたエネルギーと各ステップの座標を直接得ることができるため、各イベントにお

けるエネルギーの値をステップ間の距離で割ることで  $dE/dx$  (MeV/cm) とし、座標ごとに全イベントでの平均を計算することでブラッグカーブを得ることができた。横軸はビームと平行方向である  $y$  軸の最大値の値である。ただし、原点を入射孔の位置に変えているので、実質的なガス中での飛程とみなせる。以上のような解析によって二つのブラッグカーブを得た。

図 5.10 が実験結果から得たブラッグカーブ、図 5.11 がシミュレーション結果から得たブラッグカーブである。さらに図 5.12 は二つのグラフを重ねたものである。なお縦軸は規格化されている。これらの図から読み取れることを述べる。まず、シミュレーション結果のブラッグカーブには二つのピークが確認できるが、これは前述の通り、通過事象と貫通事象の二種類の陽子がそれぞれ形成するブラッグピークであると解釈できる。これに対し実験結果のブラッグカーブにははっきりとしたピークが確認できない。図 5.12 の比較から貫通事象のピークが期待される飛程が 4.5~5.0cm の位置にやや盛り上がりが見えるが、ブラッグピークとみなすのは難しい。通過事象のピークも見受けられず、ヒットマップや飛程とエネルギーの関係のグラフでもブラッグピークとみなせるようなピークは確認できなかったことから、実験データからブラッグピークを確認することはできなかったと結論づけた。

目的のブラッグピークが観測できなかった原因について次章で議論する。

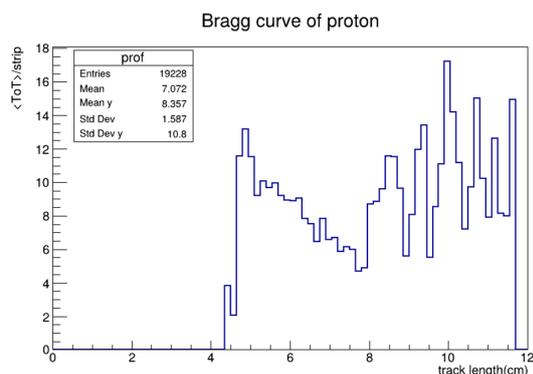


図 5.10: 実験データから得たブラッグカーブ

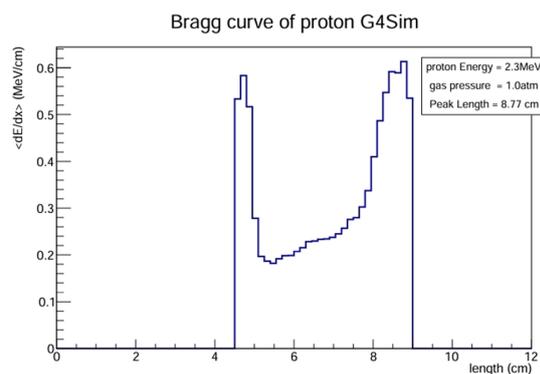


図 5.11: シミュレーションから得たブラッグカーブ

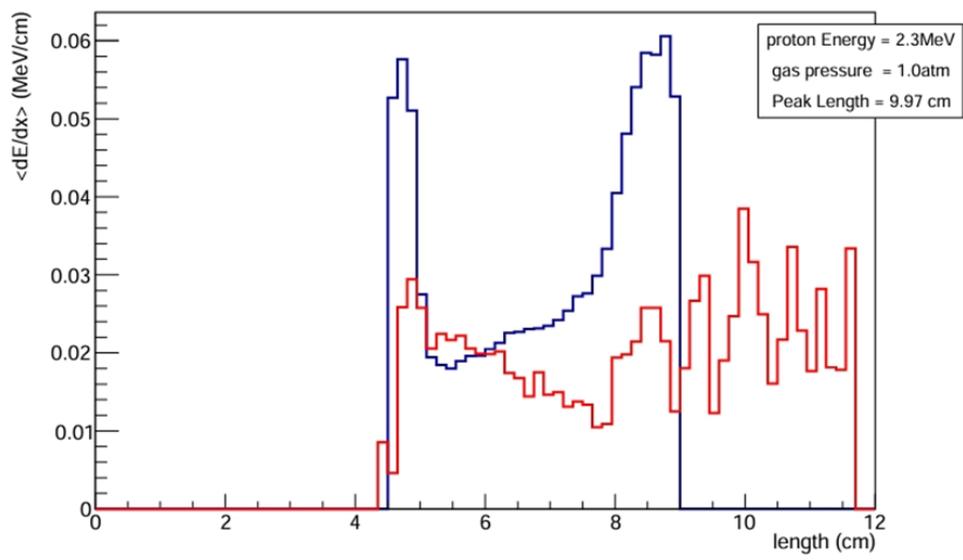


図 5.12: ブラッグカーブの比較

## 6 考察

前章の通り、今回の実験では期待されたブラッグピークを観測することはできず、シミュレーションの結果とも大きく異なる結果に終わった。このことについて、考えられる要因を以下で考察する。

### 6.1 装置のアライメントの問題

今回用いた膜は厚みが  $10\ \mu\text{m}$  あるのに対し、そこに空いた入射孔の大きさは直径  $1\ \mu\text{m}$  と小さく、かなり細長い構造のものであった。そのため、図 6.1 のようにビームの角度に対して入射孔の角度がほんのわずかも傾いていると陽子は適切に入射孔を通過できない。例えば仮にビームが全て平行と仮定すると、それに対して入射孔が約 6 度傾くと全ての陽子が膜に接触し、エネルギーの一部を失ってしまう。フランジのチューブに膜を接着する作業等は手作業で行われたため、膜の傾きが実際にこれより大きかった可能性は十分に考えられる。その他にも、チューブが曲がっていたり、タンデム加速器から TPC までの装置のどこかがまっすぐ接続されていなかったり等、今回用いた装置全体のどこかのアライメントの問題のために陽子が入射孔を全く通過しなかった結果、目的のブラッグピークが観測できなかったのではないかと考えた。

### 6.2 膜の薄さについて

シミュレーション結果から、 $2.3\ \text{MeV}$  の陽子は今回用いた  $10\ \mu\text{m}$  のステンレス膜を貫通し検出領域に到達していたと分かった。これによって生じたと考えられる現象が、 $2.3\ \text{MeV}$  以上のエネルギーの陽子を高いレートで入射させた際に生じていた放電である。本実験では複数のエネルギーの陽子を測定で用いたが、 $2.3\ \text{MeV}$

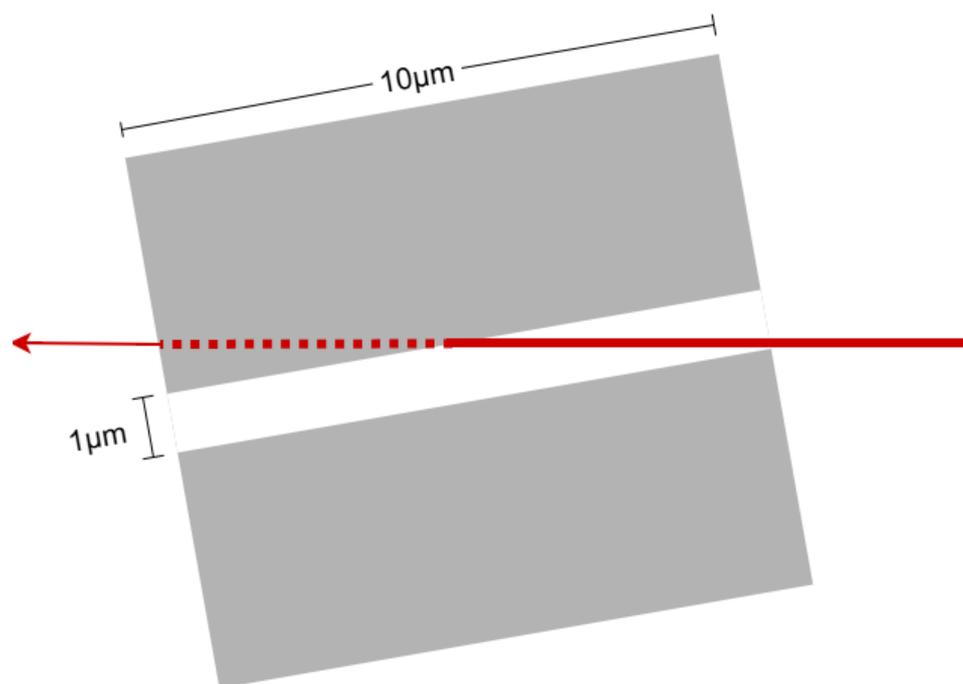


図 6.1: 傾いている膜のイメージ

以上の陽子を TPC に打ち込むと放電が起き、GEM や  $\mu$ -PIC に電流が流れてしまっていた。その結果、ビームの軌跡近傍のストリップで信号がほとんど検出できず、有意なデータが得られなかった。2.3 MeV ではビームのレートを極力落とすことで解決したが、2.4 MeV 以上ではレートによらず計測できなかった。

実験中にはこの現象の原因を特定できなかったが、Geant4 シミュレーションの結果から、これは遮られる想定だった多数の陽子が TPC に到達してしまうことで、TPC 内で過剰なエネルギー損失が起き放電を引き起こしたと考えることができる。2.3 MeV 以上のエネルギーで大きな影響が現れたのも、2.3 MeV で貫通事象がちょうど検出領域の端に到達していたことから説明でき、陽子のレートを下げて放電が落ち着いたことも自然と言える。

この現象の影響で使用する陽子のエネルギーに制限がかかってしまっただけでなく、貫通事象の陽子の信号に検出器のトリガーが反応してしまい、通過事象はほとんど捉えることができなかった可能性がある。実際、今回の解析に用いた約 5000 イベントの中から通過事象由来と考えられるものを探して飛跡の復元を試みたが、図 6.2 のようなものは 10 イベントも見つからなかった。

このように、仮にアライメントに問題がなかったとしても、膜を貫通した陽子が原因で、目的のピークを作るような陽子をほとんど検出できていなかった可能性が考えられた。

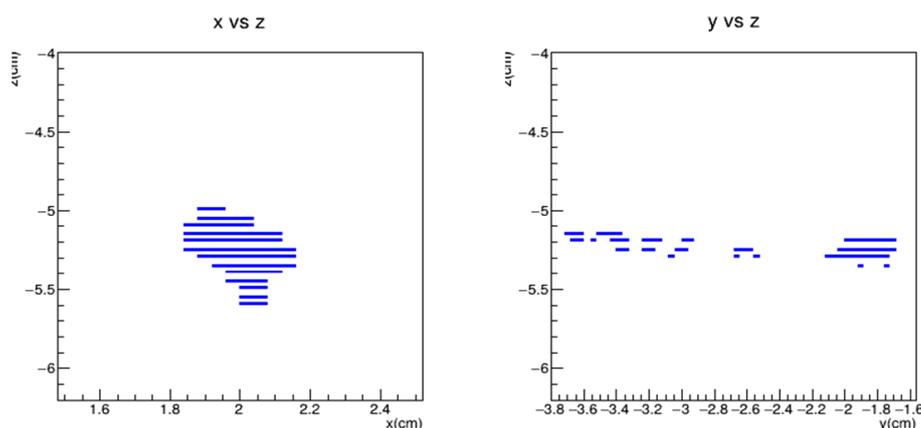


図 6.2: 通過事象の陽子由来と見られる信号の飛跡  
x 方向には幅がなく y 方向には幅をもち、 $y=-1$  付近で止まっている

### 6.3 ガスゲインについて

事前の基礎実験では、検出器に用いるガスの混合比や圧力を比較検討し、十分なガスゲインが出せるものとして Ar+CO<sub>2</sub>、1 atm という条件のガスが最終的に本実験で用いられた。基礎実験で使用した装置は本実験で使用したもの異なるが、それでも陽子の信号を検出するのに十分なガスゲインを出せるだろうと考えて実験を行った。宇宙線  $\mu$  粒子でのエネルギー較正を行うことを予定していたが、放電等で十分なガスゲインを得ることができなかったため、実験時のガスゲインを求めることができなかった。このため、検出器のリークなどによってガスの純度が劣化し、実際にはテストチェンバーで得られたほどのガスゲインが無く、信号がノイズに埋もれて見えなくなってしまった可能性を考えた。

## 7 結論

本研究では、陽子のエネルギー損失をガス TPC とタンデム加速器を用いて測定し、ブラッグピークの観測を目的とした実験を行った。測定結果から陽子のエネルギー損失を取得することができたが、明瞭なブラッグピークを確認することはできなかった。その要因の一つとして装置全体のアライメントに問題があった可能性が考えられる。また、Geant4 シミュレーションの結果から多くの陽子がステンレス膜を貫通し検出領域に到達していたことが示唆され、ブラッグピークの観測を困難にした一因と考察した。この結果は実験結果のヒットマップの分布とも整合的である。

以上の結果から、本研究では目的であったブラッグピークの観測には至らなかったものの、シミュレーション結果との比較によりその原因を考察した。

## 謝辞

本研究を進めるにあたり、ご協力いただきましたすべての方々に感謝申し上げます。

まず、担当教員の身内賢太郎教授には本研究において時にあたたかく、時に明るく、多くのご助言をいただきましたこと心より感謝申し上げます。行き詰った際、身内教授のご意見を伺いに行くたびに新たな知見と元気をいただき、研究面と心理的な面の両方で大きく支えていただきました。

また、我々の理解が及ぶまで根気よく議論してくださった東野聡特命助教にも深く感謝申し上げます。本実験中もお忙しいにも関わらず研究の進捗に対してくださったたくさんのコメントは、方針を決定するにあたり大変有難いものでした。タンデムを去る前にいつの間にか苦丁茶を淹れて全員に飲ませていたことはいい思い出です。

さらに、ティーチングアシスタントとして常に親身に相談に乗ってくださった神戸大学粒子物理研究室博士課程前期課程の野村脩貴氏にも感謝申し上げます。昨年度の研究の様子を教えていただいたことで、実際のタンデムでの実験のイメージを持ちながら研究を進めることができました。

最後に、本研究に関わるすべての方々にあらためて感謝申し上げ、謝辞とさせていただきます。

## 参考文献

- [1] Particle Data Group, "Passage of Particles Through Matter", Eq. (34.5), <https://pdg.lbl.gov/2022/reviews/rpp2022-rev-passage-particles-matter.pdf>
- [2] Particle Data Group, "Passage of Particles Through Matter", Fig. (34.1), <https://pdg.lbl.gov/2022/reviews/rpp2022-rev-passage-particles-matter.pdf>
- [3] J.F. Ziegler, M.D. Ziegler, and J.P. Biersack, "SRIM - The stopping and range of ions in matter (2010)", <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168583X10001862?via%3Dihub>
- [4] KEK, "MPGD プロジェクト", [https://rd.kek.jp/project/mpgd/index\\_20160412j.html](https://rd.kek.jp/project/mpgd/index_20160412j.html)
- [5] CERN, "GAS ELECTRON MULTIPLIER - GENERAL", <https://gdd.web.cern.ch/sites/default/files/oldGDD/www/gemgeneral.html>
- [6] T. Nagayoshi, "Development of Micro Pixel Chamber and Systematic Study on the Electrode Structure," Ph.D. thesis, Department of Physics, Kyoto University, 2004, [https://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/publication/d\\_ron/nagayoshiD.pdf](https://www-cr.scphys.kyoto-u.ac.jp/publication/d_ron/nagayoshiD.pdf)
- [7] Anna Peisert and Fabio Sauli, Drift and diffusion of electrons in gases : a compilation (with an introduction to the use of computing programs), <https://cds.cern.ch/record/154069>.