# 2024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 門田 佳吾・遠山 和佳子・野村 脩貴・山内 康輝

2025年4月7日

# 目次

1	理論	3		
1.1	エネルギー損失	3		
1.2	エネルギー領域	3		
1.3	ブラッグピーク	7		
1.4	ガス中の反応....................................	7		
1.5	検出原理	8		
2	実験装置	10		
2.1	Tandem 加速器	10		
2.2	ガス TPC	10		
2.3	検出器システムの構造体....................................	15		
2.4	読み出し回路	18		
3	基礎実験	20		
3.1	基礎実験の原理・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・	20		
3.2	セットアップ	21		
3.3	実験結果	23		
4	シミュレーション	25		
4.1	SRIM によるシミュレーション	25		
4.2	シミュレーション条件	26		
4.3	シミュレーション結果	27		
4.4	ビーム初期位置とエネルギーの関係....................................	30		
5	Tandem 加速器における実験	33		
5.1	実験条件	33		
5.2	データ	36		
5.3	飛跡検出	37		
5.4	ブラッグピークの観測	41		
6	結論	45		
謝辞		46		
参考文献				

#### 概要

荷電粒子が物質中に入射した際、物質中を進む過程で持っているエネルギーが失われる。我々は陽子のガス 中でのエネルギー損失を実験的に確かめたいと考えた。そこで、本研究の目的をアルゴンガス中での陽子のブ ラッグピークを観測することとした。検出器としてガス TPC を用い、神戸大学海事研究科にあるタンデム加 速器を用いて 3 MeV まで加速させた陽子を TPC 内に入射させた。本論文ではエネルギー損失についての理 論、実験装置、基礎実験、実験により得られたデータの解析結果について述べる。

# 1 理論

## 1.1 エネルギー損失

荷電粒子が特定の dx を持つ吸収体を通過するとき、荷電粒子はエネルギー dE を失う。このエネルギー損 失 dE は粒子が吸収体の原子と相互作用を起こすことによって生じる。今回の実験において、この相互作用は 粒子が物質中の電子を電離させるというものが考えられる。このとき、エネルギー損失 dE/dx は阻止能と呼 ばれる。



図 1.1: エネルギー損失の模式図

#### 1.2 エネルギー領域

図 1.2 に阻止能の運動量依存性を示す。今回の実験で測定しようとしている領域は図 1.2 の赤太線に挟まれ ている比較的低運動量の部分である。以降で阻止能の運動量依存に関して、いくつかの運動量領域に分けて述 べる



・低エネルギー領域

図 1.3 で示している低エネルギー領域には Lindhard-Scharff model が適用できる。低エネルギーの荷電粒 子は標的物質の電場によって減速され、速度が大きく減少するため阻止能が急激に上昇する。阻止能の速度依 存性は、

$$-\frac{dE}{dx} = nz^{\frac{1}{6}} \frac{zZ}{(z^{\frac{2}{3}} + Z^{\frac{2}{3}})^{\frac{3}{2}}} 8\pi\hbar a_0 v$$
(1.1)

と表すことができる。ここで、n は原子の数密度、z は粒子の電荷、Z は吸収体の原子番号、 $a_0$  はボーア半径、v は粒子の速度である。



図 1.3: Lindhard-Scharff 領域 [1]

・中エネルギー領域

図 1.4 で示している中エネルギー領域には Bethe-Bloch の式が適用できる。物質中の電子や原子核との衝 突が多様化し減速しにくくなるため、阻止能が速度の二乗に反比例して急速に減少する。速度の依存性は、

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 Z^2}{m_0 v^2} NB$$
(1.2)

と表すことができる。ここで、 $B \equiv Z [\ln \frac{2m_0 v^2}{I} - \ln (1 - \frac{v^2}{c^2}) - \frac{v^2}{c^2}]$ 、v は粒子の速度、N は単位体積当たりの 吸収体の原子の個数、Z は原子番号、 $m_0$  は電子の静止質量、e は素電荷である。



・高エネルギー領域

図 1.5 で示している高エネルギー領域では放射損失や原子核との散乱によって、より多くのエネルギーを失うため阻止能は上昇する。



本研究では、Linddahard-Shafft 領域と Bethe-Bloch 領域の間の、阻止能がピークとなる近傍の運動量について実験的に検証することを目的とする。

#### 1.3 ブラッグピーク

前述の通り、荷電粒子が物質内を通過するとき、その荷電粒子は物質中の原子を電離する。これにより、荷 電粒子は物質内を進むにつれてエネルギーを失っていき、いずれ停止する。この荷電粒子の通過距離とエネル ギー損失の関係をプロットしたものをブラッグ曲線と呼ぶ。物質内を進む荷電粒子が停止する直前、エネル ギー損失は最大になり急激にほぼゼロまで低下する。この極大部分はブラッグピークと呼ばれる。図 1.6 は陽 子が1気圧のアルゴンガス内を通過したとき、陽子のエネルギーに対するエネルギー損失を、SRIM という ツールを用いてシミュレーションしたものである。また図 1.7 は陽子の進んだ距離に対するエネルギー損失を 表している。





図 1.7: 陽子の進んだ距離に対するエネルギー損失

#### 1.4 ガス中の反応

今回の実験では検出器内をアルゴンガスで満たした。図 1.8 は陽子がアルゴン中を通過したときの反応を模式的に表している。前述したように陽子はアルゴン原子の電離を引き起こし、それに伴って電子が発生する。 このとき、アルゴン原子1個を電離させるのに必要な平均エネルギーは 26eV である。



図 1.8: アルゴンの電離

#### 1.5 検出原理

今回の実験にはガス TPC(Time Projection Chamber、三次元飛跡検出器)を用いる。検出用のガスとして アルゴンを用いることを考え、検出原理を述べる。

図 1.9 はガス TPC での検出を模式的に表した図である。今回ガス TPC 内はアルゴンで満たしている。検 出の流れは以下の通りである。

①ガス中を通過した荷電粒子がアルゴンを電離させ、電子が発生する。ここで発生する電子を一次電子と 呼ぶ。

② z 方向に形成された一様電場によって一次電子が検出面方向に一定の速度で移動する。

③検出面近傍に形成した強電場により一次電子を雪崩増幅させ (図 1.10) その電荷量を測定する。



図 1.9: 検出の模式図



測定した電荷量と増幅率 (ゲイン) が分かれば (式 1.3) を用いて荷電粒子のエネルギー損失を測定でき、検 出した位置から荷電粒子の2次元の飛跡が分かる。z 方向については一様な場内で電子のドリフト速度が一定 であることを利用する。電子が検出面に到達するまでの時間差を測定すれば、(式 1.4) を用いて z 方向の相対 距離を測定することができる。

以上の様にして、ガス TPC では入射した荷電粒子の3次元飛跡とエネルギー損失を測定することができる。

$$E_{loss} = \frac{Charge/e}{Gain_{gas}} \times 26 \ eV \tag{1.3}$$

 $E_{loss}$ ・・・エネルギー損失 Charge・・・検出された電荷量  $e \cdot \cdot \cdot$ 電気素量  $Gain_{gas} \cdot \cdot \cdot ガスゲイン$ 

 $z_{relative} = t_{defference} \times v_{drift}$ 

(1.4)

*z<sub>relative</sub>*・・・相対的な z 座標 *t<sub>defference</sub>*・・・検出の時間差 *v<sub>drift</sub>*・・・ガス中の電子のドリフト速度

# 2 実験装置

#### 2.1 Tandem 加速器

本研究では、神戸大学海事科学部にある Tandem 加速器を用いた。Tandem 加速器では、図 2.1 にあるよう に、加速管の中央部分に正の高電圧をかける。イオン源で生成した負イオンを加速し、高電圧ターミナル内で 負イオンを正イオンに変換して、再度加速させることで、実効的に 2 倍の加速電圧を得ることが特徴である。



今回用いた Tandem 加速器での陽子の最大加速エネルギーは 3.4MeV(1.7MeV × 2) で、最大ビーム強度は 100nA 程度であった。

#### 2.2 ガス TPC

本研究では、加速した荷電粒子の三次元飛跡を検出するためにガス TPC(Time Projection Chamber)を用 いた。ガス TPC とは、二次元の画像検出器と時間情報を合わせて三次元飛跡を検出可能とした装置である。 今回は GEM を前置電子増幅器、μ-PIC を主電子増幅器および二次元画像装置として用いた。ガス TPC のイ メージ図を図 2.2 に示す。荷電粒子の飛跡に沿って生成された電子を、フィールドケージで形成された電場で ドリフトさせ、GEM で増幅した後に μ-PIC で再度増幅、検出される構造になっている。図 2.3 は、本実験で 使用したガス TPC を示す。以降、GEM、μ-PIC、フィールドケージの順に説明する。



図 2.2: ガス TPC のイメージ図



図 2.3: 本研究で使用したガス TPC のチェンバー (左: イメージ, 右: 写真)

2.2.1 GEM

GEM(Gas Electron Multiplier) とは、図 2.4 のように数 10  $\mu$ m から数 100  $\mu$ m の厚さの絶縁体を 2 枚の 金属電極で挟み、多孔加工を施したものである。上下の電極にそれぞれ異なる電位をかけることで強電場を発 生させ、電子を雪崩増幅させる。今回は厚さ 100  $\mu$ m の液晶ポリマーと厚さ 5  $\mu$ m の銅で作られた GEM を 用いた。また、今回の GEM の穴の直径は 70  $\mu$ m で穴の中点間の距離は 140  $\mu$ m のものを用いた。



図 2.4: GEM の模式図 [2]

#### 2.2.2 μ-PIC

 $\mu$ -PIC(micro Pixel Chamber) とは、図 2.5 のように anode と cathode という 2 種類の電極を用いて異な る電位をかけることで anode,cathode 間に強電場を形成して、anode 付近で雪崩増幅させるものである。各 電極はストリップ接続され、チャージアンプで読み出すことで、検出した電子の量がわかるようになっている。 今回、 $\mu$ -PIC は anode-cathode がそれぞれ 256 ストリップずつのものを用いた。また、anode と cathode に よって形成される各ピクセルの間隔は 400  $\mu$ m、検出面積は 10 × 10 cm<sup>2</sup> である。座標は図 2.6 の様になっ ている。y 軸がビームと平行で、x 軸がビームと垂直となっている。ビームの入射孔は x=2.0 の位置にあり、 y の負の側がビーム上流部である。



#### 2.2.3 フィールドケージ

TPC として正しく機能させるためには検出領域の電場を一定で、かつ一様にすることが必要である。その ためにフィールドケージというのものを用いる。Femtet[4] という電場シミュレーションソフトを用いて今回 設計・製作したフィールドケージの効果を評価した。図 2.7 がフィールドケージがない場合で、外側の青い線 がチェンバー (0V)、上側の青い板が Drift 電位 (-3200V)、下側の青い板が GEM の上側の電位 (-590V) とし ている。図 2.8 はフィールドケージがある場合で、フィールドケージがない場合の条件に追加して、Drift 領 域の周囲に帯状の電極を配し、等間隔 (145V) の電位 (-3200V~-590V) を与えている。この帯状の電極のこ とをフィールドケージと呼ぶ。



図 2.7: フィールドケージがない場合の電場計算のジオメ 図 2.8: フィールドケージがある場合の電場計算のジオメ トリ トリ

この条件をもとに行った計算の結果を図 2.9、図 2.10 に示す。各図の色付きの矢印は向きは電場の向き、色 はその大きさを表し、赤が強い電場を、青が弱い電場を表している。これらの図はいずれもフィールドケージ 中央部の電場を描画している。



図 2.9: フィールドケージがない場合の電場計算の結果



図 2.10: フィールドケージがある場合の電場計算の結果

図 2.9 では、色にムラがあるため電場が一定ではなく、矢印の方向が場所によって異なる向きを向いている ため一様ではないので TPC として正しく機能しない。一方、フィールドケージがある場合には図 2.10、色が 揃っていて矢印の方向が一様なので今回のフィールドケージは正しく機能すると考えられる。この結果を定量 的に評価するために、電子の移動を計算した。モデルとして電子を電場の方向と逆向きに運動する粒子であ るとして考えた。この条件のもと、 $\mu$ -PIC の検出面の周囲 4 mm を除いた部分の直上の領域で発生した電子 のうちで、 $\mu$ -PIC に到達した割合を求めた。この結果、フィールドケージがない場合は 24.6 %、フィールド ケージを取り付けた場合は 99.8 % が  $\mu$ -PIC に到達するという結果を得た。この数字は、フィールドケージ の効果を定量的に示している。この帯状の電極に想定した電位を印加するために、電極間に表面実装の抵抗を 実装可能な基板を設計、製作した。図 2.11 は左に電極と抵抗実装の概念図、右に実物の写真を示す。この基 板を用いてフィールドケージを組み上げるために、キューブ状の枠を設計、3D プリンターを用いて製作した (図 2.12)。この枠の概形は 15 × 15 × 9.5 cm<sup>3</sup> で柱の太さを 1 × 1 cm<sup>2</sup> とした。ビームを通す位置の基板に は、直径 6.4 mm の穴を開けた。完成したフィールドケージを図 2.13 に示す。



**図 2.11:** フィールドケージ用基板 (左:概念図、右:実物の写真)



図 2.12: フィールドケージの枠



図 2.13: フィールドケージ

## 2.3 検出器システムの構造体

本研究では、陽子ビームを TPC に照射する。本研究で用いる予定のエネルギーの陽子は空気中で数 cm 進 んだだけで停止してしまうため、図 2.3 のチェンバーを直接ビームラインに接続する必要がある。そのため に、チェンバーおよび読み出し回路を一体化し、ビームラインに合わせて微調整可能な架台を設計、製作した。 図 2.14 はチェンバーと読み出し回路とその処理機構を架台に搭載した様子を表している。ここで、図 2.14 の 右図中の緑の点線は図 2.3 のチェンバー部分を表している。チェンバーから手前に向けて、接続のためのパイ プが伸びている。この検出器をビームラインに接続した写真が図 2.15 である。次に図 2.3 にある入射孔につ いて説明する。



図 2.14: 読み出し回路とチェンバー (左: 図面, 右: 実物)



図 2.15: 検出器システムをビームラインに接続した状態

#### 2.3.1 入射孔

本研究では、ビームラインの高真空とチェンバー内のほぼ大気圧の ガス領域の間の圧力差を維持した上で、陽子ビームを通す必要があ る。通常は薄いベリリウムなどの物質量の少ない窓を用いることが 多いが、それでも窓でのエネルギー損失が無視できないため、本研 究では微細な穴が加工されたステンレス箔を用いることとした。こ の穴のことを入射孔と呼ぶ。本研究では光機械製作所によって製作 された直径 2 µm の穴が開いている厚さ 10 µm のステンレス箔を 用いた。この 2 µm の穴は右の図 2.17 にあるようなテーパー加工 によって実現されている。(図 2.17 は上からビーム入射側から、横 から、検出器側から見た図の順に並んでいる。)



図 2.16: 入射孔を実装した写真



図 2.17: ステンレス箔

図 2.18 はビームの進行方向に対して横から見た図でビームは左から右に進む。入射孔は、パイプの左端に搭載されており、入射孔から検出領域までは 13.5 cm である。



図 2.18: チェンバーに入射孔を実装した様子の模式図

#### 2.4 読み出し回路

TPC として飛跡と各点での電離量を測定するためには、anode と cathode の各ストリップの電荷量とその 信号のやってきた時間を検出することが必要である (1.5 節)。これを得るために各ストリップでスレッショ ルドを超えた部分がわかるデジタル信号と、128 ストリップ分をまとめた波形情報をアナログ信号として記 録した。図 2.19 には、3 ストリップ分のデータ取得例を示す。デジタル信号として左の青色、アナログ信号 として右の緑色のような情報を記録する。デジタル信号として、信号の立ち上がりを信号が来た時間、信号 の長さをスレッショルドを超えた時間 (ToT:Time over Threshold) として取得する。アナログ信号は波形を 取得、解析ではその面積を FADCsum として、検出された電荷に対応する量として用いた。図 2.19 のデジ タル信号を見ると各ストリップで検出される電荷の大きさと ToT に相関があることがわかる。この相関とア ナログ信号から得られる総電荷量から、各ストリップで検出された電荷量を推定することが可能となる。図 2.20 と図 2.21 に実際のデータを示す。図 2.20 と図 2.21 の clock は取得している装置が異なるので別物であ る。図 2.20 は横軸の y が cathode の座標、縦軸は clock(1 clock=10 ns) で、ここから先ほど述べた信号のき た時間と ToT を読み取ることができる。図 2.21 は 128 ストリップをまとめた波形情報を表しているので各 clock(1 clock=10 ns) での ADC 値 (電圧のアナログ値をアウトプットレンジ 1V で 256 分割しデジタル化し たもの)を足すことによって面積を見積もることができる。



図 2.19: 取得されるデータの模式図 (左: デジタル信号, 右: アナログ信号)



実際にデジタル信号とアナログ信号を取得する流れとして、回路図の概略を図 2.22 に示す。トリガー スレッショルドを超えた大きさの信号が来ると 1000 clock 分の信号を記録する。デジタル信号は、anode と cathode から来た電荷信号を ASD ボード (Amp-Shaper-Discriminator) を介してデジタル信号にして、 Encoder,Memory Board で記録して PC に保存する。アナログ信号は、cathode から来た電荷信号を ASD ボードを介してアナログ信号にして、波形記録装置である flash analog-to-digital converter(FADC) で記録 して PC に保存する。



図 2.22: 読み出し用回路図の概略

## 3 基礎実験

基礎実験としてテストチェンバー (図 3.1) と <sup>55</sup>Fe(5.9keV のX線源)線源を用いて、使用するガス (Ar:CO<sub>2</sub>=8:2)のガスゲインを1気圧で測定した。また、ガスゲインの印加電圧依存性についても調べた。



図 3.1: テストチェンバー

Drift(7mm)
GEM
Induction(3mm)
$\mu$ -pic(256×256)

図 3.2: テストチェンバーの概略

#### 3.1 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、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 1.3 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。電子が十分な大きさの電場でガス中を微少距離 dr を移動するとその数は式 3.1 の様な関係で増えてい くことが知られている。α はタウゼント定数と呼ばれ、本実験において電子の移動距離に依存しないとすると 式 3.2 の様な関係となる。α は電場に比例し、チェンバー内の電場は印加電圧に比例するためガスゲインは印 加電圧に対して指数関数的に増加する。

$$\frac{dn}{dr} = \alpha n \tag{3.1}$$

*n*・・・電子の数
*r*・・・電子の進んだ距離
*α*・・・タウゼント定数

$$Gain_{gas} = exp(\alpha r) \tag{3.2}$$

*Gain<sub>gas</sub>*・・・ガスゲイン

## 3.2 セットアップ

基礎実験のセットアップは図 3.3 の通りである。μ-PIC で検出されされた電荷信号をチャージアンプ (図 3.4) によって電圧信号に変換し、MCA(Multi Channel Analyzer)(図 3.5) 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 AMP は今回は使用していない。



図 3.3: 基礎実験のセットアップ

#### 3.2.1 チャージアンプ

入力される電荷信号を 2.22 × 10<sup>2</sup> mV/pC の変換率で電圧信号に変換する。256 チャンネルの出力に対し て 4 チャンネルのアナログ出力をもち、それぞれ検出器の 256 本のストリップの出力が 64 本ずつまとめられ ている。アンプ以外の機能もあるが今回は使用しない。



図 3.4: チャージアンプ

#### 3.2.2 MCA

波形のピーク電圧をアウトプットレンジを 1V として 8192 分割でデジタル化して記録する。



🛛 3.5: MCA

#### 3.3 実験結果

表 3.1 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 3.6 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右のピークが 5.9keV に対応し、左のピークが 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 のピークである。今回は 5.9keV の方のピークの MCA 値と式 3.3 を用い てガスゲインを求める。



図 3.6: 表 3.1 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	500	
$\Delta~{\rm GEM}$	-500	
induction	-200	
drift	-200	

**表 3.1:**印加電圧

$$Gain_{gas} = \frac{\frac{MCA_{peak(5.9\ keV)}/8192\ pC}{G_{amp}\ mV/pC}}{5.9\ keV/26\ eV \times 1.6 \times 10^{-7}\ pC}$$
(3.3)

表 3.2 の通り、μ-PIC の Anode に印加する電圧を 500V 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 3.7 のようになった。逆に表 3.3 の通りに GEM 間に印加する電圧を 500V に固定し て μ-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 3.8 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。ここからテストチェンバーは予想 通りの挙動で動いていることが分かる。



図 3.7: △ GEM 依存のゲインカーブ

装置名	設定電圧 (V)
Anode	500
$\Delta~{\rm GEM}$	-440~-500
induction	-200
drift	-200

表 3.2: Δ GEM 依存の変化を調べたときの印加電圧 表 3.3: Anode 依存の変化を調べたときの印加電圧



図 3.8: Anode 依存のゲインカーブ

装置名	設定電圧 (V)
Anode	$460 \sim 500$
$\Delta~{\rm GEM}$	-500
induction	-200
drift	-200

# 4 シミュレーション

本章では、本実験の結果を予測をするためにシミュレーションを行った。最初に SRIM を用いてガス中で のエネルギー損失について大まかにシミュレーションし、その後 Geant4 を用いて実際のチェンバーの形状な どを考慮したより正確なシミュレーションを行った。

## 4.1 SRIM によるシミュレーション

まず今回使うガス、質量比で Ar:CO<sub>2</sub>=8:2、0.8 気圧のガス中での陽子のエネルギー損失について理解を深 めるために SRIM によるシミュレーションを行った (図 4.1)。青が電子的な阻止能で、オレンジが核的阻止能 である。SRIM によるシミュレーションによると核的阻止能によるエネルギー損失はほとんどないことが分か り、電離信号としてガスチェンバーで観測できる事が分かる。平均飛程距離については図 4.2 のようになり、 最大加速エネルギー 3.0 MeV を持つ陽子の平均飛程距離はは 15.3 cm である事が分かる。入射孔から検出領 域までの距離は 13.5cm で、チェンバーの座標は図 2.6 のとおりなので、図 4.3 の様な予想が出来る。









図 4.3: SRIM によるシミュレーションから予想できるチェンバー内での陽子の飛跡

### 4.2 シミュレーション条件

陽子の検出器内での反応の理解のために Geant4 というソフトを用いてシミュレーションを行った。Geant4 のバージョンは 4.11.2.2 であり、地下実験のような低エネルギーの物理に比較的よく使われる物理モデルを用 いた [5]。2 章で説明している検出器の構造を再現したジオメトリを図 4.4 に示す。チェンバー内にピンク色 の枠で示した TPC が配置されており、ビームを通すための直径 6.4 mm の穴が空いている。チェンバーを貫 通して外部の真空領域とチェンバー内のガス領域をつなぐようなステンレスパイプが通っている。パイプは図 4.4 で白色で示している。ステンレスパイプの入射孔部分には 2.1 節の図 2.16 で示したような厚さ 10  $\mu$ m、 ビーム入射側の直径が 15  $\mu$ m、TPC 側の直径が 2  $\mu$ m の円錐台形の穴が空いたステンレス箔が貼られている。 図 4.4 においては「入射孔」と示している。検出領域はピンク色で示した 10.24×10.24×8.00 cm<sup>3</sup> の TPC 内 で、入射孔から検出領域までの距離は 135.0 mm とした。ビームは図 4.4 の左から右に入射する。検出器の座 標を図 4.5 に示す。検出器の座標系は実験と同様で、GEM 上面の中心を原点とする。図 4.5 の座標において ビームは y 軸の負から正の方向に入射する。z 座標については図 4.5 に示した通り GEM 上面中心を原点とし て紙面の奥から手前方向に +z 方向が来るように設定した。ガスチェンバーのシミュレーションとして、ガス の電離によって失われるエネルギーを用いた。



図 4.4: 検出器のジオメトリ

チェンバーを満たすガスは実際の実験で用いたものと同じ、圧力 0.8 気圧の質量比 8:2 のアルゴンと二酸化 炭素の混合ガスとした。ビーム入射条件を以下に示す。

入射粒子:陽子

・エネルギー:3 MeV

・運動量方向: y 軸正方向

上記を共通条件とした上で、入射孔の円錐台形形状の影響を調査するために、ビームの初期位置を以下の2つ の条件とした。

①入射孔の中心を通るように陽子ビームを入射させる

②ビームの初期位置を、ある範囲内の任意の位置とする

②の範囲として円錐台形の入射孔のビーム入射側の直径 15 µm に対して一辺 15 µm の正方形を設定した。シ ミュレーションの様子を図 4.6 に示す。図 4.6 は①の条件の入射孔の中心を通る 10 個の陽子を発生させた場 合の様子である。図 4.6 中の青と黄色の線は陽子を表している。入射孔に到達するまでの真空中での陽子の飛 跡を青い線、ガス領域での飛跡を黄色の線で表している。



図 4.6: 陽子ビームシミュレーションの例

## 4.3 シミュレーション結果

#### 4.3.1 エネルギー分布

シミュレーションによって得られた、TPC 内で失ったエネルギーのスペクトルを図 4.7 に示す。青が①、 赤が②の条件でのシミュレーション結果のヒストグラムである。縦軸はヒストグラムの面積が1となるように 規格化を行った。



図 4.7: TPC 内で失ったエネルギー分布

青で書かれた①の分布から、TPC 内で失うエネルギーは 0.85 MeV 程度にピークを持ち、0.2 MeV 程度の 広がりを持った分布であることが分かる。これらの TPC 内で失ったエネルギーは、TPC への入射時のエネ ルギーと等しかったため、TPC に到達するまでのガス領域でエネルギーを失っていることが言える。そのエ ネルギー損失量も各事象毎に異なるため、TPC 内で失うエネルギーに幅が生じていると考えられる。また、 このシミュレーションでは 10<sup>5</sup> 個の陽子を発生させたが、TPC に到達した事象がおよそ 10<sup>4</sup> 事象であったこ とから、ガス中での陽子の散乱によりビームの拡散が起こりパイプ内やフィールドケージの壁で止まった陽子 事象が多いと考えられる。

次に、図 4.7 の 2 つのヒストグラムを比較すると、入射孔形状の影響で②のエネルギー分布が①の分布に対 して全体的に低エネルギー側によっていることが分かる。この違いの要因として、①では TPC に到達するま でのガス領域のみでエネルギーを失うのに対して、②ではステンレス箔通過の際にもエネルギーを失い、より 小さいエネルギーを持って TPC に到達する陽子が多数あることが考えられる。実際の実験条件に近いのは② の条件であるので実験結果の分布も②の結果に近い分布になると予想することができる。

それぞれの結果について、TPC 内で失ったエネルギーと信号が検出された y 座標の最大値の関係を示した分布を図 4.8, 図 4.9 に示す。図 4.8 が①、図 4.9 が②の条件についての分布である。今後の議論においてこの最大値を  $y_{max}$  と定義する。座標は検出器の座標系に従い、ビームは y 軸の負から正の方向に入射する。つまり  $y_{max}$  は陽子が TPC 内でどれくらい進んだかを示すパラメータであると言える。検出領域は y = -5.12 cm  $\sim 5.12$  cm の範囲である。

28



2 つの分布の概形は似ており、TPC 内で失ったエネルギーと y<sub>max</sub> が連続分布になっている。また、2 つの 分布を比較すると、①の分布は事象が幅を持ちながらも一か所に集中しているのに対して、②の分布は事象が 低エネルギー側にも及んでいることが分かる。このことから、入射孔の形状が実験データの連続分布に大きく 影響するであろうことが予想できる。双方の分布に確認されるエネルギーが 0.7 から 1 MeV の範囲の y<sub>max</sub> の値が小さい事象については TPC 内に入射した陽子の軌道が、ガス中の原子核との衝突などによって曲げら れることで、y<sub>max</sub> の値が小さくなっている可能性があると考えられる。

#### 4.3.2 ブラッグカーブ

我々が最終的に得たいブラッグカーブのシミュレーションによる結果を図 4.10 に示す。Geant4 シ ミュレーションでは各ステップ毎のエネルギー損失と座標が記録される。その情報から各ステップ毎の dE/dx (MeV/cm) を計算することができる。図 4.10 は横軸がビームの入射方向に対して平行な座標である y (cm)、縦軸が dE/dx (MeV/cm) の平均値である。



図 4.10 から y = -2.5 cm 付近にピークがあることが分かる。5 章では実験データからこのピークを確認す

るための解析を行う。

#### 4.4 ビーム初期位置とエネルギーの関係

シミュレーションの結果について、ビーム初期位置とエネルギーの関係を比較することでどれほどの厚さの ステンレス箔を通り抜けた陽子事象が TPC に到達しているのかが分かる。今回のシミュレーションではビー ムの初期位置を乱数で決めているので初期位置は事象毎に異なる。座標軸は実際の検出器と同じで、ビームの 初期位置の範囲は y = -20 cm の y 軸に垂直な平面上での一辺 15  $\mu$ m の正方形とした。ビーム軸を y 軸とし てビーム軸からの距離を  $r = \sqrt{r_x^2 + r_z^2}$  (cm) とする。この時、 $r_x$  はビーム軸からの x 方向の距離、 $r_z$  は z 方向の距離である。

ビーム軸からの x,z 方向の距離  $r_x,r_z$  と、TPC 到達時のエネルギーの関係を図 4.11, 図 4.12 に示す。いず れも縦軸に TPC 到達時のエネルギー、横軸にビーム軸からの距離を示し、色が明るくなるほど事象数が多い ことを示す。この分布から TPC 到達時のエネルギーが大きい事象は  $(r_x,r_z) = (0,0)$  付近に集中しており、 そこから放射状に広がっていることが分かる。 $r_x,r_z$  が共に-1 から 1  $\mu$ m の範囲が直径 2  $\mu$ m の穴の範囲に対 応しており、円錐台形の入射孔の TPC 側の直径 2  $\mu$ m であることから、座標とエネルギーの分布が図 4.11, 図 4.12 のような形になることが説明できる。また、 $r_x,r_z$  が共に-4 から 4  $\mu$ m の範囲の事象までがステンレ ス箔を通過して検出領域に到達していることが分かる。図 4.13 はビーム軸からの距離 r と TPC 内で失うエ ネルギーの関係を表した分布である。この分布から r が大きくなるほど、つまりステンレス箔を通過した距離 が長いほど、そこで多くのエネルギーを失い、最終的に TPC に到達する時点でのエネルギーが小さくなって いることが分かる



図 4.11: r<sub>x</sub> とエネルギーの関係



図 4.12: r<sub>z</sub> とエネルギーの関係



図 4.13: ビーム軸からの距離 r とエネルギーの関係

本シミュレーションの陽子の初期運動エネルギーは 3 MeV としたので、TPC に到達するまでに失ったエ ネルギーを、3 MeV から TPC 内で失ったエネルギーを引いた値として見積もることができる。こうして見 積もった、TPC に到達するまでに失ったエネルギーと、ステンレス箔の厚さの関係を示した分布を図 4.14 に 示す。この分布において、ステンレス箔でエネルギーを失わず、入射孔の 2 µm の穴を通過した事象は省い ている。この分布から厚さ約 5.0 µm までのステンレス箔を通過した陽子が検出領域に到達していることが分 かる。



図 4.14: 通過したステンレス箔の厚さと通過時に失ったエネルギーの関係

図 4.15 に TPC に到達するまでに失ったエネルギーの分布を示す。4.2 節で示した②の条件でのシミュレー ション結果についてステンレス箔を通って TPC に到達した事象とステンレス箔を通らずに TPC に到達した 事象を分けた。条件について以下に示す。

1.事象選別なし(全事象)

2. ステンレス箔を通って TPC に到達した事象

3. ステンレス箔を通らずに TPC に到達した事象

TPC 到達前に失ったエネルギーの分布を1については黒い実線、2を青い点線、3を赤い点線で示している。2のエネルギー分布と3のエネルギー分布を足すと、1のエネルギー分布となる。これらの分布からTPC に入るまでのガス領域で2~2.4 MeV のエネルギーを落とし、加えてステンレス箔を通った事象についてはさらに0~0.6 MeV のエネルギーを落とすことが分かる。



図 4.15: TPC に到達するまでに失ったエネルギーの分布

# 5 Tandem 加速器における実験

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 2025/1/13~1/17 の 5 日間で行われた。本論 文で用いるデータは 2025/1/17 12:25~14:30 で計測されたものである。本章では実際の実験がどのように行 われたのか、その条件を中心に述べたあとその結果について議論していく。実験の概略図を図 5.1 に示す。



図 5.1: 実験の概略図

## 5.1 実験条件

#### 5.1.1 ビーム

タンデム加速器の構造や性能については前述の通りである (2.1 節)。今回の実験ではエネルギー 3MeV で 強度が 65nA 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 5.2)。蛍光版はビームが当たると光るようになっていて、真ん中に直径 7.5mm の穴が開いている。ビームがこの穴に入っているというということはチェンバーの入射孔に入っていると考え てよい。穴の横でビームの焦点を絞り (図 5.3)、そのあとビームをずらして穴に入れた (図 5.4)。ビームが穴 に入る前の TPC で観測された計数率は 2.6Hz でビームが穴に入っているときは 14Hz となったのでビーム由 来の信号が TPC で検出できていると判断した。



図 5.2: ビームプロファイルモニター



図 5.3: ビームプロファイルモニターにビームを当ててい る様子



図 5.4: ビームをチェンバー内に入れている様子

## 5.1.2 チェンバー

チェンバーの構造については図 2.3 のとおりである。TPC 内には質量比 8:2 の Ar:CO<sub>2</sub> が 0.8 気圧で封入 されており、印加電圧とそれによって発生する面間の電場は表 5.2、表 5.2 のようになっている。

装置名	設定電圧 (V)	装置名	設定電場 (V/cm)
Anode	570	Anode	-35k
$\Delta~{\rm GEM}$	-410	$\Delta~{\rm GEM}$	-41k
induction	-170	induction	-170
drift	-2620	drift	-276
<b>表 5.1:</b> 印加電圧		表	5.2: 電場

※ Anode の電場は Anode の中心から 100 μ m の大きさ

計測中にガス圧、電流値をモニターした。その様子を図 5.5、図 5.6 に示す。図 5.5 を見ると計測中のガス 圧は安定していたことがわかり、図 5.6 を見ると、μ-PIC の Anode の電流値にところどころピークがあるの がわかる。これは μ-PIC の Anode-Cathode 間で放電が起きているからであり、この時は TPC として計測で 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起こっているので今回の計測には 大きな影響はないと判断した。



図 5.5: ガス圧のモニター



図 5.6: 電流値のモニター

#### 5.2 データ

本実験は、2025/1/17 12:25~14:30 の間測定を行い 29855 事象のデータを得た。その平均レートは 4.0Hz であった。また、バッググラウンドデータの測定として、2025/1/17 14:30~14:50 の間ビームを入射しない 条件での測定を行った。1348 事象のデータを得て、その平均レートは 1.1Hz であった。今回のチェンバーと データの座標の関係は図 2.6 の通りとなっている。図 5.7、図 5.8 にある一事象のデータ例を示す。波形情報 (図 5.7) で検出された信号の電荷量に対応する FADCsum を読み取り、各ストリップの信号の立ち上がりか ら飛跡情報 (図 5.8) を得ることができる。ここで、得られたデータの x 座標の最大値と最小値の真ん中の値 を x の中央値と定義する。また、y 座標においても同様に定義する。ストリップごとの ToT は飛跡の z 軸方 向の長さと電荷量の大きさの情報を同時に持つがこの例だと飛跡の z 軸方向の長さからくる情報は十分小さい ため概ね電荷量の大きさの情報、つまりそのストリップに落としたエネルギーだと解釈できる。Magboltz に よるシミュレーションによるとドリフト領域における電子の速度は 1.2 cm/µm、1 clock=10 ns なので、式 1.4 を用いて z 座標を再構成できる。



図 5.7: 一事象の波形情報例



図 5.8: 一事象の飛跡情報例

## 5.3 飛跡検出

全ての事象の x の中央値と y の中央値を 2 次元ヒストグラムにプロットすると図 5.9 の様になった。また、 バックグラウンドデータについても同様にすると図 5.10 のようになった。



図 5.9: 全データでの x の中央値と y の中央値のプロット

中央値のプロット

本データを x 方向に投影したものが図 5.11、y 方向に投影したものが図 5.12 となっている。同様にバッ クグラウンドデータについても同様のプロットを行ったのが図 5.13、図 5.14 である。これらから、明らか に読み出し回路由来の電気ノイズでデータの解析の妨げになっているものを取り除くために (-0.11 cm < x <-0.1 cm, 1.85 cm < y < 1.9 cm) と (2.45 cm < x < 2.48 cm, 1.82 cm < y < 1.89 cm) をカットする。



図 5.11: 全データでの x 方向への投影



図 5.12: 全データでの y 方向への投影



図 5.13: バックグラウンドデータでの x 方向への投影

図 5.14: バックグラウンドデータでの y 方向への投影

カット後の本データは図 5.15 のようになりデータ数は 25935 事象、バックグラウンドデータは図 5.16 の 様になりデータ数は 353 事象であった。また本データの x 方向、y 方向の投影は図 5.17、図 5.18、バックグ ラウンドデータについては図 5.19、図 5.20 のようになった。これを見ると (*x*, *y*) = (2, -3) 付近にビーム由 来と思われる事象が集中していることが分かる。これは SRIM を用いたシミュレーションによる予想 (図 4.3) と比べてもある程度一致している。



 図 5.15: カット後の全データでの x の中央値と y の中央 図 5.16: カット後のバックグラウンドデータでの x の中央 値のプロット
値と y の中央値のプロット



図 5.17: カット後の全データでの x 方向への投影



図 5.18: カット後の全データでの y 方向への投影



図 5.19: カット後のバックグラウンドデータでの x 方向へ 図 5.20: カット後のバックグラウンドデータでの y 方向への投影の投影の投影

実際に陽子の飛跡と考えられる分布の中から一事象を取り出すと図 5.21、図 5.22の様になる。この事象で z 座標が一致する (x,y) 座標のうち一番早く来た信号を飛跡として捉え、それ以降を重みの信号として処理し て三次元飛跡を再構成すると図 5.23の様になった。



図 5.21: 陽子事象の波形情報



図 5.22: 陽子事象の飛跡情報

x vs y vs z



図 5.23: 陽子事象の飛跡の再構成

#### 5.4 ブラッグピークの観測

本節では実験で得られたデータとシミュレーションによる結果を比較し、ブラッグピークの観測を目指す。 図 5.24 が実験から得られた FADCsum と  $y_{max}$  の分布である。横軸の FADCsum とは FADC 波形の積分値 のことで検出されたエネルギーと対応する値である。図 5.24 の分布は連続的な分布になっており、特に  $y_{max}$ の小さい範囲に多くの事象が確認される。この結果は 4.3 節の②の条件でのシミュレーション結果の分布であ る図 4.9 と似た分布となっており、実際にステンレス箔中でエネルギーを失い、小さいエネルギーを持って TPC に入射する陽子が多数あることが分かる。つまり、入射孔形状が実験データの連続分布に大きく影響し ていることが図 4.9 との比較により確かめられた。図 5.25 と図 5.26 はそれぞれ図 5.24 の横軸 FADCsum と 縦軸  $y_{max}$  についての一次元ヒストグラムである。



図 5.24: 実験から得られた FADCsum と ymax の関係



次にシミュレーションとの位置の比較により、本研究の目的であるブラッグピークを観測するための解析に ついて述べる。シミュレーション結果でブラッグピークが明確に見えると予想される範囲の y<sub>max</sub> の範囲内の 事象を実験データから抽出して解析を行った。連続分布のどの範囲の事象を抽出してもブラッグピークを確認 できると予想できる。しかし、今回はより明確にブラッグピークを確認するために進んだ距離の長い、入射孔 形状の影響をあまり受けていないと考えられる陽子事象を抽出した。範囲として-2.4 cm< y<sub>max</sub> <-1.9 cm を 設定した。

まず先にシミュレーション結果である図 4.10 についての-2.4 cm< y<sub>max</sub> <-1.9 cm の範囲で単位長さあた りのエネルギー損失の y 座標依存を図 5.27 に示す。



実験データについて対応する結果を図 5.28 に示す。これは-2.4 cm< y<sub>max</sub> <-1.9 cm 内の事象に対する y 座標と1ストリップ当たりの TOT の平均値の関係を示したヒストグラムである。縦軸については1ストリッ プで記録された TOT の和を総事象数で割ることで平均を取った。



y = -5.12 cm が TPC の入口で、繰り返しにもなるがビームは y 座標の負から正の方向に入射する。本 解析においてブラッグピークを観測するために縦軸を TOT とした理由を述べる。TOT と荷電粒子のエネル ギー損失というのは必ずしも正確に対応するわけではないが、今回注目するブラッグピーク部分では荷電粒子 が止まる直前に多くのエネルギーを失い、TOT が明確に増加することが期待される。このことからブラッグ ピーク部分の TOT と各ストリップでのエネルギー損失は対応すると言える。それを踏まえて図 5.28 を見る と、陽子が TPC 内に入射し、領域内を進み、止まる直前に多くのエネルギーを失っていることが分かる。

シミュレーション結果についての-2.4 cm< y<sub>max</sub> <-1.9 cm 内における事象のブラッグピークから実験デー タとのブラッグピークの位置の比較を行った。図 5.29 は実験結果とシミュレーションの結果を重ねたヒスト グラムである。青が実験結果、赤がシミュレーション結果を表している。縦軸はヒストグラムの面積が 1 とな るように規格化を行った。2 つを比較するとブラッグピークの位置もおおよそ一致していることが分かる。本 解析において注目するのはブラッグピーク部分のみなので、位置と 1 ストリップ当たりの TOT の平均値の関 係から明確なピークが確認できたことで、本研究の目的であるアルゴンガス中での陽子のブラッグピークの観 測は達成できたと言える。



# 6 結論

本研究の目的はガス検出器内に陽子ビームを入射し、アルゴンガス中での陽子のブラッグピークを観測する ことであった。そのために検出器内に直接ビームを入射可能な機構を有したチェンバー、それに加えて検出領 域の電場を整えるためのフィールドケージを製作した。基礎実験ではガス検出器のガスゲイン測定を実施し、 ガス比の決定、本実験で使うガスにおいて十分なゲインがでていることを確認した。そして、放射線源を用い た測定を通して TPC を実際に動かすことの難しさを体験し、同時に実験やデータ取得についての理解を深め ていった。

本実験では陽子ビームを検出器に打ち込み、得られたデータを解析した。まず、得られたデータのうちで、 一事象の3次元飛跡再構成を行った。そして、ビーム由来の陽子事象のブラッグピークを観測するための解析 を行った。エネルギー較正を行うことができなかったため、実験データからエネルギーについての情報を得る ことができなかったものの、本研究においてアルゴンガス中での陽子のブラッグピークを観測することがで きた。

# 謝辞

本研究を進めるにあたり、多くの方々に支えられました。まず、研究活動を通じて議論し、助け合った研究 室の皆さんに心より感謝いたします。日々の何気ない会話や助言が大きな支えとなり、研究を続ける励みにな りました。

次に、本研究をご指導くださった身内賢太朗准教授に深く感謝申し上げます。研究の方向性をご示唆いただ き、貴重なご助言を通じて多くのことを学ぶことができました。また、お忙しい中、進捗の相談にも親身に対 応していただき、大変感謝しております。

また、実験で行き詰まった際に最後まで付き合ってくださり、技術的な助言を含め多方面から支えてくだ さった研究員の東野聡氏にも、心より感謝申し上げます。実験や解析の進め方について丁寧にご指導いただ き、多くの学びを得ることができました。何度も壁にぶつかる中で粘り強く向き合う姿勢を学ぶことができ、 研究を進める上で大きな支えとなりました。

最後に、本研究に関わるすべての方々に深く感謝申し上げます。

# 参考文献

- Particle Data Group, https://pdg.lbl.gov/2024/reviews/rpp2024-rev-passage-particles-matter. pdf.
- [2] KEK 測定器開発室, MPGD トップ, https://rd.kek.jp/project/mpgd/index\_j.html.
- [3] 神戸大学粒子物理学研究室, µ-PIC, https://ppwww.phys.sci.kobe-u.ac.jp/laboratory/micro/ index.html.
- [4] ムラタソフトウェア, Femtet, https://www.muratasoftware.com/products/.
- [5] Geant4 underground physics sample, https://gitlab.cern.ch/geant4/geant4/tree/master/ examples/advanced/underground\_physics.