ミューオニウムの真空への引き出しの確認

課題研究 P2 青柳昂生 竹山拓見 田中智也

2025年3月31日

概要

ミューオニウム・反ミューオニウム転換はレプトン数保存の観点から標準模型では禁止されているが, 標準模型を超えた理論では許される.この転換は物質の作る外場中では抑制されるため, ミューオニウムを真空中に引き出すことが実験上重要となる.同様の実験が2018年度の課題研究 P2 で行われていたものの, 真空への引き出しを確認することができなかった.そこで本研究では真空槽, ファイバートラッカー, ディグレーダを改良し, 改めてミューオニウムの真空への引き出しを確認することを主な目的としていた.Geant4のシミュレーションではこれらの改良の結果, 引き出しを確認できる性能があることが確認できた.

しかし、J-PARC MLF のミューオンビームが不備により使用できなかったため、宇治キャンパスの KEL 単 電子ビームラインを利用してトラッカーの性能を検証することになった.シミュレーションとの比較により、 自作したファイバートラッカーがミューオニウムの引き出しを確認するために十分な性能を有することが確か められた.

目次

第1章	はじめに	3
1.1	背景と目的	3
1.2	原理	3
第 2章	実験施設	6
2.1	J-PARC MLF D2 ミューオンビームライン	6
2.2	KEL 単電子ビームライン	7
第3章	実験装置	8
3.1	真空槽まわり....................................	8
3.2	検出器	9
3.3	DAQ	10
3.4	先行研究からの主な変更点....................................	11
3.5	シミュレーションによる先行研究との比較	12
第4章	予備実験	15
4.1	MPPC のゲイン測定	15
4.2	線源を使ったトラッキング....................................	16
第5章	本実験:ファイバートラッカーの性能評価	18
5.1	概要	18
5.2	セットアップ	18
5.3	シミュレーション	20
第6章	結果と解析	22
6.1	実験1	22
6.2	実験 2	23
6.3	実験 3	23
6.4	実験 4	23
第7章	考察	25
7.1	クロストークの影響	25
7.2	実験3のシミュレーションとの乖離について....................................	26

第8章	おわりに	28
謝辞		29
付録 A	実験装置の寸法	30 30
参考文献		32

第1章

はじめに

1.1 背景と目的

ミューオニウム Mu とは反ミューオン µ⁺ と電子 e⁻ の束縛状態である. ミューオニウムから反ミューオニ ウムへの転換はレプトン数の世代ごとの保存から標準模型では禁止されるが,標準模型を超えた理論では起こ ると予想される. たとえばニュートリノ振動があれば,図 1.1 のような過程が考えられる. このような転換は 物質の作る外場中では抑制されるため,ミューオニウムを真空に引き出すことが実験上重要となる. 本研究で は J-PARK の MLF のミューオンビームを用いてミューオニウムの真空への引き出しを確認することを目的 とした.



図 1.1 ミューオニウム・反ミューオニウム転換の例 [2]

1.2 原理

1.2.1 ミューオンの崩壊

ミューオンはレプトンの第 2 世代に属する素粒子であり, 電子と同じ電荷をもち, 電子の約 200 倍の質量を もつ. 寿命は 2.2 μs で, 電子とニュートリノに崩壊する. 反ミューオン μ^+ が陽電子 e^+ と電子ニュートリノ ν_e , 反ミューニュートリノ $\bar{\nu}_\mu$ に崩壊するダイアグラムを図 1.2 に示す.



図 1.2 µ⁺の崩壊

ウィークボソンの質量よりも十分低エネルギーな領域を考えているので,フェルミ結合定数*G*を用いて不変 散乱振幅を計算すると

$$\mathcal{M} = \frac{G}{\sqrt{2}} [\bar{v}_{\mu}(p')\gamma_{\alpha}(1-\gamma^{5})v_{\nu_{\mu}}(k')] [\bar{u}_{\nu_{e}}(k)\gamma^{\alpha}(1-\gamma^{5})v_{e}(p)]$$
(1.1)

$$\equiv \frac{G}{\sqrt{2}} J_{\mu,\alpha} J_e^{\alpha} \tag{1.2}$$

となる. ただし, スピンの引数は省略している. $|\mathcal{M}|^2$ の計算を念頭にまず, ミューオンのカレントの部分の計算を進める. 規格化条件 $\sum_{s=\pm} v(p,s)\bar{v}(p,s) = p^{\mu}\gamma_{\mu} - m$ を用いると,

$$|J_{\mu}|^{2} = \sum_{s',t'=\pm} \bar{v}_{\mu}(p',s')\gamma_{\alpha}(1-\gamma^{5})v_{\nu}(k',t')\bar{v}_{\nu}(k',t')\gamma_{\beta}(1-\gamma^{5})v_{\mu}(p',s')$$
(1.3)

$$= \operatorname{tr}[(p^{\prime \mu} \gamma_{\mu} - m) \gamma_{\alpha} (1 - \gamma^{5}) k^{\prime \nu} \gamma_{\nu} \gamma_{\beta} (1 - \gamma^{5})]$$
(1.4)

となる. ここで, *m* はミューオンの質量を表し, ニュートリノの添え字は省略している. 質量に比例する部分は tr $AB = \text{tr } BA, \gamma^5 \gamma_{\mu} = -\gamma_{\mu} \gamma^5, (1 + \gamma^5)(1 - \gamma^5) = 0$ よりゼロとなる. さらにトレース公式を用いると

$$\operatorname{tr}[p^{\prime\mu}\gamma_{\mu}\gamma_{\alpha}(1-\gamma^{5})k^{\prime\nu}\gamma_{\nu}\gamma_{\beta}(1-\gamma^{5})] = 8(k_{\beta}^{\prime}p_{\alpha}^{\prime}+k_{\alpha}^{\prime}p_{\beta}^{\prime}-g_{\alpha\beta}k^{\prime}\cdot p^{\prime}+i\epsilon_{\mu\alpha\nu\beta}k^{\prime\mu}p^{\prime\nu})$$
(1.5)

となる. 電子カレントの部分も同様に計算でき, 積をとって整理することで

$$\sum |\mathcal{M}|^2 = 64G^2(p \cdot k')(k \cdot p') \tag{1.6}$$

を得る.ただし、散乱後の状態ではスピン和を、散乱前の状態では平均をとった.これより微分散乱断面積は

$$d\Gamma = \frac{64G^2}{2p'_0(2\pi)^5} \frac{d^3p}{2p_0} \int \frac{d^3k}{2k_0} \int \frac{d^3k'}{2k'_0} \delta(-p'+p+k+k')(p\cdot k')(k\cdot p')$$
(1.7)

と計算できる.

1.2.2 ミューオニウムの生成率

ミューオンは磁気モーメントを持ち, 振動数 $\omega = g \frac{e}{2m_{\mu}} B$ で歳差運動をする (μ SR) が, ミューオニウムにつ いても低磁場環境ではある振動数 ω' で振動する (mSR). 真空槽の両側面に検出器を設置し, そのカウント数 の Asymmetry からミューオニウムの生成率を計算できる. θ にある検出器のカウント数を $C_{\theta}(t)$ とすると,

$$C_{\theta}(t) = N_0 \exp(-t/\tau) \left(1 - A_{\mu} \sin(\omega t + \theta + \phi_{\mu}) - A_{Mu} \sin(\omega' t + \theta + \phi_{Mu})\right)$$
(1.8)

である. 両側面でのカウント数は $\theta = \pi/2, 3\pi/2$ に対応し, Asymmetry は

$$\frac{C_{\pi/2} - C_{3\pi/2}}{C_{\pi/2} + C_{3\pi/2}} = A_{\mu} \sin(\omega t + \phi_{\mu}) + A_{Mu} \cos(\omega' t + \phi_{Mu})$$
(1.9)

であり、これより A_{μ}, A_{Mu} を求めることができる. そして生成率 R は

$$R = \frac{2A_{Mu}}{A_{\mu} + 2A_{Mu}} \tag{1.10}$$

となる. ただし, 係数2は生成された Mu のうち半分しか mSR に寄与しないことからきている.

1.2.3 陽電子のトラッキング

今回の実験ではターゲットとして SiO₂ を用いる. μ^+ はターゲット内で電子を捕獲し, ミューオニウムが生成される. その後, ミューオニウムはターゲット内の空隙を移動し, 一部は標的外に放出され陽電子に崩壊する. 今回はその陽電子を検出し, 軌道を再構成することでミューオニウムの崩壊位置を割り出す. その際, ほとんどはターゲット領域に分布するが, 上述のように標的外で崩壊するミューオニウムもあるため, 標的外の真空領域にテールを引いた分布が得られると期待される. トラッキングにはシンチレーションファイバーを束ねたものを2セット用意して平行に配置し, MPPC で読み出して光ったファイバーを特定する. それからビームの中心軸に向かって外挿し, 崩壊位置を再構成する. ただし, 実際のビームには広がりがある点を無視している.



図 1.3 トラッキングのイメージ

第2章

実験施設

2.1 J-PARC MLF D2 ミューオンビームライン



図 2.1 MLF D2 ミューオンビームライン

今回使用させていただく予定だったミューオンビームラインについて紹介する.

今回の実験では, J-PARC にある MLF D2 ミューオンビームラインを用いる予定だったが, 2025 年 2 月に MLF で中性子源として使っている水銀の循環システムの不備が発生し, 実験することができなかった [5]. 使用予定だったビームの特性をまとめておくと, 運動エネルギー 4.1 MeV, ダブルパルス時強度 5.0 × $10^6 \mu^+/s$ の反ミューオン μ^+ ビームが得られる [6].

2.2 KEL 単電子ビームライン



図 2.2 KEL 単電子ビームライン照射ポート

本実験では, 京大化研電子線形加速器 KEL の単電子ビームを使わせていただいた.

このビームラインでは加速管の放電などで生じたわずかな電子を加速することで, 20-40 Hz という極低強度 の単電子ビームが得られる.電子ビームのエネルギーは 10 MeV から 70 MeV まで容易に調整可能である [7]. 実際の実験では,崩壊した µ⁺ から放出される e⁺ のエネルギーを再現し,検出器のトラッキング性能が, ミューオニウムの真空への引き出しを確認するのに十分であることを検証するのに用いた.

ビームの詳細は以下の表 2.1 の通りである.

表 2.1 KEL	単電子ビーム	、 ライ	ンの特性
-----------	--------	-------------	------

イベントレート	20 - 40 Hz (可変)
電子ビームエネルギー	10 - 70 MeV (可変)
水平分布 (σ)	${\sim}13~\mathrm{mm}$
鉛直分布(σ)	$\sim 10 \text{ mm}$

第3章

実験装置

3.1 真空槽まわり

真空槽

今回設計,外注した真空槽を図 3.1 に示した. μ^+ ビーム入射口および, ビーム軸に垂直な 2 つの e^+ 放出口にはそれぞれ穴あきフランジを使用していて, 散乱の影響を減らすため 6 µm のカプトン箔を挟 んだ. 製作は協友製作所に依頼した.

ディグレーダ

 μ^+ ビームのエネルギーを適切に減らすことによって、SiO₂ エアロゲルターゲット後方表面付近で μ^+ 止めることができ、これにより真空に引き出されるミューオニウムの数が増加、イベント数の向上が 見込める. 3D プリンターによって製作したものが図 3.2 である. 50 µm のアルミ箔を数枚挟んでおり、 50 µm から 250 µm まで 50 µm 刻みで厚みを変更することができる.

3軸ヘルムホルツコイル

2018 年度に製作されたものを流用させていただいた. 2018 年度は主にミューオニウムの生成率を測 定するために使用していたが,今回は単に地磁気の影響を抑えるために用いる予定だった. 中心部付近 に一様な磁場を印加できるヘルムホルツコイルを 3 軸重ねたものである(図 3.3). 各軸 100mG 精度 で最大 1.5 A の電流を流すことにより 2G 程度の磁場を印加できる. テスラメータをもちいて動作確認 を行い,十分な性能があることを確認した.





図 3.1 真空槽

図 3.2 ディグレーダ



図 3.3 3 軸ヘルムホルツコイル

3.2 検出器

ファイバートラッカー

1 mm 角のシンチレーションファイバーを 16 本並べたものと, 2 mm 角のシンチレーションファイ

バーを 10 本並べたものの 2 層分を製作し, ファイバートラッカーとした(図 3.4). ファイバーはそれ ぞれ端面を研磨し, オプティカルセメントを用いて 3D プリンターで製作したクッキーと接着させた. ファイバーで生じた光は 16ch MPPC で検出し, 後述する EASIROC モジュールにフラットケーブル でつなぎデータを取得した.

また KEL での実験の際には, 1.5 mm 角のシンチレーションファイバーを 16 本並べたものに遮光用の 被膜(厚さ 0.1 mm)をしたテストファイバーを研究室からお借りして併せて用いた.



図 3.4 ファイバートラッカー

3.3 DAQ

EASIROC

今回のデータ取得は, MPPC 基盤と EASIROC モジュールとをフラットケーブルでつなぎ, EASIROC モジュールと PC を LAN ケーブルでつないで行った.

EASIROC モジュールは 64 個の MPPC を同時駆動可能で, MPPC 出力を 12bitADC でデータを取得 できる.また, PC から MPPC への印加電圧を 0-90V まで制御することができ, それぞれの ch に対し て 0-4.5V の調整可能で, TDC を用いて時間情報を取得することも可能である [8].

今回使用した EASIROC モジュールは,半分の 32ch に個別の電圧調整をすると周期的なノイズが発生 することがわかったため,個別の調整はできなかった.また,外部からのノイズに対して弱く,アルミホ イル等を用いてフラットケーブルの接続部分を遮蔽することが実験上重要であった.

3.4 先行研究からの主な変更点

2018 年度は, 様々な要因によりミューオニウムの真空への引き出しを確認するに至らなかった. このことか ら今回は Geant4 によるシミュレーションを用いた検討を重ねることで, ミューオニウムの真空への引き出し の確認を目指した. 以下はその主な変更点をまとめたものである.

真空槽の変更点

真空槽は 2018 年度が円筒であるのに対して,本年は直方体に変更した(図 3.5). この変更により ビーム軸から側面のフランジの外側までの距離を 57 mm から 47 mm まで短縮することに成功した. これによってさらにファイバートラッカーをビーム軸に近づけることができ,イベント数の向上や散乱 の影響の削減が見込める.

ファイバートラッカーの変更点

2018 年度では一層目のファイバーの厚みが 2 mm であったのを 1 mm へと変更した. 2018 年度は 1 mm 角のファイバーをずらして重ねることで位置分解能を高めていたが, シミュレーションを用いて 検討した結果, 位置分解能が落ちる代わりに一層目を薄くして散乱の影響を抑えたほうが, より多くの イベント数を稼げると判断し一層目の厚みを 1 mm へと変更した. また 2018 年度も 16ch の MPPC を 使用していたため, この変更によりファイバーの幅も 8.5 mm から 16 mm へと増加しておりより広い 範囲のトラッキングが可能となった. 二層目については, 2018 年度は一層目と同じ設計としていたが, 今回は 2 mm 角のファイバーを 10 本並べて幅を 20 mm とした.

以上の変更により, さらに大きな立体角をカバーできるようになり, イベント数が向上すると考えら れる.

加えて, 2018 年度では有効範囲の制限と coincidence をとるために, ファイバートラッカーの前後に フィンガーカウンタを配置していた.真空槽とファイバートラッカーの間に配置されたフィンガーカウ ンタの厚みは 3 mm であり, これは散乱の大きな原因となっていた.本年度はこれらを使用しないこと で, 散乱の影響を減少させた.

ディグレーダの変更点

2018 年度の実験の際にはディグレーダの入れ替えに時間がかかり, データ取得の時間が減ってし まったと伺い, 容易にディグレーダを入れ替えられる機構を考案, 3D プリンターで作成した. また, 細 かく厚みを変えられるようにディグレーダは 50 µm から 250 µm まで, 50 µm ごとに 5 枚用意した. さ らに, ディグレーダを真空槽に近づけたほうが散乱によるビームの広がりが減ると考え真空槽に極力近 づけた(図 3.2, 図 3.3).



図 3.5 真空槽の形状の比較(縦がビーム軸)

3.5 シミュレーションによる先行研究との比較



図 3.6 2018 年度のモデル



図 3.7 今回のモデル

2018 年度の装置と今回の装置を Geant4 のシミュレーションを用いて比較した. 図 3.6 と図 3.7 は, それぞれ 2018 年度と今回の装置を Geant4 内で再現したモデルである. 先述のとおり, 真空槽, ディグレーダの距離, ファイバートラッカーの厚みなどを変更した.

図 3.6, 図 3.7 のモデルを用いてシミュレーションをした結果が以下である.



図 3.8 2018 年度のモデルにおける崩壊位置とト ラッキングのシミュレーション



図 3.9 今回のモデルにおける崩壊位置とトラッキ ングのシミュレーション

図 3.8, 図 3.9 はそれぞれのモデルに対して, MLF D2 ミューオンビームラインと同じ運動エネルギー 4.1 MeV の μ⁺ ビームを 1,500 万発ずつ撃ち込み, 崩壊して放出された e⁺ をトラッキングできたイベントを取 り出してきたグラフである. イベント数はそれぞれ図 3.8 は 486 イベント, 図 3.9 は 697 イベントで, 単純に ターゲットで止めることができた反ミューオンの数が向上していると考えられる.

赤いグラフは反ミューオンの崩壊位置で, 青いグラフはファイバートラッカーによって飛跡を再構成して得 られた外挿位置を示したものである. 赤いグラフに対する青いグラフのばらつきを確認すると, 明らかに図 3.8 よりも図 3.9 のほうがばらつきが少なく, トラッキングの性能も向上しているとわかる. また, 反ミューオンの 崩壊位置に関しても, 本実験のセットアップの方がばらつきが少ない. これは, ディグレーダを真空槽に近づけ たことが有効であったことがうかがえる.



図 3.11 ガウス分布を用いた崩壊位置の再現

次に, 真空槽内で e⁺ をランダムな方向に撃ちだすことで, 疑似的にミューオニウムの崩壊を再現し, 実際に

⁽出典: J-PARC におけるミュー粒子 g-2/EDM 精 密測定の紹介+極冷ミュー粒子源開発の現状 [9])

ミューオニウムの真空への引き出しが起こった場合と起こらなかった場合とを判別する性能があるかをシミュ レーションで確認した.

図 3.10 は, ミューオニウムの真空への引き出しがあった場合となかった場合のミューオンの崩壊位置の分布 である.赤い点は引き出しがある場合,黒い点は引き出しがない場合を表していて,赤い点のほうがターゲット 後方 (z 軸正の方向)のイベント数が多くなっていることが見てとれる.

図 3.11 は, 2 つの Gaussian をもちいて図 3.10 の赤いグラフを再現したものである. Gaussian のうち一つ は引き出しのない場合の, もう一つは引き出し部分の分布とし, 引き出しのない場合の分布にしたがって e⁺ を 撃ちだしたものと, 二つの Gaussian を合わせた分布にしたがって e⁺ を撃ちだしたものとを比較した.

その結果をまとめたものが以下の図 3.12, 図 3.13 である.





図 3.12 2018 年度のモデルにおけるトラッキング シミュレーション

図 3.13 今回のモデルにおけるトラッキングシミュ レーション

赤いグラフが引き出しのない場合の分布にしたがって e⁺ を撃ちだしたシミュレーション結果で, 青いグラ フは引き出し部分を含めたシミュレーション結果である.ファイバートラッカーの幅が増えたことにより,ト ラッキング可能な範囲が広がっていることに注意したい.また, シミュレーションには実際の実験で想定され る最大運動エネルギー 50 MeV のエネルギー分布に従う e⁺ を使用した^{*1}.

図 3.12 と図 3.13 を比較すると, 今回のモデルのほうがターゲット後方(z 軸正の部分)の引き出しの有無 によるイベント数の差がよく見えている. またトラッキング範囲が増えたことで, より引き出しを確認できる 裾野の部分までデータを得ることができた.

以上のシミュレーションより,今回製作した実験装置の性能が先行研究から向上していると結論付けた.今回の改善によって,ミューオニウムの真空への引き出しを確認するのに十分な性能が得られたと考える.

^{*1} 静止した μ^+ が崩壊したときの e^+ の運動エネルギーは、エネルギー・運動量保存則より、 $E_{\max} \sim \frac{m_{\mu}}{2} \sim 50 \text{ MeV}$

第4章

予備実験

4.1 MPPC のゲイン測定

ファイバートラッカーに用いる二つの 16ch MPPC を MPPC1, MPPC2, テストファイバーに用いる 16ch MPPC を MPPC3 としてそれぞれゲインの測定を行った. 実験方法は LED と MPPC を暗幕にいれ, Clock Generator, Attenuator をもちいて適切な光量で LED を光らせ, MPPC のゲインを測定した. MPPC1, MPPC2 については, width 28 ns, Attenuator 1dB と設定し, MPPC への印加電圧を 56.5V, 57.0V, 57.5V と変化させてそれぞれ 10,000 イベントずつデータをとった. MPPC3 については, width 25 ns, Attenuator 6dB と設定し, MPPC への印加電圧を 57.0V, 57.5V, 58.0V と変化させてそれぞれ 10,000 イベントずつデー タをとった.

それぞれの電圧における各 ch に対して pedestal, 1 p.e., 2 p.e. 部分を Gaussian でフィッティングし, 電圧 ごとにゲインを取得し, グラフにプロットしたものが以下の図 4.1, 図 4.2, 図 4.3 である. これを線形フィッ ティングし, 各 ch における電圧に対するゲインの式を得た.



図 4.1 MPPC1 のゲインのバイアス電圧依存性

図 4.2 MPPC2 のゲインのバイアス電圧依存性



図 4.3 MPPC3 のゲインのバイアス電圧依存性

4.2 線源を使ったトラッキング

ファイバートラッカーがある程度正しく動作していることを確認するため, 線源 ⁹⁰Sr を用いたトラッキング のテストを行った. 真空への引き出しを確認する際は, 真空槽の中心軸から 1 層目は 55 mm, 1 層目と 2 層目 の間は 80 mm の距離を設けて実験する. しかし, このセットアップのままだと, 線源の位置を中心軸沿いに変 化させてもシミュレーションおよび実験の双方で外挿位置のヒストグラムのピークがほぼ変化しない結果が得 られた. これはおもに線源である ⁹⁰Sr の β 崩壊で生じる電子の最大の運動エネルギーが, 崩壊生成物の ⁹⁰Y の崩壊まで考えても約 2.2 MeV[10] と低いことが原因である. そのため, 本項の実験では線源から 1 層目は 11 mm, 1 層目と 2 層目の間は 32.5 mm とした.

EASIROC の 0-15 ch にファイバートラッカーの 1 層目を, 32-47 ch に 2 層目を接続し, トリガーに関して は Or32And (上 32 ch のいずれかと下 32 ch のいずれかの ch が同時に threshold を超えた場合トリガーを発 行)とし, 100,000 イベント取得した.また, イベントセレクションに関しては, 各イベントのファイバーごと の ADC value を確認し, 概ね有効なイベントを判別できる値に threshold を設定した.

結果は図 4.4, 4.5, 4.6 の通りである.また,図 4.7, 4.8, 4.9 はシミュレーションのヒストグラムである.こ こで、シミュレーションでの電子のエネルギーは、2.2 MeV を最大とした⁹⁰Y の崩壊により生じる電子のエネ ルギー分布を用いた.いずれの場合も概ねピークの位置はシミュレーションと一致していることから、ファイ バートラッカーが期待通り動作していることが確認できた.一方で、シミュレーションに対してややヒストグ ラムの広がりが大きくなっている.これは電子のエネルギーが低いために散乱の影響が大きくなったことが考 えられる.



図 4.4 線源を中心から左 (負) に 図 4.5 線源を中心においた場合 10 mm においた場合

図 4.6 線源を中心から右(正)に 10 mm においた場合



図 4.7 線源を中心から左 (負) に 10 mm においた場合 (シミュレー ション)



図 4.8 線源を中心においた場合 (シミュレーション)



図 4.9 線源を中心から右(正)に 10 mm においた場合 (シミュレー ション)

第5章

本実験:ファイバートラッカーの性能評価

5.1 概要

2章の実験施設で述べた通り, MLF のミューオンビームが使用できなくなったため, KEL 単電子ビームラ インを用いたファイバートラッカーの性能評価を行った.本実験の目的は,

- ファイバートラッカーがミューオンの崩壊で生じる電子のエネルギー帯で十分に動作すること
- 真空槽による散乱の影響
- クロストークの影響

の確認である.

5.2 **セットアップ**

セットアップについて,ファイバートラッカーをビーム軸に対して垂直に配置する「直進方向」と,斜めに 傾けて配置する「斜め方向」の2種類に大別される.

まず, 直進方向のセットアップを図 5.1 に示す.



図 5.1 直進方向のセットアップ

表 2.1 にあるように, ビームには水平および鉛直方向の広がりがある.そのため, 線源のように単に 2 層で トラッキングしてもファイバートラッカーの精度を調べることができない.そこで, ファイバートラッカーと ビームの間にテストファイバーを配置した.テストファイバーでのヒット位置と, ファイバートラッカーで外 挿して得られるテストファイバー上でのヒット位置の差は理想的には 0 mm となる. しかし, 電子がファイ バーで散乱されることで誤差(図 5.1 中の黄色い矢印)が生じるため, この誤差をヒストグラムにして Geant4 のシミュレーションと比較した. なお, ファイバートラッカーとテストファイバーの中心間の距離は 105 mm である.

また,ファイバートラッカーとテストファイバーの間に真空槽を置いた場合についても実験し,真空槽によ る散乱の影響も確かめた.真空槽は両窓にカプトン箔を張ったまま実験を行った.

次に, 斜め方向のセットアップを図 5.2 に示す.



図 5.2 斜め方向のセットアップ.緑色の領域は、真空への引き出しの確認の際にエアロゲルが配置される位置

真空への引き出しが確認できる場所は,図 3.10 のとおり,およそエアロゲル(図 5.2 の緑色の四角がその位置に相当)の表面から 10 mm ほど先の場所である.この場所から生じた e⁺ が 2 層目の中心に入射するような角度となるようにファイバートラッカーを傾けた.このとき,テストファイバーは傾けておらず,真空槽は設置していない.このときのテストファイバーのヒット位置とファイバートラッカーによる外挿によって得られた位置との差を誤差とした.

また,このセットアップにおいて,テストファイバーを撤去した場合もデータ取得を行った.このとき,電子 がミューオンビーム方向の軸上から来たものであるとしてトラッキングを行うことで,実際に10 mm の位置 にピークが現れることがシミュレーション上で確認できたため,実際にファイバートラッカーを用いた場合で も同様のデータが得られるかを確かめた.

以上のセットアップをまとめたものが以下の表 5.1 である.以降, この表にある名称でセットアップを区別 する.

セットアップ名	ビーム方向	真空槽	テストファイバー
実験1	直進	なし	あり
実験 2	直進	あり	あり
実験3	斜め	なし	あり
実験 4	斜め	なし	なし

表 5.1 セットアップのまとめ

EASIROC との接続に関して, テストファイバーが取り付けられた MPPC3 を上 32 ch に, テストファイ バーが取り付けられた MPPC1, 2 を下 32 ch に取り付けた. トリガーは, 実験 1, 2, 3 では Or32And, 実験 4 では Or32d(下側の 32 ch のいずれかで threshold を超えればトリガーを発行)とした. MPPC には 55.0 V 印加し, 各 ch の調整は先述の通り行っていない.

各実験で 10,000 イベントずつデータを取得した. イベントセレクションについては, 予備実験で行った MPPC のゲインを使用し, テストファイバーは 12 p.e., ファイバートラッカーは 7.5 p.e. を threshold とし た. この値は, 各 ch の threshold を超えたイベント数のヒストグラムを見て, 概形が山なりとなるように決定 した. なお, 次章の結果では, クロストークが起きていないイベントのみを選んでいる. クロストークの影響は 7章の考察で述べる.





図 5.3 実験のようす. いずれも直進方向の場合で, 左が真空槽なし, 右が真空槽あり.

5.3 シミュレーション

前節でファイバートラッカーが真空への引き出しを確認できることを Geant4 によるシミュレーションに よって確かめた.これに加えて,ファイバートラッカーの性能がシミュレーションと一致していれば,実際の ファイバートラッカーも同様に真空への引き出しが確認可能であると考えられる.そのため,この実験におけ るシミュレーションの設定は非常に重要となる.

まずはエネルギーの設定について,使用したビームはエネルギーの広がりを持つ. エネルギー分布の正確な 式はわからなかったため,最大エネルギーの 50 MeV がピークとなり,低エネルギーになるに従って緩やかに 減少する以下の関数を用いた.

$$\rho(E) = 3E^2 - 2E^3$$

ここで, *E* はエネルギーを最大エネルギー(50 MeV)で割ったものである.この関数はミューオンの崩壊で 放出される *e*⁺ のエネルギー分布の式をもとにしている. 電子の運動方向については, ビーム軸に平行とし, 斜め方向に飛ぶことは考慮していない. 初期位置の広がり はビームの特性をそのまま採用している.

ジオメトリについて, テストファイバーとファイバートラッカーはファイバー部分の有効範囲(高さ 20 mm, 幅はテストファイバー 27.2 mm, ファイバートラッカー 1 層目 16 mm, 2 層目 20 mm)のみを実際の配置に 基づいて配置した.なお,ファイバーごとの分割はおこなっておらず,各層を1つのプラスチックシンチレータ の直方体として実装している.これは分割した場合もほとんど影響がみられなかったためである.ヒット判定 はエネルギーを各層で少なくとも 1 eV ずつ落としていることを条件としている.また,実験 2 のシミュレー ションではこれに加えて真空槽を配置している.真空槽は設計 CAD データを CADMesh.hh[11]を用いて実 装している.

レコフレームや真空槽を配置する台なども考慮していない.これらの影響に関しては7章の考察で議論する.

第6章

結果と解析

6.1 実験1

ビームは直進方向で真空槽がないときのテストファイバーとファイバートラッカーの誤差に関するヒストグ ラムは以下の図 6.1 のようになった.



Difference between the test fiber and the fiber tracker

図 6.1 実験1(ビーム直進方向,真空槽なし)におけるテストファイバーとの誤差

ここで, 誤差は

(ファイバートラッカーによる外挿位置) - (テストファイバーのヒット位置)

とし, 正方向はファイバートラッカー側から見て右側とした.本実験では, テストファイバーとファイバート ラッカーの設置の際に平行のずれが生じており, トラッキングを行うとピークが 0 とならなかった. そのため, 誤差を Gaussian でフィッティングし, 得られた mean だけ全データをシフトしている.

実験結果はシミュレーションと概ね一致しており,ファイバートラッカーが適切に動作していることがわ かった.

6.2 実験2

ビームは直進方向で真空槽があるときのテストファイバーとファイバートラッカーの誤差に関するヒストグ ラムは以下の図 6.2 のようになった.



図 6.2 実験2(ビーム直進方向,真空槽あり)におけるテストファイバーとの誤差

実験1と比較すると、実験結果とシミュレーションのどちらも誤差が5mm以上のイベントが多くなってい ることがわかる.これが真空槽によって散乱される影響であると考えられる.実験結果はシミュレーションよ りも分散が大きくなってしまっているものの、ピークは十分に確認できる.

また、本実験では電子は真空槽の窓を2回通過するが、真空への引き出しを確認する際は1回のみ通過する. このことを踏まえると、 散乱の影響は引き出しの確認に支障しないと考えられる.

実験3 6.3

ビームが斜め方向のときのテストファイバーとファイバートラッカーの誤差に関するヒストグラムは以下の 図 6.3 のようになった.

なお、本実験では実験1,2で行ったような mean のシフトは行っていない. ピークはシミュレーションと同 様に誤差が0 mm の場所にあらわれており、この点に関してはシミュレーション通りの結果が得られたとい える.

一方で, 実験 1, 2 と比べると, 誤差が –5 mm よりも小さいところで多くのイベントが現れている. 誤差が 正の場所にこれらのイベントが現れていない要因の一つは、ファイバートラッカーがビーム軸に対して左右非 対称に設置されていることである.

さらなる考察は7章で行う.

実験 4 6.4

ビームが斜め方向でテストファイバーがないときの、ミューオンビーム軸上から電子がきたと仮定したとき のファイバートラッカーによる外挿位置は以下の図 6.4 のようになった.



図 6.3 実験3(ビーム斜め方向)におけるテストファイバーとの誤差



図 6.4 実験4(ビーム斜め方向,テストファイバーなし)におけるミューオンビーム軸上の外挿位置

シミュレーションと同様に,およそ 10 mm にピークがあり,ファイバーの有効範囲の関係で 10 mm 以降 は一気にイベントが減るようすが確認できた.この実験では実験3で見られたような大きな散乱は見られず, ファイバートラッカーは期待通り動作しているといえる.

第7章

考察

7.1 クロストークの影響

本項ではクロストークの影響について述べる. ここでのクロストークは, MPPC がアバランシェ増幅する際 に生じる 2 次電子が隣接する ch に入る現象に加えて, 隣接するファイバーのシンチレーション光を検出する 場合も含むものとする. また, 隣接しない複数の ch が threshold を超えた場合は含まない. 各実験でクロス トークが起こったイベント数を以下の表 7.1 に示す.

	全イベント数	クロストークが起こった	割스		
	(クロストーク含む)	イベント数	리미		
実験1	1,800	121	6.72~%		
実験 2	1,261	87	6.90~%		
実験 3	865	85	9.83~%		
実験 4	2,579	312	12.10~%		

表 7.1 各実験におけるクロストークのイベント数

表からわかるように, 直進方向の場合よりも斜め方向の方がクロストークが多く発生したことがわかる. こ れは電子がファイバーの側面に当たる割合が高くなったためだと考えられる.

クロストークが起こった場合に,検出したファイバーの位置の平均をとった場合の実験1における誤差は次の図 7.1 のようになった.



図 7.1 実験1の誤差. 左がクロストークを含まない場合, 右がクロストークを含む場合.

クロストークを含む場合と含まない場合でほとんど差がないことがわかる.

クロストークの発生に関しては,ファイバーに反射材を塗るなどして減少させることができるが,今のまま でもそれほど多くはないことから,クロストークを含まないイベントについてのみ解析することで対応できる と考える.

7.2 実験3のシミュレーションとの乖離について

実験1,2,4 はシミュレーションと同様の結果が得られたのに対して,実験3 では誤差が-5 mm 以下のと ころにシミュレーションにない多数のイベントが見られた.これらのイベントに関して,誤差の定義から,テス トファイバーのヒット位置がファイバートラッカーの外挿によって得られた位置よりも正方向側にあることが わかる.このことから,ファイバートラッカーの1層目にヒットした後に正方向に散乱されたと考えられる.

考えられる一つの要因として, レコフレームによる散乱の影響がある.ファイバートラッカーの1層目を通 過後に電子がレコフレームによって散乱される場合, テストファイバーのヒット位置よりも外挿位置は負の方 向にずれる.これを考慮したときのシミュレーションの結果は次の図 7.3 のようになった.なお,このシミュ レーションではレコフレーム表面の凹凸は無視している.



図 7.2 レコフレームを配置したときの Geant4 の ジオメトリ



図 7.3 レコフレームをシミュレーションに含めた 場合の実験 3 の誤差

レコフレームを含めた場合でもシミュレーションの結果はほとんど変わらなかった. レコフレームによる散 乱の影響は大きくないと考えられる.

一方で,図7.4 のような場合のトラックは,1 層目のヒット位置がレコフレームがある場所から遠くレコフ レームの散乱のみでは説明できない.このときの散乱の影響は明らかに1 層目にあると考えられる.電子が斜 めに入射したときに最も考慮しなくてはならないのは,シンチレーションファイバーの側面での反射の影響で ある.Geant4 中では,図7.2 の水色の Box がファイバートラッカーのファイバー部分にあたるが,先述の通り ファイバーごとに分割はしていない.これを分割し,さらに設置精度の関係でファイバー間に 0.1 mm の空隙 が存在するとしたときのシミュレーションは以下の図7.6 のようになった.

この場合も大きな変化はなく、裾のイベントを説明することはできなかった.



図 7.4 実験 3 のトラックの 1 例. 傾いているのがファイバートラッカー. このときの誤差は –17.27 mm.



図 7.5 Geant4 上での分割されたファイバー



図 7.6 ファイバーを分割した場合のシミュレー ションを含む実験 3 の誤差

シミュレーションで誤差が –5 mm 以下となるイベントの原因を見つけることはできなかった.一方で, ファイバーの側面での反射に関しては, 適切なシミュレーションが行えているか不明であるため, さらなる検 証が必要であると考える.これらのイベントを減らす方法の一つは, 7.1 節でも述べた通り, 各ファイバーに反 射材を塗布することが有効であると考えられる.これを行うことで光量も増加するため, 有効な手法であると いえる.

第8章

おわりに

本研究では、ミューオニウムの真空への引き出しの確認を目的に、2018 年度の実験装置の改良を進めた.

改良点の主に3つおこなった.1つ目は,真空槽の形状変更であり,エアロゲルからファイバートラッカーま での距離を短くすることで,真空槽による e⁺ の散乱の影響を減らし,イベント数の増加を見込むことができ た.2つ目はファイバートラッカーの改良である.各層のファイバーの厚みを最適化することで,有効範囲を広 げ,散乱の影響を減少させた.3つ目はディグレーダの切り替え機構の変更である.3D プリンターを用いたホ ルダーを作成することで,スムーズに厚みを変更できるようにした他,アルミ箔に関してもやや厚みのあるも のを使用することで皺ができにくくなった.

これらのセットアップを Geant4 を用いたシミュレーションで検証し, 真空への引き出しを確認することに 十分な性能があることを確認した.

MLF のミューオンビームは機器の不備のため利用することができなかったが, KEL の単電子ビームライン を使用させていただくことができ, ファイバートラッカーの性能評価を行うことができた. 実験結果はシミュ レーションと概ね一致しており, ファイバートラッカーが期待通り動作していることが確認できた. 電子が斜 めから入射する場合はノイズが多くなってしまうが, 真空への引き出しに大きな影響はないと考えられる.

MLF のミューオンビームは 5 月以降に復旧する可能性があるとのことなので, 復旧次第本来の目的である ミューオニウムの真空への引き出しの確認を行いたい.

謝辞

本研究の遂行にあたって,指導教員である中家剛教授,木河達也助教には,普段のゼミでの進捗報告から,宇 治キャンパスでの本実験まで,数え切れないほどの助言をいただき,非常にお世話になりました.

TA の恩田直人さん, 溝添泰隆さんには実験装置や加工装置の使い方で大変お世話になりました. 恩田さん には, 忙しい中 EASIROC モジュールの使い方を丁寧に教えていただきました. 溝添さんには 3D プリンター や電動ノコギリなどの使い方を基本から教えていただきました.

また,高エネルギー加速器研究機構の三部勉教授,木村眞人特任助教には,本学までお越しいただき,ミュー オニウムについて教えていただいた他,本実験に多くの助言をいただきました.

京都大学 化学研究所 先端ビームナノ科学センター 粒子ビーム科学研究領域の若杉昌徳教授, 塚田暁准教授, 頓宮拓さんには, 単電子ビームラインを使わせていただきました.また, EASIROC のノイズが大きくうまく 測定できなかった際に, アルミホイルで巻くよう助言いただいたおかげで, ビーム時間内にデータ取得を終え ることができました.

皆様のご協力のもと、実験を無事遂行することができました. 心から感謝申し上げます.

付録

A 実験装置の寸法

A.1 真空槽



図 8.1 真空槽の寸法

A.2 ジグ (1 層目)

ファイバーを層状に束ねているために使用. 2 枚重ねてネジ止めすることでファイバーを束ねる. 3D プリン ターの精度の関係で寸法には余裕を持たせている.

A.3 クッキー (1 層目)

MPPC とファイバーを接着するために使用. ジグと同様に寸法に余裕を持たせている.



図 8.2 ファイバートラッカー 1 層目のジグの寸法. これを 2 枚重ねてファイバーを束ねる. 3D プリン ターの精度の関係で寸法には余裕を持たせている.



図 8.3 クッキー(1 層目)のジグの寸法

参考文献

- [1] 2018 年度課題研究 P2 レポート, https://www-he.scphys.kyoto-u.ac.jp/gakubu/P2/P2-18/P2_2018_report_muonium.pdf
- [2] Cvetič, G., Dib, C., Kim, C. & Kim, J. Muonium-antimuonium conversion in models with heavy neutrinos. *Phys. Rev. D.* 71, 113013 (2005,6), https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevD. 71.113013
- [3] 高エネルギー加速器研究機構, https://www2.kek.jp/imss/msl/muon-tour/outline.html
- [4] 物理のペーじ, http://physnd.html.xdomain.jp/field/decay.pdf
- [5] J-PARC, 『MLF 2024B 利用運転のキャンセルについて』
 https://j-parc.jp/c/information/2025/02/06001459.html
- [6] J-PARC MLF, 『Muon D2』 https://mlfinfo.jp/ja/d2/
- [7] 京都大学化学研究所,『京大化研電子線形加速器 KEL』 https://pbs.kuicr.kyoto-u.ac.jp/research-equipments-ja/electron-linac-ja/
- [8] 石島直樹, 仲居勇樹, 『EASIROC MODULE User Guide』 https://research.kek.jp/people/isamun/easiroc/manual.pdf
- [9] 上野一樹、『J-PARC におけるミュー粒子 g-2/EDM 精密測定の紹介+極冷ミュー粒子源開発の現状』 https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/info/sympo/18/torape/20120222_kazuki_ICEPPsympo.pdf
- [10] Dixon, J., Rajan, A., Bohlemann, S. et al. Evaluation of a Silicon 90Sr Betavoltaic Power Source. Sci Rep 6, 38182 (2016). https://doi.org/10.1038/srep38182
- [11] christopherpoole. "CADMesh". GitHub. https://github.com/christopherpoole/CADMesh, (参照 2025-03-27)