

大強度陽子加速器施設 J-PARC における
ビームライン H ラインのための
パルスビームプロファイル測定装置の開発
(Development of a pulse-beam profile measurement system
for the beamline H-Line at Japan Proton Accelerator
Research Complex J-PARC)

理学研究科

数物系専攻

長谷 和哉

概要

ミューオン・電子転換過程 ($\mu^- + (A,Z) \rightarrow e^- + (A,Z)$) は荷電レプトン・フレーバーを保存しない過程である (charged Lepton Flavor Violation, cLFV). 素粒子の標準模型では cLFV は禁止されているが, 標準模型を超えた多くの物理モデルでは現在の実験による分岐比の上限値 10^{-13} の数桁下に cLFV が存在すると予想されている.

ミューオン・電子転換過程探索実験 DeeMe (Direct emission of electron by Muon-electron conversion) は茨城県東海村の大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の物質生命科学実験施設 (MLF) で計画されている実験であり, 3 GeV 陽子シンクロトロン (Rapid-Cycling Synchrotron, RCS) からの大強度高純度パルス陽子ビームを活用することによって単一事象感度 10^{-14} の実験を実現しようとしている. 探索する粒子は 105 MeV/c の運動量を持った遅延電子であるため, DeeMe では運動量を測定するための飛跡検出器を用いて遅延電子を観測する.

DeeMe は MLF の High-momentum muon beamline (H-Line) と呼ばれるビームラインを用いて実験を行なう. H-Line は 2022 年 1 月 15 日に初めてビームが開通した, 新しいビームラインである. 様々な電磁石で構成されており, これらの電磁石にある電流を流すことで特定の運動量を持った荷電粒子を輸送することができる. H-Line が荷電粒子を輸送したその先に H1 エリアと呼ばれる実験エリアがあり, DeeMe はここに実験装置を設置して実験を行なう. H1 エリアに搬入する実験装置は PACMAN と呼ばれる大きな双曲電磁石と, 飛跡検出器の役割を担う 4 つの MWPC である. この MWPC の検出面の大きさにビームが合うように, H-Line の電流値設定を調整する必要がある. この電流値の調整のことをビームチューニングといい, これを行なうためにビームの形状を測定する装置, プロファイル測定装置を開発した.

プロファイル測定装置はソロカウンター方式という, 1 つのカウンターを動かしながら各点でのビーム強度を測るスキャン方法をとる. ゆえに, プロファイル測定装置はカウンターとしての役割を担うチェレンコフ検出器, カウンターを動かすための 2 軸ロボット, DAQ システムとしての Redpitaya の 3 つから構成されている. チェレンコフ検出器の発光物質としてアクリルを採用しており, 形状を四角錐にすることで電子とミューオンを区別することができるようになっている. 2 軸ロボットはパソコンを用いた遠隔操作が可能であり, 遠隔操作するためのプログラムを C 言語で作成した. また, Redpitaya もパソコンで制御することができるため, 2 軸ロボット同様にプログラムを C 言語で作成した. 同じ言語でプログラムを作成したためこれら 2 つを統合することができ, プロファイル測定装置としてのシステムを構築した.

プロファイル測定装置のスキャンで得られるデータは, チェレンコフ検出器に設置された PMT から送られてくる電気信号を 8 ns ごとに記録したものであり, これから横軸: 時間, 縦軸電圧の波形を描くことができる. この波形よりビーム強度を測定し, それをロボットの座標ごとにプロットすることでプロファイル画像を作成することができる. また, チェレンコフ検出器を用いた先行実験のときに得られた, ビーム強度から飛来電子数への変換係数を利用することでプロファイル画像と同時に飛来電子数を見積もることができる.

2022 年 5 月, DeeMe に H-Line のビームタイムが与えられたため, 開発したプロファイル測定装置を H1 エリアにて実際に使用した. まずは DeeMe のメインターゲットである 105 MeV/c の電子に対してスキャンを行ない, プロファイル画像の作成と飛来電子数の見積もりを行なうことができた. また, ビームチューニングを行ない, 105 MeV/c の電子を輸送するために適した電流値設定を決定することができた. 加えて, 105 MeV/c の電子だけでなく, 50 MeV/c の陽電子に対してビームチューニングを行ない, 最適な電流値設定を決定することができた.

目次

1	序章	7
1.1	標準模型	7
1.2	荷電レプトン・フレーバー非保存過程	7
1.3	ミューオン・電子転換過程	9
1.4	ミューオン・電子転換過程のシグナルとバックグラウンド	10
2	実験計画	13
2.1	Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)	13
2.1.1	Linac	13
2.1.2	RCS	13
2.1.3	MR	13
2.1.4	MLF	14
2.2	DeeMe 実験	14
2.3	DeeMe 実験における物理解析とバックグラウンド	14
2.4	陽子標的兼ミューオン静止標的	15
2.5	H-Line	16
2.6	H1 エリア	17
2.6.1	磁気スペクトロメータ	17
2.6.2	双極電磁石 (PACMAN)	17
2.6.3	飛跡検出器 (MWPC)	18
3	パルスビームプロファイル測定装置	28
3.1	開発動機	28
3.2	構成要素	28
3.3	チェレンコフ検出器	28
3.3.1	本体・ライトガイド	28
3.3.2	アクリル	29
3.3.3	ブラックボックス	29
3.3.4	PMT	29
3.4	2 軸ロボット	29
3.5	Redpitaya	29
3.6	測定の流れ	30
3.6.1	システムの流れ	30
3.6.2	ロボットの移動方法	30
4	測定データの解析方法	40
4.1	測定データの中身	40
4.2	波形の作成	40
4.3	積分時間の決定	40
4.4	プロファイル画像の作成	41
4.4.1	プロファイル画像	41
4.4.2	プロジェクション	41
4.4.3	特記事項	41
4.4.4	シミュレーションとの比較：プロファイル画像	42

5	飛来電子数の求め方	50
5.1	先行実験	50
5.2	飛来電子数と積分値の関係式の導出	50
5.3	変換係数	50
5.4	飛来電子数の計算	51
5.5	運動量と飛来電子数の関係	51
5.6	シミュレーションとの比較：飛来電子数	51
6	ビームチューニング	56
6.1	負電荷・105 MeV/c	56
6.1.1	積分値に対するチューニング	56
6.1.2	最適化の手順	56
6.1.3	チューニング結果	57
6.1.4	プロファイルに対するチューニング	57
6.2	正電荷・50 MeV/c	58
6.2.1	ロボット位置：Straight_v0	58
6.2.2	ロボット位置：Bended	59
7	結論	70
	謝辞	71
	参考文献	72

目次

1.1	ニュートリノ振動を考慮したミューオン・電子転換過程のダイアグラム	11
1.2	cLFV 過程のエネルギースケール Λ とモデルパラメータ κ に対する $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊と ミューオン・電子転換過程の感度依存性	11
1.3	Czarnecki らによる DIO 電子のエネルギースペクトル. Si (青), C (赤).	12
2.1	J-PARC 施設のレイアウト	19
2.2	J-PARC MLF Beamline	20
2.3	JDeeMe 実験の全体図	20
2.4	RCS からのパルス陽子ビームの構造と DeeMe 実験における信号探索時間	21
2.5	G4beamline シミュレーションで得られる予想運動量スペクトル. SiC 標的, RCS 1 MW で 2×10^7 s (1 年間) のビームタイムと, 3×10^{-14} のミューオン・電子転換分 岐比, $R_{DP} = 10^{-19}$ を仮定した.	21
2.6	グラフィット製回転標的	22
2.7	ミューオニック C 原子における原子核と μ^- の波動関数の重なり	22
2.8	ミューオニック Si 原子における原子核と μ^- の波動関数の重なり	22
2.9	G4beamline で描かれた H-Line	23
2.10	電子の運動量と H-Line の各電磁石・磁気スペクトロメータのアクセプタンス	23
2.11	g-2/EDM 実験の概要	24
2.12	MuSEUM 実験の概要	24
2.13	H1, H2 エリアの俯瞰	25
2.14	磁気スペクトロメータ. 右側がビーム上流, 左側がビーム下流である.	25
2.15	DeeMe 実験に用いられる双極電磁石 PACMAN	26
2.16	DeeMe 実験に用いられる飛跡検出器 MWPC	27
2.17	DeeMe の MWPC の断面図	27
3.1	パルスビームに対してストリップカウンター方式を用いた場合	31
3.2	パルスビームに対してソロカウンター方式を用いた場合	31
3.3	チェレンコフ検出器の全体像	32
3.4	チェレンコフ検出器の中身	32
3.5	四角錐の亚克力	32
3.6	亚克力設置の様子. 底に窓を設けている.	33
3.7	ブラックボックス	33
3.8	ブラックボックス設置の様子	33
3.9	PMT	34
3.10	PMT の型番	34
3.11	PMT 設置の様子	34
3.12	2 軸ロボット. 斜めに取り付けられているのはチェレンコフ検出器.	35
3.13	H1 エリアのビームダクト	36
3.14	2 軸ロボットに取り付けられたチェレンコフ検出器内の亚克力の向き	37
3.15	Redpitaya. 黒線が電源ケーブル, 赤線がイーサネットケーブル.	37
3.16	Redpitaya の入力・出力チャンネル	38
3.17	プロファイル測定装置のダイアグラム	38
3.18	ロボットの移動方法	39
4.1	Redpitaya が取得するデータ	43
4.2	測定データの波形	43

4.3	図 4.2 を拡大表示した波形	43
4.4	測定データの足し合わせ波形	43
4.5	ロボットの位置：Straight	44
4.6	ロボットの位置：Bended	44
4.7	図 4.4 を拡大表示した波形	45
4.8	積分の時間範囲の開始点付近	45
4.9	積分の時間範囲の終了点付近	45
4.10	電流値設定：負電荷 70 MeV/c, PACMAN で曲げないときのプロファイル画像等	46
4.11	電流値設定：負電荷 70 MeV/c, PACMAN で曲げるときのプロファイル画像等	47
4.12	図 4.10 のプロファイル画像部分を拡大したもの	47
4.13	図 4.11 のプロファイル画像部分を拡大したもの	48
4.14	正電荷・50 MeV/c・Straight のシミュレーションによるプロファイル画像	48
4.15	正電荷・50 MeV/c・Straight の測定によるプロファイル画像	49
5.1	KURNS 実験で得られたビーム強度依存性	53
5.2	飽和していない点を抽出したビーム強度依存性	53
5.3	ビームの運動量に対する飛来電子数（正電荷）	54
5.4	ビームの運動量に対する飛来電子数（負電荷）	54
5.5	飛来電子数の実測値とシミュレーションの比較	55
6.1	表 6.1 のプロファイル画像	60
6.2	表 6.1 の HB2 を -5% したプロファイル画像	60
6.3	表 6.1 の HB2 を -10% したプロファイル画像	61
6.4	表 6.1 の HB2 を +10% したプロファイル画像	61
6.5	HB2 の電流値に対する積分値の変化	62
6.6	表 6.2 のプロファイル画像	62
6.7	表 6.2 の Bended でのプロファイル画像	63
6.8	表 6.2 の全体を +15% したプロファイル画像	63
6.9	表 6.2 の全体を +7.0% したプロファイル画像	64
6.10	表 6.4 のプロファイル画像	64
6.11	表 6.4 の HQ1 を +10% したプロファイル画像	65
6.12	表 6.4 の HQ1 を +20% したプロファイル画像	65
6.13	表 6.4 の HQ1 を -10% したプロファイル画像	66
6.14	表 6.4 の HQ2 を +10% したプロファイル画像	66
6.15	表 6.4 の HQ2 を -10% したプロファイル画像	67
6.16	表 6.4 の HQ2 を -20% したプロファイル画像	67
6.17	表 6.4 の HQ3 を +10% したプロファイル画像	68
6.18	表 6.4 の HQ3 を -10% したプロファイル画像	68
6.19	表 6.4 の HQ3 を -20% したプロファイル画像	69
6.20	表 6.5 の Bended でのプロファイル画像	69

表目次

1.1	クォークとレプトン (フェルミオン)	7
1.2	ゲージボソン	7
1.3	代表的な e LFV 過程探索実験における分岐比の上限値	8
2.1	RCS パラメーター一覧	14
2.2	C 製標的, SiC 製標的を用いた場合の統計量	15
2.3	PACMAN 電磁石の仕様	18
5.1	PACMAN で曲げられた後の飛来電子数の減少割合	51
5.2	飛来電子数の実測値とシミュレーション値	52
6.1	シミュレーションによって得られた負電荷・105 MeV/c の電流値設定	56
6.2	積分値に対するチューニングによって得られた負電荷・105 MeV/c の電流値設定	57
6.3	プロファイルに対するチューニングによって得られた負電荷・105 MeV/c の電流値設定	57
6.4	シミュレーションでの平均運動量が 50 MeV/c になるときの電流値設定	58
6.5	直進ビームに対するチューニングによって得られた正電荷・50 MeV/c の電流値設定	59

1 序章

1.1 標準模型

素粒子物理学は、物質の最小の構成要素である素粒子の性質やそれらの間の相互作用を調べ、自然の根本法則を明らかにしようとする学問である。素粒子の振る舞いを良く記述する理論として標準模型が確立されてきた。標準模型では、物質を構成するクォークとレプトン (表 1.1), それらの力を媒介するゲージボソン (表 1.2) が素粒子とされる。

表 1.1: クォークとレプトン (フェルミオン)

	第 1 世代	第 2 世代	第 3 世代	電荷 $Q/[e]$	スピン
クォーク	u	c	t	+2/3	1/2
	d	s	b	-1/3	1/2
レプトン	ν_e	ν_μ	ν_τ	0	1/2
	e^-	μ^-	τ^-	-1	1/2

表 1.2: ゲージボソン

ボソン	媒介する力	電荷 $Q/[e]$	スピン
γ (フォトン)	電磁相互作用	0	1
g (グルーオン)	強い相互作用	0	1
W^\pm (W ボソン)	弱い相互作用	± 1	1
Z^0 (Z ボソン)	弱い相互作用	0	1

標準模型で予測されながら唯一発見されていなかったヒッグス粒子が 2012 年 7 月、スイスにある欧州原子核合同研究機構 (CERN) の陽子-陽子衝突加速器 LHC で実験しているグループ、ATLAS と CMS によって発見された。この発見により、標準模型を構成する素粒子は揃ったのだが、標準模型では説明できない現象がいくつか見つかっている。例えば、ニュートリノが質量をもつことが挙げられる。ニュートリノ振動 (中性レプトンであるニュートリノが他の世代のニュートリノへ遷移する現象) が 1998 年、神岡鉱山に設置されたスーパーカミオカンデにより発見されたことがニュートリノが質量を持つということの証明となっている。標準模型では、ニュートリノの質量は厳密に 0 であるため、ニュートリノ振動の発見は標準模型では説明できないものを示す証拠となっている。

このように、標準模型には不十分な点が存在するため、標準模型を越える新しい理論につながる発見が世界中の研究者によって探されている。その一つとして、荷電レプトンフレーバー非保存過程が挙げられる。本章では、標準模型では説明できないレプトンフレーバー保存を破る過程とミューオン・電子転換過程探索のための DeeMe 実験 [1] について述べていく。

1.2 荷電レプトン・フレーバー非保存過程

標準模型において物質を構成するクォークとレプトンについて、レプトンはそれぞれの世代で固有の量子数を持ち、第一世代 (e, ν_e) は電子レプトン数 L_e , 第二世代 (μ, ν_μ) はミューオンレプトン数 L_μ , 第三世代 (τ, ν_τ) はタウレプトン数 L_τ と定義され、それらはレプトンフレーバーと呼ばれる。それぞれのレプトンフレーバーに対して、粒子には +1 の量子数を、反粒子には -1 の量子数を、他の粒子には 0 の量子数を課す。標準模型では、全ての素粒子の相互作用において反応の前後でそれぞれのレプトンフレーバー量子数の総和は保存し、これはレプトンフレーバー数保存と呼ばれる。

(例) ミューオンの崩壊 (Michel 崩壊)

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (1.1)$$

式 (1.1) について考える. レプトン数は左辺は L_e が 0, L_μ が +1, 右辺は L_e が +1 + (-1) = 0, L_μ が +1 となり, レプトンフレーバー量子数が保存していることがわかる. 一方で, クォークに関してはフレーバーは保存されない. 標準模型では, 素粒子はヒッグス粒子と湯川相互作用をすることで質量を獲得する. クォークの質量固有状態は左巻きの u クォークと d クォークについて質量行列を独立に対角化することで得られるが, 標準模型ではこの状態は弱い相互作用を記述する SU(2) ゲージ群の二重項に統合されなければならない. このとき 2 つの状態の間をつなぐ相対的な回転自由度から, フレーバーの混合が生じる. レプトンについても同じことが言えるが, 標準模型の枠内ではニュートリノの質量が 0 であるため, 荷電レプトンの質量固有状態は SU(2) の二重項全体の回転で得られる. よって荷電レプトンではフレーバーの混合が生じず, レプトンフレーバー数が保存されるのである. しかしニュートリノ振動現象の観測により, ニュートリノの質量は 0 ではないことが分かり, 弱い相互作用においてレプトンフレーバー数保存は成立しないことが確認された.

しかし, 荷電レプトンにおいてレプトン・フレーバー非保存過程 (charged Lepton Flavor Violation, cLFV) は未だ発見されていない. 標準模型の範囲で cLFV 過程を考えた時, ニュートリノ混合を考慮すると, ミューオンが仮想的に W ボソンを放出し ν_μ となる. ν_μ がニュートリノ混合によって ν_e になり, W ボソンを吸収すれば μ^- の稀崩壊 $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$ になる. しかし, この過程 (図 1.1) の分岐比は, Maki-Nakagawa-Sakata (MNS) ニュートリノ混合行列成分 $U_{\mu i}$, $U_{e i}$ とニュートリノの質量差 Δm_{ij} , W ボソンの質量 M_W を用いて式 (1.2) であらわされ, ニュートリノの質量差が W ボソンの質量に比べ非常に小さいため, 10^{-54} 以下と非常に小さくなる. 10^{-54} の分岐比の過程を観測するに至る実験は現在の技術では不可能である.

$$Br(\mu \rightarrow e\gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_{i=2,3} U_{\mu i}^* U_{e i} \frac{\Delta m_{ij}^2}{M_W^2} \right|^2 < 10^{-54} \quad (1.2)$$

標準模型では, ニュートリノ混合を考慮した場合でも cLFV 過程は観測されないと言うことができ, cLFV 過程の観測はすなわち新しい物理の証拠になる. 既に標準模型を越える多くの新しい理論モデルでは cLFV 過程の発生確率は現在の上限値 (表 1.3) の数桁下であると予想している. cLFV は, 理論的に存在が十分に期待されており, 現在の実験技術で観測できる程度に分岐比であり, 実験結果の解釈もシンプルなため, 新しい物理を探索する方法として優れていると言える. cLFV 過程の分岐比と現在の実験上限値をまとめたものが表 1.3 である.

表 1.3: 代表的な cLFV 過程探索実験における分岐比の上限値

崩壊モード	分岐比の上限値	実験
$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$	$< 5.7 \times 10^{-13}$	MEG [2]
$\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$	$< 1.0 \times 10^{-12}$	SINDRUM [3]
$\mu^- + A_u \rightarrow e^- + A_u$	$< 7 \times 10^{-13}$	SINDRUMII [4]
$\mu^- + T_i \rightarrow e^- + T_i$	$< 4.3 \times 10^{-12}$	SINDRUMIII [5]
$\tau^\pm \rightarrow \mu^\pm \gamma$	$< 4.4 \times 10^{-8}$	Belle [6]
$Z^0 \rightarrow \mu^\pm \gamma$	$< 1.2 \times 10^{-5}$	DELPHI [7]
$K_L^0 \rightarrow e^\pm \mu^\pm$	$< 4.7 \times 10^{-12}$	BNL E871 [8]
$B_S^0 \rightarrow e^\pm \mu^\mp$	$< 2.0 \times 10^{-7}$	CDF [9]
$B^0 \rightarrow e^+ \mu^-$	$< 6.4 \times 10^{-8}$	CDF [10]

ミューオン・電子転換過程には光子を伴う過程 ($\mu \rightarrow e\gamma$) と伴わない過程 ($\mu N \rightarrow eN$) がある。その有効ラグランジアンは以下の式 (1.3) で表される。

$$\mathcal{L} = \frac{m_\mu}{(\kappa + 1)\Lambda^2} \bar{\mu}_R \sigma^{\mu\nu} e_L F_{\mu\nu} + \frac{\kappa}{(\kappa + 1)\Lambda^2} \bar{\mu}_L \gamma^\mu e_L (\tilde{q}_L \gamma_\mu q_L) \quad (1.3)$$

ここで Λ はエネルギースケールを表し、 κ は二つの相互作用の比である。式 (1.3) の右辺の第一項は光子を伴う過程を示しており、実光子として放出されれば $\mu \rightarrow e\gamma$ の崩壊に、仮想光子として原子核に結合すればミューオン・電子転換過程 $\mu N \rightarrow eN$ となる。ミューオン・電子転換過程は $\mu \rightarrow e\gamma$ を内包し、その分岐比は $\mu \rightarrow e\gamma$ の数百分の1程度と小さい。また、式 (1.3) の右辺の第二項は終状態に光子を伴わない過程を表し、 $\mu \rightarrow e\gamma$ では観測することができない。

2つのパラメータ、 Λ と κ は説明するモデルによって変化し、標準模型を超える新しい物理モデルの検証が可能となるため重要なパラメータである。モデルによる違いを図 1.2 に示す [11]。同時に、現在の $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$ やミューオン・電子転換過程の探索実験が与える実験上限値によって排除された領域と、DeeMe グループが目指すエネルギースケール Λ の目標値も表している。cLFV 過程の探索によって到達できるエネルギースケールは 10^3 TeV にもなり、直接加速器で到達できない高エネルギーの物理現象の探索が可能であることが分かる。

1.3 ミューオン・電子転換過程

物質中で μ^- が静止すると、 μ^- は物質中の原子核のクーロン場に束縛され、ミューオニック原子が形成される。束縛された μ^- は X 線を放出しながら基底状態である $1S$ 軌道まで落ちていく。その後 μ^- は、標準模型の枠内では原子核軌道上で崩壊するか (式 (1.4))、原子核に捕獲されるミュー粒子原子核捕獲反応 (式 (1.5)) の2つの過程のいずれかをたどる。

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu \quad (1.4)$$

$$\mu^- + (A, Z) \rightarrow \nu_\mu + (A, Z - 1) \quad (1.5)$$

ここで A は μ が束縛された物質の原子量、 Z は原子番号を表す。式 (1.4) のような過程を Decay in Orbit (DIO)、式 (1.5) のような過程を、Muon Capture (MC) と呼ぶ。ミューオンの寿命 τ は次式のように表される。

$$N = N_0 e^{-(\alpha_f + \alpha_c)t} \quad (1.6)$$

$$\tau = \frac{1}{\alpha_f + \alpha_c} \quad (1.7)$$

ここで、 N は時間 t に残っているミューオンの数、 N_0 は最初 ($t=0$) にあったミューオンの数である。また、 α_f は DIO の崩壊定数であり、自由空間でのミューオンの Michel 崩壊と同様で、 $\alpha_f = 0.452 \text{ s}^{-1}$ である。崩壊定数の逆数は自由空間でのミューオンの寿命であり、 $2.197 \times 10^{-6} \text{ s}$ である。 α_c は MC の崩壊定数であり、ミューオンと原子核の波動関数の重なりに依存するため、物質の原子番号によって大きく異なる。炭素 (C) で $\alpha_c = 0.0388 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ 、ケイ素 (Si) の場合 $\alpha_c = 0.8712 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ である。従って、C 原子に束縛されたミューオンの寿命は $\tau = 2.02 \mu\text{s}$ 、Si 原子に束縛されたミューオンの寿命は $\tau = 0.754 \mu\text{s}$ となり、物質中でのミューオンの寿命は自由空間でのそれよ

りも小さくなることがわかる。実験のデザインにおいて、ミュオニック原子の寿命は非常に重要である。ミュオン・電子転換過程はミュオンと原子核の重なりに依存する反応であるので、その分岐比はミュオン原子核捕獲の崩壊幅に対するミュオン・電子転換過程の崩壊幅を用いて、次のように定義される。

$$Br(\mu^- + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z)) \equiv \frac{\Gamma(\mu^- + (A, Z) \rightarrow e^- + (A, Z))}{\Gamma(\mu^- + (A, Z) \rightarrow \nu_\mu + (A, Z - 1))} \quad (1.8)$$

1.4 ミュオン・電子転換過程のシグナルとバックグラウンド

ミュオン・電子転換過程が起こった場合、単色エネルギー $E_{\mu e}$ をもつ電子が原子核から放出される。そのエネルギーは、ミュオンの質量 m_μ から、ミュオニック原子中での $1S$ 軌道における束縛エネルギー B_μ と原子核の反跳エネルギー E_{rec} を引いたものになる。

原子核の反跳エネルギー E_{rec} は、原子核の質量 M_A を用いて式 (1.9) のように近似できるが、反跳エネルギー E_{rec} は十分小さいため、無視することで式 (1.10) のように近似することが出来る。

$$E_{rec} \approx \frac{(m_\mu - B_\mu)^2}{2M_A} \quad (1.9)$$

$$E_{\mu e} = m_\mu - B_\mu - E_{rec} \approx m_\mu - B_\mu \quad (1.10)$$

$1S$ 軌道の束縛エネルギー B_μ はミュオニック原子をつくる原子によって異なるため、実験に用いる標的物質によってミュオン・電子転換過程由来の電子のエネルギー $E_{\mu e}$ の大きさも異なる。C 原子の場合では 105.06 MeV, Si 原子の場合では 104.91 MeV となる。ミュオン・電子転換探索実験において、前述の DIO は主なバックグラウンド源となる。図 1.3 に Czarnecki らが行った原子核の反跳の効果や、原子軌道に束縛されたミュオン粒子の相対論的な効果等を考慮して計算された DIO 電子の予想運動量スペクトルを示す [10]。DIO で放出される電子のエネルギーは原子核の反跳により 105 MeV 付近まで加速される場合があり、主なバックグラウンドとなる。しかし、図のように Si 原子, C 原子の $E_{\mu e}$ である 105 MeV 近傍で急激に減少しており、十分な運動量分解能を持った測定器を用いることによって、ミュオン・電子転換電子と DIO 電子の区別が可能であると考えられる。

他の主なバックグラウンドとして、即発電子が考えられる。即発電子バックグラウンドとは、一次陽子ビームが陽子標的に入射したとき生成される様々な即発二次粒子のうち、 $E_{\mu e}$ と同じエネルギーを持った電子の事である。陽子ビームが標的に入射したタイミングで発生するため、遅延して出てくるミュオン・電子転換の電子とを分ける事が出来る。ただし遅延タイミングに一次陽子が存在すると、遅れた一次陽子による即発電子をミュオン・電子転換の電子と間違える可能性が予想される。このようなパルス陽子ビームから遅れて陽子標的に入射する陽子を Delayed proton と呼ぶ。DeeMe 実験においてはこのような Delayed proton の少ない高純度なパルス陽子ビームを用いることが重要である。

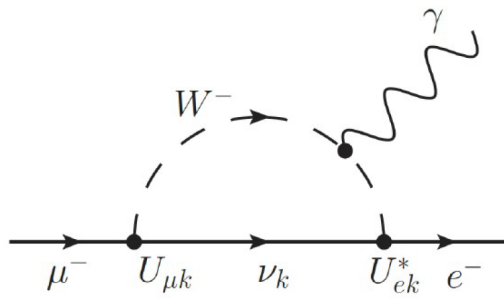


図 1.1: ニュートリノ振動を考慮したミュオン・電子転換過程のダイアグラム

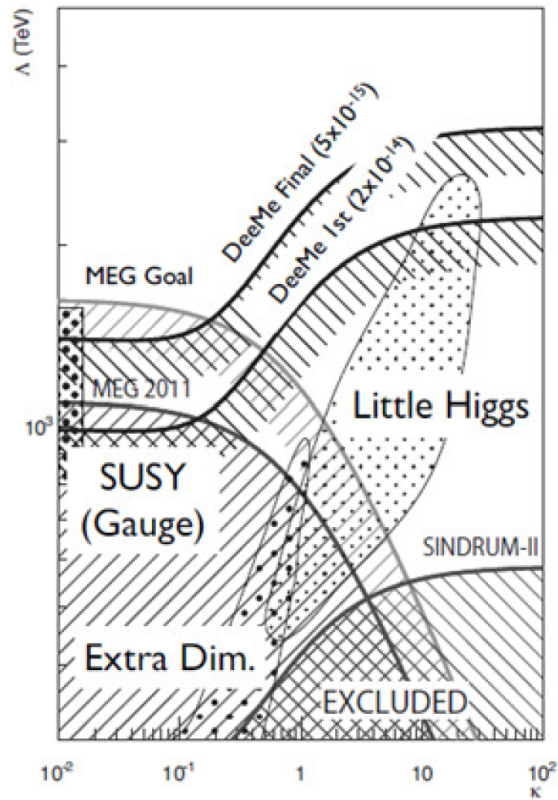


図 1.2: cLFV 過程のエネルギースケール Λ とモデルパラメータ κ に対する $\mu \rightarrow e\gamma$ 崩壊とミュオン・電子転換過程の感度依存性

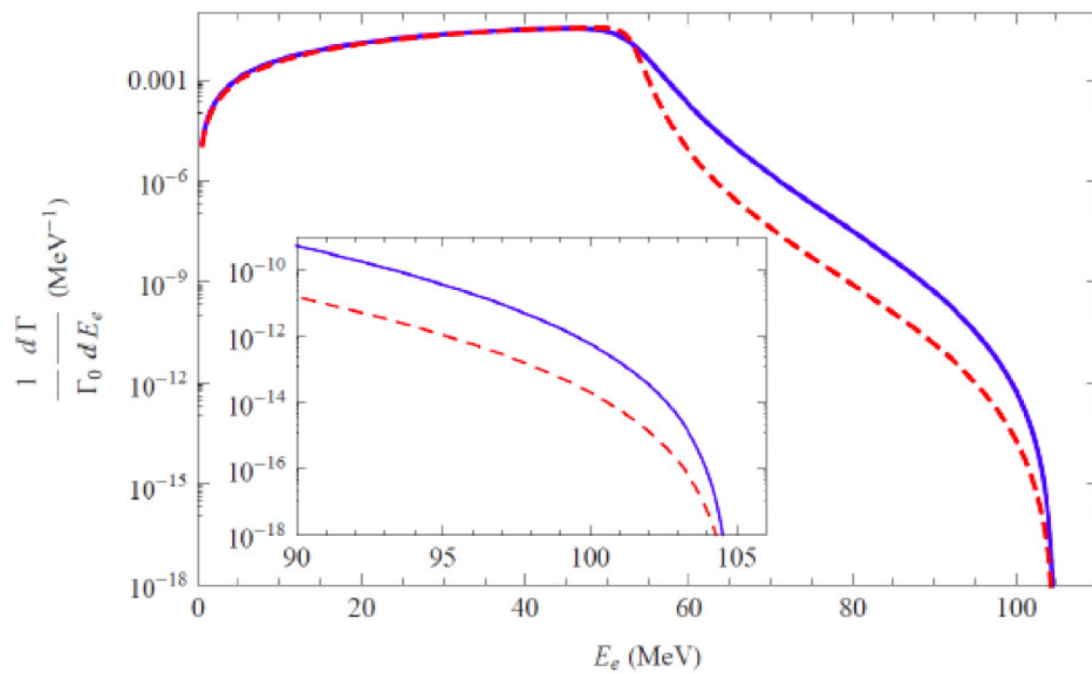


図 1.3: Czarnecki らによる DIO 電子のエネルギースペクトル. Si (青), C (赤).

2 実験計画

ミュオン・電子転換過程探索実験 (Direct electron emission from Muon – electron conversions, DeeMe) 実験は、茨城県東海村にある J-PARC の物質・生命科学実験施設 MLF でミュオン・電子転換過程の探索を目指す実験である。実験計画・方法と加速器施設の設備について述べていく。

2.1 Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC)

J-PARC は、日本原子力研究開発機構 (JAEA) と高エネルギー加速器研究機構 (KEK) が共同で運営している大型加速器施設である [12]。高強度の陽子ビームを標的に当てて生成させた様々な二次粒子 (中性子, ミュオン, K 中間子, ニュートリノなど) ビームを活用し, 素粒子物理, 原子核物理, 物質科学, 生命科学, 原子力工学などの多くの分野の基礎から応用まで広い範囲の研究が行われている。

J-PARC は, 3 台の加速器と 3 箇所の実験施設で構成されている。加速器の構成は, ビームエネルギー 400 MeV の線形加速器 Linac, ビームエネルギー 3 GeV の円形加速器 (Rapid-Cycling Synchrotron, RCS), ビームエネルギー 30 GeV の円形加速器 (Slow-Cycling Main Ring Synchrotron, MR) である。実験施設は, RCS からの 3 GeV 陽子を利用する物質生命科学実験施設 (Material and Life Science Experimental Facility, MLF), MR からの 30 GeV 陽子を利用するハドロン実験施設とニュートリノビームラインが存在する。図 2.1 に J-PARC 施設のレイアウトを示す。

2.1.1 Linac

Linac では, 負水素イオン源で負水素イオン H^- を発生させ, そのエネルギーを 600 MeV まで加速する。最大 50 Hz の繰り返しでパルス運転され, 400 MeV まで加速された時点で, RCS へのビームラインと, さらに加速する超伝導リニアックビームラインの 2 つにそれぞれ 25 Hz で振り分けられる。

2.1.2 RCS

Linac から取り出された 400 MeV の負水素イオン H^- を, 荷電変換用炭素皮膜を用いて電子を 2 つ剥ぎ取り, 陽子 H^+ ビームに変換して入射する。その後, 約 20 ms で RCS を 15,000 回程度周回させる。 H^+ ビームは周回毎に高周波加速空洞で加速され, 最終的に 3 GeV まで加速される。そして下流にあるビーム輸送系を通じて MLF と MR へ輸送される。RCS から MLF へは「速い取り出し」と呼ばれる方法で取り出される。原理的には取り出し後のリング内に陽子は残らず, Delayed proton によって生成される即発電子のバックグラウンドを抑えられると期待される。RCS は 3 GeV まで加速するのにわずか 20 ms しかかからないため, 1 秒間に 25 回もの新しいビームを加速することができ, 平均電流 333 μA , 電力 1 MW が可能となった。RCS の基本的なパラメータは表 2.1 に示す通りである。

2.1.3 MR

RCS から取り出されたビームの一部は, 続けて MR に入射される。このビームは, 1 周を約 2 秒かけて 32 万回ほど周回し, 3 GeV から 30 GeV へと加速される。

表 2.1: RCS パラメーター一覧

周長	348.3 m
入射エネルギー	400 MeV
出射エネルギー	3 GeV
繰り返し運転	25 Hz
バンチ数	2
ビーム強度	800 kW (2023 年 1 月現在)

2.1.4 MLF

MLF は図 2.1 のように MR の中央に位置する。MLF では、RCS からの 2 バンチパルス陽子ビームを標的に当て、ミューオンビームおよび中性子ビームを生成する。RCS からの陽子ビームのうち、92 % が MLF で利用される。これらビームは物質科学・生命科学などの研究に活用されている。図 2.2 は、MLF のビームラインを示している。

2.2 DeeMe 実験

DeeMe 実験の全体図を図 2.3 に示す [1]。RCS からのパルス陽子ビームを陽子標的に照射すると、標的の近傍に π 中間子が生成される。ここで、一般的なミューオン・電子転換過程を探索する実験では、 π 中間子を電磁石を用いて収集した後、 π 中間子は μ に崩壊し、ミューオン静止標的で静止する。このように、陽子標的とミューオン静止標的の 2 枚の標的を使う一方、DeeMe 実験では、陽子標的と、ミューオン静止標的を 1 枚の標的に置き換えることが可能であるという事実を得ている [13]。これにより、コンパクトで低コストな実験が可能になる。DeeMe 実験の独創性はここにある。

一次陽子標的中の大量のミューオニック原子から放出された電子は二次ビームラインを用いて電子スペクトロメータまで輸送される。二次ビームラインによって低エネルギーのバックグラウンドは取り除かれる。さらに電子は磁気スペクトロメータまで輸送され、運動量が測定される。

DeeMe グループは、最初は炭素製標的を用いて実験を始め、1 MW 陽子ビーム、 2×10^7 s のビームタイムで、 1×10^{-13} より小さい単一事象感度を目指す。その後、SiC 製標的に取り替え、 2×10^{-14} より小さい単一事象感度を目標とすることを検討している。図 2.4 にパルス陽子ビームの時間構造と DeeMe 実験における信号探索時間を示す。パルス陽子ビームは 2 バンチ構造となっており、ビーム間隔は 600 ns、繰り返し 40 ms で標的に入射する。前述のように、ミューオン・電子転換過程による電子は、ビーム入射後 1 μ s 程度遅延して出てくる。そのため、信号探索領域は二バンチ目が入射してから 300 ns 後の 2 μ s に設定している。

2.3 DeeMe 実験における物理解析とバックグラウンド

DeeMe 実験におけるバックグラウンドについてまとめる。

DIO 電子

DIO で放出される電子の運動量はシグナル領域まで到達する可能性があるが、105 MeV/c のシグナルに対して 1 MeV/c 以下の運動量分解能があればシグナルとの区別は可能である。

DP バックグラウンド

Delayed Proton (DP) とは、RCS 加速器からの正規の取り出しタイミングより遅れて取り出

されてしまう一次陽子によるバックグラウンドである。シグナル電子の遅延と同じタイミングで、DP から電子が発生するとバックグラウンドとなる。メイン陽子と信号探索時間領域 2 μs の間の DP 数の比を Rate of Delayed Proton (R_{DP}) と定義する。ビームロスモニターで DP を測定した結果、 $R_{\text{DP}} < 2.1 \times 10^{-19}$ となった。1 年間のビームタイムあたりの DP バックグラウンド数は $N_{\text{DP}} < 0.004$ となり十分に小さいという結果が得られた [11]。

宇宙線起源によるもの

信号探索時間は RCS からのパルス陽子ビームの繰り返しである 40 ms 中の数 μs であるため、宇宙線起源のバックグラウンドは約 5×10^{-5} に抑えられるとされている [1]。

物理感度を評価するため、Geant4 [14] を用いて 3 GeV のエネルギーをもつ陽子からミュオンニック原子を生成するシミュレーションを行っている。なお、このシミュレーションが与えるミュオンニック原子の収量は、2009 年に D-Line で行ったテスト実験の結果とよく一致している。シミュレーションの結果、SiC 回転標的中に生成されるミュオンニック Si 原子は $1.1 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ 、ミュオンニック C 原子は $0.5 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$ である。このミュオンニック Si 原子から、ミュオン・電子転換の電子を発生させ、G4beamline (Geant4 をベースに作られたビームラインシミュレーションツール [15]) で輸送し、電子の飛跡再構成を行うことで、運動量スペクトルを得た。この運動量スペクトルは、現実的なミュオンニック原子の生成率、H-Line 輸送効率、多重散乱や位置分解能の効果も考慮されたものである。そのような運動量スペクトルを図 2.5 に示す。ミュオン・電子転換によるシグナルは単色であると先に述べたが、標的内でのエネルギー損失の影響のため、低運動量側にテールを引いている。信号領域を 102.0 - 105.6 MeV/c の範囲に設定することにより、1 年間のビームタイム $2 \times 10^7 \text{ s}$ で、2015 年に行われた単一事象感度のモンテカルロシミュレーション評価では 2×10^{14} の実験感度を達成することができるという結果が得られた [11]。

2.4 陽子標的兼ミュオン静止標的

2023 年 1 月現在 MLF にて使用されているミュオン生成標的は、グラファイト製回転標的が用いられている (図 2.6)。これは直径 33 cm、厚さ 2 cm のドーナツ型円盤である。DeeMe 実験では、最初グラファイト製標的で物理測定を開始し、後に SiC 標的に置き換えて実験する。その理由として以下があげられる。

1. 図 2.7・2.8 に C 原子と SiC それぞれの、 μ^- と原子核の波動関数の重なりを示した。 μ^- との波動関数の重なりが Si 原子核のほうが C 原子核よりも多い。ミュオンニック原子中の μ^- が原子核と反応する (MC, またはミュオン・電子転換) 確率は、 μ^- と原子核の波動関数の重なりに依存するため、C 原子標的の場合、ミュオンニック原子中の μ^- の 8% しか原子核と反応しない。一方、Si 原子核の場合、67% が反応する。混合物に μ^- が静止した場合、MC の比率は原子番号に比例することが知られており (Fermi-Teller Z 則) [16]、 μ^- の 70% が Si 原子核 ($Z=14$) と、30% が炭素原子核 ($Z=6$) と反応する。つまり、SiC 標的中で原子核と反応するのは、 $70\% \times 67\% + 30\% \times 8\% = 49\%$ となり、グラファイト製標的に比べ、約 6 倍の改善が見込まれる。表 2.2 に、C 製標的、SiC 製標的を用いた場合の統計量を示している。

表 2.2: C 製標的, SiC 製標的を用いた場合の統計量

	C 製標的	SiC 製標的
300 ns カットによる生存率	1.5	1
低エネルギーのミュオンの収量	1	1.7
原子核との反応率	8%	49%

2. ミューオン原子中の μ^- の寿命は、C 原子標の中では $2 \mu\text{s}$ 、SiC 標の中では $0.76 \mu\text{s}$ である。DeeMe 実験の探索開始時間である二パルス目入射後の 300 ns 後の生存率を考えると、C 製標的のほうが SiC 製標的の場合よりも 1.5 倍統計量が多くなる。しかし、低エネルギーのミュオンの収量は C 製標的に対して SiC 製標的は 1.7 倍の統計量が得られる。
3. 陽子標的は陽子ビームによる熱流入や衝撃に耐える必要がある。SiC は核融合炉のブランケット材料としても有望視されている程の強靱な材料であり、高い融点、優れた耐熱衝撃性、高い放射線耐性をもつため、標的材料として C 原子よりも適している。

SiC 製回転標的については室蘭工業大学の環境・エネルギーシステム材料研究機構 (OASIS) によって開発が進められている [17].

他のミュオンの cLFV 過程探索実験では、Ti ($Z=22$) や、Au ($Z=79$) が使用されている。しかし DeeMe 実験でこれらを使用しない理由として、1 MW の陽子ビームに対する熱耐性がないことがあげられる。TiC 製標的も考えられるが、ミュオン原子によるミュオン原子内の μ^- の寿命は 300 ns 程度になってしまい、統計量が少なくなる。また、ミュオン原子から出るミュオン・電子転換電子のシグナルのエネルギーは、104.4 MeV 程度であり、シグナルが DIO 電子に埋もれてしまう。以上の理由もあり、DeeMe グループでは将来的には SiC 製標的を導入を提案している。

2.5 H-Line

陽子標的からは、 μ^- の崩壊に伴い放出される低エネルギーの電子 ($E_e \lesssim 52.5 \text{ MeV}/c$) やミュオン原子核捕獲に伴う高速中性子が大量に発生する。これらの粒子の瞬間的な計数率は 10^{14} Hz にも達する。これらのバックグラウンドから検出器を保護するために、ミュオン・電子転換過程で放出される電子の運動量 105 MeV/c 近傍の、90 MeV/c から 120 MeV/c の運動量をもつ荷電粒子を選び輸送することができるビームラインの建設が必要になる。また、高統計を達成し実験精度を向上するには、アクセプタンスを大きくしなければならない。2022 年 1 月に完成したこの二次ビームラインを High-momentum muon beamline (H-Line) と呼んでいる。図 2.9 に G4beamline によって描かれた H-Line を示す [18]。標的から磁気スペクトロメータまで、大口径キャプチャーソレノイド HS1, 双極磁石 HB1・HB2, 輸送ソレノイド HS2・HS3, 四重極磁石 HQ1・HQ2・HQ3 からビームラインは構成されている。図 2.10 に電子の運動量と H-Line の各電磁石・磁気スペクトロメータのアクセプタンスとの関係を示す [18]。磁気スペクトロメータのアクセプタンスはおおよそ $120 \text{ msr}/(\text{MeV}/c)$ となる。

H-Line は DeeMe 実験の他にも、ミュオンについての基礎物理学研究への活用が期待されている。前述のようにパルス陽子ビームが標的に照射されると π^+ が生成されるが、これが崩壊することで surface muon (μ^+ , 約 28 MeV/c) となる。105 MeV/c の電子を用いて実験を行う DeeMe に対し、以下の実験はこの約 28 MeV/c の surface muon で実験を行う。

g-2/EDM 実験

ミュオンの異常磁気能率 (g-2) と、電気双極子能率 (EDM) の精密測定を目指している (図 2.11, [19]).

MuSEUM 実験

ミュオニウム基底状態の超微細構造の精密測定を目指している (図 2.12, [20]).

2.6 H1 エリア

H-Line の建設に伴い、実験を行なう場所として H1 エリアが建設された (図 2.13). DeeMe はこの H1 エリア内で実験を行っており、今後は MuSEUM も利用を開始する予定である. また 2023 年 1 月現在 H2 エリアが建設中であり、これは g-2/EDM が利用予定である.

2.6.1 磁気スペクトロメータ

電子の運動量の精密測定を行うため、H-Line の下流に磁気スペクトロメータが置かれる (図 2.9). 磁気スペクトロメータは、PACMAN と呼ばれる双極電磁石と 4 台の飛跡検出器から成る (図 2.14). 4 台の飛跡検出器の内、2 台は電磁石の上流に、残りの 2 台は下流に置かれる. 空気による散乱を抑えるために、それぞれの隙間にはヘリウムで満たしたバッグを入れている.

磁気スペクトロメータの原理について考える. 図 2.15 に PACMAN と座標系を示す. 荷電粒子は写真の手前から奥に向かって進む. 簡単のため、磁場は y 軸方向の成分のみを一様に持つとし、荷電粒子は xz 平面を円運動するとする. 相対論的な荷電粒子が一様な磁場中を円運動するとき、荷電粒子の静止質量を m_0 、速さを v 、円運動の半径を r 、光速度を c 、電荷を q 、磁束密度を B とすると、ローレンツ力が向心力と成るので、

$$\frac{m_0 v^2}{r} \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} = qvB \quad (2.1)$$

変形して

$$r = \frac{1}{cqB} \frac{cm_0 v}{\sqrt{1 - (v/c)^2}} \quad (2.2)$$

光速度 c に 3×10^8 m/s, 電荷 q に 1.6×10^{-19} C, 磁束密度 B に 0.4 T, 運動量 $m_0 v / \{1 - (v/c)^2\}^{-1/2}$ に 105 MeV/c を代入すると、

$$r = \frac{1}{3 \times 10^8 \text{ m/s} \cdot 1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot 0.4 \text{ T}} \cdot c \cdot 105 \text{ MeV}/c \quad (2.3)$$

$$= \frac{1}{3 \times 10^8 \text{ m/s} \cdot 1.6 \times 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s} \cdot 0.4 \text{ N} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}} \cdot 105 \text{ MeV} \quad (2.4)$$

$$= \frac{1}{3 \times 10^8 \cdot 1.6 \times 10^{-19} \cdot 0.4 \text{ N}} \cdot 105 \cdot 10^6 \cdot 1.6 \times 10^{-19} \text{ N} \cdot \text{m} \quad (2.5)$$

$$\approx 0.88 \text{ m} \quad (2.6)$$

したがって、105 MeV/c の運動量をもつ電子は、0.4 T の一様な磁場中をおよそ 0.88 m の曲率半径で円運動することになる. この円運動により電子は 70 度ほど曲げられることになり、これに合わせて MWPC の設置場所を決める.

2.6.2 双極電磁石 (PACMAN)

磁気スペクトロメータの磁場をかけるために、双極電磁石 PACMAN (図 2.15) が用いられる. この電磁石は、カナダの国立研究所 TRIUMF で行われた正パイ中間子の陽電子と正ミューオンへの崩壊の分岐比を測定する実験 (PIENU 実験) に用いられていた. 電磁石 PACMAN は 2014 年 8 月に TRIUMF から J-PARC MLF まで運ばれた. PACMAN の使用を仕様を表 2.3 に示す.

表 2.3: PACMAN 電磁石の仕様

Current (Max)	500 A
Magnetic field (Max)	0.68 T
Length	2350 mm
Height	2500 mm
Width	700 mm
Math	29.5 t
Inductance	100 mH

磁気スペクトロメータにはセクター電磁石を使用することも検討されていた。しかし、図 2.15 で示すように、PACMAN の磁場形状は長方形になっているため、電磁石出口での運動量ディスページョンはセクター電磁石よりも大きい。ゆえに PACMAN を用いた磁気スペクトロメータの運動量分解能は、セクター電磁石を使用するデザインよりも優れているため PACMAN を用いる。

2.6.3 飛跡検出器 (MWPC)

DeeMe 実験で用いる飛跡検出器は、MWPC (Multi Wire Proportional Chamber) である (図 2.16)。図の黄色の四角部分が検出面であり、大きさは 240 mm の正方形である。DeeMe 独自の特徴として、アノードワイヤー間にポテンシャルワイヤーが張られている (図 2.17)。即発粒子が輸送されてくるタイミングでポテンシャルワイヤーに電圧をかけることによって、荷電粒子による信号のゲインを小さくでき、また、遅延粒子が輸送されてくるタイミングで電圧を 0 V にすることによって、ゲインを大きくすることができる。これにより、 μ -e 転換電子が含まれる遅延タイミングの検出効率低下を防ぐことができる。



図 2.1: J-PARC 施設のレイアウト

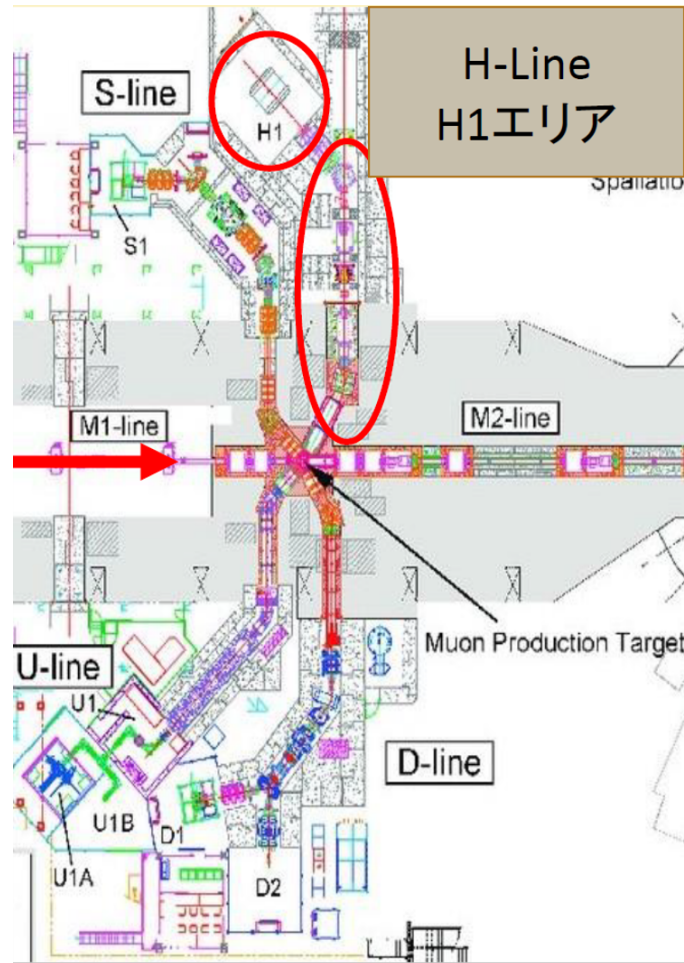


図 2.2: J-PARC MLF Beamline

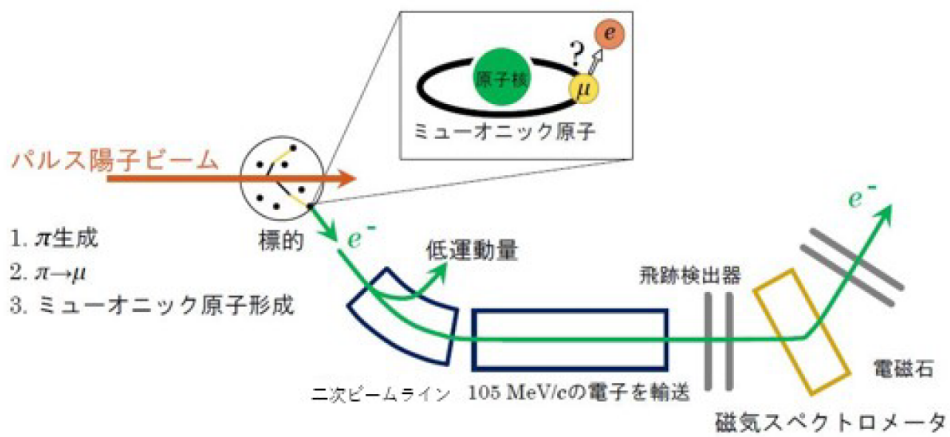


図 2.3: JDeeMe 実験の全体図

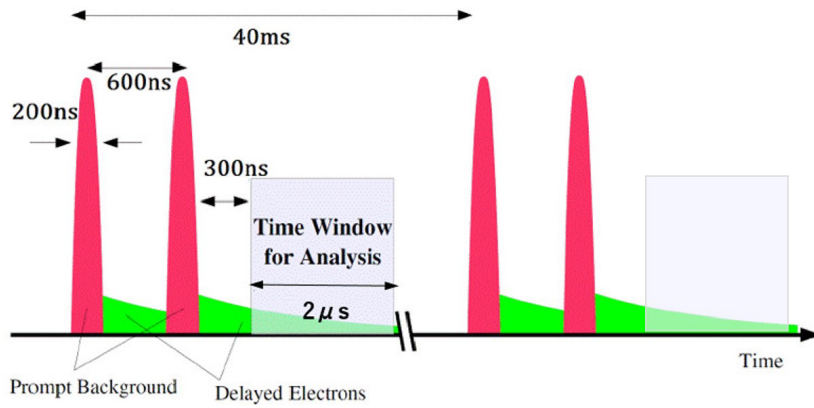


図 2.4: RCS からのパルス陽子ビームの構造と DeeMe 実験における信号探索時間

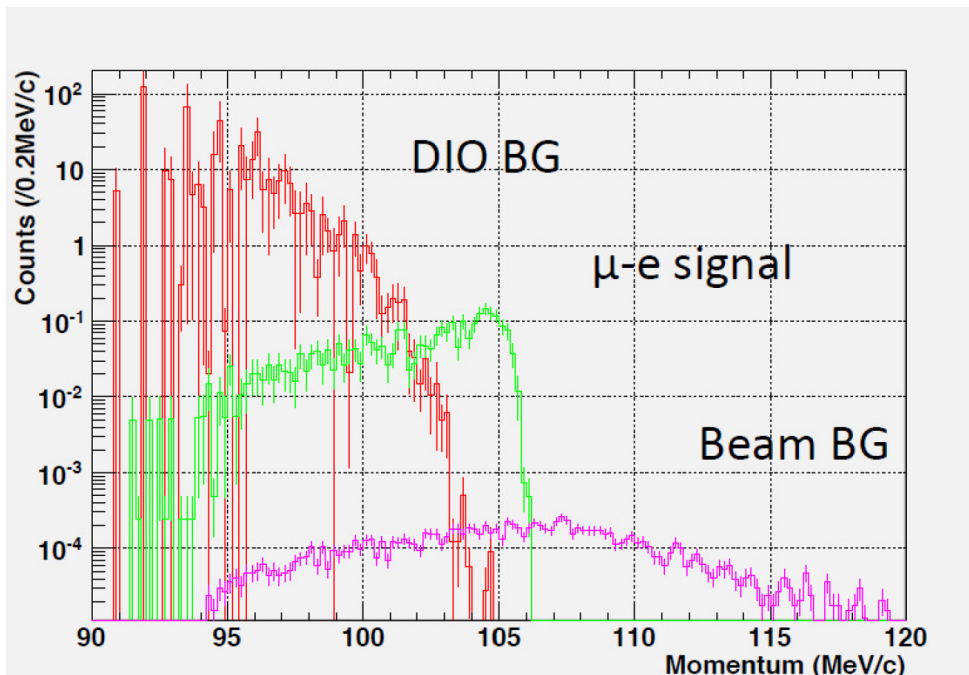


図 2.5: G4beamline シミュレーションで得られる予想運動量スペクトル. SiC 標的, RCS 1 MW で 2×10^7 s (1 年間) のビームタイムと, 3×10^{-14} のミュオン・電子転換分岐比, $R_{DP} = 10^{-19}$ を仮定した.

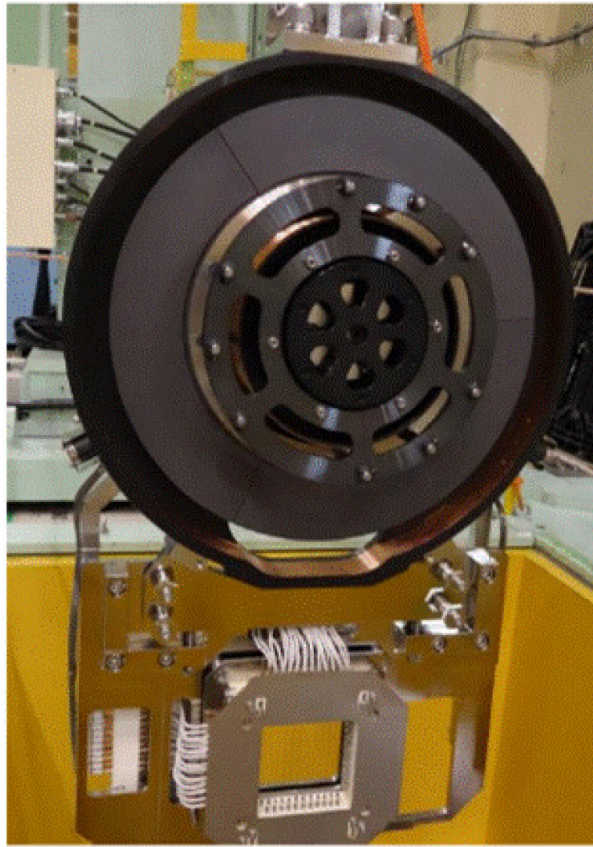


図 2.6: グラファイト製回転標的

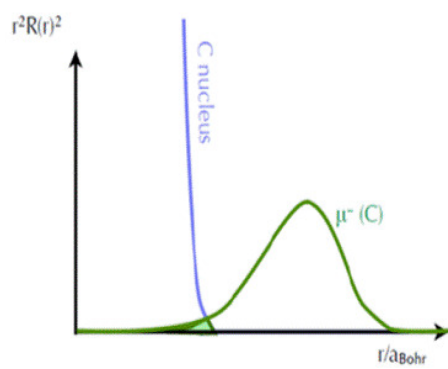


図 2.7: ミューオンック C 原子における原子核と μ^- の波動関数の重なり

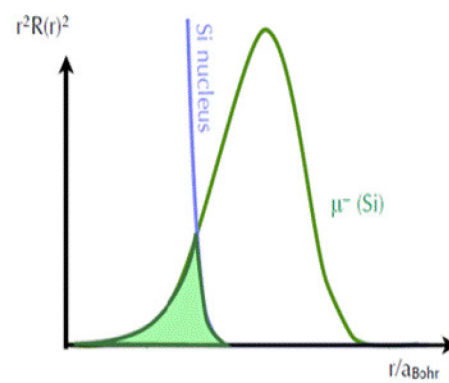


図 2.8: ミューオンック Si 原子における原子核と μ^- の波動関数の重なり

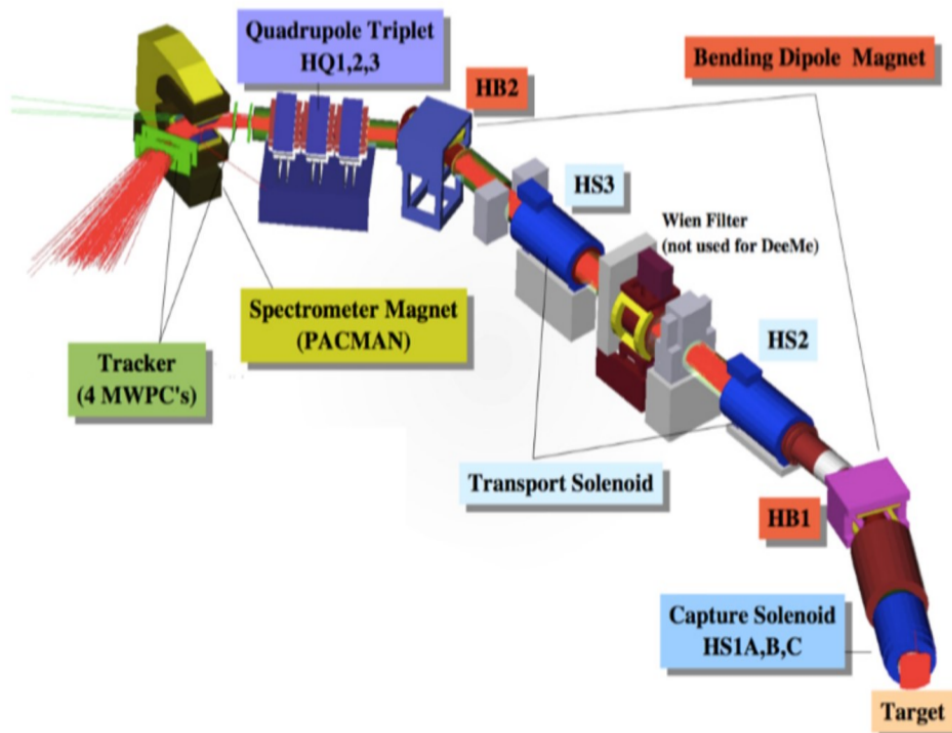


図 2.9: G4beamline で描かれた H-Line

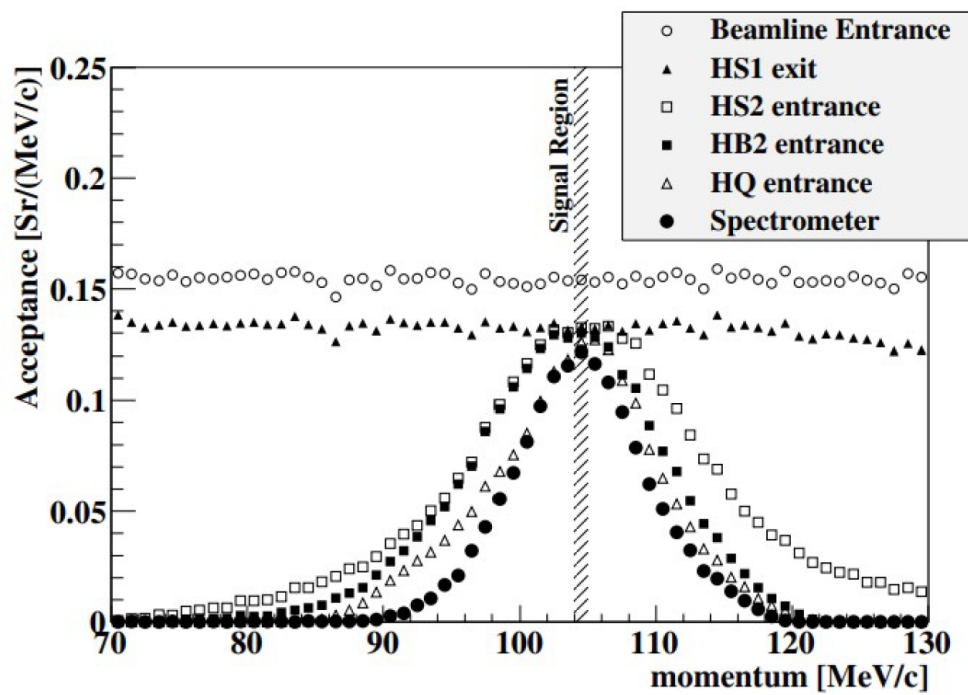


図 2.10: 電子の運動量と H-Line の各電磁石・磁気スペクトロメータのアクセプタンス

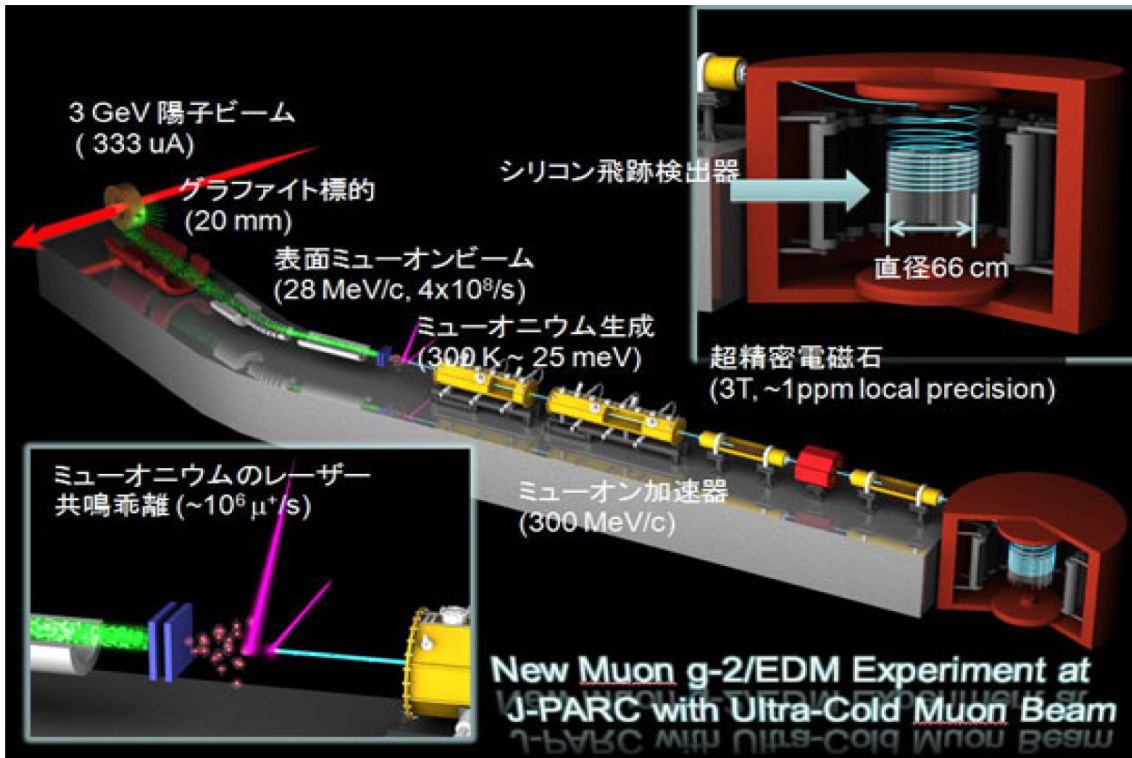


図 2.11: g-2/EDM 実験の概要

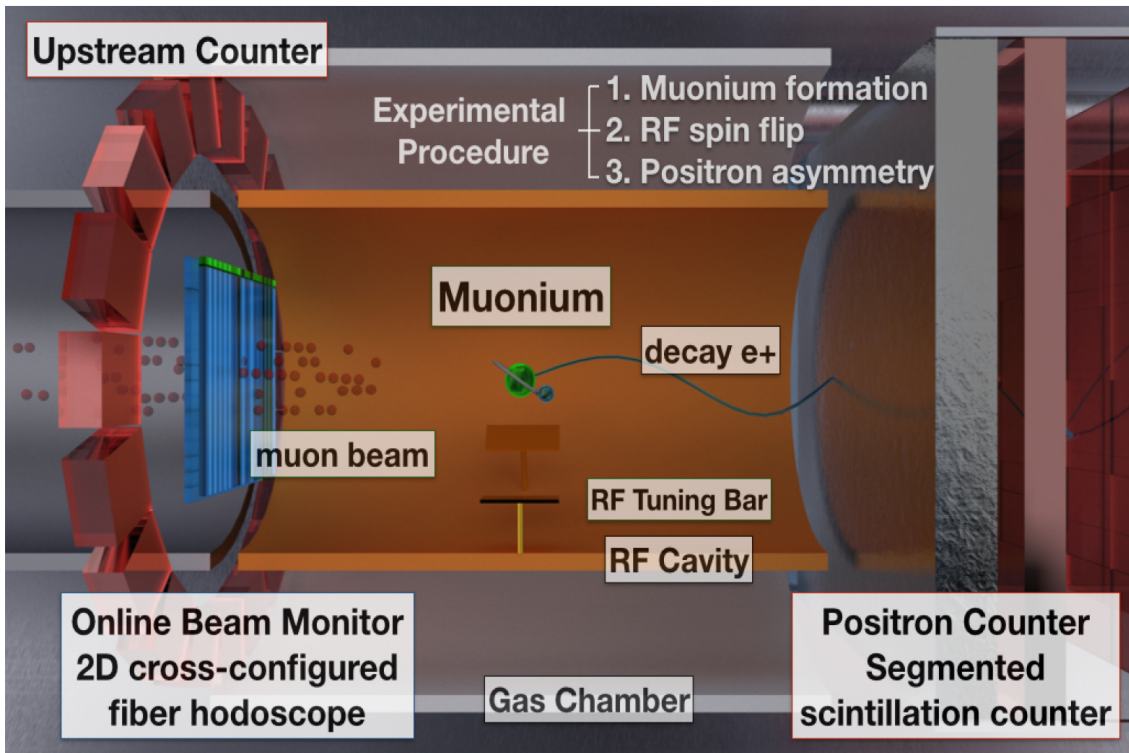


図 2.12: MuSEUM 実験の概要

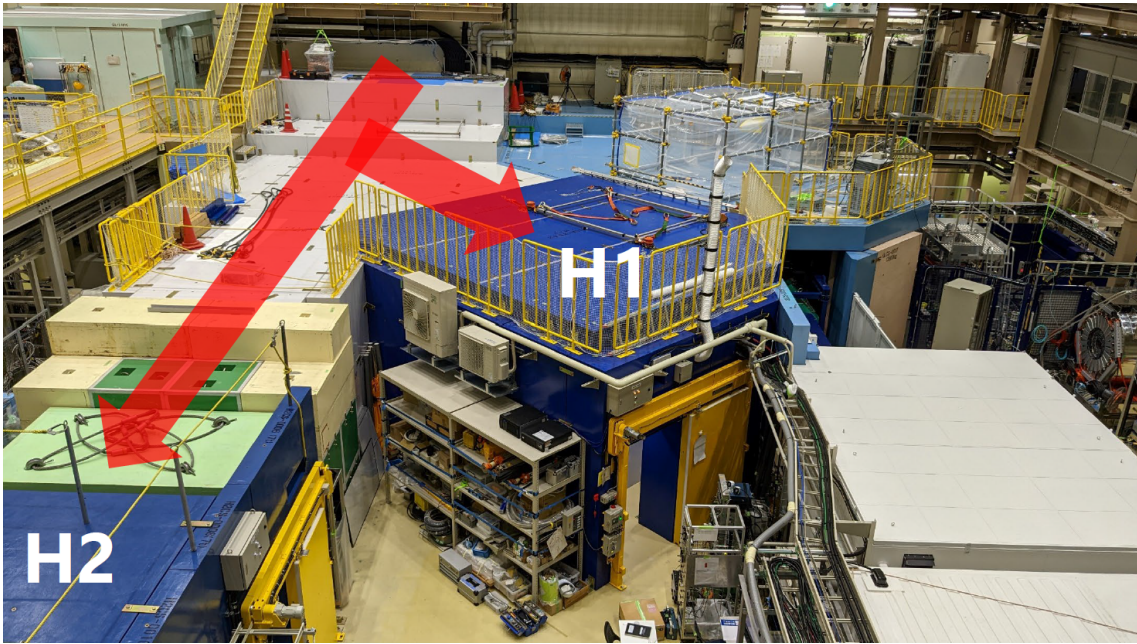


図 2.13: H1, H2 エリアの俯瞰

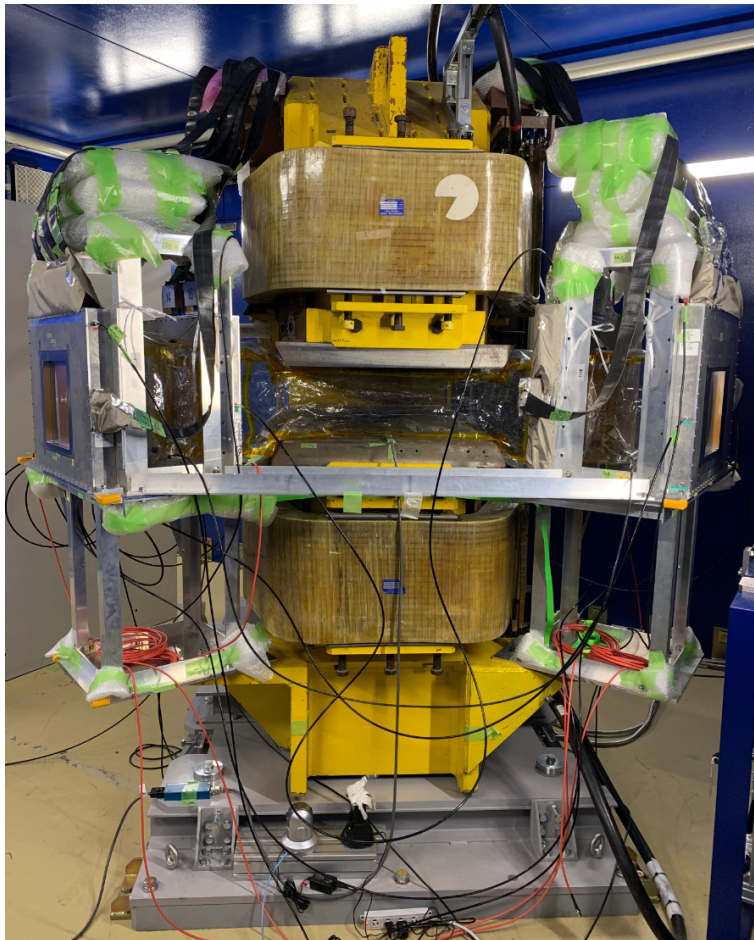


図 2.14: 磁気スペクトロメータ. 右側がビーム上流, 左側がビーム下流である.

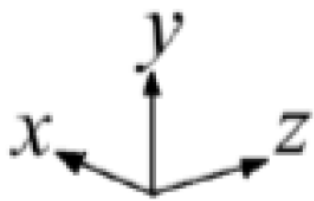


図 2.15: DeeMe 実験に用いられる双極電磁石 PACMAN

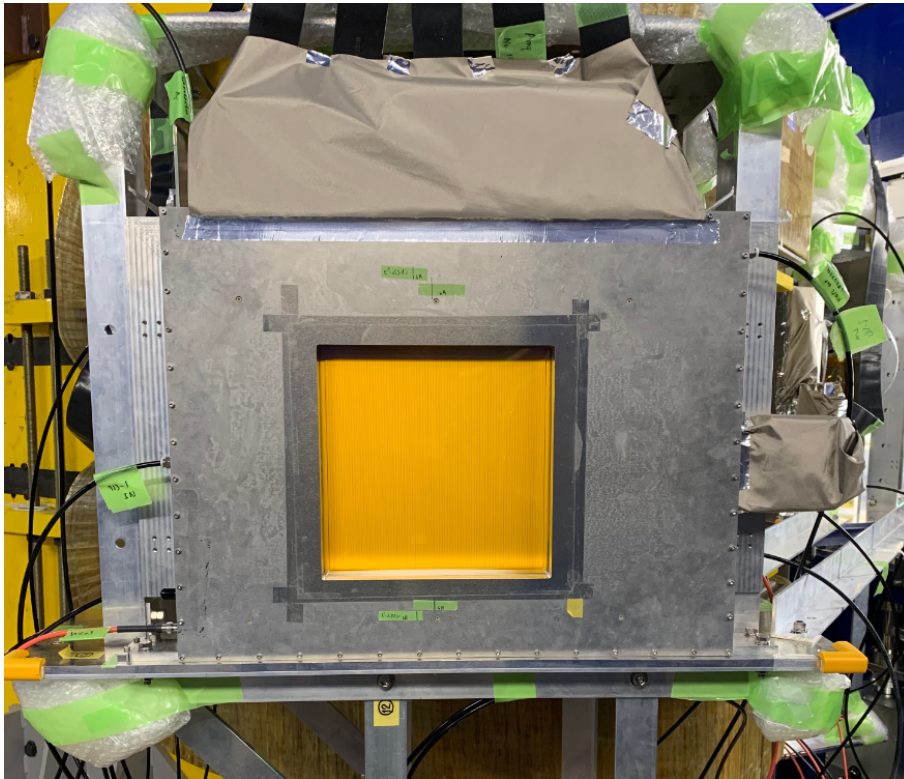


図 2.16: DeeMe 実験に用いられる飛跡検出器 MWPC

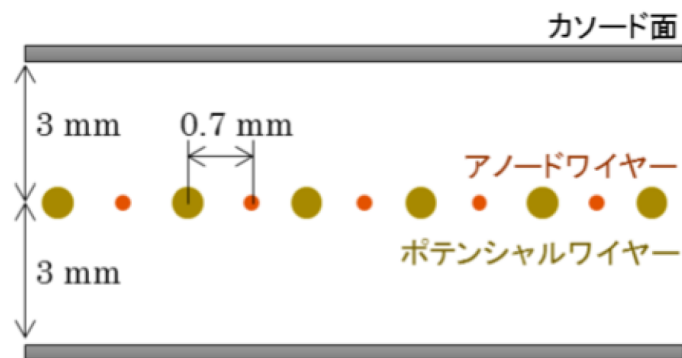


図 2.17: DeeMe の MWPC の断面図

3 パルスビームプロファイル測定装置

H-Line の建設に伴い、H1 エリアに到達する荷電粒子ビームの形状（プロファイル）を測定するための装置、パルスビームプロファイル測定装置（以下、プロファイル測定装置）の開発に着手し、2022 年 3 月に完成した。ここでは、このプロファイル測定装置の概要について説明する。

3.1 開発動機

H-Line は各電磁石に流す電流値を変えることで様々な運動量の荷電粒子を輸送することができる。また、この電流値設定を調整することで、H1 エリアに到達する荷電粒子ビームのプロファイルを適当なものに変えることができる。このように、希望するプロファイルに変えるために電流値設定を調整することをビームチューニングといい、DeeMe においては、MWPC の検出面の大きさ（260 mm × 260 mm）に合うようにビームチューニングを行なう必要がある。この際、プロファイルを随時測定する必要があるため、プロファイル測定装置の開発に至った。

プロファイルの測定方法としてストリップカウンター方式というものがあるが、これは H-Line のようなパルスビーム（約 10^8 個の荷電粒子が同時にやってくるビーム）には適さない方式である（図 3.1）。パルスビームに適した測定方法としてはソロカウンター方式がある（図 3.2）。この方式では用いるカウンターは 1 つだけであり、そのカウンターをあらゆる位置に動かし、その各位置での信号の強さを取得することによってプロファイルを測定する。今回開発したプロファイル測定装置はこのソロカウンター方式を用いる。

3.2 構成要素

プロファイル測定装置は以下の 3 つで構成されている。

- チェレンコフ検出器 … カウンターの役割
- 2 軸ロボット … カウンターを動かす役割
- DAQ システム … カウンターからの信号を処理する役割

次にこれらの構成要素について説明する。

3.3 チェレンコフ検出器

3.3.1 本体・ライトガイド

プロファイル測定装置のカウンターとしてチェレンコフ検出器を開発した（図 3.3）。このチェレンコフ検出器は上板が外れるようになっており、中の様子は図 3.4 のようになっている。光沢があるのはアルミニウムの平板を貼っているためであり、これにより、この長い本体はライトガイドの役割を果たすのである。アルミニウムの平板には東洋アルミニウム株式会社の LUXAL を用いており、接着材にはニチバン株式会社の両面テープを用いている。

3.3.2 アクリル

チェレンコフ光を発生させる物質として、この検出器では四角錐のアクリルを使用している (図 3.5)。大きさは底面が 20 mm の正方形で高さが 10 mm である。設置する場所は図 3.4 の右側である。

形状を四角錐にしているのは、物質の違いによってチェレンコフ光の放射角が異なることを利用して、ミュオン由来のチェレンコフ光をライトガイド内に入れないようにするためである。そのため、アクリルを設置する場所に窓を用意して、ミュオン由来の光を外に出すようになっている (図 3.6)。これにより、主に電子由来のチェレンコフ光がライトガイド内を反射することになる [21]。

3.3.3 ブラックボックス

ミュオン由来のチェレンコフ光がライトガイド内に入らないようにするために、光を吸収するための箱 (ブラックボックス) を作成した (図 3.7)。段ボールで箱を作り、中を株式会社カンベハピオの黒色水性シリコンカラスプレーで塗装している。形状を箱にしているのは、反射される回数を増やすためである。このブラックボックスをアクリル設置部分の裏側に設置する (図 3.8)。

3.3.4 PMT

チェレンコフ光を電気信号に変える装置として、浜松ホトニクス株式会社の H3165-10 の PMT を用いる (図 3.9)。この PMT をアクリル設置部分とは反対の位置 (図 3.3 の左側) に設置する。設置した様子を図 3.11 に示す。

3.4 2 軸ロボット

チェレンコフ検出器を動かすために 2 軸ロボットというものを使用する (図 3.12)。用いる 2 軸ロボットはヤマハ発動機の製品であり、型番は SP-SXYX-C-F1-55-ZF-55-5L である。可動範囲は鉛直・水平方向ともに 550 mm であり、移動速度は 0.1 ~ 1000 mm/s である。H1 エリアのビームダクトは外径が 510 mm なので、この可動範囲で十分である (図 3.13)。この 2 軸ロボットはプログラミングによる制御が可能であり、そのコードを C++ で作成した。これにより、指定した範囲にチェレンコフ検出器を自動的に動かせるようになった。

チェレンコフ検出器は約 30 度傾けて取り付けられている。これは 2 軸ロボットにビームが当たって散乱するといったバックグラウンドを生じさせないようにするためである。チェレンコフ検出器内のアクリルはこの角度を考慮して取り付けられている (図 3.14)。

3.5 Redpitaya

このプロファイル測定装置の DAQ システムとして、Redpitaya 社の STEM-lab 125-14 という製品を使用する (図 3.15)。125 という数字は Redpitaya のサンプルレート、125 MS/s を表しており、14 はビット数を表している。また、OS は Linux である。スマートフォンほどの大きさでありながら、DAQ としての機能以外にもオシロスコープやロジックアナライザーとしての機能を兼ね備えている。この Redpitaya には入力・出力チャンネルがそれぞれ 2 つあり (図 3.16)、ch1 にチェレンコフ検出器の PMT からの信号を、ch2 に RCS 出射トリガーを入力する。また、PC とはイーサネットケーブルで通信する。Redpitaya も 2 軸ロボット同様にプログラミングによる制御が可能のため、C++ でコードを作成した。また、このコードを 2 軸ロボットのコードと統合することで、プロファイル測定装置のシステムも作成した。

3.6 測定の流れ

3.6.1 システムの流れ

プロフィール測定装置のダイアグラムを図 3.17 に示す。まず、PC からロボットに任意の位置に動くよう命令を出す。ロボットはその命令を受け取り、移動を開始する。ロボットが移動している間、Redpitaya は信号を受け取らないようにする。任意の点に到達すると、Redpitaya はチェレンコフ検出器・PMT からの信号を受け取り、RCS 出射トリガーのタイミングでデータ取得を開始し、それを PC に送る。PC はデータを受け取ると、再びロボットに移動命令を出す、といった流れで測定を行なっていく。

3.6.2 ロボットの移動方法

ロボットの移動方法を図 3.18 に示す。ロボットの座標はビーム下流側から見て右上に原点を持ち、その原点から図 3.18 のように蛇行するように移動させる。各点の移動距離はアクリルの底面の大きさと同じ 20 mm である。各点では 10 個データを取得し、取得が完了すれば次の点へ移動する。取得するデータについては次章で詳しく説明する。

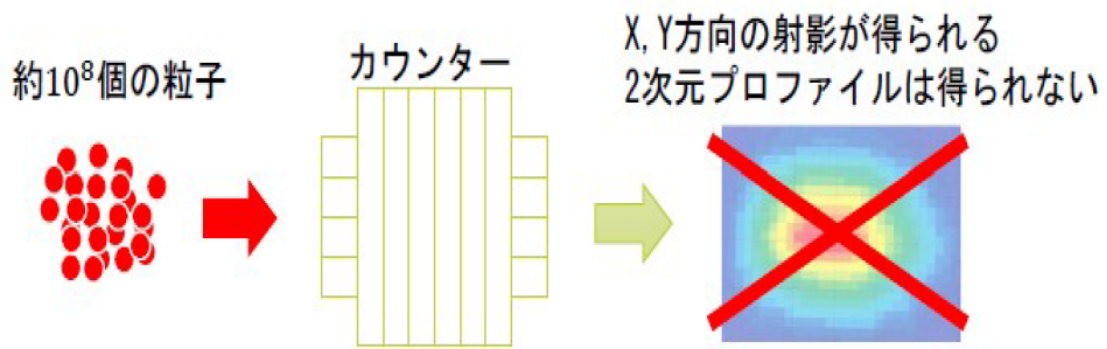


図 3.1: パルスビームに対してストリップカウンター方式を用いた場合



図 3.2: パルスビームに対してソロカウンター方式を用いた場合

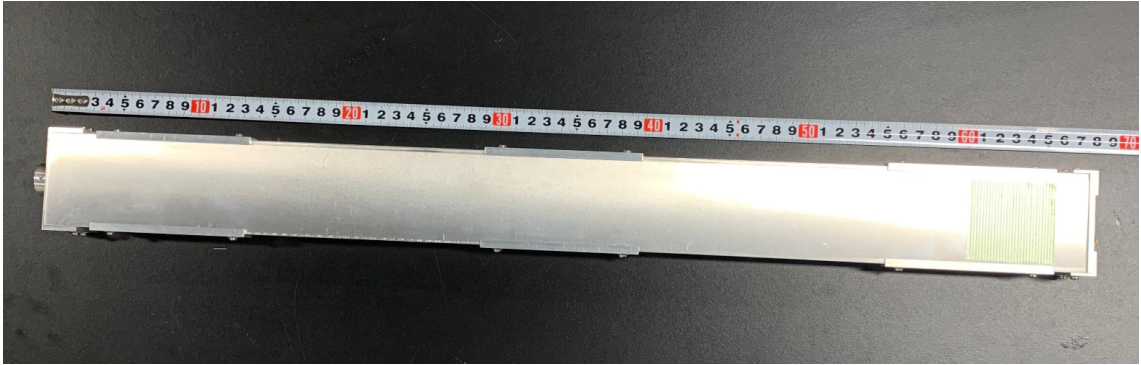


図 3.3: チェレンコフ検出器の全体像

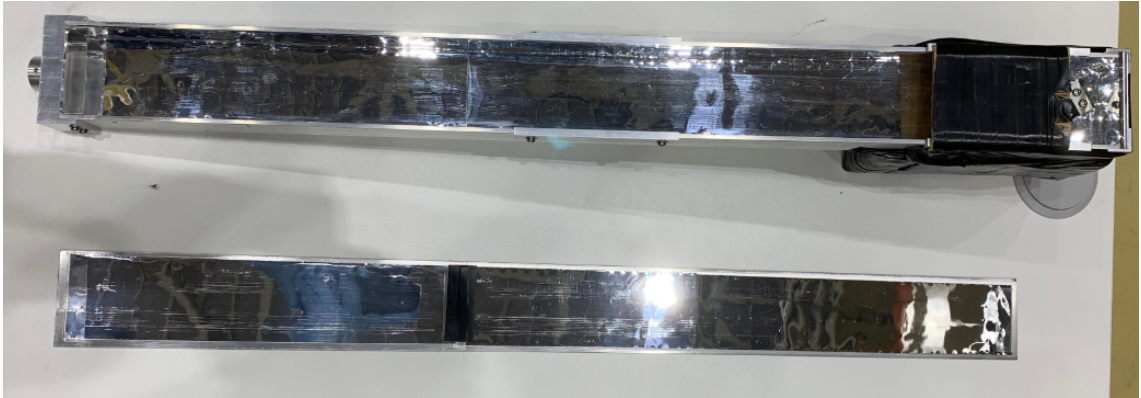


図 3.4: チェレンコフ検出器の中身



図 3.5: 四角錐の亚克力



図 3.6: アクリル設置の様子. 底に窓を設けている.



図 3.7: ブラックボックス



図 3.8: ブラックボックス設置の様子



図 3.9: PMT



図 3.10: PMT の型番

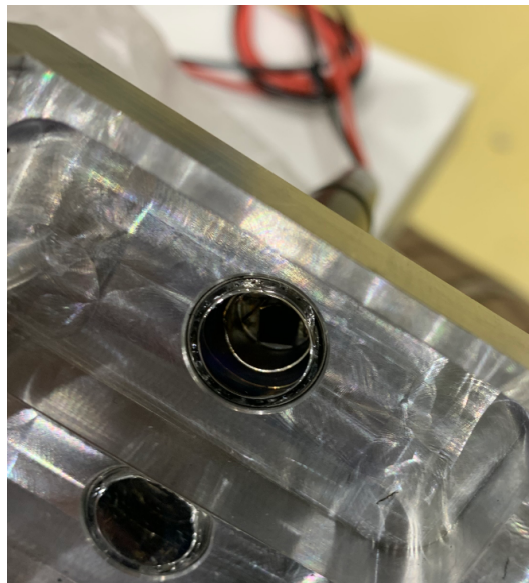


図 3.11: PMT 設置の様子

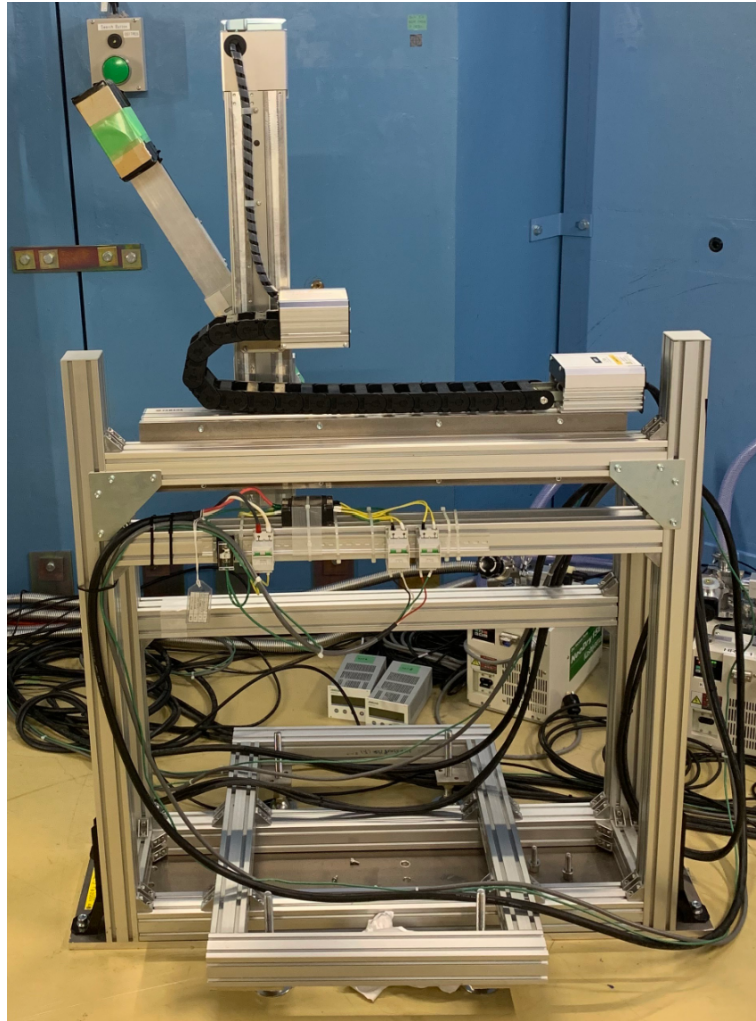


図 3.12: 2 軸ロボット. 斜めに取り付けられているのはチェレンコフ検出器.

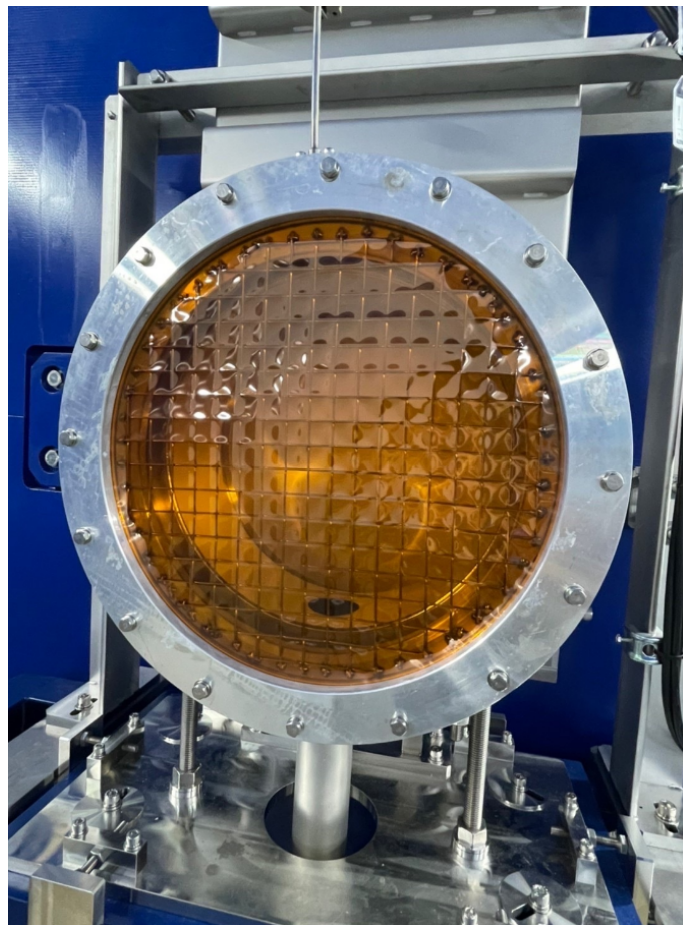


図 3.13: H1 エリアのビームダクト

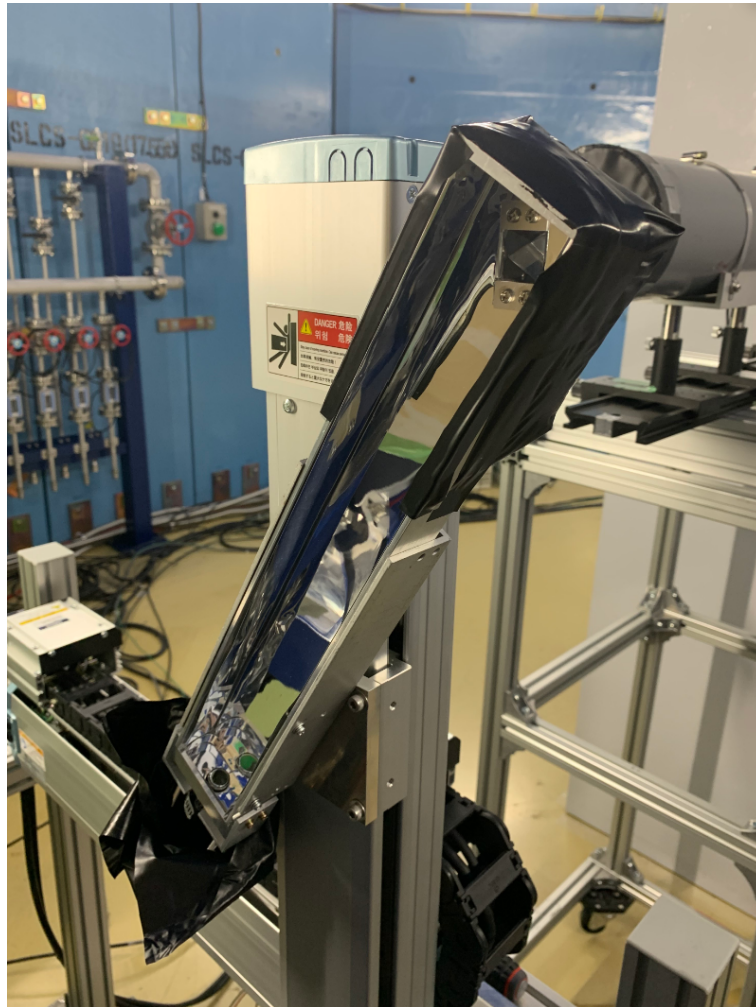


図 3.14: 2 軸ロボットに取り付けられたチェレンコフ検出器内のアクリルの向き



図 3.15: Redpitaya. 黒線が電源ケーブル, 赤線がイーサネットケーブル.



図 3.16: Redpitaya の入力・出力チャンネル

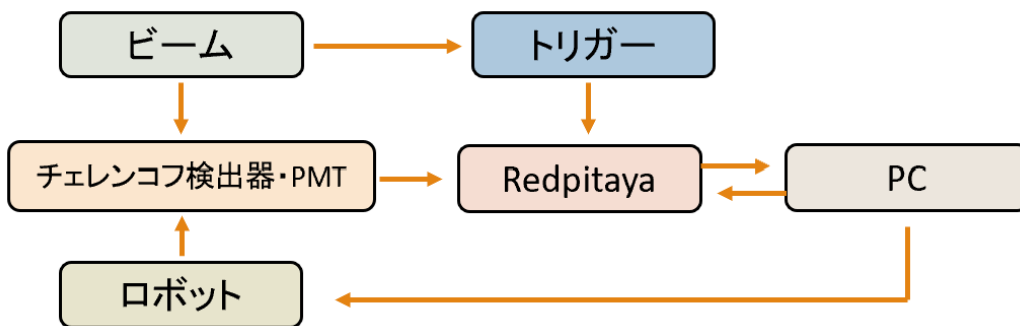


図 3.17: プロファイル測定装置のダイアグラム

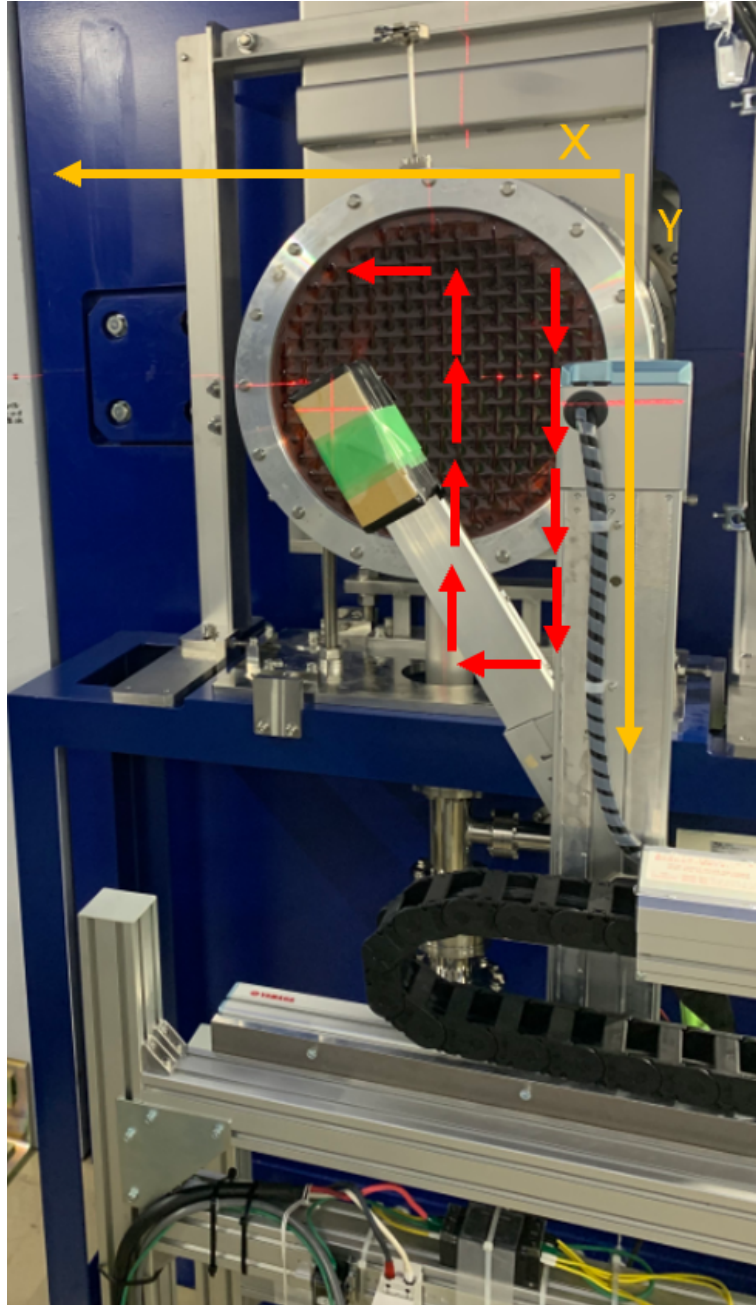


図 3.18: ロボットの移動方法

4 測定データの解析方法

ここでは Redpitaya から PC に送られてくる測定データの解析方法について説明する。

4.1 測定データの中身

ロボットが移動した各点で Redpitaya が取得するデータは図 4.1 のようなものである。最初に取得する 2 つの数字はロボットの座標を表しており、図 4.1 の場合だと $(x, y) = (80, 120)$ という意味になる。括弧で囲まれた数値は PMT からの電気信号であり、単位は Volt である。これを 125 MS/s、すなわち 8 ns 毎に 12 μ s 間取得している。

4.2 波形の作成

Redpitaya からの測定データから波形を作成する (図 4.2)。横軸：時間、縦軸：電圧である。図の上部に記載されている座標は、このデータを取得したときのロボットの位置を表している。マイナスが付いているのは、プロファイル画像を作成したときに、ロボットの座標原点と同様にビーム下流側から見て右上に原点が来るようにするためである。また、記載されている event は、その測定データの中で何個目のデータなのかを示したものである。図 4.2 の場合だと、1 回のデータ測定で取得したデータのうち、1205 番目のデータの波形ということになる。

図 4.2 の 0 ~ 1 μ s の間に見える 2 つの谷を拡大表示したのが図 4.3 である。この 2 つの谷は H-Line のビームの特徴であるダブルパルスを観測したものである。このダブルパルスの信号の大きさ、すなわち積分値を求め、この積分値でプロファイル画像を作成する。ただし、ここでいう積分値とは「電圧値の和」であり、単位が $V \cdot s$ ではなく V だということに注意が必要である。

4.3 積分時間の決定

積分値を求めるにあたり、積分する時間範囲を先ほどの波形から決める。ダブルパルスが H1 エリアに到達するタイミングと RCS 出射トリガーの関係は基本的には不変なため、波形を読み取って積分範囲を一度決定すれば、どのデータに対しても同じ時間範囲を用いることができる。ただし、図 4.3 のような波形では、ノイズが大きく時間範囲を決定するのは難しい。

そこで、1 回のデータ測定で取得したデータ全てを足し合わせて、ダブルパルスが顕著に見えるような波形を作成した (図 4.4)。横軸、縦軸は図 4.2 などと同じである。図の上部に記載されているのはデータのファイル名であり、図 4.4 の場合は H-Line の電流値を負電荷の 70 MeV/c の設定にしたデータだということが分かる。また、Straight というのはロボットの設置場所に関することで、PACMAN でビームを曲げずに直進させた先にロボットを設置した場合のことをいう (図 4.5)。PACMAN でビームを曲げた先にロボットを設置した場合は Bended と名付けている (図 4.6)。さらに、nEntry = 2520 と記載されているが、これは 1 回のデータ測定で取得したデータの個数を示している。このデータの場合、ロボットは水平方向に 18 点、鉛直方向に 14 点移動しており、各点で 10 個のデータを取得しているので、データの個数は $18 \times 14 \times 10 = 2520$ 個となる。

この足し合わせ波形により、ダブルパルスの波形が顕著に見えるようになった。ダブルパルス部分を拡大表示した波形を図 4.7 に示す。ダブルパルスの 1 つ目に関して、ピークが 2 つあるように見えるが、1 つ目のピークは即発電子によるもので、2 つ目のピークは即発電子に DIO などの遅延電子が重なったことによるものである。テイルを少し引いているのも遅延電子によるものである。この足し合わせ波形の 1 つ目のダブルパルスの開始部分をさらに拡大表示した波形を図 4.8 に示す。この図から、1 つ目のダブルパルスの積分の時間範囲の開始点を 0.120 μ s と決定した。0.112 μ s でも

良いように思えるが、よりきちんと下がった点を今回は採用した。また、ダブルパルスの1つ目の終了部分を拡大表示した波形を図 4.9 に示す。これより、1つ目のダブルパルスの積分の時間範囲の終了点を $0.264 \mu\text{s}$ とした。

以上のようにして、1つ目のダブルパルスに関して積分の時間範囲を決定した。これを2つ目のダブルパルスに関しても同様に行ない、両方の積分の時間範囲を決定する。各データに対して、決定した積分範囲でダブルパルス2つの積分値を求め、その平均値を取る。この平均値をロボットの座標毎にまとめてプロファイル画像にしていくのである。

4.4 プロファイル画像の作成

作成したプロファイル画像を図 4.10, 4.11 に示す。図 4.10 は Straight の位置にロボットを設置した場合のプロファイル画像であり、図 4.11 は Bended の位置にロボットを設置した場合のプロファイル画像である。これらの図にはプロファイル画像の他に、プロジェクションや飛来電子数を記載している。次節からはこれらについて説明する。

4.4.1 プロファイル画像

図 4.10 のプロファイル画像部分を拡大したものを図 4.12 に示す。この図では、 x 軸、 y 軸がそれぞれロボットの座標を表しており、表示範囲はロボットの可動範囲に合わせている。このデータの場合、ロボットは $(x, y) = (-80 \sim -420, -180 \sim -440)$ の範囲を蛇行移動してデータを取得した。マイナスが付いているのは、ロボットの座標原点がビーム下流側から見て右上にあるということを実現するためである。ゆえに、この図はビーム下流側から見たときのプロファイル画像である。また z 軸には前述した積分値を用いており、この積分値が大きいほど、その点での飛来粒子数が多いということになる。

図 4.12 に赤線で描かれているのは1台目の MWPC の検出面である。検出面の座標範囲は $(x, y) = (-150 \sim -410, -200 \sim -460)$ である。この図の場合、ロボットは Straight の位置に設置しているため、この1台目の MWPC の検出面がプロファイルの基準となる。

次に、図 4.11 のプロファイル画像部分を拡大したものを図 4.13 に示す。この図の場合、ロボットは Bended の位置に設置しているため、プロファイルの基準は4台目の MWPC の検出面になる。検出面の座標範囲は $(x, y) = (-110 \sim -370, -190 \sim -450)$ である。これらの基準に対してプロファイルを変化させていくビームチューニングについては次々章で説明する。

4.4.2 プロジェクション

図 4.10 において、右上に位置しているのは、 z 軸の値を x 軸方向に射影したプロジェクションであり、左下に位置しているものは、 z 軸を y 方向に射影したものである。このプロジェクションの Mean やピーク位置を見ることで、プロファイルを目視だけでなく定量的に評価することができる。

4.4.3 特記事項

図 4.10 において、右下部分には英文が4つ記載されている。日本語に訳すとそれぞれ以下のようになる。

- プロファイルはビーム下流側から見たもの
- ビームダクトの中心座標

- 飛来電子数と積分の時間範囲と座標範囲
- 各点での取得データの個数

英語では Intensity と表記しているが、これはパルスあたり何個の電子が飛来してきたのかを表すものである。この飛来電子数について、どのように計算して導出しているのかは次章で説明する。

4.4.4 シミュレーションとの比較：プロファイル画像

G4beamline を用いることによって、プロファイル画像をシミュレーションで作成することができる。正電荷・50 MeV/c・Straight の設定でシミュレーションしたときのプロファイル画像を図 4.14 に示す。このプロファイル画像も実測のものと同様、ビーム下流側から見たときのプロファイルである。x 軸、y 軸両方ともビームラインが基準となっており、 $x = 0$ の地点が図 4.12 の $x = -260$ と一致し、 $y = 0$ の地点が $y = -320$ と一致する。z 軸はその地点で観測した陽電子の数を表しており、このシミュレーションの場合は合計で約 9 万個の陽電子を観測している。

このシミュレーションのプロファイル画像と比較するために、正電荷・50 MeV/c・Straight の設定で測定したプロファイル画像を図 4.15 に示す。これらと比較すると、シミュレーションは右下に下がっているのに対し、実測は真横に広がっていることが分かる。x 軸方向に関しては、シミュレーションはビームラインから左に約 0.9 mm の位置に Mean X があるのに対し、実測はビームライン ($x = -260$) から右に 18.1 mm の位置に Mean X がある。つまり、およそ 19 mm のズレがある。y 軸方向に関しても、シミュレーションはビームラインから下に 24.6 mm の位置に Mean Y があるのに対し、実測はビームライン ($y = -320$) か上に 4.6 mm の位置に Mean Y がある。つまり、29.6 mm のズレがある。このようなズレがなぜ生じるのかは今後考えていく必要がある。

```

80.000000 120.000000 f=-0.040223,-0.0114923,-0.0373499,-0.0574614,-0.0373499,-0.0545884,-0.0459691,-0.0287307,-0.0517153,
-0.0258576,-0.0632076,-0.0488422,-0.0632076,-0.0632076,-0.0517153,-0.0459691,-0.0316038,-0.0344769,-0.040223,-0.0373499,
-0.0373499,-0.0287307,-0.0488422,-0.0344769,-0.0373499,-0.0517153,-0.0229846,-0.0316038,-0.0344769,-0.0316038,-0.0344769,
-0.0488422,-0.0373499,-0.0574614,-0.0603345,-0.0545884,-0.0574614,-0.0517153,-0.0488422,-0.0574614,-0.0373499,-0.0517153,
-0.0488422,-0.0517153,-0.0517153,-0.0344769,-0.0459691,-0.0344769,-0.0517153,-0.0373499,-0.0316038,-0.0344769,-0.0430961,
-0.040223,-0.0287307,-0.0229846,-0.0287307,-0.0287307,-0.0574614,-0.0373499,-0.0229846,-0.0574614,-0.0373499,-0.0287307,
-0.0430961,-0.0488422,-0.0430961,-0.0344769,-0.040223,-0.0459691,-0.0344769,-0.0603345,-0.040223,-0.0287307,-0.0632076,

```

図 4.1: Redpitaya が取得するデータ

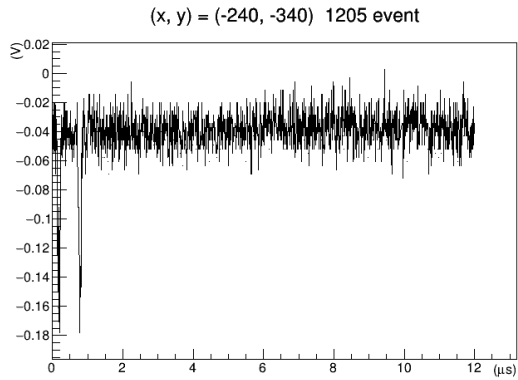


図 4.2: 測定データの波形

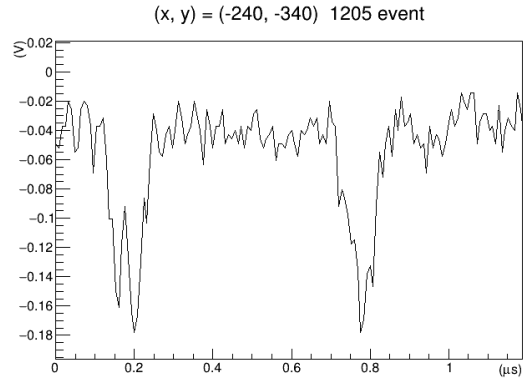


図 4.3: 図 4.2 を拡大表示した波形

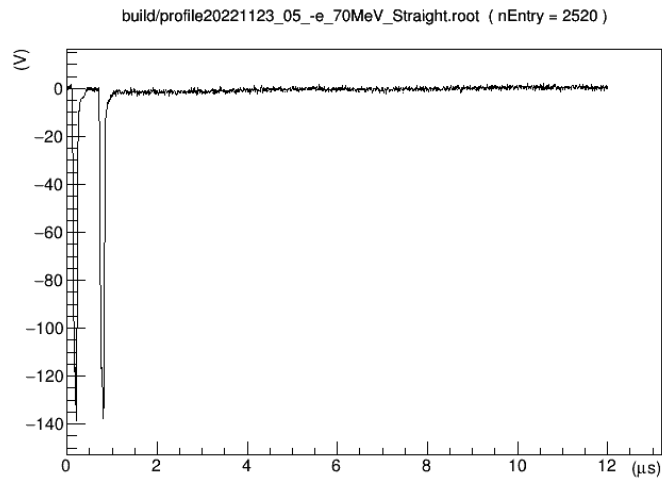


図 4.4: 測定データの足し合わせ波形

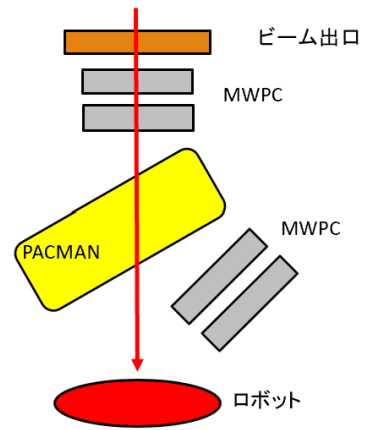
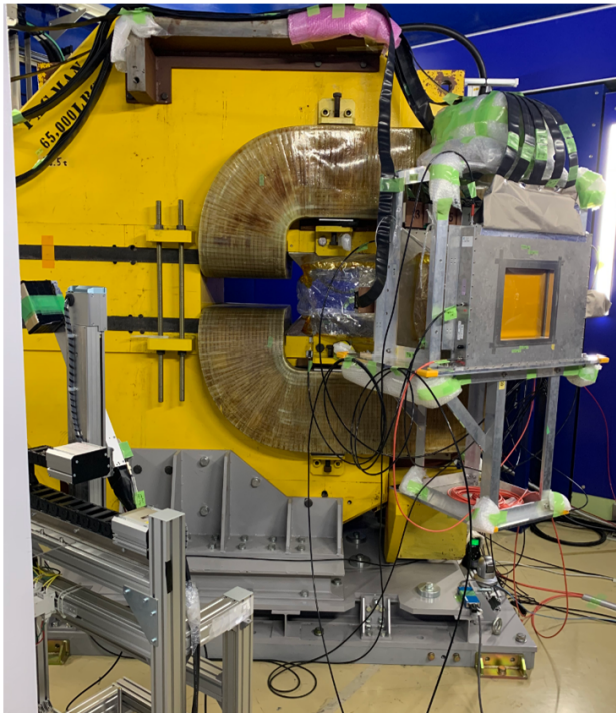


図 4.5: ロボットの位置：Straight

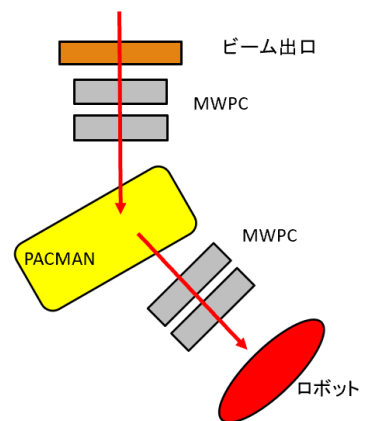
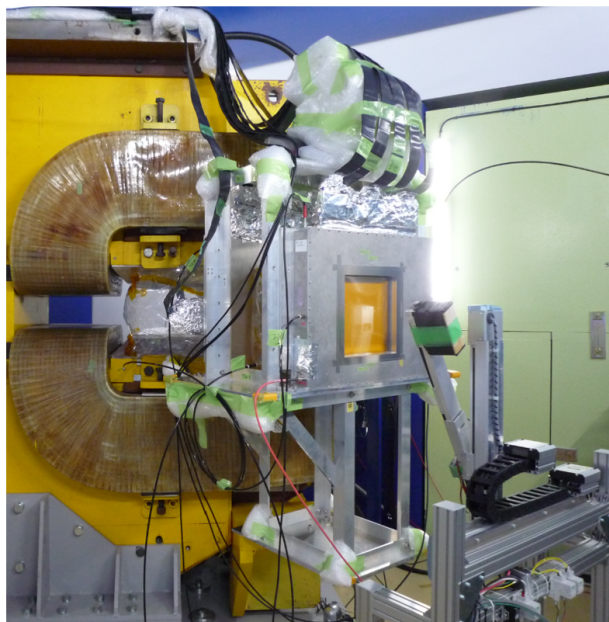


図 4.6: ロボットの位置：Bended

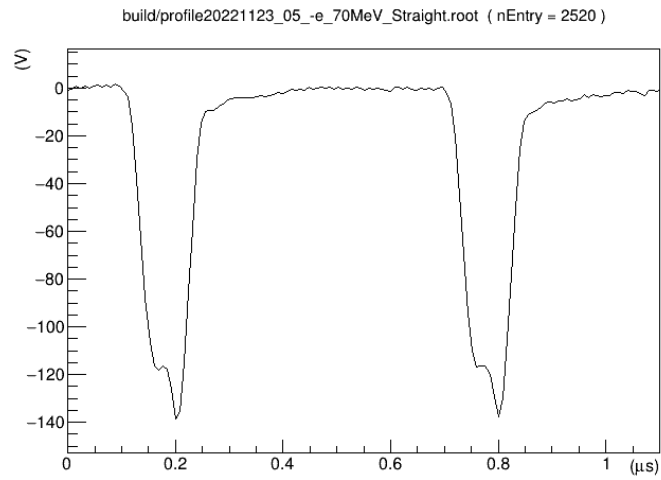


図 4.7: 図 4.4 を拡大表示した波形

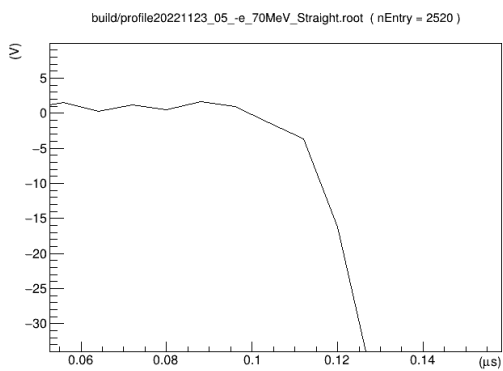


図 4.8: 積分の時間範囲の開始点付近

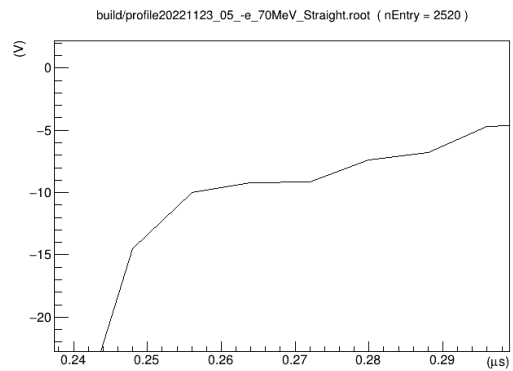


図 4.9: 積分の時間範囲の終了点付近

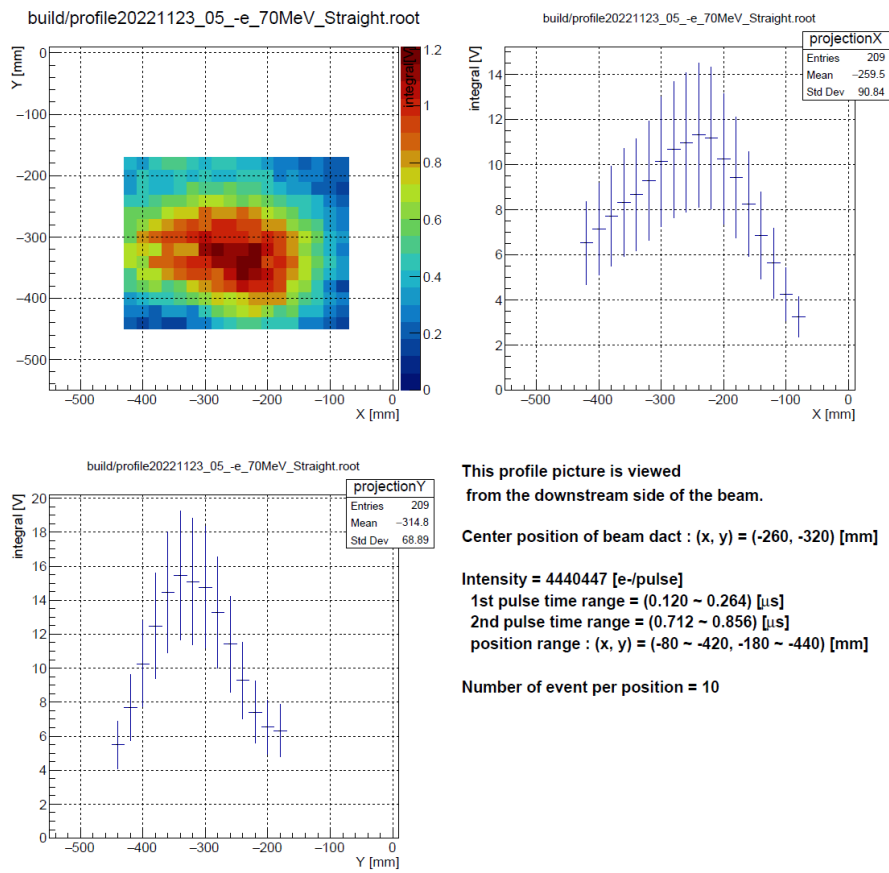


図 4.10: 電流値設定：負電荷 70 MeV/c, PACMAN で曲げないときのプロファイル画像等

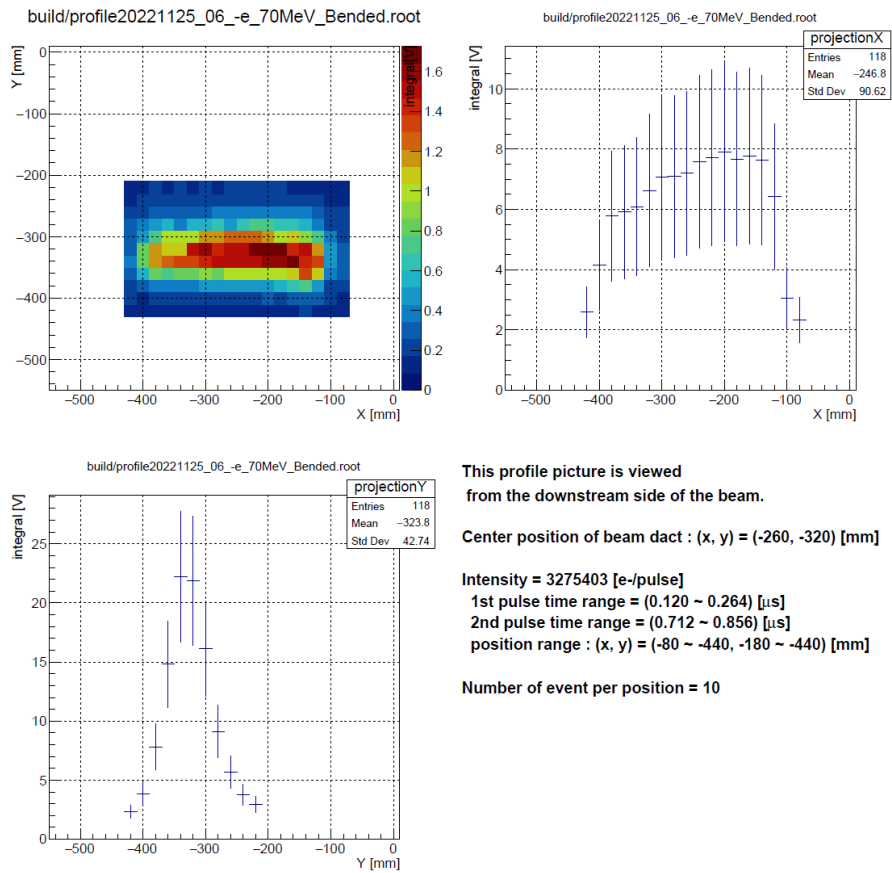


図 4.11: 電流値設定: 負電荷 70 MeV/c, PACMAN で曲げるときのプロファイル画像等

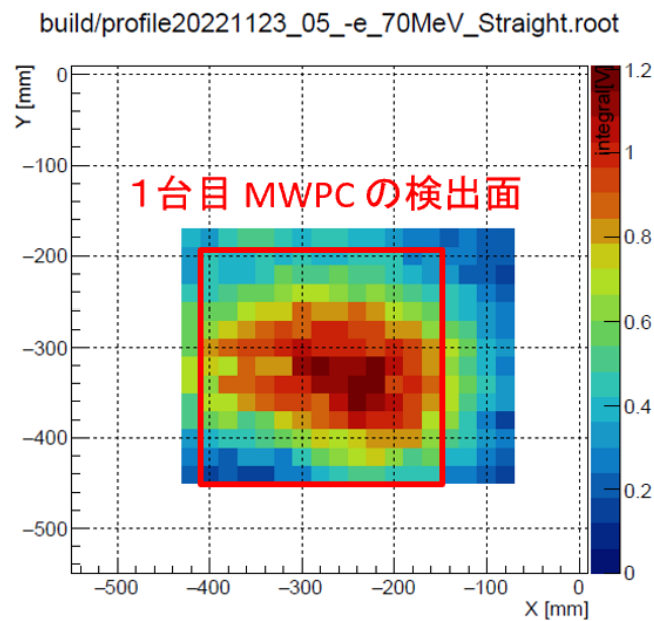


図 4.12: 図 4.10 のプロファイル画像部分を拡大したもの

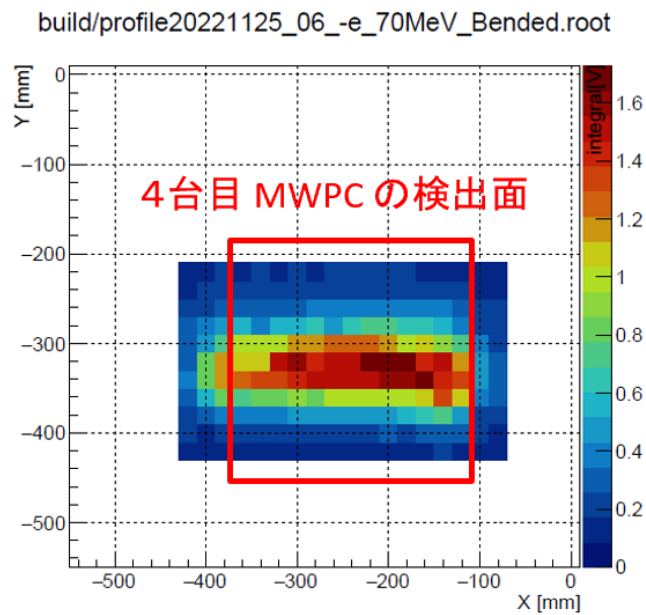


図 4.13: 図 4.11 のプロフィール画像部分を拡大したもの

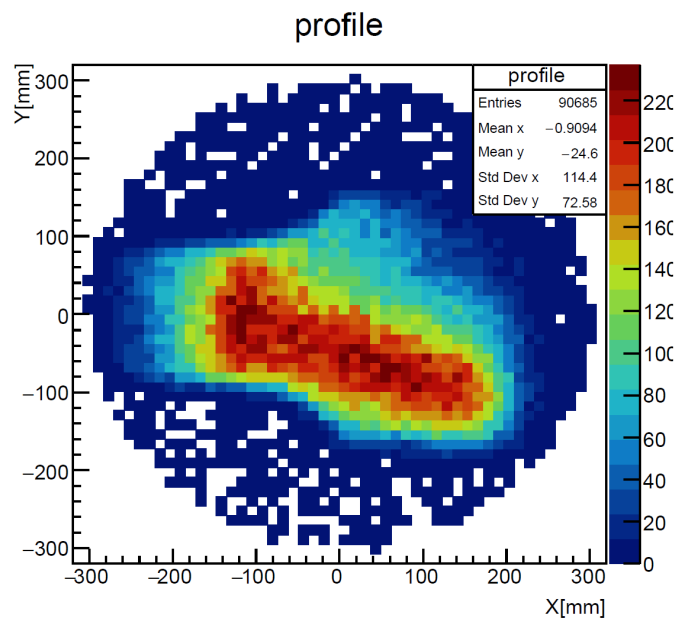


図 4.14: 正電荷・50 MeV/c・Straight のシミュレーションによるプロフィール画像

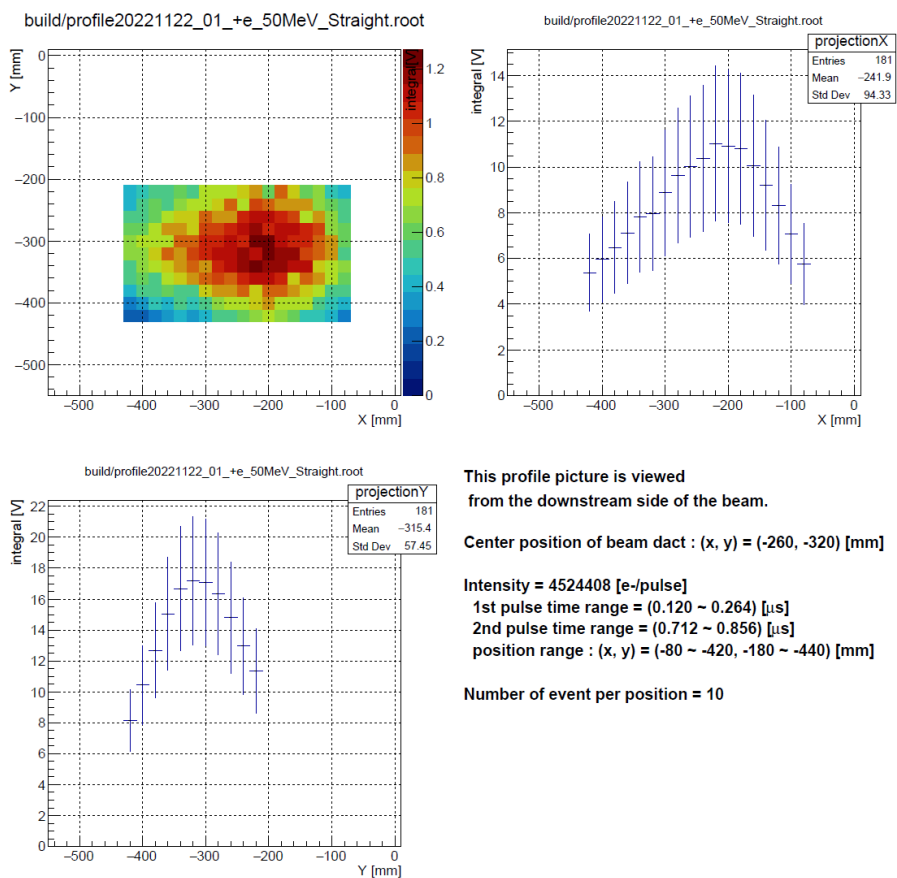


図 4.15: 正電荷・50 MeV/c・Straight の測定によるプロファイル画像

5 飛来電子数の求め方

このプロファイル測定装置では、プロファイル画像だけでなくパルスあたりの飛来電子数も求めることができる。この章ではその飛来電子数の求め方についてまとめる。

5.1 先行実験

このプロファイル測定装置に使用されているチェレンコフ検出器は、2020年11月に京都大学複合原子力研究所（以下、KURNS）の電子線型加速器を用いて、性能評価のための実験が行なわれている [21]。この実験の際に、積分値と飛来電子数の関係式を取得しており、これを利用することで H1 エリアでの飛来電子数を見積もっていく。

図 5.1 は KURNS での実験で得られたビーム強度依存性を示したものである。横軸 Intensity が本論文の飛来電子数、縦軸 Response が積分値に値する。-700 V と -1000 V は PMT の印加電圧を示している。この図から飛来電子数と積分値の関係式を導出し、H1 エリアでの実験に反映することで飛来電子数を求めることができる。

5.2 飛来電子数と積分値の関係式の導出

図 5.1 より、飛来電子数と積分値の関係式を導出するのだが、よく見ると -700 V の場合だと 10^6 electron/pulse 付近で、-1000 V の場合だと 10^5 electron/pulse 付近で Response が飽和していることが分かる。ゆえに、関係式を導出する際には Response が飽和していない点のみを抽出する必要がある。今回は -700 V の点を左から 5 個抽出し、再プロットしてその近似直線を求めることにする。

図 5.2 に再プロットしたグラフを示す。このグラフにおいて、近似直線を導出すると

$$y = 0.02988x + 4.382 \quad (5.1)$$

と求めた。この y に、H1 エリアで求めた積分値を代入することで、飛来電子数を導出することができる。ただし、図 5.2 の縦軸の単位は ADC counts であり、H1 エリアで求まる積分値の単位は volt であるため、積分値を ADC counts に変換する係数をかけないといけない。

5.3 変換係数

KURNS での実験では DAQ システムとして、Redpitaya ではなく COPPER と呼ばれる FADC を用いている。COPPER はサンプルレートが 500 MHz であり、1 volt を 8 bits で表す。そのため、volt を ADC counts に変換するには、H1 エリアでの積分値に $2^8 - 1 = 255$ をかければよい。また、Redpitaya のサンプルレートは 125 MHz であり、COPPER の方が 4 倍ほど大きい。本論文での積分値は電圧値の和という意味であるため、サンプルレートが 4 倍ほど違えば電圧値の数も 4 倍ほど異なる。すなわち、このサンプルレートが大きいほど積分値は大きくなるため、H1 エリアでの積分値にさらに 4 をかける必要がある。

加えて、KURNS で使用したチェレンコフ検出器（以下、KURNS 検出器）と、H1 エリアで使用するチェレンコフ検出器（以下、H1 検出器）は長さが異なるため、H1 検出器の積分値を KURNS 検出器での積分値に変換する係数も必要になる。H1 検出器は全長 680 mm なのに対して、KURNS 検出器は 430 mm である。この係数を導出するために、H1 エリアにて、検出器内のアクリルの位置が一致するようにロボットの座標を調節し、それぞれの検出器で 1000 個のデータを取得し、それぞれの積分値を求めた。データあたりの積分値は、H1 検出器が 1.233 V、KURNS 検出器が 1.071 V

だった。ゆえに、H1 検出器の積分値を KURNS 検出器での積分値に変換する係数は $1.071 / 1.233 \simeq 0.8686$ と求まった。

まとめると、式 5.3 の y に H1 エリアでの積分値を代入するためには、その積分値に $\times 255 \times 4 \times 0.8686$ すればよいのである。

5.4 飛来電子数の計算

以上の手順を踏まえて一度飛来電子数を計算してみる。図 4.10 のデータにおいて、時間範囲と座標範囲を指定して積分値を求めてみると 149.7620 V と求まった。これに変換係数をかけて、式 5.3 の y に代入すると

$$149.7620 \times 255 \times 4 \times 0.8686 = 0.02988x + 4.382 \quad (5.2)$$

となり、これを x について解くと

$$x = 4.44 \times 10^6 \quad (5.3)$$

と求まる。

このような計算方法で求めた飛来電子数を図 4.10 の右下に記載しているのである。

5.5 運動量と飛来電子数の関係

以上の計算方法で求めた飛来電子数と、そのときのビームの運動量の関係を図 5.3, 5.4 に示す。それぞれの図において、横軸：運動量、縦軸：飛来電子数である。黒色の点はロボットの位置が Straight のときのデータであり、赤色の点は Bended のときのデータである。正電荷・負電荷両方ともに、運動量が高くなると飛来電子数が少なくなる傾向が見られた。加えて、PACMAN で曲げられると飛来電子数が少なくなることも見られた。各運動量に対して、PACMAN で曲げられるとどれほど飛来電子数が少なくなるのかをまとめたものを表 5.1 に示す。減少割合は $1 - (\text{Bended}/\text{Straight})$ で計算しており、値が大きいほど PACMAN で曲げられた際に多くの電子を失っているということになる。

表 5.1: PACMAN で曲げられた後の飛来電子数の減少割合

電荷	運動量 [MeV/c]	減少割合
正	45	0.189
	50	0.217
	55	0.280
負	50	0.123
	60	0.192
	70	0.262
	105	0.457

5.6 シミュレーションとの比較：飛来電子数

プロファイル測定装置で算出した飛来電子数を評価するために、G4beamline によるシミュレーションを行なった。このシミュレーションで得られた飛来電子数と、プロファイル測定装置で測定した飛来電子数をまとめたグラフを図 5.5 に示す。黒色の点がプロファイル測定装置で計測した実測値であり、赤色の点が同じ電流値設定にしたときのシミュレーションの値である。これを見ると、図

5.3, 5.4 で見られたような, 同じ電流値設定の場合 Straight より Bended の方が飛来電子数が少ないという特徴がシミュレーションにも現れていることが分かる.

また, 各測定条件に対して実測値とシミュレーション値がどれほど違うのかをもとめたものを表 5.2 に示す. この表より, 105 MeV/c 以外の測定条件では, 飛来電子数の実測値とシミュレーション値はおおよそ 2 倍ほど異なることが分かる. 105 MeV/c のみ実測値がシミュレーション値より小さくなっていることに関しては, 今後検討が必要である.

表 5.2: 飛来電子数の実測値とシミュレーション値

電荷	運動量 [MeV/c]	ロボット位置	実測値/シミュレーション値
正	45	Straight	1.777
		Bended	2.007
	50	Straight	1.977
		Bended	2.200
負	70	Straight	2.564
	105	Bended	0.752

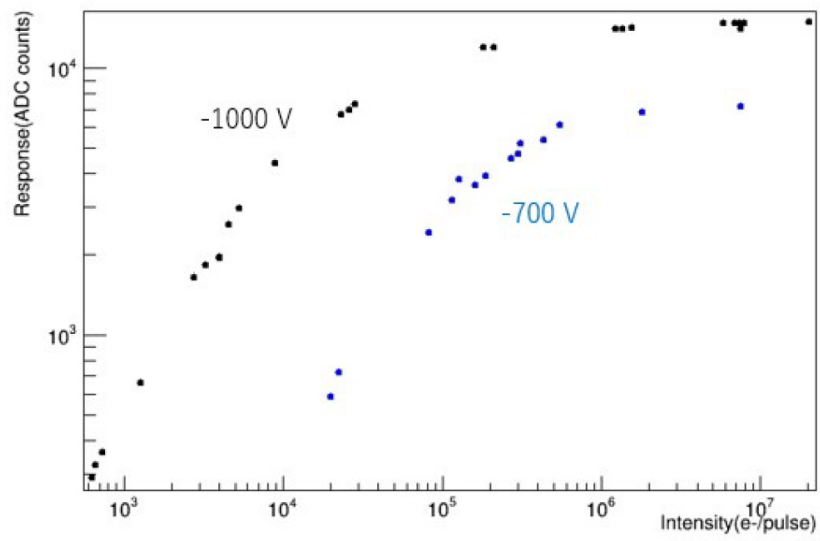


図 5.1: KURNS 実験で得られたビーム強度依存性

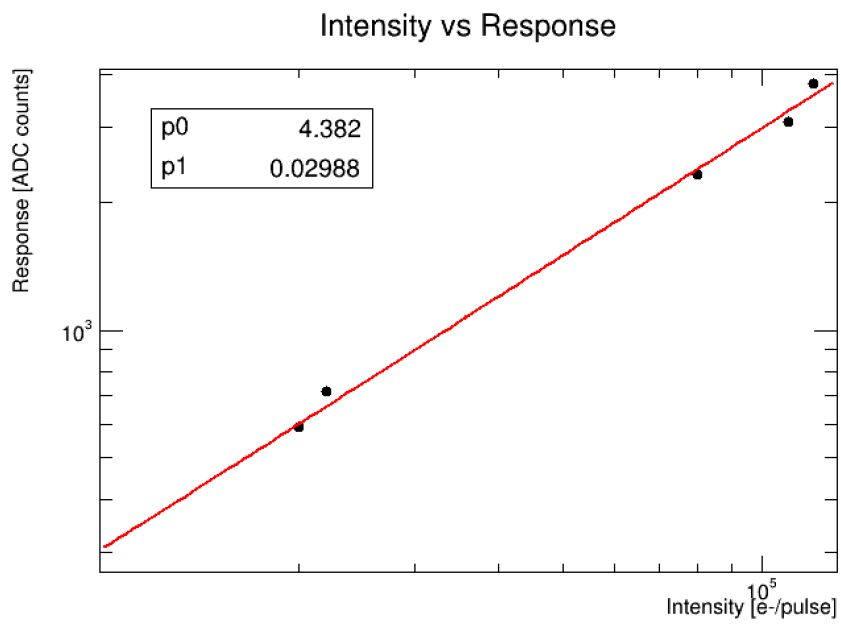


図 5.2: 飽和していない点を抽出したビーム強度依存性

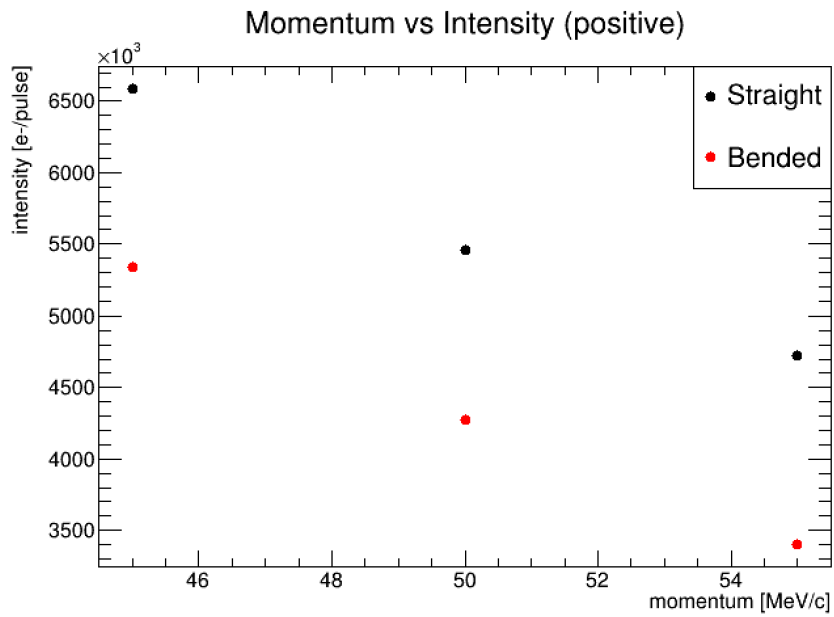


図 5.3: ビームの運動量に対する飛来電子数 (正電荷)

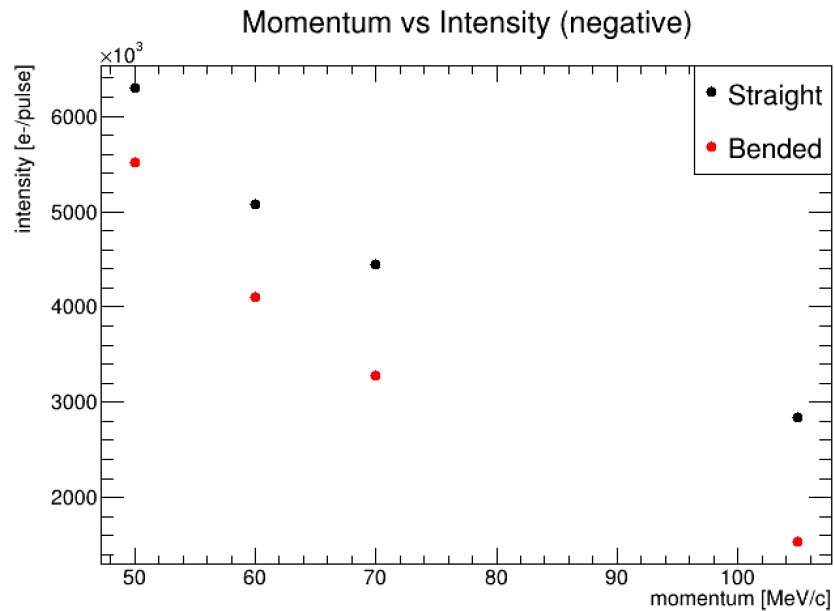


図 5.4: ビームの運動量に対する飛来電子数 (負電荷)

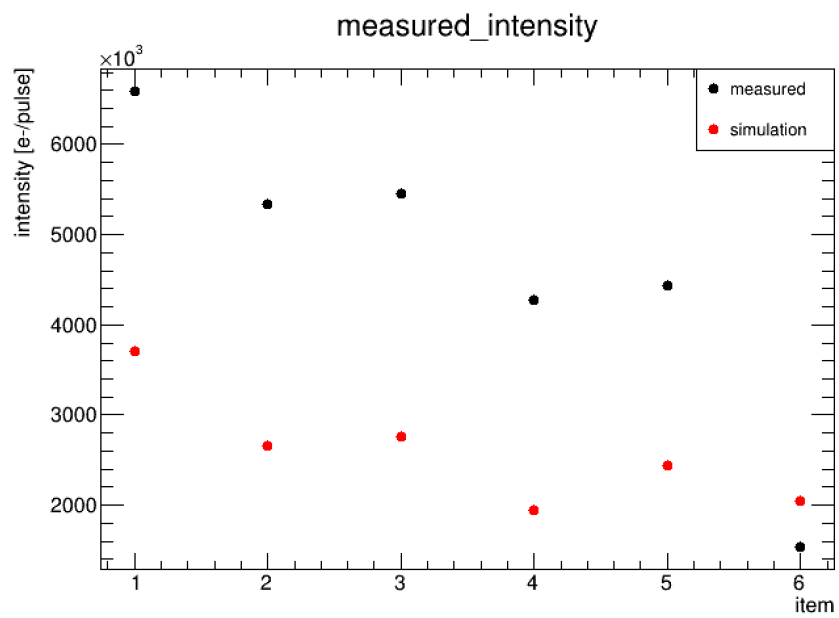


図 5.5: 飛来電子数の実測値とシミュレーションの比較

6 ビームチューニング

この章では、2022年5月6日にプロファイル測定装置を用いて行なったビームチューニングについて説明する。

6.1 負電荷・105 MeV/c

ビームチューニングはまず、DeeMeのメインターゲットである負電荷・105 MeV/cのビームに対して行なわれた。まずは、このビームチューニングを説明する。

6.1.1 積分値に対するチューニング

ビームチューニングはプロファイルを MWPC の検出面に収まるようにすることと、飛来電子数が多くなるようにすることの2点の目的を持って行なう。これに対して、まずは飛来電子数に対してチューニングを行なった。なお、2022年5月の時点では飛来電子数の計算方法が確立されていなかったため、飛来電子数ではなく積分値を判断基準にしてチューニングを行なった。このときのロボットは、図 3.18 のようなビームダクトの直後の位置に設置されている。ビームダクトの中心をロボットの座標で表すと $(x, y) = (-280, -320)$ である。PACMAN が H1 エリア内に設置される前だったため、可能だった設置位置である。この位置にプロファイル測定装置を設置し、積分値が多くなるように電流値設定を変更していく。

シミュレーションによって事前に見積もられた、負電荷・105 MeV/c の電流値設定を表 6.1 に示す。HS1 は MLF 内の他のビームラインにも影響を与えるため、ビームチューニングのときは値を変更しない。そのため、この表には記載していない。この電流値設定を基に、HB1 は固定で HB2 → HS2 → HS3 → HQ1 → HQ2 → HQ3 の順で電流値を変更していき、積分値が大きくなる電流値を見つけていく。基本的には上流にある電磁石がビームの輸送に大きな影響を与えるのだが、HB2 はベンディング電磁石のため、まずはこれからチューニングを行なっていく。

表 6.1: シミュレーションによって得られた負電荷・105 MeV/c の電流値設定

電磁石	HB1	HS2	HS3	HB2	HQ1	HQ2	HQ3
電流値 [A]	-330.00	111.0	155.0	-367.00	-152.50	-251.00	-150.00

6.1.2 最適化の手順

まずは一度、表 6.1 の電流値設定でプロファイルを測定した (図 6.1)。このときの積分値は 69.4452 V だった。

次に HB2 の電流値を -5% した値、 $367.00 \text{ A} \times 0.95 = 348.65 \text{ A}$ に設定してプロファイルを測定した (図 6.2)。このときの積分値は 63.8188 V だった。ビームダクトの中心が $(x, y) = (-280, -320)$ なので、プロファイルとしては図 6.2 の方が、ビームダクト中心付近にビーム中心があるため適しているのだが、今は積分値を基準にチューニングしているため、プロファイルは考慮しない。

さらに HB2 の電流値を小さくして -10% した値、 $367.00 \text{ A} \times 0.90 = 330.30 \text{ A}$ に設定してプロファイルを測定した (図 6.3)。このときの積分値は 43.8584 V だった。これ以上 HB2 の電流値を小さくしていても積分値が大きくなることはないかと判断し、今度は電流値を大きくしてみる。

HB2 の電流値を +10% した値、 $367.00 \text{ A} \times 1.10 = 403.70 \text{ A}$ に設定してプロファイルを測定した (図 6.4)。このときの積分値は 35.4900 V だった。

以上のように、表 6.1 の電流値を基準に $\pm 5 \sim 10 \%$ した値でプロファイルを測定し、積分値を求めた。これをグラフにまとめたのが図 6.5 である。負電荷・105 MeV/c を輸送する際の HB2 の最適な電流値は複数個は存在しないため、このグラフは二次曲線でフィットすることができる。この二次曲線の頂点の値が HB2 の最適な電流値となるのである。よって負電荷・105 MeV/c の場合、最適値は 364.4 A と求まった。

6.1.3 チューニング結果

以上のように、シミュレーションで求めた電流値を $\pm 5 \sim 10 \%$ した値でプロファイルを測定し、二次曲線から最適値を求めるということをそれぞれの電磁石で行なった。その結果得られた電流値設定を表 6.2 に示す。この表の電流値設定で測定したプロファイル画像が図 6.6 である。このときの積分値は 126.725 V であり、ビームチューニングする前と比べるとおよそ 2 倍になった。これで積分値に対するチューニングは完了とし、次にプロファイルに対するチューニングを行なっていく。

表 6.2: 積分値に対するチューニングによって得られた負電荷・105 MeV/c の電流値設定

電磁石	HB1	HS2	HS3	HB2	HQ1	HQ2	HQ3
電流値 [A]	-330.00	129.4	155.0	-364.40	-183.00	-276.10	-150.00

6.1.4 プロファイルに対するチューニング

プロファイルに対するチューニングは、ロボットを Bended の位置 (図 4.6) に設置して行なう。まずはこの位置で、積分値に対するチューニングによって得られた電流値設定 (表 6.2) のプロファイルを測定した (図 6.7)。この図において、4 台目の MWPC の検出面は $(x, y) = (-110 \sim -370, -190 \sim -450)$ に位置するため、右側にビームが寄っていることが分かる。ゆえに、このビームを $x = -110 \sim -370$ の範囲に広がるようにチューニングを行なっていく。

今回のチューニングはロボットを Bended の位置に設置しているため、PACMAN 通過後のビームを見ていることになる。PACMAN には 105 MeV/c の運動量を持ったビームを曲げるのに適した電流値を設定しているため、図 6.7 より右側にビームが偏っていることから、積分値に対するチューニングによって得られた電流値設定は、105 MeV/c よりも低い運動量を輸送するのに適した電流値設定ということになる。ゆえに、表 6.2 の電流値をそれぞれ同じ比率で大きくして、より高い運動量を輸送するようにすればビームが右側に偏っていることを改善することができるのである。

そこで、まずは各電磁石の電流値を表 6.2 の値から +15% したものでプロファイルを測定した (図 6.8)。すると、期待通りビームが左側に移動したが少し寄りすぎたため、次に表 6.2 の値から +7.0% したものでプロファイルを測定した (図 6.9)。これを見ると、ビームが $x = -110 \sim -370$ の範囲に広がっていることが分かるため、このときの電流値設定がプロファイルの観点から見て最適な設定だと判断した。これを表 6.3 に示しておく。

表 6.3: プロファイルに対するチューニングによって得られた負電荷・105 MeV/c の電流値設定

電磁石	HB1	HS2	HS3	HB2	HQ1	HQ2	HQ3
電流値 [A]	-353.10	138.5	165.9	-389.91	-195.81	-295.43	-160.50

以上のようにして、負電荷・105 MeV/c に対して積分値とプロファイルの 2 つの観点からチューニングを行ない、このビームを輸送するのに最適な電流値設定を決定することができた。

6.2 正電荷・50 MeV/c

次に、負電荷・105 MeV/c とは異なるビームとして、正電荷・50 MeV/c のビームに対してもビームチューニングを行なった。

6.2.1 ロボット位置：Straight_v0

まずは、PACMAN で曲げられずに直進してくるビームに対してチューニングを行なう。ロボットの位置の名称を Straight_v0 としているが、これは Straight の位置から、ビーム下流側から見て右に 30 mm 移動した位置である。今まで Straight と呼んでいた図 4.5 のような位置が明確に決まる前に行なったチューニングのため、Straight_v0 と呼ぶことにする。

まず、負電荷・105 MeV/c の直進ビームに対して行なったビームチューニングで得られた電流値設定 (表 6.2) を、それぞれ 50/105 倍して 50 MeV/c 用にスケールダウンさせる。その後シミュレーションを行ない、ビームの平均運動量が 50 MeV/c となるように各電磁石の電流値を調整する。プロファイル測定装置では運動量を測定することができないため、シミュレーションでの平均運動量を信頼することにする。これによって得られた電流値設定を表 6.4 に示す。今回チューニングするビームは正電荷のため、電流値はすべて正になっている。

表 6.4: シミュレーションでの平均運動量が 50 MeV/c になるときの電流値設定

電磁石	HB1	HS2	HS3	HB2	HQ1	HQ2	HQ3
電流値 [A]	170.90	67.3	80.3	187.10	88.00	142.40	77.70

この表の値でプロファイルを測定したものが図 6.10 である。Straight_v0 の位置にロボットを置いたとき、1 台目の MWPC の検出面は $(x, y) = (-180 \sim -440, -200 \sim -460)$ に位置する。ゆえに、図 6.10 のビームの大きさだと、MWPC の検出面の外にビームが当たってしまう。そこで、ビームの大きさを小さくするよう、プロファイルに大きな影響を与える HQ1, 2, 3 の電流値を変更していく。

まずは HQ1 の電流値を変えてみる。表 6.4 の HQ1 の値、88.00 A をまずは +10% したときのプロファイルを測定した。そのときのプロファイル画像を図 6.11 に示す。この図を見ると、図 6.10 よりもビームが小さくまとまっていることが分かる。次に、HQ1 を +20% してプロファイルを測定した (図 6.12)。これを見ると、図 6.11 よりもさらにビームが小さくまとまっていることが見てとれる。今度は反対に HQ1 を -10% してプロファイルを測定した (図 6.13)。ここから、HQ1 を小さくするとビームが大きくなるのが分かる。以上から、HQ1 の電流値を $88.00 \text{ A} \times 1.2 = 105.60 \text{ A}$ とすることとする。HQ1 を +30% などにするという案もあるが、そうすると表 6.4 の値との差が大きくなり、ビームの平均運動量が 50 MeV/c から離れてしまう恐れがあるため、ここでは HQ1 は +20% に留めておく。

次に HQ2 の電流値を変えていく。表 6.4 の HQ2 の値、142.40 A をまずは +10% したときのプロファイルを測定した。そのときのプロファイル画像を図 6.14 に示す。HQ1 の場合は電流値を大きくするとビームが小さくなったが、HQ2 の場合はその反対で電流値を大きくするとビームが広がった。そこで次は HQ2 を小さくするよう -10% で測定した (図 6.15)。この図より、HQ2 を小さくするとビームが小さくなるのが分かる。さらに小さくして HQ2 -20% で測定した (図 6.16)。今度はビームが広がったため、HQ2 の電流値は $142.40 \text{ A} \times 0.90 = 128.16 \text{ A}$ とすることとする。

最後に HQ3 の電流値を変えていく。まずは表 6.4 の HQ3 の値、77.70 A を +10% したときのプロファイルを測定した。そのときのプロファイル画像を図 6.17 に示す。この図より、HQ3 を大きくするとビームが x 方向に小さくなり y 方向に大きくなるのが分かる。次に HQ3 を -10% して測定した (図 6.18)。HQ3 +10% のプロファイル (図 6.17) と比較すると、HQ3 -10% の方がより

ビームが小さくまとまったことが見てとれる．そこでさらに HQ3 を -20% して測定した (図 6.19)．HQ3 -10% のプロファイル (図 6.18) と比較すると, x 方向に広がったことが分かる．ゆえに HQ3 の電流値は $77.70 \text{ A} \times 0.90 = 62.16 \text{ A}$ とすることとする．

以上のようにして, 正電荷・50 MeV/c の直進ビームに対してプロファイルの観点からチューニングを行ない, MWPC に入射させるビームを最適化することができた．このときの電流値設定を表 6.5 に示しておく．

表 6.5: 直進ビームに対するチューニングによって得られた正電荷・50 MeV/c の電流値設定

電磁石	HB1	HS2	HS3	HB2	HQ1	HQ2	HQ3
電流値 [A]	170.90	67.3	80.3	187.10	105.60	128.16	62.16

6.2.2 ロボット位置：Bended

次にロボットを Bended (図 4.6) の位置に設置して, 4 台目の MWPC の検出面に合う大きさのビームに変えていく．

まずは表 6.5 の設定でプロファイルを測定した．そのときのプロファイル画像が図 6.20 である．この図において 4 台目の MWPC の検出面は $(x, y) = (-110 \sim -370, -190 \sim -450)$ に位置する．ゆえにビームは検出面内に入っているため, この Bended の位置ではビームチューニングを行なう必要はない．すなわち, 表 6.5 の電流値設定が正電荷・50 MeV/c を輸送するのに適した設定であるということになる．

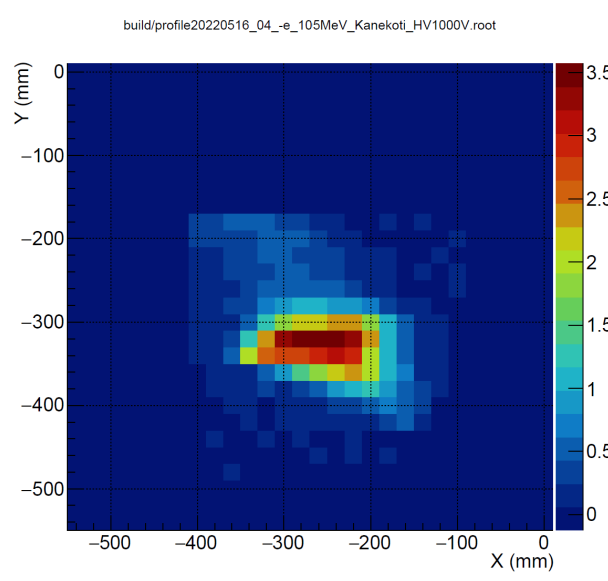


図 6.1: 表 6.1 のプロフィール画像

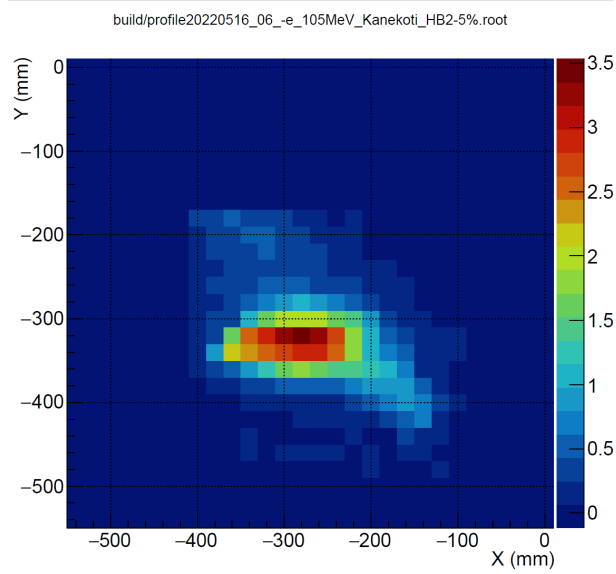


図 6.2: 表 6.1 の HB2 を -5% したプロフィール画像

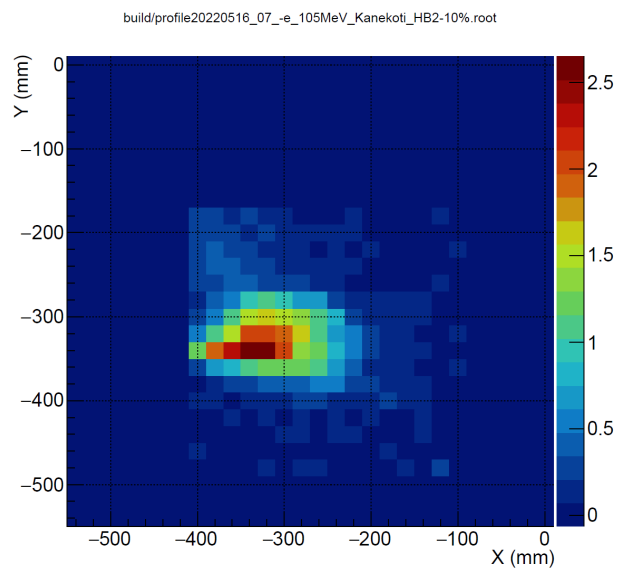


図 6.3: 表 6.1 の HB2 を -10% したプロファイル画像

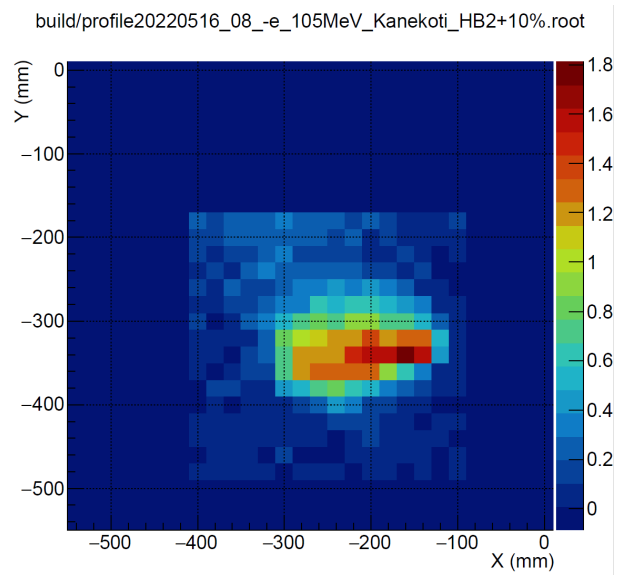


図 6.4: 表 6.1 の HB2 を +10% したプロファイル画像

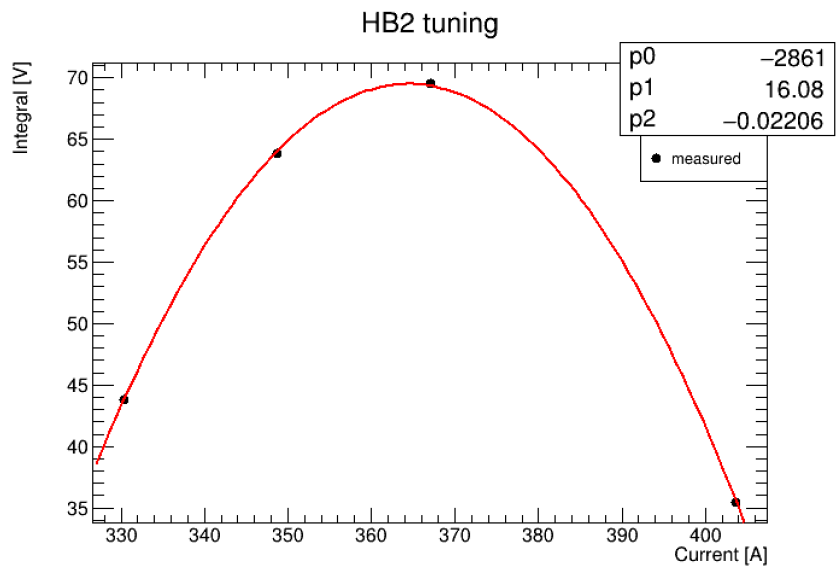


図 6.5: HB2 の電流値に対する積分値の変化

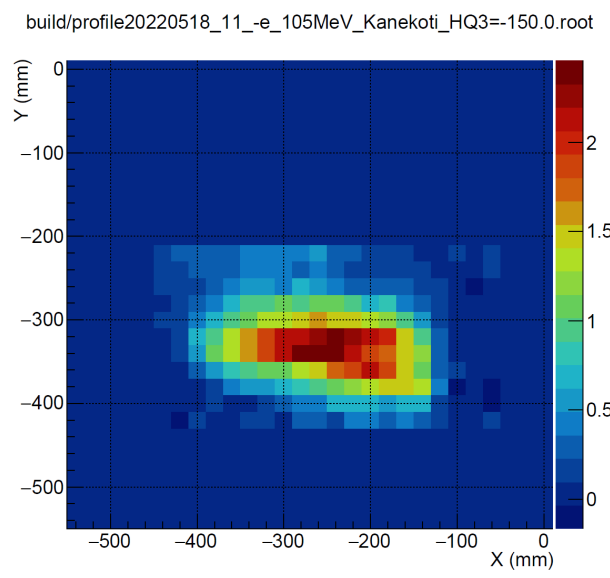


図 6.6: 表 6.2 のプロフィール画像

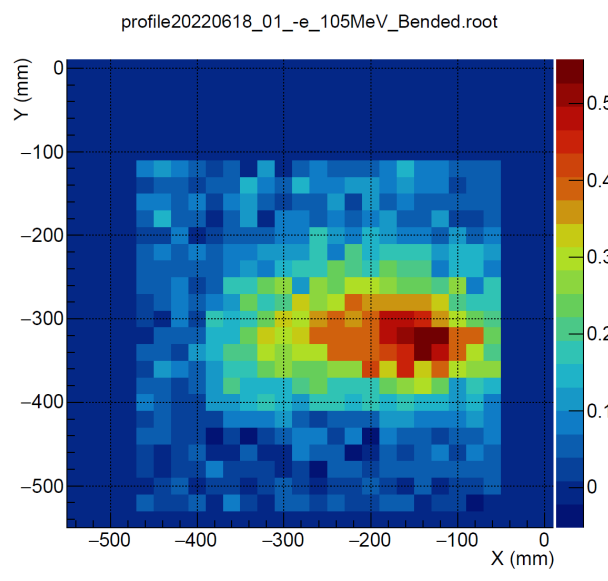


図 6.7: 表 6.2 の Bended でのプロフィール画像

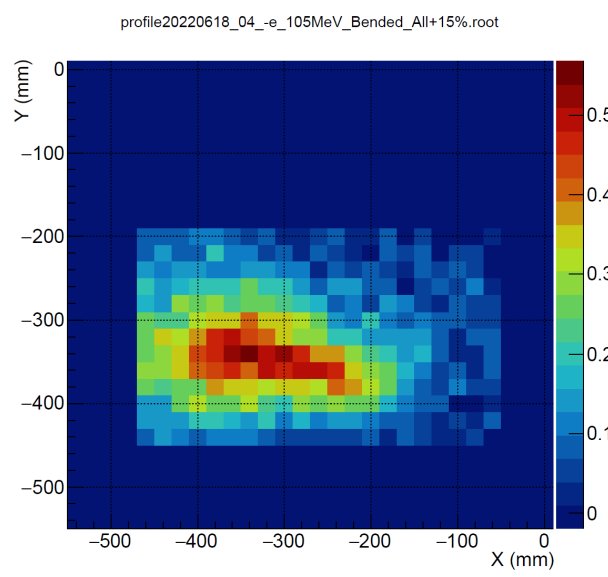


図 6.8: 表 6.2 の全体を +15% したプロフィール画像

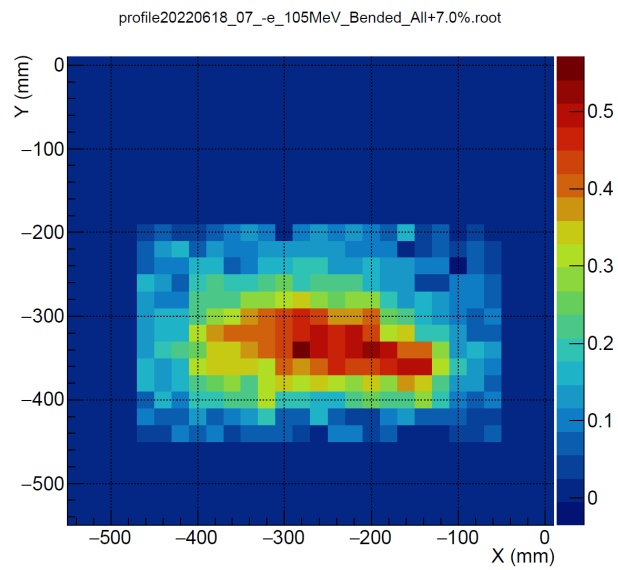


図 6.9: 表 6.2 の全体を +7.0% したプロフィール画像

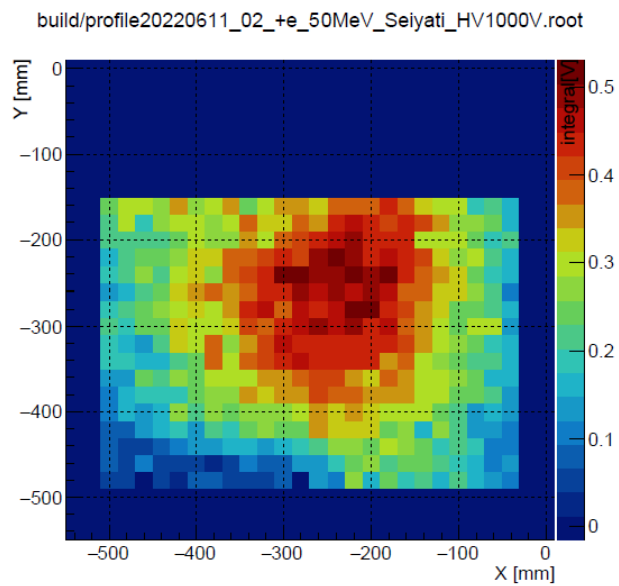


図 6.10: 表 6.4 のプロフィール画像

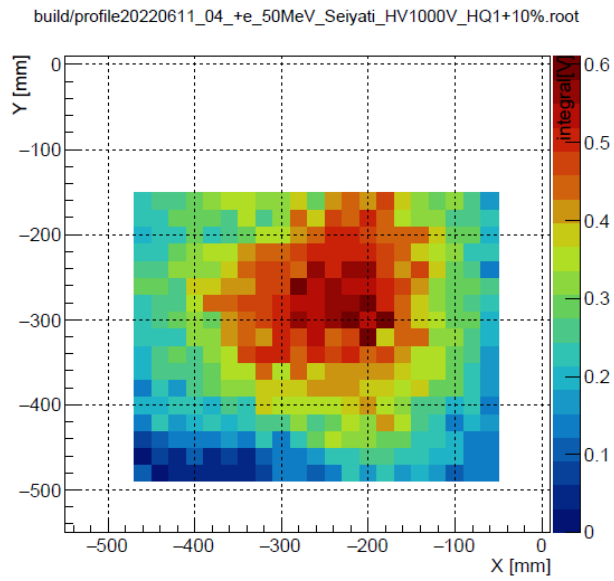


図 6.11: 表 6.4 の HQ1 を +10% したプロファイル画像

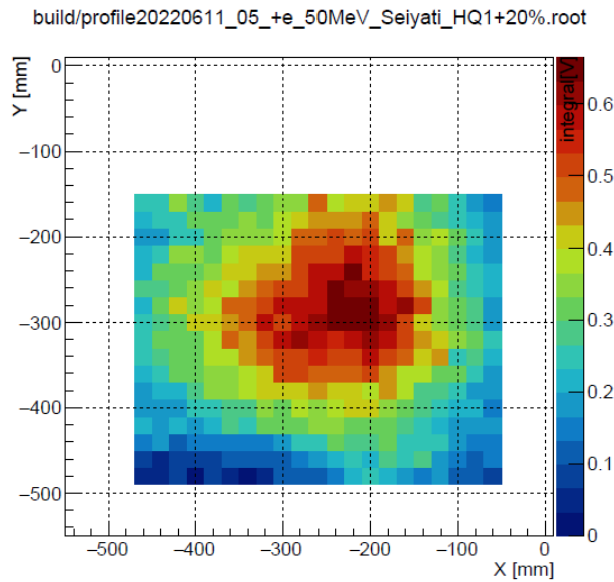


図 6.12: 表 6.4 の HQ1 を +20% したプロファイル画像

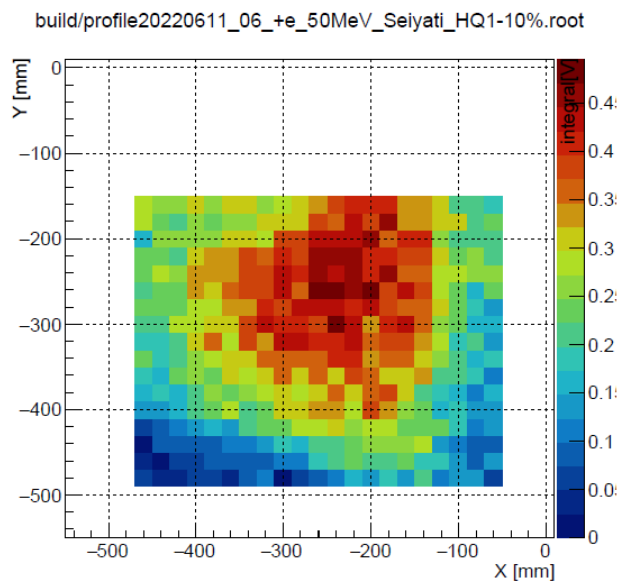


図 6.13: 表 6.4 の HQ1 を -10% したプロファイル画像

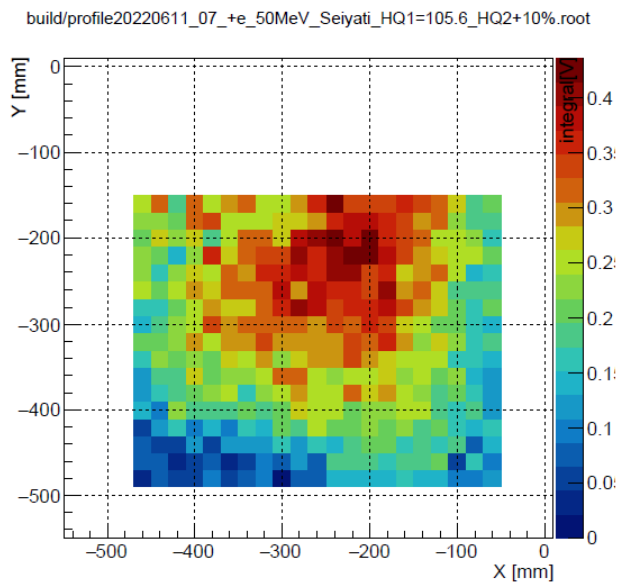


図 6.14: 表 6.4 の HQ2 を +10% したプロファイル画像

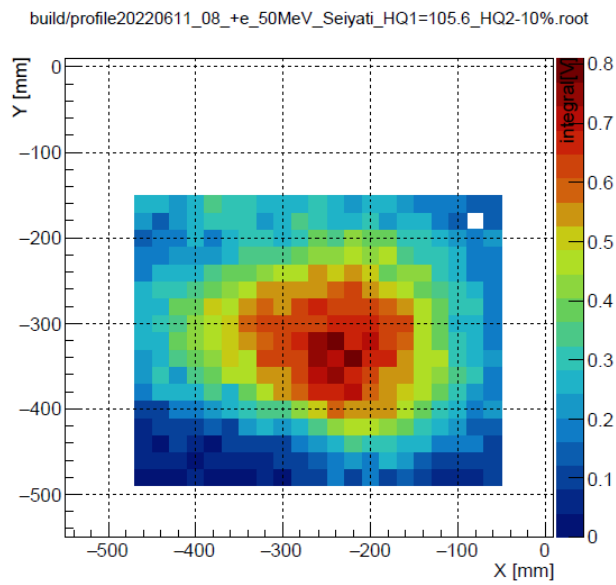


図 6.15: 表 6.4 の HQ2 を -10% したプロフィール画像

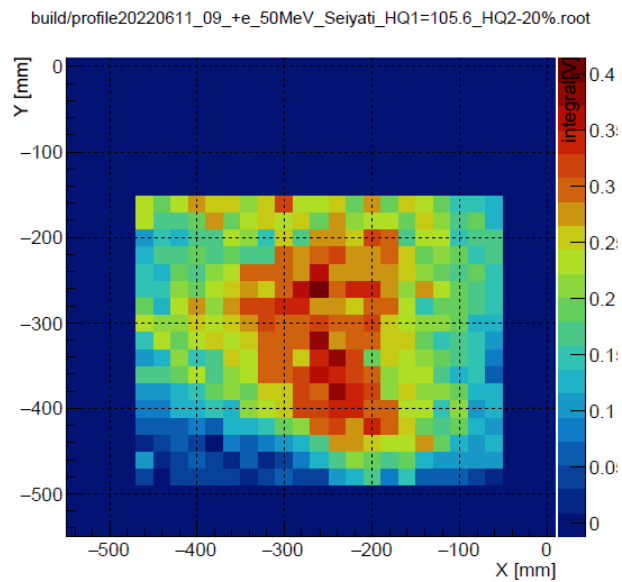


図 6.16: 表 6.4 の HQ2 を -20% したプロフィール画像

build/profile20220611_10_+e_50MeV_Seiyati_HQ1=105.6_HQ2=128.16_HQ3+10%.root

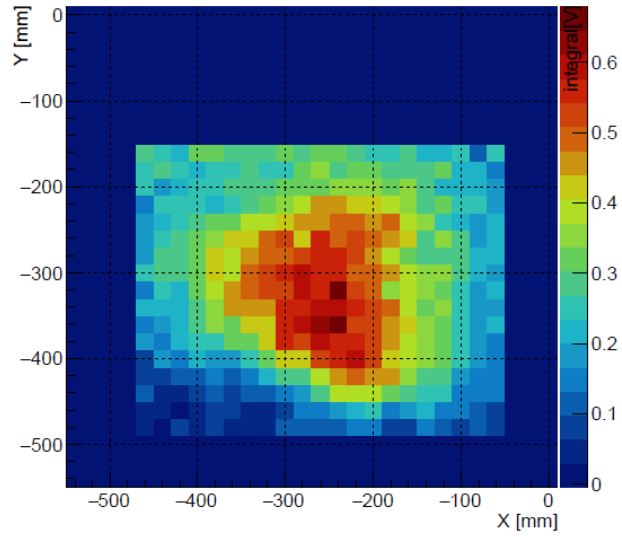


図 6.17: 表 6.4 の HQ3 を +10% したプロファイル画像

build/profile20220611_11_+e_50MeV_Seiyati_HQ1=105.6_HQ2=128.16_HQ3-10%.root

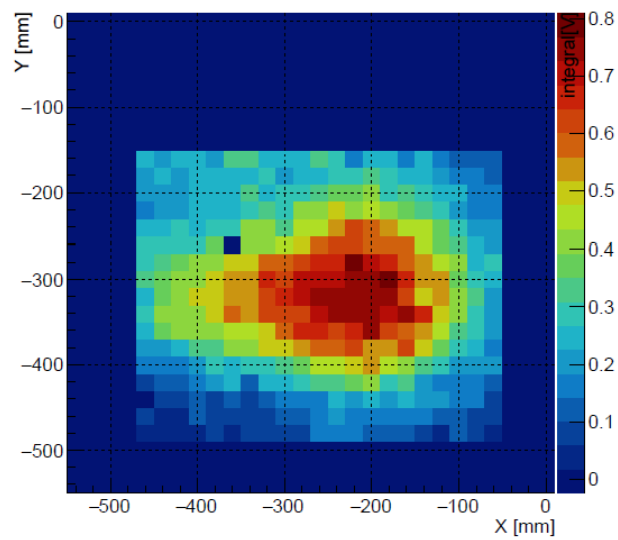


図 6.18: 表 6.4 の HQ3 を -10% したプロファイル画像

build/profile20220611_12_+e_50MeV_Seiyati_HQ1=105.6_HQ2=128.16_HQ3=20%.root

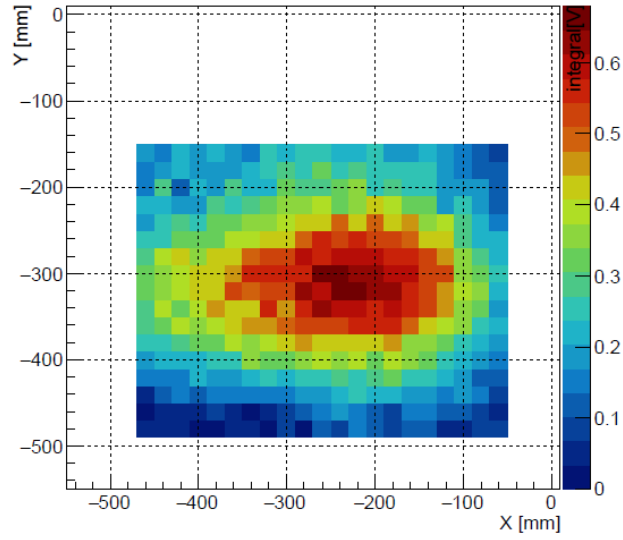


図 6.19: 表 6.4 の HQ3 を -20% したプロフィール画像

build/profile20220614_01_+e_50MeV_Bended_Tuningti.root

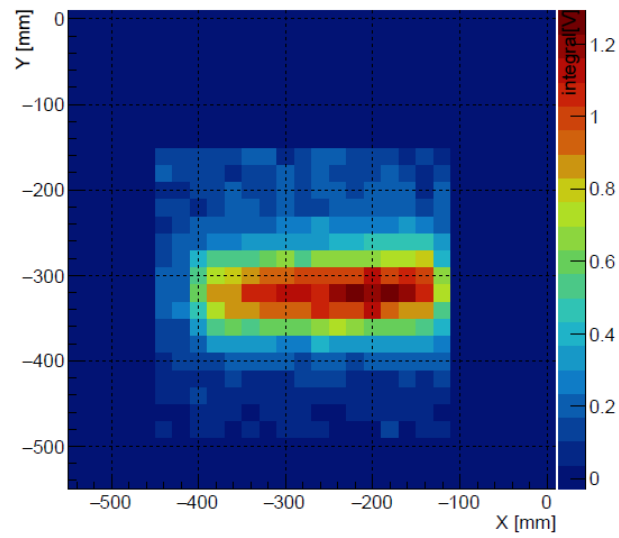


図 6.20: 表 6.5 の Bended でのプロフィール画像

7 結論

DeeMe 実験は cLFV 過程の 1 つであるミューオン・電子転換過程 ($\mu^- + (A,Z) \rightarrow e^- + (A,Z)$) を 10^{-14} の単一事象感度で探索する実験である。この過程を探索すべく、2022 年 5 月から始まった H-Line でのビームタイムの期間で実験を行なっている。

H1 エリアに到達する prompt タイミングのビームの形状を測定する装置として、プロファイル測定装置を開発した。チェレンコフ検出器、2 軸ロボット、Redpitaya から構成された測定装置であり、プロファイル画像の作成の他に飛来電子数の見積もりもできる測定装置を開発した。チェレンコフ検出器はチェレンコフ光を発生させる物質にアクリルを用いており、形状を四角錐にすることで電子由来のチェレンコフ光のみを PMT 部分にまで届くことができるようになっている。2 軸ロボットは蛇行移動するようにプログラミングを組み、各座標で 10 個の波形データを取得するように Redpitaya に要請した。この結果、プロファイル測定装置がスキャンを開始してから 1 枚のプロファイル画像が作成されるまでに要する時間は、およそ 10 分ほどと短い時間に収めることができた。

1 回のスキャンで取得したデータを全て足し合わせた波形を描き、そこからダブルパルスのそれぞれの時間範囲を決定した。この時間範囲内の電圧値の和を取得し、それらの平均を取ることで 1 パルス当たりの Integral とした。プロファイル画像はこの Integral を座標ごとにプロットすることで作成している。また、KURNS での先行実験で得られたチェレンコフ検出器のビーム強度依存性から、Integral を Intensity に変換する係数を導出することで、飛来電子数を見積もれるようになっている。この飛来電子数はシミュレーション値と比較しても、およそ 2 倍ほどのズレなため参考にはできる数となっている。

開発したプロファイル測定装置を用いて H1 エリアにてビームチューニングを行なった。ロボットを Straight の位置に置いたときは 1 台目 MWPC の検出面を、Bended の位置に置いたときは 4 台目 MWPC の検出面を基準にしてビームチューニングを行なった。Straight の場合は HB1 は固定で HB2 \rightarrow HS2 \rightarrow HS3 \rightarrow HQ1 \rightarrow HQ2 \rightarrow HQ3 の順で電流値を変更していき、Bended の場合は HB1 \sim HQ3 の全てを同じ割合変更することでチューニングを行なった。ビームチューニングは 105 MeV/c の電子と 50 MeV/c の陽電子に対して行ない、それぞれの最適な電流値設定を決定することができた。

謝辞

本修士論文を執筆するにあたり、多くの方々の助力がありました。ここではそれらに対する感謝の意を示したいと思います。

清矢 良浩教授には、物理の根本的な知識や実験屋さんとしての思考アプローチだけでなく、人生において重要な視点や考え方など、これからの私の人生において大きな影響を与えるであろうことまで教えていただきました。また、私が研究内容について質問しに行った際には、いつ何時でも第一に対応し、親切丁寧に私が納得するまでご指導していただきました。清矢教授が私の担当教授であったことを誇りに思い、また、師と仰ぐ存在に出会えたことを心より喜ばしく思います。山本 和弘准教授には、研究室のパソコン関連の環境を構築していただきました。これまでの研究活動において、何不自由なくデータ解析やコーディングを行えたのは山本教授の助力があってこそでした。豊田 博俊氏には、研究室でのんだ付けや工作などの物作りに関することを教えていただきました。手島 菜月氏には、DeeMe の実験の際に大変お世話になりました。私では対処できないエラーにも迅速かつ正確に対応している姿を見て、研究者としての力量の差を感じるとともに尊敬の念をいただいました。また、MLF にくださった差し入れは非常にありがたかったです。

大阪大学の青木 正治教授は、他大学の教授でありながらも私に熱心な指導をしてくださいました。プロファイル測定装置を用いて H1 エリアで初めてビームチューニングをする際、私一人で行なう予定だったときに青木教授に来ていただき、チューニングの手順や考え方を教えていただいたことを今でも覚えています。当時はお手伝いいただき、ありがとうございました。同大学の東野 祐太氏には、東海村での実験において DeeMe に多大なる貢献をしていただいたことに感謝の念を抱いております。KEK の山崎高幸氏には、MLF での実験において大変お世話になりました。茨城県での私の指導教官のような立場で、Redpitaya や直交ロボットに関するシステム構築を手伝っていただきました。山崎氏の助力なしではプロファイル測定装置は完成していなかったと思います。

本学高エネルギー物理学研究室の後輩であり、DeeMe 実験の一員でもある金子 聡氏、田川 椋平氏には東海村で長く時間をともに過ごしました。2022 年 1 月の H-Line コミッシュニングから始まり、2023 年 3 月までの DeeMe ビームタイムの期間、同期がいない私にとって心細かった東海村での生活に色を添えてくれました。お二人が DeeMe の後輩で本当に良かったと心から思っています。同じく、DeeMe の先輩の植松 泰智氏には、まだ右も左も分からずに参加した 2022 年 7 月の KURNS ビームタイムにて DeeMe の DAQ システムの使い方や、ガスシステムの運用方法など実験に関する様々なことを教わりました。あのとき教えていただいたノウハウが、修士二年の今の時期まで役立てられています。

本学高エネルギー物理学研究室の先輩の本條 貴司氏、後輩の川村 悠馬氏は、所属する実験グループは違えど研究室で顔を合わせる事が多く、休憩がてらの他愛のない会話をする事が研究室に行くことのひとつの楽しみでした。同期の山本 達也氏は、唯一の同期ということもあり心の拠り所となる存在でした。就職活動や研究活動などの大学院生としての不安要素をともに分かち合い、情報を共有することで孤独を感じずに修士の 2 年間で過ごすことができました。

最後に、大学院生の期間のみならず、これまでの私の人生を支えてくださった家族に心から感謝申し上げます。

参考文献

- [1] 青木正治, 「J-PARC RCS からのパルス陽子ビームを活用したミュオン・電子転換過程探索実験 (DeeMe)」, 高エネルギーニューズ Volume31 Number3, pp.228-237, (2012)
- [2] Gianluca Cavot, "Searching for the $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ decay with MEG and MEG-II", arXiv:1407.8327 (2014)
- [3] U.Bellgardt et al. (SINDRUM collaboration), "Search for the decay $\mu^+ \rightarrow e^+ e^+ e^-$ ", Nucl.Phys. B299, 1 (1988)
- [4] W. Betrl et al. (SINDRUM collaboration), "A Search for muon to electron conversion in muonic gold", Euro. Phys, Vol. 31No. C47, pp. 337-346 (2006)
- [5] C. Dohmen et al. (SINDRUM collaboration), "Test of lepton-avour conservation in $\mu - e$ conversion on titanium", Phys. Lett. B317, 631 (1933)
- [6] K. Hayasaka, "Tau lepton physics at Belle", Nucl. Phys. B299, 1 (1988)
- [7] P. Abreu et al. (DELPHI Collaboration) Z. Phys. C 73, 243 (1997)
- [8] D. Ambrose et al. (BNL E871 Collaboration), "New Limit on Muon and Electron Lepton Number Violation from $K_L^0 \rightarrow \mu^{pm} e^{mp}$ Decay", Phys. Rev. Lett. 81, 5734 (1988)
- [9] CLARK, Allan Geoffrey, et al. (CDF Collaboration) "Search for the Decays $B_S^0 \rightarrow e^+ \mu^-$ and $B_S^0 \rightarrow e^+ e^-$ in CDF RunII" Phys. Rev. Lett. 102.201801 (2010)
- [10] A. Czarnecki, X.G. Tormo, W.J. Marciano, "Muon decay in orbit spectra for $\mu^- - e$ conversion experiments", Hyperfine Interact.210, 19-23 (2012)
- [11] 清水宏祐, 「ミュオン粒子・電子転換過程探索実験 DeeMe におけるアフタープロトン背景事象および単一事象感度の評価」, 大阪市立大学理学研究科高エネルギー物理学研究室 修士論文 (2015)
- [12] 「J-PARC 大強度陽子加速器施設」
<https://j-parc/ja/jparc.html>
- [13] 青木正治, 「RCS からのパルス陽子ビームを活用したミュオン電子転換過程の探索実験」, ミュオン共同利用 S1/S2 型実験課題平成 28 年度研究計画書
- [14] 「Geant4」
<https://geant4.web.cern.ch/>
- [15] 「G4beamline」
<http://www.muonsinternal.com/muons3/G4beamline>
- [16] E. Fermi and E. Teller, "The Capture of Negative Mesotrons in Matter", Phys.Rev. 72, 399 (1947)
- [17] 「環境・エネルギーシステム材料研究機構 — 教育・研究 — センター等 — 国立大学法人 室蘭工業大学」
https://www.muroran-it.ac.jp/academic/research/ed_re/oasis.html
- [18] Y.Nakatsugawa, "Search for muon to electron conversion at J-PARC MLF:Recent status on DeeMe", PoS NUFACT2014 (2015) 093

- [19] 「g-2 - Experimental Particle Physics, Kyushu University」
<http://epp.phys.kyushu-u.ac.jp/index.php?g-2>
- [20] 「Laboratory for Particle Properties」
<http://phi.phys.nagoya-u.ac.jp/research/museum.html>
- [21] 小向倅平, 「パルスビームラインのためのビームプロファイルスキャン装置の開発」, 大阪市立大学理学研究科高エネルギー物理学研究室 修士論文 (2020)