

2023年度 修士論文

次世代 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊探索実験のための
光子ペアスペクトロメーターの開発

(Development of Photon Pair Spectrometer
for Next Generation $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ Search Experiment)

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻
素粒子物理国際研究センター 森研究室

横田 凜太郎

2024年1月

概要

標準理論を超えた物理のプローブとなりうる $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊探索実験として MEG II 実験が進行中である。MEG II 実験では、目標探索感度として 2026 年末までに崩壊分岐比 6×10^{-14} を目指しているが、この感度では大統一理論が予言する領域を完全に探索できない。そこで、 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の発見をより確実なものにするため、また、MEG II で発見した場合は $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の詳細測定を行うための将来実験を計画している。将来実験では数年後予定されている μ^+ ビームの強度増加計画に合わせて、MEG II 実験とは全く異なる設計コンセプトを持ち、探索感度 1.5×10^{-15} を目指す。 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 探索では背景ガンマ線と背景陽電子による偶発的背景事象の削減が感度向上のために重要であり、ガンマ線検出器の分解能向上が非常に重要である。そこで、新たなガンマ線検出器として将来実験でアクティブコンバーター型光子ペアスペクトロメーターを導入することを検討している。ペアスペクトロメーターとは、コンバーター層でガンマ線を対生成させて生成された電子陽電子の軌道を背後の飛跡検出器によって測定することでガンマ線のエネルギー、位置、角度を測定する検出器である。ここで、コンバーター層をアクティブ素材にすることで、コンバーター層でのエネルギー測定を可能にする。これにより、従来型のペアスペクトロメーターのコンバーター層で電子陽電子対が落とすエネルギーを測定できないという欠点を解決でき、分解能の大幅な改善が見込まれる。

アクティブコンバーターの性能評価試験として、2023 年 12 月に高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) 測定器開発テストビームラインにて電子ビームを使用したビームテストを行った。ガンマ線のタイミングも測定できるアクティブコンバーターとして検討しているシンチレーター、Lutetium-yttrium oxyorthosilicate (LYSO) 結晶と光検出器である Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) を組み合わせたカウンターに対して、異なるサイズの LYSO や異なる MPPC ピッチなど様々な測定状況で時間分解能とエネルギー分解能を測定し、分解能の位置依存性や角度依存性についても調べた。その結果として、 $3 \times 10 \times 50 \text{ mm}^3$ の LYSO に対して、両端に $50 \mu\text{m}$ のピクセルサイズ MPPC 3 つを直列接続させた時、約 26 ps の時間分解能を達成することがわかった。また、全ての LYSO サイズでエネルギー分解能においても簡単な解析で約 100 keV という要求に対して十分な分解能が得られていることがわかった。また、具体的なアクティブコンバーターの設計としては、高いガンマ線検出効率と将来実験の要求性能を満たす時間分解能とエネルギー分解能を合わせ持つのは、 $3 \times 5 \times 50 \text{ mm}^3$ の LYSO 側面に $50 \mu\text{m}$ ピッチの MPPC (S14160-3050HS) を 3 チャンネル直列接続した時であることがわかった。これにより、将来実験ではエネルギーだけでなくタイミング測定器としてもアクティブコンバーターが導入可能な検出器となりうることを示した。

目次

第 1 章	序論	7
第 2 章	$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 探索実験の物理、現状	9
2.1	標準理論	9
2.2	$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の探索	10
2.2.1	信号事象	10
2.2.2	背景事象	11
第 3 章	MEG II 実験と将来実験	12
3.1	MEG II 実験	12
3.2	将来実験	13
3.2.1	各検出器	14
3.2.2	ペアスペクトロメーターの特徴	14
第 4 章	アクティブコンバーター型のペアスペクトロメーター	15
4.1	背景、MEGA 実験	15
4.2	動作原理	17
4.3	アクティブコンバーターに要求される性能	17
4.4	本研究のモチベーション	18
第 5 章	シミュレーションによるアクティブコンバーターの設計	19
5.1	シミュレーションのセットアップ	19
5.2	先行研究による材質、厚みの検討	20
5.3	セグメントサイズの検討	23
5.3.1	ターン粒子によるパイルアップ	23
5.3.2	パイルアップイベントの削減	27
5.4	斜方入射の影響	29
5.4.1	ガンマ線入射角度に応じたコンバーターの厚み	29
5.4.2	ガンマ線入射角度ごとの検出効率比較	30
5.4.3	まとめ	32
第 6 章	電子ビームによる LYSO の性能試験	33
6.1	測定環境	33
6.1.1	PF-AR テストビームライン	33
6.1.2	入射電子のエネルギーごとのデポジットエネルギーの比較	35
6.1.3	セットアップ	37

6.2	測定方法	42
6.2.1	取得データセット	42
6.2.2	検出器の運転パラメータの最適化	43
6.2.3	タイミング取得	47
6.2.4	Time walk の補正	49
6.3	測定結果	50
6.3.1	最適な MPPC ピッチ、MPPC 接続方法	50
6.3.2	光量、エネルギー分解能	52
6.3.3	時間分解能の位置依存性	56
6.3.4	時間分解能の角度依存性	62
6.3.5	まとめ	64
第 7 章	結論	65
7.1	結論	65
7.2	今後の展望	65
	参考文献	67

目次

2.1	標準理論の素粒子 [1]	9
2.2	$\mu \rightarrow e\gamma, \mu N \rightarrow eN, \mu \rightarrow 3e$ の各現象に対する上限値の推移 [7]	10
2.3	$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ の物理的特徴	11
3.1	MEGII 実験、検出器全体図 [7]	12
3.2	将来実験の概念図 [8]。図中には、座標の定義として $(z, \theta, \phi) = (\text{ビーム軸}, \text{仰角}, \text{方位角})$ を記した。	13
4.1	MEGA 実験のレイアウト [10]	15
4.2	MEGA 実験で使用されたペアスペクトロメーター [10]	16
4.3	コンバーターに使用された鉛の異なる厚さ (100, 560 [μm]) ごとのコンバーター通過後のコンバージョンペアのエネルギー分布。出力はモンテカルロシミュレーションを使用。	16
4.4	アクティブコンバーター型ペアスペクトロメーター	17
4.5	先行実験と新実験の比較 [8]	18
5.1	パイルアップしなかったイベントに対して、ガンマ線のエネルギーを再構成した時のエネルギー分布。縦軸は対数スケール。	21
5.2	異なる材質ごとのコンバージョン確率と検出効率の比較	22
5.3	シミュレーションにおけるコンバージョンペアの運動	23
5.4	セグメンテーションを導入した際のレイアウト (L. Gerritzen より) 青線がビーム軸を示す	24
5.5	ターン粒子が一周しコンバージョン点付近へ再入射した位置の入射角度別分布。入射角はビーム軸からの角度。原点はガンマ線入射点。	25
5.6	ターン粒子が半周しコンバージョン点付近へ再入射した位置の入射角度別分布。入射角はビーム軸からの角度。原点はガンマ線入射点。	26
5.7	異なるセグメントサイズに対するガンマ線 90 度入射の結果	27
5.8	3 mm 厚のコンバーター、異なるセグメントサイズに対するガンマ線 90 度入射の時の検出効率 (入射ガンマ線数に対する) 比較	28
5.9	シミュレーションによるガンマ線斜方入射の様子を 2 方向から見た図。 θ はビーム軸からの入射角度を表す。	29
5.10	入射角度に対する検出効率の比較 入射角度はビーム軸からの角度を示し、90 度が垂直入射である。	30
5.11	31
5.12	入射角度ごとにコンバージョンしたイベント (青)、図 5.11 のエネルギーを再構成できたイベント (赤)、パイルアップイベント (緑) について、ガンマ線入射数に対する割合をまとめて表示したグラフ	32

6.1	ビームサイズ、水平軸 (x) と垂直軸 (y)[13]	33
6.2	beam momentum vs rate[13]	34
6.3	参考：鉛に入射した時の電子陽電子の放射長あたり相互作用ごとの阻止能の比 [17]	35
6.4	電子のデポジットエネルギーと阻止能 (平均)	36
6.5	LSYO と TC のセットアップ	37
6.6	セットアップの写真	38
6.7	配線の概要図	38
6.8	シンチレーターである LYSO とその読み出し MPPC 基板	39
6.9	基板と組み合わせた際の LYSO と TC の図	40
6.10	ピクセルサイズ (ピクセルピッチ) の異なる MPPC の特性 [19]	41
6.11	時間差によって算出した時間分解能を V_{over} でスキャンしたプロット ($50\mu\text{m}$ 、直列)。赤点：下流 LYSO、青点：上流 LYSO。ここでの各 ch の V_{BR} は約 38 V。また V_R は推奨 V_{OVER} を表す。	44
6.12	時間差によって算出した時間分解能の異なる WDB ゲインでスキャンしたプロット。赤点：下流 LYSO、青点：上流 LYSO。	45
6.13	LED 光を 4 つの直列接続 MPPC で検出した際の異なる PZC 値ごとの波形、PZC は 300Ω から 1000Ω までの値で変化させている。抵抗値が大きくなるほど波形は鋭くシェーピングされる	46
6.14	$3\times 5\times 50$, FTRL の LYSO に対して $50\mu\text{m}$ ピッチの MPPC を 3 つ独立接続させ、PZC のパラメータを変えて時間分解能をスキャンしたプロット。横軸の PZC parameter は可変抵抗の大きさに対応したパラメータで、7 が抵抗値最大に設定されており最も波形が鋭くシェーピングされる	46
6.15	LE の取得	47
6.16	式 6.2 に従ってプロットした LYSO 両端の時間差分布	47
6.17	LE スキャンの例。 $3\times 5\times 50$ FTRL の LYSO を $50\mu\text{m}$ ピッチ独立 3ch で読み出した時の波形に対する、時間分解能の LE threshold 依存性	48
6.18	左：独立接続した 3 つの MPPC の波形。右：直列接続した 3 つの MPPC の波形。右図 2,3 段目の空のチャンネルに見えているノイズは、信号チャンネルの信号が WDB 内のチャンネル間のクロストークによって他の空チャンネルに干渉したものと考えられる。	51
6.19	$50\mu\text{m}$ ピッチの MPPC を独立接続してダークカウントを測定した時の電荷分布。縦軸は対数スケールである。	53
6.20	$3\times 5\times 50$ (FTRL) サイズに $50\mu\text{m}$ ピッチの MPPC を独立接続した時の電荷分布	54
6.21	$3\times 5\times 50$ (FTRL) の LYSO に対して行った時間差の時間分解能の両端を含む位置スキャン	56
6.22	$3\times 5\times 100$ の LYSO に対して行った時間差の時間分解能の上流と下流側の位置スキャン	57
6.23	$3\times 5\times 50$ (FTRL) の LYSO に対して行った時間差の時間分解能の位置スキャン	58
6.24	$3\times 5\times 50$ (NORMAL) の LYSO に対して行った時間差の時間分解能の位置スキャン	58
6.25	$1.5\times 5\times 50$ の LYSO に対して行った時間差の時間分解能の位置スキャン	59
6.26	$3\times 10\times 50$ の LYSO に対して行った時間差の時間分解能の位置スキャン	59
6.27	$3\times 5\times 100$ の LYSO に対して行った時間差の時間分解能の位置スキャン	60
6.28	$3\times 10\times 50$ (FTRL) の LYSO、直列接続に対して行った時間差の時間分解能の両端を含む位置スキャン	60
6.29	$1.5\times 5\times 50$ の LYSO に対して行った時間差の時間分解能の角度スキャン。青点：上流。赤点：下流	62
6.30	$3\times 10\times 50$ の LYSO に対して行った時間差の時間分解能の角度スキャン。青点：上流。赤点：下流	63
6.31	シンチレーション光の広がりの違い。垂直入射と 30 度入射。	63

表目次

3.1	検出器の特性	14
5.1	真空の組成と状態	19
5.2	各物質の元素構成	21
6.1	DAQ リスト (照射位置は長手方向の中心を 0 mm として、長さの 1 割の距離で 11 点スキャン)	42
6.2	基板の種類ごとの V_{OVER} スキャン	44
6.3	MPPC ピッチ、接続方法ごとの時間分解能 (10 mm 幅) [ps]	50
6.4	MPPC ピッチ、接続方法ごとの時間分解能 (5 mm 幅) [ps]	50
6.5	LYSO サイズごとの光量	54
6.6	DAQ リスト (位置スキャン)。(照射位置は長手方向の中心を 0 mm として、長さの 1 割の距離 で 11 点スキャン)	56
6.7	LYSO の時間分解能 (中心照射)	61

第 1 章

序論

標準理論は現在、素粒子物理学の幅広い領域を記述することができる。しかしながら、標準理論は理論面からも実験面からも完全な理論とは言えず、標準理論を超えた物理を記述するさまざまな新理論が提唱されている。標準理論で記述できない現象の一つに”荷電レプトンフレーバーの破れ” (Charged Lepton Flavor Violation: CLFV) がある。この現象は標準理論のレプトンフレーバー保存則によって禁止されている。しかし、新理論の一つである超対称性大統一理論によれば、CLFV 現象の一つである $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊は実験によって探索可能な分岐比を持つことが期待されている。そのため $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊実験である MEG II 実験がスイスの Paul Scherrer Institut (PSI) にて進行中である。MEG II 実験では、目標探索感度として 2025 年までに崩壊分岐比 6×10^{-14} を目指しているがこの感度では大統一理論が予言する領域を完全に探索できない。そこで、 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の発見をより確実なものにするため、また、MEG II で発見した場合は $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の詳細測定を行うための将来実験を計画している。将来実験では数年後予定されている μ^+ ビームの強度増加計画に合わせて、MEG II 実験とは全く異なる設計コンセプトを持ち、探索感度 1.5×10^{-15} オーダーを目指す。

10^{-15} オーダーまで探索感度を向上させるために、背景ガンマ線と背景陽電子による偶発的背景事象の削減が重要である。そのため、高い分解能での測定が偶発的背景事象の削減に必要である。そこで、高感度な新しいガンマ線検出器として将来実験でアクティブコンバーター型光子ペアスペクトロメーターを導入することを検討している。ペアスペクトロメーターはガンマ線の飛来方向を測定できるため、MEG II のカロリメーターでは難しかったガンマ線の放出点再構成を可能にし、さらなる背景事象の削減が期待できる。将来実験で要求される光子ペアスペクトロメーターの測定分解能は (エネルギー 0.4 %, 時間 30 ps, 位置 0.2 mm) である。一方、陽電子測定器では、ミューオンビームの増強により高いレート耐性を要求されるため、MEG II 実験で使用しているガス検出器ではなくシリコン検出器の採用を検討している [9]。

本論文で述べる研究は、将来実験での導入を検討しているアクティブコンバーター型ペアスペクトロメーターのアクティブコンバーターについて将来実験で要求される性能を達成するために、以下の項目を目的として行なったものである。第一に、コンバーターはどのような材質やサイズが適切であるか、どのようにコンバーター内シンチレーション光を検出するべきか、また実際の性能が異なる位置や角度の条件にどのように依存しているか評価すること。第二に、これらの条件での性能を実際に測定、評価した上で、最適なアクティブコンバーターの設計を検討することである。本研究の意義としては、 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊探索のための将来実験に導入が検討されているアクティブコンバーターは開発の初期段階にあるので、今回の研究の結果は今後の将来実験用ガンマ線検出器の開発にとって重要な知見や情報につながる。

本論文は以下のように構成されている。第 2 章では $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の基礎的な物理と探索実験の現状について説明する。第 3 章では現在行われている MEG II 実験の簡単な紹介と将来実験の背景や各検出器の概要について述べる。第 4 章ではアクティブコンバーター型ペアスペクトロメーターの動作原理や要求性能について説明する。第 5 章ではシミュレーションを用いてアクティブコンバーターに適した物質の候補やそのサイズを評価した。第 6 章ではアクティブコンバーターの性能評価のための実機テストとして KEK にて行ったビームテストの結果及び考察について述べる。最後に第 7 章では今回の研究によって得られた結果から、次世代 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊探索実験のための光子ペアスペクトロメーターの開発に対する結論を述べる。

第 2 章

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索実験の物理、現状

2.1 標準理論

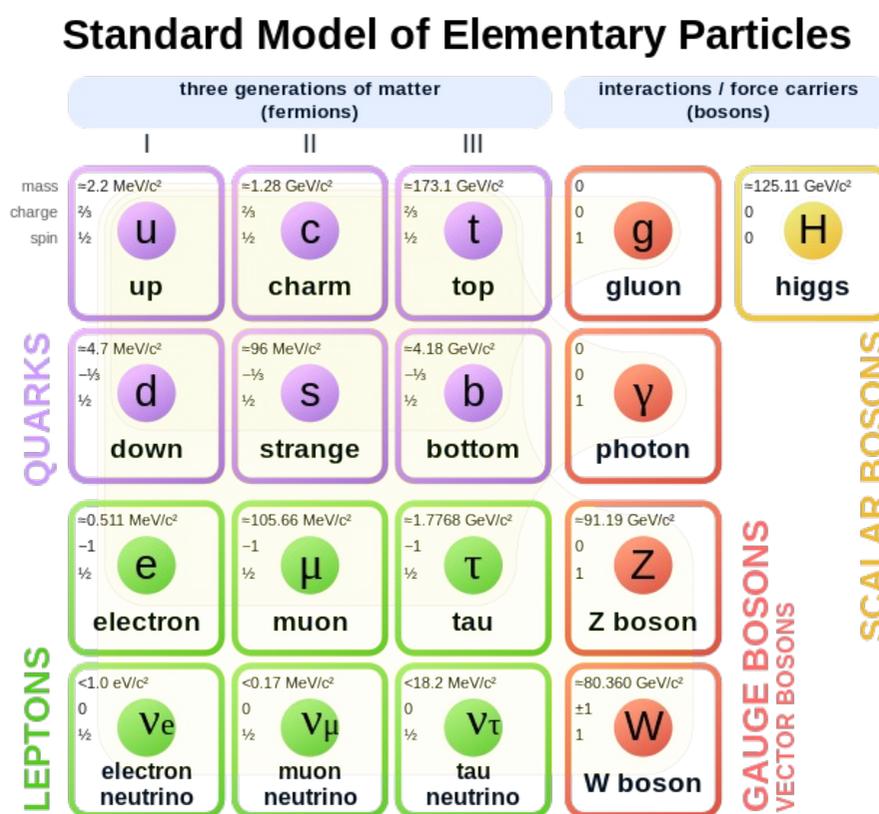
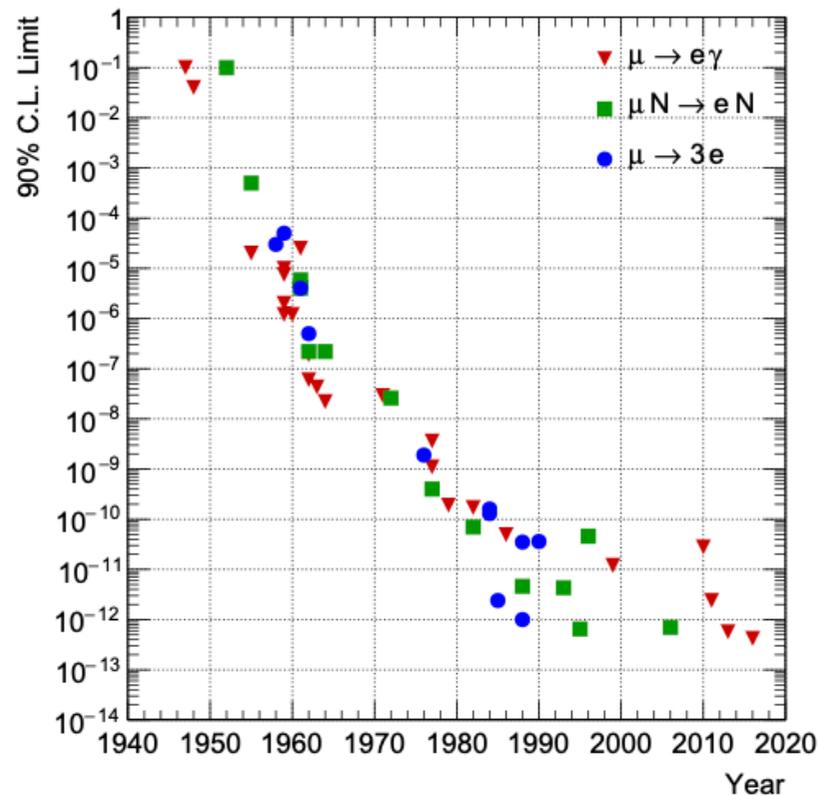


図 2.1: 標準理論の素粒子 [1]

標準理論はこれまで、図 2.1 に示した素粒子の存在を代表として、素粒子物理に関するさまざまな結果を予言してきた。その一方で、ニュートリノ振動の発見 [3] やミューオン歳差運動の標準模型の予測からのずれ [4] など、いくつかの実験結果との矛盾を示している。また、重力理論との両立や強い相互作用と電弱相互作用の統一など、理論的な側面からもいくつかの問題がある。

そこで、これらの問題を解決するために超弦理論や超対称性大統一理論等の新たな物理モデルが提唱されている。現在これらの新物理の検証のために MEG II 実験を始めとした、標準理論を超えた実験が盛んに行われている。

図 2.2: $\mu \rightarrow e\gamma, \mu N \rightarrow eN, \mu \rightarrow 3e$ の各現象に対する上限値の推移 [7]

2.2 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の探索

2.2.1 信号事象

標準理論で禁止されている現象の一つに CLFV 現象がある。CLFV 現象とは、荷電レプトンのフレーバー（電子、ミューオン、タウ）が保存されないという物理学的な現象を指す。新理論の一つである超対称性大統一理論によれば、実験で探索可能な頻度で CLFV が起こり得ることがわかっており、この現象の探索が新理論の強いプローブとなる。

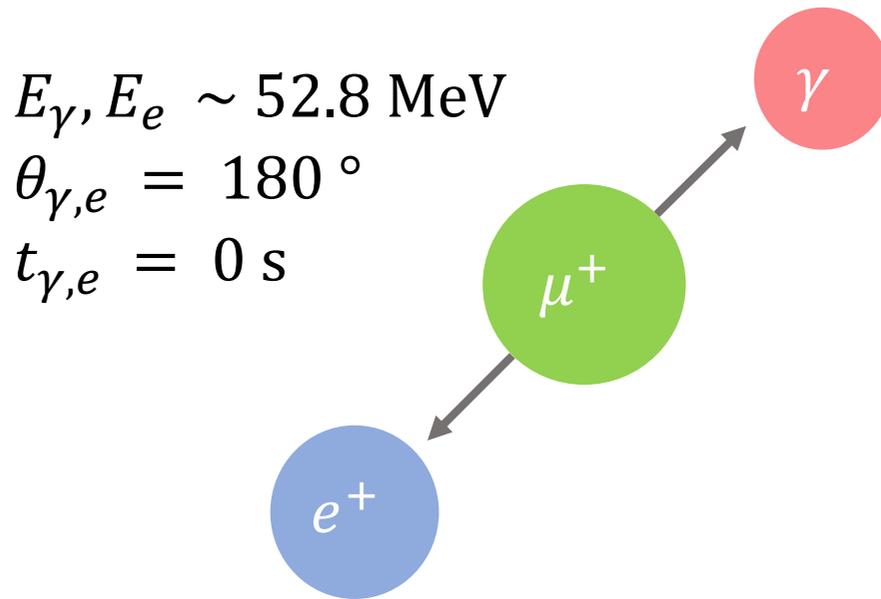
CLFV 現象の一例として $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊がある。ニュートリノ振動を取り入れた標準理論のモデルによれば、その崩壊分岐比は式 2.1 で表される。（ α ：微細構造定数、 U_{ij} ：ニュートリノ混合の PMNS 行列、 δm_{ij} ：ニュートリノの世代間質量差、 m_W ：W ボソン質量）

$$\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) = \frac{3\alpha}{32\pi} \left| \sum_{j=2,3} U_{\mu j}^* U_{ej} \frac{\delta m_{j1}^2}{M_W^2} \right| \sim 10^{-54} \quad (2.1)$$

ここで表された分岐比は図 2.2 を見て分かるように現在の $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 探索実験の感度よりも遥かに低い。しかしながら、新物理の理論として提唱されている超対称性大統一理論によると $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ の分岐比は 10^{-11} から 10^{-14} と実験による探索が可能な感度が届きうる範囲となる [2]。

二体崩壊である $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊は運動学的に以下の特徴を持つ (図 2.3)。

- γ と e^+ は同時に放出される。
- γ と e^+ は反対方向に放出される。
- γ と e^+ は同じ単一のエネルギーを持ち、その値はミューオンの質量の半分である約 52.8 MeV。

図 2.3: $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ の物理的特徴

2.2.2 背景事象

$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊探索では、探索の妨げとなる物理的背景事象と偶発的背景事象の二つの背景事象が存在する。物理的背景事象とは、ミューオンの輻射崩壊と呼ばれ $\mu^+ \rightarrow e^+\nu_e\bar{\nu}_\mu\gamma$ のように崩壊する反応である。 $\nu_e\bar{\nu}_\mu$ のエネルギーが小さければ輻射崩壊は $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊と運動学的に似た反応となり、 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊に対する背景事象になりうる。ただし、物理的背景事象は十分な分解能で測定すれば、 $\nu_e\bar{\nu}_\mu$ が放出されているため、陽電子とガンマ線の放出角度とエネルギーが信号事象と異なるので区別することができる。一方、偶発的背景事象とは、ミューオンが Michel 崩壊と呼ばれる $\mu^+ \rightarrow e^+\nu_e\bar{\nu}_\mu$ 由来の陽電子と、Michel 崩壊由来の陽電子の対生成もしくは輻射崩壊 $\mu^+ \rightarrow e^+\nu_\mu\bar{\nu}_e\gamma$ 由来の光子とが反対方向同エネルギー同時刻で検出され、まるで信号事象のように観測されてしまう事象である。偶発的背景事象の数は以下の式で表される。 $(R_\mu$: ミューオンビームレート、 ΔE_γ : γ 線エネルギー分解能、 ΔP_e : 陽電子運動量分解能、 $\Delta\Theta_{e\gamma}$: ガンマ線と陽電子の放出角のなす角の分解能、 $\Delta t_{e\gamma}$: ガンマ線と陽電子の時間差分解能、 T : 測定時間)

$$N_{BG} \propto R_\mu^2 \times \Delta E_\gamma^2 \times \Delta P_e \times \Delta\Theta_{e\gamma}^2 \times \Delta t_{e\gamma} \times T \quad (2.2)$$

偶発的背景事象は $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊探索において主要な背景事象であり、背景ガンマ線は信号エネルギー付近で急激に減少するため、ガンマ線検出器のエネルギー分解能向上が非常に重要である。そのため上式より背景事象の頻度はガンマ線のエネルギー分解能の 2 乗に比例しており、偶発的背景事象削減のためにはガンマ線検出器のエネルギー分解能向上が非常に重要であることがわかる。また式からは、ガンマ線の時間分解能も背景事象の抑制に重要であることがわかる。

第 3 章

MEG II 実験と将来実験

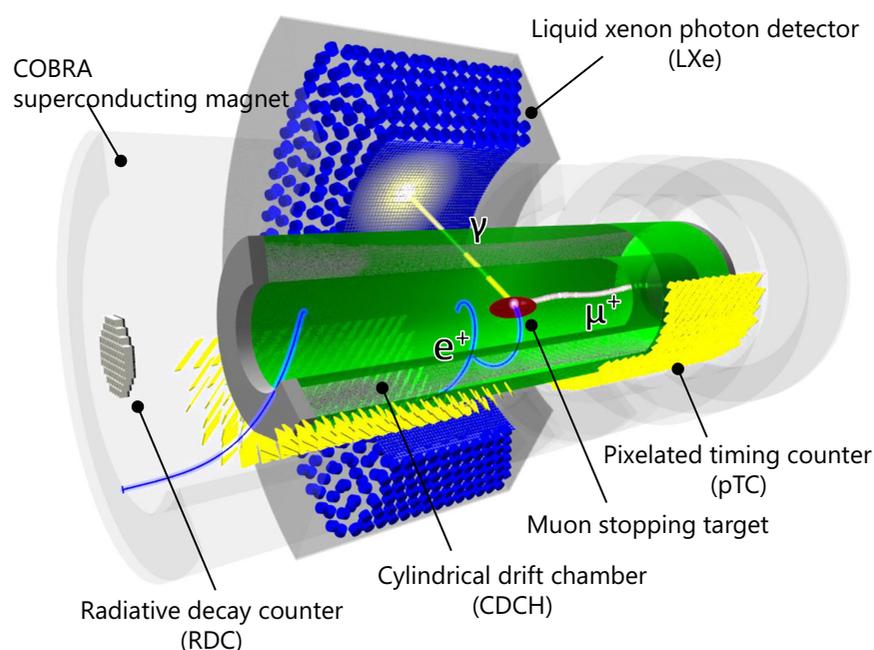


図 3.1: MEGII 実験、検出器全体図 [7]

3.1 MEG II 実験

$\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊探索のための MEG II 実験が行われ、実験の結果として既に 3.1×10^{-13} という感度の上限値が 2023 年に得られている [5]。2026 年末までに 6×10^{-14} の探索感度を目指して実験が継続中である。図 3.1[7] に MEG II 実験で用いた検出器の全体図を示す。

MEG II 実験の各要素の簡単な説明を、上の全体概要図に従って下記に述べる。

- ミューオンビーム

崩壊する粒子であるミューオンは、PSI の $\pi E5$ ビームラインにおけるビームレート 7×10^7 Hz の大強度直流 μ^+ ビームより供給される。

- ミューオンターゲット

ミューオンを入射させて静止させるターゲットはポリビニルトルエンでできた薄い膜であり、ビーム軸に対して 15 度傾けて設置されている。これには主に二つの理由があり、ビームに対する実効的厚みを大きくし静止効率を伸ばすためとビーム方向とは垂直な検出器方向の厚みを抑えることで信号事象由来の陽電子の多重散乱の影響を小さくするためである。

- COBRA 電磁石

Constant Bending Radius (COBRA) 電磁石は磁場に特殊な勾配をつけることのできる超伝導磁石である。勾配磁場によって生成された陽電子の軌跡の曲率は放出角度にはほぼ依存せず、運動量に依存し信号事象エネルギー付近の陽電子を選択することができる。

- ドリフトチェンバー

Cylindrical Drift Chamber (CDCH) は、封入された混合ガスと読み出しのためのワイヤーで構成されるガス検出器であり、信号事象由来の陽電子の飛跡を測定する。また CDCH には、背景事象の Michel 崩壊由来の陽電子が大量に飛来する環境でも信号事象を高精度で測定できる。

- 陽電子タイミングカウンター

Pixelated Timing Counter (pTC) は信号事象由来陽電子のタイミング測定検出器で、シンチレーターと Silicon Photomultiplier (SiPM) で構成されたカウンターが複数ビーム軸に沿って並び、陽電子は複数のカウンターを通ることで良い時間分解能を持つとともに、背景陽電子による大量の背景事象を処理できる。

- 輻射崩壊同定用検出器 (Radiative Decay Counter, RDC)

RDC は $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 探索の妨げとなる偶発的背景事象の削減のために設置された検出器である。RDC は輻射崩壊由来の陽電子を特定することで背景ガンマ線を同定することで探索感度の向上につながる。

- 液体キセノン検出器

液体キセノン検出器 (Liquid Xenon Detector, LXe) は信号事象由来ガンマ線の時間、位置、エネルギーを測定する検出器である。ガンマ線が液体キセノンに入射し放出したシンチレーション光を複数の SiPM と Photomultiplier Tube (PMT) で読み出すことでガンマ線を再構成する。

3.2 将来実験

MEG II 実験の目標分岐比 6×10^{-14} では大統一理論が予言する領域を完全に排除することができない。また、MEG II 実験で $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊が発見されたとしても、崩壊分岐比や崩壊角度分布のさらなる精密測定により大統一理論のモデルの選別が次の課題として挙がるため 10^{-15} オーダーの感度での探索実験の重要性は大きい。

そういった中で PSI のミューオンビーム強度を現行の約 100 倍へ大幅に強化する HIMB 計画 (High intensity muon beam 計画) が進行中であり、これに合わせて次世代の $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 探索実験として全く新しいコンセプトを持った実験が計画中である [8]。

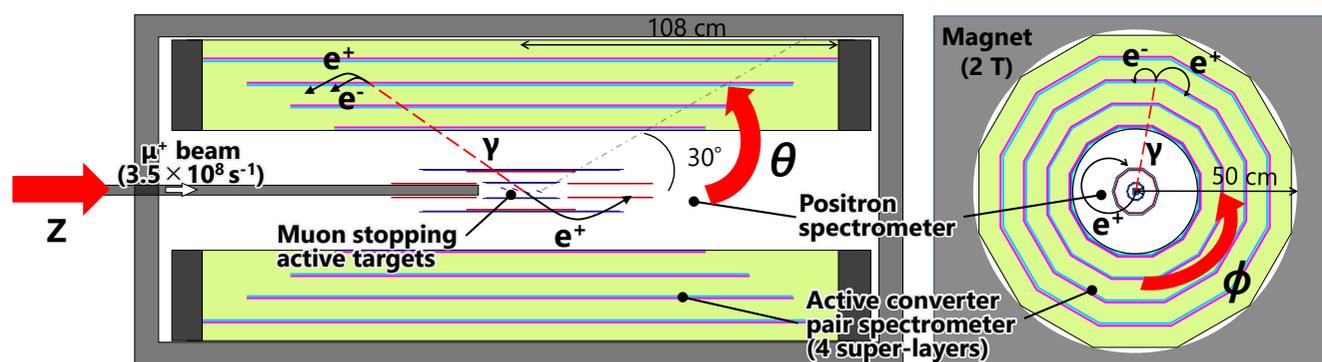


図 3.2: 将来実験の概念図 [8]。図中には、座標の定義として $(z, \theta, \phi) = (\text{ビーム軸, 仰角, 方位角})$ を記した。

3.2.1 各検出器

現在検討されている、MEG II 実験から刷新した将来実験の要素を以下に述べる。また、将来実験の概念図を図 3.2 に示す。

- ガンマ線検出器

将来実験ではガンマ線検出器としてペアスペクトロメーターを採用することを検討している。ペアスペクトロメーターとはガンマ線をコンバーター層と呼ばれる部分で電子と陽電子にコンバージョンさせ、磁場によって回転運動するコンバージョンペアの運動量をコンバーター層の背後に設置されたトラックャーにて検出するガンマ線検出器である。またペアスペクトロメーターが持つ新しいコンセプトであるアクティブコンバーターの詳しい説明については 4 章で議論する。

- 陽電子検出器

ミュオンビームの増強により、より高いレート耐性を要求されるため、MEG II 実験で使用しているガス検出器ではなくシリコン検出器を採用する。PSI で実施予定の $\mu^+ \rightarrow e^+e^+e^-$ を探索している Mu3e 実験の超薄型シリコンセンサー (HV-MAPS) 技術をベースとして開発を行う [9]。

3.2.2 ペアスペクトロメーターの特徴

将来実験ではガンマ線検出器を MEG II 実験の液体キセノン検出器からペアスペクトロメーターへ変更する。そこでこの二つの検出器の特徴の違いを以下に記述する。

表 3.1: 検出器の特性

検出器	利点	欠点
キセノン検出器	<ul style="list-style-type: none"> ● 高検出効率 	<ul style="list-style-type: none"> ● MEG II でエネルギー、時間、位置の分解能を改善することは難しい ● レート耐性
ペアスペクトロメーター	<ul style="list-style-type: none"> ● コンバーター層でのエネルギー損失を測定可能な場合、高感度なエネルギー分解能 ● 高感度な位置の分解能 ● ガンマ線の入射方向を測定可能 ● 高レート耐性 	<ul style="list-style-type: none"> ● 低検出効率 ● コンバーター層でのエネルギー損失

特筆する点としてペアスペクトロメーターは高レート耐性という特徴を持っており、ビームレートが大幅に上昇する将来実験において、ガンマ線検出器として有効な選択肢である。また、ペアスペクトロメーターが持つ欠点について、コンバーター層でのエネルギー損失は 4 章で議論するアクティブコンバーターによって抑制される。低検出効率に関しては、コンバーター層の厚みを増やすか、ビームレートの増加によって補強する (その分陽電子検出器では高いレート耐性が求められる) ことによって解決する。

第 4 章

アクティブコンバーター型のペアスペクトロメーター

本章では将来実験にてガンマ線検出器として採用を検討しているアクティブコンバーター型のペアスペクトロメーターについて紹介する。

4.1 背景、MEGA 実験

まず、アクティブコンバーター型のペアスペクトロメーターを提案した背景について説明する。 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 崩壊探索実験は MEG 実験以前にも行われており、The Los Alamos Meson Physics Facility (LAMPF) のミューオンビームを使用した MEGA 実験がその例である (図 4.1)。

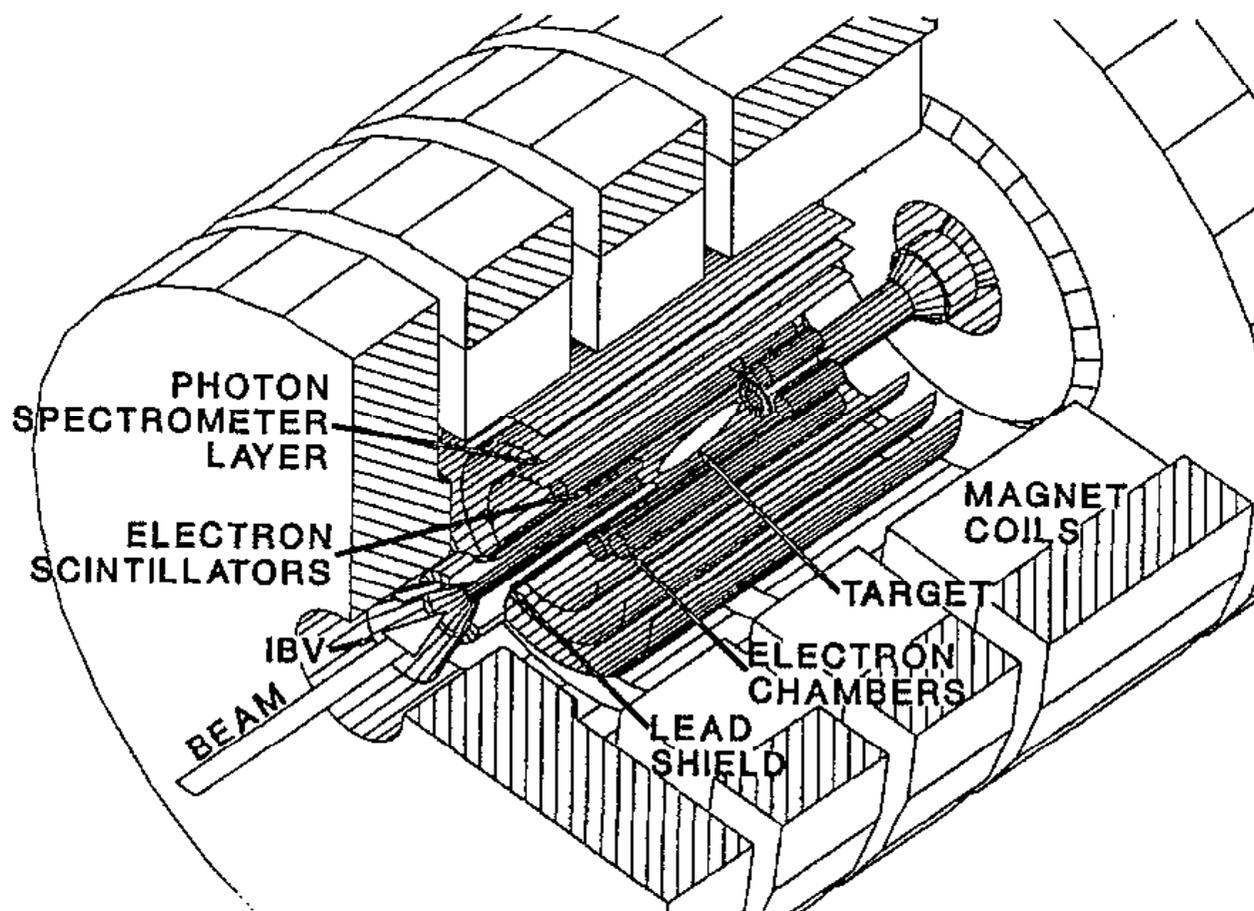


図 4.1: MEGA 実験のレイアウト [10]

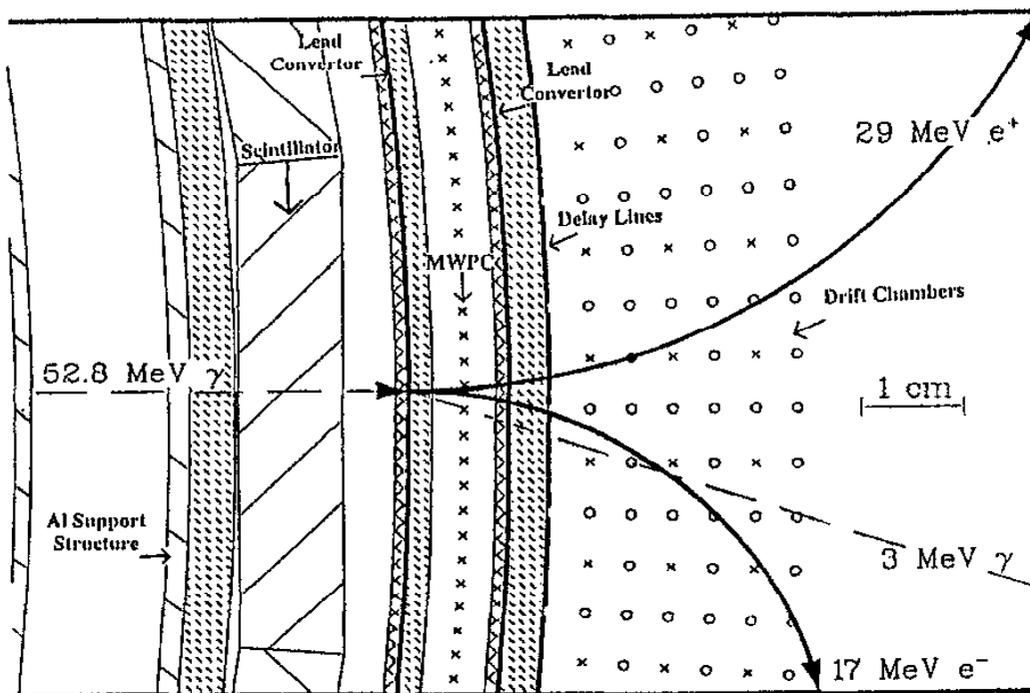


図 4.2: MEGA 実験で使用されたペアスペクトロメーター [10]

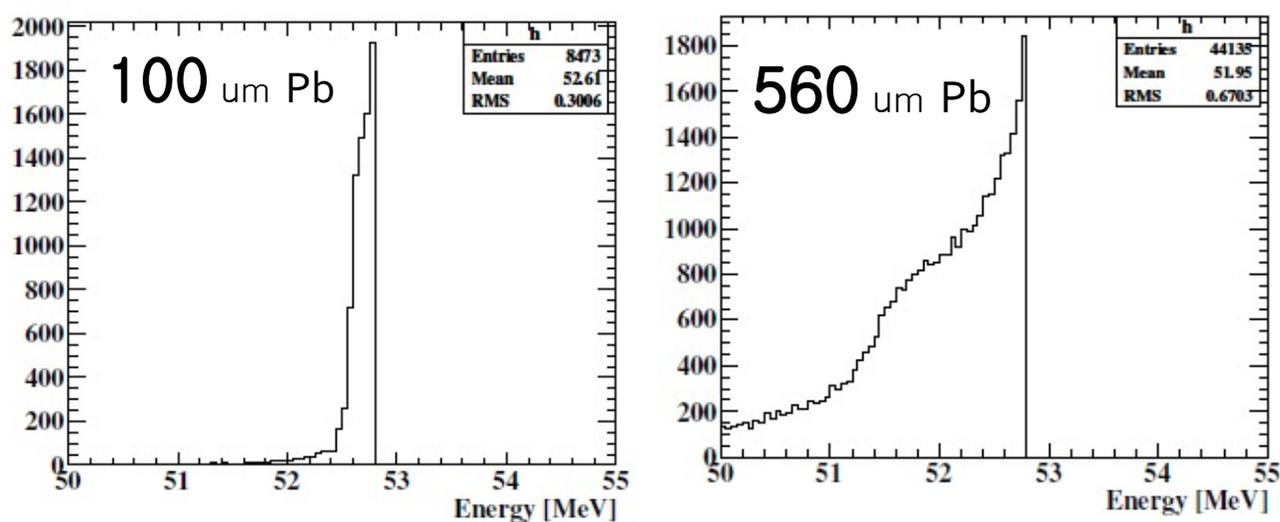


図 4.3: コンバーターに使用された鉛の異なる厚さ (100, 560 [μm]) ごとのコンバーター通過後のコンバージョンペアのエネルギー分布。出力はモンテカルロシミュレーションを使用。

MEGA 実験では将来実験と同じく、ガンマ線検出器として図 4.2 のようなペアスペクトロメーターを採用していた。また、コンバージョンペアのトラッカーにはドリフトチェンバーが使用されていた。さらにコンバーターとして使用していたのは薄い鉛であり、鉛は Z が大きいのでコンバージョン確率は高いが図 4.3 に示すように、その分エネルギー損失も大きく、制動放射によるエネルギー損失は信号事象エネルギー 52.8 MeV 付近において約 1MeV ほどであった。コンバーター層でのエネルギー損失によってエネルギー分解能は 3-5% と制限がかけられていた。[10]

この問題を解決するためにコンバーターをアクティブ素材とする方針で開発を進めている。本検出器は、アクティブなコンバーター層を有しており上述したコンバーター層でのエネルギー損失を測定することが可能であり、高精細なエネルギー測定を実現する。次項では本検出器についての詳細な説明を述べる。

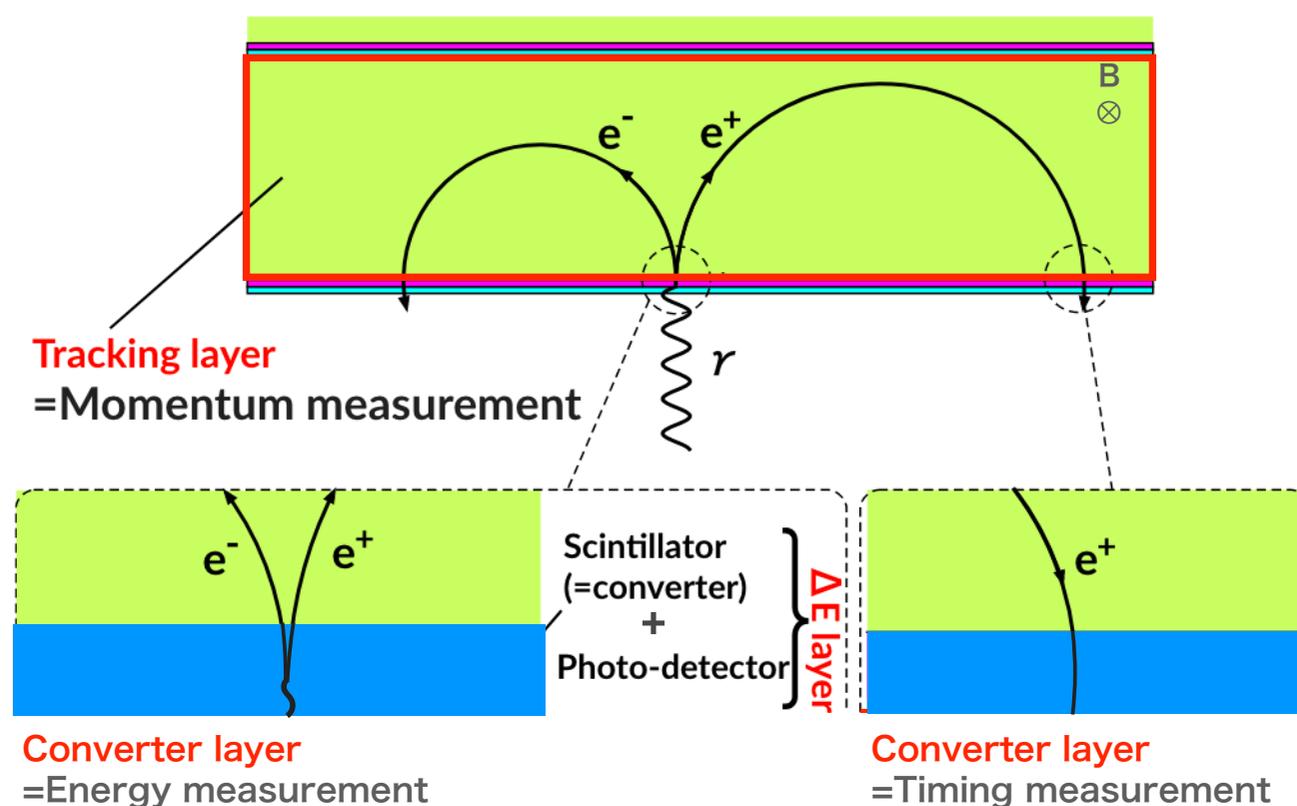


図 4.4: アクティブコンバーター型ペアスペクトロメーター

4.2 動作原理

アクティブコンバーターは、一般的なガンマ線スペクトロメーターで課題であったコンバーターでのエネルギー損失をコンバーター自身で測定するという画期的なアイデアで非常に良いエネルギー分解能を実現することができる。図 4.4 にアクティブコンバーター型のペアスペクトロメーターの動作原理を表した。

アクティブコンバーター型ペアスペクトロメーターでは、ガンマ線をまずコンバーター層で電子と陽電子にコンバージョンさせ、トラッカー層では磁場によって回転軌道を描くペアの飛跡を測定することで運動量の測定をおこなう。トラッカーから得られるエネルギーとアクティブコンバーターで測定したペアのエネルギーによってエネルギーの高精度な再構成が可能となる。さらにガンマ線のタイミング測定では、時間応答の速い材質をコンバーターに用いることで、アクティブコンバーターをガンマ線のタイミング測定器としても使用することを検討している。

4.3 アクティブコンバーターに要求される性能

将来実験の目標とする 10^{-15} オーダーの感度での探索を実現するためには、ガンマ線ペアスペクトロメーターには測定分解能 (エネルギー 0.4 %, 時間 30 ps, 位置 0.2 mm) が要求される。これは、図 4.5[8] に表されるように、MEG II 実験で得られた結果と増加されるビームレートを考慮して目標感度の達成に必要な性能として算出されたものである。ここでアクティブコンバーター自身に要求される時間分解能については、対生成される電子陽電子二つの粒子がコンバーターに再入射する際、独立に測定するので一つの荷電粒子に対して $30 \times \sqrt{2}$ で約 40 ps の性能が求められる。

測定器性能	MEG	MEG II	新実験
ビームレート [μ/s]	3×10^7	7×10^7	3.5×10^8 (HiMB計画)
ガンマ線エネルギー[%]	1.7-2.4	1	0.4
ガンマ線位置[mrad]	10	4.6	0.7
ガンマ線時間[ps]	65	50	30
ガンマ線検出効率	0.63	0.69	0.63
陽電子エネルギー[keV]	380	100	150
陽電子角度[mrad]	9	6	6
陽電子時間[ps]	70	40	30
陽電子検出効率	0.3	0.7	0.7
崩壊分岐比感度*	5.3×10^{-13}	5×10^{-14}	1.5×10^{-15}

* 崩壊分岐比感度 小 = 新物理検証能力 大

$\times \frac{1}{10}$
 $\times \frac{1}{30}$

図 4.5: 先行実験と新実験の比較 [8]

4.4 本研究のモチベーション

先行研究では、アクティブコンバーターの材質候補として検討している Lutetium–yttrium oxyorthosilicate (LYSO) 結晶に対する時間分解能及び光量を評価した [11](LYSO をテストした理由として、5 章で述べるが検出効率の観点ではいくつかの候補の物質の中で LYSO がもっとも適した物質という結果がシミュレーションで得られているため)。結果として光量は十分な統計量が得られるということと、時間分解能については 40 から 50 ps ほどの性能を持つことが示された。しかしながら、先行研究は LYSO の初めてのテストでありシンプルな測定状況でその性能を評価していたため、最も良い時間分解能を得るための検出方法や、測定環境を十分に評価できていなかった。そこで、本研究では 5 章でシミュレーションによってコンバージョンペアの回転運動を考慮したコンバーターの適切なサイズの検討を初めて行なった結果について報告する。6 章では、実機テストによる様々な測定条件、測定環境下でのアクティブコンバーターの時間分解能、エネルギー分解能の評価を行った。

第 5 章

シミュレーションによるアクティブコンバーターの設計

アクティブコンバータに適した材質やジオメトリを、主に検出効率、パイルアップ確率を指標として、シミュレーションによって評価した。

5.1 シミュレーションのセットアップ

シミュレーションには CERN によって開発されたソフトウェアである Geant4 [12] を用いた。Geant4 はモンテカルロ法を用いて物質中における粒子の飛跡をシミュレートすることができる。シミュレーションによって生成したジオメトリは図 5.3 に表され、軸の定義は、 (x, y, z) =(コンバーター面上でビーム軸に垂直な方向, コンバーター面に垂直な方向, ビーム軸方向) である。シミュレーションでは、設置したコンバーター層に 52.8 MeV の信号エネルギーを持ったガンマ線を入射させる。コンバーターに対するガンマ線の入射位置はイベントごとにランダムに割り振られている。また、電子陽電子対の運動傾向を比較するために、ガンマ線の入射角度を変更したシミュレーションも行った。また、シミュレーションで使用した物理リストは、標準の電磁気 (EM) パッケージの 1 つである "Livermore" であり、その中で使用した物理モデルを以下に示す。

- Gamma Conversion: G4LivermoreGammaConversionModel
- Gamma PhotoAbsorp: G4LivermorePhotoElectricModel
- Gamma Compton: G4LivermoreComptonModel
- Electron scatter: G4eMultipleScattering
- Electron ionization: G4LivermoreIonisationModel
- Electron brems: G4LivermoreBremsstrahlungModel
- Electron annihi (e+): G4eplusAnnihilation

さらにシミュレーションにおける真空の組成と状態を表 5.1 に表す。

表 5.1: 真空の組成と状態

元素	元素記号	原子番号	状態	密度	温度	圧力
Hydrogen	H	1	Gas	$1.7 \times 10^{-21} \text{ kg/m}^3$	0.1 K	$1.0 \times 10^{-19} \text{ Pa}$

5.2 先行研究による材質、厚みの検討

先行研究でコンバーターに適した材質と厚みを検討するため、まずコンバーターの材質の検討としてガンマ線の対生成確率を指標に 4 つの候補を図 5.2a のように比較した [11]。参考として、4 つの候補物質の元素組成を表 5.2 に示した。

また検出効率 [%] の定義及び性質について以下にまとめた。ここで定義した記号は以降の文中においても使用する。

$$\text{検出効率} \stackrel{\text{def}}{=} \frac{N_{\text{signal}}}{N_{\text{gamma}}} \quad (5.1)$$

- N_{gamma} は、入射ガンマ線の数。
- 信号事象数 N_{signal} の定義は、 $52.8 - \delta E \text{ MeV} \leq E_{\text{rec}, \gamma} \leq 52.8 + \delta E \text{ MeV}$ となったイベントの数。またここで、
 - $E_{\text{rec}, \gamma} = E_{\text{de}} + E_{e^-} + E_{e^+}$ であり、各記号の定義は以下に示す。
 - $E_{\text{rec}, \gamma}$: 再構成したガンマ線のエネルギー
 - E_{de} : コンバーター内でコンバージョンしてコンバーターを抜けるまでにコンバージョンペアが落としたデポジットエネルギー
 - E_{e^-}, E_{e^+} : コンバーター通過後の電子、陽電子の静止質量を含むエネルギー
 - δE : コンバーターのエネルギー分解能、ここでは $\delta E = 100 \text{ keV}$ 。
- コンバーター通過後のトラッカーによる E_{e^-}, E_{e^+} の測定精度は非常に高いという仮定の元、無視している。

検出効率に影響を与えるイベント、つまり有感領域 $52.8 - \delta E \text{ MeV} \leq E_{\text{rec}, \gamma} \leq 52.8 + \delta E \text{ MeV}$ のエネルギー領域外のイベントの原因とは主に、制動放射によってコンバーター内でエネルギーを損失するものと、コンバージョンペア由来の二次粒子によってコンバーターで余分なデポジットエネルギーが生じるものである。5.4.2 項で後述する、コンバージョンペアのどちらかがコンバーター内で停止し、エネルギーを再構成できなかったイベントは N_{signal} に含まれない。また、上記の定義に従って 5.3.1 項で後述するパイルアップを起さなかったイベントに対して、ガンマ線のエネルギーを再構成した時のエネルギー分布を図 5.1 に示す。

図 5.2b は材質ごとの厚みに対する検出効率 (図中では"efficiency"と記す) のプロットである。図 5.2a からわかるように、コンバージョン確率は厚みが増すほど確率は上がるが、図 5.2b に示すように厚みが増えるほど検出効率は頭打ちになる。これは厚みが増すほどコンバージョン確率が増す一方で、制動放射によって指定したエネルギー領域に持ち出されるエネルギーが増えるためである。これらの寄与により、コンバーターには適した厚みが存在し、検出効率が最も高い材質は LYSO であり、最も検出効率が高い厚みは 3 mm で、その時の検出効率は 3.0% であった。

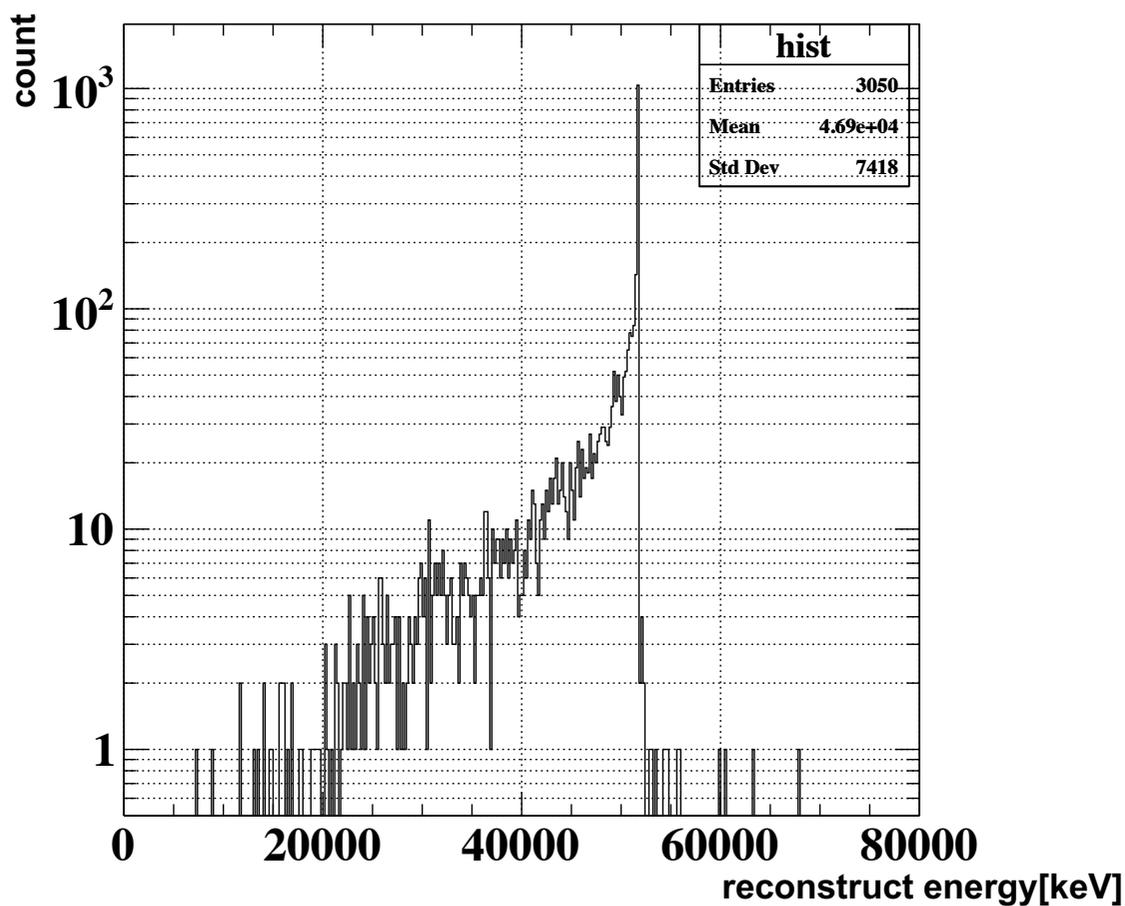


図 5.1: パイルアップしなかったイベントに対して、ガンマ線のエネルギーを再構成した時のエネルギー分布。縦軸は対数スケール。

(a) LYSO の元素構成

元素	元素記号	原子番号	質量比
Oxygen	O	8	50
Silicon	Si	14	10
Yttrium	Y	39	2
Lutetium	Lu	71	18

(b) Si の元素構成

元素	元素記号	原子番号	質量比
Silicon	Si	14	1

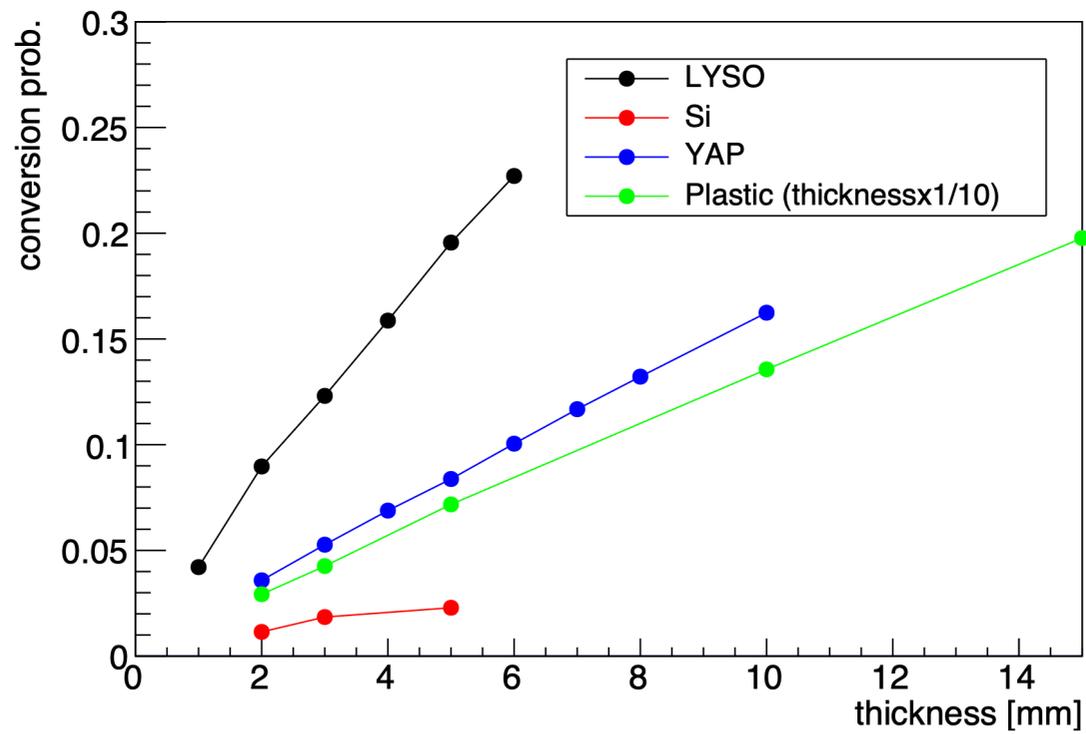
(c) YAP の元素構成

元素	元素記号	原子番号	質量比
Yttrium	Y	39	2
Silicon	Si	14	1
Oxygen	O	8	5

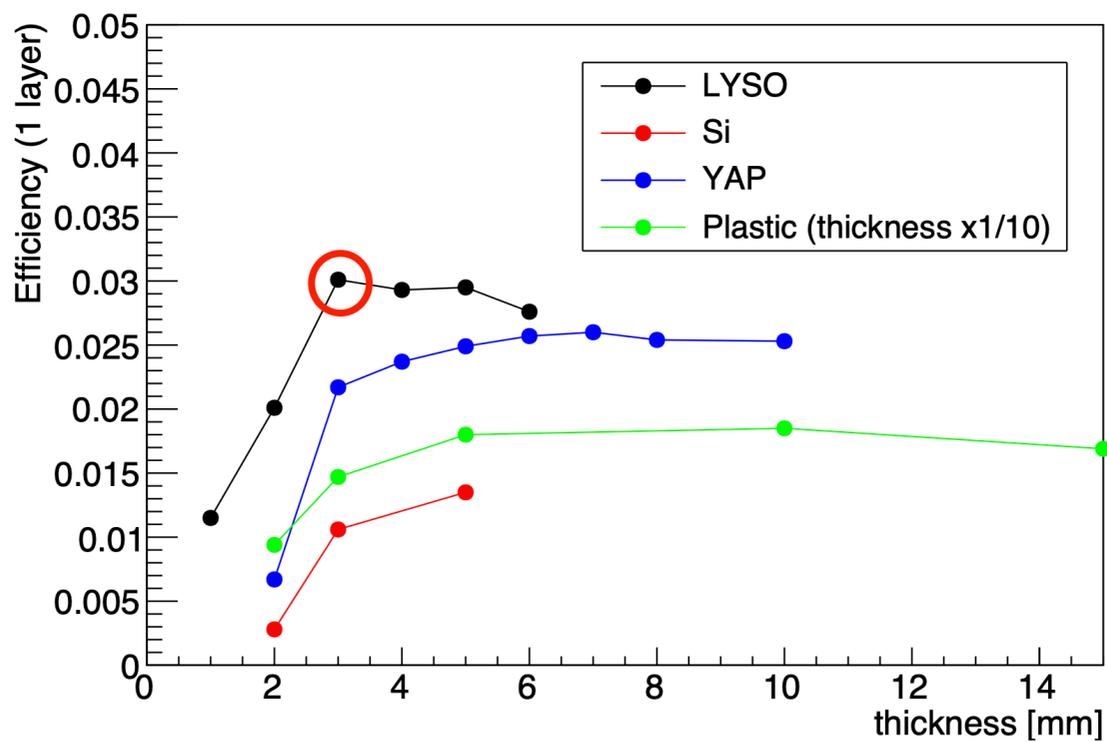
(d) Plastic の元素構成

元素	元素記号	原子番号	質量比
Carbon	C	6	10
Hydrogen	H	1	9

表 5.2: 各物質の元素構成

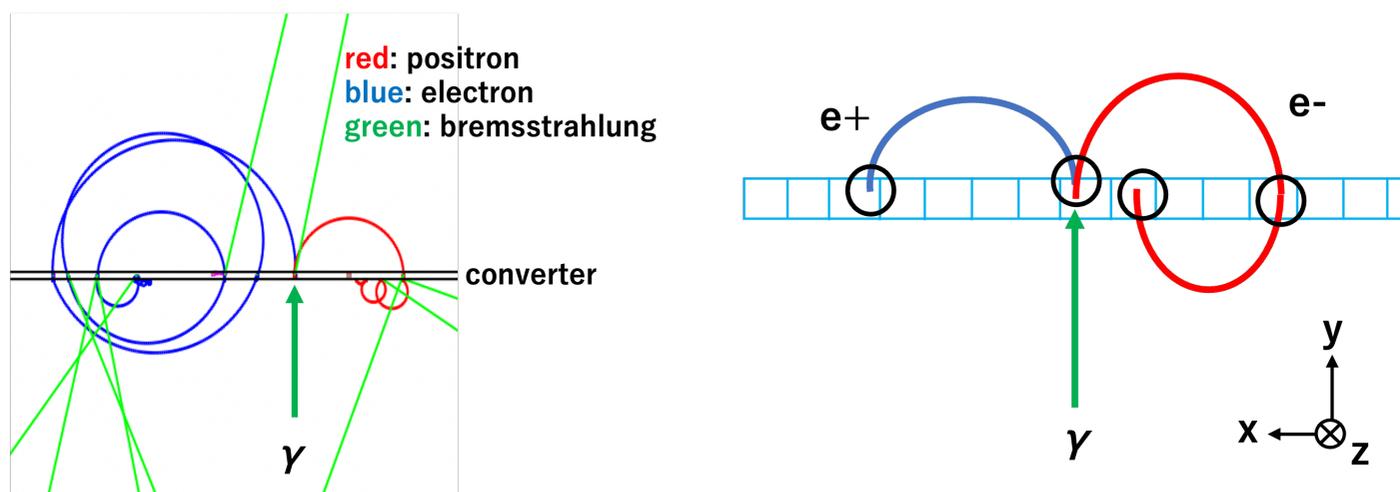


(a) 異なる材質ごとの厚みに対するコンバージョン確率



(b) 異なる材質ごとの厚みに対する検出効率

図 5.2: 異なる材質ごとのコンバージョン確率と検出効率の比較



(a) シミュレーションによる粒子軌道の描画

(b) ターンによる余分なデポジットエネルギー。
座標軸 (x, y, z) は (コンバーター面上でビーム軸に垂直な方向, コンバーター面に垂直な方向, ビーム軸方向) を表す。

図 5.3: シミュレーションにおけるコンバージョンペアの運動

5.3 セグメントサイズの検討

アクティブコンバーターはビーム軸を囲う円筒状に設置される。しかしながら後述するターン粒子によるパイルアップの影響を考慮すると、コンバーター層を細かいセグメント状に分けて敷き詰める必要がある (図 5.4)。加えて、セグメントサイズによって使用するチャンネルの数が大きく変わり、コンバーターの数が増えるほどコンバーター同士の間隙によるデッドスペースが増えるため、コスト面でもガンマ線検出のカバレッジに関しても異なるセグメントサイズに対してその性能を調べる必要がある

本節では、ターン粒子のパイルアップを考慮した場合、セグメントのサイズごとの検出効率にどう影響するか調べた結果について述べる。

5.3.1 ターン粒子によるパイルアップ

まずターン粒子のパイルアップについて説明する。5.2 節で述べたが、ガンマ線のエネルギーはコンバーターで測定する E_{de} に加えて、コンバージョンペアの回転軌道を元にトラックで測定する E_{e-} , E_{e+} を足し合わせて再構成する。検出器全体にはビーム軸方向に 2 T の磁場が場所に依らずかかっており、荷電粒子はビーム軸方向を軸とした回転運動を行う (図 5.3a、ここではこれをターン粒子と呼んでいる)。その影響によってコンバーター内でコンバージョンした電子陽電子は再びコンバーターに入射し、エネルギーを落としてしまう (図 5.3b。コンバーターが一枚の層だった場合、コンバージョン時のデポジットエネルギー E_{de} とターンして再び入射した粒子によるエネルギーデポジット (以下、 E_{turn} とする) を区別することができない。

この余分な E_{turn} と測定したい E_{de} を区別するために導入するのが、コンバーター層のセグメンテーションである。これによりターンして再び入射する粒子が異なるセグメントに入射する場合は、再入射時の E_{turn} は除去することができ、アクティブコンバーターとして正確な E_{de} を測定することができる。しかしながら、セグメンテーションを行ったとしても完全に余分な E_{turn} を除去できるわけではなく、ターン粒子が最初にコンバージョンしたセグメントと同一のセグメントに再入射してしまうことがある (これをターンによるパイルアップと呼ぶ)。そういったパイルアップイベントの割合は、セグメントのサイズまたは、ターン粒子の運動の傾向に依存する。ガンマ線の入射角度によってターン粒子の回転軌道は変化するため、図 5.5 にこの変化を比較するために

ターン粒子のコンバーター層に再入射した時の位置をガンマ線の入射角度ごとにプロットした。

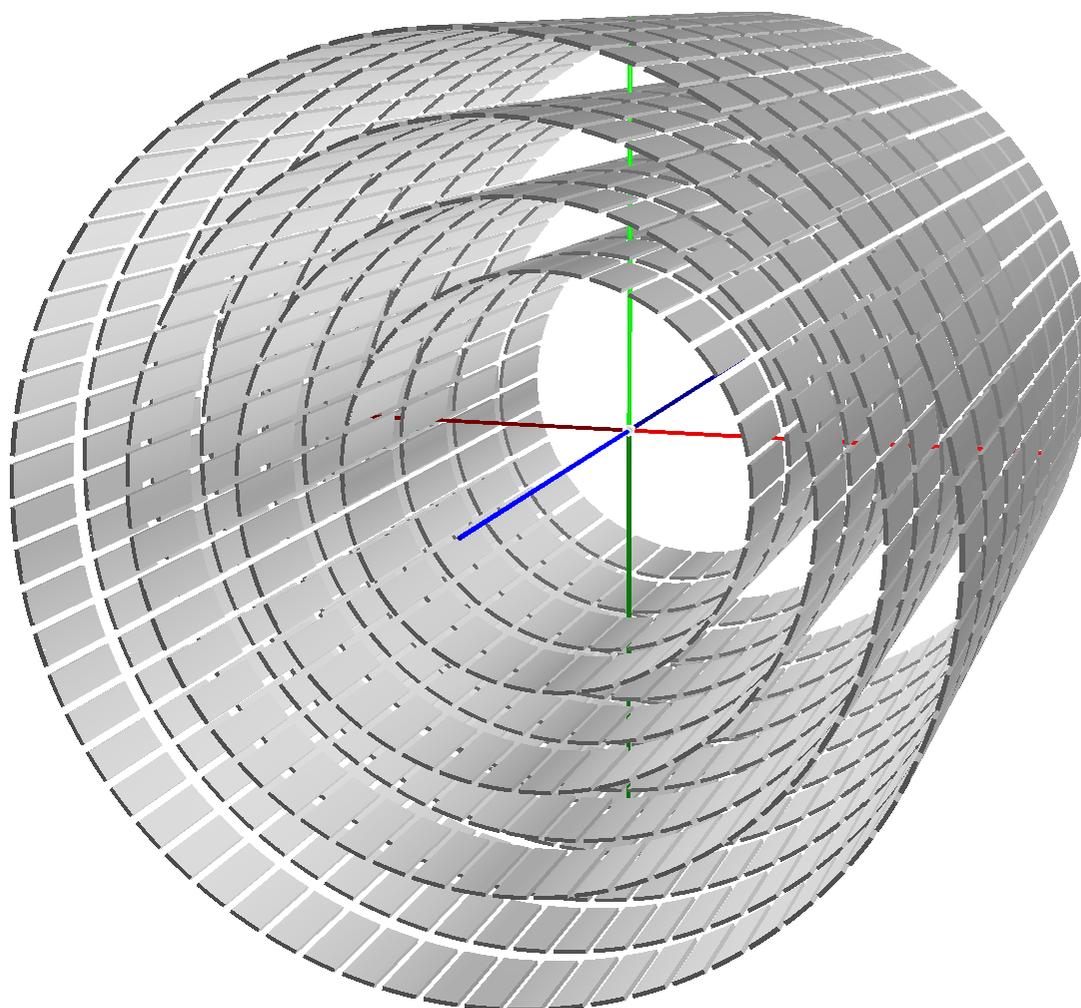


図 5.4: セグメンテーションを導入した際のレイアウト (L. Gerritzen より)
青線がビーム軸を示す

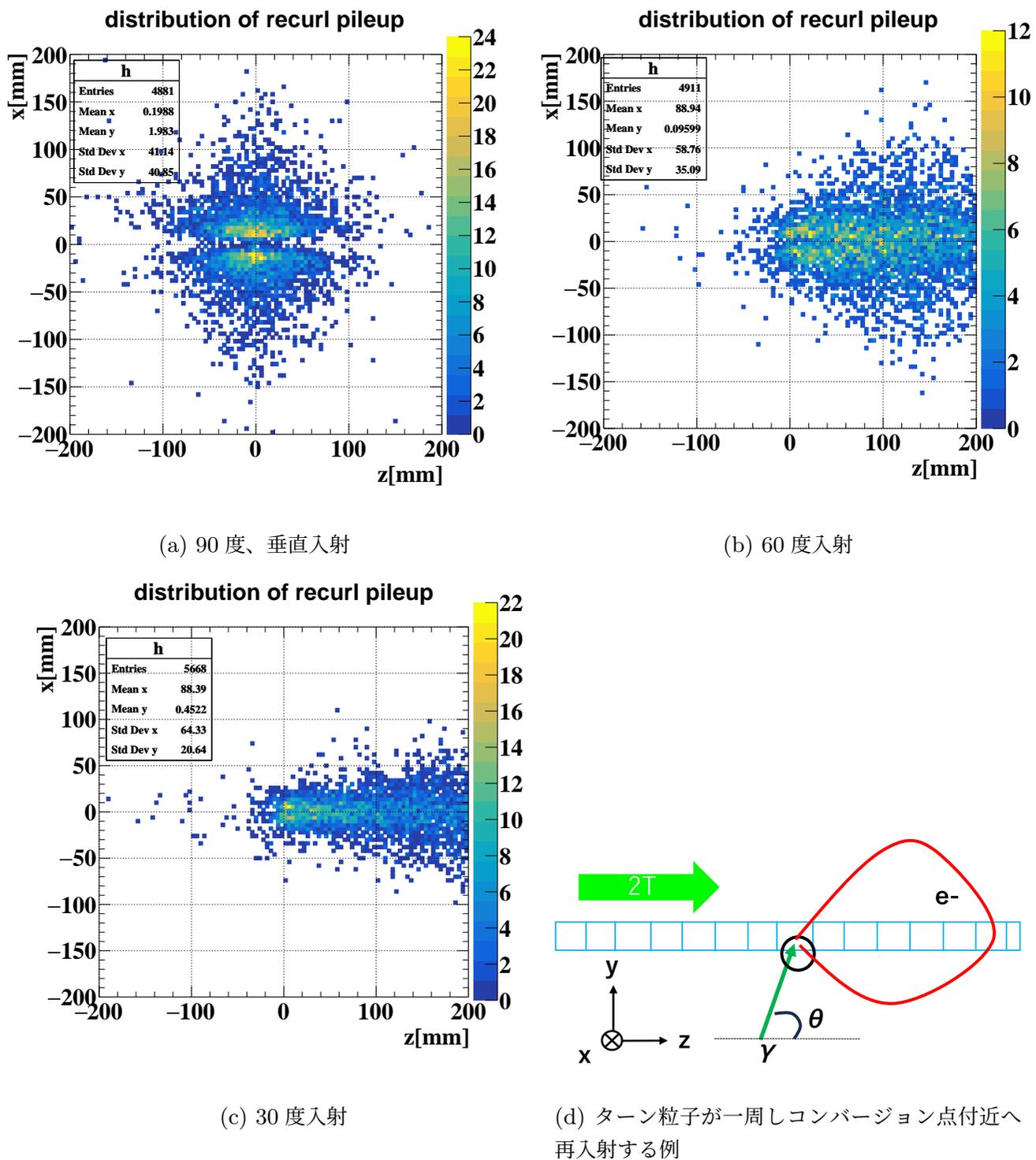


図 5.5: ターン粒子が一周しコンバージョン点付近へ再入射した位置の入射角度別分布。入射角はビーム軸からの角度。原点はガンマ線入射点。

再入射位置の分布

ガンマ線の入射角度によってターン粒子の回転軌道は変化する。この変化を比較するために、図 5.6d に表された黒丸のように、ターン粒子が回転しコンバーター層を突き抜け一周した後、コンバージョン位置付近に再入射した時の位置をガンマ線の入射角度ごとに図 5.5 に示す。また、半周して、コンバージョン位置付近に再入射した時の位置も図 5.6 に示す。ガンマ線の入射角度はミュオンビーム軸からの角度を表し、ビーム軸と平行な時に 0 度、垂直時に 90 度である。図 5.5 を見てわかるように、一周後の再入射位置分布は x 方向に比べて z 方向の方が広がり大きい。これは、原理的にコンバーターに対して垂直方向にコンバージョンした電子陽電子対は、回転運動によりコンバージョン点に戻ってくるが、コンバーター内での多重散乱により少しでも z 軸方向の運動量を持ったイベントはドリフト運動により、再入射位置が z 軸方向に広がるためである。

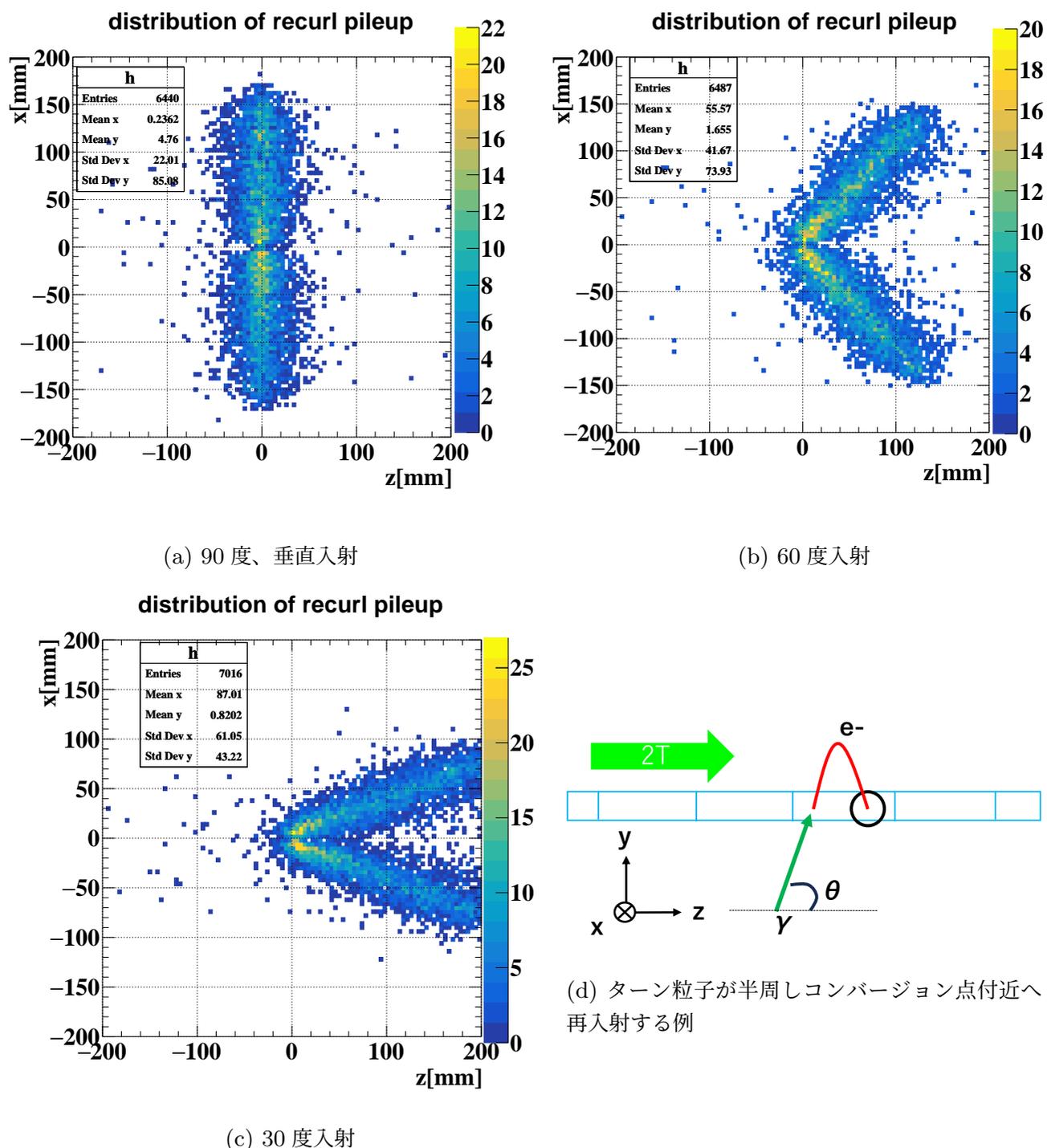
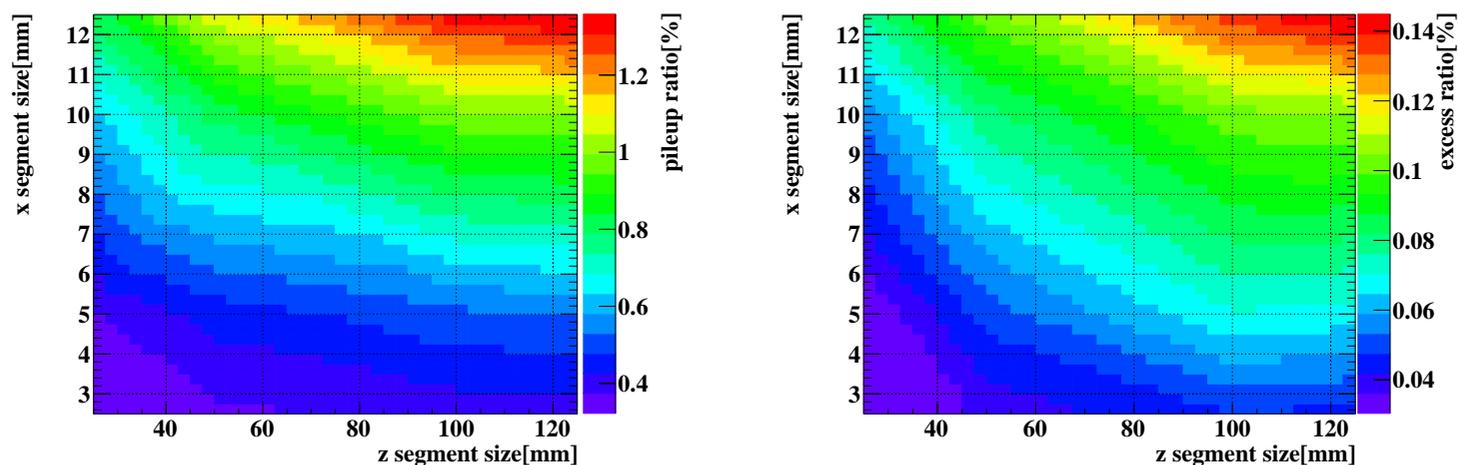


図 5.6: ターン粒子が半周しコンバージョン点付近へ再入射した位置の入射角度別分布。入射角はビーム軸からの角度。原点はガンマ線入射点。

また、図 5.5 と図 5.6 で見られた入射角度ごとの変化としては、入射角度がビーム軸に傾くほどターンしてきた電子と陽電子の一周後の再入射位置分布はビーム軸方向に伸び、 x 方向の分布の広がり小さくなっている。これは、入射角度が小さくなるほど電子陽電子対の z 方向運動量の割合が大きくなり、電子陽電子対はより小さい半径かつ大きな z 方向運動量でドリフト運動を行うためである。

これらの結果により、セグメンテーションを行う際は z 方向に比べて x 方向のセグメントサイズを細かく分けることが効果的なパイルアップ削減につながる事がわかる。また、入射角度が小さい場合は回転半径が小さくなるために細かなセグメンテーションが特に重要となる。



(a) 異なるセグメントサイズに対するガンマ線 90 度入射の時のパイルアップイベントの (入射ガンマ線数に対する) 割合

(b) 異なるセグメントサイズに対するガンマ線 90 度入射の時のパイルアップを起こさずに信号エネルギー超過したイベントの (入射ガンマ線数に対する) 割合

図 5.7: 異なるセグメントサイズに対するガンマ線 90 度入射の結果

5.3.2 パイルアップイベントの削減

トラック層で飛跡を再構成し、同じセグメントに入射したかどうかを特定することで、5.3.1 項で述べたパイルアップイベントは削減できる。そのため、シミュレーションではコンバーター層を分割し、パイルアップイベントを削除した後の検出効率をセグメントサイズごとに比較した。また、5.3.1 項の再入射位置分布の結果から、セグメントの各辺の長さは z 軸方向に対して x 軸方向の長さが短い方がパイルアップを選別しやすいことがわかるので、セグメントの x 方向の長さは、コンバーター層の z 方向に対して細かいスケールでスキャンした。セグメントサイズのセットは $(x, z) = (2.5 \text{ or } 5 \text{ or } 10 \text{ or } 12.5, 25 \text{ or } 50 \text{ or } 100 \text{ or } 125 \text{ mm})$ で、計 16 点のデータから等高線プロットを出力した。

コンバージョンイベントの内、パイルアップイベントが起きた割合を図 5.7a に、パイルアップを起こしていないイベントであるにも関わらず信号エネルギーを超過した割合のセグメントサイズごとのスキャン結果を図 5.7b に示した。

図 5.7a から分かるようにセグメントサイズが大きくなるほどパイルアップイベントの割合は大きくなっている。また、セグメントのサイズの伸びに対する検出効率の低下に関しては、 x 方向のサイズの伸びに比べて z 方向のサイズのほうが低下が緩やかであり、 x 方向のセグメントサイズの最適化が特に重要であることがわかる。

図 5.7b は、ターン粒子由来制動放射の同一セグメントへの再入射など、パイルアップ以外の原因によって余分なデポジットエネルギーを加算してしまい、再構成したガンマ線のエネルギーが信号イベントである 52.8 MeV を超過してしまうイベントの割合を表している。ここでも、セグメントサイズが大きくなるほど超過イベントの割合は大きくなっている。超過イベントは、ガンマ線が持つエネルギーを過大評価したイベントである。そのため、超過イベントが起これやすくなると本来信号エネルギー 52.8 MeV より低いエネルギーを持つ背景ガンマ線が信号エネルギー領域に侵入し、 $\mu^+ \rightarrow e^+ \gamma$ 探索の背景事象につながりやすくなるため、こちらもセグメントの設計において非常に重要な情報である。

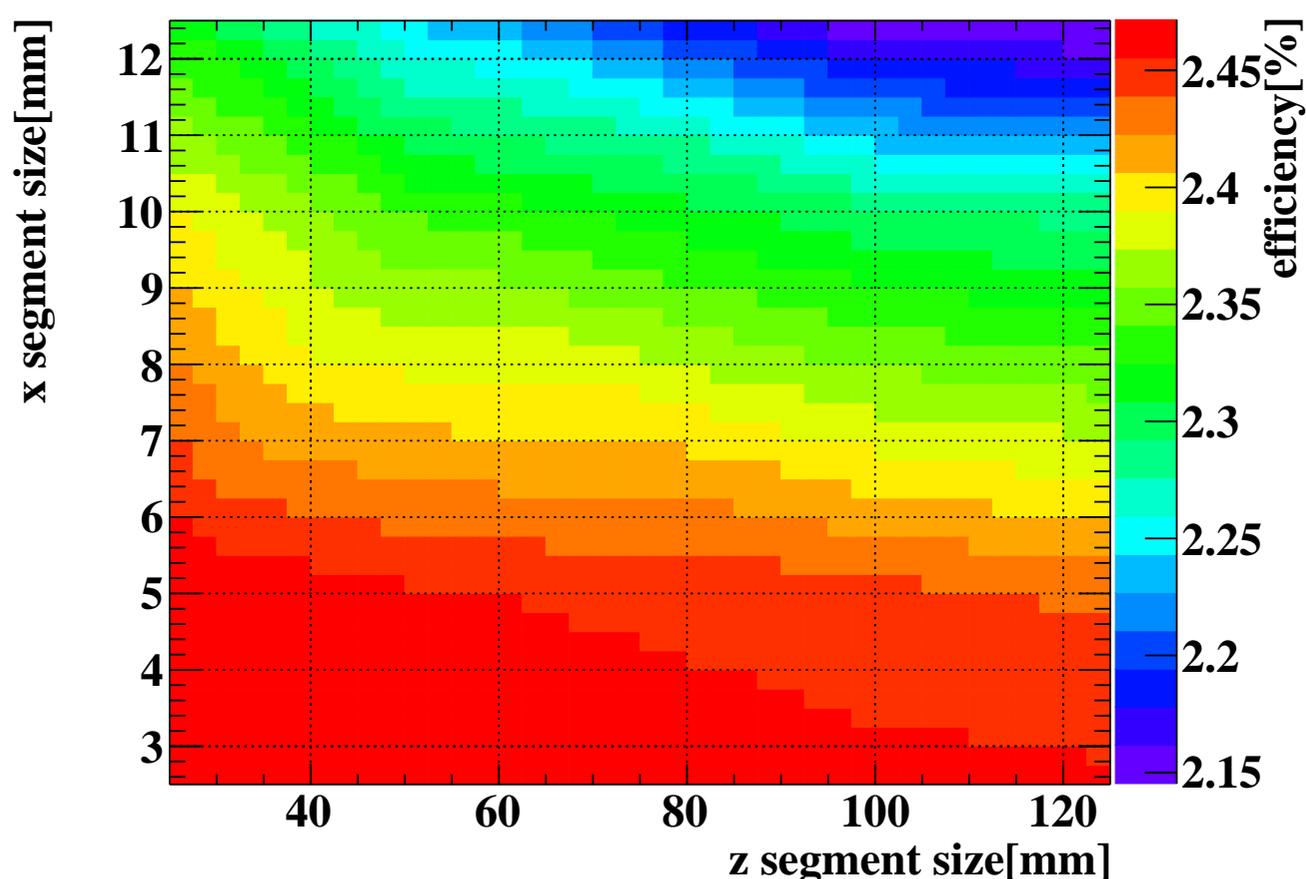


図 5.8: 3 mm 厚のコンバーター、異なるセグメントサイズに対するガンマ線 90 度入射の時の検出効率 (入射ガンマ線数に対する) 比較

パイルアップイベントを削除した後の検出効率

図 5.8 にパイルアップイベントを削除した後の検出効率をセグメントサイズごとにスキャンした図を示す。図 5.8 からは、セグメントサイズは小さいほど検出効率が高いことに加え、セグメントサイズの増大は z 方向よりも x 方向の方が検出効率の悪化に大きく寄与している。セグメントサイズは小さいほど検出効率が高くなる結果は、図 5.7a を見てわかるように、セグメントサイズの増大はターン粒子が同じセグメントに再入射する確率が高くなり、パイルアップイベントの割合が増えていることが要因と考えられる。また、図 5.7a で、 z 方向よりも x 方向のセグメントサイズ増大の方がパイルアップイベントの割合が大きく増加しており、セグメントサイズの増大が z 方向よりも x 方向の方が検出効率悪化に大きく寄与する結果についても、同様にパイルアップイベントの傾向が要因と考えられる。

また、 $3 \times 5 \times 50 \text{ mm}^3$ のサイズにおいては、最も検出効率が高かった $3 \times 5 \times 25 \text{ mm}^3$ と同じ検出効率 2.5% を示していた。この結果と現実的なセグメント数 (読み出しチャンネル数) を考えて、 $3 \times 5 \times 50 \text{ mm}^3$ を標準的なサイズとして採用できることがわかった。

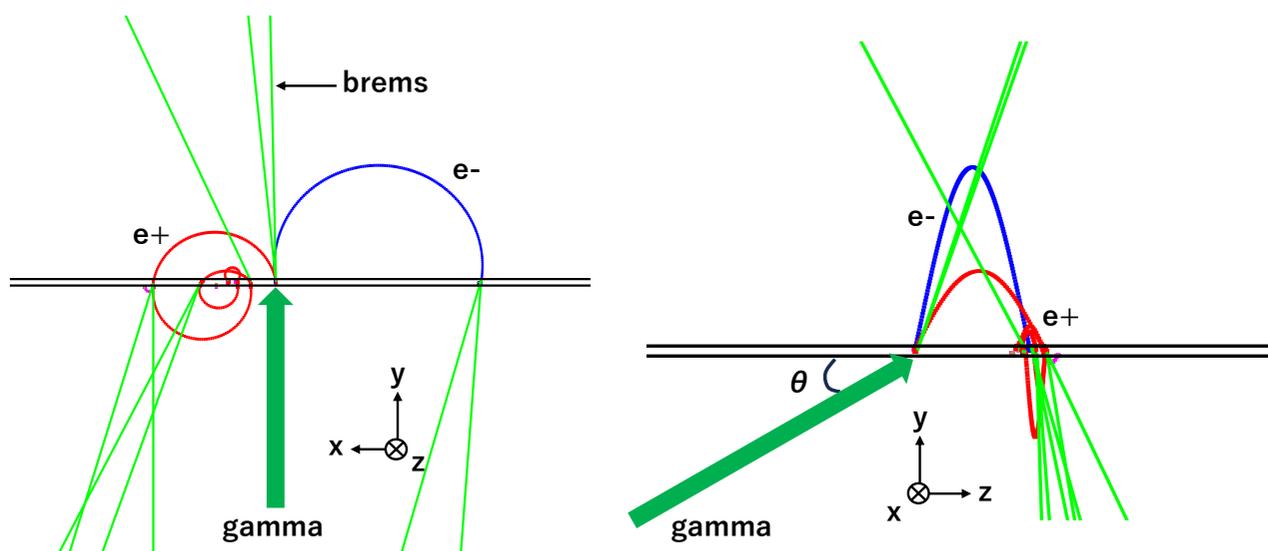


図 5.9: シミュレーションによるガンマ線斜方入射の様子を 2 方向から見た図。 θ はビーム軸からの入射角度を表す。

5.4 斜方入射の影響

本節では、ガンマ線の入射角度が垂直方向に対して傾く斜方入射の際、測定にどういった影響が生じるのかについて議論する。図 5.9 には、シミュレーションによるガンマ線斜方入射の様子を 2 方向から見た図を示した。

まず、図 5.5 に見られるようにガンマ線の入射角度によって磁場に垂直なコンバージョンペアの運動量は変化し、その運動の特徴も如実に変化している。こういった変化はパイルアップイベントの割合にも影響し、最終的に得られる検出効率には入射角度ごとの違いが現れる。さらに、斜方入射の場合垂直入射に比べてガンマ線から見たコンバーターの実効厚さが増えるため、制動放射の割合に関しても影響が現れる。

5.4.1 ガンマ線入射角度に応じたコンバーターの厚み

そこで将来実験では入射角度に応じてコンバーターの厚みを変えることを検討する。シミュレーションにおいてコンバーターの厚さを入射角度に応じて変更し、ガンマ線入射方向に対するコンバーターの実効的な長さが一定になるようにジオメトリを変更した。ビーム軸からの入射角度 θ_γ に応じたコンバーターの実効厚さ T は、本来のコンバーターの厚さを T_0 としたときに以下のように表される。

$$T = \frac{T_0}{\sin \theta_\gamma} \quad (\theta_\gamma \text{ はビーム軸からの角度}) \quad (5.2)$$

そのため、入射角度に依存せずコンバージョン確率が一定になるように、式 1.2 に従いコンバーターの厚みを $T \sin \theta_\gamma$ のように変更し、コンバーターの実効厚みがガンマ線入射角度に対して一定となるようなジオメトリにした。

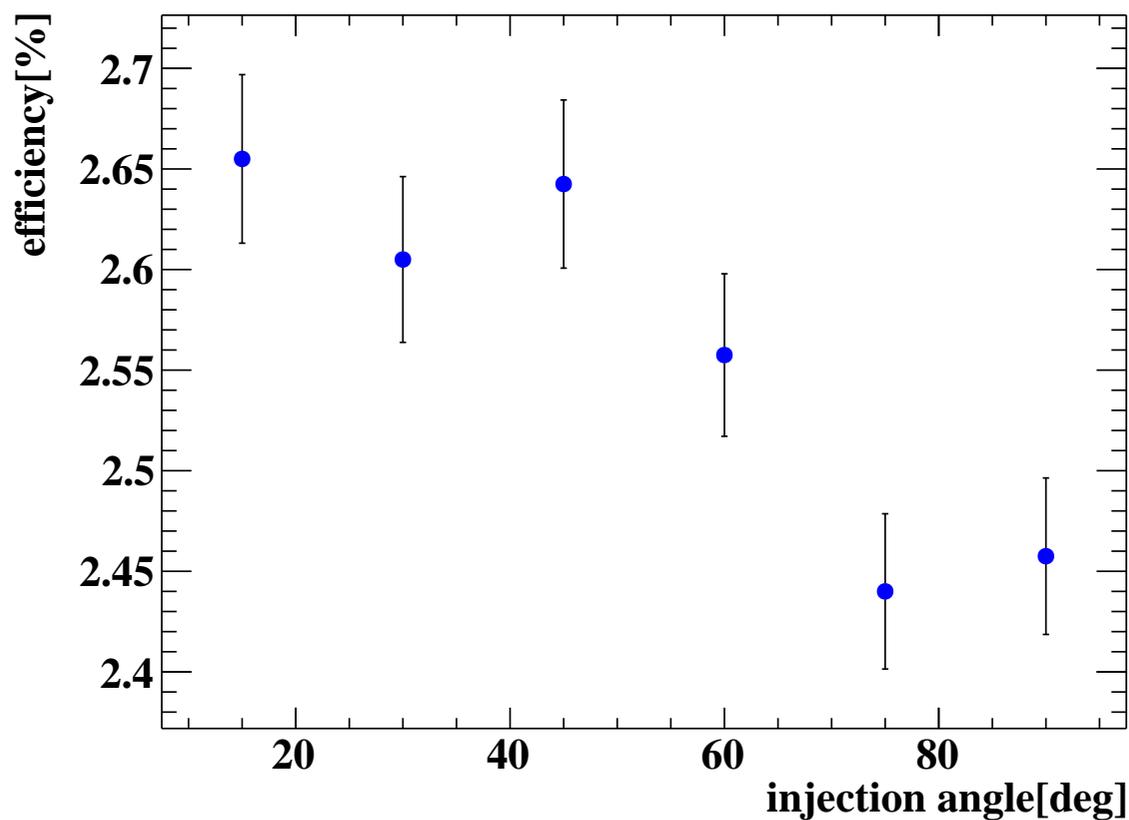


図 5.10: 入射角度に対する検出効率の比較

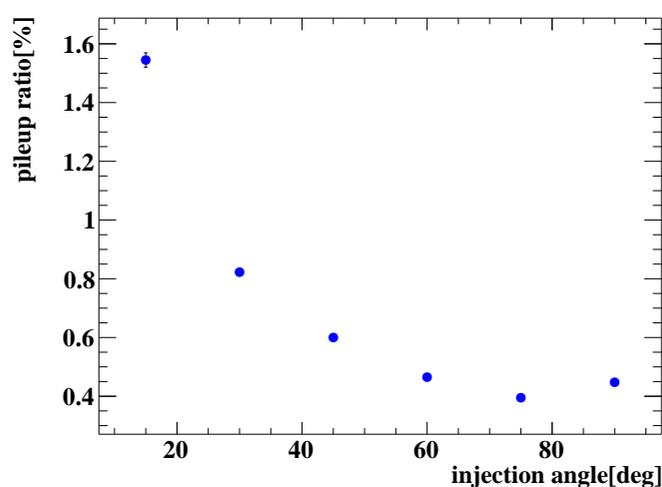
入射角度はビーム軸からの角度を示し、90 度が垂直入射である。

5.4.2 ガンマ線入射角度ごとの検出効率比較

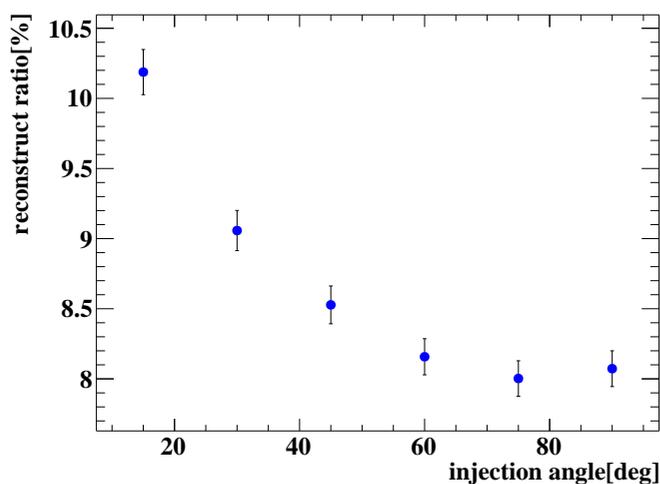
(長さ $10 \times$ 幅 25 mm^2) のセグメントサイズに対して、入射角度ごとの実効厚さを一定にしてコンバージョン確率を一定にした後に算出したガンマ線の検出効率を図 5.10 に表す。図 5.10 を見ると、入射ガンマ線のビーム軸からの角度が小さくなるほど検出効率が上がっている。一方図 5.11a に示すパイルアップイベントがガンマ線入射イベント数に占める割合は、入射角度が小さいほど大きくなっている。これは、入射角度が小さいほどパイルアップが多くなるのに反して検出効率が上がっており、パイルアップ削減の効果と相反した結果になっていることを意味し、パイルアップの割合が検出効率悪化の大きな要因ではないと考えられる。

また、イベントの再構成には2つの荷電粒子の飛跡を要求することを考慮し、図 5.11c のようにコンバーター内でコンバージョンペアが運動量を失い、停止してトラッカー層まで辿り着かないイベントは、エネルギーが再構成されないので N_{signal} の算出に用いていない。電子陽電子対が飛跡検出器に到達し、イベントが再構成される割合を、ガンマ線の入射角度の関数として 5.11b に示す。また、図 5.11 の各プロットをまとめた図として、コンバージョンイベント、エネルギーを再構成したイベント、パイルアップイベントの入射ガンマ線の数に対する割合を入射角度ごとにまとめて図 5.12 に示した。入射角度が大きいくほど、図 5.11a のようにパイルアップの割合は減少する一方で、図 5.11b のようにエネルギーを再構成したイベントの割合も減少している。ゆえに図 5.10 の結果に対する考察として、入射角度の大きい場合はコンバージョンペアがコンバーター内で停止する割合が大きく、入射角度が大きいくほど検出効率が減少している可能性があるといえる。

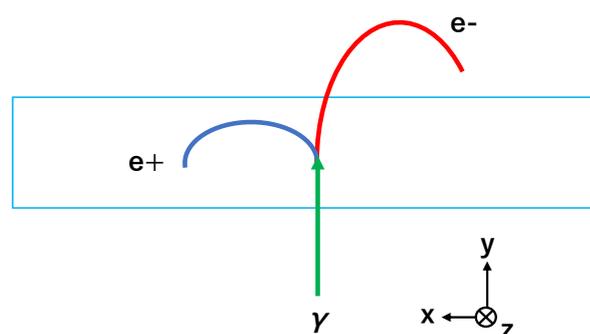
しかし、入射角度が大きいくほどコンバージョンペアがコンバーター内で停止する割合が大きくなることに対する原因は究明できていない。これらの原因を知るためには、より詳細にコンバーター内におけるコンバージョンペアの運動を解析する必要がある。



(a) パイルアップイベントの割合と入射角度の関係



(b) エネルギーを再構成できたイベントの割合



(c) コンバージョン後にコンバーター内で荷電粒子が停止してしまう図

図 5.11

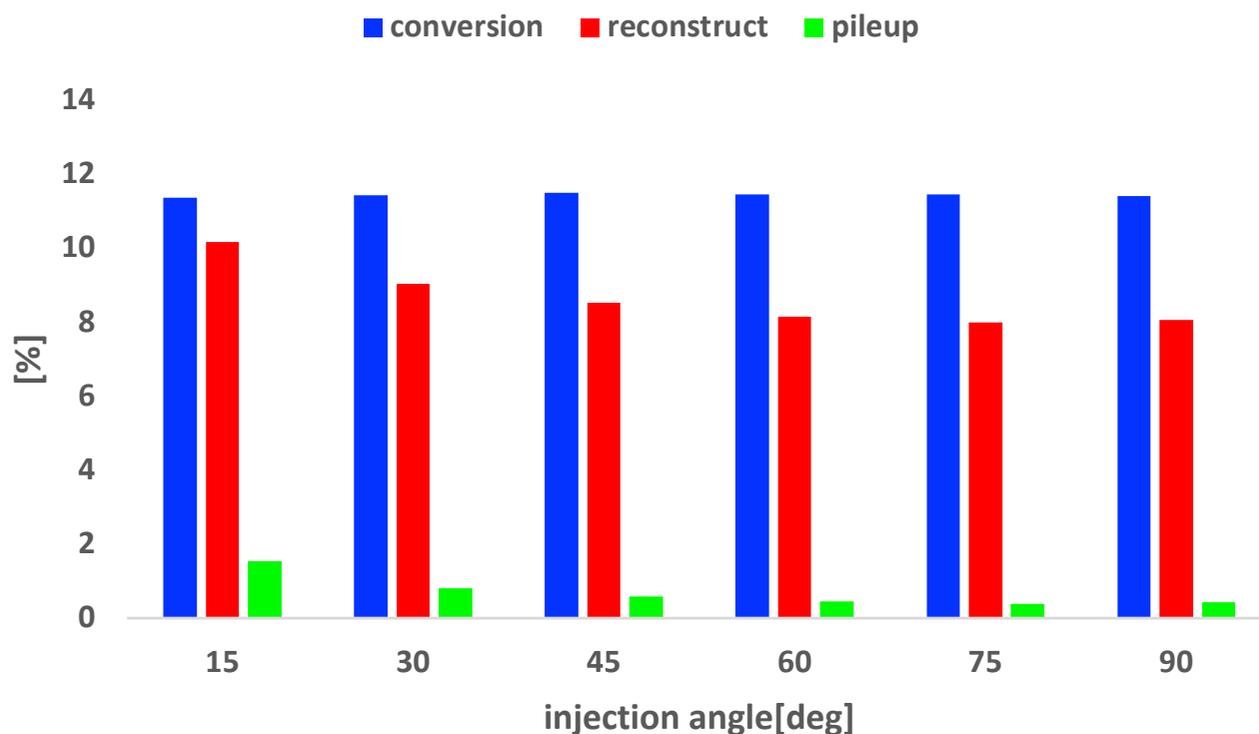


図 5.12: 入射角度ごとにコンバージョンしたイベント (青)、図 5.11 のエネルギーを再構成できたイベント (赤)、パイルアップイベント (緑) について、ガンマ線入射数に対する割合をまとめて表示したグラフ

5.4.3 まとめ

- 材質、厚みの検討

コンバーター層は厚さ 3 mm の LYSO が最も検出効率が高いことがわかった。

- セグメントサイズの検討

パイルアップ削減を考慮したシミュレーションによる結果では、セグメントサイズは面積が小さくなるほど検出効率が高く、x 方向を細かくセグメンテーションすることの重要性を示した。

また、 $3 \times 5 \times 50 \text{ mm}^3$ のサイズにおいては、最も検出効率が高かった $3 \times 5 \times 25 \text{ mm}^3$ と同じ検出効率 2.5% を示していた。この結果と現実的なセグメント数 (読み出しチャンネル数) を考えて、 $3 \times 5 \times 50 \text{ mm}^3$ を標準的なサイズとして採用できることがわかった。

- 斜方入射の影響

入射角度が小さくなるほど、検出効率は上昇する。その理由として、入射角度の大きい場合はコンバージョンペアがコンバーター内で停止する割合が大きく、こういったイベントは再構成しないため入射角度が大きいほど検出効率が減少している可能性が考えられる。

第 6 章

電子ビームによる LYSO の性能試験

アクティブコンバーターの材質として検討している LYSO 結晶に対して、結晶が持つ時間分解能やエネルギー分解能などを調べるため、高エネルギー加速器研究機構 (以下 KEK) にて電子ビームを使用したビームテストを行った。本章ではその結果及び考察について述べる。ビームテストの期間は 2023 年の 12 月 10 日から 12 月 17 日であり、依然詳細な解析が進行中で、本章で述べる内容はビームテストのプレリミナリな結果であることに注意されたい。

6.1 測定環境

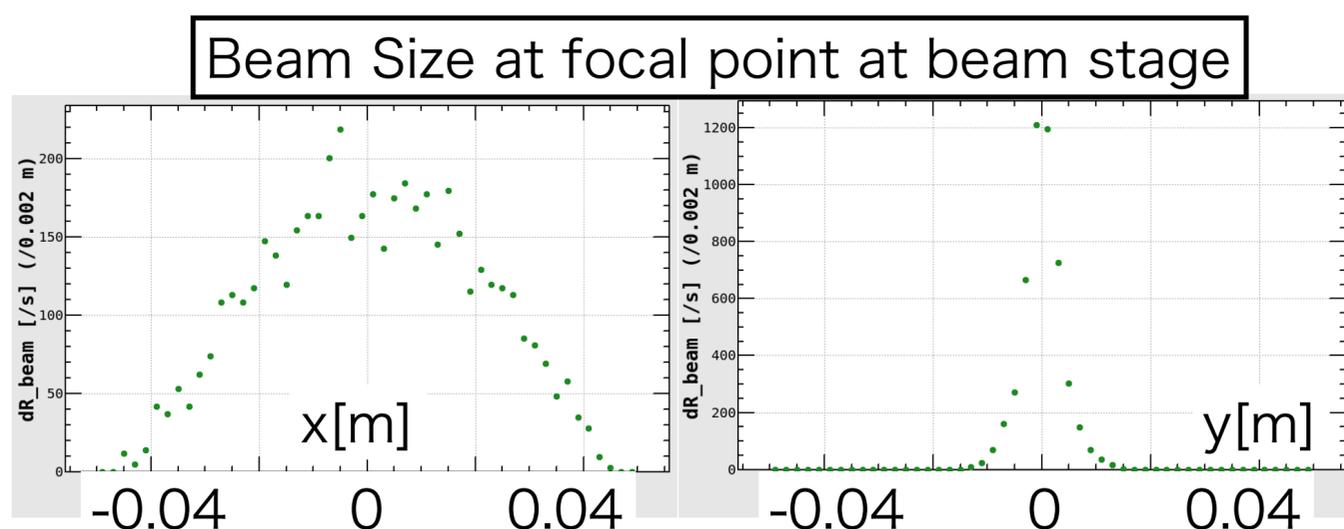


図 6.1: ビームサイズ、水平軸 (x) と垂直軸 (y)[13]

6.1.1 PF-AR テストビームライン

本ビームテストでは、KEK つくばキャンパス PF-AR における、測定器試験のための電子ビームラインを利用した。Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) は周回周期 $1.257 \mu\text{s}$ のシングルバンチ電子ビーム蓄積リングであり、運動量は 6.5 GeV もしくは 5 GeV で、 50 mA 程度の強度で運転している。この蓄積リングに、ビームハローを削るようにワイヤ標的を入れ光子を生成させ、その光子を銅製のコンバータに入射させることで電子陽電子対を生成する。双極電磁石と四重極電磁石からなるビーム取り出し電磁石群により、電子ビームを測定器試験エリアに取り出している。以下に利用した電子ビームのプロファイルを示す [14]。

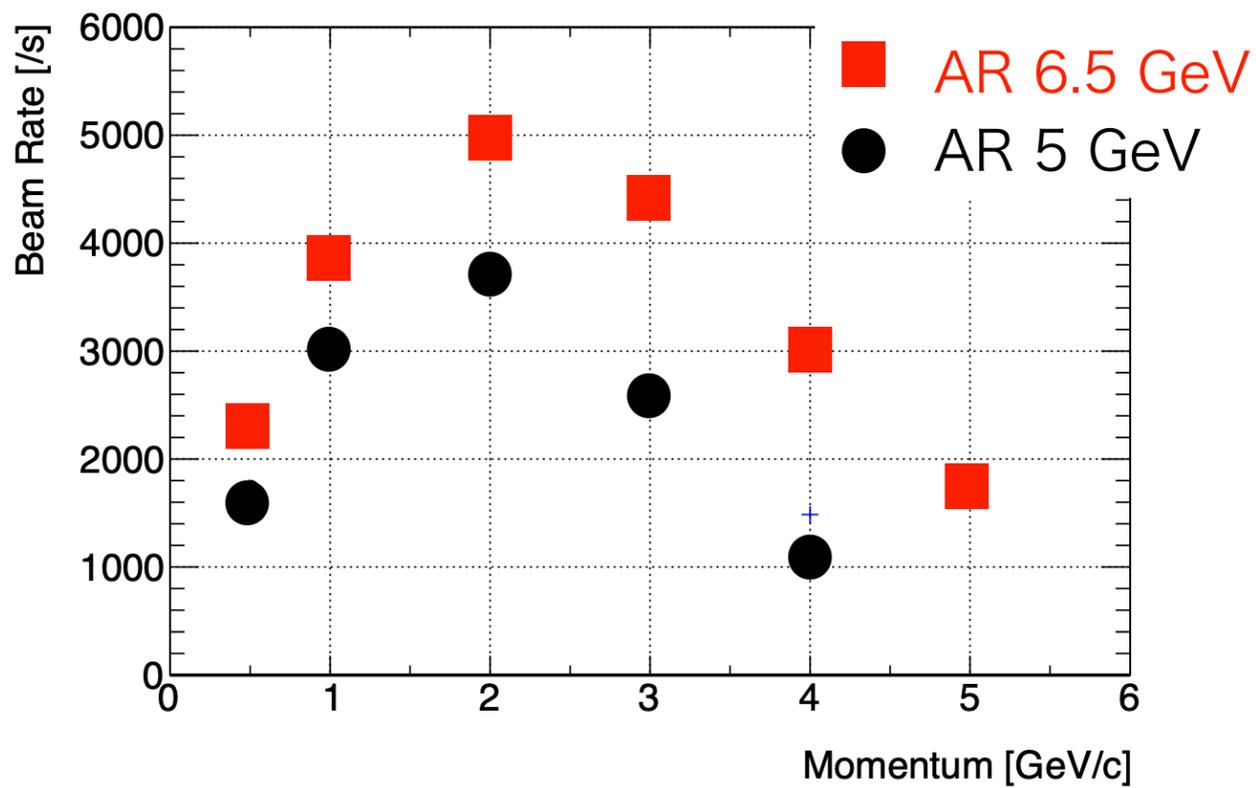


図 6.2: beam momentum vs rate[13]

ビームプロファイル

電子ビームは KEK の Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) 測定器開発テストビームライン [13] のものであり、電子ビームのサイズは上の図 6.1[13] に表される。

ビームのモーメントムは 0.5-6.5 GeV で運動量ごとにビームのレートが図 6.2 のように変化する。

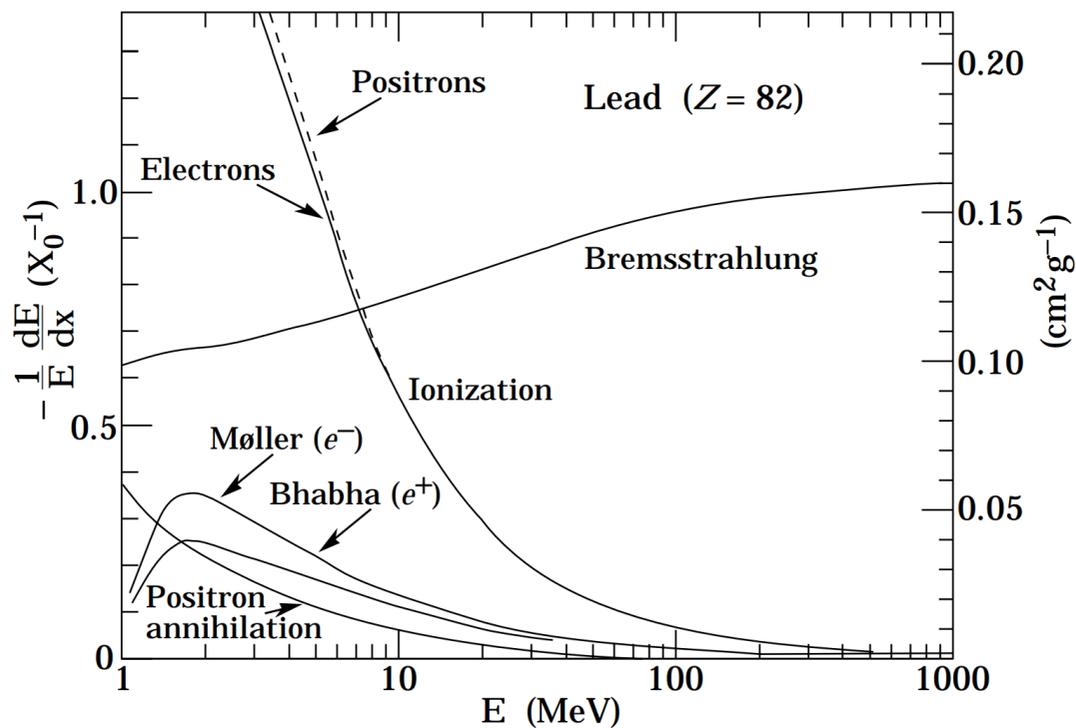


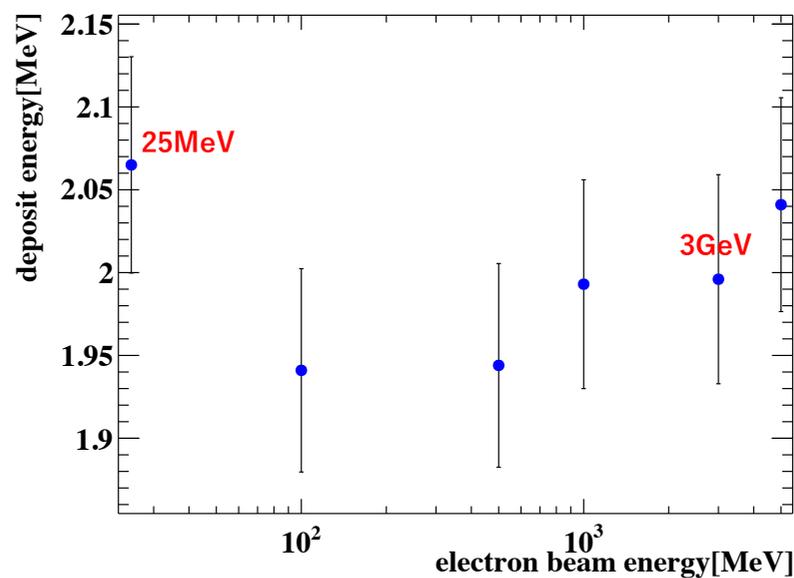
図 6.3: 参考：鉛に入射した時の電子陽電子の放射長あたり相互作用ごとの阻止能の比 [17]

6.1.2 入射電子のエネルギーごとのデポジットエネルギーの比較

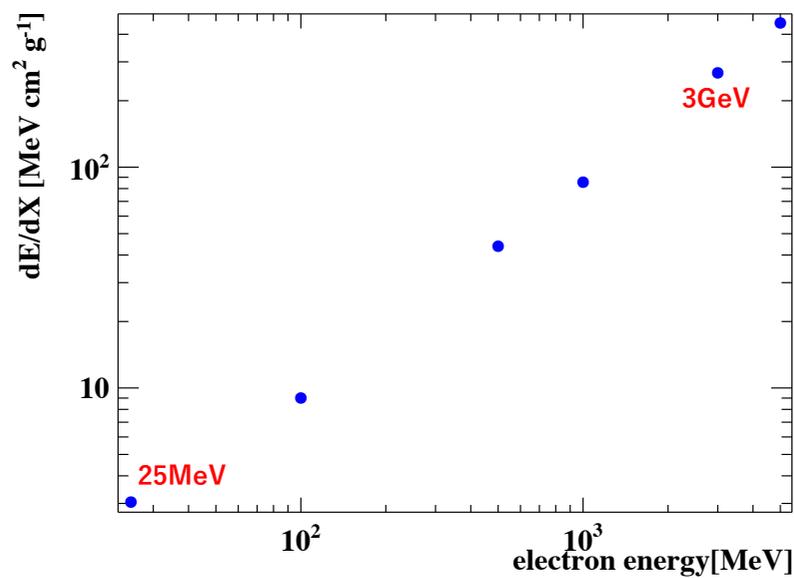
今回のビームテストでは、電子ビームのエネルギーは一貫して 3 GeV で LYSO に入射していた。一方、将来実験では 52.8 MeV のガンマ線がコンバーターに入射し、対生成する電子陽電子のペアは約 0.5 MeV から 26 MeV の幅のエネルギーを持つ。このようにビームテストの入射電子のエネルギーは将来実験よりも数オーダー大きい。荷電粒子の LYSO に対する阻止能はベータプロットの式に従って変化するため、生成される光量にも変化が生まれるはずである。そのため、今回のビームテストの結果が将来実験に適用できるものなのか精査する必要がある。

そこでシミュレーションを用いて、LYSO に 25 MeV から 3 GeV のエネルギーを持った電子を垂直入射させ、LYSO が得たエネルギーデポジットと電子の阻止能を図 6.4 のように見積もった。

図 6.4a はシミュレーションによって算出した、入射電子の LYSO に対するエネルギーデポジットである。図 6.4a では将来実験のエネルギー 25 MeV とビームテストのエネルギー 3 GeV の差は各点の平均に対して 3% ほどである。今回のビームテストで得られた時間分解能やエネルギー分解能を将来実験におけるコンバージョンペアにも適用することが出来ると言える。



(a) シミュレーションによって算出した LYSO に対する入射電子のエネルギーごとの電子のデポジットエネルギー (平均) の分布。横軸は対数スケール。



(b) 同じく算出した LYSO に対する入射電子のエネルギーごとの電子の阻止能の分布。横軸、縦軸は対数スケール。

図 6.4: 電子のデポジットエネルギーと阻止能 (平均)

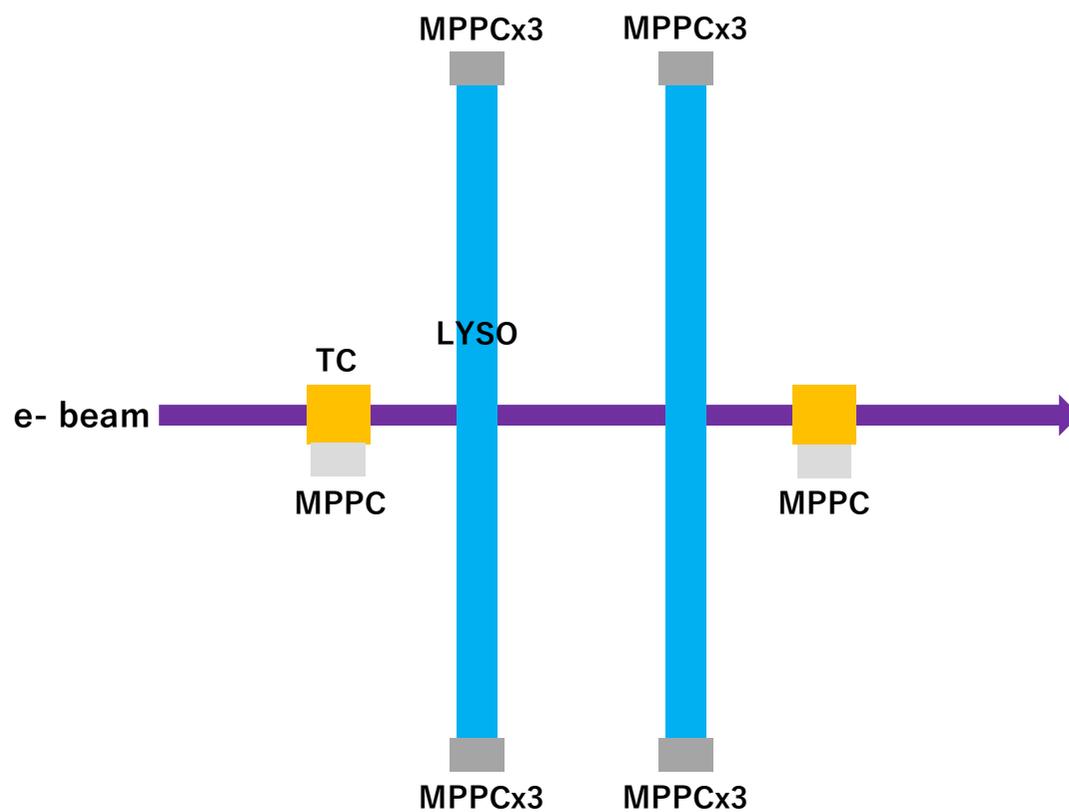


図 6.5: LYSO と TC のセットアップ

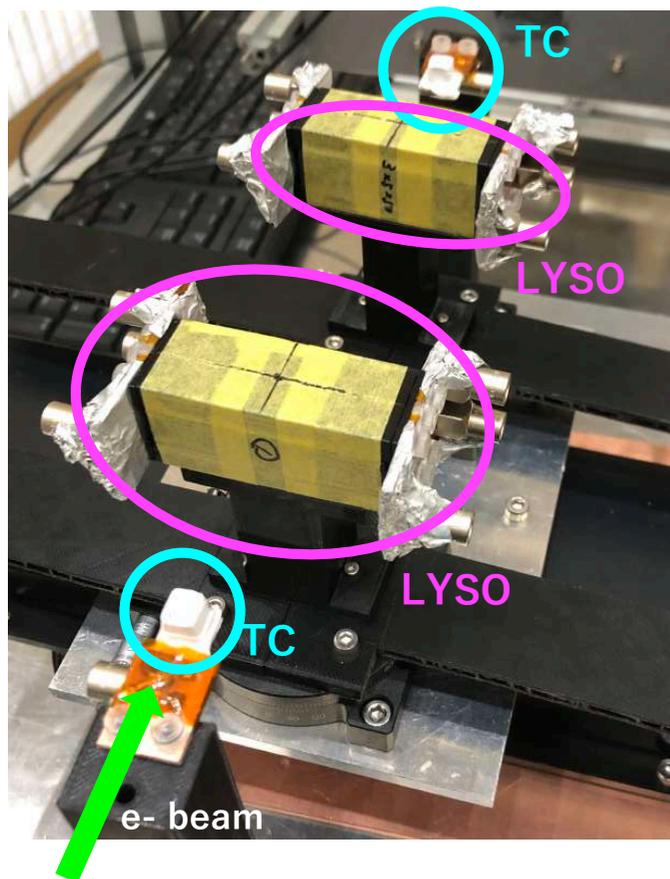
6.1.3 セットアップ

カウンター周りのセットアップ

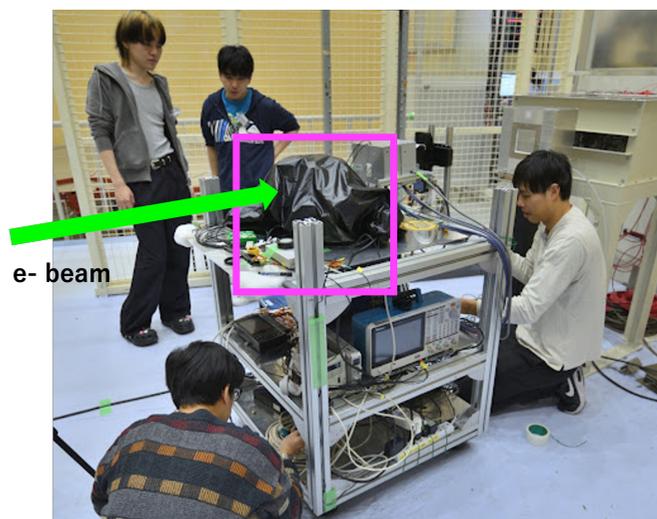
ビームに対するトリガーは、事前に作成したプラスチックシンチレーターでできたカウンターを使ってかける。このトリガーカウンターは 30 – 40 ps と良い時間分解能を持っており、データ解析時にはタイミングリファレンスカウンター (Timing reference counter, 以下 TC と呼ぶ) としても使用できる。実際の LYSO と TC のセットアップの概念図と写真は図 6.5, 6.6 で表され、レーザー墨出し機を用いて LYSO を挟む 2 つの TC、2 つの LYSO の中心をビームが貫くようにビームに対するアラインメントを行った。トリガーは前後の TC によってコインシデンスを取るため、LYSO に対して垂直にビームが当たっていることを保証できる。

全体のセットアップ

測定器に関する配線は図 6.7 のように表され、データ取得は PSI で開発された波形デジタイザ Wave Dream Board (WDB)[20] を使用した (sampling rate: 4GHz)。また WDB は波形のデジタイズと同時に HV の印加、アンプ、波形シェーピングとしての機能も持っている。また、印加する電圧値が LYSO 側の MPPC の推奨電圧と大きく異なるため、TC には HV 供給モジュールである SCS から HV を供給している。



(a) 実際のカウンター周りのセットアップ



(b) セットアップ全体の写真。中央の枠内がブラックシートによって図 6.6a 全体を遮光した部分。

図 6.6: セットアップの写真

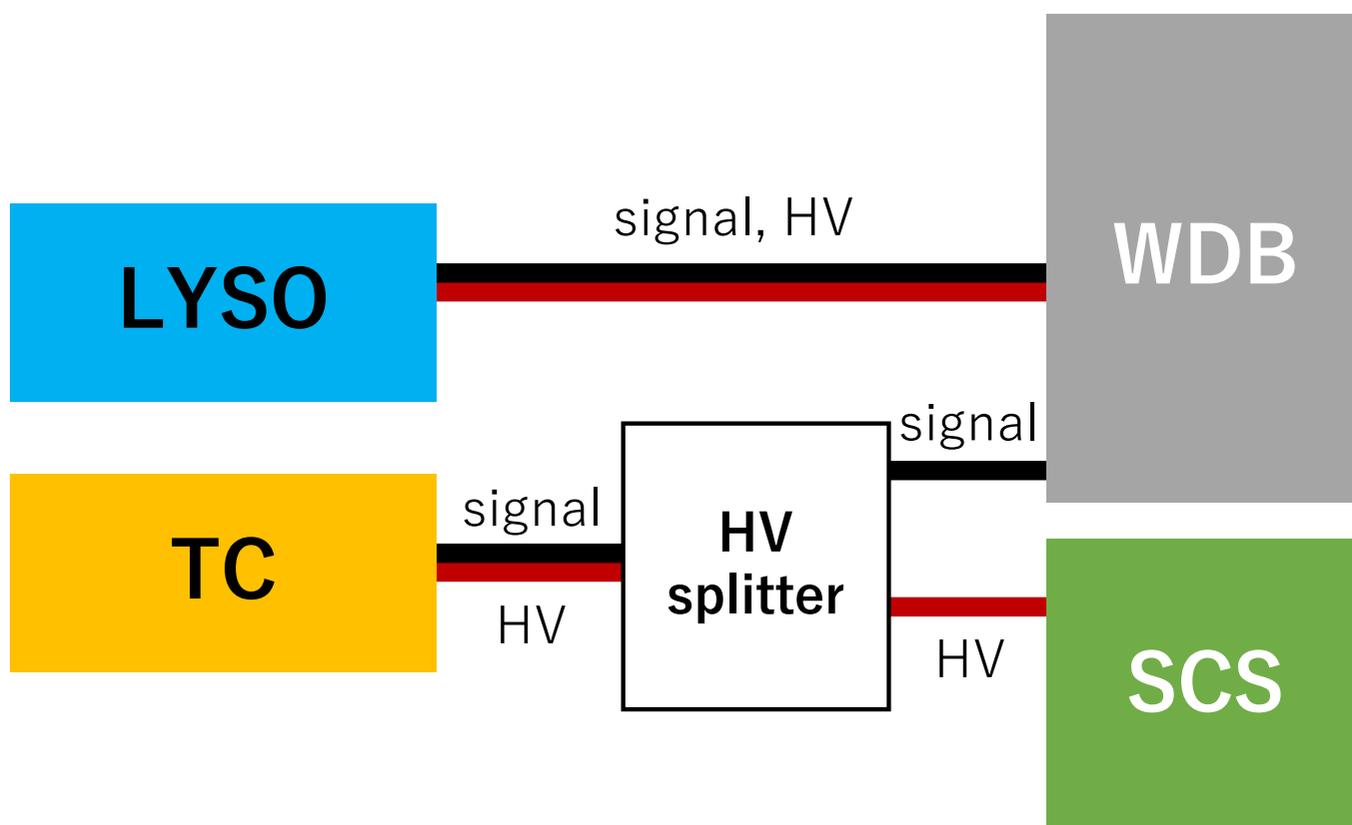
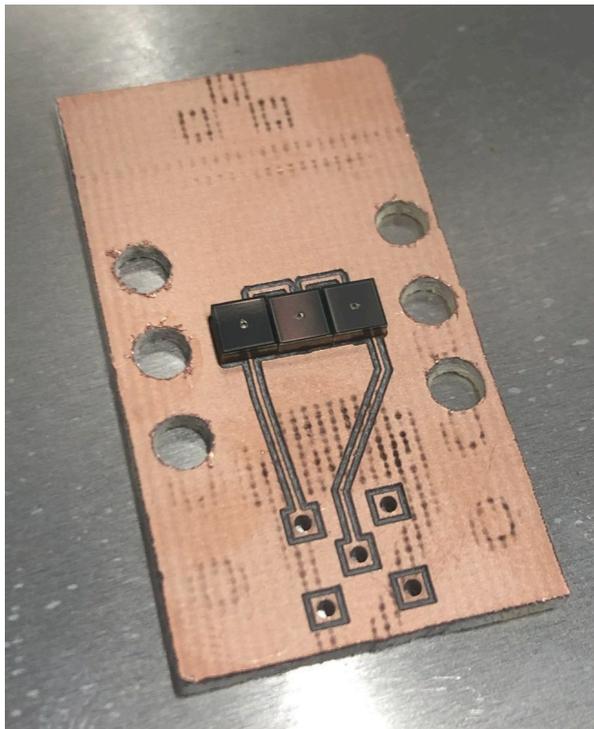
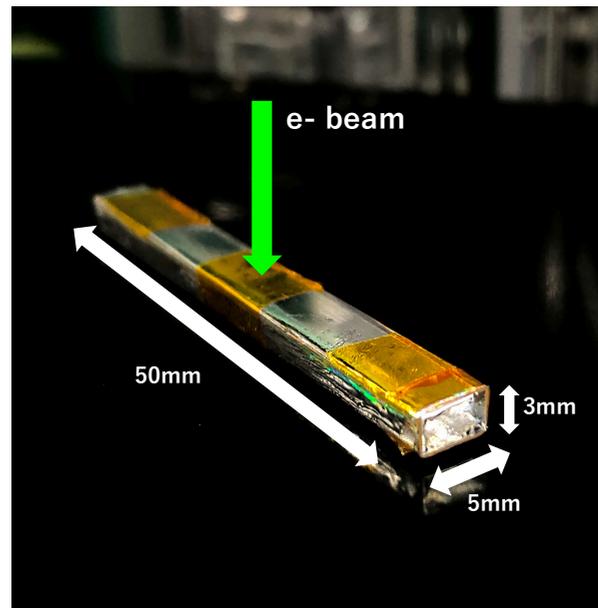


図 6.7: 配線の概要図



(a) MPPC 基板 (直列接続)。基板中央の 3 つ並んだ部品が MPPC (S14160-3050HS)。基板下部に LEMO コネクタを取り付ける。



(b) ESR によって覆われた LYSO。ビームは図のように LYSO に入射する。

図 6.8: シンチレーターである LYSO とその読み出し MPPC 基板

LYSO と読み出し基板

LYSO のシンチレーション光測定には、SiPM を使用した。また、反射材 (3M 社製 ESR) で LYSO は側面以外を覆われている。今回のビームテストでは浜松フォトニクス Multi-Pixel Photon Counter (MPPC) を使用しており、受光面積が $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ でピクセルピッチが $50\ \mu\text{m}$ ($15\ \mu\text{m}$, $10\ \mu\text{m}$) の”S14160-3050HS (S14160-3015HS, S14160-3010HS)[15][16]”を LYSO の側面に 3 つ並べて取り付け、LYSO に対して両端合わせて 6 個の MPPC でシンチレーション光を検出する。実際には、MPPC を三つ取り付けた基板をノイズ抑制のためアルミ фольで保護し、図 6.6a のように LYSO を内蔵したホルダーに取り付けている。一方、TC は一辺 5 mm の立方体のシンチレーターであり、 $3 \times 3\text{ mm}^2$ と $6 \times 6\text{ mm}^2$ 角の受光面積を持った SiPM (S14160-6050HS, S1460-3050HS) を用いて信号を読み出す。さらに、TC は MPPC にオプティカルセメントで接着した上、基板に固定するためテフロンテープを用いている。また、LYSO と TC に使用している MPPC を環境光から遮光するために、DAQ 時に検出器全体はブラックシートで覆われている。図 6.8 に作成した MPPC 基板と ESR で覆われた LYSO を示す。さらに、基板と組み合わせた際の LYSO と TC の図を図 6.9 に示す。

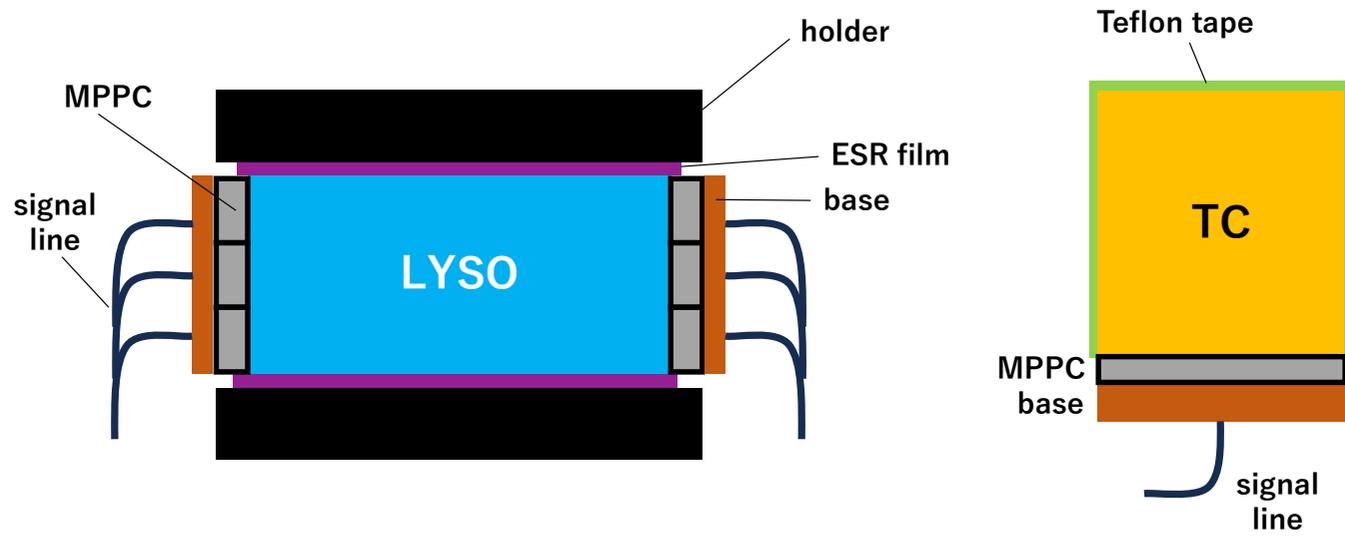


図 6.9: 基板と組み合わせた際の LYSO と TC の図

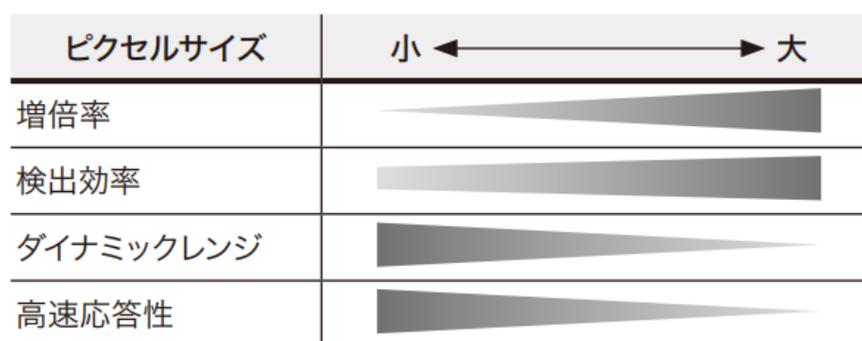


図 6.10: ピクセルサイズ (ピクセルピッチ) の異なる MPPC の特性 [19]

今回使用した基板には MPPC のピクセルピッチ、接続方法によっていくつかの種類がある。以下ではその特性の違いについて述べる。

MPPC のピクセルピッチ

今回データを取得した MPPC のピクセルピッチは 10, 15, 50 μm の 3 種類である。MPPC にはいくつかの異なるピクセルピッチが存在しており、ピクセルピッチごとの性能の違いは図 6.10 に表す。

SiPM はガイガーモードの APD をセル個数ぶんだけ並列接続したものであり、ピクセルピッチが小さいことの欠点は、セル容量が小さくなるので増倍率は減ることと、フィルファクターが減るので dead space の割合が増え、PDE が減少することである。利点として、セル容量が小さくなるので、波形の時定数が短くなりタイミング的には有利になる可能性がある。

MPPC の接続方法

また、データ取得は 2 種類の MPPC 接続方法で行われており、LYSO の端に 3 つの MPPC を設置し基板上では独立に読み出しその後の解析で 3 つの波形をもとに時間情報等を取得する“独立接続 (独立読み出し)”と、LYSO の端に 3 つの MPPC を設置し基板上では直列接続しその後一つの波形から解析を行う“直列接続”の二つの方法で測定を行った。直列接続の利点として考えられるのは、容量が少なくなるため増倍率が下がるが波形が鋭くなり応答性が良くなるので、タイミング測定に関して良い性能が期待できる。また、6.3.1 項で後述するが 3 つの MPPC の信号を合算した 1 つの大きな波形が得られることで、独立読み出しの 3 つの波形に比べてチャンネルごとの波形のばらつきが無いこともタイミング測定における利点として挙げられる。また、チャンネル数を減らせる点も将来実験に導入する上で大きな利点である。

表 6.1: DAQ リスト
(照射位置は長手方向の中心を 0 mm として、長さの 1 割の距離で 11 点スキャン)

LYSO のサイズ [T × W × L[mm ³]]	照射位置 [mm]	角度 [°]	MPPC ピクセルピッチ [μ m]	MPPC 接続方法
3 × 5 × 50 (FTRL)	-25 ~ +25	-	-	独立、直列
3 × 5 × 50 (NORMAL)	-25 ~ +25	-	-	独立
1.5 × 5 × 50 (FTRL)	-25 ~ +25	0 ~ 60	-	独立
3 × 10 × 50 (FTRL)	-25 ~ +25	0 ~ 60	50, 15, 10	独立、直列
3 × 5 × 100 (FTRL)	-50 ~ +50	-	-	独立

6.2 測定方法

6.2.1 取得データセット

LYSO の測定に際して変更するいくつかのパラメーターが存在し、それぞれのパラメーターごとに評価する目的がある。実際に取得した DAQ のセッティングは上の表 6.1 に示す。

以下、比較するパラメーターとその目的を示す。

- LYSO のサイズ

前述したように、将来実験ではコンバーターのセグメンテーションを検討しているため、LYSO の異なるサイズに対してその測定性能を調べる必要がある。

- LYSO のタイプ

アクティブコンバーターの材質として使用を検討している LYSO には 2 種類のタイプがあり、標準的な LYSO (以下 NORMAL タイプ) と FTRL と呼ばれる光量は NORMAL タイプに劣るが、時間分解能は優れたタイプが存在する。NORMAL は光量に優れ、FTRL はより速い。一長一短なので、エネルギー分解能、時間分解能をそれぞれ測定して比較する必要がある。

- MPPC のピクセルピッチ数

6.1.3 項で議論したように、ピクセルピッチの違いに対して光量や時間分解能を比較する必要がある。

- MPPC の接続方法

6.1.3 項で議論したように、独立に 3 つの MPPC から得られる信号と直列接続した 1 つの MPPC の信号の違いについて光量や時間分解能を比較する必要がある。

- LYSO に対するビームの照射位置

LYSO の長手方向に対して時間分解能及びエネルギー分解能の位置依存性を測定したい。

- LYSO に対するビームの照射角度

LYSO に対して電子が角度を持って入射する場合に、厚みを薄くすることで入射方向の実効厚みを同じにすることができる。そのため、同じ実効厚みで異なる入射角度の場合に同じ検出器性能が実現できるか検証する必要がある。また、表 6.1 での角度の定義は入射ガンマ線のミュオンビーム軸からの角度である。

6.2.2 検出器の運転パラメータの最適化

6.2.1 項にある各測定に移る前に、最適な DAQ のための初期設定を行った。WDB 内では MPPC に印加する電圧、波形に対するアンプのゲイン、可変抵抗による波形の Shaping を設定できる。そのためこれらのパラメータに関して、良い分解能を示す値を固定した。また、先行研究 [11] の測定と異なる要素として、読み出し機器を Domino Ring Sampler(DRS)[21] から、WDB に変更し、読み出し周波数においても 1.6 Gsps (Giga sampling per seconds) から 4 Gsps へ変更している。

動作電圧のスキャン

MPPC は逆バイアスの電圧を印加することで動作し、電流が流れ始める電圧値を降伏電圧 (Breakdown Voltage, V_{BR}) と呼ぶ。また降伏電圧とその時印加している電圧、動作電圧 (Operation Voltage, V_{OP}) の差をオーバー電圧と呼び (Over Voltage, V_{OVER})、これらの関係は以下の式 6.1 で表される。

$$V_{OVER} = V_{OP} - V_{BR} \quad (6.1)$$

MPPC が検出したフォトンの増倍率は、 V_{OVER} に比例し、検出効率についても V_{OVER} に依存する。 V_{OVER} は小さければ増倍率が低く信号が小さくなり S/N が小さくなり時間分解能が悪くなる。大きければダークカウント (MPPC が外部からの光刺激を受けずに自身で発生する光信号 (ノイズ信号)) が増加してしまい時間分解能が悪化する恐れがある。最適な動作電圧でタイミング測定を行うために、図 6.11 のように V_{OVER} のスキャンを行った。

図 6.11 は今回使用した $50\mu\text{m}$ ピッチ MPPC[15] の 3 つを $3\times 10\times 50$ の FTRL タイプの LYSO に直列接続した時の V_{OVER} スキャン。各個体には製造時に浜松フォトニクスが記録した推奨 V_{OVER} が割り振られている。これを元に、推奨 V_{OVER} から 1V ごとに V_{OP} を上昇させて以下の手順で測定を行った。・スキャンの手順

1. 推奨 V_{OVER} から推奨 $V_{OVER} + \text{数 } V$ の範囲で V_{OP} を変更し、いくつかの RUN を取得。
2. それぞれの RUN に対して、6.2.3 項で後述する LE のスキャンを行い最も良い時間分解能 $\sigma_{t_{optimal}}$ を算出。
3. 各 RUN の $\sigma_{t_{optimal}}$ を比較し、最適な V_{OVER} を決定する。

スキャンの結果として、表 6.2 に基板の種類ごと最適な時間分解能が得られ、その後の測定で用いた V_{OVER} の値を示す。図からは、特に推奨 V_{OVER} と推奨 $V_{OVER} + 4 V$ において時間分解能が特に良くなっている。推奨 V_{OVER} で特に良い理由は不明だったが、推奨 V_{OVER} の値を除けば、 V_{OVER} が大きくなるにつれて上記の増倍率の増大とダークカウントの増加の効果が現れていると考えられる。

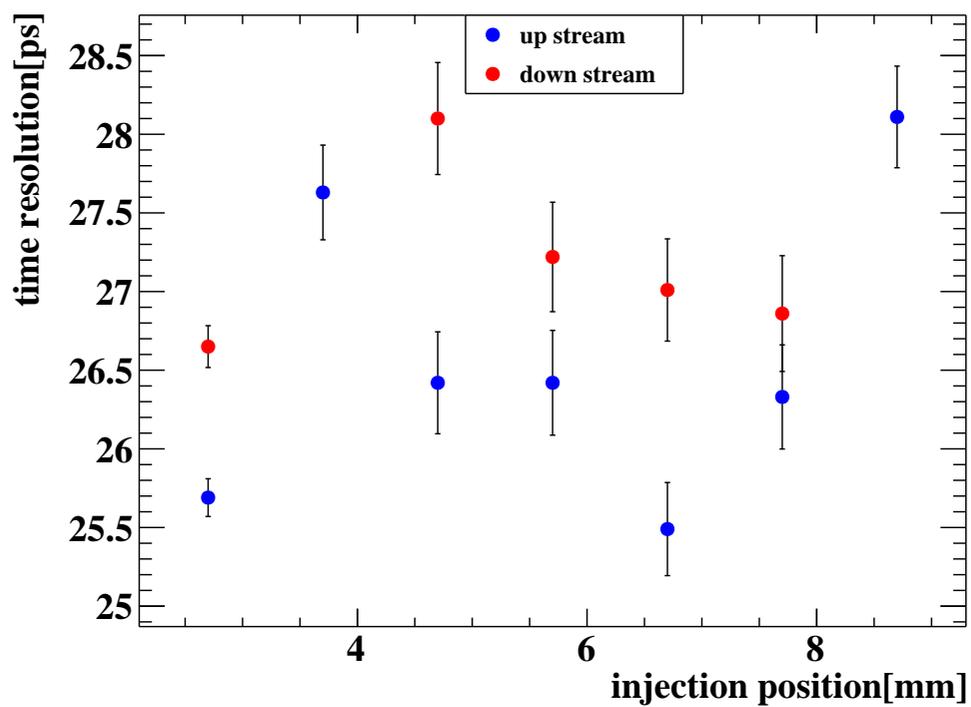


図 6.11: 時間差によって算出した時間分解能を V_{over} でスキャンしたプロット ($50\mu\text{m}$ 、直列)。赤点：下流 LYSO、青点：上流 LYSO。ここでの各 ch の V_{BR} は約 38 V。また V_R は推奨 V_{OVER} を表す。

表 6.2: 基板の種類ごとの V_{OVER} スキャン

MPPC ピクセルピッチ	接続方法	推奨 V_{OVER} [V]	V_{OVER} [V]
$50\mu\text{m}$	独立	2.7	5.7
$50\mu\text{m}$	直列	2.7	6.7
$15\mu\text{m}$	独立	4	10
$15\mu\text{m}$	直列	4	9
$10\mu\text{m}$	独立	5	11
$10\mu\text{m}$	直列	5	10

アンプのゲインスキャン

WDB には信号に対するアンプ (増幅器) の機能もあり、1 から 100 倍の範囲で増幅率が可変である。アンプのゲイン (増倍率) は、大きければ S/N が高くなりタイミング測定に有利となる。しかし、WDB の場合、ゲインが高いとチャンネル間の同期用信号由来のノイズ (クロックノイズ) の影響が大きくなるので最適な値を決定する必要がある。図 6.12 にその結果を示す。測定状況は動作電圧のスキャン同様、 $50\ \mu\text{m}$ ピッチ MPPC[15] の 3ch を $3\times 10\times 50$ の FTRL タイプの LYSO に直列接続した時のデータである。また、WDB の波形に対するゲインは例えば 100 の設定であったとしても、正確に 100 倍されるとは限らない。アンプのゲインのキャリブレーションはスケジュールの都合上測定できておらず、光量を求める解析を行う場合には注意する必要がある。また、各基板の種類においてゲインのスキャンを行ったが全ての基板で 100, 50 倍の時間分解能の値に大きな差はみられず、上記のクロックノイズの影響を考慮し一貫してゲイン 50 倍での測定を行った。

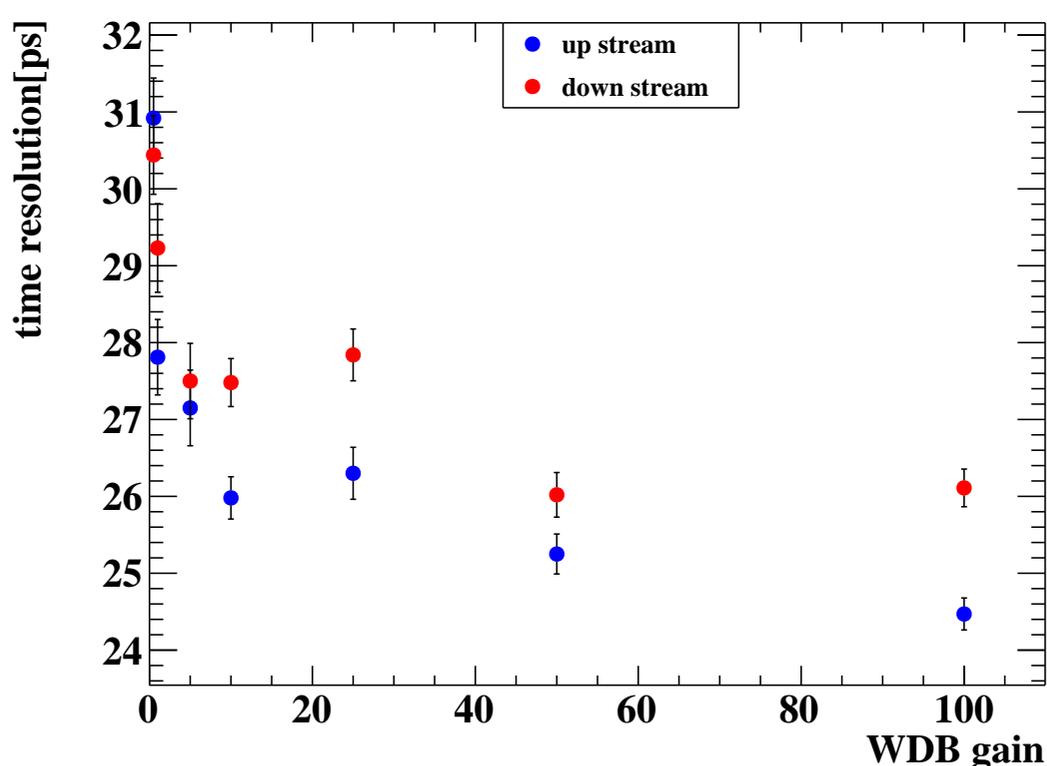


図 6.12: 時間差によって算出した時間分解能の異なる WDB ゲインでスキャンしたプロット。赤点: 下流 LYSO、青点: 上流 LYSO。

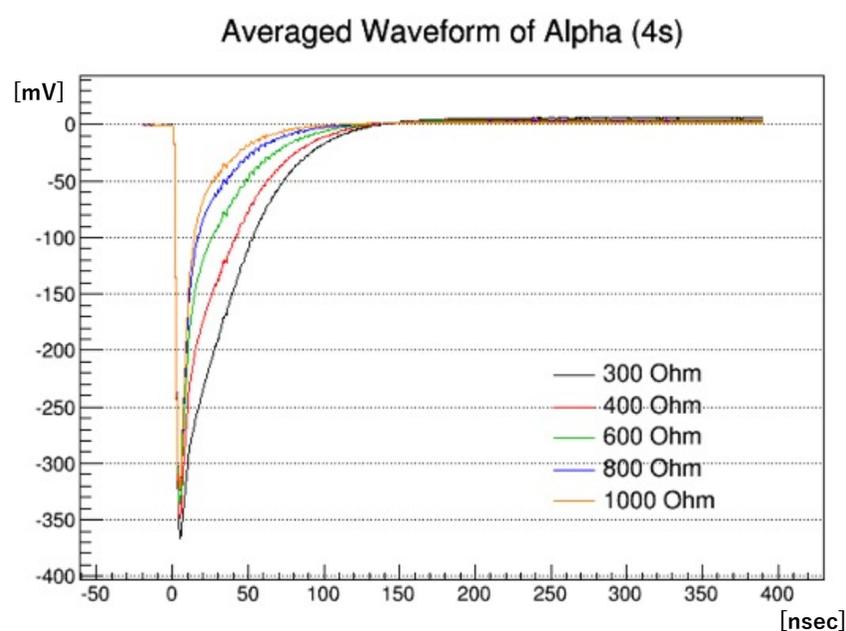


図 6.13: LED 光を 4 つの直列接続 MPPC で検出した際の異なる PZC 値ごとの波形、PZC は 300Ω から 1000Ω までの値で変化させている。抵抗値が大きくなるほど波形は鋭くシェーピングされる

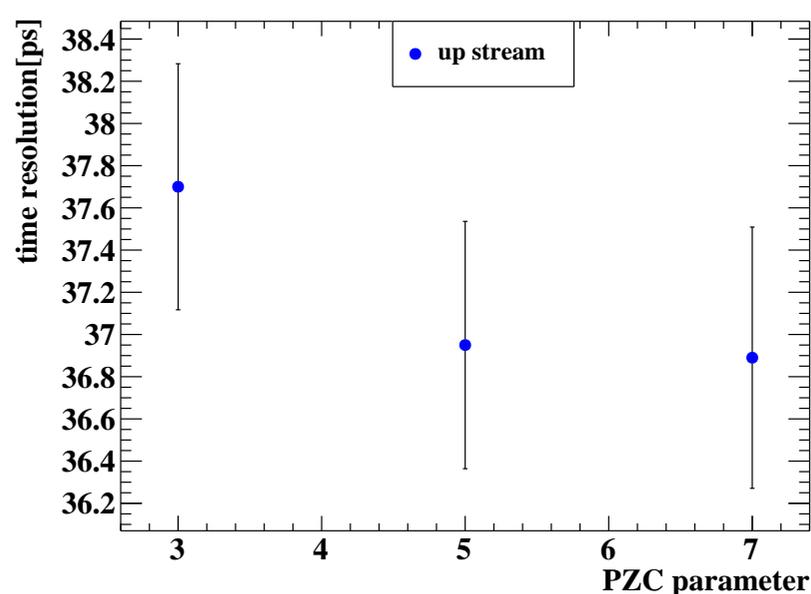


図 6.14: $3\times 5\times 50$, FTRL の LYSO に対して $50\mu\text{m}$ ピッチの MPPC を 3 つ独立接続させ、PZC のパラメータを変えて時間分解能をスキャンしたプロット。横軸の PZC parameter は可変抵抗の大きさに対応したパラメータで、7 が抵抗値最大に設定されており最も波形が鋭くシェーピングされる

可変抵抗のスキャン

アンプ機能に加え、WDB に内蔵された PZC のための可変抵抗の設定値を変えることによって波形の立ち上がりを鋭くシェーピングさせることができる。PZC の値ごとの波形の変化の例として、LED 光を MPPC で検出した際の異なる PZC 値ごとの波形を図 6.13 に示す。PZC の値は波形の立ち上がりに影響を与えるので、図 6.14 のように最適な値のためのスキャンを行った。結果として、全ての基板で抵抗値最大 (約 $1\text{ k}\Omega$) である設定値 7 の時に時間分解能が最も良く、この値をその後の測定で使用した。

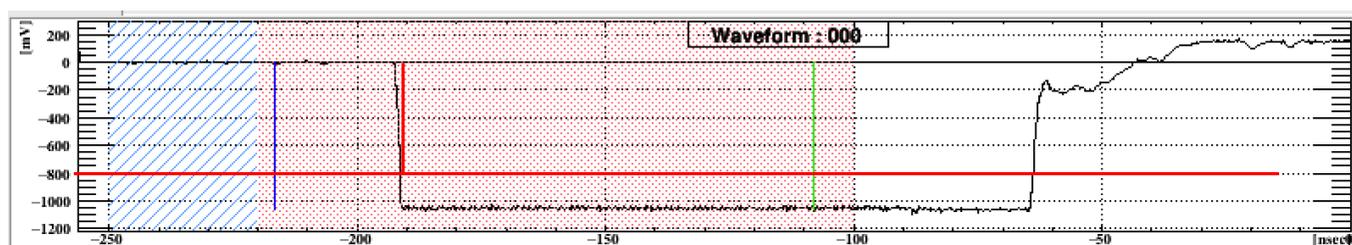


図 6.15: LE の取得

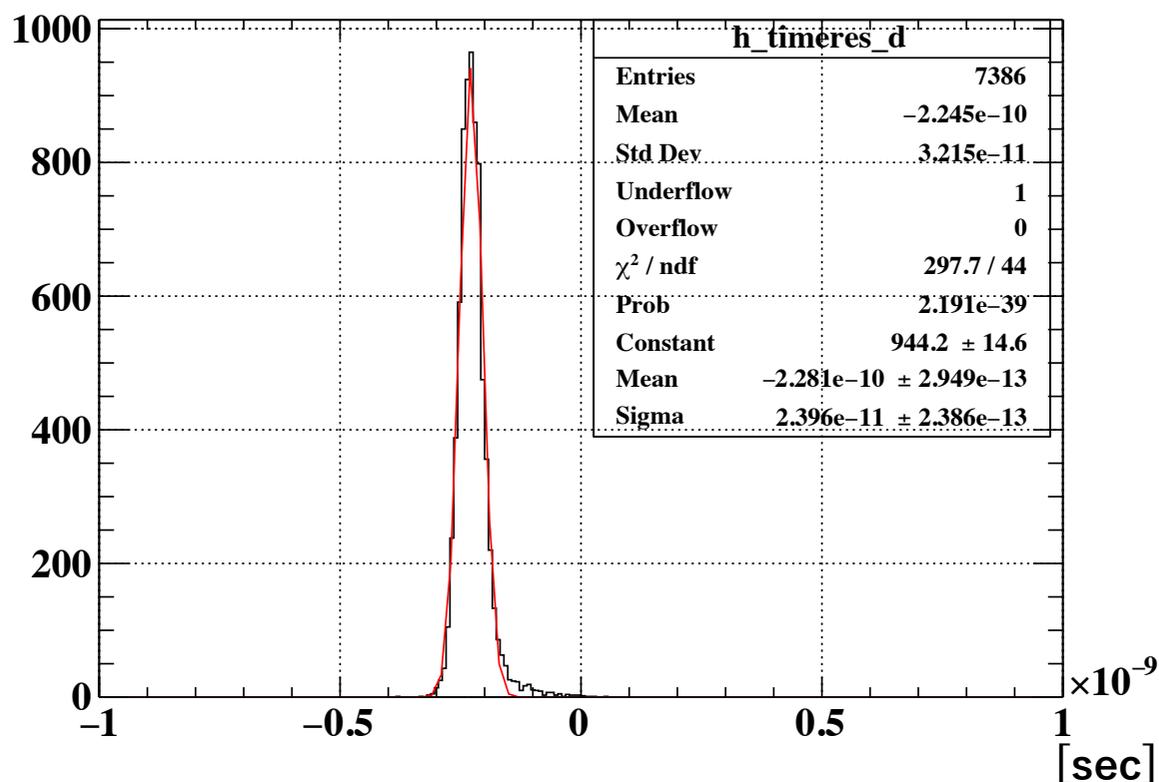


図 6.16: 式 6.2 に従ってプロットした LYSO 両端の時間差分布

6.2.3 タイミング取得

Leading edge を用いたタイミング取得

MPPC で検出した、電子ビームの信号は WDB によって波形取得される。今回のタイミング測定のポイントとして、シンチレーション光がある程度の時間の幅を持って MPPC に到達するため、良い時間分解能の測定のためにはシンチレーション光の中でも早いタイミングで MPPC に到達する光子 (early arrival photon) に注目したい。そのため今回の DAQ では波形を大きく増幅させ、early arrival photon に注目して波形の時間情報を取得する。取得した典型的な LYSO の波形は図 6.15 に表されているが、波形の上部は WDB の電圧の読み出しレンジを超えておりサチュレーションを起こしている。信号のタイミングは、図 6.15 のように波形の立ち上がる際にあるスレッシュホールドを超えた時間から定義する Leading Edge (以下 LE) 法を用いた。

図 6.15 の赤線で表されるように、LE 法では MPPC から得られた波形が LE スレッシュホールド V_{LE} を超えた時間を信号の立ち上がり時間 $t_{risetime}$ と定義している。一般にスレッシュホールドが低いほど MPPC に早く到達した光子の時間情報が得られ時間分解能は向上するが、低すぎるとノイズがトリガーされてしまうので時間分解能の評価において最適な LE スレッシュホールドを設定することは重要である。

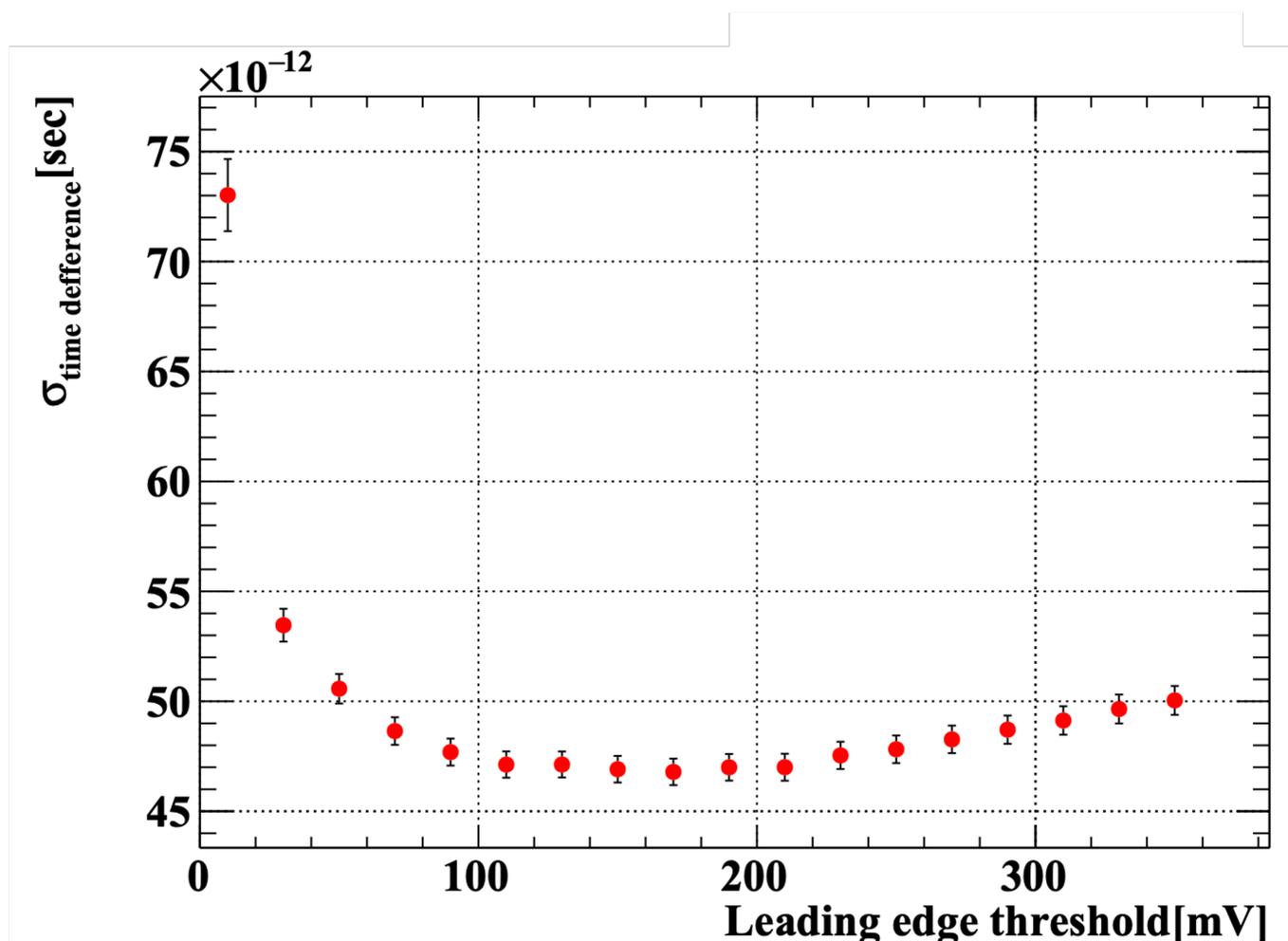


図 6.17: LE スキャンの例。3 × 5 × 50 FTRL の LYSO を 50 μm ピッチ独立 3ch で読み出した時の波形に対する、時間分解能の LE threshold 依存性

時間分解能の算出方法

ところで、時間分解能の値は、LE 法によって得られた $t_{risetime}$ を用いて LYSO の両端の MPPC のタイミングの差から求められている。TC をタイミングリファレンスとした時間分解能の算出は時間の都合上未解析である。以下に両端時間差による時間分解能の算出式 6.1 を示す。 $t_{right/left}$ は LYSO の端に接続された 3 つの MPPC に対して LE から取得した平均時間とする。

$$\sigma_{t_{LYSO}} = \sigma \left(\frac{t_{right} - t_{left}}{2} \right) \quad (6.2)$$

式 6.2 に従い、実際に電子ビームの信号から得られた LYSO 両端の時間差分布を図 6.16 に示す。図 6.17 に LE threshold ごとの時間分解能を示す。一般にスレッシュホールドが低すぎると信号に対してノイズがトリガーされる割合が増え、高すぎると信号の立ち上がり部分を捉えることができなくなり分解能は悪くなる振る舞いが確認できた。

6.2.4 Time walk の補正

より良い時間分解能を得るためには、波形ごとの大きさの違いによるタイミングのバイアスを以下の方法によって補正すべきだが、今回本論文で述べている結果には、時間の都合で補正なしで算出した時間分解能の値を用いている。

Time over threshold を使った補正

今回の測定は上述した事情により、波形がサチュレーションを起こしているため、波形の大きさの違いによる立ち上がりの時間のふらつき (Time walk) を、波形があるスレッシュホールドを超えていた時間 (Time over threshold, TOT) を用いて補正することができる。

Template 波形を使った補正

WDB のゲインでは 50 倍の倍率が良い時間分解能を示すことが多かった。一方で DAQ においていくつかのイベントは 50 倍増幅された波形が WDB の時間レンジの最大値を越え、立ち下がりが記録されないイベントが見られた。立ち下がりのタイミングが不明な場合、TOT の値を知ることができないので、テンプレート波形を使用した波形の大きさを再現する別の方法による Time walk 補正を行った。ここでは波形全体が記録されている低ゲインのデータから得られた MPPC 信号のテンプレート波形を作成し、50 倍などの高ゲインの波形の立ち上がり部分に対してテンプレート波形のフィットを行い、元の波高を再現することで Time walk の補正を行うことができる。

6.3 測定結果

6.3.1 最適な MPPC ピッチ、MPPC 接続方法

ピッチ違いや接続方法違いの比較はシンプルな測定状況 (垂直中心入射、50 μm ピッチ MPPC) で最も時間分解能が良かった $3 \times 10 \times 50 \text{ mm}^3$ サイズの LYSO をサンプルとして測定した。以下の表 6.3 にピッチや接続方法ごとの時間分解能の比較の結果をまとめる。また、 $3 \times 5 \times 50 \text{ mm}^3$ における独立接続と直列接続の時間分解能の比較も表 6.4 にまとめた。

結果としては、50 μm かつ直列接続が最も時間分解能が良かった。タイミング性能に対して、1 光子に対する増倍率と、光子の統計量に関わる光子検出効率どちらも高いピクセルピッチの大きい MPPC の方が良い時間分解能を示している。

接続方法に関しても直列の方が独立よりも良い時間分解能を示している。理由として考えられるのは、図 6.18 を見てわかるように、直列の接続の場合 3 つの MPPC は受光面積が 3 倍の 1 つの MPPC となり、出力されるのは独立よりも大きな波形 1 つであるのに対して、独立の場合は 3 つのうち端の MPPC は波高が中央の MPPC に比べ小さくなり 3 つの波形はそれぞれ異なる大きさを持つ。そのため独立の場合は信号の時間情報を算出する際に波形の大きさ依存のばらつき (time walk) が出やすく、直列の場合はそもそも一つの大きな波形なのでその効果が小さい。ゆえに直列接続の方が良い時間分解能を示していると考えられる。しかしながら後述する time walk 補正を行えば独立と直列の時間分解能の差は小さくなる可能性がある。

表 6.3: MPPC ピッチ、接続方法ごとの時間分解能 (10 mm 幅) [ps]

pixel size \ 接続方法	独立	直列
10 μm	68.2	56.8
15 μm	42.8	38.8
50 μm	28.6	25.7

表 6.4: MPPC ピッチ、接続方法ごとの時間分解能 (5 mm 幅) [ps]

pixel size \ 接続方法	独立	直列
50 μm	36.9	26.4

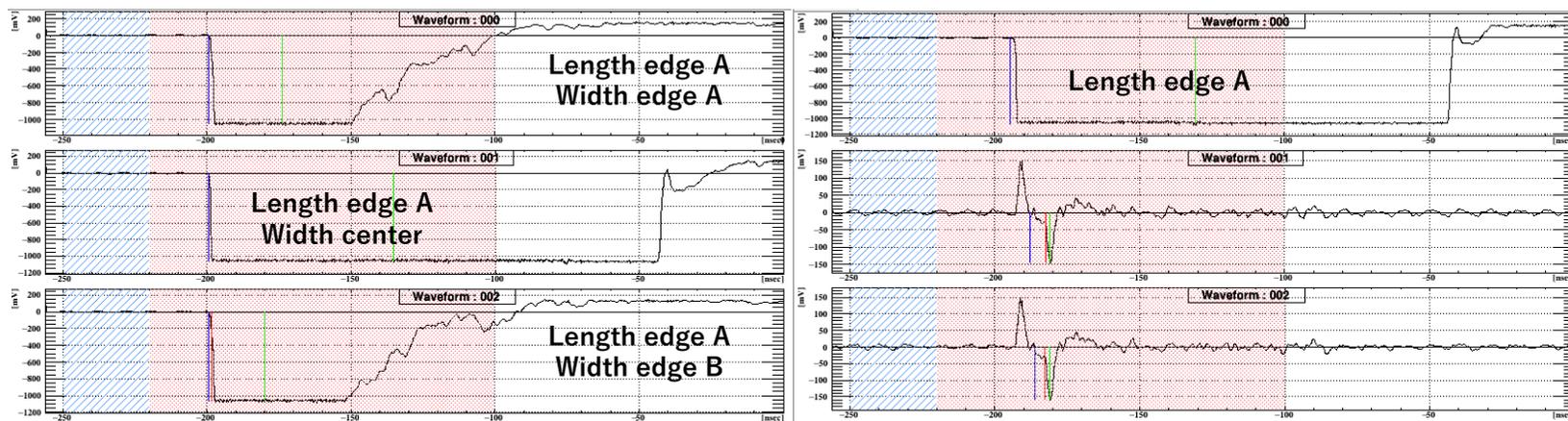


図 6.18: 左：独立接続した 3 つの MPPC の波形。右：直列接続した 3 つの MPPC の波形。

右図 2,3 段目の空のチャンネルに見えているノイズは、信号チャンネルの信号が WDB 内のチャンネル間のクロストークによって他の空チャンネルに干渉したものと考えられる。

6.3.2 光量、エネルギー分解能

LYSO は荷電粒子のデポジットエネルギーを測定できるアクティブなコンバーターとして導入するため、光量及びエネルギー分解能について評価する必要がある。LYSO から得られた光電子数の算出方法としては、まず、取得した MPPC のダークカウントのデータから 1 光子の電荷量を求める。次に、低ゲインで信号波形全体がおさまっているデータから信号の電荷量を求める。これを 1 光子の電荷量で割り、ゲインなどの逆算を行うことで LYSO で検出された photo electron (p.e.) 数を算出することができる。

今回、1 光子を見積もることができたのは 50 μm ピッチの MPPC を独立接続したデータのみで、他の基板では 1 光子の電荷のピークが小さく、1 光子の電荷量を特定できなかった。これは、50 μm ピッチの MPPC を独立接続の基板が、6.1.3 項で説明したように、15, 10 μm ピッチや直列接続と比べて信号の増倍率が最も大きい基板であったためと考えられる。詳細な解析により、これらの基板においても 1 光子の分布を確認できる可能性はあるが、時間の都合上以下では 50 μm ピッチの MPPC を独立接続したデータを示す。

エネルギー分解能

エネルギー分解能は上記の p.e. 数によって統計的に以下の様に制限される。

$$\frac{\sigma(E)}{E} \leq \frac{1}{\sqrt{N_{p.e.}}} \quad (6.3)$$

4 章で述べたペアスペクトロメーターへの要求性能として、エネルギー分解能は信号エネルギーに対して 0.4% のエネルギー分解能を要求される。LYSO の dE/dX は文献にもよるが例えば、1.12 MeV/mm であり、3mm の LYSO では電子陽電子で 6.72 MeV となる。このデポジットエネルギーに対して、52.8 MeV \times 0.4% \sim 210 keV 程度のエネルギーを見分けることが求められる。つまり、上式より 3 mm の LYSO に対して、少なくとも一つの荷電粒子に対して約 500 個の検出光子数が必要となる (1.5 mm 厚で約 120 個)。ただし、ここ見積もったデポジットエネルギーはガンマ線がコンバーターに入射直後に対生成した時の荷電粒子が落とすエネルギーであり、要求光量の値は保守的な見積もりであることに注意されたい。

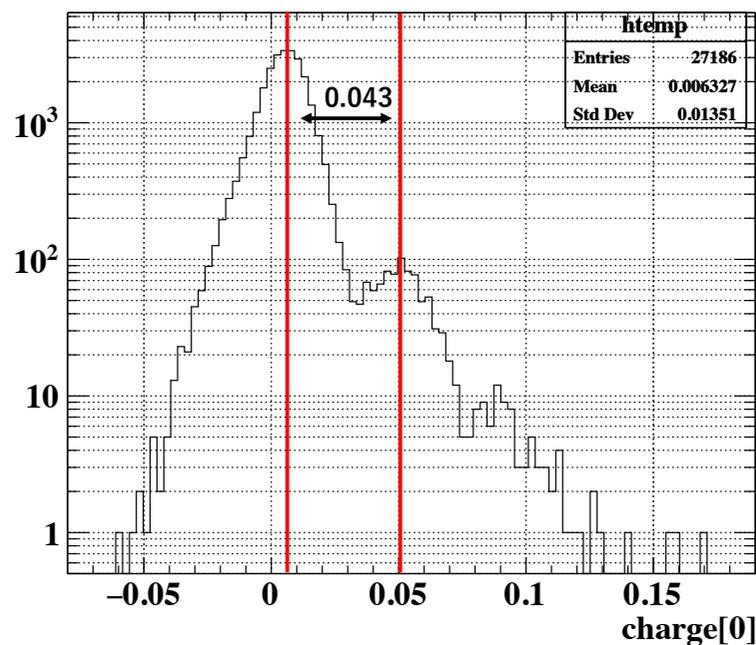


図 6.19: 50 μm ピッチの MPPC を独立接続してダークカウントを測定した時の電荷分布。縦軸は対数スケールである。

1 光子の電荷量

1 光子 (1 p.e.) の電荷量は、50 μm ピッチの MPPC を独立接続した基板を用いて、ゲイン 50 倍で MPPC のダークカウントを測定して求めた。図 6.19 に測定したダークカウントの電荷量分布を示す。また、図 6.19 では、3 つの電荷分布のピークが見えておりこれらがペDESTAL と 1 p.e.、2 p.e. の電荷分布と考えられる。

図 6.19 から、ペDESTAL と 1 p.e. の MPV を比較し、見積もられた 1 p.e. の電荷量 (図中では charge と表示されており、 e を素電荷として $1 \text{ charge} = e \times 10^9 \text{ C}$) は、0.043 charge であった。

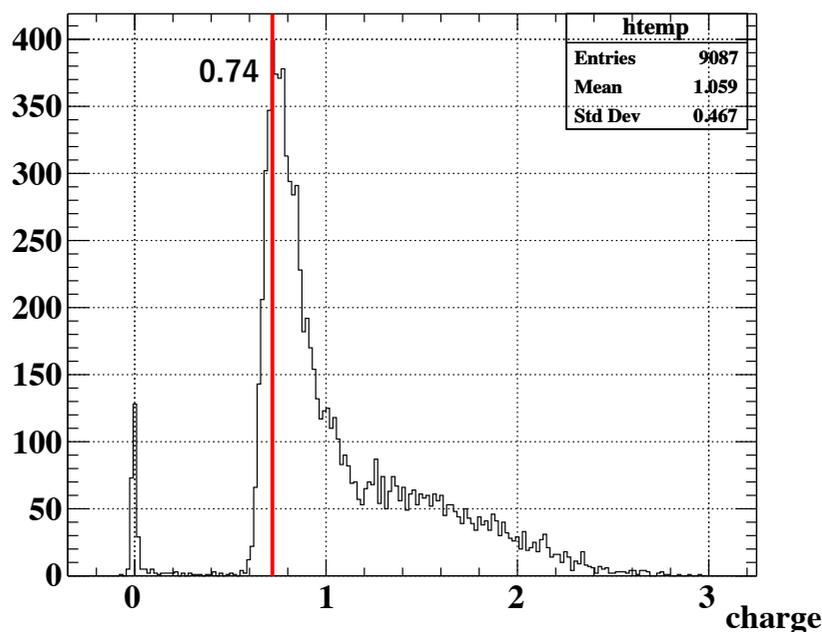


図 6.20: 3×5×50 (FTRL) サイズに 50 μm ピッチの MPPC を独立接続した時の電荷分布

表 6.5: LYSO サイズごとの光量

サイズ	光量 [p.e.]	$\sigma(E)$ [keV]
3×5×50 (FTRL)	1720	120
3×5×50 (NORMAL)	2160	100
1.5×5×50 (FTRL)	978.0	80
3×10×50 (FTRL)	2210	100
3×5×100 (FTRL)	1560	120

光量の見積もり

上記の方法で算出した 1 p.e. 電荷量を用いて、LYSO サイズごとの光量を見積もった。比較するデータは全て、電子ビームを上流側 LYSO の中心に垂直入射させ、同じ MPPC の V_{OVER} でデータ取得したものである。また、LYSO で検出した電荷量は図 6.20 のようにランダウ分布に従った分布となっており、分布の MPV から電荷量を算出した。LYSO サイズごとの光量とエネルギー分解能を表 6.5 に示す。ただし、ここでの光量及びエネルギー分解能は、ガンマ線が入射した直後にコンバージョンが起こった場合の、光量分布 (ランダウ分布) の最頻値に対するものである。また、 $\sigma(E)$ は $6.72 \text{ MeV}/\sqrt{2} \times \text{p.e.}$ により算出した電子陽電子対に対するコンバーターのエネルギー分解能である。

結果として、全ての LYSO のサイズの光量は、要求される光量 500 p.e. およびアクティブコンバーターのエネルギー分解能 210 keV を十分満たしていた。

まず FTRL と NORMAL タイプの比較だが、6.2.1 で述べたように NORMAL の光量は FTRL タイプよりも多い結果となった。

LYSO (FTRL) のサイズごとの比較としては、3×5×50 を基準として、1.5 mm 厚のものは厚さが半分となったため光量も半分の値となり、コンシステントな結果であった。100 mm 長のサイズでは、1.5 mm 厚ほどではないが標準サイズから光量が落ちており、LYSO の中心から MPPC に到達するまでにシンチレーション光が 50 mm 長に比べて大きく減衰したことが原因として考えられる。10 mm 幅に関しては最も多くの光量が得られ

ており、これは 6.3.5 項でも言及するが、LYSO 側面に対する 3 つの MPPC の間の不感領域の割合と集光率の高さに起因している可能性が挙げられる。

6.3.3 時間分解能の位置依存性

LYSO の長さ方向に対して、ビームの照射位置を変えて垂直入射させ、時間分解能のスキャンを行った。以下の種類の LYSO に対して以下の表 6.6 に従って測定を行った。

表 6.6: DAQ リスト (位置スキャン)。(照射位置は長手方向の中心を 0 mm として、長さの 1 割の距離で 11 点スキャン)

LYSO のサイズ [T× W× L[mm ³]]	照射位置 [mm]
3× 5× 50 (FTRL)	-25 ~ +25
3× 5× 50(NORMAL)	-25 ~ +25
1.5× 5× 50 (FTRL)	-25 ~ +25
3× 10× 50 (FTRL)	-25 ~ +25
3× 5× 100 (FTRL)	-50 ~ +50

長さが 50 mm (100 mm) の LYSO では、結晶の端から端まで 5 mm (10 mm) ごとにシグマ光機社製のムービングステージ (OSMS33-300) で位置を変えて電子を入射させ計 11 点のスキャンを行った。また、ここでは MPPC は 50 μm ピッチのもので片側 3ch 独立接続しており、両端の時間差より時間分解能を算出している。図 6.21 から図 6.27 に異なるサイズの LYSO に対して 3 GeV の電子を入射させた時の時間分解能に対する位置スキャンの結果を示す。また、時間分解能が良かった 3× 10× 50 (FTRL) に関してのみ直列接続で位置依存性の測定を行ったため、そのプロットを図??に示す。

LYSO の両端に照射したデータ

図 6.21 に示したように、LYSO の両端で取得したデータは時間分解能が数 10 ps ほど極端に悪かった。これは TC によってトリガーされたとしても、LYSO にそもそも当たっていない事象 (あるいはかすっている事象) がデータに含まれていることが原因と考えられる。詳細な解析によってこういったイベントを取り除いた上で時間分解能を算出できる可能性はあるが、今回は時間の都合上、両端のデータを除いた結果を示す。

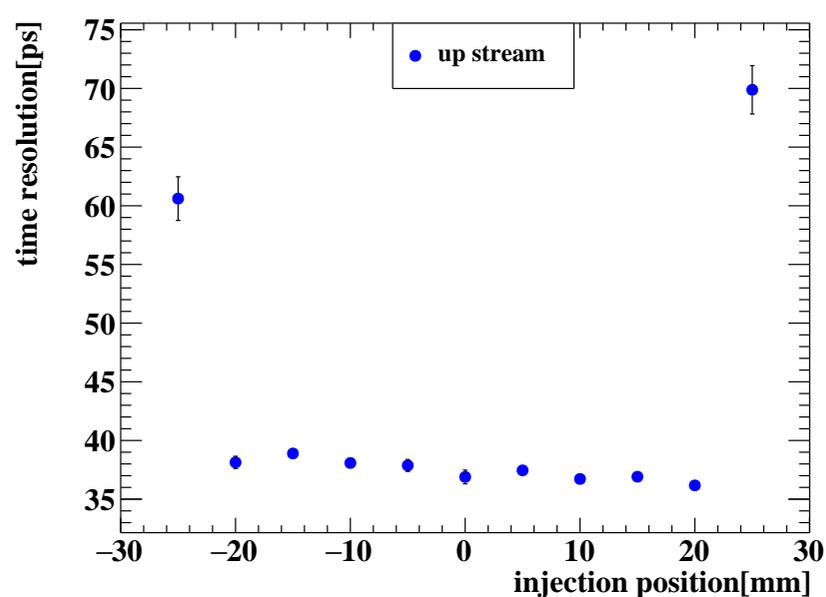
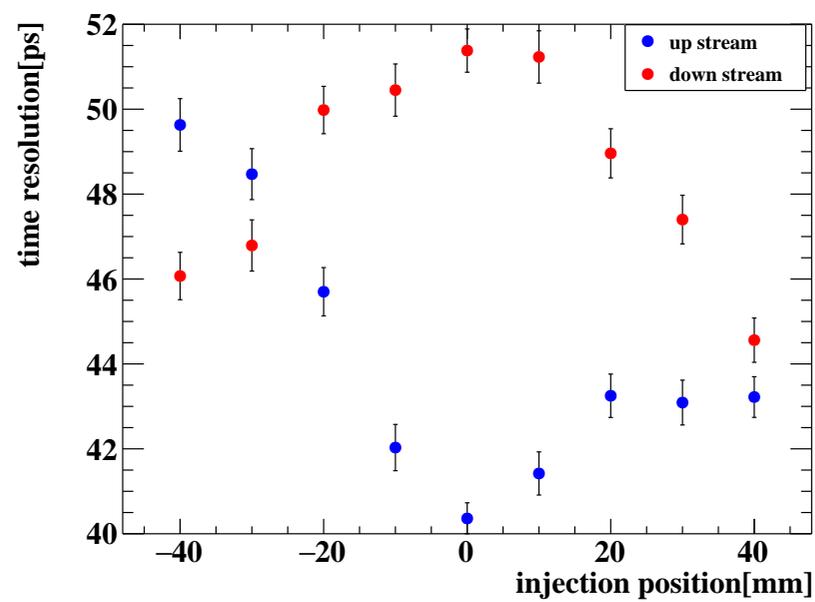


図 6.21: 3× 5× 50 (FTRL) の LYSO に対して行った時間差の時間分解能の両端を含む位置スキャン

上流側と下流側の非対称性

図 6.22: $3 \times 5 \times 100$ の LYSO に対して行った時間差の時間分解能の上流と下流側の位置スキャン

今回のビームテストでは上流下流に二つの LYSO を並べてデータ取得を行なった。しかしながら図 6.22 に見られるような上流下流の位置依存性には非対称性が見られた。また、全ての LYSO サイズにおいて上流側の時間分解能が良い傾向が見られた。この上流と下流の非対称性については、上流側で生じた二次粒子の影響があるので、下流側の時間分解能が影響を受けている可能性がある。そのため、以下の結果では下流側に設置していた NORMAL タイプのデータを除いて上流側のプロットを示す。

以下に、LYSO の端、ビーム下流 (NORMAL を除く) のデータを取り除いた上で、LYSO のサイズ、タイプごとの位置スキンの結果を示す。

- $3 \times 5 \times 50$ (FTRL)

$3 \times 5 \times 50$ (FTRL) のデータは FTRL と NORMAL タイプ二つの LYSO をそれぞれ一本ずつ、ビーム上流と下流に並べて取得した。以下に、FTRL と NORMAL に対する時間分解能の位置スキンの結果を示す。

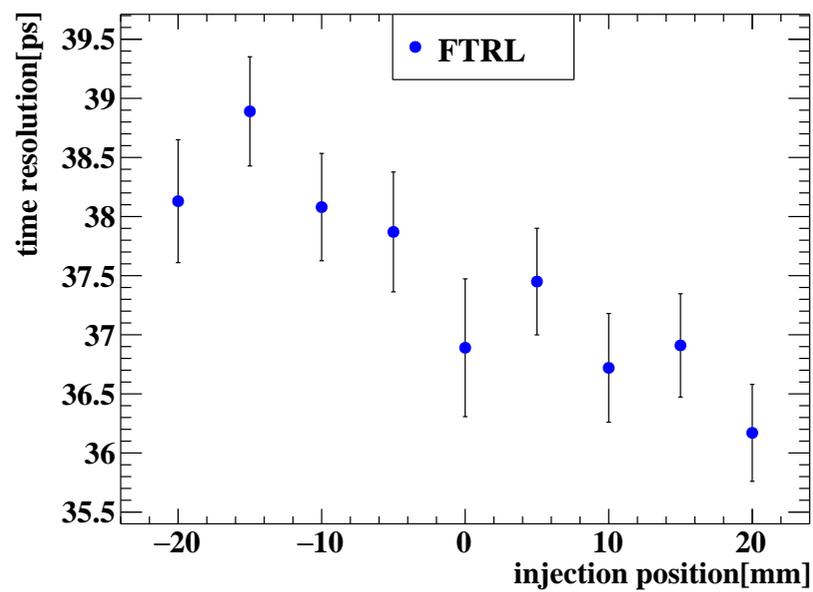


図 6.23: $3 \times 5 \times 50$ (FTRL) の LYSO に対して行った時間差の時間分解能の位置スキン

- $3 \times 5 \times 50$ (NORMAL)

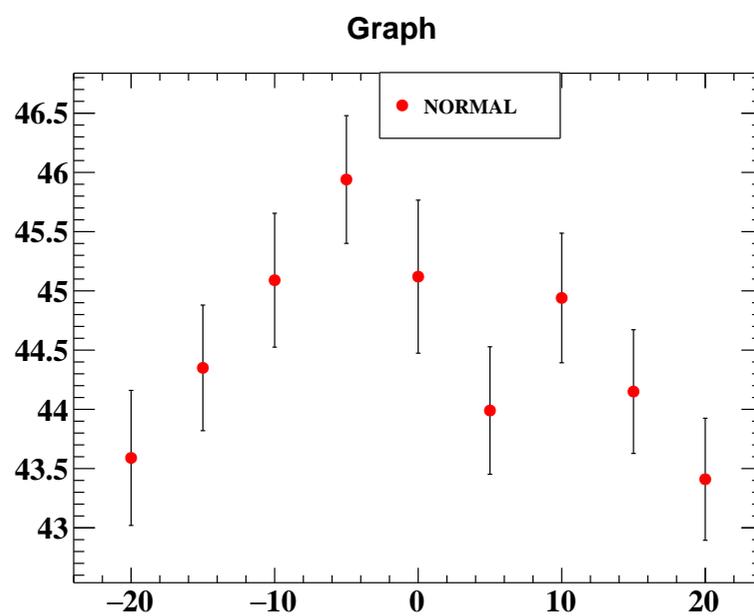


図 6.24: $3 \times 5 \times 50$ (NORMAL) の LYSO に対して行った時間差の時間分解能の位置スキン

- 1.5×5×50 (FTRL)

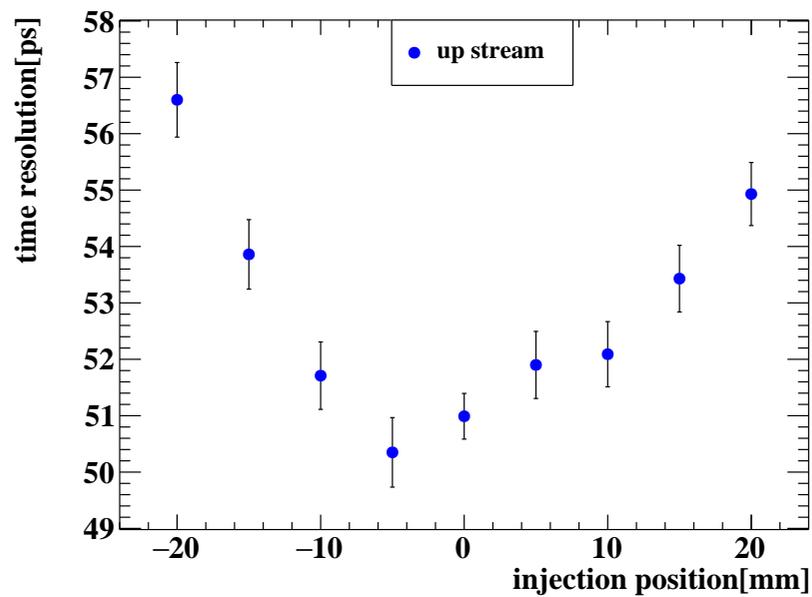


図 6.25: 1.5×5×50 の LYSO に対して行った時間差の時間分解能の位置スキャン

- 3×10×50 (FTRL)

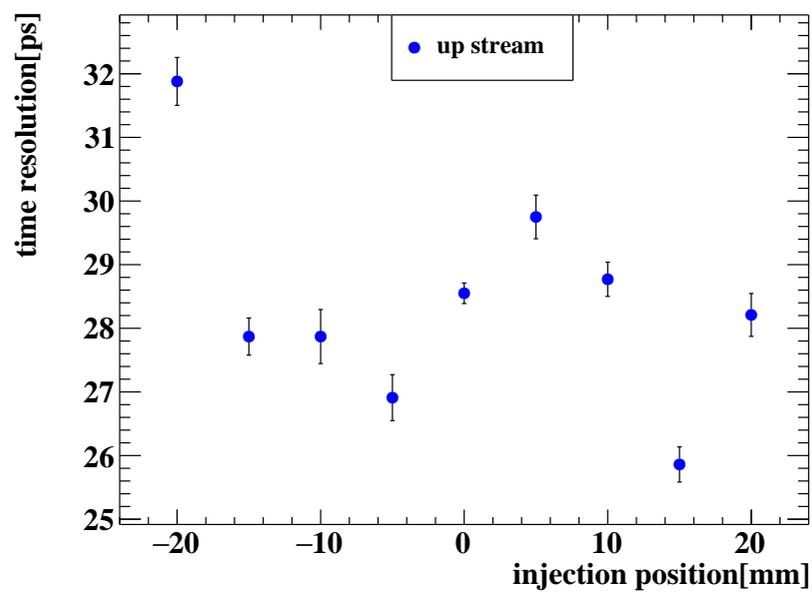


図 6.26: 3×10×50 の LYSO に対して行った時間差の時間分解能の位置スキャン

- 3×5×100 (FTRL)

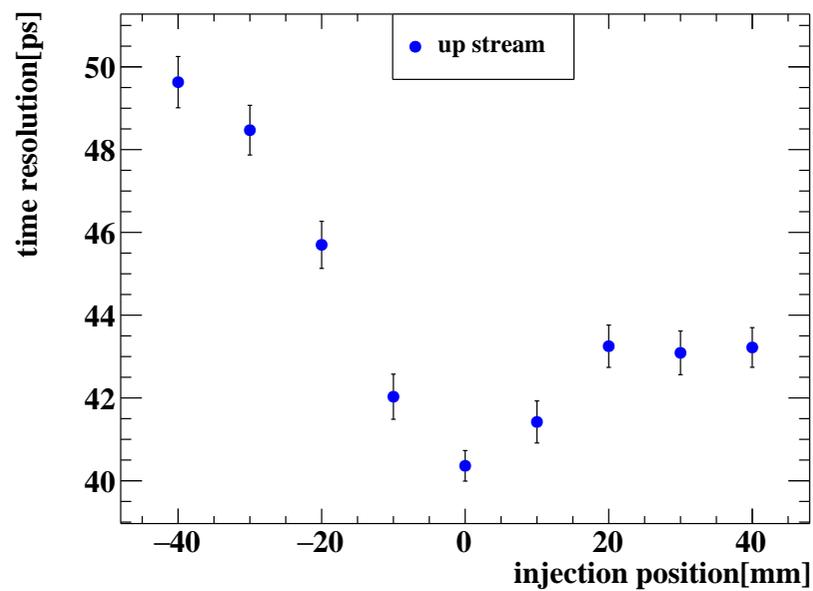


図 6.27: 3×5×100 の LYSO に対して行った時間差の時間分解能の位置スキャン

- 3×10×50 (FTRL)、直列接続

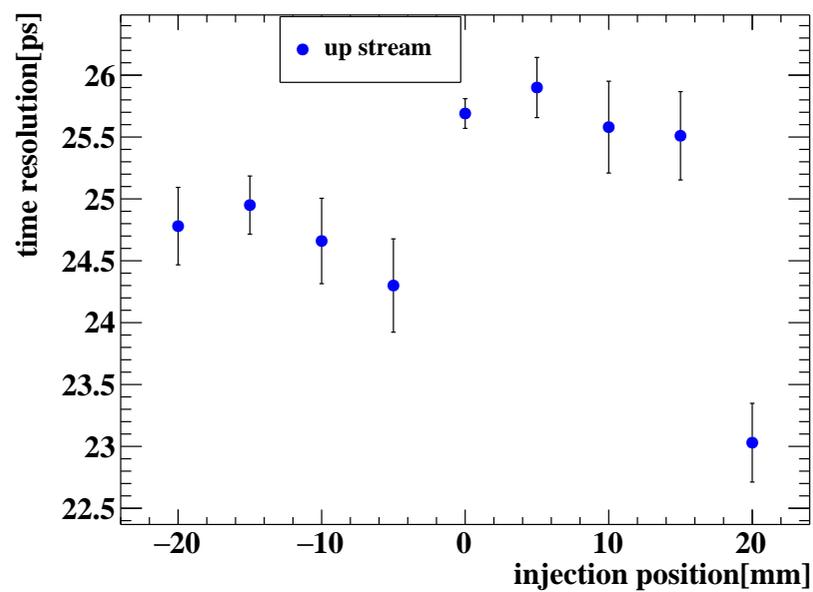


図 6.28: 3×10×50 (FTRL) の LYSO、直列接続に対して行った時間差の時間分解能の両端を含む位置スキャン

LYSO のサイズごとの時間分解能

表 6.7: LYSO の時間分解能 (中心照射)

LYSO のサイズ [T×W×L[mm ³]]	時間分解能 [ps](中心照射)
3×5×50 (FTRL)、独立接続	36.9
3×5×50 (NORMAL)、独立接続	45.1
1.5×5×50 (FTRL)、独立接続	51.0
3×10×50 (FTRL)、独立接続	28.5
3×5×100 (FTRL)、独立接続	40.4
3×10×50 (FTRL)、直列接続	25.7

上の表 6.7 でビームを中心に照射した時の時間分解能を LYSO のサイズごとにまとめた。今回は時間の都合上、両端のデータを除いた結果を示す。また、NORMAL タイプの LYSO を除き、全てのデータで時間分解能が良かった上流側の結果を記載している。

結果としては、10 mm 幅のサイズの LYSO が最も良い分解能を示している。理由として、LYSO の側面を MPPC がカバーできる割合、集光率の違いの二点が考えられる。まず 10 mm 幅と 5 mm 幅の比較として、1 点目に挙げた LYSO 側面に対する 3 つの MPPC の間の不感領域の割合が 10 mm 幅の方が小さいため、光量および時間分解能に影響している可能性がある。10 mm 幅と、5 mm 幅や 1.5 mm 厚の比較としては 2 点目の集光率が影響している可能性がある。薄い程、幅が狭い程、反射の回数が増えるので集光率が低くなるためである。また、時間分解能の位置依存性については端の分解能が著しく悪化すること以外に特徴的な傾向は確認できなかった。しかし、位置依存性の影響が強まることが予想される 100 mm 長のサイズに関しては、上流側の LYSO について、中心ほど時間分解能は良くなる傾向が図 6.27 から確認できた。また、上流側の LYSO は上流による二次粒子の影響が少ない下流側に比べて正確なデータが取れていることが期待できる。

光量と時間分解能の比較としては、6.3.4 項を見てわかるように LYSO サイズごとの時間分解能の良さは光量の多さと対応している。

6.3.4 時間分解能の角度依存性

ビームの照射角度を変えて LYSO の中心に照射させ、図 6.29 と図 6.30 のように時間分解能のスキャンを行った。LYSO の回転には、中央精機社製の回転ステージ (S-6012) を用いた。また LYSO のサイズは、ガンマ線がビーム軸から 30 度の角度で入射する z 座標の大きい位置の薄いコンバーターとして $1.5 \times 5 \times 50$ (FTRL) に加え、 $3 \times 10 \times 50$ (FTRL) のデータを取得した。90 度から 30 度の間で角度の刻みは 15 度とし、数点のデータを取った。また MPPC は $50 \mu\text{m}$ ピッチの独立読み出しである。

3 mm 厚の垂直入射と 1.5 mm 厚の 30 度入射はビームに対する実効的厚さが等しいため光量の面では同じ量が期待できるが、結果としては、1.5 mm 厚の時間分解能は 3 mm 厚の分解能を大きく下回っていた。さらに同一のサイズ内における角度依存性も入射角度が大きくなるほど光量が増え時間分解能も向上することが期待できるが、どちらのサイズにおいてもそのような傾向は見られなかった。

1.5 mm 厚の分解能が悪かった結果への考察として、MPPC で検出される光量は集光率が関連するため、1.5 mm 厚の分解能が悪いのは 3 mm 厚に比べて集光率が悪い可能性がある。前項で述べたように、1.5 mm 厚のように薄く幅が狭い程、反射の回数が増えるので集光率が低くなる。

また、 $3 \times 10 \times 50$ サイズで見られた、入射角度が大きくなるほど時間分解能の傾向については、シンチレーション光の発生位置の広がりが増える可能性が考えられる。例として、図 6.31 を見てわかるように、垂直入射と 30 度入射では長さ方向の発光分布の広がりには 3 倍以上異なる。この時、単純に時間差の標準偏差は約 1.7 倍に増え時間分解能は悪化する。このように、両端の時間差を見る場合には入射角度が大きくなるほど時間差分布の広がりが大きくなり、時間分解能は悪化することが予想される。

- $1.5 \times 5 \times 50$ (FTRL)

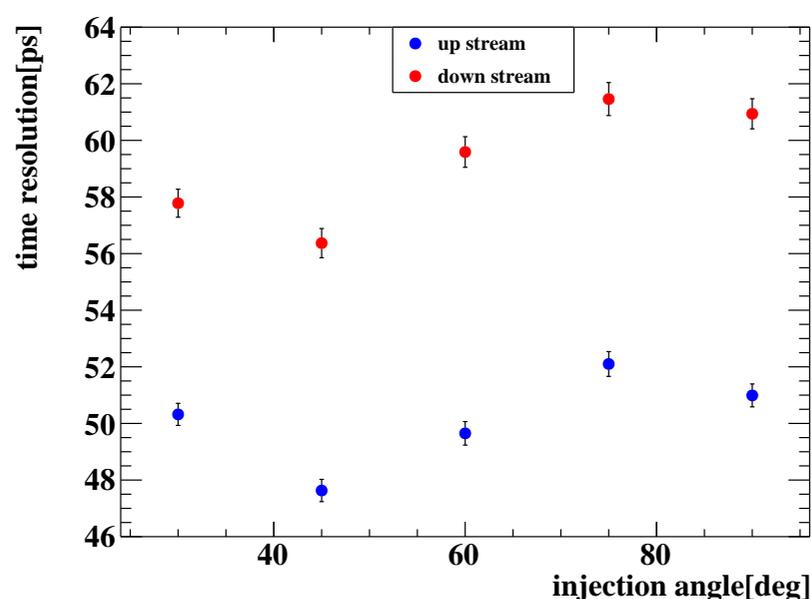


図 6.29: $1.5 \times 5 \times 50$ の LYSO に対して行った時間差の時間分解能の角度スキャン。青点：上流。赤点：下流

- 3×10×50 (FTRL)

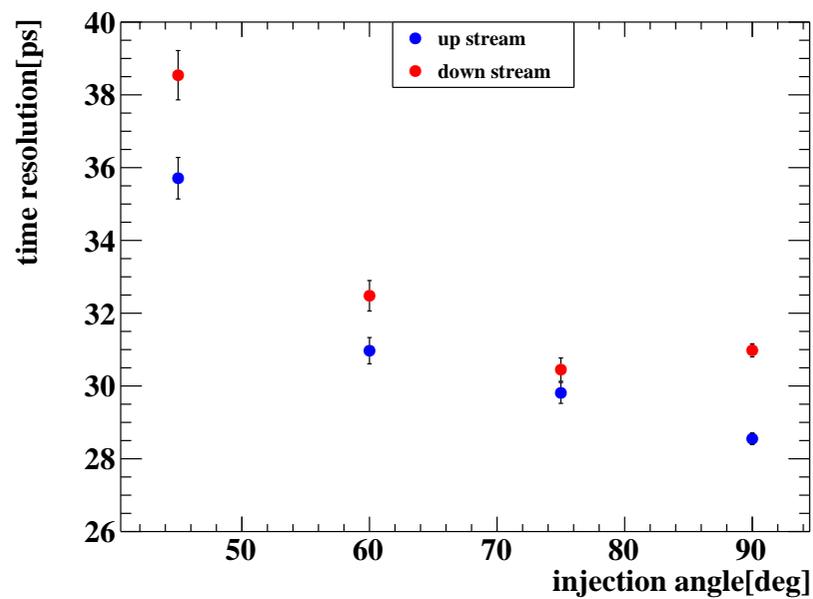


図 6.30: 3×10×50 の LYSO に対して行った時間差の時間分解能の角度スキャン。青点：上流。赤点：下流

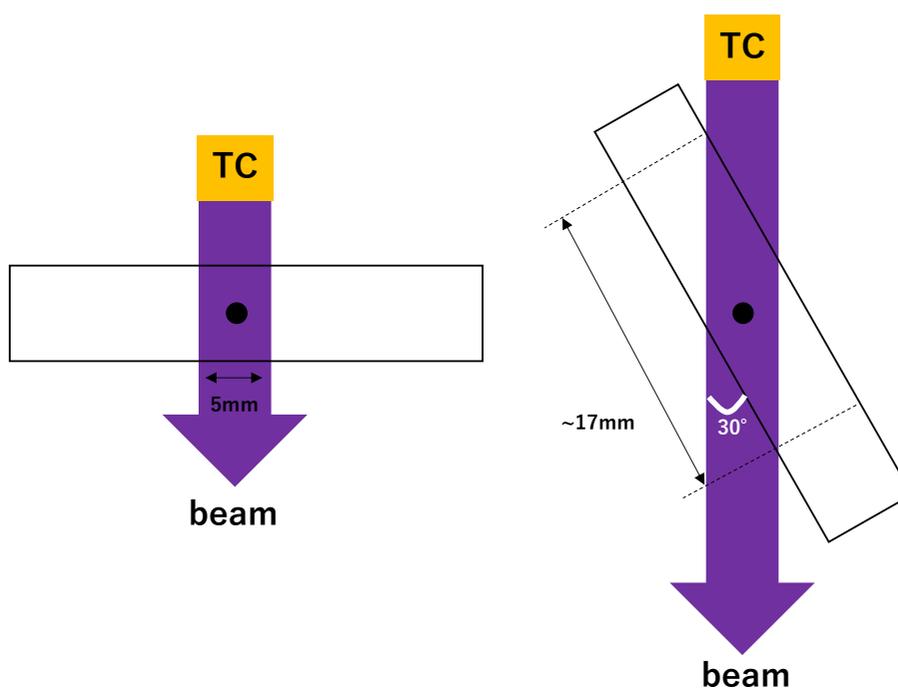


図 6.31: シンチレーション光の広がりの違い。垂直入射と 30 度入射。

6.3.5 まとめ

- LYSO のサイズ

10mm 幅を持つ LYSO が 3 つの $50 \mu\text{m}$ ピッチ MPPC を片側に直列接続した時、最も良い時間分解能を示した。要因として、他のサイズに比べて LYSO 側面に対する 3 つの MPPC の間の不感領域の割合が小さくと集光率が大きい可能性が考えられる。時間分解能 (中心照射) では約 26 ps を達成しており、アクティブコンバーターの時間分解能に対する要求値約 40 ps を十分満たすことがわかった。また、アクティブコンバーターの設計において重要な点として、検出効率を考慮した場合、 $3 \times 5 \times 50 \text{ mm}^3$ のサイズにおいても $50 \mu\text{m}$ ピッチ直列接続の時、エネルギー分解能約 100 keV (独立接続の和と直列接続で得られる電荷量が等しいと見なした時)、時間分解能約 26 ps と要求性能を十分満たしていることもわかった。先行研究 [11] で得られた時間分解能 40 から 50 ps から大きく分解能が向上した要因がいくつか挙げられる。まず先行研究の DRS ではアンプが DRS から独立しており、アンプごとに個体差があったためチャンネルごとにノイズ状況やゲイン等のばらつきが見られたのに対して、WDB ではアンプが内蔵されておりチャンネルごと比較的差異のない測定状況であった。さらに、 $15 \mu\text{m}$ の MPPC を片側 1 つの MPPC で読み出していた先行研究に比べて、増倍率と PDE が高い $50 \mu\text{m}$ の MPPC を使用し、片側 3 つの MPPC を直列接続して読み出したことで光子統計量の面でも向上が期待される測定環境であったことが挙げられる。

- LYSO のタイプ

時間分解能に関しては、上流下流の差はあるが、NORMAL タイプよりも FTRL タイプの方が良い値を示した。光量については、NORMAL タイプの方が多かった。

- 時間分解能の位置依存性

多くのサイズでは長さ方向の端部分を除いて強い位置依存性は見られなかったが、100 長のサイズに関しては、長さ方向の中心ほど時間分解能は良くなる傾向が見られた。

- MPPC ピッチ

MPPC のピクセルピッチが大きいほど時間分解能は良くなった。

- MPPC 接続方法

MPPC は独立読み出しよりも、直列で読み出した方が時間分解能が良かった。

- LYSO サイズごとの光量

簡易的な見積もりではあるが、全てのサイズの LYSO において要求される光量を達成していた。

シミュレーションにより、ビームテストと将来実験どちらの場合でも荷電粒子が生成する光量は変わらないことがわかり、ビームテストでの時間分解能、エネルギー分解能を将来実験においても実現できることを示した。

第 7 章

結論

7.1 結論

本研究では、次世代の $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊探索実験のための光子ペアスペクトロメーターの開発として時間分解能及びエネルギー分解能について将来実験で要求される性能を満たすアクティブコンバーターの開発を目指して、シミュレーションによるジオメトリの評価とビームテストによる実機の性能評価を行った。 1.5×10^{-15} の探索感度を実現するためにアクティブコンバーター型ペアスペクトロメーターに要求される性能は、測定分解能 (エネルギー 0.4 %, 時間 30 ps, 位置 0.2 mm) であるが、コンバーターに要求される時間分解能は約 40ps となる。

シミュレーションの結果として、読み出しチャンネル量を考慮した標準的なサイズ $3 \times 5 \times 50 \text{ mm}^3$ において、比較的高い検出効率を得られることがわかった。ビームテストの結果として、波高依存性などの補正を行わないシンプルな解析で $3 \times 10 \times 50 \text{ mm}^3$ サイズかつ FTRL タイプの LYSO の時間分解能が他のサイズと比較して最も良かった。この時の測定環境は、電子ビームが LYSO 中心に入射、かつ読み出し用の MPPC はピクセルサイズが $50 \mu\text{m}$ のものを LYSO 側面に 3 つ直列接続した時、約 26 ps の時間分解能を持つことがわかり、要求される約 40 ps を十分に達成していた。また、光量についても、簡単な見積もりではあるが測定した全ての LYSO サイズにおいてエネルギー分解能約 100 keV を達成しており、ペアスペクトロメーターに要求されるエネルギー分解能約 200 keV を達成することがわかった。これにより、LYSO と MPPC を組み合わせたカウンターは将来実験で用いるアクティブコンバーターの候補として、要求されるエネルギー分解能と時間分解能を十分満たすことが示された。また、具体的なアクティブコンバーターの設計としては、高いガンマ線検出効率と将来実験の要求性能を満たす時間分解能とエネルギー分解能を合わせ持つのは、 $3 \times 5 \times 50 \text{ mm}^3$ の LYSO 側面に $50 \mu\text{m}$ ピッチの MPPC(S141460-3050HS) を 3 チャンネル直列接続した時であることがわかった。

7.2 今後の展望

今回のビームテストの結果をより詳細に解析し正確な時間分解能を評価するための今後の課題として以下のような解析の余地が残されている。

波形に乗ったクロックノイズは周期的なノイズであるため詳細な解析により差し引くことができる可能性がある。また、時間分解能の算出方法についても両端時間差ではなく TC との時間差を用いた解析も行い、両端時間差と比較する必要がある。TOT や Template 波形を用いた波高ごとのばらつきの補正も残されており、補正の結果によってはさらに時間分解能が向上する可能性がある。先行研究では宇宙線で要求エネルギー分解能を十分満たすことがわかっているが、今回の電子ビームによる光量及びエネルギー分解能の正確な評価も今後の重要な課題である。また、位置依存性や角度依存性に対してはビームテストの結果に対して完全な考察ができておらず、今後の詳細な解析やシミュレーションを通して一貫性のある評価が必要である。

謝辞

まず、私に本研究を行う機会を与えてくださった森俊則教授に深く感謝いたします。私が学会発表やビームテストにおいて得た経験は非常に価値のあるものと感じており、修士課程の2年間は非常に充実した日々でありました。

研究活動におきましては、大谷航准教授にはお忙しい中にも関わらず、ビームテストの手続きから学会発表に至るまで非常に多くの機会に助言やコメントを頂いたことで、円滑かつ有意義に研究活動を進めることができました、ありがとうございました。

また、PSIの方々にも多くの機会において助けられ、岩本敏幸助教授には常に丁寧なコメントをいただき、内山雄祐助教授にはミーティングの際に的確なご指摘をいただきました。潘晟特任助教授には、研究活動の進め方や基礎知識に疎かった修士一年の時期から懇切丁寧に指導していただき、非常にお世話になりました。大矢淳史さん、米本拓さん、山本健介さん、松下彩華さん、Lukas Gerritさんにはミーティング等でのコメントからスイスや東京での生活まで大変お世話になりました。東京の方々には特に日常生活において多くの機会に交流していただきました。ILCの増田隆之介さん、村田樹さんには研究活動から大学生活まで交流していただき感謝しております。将来実験研究の先輩である池田史さんには、喫煙所での小さな議論から、実際に研究を進める上でのハードウェアからソフトウェアの分野における指導など、様々な場面で助けていただきました。同期である李維遠さんには、入学当初から慣れない東京生活と研究生活の中で多くの場面で助けていただき、日々刺激を受けておりました。時には大変な時期を共有しながら、研究においてお互いを高め合えたことに感謝いたします。

また、後輩である馬越隆成さん、小川拓泰さん、神山大樹さん、高津大誠さんにはビームテストの準備、手伝いや共に研究生活を楽しめたことに感謝いたします。

さらに、事務室の秘書の方々には全くわからなかった渡航や出張の手続き、物品の購入まで、研究を進める上で欠かせないサポートをしていただきました。

最後に、こちらでは書き切れなかった、私の研究生活において関わってくださった方々ならびに生活面で支えていただいた家族、友人の方々に対して感謝を申し上げたいと思います。

参考文献

- [1] <https://ja.wikipedia.org/wiki/%E6%A8%99%E6%BA%96%E6%A8%A1%E5%9E%8B>
- [2] J.A. Casas, A. Ibarra, "Oscillating neutrinos and $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ ", Nucl. Phys. B, 618(1-2):171–204, (2001)
<https://arxiv.org/abs/hep-ph/0103065>
- [3] Super-Kamiokande Collaboration, "Evidence for oscillation of atmospheric neutrinos", Physical Review Letters 81: 1562(1998)
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.81.1562>
- [4] Muon g - 2 Collaboration, Phys. Rev. Lett. 126, 141801 – Published 7 April(2021)
<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.126.141801>
- [5] MEGII Collaboration, "A search for $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ with the first dataset of the MEG II experiment"
<https://arxiv.org/abs/2310.12614>
- [6] MEGII Collaboration, "Operation and performance of MEG II detector"
<https://arxiv.org/abs/2310.11902>
- [7] MEGII Collaboration, "The design of the MEG II experiment", Eur. Phys. J. C 78 (380) (2018)
<https://arxiv.org/abs/1801.04688>
- [8] 大谷航, 「世界最高感度のミュー粒子稀崩壊探索で迫る素粒子の大統一」, 令和 3(2021) 年度 基盤研究 (S) 研究計画調書
<https://kaken.nii.ac.jp/ja/grant/KAKENHI-PROJECT-21H04991/>
- [9] André Schöning, "High Voltage Monolithic Active Pixel Sensors(HV-MAPS)", NuFact 2021, Cagliari, 6.-11. September (2021)
<https://www.psi.ch/de/media/69138/download?attachment>
- [10] M. Barakat et al., "Construction of the MEGA photon detector", Nucl. Instr. and Meth. A 349 (1994) 118
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0168900294906157>
- [11] 池田史, 「将来の $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 探索実験のためのアクティブコンバーターを用いた光子ペアスペクトロメーターの開発」, 修士論文 (2022)
https://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/download/master/m2022_ikeda.pdf
- [12] Geant4 公式ウェブサイト
<https://geant4.web.cern.ch/>
- [13] ARTBL 利用手引き
<https://wiki.kek.jp/pages/viewpage.action?pageId=236520770>
- [14] <https://wiki.kek.jp/display/artbl/Documents>
- [15] 使用した浜松フォトニクス社製の 50 μm pitch MPPC: S14160-3050HS
https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/mppc_mppc-array/S14160-3050HS.html
- [16] 同じく 10, 15 μm pitch MPPC: S14160-3010HS, S14160-3010HS

- https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/mppc_mppc-array/S14160-3015PS.html
- [17] Groom, D.E., Klein, S.R, "Passage of particles through matter", *Eur. Phys. J. C* 15, 163–173 (2000)
<https://doi.org/10.1007/BF02683419>
- [18] The National Institute of Standards and Technology (NIST)
<https://physics.nist.gov/PhysRefData/Star/Text/ESTAR.html>
- [19] 浜松フォトニクス, MPPC 技術資料
https://www.hamamatsu.com/content/dam/hamamatsu-photonics/sites/documents/99_SALES_LIBRARY/ssd/mppc_kapd9008j.pdf
- [20] L. Galli et al., "WaveDAQ: An highly integrated trigger and data acquisition system", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators. Spectrometers. Detectors and Associated Equipment*. Volume 936(2019). Pages 399-400
<https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.07.067>
- [21]] S. Ritt, R. Dinapoli, U. Hartmann, Application of the DRS chip for fast waveform digitizing, *Nucl. Instrum. Methods. A* 623 (1) (2010) 486–488.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2010.03.045>