

著者	ふりがな 氏名	さかさばら れい 榊原 滯
表題	感度 $O(10^{-15})$ の $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索を目指した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の開発	

本論文の内容に捏造・改ざん・盗用はない（チェックをお願いします）

論文概要（全体で4ページに収まるようにページを増やして構いません）

$\mu \rightarrow e\gamma$ は標準模型において極めて強く抑制されており、ニュートリノ振動を含む拡張標準模型においても分岐比は 10^{-54} 程度である。そのため、 $\mu \rightarrow e\gamma$ の観測は標準模型を超える新物理の存在を直接示す決定的証拠となる。特に、有効場理論の枠組みでは $O(10^{-15})$ 感度の $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索により $O(10 \text{ TeV})$ スケールの新物理に到達することが可能であり、 $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験は高エネルギーフロンティアで到達できない領域を探ることができる。

現在 $\mu \rightarrow e\gamma$ を探索している MEG II 実験は、2026 年までのデータ取得で分岐比感度 6×10^{-14} に到達することを目標としている。一方で、MEG II で発見がなかった場合のさらなる探索や、発見後の精密測定を動機として、 $O(10^{-15})$ 感度での $\mu \rightarrow e\gamma$ 将来探索実験を計画している。

PSI におけるミューオンビームライン強度増強計画 (HIMB) [1] により、2029 年より約 100 倍のミューオンレートが供給可能となる。統計量の増大により感度向上が期待される一方で、主な背景事象である偶発事象の数が大幅に増加する。背景事象数は光子エネルギー分解能の二乗に比例するため、ガンマ線検出器の分解能向上は $O(10^{-15})$ 感度達成のための決定的要素である。

本研究では、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(Figure. 1)を用いて高いエネルギーおよび時間分解能を実現し、偶発的背景事象を削減するためのガンマ線検出器の性能評価と実証を行った。本方式では、ガンマ線を薄いコンバーター層で電子・陽電子対へ変換し、その運動量をペアトラッカーで測定することで高精度エネルギー再構成を行う。さらにコンバーター自体をシンチレーター (LYSO 結晶) として動作させることで、対生成位置におけるエネルギー損失情報、および高精度時間情報を取得する。これにより、従来のパッシブコンバーター方式では困難であった偶発的背景

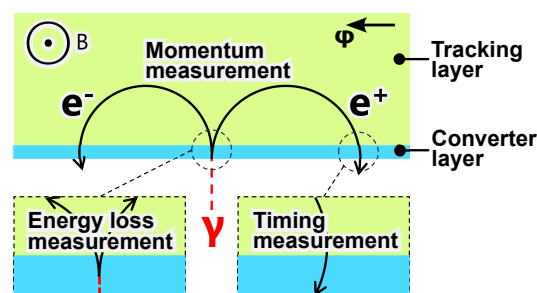


Figure 1. アクティブコンバーター型ペアスペクトロメーターによるガンマ線測定原理。

の強力な抑制が可能となる。

まず、ペアスペクトロメーターによる測定の原理実証として詳細なモンテカルロシミュレーションを行い、信号効率・レート耐性・背景スペクトラムへの影響を包括的に評価した。信号効率を物理過程起因とトポロジー起因に分解し、コンバーター厚みおよび層構造の最適領域を定量的に決定した。また、ヒット重なりや角度依存性を評価し、将来高レート環境においても性能が維持される設計条件を明確化した。

次に、アクティブコンバーター部分のハードウェア性能の実証のため、LYSO 結晶を用いたアクティブコンバーター試作機を製作し、KEK PF-AR テストビームラインにおいて電子ビーム試験を実施した(Figure 2.)。波形解析アルゴリズムの開発、較正手法の確立、系統誤差評価を含む包括的解析の結果、約 25 ps の時間分解能(Figure 3.)および $O(10^4)$ 光電子の光量(Figure 4.)を達成した。これは設計要求 (1100 光電子、40 ps) を大幅に上回る性能である。

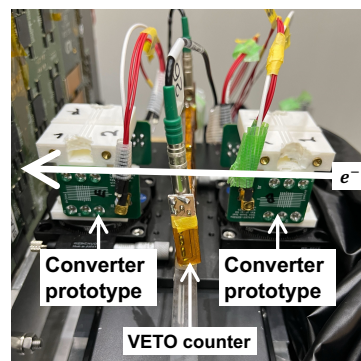


Figure 2. アクティブコンバーター試作機の電子ビーム試験のためのセットアップ。

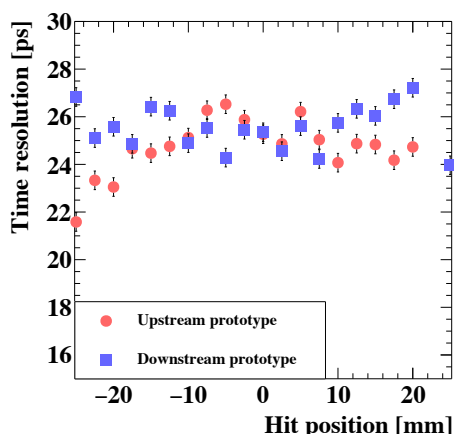


Figure 3. アクティブコンバーター試作機の、ビーム入射位置に対する時間分解能。

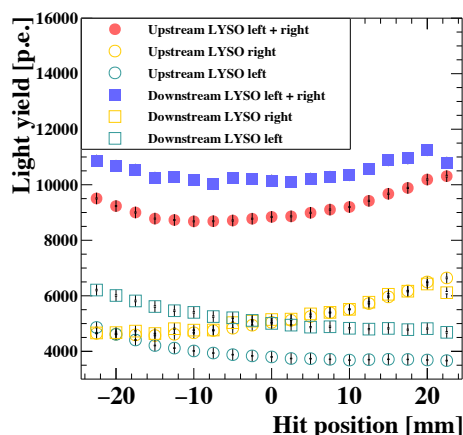


Figure 4. アクティブコンバーター試作機の、ビーム入射位置に対する光量。

さらに、実測性能を用いて将来実験感度を再評価した結果、本方式を導入することで約3年間のデータ取得により $O(10^{-15})$ 領域への到達が可能であることを示した。

本研究は、アクティブコンバーター型ペアスペクトロメーターの実装可能性を理論的評価と実証実験の両面から示し、次世代 $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験に対する具体的設計指針を与える成果である。

[1] R. Eichler, et al., IMPACT conceptual design report URL <https://www.dora.lib4ri.ch/psi/islandora/object/psi%3A41209>

アピールポイント

(本論文において特に自身が力を入れた部分や独自のアイデアがあれば記載してください。全体で4ページ以内に収ま

る範囲でページを増やして構いません。)

本研究では、 $O(10^{-15})$ 感度の $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験を成立させるために必要なガンマ線測定性能を明確化し、その実装可能性をシミュレーションおよびビーム実証の両面から検証した。特に以下の4点に重点を置いて研究を遂行した。

シミュレーション結果の体系的な評価指標を構築

研究の出発点は、アクティブコンバーター型ペアスペクトロメーターの性能を精度良く評価できる包括的なシミュレーション基盤を整備することであった。Geant4を用いて、コンバーター層・ペアトラッカー層からなるペアスペクトロメーターの、将来実験における幾何構成を含む詳細な検出器モデルを構築し、単なるエネルギー損失評価に留まらず、**ペアスペクトロメーターによるガンマ線検出原理全体を総合的に解析可能な環境を構築**した。特に、信号効率を「物理過程に由来する効率」と「事象トポロジーに由来する効率」に分解して評価した点は本研究の大きな工夫である。また、物理過程に由来する効率も、ガンマ線が変換される確率による寄与と、変換される位置に依存してエネルギー再構成精度が変化することの寄与を分解して評価した。これらの分解により、感度を制限する支配的要因を明確化し、設計上のボトルネックを物理的に理解した上で最適化を進めることが可能となった。単なるパラメータスキャンではなく、現象論的理解に基づいて検出器設計を体系化した点が本研究の重要な特徴である。

ペアスペクトロメーターでの測定に関する物理過程の理解と、それを踏まえた最適化

ペアスペクトロメーター方式では、コンバーター内でガンマ線が電子・陽電子対へと変換され、後段の運動量測定によりエネルギー再構成が行われる。しかし、コンバーター厚みを増やすことで変換効率は向上する一方、制動放射によるエネルギー損失の増大や多重散乱により測定分解能が劣化する。このトレードオフを定量的に理解することが不可欠である。

本研究では、**ガンマ線入射から対生成・エネルギー損失・飛跡検出に至る一連の物理過程を詳細に解析し、**

- 変換確率の角度依存性
- 対生成位置分布と信号トポロジー
- エネルギー損失ゆらぎの評価
- 多重散乱が角度分解能に与える影響

などを精密に理解した上で、**検出器性能が最も高くなる設計領域を同定し、**将来実験に求められる感度を達成するための具体的な設計指針を確立した。

アクティブコンバーター試作機の性能評価

シミュレーションで最適化した設計の実際の測定性能を実証するため、LYSO結晶を用いたアクティブコンバーター試作機を製作し、KEK PF-ARテストビームラインにおいて**電子ビーム試験**を実施し

た。解析では、**波形処理・較正を含む包括的な手法を確立**し、複数の独立した解析手法によるクロスチェックや系統誤差の評価を通じて信頼性の高い解析を行った。

その結果、

- 光量： $O(10^4)$ 光電子（要求値の約 10 倍）
- 時間分解能：約 25 ps（要求値 40 ps を大きく上回る）

を達成した。

これらの成果は、**アクティブコンバーター方式が設計要求を十分満たすのみならず、統計的余裕を確保して高レート環境に適用可能であることを強く示すものである。**

なお、この結果は $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験の要求を満たすだけでなく、**薄層シンチレーション検出器の基礎性能として極めて高い水準である点にも意義がある。**

将来実験感度への直接接続

本研究の最も重要な特徴は、「検出器概念の提案

→ 設計パラメーターの最適化 → 実機性能の実証

→ $\mu \rightarrow e\gamma$ 探索実験の到達感度推定」を一貫して遂行した点にある。

実測された光量・時間分解能を実験感度評価に

組み込み、PSI HIMB 計画によって想定される

高レート環境下でも、約 3 年間のデータ取得

によって $O(10^{-15})$ の分岐比感度に到達可能であることを

を明確に示した (Figure 5.)。

すなわち、本研究は、

- 検出器概念の具体化
- 物理解解に基づく設計パラメータの最適化
- 試験ビームを用いた試作機開発による性能の裏付け
- 将来実験の物理感度への直接接続

を体系的に実施した測定器開発研究である。

単なる性能測定に留まらず、**最終的な物理的要求を見据えて検出器設計を構築・実証した点に、本研究の独自性と大きな意義がある。**

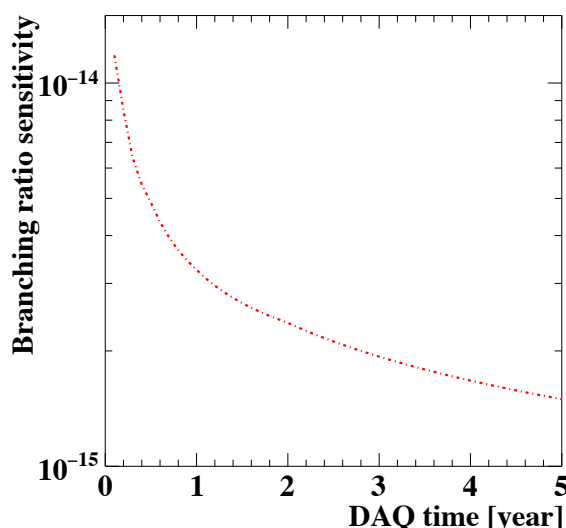


Figure 5. アクティブコンバーター試作機の、ビーム入射位置に対する光量。