

自作検出器を用いた稀崩壊 $\mu \rightarrow e\gamma$ の探索

東京大学大学院 理学系研究科 物理学専攻 高井 ゆり

概要

J-PARC MLF Muon D2の Pulsed Muon Beam と自作検出器を用いて、荷電レプトンフレーバーを破る反応 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の探索実験を行った。取得した波形データに対し、パルスビーム由来のピルアップを分解し、最尤解析と Feldman-Cousins 法により分岐比上限を評価した。その結果、有意な信号超過は認められず、**90%信頼水準で $\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) < 1.0 \times 10^{-3}$** という結果を得た。本研究の特色は、**自作装置を用いた実験で、どこまで分岐比に制限を与えられるかに挑戦したこと** である。なお、本研究は筆者が京都大学理学部4年時に、卒業研究として行ったグループ研究の内容である。

理論的背景

- $\mu \rightarrow e\gamma$ は charged Lepton Flavor Violation: cLFV 反応。
- ニュートリノ振動を考えた場合、分岐比は $\mathcal{O}(10^{-55} - 10^{-54})$ [1] だが、超対称性模型では $\mathcal{O}(10^{-14} - 10^{-11})$ [2, 3] まで増大する。
- MEG II 実験による現在の制限: $\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) < 1.5 \times 10^{-13}$ (90% C.L.) [4] に対し、自作検出器を用いた実験でどこまで分岐比に制限を与えられるかに挑戦する。

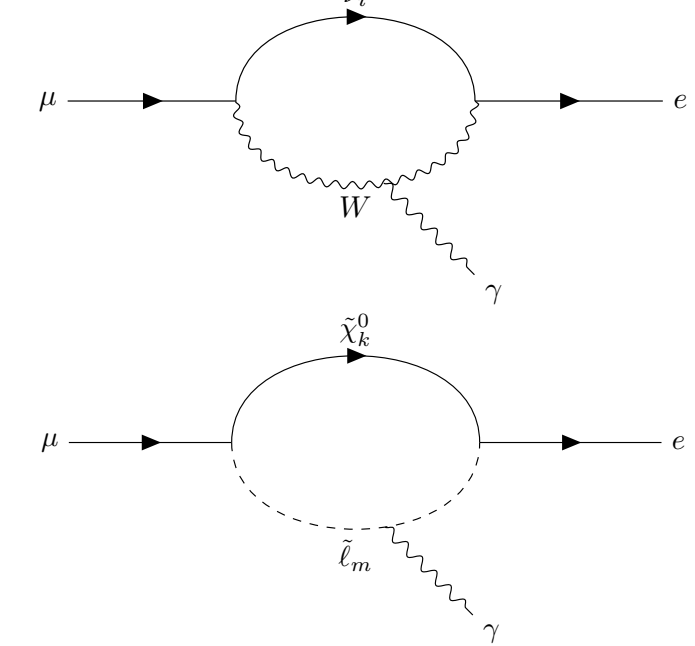


Fig. 1. $\mu \rightarrow e\gamma$ へのニュートリノ混合の寄与(上)、超対称性粒子の寄与の例(下)。

実験・事象再構成

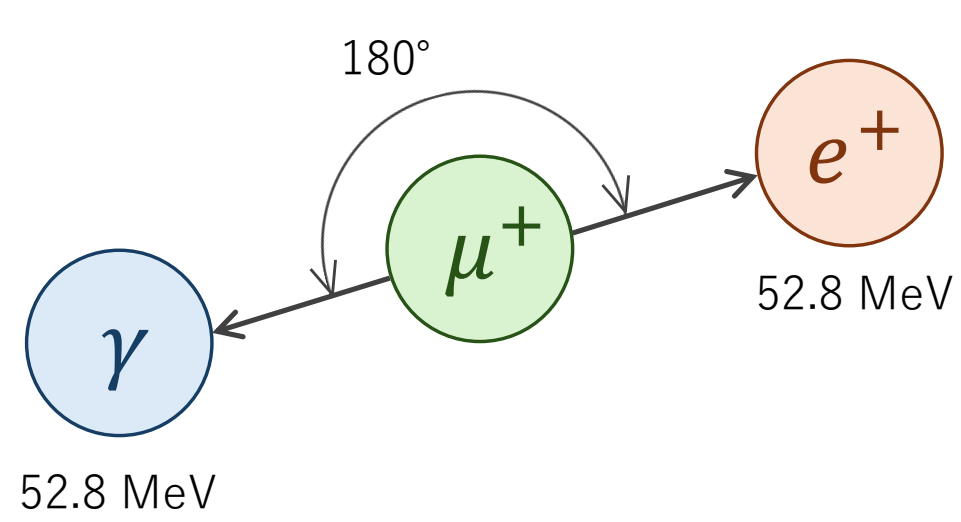


Fig. 2. ミューオン静止系における $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊。

$\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ の信号の特徴:

- 陽電子と光子が一つずつ検出される。
- 2粒子が同時に検出される。
- ともに $52.8 \text{ MeV}/c$ の運動量を持つ。
- 放出角は 180° をなす。

1. 自作検出器と DAQ システム

- プラスチックシンチレータ(PS)×1、NaIシンチレータ×2、それらに装着する光電子増倍管(PMT)×3からなる検出器セットを2セット用意。
- 検出器セットを向かい合わせに置き、 180° の信号を選択する。
- 前段のPSの反応の有無で、陽電子と光子を区別する。
- 後段のNaIにおいて陽電子と光子のエネルギーと時刻を測定する。
- A、BいずれかのPSに反応があったら、全てのNaIとPSの信号を、CAEN Digitizerを用いて波形として取得する。
- エネルギー分解能: NaI A1 (10.20%), A2 (11.08%), B1 (12.63%), B2 (10.45%)
- 時間分解能: NaI A1 (2.0 ns)、A2 (1.8 ns)、B1 (2.3 ns)、B2 (2.0 ns)

2. J-PARC MLF Muon D2

- 強度 $5.0 \times 10^6 \mu^+/s$ 、25 Hz のダブルパルスビーム。
- 表面ミューオンと崩壊ミューオンの両方が利用可能。

自作検出器とアクリル製の静止ターゲットを、Muon D2ビームラインに持ち込んで実験を行った。45 MeV/cの正の崩壊ミューオンを用い、検出器セットのなす角を 180° 、 120° 、 60° 、と変えて、それぞれ30分×7回、7回、6回の測定を行った。

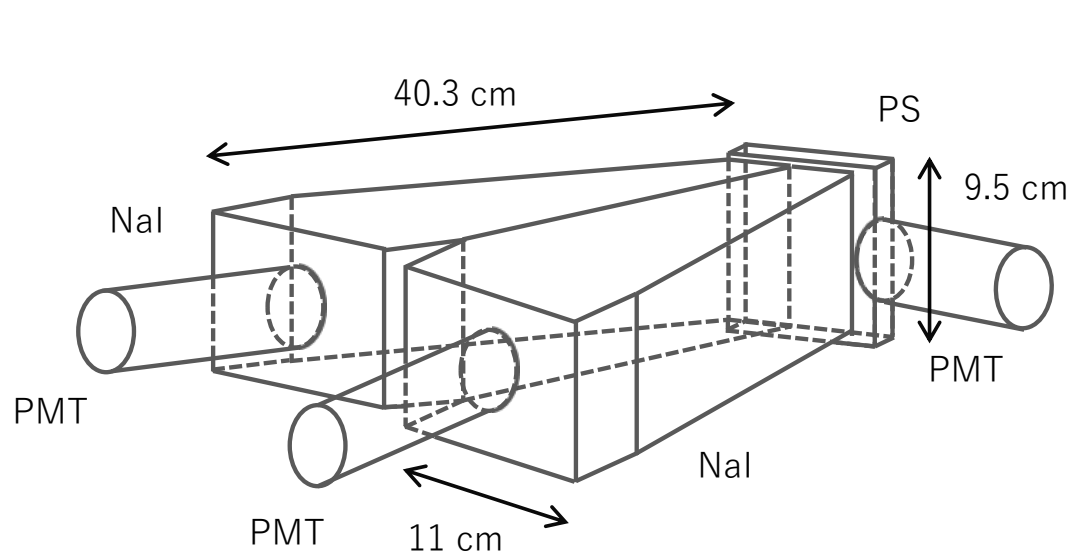


Fig. 3. 検出器セットの模式図。

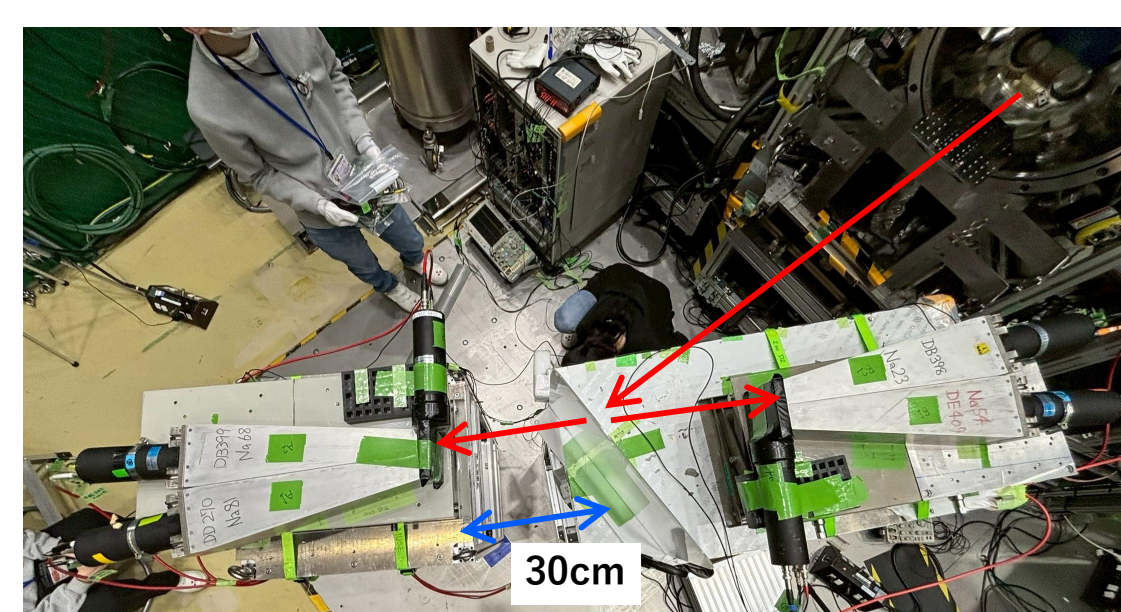


Fig. 4. J-PARCでの実験の様子。

3. 事象再構成

取得した波形データを、4次元データ ($E_{e^+}, E_\gamma, t_{e^+\gamma}, \theta_{e^+\gamma}$) に再構成した。

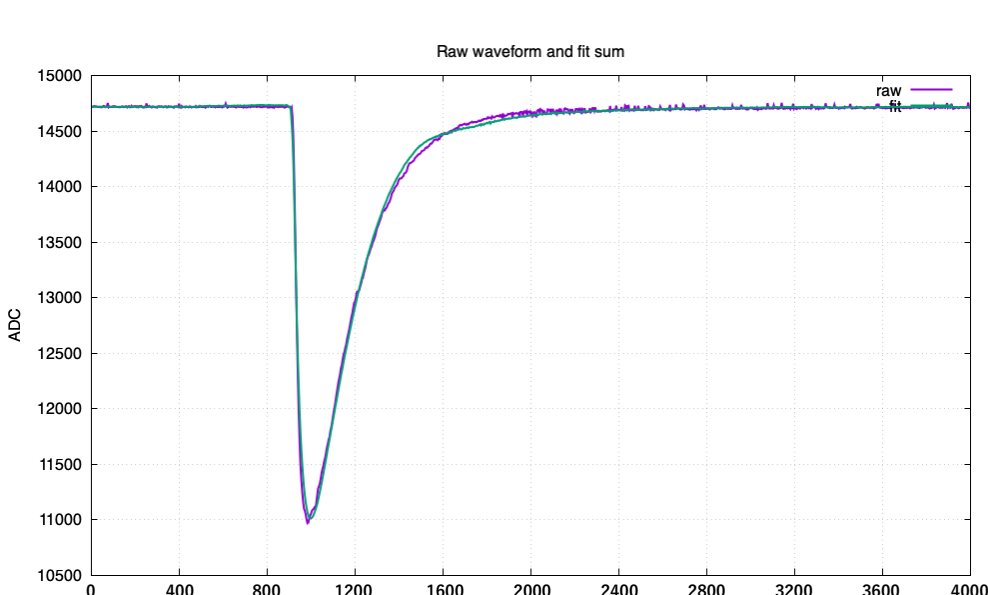


Fig. 5. 単一パルスのフィッティング。

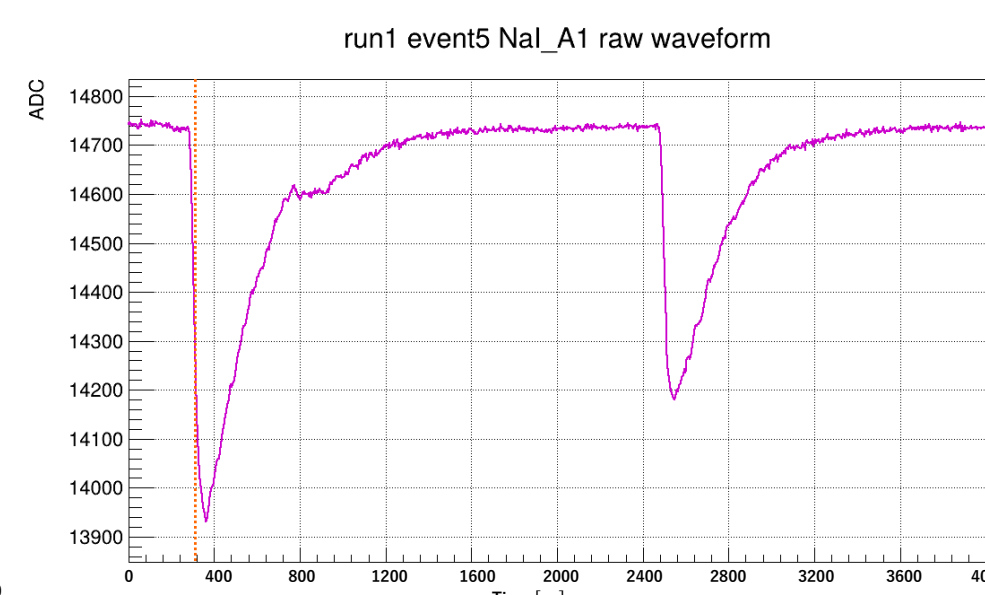


Fig. 6. NaIの生波形。

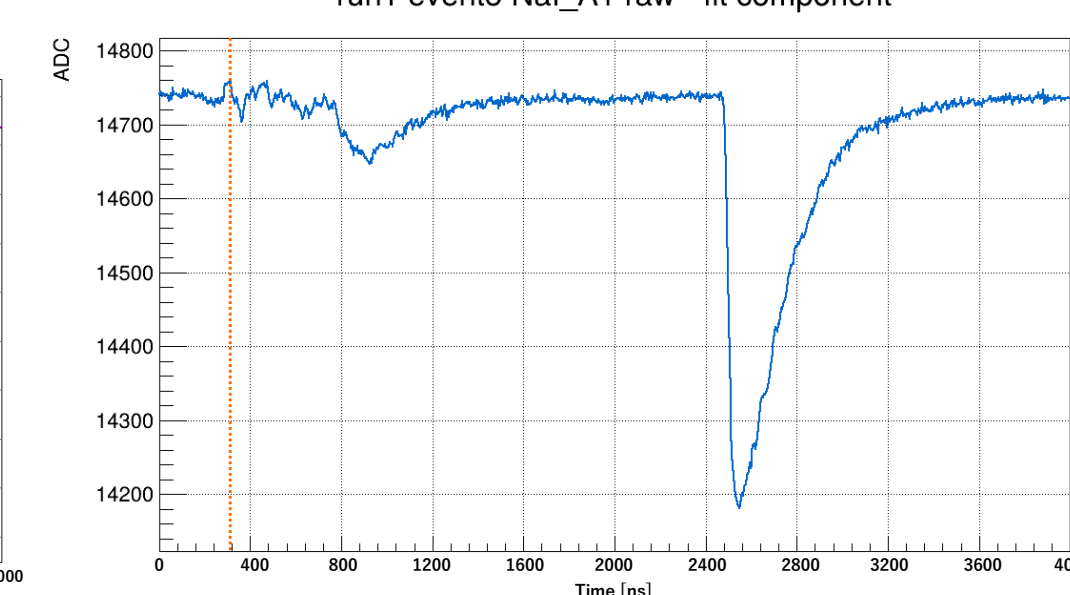


Fig. 7. 生波形からフィッティングした最大ピークを差し引いた様子。

NaIの生波形から単一パルスを抽出し、各パルスのエネルギーと時刻を決定。隣り合うNaIのピーク時刻を比較し、時間差20 ns以内であれば同一シャワー由来と判定しエネルギーを合算。PSの立ち下がり時刻を調べ、NaIの時刻情報と照合して陽電子か光子かを判定。検出器セットA、Bに、時間差500 ns以内に到来した陽電子と光子をペアリング。角度情報は、検出器セットのなす角を用いた。

統計解析

再構成で得られた4次元データ ($E_{e^+}, E_\gamma, t_{e^+\gamma}, \theta_{e^+\gamma}$) より、信号数 N_{sig} を計算し、 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の分岐比上限とその信頼区間を求めた。

1. 解析窓の決定

検出器の分解能の数倍の大きさを保ち、適度な事象数を含むように解析窓(Analysis Window: AW)を決定。

$$AW = \left\{ \mathbf{x} \left| \begin{array}{l} 20.0 \text{ MeV} < E_{e^+} < 80.0 \text{ MeV}, \\ 20.0 \text{ MeV} < E_\gamma < 80.0 \text{ MeV}, \\ -50.0 \text{ ns} < t_{e^+\gamma} < 50.0 \text{ ns}, \\ \theta_{e^+\gamma} = 120^\circ \text{ or } 180^\circ \end{array} \right. \right\}$$

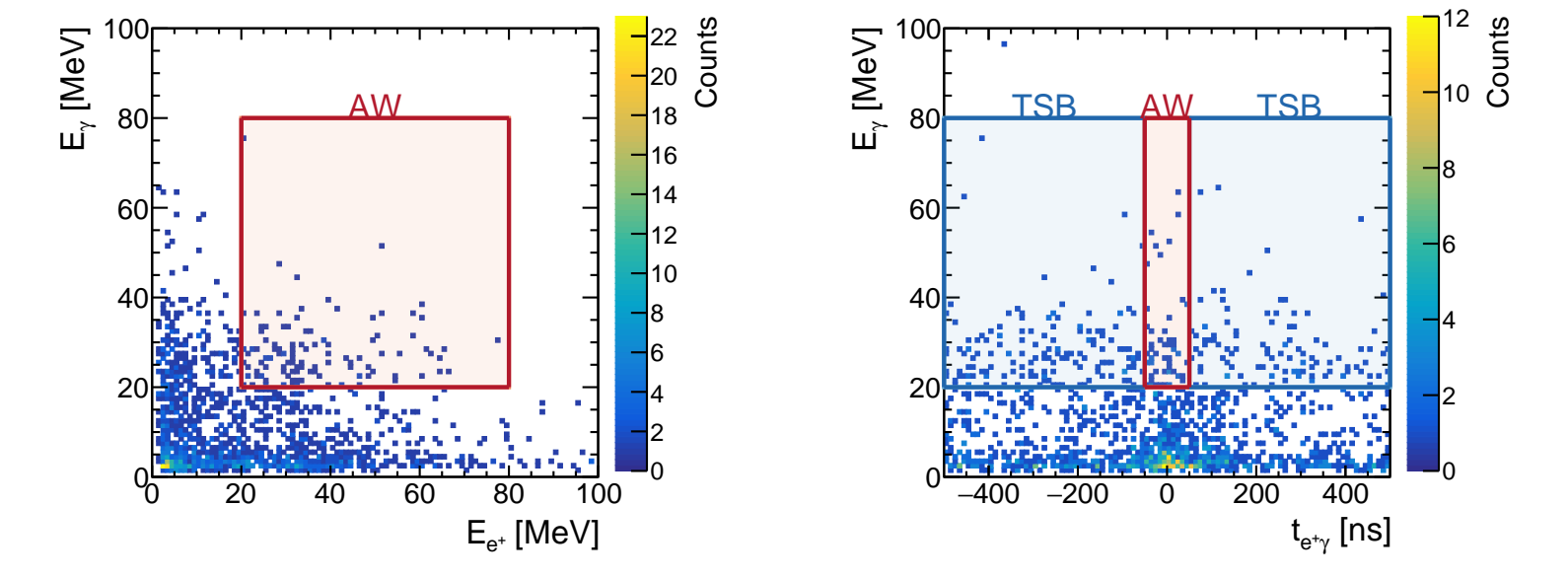


Fig. 8. 解析に用いた事象分布と、解析窓(AW)および時間サイドバンド(TSB)。

2. 偶発バックグラウンド(ACC)解析

本来ACCの時間差分布は一様分布だが、幅50 nsほどのパルスビーム由来のピーク構造が見られた。時間サイドバンド(TSB)において、このピークをエネルギービントごとにガウシアンでフィッティングし、AW内のACC数と時間構造を予測する。

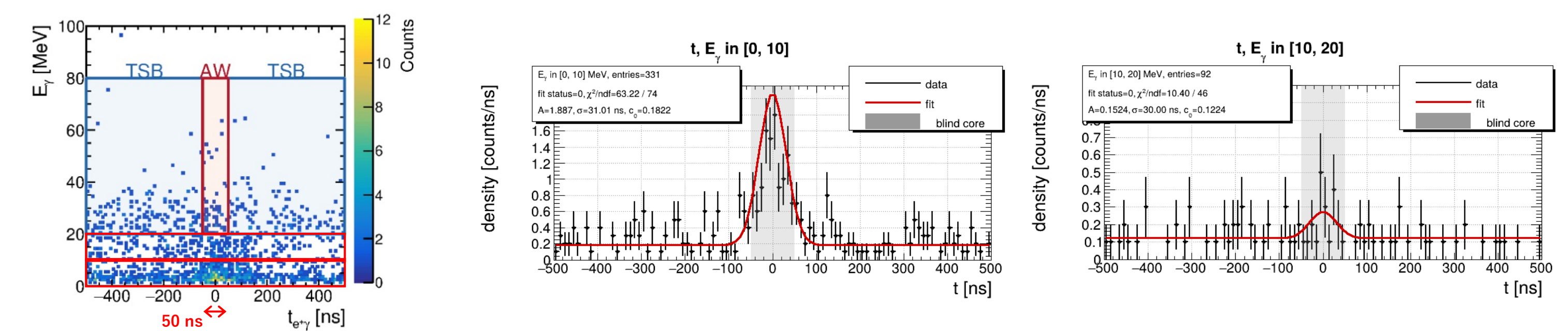


Fig. 9. 事象分布図上のピークとエネルギービンの定義。

Fig. 10. $E_\gamma \in [0, 10]$ でのフィット。

Fig. 11. $E_\gamma \in [10, 20]$ でのフィット。

3. 最尤解析

AW内の信号数 N_{sig} 、輻射崩壊背景事象(RMD)数 N_{RMD} 、ACC数 N_{ACC} を最尤解析で決定する。 $C(N_{\text{ACC}})$ は、TSBから求めた予測ACC数を用いた制約項で、 p_{sig} 、 p_{RMD} 、 p_{ACC} はそれぞれ信号、RMD、ACCの確率密度関数。実データに対して尤度フィットを行った結果、 $N_{\text{sig}} = 0.0 \pm 0.7$ という結果が得られ、有意な信号超過は認められなかった。

$$L(N_{\text{sig}}, N_{\text{RMD}}, N_{\text{ACC}}) = e^{-(N_{\text{sig}} + N_{\text{RMD}} + N_{\text{ACC}})} C(N_{\text{ACC}}) \times \prod_{i=1}^{N_{\text{obs}}} (N_{\text{sig}} p_{\text{sig}}(\mathbf{x}_i) + N_{\text{RMD}} p_{\text{RMD}}(\mathbf{x}_i) + N_{\text{ACC}} p_{\text{ACC}}(\mathbf{x}_i))$$

4. 分岐比と信頼区間

Michel崩壊(分岐比 $\sim 100\%$)の陽電子のデータから算出した、有効停止ミューオン数 N_μ^{eff} を用いて分岐比を計算した。 $N_\mu^{\text{eff}} = (1.71 \pm 0.03) \times 10^3$ と計算され、プロファイル尤度比を統計検定量とするFeldman-Cousins法により、90% C.L.の分岐比上限は以下のように求まった。

$$\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) = \frac{N_{\text{sig}}}{N_\mu^{\text{eff}}} < 1.0 \times 10^{-3}$$

MEG II実験との比較

Table 1. 本研究とMEG II実験との比較

	本研究	MEG II [4]
分岐比上限	1.0×10^{-3}	1.5×10^{-13}
感度	1.1×10^{-3}	$2.2(2.5) \times 10^{-13}$
acceptance	$< 0.76\%$	$\sim 11\%$
stopped μ^+ : N_μ	$\mathcal{O}(10^6)$	2.5×10^{14}
N_μ^{eff}	$(1.71 \pm 0.03) \times 10^3$	$(1.34 \pm 0.07) \times 10^{13}$

分岐比上限、感度ともにMEG IIとは10桁の差がある。これはacceptanceに2桁の差があり、停止ミューオン数に8桁の差が予想されることと整合的である。

まとめ

J-PARC MLF Muon D2の Pulsed Muon Beam と、自作の検出器系を用いて、cLFV過程 $\mu^+ \rightarrow e^+\gamma$ 崩壊の探索を行った。取得した波形データから物理量を再構成し、尤度解析を行った結果、有意な信号超過は観測されなかった。Feldman-Cousins法で分岐比上限を評価すると、**90% C.L.で $\mathcal{B}(\mu^+ \rightarrow e^+\gamma) < 1.0 \times 10^{-3}$** を得た。感度を制限した主たる要因は、パルスビームに起因する低いレートと波形ピルアップによる、統計量の少なさと、検出器のacceptanceの小ささであった。

参考文献

- [1] S. T. Petcov, Sov. J. Nucl. Phys. 25, 340 (1977).
- [2] J. Hisano et al., Phys. Rev. D Vol.53 No.5, 2442 (1996).
- [3] J. Hisano et al., Phys. Lett. B Vol.437, 351 (1998).
- [4] MEG II Collaboration, Eur. Phys. J. C 85, 1177 (2025).