

Experimento de medición de la vida media del muón con electrónica reprogramable y software moderno

Aguilar C.¹ Cid M.^{1*} Salazar H.¹ Villaseñor L.^{1,2} Varela E.¹ Ponce E.¹

¹Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. ²Profesor de Asignatura, ENES Unidad Morelia, UNAM.

*manuel.cidp@alumno.buap.mx

Resumen

Se presenta un estudio sobre la detección de muones cósmicos mediante un detector de centelleo, diseñado para medir el tiempo de desintegración tanto de muones positivos como de muones negativos. Además, se analiza exhaustivamente la distribución de amplitud de los pulsos generados durante el proceso de desintegración mediante un riguroso análisis estadístico.

Como resultado de este estudio, se ha medido un tiempo de vida promedio del muón de 2.086 microsegundos. Estos hallazgos son de gran relevancia en el campo de la física de partículas y contribuyen al entendimiento de la naturaleza y comportamiento de las partículas cósmicas de alta energía.

Objetivo

El propósito de este trabajo es abordar los siguientes objetivos:

- Diseñar y construir un detector con la capacidad de identificar muones secundarios generados como resultado de la desintegración de núcleos y protones durante su interacción con rayos cósmicos primarios.
- Determinar el tiempo de vida promedio del muón mediante el empleo de electrónica reprogramable de última generación.

Introducción

La detección de muones es un campo de estudio crucial en la física de partículas, con numerosas aplicaciones en ámbitos que van desde la astrofísica a la detección de radiaciones y la geofísica. Los muones, partículas elementales que se forman durante las colisiones entre partículas cósmicas y atmosféricas, tienen una vida relativamente larga y pueden penetrar profundamente en los materiales.

Se desintegra mediante la fuerza débil con los modos de desintegración.

$$\begin{aligned} \mu^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + v_\mu \\ \mu^+ &\rightarrow e^+ + \bar{\nu}_e + \bar{v}_\mu \end{aligned}$$

con una vida útil en el vacío de $2,19 \mu s$, sin embargo, cuando los muones negativos se desintegran en un medio, además de desintegrarse pueden ser capturados por protones de los núcleos del medio lo que da como resultado una medición promedio de la vida útil de los muones positivos y negativos inferior a $2,19 \mu s$.

Esto los hace valiosos tanto para estudiar las propiedades de los materiales como para detectar radiaciones.

Se han realizado estudios sobre los muones procedentes de los rayos cósmicos, centrados en el análisis del flujo y la vida útil de los muones para obtener información crucial sobre la dilatación temporal y determinar las características de las partículas y los procesos que surgen durante la colisión. La influencia de los factores en el flujo y la vida útil de los muones se ha analizado utilizando detectores de muones de rayos cósmicos (CRMD).

Se ha descubierto que la ubicación de los fotomultiplicadores en los detectores de rayos cósmicos con respecto a la profundidad que se sumerge en el fluido empleado (en este caso líquido centellador) influye en el flujo y la vida útil de los muones.

En base a investigaciones realizadas en otros experimentos, se han detectado frecuencias de marea en series temporales de medidas de flujo de muones realizadas durante un periodo de ocho años, y estas frecuencias sugieren que los muones pueden ser una sonda complementaria para el estudio de las mareas atmosféricas a altitudes entre 20 y 60 km.

Metodología

El detector utilizado consiste en un recipiente cilíndrico de aluminio de 57 cm de altura y 53 cm de diámetro. Dentro del recipiente se vertió líquido centellador NE224, un líquido especialmente diseñado para detectar partículas cargadas, con una altura final de 45 cm. El tubo fotomultiplicador (PMT) empleado se encuentra en la parte superior del recipiente, ubicado en el centro y sumergido en el centellador hasta el fotocatodo.



Figure 1. Construcción del detector.

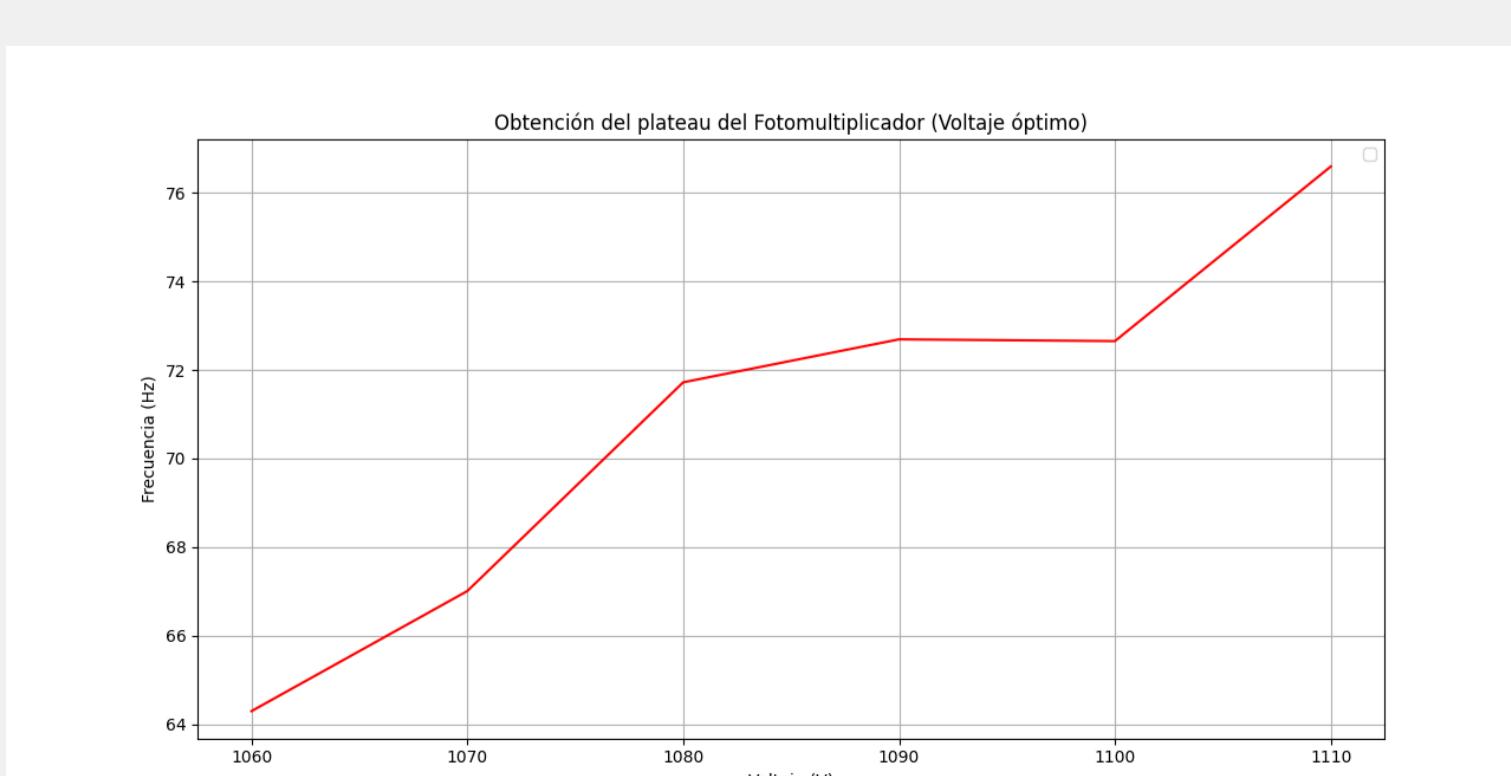


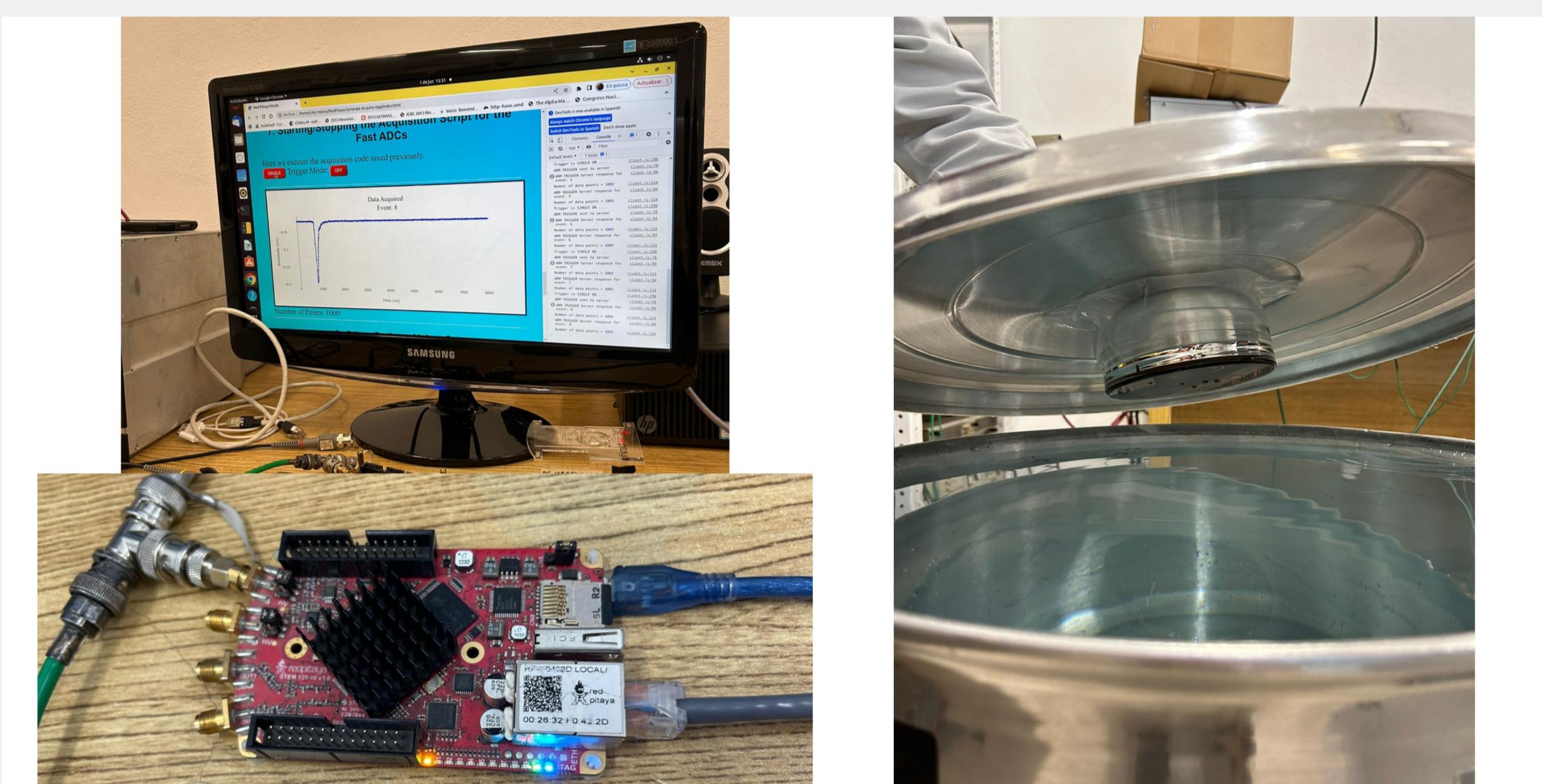
Figure 2. Gráfica del plateau del Tubo Fotomultiplicador utilizado en el detector.

Se obtuvo el plateau del PMT para encontrar el voltaje óptimo de funcionamiento, esto garantiza un buen proceso de trabajo del detector.

El software empleado en este proyecto es una combinación de Python, HTML, Javascript y Node.js. Para la adquisición de datos, se utiliza una tarjeta de desarrollo de código abierto comercial conocida como RedPitaya STEMlab 125-14, la cual se controla mediante una computadora personal.

La tarjeta RedPitaya se ha programado utilizando Verilog para digitalizar el intervalo de tiempo entre dos pulsos consecutivos provenientes del Tubo Fotomultiplicador (PMT). El primer pulso corresponde al muón que se detiene dentro del detector, mientras que el segundo pulso corresponde al electrón resultante de su desintegración.

El uso de la tarjeta RedPitaya proporciona ventajas significativas, como la reducción de costos del proyecto y el aumento de su versatilidad.



Resultados

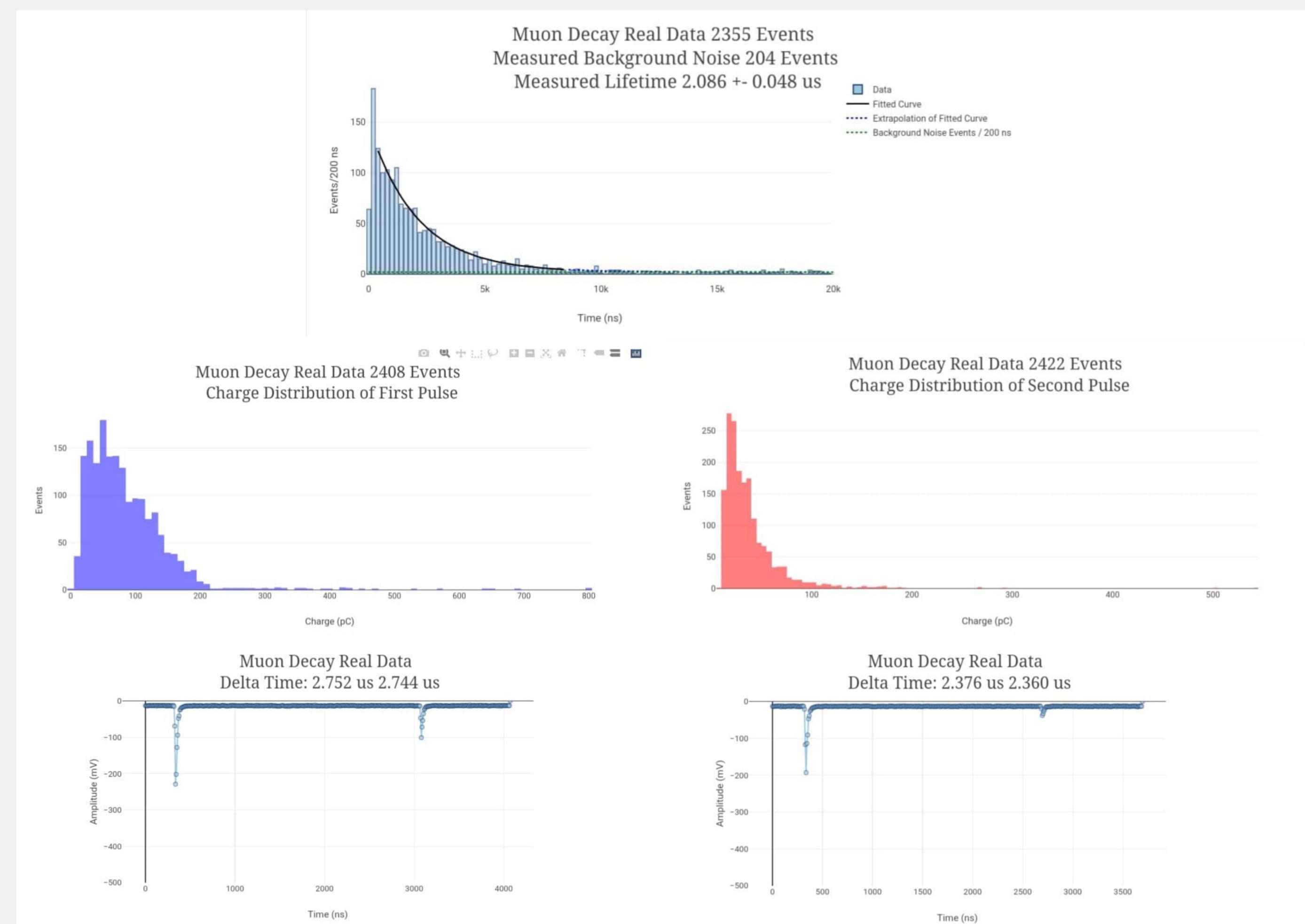


Figure 3. Análisis estadístico de los dos pulsos dentro del detector.

En las gráficas presentadas, podemos observar la distribución del tiempo de vida medio del muón en forma de histograma. Estos resultados son fundamentales para comprender la física detrás de las interacciones de los muones con la materia y contribuyen a nuestra comprensión de las propiedades de estas partículas subatómicas. Las distribuciones de carga del segundo pulso corresponden a la distribución de Michel del electrón y positrón que resultan del decaimiento del muón negativo y positivo, respectivamente.

Conclusiones

En este estudio, hemos abordado la detección de muones cósmicos a través de un detector de centelleo, diseñado meticulosamente para medir el tiempo de desintegración tanto de muones positivos como de muones negativos. Nuestro enfoque se ha centrado en el análisis exhaustivo de la distribución de amplitud de los pulsos generados durante el proceso de desintegración, respaldado por un riguroso análisis estadístico.

El desarrollo de un código personalizado para la plataforma RedPitaya desempeñó un papel esencial en la adquisición de datos en nuestro estudio de detección de muones cósmicos. Este código permitió la detección precisa de pulsos dobles generados en el detector, lo que resultó en la captura eficiente de información relevante para nuestra investigación. Esta aproximación personalizada en la programación de la RedPitaya fue fundamental para garantizar la fiabilidad y la calidad de los datos recopilados en este proyecto.

Como resultado de esta investigación, hemos medido un tiempo de vida promedio de los muones de 2.086 microsegundos. Este tipo de experimentos son de alta relevancia en la educación y ofrece amplias ventajas, como ser utilizados en las aulas para motivar a los estudiantes a comprender a fondo varios procesos físicos involucrados en la interacción de partículas cargadas con la materia.

Referencias

- 1.- <https://ciiec.buap.mx/Muon-Decay-Real-Data/>
- 2.- <https://ciiec.buap.mx/RedPitaya-Muon-Decay-App/>
- 3.- Lederman, L. M., Weinrich, M., Fairbank, W. M. (1963). Measurements of the Negative Muon Lifetime and Muonic Atom Lifetimes and the Sign of the Muon Decay Matrix Element. *Physical Review*, 132(3), 1303-1311.
- 4.- Griffiths, D. J. (1987). *Introduction to Elementary Particles*. John Wiley Sons.