



# Módulo de instrumentación - Proyecto de Módulo Medición de la Vida Media del Muón

Oscar Altuve (USB), Víctor Clarizio (UCV),  
Rafael Martinez (USB), Dennis Cazar (USFQ)

1 de junio de 2022

## Índice

1. Introducción	2
2. Proceso experimental	3
3. Resultados y análisis	9
4. Discusión y Conclusiones	9
Referencias	12

## Resumen

El objetivo principal del proyecto fue la determinación de la vida media del muón por medio del telescopio de muones del proyecto Escaramujo, cuya disposición cuenta con un arreglo de tres placas centelladoras acopladas a diodos fotomultiplicadores, diseñados para captar los arribos y decaimientos de los muones resultantes de las cascadas de rayos cósmicos provenientes de la atmósfera. Se obtuvieron e interpretaron los datos adquiridos del experimento, como también se desarrolló un programa donde se efectúa la corrección les tiempo de conteos de eventos entre la tarjeta DAQ serie 6000 de Quarknet y la señal GPS. Se determinó de la vida media del muón por medio de un ajuste realizado con data abiertos de la colaboración e-lab obteniendo un valor de  $\tau = (2,018480 \pm 4,450116 \times 10^{-2})\mu s$ , con una discrepancia de 8,12% del valor tabulado en la literatura.

## 1. Introducción

Los rayos cósmicos se definen habitualmente como partículas provenientes del espacio exterior, las cuales presentan altos niveles energéticos debido a su gran energía cinética, desde su descubrimiento en el siglo pasado los rayos cósmicos son una valiosa fuente de adquisición de datos en el ámbito de la física de partículas y el estudio de estos fenómenos es una alternativa a los experimentos desarrollados en los Grandes Colisionadores.

La naturaleza de estas partículas puede ser: radiación gamma, hadrones o leptones. Estas ingresan en la atmósfera donde interactúan por diferentes mecanismos con la misma ocasionando una cascada de diferentes partículas, podemos describir el caso para un leptón el cual al interactuar con algún núcleo de la atmósfera genera partículas ionizadas, partículas elementales y piones, particularmente estos  $\pi_0$  decaerán en rayos gamma  $\pi_0 \rightarrow \gamma + \gamma$  los cuales posteriormente crearan pares electrón-positrón  $\gamma \rightarrow e^- + e^+$ , estos pares producirán más radiación, este ciclo de creación de pares y radiación va a estar limitado por la energía inicial de la partícula.

El muón es una de las partículas elementales descritas en el modelo estándar, fue descubierto por C. Anderson y H. Neddermeyer en 1936. estas partículas se pueden formar en las cascadas cósmicas en el decaimiento de un mesón  $K^+$ ,  $\pi_0 \rightarrow \gamma + \gamma$  en el cual su modo principal decae  $K^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$  (Branching Ratio 63%). El muón pertenece a la familia de los leptones, posee una carga eléctrica igual a la del electrón mas su masa es aproximadamente 200 veces mayor, en la tabla 1.

Tabla 1: Características del Muón [1].

Propiedad	Símbolo	Valor
Masa	$m_\mu$	$(105,6583745 \pm 0,0000024)MeV$
Vida media	$\tau_\mu$	$(2,1969811 \pm 0,0000022)\mu s$
Spin	$s_\mu$	1/2
Carga	$q_\mu$	$e^*$

\* Carga del electrón.

El muón tiene varios modos de decaimiento, las mayores contribución se observan en la tabla 2, en que se esperará una mayor ocurrencia del canal de decaimiento  $\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$ .

Por otra parte, las partículas no son entes inmutables en el tiempo, son susceptibles a procesos espontáneos donde emiten radiación u otras partículas, en estos procesos se cumplen diversas relaciones de conservación de energía, color y sabor.

Estos procesos de decaimiento suceden de forma estocástica, sin embargo podemos modelar una función de distribución definiendo la tasa promedio de decaimientos por unidad de tiempo  $\lambda = \frac{1}{\tau}$ , la cual debemos suponer que es constante. Sin embargo dentro de la unidad de tiempo los eventos de decaimiento suceden de forma aleatoria. Además sabemos que la cantidad de decaimientos es

Tabla 2: Principales modos de decaimiento del muón [1].

Modos de decaimiento	Fracción ( $\Gamma_i/\Gamma$ )
$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$	$\approx 100\%$
$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + \gamma$	$*(6,0 \pm 0,5) \times 10^{-8}$
$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu + e^+ + e^-$	$** (3,4 \pm 0,4) \times 10^{-5}$

Los modos  $\mu^+$  son conjugados de carga de los modos  $\mu^-$ .

\*Solo incluye eventos con  $\gamma > 10\text{MeV}$ .

\*\*Se presenta dentro de ciertos límites de energía.

proporcional a la cantidad de partículas. Con esta información construimos la siguiente ecuación diferencial:

$$dN = -\frac{N}{\tau} dt. \quad (1)$$

Integrando a ambos lado y definiendo las siguientes condiciones iniciales ( $N(0) = N_0$  y  $t_0 = 0$ ) obtenemos:

$$N(t) = N_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2)$$

En el contexto del proyecto,  $N_0$  significaría el número total de muones que fueron capturados y desintegrados dentro del detector y  $N(t)$  el número de estos muones con  $\Delta t > t$ , donde  $\Delta t$  es el tiempo entre las dos señales en el contador donde ocurrió el decaimiento.

A efectos prácticos, se debe mencionar que el tiempo de vuelo del muón antes de ingresar al detector no es de interés. Aunque,  $\Delta t$  no es su tiempo de vida completo, trazar el número de decaimientos en función del tiempo de decaimiento producirá la misma forma de decaimiento exponencial a partir de la cual se pueden encontrar los tiempos de vida. El "tiempo cero común que utilizamos resulta del tiempo en el cual cada muón entra al detector.

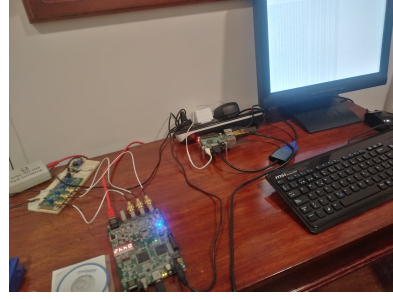
## 2. Proceso experimental

En esta sección se detallará el hardware que compone el **Detector de Muones de Rayos Cósmicos (CRMD)** que se empleará en la experimentación. El sistema se compone por un arreglo de 3 centelladores inorgánicos plano paralelos acoplados a detectores y diodos fotomultiplicadores. Adicional a esto, contamos con la tarjeta de adquisición de datos *QuarkNet Ver.2.5*. [2].

La tarjeta de adquisición de datos (mostrada en la Figura 1) resulta ser el enlace lógico entre los centelladores y el computador. Se encarga de tomar las señales de los contadores y proveer una señal procesada y lógica que posteriormente pueda ser analizada por el computador. Posee un conector USB para enlazar con el computador y un reloj GPS que provee un tiempo de ocurrencia de eventos muy preciso sincronizado con el *Tiempo Universal Coordinado (UTC)*. Adicionalmente, por medio de comandos, es posible obtener mediciones de la temperatura, la presión y otros sensores.



(a)



(b)

Figura 1: (a) Vista superior de la tarjeta de adquisición de datos QuarkNet Serie 6000 utilizada en el montaje experimental. (b) La tarjeta QuarkNet es posteriormente conectada al computador para almacenar la data adquirida.

En términos del conteo de señales, la tarjeta de adquisición de datos tiene 5 contadores incorporados, enumerados desde 0 hasta 4. Los contadores 0 hasta el 3 registran los conteos individuales para cada canal, y el canal 4 registra el conteo de *trigger* para cualquier coincidencia que exista con el mismo.

Hablemos de los contadores de centelleo. Considerando que el flujo de muones al nivel del mar es de  $\approx 1 \times 10^{-2} \text{ muons/cm}^2 \text{ s}$ , y que estos abarcan el 70 % de los rayos cósmicos al mismo nivel, un detector con un área superficial significativa ayudará a incrementar el número de conteos por minuto de manera considerable. Experimentalmente hablando, incrementar dicha área superficial de detección favorecería los conteos. Por otro lado, si lo que buscamos es hallar la vida media del muón, entonces se debe incrementar el espesor del centellador. Esto incrementa la tasa de conteos debido a que solo los muones que fueron detenidos y que posteriormente decaen serán utilizados para estudios de la tasa de desintegración. Nuestro contador está compuesto de un centellador de plástico que está recubierto con papel aluminio y un fotomultiplicador de silicio (PTM) a una de sus esquinas, el cual provee el voltaje operacional necesario y envía una señal eléctrica a la tarjeta de adquisición de datos, en el instante en donde un pulso lumínico es detectado.

Si bien la utilización de nuestro montaje experimental tiene como objetivo principal la obtención de la vida media del muón, existen otros experimentos con los cuales podemos obtener cantidades físicas igual de importantes. Tal es el caso del **flujo de muones** que llegan a nuestro detector. Debido a la dificultad de accesibilidad a la instrumentación del experimento, se descarta la posibilidad de estudiar la distribución angular de dichas partículas, debido a que esto requeriría variar el ángulo acimutal de incidencia rotando el sistema de detección. El flujo de los rayos cósmicos puede ser descrito de la siguiente forma:

$$\Phi_{CR} = \frac{\text{events}}{\text{time} \times \text{area}} \quad (3)$$

donde los **eventos** son considerados como el número de conteos registrados en un intervalo de **tiempo**, y el **área** es la superficie de nuestro detector. Las dimensiones de cada centellador son de

$(25,4 \times 30,5 \times 1,3)cm$ . Al analizar la data, se debería obtener un histograma de flujo vs. el tiempo, similar a como se indica en la Figura 2.

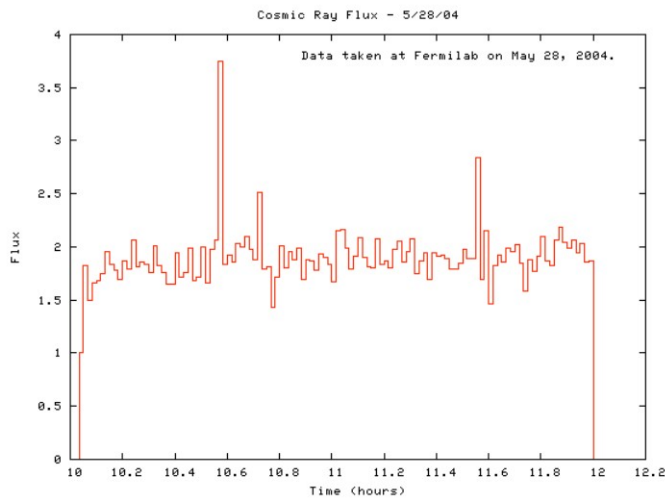


Figura 2: Flujo de rayos cósmicos en función del tiempo [2].

A continuación, nos centramos nuevamente en la determinación de la vida media del muón. Nuestro sistema de detección está compuesto por tres centelladores dispuestos como se muestra en la Figura 3.

Por comodidad, llamaremos al contador superior, el del medio y el inferior como 0, 1 y 2 respectivamente. Nuestro sistema está expuesto a radiación ionizante proveniente principalmente de la atmósfera (rayos cósmicos) y por emisiones fotónicas de elementos radioactivos que se encuentran en la corteza terrestre. Sabemos que los centelladores emiten, por medio de un proceso de fluorescencia, fotones como respuesta al proceso de ionización [3], creando un efecto de cascada que es detectado como muchos conteos en intervalos de tiempo (**tiempo de adquisición**). Al entrar en contacto un muón en el contador 0, se genera una señal. Si el muón viaja a través del contador 0 y entra en contacto con el contador 1, ambos contadores deberían tener una señal aproximadamente al mismo tiempo debido a las altas velocidades con las que el muón arriba. Ahora bien, si el muón se detiene en el contador 1, existirá un periodo de tiempo muy corto luego del cual decaerá y generará una segunda señal en el mismo contador. **El tiempo de decaimiento**  $\tau_d$ , que será el tiempo entre estas dos señales, puede ser extraído analizando los histogramas correspondientes a la data obtenida. Esperamos finalmente obtener una señal en el contador 2, la cual presumimos que será consecuencia directa del decaimiento del muón que se detuvo en el contador 1 como resultado de haber transferido toda su energía (ver Figura 4). Es importante además describir el proceso que ocurre cuando un muón alcanza el detector. Cuando el muón llega al centellador, este emite una cascada de fotones que son detectadas por nuestro fotomultiplicador de silicio.



Figura 3: Detector de vida media del muón compuesto por 3 contadores plano paralelos [2].

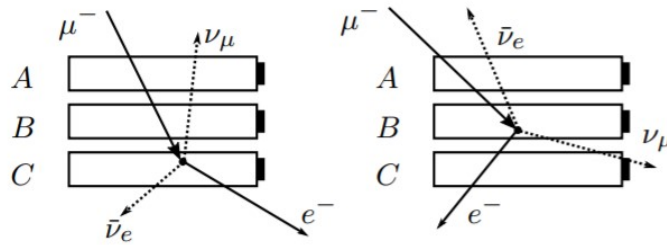


Figura 4: Posibles trayectorias del muón a medir. El muón atraviesa la placa 0, pasa a la placa 1, donde se detiene y decae. El electrón resultante atraviesa la placa 2.

Posteriormente, en la salida del mismo, se emite un pulso cuadrado cuyo ancho es proporcional a la duración del inverso del pulso original, como se indica en la Figura 5. En esta imagen se muestra como se genera un pulso de conteo a partir de la señal detectada. Cuando los muones atraviesan el centellador, el SiPM detecta los fotones producidos. Posterior a esto, el SiPM produce una señal en la forma de un pulso invertido de corriente. Al pasar por la electrónica la señal se convierte en un pulso cuadrado de voltaje cuya duración es proporcional a la duración del pulso invertido

Como mencionamos anteriormente, buscamos alguna simultaneidad entre las señales obtenidas en el contador 0 y el contador 1, para hallar analíticamente la diferencia temporal entre las mismas. Si esto ocurre, entonces asumimos que el decaimiento del muón tendrá lugar en la placa intermedia o en la inferior. Consideramos que el muón deposita toda su energía en las placas, por lo que se encontrará en reposo al decaer. Es decir, los datos obtenidos están dados en el marco de referencia

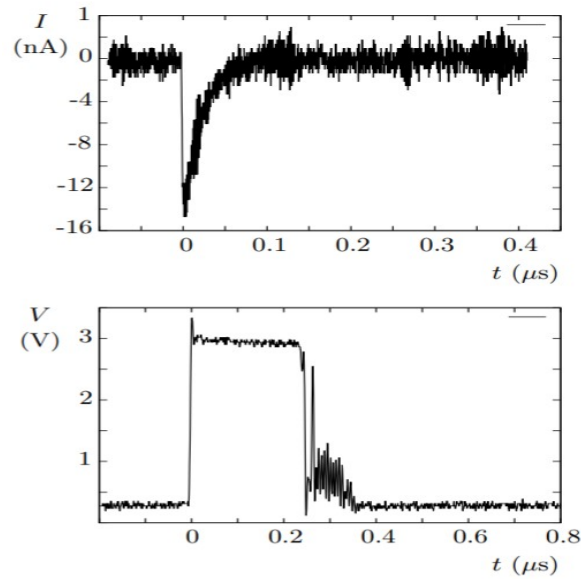


Figura 5: Generación de pulso de conteo.

en reposo del muón [4]. La adquisición de datos en la tarjeta QuarkNet Serie 6000 se configura para registrar solo los eventos de doble coincidencia. Cuando se detecta una doble coincidencia, se inicia la ventana de adquisición y se registran todos los conteos dentro de esta. Debido a que ésta es la data de interés, filtramos los datos para considerar únicamente los eventos de doble coincidencia en el contador 0 y el contador 1 y, un tiempo posterior, el conteo registrado en el contador 2. Este tiempo debe corresponder al **tiempo de decaimiento del muón**. Un ejemplo del evento de simultaneidad descrito anteriormente se muestra en la Figura 6.

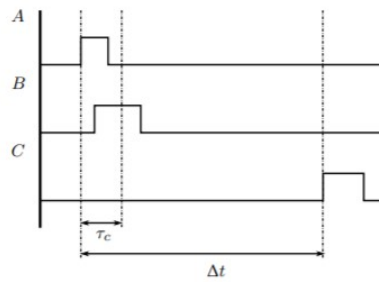


Figura 6: Representación esquemática de los pulsos detectados en las placas 0, 1 y 2.

La ventana de simultaneidad se define como el intervalo de tiempo en el que dos conteos se consideran coincidentes, y esta debe ser tan pequeña como sea posible. Cabe destacar que no todos

los eventos producidos en la salida provienen del decaimiento de muones, si no que también pueden ser producidos por radiación ionizante de fondo. Podemos observar que el tiempo  $\tau_c$  representa el intervalo temporal dentro del cual se define la simultaneidad entre los detectores 0 y 1 (placa superior y placa intermedia). El tiempo  $\Delta t$  representaría el tiempo de decaimiento del muón.

Es necesario resaltar que el orden de magnitud del tiempo en este estudio comprende valores entre  $10^{-6} - 10^{-9}s$ , desde un punto de vista técnico, realizar estas mediciones con el montaje experimental presenta dificultades. La tarjeta de adquisición de datos tiene un oscilador de  $25MHz$ , que "marca" cada  $40ns$ . El dispositivo no mantiene su frecuencia con mucha precisión y el oscilador puede desplazarse entre 10 y 100Hz de su valor nominal, que pudiera ser más bajo frente a cambios drásticos de temperatura. Por lo que es necesario realizar correcciones en el tiempo con ayuda de señal GPS.<sup>[2]</sup>

Para calcular el **tiempo absoluto de la señal 1pps** (1 pulso por segundo) empleamos la ecuación 4 donde K representa la columna Time (GMT) en segundos y P la corrección dada por el GPS en milisegundos.

$$T_{1PPS} = Round \left( K_{sec} + \frac{P_{msec}}{1000} \right) \quad (4)$$

Ahora bien, para calcular el **tiempo de cada trigger** se debe encontrar el tiempo relativo entre el  $T_{1PPS}$  y el trigger. Esto se puede calcular restando los conteos en "1PPS Count" con "Trigger Count" denotadas J y A respectivamente (en números decimales)  $\Delta T_{clk} = A - J$ .

El cálculo del tiempo absoluto de la columna "Trigger Count", viene dado por,  $\Delta T_{sec} = \Delta T_{clk}(1/f_{clk})$ , y la suma de  $T_{PPS}$ . Así, el tiempo absoluto del trigger será:

$$T_{abs} = Round \left( K_{sec} + \frac{P_{msec}}{1000} \right) + \frac{(A - J)}{f_{clk}} \quad (5)$$

con  $f_{clk} = 25MHz$  para la tarjeta DAQ Serie 6000 de Quarknet.

De acuerdo al reloj GPS, los triggers ocurren en momentos posteriores a la hora 00:00:00 UTC.

QuarkNet junto a I2U2<sup>1</sup> soportan el proyecto e-Labs<sup>2</sup> el cual se presenta como una plataforma digital dirigida a los estudiantes del High School, donde los mismos pueden explorar, compartir y analizar la data de los diferentes dispositivos QuarkNet, algunas de estas utilidades se muestran disponibles solo a los participantes de la colaboración, sin embargo bajo un registro de invitado, un usuario puede acceder al análisis y descarga de data recopilada por los diferentes institutos participantes, este recurso fue utilizado en el desarrollo del proyecto con la finalidad de reproducir los análisis además de probar los códigos de lectura y análisis de los datos obtenidos de nuestro dispositivo y de otras instituciones pertenecientes a la colaboración.

<sup>1</sup>Como parte de National Science Foundation and the Office of Science U.S. Department of Energy.

<sup>2</sup><https://www.i2u2.org/elab/cosmic/home/index.jsp>



Trigger_Count	RE0	FE0	RE1	FE1	RE2	FE2	RE3	FE3	1PPS_Count	Valid	NSatellites
3222488000	217.5	0	52.5	0	0	0	0	0	3205450981	A	09
3232669921	227.5	0	0	0	0	0	0	0	3230450979	A	09
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Error_Bits	Correction	Full_time	T1pps	Tabs
0	50	2022-04-16T02:14:53.814000	8093.864	8094.68148076
0	58	2022-04-16T02:14:54.806000	8094.864	8095.08875768
...	...	...	...	...

Figura 7: Interpretación de las variables del formato de datos obtenido en el experimento.

### 3. Resultados y análisis

Los análisis computacionales realizados en éste proyecto se desarrollaron en Jupyter Notebooks con kernel Python 3.7, y se alojaron en un repositorio público de Gitmilab [5].

En la corrida del experimento, se obtuvieron las columnas de datos de interés para la medición de la vida media del muón, pero con ciertas limitantes dadas por el tiempo de conteos puesto que el sistema GPS no vinculó a satélites; de igual forma, el arreglo de datos permitió el entendimiento de la disposición de los resultados experimentales y realizar una interpretación (traducción) de estos a una codificación de alto nivel gracias a la librería Pandas, que es entendible por los usuarios, además se adapta a cualquier salida del experimento para este estudio. En la tabla 7 se muestra la interpretación.

Dado que se hizo una interpretación de alto nivel, las columnas del dataframe varía de acuerdo al significado de cada variables tal como describe la tabla de la figura 8.

Conocida la dificultad presentada por la sincronización del GPS, se hizo una revisión de antecedentes de la investigación y se realizó un ajuste sobre los datos tomados por Grace High School de Idaho (perteneciente al proyecto e-Labs) durante los días 12 al 15 de mayo de este año [6], en el que se obtuvo el gráfico de la figura 9.a. de conteos de decaimientos en función de la diferencia de tiempos de decaimiento y el ajuste sobre la distribución de puntos. Además, se determinó la vida media del muon con un valor  $\tau = ((2,018480 \pm 4,450116 \times 10^{-2})\mu s$  que discrepa con el valor tabulado 8%. Por su parte, la web de e-Labs permite representar el ajuste anterior como se muestra en la figura 9.b en el que se observa correspondencia entre ambos resultados de tiempo de vida media.

### 4. Discusión y Conclusiones

De los datos adquiridos por el detector se observaron los diferentes registros ocasionados por las partículas cargadas que interactuaban con las placas centelladoras, al momento de realizar la corrección temporal a la tarjeta de adquisición de datos modulada por el GPS, se identificó que los diferentes registro no tenían valores validos debido a una falla en la habilitación del GPS y su enlace

```
Data columns (total 17 columns):
#   Column      Dtype
---  -
0   Trigger_Count float64
1   RE0          float64
2   FE0          float64
3   RE1          float64
4   FE1          float64
5   RE2          float64
6   FE2          float64
7   RE3          float64
8   FE3          float64
9   1PPS_Count   float64
10  Valid        object
11  NSatellites   object
12  Error_Bits    float64
13  Correction    int64
14  Full_time     datetime64[ns]
15  Tlpps         float64
16  Tabs         float64
```

Figura 8: Formato de cada columna en el DataFrame.

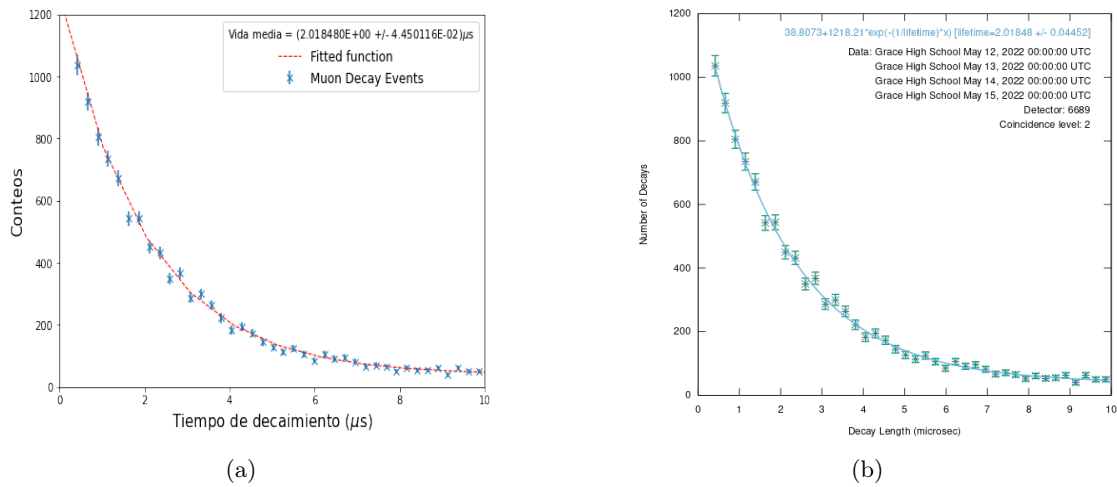


Figura 9: Distribución de conteos como función del tiempo de decaimientos de los muones. (a) Ajuste realizado en el proyecto y (b) ajuste realizado por Quarknet.

a satélites.

No obstante, los datos recopilados permitieron desarrollar un algoritmo de lectura e interpretación los datasets a un formato de alto nivel con valores decimales, binarios y de fecha legible por usuarios humanos y manejables por herramientas de análisis de datos actuales, dado que originalmente se expresan en hexadecimal y dificulta el entendimiento de las mediciones. Este tratamiento es posible seguirlo en el repositorio del proyecto.

Podemos concluir que con el montaje experimental empleado en laboratorio es posible la adquisición de señales candidatas a muones provenientes de rayos cósmicos.

Por otra parte, observamos una limitación al momento de analizar los datos producto de fallos en el detector al habilitar el GPS y enlazar con satélites. Por lo que hubo una imposibilidad al realizar la corrección temporal de los datos adquiridos en nuestro detector.

Sin embargo, al emplear datos adquiridos por otros experimentos con la misma tecnología, vimos la viabilidad de la metodología para la determinación del tiempo de vida media del muón con un valor experimental de  $\tau_{exp} = (2,018480 \pm 4,450116 \times 10^{-2})\mu s$ .

Además, con éste experimento se ratifica la naturaleza estocástica del fenómeno del decaimiento del muón.

### **Recomendaciones**

En caso de la repetición del desarrollo de éste proyecto recomendamos:

- Al momento de experimentar con el telescopio de muones es una buena practica revisar la correcta habilitación y configuración de los sensores, en especial del GPS y su enlace a satélites.
- Recubrir el detector con un blindaje que permita sólo la detección de muones que inciden verticalmente y reduzca posibles señales de fondo.
- Explorar algoritmos recientes para el manejo de la tarjeta de adquisición de datos y la reproducción de estos resultados, en repositorios públicos de la web.

## Referencias

- [1] P. Zyla *et al.*, “Review of Particle Physics,” *PTEP*, vol. 2020, no. 8, p. 083C01, 2020, and 2021 update.
- [2] T. Jordan and H.-G. Berns, “Quarknet cosmic ray muon detector user’s manual series"6000"daq,” 2010.
- [3] F. H. Attix, *Introduction to radiological physics and radiation dosimetry*. John Wiley & Sons, 2008.
- [4] T. Gorringer and D. Hertzog, “Precision muon physics,” *Progress in Particle and Nuclear Physics*, vol. 84, pp. 73–123, 2015.
- [5] O. A. Altuve, V. Clarizio, and R. Martinez, “Medición de la vida media de un muón,” 2022. [Online]. Available: <https://gitmilab.redclara.net/altuveo/medicion-de-la-vida-media-del-muon>
- [6] I2U2 and Quarknet, “Lifetime: Choose data for lifetime study,” 2022. [Online]. Available: <https://www.i2u2.org/elab/cosmic/analysis-lifetime/>