

Medición de la Vida Media del Muón

ANDRÉS VALLE¹, LILIAN GARCÍA² Y HÉCTOR PÉREZ³

¹Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas - USAC, mail: andresvalle@ecfm.usac.edu.gt

²Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas - USAC, mail: lgarcia@ecfm.usac.edu.gt

³Escuela de Ciencias Físicas y Matemáticas - USAC, mail: hector@ecfm.usac.edu.gt

Recibido: 28 de febrero del 2017 / Aceptado: 30 de abril del 2017

Resumen

In this paper is presented the measurement of the muon mean lifetime using as source muons generated by the interaction of cosmic rays with the atmosphere. The experimental setting consists of an array of three scintillator plates coupled to photomultiplier diodes. Events in which a muon passes through the two upper plates, loses all of its energy and decays in the lower plate were recorded. The measurement of the time difference between the signal produced in the upper plates and the lower plate gave 916 valid events. From the parametrization of their distribution was obtained a mean lifetime $(2.19 \pm 0.09) \mu\text{s}$. This value is compatible with the world average value $(2.1969811 \pm 0.0000022) \mu\text{s}$.

Keywords: muon, scintillators, mean life, cosmic ray

Se obtuvo la vida media del muón utilizando como fuente muones generados por la interacción de la atmósfera con los rayos cósmicos. Usando un arreglo de tres placas centelladoras acopladas a diodos fotomultiplicadores, se registraron eventos en los que un muón pasa por las dos placas superiores, pierde toda su energía y decae en la placa inferior. Al medir la diferencia de tiempo entre la señal producida entre las placas superiores y la placa inferior para 916 eventos válidos se construyó una distribución estadística, a partir de la cual se obtuvo una vida media de $(2.19 \pm 0.09) \mu\text{s}$. Dicho valor concuerda con el promedio mundial $(2.1969811 \pm 0.0000022) \mu\text{s}$.

Palabras clave: muón, centelladores, vida media, rayos cósmicos

I. INTRODUCCIÓN

A. Muón

EL muón (μ) es una partícula elemental perteneciente a la familia de los leptones [5]. Tiene características similares a las del electrón, pero de masa aproximadamente 200 veces mayor. Fue descubierto en el año 1936 por C. ADERSON y H. NEDDERMEYER, al analizar la pérdida de energía de cascadas de rayos cósmicos en placas de platino [11]. Los rayos cósmicos son la principal fuente de muones en la superficie de la Tierra. [14]

La Tabla 1 muestra las propiedades del muón. El muón es una partícula inestable que decae en partículas más ligeras a través de la fuerza débil [10] siguiendo los procesos descritos en la Tabla 2. Si bien el muón tiene varios modos de decaimiento, sólo se tomará en cuenta el primero ($\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$) ya que el segundo y tercero no son distinguibles del primero en el experimento que ahora se propone.

B. Vida Media

El tiempo transcurrido entre el decaimiento sucesivo de dos partículas inestables es un proceso estocástico que puede ser descrito utilizando la distribución exponencial [8]. Si suponemos que la tasa promedio de decaimientos

Propiedad	Símbolo	Valor [◊]
Masa	m_μ	$105.658\,371\,5(35) \text{ MeV}/c_0^2$
Carga	q_μ	e^\ddagger
Spin	s_μ	$1/2$
Vida Media	τ_μ	$2.196\,981\,1(22) \mu\text{s}$

[◊] Las cifras en paréntesis representan la incerteza en los últimos dígitos del valor.

[‡] e es la carga del electrón.

Tabla 1: Resumen de algunas propiedades del muón. Valores obtenidos del Particle Data Group [13]

por unidad de tiempo $\lambda = 1/\tau$ es constante durante un intervalo de tiempo y que los eventos se distribuyen aleatoriamente durante este [1], y tenemos un número total de muones $N(t)$ a un tiempo t ; entonces la cantidad de ellos que decaería en un intervalo dt está dado por:

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

Donde el signo negativo en la Ecuación (1), expresa que el número de muones *disminuye*. Si se tienen inicialmente (en $t = 0$) una cantidad N_0 de muones, la Ecuación (1) predice que la cantidad restante de muones a un tiempo t será:

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

Modo de decaimiento [†]	Probabilidad
$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$	$\approx 100\%$
$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e + \gamma$	$\dagger (1.4 \pm 0.4)\%$
$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e^- + e^+$	$\diamond (3.4 \pm 0.4) \times 10^{-3}\%$

[†] La letra γ representa un fotón y ν un neutrino.

[‡] Este porcentaje incluye solo eventos con $\gamma > 10$ MeV.

[◊] Solo se presenta dentro de ciertos límites de energía.

Tabla 2: Modos de decaimiento del muón. Valores obtenidos del Particle Data Group [13]

El parámetro τ se conoce como la *vida media*, y representa el tiempo promedio que tarda una partícula en decaer. El valor de la vida media del muón más preciso a la fecha [13] es de $\tau_\mu = 2.196\,981\,1(22)\,\mu\text{s}$ (ver Tabla 1).

II. MÉTODO EXPERIMENTAL

El diseño experimental utilizado está basado en el trabajo de IZRAELEVITCH [7]. Se utilizaron tres placas centelladoras plásticas marca Eljen, serie EJ-200; acopladas a diodos fotomultiplicadores de silicio marca SensL serie C-Series de 6 mm, comunmente llamados *SiPM*¹ o fotodiodos.

Las placas fueron apiladas una sobre otra y nombradas como *A*, *B* y *C*; comenzando por la placa superior (Figura 1). Las salidas de los diodos fueron analizadas con la tarjeta de adquisición QuarkNet Serie “6000” [2] y los datos fueron recolectados con una computadora. La tarjeta QuarkNet utilizada cuenta con un GPS que permite vincular datos de tiempo y posición a cada evento registrado.

Cuando una partícula ionizante atraviesa un material centellador, éste emite fotones [1]. Cuando los fotones son capturados por el *SiPM*, se genera un pulso de corriente en el fotodiodo que es enviado a la tarjeta de adquisición.

En la tarjeta, el pulso de corriente se amplifica e invierte y pasa por un *convertor de tiempo a señal digital* o *TDC*², cuya salida es un pulso de voltaje con una duración que es proporcional al tiempo que el pulso de corriente excede un valor de umbral (*trigger*) determinado (este proceso se ilustra en la Figura 2). Para este experimento se fijó el umbral de cada diodo de forma que las tasas de conteos en las placas sean aproximadamente iguales (véase tabla 3).

Las placas están constantemente expuestas a radiación ionizante del fondo natural, que está constituido por las emisiones de los elementos radiactivos presentes en el suelo y materiales en general así como de la interacción atmosférica con rayos cósmicos. El material centellador emite fotones como respuesta al proceso de ionización, de manera que existen muchos conteos en un intervalo

de tiempo. Al intervalo en que se toman las mediciones se le conoce como *ventana de adquisición*. Y el conjunto de conteos dentro de la ventana de adquisición forma un evento.

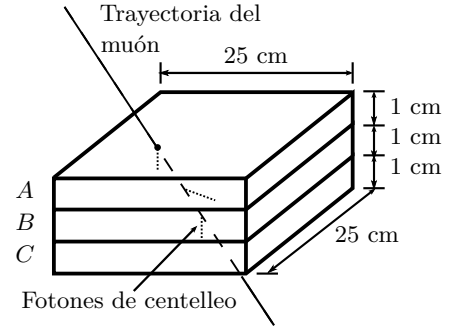


Figura 1: Esquema del arreglo de las tres placas acopladas al fotodiodo. Cada placa mide (25 × 25 × 1) cm. La traza dibujada corresponde a la trayectoria de una partícula ionizante cuando pasa a través de las placas.

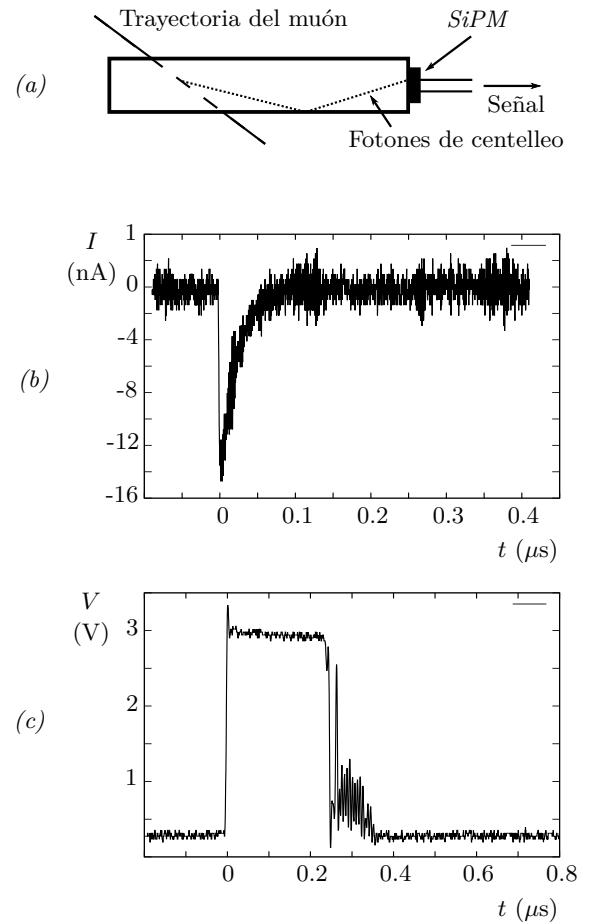


Figura 2: Generación de un pulso de conteo. (a) Al pasar un muón por el centellador se producen fotones que detecta el SiPM. (b) El SiPM produce una señal que es un pulso invertido de corriente. (c) Al pasar por la electrónica la señal se convierte en un pulso cuadrado de voltaje cuya duración es proporcional a la duración del pulso invertido.

¹*SiPM* del nombre en inglés: Silicon PhotoMultiplier

²*TDC*: Time to Digital Converter

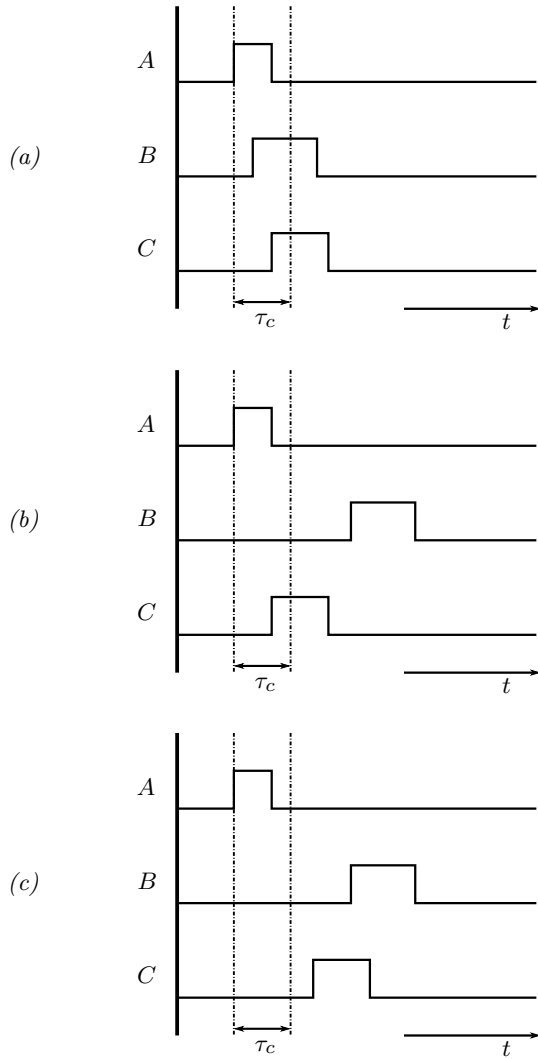


Figura 3: Representación esquemática de la salida de las placas A, B y C para tres tipos de eventos. Las líneas punteadas verticales muestran el espacio temporal dentro del que se consideran que los eventos son simultáneos. (a) El evento es de triple coincidencia. (b) Doble coincidencia, entre las placas A y C. (c) Este evento no tiene coincidencias.

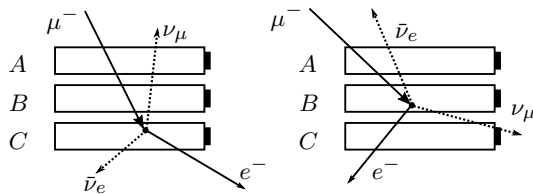


Figura 4: Posibles trayectorias del muón a medir. El muón atraviesa la placa A, pasa a la placa B, donde se detiene y decae. El electrón resultante atraviesa la placa C.

Los eventos se clasifican por la cantidad de placas que detectan conteos de forma simultánea [7]. En la Figura 3, se ilustran distintos tipos de eventos.

Para medir la vida media del muón se buscaron eventos que presentaran conteos simultáneos en las dos placas superiores. De esta forma el decaimiento debe tener lugar en las placa B o C, y si consideramos que el muón deposita toda su energía en las placas, se encontrará en reposo al decaer. Es decir, los datos obtenidos están dados en el marco de referencia en reposo del muón [4]. Las trayectorias utilizadas para el análisis se ilustran en la Figura 4

La adquisición de datos en la tarjeta QuarkNet se configuró para registrar únicamente 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. Para el análisis de datos se filtraron los eventos para considerar solamente casos en los que hubieran dos conteos simultáneos en las dos placas superiores y, tiempo después, un conteo en la placa del fondo.

Por lo tanto, la diferencia de tiempo entre el conteo simultáneo en las placas superiores y el conteo en la placa C es el tiempo de decaimiento del muón (Δt). Un ejemplo del evento descrito anteriormente se muestra en la Figura 5.

La ventana de simultaneidad se define como el intervalo de tiempo en que dos conteos se consideran coincidentes. Ésta debe ser tan pequeña como sea posible. Los valores utilizados para el análisis fueron: una ventana de coincidencia de 50 ns y una ventana de adquisición de 40 μ s. Estos valores dependen de la electrónica empleada y están basados en el trabajo de IZRAELEVITCH [7].

Se debe considerar que no todos los eventos que producen una salida como la de la Figura 5 provienen del decaimiento de muones. Estos eventos también pueden ser producidos por la radiación ionizante de fondo. En la Figura 6 se muestra como una partícula p_1 que pasa por las placas A y B pero no por la C produce una coincidencia doble; y dentro del tiempo considerado por la ventana de adquisición, una segunda partícula p_2 pasa por la placa C (no necesariamente solo por esta).

El tiempo transcurrido entre la doble coincidencia producida por p_1 y el paso de p_2 obedece una distribución de probabilidad exponencial, donde la media λ_C es el promedio de pulsos por unidad de tiempo en la placa C. Si el tiempo de la ventana de adquisición $\Delta t_a \ll 1/\lambda_C$, de la distribución exponencial se tiene:

$$K_0 e^{-\lambda_C \Delta t_a} \approx K_0 \quad (3)$$

así, si se cumple esta condición, el efecto de la radiación ionizante de fondo serán conteos distribuidos de forma uniforme en el tiempo. A partir de los datos de la Tabla 3 se tiene que $1/\lambda_C \approx 56\,338\ \mu\text{s} \gg 40\ \mu\text{s}$ por lo que la condición se verifica.

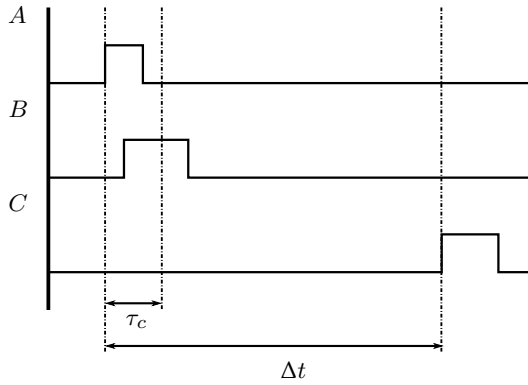


Figura 5: Representación esquemática del evento que se busca. Con τ_c se representa el intervalo temporal dentro del que se define la simultaneidad entre las placas A y B. Con Δt se define el tiempo de decaimiento.

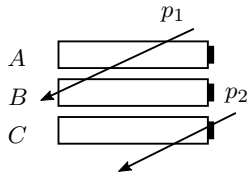


Figura 6: Ejemplo de un evento producido por radiación ionizante de fondo.

Placa	Conteos (mín^{-1})	
	\bar{x}	σ
A	1172	49
B	1095	40
C	1065	39
Coincidencias	624	25

Tabla 3: Tasas de conteos promedio en las placas centelleadoras. Se midieron los conteos en intervalos de 1 mín durante 9 h. También se muestra el conteo de coincidencias dobles entre cualquier par de placas.

Constante	Valor	Incerteza	Unidad
A_0	502	28	Conteos
B_0	2195	86	ns
C_0	2.3	0.4	Conteos

Tabla 4: Constantes del ajuste[†] de la Ecuación (4) a los datos medidos.

Los datos crudos provenientes de la tarjeta QuarNet fueron procesados utilizando las librerías del *ToolKit Root v.6.06.04* [15] para C++. En esta fase se implementó por *software* el filtro para seleccionar los *eventos válidos*, que son los cumplieron con los requerimientos impuestos para la ventana de simultaneidad y ventana de adquisición.

Con los eventos válidos obtenidos se elaboró un histograma de conteos para Δt , con un tamaño de intervalo de clase de $1 \mu\text{s}$, y se ajustó la siguiente función utilizando el *software GnuPlot* [17]:

$$y(x) = A_0 e^{-x/B_0} + C_0 \quad (4)$$

donde el término exponencial es de la forma de la Ecuación (2), por lo que B_0 será la vida media τ_μ . La constante C_0 representa la contribución del fondo natural al experimento, acorde a la Ecuación (3).

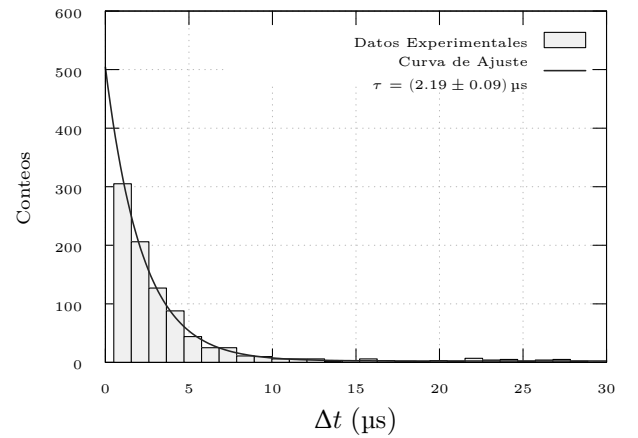


Figura 7: Distribución de la diferencia de tiempo entre los conteos de las placas superiores con el conteo en la placa inferior.

III. RESULTADOS

El evento ilustrado en la Figura 5 tiene una tasa de ocurrencia muy baja [7], por lo que fue necesario tomar datos durante un largo período de tiempo para obtener suficiente estadística para el análisis. Tras tomar datos durante dos meses, se registraron 2.9×10^7 eventos de doble coincidencia. De dichos eventos, se seleccionaron 916 que cumplieran con los criterios descritos en la Sección II.

Al analizar las diferencias de tiempo entre el conteo simultáneo de las dos placas superiores con el conteo en la placa inferior, se obtienen el histograma de la Figura 7.

A partir del ajuste³ realizado a los datos usando la función de densidad de probabilidad descrita por la ecuación (4); se obtuvieron los valores de las constantes, los que se muestran en la Tabla 4, por lo que la vida media medida para el muón fue $(2.19 \pm 0.09) \mu\text{s}$, con un valor de $\chi^2_\nu = 0.886389$.

³ $\chi^2_\nu = 0.886389$ con un número de grados de libertad de $\nu = 24$. Se consideraron incertezas de tipo Poisson para el total de conteos n_i en cada intervalo ($\sigma_i = \sqrt{n_i}$).

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la figura 7 se puede comparar el histograma de los datos obtenidos contra la función de ajuste. El valor de $\chi^2_\nu \approx 1$ indica el buen ajuste de la distribución estadística propuesta por la ecuación (2). La vida media obtenida con este método difiere con un error relativo del 0.3% con respecto al valor experimental más preciso (Sección B) publicado en [13].

El valor de la constante A_0 del ajuste depende solamente del número de eventos registrados, los cuales dependen del tiempo de medición.

Es interesante que el valor C_0 sea tan pequeño. Como se discutió en la Sección II, esta constante se suma por la contribución del fondo natural de radiación. Los conteos por fondo natural de radiación en la placa C tienen una tasa que es mucho mayor que la de eventos válidos, por lo que a primera vista se esperaría que su valor fuera más significativo. Sin embargo cuando se considera que esta se debe solo a aquellos pulsos en la placa C que suceden después de una doble coincidencia en A y B , se ve que el filtrado está tomando un subconjunto muy pequeño de los pulsos reportados en la Tabla 3. Finalmente, el valor de C_0 no es cero dentro del margen de error, por lo que se justifica su inclusión en el ajuste.

Aunque la cantidad de eventos registrados durante dos meses fue alta, fueron pocos los eventos que pasaron los filtros y fueron utilizados para el análisis. Por este motivo, es necesario prolongar el tiempo de las mediciones si se desean resultados más precisos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la colaboración de FEDERICO IZRALEVITCH por donar el equipo utilizado en el experimento y el tiempo invertido en el taller de capacitación.

REFERENCIAS

- [1] Attix, F. (2008). *Introduction to Radiological Physics and Radiation Dosimetry*. Wiley. URL <https://books.google.com.gt/books?id=WN8LTw3S5CEC>.
- [2] Bardeen, M.; Gilbert, E.; Jordan, T.; Nepywoda, P.; Quigg, E.; Wilde, M. y Zhao, Y. (2006). The quarknet/grid collaborative learning e-lab. *Future Generation Computer Systems*, 22(6), 700 – 708, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.future.2006.03.001>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X06000306>.
- [3] Bevington, P. y Robinson, D. (2003). *Data reduction and error analysis for the physical sciences*. McGraw-Hill Higher Education, McGraw-Hill. URL <https://books.google.com.gt/books?id=0poQAQAAIAAJ>.
- [4] Gorringer, T. y Hertzog, D. (2015). Precision muon physics. *Progress in Particle and Nuclear Physics*, 84, 73 – 123, doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ppnp.2015.06.001>. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146641015000435>.
- [5] Griffiths, D. (2008). *Introduction to Elementary Particles*. Physics textbook, Wiley. URL <https://books.google.com.gt/books?id=w9Dz56myXm8C>.
- [6] Gross, J. (2011). *The Speed and Lifetime of Cosmic-Ray Muons*. MIT.
- [7] Izraelevich, F. (2012), Detectores centelladores. <http://instrumentacion.ecfm.usac.edu.gt/escaramujo/documentos/izraelevitch.pdf>.
- [8] Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement*. John Wiley & Sons.
- [9] Knoll, G. F. (2010). *Radiation Detection and Measurement*. Wiley, 4th enlugar. URL <http://gen.lib.rus.ec/book/index.php?md5=64bb25ec206620f0366594375c40438a>.
- [10] Martin, B. y Shaw, G. (2008). *Particle Physics*. Manchester Physics Series, Wiley. URL <https://books.google.com.gt/books?id=whIbrWJdEJQC>.
- [11] Neddermeyer, S. H. y Anderson, C. D. (1937). Note on the nature of cosmic-ray particles. *Phys. Rev.*, 51, 884–886, doi:10.1103/PhysRev.51.884. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.51.884>.
- [12] Neddermeyer, S. H. y Anderson, C. D. (1937). Note on the nature of cosmic-ray particles. *Phys. Rev.*, 51, 884–886, doi:10.1103/PhysRev.51.884. URL <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRev.51.884>.
- [13] Olive, K. A. et al. (2014). Review of Particle Physics. *Chin. Phys.*, C38, 090,001, doi:10.1088/1674-1137/38/9/090001.
- [14] Segrè, E. (1964). *Nuclei and particles: an introduction to nuclear and subnuclear physics; 1st ed.* New York, NY: Benjamin. URL <https://cds.cern.ch/record/100961>.
- [15] The ROOT Team (1995–2015), A modular scientific software framework. <http://root.cern.ch>.
- [16] Valle, A. y Garcia, L. (2016). *Proyecto Escaramujo Guatemala: Caracterización y calibración de las placas centelladoras*.
- [17] Williams, T. y Kelley, C. (2015), Gnuplot 5.0: an interactive plotting program. <http://www.gnuplot.info/>.