

# Detección de muones atmosféricos

Caradonna Antonio, 13-10223

*Laboratorio avanzado de física I, Universidad Simón Bolívar, Sartenejas, Venezuela.*

(29 de octubre, 2018)

En la práctica de detección de muones atmosféricos del laboratorio avanzado de física para estudiantes de pre-grado se estudia un detector de muones para posteriormente utilizarlo en la detección de éstos y el cálculo de su vida media. Además, se calculó la proporción entre muones positivos y negativos, la constante de acoplamiento de Fermi y se comprobó la dilatación del tiempo utilizando mediciones a diferentes alturas.

## I. INTRODUCCIÓN

Los muones son partículas subatómicas elementales que pertenecen a la segunda generación de los leptones. En principio, por la gran cantidad de masa que poseen los muones, se pensó que se trataba de la partícula predicha por Yukawa Hideki en 1935 para explicar la fuerza que une a protones y neutrones en el núcleo pero en realidad fueron descubiertos por Carl D. Anderson y Seth Neddermeyer en 1936 mientras estudiaban la radiación cósmica, que está compuesta en su mayor parte por protones de muy alta energía provenientes del espacio.

Estas partículas se forman cuando los rayos cósmicos interactúan con la atmósfera. Su tiempo de vida media es de  $2.2\mu s$ , su spin es  $\frac{1}{2}$ , su carga es de  $-1e$  y su masa es 207 veces mayor que la del electrón. Por otro lado, su desintegración suele producir un electrón más otras partículas cuya carga total es nula. El resultado más común suele ser la desintegración en un electrón, un antineutrino-electrónico y un  $\mu$ -neutrino. Su antipartícula, el antimuón, generalmente se desintegra en un positrón, un  $e$ -neutrino y un  $\mu$ -antineutrino.

$$\mu^{\pm} = e^{\pm} + 2\nu$$

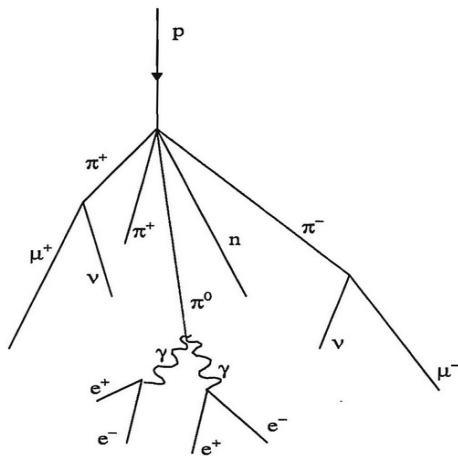


Figura 1: Descomposición de rayos cósmicos

## II. DETECTOR

El detector de muones consta de un centellador, un tubo fotomultiplicador, una fuente de alto voltaje y un módulo electrónico. El centellador de plástico y el tubo fotomultiplicador se encuentran dentro de un cilindro de aluminio para evitar pérdidas de luz. El detector tiene varias perillas en la parte superior, una de ellas sirve para ajustar el voltaje que pasa a través del tubo fotomultiplicador. Otra es un pulsador, que sirve para simular la entrada de muones a

través de un led que emite luz dentro del cilindro.

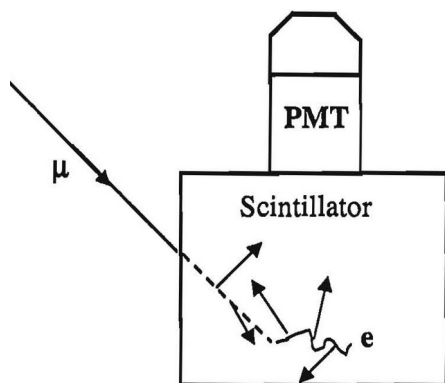


Figura 2: Detector de muones. Centellador y tubo fotomultiplicador (PMT)

Por otro lado, la radiación que emite un muón al entrar o decaer dentro del centellador se amplifica en el tubo fotomultiplicador y se emite en forma de señal al módulo electrónico y, a su vez, éste transmite la información de la señal a una PC a través de un puerto USB para finalmente ser analizada por el software '*Muon Physics*'. Además, el módulo electrónico posee una perilla de umbral de voltaje, que solo permite el paso de señales por encima de cierto voltaje. De este modo, se puede filtrar posibles eventos que no sean producidos por muones sino por la radiación alrededor del detector.

El proceso de detección se muestra en la Figura 3.

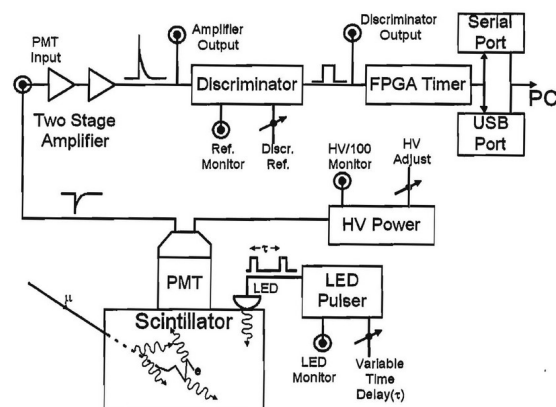


Figura 3: Esquema sobre proceso de detección de muones

Como se observa, después de que la señal es amplificada, pasa por el discriminador y posteriormente el FPGA activa un contador. Finalmente, la señal es enviada mediante un cable USB a la computadora, como se mencionó anteriormente.

### III. SOFTWARE (MUON PHYSICS)

Una vez la información llega al computador, el programa *Muon Physics* es el que se encarga de contabilizar y generar un histograma con los decaimientos. Éste consta de cinco secciones:

**Control:** En esta sección se puede configurar el puerto, la escala del histograma, el inicio del conteo, pausarlo o salir.

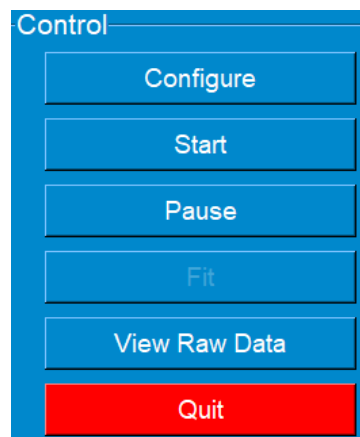


Figura 4: Sección de control del software.

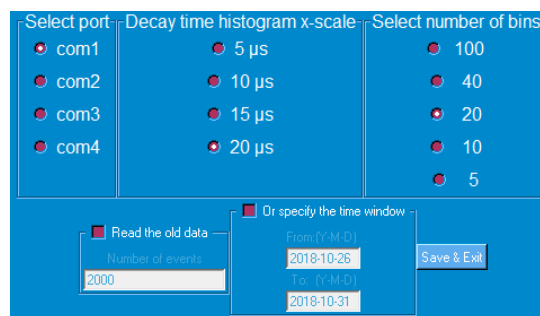


Figura 5: Botón de configuración en sección de Control.

**Histograma de tiempo de decaimiento de muones:** En esta sección se observa la gráfica de intervalos de tiempo entre activaciones consecutivas del contador para el cálculo de vida media de muones.

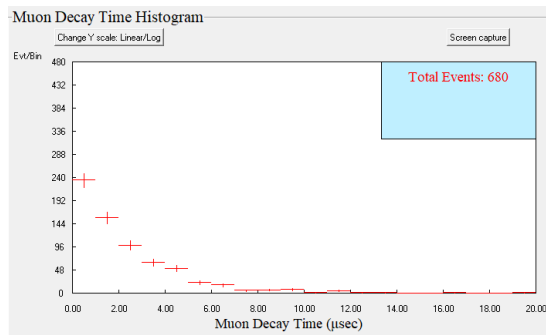


Figura 6: Sección que genera la gráfica de decaimiento de muones en el software.

**Monitor:** En esta sección se observan los valores más relevantes de la medición actual; como el tiempo que ha transcurrido, el número de muones contados, la cantidad de muones por segundo, los decaimientos dentro del centellador y la cantidad de decaimientos por minuto.

Monitor	
This measurement	
Elapsed Time	0:2:44
Number of Muons	2469
Muon Rate (per second)	16
Muon Decays	790
Decay Rate (per minute)	286.5

Figura 7: Sección de monitor en el software.

**Rate meter:** Este gráfico se actualiza de

forma continua y traza el número de señales por encima del umbral del discriminador en función del tiempo. Es útil para monitorear la tasa de activación general.

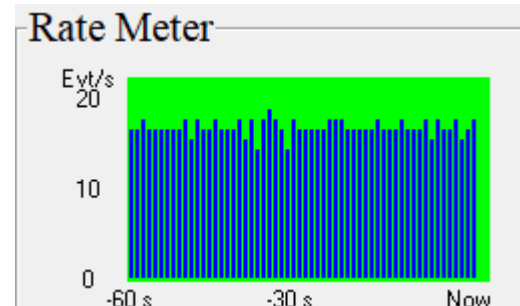


Figura 8: Imagen de Rate Meter antes de empezar las mediciones en el software.

**Muones que atraviesan el detector:** Esta sección muestra la cantidad de señales por encima del umbral.

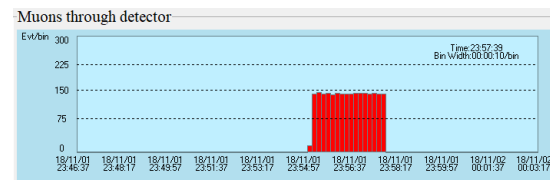


Figura 9: Imagen de sección que muestra la cantidad de señales por encima del umbral del discriminador.

## IV. MEDICIÓN DE LA VIDA MEDIA DE LOS MUONES

Una vez se quiere dejar de tomar mediciones de muones con el detector, se guardan los recolectados hasta el momento y se genera un archivo con dichos datos en la carpeta *muon\_data* del software y para leer los datos es necesario abrir el archivo usando el bloc de notas. Al abrir el archivo se observa que la mayoría de los datos son, por ejemplo, del siguiente tipo: 40000 1538439864.

Como ya sabemos, cuando un muón entra en el detector, pierde energía y emite luz. Esta

luz activa un contador que se desactiva cuando el muón decae y el electrón generado emite más radiación. Pero ¿Qué pasa si el muón no decae dentro del detector? En ese caso, el contador se detiene automáticamente luego de un tiempo predeterminado. De este modo, el primero número que sale en el archivo se refiere al intervalo de tiempo entre activaciones del contador. Entonces, el número 40000 nos dice que el muón no decaió dentro del detector y, por lo tanto, ese dato no es de particular interés. Solo nos interesan eventos en los que el muón decae dentro del detector. Por otro lado, el número '1538439864' que sale justo al lado es simplemente una forma "encriptada" en que se guarda la fecha y hora en que ese particular evento ocurrió.

Como ya dijimos, solo nos interesan los eventos en los que el muón decae dentro del detector, este tipo de eventos se diferencia de los ya mencionados porque el primer número es menor a 20000. Cabe destacar que la representación de los números es en nanosegundos.

Para filtrar los datos que no nos interesan se utiliza la herramienta *sift* que se encuentra dentro de la carpeta *muon\_util* del software. Este archivo ejecutable se encarga de generar un archivo nuevo con los posibles decaimientos y borra el resto de los eventos. En ambos casos se comprobó que el número de eventos resultante al generar este nuevo archivo fuera el mismo que el número de decaimientos contados por el software en el histograma.

Una vez se tiene el nuevo archivo de bloc de notas con los decaimientos, se pasaron a una hoja de cálculo en Excel y se contó la cantidad de veces que se repite cada evento. Finalmente, se transformaron los valores de decaimientos a microsegundos y se pasaron los datos a Origin8 para su análisis. Una vez en Origin8, se graficaron los datos y se ajustó la curva a la exponencial decreciente

$$N(t) = A e^{t/\tau} + B$$

Donde  $\tau$  es la vida media de un muón.

## V. PROPORCIÓN ENTRE $\mu^{+}$ Y $\mu^{-}$

Sea  $\lambda^{+}$  la tasa de decaimiento de los muones con carga positiva dentro del centellador y  $\lambda^{-}$  la de los muones con carga negativa. Además, sean  $N^{+}$  y  $N^{-}$  el número de muones positivos y negativos incidentes por unidad de tiempo. Entonces, la tasa de decaimiento promedio  $\langle \lambda \rangle$  viene dado por:

$$\langle \lambda \rangle = N^{+} \lambda^{+} + N^{-} \lambda^{-}$$

Usando  $\rho = N^{+}/N^{-}$ ,  $\tau^{-} = 1/\lambda^{-}$  como el tiempo de vida de los muones con carga negativa y  $\tau^{+} = 1/\lambda^{+}$  la de los muones con carga positiva, respectivamente. Entonces, podemos reescribir  $\langle \lambda \rangle$  de la siguiente manera

$$\langle \lambda \rangle = \rho \lambda^{+} \left( 1 + \frac{\lambda^{-}}{\lambda^{+}} \right)$$

$$\Rightarrow \langle \lambda \rangle^{-1} = \frac{1 + \rho}{\rho \lambda^{+} \left( 1 + \frac{\lambda^{-}}{\lambda^{+}} \right)}$$

y el tiempo de vida media observado  $\tau_{obs}$ , tomando  $\rho = 1$ , viene dado por

$$\tau_{obs} = (1 + \rho) \tau^{+} \left( 1 + \frac{\tau^{+}}{\tau^{-}} \right)^{-1}$$

Con  $\tau^{-} = \tau_c = 2.043 \pm 0.003 \mu s$  y  $\tau^{+} = \tau_{\mu} = 2.19703 \pm 0.00004 \mu s$ .

Finalmente, Podemos medir la razón  $\rho = N^{+}/N^{-}$ .

$$\rho = -\frac{\tau^{+}}{\tau^{-}}$$

## VI. CONSTANTE DE ACOPLAMIENTO DE FERMÍ

Para el cálculo de la constante de Fermi se utiliza la siguiente ecuación

$$\tau = \frac{192 \pi^3 \hbar^7}{G_F^2 m^5 c^4}$$

Donde,  $\hbar$  es la constant de Plank dividida entre  $2\pi$ ,  $m$  es la masa de los muones,  $c$  es la velocidad de la luz y  $\tau$  es el tiempo de vida media de los muones. Despejando, se obtiene el valor de la constante de acoplamiento de Fermi

$$G_F = \sqrt{\frac{192 \pi^3 \hbar^7}{\tau m^5 c^4}}$$

## VII. EFECTO DE DILATACIÓN DEL TIEMPO

Los muones pierden energía, como todas las partículas cargadas que viajan a una velocidad cercana a la de la luz, a través de la interacción coulombiana con la materia a una tasa aproximada de  $C_0 = 2 \text{ MeV/g/cm}^2$ . Además, el tiempo que tardan en viajar desde una altura  $H$  hasta el nivel del mar, para un sistema en reposo junto con la partícula, viene dado por

$$t' = \int_H^0 \frac{dh}{c\beta(h)\gamma(h)}$$

Donde,

$$\beta = \frac{v}{c} \quad \text{y} \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$$

Como los muones pierden energía a una tasa constante al pasar por un medio de densidad de masa  $\rho$ ,  $dE/ds = C_0$  y como  $s = \rho x$ , entonces  $dE = \rho C_0 dh$ . También, como  $dE = m c^2 d\gamma$  entonces se reescribe la integral de la siguiente forma

$$t' = \frac{mc}{\rho C_0} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} \frac{d\gamma}{\sqrt{\gamma^2 - 1}}$$

Con  $\gamma_1$  el factor gamma del muón a una altura  $H$ , donde  $\gamma_1 = E_1/mc^2$  y  $E_1 = E_2 + \Delta E$  y  $E_2 = 160 \text{ MeV}$ , y  $\gamma_2$  el factor gamma del muón justo antes de entrar al centellador, con  $\gamma_2 = 1.5$  porque queremos que el muón se detenga en medio del centellador. Así, para la tasa de detención de muones a diferentes alturas se expresa como  $R = \exp(-t'/\tau)$ , donde  $\tau$  es el tiempo propio de vida de los muones.

## VIII. RESULTADOS

### A. Cálculo de vida media de los muones.

Para la primera muestra de datos de 50 horas de medición y 1867 eventos de decaimientos dentro del centellador, se obtuvo el siguiente gráfico

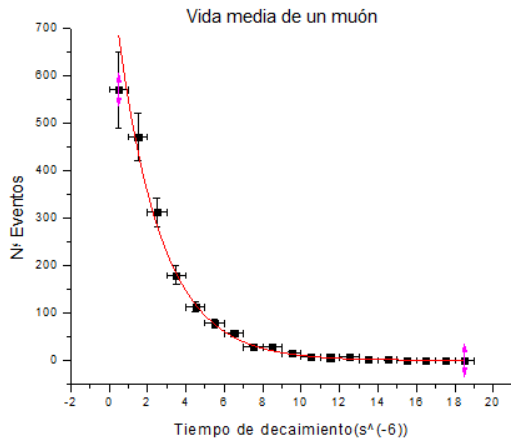


Gráfico 1: N° de eventos vs tiempo de decaimiento para aproximadamente 50 horas de conteo de muones y 1867 decaimientos.

Del ajuste de la curva se obtuvieron los siguientes valores, donde  $\tau$  es el tiempo de vida media de los muones medido en  $\mu s$ .

Tabla 1: Valores asociados al ajuste realizado al gráfico 1

	Valor	Error
$\tau_1$	2.26	0.09
<b>A</b>	853.52	107.08
<b>B</b>	0.61	0.17

Por otro lado, para la muestra de datos de 20 horas de medición y 145 eventos de decaimiento, se obtuvo el siguiente gráfico

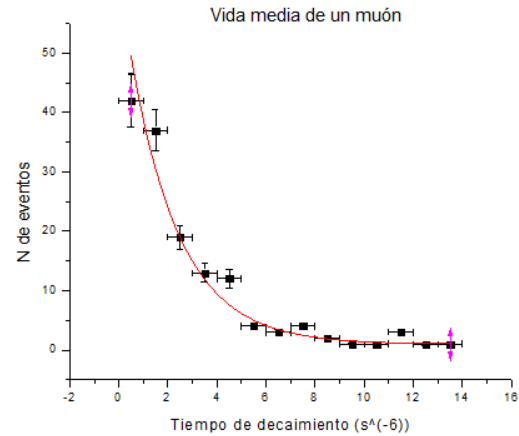


Gráfico 2: N° de eventos vs tiempo de decaimiento para aproximadamente 20 horas de conteo de muones y 145 decaimientos.

Se realizó el mismo ajuste exponencial y se obtuvieron los siguientes valores para los parámetros

Tabla 2: Valores asociados al ajuste realizado al gráfico 2.

	Valor	Error
$\tau_2$	2.01	0.27
<b>A</b>	62.22	13.16
<b>B</b>	0.97	0.32

Ambos resultados son comparables entre ellos e indistinguibles con respecto al valor real, pero para obtener un resultado más preciso y con menos error es necesario hacer una detección de muones mucho más larga.

### B. Proporción entre $\mu^{+}$ y $\mu^{-}$

Se obtuvo el siguiente resultado

Tabla 3: Proporción entre muones positivos y negativos para los distintos  $\tau$  medidos en  $\mu s$ .

	Valor	Error
$\tau_{obs}$	2.119	0.003
$\rho_1$	1.047	0.003
$\rho_2$	3.702	0.153
$\rho_3$	-0.189	0.026

Donde  $\rho_1$  se obtiene utilizando  $\tau_{obs}$ ,  $\rho_2$  se obtiene utilizando  $\tau_1$  y  $\rho_3$  se obtiene utilizando  $\tau_2$ .

Los primeros dos resultados tienen sentido, aunque  $\rho_2$  está alejado de lo esperado, ya que dice que decaen casi cuatro veces más muones positivos que muones negativos dentro del centellador. Por otro lado,  $\rho_3$  no tiene sentido. Debemos recordar que los valores de  $\rho_3$  y  $\rho_2$  fueron calculados con estadística correspondiente a uno y dos días de medición, respectivamente.

Las mediciones no tienen la estadística suficiente para obtener el valor esperado. Como muestran Coan, T., Liu, T. y Ye, J. en su paper<sup>1</sup>, es necesario una medición continua por aproximadamente veinte días para obtener la estadística necesaria.

La diferencia entre el valor esperado  $\rho_1$  y el obtenido con nuestra observación es de 254%.

### C. Constante de acoplamiento de Fermi

Según el valor de referencia<sup>2</sup>, la constante de acoplamiento de Fermi es

$$G_F = 1.4 \times 10^{-49} \text{ erg cm}^3$$

Y, utilizando  $\tau_1$  se obtuvo,

$$G_F = 1.41 \times 10^{-62} \text{ J m}^3$$

Los resultados son equivalentes si se transforman de cgs a MKS o viceversa.

<sup>1</sup> Coan, T., Liu, T. y Ye, J. *A Compact Apparatus for Muon Lifetime Measurement and Time Dilation Demonstration in the Undergraduate Laboratory*. 2005.

<sup>2</sup> Perkins, D. *Introduction to high energy physics*, 1972.

### D. Efecto de dilatación del tiempo

Para una diferencia de altura de  $\Delta h = 1800\text{m}$  comprendida entre El Jarillo y La Guaira, se obtuvo lo siguiente

Tabla 4: Tiempo de tránsito y tasas de detención de muones relativista y no relativista para una diferencia de altura de 1800m.

	Valor
$t'$	$1.45\tau$
$R$	$0.23 \pm 0.02$
$R_{nr}$	$0.06 \pm 0.01$

Donde  $t'$  es el tiempo de tránsito y  $R_{nr}$  es el coeficiente R en el caso no relativista.

Se aprecia que para el caso no relativista, la tasa de detención de muones es despreciable, lo que contradice lo observado en las mediciones.

Lamentablemente, no se poseen los tiempos de medición de los datos a diferentes alturas y no se puede hacer una comparación formal de lo observado y lo predicho por la teoría.

Para el caso de una diferencia de altura de  $\Delta h = 500\text{m}$  entre Maracay y La Guaira se obtuvo

Tabla 5: Tiempo de tránsito y tasas de detención de muones relativista y no relativista para una diferencia de altura de 500m.

	Valor
$t'$	$0.65\tau$
$R$	$0.51 \pm 0.01$
$R_{nr}$	$0.47 \pm 0.01$

En este caso se observa que la diferencia entre las tasas de detención relativista y no relativista es despreciable y esto se debe a

que en el caso no relativista, los muones se espera que puedan viajar 600m antes de decaer. De este modo, en este caso no se aprecia el efecto de la relatividad pero sirve para ilustrar el fenómeno.

## IX. CONCLUSIONES

1) Se calculó la vida media de los muones para dos tiempos de detección distintos. Para el primero, de 50 horas continuas y un total de 1867 decaimientos del detector, se obtuvo un tiempo de vida media de  $\tau = (2.26 \pm 0.09) \mu s$  y para el segundo, de 20 horas continuas y un total de 145 decaimientos dentro del detector, se obtuvo  $\tau = (2.01 \pm 0.27) \mu s$ . Aunque la detección debió hacerse por un tiempo más prolongado, los resultados se aproximan entre ellos y son bastante cercanos a los valores reportados por otros físicos que han realizado el mismo experimento como los enunciados en las referencias.

2) Para obtener la proporción esperada entre muones de carga positiva y muones de carga negativa que decaen dentro del centellador es necesario mucho más tiempo de medición, ya que se espera que los muones negativos vivan un poco menos que los positivos y, al obtener un valor para la vida media un poco mayor al valor real, la proporción entre los muones cambia drásticamente. De igual forma, por la forma de la ecuación, si el valor de la vida media está por debajo del valor real, el resultado carece de sentido.

Por otro lado, para el caso de la constante de acoplamiento de Fermi, la diferencia entre el valor real de la vida media de los muones y nuestro valor observado no tuvo gran impacto y se halló un valor igual al esperado.

3) Se comprobó el efecto relativista en los muones debido a su gran velocidad pero no se pudo comparar con valores observados por falta de información.

## X. REFERENCIAS

[1] Coan, T., Liu, T. and Ye, J., “*A Compact Apparatus for Muon Lifetime Measurement and Time Dilation Demonstration in the Undergraduate Laboratory*”.

[2] Coan, T., Ye, J., “*Muon Physics. MP1-A User’s Manual*”.

[3] Reiter, R.A. et al., *Phys. Rev. Lett.* 5, 22 (1960).

[4] Perkins, D., “*Introduction to high energy physics*”.