Determinación de la vida media del muón en agua

A. Abate, R. Cárdenas, F. Grinblat & P. Soubelet
Instituto Balseiro - Introducción a Física Nuclear y Partículas
(Dated: 18 de abril de 2012)

Se estudió la energía depositada por rayos cósmicos ultrarelativistas en un detector Cherenkov. El mismo consistía en un tanque de agua y un fotomultiplicador con el cual se detectaron los pulsos debidos al Efecto Cherenkov producidos en el agua. Se determinó que el tiempo de vida media de los muones en dicho tanque es $\tau = (1100 \pm 10)\ ns$.

I. INTRODUCCIÓN

Se define como rayos cósmicos a la radiación que ingresa a la atmósfera desde el espacio exterior. La misma está conformada principalmente por núcleos atómicos desde $Z = 1$ (H) hasta $Z = 56$ (Fe), electrones, radiación electromagnética (γ) y neutrinos de alta energía. El espectro de energía de los rayos cósmicos abarca desde $1\ MeV$, para partículas del viento solar, hasta $10^{14}\ MeV$, correspondiente a partículas intergalácticas, y se reduce fuertemente para energías mayores.

Debido a la alta energía de los rayos cósmicos, denominados *rayos cósmicos primarios*, se producen nuevas partículas al interactuar con los átomos de nitrógeno que componen la atmósfera. Como resultado de esta colisión se produce una cascada de partículas llamada *Lluvia Atmosférica Extendida* o *rayos cósmicos secundarios* (Ver Fig. (1)).

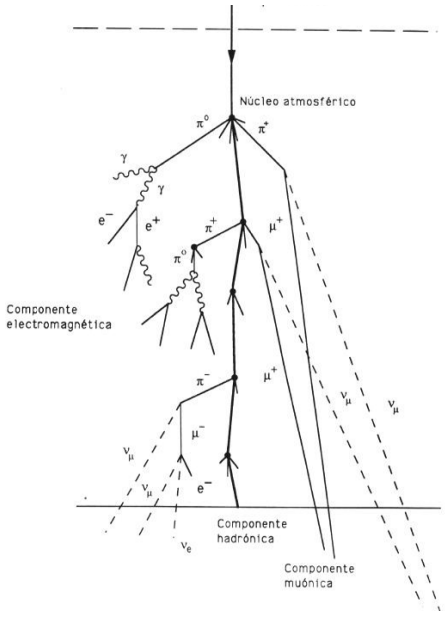

Figura 1: Esquema de una cascada atmosférica.

Los *rayos cósmicos secundarios* poseen tres componentes principales. La Componente Electromagnética, de fotones y electrones; la Cascada Hadrónica, formada por piones y kaones; y la Componente Muónica, proveniente del decaimiento de los muones.

El muón es una partícula que posee la carga del electrón y una masa aproximadamente 200 veces mayor a la de este último. Los muones son partículas que tienen un *tiempo de vida medio*, es decir que existe un tiempo característico a partir del cual un muón tiene una muy alta probabilidad de decaer en otras partículas. En particular, la reacción que tiene lugar en tal decaimiento natural para los μ^+ y μ^- es la siguente[1]:

$$\mu^+ \longrightarrow e^+ + \bar{\nu_\mu} + \nu_e \tag{1}$$

$$\mu^- \longrightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu_e} \tag{2}$$

donde μ^+ y μ^- son los muones de carga positiva y negativa, respectivamente; e^+ y e^- denotan al electrón y positrón; y ν representa a los neutrinos.

La llegada de muones a la superficie es un *proceso de Poisson*. En estos procesos la ocurrencia de eventos es independiente de los eventos anteriores y aleatoria y tal que el número de eventos por unidad de tiempo es constante [2].

Si t es el intervalo de tiempo entre dos sucesos consecutivos y λ la cantidad de eventos por unidad de tiempo (que es constante), se puede demostrar que la probabilidad que se registren $\lambda.t$ eventos tiene una dependencia como,

$$P \propto e^{-\lambda.t}, \tag{3}$$

donde λ se relaciona con el tiempo de vida media del muón τ por medio de la expresión:

$$\tau = \frac{1}{\lambda} \tag{4}$$

Debido a la gran energía que poseen los muones se mueven a velocidades relativistas, produciéndose una dilatación temporal que permite que estos se encuentren en la tierra. La distribución de energía con la cual dichas partículas se observan en la superficie terrestre tiene su máximo en $4\ GeV$. Si los muones ingresan al agua con dicha energía, poseen una velocidad mayor que la de propagación de una onda electromagnética en este medio, razón por la cual emitirá radiación Cherenkov. La energía depositada por la partícula en el agua es de aproximadamente $2\ \frac{MeV}{cm}$ [3]. Al perder energía los muones disminuyen su velocidad y finalmente, se dejarán de observar los efectos relativistas de dilatación temporal. Si estos muones decaen dentro del agua emitiendo e^+ o e^- que producirán efecto Cherenkov.

II. MÉTODO EXPERIMENTAL

Para detectar los muones que llegan a la superficie terrestre se utilizó un detector Cherenkov. El detector consiste principalmente en un tanque de agua y un fotomultiplicador que convierte los fotones producidos por el efecto Cherenkov en una señal eléctrica.

Se trabajó con un tanque cilíndrico que se encontraba lleno de agua y recubierto de un blindaje metálico cuya función es oscurecer al tanque de modo tal que la luz exterior no ingrese al detector.

Tanto los muones como los e^+ y e^- producto del decaimiento del mismo, generan señales que son detectadas por el fotomultiplicador. El intervalo de tiempo entre la señal de ingreso al tanque del muón y la señal proveniente del decaimiento, es el tiempo de vida media del muón. Construyendo un histograma de los intervalos de tiempo de dos señales consecutivas detectadas se obtuvo una gráfica con una dependencia funcional dada por Ec. (3). A partir de un ajuste exponencial se determinó λ.

1. *Características del PMT*

El fotomultiplicador, PMT, consiste en un arreglo de electrodos (dínodos), acomodados en orden creciente de potencial(ver Fig. (1)).

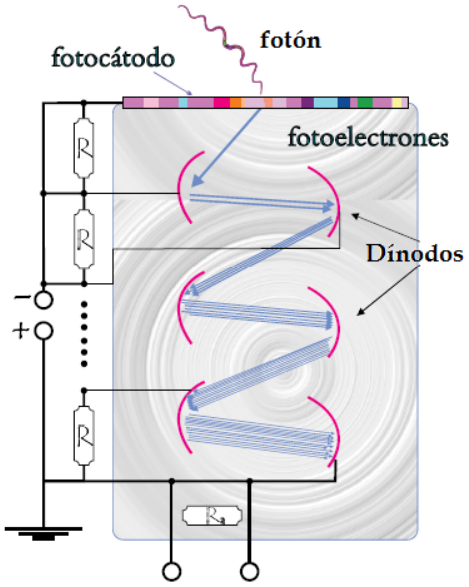

Figura 2: Esquema experimental.

Al incidir un fotón sobre el fotocátodo de sodiopotasio, éste desprende un electrón primario por Efecto Fotoeléctrico. El mismo es acelerado hasta el primer dínodo, y al incidir sobre éste, desprende una cantidad δ electrones. Debido a la geometría particular de los dínodos, dichos electrones se aceleran al dínodo siguiente, desprendiendo cada uno de ellos otra cantidad δ de electrones, y así sucesivamente.

En el presente trabajo se utilizó un PMT *Hamamatsu* $R5912$ que contaba de 8 dínodos, por lo cual por cada fotón se desprendían δ^8 electrones. La ganancia del PMT es del orden de 10^7.

El PMT se encontraba ubicado en la parte superior del tanque de agua y su máxima sensibilidad se registraba para longitudes de onda entre 300 nm y 650 nm, valores adecuados para detectar la radiación Cherenkov. Se realizó una medición dónde la tensión de base es 1500 V.

Se caracterizó la respuesta del PMT midiendo un pulso promedio utilizando la función de *promediar mediciones* con un osciloscopio digital. Se excitó al detector con un pulso de 1 kHz de frecuencia, con 50 ns de duración y $3,5$ Vpp de amplitud. El nivel de disparo del osciloscopio se determinó de modo tal que la tasa de eventos fuera constante, por lo que se consideraron únicamente eventos con la misma energía.

Se observó que el área de los pulsos aumenta con la tensión de polarización del PMT, lo cual se corresponde con una mayor sensibilidad en la detección. Considerando que el área del pulso es proporcional a la cantidad de electrones producidos por Efecto Fotoeléctrico, se obtiene que el área de los pulsos es proporcional al número de electrones que alcanzan al ánodo y al dínodo. Por lo tanto, puede estimarse la ganancia del PMT a partir del cociente entre dichas áreas.

Es importante destacar que se observó un nivel de señal constante no nulo a la salida del PMT (línea de base). El mismo se debe a la existencia de una corriente oscura producida por la emisión de electrones térmicos en el fotocátodo y el ingreso de luz externa debido a las imperfecciones en el blindaje del tanque de agua.

2. *Digitalización de los pulsos del PMT*

En el tanque de agua se encuentra ubicada junto al PMT una base que genera la alta tensión y polariza al mismo. La tensión de alimentación de la base se obtiene conectándola a una placa digitalizadora, como puede verse en la Fig.(3).

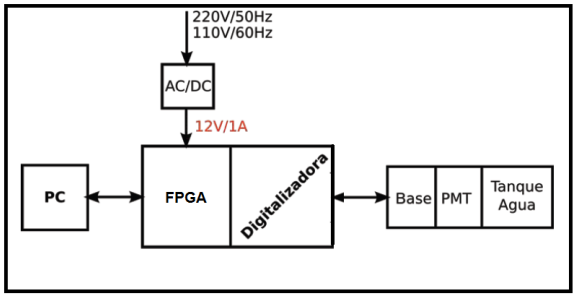

Figura 3: Configuración electrónica del sistema experimental.

La placa digitalizadora se encuentra conectada a una placa FPGA, utilizada para analizar los pulsos digitalizados. En la placa FPGA se registran pulsos de tres canales independientes y con el software desarrollado por el proyecto LAGO se generan archivos con la información pertinente a cada uno de los tres canales. Se midió en uno de los canales la señal del ánodo.

Un pulso característico de las mediciones consistía en un conjunto de 16 bines. El tiempo de duración de cada bin se correspondía con la frecuencia de muestreo de la FPGA, siendo el intervalo de tiempo de 25 ns.

Cabe destacar que la altura de los picos de las señales en el PMT es proporcional a la corriente generada en el PMT por la detección del evento. Por lo tanto, el área de los picos es proporcional a la carga total producida por la detección de los fotones, siendo posible establecer una correlación lineal entre la carga del pulso y la energía del evento incidente. De esta forma, se generaron histogramas de carga (proporcionales a la energía), tomando el área de cada señal dada por el PMT.

La conversión del área de los pulsos medidos en unidades de energía se realizó considerando que la traza más probable del muón es igual a la altura del tanque más un 5 %[4]. En este caso, la traza más probable era $1,64\ m$.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Tiempo de vida media del muón

En la Fig. (4) se muestra el histograma de diferencia de tiempo entre dos eventos registrados por el detector Cherenkov.

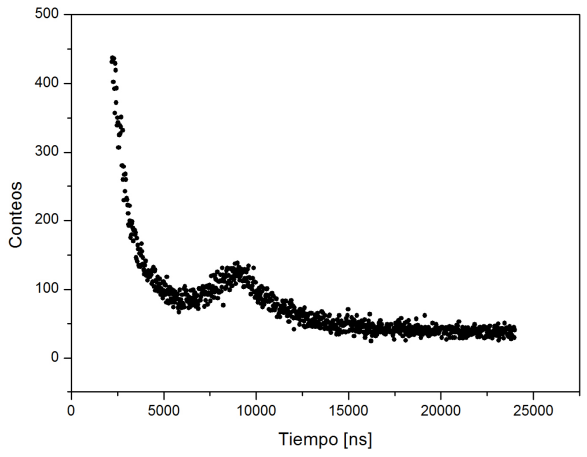

Figura 4: Histograma de diferencia de tiempo entre dos eventos registrados por el detector Cherenkov. El pico característico corresponde al *after pulse*.

Puede observarse un comportamiento exponencial tanto para tiempos pequeños (de 2000 a 5000 ns aproximadamente) como para tiempos grandes (a partir de 15000 ns). En el rango comprendido entre 5000 ns y 15000 ns se encuentra un pico de cuentas que no es compatible con la estadística de Poisson. Este pico es denominado *after pulse*. El mismo proviene de la ionización de gases residuales dentro del fotomultiplicador por parte de los electrones emitidos del fotocátodo. Los iones positivos serán acelerados hacia el fotocátodo provocando una nueva emisión de electrones. De esta manera, la diferencia de tiempos entre la llegada de un fotón y la aparición de la señal de *after pulse* dependerá de la tensión de trabajo del fotomultiplicador y de parámetros geométricos.

Para determinar el tiempo de vida medio a partir de dichas mediciones, se suprimieron los puntos correpondientes a la región del *after pulse*. Considerando la Ec. (3), se realizó un ajuste exponencial de la forma, $y = A + Be^{-\frac{t}{\tau}}$, donde τ es el tiempo de vida media del muón.

En la Fig. (5) se presenta el ajuste realizado:

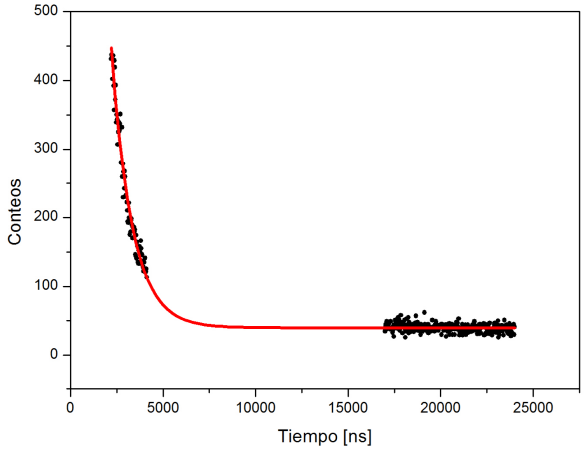

Figura 5: Ajuste realizado para obtener el tiempo de vida media del muón sin el *after pulse*. Se obtuvo un valor de $\tau = (1100 \pm 10)\ ns$.

El resultado obtenido para el tiempo de vida media del muón en agua es $\tau = (1100 \pm 10)\ ns$, siendo el valor aceptado del muón en el vacío $\tau = (2197,03 \pm 0,02)\ ns$ [1].

A pesar de que el tiempo de vida media de los muones μ^+ y μ^- en el vacío son iguales, no lo son al decaer en un medio material. En particular, el muon μ^- puede sufrir el efecto de captura muónica en el cual queda ligado a alguno de los átomos de la molécula de agua. Una posible explicación a la discrepancia entre el valor medido y el tabulado se encuentra en que experimentalmente no fue posible discriminar los μ^+ y μ^-, con lo cual se obtuvo el promedio ponderado de su tiempo de vida medio.

IV. CONCLUSIONES

Se utilizó un detector Cherenkov que consistía en un tanque de agua y un fotomultiplicador, adecuados para registrar la radiación Cherenkov de rayos cósmicos ultrarelativistas. A partir de un histograma de diferencias temporales de pulsos se obtuvo el tiempo de vida media del muón, cuyo valor es $\tau = (1100 \pm 10)\ ns$. La discrepancia con respecto a los valores tabulados, se adjudicó a la medición del promedio de los tiempos de vida medio del μ^+ y μ^- en el agua.

---

[1] Particle Data Group , Review of Particle Physics, Regents of the University of California (2010).

[2] Ricardo. A. Maronna, Probabilidad y Estadística Elementales para estudiantes de Ciencia, Facultad de Cs. Exactas UNLP, p. 21-24. (2007)

[3] D. Alexander, K. M. Pathak, and M. G. Thomp-son, Cerenkov energy loss of muons in water, Journal of Physics A 1 (1968).

[4] Resultado de una simulación numérica del *Observatorio Pierre Auger*