

ESTUDIO DE LA ESTABILIDAD DE UN DETECTOR CHERENKOV DE AGUA EN EL MARCO DE LA COLABORACIÓN LAGO

A STUDY OF THE STABILITY OF A WATER CHERENKOV DETECTOR IN THE FRAMEWORK OF THE LAGO COLLABORATION

B. MAMANI[†], M. A. SUBIETA VASQUEZ [‡], & FOR THE LAGO COLLABORATION

Carrera de Física, Universidad Mayor de San Andrés,

c. 27 Cota-Cota, Casilla de Correos 8635, La Paz, Bolivia

(Recibido 16 de noviembre de 2022; aceptado 20 de diciembre de 2022)

<https://doi.org/10.53287/veba8520ih50k>

RESUMEN

El proyecto LAGO (*Latin American Giant Observatory*) tiene el objetivo de estudiar destellos de rayos gamma de ultra alta energía (GRBs, por sus siglas en inglés), así como también, astropartículas de alta energía en el contexto del clima espacial y la radiación atmosférica a nivel del suelo. LAGO despliega detectores Cherenkov de agua (WCD) al nivel de la superficie de la tierra, bajo la denominada, técnica de “partículas individuales”. En el presente trabajo se muestra el estudio de la estabilidad de un prototipo de detector Cherenkov de agua, puesto en marcha en las instalaciones del laboratorio de Rayos Cósmicos de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA). Este laboratorio se encuentra ubicado en el Campus de la universidad en la zona de Cota Cota, La Paz, Bolivia (~ 3400 m s. n. m.). Se ha estudiado el desempeño y la estabilidad del detector, bajo cuatro parámetros: la independencia de los datos registrados a través de una prueba de bondad de ajuste de los datos a una distribución de Poisson, el comportamiento de la razón área-pico de las señales registradas, el estudio del comportamiento del histograma de cargas y la medida experimental del tiempo de vida medio del muón; lográndose obtener un valor de $2.2 \pm 0.2 \mu\text{s}$. Este último estudio se llevó a cabo durante un tiempo de cuatro meses.

Descriptores: Rayos Cósmicos, LAGO, detectores de radiación Cherenkov, decaimiento de partículas, física de partículas.

Código(s) PACS: 96.40.-z, 29.40.Ka, 13.35.Bv

ABSTRACT

The LAGO project (*Latin American Giant Observatory*) is primarily focused on studying Gamma Ray Bursts (GRBs) as well as studying high energy astroparticles, space weather and atmospheric radiation at ground level. The technique used in LAGO is ground-based Water Cherenkov Detectors (WCD), by using “individual particle” detection. The present work shows the performance and stability of the WCD prototype at the Cosmic Ray Laboratory of the Universidad Mayor de San Andrés (UMSA) based in Cota Cota La Paz, Bolivia (~ 3400 m a.s.l.). The detector was studied taking into account four parameters: the independence of the data by testing goodness-of-fit to Poisson distribution, the behavior of the signals area-peak ratio and finally the behavior of the charge histogram and the muon half-life time was experimentally measured obtaining a value of about $2.2 \pm 0.2 \mu\text{s}$. Data collected of the muon half-life study was carried out over four month period.

Subject headings: Cosmic Rays, LAGO, water Cherenkov detectors, particle decay, particle physics.

1. INTRODUCCIÓN

Los Rayos Cósmicos (RC) son partículas altamente energéticas de origen extraterrestre que abarcan un rango de energía que va desde 10^7 eV hasta 10^{20} eV. Si

trazamos el rango de energías contra el número de rayos cósmicos detectados, se genera el espectro de energías característico de los RC (Fig. 1), el cual obedece a una ley de potencias. En el espectro podemos destacar que alrededor de 4×10^{15} eV hay un cambio en el índice espectral que se conoce como la *Rodilla*, otro cambio alrededor de 400×10^{15} eV conocido como la *2da Rodilla*, y por último, un aplanamiento en las energías más altas alrededor de 10×10^{18} eV cono-

¹<https://orcid.org/0009-0000-6305-5736>

²<https://orcid.org/0000-0002-9787-4681>

¹Email: bmamani@fumsa.edu.bo.

²Email: msubieta@fumsa.edu.bo.

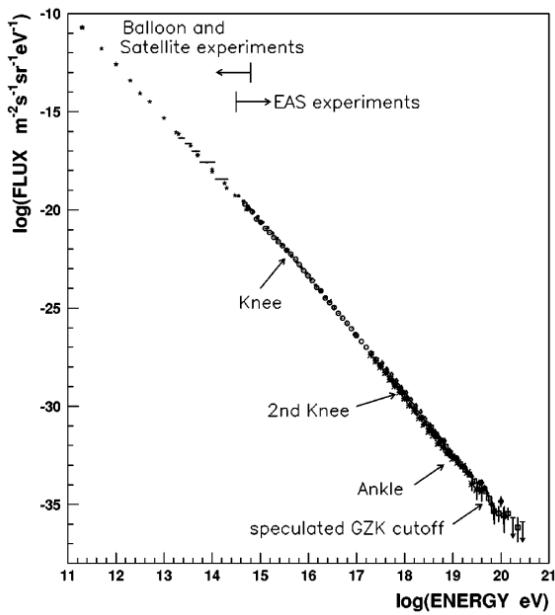


FIG. 1.— Espectro de energía de Rayos Cósmicos primarios, extraído de Nagano & Watson (2000)

cido como el *Tobillo* (Hörandel (2003)). En cuanto a su composición química, la cual puede ser muy variada debido al amplio rango de energías, podemos de manera general decir que un 90% son núcleos de hidrógeno o protones, un 9% son núcleos de helio y un 1% restante son núcleos pesados como el boro, litio, berilio y hierro (Rivera (2009)).

Debido a diversos factores, como la distancia a las fuentes de los rayos cósmicos y la naturaleza de los mecanismos de aceleración de los rayos cósmicos, entre otros, es que el flujo correspondiente a energías del orden de 1 GeV es de 1 *partícula*/(m²sr s GeV) por lo que la detección directa de estos eventos es posible por medio de satélites en órbita. La forma indirecta de detectar RC a partir de energías de 10¹⁵ eV es por medio de los Chubascos Atmosféricos Extensos (EAS, por sus siglas en inglés) que nacen de la interacción del rayo cósmico primario con un núcleo de la atmósfera, produciendo una cascada de partículas secundarias que llegan hasta el nivel del suelo (nivel de observación).

Las EAS están dominadas por procesos hadrónicos los cuales se propagan longitudinalmente en la atmósfera (Grieder (2010)). Estos decaen en muones y neutrinos, produciendo la componente más penetrante del chubasco de partículas, es decir, la componente muónica. La componente más intensa del chubasco (electrones y fotones) se origina por el decaimiento de piones neutros en fotones, iniciando así, los chubascos electromagnéticos. Es de esta forma que podemos señalar las tres componentes características de cada chubasco atmosférico, la componente hadrónica (π^\pm , K^\pm , p, n), la componente electromagnética (e^\pm , γ) y la componente muónica (μ^\pm , ν^\pm) (Fig. 2).

Una de las técnicas para la detección de los EAS es la denominada como “partículas individuales”

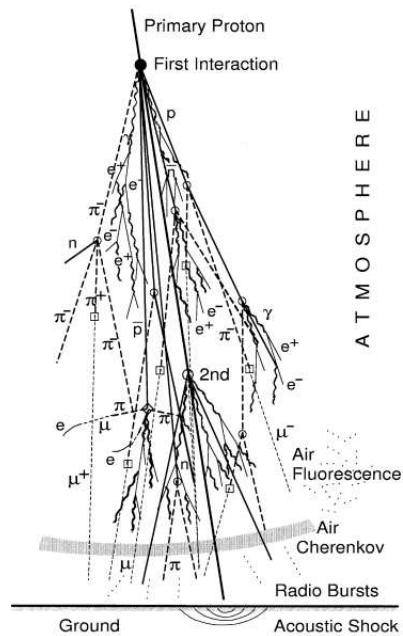


FIG. 2.— Esquema simplificado de un chubasco atmosférico, extraído de Grieder (2010)

(Vernetto (2000)), la cual requiere para su implementación, del registro de todas las partículas que interactúan con un detector, sean estas producto de los RC (partícula primaria) o de remanentes de otros eventos.

Una manera típica de detectar estos eventos es a través de un detector Cherenkov de agua, en el cual, como su nombre lo menciona, la detección se realiza a través de un reservorio de *agua* cuyo interior está recubierto por un material con una alta reflectividad en el espectro visible (Gichaba & Mississippi U. (1998)), para optimizar la reflexión difusiva de los fotones producidos por el efecto Cherenkov debido al paso de una partícula cargada en el agua. En la parte superior del reservorio se encuentra un sensor de luz que se caracteriza por ser altamente sensible a un amplio espectro que va desde el ultravioleta hasta el infrarrojo. Este sensor es denominado como “tubo fotomultiplicador” (PMT, por sus siglas en inglés) y detecta a los fotones Cherenkov que producen las partículas cargadas que lo atraviesan.

LAGO (*Latin American Giant Observatory*) (LAGO PROJECT (2022)), es una gran colaboración internacional de 10 países, en particular latinoamericanos, de los cuales Bolivia forma parte. Las metas generales de la colaboración LAGO contemplan la realización de estudios sobre:

- Destellos de rayos gamma de ultra alta energía (GRBs, por sus siglas en inglés).
- Astropartículas de alta energía.
- Clima espacial.
- Radiación atmosférica a nivel del suelo.

La colaboración LAGO emplea principalmente la técnica de detección basada en un detector

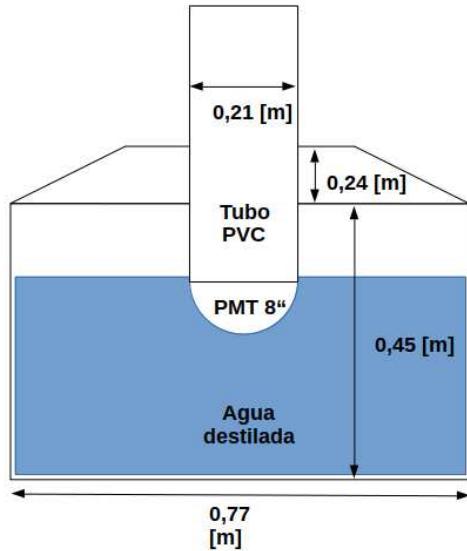


FIG. 3.— Esquema con las medidas del prototipo del detector Cherenkov de agua.

Cherenkov de agua. El efecto Cherenkov o radiación de Cherenkov no es más que el fenómeno producido por una partícula cargada que se mueve más rápido que la velocidad de la luz en el medio, dicha velocidad está dada por $\beta c = \nu = \frac{c}{n}$, donde n es el índice de refracción del medio y c la velocidad de la luz en el vacío. Por lo tanto, para que se produzca el efecto Cherenkov, se debe cumplir que la velocidad de la partícula cargada debe ser $\nu_{Part} > \frac{c}{n}$ (Leo (1994)).

Un prototipo de detector Cherenkov de agua (WCD), fue montado y puesto en marcha en las instalaciones del Laboratorio de Rayos Cósmicos en la Carrera de Física (UMSA), ubicado en el campus universitario de Cota Cota, La Paz, Bolivia (~ 3400 m s. n. m.).

Se llevaron a cabo cuatro estudios sobre la estabilidad del tanque: probar que los datos siguen una distribución de Poisson, hallar la relación Área/Pico, observar el comportamiento del histograma de cargas y medir experimentalmente el tiempo de vida medio del muón.

2. PROTOTIPO DEL DETECTOR CHERENKOV DE AGUA

El prototipo del detector Cherenkov de agua, bajo la base de un tanque plástico de PVC de la marca TANKBURG de 300 litros de capacidad, tiene forma cilíndrica de 0.77 m de diámetro y 0.45 m de alto (ver Fig. 3). El tanque es llenado con aproximadamente 210 litros de agua destilada. Esta no debe ser contaminada con ningún producto en su interior, además no debe haber nada que se disuelva en el agua o que deje residuo alguno, ya que esto afectaría en el coeficiente de absorción (Sato (2011)). Por este motivo, en el interior del tanque se coloca un cilindro de Tyvek¹, sin la tapa superior, cosido con hilo de pescar de la marca Strong & Strehly. De igual manera, se forraron dos semicircunferencias de



FIG. 4.— Fotografías del cilindro de Tyvek dentro del tanque plástico.

poliestireno expandido (plastoformo) (ver Fig. 4) con una abertura circular de 0.23 m de diámetro para el paso del tubo fotomultiplicador (PMT). En la base interna del tanque, producto del diseño del mismo, presenta protuberancias que garantizan la estabilidad del mismo, por lo que para poder tener una base lisa se incorporaron dos semicircunferencias de acetato.

El detector utiliza un PMT de 8 pulgadas de la marca THOR EMI ELECTRON D642DKF. Para el soporte del PMT en la tapa del tanque se realizaron modificaciones con un tubo de PCV de 0.21 m de diámetro (Fig. 5). Para sujetar el PMT se diseñó una argolla de metal (Fig. 6), de manera tal que solo el fotocátodo esté en contacto con el agua. Por otro lado, para asegurar el PMT al tubo de PVC se calaron canales para que la argolla mantenga fijo al PMT. El tanque está cubierto con tela negra, esto para evitar el paso de los rayos de luz ambiental que pueden activar el PMT provocando ruido en la señal del detector (Fig. 7).

3. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

El sistema de adquisición de datos (DAQ, por sus siglas en inglés) empleado en el prototipo del detector (Fig. 8), consiste de un divisor de voltaje EMI-D642, esta placa cuenta con dos entradas BNC (Bayonet Neill-Concelman), una para suministrar alto voltaje a cada dínodo del PMT a través del divisor de voltaje, y la otra para la salida de señal. Un

¹ El Tyvek es un material con una alta reflectividad en el espectro visible.



FIG. 5.— Modificaciones realizadas a la tapa del tanque más el acople del tubo PVC.



FIG. 7.— Detector final puesto en marcha con tela negra como cobertura.



FIG. 6.— Argolla metálica diseñada para mantener el PMT fijo al tubo de PVC.

cable tipo LEMO es empleado para llevar la señal de la salida del ánodo del PMT al osciloscopio SIGLENT SDS 1202X-E de 200 MHz y 1 GSa/s el cual registra los pulsos de cada evento (Fig. 9). A través de una conexión vía Ethernet los datos son almacenados en un servidor. El registro de los datos es llevado a cabo por un programa escrito en GOLANG, desarrollado por el Grupo de Rayos Cósmicos de Carrera de Física (UMSA), que interpreta el protocolo SCPI (*Standard Commands for Programmable Instruments*) bajo el

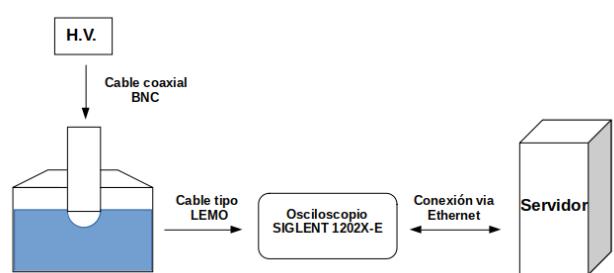


FIG. 8.— Esquema del sistema de adquisición de datos DAQ.

cual se comunica el osciloscopio.

4. MEDICIONES Y RESULTADOS

El detector ha estado en funcionamiento intermitentemente desde febrero de 2022. Una serie de pruebas se han realizado para el estudio de la estabilidad del detector, consistentes en: confirmar que los datos siguen una distribución de Poisson, comportamiento de la razón Área/Pico de las señales, construcción del histograma de cargas y, finalmente, la medida experimental del tiempo de vida medio del muón.

Antes de poner en marcha el detector se realizó la caracterización del Plateau (Hamamatsu-Photonics (2007)). Para esto se conectó el PMT a la fuente de alto voltaje, un módulo nuclear CAEN MOD. N471

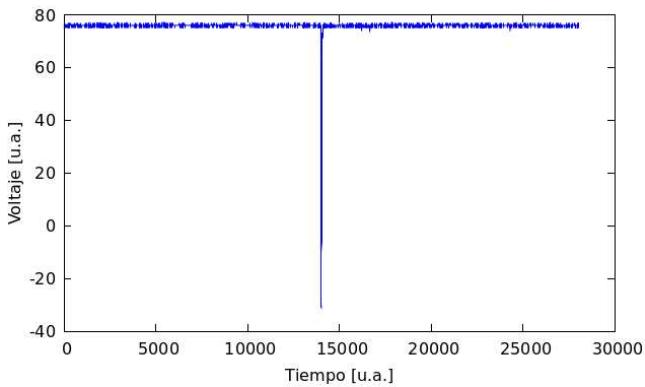
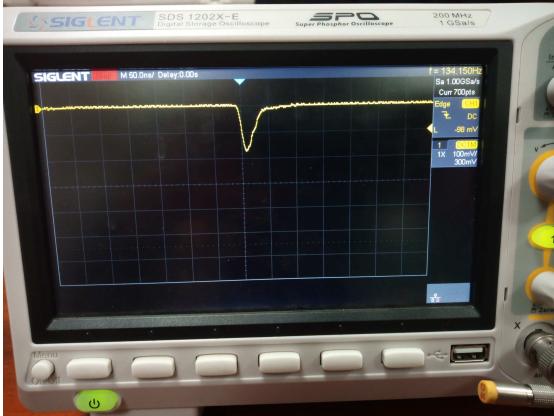


FIG. 9.— Pulso registrado a través del osciloscopio (en unidades arbitrarias). En la figura superior, se muestra un pulso observado en el osciloscopio. En la figura inferior, un pulso registrado, no hay relación entre los dos pulsos.



FIG. 10.— Distribuidor de alto voltaje y fuente de alto voltaje en la canastilla NIM.

alimentado por la canastilla (C) NIM, que alimenta a un distribuidor para garantizar la estabilidad a lo largo del tiempo (ver Fig. 10). A la salida del canal, un cable coaxial que lleva alto voltaje alimenta a la placa EMI-D64. La salida de la señal es llevada al osciloscopio y una copia de esta es conectada a los módulos de la canastilla NIM. En un intervalo de 20 s y variando el alto voltaje cada 50 V, se registraron el número de eventos en un módulo NIM contador. Observando para valores bajos de voltaje una correlación entre el número de eventos en el módulo NIM y el registro de pulsos en la pantalla del osciloscopio.

En la Fig. 11 se observa que la zona del “plateau”

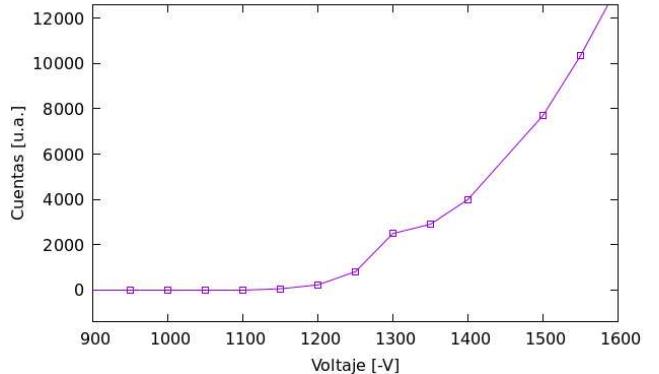


FIG. 11.— Plateau del PMT ThorEmiElectronTube D642DKF. A pesar que zona del plateau está entre 1300 y 1350 V se utilizó como voltaje efectivo de operación 1300 V, debido a que para voltajes superiores solo incrementan el ruido de señal y no así las cuentas provenientes de partículas secundarias producidas en las EAS.

se encuentra entre los valores de 1300 a 1350 V siendo el voltaje efectivo de operación 1300 V.

4.1. Distribución de Poisson de los datos

Los eventos registrados en el detector, por su naturaleza, son eventos independientes que siguen una distribución de Poisson (Clark (1960)). El detector, al estar destinado a funcionar un largo tiempo (días, meses o incluso años), debe seguir una condición estable, garantizando así la independencia de los datos de otros efectos. Es con este fin, que se tomó el registro del número de cuentas, señales registradas denominadas trazas, en el detector.

Utilizando módulos nucleares en la canastilla NIM (ver Fig. 10), una copia de la señal entra hacia el discriminador de 8 canales de la marca CAEN MOD. 96 con un trigger (umbral) de 50 mV donde se tomaron las cuentas cada 10 s a lo largo de 20 min.

Se realiza una prueba de bondad de ajuste para una distribución de Poisson bajo los siguientes parámetros:

- Se establece un estadístico que nos ayude con la prueba de hipótesis. Este estadístico sigue una distribución de chi-cuadrado con $n-1$ grados de libertad (Bol'shev & Mirvaliev (1979)).

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\bar{x}} \quad (1)$$

- Se toma como H_0 : $D \sim \chi^2_{(n-1)}$.
- Se toma como H_1 : $D \not\sim \chi^2_{(n-1)}$.

Definiendo una prueba de dos colas, para un valor estándar del 5% para una muestra de 42 datos, se tiene un valor de la región de rechazo inferior en $\frac{\alpha}{2} = 0.025$, con un valor de 24.4 y para la región de rechazo superior $1 - \frac{\alpha}{2} = 0.975$ con un valor de 59.3. Tras realizar la prueba de bondad de ajuste, el análisis del estadístico nos arroja un valor de

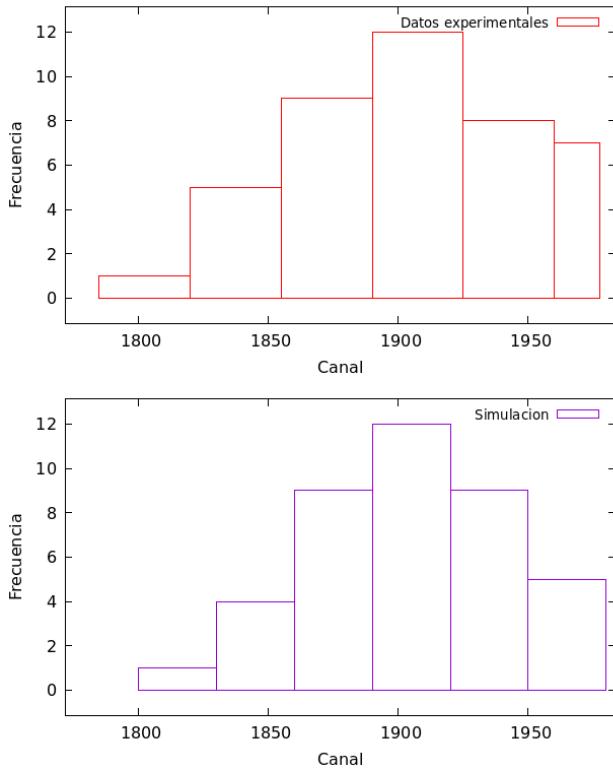


FIG. 12.— Gráfica del histograma de las cuentas en 20 minutos. Arriba: Datos obtenidos con el registro de los módulos NIM. Abajo: Datos simulados con la inversa de la acumulativa de la distribución de Poisson con $E[x] = 1908$ y un percentil inicial de 1810.

$\chi^2_{0.025} = 24.4 < 43.6 < \chi^2_{0.975} = 59.3$, por lo tanto, NO rechazamos la hipótesis nula y concluimos que la distribución de las cuentas registradas en el detector sigue una distribución de Poisson. Podemos apreciar de mejor manera, que el comportamiento de las cuentas sigue una distribución de Poisson en la Fig. 12, donde se muestra un histograma de las cuentas registradas por el contador. En la Fig. 12 inferior se muestra datos simulados para una distribución de Poisson con un $E[x] = 1908$ y un percentil inicial de 1810.

4.2. Razón Área-Pico

Una medida de la calidad del agua a través del coeficiente de absorción, junto a la reflectividad del recubrimiento interno del detector (Sato (2011)) (en nuestro caso el cilindro de Tyvek), es la razón área-pico de las señales registradas. Una caída en el comportamiento de esta razón, que en principio debería mantenerse lineal a lo largo del tiempo, es considerada una clara muestra de un cambio en la reflectividad o de la calidad del agua, producto del crecimiento de micro-organismos (Suomijärvi (2008)). Para este estudio se tomaron medidas intermitentes² de las señales registradas por el detector en un periodo de 4 meses.

² La toma de datos se realizó de forma discontinua a lo largo del estudio con una diferencia de 30 días entre los puntos de estudio.

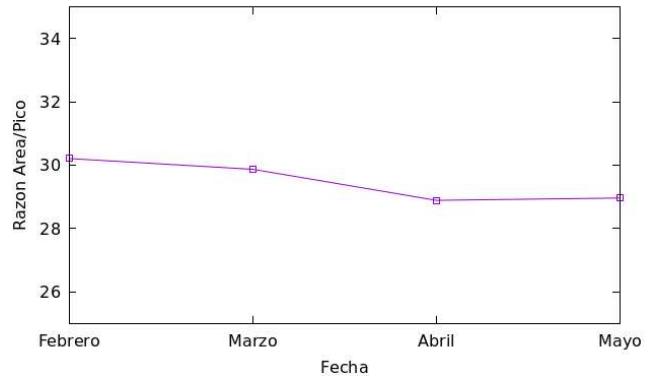


FIG. 13.— Comportamiento de los valores de la razón área-pico para los meses de febrero a mayo del 2022.

La obtención de la razón área-pico se realizó calculando el área debajo de cada pulso (traza) individual, a la par de la obtención del valor de voltaje máximo del pulso. Debido a la resolución con la que cuenta el DAQ, en especial el osciloscopio cuya resolución es de 1 GSa/s (1 giga sample por segundo), la diferencia temporal entre cada punto que conforma la señal entera es de 1 ns. Es por esta razón que se estableció el siguiente algoritmo para el análisis de los datos:

- Como podemos apreciar en la Fig. 9 el pulso se encuentra en unidades arbitrarias. El osciloscopio cuenta con una fórmula para la transformación a las unidades correctas.

$$V = N \frac{VDIV}{25} - OFFSET \quad (2)$$

- Con la transformación de las unidades, se voltean el pulso y se lo normaliza para que el análisis sea más sencillo.
- Se calcula el área debajo de la señal.
- Se acumulan los puntos del pulso en “bines”, cada bin cuenta con una ventana de 7 ns, es decir, con 7 puntos.
- Se calcula el máximo valor del voltaje para cada bin de la señal, y por comparación, se calcula el máximo bin de toda la señal.
- Se registra tanto el área, el máximo voltaje y la razón área-pico de cada señal en un archivo de texto.

Tras el cálculo de la razón área-pico de cada señal registrada en los datos tomados intermitentemente a lo largo de los 4 meses, se procede a realizar un ajuste lineal $F(x) = A$, de donde se obtiene un valor para cada mes (ver Fig. 9).

4.3. Histograma de cargas del detector WCD

Una forma de calibrar el detector y tener una comparación con unidades físicas, es la obtención de la curva de los muones que atraviesan de forma completamente vertical al detector, de esta manera obteniendo el VEM (Vertical Equivalent Muon).

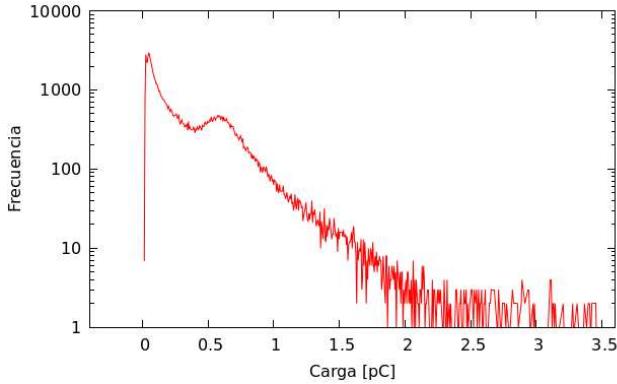


FIG. 14.— Gráfica del histograma de cargas.

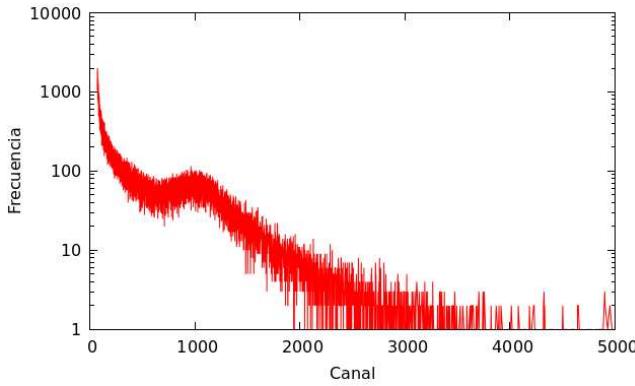


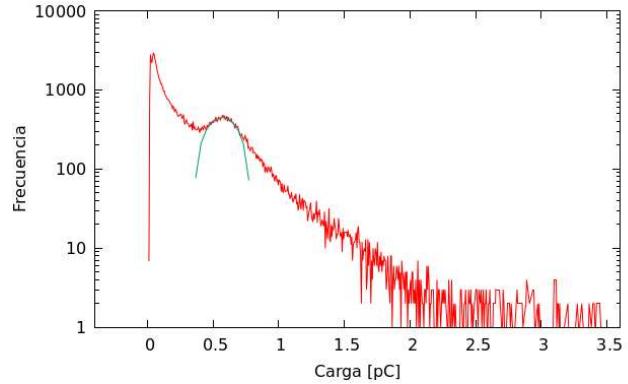
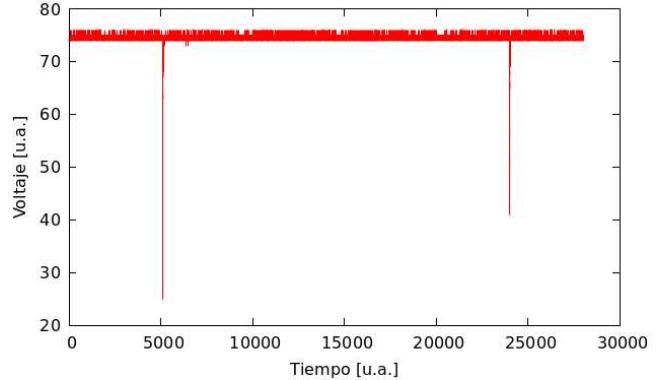
FIG. 15.— Histograma de altura de pulsos.

Tras el análisis de todas las partículas secundarias producidas por las EAS, los electrones y positrones al tener una masa aproximadamente 207 veces menor que la de los muones, pierden energía principalmente por el proceso de ionización. Los rayos gamma en el rango de energías $[10^3 \text{ eV} - 10^6 \text{ eV}]$ que llegan al detector, producen los efectos denominados: efecto fotoeléctrico, efecto de dispersión de Compton y producción de pares. El estudio de estos efectos muestra que ninguno produce una gran cantidad de fotones registrados en el PMT.

Los puntos mencionados se ven representados en el histograma de carga (ver Fig. 14). Donde se espera una frecuencia alta para valores bajos y frecuencias bajas para valores altos. Es entre estos dos valores que resalta la curva de los muones (ver Figuras 14 y 15), que es donde se debe realizar la calibración del detector.

De igual manera, se observa el comportamiento del histograma de la altura de los pulsos, donde se toma el valor máximo de cada pulso registrado asociado al pico del histograma (ver Fig. 15).

Con un ajuste a la curva de muones, podemos ver que el punto máximo representa al VEM (muones que atraviesan el detector de forma vertical). Estos muones depositan en el agua una energía promedio como una función de su energía y de la altura del detector. De esta manera vemos que:

FIG. 16.— Histograma de cargas ajustado con una función $f(x) = e^{a+bx+cx^2}$, dando un valor para el VEM en el canal $0.57 \pm 0.06 \text{ pC}$ con una energía de 90 MeV.FIG. 17.— Pulsos registrados durante la apertura en la ventana temporal de $\leq 20 \mu\text{s}$.

$$E_T = h_d \frac{dE}{dx}, \quad (3)$$

donde la pérdida de energía de un muón en el agua es típicamente $\sim 2 \text{ MeV/cm}$. Al realizar un ajuste a la curva de los muones (VEM), se tiene una distribución centrada en este valor (ver Fig. 16). Ajustando la curva a $F(x) = e^{a+bx+c^2}$, del histograma de la Fig. 14, se presenta un valor para el VEM en $0.57 \pm 0.06 \text{ pC}$ con una energía de 90 MeV, que fue calculada utilizando la ecuación (3) como primera aproximación.

4.4. Tiempo de vida media del muón

Como vimos en la sección 4.1, los eventos registrados en el detector siguen una distribución de Poisson. Una propiedad interesante de esta distribución es la re-escalabilidad (Machado et al. (2020)). Usando esta propiedad definimos t como la duración temporal entre dos eventos que siguen una distribución de Poisson, identificando a t como una variable aleatoria que obedece una distribución exponencial, $P(t) = \lambda e^{(-\lambda t)}$. Con base en estas propiedades, definimos el tiempo de vida medio del muón como $\tau_\mu = \frac{1}{\lambda_\mu}$.

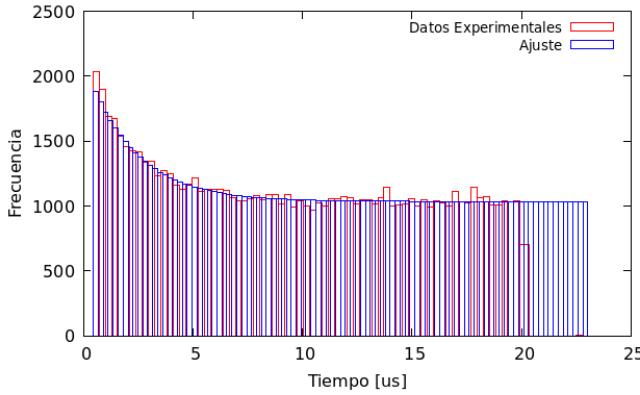


FIG. 18.— Histograma de las diferencias temporales de los pulsos, con un ajuste $P(t) = Ae^{-\tau_\mu t} + C$ se obtiene un valor para el muón de $2.2 \pm 0.2\mu\text{s}$.

Como una prueba de la sensibilidad y estabilidad del detector, se midió el tiempo de vida medio del muón. El muón puede decaer de dos maneras distintas:

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \bar{\nu}_\mu + \nu_e, \quad (4)$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e, \quad (5)$$

consecuencia de la fuerza débil. Debido a las condiciones del detector no se puede hacer distinción entre los dos decaimientos, por lo que solo tomaremos en cuenta el segundo decaimiento.

Ajustando el osciloscopio en las opciones del trigger, se establece el tipo *intervalo*, el cual activa una ventana temporal, que para nuestro caso es $\leq 20\mu\text{s}$ donde se registran todos los eventos que caen dentro de esta ventana temporal. De esta manera, se observa una secuencia de pulsos (ver Fig. 17): el primero, generado por un muón, y el segundo, debido a un electrón.

Siguiendo el algoritmo desarrollado, descrito en la sección 4.2, se identifican los picos máximos de los dos pulsos, es decir, el primero del muón o antimuón, y el segundo, de los electrones o positrones. Con cada pico máximo se asocia un tiempo, la diferencia temporal entre los dos picos máximos, representará el tiempo que transcurre entre el registro del primer pulso y el segundo.

Debido a las interacciones que se producen en el detector, los fenómenos asociados al histograma se pueden resumir de la siguiente manera: la primera zona que está asociada al decaimiento del muón, sigue un comportamiento exponencial, y la segunda, dominada por *afterpulsing* (Torre et al. (1983)) y por eventos aleatorios producidos por partículas ajenas que atraviesan el detector en la misma ventana temporal.

Procediendo con el ajuste del histograma de tiempos, se emplea la siguiente ecuación:

$$P(t) = Ae^{-\tau_\mu t} + C. \quad (6)$$

Del ajuste correspondiente (Fig. 18) se obtuvieron los siguientes valores para los parámetros:

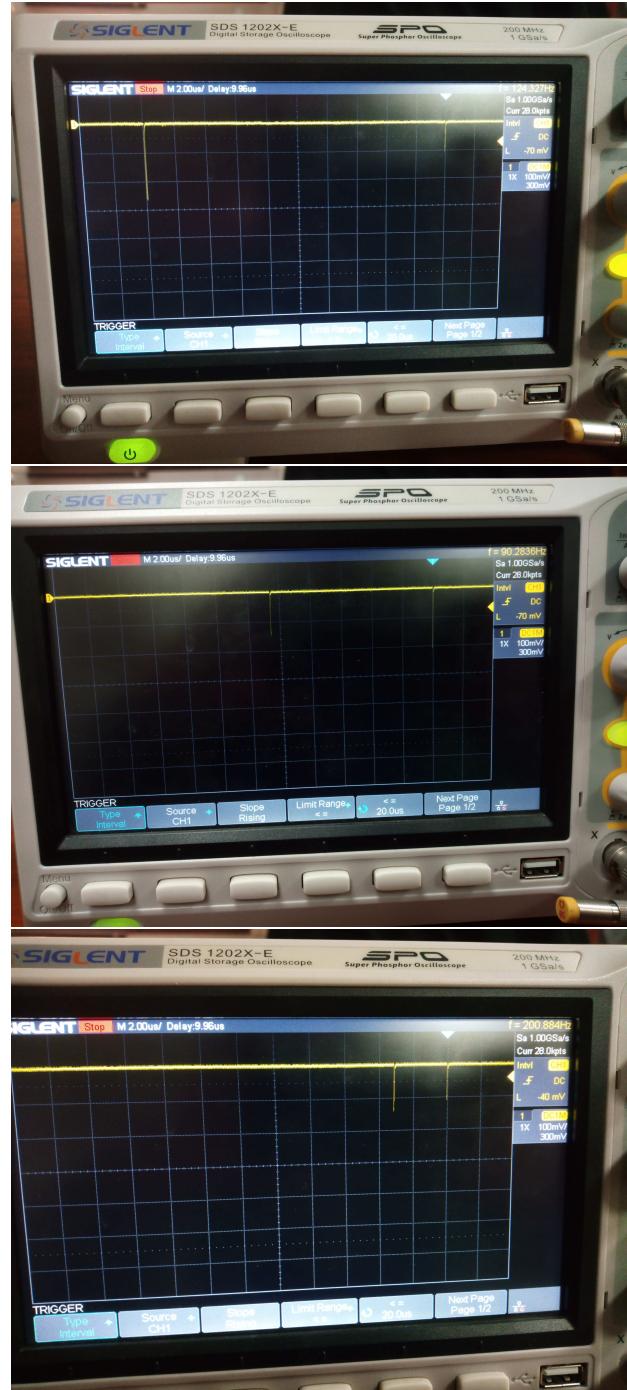


FIG. 19.— Pulsos registrados por el osciloscopio en la ventana de $\leq 20\mu\text{s}$. Arriba, pulso en el máximo de la ventana temporal. Medio, evento aleatorio. Abajo, posible decaimiento del muón.

$A = 1091 \pm 128$, $C = 1035 \pm 6$ y $\tau = 0.45 \pm 0.042$. El valor obtenido para el tiempo de vida medio del muón fué $2.2 \pm 0.2\mu\text{s}$, siendo este valor muy cercano al reportado en la bibliografía, que es de $2.1969811 \pm 0.0000022\mu\text{s}$ (Olive (2016)).

5. CONCLUSIONES

En el presente trabajo, se han estudiado las principales características de un prototipo de detector Cherenkov de agua, que se mantuvo en operación

de forma intermitente por un tiempo de 4 meses, del mes de febrero al mes de mayo del año 2022.

Se confirma que los datos registrados por el DAQ, que fueron producidos por partículas que atraviesan el detector, siguen una distribución de Poisson garantizando su correcto funcionamiento. De no haber sido así, significaría que los datos están correlacionados, perdiendo la calidad de ser eventos independientes.

El estudio de la razón área-pico de las señales, nos muestra problemas técnicos al momento del ensamblado del detector, este no está completamente sellado. La disminución de la calidad de los datos con el paso del tiempo, refleja una alteración del coeficiente de absorción del agua destilada, debido a la introducción de motas de polvo o impurezas del ambiente, y la generación de microorganismos en el tanque bajando la calidad del agua. El histograma de cargas, nos muestra una mejor calidad del detector, comparado con los reportes previos para prototipos similares (Velarde et al. (2009)).

La medición del tiempo de vida media del muón, muestra que el prototipo del detector Cherenkov de agua a pesar de los problemas en el ensamblado, es lo bastante sensible como para detectar decaimientos de partículas (muones) que típicamente son estudiados en detectores de centelleo. Del histograma de diferencias temporales se puede apreciar un alza en la frecuencia para tiempos cortos ($\leq 1.5\mu s$). Estos valores altos, son un claro indicio de que el detector es lo suficientemente sensible para observar decaimientos mucho más cortos que el del muón. De

esta manera, concluimos que existe la posibilidad de medir tiempos de decaimiento de partículas como los de los piones y kaones que hasta el momento solo habían sido estudiados con centelladores líquidos a menores alturas o en aceleradores de partículas.

Como perspectiva a futuro, se pretende implementar las siguientes mejoras al prototipo del detector: un nuevo sistema DAQ que se está probando para su funcionamiento a largo plazo, la implementación de la tarjeta Red Pitaya acoplada con la placa propia de la colaboración LAGO V1R0, además de la incorporación de sensores de presión y temperatura. Adicionalmente, la incorporación de un GPS para la posterior sincronización del tanque en un pequeño arreglo de 3 detectores WCD para el estudio de la dirección de arriba de las EAS en las instalaciones del laboratorio de Chacaltaya (UMSA) a más de 5000 m s. n. m.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue posible gracias al arduo trabajo de los miembros del laboratorio de Rayos Cósmicos y Altas Energías de la UMSA con quienes se desarrolló el diseño, construcción y montaje del prototipo del detector Cherenkov de agua.

Conflictos de intereses

Los autores declaran que no hay conflicto de intereses respecto a la publicación de este documento.

REFERENCIAS

- Bol'shev, L. N. & Mirvaliev, N. 1979, *Theory of Probability and its applications*, **23**, 461
- Clark, G. W. 1960, *Phys. Rev.*, **122**, 637
- Gichaba, J. O. & Mississippi U. 1998, Measurements of TYVEK reflective properties for the Pierre Auger Project, <https://www.osti.gov/biblio/15017207>
- Grieder, P. K. 2010, *Extensive Air Showers, High Energy Phenomena and Astrophysical Aspects* (Springer)
- Hamamatsu Photonics. 2007, Photomultiplier Tubes Basics and Applications (Hamamatsu)
- Hörandel, J. R. 2003, *Astroparticle Physics*, **19**, 193
- Leo, W. R. 1994, *Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments* (Springer Berlin, Heidelberg), 46
- Machado, F. D., Castromonte, D. C., & Otimiano, L. 2020, DETECTOR CHERENKOV: Estudio del decaimiento del μ y el espectro de Michel, Facultad de Ciencias - Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú
- LAGO PROJECT. 2022, http://wiki.lagoproject.net/index.php/Main_Page
- Nagano, M. & Watson, A. A. 2000, *Reviews of Modern Physics*, **72**, 689
- Olive, K. A. 2016, *Chinese Physics. C, High Energy Physics and Nuclear Physics*, **40** (10), 100001
- Rivera, H. 2009, Tesis de Grado, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz
- Sato, R. 2011, in *32nd International Cosmic Ray Conference*, Vol. 3, 204
- Suomijärvi, T. 2008, in *30th International Cosmic Ray Conference*, Vol. 4, 311
- Torre, S., Atonioli, A., & Benetti, P. 1983, *Review of Scientific Instruments*, **54**, 1777
- Velarde, A., Ticona, R., Miranda, P., Rivera, H., & Quispe, J. 2009, *Revista Boliviana de Física*, **15**, 32
- Vernetto, S. 2000, *Astroparticle physics*, **13**, 75