

RESULTADOS DEL TALLER “INSTRUMENTACIÓN EN FÍSICA DE PARTÍCULAS ELEMENTALES” COMO PARTE DEL PROYECTO *ESCARAMUJO* EN LA PAZ – BOLIVIA

RESULTS OF THE WORKSHOP “INSTRUMENTATION IN ELEMENTARY PARTICLE PHYSICS” AS PART OF THE *ESCARAMUJO* PROJECT IN LA PAZ – BOLIVIA

NAOMI GUACHALLA ALARCÓN[†], SERGIO YÁÑEZ PAGANS[‡], & CARLA CALLE GARCÍA^{*}

Instituto de Investigaciones Físicas, Carrera de Física
Universidad Mayor de San Andrés
c. 27 Cota-Cota, Campus Universitario, Casilla de Correos 8635
La Paz - Bolivia

(Recibido 9 de junio de 2016; aceptado 6 de julio de 2016)

RESUMEN

En este trabajo mostramos los resultados obtenidos en el taller “Instrumentación en Física de Partículas Elementales” como parte del proyecto *Escaramujo*. Este proyecto consistió de la construcción de tres detectores con base en centelladores plásticos y fotomultiplicadores de silicio que utilizamos para medir la tasa de partículas cargadas (TPC) a diferentes altitudes (entre 3427 y 5238 msnm) y a una misma altitud (5238 msnm). Además, caracterizamos filtros de plomo de diferentes grosores mediante la medición de la TPC con los detectores ubicados debajo de éstos. Hallamos que la TPC crece exponencialmente con la altitud y que presenta fluctuaciones a una misma altitud. Por otro lado, nuestros resultados indican que filtros de plomo con grosores superiores a un valor crítico de 5 mm son capaces de absorber partículas cargadas, ocasionando un decrecimiento de tipo exponencial en la TPC en función del grosor, mientras que los filtros con grosor inferior a dicho valor ocasionan un incremento en la TPC.

Código(s) PACS: 95.55.Vj — 95.85.Ry — 95.45.+i

Descriptores: Detectores de partículas elementales y rayos cósmicos — Rayos cósmicos — Instalaciones de detección.

ABSTRACT

In this paper we show the results obtained in the workshop “Instrumentation in Elementary Particle Physics” as a part of the *Escaramujo* project which consisted of the construction of three detectors based on plastic scintillators and silicon photomultipliers that we used for measuring the rate of charged particles (TPC) at different altitudes (between 3427 and 5238 masl) and at the same altitude (5238 masl). Moreover, we characterized lead filters of different thicknesses by measuring the TPC with the detector located below them. We found that the TPC grows exponentially with altitude and that it has fluctuations at the same altitude. On the other hand, our results indicate that lead filters with thickness greater than a critical value of 5 mm are capable of absorbing charged particles, causing an exponential decrease in the TPC as a function of the thickness; meanwhile the filters with thickness lower than that value cause an increase in TPC.

Subject headings: Elementary particle and cosmic ray detectors — Cosmic rays — Observatories and site testing.

1. INTRODUCCIÓN

En 1911, Victor Hess descubrió que existía radiación penetrante en la atmósfera proveniente del espacio exterior y la denominó “rayos cósmicos”, término que engloba todo tipo de partículas que llegan a la Tierra provenientes del espacio exterior (Gaisser 1990). Además, dedujo que la intensidad

de la radiación producida por los rayos cósmicos secundarios aumenta con la altitud. Cuando los rayos cósmicos llegan a la atmósfera terrestre producen chubascos de partículas de alta energía, los cuales se desarrollan a lo largo de la misma debido a la interacción con los núcleos atómicos que se encuentran en el aire (Antoni et al. 2003).

Como parte del Proyecto *Escaramujo*¹ el Dr. Federico Izraelevitch dictó el taller: “Instrumentación

[†]naomiguuaa@physics.org

[‡]sergioyapa@physics.org

^{*}carlacalle@physics.org

¹ <http://es.escaramujoproject.org/>



FIG. 1.— Fotografía del DV, se observan los canales de entrada y de salida en la parte superior e inferior, respectivamente. Éste fue empleado para regular el voltaje operativo manualmente.

en Física de Partículas Elementales” en distintas instituciones de Latinoamérica. Éste tuvo como objetivo construir y poner en marcha detectores de rayos cósmicos basados en centelladores plásticos y fotomultiplicadores de silicio (SiPM). Durante el taller dictado en La Paz – Bolivia utilizamos los detectores para tomar medidas de la TPC a una misma altitud y a diferentes altitudes, estas últimas tuvieron como fin reproducir los resultados del experimento de Victor Hess. Además, medimos la TPC con los detectores ubicados debajo de diferentes filtros de plomo a fin de comprobar su capacidad de absorber partículas cargadas.

En el presente trabajo analizamos los datos obtenidos durante el taller anteriormente mencionado. Encontramos que a una misma altitud la TPC presenta fluctuaciones y que existe una dependencia exponencial de la misma con la altitud. Además, comprobamos que los filtros de plomo que poseen un grosor superior a un cierto valor crítico (5 [mm]) son capaces de absorber partículas cargadas, mientras que los que poseen un grosor inferior a dicho valor incrementan la TPC, comportamiento que pudo deberse a interacciones de rayos γ con dichos filtros que generan un exceso de partículas cargadas.

2. DESCRIPCIÓN Y CONSTRUCCIÓN DEL DETECTOR

Construimos tres detectores² con centelladores plásticos (EJ-200, Eljen Technology) cuadrados de 25.5 cm de lado y 1.0 cm de grosor. Estos últimos emiten fotones visibles debido a interacciones electromagnéticas con partículas cargadas, principalmente ionización y excitación. Sin embargo, algunos de estos fotones poseen un ángulo de incidencia menor al ángulo crítico, lo que implica que estos no son reflejados por sus paredes y “escapan”. Con el fin de que todos estos fotones se refracten hacia el centellador nuevamente y sigan su trayectoria a través de él, recubrimos el mismo con papel tyvek blanco y con papel negro, este último para evitar el ingreso de fotones de fuentes externas al centellador. Dejamos espacio suficiente en ambas capas de papel para colo-

² De aquí en adelante, llamaremos a los detectores basados en centelladores plásticos y fotomultiplicadores de silicio (SiPM) simplemente como detectores.



FIG. 2.— Fotografía del conversor TDC que sirvió para digitalizar los pulsos eléctricos.

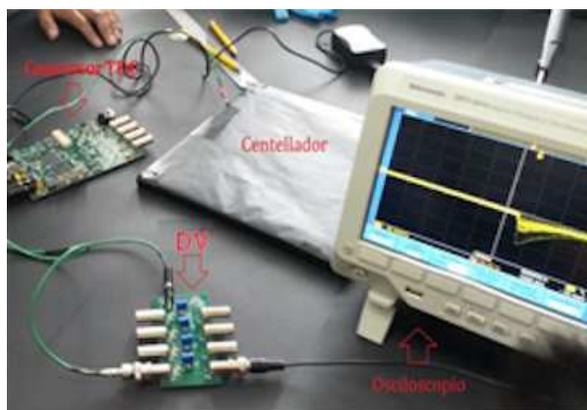


FIG. 3.— Fotografía de la conexión realizada para visualizar el pulso analógico en el osciloscopio con uno de los detectores. Realizamos la misma conexión para los otros detectores.

car el fotomultiplicador de silicio (SiPM³) cuadrado de 6 [mm] de lado, éste tenía la función de recibir la luz de centelleo, producir electrones, incrementar la cantidad de los mismos y convertirlos en un pulso eléctrico (Buzhan et al. 2003). Posteriormente, conectamos cada uno de estos detectores a un canal de entrada de un divisor de voltaje (denominado DV) que sirvió para regular manualmente el voltaje operativo (Fig. 1).

Conectamos el DV a un conversor TDC⁴ (QuarkNet (Rylander et al. 2010), proporcionado por Fermi-Lab) que tuvo como función digitalizar los pulsos eléctricos (Fig. 2). Además, conectamos el canal de salida del DV a un osciloscopio (Tektronix DPO 3034 300MHz 2.5GS/s) en el cual observamos un pulso analógico que nos permitió comprobar el correcto funcionamiento de cada detector (Fig. 3).

El ingreso de fotones a un detector genera una variación en el voltaje operativo, es por esto que exponamos cada detector a fuentes externas de luz y tomamos medidas de la variación en el voltaje operativo, esto con el fin de comprobar que no existan regiones en el detector por las que puedan ingresar los fotones de dichas fuentes.

³ A diferencia de un fotomultiplicador convencional, el SiPM opera en el orden de los voltios y no en el de los kilovoltios (Silicon photomultiplier 2016).

⁴ Time-to-Digital Converter.



FIG. 4.— Fotografía de la minicomputadora Raspberry PI2.

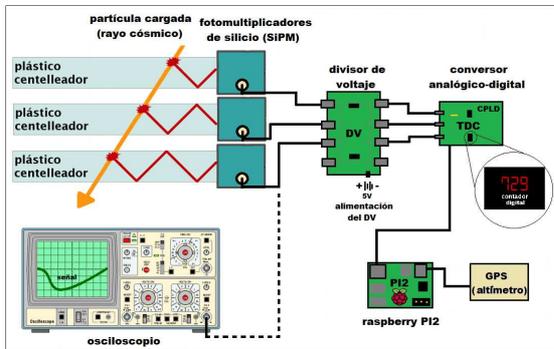


FIG. 5.— Diagrama del arreglo experimental para la toma de datos. Empleamos el osciloscopio únicamente para comprobar el correcto funcionamiento de los detectores.

Finalmente, apilamos los detectores y conectamos el convertidor TDC a la computadora Raspberry PI2 (Fig. 4), que mediante el programa Minicom (Minicom 2016) permitió ajustar los parámetros (umbral, trigger⁵, etc.) y recolectar datos. También conectamos un GPS a dicha computadora para medir la altitud (Fig. 5).

2.1. Calibración del detector

Con el fin de encontrar el voltaje operativo y el voltaje de umbral (mediante el cual se discriminan las partículas menos energéticas) adecuados de un detector para la toma de datos, medimos la TPC (en Hz⁶) para diferentes voltajes y un umbral fijo. Realizamos esto para diferentes valores del umbral (20, 30 y 40 [mV]) y hallamos la región de plateau para cada uno de estos (Fig. 6). A partir de dichas regiones obtuvimos un intervalo del voltaje operativo (28.8–29.8 [V]) y un voltaje de umbral (30 [mV]), escogimos este último debido a que existe menor variación en los puntos en su región de plateau en comparación con las regiones de plateau correspondientes a otros valores del voltaje de umbral. A recomendación del Dr. Federico Izraelevitch, supusi-

⁵ Nos permite capturar las señales cuando se cumple una condición determinada en la señal, por ejemplo cuando ésta supera el umbral.

⁶ Hz = cuentas/s.

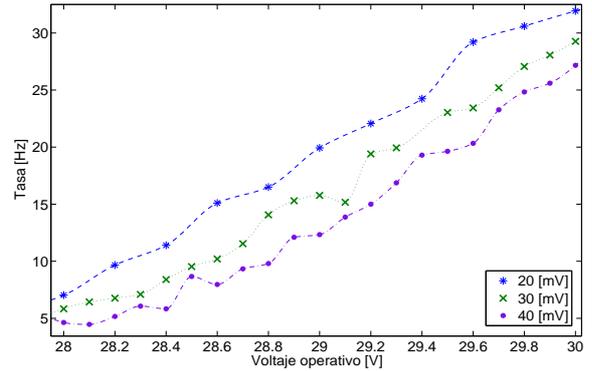


FIG. 6.— TPC en función del voltaje operativo para tres diferentes valores fijos del umbral (20, 30 y 40 [mV]). Nótese las regiones de plateau entre los valores 28.8 y 29.8 [V] de el voltaje operativo.

mos valores del voltaje operativo y del voltaje de umbral similares para los otros dos detectores, esto debido a que dichos detectores fueron manufacturados de igual manera.

3. TOMA DE DATOS EXPERIMENTALES

3.1. Medición de la TPC en función de la altitud

Este experimento consistió en medir la TPC a diferentes altitudes. Tomamos datos a lo largo de la trayectoria entre el Laboratorio de Rayos Cósmicos (LRC) de la Universidad Mayor de San Andrés ubicado en el campus de Cota Cota (3427 m.s.n.m.) (Fig. 7) hasta el Laboratorio de Chacaltaya (5238 m.s.n.m.). Medimos la TPC en intervalos de 2 minutos con el fin de tener datos suficientes para realizar un análisis estadístico y tener una tendencia clara entre las variables estudiadas.

Se realizó un segundo experimento, el cual consistió en medir la TPC a una misma altitud en el Laboratorio de Chacaltaya (5238 m.s.n.m.). En este caso, medimos la TPC en intervalos de 5 minutos a lo largo de 1.5 horas, nuevamente para tener datos suficientes para realizar un análisis estadístico y tener una tendencia clara. El error en la medida de la TPC se debe a fluctuaciones de la misma, por lo que a través de los datos obtenidos en este experimento (Fig. 10) pudimos calcular el error porcentual (0.4%). Como se mencionó anteriormente, tomamos datos para una única altitud, por lo que no sabemos el error asociado a la TPC a diferentes altitudes, sin embargo, este experimento nos da una idea de su valor.

3.2. Caracterización de filtros de plomo

Este experimento consistió en medir la TPC con los detectores ubicados debajo de filtros de plomo para estudiar su capacidad de absorber las partículas menos energéticas. Empleamos filtros de plomo de diferentes grosores (5, 10, 15, ..., 40 [mm]) como se muestra en la Fig. 8.

4. RESULTADOS

4.1. Medición de la TPC en función de la altitud



FIG. 7.— Trayecto realizado entre el Campus Universitario ($16^{\circ}32'19.64''$ Lat. S, $68^{\circ}3'59.00''$ Long. W) y el Laboratorio de Chacaltaya ($16^{\circ}21'11.78''$ Lat. S, $68^{\circ}7'53.22''$ Long. W), con una diferencia de altitudes de 1811 [m].

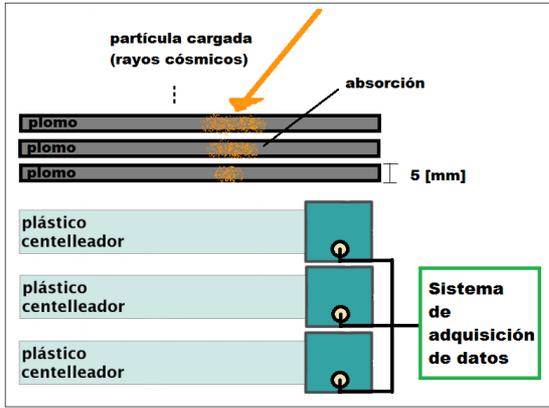


FIG. 8.— Diagrama de los detectores con filtros de plomo de 5 [mm] de grosor ubicados sobre ellos. La variación en el grosor de los filtros de plomo consistió en una superposición paulatina de filtros.

Los resultados hallados para la TPC a diferentes altitudes se muestran en la Fig. 9. Realizamos un ajuste exponencial con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.972$.

La ecuación que mejor describe el comportamiento de los datos está dada por la ecuación (1)

$$T(h) = ae^{bh}, \quad (1)$$

donde T es la TPC, h es la altitud y a , b son coeficientes dados por

$$\begin{aligned} a &= 5.9 \pm 0.8, \\ b &= 0.0003 \pm 0.0001. \end{aligned} \quad (2)$$

Por otro lado, los resultados hallados para la TPC a una misma altitud se muestran en la Fig. 10.

4.2. Caracterización de filtros de plomo

Los resultados hallados para la TPC con los detectores ubicados debajo de diferentes filtros de plomo se muestran en la Fig. 11. Observamos un incremento de la TPC con filtros con grosores menores al valor crítico, el cual es 5 [mm]. Además, observamos

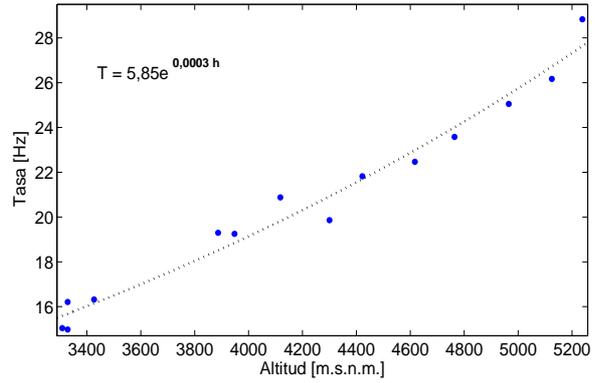


FIG. 9.— Datos tomados durante la subida a Chacaltaya ajustados a una función exponencial y su respectiva ecuación. La TPC máxima es 28,83 [Hz] a una altitud de 5238 m.s.n.m y la mínima es 14,98 [Hz] a una altitud de 3329 m.s.n.m. Resultados semejantes se presentan en los experimentos realizados por Víctor Hess (Hess 1912).

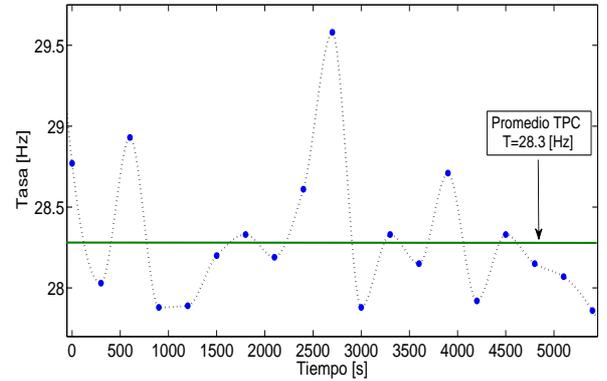


FIG. 10.— Medidas de la TPC durante 1.5 horas a una misma altitud (5240 m.s.n.m.), con un valor máximo de 29.58 [Hz] y un mínimo de 27.86 [Hz]. El valor promedio de la TPC es 28.30 [Hz] con una desviación estándar $\sigma = 0.45$ y un error de 0.10. Podemos apreciar las fluctuaciones en la TPC para diferentes tiempos.

un decrecimiento de la misma con filtros con grosores superiores a dicho valor.

La ecuación más simple que describe satisfactoriamente el comportamiento de los datos, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.999$, está dada por la ecuación (3)

$$T(x) = Ae^{Bx} + Ce^{Dx}, \quad (3)$$

donde T es la TPC, x es el grosor del filtro de plomo y A , B , C , D son coeficientes dados por:

$$\begin{aligned} A &= 39.4 \pm 0.9 \text{ [Hz]}, \\ B &= -0.099 \pm 0.001 \text{ [mm}^{-1}\text{]}, \\ C &= -12.5 \pm 1.2 \text{ [Hz]}, \\ D &= -0.7 \pm 0.4 \text{ [mm}^{-1}\text{]}. \end{aligned}$$

⁷ Este coeficiente se conoce como “longitud de radiación” que es la distancia media a la cual un electrón pierde toda su energía (excepto $1/e$) mediante bremsstrahlung (Groom & Klein 2000).

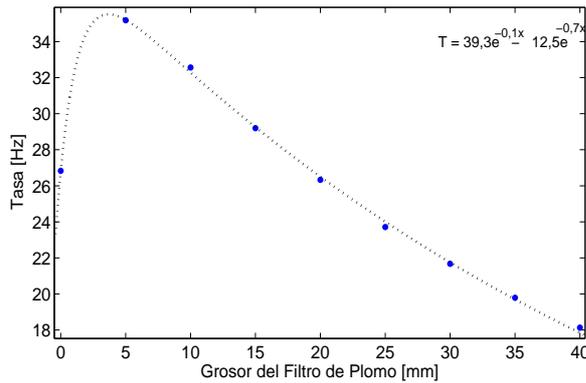


FIG. 11.— Medidas de la TPC con filtros de plomo de diferentes grosores. Estos datos fueron tomados en el Laboratorio de Chacaltaya (5238 m.s.n.m.).

5. CONCLUSIONES

Encontramos que la TPC crece exponencialmente con la altitud y que la misma fluctúa en el intervalo $27.86 \leq T \leq 29.58$ [Hz] al ser medida a una misma altitud (Laboratorio de Chacaltaya (5238 m.s.n.m.)). Además, encontramos que los filtros de plomo con grosores menores al valor crítico ($x \leq 5$ [mm]) son incapaces de absorber partículas de la TPC dado que estos incrementan la misma, este comportamiento

se describe por la ecuación de Bethe-Bloch (Bethe & Ashkin 1953). El mismo pudo deberse a las interacciones de rayos γ con dichos filtros, las cuales generan un exceso de partículas cargadas. Por otro lado, los resultados muestran que los filtros de plomo son absorbentes si tienen grosores superiores al valor crítico ($x > 5$ [mm]). El comportamiento de la TPC detectada debajo de los filtros mencionados puede ser modelado mediante una suma de dos funciones exponenciales con coeficientes (A , C) de signos opuestos y exponentes (B , D) negativos.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos al Dr. Federico Izraelvitch, fundador del proyecto Escaramujo. A los docentes del laboratorio de rayos cósmicos de la Universidad Mayor de San Andrés: Dr. Martín Subieta, Dr. Hugo Rivera, Ing. Pedro Miranda. A los patrocinadores del proyecto Escaramujo: Senselight, Eljen Technology, RAICES, RE.C.A.R.MO, Consulado General de la República de Argentina, LAGO y Fermilab. Además a los participantes del proyecto Escaramujo: Maricela Flores (Benemérita Universidad Autónoma de Puebla), César Cornejo, Kevin Cordero, Erick Berazain, Ronald Condori y Javier Ríos por su colaboración en la construcción de los detectores y en la toma de datos.

REFERENCIAS

- Antoni T. et al. (2003), *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **513**, 490
- Bethe H. A. & Ashkin J. (1953), *Experimental nuclear physics* (E. Segre (Wiley, New York))
- Buzhan P. et al. (2003), *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A* **504**, 48
- Gaisser T. K. (1990), *Cosmic rays and particle physics* (Cambridge University Press)
- Groom D. E. & Klein S. R. (2000), *The European Physical Journal C-Particles and Fields* **15**, 163
- Hess V. F. (1912), *Z. Phys.* **13**, 1084
- Minicom (2016), <https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Minicom&oldid=717026370>
- Silicon photomultiplier (2016), https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Silicon_photomultiplier&oldid=705772134
- Rylander J. et al. (2010) *QuarkNet Cosmic Ray Muon Detector* (Users Manual—Series “6000” DAQ.)