

PROYECTO LAGO BOLIVIA  
LARGE APERTURE GAMMA RAY OBSERVATORY  
THE LAGO PROJECT IN BOLIVIA

A. VELARDE<sup>†</sup>, R. TICONA, P. MIRANDA, H. RIVERA & J. QUISPE  
Instituto de Investigaciones Físicas  
Universidad Mayor de San Andrés  
La Paz – Bolivia

RESUMEN

LAGO es una red en tierra de detectores Cherenkov con agua (WCD) para detectar partículas secundarias remanentes de pequeños chubascos atmosféricos producidos por gammas provenientes de GRBs.

La red LAGO está constituida por estaciones que se han seleccionado en sitios de altura: Sierra La Negra (4.650 m.s.n.m.) en Puebla–México, Chacaltaya (5.230 m.s.n.m.), en La Paz–Bolivia, Pico Espejo (4.765 m.s.n.m.) en Mérida–Venezuela. También hacen parte de la red los 16.000m<sup>2</sup> de detectores Cherenkov de AUGER en Malargüe–Argentina (1.400 m.s.n.m.). En Perú se están ubicando posibles sitios de altura cerca de Cusco para instalar otra estación de la red LAGO y se ha presentado una propuesta para instalar detectores en la “Pirámide” del CNR en el Everest (5.050m.s.n.m.).

Se presentan los resultados de la instalación y puesta en marcha de la estación LAGO Bolivia en el Laboratorio de Física Cósmica de Chacaltaya.

*Descriptores:* Gamma Ray Bursts (GRBs) — rayos cósmicos

Código(s) PACS: 95.85.Pw, 95.85.Ry, 95.45.-i

ABSTRACT

LAGO is a network of water Cherenkov detectors (WCD) which operate which detect secondary particles that are remnants of small atmospheric showers (storms) produced by gammas originating from GRBs. LAGO is made up of high altitude sites: Sierra La Negra (4,650 m asl.) in Puebla–Mexico, Chacaltaya (5,230 m asl.) in La Paz–Bolivia, Pico Espejo (4,765 m asl.) in Mrida–Venezuela. They also make up part of the 16,000m<sup>2</sup> AUGER Cherenkov detector network in Malarge–Argentina (1,400 m asl). In Peru a number of possible high altitude sites close to Cusco are being identified for the installation of a LAGO network. There is even a proposal to install detectors in Everests CNR Pyramid at (5,050 m asl). We present the results from the installation and operation of Bolivias LAGO station in the Cosmic Physics Laboratory at Chacaltaya.

*Subject headings:* Gamma Ray Bursts (GRBs) — cosmic Rays

1. INTRODUCCIÓN

Desde el descubrimiento de los Gamma Ray Bursts (GRBs), a fines de los años 60 por el satélite VELA (Klebesadel 1973), este fenómeno astrofísico ha despertado el mayor interés en el campo de la astrofísica.

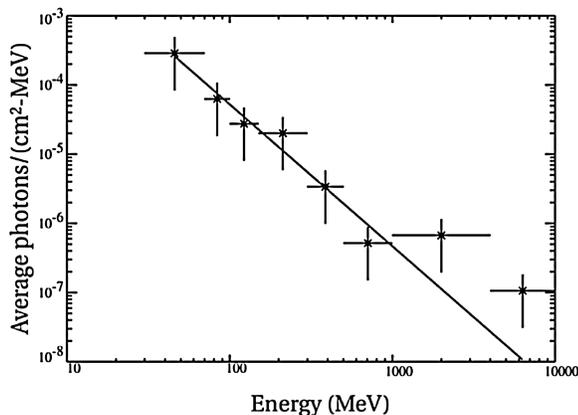


FIG. 1.— Espectro diferencial de energía de los fotones de los GRBs en el rango de los MeV. (B. L. Dingus, U. Utah, [http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/grbs/grb\\_spectrum.html](http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/objects/grbs/grb_spectrum.html).)

Se han diseñado e instalado varios instrumentos de detección en satélites y también en tierra para detectarlos (Meszaros 2006).

Los GRBs son explosiones súbitas de fotones de alta energía ( $E > 10\text{KeV}$ , Rayos X duros y Rayos Gamma), de corta duración (entre 0,01 a 100 segundos), seguidos por una radiación remanente más débil en rayos X conocida como posluminiscencia. Se detectan, en promedio, uno por día.

Se trata de los fenómenos físicos más luminosos del universo, produciendo una gran cantidad de energía en haces de rayos

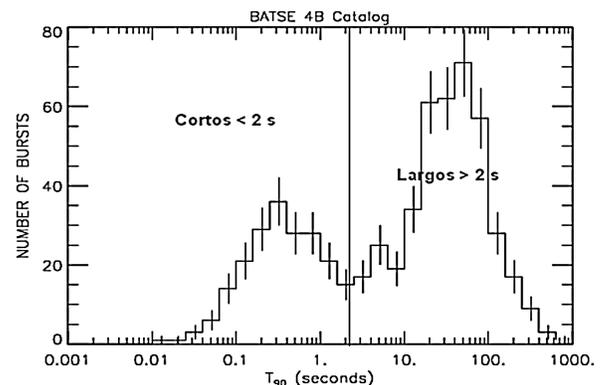


FIG. 2.— Distribución de la duración de los GRBs.

<sup>†</sup>avelarde@fiumsa.edu.bo, <http://www.fiumsa.edu.bo/investigacion/LAGO>.

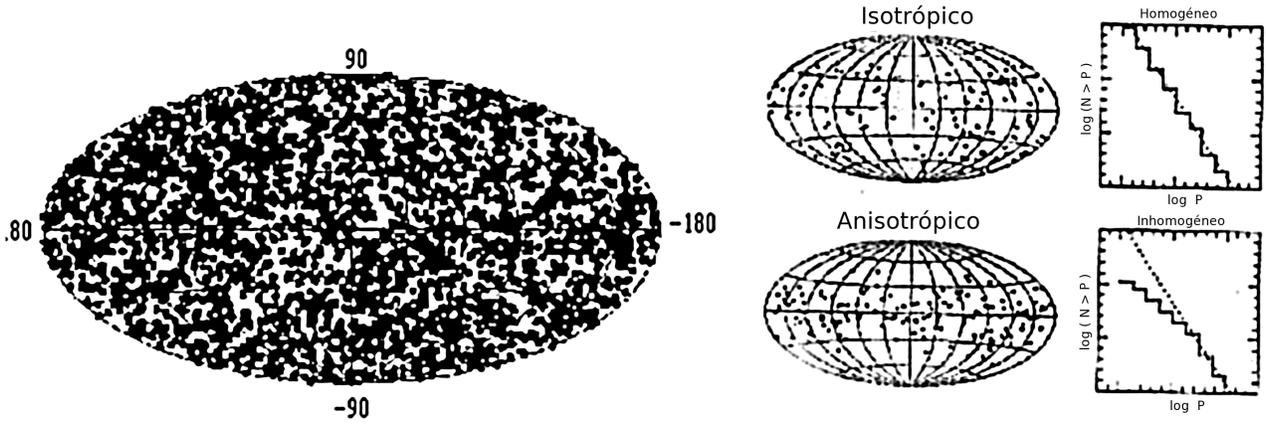


FIG. 3.— Mapa de las direcciones de arribo de los GRBs detectados por BATSE y déficit del número de GRBs de baja fluencia ( $[P] = \text{erg}/\text{cm}^2$ ). Tomada de [apod.nasa.gov/apod/ap000628.html](http://apod.nasa.gov/apod/ap000628.html).

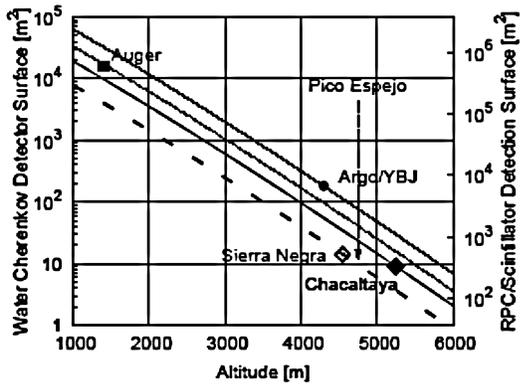


FIG. 4.— Líneas equisensibles para experimentos de diferente tamaño y altitud.



FIG. 6.— Laboratorio de Física Cósmica de Chacaltaya. En círculo, la “Sala de Muones”.

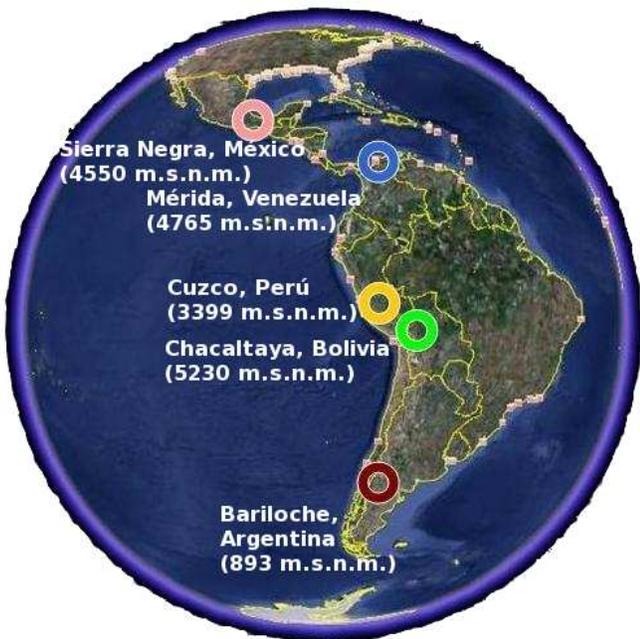


FIG. 5.— Red de estaciones LAGO.

gamma; su luminosidad se estima en  $L_\gamma \sim 10^{52}$  erg/s (Ramirez & Fenimore 1999).

La mayoría de los fotones de los GRBs han sido observados en el rango de energías de los MeV, por detectores en satélites. Su espectro de energía típico sigue una ley de potencias  $E^{-\alpha}$  con

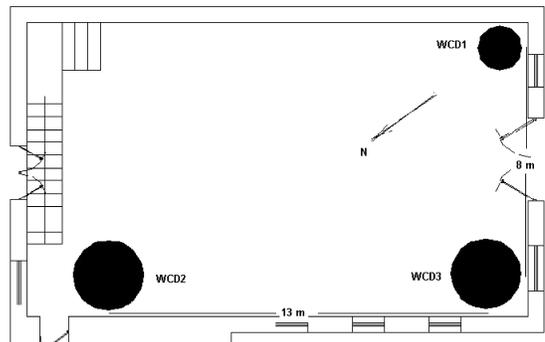


FIG. 7.— Disposición de los tres detectores dentro la “Sala de Muones”.

$\alpha \sim -2$  para el rango de energía  $E < 1\text{GeV}$ , como se muestra en la Fig. 1.

En la Fig. 2 se muestra la distribución de los GRBs según su duración. Se ve que es una distribución bimodal con dos poblaciones bien definidas. Los de corta duración ( $< 2s$ ), centrada alrededor de  $0.3s$  y los de larga duración ( $> 2s$ ), centrada alrededor de los  $30s$ .<sup>1</sup>

Algunos GRBs de larga duración ( $> 2s$ ) se han asociado con hipernovas que corresponden a la muerte de estrellas supermasivas ( $> 40M_\odot$ ).<sup>2</sup> Su brillo es cientos de veces mayor al de una supernova típica.

Los GRBs de corta duración ( $< 2s$ ) provienen de galaxias muy lejanas, prácticamente de los confines del universo.

<sup>1</sup> BATSE 4B Gamma-Ray Burst Catalog, [www.batse.msfc.nasa.gov/batse/grb/duration](http://www.batse.msfc.nasa.gov/batse/grb/duration).

<sup>2</sup> Gamma Ray Burst: “Introduction to a Mystery”, [http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know\\_11/bursts.html](http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/know_11/bursts.html).

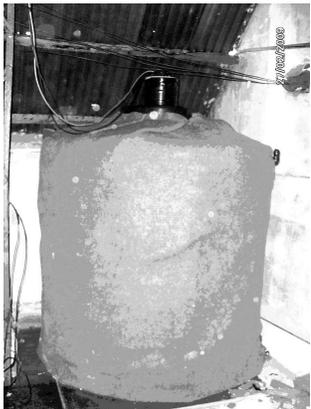


FIG. 8.— WCD1. Diámetro: 1,4m. Altura de agua: 1,4m. HV: 1.300V. Conteo de fondo: 6.000c/s.

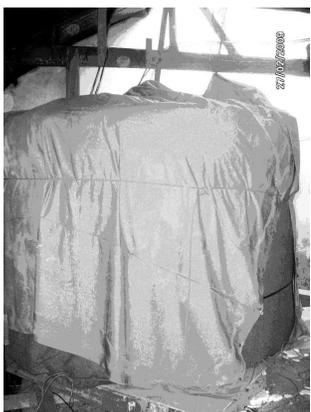


FIG. 9.— WCD2. Diámetro 2,2m. Área: 3,8m². HV: 1.600V. Conteo de fondo: 12.000c/s.

Uno de los más espectaculares: el GRB 990123 de 23 de enero de 1999, muestra los siguientes datos:

Corrimiento al rojo  $z = 1,6$  equivale a un  $\Delta t \sim 7,6 \times 10^9$  años luz, una energía,  $E \sim 3 \times 10^{54} \text{erg}$ , y una luminosidad máxima,  $L_{max} = 10^{53} \text{erg/s}$  (Blandford & Helfand 1999).

El GRB más lejano, recientemente detectado por el telescopio Fermi, es el del 23 de abril de 2009, (GRB090423) con un corrimiento al rojo  $z = 8,2$  que corresponde a una distancia de  $13 \times 10^9$  años luz, esto es, escasos 600 millones de años después del *Big Bang*.<sup>3</sup>

Los gammas de alta energía, al atravesar el espacio intergaláctico, son absorbidos por producción de pares al interactuar con la radiación de fondo infrarroja y de microondas; por ello, los gammas que llegan a la tierra son de baja energía.

En la Fig. 3, se muestra el mapa final de los GRBs detectados por BATSE, en el satélite Compton Gamma Ray Observatory que estuvo en operación de 1991 al 2000. La distribución es isotrópica, no se observa ninguna dirección preferente, provienen de todas las direcciones del universo. Sin embargo, las fluencias son incompatibles con un modelo de distribución uniforme de las fuentes, se observa una deficiencia de fotones de baja fluencia, como se muestra en la misma figura.

En el caso de una distribución isotrópica homogénea, el número de GRBs será proporcional al volumen y la fluencia es proporcional a la inversa de la distancia, de modo que el número de GRBs viene a ser proporcional a la fluencia elevada a  $-3/2$ :

$$N \propto r^3; \quad P \propto \frac{1}{r^2} \Rightarrow N \propto P^{-\frac{3}{2}}.$$

<sup>3</sup> [www.nasa.gov/mision\\_page/swift\\_burst/cosmic\\_record.html](http://www.nasa.gov/mision_page/swift_burst/cosmic_record.html).



FIG. 10.— WCD3. Diámetro 2,2m. Área: 3,8m². HV: 1.200V. Conteo de fondo: 12.000c/s.

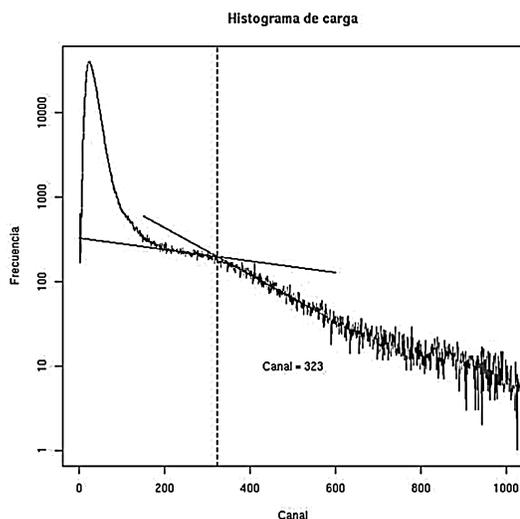


FIG. 11.— Espectro del WCD1 prototipo.

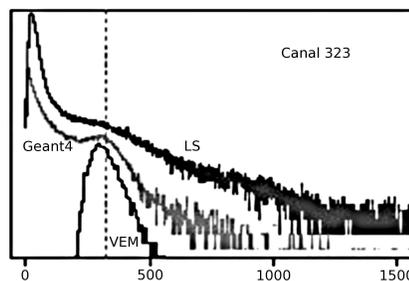


FIG. 12.— Comparación de espectros simulado y medido en Cota Cota (VEM: simulado).

## 2. DETECCIÓN DE GRBs EN TIERRA

Dada la baja energía de los fotones de los GRBs que llegan a la tierra, es necesario detectarlos mediante satélites fuera de la atmósfera (Bertou 2009). Sólo en unos cuantos GRBs se han observado fotones con energías mayores a  $1 \text{GeV}$ . La mayor observada fue de  $18 \text{GeV}$  (GRB 940217).

Para detectar fotones de alta energía en un GRB se requieren grandes áreas de detección, cosa que no se puede hacer en satélites. Es posible detectar fotones de alta energía mediante la técnica de las partículas individuales sobrevivientes de los pequeños chubascos atmosféricos producidos por fotones de energías mayores a  $1 \text{GeV}$ , mediante arreglos de detectores de

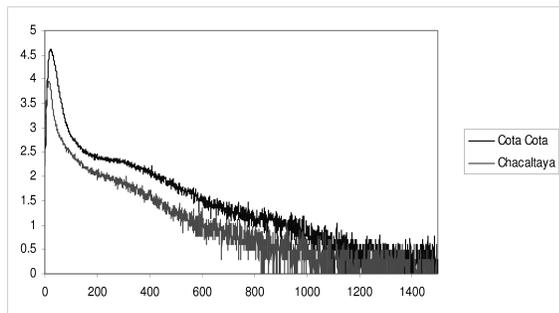


FIG. 13.— Comparación espectros Cota Cota–Chacaltaya. log (Frecuencia) vs. canal.

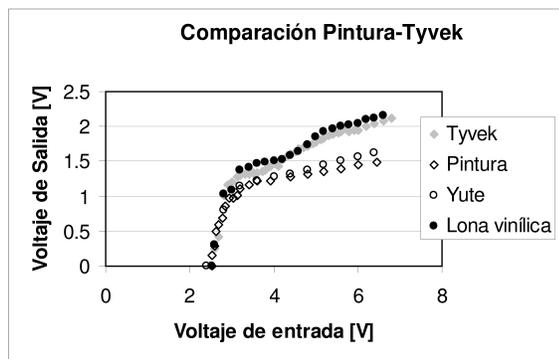


FIG. 14.— Comparación de la reflectividad.

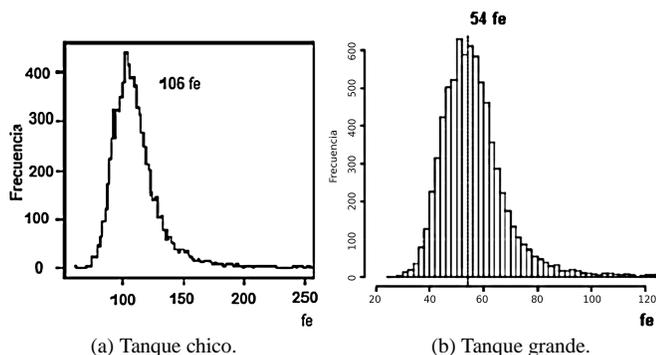


FIG. 15.— Comparación del VEM para los tanques chico y grandes.

partículas en tierra. Mientras más alto se coloquen estos detectores, mayor será su sensibilidad. En la Fig. 4 se muestra una simulación de la sensibilidad de un detector Cherenkov con agua en función de la altura (Bertou 2009).

La gran mayoría de las partículas secundarias remanentes producidas por un gamma primario, serán fotones. Por ello es que la utilización de detectores Cherenkov es preferible a los centelleadores u otros detectores de partículas cargadas.

Según esta simulación  $20m^2$  de detectores Cherenkov con agua en Chacaltaya (5.200 m.s.n.m.) son equivalentes a los  $16.000m^2$  de área afectiva del experimento AUGER en Malargüe, Argentina, a 1.400 m.s.n.m..

### 3. EL PROYECTO LAGO

Como ya señalamos, la detección de GRBs de energías del orden de los  $GeV$ , es posible en detectores en tierra correlacionados con los registros de satélite, mediante la técnica de la observación de las fluctuaciones de los registros temporales de la radiación de fondo de cada detector debido al arribo de partículas secundarias, mayoritariamente fotones, sobrevivientes del chu-

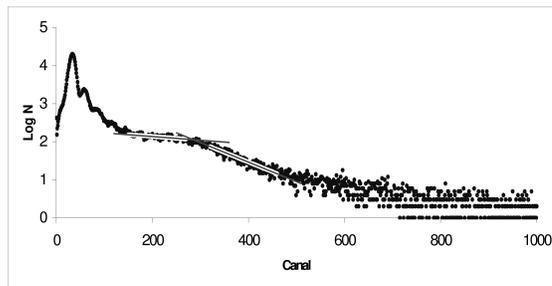


FIG. 16.— Calibración del tanque WCD2. El pico muón (intersección de las dos líneas) corresponde al canal 280. El VEM=273 y corresponde a  $300MeV$ .

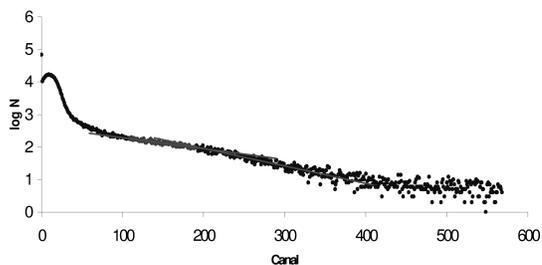


FIG. 17.— Espectro de carga del WCD3. VEM: Canal197=  $300MeV$ .

TABLA 1  
PARÁMETROS DE LOS TANQUES.

Parámetros	WCD1	WCD2-3
Diámetro	1,4m	2,2m
Altura del agua	1,4m	1,5m
Material	plástico	Fibra de vidrio
Superficie reflectante	Tyvek	Lona vinílica

basco generado en el tope de la atmósfera por los rayos gamma de un GRB que llegan durante el corto periodo de tiempo de duración del mismo.

Este método se conoce como “Single Particle Technique” (SPT, Técnica de partículas individuales, Aglietta 1996). Cuando fotones de un GRB alcanzan la atmósfera, producen chubascos de rayos cósmicos, sin embargo, sus energías no son suficientes para producir chubascos detectables en tierra (ni siquiera a grandes alturas). Sin embargo, se espera que lleguen muchos fotones en un periodo corto de tiempo. Entonces se podrá ver un incremento en la razón de conteo de la radiación de fondo en los detectores durante ese periodo de tiempo. Esta técnica ya se aplicó en INCA (Vermetto 1999), en Chacaltaya, y en ARGO (Surdo 2003), en Tibet. Un estudio general de esta técnica puede encontrarse en Ref. Vermetto 2000.

El proyecto LAGO consiste en instalar una red de estaciones terrestres para detectar fotones de alta energía provenientes de las explosiones de rayos gamma (GRBs), utilizando la SPT con detectores Cherenkov con agua.

Para alcanzar una sensibilidad razonable, se han seleccionado sitios de altura en Sierra La Negra (4.650 m.s.n.m.) en Puebla-México, Chacaltaya (5.230 m.s.n.m.), en La Paz-Bolivia, Pico Espejo (4.765 m.s.n.m.) en Mérida-Venezuela. También hacen parte de la red los detectores de AUGER en Malargüe–Argentina (1.400 m.s.n.m.). En Perú se están ubicando posibles sitios de altura cerca de Cusco para instalar otra estación de la red LAGO y se ha presentado una propuesta para instalar detectores en la “Pirámide” del CNR en el Everest (5.050 m.s.n.m.).

### 4. LA ESTACIÓN DE CHACALTAYA

Actualmente se encuentran instalados y en operación tres detectores Cherenkov con agua; dos de 2,2m de diámetro, ( $3,8m^2$ )

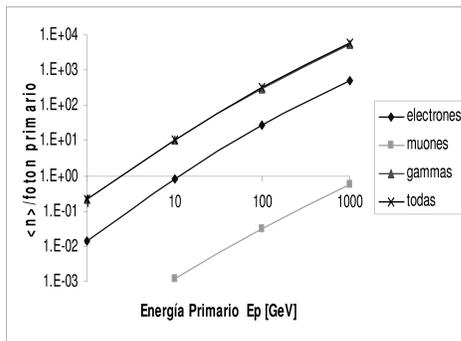


FIG. 18.— Número de partículas secundarias en función de la energía del gamma primario.

TABLA 2  
NÚMERO MEDIO DE PARTÍCULAS SECUNDARIAS PARA DISTINTAS ENERGÍAS DE UN FOTÓN PRIMARIO VERTICAL.

$E_p$ [GeV]	$e^\pm$	$\mu^\pm$	$\gamma$	Total
1	0,014	0,0	0,21	0,224
10	0,774	0,0012	9,98	10,76
100	26,22	0,032	291,2	317,5
1.000	522,0	0,56	5.513,0	6.080,0

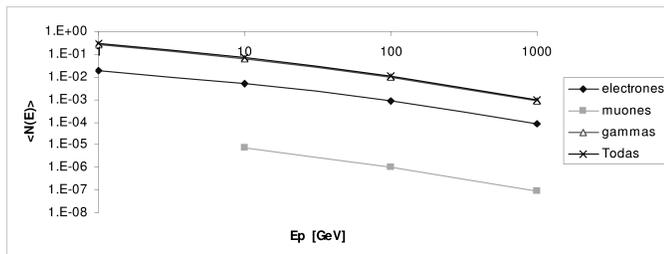


FIG. 19.— Frecuencia media de los secundarios que llegan a la estación de Chacaltaya en función de la energía de los primarios de un GRB.

TABLA 3  
 $\langle N(E_p) \rangle$ : NÚMERO MEDIO DE PARTÍCULAS SECUNDARIAS PARA DISTINTAS ENERGÍAS DE UN GAMMA PRIMARIO VERTICAL PONDERADAS AL ESPECTRO DE ENERGÍA DE LOS GRBS.

$E_p$ [GeV]	$e^\pm$	$\mu^\pm$	$\gamma$	Total
1	0,018	0,0	0,27	0,29
10	0,0050	$7,8 \times 10^{-6}$	0,065	0,07
100	0,00085	$1,0 \times 10^{-6}$	0,0095	0,01
1.000	$8,5 \times 10^{-5}$	$9,0 \times 10^{-8}$	0,00090	0,00099

y 1,5m de altura del agua y uno de 1,4m de diámetro, (1,5m<sup>2</sup>) y 1,4m de altura de agua. Han sido colocados en la “Sala de Muones” del Laboratorio de Física Cósmica de Chacaltaya (ver Fig. 6).

La Fig. 7 muestra la disposición de los detectores y en las Figs. 8, 9 y 10 se muestran los detectores.

Los detectores han sido envueltos en cobertores de lana para evitar que el agua congele.

#### 4.1. Calibración del Detector Prototipo WCD1

En la Tabla 1 se dan las características de este prototipo.

En la Fig. 11 se muestra el espectro de las señales en el WCD1 (prototipo), medido en Cota Cota (3.300 m.s.n.m.).

El pico que se observa, corresponde a los muones que atraviesan el tanque. Para determinar su posición en función de los canales del espectro, se tienden dos ajustes lineales antes y después del pico y se encuentra la intersección. En nuestro caso se ubica en el canal 323 (323±20).

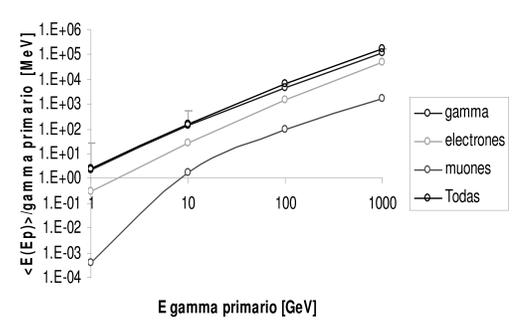


FIG. 20.— Energía media de los secundarios en función de la energía de un gamma primario vertical.

TABLA 4  
 $\langle E \rangle$  [MeV]: ENERGÍA MEDIA DE LAS PARTÍCULAS SECUNDARIAS PARA DISTINTAS ENERGÍAS DE UN GAMMA PRIMARIO VERTICAL.

$E_p$ [GeV]	$e^\pm$	$\mu^\pm$	$\gamma$	Total
1	0,32	0,0004	2,19	2,52
10	28,4	1,72	130,1	160,5
100	1.538	99	4.860	6.500
1.000	50.500	1.700	122.100	174.000

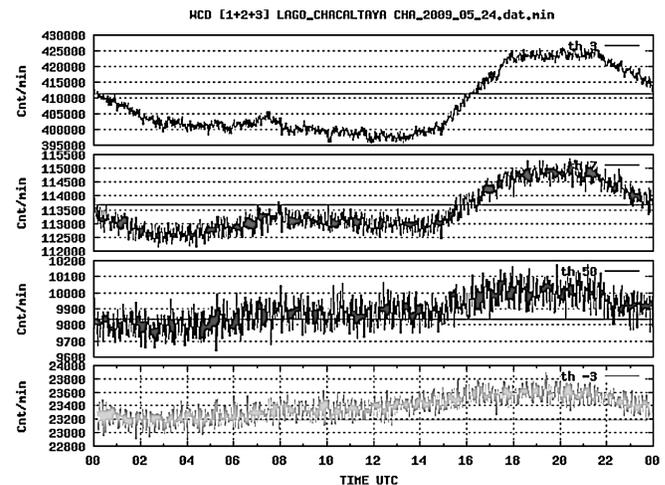


FIG. 21.— Registro diario, al minuto, de la suma de los tres detectores, para los cuatro niveles de discriminación.

Se busca determinar el VEM (“Vertical Equivalent Muon”). Sabiendo que un muón relativista deposita 2MeV/cm en agua y conociendo la profundidad del agua, se puede utilizar el VEM para calibrar el equipo en energía.

Para determinar el VEM se utilizó el programa Corsika para simular la radiación de fondo en Cota Cota y el programa Geant4 para simular el espectro en el tanque y el VEM (Rivera 2007).

En la Fig. 12, se muestra la comparación entre el espectro medido, el simulado y el VEM. Se hizo coincidir el pico muón de la simulación con el pico muón medido. El pico muón de la simulación corresponde a 109 fotoelectrones (fe) que se ajustan al canal 323 del espectro medido.

El VEM simulado corresponde a 106 fotoelectrones y equivale al canal 315, o sea, a 0,975Pico Muón.

#### 4.2. Prototipo en Chacaltaya

La Fig. 13 muestra el espectro del prototipo (WCD1) en Chacaltaya, comparado con el espectro medido en Cota Cota. Se puede ver que el pico muón es menos destacado, sin embargo, coincide con el de Cota Cota. Naturalmente, la energía depositada por un muón al atravesar el tanque es independiente de la

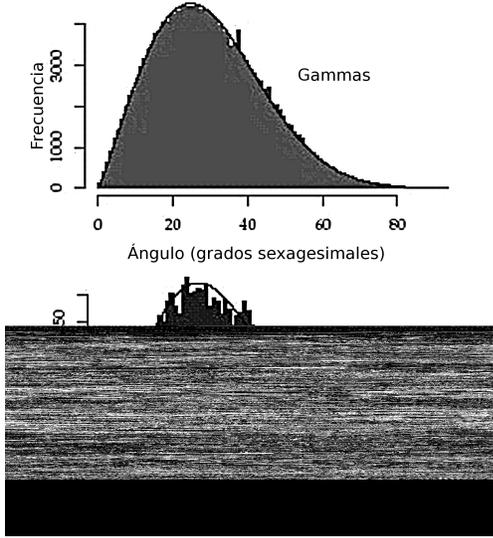


FIG. 22.— Distribución angular (zenital) de la radiación cósmica en Chacaltaya.

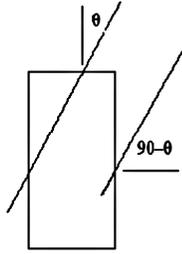


FIG. 23.— Detector cilíndrico.

altura.

Confirmamos, entonces que el canal  $(315 \pm 20)$  corresponde al VEM y equivale a  $280 \text{ MeV}$ . El error se calcula con base en los errores del ajuste de las líneas cuya intersección se utilizó para determinar el pico muón. Ahora bien, se determinó el factor de  $0,34 \text{ mV}/\text{canal}$ , entonces corresponde a una señal de  $(107 \pm 7 \text{ mV})$ .

#### 4.3. Tanques Grandes, WCD2 y WCD3

Las correspondientes características se dan en la Tabla 1.

Se hicieron medidas comparativas de la reflectividad de varios materiales mediante destellos de diferentes intensidades de un LED violeta dentro de una caja con un fotomultiplicador; comprobando que, como se muestra en la Fig. 14, la lona vinílica que se utiliza en las gigantografías tiene un comportamiento similar al Tyvek que utilizan en los tanques del proyecto AUGER.

#### 4.4. Simulación del VEM

En la Fig. 15, se muestra la simulación del VEM para el tanque chico y el grande, en número de fotoelectrones ( $f_e$ ).

Tanque chico:  $106 f_e$ .  
Tanque grande:  $54 f_e$ .

Se observa que hay una relación de  $\cong 1/2$  del tanque grande respecto al chico, esto se debe a la relación del área del fotomultiplicador al área reflectante. El número de fotoelectrones es proporcional a dicha relación  $A_{PM}/A_{Tanque}$ :

$$N_{f_e} = N_{fot/cm} \times H \times E_{fcuant} \times (A_{PM}/A_{Tanque}) \times r \times t, \quad (1)$$

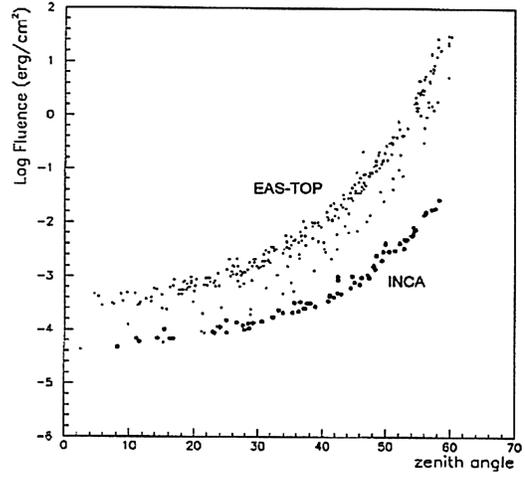


FIG. 24.— Límite inferior de la fluencia en función del ángulo zenital de los GRBs, determinado por los resultados del experimento INCA.

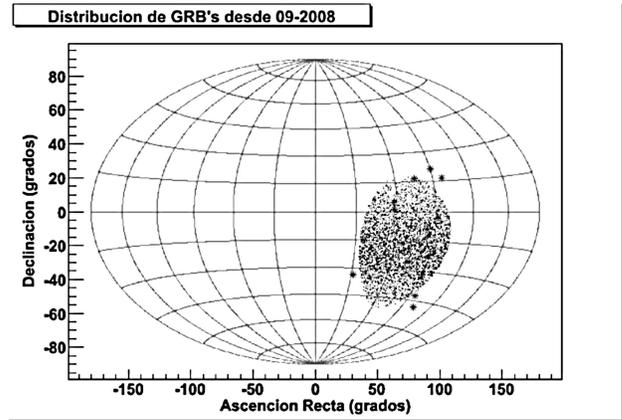


FIG. 25.— Direcciones de GRBs reportados sobre Chacaltaya (asteriscos) y direcciones de chubascos registrados (puntos).

donde  $N_{fot/cm}$  es el número de fotones Cherenkov por  $cm$ ,  $H$  es la altura de agua,  $E_{fcuant}$  es la Eficiencia Cuántica del fotomultiplicador,  $r$  es el coeficiente de reflexión en las paredes, y  $t$  es el coeficiente de transmisión del agua.

En ambos tanques se usa un sólo fotomultiplicador de  $20 \text{ cm}$  de diámetro; la relación  $A_{PM}/A_{Tanque}$  para el detector chico (WCD1) es  $3,4 \times 10^{-3}$  y para los tanques grandes es  $1,7 \times 10^{-3}$ ; la relación entre ambos da, efectivamente,  $\cong 0,5$ .

#### 4.5. Calibración de los Tanques Grandes

La calibración de los tanques grandes resultó en lo siguiente: Para un conteo de fondo de  $1.200 \text{ c/s}$ :

WCD2: HV  $1.600 \text{ V}$ , VEM Canal  $273 = 300 \text{ MeV}$ .

WCD3: HV  $1.200 \text{ V}$ , VEM Canal  $197 = 300 \text{ MeV}$ .

En la Fig. 16 se muestra el espectro de carga del detector grande WCD2. Utilizando el método descrito, mediante la intersección de dos ajustes lineales en el cambio de pendiente del espectro, se encuentra que el pico muón corresponde al canal  $280 (\pm 20)$ . El VEM, siguiendo el dato de la simulación, corresponderá, entonces, al canal  $280 \times 0,975 = 273$ . Para una altura de agua de  $1,5 \text{ m}$ , la energía depositada por los muones es de  $300 \text{ MeV}$ .

De igual manera, se calibró el segundo tanque grande WCD3; en la Fig. 17 se muestra su espectro de carga.

En la Tabla 3, se muestran los valores numéricos resultantes de la simulación.

TABLA 5  
 $F [10^{-4} \text{ erg/cm}^2]$ : FLUENCIA MÍNIMA PARA LOS DETECTORES.

WCD1	WCD2-3	WCD1-2-3
1,9	1,4	0,8

#### 4.6. Cálculo del número medio de partículas secundarias en función de la energía del fotón primario

En la Fig. 18 se muestra el número de partículas secundarias esperadas en la estación de Chacaltaya en función de la energía de un fotón primario vertical en el rango de  $1 \text{ GeV}$  a  $1 \text{ TeV}$ .<sup>4</sup> En todos los casos la gran mayoría son fotones, por ello es que se han escogidos detectores Cherenkov que son sensibles a los fotones, además de las partículas cargadas.

En la Tabla 2 se muestran los valores numéricos resultantes de la simulación.

En la Fig. 18 se muestra el número de partículas secundarias en función de la energía del gamma primario vertical ( $E_p$ ) que arriban a la estación de Chacaltaya, ponderadas al espectro de energía de los GRBs:<sup>4</sup>

$$\langle N(E_p) \rangle = \frac{\langle n(E_p) \rangle E_p^{-\alpha}}{1.000 \text{ GeV} \int_{1 \text{ GeV}} E_p^{-\alpha} dE_p} \quad (2)$$

En la Fig. 19, se muestra el resultado de la simulación. El número de fotones constituye la mayoría de las partículas que arriban y la gran mayoría de ellos corresponden a secundarios producidos por un primario vertical de  $1 \text{ GeV}$ .

#### 4.7. Energía media en función de la energía del gamma primario

En la Fig. 20 se muestran los resultados de la simulación<sup>4</sup> de la energía media de las partículas secundarias en función de la energía de un gamma primario vertical.

En la Tabla 4, se muestran los valores numéricos resultantes de la simulación.

Como vimos, casi la totalidad de las partículas secundarias son fotones provenientes de los gammas primarios de menor energía,  $1 \text{ GeV}$ , de manera que el nivel de discriminación de los detectores debe corresponder a  $2,52 \text{ MeV}$ . En el WCD1 y WCD2 corresponde al canal 3 y en el WCD3, al canal 4.

El sistema de detección tiene cuatro niveles de discriminación fijos 3, 7, 50 y  $-3$ . En la Fig. 21 se muestran los registros por minuto de un día en estos cuatro niveles de discriminación.

#### 4.8. Fluencia mínima de los GRBs detectables por la estación de Chacaltaya

Si esperamos una señal de cuatro desviaciones estándar sobre el conteo de fondo en el registro con nivel de discriminación 3,

<sup>4</sup> Simulación en AIREs, Alexandra de Castro (LAGO Venezuela) y Javier Quispe (LAGO Bolivia).

entonces tenemos que el número de partículas secundarias provenientes de un gamma primario vertical será:  $\langle n \rangle = 4\sigma$ , luego:

$$4\sqrt{N} = K \Delta t \int_{1 \text{ GeV}}^{1 \text{ TeV}} A_{ef} \langle N(E, 0) \rangle dE, \quad (3)$$

donde  $N$  es el conteo de fondo ( $\sim 12.000 \text{ c/s}$  para tanques grandes y  $6000 \text{ c/s}$  para el chico),  $\Delta t \sim 10 \text{ s}$  es la duración típica de un GRB,  $A_{ef}$  es el área efectiva del detector que es un cilindro,  $\langle N(E, 0) \rangle$  es la frecuencia media de partículas secundarias en función de la energía de un GRB vertical.

En la Fig. 22 se muestran las distribuciones angulares de las partículas secundarias en Chacaltaya,<sup>5</sup> que se ajustan muy bien a una distribución de Weibull:

$$W(\theta) = 0,0647 \left( \frac{\theta}{33,76} \right)^{1,15} \exp \left[ - \left( \frac{\theta}{33,76} \right)^{2,15} \right], \quad (4)$$

de donde podemos calcular el área efectiva de un cilindro (ver Fig. 23):

$$A_{ef} = \int_0^{90} (\pi r^2 \cos \theta + 2\pi r H \sin \theta) W(\theta) d\theta. \quad (5)$$

Entonces, de la ecuación (3), podemos obtener la constante de proporcionalidad  $K$  y luego calcular la fluencia mínima para los detectores:

$$F = K \Delta t \frac{\int_{1 \text{ GeV}}^{1 \text{ TeV}} E^{-\alpha+1} dE}{\int_{1 \text{ GeV}}^{1 \text{ TeV}} E^{-\alpha} dE}. \quad (6)$$

Los resultados son mostrados en la Tabla 5.

## 5. CONCLUSIONES

LAGO Bolivia podría detectar en tierra GRBs verticales con energías mayores a  $1 \text{ GeV}$  si su fluencia fuera superior a  $\sim 0,8 \times 10^{-4} \text{ erg/cm}^2$ .

Comparando con el resultado del experimento INCA (Vernetto 2000) (Fig. 24) que con el mismo propósito funcionó en Chacaltaya de 1995 al 2000 y que consistía de  $48 \text{ m}^2$  de detectores plásticos de centelleo, los  $\sim 10 \text{ m}^2$  de LAGO-Bolivia son equivalentes.

Para disminuir la fluencia de los GRBs verticales en un orden, necesitaríamos aproximadamente 100 detectores. En la Fig. 25 mostramos algunos GRBs reportados por los satélites que llegaron dentro del ángulo de visión de Chacaltaya. Ninguno produjo señal.

<sup>5</sup> Simulación en Corsika, Hugo Rivera B., LAGO Bolivia

## REFERENCIAS

- Aglietta, M. 1996, ApJ, 469, 305  
 Bertou, X. 2009, Proceedings of the 13<sup>th</sup> ICRC, The Large Aperture GRB Observatory  
 Blandford, R. D. & Helfand, D. J. 1999, MNRAS, 305, No 3  
 Klebesadel, R. 1973, ApJ, 182, 85  
 Meszaros, P. 2006, Rept. Prog. Phys., 69, 2259  
 Ramirez, E. & Fenimore, E. 1999, Filling Factors: Hubble Relationship for Gamma Ray Bursts, T-04 Fifth Huntsville GRB Symposium, Huntsville, Alabama, USA, 18-22 octubre  
 Rivera, H. 2007, Implementación de un Prototipo de Detector de Muones de Chubascos Atmosféricos. Tesis de Licenciatura en Física, Carrera de Física, UMSA. La Paz, Bolivia  
 Surdo, A. 2003, 28th ICRC, Tsukuba, Japan  
 Vernetto, S. 1999, A&AS, 138, 599  
 —. 2000, Astropart. Phys., 13, 75