

BÚSQUEDA DE LA COMPONENTE DE ALTA ENERGÍA DE DESTELLOS DE RAYOS GAMMA (GRB) CON EL EXPERIMENTO INCA II

SEARCH OF THE HIGH ENERGY COMPONENT OF GAMMA RAY BURSTS (GRB) WITH THE INCA II EXPERIMENT

WARA CHAMANI[†] & ALFONSO VELARDE[‡]

Instituto de Investigaciones Físicas, Carrera de Física
Universidad Mayor de San Andrés
c. 27 Cota-Cota, Campus Universitario, Casilla de Correos 8639
La Paz – Bolivia

(Recibido 4 de julio de 2011; aceptado 8 de agosto de 2011)

RESUMEN

INCA II es un experimento que emplea los detectores del arreglo BASJE (Bolivian Air Shower Joint Experiment) situado en el monte Chacaltaya, Bolivia. INCA II opera desde septiembre de 2009 y emplea la técnica de las partículas individuales para la búsqueda y estudio de destellos de rayos gamma (GRB) en el rango de energías de 1GeV a un 1TeV . En este trabajo se muestran los resultados de simulaciones para la determinación de la sensibilidad del experimento a la detección de los GRB, así como el análisis de datos para el estudio de estabilidad de los detectores; además se realiza la búsqueda de alguna significancia estadística en los registros debido a algún evento registrado por los satélites. Finalmente se calcula el límite superior de la fluencia de la energía de GRB para que éstos puedan ser detectados.

Descriptor: destellos de rayos gamma — rayos cósmicos — observatorios y pruebas de campo

Código(s) PACS: 95.85.Pw, 96.50.S-, 95.45.+i

ABSTRACT

INCA II is an experiment that uses the detectors of the BASJE project (Bolivian Air Shower Joint Experiment) located at Mount Chacaltaya, Bolivia. INCA II has been running since September 2009 and employs the single-particle technique for the search and study of gamma ray bursts (GRB) in the energy interval $1\text{GeV} - 1\text{TeV}$. In this work we show the results of the simulations for determining the sensitivity of this experiment to detect GRB, as well as the data analysis of the detectors stability. We also look for some statistical significance of data registered by the satellites due to some event or other activity. Finally, we calculate the energy fluence upper limit of GRB so that they can be detected.

Subject headings: gamma ray bursts — cosmic rays — observatories and site testing

1. INTRODUCCIÓN

Los estallidos de rayos gamma o gamma-ray bursts (GRB), son los eventos más energéticos y brillantes en el universo. Los GRBs son principalmente observados por satélites, y su componente más energética ($> 1\text{GeV}$) puede ser detectada en altas montañas. El experimento INCA II fue instalado en septiembre de 2009, que emplea los detectores de centello del arreglo de chubascos atmosféricos de BASJE en el monte de Chacaltaya, para observar la componente de alta energía de los GRBs en coincidencia con satélites y otros experimentos detectando partículas con energías mayores a 1GeV , usando la técnica de las partículas individuales (Vernetto 2000).

[†]Email: nosferatum.777@yahoo.es

[‡]Email: avelarde@fiumsa.edu.bo

2. ARREGLO EXPERIMENTAL

El antecedente a este experimento fue INCA que funcionó en el periodo: diciembre de 1996 hasta marzo de 2001. Fue una colaboración entre el IIF-UMSA, la Universidad de Torino y el Instituto Tecnológico del Japón. El arreglo experimental consistió de 12 centelladores de $2 \times 2\text{m}^2$ del proyecto BASJE distribuidos sobre un área de $20 \times 20\text{m}^2$. Durante ese periodo se estudiaron posibles eventos en correlación con los 135 eventos detectados por el satélite BATSE, ningún evento significativo fue encontrado (Cabrera & et al. 1999). Desde septiembre de 2009 se ha renovado el arreglo de BASJE, con un área de detección de $600 \times 700\text{m}^2$, INCA II utiliza las señales de este nuevo arreglo, que consiste de 12 detectores de $2 \times 2\text{m}^2$ y 37 detectores de $1 \times 1\text{m}^2$ (figura 1).

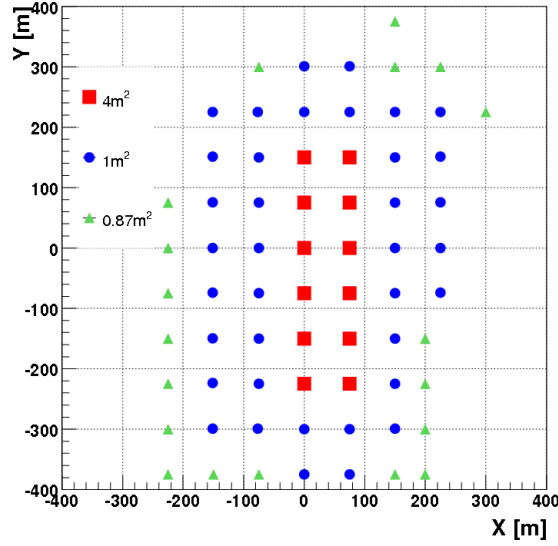


FIG. 1.— Nuevo arreglo experimental de BASJE. INCA II emplea los detectores de 4 m^2 y de 1 m^2 .

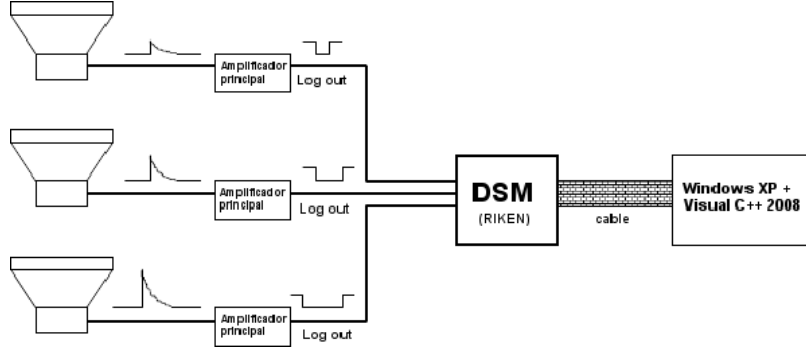


FIG. 2.— Arreglo experimental de INCA II, sistema de adquisición de datos.

3. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS

Para el registro del conteo de partículas fue diseñado un detector - monitor multicanal llamado BASJE - INCA Detector Spectrum Monitor (DSM) (Tsunesada & Tajima 2009). Este dispositivo tiene 64 canales de entrada y mide los conteos de las señales con 8 discriminadores (bins) cada 10 segundos para los 49 detectores.

La señal proveniente de un detector es preamplificada de modo que genera pulsos de la forma exponencial $V_N(t) = NV_1 \exp(-t/\tau)$, donde N es el número de partículas y V_1 es el voltaje de salida en el caso de una partícula, τ el tiempo de decaimiento. Luego la señal es amplificada generando señales rectangulares “Log out” de manera que el contador DSM fue diseñado para este tipo de señales. El número de partículas en el detector o densidad local es medido a partir del ancho de pulso. El ancho del pulso de la salida de un discriminador es logarítmicamente proporcional al altura del pulso de la señal exponencial y así al número de partículas.

El tiempo de decaimiento (τ) del pulso exponencial de un amplificador es de alrededor $1.2\mu\text{s}$ y cada detector es calibrado de modo que el “Log out” tenga un ancho $T_o = 0.8\mu\text{s}$.

Por cada detector se tienen 8 contadores de

diferentes ancho de pulso, con valores menores a $0.5, 1.0, 2.2, 3.3, 4.5, 5.6, 6.8$ y $7.9\mu\text{s}$. Los registros son llevados a cabo cada 10segundos , el conteo a partícula individual de un detector de 4m^2 es de $20000/10\text{s}$ y $5000/10\text{s}$ para uno de 1m^2 .

Para el registro de datos del DSM se emplea una computadora con *Windows XP* y un software diseñado en *Visual C++ 2009 Express Edition*. Los datos del DSM están escritos en formato binario. Un dato (cada 10segundos) incluye el tiempo en *Día Juliano Modificado*, temperatura, presión y los conteos de los 49 detectores con sus respectivos 8bins .

4. SENSIBILIDAD DE INCA II

Los GRBs pueden ser observados con un arreglo de detectores (en nuestro caso de centelleo) a grandes altitudes, detectando las partículas secundarias de chubascos puramente electromagnéticos desarrollados en la atmósfera. A fin de evaluar la sensibilidad de INCA II a la detección de GRBs en el rango de energías $1\text{GeV} - 1\text{TeV}$, se realizó una simulación Monte Carlo, empleando el paquete CORSIKA (CORSIKA 2010). Para este propósito se ha escogido una combinación entre el modelo de interacciones hadrónicas a bajas energías como GHEISHA y un modelo de interacciones hadrónicas a altas e-

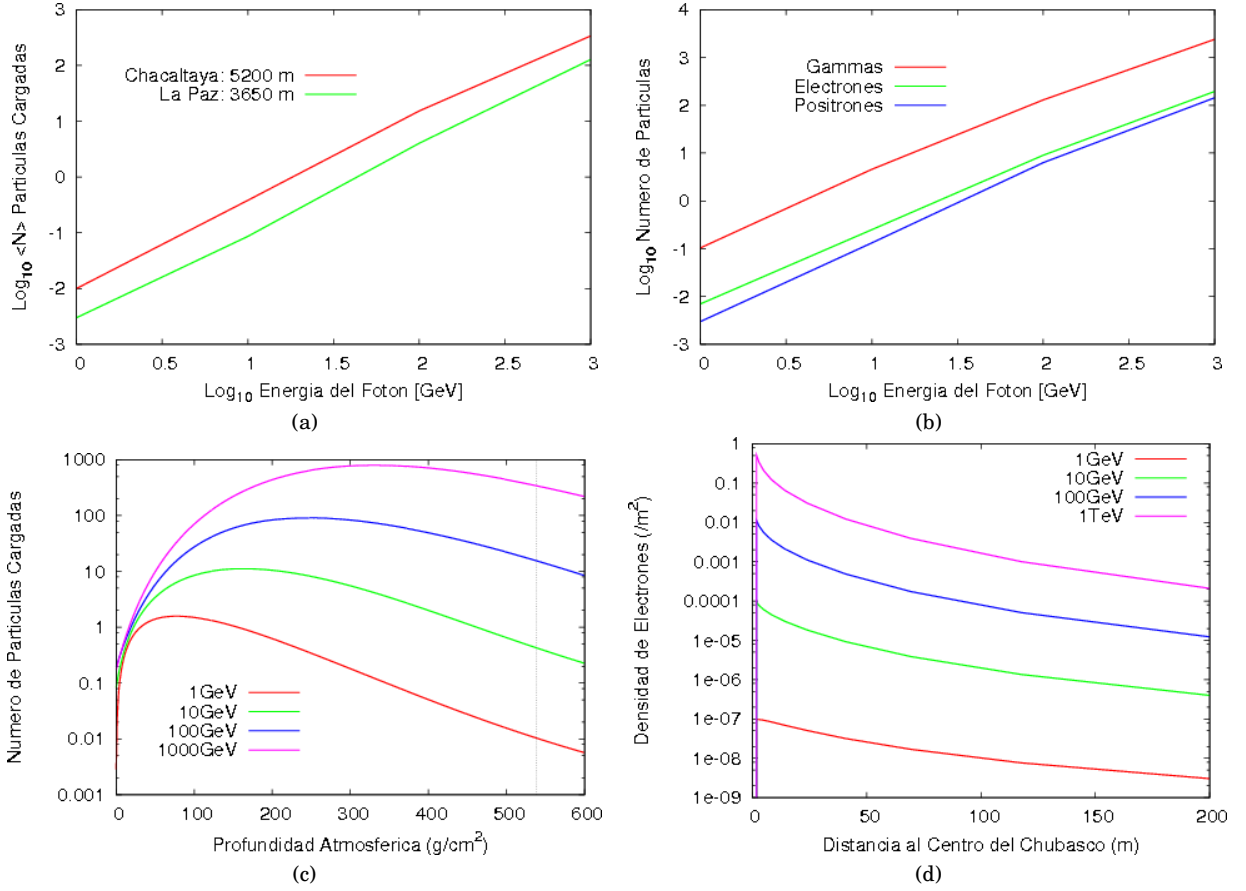


FIG. 3.— (a) Número medio de partículas cargadas alcanzando los niveles de 5200m y 3500m, generados por un fotón primario con incidencia vertical en la atmósfera, en función de la energía del fotón. (b) Partículas secundarias generadas al nivel de Chacaltaya. (c) Desarrollo longitudinal de partículas cargadas descrita por la función de Gaisser-Hillas. (d) Distribución lateral de electrones dado por la función NGK.

nergías como QGSJETII, debido a que el primero trata con energías menores de 80GeV y el segundo con energías mayores a 10^{11}eV ; también las opciones EGS4 y NGK fueron incluidas para la simulación de chubascos puramente electromagnéticos.

4.1. Distribuciones de Partículas

Las simulaciones fueron ejecutadas, inicialmente, para fotones primarios con incidencia vertical (ángulo cenital $\theta = 0^\circ$), con índice espectral $\alpha = 2$ que toma en cuenta la absorción en el espacio intergaláctico a través de la producción de pares (Vernetto 2000). Con el objeto de comparar la sensibilidad a grandes altitudes, en la figura 3a se muestran las distribuciones de partículas cargadas en función de la energía del fotón primario a 5200m.s.n.m. y 3500m.s.n.m. ; en la figura 3b también se muestran las distribuciones de partículas secundarias producidas al nivel de Chacaltaya.

En la figura 3c se muestra la distribución longitudinal del número medio de partículas cargadas para las energías de 1GeV , 10GeV , 100GeV y 1TeV , descritas por la función de Gaisser-Hillas, que tiene la forma:

$$N(t) = N_{max} \left(\frac{t - X_o}{X_{max} - X_o} \right)^{\frac{X_{max} - X_o}{\sigma}} \exp\left(-\frac{X_{max} - t}{\sigma}\right) \quad (1)$$

Donde $N(t)$ es el número de partículas como función de la profundidad atmosférica t , X_o la profundidad en la primera interacción y σ el camino libre medio de interacción. Por otro lado en la figura 3d se muestra la distribución lateral de Nishimura-Kamata-Greisen (NKG) para electrones.

4.2. Evaluación de la Sensibilidad

La evaluación de la sensibilidad a la detección de GRBs depende de diferentes parámetros del GRB. Considerando la ecuación diferencial del espectro de energías de los GRBs (Castellina & et al. 1997), dado por:

$$\frac{dN}{dE} = kE^{-\alpha} \left[\frac{\text{fotones}}{\text{cm}^2 \text{s GeV}} \right], \quad (2)$$

extendiéndose desde 1GeV hasta una energía de corte E_{max} con un tiempo de duración Δt . Entonces el número de eventos del GRB es dado de la siguiente forma:

$$N_s = k\Delta t \int_{1\text{GeV}}^{E_{max}} A_{eff}(E) E^{-\alpha} dE \quad (3)$$

Donde A_{eff} es el área efectiva del detector.

4.2.1. Area Efectiva

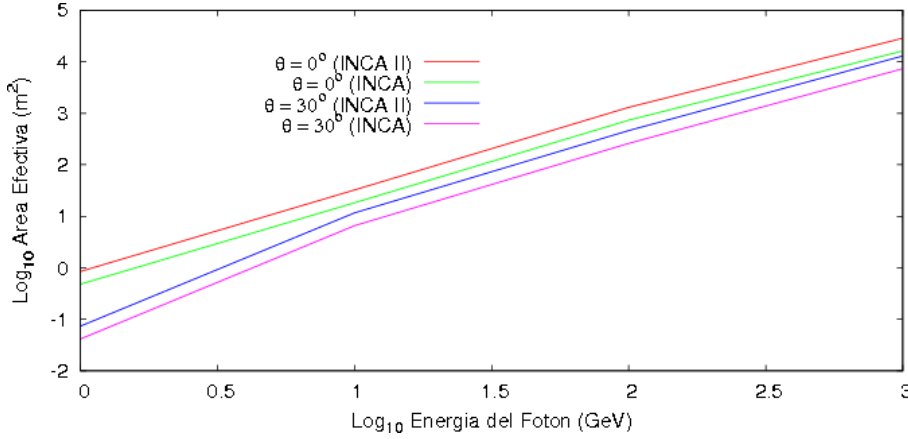


FIG. 4.— Area efectiva de INCA II comparada a INCA, como función de la energía del fotón para dos ángulos cenitales θ .

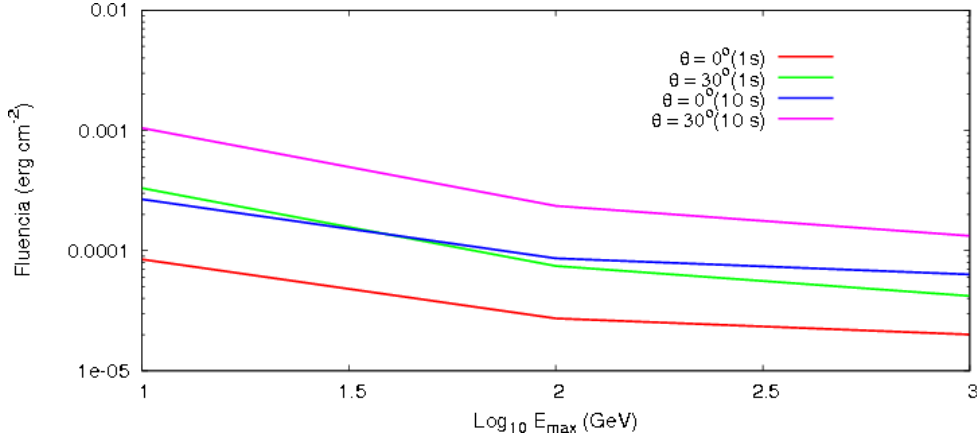


FIG. 5.— Mínima fluencia de energía que INCA II puede observar en el rango $1\text{GeV} < E < E_{max}$, en función de la máxima energía del espectro E_{max} para un GRB de una duración $\Delta t = 1\text{s}$ y 10s , para dos ángulos cenitales.

De acuerdo al análisis estadístico dado por Castellina & et al. (1997) en área efectiva del detector A_{eff} , esta dada por:

$$A_{eff}(E, \theta) \approx A_d \cdot \bar{N}_e(E, \theta) \cdot \cos\theta, \quad (4)$$

donde A_d es el área total de detección, (\bar{N}_e) el número medio de partículas cargadas por un fotón primario de energía E alcanzando el nivel de observación y θ el ángulo de incidencia. Puesto que INCA II trabaja con la técnica de las partículas individuales con 49 centelladores, 12 de 4m^2 y 37 de 1m^2 , podemos calcular el área efectiva total como:

$$A_{eff} = 85 \cdot \bar{N}_e(E, \theta) \cdot \cos\theta \quad (5)$$

La figura 4 muestra el área efectiva de INCA II comparada a INCA para GRBs con incidencia vertical y un ángulo cenital de 30° . El área efectiva de INCA II es 1.8 veces más sensible que INCA.

5. SEÑAL DEL GRB

Con la técnica de las partículas individuales, una señal proveniente de un GRB, es detectable con una significancia estadística de $n = 4$ desviaciones estándar. El número de partículas N_s tiene que ser significativamente mayor al fondo de fluctuaciones estadísticas $\sigma_b = \sqrt{A_d B \Delta t}$, donde B es el fondo de

cuentas y Δt el tiempo de duración del GRB, así $N_s/\sigma_b > n$. Para los siguientes cálculos es necesario mencionar que el conteo de fondo de partículas a 5200m.s.n.m. es $B = 500$ cuentas $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$, y para determinar el valor mínimo del coeficiente k del espectro de energía de los GRBs, se establece $n = 4$ y hallamos la siguiente relación:

$$k\Delta t \int_{1\text{GeV}}^{E_{max}} A_d \bar{N}_e(E, \theta) \cos\theta E^{-\alpha} dE = 4\sqrt{A_d B \Delta t} \quad (6)$$

5.1. Fluencia de Energía

Para la evaluación de la mínima fluencia de energía que INCA II puede observar, asumimos que el flujo de rayos gamma en la atmósfera es descrito como en (2) en el rango de energía de $1\text{GeV} \div E_{max}$,

$$F = k\Delta t \int_{1\text{GeV}}^{E_{max}} E^{-\alpha+1} dE \quad (7)$$

La figura 5 muestra la mínima fluencia de energía para un GRB detectable, con una duración de $\Delta t = 1\text{s}$ o 10s como función de E_{max} , para dos ángulos cenitales. Con el nuevo arreglo de INCA II la mínima fluencia $F(E > 1\text{GeV})$ es del orden de $10^{-5}\text{erg} \cdot \text{cm}^{-2}$.

6. ANÁLISIS DE DATOS

6.1. Estabilidad de los Detectores

Debido a la naturaleza probabilística del registro de partículas provenientes de un chubasco atmosférico extenso, en un futuro análisis de eventos de GRBs es necesario determinar si los detectores muestran estabilidad.

En las figuras 6 y 7 se muestran las distribuciones de cuentas (de un día) de los detectores *L00*, *S00* y *G00* con sus *8bins* o discriminadores. El ajuste realizado muestra que todos exhiben una distribución muy cercana a una función normal. El análisis se realizó para los 49 y todos se ajustan a tal función, con una bondad de ajuste: $0.90 < r^2 < 0.98$.

6.2. Registros de Cuentas

En la figura 8 se muestran los registros durante 10 días sin la corrección por la presión, de los detectores *S*, *G* y *L*, en el bin 0. A fin de no saturar los gráficos con muchos datos (debido a los 49 detectores), se muestran solo algunos registros de los mismos.

6.3. Búsqueda de un GRB

En principio, el análisis de datos consiste en la búsqueda de excesos significativos sobre el fondo de registros de los detectores en coincidencia con aquellos que son registrados por los satélites (GRBOX 2010).

Debido a fallas técnicas, como cortes inesperados de energía, rayos o ruido, lamentablemente para muchos eventos registrados por los satélites que se encuentran justamente dentro del ángulo de visión de Chacaltaya, no se tienen los registros en aquellos días, pero al menos existen 2 registros completos, para analizar posibles eventos significativos debido a GRBs.

En particular se ha analizado el registro disponible para el evento de *GRB101017A*, que tuvo una duración de 70 segundos, su inicio a 10:32:47 y con una posición de 291.377 (Ascensión Recta) y -35.141 (Declinación).

Para establecer alguna correlación con este evento, se realizaron sobre los registros, básicamente el siguiente análisis:

- La corrección por la presión de los 49 registros.
- Los contajes fueron normalizados al segundo y al metro cuadrado.
- Se eliminaron los intervalos donde el contaje sufre una caída o es interrumpida en algún punto.
- Los contajes de cada detector fueron sumados, para obtener la distribución total de cuentas versus el tiempo, donde se busca la señal del GRB.
- Empíricamente se buscó si hubo alguna señal en coincidencia (en el tiempo) con el evento.

- Se realizó un análisis de distribuciones de fluctuaciones estadísticas alrededor de 20 minutos entorno al intervalo de tiempo del GRB, del número de cuentas versus la desviación estándar, para los *8bins* de cada detector en la distribución total de contaje.

Las figuras 9 y 10 muestran las distribuciones mencionadas anteriormente, las curvas se ajustan a distribuciones de Gauss, con *r.m.s.* en el intervalo de 1.01 y 1.20. Se concluye que no se detectó ningún evento significativo en ninguno de los 8 discriminadores (en los gráficos se muestran solamente los primeros 4), porque no se ha encontrado alguna fluctuación mayor a 4 sigmas (desviación estándar), que permitiría confirmar una correlación con el evento detectado por el satélite.

6.4. Límites en la Fluencia de Energía

Finalmente se realizó un análisis para determinar los límites en la fluencia de energía del experimento durante el año 2010, es decir se seleccionaron los 13 eventos de GRBs (GRBOX 2010), aquellos que tienen ángulos zenitales menores a 60 grados. Las fluencias han sido calculadas como se describe en la sección 5, con 4 desviaciones estándar, suponiendo que el espectro del GRBs se extiende desde la región de 1GeV hasta 1TeV con un índice espectral de $\alpha = 2$. En la figura 11a se muestran los límites que, se extiende desde $10^{-5}\text{erg}\cdot\text{cm}^{-2}$ hasta $10^{-1}\text{erg}\cdot\text{cm}^{-2}$, dependiendo del ángulo zenital y el tiempo de duración del evento. Se observa que la tendencia es similar a aquella que fue reportada por INCA (Castellina & et al. 2001) (figura 11b).

7. CONCLUSIONES

A partir de las simulaciones con el paquete CORSIKA se han obtenido la distribución de partículas secundarias que se producen al nivel de observación generadas por el chubasco electromagnético del rayo gamma primario, a partir de ello se ha determinado la sensibilidad del experimento a los GRBs, calculando básicamente el límite en la fluencia de energía y el área efectiva del experimento para el rango de energía que se pretende estudiar de 1GeV hasta 1TeV . Se ha visto que INCA II es 1.8 veces más sensible que el pasado experimento INCA.

La distribución de contaje de todos los detectores con sus *8bins* respectivos se ajustan a la curva de gaus, que en promedio muestra una buena estabilidad de los detectores en el tiempo, excepto cuando existen cortes inesperados, ruido o rayos. Se ha estudiado solo un evento de GRB, debido a que se contaba con muy pocos registros para analizar en correlación con lo registrado por los satélites. Con la técnica de la búsqueda de anomalías estadísticas, se han buscado sobre los registros alguna señal que supere 4 desviaciones estándar y también alguna fluctuación significativa alrededor de 20 minutos del evento de GRB, y no se ha encontrado ningún exceso significativo (figuras 9 y 10).

Finalmente se ha comparado la distribución de

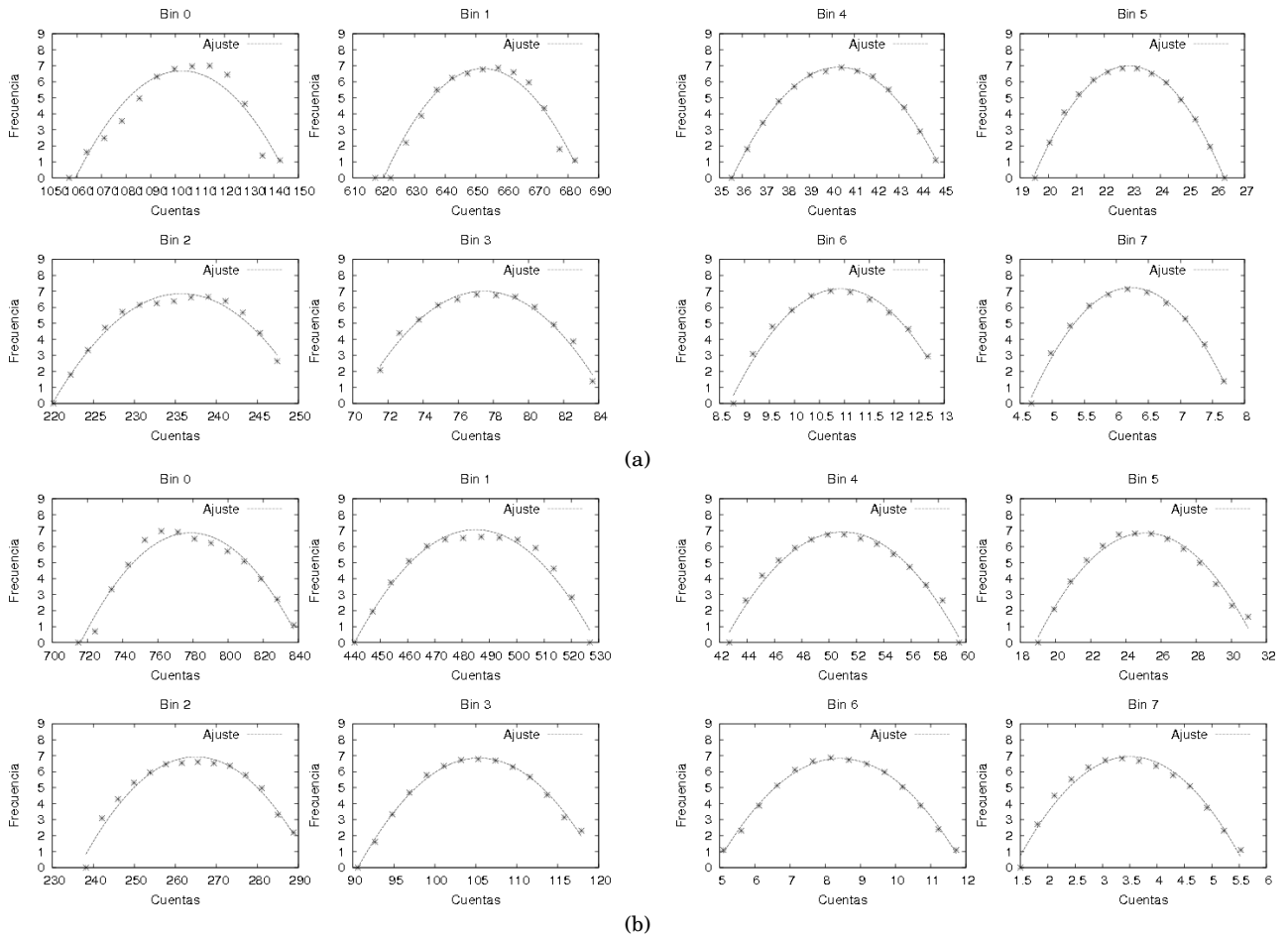


FIG. 6.— Distribuciones de conteaje a lo largo de un día de los detectores (a) $L00$ y (b) $S00$ para los $8bins$. Todos se ajustan a una función normal.

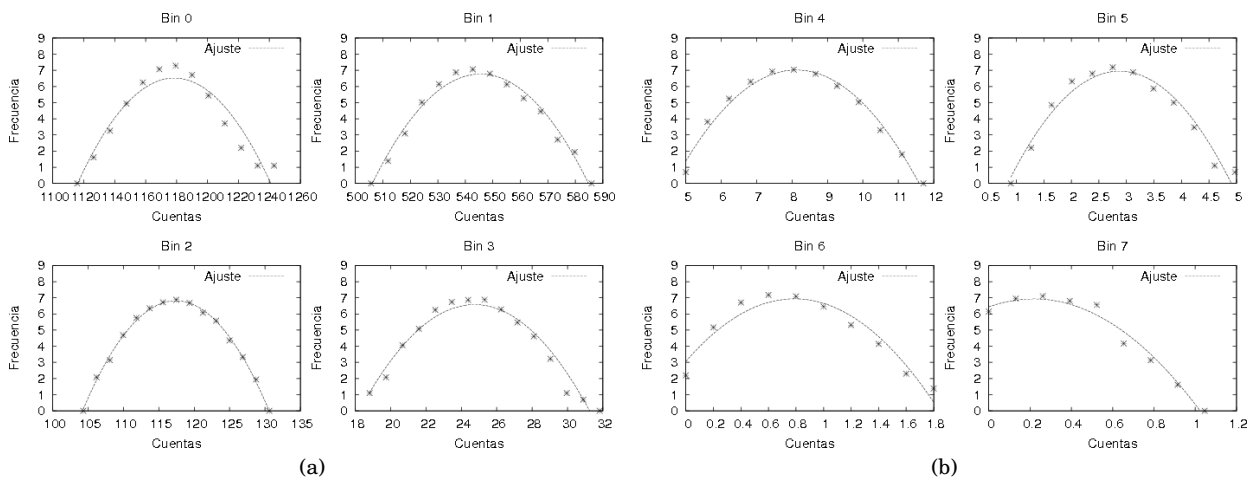


FIG. 7.— Distribuciones de conteaje a lo largo de un día del detector $G00$ para los $8bins$.

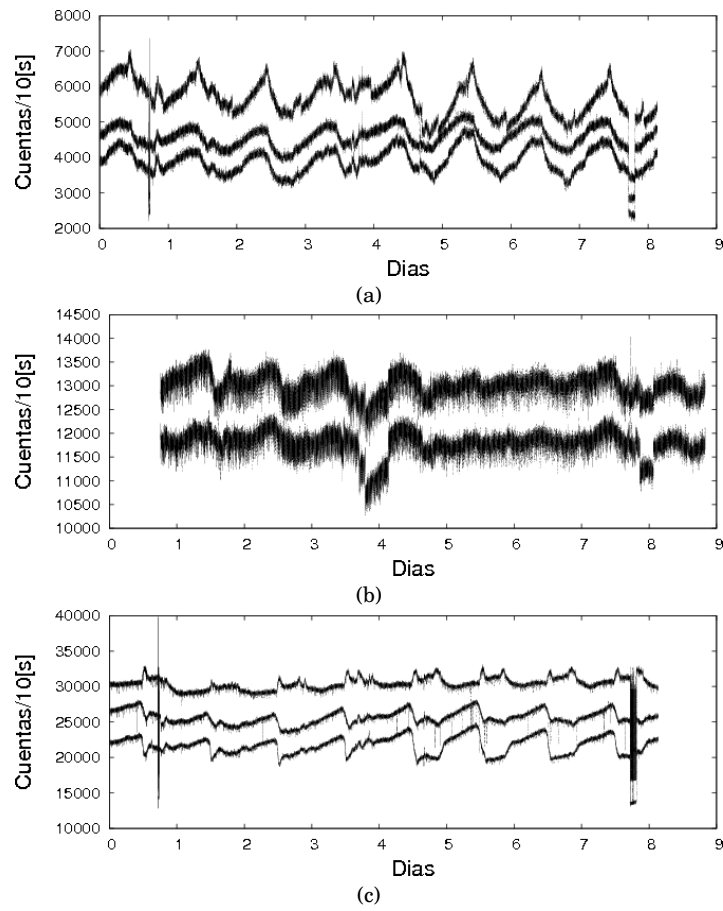


FIG. 8.— Variación temporal durante 10 días de los detectores (a) *S*, (b) *G* y (c) *L*.

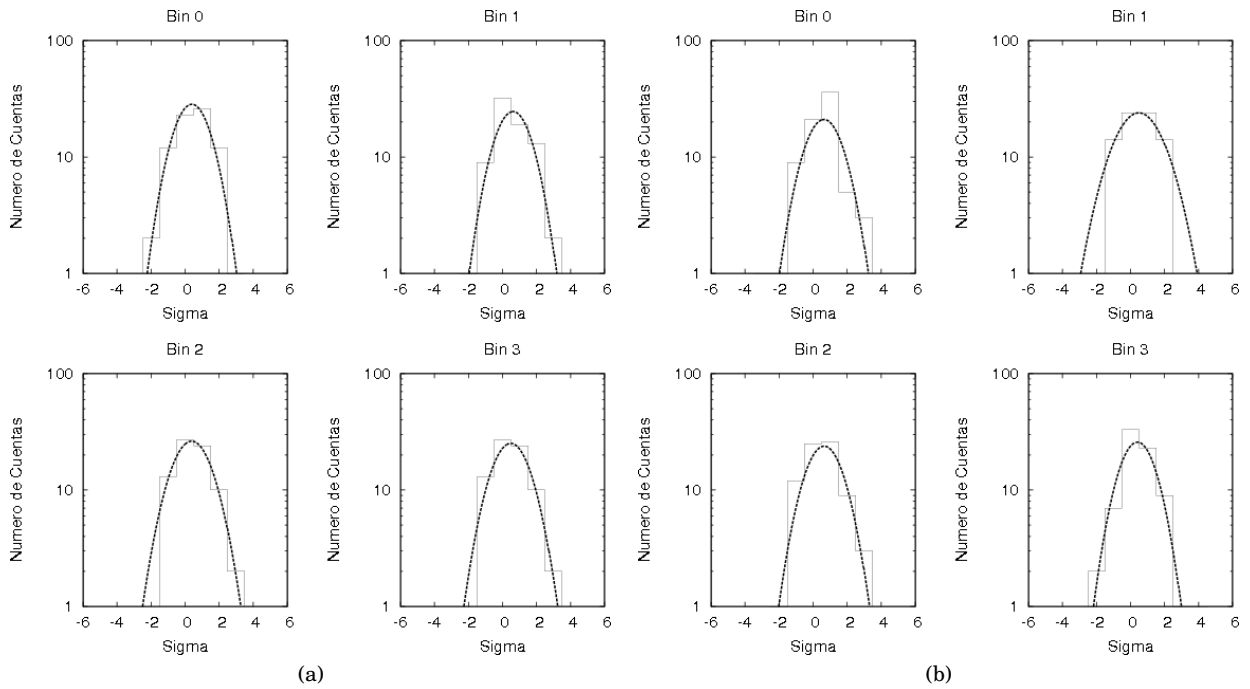


FIG. 9.— Análisis para la búsqueda de alguna fluctuación estadística generada por el GRB mayor a 4 desviaciones estándar (sigma) para los detectores (a) *L*, (b) *G*, para los 4bins.

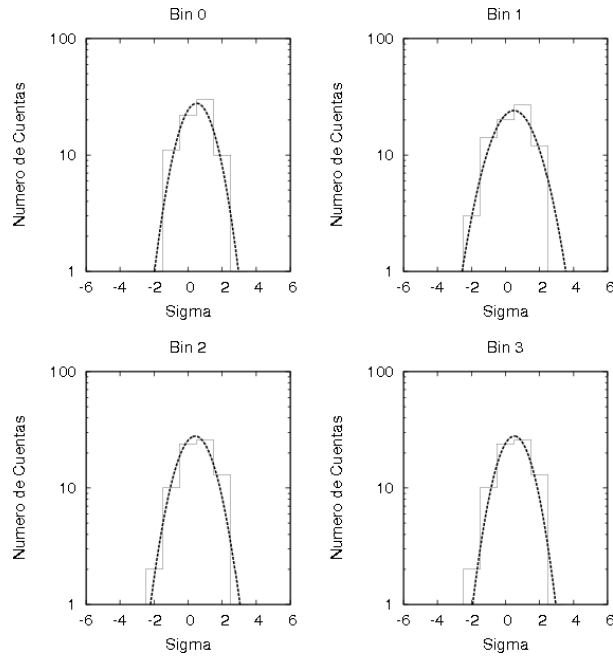


FIG. 10.— Análisis para la búsqueda de alguna fluctuación estadística generada por el GRB mayor a 4 desviaciones estándar (sigma) para el detector *S*, para los 4bins.

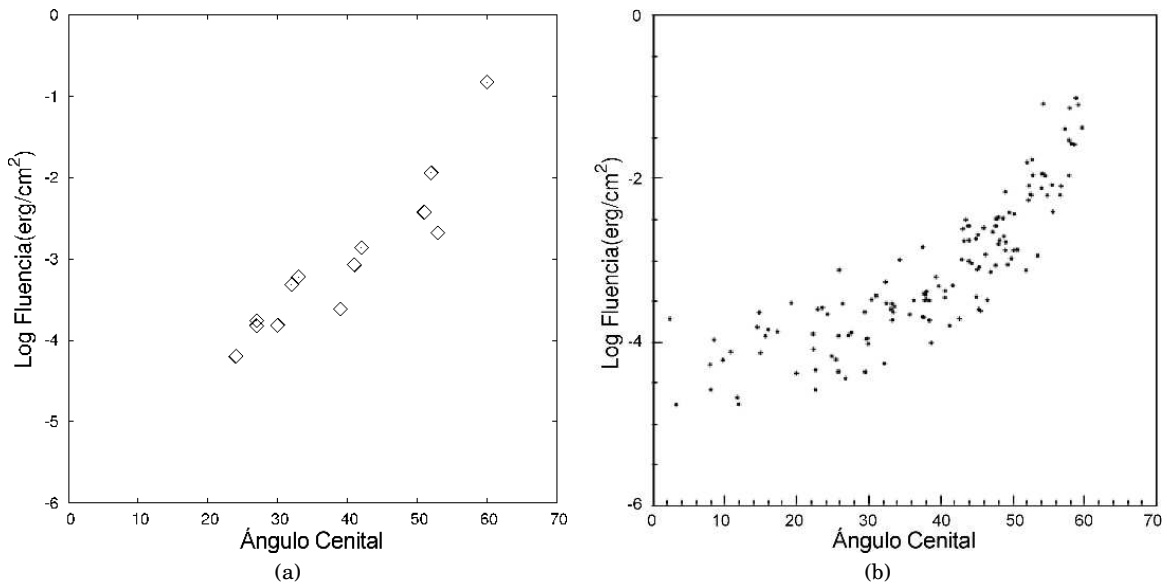


FIG. 11.— Límites de la fluencia de la energía en el rango de energía de $1\text{GeV} - 1\text{TeV}$ para (a) INCA II para 13 GRBs y (b) INCA de 135 GRBs, como función del ángulo zenital del evento.

la fluencia de la energía para 13 GRBs que ocurrieron en el campo de visión de Chacaltaya, con la distribución del pasado experimento INCA, se ha visto que la tendencia es similar y además el límite superior de la fluencia determinado por simulación (figura 5) de $10^{-5}\text{erg}\cdot\text{cm}^{-2}$ es similar a aquel que se calcula con datos experimentales (figura 11a).

AGRADECIMIENTOS

W. Chamani agradece a los profesores Oscar Saavedra, Yoshiki Tsunesada y Johannes Knapp por sus útiles comentarios y sugerencias y a los ingenieros Norio Tajima y Pedro Miranda por su valioso apoyo en el arreglo experimental.

REFERENCIAS

Cabrera, R. & et al. 1999, *Astron. Astrophys. Suppl.*, 138
 Castellina, A. & et al. 1997, *Il Nuovo Cimento*, 20C 2, 137
 —. 2001, ICRC
 CORSIKA. 2010, <http://www-ik.fzk.de/corsika/>
 GRBOX. 2010, <http://lyra.berkeley.edu/grbox/grbox.php>

Tsunesada, Y. & Tajima, N. 2009, *BASJE-INCA Detector Spectrum Monitor (IIF - UMSA)*

Vernetto, S. 2000, *Astroparticle Physics* 13