

EMISIÓN NEUTRÓNICA SOLAR DE LARGA DURACIÓN COMPARADA CON LA RADIACIÓN PRODUCIDA POR ELECTRONES EN LA FULGURACIÓN SOLAR DEL 7 DE SEPTIEMBRE DE 2005

T.Sako,¹ K.Watanabe,¹ Y.Muraki,¹ Y.Matsubara,¹ H.Tsujihara,¹ M.Yamashita,¹ T.Sakai,² S.Shibata,³ J.F.Valdés-Galicia,⁴ L.X.González,⁴ A.Hurtado,⁴ O.Musalem,⁴ P.Miranda,⁵ N.Martinic,⁵ R.Ticona,⁵ A.Velarde,⁵ F.Kakimoto,⁶ S.Ogio,⁷ Y.Tsunesada,⁶ H.Tokuno,⁶ Y.T.Tanaka,⁸ I.Yoshikawa,⁸ T.Terasawa,⁸ Y.Saito,⁹ T.Mukai,⁹ y M.Gros¹⁰

¹ Solar-Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya 464-8601, Japan.

² College of Industrial Technologies, Nihon University, 2-11-1 Shinei, Narashino, Chiba 275-0005, Japan.

³ College of Engineering, Chubu University, Kasugai, Aichi 487-8501, Japan.

⁴ Instituto de Geofísica, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, Coyoacan DF 04510, México.

⁵ Instituto de Investigaciones Físicas, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia.

⁶ Department of Physics, Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo 152-8551, Japan.

⁷ Graduate School of Science, Osaka City University, Osaka 558-8585, Japan.

⁸ Department of Earth and Planetary Science, University of Tokyo, Tokyo 113-0033, Japan.

⁹ ISAS/JAXA, Sagami-hara 229-8510, Japan.

¹⁰ DSM/DAPNIA/SAP, CEA Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette, France.

RESUMEN

El 7 de septiembre de 2005 se detectaron señales intensas de emisiones neutrónicas asociadas con la fulguración solar que ocurrió en esa fecha. Dichas señales fueron producidas por iones y electrones relativistas. En particular, se observaron neutrones relativistas con los telescopios de neutrones solares (SNT) ubicados en el monte Chacaltaya en Bolivia y en el monte Sierra Negra en México, y con monitores de neutrones (NM) en Chacaltaya y Ciudad de México; estas observaciones tuvieron altas significaciones estadísticas. Al mismo tiempo los satélites *Geotail* e *INTEGRAL* detectaron rayos X (RX) duros y rayos gamma ($R\gamma$), emitidos predominantemente por electrones de alta energía. Encontramos que un modelo para la emisión impulsiva de neutrones durante el pico de RX y $R\gamma$ puede explicar los picos principales de todas las señales detectadas de neutrones, pero falla al tratar de explicar la larga cola de la fase de decaimiento. Un modelo alternativo en el que la emisión neutrónica sigue el perfil de emisión de RX y $R\gamma$, falló asimismo para explicar la larga cola. Estos resultados indican que la aceleración de los iones comenzó al mismo tiempo que la de los electrones, pero que los iones fueron continuamente acelerados o atrapados durante un mayor tiempo en el sitio de la emisión. Demostramos asimismo que los datos de los neutrones observados por los canales multienergéticos de los SNT imponen restricciones sobre el espectro neutrónico.

Descriptor: Aceleración de Partículas, Rayos Cósmicos, Mecanismos Radiativos: No Térmicos, Sol: Fulguraciones, Sol: Emisión de Partículas, Sol: Rayos X, Rayos Gamma.

1. INTRODUCCIÓN

El Sol es el único acelerador robusto de iones al que tenemos acceso directo; por lo tanto es un laboratorio importante para estudiar la aceleración de partículas. En algunas ocasiones el Sol acelera iones a energías relativistas (~ 1 GeV). La capacidad para producir imágenes de las radiaciones emitidas por electrones permitió estudios detallados de la aceleración de electrones (ver, e.g., Masuda *et al.* 1994), pero éste no es el caso de la aceleración de iones. Aunque *RHESSI* inauguró una era nueva en la imagenología de las aceleraciones de iones (Hurford *et al.* 2003), aún las observaciones son limitadas. A fin de

trasladar la rica información sobre la aceleración de electrones al dominio de la aceleración de iones, es todavía importante comparar los tiempos de emisión de electrones y de iones, o bien, de las partículas secundarias que de éstos resultan. Para estos estudios se aplican varios métodos, y cada uno de ellos tiene ventajas y desventajas, como se resume más adelante.

A fin de evitar la complejidad debida al campo magnético, se considerará las observaciones de partículas secundarias neutras y/o radiaciones. Las radiaciones debidas a electrones (radio emisión de sincrotrón, bremsstrahlung, RX duros, $R\gamma$) se registran con exce-

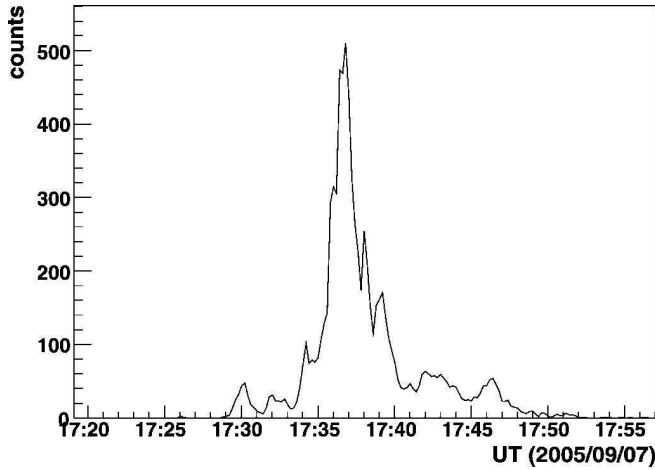


Figura 1. Perfil temporal de RX duros observados por el satélite *Geotail* el 7 de septiembre de 2005.

lente resolución espacial y temporal. Por otra parte, las observaciones de $R\gamma$ nucleares o $R\gamma$ emitidos en el decaimiento del π^0 (π^0 - $R\gamma$), así como neutrones emitidos por interacciones de iones, tienen sus méritos y deméritos. Aprovechando la excelente resolución temporal de las observaciones de rayos gamma nucleares, Forrest & Chupp (1983) concluyeron que en la fulguración del 7 y 21 de junio de 1980 los electrones y los iones fueron acelerados simultáneamente dentro del orden de un segundo. Sin embargo, Watanabe *et al.* (2006) demostraron que en la fulguración del 28 de octubre de 2003 hubo un retraso en estas aceleraciones del orden del minuto. Debido a que las partículas primarias (padres) de los $R\gamma$ nucleares tienen energías menores a 100 MeV, las observaciones de estos rayos no son suficientes para tener acceso a energías relativistas; los π^0 - $R\gamma$ se emiten de iones con energías relativistas. Tal como se encontró en Debrunner *et al.* (1993) y en Kanbach *et al.* (1993), existen observaciones en las que los π^0 - $R\gamma$ se emiten continuamente durante un cierto lapso (20 minutos y 8 horas, respectivamente). No obstante, Debrunner *et al.* (1993) señalaron que en el evento del 24 de mayo de 1990, es difícil discriminar entre los π^0 - $R\gamma$ emitidos por bremsstrahlung y los $R\gamma$ emitidos por neutrones.

Suponiendo que la cola continua está formada por π^0 - $R\gamma$ y que los neutrones de alta energía (1100 MeV) se emitieron simultáneamente, Debrunner *et al.* (1993) explicaron el perfil observado de la señal en el nivel base del NM. Aquí, los neutrones solares se emiten a través de la interacción entre los iones acelerados y la atmósfera solar. Estos neutrones pueden tener energías comparables a las de los iones generadores. Las observaciones en el nivel base de iones y neutrones son sensibles sólo a energías por encima de los 100 MeV y libres de la contaminación de radiación de electrones. En contraste a la conclusión de Debrunner *et al.* (1993), Muraki & Shibata (1996) concluyeron que los neutrones fueron emitidos dentro del lapso de un minuto para el mismo evento. Ellos desarrollaron un código Monte Carlo so-

fisticado (Shibata 1994) para simular el transporte de neutrones en la atmósfera terrestre y encontraron que la señal retrasada puede explicarse por neutrones de baja energía (~ 100 MeV). Picos agudos encontrados en los RX y $R\gamma$ apoyan el escenario sencillo en el que tanto los iones como los electrones habrían sido acelerados en el rango del minuto.

En este artículo presentamos los resultados de un evento reciente de neutrones solares en el nivel base observados con una alta estadística. Comparamos perfiles temporales de RX duros y neutrones el 7 de septiembre de 2005 y concluimos que los neutrones fueron emitidos durante un periodo más largo que los RX. Aunque las condiciones de las observaciones fueron similares a las del caso del 24 de mayo de 1990, la relación entre la producción de neutrones y RX fue muy diferente en los dos eventos. Además de las observaciones con alta estadística, detectamos eventos con dos tipos diferentes de detectores (dos SNT y dos NM) ubicados en tres estaciones diferentes. Esto nos permitió estudiar el espectro de neutrones y el perfil temporal en mayor detalle. En este artículo nos proponemos presentar un reporte sobre el análisis de tal evento. Después de la descripción de las observaciones, trataremos de explicar los perfiles observados de los neutrones a través de dos modelos: emisión impulsiva, o bien, el perfil muestra de los RX y $R\gamma$.

2. OBSERVACIONES

Una fulguración solar intensa ocurrió el 7 de septiembre de 2005. La emisión blanda de los RX observados por el satélite *GOES* comenzó a incrementarse a las 17:17 UT, alcanzó su máximo a las 17:40 UT y decayó a la mitad de su valor máximo a las 18:03 UT. El pico del flujo de RX fue clasificado como X17.0. Esta fulguración ocurrió en AR 10808, que estuvo localizada en las coordenadas S06°, E89°, en el instante del comienzo de la fulguración. Así, la fulguración se clasifica como una “fulguración troncal (*limb*) Este”. Tal como se espera para tales eventos, el satélite *GOES* no detectó ningún incremento de partículas cargadas (<0.1 partículas $s^{-1} cm^{-2} sr^{-1}$ encima de los 100 MeV). (Un evento de protones solares ocurrió entre 3 y 4 horas después del comienzo de la fulguración.) Los datos tomados en Mauna Loa muestran una eyección masiva desde la corona que se asocia a esta fulguración.¹ Obtuvimos datos de *Geotail* de RX duros que indican una emisión de RX de >50 keV (Terasawa *et al.* 2005) cuyo pico ocurrió a las 17:36:40 UT, tal como se muestra en la Fig.1. El detector *INTEGRAL* SPI también registró RX y $R\gamma$ de 1150 keV cubriendo el rango de energías de las emisiones nucleares, cuyo perfil fue casi idéntico al registrado por *Geotail*. Ya que no hubo una evidencia clara de líneas nucleares, se considera que la radiación de alta energía indica la trayectoria de los electrones de alta energía. La energía de la radiación puede alcanzar la del electrón generador.

¹Los datos de Mauna Loa en Septiembre de 2005 pueden ser obtenidos de http://mlso.hao.ucar.edu/cgi-bin/mlso_datasum.cgi?2005&9&7&ACOS, cortesía de *the High Altitude Observatory, National Center for Atmospheric Research*.

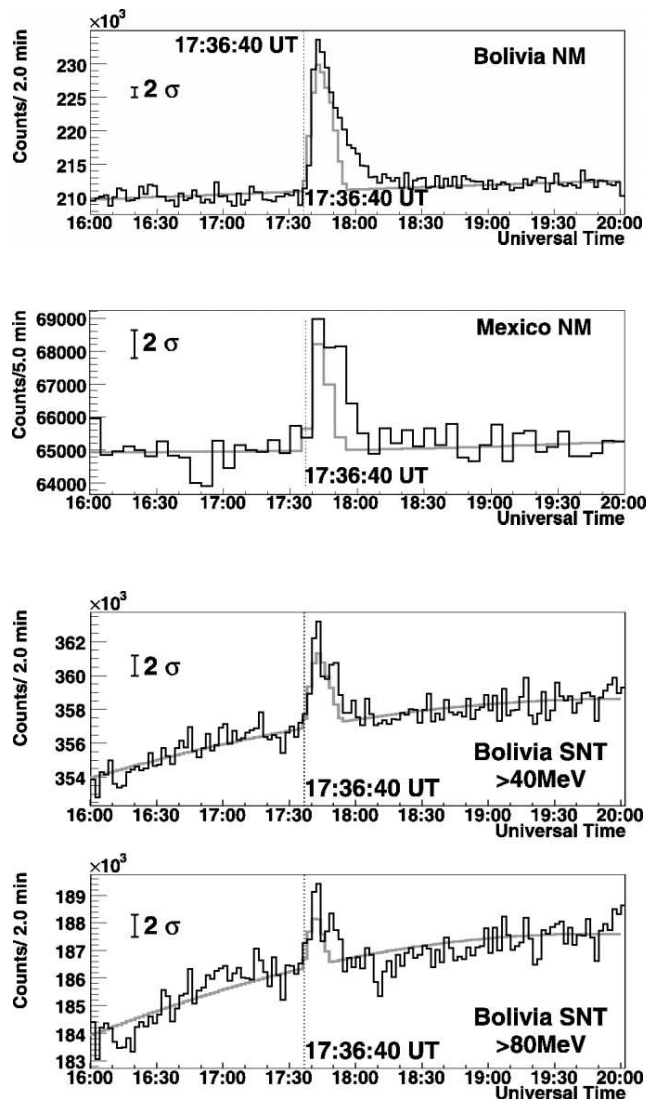


Figura 2. De arriba hacia abajo, tasa de conteo de 2 minutos del NM de Bolivia (primer panel), tasa de conteo de 5 minutos del NM de Ciudad de México (segundo panel), tasas de conteo de 2 minutos en diferentes canales del SNT de Bolivia (>40 MeV, tercer panel; >80 MeV, abajo). La fluctuación de fondo de 2σ se indica en la esquina superior izquierda de cada panel. El tiempo pico de los RX duros detectados por *Geotail* es 17:36:40 UT. Las curvas grises indican los conteos esperados suponiendo un flujo de neutrones derivado de los datos del NM de Bolivia. El fondo se estimó a través de un ajuste polinomial de 3er orden excluyendo el lapso 17:30–18:30 UT.

En el instante en que GOES detectó el pico de RX de la fulguración (17:40 UT), México y Bolivia eran los lugares adecuados para observar neutrones solares en la red de SNT (Tsuchiya *et al.*, 2001; Valdés-Galicia *et al.*, 2004). En Sierra Negra, México (E262. 7°, N19.0°; 4580 m sobre el nivel del mar [snm]), donde un SNT está instalado, el ángulo cenital solar fue 17. 5°, y la masa de aire en la línea de vision al Sol era de 603 g cm⁻². En la ciudad de México (E260.8°, N19.3°; 2274 m snm), donde se localiza un NM, el ángulo cenital y la masa de aire fueron 18.9° y 825 g cm⁻², respectivamente. En el

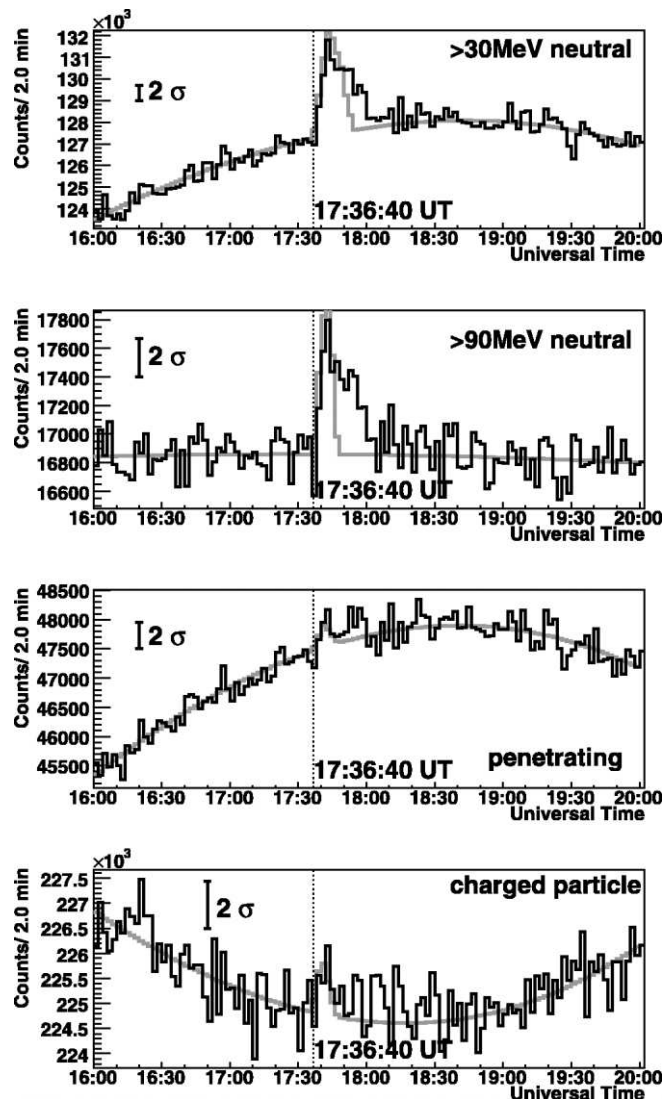


Figura 3. Tasas de conteo de 2 minutos de canales diferentes en el SNT de México (>30 MeV neutral, >90 MeV neutral, neutral penetrante y partículas cargadas). La fluctuación de fondo de 2σ se indica en la esquina superior izquierda de cada panel. El tiempo pico de los RX duros detectados por *Geotail* es 17:36:40 UT. Las curvas grises indican los conteos esperados suponiendo un flujo de neutrones derivado de los datos del NM de Bolivia con fondo. El fondo se estimó a través de un ajuste polinomial de 3er orden excluyendo el lapso 17:30–18:30 UT.

monte Chacaltaya en Bolivia (E292. 0°, S16. 2°, 5250 m snm), donde están ubicados un SNT y un NM, el ángulo cenital y la masa de aire fueron 28.0° y 612 g cm⁻², respectivamente. El SNT de México tiene centelladores de plástico de 4 m² de área y 30 cm de grosor, cubiertos por recipientes de contadores proporcionales que funcionan como anticontadores. Para convertir $R\gamma$ en pares de electrones, los contadores proporcionales están cubiertos por plomo y hierro con grosor de una unidad de radiación. Una señal de los centelladores que no tiene coincidencia con la señal del anticontador, se considera como generada por partículas neutras. La señal coincidente del anticontador

tador y el centellador se debe a partículas cargadas. Las señales de los centelladores se discriminan en 4 rangos diferentes de energía correspondientes a >30 , >60 , >90 y >120 MeV. Debajo de los centelladores hay 4 capas de contadores proporcionales que están alineados y miden la dirección y energía de las partículas que rebotan. Los detalles del detector y su funcionamiento están descritos en Valdés-Galicia *et al.* (2004). El SNT que está en Bolivia es más sencillo. Consiste de centelladores de 4 m² de área y 40 cm de grosor cubiertos por centelladores y anticentelladores de plástico de 1 cm de grosor (Matsubara *et al.*, 1993, 1995). Sin embargo, en el momento relevante estos anticentelladores no estaban funcionando, así que sólo podemos considerar los centelladores centrales. Se registraron cuentas en 4 rangos diferentes de energía: >40 , >80 , >160 y >240 MeV. El NM de México es 6NM64 y el NM de Bolivia es 12NM64. Ya que uno de los contadores de Bolivia no era funcional en el momento de la fulguración, el área efectiva se redujo en un 8%. Los detectores registran ritmos de conteo con 10 s de intervalo, excepto el de México, que tiene un intervalo de 5 min. El tiempo absoluto se registra con antenas GPS con una precisión de 1 s. Los perfiles temporales observados en todos los detectores se muestran en la Fig.2 (el NM de Bolivia, el NM de México y el SNT de Bolivia) y en la Fig.3 (el SNT de México). Excesos claros se registraron por todos los detectores después del instante del pico de RX duros (17:36:40 UT) en el satélite *Geotail*. Algunos saltos menos significativos en los canales de la partícula penetrante y la partícula cargada del SNT de México son importantes para restringir las energías primarias.

3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

Antes de atribuir las señales observadas a neutrones, primero investigamos la posibilidad de tener un evento protónico. Ya que la fulguración ocurrió en la rama solar Este, los protones se deben mover difusivamente a través del campo magnético antes de llegar a la Tierra. Entonces es poco probable que el incremento agudo observado en la Fig.2 se deba a protones. Las rigideces de corte en Chacaltaya y ciudad de México son de 12.5 y 8.6 GV respectivamente. Por otra parte, en la estación de Apatity², donde la rigidez de corte es de 0.57 GV, no se encontró un exceso significativo. Ya que el punto subsolar en el instante de la fulguración estaba entre México y Bolivia, es natural concluir que la señal fue provocada por neutrones. Es más: cuando graficamos el incremento relativo en el NM de Bolivia (11%) y del NM de México (6%) con respecto a la masa de aire en la línea de visión (Fig.3 de Shea *et al.*, 1991), el gráfico se ubica justamente entre los dos eventos históricos de neutrones solares del 24 de mayo de 1990 y del 3 de junio de 1982. Todos estos resultados indican que la señal observada se debe a neutrones solares. Las significancias estadísticas del exceso en el intervalo 17:40–17:45 UT se calcularon para cada detector. Dichas significancias se definen en

unidades de la desviación estándar del promedio de datos entre las 4:30 y 16:30 UT. Los resultados para el NM de Bolivia, el NM de México, el SNT de Bolivia (>140 MeV) y el SNT de México (>30 MeV neutral) son 40σ , 9σ , 12σ y 16σ respectivamente.

El flujo de neutrones se calcula usando el método de Monte Carlo. Para este cálculo usamos los datos del NM de Bolivia, ya que ésta es la señal más significativa. Ya que el NM es sensible a una amplio rango de energía de neutrones, el perfil de la emisión se convoluciona con una distribución amplia de tiempo de vuelo, y no se mide directamente. Así pues realizamos la hipótesis de dos modelos para el tiempo de emisión. En la primera hipótesis se supone que los neutrones fueron emitidos impulsivamente cuando ocurrió el pico de la emisión de los RX duros. Considerando los 500 s de tiempo de vuelo de los RX desde el Sol hasta la Tierra, el pico de la emisión ocurrió por las 17:28:20 UT. Con esta suposición, la energía de los neutrones correspondiente al incremento abrupto de las 17:40:00 UT en los datos del NM de Bolivia es de 400 MeV. Del perfil temporal de los neutrones, hemos calculado el espectro energético de los neutrones solares usando el programa Shibata para atenuación atmosférica (Shibata, 1994) y la eficiencia del NM calculada por Clem & Dorman (2000). Usando el método descrito por Watanabe *et al.* (2003, 2006), el espectro energético de los neutrones en el Sol se ajustó por una ley de potencias como $6.1 \times 10^{27} (E/100 \text{ MeV})^{-3.8} \text{ MeV}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. Ya que todos los datos no se pudieron ajustar por una simple ley de potencias, entonces sólo ajustamos los datos entre las 17:40 y las 17:47 UT, que corresponden al intervalo de neutrones de 100–400 MeV. De manera interesante, de acuerdo a un análisis independiente usando un modelo de atenuación diferente (Dorman *et al.* 1999) y un cálculo diferente de eficiencia (Valdés-Galicia *et al.* 2004), los datos del SNT de México dan un resultado consistente de $5.3 \times 10^{27} (E/100 \text{ MeV})^{-4.0} \text{ MeV}^{-1} \text{ sr}^{-1}$. Esta diferencia es una buena estimación de la incertidumbre sistemática del método de análisis, ya que en este caso, el error estadístico es prácticamente despreciable.

A partir de esta intensidad, calculamos la respuesta de todos los detectores y canales usando el método de Monte Carlo. Para el cálculo de la respuesta de los SNT, usamos el paquete GEANT3. Los perfiles simulados están sobrepuestos en las curvas grises en las Figs. 2 y 3. Podemos encontrar un acuerdo razonable en la amplitud observada (debemos notar aquí que aún queda una incertidumbre sistemática en la respuesta del detector en el nivel de $\pm 10\%$ que puede cambiar la normalización de cada detector). Sin embargo, está claro que las colas largas de los perfiles observados no están bien ajustadas. Probamos varios índices de ley de potencias y tiempos de emisión pero no pudimos encontrar algún parámetro que nos permita ajustar satisfactoriamente el perfil observado. A fin de mantener el modelo de emisión impulsiva, debemos suponer una suavización del espectro debajo de los 60 MeV. Con los neutrones de menor energía (que tienen menor velocidad) se puede explicar

²Los datos del monitor de neutrones Apatity pueden ser obtenidos de <http://pgi.kolasc.net.ru/CosmicRay>.

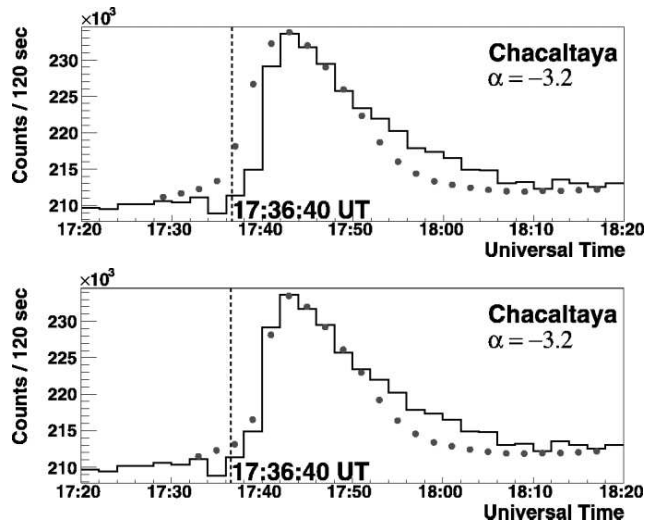


Figura 4. Perfiles de tiempo simulado (puntos) y observado (histograma) del NM de Bolivia. En estos cálculos se supuso que la emisión de neutrones sigue el perfil de los RX duros. Arriba: caso en el que no se incluye energía de corte. El mejor índice de potencia que se encontró es -3.2 , pero se observa discrepancias aparentes en las fases de ascenso y decaimiento. Abajo: el mismo espectro, pero donde se supuso un corte agudo en 400 MeV. La parte ascendente está bien explicada, no obstante aún se encuentra una gran discrepancia en la fase de decaimiento.

la señal atrasada. Pero esto no es consistente con los resultados de los SNT que muestran largas colas para los perfiles de >80 y >90 MeV. Tal restricción fue imposible sólo a partir de los datos de los NM.

Como un segundo modelo del perfil de la emisión, hemos supuesto que los neutrones fueron emitidos con el mismo perfil que los RX duros y los $R\gamma$. El resultado del mejor ajuste con una ley simple de potencias con índice -3.2 se muestra en el panel superior de la Fig. 4. Hay una discrepancia obvia entre los datos y la simulación de Monte Carlo. A fin de compensar la diferencia en la fase ascendente, intentamos con el mismo espectro pero con un corte agudo en los 400 MeV. El resultado se muestra en el panel inferior de la Fig. 4. En este caso, el perfil justo hasta después del pico, está bien ajustado. Esto indica que la aceleración de los iones comenzó al mismo tiempo que la de los electrones. Sin embargo, la discrepancia en las colas, que no pudimos ajustar con ningún conjunto de parámetros, sugiere que los iones fueron acelerados de manera continua o bien fueron atrapados por un periodo mayor que los electrones.

En las observaciones de la fulguración del 24 de mayo de 1990, se pensó que los iones relativistas eran acelerados junto con los electrones dentro del lapso de un minuto. Los resultados publicados de un análisis realizado para los eventos del 21 de junio de 1980 y del 23 de julio de 2002, sugieren asimismo una aceleración casi simultánea de iones y electrones (Chupp 1990; Lin *et al.* 2003; Hurford *et al.* 2003). Por otra parte, para la fulguración del 11 de junio de 1991 se reportó una vida media larga de los iones relativistas (Kanbach *et al.* 1993). Ellos

observaron también diferentes tiempos de vida de iones y electrones, pero nada pudieron decir acerca del comienzo de la aceleración debido a la saturación. En Chupp (1990) también se encontró emisiones extendidas de protones (pero no así de electrones) en las fulguraciones del 3 de junio de 1982 y del 24 de abril de 1984. Las nuevas observaciones de la fulguración del 7 de septiembre de 2005 presentadas aquí están situadas entre estos dos extremos. Se ha cubierto toda la historia de la fulguración y se encontró analogías y diferencias en el comportamiento de los iones y electrones altamente energéticos, por medio de una alta estadística. Es más: las observaciones de base están libres de contaminación por radiaciones producidas por electrones. Estas observaciones de base de alta calidad restringen tanto el ámbito de aceleración como el sitio de emisión de partículas relativistas. Las otras formas del espectro energético y los perfiles de emisión extendidos independientes de RX y $R\gamma$ deberían ser puestos a prueba a fin de explicar de manera consistente todos los resultados obtenidos para el evento.

Los autores de este artículo agradecen el trabajo de nuestros colegas que manejan y mantienen los telescopios de neutrones solares. Asimismo agradecemos al equipo de *INTEGRAL* por su apoyo a la misión y por su orientación en el análisis de los datos del satélite *INTEGRAL*. El trabajo de K. Watanabe fue apoyado por el programa *Grant-in-Aid* de la *Japan Society for the Promotion of Science Fellows*. Este trabajo fue apoyado por una *Grant-in-Aid for Scientific Research on Priority Area* (11203204) del Ministerio de Educación, Cultura, Deporte, Ciencia y Tecnología del Japón, y por una *Grant-in-Aid for Scientific Research* (16540242) de la Sociedad Japonesa para la Promoción de la Ciencia. Esta investigación fue parcialmente apoyada por la *Nihon University Multidisciplinary Global Research Grant* para 2001 y 2002, y por una *DGAPA UNAM Grant* 115303. Finalmente, los autores agradecen al árbitro anónimo por sus valiosos comentarios que ayudaron a mejorar nuestro manuscrito.

REFERENCIAS

- [1] Chupp, E. L. 1990, *ApJS*, 73, 213.
- [2] Clem, J. M., & Dorman, L. I. 2000, *Space Sci. Rev.*, 93, 335.
- [3] Debrunner, H., *et al.* 1993, *ApJ*, 409, 822.
- [4] Dorman, L. I., Valdés-Galicia, J. F., & Dorman, I. V. 1999, *J. Geophys. Res.*, 104, 22417.
- [5] Forrest, D. J., & Chupp, E. L. 1983, *Nature*, 305, 291.
- [6] Hurford, G. J., *et al.* 2003, *ApJ*, 595, L77.
- [7] Kanbach, G., *et al.* 1993, *A&AS*, 97, 349.
- [8] Lin, R. P., *et al.* 2003, *ApJ*, 595, L69.
- [9] Masuda, S., *et al.* 1994, *Nature*, 371, 495.
- [10] Matsubara, Y., *et al.* 1993, in *Proc. 23rd Int. Cosmic Ray Conf. (Calgary)*, 139.
- [11] Matsubara, Y., *et al.* 1995, in *Proc. 24th Int. Cosmic Ray Conf. (Roma)*, 1312.
- [12] Muraki, Y., & Shibata, S. 1996, in *AIP Conf. Proc. 374, High Energy Solar Physics*, ed. R. Ramaty, N. Mandzhavidze, & X.-M. Hua (Woodbury: AIP), 256.

- [13] Shea, M. A., Smart, D. F., & Pyle, K. R. 1991, *Geophys. Res. Lett.*, 18, 1655.
- [14] Shibata, S. 1994, *J. Geophys. Res.*, 99, 6651.
- [15] Terasawa, T., *et al.* 2005, *Nature*, 434, 1110.
- [16] Tsuchiya, H., *et al.* 2001, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 463, 183.
- [17] Valdés-Galicia, J. F., *et al.* 2004, *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A*, 535, 656.
- [18] Watanabe, K., *et al.* 2003, *ApJ*, 592, 590
———. 2006, *ApJ*, 636, 1135.