

# OBSERVACIÓN SIMULTÁNEA DE NEUTRONES SOLARES EN ASOCIACIÓN CON UNA FULGURACIÓN SOLAR DEL 7 DE SEPTIEMBRE DE 2005

E. Ricaldi<sup>1</sup>, P. Miranda<sup>1</sup>, R. Bustos<sup>1</sup>, R. Ticona<sup>1</sup>, O. Burgoa<sup>3</sup>, D. López<sup>3</sup>, Y. Matsubara<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Instituto de Investigaciones Físicas, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz—Bolivia*

<sup>2</sup>*Solar Terrestrial Environment Laboratory, Nagoya University, Nagoya—Japan*

<sup>3</sup>*Carrera de Física, U.M.S.A., La Paz—Bolivia*

## RESUMEN

El 7 de Septiembre de 2005 a las 17:36:40 (GMT) se produjo una fulguración solar registrada por el Telescopio de Neutrones Solares (TNS) y el Monitor de Neutrones (12NM-64) a las 17:40 (GMT), que fué verificado por el satélite GOES[1]. Se observa una correlación del evento entre los datos del experimento de Chacaltaya y los del Observatorio Geomagnético de Patacamaya, ambos del Instituto de Investigaciones Físicas de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA).

*Descriptor: Neutrones Solares, Crochets Magnéticos.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Las partículas energéticas son generadas y aceleradas por fenómenos astronómicos conocidos, tales como: supernovas, estrellas de neutrones, núcleos galácticos activos, fulguraciones solares, etc.

El Sol es una estrella típica y como es difícil observar otras estrellas en detalle, el estudio del Sol es una de las tareas más importantes de la astrofísica. La siguiente estrella más próxima está a 4.3 años luz de distancia, unas  $10^5$  veces la distancia de la Tierra al Sol, por lo que el entendimiento del Sol nos puede decir mucho acerca de la estructura y actividad de otras estrellas en el Universo.

El Sol tiene una estructura dinámica compleja. Sus principales características son mostradas en la Tabla 1.

TABLA 1  
Características del Sol

Radio	$6.96(7) \times 10^{10}$ cm
Volumen	$1.41 \times 10^{33}$ cm <sup>3</sup>
Masa	$1.99(2) \times 10^{33}$ g
Densidad Media	1.41 g/cm <sup>3</sup>
Luminosidad	$3.80 \times 10^{33}$ erg/s
Temperatura media (sup)	5770 K
Cromósfera	2000 km
Rango de temperatura de la cromósfera	(4500 - 20000) K
Campo Magnético	1000 gauss

El Sol produce explosiones conocidas como fulguraciones solares, las cuales están físicamente relacionadas con las manchas solares. La observación sistemática de las fulguraciones solares con espectro-Heliógrafos permiten la observación de fulguraciones en el rango  $H_{\alpha}$ . Los

satélites que observan rayos X concretaron que las fulguraciones solares generan ondas electromagnéticas a lo ancho de todo el espectro, desde ondas de Radio hasta frecuencias de rayos  $\gamma$ .

Las partículas aceleradas en una fulguración solar pueden emitir ondas electromagnéticas (OEM) y partículas secundarias las cuales interactúan con la atmósfera solar. Las OEM son producidas por emisión sincrotrónica en el intenso campo magnético de la corona solar, mientras que los rayos X son producidos por la interacción de electrones acelerados con la atmósfera solar mediante el fenómeno de bremsstrahlung. De manera similar los rayos  $\gamma$  y los neutrones son producidos por la interacción de iones acelerados con la atmósfera solar.

No está bien entendido como las partículas de la fulguración solar son aceleradas sin embargo los neutrones solares y los rayos  $\gamma$  producidos en una fulguración solar son inmunes a los campos magnéticos por lo tanto ellos retienen información sobre la posición de su origen y el tiempo de aceleración permitiéndonos entender mejor los mecanismos de aceleración.

## 2. ORGANIZACIÓN EXPERIMENTAL

### 2.1. Detector de Neutrones Solares

El detector de neutrones solares está ubicado en el Monte Chacaltaya (68°O, 16.2° S, 5250 m s.n.m.) y está en funcionamiento desde el 21 de Septiembre de 1992. Consiste de cuatro contadores de centelleo plástico de 1 m<sup>2</sup> de área y 40 cm de espesor además de un anti-contador para vetar partículas cargadas (ver figura 1).

El anti-contador consiste de 17 centelladores, cada uno de 220 cm × 46 cm de área y 1 cm de espesor. El tamaño de los fotomultiplicadores (PMT) usados en los contadores de centelleo es de 12.7 cm, modelo R877, y de 5.1 cm, modelo R329 para el anti-contador. Las energías de los protones de retroceso son discriminadas dentro de

<sup>1</sup>Email: ericaldi@fiumsa.edu.bo

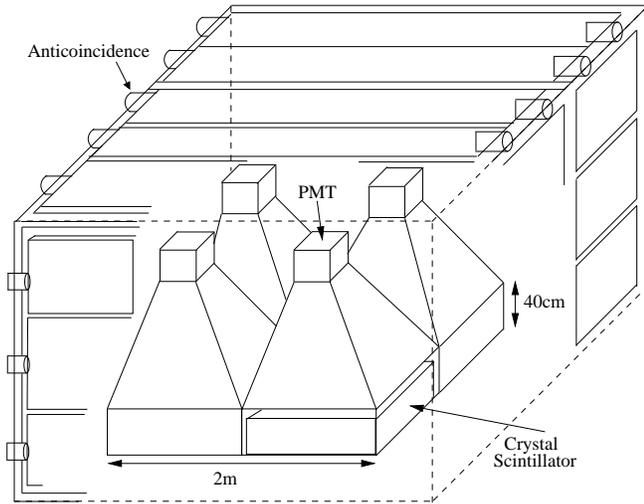


Figura 1. Vista esquemática del Detector de Neutrones Solares.

cuatro niveles:  $> 40 \text{ MeV}$ ,  $> 80 \text{ MeV}$ ,  $> 160 \text{ MeV}$  y  $> 240 \text{ MeV}$ , medidas mediante la altura de pulso generado a la salida del fotomultiplicador.

### 2.2. Observatorio Geomagnético de Patacamaya

Está ubicado en la localidad de Patacamaya distante a 110 km de la Ciudad de La Paz, sus coordenadas son  $17^{\circ}15'57''\text{S}$ ,  $67^{\circ}57'07''\text{O}$ , a 3789 m s.n.m., opera desde 1983. En este laboratorio se cuenta con un variómetro, un teodolito magnético y un magnetómetro de protones. El variómetro toma los datos de las variaciones diarias de los elementos H, D, Z, del campo magnético terrestre, siendo la más sensible la componente H.

## 3. RESULTADOS

En la figura 2 se muestran los contejes registrados por el Detector de Neutrones Solares y el Monitor de Neutrones 12-NM64. La figura 3 muestra una anomalía notable (crochet) en la componente H del campo magnético de la Tierra que correlaciona perfectamente con el evento registrado por el TNS y el 12NM-64 de Chacaltaya. Además incluye el registro correspondiente al paso por la Tierra de la nube de plasma emitida por el Sol, el día 9 de septiembre de 2005.

La figura 4 muestra el incremento del flujo de rayos X detectado por el satélite GOES[1].

La Tabla 2 incluye algunos de los datos principales que se pueden leer de los registros.

## 4. CONCLUSIONES

Como se indicó en la introducción las fulguraciones solares pueden acelerar iones a altas energías, los cuales al interactuar con la atmósfera solar producen rayos x y rayos gamma como también neutrones secundarios vía diferentes interacciones nucleares. Un neutrón libre (es decir no unido al núcleo) tiene una vida de decaimiento de 886 segundos (14min y 45s) que es comparable al

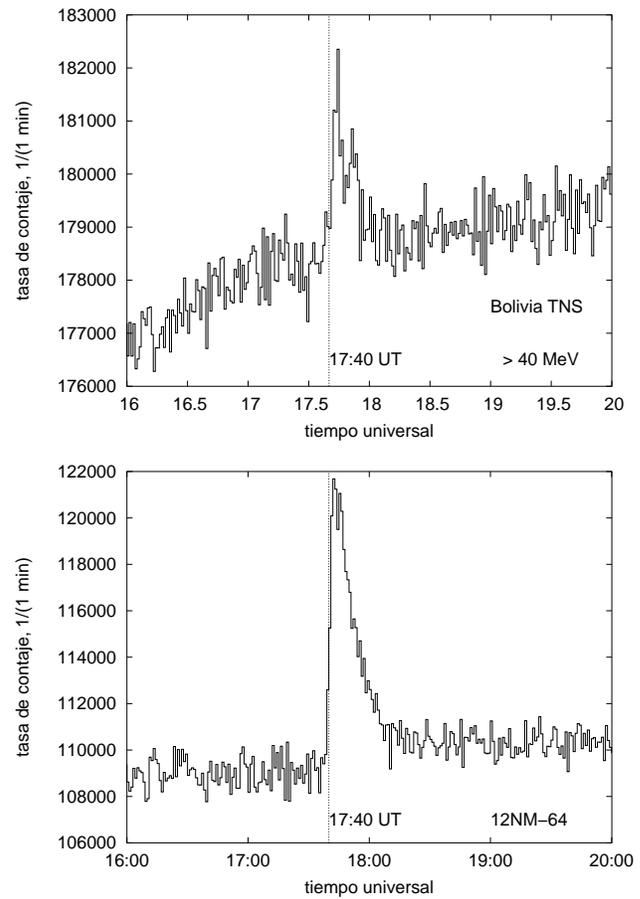


Figura 2. Registro del evento del 7 de Septiembre de 2005 mediante el Detector de Neutrones Solares TNS (arriba) y el Monitor de Neutrones 12-NM64 (abajo), horas 17:40 tiempo universal.

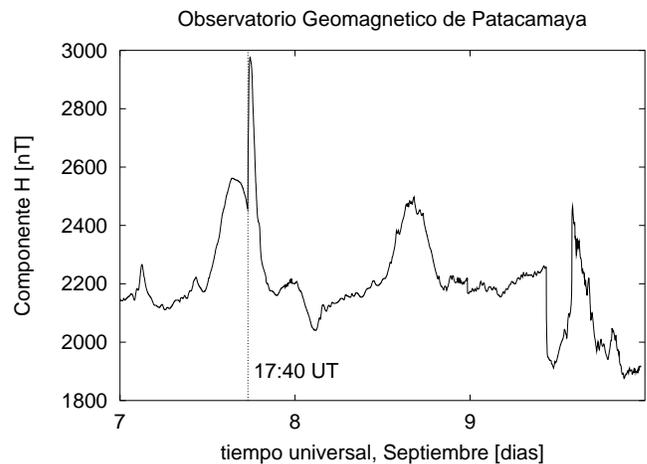


Figura 3. Variación de la componente horizontal del Campo Magnético de la Tierra en el Observatorio de Patacamaya.

tiempo de viaje de la luz del Sol hasta la Tierra 499 segundos (8min y 20s), entonces solamente los neutrones más rápidos (los que se mueven con velocidades relativistas) podrán alcanzar la Tierra antes de decaer en protones y electrones.

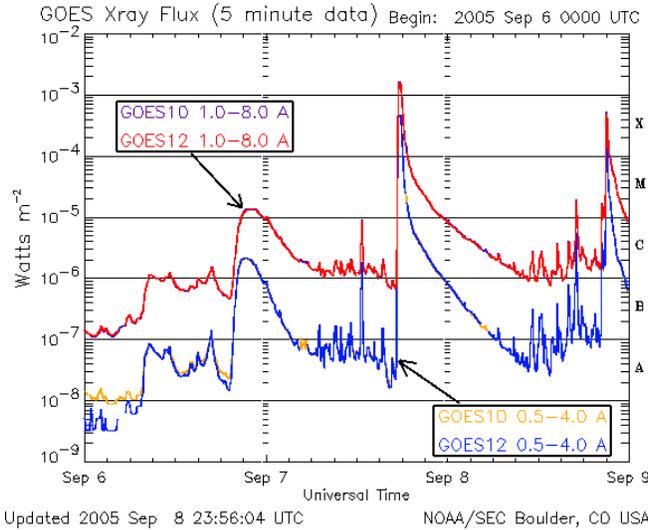


Figura 4. Incremento del Flujo de Rayos X detectado por el satélite GOES [1].

Debido a que los neutrones no son afectados por los campos magnéticos del Sol éstos mostrarían directamente el espectro de energías de los iones acelerados y también podrían ayudar a determinar el tiempo de producción de los neutrones, el cual sería el mismo que el tiempo de aceleración de los iones.

La energía de los neutrones solares fué estimada mediante el tiempo de vuelo y estaban entre 25 y 400 MeV debido a que fue una fulguración intensa de larga duración de emisión de neutrones. El tiempo de vuelo de los neutrones solares más energéticos fue estimado en 11min 40s con una velocidad de 214300 km/s.

El momento en que se produce la fulguración solar, el Sol apuntaba directamente sobre Bolivia entonces el laboratorio de Chacaltaya y Patacamaya estaban en muy buena posición para observar los neutrones solares.

Los protones y electrones producto del decaimiento de los neutrones solares interactúan con el campo magnético de la Tierra (efecto de la fulguración solar sobre los elementos del campo magnético terrestre) produciendo un sistema de corriente eléctrica de enganche que resulta siendo una desviación del sistema de corriente ionosférica que produce la variación magnética denominada variación diaria solar,  $S_q$ .

La corriente eléctrica de enganche produce la anomalía magnética denominada: anomalía de enganche (*geomagnetic crochet*) que es una variación magnética rápida con características similares al comportamiento de los neutrones registrados en el TNS y 12NM-64 de Chacaltaya.

Como las velocidades de viaje de los neutrones son relativistas, éstos pueden penetrar profundamente en la magnetósfera hasta la superficie de la Tierra, pero los protones y electrones producto de su decaimiento interactúan con los átomos e iones de la ionósfera que seguramente ofrecen buenas condiciones para que sucedan las colisiones rápidas necesarias para producir la deno-

minada corriente eléctrica de enganche, lo que a su vez crean campos magnéticos adicionales que observamos en el registro.

La fulguración solar desprendió una nube de plasma que tardó 1d 17h y 27min en llegar a la Tierra, lo hizo a una velocidad de cerca de 1005 km/s y tuvo una extensión de 12964500 km, produjo una disminución en la intensidad de la componente  $H$  del campo magnético de la Tierra por un intervalo de tiempo de 3 horas 35 minutos en el Observatorio de Patacamaya (baja latitud, laboratorio casi ecuatorial) en horas de la madrugada local (es decir cuando el observatorio no daba de frente a la nube de plasma solar).

TABLA 2

Parámetros obtenidos de los registros y constantes utilizadas.

Tiempo de emisión de la fulguración solar	17.472 horas
Tiempo de llegada de la radiación electromagnética	17.611 horas
Tiempo de llegada de los neutrones	17.667 horas
Tiempo de viaje de la radiación EM	500 s
Tiempo de viaje de los neutrones	700 s
Velocidad de propagación de la radiación EM	$3 \times 10^6$ km/s
Velocidad de propagación de los neutrones	214286 km/s
Tiempo de llegada de la nube de plasma solar	10.917 horas
Tiempo de finalización del paso de la nube de plasma solar	14.50 horas
Tiempo que tarda la nube de plasma solar en pasar por la Tierra	3.583 horas
Tiempo de viaje de la nube de plasma solar	1.727 días (149220 s)
Velocidad de propagación de la nube de plasma solar	1005 km/s
Espesor de la nube de plasma solar	12964500 km
Duración de la señal de neutrones	~20 minutos
Duración de la señal magnética (crochet)	~20 minutos
Intensidad de campo magnético del crochet	~ 400 nT

En la actualidad se está revisando la base de datos (anterior), para verificar la existencia de este tipo de eventos (crochet) que se producirían por efecto de las fulguraciones solares.

#### REFERENCIAS

- [1] Space Environment Center-N.O.A.A.  
<http://www.sec.noaa.gov/today.html#xray>
- [2] <http://www.fiumsa.edu.bo/iif/geomag.htm>
- [3] Watanabe K, *Solar Neutron Events associated with Solar Flares, PhD Thesis, 2005*
- [4] Watanabe K., *Highly Significant detection of Solar Neutrons, RHESSI Science Nuggets.*
- [5] Sako T. et al., *Long Lived Solar Neutron Emission in Comparison with electron-produced radiation in the 2005 september 7th, Solar Flare*, Astrophysical Journal, 2006 November 1.
- [6] R. G. Rastogi, *Effect of Solar Disturbances on the Geomagnetic H, Y and Z Fields in American Ecuatorial Electrojet Stations, Solar Flare effects*, J. Ind. Geophysical Union (2003) Vol.7, Number 2, pp.43-51.