

OBSERVACIÓN DE NEUTRONES SOLARES Y EFECTOS SOBRE EL CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE  
ASOCIADOS CON LA FULGURACIÓN SOLAR DEL 2 DE NOVIEMBRE DE 2003  
OBSERVATION OF SOLAR NEUTRONS AND THE EFFECTS ON THE EARTH'S MAGNETIC FIELD ASSOCIATED  
WITH THE SOLAR FLARE OF THE 2nd NOVEMBER 2003

CHAMANI W.<sup>1</sup>, TICONA R.<sup>2</sup> Y RICALDI E.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Carrera de Física

<sup>2</sup> Instituto de Investigaciones Físicas  
Universidad Mayor de San Andrés  
La Paz – Bolivia

RESUMEN

El 2 de noviembre de 2003 a las 17:03:00 (GMT) se produjo una fulguración solar que fue verificada por el satélite GOES y se registró por el Monitor de Neutrones (NM-64) a las 17:17:24 (GMT) del laboratorio de Física Cósmica en el monte Chacaltaya. En particular, se observó que la fulguración produjo la variación del campo geomagnético local (F); se produjeron variaciones de la intensidad de la componente horizontal (H), de la declinación (D) y de la componente vertical (Z). Se observaron los registros de los incrementos con respecto a los valores promedio (registrados diariamente) de dichas componentes estimados en  $71 nT$ , 10 grados y  $19 nT$  respectivamente en el Observatorio Geomagnético de Patacamaya, así como el incremento del campo neto F estimado en  $66 nT$  registrado por el Observatorio Geomagnético de Villa Remedios. Las duraciones de la señal de neutrones y de la señal magnética fueron aproximadamente de 40 y 54 minutos respectivamente, lo que muestra que la fulguración fue intensa y la emisión de neutrones fue de larga duración.

*Descriptores:* fulguración solar — neutrones solares — crochets magnéticos

Código(s) PACS: 96.60.Rd, 96.60.Vg

ABSTRACT

On the 2nd November 2003 at 17:03:00 (GMT) there was a solar flare recorded by the GOES satellite. The event was also registered at 17:17:24 (GMT) by the Neutron Monitor (NM-64) of the Cosmic Physics Laboratory located at Mount Chacaltaya in Bolivia. The flare produced changes in the intensity of the local geomagnetic field (F) affecting all three vector components —horizontal component (H), declination (D) and the vertical component (Z). Records of the increase in relation to average values of the aforementioned components were observed at  $71 nT$ , 10 degrees and  $19 nT$  at the Geomagnetic Observatory at Patacamaya (Bolivian Altiplano) and the net increase of the F field estimated at  $66 nT$  registered by the Geomagnetic Observatory at Villa Remedios. The duration of the neutron and magnetic signals were between 40 and 54 minutes approximately. This demonstrates that the flare was intense and that the emission of neutrons took place over a long period of time.

*Subject headings:* solar flares — solar neutrons — magnetic crochet

1. INTRODUCCIÓN

El estudio y la observación de las fulguraciones solares y los efectos que produce sobre el campo geomagnético han merecido la atención de muchos científicos sobre todo a partir de las observaciones de Carrington y Hodgson en 1859, cuando encontraron una interrelación entre un crochet magnético y una fulguración solar. Las fulguraciones son los eventos más violentos y energéticos en el sistema solar, los cuales están físicamente relacionados con las manchas solares; pueden acelerar iones a altas energías. Estos eventos se producen cuando la energía magnética acumulada en la atmósfera solar, cercana a una mancha, es repentinamente li-

berada. Seguidamente, generan ondas electromagnéticas a lo ancho de todo el espectro, desde ondas de radio hasta frecuencias de rayos gamma, que son producidas por emisión sincrónica en el campo magnético solar de la corona. Mientras los rayos X (RX) son generados en la atmósfera solar mediante el fenómeno del Bremsstrahlung, los neutrones son producidos por la interacción de iones acelerados con la atmósfera solar. Este tipo de eventos pueden ser observados por distintos métodos como: 1) la observación de la emisión con espectro-Heliógrafos, 2) la observación del flujo de rayos X con satélites y también pueden ser reconocidos y observados indirectamente sobre los efectos que producen en el campo geomagnético, ya que ocasionan variacio-

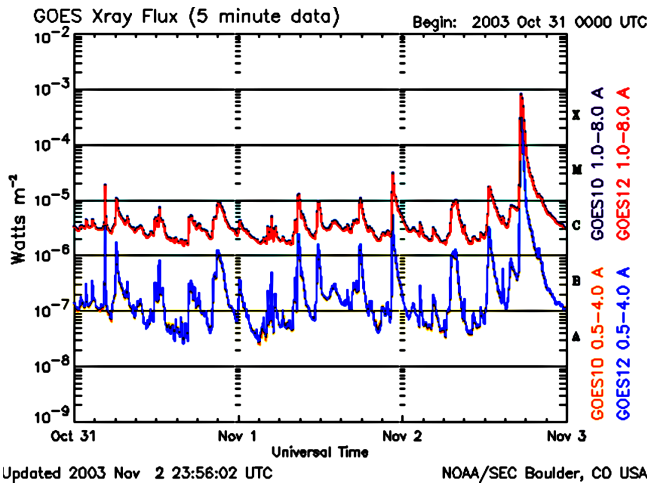


FIG. 1.— Incremento del flujo de rayos X detectado por el satélite GOES entre el 1 y el 3 de Noviembre. El tiempo de inicio de la fulguración X8.3 fue a las 17:03 UT. La línea roja expresa el flujo de rayos X en el rango de longitud de onda de 1.0 – 8.0Å y la azul para el rango de 0.5 – 4Å (*color online*).

nes y perturbaciones en sus tres componentes: la horizontal (H), la vertical (Z) y la de declinación (D), debido a que un frente de partículas cargadas provenientes de la fulguración chocan con la magnetósfera de la Tierra, produciendo su deformación y compresión, seguidas de tormentas magnéticas en la atmósfera terrestre con un retraso de hasta algunos días. Otro de los efectos que producen son los crochets magnéticos que son variaciones magnéticas rápidas debidas a una desviación del sistema de corriente ionosférica, donde la variación geomagnética en el hemisferio iluminado por el sol se intensifica por un corto tiempo; el efecto es más grande cerca del punto subsolar (zenit). Por otro lado, los neutrones solares producidos son inmunes a los campos magnéticos, lo que hace posible que puedan alcanzar la superficie de la Tierra y por lo tanto nos permitan estudiar los mecanismos por los cuales han sido acelerados. Debido al interés por estudiar y observar este tipo de fenómenos que produce el sol, en este trabajo presentamos resultados preliminares del evento de una fulguración solar producida el 2 de noviembre de 2003 y reportamos los efectos que ha tenido sobre el campo magnético de la Tierra. Se observa una correlación del evento entre los datos del experimento del Monitor de Neutrones 12NM-64 de Chacaltaya y dos observatorios geomagnéticos, ubicados en Patacamaya y en Villa Remedios, de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA).

## 2. LA PROPAGACIÓN DE LOS NEUTRONES SOLARES

Los neutrones producidos en una fulguración solar no son afectados por el campo magnético del sol ni por el campo magnético terrestre; pero dependiendo de su energía logran alcanzar la superficie de la Tierra antes de que decaigan durante su viaje. Por ello la probabilidad de sobrevivencia,  $P(E)$ , de un neutrón es:

$$P(E) = \exp\left(\frac{-t}{\gamma\tau}\right). \quad (1)$$

Donde  $t$  es su tiempo de vuelo entre el Sol y la Tierra,  $\gamma$  es el factor de Lorentz y  $\tau = 886s$ , el tiempo de vida del neutrón.

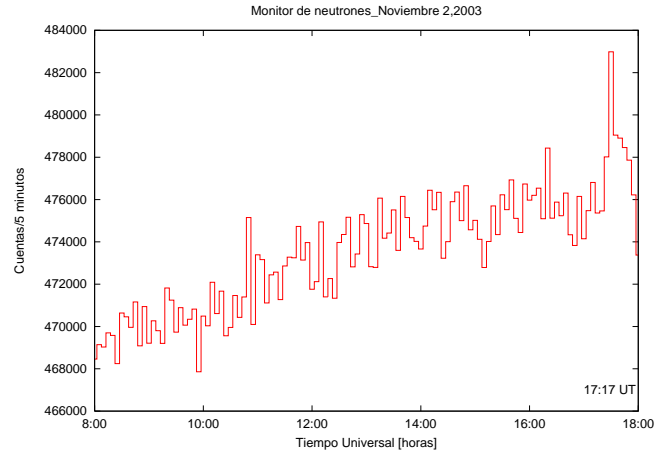


FIG. 2.— El conteo registrado cada 5 minutos por el Monitor de Neutrones (12-NM64) localizado en el monte Chacaltaya, Bolivia el 2 de Noviembre de 2003. Los datos después de las 18:00 UT no fueron registrados debido a un corte de electricidad. El tiempo (inicio de la fulguración) registrado fue a horas 17:17:24 UT el cual correlaciona con el tiempo registrado por el satélite GOES. Se observa que la emisión neutrónica solar intensa máxima fue a horas 17:30:01 UT.

## 3. MÉTODO DEL TIEMPO DE VUELO

Los neutrones solares no pueden viajar a la velocidad de la luz debido a que tienen masa. El tiempo de su llegada a la Tierra es más largo para neutrones de bajas energías y si existe un amplio rango de energía de los neutrones producidos al mismo tiempo en el Sol, entonces existe también un amplio rango de tiempos de llegada. El tiempo de retraso  $\Delta t$ , está dado por:

$$\Delta t = \frac{R}{c\beta} - \frac{R}{c} \quad (2)$$

$$\beta = \frac{v}{c} \quad (3)$$

Donde  $R$  es la distancia entre el Sol y la Tierra ( $1UA = 1.496 \times 10^{11}m$ ),  $c$  es la velocidad de la luz y  $v$  la velocidad del neutrón. Combinando la ecuación (2) con la (3) se obtiene:

$$\beta = \frac{1}{c\Delta t/R + 1} \quad (4)$$

Entonces la energía cinética del neutrón  $T_n$  es:

$$T_n = (\gamma - 1)M_n, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad (5)$$

Donde  $M_n$  es la energía de la masa en reposo del neutrón ( $940MeV$ ).

## 4. ARREGLO EXPERIMENTAL

### 4.1. Monitor de Neutrones NM-64

El monitor de neutrones es un instrumento para monitorear la intensidad de los rayos cósmicos galácticos y solares. Consiste principalmente de tres partes: el reflector, el productor y el contador. El monitor MN-64 usa polietileno como reflector. El rol del reflector es el de rechazar los neutrones de bajas energías producidos en la atmósfera y en las sustancias cercanas al monitor de neutrones. El plomo que rodea al reflector es usado como productor. Un contador de  $BF_3$

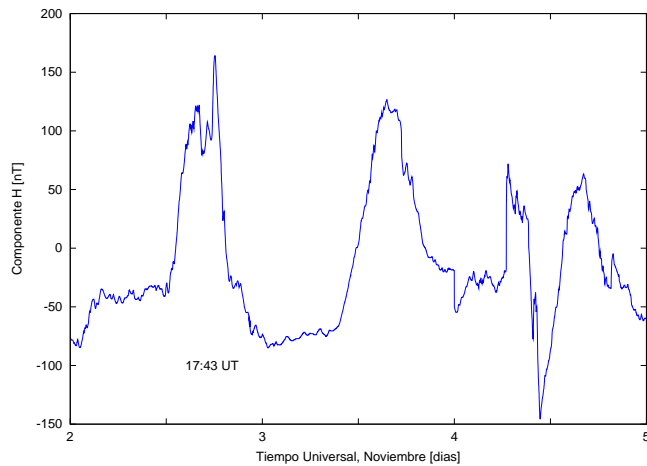


FIG. 3.— Incremento de la componente horizontal H del campo magnético de la Tierra, el tiempo de inicio fue a horas 17:43 UT. La intensidad de campo magnético del crochet fue aproximadamente  $71 nT$ . La tormenta magnética se identifica como un cambio abrupto de la componente H al tercer día después de la fulguración.

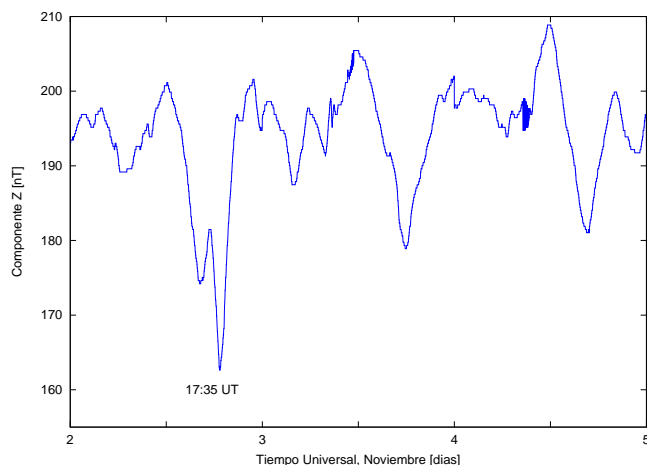


FIG. 4.— Decremento de la componente vertical Z del campo magnético de la Tierra que se inicia a horas 17:35 UT. La intensidad de dicha componente fue de  $19 nT$ .

está localizado dentro del productor. El moderador interno es usado para desacelerar neutrones hasta energías térmicas, el cual está localizado entre el contador y el productor.

#### 4.2. Observatorio Geomagnético de Patacamaya

En este laboratorio se cuenta con un arreglo óptico-mecánico (Variógrafos La Cour), un teodolito magnético y un magnetómetro de protones. El variógrafo toma los datos de las variaciones diarias de los elementos H, D, Z del campo magnético terrestre, siendo la más sensible la componente H en latitudes muy cercanas al ecuador y menos sensible la componente Z.

#### 4.3. Observatorio Geomagnético de Villa Remedios

Este laboratorio cuenta con un arreglo de bobinas que trabajan a modo *Flux Gate*, modelo FGE, de tres componentes X, Y, Z y F, proveniente de un magnetómetro fijo Overhauser. Los datos son registrados por un *Data Logger*. Los registros de este observatorio son rígidamente y están sujetos a un mínimo

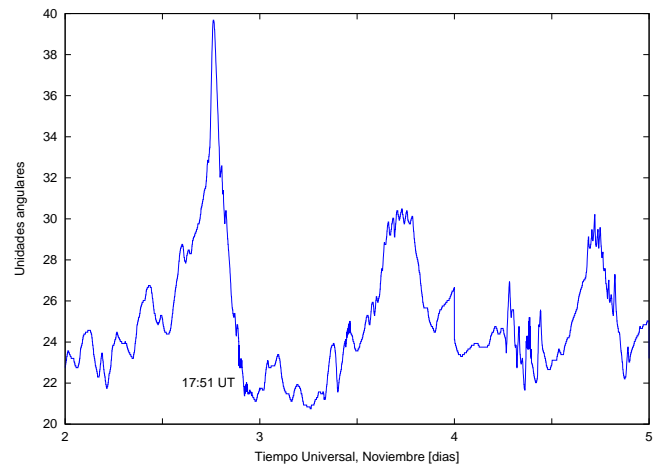


FIG. 5.— Incremento de la componente de declinación D del campo magnético de la Tierra registrada a horas 17:51. La intensidad de dicha componente fue de 10 grados.

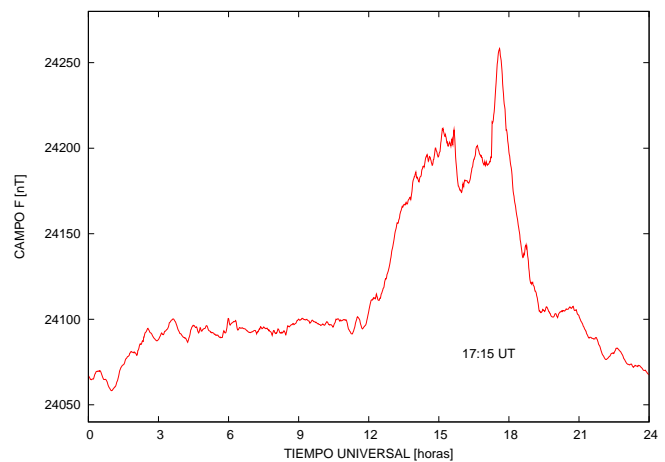


FIG. 6.— Variación del campo magnético neto F que se inicia a horas 17:16 UT. La intensidad del campo neto F fue de aproximadamente  $66 nT$ .

de fuentes de error, siendo la variación de la temperatura del recinto del registro la más significativa.

### 5. REGISTROS Y OBSERVACIONES

Una fulguración solar intensa ocurrió el 2 de noviembre de 2003. La emisión del flujo de rayos X blandos observados por el satélite GOES (Fig. 1), comenzó a incrementarse a las 17:03 UT, alcanzó su máximo a las 17:25 UT y decayó a la mitad de su valor máximo a las 17:39 UT. El pico del flujo de RX fue clasificado como X8.3. La mancha solar corresponde a la región 10486, ubicada en las coordenadas  $S14^\circ, W56^\circ$ . En la misma región se produjo el evento solar de neutrones el 28 de Octubre de 2003. La Fig. 2 muestra el conteo registrado cada 5 minutos por el Monitor de Neutrones NM-64. La emisión neutrónica comenzó a incrementarse a las 17:17:24 UT, la señal intensa alcanzó su máximo a las 17:30:01 UT, el que correlaciona con el tiempo registrado por el GOES. La duración del evento fue de aproximadamente de 40 minutos. Las Figs. 4, 5 y 6 muestran el efecto que produce la fulguración solar sobre el campo magnético de la Tierra. Se producen variaciones respecto de los valores,

registrados diariamente, de las componentes horizontal (H), vertical (Z) y de declinación (D) del campo geomagnético por el Observatorio Geomagnético de Patacamaya. La Fig. 7 muestra la variación del campo geomagnético neto (F) registrado por el Observatorio Geomagnético de Villa Remedios. La Fig. 4 muestra una anomalía notable (crochet) en la componente H del campo, que alcanzó su máximo a las 18:04 UT con una intensidad de  $71 nT$ . A partir de los datos que se leen de este registro, la duración de la señal magnética fue de 54 minutos, por otro lado, la nube de plasma solar llegó aproximadamente un día y medio después de la fulguración. La tormenta magnética se identifica como un cambio abrupto de la componente H al tercer día después de la fulguración, en este mismo lapso de tiempo ocurre la fase de compresión y deformación de la magnetósfera terrestre. La Fig. 5 muestra el decremento de la intensidad de la componente vertical Z del campo estimada en  $19 nT$  que se inició a horas 17:35 UT. Por el contrario, en este caso se observa un incremento de la componente de declinación D del campo estimado en 10 grados, que es el ángulo formado entre el polo norte geográfico y la componente H del campo.

#### 6. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este estudio permiten concluir que la fulguración solar fue intensa, de larga duración y de emisión de neutrones parecida al evento registrado el 7 de septiembre de 2005 (Ricaldi 2007). Además se ha visto que el efecto que ha producido ha sido el cambio drástico de la in-

tensidad del campo geomagnético ocasionando los llamados crochets magnéticos o anomalías magnéticas que producen la variación diaria solar (Sq), el cual se manifestó significativamente en el incremento de la componente H, lo cual es de esperarse para latitudes bajas como la de Chacaltaya, cercanas al ecuador magnético. En el instante que ocurrió la fulguración solar, el Sol estaba situado casi en el cenit sobre el observatorio de Chacaltaya ( $292.0^{\circ}E$ ,  $16.2^{\circ}S$ ,  $5250 m.s.n.m.$ ), por lo tanto se encontró en una muy buena posición para la observación de los neutrones solares. El rango de energías de los neutrones solares obtenido mediante el método del tiempo de vuelo estuvo entre 50 y  $194 MeV$ , con velocidades relativistas entre  $0.31 c$  y  $0.56 c$ . Por otro lado, se han estimado los incrementos y decrementos del campo neto F, las componentes D y Z del mismo en  $66 nT$ , 10 grados y  $19 nT$ , respectivamente. Se ha visto que la tormenta geomagnética se produce al tercer día después de la fulguración, la cual desprendió una nube de plasma que tardó 1d 12h y 46 minutos en llegar a la Tierra, lo hizo a una velocidad de casi  $1133 km/s$  y tuvo una extensión de  $13.7 \times 10^6 km$ . Este evento produjo la disminución en la intensidad del campo magnético neto F de la Tierra por un intervalo de tiempo de 3 horas 21 minutos en el observatorio geomagnético de Villa Remedios. Por último, los resultados presentados son preliminares ya que falta observar el registro del evento por el Detector de Neutrones Solares y así poder confirmar o rechazar alguna correlación con los datos del Monitor de Neutrones.

#### REFERENCIAS

- Space Environment Center–N.O.A.A. 2010, <http://www.sec.noaa.gov/today.html.xray>
- Rastogi, R. G. et al. 1999, *Phys Earth Planets Space*, 51, 947
- Ricaldi, E. 2007, Observación simultánea de neutrones solares en asociación con una fulguración solar del 7 de septiembre de 2005 (IIF–UMSA)
- Ticona, R. 2004, El Monitor de Neutrones (IIF–UMSA)
- Watanabe, K. 2005, Solar Neutron Events Associated with Solar Flares (PhD Thesis)
- Zirin, H. 1965, Solar Flares: Observations, Chapter 6 of Stellar and Solar Magnetic Fields (IAU Symposium No 22)