

Análisis de las características de algunos eventos protónicos observados en la estación radioastronómica de La Habana en la banda centimétrica corta*

**Ramón E. RODRÍGUEZ TABOADA

RESUMEN. *Se hace un estudio estadístico de los eventos protónicos y las explosiones solares en la banda centimétrica. Se obtuvieron las distribuciones de los índices energéticos de las partículas en la fuente solar y en el espacio circuninterrestre, así como de la intensidad del flujo de protones con el carácter del espectro. Se analiza el papel de los campos magnéticos en la explicación de las relaciones obtenidas.*

INTRODUCCION

La acción de la radiación electromagnética y corpuscular del Sol en el espacio circuninterrestre y las altas capas de la atmósfera y la magnetosfera de la Tierra es conocida, y por este motivo, por su importancia práctica, una parte sustancial de los recursos que hoy se destinan al estudio de la Física Solar están dedicados a la investigación de los fenómenos no estacionarios en la atmósfera del Sol, en particular, al estudio de las explosiones solares.

Por su carácter geoelectivo, los llamados eventos protónicos, caracterizados por un aumento del flujo de protones en el espacio circuninterrestre, son los más relevantes,

y sobre los mismos se ha acumulado suficiente material de observación como para permitir el establecimiento de algunos criterios empíricos sobre las características de las regiones activas en que ocurren (Enome y Tanaka, 1973) y sobre su espectro en ondas de radio (Guidice y Castelli, 1972), o para su pronóstico (Kuklin, 1982). Es necesario, sin embargo, señalar que estos criterios exigen observaciones con grandes instrumentos que permitan alcanzar una

*Manuscrito aprobado en mayo de 1987.

**Instituto de Geofísica y Astronomía de la Academia de Ciencias de Cuba.

resolución angular del orden del minuto de arco, o un cubrimiento en frecuencias de la banda de radio entre los 30 000 y los 300 MHz.

Un aspecto de particular importancia en el estudio de las explosiones solares, en general, es el relacionado con la aceleración de los electrones, los protones, e incluso los iones pesados en el proceso de la explosión.

Para comprender, para analizar los posibles mecanismos de aceleración de estas

partículas es necesario conocer su espectro energético. Según los resultados teóricos, resultan buenos parámetros, para estimar la distribución energética de los electrones acelerados en la atmósfera solar, la emisión de rayos X y la emisión en ondas de radio. En este trabajo se analiza la relación entre las partículas aceleradas en la fuente (electrones) y las partículas que, originadas en el mismo evento, llegan al espacio circun-terrestre (protones).

MATERIALES Y METODOS

Como material de base se emplearon los datos, sobre las mediciones de protones en distintos rangos de energía, que aparecen publicados en el "CATÁLOGO DE EVENTOS PROTÓNICOS PARA 1970-1979" publicado por el Izmiran en Moscú, así como los reportes de observaciones radioastronómicas en la banda centimétrica de los radioestallidos a ellos asociados que aparecen en el mismo catálogo y las observaciones en 15 y 6,7 GHz realizadas en la Estación Radioastronómica de La Habana (ERH).

Para analizar las características en la banda de radio se procedió a construir los espectros de radioemisión de los eventos protónicos observados en la ERH en el período 1970-1979. Estos espectros fueron analizados según la clasificación desarrollada en un trabajo anterior (Rodríguez, 1983), en que se determinó que las explosiones en radioondas pueden ser divididas por su espectro, en la banda de 1 a 21 cm, en las 6 clases espectrales que se detallan a continuación:

- Clase 1. Espectro monótono creciente.
- Clase 2. Espectro monótono decreciente.
- Clase 3. Espectro con un máximo en la

banda de los 6 cm, aproximadamente.

- Clase 4. Espectro con un máximo en la banda de los 3 cm, aproximadamente.
- Clase 5. Espectro complejo, con varios máximos.
- Clase 6. Espectro, aproximadamente, constante.

Debido a que para estos eventos no se contó siempre con observaciones en toda la banda (1-21 cm), lo que no permite separar en esos casos los eventos de la clase espectral 3 de los eventos de la clase 1, pudiera ocurrir que alguno de los eventos considerados en la clase espectral 1 fuese realmente de la clase 3, pero este efecto en la distribución fue analizado, y la inclusión de todos los casos indeterminados de los eventos considerados de clase espectral 1 en la clase 3 sólo conduce a igualar la distribución obtenida para las explosiones asociadas a eventos protónicos a la distribución general.

Para analizar si existe preferencia por alguna clase espectral en particular, se procedió a realizar una prueba de Kolmogorov-

Smirnov para confirmar si ambas muestras (Tabla 1), la analizada, para establecer la clasificación y que tomaba en consideración todas las explosiones ocurridas (estuviesen o no asociadas a eventos protónicos), y la muestra de eventos protónicos (fueron o no extraídas de una misma población).

TABLA 1. Distribución de las explosiones en la banda centimétrica según su espectro. T indica el total de las explosiones, y P las asociadas a eventos protónicos.

Clase	N		%	
	T	P	T	P
1	104	21	15	35
2	188	12	27	20
3	141	3	20	5
4	121	7	17	12
5	5	5	1	8
6	37	8	5	13

La comparación de ambas muestras arrojó el resultado de que no existe diferencia significativa entre las muestras para el nivel de significación de 1%. Sólo para una significación del 5% puede considerarse que las muestras son diferentes (Figs. 1 y 2).

De forma complementaria se analizó la brillantez e intensidad (área) de los destellos en Halfa asociados, obteniéndose la distribución que aparece en la Fig. 3. En esta figura se aprecia, en forma general, que los eventos protónicos están asociados a destellos brillantes, independientemente de su intensidad (área). Es interesante el resultado consistente en que asociados a eventos protónicos hay una cantidad no despreciable de subflares.

Otro aspecto que se analizó fue la relación entre la intensidad del evento protóni-

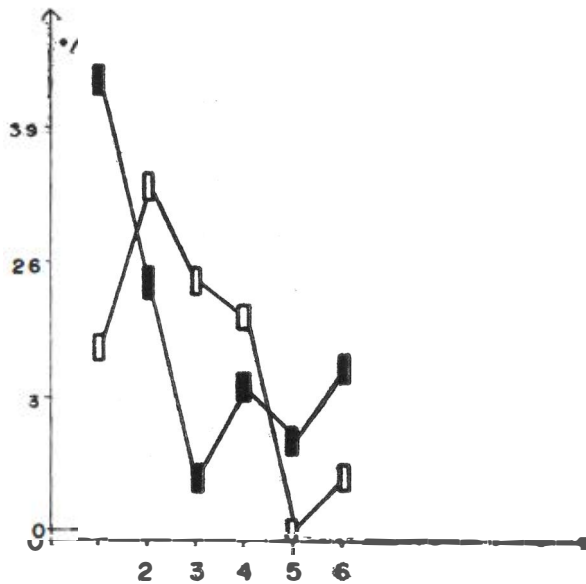


Fig. 1. Distribución de las explosiones en la banda centimétrica según su clase espectral (rectángulos blancos). Distribución de las explosiones asociadas a los eventos protónicos (rectángulos negros).

co y la clase espectral de las explosiones en radioondas.

Se construyeron los histogramas de la intensidad del flujo de protones en el espacio circunferencial, para cada una de las clases espectrales. En la Fig. 4 puede verse que el carácter de la distribución para los eventos de clase espectral 4 se diferencia sensiblemente de la del resto de las clases espectrales, y los límites superiores de la intensidad del flujo de protones indican un ordenamiento de las clases espectrales, según este parámetro, por la secuencia 3-6-5-2-1-4, en orden creciente de la intensidad máxima observada en cada clase.

Se procedió, además, para aquellos casos de las clases espectrales 1, 3, 4, y 5, en que

la pendiente del espectro permite asumir un mecanismo no térmico, y bajo la suposición de que la distribución de las partículas que originan la radiación siguen una ley del tipo

$$dN(E) = E^{-\gamma} dE \quad (1)$$

que es la que se ha observado que correlaciona bien con las observaciones de las explosiones en Rayos-X (Kane, 1973); se obtuvo el índice espectral característico para cada explosión en radioondas en el momento del máximo según

$$\gamma = \log [F(f1)/F(f2)] / \log [f2/f1] \quad (2)$$

y bajo las suposiciones expresadas se calculó el índice energético de las partículas (electrones) según

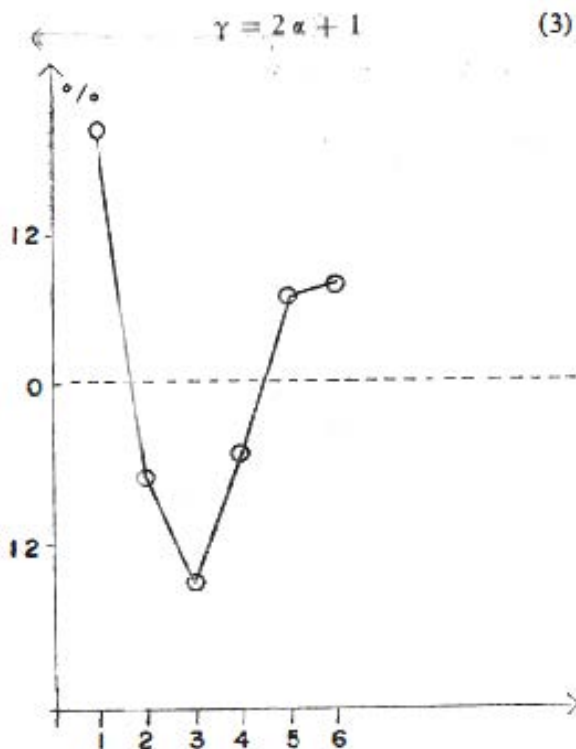


Fig. 2. Diferencia entre las distribuciones según la clase espectral de los eventos protónicos y de los eventos en general. [%P-%T] (eje de las Y).

El índice energético de las partículas (protones) en el espacio circunferrestre fue calculado empleando el método descrito en el propio catálogo de referencia. Estos parámetros permitieron estudiar la relación entre ellos, y su dependencia de la clase espectral.

En primer lugar se procedió a buscar la distribución de los índices energéticos, cuyos histogramas se presentan en la Fig. 5, y en la que puede apreciarse que, mientras el índice energético de las partículas en la fuente presenta un máximo agudo en el orden de 2,7, el índice energético de las par-

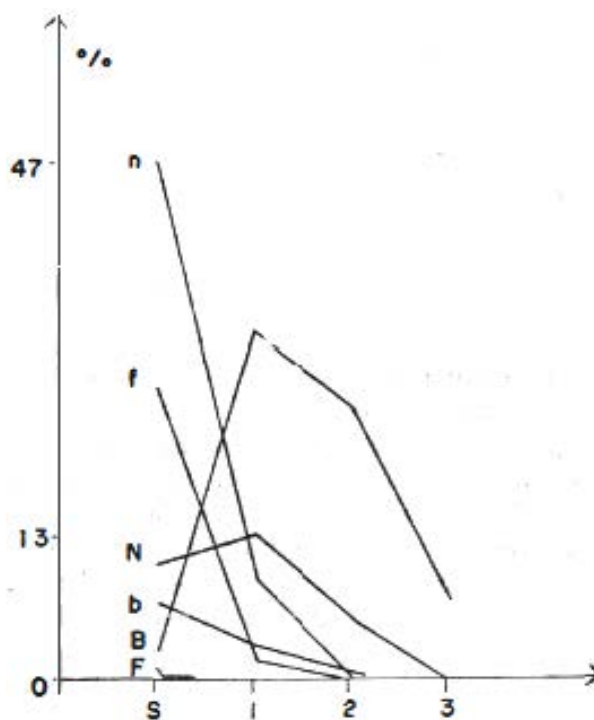


Fig. 3. Distribución de los destellos en Halfa según su intensidad y brillo. N, B, F: destellos asociados a eventos protónicos; b, f, n: destellos asociados a la distribución general. Se indica el brillo en cada una de las distribuciones por importancia. Se aprecia que mientras en la distribución general dominan, generalmente, los destellos de brillantez normal, en los asociados a eventos protónicos dominan los brillantes.

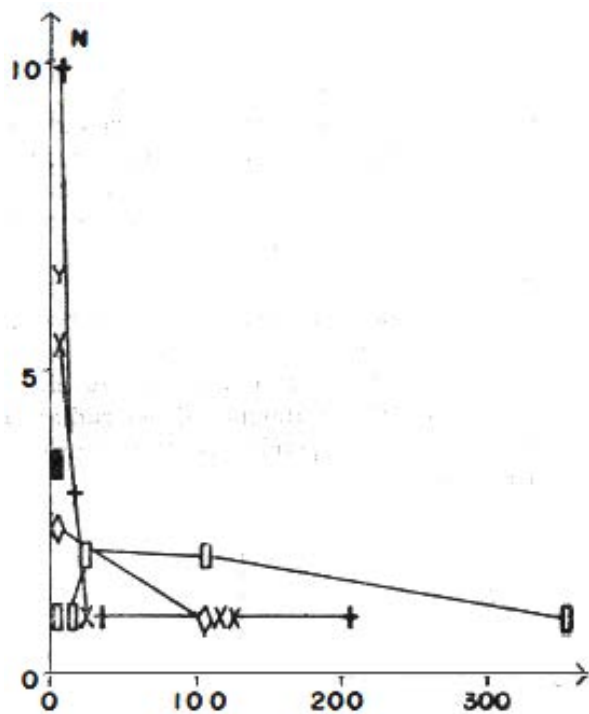
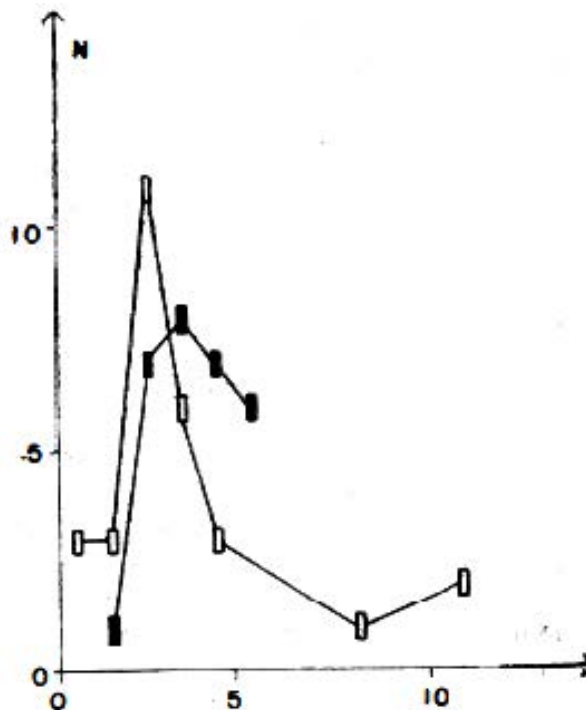


Fig. 4. Histograma de la intensidad del flujo de protones en el medio circunferrestre para las distintas clases espectrales. Clase 1, +; clase 2, x; clase 3, rectángulo negro; clase 4, rectángulo blanco; clase 5, rombo; clase 6, Y.

Fig. 5. Distribución de los índices energéticos. Los cuadros en blanco representan la distribución del índice energético de los electrones acelerados en la fuente solar. Los cuadros negros representan la distribución del índice energético de los protones en el medio circunferrestre.

Se nota claramente que los máximos no coinciden, efecto que puede estar ligado a la propagación de las partículas en el medio interplanetario, y llevar a un ablandamiento del espectro energético.



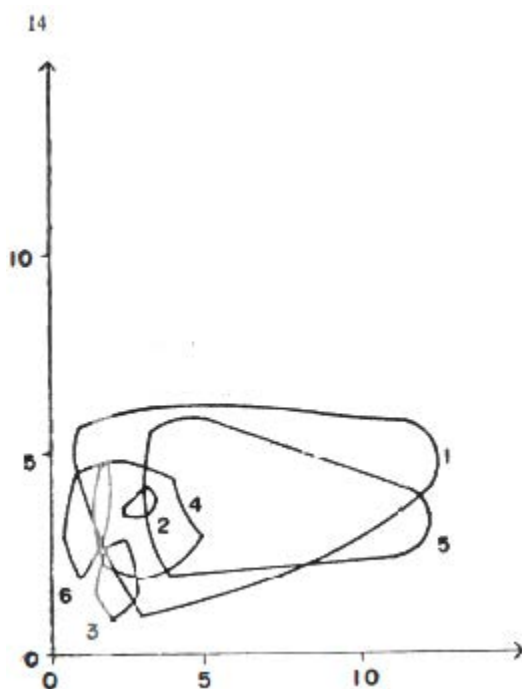


Fig. 6. Distribución por clases espectrales de la relación entre los índices energéticos. En el eje de las X se indica el índice según datos de radio; en el de las Y, el de los protones. Las regiones en las que se distribuyen las distintas clases espectrales indican que las condiciones de las fuentes que originan eventos de las clases espectrales 1 y 5 pueden tener un mayor rango de variación de sus parámetros físicos, o que éstas son esencialmente más complejas que las fuentes que originan el resto de las clases espectrales.

tículas en el medio circunferrestre es menos definido y del orden de 4,0.

El análisis de la relación de ambos índices energéticos (Fig. 6) muestra que, mientras las clases espectrales 2, 3, 4, y 6, ocupan una zona relativamente pequeña (a pesar de ser el 50% de los casos), las clases espectrales 1 y 5 se extienden considerablemente en el diagrama, en el sentido del aumento del índice energético de las partículas en la fuente.

De forma complementaria se analizó la distribución en el disco solar de la posición de los eventos considerados (Fig. 7). Por haber sido registrados sólo dos casos a más de 50 grados del meridiano central hacia el E, no es necesario entrar a considerar factores de heliolongitud en los análisis realizados (Ocheckov, 1986).

Se nota sin embargo una disminución del número de casos a distancias mayores de 40 grados hacia el E del meridiano central, que puede estar relacionada con el efecto conocido de debilitamiento de la radiación corpuscular, en dependencia de su posición en el disco.

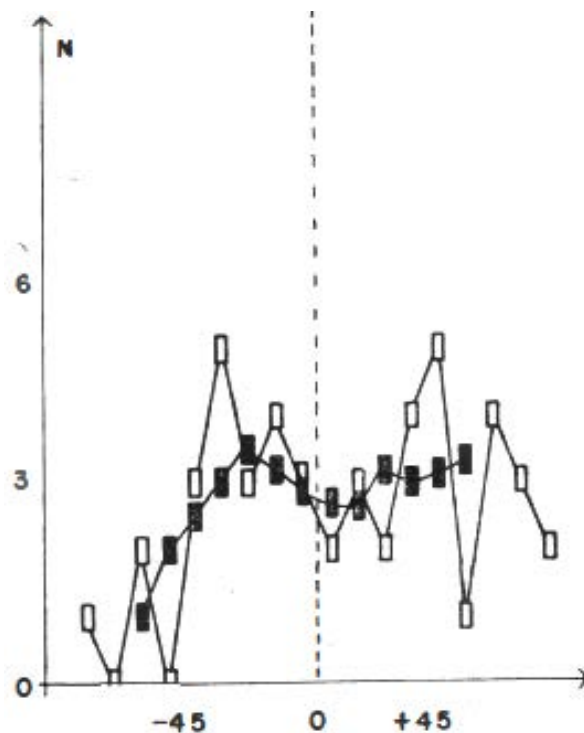


Fig. 7. Distribución heliográfica de los eventos protónicos. En el eje de las X se da la heliolongitud; el signo - indica el Este. Los cuadros blancos muestran el valor observado; los negros, el suavizado.

RESULTADOS Y DISCUSION

El análisis de la distribución por clases espectrales muestra que no existe una diferencia apreciable en el carácter del espectro en la banda centimétrica para los eventos protónicos, aunque hay evidencias de que, en general, éstos están asociados a explosiones solares en que las partículas adquieren una gran energía presentando el espectro un carácter no térmico. Esta hipótesis se apoya también en el análisis de las características del destello óptico, que mostró no sólo el resultado conocido de que los eventos protónicos se asocian a destellos de mayor importancia (área), sino que además, están asociados a destellos brillantes. Estos resultados pueden interpretarse de forma cualitativa si se asume que, mientras en la aparición del destello y la determinación del carácter del espectro en la banda centimétrica juega un papel fundamental la estructura local del campo magnético, en la determinación de su carácter de evento protónico, quien juega un papel fundamental es la estructura global de la región activa (o tal vez del Complejo de Actividad), que es quien determina en mayor medida la posibilidad de las partículas de salir al medio interplanetario.

Esta hipótesis explica el resultado de que aparezcan indicios de una preferencia por los eventos más energéticos, ya que en estos casos las partículas tendrán una mayor posibilidad de escapar al espacio interplanetario.

La distribución de la intensidad del flujo de protones, para las distintas clases espectrales, muestra que sólo la clase 4 presenta un carácter esencialmente diferente al resto de las clases. Mientras que en todos los casos el máximo de la distribución está en

el intervalo de los menores flujos (0-50 u), para ella se obtiene un amplio máximo en el intervalo 200-1 000 u. En nuestro caso la unidad empleada es $\text{cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Sr}^{-1}$. Además, los valores máximos observados del flujo de protones indican que la intensidad en el momento del máximo está relacionada, probablemente, con la clase espectral (en forma creciente) según la secuencia 3-6-5-2-1-4. Este aspecto parece estar relacionado con las condiciones locales, en el sentido de que relaciona el carácter del espectro con el volumen de la atmósfera solar que es perturbada durante la explosión.

La distribución de los índices energéticos de las partículas en la fuente y en el espacio circunplanetario no contradice la suposición de que ambas tengan un mismo origen, ya que el ablandamiento del espectro puede originarse en el proceso de propagación de los protones hacia y en el medio interplanetario. Además, la estructura global de la región activa puede establecer límites de energía que lleven a este ablandamiento, o la propia propagación puede hacer que las partículas más energéticas desaparezcan del volumen principal de partículas, ablandándose el espectro. De todas formas este es un aspecto que debe estudiarse de forma particular.

La búsqueda de una relación entre ambos índices energéticos mostró que las clases 1 y 5 muestran una dispersión mayor que el resto de las clases, lo que en los marcos de este trabajo se interpreta como que en estos casos las condiciones físicas en la región activa parecen ser sensiblemente más variadas que para el resto de las clases espectrales.

CONCLUSIONES

El análisis conjunto de los eventos protónicos y de las explosiones solares, en la banda centimétrica, observadas en la ERH asociada a ellos mostró que mientras la intensidad del flujo de protones está relacionado con el carácter del espectro, lo que es un indicio de que está relacionado con las condiciones locales de la región en que ocu-

rre el evento, el carácter de protónico no muestra relación con el carácter del espectro, lo que indica por tanto que el carácter protónico debe estar relacionado con las características generales de la región activa y que, por lo tanto, la caracterización de la misma requiere de observaciones detalladas en un amplio diapasón.

REFERENCIAS

- Enome, S., y H. Tanaka (1973): High energy phenomena on the Sun. *NASA SP-342*, Washington, pp. 78-86.
- Guidice, D. A., y J. P. Castelli (1973): High energy phenomena on the Sun. *NASA SP-342*, Washington, pp. 87-104.
- Kane, R. S. (1973): High energy phenomena on the Sun. *NASA SP-342*, Washington, pp. 55-78.
- Kuklin, G. V. (1982): *Solniechnie Vspishki*. Sib-IZMIR. Nauka, Moscú, pp. 178-219.
- Ocheckov, Yu. P. (1986): Geliologotnaya zavisimost intensivnosti solnechnix protonnix sobitii. *Geomagnetiz i Aeronomiya*, Tom. XXVI, No. 6: 1007-1009.
- Rodríguez, R. E. (1983): Resultados preliminares de la investigación de las explosiones solares en la banda centimétrica. *Cien. Tierra Espacio*, (6):21-31.

Ciencias de la Tierra y del Espacio, 14, 1987

CHARACTERISTICS OF SOME SOLAR MICROWAVE BURSTS RELATED WITH SOLAR PROTON EVENTS OBSERVED IN THE HAVANA RADIOASTROMICAL STATION

Ramón E. RODRÍGUEZ TABOADA

ABSTRACT. *An statistical study of solar microwave bursts and their related proton events was realized. The distribution of the energetic indexes for the particles in the solar source and in the nearby space were obtained, and the relation of the proton flux intensity with the spectral character of the microwave burst analyzed. The role of the solar magnetic fields was considered to explain the obtained results.*