

# **Evolución temporal del índice espectral y el porcentaje de polarización de explosiones solares en banda centimétrica**

RAMÓN E. RODRÍGUEZ TABOADA

## **RESUMEN**

Se analizó la evolución temporal de ocho eventos, con semejante característica espectral, observados simultáneamente en 6,7 y 15,0 GHz en la Estación Radioastronómica de La Habana. Se concluye que no puede hablarse de valores característicos del índice espectral para las distintas fases de los eventos; que por lo general el máximo del índice espectral se alcanza antes del máximo de la emisión total; y que el comportamiento reportado como poco frecuente (máximos coincidentes de la emisión total y del porcentaje de polarización) aparece con relativa frecuencia, al menos para la clase espectral analizada. Se considera la posibilidad de explicar el carácter del espectro en el momento del máximo de emisión total por el mecanismo de radiación sincrotrón.

## **1. INTRODUCCIÓN**

Los procesos no estacionarios en la atmósfera solar son procesos esencialmente complejos, en los cuales pueden tener efecto diversos mecanismos de emisión, incluso simultáneamente. Es por esto que en el estudio de las explosiones solares uno de los objetos de investigación es la determinación de la importancia de los distintos mecanismos de emisión en sus diversas manifestaciones.

En investigaciones anteriores (RODRÍGUEZ, 1983) hemos tratado de clasificar, dentro de la banda de 1 a 21 cm, las explosiones solares atendiendo a su espectro, para de esta forma obtener una base de datos más homogénea, que nos permita hacer inferencias sobre los posibles mecanismos de generación y dinámica de las explosiones solares.

En este trabajo se analiza la evolución temporal de los parámetros índice espectral y porcentaje de polarización de eventos obser-

---

Manuscrito aprobado el 15 de marzo de 1985.

R. E. Rodríguez pertenece al Instituto de Geofísica y Astronomía, de la Academia de Ciencias de Cuba.

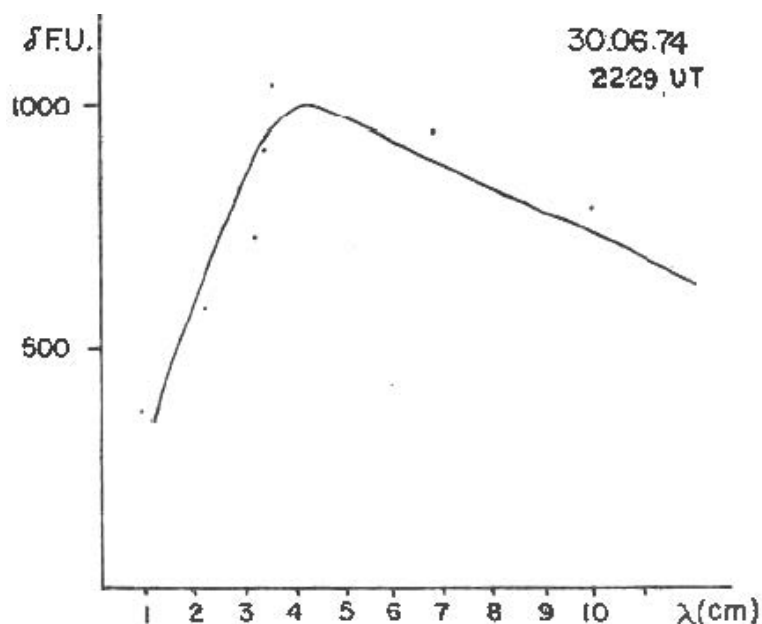


FIG. 1. Espectro (en el momento del máximo) del evento 30.06.74 (22<sup>h</sup> 29<sup>m</sup>), perteneciente a la clase espectral 4, que, como puede apreciarse, está caracterizada por un máximo en la zona de los 9,0 GHz, aproximadamente (datos de *Solar Geophysical Data* y de la Estación Radioastronómica de La Habana).

vados simultáneamente en 6,7 y 15,0 GHz, pertenecientes a la clase espectral 4; eventos cuyo espectro en el máximo de emisión muestra (Fig. 1) un marcado máximo en la zona de la banda centimétrica corta (aproximadamente 9,0 GHz), y sobre la base de los valores observados se hacen inferencias sobre la importancia del mecanismo de radiación sincrotrón para esta clase espectral.

## 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Como material de base se tomaron 8 eventos de clase espectral 4, observados simultáneamente en 6,7 y 15,0 GHz, en la Estación Radioastronómica de La Habana (ERH), los días 1 y 6 de julio de 1974 (21<sup>h</sup> 54<sup>m</sup>, 19<sup>h</sup> 04<sup>m</sup>), 6 y 30 de junio de 1974 (15<sup>h</sup> 40<sup>m</sup>, 22<sup>h</sup> 47<sup>m</sup>), 9 y 17 de septiembre de 1977 (16<sup>h</sup> 40<sup>m</sup>, 15<sup>h</sup> 15<sup>m</sup>), y 29 y 30 de abril de 1976 (19<sup>h</sup> 10<sup>m</sup>, 21<sup>h</sup> 08<sup>m</sup>). Los registros de intensidad y polarización de estos eventos fueron cifrados con un intervalo de 10 seg, y a los datos así obtenidos se les procesó con un programa para obtener la evolución temporal del índice espectral ( $\alpha$ ), definido según la expresión

$$\alpha = \log(F_1/F_2) / \log(f_2/f_1) \quad (1)$$

donde  $F$  indica el flujo observado y  $f$  la frecuencia en que se realizó la observación; y el porcentaje de polarización circular según la expresión

$$P = F^V/2F^I \cdot 100 \quad (2)$$

donde  $F^V$  es el flujo polarizado circularmente y  $F^I$  es el flujo total; ambos, por supuesto, para la misma frecuencia de observación.

Estos datos tabulados constituyeron el material empleado para construir las curvas de evolución temporal de estos dos parámetros, para cada uno de estos eventos; las curvas así obtenidas fueron suavizadas con el fin de hacer más fácil su análisis.

### 3. RESULTADOS

De estas curvas se tomaron valores en las distintas fases del evento, precursor, máximo y postevento, con los cuales se calculó el valor medio y la dispersión. También se calculó el valor del índice espectral por los reportes del *Solar Geophysical Data* para estimar la influencia que tiene el no disponer de observaciones detalladas en la banda de los 3 cm. Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Las dispersiones son muy altas, lo que en nuestra opinión no permite hablar de valores típicos para las distintas fases del evento. La situación permanece cuando se toma en consideración no el índice espectral de la emisión total sino el de la emisión polarizada (Tabla 1).

En forma preliminar se analizó la posición relativa de los máximos de intensidad e índice espectral, obteniéndose que, en línea general, el máximo del índice espectral se alcanza antes del máximo de la emisión total (6 de 8 casos; Tabla 2) y que el de la emisión polarizada le sucede (50% de los casos; Tabla 2). Además, se encontró que el valor del índice espectral de la emisión polarizada es menor que el de la emisión total, lo que puede estar relacionado con el tamaño relativo de las fuentes polarizadas y no polarizadas, así como con el fenómeno de depolarización de las ondas normales en el campo magnético cuasitransversal del grupo en la dirección de propagación (Figs. 2 y 3).

El análisis de las curvas de evolución temporal del porcentaje de polarización en 15,0 y 6,7 GHz mostró que en cuatro de siete eventos analizados, a máximos relativos de la emisión total le corresponden mínimos relativos del porcentaje de polarización en ambas frecuencias. No obstante, debemos señalar que los casos en que se observa otro comportamiento no son tan poco probables (al menos para esta clase espectral) como se deduce de la literatura (STEFFEN, 1975). En particular, podemos ver que el fenómeno no ocurre en todo el espec-

**TABLA 1. Momento del cálculo del índice espectral.**

Evento	Pre.	Máx.	Post.	S.G.D.
<b>Emisión total</b>				
17.09.77	-0,5	1,4	0,7	1,32
30.04.76	-1,0	1,7	0,2	0,92
29.04.76	0,4	1,3	0,6	2,24
06.07.74	-1,0	0,5	0,5	0,34
01.07.74	-0,5	0,0	-0,5	0,79
30.06.74	-1,0	0,0	-0,7	0,50
06.06.74	-1,0	0,8	1,5	0,94
09.09.74	-0,7	0,6	0,2	
Promedio	-0,66	0,79	0,31	1,01
Dipersión	±0,48	0,64	0,70	
<b>Emisión polarizada</b>				
17.09.77	-2,0	0,5	-0,5	
30.04.76	-1,8	0,5	3,0	
29.04.76	-1,8	0,5	-1,5	
06.07.74	0,5	2,5	-1,0	
01.07.74	-0,5	-0,5	0,0	
30.06.74	-1,0	-0,6	-0,5	
06.06.74	-3,0	1,0	-3,0	
09.09.74	0,0	-1,5	0,0	
Promedio	-1,20	0,31	-0,44	
Dispersión	±1,2	1,2	1,7	

**TABLA 2. Momento del máximo del índice espectral.**

Evento	Precede	Coincide	Sucedede
17.09.77		×	
30.04.76	×		
29.04.76			×
06.07.74	×		
07.07.74	×		
30.06.74	×		
06.06.74	×		
09.09.74	×		

**Emisión polarizada respecto al máximo del índice espectral de la emisión total**

17.09.77			×
30.04.76			×
29.04.76		×	
06.07.74	×		
01.07.74			×
30.06.74		×	
06.06.74			×
09.09.74	×		

tro, pues puede presentarse en una frecuencia y en otra no (Figs. 2 y 3).

El índice espectral y el grado de polarización permiten analizar la acción del mecanismo de radiación sincrotrón, por lo que procedimos a calcular los valores del grado de polarización en 15,0 y 6,7 GHz. La relación del porcentaje de polarización de estas frecuencias para el momento del máximo varía entre 11 y 1, con un valor promedio de 4,2 veces (Tabla 3); si se eliminan los días 06/07/74 y

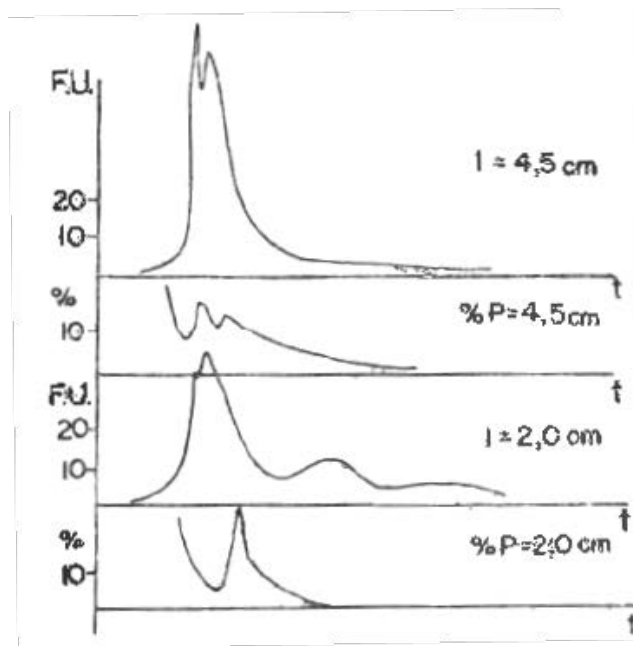
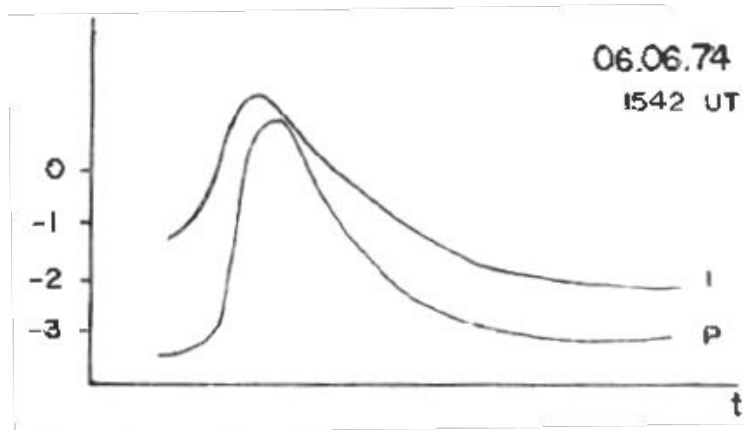


FIG. 2. Arriba: esquema de la evolución temporal del índice espectral de las emisiones total (I) y polarizada circularmente (P), durante el evento 06.06.74 (15<sup>h</sup> 42<sup>m</sup>). Abajo: esquema de la evolución temporal de la emisión total y del porcentaje de polarización circular, durante el evento 06.06.74 (15<sup>h</sup> 42<sup>m</sup>), en que puede apreciarse el comportamiento llamado normal (coincidencia de los máximos de emisión total con mínimos del grado de polarización circular).

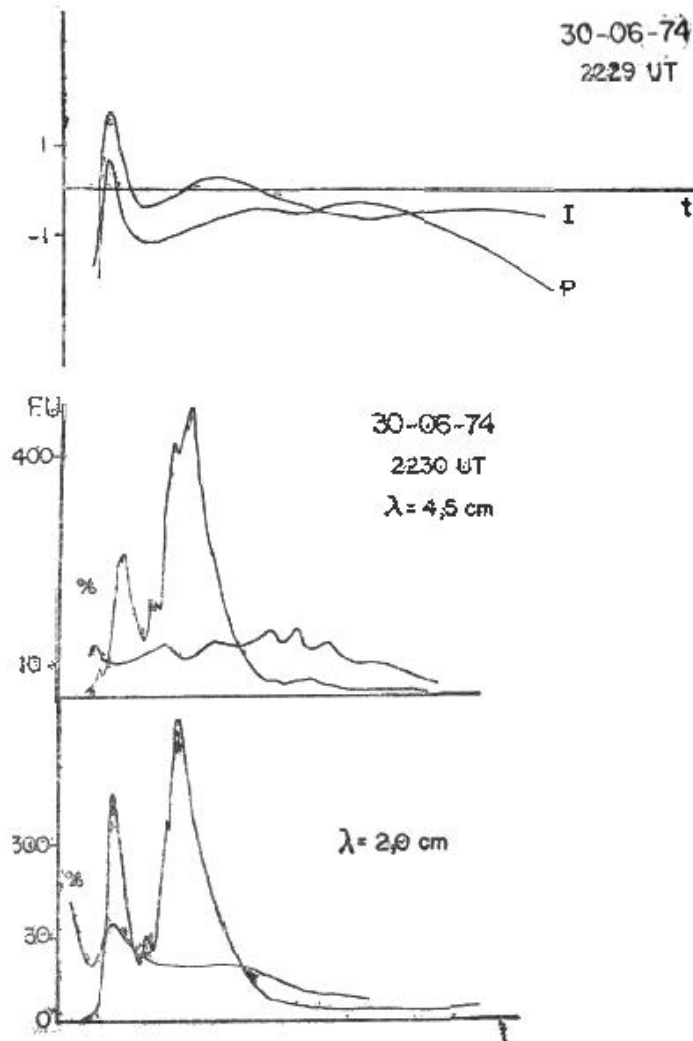


FIG. 3. Arriba: esquema de la evolución temporal del índice espectral de las emisiones total (I) y polarizada circularmente (P), durante el evento 30.06.74 (22<sup>h</sup> 29<sup>m</sup>). Abajo: esquema de la evolución temporal de la emisión total y del porcentaje de polarización circular, durante el evento 30.06.74 (22<sup>h</sup> 47<sup>m</sup>), en que puede apreciarse el comportamiento anormal (coincidencia de máximos de emisión total con máximos del grado de polarización circular) en 15,0 GHz (2,0 cm).

**TABLA 3.** Grado de polarización y relación del porcentaje de polarización para el momento del máximo.

Evento	Grado de polarización		Relación
	P (15,0 GHz)	P (6,7 GHz)	P (15,0 GHz) / P (6,7 GHz)
17.09.77	-0,26	-0,10	2,60
30.04.76	0,08	0,01	8,00
29.04.76	0,53	0,15	3,53
06.07.74	-0,22	0,02	11,00
01.07.74	0,07	0,04	1,75
30.06.74	-0,20	0,12	1,67
06.06.74	0,11	0,12	0,92

30/04/76, que presentaron saturación en algunas de las frecuencias, la relación cae a 2,1 como promedio, con límites entre 1 y 3,5 y valores promedio de 0,08 y 0,22 para 6,7 y 15,0 GHz, respectivamente.

Resumiendo los resultados:

- a) De la muestra analizada de eventos de clase espectral con un máximo en la banda centimétrica corta (clase espectral 4) se obtuvo que no puede hablarse de valores característicos del índice espectral en las distintas fases del evento debido a las grandes dispersiones observadas.
- b) En forma general, puede decirse que el máximo del índice espectral se alcanza antes de que la emisión total del evento alcance el máximo, así como que el índice espectral de la emisión polarizada es menor que el de la emisión total.
- c) La correspondencia entre máximos de la emisión total y mínimos de grado de polarización, reportada como comportamiento normal en la literatura, solo se observó en un 50% de los casos.

#### **4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES**

Estos resultados pueden ser interpretados desde el punto de vista de que el rango en que pueden ser aceleradas las partículas en las distintas explosiones solares puede variar en límites bastante amplios,



lo que puede conllevar la dispersión de los valores del índice espectral.

El hecho de que los máximos de emisión total y de los distintos índices espectrales calculados no se alcancen simultáneamente, apunta hacia que la estructura de la fuente del evento es una estructura compleja, al menos en su evolución temporal, donde diferentes mecanismos pueden tener distinta importancia a lo largo de la vida del evento, incluso dentro de las fases de vida consideradas.

El comportamiento hallado para el porcentaje de polarización requiere un análisis de las posibles condiciones físicas de la fuente sobre un modelo complejo de la evolución temporal de las mismas, que no ha sido abordado dentro de los marcos de este trabajo.

Los resultados experimentales obtenidos, sin embargo, permiten hacer consideraciones basadas en cálculos aproximados sobre algunas magnitudes físicas fundamentales de los eventos. Bajo la suposición de que en el momento del máximo la radiación se origina por radiación sincrotrón de un conjunto de partículas con distribución

$$dN(E) = E^{-\gamma} dE \quad (3)$$

entonces el índice espectral vendrá dado por

$$\alpha = (\gamma - 1)/2 \quad (4)$$

Tomando como valor promedio del índice espectral el de 0,8, obtenido para la emisión total, se obtiene un valor del índice energético  $\gamma$  igual a 2,6, valor menor que el de 4 obtenido por STEFFEN (1975), pero muy cercano al de 2,5 obtenido por DRAVSKIJ (1960). Sin embargo, la forma del espectro para esta clase espectral, una caída para las frecuencias por debajo de 6-7 GHz con un máximo cerca de los 9,5 GHz, indica que está actuando también otro mecanismo. Analicemos la posibilidad de que esta caída se deba a auto-absorción, empleando la expresión

$$\nu_{\max}^{5/2} = K(\gamma) (H \sin \varnothing)^{1/2} F_{\nu_{\max}} \Omega - 1 \quad (5)$$

donde  $\nu_{\max}$  es la frecuencia en que se alcanza el máximo,  $F_{\nu}$  es el flujo a la frecuencia  $\nu_{\max}$ ,  $H$  es la intensidad del campo magnético,  $\varnothing$  es el ángulo entre el campo magnético y la velocidad de las partículas,  $\Omega$  es el ángulo que sustenta la fuente, y  $K(\gamma)$  viene dado por

$$K(\gamma) = \frac{1}{4} (6/\pi)^{1/2} (e/m^3 c)^{1/2} \cdot \frac{(\gamma + 1)(3\gamma + 10)}{(3\gamma + 7)}$$

$$\frac{\Gamma\left(\frac{3\gamma + 2}{12}\right) \Gamma\left(\frac{3\gamma + 10}{12}\right)}{\Gamma\left(\frac{3\gamma - 1}{12}\right) \Gamma\left(\frac{3\gamma + 7}{12}\right)} \quad (6)$$

Los valores de este coeficiente se tomaron de PACHOLCZYK (1970). Tomando los valores siguientes: Flujo = 100 sfu,  $\Omega = 1$  min de arco, frecuencia del máximo = 9,5 GHz,  $\emptyset = 45^\circ$ , para obtener valores razonables del campo magnético (menos de 3 000 oe), se hace necesario que  $K(\gamma)$  sea del orden de  $2 \cdot 10^{36}$ , valor mayor que el de  $1,45 \cdot 10^{31}$  tabulado para  $\gamma$  igual a 6, lo que hace difícil explicar el comportamiento del espectro (máximo en 9,5 GHz) bajo esta suposición.

Sobre la base de los resultados obtenidos del grado de polarización circular para las diferentes frecuencias de observación (6,7 y 15 GHz), podemos conseguir, bajo las mismas suposiciones que anteriormente, la intensidad del campo magnético en la fuente; para ello empleamos la expresión

$$\pi(\nu) = 4/3^{1/2} \text{ ctg } \emptyset \quad \begin{matrix} (\gamma + 1) \\ \gamma(\gamma + 7/3) \end{matrix} \quad \begin{matrix} \Gamma\left(\frac{3\gamma + 4}{12}\right) \Gamma\left(\frac{3\gamma + 8}{12}\right) \\ \Gamma\left(\frac{3\gamma + 7}{12}\right) \Gamma\left(\frac{3\gamma - 1}{12}\right) \end{matrix} \times \\ \times (\gamma + 2) \times (\text{sen } \emptyset V_H/V)^{1/2} \quad (7)$$

donde la notación es la misma que en la expresión anterior; y empleando los coeficientes tabulados por LEGG y WESTFELD (1968) para  $\gamma$  igual a 2,6 y los grados de polarización observados como promedio para 6,7 (0,08) y 15 GHz (0,22), se obtienen respectivamente valores del campo de 6 y 110 oe valores que son admisibles de acuerdo con las condiciones físicas que se acepta existen en las fuentes, aunque difieren en un orden entre sí.

En conclusión, ambos aspectos, el grado de polarización y el carácter del espectro, indican para esta clase espectral una fuente compleja que no puede ser explicada por el modelo simple propuesto dentro de los marcos del mecanismo de radiación sincrotrón.

## REFERENCIAS

- DRAVSKIJ, A. F. (1960): Some peculiarities of the dynamic spectrum of bursts of the solar radioemission in the microwave region. *IZV. G.A.O.*, 21, 5, 164: 128-139.

LEGG, M. P. C., y WESTFELD, K. C. (1968): Elliptic polarization of synchrotron radiation. *Astrophys. J.*, 154:499-514.

PACHOLCZYK, A. G. (1970): *Radio astrophysics*. Freeman, San Francisco, 269 pp.

RODRÍGUEZ, R. E. (1983): Resultados preliminares de la investigación de las explosiones solares en banda centimétrica. *Cien. Tierra Espacio*, 6:21-31.

STEFFEN, P. (1975): A burst with a peculiar behavior. *Solar Phys.*, 44:149-154.

#### TEMPORAL EVOLUTION OF SPECTRAL INDEX AND OF PERCENTAGE OF POLARIZATION OF SOLAR BURSTS IN CENTIMETRIC BAND

##### ABSTRACT

The temporal behavior of eight bursts, with the same spectral characteristic, observed simultaneously on 6,7 and 15,0 GHz by the Havana Radioastronomical Station, was analyzed. It is concluded that it is not proper to speak of characteristic values of the spectral index for the different burst phases; that in general the spectral maximum of the index occurs before the total emission maximum; and that the behavior reported as unfrequent (coincidence of maximum total emission and maximum polarization degree) appears relatively frequently, at least for the spectral class analyzed. Consideration is given to the possibility of explaining the character of the spectrum at the time of total emission maximum by the synchrotron radiation mechanism.