

Caracterización de la radioemisión de dos tipos de eventos protónicos para $E > 10$ MeV, su direccionalidad y los procesos dinámicos de la CME.

Eduardo del Pozo García ⁽¹⁾ y Berta Meléndez Oliveros ⁽¹⁾.

⁽¹⁾ Instituto de Geofísica y Astronomía. Calle 212 No.2906, La Lisa, C. Habana, CP 11600, Cuba.

Recibido: enero-octubre, 2009	Aceptado: noviembre, 2009
-------------------------------	---------------------------

Resumen

Se presenta un análisis de las características de la radioemisión en banda centimétrica asociada a dos tipos de eventos protónicos para energías de más de 10 MeV y su relación con el flujo protónico incorporando algunos resultados anteriores sobre la diferente direccionalidad de los dos tipos de eventos protónicos. Se evidencia la existencia de un posible valor umbral en el proceso de aceleración-emisión de las partículas, con una intensificación del flujo protónico para los eventos de alta emisión en banda métrica, dando lugar a una marcada asimetría Este-Oeste en la salida de partículas. Mientras que los eventos de baja intensidad en banda métrica no presentan este efecto, muestran un diagrama de direccionalidad simétrico, y se propone:

- La posible relación de esta manifestación con la eventual desconexión anticipada de uno de los enlaces fotosféricos de la CME durante su ascenso en la atmósfera del Sol, como la posible causal de la existencia de dos tipos básicos de eventos protónicos según su nivel de radioemisión en banda métrica.
- El paradigma que considera la estructura espiral del campo magnético interplanetario como la causa principal de la asimetría Este-Oeste de todas las emisiones del Sol, debe ser cambiado sobre la base de la diferente direccionalidad de los eventos protónicos correspondiente a una probable diferente dinámica de los procesos de generación en la atmósfera del Sol.

Palabras clave: Eventos protónicos

Abstract

An analysis of the radioemission at centimetric band associated to two types of proton events for energy of more than 10 MeV, and separately analyzed according to their radioemission level at metric band, and its relation with proton flux intensity is presented. Some previous results about the directivity of the two types of proton events are also included in the analysis.

One threshold value in the particle acceleration-emission process with proton flux intensification is evidenced at those proton events with high intensity at metric band, taking origin to a remarkable East-West asymmetry in the proton flux directivity. While, the proton events with relatively low metric radioemission do not shown any threshold, and present a symmetric proton flux directivity diagram, and its proposed:

- The possible of earlier CME one-footpoint disconnection as the origin of the intense and asymmetric proton flux of the proton events with high intensity at metric band.
- The current paradigm that consider the spiral structure of the interplanetary magnetic field as main origin of the East-West asymmetry of the solar emissions, should be changed by the different directivity of the two types of events according their different dynamics at the Sun atmosphere.

Key words: Proton events.

Introducción

El Clima Espacial incluye el conjunto de las emisiones solares siempre presentes que se incrementan notablemente con la ocurrencia de grandes eventos en el Sol que. El mismo caracteriza por tres componentes principales:

- Las ondas electromagnéticas que arriban a la Tierra en unos 8 minutos
- Protones de alta energía que arriban en un intervalo de 1 a 40 horas
- Nubes de plasma que arriban unos dos días después

Los protones de alta energía se emiten en algunos eventos solares, que son de alta incidencia en la actividad humana extraterrestre y causantes de la absorción en las capas polares PCA con efectos sobre las comunicaciones, que eventualmente alcanzan el nivel de energía de los rayos cósmicos y pueden llegar a ser intensos al nivel de la superficie del planeta [Ryan, J.M. et al; 1998].

Por otra parte los nuevos resultados de la investigación sobre los fenómenos solares y el medio interplanetario [Klassen, A. et al 2000] [Claben H. T. et al 1998] [Klein K. L. et al, 2001], [Kardapolova, et al 2008] continúan desarrollando la base de conocimientos necesaria para caracterizar la intensidad del flujo protónico.

La mayoría de los eventos protónicos están asociados a eyecciones de masa coronal con una potente emisión en ondas de radio a los radioeventos denominados “gran burst” (GB) o su variante con varios máximos de emisión, los denominados “complejos” (C) según la clasificación de radioeventos.

Los GB y C presentan una gran emisión tanto en banda métrica como en banda centimétrica, y es precisamente esta emisión la que nos brinda la posibilidad de obtener una información por adelantado para pronosticar sobre el flujo protónico que va arribar a las inmediaciones de la Tierra unas horas después.

Después de ocurrir un gran evento en el Sol y producirse los primeros efectos en la Tierra por acción de las ondas electromagnéticas, surge la necesidad de saber si unas horas después se producirá el arribo de protones de alta energía y cual será la intensidad del flujo protónico.

Parte de los eventos no presentan flujo de protones de alta energía manteniéndose el nivel de flujo protónico anterior al evento, lo que puede dar lugar a falsas alarmas en los pronósticos del estado del clima espacial en detrimento de los pronósticos del estado de la magnetosfera, la ionosfera y las comunicaciones. Esto no ocurre solamente en los eventos de pequeña intensidad en ondas de radio, sino también en los grandes eventos, en los casos que presentan un tiempo relativamente pequeño de máxima aceleración de partículas, llamados eventos impulsivos.

Además, es conocido que los eventos protónicos muestran dos máximos en la radioemisión, por lo general de amplitud semejante. Esto puede ser indicativo de la existencia de dos procesos de aceleración de partículas, un proceso inicial en la CME y otro durante el avance de la onda de choque hacia el exterior del Sol [Klein K.L., 2001] [Vashenyuk E.V., 2006].

Desde los primeros trabajos en IZMIRAN [Akinjian, S. T. et al, 1977], [Chertok, I. M., 1982] al analizar el comportamiento de los datos de radioemisión del evento solar y el flujo protónico se encontró la existencia de dos comportamientos en los gráficos de distribución de la intensidad del flujo protónico con la heliolongitud según su intensidad de la radioemisión en banda métrica fuera muy alta o relativamente baja. Y el análisis de la dependencia de la intensidad del flujo protónico con la heliolongitud se realizó por separado en dos grupos de eventos, según el nivel de radioemisión en banda métrica. Con posterioridad se analizó un número mayor de casos y se incluyó el índice del espectro energético en la colaboración IGA-IZMIRAN [Fomichev V.V., Chertok I.M., Del Pozo E., 1989, ---1989a].

Posteriormente con estos dos tipos de eventos, los datos fueron analizados completamente por separado utilizando la regresión múltiple con análisis de varianza y se determinaron dos diferentes diagramas de direccionalidad de los referidos tipos de eventos [Del Pozo, et al 1996, --- et. al 1998], lo que explica muy bien el diferente comportamiento en el arribo del flujo protónico según la posición relativa en el Sol respecto a la Tierra, para cada tipo de evento por separado.

En sucesivos resultados, el análisis por separado de los dos tipos de eventos protónicos fue fructífero con diferentes conjuntos de eventos protónicos [Del Pozo, et al 1996, --- et. al 1998], [Del Pozo, E., et al 2003], [Del Pozo, E., et al 2006].

En el presente artículo se profundiza en las características de la radioemisión asociada a los eventos protónicos y en el modelo de “Diagnóstico y Pronóstico de los Eventos Protónicos” [Fomichev V.V., Chertok I.M., Del Pozo E., 1989, ---1989 a] incorporando algunos resultados anteriores obtenidos sobre los dos grupos de eventos protónicos, y se realiza un análisis más detallado de los elementos observacionales de las CMEs que dan validez al criterio de existencia de dos tipos básicos de eventos protónicos según su nivel de radioemisión en banda métrica para energías de más de 10 MeV.

Materiales y métodos

Se utilizaron los eventos protónicos del periodo 1967-2003” que fueron identificados a partir de las observaciones de la intensidad de flujo protónico de los satélites GOES y los destellos en H-Alpha, reportados en la Solar Geophysical Data y en el sitio de la NOAA: <ftp://ftp.ngdc.noaa.gov>. Los eventos protónicos fueron tomados del sitio ftp://ftp.ngdc.noaa.gov/stp/solar_data/sat_environment/particles/p_events.lst

Las la intensidad de la radioemisión de las bandas métrica y centimétrica fueron tomados de la Solar Geophysical Data y del sitio de la NOAA, en el cual se asocian con la hora del máximo del destello en H-alpha y rayos-X.

Los datos fueron seleccionados de la siguiente forma:

- Se tomaron los eventos que se identifican con los destellos en el disco visible del Sol.
- Se consideraron como eventos protónicos aquellos que presentan una intensidad máxima del flujo de protones observado en la Tierra con intensidad $I_{10} > 1.5 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ y de energía $E > 10$ MeV. Además fueron incluidos los eventos solares que satisfacían el criterio de protónico de “Solar Geophysical Data” [1966-2003].
- Los eventos que se observan sobre el fondo de una perturbación geomagnética de gran intensidad, que provoca una variación complementaria de los parámetros de estos flujos protónicos no fueron incluidos en el análisis [Fomichev et al 1989].
- No fueron incluidos los eventos producidos en una región de gran actividad, ni los casos en que el flujo protónico observado fue el resultado de eventos de diferentes zonas, pues en ambos casos no es posible separar con exactitud a que evento corresponden los flujos protónicos observados.

La selección del material se siguió la asociación de los eventos protónicos utilizando los datos temporales de ocurrencia y posición de los destellos y los CME de la revista Solar Geophysical Data [1997-2003], más las asociaciones hechas de los CME con los destellos por Gopalswamy et al, [2001]; más los datos de los CME que fueron registrados por el Solar Heliospheric Observatory (SOHO) y el Large Angle and Spectrometric Coronagraph (LASCO), los cuales están listados en el catálogo LASCO CME de la NASA [1997-2003]. En la selección del material se siguió la asociación de los eventos protónicos utilizando los datos temporales de ocurrencia y posición de los destellos de la revista Solar Geophysical Data [1997-2003]. En total se utilizaron 102 eventos protónicos, 59 de radioemisión métrica débil (menos de 5000 sfu), y 43 de radioemisión métrica intensa (igual o mayor de 5000 sfu). Se utilizaron las variables:

- La intensidad de la radioemisión en banda centimétrica: 2995 MHz (S3), 4995 MHz (S5), 6700 MHz (S7), 9500 MHz (S9) y 15000 MHz (S15), en unidades $10^{-22} \text{ W m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (sfu)
- La intensidad de la radioemisión en banda métrica: 100 MHz (S100) y 200-300 MHz (S200)
- Coordenadas heliolongitud del destello respecto al meridiano central del Sol - θ (en grados)
- Velocidad inicial de la CME - V_0 , en Km. s^{-1}
- La intensidad del flujo protónico para energías de más de 10 MeV en $\text{cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ ster}^{-1}$ -Fp
- Adicionalmente se calcularon los parámetros S7/S9, S7/S15 y S9/S15 caracterizadores del radioespectro, constituidos por los cocientes de las intensidades máximas del radioevento en 6700, 9500 y 15000 MHz..

Resultados y discusión

Caracterización de los dos Tipos de Eventos Protónicos para $E > 10$ MeV

1- Antecedentes: Las investigaciones sobre eventos protónicos desarrolladas en IZMIRAN en los años 70-80s, permitieron desarrollar las primeras versiones del modelo de diagnóstico y pronóstico de los eventos protónicos.

La caracterización del flujo protónico en estos años se realizó sobre la base conceptual:

- Para alcanzar suficiente energía, salir del Sol y de sus inmediateces los protones deben ser fuertemente acelerados durante algún tiempo, conjuntamente con los electrones del plasma.
- Los electrones acelerados emiten intensamente en ondas de radio dando lugar a los eventos del tipo II asociados a la onda de choque, siendo la intensidad en banda centimétrica un indicador del grado de aceleración que van alcanzando las partículas.
- De acuerdo a la intensidad y la topología de los campos magnéticos presentes en la zona que rodea al evento, es el grado de interacción en la alta corona del plasma caliente emergente y de las partículas de mayor energía que emite con la distribución del plasma coronal preexistente, lo que determina las condiciones de propagación en la corona de la onda de choque y de las partículas cargadas de alta energía:

- Las partículas van saliendo de la perturbación en ascenso a velocidades cercanas a la de la luz a medida que se desplaza por la alta corona, siendo la radioemisión en banda métrica un indicador del nivel de esta interacción.
- La intensidad de la radioemisión en banda métrica caracteriza dos tipos básicos de comportamiento en el evento protónico, los eventos de componente métrica intensa (met-1) y los de componente débil (met-2).
- Las partículas ya aceleradas y la propia onda de choque se propagan hacia el exterior del Sol penetrando en el medio interplanetario, dando lugar a otros procesos.
- Y el medio interplanetario modifica la propagación tanto de las partículas de mayor energía que se adelantan en su salida hacia el medio interplanetario, como el plasma saliente de la CME conformando la eyección de masa coronal interplanetaria (ICME). Estas emisiones son desviadas debido a la forma espiral del campo magnético interplanetario, el cual va modificando la dirección en que se propagan las partículas, de tal forma que observando desde la Tierra deben ser desviadas hacia el Este del Sol

De esta forma se consideró [Fomichev et al 1989], que la intensidad del flujo protónico que arriba a la Tierra depende de los valores de aquellos parámetros que contienen información sobre los procesos anteriormente mencionados:

- La intensidad de radioemisión de banda centimétrica, como un indicador de la magnitud inicial de la aceleración emitida al inicio de los procesos de aceleración de partículas del SEP
- La intensidad de radioemisión de banda métrica que caracteriza la salida y la propagación de la perturbación a través de la alta corona del Sol, y se determinó que el nivel de intensidad en banda métrica para dividir en los dos grupos básicos de eventos es de unas 5000 sfu.
- La posición relativa entre la emisión en el Sol y la posición de la Tierra en la órbita, aproximada por la heliolongitud del destello.

El acierto de estas primeras investigaciones tuvo uno de sus fundamentos en considerar en parte del análisis, que los eventos protónicos se agrupan en dos tipos básicos según su nivel de emisión en banda métrica.

El escenario dinámico de la aceleración de partículas hasta alcanzar altas energías en el plasma en la onda de choque del evento se consideró el mismo para ambos grupos de eventos, Mientras que el diferente nivel de emisión en banda métrica y los diferentes comportamientos de los dos tipos de eventos protónicos se consideró asociado a las condiciones de salida de las partículas emitidas por el plasma energizado, sin considerar que, mas que condiciones de salida, en estos complejos eventos podían tener lugar otros procesos y diversos escenarios de aceleración-emisión-salida en las fuentes emisoras dando lugar a diferentes emisiones en banda métrica y centimétrica, que actualmente forma parte del concepto de la CME y los procesos asociados.

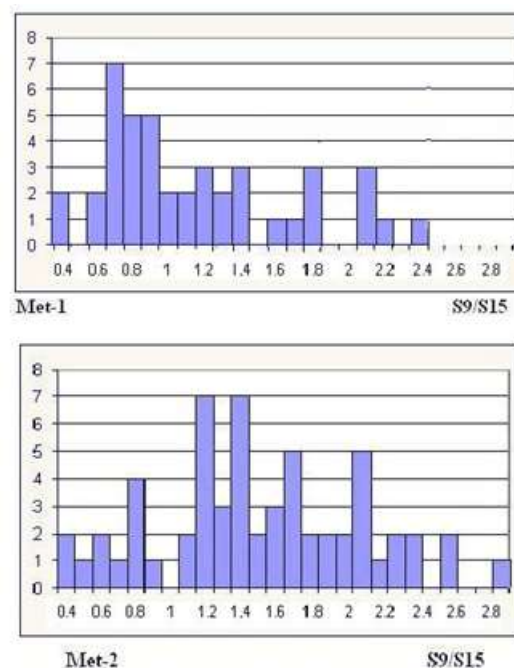


Fig 1: Distribución de los eventos protónicos (met-1 y met-2) según el parámetro de radioespectro S9/S15.

2- Características de la Radioemisión de los dos Tipos de Eventos:

Para determinar cuan diferente son estos dos tipos de eventos es necesario profundizar en sus características de radioemisión: En la Fig.1 se presentan los histogramas de la distribución de valores del parámetro de espectro de

banda centimétrica S9/S15, para los dos grupos de eventos protónicos. Se observa claramente la diferencia entre los dos histogramas.

En la mayoría de los eventos del grupo met-1, el 55% tienen menor valor del parámetro S9/S15, con $S9/S15 < 1$. Y en los eventos del grupo met-2 predominan valores mayores de este parámetro, con un 80% de los casos con $S9/S15 > 1$. Por lo cual, grupo met-1 se caracteriza por un proceso de aceleración-emisión-salida de las partículas en general de mayor emisión en la banda centimétrica alta (S15).

Y el grupo de menor intensidad en banda métrica (met-2) se caracteriza por un proceso de aceleración-emisión-salida de las partículas, en general acompañado de menor emisión en la banda centimétrica alta (S15).

Además el radioespectro promedio a partir de los eventos normalizados en banda centimétrica para cada grupo de eventos se puede observar que los eventos met-1 tienen el máximo en S15 (15000 MHz), es decir predominan los eventos con máximos en S9 y S15 (Fig. 2).

Mientras eventos del grupo met-2 muestran el máximo del espectro promedio en S5 (5000 MHz), es decir predominan los radioespectros con máximo en S5 y en S7.

Lo anterior nos lleva a considerar la posible asociación de la alta emisión en banda métrica con el incremento del nivel de radioemisión en la parte más alta de la banda centimétrica, en particular en S15. Y nos guía hacia un posible escenario dinámico del evento en el cual, en el transcurso del proceso de aceleración -- emisión -- salida de partículas, ocasionalmente se desencadena un proceso adicional de aceleración de partículas, que genera una mayor radioemisión en la parte más alta de la banda centimétrica con características espectrales distintas, modificando y/o superponiéndose a la radioemisión ya existente en escenario dinámico del evento.

Con anterioridad se determinó, que el incremento en la radioemisión en la banda centimétrica alta, el endurecimiento del radioespectro da lugar al incremento tanto en la intensidad del flujo de partículas en energía de más de 10 MeV, así como a un endurecimiento del espectro energético del flujo de partículas, es decir de partículas a mayores niveles de energía [Fomichev et al 1989a].

Otro aspecto publicado de las características de la radioemisión asociada a los eventos protónicos es la forma de la distribución de valores en el gráfico de dispersión entre la intensidad del flujo protónico y la intensidad de radioemisión en banda centimétrica, para todos los eventos protónicos (Fig. 3) [Fomichev et al 1989].

La línea quebrada en el gráfico representa la aproximación a la relación del flujo protónico con la radioemisión obtenida en esa ocasión, sin separar los dos tipos de eventos. Puede observarse el cambio de pendiente de la línea, una leve inflexión en la distribución de puntos alrededor de las 5000 sfu de la intensidad de la radioemisión.

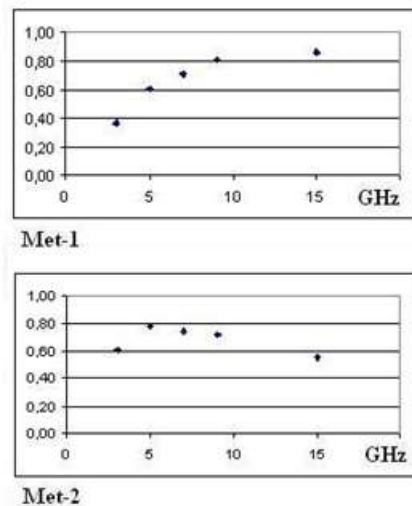


Fig 2: Radioespectros normalizados promedios en banda centimétrica de los dos grupos de eventos protónicos. Intervalos de confianza en Anexo I

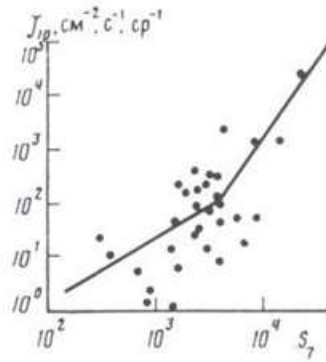


Fig. 3: Intensidad del flujo protónico con la intensidad de la radioemisión en banda centimétrica.

Esta aproximación, y en particular el cambio de pendiente de la línea fundamentalmente se apoyó en los eventos del grupo met-1, que constituyen la mayor parte de los casos representados con mayor intensidad del flujo protónico. Los casos del grupo met-2 presentes en el gráfico en su mayoría se encuentran a la derecha y hacia abajo de la línea quebrada.

Además, en el referido artículo de 1989 se asumió que no había diferencias básicas en los escenarios del evento y procesos de aceleración-emisión-salida de las partículas entre los dos tipos de eventos, y con esta aproximación se obtuvo una relación empírica para la intensidad del flujo protónico con la intensidad de radioemisión centimétrica.

La mencionada inflexión (Fig. 3) representa un cambio en la relación radioemisión-emisión-salida de partículas de alta energía, de tal forma que a partir de aproximadamente 5000 sfu. los incrementos del logaritmo de la intensidad del flujo de partículas es mayor para un mismo incremento del logaritmo de la intensidad de la radioemisión en banda centimétrica.

La Fig.4 presenta en su parte superior los radiospectros de la intensidad de la radioemisión centimétrica obtenidos de los eventos met-1 para valores menores y mayores al nivel de 5000 sfu. en banda centimétrica, y en la inferior los espectros de los eventos met-2. En los casos de menor nivel de radioemisión centimétrica (a la izquierda de la figura) se puede apreciar que los espectros.

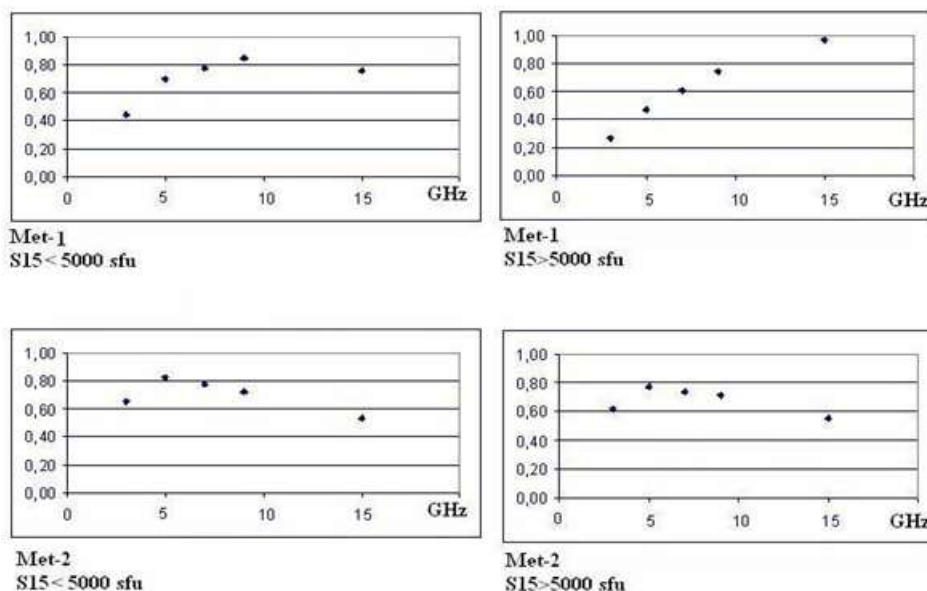


Fig 4: Radiospectros normalizados y posteriormente promediados de los eventos de los dos grupos de eventos protónicos. Con valor de la intensidad de radioemisión menor y mayor a de $S_{15} > 5000$ sfu. en banda centimétrica. Ver intervalos de confianza en Anexo I.

de los dos grupos de eventos difieren en la frecuencia del valor máximo en el radiospectro centimétrico, ubicándose en las frecuencias bajas en el grupo met-2, y las altas en el grupo met-1.

Sin embargo, lo más notable en la Fig.4 es el siguiente efecto: La radical diferencia del espectro del grupo met-1 para los eventos de mayor nivel de radioemisión centimétrica ($S_{15} > 5000$ sfu) con un destacado máximo de intensidad de radioemisión en la frecuencia más alta.

Este efecto permite afirmar, cuando los eventos met-1 alcanzan un nivel de radioemisión por encima de las 5000 sfu, se produce una intensificación de la radioemisión en la banda centimétrica alta, en el proceso generación-emisión-salida de partículas del evento, que puede ser la expresión en ondas de radio de un posible un cambio en el escenario dinámico de los eventos met-1, que los hace diferentes a los eventos met-2.

Lo anterior evidencia la posible existencia de un valor umbral en el proceso generación-emisión-salida de partículas cargadas en los eventos del grupo met-1, lo cual se manifiesta en un mayor incremento de la intensidad de flujo protónico, a la vez que no hay evidencias que permitan proponer un valor umbral para los eventos del grupo met-2.

La mencionada intensificación se desarrolla de tal forma que la salida de partículas es mayor en los eventos met-1, y se endurece el espectro energético del flujo de protones como se determinó en la aproximación de 1989. Y podemos afirmar que entre los dos tipos de eventos existe una diferencia básica.

3. La Direccional dad del Flujo Protónico:

La dependencia de la radioemisión y la heliolongitud de los dos tipos de eventos están expuestas en las tablas 1 y 2 [Del Pozo, E., 2003]: La tabla 1 para eventos de componente métrica intensa y la tabla 2 para eventos de componente métrica débil.

Los eventos de componente métrica intensa (tabla1), presentan una definida dependencia de la intensidad de la radioemisión, de la heliolongitud y de su cuadrado. El término de primer grado en la heliolongitud determina el carácter asimétrico de su direccionalidad respecto al meridiano central del Sol.

Tabla 1.- EVENTOS DE COMPONENTE METRICA INTENSA (46 casos)

1. Relaciones del flujo protónico con:

- La radioemisión en banda centimétrica (S7, S9, S15)
- La heliolongitud " θ "

	Correlación	E.Std
$\text{LogFp7} = 1.37 (\text{LogS7}) + 0.022\theta - 1.91 \cdot 10^{-4} \theta^2 - 3.33$	0.80	0.84
$\text{LogFp9} = 1.30 (\text{LogS9}) + 0.021\theta - 1.94 \cdot 10^{-4} \theta^2 - 3.18$	0.80	0.85
$\text{LogFp15} = 1.13 (\text{LogS15}) + 0.020\theta - 2.02 \cdot 10^{-4} \theta^2 - 2.48$	0.80	0.85

En la tabla 2 los eventos de componente métrica débil (met-2) presentan una dependencia no sólo de la intensidad de la radioemisión en banda centimétrica, sino además de la pendiente del espectro a través del parámetro S7/S9, y solamente presentan la dependencia cuadrática con la heliolongitud, que es simétrica respecto al meridiano central del Sol, pues no aparece el término de primer grado de la heliolongitud como aparece en las relaciones de la tabla 1 de los eventos de componente métrica intensa.

Tabla 2.- EVENTOS DE COMPONENTE METRICA DEBIL (41 casos)

Relaciones del flujo protónico con:

La radioemisión en banda centimétrica (S7, S9, S15, S7/S9) y la heliolongitud " θ "

	Correlación	E. Std
$\text{LogFp7} = 1.48 (\text{LogS7}) - 1.81 \cdot 10^{-4} \theta^2 + 2.73 \frac{S7}{S9} - 5.85$	0.74	0.74
$\text{LogFp9} = 1.49 (\text{LogS9}) - 1.84 \cdot 10^{-4} \theta^2 + 3.40 \frac{S7}{S9} - 6.57$	0.75	0.74
$\text{LogFp15} = 1.30 (\text{LogS15}) - 1.97 \cdot 10^{-4} \theta^2 + 3.50 \frac{S7}{S9} - 5.84$	0.79	0.68

Los dos diferentes patrones de direccionalidad del flujo protónico ratifican lo anteriormente obtenido [Del Pozo, et al 1996, --- et. al 1998], y las relaciones son válidas para todo el hemisferio visible del Sol $\theta \in [90, 90]$ con una dependencia aproximadamente cuadrática del logaritmo de la intensidad del flujo protónico con la heliolongitud (Fig. 5).

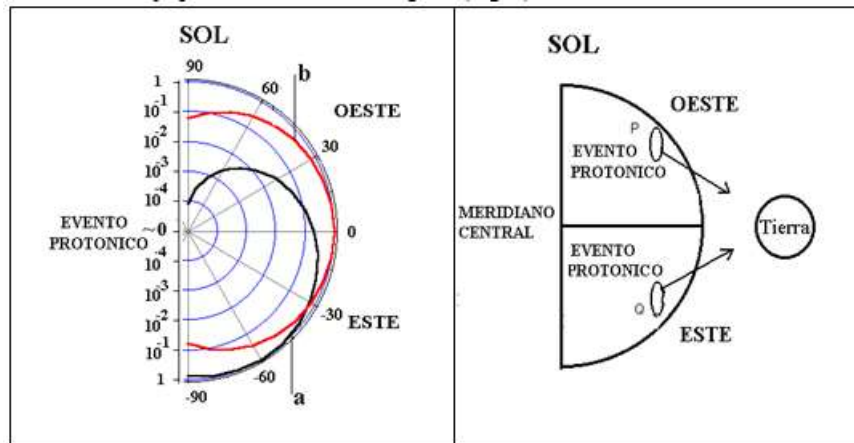


Fig. 5: A la izquierda Diagramas de Direccionalidad de la Intensidad Normalizada del Flujo Protónico salientes del Evento Protónico ubicados en el Meridiano Central del Sol a- Diagrama de los eventos solares de componente de radioemisión métrica intensa b- Diagrama de los eventos solares de componente de radioemisión métrica débil A la derecha vista superior del Sol con los eventos protónicos situados en P y Q en el Sol

La asimetría Este-Oeste respecto al meridiano central de los eventos protónicos de componente métrica intensa (met-1) puede interpretarse (diagrama de direccionalidad “a”) (Fig. 5):

- Al observar un evento al Oeste del meridiano central del Sol, desde la posición del evento se “ve a la Tierra” hacia el lado Este del Sol (evento en P) el factor de atenuación es pequeña, aproximadamente = 1 desde el Sol hacia el Este para la propagación del flujo protónico.
- Al observar un evento al Este del meridiano central del Sol, desde la posición del evento se “ve a la Tierra” hacia el lado Oeste del Sol (evento en Q): la atenuación es mayor, con un factor de atenuación entre 10^{-1} y 10^{-4} para la propagación del flujo protónico desde el Sol hacia el Oeste.

Los eventos del grupo met-2 muestran un diagrama simétrico respecto al meridiano central del Sol (diagrama de direccionalidad “b”- Fig. 5) y los mayores valores del coeficiente de atenuación para heliolongitudes cercanas a ambos limbos es menor, del orden de 10^{-1} . Y presenta un intervalo de heliolongitudes entre 20-80 grados como el intervalo favorecido por la direccionalidad de estos eventos para la máxima emisión.

Lo anterior permite sustentar la siguiente hipótesis de trabajo:

“La diferente direccionalidad de los dos tipos de eventos protónicos tiene en lo fundamental su origen en los diferentes escenarios dinámicos de la CME, y los procesos de generación-emisión-salida de partículas que tienen lugar en el transcurso del desarrollo en cada tipo de evento”:

4. Posible Vinculo con los Procesos de la CME:

A medida que la CME asciende va deformando y arrastrando su campo magnético y va aumentando el largo de las líneas magnéticas que la conectan con sus enlaces fotosféricos, las partículas del plasma asociadas a esas líneas entregan parte de su energía al campo magnético, por lo cual los enlaces se pueden mantener más tiempo frenando el ascenso.

Se ha determinado que algunas CME durante la primera fase de su ascenso presentan una transformación al desconectarse uno de sus dos enlaces magnéticos en la fotosfera [Dasso, 2007] [Mandrini C.H., 2007] proceso que altera toda la estructura de la CME [Siarkowski M 2004] [Innes D. E 1999].

El efecto observado implica que, en determinadas condiciones ocurre anticipadamente el desacoplamiento magnético parcial o total de uno de los enlaces fotosféricos, iniciándose un proceso de reconexión magnética de mayor magnitud en una escala de cientos de miles de kilómetros [Mandrini C.H, 2007].

Puede considerarse que al desconectarse uno de los enlaces magnéticos una parte de las líneas se efectúa una reconexión magnética hacia la parte superior de la CME, aumentando la intensidad del campo magnético, acelerando bruscamente todo el plasma asociado e incorporándolo a la parte superior de la CME, al mismo tiempo que la CME sigue ascendiendo con un solo enlace, lo que tiende a torcerlo, favoreciendo el mayor ascenso del lateral desacoplado. Este escenario se aviene con lo anteriormente descrito de los eventos del tipo met-1:

- mayor intensidad de la radioemisión en la banda centimétrica alta
- mayor intensidad de flujo protónico con un endurecimiento del espectro energético
- mayor emisión en la banda métrica
- y una marcada asimetría en la direccionalidad de la emisión del flujo protónico.

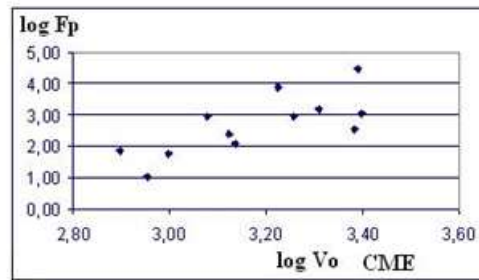


Fig 6: Dispersión de la intensidad del flujo protónico con la velocidad de ascenso de la CME (eventos met-1 de mejor propagación)

Además, en la Fig. 6 puede observarse que en eventos met-1 una mayor intensidad del flujo protónico para mayores velocidades de ascenso en los eventos ocurridos en heliolongitudes entre 20-80 grados, intervalo de heliolongitud de máxima emisión según la direccionalidad, lo cual concuerda con el efecto de un enlace magnético desacoplado en una CME que favorece el incremento de la velocidad de ascenso y puede ser la causa de la mayor emisión de flujo protónico observada en los eventos met-1.

Por otra parte, otros resultados sobre la rotación diferencial del Sol indican que el enlace de las arcadas magnéticas que está más cerca del ecuador del Sol es el más afectado, con un mayor desplazamiento quedando del lado oeste de la región activa, tanto es así, que se ha propuesto, que la acción de este efecto actuando poco a poco en el lapso de unos 30 días puede propiciar el inicio de una CME [Wolfson R., 1996].

Otro aspecto bien conocido es la fuerza de Coriolis que actúa sobre los cuerpos en movimiento en un astro en rotación. La acción de esta fuerza esta presente tanto en el ascenso de la CME, como en los movimientos de masa en su interior a lo largo de sus líneas magnéticas con componente en la dirección perpendicular al eje de rotación del Sol, provocando sobre una masa de plasma en ascenso una inclinación o torcedura hacia el lado Este del Sol.

Por tanto, sobre el enlace Oeste de una CME en ascenso ha estado actuando la rotación diferencial del Sol moviéndolo hacia el Oeste, y al ascender la CME comienza a actuar la fuerza de Coriolis tensionando la parte superior en ascenso hacia el lado opuesto, hacia el Este. Y el escenario del ascenso favorece que ocurra el desacoplamiento del enlace Oeste de la CME. De esta forma la CME asimétrica resultante, con el lateral Oeste desacoplado y su estructura levantada del lado Oeste, puede ser la causal de la asimetría Este–Oeste de los eventos de componente métrica intensa, met-1.

En resumen, es un hecho observacional que los diagramas de direccionalidad de los eventos de diferente nivel en banda métrica difieren notablemente [Del Pozo et al 1998], lo cual fue confirmado en las relaciones obtenidas en el 2003 [Del Pozo et al 2003], lo que puede estar asociado con asimetrías que se presentan en algunos casos, en particular con la desconexión parcial o total de uno de los enlaces magnéticos de la CME durante su ascenso en la atmósfera del Sol, y puede considerarse que ocurre con la base más al Oeste, pues debido a la rotación diferencial del Sol uno de los enlaces fotosféricos de la CME se adelanta hacia el Oeste, mientras que las estructuras ascendentes se inclinan hacia el lado opuesto, hacia el Este por acción de la fuerza de Coriolis, provocando una mayor deformación y alargamiento de las líneas magnéticas de la base Oeste de la CME.

Conclusiones

Los resultados obtenidos nos llevan a pensar que el paradigma que toma como causa principal de la asimetría Este–Oeste de las emisiones del Sol, la estructura espiral del campo magnético interplanetario, debe ser cambiado sobre la base de la siguiente hipótesis de trabajo:

“Existen dos patrones básicos de propagación en la Corona y salida de la CME al medio interplanetario asociados al grado de desconexión de uno de sus enlaces fotosféricos, lo cual provoca una asimetría, dando lugar a dos diferentes escenarios de aceleración de partículas y de diagramas de direccionalidad de su intensidad:

- Un escenario en el cual se conserva la simetría, en el caso de poca o ninguna desconexión temprana de una de las bases de la CME, frecuentemente asociada a una menor emisión de radioemisión en banda métrica, y una menor emisión en la frecuencia de 15 GHz, dando lugar a un patrón de aceleración de partículas y de salida al medio interplanetario que resulta en un diagrama de direccionalidad simétrico de la intensidad partículas, y una relación máximo-mínimo de $1-10^{-2}$
- Otro escenario marcadamente asimétrico, en el caso de desconexión de una de las bases de la CME, con una mayor emisión de radioemisión en banda métrica, dando lugar a un patrón de aceleración de partículas y de salida

al medio interplanetario que resulta en un diagrama de direccionalidad de la intensidad partículas marcadamente asimétrico, con una relación máximo-mínimo de $1-10^{-4}$.

Los resultados obtenidos mejoran el conocimiento sobre el complejo enjambre de fenómenos que forman el escenario dinámico de las CME en sus diferentes variantes.

Es recomendable continuar explorando el origen de la asimetría Este-Oeste de los parámetros de arribo de las ICME analizando estos dos tipos de eventos de alta y baja emisión en banda métrica. Teniendo en cuenta que, por sus características la radioemisión puede ser observada generalmente desde unos pocos hasta unos 30 minutos antes de la salida del CME, los resultados obtenidos son de un alto valor práctico, pues permiten ampliar la información, que se puede obtener con la radioemisión sobre lo que está aconteciendo en la atmósfera del Sol y tener un pronóstico por adelantado, con las observaciones de la patrulla internacional del Sol de los flujos de protones que pueden arribar a las inmediaciones de la Tierra unas horas después.

.

Referencias

- Akinjian, S. T., V. V. Fomichev, y I. M. Chertok, (1977), *Geomagnetism and Aeronomy*, 17(1,2): 10-15; 177-183.
- Belov A.; García, H.; Kurt, V.; Mavromichalaki, H. and Gerontidou, M: *Solar Physics* (2005) 229: 135–159
- Claben H.T., et al, (1998) *A & A* 335, 1101-1110
- Chertok, I. M., (1982): *Geomagnetismo y Aeronomía* 22(2): 182-186
- Dasso, S. (2007) COLAGE -Comunicación personal
- Del Pozo E., Chertok I.M. (1995), *Publicacion Stock of Institute of Documentation and Scientific and Technical Information (IDIC)*
- Crosby, N.; Toivanen, P.; Heynderickx; Bothmer, V.; Gabriel, S.; Hildner, E.; Vilmer, N. (1998) “Working Group 2: Forecasting Space Weather Scientific Road Map” European Space Agency, ESA Workshop on Space Weather, 11-15 November, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands pag. 521-524.
- Del Pozo, E., Valiente J.F. (1996), *Proceedings of IV Latin American Congress and Spaces Geophysic (COLAGE)*, (Eds) T. Heredia and A.G. Elias, Tucumán National University, Argentina.
- Del Pozo E., Valiente J.F., (1998), *V Latin American Congress on Space Geophysics (COLAGE)* Costa Rica. *Revista Geofísica* No 50 Enero – Junio 1999pp 119-126
- Del Pozo, E., Valiente J.F., Días A., (1998 b), *ESA Workshop on Space Weather*, 11-15 November, ESTEC, Noordwijk, The Netherlands p.357-360.
- Del Pozo, et al, (2000) *Artículo Científico – Técnico*, *Publicacion Stock of Institute of Documentation and Scientific and Technical Information (IDIC)*.
- Del Pozo, et al, (2000a) “Solar Proton Flux Forecast” *Scientific Committee on Solar Terrestrial Physics, The First S-Ramp Conference Abstr.*, Oct 2-6 Sapporo Japan
- Del Pozo, E., Valiente, J. F., Rodriguez, T., (2003), *ESA Workshop on Space Weather*
- Del Pozo, E., Valiente, J. F., Rodriguez, T., (2006), *ESA Workshop on Space Weather*
- Fomichev V.V., Chertok I.M., Del Pozo E., (1989): *Geomagnetism and Aeronomy* Vol. XXIX # 4 pp. 537-544
- Fomichev V.V., Chertok I.M., Del Pozo E., (1989a): *Idem*. pp. 545-550
- Gopalswamy, N., 2001; <http://science.nasa.gov/headlines>, March 27
- Innes D. E., Inhester, B., Srivastava, N., Brekke P., Harrison R. A., MATTHEWS S. A., NOËNS, J. C., SCHMIEDER B. and THOMPSON B. J. (1999): *Solar Physics* 186: 337–361
- Kardapolova, N. N., Borisevich, T. P Peterova, N.G., and. Lesovo, S.V, (2008) “Coronal Mass Ejection of April 27, 2003, and Evolution of the Active Region NOAA 10338 in the Radio”
- Klein K. L., et al, (2001); *A& A* 373, 1073-1082
- Klein K. L., et al, (2001b); *Space Science Review* 95; 215-225
- Mandrini C.H. Nakwacki •M.S. •G. Attrill L., van Driel-Gesztelyi, Démoulin P. Dasso S. And Elliott H., (2007): *Solar Phys* 244: 25–43
- Ryan, J.M.; Aikin, A.C.; Cliver, E.W.; Reiger, E. and Share, G.H. (1998). “Solar-Terrestrial and Terrestrial Science” libro “The many Faces of the Sun” Capítulo 14, pag. 457-479.
- Siarkowski M. and Falewicz, R. (2004); *A & A* manuscript no. 1036 August 17,
- Solar Geophysical Data (1987-2003)*: National Geophysical Solar Terrestrial Data Center A, Boulder, Colorado, USA.
- Vashenyuk E.V., Balabin Yu.V., Perez-Peraza J., Gallegos-Cruz A. and Miroshnichenko L. I. (2006): *Advances in Space Research* 38 411–417
- Wolfson R., Bhattacharjee H. and Dlamini B. (1996); *A & A*, 463:359-364

Anexos

Intervalos de Confianza en los Radioespectros (Alfa =0,1)					
	S3	S5	S7	S9	S15
Met-1 S15<5000	0,088	0,092	0,071	0,064	0,077
Met-1 S15>=5000	0,097	0,110	0,081	0,075	0,083
Met-2 S15<5000	0,074	0,064	0,050	0,063	0,070
Met-2 S15>=5000	0,153	0,133	0,101	0,126	0,139
Met-1	0,064	0,072	0,053	0,049	0,055
Met-2	0,067	0,058	0,045	0,057	0,062
Todos	0,068	0,063	0,046	0,052	0,066