

Análisis de las eyecciones de masa coronal y del viento solar que presentan eventos protónicos asociados

Isabel Tatiana Rodríguez Esnard ⁽¹⁾, Eduardo del Pozo García ⁽¹⁾, Jorge Valiente Márquez ⁽¹⁾.

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

Recibido: enero-octubre, 2005	Aceptado: noviembre, 2005
-------------------------------	---------------------------

Resumen

Se estudiaron 43 eyecciones de masa coronal asociadas a eventos protónicos con valores de energía mayores que 10 MeV, atendiendo a que muchos protones de los eventos de partículas energéticas son acelerados en la onda de choque de eyecciones anchas y rápidas, cuyas velocidades son mayores o iguales que 700 Km/s. Conjuntamente fueron analizados algunos parámetros del viento solar como son densidad, velocidad y temperatura, durante el arribo de las Eyecciones Masa Coronal Interplanetarias a las inmediaciones de la Tierra, determinando así su comportamiento. El análisis de las variaciones del viento solar durante la propagación de una eyección de masa coronal en el medio interplanetario, es de gran importancia para la realización de modelos de arribo de las mismas y para determinar su cinemática.

De esta forma se obtienen diferentes asociaciones entre la velocidad máxima de arribo de la eyección y el tiempo en que realiza su trayectoria; la temperatura y la velocidad del viento solar con la intensidad del flujo protónico, y un análisis general de todas las eyecciones de masa coronal, en particular de la ocurrida el 4 de noviembre del 2003.

Palabras clave: Física solar.

Abstract

A group of 43 CME with associated proton events ($E > 10$ MeV) was realized. Proton Event are accelerated in the interplanetary shocks driven by wide and fast (> 700 Km/s) coronal mass ejections (CMEs).

We analyze the behavior of some solar wind parameter such as density, speed flow and temperature, during the arrival of the interplanetary CME earth neighborhood. The analysis of the Solar Wind variations during the propagation of the interplanetary CME is very important for CME propagation models, and to determine its kinematics.

We find some associations between:

- The maximum CME speed at arrival and with the propagation time from the Sun to Earth.
- The Solar Wind temperature and speed with the proton flux intensity

Finally, some CME analysis are presented, in particular the CME of November 4, 2003

Key words: Solar physics.

Introducción

Las Eyecciones de Masa coronal (CMEs, del inglés Coronal Mass Ejections), son enormes estructuras de plasma y campo magnético eyectadas desde el Sol. En el medio interplanetario, una CME puede considerarse como un plasmoide o como una nube magnética y puede ser identificada en el viento solar (SW, del inglés Solar Wind) por algunas de las siguientes características tales como: la onda de choque, variaciones en la densidad, estructuras de campo magnético consistentes con la topología de lazos, flujos bidireccionales de electrones y protones de baja energía a lo largo de las líneas de campo, inusuales estados de ionización y fuertes campos magnéticos con poca variación, entre otras (Webb 2001, Manoharan 2003).

Sin embargo, la dinámica de una CME en el SW está determinada por tres fuerzas principales: la fuerza de Lorentz (F_z), la fuerza de gravedad (F_g) y la fuerza debida a la interacción de la CME en el medio interplanetario y con el SW, llamada fuerza de arrastre (F_D) (Cargill 2004), siendo esta última la más importante.

Las CMEs investigadas tienen asociados eventos protónicos, la mayoría de ellos graduales, con energías mayor que 10 MeV, puesto que los protones de los eventos graduales de partículas energéticas, son acelerados en la onda de choque de las CMEs rápidas, cuyas velocidades son mayores o iguales que 700 Km/s (Reames, 1999), hallándose el 96% de estos eventos protónicos asociados a CME (Kahler et al., 1984). Este alto grado de asociación, permite una mejor localización del evento en el Sol.

En el presente trabajo se analizó el comportamiento de algunos parámetros del SW como son densidad, velocidad y temperatura, durante el arribo de las CMEs a las inmediaciones de la Tierra. De esta forma, para la muestra en análisis se determinaron algunas características del comportamiento de la propagación de la eyección en el medio interplanetario.

Se analizaron también, las variaciones del SW durante el tiempo de propagación de la CME por el medio interplanetario (ICME, del inglés Interplanetary Coronal Mass Ejections) antes de su arribo a las inmediaciones de la Tierra para el caso del CME del 4 de noviembre de 2003.

El análisis realizado sobre estos fenómenos es de importancia para la realización de modelos de arribo y de la cinemática de las ICMEs.

Materiales y métodos

A partir de la asociación entre eventos protónicos y CMEs reportadas en el sitio Web de la NOAA <http://www.sec.noaa.gov/ftpdir/indices/sep.txt>, de acuerdo al tiempo de detección y localización de ambos fenómenos, fueron seleccionados 68 casos de CMEs y eventos protónicos con energías mayores que 10 MeV, detectados por instrumentos a bordo de los satélites GOES en el periodo de 1997 al 2004. Los cuales son de mayor interés por su geoefectividad.

Además, se seleccionaron aquellos eventos protónicos con energías mayores que 30 MeV y 60 MeV obtenidos también del sitio <http://spird.ngdc.noaa.gov>.

Las CMEs seleccionadas fueron detectadas por el coronógrafo LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph) a bordo del satélite SOHO (Solar Heliospheric Observatory). Sus parámetros como ancho, posición, velocidad y aceleración, se tomaron del catálogo LASCO CME, de la NASA listado en el sitio Web <http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME-List>.

Algunas velocidades de la ICME determinadas por el método de centelleo interplanetario, se obtuvieron de mediciones realizadas por el radiotelescopio "Solar-Terrestrial Environment Laboratory" (STEL), de la Universidad de Nagoya en Japón.

Por otro lado, la densidad, velocidad y temperatura del SW, fue obtenida de la base de datos OMNIWEB de la NASA (<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/omniweb/form/dx1.html>), registrada por varios satélites en las inmediaciones de la Tierra.

Los parámetros estudiados del SW se tomaron en el momento de detección de las CMEs y en las siguientes 120 horas, de este modo se construyeron los gráficos de densidad, velocidad y temperatura en función del tiempo para cada una de ellas (Fig.1) y posteriormente se estimó el tiempo de llegada de la ICME a las inmediaciones de la Tierra (a unos 215 $R_\odot$ del Sol), a partir del incremento súbito de los parámetros antes mencionados con el arribo de la onda de choque.

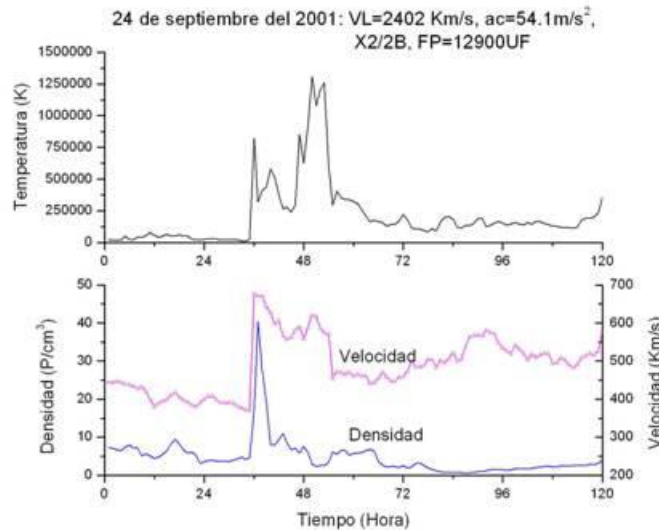


Fig.1. a) Temperatura en función del tiempo en Horas. Panel inferior b) densidad en función del tiempo (a la izquierda) y de velocidad (a la derecha).

De los 68 casos tomados, 8 fueron eliminados por falta de datos de SW y 17 por no existir una clara determinación del arribo del ICME en las observaciones del SW, de esta forma se conformó una base de datos con los 43 casos restantes.

Resultados y discusión

Características más notables de las CMEs examinadas

De las 43 CMEs, 42 poseían altas velocidades ($>750\text{Km/s}$) presentando eventos protónicos asociados, tanto la mencionada alta velocidad como los protones de alta energía nos indican la existencia de una onda de choque presente en estas eyecciones.

De esta forma los más intensos eventos protónicos estuvieron asociados con las CMEs más rápidas y con destellos de gran importancia en rayos X y $H\alpha$, por lo que podemos decir que en estos eventos estuvieron involucrados intensos campos magnéticos y se liberaron grandes cantidades de energías.

El análisis de los eventos halo es de gran importancia puesto que son considerados por muchos autores como especiales, por tener un comportamiento diferente del resto de las CMEs y por su gran geoeffectividad, aunque puede haber tormentas magnéticas sin CMEs halo, lo que indica que no toda la geoeffectividad se debe a los CMEs halo.

Estas 42 CME, además de estar asociadas a eventos protónicos son consideradas como eventos tipo halo parcial o total (Fig.2) de acuerdo al criterio de clasificación por anchos de Yashiro et. al., (2004), que considera a aquellas CMEs con anchos aparente (Wide) mayores que 120° , como eventos halo.

A pesar de las limitaciones para estimar el verdadero ancho de estas eyecciones, puesto que son observadas solamente en el plano perpendicular a la dirección Sol-Tierra, podemos al menos considerarlas, si bien con determinada incertidumbre, como anchas en su asociación con la onda de choque, lo cual no es de sorprender por estar de acuerdo con la estadística de Gopalswamy et al., (2001), quien obtuvo que 95 de las 101 CMEs fueron halo y estuvieron asociadas con explosiones en ondas de radio tipo II decamétricas-hectométrica, atribuidas a ondas de choque.

Dado que la muestra seleccionada está constituida por CME que tienen asociados eventos protónicos y tuvo lugar la aceleración de partículas es de esperar, que las CME seleccionadas sean preponderantemente anchas, ya que las CMEs estrechas son en general inefectivas en la producción de ondas de choque que aceleren partículas, según los resultados de Kahler y Reames (2003) para CMEs rápidas y estrechas ($<60^\circ$)

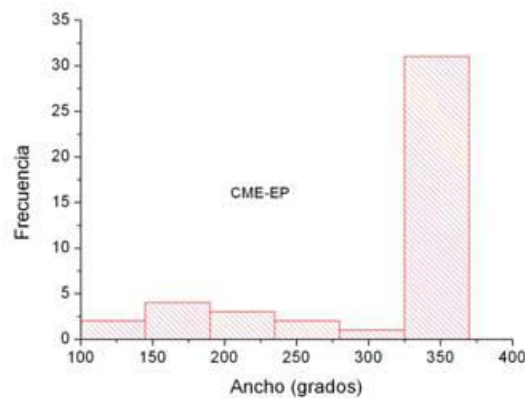


Fig.2 Histograma de distribución de ancho de las CME que tienen asociados a eventos protónicos.

Características del SW asociado a las CMEs

En los casos estudiados, la llegada de la onda de choque asociada a la ICME a las inmediaciones de la Tierra, trae como consecuencia una variación en los parámetros observados del plasma interplanetario, incrementándose la densidad, la velocidad y la temperatura hasta valores inusuales para el SW, como se muestra en la Fig.1, mientras que la temperatura y velocidad aumentan proporcionalmente (Fig. 3), obteniéndose un coeficiente de correlación de 0.9 con una desviación estándar de 0.12.

$$T = 2.62 * V - 1.59 \text{ donde}$$

T-Temperatura V- Velocidad

No ocurriendo así con la densidad, cuyo comportamiento en este sentido se presenta irregular.

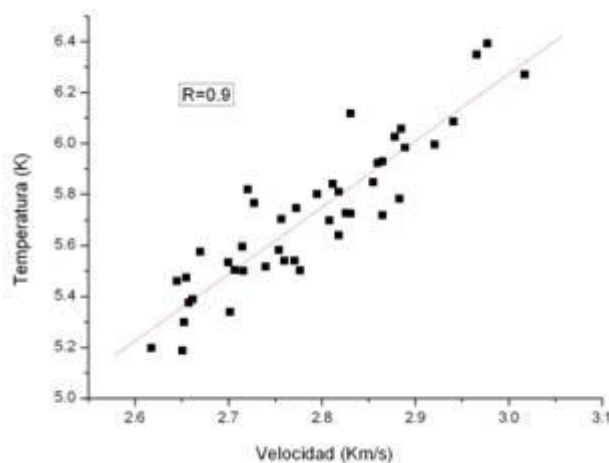


Fig.3 Temperatura en función de la velocidad, del SW, en las inmediaciones de la tierra, durante la llegada del plasmoide.

Puede pensarse que las CMEs detectadas en las cercanías del Sol con mayor velocidad son precisamente las que llegan primero. Sin embargo, en el análisis de esta muestra se obtiene una información diferente, pues se determinó que, arriban con mayor velocidad a las inmediaciones de la Tierra aquellas ICMEs que demoran menos tiempo en realizar su propagación desde el Sol hasta la Tierra (Sol-Tierra), como puede ser apreciado en la Fig.4, y no son precisamente las que salieron con mayor velocidad del Sol, obteniéndose una correlación de 0.8 y una relación entre ambas magnitudes dada por.

$$V = -9.63 * t + 1162 \text{ donde}$$

V es velocidad y t tiempo

Mientras que para densidades del SW mayores que 20 partículas/cm³ la correlación aumenta a 0.9 con.

$$V = -8.51 * t + 1095$$

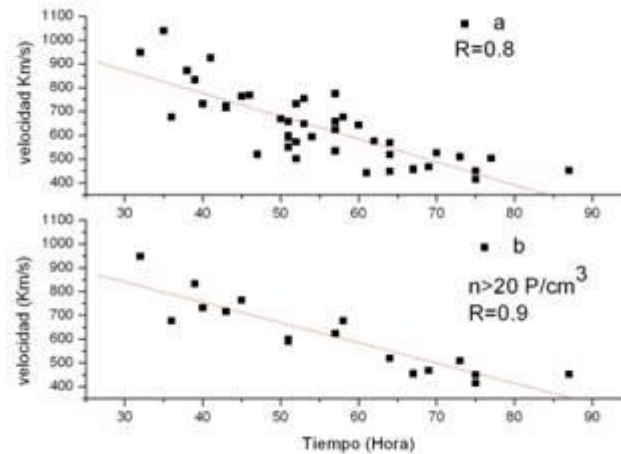


Fig.4 Velocidad del SW en función del tiempo (en horas). En el eje x, tiempo de recorrido de la ICME, desde el Sol hasta las inmediaciones de la Tierra. a) Para todos los valores de densidad del SW, b) Para los casos con densidad mayor que 20 Partículas/ cm^3 .

Para poder estimar en qué medida estas ICMEs se desaceleran, fue calculada su aceleración en una unidad astronómica partiendo de los datos de las CMEs y del SW, obteniéndose que aquellas CMEs más aceleradas en las inmediaciones del Sol, desaceleran más en su propagación (Fig. 5) que las eyectadas con menor aceleración, esto da una medida de la interacción de la ICME con el SW.

Un mejor ajuste se puede lograr, si fuera posible obtener algunos parámetros de la fuerza de arrastre, que de acuerdo con Cargil (2004) es proporcional, al cuadrado de la diferencia entre la velocidad de la ICME y velocidad del viento solar, y al coeficiente de arrastre que depende de la densidad relativa de la ICME con respecto al viento solar.

Para poder estimar en qué medida estas ICMEs se desaceleran, fue calculada su aceleración en una unidad astronómica partiendo de los datos de las CMEs y del SW, obteniéndose que aquellas CMEs más aceleradas en las inmediaciones del Sol, desaceleran más en su propagación (Fig. 5) que las eyectadas con menor aceleración, esto da una medida de la interacción de la ICME con el SW.

Un mejor ajuste se puede lograr, si fuera posible obtener algunos parámetros de la fuerza de arrastre, que de acuerdo con Cargil (2004) es proporcional, al cuadrado de la diferencia entre la velocidad de la ICME y velocidad del viento solar, y al coeficiente de arrastre que depende de la densidad relativa de la ICME con respecto al viento solar.

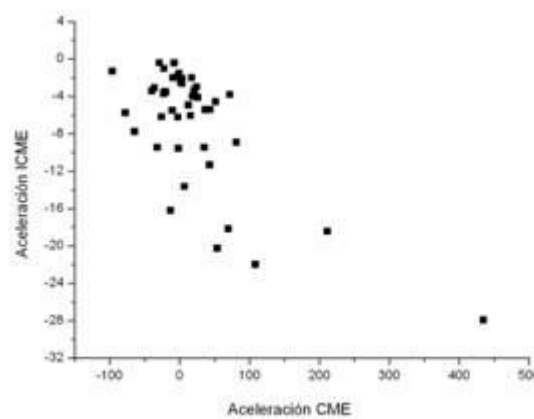


Fig.5. Aceleración del SW, en el momento de llegada de la ICME a las inmediaciones de la Tierra, en función de la aceleración del CME

Un caso particular fue la CME ocurrida el 4 de noviembre del 2003, con una aceleración, de salida de la corona, de 434.8 m/s^2 , este valor extremadamente alto y muy por encima de las aceleraciones promedio, estuvo asociado a un gran destello X28/3B. Ambos fenómenos liberaron gran cantidad de energía en la atmósfera del Sol, sin embargo, los valores de velocidad, temperatura y densidad, registrados posteriormente en las inmediaciones de la Tierra en el arribo, no fueron de gran magnitud como pudiera esperarse, (Fig.6).

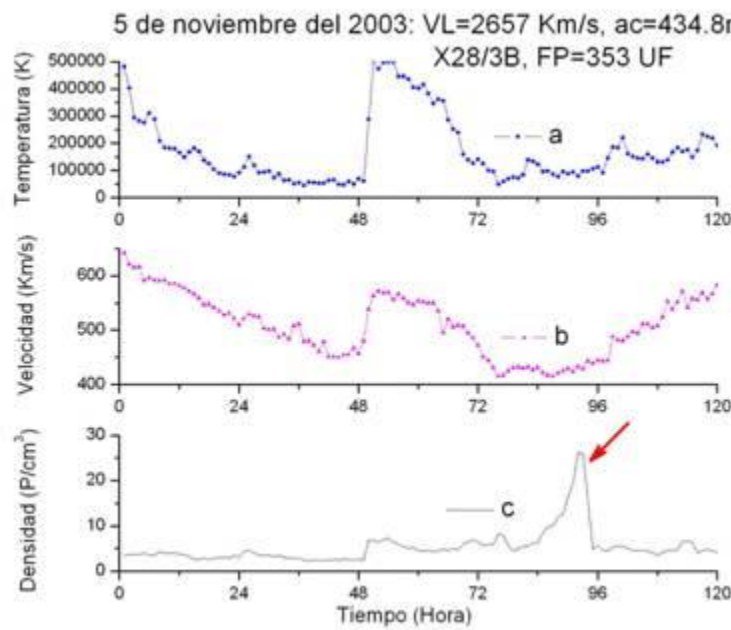


Fig.6 a) temperatura en función del tiempo en horas. b) velocidad en función del tiempo y c) densidad en función del tiempo

Es de notar la forma irregular del comportamiento de la densidad y la velocidad observada en las inmediaciones de la Tierra, que presenta un máximo principal de densidad aproximadamente un día después del arribo de esta ICME, antecedido de una disminución en la velocidad (Fig. 6).

Utilizando la información del LASCO y los datos de centelleo interplanetario (Fig.7), se puede notar que esta ICME fue notablemente acelerada de su salida de la Corona hasta unos 20 R_☉, y después es bruscamente desacelerada entre aproximadamente entre los 20 y los 50 R_☉.

Por lo que se puede pensar que esta ICME puede no haber tenido aceleraciones positivas y negativas uniformemente distribuidas en toda su estructura y estas diferencias hayan dado lugar a los mencionados registros irregulares en las inmediaciones de la Tierra, incluyendo el máximo de densidad observado un día después.

Podemos pensar que en este caso, ocurre algún proceso en el medio interplanetario, que tiende a uniformar los parámetros, de las ICME, que sobrepasan los valores más frecuentes, probablemente por esta razón desacelera tan rápido entre los 20 y los 50 R_☉ como muestra la Fig.7, estabilizándose con velocidades por debajo de los 1000 Km/s.

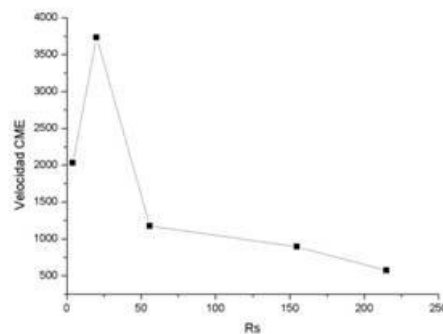


Fig.7 Velocidad de la CME en función de la distancia en radios Solares.

Comportamiento de la intensidad del Flujo protónico asociado a CME con los parámetros del SW

En los casos analizados, las CME presentaron asociados flujos de protones con energía mayor que 10 MeV. No obstante, también se tomaron los flujos de protones con valores entre 10 y 30 MeV y 10 y 60 MeV, aunque apenas se observó diferencia entre los intervalos tomados, puesto que la mayoría poseen valores de energía entre 10 y 30

MeV mientras que la intensidad del flujo de protones con valores mayores que 60 MeV fueron poco significativos con relación a los que tienen energía mayor que 10MeV

Existe una evidente correlación entre la velocidad de la CME y la intensidad del flujo de partículas energéticas aceleradas en la onda de choque conducida por la ella, con una dispersión de cuatro ordenes de magnitud, (Kahler, 2001), mientras que la asociación entre la intensidad del flujo protónico con la velocidad o la temperatura del SW durante el arribo de la ICME es mas difícil de determinar, A pesar de esto, como muestran las Fig.8 y Fig.9 hay una cierta relación, ya que las mayores intensidades en los flujos de protones se corresponden con las mayores velocidades y temperaturas del plasma interplanetario en el momento de llegada de la ICME a las inmediaciones de la Tierra.

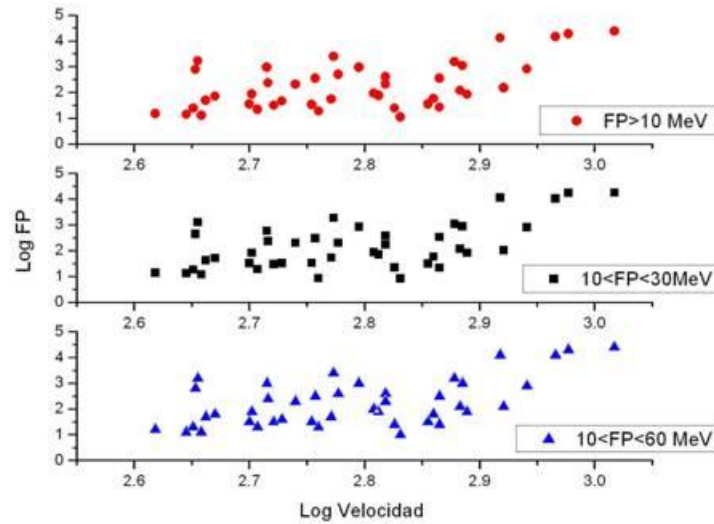


Fig.8 Logaritmo de la intensidad del flujo protónico en función de la velocidad del plasma proveniente del Sol.

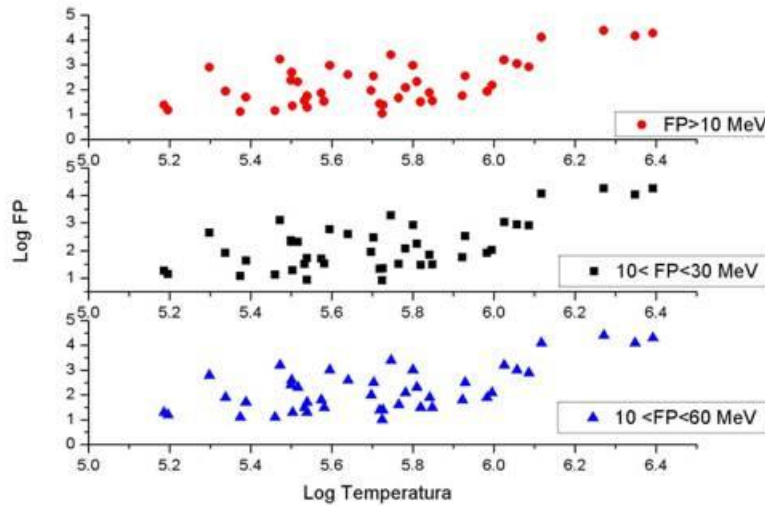


Fig.9 Logaritmo de la intensidad del flujo protónico en función del logaritmo de la temperatura del plasma proveniente del Sol.

Conclusiones

Lo resultados obtenidos, muestran la validez de la utilización combinada de los parámetros del CME, el viento solar y el evento protónico asociado para la mejor comprensión de estos fenómenos. Es decir, la información contenida en estos parámetros del plasma solar e interplanetario nos ha permitido obtener algunas relaciones entre ellos.

Las CMEs estudiadas tuvieron altas velocidades (>750 Km/S), y las que presentaron mayores valores en este parámetro tuvieron eventos protónicos asociados de alta intensidad y a destellos de gran importancia.

Para esta muestra se determinó, una asociación de la velocidad con la temperatura del plasma observado en el momento de arribo de la ICME a las inmediaciones de la Tierra, y la intensidad del flujo protónico.

De forma tal, que llegan con mayor velocidad a las inmediaciones de la Tierra aquellas ICME que demoraron menos tiempo su propagación del Sol a la Tierra, lo cual no significa que un inicio fueran las de mayor velocidad. Por otro lado, desaceleraron más aquellas ICME que al comienzo tenían una mayor aceleración en las cercanías del Sol.

La CME del 4 de noviembre del 2003 alcanzó una aceleración extremadamente alta de 434.8 Km/s² y asociada a ella ocurrió un gran destello en rayos X y H alfa (X28/3B), presentándose ambos eventos como parte de un mismo proceso de liberación de gran cantidad de energía en la atmósfera solar.

Por lo que proponemos que en este caso ocurre algún proceso en el medio interplanetario, el cual tiende a uniformar los parámetros de las ICME que sobrepasan los valores más frecuentes de su velocidad. Probablemente por esta razón luego de haber acelerado hasta valores inusuales, entre los 3 y $20 R_{\odot}$, desacelera tan rápido entre 20 y $50 R_{\odot}$, estabilizándose con velocidades por debajo de los 1000 Km/s. Podemos hacer la hipótesis de trabajo que ocurre algún proceso en el medio interplanetario que tiende a uniformar los parámetros de las ICME que sobrepasan los valores más frecuentes de velocidad.

Además, en la mencionada ICME se produce un incremento de la densidad, observada aproximadamente un día después de su llegada a las inmediaciones de la Tierra, por lo que se puede pensar que esta ICME puede no haber tenido aceleraciones positivas y negativas uniformemente distribuidas en toda su estructura y estas diferencias hayan dado lugar a los mencionados registros irregulares en las inmediaciones de la Tierra, incluyendo el máximo de densidad observado un día después.

Referencias

- Cargill, P.J., 2004. Solar Phys, 221, 135
- Gopalswamy, N., S.Yashiro., M.L.Kaiser., R.A.Horward., y J.-L. Bougeret., 2001, J.Geophys. Res, 106, 29219
- Hundhasen, A.J. 1999, in the many faces of the Sun, eds. K. T. Strong et al.,(Springer-Verlag, New York),143
- Kahler, S.W., N.R. Sheeley., R.A.Horward., M.J. Koomen., D.J .Michels., R.E. Mc Guire., T.T. Von Ronsenvinge., y D.V. Reames.,1984, J. Geophys. Res.,12, 209
- Khaler, S.W., 2001, J. Geophys. Res., 106, 20947
- Khaler, S.W y D.V.Reames., 2003, APJ, 584,1063
- Manoharan, P.K., M. Kojima., N.Gopalswamy., T. Kondo., y Z.Smith., 2000, APJ,530,1061
- Manoharan, P.K., 2003, The Solar Wind, eds. H.M.Antia et al, (Springer-Verlag, Berlin Heidelberg), 299
- Reames, D.V. 1999, Space Sci. Rev, 90, 413
- St. Cyr, O.C., J.T. Burkepile., A.J. Hundausen., y A.R. Lecinski., 1999, J.Geophys.Res.,104, 12493
- Webb, D.F., 2001, Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics, eds. , (Nature Publishing Group), 4283
- Yashiro, S., N. Gopalswamy., G. Michalek., O.C. St Cyr., S.P. Plunkett., N.B. Rich., y R. A. Horward., 2004, J. Geophys. Res., 109, 07105