Ciencias de la Tierra y el Espacio, 2005, Vol.6, pp. 1--7, ISSN 1729-3790

Análisis del tiempo de relajación de las emisiones sucesivas de masa coronal

Adolfo L. Méndez Berhondo [(1)], Ramón E. Rodríguez Taboada [(1)], Liliana Alfonso Larralde [(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

Una característica de las eyecciones de masa coronal es que pueden ser eventos complejos tanto por su morfología como por su evolución temporal. Especial atención reciben las eyecciones de masa coronal con varias emisiones temporalmente cercanas provenientes de un mismo escenario magnético, y que son considerados como las emisiones sucesivas de un único evento. Las eyecciones de masa coronal con varias emisiones sucesivas ofrecen información relacionada con la reorganización de la estructura coronal y el almacenamiento de la energía desde escalas locales hasta escalas globales. En este trabajo se hace un estudio preliminar del tiempo de relajación (tiempo de espera entre emisiones sucesivas) de las eyecciones de masa coronal observadas por el coronógrafo a bordo de la misión SMM. Se encontró que la distribución del tiempo de relajación, t, entre las emisiones de las eyecciones de masa coronal con emisiones sucesivas, sigue una ley de potencia del tipo A^{α} con a menor que cero.

Palabras clave: Física solar.

Abstract

A characteristic of CMEs (Coronal Mass Ejections) is that they can be complex events both by its morphology and its temporary evolution. Special attention receives the CMEs with several temporally near emissions coming from same magnetic scenario. In some cases they can be considered as successive emissions of a unique event. The CMEs with several successive emissions offer information related to the reorganization of the coronal structure and the storage of the energy from local to global space scales. In this work a preliminary study of the relaxation times analysis (waiting time between successive emissions) of the CME observed by the SMM mission is presented.

Key words: Solar physics.

Introducción

Una característica de las eyecciones de masa coronal (EMC) es que pueden ser eventos complejos, tanto por su morfología, como por su propia evolución temporal (Rodríguez et al. (1998a). En Rodríguez et al. (1998a, 1998b) reciben especial atención las eyecciones de masa coronal con varias emisiones temporalmente cercanas que, provenientes de un mismo escenario magnético, son consideradas como emisiones sucesivas de un mismo evento.

Este tipo de emisiones de plasma coronal pudiera estar relacionada con procesos de reestructuración a gran escala de la topología de la magnetosfera solar (Chertok y Grechnev, 2003), así como con el origen y evolución de expulsiones de masa coronal "globales". En este sentido, Dere y Howard (1999) proponen una clase de eyecciones de masa coronal que involucra estructuras coronales a gran escala, donde además presentan varias emisiones que estarían relacionadas físicamente. Existen antecedentes en la literatura que evidencian o indican la existencia de este tipo de eventos. Burlaga et al. (2002) identifica un conjunto de eyecciones continuas de masa coronal, como partes de un mismo evento, dos o más emisiones observadas en un intervalo de tiempo de 1-4 días.

Las eyecciones de masa coronal con emisiones sucesivas son un fenómeno complejo, en el que el proceso de conversión de energía magnética en aceleración del plasmoide eyectado se produce fragmentadamente en una estructura que busca su estado de equilibrio (nivel básico de energía). En Rodríguez et al. (1998) se propuso, no sólo la existencia de este tipo de evento, sino que además se comprobó que el mismo está asociado fundamentalmente a escenarios magnéticos intensos (grupo de manchas y plagas de Ca) a diferencia de las eyecciones de masa coronal clasificadas como simples (una sola emisión) que se asocian esencialmente a escenarios con intensidades del campo magnético más débiles (líneas de cambio de polaridad del campo magnético de fondo).

Moon et al. (2003) propone la existencia de las eyecciones de masa coronal simpáticas, emisiones cercanas temporalmente y con una separación espacial significativa, pero con una conexión física entre ellas, similar a los llamados destellos simpáticos (Biesecker y Thompson, 2000). En relación a esto último, Rodríguez et al. (1998a) proponen la existencia de una clase de evento con emisiones sucesivas clasificadas como múltiples, donde las emisiones presentan una separación espacial mayor de 20° respecto al ángulo en que se observa la salida a través del coronógrafo, las cuales pueden ser una evidencia de la existencia de las eyecciones de masa coronal simpáticas propuestas por Moon et al. (2003). No obstante estas evidencias, la existencia de EMC con emisiones sucesivas como parte de un mismo evento ha sido objeto de controversia (Schwenn, 2001).

En este trabajo exploramos el estudio de los tiempos de espera entre las emisiones sucesivas de un misma EMC, parámetro básico en el análisis de la evolución y fenomenología de este tipo de evento. Se incluye un examen del mismo en los marcos de la teoría de criticidad autoorganizada introducida por Bak et al. (1987) aspecto éste que ha cobrado una importancia significativa dentro de la comunidad científica, en el estudio del comportamiento de numerosos sistemas físicos, económicos, sociales, etc., en general, y en particular en fenómenos transientes de la actividad solar (Lu y Hamilton, 1991; Wheatland y Sturrock, 1996; Charbonneau et al., 2001; Chou, 2001; Yeh et al., 2002; Liu et al., 2002; Hughes et al., 2003; Wheatland, 2003). El estudio está basado en las eyecciones de masa coronal observadas por la misión Solar Maximum Mision en 1980 y entre 1984-1989 (St. Cyr y Burkepile, 1990), cuya evolución ocurre por emisiones sucesivas.

Materiales y métodos

A partir de los reportes de eyecciones de masa coronal referidos en St. Cyr y Burkepile (1993), donde se brinda una amplia información observacional de las principales características de las eyecciones de masa coronal observadas durante 1980, y en el período de 1984 hasta 1989 por el coronógrafo a bordo del Solar Maximum Mission, se revisaron y analizaron los reportes de aquellos casos que se consideraron como eyecciones de masa coronal con emisiones sucesivas.

De la descripción de la evolución que se hace para cada evento en el reporte de St. Cyr y Burkepile (1990) y del ángulo en que se observa la salida a través del coronógrafo de cada emisión reportada, se determinaron, siguiendo el criterio de Rodríguez et al. (1998a), los eventos clasificados como múltiples y por componentes. Los eventos por componentes son aquellos cuyas emisiones ocurren cercanas espacialmente unas de otras, dentro de una ventana de 20° respecto al ángulo en que se observa la salida a través del coronógrafo. Los eventos múltiples son eventos cuyas emisiones sucesivas están alejadas unas de otras con una diferencia espacial mayor que 20° respecto al ángulo en que se observa la salida de las emisiones a través del coronógrafo. Esto apunta a que en el proceso de las emisiones sucesivas de los eventos múltiples, están involucradas dos o más regiones activas interconectadas que comparten una magnetosfera común compleja.

Por cuanto se considera radial el recorrido de las eyecciones de masa coronal, al menos hasta que se hace visible por el coronógrafo y siguiendo la metodología empleada en Gil et al. (1998) para la confección de un catálogo de eyecciones de masa coronal y otros fenómenos concomitantes de la actividad solar (entre ellos la región activa asociada), se consideró suficiente considerar una ventana de 20° referida al ángulo en que se observa la salida de cada emisión por el disco del coronógrafo para distinguir entre eventos múltiples y por componentes. Esta ventana

espacial está directamente relacionada con la correspondiente que representa la dimensión característica en heliolongitud de la región activa asociada a la emisión, y hemos considerado que un grupo de manchas no sobrepasa (generalmente) los 20° en heliolongitud. Por ello, una separación mayor de 20° referida al ángulo en que se observa la salida de cada emisión, nos indicaría que las emisiones corresponden a dos regiones activas diferentes.

En el caso de los eventos clasificados como múltiples, la región activa asociada sería entonces un complejo de actividad, donde están involucradas dos o más regiones activas (grupos de manchas o plagas) interconectadas magnéticamente conformando una magnetosfera compleja. Respecto a esto último, existen reportes de la evolución de las llamadas estructuras trans-ecuatoriales, extensas estructuras magnéticas que interconectan regiones activas muy separadas, hacia la ocurrencia de una eyección de masa coronal (Glover et al., 2003; Simnett y Hudson, 1997).

Un aspecto importante en el estudio de la evolución de este tipo de evento, es el llamado tiempo de relajación t, el cual se ha definido como el tiempo de espera que media entre el comienzo de una emisión y el comienzo de la emisión sucesiva (Rodríguez et al., 1998a). Físicamente el tiempo de relajación representa el tiempo que tarda la estructura en alcanzar el próximo estado de inestabilidad en su búsqueda del estado básico. En él están involucrados dos procesos físicos opuestos: la tendencia natural hacia la búsqueda del estado de equilibrio o nivel básico de la estructura, y por otra la inyección de energía *force-free*.

Resultados y discusión

§1.- Análisis del tiempo de relajación (t) en los eventos de dos componentes y los múltiples.

Como mencionamos anteriormente, el tiempo de relajación t, es un aspecto importante en el estudio de la evolución de las eyecciones de masa coronal con emisiones sucesivas, ya que en él están involucrados la tendencia natural hacia la búsqueda del estado de equilibrio o nivel básico de la estructura, y la inyección de energía *force-free* que aún se continúa acumulando.

El tiempo de relajación para los eventos de dos componentes y los múltiples (M) se calculó como la diferencia (en horas) entre el comienzo de una emisión y el comienzo de la emisión sucesiva. Las pruebas de Kolmogorov-Smirnov no arrojaron que exista una diferencia significativa entre los tiempos de relajación de los eventos múltiples y los eventos de dos componentes.

Esto apunta a que el "tiempo de respuesta" es el mismo para ambos eventos. Esto sugiere que el mecanismo por el cual se está suministrando energía al sistema no es sensible a la longitud característica de la magnetosfera de la región activa asociada al evento, ya sea por componentes (una región activa con magnetosfera "simple") o múltiple (dos o más regiones activas compartiendo una magnetosfera compleja).

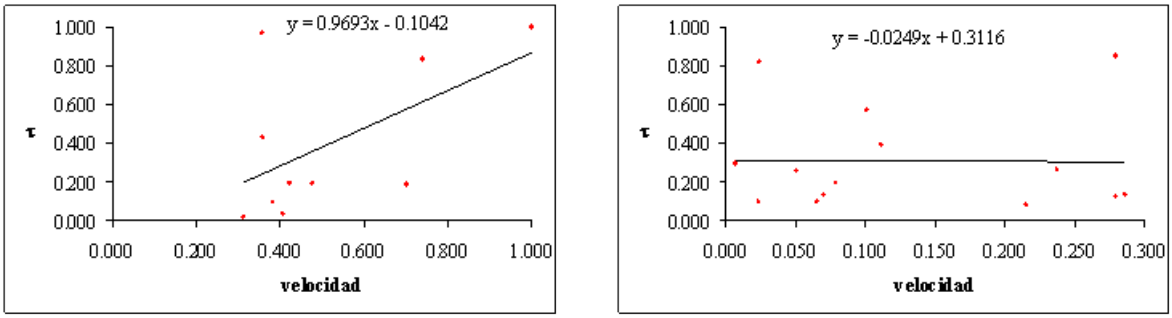
§2.- Análisis de la relación entre el tiempo de relajación (t) y la velocidad de la segunda emisión.

Este es un aspecto que reviste una importancia fundamental para esclarecer el mecanismo involucrado en la génesis de este tipo de evento.

Por cuanto la velocidad de la segunda emisión está directamente relacionada con el tiempo de relajación (es la velocidad de la emisión luego de transcurrir un tiempo t) se procedió al examen de este aspecto. En la figura 1 se observa el análisis de la regresión lineal para los eventos de dos componentes. La misma sugiere que existen dos poblaciones que presentan dos regresiones diferentes a partir de un valor crítico de la velocidad de la segunda emisión. Para segundas emisiones con velocidades mayores de 350 km/s la regresión presenta una pendiente cercana a uno (Fig. 1a). Para segundas emisiones con velocidades menores de 350 km/s, la regresión presenta una pendiente muy próxima a cero, o sea, el tiempo de relajación es el mismo independientemente del valor que presente la velocidad de la segunda emisión (Fig 1b).

En el caso de los eventos múltiples, el análisis no mostró resultado de significación alguna ya que no existía una población suficiente de eventos en los que se tuviese simultáneamente los datos del tiempo de relajación y su correspondiente valor de velocidad de la segunda emisión. Este es un aspecto muy importante a tener en cuenta para explorar en un futuro.

La existencia de estas dos poblaciones se explica como que una de ellas (pendiente cercana a uno) representa una clase de eventos donde el mecanismo de cizalladura es adecuado (Mikic y Linker, 1994) o sea, es más eficiente (depende del tiempo de relajación) y otra en que no (pendiente cercana a cero). A este respecto, un aspecto que debe ser investigado con más detalle es el papel que juega el escenario magnético al que están asociados los eventos, así como la morfología de las emisiones. En este sentido, Pevtsov (2000) indicó que la rotación diferencial –elemento fundamental en el mecanismo de cizalladura- no tiene un efecto significante sobre la morfología de algunas estructuras de gran tamaño, sugiriendo entonces que los procesos de reconexión tienen lugar a partir de la salida y evolución de nuevas estructuras.



(a) (b)

Figura 1. Regresión lineal velocidad de la segunda emisión de los eventos de dos componentes versus tiempo de relajación (t) para aquellos eventos con velocidad mayor de 350 km/s (a) y menores de 350 km/s (b). Los valores de velocidad (km/s) y tiempo de relajación (horas) están normalizados.

§3.- Análisis de las distribuciones del tiempo de relajación (t).

Lu y Hamilton (1991) examinando la distribución de la tasa de ocurrencia de los destellos, obtienen una distribución que sigue una ley de potencias A^{γ}. En consecuencia se sugiere que el campo magnético coronal se encuentra en un estado de criticidad autoorganizada y en ese caso se propone que los destellos se producen a través de un proceso de avalancha donde se suceden un sinnúmero de pequeñas reconexiones magnéticas, similar a lo descrito en el modelo de una pila de arena (Bak et al., 1987). Hughes et al. (2003) propone igualmente un modelo que explica la ocurrencia de destellos a través de avalanchas de reconexiones magnéticas producidas por la evolución de lazos magnéticos en las regiones activas y en la vecindad de éstas.

Por su parte, en una extensión en este enfoque a las eyecciones de masa coronal, en Wheatland (2003) se realiza un estudio de la distribución del tiempo de espera (Dt) de las eyecciones de masa coronal observadas por el coronógrafo a bordo del SOHO durante el período 1996-2001. El tiempo de espera se define como el tiempo entre una eyección y la siguiente, no importa dónde, ni si existe una conexión física directa entre una y otra. En este caso, el Sol es visto globalmente como un sistema que genera este tipo de eventos. En total se examinó la distribución del tiempo de espera de 4645 eventos, la cual mostró una clara ley de potencia $(Dt)^{\gamma}$ para Dt mayores de 10 horas, con un exponente $g \approx -2.36 \pm 0.11$.

Al dividir el período de tiempo observado entre 1996-1998 y 1999-2001, los cuales representan el mínimo y parte del ascenso en el ciclo solar, y el máximo del ciclo siguiente respectivamente, las distribuciones mostraron diferentes exponentes (-1.86 ± 0.14 y -2.98 ± 0.20 respectivamente). El autor concluye que la distribución del tiempo de espera (Dt) de las eyecciones de masa coronal puede ser comprendida como que las eyecciones de masa coronal ocurren como un proceso de Poisson dependiente del tiempo. Esto quiere decir que estos eventos ocurren como una secuencia de eventos independientes con una tasa media que varía con el tiempo, lo cual se traduce en una probabilidad de ocurrencia por unidad de tiempo que varía con el tiempo. Yeh et al. (2002) obtuvo resultados similares.

Esto sugieren que el estado de criticidad auto organizada (SOC) es un buen candidato para describir el estado en que se encuentran insertos estos eventos, así como la evolución de la corona solar. En nuestro caso, al explorar las distribuciones de los tiempos de relajación encontramos que estos se distribuyen siguiendo igualmente una ley de potencias del tipo A^{γ}. En las figuras 2 y 3 se muestran los resultados de la exploración. La figura 2 corresponde a la distribución de los tiempos de relajación correspondiente a los eventos de dos y tres componentes. La figura 3 a los eventos clasificados como múltiples. En la tabla I se muestran los valores obtenidos para los exponentes.

Es oportuno hacer notar aquí que el tiempo de relajación definido por nosotros, es el equivalente a un "tiempo de espera" pero entre emisiones de un mismo evento, lo cual físicamente no representa lo mismo que el tiempo de espera analizado en Wheatland (2003) y Yeh et al. (2002). En nuestro caso estamos analizando la evolución de una región activa hacia el proceso de eyección. En el caso de los análisis de Wheatland (2003) y Yeh et al. (2002), como se dijo, el Sol es visto globalmente como sistema que genera este tipo de eventos, donde no se tiene en cuenta las variaciones de las condiciones físicas intrínsecas de las regiones activas individuales ni el cambio en el número de ellas.

Tabla I. Valores de los exponentes de las distribuciones de los tiempos de relajación.

	Valor del exponente (γ) en la distribución del tipo A^{γ}
2 y 3 componentes	-1.943 ± 0.312
Múltiples	-1.419 ± 0.308

Este es un primer resultado importante que indica en primer lugar, que no existe un tiempo de relajación que predomine, o sea, que no existe un valor característico para los tiempos de relajación en general y en cada clase en particular.

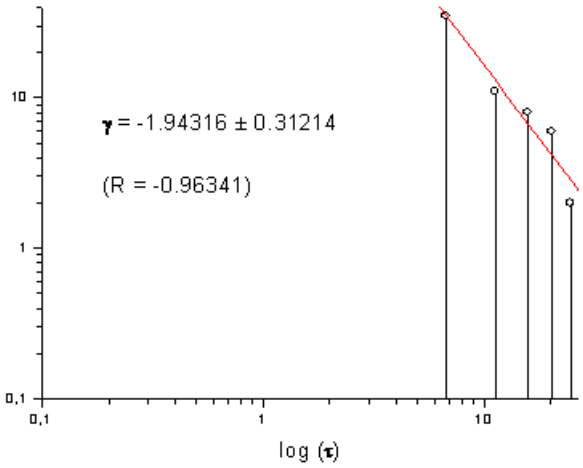


Figura 2. Distribución de los tiempos de relajación (t) de todos los eventos clasificados por componentes (2 y 3 emisiones). R es el coeficiente de correlación.

Por otra parte, toda vez que el nivel de disparo está relacionado intrínsecamente con el tiempo de relajación de la estructura, puesto que este último puede ser visto también como una medida temporal entre un nivel de disparo y el otro sucesivo, el hecho de que no exista un valor característico en el tiempo de relajación, apunta hacia el hecho de que en las eyecciones de masa coronal con emisiones sucesivas no exista un nivel de disparo fijo, el cual puede ser diferente según el número de emisiones que presente el evento y la propia clase del evento (por componentes ó múltiple).

Wheatland (2003) analizando la distribución del tiempo de espera de las eyecciones de masa coronal durante el período 1996-2001, obtuvo igualmente valores diferentes para los exponentes al analizar la data según el estadío del ciclo solar. Durante el ciclo de actividad solar, la distribución topológica del campo magnético cambia al variar el número de regiones activas presentes. Durante el máximo del ciclo, la presencia de muchas regiones activas (manchas y plagas de Ca) implica una mayor complejidad en la topología de las estructuras magnéticas.

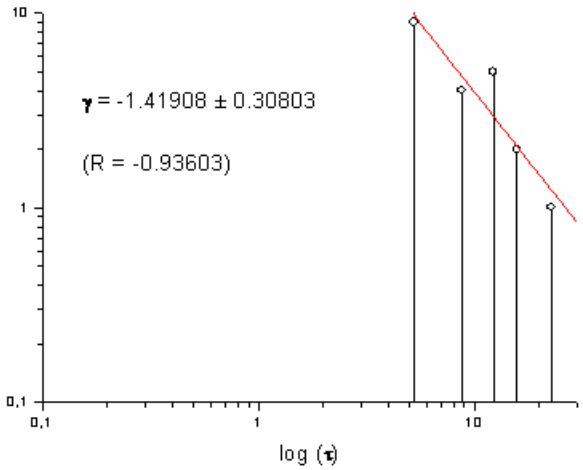


Figura 3. Distribución de los tiempos de relajación (t) de todos los eventos clasificados como múltiples. R es el coeficiente de correlación.

Wheatland (2003) explica la diferencia obtenida entre los valores de los exponentes en las distribuciones que siguen una ley de potencia del tipo A^{γ} con γ menor que cero, como que la probabilidad de ocurrencia por unidad de tiempo de estos eventos, varía con el tiempo, y esto es debido precisamente a que ambos están referidos a estadíos diferentes del ciclo solar, con menor o mayor presencia de regiones activas.

Siguiendo esto, podemos interpretar la diferencia observada en los valores de los exponentes de la distribución de los tiempos de relajación, como que el valor de los exponentes está relacionado con la topología magnética de las estructuras involucradas en el proceso de la eyección de masa coronal con emisiones sucesivas, toda vez que los eventos múltiples y los eventos clasificados por componentes están asociados a estructuras con topologías magnéticas diferentes. De esta manera, la diferencia encontrada en los valores de los exponentes de las distribuciones, no estaría relacionada con la física del mecanismo de la eyección, sino con el escenario magnético en la cual está inserto el fenómeno, lo cual está de acuerdo con que no existan diferencias significativas en los tiempos de relajación para los múltiples y los eventos por componentes. Este hecho avala nuestra propuesta de existencia de estas dos clases de eyecciones de masa coronal por componentes.

Conclusiones

En este trabajo se ha abordado el estudio del tiempo de relajación (tiempo de espera entre emisiones sucesivas) de las eyecciones de masa coronal observadas por el coronógrafo a bordo de la misión SMM, parámetro básico en el análisis de la evolución y fenomenología de este tipo de evento. Esto nos permite acercarnos a los mecanismos y procesos de almacenaje y liberación de energía desde escalas espaciales locales hasta escalas globales, así como el análisis de la reorganización de la estructura magnética que está asociada al proceso de la eyección y la propagación y evolución del material expulsado en el medio interplanetario, aspecto este último de vital importancia en la física de las relaciones Sol-Tierra.

Se encontró que la distribución del tiempo de relajación, τ, entre las emisiones de las eyecciones de masa coronal con emisiones sucesivas, sigue una ley de potencia del tipo $\mathbf{A}^{\alpha}$ con α menor que cero. Un enfoque importante y que se inserta en las tendencias actuales de la exploración del comportamiento dinámico de los sistemas físicos, es el análisis del tiempo de relajación entre emisiones sucesivas en los marcos de la teoría de criticidad auto organizada introducida por Bak et al. (1987). En este sentido se propone que la diferencia encontrada entre los valores de los exponentes para cada clase analizada (2 y 3 componentes, y múltiples) no está relacionada con la física del mecanismo de la eyección, sino con el escenario magnético en la cual está inserto el fenómeno. Los resultados apuntan hacia el estado de criticidad auto organizada (SOC) para describir el estado en que se encuentran insertos este tipo de evento, así como la evolución de la corona solar.

Un aspecto que creemos fundamental estudiar en el futuro es la distribución que siguen los tiempos de espera entre eyecciones de masa coronal con emisiones sucesivas así como el intervalo entre el final de un evento y el comienzo de otro (*quiescent time*; Chou, 2001) a fin de explorar la posibilidad de plantearnos tareas de pronóstico para este tipo de evento, los cuales tienen una importancia capital en la dinámica y evolución de las relaciones Sol-Tierra.

Referencias

Bak P., Tang C. y Weinsenfeld K. (1987): Physics Review Letters, 59, 381.
Biesecker D. A. y Thompson B. J. (2000): Journal of Atmospheric and Solar-Terrerrestrial Physics, 62, 1449.
Burlaga L. F., Plunkett S. P. y St. Cyr O. C. (2002): Journal of Geophysical Research, 107, 1266.
Charbonneau P., McIntosh S. W., Liu H. –L. y Bogdan T. J. (2001): Solar Physics, 203, 321.
Chertok I. M. y Grechnev V. V. (2003): Astronomy Reports, 47, 2, 139.
Chou, Yung-Ping (2001): Solar Physics, 199, 345.
Glover A., Harra L. K., Matthews S. A. y Foley C. A. (2003): Astronomy and Astrophysics, 400, 759.
Dere K. P. y Howard R. A. (1999): American Astronomy Society Meeting #194, Session 101.1.
Gil G., Méndez A. y Rodríguez R. E. (1998): New Astronomy, 3, 335.
Hughes D., Paczuski M., Dendy R. O., Helander P. y McClements K. G. (2003): Physical Review Letters, 90, 131101.
Liu H. –L., Charbonneau P., Pouquet A., Bogdan T. y McIntosch S. (2002): Physical Review E, 66, 5611.
Lu E. y Hamilton R. J. (1991): Astrophysical Journal, 380, L89
Mikic Z. y Linker J. A. (1994): Astrophysical Journal, 430, 898.
Moon Y. –J., Choe G. S., Wang H. y Park Y. D. (2003): Astrophysical Journal, 588, 2, 1176.
Pevtsov A. A. (2000): Astrophysical Journal, 531, 533.
Rodríguez R. E., Gil G., Méndez A. y Pérez-Enriquez R. (1998a): New Astronomy, 3, 321.
Rodríguez R. E., Gil G., Méndez A. y Pérez-Enriquez R. (1998b): Astrophysics and Space Science, 256, 1/2, 373.
Schwenn R. (2001): Invited Talk, "International Solar Cycle Studies 2001- Solar Variability, Clime, and Space Weather", International Council of Scientific Union, Scientific Committee on Solar-Terriestrial Physics, Co. USA.
Simnett G. M. y Hudson H. S. (1997): Proceedings of 31st ESLAB Symposium "Correlated Phenomena at the Sun, in Heliosphere, and in Geospace", (ed.) A. Wilson, ESTEC, ESA, SP-415, 437.
St Cyr O. C. y Burkepile J. T. (1993): Technical Note, NCAR/TN-369+STR, Bo., Co., USA.
Wheatland M. S. y Sturrock P. (1996): Astrophysical Journal, 471, 1044.
Wheatland M. S. (2003): Solar Physics, 214, 361.
Yeh C. –T., Ding M. D. y Chen P. F. (2002): Astronomy Society of Japan, 472.