

CARACTERISTICAS MAGNETICAS Y DE PLASMA DEL VIENTO SOLAR DETRAS DE UNA ONDA DE CHOQUE INTERPLANETARIA

Silvia Bravo y Marco Lanzagorta

Departamento de Física Espacial

Instituto de Geofísica, UNAM

Ciudad Universitaria, Coyoacán, D.F., 04510, México

RESUMEN

Aunque no cabe ninguna duda del origen solar de las ondas de choque que viajan en el medio interplanetario, el fenómeno específico que las produce no está aún claro. En este trabajo se estudia la estructura magnética y las características del plasma del viento solar detrás de un cierto número de ondas de choque interplanetarias con el propósito de determinar si el plasma fue emitido de regiones magnéticamente biertas o cerradas y si corresponde a las llamadas nubes. Se analizan los resultados y se propone un posible escenario en el Sol donde pudieran producirse los fenómenos observados.

INTRODUCCION

Las observaciones de frentes de choque que viajan en el medio interplanetario son tan viejas como las observaciones del viento solar en los años sesenta. Sin embargo, los primeros análisis de estas estructuras se llevaron a cabo hasta la década de los setentas, empezando con Burlaga (1971) y Hundhausen (1972). Estos frentes de choque, que evidentemente viajan a velocidades supermagnetosónicas respecto al viento solar, que a su vez es supermagnetosónico, perturban el entorno de la Tierra cuando golpean el borde de la magnetosfera y producen, entre otras cosas, las tormentas geomagnéticas y las auroras polares.

Es bien sabido que existen dos tipos de ondas de choque en el medio interplanetario: a) las de tipo corrotante (CIRs), asociadas con los hoyos coronales estables que emiten corrientes de viento solar rápido y que corrotan con el Sol y b) las que salen radialmente, asociadas con eventos transitorios en el Sol, en los que se emite una gran cantidad de energía. Estas últimas fueron originalmente atribuidas, en forma natural, a las ráfagas solares (ver Hundhausen, 1972), aunque desde las primeras observaciones de los frentes de choque interplanetarios había ya dos posiciones teóricas diferentes. Por un lado, Parker (1961) postuló que las ondas de choque observadas eran ondas de explosión producidas por el enorme pulso de presión causado por el estallido de la ráfaga, las cuales se propagaban a través de las líneas de campo magnético ya abiertas del viento solar. Por otro lado,

Gold (1955) había ya mencionado la posible emisión de lenguas de plasma desde el Sol, debidas al estallido de las ráfagas, que estiraban las líneas del campo magnético cerrado de esa región y que formarían los choques al introducirse en el material ambiente del medio interplanetario. Esta última posibilidad fue posteriormente desarrollada por otros autores en diversas modalidades y acutalmente se mencionan las nubes magnéticas (ver por ejemplo Burlaga, 1975 y Klein y Burlaga, 1982) que consisten en estructuras de plasma eyectadas desde la cromosfera, cuyas líneas de campo se han desconectado del Sol, y cerrado consigo mismas (plasmoides) y que se introducen en el plasma ambiente a velocidades mucho mayores que las del viento solar.

Sin embargo, la asociación de los choques interplanetarios (CHIs) con el estallido de una ráfaga solar tuvo serias dificultades desde el principio ya que no era extraño observar choques interplanetarios cuando no se habían registrado ninguna ráfaga y el número de ráfagas siempre ha excedido, por mucho, al número de CHIs. Las asociaciones selectivas tampoco han funcionado y no es raro que no se observe ningún CHI después de las ráfagas más intensas. Las observaciones de la última década han puesto cada vez más en apuros a esta interpretación y actualmente ya no es de ninguna manera sostenible. Las observaciones combinadas del sol y del medio interplanetario han mostrado una relación muy cercana entre los CHIs y las eyecciones de masa coronal (EMC) en las que grandes cantidades de materia se ven desplazarse hacia afuera en la corona a muy alta velocidad (ver Sheeley et al., 1985). Se piensa que es el rápido movimiento hacia afuera de estas grandes masas el que forma enfrente de ellas una onda de choque que después se propaga en el medio interplanetario y esto ha venido a reforzar la imagen de los choques formados por nubes; sin embargo, la asociación de estas EMC con las ráfagas ha resultado ser también muy pobre.

Otro tipo de evento solar explosivo que se ha visto asociado

con los CHIs han sido las protuberancias eruptivas (Joselyn y McIntosh, 1981), que consisten en la desintegración repentina de las gigantescas arcadas de material denso introducidas desde la cromosfera en la corona solar. Sin embargo, un estudio que comprendió varios cientos de EMC, a lo largo de todo el ciclo solar, mostró un porcentaje, no muy variable con la época, de menos de 50% de EMC asociadas con ráfagas o con protuberancias eruptivas (Wagner, 1984). Más aún, análisis detallados de la evolución de ambos tipos de procesos cuando se encontraron asociados, mostraron que es común que las EMC empiecen a verse antes de que ocurra el evento explosivo superficial (ver, por ejemplo, Jackson y Hildner, 1978). Esto conduce necesariamente a admitir que aunque las EMC, y por lo tanto los CHIs, estén a veces asociados con estos eventos solares explosivos, las ráfagas o las protuberancias eruptivas no pueden considerarse de ninguna manera como la causa de las EMC y, por lo tanto, tampoco de los choques que se forman asociados a ellas.

En un extenso estudio de casi 100 perturbaciones del viento solar, rastreadas por el método de centelleo interplanetario (IPS) durante más de año, Hewish y Bravo (1986) pudieron estimar la región del Sol donde se originaron estas perturbaciones y encontraron que, en todos los casos, esta región contenía un hoyo coronal de baja o mediana latitud o la extensión a mas bajas latitudes de un hoyo coronal polar. En un estudio más reciente, Bravo y Pérez-Enríquez (1991) encontraron una relación espacial muy cercana entre las EMC asociadas con choques interplanetarios observados con el HELIOS y hoyos coronales. Esto refuerza la asociación encontrado con el método de IPS entre los hoyos coronales y las perturbaciones en el espacio interplanetario, aunque no necesariamente indica que la fuente de la EMC y del choque que la acompañó hayan sido estos hoyos. De hecho no es posible justificar que se emitan las cantidades tan grandes de masa que se observan en una EMC como provenientes de una región de campo magnético abierto de donde fluye constantemente el viento solar. La interpretación dada por Bravo y Pérez-Enríquez es que el choque interplanetario no es producido por la EMC sino que se forma en el flujo de viento del hoyo coronal como resultado de lo mismo que origina la EMC. Esto es, los choques interplanetarios y las EMC sólo son fenómenos asociados en el sentido de que ambos tienen el mismo origen, pero las EMC no son la causa de los choques. El origen común de ambos fenómenos es, según estos autores, el surgimiento desde abajo de la fotosfera solar de material de polaridad distinta al emplazado ahí con anterioridad. Este surgimiento, que por otro lado es un suceso normal en el Sol, provocaría, en algunas ocasiones, que líneas de campo magnético originalmente cerradas en un casco coronal adyacente a un hoyo coronal se abrieran, provocando con ello dos efectos diferentes: por un lado, la liberación de la masa anteriormente contenida en la región del casco cerrado que se abrió, y por otro lado, el crecimiento del tamaño del hoyo coronal adyacente el cual ahora comprenderá también a las líneas de campo magnético

recientemente abiertas. Este último efecto dará lugar a la alteración repentina de las condiciones de flujo del viento solar en este hoyo y por lo tanto a la formación de una onda de choque que se propague al medio interplanetario, como lo han simulado numéricamente Hasan y Venkatakrishnan (1982).

Sin embargo, la controversia aún persiste y el propósito de este trabajo es estudiar las características del campo magnético y del plasma detrás de las ondas de choque observadas a la altura de la Tierra con el propósito de investigar si estos choques vienen o no acompañados por grandes masas de material detrás de ellos (nubes de plasma) o por estructuras de campo magnético cerrado (nubes magnéticas) para poder comprender mejor el fenómeno solar que está produciendo estos choques.

En los registros del viento solar, los choques producidos por una onda de explosión y por el cambio repentino en las condiciones de flujo de un hoyo coronal serían prácticamente indistinguibles, ya que en ambos casos se postula la presencia de un viento solar más rápido (y generalmente menos denso) cuya intrusión en el viento solar ambiente produce una onda de choque. La única diferencia gruesa sería en el tiempo de duración de este viento rápido y enrarecido que en el primer caso (ráfaga) debería esperarse que fuera considerablemente menor que en el segundo (cambio de régimen de flujo en un hoyo coronal). Dryer et al. (1980) han simulado numericamente ambas posibilidades, considerando, incluso, el nacimiento de un hoyo coronal.

En el caso de una onda de choque impulsada por una nube magnética, se esperaría que los registros del medio interplanetario del plasma posterior a la onda de choque mostraran que, a) la dirección del campo magnético rotara suavemente por un ángulo muy grande en el lapso de un día, b) la intensidad del campo magnético fuera más alta que la promedio y c) la temperatura fuera más baja (ver Burlaga, 1991). En el caso de un choque impulsado por una nube de plasma se esperaría lo mismo pero con una densidad de plasma mayor a la normal.

OBSERVACIONES

Para este estudio se seleccionaron 29 eventos de ondas de choque observados a la altura de órbita de la Tierra entre 1978 y 1979, que no correspondían a regiones corrotantes de interacción (CIRs) según el estudio de Hewish y Bravo (1986) y que dieron lugar a comienzos repentino de tormentas geomagnéticas (CR) (ver las tres primeras columnas de la Tabla). De acuerdo a los datos de plasma y de campo magnético publicados por King (1983) se buscó la presencia de alguna estructura de nube detrás del choque y los resultados de SI o NO se indican en las columnas 4 y 5 de la Tabla. En los casos de SI, la sexta columna indica el tiempo transcurrido entre el paso del choque y el arribo de la nube. En los casos

en que NO se encontró ninguna de estas estructuras, las características del viento solar detrás del choque indicaron la presencia de un plasma caliente, rápido, poco denso y transportando campo magnético de esencialmente la misma polaridad. Esto último es lo que se esperaría en el caso de una onda de choque producida por la interacción de dos flujos de viento solar, el segundo mucho más rápido que el primero y originado por la explosión de una ráfaga (según Parker, 1961) o por el aumento brusco e el área de sección transversal de un hoyo coronal (Hasan y Venkatakrishnan, 1983). En las columnas 6 y 7 se ha indicado si hubo una ráfaga o la erupción de un filamento asociado a cada evento, según Hewish y Bravo (1986). En los casos en que se observó una nube de plasma o magnética detrás del choque, se registró en la octava columna de distancia en radios solares entre estas dos estructuras a la altura de la Tierra.

RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Como ya se mencionó, en todos los caso aquí estudiados se encontró un hoyo coronal en la región solar fuente de la perturbación causante de la onda de choque, pero como puede verse de la tabla, en algunos casos también hubo una ráfaga (34%) o un filamento que erupció (31%) en la región fuente. En el 45% de los casos no se observó ningún evento eruptivo. En este estudio encontramos doce casos (41%) en los que una nube de plasma, una nube magnética o ambas llegaron detrás del frente de choque. Un resultado muy interesante es que en TODOS los casos de nube hubo una ráfaga o la erupción de un filamento asociada al origen de la perturbación en el Sol. Sin embargo, en general, la nube no se encontraba exactamente detrás del choque, sino que venía separada de éste por una distancia de hasta 36Rs al ser observada a la altura de la Tierra (ver la octava columna en la Tabla).

La principal conclusión de este trabajo es que los choques interplanetarios no pueden estar impulsados por nubes pues no solo la mayoría de ellos no tienen una nube detrás, sino que aún en aquellos casos en que sí la tienen, ésta viene, en general, separada del choque. Esto, unido al hecho de que la presencia de la nube siempre está relacionada con algún evento explosivo (ráfaga o protuberancia eruptiva) en la

región fuente, refuerza la imagen propuesta de que los choques se producen en los hoyos coronales y los fenómenos explosivos y sus consecuencias (las nubes) son meramente colaterales. Es evidente, también que estas nubes son distintas de las eyecciones de masa observadas en la corona que siempre acompañan a los choques interplanetarios. Según la imagen propuesta por Bravo y Pérez-Enríquez (1991), el surgimiento de material fotosférico de polaridad diferente a la del emplazado ahí anteriormente es el que produce toda esta variedad de manifestaciones.

Uniendo los resultados obtenidos de este estudio, podemos decir que en ocasiones este surgimiento produce la ruptura de líneas originalmente cerradas, provocando la liberación de una cantidad apreciable de masa coronal (EMC) y el crecimiento repentino del área transversal del tubo de flujo del hoyo coronal adyacente, esto produce un cambio violento de régimen de flujo de viento solar desde el hoyo y la creación de una onda de choque en él; algunas veces, cuando está cerca una región activa o una protuberancia, éstas se desestabilizan y dan lugar al estallido de una ráfaga o a la erupción del filamento; estas erupciones pueden lanzar hacia el espacio interplanetario grandes cantidades de material más denso y frío (nubes), en general posteriormente el inicio del choque. Una posible razón para la diferencia de separación entre la nube y el choque observados a la altura de la Tierra, podría ser que las estructuras responsables de ambos eventos se encontraran a diferentes distancias en el Sol, lo que produciría diferentes retrasos en su emisión. Para probar esto se exploró en los mapas de la superficie solar para estos eventos si la región activa o el filamento que habían explotado se encontraban adyacentes o no al hoyo coronal considerado como fuente del choque. Los resultados de esta exploración se muestran en la novena columna de la Tabla y puede verse que grosso modo, la distancia entre ambas estructuras puede ser la causa de las distintas separaciones. Inclusive hubo tres casos (Nos. 15, 17 y 19 en la Tabla) en los que hubo, ráfaga, estallido de filamento o ambas cosas en la región sin que se observara ninguna nube detrás del choque. En estos casos se encontró que las estructuras estallantes se encontraban muy lejos del hoyo coronal, incluso en el otro hemisferio, pero dada la gran incertidumbre en la localización de la fuente por el método de IPS, $\pm 90^\circ$, quedaban ambas estructuras dentro de la región.

REFERENCIAS

- Burlaga L.F., Space Sci. Rev, 12, 600, 1971
- Burlaga L.F., en "Physics of the Inner Heliosphere", R. Schwenn y E. Marsch (eds), Springer-Verlag, 1991, P.1
- Drayer N., S.T. Wu, y S.M. Han, Geofis. Int., 19, 1, 1980
- Gold. T., Gas Dynamics of Cosmic Clouds, North-Holland, Amsterdam, 1955, p. 103
- Hasan S. S. y P. Venkatakrishnan, Solr Phys., 80, 385, 1982
- Hundhausen a., Coronal Expansion and the Solar Wind, Springer Verlag, 1972
- Jackson B.C. y E. Hildner, Solar Phys., 60, 155, 1978
- Joselyn J.A. y P.S. McIntosh, J. Geophys. Res., 86, 4555, 1981
- King J. H., Interplanetary Medium Data Book, Rep. NSSDC 83-01, National Science Data Center, 1983
- Klein L.W., y L. F. Burlaga, J. Geophys. Res., 87, 613, 1982
- Parker, E. N., Astrophys. J., 133, 1014, 1961
- Wagner W. J., Ann, Rev. Astron, Astrophys., 22, 267, 1984

TABLA DE EVENTOS DE CHOQUE OBSERVADOS A 1 UA

No	Fecha de arribo	Hora (UT) CR	Nube Plasma	Nube Magnet.	Ráfaga Asoc.	Erup.Fil. Asoc.	Dist. Ch.-Nube	Ady.
1	1978 18 Ag	12:42	NO	NO	NO	NO	-	-
2	27 Ag	02:46	NO	SI	NO	SI	27 Rs	NO
3	5 Sep	18:59	SI	NO	SI	SI	15	SI
4	11 Sep	09:00	NO	NO	NO	NO	-	-
5	20 Sep	14:17	NO	NO	NO	NO	18	NO
6	25 Sep	07:18	SI	SI	SI	NO	7	SI
7	29 Sep	03:01	NO	SI	SI	NO	11	SI
8	4 Oct	00:47	NO	NO	NO	NO	-	-
9	9 Oct	03:32	NO	SI	NO	SI	11	SI
10	17 Oct	04:30	NO	SI	NO	SI	36	NO
11	29 Oct	11:16	NO	NO	NO	NO	-	-
12	8 Nov	01:52	NO	NO	NO	NO	-	-
13	12 Nov	01:00	NO	SI	SI	NO	0	SI
14	18 Nov	23:20	NO	NO	NO	NO	-	-
15	18 Dic	00:36	NO	NO	SI	SI	-	NO
16	25 Dic	12:12	NO	NO	NO	NO	-	-
17	1979 4 Ene	17:25	NO	NO	SI	NO	-	NO
18	6 Ene	00:32	NO	NO	NO	NO	-	-
19	9 Ene	03:40	NO	NO	SI	NO	-	NO
20	25 Ene	01:39	NO	NO	NO	NO	-	-
21	21 Feb	03:02	SI	SI	SI	SI	5	SI
22	4 Mar	04:45	NO	NO	NO	NO	-	-
23	6 Mar	08:18	NO	NO	NO	SI	-	NO
24	9 Mar	08:08	SI	SI	NO	SI	0	SI
25	22 Mar	08:26	NO	SI	SI	NO	27	NO
26	5 Abr	01:56	SI	NO	SI	NO	0	SI
27	24 Abr	23:58	SI	SI	NO	SI	0	SI
28	29 May	18:51	NO	NO	NO	NO	-	-
29	12 Jul	12:40	NO	NO	NO	NO	-	-



INVERSIONES DEL CAMPO MAGNETICO.

Estudios recientes parecen comprobar que el campo magnético de transición durante una inversión permanece dipolar en un porcentaje muy alto. Algunos investigadores examinaron los registros de las inversiones del campo magnético de la tierra durante los últimos diez millones de años y encontraron que los polos tienden a seguir una trayectoria a través de Norte y Suramérica mientras el otro lo hace a 180 grados, a través de Asia Oriental y Australia.

ERUPCION DEL VOLCAN ETNA

Durante abril pasado, el volcán Etna hizo erupción y el derrame de lava formó un río que amenazó con destruir las casas del poblado de Zafferana. Franco Barberi, puso en práctica una operación para desviar la corriente de lava mediante la canalización y obstrucción con bloques de concreto; la operación fue calificada como un éxito por parte de los expertos italianos de seguridad civil.