

ACTIVIDAD DE LOS HOYOS CORONALES SOLARES DE BAJA LATITUD

S. Bravo, B. Mendoza, R. Pérez-Enríquez y J. Valdés-Galicia

Instituto de Geofísica
Universidad Nacional Autónoma de México

RESUMEN. Al analizar el centelleo de las radiofuentes estelares de diámetro pequeño producido por el paso de la señal de radio a través del medio interplanetario (IPS), se ha podido observar que los pequeños hoyos coronales que aparecen a latitudes medias y bajas en la parte ascendente y descendente del ciclo de actividad solar presentan muchas variaciones. Las perturbaciones producidas en el medio interplanetario por estas variaciones son capaces de alterar la intensidad de la radiación cósmica que se recibe en la Tierra, por lo que se sugiere que la actividad de los hoyos coronales influye en la modulación de 11 años.

ABSTRACT. Strong variations of the coronal holes of mid and low latitudes during the ascending and descending phase of the solar cycle have been observed by means of IPS records (the interplanetary scintillation of small diameter radio sources). These variations induce the propagation of disturbances in the interplanetary medium which produce the IPS and are also responsible of cosmic ray modulation. We suggest that the 11 years modulation is influenced by such a coronal hole behaviour.

Key words: INTERPLANETARY MEDIUM — SUN-ACTIVITY — SUN-CORONA

I. INTRODUCCION

Los hoyos coronales son estructuras en la corona solar cuya densidad y temperatura es menor que la correspondiente a las regiones circundantes. Su campo magnético presenta una topología abierta y en la fotosfera corresponde a extensas regiones magnéticas unipolares de larga vida (Fig. 1). Fueron observados por primera vez por Waldmeier en 1957 y observaciones posteriores en rayos X y ultravioleta durante los 60's revelaron así mismo su existencia. Sin embargo su importancia no fue reconocida sino hasta los 70's, cuando se les identificó como las fuentes del viento solar rápido. (Bohlin et al., 1971; Withbroe et al., 1971; Saito 1972; Vaiana et al., 1973).

Los hoyos coronales están presentes a todas latitudes siendo sus propiedades físicas similares, pero no así su comportamiento a lo largo del ciclo solar. (Sheeley et al., 1976; Broussard et al., 1978; Hundhausen et al., 1981).

La evolución de los hoyos polares refleja la variación del campo magnético polar. Durante el mínimo solar, cuando los campos polares son intensos, los hoyos polares son grandes y simétricos, extendiéndose incluso más allá de los 60° y con vidas medianas de 10 o más rotaciones solares (Waldmeier, 1981). En la fase ascendente del ciclo, éstos reducen sus tamaños y cerca del máximo, cuando los campos polares se debilitan y cambian polaridad, los hoyos coronales desaparecen, para reaparecer otra vez durante la fase descendente del ciclo.

La evolución de los hoyos no polares es más compleja. Se forman si existe una región unipolar suficientemente grande para que se produzca un desbalance de flujo magnético (Bohlin y Sheeley, 1978) y tienden a desaparecer cuando se incrementa el número de pequeñas regiones acti-

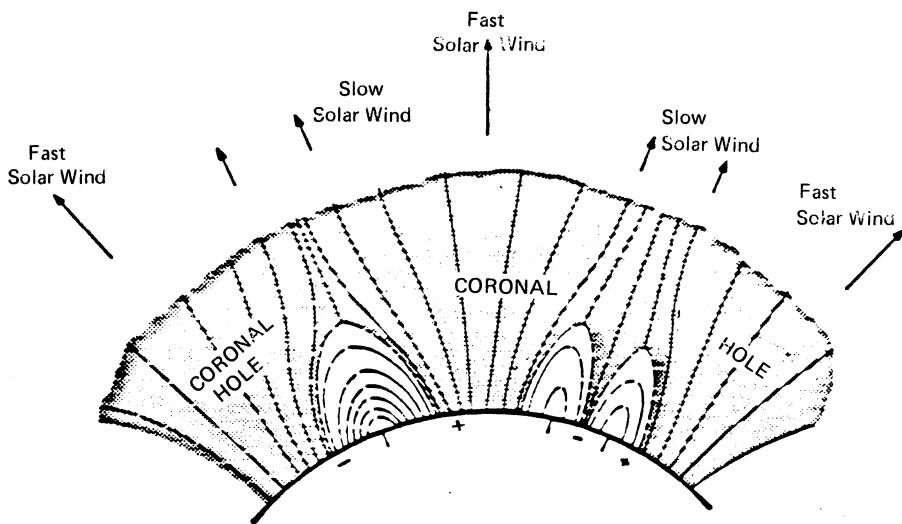


Fig. 1 Modelo fenomenológico de las estructuras magnéticas coronales de gran escala mostrando los hoyos coronales como regiones magnéticas abiertas. (Tomado de Hundhausen, 1977).

vas en la vecindad del hoyo (Nolte et al., 1978).

Conforme se acerca el máximo solar, empiezan a aparecer tanto hoyos a latitudes medias (aquejlos que se extienden de los 40° hasta el polo pero sin cubrir éste último), como hoyos a baja latitud (hoyos formados entre el ecuador y los 40°). En el máximo solar, cuando los hoyos polares prácticamente desaparecen, los hoyos de medias y bajas latitudes son ya abundantes y continúan apareciendo durante la fase descendente del ciclo. Cerca y durante el mínimo, cuando los hoyos polares presentan sus mayores tamaños, los hoyos no polares están ausentes. La vida media de un hoyo no polar es muy variable y puede ir de unas cuantas horas hasta algunas rotaciones solares. Se ha observado que durante la fase ascendente del ciclo solar los hoyos tienen vidas medias que no rebasan unas pocas rotaciones solares, Sheeley y Harvey (1981) han observado que cerca del máximo solar, los hoyos de baja latitud son considerablemente deformados por la rotación diferencial solar lo cual provoca su decaimiento después de 3 o 4 períodos de rotación; además los hoyos así deshechos migran y a su vez se coalescen con otros cuya polaridad es la misma o se aniquilan mutuamente cuando sus polaridades son opuestas. Durante la fase descendente, los hoyos de bajas latitudes presentan vidas medias comprendidas entre 6 y 8 rotaciones solares, siendo entonces más estables.

II. ACTIVIDAD DE LOS HOYOS CORONALES

Hasta hace poco tiempo, un hoyo coronal se consideraba simplemente una región en el Sol donde las líneas de campo se abren hacia el medio interplanetario y el viento solar fluye con mayor rapidez. Sin embargo, un estudio reciente de las perturbaciones que se propagan en el medio interplanetario, utilizando técnicas de IPS para rastrearlas hasta su origen en el Sol, ha mostrado que estas perturbaciones son generadas en regiones de hoyos coronales de medianas y bajas latitudes (Hewish y Bravo, 1986) ver figura 2. Esto nos ha hecho cambiar nuestra imagen y ahora vislumbramos a los hoyos coronales como regiones *activas*, cuya actividad se transporta hacia el medio interplanetario a través del plasma del viento solar, alterando la quietud de este medio y produciendo un buen número de perturbaciones que hacen sentir sus efectos en zonas muy amplias de la heliosfera.

Aunque aún no está bien entendida, la actividad de un hoyo coronal parece manifestarse en alteraciones en la velocidad del flujo de plasma que de él surge, lo cual produce la for-

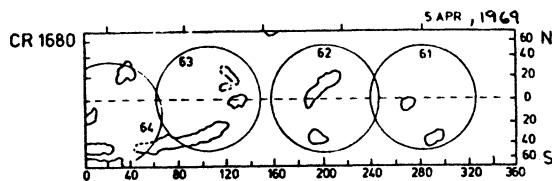


Fig. 2 Diagrama de la superficie solar correspondiente a la rotación Carrington 1680 donde se muestran los hoyos coronales. Los círculos corresponden a las regiones estimadas, en base a observaciones IPS, de donde surgieron perturbaciones que se propagaron hacia el medio interplanetario. (Tomado de Hewish y Bravo, 1986).

latitudes altas (los hoyos polares) parecen ser mucho más estables y hasta ahora no se ha registrado en ellos variaciones frecuentes de este tipo.

Como se mencionó en la sección anterior, conforme el ciclo solar va ascendiendo, los hoyos coronales polares van reduciendo su área y empiezan a aparecer pequeños hoyos a latitudes medianas y bajas. Como éstos son más activos y más rápidamente cambiantes, un número mayor de perturbaciones empezarán a viajar a través del medio interplanetario, cuya frecuencia e intensidad aumentarán conforme progrese el ciclo, llegando a un máximo cuando el área de hoyos coronales polares sea mínima. En la parte descendente del ciclo solar, la perturbación del medio interplanetario causada por los hoyos coronales disminuye y llega a un mínimo cuando estos desaparecen como entidades pequeñas en las zonas de mediana y baja latitud y en su lugar van creciendo los hoyos polares.

III. HOYOS CORONALES Y MODULACION DE RAYOS COSMICOS

Como ya se mencionó el área y actividad de los hoyos coronales presentan una variación de 11 años acorde a la actividad solar. Una variación semejante se observa también en la intensidad de la radiación cósmica detectada en la Tierra y se encuentra también correlacionada con la actividad solar pero con fase inversa, esto es, en períodos de mínima actividad solar se registra el máximo de intensidad de rayos cósmicos en la Tierra y viceversa. Esta variación ha sido siempre considerada como debida a la modulación que sufren los rayos cósmicos en el medio interplanetario en su paso hacia la Tierra, la cual a su vez está determinada por el nivel de actividad solar.

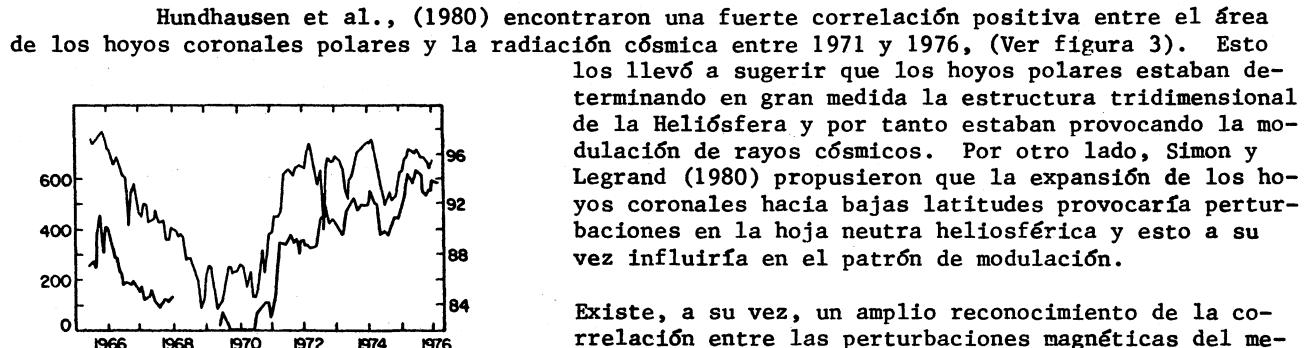


Fig. 3 Tamaño de los hoyos coronales polares (línea gruesa; escala a la izquierda) y el flujo de rayos cósmicos observados en Mt. Washington (línea delgada; escala a la derecha). (Tomado de Hundhausen et al., 1980).

mación de zonas de compresión y eventualmente de ondas de choque conforme un plasma más rápido alcanza al plasma lento emitido con anterioridad. Estos "soplidos" de los hoyos coronales de medianas y bajas latitudes pueden tener una frecuencia tan alta como uno cada 5 días, aunque hay hoyos bastante estables cuya emisión de viento rápido se mantiene bastante uniforme por un tiempo más largo. Por otra parte, como ya se mencionó, estos hoyos suelen ser efímeros y muy cambiantes en su estructura, fragmentándose o uniéndose entre ellos debido principalmente al efecto de la rotación diferencial del Sol. Esto también es fuente de alteraciones del flujo de plasma y en consecuencia de la formación de perturbaciones en el medio interplanetario. En contraste, los hoyos coronales de

latitudes altas (los hoyos polares) parecen ser mucho más estables y hasta ahora no se ha registrado en ellos variaciones frecuentes de este tipo.

Como se mencionó en la sección anterior, conforme el ciclo solar va ascendiendo, los hoyos coronales polares van reduciendo su área y empiezan a aparecer pequeños hoyos a latitudes medianas y bajas. Como éstos son más activos y más rápidamente cambiantes, un número mayor de perturbaciones empezarán a viajar a través del medio interplanetario, cuya frecuencia e intensidad aumentarán conforme progrese el ciclo, llegando a un máximo cuando el área de hoyos coronales polares sea mínima. En la parte descendente del ciclo solar, la perturbación del medio interplanetario causada por los hoyos coronales disminuye y llega a un mínimo cuando estos desaparecen como entidades pequeñas en las zonas de mediana y baja latitud y en su lugar van creciendo los hoyos polares.

III. HOYOS CORONALES Y MODULACION DE RAYOS COSMICOS

Como ya se mencionó el área y actividad de los hoyos coronales presentan una variación de 11 años acorde a la actividad solar. Una variación semejante se observa también en la intensidad de la radiación cósmica detectada en la Tierra y se encuentra también correlacionada con la actividad solar pero con fase inversa, esto es, en períodos de mínima actividad solar se registra el máximo de intensidad de rayos cósmicos en la Tierra y viceversa. Esta variación ha sido siempre considerada como debida a la modulación que sufren los rayos cósmicos en el medio interplanetario en su paso hacia la Tierra, la cual a su vez está determinada por el nivel de actividad solar.

Hundhausen et al., (1980) encontraron una fuerte correlación positiva entre el área de los hoyos coronales polares y la radiación cósmica entre 1971 y 1976, (Ver figura 3). Esto llevó a sugerir que los hoyos polares estaban determinando en gran medida la estructura tridimensional de la Heliosfera y por tanto estaban provocando la modulación de rayos cósmicos. Por otro lado, Simon y Legrand (1980) propusieron que la expansión de los hoyos coronales hacia bajas latitudes provocaría perturbaciones en la hoja neutra heliosférica y esto a su vez influiría en el patrón de modulación.

Existe, a su vez, un amplio reconocimiento de la correlación entre las perturbaciones magnéticas del medio interplanetario, tanto en pequeña como en gran escala, con las variaciones en la intensidad de rayos cósmicos, por lo que la mayoría de los autores se inclinan por la proposición de que el origen de la modulación se encuentra en las perturbaciones producidas por el Sol. En términos generales el procedimiento ha sido de buscar correlaciones de la intensidad de rayos cósmicos con algún parámetro de la actividad solar.

Casi todos los estudios han utilizado como parámetro el número de manchas solares (v.g. Akopian et al., 1981, Nagashima y Morishita, 1980, Webber y Lockwood, 1981) y sólo un esfuerzo serio se ha hecho empleando el número de ráfagas intensas. (Hatton, 1980).

A nivel teórico la modulación se ha estudiado desde Parker (1965) a través de la ecuación de movimiento de las partículas en presencia de un plasma inhomogéneo en expansión continua. En la ecuación propuesta por Parker se incluyen los efectos de difusión, convección y deceleración causada por la expansión continua del viento solar y por la presencia de irregularidades magnéticas en el medio. Posteriormente se han incluido otros efectos como el arrastre magnético causado por la curvatura y el gradiente del campo interplanetario (Jokipii et al., 1979, 1981, 1983, Moraal et al., 1979, 1985). Sin embargo los modelos hasta hoy desarrollados no han podido reproducir fielmente las observaciones (Otaola et al., 1985, Newkirk y Fisk, 1985, García-Muñoz, et al., 1986).

En la nueva perspectiva de los hoyos coronales de medianas y bajas latitudes como productores de las principales perturbaciones del medio interplanetario, la correlación encontrada por Hundhausen et al., (1980) tiene otro significado. Como se mencionó, los hoyos coronales polares disminuyen su tamaño al aumentar la actividad del Sol y es en este proceso cuando aparecen los pequeños y cambiantes hoyos coronales de medianas y bajas latitudes que van a perturbar el espacio interplanetario. Así pues, cuando las áreas de los hoyos coronales polares son grandes, los rayos cósmicos encontrarán un medio bastante quieto en su camino a la Tierra por lo que sufrirán una modulación muy pequeña y se registrará una alta intensidad. Por otra parte, al disminuir el área de los hoyos polares, disminuirá también la intensidad de rayos cósmicos observada en la Tierra pues entonces sufrirán una mayor modulación en el medio interplanetario causada por las perturbaciones producidas por los hoyos de más baja latitud que han aparecido.

Adicionalmente, es interesante notar en la Fig. 3 que la parte de caída de la intensidad de rayos cósmicos (66-69) es menos pronunciada que la recuperación de ésta. (71-72). Este hecho esta de acuerdo con el comportamiento de los hoyos coronales de medianas y bajas latitudes, los cuales, como se señaló, son más frecuentes e inestables cuando el ciclo solar va de mínimo a máximo que cuando va de regreso hacia el mínimo.

Con esto concluimos que la correlación obtenida por Hundhausen et al., apoya la idea de que los rayos cósmicos son modulados por las irregularidades del medio interplanetario y pone de manifiesto según lo expuesto aquí el papel preponderante que los hoyos coronales no polares juegan en esta modulación.

REFERENCIAS

- Akopian, S.K., Asatrian G.A., Strozhkov Yu.I., 1981, Proc. 17th. Int. Conf. on Cosmic Rays, 3, 227.
 Bohlin, J.D., Koomen, M.J. and Tousey, R. 1971, *Solar Phys.* 21, 408.
 Bohlin, J.D. and Sheeley Jr. N.R. 1978, *Solar Phys.* 56, 125.
 Broussard, R.M., Sheeley Jr. N.R. and Tousey R. 1978, *Solar Phys.* 56, 161.
 García-Muñoz, M., P. Meyer, K.R. Pyle and J.A. Simpson, 1986, *J. Geophys. Res.*, 91, 2858.
 Hatton, C., 1980, *Solar Phys.* 66, 159.
 Hewish, A., and S. Bravo, por aparecer en *Solar Phys.*
 Hundhausen, A.J., D.G. Sime, R.T. Hansen and S.F. Hansen, 1980, *Science*, 207, 761.
 Hundhausen, A.J., Hansen R.T. and Hansen S.F. 1981, *J. Geophys. Res.* 86, No. A4, 2079.
 Jokipii, J.R. and D.A. Kopriva, 1979, *Astrophys. J.* 234, 384.
 Jokipii, J.R. and B.T. Thomas, 1981, *Astrophys. J.* 243, 1115.
 Kota, J. and J.R. Jokipii, 1983, *Astrophys. J.*, 265, 593.
 Moraal, H., L. Gleeson and G.M. Webb, 1979, Proc. 16th. Int. Conf. Cosmic Rays, Kyoto, 3, 1.
 Nagashima, K. and I. Morishita, 1980, *Planet. Sp. Sci.*, 28, 195.
 Newkirk, G. and L.A. Fisk, 1985, *J. Geophys. Res.*, 90, 3391.
 Nolte, J.T., Davis J.M., Gerassimenko M., Krieger A.S., and Solodyná C.V. 1978, *Solar Phys.* 60, 143.
 Otaola, J.A., R. Pérez-Enríquez and J.F. Valdés-Galicia, 1985, Proc. 19th. Int. Conf. on Cosmic Rays, La Jolla, 4, 493.
 Parker, E., 1965, *Planet. Sp. Sci.*, 13, 9.

- Potgieter, M.S. and H. Moraal, 1985, *Astrophys. J.*, 294, 425.
 Saito, K. 1972, *Ann. Tokyo Astron. Obs.* 13, 93.
 Sheeley, Jr. N.R., Harvey J.W. and Feldman W.C. 1976, *Solar Physics*, 49, 271.
 Sheeley, Jr. N.W. and Harvey J.W., 1981, *Solar Physics*. 70, 237.
 Simon P.A. and J.P. Legrand, 1980, *Sun and Climate, Journess d'etudes internationales, Toulouse*, pp. 33-44.
 Vaiana, G.S., Krieger, A.S. and Timothy, A.F. 1973, *Solar Phys.* 32, 81.
 Waldmeier, M. 1981, *Solar Phys.* 70, 251.
 Webber, W.R. and J.A. Lockwood, 1981, *J. Geophys. Res.*, 86, 11458.
 Withbroe, G.L., Dupree, A.K., Goldberg, L., Huber, M.C.E., Noyes, R.W., Parkinson, W.H. and Reeves, E.M. 1971, *Solar Phys.*, 21, 272.

DISCUSSION

ALVAREZ: Me gustaría que ampliaras en lo que significa la correlación entre los hoyos coronales y la intensidad de rayos cósmicos, ya que para algunos otros parámetros, las correlaciones positivas cambian y se vuelven anti-correlaciones al cambiar los ciclos solares (sólo se tiene un ciclo en el caso de los hoyos coronales).

BRAVO: Desgraciadamente, el mapeo de hoyos coronales que permite calcular su área es bastante reciente y se tiene solamente un poco más de un ciclo solar de estos datos.

ANGELES: ¿Existe algún modelo para explicar la presencia de los hoyos coronales?

BRAVO: Hay varios que se están elaborando y van principalmente en dos líneas diferentes: un calentamiento mayor en la base que hace que el plasma rompa las líneas o una configuración magnética que permita con mayor facilidad el flujo de plasma hacia afuera. Yo personalmente comarto esta última.

MENDOZA: ¿Han hecho la correlación entre el área de los hoyos coronales y el flujo de las ráfagas en rayos-X?

BRAVO: No. Pero te puedo decir que debe existir una correlación inversa. No sé que tan buena pero debe haber, y esto no es extraño pues las ráfagas intensas de rayos-X también son manifestaciones de actividad solar y todas estas manifestaciones están relacionadas.