

GEOFISICA INTERNACIONAL

REVISTA DE LA UNIÓN GEOFÍSICA MEXICANA, AUSPICIADA POR EL INSTITUTO DE GEOFÍSICA DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Director: Julián Adem

Subdirector: Manuel Maldonado-Koerdell

Vol. 3

México, D. F., 1o. de Abril de 1963

Núm. 2

LABORATORIO DE FISICA COSMICA,
UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRES,
LA PAZ, BOLIVIA

*VARIACIONES EN INTENSIDAD DE LA RADIA-
CION COSMICA Y LOS ESTADOS ELECTROMAG-
NETICOS DEL ESPACIO INTERPLANETARIO **

H. S. AHLUWALIA * e I. ESCOBAR V. * * *

RESUMEN

Los cambios en los estados electromagnéticos del espacio interplanetario producen fluctuaciones temporales en la intensidad de los rayos cósmicos que inciden sobre la Tierra. Estos cambios en los estados electromagnéticos interplanetarios, a su vez, son producidos por el viento solar. Por consiguiente, el estudio de las variaciones de la intensidad de rayos cósmicos proporciona una manera fácil de obtener información concerniente a los parámetros que caracterizan al viento solar en un instante dado. Pruebas obtenidas mediante el estudio de las variaciones diarias en la radiación cósmica durante días solares quietos, indican que la velocidad del viento solar es generalmente superior a los 100 Km/seg y que este viento solar experimenta una variación cíclica de 22 años. También se demuestra que el corrimiento del máximo de variación diaria se hacia horas anteriores en días perturbados que se observa en las primeras fases de las tormentas de rayos cósmicos, permite a uno escoger, para la configuración del campo magnético interplanetario en días geomagnéticamente perturbados, entre el modelo de "onda expansiva" de Parker y el modelo de "lengua magnética" por el que abogan Gold y otros. Las observaciones satisfacen mejor el modelo de la onda expansiva.

Se presenta un modelo cualitativo para explicar las características generales de la variación secular de la intensidad isotrópica de rayos cósmicos en función de ideas más corrientemente aceptadas en el cual el viento solar tiene rol más importante. El modelo requiere que el campo magnético interplanetario se extienda hasta una distancia del Sol que alcanza a varias decenas de unidades astronómicas.

* Este trabajo fue realizado en parte por la Oficina de Investigación Científica de la Fuerza Aérea de los Estados Unidos, bajo la subvención AF-AFOSR 62-395.

* * Con licencia del Laboratorio de Investigaciones Físicas de Ahmedabad (India) dentro del programa de Asistencia Técnica de UNESCO.

* * * También de la Comisión Boliviana de Energía Atómica.

*THE COSMIC RAY INTENSITY VARIATIONS
AND THE ELECTROMAGNETIC STATES OF THE
INTERPLANETARY SPACE **

H. S. AHLUWALIA * * and I. ESCOBAR V. * * *

ABSTRACT

Changes in the electromagnetic states of the interplanetary space produce temporal fluctuations in cosmic ray intensity as observed on the Earth. The changes in the interplanetary electromagnetic states are, on the other hand, brought about by solar wind. The study of cosmic ray intensity variations, therefore, provides an easy way to obtain information with respect to the parameters that characterize the solar wind at any given time. Evidence available from the study of quiet day solar diurnal variation of cosmic rays indicates that solar diurnal variation of cosmic rays indicates that solar wind velocity is usually above 100 Km/sec and that the wind velocity undergoes a 22-year cyclic change. Also it is demonstrated that the shift to earlier hours of the time of maximum of disturbed day solar diurnal variation observed during early stages of the cosmic ray storms enables one to choose between Parker's "blast wave" model and the "magnetic tongue" model advocated by Gold and others for the configuration of interplanetary magnetic field obtainable on geomagnetically disturbed days. Observations fit the blast wave model better.

A qualitative model, in which solar wind plays a major role, is presented to explain the gross features of the secular variation of isotropic intensity of cosmic rays in terms of currently most accepted ideas. The model requires that the interplanetary magnetic field should extend over a distance amounting to several tens of astronomic units from the Sun.

* This research was supported in part by the Office of Scientific Research of the United States Air Force under grant AF-AFOSR 62-395.

* * On leave of absence from the Physical Research Laboratory, Ahmedabad (India) under the Technical Assistance program of UNESCO.

* * * Also with the Bolivian Atomic Energy Commission.

INTRODUCCION

Se acepta de una manera general que la radiación corpuscular del Sol es causante de una gran variedad de fenómenos interplanetarios y geofísicos como la polarización de la luz zodiacal, las colas de los cometas, la luminiscencia lunar, las auroras, las perturbaciones magnéticas, etc. Además, la radiación corpuscular es también responsable de la existencia y mantenimiento de campos magnéticos interplanetarios y de la producción de variaciones temporales en la configuración de esos campos. No obstante, existen diferentes opiniones sobre el modo real en que se produce la emisión y propagación de esta radiación corpuscular del Sol y sobre la naturaleza de los mecanismos por medio de los cuales, ésta da lugar a los diversos fenómenos arriba enumerados.

Investigaciones teóricas recientemente efectuadas por Parker (1960a) y Chamberlain (1960, 1961), indican que la corona solar es demasiado caliente para encontrarse confinada por el campo gravitacional solar y que por consiguiente, debe expandirse continuamente. Sin embargo, ambos estudios no concuerdan en lo que respecta a la distancia hasta la cual tiene lugar el calentamiento de la corona. En el estudio de Chamberlain, se supone que la corona es calentada sólo en sus capas inferiores, dando lugar este calentamiento a una velocidad de expansión hidrodinámica de la corona del orden de 20 Km/seg. Parker, por otro lado, supone que el calentamiento se extiende mucho más arriba en la corona solar y obtiene así velocidades de expansión de algunos centenares de kilómetros por segundo. Este flujo de gas emergente constituye la radiación corpuscular que Parker llama viento solar. Parker (1961a y b) igualmente ha demostrado que durante las erupciones solares, cuando la temperatura de la región que contiene la erupción sube hasta $4 \cdot 10^6$ °K, tiene lugar una expansión coronal súbita con velocidades del orden de 1000 a más de 2000 Km/seg, dando origen a un viento solar de mayor consideración.

Debido a la gran conductividad del plasma que constituye el viento solar, las líneas de fuerza de los campos magnéticos de la corona, cuya densidad de energía es menor que la densidad de la energía cinética del viento, son distendidas hacia afuera. Parker (1958a, 1962a) ha mostrado que en días solares quietos este efecto da lugar a un campo magnético interplanetario en espiral, que en una primera aproximación toma la forma de una suave espiral de tipo Arquímedes, en el plano ecuatorial solar. Este campo espiral en promedio gira juntamente con el Sol (Ahluwalia y Dessler, 1962). En días perturbados el campo espiral puede llegar a contener un gran número de irregularidades y por consiguiente, es probable que la configuración del campo interplanetario sea considerablemente más complicada. Sin embargo, hay diferentes opiniones respecto a la distancia a que debe terminar el campo magnético interplanetario, Brandt y Michie (1962) sitúan este límite a 2 unidades astronómicas, pues a mayor distancia el campo en espiral debe desorganizarse convirtiéndose en un campo magnético irregular. De

INTRODUCTION

It is generally accepted that solar corpuscular radiation is responsible for a wide variety of interplanetary and geophysical phenomena like polarization of zodiacal light, comet tails, lunar luminescence, auroral and geomagnetic disturbances, etc. Besides, corpuscular radiation is also instrumental in creating and sustaining an interplanetary magnetic field and producing temporal variation in the configuration of this field. There are, however, different opinions regarding the actual mode of emission and of propagation of the corpuscular radiation from the Sun and the nature of the mechanism through which it gives rise to the diverse phenomena enumerated above.

Two recent theoretical investigations by Parker (1960a) and Chamberlain (1960, 1961) indicate that the solar corona is too hot to be confined by the solar gravitational field and hence must expand continuously. The two approaches, however, differ as to the range of distance over which coronal heating takes place. In Chamberlain's approach the corona is assumed to be heated at its base yielding the hydrodynamic coronal expansion velocity of 20 Km/sec. Parker, on the other hand, assumes that the heating extends much further up into the solar corona and thus obtains expansion velocities of several hundred kilometers per second. This outward flow of gas constitutes the corpuscular radiation and Parker calls it the solar wind. Parker (1961a and b) has also pointed out that at the time of solar flares when the temperature of the region containing the flare rises to about $4 \cdot 10^6$ °K there could take place a sudden coronal expansion with velocities in the range of 1000 to over 2000 Km/sec giving an enhanced solar wind.

Because of the great conductivity of the plasma constituting the solar wind, the lines of force of the magnetic fields in the corona, the energy density of which is less than the kinetic energy density of the wind, are stretched outwards. Parker (1958a, 1962a) has shown that on quiet days this gives rise to a spiral interplanetary magnetic field which in first approximation, has the configuration of a smooth Archimedes' spiral in the solar equator. This spiral field on the average co-rotates with the Sun (Ahluwalia and Dessler, 1962). On disturbed days the spiral field may contain a large number of irregularities and hence the configuration of the interplanetary field is likely to be considerably more complicated. There is, however, a difference of opinion as to where the interplanetary magnetic field should terminate. Brandt and Michie (1962) suggest a figure of 2 astronomic units at which the spiral field must disorganize into an irregular magnetic shell. On the other hand, Parker (1962c) and more recently Axford, Dessler and Gottlieb (1962) have examined this problem in some

otro lado, Parker (1962c) y más recientemente Axford, Dessler y Gottlieb (1962) han examinado este problema con cierto detalle y dado argumentos que justifican que la terminación deberá producirse a distancias mucho mayores, quizás hasta las 50 o aún 1000 unidades astronómicas.

La radiación cósmica que bombardea la Tierra tiene que pasar al través del medio interplanetario y resultaría modificada de una manera característica por la configuración de los campos magnéticos interplanetarios existentes en un momento dado. Resulta, pues, claro que los rayos cósmicos pueden ser usados de una manera continua como instrumento para analizar precisamente esos estados electromagnéticos del espacio interplanetario. La información sobre meteorología interplanetaria así obtenida puede utilizarse para complementar y verificar las informaciones relacionadas con los parámetros del viento solar que fueron derivados del estudio de los fenómenos geofísicos, así como también para verificar las predicciones de los diferentes modelos teóricos existentes. El propósito de este trabajo es explorar el alcance de esta forma de aproximación alterna.

Los métodos que utilizan la radiación cósmica pueden ser clasificados en dos grandes grupos. El primero involucra el estudio de las características de propagación de los rayos cósmicos producidos en las erupciones solares; es decir, los rayos cósmicos solares y el otro trata de la modulación en el flujo de rayos cósmicos galácticos producido por el campo magnético interplanetario que causa el viento solar.

El primer método de aproximación ha sido elaborado por McCracken y Palmeira (1960) y McCracken (1961, 1962) quienes han demostrado cómo la estructura fina de las fases de inicio y decaimiento de los incrementos de la intensidad de la radiación cósmica, tal como es observada por los detectores establecidos sobre la superficie de la Tierra, está relacionada con las formaciones características del campo magnético interplanetario existente en aquel período de tiempo. El segundo método se encuentra aún en la fase preliminar de su desarrollo y fue postulado por Ahluwalia y Dessler (1962). En este artículo nos referiremos principalmente a este segundo método de aproximación delineando su utilidad para arrojar mayor luz sobre los estados electromagnéticos del espacio interplanetario y sus variaciones temporales. El siguiente paso será, naturalmente, relacionar de manera clara estos varios estados con los parámetros que caracterizan al viento solar en cualquier instante dado.

detail and have given arguments to the effect that the termination should occur at much larger distances, perhaps as great as 50 to 1000 astronomic units.

The cosmic radiation which bombards the Earth has to pass through the intervening interplanetary medium and would be influenced in a characteristic manner, by the interplanetary magnetic field configuration existing at a given time. It is clear then that cosmic rays can be used as probes for sounding the electromagnetic states of interplanetary space on a continuous basis. The information about interplanetary meteorology so obtained can be utilized in supplementing and crosschecking the information regarding solar wind parameters derived from the study of geophysical phenomena and also in verifying the predictions of different theoretical models. The purpose of this paper is to explore the scope of this alternate approach.

The cosmic ray approach can be classified into two broad classes. One involves the study of the propagation characteristics of the cosmic rays produced in solar flares, i. e. the solar cosmic rays, and the other deals with the study of the modulation of galactic cosmic ray flux effected by the interplanetary magnetic field set up by the solar wind.

The first approach has been elaborated upon by McCracken and Palmeira (1960) and by McCracken (1961, 1962) who have demonstrated how the fine structure of the onset and decay phases of flare type increases in cosmic ray intensity, as observed by ground based detectors, is related to the characteristic features of the interplanetary magnetic field existing at the time. The second approach is due to Ahluwalia and Dessler (1962) and is still in its preliminary phase of development. In this presentation we shall concern ourselves mainly with outlining the usefulness of this latter approach in throwing light on the electromagnetic states of interplanetary space and their time variations. The next step should of course be to unambiguously relate these various states to the parameters which characterize the solar wind at any given time.

VARIACION DIARIA SOLAR EN DIAS QUIETOS Y ESTIMACION DE LA VELOCIDAD MEDIA DEL VIENTO SOLAR

QUIET DAY SOLAR DIURNAL VARIATION AND AN ESTIMATE OF AVERAGE SOLAR WIND VELOCITY

La Fig. 1 muestra, en el plano ecuatorial solar, el efecto de un campo magnético interplanetario espiral, corrotante con el Sol, sobre los rayos cósmicos galácticos con energías del orden de 10^{11} eV o mayores, dentro del sistema solar. Los símbolos que aparecen en la figura tienen los siguientes significados:

Fig. 1 shows the effect of the co-rotating solar spiral interplanetary magnetic field in the plane of the solar equator on galactic cosmic rays, having energies up to 10^{11} eV and higher, within the solar system. The symbols in the figure have the following meaning:

V_s = Velocidad del viento solar en un instante cualquiera.

B = La fuerza del campo magnético interplanetario espiral a la altura de la órbita terrestre. La línea punteada indica el perfil del campo espiral en el ecuador solar. La dirección del campo en la órbita de la Tierra está indicada por medio de una flecha sobre la línea punteada.

ϵ = La intensidad del campo eléctrico en la órbita terrestre, resultante del movimiento relativo del campo magnético interplanetario espiral con respecto a la Tierra. Su dirección es perpendicular al plano ecuatorial del Sol.

ω = Velocidad angular del Sol, tal como es vista desde una Tierra inmóvil.

χ = Complemento del ángulo denominado en "manguera de jardín" por Chapman y Bartels (1940), medido a partir de la línea Tierra-Sol en dirección al Este. Como es obvio, este ángulo χ será una función de la velocidad del viento solar (V_s). A medida que V_s aumenta, las líneas de fuerza magnética serán menos curvadas y así el valor de χ será mayor.

V = La velocidad de los centros guía de las partículas de rayos cósmicos que "derivan" bajo la acción del campo eléctrico ϵ y del campo magnético B en su camino hacia la Tierra. La dirección de movimiento de los centros guía está indicada por dos flechas.

Compton y Gotting (1935) mostraron que el movimiento relativo entre la Tierra y los centros guía de las partículas de radiación cósmica da lugar a un exceso en el flujo de los rayos cósmicos galácticos que llegan de la dirección χ vista desde la Tierra. Se ha sugerido por Ahluwalia y Dessler (1962) que esta anisotropía en el flujo modulado de rayos cósmicos galácticos es la causa de la variación diaria en la intensidad de los rayos cósmicos durante los días no perturbados, tal como es observada por detectores instalados sobre la Tierra en rotación. No es difícil mostrar que la amplitud de la variación diaria así producida tiene que ser proporcional a la velocidad de los centros guía (V), la cual a su vez está relacionada con la velocidad del viento solar (V_s) por la simple siguiente expresión:

$$V = k V_s (k^2 + V_s^2)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

donde k es una constante. Entonces, si uno conoce la amplitud de la variación diaria es posible computar la velocidad media del viento solar durante el día en cuestión.

La Fig. 2 muestra la relación entre la velocidad del viento solar (V_s) y la velocidad (V) de los centros guía. Se ve que para pequeños valores de V_s , el valor de V aumenta

V_s = Velocity of the solar wind at any given time.

B = The strength of the interplanetary spiral field at Earth's orbit. The dotted curve indicates the profile of the spiral field in the solar equator for a given velocity of the solar wind. The direction of the field at Earth's orbit is indicated by an arrow on the dotted curve.

ϵ = The strength of the electric field at the Earth's orbit resulting from the relative motion of the co-rotating interplanetary spiral magnetic field with respect to the Earth. The direction of ϵ is perpendicular to the plane of the solar equator.

ω = Angular velocity of the Sun as seen from a stationary Earth.

χ = Complement of "garden-hose" angle, according to Chapman and Bartels (1940) measured eastwards from the Earth-Sun line. As is obvious, χ would be a function of solar wind velocity (V_s). As V_s increases the magnetic lines of force would be less curved and so the value of χ would be greater.

V = The velocity of the guiding centers of the cosmic ray particles which "drift" under the action of the electric field ϵ and the magnetic field B on their way to the Earth. The direction of motion of the guiding centers is indicated by two arrows.

The relative motion between the Earth and the guiding centres of cosmic rays particles gives rise to an excess of galactic cosmic ray flux coming from the direction χ as seen from the Earth in the way envisaged by Compton and Getting (1935). As suggested by Ahluwalia and Dessler (1962), this anisotropy in the modulated galactic cosmic ray flux is the cause of quiet day solar diurnal variation of cosmic ray intensity as observed by detectors based on the spinning Earth. It is not difficult to show that the amplitude of the diurnal variation so produced should be proportional to the velocity of guiding centers (V) which in turn is related to the solar wind velocity (V_s) in a simple manner as follows:

where k is a constant. If then one knows the amplitude of diurnal variation, it is possible to compute the average solar wind velocity during the day in question.

Fig. 2 shows the relationship between the solar wind velocity (V_s) and the velocity (V) of the guiding centres. It is seen that for smaller values of V_s , V increases ap-

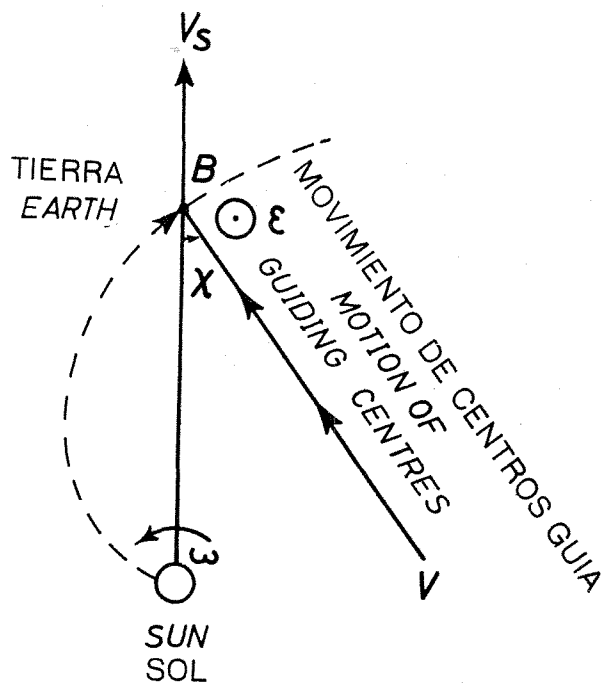


Fig. 1. Perfil del campo magnético interplanetario producido por un viento solar que se mueve hacia el exterior con velocidad V_s . B y ϵ son los campos magnéticos y eléctricos respectivamente. Los centros guía de rayos cósmicos galácticos se mueven en la dirección indicada, con velocidad V . ω es la velocidad rotacional del Sol vista desde la Tierra estacionaria.

Fig. 1. Profile of the interplanetary magnetic field produced by solar wind moving outwards with a velocity V_s . B and ϵ are the magnetic and electric fields respectively. The guiding centers of galactic cosmic rays move in the direction indicated with a velocity V . ω is rotational velocity of the Sun as seen from the stationary Earth.

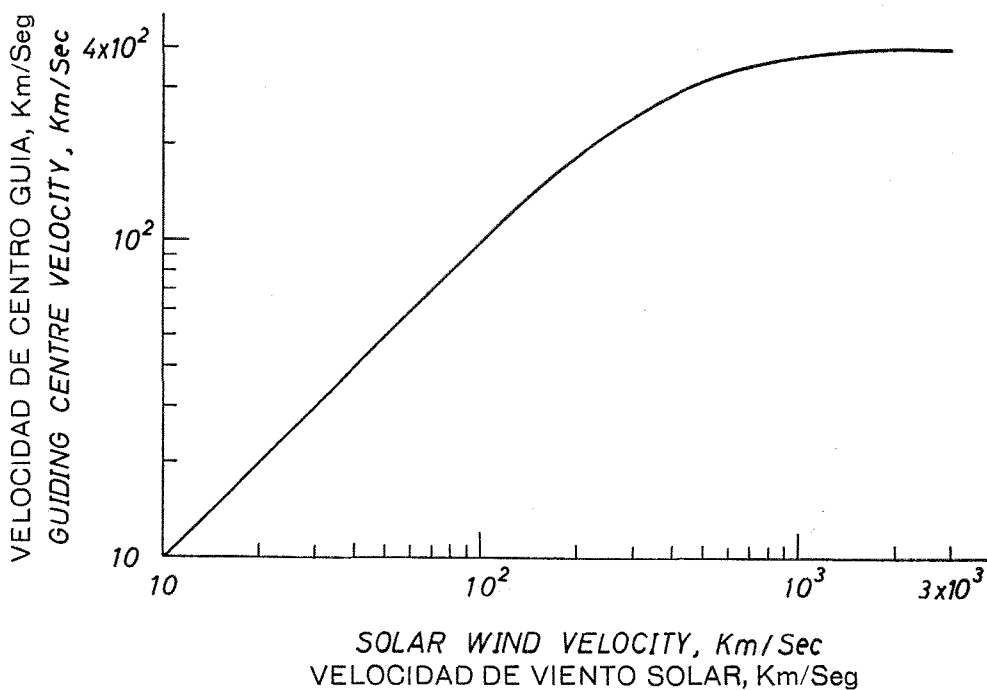


Fig. 2. Velocidad de los centros guía en función de la velocidad del viento solar.

Fig. 2. Guiding center velocity as a function of the solar wind velocity.

aproximadamente en forma lineal y posteriormente se nivela con un límite asintótico.

La Fig. 3 da la relación entre la amplitud esperada, medida de valle a cresta, de la variación diaria solar de los rayos cósmicos y la velocidad de deriva V . Se puede ver que a medida que V aumenta (debido al aumento en V_s) la amplitud de la variación diaria también aumenta y como se ha establecido más arriba, χ también aumenta a medida que V_s aumenta. Por consiguiente, la teoría predice que cuanto mayor sea la amplitud de la variación diaria solar de la radiación cósmica en un día no perturbado, tanto más tarde en hora local se producirá el máximo diario. Para confirmar esta aseveración mostramos la Fig. 4, que es una representación de la amplitud anual media de variación diaria media (valle a cresta) y la hora local del máximo diario

proximately linearly and thereafter it levels off to an asymptotic limit.

Fig. 3 gives the relationship between the expected peak-to-peak amplitude of solar diurnal variation of cosmic rays and the drift velocity V . It can be seen that as V increases (due to increase in V_s) the amplitude of the diurnal variation also increases. As has been already stated above, χ also increases as V_s increases. The theory, therefore, predicts that the larger the quiet day amplitude of solar diurnal variation of cosmic rays the later would be the local time at which the diurnal maximum occurs. That this is indeed the case is evident from Fig. 4 which is a plot of annual mean diurnal variation amplitude (peak-to-peak) and diurnal local time of maximum for the hard component of cosmic rays as observed at Huancayo with a

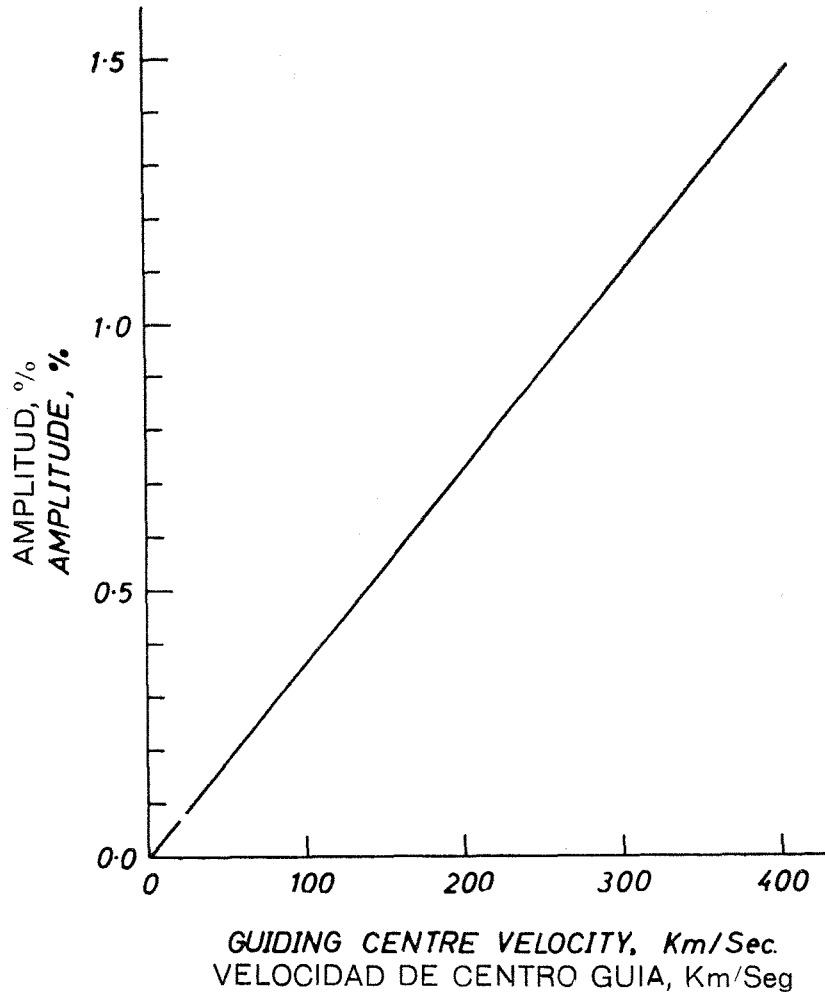


Fig. 3. Amplitud porcentual entre valores extremos de la curva de amplitud de la variación diaria solar en función de la velocidad de los centros guía.

Fig. 3. Percentage free-space peak-to-peak amplitude of solar diurnal variation of cosmic rays as a function of the guiding center velocity.

para la componente dura de la radiación cósmica, medida en el Observatorio de Huancayo, con una cámara blindada de ionización durante 23 años, de 1937 a 1959.¹

Estrictamente se debería buscar una relación de este tipo sobre la base de datos diarios y sin embargo, los promedios anuales realmente representan el estado de las fluctuaciones predominantes en la mayoría de los días del año en cuestión, por lo que no es necesario indicar que la relación predicha se observa, en la práctica, en la mayor parte de los días durante los años citados. Para calcular la velocidad media del viento solar, a partir de estos datos debe aplicarse una corrección por el hecho de que el flujo inicialmente dirigido en un sentido es sometido a una deflexión diferencial dependiente de las energías de las partículas que constituyen el campo geomagnético. También la radiación secundaria producida por el flujo primario en su camino a la Tierra está sujeta a la acción del campo magnético, de manera que se produce una considerable dispersión. Hay un límite superior de energía E_{\max} que depende de la distribución de intensidad del campo magnético interplanetario espiral; las partículas de rayos cósmicos con energías mayores que este límite no son afectadas por el campo espiral corrotante. Ahluwalia y Dessler (1962) han calculado que estos factores reducen el valor de la amplitud verdadera en un 40%.

La Fig. 4 muestra el valor mínimo de la amplitud que se produce en 1954 y el valor máximo en 1959 y que estos valores son 0.26% y 0.72%, respectivamente, que corresponden a amplitudes de 0.44% y 1.27%, respectivamente. De acuerdo a las Figs. 2 y 3, estos valores representarían velocidades del viento solar de 150 Km/seg a 600 Km/seg con un promedio de 400 Km/seg. Esto ciertamente excluye la condición de contorno expuesta por Chamberlain para el calentamiento de la corona. El valor de Chamberlain de 20 Km/seg para la velocidad del viento solar predecirá una amplitud entre extremos de la variación diaria de 0.10% la cual es 8 veces menor que el promedio observado. Por consiguiente, es lógico concluir que en la mayor parte de los días, la fuente de calor sube bastante arriba de la misma corona solar, favoreciendo las condiciones de contorno expuestas por Parker, Axford, Dessler y Gottlieb (1952) también llegaron a la misma conclusión a partir de un conjunto diferente de argumentos que involucraba el equilibrio entre la densidad de energía cinética del viento y la densidad de energía magnética del campo "congelado" dentro del plasma.

CAMBIOS EN PERIODOS LARGOS DE TIEMPO EN LA VELOCIDAD DEL VIENTO SOLAR

Por la Fig. 4 se ve claramente que los parámetros de variación diurna presentan un ciclo de variación de 22 años

¹ Los datos básicos fueron tomados del trabajo de Forbush y Venkatesan (1960) y corregidos por efectos de temperatura de acuerdo a los datos obtenidos por cortesía del Departamento de Meteorología de la India.

shielded ionization chamber over the past 23 years, i. e. from 1937 to 1959.¹

Strictly speaking one should look for a relationship of this kind on a day to day basis; nevertheless yearly averages do represent the state of affairs on a majority of days in the year and so it is not unreasonable to say that the predicted relationship is observed in practice on most days. To compute the average solar wind velocity from these data one has to apply a correction for the fact that initially directed flux undergoes differential deflection, depending on the energy of particles constituting the flux, by the geomagnetic field. Also, the secondaries produced by the primary flux on its way to the Earth are subject to the action of the geomagnetic field so that considerable smearing takes place. Depending on the intensity distribution of the spiral interplanetary magnetic field, there exists an upper energy limit E_{\max} , cosmic ray particles having energies greater than this limit are not affected by the co-rotating spiral field. Ahluwalia and Dessler (1962) estimate that these factors, on the average, reduce the free space value of the amplitude by about 40%.

From Fig. 4 it is seen that the minimum value of the amplitude occurs in 1954 and the maximum in 1959 and these values are respectively 0.26% and 0.72% that correspond to free space amplitudes of 0.44% and 1.20% respectively. From Figs. 2 and 3 it is seen that these correspond to the solar wind velocities of 150 Km/sec to 600 Km/sec, giving an average value of about 400 Km/sec. This certainly precludes Chamberlain's boundary condition for coronal heating. Chamberlain's value of 20 Km/sec for solar wind velocity would predict a peak-to-peak diurnal variation amplitude of about 0.10% which is less than the average observed value by a factor of 8. It is, therefore, legitimate to conclude that on most days the heat source extends well up into the solar corona favoring Parker's boundary conditions. Axford, Dessler and Gottlieb (1962) have also arrived at the same conclusion from a different set of arguments involving the balance between kinetic energy density of the wind and the magnetic energy density of the field "frozen-in" in the plasma.

LONG TERM CHANGES IN THE VELOCITY OF THE SOLAR WIND

It is clear from Fig. 4 that the diurnal variation parameters exhibit a 22 year rather than an 11 year cycle

¹ The basic data have been taken from the paper by Forbush and Venkatesan (1960) and corrected for temperature effect using data supplied through the courtesy of the Indian Meteorological Department.

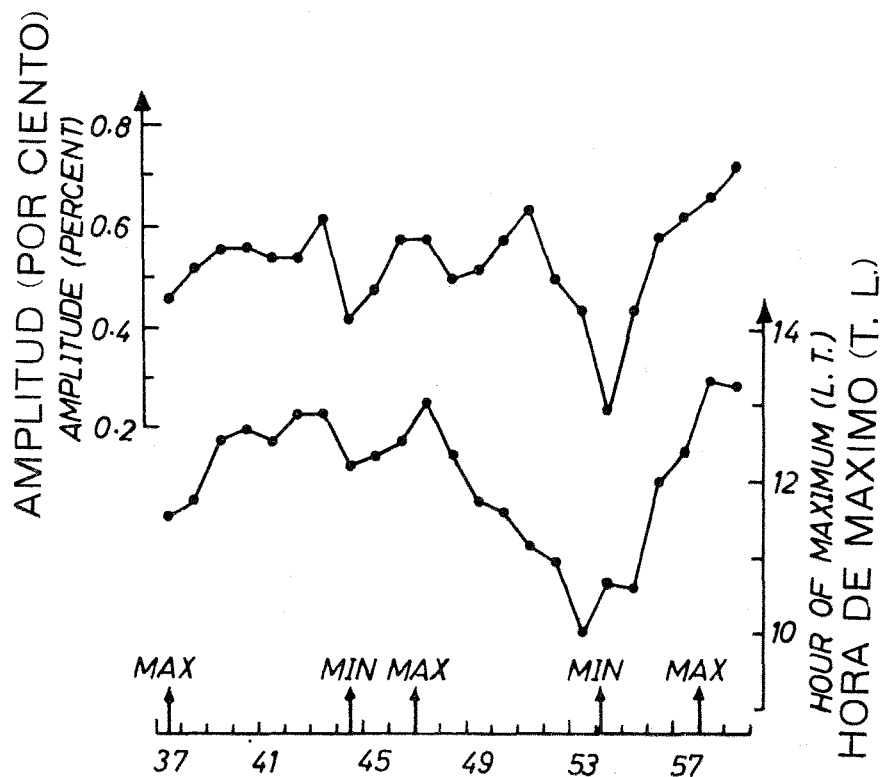


Fig. 4. Representación de la amplitud media anual y del tiempo de máximo de la variación solar de rayos cósmicos observada en Huancayo con una cámara blindada de ionización en los años 1937 a 1959. Las flechas indican los períodos de máximo y mínimo de manchas solares.

Fig. 4. A plot of annual mean amplitude and the time of maximum of solar diurnal variation of cosmic rays as observed at Huancayo, with shielded ionization chamber, over the years 1937-1959. Arrows indicate time of sunspot maxima and minima.

más bien que un ciclo de 11 años. Este efecto ha sido también observado previamente por Thambyapillai y Elliot (1953) y Steinmaurer y Gheri (1955). La hora del máximo durante el día cambia aproximadamente de 3 a 4 horas y la amplitud diaria media anual cambia también por un factor de tres, en el transcurso del ciclo de los 22 años. Esto implica que la velocidad del viento solar también sufre cambios con un período de 22 años, es decir, con un ciclo solar.

También cabe señalar aquí que la desviación standard de los puntos que representan la media anual, calculados a partir de las doce amplitudes medias mensuales y el tiempo de máximo para el año 1954, que corresponde a mínima actividad solar, es aproximadamente dos veces mayor que el observado durante el mínimo solar de 1944. Esto significa que durante el mínimo de actividad solar de 1954, ocurrieron fluctuaciones bastante grandes en la velocidad del viento solar. Esta deducción recibió posteriormente apoyo procedente de las observaciones de Possener y van Heerdaan (1956) quienes descubrieron que durante la segunda mitad de 1954 tanto el tiempo de máximo como la amplitud de variación diaria registrada por un monitor de neutrones en Londres presentó fluctuaciones muy amplias en comparación con las observadas en los períodos adyacentes y que por algún tiempo, durante este período, la amplitud de la variación diaria disminuyó hasta un valor significativamente no diferente de cero. Más adelante también mostraron que du-

of change. This effect has also been noted previously by Thambyapillai and Elliot (1953) and Steinmaurer and Gheri (1955). The diurnal time of maximum changes by about 3 to 4 hours and the annual mean diurnal amplitude changes by a factor of three over 22 years. If our explanation of diurnal variations is correct, then it follows that solar wind velocity should also undergo a 22 year cycle of change.

Further, it may be pointed out here that the standard deviation of the annual mean data points—calculated from twelve monthly mean amplitudes and time of maxima for the year—for the solar minimum year of 1954 is about twice as large as that observed during the solar minimum of 1944. This means that during the solar minimum of 1954 there occurred rather large fluctuations in the solar wind velocity. This inference receives further support from the observations of Possener and van Heerdaan (1956) who found that during the latter half of 1954 both the time of maximum as well as the amplitude of diurnal variation, as recorded by the neutron monitor in London, exhibited fluctuations over a wide range compared to those observed in the adjoining periods and that for some time during this period the diurnal variation amplitude decreased to a value not significantly different from zero. They have further shown that such "anomalous" behavior of diurnal variation parameters was not observed during the solar

rante el mínimo solar de 1944 no fue observado tan "anómalo" comportamiento de los parámetros de la variación diaria. Por consiguiente, es muy posible que durante la segunda mitad de 1954 la velocidad del viento solar fluctuó violentamente y en algunos días pudo haber llegado a ser nula.

Si los futuros estudios confirman que la velocidad del viento solar sufre en realidad grandes cambios en cada mínimo solar alternado, se tendrá que considerar las implicaciones de este resultado en la naturaleza del mecanismo responsable para el calentamiento de la corona solar.

VARIACION DIURNA SOLAR EN DIAS PERTURBADOS

Hasta ahora no hemos tenido en consideración las irregularidades del campo interplanetario que actuarían como centros de dispersión y filtro para los rayos cósmicos en su camino a la Tierra. Las irregularidades en el campo interplanetario aparecen debido a la no uniformidad del viento solar, resultante a su vez, del calentamiento no uniforme de las diferentes regiones de la corona solar y de las ocasionales erupciones solares, cuando la temperatura de la región llega hasta $4 \cdot 10 \times 10^6$ °K.

No es un problema simple el hacer conjeturas acerca de la configuración de estas irregularidades. Las dificultades nacen debido a que algunos de los procesos involucrados no son aún bien conocidos ni teórica ni empíricamente; por ejemplo, la teoría de "colapsos" en plasmas sin colisiones, que aparentemente juega un papel importante en la formación de irregularidades en el campo interplanetario, todavía está en un estado rudimentario. Sin embargo, existen dos modelos para la configuración de las irregularidades en el campo interplanetario en los períodos de erupción. Uno de ellos llamado modelo de la "lengua magnética" ha sido sugerido por Cocconi, Greisen, Morrison, Gold y Hayakawa (1958), Piddington (1958) y Gold (1959). El otro conocido como el de la "onda de choque" es debido a Parker (1961a, 1961b, 1962b). Ambos modelos explican bastante bien las principales características de erupciones solares asociadas con aumentos en la intensidad de rayos cósmicos observados sobre la superficie de la Tierra (McCracken, 1962).

No obstante, cuando se trata de encontrar una explicación para el desplazamiento mundial a horas más tempranas del máximo de la variación diurna solar de la radiación cósmica en días perturbados, observado en la primera etapa de las tormentas de rayos cósmicos y los incrementos transitorios en su intensidad, que a veces son observados durante la etapa de recuperación de las tormentas de rayos cósmicos (Ahluwalia, 1962) el modelo de la "lengua" es inadecuado. En cambio, el modelo de la "onda de choque" explica las características generales bastante satisfactoriamente, aunque sólo de modo cualitativo.

Tomemos, por ejemplo, el caso de la variación diurna solar en días perturbados, que ocurre con carácter mundial en la primera etapa de una tormenta de rayos cósmicos.

minimum of 1944. It is quite likely, therefore, that during the latter half of 1954 the solar wind velocity fluctuated violently and on some days it might have even dropped to zero.

Should further studies confirm that solar wind velocity does in fact undergo large changes every alternate solar minimum, one would have to consider the implications of this result on the nature of the mechanism responsible for heating the solar corona.

DISTURBED DAY SOLAR DIURNAL VARIATION

We have so far not taken account of irregularities in the interplanetary field which could act as scattering and screening centres for cosmic rays on their way to the Earth. Irregularities in the interplanetary field arise due to nonuniformity of the solar wind velocity resulting from non-uniform heating of different regions of the solar corona and from occasional solar flares when the temperature of the flare region rises to $4 \cdot 10 \times 10^6$ °K.

It is not a simple matter to conjecture regarding the configuration of these irregularities. The difficulties arise because some of the processes involved are not yet well understood either theoretically or empirically, e.g. the theory of shocks in collisionless plasmas which apparently play an important role in the formation of irregularities in the interplanetary field is still in a rather rudimentary form. There, however, exist two models for configuration of flare time irregularities in the interplanetary field. One of them is the "blast wave" model suggested by Parker (1961a, 1961b, 1962b). The other, called the "magnetic tongue" model has been suggested by Cocconi, Greisen, Morrison, Gold and Hayakawa (1958); Piddington (1958) and Gold (1959). Both models explain fairly well the general features of solar flare associated cosmic ray intensity increases observed on the surface of the Earth (McCracken, 1962).

However, the "tongue" model proves to be inadequate when one tries to find an explanation for the worldwide shift to earlier hours of the disturbed day solar diurnal variation of cosmic rays observed during early stages of cosmic ray storms and the transient increases in cosmic ray intensity that are sometimes observed during the recovery phase of cosmic ray storms (Ahluwalia, 1962). On the other hand, the "blast wave" model explains the general features fairly satisfactorily, although only qualitatively.

For instance, let us examine the case of disturbed day solar diurnal variation which occurs on a world wide basis during the early stages of a cosmic ray storm. Individual

Las características individuales del fenómeno han sido observadas por varios investigadores de este campo; aquí citaremos a Yoshida (1958) y las referencias contenidas en el trabajo de esta autora. Yoshida estudió con detalle diez casos individuales de variación diurna solar en días perturbados que fueron observados durante el período de Enero de 1938 a Febrero de 1950. En su estudio consideró la corrección debida al "efecto de curvatura" causado por decrecimiento de la intensidad de rayos cósmicos al tomar en cuenta datos de tres estaciones separadas 120° en longitud geográfica aproximadamente.

Este método de aplicar una corrección es perfectamente satisfactorio, si se toman los datos de detectores semejantes situados aproximadamente en la misma latitud geomagnética, ya que según el trabajo de Brunberg (1956) y otro recientemente realizado por McCracken (comunicación privada), la respuesta de los detectores es fuertemente dependiente de la latitud geomagnética en que se hallen. Cuando se encuentran cerca del ecuador responden a rayos cósmicos primarios que llegan de una banda bastante amplia de longitudes celestiales y de una banda bastante estrecha de latitudes celestiales. Por el contrario, los detectores situados a altas latitudes geomagnéticas, tienen respuesta confinada a una banda estrecha de longitudes celestiales, pero su respuesta a latitudes celestiales indica una gran dispersión. Así, cualquier estimación que se haga de la amplitud de la anisotropía del tiempo de tormenta —que da lugar a la variación diurna solar en días perturbados— a partir de datos obtenidos en una estación ecuatorial es muy posible que sea subestimada (debido a la dispersión mencionada) si las características de respuesta del detector no son tomadas en cuenta. Igualmente, una estimación realizada usando datos obtenidos a altas latitudes geomagnéticas es muy probable que también sean inexactas, si la amplitud de la anisotropía resulta tener alguna relación funcional con las latitudes celestiales. Estas objeciones también son válidas para cualquier procedimiento de corrección utilizado para tomar en cuenta el decrecimiento de intensidad de rayos cósmicos durante una tormenta sin considerar diferencias en características de respuesta del instrumental si el decrecimiento no es isotrópico en carácter, aunque la dependencia del decrecimiento, en función de la energía de los rayos cósmicos primarios se conozca con buen grado de aproximación.

A la luz de estos hechos, la opinión de los autores es que en tres de los diez eventos, la amplitud y la dirección en la anisotropía de tormenta no han sido adecuadamente calculadas por Yoshida. La razón para este aserto es que los datos utilizados para el cálculo de estos parámetros en tres acontecimientos —ocurridos en Enero de 1938— provienen de estaciones situadas en lugares muy dispersos que van desde el ecuador (Huancayo), hasta tan al norte como es la latitud geomagnética de 50° (Dahlem) sin tomar en cuenta las diferencias en las características de respuesta de los detectores. Además, ya que los errores asociados con las varias evaluaciones individuales no están indicados, resulta difícil comentar acerca de las estimaciones cuantitativas rea-

instances of this phenomenon have been observed by several researchers, for example, Yoshida (1958) and references contained therein. Yoshida studied, in some detail, ten individual cases of disturbed day solar diurnal variation observed during the period January 1938 to February, 1950. In her study she took into account the correction due to "curvature effect" arising out of decrease of cosmic ray intensity by considering data from three stations situated approximately 120° apart in geographic longitudes.

This method of applying correction is fairly accurate if data from similar detectors situated at about the same geomagnetic latitudes are considered, because as is apparent from the work of Brunberg (1956), and has more recently been demonstrated by McCracken (private communication), the detector response is strongly dependent on the geomagnetic latitude of its situation. Detectors near the equator respond to cosmic ray primaries arriving from a rather broad band in asymptotic longitudes and from a rather narrow band of asymptotic latitudes. On the other hand, detectors situated at high geomagnetic latitudes have their response confined to a narrow range in asymptotic longitudes but their asymptotic latitude response indicates a rather large spread. Thus, any estimate made of the amplitude of storm time anisotropy —which gives rise to disturbed day solar diurnal variation— from data obtained at an equatorial station is likely to be an underestimate (due to smearing) if detector response characteristics are not taken into account. Similarly, an estimate made using data obtained at a high geomagnetic latitude is likely to be inaccurate if the amplitude of anisotropy happens to bear some functional relationship to asymptotic latitudes. These objections will also be valid for any correction procedure used to take account of decrease in cosmic ray intensity during a cosmic ray storms without considering differences in instrumental response characteristics if the decrease is not isotropic in character even if the functional dependence of the decrease on the primary cosmic ray energy is known to a fair degree of approximation.

In the light of these facts, it is the opinion of the authors that in three out of ten events, the amplitude and direction of storm time anisotropy has not been properly estimated by Yoshida. The reason being that the data used to estimate these parameters for the three events —which occurred in January, 1938— came from stations ranging right from the equator (Huancayo) to as far north as about 50° geomagnetic latitude (Dahlem) without taking into account the differences in response characteristics of the detectors. Also, since errors associated with individual evaluations are not given, it becomes difficult to comment on the various quantitative estimates made by Yoshida. However, if the three events are rejected, then the remaining

lizadas por Yoshida. Sin embargo, se puede observar que si los tres acontecimientos antes mencionados se rechazan, los siete restantes indican que el incremento de amplitud de la variación diurna solar en días perturbados se encuentra comprendidos entre 0.1 y 0.6% y que el desplazamiento en su hora máxima va entre 0.7 y 6.6 horas. El incremento medio de amplitud es $0.33 \pm 0.08\%$ y el desplazamiento medio en la hora del máximo alcanza a 2.33 ± 0.76 horas. La desviación standard se estimó, en ambos casos, a partir de la dispersión en los valores observados. Además, los resultados de Yoshida señalan que la amplitud comienza aumentando y el tiempo de máximo comienza desplazándose horas anteriores al inicio de la tormenta de rayos cósmicos y este estado de cosas continúa por varias horas. Sin embargo, como los errores no se indican, es difícil decir cuánto tiempo dura la anisotropía de tormenta. Una estimación muy aproximada para su duración puede ser de 20 horas.

De lo expuesto líneas arriba, se deduce la necesidad de realizar un estudio más meticuloso de tormentas individuales de rayos cósmicos que posibilitaría hacer una evaluación más precisa de los varios parámetros que definen una anisotropía típica en el tiempo de una tormenta. A pesar de ello los datos existentes en la actualidad indican que durante las primeras fases de una tormenta de rayos cósmicos, la variación diurna solar tiene una mayor amplitud y que la hora de máximo se adelanta a la normal, aunque aún se argumenta sobre la magnitud del incremento en amplitud, el valor del desplazamiento en el tiempo del máximo y la duración del efecto.

Ahora procederemos a ver cuál de los dos modelos sobre las configuraciones del campo magnético interplanetario en días perturbados concuerda mejor con las características observadas sobre la variación diurna solar. En particular, nos interesaría saber cuál de los dos modelos predice el desplazamiento a horas anteriores del tiempo del máximo en esta variación diurna solar durante días perturbados. La razón por la cual damos más importancia a esta característica particular de la anisotropía de tormenta es que una comparación cualitativa de los modelos es fácilmente realizable.

En el modelo de Parker se forma una onda de choque cuando el viento solar de la parte calentada de la corona alcanza al viento solar que va por delante durante los días quietos. El cambio en el frente de la onda de choque es del tipo sin colisión y la densidad puede aumentar notablemente el valor normal de un día quieto. Si se supone un movimiento estrictamente radial del gas, es claro que solamente la componente azimutal del campo magnético interplanetario sería comprimida por la onda expansiva y daría lugar a una configuración en la cual las líneas del campo magnético serían "distorsionadas". El perfil de la densidad y la magnitud de la "torcedura de las líneas" así como la magnitud del campo magnético comprimido y el espesor de la onda expansiva dependerán durante los días quietos de la velocidad del viento que va por delante de la onda de choque y de la presión de la corona que actúa por detrás de la misma. Cuanto más fuertemente sea comprimida la onda por detrás, tanto mayor será la distorsión y tanto mayor la densidad de partículas atrás

seven events indicate that the amplitude increment of disturbed day solar diurnal evaluation lies in the range 0.1 to 0.6% and the shift in its time of maximum ranges from 0.7 to 6.6 hours. The mean increment in amplitude is $0.33 \pm 0.08\%$ and the mean shift in time of maximum amounts to 2.33 ± 0.76 hours. The standard deviation has been estimated, in both cases, from the scatter in the observed values. Further, Yoshida's results also indicate that the amplitude starts increasing and the time of maximum starts shifting to earlier hours almost with the commencement of the cosmic ray storm and this state of affairs continues for several hours. However, since the errors are not given, it is difficult to say how long the storm time anisotropy lasts. A crude estimate for the duration may be put at 20 hours.

From what has been said above it is amply clear that there is need for a carefully conducted new study of individual cosmic ray storms so that it would be possible to make a more precise evaluation of the various parameters which define a typical storm time anisotropy. Even so the estimates currently available do indicate that during early stages of a cosmic ray storm, the solar diurnal variation has a larger amplitude and an earlier time of maximum although there is room for argument regarding the magnitude of amplitude increment, the amount of shift in the time of maximum and the duration of the effect.

We shall now proceed to see which of the two models of disturbed day interplanetary magnetic field configurations is in accord with the observed characteristics of the disturbed day solar diurnal variation. In particular, we would like to know which of the two models predicts the shift to earlier hours for the time of maximum of disturbed day solar diurnal variation. The reason why we single out this particular characteristic of the storm time anisotropy is that qualitative comparison of the two models, in this respect, is easily made.

In Parker's model a blast wave is formed when enhanced solar wind from the heated part of the corona overtakes quiet day solar wind ahead of it. The shock transition at the front is of collisionless type and the density rise at the front may be a few times the quiet day value. If strictly radial gas motion is assumed, it is clear that only azimuthal component of the interplanetary magnetic field would get compressed in the blast wave giving rise to a configuration in which magnetic field lines are "kinked". The density profile and the amount of "kinking" as also the magnitude of the compressed field and the thickness of the blast wave would depend upon the velocity of the quiet day wind ahead of the wave and the coronal pressure behind the wave. The harder the wave is driven from behind the more would be the kinking and the larger would be the density rise at back of the wave and so the strength of

de la onda y así la fuerza o intensidad del campo magnético comprimido también aumentaría considerablemente hacia la parte posterior de la onda. En casos extremos, a la altura de la órbita de la Tierra, la densidad y la magnitud de la onda pueden elevarse hasta un valor correspondiente a días quietos multiplicado por un factor de algunas decenas. Así, la onda expansiva tiene las características básicas de una región de campo magnético bastante intenso y cuando alcanza la Tierra, los rayos cósmicos hasta con energías bastante altas (de varias decenas de 10^{10} eV) son impedidos de llegar a la Tierra, originando una tormenta de rayos cósmicos. También por la distorsión de las líneas del campo magnético, la dirección de anisotropía debida a rayos cósmicos primarios corrotantes se aproxima a la línea Sol-Tierra y causa la llamada anisotropía de tormenta que origina la variación diurna solar de días perturbados.

Las Figs. 5a y 5b ilustran este argumento para dos casos extremos de expansiones coronales. La onda expansiva de la Fig. 5a se presenta cuando la corona continúa ejerciendo presión siguiendo a la expansión inicial. En cambio la onda expansiva mostrada en la Fig. 5b se forma cuando después de la expansión inicial, la corona se enfría de inmediato. Para la configuración de onda expansiva mostrada en la Fig. 5a, la región de mayor densidad así como de campo magnético más intenso, se encuentra en la parte posterior de la onda. Por el contrario, para la configuración de onda expansiva que se muestra en la Fig. 5b, la región de máxima densidad y de más fuerte campo magnético se encuentra en la parte anterior de la onda. De esta manera, para la onda dirigida (Fig. 5a), la dirección de anisotropía de tormenta avanzaría desplazándose hacia el oeste y aproximándose a la línea Sol-Tierra a medida que la parte posterior de la onda alcanza la Tierra. Por el contrario, cuando la onda mostrada en la Fig. 5b llega a la Tierra ocurriría un cambio súbito en la dirección hacia el oeste y posteriormente comenzaría a desplazarse hacia el este; vale decir, hacia horas posteriores, a medida que la onda se propaga, expandiéndose. Debido al incremento en intensidad del campo magnético en la onda expansiva, el límite E_{\max} alcanza valores más altos y hace corrotar los rayos cósmicos primarios de más altas energías y este es uno de los factores que contribuyen a la mayor amplitud de la anisotropía de tormenta. Puede verse que este modelo predice que la anisotropía del inicio de tormenta aparece simultáneamente con la tormenta de rayos cósmicos.

Después de que la onda expansiva se aleja de la Tierra, la intensidad de la radiación cósmica comienza a recuperarse. La variación diurna de la intensidad de rayos cósmicos observados durante la fase de recuperación tendrá una amplitud y un tiempo de máxima apropiados a la velocidad del viento que va detrás de la onda; cuanto más alta la velocidad del viento, tanto mayor será la amplitud y tanto más tarde el tiempo del máximo diurno.

Sobre la base del modelo propuesto por Gold y otros, los escapes de material de la cromósfera, que resultan de las

the compressed magnetic field would also be considerably enhanced towards the rear of the wave. In extreme cases the density and the magnitude of the magnetic field at the rear of the wave may rise to a few ten folds of the quiet day values at the Earth's orbit. The blast wave, therefore, has the basic characteristics of a region of rather intense magnetic field and so when it overtakes the Earth, cosmic ray primaries up to fairly high energies (several tens of 10^{10} eV) are screened off from the Earth and a cosmic ray storm ensues. Also because of kinking in the magnetic field lines, the direction of anisotropy due to corrotating cosmic ray primaries shifts closer to the Earth-Sun line and the so called storm time anisotropy results which give rise to disturbed day solar daily variation.

Figs. 5a and 5b illustrate this argument for two extreme cases of coronal expansions. The blast wave of Fig. 5a results when the corona continues to exert pressure following the initial expansion. On the other hand, the blast wave shown in Fig. 5b is formed when, after initial expansion, the corona cools off just as soon. For the blast wave configuration shown in Fig. 5a, the region of the highest density as well as that of strongest magnetic field is at the rear of the wave. On the other hand, for the blast wave configuration shown in Fig. 5b the region of the highest density and that of the strongest magnetic field is at the head of the wave. Thus, for the driven wave (Fig. 5a) the direction of storm time anisotropy would go on shifting westwards, closer to the Earth-Sun line, as the rear of the wave approaches the Earth. On the other hand, when the wave shown in Fig. 5b hits the Earth there could occur a sudden change of direction westwards and thereafter it would start shifting eastwards, i.e., towards later hours, as the wave propagates outwards. Also, because of increased strength of the magnetic field in the blast wave, the limit E_{\max} shifts to a higher value there by causing higher energy cosmic ray primaries to co-rotate too and this is one of the factors which contribute to higher amplitude of storm time anisotropy. It might perhaps be already apparent that this model predicts that storm time anisotropy should appear simultaneously with a cosmic ray storm.

After the blast wave has left the Earth cosmic ray intensity would start recovering. The diurnal variation of cosmic ray intensity observed during the recovery phase would have amplitude and time of maximum appropriate to the wind velocity behind the wave; the higher the wind velocity the larger would be the amplitude and the later would be the time of diurnal maximum.

On the basis of the model advocated by Gold and others, chromospheric outburst of material resulting from a solar

erupciones solares, distienden hacia afuera las líneas del campo magnético en la región del escape, dando lugar a una larga "lengua". Cuando esta lengua magnética alcanza la Tierra, los rayos cósmicos primarios de energías bastante altas no pueden penetrar al través de ella y por lo tanto, no pueden llegar a la Tierra produciéndose entonces una tormenta de rayos cósmicos. La energía afectada dependerá de la intensidad del campo magnético en la lengua, de la posición relativa de la Tierra en esta lengua, así como de su anchura en un momento dado. El modelo de "botella" siendo bastante cuantitativo, hace difícil precisar los efectos de las configuraciones del campo sobre la dirección y tiempo de la tormenta sin llegar a simplificaciones aceptables.

Es, sin embargo, conocido el hecho de que un plasma emitido en un medio interplanetario por erupciones cromosféricas tiene una tremenda energía cinética en dirección radial. Para velocidades de 10^3 Km/seg y una densidad de

flare draws out the magnetic field lines, in the region of the outburst, into an elongated "tongue". When this magnetic tongue hits the Earth cosmic ray primaries of fairly high energies are prevented from reaching the Earth and a cosmic ray storm follows. The range of energies so affected depends upon the strength of the magnetic field in the tongue, the relative position of the Earth within the tongue as also the width of the tongue at any given time. The "bottle" model being rather qualitative, it becomes difficult to make precise inferences regarding the effect that this field configuration will have on the direction of storm time anisotropy without making certain plausible simplifications.

It is common knowledge that the plasma ejected into the interplanetary medium by the chromospheric outburst has a tremendous kinetic energy in the radial direction. For velocities of 10^3 Km/sec and plasma particle density of

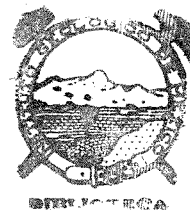
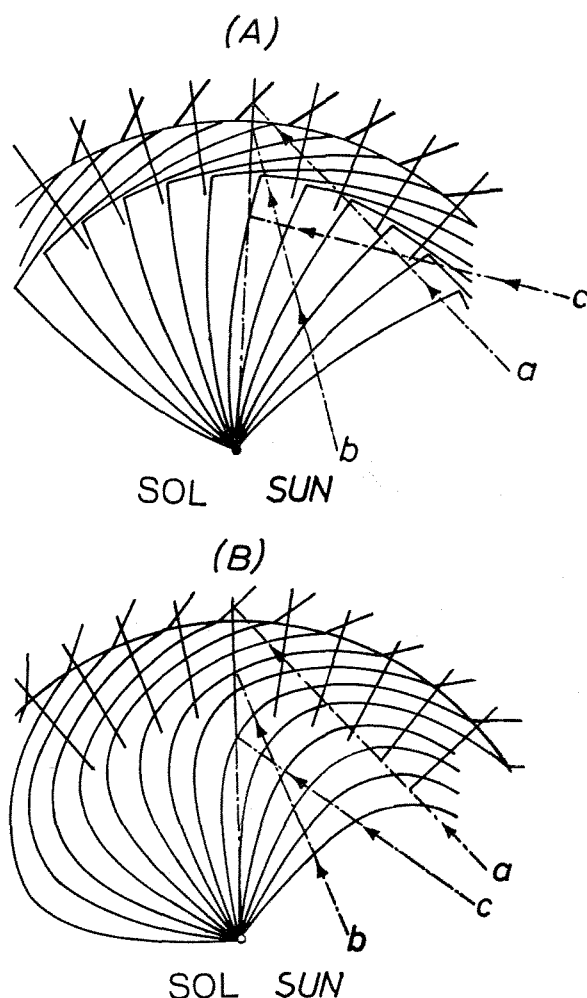


Fig. 5a y b. Concepción artística, en un corte transversal de la configuración del campo magnético en el interior de los dos tipos de ondas de choque en el plano del ecuador solar (según Parker, 1961b); las flechas indican la dirección de la anisotropía, "a" en días quietos; "b" cuando la onda alcanza a la Tierra y "c" después de que la onda se ha alejado de la Tierra.

Figs. 5a, b. An artist's conception of the magnetic field configuration inside the cross-section of two types of blast waves in the plane of the solar equator (after Parker, 1961b); arrows indicate the direction of anisotropy, "a" on quiet days, "b" when the blast wave overtakes the Earth and "c" after the blast wave has receded from the Earth.

partículas en el plasma de 10^2 por cm^3 no es muy difícil mostrar que aun campos magnéticos considerablemente grandes sufrirán distensiones en este medio interplanetario con valores en la órbita de la Tierra de decenas de gammas.

Estas líneas de campo corrotarán con el Sol. Debido a la velocidad considerable del plasma, se puede estimar que las líneas del campo magnético en la órbita de la Tierra corrotarán con la misma velocidad, prácticamente, cerca del Sol. Además, irregularidades en pequeña escala en la estructura del campo magnético, que se precisan para explicar según McCracken (1962) las características de los incrementos en la radiación cósmica con las erupciones de este tipo, no tendrán prácticamente efecto para energías primarias —del orden de algunas decenas de 10^{10} eV— en que producen variaciones diurnas solares en la intensidad de la radiación cósmica; así, podemos considerar que las líneas de fuerza dentro de la “botella” son bastante suaves en su efecto sobre la radiación cósmica primaria.

10^2 cm^{-3} , it is not difficult to show that rather large fields are stretched out into interplanetary medium giving a value at Earth's orbit of several tens of gammas.

These field lines co-rotate with the Sun. Due to rather large plasma velocity one can consider the field lines at the Earth's orbit to co-rotate with nearly the same speed as near the Sun. Further, small scale irregularities in the field structure required by McCracken (1962) to explain the characteristic features of cosmic ray flare type increases are hardly of any consequence for the primaries —having energies of several tens of 10^{10} eV— which produce solar diurnal variation in cosmic ray intensity. We can, therefore, consider the field lines inside the “bottle” to be rather smooth so far as their effect on these primaries is concerned.

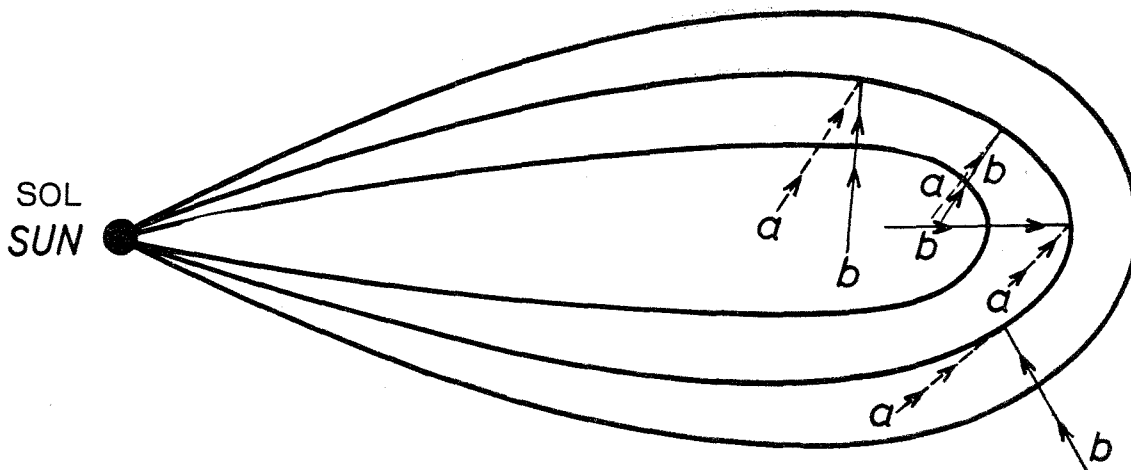


Fig. 6. Concepción artística de la configuración del tipo de “botella”: “a” indica la dirección de la anisotropía en un día quieto, correspondiente a un viento solar de 400 Km/se; “b” señala la dirección de la anisotropía a esperarse cuando la “botella” rodea la Tierra. Las flechas señalan cuatro posiciones diferentes de la Tierra dentro de la “botella”.

La Fig. 6 indica la dirección y el tiempo de la anisotropía —(b)— que se puede observar bajo las condiciones arriba expuestas; para comparación se ha señalado en la curva —(a)— la dirección y sentido de la anisotropía en un día quieto producida por el viento solar de 400 Km/seg para las diferentes posiciones de la Tierra dentro de la “botella”.

Se hace bastante evidente que con excepción de colisiones producidas en la parte delantera de esta “botella”, con la Tierra, la dirección y el tiempo de la anisotropía en la tormenta tenderá hacia horas posteriores en comparación con la observada durante días quietos. Por otro lado, como ya hemos visto, el modelo de la onda de choque propuesto por Parker pronostica que la dirección y el tiempo de la anisotropía

Fig. 6. An artist's conception of “bottle” type configuration; “a” indicates the direction of quiet days anisotropy corresponding to solar wind velocity of 400 Km/sec, “b” indicates the direction of anisotropy to be expected when the “bottle” envelopes the Earth. Arrows indicate four different positions of the Earth inside the “bottle”.

Fig. 6 indicates the direction of storm time anisotropy —(b)— that one would observe under these conditions; for comparison the direction of quiet day anisotropy —(a)— produced by 400 Km/sec solar wind is also indicated for different positions of the Earth inside the “bottle”.

It is quite evident that except for the very special case of head-on collision of the “bottle” with the Earth, the direction of storm time anisotropy would be towards later hours as compared to that observed on quiet days. On the other hand, as we have already seen, Parker's blast wave model predicts that the direction of storm time anisotropy should always lie closer to the Earth-Sun line. It must, how-

tropía durante la tormenta deberá hallarse más cerca de la línea Tierra-Sol. Se podrá, por lo tanto, indicar que una vez que la onda de choque ha dejado la Tierra, ambos modelos pronostican el mismo tipo de anisotropía y que durante esta fase no será posible diferenciar entre las dos configuraciones. Los resultados experimentales sobre la naturaleza de la anisotropía del tiempo de tormenta que ahora se tienen, favorecen pues al modelo de la onda expansiva de Parker del campo interplanetario que se obtiene en días perturbados geomagnéticamente.

Por la anterior discusión se ve claramente que sería muy deseable un riguroso estudio de la anisotropía del tiempo de tormenta desde el punto de vista de obtener una mayor información empírica relacionada con la configuración de las irregularidades en el campo magnético interplanetario. En particular, si nuestro concepto acerca de la anisotropía del tiempo de tormenta esbozado arriba es correcta, el estudio de esta anisotropía proporcionaría una poderosa herramienta empírica para explorar las características de ondas expansivas individuales. La duración de la anisotropía del tiempo de tormenta puede darnos información sobre el espesor de la onda y la velocidad con la cual su dirección se desplaza hacia el oeste determinaría el grado de distorsión de las líneas de fuerza del campo en la onda. Por ejemplo, si se toma el plazo de 20 horas como duración aproximada de la onda expansiva de 10^3 Km/seg se obtiene para el espesor de la onda un valor de $\sim 0,5$ unidades astronómicas. Este valor no parece estar alejado de lo razonable. La etapa inicial de varias tormentas de rayos cósmicos en la cual la intensidad isotrópica de los mismos decrece continuamente, tiene también la misma duración en tiempo e igual acontece con la distorsión del campo interplanetario que sigue a una erupción solar (Coleman *et al.*, 1960, así como una comunicación privada del Prof. Rossi), lo cual es interpretado como el campo asociado con una onda de choque (Parker, 1962c).

Sin embargo, para obtener una información más completa, se tiene que estudiar la estructura fina del perfil de las tormentas de rayos cósmicos individuales. Además, puesto que el viento solar parece ser la causa matriz de la existencia de las variaciones temporales observadas en la intensidad de los rayos cósmicos, así como de la intensidad del campo magnético (Parker, 1958b y 1960b; Francis, Green y Dessler, 1959; Dessler, Francis y Parker, 1960; Dessler, Hanson, Parker, 1961 y Dvorijashin, 1961) y quizá del sistema de corrientes e irregularidades ionosféricas, cuyas causas se encuentran fuera del alcance de las fuerzas de marea (Dessler, 1958), siendo claro que un estudio correlacionado que involucre la recopilación de información de estas disciplinas, aparentemente no relacionadas entre sí, puede dar resultados muy alentadores.

MODELO DE VIENTO SOLAR PARA LA VARIACION SECULAR DE INTENSIDAD DE LOS RAYOS COSMICOS

Es bien sabido que la intensidad isotrópica de los rayos cósmicos sufre una variación con el ciclo solar; siendo má-

ever, be said that once the blast wave has left the Earth both models predict the same type of anisotropy and at that stage there appears to be no possibility of discriminating between the two configurations. The experimental results on the nature of storm time anisotropy presently available, therefore, favor Parker's blast wave model of interplanetary field obtainable on geomagnetically disturbed days.

From the above discussion it is quite clear that a rigorous study of storm time anisotropy is highly desirable from the point of view of obtaining empirical information regarding the configuration of irregularities in the interplanetary magnetic field. In particular if our concept of the origin of storm-time anisotropy as outlined above is correct, then the study of storm time anisotropy should provide a powerful empirical tool for probing the characteristics of individual blast waves. The duration of storm time anisotropy can give us information pertaining to the thickness of the wave and the rate at which the storm time anisotropy shifts westwards would determine the amount of "kinking" in the field lines in the wave. For example, if one takes 20 hours as the rough duration of storm time anisotropy and a blast wave velocity of 10^3 Km/sec one obtains a blast wave thickness value of ~ 0.5 astronomic units. This value does not seem to be at all unreasonable. The initial stage of several cosmic ray storms, when the isotropic intensity of cosmic rays continuously decreases, also lasts for about the same length of time and this is also true for interplanetary magnetic field enhancement following a solar flare (Coleman *et al.*, 1960; also private communication from Professor Rossi) which has been interpreted as the field associated with the blast wave (Parker, 1962c).

However, to be able to obtain more complete information, it is necessary to study the fine structure of the profile of individual cosmic ray storms. Further, since solar wind appears to be the parent cause of bringing about the observed temporal variations in the cosmic ray intensity, in the intensity of the geomagnetic field (Parker, 1958b and 1960b; Francis, Green and Dessler, 1959; Dessler, Francis and Parker, 1960; Dessler, Hanson and Parker, 1961 and Dvorijashin, 1961) and also perhaps in ionospheric currents system and irregularities the cause of which lies outside the scope of the tidal forces (Dessler, 1958), it is clear that correlated studies involving pooling of information from these apparently unrelated disciplines can prove highly rewarding.

A SOLAR WIND MODEL FOR THE SECULAR VARIATION OF COSMIC RAY INTENSITY

It is well known that the isotropic intensity of cosmic rays undergoes variation with the solar cycle; the intensity

xima la intensidad en el mínimo del ciclo solar y viceversa (Forbush, 1958). Como quiera que este cambio de intensidad, (a) se extiende sobre un largo período de tiempo y (b) es independiente de la posición de la Tierra en su traslación alrededor del Sol, lleva implícita la existencia de un mecanismo de modulación heliocéntrico. Se puede demostrar que el viento solar que va llevando campos magnéticos "congelados" es capaz de dar lugar a un mecanismo de esta clase que cualitativamente explica los rasgos generales de la variación secular en la intensidad de la radiación cósmica.

A cierta distancia del Sol la densidad de energía del viento solar debería ser comparable con la densidad de energía del campo magnético galáctico (Parker, 1962c y Axford, Dessler y Gottlich, 1962). Cerca de dicha región, el viento solar sufriría una transición de tipo de choque convirtiéndose en un flujo subsónico. El plasma que sufrió el choque continuaría difundiendo hasta cierta distancia antes de ser detenido. Luego se difundiría gradualmente en el medio interestelar. Quizá la principal causa para la detención del plasma que sufrió ese choque sería el intercambio de cargas con el hidrógeno neutral galáctico (Axford, Dessler y Gottlieb, 1962) y el proceso por el cual el plasma se difunde en el medio interestelar quizá involucre el intercambio de inestabilidades que se desarrollan en el límite entre el plasma sometido al choque y el campo galáctico, tal como fuera sugerido por Davis (1962), dando como resultado que parte del plasma escape hacia el espacio interestelar. La distancia exacta sobre la cual el plasma sometido al choque se extiende y la velocidad con que se disipa en el medio interestelar es un asunto de extrema especulación. No obstante, se puede ver cualitativamente que un cuadro como el presentado aquí, lleva a la formación de una cavidad rodeada por una gruesa envoltura del plasma que sufrió el choque. El

being maximum at the minimum of the solar cycle and vice versa (Forbush, 1958). Since this change of intensity (a) is spread out over a long period of time and (b) is independent of the position of the Earth as the Earth goes around the Sun, the existence of a heliocentric modulation mechanism is implied. The outward streaming solar wind carrying "frozen-in" magnetic field can be shown to be capable of giving rise to a mechanism of this kind which qualitatively explains the gross features of the secular variation of the cosmic ray intensity.

At some distance from the Sun the energy density of solar wind should become comparable to the energy density of the galactic magnetic field (Parker, 1962c and Axford, Dessler and Gottlieb 1962). Near this region the solar wind would undergo shock transition to subsonic flow. The shocked plasma may continue to some distance until it is completely stopped. It would then gradually diffuse into the interstellar medium. Charge exchange with galactic neutral hydrogen is perhaps mainly responsible for stopping the shocked plasma (Axford, Dessler and Gottlieb, 1962) and the main process through which the plasma diffuses into interstellar medium perhaps involves the interchange instabilities which develop at the boundary of the shocked plasma and the galactic field as suggested by Davis (1962) resulting in chunks of plasma escaping into space beyond. The exact distance over which the shocked plasma extends and the rate at which it dissipates into the interstellar medium is a matter of extreme speculation. Nevertheless, qualitatively one can see that such a picture leads to the formation of a cavity surrounded by a thick shell of shocked plasma. The magnetic field in the shell is likely to be highly irregular both in regards to configuration as well

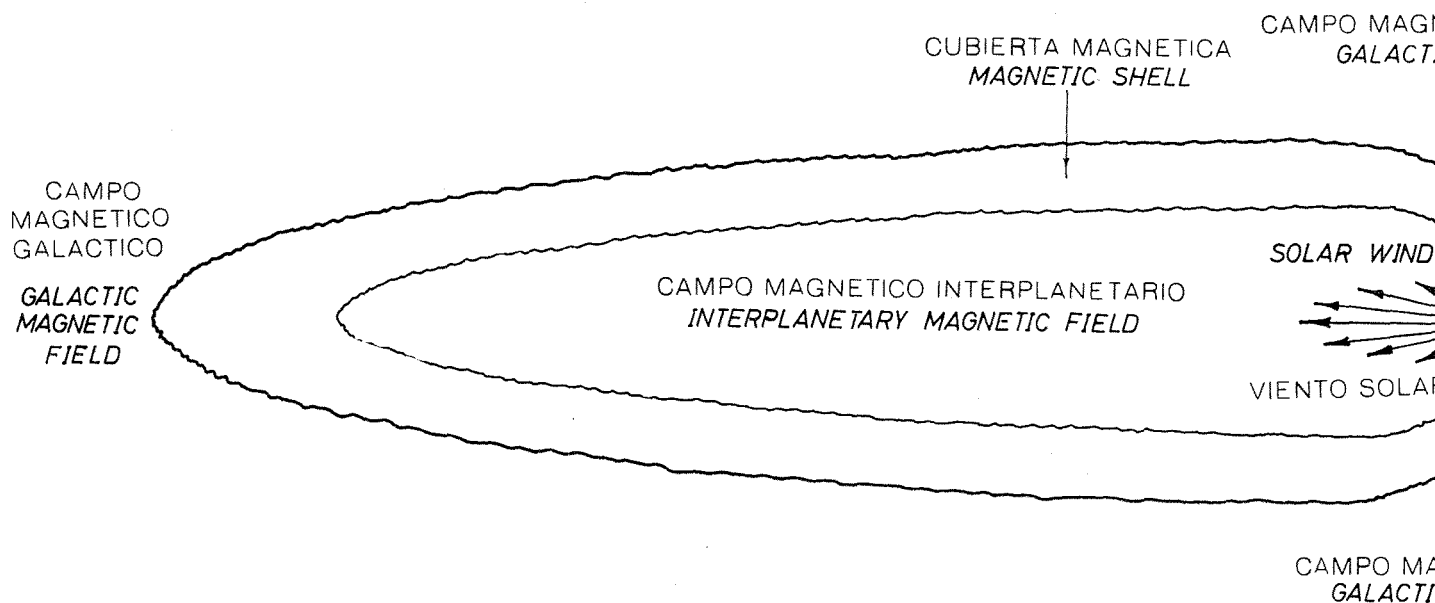


Fig. 7. Concepción artística de la cavidad creada por el viento solar.

campo magnético en esta envoltura es muy probable que se encuentre en estado altamente irregular, tanto en lo que se refiere a configuración como a distribución de intensidad. Esta cáscara formaría una pantalla entre los espacios interplanetario e interestelar, semipermeable para los rayos cósmicos galácticos. Se podría establecer que la forma de la cavidad y de la cáscara que la rodea es más probable que sea elipsoidal que esférica. Así se deduce de las observaciones de Stumpf sobre las colas de los cometas y de Sleas (Simposio Núm. 16 de la I.U.A., Cloudcroft, 1961), sobre la difusión en el medio interplanetario de ondas de radio de algunas radio-estrellas que indican que el viento solar es menos fuerte a altas latitudes solares. De estas observaciones se deduce que el espesor de la envoltura a lo largo del plano polar del Sol debería ser menor que en el plano ecuatorial. La razón es que no hay un motivo aparente para esperar que el mecanismo involucrado en detener el plasma que sufrió el choque y finalmente dispersarlo sea menos efectivo a lo largo del plano polar solar, que en el plano ecuatorial solar, pues la provisión del plasma es menor a lo extenso del plano polar solar. Bajo condiciones de equilibrio, el espesor de la envoltura resultante será menor en esa región.

Estos argumentos a su vez implican que en cualquier momento dado la velocidad de difusión de rayos cósmicos galácticos en el medio interplanetario será mayor en el plano solar del Sol en comparación a su velocidad de difusión en el plano ecuatorial solar. La Fig. 7 da una representación gráfica de esta concepción.

En el máximo del ciclo solar, cuando el campo interplanetario contiene mayor número de irregularidades (ondas expansivas) que se mueven hacia afuera, la remoción convectiva de rayos cósmicos será más intensa cerca de la Tierra; pruebas directas de ello han sido dadas por las medi-

as to intensity distribution. This shell thus forms a semi-permeable screen between interplanetary and interstellar spaces for galactic cosmic rays. It might be stated that the shape of the cavity and the shell surrounding it, is more likely to be ellipsoidal than spheroidal. This follows from the observations of Stumpf on comet tails and of Sleas (reported at I. A. U. Symposium No. 16, Cloudcroft, 1961) on scattering of radio waves of some of the radio stars by the interplanetary medium, which indicates that solar wind is less strong at higher solar latitudes. From these observations it also follows that the thickness of the shell along the polar plane of the Sun should be less than its thickness along the solar equatorial plane. The reason being that there is no apparent motive to expect that the mechanisms involved in stopping the shocked plasma and in ultimately dissipating it are any less effective along solar polar plane than along the solar equatorial plane and since the supply of plasma is less along the solar polar plane. So under equilibrium conditions, the thickness of the resulting shell should also be less there.

These arguments in turn imply that at any given time the diffusion rate of galactic cosmic rays into interplanetary medium will be larger along the polar plane of the Sun as compared to their diffusion rate along the solar equatorial plane. Fig. 7 gives a pictorial representation of this conception.

At the maximum of solar cycle when the interplanetary field contains larger number of outward moving irregularities (blast waves), the convective removal of cosmic rays would be much stronger near the Earth; direct evidence

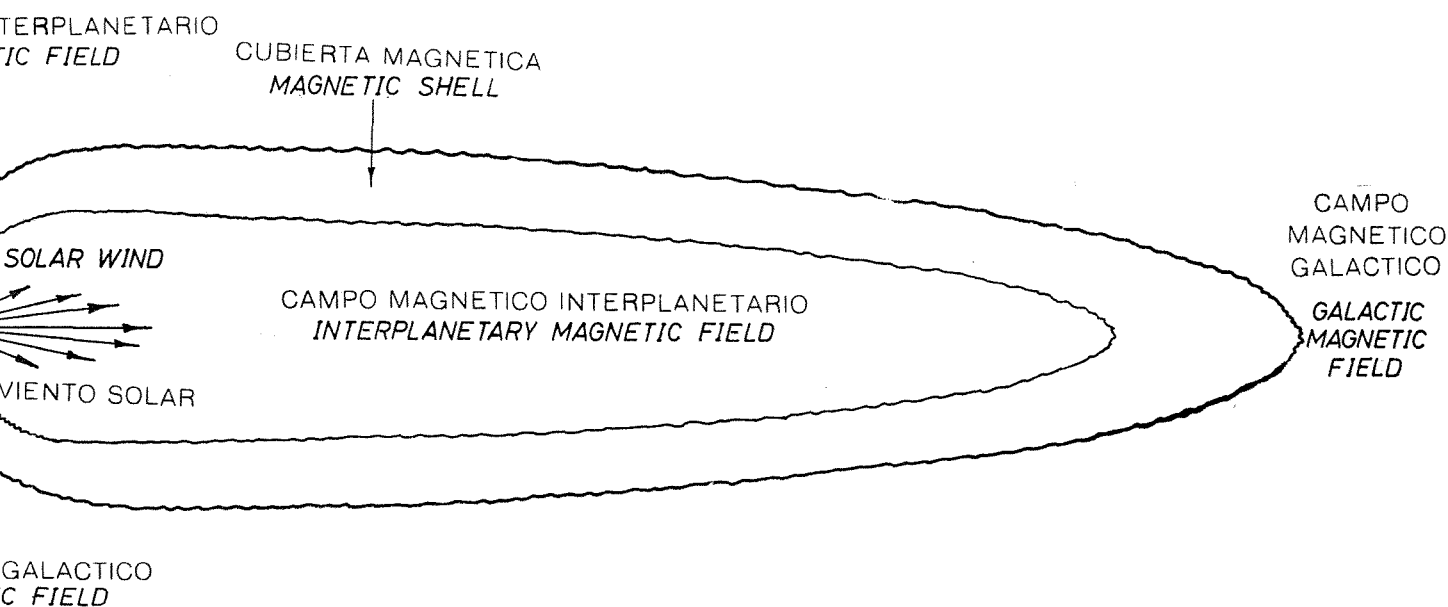


Fig. 7. An artist's conception of the cavity created by the solar wind.

das en el espacio realizadas por Fan, Meyer y Simpson (1960a). Los rayos cósmicos convectivamente removidos serían depositados en el límite de la cavidad de donde serán bombeados hacia el medio estelar por las volutas de plasma que escapan de la envoltura debido al intercambio de inestabilidades desarrolladas en la superficie de separación de ambos medios. Además, el espesor de la envoltura misma será mayor, impidiendo así la difusión hacia adentro de los rayos cósmicos galácticos de más bajas energías.

Estos factores reducirían el nivel de intensidad de los rayos cósmicos en la cavidad en general y en las proximidades de la Tierra en particular, por debajo del nivel galáctico. Este modelo también requiere que exista un cierto tiempo de retardo entre el inicio de la actividad solar y el comienzo de la disminución de la intensidad de rayos cósmicos. La demora dependería del tiempo que tome la envoltura en adquirir cierto espesor. Luego, es de esperar que los rayos cósmicos de más baja energía serían los primeros en sufrir el decrecimiento y esto último ha sido observado experimentalmente (Forbush, 1958).

En cambio, cerca del mínimo de actividad solar, (a) el tamaño de la cavidad se contraerá debido a la presión del viento solar que en promedio se hallará reducida, (b) el espesor de la capa envolvente tenderá a decrecer debido a la reducida provisión de plasma que facilita la difusión hacia adentro de los rayos cósmicos de baja energía procedentes de todos lados hacia el interior del medio interplanetario y (c) la remoción convectiva de los rayos cósmicos en la proximidad de la Tierra decrecería apreciablemente. Esto conduciría a una intensidad isotrópica incrementada de los rayos cósmicos en la Tierra cercana al mínimo del ciclo solar.

La descripción dada arriba es de carácter más bien cualitativa y podría pasar algún tiempo antes de que sea posible hacer una estimación cuantitativa de la contribución de los varios factores arriba enumerados a los cambios de la intensidad de los rayos cósmicos cerca de la Tierra. Sin embargo, se puede estimar el orden de magnitud del radio de la cavidad en el plano ecuatorial solar, calculando a qué distancia la densidad de energía cinética del viento solar llega a ser comparable con la densidad de energía magnética del campo magnético galáctico. Tomando como valores típicos para la densidad del plasma 10 protones por cm^{-3} , un campo magnético galáctico de 10^{-5} gauss y una velocidad del viento solar entre 150 y 600 Km/seg., como se dedujo arriba, se obtiene para el radio de la cavidad (en el plano ecuatorial solar) un valor de varias decenas de unidades astronómicas. Ello incluso será cierto si el campo magnético interplanetario se terminase a dos unidades astronómicas como ha sido sugerido por Brand y Michie (1962), puesto que se podría esperar un gradiente negativo bastante grande en la intensidad de radiación primaria de bajas energías (100 a 150 Mev) en dirección al Sol en el tiempo del máximo solar pues para estas energías la radiación cósmica primaria fluctúa con un factor de cuatro a cinco entre mínima y la máxima actividad solar (Neher, 1962). En efecto, Fan, Meyer y Simpson (1960b) han intentado medir ese gradiente usan-

for this being provided by the space probe measurements of Fan, Meyer and Simpson (1960a). The convectively removed cosmic rays would be deposited at the boundary of the cavity from where they are pumped out into interstellar medium by blobs of plasma escaping from the shell due to interchange instabilities developing at the interface. Further, the thickness of the shell itself should be larger thus preventing diffusion inward of lower energy galactic cosmic rays.

These factors should reduce the level of cosmic ray intensity in the cavity in general and near the Earth in particular below the galactic level. This model also requires that there should exist a time lag between the onset of fresh solar activity and the start of universal decrease in cosmic ray intensity. The lag would depend on the time taken by the shell to build-up to a certain thickness. Further one would expect that lower energy cosmic rays should be the first to undergo the decrease and this is indeed observed in practice (Forbush, 1958).

On the other hand, near solar minimum (a) the size of the cavity would shrink due to reduced average pressure of the solar wind (b), the thickness of the surrounding shell would decrease due to reduced supply of the plasma thus facilitating diffusion inward of lower energy cosmic rays from all sides into the interplanetary medium, and (c) the convective removal of cosmic rays near the Earth would decrease appreciably. This would lead to increased isotropic intensity of cosmic rays at the Earth near the minimum of the solar cycle.

The account given above is rather qualitative and it might be some time before it becomes possible to make a quantitative estimate of the contributions from the various factors enumerated above to the change of cosmic ray intensity near the Earth. However, one can make an order of magnitude calculation to estimate the radius of the cavity in the solar equatorial plane by finding out at what distance the kinetic energy density of the wind becomes comparable to the magnetic energy density of the galactic magnetic field. Taking typical values of 10 protons cm^{-3} for solar wind plasma density, a galactic magnetic field of 10^{-5} gauss and solar wind velocity in the range 150 to 600 Km/sec, as derived above, one gets for the radius of the cavity (in the solar equatorial plane) a value of several tens of astronomical units. This is just as well because if the interplanetary field were to terminate at two astronomical units as suggested by Brandt and Michie (1962) then one would expect a rather large negative gradient in the intensity of low energy primaries (100-150 MeV) in the direction of the Sun at the time of solar maximum because in this energy range the intensity of primaries changes by a factor of four to five from minimum to maximum solar activity (Neher, 1962). In fact, Fan, Meyer and Simpson (1960b) made an attempt to measure such a gradient using a space probe.

do equipo para exploración espacial. Aunque sus mediciones se extienden tan sólo a 0.1 unidad astronómica entre la Tierra y el Sol, el hecho de que el gradiente medido dentro de errores de medición fuese despreciable cuando la intensidad de los primarios de baja energía en la parte superior de la atmósfera de la Tierra es la mitad que la observada en 1954 (Neher, 1962), hace dudar la sugestión de Brandt y Michie.

Although their measurements extended to only 0.1 astronomic units from the Earth towards the Sun, the fact that the gradient measured by them within errors of measurements, was negligible at a time when low energy primary intensity at the top of the Earth's atmosphere was half that observed in 1954 (Neher, 1962) compels one to put strong reservations on Brandt and Michie's suggestion.

AGRADECIMIENTOS

Deseamos expresar nuestro agradecimiento a A. J. Dessler, B. Rossi y E. N. Parker por sus valiosas sugerencias y comentarios, y a Abelardo Aparicio y José Rivas por la colaboración en los cálculos y diagramas.

ACKNOWLEDGEMENTS

Grateful acknowledgements is extended to A. J. Dessler, B. Rossi and E. N. Parker for helpful suggestions, and to Abelardo Aparicio and Jose Rivas for performing computations and drawing diagrams.

BIBLIOGRAFIA

- AHLUWALIA, H. S. 1962. On Short-lived Anisotropic Cosmic Ray Increase of July 18, 1959. Presented at the Fifth Interamerican Seminar on Cosmic Rays, La Paz, Bolivia, II, XXVI-I (to be published elsewhere).
- AHLUWALIA, H. S. & A. J. DESSLER. 1962. Diurnal Variation of Comic Radiation Intensity produced by a Solar Wind, *Planet. & Space Sci.*, 9:195.
- AXFORD, W. I., A. J. DESSLER & B. GOTTLIEB. 1962. Termination of Solar Wind and Solar Magnetic Field (Submitted for publication to *Astrophys. Jour*).
- BRANDT, J. C. & R. W. MICHIE. 1962. Semiempirical Model of the Interplanetary Medium. *Phys. Rev., Letters*, 8:195.
- BRUNBERG, E. A. 1956. Cosmic Rays in the Terrestrial Magnetic Dipole Field, *Tellus*, 8:215.
- CHAMBERLAIN, J. W. 1960. Interplanetary Gas II-Expansion of a Model Solar Corona, *Astrophys. Jour*, 131:47.
- 1961. Interplanetary Gas III-Hydrodynamic Model of the Corona, *Astrophys. Jour*, 133:675.
- CHAPMAN, S. & J. BARTELS. 1940. *Geomagnetism*. Oxford University Press, 1 vol.
- COCCONI, G., K. GREISEN, P. MORRISON, T. GOLD & S. HAYAKAWA. 1958. Cosmic Ray Flare Effect. *Nuovo. Cim., Suppl.* 8:161.
- COLEMAN, P. J., L. DAVIS & C. P. SONNET. 1960. Steady Component of the Interplanetary Magnetic Field, Pioneer. V. *Phys. Rev., Letters*, 5:43.
- COMPTON, A. H. & I. A. GETTING. 1935. An Apparent Effect of Galactic Rotation on the Intensity of Cosmic Rays, *Phys. Rev.*, 47:817.
- DAVIS, L. 1962. The Effect of Solar Disturbances and the Galactic Magnetic Field on the Interplanetary Gas. *Proc. Intern. Conf. Cosmic Rays and Earth Storms* (Kyoto), II:543.
- DESSLER, A. J. 1958. Large Amplitude Hydromagnetic Waves above the Ionosphere, *Jour. Geophys. Res.*, 63:507.
- DESSLER, A. J. & E. N. PARKER. 1959. Hydromagnetic Theory of Geomagnetic Storms. *Jour. Geophys. Res.*, 64:2239.

BIBLIOGRAPHY

- DESSLER, A. J., W. E. FRANCIS & E. N. PARKER. 1960. Geomagnetic Storm Sudden-Commencement Rise Times. *Jour Geophys. Res.*, 65:2715.
- DESSLER, A. J., W. B. HANSON & E. N. PARKER. 1961. Formation of the Geomagnetic Storm Main-Phase Ring Current. *Jour. Geophys. Res.*, 66:3631.
- DVORIJASHIN, A. S. 1961. Excitation of Short-Periodic Oscillations of the Earth's Magnetic Field during the Sudden Commencement of Magnetic Storms, *Ann. Intern. Geophys. Year*, 55:98.
- FAN, C. Y., P. MEYER & J. A. SIMPSON. 1960. Rapid Reduction of Cosmic Radiation Intensity measured in Interplanetary Space. *Phys. Rev., Letters*, 5:269.
- — — 1960b. Experiments on the Eleven Year Changes of Cosmic Ray Intensity using a Space Probe, *Phys. Rev., Letters*, 5:272.
- FRANCIS, W. E., M. I. GREEN & A. J. DESSLER. 1959. Hydromagnetic Propagation of Sudden Commencements of Magnetic Storms. *Jour. Geophys. Res.*, 64:1643.
- FORBUSH, S. E. 1958. Cosmic Ray Intensity Variations during Two Solar Cycles. *Jour. Geophys. Res.*, 63:651.
- FORBUSH, S. E. & D. VENKATESAN. 1960. Diurnal Variation in Cosmic Ray Intensity, 1937-1959, at Cheltenham (Fredericksburg), Huancayo and Christchurch. *Jour Geophys. Res.*, 65:2213.
- GOLD, T. 1959. Plasma and Magnetic Fields in the Solar System. *Jour. Geophys. Res.*, 64:1665.
- MCCRACKEN, K. G. 1961. The Large Scale Features of the Interplanetary Magnetic Field as deduced from Cosmic Ray Observations. *Space Research II, Proc. Sec. Intern. Space Sci. Symp., Florence* (Edited by H. C. van de Hulst, C. de Jager and A. F. Moorse), Amsterdam, North-Holland Publ. Co., 813 pp.
- 1962. The Cosmic Ray Flare Effect 1, 2, 3. *Jour Geophys. Res.* 67:435.
- MCCRACKEN, K. G. & R. A. R. PALMEIRA. 1960. Comparison of Solar Cosmic Ray Injections including July 17, 1959 and May 4, 1960. *Jour Geophys. Res.*, 65:2673.
- NEHER, H. V. 1962. A Summary of Secular Variations of Cosmic Rays, *Proc. Intern. Conf. Cosmic Rays and Earth Storms* (Kyoto), II:492.
- PARKER, E. N. 1958a. Dynamics of Interplanetary Gas and Magnetic Fields, *Astrophys. Jour.*, 128:664.
- 1958b. Interaction of the Solar Wind with Geomagnetic Field. *Phys. Fluids*, 1:171.
- 1960a. The Hydrodynamic Theory of Solar Corpuscular Radiation and Stellar Winds. *Astrophys. Jour.*, 132:821.
- 1960b. *Plasma Dynamics* (Edited by F. H. Clauser). London, Addison-Wesley Publ. Co., Inc., 1 vol.
- 1961a. Sudden Expansion of the Corona following a Large Solar Flare and the Attendant Magnetic Field and Cosmic Ray Effects. *Astrophys. Jour.*, 133:1014.
- 1961b. Solar Wind. *Jour. Res. National Bur. Stand.*, 65D:537.
- 1962a. *Interplanetary Dynamical Processes*. New York, Interscience Publishers, Inc., 1 vol.
- 1962b. Interplanetary Dynamics and Cosmic Ray Modulation, *Proc. Intern. Conf. Cosmic Rays and Earth Storms* (Kyoto) II:563.
- 1962c. Kinetic Properties of Interplanetary Matter, *Planet. & Space Sci.*, 9:461.
- PIDDINGTON, J. H. 1958. Interplanetary Magnetic Field and its Control of Cosmic Ray Variations. *Phys. Rev.*, 112:589.

- POSSENER, M. & I. J. VAN HEERDAN. 1956. The Daily Variation of Cosmic Ray Intensity measured near the 1954 Sunspot Minimum, *Phil. Mag.*, Series 8, Vol 1, 253.
- STEINMAURER, R. & H. GHERI. 1955. Change in Phase of the Diurnal Variation of the Cosmic Radiation over the Years. *Naturwissen*, 42:294.
- THAMBYAPILLAI, T. & H. ELLIOT. 1953. World-wide Change in the Phase of the Cosmic Ray Solar Daily Variation. *Nature*, 171:918.
- YOSHIDA, S. 1958. Anisotropy of Cosmic Rays during the Cosmic Ray Storms, *Memoria del V Congreso Internacional de Radiación Cósmica, Guanajuato, México, Sept. 5-13, 1955* (Published by Instituto Nacional de Investigación Científica, México), p. 358.

