

FISICA SOLAR, FISICA CORONAL, LAS RELACIONES SOL-TIERRA

Jorge Pérez-Peraza*

Física Coronal — Eclipses Solares — Física de la Atmósfera

*Todos los hombres han nacido bajo la estrella Sol
viviendo de su calor, bañados en su luz;
y son las estaciones las que gobiernan la Tierra,
humilde esclavo de un astro jamás igualado,
que nos da el día y sus mil beneficios,
engendra la vida y nutre a la naturaleza;
como la Tierra que sigue los caminos que le ha impuesto,
Júpiter y Saturno, y Marte, Venus, Mercurio
están sometidos a sus leyes postrados a sus rodillas. . .*

“Tercer Epístola sobre la filosofía de Newton”
Jean D. De l’Isle (1672-1719)

Concerniente a los eclipses solares han sido escritos un cierto número de artículos muy ilustrativos, en idioma castellano, principalmente en relación al eclipse total de 1970 y el eclipse anular de 1984. La mayoría de estas publicaciones se orientan a explicar la dinámica misma del fenómeno de ocultación, coordenadas geográficas, fechas y horarios de la trayectoria de la umbra sobre la superficie de nuestro planeta; a describir todos esos aspectos tan espectaculares asociados al fenómeno (anillo de diamantes, perlas de Bailey, contactos, etc.) así como las consecuencias psicológicas sobre algunos sectores de la población, conocimientos que en general ya se manejan desde la remota antigüedad. Sin embargo, escasamente se han abordado las razones por las que actualmente los científicos, particularmente los físicos solares, otorgan una importancia fundamental al estudio de los eclipses solares totales.

Anteriormente a la era espacial, muchos logros científicos en física solar, geofísica, astrofísica, aeronomía y meteorología fueron alcanzados en asociación a eclipses solares totales. Por ejemplo, el descubrimiento del elemento helio en la atmósfera solar, en el eclipse del 18 de agosto de 1868, en la India.

* Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica; Tonantzintla, Puebla.



Figura 2. La luz solar que se asoma a través de los valles y cimas del borde de la Luna produce esos pequeños puntos brillantes conocidos como Perlas de Bailey (eclipse de noviembre 12, 1966).

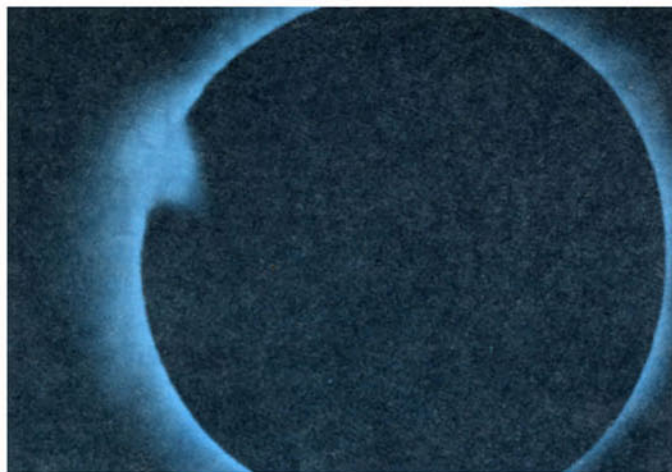


Figura 1. Efecto de Anillo de Diamante al inicio de la totalidad del eclipse de junio 30, 1973.

Ahí mismo, en el eclipse del 12 de diciembre de 1871, el astrofísico francés Janssen descubrió las líneas de Fraunhofer del sodio en la corona; y años después, el 22 de enero de 1898, Evershad obtuvo el primer espectro ultravioleta de la cromosfera y de las prominencias. Otros resultados relevantes en ocasión de eclipses totales han sido: la corroboración, cada vez con medidas más refinadas, de la teoría especial de la relatividad de Einstein; el descartar la presencia de un supuesto planeta entre Mercurio y el Sol; el medir la tasa de desaceleración de la rotación axial de la Tierra y la aceleración secular de la Luna; la separación de los 3 componentes de la corona, capas K, E, y F (Fig. 8 en *ICyT* núm. 92, 1984), etcétera.

En realidad, los logros más importantes alcanzados con los eclipses residen en que la mayor parte de nuestro conocimiento acerca de la estructura de las diferentes capas de la atmósfera solar superior y la fenomenología que tiene ahí lugar, provienen de la información recolectada durante los eclipses; cuyo total no excede a un lapso de media hora de recolección de información: algunos segundos en un evento, otros segundos más en otro evento. . . en el curso de un siglo, aproximadamente.

Surge entonces la pregunta ¿cuál es en el presente el interés científico de los eclipses solares, para el físico solar, cuando estamos viviendo la nueva era espacial, si en realidad la combinación de técnicas radio-astronómicas de alta resolución con experimentos en naves espaciales, como el Skylab, transportando coronógrafos, han sido extremadamente útiles para la observación continua, sinóptica, de los detalles cotidianos de la corona solar? Al efecto, para el amateur, la observación de los anillos de diamantes (Fig. 1), las perlas de Bailey (Fig. 2), las sombras volantes, los diferentes contactos, serán siempre un espectáculo fascinante. Para algunos científicos el interés reside en las reacciones biológicas de plantas y animales,

para otros más en experimentos repetitivos para refinar resultados ya conocidos; pero, para el verdadero trabajo de frontera ¿qué interés tiene si el físico solar puede producir eclipses solares a voluntad con los coronógrafos? La respuesta a estas preguntas es que existe una ventaja neta de los eclipses naturales sobre los artificiales: con el bloqueo artificial de la luz solar, producido con un coronógrafo, el brillo del cielo alrededor del limbo puede disminuir sólo a una millonésima de la brillantez del disco aproximadamente, tal que en el mejor de los casos solamente la brillante corona interna, hasta 1 radio solar, puede ser observada; en tanto que cuando la Luna bloquea la luz solar, la brillantez del cielo cerca del limbo cae a niveles tan bajos como una billonésima del disco solar, o incluso niveles menores, y uno puede entonces observar los tenues detalles de las estructuras coronales hasta una extensión de 4 a 5 radios solares.

Dado que misiones espaciales, como la futura "Sonda Estelar" (Starprobe, Fig. 3), que penetran la atmósfera solar a distancias del orden de (3-10) radios solares para tomar datos *in situ*, no son acontecimientos



Figura 3. La "sonda (solar) estelar" concebida para estudiar las regiones inexploradas de la atmósfera solar donde el viento solar se vuelve supersónico (3 a 60 radios solares). Esta concepción artística pretende ilustrar el perihelio de la nave a aproximadamente 2.1 millones de km de la superficie solar.

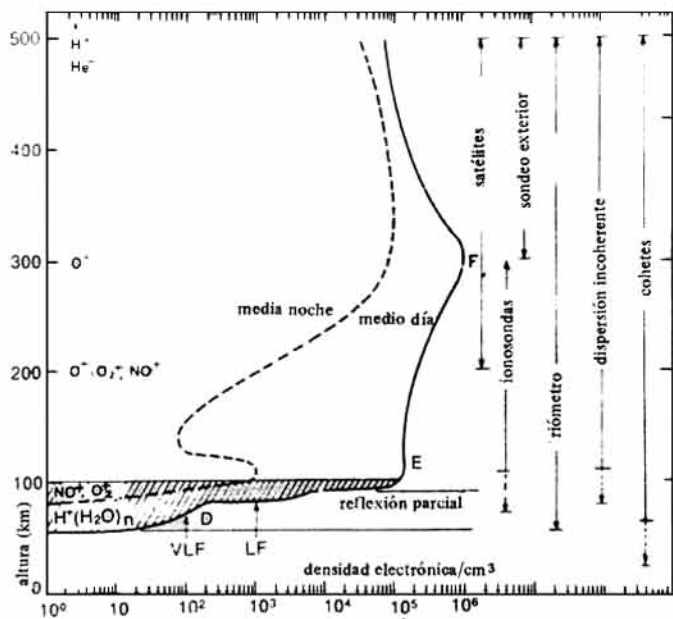


Figura 4. La ionosfera terrestre, consistente de electrones e iones se extiende sobre la mayor parte del medio ambiente espacial cercano a nuestro planeta. La mayor parte de esta extensa región está sujeta a varios grados de cambios durante un eclipse solar. En particular en la región F y en la parte superior de la ionosfera los efectos son más drásticos. Algunas técnicas experimentales para estudiar la ionosfera son indicadas en el lado derecho del diagrama.

que puedan ser financiados con mucha frecuencia y por muchos países, y en tanto que los eclipses solares totales ocurren con una frecuencia promedio de 72 por siglo, entonces, los eclipses siguen siendo la fuente primaria de datos para investigaciones cuantitativas, que involucren estudios fotométricos del continuo, intensidad y perfiles de las *líneas espectrales de emisión* —que son esenciales para estudiar variaciones espaciales de temperatura y densidad electrónica, estructuras de campo magnético, polarización, etcétera.

Es interesante recordar que la *luz visible* está constituida de un continuo de colores, tales como violeta, índigo, azul, verde, amarillo, anaranjado y rojo; este continuo es llamado comúnmente *luz blanca*, y de hecho el color blanco que toma la corona proviene de la luz visible, fotosférica, que ha sido dispersada por los electrones libres en la corona, sin cambiar su color (la dispersión defleca los fotones pero no modifica su longitud de onda). Superpuesto a este continuo hay cientos de líneas oscuras, las llamadas *Líneas de Fraunhofer*. Cada línea representa la rúbrica del estado atómico de un cierto elemento presente en la atmósfera solar y proporciona información acerca de su estado de ionización. La intensidad y ancho de estas líneas revelan la temperatura y densidad de los elementos. La posición y polarización de las líneas dan información acerca de las in-

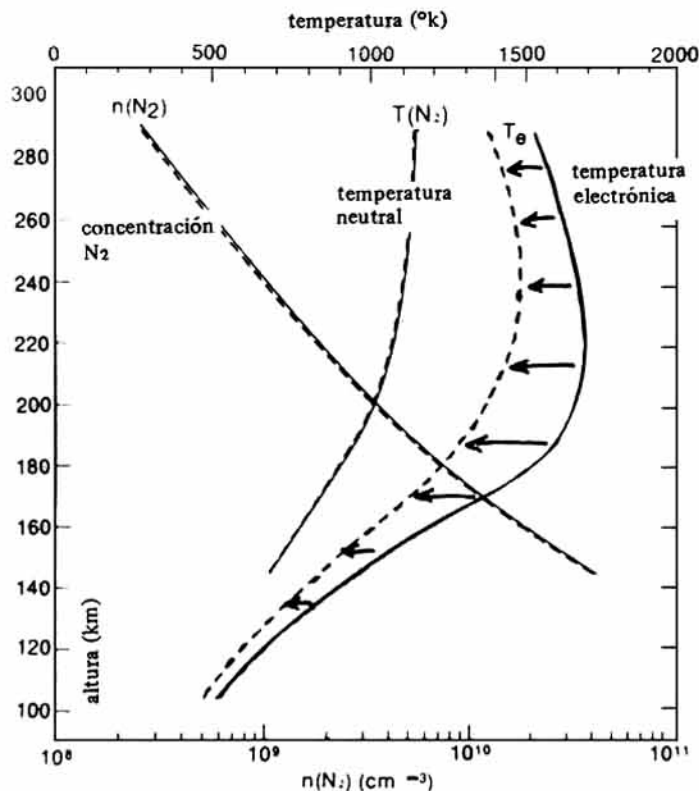


Figura 5. Medidas de densidades y temperaturas mediante cohetes durante el eclipse de 1970. Las curvas sólidas y las punteadas representan mediciones para 45% y 84% de oscuridad. No se observaron cambios en la densidad y en la temperatura del N_2 atómico; pero sí un considerable decrecimiento en la densidad electrónica.

tensidades de campo magnético y movimientos de masa. Sin embargo, puesto que las observaciones coronales durante un eclipse están severamente restringidas en tiempo, no se obtiene información acerca de los cambios dinámicos que tienen lugar; no obstante, debido a las elevadas temperaturas, la corona es como un laboratorio de física de plasmas, donde una gran cantidad de información, referente a las interacciones de partículas de muy alta energía con la materia y los campos magnéticos, puede ser inferida durante los efímeros lapsos de observación de un eclipse. En concreto, para estudios de la cromosfera y corona en un perímetro inferior a 5 radios solares, la mejor opción siguen siendo los eclipses solares naturales.

En lo concerniente a los estudios sobre los efectos de los eclipses solares en la atmósfera terrestre, éstos están básicamente dirigidos hacia el entendimiento de la variación en la absorción de la radiación (UV y rayos-X principalmente) y de la química local, a medida que la luz del sol se oscurece gradualmente.

La atmósfera se extiende varios miles de kilómetros en el espacio. A *grosso modo* la región ionizada de la atmósfera, la *ionosfera*, se extiende por arriba

	FOTONES		PARTICULAS	
	Visible	ultravioleta, rayos X	baja energía (viento solar)	alta energía (rayos cósmicos solares-)
tiempo de recorrido	8 mn	8 mn	~ 2 días	$\Sigma v \approx 3.5$ horas
potencia media ($W m^{-2}$)	1 400	~ 1	~ 10^{-3}	no existe valor medio (sólo fenómenos eruptivos) dinámica del orden de $10^4 - 10^5$
variación a lo largo de un ciclo solar	< 1 %	0.3 — 500	~ 1 — 10	
efectos en la atmósfera	calentamiento de la atmósfera	calentamiento de la alta atmósfera modificación del contenido en ozono	calentamiento por transferencia de las zonas aurales	cambio de composición iónica
efectos en la ionosfera	—	ionización en todas las alturas	ionización en las zonas aurales	ionización a baja altura, principalmente en los casquetes polares
efectos en la magnetosfera	—	—	creación de la magnetosfera auroras boreales	cinchas internas de radiación
consecuencias prácticas	equilibrio térmico de la Tierra	• modificación de la composición de la atmósfera media (¿clima?) • llenado de los satélites • perturbaciones de las comunicaciones por radio a larga distancia	• modificación de la circulación atmosférica (?) • perturbación de las comunicaciones por radio a larga distancia • corrientes inducidas en el suelo y daños producidos en las líneas de alta tensión, de teléfono, en oleoductos, etc. • carga de los satélites	• modificación de la química de la atmósfera media (¿clima?) • interrupción de las comunicaciones por radio en los casquetes polares • daños producidos en la electrónica de los satélites

Cuadro 1. Emisiones electromagnéticas y corpusculares del Sol y sus efectos sobre el medio ambiente (acorde a R. Gendrin).

de 60 km, en tanto que por abajo de esta altitud se encuentra la atmósfera no ionizada, aunque cierta cantidad de iones positivos y negativos ($\leq 10^3/cm^3$) están presentes. Además, durante todo tipo de disturbio de origen solar, un gran número de electrones son generados en estas capas interiores, de tal suerte que, de manera global, la atmósfera entera puede considerarse como una mezcla de electrones, iones y partículas neutras, en proporciones que varían acordes a las diferentes altitudes (Fig. 4). Muchas de estas partículas neutras son el resultado de reacciones químicas complejas: los electrones, iones y muchas de esas moléculas son primariamente producidas por la interacción de la radiación solar con la atmósfera.

El principal interés durante los eclipses solares es el de monitorear la manera en que reaccionan las diferentes capas de la atmósfera superior, conforme se oscurece el Sol, así como el entender la naturaleza de la radiación responsable de la conformación de las diferentes capas ionosféricas. Se hizo evidente, desde el eclipse del 31 de agosto de 1932, que los eclipses tienen siempre un efecto más marcado sobre las capas D y E de la ionosfera. Así también se ha hecho patente un fenómeno inesperado: la "función eclipse" (el cociente del flujo solar instantáneo, a una longitud de onda dada, con respecto a su valor no-eclipsado) no varía como se esperaba, de tomar el valor de la unidad en el primero y cuarto contacto y

cero en el segundo y tercer contacto. En otros términos, aun cuando el disco visible está completamente cubierto, una (10-15)% de la radiación ionizante está presente, indicando que parte de esa radiación ionizante proviene de fuera del disco solar. Así, también, la ionización irregular y sus efectos sobre las capas D y E durante la fase parcial del eclipse indican que la radiación ionizante no proviene de manera uniforme del disco solar, y que existen dominios de frecuencias en que esas radiaciones se concentran.

Durante una campaña de sondeos por cohetes llevada a cabo en tres eclipses —el 20 de mayo de 1966 (Grecia), 12 de noviembre de 1966 (Brasil) y 7 de marzo de 1970 (Islas Galápagos)— se puso en evidencia que la concentración electrónica decrecía drásticamente a todas altitudes, en tanto que el decrecimiento de la concentración de iones positivos no era tan marcada. Las capas superiores de la atmósfera fueron estudiadas mediante señales de muy alta frecuencia por satélites geostacionarios: como las radio-ondas atraviesan toda la ionosfera, los efectos observados son integrales. Se observa que la relajación electrónica toma unos cuantos minutos después del eclipse, a la altura de 80 km, mientras que en la capa F, a una altura de 300 km, se prolonga un par de horas. La temperatura electrónica sufre también un decrecimiento correspondiente, en tanto que la densidad y temperatura molecular de la atmósfera no

sufre cambios perceptibles en el lapso de un eclipse (Fig. 5). Otro efecto interesante a estudiar consiste en que la umbra solar viaja a velocidad supersónica a través de la atmósfera baja, a razón de 1600 km/h en el ecuador, hasta 3 020 km/h en latitudes superiores. Esto debe causar que el gas atómico atmosférico emita ondas de gravedad internas, a manera de formar una onda-arqueada cerca de la umbra. Tales ondas han sido aparentemente detectadas en los eclipses recientes, aunque existe aún una gran controversia al respecto.

Una gran parte de los experimentos atmosféricos durante los eclipses están dirigidos a profundizar en el conocimiento de los procesos químicos que involucran el ozono en la estratosfera, que es la capa de la atmósfera de la Tierra en que el ozono alcanza su mayor concentración. Se pretende estudiar los procesos que determinan posibles cambios en la concentración del ozono y otros constituyentes menores, lo que ocurre con cierta frecuencia, como ocurrió durante la *fulguración solar* de agosto de 1972, ya que ello permite entender algunas intercorrelaciones climáticas y estudiar los incrementos de radiación ul-

travioleta, alrededor de 3 000 Å, para inferir efectos relacionados con los riesgos de cáncer en la piel. Otros experimentos conciernen al entendimiento del circuito eléctrico global atmosférico, que depende sensiblemente de la concentración iónica estratosférica; se estudia como cambia esa concentración iónica en el curso de un eclipse. En fin, estas medidas, aunque de carácter efímero, son de gran utilidad como elementos de información, dentro del marco de los modelos que intentan describir la dinámica de la físico-química de la atmósfera y sus intercorrelaciones con la magnetosfera y el clima terrestre.

Es evidente que lo descrito en relación a la incidencia del estudio de los eclipses solares en la física coronal y en la física de la atmósfera terrestre es únicamente de carácter ilustrativo, y que en realidad hay muchísimos más problemas de la física solar y la física de nuestra atmósfera en que los eclipses proporcionan una ayuda excepcional. La idea esencial de esto es exponer un muestreo característico, aunque reducido, del interés de los científicos en organizar expediciones, a veces muy costosas, con fines obviamente muy diferentes a la observación del aspecto espectacular del fenómeno, tan conocido y estimado por los amateurs de la astronomía.

Física de relaciones Sol-Tierra

*Me pides mucho amar sin ser amado
Me pides mucho tal vez
Decía sonriendo a la bella ventana
El dulce sol de mayo
Quieres que día a día
Los largos y ardientes rayos de mi amor
Te iluminen como una caricia*

Y tú, tú ¿qué me das?

*Escucha Sol —mi amo— dice la ventana
Yo no soy bella más que para ti
Yo existo por tu luz
Aparte la oscuridad de mi recámara
No poseo nada de nada.
Penétrame y enseguida
Me torno bella y clara*

*Así hablaban el Sol y la sombría ventana
Súbitamente la noche se hizo
Desapareció él
Y ella muere a su vez en un oscuro sueño*

Poemas a Lou

Guillaume Apollinaire (1880-1918)

Primero, debe señalarse que estas relaciones son de carácter netamente unilaterales: el Sol ejerce una influencia sobre la Tierra y el sistema solar, sin que hasta ahora se haya puesto en evidencia la acción inversa. La acción del Sol sobre nuestro medio ambiente suele estudiarse en tres categorías: 1) Los

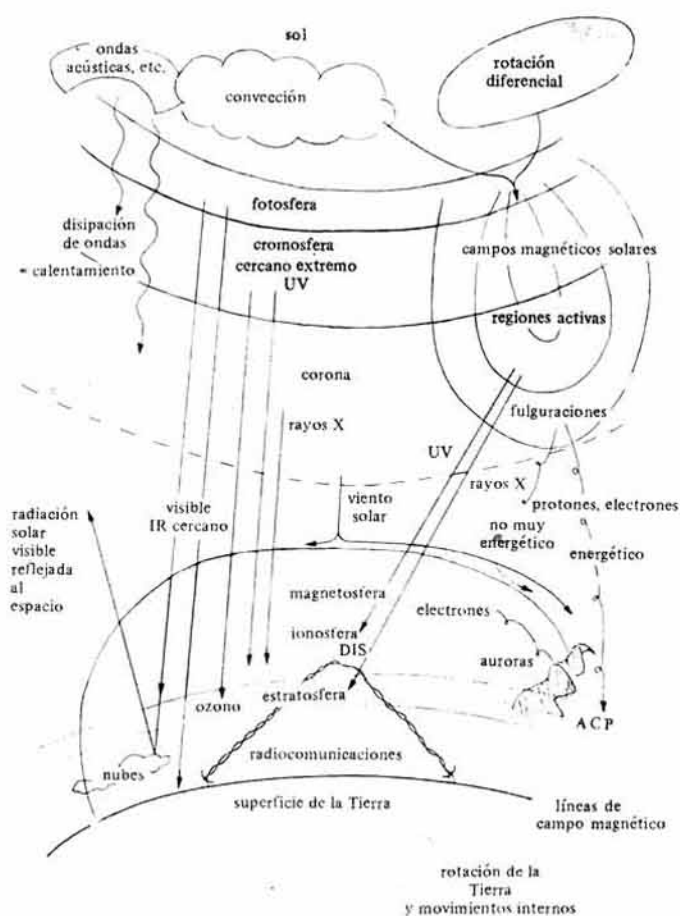
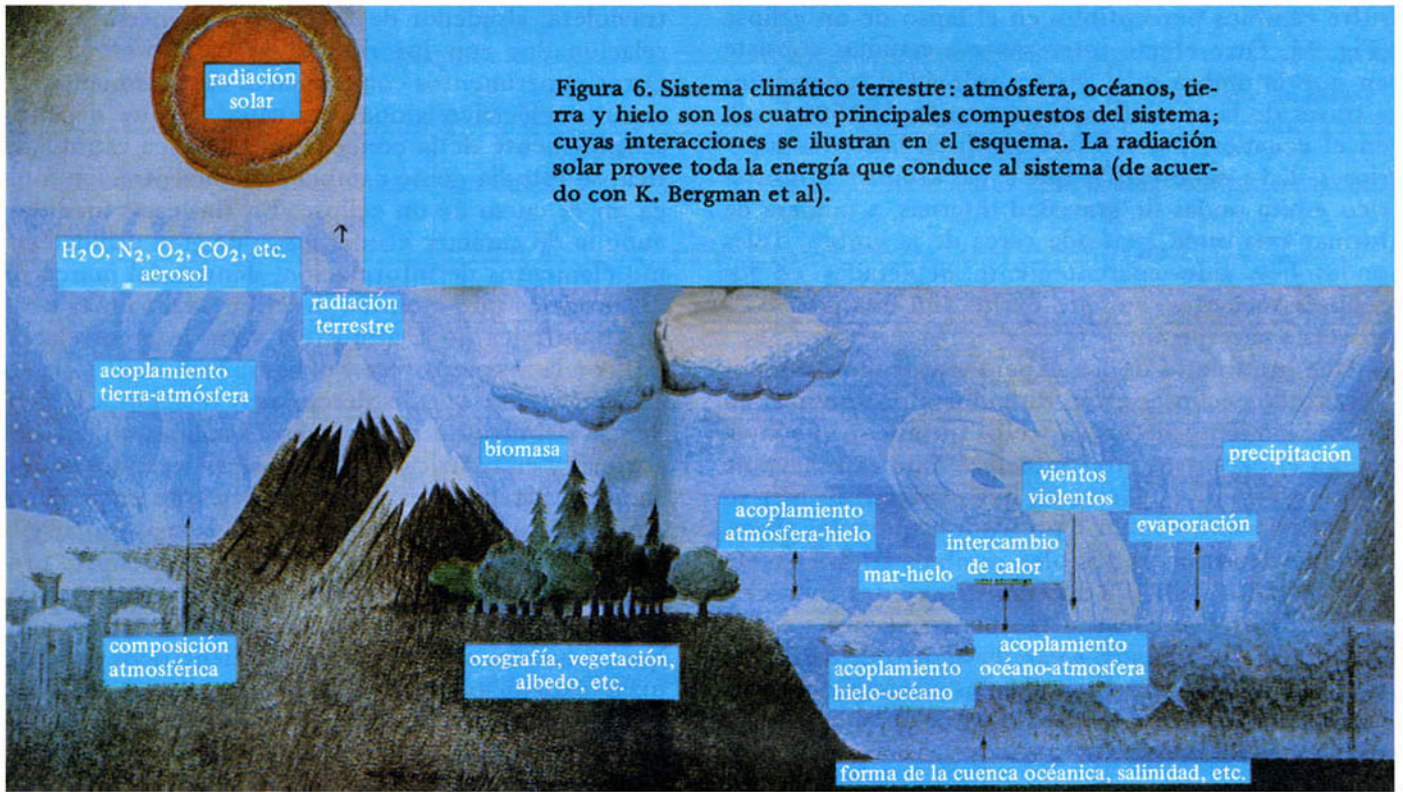


Figura 7. Balance dinámico global de las relaciones Sol-Tierra. (De acuerdo con R.S. Kandel).



fenómenos que dependen de las fuerzas de gravitación, que determinan el movimiento de la Tierra y demás cuerpos del sistema solar alrededor del Sol, y cuyo estudio constituye parte de la *mecánica celeste*. 2) Los fenómenos que dependen de la radiación electromagnética, de carácter cuasiconstante que emite el Sol desde su núcleo a través del radiador fotosférico. La casi totalidad (99%) de esa po-

tencia se emite en el dominio del visible y del infrarrojo cercano ($\sim 2\,900\text{--}8\,000$) Å. La atmósfera terrestre es transparente al visible y al escaso flujo de radio-ondas (1 cm-30 m), pe. . considerablemente opaca al infrarrojo, así como a las emisiones cromosféricas y coronales en UV y rayos X características de la corona ardiente ($\sim 10^6$ °K). Este flujo estacionario de fotones designado como la *constante solar*,

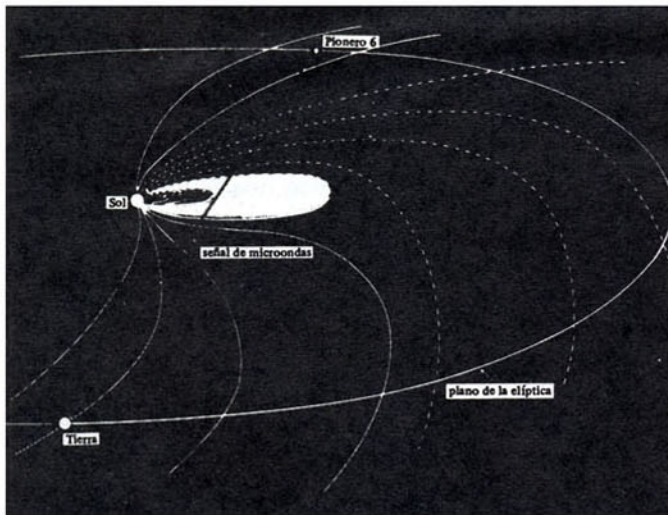
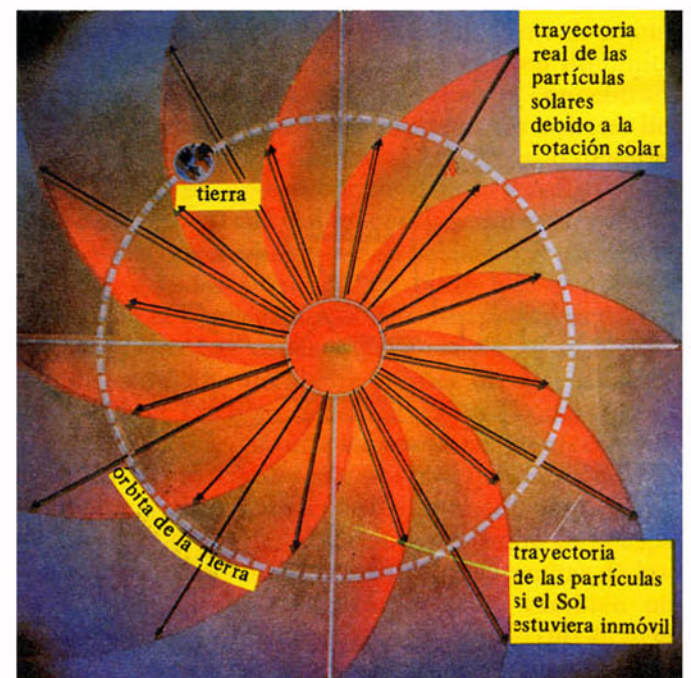


Figura 8. a) Esquematización de las líneas de campo magnético interplanetario. b) Corte transversal del campo magnético interplanetario. Las partículas cargadas presentes en el medio interplanetario se desplazan siguiendo trayectorias helicoidales a lo largo de esas líneas.



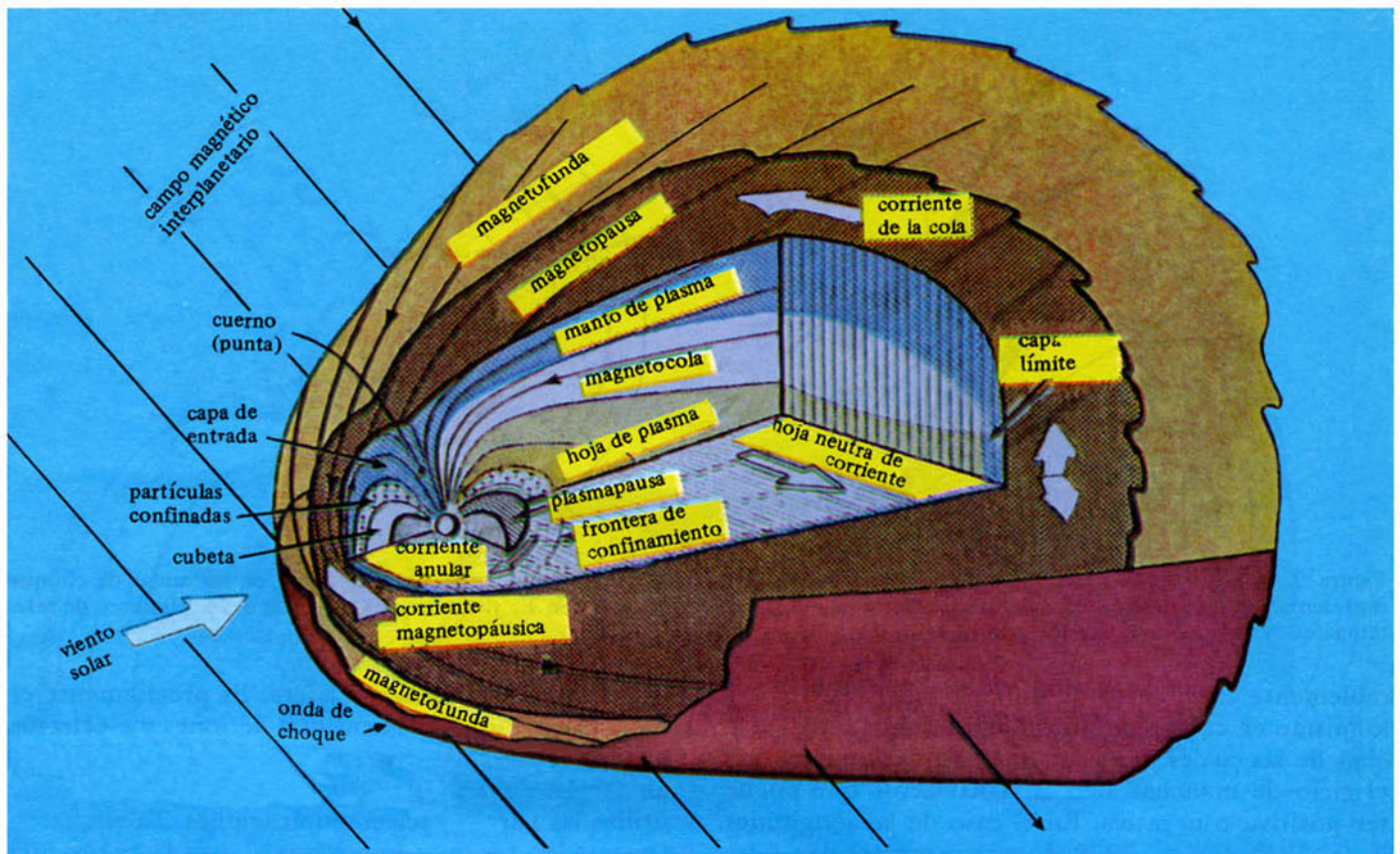


Figura 11. Estructura fina de la magnetosfera terrestre (de acuerdo con W. Heikkila).

es el que determina el equilibrio térmico del sistema *atmósfera-tierra-océanos-hielo* (Fig. 6) y consecuentemente el equilibrio biológico de nuestro planeta, constituyéndose en dominio de estudio de varias disciplinas geofísicas y biológicas, particularmente aeronomía, meteorología, climatología y oceanografía. 3) Los fenómenos que dependen de la radiación electromagnética y corpuscular solar de carácter *variable*, que constituyen el dominio de la *física-solar terrestre* (STP, por sus siglas anglosajonas), y cuyo campo reside en el estudio de los procesos físicos que gobiernan las fuentes que los originan, su propagación a través del espacio interplanetario y los procesos fisicoquímicos que gobiernan su interacción con la Tierra y otros objetos del sistema solar; es decir, el sistema circulatorio que involucra flujos de fotones, plasma, campos magnéticos, ondas y partículas energéticas, y sus respectivas transferencias de masa, momento y energía, por un circuito que comprende desde la fotosfera hasta la superficie terrestre (cuadro 1). Aunque sólo una minúscula fracción del orden de 10^{12} watts, del total de radiación de 10^{18} watts que inciden sobre la Tierra, proviene en esa forma de emisiones variables de interés para la física-solar-terrestre, tiene, sin embargo, un efecto significativo sobre el delicado balance dinámico-global del medio ambiente terrestre (Fig. 7). Desde este marco de

referencia, la influencia solar se manifiesta en dos formas a) *la componente lentamente variable* asociada al desarrollo de *centros de actividad*, aludidos en los artículos precedentes (ICyT núms. 92 y 93) y b) *componente variable transitoria* asociada a la ocurrencia de perturbaciones impulsivas en la atmósfera solar (fulguraciones y prominencias principalmente), así como la presencia de estructuras magnéticas abiertas (hoyos coronales, que generan torrentes de alta velocidad del viento solar). Los efectos de estas componentes se manifiestan, principalmente por incrementos en radiación X y UV, presencia esporádica de partículas energéticas y ondas de choque en el flujo continuo de la corona en expansión, y perturbaciones esporádicas de este viento solar (y consecuentemente del campo magnético asociado a éste), que modifican directamente el estado de equilibrio ("no perturbado") de la *magnetosfera* (campo magnético terrestre) y las diferentes capas de la atmósfera terrestre e, indirectamente, a través de disturbios introducidos en el estado no perturbado del espacio interplanetario. Todos estos fenómenos están asociados a los fenómenos del sol activo, a excepción de la componente transitoria de los chorros rápidos del viento solar, que puede manifestarse en periodos no-perturbados del llamado Sol quieto.

Si bien la radiación solar visible no varía conside-

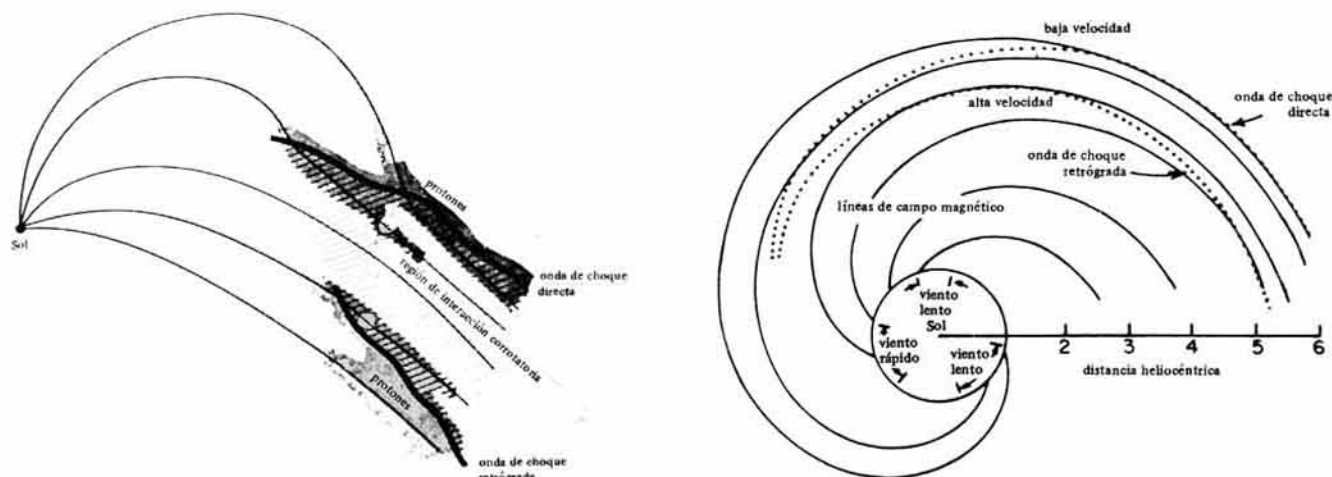


Figura 9. a) Esquema de una región de interacción corrotatoria (RIC): las regiones oscuras alrededor de las ondas de choque representan la distribución espacial de protones energéticos (de acuerdo con E. J. Smith). b) RIC vista desde el marco de referencia que corrotta con el Sol (de acuerdo con L.A. Fisk).

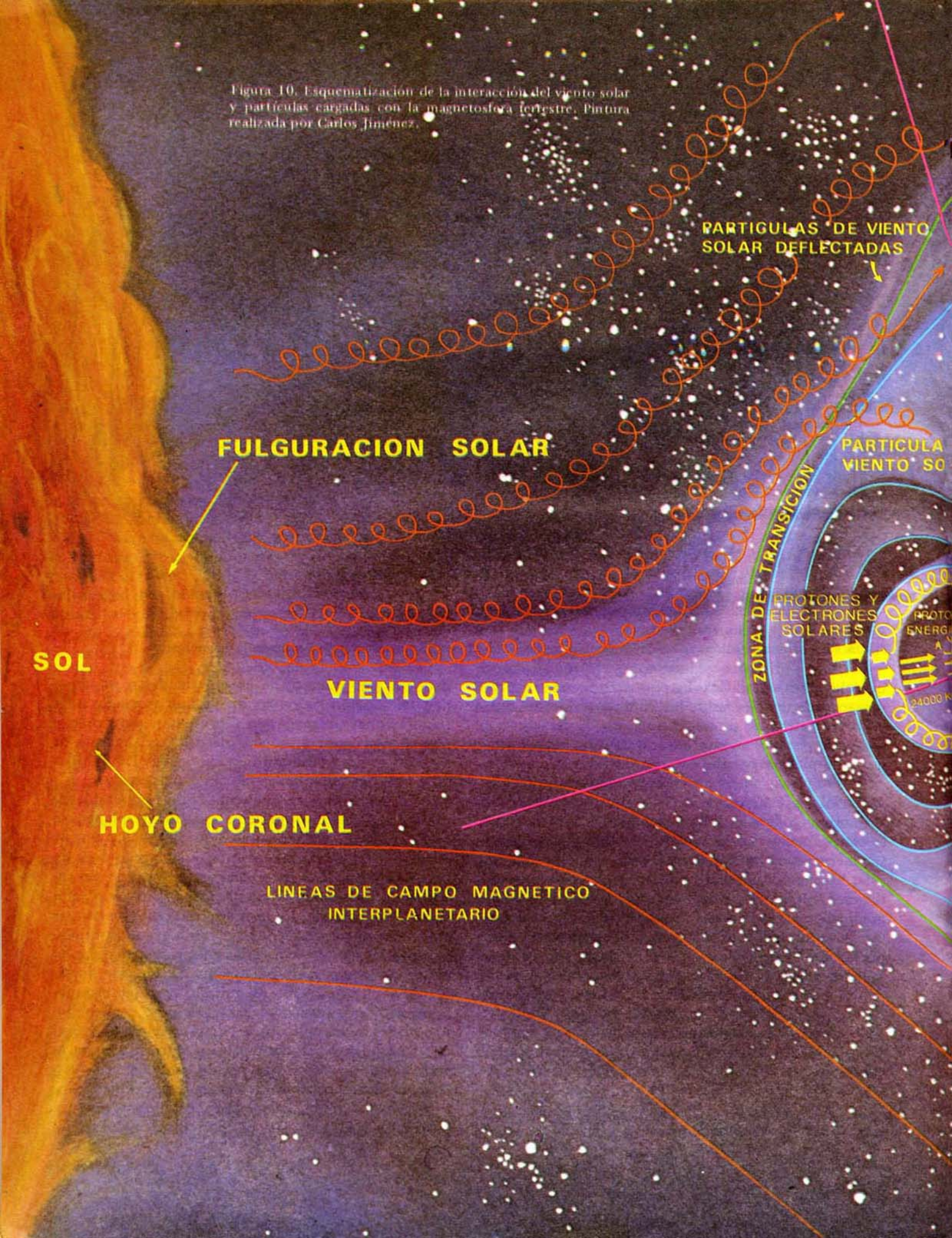
rablemente en el curso de un ciclo solar, esto no es lo mismo en el caso de otras longitudes de onda, muchas de las cuales muestran una correlación neta con el ciclo de manchas solares: correlación que puede ser positiva o negativa. En el caso de las longitudes de onda corta ($\lambda < 2000 \text{ \AA}$) que corresponden a las radiaciones más penetrantes (UV y rayos-X) y que causan los efectos más importantes de fotoionización, la correlación es positiva: la variación parece incrementarse proporcionalmente a la energía de la radiación. Por ejemplo en UV y EUV ($\lambda < 600 \text{ \AA}$) la variación sobre el ciclo solar, incluyendo fulguraciones, permanece dentro de un factor de dos: el flujo de rayos-X, entre 10 y 100 $\text{\AA}$, varía en dos órdenes de magnitud, en tanto que la variación de los rayos-X entre 2 y 8 $\text{\AA}$ supera un factor de 500. En primer lugar, toda variación de flujo UV solar repercute sensiblemente en la temperatura y densidad de la atmósfera superior terrestre (200 a 800 km de altitud) como consecuencia de la absorción de esta radiación en altitudes menores y su rápida conducción de calor hacia arriba. De hecho, el subsecuente aumento de presión que resulta de tales calentamientos ($P \propto T$) es la causa del *incremento de frenado* de los satélites en órbita baja, particularmente de la espectacular caída del *Skylab*, en 1979, como resultado de un incremento de la actividad solar, más rápido e importante de lo previsto. Por otro lado, la variación UV es también la causante de la fotodisociación y de la fotoionización de las moléculas y átomos entre 60 y 300 km de altura, y, de ahí, la existencia de la ionosfera terrestre. En particular, la línea Lyman- α del hidrógeno (1216 $\text{\AA}$) y Lyman- α del helio neutro y el ionizado (584 y 304 $\text{\AA}$) son los responsables de la producción de electrones libres en las

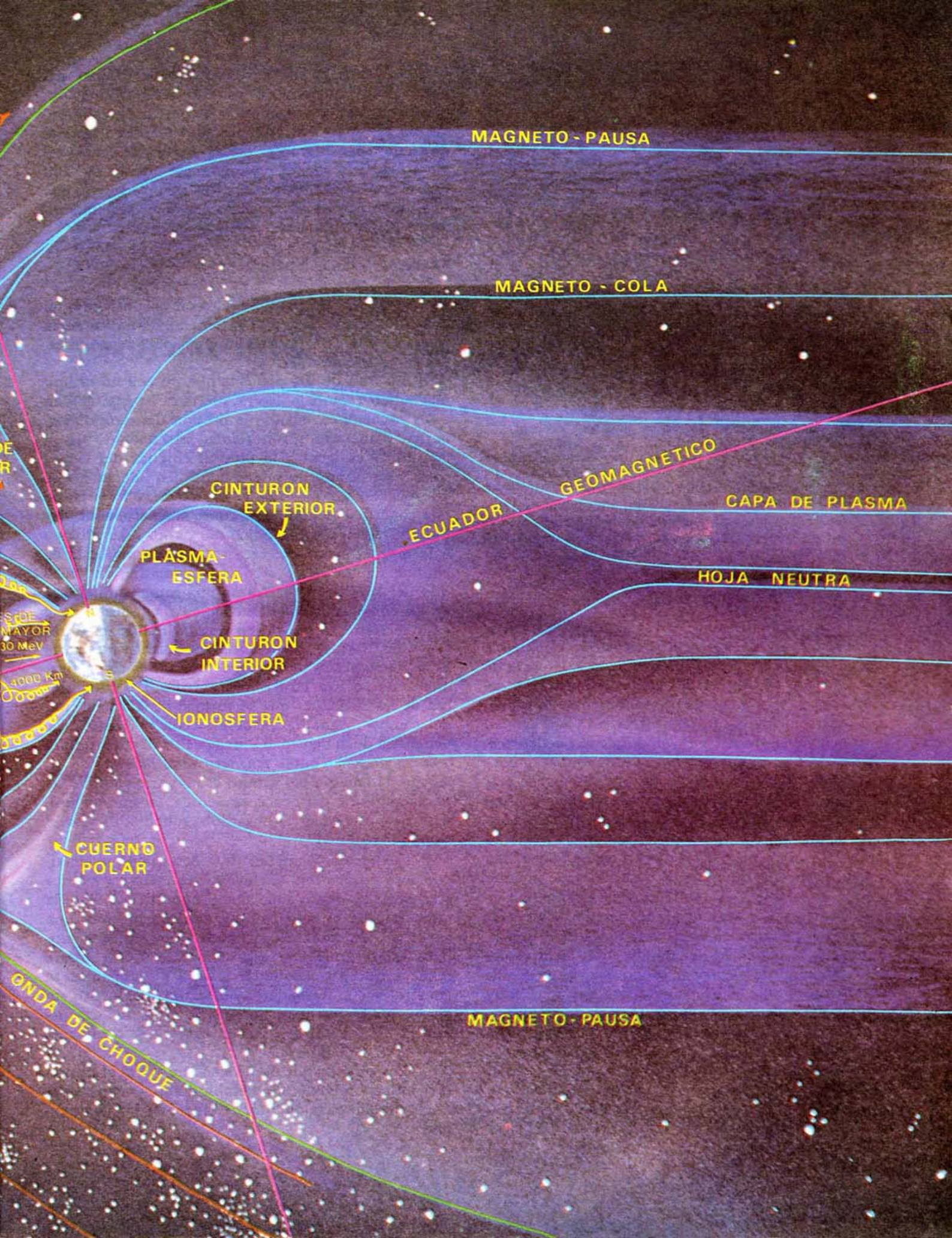
capas más bajas de la ionosfera. Es precisamente en estas capas, donde la densidad de iones y electrones es aún relativamente elevada, en que tiene lugar la absorción de las ondas radioeléctricas decamétricas utilizadas para las telecomunicaciones. Tales aumentos pueden ser muy importantes cuando se produce una fulguración solar: los rayos-X penetran aún más profundamente que los rayos UV, las fotodisociaciones que originan tienen consecuencias importantes con respecto al equilibrio fotoquímico de la estratosfera y, por lo tanto, con respecto a las posibilidades de absorción o de remisión de las radiaciones luminosas que proceden del albedo terrestre. El equilibrio radiativo del planeta se ve así alterado.

El viento solar conforma la estructura misma del espacio interplanetario; en efecto, de acuerdo a la teoría magnetohidrodinámica (MHD), ya que el medio interplanetario es de *conductividad eléctrica* "infinita" (muy elevada) implica que el campo magnético está "congelado"* a la materia coronal, la cual adquiere del Sol suficiente calor para expandirse más de 100 U.A., hasta donde su presión se hace del orden de la presión interestelar ($\sim 10^{-12} \text{ dinas/cm}^2$), gracias a la elevada *conductividad térmica* del plasma. El campo magnético arrastrado en el plasma se conforma en espirales debido a la rotación del Sol (Fig. 8), tal que al nivel de la órbita terrestre, el ángulo de la espiral respecto a la dirección del Sol es de 45° . El campo magnético presenta una estructura sectorial que se orienta en un sector hacia la dirección solar y en el contiguo en la dirección antisolar, separándose por una lámina de corriente neutra, en la

* Se designa así al movimiento conjunto de convección de plasma y campo magnético.

Figura 10. Esquematación de la interacción del viento solar y partículas cargadas con la magnetosfera terrestre. Pintura realizada por Carlos Jiménez.





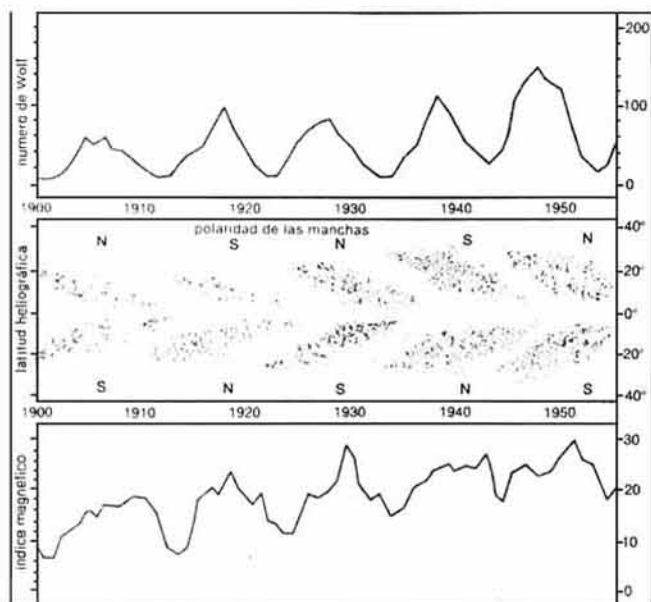


Figura 14. En el cuadro superior se ilustra el número de manchas (número de Wolf) durante las seis primeras décadas del siglo XX. En el cuadro intermedio se presenta el “diagrama mariposa” que ilustra la emigración de las manchas en el curso de un ciclo solar, desde las latitudes heliográficas medias hacia el ecuador solar. En el cuadro inferior se ilustra la actividad magnética terrestre (representada por el índice A_a) que está directamente asociada a la actividad solar, pero con un cierto retraso.

ción a la pérdida de momento angular de algunas estrellas a causa de sus vientos estelares. También la teoría hidrodinámica clásica prevee la existencia de una onda de choque en el frente de expansión del viento solar, asociada a la transición entre la velocidad supersónica y la subsónica (relativo a la velocidad hidromagnética de Alfvén), en donde se pueden acelerar partículas rápidas capaces de remontar en contracorriente al viento solar. Estas ondas se hacen más abruptas a medida de que aumenta su distancia del Sol, tal como ocurre con las olas oceánicas al acercarse a una playa. Se ha observado recientemente que estas ondas, más allá de la órbita de Marte, dan origen a un gran número de partículas de energía moderada (1-50) MeV, abriéndose la posibilidad de que una fracción sustancial de partículas de esas energías detectadas en la Tierra, tengan ese origen. Dado que la velocidad del sonido en el viento solar y la temperatura decrecen progresivamente con la distancia del Sol, ocurre que la presión crece muy rápidamente, de manera que se forman dos ondas de choque, la *directa* y la *retrograda*, a cada lado de la región de alta presión, propagándose en sentidos opuestos, aunque de todas formas alejándose ambas del Sol (Fig. 9). Observaciones recientes indican que los electrones de origen joviano, acelerados entre 1 y 10 MeV, son inhibidos a propagarse a través del vien-

to solar por estos pares de ondas, que forman una barrera muy eficiente. El estudio de la producción, confinamiento y propagación de partículas energéticas en el espacio interplanetario, está directamente asociado a las diferentes ondas y perturbaciones del viento solar, y constituye solamente uno de los campos de investigación de la física-solar-terrestre, que inegablemente ha enriquecido nuestro conocimiento de la física de plasmas a escala de laboratorio.

El campo geomagnético

La interacción del viento solar con un obstáculo tal como los planetas es un fenómeno de importancia fundamental. Tres tipos de interacciones se manifiestan en el sistema solar:

1. El caso de los planetas que poseen un campo magnético (como la Tierra, Mercurio y Júpiter); en estas situaciones, cuando la presión del campo magnético planetario (proporcional al cuadrado de su amplitud) es igual a la presión cinética del viento solar, éste último no puede continuar adelante, y se ve obligado a contornar el obstáculo, a lo largo de una superficie denominada como *magnetopausa*. Debido al régimen supersónico del viento solar relativo a la magnetopausa, se crea entre ellos una onda de choque en forma de arco en el lado-día, en tanto que del lado-noche se forma una cauda similar a la de los cometas, la *magnetocola*, cuya extensión en el caso terrestre es del orden de 500 radios terrestres ($R_T = 6370$ km). La distancia geocéntrica a la nariz de la *onda-arco* y de la *magnetopausa* es respectivamente de $15 R_T$ a $10 R_T$ en promedio. Las dimensiones de las cavidades que se forman de la interacción del campo magnético planetario con el viento solar dependen de la densidad y de la velocidad del fluido, y se les designan como *magnetosferas planetarias*, en las que la energía del campo es mayor que las de las poblaciones de partículas presentes, tal que los movimientos de estas últimas son gobernados por el campo magnético.

2. Cuando los planetas no tienen campo magnético, pero poseen una envoltura atmosférica (Venus y Marte); el viento solar comprime directamente la atmósfera en el lado frontal, conformando así una superficie de equilibrio, llamada *anemopausa* (ionopausa si la atmósfera está ionizada). De la misma manera que las magnetopausas, las ionopausas se constituyen en verdaderos obstáculos del viento solar extendiéndose con una cauda en forma de *anemocola* (ionocola) del lado antisolar, y se forma una onda-arco del lado-día.

3. Los objetos que no poseen atmósfera ni campo magnético (la Luna, por ejemplo); ahí el viento solar no se detiene más que por el efecto de la misma superficie.

Regresando a la *magnetosfera terrestre* (Fig. 10), ésta constituye entonces la región determinada por las líneas de campo magnético terrestre, a través de las cuales se transmiten tensiones, se guían ondas, partículas cargadas y corrientes eléctricas, se confinan plasmas y se conectan físicamente la atmósfera terrestre con el viento solar. Tres principales poblaciones de partículas pueblan la magnetosfera: 1) electrones e iones de la ionosfera superior; 2) plasma capturado del viento solar incidente; 3) partículas de alta energía capturadas en los anillos de radiación de Van Allen. La magnetosfera funciona como una *máquina* que convierte la energía cinética del viento solar en energía magnética, mediante la acción de un dinamo magnetohidrodinámico. Parte de esa energía convertida es inyectada dentro del sistema de corrientes de la magnetocola —que consiste de dos *selenoides*— y, otra parte, se gasta proporcionando potencia al movimiento convectivo de gran escala del plasma magnetosférico, como un *motor*. El campo eléctrico asociado a ese movimiento convectivo se comunica hacia abajo, a la ionosfera por un sistema de corrientes alineadas, tal que la interacción friccional que se suscita a consecuencia de la convección hacia la ionosfera en la componente neutra existente, provoca un calentamiento de tipo Joule. Por otro lado, los electrones, que se conducen por las corrientes alineadas por las líneas de campo, son acelerados a lo largo de ellas, causando las *auroras polares* al interactuar con la atmósfera superior. Antes del descubrimiento del viento solar y la exploración de la magnetosfera a finales de la década de los cincuenta, la concepción del campo geomagnético era la de un simple campo dipolar. Actualmente, se tiene un conocimiento bastante detallado en la magnetosfera (Fig. 11).

Cabe destacar algunas de las capas constitutivas del campo geomagnético: entre la *magnetosfera* y la *onda-arco* existe una región de transición de plasma subsónico comprimido, llamada *magnetofunda*, que actúa como un medio elástico, transmitiendo la presión cinética del viento solar al campo geomagnético. Esta región está separada de la magnetosfera por la estrecha magnetopausa aludida previamente. Tres distintas capas de plasma están presentes: 1) la *capa límite*, que es la capa dinámica que controla el proceso de penetración del viento solar a la magnetosfera constituida, a su vez, por el *manto de plasma*, la *capa de entrada* y los *cuernos polares* (o fisuras); 2) la *lámina* (hoja) *de plasma*, que es el recipiente de plasma caliente capturado del viento solar, en la región de líneas estiradas de la magnetocola; 3) la *plasmaesfera*, que es el recipiente de plasma frío de origen ionosférico en la región de líneas de campo cerradas en las latitudes bajas y medianas, y que co-rotan con la Tierra. Así también existen tres principales regiones con diferentes topologías de líneas de cam-

po magnético: 1) las regiones de líneas de campo cerradas que emergen en forma de dipolo en latitudes medias y bajas, y que encierran a la plasmaesfera; 2) las líneas de campo abiertas que emergen de latitudes geomagnéticas altas, formando los dos lóbulos principales de la magnetocola, y cuya intersección con la Tierra define los *casquetes polares*; 3) regiones de líneas de campo cerradas en la dirección antisolar, que se elongan considerablemente en la magnetocola (Fig. 12). En la vecindad del eje Sol-Tierra, el campo magnético cambia bruscamente de sentido, sin cambiar de dirección, lo que define una región de campo magnético nulo, llamada la *capa* (hoja) *neutra*.

Una fracción de los iones y electrones de la plasmaesfera tienen suficiente energía para vencer la barrera gravitacional y escaparse a lo largo de las líneas abiertas de los casquetes polares ionosféricos, “evaporándose” hacia los lóbulos de la cola, en lo que se designa como el *viento polar*. La llamada *zona auroral* ocupa una banda de latitudes entre 65° y 70° y se extiende en longitud alrededor de todo el planeta: las regiones aurorales localizadas en el campo dipolar de la Tierra, en dirección ecuatorial son los anillos estables de radiación de Van Allen, en tanto que fuera de esta región, en la dirección polar, se localizan los casquetes polares que están magnéticamente conectados con la magnetocola. Entonces, la zona auroral delimita, de hecho, la región en que la influencia del viento solar es reemplazada por el control que toma el campo dipolar, por lo cual es poco sorprendente que cuando el Sol da un “empujoncito extra” (chorros de alta velocidad que emergen de los hoyos coronales), sus efectos se muestran activamente en la zona auroral. La variabilidad de esta zona auroral es una de las disciplinas estudiadas con más énfasis. En lo concerniente al tercer tipo de población de partículas (atrapadas en los anillos de Van Allen), el Sol eyecta esporádicamente partículas energéticas entre 1 a 200 MeV (muy ocasionalmente entre 200 y 15 000 MeV) que al interactuar nuclearmente con la atmósfera terrestre producen neutrones, los cuales a su vez se desintegran posteriormente en nuevos protones y electrones. Algunas de esas partículas sometidas a la fuerza de Laplace se verán atrapadas en el campo dipolar terrestre, formando los ya aludidos *cinturones de radiación de Van Allen* (Fig. 13): el cinturón interno con protones de más de ~ 30 MeV de energía, centrado aproximadamente a una altura geocéntrica de $1.5 R_t$ (4 000 km de altura sobre la superficie ecuatorial), y un anillo externo con protones de baja energía y principalmente electrones de energía alrededor de 1 MeV, centrado a una altura de 24 000 km (cerca de $5 R_t$ de altura geocéntrica). En corte transversal, éstos semejan dos cuernos, en tanto que en volumen, semejan dos man-

gueras toroidales que dejan descubiertas las zonas polares (Fig. 10). En el seno de estos anillos las partículas oscilan rápidamente de norte a sur y viceversa, en un tiempo de seis segundos aproximadamente, con un movimiento horizontal de deriva hacia el oeste los protones y hacia el este los electrones. Estos cinturones juegan entonces un papel benéfico confinando partículas cargadas, eyectadas por las fulguraciones, cuyo poder de penetración es muy elevado, pudiendo causar daños tanto a la instrumentación como a la tripulación de vehículos espaciales, razón por la cual se tiene interés de circular por abajo de ellos, o fuera de su jurisdicción.

En lo concerniente a los rayos cósmicos y a las partículas energéticas solares, la magnetosfera juega un papel de filtraje y de guía: por un lado deflecha en su trayectoria las partículas menos energéticas, filtrando solamente aquellas cuya energía es superior a un valor umbral impuesto por el campo magnético y que depende de la latitud, y por otro lado, guía las partículas a lo largo de las líneas de campo.

Influencia solar sobre el medio ambiente terrestre

Hemos visto entonces que existe un intercambio de plasma entre el viento solar, la magnetosfera y la ionosfera terrestre, al igual que un intercambio de corrientes eléctricas, de manera que se establece glo-

balmente un balance dinámico físicoquímico muy delicado; es decir, en realidad nunca se establece un estado de equilibrio, ya que existen incesantes perturbaciones en el viento solar que inciden sobre la frontera magnetosférica: el campo magnético interplanetario actúa como la llave moduladora de fenómenos magnetosféricos, en el sentido de regulador de la transferencia de energía, de momento y de partículas del viento solar a la magnetosfera. De esta manera, el viento solar se constituye en la principal fuerza electromotriz externa generadora de procesos magnetosféricos. Bajo ciertas circunstancias, el campo magnético interplanetario puede actuar como "disparador" de las inestabilidades más fundamentales de la magnetosfera, las llamadas *subtormentas geomagnéticas* que a su vez se acompañan de *tormentas ionosféricas*.

Es conveniente mencionar que no es privilegio de nuestra estrella el presentar una actividad magnética, también nuestro planeta es poseedor de esa actividad magnética, con la diferencia de que no toda ella es intrínseca, sino inducida externamente como se acaba de mencionar. Esta actividad se manifiesta por fluctuaciones de la intensidad y/o de la dirección del campo magnético terrestre, que aparecen en forma simultánea en toda la superficie del globo pero con diferentes amplitudes. Estas variaciones son de dos tipos, *regulares* y *esporádicas*: las regulares presentan ciertas periodicidades tales como *oncenales*, de *variación lenta* o *seculares*, y de variación a corto término tales como *diurnas*, de *temporada*, *lunares* y de *recurrencia de 27 días*. En tanto que las esporádicas se asocian a la actividad solar, o flujos de alta velocidad del viento solar, que producen las mencionadas subtormentas geomagnéticas; en cambio, las variaciones



Figura 13. a) James Van Allen, astrofísico estadounidense que comprobó experimentalmente la existencia de los anillos de partículas cargadas que rodean la atmósfera terrestre. b) Carl McIlwain, James Van Allen y George Ludwig en la Universidad de Iowa en 1958.

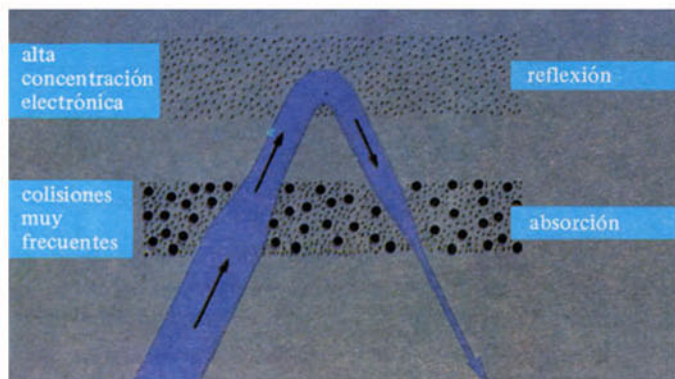
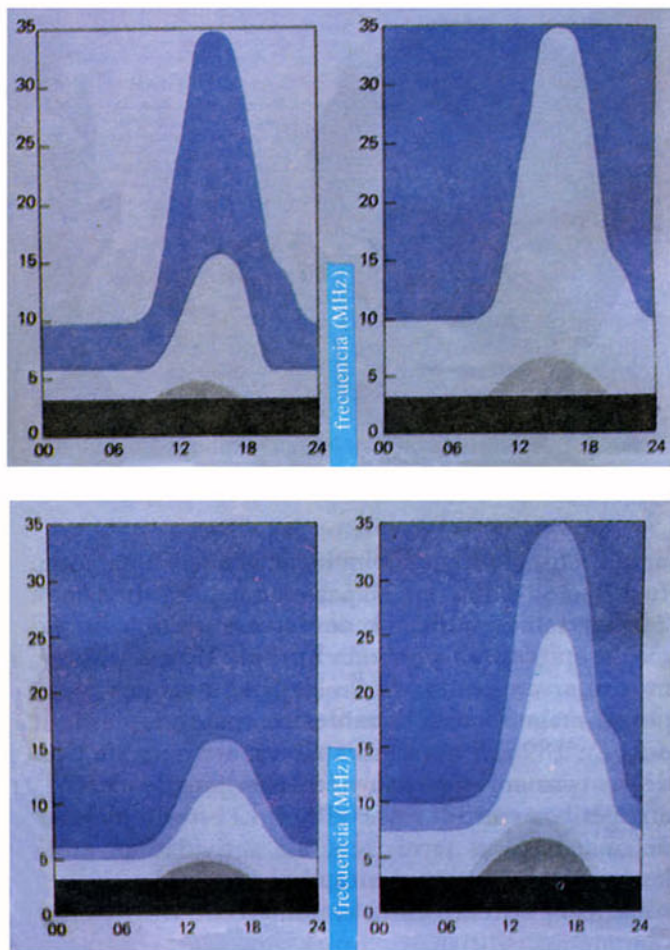


Figura 16. a) Si la concentración de electrones es muy elevada a gran altitud las ondas de radio son reflejadas, en tanto que si la concentración elevada ocurre a baja altitud esas ondas son absorbidas. Para radiación de frecuencia muy elevada no hay suficientes electrones para que se efectúe la reflexión, en tanto que para frecuencias bajas la absorción es muy fuerte. b) Se ilustra la alteración del rango de frecuencias utilizables para las comunicaciones entre Londres y Halifax (Canadá) durante un mínimo solar (diciembre de 1954) y el máximo solar siguiente (diciembre de 1958). Las zonas blancas indican las frecuencias utilizables, las zonas azules y grises indican frecuencias limitadas por reflexión y absorción respectivamente. Las frecuencias inferiores a los MHz no fueron accesibles por haber sido reflejadas por la capa E de nuestra atmósfera. c) Durante una tormenta ionosférica la frecuencia límite para la reflexión decrece en tanto que la frecuencia límite para la absorción crece. Los diagramas muestran cómo esas modificaciones reducen la banda de frecuencia disponibles para las comunicaciones, y se pone en evidencia cómo los efectos de una tormenta magnética son más severos en el mínimo de actividad solar (de acuerdo con J. A. Ratcliffe).

regulares se deben a corrientes inducidas en la ionosfera por los desplazamientos de ésta en el campo magnético, en un efecto similar al del principio del dínamo: mientras mayor es el grado de ionización, más elevada la conductividad del plasma y más intensas las corrientes inducidas, de tal suerte que las variaciones de ionización, como por ejemplo las provocadas por variaciones de luminosidad solar en el curso del día, inducen variaciones de corrientes y consecuentemente del campo magnético.

La actividad magnética terrestre se mide por diversos indicadores, de los cuales los más populares son los índices K_p y A_p , cuyo margen de variación es de cero a nueve, el índice 0 corresponde a "calma" magnética, y el índice 9 a las tormentas geomagnéticas más intensas. Los índices magnéticos terrestres presentan correlaciones muy marcadas con la actividad solar oncenal y con la rotación solar de 27 días, pero con un cierto desfase (retardo en tiempo), (Fig. 14). Las variaciones esporádicas son consecuencia de eventos particulares en el Sol: emanaciones de plasma de los centros activos, fulguraciones y flujos reforzados de alta velocidad del plasma coronal, que en última instancia se traducen en perturbaciones del viento solar y su campo magnético inter-



planetario "congelado". Estos disturbios del viento solar son la fuente de las perturbaciones geomagnéticas observadas al interior de la cavidad magnetosférica, en forma de subtormentas geomagnéticas, tormentas ionosféricas, auroras polares e intensas corrientes transmitidas al suelo terrestre. En efecto, la energía cinética disponible en el viento solar puede variar de ~ 0.1 ergios/cm²-seg (para una densidad de 5 protones/cm³ y una velocidad de 300 km/seg) hasta ~ 10 ergios/cm²-seg (para una densidad de 10 protones/cm³ y una velocidad de 1 000 km/seg). Consecuentemente, la energía total incidente sobre la magnetosfera, considerada como un blanco de 40 R_t de diámetro (sin contar la cola lejana), puede variar de 5×10^{19} a 5×10^{21} ergios/seg. Por otro lado, la energía disipada en una subtormenta geomagnética es del orden de 10^{18} , 10^{19} ergios/seg, lo que confirma que la energía disponible en el viento solar es ampliamente suficiente para producir ese fenómeno.

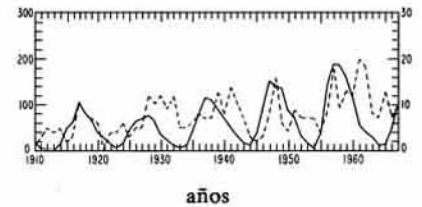
La estrecha correlación entre las emisiones solares esporádicas y sus efectos terrestres, en las tormentas magnéticas y auroras polares, se hizo evidente desde finales del siglo pasado y primeras décadas del presente: ya en 1860 el físico británico R.C. Carrington



Chapman



Chapman



Curiosamente la producción científica de Chapman (más de 450 artículos, línea punteada) sigue, como las auroras, la tendencia del ciclo de actividad solar (línea continua).

había observado la coincidencia entre una intensa fulguración solar y la aparición, aproximadamente 24 horas más tarde, de numerosas auroras boreales que se extendían por toda Europa. Hoy en día sabemos que van acompañadas de fluctuaciones de campo geomagnético detectables en casi todas las latitudes. En 1896, Birkeland atribuía el origen de ellas y de las tormentas geomagnéticas, a jets de electrones energéticos emitidos por el Sol. El estudio detallado del magnetismo terrestre y esa actividad auroral en las regiones de latitud alta, puso en evidencia la correlación existente entre el número de Wolf y ciertos fenómenos geofísicos, con el subsecuente incremento en la frecuencia de las auroras boreales cuando se producen los periodos de máxima actividad solar (Fig. 3b, *Elementos* núm. 6, enero-marzo de 1986), fenómenos que no podrían explicarse simplemente en base a la radiación electromagnética del Sol.

El estudio de la actividad magnética terrestre y su correlación con la actividad solar asocia nombres tales como Schuster, Linderman, Chapman, Ferraro, Alfvén (Fig. 15), Störmer, Martyn y otros, quienes antes del descubrimiento de los rayos cósmicos solares

en 1942, emitieron hipótesis relativas a que el Sol no era únicamente fuente de luz sino también de partículas cargadas eléctricamente, desarrollando modelos físicomatemáticos al respecto, que aun cuando se han tenido que modificar ligeramente, los conceptos fundamentales de algunos han permanecido válidos, en la medida de que para entonces no se conocían aún los hoyos coronales y el viento solar reforzado que sabemos ahora que contribuyen sustancialmente a la actividad geomagnética. Las perturbaciones transitorias introducidas por el Sol en nuestro medio ambiente pueden clasificarse *grosso modo* de la manera siguiente:

1. *Perturbaciones ionosféricas repentinas* (o de inicio brusco), cuyo efecto es el incremento brutal del número de electrones de la capa D de nuestra atmósfera, causado por los flujos de rayos-X de las diversas manifestaciones de la actividad solar y observables del lado-día de la Tierra únicamente. Esto entraña un aumento de absorción por un lapso de 15 minutos a dos horas, lapso en el cual las comunicaciones de radio se debilitan e incluso pueden llegar a interrumpirse debido al descenso de la capa D por



Birkeland



Schuster



Störmer



Lindemann

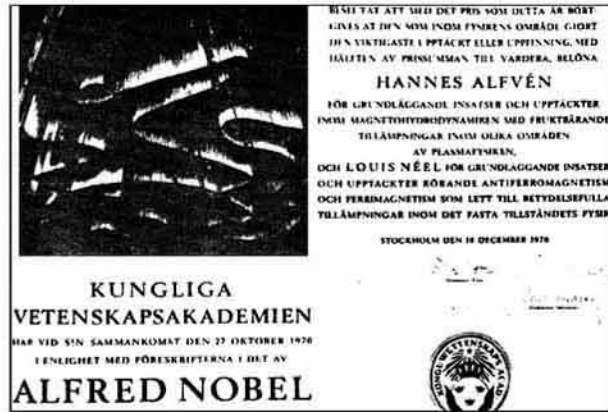


Figura 15. Hannes Alfvén, considerado como el pionero de la magnetohidrodinámica solar y ganador del Premio Nobel por la diversidad de aportaciones a la astrofísica de plasmas, física espacial y disciplinas afines.



Hannes Alfvén
Nobel Laureate
The Nobel Prize citation for Physics in 1970 Awarded to Hannes Alfvén for his work on magnetohydrodynamics and plasma physics.

Sketches showing the main features of

una distancia hasta de 15 kilómetros; en general, los efectos dependen de la frecuencia de la onda reflejada.

2. *Tormentas ionosféricas*, debidas a corrientes de partículas cargadas desviadas por el campo magnético terrestre hacia la zona de auroras polares, tanto del lado noche como del lado día. Se acompañan de un incremento de la población de electrones de la capa D y disminución en la capa F; lo que provoca una situación compleja pues en la capa D aumenta la frecuencia de onda correspondiente al límite de absorción, en tanto que en la capa F disminuye; cosa que se combina con variaciones del límite de reflexión, dando lugar a una reducción de las frecuencias utilizables (Fig. 16). El enlace de radio entre Londres y Montreal es muy susceptible a este tipo de perturbaciones, en tanto que entre Londres y Nueva York estando más alejados de la zona auroral, sus comunicaciones son menos afectadas por estos "apagones aurorales". Tienen una tendencia a la recurrencia con 27 días de periodo, lo que ubica su origen en perturbaciones provenientes de centros activos del Sol o de hoyos coronales. Las tormentas son más

frecuentes cerca del máximo de actividad pero más perturbadoras en el mínimo de actividad.

3. *Absorción ionosférica de los casquetes polares* ("Apagones polares"); se asocian a las fulguraciones solares, con un retardo de 2 a 4 horas, comenzando entonces bruscamente la absorción, la cual se incrementa en el curso de algunas horas. Este efecto de incremento de ionización en la baja ionosfera y la subsecuente absorción de ondas perdura alrededor de una semana, mucho después de que terminó la fulguración, lo que indica que existen regiones en la atmósfera solar de almacenamiento de partículas muy rápidas con liberación gradual, o alternatively, que se inducen efectos magnéticos capaces de acelerar partículas hacia los casquetes polares, durante el tiempo que duren esos efectos de perturbación local.

4. *Absorciones aurorales*, que ocurren al mismo tiempo que las subtormentas geomagnéticas (es decir 2 días después de una fulguración, cuando las subtormentas son provocadas por ese agente, y no decenas de minutos después de la fulguración como en el caso de la absorción polar); además, se limitan a la zona auroral y no cubren todo el casquete polar. Afectan principalmente la baja ionosfera y coinciden con las auroras visibles de mayor magnitud. Su origen se atribuye a partículas aceleradas por condiciones creadas cerca de la Tierra por la subtormenta geomagnética precursora.

5. *Auroras polares* (boreales o australes), fenómenos luminosos que han sido registrados por al menos 2 milenios y estudiados cuidadosamente por 300 años (Fig. 17). Para los antiguos habitantes de las altas latitudes, las auroras eran la *diosa del alba*, por su luminosidad, a veces comparable a la de la Luna, en plena noche. Las auroras toman formas muy diversas, aunque muy frecuentemente en forma de arco, semejante a la configuración del campo magnético. Son muy escasas en los meros polos, y se distri-



Ferraro

buyen generalmente en un anillo que se inicia a 5° de los polos magnéticos, lo que hace suponer que el fenómeno depende del campo geomagnético; las latitudes de mayor probabilidad son 23° en el norte, *auroras boreales* y 18° en el hemisferio sur, *auroras australes*; cada aurora boreal es acompañada de una austral. De colores variados, generalmente se presentan verdes o azul-verde, con bordes rosas o rojos: oxígeno excitado emitiendo en el verde ($5577 \text{ \AA}$) y el rojo ($6300 \text{ \AA}$), aunque se encuentran rayas y bandas de emisión del N_2 , N , O_2 y H . Las auroras son debidas a la excitación de esas moléculas y átomos a altitudes que van de ~ 100 a $1\,000 \text{ km}$, aunque el plasma no sólo se excita sino que también se produce una ionización notable, hasta densidades mil veces superiores a las que prevalecen en la baja ionosfera, durante la duración de la aurora. Puesto que se trata de un fenómeno esencialmente nocturno, el agente excitante e ionizante no puede ser la luz electromagnética, sino que se trata de partículas cargadas, guiadas por las líneas del campo geomagnético. La frecuencia de auroras sigue el ciclo oncenal de actividad magnética solar aunque con cierto retardo en los picos (Fig. 18). Las más brillantes están directamente ligadas a las fulguraciones solares, apareciendo simultáneamente a la subtormenta geomagnética en los dos hemisferios. Sin embargo, las partículas energéticas solares no son ciertamente la causa directa, pues llegan mucho antes que el inicio de la subtormenta y no tendrían razón alguna para concentrarse sólo en las

zonas aurorales. Se puede pensar también en las nubes de plasma emitidas por centros activos y fulguraciones, que sí están directamente asociadas a la subtormenta, ¿pero en ese caso, por qué esa localización en zonas restringidas en latitud? Se puede también pensar que las partículas pertenecen al viento solar, sin embargo su débil energía, $\leq 1 \text{ KeV}$, no les permite filtrarse fácilmente a través de la pantalla del campo magnético; no obstante, una fracción de las partículas llega a penetrar por la magnetocola, con una dificultad menor, cuanto mayor es el nivel de la actividad solar. Lo que sucede es que el movimiento de reflujos hacia la Tierra va acompañado de una ganancia de energía hasta $\sim 10 \text{ KeV}$, como resultado de campos eléctricos o variaciones de campos magnéticos asociados a reacoplamientos de líneas de campo magnético, causados por las perturbaciones de la subtormenta —lo que acelera también partículas locales. Las observaciones indican una localización de estos fenómenos aproximadamente a $7 R_t$, distancia a la cual las partículas se precipitan a lo largo de las líneas de fuerza del campo magnético, provocando las auroras polares (Fig. 19).

Las consecuencias de estos fenómenos son muy variadas, de las cuales las más espectaculares se localizan a nivel del suelo: la precipitación de partículas entraña corrientes de gran intensidad, de varios millones de amperios, muy variables, que pueden crear por inducción en la corteza resistiva de la Tierra campos eléctricos hasta de 5 volts/km y producir daños en los sistemas conductores tales como oleoductos (Fig. 20), cables telefónicos o líneas de conducción de energía eléctrica. Por ejemplo, como Canadá y el norte de Estados Unidos están muy cerca de la zona auroral, y la red de líneas de alta tensión es muy vasta y densa, sucede a menudo que los campos eléctricos telúricos acabados de mencionar hacen circular corrientes de cerca de un ciento de amperios a nivel del “neutro” de los transformadores. Las alternancias se tornan entonces disimétricas, y así una pérdida de rendimiento y consecuentemente de la tensión, hasta en un 50%, sometiéndose además el transformador a un calentamiento temporal: los dispositivos de control automático y manual desconectan entonces la central de la red, precisamente cuando la potencia generada por las otras centrales es inferior. La demanda de potencia de las centrales que aún están conectadas, aumenta por encima de los límites razonables y se provoca una desconexión en cadena. Es así entonces que las subtormentas geomagnéticas y auroras asociadas, están al origen de los *apagones espectaculares ocurridos en Nueva York en mayo de 1969 y agosto de 1972*, entre otros.

Otras consecuencias conciernen al incremento de la densidad electrónica en la ionosfera a consecuencia de la precipitación de partículas, con la subse-

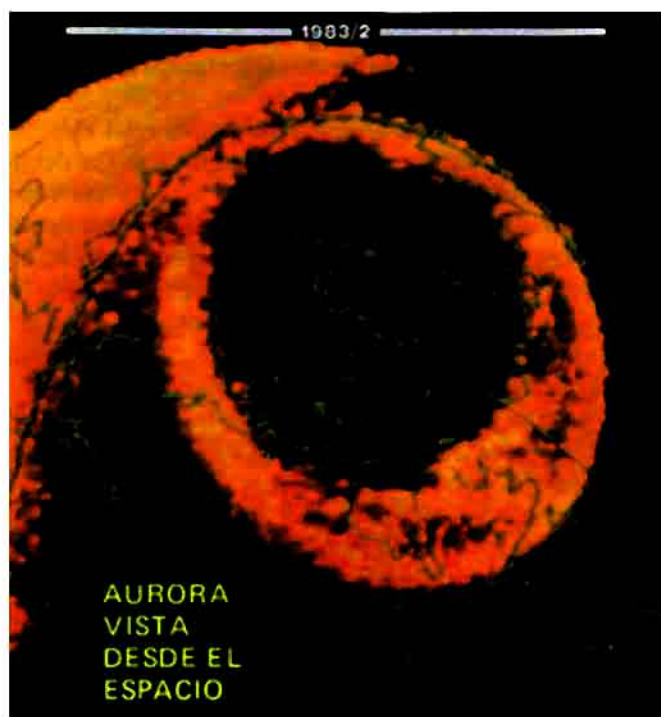


Figura 19. Aurora polar vista desde el espacio por el satélite Explorador Dinámico I en luz ultravioleta, a $25\,000 \text{ km}$ arriba del polo norte.



Figura 17. Auroras polares (boreales o australes) debido a la excitación atómica y molecular que se produce por partículas cargadas energéticas que interaccionan con la atmósfera terrestre.

cuenta perturbación de las comunicaciones radioeléctricas: las corrientes asociadas, circulando a 100 km de altura forman el *electrojet auroral*, que por el efecto Joule resultante contribuyen al calentamiento de la atmósfera superior, además de la energía depositada directamente por las partículas precipitadas, precisamente en regiones donde no llega la luz del Sol ordinariamente. Por otro lado, las interacciones de esas partículas con especies neutras producen una modificación de la circulación en esa zona atmosférica, lo que afecta los fenómenos de transporte de materia y energía en alturas menores, justamente donde se determinan los procesos meteorológicos. Parece existir una cierta correlación entre la circulación troposférica y las características del viento solar "reforzado" (que origina precisamente la actividad magnética auroral o polar). Otra implicación a nivel de la atmósfera, consiste en que la inyección de partículas energéticas produce un fenómeno de carga en los vehículos espaciales que pueden inducir efectos de ruidos electrostáticos capaces de deteriorar sus partes electrónicas o de telecomando.

6. *Modulación de los rayos cósmicos* en el viento solar. En las fulguraciones solares se eyecta plasma

magnetizado hacia el espacio interplanetario con una velocidad del doble de la del viento solar quieto, alcanzando la Tierra dos días después de haber atravesado el tortuoso camino, con múltiples deflecciones con el campo interplanetario. Esto causa un incremento sustancial de la densidad de energía del viento solar. Sin embargo, nuestro planeta no se encuentra necesariamente dentro del trayecto de esa nube de



Figura 20. La ocurrencia de auroras entraña a menudo la generación a nivel del suelo de intensas corrientes eléctricas (varios millones de amperios) y campos eléctricos de varios volts/km que pueden producir serios daños en instalaciones tales como oleoductos, líneas eléctricas, telefónicas, etcétera.

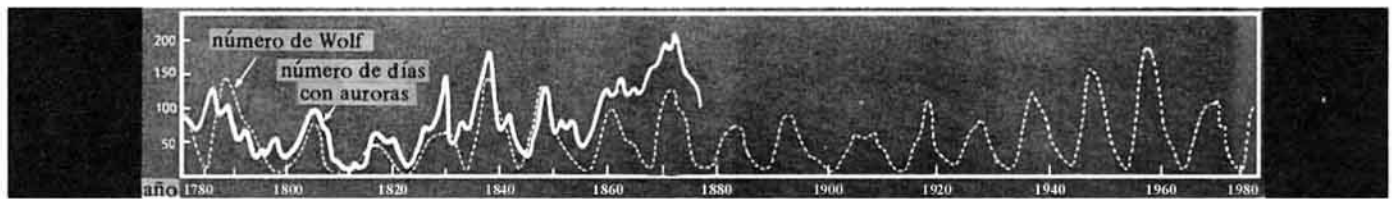


Figura 18. La frecuencia con auroras sigue el ciclo oncenal de actividad solar con cierto retraso.

plasma magnetizado: todo depende de su extensión lateral y la localización de su fuente en relación a los tubos magnéticos de Arquímedes que conectan al Sol y la Tierra (Fig. 21). Se produce así una modulación de los rayos cósmicos galácticos similar a la que se produce acorde al ciclo oncenal de actividad, sólo que a corto término. Se observa después de algunas decenas de horas de la fulguración una disminución de aproximadamente 20% de flujo galáctico de rayos cósmicos, que dura varios días para recuperar el nivel normal del fondo galáctico. Este fenómeno es conocido como "efecto Forbush" y se atribuye al bloqueo magnético efectuado por el reforzamiento de campo magnético del viento solar, proveniente de la nube de plasma magnetizado, al pasar en la vecindad de la órbita terrestre. Las partículas son deflektadas y deceleradas, de tal suerte que se reduce el número que puede sobrepasar esa barrera y llegar a nuestra vecindad.

7. *Tormentas magnéticas*, se distinguen dos tipos de tormentas magnéticas, las llamadas a) *tormentas recurrentes* y b) *tormentas esporádicas*. Así también cada una de ellas se subdivide en dos tipos, de *inicio brusco* y de *inicio progresivo*. Las del tipo *recurrente* parecen estar asociadas a los torrentes de muy alta velocidad del viento solar que se asocian a los hoyos coronales, y a regiones activas que perduran varias rotaciones solares; en tanto que las *esporádicas* se asocian a las fulguraciones solares. En general, ocurre que el plasma rápido eyectado por la fulguración o el reforzamiento del viento solar por chorros de alta velocidad, al llegar a la magnetosfera la comprimen, dando lugar así a un incremento importante de campo magnético, conmensurable en la Tierra. Unas horas después, sin embargo, el campo se invierte y cae en intensidad con un valor de 1% de su valor normal, el cual se recupera posteriormente muy lentamente. El mínimo valor de intensidad de campo ocurre medio día después del inicio y tarda en recuperarse de 2 a 3 días. En realidad las tormentas magnéticas son la secuencia de una serie de eventos más fundamentales designados como *subtormentas geomagnéticas*, que constituyen formalmente la analogía más cercana con el fenómeno de mayor impacto sobre el sistema solar: las *Fulguraciones Solares*; de hecho puede ser que ambos sean la manifestación de una misma inestabilidad básica universal, que tam-

bien puede tener lugar en otros fenómenos explosivos, como explosiones de galaxia, ráfagas (fulguraciones) estelares, en supernovas, etc. Las subtormentas son, entonces, fenómenos explosivos (de 10-20 min de duración) en los que la energía magnética acumulada es convertida en energía cinética del plasma, por el proceso de reacoplamiento y reconexión de líneas de campo, en el que un intenso campo eléctrico localizado se genera acelerando partículas y plasma a lo largo de una línea neutra que se forma en la región de reconexión del campo magnético interplanetario con el campo de la magnetosfera, cuando a consecuencia de la compresión se juntan líneas de polaridad opuesta. Dicha compresión crea entonces un plasma y configuración magnética altamente inestables, tal que al relajarse a un estado más estable, se produce el fenómeno explosivo de la subtormenta, en el que se generan verdaderos cinturones de anillos de corrientes eléctricas muy intensas, que provocan precisamente la disminución de campo magnético, y cuya correspondiente energía se transforma en cinética. Algunas de las partículas aceleradas, muchas de las cuales al origen provenían del reflujo del viento solar a través de la magnetocola, adquieren su membresía para ingresar a los anillos de radiación de Van Allen, dentro de la *plasmaesfera*, en donde se establecen interacciones ondas-partículas que se utilizan desde la Tierra como sensores de percepción remota de la evolución de las configuraciones magnetosféricas. Es evidente que todas las implicaciones descritas en relación a las tormentas ionosféricas y a las auroras, en lo concerniente a disturbios ionosféricos y terrestres, son en el fondo consecuencias del fenómeno de las subtormentas; en particular, los cambios de densidad inducidos en la atmósfera superior pueden alterar sustancialmente la estabilidad orbital de los vehículos espaciales de perigeo-corto. Parece, incluso, que los procesos magnetosféricos pueden afectar a la propia rotación terrestre.

Las fulguraciones (llamadas) solares

Como la sede de la mayor parte de los fenómenos variables de carácter transitorio que estudia la física solar-terrestre son las fulguraciones solares (ver ICyT, núm. 93), vale la pena retrazar brevemente la evolución de estos fenómenos, que ultimadamente constituyen el espectáculo más extraordinario y más ener-

gético del sistema solar, y que generalmente no se pueden observar en luz blanca visible, sino que más del 90% se observan en la parte roja del espectro luminoso (en la línea $H\alpha$, por ejemplo).

El primero en reportar una fulguración fue el astrónomo británico Richard Carrington, el 1o. de julio de 1859, que coincidió en ser una de las escasas fulguraciones observables en luz blanca. Las fulguraciones están siempre asociadas a las manchas magnéticas de la superficie solar. Las manchas aparecen cada vez que hay una variación local del campo magnético sobre la fotosfera y en la corona del Sol. En primer lugar, se nota la aparición de una zona compacta, tal que si la intensidad de campo magnético es débil se tendrá una *playa facular*, en tanto que si es elevada, se tendrá enseguida una mancha. Si es una playa, se verá más clara que la superficie promedio del Sol, e irá progresivamente elongándose en el sentido este-oeste. Dos días más tarde aparecen puntitos negros sobre esa playa, dos de los cuales aumentan de superficie para constituirse en manchas: una de ellas, adelante en el sentido de la rotación se convertirá en la mancha "cabeza", y, la otra, atrás, en mancha "cola", con polaridades magnéticas opuestas. Las dos manchas se separan lentamente rodeándose de manchas más pequeñas. Una decena de días después del nacimiento de ese centro activo termina su crecimiento, y es entonces que sobreviene una fulguración, si es que la fulguración tiene ahí lugar: en realidad si el grupo de manchas está perfectamente constituido, con sus manchas cabeza y cola en su respectivo lugar, probablemente no sucede nada; pero si la una y la otra se embrollan entre sí, o si dos grupos bipolares se superponen apareciendo puntos brillantes entre regiones de polaridad opues-

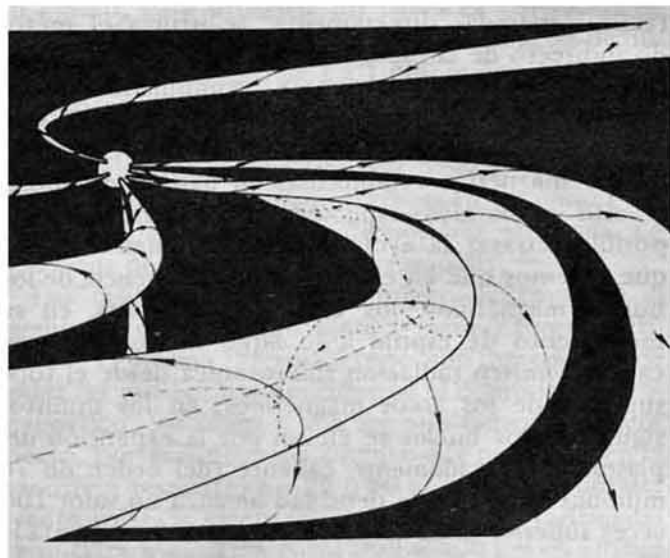


Figura 21. Esquematización de los "tubos" de campo magnético (tubos de Arquímedes) en que se concentran las líneas de campo magnético interplanetario.

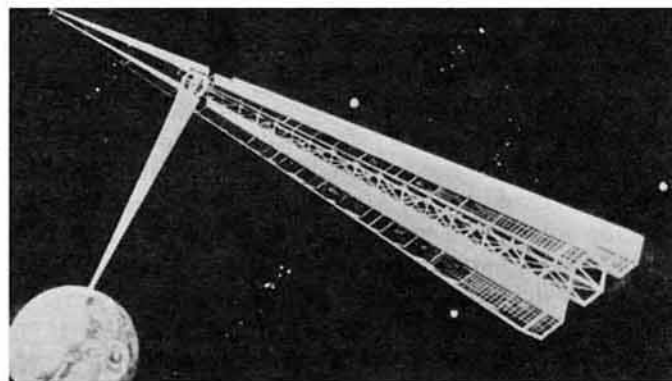


Figura 27. Concepción artística del ambicioso proyecto (SPS), Satélite de Potencia Solar.

ta, se genera, entonces, una inestabilidad magnética que, muy probablemente va a producir una o varias fulguraciones. El fenómeno evoluciona en varios minutos, los puntos brillantes se reúnen formando surcos luminosos. En esas condiciones, se presenta la ruptura de un filamento en la vecindad de una de las manchas, lo que indica un cambio de configuración magnética. Los *filamentos*, hemos dicho en ICyT, núm. 92, son la proyección sobre la superficie solar de arcos de gas ionizado, que cuando se observan sobre el borde del disco, dibujan magníficas *protuberancias* luminosas. En luz roja $H\alpha$, se ve aparecer un enorme punto muy luminoso que alcanza su brillantez máxima en pocos minutos, para extenderse a continuación formando una especie de manchón de múltiples ramificaciones. Se eyecta, entonces, en proyección que sigue las líneas de campo, material solar del filamento, que se eleva como jet para volver a caer una parte en forma fraccionada. Una pequeña fracción del disco solar (menor o igual que 5 mil millones de km^2 ; 2 500 veces la República Mexicana) se observa literalmente en flamas (Fig. 22). La región tardará cierto tiempo (menos de 3 horas) para recobrar su aspecto normal. Se libera en unos minutos una cantidad brutal de energía ($\sim 10^{31}$ ergios), que traducida en términos de potencia $\sim 10^{19}$ Kw/h (equivalente a 100 millones de años del consumo eléctrico actual de México, suficiente para cubrir los requerimientos energéticos de la humanidad en los próximos 100 mil años); en otros términos, equivalente a una explosión de 25 mil millones de megatones (como marco de referencia se puede indicar que la bomba atómica de Hiroshima correspondió solamente a 0.02 megatones). Físicamente se produce *in situ* la eyección de plasma (materia compuesta de protones, electrones e iones pesados de muy alta temperatura). Tal deflagración provoca: la creación de una onda de choque que se propaga en la corona solar a más de 1 200 km/seg, destrucción del campo magnético local y aceleración de partículas locales (protones, electrones y

núcleos pesados) a energía cinética del orden de (1 a 15 000) MeV/núcleos para los núcleos y (0.01 a 10) MeV los electrones, calentamiento del material circundante y emisiones electromagnéticas en todo el espectro (rayos- γ hasta radio ondas). El destino de esas partículas aceleradas dependerá de la altitud en que son inyectadas en la atmósfera solar y de la configuración magnética en el lugar de inyección: si es muy abajo se frenarán por la densidad relativamente elevada, termalizándose rápidamente. Por lo contrario, más arriba en la corona, pueden encontrar líneas abiertas de campo magnético, lo que les permitirá escaparse hacia el espacio interplanetario, previo desplazamiento azimutal hasta encontrar esas líneas. Durante su pasaje a través de la corona, las partículas provocan excitaciones del plasma local, lo que induce sobressaltos en las emisiones de radio del Sol, lo mismo que intraccionando con los campos magnéticos (efecto sincrotrón); éstos en general se designan como *estallidos de radio*, los que despliegan una clasificación muy amplia. En general, se caracterizan por una fuerte deriva en frecuencia hacia las bajas frecuencias (a razón de 20 MHz/seg) a medida de que los haces de partículas atraviesan regiones de densidad y campo magnéticos más débiles. De tal suerte que los radiotelescopios registran primero ondas métricas, luego decamétricas, hectométricas y kilométricas, en el curso de unas cuantas decenas de segundos. Desde el punto de vista de la radiación-X liberada, las fulguraciones se clasifican en 3 clases: comunes = C, moderadas = M e intensas = X, cada una en la escala de 1 a 12 (es decir, la X-12, siendo la más intensa, es 12 veces más intensa que la X-1, la cual a su vez libera 10 veces más radiación que la M-1 y 100 veces más que las de clase C-1). Otras clasificacio-

ciones conciernen al área ocupada, o a otros tipos de emisiones de partículas o fotones.

El hecho de que las fulguraciones ocurren cerca de manchas en fase de crecimiento, en donde los campos magnéticos de formación reciente emergen en forma de bucles a la superficie solar, ha conducido a que, entre la gran cantidad de diferentes tipos de modelos que se proponen para el origen e interpretación del fenómeno, dos principales corrientes sean las que se mantengan permanentemente en el primer "rank" de popularidad: a) Al emerger los bucles magnéticos, éstos tienden a expandirse por la acción del plasma coronal en expansión, e interactuar con los campos de formación anterior, tal que cuando bucles contiguos de diferente polaridad se juntan entre sí, se suscita una aniquilación de líneas de campo formándose una *hoja neutra* entre ellos, con la subsecuente reconexión y reorganización de líneas de campo. Esa hoja neutra es la sede de inestabilidades (llamadas de "desgarre" y "efectos de constricción") que inducen intensos campos eléctricos acelerando partículas a las energías observadas, y propiciando la eyección de masa. b) El segundo tipo de modelo, los "tokomaks", por analogía con los reactores de fusión a nivel de laboratorio, propone la sede de inestabilidades en el interior mismo de los bucles toroidales, en vez de las láminas neutras. En el presente, es aún difícil discernir cuál de los dos tipos de modelo es el adecuado, pues ciertos tipos de observaciones favorecen a uno, y otras observaciones al otro.

Para entender mejor los detalles del proceso conviene disponer de la evolución temporal y espacial de la temperatura en el curso del fenómeno; como no existen termómetros sensibles a temperaturas de (1 a 100) millones de $^{\circ}\text{K}$ y, además, no es aún factible realizar medidas directamente, se utiliza el método indirecto de la espectroscopía. En particular con la espectroscopía de rayos-X, combinada con las observaciones en otras longitudes de onda (UV y radio-ondas principalmente), y con las cartas de campo magnético establecidas en base al desdoblamiento de las rayas espectrales (efecto Zeeman), es posible retrazar la evolución del fenómeno. Es así que sabemos que en el curso de la emergencia de los bucles magnéticos, los electrones termales, en su movimiento de espiral a lo largo de las líneas de campo, emiten radiación sincrotrónica desde el tope superior de los arcos magnéticos; en los minutos siguientes los bucles se elevan por la expansión del plasma extremadamente caliente (del orden de 70 millones de $^{\circ}\text{K}$), y la densidad alcanza un valor 100 veces superior al de la prefulguración. Se calienta la cromosfera que emite radiación inmediatamente, lo que entraña entonces una expansión explosiva del plasma a través de la corona a velocidades tan altas

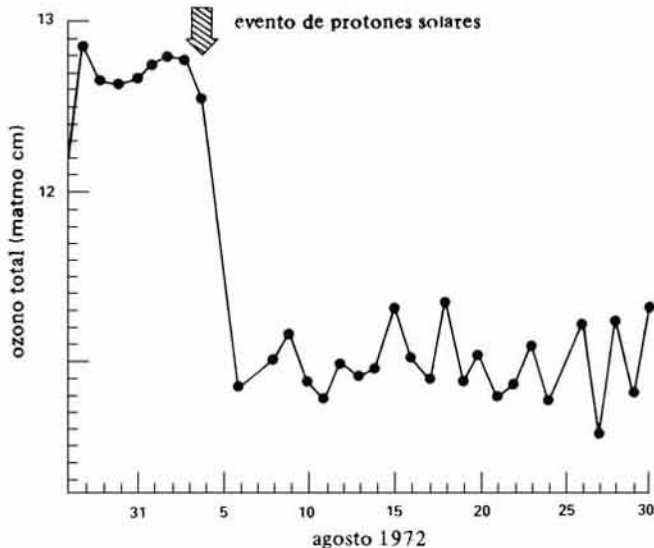


Figura 23. Reducción del ozono por efecto de las partículas solares sobre la atmósfera en las altas altitudes. (De acuerdo con D. Heath).

como 1 500 km/seg, habiéndose generado electrones energéticos y protones de energía alrededor de 100 KeV. Las ondas de choque generadas en esa explosión así como la gran onda de choque que acompaña a las eyecciones del plasma coronal, aceleran las partículas que penetran el campo magnético de la corona con un ángulo de $\sim 3^\circ$ con respecto a la orientación de ese campo, tal que los protones alcanzan en esta segunda etapa de aceleración energías del orden de cientos y miles de MeV, en tanto que los electrones pueden alcanzar energías de algunas decenas de MeV. Las partículas aceleradas, incidiendo sobre la cromosfera, dan lugar a emisiones intensas en rayos-X y UV, en tanto que los electrones generan principalmente los estallidos previamente mencionados en radio-emisiones, durante su confinamiento en regiones cerradas de campo, o durante su escape de regiones abiertas de campo magnético. Algunos minutos después, al enfriarse el plasma se emite principalmente en UV e inclusive en luz blanca.

Sin embargo, todavía quedan muchos enigmas por resolver, uno de los cuales es el ¿por qué parte de esos protones y electrones acelerados atraviesan la atmósfera agrupados en haces coherentes de partículas sin difundirse erráticamente? Esto preocupa particularmente a los especialistas, pues cuando se descubre el por qué de esa propiedad, desafortunadamente, la tecnología de las armas de "haces de partículas", muy en boga en la actualidad, habra progresado seriamente. A pesar de la enorme cantidad de trabajos cuantitativos, teóricos y observacionales realizados para descifrar los detalles del proceso mismo de aceleración de partículas termales hasta energías supratemales e incluso relativistas, esto se presenta aún elusivo a ser totalmente comprendido; en efecto, para producir los haces de partículas de energías observadas se necesitarían diferencias de potencial en el dominio de 1 a 1 000 millones de volts, que no se encuentran en la atmósfera solar, y que además, de existir permanentemente, provocarían que los electrones, que son más ligeros, se desplazaran inmediatamente provocando cortos circuitos entre las zonas susceptibles de acelerar protones. La búsqueda de otras soluciones se impone.

Las repercusiones de las fulguraciones sobre el medio terrestre, la atmósfera y campo geomagnético, vía el plasma interplanetario, son inmediatas: de todas las radiaciones emitidas en el dominio electromagnético, los rayos-X son los que tienen el mayor efecto, por la ionización intensa que producen en la atmósfera terrestre. En 20 ó 30 minutos después del evento solar, la electrización de las capas rarefadas de nuestra atmósfera entre 200 y 400 km de altitud aumenta enormemente. Los espejos de ondas de radio que constituyen las llamadas capas de *Heaviside* se trastornan totalmente. Las ondas cortas que se



Figura 24. Young y Crippen, astronautas del Columbia en abril de 1981.

propagan botando entre las capas sucesivas, agujeran súbitamente los espejos y se pierden en el espacio. Por el contrario, ciertas ondas, como las de la televisión, se van a encontrar ahora con una zona que se convirtió en reflexiva para ellas, de manera que las emisiones se verán nebulosas por imágenes fantasmas provenientes de miles de kilómetros. Por otro lado, la onda de choque y las nubes de plasma, atravesando el medio ultrarrarificado del viento solar a una velocidad 2 a 3 veces superior a la de él, alcanzan la Tierra 1 a 3 días después, con una velocidad promedio del orden de 1 000 km/seg, modificando la configuración magnética existente entre nuestro campo magnético y el viento solar. Las partículas cargadas confinadas en los anillos de Van Allen, alteran sus trayectorias, propiciando su penetración hacia los polos, donde producen cierto tipo de fenómenos luminosos y las auroras polares. Las tormentas magnéticas e ionosféricas hacen lujo de presencia. En cuanto a las partículas aceleradas, lo que sucede es que siendo las fulguraciones fenómenos localizados, las emisiones resultan relativamente direccionales, en el sentido de que las partículas son canalizadas por el campo magnético interplanetario (figuras 8 y 21); la Tierra, estando lejos de encontrarse siempre en el eje Sol-Tierra adecuado, no recibe generalmente más que bocanadas muy diluidas de lo que fue emitido. Las partículas cuya llegada a la Tierra puede ocurrir en tan sólo 8 minutos o en varias decenas de minutos, pueden durar varias horas e incluso días, añadiéndose temporalmente al flujo de rayos cósmicos galácticos. Afortunadamente existe el efecto protector de la atmósfera y de la magnetosfera terrestre; lo que no es por ejemplo el caso de la Luna, que preocupa altamente a los especialistas en programar viajes del hombre hacia ese satélite. Evidentemente, sin ese efecto de escudo de la atmósfera la vida en la Tierra no habría podido desarrollarse. En cuanto a la mag-



Figura 22. Fulguración solar típica. La altura del marco es de 220 000 km. Se inserta la Tierra a la misma escala (acorde a R. Giovanelli).

netosfera: algunas partículas de cierta energía y direcciones específicas de llegada a ella son desviadas lejos de la Tierra, en tanto que otras penetran siguiendo las líneas de fuerza encurvadas hacia las altas latitudes. Estas al ser absorbidas en las altas latitudes producen nuevos efectos de ionización de las capas reflectoras, afectando también las ondas cortas de radio en esas regiones (Suecia y Canadá muy particularmente). Esa "lluvia polar" dura a veces varios días, el tiempo que toma en que todo el espacio situado entre el Sol y la Tierra, se encuentre "lavado" de esos jets corpusculares. Los protones que alcanzan a llegar hasta altitudes de 60 ó 40 km producen los mismos efectos que los rayos-X mencionados: ionización en las capas bajas de la ionosfera y disociación de moléculas. En el primer caso se produce la formación de capas ionosféricas absorbentes, que tienen por efecto el impedir toda comunicación radioeléctrica en los casquetes polares durante varios días (lo que hemos dicho se denomina "apagón" polar). En el segundo caso, ocurre la formación del óxido de nitrógeno reductor que, por reacción con el ozono, disminuye la concentración de

ta de un -20% (como en el caso de la serie de eventos del mes de agosto de 1972), y con una duración que puede prolongarse por cerca de un mes (Fig. 23). Se estima que la tasa de producción de óxido de nitrógeno pudiera incrementarse en un factor de 7, si el campo magnético terrestre llegara a anularse, lo que conduciría a una disminución de la cantidad de ozono en la alta atmósfera, muy perjudicial para el mantenimiento o el desarrollo de las actuales formas de vida sobre el planeta (ver *Elementos* núm. 6, 1985). En efecto, la capa de ozono situada aproximadamente

entre 25 y 50 km, constituye una pantalla protectora extremadamente eficaz contra la penetración de los rayos-X hasta el nivel del suelo. Ahora bien, la anulación del campo magnético terrestre se produce en cada una de las inversiones, con un promedio de cada 100 mil años. Obviamente la ausencia del campo geomagnético en coincidencia con las fulguraciones puede provocar modificaciones en los sistemas ecológicos de nuestro planeta, tales como mutación y extinción de especies orgánicas, razón por la cual se especula acerca de que el origen de la tendencia de ciertas especies a evolucionar escalonadamente y no en curvas, pueda estar asociado a la ocurrencia de periodos de muy intensa actividad solar en coincidencia con los periodos de depresión e inversión del campo geomagnético en el pasado; como una hipótesis alternativa a aquella en la que la desaparición de algunas especies, en particular los dinosaurios, puede estar asociada con la incidencia esporádica de material extraterrestre, como restos cometarios, que al interaccionar con la Tierra produjeron una explosión y subsecuente levantamiento de polvo que se tradujo en una especie de "inviernos nucleares" por periodos mayores a los 6 meses. Dicho sea de paso, la próxima inversión de campo geomagnético está prevista para antes del año 3000.

Los protones que penetran hasta altitudes de 20 a 30 kilómetros crean también una débil ionización que modifica la conductividad eléctrica por encima de las nubes, y que favorece tormentas atmosféricas y precipitaciones en forma de lluvia: he aquí una de las posibles influencias directas importantes de la actividad solar sobre nuestro clima, que tanto tras-

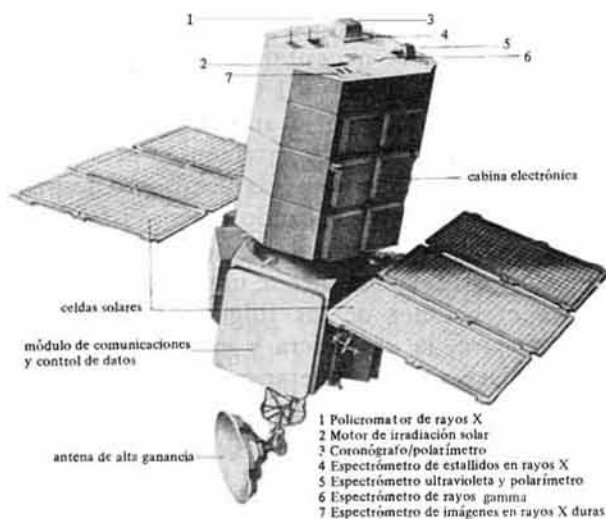


Figura 29. Satélite de la Misión del Máximo Solar, en la que se recolectó la información más moderna y abundante en lo concerniente a los diversos fenómenos asociados a la actividad solar, y a partir de la cual se comienza a entender un poco mejor los procesos de generación de partículas solares.

tornó la meteorología a finales de julio y en agosto de 1972 en Europa y América del Norte, al menos. Aunque aparentemente muy pocas partículas penetran más abajo de 40 km, no se puede negar que las perturbaciones en las capas superiores influyen sobre las capas inferiores, en donde se localiza la sede de los fenómenos meteorológicos propiamente dichos. Al efecto, durante *un verano del 72* se desarrolló una actividad anormal en el Sol, con fulguraciones violentas “fuera de estación”, excepcionales por su fecha de ocurrencia y por su carácter. Por su fecha de ocurrencia ya que es poco usual que eso ocurra en la fase de declinación de un ciclo (núm. 20), en el cual de hecho, el máximo precedente de 1968-1969, fue de débil intensidad comparada a los máximos anteriores, principalmente el de 1957-58. Fue precisamente lo calmado de ese máximo lo que permitió los desembarcos sobre la Luna de 1969-1972; sin embargo, a pesar de esa relativa calma, en el curso del evento del 7/VIII/72, la dosis de radiación que incidiría en las paredes de un vehículo espacial, fue equivalente a los 1 080 rad, muy por encima de la dosis letal de 400 rad. De acuerdo al boletín emitido por el *Solar Forecaster* (vigilante solar) de la National Oceanic and Atmospheric (NOA) de Boulder, Colorado, tal evento en la fase decreciente del ciclo, es “como si nevara en Atlanta, Georgia en el mes de julio” (como si lloviera en Acapulco en el mes de diciembre). Fulguración excepcional por su carácter, ya que el caso precedente data de 1959, poco después también del pico de actividad, ocasión en que un mismo centro de actividad produjo varias fulguraciones sucesivas de efectos acumulativos. Durante el periodo 2 a 8 de agosto de 1972, el tránsito telefónico por cables coaxiales fue alcanzado por los efectos de superficie, ejemplo adicional de que no sólo la propagación ionosférica de radio ondas es afectada.

La fulguración de abril, 1981

El 10 de abril de 1981, una fulguración de las más intensas que se hayan registrado tuvo lugar 43 horas antes del lanzamiento de la nave tripulada *Columbia*: si ésta hubiese sido lanzada como estaba previsto originalmente el día 10 a las 12 hrs. T.U., la fulguración habría coincidido con la cuarta órbita de los astronautas Young y Crippen (Fig. 24), quienes habrían recibido una dosis de radiación tal, que sin duda les habría impedido volver al espacio por el resto de sus vidas; afortunadamente para los astronautas, una avería en la computadora obligó a diferir en 48 horas el primer vuelo de ese navío espacial. El 12 de abril los efectos de la fulguración se hacían aún sentir pero los protones más energéticos que conducían energías hasta de 500 MeV habían ya alcanzado la Tierra y habían sido absorbidos en gran

parte por los cinturones de radiación de Van Allen. Estos anillos de radiación juegan un papel benéfico, confinando parte del excedente de partículas cargadas que invaden nuestro medio ambiente a causa de las fulguraciones solares. Los astronautas del *Columbia* se beneficiaron entonces de esa protección, puesto que circularon por debajo. No obstante, esa protección se vuelve de carácter muy parcial para las fulguraciones particularmente intensas en protones, como ocurrió el 10 de abril en la ocasión del vuelo inaugural del *Columbia*. Los protones acelerados a energías superiores a los 10 MeV, particularmente, lograron pasar a través de las “mallas” de esa red protectora. El conteo de ellos indicó flujos hasta del orden de 300 protones/cm² seg después del filtrado por los cinturones de Van Allen. Tal flujo habría obligado a anular cualquier excursión fuera de la nave, si ésta hubiese salido normalmente, pues las escafandras no habrían constituido ninguna protección biológica adecuada. El flujo de protones de alta energía emitido en ese evento del 10 de abril de 1981, era tal que de ser recibida por los astronautas fuera de la nave con su simple escafandra, habrían perecido en un lapso no muy prolongado, pues la dosis excedía ampliamente la dosis letal. Una exposición de solamente una hora habría sido suficiente para provocar náuseas y vómitos. Los peligros están aún latentes para los astronautas que trabajan a bordo de transbordadores y estaciones (militares, por ejemplo) en órbita polar, ahí donde la protección de los anillos de Van Allen es prácticamente nula. En efecto, esa órbita, inclinada 90° respecto al ecuador terrestre, es la única que permite sobrevolar la casi totalidad del planeta (de ahí que se conciba fácilmente el interés primordial que representa para los militares), a pesar de los inconvenientes que ofrece en lo relativo a seguridad radiológica de los tripulantes. De ahí también, que ese evento del 10 de abril haya sido particularmente analizado por científicos, para conocer su desarrollo y comprender de manera más profunda las causas y los efectos.

Se sabe ahora que los sucesos se desarrollaron de la manera siguiente: *el 2 de abril* apareció una mancha aislada similar a las que aparecen regularmente sobre la superficie solar, que se insertan dentro de un conjunto más vasto, del tipo de los denominados *centros activos*. *Hasta el 7 de abril*, la mancha no cambió de forma; a partir de esa fecha una especie de erupción brotó en forma de mancha brillante, contigua a la mancha solar. *El 8 de abril*, 16 pequeñas manchas adicionales aparecieron alrededor de la original, y cinco nuevas erupciones brillantes se produjeron en la región. *El 9 de abril* se contaba ya con 29 manchas solares, y se sucedía la catorceava erupción brillante de la región. No había sin embargo ninguna razón aún para temer la ocurrencia de un

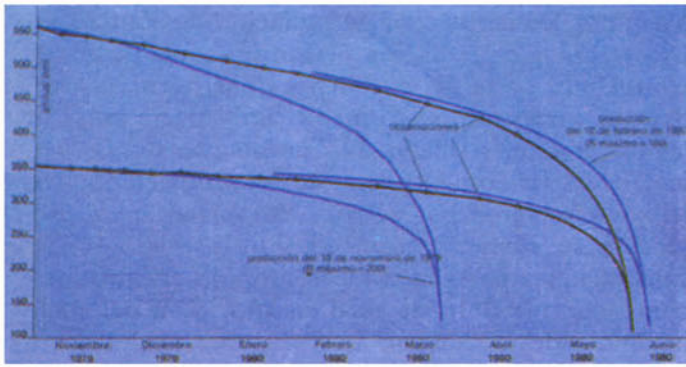


Figura 25. Ejemplificación del fenómeno de frenado de un satélite en la atmósfera terrestre con el satélite MAGSAT. Las curvas azules ilustran las predicciones para el frenado y las curvas negras lo ocurrido realmente durante el vuelo (acorde a R. Gendrin).

fenómeno más violento. Los magnetogramas, que según hemos descrito en *ICyT*, núm. 92, constituyen fotografías que permiten visualizar en el disco solar las zonas fuertemente magnetizadas, en forma de manchas blancas y negras (polaridades positivas y negativas respectivamente), mostraban claramente una estructura magnética más compleja que las ordinarias; sin embargo, no era para conmocionarse, pues no había algo verdaderamente excepcional. De repente, el 10 de abril en la mañana, la mancha inicial de polaridad negativa se rodeó de un rosario de manchitas alternativamente positivas y negativas. A unas pocas horas del lanzamiento previsto para el *Columbia*, se concibió entonces la presencia de un grupo de manchas poco usual, y que algo iba a ocurrir: 7 erupciones brillantes a manera de ráfaga dieron la señal del inicio de la gran fulguración, que como marejada sumergía a las 16:45 T.U. toda una región del disco solar, que en su máximo de extensión alcanzó a cubrir 2 mil millones de km^2 (o sea mil veces la superficie de México). El desplazamiento brutal de plasma solar producido por esa fulguración provocó una onda de choque que se propagó rápidamente por la corona, acompañada de grandes masas de plasma, que alcanzaron, 58 horas más tarde, la magnetosfera terrestre, provocando inmediatamente una *tormenta magnética* sumamente violenta, que dio lugar a una irrupción brusca de electrones en el campo magnético (las agujas imanadas se trastornaron de inmediato). Canalizadas por las líneas de fuerza del campo geomagnético, las partículas interactuaron notablemente con los átomos de la atmósfera alta, excitándolos, con la aparición subsecuente de magníficas auroras boreales. Una de ellas, particularmente intensa, se contempló en Canadá y EU; pero algo más inhabitual fueron las sobretensiones de la red eléctrica de alta tensión (medio millón de volts) que se manifestaron entre Dultun y Winnipeg. En Quebec, un transformador recién instalado

se quemó completamente. Los electrones que alcanzaron altitudes menores desorganizaron parcial y localmente la ionosfera entre 80 y 250 km de altitud, la que actúa como espejo reflector de ciertas ondas de radio: la gama de ondas cortas utilizadas generalmente para comunicaciones profesionales, la armada, la marina, la policía, etc. La tarde misma del 12 de abril, fueron señaladas perturbaciones radiotelefónicas en las frecuencias de la policía, particularmente en Topeka y Kansas. Sin embargo, las comunicaciones con el navío espacial no fueron interrumpidas, aunque estuvo sujeto como tantos otros satélites artificiales, que circulan a menos de 3 000 km de altitud, a un incremento de la densidad atmosférica. La temperatura en la exosfera, más allá de 600 km de altura, saltó bruscamente de 1 200 a 2 200°K, siendo el salto más brusco registrado en los 15 años precedentes. El calentamiento provocado en la atmósfera por las radiaciones corpusculares y electromagnéticas emitidas por el Sol, provocaron alto grado de agitación térmica de las moléculas atmosféricas que se repartieron a altitudes donde generalmente su densidad es muy débil. A los 200 km de altura en que circulaba el *Columbia*, la densidad de duplicó de $8 \times 10^{-13} \text{ gr/cm}^3$ a $1.7 \times 10^{-12} \text{ gr/cm}^3$ en el curso de unas cuantas horas.

El frenado atmosférico de la nave (Fig. 25) se encontró acrecentado proporcionalmente. Consecuen-

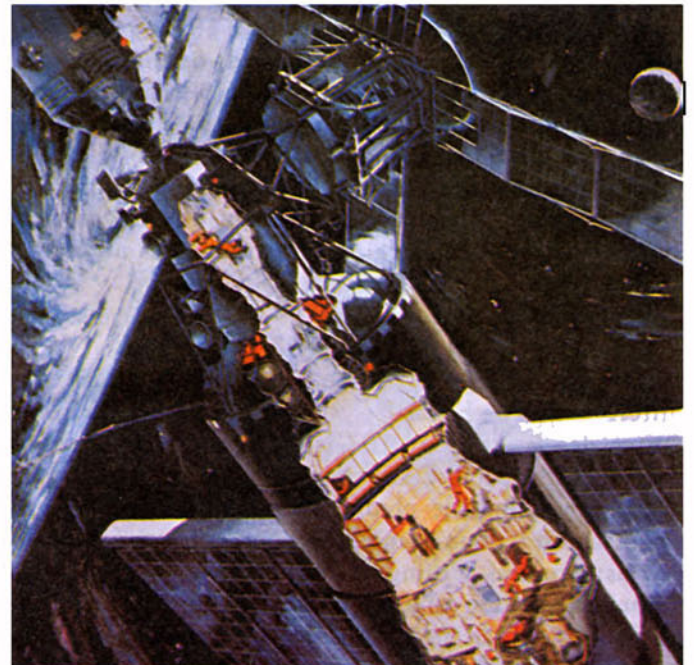
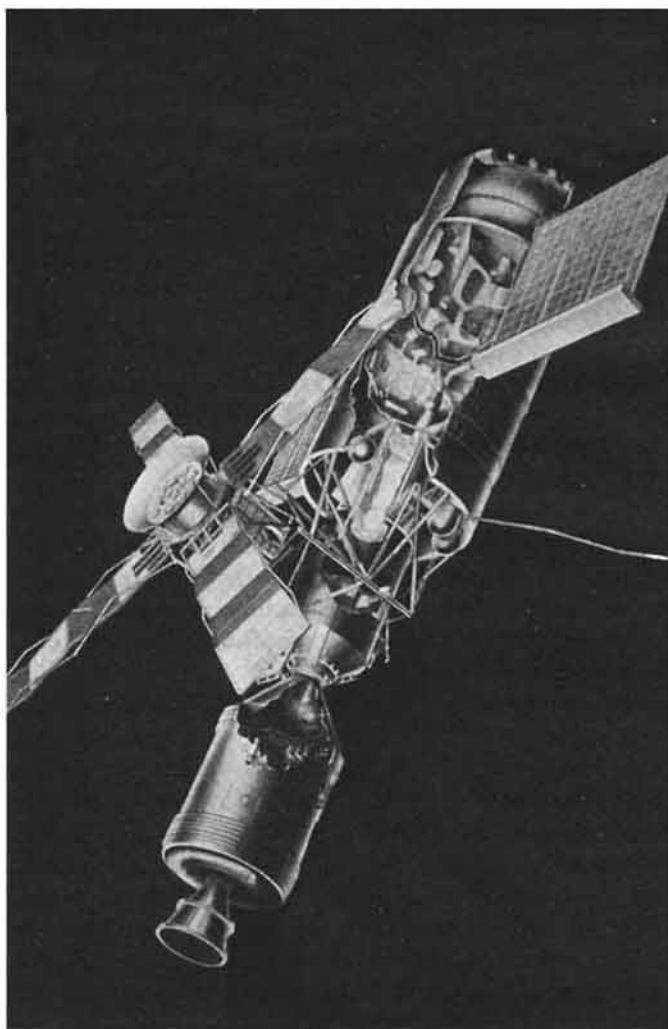


Figura 26. El Skylab, transportó ocho instrumentos para observación solar en el curso de cuatro diferentes misiones, tres de ellas tripuladas. De mayo 14 de 1973 a febrero 8 de 1974 obtuvo una cantidad tal de datos solares que enriqueció ampliamente el conocimiento de nuestra estrella. Probablemente los descubrimientos más modernos sobre el Sol provienen de estas expediciones en el Skylab.

temente, Young y Crippen tuvieron que poner en acción antes de lo previsto los motores-cohetes de maniobra, con objeto de mantener al *Columbia* en su órbita inicial, para evitar una caída prematura como sucedió en el *Skylab* (Fig. 26) en julio de 1979, a raíz de un incremento inesperado de la densidad atmosférica promedio.

La meteorología solar. Aquí cabe mencionar que el año de 1982 fue un año excepcional, ya que a pesar de haber transcurrido tres años desde el máximo de actividad solar (1979) del ciclo núm. 21 iniciado en 1976, sin embargo tuvo lugar un incremento en la frecuencia de fulguraciones y tormentas geomagnéticas respecto a lo que es común en ese periodo del ciclo. Entre los eventos más notables de 1982 hubo dos fulguraciones tipo X-12 y una tipo X-7. Del hecho de que la menos intensa (X-7) produjo la tormenta magnética más intensa de la última década (provocando distorsión del campo geomagnético, interrupciones de las comunicaciones de largo alcance, interferencia en las actividades en radio y una intensa aurora boreal que se extendió por varias latitudes) ha llevado a pensar a algunos investigadores que la



intercorrelación entre manchas solares y la actividad geomagnética no es tan simple y directa como se cree convencionalmente. Al efecto un decrecimiento del número de manchas ha sido observado desde 1979 y se espera que continúe hasta el mínimo de actividad solar de 1987: se cree generalmente que las fulguraciones y tormentas geomagnéticas evolucionan acorde a la evolución de las manchas solares y en consecuencia se esperaría que ambas decrecieran después del máximo de actividad solar, por lo que no se entiende aún bien a qué se debe ese incremento desarrollado en 1982, y ¿por qué aunque el número de tormentas geomagnéticas decreció después del máximo, sin embargo la intensidad promedio de ellas tendió a incrementarse, alcanzando el pico tres años después, en 1982? Aunque las tormentas ocurren durante todo el ciclo de actividad solar, sin embargo esta concentración reciente de actividad geomagnética y de fulguraciones tipo-X ha particularmente inquietado el interés de los científicos, ya que se producen "fuera de estación" desorientaciones en la emigración de las aves, incrementos en la corrosión de las tuberías de gas y petróleo, sobretensiones en líneas de potencia eléctrica, posible exposición a sobredosis de radiación solar de tripulantes de naves espaciales y de vuelos polares, etc., que normalmente se espera en periodos de máximo de actividad solar, es decir en el incremento y no en el decremento de la curva del ciclo solar.

Recientemente una secuencia prolongada de fulguraciones tuvo lugar en el lapso del 4 al 7 de febrero de 1986, dando lugar a una *tormenta magnética* el 8 de febrero que junto con la del 12-13 de julio de 1982 han sido las más intensas de las dos últimas décadas. Estos eventos solares dieron la oportunidad de probar la efectividad de las estaciones de datos interactivos a través del Sistema de Despliegue y Adquisición de Datos del Laboratorio Ambiental Espacial (SELDADS II) puesto en funcionamiento por el Centro de Servicios Ambientales Espaciales (SESC) de la Administración Atmosférica y Oceánica Nacional (NOAA) de los EU, para proporcionar alertas de las manifestaciones más tempranas de ese tipo de actividad solar, mediante satélites y estaciones terrestres. Muchos de los satélites en órbita terrestre e interplanetaria midieron los efectos de tal actividad solar: por ejemplo, el satélite Giotto de la Agencia Espacial Europea (ESA) en su ruta hacia la "cita" con el cometa Halley registró el pasaje de una onda de choque interplanetaria a 0.72 unidades astronómicas del Sol y 53° el oeste de la Tierra, el 8 de febrero. El satélite astronómico orbital polar MARECS I de la ESA experimentó una saturación en su sensor de rayos-X durante el periodo de las fulguraciones (4-7 de febrero). Dos satélites geoestacionarios de los Laboratorios Nacionales de los Alamos, Nuevo México, EU,

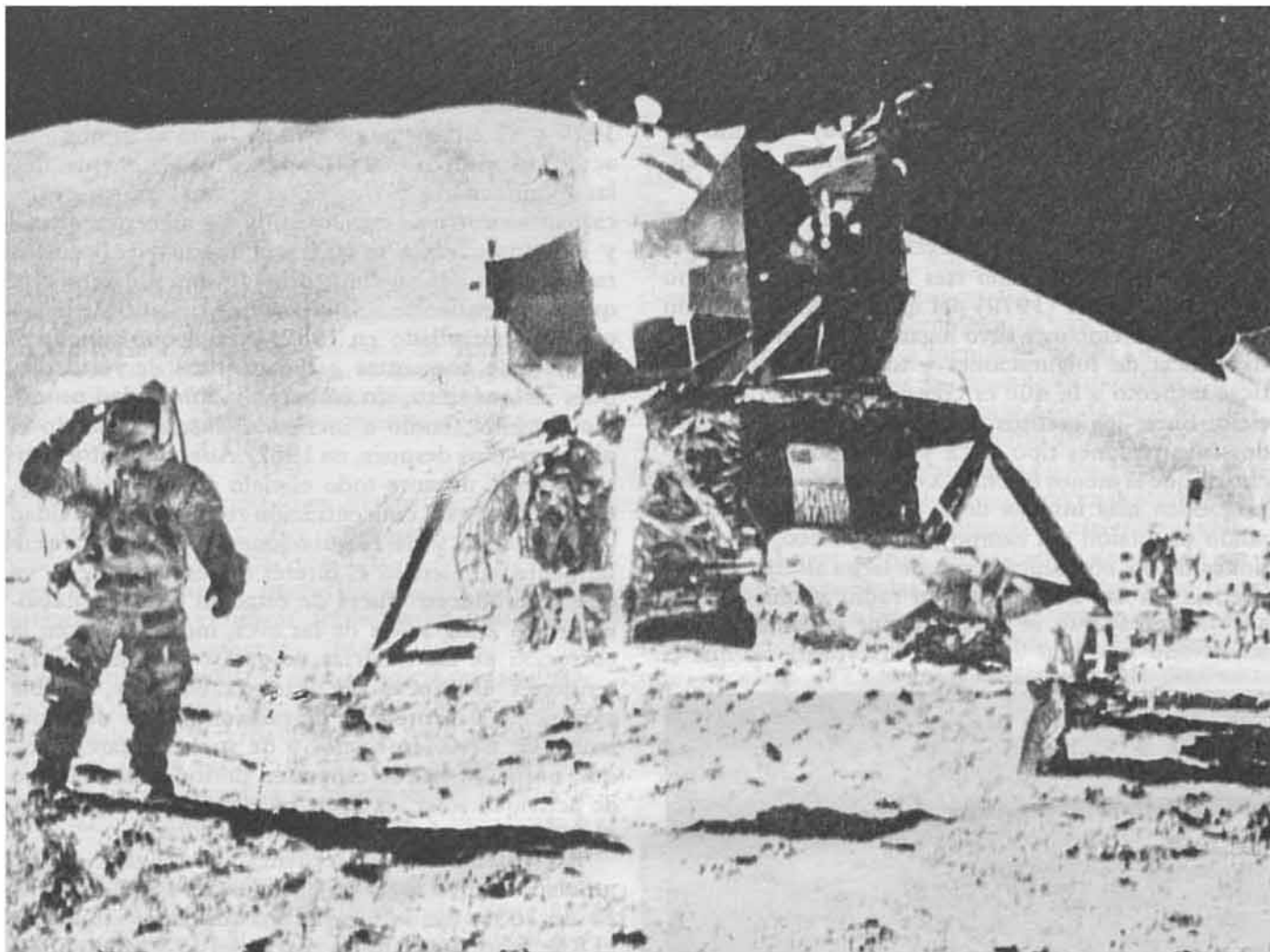


Figura 28. La nave Apolo en la superficie lunar.

registraron grandes incrementos de plasma energético simultáneamente a los registros del MARECS. Algunos satélites geosíncronicos de comunicaciones, satélites de navegación y vehículos espaciales de baja altitud experimentaron diversas anomalías e incluso serias desviaciones de sus órbitas. En varias localidades de la Tierra se reportaron diversas interrupciones en las radio-comunicaciones de enlace de alta frecuencia, y varios circuitos de las estaciones de microondas y telefónicas fueron dañados. Los magnetogramas de Canadá y EU muestran cambios magnéticos impresionantemente grandes. En College, Alaska se registraron las variaciones magnéticas más drásticas, jamás habidas en esa región. Los índices magnéticos Ap y Kp están entre los mayores registrados en los últimos 20 años. En Canadá existe un interés muy particular de carácter legal y científico asociado a los posibles efectos de los drásticos cambios de campo magnético del 8 de febrero, debido a una colisión frontal que ocurrió entre un tren de carga y uno de pasajeros; se pretende elucidar si *potenciales in-*

ducidos por las mencionadas variaciones magnéticas pudieron haber afectado un dispositivo de microondas que supuestamente controlaba el frenado del tren de carga.

Es por todo ello (particularmente por los frenados atmosféricos de las naves) y en base a los fenómenos esporádicos de las fulguraciones solares que se está desarrollando una nueva disciplina, *la meteorología solar*, que permita prever con suficiente anticipación la ocurrencia de esos eventos, así como alteraciones inducidas por el viento solar y nubes de plasma eyectada de centros activos, sobre los relativamente estables cinturones de radiación de Van Allen. En efecto, las partículas que pueblan esos anillos tienen un gran poder de penetración y pueden causar daños importantes en los sistemas electrónicos transportados, por no mencionar los peligros a los que se ven sometidos los seres humanos en los vuelos tripulados. Es verdad que se podrán tomar precauciones contra los efectos dañinos, protegiendo las partes sensibles con blindajes adecuados. Sin embargo, no es factible por

ahora blindar las celdas solares, las que están sujetas a degradaciones no despreciables por su exposición a los flujos intensos de estas partículas. Ciertamente, no todas las oleadas de protones tienen la intensidad de las que se produjeron el 23 de febrero de 1956, agosto de 1972 o abril de 1981. Y también es cierto que es posible disponer de un cierto margen de potencia en satélites geoestacionarios por periodos no mayores de cinco años, en caso de peligro para las celdas solares; sin embargo, no sucede lo mismo en proyectos en los que entran en juego periodos de vida mucho más largos, como podría ser el caso del *Solar Power Satellite* (SPS) (Satélite de Potencia Solar) (Fig. 27). En tal proyecto se intentaba enviar al espacio cerca de 100 km² de paneles solares, cuya energía almacenada sería radiada en forma de microondas y recolectada al nivel del suelo. Sin embargo, la rentabilidad de una operación de tal índole no está asegurada, a menos de poder garantizar al sistema un periodo de vida superior a los treinta años; pero, ¿quién puede prever hoy en día, con un alto margen de seguridad, el número y la intensidad de las oleadas de partículas energéticas que ocurrirán dentro de los próximos treinta años? En el caso específico de los vuelos *Apolo* (Fig. 28), la NASA puso en marcha en los años sesenta una red de alerta a las fulguraciones solares para el estudio de los riesgos representados, en aquella ocasión, por las duchas de partículas solares, siendo hoy en día aún el sistema más completo de alerta que funciona. En realidad para el *Apolo*, los riesgos eran limitados, en razón de la duración relativamente corta de los mismos (ocho días a lo máximo). Las cosas serán muy diferentes en la era de la ocupación continua del espacio, pues el efecto de radiaciones sobre el organismo es acumulativo: no es más peligroso el recibir de una sola vez la dosis de radiaciones ionizantes admitidas para el ciclo entero de la vida de un ser humano de aproximadamente 70 años, vecina a las 1 000 rads (equivalente a 300 mil radiografías), que el recibir 200 rads por año durante 5 años, lo que entrañaría la jubilación anticipada de un astronauta en vuelo durante ese lapso. Es por ello que los especialistas se preocupan por prever con certitud esas fulguraciones, a fin de evitar una sobredosis de radiación en instalaciones tales como las macroceldas solares del SPS, o en los astronautas que en el futuro se encuentren en puestos fijos en el espacio exterior. Desafortunadamente, estas previsiones son actualmente imprecisas y aleatorias, pues reposan esencialmente sobre correlaciones estadísticas que han sido establecidas entre la morfología de ciertos grupos de manchas y la ocurrencia de las fulguraciones. Al presente, la mejor documentación de que disponen los físicos solares para penetrar en el secreto de las fulguraciones, ha sido obtenida gracias al telescopio

solar embarcado en la estación *Skylab* en 1973 y a la *Misión del Máximo de Actividad Solar* (SMM) (Fig. 29), puesto en órbita en el *Satélite Automático Especializado* (SAS) en febrero de 1980, misión en la cual participaron 400 físicos solares y plasmólogos de 17 países. Ese satélite llamado también *Solar Max*, quedó inutilizable, siendo recuperado posteriormente por el telemanipulador de la nave espacial. A raíz de esta campaña se sabe en particular que los procesos de aceleración de partículas en el Sol necesitan un ángulo de $\sim 3^\circ$ entre el frente de onda de la onda de choque de la fulguración y el campo magnético prevaleciente; el problema ahí, es que los campos magnéticos de la atmósfera solar tienen una estructura extremadamente tortuosa. Se necesitaría toda una red de pequeños telescopios en órbita proveyendo, en tiempo real, imágenes de los campos magnéticos de la cromosfera, corona y fotosfera, de tal suerte que ligeras derivas de intensidad de esos campos serían evidenciadas en media hora, en lugar de todo un día como sucede actualmente. El desarrollo anormal de algunas características magnéticas podrían señalarse inmediatamente.

En fin, los físicos solares conocen actualmente con cierto margen de precisión lo que sucede en la superficie solar, resta a los especialistas de otras disciplinas establecer las correlaciones adecuadas. El objetivo de esta nueva *meteorología solar* es entonces de carácter dual, comprender el origen de las fulguraciones y poner a punto un método de previsión. Las principales inquietudes de los responsables de programas espaciales son entonces, no solamente disminuir el riesgo de irradiación para los ocupantes de navíos y estaciones espaciales, sino también prever la pérdida de altitud de los vehículos por frenado atmosférico causado por cambios bruscos de densidad y temperatura, trastornos en la estabilidad de los anillos de Van Allen y trastorno a instrumentos sensibles tales como las celdas solares. . . *En las décadas que vienen, vamos a presenciar una ocupación permanente del espacio por el hombre y sus vehículos espaciales, dinámica en la que ineludiblemente se verán obligados a participar, en mayor o menor grado, los llamados países en vías de desarrollo, aun aquéllos que no han resuelto sus necesidades más primordiales, con tal de que dispongan de un cierto potencial de especialistas. Una vez involucrados en el conocimiento de la Ciencia y la Tecnología, al igual que de la Cultura, se establece un proceso cuya evolución, aunque no se fomenta, no puede tampoco inhibirse (pues es de carácter irreversible), a riesgo de provocar la emigración del conocimiento, con la subsecuente dependencia tecnológica, como ya se ve en algunos de nuestros países obligados a adquirir en otros de mayor desarrollo tecnológico, satélites artificiales de múltiples utilidades socioeconómicas.*