

Meteorología Espacial

Blai Sanahuja

La magnetosfera terrestre nos protege muy eficientemente de las perturbaciones espaciales generadas por la actividad solar. El choque de proa de la magnetosfera evita que penetren en el entorno de la Tierra buena parte de las partículas generadas en esas tormentas y, además, controla la formación de subtormentas magnéticas. Pero la magnetosfera no puede contener todos los efectos de los choques interplanetarios e impedir que se generen tormentas magnéticas cuyas consecuencias alcanzan cotas suborbitales y la superficie terrestre. Los vuelos interplanetarios y la exploración planetaria implican salir del manto protector de la magnetosfera, sometiendo a astronautas, instrumentos y utillaje embarcados a una segura exposición a la radiación generada por la actividad solar y los rayos cósmicos, con los riesgos que ello representa. La Meteorología Espacial trata de dar soluciones operativas a estos problemas.

1. Introducción

Una tormenta geomagnética es una perturbación transitoria intensa del campo magnético terrestre, casi siempre consecuencia de la interacción de la magnetosfera terrestre con un choque interplanetario generado por una Eyección de Masa Coronal (EMC) solar. Las manifestaciones visibles más conocidas que suelen acompañar a una tormenta geomagnética son las auroras boreales y australes; el óvalo auroral generado por la tormenta del 14 de julio de 2000 fue detectado y registrado por el satélite de exploración magnetosférica IMAGE (figura 1). Las auroras no son el único efecto de las tormentas geomagnéticas; ésta de julio, por ejemplo, fue responsable de la pérdida del satélite japonés ASCA. La tormenta del 13 de marzo de 1989, dejó fuera de servicio –en apenas diez minutos– la red de producción y distribución de energía eléctrica de Quebec y Montreal, quedando a oscuras durante casi

un día buena parte de sus áreas metropolitanas. Además, numerosos transformadores eléctricos resultaron dañados; su sustitución costó millones de euros y se estimaron unas pérdidas de casi medio millón de euros por día. De hecho, toda la red eléctrica del noreste del Canadá y de los Estados Unidos estuvo a punto de sufrir un colapso general. Otras tormentas geomagnéticas han sido responsables de la caída prematura del observatorio Skylab (en 1979), de las disfunciones sufridas por los satélites de comunicaciones canadienses Anik E-1 y -2 (1994) o, más recientemente, la pérdida del satélite de comunicaciones Telstar 401, valorado en 130 millones de dólares.

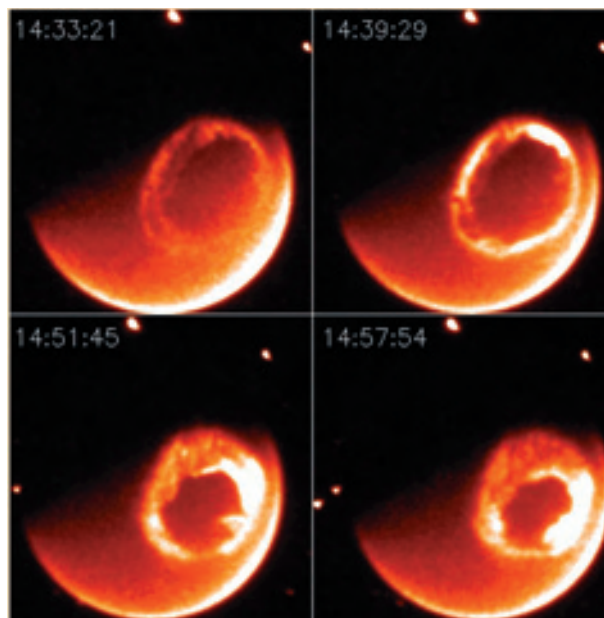


Figura 1. Satélite IMAGE (Imagen for Magnetopausa-to-Aurora Global Exploration). Secuencia temporal de imágenes del óvalo auroral generado por la tormenta magnética del 14 de julio de 2000. Las cuatro imágenes han sido tomadas por la cámara FUV en el ultravioleta lejano (121,6 nm y 135,6 nm); este instrumento tiene capacidad para resolver la aurora de protones y de electrones, y calcular su estructura y densidad. Son evidentes los rápidos cambios que tienen lugar en el óvalo en apenas una hora. Foto cortesía de NASA (<http://gts.gsdoc.nasa.gov/>).

Las EMCs intensas generan ondas de choque magnetohidrodinámicas en el viento solar; estos choques pueden producir flujos de partículas energéticas, por ejemplo protones con energías entre 30 keV y 100 MeV (a veces hasta algunos GeV). Las fulguraciones solares también aceleran partículas pero en general los flujos son menos intensos que los inducidos por las EMCs. Bajo el nombre de 'tormentas solares' aquí englobaremos los diversos tipos de actividad solar cuyos efectos se propagan por el medio interplanetario, generando perturbaciones importantes en el viento solar. Los choques interplanetarios se expanden a lomos del viento solar, mientras que las partículas energéticas lo hacen describiendo espirales a lo largo del campo magnético asociado. Estas tormentas también son peligrosas por la dosis de radiación que puede recibir un astronauta, sea durante actividades extravehiculares o en largas travesías espaciales. Para más detalles, ver [1, 2 y 3].

La asociación entre la actividad solar, las tormentas geomagnéticas y sus efectos es un hecho bien establecido. Las primeras noticias corresponden a crónicas de hace casi 150 años; el 2 de septiembre de 1859, la línea telegráfica entre Boston y Nueva York funcionó durante casi una hora 'tan sólo con baterías celestes', en palabras de un ingeniero de la American Telegraph Co. Los sistemas de comunicación vía satélite y los de navegación (Loran, GPS, Omega, Galileo, etc.), así como los radares de defensa aérea, quedan afectados por las perturbaciones que aparecen en la ionosfera media y alta. La electrónica embarcada en satélites puede sufrir un incremento de su carga eléctrica a causa de una tormenta; los sistemas de control a bordo resul-

tan afectados de forma espuria por subsiguientes descargas electrostáticas, o por pulsos electromagnéticos de ruido, y puede producirse un deterioro general de las superficies expuestas del satélite. En los oleoductos aparecen irregularidades en los instrumentos de aforo y la corrosión prematura es un problema real en el oleoducto Trans-Alaska. En los países nórdicos, las alteraciones que se producen en los sistemas de control ferroviario suponen un importante problema de seguridad.

El primer indicio de la tormenta espacial del 14 de julio de 2000 fue la detección de una imponente EMC por el coronógrafo LASCO, a bordo del observatorio espacial SOHO (Solar Heliospheric Observatory), situado a 0,99 AU del Sol (una unidad astronómica, 1 AU = 149,6×10⁶ km), justo por delante de la Tierra; casi simultáneamente, el telescopio ultravioleta EIT de SOHO detectó la fulguración solar que la acompañaba. En algo menos de una hora SOHO fue barrido por una ráfaga de protones y electrones de alta velocidad. Unas 26 horas más tarde llegaron el frente del choque interplanetario (viajando a 1.500 km s⁻¹) y el grueso de las partículas aceleradas en él. El impacto y posterior interacción con la magnetosfera originó una tormenta magnética que desencadenó efectos similares a los ya descritos. La actividad magnética solar varía con el ciclo solar de 11 años y las tormentas geomagnéticas reflejan ese patrón; su periodicidad, sin embargo, puede quedar modulada por otros procesos que producen efectos similares. Por ejemplo, las regiones corrotacionales interactivas, asociadas con los chorros de viento solar de alta velocidad generados por los agujeros coronales, también pueden producir tormentas geomagnéticas; pero sus efectos se incrementan hacia el mínimo solar, y no hacia el máximo.

2. Física de la relación Sol-Tierra. Meteorología Espacial

La Física de la relación Sol-Tierra es un campo interdisciplinario uno de cuyos principales objetos es el estudio de la interacción de las partículas cargadas con los campos magnéticos existentes en el espacio, entre el Sol y la vecindad de la Tierra. En este marco, la energía de la mayor parte de las partículas deriva del Sol o de la interacción entre el viento solar y la magnetosfera de la Tierra. Además de energía y partículas, el Sol aporta variabilidad espacial y temporal al sistema viento solar - magnetosfera, el cual constituye un imponente generador que transforma la energía cinética del movimiento del plasma del viento en energía eléctrica. Esta transformación involucra diversas y complejas interacciones pues los campos magnéticos que determinan el movimiento de las partículas son a su vez afectados por el movimiento de éstas, según sean las condiciones locales. De forma sucinta, puede decirse que la relación entre la energía cinética específica de las partículas y la energía específica del campo magnético dicta las características de su interacción [4 y 5]. Otro aspecto importante dentro de la Física de la relación Sol-Tierra es el estudio de la variabilidad de la constante solar (flujo de energía fotónica por segundo y metro cuadrado, medido a 1 AU) y sus efectos en la atmósfera de la Tierra; aquí nos referiremos exclusivamente a las partículas, plasmas y campos magnéticos.

La Meteorología Espacial (Space Weather) remite al estudio de las condiciones en el espacio que afectan a la Tierra, a sus sistemas tecnológicos y de aquéllas que ponen en peligro la vida humana o la salud [6 y 7]. La Meteorología Espacial se ocupa de la previsión, de la predicción en tiempo real y a medio plazo de las tormentas solares y de sus consecuencias espaciales y geomagnéticas, y del análisis de los riesgos que existen para astronautas o tripulaciones de vuelos a gran altura. Se ocupa también de las condiciones adversas en el entorno espacial que dan lugar a disfunciones en las operaciones de satélites, comunicaciones, navegación y en las redes terrestres de distribución de energía eléctrica, así como de las potenciales pérdidas socio-económicas que generan [8]. La figura 2 muestra un diagrama con los diversos agentes de este campo, las interrelaciones entre ellos y los efectos más importantes que inducen. Los mecanismos que producen diferentes tipos de perturbaciones pueden ser cadenas causales fácilmente reconocibles, como los efectos ionizantes de las fulguraciones en la atmósfera terrestre; en muchos casos, sin embargo, las conexiones son más complejas y sutiles, como ocurre con las auroras que no siempre siguen a una actividad solar específica.

3. El viento solar y el campo magnético interplanetario

El viento solar es un flujo de partículas solares ionizadas –protones, electrones y una pequeña cantidad de otros iones– y un remanente del campo magnético solar que llena el medio interplanetario, formando la heliosfera. Por las observaciones de las sondas Pioneer y Voyager sabemos que el viento solar se extiende más allá de la órbita de Neptuno; los modelos teóricos indican que los confines de la heliosfera probablemente se encuentren al doble de esa distancia. La existencia del viento solar fue propuesta por L. Biermann en 1940 para explicar la formación de las colas iónicas de los cometas; en 1958, E. Parker propuso un modelo hidrodinámico

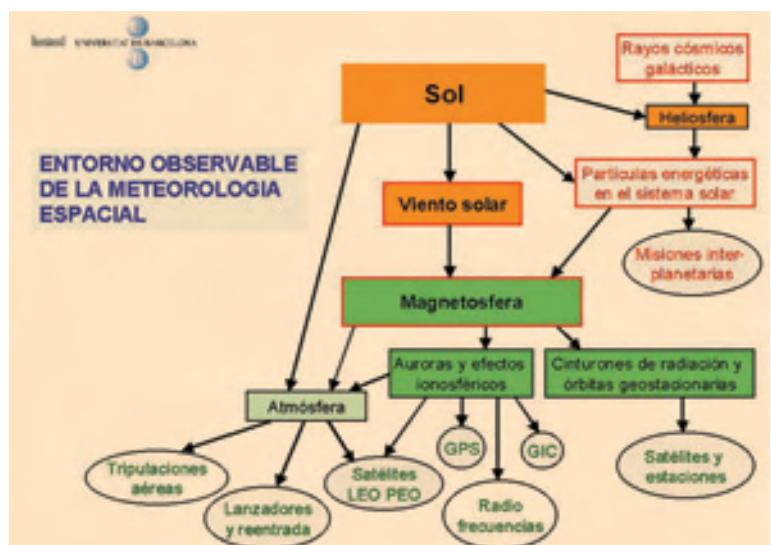


Figura 2. Entorno observable en Meteorología Espacial. El diagrama muestra los tres componentes principales del escenario: El Sol, el viento solar y la magnetosfera terrestre. Los efectos en la atmósfera, superficie terrestre y en el espacio interplanetario se muestran en óvalos; las flechas de flujo señalan las interacciones o dependencias causales entre ellos. (LEO: Low Earth Orbit, PEO: Polar Earth Orbit.)

mico sobre su origen y propagación. Pero no fue hasta 1962, gracias al satélite Explorer 10 y a la sonda Mariner 2, que se tuvo confirmación observacional de su realidad. La velocidad media del viento solar a 1 AU es de 430 km s^{-1} , aunque puede variar entre 200 y 1.000 km s^{-1} . Su densidad es inferior a 10 part. cm^{-3} ; en términos de densidades terráqueas se trata de un vacío casi absoluto, pero su presencia es fundamental porque constituye el sustrato sobre el cual los efectos de la actividad solar se propagan hasta la Tierra y por toda la heliosfera.

El viento solar es consecuencia de la gran diferencia de presión existente entre la caliente corona solar ($\sim 40 \text{ mPa}$) y el frío medio del espacio interestelar (que a 1 AU es de $\sim 30 \text{ pPa}$); este gradiente de presión produce la expansión del plasma solar hacia el espacio, a pesar de que la gravedad solar intenta mantenerlo confinado en su entorno coronal. La interrelación entre el plasma que constituye el viento solar y el campo magnético interplanetario puede describirse –muy aproximadamente– gracias a la condición de 'campo magnético congelado'. Se trata de una consecuencia de la ley de Faraday: en un plasma eléctrico conductor el campo eléctrico en el sistema de referencia natural del plasma debe ser nulo si no existen corrientes eléctricas en su seno. Como resultado de esta condición, el campo magnético interplanetario es transportado por el viento solar y, debido a la rotación solar, sus líneas de campo se combinan adoptando la forma de una espiral arquimediana. La intensidad media del campo magnético interplanetario a 1 AU es de 5 nT ; su dirección forma un ángulo de $\sim 45^\circ$ con la línea Sol-Tierra y su polaridad ($\pm 180^\circ$) depende de la dirección del campo magnético coronal en el cual está enraizado cada tubo de flujo.

La expansión del viento solar, y las variaciones tanto en su génesis como las asociadas a la actividad solar, dan lugar a una amplia variedad, y variabilidad, de sus propiedades, encontrándose situaciones experimentales difíciles, por no decir imposibles, de reproducir en el laboratorio. Dos ejemplos: (a) las colisiones entre partículas son casi inexistentes en el espacio interplanetario; el tiempo característico para una colisión protón-protón es de 15 horas mientras que su tiempo de vuelo Sol -Tierra es inferior a 1,5 horas. (b) La temperatura de los protones del viento solar (una medida de su energía cinética media) es distinta de la de los electrones (a 1 AU, $1,2 \times 10^5 \text{ K}$ y $1,5 \times 10^5 \text{ K}$ respectivamente) y ambas pueden presentar distintas anisotropías en las direcciones perpendicular y paralela al campo magnético interplanetario.

4. La magnetosfera de la Tierra

El campo magnético terrestre actual se describe en primera aproximación como un dipolo cuyo eje está desviado $11,3^\circ$ respecto al eje de rotación de la Tierra; su momento dipolar vale $8 \times 10^{22} \text{ A m}^2$ y viene decreciendo desde el siglo XVI. La intensidad del campo magnético en el ecuador es de $\sim 30.000 \text{ nT}$, y aproximadamente el doble en los polos. Los estudios geológicos muestran la existencia de inversiones de polaridad en el campo geomagnético con tiempos característicos muy dispares, de millones de años a decenas de miles de años; no sabemos si se trata de variaciones de intensidad con cambio de polaridad, o si son debidas a una rotación continua del eje dipolar.

La interacción entre el viento solar y el campo magnético de la Tierra fue descrita por primera vez por S. Chapman y V. Ferraro, en los años 30. El viento solar confina el campo magnético terrestre en una cavidad que rodea el planeta, la magnetosfera. El tamaño de la magnetosfera queda determinado por el balance entre la presión del viento solar y la del campo geomagnético en una superficie límite - la magnetopausa (figura 3). Por la parte diurna, la enfrentada al Sol y contracorriente al viento solar, la magnetopausa se extiende unos $10 R_\oplus$ (un radio terrestre, $1 R_\oplus = 6.370 \text{ km}$) por delante de la Tierra, aunque puede encogerse hasta $6,5 R_\oplus$ si aumenta la presión dinámica del viento. Por la parte posterior, la nocturna, y corriente abajo se forma la magnetocola, que tiene un grosor entre 40 y $60 R_\oplus$ y que se extiende más de $900 R_\oplus$. La zona de la magnetosfera controlada por el campo magnético terrestre (corrota con ella) se conoce como plasmasfera. En la región diurna, contracorriente de la magnetopausa, se forma un choque de proa (o arco de choque) en el cual el viento solar supersónico se termaliza y deviene subsónico. Su flujo alrededor de la magnetopausa crea una capa de plasma turbulento denominada magnetofunda o vaina magnética; el destino final de este plasma es reunirse con el viento solar no perturbado en la parte posterior de la cavidad magnetosférica.

Al principio de los años 60, J.W. Dungey se percató de la importancia de los procesos de reconexión magnética en los plasmas magnetosféricos. Si las líneas del campo magnético se debilitan mucho, o si se dan cambios (espaciales o temporales) bruscos en su sentido, puede no ser válida la condición de campo magnético congelado. En esta situación, las líneas de campo se 'difunden' en el plasma y, si existen regiones del plasma con polaridad magnética opuesta, esas líneas pueden romperse y reconectarse, dando lugar a una nueva

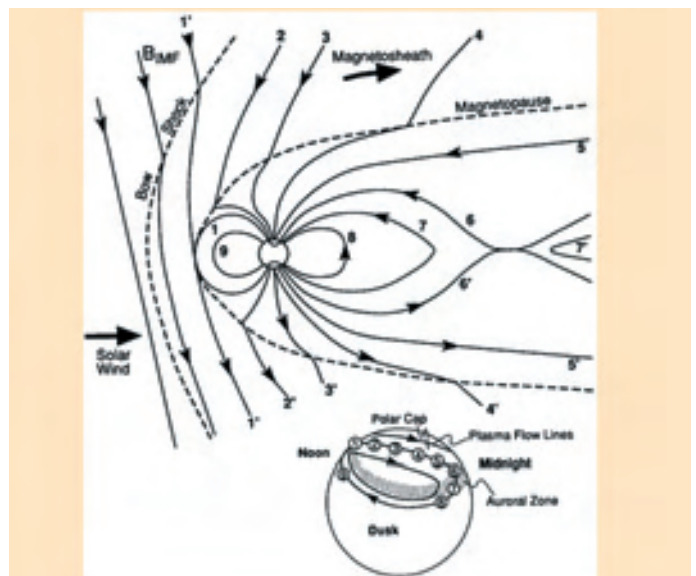


Figura 3. Flujo de plasma dentro de la magnetosfera conducido por la reconexión magnética que se desarrolla en la parte diurna de la magnetosfera (ver texto). Las líneas de campo numeradas muestran la sucesión de configuraciones por las que una línea geomagnética de campo (1) pasa después de reconectarse con una línea del campo magnético interplanetario (1'). Las líneas de campo 6 y 6' se reconectan en un segundo punto de la magnetocola, después de lo cual retorna a bajas latitudes. La inserción inferior muestra la posición de la base de estas líneas de campo numeradas en el hemisferio norte, a altas latitudes ionosféricas, y los correspondientes flujos de plasma en las regiones polares.

topología magnética. Estas reconexiones son complejas pues tienen lugar en presencia de plasmas que conducen fácilmente la corriente eléctrica, la cual genera nuevos campos que a su vez dan forma al plasma. En la parte central externa de la magnetopausa y el choque de proa las líneas del campo interplanetario se pueden reconectar con las magnetosféricas; la tensión magnética que ejercen estas nuevas líneas acelera el plasma que ha penetrado en la magnetosfera, alejándolo del lugar donde se ha producido la reconexión. En consecuencia las líneas de campo se comprimen alrededor de la magnetopausa y son transportadas hacia la magnetocola; este flujo fue identificado por primera vez por los satélites ISEE-1 y -2, en 1978.

El plasma del viento solar en la magnetosfera fluye hacia la magnetocola, transportando campos magnéticos congelados de polaridad opuesta en el lóbulo magnetosférico septentrional (el superior) y en el meridional. En algún punto de la parte nocturna la condición de congelamiento magnético se relaja, creándose una región de difusión en la cual esos campos magnéticos se reconectan; dicha región es la capa o lámina de plasma, una delgada capa del centro de la magnetocola, unos $90 R^*$ detrás de la Tierra. El plasma expulsado en una reconexión producida en esta capa puede moverse hacia la Tierra, renovando el plasma interno de la magnetosfera, o fluir corriente abajo, reintegrándose en el viento solar. El ritmo de las reconexiones en la región diurna es mayor cuando el campo magnético interplanetario tiene dirección sur, opuesta al campo ecuatorial de la Tierra; cuando tiene dirección norte el flujo magnético acaba 'perdiéndose' en el medio interplanetario.

5. Actividad solar y choques interplanetarios

Las fulguraciones son un fenómeno explosivo en la superficie del Sol que involucra una importante liberación de energía, las más intensas $10^{24} - 10^{25}$ W en unas horas. Las EMCs representan un fenómeno violento de eyección de material coronal (figura 4) a causa de la disrupción de una estructura magnética estable (durante días o semanas) al abrirse al espacio, tras sufrir una importante reconfiguración. En el proceso de reconexión parte de la energía magnética almacenada se transforma en energía cinética o mecánica; la masa involucrada en una EMC está entre 10^{12} y 10^{13} kg y su velocidad en la corona varía entre 50 y 2.000 km s^{-1} . Las EMCs expulsan al medio interplanetario parte del material cromosférico y coronal contenido en esas estructuras cerradas. Hasta que se dispuso de coronógrafos espaciales (Skylab, Helios, SolarMax, etc.) no fue posible disponer de observaciones coronales precisas y sistemáticas de las EMCs; se constató entonces que no existe una relación causal entre EMCs y fulguraciones, aunque con frecuencia éstas acostumbra acompañar a aquéllas. Existen otros fenómenos solares menos energéticos que también pueden dar lugar a perturbaciones interplanetarias, como las desapariciones de filamentos quiescentes o los agujeros coronales.

Los choques magnetohidrodinámicos en el medio interplanetario se identifican por los cambios característicos que originan a su paso, en particular un aumento rápido de la densidad, velocidad y temperatura del plasma, y un salto brusco –aumento o disminución– en la intensidad del campo magnético (figura 5). Entre $0,3$ y 1 AU , sus características

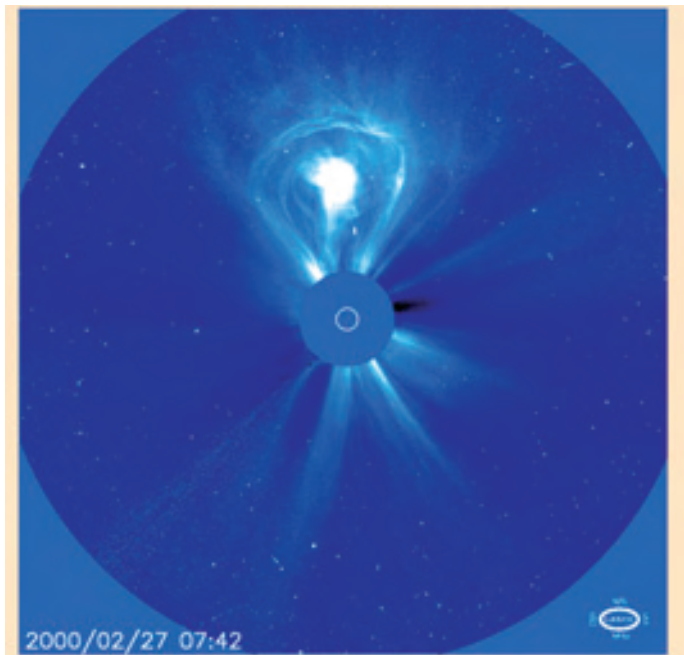


Figura 4. A las 2300 UT del 26 de febrero de 2000 pudo verse la erupción de un largo filamento solar en las imágenes del telescopio ultravioleta EIT (Extreme ultraviolet Imaging Telescope) a la luz de $19,5 \text{ nm}$ emitida por los iones de Fe XII, hierro que ha perdido once electrones. Aproximadamente una hora más tarde se observó una inmensa eyección de masa coronal en las imágenes del coronógrafo LASCO (Large Angle and Spectrometric Coronagraph). El disco del coronógrafo oculta la región más brillante de la corona; el campo total es de $30 R_E$ y el Sol es del tamaño del círculo blanco central. Ambos instrumentos están embarcados en SOHO [11]. Cortesía de NASA/GSFC y ESA.

básicas son: una relación de compresión hidrodinámica entre 1 y 8, una relación de compresión magnética entre 1 y 7, y velocidades en el viento solar entre 300 km s^{-1} (sólo observables en regímenes de viento solar muy lento) y 2.000 km s^{-1} (el valor medio es 600 km s^{-1}). Los parámetros del choque están ligados a propiedades de la EMC como su velocidad inicial, extensión angular y energía total liberada en la eyección; varían también según se trate de una EMC explosiva, con alta velocidad inicial y que desacelera rápidamente en el medio interplanetario, o de una EMC de progresión lenta y que varía gradualmente. Los flujos de partículas asociados a un choque interplanetario son los 'sucesos solares de partículas' (SEP, Solar Energetic Particle); dependiendo de la energía de las partículas, la fuerza del choque y la posición del observador en el espacio (entre otras variables), los SEPs muestran un importante incremento del flujo de partículas con la llegada del choque (figura 6).

A 1 AU , la estructura que frecuentemente se observa unas 12 horas después del paso del frente del choque - identifíquese como flujo bidireccional de protones o electrones, rotación suave y ordenada del campo magnético o nube magnética, contiene parte de la EMC original. Aproximadamente sólo un tercio de las EMCs conducen choques interplanetarios y, sin embargo, aparentemente todos los choques interplanetarios están dirigidos por una EMC, aunque no siempre se observa su presencia pues depende de la posición relativa del observador interplanetario respecto al frente del choque.

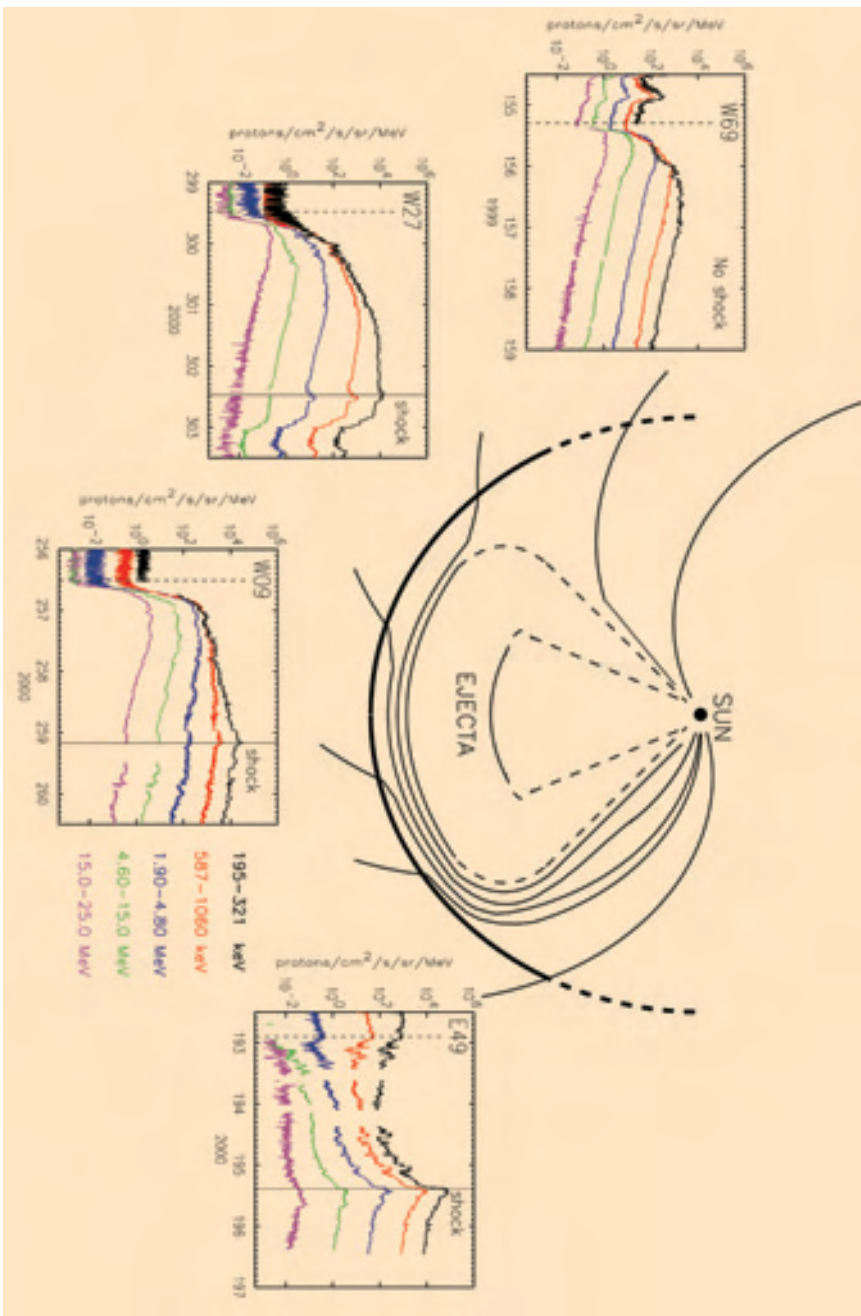


Figura 5. Datos del campo magnético interplanetario y del plasma del viento solar que muestran un choque interplanetario y la nube magnética conductora que le sigue. Son observaciones de la sonda interplanetaria Helios-1; de arriba a bajo: Flujo de densidad del campo magnético, y altura y acimut del campo. Velocidad del viento solar, densidad y temperatura del plasma de protones. Las líneas verticales indican el choque y los límites de la nube magnética, respectivamente. (L. F. Burlaga, en *Physics of the inner heliosphere*, vol. II. Eds. R. Schweenn y E. Marsch, 1991. Springer Verlag, Berlín.)

6. Subtormentas y tormentas magnetosféricas

No todas las tormentas solares generan grandes perturbaciones geomagnéticas; las condiciones necesarias para que se produzca una tormenta son que la perturbación interplanetaria –con choque o no– se propague en la dirección adecuada, que tenga la suficiente fuerza magnetohidrodinámica y que la componente vertical del campo magnético asociado tenga polaridad adecuada (componente vertical opuesta a la del campo magnetosférico). Cuando se dan esas condiciones

se puede producir una subtormenta magnetosférica, una evolución ordenada, no suave y rápida (de 1 a 3 horas) en la magnetosfera que genera variaciones del campo magnético terrestre de 200 a 2.000 nT. El flujo de energía transportado por el viento solar es pequeño (10 mW m⁻²) y sólo un 1 % de él se transfiere a la magnetosfera. Sin embargo, los efectos de una subtormenta resultan aumentados en uno o dos órdenes de magnitud por dos factores: el almacenamiento de energía en la magnetocola y la descarga de esa energía sobre una pequeña área de la superficie terrestre, las zonas aurales.

El agente principal del proceso es la reconexión magnética que se desarrolla en la lámina neutra de la magnetocola, donde se almacenan las partículas provenientes del viento solar; las partículas son aceleradas y parte de ese plasma es lanzado de vuelta hacia las regiones polares, con velocidades entre 500 y 1.000 km s⁻¹. En una subtormenta pueden llegar a transferirse 10¹¹ W del medio interplanetario a la ionosfera (70 – 700 km de altura), lo que provoca un calentamiento considerable de la atmósfera por encima de los 100 km. Parte de las partículas que penetran por las cúspides polares, puntos de emergencia de las líneas del campo geomagnético en los polos, caen hacia la atmósfera; su caída es frenada por los iones o moléculas de hidrógeno, nitrógeno y oxígeno de la alta atmósfera, a las cuales transfieren energía. Su posterior desexcitación luminiscente es la causa de las auroras.

Si la orientación sur del campo magnético interplanetario persiste, el sistema pasa por un ciclo de subtormentas. Una tormenta magnética se define como una acumulación de subtormentas que genera una perturbación transitoria de más del 1% de la intensidad del campo magnético terrestre, su duración típica es de 1 a 5 días. Una tormenta se inicia con un brusco crecimiento de la componente horizontal del campo geomagnético, a continuación este valor cae muy por debajo del original durante más de un día y sigue una fase de recuperación de varios días. Su distribución temporal sigue una ley de potencias, tormentas suaves (índice Dst < 150 nT, ver [3]) casi cada mes, unas pocas intensas (150 – 300 nT)

al año, y muy pocas extraordinariamente intensas (> 500 nT) en cada ciclo solar (por ejemplo, las citadas en la introducción). En una tormenta intensa la plasmasfera puede reducirse a 1/4 de su radio, en tal caso, la órbita geostacionaria sale de ella y los satélites allí situados se ven afectados por los movimientos del plasma magnetosférico y las separaciones de carga inducidas. El movimiento de las partículas que se precipitan sobre las regiones polares genera un electrochorro auroral a 100 - 150 km de altura. Las corrientes eléctricas no uniformes inducidas por este chorro pueden tener una inten-

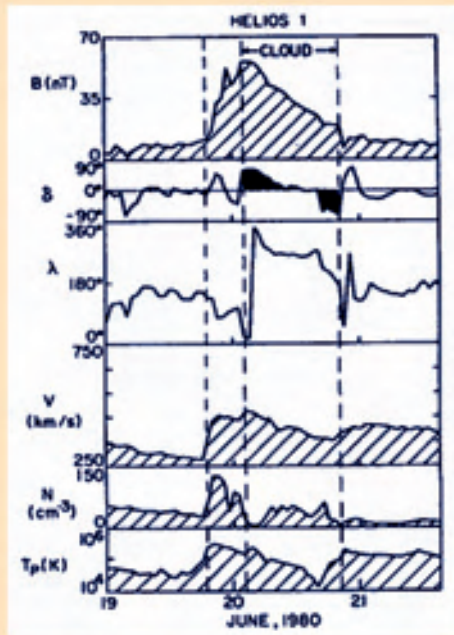


Figura 6. Perfiles temporales de flujos de protones para cuatro sucesos SEP observados por el detector EPAM, a bordo de la sonda ACE y por el detector CPME (alta energía), en el satélite IMP8. Corresponden a perfiles típicos de sucesos SEP generados desde diferentes longitudes solares, respecto al observador. La línea a trazos en cada gráfico identifica el momento en que se produce la actividad solar que desencadena todo el evento, la línea continua señala el paso del choque interplanetario por la posición del observador. Cortesía de D. Lario (Johns Hopkins University).

sidad de 106 amperios y crear perturbaciones en el campo geomagnético equivalentes a la producción de un generador de 107 MW. Estas perturbaciones se conocen como GICs (Geomagnetic Induced Currents); el período típico de estas fluctuaciones es de 6 minutos, por consiguiente, los flujos inducidos actúan a modo de una intensa corriente continua.

7. Ejemplos y repercusión. Modelos operativos

Durante la tormenta del día 13 de marzo de 1989 un gran transformador en New Jersey (USA) quedó sometido a unas GICs que alcanzaron los 80 A, cuando sólo precisaba de una corriente alterna de 2 a 4 A para producir la excitación adecuada de su núcleo de hierro. Éste sufrió una situación de extrema saturación durante el medio ciclo de la corriente alterna y el flujo magnético interno derivó hacia su entorno próximo, calentándolo por disipación y destruyendo los aislantes. El resultado final fue que en determinadas zonas del transformador se alcanzaron los 400 °C.

Los puntos más vulnerables de la corteza terrestre a la acción de las corrientes inducidas son los que se hallan sobre rocas ígneas pues su elevada resistencia eléctrica hace que las GICs se disipen a través de las líneas de transmisión de fluido eléctrico, o de los generadores eléctricos, situados sobre dichos terrenos. Las interconexiones de alto voltaje en la red de distribución de energía eléctrica permiten que ésta pueda ser transportada a miles de kilómetros de distancia de su lugar de producción; en estas condiciones, el potencial eléctrico geoterrestre (~7 V/km) puede generar flujos muy elevados de corrientes inducidas. La circulación de dichas

corrientes por la red hace que los transformadores se conviertan en consumidores de potencia reactiva y en fuente de corrientes armónicas. Un aumento desmesurado de la potencia reactiva puede superar la capacidad de reacción del sistema, las corrientes parásitas pueden dañar los sistemas de protección u otros elementos críticos de la red. Los circuitos de muy alta tensión de largo recorrido transportan más de 1.000 MW en una sola línea; una elevada pérdida de carga de forma repentina e imprevista puede producir un severo choque sobre el sistema, dañándolo irremediablemente. Aunque se ha empezado a tomar medidas de seguridad, las redes de producción y distribución de energía han ido creciendo y extendiéndose de forma acelerada, y transportando más energía; en consecuencia, los sistemas son cada vez más vulnerables a las tormentas geomagnéticas.

La radiación de partículas que alcanza la Tierra proviene de la radiación cósmica, un fondo permanente de origen galáctico, y de las partículas generadas por la actividad solar, cuyo flujo puede aumentar entre 1.000 y 100.000 de veces, en unas horas o unos pocos días. Los efectos de la exposición diaria a la radiación cósmica, al nivel del mar, supone una dosis equivalente de 0,4 mSv/año [9]. (Una radiografía equivale a unos 0,02 mSv, y se estima que la probabilidad de contraer un cáncer para una población de 100.000 personas es de 0,05 por sievert.) El National Council on Radiation Protection and Measurements establece un límite anual de dosis equivalente en todo el cuerpo de 5 mSv, para las personas en general, y de 50 mSv para trabajadores en entornos de radiación. La dosis equivalente recibida en un vuelo comercial varía con la altura y con la latitud; su valor máximo es de unos 20 mSv/hora en un viaje de dos horas sobre los polos a 10 km de altura, es decir, el doble de la dosis de radiación diaria para un vuelo polar en el Concorde. La directiva 96/29 del Euratom para el personal de navegación aérea, de aplicación obligatoria a partir del 13 mayo de 2000, establece que: 'El personal de navegación no debe exponerse a una dosis de 100 mSv durante 5 años consecutivos, con la condición de que en un año no se sobrepase la dosis de 50 mSv' [10].

En el interior de la Estación Espacial Internacional la dosis equivalente estimada para la irradiación causada por una fulguración solar es de 140 mSv por erupción, y de 100 mSv cada 6 horas si se trata de una actividad extravehicular (EVA). En una misión Tierra-Luna la dosis equivalente que un astronauta recibe está entre 1 y 3 Sv/día; por tanto, se hace necesario disponer de un blindaje protector adecuado y una alerta de una hora como mínimo. El gran suceso de protones del 4 de agosto de 1972 dio lugar a irradiaciones de 7 Sv/hora en la superficie de la Luna. Este suceso tuvo lugar entre las misiones Apolo 16 y 17, separadas apenas medio año; de haber coincidido con una de ellas, los astronautas hubiesen recibido una dosis mortal de 15 Sv. La estrategia de protección durante los paseos lunares del programa Apolo consistía en la detección de partículas relativistas asociadas a una fulguración, unos 30 minutos después de que ésta se hubiera producido. Dada la alerta, los astronautas debían refugiarse en el módulo de comando esperando la llegada del grueso del suceso de partículas unas 5 horas más tarde; se asumía el paradigma –hoy sabemos que erróneo– de las fulguraciones. En un viaje a Marte es una certeza que los astronautas quedarán expuestos a dosis excesivas de radiación si

no se toman las adecuadas precauciones, puesto que dura 100 veces más que un viaje Tierra - Luna. Se precisaría una zona blindada con 50 g cm⁻² de aluminio para garantizar la seguridad de los (más de 7) astronautas de la misión. Una base en la superficie de Marte tendría un riesgo un 25% menor, aún muy considerable, y algo parecido ocurriría para una base en cualquier planeta o cuerpo espacial sin magnetosfera protectora.

La dificultad básica para realizar cualquier predicción está en que depende de cómo va a ser usada, y se complica más aún por el hecho de que un instrumento en el espacio puede resultar afectado de diferentes formas. Por ejemplo, la degradación de los componentes electrónicos y la pérdida de potencia de los paneles solares depende de la cantidad total de radiación que reciben todo el tiempo, mientras que los SEEs (Single Event Effects) son debidos a una única partícula que deposita una cantidad de energía suficiente en un espacio sensible de un instrumento electrónico. Los riesgos ante la radiación de los astronautas dependen de flujo máximo de partículas que reciben, pero también de la fluencia de partículas (el flujo de partículas integrado en tiempo y energía).

Los diseñadores de misiones espaciales precisan previsiones con varios años de adelanto para evaluar las necesidades ambientales de las sondas o naves. Si han de ser completamente seguras debe definirse el 'peor caso posible' y proceder a partir de él; pero en muchos casos no hay tal 'peor caso', sea por desconocimiento de los mecanismos físicos involucrados o por falta de datos estadísticos. Las EVAs precisan una predicción del orden de meses, y la metodología de su aplicación es distinta de las anuales; una determinada EVA que presenta un riesgo de radiación de 1 sobre 10 puede ser considerada aceptable, pero no si dicha relación es de 1 a 2. La decisión sobre si desconectar una red eléctrica en previsión de una tormenta geomagnética fuerte ha de tomarse en cuestión de horas, o de un día a lo sumo; en este caso es más una cuestión de prevención que de predicción.

¿Cuán útiles y robustos son los modelos de predicción en tiempo real y a medio plazo? En el escenario interplanetario los modelos que simulan el origen de la actividad solar y las ECMs no son operativos todavía. Los códigos que predicen máximos flujo y fluencias de partículas dan resultados que están uno o dos órdenes de magnitud, como mínimo, por debajo de los valores observados (nuestro trabajo está en la línea de resolver este problema). Por otra parte, las predicciones medias a 1 - 3 días sobrestiman de forma sistemática

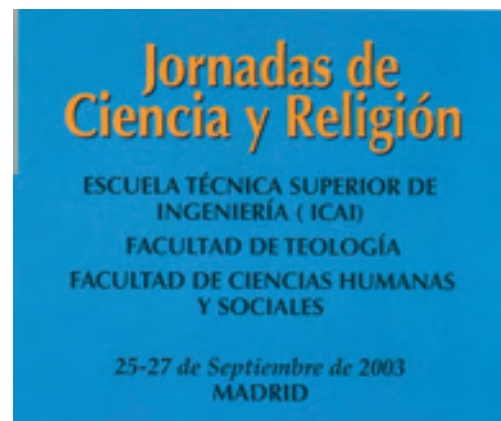
la probabilidad de que se produzca un gran suceso de partículas. Los modelos para predicción en tiempo real son inexistentes, excepto las prealertas de media hora que puedan proporcionar las observaciones desde sondas situadas en el punto lagrangiano interno del sistema Sol-Tierra. En el campo magnetosférico existen modelos operativos más desarrollados; su utilidad queda acotada por la dependencia de las condiciones de contorno fijadas por el medio interplanetario y la actividad solar. Ésta es la situación actual, de ahí los programas a medio y largo plazo impulsados por las agencias espaciales y climáticas (NASA, ESA, NOAA, NSDA) y por diversos países [11].

8. Referencias

- [1] H. KOSKINEN, E. TANSKANEN *et al.* Rationale for an European Space Weather Programme. Finnish Meteorological Institute (2001). ESA (Off. A. Hilgers) ESWS-FMI-RP-0002.
- [2] National Space Wether Program Strategic Plan. Office of the Federal Coordinator for Meteorological Services and Supporting Research (1995). FCM-P30-1995. Silver Spring, MD (USA).
- [3] P. SONG, H.J. SINGER Y G.L. SISCOE. Space Weather. Geophysical Monograph n. 125, *American Geophysical Union* (2001). ISBN: 0-87590-984-1
- [4] M.G. KIVELSON Y C. T. RUSSELL. Introduction to Space Physics. Cambridge University Press (1996). ISBN 0-521-45714-9.
- [5] M. B. KALLENRODE (1998) *Space Physics*. Springer Verlag. ISBN : 3-540-64126-2.
- [6] R. TURNER (1996) Foundations of solar particle event risk management strategies. ANSER Technical Report, Arlington, Virginia.
- [7] Radiation and the International Space Station. (2000) National Academic Press, Washington, DC. ISBN 0-309-06885-1.
- [8] H. KOSKINEN, E. TANSKANEN *et al.* (2001). Space Weather effects catalogue. Finnish Meteorological Institute. ISBN: 951-697-537-2.
- [9] Efectos de la radiación cósmica. Dosimetría. S.I.E.V.E.R.T., <http://www.sievert-system.org>.
- [10] In-Flight Radiation Protection Services (<http://robbarish.tripod.com>). High Altitude Radiation Services (<http://www.sover.net/~radcount>).
- [11] Webs. Iniciativas rusas en Meteorología Espacial, <http://alpha.upi.msu.ru/RSWI/rswi.html>. Programa NASA Living with a Star, <http://sec.gsfc.nasa.gov/lws.htm>. NOAA/SEC, <http://www.sec.noaa.gov>. ESA, Studies on Space Weather, <http://www.estec.esa.nl/wmwww/spweather/spweathstuctures.htm>. SOHO, Current Space Weather, <http://sohowww.nascom.nasa.gov>. Más conexiones sobre Física de la relación Sol-Tierra y Meteorología Espacial, <http://www.am.ub.es/~blai>.

Blai Sanahuja

*Departament d'Astronomia i Meteorologia
Facultat de Física. Universitat de Barcelona*



www.upco.es