



Día internacional Sol - Tierra

27 de abril de 2001



- Los sonidos del Sol.*
T. ROCA CORTÉS
- La corona solar.*
T. ROCA CORTÉS
- ¿De qué está hecho el Sol?*
T. ROCA CORTÉS
- El ciclo de actividad solar.*
A. EFF-DARWICH,
B. GARCÍA-LORENZO
- La rotación del Sol.*
C. RÉGULO RODRÍGUEZ
- Influencia de la actividad solar
en las misiones espaciales.*
F. HERRERA CABELLO
- Las barreras de la Tierra contra
la influencia solar.*
M. VÁZQUEZ ABELEDO
- Conviviendo con una estrella.*
I. RODRÍGUEZ HIDALGO
- Magnetismo solar: la clave para
descifrar los enigmas del Sol.*
J. TRUJILLO BUENO
- Un viaje al Sol.*
A. JIMÉNEZ MANCEBO
- Las futuras misiones
heliosféricas de la Agencia
Espacial Europea.*
V. MARTÍNEZ PILLET
- ¿Por qué los astrónomos
estudian el Sol?*
J. SÁNCHEZ ALMEIDA



El día 27 de abril, las agencias espaciales estadounidense y europea celebraron el quinto aniversario del lanzamiento del satélite SOHO organizando el Día internacional Sol-Tierra. El Instituto de Astrofísica de

Las actividades organizadas por el IAC -a través de su Área de Investigación, su Gabinete de Dirección y sus Observatorios del Teide y del Roque de los Muchachos-, junto con el Departamento de Astrofísica de la ULL y el Museo de la Ciencia y el Cosmos de Tenerife, en el marco de la campaña «El Sol, la estrella de nuestra vida», se orientaron hacia diferentes tipos de público:



Se difundieron en la prensa local y nacional una serie de artículos divulgativos firmados por astrofísicos del IAC y de la ULL, más notas de prensa anunciadoras de los eventos. A través de los Centros de Profesores (CEP) se estableció una colaboración con los Centros de Enseñanza Secundaria y Bachillerato de Canarias para hacer llegar al alumnado la filosofía de la campaña, facilitando y promoviendo un mayor conocimiento del Sol y su influencia sobre nosotros. Se organizaron charlas de divulgación sobre el mismo tema en museos y centros culturales, que fueron impartidas por científicos del IAC y la ULL. Finalmente, se celebró una jornada de puertas abiertas en los telescopios solares del Observatorio del Teide.

Canarias (IAC) participó en esta iniciativa lanzando una campaña de divulgación de la Física Solar con el lema "El Sol, la estrella de nuestra vida". Esta campaña consistió en una serie de actividades para el público en general que tuvieron lugar los días 27 y 28 de abril. El IAC, en colaboración con el Departamento de Astrofísica de la Universidad de La Laguna (ULL) y el Museo de la Ciencia y el Cosmos, se sumó así al esfuerzo de divulgación simultáneo en centros educativos, museos, planetarios, etc. de Europa y de Estados Unidos, orientado a extender a la sociedad el conocimiento del Sol, su influencia en la vida sobre la Tierra y su estudio desde observatorios en tierra y en el espacio. La campaña incluía la difusión de una serie de artículos de divulgación firmados por especialistas en el estudio del Sol, que fueron publicados en prensa local y nacional y que se reproducen en este suplemento especial dedicado al Día internacional Sol-Tierra.

El resultado de la campaña fue altamente positivo. En lo referido a los artículos de prensa, en este especial se reproducen los artículos publicados en medios de comunicación locales y de ámbito nacional. En total se generaron más de 40 noticias en prensa y numerosas entrevistas en radio y televisión, tanto regional como nacional.

La labor realizada con los centros de enseñanza consistió en ofrecer al profesorado, a través de los CEP, material didáctico audiovisual y escrito sobre el Sol procedente de la NASA y convenientemente traducido y adaptado por personal del IAC, de modo que los docentes interesados pudieron contar con charlas y material de apoyo ya preparado para impartir sus clases. En total se distribuyeron 71 paquetes de material didáctico a profesores que lo solicitaron, además de 114 CD-Rom con material didáctico y sobre el satélite SOHO, que fueron distribuidos a los 19 CEP de todas las islas, y 150 carteles divulgativos y conmemorativos de las jornadas que fueron repartidos entre los centros de enseñanza de las islas. Además, el material, junto con enlaces de interés y una selección de imágenes de la galería del Instituto, se colocó en una página especial dedicada a la campaña dentro de la página web del IAC (<http://www.iac.es/educa>).

El mismo día 27 de abril se impartieron 8 charlas divulgativas: 5 en Tenerife, 2 en La Palma y 1 en Gran Canaria, que estuvieron a cargo de especialistas en Física Solar del IAC y de la Universidad de La Laguna.

Por último, a modo de clausura de las actividades del Día internacional Sol-Tierra, las instalaciones solares del Observatorio del Teide abrieron sus puertas a unos 2.500 visitantes a lo largo del día 28 de abril. (Ver última página de este suplemento).

Más información:
<http://www.iac.es/educa/sol-tierra/pagweb/pre.htm>
 Revistas del IAC:
<http://www.iac.es/gabinete/iacnoticias/iacnot.htm>

Coordinación del contenido de este suplemento:
 Begoña López Betancor y Carmen del Puerto
 Diseño: Gotzon Cañada y Begoña López Betancor

Los sonidos del Sol

Prof. Teodoro Roca Cortés
Universidad de La Laguna
Instituto de Astrofísica de Canarias



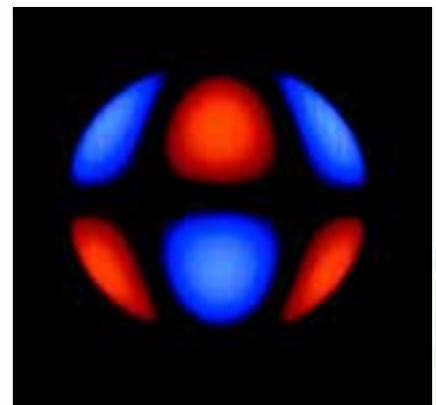
La luz visible que nos llega del Sol procede de su superficie, una finísima capa cuyo espesor es de sólo un 0,1% de su radio. Por tanto, podemos decir que el Sol mismo con su luz nos impide ver qué hay debajo de la superficie y cuáles son las condiciones físicas en las que está el plasma allí. Consecuentemente, lo que conocemos del funcionamiento del interior solar es fruto de las predicciones de modelos matemáticos que construimos utilizando la física conocida. Así es que la pregunta: ¿podemos obtener información cuantitativa de lo que sucede en el interior solar?, tiene perfecto sentido. La respuesta es afirmativa y, en este corto relato, voy a tratar de explicarles la técnica necesaria para ello.

Si acercamos nuestro oído a uno de los raíles de la vía del tren, somos capaces de saber si un tren ha pasado o va a pasar por allí dentro de poco. Lo que hacemos en realidad es detectar el sonido que producen las ruedas del tren en su contacto con los raíles y que se propaga desde allí hasta nuestra oreja (el detector) mucho más rápido que el tren. El sonido se propaga en forma de ondas acústicas; y la forma o cómo lo hace depende del medio en el que se propaga, es decir, del material del que están hechos los raíles. Si son de hierro o de cualquier otro metal o aleación, el sonido se propaga de forma más o menos rápida.

Estas ondas que se propagan a lo largo de los raíles hasta que se desvanecen se llaman «ondas viajeras». El caso de un instrumento musical, de una cuerda de un timble por ejemplo, es ligeramente distinto. Podemos tocar una de sus cuerdas (una dimensión), la onda viajera se transmite a lo largo de la cuerda en ambas direcciones y llega a ambos extremos; allí se refleja y ambas vuelven hacia atrás, llegan otra vez a los extremos, se reflejan y así sucesivamente. Cuando se encuentran unas con otras se produce el fenómeno de interferencia; la consecuencia es que en algunos puntos de la cuerda el movimiento se cancela (nodos) y en otros se amplifica, dependiendo de la longitud de la cuerda, de su tensión y del material de que está hecha. De esta forma, se selecciona qué ondas pueden permanecer vibrando; estas ondas se llaman «estacionarias» y, como sólo dependen de cada situación particular, se las llama también modos propios de vibración de la cuerda. De esta forma, si podemos medir su frecuencia o su longitud de onda (el doble de la distancia entre nodos), podemos saber qué estructura está vibrando. Para afinar el timble (que el sonido emitido tenga la frecuencia correcta), tenemos que cambiar las condiciones del mismo; como no podemos cambiar la longitud ni el material de la cuerda, cambiamos la tensión a la que está sometida. Obviamente, cualquier instrumento de cuerda funciona de forma parecida. Otros instrumentos, como los de viento, funcionan igual sólo que, en este caso, lo que vibra es el aire en los tubos de las trompetas, trombones, trompas, etc...

De forma semejante podemos razonar con un instrumento algo más complicado cómo es un tambor (dos dimensiones). Cuando lo golpeamos, producimos ondas acústicas que se propagan hasta donde estamos nosotros. Pero si nos fija-

mos en la frecuencia del sonido, veremos que cambia dependiendo de si golpeamos (con la misma fuerza y en el mismo sitio) un tambor pequeño u otro grande, o dos del mismo tamaño pero de diferente material. Los modos propios de vibración en cada caso son diferentes y tienen diferentes frecuencias. Como pueden ver, las frecuencias de estas vibraciones nos revelan no sólo de qué instrumento se trata, sino que también nos informa de su estructura (grande o pequeño, material de que está hecho, tensión, etc...). En general, en una orquesta musical cuando están afinando los instrumentos, la misma nota emitida por cada uno de ellos «suena» diferente y su director lo sabe, porque los instrumentos tienen diferente «timbre», tienen



Simulación de oscilaciones solares.
ã IAC.

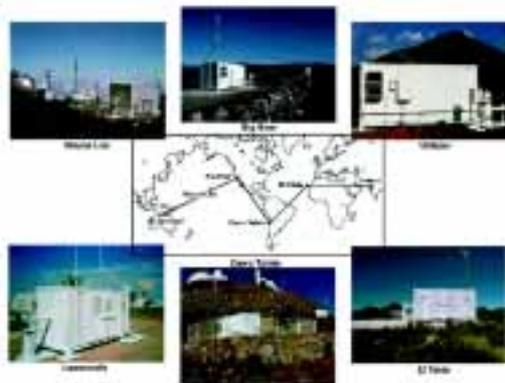
diferentes modos de vibración. Toda estructura física tiene sus propios modos de oscilación cuyas frecuencias definen su estructura.

Modernamente este tipo de técnicas han encontrado gran aplicación en diferentes campos, en concreto la medicina. Hasta hace unos 30 ó 40 años era imposible ver el interior del cuerpo humano sin utilizar un bisturí y abrir al paciente o irradiándolo con rayos X

(dañinos a grandes dosis). Ahora se suelen utilizar diversas técnicas que permiten hacerlo de forma menos traumática, como la ecografía. Estoy seguro de que las mujeres saben bien a qué me refiero ya que ahora pueden ver el feto antes de que haya nacido, es decir, dentro de su propio vientre. Mediante el ecógrafo se envían ondas de sonido (ultrasonidos) que penetran en el vientre y se reflejan parcialmente en lo que van encontrando. El análisis de estas ondas reflejadas es el que permite «ver» qué hay allí dentro, sin necesidad de verlo con nuestros propios ojos sino con el ecógrafo. Ahora este aparato se usa ampliamente en la medicina interna y en otras ramas. También se utiliza en la industria para el análisis de estructuras, en la construcción, etc...

Esta es también la técnica que usan los geofísicos para conocer el interior de nuestro planeta Tierra. Explosiones, terremotos u otras perturbaciones en la corteza terrestre excitan los modos de vibración propios de la Tierra que pueden ser hasta de varios millones; el estudio de parte de ellos o todos en su conjunto por medio de sismógrafos ofrece la posibilidad de conocer la estructura de las capas que atraviesan.

Bueno, pues de forma similar podemos conocer el interior de nuestro Sol. Si, ya sé que no podemos ir al Sol y golpearlo o enviarle ultrasonidos; tampoco podemos instalar allí sismógrafos. No hay necesidad. El propio Sol se encar-



Nodos de la Red GONG en todo el mundo. El instalado en el Observatorio del Teide (Tenerife) fue el segundo de ellos en entrar en funcionamiento. Imagen cortesía de la Red GONG.

ga de autoexcitarse a través de movimientos turbulentos en su interior (convección). Estos crean ondas de sonido que se propagan por su interior, se reflejan y vuelven hasta la superficie deformándola ligeramente; tan ligeramente, que estas deformaciones son menores que una diez millonésima parte de su radio. Sucede algo parecido en el mar o los océanos, su superficie se ve deformada por las olas, que no son sino manifestaciones superficiales de la acción de las ondas que se propagan por su interior. De esta forma, observando la superficie solar con heliosismógrafos muy precisos, ya sea en el Observatorio del Teide (en Tenerife) o en el satélite SOHO, podemos descubrir las frecuencias de las ondas que se propagan por su interior y, de su estudio, podremos deducir las características físicas del interior solar por donde ellas se propagan. Así pues, los sonidos del Sol nos envían información de cómo es por dentro. Sus frecuencias se sitúan alrededor de 3 milihertzios, que corresponden a una longitud de onda de unos 5 minutos; nosotros, los humanos, no podemos oírlos directamente ya que nuestros oídos sólo son sensibles a vibraciones de frecuencias entre 100 y 20.000 hertzios, pero los heliosismógrafos sí pueden detectarlos.

No sólo podemos conocer su estructura, sino también su dinámica. En efecto, si el interior solar está girando afectará a las frecuencias de las ondas acústicas, pero no de la misma forma a todas. Estudiando cómo les afecta podemos llegar a conocer cuál es la velocidad de rotación a diferentes profundidades en el Sol. Así, la superficie del Sol, que gira más rápido en el ecuador que en los polos, mantiene este tipo de giro hasta una profundidad de 2/7 partes de su radio; a partir de allí, la rotación es igual en todos sus puntos, como si fuera una bola (sólido rígido). Esta capa está situada justo debajo de donde empieza el transporte energético por convección.

Para poder medir estos pequeñísimos desplazamientos ha habido que esperar hasta hace un par de décadas. En trabajos pioneros realizados en el Observatorio del Teide por investigadores del IAC y de la Universidad de Birmingham (Inglaterra) se pusieron a punto tanto las técnicas instrumentales como de observación. El desarrollo de ambas ha pasado por el establecimiento de redes mundiales de heliosismógrafos, como la red GONG por ejemplo, y finalmente ha culminado en tres instrumentos a bordo del satélite SOHO, los GONG, VIRGO y MDI construidos por consorcios internacionales de científicos de diferentes países, en los que han participado los del IAC. El resultado de todo ello es que el conocimiento cuantitativo del interior solar es hoy una realidad, descubriendo gran cantidad de fenómenos que ocurren allí y aportando datos numéricos que ayudan a desvelar la bella complejidad del funcionamiento de una estrella, nuestro Sol.

En particular, podemos comparar ahora las predicciones de los modelos físico-matemáticos antes mencionados con las medidas heliosísmicas. En general, comprobamos que dichos modelos explican bien, *grosso modo*, el funcionamiento solar. No obstante, cerca de la base de la zona de convección no lo hacen y tampoco cerca del núcleo solar. Ambas zonas son de capital importancia ya que en la primera es donde se cree que se acumula el campo magnético solar antes de aflorar a la superficie en forma de manchas, mientras que la segunda es donde se produce la energía solar por medio de reacciones termonucleares. Las medidas heliosísmicas son tan precisas que permiten distinguir estos detalles y, por tanto, han revelado nuevos conocimientos y auguran otros interesantes para un futuro inmediato.

La corona solar

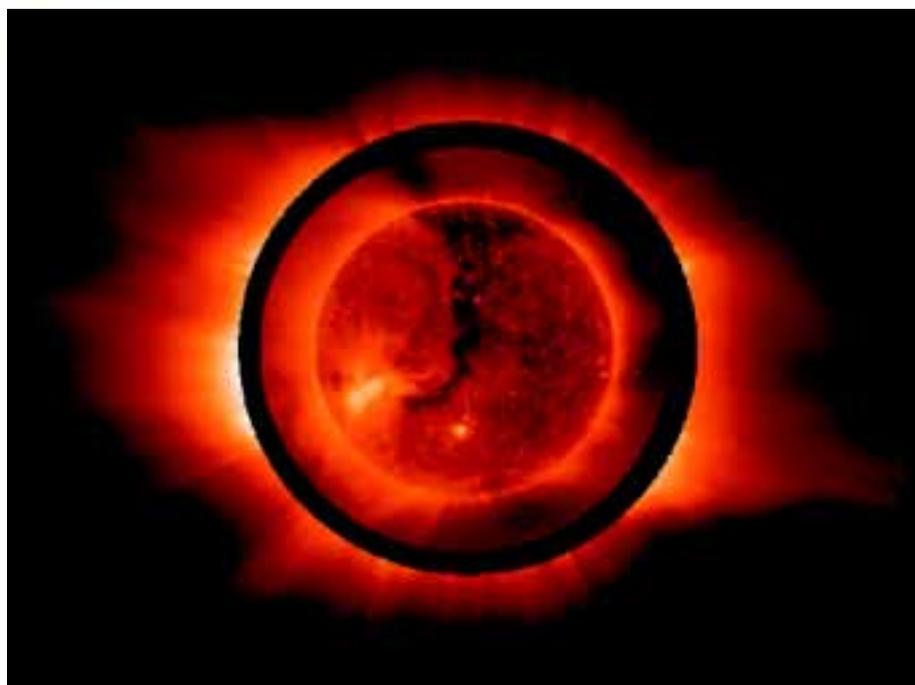
Prof. Teodoro Roca Cortés
Universidad de La Laguna
Instituto de Astrofísica de Canarias

Todo rey tiene su corona y el Sol, que lo es en nuestro entorno cercano, no podía ser menos. La corona solar es la parte externa de su atmósfera, que se extiende más de un millón de kilómetros, se adentra en el espacio interplanetario y puede observarse en eclipses totales de Sol cuando la Luna tapa el disco solar. Hoy en día sabemos que es extremadamente tenue, ya que su densidad es un billón de veces inferior al de la atmósfera de la Tierra a una altura de 90 km y solamente comparable al mejor vacío que podemos conseguir hoy en día en los laboratorios terrestres. No obstante, es extremadamente caliente, ya que su temperatura es de unos 2 millones de grados. Una prolongación, o la misma corona solar que está en constante expansión, la constituye el llamado "viento solar", que es un flujo continuo de plasma que al pasar por la Tierra tiene unos 400 km/s de velocidad y llega hasta los confines del Sistema Solar.

La luz visible que emite la corona solar es muy débil si la comparamos con la emitida por la fotosfera (su superficie) que es mil millones de veces más intensa. Así es que la corona no puede observarse si no es ocultando perfectamente el disco solar: ya sea durante un eclipse (el disco lunar oculta el solar), o utilizando un instrumento llamado coronógrafo (en el que un disco metálico oculta el de una imagen del Sol producida por un telescopio) como el de LASCO o UVCS (experimentos a bordo del satélite SOHO). Es tan débil, debido a la pequeña cantidad de partículas (electrones e iones) que difunden la luz procedente de la fotosfera, lo que da una idea de la pequeña densidad del material en esta zona. Podría decirse que la corona es una especie de neblina muy tenue situada por encima de la superficie.

La primera evidencia científica de su existencia se produjo durante el eclipse de 1870, en el que Charles Young observó una raya (verde) en el espectro de la luz coronal; décadas más tarde se descubrieron otras (roja y amarilla) que no se correspondían con las producidas por ningún otro elemento conocido en la Tierra. A comienzos del siglo XX, los astrónomos estaban tan perplejos que llegaron a proponer la existencia de un elemento químico nuevo presente en el Sol, y no en la Tierra, al que se llamó "coronio". No obstante, el auge de la espectroscopía hacia 1940 propició trabajos como los de Edlen y de Grotrian, que demostraron que estas rayas

espectrales eran producidas por átomos altamente ionizados de elementos conocidos como el hierro (9 y 13 veces ionizado) y el calcio (14 veces). Estas condiciones de ionización se dan solamente si la temperatura del medio es muy alta, por ejemplo unos dos millones de grados, cuando el átomo de hierro ha perdido 13 de sus 26 electrones. Por tanto, la presencia de estas ra-



*Imagen en el UV compuesta obtenida por dos instrumentos a bordo de SOHO: el UVCS, espectrocoronógrafo (parte externa) y EIT, telescopio (parte interna). La imagen interna se produce por la emisión de luz de átomos de hierro (11 veces ionizado a cerca de 2 millones de grados); obsérvanse las áreas oscuras (agujeros coronales) casi de un polo a otro, por donde escapa el viento solar más rápido. En la imagen externa más allá de una vez y media el radio solar, la luz es emitida por átomos de oxígeno (cinco veces ionizado) que son acelerados, en esta región, a velocidades supersónicas para escapar hacia el medio interplanetario.
Imagen de SOHO (ESA-NASA).*

yas espectrales delataba, tras una correcta interpretación, la existencia de plasma a muy altas temperaturas en la corona solar.

No obstante, el plasma de la corona solar emite radiación en diferentes longitudes de onda, de forma que observarla en el visible es la peor elección posible. De hecho, la corona emite más radiación en longitudes de onda muy cortas, como las de la luz en el ultravioleta extremo (UVE) y los rayos X. Esta radiación que, afortunadamente para los seres vivos terrestres, es eficientemente filtrada en nuestra atmósfera por la capa de ozono, también hace que, desgraciadamente, no podamos observar la corona solar ni desde las montañas más altas del planeta. No fue hasta 1946, en el que puede considerarse el comienzo de la investigación espacial, que en un vuelo de un cohete tipo V2 (capturado a los alemanes en la Segunda Guerra Mundial) lanzado desde White Sands (Nuevo México, USA) a sólo 90 km de altura, se obtuvo la primera imagen del Sol en el UVE; más adelante, en los años sesenta podía observarse la corona algo mejor con vuelos suborbitales y de corta duración. Pero no fue hasta el lanzamiento del Skylab, en 1973, con astronautas-astrónomos como tripulación e instrumentación más sofisticada (también en rayos X) a bordo, cuando nuestra observación de la corona



Imagen de un eclipse de Sol en luz blanca, obtenida por el Dr. F. Baudin, del Instituto de Astrofísica Espacial de París, desde Irán en 1999 con un filtro neutro especial variable. Esta luz proviene de la fotosfera, o superficie solar, y es dispersada por los electrones presentes en la corona.

mejoró ostensiblemente. Modernamente, el instrumento EIT, a bordo del satélite SOHO, ha obtenido imágenes de gran nitidez en diferentes filtros en el UVE (ver figura).

No obstante, ¿cómo es posible que existan capas externas tan calientes?; de hecho, la corona ¿es tan caliente como el interior solar? Esta pregunta que empezaron a plantearse los físicos solares en los años 50 sólo comienza a ser contestada con certeza en la actualidad tras los experimentos a bordo de SOHO. Tenemos ya evidencias certeras de que el calentamiento se produce por la energía que transportan ondas de tipo acústico y otras asociadas al campo magnético, producidas en las capas situadas más abajo, cercanas a la superficie.

Los rayos X emitidos en la corona se producen básicamente por los electrones acelerados y no en transiciones energéticas en átomos. Estos electrones acelerados se mueven tan rápido que no pueden ser capturados por los iones presentes, sino que interactúan con los protones cambiando de trayectoria. La emisión no es uniformemente brillante en toda la corona, sino que aparecen zonas o puntos muy intensos, normalmente asociadas a la presencia de manchas en la superficie (pero no siempre), así como zonas muy oscuras que son llamadas agujeros coronales (ver la figura). Imágenes en rayos X del Sol delatan la estructura de la corona; zonas más brillantes indican lugares donde el plasma es más denso y caliente. Hoy en día, los satélites YOHKOH («mssly1.mssl.ucl.ac.uk/ydac/»), el primero dedicado a la emisión coronal en rayos X, y después los SOHO («sohowww.estec.esa.nl/») y TRACE («vestige.lmsal.com/TRACE/») que están consiguiendo imágenes solares en rayos X de muy alta resolución, demuestran los complicados procesos que ocurren entre el plasma coronal y los campos magnéticos allí presentes. El movimiento de los componentes en la corona está determinado fundamentalmente por el campo magnético producido en el interior solar, que aparece allí en formas de bellos arcos en los que quedan atrapadas las partículas. Donde quiera que el campo magnético no existe o queda en configuración libre (por ejemplo, en los agujeros coronales) su densidad es menor y por allí escapa el plasma hacia el medio interplanetario en el viento solar.

La existencia del viento solar, que ya había predicho Biermann en 1951 al estudiar la forma de las colas de algunos cometas, siempre opuesta a la dirección donde se hallaba el Sol, fue explicada y predicha correctamente por Parker, en 1958. Predijo, por medio de un modelo teórico, que la corona no podía ser estática y debía necesariamente estar en expansión. Sus predicciones fueron confirmadas con el satélite Mariner 2, en su vuelo a Venus en 1962, que midió un flujo de partículas procedentes del Sol con una velocidad de entre 300 y 700 km/s a su paso por el entorno de la Tierra. También midió una densidad de partículas de unos 5 millones por metro cúbico, menos de una diez millonésima parte de la que hay en la corona. Así pues, el Sol no sólo nos envía luz, sino que también nos envía materia. Este plasma normalmente no penetra la atmósfera terrestre porque la Tierra es un gigantesco imán; es decir, tiene un campo magnético que, a modo de cascarón, la protege desviando este flujo. Solamente partículas con mucha mayor energía pueden penetrar este caparazón magnético, entrar en la atmósfera y llegar hasta la superficie. El satélite ULYSSES (www.sp.ph.ic.ac.uk/Ulysses/) ha completado un estudio del viento solar en todas las direcciones, no sólo en las cercanías de la Tierra o en el plano de su órbita.

Volviendo a la corona, los electrones pueden ser acelerados por las fulguraciones solares a velocidades próximas a la de la luz que, cuando caen hacia capas inferiores más densas, chocan violentamente contra ellas produciendo emisiones intensas de rayos X. Los satélites norteamericanos GOES6 y 7 (www.goes.noaa.gov) observan el flujo solar en rayos X de forma continua. A principios del mes de abril, SOHO registró la fulguración solar más intensa jamás detectada. En este tipo de sucesos, no sólo se libera una enorme cantidad de energía, sino que los electrones y protones acelerados escapan del Sol pudiendo llegar a la Tierra en un solo día y penetrar en su atmósfera por los polos magnéticos, el punto más débil del caparazón magnético antes descrito. Afortunadamente, en el caso antes mencionado, la fulguración no estaba dirigida hacia la Tierra. Asociadas a ellas, pero no siempre, SOHO ha descubierto cuán frecuentes son también las llamadas eyecciones coronales de materia, que no son más que flujos intensos de materia de la corona que se inyectan en el medio interplanetario.

Teniendo en cuenta la automatización creciente de la vida humana en la Tierra y la dependencia de nuestra forma de vida de las comunicaciones, el estudio de la corona solar y sus emisiones ha superado el interés meramente científico y cultural. En efecto, el estudio de lo que se ha dado en llamar el medio ambiente espacial, es decir, el entorno espacial del planeta Tierra, debe incluir de forma prioritaria el estudio de la fuente de sus continuas, y cada vez más dramáticas, alteraciones: el Sol y, en concreto, su corona y su viento.



Ésta fue la pregunta con la que Manuel, un niño de 12 años, inició la conversación una tarde calurosa de junio en la escuela de San Borondón, donde Don Heliodoro, maestro y aficionado a la Astronomía, daba sus clases de Ciencias.

- El Sol está hecho con los mismos materiales de que están hechos la Tierra y los demás planetas del Sistema Solar. Si aceptamos la teoría de que todo el Sistema Solar, incluido el Sol, se formó a la vez en esta zona de la Galaxia que ahora ocupamos, a partir del material que había por ahí en aquella época, llegaremos a la conclusión de que en los objetos del Sistema Solar debemos encontrar los mismos elementos químicos, es decir, la misma clase de átomos y moléculas que encontramos en la Tierra.

- Pero, ¿en las mismas proporciones, Don Heliodoro?, preguntó María.

- No, evidentemente no tendríamos por qué encontrar en cada uno de ellos las mismas proporciones de los mismos constituyentes ya que, si así fuera, todos los objetos se parecerían mucho más unos a otros a simple vista y es evidente que hay planetas rocosos, otros gaseosos, cometas, meteoritos, el mismo Sol...

- Pero, todo lo que nos ha dicho hasta ahora se deduce de la suposición de una simple teoría y de una ojeada a simple vista. Y las evidencias y los hechos de los que usted siempre nos habla, Don Heliodoro, ¿dónde están?

- Buena pregunta, Manuel. Veamos, el Sol es el objeto más grande del Sistema Solar, es la única estrella que hay en él, es decir, el único objeto capaz de producir energía por sí mismo. Esta energía que irradia en todas direcciones es la que ha permitido que aparezca y se desarrolle vida en nuestro planeta llegando, en su evolución, hasta la aparición de vida inteligente. Casi la totalidad de esta energía nos llega en

forma de luz y calor que nos permiten observar su superficie de un tono anaranjado, precisamente el color que tendría cualquier objeto a la misma temperatura, aproximadamente 5.500 °C. Si descomponemos la luz que nos llega del Sol por medio de un prisma, por ejemplo, podemos observar los colores que componen la luz blanca, desde el violeta hasta el rojo, en una serie de bandas, es lo que se llama espectro. Un observador más avezado podría descubrir entre toda esta gama de colores unas finísimas rayas oscuras, de diferentes tonos grises, como si faltara energía en estas zonas, tal y como puede observarse en el espectro adjunto. Estas rayas, mis queridos alumnos, son la evidencia de que en la superficie solar hay átomos diferentes.

- Interesante Don Heliodoro, terció Yaiza. ¿Quiere decir con ello que la posición de estas rayas en el espectro nos delata de qué átomos se trata?

- Efectivamente, estas rayas se denominan de absorción o de Fraunhöffer (en honor al físico alemán que las descubrió a principios del siglo XIX y que identificó 574, de las 26.000 aproximadamente

que se conocen actualmente) porque son precisamente estos átomos los que han absorbido la energía que falta, dejando una sombra oscura en su lugar. Mis queridos alumnos, cada elemento químico que conocemos aquí en la Tierra tiene una serie de rayas, parecidas a éstas, situadas en diferentes lugares en el espectro. Comparándolas con las del espectro solar podemos saber qué elementos hay en el Sol.

- Entiendo. Nos está diciendo que podemos saber de qué elemento se trata sin más que medir la posición de las rayas en el espectro. Entonces, esto es parecido a cómo la policía científica identifica a cualquier persona humana por medio de sus huellas dactilares (o su ADN). Interesante, dijo David, aficionado a los detectives.

- Pues bien, en la superficie del Sol se han identificado todos los elementos químicos conocidos aquí, en la Tierra. Es más, alguno de ellos, el Helio por ejemplo, se

identificó en el Sol antes de hacerlo en ningún laboratorio terrestre, unos 30 años más tarde. De ahí su nombre, que proviene de cómo llamaban los griegos al Sol.

- Y también el suyo, ¿no?

- Efectivamente, Dácil, y también el mío.

- Pero, y las proporciones, ¿qué nos dice de las proporciones?, insistió María.

- ¡Ah! sí!, las proporciones. Las abundancias de los elementos las podemos deducir también de las rayas espectrales. De hecho, la anchura de estas rayas y su tonalidad de gris están relacionadas con la cantidad de átomos de este elemento presente en la superficie solar. Los astrónomos, pueden calcularlas con facilidad. De hecho, se encuentra que el 93,9% del total de átomos presentes es Hidrógeno, el 6% es Helio y el 0,1% restante son elementos más pesados que estos dos, el Oxígeno, el Carbono, el Silicio, el Hierro, etc. El número total de átomos, en sus diversas formas, que hay en el Sol es de alrededor de 10^{57} , es decir, un uno seguido de 57 ceros.

- Interesante, pero me ha parecido entender que hay diversas formas de un mismo átomo presentes en el Sol. Tenía entendido que el átomo es la parte más pequeña de un elemento químico que conserva todas sus características, y de estos hay solamente unos 104 tipos en la naturaleza.

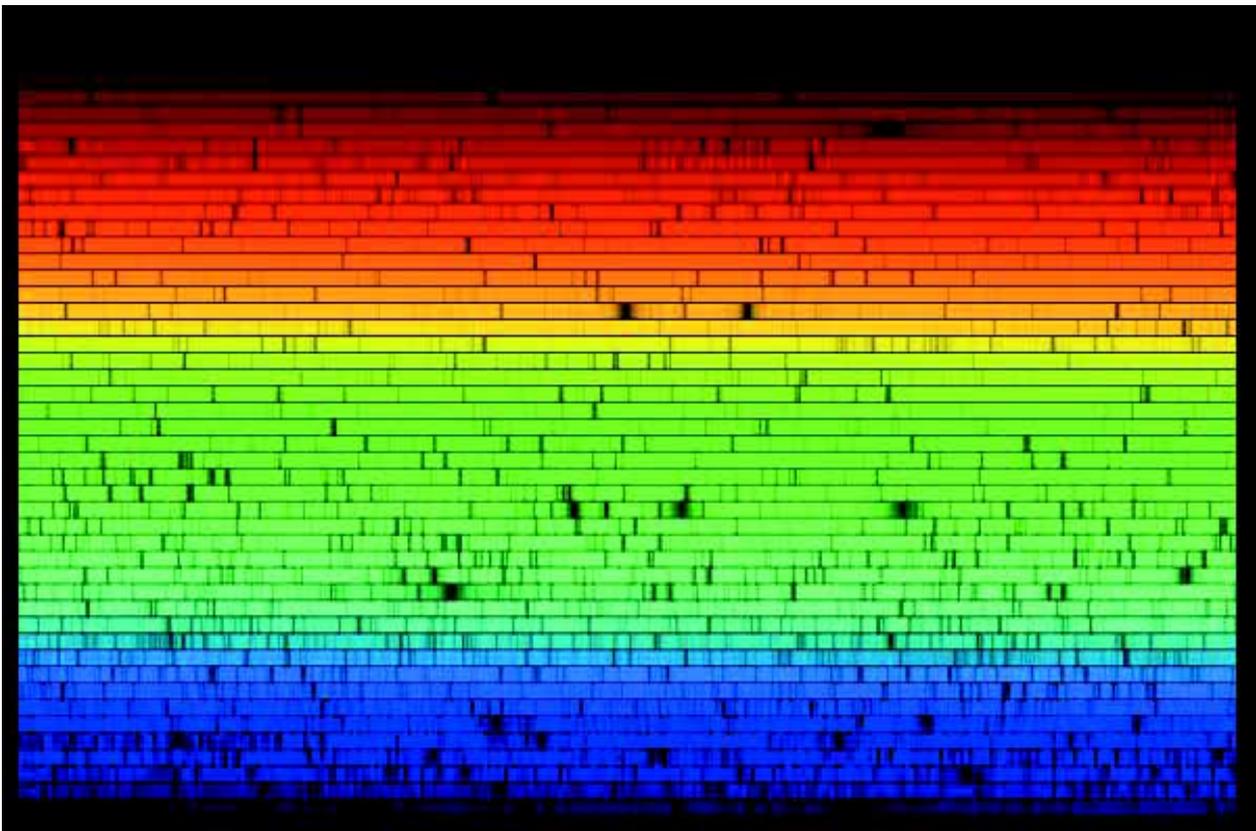


Imagen del espectro solar, creada a partir del Atlas Solar Digital obtenido con el espectrógrafo FTS en el telescopio McMath-Pierce en Kitt Peak (Arizona, USA). Va desde 400 nm (parte inferior izquierda) a 700 nm (parte superior derecha), en tiras de 6 nm cada una. 1nm es la millonésima parte de un milímetro. Los astrónomos clasifican al Sol como una estrella de tipo espectral G2. Esta imagen es una cortesía de N. Sharp del NOAO-NSO-AURA-NSF.

- No se les escapa nada, ¡eh! Efectivamente, el átomo es una partícula eléctricamente neutra y es diferente para cada uno de los elementos de la Tabla Periódica en que los clasificó por primera vez el ruso Dimitri Mendeléev. Constan de un núcleo central masivo con protones o cargas positivas rodeado del mismo número de electrones con carga negativa de manera que, en conjunto y en condiciones normales, forman un átomo neutro.

- Usted lo ha dicho, en condiciones normales. Pero, usted nos acaba de decir que la temperatura de la superficie solar es muy alta, no es normal.

- Tienen razón, en las condiciones físicas solares muchos elementos han perdido algunos o incluso todos los electrones de forma que los átomos, ahora cargados positivamente, se llaman iones (o cationes) mientras que los electrones que quedan libres son iones cargados negativamente (o aniones). De esta forma, las partículas que forman esta especie de gas del que se compone el Sol están cargadas eléctricamente y este nuevo estado en que podemos encontrar la materia se ha venido a denominar "plasma".

- Pero Don Heliodoro, hasta ahora nos ha hablado de las evidencias que encontramos en la superficie del Sol; y en su interior, ¿qué pasa en su interior? ¿Quién nos garantiza que allí dentro encontraremos los mismos elementos? ¿Y en qué proporciones?

- Muy perspicaz. Efectivamente, el espectro de la luz solar sólo nos da información de su superficie, que es desde donde es emitida. Pero hay una evidencia más: si hacemos una buena fotografía del Sol y la aumentamos suficientemente observaremos que está formada por pequeñas celdillas (de unos 1.000 km de tamaño) que son consecuencia del estado de ebullición continua en que se encuentra el plasma solar por debajo de su superficie. Esta ebullición transporta calor desde el interior hasta la superficie por medio del proceso de convección, de igual forma que un caldero con potaje, calentado por debajo, va calentando la parte de arriba. Este proceso en el que también se mezcla el material, mis queridos alumnos, asegura que lo que observamos en la superficie es fiel reflejo de lo que hay debajo. Al menos, hasta el fondo de la zona que se encuentra en ebullición. Esta zona está aproximadamente a unos 2/7 del radio solar (unos 200.000 km) por debajo de la superficie.

- Esto quiere decir que el interior del Sol está aún más caliente que su superficie, ¿no es así? Esto es excitante, dijo David. Y por debajo de esta zona, ¿qué pasa?

- Por supuesto, está mucho más caliente. De hecho, el centro del Sol es una zona donde la temperatura llega a tener unos 15 millones de grados; es allí donde se producen las reacciones termonucleares que producen la energía que luego es transportada hacia el exterior, de una forma lenta primero (por radiación) y de otra rápida después (por convección), como ya hemos dicho. En estas reacciones termonucleares resulta que 4 núcleos de Hidrógeno se transforman en uno de Helio y en este proceso se obtiene, además, energía. El Sol quema, aproximadamente, 600 millones de toneladas cada segundo y produce una potencia que permitiría mantener encendidas unos 4

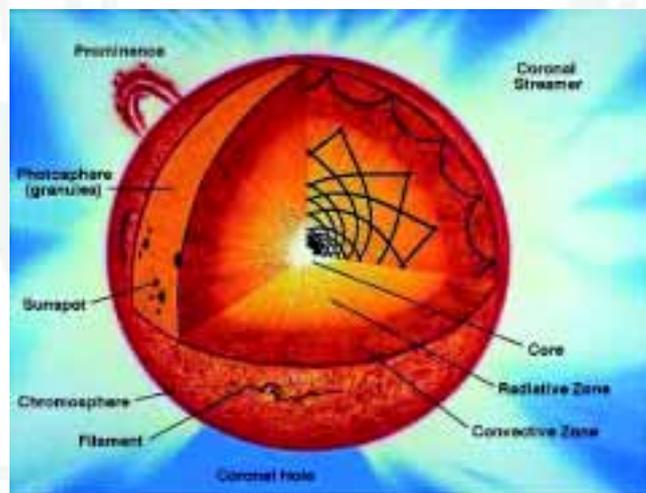
billones de billones de bombillas de 100 vatios, como las que tenemos en casa.

- Entiendo, pero entonces también se cambian las proporciones de Hidrógeno y de Helio, ¿no?

- Obviamente, allí se gasta mucho Hidrógeno, con lo que habrá menos cantidad que en la superficie, y se obtiene Helio, con lo que habrá más. Efectivamente, las proporciones ahí de estos dos elementos han cambiado. Las proporciones nuevas sólo se pueden calcular utilizando modelos matemáticos de cómo funciona una estrella como el Sol. Estos modelos predicen que en el centro del Sol se puede haber gastado cerca de la mitad del Hidrógeno que habría al comienzo de la formación del Sol, justo antes de que las reacciones empezaran a funcionar.

- Y, ¿dónde están las evidencias de todo esto?

- Eso, mis queridos alumnos, es mucho más difícil de obtener. Sólo muy recientemente, hacia 1979, ha sido posible comenzar a obtener evidencias experimentales indirectas de lo que sucede allí dentro, por medio de lo que se ha dado en llamar la Heliosismología. Y, a propósito, esta investigación se realizó cerca de aquí, en el Observatorio del Teide, del Instituto de Astrofísica de Canarias. Pero, de ello amigos míos, hablaremos otro día.



Esquema de la estructura del interior solar. Cortesía del International Solar-Terrestrial Physics Program y de NASA.



El ciclo de actividad solar

Antonio Eff-Darwich (Univ. de La Laguna)
Begoña García-Lorenzo (ING, La Palma)



El Sol es una gigantesca bola de gas a la que la Tierra, al igual que el resto de los cuerpos del Sistema Solar, se encuentra íntimamente ligada. Pequeños cambios en las propiedades físicas del Sol pueden tener, y de hecho han tenido, efectos enormes en el clima y la vida en nuestro planeta.

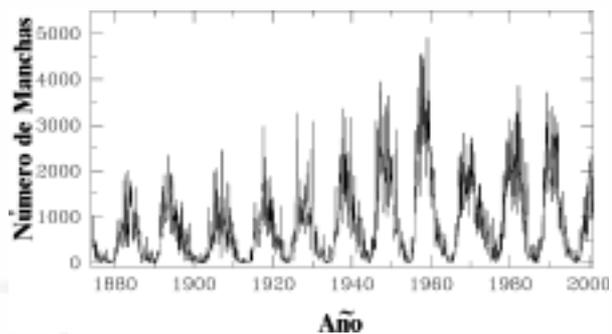
El cambio más evidente en el clima son las estaciones. Durante el verano hace calor, llueve poco y apetece comerse una ensalada fresca. En el invierno, por el contrario, hace frío, llueve mucho y apetece un buen escaldón. Las estaciones son provocadas por cambios de orientación de la Tierra respecto al Sol que inducen variaciones en la cantidad de energía (en general en forma de luz) que nos llega del Sol. Hay, por otra parte, variaciones con el tiempo de la cantidad de energía emitida por el Sol. Estas últimas se engloban en lo que los científicos denominan el "ciclo de actividad solar", y el estudio de sus efectos en nuestro planeta ha despertado un enorme interés en los últimos años.

La energía producida en el interior del Sol es una cantidad más o menos constante, al menos así lo ha sido en los últimos mil millones de años. Sin embargo, la energía que escapa del Sol al resto del Sistema Solar cambia con el tiempo. Debe haber algo que está controlando la emisión, y se cree que ese algo está relacionado con el hecho que el Sol es un enorme imán o, como se dice en términos científicos, tiene un campo magnético.

El imán que tiene el Sol es producido, a grandes rasgos, por el mismo fenómeno físico que explica el siguiente experimento: cojamos un clavo de metal y enrollemos alrededor de él un cable eléctrico delgado que conectaremos a una pila de pequeño voltaje. Si acercamos un trocito de metal al clavo, éste lo atraerá. Lo que ha ocurrido es que el clavo se ha convertido en un imán al circular alrededor de él una corriente eléctrica. En el interior del Sol también se producen corrientes eléctricas que lo imantan del mismo modo que al clavo. Este imán solar puede controlar el transporte de energía y la forma en que parte de ella aflora y escapa de la superficie del Sol. La teoría física que intenta explicar el fenómeno del campo magnético solar, así como la forma en que éste es capaz de hacer variar la energía que emite el Sol, es tan compleja como incompleta. Esto no es de extrañar, ya que son muchos los distintos procesos involucrados y muy sutil la forma en que éstos se relacionan. En pocas palabras, puede decirse que el modo en que el imán solar interactúa con el movimiento del gas y cómo este gas es capaz de ajustar su densidad y temperatura, son las claves que explican la variación de energía emitida por el Sol.

Cualquier teoría debe ser capaz de explicar lo que se observa en la realidad. Históricamente, las observaciones necesarias para explicar la teoría del imán solar, las variaciones de energía con el tiempo y su efecto en la Tierra, empezaron de forma casual (como otras muchas cosas en ciencia) hace más de dos mil años. El astrónomo chino Liu Hsiang descubrió unas pequeñas manchas oscuras en la superficie del Sol que no sabía a qué atribuir. Mucho más tarde, en el siglo XV, los

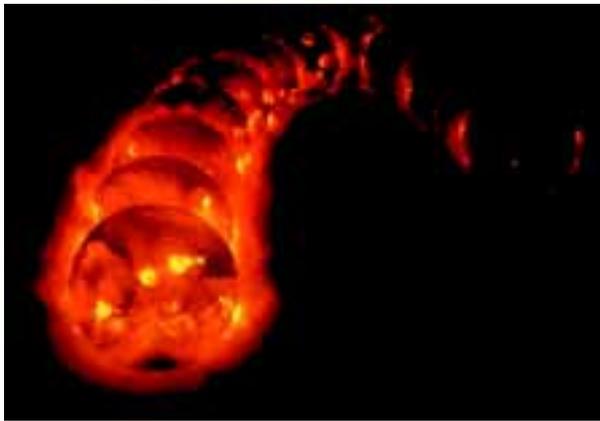
Europeos se interesaron por estas estructuras, siendo Thomas Harriot quien, en 1610, realizó el primer estudio cuidadoso de este fenómeno. Descubrió que estas estructuras crecían o menguaban con el tiempo, variando su forma y apariencia. Las "manchas solares", nombre con el que ahora las conocemos, provocaron una de las primeras disputas protagonizadas por el famoso astrónomo Galileo Galilei con la Iglesia de su época. Galileo afirmaba que las manchas eran una propiedad del Sol, mientras que la Iglesia mantenía que eran pequeños planetas que cruzaban frente al Sol. En-



Evolución mensual del número de manchas solares desde 1875 hasta nuestros días. Obsérvese que la distancia entre pico y pico es de unos once años. Datos obtenidos por el Observatorio de Greenwich (Inglaterra).

Entre 1826 y 1843, Heinrich Schwabe, un astrónomo aficionado de profesión farmacéutico, emprendió la búsqueda de un supuesto pequeño planeta más cercano al Sol que Mercurio, al que denominaban Vulcano. A lo largo de esos años, Heinrich anotó la aparición, evolución y posterior desaparición de multitud de manchas en la superficie del Sol. Después de casi dos décadas de observaciones, llegó a la conclusión de que el planeta Vulcano no existía. No obstante, encontró algo que a todos los astrónomos se les había escapado hasta aquel momento: el número de manchas en la superficie del Sol aumentaba progresivamente durante cinco

años, a partir de entonces empezaba a disminuir y, transcurridos otros cinco años, volvía a crecer de nuevo. Hacia la mitad del siglo XIX, Richard Carrington, otro astrónomo aficionado, notó que la posición de las manchas en la superficie solar no era arbitraria, sino que evolucionaban desde los polos del Sol, cuando el número de manchas es mínimo, hasta concentrarse en el ecuador cinco años después, cuando el número de manchas es máximo. A partir de entonces, se ha mantenido un registro continuo del número de manchas, su posición y evolución en la superficie de nuestro Sol. De esta forma, se ha confirmado el hallazgo de Schwabe y se ha establecido en aproximadamente once años el tiempo que transcurre entre un máximo en el número



Fotomontaje de imágenes del Sol tomadas por el satélite japonés Yohkoh durante cinco años. La primera imagen de la izquierda fue obtenida en 1991, durante un máximo de actividad, mientras que la última de la derecha fue tomada en 1995, durante un mínimo de actividad en el Sol.

ro de manchas y el siguiente. En otras palabras, el ciclo de actividad solar tiene un periodo de unos once años.

Durante el pasado siglo XX, tanto las teorías físicas como nuevas observaciones han demostrado que las manchas solares son una manifestación del campo magnético solar («el imán solar») que, al evolucionar con el tiempo, provoca que el número de manchas y su localización varíen cada once años aproximadamente. Cuando el número de manchas es muy grande, la superficie del Sol se vuelve muy turbulenta y aumenta la cantidad de materia y energía emitidas al espacio. A veces,

este aumento es muy abrupto y proviene de gigantescas explosiones provocadas cuando estas estructuras magnéticas se «cortocircuitan». No hace mucho, en marzo de 1989, seis millones de personas en Canadá y Estados Unidos se quedaron sin electricidad durante más de nueve horas, debido a que una gigantesca explosión en el Sol afectó drásticamente a una central hidroeléctrica en Quebec (Canadá). Los pasajeros de cualquier avión que estuviese cruzando el Atlántico en esos momentos, recibieron más radiación que la que se mide al hacernos una radiografía, que es mucha. También se produjeron graves desperfectos en varios satélites de telecomunicaciones. Curiosamente, la mayor explosión registrada en el Sol en los últimos 25 años tuvo lugar hace unos días: el 2 de abril de 2001 se produjo una explosión solar que liberó al espacio mucha más energía que el famoso caso de 1989. Afortunadamente, toda esta energía no fue expulsada directamente hacia nosotros. Pese a la elocuencia de estos ejemplos, se cree que este tipo de fenómenos explosivos tienen muy poco impacto en el conjunto del planeta.

El estudio de la relación entre la actividad magnética solar y nuestro planeta empezó en 1873, cuando Edward Maunder realizaba un programa de fotografías diarias de las manchas solares. Pronto se dio cuenta de que ciertos fenómenos que ocurrían en la Tierra, como las auroras boreales, estaban relacionados directamente con la actividad solar. Astrónomos del siglo XIX observaron que procesos asociados al magnetismo solar provocaban perturbaciones en muchos aparatos de medida terrestres. Últimamente se está estudiando la posible relación entre el cambio climático y la variación del nivel de energía emitida por el Sol debida a su ciclo de actividad. Incluso pequeños cambios del nivel de energía que recibimos del Sol pueden afectar a los procesos químicos y físicos que tienen lugar en la parte alta de la atmósfera y provocar, a través de complejos y más bien desconocidos procesos, cambios en el clima del planeta. Un caso muy ilustrativo, que fue estudiado

por Maunder, ocurrió entre los siglos XVII y XVIII. Durante este periodo de tiempo, conocido con el nombre de 'mínimo de Maunder' (que para eso lo estudió), el Sol permaneció prácticamente inactivo, con registros de números de manchas muy bajos e incluso nulos durante algunos años. Este periodo coincidió con un enfriamiento en nuestro planeta que provocó continuas heladas en Europa. El desastre en la agricultura fue enorme y miles de personas se vieron obligadas a emigrar a tierras más cálidas como, por ejemplo, las colonias de América. Gracias a otros registros históricos y geológicos se ha constatado que el 'mínimo de Maunder' ha ocurrido más veces a lo largo de la historia de nuestro planeta. El caso contrario parece que se dio entre los siglos XI y XII, cuando un largo periodo de fuerte actividad solar (si los datos disponibles no engañan) produjo un aumento generalizado de las temperaturas en Europa y severas sequías en América.

La Tierra está, literalmente, a merced de los designios marcados por el Sol. Poco o nada podemos hacer para evitarlo, pero el estudio de los fenómenos físicos que ocurren en el Sol y su más que probable relación con el clima pueden ayudarnos a paliar sus efectos. Desde el punto de vista de un físico, sería gratificante poder desentrañar misterios como el ciclo de actividad solar. Toda la nueva física resultante de estos estudios se podrá siempre aplicar a otros fenómenos que ocurren en el Universo ya que, no se olviden, el Sol es una de las estrellas más comunes entre los cientos de miles de millones que pululan por el espacio.



La rotación del Sol

Dra. Clara Régulo Rodríguez
Universidad de La Laguna
Instituto de Astrofísica de Canarias

Que el Sol rota es un resultado observacional conocido desde la época en que Galileo apuntó por primera vez al cielo con su telescopio en 1608.

Contrariamente a las ideas de la época, apoyadas por Aristóteles y aceptadas por la iglesia católica como dogmas de fe, de que los objetos celestes, incluido el Sol, eran objetos perfectos y sin mancha, las observaciones de Galileo demostraron que en la superficie del Sol existían manchas oscuras que aparecían y desaparecían con periodos de días o semanas. Estas manchas se movían sobre el disco solar de este a oeste y tardaban unas dos semanas en cruzarlo. Galileo explicó acertadamente estas observaciones por medio de la rotación del Sol sobre un eje ligeramente inclinado hacia la Tierra.

Hoy sabemos que, en efecto, el Sol rota sobre un eje que tiene una inclinación máxima de unos 7 grados respecto del plano en el que orbita la Tierra, y también sabemos que el Sol, que no es un sólido rígido, rota de forma diferencial, es decir, rota más rápido en el ecuador que en los polos, de forma que, mientras en el ecuador tarda unos 26 días en dar una vuelta completa, cerca de los polos tarda más de 30 días. Esta rotación diferencial del Sol desempeña un papel muy importante en la vida de nuestra estrella ya que, junto con la convección, es la responsable de la generación y mantenimiento del campo magnético solar según las teorías actuales.

Aproximadamente en el último tercio del radio solar, la energía que se ha generado en el interior de la estrella, al propagarse hacia el exterior, genera un movimiento de materia similar al de un líquido cuando hierve, donde el material más caliente asciende, se enfría y desciende de nuevo: es la zona convectiva solar. Hoy en día se acepta que el campo magnético solar se regenera continuamente a partir de la combinación de la rotación diferencial y de los movimientos convectivos en la parte externa del Sol. A este mecanismo se le denomina "efecto dinamo", por ser similar a las dinamos de los motores de los coches.

Este campo magnético solar, generado con la ayuda de la rotación diferencial del Sol, es el responsable de todos los fenómenos activos de la superficie del Sol, así como de las emisiones de gas y del viento solar. El viento solar está formado por partículas cargadas eléctricamente, básicamente protones y electrones que se mueven a velocidades de 400 km por segundo y que alcanzan a todo el sistema solar; cuando llegan hasta nosotros son las responsables no sólo de efectos tan impresionantes como las auroras boreales, sino también de muchos problemas en las comunicaciones en la Tierra y en los satélites artificiales que la rodean, por lo que, hoy en día, debido a nuestra creciente dependencia de los satélites de comunicaciones, su estudio ha cobrado una enorme importancia.

Sabemos, por tanto, que el Sol rota en su superficie, que rota de forma diferencial y que esta rotación gobierna una

parte importante de la vida de la estrella, pero ¿qué ocurre en su interior?, ¿rota el Sol igual que en su superficie?, ¿queda en su interior memoria de la rotación de su época de formación? Las respuestas a estas preguntas son claves para entender los mecanismos de generación y conservación del campo magnético solar, pero no tienen una respuesta fácil debido a que el Sol es opaco y no podemos observar su interior, al menos de forma directa.

Sin embargo, existen caminos indirectos para observar el interior del Sol y esta observación es tan importante para la comprensión de la estructura interna del Sol y, con ello, de la estructura de las estrellas, de las cuales el Sol es sólo una más, que, en diciembre de 1995, se lanzó un satélite artificial SOHO (*SOLar and Heliospheric Observatory*), dedicado exclusivamente al estudio de nuestra estrella. Este satélite, situado a 1,5 millones de km de la Tierra y que continúa operativo, es un proyecto de cooperación internacional entre la agencia espacial europea ESA y la agencia espacial norteamericana NASA. El satélite tiene 11 instrumentos a bordo, 3 de ellos dedicados a la

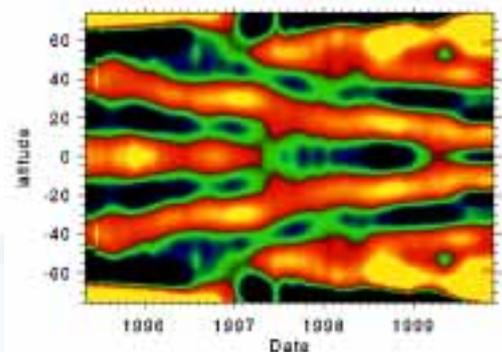


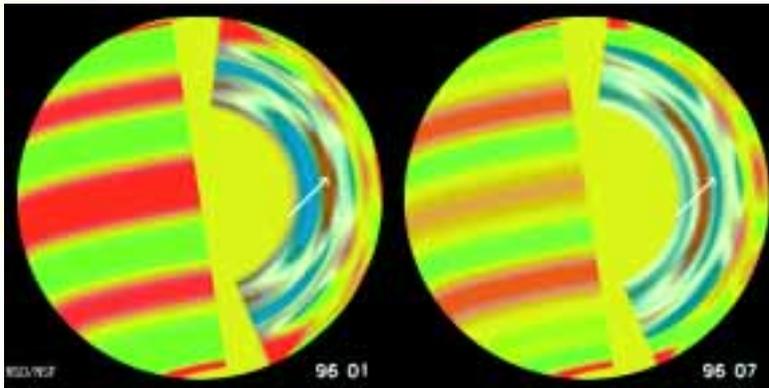
Gráfico con las diferentes bandas de la rotación solar: más rápida en rojo y amarillo y más lenta en verde y azul. En la imagen se ve cómo las bandas avanzan hacia el ecuador con el ciclo de actividad. Imagen cortesía de NSO/NSF.

observación del interior del Sol por medio de técnicas "heliosismológicas". La heliosismología es la técnica que nos permite "ver" el interior del Sol y está basada en las mismas técnicas que han permitido conocer cuál es la estructura interna de la Tierra: el estudio de la propagación de ondas en su interior. Estas ondas, generadas en los terremotos, en los movimientos sísmicos o bien

terior, lo que sí se puede medir a partir, por ejemplo, de medidas de pequeños cambios en el radio, la temperatura o la energía de la estrella.

Son estas medidas indirectas del interior del Sol las que nos han permitido conocer, entre otros muchos resultados, cómo rota el Sol en su interior.

Así se ha podido saber que el Sol rota igual que en su superficie, es decir, rota más rápido en el ecuador que en los polos, a lo largo de toda su zona convectiva, un tercio del radio solar, y que, a partir de aquí, rota como un sólido rígido. La



Instantáneas de la rotación solar en dos tiempos distintos.

estrecha zona en la que se produce este cambio en la rotación y que se sitúa en la parte baja de la zona convectiva solar recibe el nombre de "tacoclina", y es donde actualmente se sitúa la zona de generación y mantenimiento del campo magnético solar. Esta rotación interna del Sol, con la aparición de la tacoclina, cuya existencia no se sospechaba antes de la realización de las observaciones de SOHO, ha permitido avanzar y profundizar en la comprensión de la generación del campo magnético del Sol, que aún hoy no está del todo esclarecida.

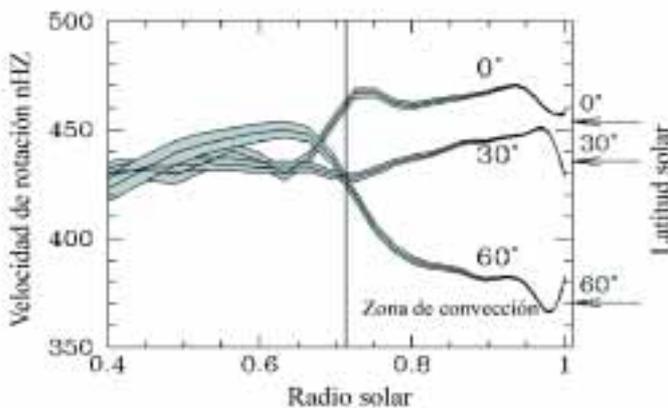


Gráfico con los resultados obtenidos por SOHO sobre la rotación solar.

En el gráfico, cortesía de SOHO (MDI, data gallery), se muestran los resultados obtenidos por el satélite SOHO sobre la rotación del Sol. En el eje horizontal está representado el radio solar, en el eje vertical izquierdo la velocidad de rotación, y en el eje vertical derecho la latitud solar en grados (cero para el ecuador y 90 para los polos). En la figura se observa claramente cómo la rotación diferencial de la superficie solar se mantiene hasta la base de la zona convectiva donde se transforma en una rotación de sólido rígido con una velocidad aproximadamente igual a la que presenta la superficie del Sol a unos 30 grados de latitud.

artificialmente, han permitido extraer información de cómo es el interior de la Tierra, dado que la dirección y la velocidad de propagación de las ondas dependen de la temperatura y composición química de las zonas que la onda atraviesa. Ahora bien, ¿de qué manera podemos obtener esta información para el Sol, dado que no podemos poner sismógrafos en su superficie?

Pero ¿es esto importante?, ¿es importante que el Sol rote?, ¿nos afecta cómo rota el Sol?, ¿merece la pena tanto esfuerzo, no solo humano, sino también económico, para intentar entender qué es lo que ocurre en el Sol? Desde las implicaciones filosóficas que tuvo en su momento el hecho de que los cielos no fueran inmutables hasta los efectos reales de los campos magnéticos solares que hoy en día sabemos que afectan a nuestra vida cotidiana, pasando por el mero deseo de conocimiento, la respuesta a todas estas preguntas es Sí. Cuando Galileo descubrió que el tiempo que tarda un objeto en caer una distancia dada partiendo del reposo es proporcional a la raíz cuadrada de dicha distancia, nació la ciencia, nació la idea de que una fórmula matemática, no un dios, controlaba el comportamiento del mundo material. La ciencia nos ayuda a construir un cuadro de la realidad objetiva y nos ayuda a situarnos en él. La rotación del Sol es una pieza más de conocimiento que, sumada a otras muchas, nos permite ir comprendiendo qué es el universo que nos rodea, lo que sin duda nos ayudará a comprender qué es el hombre.

En el interior del Sol se generan y propagan distintos tipos de ondas que producen movimientos en el gas atmosférico solar y es este movimiento de las capas superficiales del Sol, producido por las ondas que se propagan en su in-



Influencia de la actividad solar en las misiones espaciales

Prof. Félix Herrera Cabello
Universidad de La Laguna

La puesta en órbita de un vehículo tripulado o no tripulado implica, aparte de disponer del lanzador (cohete) y las infraestructuras de lanzamiento y seguimiento adecuadas, resolver una serie de **problemas** a los que estará sometido en el espacio exterior, que obviamente son más críticos en el caso de los vuelos tripulados. Estos problemas son: el impacto de los **micrometeoritos** (en parte resuelto, pues se han diseñado las naves con los datos aportados por los primeros satélites), la **basura espacial** que, presente en determinadas zonas (especialmente en la órbita geoestacionaria), constituye siempre un riesgo, la **ausencia de gravedad y los cambios de aceleración** a los que están sometidas las tripulaciones, dando lugar a cambios importantes en el organismo (todavía no suficientemente conocidos) que dependerán del tiempo de vuelo y las **radiaciones** que constituyen uno de los mayores peligros en el espacio exterior, tanto cercano como lejano.

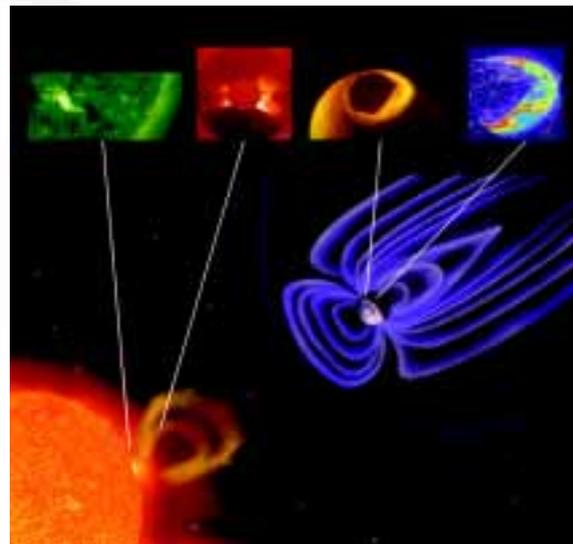
Las fuentes de radiación más importantes son la **radiación cósmica galáctica** (generada en la explosión de supernovas) y la **radiación cósmica solar**, que modula todo el medio ambiente espacial, causando problemas no sólo de instrumentación, navegación y aceleración de la caída de los vehículos de órbita baja, sino que pueden poner en peligro la vida de los astronautas si no se toman las medidas de protección adecuadas. Por sus repercusiones veamos, aunque sea brevemente, la naturaleza de esta última, asociada estrechamente a los periodos de actividad solar.

Situado a una distancia de 1 unidad astronómica (unos 150 millones de kilómetros), **el Sol** es una esfera gaseosa altamente ionizada (plasma) de aproximadamente un millón cuatrocientos mil kilómetros de diámetro, compuesta en un **93,1% por hidrógeno y un 6,8% de helio**. Esta masa no gira uniformemente como un cuerpo rígido sino como lo que es, una esfera de gas cuyo **periodo de rotación** depende de la latitud, tomándose como rotación media aproximadamente los **27 días**.

Podemos considerar al Sol como constituido por **4 regiones**. El **núcleo** es donde tienen lugar los procesos termonucleares de fusión donde 4 átomos de hidrógeno se unen para dar 1 átomo de helio que queda como ceniza de la reacción, liberándose una gran cantidad de energía (389.000 trillones de kilowatios por segundo) en forma de radiación gamma y unas partículas denominadas neutrinos. Los neutrinos atraviesan fácilmente la atmósfera solar y escapan hacia el medio interplanetario, sin embargo los fotones de radiación gamma después de un largo viaje de miles de años (pues experimenta una serie de procesos de absorción y emisión), pasan a la capas exteriores por radiación y convección (columnas de gases) irrumpiendo en la fotosfera, que es el disco que vemos a simple vista, donde liberan su energía. Cuando observamos la **fotosfera** con un telescopio

de alta resolución, aparece formada por una serie de gránulos, que recuerdan a los granos de arroz, pero obviamente de unos 200 a 2.000 kilómetros de diámetro (**granulación fotosférica**) que constituyen la parte superior de las columnas de convección.

Rodeando la fotosfera existe una región que se denomina **cromosfera**, que sólo es visible con filtros especiales. Esta región es de enorme interés, pues en ella tienen lugar los mayores cataclismos de la atmósfera solar. Estos cataclismos, denominados **fulguraciones cromosféricas**, que aparecen como enormes «explosiones», son una liberación repentina de una tremenda cantidad de energía y materia desde la atmósfera solar. Su duración es de minutos a horas y se producen en determinadas zonas de la atmósfera solar denominadas **regiones activas** caracterizadas por la existencia de grupos de



*Ilustración de una emisión de masa coronal (CME) y sus efectos sobre la Tierra. Imagen cortesía del International Solar-Terrestrial Physics Program y de NASA.
Autor: Mike Carlowicz*

manchas, más o menos complejas, con intensos campos magnéticos. Aunque su mecanismo no es del todo conocido, se supone que está relacionado con inestabilidades del campo magnético cuyo colapso parece generar la fulguración, que aparece como una zona de intenso brillo repentino que cubre grandes áreas de la cromosfera.

La fulguración se comporta como un **gigantesco acelerador**, donde se genera **radiación electromagnética** que va desde la radiación gamma a las ondas de radio decamétricas, pasando por rayos X, ultravioleta, visible, infrarrojo y ondas de radio milimétricas y de **radiación corpuscular**, principalmente protones y electrones que, como verdaderos proyectiles, son lanzados al medio interplanetario formando parte del **viento solar**. Este viento en principio sale en forma radial pero, debido a la rotación del Sol, adquiere la configuración de espirales de



Imagen de una aurora boreal obtenida desde Groenlandia por la expedición SheliOS 2000, en septiembre de 2000. Imagen cortesía SheliOS (www.sheliOS.org).

Arquímedes (que recuerda a los aspersores utilizados para regar los jardines), cuya interacción con el medio interplanetario causa como veremos una serie de problemas.

Por encima de la cromosfera se encuentra la **corona**, zona altamente enrarecida observable ha-

bitualmente con unos instrumentos especiales denominados coronógrafos y, en condiciones ideales, durante los eclipses totales de Sol. En la corona, y no siempre asociadas a las fulguraciones, se producen las **eyecciones coronales de masa**, donde millones de toneladas de plasma solar son eyectadas al medio interplanetario causando, como en el caso de las fulguraciones, serios problemas en todos los vuelos al espacio exterior si no se toman las medidas adecuadas.

Nuestro planeta, que a fin de cuentas también es una nave viajando por el espacio, está protegido por dos «paraguas»: su **atmósfera**, que con su capa de ozono filtra buena parte de la radiación ultravioleta, y el **campo magnético terrestre**, que desviando y atrapando otras de estas partículas permite la vida en la Tierra.

Veamos la cronología de los fenómenos asociados a una gran fulguración. Hay unos **efectos inmediatos** debidos a la radiación electromagnética que, por viajar a la velocidad de la luz, tarda unos 8,5 minutos en llegar a la Tierra, provocando interrupciones en las comunicaciones por radio. Veamos por qué. La ionosfera es una región de la atmósfera terrestre compuesta básicamente por 3 capas: D, E y F, que se comportan como un espejo para las señales de radio de diferentes longitudes de onda emitidas desde la Tierra que, tras sucesivas reflexiones entre la superficie terrestre y estas capas, permite la comunicación a grandes distancias. Normalmente las señales de onda corta se reflejan en la capa F (que es la más alta) después de atravesar las capas D y E, pero los rayos X y la radiación ultravioleta asociados a la fulguración ionizan fuertemente la capa D, impidiendo por absorción que las señales lleguen a la F, donde deben reflejarse. El resultado es que podemos estar escuchando una emisión de radio en onda corta, por ejemplo la BBC y, de repente, el receptor ha enmudecido y lo achacamos a una avería, cuando la realidad es que en el Sol ha ocurrido una fulguración importante.

En lo que se refiere a la radiación corpuscular (protones y electrones), éstos tardan, según su rango de energía, entre 15 minutos y 72 horas en llegar a la Tierra, causando una serie de fenómenos. Así, los **protones de muy alta energía**, que tardan de 15 minutos a 1 hora en llegar a la Tierra o a la Luna, constituyen el mayor peligro en el espacio exterior y en su interacción con la atmósfera terrestre generan emisión

secundaria que es detectable a nivel del suelo con los detectores de neutrones. Los **protones de alta energía**, que tardan de 1 a 20 horas en llegar a la Tierra, al incidir sobre las regiones polares generan la absorción de las señales de radio procedentes del medio exterior, en las frecuencias de 30 y 50 megahertzios.

Por último, las nubes de plasma formadas por **partículas de menor energía** (40-100 kiloelectrón-voltios) que tardan de 20 a 72 horas en llegar a la Tierra, generan fenómenos como son las **auroras** al interactuar con la alta atmósfera, que excitada emite cortinas de luz de belleza indescriptible. Las auroras son observables en las latitudes altas (regiones polares), pues son los puntos por donde las partículas penetran con más facilidad, al requerir menos energía, ya que en estas zonas la intensidad del campo magnético terrestre es nula al ser allí donde se cierran sus líneas de fuerza.

Las **tormentas magnéticas** son causadas también por las partículas solares al interaccionar con el campo magnético terrestre, haciendo que la brújula magnética «se vuelva loca» en las latitudes altas y que las aves pierdan su orientación durante los procesos migratorios. Asociadas a las tormentas magnéticas se generan corrientes inducidas que causan la **interrupción de las comunicaciones por cable submarino** (por ejemplo, estamos hablando por teléfono con Nueva York y se interrumpe la comunicación sin causa aparente). Asimismo, se produce la **inducción de corrientes eléctricas en las líneas de alta tensión** de largo recorrido que pueden desde quemar transformadores hasta dejar sin fluido eléctrico a grandes urbes, como ha ocurrido con los famosos apagones de Nueva York y Quebec (en 1989). La inducción de corrientes de cientos de amperios en las líneas de bombeo de combustible a grandes distancias, como ocurre en Alaska, puede dar lugar también a problemas de corrosión.

Como vemos, todos estos fenómenos suelen sonar como algo más o menos anecdótico, pero en realidad pueden causar pérdidas muy cuantiosas. Nuestro modo de vida, cada vez más dependiente de las comunicaciones, se ve gravemente perturbado por estos fenómenos. Pero, ¿qué problemas surgen en el espacio exterior cuando este chorro de partículas (especialmente las de muy alta energía) es lanzado al medio interplanetario?

En el caso de **vuelos no tripulados** el chorro de partículas puede dañar los instrumentos (paneles solares, ...), por lo que hay que comandarlos para dar la espalda a estas radiaciones o dirigir los sensores hacia ellas para recabar más información. En los vehículos de órbita baja, las partículas pueden acelerar su caída, como ha sido el caso del Skylab y de la MIR. En el caso de **vuelos tripulados**, como el vuelo a la Luna, extrapolable también al viaje a Marte, las perspectivas son las siguientes:

Cuando se planificó el proyecto *Apollo*, la cápsula donde iban los 3 astronautas estaba diseñada para protegerlos de las radiaciones, pero la Luna carece de atmósfera y campo magnético que le sirvan de «paraguas». Según el plan de vuelo sabemos que un astronauta se quedó en la cápsula y dos bajaron a la superficie lunar utilizando el módulo lunar, que no ofrecía ninguna protección, y menos aún el traje, al que tampoco se le podía dar más protección pues les impediría su movilidad. Ante esta perspectiva, ¿por qué no darle protección al módulo? Esto supondría aumentar su peso, lo que llevaría asociado aumentar la potencia del sistema de propulsión del cohete Saturno, encareciendo enormemente el coste del lanzamiento y, por tanto, del programa.

¿Cuál fue entonces la solución adoptada para resolver el problema? Pues disponer de 3 Observatorios: Australia, Houston y Maspalomas, situados aproximadamente a 120 grados de longitud unos de otros, de forma que al girar la Tierra hubiese siempre al menos uno observando la actividad solar con la instrumentación adecuada para evaluar la importancia de la fulguración desde el punto de vista energético, comunicando a la consola de radiaciones del Centro de Vuelos Tripulados en Houston, especialmente durante la fase de alunizaje, los datos para tomar la decisión del cambio del plan de vuelo si se consideraba necesario.

A este problema de radiaciones se enfrentarán los astronautas en el caso de los vuelos, tanto al espacio cercano como lejano, como es el caso del **vuelo a Marte**. En este caso, aparte de tener información en tiempo real de la activi-

dad solar que ocurre en todo el disco solar (y no sólo del hemisferio visto desde la Tierra) suministrada por una red de satélites, deberán disponer de un habitáculo de protección, con el problema añadido de que dada la distancia (la Tierra será un mero punto de luz) y el tiempo de tránsito de las comunicaciones (que será de muchos minutos), los astronautas deberán tomar sus propias decisiones, pues no contarán con la ayuda inmediata desde la Tierra como sucedió en el vuelo a la Luna.

En **vuelos de aviones a gran altitud** como los **supersónicos** (Concorde), especialmente en rutas polares, las tripulaciones pueden estar sometidas a niveles de radiación que hay que evaluar por el riesgo que suponen las elevadas dosis de radiación absorbida. Para ello el avión va equipado con detectores de partículas y, en caso necesario, realiza el descenso a un nivel de vuelo más seguro.



Ilustración artística de la influencia de la actividad solar sobre los sistemas de comunicaciones terrestres y los vuelos y satélites espaciales. Cortesía del International Solar-Terrestrial Physics Program y de NASA. Autor: Mike Carlowitz

Las barreras de la Tierra contra la influencia solar

Dr. Manuel Vázquez Abeledo
Instituto de Astrofísica de Canarias



El Sol es la principal fuente de energía para todos los procesos que tienen lugar en la Tierra. Cualquier variación que experimente el astro puede ocasionar, por tanto, cambios en nuestro planeta. Tres son los canales a través de los cuales puede producirse esta relación: la radiación visible, la radiación ultravioleta y el flujo de partículas.

Desde que se originó la vida hace unos 3.800 millones de años, nuestro planeta ha sufrido diferentes crisis, climáticas y biológicas, de las que siempre se ha recuperado. Ello ha sido posible, en gran manera, gracias a que la Tierra dispone de una serie de barreras de protección contra las variaciones que experimenta nuestra estrella. A la descripción de estas barreras dedicaremos este artículo.

Los gases invernadero

La temperatura de la Tierra ha permanecido siempre dentro de unos márgenes que han permitido la existencia de agua líquida en su superficie. Este factor ha sido esencial para que la vida se haya

mantenido y evolucionado. Ahora bien, hace 3.800 millones de años la cantidad de energía que emitía el Sol era un 30% menor que la actual. Cálculos sencillos nos dicen que, con tales niveles, la Tierra se habría congelado completamente y difícilmente hubiera salido de tal estado. Sin embargo, las evidencias indican que tal situación no se dio, precisamente gracias a la primera barrera de protección: los gases invernadero de nuestra atmósfera. Entre ellos podemos citar el vapor de agua, el metano, el ozono y el dióxido de carbono (CO_2), que vamos a tomar como ejemplo.

Dada la temperatura de su superficie (unos $5.500\text{ }^\circ\text{C}$), el Sol emite la mayor parte de su radiación en el visible, intervalo espectral al cual se han adaptado los ojos de la mayoría de los seres vivos. Una parte de esta radiación, aproximadamente un tercio, es reflejada por la superficie y la atmósfera terrestres. El resto calienta el planeta, que a su vez emitirá también radiación, pero, dada su temperatura, ésta se encontrará en la zona del infrarrojo. El CO_2 de la atmósfera tiene la propiedad de dejar pasar la radiación solar, mientras que absorbe la infrarroja que procede de la superficie terrestre. Este proceso de absorción contribuye así al aumento de la temperatura del planeta, bastantes grados más de lo que le correspondería por su distancia al Sol. Este mecanismo se conoce con el nombre de "efecto invernadero" y ha constituido un factor esencial para el equilibrio del clima en la Tierra.

Desde aquellos primeros tiempos, la luminosidad solar ha ido aumentando, mientras que, en la Tierra, la atmósfera ha pasado de ser una en que predominaba el CO_2 a la actual, donde el oxígeno juega el papel decisivo para seres vivos, como plantas y animales. Sin embargo, la cantidad de los gases invernadero en la atmósfera sigue siendo fundamental



Esquema del proceso de calentamiento terrestre por el efecto invernadero.

para que la temperatura del planeta haga posible la existencia de agua líquida y, por lo tanto, de vida.

En la actualidad, el Hombre está inyectando cantidades de CO₂ a la atmósfera como consecuencia de la quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo y gas natural). Esto sucede a una escala temporal tan rápida que los sumideros naturales (los océanos y la biosfera) no pueden absorber el gas al mismo ritmo. La consecuencia es un calentamiento global del planeta y otras perturbaciones en el clima que se intensificarán a lo largo de este siglo. Estamos utilizando en nuestra contra una barrera de protección climática de primer orden, y las consecuencias van a afectar sobre todo a nuestra civilización, especialmente a los sectores menos desarrollados económicamente.

La capa de ozono

El Sol emite también radiación ultravioleta que tiene efectos dañinos sobre los seres vivos. Durante miles de millones de años, estos seres se mantuvieron a nivel bacteriano en los océanos terrestres, donde podían encontrar una protección contra la acción de estos rayos solares. Fue la acción de alguno de estos microorganismos, las cianobacterias, la que originó el aumento de los niveles de oxígeno, al tiempo que iban disminuyendo los de CO₂.

Una de las consecuencias de la acumulación de oxígeno en la atmósfera terrestre fue la aparición progresiva de la capa de ozono. Las moléculas de este gas consisten en tres átomos de oxígeno (O₃), en vez de los dos (O₂) del oxígeno normal. Pues bien, el ozono tiene la importante propiedad de absorber la parte más dañina de la radiación ultravioleta. Su acción iba a posibilitar que los seres vivos pudieran ocupar la superficie sólida del planeta y que se produjese la rápida evolución biológica que iba a llevar hasta el ser humano.

En nuestra época, la cantidad de dicha radiación que nos llega del Sol muestra claras diferencias entre el máximo y el mínimo del ciclo de actividad de nuestra estrella, que tiene un período de 11 años. Ahora bien, la radiación ultravioleta solar mantiene un estrecho balance con el contenido de ozono en la atmósfera, ya que interviene tanto en sus procesos de formación como de destrucción y el balance neto de su influencia no está del todo claro. Su acción más clara se encuentra en cambios en la circulación del aire en grandes alturas, que llevarían asociadas variaciones en el clima.

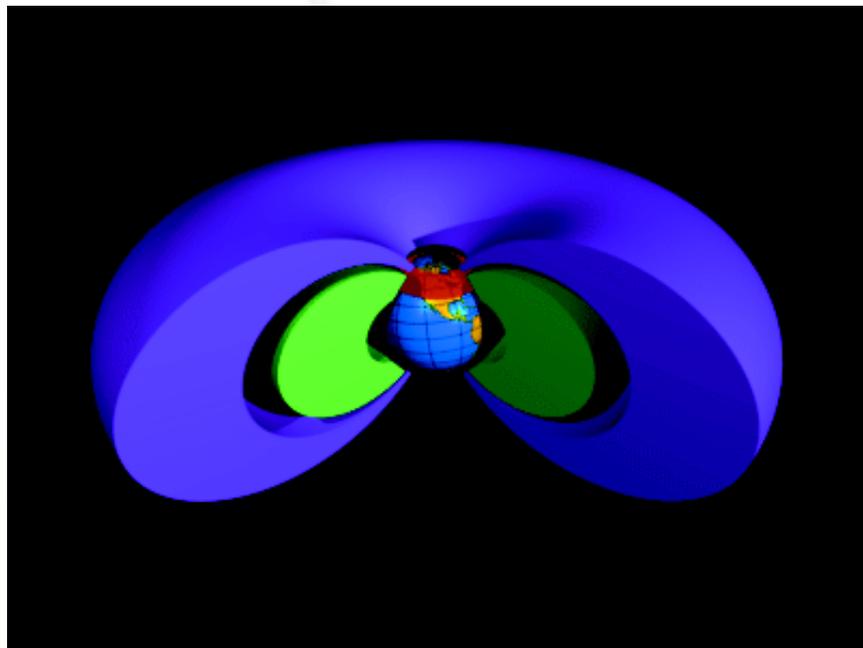
Por desgracia, la civilización ha empezado a deteriorar esta importante barrera mediante la emisión de ciertos productos químicos que la destruyen, como son los clorofluorocarbonos. En las zonas en que esta capa se ha debilitado, las situadas a latitudes altas especialmente en el Sur, la radiación ultravioleta puede penetrar más fácilmente, causando innumerables daños en los seres vivos. Entre los efectos que provoca en los seres

humanos destaca el aumento del número de casos de cataratas en los ojos y de cáncer de piel.

El campo magnético terrestre

Además de radiación, el Sol emite también un flujo continuo de partículas que se conoce con el nombre de "viento solar". De vez en cuando, su tranquilo fluir se ve interrumpido por una explosión en la atmósfera solar, conocida como una emisión coronal de masa, en la que en unos pocos segundos se lanzan al espacio más de mil millones de toneladas de partículas con velocidades de hasta 1.500 kilómetros por segundo, en el caso de los fenómenos más energéticos. El número de tales procesos y su intensidad varían según el ciclo de 11 años de la actividad solar. En el mínimo observaremos uno por semana, mientras que en un máximo, como en el que nos encontramos en el año 2001, podemos tener hasta tres al día en las fases más activas.

Su impacto directo sobre la superficie terrestre provocaría también indudables daños a los seres vivos. Afortunadamente disponemos de una tercera



Simulación del cinturón magnético que rodea a la Tierra. Imagen cortesía del International Solar-Terrestrial Physics Program y de NASA.

barrera de protección: el campo magnético terrestre.

La Tierra tiene uno de los campos magnéticos más fuertes del Sistema Solar. Su intensidad depende del período de rotación del planeta, 24 horas, y del espesor de una capa de metales en estado líquido que circunda el núcleo de la Tierra. Pues bien, las partículas solares tienen dificultades para moverse en direcciones perpendiculares a las líneas de fuerza, aunque comprimen el campo magnético como si fuera de gelatina. Aproximadamente un 1 % de esas partículas logran penetrar en nuestra atmósfera a través de las regiones polares, donde la resistencia de esta tercera barrera es menor. Las partículas solares se encuentran allí con los átomos de nuestra atmósfera y de su interacción resultan las espectaculares auroras. Sin embargo, al ir aumentando la densidad de la atmósfera las partículas van perdiendo energía, con lo que los efectos en la superficie terrestre quedarán muy debilitados.

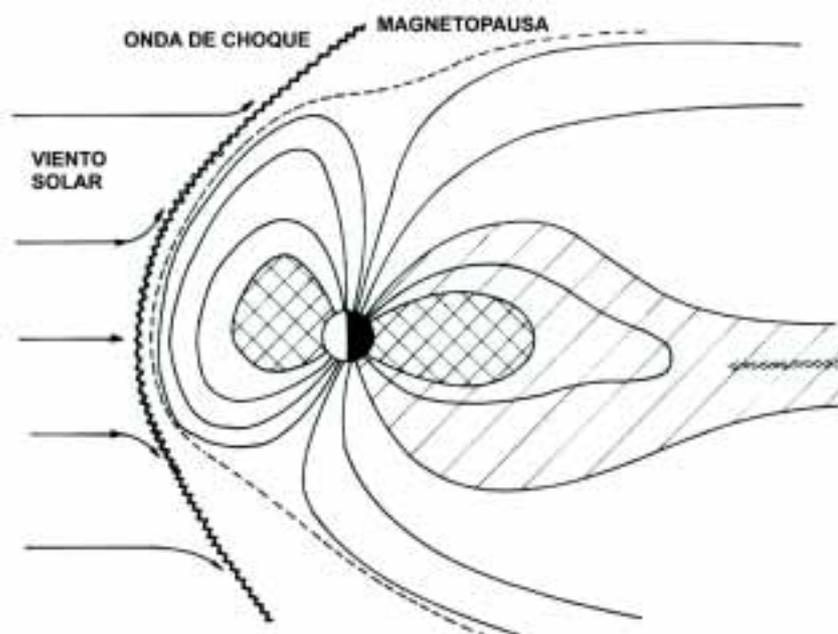
Las partículas procedentes de las tormentas solares están cargadas eléctricamente y se encuentran en movimiento, es decir, dan lugar a campos magnéticos que interactúan con

el de nuestro planeta y, muy especialmente, con toda una serie de instrumentos que nuestra civilización posee en el espacio cercano a la Tierra, al alcance de la acción de dichas partículas. Nuestra civilización dispone ya de numerosos satélites que se encuentran en alturas que sí sufren las consecuencias de estas tormentas solares. Las corrientes eléctricas inducidas por la lluvia de partículas solares producen graves perturbaciones en las comunicaciones y en los sistemas de navegación, junto con problemas en los centros de distribución de energía eléctrica y los grandes oleoductos. Sus consecuencias económicas son importantes.

Por el momento, el Hombre no tiene capacidad de perturbar esta barrera, que en cambio sí sufre variaciones seculares en su intensidad, llegando a anularse en algunas épocas. Por suerte, todavía estamos lejos de que tal proceso se produzca.

Sobre nuestro planeta inciden partículas con energías todavía mayores que las solares, procedentes de regiones exteriores al Sistema Solar, como pueden ser explosiones de supernovas o agujeros negros. Son lo que se conoce con el nombre de "rayos cósmicos". Afortunadamente tenemos una nueva barrera contra ellas. El campo magnético solar se extiende hasta los confines del Sistema Solar, la llamada "heliosfera" que, al igual que el campo magnético terrestre con respecto al solar, amortigua la influencia de estos rayos cósmicos.

No es extraño que gracias a estas barreras la vida haya sobrevivido durante un período prolongado de tiempo en nuestro planeta. Se han necesitado varios miles de años para que se desarrollaran formas de vida complejas, hace unos seiscientos millones de años. Ahora, una de las últimas especies en aparecer sobre el planeta, el *Homo Sapiens*, empieza a poner en riesgo el funcionamiento correcto de alguna de esas barreras. Esperamos que las mejores características de su inteligencia le permitan tomar conciencia del problema y adoptar medidas antes de que sea demasiado tarde, especialmente para ella misma.



Tenemos un Sol que es la estrella más importante del Universo para nosotros ya que, aunque sea una estrella de lo más corriente, es la que tenemos más cercana y por lo tanto la única que nos puede influir directamente en multitud de aspectos. En cambio, de lo que cada vez nos quedan menos dudas es de que vivimos en un planeta excepcional, quizás único en el Universo: la Tierra. Procuremos cuidarla.

Representación del cinturón magnético que rodea a la Tierra.



Conviviendo con una estrella

Dra. Inés Rodríguez Hidalgo
Universidad de La Laguna
Instituto de Astrofísica de Canarias

¿Se ha preguntado usted si realmente necesita al Sol, si ésta es realmente *la estrella de su vida*? La respuesta es un rotundo sí: sin el calor del Sol la Tierra sería un témpano a menos de 180 grados bajo cero, y sin su luz estaríamos a oscuras, ni siquiera veríamos la Luna cuyo brillo se debe a la reflexión de la luz solar. La vida en nuestro planeta es posible gracias a la energía del Sol, que dirige el ciclo del agua y es utilizada por las plantas para crecer y transformar dióxido de carbono en el oxígeno que respiramos. Los seres humanos comemos algunas plantas y animales que, a su vez, se alimentaron de ellas. Los árboles que nos dan madera, papel o celulosa necesitan energía solar. Sin el Sol no

dispondríamos de leña, carbón ni derivados del petróleo para nuestros fuegos y motores...

Pero, además, hoy sabemos que el Sol es una estrella enormemente dinámica cuyos cambios nos afectan de forma importante. No se trata de una esfera perfecta ni es eterno e inmutable como creían los griegos... Ya Galileo hacia 1610 observó por primera vez su superficie a través de un telescopio, descubriendo en ella regiones oscuras llamadas *manchas solares*, que emergen, cambian y desaparecen. Esto se debe a que el Sol es una estrella *activa*, término que en Astrofísica designa a lo relacionado con el magnetismo, y las manchas son una de las diversas manifestaciones de esa actividad magnética. La "personalidad magnética" del Sol radica en que su materia se encuentra en forma de *plasma* (el llamado "cuarto estado de la materia"), similar a un fluido caliente en el que gran parte de las cargas positivas y negativas de los átomos están separadas. En el plasma solar, excelente conductor de la electricidad y en continuo movimiento, se originan campos magnéticos y circulan corrientes eléctricas de hasta billones de amperios.

El campo magnético del Sol no es un simple dipolo, sino que puede presentar muchos polos norte y sur al mismo tiempo,

y su configuración es variable, con cambios rápidos y drásticos. Por ejemplo, cerca de la superficie solar se producen las *fulguraciones*, explosiones súbitas que liberan una enorme cantidad de energía de origen magnético (una fulguración de tamaño promedio podría proporcionar la potencia consumida en Estados Unidos durante 10.000 años). Emiten desde ondas de radio hasta rayos gamma, y muchas van acompañadas de ráfagas de electrones, protones y otras partículas cargadas a velocidades tan altas que escapan del Sol. Las *protuberancias* son grandes formaciones de plasma algo más denso y frío que sus alrededores, suspendidas sobre la superficie solar, a menudo siguiendo

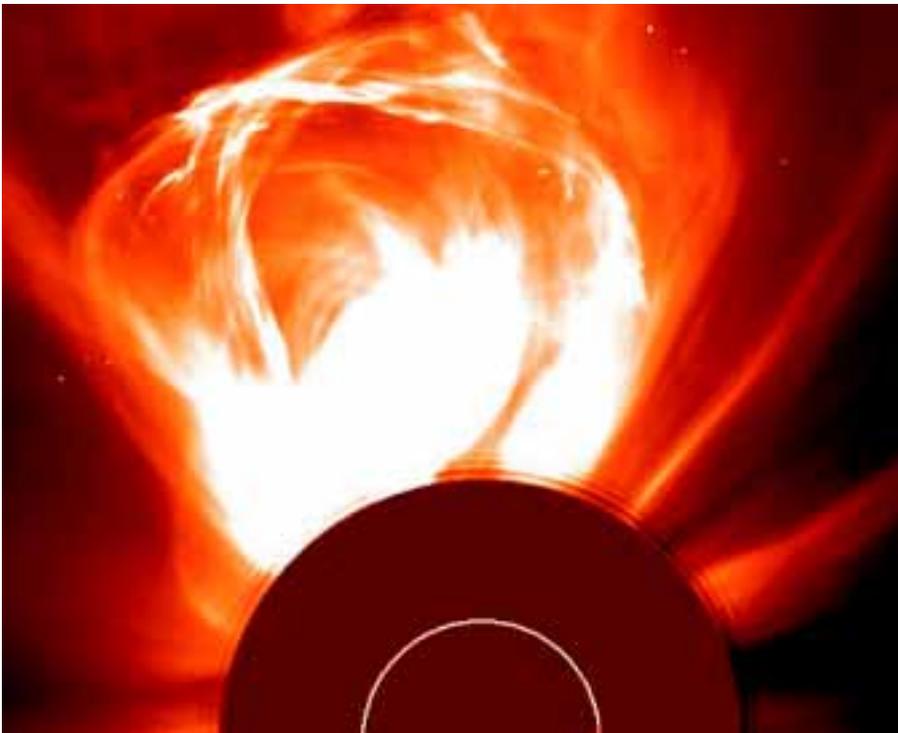


Imagen de una emisión de masa coronal (CME) obtenida por el satélite SOHO (ESA/NASA), el día 9 de marzo de 2000. Cortesía del Consorcio SOHO (ESA/NASA).

do la forma de las líneas del campo magnético, y las de tipo eruptivo también están asociadas a emisión de partículas. Desde la *corona*, la zona más externa de la atmósfera solar (ese halo blanquecino visible durante un eclipse total), "sopla" un flujo continuo de partículas cargadas a gran veloci-

dad y en todas direcciones, llamado *viento solar*. Y frecuentemente, desde unas pocas veces por semana en épocas de mínima actividad solar, hasta varias veces al día en las de máxima, se producen erupciones gigantescas llamadas *expulsiones de masa coronal* (o *CMEs*, de sus siglas en inglés), los fenómenos más violentos del Sol: la corona se desgarrando liberando miles de millones de toneladas de materia que viajan a millones de kilómetros por hora a través del espacio, eventualmente hacia la Tierra.

El cambiante *clima* o *medioambiente espacial* viene configurado esencialmente por las emisiones de partículas cargadas desde el Sol. La Tierra está protegida de los estallidos de radiación y partículas solares por la *magnetosfera*, la región dominada por su campo magnético, que se extiende decenas de miles de kilómetros en el espacio y desvía el viento solar alrededor de nuestro planeta. Pero a pesar de este escudo natural, el clima espacial influye notablemente sobre nuestro entorno: el viento solar azota la magnetosfera y la distorsiona, comprimiendo su lado diurno y expandiendo su zona nocturna en forma de cola. Las partículas del viento y las *CMEs* excitan el plasma atrapado en los *cinturones de radiación de Van Allen* alrededor de la Tierra y en la ionosfera, causando *tormentas magnéticas*. Así se producen las espectaculares *auroras boreales* y *australes*, normalmente visibles sólo en latitudes cercanas a los polos. Pero el medioambiente espacial tiene también otros efectos menos agradables: afecta a los satélites y naves espaciales (puede dañar sus superficies, desorientarlos, modificar sus órbitas...), a sus instrumentos y tripulantes (la "nieve" observada en muchos detectores a bordo de satélites se debe al bombardeo de partículas cargadas y éstas son perjudiciales para la salud humana), y perturba las comunicaciones por radio y satélite y hasta las redes de tuberías y fluido eléctrico (citamos como ejemplo la famosa rotura de redes eléctricas del 6 de marzo de 1989, en Canadá, causada por una severa tormenta magnética asociada a una fulguración muy intensa) y a nuestros aparatos magnéticos (produciendo pérdidas de aviones y barcos). Un ejemplo muy reciente: a finales de marzo apareció el mayor grupo de manchas solares de los últimos 10 años y, asociadas a él, la fulguración más intensa registrada hasta la fecha y una enorme expulsión de masa coronal, el pasado 2 de abril. Como consecuencia se observaron auroras en latitudes tan meridionales como Niza.

Además de estos rápidos cambios, el número e intensidad de las manchas y otros fenómenos magnéticos del Sol aumenta y disminuye aproximadamente cada 11 años a lo largo del llamado *ciclo de actividad solar*. A éste se superponen variaciones temporales más lentas, como el Mínimo de Maunder (1645 –1715), época en que prácticamente no hubo manchas en la superficie solar. Hoy sabemos que en las fases de máxima actividad el Sol emite mayor cantidad de energía (la

"pequeña edad del hielo", largo periodo que incluye el Mínimo de Maunder, estuvo caracterizada por temperaturas promedio mucho más bajas que las actuales en Europa septentrional) y actualmente la actividad solar es máxima, por lo que este efecto de mayor calentamiento solar debe ser tenido en cuenta, junto a factores de origen antropogénico, en los estudios del cambio climático global.

Es obvio que necesitamos al Sol para vivir... pero también necesitamos, y cada vez más en una época inmersa en la tecnología y marcada por las comunicaciones y la exploración del espacio, conocerlo muy bien, porque realmente *convivimos con una estrella turbulenta y fascinante*. Confíemos en que la celebración del Día Internacional Sol-Tierra se repita en años sucesivos y nos ayude a "conectar" con *la estrella de nuestra vida*.

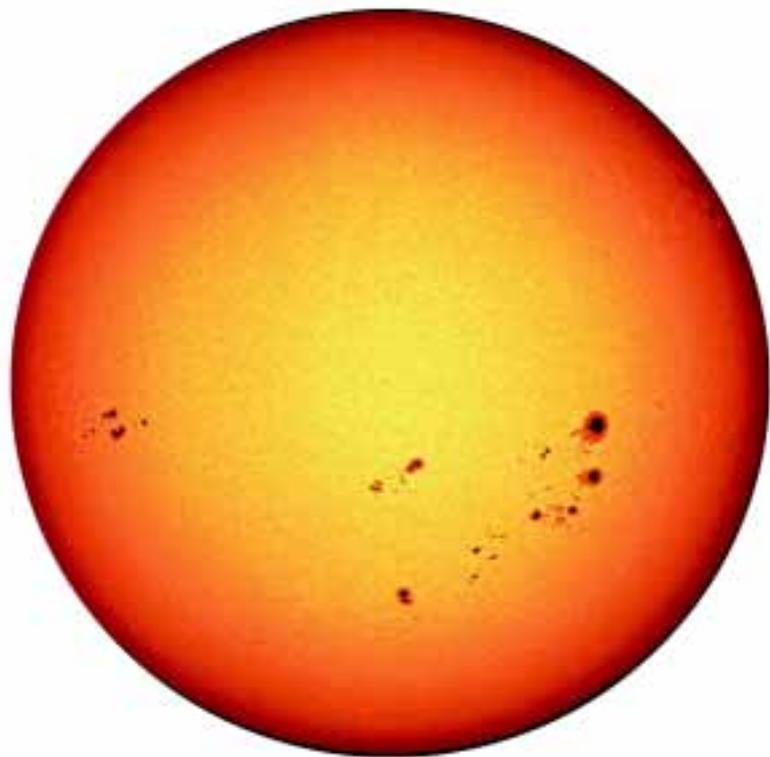


Imagen de la fotosfera solar tomada el 26 de agosto de 1990, desde el Observatorio austríaco de Kanzelhöhe. En ella pueden apreciarse varias manchas solares cerca del ecuador. ã Th. Pettauer (IfA), J.A. Bonet (IAC).



Magnetismo solar: la clave para descifrar los enigmas del Sol

Dr. Javier Trujillo Bueno
Instituto de Astrofísica de Canarias / CSIC

Nuestra Galaxia (la Vía Láctea) tiene unos doscientos mil millones de estrellas, y en ella encontramos desde intentos frustrados de estrellas (las enanas marrones) hasta estrellas muy masivas que pueden llegar a ser miles de millones de veces más luminosas que el Sol. Y más allá de la Vía Láctea existen muchísimas más

expulsado violentamente por estrellas durante las fases finales de sus vidas. En muchas de estas nubes de material cósmico se dan las condiciones físicas necesarias para que los átomos se unan entre sí dando lugar a la formación de complejas especies moleculares cuyo estudio es clave para poder obtener pistas sobre el origen de la vida en el Universo. ¿Por qué estudiar entonces el Sol cuando tenemos la posibilidad de escoger entre tantos campos atractivos de la Astrofísica?

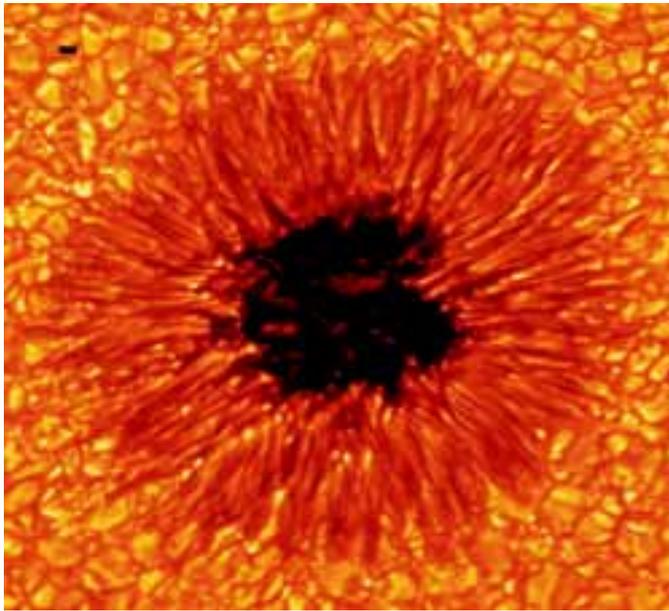


Imagen de una mancha solar con alta resolución espacial, obtenida con el Telescopio de la Torre Solar Sueca (RACS), ORM. J.A. Bonet (IAC), A. Hanslmeier (IfA), M. Sobotka (AsU) y M. Vázquez (IAC).

galaxias cuyo estudio nos da información sobre los orígenes y la estructura del Universo a gran escala. En este contexto, el Sol es sólo una insignificante estrella amarilla que se encuentra en el disco de una galaxia espiral (la Vía Láctea), a unos dos tercios del centro galáctico donde pensamos que existe un agujero negro masivo que ejerce una dramática influencia en el medio circundante. El disco de nuestra galaxia no sólo contiene muchas más estrellas y sus planetas, sino también enormes extensiones de material

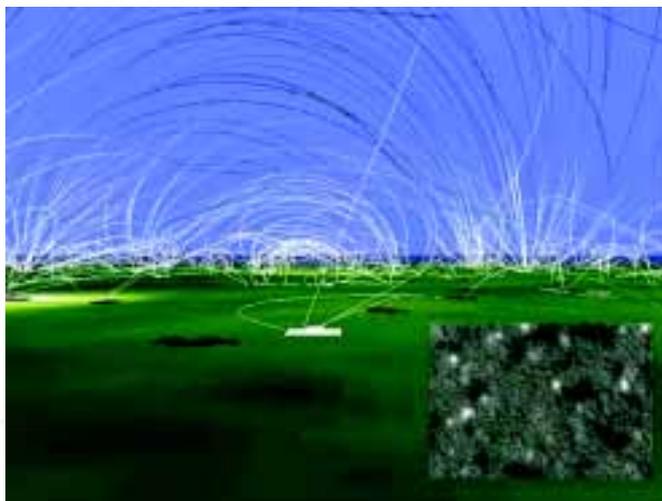
El Sol, nuestra estrella más cercana y fuente de la vida en la Tierra, resulta ser un sistema astrofísico mucho más complejo y enigmático de lo que aparenta a simple vista. Cuando se observa y estudia el Sol haciendo uso de potentes telescopios e instrumentos basados en la más avanzada tecnología se descubre que, lejos de manifestarse con la aparente serenidad que inspira cuando lo contemplamos al atardecer, se está de hecho comportando de una forma que, además de exótica y fascinante, interesa mucho a los científicos. Para nosotros, el Sol continúa siendo el laboratorio que nos permite investigar en detalle la física que controla el comportamiento de muchas de las otras estrellas que pueblan el Universo. Es importante recordar que, con la actual tecnología, el Sol sigue siendo la única estrella donde podemos observar directamente detalles en su superficie. Cualquier otra estrella se ve sólo como un simple punto luminoso en el foco de nuestros más grandes y potentes telescopios.

El plasma solar (una mezcla de gases formada en su mayor parte por hidrógeno y helio y, en menor concentración, por toda una multitud de elementos químicos) es un gas muy caliente, con una buena proporción de electrones libres y de iones, es decir, está parcialmente ionizado. El plasma solar es, por tanto, un excelente conductor de la electricidad, sobre todo en el interior estelar donde la conductividad supera incluso a la del cobre a temperatura ambiente. El plasma solar está además rotando continuamente en torno al eje de rotación del Sol, y lo hace con un período (entre 25 y 32 días), cuyo valor preciso (que conocemos gracias a la heliosismología) depende de la latitud y de la profundidad. Como consecuencia de la alta conductividad y de dicha rotación diferencial el Sol genera campos magnéticos mediante un complejo mecanismo que aún no hemos logrado descifrar por completo. Los campos magnéticos pueden visualizarse mediante "líneas de fuerza magnética", como las que podemos ver dibujadas en los libros de texto de física básica, con líneas saliendo de uno de los polos de un imán y uniéndose en forma de arco con el otro polo magnético de polaridad opuesta. Líneas muy cercanas entre sí visualizan fuertes campos magnéticos, mientras que líneas muy separadas indican que el campo es débil. Es importante resaltar que las leyes del electromagnetismo aplicadas a un plasma que es un excelente conductor de la elec-

tricidad implican que los campos magnéticos del Sol se ven atrapados por su propio plasma y son arrastrados a medida que éste se mueve hacia arriba y hacia abajo en la llamada "zona de convección", situada bajo la superficie visible del Sol. Es como si tuviésemos espaguetis cocinados sumergidos en miel de abeja y sometidos por completo a los movimientos del fluido.

En la zona de convección del Sol que llega en profundidad hasta un tercio del radio solar tienen lugar vigorosos movimientos turbulentos que recuerdan a aquellos que observamos en el agua hirviendo. Su origen físico se debe al hecho de que el interior del Sol donde tienen lugar las reacciones termonucleares de fusión es enormemente caliente (unos 15 millones de grados) y denso (unas 100 veces la densidad del agua), mientras que su superficie visible es relativamente fría (unos 6.000 grados) y muy tenue. Si el plasma de esta zona de convección no fuese un excelente conductor de la electricidad no tendríamos la continua y variopinta generación de campos magnéticos que se producen en el Sol. Y si esto fuese así, el Sol no sería entonces lo interesante y útil que resulta ser de cara a poder aspirar a entender, en términos físicos, muchos de los fenómenos que acontecen en otros contextos astrofísicos.

Mediante un complejo proceso que aún no es comprendido en su totalidad, parte de los campos magnéticos que emergen en la superficie del Sol se concentran y se intensifican hasta formar las gigantescas manchas solares que vienen siendo observadas desde los tiempos de Galileo. Estas sombras oscuras en la superficie solar (oscuras por estar unos 2.000 grados relativamente más frías que sus alrededores) pueden apreciarse en ocasiones a simple vista utilizando un filtro adecuado, y su número va en aumento a medida que la actividad magnética solar se acerca a su máxima intensidad, algo que sucede cada 11 años. Una mancha solar puede llegar a tener un diámetro tan grande como cincuenta mil kilómetros, lo que equivale aproximadamente a unas cinco veces el diámetro de la Tierra. Intensos campos magnéticos se extienden por todo su volumen y atraviesan su superficie. Tales campos magnéticos tienen una intensidad típica de unos 3.000 gauss. Comparativamente, el campo magnético terrestre que hace funcionar una brújula tiene un valor de medio gauss, mientras que un imán casero genera un campo magnético de unos 100 gauss. Un campo magnético de 3.000 gauss es realmente impresionante. Campos magnéticos tan intensos pueden de hecho generarse en los laboratorios terrestres con la ayuda de electroimanes. En el seno de ellos una cacerola de hierro saldría disparada para pegarse de inmediato en el polo más cercano al imán. Sin embargo, los campos magnéticos del Sol tienen un comportamiento muy distinto respecto de los que podemos experimentar en el aire no conductor que respiramos. Hasta cierto punto podemos simular sus efectos en gases calientes confinados por campos magnéticos generados en los laboratorios terrestres, lo que constituye la base de la idea para producir energía mediante la fusión de hidrógeno en helio. No obstante, dadas las enormes dimensiones de una mancha solar, y del Sol en su conjunto, hay un amplio dominio de la física que no es accesible mediante experimentos en los laboratorios terrestres. En cambio, el Sol realiza continuamente y gratuitamente nuevos experimentos en su propio laboratorio.



En esta imagen generada por ordenador, la superficie solar aparece cubierta de miles de polos magnéticos norte y sur junto con líneas de campo en forma de bucles que se extienden hacia la corona solar. En la imagen del recuadro, detalle de la superficie solar. Cortesía del International Solar-Terrestrial Physics Program y de NASA.

la acción de los campos magnéticos. Actualmente, en el Instituto de Tecnología de California (EE UU), y en otros centros de investigación de países que apoyan de forma inteligente con visión de futuro la investigación básica, grupos de investigadores en Física de Plasmas están intentando simular en los laboratorios terrestres protuberancias en miniatura, un billón de veces más pequeñas que las que se producen de forma

natural en el Sol. Lo han logrado muy recientemente, si bien se trata de estructuras de plasma que sólo viven un microsegundo. El objetivo final de este grupo de investigación es lograr confinar un plasma muy caliente mediante campos magnéticos con vistas a la construcción de máquinas capaces de una producción mucho menos contaminante de energía mediante la fusión termonuclear controlada, lo cual es diferente del proceso de fisión nuclear que constituye la base de las actuales y controvertidas centrales nucleares. Es de gran interés notar que muchas de las protuberancias que los astrofísicos estudiamos en el Sol "viven" durante semanas, mientras que otras desaparecen en un evento explosivo al cabo de solo unos minutos de su formación. Creemos que la estabilidad del plasma confinado en las protuberancias solares de larga vida está íntimamente relacionada con la topología de sus campos magnéticos, la cual estamos intentando descifrar con la ayuda de una técnica (la espectropolarimetría) que luego mencionaremos.

Pero el magnetismo solar no se reduce a estructuras gigantescas como las manchas y protuberancias solares. En general, los campos magnéticos emergen en la superficie del Sol de una forma filamentosa, altamente intermitente y con frecuencia con las dos polaridades magnéticas separadas por distancias espaciales tan pequeñas que no podemos

resolver con los telescopios actuales (cuyo límite de resolución es de unos 300 km sobre la superficie del Sol). Estos filamentos magnéticos se encuentran en un estado altamente dinámico causado precisamente por los movimientos turbulentos del plasma de la zona de convección. Cuando conjuntos de líneas de campo magnético de polaridad magnética opuesta entran en contacto en la atmósfera del Sol tiene lugar un catastrófico proceso de disipación de energía que pensamos es el responsable del enigmático calentamiento de la corona solar. Tales procesos de reconexión magnética pueden llegar a ser muy violentos y conllevan con frecuencia la eyección en el medio interplanetario de partículas cargadas (electrones y protones) con velocidades cercanas a la de la luz. En algunas ocasiones tienen lugar impresionantes erupciones de masa en las que billones de toneladas de gas coronal son expulsadas al espacio, lo que constituye una seria amenaza para los astronautas en misiones espaciales y para los satélites artificiales en órbita alrededor de la Tierra. Tenemos, sin embargo, sólo una idea general de por qué se producen éstos y otros fenómenos explosivos en el Sol. Sólo podemos decir con seguridad que se deben a la acción de los campos magnéticos, los cuales se generan en todos los plasmas astrofísicos en rotación, pero queda aún mucho por investigar y descubrir.

La clave para obtener información empírica sobre la intensidad, topología y evolución temporal de los campos magnéticos del Sol la constituye la observación y la interpretación física de la polarización de la luz solar. La luz es radiación electromagnética. Y ésta no sólo se caracteriza por su intensidad para cada longitud de onda, sino además por su estado de polarización, el cual está relacionado con la orientación del vector campo eléctrico de la onda en el plano perpendicular a la dirección de propagación. La luz emitida por los átomos en presencia de un campo magnético está polarizada, tanto más cuanto mayor es la intensidad del campo magnético. Gracias a la existencia de dos efectos físicos descubiertos en los laboratorios terrestres (los efectos Zeeman y Hanle) podemos obtener información sobre campos magnéticos en la atmósfera solar en un rango de intensidades que va desde una milésima de gauss hasta miles de gauss.

Recogiendo la luz solar mediante modernos telescopios, analizándola cuidadosamente con instrumentos adecuados (en particular, con espectropolarímetros) e interpretando las observaciones mediante estudios rigurosos de astrofísica teórica y simulaciones numéricas del proceso de generación y transporte de radiación polarizada en plasmas magnetizados, los astrofísicos intentamos explorar de esta manera un dominio de la física que de otra forma sería, hoy por hoy, inaccesible. Esta física es necesaria para poder llegar a entender el origen y los mecanismos del magnetismo en Astrofísica. En el caso concreto del Sol es además crucial porque el clima terrestre y el "clima" del espacio que rodea a la Tierra está modulado y se ve afectado por la propia actividad magnética del Sol.



Imagen de una protuberancia solar obtenida por el satélite SOHO, el 8 de julio de 1999. Cortesía del Consorcio SOHO (ESA/NASA).

Un viaje al Sol

Dr. Antonio Jiménez Mancebo
Instituto de Astrofísica de Canarias



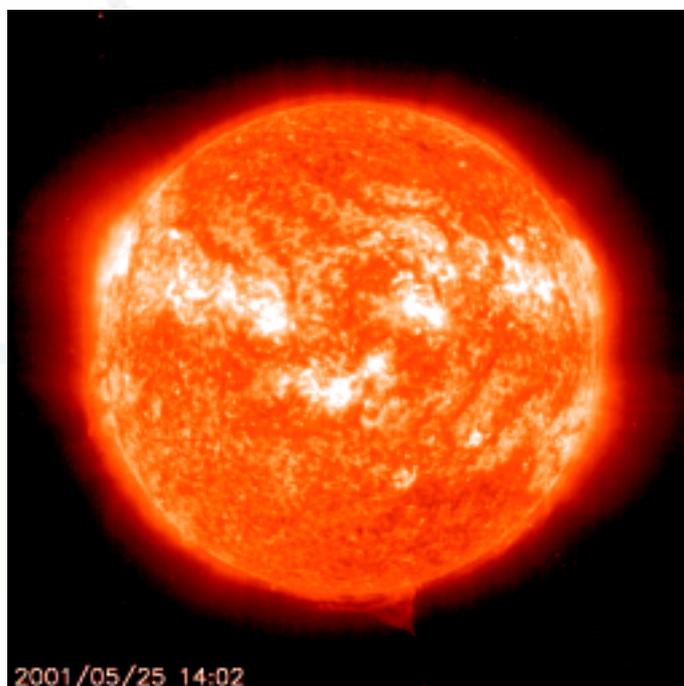
El sábado 2 de diciembre de 1995 tuvo lugar un hecho histórico para la comunidad científica internacional: un cohete Atlas Centauro II-AS (AC-121) despegaba del centro espacial de Cabo Cañaveral (Florida) con una preciada carga a bordo, el satélite SOHO (*Solar and Heliospheric Observatory*, Observatorio Solar y Heliosférico). Su misión: el estudio más profundo jamás realizado por el hombre de nuestra estrella, el Sol; los once sofisticados instrumentos que componen SOHO se encargarían de ello. Tres de estos instrumentos estarían dedicados al estudio de las oscilaciones solares, ondas de presión y de gravedad atrapadas dentro del Sol que se propagan desde el mismo núcleo solar hasta la superficie, permitiendo obtener información precisa de cómo es el Sol por dentro y determinar importantes parámetros físicos en función de la distancia al centro de nuestra estrella. (El Instituto de Astrofísica de Canarias ha participado de forma directa en dos de estos instrumentos: GOLF y VIRGO). Otros cinco instrumentos se encargarían de estudiar la atmósfera solar desde la misma superficie hasta la corona externa, a una distancia de 30 veces el radio del Sol. En concreto se estudiarían flujos y turbulencias, temperaturas y densidades del plasma, abundancias químicas, erupciones solares, campos magnéticos y emisiones en ultravioleta, así como la cromosfera y la corona solar, junto con su hasta ahora no comprendido calentamiento. Los tres últimos instrumentos tendrían como objetivo el estudio del viento solar, flujo de partículas expulsadas por el Sol a grandes velocidades y que llegan hasta nosotros produciendo, aparte de problemas en las comunicaciones, las hermosas auroras boreales. Sus principales tareas serían la detección de estas partículas, determinación de la masa, carga iónica, energías y el estudio del proceso de aceleración y propagación por el medio interplanetario. En definitiva, una flota de instrumentos de la más moderna tecnología dedicados exclusivamente al estudio profundo del Sol y que abriría una nueva época en la Física Solar.

Después de unas dos horas en órbita circular alrededor de la Tierra, SOHO comenzó su viaje espacial en dirección al Sol siguiendo una órbita de transferencia, ya que su destino final no era girar en torno a nuestro planeta, sino alcanzar el llamado punto Lagrangiano L1. Éste es un lugar situado a un millón y medio de kilómetros de la Tierra en dirección al Sol donde las fuerzas gravitatorias de nuestra estrella y de los planetas del sistema solar se anulan, creando una región en el espacio interplanetario de gravedad cero. SOHO empleó cuatro meses en llegar a su destino - unas cuatro veces la distancia de la Tierra a la Luna-, durante los cuales desplegó los paneles solares y realizó todo tipo

de pruebas de funcionamiento instrumental tanto a nivel del propio satélite como de la carga científica.

En abril de 1995, SOHO alcanzó la zona de gravedad nula y apuntó directamente al centro del Sol, siendo ésta la posición operativa del satélite para poder obtener la información científica deseada durante las 24 horas del día. Uno a uno se fueron poniendo en funcionamiento todos los instrumentos hasta quedar completamente operativos y comenzar a desentrañar los secretos que guarda nuestra estrella.

Abajo en la Tierra, los tres radares del llamado *Deep Space Network* (Red del Espacio Profundo) se encargaban de hacer llegar al satélite todas las instrucciones



El Sol visto por SOHO. Imagen cortesía de SOHO LASCO, EIT y MDI.

necesarias para su correcto funcionamiento y de recibir el flujo de datos que ya empezaba a enviar SOHO. Todo estaba coordinado por el personal de las agencias espaciales Europea y Americana, ESA y NASA, desde el Goddard Space Flight Center (GSFC) que la NASA tiene en Greenbelt (Maryland). También abajo en la Tierra, los más de 200 científicos de los 23 institutos de investigación y universidades que toman parte en el proyecto (el Instituto de Astrofísica de Canarias, entre ellos) empezaban a analizar los tan esperados datos después de los diez años transcurridos entre que se concibió el satélite y se hizo realidad.

Durante los siguientes casi tres años, hasta el 24 de junio de



1998, SOHO estuvo aportando la más valiosa información nunca obtenida del Sol, no solo por la continuidad de 24 horas diarias, sino también por su enorme calidad al no tener delante la distorsionante atmósfera terrestre, limitación inevitable de las observaciones desde la Tierra.

¿Y por qué hasta el 24 de junio de 1998? Porque en esa fecha sucedió algo terrible para los científicos de SOHO. Debido a una serie de fallos en cadena, SOHO empezó a girar sobre uno de sus ejes de forma descontrolada. Los datos enviados por su antena salían en direcciones distintas a la de la Tierra y, por este mismo motivo, no recibía las instrucciones del centro de control, sus paneles solares ya no apuntaban al Sol para la recarga

continua de sus baterías, su energía se iba acabando y, a medida que pasaban las horas, la situación se hacía más peligrosa. Todo el esfuerzo realizado por los expertos para recuperar el control del satélite fueron en vano, SOHO se estaba apagando poco a poco sin poder evitarlo. Tres días más tarde se le dio definitivamente por perdido.

Comenzó entonces una misión casi imposible, recuperar el satélite. Primero había que localizarlo, un cubo de poco menos de cuatro metros de lado situado a un millón y medio de kilómetros de la Tierra. Si se conseguía, habría que intentar establecer contacto telemétrico con él para cargar las baterías lo suficiente como para empezar a descongelar los previsiblemente congelados tanques de hidracina (combustible de los motopropulsores). Si se tenía suficiente éxito en este proceso, habría que apuntar el satélite al Sol para completar la carga de las baterías y proceder al descongelamiento del resto de sistemas e instrumentos.

A la sede de la NASA en Maryland (GSFC) empezaron a llegar los mejores expertos en tecnología espacial procedentes de varias partes del mundo para aunar los esfuerzos en esa difícil tarea. Al mismo tiempo, los tres radares de la Red del Espacio Profundo (Madrid, Goldstone y Canberra) rastreaban constantemente la zona del espacio interestelar donde se suponía que debía de encontrarse el satélite; un poco más tarde se le unió el radiotelescopio gigante de Arecibo. Durante tres largas semanas, la búsqueda resultó infructuosa, llenando de pesimismo y desesperación incluso a los científicos más optimistas.

El 23 de julio de 1998 sucedió lo que ya nadie esperaba. Las señales enviadas por el radiotelescopio de Arecibo encontraron un objeto cuyo eco fue recibido por la estación de Goldstone. Dicho objeto era del tamaño de SOHO y se encontraba en la zona donde se perdió. No había duda, SOHO había sido finalmente encontrado. De los datos de los radares se deducía que estaba girando a una vuelta por minuto sobre uno de sus ejes. Comenzó entonces un bombardeo de telecomandos al satélite para intentar establecer contacto con él, consiguiéndose dicho contacto telemétrico el 4 de agosto de 1998. El siguiente paso crucial era descongelar la hidracina para dar movilidad al satélite y apuntarlo al Sol. Esto se consiguió en un proceso muy lento, ya que al no estar los paneles solares apuntando directamente al Sol, la carga que adquirirían las baterías era muy débil. Esta poca energía se empleaba en calentar un poco la hidracina y volver a cargar las baterías durante horas antes de proceder a un nuevo calentamiento. Este proceso duró un mes y medio y fue favorecido al comienzo de septiembre de 1998, al entrar en una posición de la órbita en la cual los paneles solares de SOHO empezaron a apuntar al Sol de forma más frontal.

El 16 de septiembre de 1998, finalmente SOHO pudo ser maniobrado y apuntó de nuevo al Sol, comenzando entonces al encendido y puesta a punto de los once instrumentos. A finales de octubre de 1998, SOHO estaba de nuevo operativo y, lo que es más sorprendente, los once instrumentos no habían sufrido daños después de su involuntaria hibernación de casi cuatro meses.

En el momento de escribir estas líneas, SOHO sigue allí arriba maravillando a los astrofísicos solares de todo el mundo, aportando una valiosísima información de nuestro astro rey, vigilando su evolución y su comportamiento diario. A SOHO todavía le quedan algunos años de vida útil y nuevos satélites, actualmente en proyecto, le tomarán el relevo.

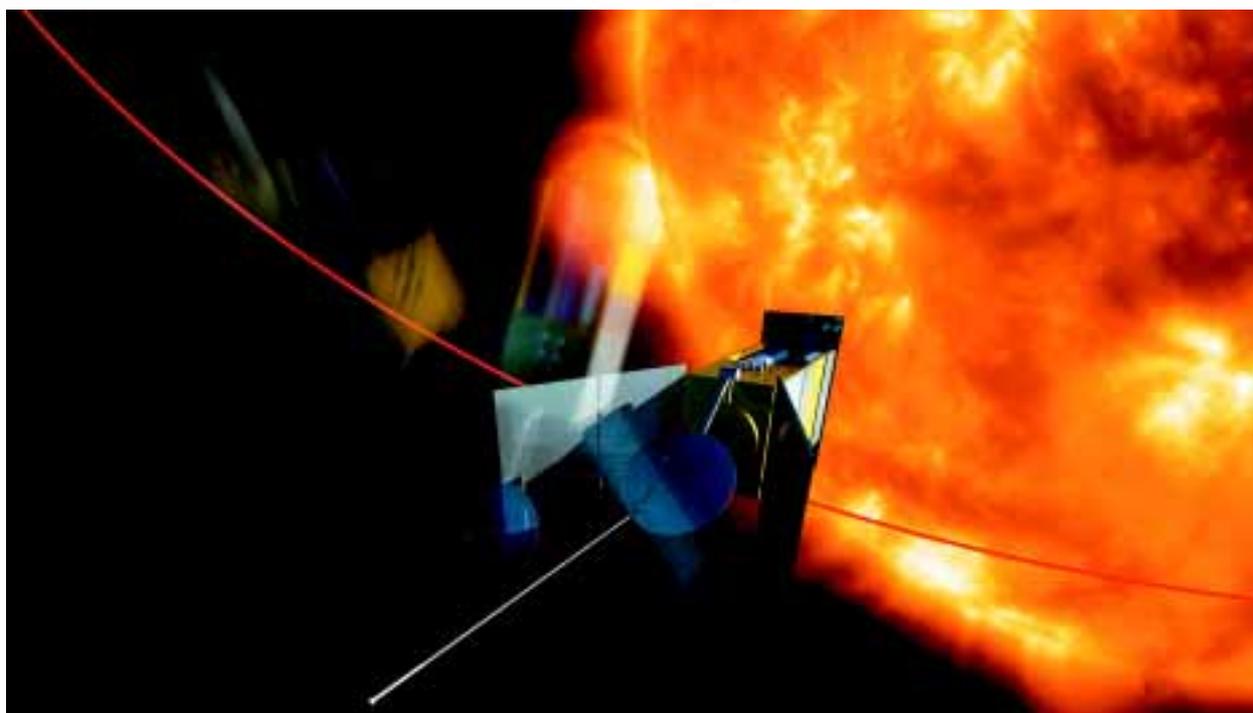
Las futuras misiones heliosféricas de la Agencia Espacial Europea

Dr. Valentín Martínez Pillet
Instituto de Astrofísica de Canarias



23 de febrero del año 2089. Toshifumi S., un ciudadano japonés que realiza su tesis doctoral en Europa, tiene previsto viajar a su país natal para reunirse con los suyos. Al levantarse ese día sintoniza el canal de televisión para ver la predicción del tiempo. A pesar de estar en febrero, en su aeropuerto de partida luce el Sol y hace un día espléndido. Todo parece ir estupendamente. Sin embargo, la emisión televisiva es cortada para anunciar que el centro de alerta internacional para la predicción de fenómenos solares acaba de informar de una erupción solar de clase 20 que ha producido una eyección de masa coronal dirigida hacia la Tierra. Toshi empieza a preocuparse, su vuelo estratosférico, que le pondrá en dos horas y media en Tokyo, puede verse retrasado. Se dirige al aeropuerto a probar suerte pensando "...por qué me tocaría este máximo de actividad solar...". ¿Ficción?. No tanto. La NASA, antes de lanzar el *Space Shuttle* Endeavour el 20 de abril de 2001 con siete astronautas a bordo, comprobó que no se hubiera producido ningún fenómeno energético en la superficie solar en fechas cercanas y que, por tanto, "el tiempo, el de más afuera, también estaba despejado". Es un hecho que las diferentes agencias espaciales de todo el mundo están convencidas de la necesidad de entender los complejos procesos que conforman lo que hoy en día llamamos relaciones Sol-Tierra. Por estas relaciones nos referimos a cómo todos los procesos de liberación energética que ocurren en la superficie solar afectan al entorno de la Tierra.

Una brújula en el Sol sería muy poco útil, pero no por no poseer un campo magnético como el terrestre (que es quien alinea la brújula con los polos Norte o Sur terrestre), sino porque el campo magnético solar es un auténtico embrollo. Este campo magnético es mucho más intenso que el terrestre. Su origen es todavía un misterio, pero las teorías que usan los investigadores para explicarlo no distan mucho de las usadas para explicar el campo magnético terrestre. Sin embargo, al ser el Sol una bola de plasma gaseoso (por comparación con nuestra superficie sólida), los campos magnéticos se ven envueltos en complejas interacciones con los movimientos del gas solar. El origen de estos movimientos a gran escala es parecido al fenómeno de las corrientes marinas. Pero en el caso del Sol, existe un ingrediente adicional: el gas está



Impresión artística del satélite Solar Orbiter en modo de observación en las cercanías del Sol. La imagen solar que mostramos es real y fue obtenida por el satélite SOHO (Gabriel Pérez, SMM/IAC).

burbujeando continuamente. Las altísimas temperaturas de la superficie solar producen movimientos convectivos (las burbujas) que interactúan con el campo magnético de la superficie. Todas estas complejas interacciones se traducen en el continuo aumento de la energía magnética en el Sol. Pero la naturaleza rara vez es capaz de almacenar energía magnética de forma estable. Después de un tiempo, una parte importante de esta energía es liberada de forma explosiva. En este proceso se desprenden energías equivalentes a millones de bombas nucleares (pero recordemos que no es una explosión nuclear lo que ha ocurrido) con emisión de radiación electromagnética de altas energías (rayos X), partículas radiactivas (aceleración de protones), etc. Estas explosiones ocurren a un ritmo de dos diarias durante el máximo de actividad solar (cada 11 años). La dirección en la que son dirigidas rara vez coincide con la dirección donde se encuentra la Tierra. Pero si éste fuera el caso, al llegar todas estas partículas producirían lo que conocemos como tormentas geomagnéticas (al interactuar con los cinturones magnéticos, o de Van Allen, de la Tierra). Los efectos pueden ser dramáticos, cortocircuitos en satélites orbitando la Tierra, pérdida de comunicaciones con las bases de seguimiento terrestre, cortocircuitos en plantas eléctricas, mal funcionamiento de sistemas tan populares como el GPS (o el futuro Galileo, equivalente Europeo) y otras. No es el Sol o la Tierra quien está cambiando en este caso. Es nuestra civilización.

En la actualidad existen varios satélites que estudian el Sol y el entorno terrestre que se ve afectado por estas tormentas. La Agencia Espacial Europea (ESA) y su equivalente norteamericana (NASA) tienen el satélite SOHO observando continuamente el Sol. Este satélite ha permitido avances extraordinarios en nuestra comprensión de estas tormentas solares. SOHO está haciendo de guardián en la actualidad, y representa el mejor sistema de alerta de que disponemos. Pero SOHO se apagará un día (le quedan todavía varios años). Para ese momento, las distintas agencias espaciales están preparando una batería de satélites que permitan seguir vigilando estos procesos y, lo que es más importante, ser capaces de predecirlos. Esta capacidad de predicción pasa necesariamente por entender el magnetismo solar y muchos de estos satélites son medidores (a distancia) de este campo magnético solar. Uno de los mensajes de SOHO (pero también de las investigaciones realizadas desde telescopios basados en tierra) es que nos estamos perdiendo los detalles de estos procesos. Necesitamos ver el Sol desde más cerca. Por ello la ESA aprobó el año pasado la misión denominada *Solar Orbiter*.

Como su nombre indica, el *Solar Orbiter* va a orbitar alrededor del Sol (como la Tierra). Pero para acceder a esos detalles que no vemos, se acercará al astro rey hasta una distancia de 30 millones de km (la Tierra está a unos 150 millones de km). De esta manera verá la superficie solar con un grado de detalle que no hemos alcanzado hasta el momento (podrá resolver estructuras de unos 50 km en la superficie solar). Jugando con la gravedad de Venus, del Sol, así como de la potencia propulsora que la energía solar le dará, será capaz de alcanzar una órbita helio-estacionaria, es decir, que verá siempre el mismo punto del Sol. Además, los encuentros con Venus lo irán sacando progresivamente del plano de la eclíptica (donde se encuentra la órbita de la Tierra)

accediendo a una visión privilegiada de los polos solares. Todas estas propiedades harán que el *Solar Orbiter* envíe datos a la Tierra de una calidad excepcional que permitirán mejorar nuestra capacidad de comprensión y predicción de los fenómenos explosivos que antes mencionábamos.

El lanzamiento del *Orbiter* está previsto para el periodo 2009-2011. El motivo de este retraso es la necesidad de contar con la tecnología que nos permita acercarnos al Sol sin achicharrarnos. La intensidad de la radiación solar es 16 veces mayor que en las proximidades de la Tierra y no es fácil eliminar este exceso de calor. Una vez lanzado, los investigadores deberán ser pacientes y esperar dos años hasta el primer encuentro con el Sol, sólo entonces empezará a enviar datos a la Tierra. Después, está previsto que dure entre cuatro y siete años en función de las circunstancias de la misión (y de las propias tormentas solares que podrían destruirlo, crucemos los dedos).

En paralelo con el desarrollo de la tecnología necesaria para acercarse al Sol, las instituciones científicas europeas deberán desarrollar la instrumentación que volará en este satélite. Lo primero será reunirse y discutir en detalle las preguntas científicas que se quieren responder con esta instrumentación. La primera de estas reuniones tendrá lugar en el Puerto de la Cruz (Tenerife) en mayo de 2001. A esta reunión asistirán científicos de todo el mundo y de las distintas agencias espaciales. La NASA, que cuenta con misiones como STEREO, que observará el Sol desde dos puntos de la órbita terrestre en "estero", o *Solar Probe*, un kamikaze hacia el Sol, ha mostrado su interés en el proyecto *Solar Orbiter*. Durante el congreso ESA y NASA (junto con la agencia espacial japonesa, ISAS, y la rusa, RSA) intentarán coordinar las futuras misiones espaciales que van a estudiar el Sol y la heliosfera que lo rodea. Aunar esfuerzos en este tema revertirá en el beneficio de toda nuestra civilización tecnológica. Incluso, de nuestro amigo Toshi.

¿Por qué los astrónomos estudian el Sol?

Dr. Jorge Sánchez Almeida
Instituto de Astrofísica de Canarias



El Sol proporciona toda la energía que mueve la vida en la tierra y, por ello, nos afecta directamente. Si se hiciera un poco más oscuro o más brillante variaría el clima terrestre hasta hacer imposible nuestra vida, con lo cual resulta fácil explicar el interés de los seres humanos por su funcionamiento. Sin embargo, otras razones mucho menos obvias son responsables del interés de los astrónomos por el Sol. La Astronomía tiene como meta entender por qué existen estructuras como estrellas o galaxias, por qué son como las observamos y cómo funcionan. En este camino se hace necesario explicar por qué enor-

mes nubes de materia difusa y en apariencia inconexa deciden colapsar hasta producir estrellas, objetos que viven y mueren mezclando sus desechos con el medio del que proceden. Éstos y otros muchos procesos críticos a la hora de entender el Universo no se pueden reproducir en laboratorios terrestres. En otras palabras, experimentos similares a los que permiten desarrollar nuevos combustibles y descubrir nuevos fármacos son incapaces de decirnos cómo nace una estrella. El motivo es simple. Las cantidades de materia, las temperaturas y los intervalos de tiempo en los que se produce el colapso son demasiado grandes como para poderlos encerrar en un pequeño laboratorio terrestre. Puesto en palabras que quieren resultar chocantes, *los sesudos científicos terrestres difícilmente hubieran predicho la existencia de estrellas*. Sabemos que existen simple y llanamente porque las vemos cada noche en el cielo. Podemos volar, construir ordenadores y producir otras muchas maravillas, pero los conocimientos que permiten estos avances son difícilmente aplicables a cosas mucho mayores que el planeta Tierra.



Imagen de la corona solar tomada por el satélite norteamericano TRACE. Está formada por millones de estructuras en forma de arco que parten de la superficie solar (la zona oscura en la parte inferior de la imagen). Casi todos los objetos astronómicos tienen corona, pero sólo en el Sol se puede estudiar con este detalle.

Esta limitación de la Astronomía, incapaz de experimentar directamente con los objetos que estudia, explica el especial interés de los astrónomos por el Sol. Pero, ¿cuál es exactamente su papel en esta historia? El Sol es, en muchos aspectos, un objeto típico del Universo. En él suceden cosas que también se dan en las demás estrellas y que, como mencioné anteriormente, no forman parte de nuestra experiencia cotidiana. Sin embargo, el Sol se encuentra más cerca de la Tierra que ningún otro objeto *típico del Universo*, lo que permite un estudio detallado. Podríamos decir que **suple la carencia de laboratorios de Astronomía**. Como cualquier laboratorio, el Sol cumple una doble función. Por un lado, permite contrastar nuestros conocimientos sobre la física y la química que afecta a todos los objetos astronómicos. Una vez que nuestras teorías describen adecuadamente el comportamiento del Sol podemos aplicarlas más allá con garantías. Por ejemplo, nuestras teorías sobre cómo funciona una estrella predicen que la cantidad de luz que emite, su edad y su tamaño están estrechamente relacionados, parámetros que en el Sol se pueden determinar con mucha precisión. Como observamos que siguen la relación predicha, tenemos confianza en la teoría y creemos que describe adecuadamente todas las demás estrellas. La segunda función de cualquier laboratorio es la de descubrir nuevos fenómenos. La observación del Sol ha resultado en la práctica una constante fuente de inspiración. En él vemos con facilidad comportamientos que difícilmente hubiéramos descubierto en otros objetos de no ser porque sabemos que se dan en nuestro astro. Un

ejemplo claro es el llamado *ciclo de actividad*: la superficie solar cambia de apariencia cada once años; el número de *manchas*, unas estructuras oscuras fácilmente visibles, varía en el tiempo hasta llegar a desaparecer durante el mínimo del ciclo. Esta variación va acompañada de un pequeñísimo cambio en la cantidad total de luz que emite el Sol. Como observamos variaciones cíclicas en la cantidad de luz procedente de otras estrellas, creemos que ellas también tienen manchas y sufren ciclos.

Otro descubrimiento solar de carácter universal es la existencia de la corona, ese halo tenue que se hace visible durante los eclipses totales y que los hace tan llamativos (ver figura). Está extremadamente caliente comparada con la superficie solar, lo cual resulta sorprendente. Usando un símil fácil de entender, es como si en una habitación con estufa hiciera más frío cuanto más nos acercamos a la fuente de calor. Yendo desde la corona a la superficie solar la temperatura disminuye hasta mil veces.

Pues bien, por sorprendente que parezca, casi todos los objetos astronómicos tienen también su corona. Por qué la tienen es algo que aún hoy no entendemos adecuadamente. La solución del enigma pasa por explicar previamente el comportamiento de la corona solar.

En resumen, el Sol es, con diferencia, el mejor laboratorio de Astronomía del que disponemos. Por esta razón resulta imprescindible, pues permite comprobar las ideas fundamentales sobre cómo se comportan los objetos astronómicos y, con frecuencia, en él se descubren fenómenos comunes a todos ellos.



- «El Sol y el medioambiente espacial». Por FÉLIX HERRERA CABELLO (ULL). Aula Magna de la Facultad de Física y Matemáticas de la Universidad de La Laguna.
- «El Sol, algo más que una estrella». Por MANUEL VÁZQUEZ ABELEDO (IAC). Auditorio de CajaCanarias, en Santa Cruz de Tenerife.
- «Viviendo con una estrella». Por VALENTÍN MARTÍNEZ PILLET (IAC). Museo de la Ciencia y el Cosmos de Tenerife.
- «El Sol, nuestra estrella». Por ANTONIO JIMÉNEZ MANCEBO (IAC). Centro Base de Servicios Sociales del Ayuntamiento de Granadilla (Tenerife).
- «La Estrella de nuestra Vida». Por INÉS RODRÍGUEZ HIDALGO (IAC/ULL). Auditorio del Liceo de La Orotava.
- «Jugando con el Sol». Por J. ANTONIO GONZÁLEZ HERNÁNDEZ (Agrupación Astronómica Isla de La Palma). Sala de Conferencias de CajaCanarias, en Santa Cruz de La Palma.
- «El Sol, la Estrella de nuestra Vida». Por CLARA RÉGULO RODRÍGUEZ (IAC/ULL). Sala de Conferencias de CajaCanarias, en Santa Cruz de La Palma.
- «El Sol del nuevo Milenio». Por ANTONIO EFF-DARWICH (ULL). Sala de Cine del Cabildo de Gran Canaria.

OTRAS ACTIVIDADES ORGANIZADAS:

- Viernes 27 de abril de 2001. Observación directa del Sol desde el Museo de la Ciencia y el Cosmos del Organismo Autónomo de Museos y Centros del Cabildo de Tenerife.
- Programas de radio especiales de CANARIAS INNOVA, una iniciativa del IAC en colaboración con Radio Nacional de España en Canarias.

RESPONSABLES DE LA CAMPAÑA «El Sol, la estrella de nuestra vida»

Coordinadores:

Teodoro Roca Cortés
Pere Lluís Pallé

Traducción y adaptación del material didáctico:

Inés Rodríguez Hidalgo

Página Web:

Itziar Anguita

Coordinación con centros educativos y culturales:

Itziar Anguita
Luis Cuesta

Relaciones con los medios:

Carmen del Puerto
Begoña López Betancor

Jornada de Puertas Abiertas Solares en el Observatorio del Teide:

Miquel Serra-Ricart

José Antonio Bonet

Actividades en el Museo de la Ciencia y el Cosmos:

Ignacio García de la Rosa

Coordinación de charlas de divulgación:

Secretaría del Área de Investigación
Juan Carlos Pérez Arencibia

28 DE ABRIL: JORNADA DE PUERTAS ABIERTAS SOLARES

Como resultado de la Jornada de Puertas Abiertas en los telescopios solares del Observatorio del Teide, organizada en el marco de las actividades con motivo del Día internacional Sol-Tierra por el IAC y el Departamento de Astrofísica de la Universidad de La Laguna, unas 2.500 personas visitaron este Observatorio el sábado 28 de abril. En esta jornada se permitió la entrada de visitantes desde las 10 de la mañana hasta las 6 de la tarde, de forma ininterrumpida. Las visitas, de dos horas de duración, fueron guiadas, para lo cual se contó con el personal del Observatorio, astrónomos y guías profesionales. Como en ocasiones anteriores, también colaboraron la Cruz Roja y la Guardia Civil.

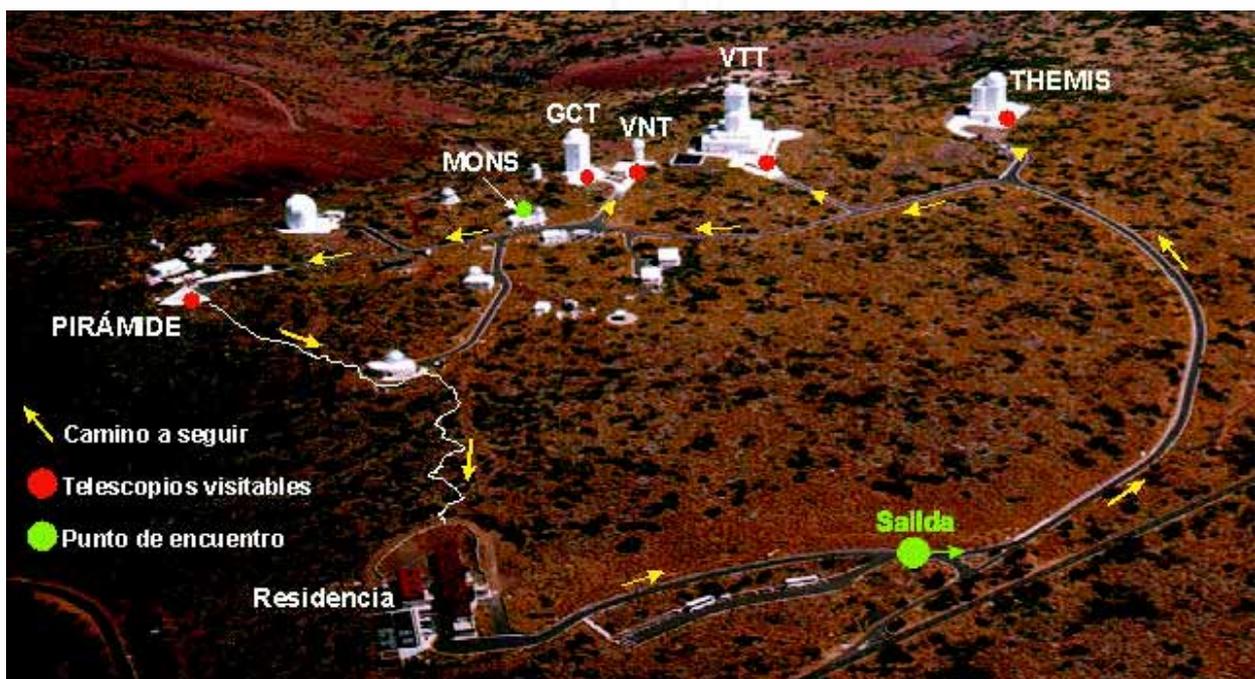
Se visitaron cinco instalaciones del Observatorio del Teide: los telescopios alemanes VTT y "Gregory Coudé", el Laboratorio Solar, el telescopio franco-italiano THEMIS y el telescopio infrarrojo español "Carlos Sánchez" acogieron a los visitantes en grupos. El éxito de las jornadas fue posible gracias a la labor de un amplio equipo de personas: 20 astrónomos (incluidos alumnos del Departamento de Astrofísica de la ULL), que impartieron charlas y explicaciones y guiaron a los grupos por el interior de los telescopios; 7 guías, que llegaron a desplazar hasta 500 personas simultáneamente; 5 personas de mantenimiento y personal de seguridad, que con-

tribuyeron a la coordinación de toda la operación. También se montó una pequeña carpa con paneles expositivos sobre las diferentes instalaciones solares de los Obser-

vatorios del IAC (incluidas las del Observatorio del Roque de los Muchachos, en La Palma), así como material de divulgación, vídeo y dos telescopios pequeños -Celestrón C8 y Meade X50-, con filtros solares para la observa-

ción directa del Sol. Todo ello coordinado desde un 'centro de operaciones' localizado en la residencia del Observatorio del Teide que siguió el desplazamiento por la zona, con la ayuda de un ordenador y una emisora central, de hasta 7 grupos de visitantes a la vez.

2.500 personas visitaron
en grupos organizados
las instalaciones del
Observatorio del Teide.



En la figura se presenta sobre el mapa del Observatorio del Teide el recorrido realizado por los grupos de visitantes.

La Jornada de Puertas Abiertas Solares del 28 de abril, en imágenes:



Fotos: Pere Lluís Pallé (IAC)

