

Divinizado o “creado por Dios”, presente en los monumentos, en la pintura, el cine, la literatura, la música... el Sol ha sido siempre objeto de curiosidad y estudio por parte del ser humano. Podría pensarse que una estrella tan familiar ya no puede ofrecer sorpresas... pero nada más lejos de la realidad.

AL SOL QUE MÁS CALIENTA

INÉS RODRÍGUEZ HIDALGO

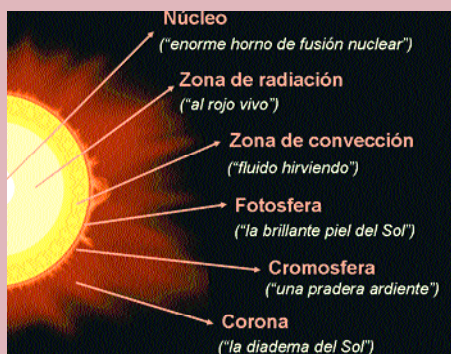
INSTITUTO ASTRÓFISICO DE CANARIAS. DPTO. DE ASTROFÍSICA DE LA UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA

El Sol es un gran desconocido para el gran público y, en muchos aspectos, para los físicos solares que afrontamos el desafío de comprender su “funcionamiento”. A lo largo de diez ideas clave, este texto es una invitación a conocer mejor nuestra turbulenta, dinámica y fascinante estrella.

1. LA ESTRELLA DE NUESTRA VIDA

El Sol es realmente *la estrella de nuestra vida*: sin su calor la Tierra sería un témpano helado a -180° , y sin su luz estaríamos a oscuras, ni siquiera veríamos la Luna, que brilla por reflejar la luz solar. La energía del Sol 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 plantas y animales que, a su vez, se alimentaron de ellas. Los árboles que proporcionan madera, celulosa o papel necesitan energía solar. Sin ella no tendríamos leña, carbón ni derivados del petróleo para nuestros fuegos y motores...

El Sol nació de una gran nube de gas y polvo interestelar hace algo más de 4.600 millones de años. Poco más tarde, del disco de materia a su alrededor se formaron los planetas. El estudio del clima en el pasado indica que la *luminosidad* solar se ha mantenido constante, dentro de un 5% de variación, durante

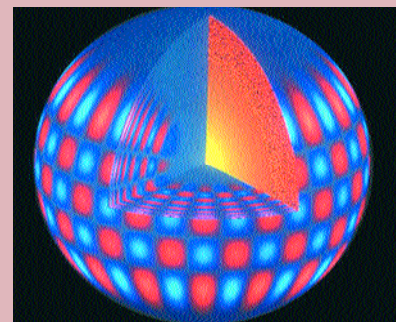


Capas del Sol

Si un piano tiene 88 teclas, cada una corresponde a una nota musical, el Sol vibra con 10 millones de “notas” diferentes a la vez. Esta imagen generada por ordenador muestra el patrón de movimientos ascendentes (color azul) y descendentes (color rojo) del material solar para un modo concreto de oscilación (una “nota” solar individual). Como puede verse, las oscilaciones involucran a la superficie y capas interiores del Sol, por lo que la Heliosismología permite sondear el interior solar.

<http://www.noao.edu/education/ighelio/SolarMusic/slide3.jpg>

Oscilaciones del Sol



los últimos 3.500 millones de años. El Sol se encuentra hacia la mitad de su vida, y dentro de un tiempo similar, cuando agote el hidrógeno fresco en su interior, iniciará su evolución hacia el final.

2. ALGO MÁS QUE UNA ESTRELLA CORRIENTE

El Sol es una gran esfera de materia *autogravitante* (la fuerza de gravedad –compresión– y la presión del gas y la radiación –expansión– están *equilibradas*), con suficiente masa como para que su interior haya alcanzado la temperatura necesaria para iniciar *reacciones nucleares de fusión* que son su *fente de energía* propia. Es decir, una *estrella*, la unidad estructural en Astrofísica.

El Sol y su corte de planetas forman parte de la *Vía Láctea*, una familia de 200.000 millones de estrellas, gas y polvo. Ocupa el “extrarradio” de nuestra galaxia, en uno de sus brazos espirales, a unos 27.000 años-luz del centro galáctico. (1 año-luz no es una medida de tiempo, sino de distancia. Equivale a la recorrida por la luz, viajando a 300.000 km/s, durante un año: casi 9 billones y medio de kilómetros).

Lo cierto es que el Sol es una estrella bastante normalita. Tiene un radio de 696.000 km (54,5 Tierras puestas en fila) y una masa de

2 quintillones de kilos. La materia solar es enormemente densa en su interior y muy tenue en sus capas exteriores; pero su densidad media es 1,4 veces superior a la del agua: el Sol en una inmensa piscina... ino flotaría! La temperatura en su superficie es cercana a los 5800 K (0 grados Kelvin, K, corresponde a -273°). Y su luminosidad es de 386 cuatrillones de vatios).

Hasta aquí esta estrella no parece muy apasionante... Sin embargo el Sol, aproximadamente en el centro –un foco de las órbitas elípticas– de nuestro sistema planetario, es la estrella más cercana, la única que podemos estudiar con alta resolución espacial: los actuales instrumentos de observación solar permiten distinguir detalles de unos 75 kilómetros sobre su superficie. Su distancia media a la Tierra es de “sólo” 149 millones y medio de kilómetros, u 8 minutos-luz, así que siempre vemos el Sol “de hace 8 minutos”.

Un último aspecto hace del Sol algo más que una estrella corriente: hoy por hoy es imposible reproducir en la Tierra las condiciones de presión y temperatura de los interiores estelares, por lo que el Sol sirve como “laboratorio” para confirmar, rechazar o corregir las teorías de estructura y evolución estelar.

3. ¿DE QUÉ ESTÁ HECHO EL SOL?

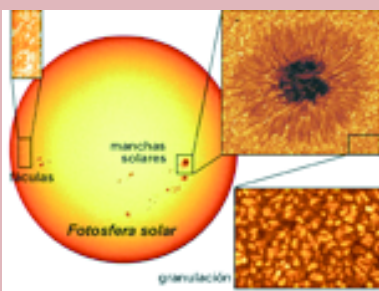
¿Se podría caminar sobre el Sol, sumergirse o flotar en él? La pregunta alude a que el material solar no es sólido, líquido ni gaseoso, sino que se encuentra en el llamado *cuarto estado* de la materia, el plasma. Un plasma es similar a un gas total o parcialmente ionizado, con una temperatura tan alta que todos o muchos de los átomos se disocian en electrones y núcleos o iones, que pueden moverse libremente y exhiben además fenómenos colectivos dirigidos por las fuerzas eléctricas y magnéticas.

La composición química (en peso) de 1 kilo de plasma de la superficie solar es de un 73% de hidrógeno, un 25% de helio, y sólo un 2% de elementos químicos más pesados, llamados *metales* en Astrofísica. Ésta es esencialmente la composición de la nube de gas y polvo de la que se originó el Sol.

4. ¿POR QUÉ BRILLA EL SOL?

Esta es, sin duda, la pregunta del millón, ya que una estrella lo es por generar su propia energía. Tras décadas de acaloradas discusiones físicas, esta cuestión tuvo respuesta hacia los años treinta del siglo pasado, cuando Hans A. Bethe propuso las reacciones de

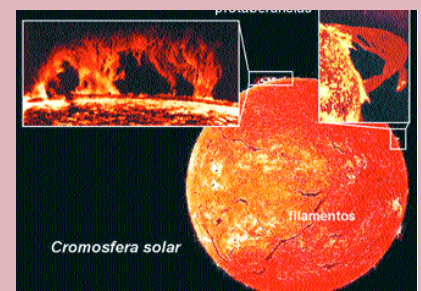
Fotosfera solar



En la imagen observamos grupos de manchas solares, rodeadas de faculas brillantes. La espectacular mancha fue observada por investigadores del IAC, quienes la encontraron tan preciosa que la llamaron “Claudia” (por la modelo Claudia Schieffer).

Toda la superficie del Sol presenta, vista con alta resolución espacial, un aspecto de “paella”: se trata de la granulación, evidencia de los movimientos convectivos que calienta la fotosfera desde abajo.

Cromosfera solar



Su aspecto en la emisión roja del hidrógeno en 656,3 nanómetros ha sido comparado con una “pradera ardiente”. En la imagen se observan protuberancias brillantes en el borde, que se denominan filamentos cuando se proyectan oscuras sobre la superficie. Se perciben también las regiones activas con manchas (más claramente visibles en la fotosfera) rodeadas de las “plages”, contrapartida cromosférica de las faculas de la fotosfera.

fusión nuclear como la fuente de energía capaz de mantener el brillo de las estrellas durante miles de millones de años.

La fusión nuclear transforma 4 millones de toneladas de material solar en energía cada segundo, un ritmo bastante lento; a pesar de ello, la enorme masa del Sol hace que la cantidad de energía generada sea muy grande; y gracias a ello, el Sol ha mantenido constante su luminosidad durante una gran parte de su vida.

Además de generar energía, las reacciones nucleares modifican la composición química del Sol: de un kilo de plasma del interior solar, un 37% es hidrógeno, un 61% es helio, y un 2% son elementos más pesados. Como la cantidad de hidrógeno inicial era del 73%, el Sol ha consumido aproximadamente la mitad de su combustible.

5. EL PULSO DE UNA ESTRELLA

Para explicar la estructura y evolución de las estrellas los astrofísicos elaboramos complejos *modelos*, códigos físico-matemáticos basados en ecuaciones y datos observacionales. Estos modelos describen cómo varían la temperatura, densidad, presión, composición química... del Sol desde su centro a la superficie. Para entender cómo

“funciona” el Sol es imprescindible un buen conocimiento de su interior, pero éste es inaccesible a la observación directa, ya que la materia bajo la superficie es opaca a la radiación electromagnética. ¿Cómo sondear, entonces, el “corazón” del Sol, para contrastar los modelos con la realidad?

Afortunadamente nuestra estrella tiene un “pulso”, en el que participa la superficie y toda la estrella. El Sol oscila, vibra como un instrumento musical cuando es excitado, y por su interior viajan ondas de presión similares a las ondas sísmicas en la Tierra, con un periodo dominante de 5 minutos. De su análisis se ocupa la **Heliosismología**, cuyos resultados confirman en gran medida los modelos de estructura solar.

Según los modelos, el interior solar consta de las siguientes capas:

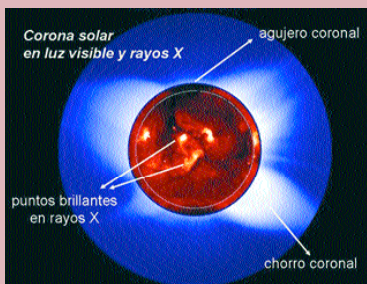
- el *núcleo*, hasta el 20% del radio solar, inmenso horno en el que tiene lugar la fusión
- Envolviendo al núcleo como una “manta” que mantiene constante su temperatura, la *zona de radiación*, hasta el 71% del radio. A través de ella, la energía generada en el núcleo se transporta hacia fuera por radiación, es decir, mediante ondas electromagnéticas.

- El último tercio del radio solar corresponde a la *zona de convección*, donde enormes celdas de material solar, de distintos tamaños, llevan consigo el calor desde la base de esta capa hasta la superficie.

6. UNA ESTRELLA IMPERFECTA

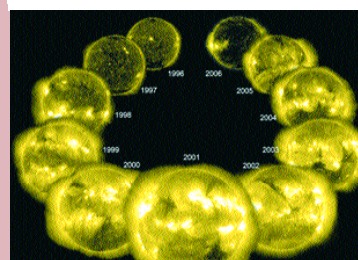
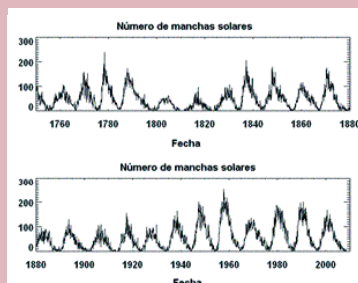
Los antiguos se equivocaban considerando el Sol una esfera inmaculada, homogénea y estática. La atmósfera solar (sus capas exteriores) es muy inhomogénea, muestra multitud de estructuras y está en continuo movimiento y evolución. Hace cuatro siglos, las observaciones de Galileo de cráteres en la Luna, satélites en torno a planetas o manchas en el Sol mostraron unos cielos tan imperfectos como la Tierra.

Volviendo a la pregunta del millón, el Sol brilla porque a partir de los últimos 500 km de su radio la materia se vuelve por fin transparente a la radiación electromagnética. Al observar el Sol vemos la radiación procedente de esta estrecha capa llamada *fotosfera*. En ella se observa de forma permanente la *granulación*, un patrón irregular y cambiante de estructuras brillantes y oscuras correspondientes a la parte superior de las más pequeñas celdas de convec-



Corona solar

Su aspecto en la emisión roja del hidrógeno en 656,3 nanómetros ha sido comparado con una “pradera ardiente”. En la imagen se observan protuberancias brillantes en el borde, que se denominan filamentos cuando se proyectan, oscuras sobre la superficie. Se perciben también las regiones activas con manchas (más claramente visibles en la fotosfera) rodeadas de las “plages”, contrapartida cromosférica de las fáculas de la fotosfera.



Ciclo solar

La manifestación más evidente del ciclo solar es la variación periódica, cada aproximadamente 11 años, del número de manchas solares. El número e intensidad de otros fenómenos y estructuras magnéticas también cambia con este periodo, por ejemplo, el aspecto de la corona en radiación ultravioleta.

ción que calientan la fotosfera desde abajo. De forma transitoria, entre el ecuador y unos 40° de latitud en ambos hemisferios, aparecen regiones oscuras llamadas *manchas solares*, intensas concentraciones magnéticas más frías (y oscuras) que su entorno, que emergen casi siempre en grupos, cambian y desaparecen, rodeadas de *fáculas*, extensas áreas magnéticas brillantes.

7. ¿HASTA DÓNDE LLEGA EL SOL?

Quienes hayan presenciado un eclipse total de Sol saben que éste no termina en su superficie visible: en los segundos anteriores y posteriores a la totalidad se ve en el borde solar un resplandor rosado-rojizo; es luz emitida por el hidrógeno de la *cromosfera* (esfera de color), capa de grosor variable situada sobre la fotosfera. Para observarla en todo el disco se utilizan filtros especiales. Sus estructuras más llamativas son las *protuberancias*, grandes formaciones de plasma más denso y frío que su entorno, con forma de chorro o de uno o varios arcos. "Suspendidas" en el borde se ven brillantes mientras que, proyectadas sobre el disco solar, aparecen como largas cintas oscuras llamadas *filamentos*. Las *fáculas* tienen su contrapartida, cientos de kilómetros más arriba, en las *plages* brillantes.

Pero tampoco el Sol termina en la cromosfera: durante la totalidad de un eclipse aparece una "diadema" blanquecina, la corona del astro rey, extendiéndose hasta muchas veces el radio solar. La corona sólo es visible en estos momentos, o a través de coronógrafos, telescopios que ocultan el disco brillante del Sol, porque su brillo es un millón de veces menor que el de la fotosfera, por lo que normalmente queda enmascarada por la luz difu-

sa del cielo diurno. La emisión UV y en rayos X de la corona permite observarla en todo el disco desde satélites espaciales, ya que esta radiación no atraviesa la atmósfera terrestre. Además de puntos brillantes en rayos X, en la corona pueden verse espectaculares chorros coronales en forma de huso, penacho o abanico, y extensas zonas oscuras llamadas agujeros coronales.

Sorprendentemente, *la temperatura crece desde la superficie hacia la cromosfera y corona*. Aunque el magnetismo (sin el cual estas capas no existirían) parece el principal responsable de este hecho, su explicación es todavía una apasionante cuestión abierta de la Física Solar.

¿Hasta dónde llega el Sol? En realidad su atmósfera no termina bruscamente, sino que representa una suave transición al medio interplanetario. La zona bajo la influencia solar se llama *heliosfera...* ¡y vivimos dentro de ella! Las naves Voyager, actualmente mucho más allá de la órbita de Plutón, aún no han detectado su límite.

8. UNA ESTRELLA CON PERSONALIDAD MAGNÉTICA

El plasma solar caliente, muy buen conductor de la electricidad y en continuo movimiento, origina corrientes eléctricas y *campos magnéticos*. Así que el Sol tiene una auténtica personalidad magnética, es una estrella activa, término que en Astrofísica designa a lo relacionado con el magnetismo.

Además, la configuración magnética del Sol sufre cambios rápidos y drásticos. Por ejemplo, en las regiones activas se producen *fulguraciones*, súbitas explosiones que liberan una enorme cantidad de energía de origen magnético; existen protuberancias eruptivas, con emisión de partículas; el *viento solar*, un flujo continuo y variable

de partículas cargadas a gran velocidad, "sopla" en todas direcciones desde la corona; en ella tienen lugar *expulsiones de masa coronal*, violentas erupciones en las que miles de millones de toneladas de materia son lanzadas al espacio, eventualmente hacia la Tierra.

9. UNA ESTRELLA VARIABLE

Además de estos rápidos cambios, los campos magnéticos solares varían a lo largo del ciclo de *actividad solar*: cada once años aproximadamente se produce un notable aumento del número e intensidad de las manchas y otras estructuras activas, asociado con diferencias en sus zonas de aparición y su morfología. Los grupos de manchas surgen en latitudes altas en ambos hemisferios solares al principio de un ciclo y, según éste avanza, van apareciendo más cerca del ecuador. La orientación magnética de las regiones activas bipolares de un hemisferio es constante, y opuesta a la del otro hemisferio, durante un ciclo, y la configuración se invierte en el siguiente. Además, al ciclo de once años se superponen variaciones temporales más lentas.

A pesar del oscurecimiento local producido por las manchas, en fases de mayor actividad el Sol emite más cantidad de energía y es globalmente más brillante; el consiguiente efecto de mayor calentamiento en la Tierra debe ser considerado en los estudios del cambio climático global. Por ejemplo, entre 1645 y 1715, época conocida como *Mínimo de Maunder*, la actividad solar fue inusualmente baja, sin apenas manchas; un periodo de tiempo algo mayor, que incluye este mínimo, con severos inviernos y temperaturas muy bajas en Europa, fue llamado "la pequeña edad de hielo".

10. CONVIVIENDO CON UNA ESTRELLA

El Sol influye en la Tierra principalmente a través de su *radiación visible*, la *radiación ultravioleta* y X, muy energética (con cambios superiores al 50%, pero sólo afecta a la atmósfera terrestre muy exterior) y el *flujo de partículas cargadas*.

La correlación observada entre una mayor actividad solar y una mayor temperatura en la Tierra sugiere que el Sol debe ser parcialmente responsable de la variabilidad del clima terrestre. Sin embargo, los últimos informes del Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC) indican que los factores de origen humano (sobre los que podemos tener control) son abrumadoramente más importantes que los solares (que nos afectan desde siempre).

El cambiante *clima o meteorología espacial* viene determinado esencialmente por las emisiones de partículas cargadas desde el Sol. Aunque la Tierra está protegida por la *magnetosfera*, su escudo magnético natural, el clima espacial influye notablemente sobre nuestro entorno: además de ser el causante de las bellísimas *auroras boreales y australes*, las *tormentas magnéticas* afectan a satélites y naves espaciales, sus instrumentos y tripulantes, perturban las comunicaciones por radio y satélite, y causan serios problemas en aparatos magnéticos y redes de tuberías y fluido eléctrico.

EPÍLOGO

Y así vivimos, al Sol que más caliente (aunque me temo que, en este sistema planetario en torno a una sola estrella, no hay donde elegir...) Éste es nuestro Sol, y actualmente calienta la Tierra justo lo necesario para preservar la vida, isomos afortunados!

ACTIVIDADES PROPUESTAS

1. OBSERVAR LA FOTOSFERA SOLAR CON UN SOLARSCOPE

Este instrumento proyecta la imagen del disco solar en luz visible en una pantalla que queda ensombrecida por la misma estructura del aparato, por lo que la observación es completamente segura. Produce una imagen de unos 10 cm de diámetro, suficiente para distinguir las manchas solares o tránsitos de Venus y Mercurio. Su mayor ventaja es que permite la observación en grupos pequeños. Algunos modelos educativos incluyen plantillas que posibilitan el cálculo de la velocidad de rotación de la Tierra y del Sol o la latitud desde el puesto de observación, por ejemplo. Su precio es bastante asequible, entre unos 50 y 100 €, según los modelos.

Se puede "jugar a ser Galileo": dibujar las manchas solares para apreciar su complejidad, determinar su posición sobre el disco respecto al ecuador solar, seguir las a lo largo del tiempo para ver su evolución y comprobar la rotación solar, etc.

<http://www.astrosafor.net/Actividades/solarscope.htm>

2. ESCUCHAR EL "PULSO" DEL SOL: <http://solar-center.stanford.edu/singing/>

El periodo dominante de las oscilaciones solares cerca de la superficie es de unos 5 minutos, al que corresponde una frecuencia de 3,3 milésimas de hertzio (1 Hz = 1 vibración/segundo). El rango de frecuencias audibles por el ser humano comienza en unos 20 Hz, luego el pulso del Sol se encuentra en la región de los infrasonidos. Sin embargo, si las frecuencias de la compleja señal recibida del Sol se multiplican por un factor 42.000 quedan trasladadas al rango audible, y el "sonido" del Sol puede escucharse. Podrán oír 40 días de vibraciones comprimidos en unos segundos...

3. VISITAR LA WEB DEL SOLAR AND HELIOSPHERIC OBSERVATORY (SOHO)

<http://sohowww.nascom.nasa.gov/>

Este satélite de ESA-NASA lanzado en diciembre de 1995, ha revolucionado totalmente la Física Solar. Desde su privilegiada posición a 1,5 millones de kilómetros de la Tierra, permite una observación continua del Sol. Cuenta con un amplio conjunto de instrumentos que proporcionan imágenes del Sol en luz visible y en varias longitudes de onda ultravioleta, imágenes de la corona solar gracias a dos coronógrafos, magnetogramas y un largo etcétera.

Las secciones Hot shots from SoHO, Pick of the Week, and The best of SoHO son magníficas galerías de imágenes y videos acompañados de textos sencillos y amenos, un estupendo recorrido por gran parte de la Física Solar. Se puede ver cómo está el Sol cada día en las secciones The Sun now, Sunspots, and Spaceweather. Se podrían contar las manchas y reproducir el último ciclo solar y medio.

Un magnífico complemento a esta información son las imágenes y videos obtenidos con otros telescopios en Tierra como el DOT (<http://dot.astro.uu.nl/albums/images/album.html>) y la Torre Solar Sueca (<http://www.solarphysics.kva.se/>) en el Observatorio del Roque de Los Muchachos (La Palma). Y satélites como Hinode (<http://solarb.msfc.nasa.gov/>) y TRACE (http://trace.lmsal.com/POD/TRACE_pod.html)

Las imágenes de STEREO (<http://stereo.gsfc.nasa.gov/gallery/best.shtml>), una misión de NASA que consiste en dos observatorios en órbita alrededor del Sol, uno por delante y otro por detrás de la Tierra, son muy recomendables: con esos dos puntos de vista, es posible reconstruir imágenes 3D del Sol!!!■