

NUESTRA ESTRELLA COTIDIANA: EL SOL

Jesús Galindo Trejo*

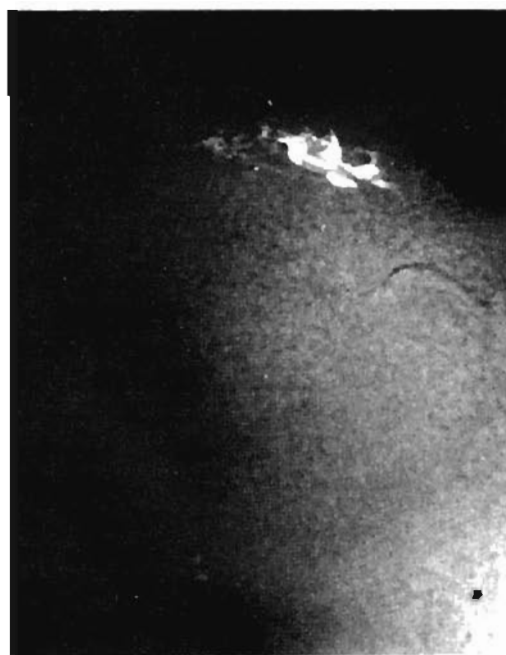
Instituto de Astronomía
Universidad Nacional Autónoma de México

En el Universo existen miles de millones de estrellas que pueden ser observadas a simple vista o con la ayuda de telescopios y detectores. La esplendor del cielo nocturno ha maravillado al hombre en todas las épocas; sin embargo, debido a la división aparente del cielo, en el de noche y en el de día, la estrella más cercana a nosotros, el Sol -responsable de tal división- no impresiona tanto como las estrellas nocturnas. No obstante los adelantos tecnológicos en materia de telescopios, no es posible observar el disco, esto es, la superficie de ninguna estrella, a excepción de la del Sol. Tener la posibilidad de un estudio detallado del disco solar significa contar con un laboratorio cósmico para investigar el estado de la materia visible más abundante en el universo: el plasma. Esta es la sustancia de que están hechas las estrellas: un gas conductor de corriente eléctrica, incandescente y controlado por campos electromagnéticos. La luz del Sol permite medir su cercanía con la Tierra. Tarda en promedio 8 minutos 16 segundos desde que abandona la superficie solar hasta que alcanza nuestro planeta. En comparación, la luz de Próxima Centauri, la siguiente estrella más cercana, nos llega después de 4 años 98 días de haber dejado su superficie. Estudiando al Sol, estamos indagando la naturaleza de otras muchas estrellas que son inaccesibles a una observación detallada por su lejanía.

Se calcula que nuestra estrella se formó hace 4,600 millones de años a

partir de materia interestelar, estableciéndose un equilibrio entre la fuerza de gravedad, la fuerza de la presión gaseosa y la de la presión de radiación; al aumentar la temperatura en su interior se dieron las circunstancias adecuadas para el "nacimiento" energético del Sol, iniciándose las reacciones termonucleares o de fusión. A partir de átomos de hidrógeno se sintetizan átomos de helio generándose grandes cantidades de energía. Las condiciones de temperatura y presión para tales reacciones sólo pueden darse en la Tierra después de la explosión de una bomba atómica.

El Sol, como todas las estrellas, evoluciona en el tiempo; de acuerdo con conocimientos teóricos, la siguiente fase de desarrollo será cuando su tempe-



La fotosfera fotografiada en luz blanca. Se aprecia un fenómeno muy raro: una ráfaga solar visible en la región más fría de la atmósfera del Sol.

* Actualmente en año sabático en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Tonantzinla, Puebla.

ratura baje y su diámetro crezca para convertirse en una estrella de las llamadas gigantes rojas; su tamaño puede ser tal que signifique el fin de la Tierra al ser absorbida por la atmósfera solar. Afortunadamente, para esto faltan aún varios millones de años. Se calcula que nuestra estrella se encuentra a la mitad de su periodo estable de existencia. Ciertamente, hay estrellas más jóvenes y otras mucho más viejas; el Sol es una estrella común y corriente, aunque particularmente importante para la vida en la Tierra, pues gracias a ella puede proveerse de luz y calor.

La masa de nuestra estrella está constituida en un 72% por hidrógeno, y un 26% por helio; el resto de los elementos químicos sólo contribuyen con el 2%. a su masa, la cual es del orden de 1.98×10^{30} kg, que equivale a aproximadamente 330,000 veces la masa de la Tierra. El diámetro medio del Sol es de 1,392,530 km. Sería necesario alinear 109 Tierras, una contigua a la otra, para abarcar tal distancia. El Sol no es sólo una gran esfera de plasma, sino que posee un campo magnético -a manera de un inmenso imán en su interior- que produce muy variados fenómenos que describiremos más adelante. Además, nuestra estrella gira en torno a sí misma, pero no lo hace en su superficie como un cuerpo sólido; así, en los polos solares, una rotación completa dura casi 32 días y en el ecuador apenas 27 días; esto se conoce como rotación diferencial.

El núcleo del Sol es el lugar donde se genera la energía que este cuerpo irradia a partir de las reacciones de fusión; abarca una región esférica de casi 1/4 del radio solar. Se estima que la temperatura alcanza ahí hasta 16 millones de grados (la escala de temperatura aquí utilizada es la absoluta o Kelvin; difiere de la escala centígrada sólo en que el cero absoluto se encuentra a -273.15 grados centígrados; además los grados en ambas escalas son iguales); el plasma posee entonces una

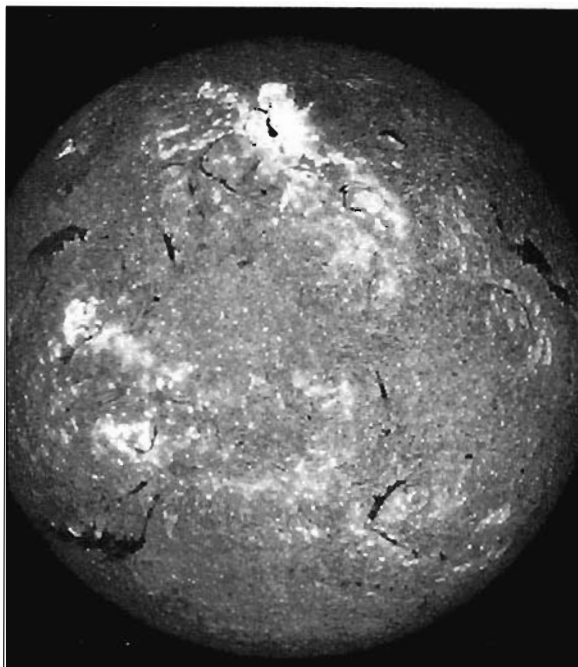


Imagen del Sol en luz de la línea H α del hidrógeno; corresponde a la cromósfera.

densidad 13 veces mayor que la del plomo. Aunque el núcleo tiene sólo la mitad de la masa solar, ahí se encuentra concentrada el 99% de la energía radiante. Se trata de energía electromagnética de longitud de onda muy corta, rayos X y gama. Los fotones energéticos resultantes de la fusión intentan abrirse camino hacia regiones superiores del interior solar; sin embargo, son absorbidos y reemitidos por la materia circundante y necesitan alrededor de 10 millones de años para alcanzar la superficie solar. Para entonces la longitud de onda ha variado y aquellos fotones emergen como luz visible. La región del interior solar donde ocurren esos procesos de absorción y re-emisión abarca a partir del límite del núcleo hasta una distancia de 0.86 del radio solar; se le conoce como zona radiativa. En regiones superiores, los fotones en su viaje hacia la superficie, poco antes de llegar a ésta, experimentan mayor resistencia a su avance; aparece una diferencia substancial de temperatura que crea especies de burbujas de gas caliente, formándose las llamadas celdas de convección; és-



Protuberancia solar estacionaria en la alta cromósfera.

tas son transportadas a la superficie donde emiten su energía. Sobre esta zona de convección, la cual tiene ya una temperatura de 500,000 grados Kelvin, se encuentra la primera capa atmosférica del Sol.

La fotosfera, la región más baja de la atmósfera solar, tiene aproximadamente 500 km de altura, aunque la mayor parte de la luz visible que emite el Sol proviene de los 100 km más altos. Esto hace que la orilla o limbo solar muestre un aspecto bien definido; sin embargo, como superficie solar, no se trata de un estrato sólido. Siendo la fotosfera la región más densa de la atmósfera solar, aún resulta sumamente enrarecida, pues su densidad apenas alcanza el 0.01% de la de la atmósfera terrestre al nivel del mar. La temperatura de la fotosfera es de unos 6000 grados Kelvin. Básicamente consta de gránulos de aproximadamente 1000 Km de ancho que tienen forma poligonal y corresponden a las porciones superiores de las celdas de convección; en el centro de cada gránulo asciende el plasma, descendiendo nuevamente por las orillas. La velocidad de este flujo constante es de casi 500 m/seg. El campo magnético en las orillas de los gránulos aparece intensificado, y cada gránulo tiene una vida media de sólo 10 minutos.

El resultado de la presencia de un campo magnético en la atmósfera del

Sol, así como de la rotación diferencial y del flujo turbulento en la zona de convección, es la llamada actividad solar; ésta se manifiesta en la fotosfera a través de las manchas solares que aparecen en los lugares donde el campo magnético es muy intenso (hasta 4000 veces mayor que el global del Sol); ya que el efecto inducido por éste es el de inhibir el movimiento del plasma, su temperatura y luminosidad disminuyen, lo que hace que, por contraste, esta región aparezca oscura respecto a los alrededores brillantes; sin embargo, si pudiéramos extraer la mancha del Sol y colocarla en el fondo oscuro del cielo, sería decenas de veces más brillante que la Luna llena. La mancha consta de una umbra fría 2000 grados Kelvin menos caliente que el fondo fotosférico circundante; alrededor de aquélla existe la penumbra menos oscura, apenas 1000 grados Kelvin menos caliente que el mismo fondo circundante. El tamaño de una mancha solar puede variar, desde el tamaño de un gránulo, hasta varias decenas de miles de kilómetros; generalmente las manchas se agrupan y evolucionan, alcanzando así longitudes de hasta 100,000 km. La vida media de una mancha es de 6 días; la de un grupo grande de manchas puede ser de varias semanas. Al rotar la fotosfera y acercarse una mancha al limbo solar, por el llamado efecto Wilson, da la impresión que la umbra es una depresión de la fotosfera; sin embargo, se trata de una ilusión óptica, pues debido a que el plasma en la umbra es menos denso que el de la fotosfera circundante, es más transparente y, por lo tanto, uno puede observar regiones más profundas.

El número de manchas solares varía periódicamente, cada 11 años en promedio, alcanzando un máximo; éste es el llamado periodo de actividad del Sol. En la fase actual de actividad, tal máximo se alcanzó probablemente en junio de 1990. Además existe un periodo magnético del Sol: cada 22 años se

invierte la polaridad del campo magnético global.

En la fotosfera alta existen también regiones extendidas más brillantes que el fondo circundante; son las llamadas fáculas, término que en latín significa antorchas pequeñas; corresponden a plasma más caliente y denso respecto al fondo.

Arriba de la fotosfera se encuentra una región de apenas 2,500 km de ancho, aún más tenue y caliente que aquella; se trata de la cromósfera. Su nombre se debe a su apariencia, observada usualmente durante los eclipses totales de Sol, ya que el hidrógeno a esa altura emite preponderantemente en su línea espectral $H\alpha$ que corresponde a luz roja. En la actualidad es posible observar la cromósfera sobre todo el disco, utilizando filtros $H\alpha$ de banda angosta. La cromósfera muestra muy variadas estructuras, de tal manera que algunas de ellas son continuaciones de estructuras fotosféricas. Así, las llamadas playas cromosféricas, calientes y brillantes, corresponden a las fáculas. Además se encuentran inmersas en campos magnéticos intensos, aunque, casi 10 veces menores que los de las manchas

solares. La granulación continúa hasta la cromósfera baja en forma de los llamados espículos; se trata de chorros de plasma que tienen un diámetro de 500 a 1200 km y que surgen y desaparecen en cuestión de minutos; alcanzan temperaturas de hasta 10,000 grados Kelvin. Estos chorros flameantes dan a la cromósfera la apariencia de una pradera en llamas.

Otras estructuras cromosféricas que caracterizan la actividad solar son las protuberancias, especies de nubes de plasma controladas por el campo magnético local, el cual las sostiene contra su peso; se observan en el limbo solar. Por otra parte, de encontrarse en el disco solar, dan la apariencia de hilos o filamentos oscuros, lo cual indica que son más frías (apenas unos 7,000 grados Kelvin de temperatura) y más densas que la cromósfera circundante.

Las protuberancias se clasifican en estacionarias y en activas; éstas últimas muestran una gran variedad de apariencias. Las protuberancias estacionarias son de las estructuras más estables de la atmósfera solar; sin cambio substancial de su forma pueden existir desde un par de meses hasta casi un



Protuberancia activa en forma de arcos fotografiada en luz de neón.

año; su fin natural consiste en que de pronto se elevan como un todo y desaparecen en las capas superiores de la atmósfera; a esto se le llama desaparición brusca. Su apariencia es la de enormes cortinas perpendiculares a la superficie solar; tienen un espesor máximo de unos 8,000 km, hasta 70,000 km de altura y alcanzan los 200,000 km de largo; generalmente estas protuberancias se forman en las regiones entre las manchas solares. El campo magnético interno de la protuberancia, aunque poco intenso comparado con el de aquellas, es suficiente para mantener estable el plasma de la protuberancia; la periodicidad en la aparición de las protuberancias estacionarias sigue prácticamente el mismo patrón que las manchas solares, aunque ligeramente desfasado.

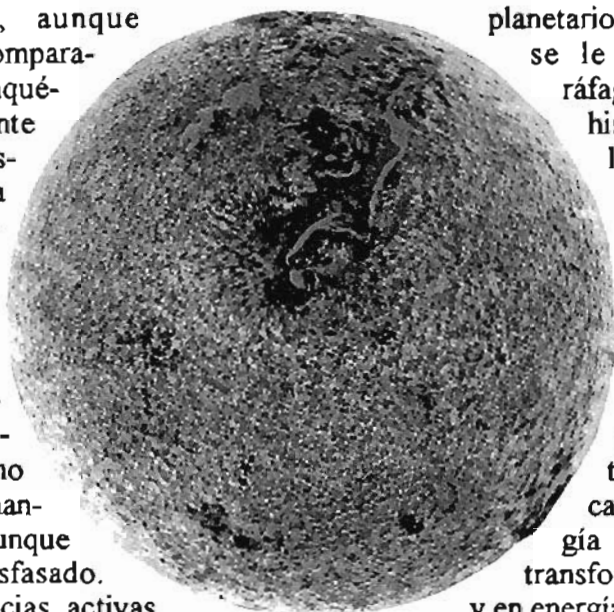
Las protuberancias activas muestran una diversidad de formas; en general son más calientes, de vida media más corta y de campos magnéticos más intensos que los de las estacionarias. Por ejemplo, las protuberancias en forma de arco, siendo unas de las más espectaculares, parecen conectar dos manchas solares; existe entonces una circulación del plasma. A veces se desarrollan sistemas de arcadas que muestran la complejidad del campo magnético que los forma. La altura típica de tales arcos es de varias decenas de miles de kilómetros y sobreviven apenas algunas horas. Las protuberancias en forma de rocío son estructuras de plasma que son eyectadas al espacio interplanetario, formando los llamados plasmoides. En contraste, en el caso de las

protuberancias llamadas de oleada, el plasma es lanzado con velocidades menores que la de escape para el Sol (618 km/seg), ocasionando que la materia, después de elevarse algunas centenas de miles de kilómetros, descienda a la cromósfera de nuevo en el transcurso de 10 a 20 minutos.

Las protuberancias activas están íntimamente relacionadas con el fenómeno más energético que sucede en la atmósfera solar y cuyo efecto se deja sentir en todo el sistema planetario. A tal fenómeno se le conoce como

ráfaga solar; aunque, históricamente, se le definió como un rápido abrilantamiento en la luz de la línea H α del átomo de hidrógeno, básicamente se trata de un proceso mediante el cual grandes cantidades de energía magnética son transformadas en calor y en energía cinética de partículas

cargadas que son aceleradas a velocidades relativistas, así como de considerables masas de plasma que son eyectadas al espacio interplanetario. Una ráfaga solar se manifiesta prácticamente en todo el espectro electromagnético, emitiéndose masivamente desde ondas de radio hasta rayos X y gama, esto en el transcurso de minutos a horas. Las ráfagas sólo excepcionalmente llegan a observarse en la fotosfera; de hecho, en una ocasión así, fueron descubiertas en 1859. Existe una tendencia a que las ráfagas se repitan en el mismo lugar y con características similares; además la ocurrencia de una puede inducir que suceda otra a considerable distancia de la primera. Igualmente, una ráfaga puede provocar que una protuberancia estacionaria



desaparezca; a su vez, la desaparición de ésta puede inducir una ráfaga. Por lo general, después de una ráfaga se genera un sistema de arcadas, estableciéndose un cierto intercambio de plasma entre diferentes regiones. El tipo de ráfaga más energética es la llamada de dos bandas; surge a partir de un filamento estacionario que experimenta una desaparición brusca; una vez que ha desaparecido el filamento surgen dos bandas brillantes, paralelas a la posición que tenía antes el filamento, que emiten luz intensa en H α . Las ráfagas suceden, de preferencia, en regiones activas complejas, por ejemplo, en la cercanía de grupos grandes de manchas solares, donde el campo magnético muestra gran variación de polaridad; cuando sucede una ráfaga en el limbo solar se puede apreciar que el abrillantamiento, es decir la región del plasma caliente, alcanza alturas de hasta 15,000 km sobre la fotosfera.

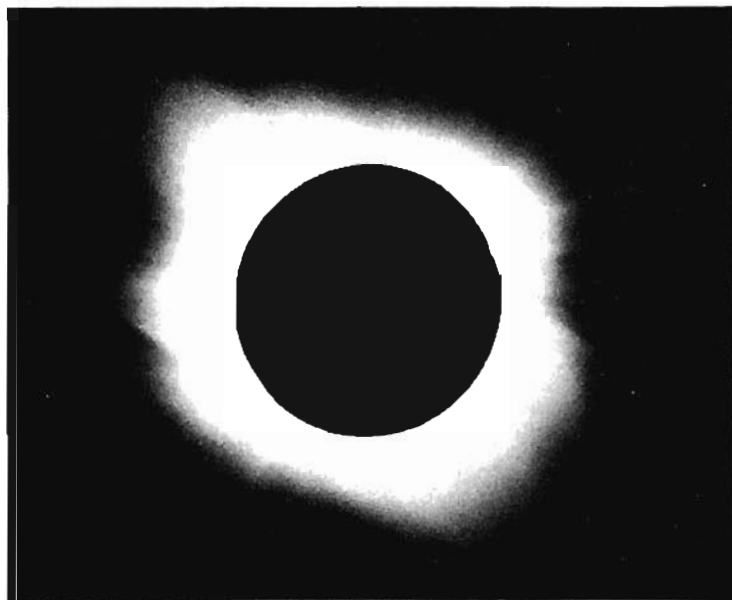
Al suceder una ráfaga, fabulosas cantidades de partículas cargadas y plasmoides de considerables dimensiones son catapultados al espacio interplanetario a grandes velocidades, típicamente a varios miles de kilómetros por segundo, formándose las llamadas ondas de choque, que atraviesan todas las regiones atmosféricas del Sol. Las partículas cargadas (electrones y protones, aunque a veces también iones pesados de alta energía, es decir, rayos cósmicos solares), al llegar a la Tierra, interaccionan con su coraza magnética, llamada magnetósfera, y con la atmósfera alta. Un resultado de esto son las llamadas auroras polares; se trata de emisiones de luz de varios colores, dependiendo del tipo del átomo o molécula de la atmósfera terrestre que ha sido excitado por las partículas energéticas; tienen la forma de grandes cortinas luminosas, sobre todo rojas y verdes. Suceden normalmente en la alta atmósfera, en regiones polares; sólo excepcionalmente, cuando la actividad solar alcanza altos niveles, se pueden

observar en latitudes bajas. Por ejemplo, en marzo de 1989, debido a una sucesión de varias ráfagas muy intensas, se reportaron auroras en la península de Yucatán; incluso, en registros históricos, se sabe de su observación en la Ciudad de México. Otro efecto de una ráfaga en el entorno terrestre es la perturbación en las comunicaciones debido a las explosiones en la emisión de ondas electromagnéticas que se generan durante la aceleración súbita de electrones. Para un astronauta en el espacio, las emisiones de partículas cargadas y de radiación electromagnética de una ráfaga solar pueden ser sumamente peligrosas.

A partir de la cromósfera alta, en una región de apenas algunas decenas de kilómetros, tiene lugar uno de los fenómenos más impresionantes de la atmósfera solar; la temperatura empieza a aumentar con la altura de tal forma que alcanza, a unos cuantos miles de kilómetros arriba, temperaturas entre dos y cinco millones de grados. Estamos entonces en la capa atmosférica más tenue y caliente del Sol, la corona. Esta región se extiende hasta la Tierra y más allá. La inversión de la temperatura en la corona constituye



El Sol en rayos X, mostrando la corona, la región más caliente de la atmósfera solar.



Eclipse total de Sol en un momento de máxima actividad; se aprecia la corona extendida.

uno de los principales problemas de la física solar. Se cree que es debida al calentamiento por ondas magnetohidrodinámicas, es decir, una combinación de ondas sonoras con oscilaciones del campo magnético, que provienen de la zona de convección.

La corona puede admirarse durante los eclipses totales de Sol, siendo entonces tan luminosa como una Luna llena. Su apariencia depende de la fase de actividad del Sol. Así, en el mínimo de actividad, el resplandor coronal es simétrico, con grandes rayos en la región ecuatorial y apenas algunos cortos y tenues en los polos. En cambio, en el máximo de actividad, la corona es más brillante y estructurada; presenta grandes rayos y torrentes distribuidos por todo el perímetro solar; es más espectacular. Aunque en la actualidad existe ya el coronógrafo que permite observar la corona en todo momento, pues provoca internamente en el telescopio un eclipse artificial al bloquear ópticamente la fotosfera, la calidad del oscurecimiento y la penetración de las observaciones aún no superan las de un eclipse total real; es por eso que los astrónomos solares todavía persiguen los eclipses de continente a

continente. Por otra parte, el avance tecnológico ha permitido diseñar detectores que permiten observar la corona no sólo en el limbo, sino incluso en el disco solar. Debido a las altas temperaturas, las emisiones electromagnéticas son, sobre todo, en el extremo ultravioleta y rayos X. Analizando imágenes en tales regiones espectrales, notamos que la apariencia del Sol es muy diferente a lo que estamos acostumbrados; aparece un Sol oscuro. Las regiones claras indican lugares donde se emiten intensamente esas radiaciones y corresponden a campos magnéticos, con líneas de fuerza cerradas, que tienden a evitar que escape el plasma. Por el contrario, en los sitios muy oscuros llamados hoyos coronales, la emisión de radiación es débil, el campo magnético funciona como una especie de canal de salida para el plasma que abandona continuamente al Sol; es el llamado viento solar. Resulta interesante que tales hoyos coronales no participan en la rotación diferencial de la fotosfera, sino que rotan como en un cuerpo rígido. Se puede afirmar que, generalmente, todo fenómeno coronal coincide con alguna manifestación de la actividad solar en las capas atmosféricas inferiores. Por ejemplo, los grandes rayos coronales aparecen arriba de las regiones activas fotosféricas; las protuberancias en arco llegan a alcanzar alturas coronales formando arcadas coronales. Arriba de las protuberancias estacionarias en la cromósfera, aparecen los llamados torrentes en forma de yelmo.

Las estructuras coronales, rayos, torrentes y las grandes arcadas, llamadas transitorios coronales, que se propagan espectacularmente hacia el espacio interplanetario, son condensaciones de plasma magnetizado que pueden observarse desde alturas de 0.5 a 1, hasta incluso a 10 radios solares de distancia. Los hoyos coronales en los polos son prácticamente permanentes; sin embargo, la mayoría de los hoyos en otras

latitudes evolucionan en tal forma que cuando se encuentra el Sol en su fase de mínima actividad, ellos alcanzan su máxima extensión; la temperatura típica de un hoyo coronal es de 1 millón de grados y son generalmente más densos que las regiones brillantes en la corona.

El viento solar es un flujo continuo de partículas cargadas -mayormente electrones y protones, con iones y núcleos de átomos pesados- que el Sol emite en todas direcciones, a velocidades que varían de 200 a 900 km/seg. A partir de su emisión, el viento solar llega a la Tierra después de casi 5 días y se extiende posteriormente por el resto del sistema solar hacia el medio interestelar; junto con el viento es transportado un campo magnético.

Como hemos señalado, sólo las regiones de la atmósfera solar pueden ser observadas de manera directa; sin embargo, en años recientes, estudiando el llamado desplazamiento Doppler en líneas espectrales solares, se han podido detectar oscilaciones intermitentes en la superficie del Sol con periodos cercanos a los 5 minutos y con amplitudes de casi 1 km/seg. Esto es sólo una manifestación del hecho de que el Sol está vibrando continuamente en su interior como un objeto resonante: se trata de ondas sísmicas. Por lo tanto, es posible inferir la estructura y la dinámica del interior solar. Así, por ejemplo, se ha determinado que la zona de convección debe extenderse más profundamente que lo supuesto hasta ahora; abajo de esta zona, el Sol rota casi como un cuerpo rígido con un periodo de 27 días.

Otro aspecto interesante y aún controversial del interior solar, son los llamados neutrinos solares. En el núcleo del Sol, como consecuencia de las reacciones de fusión, son generados neutrinos -partículas subatómicas sin carga eléctrica, de masa casi nula que se mueven casi a la velocidad de la luz- que interaccionan difícilmente con la

materia; sin embargo, se han ideado detectores para registrar estas partículas tan huidizas. Los flujos medidos de neutrinos resultan ser apenas un tercio del valor predicho por la física nuclear y los modelos del interior solar. Aunque varias alternativas teóricas se han propuesto para resolver la discrepancia, un camino más seguro parece ser el desarrollo de mejores y más elaborados detectores de neutrinos.

Ciertamente, nuestro entendimiento del Sol ha crecido en los últimos años gracias al avance de la tecnología de detectores y de los vehículos espaciales -como el del proyecto Ulises, que en estos momentos se dirige al Sol para estudiar por primera vez sus regiones polares prácticamente *in situ*- y, sobre todo, gracias al progreso en los planteamientos teóricos que han conducido a una correcta interpretación de las observaciones. No obstante, sabemos que nuestra estrella nos reserva todavía muchos de sus secretos. Por lo pronto, vale la pena reconocer que nuestro Sol, en verdad, no sólo es fuente de luz y calor, sino también de valioso conocimiento con vigencia universal.

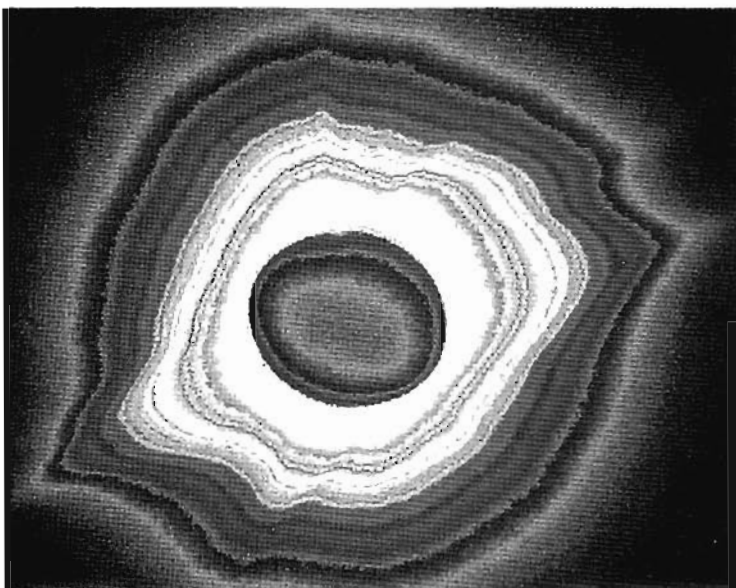


Imagen digitalizada del eclipse total de Sol del 11 de julio de 1991. En la digitalización, el color introducido ayuda a reconocer estructuras del plasma coronal que usualmente son indetectables en la imagen original. Imagen procesada en el Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Tonantzintla, Puebla.