

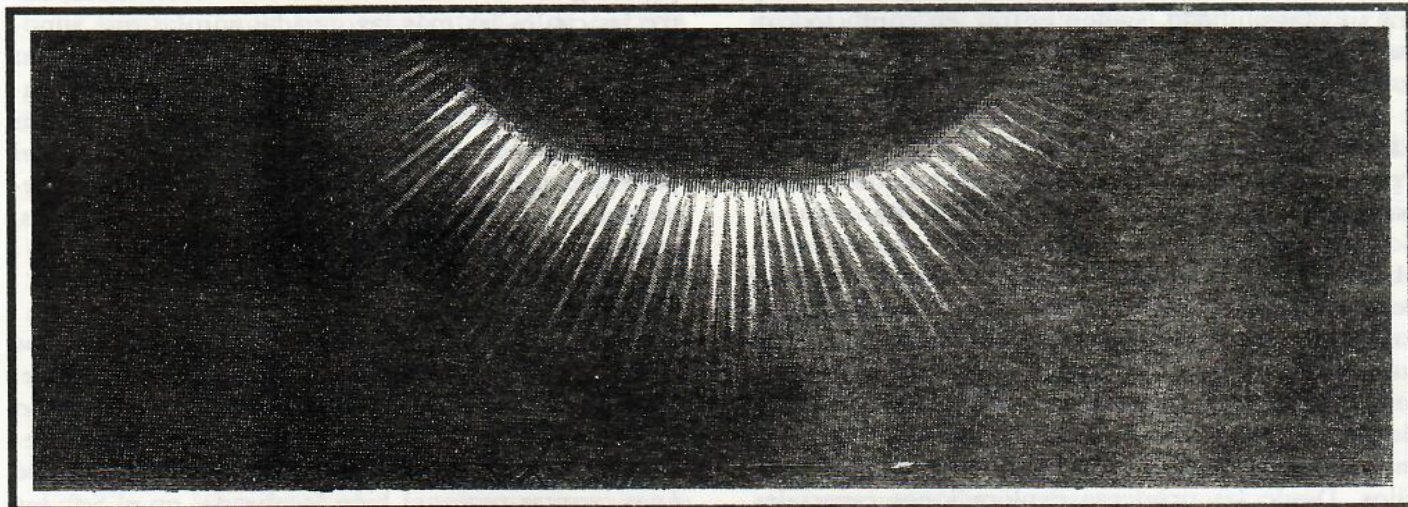
EL SOL: NUESTRO DESCONCERTANTE VECINO

Silvia Bravo

No deja de ser interesante el que los libros de divulgación más recientes sobre el Sol lleven títulos tales como *Misterios del Sol* o *La estrella más extraña* y es que, si bien los físicos solares de hace cincuenta años consideraban que aún sabían muy poco sobre el Sol, los físicos solares actuales no logramos comprender lo que sabemos. Las extensas exploraciones del Sol realizadas en las últimas décadas han mostrado una serie de características de nuestra estrella que son no sólo desconcertantes sino que aún a veces se nos antojan absurdas a la luz de una lógica pre-solar. Mencionaremos algunas de ellas para ilustrar la situación actual.

mentos que no se encontraran en la Tierra. El problema vino después, cuando se encontró que esas líneas espectrales sí correspondían a elementos bien conocidos en la Tierra, pero que se producían en estados de ionización que implicaban temperaturas del orden del millón de grados.

Tal vez parezca que no hay razón para escandalizarse si la atmósfera de una estrella tiene temperaturas así de altas, pero veamos por qué sí es escandaloso. La fuente de energía del Sol (de la cual hablaremos adelante con más detalle) se encuentra en su centro y de ahí se transmite la energía hacia las orillas. Se estima que el centro del Sol tiene una



La ardiente corona

Empezaremos con la corona. La corona es la capa más externa de la atmósfera solar; es tan tenue que sólo puede observarse durante un eclipse total de Sol, cuando la Luna cubre el brillo del disco, o con aparatos capaces de producir este mismo efecto. Cuando la espectroscopía de los años 30 permitió el estudio de los elementos en la corona, se observaron unas líneas extrañas que no correspondían a ninguna de las conocidas para los elementos terrestres y se acuñó el nombre de coronio para este supuesto nuevo elemento que sólo se encontraba en la corona solar. Hasta aquí todo estaba bien, no era extraordinario esperar que en un cuerpo celeste hubiera ele-

temperatura de 15 ó 20 millones de grados y de ahí disminuye hacia afuera, observándose unos cinco mil grados en la superficie (la fotosfera). ¿Cómo entonces lograr que más afuera, la corona tenga un millón de grados? Debiera ser más fría incluso que la fotosfera, ¿cómo es posible que se caliente más?

Al principio, muy saludablemente, los científicos se negaron a aceptar la validez de estas observaciones, pero un buen día ya no hubo más remedio; la corona de un millón de grados tuvo que ser aceptada y había que explicarla. Hasta la fecha se ha intentado todo para calentarla: no se vale la conducción de calor, pues la segunda ley de la termodinámica impide que el calor fluya de algo a cinco mil grados para ca-

lentar a un cuerpo contiguo hasta un millón; por este proceso la corona estaría, cuando más, igualmente caliente que la fotosfera. Claro que es posible que la segunda ley no se cumpla en el Sol, pero los científicos tenemos la arrogancia, o la pretensión de pensar que los modelos de la naturaleza que vamos formando, con base en experiencias locales, son universales y nos resistimos a aceptar lo contrario a menos que no haya alternativa. Hasta ahora siempre ha habido remedio y seguimos creyendo que la física que hemos hecho sirve en cualquier lugar del universo. Por lo que respecta a la corona solar, hay otras posibilidades de calentarla, como por ejemplo la disipación de ondas mecánicas o de otro tipo que no nos obligan a renunciar a la universalidad de la segunda ley. Se ha probado también con disipaciones óhmicas de corrientes eléctricas coronales, pues a estas temperaturas la corona es un plasma de conductividad eléctrica muy grande que en cierta medida está controlado por el campo magnético del Sol.

El caso es que hasta ahora ninguno de los intentos ha resultado satisfactorio, pues aunque se muestra su plausibilidad, suelen entrar en conflicto con las observaciones. ¿Qué está calentando a la corona solar? Nadie lo sabe con certeza.

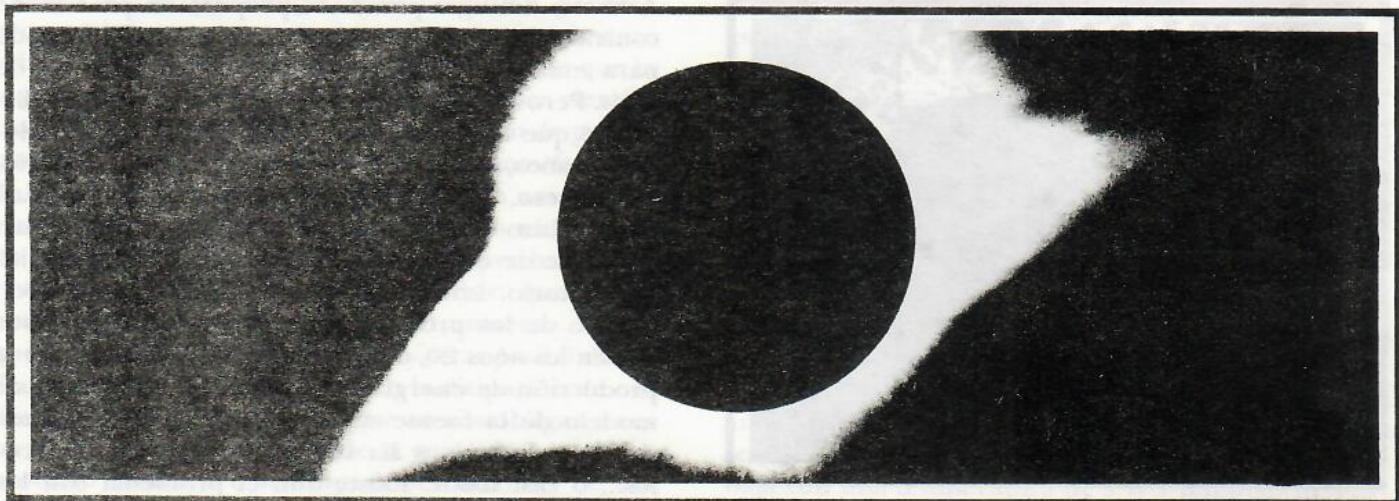
El misterioso viento solar

Pero el problema no es sólo ese. Resulta que la corona es tan caliente que existe una altura en la que el Sol ya no puede contenerla y fluye libremente hacia el espacio. Este flujo continuo de la corona se conoce como el viento solar; los límites de su extensión no los conocemos aún, pero seguramente sopla hasta más allá de Plutón. Los efectos de este viento sobre los cuerpos que pueblan el sistema solar es por demás interesante, pero como no corresponde al tema que queremos tratar aquí, no hablaremos de ellos. Desde las primeras exploraciones espaciales del viento solar, se descubrió que este tiene variaciones de diversos tipos, por ejemplo en velocidad. Son ya bien conocidas las corrientes de viento de alta velocidad que suelen aparecer en ciertas épocas, con frecuencia en forma recurrente, coincidiendo en su período de recurrencia con el período de rotación del Sol. Esto sugiere que estas corrientes están asociadas a regiones bien localizadas en el Sol que permanecen sin cambio varias rotaciones solares y es lógico suponer que éstas deben ser las regiones más calientes. Sin embargo, la situación no es ésa y ahora se sabe que el viento solar más rápido viene de regiones más frías, recientemente descubiertas y llamadas hoyos coronales. Se les puso este nombre

porque al tomar fotografías del Sol en ciertas líneas específicas, principalmente en el ultravioleta extremo y en rayos X, estas regiones se ven oscuras, pues no son también regiones de menor densidad que el resto de la corona. Los hoyos coronales también pueden observarse como regiones oscuras en la corona de luz blanca dispersada que se observa en los eclipses totales de Sol. A partir de la gran cantidad de datos observacionales de gran calidad obtenidos por el Skylab hace ya casi quince años, los esfuerzos por modelar los hoyos coronales y por explicar las características del flujo del viento solar observadas a la altura de la Tierra se han intensificado y el asunto aún no está nada claro. Resulta que si simplemente se deja fluir el viento solar, partiendo de una corona baja con una temperatura de 1 ó 2 millones de grados, las velocidades esperadas a la altura de la Tierra son mucho más bajas que las observadas (cabe aquí mencionar que el viento solar que nos llega trae entre 1 y 3 millones de kilómetros por hora!). Se han propuesto diversas opciones con mecanismos *ad hoc* para lograr obtener las velocidades observadas, entre las cuales las más favorecidas son las que suponen que la corona no sólo se calienta en su base sino que su calentamiento se extiende hasta muchos radios solares de distancia. Estas suposiciones no han encontrado aún un fundamento incuestionable y el problema de cómo impulsar al viento solar a las velocidades observadas se une a la lista de problemas, aún sin solución, de la física solar.

Y su misteriosa constancia

Puede parecer exceso de ganas de sufrir el que los científicos se preocupen porque algo es constante. Pero en el caso del viento solar, esta constancia no es lógica. Como sabemos, el flujo de plasma que llena el espacio interplanetario surge solamente de unas cuantas regiones bien localizadas en el Sol: los hoyos coronales. Estos hoyos no son de ninguna manera constantes sino que cambian en tamaño y localización. A veces, más de la cuarta parte de la superficie del Sol está cubierta por hoyos coronales localizados alrededor de los polos y en otras el área ocupada por estos hoyos no llega a ser ni el 1% de la superficie y se encuentran cerca del ecuador. Sin embargo, las características del viento solar que observamos a la altura de la Tierra no muestran ninguna sensibilidad a tan drásticas variaciones. O las variaciones son nulas o son extremadamente pequeñas. ¿Qué está regulando que el flujo del viento solar sea constante? ¿Cómo puede esto ser regulado? Cada vez hay más preguntas sin respuesta.



años durante el cual aparecen a ciertas latitudes, luego a latitudes más bajas y así durante varios años hasta barrer una franja entre 40 y 10 grados de latitud solar en ambos hemisferios, para luego volver a empezar. Su número y tamaño va creciendo conforme bajan en latitud, siendo ambos mayores alrededor de la mitad de la franja, en lo que se denomina el máximo del ciclo, y eventualmente desapareciendo o siendo muy escasas unos cinco años después, en el mínimo. Aunque esta evolución tampoco tiene una explicación rigurosa, existen algunos modelos bastante plausibles y a pesar de que aún hay mucho por hacer, se considera sólo cuestión de detalle.

Sin embargo, lo sorprendente es que se encontró que estas manchas están asociadas con los neutrinos. Sobrepuenteada a la larga evolución de once años, el número de manchas tiene una pequeña variación periódica de alrededor de 25.3 meses, la cual también se ha observado en la intensidad de los neutrinos solares con la misma periodicidad y la misma fase. ¿Cómo puede ser que una característica superficial como las manchas esté conectada con un fenómeno cuyo origen se encuentra en el interior más profundo del Sol? ¿Qué tiene que ver la evolución del campo magnético solar, que es la que coordina el ciclo de manchas, con los procesos de fusión que proveen al Sol de su energía? Ninguno de los modelos estelares actuales pueden explicar esta relación; evidentemente, algo anda mal en los modelos y por lo tanto en la imagen misma que tenemos de lo que es una estrella y de la forma como se originan su campo magnético y su energía.

Un ciclo que desaparece

Otro misterio recientemente descubierto (o "redes-

cubierto") que tal vez esté relacionado con el problema anterior es la ausencia durante períodos muy largos de tiempo de las manchas solares, esto es, la desaparición de sus ciclos. Analizando registros antiguos de manchas solares, Sporer y Maunder encontraron que durante 70 años (entre 1645 y 1715) no se había observado ninguna mancha en el disco del Sol. Aunque esta peculiaridad (que ahora se conoce como el "Mínimo de Maunder") fue reportada desde el siglo pasado, no fue tomada muy en serio, pues, entre otras cosas, una vez que hemos encontrado regularidades no nos gusta aceptar que no se cumplen. Sin embargo, como ahora ya nos hemos ido acostumbrando a esperar rarezas del Sol, el asunto ha sido revivido recientemente. La realidad del mínimo de Maunder ya no está en duda y hasta parece que en el pasado más remoto ha habido otros lapsos de tiempo igualmente largos sin manchas solares. Sin explicar una evolución magnética periódica resulta difícil explicar cómo esta evolución se apaga por algún tiempo y se vuelve a encender de nuevo parece casi imposible. Apenas estamos aceptando la idea y aún no se ha dicho nada al respecto.

La paradoja del Sol joven

El pasado del Sol también resulta misterioso. Aunque la raza humana no ha vivido aún lo suficiente como para ver nacer, evolucionar y morir a ninguna estrella y aunque los registros precisos y sistemáticos de parámetros físicos estelares tienen sólo unas cuantas décadas, se han generado ya teorías de evolución estelar bastante plausibles. Esto se ha podido hacer gracias a la gran diversidad de estrellas en muy distinto estado de evolución que pueblan los cielos que podemos escudriñar. Se han generado

modelos que se pueden correr en computadora para simular la evolución de una estrella y de esta forma se puede modelar tanto su pasado como su futuro. Según estos modelos, la luminosidad del Sol poco después que empezó a quemar hidrógeno en su núcleo era entre un 10 ó 30% menor que la actual. Un cambio tan grande entre la luminosidad de esa época y la actual ciertamente tendría implicaciones climáticas muy drásticas en la Tierra. Sin embargo, los estudios paleoclimáticos no muestran ninguna evidencia de cambio durante, por lo menos, los últimos tres mil millones de años. Según los modelos estelares, la única posibilidad de evitar esa gran diferencia en la luminosidad solar actual y la del Sol joven es que la constante de gravitación universal no sea constante. Esto parece mucho pedir, pero no parece haber otra solución... por ahora. En cualquier caso, la paradoja del Sol joven, como se le ha llamado a este problema, es otro más de los misterios del Sol.

Estos son sólo algunos elementos de la numerosa lista de problemas que está tratando actualmente de resolver la física solar, pues a pesar de que ahora sabemos mucho más que nunca antes respecto a cómo es el Sol, estamos aún muy lejos de entender por qué es como es. Y no es que de veras el Sol sea la estrella más extraña, sino que es la única que conocemos con suficiente detalle como para notar su "extrañeza", como para percibir que las estrellas son sistemas peculiares que desafían a la lógica generada de las experiencias terrestres.

Por el momento es mucho, mucho más lo que no entendemos bien del Sol que lo que creemos entender y en el afán de buscar opciones de solución se ha puesto incluso en duda la física misma. Es cierto que es posible que el cambio tan grande de escala que involucran las cantidades solares y los procesos que ocurren en el Sol rebasen los límites de aplicabilidad de una física que se ha construido con base en experiencias más modestas. Pero yo creo que aún no hemos agotado nuestras posibilidades imaginativas para usar esa misma física y que debemos ser más flexibles en nuestros supuestos cuando de estrellas se trate. No cabe duda que el futuro de la física solar se muestra como un desafío interesante y que las respuestas a los actuales "misterios" de la "estrella más extraña" nos darán grandes sorpresas que enriquecerán nuestra física básica, nos proporcionarán un mayor conocimiento de nuestro universo y harán cambiar nuestro sentido común y nuestra lógica, de modo que ya ninguna estrella nos parezca extraña.

Para el lector interesado recomendamos la lectura de los libros:

1. Silvia Bravo: *Encuentro con una estrella*. Colección Ciencia desde México, No. 38, Fondo de Cultura Económica, 1987.
2. Robert Noyes: *The Sun, Our Star*. Harvard University Press, 1982.
3. Ronald G. Giovannelli: *Mysteries of the Sun*. Cambridge University Press, 1984.
4. John Gribbin: *The Strangest Star*. The Athlone Press, 1980.

