

Índice general

- 2 Presentación por **D. Francisco Sánchez**, Fundador y Director del IAC
4 Agradecimientos

I - La aventura de la ciencia por **Ángel Gómez, Jesús Burgos, Gotzon Cañada y Miquel Serra Ricart**



- 6 Sheliós y la aventura de la ciencia
8 Sheliós'98: La aventura en el mar
14 Sheliós'99: Expedición a Turquía
24 Torre de Babel
26 Turquía: Tesoro entre dos continentes
28 A vista de Pájaro
30 La Ruta de Libertad
32 La Corona de un Rey llamado Sol

II - Eclipses totales de Sol por **Miquel Serra Ricart**



- 34 Ocultaciones
36 Características de un Eclipse Total de Sol
38 Eclipses totales de Sol: ¿Solo en la Tierra?
40 Cronología de un eclipse

III - Los eclipses en la historia por **Ángel Gómez**



- 42 Los astrónomos chinos pierden la cabeza
44 El Eclipse que hizo la Paz
46 El Sol, La Luna y La Cruz
48 El truco de Colón

IV - Una estrella fascinante por **Inés Rodríguez Hidalgo**



- 50 Somos polvo de estrellas
52 El Sol, nuestra estrella «de casa»
54 Sondeando el interior solar
56 Una estrella fascinante

V - Ciencia bajo la sombra de la Luna por **Inés Rodríguez Hidalgo**



- 58 Un regalo de la Naturaleza
60 Eclipses y precisión
62 La hermosa y dinámica corona
64 La enigmática y caliente corona
66 Eclipses y Relatividad General
68 Luz polarizada
70 ¡Todos de acuerdo para observar la corona desde la Tierra y el espacio!
72 Ciencia bajo la sombra de la Luna

VI - Inmortalizando la totalidad por **Miquel Serra Ricart y Miguel C. Díaz Sosa**



- 74 Consejos para la observación de un eclipse solar
76 Fotografiando un eclipse de Sol
80 Técnicas digitales en fotografía

VII - Los próximos eclipses por **Ángel Gómez**



- 84 África, 21 de junio de 2001
86 Espectáculos por venir: 2002-2010
88 Un Anillo de Fuego sobre España
90 Totalidad sobre la Piel de Toro: 2026 y 2027
92 18 formas de sentir un eclipse
94 Los autores del libro - Los expedicionarios

Somos polvo de estrellas

Las estrellas no son puntitos de luz clavados a la bóveda celeste, siempre quietas e inmutables, no: las estrellas son soles, enormes (en comparación con la Tierra) bolas de plasma¹ que emiten luz y se mantienen en una situación bastante estable durante miles de millones de años. Las hay más grandes y más pequeñas, más y menos luminosas, más y menos masivas, de distintos colores (por estar sus superficies visibles más o menos calientes), más viejas y más jóvenes.

Las estrellas son, en cierto modo, como seres vivos: nacen a partir de los grumos más densos de grandes nubes de materia interestelar (formada esencialmente por hidrógeno y polvo) que se contraen por gravedad. Brillan porque son capaces de generar energía en su interior, mediante reacciones nucleares de fusión en las que elementos químicos más ligeros se unen para formar otros más pesados, liberando energía en el proceso. Esa energía viaja hasta su superficie y es emitida en forma de luz (radiación electromagnética en general²). Durante la fase más «tranquila» y duradera de sus vidas se mantienen en un estado que llamamos de equilibrio gracias al balance entre la presión del plasma y la radiación hacia fuera, que tendería a disgregar la estrella en el espacio que la rodea, y la fuerza de su propia gravedad, que tendería a contraerla, haciéndola colapsar sobre sí misma. Evolucionan, reajustando su tamaño, brillo y temperatura, a medida que van agotando sucesivamente diferentes combustibles nucleares (hidrógeno, helio, carbono, nitrógeno, oxígeno...). Mueren, unas de forma más pacífica y otras muy violentamente, cuando ya no pueden generar más energía, devolviendo al espacio exterior parte de su material, enriquecido con nuevos elementos químicos. Y, cerrando un ciclo evolutivo algo peculiar, se reproducen, cuando nuevas estrellas nacen a partir de las cenizas de otras ya muertas, siendo a veces la explosión final de una estrella muy masiva que agoniza (supernova) la que provoca episodios de formación estelar.

Todos los elementos químicos que forman el Cosmos, incluido nuestro sistema solar, la Tierra y sus habitantes, o bien se formaron en los primeros momentos del Universo (los más ligeros), o bien han sido fabricados en el interior de las estrellas durante su vida (los elementos pesados, hasta el hierro) o en los violentos procesos que suponen la agonía final de algunas estrellas (los más pesados que el hierro). Por supuesto, entre ellos se encuentran los componentes esenciales de la vida, es decir, los elementos constituyentes de la materia orgánica como el carbono, fósforo, nitrógeno, oxígeno... Se puede decir, pues, con toda propiedad, que **somos polvo de estrellas**.

1 - Plasma es el llamado cuarto estado de la materia, junto con sólido, líquido y gaseoso. Un plasma es similar a un gas caliente en el que gran parte de las cargas eléctricas positivas y negativas de los átomos se encuentran separadas, por lo que en él dominan las fuerzas eléctricas y magnéticas que hacen que su comportamiento sea diferente del de un gas ordinario.

2 - La luz, una forma de radiación electromagnética (EM), se describe matemáticamente como una onda, es decir, la variación simultánea, en el espacio y en el tiempo, de dos magnitudes físicas: el campo eléctrico y el campo magnético. Las ondas EM se parecen a las que se producen en la superficie de un líquido cuando cae una piedra (pero éstas son sólo en dos dimensiones); un símil más realista son las condensaciones y rarefacciones de gas que constituyen las ondas sonoras en el aire (en tres dimensiones). Pero las ondas EM no necesitan un medio material para propagarse, sino que pueden viajar a través del vacío; y lo hacen muy deprisa, a la velocidad de la luz que en Física representamos por la letra «c», ya que avanzan casi 300.000 km en 1 segundo! Pongamos un ejemplo para poder asimilar la magnitud de este número: el radio de la Tierra es de unos 6.400 km, por lo que su perímetro es algo mayor de 40.000 km; pues bien, en 1 segundo la luz puede dar 7 vueltas y media al ecuador terrestre. Se llama longitud de onda a la distancia que separa, por ejemplo, dos «crestas» (o «valles») consecutivos de la onda. La frecuencia es el número de «crestas» (o «valles») que pasan por un punto del espacio cada segundo. En una onda EM el producto de la longitud de onda y la frecuencia es precisamente la velocidad de la luz, por lo que cuanto mayor es una, menor es la otra. Además, una mayor (o menor) frecuencia implica directamente una mayor (o menor) energía de la onda EM. Más adelante hablaremos de la relación entre la longitud de onda y el color de la luz y de formas de radiación EM diferentes de la luz visible.

Constelación del Centauro. La estrella más brillante, conocida como α Centauri y señalada por la flecha, es muy similar al Sol en tamaño, masa, brillo, composición química. ¡Hay muchos soles en el Universo!

Imagen tomada del libro "Callejero Celeste" de Miguel Díaz Solís

α Centauri A



Esquema del proceso de fusión termonuclear del hidrógeno que genera helio, algunas partículas elementales y cierta cantidad de energía en el interior de las estrellas. Esa energía (E) procede de una pequenísima diferencia de masa (Dm) entre los núcleos atómicos que se fusionan y los núcleos resultantes de la reacción, y se calcula mediante la celebre fórmula de Einstein que todos hemos visto alguna vez en camisetas, posters y pegatinas: $E = Dm \cdot c$. En esta expresión c es el cuadrado de la velocidad de la luz, un número enorme que, al ir multiplicado por el defecto de masa hace que, aunque este sea muy pequeño, la energía liberada en una reacción nuclear sea apreciable.

Nebulosa planetaria hc2 428.

En un futuro (muy lejano aún) el sol se convertirá en un objeto de este tipo: una enana blanca rodeada de una envoltura formada por las capas más superficiales que habrá expulsado al espacio exterior.

Imagen extraída del libro "Nebulosa Planetaria" del Observatorio Ikerk

IV
Una estrella fascinante
51



El Sol, nuestra estrella «de casa»

El Sol también es una *estrella*: de hecho, una estrella ordinaria, de tamaño medio, no muy masiva ni demasiado luminosa, que pertenece, junto con otros cien mil millones de compañeras, a nuestra galaxia (la *Vía Láctea*), y está situada en uno de los brazos espirales de la misma, a unos 27.000 años-luz¹ del centro galáctico.

También el Sol nació de una nube de materia interestelar hace algo más de 4.600 millones de años (aproximadamente la mitad de su vida estable) e iniciará su evolución hacia el final al cabo de un tiempo similar, cuando agote el hidrógeno fresco en su núcleo. Entonces se convertirá en una *gigante roja*, más fría que ahora y con un tamaño que llegará más allá de la órbita terrestre. Según los actuales modelos de evolución estelar, el Sol morirá, después de haberse despojado de su envoltura (*nebulosa planetaria*) en una o varias fases de 'strip-tease' a escala astronómica, como una pequeña estrella del tamaño de la Tierra, un millón de veces más densa que el agua y muy caliente (unos 25.000 grados en su superficie) llamada enana blanca. Ya sin fuentes de energía, ésta se irá enfriando lenta e irremisiblemente hasta convertirse en un oscuro tizón invisible en medio del espacio.

Pero, de momento, el Sol es una estrella adulta y estable, la fuente de luz y calor que ha hecho posible la aparición de vida en nuestro planeta por lo que, evidentemente, es la estrella más importante para nosotros. Pero, además, es la más cercana, a sólo unos 149 millones de kilómetros de la Tierra (unos 8 minutos-luz), la única en cuya superficie podemos distinguir fascinantes estructuras. Es, por tanto, la que podemos conocer con mayor detalle, lo que hace que su estudio y conocimiento sean esenciales para el desarrollo de la Astrofísica.

1- Aunque pueda parecer lo contrario, un año-luz es una medida de longitud, no de tiempo. Se define como la distancia que la luz recorre en un año. Para calcular su valor hay que hacer una sencilla cuenta: 1 año x 365,25 días (para contar los bisiestos) x 24 horas x 60 minutos x 60 segundos x 299.792,458 km recorridos en cada segundo.

El resultado es una cifra «astronómica», como era de esperar: 9,461.000.000.000, es decir, ¡casi 9 billones y medio de kilómetros!

brazo de Sagitario

nosotros estamos aquí

Reconstrucción frontal de nuestra galaxia, la Via Láctea. En uno de sus brazos espirales se encuentra el Sol, casi en el plano de simetría de la galaxia pero bastante alejado del centro, a unos 27000 años-luz del mismo.



Uno de los más hermosos espectáculos cotidianos de la Naturaleza: una puesta de Sol, la desaparición de nuestra estrella «de casa» tras el horizonte debido a la rotación diaria de la Tierra alrededor de su eje.

IV
Una estrella
tras el horizonte

Shelios

Sondeando el interior solar

No podemos olvidar que, hoy por hoy, es imposible reproducir en la Tierra las condiciones de presión y temperatura de las estrellas, por lo que el Sol es un magnífico laboratorio de Física que nos ayuda a entenderlas mejor y a confirmar nuestras ideas acerca de ellas.

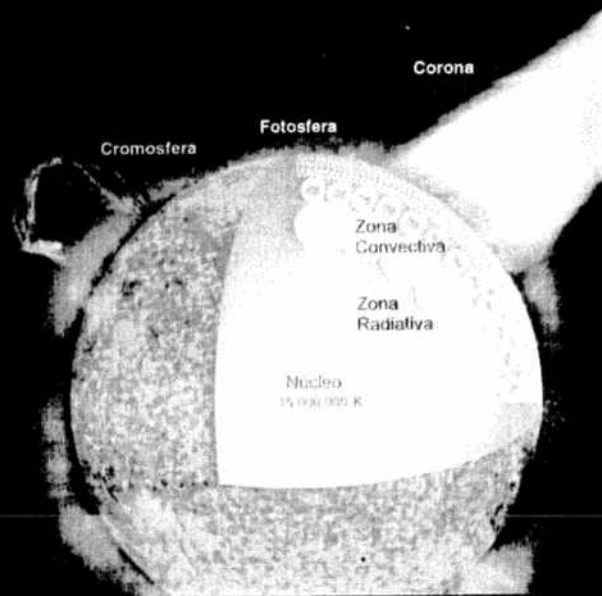
Para explicar la estructura y la evolución de las estrellas, incluido el Sol, los astrofísicos tenemos que elaborar complejas maquetas físico-matemáticas que llamamos *modelos*: reunimos nuestros conocimientos de Física y Química, escribimos ecuaciones que expresan la conservación de la masa, cómo se mantiene el Sol en equilibrio, cómo genera energía en su interior y cómo la transporta hasta su superficie y la emite en forma de luz y calor, y las resolvemos cuidando que no existan contradicciones internas y que las características observables o medibles del Sol (su color, temperatura, tamaño, composición...) sean correctamente reproducidas por el modelo.

Una pregunta crucial para entender el «funcionamiento» del Sol es cómo es éste por dentro. La respuesta no es directa, ya que no podemos «ver» el interior solar: la materia inmediatamente por debajo de la superficie del Sol es tan opaca que la luz que recibimos (prácticamente nuestra única fuente de información) procede sólo de sus zonas más superficiales. Nuestro conocimiento del interior del Sol proviene precisamente de los modelos mencionados y es confirmado en gran medida por los resultados de técnicas indirectas: la *Heliosismología*, que aplica métodos similares a los de la sismología terrestre al estudio del pulso del Sol (que vibra como si fuera un instrumento musical, tanto globalmente como por zonas, desde su interior a su superficie) y el estudio de los *neutrinos*¹ generados en las reacciones de fusión, que llegan a la Tierra procedentes del interior solar.

Hoy estamos razonablemente convencidos de que si pudiéramos cortar el Sol como si fuera una cebolla, veríamos las siguientes capas en su interior: el *núcleo* (hasta el 20% del radio solar), donde tienen lugar las reacciones nucleares de fusión, con un material 160 veces más denso que el agua, a una temperatura de 15 millones de grados; envolviendo al núcleo como una especie de manta que llega hasta el 70% del radio, la *zona de radiación*, llamada así porque a través de ella la energía generada en el núcleo se transporta hacia fuera por radiación, es decir, gracias a ondas EM (del mismo modo que lo hace el calor generado por una resistencia eléctrica a través del aire); y, en el último tercio del radio solar, la *zona de convección*, donde enormes *celdas* de material solar de distintos tamaños (pero enormes según nuestras escalas, en cualquier caso) llevan el calor desde la base de esta capa hasta la superficie, como lo hacen las burbujas de un líquido que hierve. Este nuevo mecanismo de transporte de energía aparece justamente cuando la radiación deja de ser eficiente: ¡la Naturaleza es sabia!

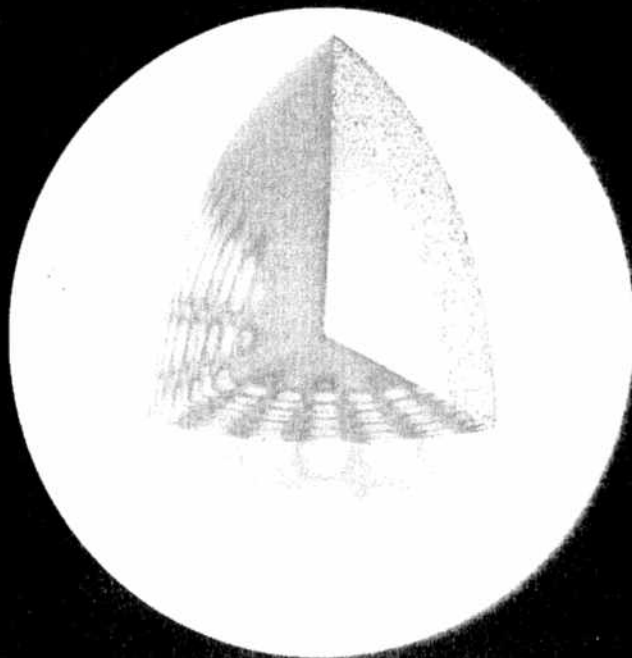
¹ Los neutrinos son partículas elementales (como los electrones, protones, neutrones, fotones, etc.) sin carga eléctrica y con una masa en reposo nula o tal vez muy pequeña. Son generados en las reacciones nucleares de fusión del interior del Sol, lo atraviesan sin apenas interactuar con la materia y se detectan en la Tierra mediante complejos y costosos experimentos.

Los modelos de estructura y evolución de las estrellas indican que si pudiéramos cortar el Sol como si fuera una cebolla veríamos en su interior las regiones llamadas núcleo, zona radiativa y zona convectiva que se señalan en el dibujo. La atmósfera solar, formada a su vez por la fotosfera, cromosfera y corona, se extiende hacia afuera desde la superficie visible del Sol.



El Sol oscila continuamente, vibra como si fuera un instrumento musical al que se ha golpeado o pulsado. Y lo hace de muy diferentes formas, tanto globalmente como por zonas. En el gráfico se muestra uno de los posibles modos de oscilación del Sol: las zonas rojas/azules corresponden, respectivamente, a regiones que en un momento dado están ascendiendo/descendiendo. Este «pulso» no sólo tiene lugar en la superficie del Sol, sino que se extiende por debajo de ella, por lo que su estudio proporciona valiosa información sobre el interior solar.

Fotomontaje de una imagen de National Optical Astronomy Observatories -NOAO- en USA



Una estrella fascinante

Al final de un interior inaccesible a la observación directa, los últimos 500 kilómetros del radio solar son, por fin, transparentes a la radiación EM: representan, pues, la superficie visible de nuestra estrella desde la que escapan la luz y el calor que nos iluminan y nos dan la vida. Pero el Sol no se termina en el borde aparente de su disco luminoso, sino que continúa en una amplia envoltura que llamamos de forma genérica *atmósfera solar*. Se extiende hasta muchas veces el tamaño del Sol, sin un límite definido, ya que sus zonas más externas y tenues suponen una suave transición al medio interplanetario.

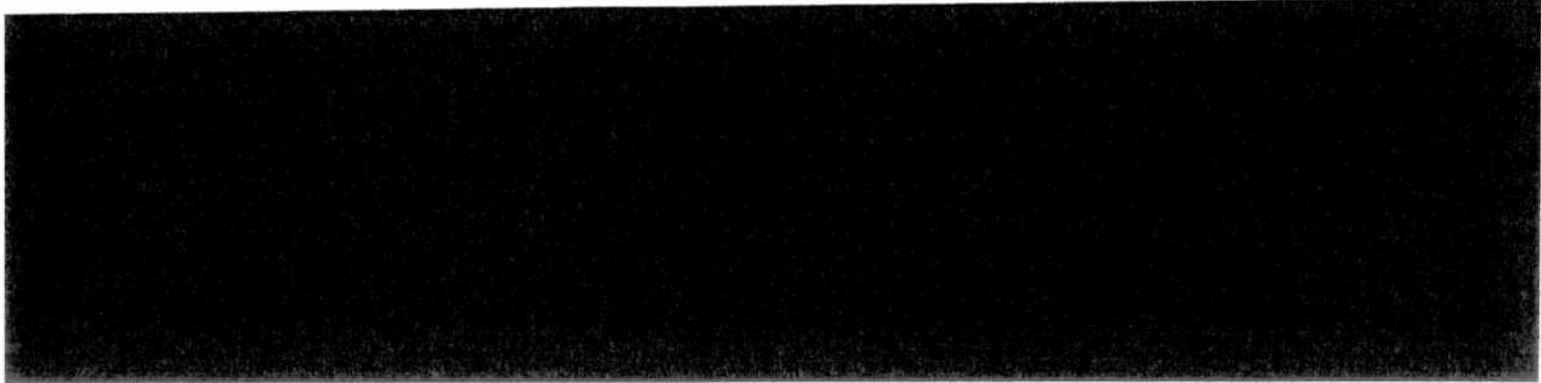
La capa más profunda de la atmósfera solar (con una temperatura de unos 5.800 grados en su base) es la que observamos a simple vista y se denomina *fotosfera* o esfera de luz. En ella se observa permanentemente la *granulación*, un patrón siempre cambiante de estructuras poligonales de unos 1.500 kilómetros de tamaño, brillantes y oscuras, que corresponden a la parte superior de las más pequeñas celdas de convección que calientan la fotosfera desde abajo. Además, de forma transitoria, aparecen regiones oscuras de unas decenas de miles de kilómetros, a menudo en grupos, llamadas *manchas solares* (intensas concentraciones de campo magnético unos 2.000 grados más frías que sus alrededores) rodeadas de *fáculas*, extensas áreas generalmente brillantes.

Sobre la fotosfera se encuentra la *cromosfera* o esfera de color, una capa de unos miles de kilómetros de anchura, sólo observable a través de filtros especiales y también como un brillo rosado-rojizo (de ahí su nombre) en los primeros y últimos segundos de un eclipse total de Sol. Las estructuras más llamativas son las *protuberancias*, grandes formaciones de plasma algo más denso y frío que su entorno que se observan como suspendidas sobre la superficie del Sol, a menudo siguiendo la forma de las líneas de campo magnético, y que reciben el nombre de *filamentos* cuando se observan, oscuras, proyectadas sobre el disco solar.

La cromosfera está rodeada por una «diadema» de forma bastante irregular, muy dinámica y espectacular, formada por plasma muy poco denso y muy caliente: la *corona*. Con un brillo comparable al de la Luna llena (aproximadamente un millón de veces menor que el de la fotosfera), la corona sólo es observable bien desde satélites espaciales (por su emisión ultravioleta y en rayos X), bien con *coronógrafos* (telescopios que ocultan el disco brillante del Sol), o bien como el grandioso espectáculo que se nos ofrece espontáneamente cuando la Luna se interpone entre el Sol y la Tierra durante un eclipse total de Sol. Entonces se pueden ver largos *chorros coronales* en forma de huso, penacho o abanico, zonas oscuras llamadas *agujeros coronales* desde los que es preferentemente emitido el *viento solar* (un flujo variable y racheado de partículas cargadas a muy altas velocidades) y, ocasionalmente, violentas *expulsiones de masa coronal*.

El plasma solar caliente, muy buen conductor de la electricidad y en continuo movimiento, origina corrientes eléctricas y campos magnéticos. Estos últimos, mantenidos por una compleja interacción entre un campo primordial alojado en la base de la zona de convección, la rotación del Sol (más rápida en el ecuador que en los polos) y los movimientos convectivos sufren drásticos cambios a lo largo del llamado *ciclo de actividad¹ solar*. Cada 11 años aproximadamente se produce un aumento notable en el número e intensidad de todos los fenómenos magnéticos solares, asociado con diferencias en las zonas de aparición y en la morfología de algunas de esas estructuras *activas*.

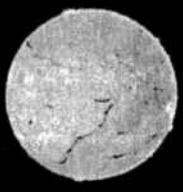
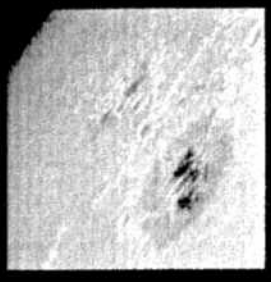
¹ En Astrofísica, el término actividad está relacionado con el magnetismo.





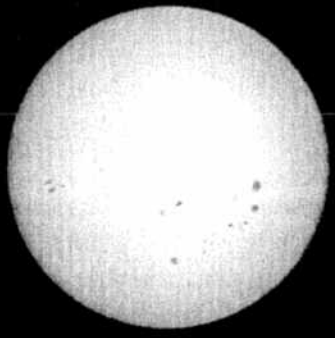
Esta mancha solar tiene nombre propio: los colegas del IAC que tomaron la imagen la encontraron tan bonita que decidieron llamarla «Cindy», como la modclo C. Crawford. Aunque se trata de una mancha bastante circular, la vemos con forma ovalada por un efecto de perspectiva, ya que se encuentra muy cerca del borde del Sol, visible en la esquina superior izquierda. Se aprecia la región central más oscura (umbra) rodeada por una zona de brillo intermedio y aspecto filamentoso (penumbra). Alrededor de la mancha hay un área más extensa y brillante donde también se manifiesta la presencia de campo magnético, llamada facula. Cubriendo toda la fotosfera y dándole el aspecto de una «paella» se encuentra la granulación, que en esta imagen se reconoce en la esquina inferior derecha (aunque con poco contraste, por estar cerca del borde).

Obtenida en el telescopio de Torre Solari Suco del ORM en La Palma por los Dres. J.A. Bonet y M. Vázquez del IAC, A. Hansmaier del Institut für Astronomie de Graz (Austria) y M. Sobota del Astronomický Ústav Akademie de Ondřejov (República Checa).



La cromosfera también es observable. A través de determinados filtros, por ejemplo, el centrado en la longitud de onda de la línea H α del hidrógeno, en la zona baja del espectro. Se aprecian zonas oscuras correspondientes a las manchas solares que se encuentran muchas cientos de kilómetros abajo en la fotosfera. Las faculas flotantes que las rodean, que en la cromosfera rodean el cambio de campo magnético, se ven en el borde, enemas, trozos de materia suspendida sobre la superficie solar, y la proyección de estas como largas colas oscuras, las «plumas».

Obtenida en el Observatorio de La Palma, Islas Canarias, por el Dr. J. A. Bonet y M. Vázquez del IAC, en colaboración con el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Cambridge, UK.



Superficie visible del Sol el 26 de agosto de 1999. El diámetro del disco solar es de casi 1.400.000 km para la luz que recibimos procedente de una estrecha zona correspondiente a los últimos 500 km del radio. Lejos de ser estática, uniforme, perfecta (como creían los antiguos) la llamada «paella» solar es muy dinámica y muestra gran cantidad de estructuras de diferentes escalas espaciales. En la imagen se aprecia fácilmente el fenómeno de granulación, la presencia de manchas oscuras llamadas «manchas solares».

Obtenida con el telescopio solar del Observatorio de La Palma por el Dr. J. A. Bonet y M. Vázquez del IAC, en colaboración con el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Graz, Austria, y el Observatorio de Astronomía de la Universidad de Cambridge, UK, por el Dr. J. A. Bonet del IAC.

En los primeros y últimos segundos de un eclipse total de Sol se observa en torno al disco un brillo rosado-rojizo que corresponde a la emisión de la zona llamada «corona baja», que rodea a la fotosfera.



Sin duda el momento culminante de un eclipse de Sol es la aparición en torno al disco oscuro, al comienzo de la totalidad, de la corona, una espectacular «diadema» blanquecina que puede llegar a extenderse hasta varias veces el tamaño del Sol.

