UNA ESTRELLA ENTRE UN MILLÓN

Inés Rodríguez Hidalgo

Investigadora del Instituto de Astrofísica de Canarias Profesora de la Universidad de La Laguna, Departamento de Astrofísica

PRESENTACIÓN

Existe una estrella entre los aproximadamente 100000 millones de astros similares que forman nuestra galaxia que, aun siendo una estrella ordinaria, más bien pequeña, no muy masiva ni demasiado luminosa, madurita, (más o menos en la mitad de su vida estable), merece muy especialmente nuestra atención...por ser nuestra estrella, la más cercana, la "de casa", aquélla a la que llamamos Sol.

El Sol parece haber estado siempre ahí, brillando hermoso e inmutable, "recorriendo" el firmamento de día desde el amanecer al ocaso, y a lo largo del año, proporcionando luz y calor, generando la energía que brota en forma de vida cada primavera, evaporando el agua del mar para que llueva, ... No es raro que ya las culturas primitivas lo consideraran divino y que haya sido siempre objeto de la curiosidad, la observación continua y el estudio por parte de la especie humana. Pero, ¿es el Sol realmente eterno e inmutable?, ¿por qué le salen manchas y el número de éstas aumenta y disminuye cada once años aproximadamente?, ¿está sano?, ¿por qué, sin previo aviso, expulsa grandes cantidades de materia y energía?, ¿cómo está hecho por dentro?, ¿por qué brilla?, ¿es igual que otras estrellas?, ¿cómo nació?, ¿cuándo y cómo morirá?, ¿podemos predecir sus cambios y cómo nos afectaran?.

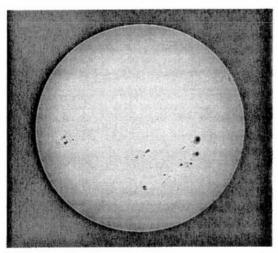


Figura 1: Damas y caballeros, con ustedes ... el Sol, en una imagen en luz blanca, con una excelente resolución espacial que permite identificar claramente la granulación que cubre todo el disco; se observan además varios grupos de manchas y algunas fáculas visibles cerca del borde. Resulta evidente también el efecto de oscurecimiento hacia el borde. (OBIENDA CON EL TELESCONO SOLAR DEL OBSERVATORIO DE KANZELHOHE, EN AUSTRIA, POR EL DE. TH. PETTALER DEL INSTITUT FUR ASTRONOMIE DE GRAZ "AUSTRIA". EL TRATAMENTO POSTERIOR DE LA MAGEN DRIGINAL SE DEBE AL DR. J.A. BONET DEL IAC).

El propósito de las próximas paginas es contagiarles al menos un poquito del interés y la pasión que el Sol despierta en los que nos dedicamos a su estudio. Para ello, realizaremos un recorrido desde el interior hasta las capas más externas del Sol describiendo sus principales características y estructuras, compararemos las predicciones teóricas y las observaciones y presentaremos las instalaciones y los campos de investigación que conforman la Física Solar en el Instituto de Astrofísica de Canarias.

Les sugiero que, a modo de presentación, disfruten de la imagen del Sol que aparece en la **Figura 1**. Pronto podrán comprobar que, cuando se empieza a conocer el Sol y se adquiere la consciencia de su inmenso tamaño, de que su superficie está "hirviendo" y burbujas del tamaño de la Península Ibérica suben y bajan a velocidades de más de 4000 km/h, de que todo el Sol está latiendo como un enorme corazón, pausada pero interminablemente, cuando presenciamos "tormentas" que expulsan llamaradas de casi cien veces el tamaño de la Tierra, uno se siente realmente pequeño. En palabras de un colega (físico solar y buen amigo), "como una hormiga cabalgando a lomos de un dragón"...

1. ¿POR QUÉ ES IMPORTANTE ESTUDIAR EL SOL?

Seguramente en la presentación ya ha quedado claro que el Sol, como todo lo hermoso, lejano e inaccesible, ha sido desde siempre un estímulo para la innata curiosidad humana (que es, al fin y al cabo, el motor de toda la Ciencia). Y que la importancia fundamental del Sol como fuente de energía y razón última de la vida en la Tierra justifica ampliamente que deseemos conocer lo mejor posible su estructura y su funcionamiento.

El Sol es, además, un excelente campo de aplicación de las leyes físicas conocidas. Resulta alentador que la Física "normal" que sirve para explicar lo que sucede en Tierra sea válida también para comprender la mayor parte de los fenómenos solares. Para la Astrofísica el Sol constituye un laboratorio próximo en el que probar la validez de nuestras ideas y predicciones teóricas acerca de las otras estrellas¹.

Por otra parte, y debido a su cercanía, el Sol es la única estrella que puede ser observada con *resolución espacial*. En la **Figura 1** se ve claramente que el Sol no es sólo un disco uniforme de luz sino que en su superficie se distinguen muchas estructuras. El análisis

¹ La Astrollsica es una ciercia más observacional que experimental, ya que raramente es posible reproducir en Tierra las condiciones que tienen lugar en las estrellas.

detallado de las mismas ha permitido ampliar nuestros conocimientos físicos: por ejemplo, en el Sol se descubrió el elemento químico *helio* (cuyo nombre es, precisamente, Sol en griego); y hemos aprendido que la interacción entre el campo magnético y la materia solares no es exactamente igual que la que tiene lugar en la Tierra.

Por último, no olvidemos que el Sol es una estrella, la unidad estructural en Astrofísica, por lo que sirve como enlace local con el resto del Universo. El conocimiento del Sol es, pues, esencial para una correcta comprensión del funcionamiento del Cosmos.

2. SITUEMOS AL SOL EN EL UNIVERSO Y EN NUESTRO SISTEMA SOLAR

El Sol se encuentra en uno de los brazos espirales de la Vía Láctea, casi sobre su plano de simetría, en una posición muy excéntrica (a unos 27000 años-luz, más de 2x10²⁷ km, del centro). Participa de la rotación de la galaxia invirtiendo más de 225 millones de años en completar una vuelta alrededor del centro galáctico.

La atracción gravitacional del Sol mantiene a la Tierra y los otros planetas del Sistema Solar describiendo órbitas elípticas a su alrededor. Aunque es una estrella muy "normal", nos parece la más grande y la más brillante por ser la más cercana: la distancia media de la Tierra al Sol es de 1 Unidad Astronómica (U.A.), que equivale "tan sólo" a 149 millones de km (frente a los algo más de 4 años-luz que nos separan de la siguiente estrella más cercana, Próxima Centauri). Así, la luz solar tarda unos 8 minutos en alcanzar nuestro planeta. Visto desde la Tierra el Sol tiene un diámetro angular de unos 32 minutos de arco (aproximadamente 1/2° o, para un adulto normal, la mitad de la anchura de un dedo de la mano tal como se ve con el brazo extendido)².

3. EL ESPECTRO SOLAR

La mayor parte de nuestro conocimiento sobre el Sol (y las otras estrellas) procede del análisis de la *radiación electromagnética (EM)* que emiten, de la que la *luz* es sólo una pequeña parte. La distribución de esta radiación en todos los rangos, desde los rayos gamma a las ondas de radio, se denomina espectro. En él está escrita de algún modo la información sobre los objetos astronómicos y decodificar este mensaje del Universo es la principal labor de los astrofísicos.

A primera vista, el espectro solar es el característico de un cuerpo calentado a unos 5800 K (unos 5530 grados centígrados)³. Conocemos este dato a partir del *color* del Sol (el correspondiente a las longitudes de onda en que la radiación emitida es máxima), y de su *luminosidad*, definida como la cantidad de energía emitida por unidad de tiempo, en todas las longitudes de onda del espectro. Esta asciende a más de 10²⁶ watios, casi 400 billones de veces más energía que la generada por todas las plantas industriales del mundo trabajando a su máxima capacidad. De toda esta energía sólo nos llegan 1370 W/m³ (cada metro cuadrado de una esfera imaginaria de 1 U.A. de radio capta la potencia necesaria para hacer lucir unas 14 bombillas de 100 watios), valor llamado *constante solar*. Si bien evidencias geológicas parecen indicar que la luminosidad y el flujo solares han permanecido casi constantes durante los últimos 3500 millones de años, desde hace unos 50 años, medidas proporcionadas por satélites muestran variaciones sólo del orden de un 0.25%. Aunque pequeñas, estas fluctuaciones son importantes en el marco de las relaciones Sol-Tierra.

La porción visible del espectro solar, que llamamos en conjunto *luz blanca*, consiste en un continuo de colores desde el violeta al rojo, cada uno correspondiente a una longitud de onda de la radiación EM. Los colores pueden verse separados cuando la luz del Sol pasa a través de un prisma o de instrumentos más complejos como las redes de difracción. (Véase la **Figura 2**). El Sol emite también en longitudes de onda más cortas (rayos gamma, rayos X y

² Veamos un ejemplo a escala: si el Sol tuviera el tamaño de una pelota de baloncesto, la Tierra sería como una cabeza de alfiler y ambos estarian separados unos 30.5 m. Si se pudiera recorrer la distancia que nos separa del Sol en un coche a 80 km/h, el trayecto duraria unos 176 años: la uz maja realmiente deprisa.

³ El espectro del Sol sigue con bastante buena aproximación la Ley de Planck que establece que el válor total de la energia emitida en forma de radiación EM requivalentemente, el número total de partículas de radiación EM o fotones) y su distribución frente a la longitud de onda vierien determinados por la temperatura de la fuente. Esos 5800 K son la llamada temperatura efectiva que, cualitativamiente, puede considerarse una medida de la temperatura superficial del Sol

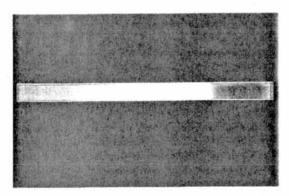


Figura 2: Espectro visible del Sol. Se observa el continuo de colores del azul al rojo surcado por multitud de líneas de absorción de distintas especies quimicas Por ejemplo, las dos bandas muy occuras y gruesas en la zona azul son líneas de calcio una vez ionizado, entre el azul y el verde se observa la línea Ha del hidrógeno, tres líneas bastante juntas e intensas en la región verde son de magnesio neutro, una raya doble en la zona miranja corresponible a socio neutro y en el extremo rojo del espectro es visible la intensa línea Ha del hidrógeno neutro y en la Torre Sona Des K.F. JACOR Y H. WORLDIA GENERAL DE GOTTINGEN.

ALTIMANIA, POR IOS DIES K.F. JACOR Y H. WORLDIA KENDALUE RESIDIO FOR SOMIANPHISK DE FRIBURG -ALTIMANIA-).

ultravioleta -UV-) y más largas (infrarrojo -IR-, microondas y radio), pero la radiación es más intensa en el rango visible.

La radiación EM (fotones) procedente del interior del Sol no es emitida inmediatamente al espacio, sino que en su camino hacia la superficie solar interacciona fuertemente con la materia, siendo absorbida y dispersada continuamente. Al alcanzarse las zonas más exteriores, cada vez menos densas, la mayoría de los fotones sí son capaces de escapar libremente y llegar hasta nosotros; se llama fotosfera a la capa de la cual proceden los fotones que originan el espectro visible del Sol. Un estudio detallado del mismo revela la presencia de lineas de absorción, estrechas bandas oscuras que surcan el continuo de colores, claramente visibles en la Figura 2. Cuando tiene lugar una transición de un electrón desde un nivel de energía a otro superior en un átomo, es absorbido un fotón cuya longitud de onda (y frecuencia, y energía) coincide con la de la transición. Esos fotones absorbidos, incapaces de escapar, dan lugar a "huecos" en determinadas longitudes de onda del espectro. Sin embargo, las líneas de absorción no son totalmente oscuras porque en zonas exteriores a la fotosfera, donde el material solar es menos denso, los fotones sí consiguen salir al espacio y alcanzarnos. Así, fotografías del Sol

tomadas a través de filtros estrechos centrados en líneas espectrales intensas permiten conocer el aspecto de las capas del Sol que rodean a la fotosfera.

Cada especie química (cada ión) se caracteriza por un conjunto diferente de transiciones electrónicas permitidas, su "huella digital" en el espectro, por lo que la identificación de las líneas espectrales conduce a la determinación de la composición química del Sol. Una escala de longitudes de onda colocada en la **Figura 2** permite asociar cada línea a una transición electrónica de un elemento químico, comparando con un patrón de transiciones observadas en laboratorio y clasificadas por su longitud de onda. La intensidad de las líneas de un determinado ión está relacionada con la abundancia del mismo en el Sol y depende también de las condiciones de densidad, presión y temperatura en la región en que se forma la línea.

Además de proporcionar esta información, el análisis del espectro permite detectar campos de velocidades, mediante el *efecto Doppler*, y campos magnéticos, mediante el *efecto Zeeman* y el análisis de la *polarización* de la luz.

4. CARACTERICEMOS AL SOL POR SUS PARAMETROS FÍSICOS

El Sol es una estrella *enana* (de clase de luminosidad V), de tipo espectral G2, que se encuentra más o menos en la mitad de su permanencia en la Secuencia Principal del diagrama de Hertzsprung-Russell. Las teorías de evolución estelar predicen que permanecerá en un

Tabla 1: Datos físicos fundamentales del Sol

-Edad 4.6x10" años 8adio 696000 km (

Radio 696000 km (109 veces mayor que el radio terrestre)
-Masa 2x10³⁰kg (prácticamente *toda* la masa del Sistema Solar)
Gravedad superficial 273 m/s² (28 veces mayor que la gravedad terrestre)

Gravedad superficial 273 m/s² (28 veces mayor que la gravedad terrestr -Luminosidad 3.86x10²ⁿ W

Temperatura efectiva5780 KMagnitud absoluta4.74

-Magnitud aparente -26.7 (10¹⁰ veces más brillante que Sirio)

Periodo de rotación en el ecuador 26 días cerca de los polos 32 días

Distancias superficiales 725 km/segundo de arco

estado similar al presente durante otros 5000 millones de años, aproximadamente su edad actual, así que podemos estar tranquilos^a.

Además de su edad, se presentan otros datos característicos del Sol en la Tabla 1.

En la Tabla se dan dos valores para el periodo de rotación del Sol. Esto es debido a que el Sol no rota como un cuerpo sólido y rígido, sino que presenta una rotación diferencial: la velocidad de rotación varia con la latitud solar, siendo mayor en las zonas ecuatoriales y disminuyendo hacia los polos. Además, modelos teóricos indican que la rotación es también diferencial en profundidad, aumentando la velocidad hacia el centro del Sol.

5. ¿DE QUÉ ESTÁ HECHO EL SOL?

El Sol es un enorme globo de "gas" incandescente, con una temperatura superficial cercana a los 6000-K. No se trata, por tanto, de una esfera sólida sobre la que se podría caminar... En él se ha detectado la presencia de casi dos tercios de los elementos químicos conocidos en Tierra. Algo más del 73% de su masa es hidrógeno (el elemento más abundante en el Sol y en todo el Universo), aproximadamente un 25% es helio y menos de un 2% corresponde a otros elementos y compuestos químicos (de mayor a menor abundancia, oxígeno, carbono, hierro, neon, nitrógeno, silicio, magnesio, azufre y otros).

La materia del Sol se encuentra en un estado físico-químico muy particular. Mientras que un gas ordinario está constituido por partículas sin carga eléctrica neta, una fracción considerable del fluído solar está ionizada, por lo que entran en juego las poderosas fuerzas electromagnéticas. La interacción de los campos electromagnéticos con la materia cambia tan radicalmente el comportamiento del gas que es preferible considerarlo como un estado distinto: el plasma, llamado cuarto estado de la materia, en el que se presenta el 99% de la materia del Universo^s. Un plasma es, pues, una "sopa" de electrones, iones, átomos neutros, moléculas y fotones, en la que las fuerzas electromagnéticas tienen un papel preponderante. Dada la alta conductividad eléctrica del plasma (por los electrones libres procedentes de átomos ionizados), y el gran tamaño y alta velocidad de las estructuras que se mueven en el Sol, se produce el efecto de congelación del campo magnético, de crucial importancia para comprender la dinámica solar. Significa que las líneas de campo y el plasma solar se mueven solidariamente: donde domina el campo magnético el flujo de materia ionizada tiende a ocurrir a lo largo de sus líneas; donde domina la energía cinética de la materia estas líneas de campo son distorsionadas por el movimiento del fluído. Volveremos sobre este punto en secciones posteriores.

6. EL SOL ESTUDIADO COMO UNA ESTRELLA: UN MODELO ESTÁNDAR

Sólo podemos "ver" la superficie del Sol. Sin embargo, el comportamiento de la misma traduce los fenómenos que ocurren bajo ella. ¿Qué podemos hacer para escudriñar el interior solar?. Y, si lo logramos, ¿somos capaces de presentar una visión de conjunto de nuestra estrella?.

La solución pasa por construir un modelo del Sol. Se denomina estándar a aquél que utiliza las suposiciones físicas más sencillas y los mejores datos físicos disponibles en el momento en que se elabora. Construir un modelo supone aceptar una serie de hipótesis lógicas:

- el Sol es *esférico*: todas las variables físicas de interés (temperatura, presión, densidad, etc.) se expresan como funciones de la distancia radial al centro, y se desprecian los efectos de la rotación y los campos magnéticos, que modificarían esta simetría.

aparecen indistintamente los terminos plasma y gas.
6 Gn *modelo* en general es un código fisico-matemático autoconsistente que permite reproducir las características observables del objeto bajo estudio, Bamadas *ligaduras* del modelo: para el Soi éstas son su forma, tamaño, masa, color, cantidad y distribución de energía emitida, etc.

⁴ Las estrellas G tienen una temperatura efectiva en el rango de 5000 a 6000 K y su color está entre el blanco y el amarillo. En su espectro muestran líneas de calcio muy intensas, junto con líneas de metales neutros e ionizados, y débiles líneas de hidrógeno ionizado. Los detalles sobre el nacimiento y muerte del Sol pueden encontrarse en el ensayo dedicado a la "Vida y muerte de las estrellas" en este mismo libro. 5 Es habitual referirse al material sular como a un gas. Se trata de un abuso de lenguaje pero está muy extendido y a lo largo del texto

- la generación de energía tiene lugar mediante reacciones termonucleares de fusión que, además, determinan la evolución de las abundancias químicas en el Sol (que, en su formación, era químicamente homogéneo, con una composición igual a la de la fotosfera).

- el transporte de energía se produce por radiación (mediante fotones absorbidos y reemitidos continuamente por los iones y electrones) y convección (mediante movimientos cíclicos del material), cada uno de ellos eficiente en capas diferentes del Sol

- el Sol está aproximadamente en *equilibrio*: *termodinámico*, según el cual las propiedades del plasma se pueden describir mediante variables de estado locales como la temperatura, presión, densidad, etc.; *hidrostático*, porque la presión del plasma y la de

radiación (hacia el exterior) son equilibradas exactamente por la acción de la gravedad (hacia el interior); y *energético*, de forma que en cada segundo se produce tanta energía en el núcleo como la que se pierde por radiación a través de la superficie.

® Tone radiativa → ... © Región de transición

© Corone —

Figura 3: Sección del Sol con sus diferentes capas. Se indica la temperatura de las mismas y su grosor en km y en fracción del radio solar. Manteniendo la escala para todas la capas la fotosfera y cromosfera no resultarian visibles, por lo que la anchura representada es mayor que la que realmente les corresponde. (Dibujo REALIZADO POR LA DRA. 1. RODRIGUEZ HIDALGO DEL IAC).

0.5

Con estas hipótesis se escribe un sistema de cuatro ecuaciones diferenciales basadas en principios físicos sencillos, que exigen la conservación de la masa, del momento y de la energía, y establecen la forma de transporte de la misma. Adoptando unos valores iniciales de la masa y la composición química del Sol y resolviendo el sistema, (es decir, integrando estas ecuaciones con un procedimiento iterativo que va modificando las variables físicas involucradas), la Astrofísica actual es capaz de elaborar una secuencia de estados tal que, al cabo del tiempo de vida del Sol conocido por datación de isótopos en meteoritos, entre otros métodos-, éste muestre las propiedades que presenta actualmente.

Una vez elaborado un modelo del Sol podemos utilizarlo para hacer predicciones de algunas de sus características. Si, como sucede con frecuencia, éstas no se ajustan a los datos observacionales, es preciso cambiar el modelo y replantearse la validez de las leyes físicas utilizadas, además de mejorar en lo posible la precisión de las observaciones, en el proceso de retroalimentación que constituye la esencia del método científico. No olvidemos, además, que solo un conocimiento preciso de nuestra estrella estudiada en conjunto permite predecir la estructura y evolución de otras estrellas.

7. "CORTEMOS" EL SOL PARA VER SU ESTRUCTURA

Simplificando bastante podemos considerar el Sol como constituido por una serie de capas concéntricas. En la **Figura 3** "cortamos" el Sol para ilustrar su estructura, indicando el grosor aproximado de cada una de las capas y su temperatura. Mientras

que la densidad de materia solar decrece continuamente hacia el exterior, la temperatura alcanza un mínimo al final de la fotosfera y, desde ahí, aumenta de nuevo.

8. VIAJE AL INTERIOR SOLAR

El interior del Sol es la zona inaccesible a la observación directa. En esta sección se describen las características y funcionamiento del núcleo, zona radiativa y zona convectiva. Se presentan también dos clases de experimentos, desarrollados en las dos o tres últimas décadas, que proporcionan información sobre el interior: el estudio de los neutrinos procedentes de las reacciones nucleares, y el análisis de las oscilaciones solares, al que se dedica la Heliosismología.

8.1 Núcleo y Zona Radiativa

Si el Sol está constituido esencialmente por los mismos elementos fundamentales que forman la Tierra, ¿cómo es capaz de emitir luz y calor de forma prácticamente inagotable?.

Durante el siglo pasado se creía que solo la contracción gravitatoria era capaz de proporcionar grandes cantidades de energía. Sin embargo, la energía resultante de un proceso imaginario que concentrara en el tamaño actual del Sol toda la materia del Sistema Solar inicialmente dispersa hasta el infinito, duraría sólo 10 millones de años. Dado que estudios físicos y químicos de la Tierra indicaban que la edad del Sol debía ser superior a 1000 millones de años, se propusieron diversos mecanismos hasta que, a finales de los años 30, el desarrollo de la Física Nuclear condujo a la respuesta acertada: la energía irradiada por el Sol se genera en su interior mediante *reacciones termonucleares de fusión* que utilizan como combustible el hidrógeno para transformarlo en helio. El *núcl*eo, que se extiende hasta aproximadamente 1/4 del radio solar, es, por lo tanto, el corazón del Sol.

El 95% de los núcleos de helío se producen mediante la reacción llamada cadena protón-protón o cadena pp (existen también otras variantes mucho menos frecuentes en las que intervienen berilio, litio o boro). Esencialmente la cadena pp, que tiene lugar en varias etapas, consiste en la fusión de núcleos de hidrógeno (protones) para producir núcleos de helio, a razón de cuatro a uno. Cuatro protones son ligeramente más pesados que el núcleo de helio resultante, de modo que la diferencia de masa (m) se convierte en energia (E) mediante la famosa equivalencia de Einstein $E = mc^2$ (donde c es la velocidad de la luz), liberándose unos 4.3x10¹² julios por cada reacción. Aunque estas reacciones transforman 4 millones de toneladas de masa en energía por segundo⁷, el Sol es un generador bastante pobre: el máximo valor estimado para el ritmo de generación de energía es del orden de 0.0015 watios por cada kilogramo... y un hombre de 70 kg de peso gasta cada segundo una energía unas 40 veces mayor. A pesar de un ritmo tan bajo, la impresionante masa del Sol hace que la cantidad de energía generada sea muy grande. La cadena de reacciones se detiene una vez formado el núcleo de helio, ya que este elemento es aún estable a la temperatura del interior. Cerca del centro la abundancia de helio es superior a la de las capas más exteriores, a expensas de una disminución de la abundancia de hidrógeno que, en esta zona, es ya del orden de un 36%. Como inicialmente era de un 75%, el núcleo del Sol ha consumido aproximadamente la mitad de su combustible.

El núcleo está envuelto por la zona radiativa, que se comporta como un "abrigo". Es semejante a un material "al rojo vivo" y se extiende hasta algo menos de 3/4 del radio solar. A través de esta región, la energía es transportada por radiación: mediante ondas electromagnéticas, es decir, mediante fotones. El proceso comienza con unos pocos fotones muy energéticos que, durante el transporte, originan una avalancha de fotones de menor energía. Los fotones procedentes del núcleo tardan entre 1 y 10 millones de años en atravesar la zona de radiación ya que, en su recorrido, interaccionan intensamente con la materia siendo absorbidos, dispersados y reemitidos muchas veces.

8.2 Zona convectiva

Las teorías de evolución estelar señalan que una estrella de la masa y luminosidad del Sol debe poseer, rodeando a su núcleo y zona radiativa, una zona de convección. El desarrollo de la misma se debe a un cambio drástico en las condiciones físicas: el material solar se vuelve tan opaco que los fotones ya no son capaces de atravesarlo, con lo que el transporte de energía mediante radiación deja de ser eficiente. Entonces comienza a funcionar el mecanismo de la convección, que consiste en la aparición de "burbujas" de material caliente, llamadas celdas convectivas, que ascienden hacia la superficie transportando energía muy eficientemente. La zona de convección (algo más del último cuarto del radio solar) es, pues, similar a un "fluído hirviendo", pero es tan compleja que aun nos sorprende su comportamiento y no somos capaces de predecirlo.

⁷ Este número parece enorme, pero supone que el Sol solo convierte en energía 2x10º de su masa total por segundo, es decir, escasamente 3 desmilesimas de su masa a lo largo de toda su vida

Debido al fuerte descenso de temperatura hacia la superficie a través de esta región, algunos núcleos son capaces de capturar uno o más electrones en el proceso de recombinación. Parece que el súbito aumento de la opacidad puede ser provocado por la recombinación del hidrógeno, helio (una vez) y helio (dos veces), que sucede a profundidades de unos 2000, 6000 y 20000 km, respectivamente. La teoría predice que deben originarse celdas de distintos tamaños, relacionados con dichas profundidades, y que las dimensiones vertical y horizontal de las burbujas han de ser del mismo orden. Esto concuerda con las estructuras convectivas detectables en la superficie solar: de menor a mayor tamaño, granulación, mesogranulación y supergranulación, sobre las que hablaremos al tratar de la fotosfera.

Aunque existe una estructuración de tamaños de las celdas en varias escalas dominantes, el proceso de la convección es, al mismo tiempo, turbulento (desordenado), debido a la bajísima viscosidad y alta compresibilidad del plasma solar. Por eso modelar la convección en el Sol es muy complicado. Se han elaborado diversos modelos, algunos bastante simplificados y otros de gran complejidad, así como simulaciones numéricas de convección turbulenta, algunas de las cuales tienen en cuenta, además, su interacción con el campo magnético (Magnetoconvección).

8.3 El problema de los neutrinos solares

Los neutrinos son una clase de partículas elementales con una bajisima probabilidad de interaccionar con la materia. Los generados en las reacciones nucleares del interior del Sol lo atraviesan casi sin ser perturbados, por lo que el estudio de aquéllos que alcanzan la Tierra proporciona información directa sobre las condiciones del interior.

Varios experimentos bastante complejos han sido diseñados para determinar el flujo de neutrinos solares, utilizando grandes cantidades de compuestos de cloro, agua pesada^e o galio, encerrados en minas a gran profundidad. Estos experimentos, cada uno especialmente sensible a neutrinos de diferentes energías que se producen en diferentes etapas de la cadena pp, han permitido verificar que realmente tienen lugar reacciones nucleares, y que éstas siguen mayoritariamente la cadena mencionada.

El problema es que el flujo de neutrinos detectado es de la mitad a un tercio del esperado según las predicciones teóricas. Se han propuesto diversas soluciones para explicar las discrepancias observadas, de las que destacamos dos: o bien los modelos estándar del Sol no son correctos, o bien no es correcto nuestro modelo de las características y comportamiento del neutrino. Ambas alternativas son de gran trascendencia en el marco de la Astrofísica: la primera, porque exigiría una revisión de las teorías de evolución estelar que, hasta el momento, parecen funcionar bien. La segunda, porque tendría importantes implicaciones cosmológicas: una de las posibilidades barajadas por esta solución es que el neutrino tenga una masa en reposo extremadamente pequeña, pero no nula. De llegar a confirmarse esta última hipótesis, la masa estimada del Universo sería sensiblemente mayor, lo que condicionaría si la expansión del mismo continuará indefinidamente o se invertirá en una contracción por efecto de la atracción gravitacional...

8.4 Heliosismología

De igual manera que el estudio de las ondas sismicas terrestres (terremotos) ha hecho posible el conocimiento de la estructura interna de la Tierra, la aplicación de esas técnicas al Sol ha dado lugar a esta joven rama de la Física Solar dedicada al análisis de las oscilaciones solares, que es una de las más potentes herramientas de conocimiento del interior solar?.

El Sol, como todo cuerpo, tiene unas frecuencias propias de oscilación que dependen de su geometría, condiciones físicas y composición química: "vibra" como si se tratara de un instrumento musical, tanto globalmente como por zonas, con periodos que van de 5 minutos a más de 1 hora. Es decir, es posible observar regiones que se levantan (con velocidades ascendentes) mientras que otras se hunden (con velocidades de descenso), así como pequeñas variaciones de radio y luminosidad a lo largo del tiempo.

Para poder determinar con precisión la amplitud y frecuencia de los llamados modos de

^{8.} Agua formada con exigeno y deuteno, un isotopo del hidrogeno con un neutron y un proton es su núcleo

⁹ En los altimos necidos se na extinuacio tambien a las estreitas, recibicado al combin de Astroscindades

oscilación del Sol es fundamental disponer de medidas de velocidad e intensidad durante muy largos periodos de tiempo. Con objeto de evitar la interrupción de las observaciones diurnas durante la noche se combinan datos procedentes de observatorios situados alrededor de todo el mundo. Además, las técnicas observacionales utilizadas en estaciones terrestres se aplican a proyectos espaciales.

A partir del análisis e interpretación de las observaciones, y de la elaboración de modelos teóricos compatibles con los resultados, la Heliosismología ha alcanzado logros tan notables como la determinación de la abundancia de helio, de la profundidad de la zona de convección y de la variación de la velocidad de rotación del Sol con la profundidad.

A modo de resumen podemos citar las siguientes conclusiones: las observaciones heliosismológicas apoyan claramente a los modelos estándar y están permitiendo obtener valores altamente fiables de la densidad y opacidad, a partir de las medidas muy precisas de las frecuencias de modos acústicos solares; de la medida del flujo de neutrinos se podrá obtener una medida precisa del perfil de temperatura en el núcleo; conocidas la densidad y temperatura, será posible calcular la velocidad local del sonido (o velocidad de propagación de las perturbaciones de presión). Todo ello nos acerca a un modelo estándar cada vez más correcto que permitirá usar el Sol como una fuente bien calibrada, válida para avanzar en el conocimiento de la física del neutrino, y para revisar y mejorar las teorías de estructura y evolución estelar.

9. VIAJE POR LA ATMÓSFERA SOLAR

La atmósfera solar que, al contrario que el interior, sí puede ser observada, supone la transición progresiva del Sol al medio interplanetario. Aunque los antiguos pensaban que el Sol era una esfera perfecta, homogénea y estática, en realidad la atmósfera solar está en continua evolución, y muestra muchas estructuras, importantes fluctuaciones de densidad, temperatura y energía emitida, movimientos turbulentos, ondas y corrientes diversas. La mayor parte de estos fenómenos está relacionada con los movimientos convectivos y con los campos magnéticos.

A continuación se presentan las distintas capas que constituyen la atmósfera solar y se describen las estructuras de carácter convectivo. Al Sol *activo* se dedica todo un apartado¹⁰, ya que seguramente los fenómenos solares más espectaculares son los vinculados directamente a la presencia de campos magnéticos. Ésta sección finaliza con una revisión del *ciclo de actividad solar* y las interacciones Sol-Tierra más importantes.

9.1 Fotosfera, cromosfera y corona

La fotosfera o esfera de luz (denominada así por motivos obvios), es la "piel" del Sol, su superficie visible de la que procede la mayor parte de la radiación solar observada. Aunque el Sol no es un objeto con límites perfectamente definidos, el escaso grosor de esta superficie ficticia, unos 500 km, hace que el borde visible nos parezca tan nítido.

La imagen del Sol de la **Figura 1** corresponde precisamente a la fotosfera. En ella Ilama la atención el fenómeno del *oscurecimiento hacia el borde*. La explicación de este fenómeno en términos sencillos es la siguiente: aunque la fotosfera permite que la energía procedente del interior solar se libere al espacio en forma de luz, no es del todo transparente, no se puede "ver" completamente a su través. Por eso la luz solar visible viene desde la profundidad correspondiente a la distancia que la radiación EM es capaz de atravesar según la opacidad del material (que depende fundamentalmente de la densidad y temperatura del mismo). Como la temperatura disminuye desde unos 5800 K en la base hasta unos 4300 K al final de la fotosfera -en la región del *minimo de temperatura*-, cuando observamos el centro/borde del Sol, la luz atraviesa las capas fotosféricas perpendicularmente/oblicuamente, recorriendo una cierta distancia que permite "penetrar" hasta niveles inferiores/superiores, más calientes/fríos y, por lo tanto, más brillantes/oscuros.

¹⁰ La palabra actividad referida ai So! lieva implicito el calificativo de magnetica. La expresión en caima sirve, por oposición, para referirse a las estructuras solares no magnéticas.

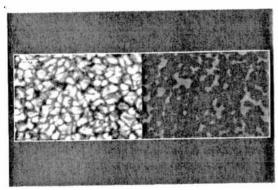


Figura 4: A la izquierda se muestra una imagen de la **granulación** solar con muy buena resolución espacial. A la derecha, el mapa de velocidades correspondiente a la misma región. Las zonas brillarites de la primera fotografía corresponden a material caliente que asciende (en azul en la imagen de velocidad) y las zonas oscuras, a material más frío que desciende (en rojo a la derecha).

(OBTENNA EN EL TELESCOPIO DE LA TORRE SQUAR SUECA DEL ORM, LA PALMA -ESPANA-POR LOS DRES, M. COLLADOS E L. RUDRIGUEZ HIDALIGO DEL IAC. EL MARA DE VELOCIDADES HA SCO ELABOBRADO POR LOS DIELS. B. REG. COBO E E. RODRIGUEZ HIDALGO DEL IAC.) También en la **Figura 1** puede verse que toda la fotosfera está cubierta de pequeños "granitos". Estas estructuras (y otras no observables en una imagen de luz blanca, pero sí con otras técnicas) son evidencias de la existencia de celdas convectivas de distintos tamaños discretos:

- granulación: las más pequeñas de las estructuras convectivas dan a la fotosfera su aspecto de "paella" característico, con gránulos brillantes rodeados por estrechos canales oscuros llamados espacios intergranulares. Los gránulos, con formas irregulares, tamaños cercanos a los 2000 km y tiempos de vida de unos 8 minutos, son "burbujas" de material caliente que asciende por la zona central, se enfría irradiando su calor y se desparrama horizontalmente; por los espacios intergranulares oscuros el material más frío desciende de nuevo, completando los movimientos cíclicos característicos de la convección. Las velocidades típicas del material son del orden de 4000 km/hora. La Figura 4 es un detalle de la granulación con su campo de velocidades asociado.

- mesogranulación: corresponde a celdas convectivas con tamaños de unos 5000 a 10000 km y tiempos de vida de horas. Se detectan principalmente por su pequeño campo de velocidades (unos 60 m/s) pero son difícilmente observables en intensidad.

- supergranulación: los tamaños de estas celdas son de unos 30000 km y los tiempos de vida del orden de un día. La velocidad de ascenso y descenso del material es de unos 100 m/s, mientras que los flujos horizontales pueden alcanzar hasta 500 m/s. Son detectables a partir de medidas de velocidad y a través de ciertos filtros estrechos. Su efecto sobre los campos magnéticos es muy importante, como veremos pronto.

Se especula la existencia de otro tipo de celdas convectivas, las llamadas *celdas gigantes*, con tamaños cercanos al grosor completo de la zona de convección y tiempos de vida del orden de un año. Sin embargo, carecemos de evidencias observacionales de este tipo de estructuras.

Por encima de la fotosfera se encuentra la *cromosfera* o esfera de color, que debe su nombre al tono rosado-rojizo que presenta cuando resulta visible durante unos segundos al principio y al final de un eclipse total de Sol. En esta capa muy transparente y poco densa la temperatura aumenta hacia el exterior, por lo que su espectro, llamado *espectro de "flash"*, muestra en *emisión* -más brillantes que el continuo de colores- líneas que aparecen en absorción en el espectro de la fotosfera como, por ejemplo, la intensa línea de hidrógeno

neutro llamada Hα.

La cromosfera, que puede verse en la **Figura 5**, ha sido comparada con "una pradera ardiente" y su aspecto está íntimamente relacionado con el campo magnético solar.

Sobre la cromosfera se encuentra la región de transición hacia la siguiente capa. Se trata de una estrecha zona en la que la temperatura aumenta tan bruscamente (de unos 10000 a un millón de grados) en unos pocos cientos de kilómetros, que supone prácticamente una discontinuidad.

La corona es la parte más externa de la atmósfera solar, altamente inhomogénea, que se extiende hasta distancias de muchas veces el radio del Sol, incluso hasta la órbita de la Tierra. Sólo resulta visible durante los eclipses totales como un halo blancuzco, claramente no esférico, alrededor del disco solar, porque la luz difusa del cielo diurno enmascara normalmente su brillo, algo menor en promedio que el de la luna llena. En la **Figura 6** puede verse una hermosa imagen de la corona obtenida durante un eclipse. También es observable utilizando coronógrafos, telescopios especiales capaces de simular



Figura 5: Imagen de la cromosfera solar, obtenida a través de un filtro centrado en la línea Hii. Se observa la red cromosférica cubriendo toda la superficie del disco, filamentos oscuros (que corresponden a protuberancias brillantes cuando se observan en el borde del Soli, plages y regiones activas en general.

(CORTESIA DEL SPACE ENVIRONMENT LABORATORY, NATIONAL AERONALITIC AIGO OCEANIC

ADMINISTRATION DE BOULDER, COLORADO -EEUU-)

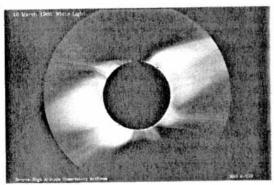


Figura 6: La **coro**na solar observada durante el eclipse de 1988, [Norte irriba, Este a la izquierda), con impresionantes **chorros** en los bordes SE y NO, inclinados hacia el ecuador solar. Sólo unos pocos chorros más pequeños son visibles sobre los polos N y S.

CONTESIA DEL ARCHIVO DEL HIGH ALTITUDE OBSERVATORY, NATIONAL CENTER FOR ATMOSPHERE RESEARCH, EN BOULDER, COLORADO - EEUU-). artificialmente un eclipse ocultando el disco luminoso del Sol.

Su apariencia se debe a la luz fotosférica dispersada por gas muy ionizado, muy poco denso y muy caliente, a unos 2x106 K de temperatura (entendida ésta como la energía cinética media de los electrones libres). En las regiones del UV extremo y rayos X del espectro coronal se han observado líneas de emisión debidas a metales altamente ionizados que solo pueden existir a temperaturas muy altas. Con filtros centrados en esas longitudes de onda es posible observar la corona completa, no sólo alrededor del disco solar.

Además de gas caliente, la corona tiene un componente de polvo (granos de materia interestelar) que, en la zona más interior de la corona, se evapora por la intensa radiación solar y, más hacia el exterior, se concentra hacia el plano ecuatorial del Sol¹¹.

9.2 El Sol activo

"Los campos magnéticos son para los astrofísicos como el sexo para los psicoanalistas." (H. C. van de Hulst)

Esta significativa frase de un notable científico indica la importancia fundamental del campo magnético en el marco de la Astrofísica en general y de la Física Solar en particular.

La más clara evidencia de que el campo magnético se manifiesta en la atmósfera solar de forma intermitente la constituyen la *red* y las *fáculas*.

La red fotosférica o cromosférica -según donde se observe- es una trama de puntos brillantes correspondientes a concentraciones de campo magnético (unos 1500 gauss en la fotosfera) en estrechos tubos de unos 150 km de diámetro. Los movimientos horizontales de fluído asociados a la supergranulación empujan y concentran las líneas de campo en los bordes de los supergránulos que son, por tanto, "delimitados" por la red.

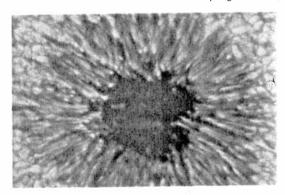


Figura 7. Imagen de una **mancha** solar con excelente resolución espacial. Se observa claramente la **umbra**, la **penumbra** con sus estructuras radiales charas y oscuras y la **granulació**n circundante. Es una de las manchas más fauntas que se han observado, por lo que los autores de la imagen la liaman carinosamente "Claudia", como la modelo Claudia Schiffer...

IOUIINICA EN EL TLESCOPO DE LA TORRE SOLAR SUECA DEL ORM, LA PALMA "ESPAÑA-MIN LOS DRIS. J.A. BONET Y M. VAZQUEZ DEL IAC, A. HANSELMEER DEL INSTITUT FUR AVERINA MAR DE GRAZ "AUSTRIA" Y M. SOBOTKA DEL ASTRONOMICKY ÚSTAV AKADEMIE DE DUDINI (UN "A PEC, CYECA"). Cerca del borde de la fotosfera son visibles estructuras brillantes de aspecto granulado llamadas fáculas (véase la **Figura 1**). Estas mismas estructuras se observan también en la cromosfera como extensas regiones brillantes que, en este caso, reciben el nombre de plages y son visibles en cualquier parte del disco (véase la **Figura 5**). Están formadas por agrupaciones de pequeñas estructuras magnéticas como las de la red, inmersas en la granulación circundante y situadas preferentemente en los espacios intergranulares.

Se denominan regiones activas en general a áreas relativamente extensas del Sol, con un intenso campo magnético local y un tiempo de vida limitado. No se localizan exclusivamente en una capa de la atmósfera solar sino que tienen distintas manifestaciones en la fotosfera, cromosfera y corona, que se describen a continuación.

Sin duda las estructuras más llamativas de la fotosfera son las manchas solares, zonas oscuras con tamaños que van desde unos 1500 km hasta unos 50000 km en algunos casos. Pueden verse muchas de ellas en la **Figura 1**. Aunque su existencia ya era conocida por el pueblo chino hace más de dos míl años fue Galileo quien,

observando con un telescopio el desplazamiento de las manchas sobre el disco, demostró que estas estructuras pertenecían realmente a la superficie del Sol y que éste rotaba.

Una mancha individual bien desarrollada como la que muestra **la Figura 7**, tiene una zona central más oscura denominada *umbra*, relativamente homogénea, rodeada por un anillo algo menos oscuro, la *penumbra*, con estructuras filamentosas brillantes y oscuras dispuestas radialmente.

¹¹ La luz fotosférica difundida por el polvo y los electrones de la corona produce la luz zodiacal, una tenue luminosidad visible a simple vista después del ocaso en noches muy claras, cerca del plano de la eclíptica.

Las manchas suelen aparecer en grupos, más o menos complejos.

Ya a principios de este siglo, G.E. Hale determino que las manchas eran intensas concentraciones de campo magnético (unos 3000 gauss en el centro decreciendo monotonamente hasta unos 1500 gauss en el borde exterior), cuyas líneas de fuerza atraviesan la superficie solar. El efecto de congelación del campo inhibe la convección que calienta la fotosfera en calma circundante, lo que produce un enfriamiento relativo de las manchas: por eso se ven oscuras. La temperatura típica en el centro de una mancha grande es de unos 4000 K frente a unos 5800 K en la fotosfera que la rodea¹². La *Magnetohidrodinámica* (MHD), conjunto de estudios observacionales y teóricos que tratan de explicar cómo se generan y mantienen los campos magnéticos en plasmas, apoya esta explicación de la menor temperatura de las manchas, surgida hacia 1940, aunque admite que debe haber algún tipo de transporte convectivo en la umbra. Se han observado los *puntos umbrales*, pequeñas estructuras aisladas con un campo magnético menor que en el resto de la umbra, un brillo cercano al de la fotosfera y un movimiento ascendente, lo que parece confirmar su naturaleza convectiva.

La estructura de una mancha bajo la fotosfera no puede ser observada directamente, sino que ha de ser modelada. Se ha propuesto un modelo monolítico (con una única estructura magnética vertical y homogénea horizontalmente) y uno fibrilar (con muchas estructuras pequeñas agrupadas como un ramillete, entre cuyos huecos hay plasma no magnético), pero ninguno cumple satisfactoriamente todos los requisitos teóricos ni observacionales, por lo que este tema es todavía un asunto controvertido. Las líneas de campo, prácticamente verticales en la umbra, se abren e inclinan hasta ponerse casi paralelas a la superficie en la periumbra. Aún no está claro si la alternancia de filamentos brillantes y oscuros depende de la inclinación del campo magnético o tiene un origen convectivo.

Generalmente, las manchas no aparecen de repente bien formadas, sino que suelen surgir como pequeñas estructuras de forma irregular, usualmente sin penumbra (poros), que crecen durante unos días hasta alcanzar su tamaño total. Todas las manchas aparecen en el seno de fáculas, que son más extensas y de mayor duración que aquéllas, pero no todas las fáculas tienen asociadas manchas. Los grupos son frecuentemente bipolares, con una mancha delantera -en el sentido de avance del grupo según la rotación solar- y una trasera, de polaridad magnética opuesta. Suelen aparecer con dos manchas primarias visibles, que van creciendo y desarrollándose, mientras que van surgiendo más pequeñas manchitas en la fotosfera circundante. El máximo desarrollo se alcanza en dos o tres semanas, tiempo desde el cual el número de manchas disminuye por sucesiva fragmentación en estructuras cada vez menores, hasta su desaparición. Normalmente las manchas más grandes tienen tiempos de vida más largos -hasta dos o tres meses-. Los mecanismos causantes del equilibrio y desaparición de las manchas, que dependen de la interacción de la convección con los campos magnéticos, no son todavía bien conocidos, a pesar de los avances de la Magnetoconvección.

Cerca de manchas muy intensas y fáculas suelen observarse en la cromosfera fibrillas, oscuros filamentos de gas de corta duración que se colocan siguiendo las líneas de campo magnético¹³.

Generalmente en las últimas fases del desarrollo de una región activa aparecen en la alta cromosfera y baja corona *protuberancias*, estructuras brillantes que se extienden desde el borde solar hacia el espacio exterior, en forma de chorros, oleadas, bucles o arcos. Cuando se observan proyectadas sobre el disco solar brillante se ven como oscuras cintas alargadas, llamadas filamentos. Pero, físicamente, filamentos y protuberancias son la misma cosa (condensaciones de gas unas cien veces más frío y más denso que su entorno) y su diferente aspecto es solo un efecto geométrico. Se observan fácilmente en imágenes tomadas con un filtro centrado en $H\alpha$, como la de la **Figura 5**.

Los filamentos se sitúan sobre las *lineas neutras* (en las que la intensidad del campo es nula y que separan regiones de polaridad magnética opuesta) y, generalmente, sobreviven durante meses tanto a las manchas como a las fáculas. Pueden hundirse, entrar en erupción o desaparecer súbitamente. En la **Figura 8** puede verse una enorme protuberancia de las clasificadas como estáticas, muy duraderas. Para evitar que el plasma más denso que la corona

13 Su configuración recuerda murbo a la afineación de Amaduras de hierro esparcidas sobre un papel bajo el que se coloca un iman cirdinario.

¹² Sia embargo, en terminos absolutos, las manchas son alin bastante calientes y brillantes: si pudieramos ver en el cielo nocturno una mancha promedio aistada del disco solar sena tan brillante como la luna fiena.

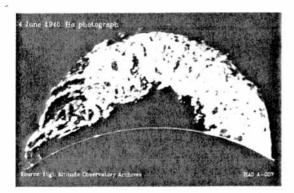


Figura 8: La **protuberancia** solar llamada "Grand Daddy", fotografiada en 1946 a través de un filtro centrado en la línea Hα. Se extiende unos 200000 krn sobre la superficie solar lla Tierra cabria perfectamente en su hueco). El arco brillante bajo la protuberancia es el borde del Sol (CORTESIA DEL ARCHIVO DEI HIGH ALTITUTTE OBSERVATORY, NARIONAL CENTER FOR ATMOSPHERIC RESEARCH, EN BOULDER -COLORADO, EEUU-.)

circundante caiga por efecto de la gravedad, éste debe estar atrapado localmente en el campo magnético y ser mantenido por él.

Las fulguraciones son probablemente el fenómeno más espectacular de la actividad solar: súbitas y violentas descargas de energía magnética en la proximidad de regiones activas, a menudo causadas por la repentina desaparición de un filamento. Pueden durar desde unos minutos hasta horas, van asociadas a la emisión de radiación X, UV, visible y ondas de radio, y acompañadas de emisión de partículas cargadas a velocidades de hasta 4 millones de km/h. El abrillantamiento que las caracteriza es fácilmente visible en rayos X o a través un filtro estrecho en Hα. No se conoce con precisión el mecanismo capaz de provocar la liberación al espacio de hasta 10²⁵ julios de energía (equivalente a la de una bomba de 2000 millones de megatones) y un billón de kg de materia en cuestión de mínutos. El modelo más plausible involucra el fenómeno de la reconexión magnética, que consiste en una reconfiguración más sencilla de las

líneas de campo que deja a cada lado del punto de reconexión sendas "burbujas" de plasma¹⁴. Así, partículas cargadas caen de nuevo sobre la cromosfera y otras son expulsadas al espacio transformando gran cantidad de energía magnética en energía cinética y térmica del gas coronal.

El campo magnético es el elemento esencial de la corona: sin él, ésta no existiría. Parece que los bloques básicos que la forman son lazos magnéticos en los que el plasma caliente está atrapado. Las estructuras coronales más comunes son chorros, anchos cerca del borde y alargados en forma de huso hacia el exterior, más brillantes que el resto de la corona por tener mayor densidad que sus alrededores, lo que hace que dispersen más luz solar. La parte inferior de los chorros consiste en arcos de campo magnético unos dentro de otros, anclados a ambos lados de una línea neutra, que se abren y se extienden radialmente a partir de una cierta altura. Se cree que los "pies" de los lazos magnéticos deben estar anclados muy profundamente, quizá en el fondo de la zona de convección, donde se generan los campos magnéticos, porque el gas coronal no sigue la rotación diferencial de la fotosfera. En muchas ocasiones se observan en la base de los chorros cavidades oscuras que contienen protuberancias (puede verse un ejemplo en la parte superior derecha del borde solar en la Figura 6).

Observaciones de la corona en rayos X muestran puntos brillantes en medio de grandes regiones oscuras. Estas zonas de intensa emisión se sitúan casi siempre sobre regiones activas. Son visibles también los agujeros coronales, zonas oscuras en que el plasma es menos denso y caliente que en el resto de la corona. Los situados sobre los polos cambian muy poco, pero los que aparecen sobre otras latitudes sí parecen estar directamente relacionados con la actividad. Marcan áreas en que las líneas de campo magnético se abren hacia el espacio exterior en lugar de curvarse de nuevo hacia el Sol (aunque, por supuesto, se cierran a distancias muy grandes), con lo que el gas coronal puede fluir libremente desde estas regiones en forma de viento solar. Éste es un flujo variable y rachéado de partículas cargadas (sobre todo electrones y protones, y algunos otros iones más pesados) que, viajando a velocidades típicas de más de 1 millón de km/h, tardan unos 4 o 5 días en alcanzar la Tierra 15.

Una de las más impresionantes manifestaciones de la actividad solar son las expulsiones coronales de masa, asociadas a la desaparición de algunos chorros. En una de las más intensas, registrada en 1989, fueron lanzados al espacio unos 20 billones de kg de materia a una velocidad de más de 7 millones de km/h (aunque los valores más habituales son menores).

¹⁴ Una analogía sencilla de este proceso sería el goteo de agua desde un grifo casi cerrado: cuando el peso del agua supera la tensión superficial, el hifillo inicial se rompe dejando caer una gota.
15 El Sol está perdiendo aproximadamente 1 millón de toneladas de materia cada segundo en forma de viento solar. Aunque la cantidad parece

muy grande, si el Sol tuviera que perder asl toda su masa tardaría unas 10000 veces más tiempo del que aún permanecerá en su estado actua

Para terminar este apartado, un breve comentario sobre el mecanismo de calentamiento de la cromosfera y la corona. Una posible explicación es el transporte mecánico de energía mediante ondas de choque: éstas serían generadas a partir ondas sonoras de baja frecuencia procedentes de la zona de convección, y aceleradas por el fuerte descenso de densidad en la cromosfera y corona, hasta superar la velocidad local del sonido (o velocidad de propagación de las perturbaciones de presión). También la caída de parte del material lanzado antes hacía el exterior produciría un calentamiento. Sin embargo, dado que estructuras activas de la cromosfera como las plages o la red aparecen brillantes, parece claro que el proceso que hace aumentar la temperatura desde el final de la fotosfera hacía el exterior debe involucrar necesariamente el campo magnético. El efecto de aniquilación de campo magnético por reconexión y las llamadas ondas magnetohidrodinámicas (capaces de producir una violenta oscilación de las partículas cargadas) parecen procesos válidos, pero aún carecemos de un modelo satisfactorio que combine los distintos mecanismos responsables del calentamiento.

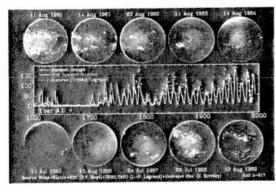


Figura 9: El ciclo de actividad solar: la linea amarilla traza el aumento y disminución periódica del número de manchas promediado por años; la línea púrpura es un contador similar, un indice normalizado llamado número de Wolf. Las cruces verdes indican número de auroras polares. Se muestran, además, imágenes de la cromosfera solar en Ha espaciadas un año, desde la fase de descenso de un ciclo a la de ascenso del siguiente. En ellas es evidente la diferencia en área cubierta por regiones activas y la latitud en la que éstas aparecen.

(Cortesia del Space Environment Laboratory, National Aeronautic and Oceanic Administration de Boulder, Colorado -EEUU-).

9.3 El ciclo solar

Los signos de actividad solar no son igualmente observables a lo largo del tiempo. Registros llevados a cabo durante décadas revelan un misterioso *ciclo* de aumento y disminución graduales en el número promedio de manchas visibles sobre el disco solar. Este hecho fue constatado por primera vez por H. Schwabe en 1843, quien estimó un período de unos 10 años para estas variaciones cíclicas. En 1848, R. Wolf reunió datos del número de manchas desde 1610, determinando una duración media del ciclo de 11.1 años. Trabajos posteriores han demostrado que la longitud de ciclos sucesivos no es estrictamente constante, sino que varia de unos 9 a unos 14 años, con un periodo medio de 10.8, por lo que normal-mente se habla del *ciclo de 11 años*. Se ha observado que no sólo la aparición de manchas, sino de todos los fenómenos de carácter magnético, presenta esta periodicidad.

La imagen de la **Figura 9** es una reconstrucción histórica del número medio de manchas por año desde las primeras observaciones solares a través de un telescopio. En ella puede verse que el número máximo no es el mismo para todos los ciclos y que éstos son asimétricos, es decir, la fase de ascenso desde un mínimo al máximo

siguiente es más rápida que la fase de descenso hasta el próximo mínimo. Estas irregularidades en el ciclo se han acentuado en épocas con un número extremadamente bajo de manchas y otros signos de actividad, como la comprendida entre 1645 y 1715, denominada *Minimo de Maunder*. Se ha propuesto que, superpuestos al periodo de 11 años, pueden existir otros más largos, en concreto uno de casi un siglo. Pero los registros fiables de actividad son todavía cortos como para llegar a una conclusión clara en este aspecto.

Otra característica del ciclo solar es que la polaridad magnética de las manchas delanteras y traseras de los grupos es la misma para todos los grupos de un mismo hemisferio, y opuesta a la de los grupos del otro hemisferio. Además la orientación magnética de los grupos de uno y otro hemisferio se intercambia de un ciclo al siguiente. Por ello se dice que, en realidad, el periodo de actividad magnética es de 22 años, formado por dos ciclos de 11. Por otra parte, las regiones activas sufren una migración en latitud a lo largo del ciclo, más o menos simétrica en ambos hemisferios: al principio del ciclo aparecen hacia unos $\pm 35^{\circ}$ o $\pm 40^{\circ}$ y al final, más cerca del ecuador solar, entre $\pm 10^{\circ}$. Esta banda de latitudes en que suelen aparecer las manchas solares se denomina cinturón de actividad. Un dibujo de la variación con el tiempo de la posición de regiones activas o del porcentaje de área cubierta por manchas en latitud sobre el disco recibe el nombre de diagrama de mariposa porque recuerda a una fila de mariposas, cada una correspondiente a un ciclo. El máximo tiene lugar hacia la mitad de cada "mariposa", cuando la mayoría de las manchas se encuentran entre unos $\pm 15^{\circ}$ de latitud. Hacia el final de un ciclo se observan las últimos grupos de manchas muy cerca del ecuador, al tiempo que los primeros del siguiente ciclo aparecen a mayores latitudes y con la polaridad magnética opuesta.

La explicación de la existencia del ciclo reside en la teoría de la dinamo solar, mecanismo responsable de la continua regeneración del campo magnético en el Sol, que supone una compleja interacción entre el campo magnético, la rotación diferencial y la convección

Una enorme esfera de gas con gran cantidad de partículas cargadas que siguen el movimiento de rotación se comporta como una dínamo gigante: imaginemos una semilla de campo magnético inicial, residente en el fondo de la zona de convección, y orientado de modo que sus líneas de fuerza unan ambos polos. Este campo poloidal se va deformando debido a la rotación diferencial, adelantando la parte ecuatorial de las líneas de campo a la situada en latitudes más altas. Gradualmente este campo termina convirtiéndose en un campo toroidal, como un anillo alrededor del ecuador. Dado que la MHD predice que una estructura magnética tiende a ascender a la superficie por flotabilidad (porque para mantener el equilibrio de presiones y ser estable ha de ser menos densa que sus alrededores no magnéticos), los movimientos convectivos de las celdas de mayor tamaño concentran y amplifican más el campo, y lo empujan hasta la superficie formando un lazo en forma de Ω . Las manchas son los cortes de estos bucles con la superficie. La fuerza de Coriolis inducida por la rotación rompe la simetría de este proceso tendiendo a torcer de nuevo las líneas de campo hasta recuperar la configuración poloidal, pero con polaridad invertida respecto a la del campo original. Y vuelta a empezar... Los valores concretos para el Sol de las magnitudes físicas involucradas dan lugar a un período de 22 años para el ciclo magnético.

Aunque la teoría dínamo explica bastante bien la mayoría de las características del ciclo, épocas como el Mínimo de Maunder y otras irregularidades están aún sin resolver.

9.4 Interacciones Sol-Tierra

Ya los astrónomos del siglo pasado se dieron cuenta de que algunas manifestaciones de actividad solar intensa (como las fulguraciones, en que se liberan grandes cantidades de radiación) eran seguidas, minutos más tarde, por perturbaciones en instrumentos magnéticos de Tierra. Las fulguraciones más fuertes y las expulsiones coronales de masa lanzan al espacio material a velocidades superiores a la del viento solar normal, generando ondas de choque que llegan a la magnetosfera¹6 y la perturban. Sus cambios se manifiestan en la superficie terrestre como tormentas geomagnéticas, que no son catastróficas sino, como mucho, "molestas": se produce un mayor nivel de ionización en la ionosfera que dificulta la transmisión de señales de radio de comunicaciones (que se reflejan en ella) y la recepción de ondas de radio procedentes de objetos astronómicos. También pueden producirse perturbaciones en las órbitas de satélites artificiales y en las redes de fluído eléctrico. La manifestación más común y espectacular de las tormentas geomagnéticas son las auroras boreales y australes, hermosas formaciones a modo de cortinas, rayos y arcos de colores que aparecen en el cielo de los polos.

Estos efectos son más frecuentes e intensos en los máximos del ciclo solar: a partir de registros históricos de auroras y del número de manchas se ha encontrado una notable correlación entre la amplitud de los ciclos y la frecuencia de aparición de auroras, como puede verse en la **Figura 9**; en particular se registraron muy pocas durante el Mínimo de Maunder. Estos datos han indicado también la existencia de otros periodos prolongados de baja actividad auroral: el Mínimo de Spörer (de 1420 a 1500) y el Mínimo de Wolf (de 1290 a 1340).

Dado el carácter transitorio de los fenómenos activos citados, salvo que su frecuencia pudiera cambiar drásticamente en periodos prolongados de tiempo, no parece directo que tales sucesos puedan inducir variaciones climáticas a largo plazo.

Es también conocido que la producción de los isótopos "Be y "C es sensible a la intensidad de rayos cósmicos galácticos que bombardean la alta atmósfera terrestre. El flujo de estos rayos es mayor en el mínimo del ciclo, ya que en el máximo son dispersados fuera del Sistema Solar por el apantallamiento producido por el viento solar. La abundancia de esos isótopos (determinada, por ejemplo, a partir de estudios de los anillos de los árboles) muestra notables incrementos durante los Mínimos de Maunder, Spörer y Wolf.

¹⁶ La Tierra es como un gran dipolo magnetico con una intensidad de campo media en los polos de ~0.6 gauss. Tiene su propio ciclo magnético aperiódico, caracterizado por epocas de inversión de la polaridad y otras de polaridad lija. La región airededor de la Tierra en que predomina su campo magnético sobre el del medio interplanetario se llama magnetosfera y se extiende hasta unas cien veces el radio terrestre.

El mecanismo que más claramente puede influir en la variabilidad climática en la Tierra son los cambios en la luminosidad global del Sol. Los efectos climáticos más espectaculares en los registros geológicos son las glaciaciones. Se han propuesto muy pocas explicaciones basadas en causas puramente solares y, por el momento, la más plausible parece la variación temporal de los parámetros orbitales de la Tierra, que modifica la cantidad de radiación solar recibida. Dada la importante variación en área cubierta por manchas oscuras a lo largo del ciclo, se podría esperar un descenso de la luminosidad solar cuando hay mayor número de manchas. Pero, de hecho, el Sol es ligeramente más luminoso cerca del máximo del ciclo, posiblemente porque las manchas están rodeadas por fáculas brillantes: el Mínimo de Maunder coincidió con una época de severos inviernos en Europa occidental, llamada a veces la "pequeña edad de hielo".

Ciertas porciones del espectro como el UV varían drásticamente a lo largo del ciclo. La interacción de la radiación UV con el oxígeno y el nitrógeno de nuestra atmósfera produce variaciones en la cantidad de ozono: habitualmente los mecanismos de producción y destrucción de ozono están equilibrados pero en periodos de mucha actividad solar parece prevalecer la producción. Aunque el UV contribuye muy poco a la radiación total del Sol, como la química y el balance energético de la alta atmósfera terrestre -a alturas mayores que 50 km- son dirigidos por el flujo de rayos UV, sus variaciones pueden tener importantes consecuencias sobre nuestro clima.

Desde el punto de vista del modelado teórico la situación es bastante complicada: en primer lugar, es preciso tener en cuenta los efectos geomagnéticos puros; en segundo lugar, es bastante difícil explicar cómo la troposfera (en la que tienen lugar los cambios climáticos) y la superficie terrestre responden a perturbaciones de la alta atmósfera; finalmente, no olvidemos que la tecnología humana está ya en condiciones de poder modificar sensiblemente nuestro clima.

Todas las correlaciones observadas sugieren una relación causa-efecto, pero las conexiones físicas entre el ciclo solar y las variaciones climáticas a gran escala todavía no son del todo claras.

10. LA FÍSICA SOLAR EN EL INSTITUTO DE ASTROFÍSICA DE CANARIAS

En el Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) existe un grupo de trabajo al que tengo la suerte de pertenecer, bastante númeroso y bien consolidado, dedicado a investigar el Sol. Además de la biblioteca y medios informáticos disponibles en la sede central del IAC en La Laguna (Tenerife), para realizar nuestra investigación contamos con las instalaciones del Observatorio del Teide (OT), en Tenerife y del Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM), en La Palma.

Los temas de investigación en el marco de la Física Solar que se abordan en el IAC pueden agruparse en dos amplias áreas: *Heliosismología* y el estudio de la *Estructura*, dinámica y magnetismo solares.

Dentro de la primera gran línea de trabajo se analizan las oscilaciones solares en velocidad y luminosidad, especialmente (aunque no sólo) a partir de datos obtenidos en el OT; éste es actualmente el único observatorio que colabora en las tres redes mundiales IRIS, BISON y GONG, cuyo propósito es disponer de series temporales de datos sin interrupción. Por otra parte, el IAC ha participado activamente en el diseño y elaboración de parte de los experimentos GOLF y VIRGO, lanzados a bordo del satélite SOHO en noviembre de 1995.

Dentro de la segunda área de investigación se lleva a cabo el análisis de estructuras fotosféricas (granulación, manchas solares, fáculas y red), cromosféricas (fibrillas) y de la baja corona (protuberancias), a partir de observaciones fotométricas, espectroscópicas y espectropolarimétricas. La interpretación de las mismas se realiza fundamentalmente mediante técnicas de inversión, elaboración de modelos teóricos o semiempíricos y realización de simulaciones numéricas complejas. También se realizan estudios de la variabilidad solar a largo plazo y trabajos en el campo de la Magnetohidrodinámica y el Transporte de Radiación.

Por último, el IAC está involucrado en el desarrollo de instrumentación

especifica destinada a proporcionar observaciones cada vez de mejor calidad en los campos de máximo interés. Podemos citar los siguientes instrumentos: Selector Automático de Imágenes Solares (SAIS), Correlador Solar del IAC (estabilizador de imágenes mediante técnicas de correlación en tiempo real) y polarimetros (para los rangos visible e infrarrojo, basados en cristales líquidos).

En la **Tabla 2** se relacionan los instrumentos solares¹⁷ disponibles en el ORM (los dos primeros) y en el OT (todos los demás).

Tabla 2: Instalaciones solares en los Observatorios de Canarias

INSTRUMENTO	DIAMETRO (CM)	PROPIETARIO	OPERATIVO DESDE EL AÑO	PRINCIPAL PRÓPOSITO CIENTÍFICO
şvsr	SO	Real Academia de Ciencias (5)	1984	Fotometria y espectrometria de muy alta resolución espacial.
DOT	40	Univ. Utrech (H)	1996 -	Fotometria con alta resolución espacial.
Laboratorici Solar (diversos fotómetros y espectrómetros)	•	Univ. Birmingham (RU) Univ. Niza (F) NSO (EEUU) Univ. Tsing-Hua (T)	1976, 1989 1989 1986, 1994 1993	Datos que permiten estudiar las oscilaciones solares en luminosidad y velocidad para todo el Sol o por zonas.
VNT	40	Inst. Kiepenheuer (A)	1972	Fotometría con alta resolución espacial.
GCT	45	Univ. Göttingen (A)	1987	Espectroscopia y espectropolarmetria con alta

SVST: Swedish Vacutini Salar Tower; DOT: Dutch Open Telescope; VMT: Vacuum Newton Telescope; GCT: Gregory Condé Telescope; VTT: Vacuum Tower Telescope; HEMIS: Telescope Heliographique pour L'Étude du Magnetisme et Instabilités Splaires.
CNRS: Centre National pour la Recherche Scientifique; NSO: National Solar Observatory.
S: Suecia; H: Holanda, RU. Reino Unido; F: Francia; EEUU: Estados Unidos; T: Taiwan; E: España; A: Alemaria; I: Italia.

Inst. Kiepenheuer (A)

CNRS (F-I)

VII

THEMIS

70

resolucion espacial.

Espectroscopia y espectropolarimetria con alta resolución espacial y espectral.

espectral

Especialmente concebido paca

realizar espectroscopia y polarimetria de alta resolución espacial y

1989

199€

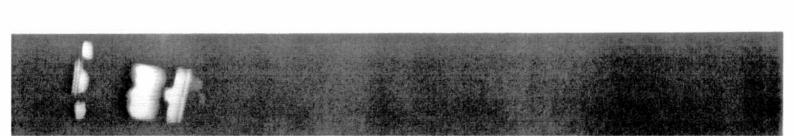
¹⁷ Conviene reseñar algunas características peculiares de los telescopios solares; se construyen generalmente en torres, con objeto de minimizar la turbulencia local que produce el caientamiento diurno del suelo; con el mismo proposito los edilicios se cubrero de pli, cas de un material especial printado de blanco, muy reflectante, que se mantiene frío; y dada la gran cantinad de luz colocitacis, puro estar la distorsión de la imagen crusada por el calentamiento del aire en el camino optico, se hace el vacís en el interior del tubo del telescopio

11. AÚN NO LO SABEMOS TODO SOBRE EL SOL

Como siempre, lo más atractivo e interesante es aquéllo que no conocemos... Entre las excitantes cuestiones abiertas de la Física Solar podemos destacar:

- -insuficiente conocimiento del interior solar, aunque las técnicas indirectas que ya hemos mencionado nos acercan cada vez más a su correcta comprensión
- -explicación del bajo flujo de neutrinos detectado
- conocimiento detallado de la rotación diferencial, especialmente de su variación con la profundidad
- -comprensión de los mecanismos de excitación de las oscilaciones
- -determinación de la forma en que se generan, mantienen y se manifiestan los campos magnéticos en el Sol
- -conocimiento exhaustivo de la estructura de las manchas y otros signos de actividad
- -explicación satisfactoria del mecanismo de desaparición de las manchas
- -descripción y comprensión de todas las propiedades del ciclo solar
- -explicación precisa del mecanismo de calentamiento de la cromosfera y la corona

Podemos afirmar, pues, con humildad, que aún no lo sabemos todo sobre el Sol. Afortunadamente, todavía queda entretenimiento, trabajo y alimento para nuestra curiosidad durante mucho tiempo.



BIBLIOGRAFÍA

Si está introducción al conocimiento del Sol ha conseguido interesarle y su curiosidad le pide más información, puede encontraria en los siguierites libros y capitulos dedicados al Sol dentro de textos de introducción a la Astronomía y Astrofisica:

El Sol, 1982, I. Nicoison (Ed. Hermann Blume, Progensa): aunque aigo anticuado, es una buena primera aproximación para los aficionados a la Física Solar, muy ameno y bastante completo, con la gran ventaja de estar traducido al español.

Astronomia Moderna, 1979, L. Oster (Ed. Reverte S.A.): Cap. 7

Curso de Astronomía General, 1992, P.J. Bakulin, E.V. Kononovich, V.I. Moroz (Ed. MIR): Cap. 9

Conceptual Astronomy, 1993, M. Zeilik (Ed. John Wiley Sons): Cap. 10. Este es un libro muy pedagogico

Introductory Astronomy and Astrophysics, 1973, E.v.P. Smith y K.C. Jacobs (Ed. Saunders Company): Cap. 9. Éste es un libro bastante "físico" y claro, aunque un poco anticuado

The New Cosmos, 1993, A. Únsold, B. Baschek (Ed. Springer Verlag). Cap. 4. La información sobre el Sol aparece mezclada con la del resto de las estrelias y el nivel es más elevado que el de los otros libros citados en este grupo.

The Physical Universe, 1982, F.H. Shu (Ed. University Science Books): Cap. 5.

The Astronomy & Astrophysics Encyclopedia, 1992, S.P. Maran leditor) (Ed. Cambridge University Press): bajo el termino "Sun" puede encontrarse información muy actualizada de casi todos los temas solares de interes escrita por especialistas.

The Cambridge Atlas of Astronomy, 1988, (Ed. Cambridge University Press): Cap. 1, después de la Introducción. Da una buena visión general, bastante actualizada, de lo que se hace en Física Solar.

Discovering the Universe, 1993, W.J. Kaufmann III (Ed. Freeman Company): Cap. 11.

Si desea información más técnica y especializada le pueden resultar útiles los siguientes libros:

Lecciones de Fisica Sular, 1984, M. Collados, I.I. García de la Rosa, P.Ll. Pallé Manzano, T. Roca Cortés, M. Vázquez y F. Kneer (Ed. IAC, Temás Monográficos, N S Serie C) resume conferencias sobre Física Solar impartidas en el IAC durante el curso 1983-84.

The Sun, 1989, M. Stix (Ed. Springer-Verlag).

Astrophysics of the Sun, 1988, H. Zirin (Ed. Cambridge University Press).

The Atmosphere of the Sun, 1988, C.J. Durrant (Ed. Adam Hilger, Bristol and Philadelphra).

Secrets of the Sun, 1984, R. Grovanelli (Ed. Cambrigge University Press).

The Sun, our Star, 1982, R.W. Noyes (Ed. Harvard University Press). Solar Astrophysics, 1990, P.V. Foukal (Ed. John Wiley Sons, Inc.).

Solar Magnetohydrodynamics, 1982, E.R. Priest (Ed. Rerdel Publishing Company): el capitulo 1 es algor más asequible que el resto del libro.

Observing the Sun, 1991, P.O. Taylor (Ed. Cambridge University Press): observación del Sol para aficionados.

Solar Observations: Techniques and Interpretation, 1992, F. Sanchez, M. Collados y M. Vázquez (editores) (Ed. Cambridge University Press): presenta las lecciones impartidas por especialistas en la Escuela de Invierno con el mismo titulo celebrada en el IAC en 1991.

Los avances más recientes en los distintos campos de la Física Solar aparecen publicados en revistas internacionales como Solar Physics, Astronomy & Astrophysics, Astrophysical Journal y otras, así como en las Actas de los numerosos congresos y reuniones científicas que tienen lugar frequentementa.