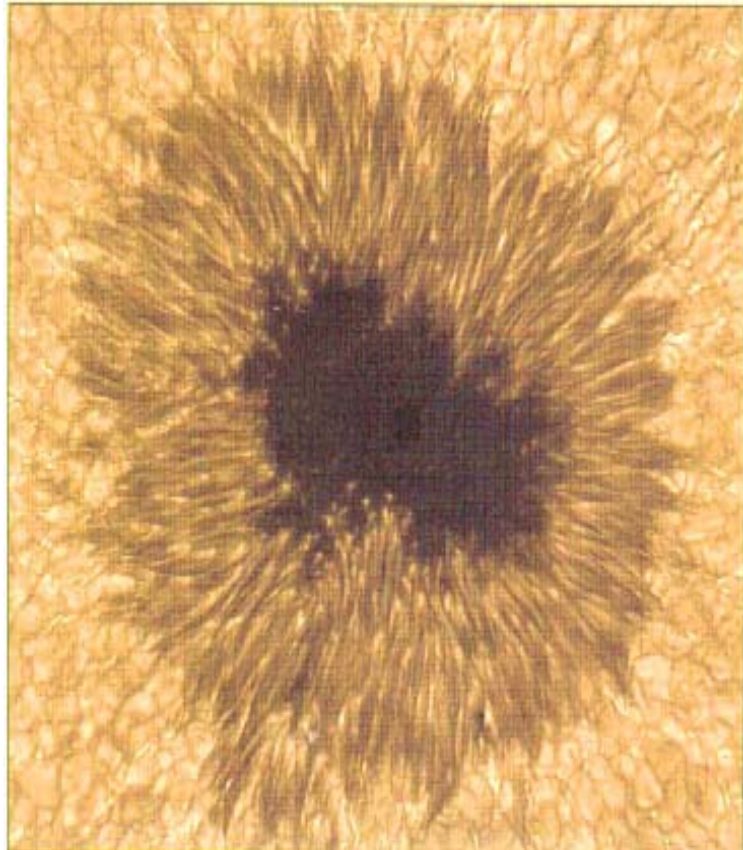


# El interior de las manchas solares

**LAS MANCHAS SON RESPONSABLES DE GRAN PARTE DE LOS FENÓMENOS VIOLENTOS QUE OCURREN EN LAS CAPAS MÁS EXTERNAS DEL SOL. SIN EMBARGO, AÚN QUEDAN INCÓGNITAS CON RESPECTO A SU ESTRUCTURA.**

**Por Luis Bellot (IAA-CSIC)**

LAS MANCHAS CONSTITUYEN LA MANIFESTACIÓN MÁS OBVIA DEL CICLO DE ACTIVIDAD SOLAR. Están formadas por una zona central muy oscura (la umbra) rodeada por un anillo más brillante (la penumbra), La penumbra es un conglomerado de pequeños filamentos que se extienden desde la umbra hasta el sol en calma. Los chinos ya conocían las manchas hace miles de años, pues algunas son tan grandes que pueden ser observadas a simple vista. Sin embargo, su estudio sistemático no comenzó hasta la invención del telescopio en 1610. Desde entonces hemos aprendido mucho sobre su naturaleza, origen y evolución.



Mancha observada en el Telescopio Solar Richard B. Dunn de Sacramento Peak, Nuevo Mexico (EEUU). La imagen, tomada en la banda G de la molécula de CH alrededor de 430,5 nm, ha sido reconstruida con técnicas speckle y alcanza una resolución de 0.13 segundos de arco. Cortesía G. Cauzzi (Observatorio Astrofísico de Arcetri, Italia) y F. Wöger (KIS, Alemania).

Sabemos, por ejemplo, que las manchas son regiones de la atmósfera solar donde existen campos magnéticos intensos. Los campos magnéticos impiden al plasma moverse libremente, reduciendo la eficacia del transporte de energía por convección. Ello hace que las manchas sean más frías que sus alrededores. Sobre el fondo brillante del Sol en calma las manchas aparecen oscuras, pero es sólo una impresión, ya que la temperatura en su interior alcanza valores de hasta 5000 grados centígrados. También sabemos que las manchas son responsables de gran parte de los fenómenos violentos que ocurren en la cromosfera y la corona solar, las capas más externas de nuestra estrella. Las observaciones ultravioletas y de rayos X obtenidas por los satélites Yohkoh, SOHO y TRACE nos muestran bucles coronales cuyos pies están anclados en las manchas. Los bucles representan líneas de campo magnético, como si fueran limaduras de hierro esparcidas alrededor de

*Para predecir las expulsiones de masa coronal con fiabilidad es necesario entender los procesos en los pies de los bucles, es decir, en las manchas.*

de un imán. Cuando estos bucles interaccionan entre sí se producen reconexiones de campo magnético que liberan grandes cantidades de energía en muy poco tiempo y dan lugar a fulguraciones en la cromosfera y expulsiones de masa coronal.

Las partículas energéticas lanzadas al espacio durante una expulsión de masa coronal pueden llegar a la

Tierra, donde dificultan las comunicaciones por radio y amenazan la integridad de los satélites en órbita. Además, producen las famosas auroras boreales. Actualmente, se están dedicando grandes esfuerzos en predecir las expulsiones de masa coronal por los efectos que tienen sobre la Tierra, pero para poder hacerlo con fiabilidad es necesario entender bien la estructura y procesos físicos que ocurren en los pies de los bucles, es decir, en las manchas. Todavía nos encontramos muy lejos de esta situación ideal: por el momento, ni siquiera hemos identificado los bloques básicos que forman las manchas solares.

### Una compleja estructura

La penumbra, con su estructura filamentosa a muy pequeña escala, es la región más compleja de las manchas. El desdoblamiento de Zeeman de las líneas espectrales nos indica que el campo magnético es vertical en el centro de la umbra y se va inclinando cada vez más en la penumbra, hasta que se hace prácticamente horizontal en el borde externo de la mancha (imagen derecha).



Estructura magnética global una mancha solar. Las flechas blancas representan el vector campo magnético desde la umbra hasta el borde externo de la penumbra. Los pequeños cilindros anaranjados representan tubos de flujo penumbrales. Cortesía D. Müller (KIS, Alemania)

Desplazamientos Doppler observados en una mancha solar en la línea de hierro neutro a 709.0 nm. La flecha apunta al centro del disco solar. Blanco indica desplazamientos al azul y negro al rojo. Nótese la estructura filamentosa del flujo Evershed. Cortesía A. Tritschler y H. Uitenbroek

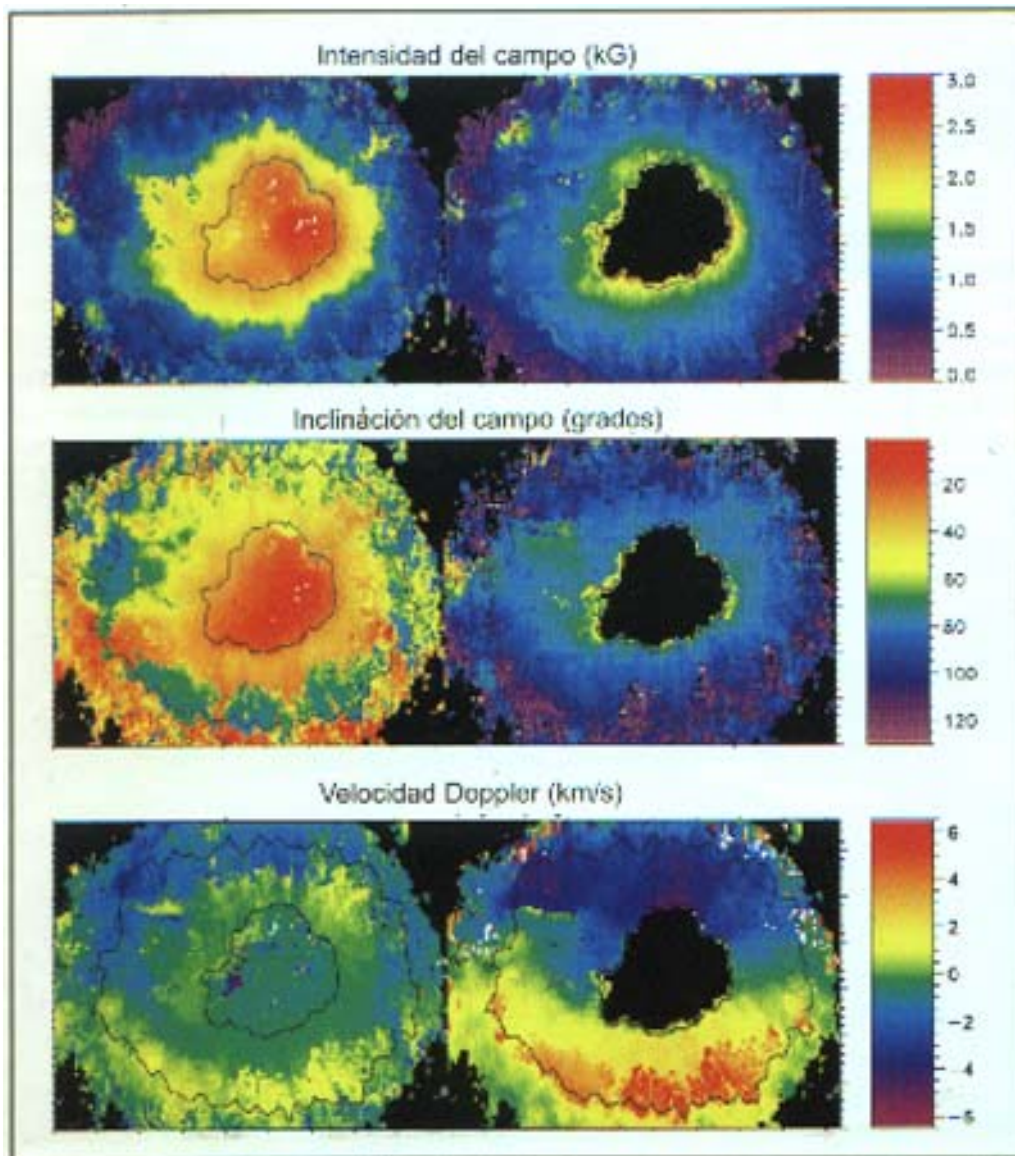
Sin embargo, hay grandes variaciones a una misma distancia de la umbra: Title y colaboradores descubrieron en 1993 que los filamentos brillantes y oscuros pueden mostrar diferencias de hasta 20 grados en la inclinación del campo. Estas variaciones ocurren a muy pequeña escala, del orden de unos cientos de kilómetros.

Los campos magnéticos más horizontales de la penumbra están asociados con un flujo continuo de materia descubierto en 1908 por Evershed y que lleva su mismo nombre. Se trata de un movimiento radial del gas desde la umbra hasta el borde externo de la penumbra. El flujo Evershed desplaza las líneas espectrales hacia el rojo en la cara de la mancha más próxima al limbo solar y hacia el azul en la cara que mira al centro del Sol (imagen anterior, abajo). Los campos magnéticos más verticales de la penumbra no parecen estar asociados a ningún movimiento de gas.

Estos resultados se han obtenido a través del análisis de observaciones polarimétricas de líneas espectrales visibles e infrarrojas con resoluciones espaciales del orden del segundo de arco (725 kms sobre la superficie del Sol). La pobre resolución espacial se debe a que se necesitan tiempos de exposición de varios segundos para alcanzar bajos niveles de ruido, pero impide distinguir los filamentos individuales que se observan en imágenes monocromáticas de alta resolución.

Es necesario, por tanto, hacer algunas aproximaciones para explicar la estructura fina de la penumbra. Lo normal es suponer que en cada píxel coexisten dos atmósferas magnéticas no resueltas, que darían cuenta de las propiedades de los filamentos brillantes y oscuros. Cuando se analizan los datos de esta manera se encuentran dos atmósferas con propiedades magnéticas y cinemáticas muy diferentes (imagen siguiente). Una de ella tiene campos internos y verticales, mientras que la otra posee campos más débiles y horizontales. La segunda atmósfera es la única que muestra desplazamientos Doppler (la huella del flujo Evershed).

Las simulaciones numéricas realizadas por Schlichenmaier y colaboradores modelan el comportamiento de un tubo de flujo magnético inicialmente en equilibrio en la frontera que separa la mancha de sus alrededores magnéticos. El tubo es calentado por la radiación que viene del exterior, se expande y asciende a la superficie por flotabilidad. Al emerger se observa como una estructura brillante con menor campo que sus alrededores, ya que el campo disminuye durante la expansión para conservar el flujo magnético. Además, la presión gaseosa crece dentro del tubo para mantener el equilibrio horizontal de fuerzas. El gradiente de presión resultante mueve el plasma a lo largo del tubo y produce un flujo Evershed de varios kilómetros por segundo. Este modelo es capaz de reproducir muchas de las propiedades de los filamentos penumbrales. Además, explica sorprendentemente bien los resultados obtenidos a partir del análisis de las observaciones polarimétricas: la atmósfera con campos débiles y horizontales representaría los tubos de flujo penumbrales, mientras que la otra atmósfera parece describir el campo ambiente que rodea a los tubos.



Estructura magnética y cinemática de una mancha obtenida a partir de la inversión de datos espectropolarimétricos suponiendo dos atmósferas en cada elemento de resolución. Los mapas muestran, de arriba abajo, la intensidad del campo magnético, la inclinación del campo con respecto a la vertical, y la velocidad Doppler para las dos componentes. Los mapas de la izquierda representan la atmósfera ambiente y los de la derecha la atmósfera de los tubos de flujo.

### Teorías alternativas

Hasta hace poco, el concepto de penumbra formada por pequeños tubos de flujo (con radios de 100-200 km) embebidos en un campo ambiente más vertical era aceptado por la mayor parte de los físicos solares. En el año 2002, las primeras imágenes tomadas con el nuevo Telescopio Solar Sueco de un metro de diámetro produjeron una gran sorpresa al revelar que los filamentos penumbrales están formados finalmente por un núcleo oscuro y dos bordes laterales brillantes (imagen inferior). Los bordes brillantes se mueven siguiendo las mismas trayectorias, como si fueran un mismo objeto, y están separadas por solo 100-200 km.

Muchos investigadores pensaron que por fin se estaban viendo los bloques básicos de la penumbra, es decir, tubos de flujo individuales. Sin embargo, Spruit y Scharmer propusieron un modelo alternativo de penumbra. En dicho modelo los filamentos con núcleos oscuros serían la manifestación de intrusiones de gas no magnético situadas por debajo de la superficie visible de la mancha. La idea ha levantado grandes expectativas en parte de la comunidad, pero todavía hay que demostrar que es capaz de explicar los aspectos observacionales de la penumbra al menos tan bien como lo hace el modelo de tubo de flujo. Uno de los problemas más serios a los que se enfrenta el modelo de Spruit y Scharmer es

De nuevo, los resultados son compatibles con la idea de que los filamentos representan pequeños tubos embebidos en un campo magnético más intenso y vertical

Parece, pues, que estamos a punto de resolver una cuestión básica que ha intrigado a los astrónomos durante siglos: la estructura de la penumbra

la falta de un lugar en la atmósfera que pueda albergar el flujo de Evershed. Como mencionamos antes, las simulaciones de tubos de flujo explican de forma natural la existencia de movimientos de gas en la penumbra, lo que supone un éxito nada despreciable.

La controversia no está cerrada y las discusiones continúan. Para poder decidir entre un modelo u otro se necesitan nuevas observaciones que resuelvan los núcleos oscuros. En el año 2005 dimos los primeros pasos en esta dirección realizando espectroscopia de filamentos penumbrales en el Telescopio Solar Sueco con 0,2 segundos de arco de resolución. Los datos demostraron que el flujo Evershed es mucho más intenso en los núcleos oscuros que en los bordes brillantes. Además, el campo magnético parece ser menor en los núcleos oscuros. Pero las observaciones espectroscópicas no permiten caracterizar completamente las propiedades de los filamentos: necesitamos medidas de polarización. En la actualidad no existe ningún telescopio terrestre capaz de proporcionarlas. Por este motivo hemos comenzado una colaboración con el Observatorio Astronómico Nacional de Japón para analizar los datos del satélite HINODE. Lanzado en septiembre de 2006, este satélite lleva a bordo un espectropolarímetro que alcanza una resolución de 0,3 segundos de arco. Las primeras observaciones d HINODE sugieren que los núcleos oscuros tienen campos más débiles e inclinados que los bordes brillantes de los filamentos penumbrales. De nuevo, los resultados son compatibles con la idea de que los filamentos representan pequeños tubos embebidos en un campo magnético más intenso y vertical.

Pero ¿es posible reproducir las imágenes de alta resolución utilizando tubos de flujo?. Para comprobarlo hemos resuelto la ecuación de transporte de calor en una atmósfera estratificada formada por un tubo de flujo y un campo ambiente que lo rodea. Las simulaciones, realizadas junto a investigadores del Instituto de Astrofísica de Canarias, demuestran que los tubos de flujo se observan en la superficie como filamentos con núcleos oscuros (imagen inferior).

Parece, pues, que estamos a punto de resolver una cuestión básica que ha intrigado a los astrónomos durante siglos: la estructura de la penumbra. El modelo de tubo de flujo explica la mayor parte de las propiedades de los filamentos penumbrales. Ahora queda la importante tarea de caracterizar y entender la evolución de la penumbra y el papel que representa el flujo de Evershed en la física de las manchas solares.

