

Diferencia de comportamiento entre neutros e iones en manchas solares

Iván Bonilla



Os voy a hablar de la diferencia de velocidad entre iones y neutros en las manchas solares. Es un tema un poco más teórico de lo que hemos estado viendo estos días.

Nos vamos primero al marco teórico. Si nos imaginamos la atmósfera del Sol como un entorno muy denso y caliente, en condiciones ideales, y separamos el Sol en iones y neutros, nos damos cuenta de que, si estudiamos el movimiento de una de estas especies, la otra debe seguirlo inmediatamente. Esto se debe a que el acoplamiento térmico y el colisional son muy altos. Sin embargo, en nuestra atmósfera real, las condiciones ideales no existen.

Por lo tanto, lo que ocurre es que este acoplamiento colisional, que en algunas regiones es muy fuerte, de repente se debilita. Esto provoca que, si la especie iónica se mueve en un sentido, la especie neutra deba acompañarla, pero con una pequeña diferencia. Es como si estuviéramos paseando con un perro y al principio no sintiéramos ninguna diferencia en el movimiento porque la cuerda no está tensa, pero de repente hubiera un tirón. Entonces, notaríamos que los movimientos no son exactamente iguales.

Estos efectos, sin embargo, son muy débiles y para estudiarlos es necesario realizar observaciones específicas, ya que se disipan en escalas del orden de metros o cientos de metros y en tiempos de segundos. Para analizarlos, además, debemos centrarnos en regiones con un fuerte campo magnético para que los iones experimenten este movimiento. Es decir, hay que observar o bien las protuberancias solares o bien las manchas solares. En las protuberancias hay numerosos estudios al respecto, pero aún no hay consenso. Algunos investigadores afirman haber encontrado esta diferencia de velocidad, también conocida como velocidad de deriva, mientras que otros sostienen que no se ha detectado.

Por ello, nos centramos en las manchas solares, donde la discusión prácticamente no existe. No porque el fenómeno esté completamente claro, sino porque solo existe un artículo al respecto. Este estudio, realizado en 2015 por el equipo de Khomenko, concluyó que no solo encontraron esta diferencia de velocidad, sino que además el hierro I, que aparece en las líneas de color rosado, muestra velocidades mayores que el hierro II. Esto confirma la existencia del fenómeno y es aquí donde entra mi investigación.

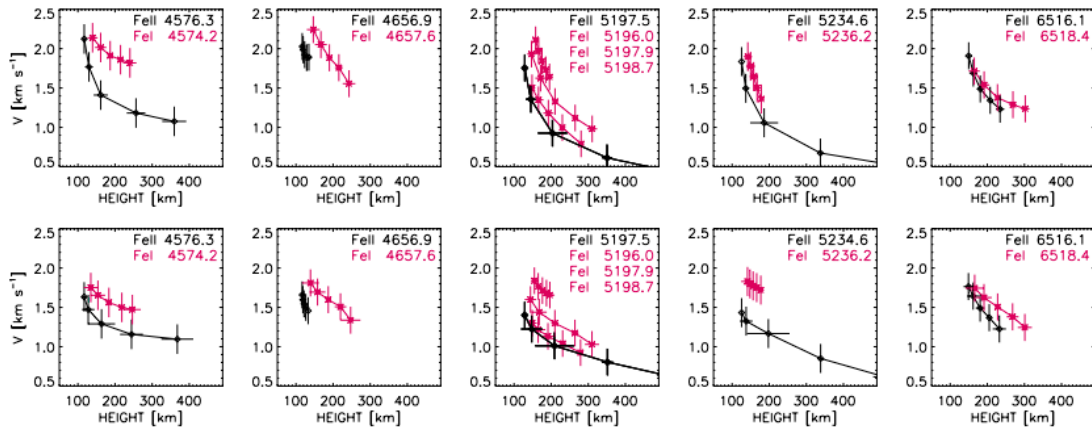
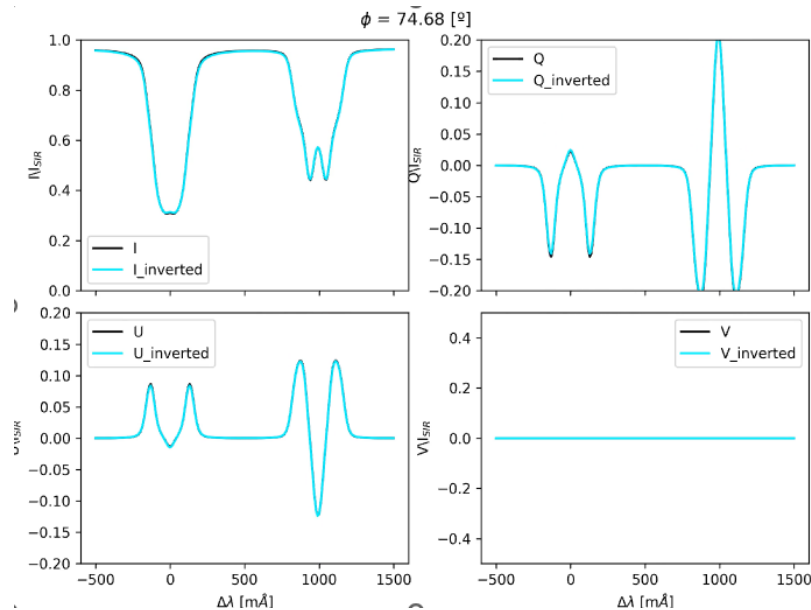


Fig. 5. Height dependence of the radial component of the Evershed flow obtained after the fit to λ -meter velocities for different pairs of lines at different radial distances in the penumbra. The model for heights is model C. The *top row* corresponds to the radial distances 0.45–0.6 R , while *bottom row* corresponds to 0.75–0.9 R .

Velocidades del hierro I y el hierro II

Lo que hicimos fue tomar estos datos y mejorarlos utilizando un código de inversión. Les explico brevemente cómo funciona este código. Si le proporcionamos un espectro — representado en color negro— al programa, llamado SIR, este programa modifica la atmósfera interna para que el resultado final, representado en color cian, sea lo más parecido posible a la línea negra. Como se observa en la animación, cuando variamos la línea negra, la línea cian la sigue casi perfectamente, lo que indica que el programa está funcionando correctamente.

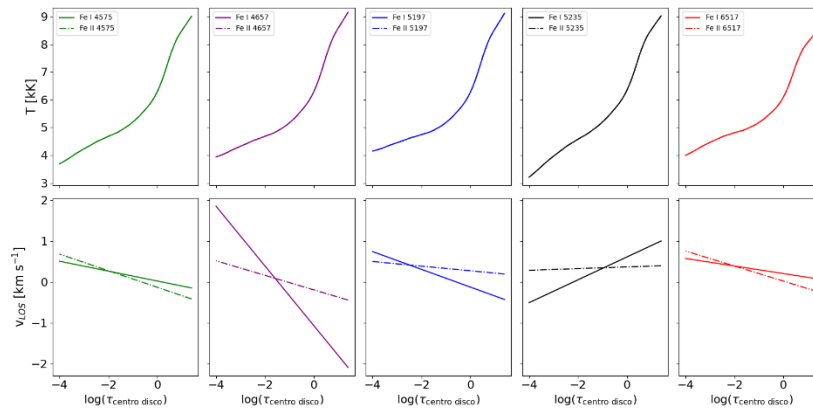


Ejemplo del programa SIR

¿Dónde aplicamos este método? Tomamos una mancha solar y definimos dos zonas diferentes: la zona roja, que corresponde al Sol en calma, y la zona amarilla, donde aplicamos la inversión para obtener los resultados principales. En este proceso es necesario realizar varios ajustes, como la calibración, la normalización y la corrección de los parámetros atómicos, para asegurar que todo esté bien definido. Sin embargo, por cuestiones de tiempo, pasaré directamente a los resultados.

Comenzamos con el Sol en calma, que es la zona más sencilla de analizar. Si tomamos todos los píxeles observados y calculamos un promedio espacial, obtenemos su estratificación en

temperatura (mostrada en la parte superior) y su estratificación en velocidad en la línea de visión (en la parte inferior). Estos resultados se presentan para cinco regiones espectrales diferentes. Compararlas individualmente es complejo, por lo que las agrupamos en una sola gráfica para extraer las primeras conclusiones.

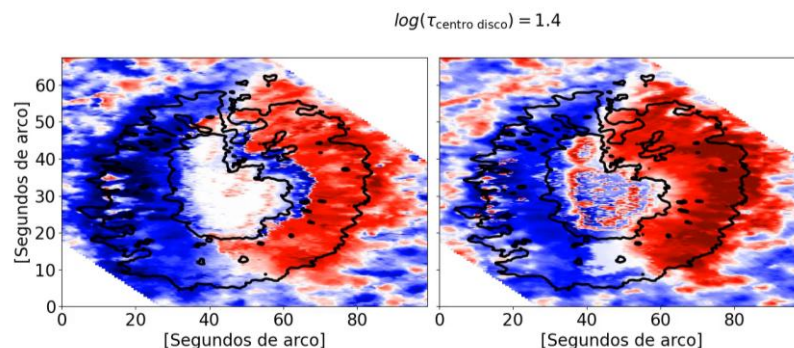


Temperatura y velocidad del Sol en calma

En la temperatura, observamos que solo hay una línea sólida, que representa a los neutros. Esto indica que los neutros y los iones tienen exactamente la misma velocidad. Esto se debe a que lo hemos impuesto en el análisis, ya que las observaciones se realizaron de manera simultánea en hierro I y hierro II, lo que implica que sus temperaturas deben ser iguales.

Sin embargo, en la velocidad, se pueden notar diferencias entre la línea de puntos, que representa los iones, y la línea sólida, que representa los neutros. No obstante, si incluyéramos las barras de error y consideráramos las incertidumbres del programa, la calibración y la longitud de onda, nos daríamos cuenta de que las barras de error son tan grandes que no se puede extraer información concluyente. La conclusión, entonces, es que no existe diferencia de velocidad entre iones y neutros en el Sol en calma, lo cual concuerda con la teoría.

Ahora veamos qué ocurre en la penumbra, donde la situación es diferente. He dividido el análisis en cuatro regiones espectrales: 4575 Å, 5197 Å, 5235 Å y 6517 Å. Además, cada una de estas regiones está separada en neutros (a la izquierda) e iones (a la derecha). Lo que observamos aquí es la inversión pixel a pixel de la velocidad en la línea de visión, desde la parte más baja hasta la parte más alta de la atmósfera.

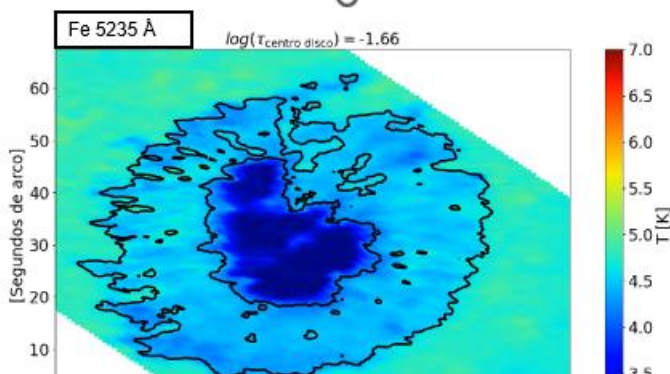


Velocidad en la línea de visión

En física solar, solemos invertir los ejes: el logaritmo de tau (profundidad óptica) indica que los valores positivos corresponden a la parte más baja de la atmósfera, mientras que los valores negativos representan la parte más alta. Nos interesa analizar la región desde la superficie (cero) hacia arriba.

Aquí observamos el llamado flujo de Evershed, que corresponde al movimiento del plasma en la penumbra. Los colores rojos indican movimiento alejándose del observador, mientras que los colores azules representan un desplazamiento hacia el observador. A medida que ascendemos en la atmósfera, el flujo de Evershed se debilita. Sin embargo, si observamos con más atención, notamos que las regiones a la derecha cambian de color antes que las de la izquierda. Esto indica que el hierro II tiene menos velocidad que el hierro I.

Para comprobar la consistencia de estos resultados, superpusimos los mapas de velocidad, restando hierro II menos hierro I. Esto provocó un cambio en la distribución de colores: las regiones que eran rojas ahora aparecen en azul y viceversa. Esto ocurre porque, si el hierro II tiene un valor positivo menor que el hierro I, la resta da un número negativo, indicando que el hierro I es mayor. En el otro lado de la penumbra, el color es rojo porque las velocidades son negativas, y la resta de dos números negativos da un valor positivo.



Superposición de los mapas de velocidad

Para verificar que este análisis no sea un efecto aleatorio, también analizamos la temperatura en diferentes alturas de la atmósfera. Como es característico en las manchas solares, observamos que el centro (umbra) es más frío que la penumbra y que el Sol en calma. Además, la temperatura disminuye con la altitud, siguiendo un patrón similar al de la atmósfera terrestre.

Para concluir, aunque no hemos detectado diferencias de velocidad entre iones y neutros en el Sol en calma —lo cual concuerda con la teoría—, sí hemos encontrado diferencias en las manchas solares. Específicamente, el hierro I tiene mayor velocidad que el hierro II de forma sistemática en cuatro regiones espectrales distintas.