

# Ondas MHD en la fotosfera y cromosfera de manchas solares

## Tobías Felipe García

En esta tesis estudiamos la propagación de ondas magneto-acústicas en manchas solares, desde debajo de la fotosfera hasta la cromosfera. La motivación de este estudio va más allá de la simple derivación de las propiedades de las oscilaciones, ya que las ondas pueden ser usadas como herramienta de diagnóstico independiente para derivar la estructura de atmósferas estelares, y además tienen un papel relevante en el balance energético de la atmósfera del Sol y otras estrellas.

La complejidad de la atmósfera solar hace que sea imposible resolver analíticamente las ecuaciones MHD en las condiciones presentes en el Sol, por lo que hemos abordado este problema mediante simulaciones numéricas, utilizando una configuración de campo magnético y una atmósfera realista. Para este trabajo se ha desarrollado un código MHD paralelizado no lineal en tres dimensiones. Las simulaciones numéricas obtenidas utilizando una fuerza excitadora con un espectro similar al solar muestran que el mecanismo que produce el cambio de la frecuencia con la altura es la propagación lineal de ondas en la banda de 3 minutos que son excitadas en la fotosfera y dominan sobre las ondas evanescentes con frecuencia por debajo de la frecuencia de corte. Las ondas en la banda de 5 minutos no pueden proporcionar energía a las capas altas de la umbra debido a que forman ondas evanescentes, que no transportan energía, u ondas rápidas magnéticas, que son refractadas hacia la fotosfera. Por el contrario, la energía de las altas frecuencias de la fuerza excitadora puede llegar a capas más altas en forma de ondas acústicas que se propagan a lo largo de las líneas de campo magnético y forman choques, proporcionando energía a la cromosfera. A su vez, se ha identificado la conversión al modo Alfvén en aquellas simulaciones en las que la fuerza excitadora está situada en regiones con una cierta inclinación de campo magnético, aunque la eficiencia de la transformación a este modo Alfvén es muy baja.

La segunda parte de esta tesis se centra en un estudio observacional. Hemos analizado espectros de intensidad de Ca II H, incluyendo las líneas superpuestas de Fe I, y espectros polarimétricos de Si I  $\lambda$  10827 y el multiplete de He I  $\lambda$  10830. Las distintas líneas espectrales tienen información complementaria sobre diferentes alturas de la atmósfera solar. Mediante el uso de varias líneas espectrales formadas a profundidades intermedias entre el Si I y el He I hemos mejorado el muestreo de la propagación de ondas a través de la atmósfera, cubriendo el vacío de información entre estas dos capas. Tras calcular el espectro de diferencia de fase y de amplificación entre la velocidad Doppler medida para diversos pares de líneas, los resultados han sido ajustados a un modelo de propagación vertical de ondas magneto-acústicas lentas en una atmósfera estratificada con pérdidas radiativas de acuerdo con la ley de enfriamiento de Newton. El acuerdo obtenido, con un modelo simple de propagación lineal, en las regiones de la baja y media atmósfera, y el desacuerdo en las capas más altas, indican que la transferencia de energía debida a la formación y disipación de choques ocurre a una altura entre las capas donde se forman las líneas de Fe I y el núcleo de Ca II H. La variación del espectro de potencia con la altura muestra un acuerdo con los resultados procedentes de las simulaciones, y confirman que el cambio en la frecuencia con la altura es debido al mayor incremento de la amplitud de las ondas que se propagan en comparación con las ondas evanescentes. También hemos podido inferir algunas propiedades de la atmósfera de la mancha solar mediante el análisis de la propagación de ondas y estimar la altura de formación de las líneas espectrales usadas en este estudio, lo que demuestra que estas técnicas pueden ser una alternativa muy prometedora para estudiar la estratificación de la atmósfera solar.

En la última parte de esta tesis, hemos intentado reproducir los resultados observacionales a través de cálculos numéricos. Hemos construido un modelo tridimensional de mancha solar basado en las observaciones, y hemos desarrollado simulaciones numéricas introduciendo como elemento excitador en la fotosfera las fluctuaciones medidas con la línea de Si I. Los resultados son comparados con las oscilaciones obtenidas a diferentes alturas con la línea de He I, el núcleo de la línea de Ca II H y las líneas de Fe I superpuestas en las alas de la línea de Ca II H. Las simulaciones muestran un gran acuerdo con las observaciones. Reproducen los mapas de velocidades y los espectros de potencia a las alturas de formación de las líneas espectrales, así como los espectros de fase y amplificación entre varios pares de líneas. El excelente acuerdo entre la propagación de ondas simulada y la observada nos ha permitido utilizar los cálculos numéricos para cuantificar la contribución energética de las ondas acústicas al calentamiento cromosférico en manchas solares. Nuestros resultados indican que la energía suministrada por estas ondas es muy baja para compensar las pérdidas radiativas de la cromosfera, siendo unas 70 veces inferior a la cantidad de energía requerida, por lo que este problema sigue siendo una de las grandes incógnitas de la física solar.

El trabajo desarrollado en esta tesis deja abierto un amplio abanico de posibilidades para el futuro. Por un lado, la robustez y versatilidad demostradas por el código numérico que se ha implementado permiten su aplicación a otros problemas astrofísicos, como por ejemplo el estudio de las capas subfotosféricas. La interpretación del campo de ondas observado alrededor de regiones activas es uno de los mayores retos de la heliosismología local. En este sentido, el código ya se ha empleado con éxito en el estudio del scattering del modo f producido por tubos de flujo magnético. Por otro lado, siguiendo la línea trazada en la tesis, aún se debe profundizar más en la relación entre las distintas capas atmosféricas. Para ello, es necesario incluir una descripción física más detallada en la resolución de las ecuaciones, teniendo en cuenta los efectos de la ionización parcial e incluyendo un tratamiento más realista del intercambio de energía por radiación. Por último, planeamos obtener nuevas simulaciones con diferentes condiciones de excitación y en otras estructuras magnéticas que permitan analizar de manera más específica la transformación de modos, especialmente al modo Alfvén.

## Publicaciones

- **Felipe, T.**, Khomenko, E., Collados, M., 2011, “Magnetoacoustic wave energy from numerical simulations of an Observed Sunspot Umbra”, *ApJ*, 735, 65
- **Felipe, T.**, Khomenko, E., Collados, M., 2011, “Magneto-acoustic waves in sunspots from observations and numerical simulations”, *Journal of Physics: Conference Series*, 271, Issue 1, pp. 012040
- **Felipe, T.**, Khomenko, E., Collados, M., Beck C., 2010, “Multi-layer study of wave propagation in sunspots”, *ApJ*, 722, 131
- **Felipe, T.**, Khomenko, E., Collados, M., 2010, “Mode transformation and frequency change with height in 3D numerical simulations of magneto-acoustic wave propagation in sunspots”, *Astronomical Notes*, 331, 10
- **Felipe, T.**, Khomenko, E., Collados, M., 2010, “Magnetoacoustic waves in sunspots: first results from a new 3D nonlinear code”, *ApJ*, 719, 357
- Khomenko, E., Collados, M., **Felipe, T.**, 2009, “Observational signatures of numerically simulated MHD waves in small-scale flux sheets” in *ASP Conference Series*, Vol. 405, *Solar Polarization 5: In Honor of Jan Stenflo*, ed. Svetlana V. Berdyugina, K. N. Nagendra, and Renzo Ramelli. (San Francisco: ASP), 183.
- Khomenko, E., Collados, M., **Felipe, T.**, 2008, “Non-linear numerical simulations of magneto-acoustic wave propagation in small-scale flux tubes”, *Solar Phys.*, 251, 589