

Simulación de la cromosfera solar en la aproximación de dos fluidos

Autora: Beatrice Popescu Braileanu
(bpopescu@iac.es)

Tesis doctoral dirigida por:
Elena Khomenko y Angel de Vicente
Centro: Universidad de La Laguna
Fecha de lectura: 1 de abril de 2020

Este trabajo presenta el estudio numérico de la propagación de ondas y la inestabilidad Rayleigh-Taylor en la atmósfera solar usando un modelo de dos fluidos. La atmósfera solar está fuertemente estratificada y con campos magnéticos complejos, creando capas con regímenes muy diferentes. La fotosfera es la capa más densa con campo magnético más intenso. La gran densidad hace que el plasma esté completamente acoplado por colisiones y que la aproximación del modelo magnetohidrodinámico (MHD) sea válida. La corona está totalmente ionizada y dominada por el campo magnético. Debido a la disminución de la densidad, las frecuencias de colisión también decrecen desde la fotosfera hacia la corona. En estos casos límite, de la fotosfera completamente acoplada por colisiones y la corona completamente ionizada y sin acoplamiento colisional, las simulaciones que usan modelos MHD dan resultados muy buenos comparados con las observaciones, pero esta situación no es el caso de la cromosfera. La cromosfera es una capa dinámica de la atmósfera solar situada entre la fotosfera y la corona. Es una capa de transición donde la evolución del plasma cambia de estar dominada por la presión del gas a estar dominada por el campo magnético, y donde el acoplamiento colisional decrece y la fracción de ionización crece. El tiempo medio entre las colisiones entre cargas y neutros es del mismo orden que el tiempo característico de evolución de las variables hidrodinámicas. Eso hace que los neutros y las cargas se desacoplen parcialmente y que la aproximación MHD clásica no sea válida en la cromosfera. Una alternativa al modelo MHD es un modelo de dos fluidos que ha sido implementado de forma numérica en este trabajo.

La complejidad de la atmósfera solar hace que sea imposible resolver de forma analítica las ecuaciones, así que los problemas se resuelven de forma numérica mediante simulaciones. Hemos extendido el código MHD no ideal Mancha3D para implementar el modelo de dos fluidos. El código Mancha3D usa un esquema numérico temporal explícito, que presenta una serie de ventajas en el caso de simulaciones paralelas a gran escala en dominios 3D. Los efectos de ionización parcial se

tienen en cuenta en la aproximación MHD a través de la ley de Ohm generalizada. Sin embargo, el modelo de dos fluidos introduce términos de acoplamiento colisional, lo que puede hacer que un código con un esquema numérico explícito se haga numéricamente inestable. Para asegurar la estabilidad cuando los términos colisionales se incluyen en un esquema explícito, el paso temporal necesario para integrar temporalmente las ecuaciones es inversamente proporcional a la frecuencia de colisión. Esta restricción se puede evitar implementando los términos colisionales de manera implícita. En el nuevo código, tratamos dichos términos de forma implícita usando un esquema semiimplícito.

Para probar el esquema numérico y determinar el orden de convergencia del esquema, hacemos unos tests de ondas acústicas y Alfvén en un medio uniforme, donde la solución numérica se puede comparar con la solución analítica exacta. Después hacemos simulaciones más realistas de ondas magnetoacústicas rápidas, usando el modelo de la atmósfera solar VALC. En los dos casos observamos amortiguamiento de las ondas, que es más grande cuando la frecuencia de colisión es parecida a la frecuencia de la onda. Los resultados son consistentes con resultados presentados en la literatura. Cuando la amplitud es suficientemente grande, podemos observar el mecanismo adicional de *damping* no lineal que no puede ser predicho por una solución analítica, pero se puede apreciar a través de simulaciones numéricas. Hemos hecho una simulación usando el modelo MHD y una configuración correspondiente a la configuración para el modelo de dos fluidos, donde la interacción entre neutros y cargas se introduce a través del término ambipolar en la ecuación de inducción. Observamos que aunque el *damping* de la onda es parecido en los dos casos, el aumento en la temperatura es mayor en el modelo con dos fluidos comparado al modelo MHD.

En la última parte presentamos simulaciones de la inestabilidad Rayleigh-Taylor (RTI) en la interfaz entre una protuberancia y la corona solar. Estudiamos la tasa de crecimiento, el desacoplamiento y los modos dominantes en un modelo donde la transición entre la prominencia y la corona es continua con una escala característica. Realizamos varias simulaciones donde estudiamos el efecto de las colisiones elásticas e inelásticas, la viscosidad y la conductividad térmica, la compresibilidad, la configuración del campo magnético, el contraste de densidad y la perturbación inicial sobre el desarrollo de la inestabilidad. En estas simulaciones hemos considerado la ley de Ohm ideal (sin difusividad magnética). Observamos que la tasa de crecimiento lineal es menor que en el caso MHD (completamente acoplado por colisiones) ideal (sin viscosidad y conductividad térmica) e incompresible. En el modelo MHD ideal sin campo magnético, la compresibilidad aumenta la tasa de crecimiento lineal para nuestro perfil de densidad.

Tesis disponible en TESEO: <https://www.educacion.gob.es/teseo/imprimirFichaConsulta.do?idFicha=622256>

Página anterior: Evolución de la densidad de neutros (arriba) y cargas (abajo) en el tiempo en una simulación con alta resolución de la inestabilidad Rayleigh-Taylor con campo sheared. En el panel de la densidad de cargas se dibujan también las líneas del campo magnético contenido en el plano de la inestabilidad. El tiempo está indicado en los paneles de la densidad de los neutros.