

DINÁMICA DE LA CROMOSFERA SOLAR:

En este artículo, presentamos el proyecto PI2FA (Partial Ionization: 2-Fluid Approach, por sus siglas en inglés). Este proyecto, respaldado por una ERC Consolidating Grant, ha estado activo durante los últimos 5 años. Su objetivo principal ha sido investigar la cromosfera solar utilizando un marco teórico innovador, que va más allá de los modelos magnetohidrodinámicos convencionales. Dada la baja temperatura de la atmósfera solar, más de la mitad de las partículas se encuentran en un estado neutro y se comportan como un fluido distinto al plasma formado exclusivamente por partículas cargadas. En este contexto, el proyecto PI2FA se ha centrado en desarrollar y aplicar herramientas para el modelado multidimensional del plasma cromosférico parcialmente ionizado, utilizando el formalismo multifluido. Las preguntas científicas abordadas incluyen el análisis de mecanismos de calentamiento cromosférico y la creación de modelos realistas multidimensionales de la cromosfera solar que incorporen efectos derivados de la presencia de átomos neutros, así como la comprensión del papel de los neutros en la dinámica de las protuberancias solares.



Funded by
the European Union



European Research Council
Established by the European Commission



Elena Khomenko

Instituto de Astrofísica de Canarias
khomenko@iac.es

INTRODUCCIÓN

La atmósfera solar exhibe varias capas, entre las cuales la cromosfera destaca por su peculiaridad y, posiblemente, su complejidad máxima. Su nombre proviene de "cromo", que significa color, ya que durante los eclipses se manifiesta en tonalidades rojizas. Este matiz se debe a la emisión de luz por parte de átomos de hidrógeno en la longitud de onda de la línea $H\alpha$. Ubicada entre la fotosfera, donde comienza la superficie solar, y la corona, su capa externa, la cromosfera posee un grosor de apenas unos mil kilómetros, una medida diminuta en comparación con el tamaño del Sol. ¿Por qué atribuir tanta relevancia a esta capa?

En el Sol, al igual que en todas las estrellas, la temperatura disminuye gradualmente desde el núcleo hacia las capas más externas. Sin embargo, de manera similar a muchas estrellas magnéticas de la secuencia principal, la temperatura alcanza un mínimo y luego vuelve a aumentar. Este aumento conduce a la emisión de radiación por parte del hidrógeno, lo que confiere el color rojo característico a la cromosfera. No obstante, aún no comprendemos completamente el origen de este incremento, ni el posterior aumento aún más drástico en la zona de transición y la corona. Se cree que la presencia del campo magnético en la superficie solar desempeña un papel crucial en este calentamiento, y se espera que comprender el calentamiento cromosférico nos permita entender también el calentamiento de la corona. A pesar de décadas de investigación, el problema de este calentamiento sigue siendo uno de los enigmas no resueltos en la física solar.

Hasta hace poco, se creía que el campo magnético del Sol se concentraba principalmente en las manchas solares. Sin embargo, la llegada de la polarimetría infrarroja en los años 90 permitió confirmar que hay elementos de intensidad magnética considerable distribuidos por toda la superficie solar, incluso durante los periodos de mínima actividad cuando no hay manchas solares. La energía que estos elementos magnéticos poseen en todo momento supera la necesaria para calentar la cromosfera. Solo se requiere encontrar mecanismos que conviertan esta energía en calor.

Al menos la mitad del hidrógeno presente en la cromosfera se encuentra en estado neutro, lo que confiere al material cromosférico una composición

equivalente a la de dos fluidos con naturalezas distintas (uno compuesto exclusivamente por partículas neutras y otro en forma de plasma formado por iones y electrones). La falta de acoplamiento colisional entre estos dos fluidos, debido a las bajas densidades en estas capas, provoca una dinámica ligeramente diferenciada entre ambos. Mientras las partículas ionizadas experimentan la influencia del campo magnético a través de la fuerza de Lorentz, las partículas neutras no lo hacen. Como consecuencia, aparece un comportamiento dinámico diferente en ambos tipos de partículas que genera fricción entre ellas, lo que constituye un mecanismo disipativo que convierte la energía mecánica o magnética en calor. Dependiendo de la descripción matemática del plasma, ya sea como un fluido único o multifluido, este fenómeno se denomina como "difusividad ambipolar" o "calentamiento por fricción". Nuestros estudios idealizados y los de nuestros colaboradores han demostrado que este mecanismo podría ser clave para proporcionar una gran cantidad de energía a la cromosfera, suficiente para mantener sus altas temperaturas. Sin embargo, la cromosfera es extremadamente compleja y hay numerosos factores a considerar, como la interacción entre el plasma y la radiación, o los procesos de ionización y recombinación, entre otros. Es por ello que se necesitan estudios más detallados sobre el mecanismo de calentamiento por neutros en modelos más realistas. El proyecto PI2FA se ha centrado en este tipo de estudios.

EL PROYECTO

El proyecto PI2FA se ha propuesto mejorar nuestra comprensión de la cromosfera solar magnetizada mediante la aplicación de un innovador marco teórico de plasma multifluido. Se han creado y aplicado herramientas para la modelización multidimensional de los plasmas cromosféricos, con el objetivo de entender los procesos no térmicos que generan calor en la alta atmósfera del Sol. Un desafío único de estos estudios radica en la incapacidad de resolver espacialmente las escalas en las que ocurren los procesos de liberación de energía magnética en observaciones directas. Sin embargo, los modernos telescopios solares de gran apertura como DKIST y el futuro EST ofrecen esperanzas en este aspecto. Además, los potentes superordenadores actuales brindan la capacidad de cálculo necesaria para abordar las escalas de interacción entre neutros y partículas

cargadas en modelos realistas. Estos modelos permiten prever los fenómenos que se deben buscar en observaciones para validar los hallazgos teóricos.

El proyecto se ha centrado en mecanismos fundamentales de propagación e intercambio de energía en plasmas complejos, como ondas, inestabilidades e interacciones plasma-radiación. La transición desde modelos unidimensionales idealizados hasta simulaciones multidimensionales representa un avance crucial, en consonancia con la constante evolución tecnológica de nuestras capacidades para la observación solar.

Al término del proyecto, hemos avanzado en nuestra comprensión de los procesos que energizan la atmósfera solar como consecuencia de estar parcialmente ionizada. Por un lado, hemos desarrollado extensiones de la teoría multifluido para diversos regímenes colisionales y hemos creado diversas herramientas computacionales y numéricas para la modelización realista de plasmas parcialmente ionizados. Por otro lado, la aplicación de estas herramientas ha generado resultados científicos interesantes, algunos de los cuales se detallan a continuación.

CALENTAMIENTO CROMOSFÉRICO POR ONDAS

La cromosfera solar está llena de ondas y choques. Los movimientos del plasma magnetizado en la fotosfera solar crean un flujo de energía mecánica y magnética suficiente para calentar la cromosfera y la corona. Esta energía puede transportarse a la cromosfera en forma de ondas. Sin embargo, no todos los tipos de ondas pueden desempeñar igualmente bien esta función. En algunas circunstancias, los choques de tipo acústico pueden escapar hacia capas superiores, propagándose alineados con el campo magnético. Las ondas de tipo magnético pueden alcanzar capas superiores porque no se disipan en la fotosfera debido a la radiación o la viscosidad y se ven menos afectadas por los efectos de la estratificación gravitacional. Hasta ahora, las ondas de Alfvén han sido las más elusivas, tanto desde el punto de vista teórico como observacional. Solo una pequeña fracción de la energía de las ondas de Alfvén sería suficiente para alimentar el viento solar. Aunque podrían transportar energía fácilmente hacia la cromosfera al propagarse alineadas con el campo, sus mecanismos de generación no están claros.

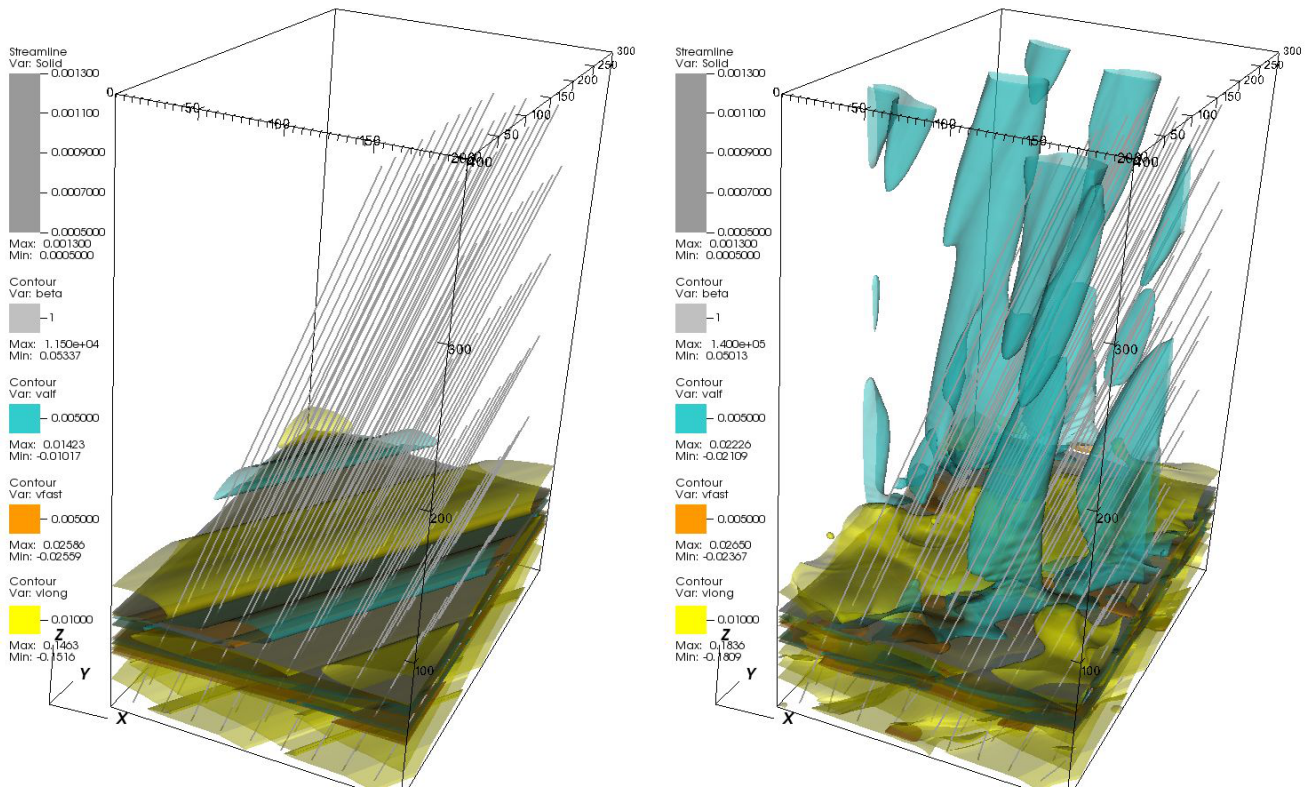


Figura 1. Modelado de propagación de ondas en la atmosfera solar horizontalmente homogénea (izquierda) y con estructuración horizontal (derecha) desde la fotosfera hasta la corona. Los colores indican la presencia de diferentes modos de oscilación: modo acústico lento (amarillo); magnético rápido (naranja) y Alfvén (azul). Las líneas inclinadas son las líneas de campo magnético. Notar como la estructuración horizontal permite la generación de modo Alfvén en la corona evidente por la presencia de contornos azules en la imagen de la derecha.

Una teoría novedosa surgida recientemente para explicar generación de modos Alfvén es la teoría de transformación de modos. Se ha demostrado que, bajo ciertas circunstancias, las ondas acústicas pueden transformarse en ondas magnéticas y de Alfvén. Las ondas de Alfvén creadas por este mecanismo podrían llegar más fácilmente a la cromosfera.

Además, las ondas de Alfvén son conocidas por ser particularmente difíciles de disipar bajo el marco de la magnetohidrodinámica clásica ideal. Afortunadamente, los efectos de interacciones ion-neutro proporcionan un mecanismo de disipación eficiente de este tipo de ondas.

En el proyecto PI2FA, hemos formulado una teoría nueva de producción de ondas Alfvén en plasmas parcialmente ionizados a través de la transformación de

modos (proceso por el cual una onda cambia sus propiedades), y hemos explorado sus mecanismos de disipación. Hemos descubierto que las corrientes creadas por el desacoplamiento colisional entre iones y electrones (denominado efecto Hall) proporcionan una manera eficiente para acoplar ondas magnéticas y de Alfvén. El mecanismo funciona para frecuencias mucho más bajas que en plasmas completamente ionizados ya que su eficiencia es inversamente proporcional al grado de ionización. Conjuntamente con la estructuración horizontal de la atmósfera solar, esto permite un flujo de energía de ondas de Alfvén suficiente como para calentar tanto regiones de Sol en calma como regiones activas (ver figura 1). Como consecuencia de la existencia de un desacoplamiento significativo en la dinámica de plasma y neutros, las ondas magnéticas y de Alfvén se disipan eficientemente a través del mecanismo de difusión ambipolar (o fricción ion-neutro).

Nuestra investigación ha revelado que los efectos multifluidos se vuelven cruciales para ondas con frecuencias mucho más bajas que las frecuencias típicas de colisión entre partículas, a diferencia de lo sugerido por la teoría clásica de ondas en plasmas homogéneos. Este descubrimiento conlleva implicaciones profundas, ya que hay considerablemente más energía disponible para la disipación a bajas frecuencias.

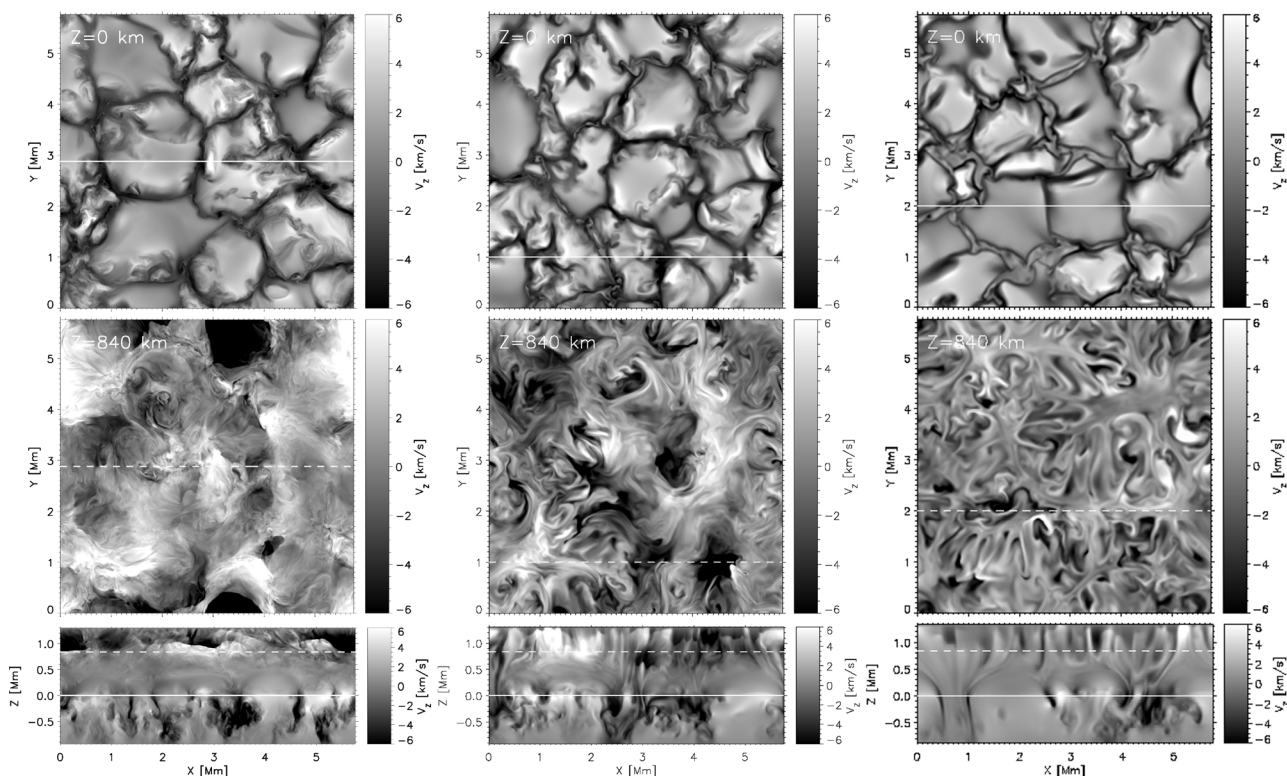
SIMULACIONES REALISTAS DE LA CROMOSFERA

Los modelos realistas de magnetoconvección tridimensional (3D) han demostrado ser una herramienta valiosa para avanzar en nuestra comprensión de numerosos procesos magnetohidrodinámicos que tienen lugar en la atmósfera solar. Estos modelos son utilizados rutinariamente por la comunidad de física solar para sintetizar el espectro emitido y permitir la comparación directa con observaciones. Su realismo en el caso de la fotosfera ha alcanzado

el punto tal que no se puede distinguir a simple vista la diferencia entre una imagen solar de granulación y la producida por el ordenador. Esto no ocurre así para la cromosfera.

Un desafío enorme para el proyecto ha sido proporcionar modelos realistas de magnetoconvección que lleguen hasta la cromosfera y tengan en cuenta los efectos de interacción entre neutros y partículas cargadas, algo que no se había abordado en modelos tridimensionales por ningún otro grupo. Estos modelos incluyen complejas interacciones hasta las escalas más pequeñas y permiten la comparación directa con datos observacionales, como una forma de preparar a nuestra comunidad para los datos de los telescopios DKIST y el futuro EST. Aquí es conveniente enfatizar que la cromosfera es un objetivo principal para estos telescopios y, por lo tanto, crear herramientas teóricas para la interpretación de datos cromosféricos es vital.

Figura 2. Simulaciones realistas de magnetoconvección solar. Las imágenes muestran cortes horizontales (paneles superiores, fotosfera y cromosfera) y vertical (panel inferior) de un modelo 3D. De izquierda a derecha: modelo de dinamo a pequeña escala; modelos de red magnética con diferente intensidad de campo. El tono de grises muestra las velocidades de movimiento del plasma.



Hemos llevado a cabo simulaciones tridimensionales que representan diversas regiones del Sol. Para describir el magnetismo solar de Sol en calma, es decir, en la superficie solar fuera de las manchas y regiones activas, hemos desarrollado modelos de dinamo a pequeña escala (SSD, por sus siglas en inglés) (ver figura 2). Estos modelos muestran la existencia de un campo magnético intrincado con cambios de polaridad a pequeña escala y configurados en forma de pequeños arcos. Por otra parte, para representar regiones de la red magnética, hemos creado modelos con campo magnético más intenso y con una polaridad dominante (ver figura 2), con elementos magnéticos en forma de tubos de flujo que se expanden con altura en la cromosfera. Hemos alcanzado una resolución numérica sin precedentes para modelar adecuadamente las escalas de intercambio de energía entre los neutros y las partículas cargadas. Inicialmente, partimos de la suposición de que los campos magnéticos más intensos tendrían un efecto de calentamiento mayor (por almacenar intrínsecamente una mayor cantidad de energía magnética). Sin embargo, nos sorprendió descubrir que el efecto mayor se producía para los campos magnéticos intrincados de dinamo a pequeña escala. Esto se debe a que, en estos modelos, la energía se deposita en capas más profundas donde se gasta principalmente en calentar el plasma en lugar de ionizarlo. Observamos que, en tan solo 10 minutos, el plasma se calienta aproximadamente 500 Kelvin (un $\sim 10\%$ de su valor inicial) en capas cromosféricas donde la interacción neutro-ion está completamente resuelta en las simulaciones, sin mostrar signos de saturación incluso en nuestra mejor resolución de 3.5 km. Este descubrimiento tiene profundas implicaciones para nuestra comprensión de la formación de las cromosferas calientes del Sol y de otras estrellas.

PROTUBERANCIAS SOLARES

La corona solar contiene nubes de plasma frío con propiedades muy similares al de la cromosfera. Se trata de protuberancias solares. Las protuberancias pueden estar suspendidas durante días o meses en la corona solar, y aisladas térmicamente de ella por el campo magnético. Al final de su vida, algunas de ellas pueden deshacerse en forma de gotas de lluvia coronal cayendo a lo largo de los arcos de campo magnético. O pueden volverse inestables y producir una erupción. En determinadas condiciones, la

materia asociada se propaga en forma de eyección de masa coronal que podría afectar a la Tierra. A pequeña escala, las protuberancias son extremadamente dinámicas. Los procesos más relevantes tienen lugar en sus bordes y en los extremos de las finas hebras que forman estas estructuras, allí donde las propiedades del plasma cambian abruptamente. Las protuberancias se mantienen estables en escalas globales debido a las fuerzas de la tensión magnética. Sin embargo, los neutros que componen el material de la protuberancia solo sienten esta fuerza a través del débil acoplamiento colisional con los iones. Por lo tanto, las protuberancias pueden volverse inestables a pequeña escala.

Para investigar la influencia de las partículas neutras en la estabilidad de las protuberancias, en el proyecto PI2FA hemos llevado a cabo un modelado exhaustivo utilizando el marco teórico multifluido para analizar las inestabilidades que se forman en la interfaz entre la hebra de la protuberancia y la corona solar. Este modelado se ha realizado con una resolución sin precedentes de 1 km, permitiendo la representación detallada de todos los procesos físicos relevantes, como las colisiones elásticas entre partículas, la ionización y recombinación, la viscosidad y la conductividad (ver figura 3). En estas simulaciones detectamos una amplia gama de efectos multifluidos, especialmente destacados en las capas de transición entre el plasma frío y caliente. En estas regiones, los desequilibrios de ionización/recombinación generan capas sobreionizadas con notables diferencias en la dinámica de partículas neutras y cargas (con velocidades relativas que pueden diferir hasta un 10-20%, aproximadamente), además de un calentamiento por fricción de hasta varios miles de Kelvin, que potencialmente podrían ser detectados en observaciones. Estos hallazgos subrayan la importancia de los efectos presentes en las capas de transición entre los materiales fríos y calientes, como la región de transición solar y la interfaz entre la protuberancia y la corona.

Los efectos multifluido operan en escalas más allá de las capacidades de resolución de nuestra instrumentación más avanzada, lo que hace necesarias iniciativas observacionales especializadas para su detección. Lo más directo que se puede medir son las velocidades de neutros y cargas, detectando los desplazamientos Doppler de las líneas espectrales

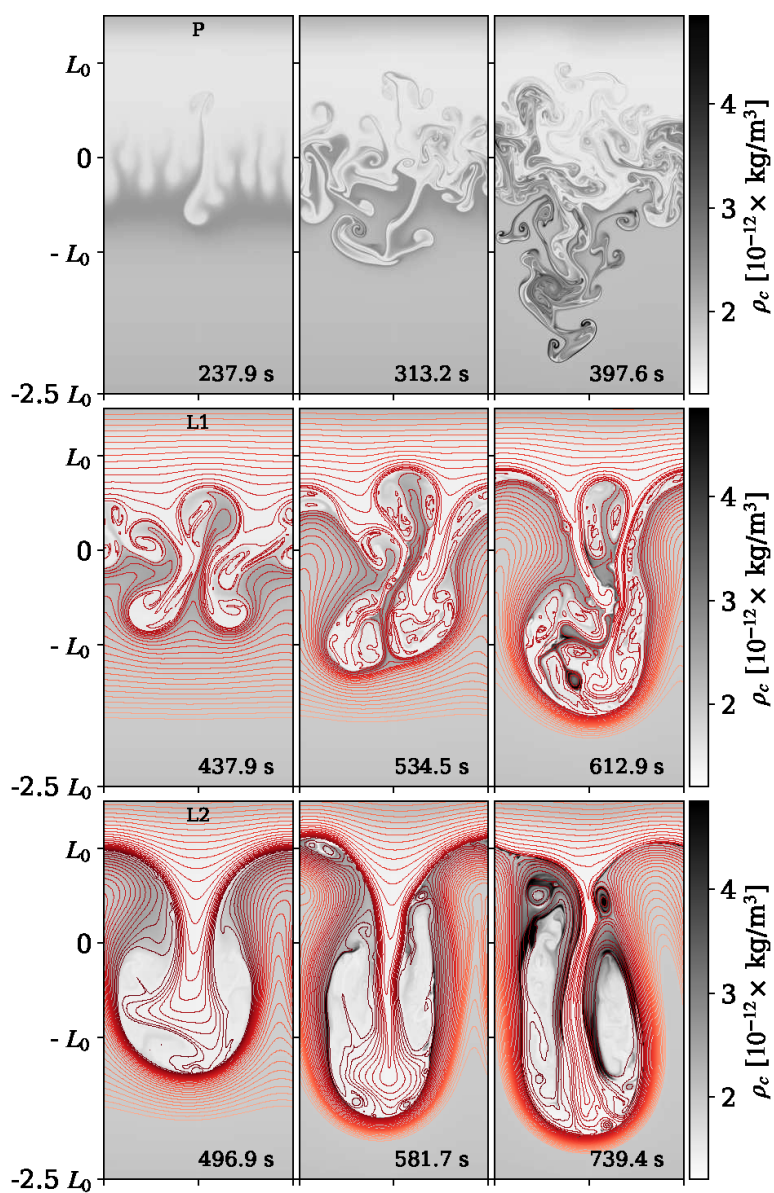


Figura 3. Simulaciones de inestabilidad de Rayleigh-Taylor en el borde de una hebra de protuberancia solar. Los paneles de izquierda a derecha muestran diferentes instantes temporales de evolución de la densidad del plasma. Los paneles de arriba abajo muestran modelos con diferente orientación de campo magnético. Las líneas rojas indican la posición de las líneas de campo magnético en el plano de inestabilidad.

emitidas por el mismo volumen del plasma. Aun sin resolver las escalas pequeñas, las huellas del desacoplamiento dinámico pueden quedar presentes en datos no resueltos espacialmente. Por esta razón, para buscar la confirmación observacional de nuestros hallazgos teóricos, hemos diseñado campañas de observación específicas en los telescopios VTT y

THEMIS del Observatorio del Teide, y también hemos utilizado datos históricos tomados en el Observatorio Ondřejov en la República Checa. En estos conjuntos de datos hemos encontrado un ligero exceso en las velocidades de los iones sobre los neutros, localizado justo en los bordes de las protuberancias, en línea con las predicciones teóricas.