



Desarrollo de modos MHD tipo *sausage* en arcos coronales

M. Cécere^{1,2}, H. Capettini^{1,3}, A. Costa¹, G. Krause^{4,5} & O. Reula^{6,2}

¹ Instituto de Astronomía Teórica y Experimental, CONICET-UNC, Argentina

² Observatorio Astronómico de Córdoba, UNC, Argentina

³ Facultad de Matemática, Astronomía, Física y Computación, UNC, Argentina

⁴ Instituto de Estudios Avanzados en Ingeniería y Tecnología, CONICET-UNC, Argentina

⁵ Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, UNC, Argentina

⁶ Instituto de Física Enrique Gaviola, CONICET-UNC, Argentina

Contacto / mariana.cecere@unc.edu.ar

Resumen / Para poder inferir las propiedades del plasma coronal, la sismología coronal combina la medición de señales temporales y espaciales de oscilaciones y ondas magnetohidrodinámicas de diferentes estructuras magnéticas con sus modelados teóricos. En el caso particular de los arcos coronales, los modos de oscilación más estudiados son los *sausage* rápidos y los estacionarios lentos, debido a que su compresibilidad los hace susceptibles de ser observados. Realizando simulaciones numéricas magnetohidrodinámicas, analizamos la capacidad de diferentes tipos de perturbaciones, asociadas con fluctuaciones de energía habituales de la corona solar, para generar estos tipos de modos. Encontramos que deposiciones confinadas de energía excitan modos lentos, mientras que perturbaciones globales, capaces de modificar en forma casi instantánea la temperatura en toda la estructura del arco, excitan modos rápidos del tipo *sausage*.

Abstract / In order to infer the properties of the coronal plasma, coronal seismology combines the measurement of temporal and spatial signals of oscillations and magnetohydrodynamic waves of different magnetic structures with their theoretical modeling. In the particular case of coronal loops, fast sausage modes and standing slow modes are the most studied oscillation modes, because their compressibility makes them susceptible to being observed. By performing magnetohydrodynamic numerical simulations, we analyze the capability of different types of disturbances, associated with typical solar corona energy fluctuations, to generate these types of modes. We found that confined energy deposition excites slow modes, while global perturbations, capable of instantly modifying the loop temperature, excite fast sausage modes.

Keywords / Sun: oscillations — Magnetohydrodynamics (MHD) — Shock waves

1. Introducción

Los modos *sausage* modelados como perturbaciones axi-simétricas de cilindros magnéticos son modos magnetoacústicos rápidos compresibles, que perturban el plasma dentro del arco en dirección radial provocando una contracción simétrica y un ensanchamiento del tubo sin distorsión de su eje (Edwin & Roberts, 1983). Estos modos tienen períodos característicos de $\sim [5 - 10]$ s, se amortiguan en pocos períodos y generalmente se encuentran asociados con arcos fulgurantes en regiones activas (e.g., Zaitsev & Stepanov, 1989; Nakariakov et al., 2003; Srivastava et al., 2008; Van Doorselaere et al., 2011). De la detección de pulsaciones cuasi periódicas en perfiles temporales en microondas y en rayos X duros, Asai et al. (2001) propusieron que tales modulaciones pueden producirse por las variaciones de estructuras magnéticas macroscópicas, por ejemplo, oscilaciones de arcos magnéticos coronales. Al analizar un arco fulgurante en microondas, Inglis et al. (2008) mostraron que todo el arco oscila con el mismo período y casi en fase, produciendo un modo *sausage* magnetohidrodinámico (MHD) o un régimen periódico de reconexiones magnéticas. Jess et al. (2010) y Nakariakov et al. (2018) presentaron interesantes ejemplos de observación de excitación de os-

cilaciones MHD en un arco coronal por un *microflare*.

Los modos magnetoacústicos lentos se excitan en toda la corona. En los arcos coronales, se los considera modos MHD longitudinales con períodos del orden de varios minutos amortiguados en pocos períodos (e.g., Wang et al., 2005; Nakariakov et al., 2019). Numerosas observaciones han revelado que estas oscilaciones pueden ser provocadas por fulguraciones impulsivas calientes ubicadas en algún lugar del arco, por ejemplo, cerca de un punto de apoyo del arco o cerca del ápice (De Moortel et al., 2002; Costa & Stenborg, 2004; Mariska, 2006). Selwa et al. (2005); Fernández et al. (2009); Ogrodowczyk et al. (2009) realizando simulaciones numéricas emularon las erupciones impulsivas mediante pulsos de deposiciones de energía que desencadenan características numéricas que se asemejan a ondas estacionarias magnetosónicas lentas.

Para estudiar la producción de modos *sausage*, estudiamos diferentes escenarios de liberación de energía que se asemejan a la acción de los *microflares*. Para ello, analizamos la acción de deposiciones impulsivas de energía capaces de excitar un patrón de modos acoplados. En primer lugar estas deposiciones fueron localizadas en una pequeña región del arco, y en segundo lugar, abarcaron la totalidad del arco coronal.

2. El modelo

El modelo considera que la dinámica está descrita por las ecuaciones MHD ideales (sin considerar la gravedad), que describen el comportamiento macroscópico de un plasma compresible, ideal y completamente ionizado a través de la densidad (ρ), velocidad (\mathbf{v}), presión (p) y campo magnético (\mathbf{B}). Las simulaciones se realizaron usando el código FLASH (Fryxell et al., 2000), un conjunto de herramientas de simulación de alto rendimiento, de código abierto disponible públicamente, desarrollado en el Center for Astrophysical Thermonuclear Flashes (Flash Center) de la Universidad de Chicago.

2.1. Configuración de equilibrio

La configuración de equilibrio consiste en un cilindro recto rodeado por la corona solar y la cromosfera en sus extremos. Se impone simetría axial alrededor de $r = 0$ y utilizamos una simulación 2.5D en coordenadas cilíndricas (r, z). En la Tabla 1 se muestran los diferentes valores de los parámetros del plasma iniciales para que haya equilibrio entre el arco y la corona. Inicialmente, el campo magnético se toma en la dirección z , y el medio está en reposo. Las dimensiones del arco son: radio $R_a = 3$ Mm y longitud $L = 25$ Mm (Nakariakov et al., 2003).

Tabla 1: Valores iniciales del sistema corona/arco en equilibrio.

	Corona	Arco
Densidad [g cm^{-3}]	1.66×10^{-15}	8.33×10^{-14}
Temperatura [MK]	1.000	2.890
B_z [G]	60	51
β	0.002	0.38

2.2. Perturbaciones

Para este trabajo proponemos perturbar un arco coronal que está inicialmente en estado de equilibrio con el medio que lo circunda. Consideramos un arco cuya densidad es un orden de magnitud mayor ($n \sim 10^{10} \text{ cm}^{-3}$) que el medio coronal, con una temperatura del orden del MK y con las dimensiones antes descriptas. Calculamos los tiempos característicos conductivos (τ_{cond}) y radiativos (τ_{rad}) dentro del arco en dos regiones diferentes. En el caso de un arco en una región tranquila, los tiempos de conducción ($\tau_{\text{cond}} \sim 10^5$ s) son mayores que los de radiación ($\tau_{\text{rad}} \sim 10$ s); por lo que una perturbación típica de energía será rápidamente radiada. En este escenario, una perturbación localizada en una región pequeña del eje del arco podría generar un patrón oscilante, lo que llamaremos perturbación localizada de energía. En el caso de un arco en una región activa, al producirse una fulguración, las bases cromosféricas pueden alcanzar temperaturas del orden de las decenas de MK. Calculamos en cuanto tiempo ese calor se conduce a lo largo del arco, y en cuanto tiempo esa energía se radia. Obtuvimos que el tiempo de conducción ($\tau_{\text{cond}} \sim 10$ s)

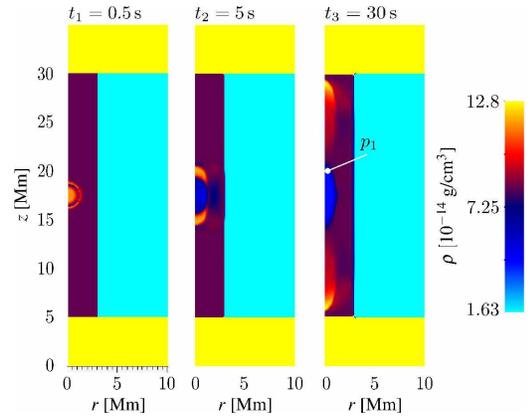


Figura 1: Evolución de la densidad a diferentes tiempos. Crédito: Capetini et al., A&A, 644, 4, 2020, reproducido con permiso ©ESO.

es muy pequeño respecto al de radiación ($\tau_{\text{rad}} \sim 10^4$ s). Este mecanismo calienta muy rápido al arco y genera un desequilibrio con el exterior, siendo esto lo que denominaremos perturbación global.

3. Resultados y discusión

3.1. Perturbaciones locales

Un pulso instantáneo de 1.5×10^{27} erg en una esfera de radio $R_p = 1$ Mm, temperatura 8 MK y $n = 10^{10} \text{ cm}^{-3}$, se asemeja a la perturbación de energía liberada por un *microflare* (Aschwanden, 2005). Esta perturbación localizada en el centro del arco ($z = 17.5$ Mm), produce una onda de choque esférica que en la evolución se vuelve altamente colimada en la dirección z por la acción del campo magnético de arco (ver Fig. 1). Se desarrolla un par de frentes de choque lentos opuestos y, cuando se alcanza la cromosfera, se reflejan principalmente dentro del arco. Además, un frente de onda de choque rápido aparece en la dirección radial que alcanza el entorno coronal a través del contorno del arco. La Fig. 2 muestra la transformada de Fourier (TF) de las variables MHD realizada en el punto $p_1 = (0.2, 20)$ Mm. Notamos que hay dos frecuencias características: $\nu_1 = 0.01$ Hz $\rightarrow \tau_1 = 100$ s correspondiente a un modo magnetoacústico lento, y $\nu_2 = 0.075$ Hz $\rightarrow \tau_1 = 13.3$ s correspondiente a un modo magnetoacústico rápido. En este caso vemos en densidad como el modo predominante es el lento, y aunque se ha excitado un modo rápido, su amplitud es insignificante.

3.2. Perturbaciones globales

En este caso, perturbamos a todo el arco con la misma cantidad de energía que el caso anterior (1.5×10^{27} erg). El desequilibrio inicial produce una onda de choque que viaja hacia afuera del arco, drenando parte de su energía hacia la corona. Luego, la densidad del arco empieza a oscilar, con las mismas frecuencias características encontradas en el caso anterior, pero donde ahora, el modo rápido es el que predomina sobre el lento (ver densidad en la Fig. 3).

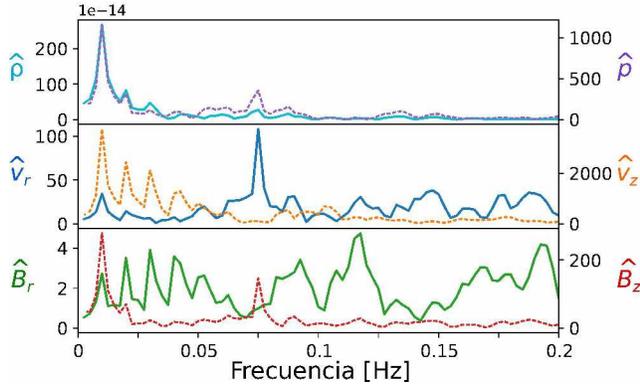


Figura 2: Amplitud de Fourier de las diferentes variables MHD (\hat{X}_{MHD}) medidas en el punto $p_1 = (0.2, 20)$ Mm, para el caso de la perturbación local. Crédito: Capettini et al., A&A, 644, 5, 2020, reproducido con permiso ©ESO.

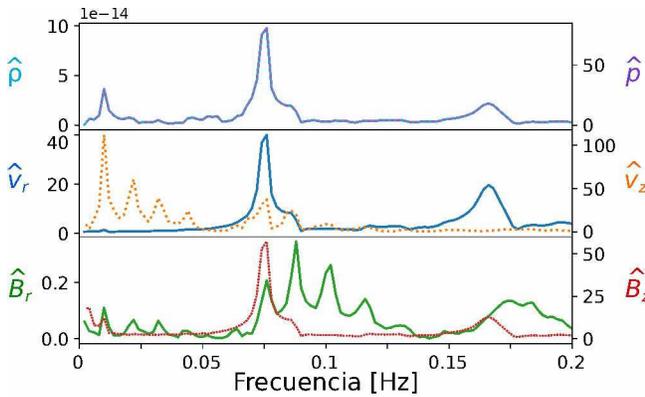


Figura 3: Idem Fig. 2, para el caso de la perturbación global. Crédito: Capettini et al., A&A, 644, 6, 2020, reproducido con permiso ©ESO.

3.3. Importancia del parámetro β en la excitación de los modos *sausage*

La excitación de los modos de *sausage* requiere la capacidad del medio para comprimir y restaurar regularmente las líneas del campo magnético. Por lo tanto, la presión térmica debe ser comparable a la presión y tensión magnéticas para equilibrar la resistencia del campo magnético. Como el parámetro β mide la importancia relativa entre energía térmica y magnética, parece un parámetro adecuado para analizar la capacidad del arco para excitar los modos *sausage*. Para estudiar esto, realizamos experimentos numéricos, variando el parámetro β (Caso I) y los valores de energía utilizados (Caso II) (ver Tabla 2, el caso de referencia es el caso global de la subsección anterior). Los resultados se detallan en la siguiente sección.

4. Conclusiones

A partir de deposiciones instantáneas de energía que emulan un *microflare*, distinguimos 2 situaciones, 1) per-

Tabla 2: Temperatura, campo magnético, parámetro β y valores de energía para los diferentes casos.

	Referencia	Caso I	Caso II
T [MK]	3.1	4.3	4.1
B [G]	51	45	58
β	0.4	0.7	0.4
Energía [10^{27} erg]	1.5	1.5	37

turbación de energía local y 2) perturbación de energía global, que originan oscilaciones acopladas cuyas frecuencias características son 2 (una lenta y una rápida). En el primer caso, domina el modo lento (longitudinal al eje del arco). Este tipo de perturbaciones excitan la propagación de ondas de choque altamente colimadas por el campo magnético. En este caso, los modos rápidos (transversales al eje del arco) tienen señales débiles. En el segundo caso, domina el modo rápido, i.e., este tipo de perturbación es capaz de producir un modo *sausage*. Esto sugiere que la rareza de este tipo de modos es debido al requerimiento de que el efecto de la conducción de calor sea el efecto dominante, estando de acuerdo con arcos de regiones activas (calientes y cortos). Por último, en el análisis realizado variando el parámetro β y la energía de la perturbación en el caso global notamos que: si la energía depositada es la misma, pero el parámetro β es mayor, la señal rápida crece casi en la misma cantidad que la señal lenta. Pero si el parámetro β es el mismo, pero la energía depositada es mayor, hay un crecimiento sustancial de la señal rápida sobre el incremento de la señal lenta.

Referencias

- Asai A., et al., 2001, ApJL, 562, L103
 Aschwanden M.J., 2005, *Physics of the Solar Corona. An Introduction with Problems and Solutions (2nd edition)*
 Costa A., Stenborg G., 2004, Solar Phys., 222, 229
 De Moortel I., Hood A.W., Ireland J., 2002, A&A, 381, 311
 Edwin P.M., Roberts B., 1983, Solar Phys., 88, 179
 Fernández C.A., et al., 2009, MNRAS, 400, 1821
 Fryxell B., et al., 2000, ApJS, 131, 273
 Inglis A.R., Nakariakov V.M., Melnikov V.F., 2008, A&A, 487, 1147
 Jess D.B., et al., 2010, ApJL, 712, L111
 Mariska J.T., 2006, ApJ, 639, 484
 Nakariakov V.M., Melnikov V.F., Reznikova V.E., 2003, A&A, 412, L7
 Nakariakov V.M., et al., 2018, ApJ, 859, 154
 Nakariakov V.M., et al., 2019, ApJL, 874, L1
 Ogrodowczyk R., Murawski K., Solanki S.K., 2009, A&A, 495, 313
 Selwa M., Murawski K., Solanki S.K., 2005, A&A, 436, 701
 Srivastava A.K., et al., 2008, MNRAS, 388, 1899
 Van Doorsselaere T., et al., 2011, ApJ, 740, 90
 Wang T.J., et al., 2005, A&A, 435, 753
 Zaitsev V.V., Stepanov A.V., 1989, Soviet Ast., 15, 66