

Variación de la ley de extinción ultravioleta en las envolturas de las nubes moleculares. Acomplamiento magnético al campo Galáctico.

Leire Beitia Antero^{1,2} y Ana Inés Gómez de Castro^{1,2}

¹Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica, Fac. CC. Físicas

²Grupo de Investigación AEGORA, U.D. Astronomía y Geodesia, Fac. CC. Matemáticas.

Resumen

Las nubes moleculares son las grandes factorías donde tiene lugar la formación estelar. El tipo de estrellas que formará en su interior depende tanto de la masa de la nube como del estado turbulento del gas, así como de la capacidad de penetración de los campos magnéticos. Las capas más externas de las nubes moleculares son más difusas, y al estar sometidas a la radiación ultravioleta externa, se ionizan, favoreciendo el acoplamiento con el campo magnético y la propagación de ondas hidromagnéticas a su interior. En este proceso, los granos de polvo acoplados al gas juegan un papel fundamental, ya que también poseen una carga neta que provoca su oscilación alrededor de las líneas de campo magnético. Así, algunas de las ondas que se propagan en la nube pueden verse amplificadas al entrar en resonancia con los granos de polvo cargados, aumentando el estado turbulento de la nube y disminuyendo el tamaño de las estrellas que se formarán en su interior. Para estudiar numéricamente esta fenomenología, hemos modificado un código de simulación magnetohidrodinámica para incluir la dinámica de los granos cargados. En este trabajo, presentamos los resultados obtenidos hasta la fecha sobre el amortiguamiento de las ondas en presencia de granos de polvo de 0.01 micras de radio.

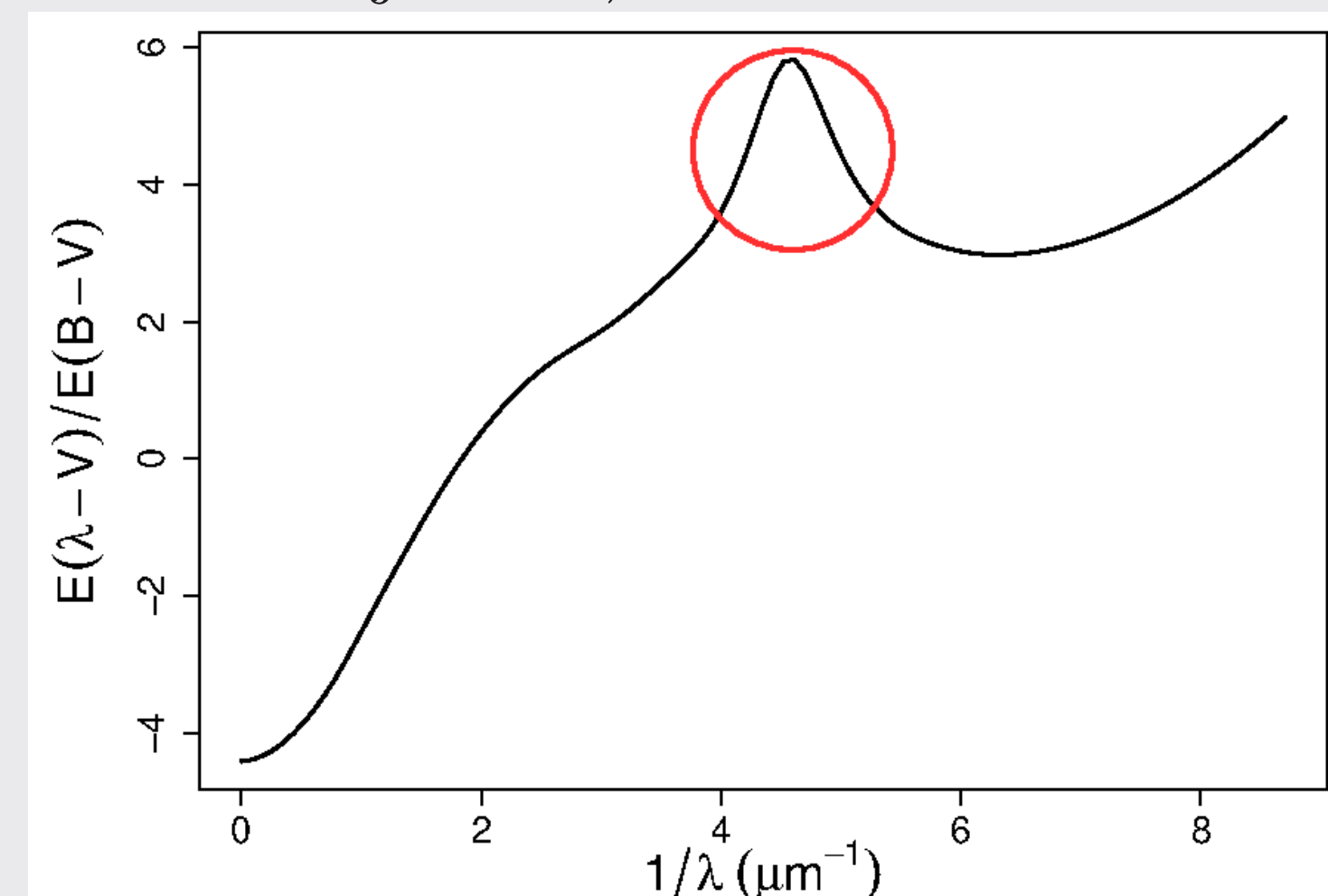
Gas y polvo interestelar

Entre las estructuras que se encuentran en el Medio Interestelar, las Nubes Moleculares son las regiones más frías en cuyo interior tiene lugar la formación estelar. Las capas más externas de estas nubes son más difusas y se encuentran sometidas a la radiación ultravioleta interestelar, por lo que su índice de ionización es mayor que en el interior de la nube y permiten el acoplamiento con el campo magnético. Además, la presencia de pequeños granos de polvo interestelar ($a_d = 0.1 - 0.1\mu\text{m}$) acoplados al gas puede favorecer este acoplamiento, ya que algunos de ellos poseen una carga neta que facilita la interacción con el campo magnético.

De esta manera, las ondas hidromagnéticas pueden penetrar a mayor profundidad en la nube, en particular aquellas cuya frecuencia es equivalente a la girofrecuencia de los granos de polvo [1].

Extinción en el ultravioleta

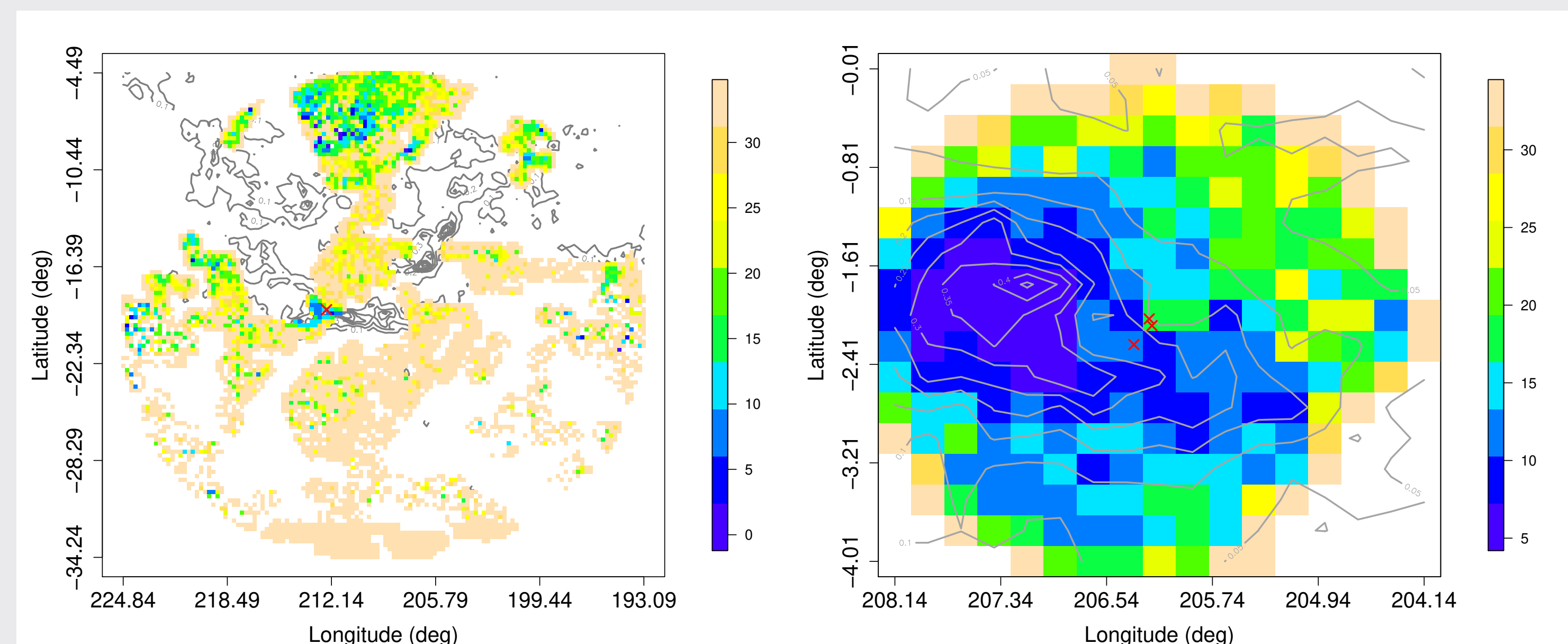
La curva de extinción presenta un rasgo muy característico a 2175 Å con forma de joroba, conocido como *UV bump*.



Esta joroba está producida por la presencia de pequeñas partículas carbonáceas, los hidrocarburos policíclicos aromáticos (PAHs). Una medida indirecta de la presencia de estos granos viene dada por el área de la joroba, que se puede calcular a partir de la extinción en el ultravioleta cercano (NUV) y en el infrarrojo [2]:

$$A_{bump} = 0.106 \pm 0.008 \frac{A_{NUV}}{A_K} + (2.0 \pm 0.3) \quad (1)$$

Combinando la fotometría de las misiones *GALEX* y *2MASS*, hemos encontrado variaciones en el área de la joroba en las regiones de formación estelar de Orión (izquierda) y Roseta (derecha) en regiones de mayor densidad donde tiene lugar el crecimiento de los granos de polvo, así como en los alrededores de regiones de fotodisociación, donde los granos son destruidos por la radiación ultravioleta [3].



Referencias

- [1] Pilipp, W. *et al.* (1987) *ApJ*, 314: 341.
- [2] Gómez de Castro, A.I. *et al.* (2015) *MNRAS*, 449: 3867.
- [3] Beitia-Antero, L. & Gómez de Castro, A.I. (2017) *MNRAS*, 469: 2531.
- [4] Stone, J.M. *et al.* (2008) *ApJS*, 178: 137.

Estudio numérico - Athena

Para estudiar la propagación de ondas en una nube molecular, estamos utilizando Athena [4], un código de simulación magnetohidrodinámica (MHD) que resuelve las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v} - \mathbf{B} \mathbf{B} + P^*) = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \nabla \cdot ((E + P^*) \mathbf{v} - \mathbf{B}(\mathbf{B} \cdot \mathbf{v})) = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} - \nabla \times (\mathbf{v} \times \mathbf{B} - \eta_{AD}(\mathbf{J} \times \mathbf{B}) \times \mathbf{B}) = 0 \quad (5)$$

donde η_{AD} es el coeficiente de difusión ambipolar que incluye el efecto de los granos cargados sobre el gas. Los granos de polvo de distintos tamaños y cargas se mueven de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\frac{\mathbf{v} - \mathbf{v}_{gas}}{t_s} - \nu_C(\mathbf{v} - \mathbf{v}_{gas}) + Q(c\mathbf{E} + (\mathbf{v} - \mathbf{v}_{gas}) \times \mathbf{B}) \quad (6)$$

donde t_s es el tiempo de parada de las partículas en el régimen de Epstein, ν_C da cuenta de las interacciones de Coulomb entre los granos de polvo cargados y las especies cargadas del plasma, y $Q = Z_d e / m_d c$. Los términos resaltados en la ecuación 6 son novedosos respecto a la versión pública de Athena, y han sido implementados en el esquema predictor-corrector existente y comprobados a partir de problemas sencillos con solución analítica.

Resultados preliminares

Hasta la fecha, hemos estudiado el amortiguamiento de ondas de Alfvén circularmente polarizadas en una región densa de una nube molecular de acuerdo con [1]: $n(H_2) = 10^4 \text{ cm}^{-3}$, $n(e) = 10^{-3} \text{ cm}^{-3}$, especie iónica dominante HCO^+ , $T = 20\text{K}$, $\mathbf{B} = 10^{-4}\text{G}$. El 1% de la masa total está incluida en granos de polvo esféricos de radio $a_d = 10^{-6} \text{ cm}$ y densidad interna $\rho_d^{int} = 1 \text{ g cm}^{-3}$ y el 73% de los granos de polvo poseen una carga negativa $Z_d = -1$.

Tomando como escala temporal de referencia la girofrecuencia de los granos cargados, hemos estudiado la atenuación de varias ondas de Alfvén así como la dinámica de los granos. Hemos comprobado que los granos de polvo cargados tienen mucha menos libertad de movimiento que los granos neutros debido principalmente a las interacciones con los iones del plasma (término ν_C). Por otro lado, la difusión ambipolar se ve amortiguada debido a la presencia de estas cargas negativas, favoreciendo la propagación de las ondas en el interior de la nube. Finalmente, con la actual formulación de las ecuaciones nos es imposible estudiar efectos de resonancia entre las ondas y los granos cargados, por lo que estamos considerando soluciones alternativas, como definir η_{AD} de acuerdo a una distribución de granos de polvo variable en el espacio.

Agradecimientos

Este trabajo está siendo financiado por una beca de Personal Investigador en Formación de la UCM (CT17/17-CT18/17).