

Reconstrucción tridimensional de la velocidad del viento solar mediante tomografía Lyman- α

F.A. Nuevo^{1,2}, A.M. Vásquez^{1,3}, F. Frassati⁴, A. Bemporad⁴, R.A. Frazin⁵, M. Romoli⁶, N. Sachdeva⁵
& W. Manchester IV⁵

¹ *Instituto de Astronomía y Física del Espacio, CONICET-UBA, Argentina*

² *Ciclo Básico Común, UBA, Argentina*

³ *Departamento de Ciencia y Tecnología, UNTREF, Argentina*

⁴ *Osservatorio Astrofisico di Torino, INAF, Italia*

⁵ *Department of Climate and Space Sciences and Engineering, University of Michigan, EE.UU.*

⁶ *Dipartimento di Fisica e Astronomia, UniFI, Italia*

Contacto / federico@iafe.uba.ar

Resumen / La determinación de la estructura termodinámica tridimensional (3D) de la corona solar por medios observacionales es de gran importancia para avanzar en la comprensión de los mecanismos físicos responsables del calentamiento coronal, así como para el desarrollo de modelos magnetohidrodinámicos (MHD) globales de la corona. Orientada a este fin, la tomografía solar rotacional utiliza series temporales de imágenes de la corona solar en luz visible (LV) y extremo ultravioleta, para determinar la distribución 3D de la densidad y temperatura electrónica de la corona solar. En este trabajo presentamos una nueva técnica tomográfica que, basada en imágenes coronales en Lyman- α y LV, permite la reconstrucción 3D del factor de atenuación Doppler Lyman- α . Este resultado, en combinación con un modelo global del campo magnético, permite reconstruir la distribución 3D de la velocidad del viento solar. El coronógrafo Metis a bordo de la misión espacial *Solar Orbiter*, que recientemente entró en operación, toma imágenes en ambos rangos espectrales, lo que permitirá aplicar la técnica por primera vez. Presentamos la metodología y resultados preliminares basados en simulaciones numéricas.

Abstract / Determination of the three-dimensional (3D) thermodynamic structure of the solar corona by observational means is of great importance to advance the understanding of the physical mechanisms responsible for coronal heating, as well as for the development of global magnetohydrodynamic (MHD) models of the corona. Oriented to this end, solar rotational tomography makes use of time series of images of the solar corona in visible light (VL) and in extreme ultraviolet, to determine the 3D distribution of the electron density and temperature of the solar corona. In this work we present a new tomographic technique that, based on coronal images in Lyman- α and VL, allows 3D reconstruction of the Lyman- α Doppler dimming term. In combination with a global model of the magnetic field, this allows 3D reconstruction of the solar wind speed. The recently operational Metis coronagraph, aboard the *Solar Orbiter* space mission, takes images in both spectral ranges, which will allow to apply the technique for the first time. We describe the methodology and present preliminary results based on numerical simulations.

Keywords / Sun: corona — Sun: fundamental parameters — Sun: magnetic fields — solar wind

1. Introducción

La técnica de tomografía solar rotacional utiliza series temporales de imágenes de la corona solar, en distintos rangos espectrales, para determinar la distribución 3D de variables termodinámicas del plasma coronal. La emisión coronal en luz visible (LV) se debe a dispersión Thomson de la radiación fotosférica por parte de los electrones coronales. Así, la utilización de imágenes LV permite la reconstrucción tomográfica de la distribución 3D de la densidad electrónica coronal (Frazin & Janzen, 2002). La emisividad coronal en extremo ultravioleta (EUV) es formada por líneas espectrales de sus iones pesados excitados colisionalmente por electrones coronales. Así, la utilización de imágenes EUV permite la reconstrucción tomográfica de la distribución 3D de la densidad y temperatura electrónica coronal (Vásquez, 2016).

La emisividad coronal UV en la línea Lyman- α se debe a excitación radiativa de sus átomos de hidrógeno neutro coronales por la radiación cromosférica. Así, esta radiación coronal es un diagnóstico indirecto de la velocidad del viento solar que, por efecto Doppler, afecta sensiblemente la tasa de excitación radiativa de los átomos de hidrógeno coronales (Vásquez et al., 2003; Bemporad et al., 2021). En este trabajo presentamos en forma original una técnica tomográfica que, basada en imágenes coronales en Lyman- α y LV, permite la reconstrucción 3D del denominado factor de atenuación Doppler Lyman- α . Este resultado, en combinación con un modelo global del campo magnético, permite reconstruir la distribución 3D del campo de velocidad del viento solar.

El coronógrafo Metis, a bordo de la nave *Solar Orbiter* (SolO), toma imágenes en LV y Lyman- α . Su campo

de visión varía en función de la posición de SolO a lo largo de su órbita altamente excéntrica. Vázquez et al. (2022) estudiaron la posibilidad de realizar tomografía LV con dicho instrumento. Usando la información orbital de la nave y simulaciones de un modelo MHD estacionario calcularon series temporales de imágenes sintéticas en LV que luego fueron utilizadas para realizar reconstrucciones tomográficas de la densidad electrónica. En aquel trabajo se exploraron condiciones extremas de la geometría de observación, a fin de analizar las limitaciones que la compleja órbita de SolO (excéntrica y de latitud variable) imponen para la realización de tomografía. En este trabajo se aplica la misma estrategia para explorar la aplicación de la nueva técnica a imágenes LV y Lyman- α de Metis.

2. Método

2.1. Tomografía Lyman- α

La intensidad coronal Lyman- α , I [$\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$], puede aproximarse por (Vázquez et al., 2003):

$$I = \frac{h\nu_0}{4\pi} B_{12} \int_{\text{LDV}} dx N_{\text{H}}(x) \Gamma(r(x)) D(v_r(x)), \quad (1)$$

donde x mide la distancia a lo largo de la línea de visión (LDV), h es la constante de Planck, ν_0 es la frecuencia central de la línea Lyman- α , B_{12} [$\text{erg}^{-1} \text{s}^{-1} \text{cm}^2$] es el coeficiente de absorción de Einstein de la transición, N_{H} es la densidad de Hidrógeno neutro, $\Gamma(r) \equiv (1/2) [1 - \sqrt{1 - (R_{\odot}/r)^2}]$ es el factor de dilución geométrico y $D(v_r)$ es el coeficiente de atenuación Doppler, dependiente de la velocidad radial, v_r , del viento solar.

Definiendo $I' \equiv I/(B_{12}h\nu_0/4\pi)$ y $D_{\text{H}} \equiv N_{\text{H}} D(v_r)$ obtenemos:

$$I' = \int_{\text{LDV}} dx \Gamma(r(x)) D_{\text{H}}(x). \quad (2)$$

Discretizando el volumen coronal en una malla computacional esférica, la Ec. (2) permite plantear un problema tomográfico de inversión lineal en donde las intensidades medidas y la geometría de observación son conocidas y la incógnita a resolver es la cantidad D_{H} . Específicamente cada píxel de una imagen Lyman- α provee un valor de I' , mientras que su *header* permite el cálculo del factor puramente geométrico $dx \Gamma(r(x))$ a lo largo de la respectiva LDV. Aplicando técnicas estándar de inversión tomográfica (Vázquez et al., 2022), se determina la distribución 3D de la cantidad D_{H} .

2.2. Reconstrucción de v_r

Utilizando tomografía en LV podemos reconstruir la densidad electrónica (N_e) y obtener la densidad de Hidrógeno neutro aproximando $N_{\text{H}} \approx 0.83 R(T_e) N_e$ (Bemporad et al., 2021), donde se asume una abundancia de Helio de 10%. $R(T_e) \equiv N_{\text{H}}/N_{\text{p}}$ es el cociente entre la densidad de Hidrógeno neutro y ionizado, dependiente de la temperatura electrónica (T_e). Este se puede obtener a partir de la base atómica y modelo de emisividad CHIANTI (Del Zanna et al., 2021).

Con las reconstrucciones 3D de D_{H} y N_{H} en cada celda tomográfica, es posible calcular la distribución 3D del factor de atenuación Doppler

$$D = D_{\text{H}}/N_{\text{H}} \approx D_{\text{H}} / (0.83 R(T_e) N_e). \quad (3)$$

El factor de atenuación Doppler puede escribirse como una integral en frecuencia del perfil de emisión cromosférico por el perfil de absorción del Hidrógeno neutro. Asumiendo una expresión gaussiana para ambos perfiles se puede aproximar (Bemporad et al., 2021)

$$D(v_r) = \frac{I_0 \lambda_0 / \sqrt{\pi}}{\sqrt{\sigma_{\text{disk}}^2 + \sigma_{\text{cor}}^2}} \exp \left[-\frac{v_r^2}{(\sigma_{\text{disk}}^2 + \sigma_{\text{cor}}^2)} \right], \quad (4)$$

donde λ_0 es la longitud de onda central de la línea Lyman- α , I_0 [$\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2} \text{sr}^{-1}$] es la intensidad total del perfil cromosférico, σ_{disk} [km s^{-1}] es su ancho $1/e$ y σ_{cor} [km s^{-1}] es el ancho $1/e$ del perfil de absorción. Asumiendo un ensanchamiento espectral puramente térmico se puede aproximar

$$\sigma_{\text{cor}} = \sqrt{(\cos \beta) V_{\text{th}\parallel}^2 + (\sin \beta V_{\text{th}\perp})^2}, \quad (5)$$

donde $V_{\text{th}\parallel}$ y $V_{\text{th}\perp}$ son la velocidad térmica paralela y perpendicular del Hidrógeno y $\beta \equiv \cos^{-1}(B_r/B)$ es el ángulo entre el campo magnético radial y el campo total.

La Ec. (4) permite despejar v_r como función de D ,

$$v_r = \sqrt{\sigma_{\text{disk}}^2 + \sigma_{\text{cor}}^2} \sqrt{\ln \left(\frac{I_0 \lambda_0 / \sqrt{\pi}}{\sqrt{\sigma_{\text{disk}}^2 + \sigma_{\text{cor}}^2}} \frac{1}{D} \right)}, \quad (6)$$

que da valores reales bajo la condición:

$$D \leq \frac{I_0 \lambda_0 / \sqrt{\pi}}{\sqrt{\sigma_{\text{disk}}^2 + \sigma_{\text{cor}}^2}}. \quad (7)$$

Utilizando la Ec. (6) y la reconstrucción de D se reconstruye la distribución 3D de la componente radial del campo de velocidad del viento solar.

3. Resultados y discusión

Calculamos imágenes sintéticas de Metis/SolO en LV y Lyman- α a partir de una simulación correspondiente a la rotación Carrington (CR) 2082 (correspondiente a mínimo solar), mediante el modelo MHD 3D Alfvén Wave Solar Model (AWSOM; van der Holst et al. 2014). Ambas series temporales se simulan desde la posición de perihelio de SolO, para el cual el campo de visión de Metis resulta ser $2.3 - 3.2 R_{\odot}$ (Vázquez et al., 2022).

Las imágenes en LV se utilizaron para la reconstrucción tomográfica de la densidad electrónica, como se muestra en la Fig. 8 de Vázquez et al. (2022). Las imágenes Ly- α se utilizaron para la reconstrucción tomográfica de D_{H} . La Fig. 1 muestra una comparación de la cantidad D_{H} de la simulación utilizada para hacer las imágenes sintéticas y su reconstrucción tomográfica.

Combinando la reconstrucción tomográfica de D_{H} y N_e se determina la distribución 3D de la atenuación Doppler D a partir de la Ec. (4), y de la componente radial de la velocidad del viento v_r a partir de la Ec. (6). La Fig. 2 muestra una comparación de v_r entre la simulación y su reconstrucción. Las celdas en color negro representan regiones no reconstruidas donde no se cumple la condición dada por la Ec. (7). Esto ocurre en

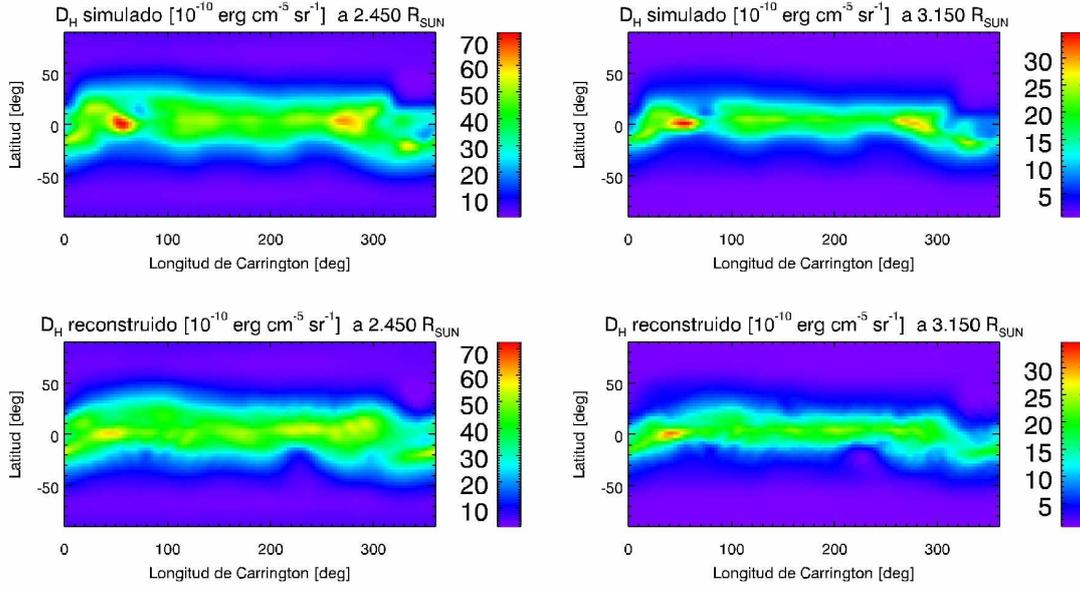


Figura 1: Comparación de D_H de la simulación del período CR 2082 (*paneles superiores*) y su reconstrucción tomográfica (*paneles inferiores*). Se muestran mapas a las alturas de $2.45 R_{\odot}$ (*izquierda*) y $3.15 R_{\odot}$ (*derecha*).

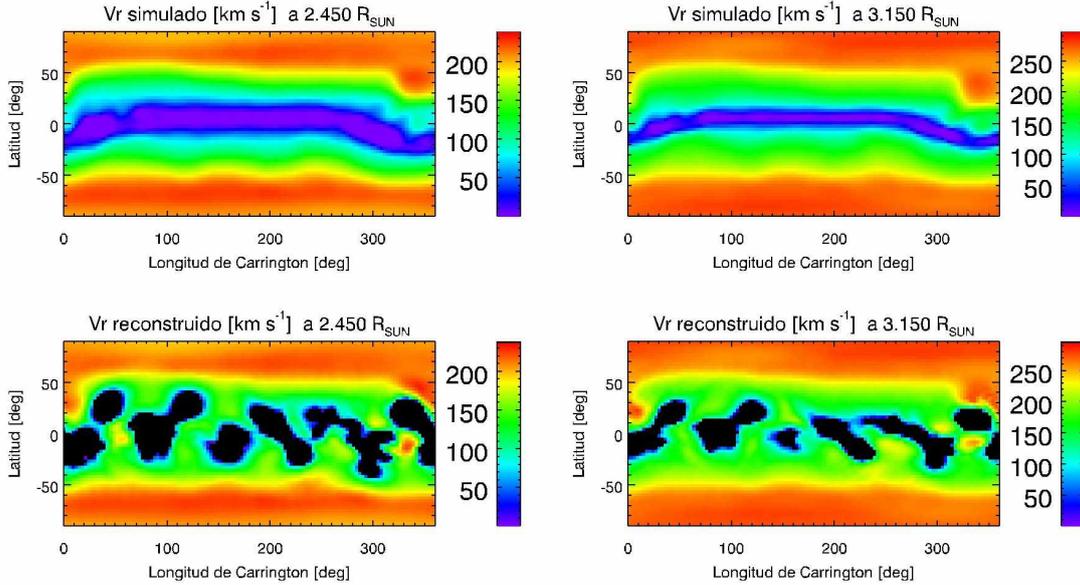


Figura 2: Comparación de v_r entre la simulación (*paneles superiores*) y su reconstrucción combinando tomografía VL y Lyman- α (*paneles inferiores*). Se muestran mapas a las alturas de $2.45 R_{\odot}$ (*izquierda*) y $3.15 R_{\odot}$ (*derecha*). Las celdas negras indican regiones no reconstruidas, donde no se cumple la condición dada por la Ec. (7).

celdas donde el valor del factor de atenuación Doppler D reconstruido sobreestima el valor simulado, en zonas de velocidad baja. A pesar de que algunas regiones no pueden reconstruirse, es posible reconstruir la transición entre las componentes lenta y rápida del viento solar.

En un próximo artículo *in extenso* incluiremos experimentos correspondientes a otros segmentos orbitales de SOLO y a condiciones coronales de máximo solar.

Referencias

- Bemporad A., et al., 2021, A&A, 654, A58
- Del Zanna G., et al., 2021, ApJ, 909, 38
- Frazin R.A., Janzen P., 2002, ApJ, 570, 408
- van der Holst B., et al., 2014, ApJ, 782, 81
- Vázquez A.M., 2016, Adv. Space Res., 57, 1286
- Vázquez A.M., van Ballegoijen A.A., Raymond J.C., 2003, ApJ, 598, 1361
- Vázquez A.M., et al., 2022, Solar Phys., 297, 120