

El ciclo de actividad coronal y la génesis del viento solar

Lic. Diego G. Lloveras

Director: Dr. Alberto M. Vásquez

Consejera de Estudios: Dra. Cristina H. Mandrini

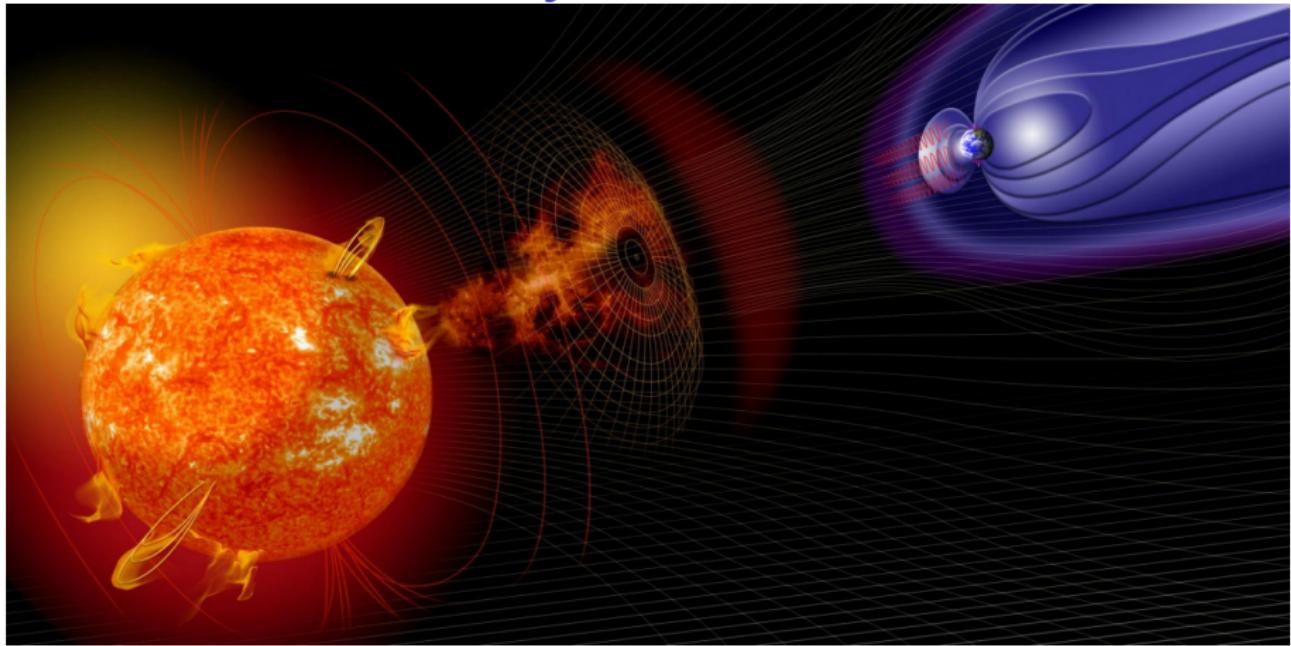
Lugar de trabajo: Instituto de Astronomía y Física del Espacio
(UBA-CONICET)



Estructura de la charla

- Introducción:
 - Corona solar – Ciclo de actividad – Emisividad EUV/LB.
- Instrumentos y Metodología:
 - Tomografía Solar Rotacional (LB/EUV→DEMT)
 - Modelo magnético (PFSS)
 - Trazado de líneas magnéticas.
- Resultados:
 - Comparación de los tres últimos mínimos de actividad solar (DEMT).
 - Modelo MHD 3D (AWSoM)
 - Comparación AWSoM vs DEMT
 - Comparación AWSoM vs tomografía LB
 - Viento solar
 - Correlación de propiedades terminales con DEMT
- Conclusiones generales.

Corona Solar y la relación Sol-Tierra

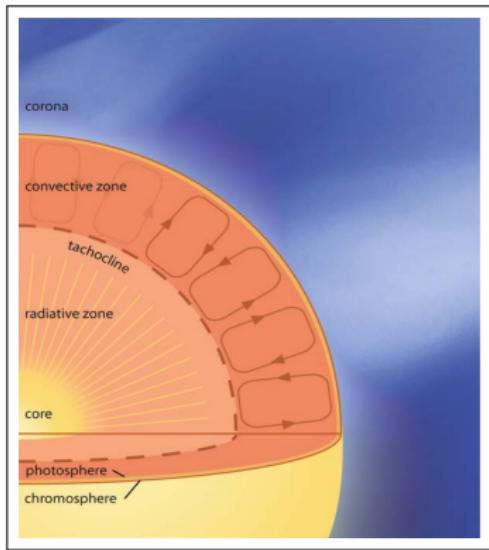


El estudio observational y modelado de la atmósfera solar resultan de gran relevancia para la comprensión de la relación Sol-Tierra, siendo esta la región donde el plasma se calienta, el viento solar es acelerado y tienen lugar eventos impulsivos como las erupciones solares y eyeciones coronales de masa.

Estructura solar

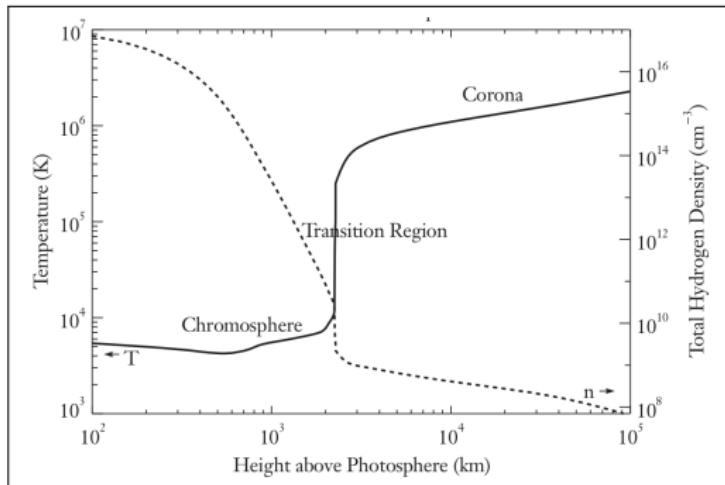
Interior solar

- Núcleo ($r < 0.25R_{\odot}$, $T \approx 15\text{MK}$)
- Región Radiativa ($0.25R_{\odot} < r < 0.7R_{\odot}$)
- Región Convectiva

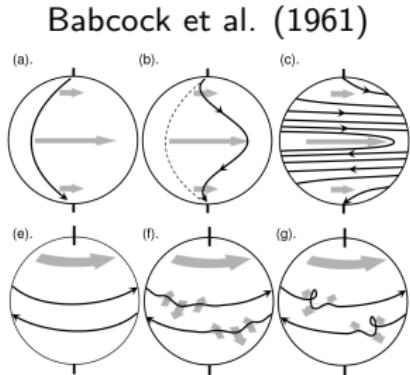


Atmósfera Solar

- Fotosfera ($T \approx 6000\text{K}$, $N \approx 10^{17}\text{cm}^{-3}$)
- Cromosfera ($T > 6000\text{K}$, $N \approx 10^{12}\text{cm}^{-3}$)
- R. Trans. ($T \sim 10^{4-6}\text{K}$, $N \sim 10^{11-9}\text{cm}^{-3}$)
- Corona Solar ($T \sim 1\text{MK}$, $N \sim 10^{8-9}\text{cm}^{-3}$)



Ciclo de Actividad Solar y manifestación coronal

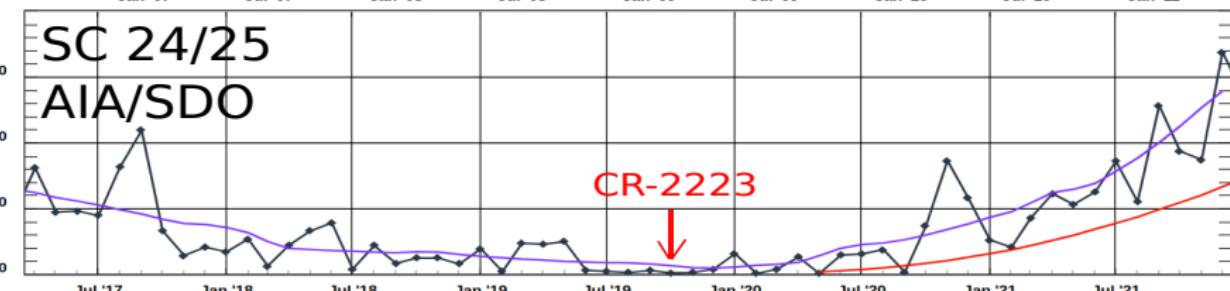
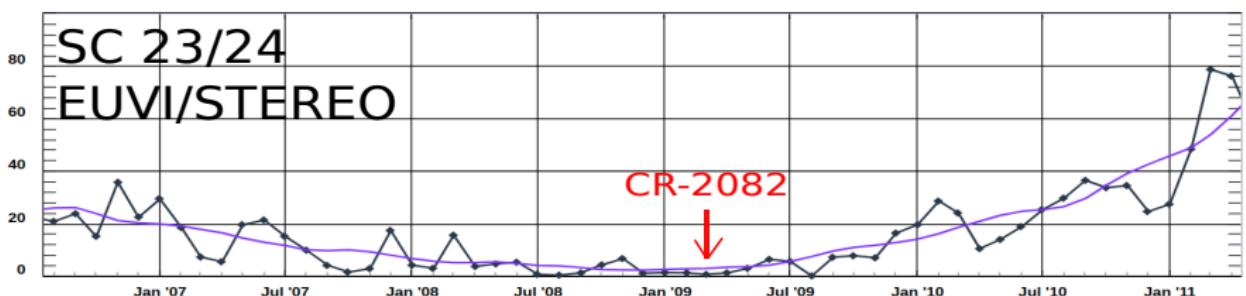
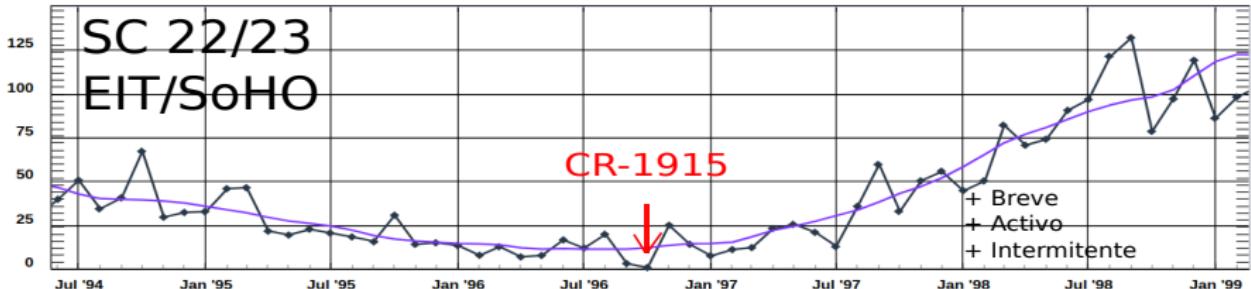


- Dínamo solar → dinámica Solar.
- Mínimo: Dipolo, pocas manchas y ARs.
- Máximo: Multipolo, muchas manchas y ARs.
- Ciclo de 11 años.



Space weather prediction center (NOAA)

Rotaciones analizadas



Radiación coronal

La radiación proveniente de la corona es causada por diversos fenómenos

- Corona-K: Scattering de Thomson de luz blanca, observable con coronógrafos.
- Corona-E: Decaimientos electrónicos en iones que emiten en UV, EUV y X.

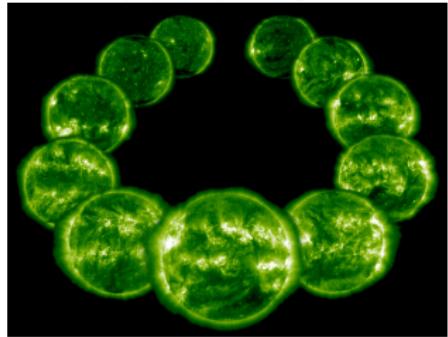
Imágenes EUV de un ciclo solar completo. Imágenes tomadas en la banda 195Å del instrumento EIT/SoHO.

- La fase de máximo muestra gran cantidad de ARs y estas aparecen en dos bandas de latitudes bien definidas.
- La fase de mínimo muestra una marcada disminución de ARs, caracterizando la corona quiescente.

Mínimo en luz blanca



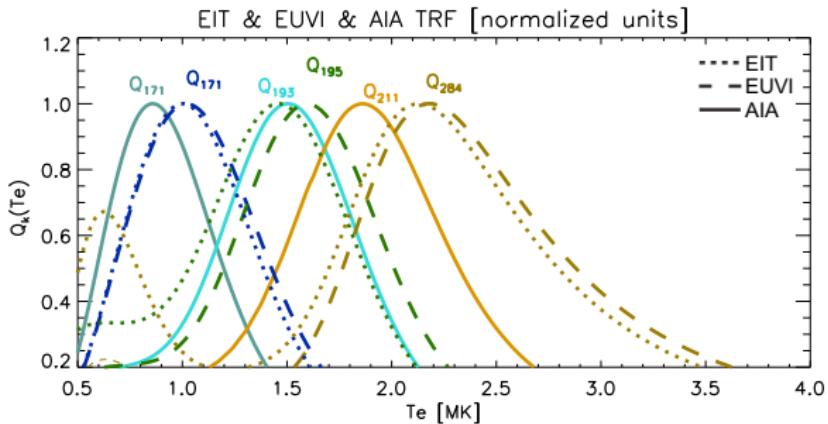
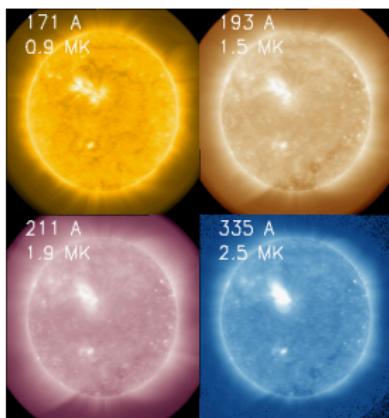
Ciclo en EUV



Temperaturas características de la corona solar

Los telescopios espaciales tienen detectores EUV, cuyos filtros seleccionan principalmente líneas de Fe ($T_e \sim 0.5 - 2.5$ MK).

$$Q_k(T) \equiv \int d\lambda \phi_k(\lambda) \eta(N_{e0}, a_0, T; \lambda) / N_{e0}^2$$



- ϕ_k : Pasabandas k
- $\eta(\lambda, T)$: Modelo de Emisividad CHIANTI.

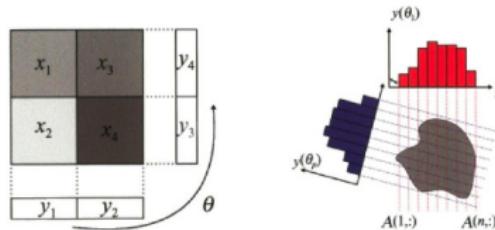
Lloveras et al. (2018)

¿Qué es la Tomografía Solar?

Incógnita: Distribución en 3D de una determinada cantidad x_i (por ejemplo, N_e) para cada volumen de celda i dentro de un objeto (p. ej., la corona solar), en régimen óptico delgado (p. ej., luz blanca coronal)

Dato:

- Vector de intensidad y_j : medición en cada pixel j de cada imagen de una serie temporal proporcionando diferentes ángulos de visión.
- Matriz de proyección A_{ji} : depende de la **geometría** (p. ej., rotación solar, órbita del telescopio) y el **proceso físico** involucrado (p. ej., Thomson scatt.).



$$\begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{pmatrix} \iff \mathbf{y} = \mathbf{Ax}$$

- **Tomografía rotacional solar:** la rotación solar proporciona los ángulos de visión necesarios.

Tomografía Solar Rotacional

La señal recibida en el j -ésimo pixel de la k -ésima banda viene dado por

$$Y_{k,j} = \int_{LDV} dI A(r_j(I)) X(k, r_j(I)) \rightarrow Y_k = A_k \cdot X_k$$

- Luz Blanca (C2-SRT)

$$X(k, r_j(I)) = N_e(r_j(I))$$

$A(r_j(I))$ = factor de scattering Thomson

- EUV (DEMT)

$$X(k, r_j(I)) = FBE_K(r_j(I))$$

$$A(r_j(I)) = 1$$

donde $FBE_K(r) \equiv \int_0^\infty d\lambda \phi_k(\lambda) \eta(r, \lambda)$

Se discretiza el volumen, $2.5 - 8.5 R_\odot$.

Celdas: $I = 60 \times 60 \times 120 \sim 4 \times 10^5$

Tamaño típico: $0.1 R_\odot \times 3^\circ \times 3^\circ$

Pixels: $J = 512^2 \times 14 \times 0.7 \sim 2.5 \times 10^6$

Se discretiza el volumen, $1.0 - 1.3 R_\odot$.

Celdas: $I = 30 \times 90 \times 180 \sim 4 \times 10^5$

Tamaño típico: $0.01 R_\odot \times 2^\circ \times 2^\circ$

Pixels: $J = 512^2 \times 3 \times 27 \sim 2 \times 10^7$

Y_k : Vector de J elementos, los pixels de todas las imágenes.

A_k : Matriz de $J \times I$ elementos, puramente geométricos.

X_k : Vector de I elementos.

Problema de optimización multidimensional. Función objetivo:

$$f(X_k) = \|Y_k - A_k X_k\|^2 + p \|R X_k\|^2$$

Imágenes Dato

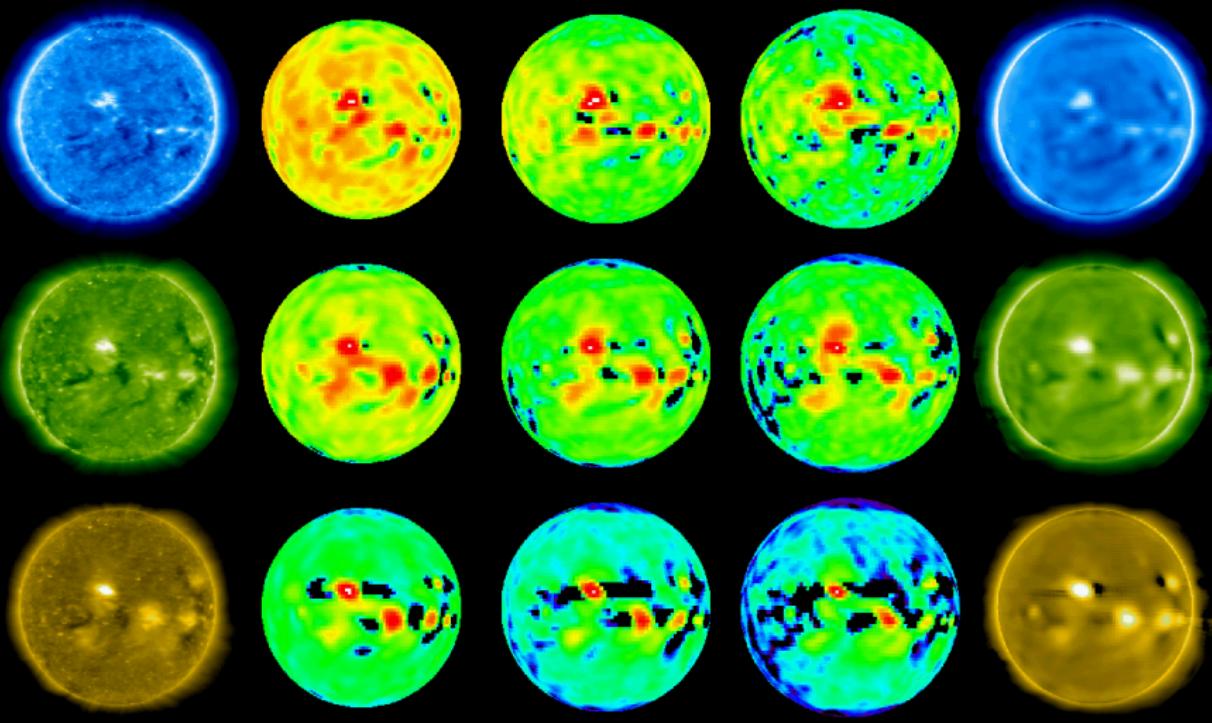
→

3D FBE

→

Imágenes Sintéticas

171 Å



$1.035 R_{\odot}$

$1.085 R_{\odot}$

$1.135 R_{\odot}$

Vásquez et al. (2009)

Medida de Emisión Diferencial local (LDEM)

- En cada celda tomográfica i se conocen K FBEs.
- Utilizando las Respuestas Térmicas $Q_k(T)$
- Las FBEs pueden reescribirse como: $FBE_{k,i} = \int dT Q_k(T) LDEM_i(T)$.
- Donde la $LDEM_i(T)$ [$\text{cm}^{-6}\text{K}^{-1}$] para cada celda i se define tal que:

$$N_{m,i}^2 = \langle N_e^2 \rangle_i = \int dT LDEM_i(T)$$

$$T_{m,i} = \langle T_e \rangle_i = \frac{1}{\langle N_e^2 \rangle_i} \int dT T LDEM_i(T)$$

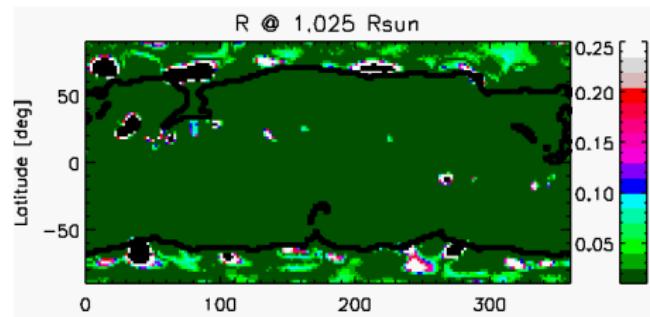
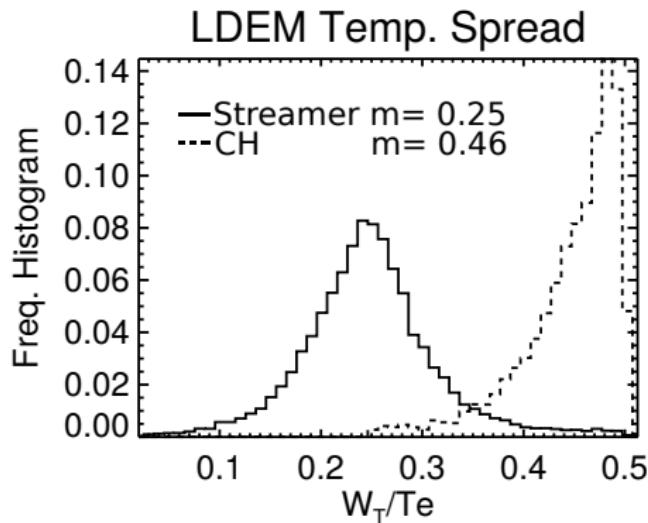
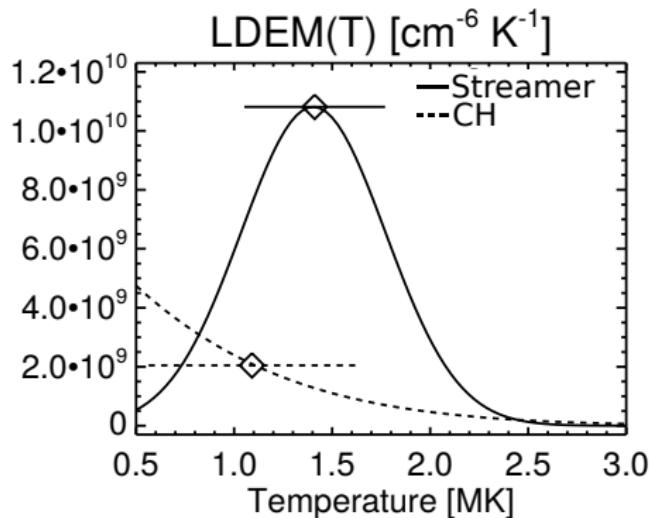
$$W_{T,i}^2 = \frac{1}{\langle N_e^2 \rangle_i} \int_{T_{min}}^{T_{max}} dT LDEM_i(T) (T - \langle T_e \rangle_i)^2$$

- Se modela la LDEM: $LDEM_i(T) = \mathcal{N}(T, \lambda_i = [A, T_0, \sigma_T])$ Nuevo et al. (2015)
- La siguiente función objetivo es minimizada en cada celda:

$$\Phi(\lambda_i) = \sum_k |FBE_{k,i} - \int dT Q_k(T) \mathcal{N}(T, \lambda_i)|^2.$$

- Grado de éxito $R_i \equiv (1/K) \sum_k |1 - FBE_{k,i} / \int dT Q_k(T) \mathcal{N}(T, \lambda_i)|$

LDEM características

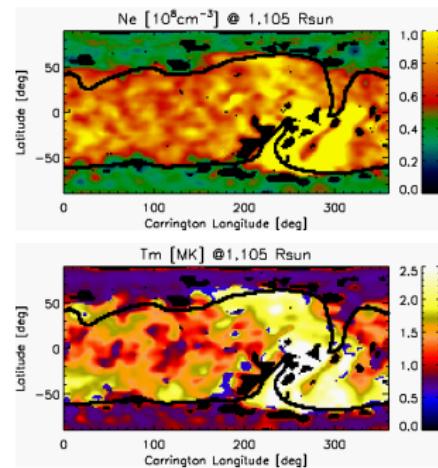


Lloveras et al. (2022)

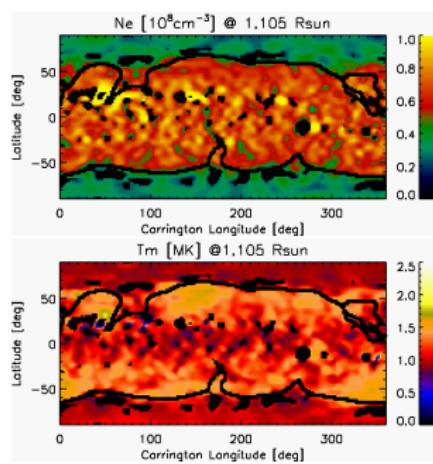
$$R \sim 1\% \text{ (Streamer)} \text{ y } \sim 10\% \text{ (CHs)}$$

Reconstrucción DEMT: densidad y temperatura

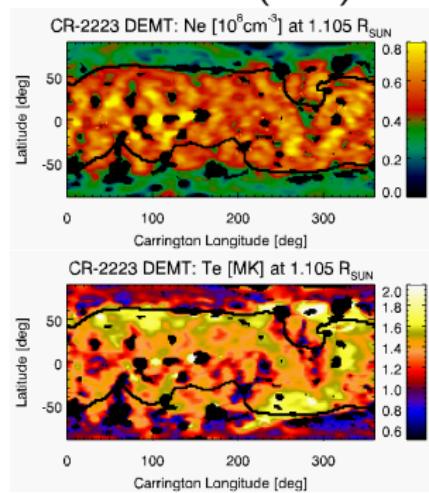
CR-1915 (EIT)



CR-2081 (EUVI)



CR-2223 (AIA)

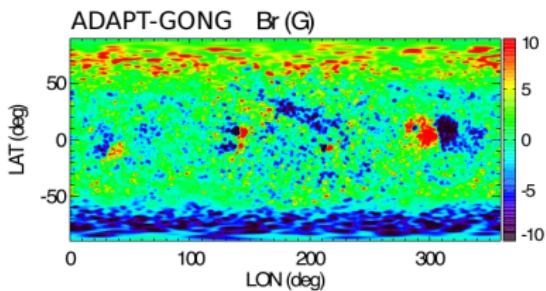
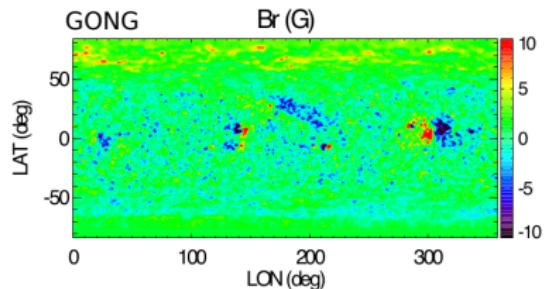


Lloveras et al. (2017,2020,2022)

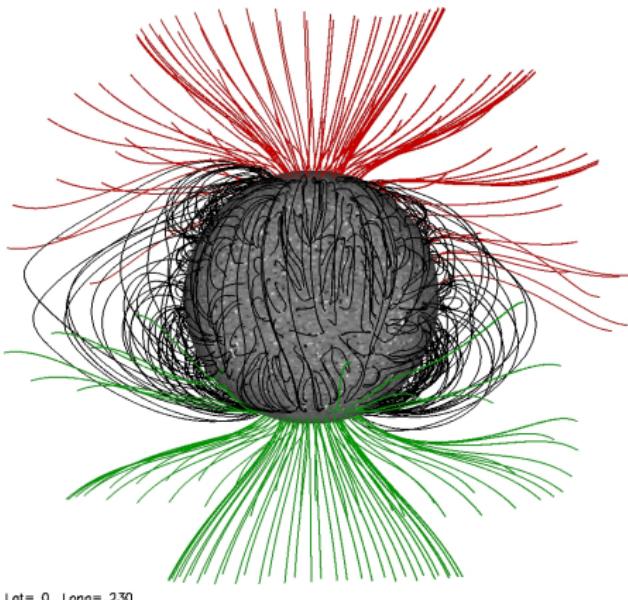
- Simetría acimutal
- Streamer(CHs) → mayor(menor) densidad y temperatura.
- Gradientes máximos en frontera A/C

Visualización 3D del modelado magnético PFSS

Magnetograma sinóptico



Modelo potencial

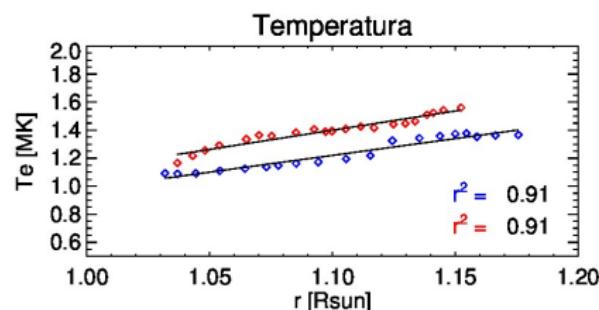
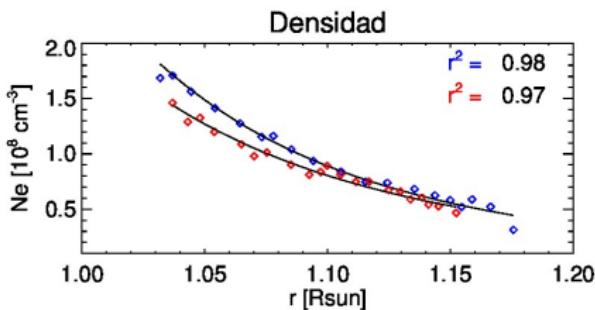
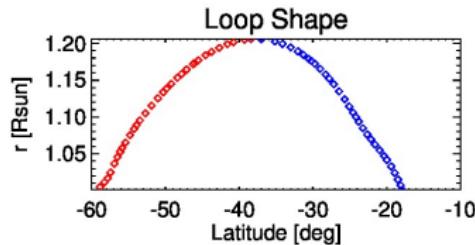


- ADAPT: modelo de transporte de flujo magnético.

$$\nabla \cdot B = \nabla \cdot (\nabla \Phi) = 0 \quad \begin{cases} \frac{\partial \Phi}{\partial r}(r = 1R_{\odot}, \theta, \phi) = M(\theta, \phi) \\ \Phi(r = 2.5R_{\odot}, \theta, \phi) = 0 \end{cases}$$

Trazado y ajuste en líneas magnéticas

- Reconstrucción geométrica de líneas
- Puntos de arranque cada $2^\circ \times 2^\circ \times 10$ alturas
- Trazado de DEMT a lo largo de líneas magnéticas
- Se realizan ajustes de densidad y temperatura a lo largo de las líneas



$$N_e = N_0 \exp[-(h/\lambda_N)/(r/R_\odot)]$$

$$T_m = ar + b$$

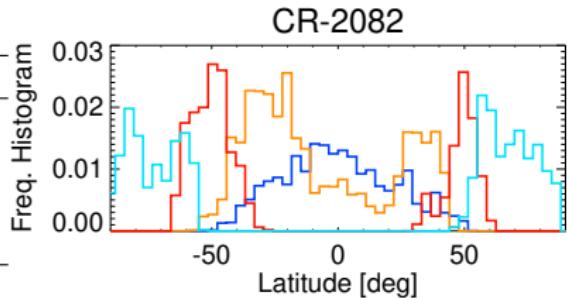
UP ($a \equiv dT_e/dr > 0$)
DOWN ($a \equiv dT_e/dr < 0$)

Criterio de selección de líneas

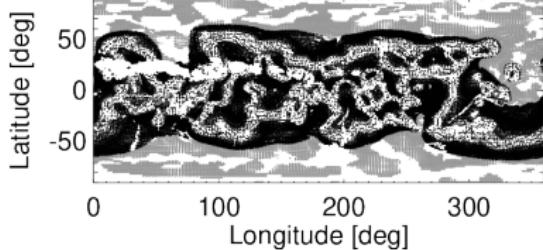
- Atravesar al menos cinco celdas de la grilla tomográficas con datos reconstruidos y debe haber al menos un dato en cada tercio del rango de alturas que abarca la línea, a fin de garantizar un muestreo de alturas completo.
- La correlación entre la temperatura DEMT y la altura debe cumplir $|\rho(T, r)| > 0.5$.
 - UP $\rho(T, r) > 0.5$
 - DOWN $\rho(T, r) < 0.5$
- Test chi-cuadrado para evaluar la bondad del ajuste, seleccionando aquellas líneas donde el nivel de confianza de los ajustes son superior al 90%.

Regiones coronales analizadas

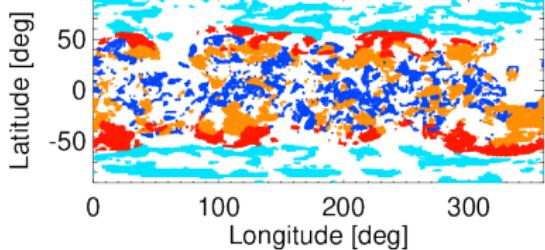
Línea	Característica	Latitud Basal
0	Cerrada Chica Down	$ \theta_0 < 50^\circ$
I	Cerrada Chica Up	$ \theta_0 < 50^\circ$
II	Cerrada Grande Up	$ \theta_0 > 40^\circ$
III	Abierta Grande Up	$ \theta_0 > 60^\circ$



CR-2082 Physical location of leg



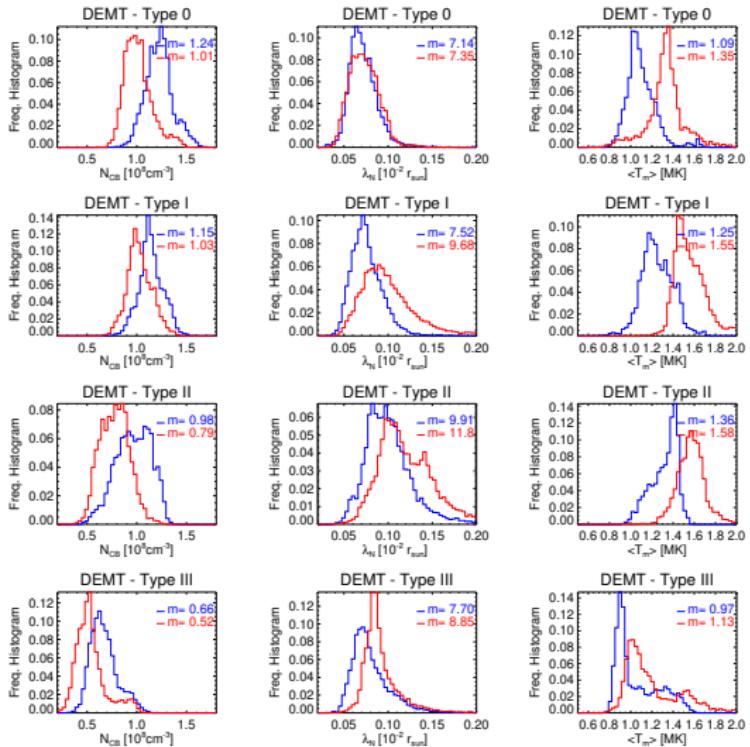
CR-2082 Physical location of leg



Comparación estadística por regiones

CR-2082
CR-2208

- Streamer ($T_0 \rightarrow T_{II}$):
 N_{CB} decrece; λ_N y $\langle T_m \rangle$ crece.
- CHs (T_{III}):
 N_{CB} , λ_N y $\langle T_m \rangle$ decrecen.



Barras de Error en DEMT

- Determinación del nivel de regularización de la inversión tomográfica de las emisividades de cada banda.
- Incerteza en la calibración radiométrica de las emisividades de cada banda (debido a factores instrumentales):
 - Absoluta → común a las tres bandas. Implica cambio de amplitud en la LDEM → solo modifica N_e
 - Relativa → referido diferencia de intensidad medida por las 3 bandas en un pixel y modifica cada banda por separado.
- Propagación de errores: $\Delta T_m \lesssim 5\%$ y $\Delta N_m \lesssim 10\%$

Conclusiones DEMT

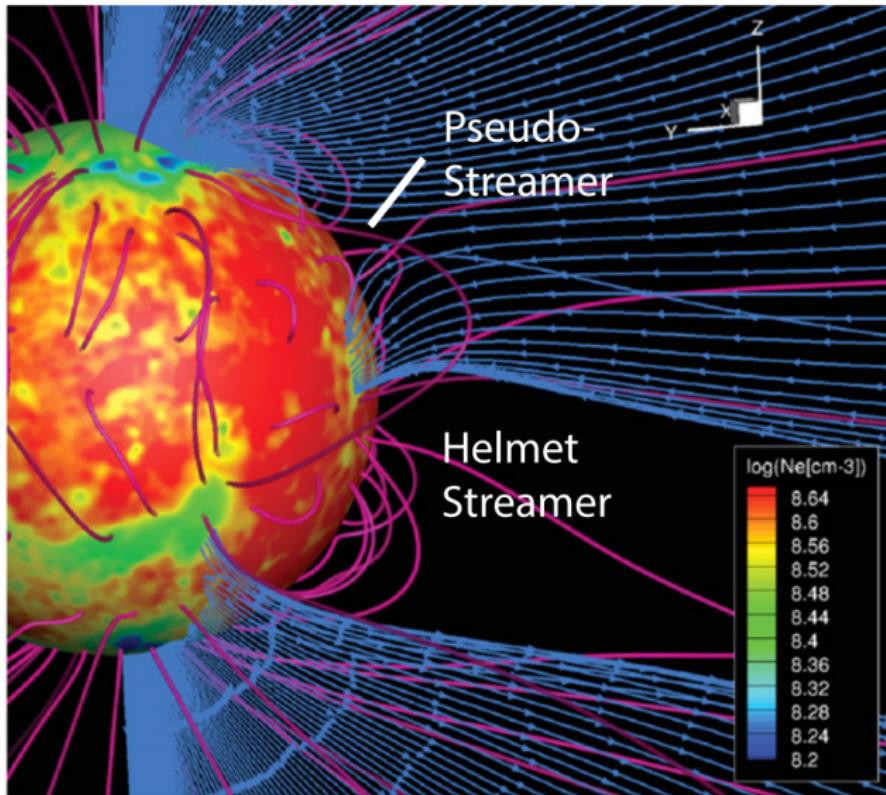
▷ Características generales:

- Los Streamers exhiben $N_{CB} \approx 1.0 - 1.2 \times 10^8 \text{ cm}^{-3}$, los CHs se caracterizan por una densidad del orden de la mitad.
- $\lambda_N \approx 7 - 11 \times 10^{-2} R_\odot$, con los valores menores correspondiendo a las latitudes más bajas del streamer y a los CHs.
- Los streamers se caracterizan por $\langle T_m \rangle \approx 1.2 - 1.6 \text{ MK}$ (con las temperaturas menores correspondiendo a las latitudes más bajas) mientras que los CHs exhiben $T_m \lesssim 1 \text{ MK}$.
- Hallamos la presencia de loops down en los 3 mínimos. Nuevo et al. (2013); Schiff and Cranmer (2016). Presenta condicionamiento al modelo de calentamiento coronal.

▷ Comparación de los últimos 3 mínimos:

- $\langle T_m^{SC\ 22/23} \rangle > \langle T_m^{SC\ 23/24} \rangle \lesssim \langle T_m^{SC\ 24/25} \rangle$
- $N_{CB}^{SC\ 22/23} > N_{CB}^{SC\ 23/24} > N_{CB}^{SC\ 24/25}$
- SC 22/23 fue el mas breve, activo e intermitente en su nivel de actividad, seguido por SC 23/24 y SC 24/25.

Space Weather Modeling Framework



- Desarrollado en CLASP de la Univ. de Michigan
- Modela sist. Sol-Hel-MI
- Vasto rango de escalas espacio-temporales
- Código Modular
- AWSOM: SC y IH

Modelo MHD de la corona global (AWSoM)

- Cond. de contorno ADAPT-GONG → PFSS
- Región de Transición extendida
- Conserv. masa, inducción, divergencia nula
- Conserv. del momento:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{v}) + \nabla \cdot \left[\rho \vec{v} \vec{v} + (p_i + p_e + \textcolor{blue}{p_A} + \frac{1}{2\mu_0} B^2) \vec{I} - \frac{\vec{B}\vec{B}}{\mu_0} \right] = -\rho \frac{GM_\odot}{r^3} \vec{r}$$

- Ecuaciones de energía:

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{1}{2} \rho v^2 + \frac{p_i}{\gamma-1} + \frac{1}{2} B^2 \right) + \nabla \cdot \left[\left(\frac{1}{2} \rho v^2 + \frac{\gamma p_i}{\gamma-1} + B^2 \right) \vec{v} - \vec{v} \cdot \vec{B} \vec{B} \right] = \frac{N_i k_b}{\tau_{ei}} (T_e - T_i) + \textcolor{red}{Q_i}$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p_e}{\gamma-1} \right) + \nabla \cdot \left(\frac{\gamma p_e}{\gamma-1} \vec{v} \right) + \nabla \cdot \left(\textcolor{blue}{p_A} \vec{v} \right) = -\nabla \cdot \vec{q}_e + \frac{N_i k_b}{\tau_{ei}} (T_i - T_e) - Q_{rad} + \textcolor{red}{Q_e}$$

- Densidad de energía de ondas de Alfvén:

$$\frac{\partial w_\pm}{\partial t} + \nabla \cdot [(v \pm \textcolor{blue}{V}_A) w_\pm] = -\frac{w_\pm}{2} (\nabla \cdot v) - \Gamma_\pm w_\pm \mp R \sqrt{w_- w_+}$$

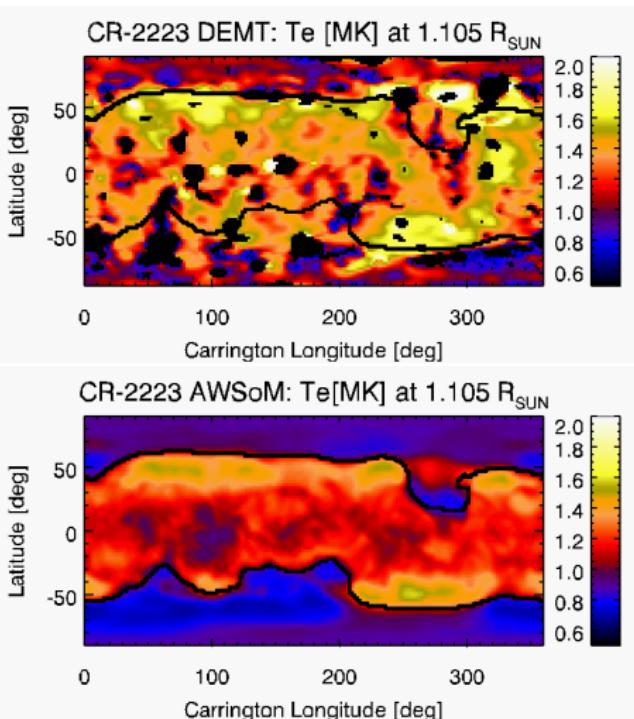
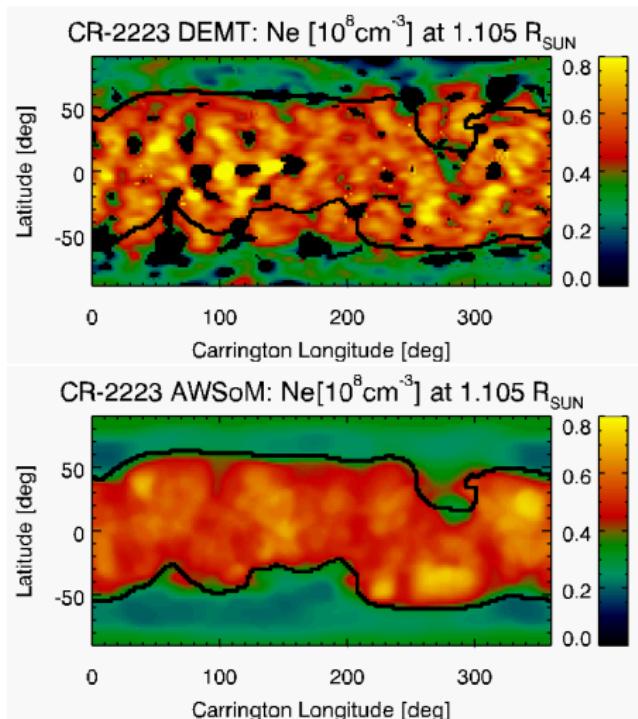
$$\Gamma_\pm = \frac{2}{L} \sqrt{\frac{w_\mp}{\rho}} \quad \text{Dmitruk et. al (2002)} \quad \textcolor{red}{Q_i} + \textcolor{red}{Q_e} = \Gamma_+ w_+ + \Gamma_- w_- \quad \textcolor{blue}{p_A} = (w_+ + w_-)/2$$

van der Holst et al. (2014)

Sachdeva et al. (2019,2021); Lloveras et al. (2022)

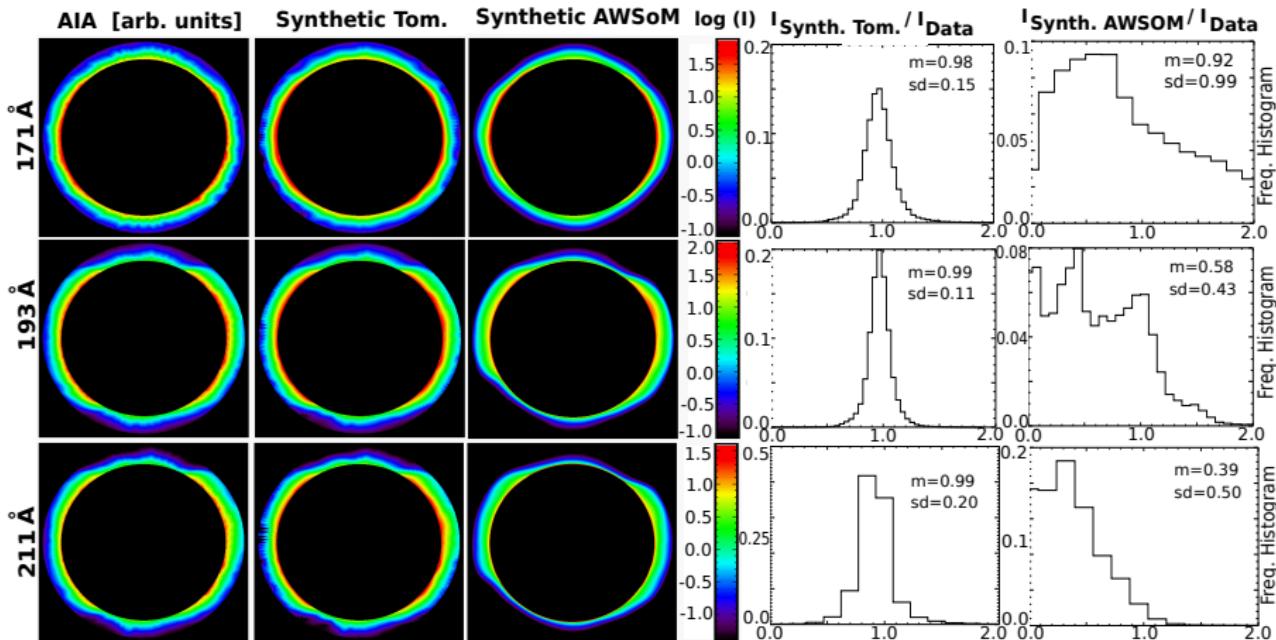
DEMT vs. AWSOM

- Objetivo: Validar la capacidad del modelo en reproducir las reconstrucciones.



- En general hay buen acuerdo en magnitud y morfología de estructuras.
- Diferencia en HS.

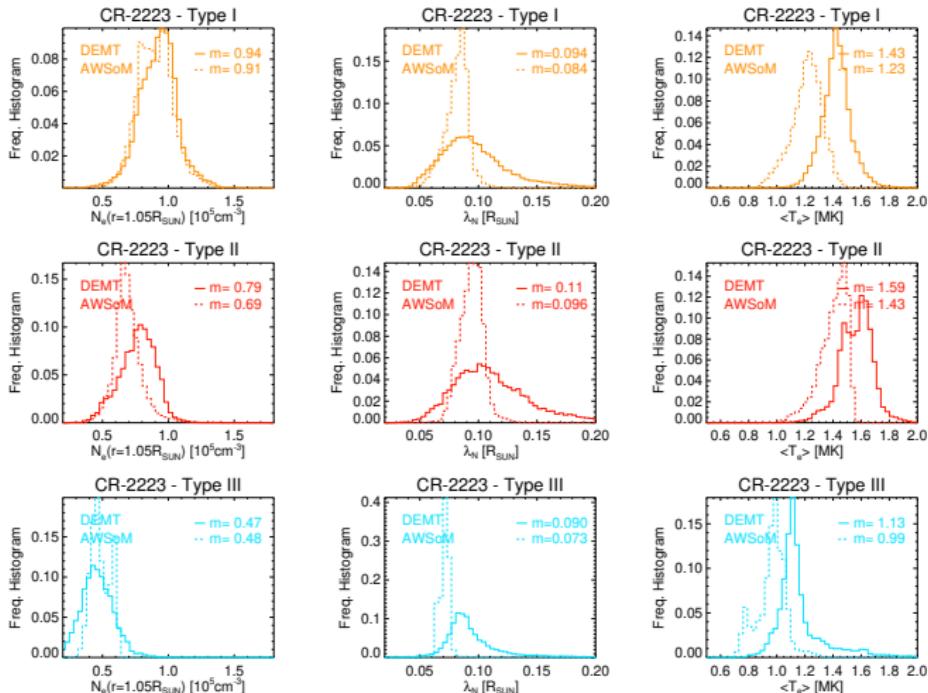
DEMT vs AWSOM: Imágenes sintéticas



$$I_{Synt} \sim \int_{LDV} dI N_e^2 Q_k$$

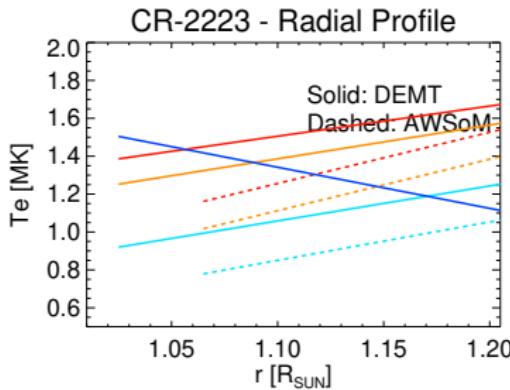
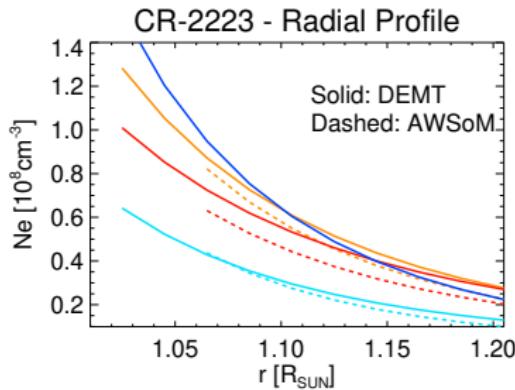
- El análisis sugiere que la discrepancia es consecuencia del magnetograma.
⇒ filtramos líneas abiertas de alta N_e .

DEMT vs AWSoM: Comparación por regiones



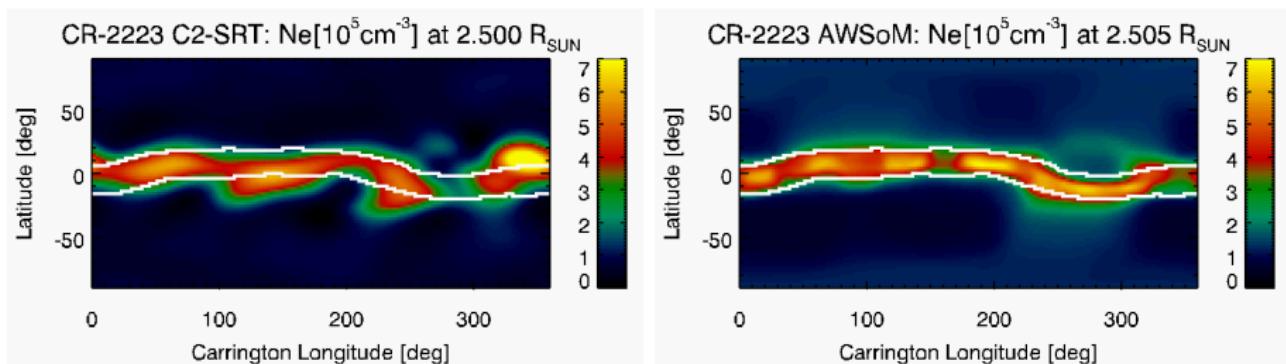
- Streamer (TI → TII): N_{CB} decrece; λ_N y $\langle T_m \rangle$ crece.
- CHs (T III): N_{CB} , λ_N y $\langle T_m \rangle$ decrecen.
- AWSoM no es capaz de modelar loops down.

Diferencias DEMT - AWSOM

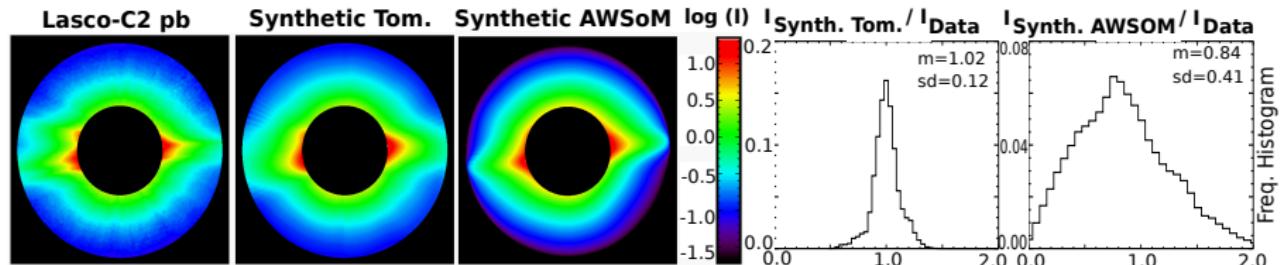


- AWSOM reproduce las densidades basales DEMT con un acuerdo $\lesssim 10\%$.
- La λ_N y temperatura simuladas son sistemáticamente 5 – 20% menores.
- Diferencias \gtrsim que las barras de error de DEMT.

Tomografía LB (C2-SRT) vs. AWSOM



- Buena consistencia general en forma y tamaño de streamer y CHs.



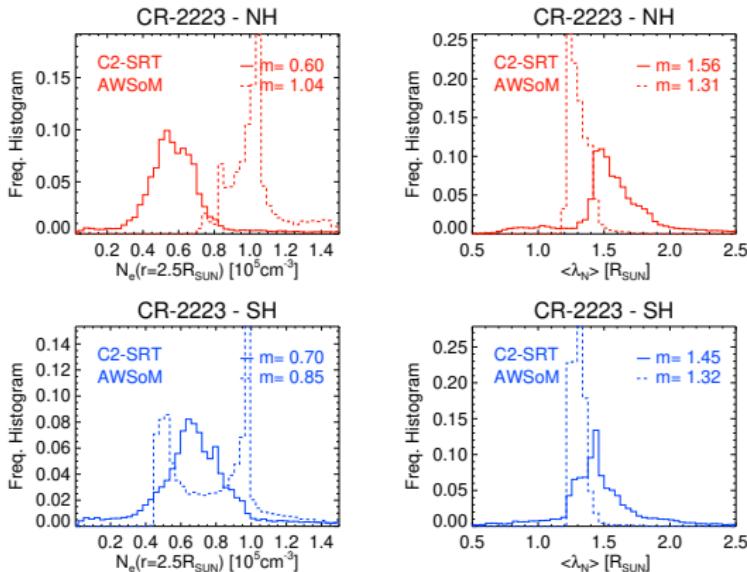
$$I_{\text{Synt}} \sim \int_{LDV} dI N_e$$

Ajuste densidad electrónica

- Rango de alturas grandes → ley de potencia.

$$N_e^{(\text{C2-SRT})}(r) = N_0 \left(r/2.5 R_\odot \right)^{-p} \rightarrow \langle \lambda_N \rangle \equiv \left\langle \left| \frac{1}{N_e(r)} \frac{dN_e}{dr}(r) \right|^{-1} \right\rangle = \frac{\langle r \rangle}{p} = \frac{4.25 R_\odot}{p}$$

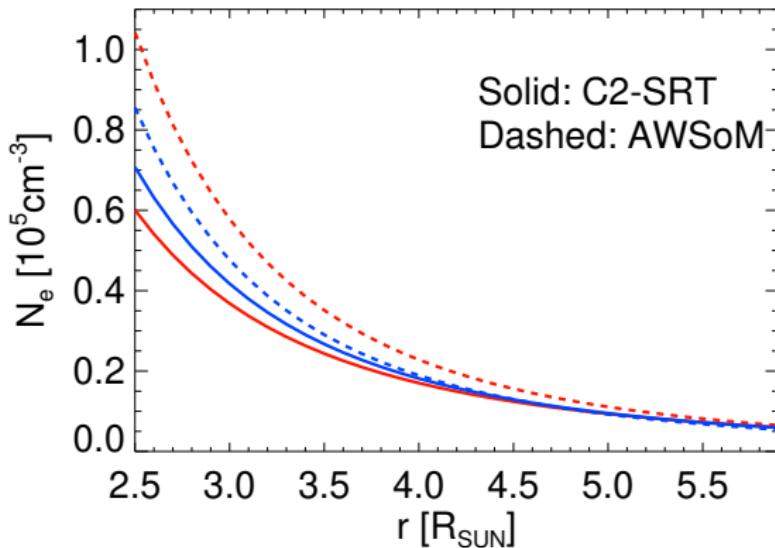
- Seleccionamos líneas abiertas y separamos ambos hemisferios.



- Errores: $\Delta N_m \approx 20\%$ y $\Delta \langle \lambda_n \rangle \approx 15\%$

C2-SRT vs AWSOM: Comparación estadística

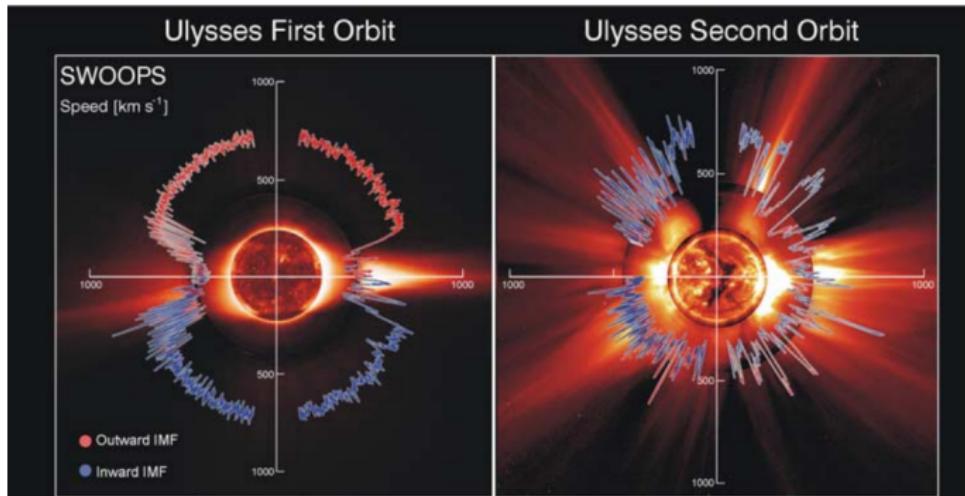
CR-2223 - Radial Profile



- $N_e(r = 2.5 R_{\odot}) \approx 0.6 - 0.7 \times 10^5 \text{ cm}^{-3}$
- $\lambda_N \approx 1.4 - 1.6 R_{\odot} \rightarrow \langle p \rangle \approx 2.8 - 3.3$ (consistente con otros estudios)
- AWSOM sobreestima densidad basal en hasta 75%
 - aceleración del viento es gradual y extendida

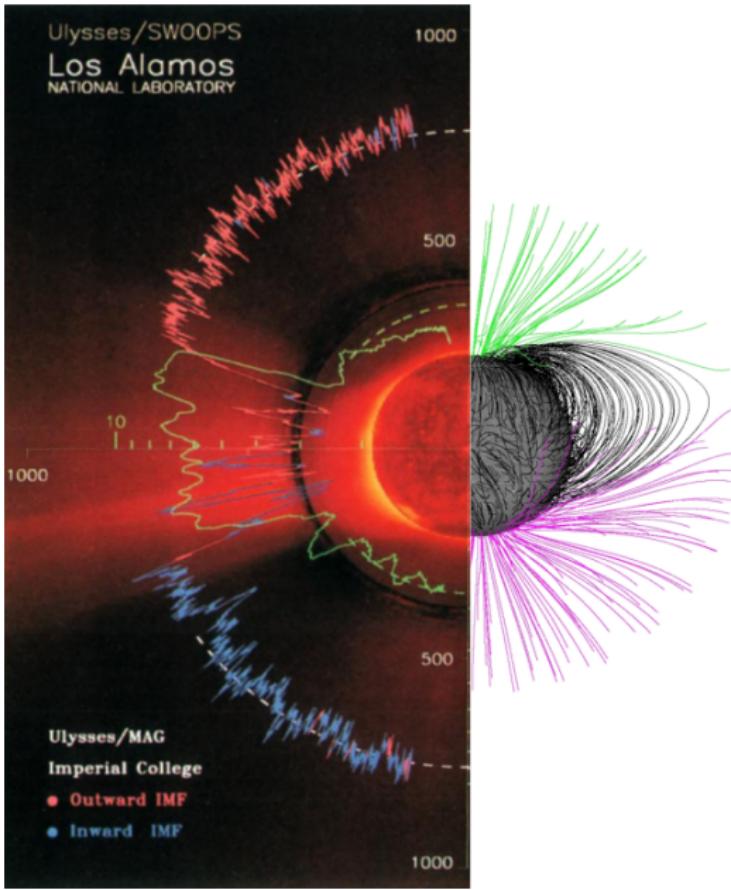
Características del Viento Solar

- La corona se expande de forma continua al medio interplanetario dando lugar al VS.
- Dos componentes: rápida ($> 500 \text{ km s}^{-1}$) y lenta ($< 400 \text{ km s}^{-1}$).
- VSR origina en los CH.
- Origen y formación VSL tema abierto.



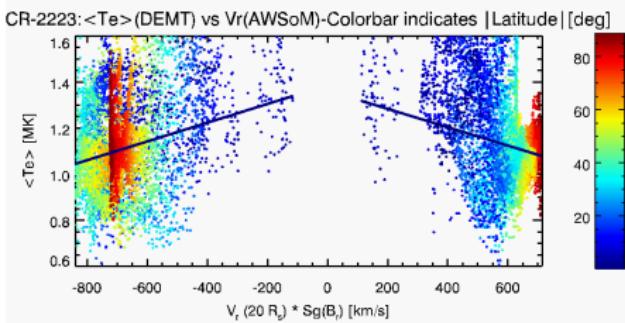
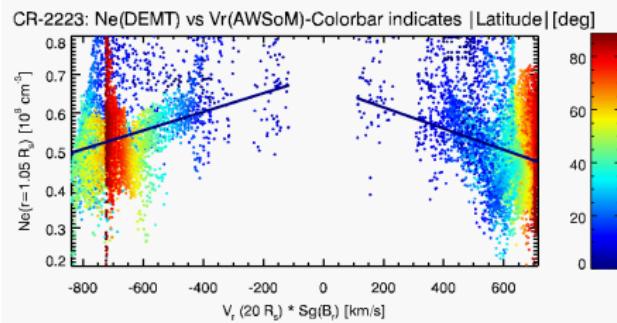
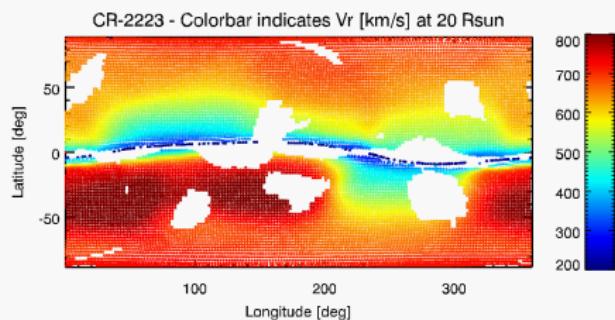
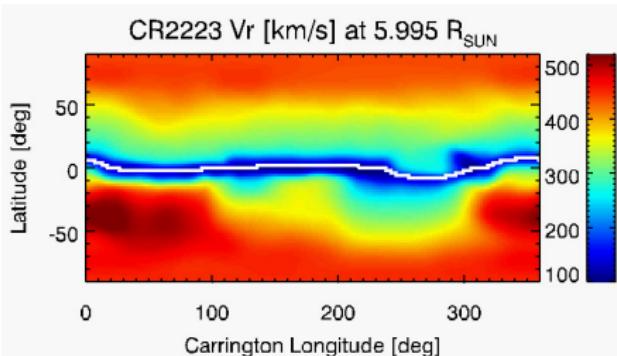
McComas et al. (2003)

- Objetivo: Determinar N_m y T_m en la región fuente del viento.



- El plasma fluye por las líneas abiertas
- Líneas abiertas de alta latitud presentan régimen rápido y de baja densidad.
- Líneas abiertas de baja latitud presentan régimen lento y de alta densidad.

N_e y T_e en la región fuente del viento



- Anticorrelación entre velocidad terminal del modelo y la densidad y temperatura DEMT.
- Consistente con Oran et al. (2015). Sub clase de VSL estable y altamente ionizado que se origina en CHBs y tiene asociado N_e y T_e altas, que favorecen la ionización.
- Dispersion ~ 20 – 40% consistente con WT CHs.

Conclusiones generales

- Caracterizamos la estructura termodinámica de la corona a lo largo de los últimos 3 mínimos de actividad solar. Hallamos que es independiente del nivel de actividad del SC que los precede. Aunque sin embargo parecen depender del nivel de actividad local.
- Hallamos la presencia de arcos down en los tres mínimos.
- Por primera vez aplicamos simultáneamente la técnica tomográfica utilizando imágenes EUV y LB. Esto constituye una valiosa herramienta de condicionamiento para la validación y el desarrollo de modelos MHD 3D que tengan como objetivo la predicción meteorológica espacial.
- Estudiamos la relación entre el campo de velocidad terminal del viento y la densidad y temperatura en su región fuente.

Muchas Gracias



