

Synthesizing the EUV output radiation from 3D numerical boxes

Andrés García-Serra Romero¹

¹Master de Astrofísica, Universidad de la Laguna

November 29, 2023

Tarea 1

Tarea 1a

En primer lugar, como se nos pide en el enunciado del entregable, vamos a calcular y visualizar la función de ganancia mediante el módulo *Chiantipy*. Para este primer apartado haremos algo muy simple, se trata de sintetizar mediante un vector de temperaturas que va de $5 \cdot 10^5$ a $5 \cdot 10^7$ K con 46 valores equi-espaciados y una densidad de electrones que dejaremos fija en $3 \cdot 10^9$.

Determinamos pues la función de ganancias para cada valor de la Temperatura y calculamos el valor de T para el que esta función de ganancias encuentra su máximo, estando en $T = 7.92 \cdot 10^5$ y $\lambda = 171.07$.

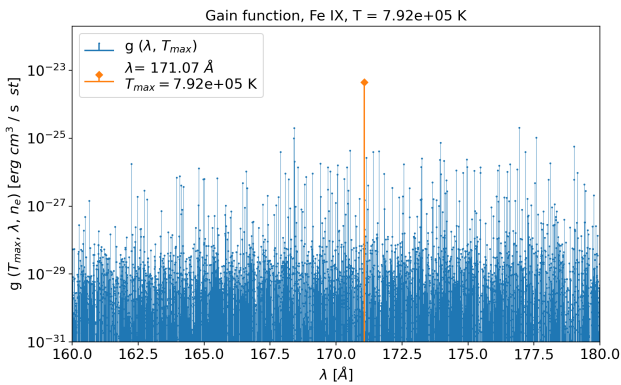


Figure 1: Representación de la distribución de valores de la función de ganancia en $T = 7.92 \cdot 10^5$ K para cada longitud de onda (azul), indicando el máximo de la función en $\lambda = 171.07$ (naranja).

En la figura 1 podemos ver la distribución de la función de ganancias para cada longitud de onda, donde está destacada la longitud de onda del máximo, que se corresponde justo al filtro de 171 utilizado

ampliamente para observar el sol. Esto implica que el Sol que se observa mediante ese filtro será todo aquello con una temperatura correspondiente al máximo que hemos comentado, $7.92 \cdot 10^5$ K, lo cual se corresponde con regiones coronales.

Tarea 1b

Seguidamente se nos pide calcular la función de ganancia total, la cual calcularemos para cada temperatura, sumando el array de funciones de ganancia sobre el eje de las longitudes de onda. Tendremos pues una representación de la función de ganancia total sumada para todas las longitudes de onda representada frente a la temperatura.

Esta representación puede verse en la figura 2. En ella podemos ver como el máximo de la curva se corresponde con el valor de Temperatura en el que la función de ganancia se hace máxima. Como hemos visto tanto en los apartados anteriores como en este la función de ganancias varia tanto con la longitud de onda como con la temperatura. Esto se debe a que la función de ganancia está relacionada con la emisión de un estado de ionización, por lo que variará con la longitud de onda según las distintas transiciones entre niveles de energía. En estas transiciones además la temperatura tendrá un papel importante, favoreciendo unas más que otras.

Podemos ver como la curva tiene un máximo en la temperatura a la que la fracción de ionización del Fe IX es máxima, lo cual es esperable, puesto que para que una mayor abundancia de estos estados implica más transiciones desde dicho estado. De esta forma también vemos como para temperaturas en las que dicho estado de ionización no es tan abundante la función de ganancia total disminuye.

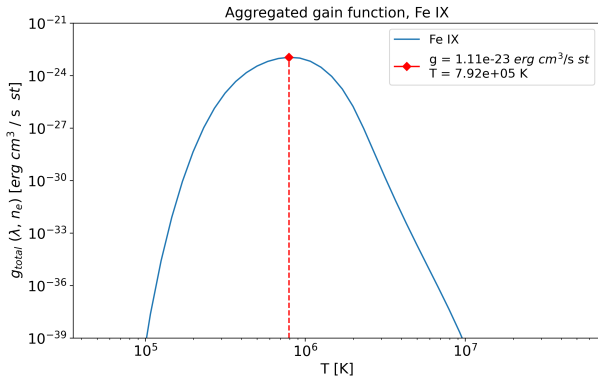


Figure 2: Valor de la función de ganancia total para cada valor de la temperatura. Esta función está calculada como la suma de la contribución a la función de ganancias de cada longitud de onda, lo cual se hace para cada valor de la temperatura. La densidad de electrones elegida será constante y con un valor de $n_e = 3 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$.

Tarea 1c

Finalmente se nos pide estudiar la variación de la forma de la función de ganancia total respecto a la densidad de electrones, la cual hemos considerado constante en el resto de apartados ($n_e = 3 \cdot 10^9 \text{ cm}^{-3}$). EN este caso calcularemos la función de ganancia exactamente igual que en el apartado anterior pero lo haremos para tres densidades distintas más ($3 \cdot 10^7$, $3 \cdot 10^8$, $3 \cdot 10^{10} \text{ cm}^{-3}$).

En la figura 3 podemos ver cómo el parámetro de densidad de electrones no afecta prácticamente a la forma de la función de ganancia total, variando muy poco el máximo de esta. Sabemos que la dependencia de la función de ganancia con n_e es muy pequeña y esta gráfica lo confirma.

Tarea 2

Para este apartado del proyecto tomaremos un array 3D de datos con valores de la temperatura y de la densidad de electrones. Estos datos han sido tomados de una simulación y contemplan un instante en la evolución de una región solar, incluyendo capas como la fotosfera, cromosfera y corona, puesto que contemplan de -2.5 a 15 Mega metros, asumiendo . Ambos archivos están en formato *fits* y tendremos que importarlos usando la librería *astropy*.

Una vez importados estudiaremos la relación de la Temperatura con la altura y con la densidad de electrones.

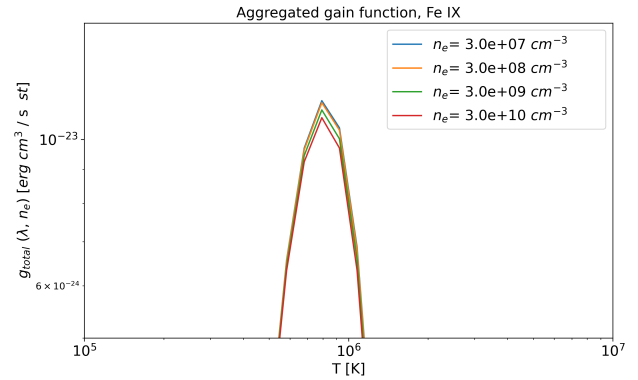


Figure 3: Valor de la función de ganancia total para cada valor de la temperatura. Esta función está calculada como la suma de la contribución a la función de ganancias de cada longitud de onda, lo cual se hace para cada valor de la temperatura. Se superponen distintas densidades de electrones en la figura, $n_e = (3 \cdot 10^7, 3 \cdot 10^8, 3 \cdot 10^9, 3 \cdot 10^{10}) \text{ cm}^{-3}$.

Tarea 2a

En primer lugar tomaremos la relación de la Temperatura respecto a la altura. Para ello idealmente tomaríamos la curva de temperatura respecto a z de cada uno de los puntos de coordenadas x e y . Sin embargo, en nuestro caso el poder de cómputo del portátil está limitado así que en vez de tomar los 768x768 puntos que supondría abarcar todo el espacio horizontal hemos tomado 10000 puntos aleatorios distribuidos entre el array de dos dimensiones de x e y . Tomando pues estos puntos, hemos representado para cada uno la curva de la variación de T con la altura.

Además, se ha calculado el valor medio de la temperatura para cada plano de z constante, con lo que se ha representado por encima de estas curvas una curva del valor de la temperatura media para cada valor de z . Finalmente, para tener una estimación estadística de la distribución de valores respecto a la media, hemos representado entorno a esta curva de valores medios de temperatura las curvas que contemplan los puntos dentro de una desviación estándar y dos. Todo esto se encuentra en la figura 4.

En la figura podemos ver como hay regiones donde la desviación de las curvas salen del entorno 2σ , pero por lo general se encuentran dentro de esta desviación. Podemos interpretar muy bien la variación como la disminución de temperatura en la fotosfera, el calentamiento en la cromosfera y finalmente la temperatura estabilizándose en la región de transición hasta llegar a la corona, justo por debajo de los 10^6 K , dependiendo de la coordenada horizontal.

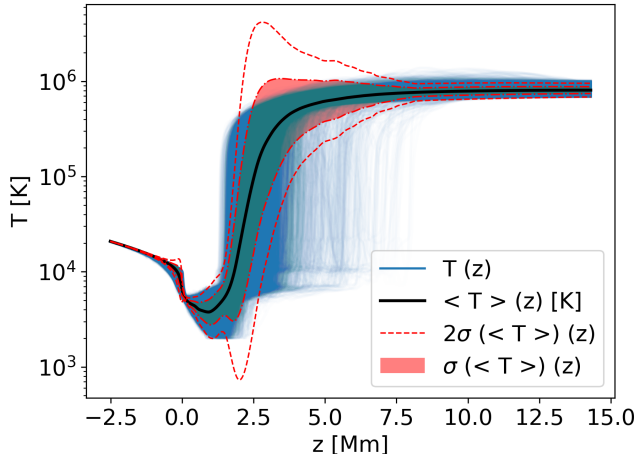


Figure 4: Representación del valor de la temperatura para 10000 valores aleatorios de coordenadas x e y en cada altura (azul), además de la curva del valor medio de la temperatura en cada altura (negro) y la desviación estándar (1σ y 2σ) del cálculo de la media (rojo).

También podemos comparar con las figuras del artículo de [Gudiksen & Nordlund \(2005\)](#), donde en sus figuras 6, 8 y 10 podemos ver que el comportamiento de la temperatura en función de la coordenada z es muy similar a nuestro caso, habiendo un claro aumento en la cromosfera y una estabilización de esta en la región de transición y corona. Mediante la herramienta *PlotDigitizer* hemos tomado la figura 6 del artículo y hemos extraído los datos para poder superponerlos a nuestros resultados. Esto es lo que se presenta en la figura 5, donde la línea magenta discontinua presenta los resultados del artículo y se encuentra dentro de la región azul de las columnas de datos representadas. Esto nos da seguridad en nuestros resultados.

Tarea 2b

En segundo lugar haremos una representación del valor de la temperatura respecto a la densidad de electrones, lo cual nuevamente en vez de para todos los valores de las coordenadas horizontales lo haremos para 10000 puntos aleatorios. Esto se encuentra representado en la figura 6.

Tarea 3

En este tercer apartado utilizaremos de nuevo la herramienta *Chianti* para calcular el valor de la intensidad integrado. Para ello tomaremos la ecuación sacada de los apuntes del tema dos,

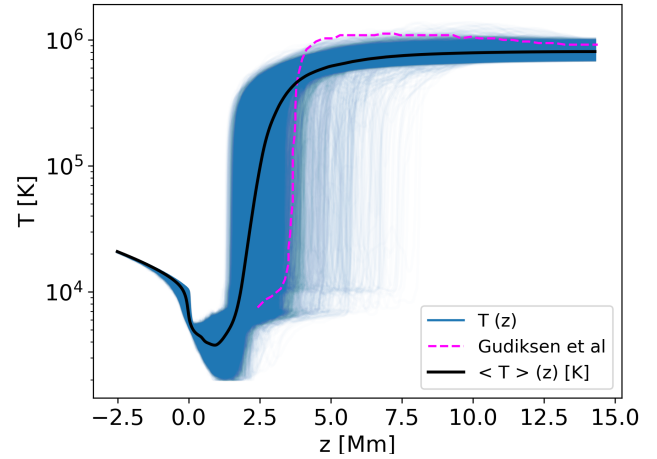


Figure 5: Representación del valor de la temperatura para 10000 valores aleatorios de coordenadas x e y en cada altura (azul), además de la curva del valor medio de la temperatura en cada altura (negro) y la curva resultante de $T(z)$ extraída de los datos del artículo [Gudiksen & Nordlund \(2005\)](#).

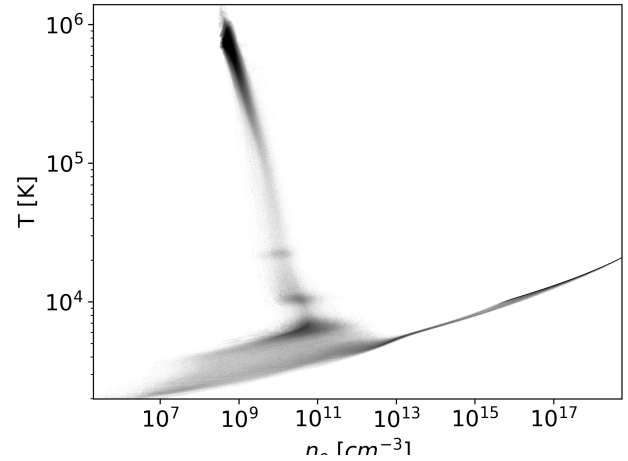


Figure 6: Representación del valor de la temperatura frente a la densidad de electrones para 10000 valores aleatorios de coordenadas x e y en cada altura. Se presenta como una figura que ilustra la densidad de puntos en cada región, así las sombras oscuras contemplan regiones con más puntos.

$$\int dz g_{211}(T, n_e) n_e n_H \quad (1)$$

Para hacer la integral utilizaremos una resolución trapezoidal, la cual aplicaremos con el módulo *trapz* de la librería *numpy*.

Tarea 3a

En primer lugar calcularemos la integral para una columna de datos de coordenadas x e y arbitraria, en este caso la dicha en el enunciado del ejercicio, $x, y = (100, 100)$. Para acotar a los puntos presentes en la cromosfera únicamente los puntos con temperaturas mayores de 10^5 K y densidades de electrones menores que 10^{11} cm^{-3} . Para facilitar el cálculo de la integral hemos tomado el valor de n_h como $n_e/1.2$, esta aproximación la podemos hacer sabiendo que los átomos de Hidrógeno y Helio en la cromosfera están completamente ionizados.

El valor de la integral en este caso es de $0.0023 \text{ erg/sstcm}^2$.

Tareas 3b y 3c

En este caso, usando el mismo método que para el apartado anterior, calcularemos la integral de los datos tomando diferentes columnas equi-espaciadas dentro del array de coordenadas horizontales. Integraremos para todas las coordenadas z de la misma forma que antes y representaremos en un plano 2D el valor de la intensidad en cada punto. De esta forma podremos visualizar la distribución de la intensidad para cada punto.

Como calcular todos los puntos de la matriz (768x768) es una tarea computacionalmente muy pesada, hemos tomado representaciones más pequeñas, comenzando por una matriz de 4x4 (Figura 7) y siguiendo por 16x16 (Figura 8) y finalmente 32x32 (Figura 9).

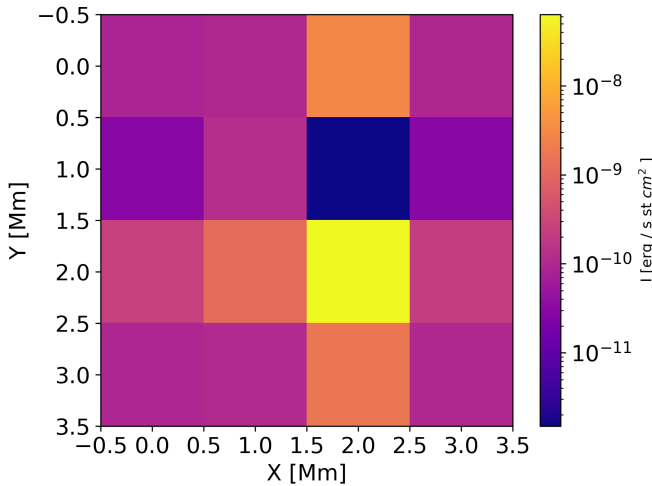


Figure 7: Mapa 2D de la distribución de Intensidades normalizadas logarítmicamente. El mapa incluye 4 columnas de datos equi-espaciadas a lo largo del array de dos dimensiones horizontal de coordenadas x e y .

Como podemos ver en los mapas, la poca resolución

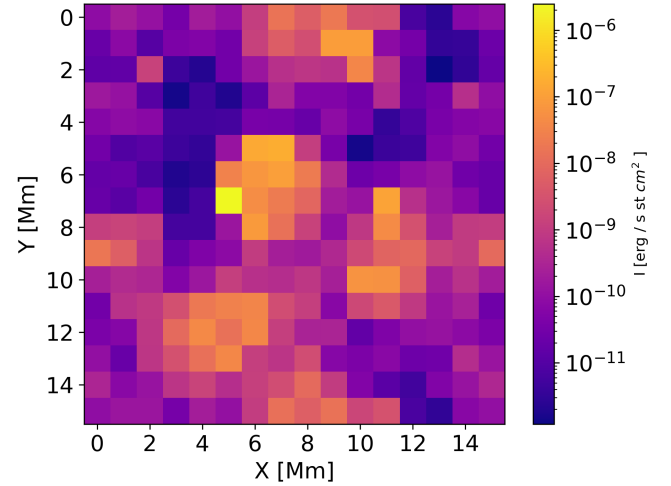


Figure 8: Mapa 2D de la distribución de Intensidades normalizadas logarítmicamente. El mapa incluye 16 columnas de datos equi-espaciadas a lo largo del array de dos dimensiones horizontal de coordenadas x e y .

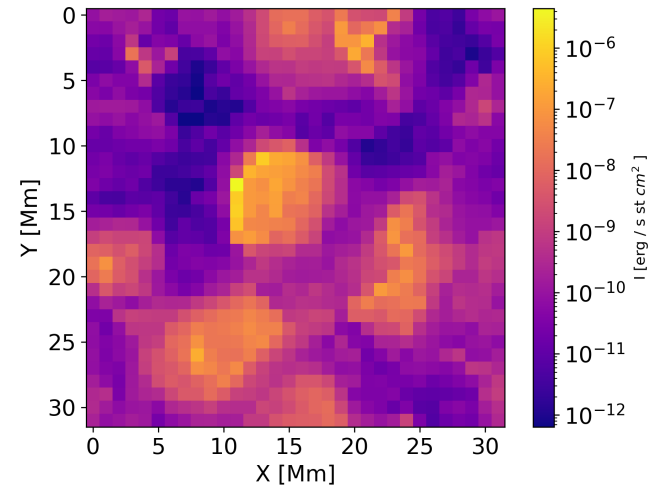


Figure 9: Mapa 2D de la distribución de Intensidades normalizadas logarítmicamente. El mapa incluye 32 columnas de datos equi-espaciadas a lo largo del array de dos dimensiones horizontal de coordenadas x e y .

tomando 4 columnas no nos permite diferenciar las estructuras que emiten a distintas intensidades, sin embargo en la imagen de 32 columnas sí que podemos diferenciar regiones de mayor emisión dentro de la imagen, las cuales podemos asociar a regiones más activas de la corona, como pueden ser emisiones de masa coronal (CMEs), flares o arcos coronales. También se ven regiones menos brillantes, incluso con 6 órdenes de magnitud menos en intensidad, que pueden asociarse a regiones con campos magnéticos muy intensos y verticales que no permiten que el plasma emita radiación, conocidos como agujeros coronales. Recordemos que estas últimas estructuras

suelen estar más cerca de los polos solares, por lo que una imagen con zonas oscuras abundantes podría implicar una localización más cercana a los polos solares.