

PRÁCTICAS ACADÉMICAS EXTERNAS CURRICULARES
OBSERVATORIO ASTRONÓMICO

INTRODUCCIÓN A LA ESPECTROSCOPIA OBSERVACIONAL

Ángela Abad Martín

Tutores profesionales: Ángeles I. Díaz Beltrán, Asier Castrillo Varona,
Sandra Zamora Arenal
Tutora académica: Violeta González Pérez

Curso 2022/2023

Resumen

La astronomía observacional permite, a través de la exploración de cuerpos celestes, estudiar sus características y peculiaridades por medio de telescopios, otros instrumentos astronómicos y el uso de programas digitales.

Durante la elaboración de esta práctica se establece como objetivo principal la formulación de códigos computacionales en el programa Python con motivo de analizar los datos pertenecientes a objetos astronómicos de interés como son las nebulosas y estrellas, particularizando el estudio a la nebulosa de Orión y a la del Anillo, con dos estrellas de calibración cada una (Rigel y Betelgeuse para Orión y Sulafat y HD-176896 para el Anillo). Los datos con los que se trabaja a continuación se recopilaron durante la observación realizada el pasado 10 de noviembre en el Observatorio Astronómico de la Universidad Autónoma de Madrid. Se comienza realizando una reducción de los datos en bruto obtenidos para posteriormente calibrar en flujo y longitud de onda los espectros de las estrellas seleccionadas para cada nebulosa con el objetivo de generar la curva de respuesta instrumental asociada al dispositivo electrónico empleado. A partir de esta se determinan los espectros de las nebulosas finales. Con estos últimos, y eliminando la contribución continua al espectro, se obtienen finalmente las líneas características de cada nebulosa suponiendo esto una iniciación en la técnica de espectroscopía observacional de cuerpos celestes.

Índice

| | | |
|--------|---|----|
| 1. | Introducción | 1 |
| 2. | Desarrollo del código y discusión de resultados | 2 |
| 2.1. | Elaboración del código de reducción de datos | 2 |
| 2.1.1. | Master Bias..... | 3 |
| 2.1.2. | Master Dark..... | 3 |
| 2.1.3. | Master Flat | 4 |
| 2.2. | Análisis de lámparas espectrales de mercurio y neón | 4 |
| 2.3. | Aplicación de correcciones para la reducción de datos..... | 5 |
| 2.3.1. | Análisis de la ganancia..... | 5 |
| 2.3.2. | Reducción, giro y recorte de imágenes | 5 |
| 2.4. | Calibración en longitudes de onda de los espectros estelares y sustracción de la contribución del cielo | 6 |
| 2.5. | Calibración en flujo de los espectros estelares y curva de respuesta instrumental | 8 |
| 2.6. | Calibración en longitudes de onda de las nebulosas y sustracción de la contribución del cielo | 10 |
| 2.6.1. | Nebulosa de Orión..... | 11 |
| 2.6.2. | Nebulosa del Anillo..... | 11 |
| 2.7. | Generación de los espectros de las nebulosas a partir de la curva de respuesta instrumental | 12 |
| 2.8. | Eliminación del continuo y representación de los espectros finales de las nebulosas | 13 |
| 3. | Conclusiones | 15 |
| 4. | Referencias..... | 16 |

1. Introducción

El campo de la espectroscopía astronómica permite caracterizar las cualidades físico-químicas de los cuerpos celestes a través del estudio de sus espectros electromagnéticos, esto es, de su tipo de radiación. En estos se suelen observar una serie de propiedades como son las líneas espectrales (dentro de las cuales se distinguen líneas de emisión y de absorción en función de si los picos son aumentos de la intensidad de radiación o disminuciones, respectivamente) y una contribución continua, que puede presentar discontinuidades a lo largo de todo el espectro^[1].

Durante la práctica se observan y analizan los espectros de estrellas y nebulosas con el objetivo de determinar las líneas características correspondientes a estas últimas y así poder comparar las diferencias entre distintos cuerpos astronómicos. Cabe destacar que, antes de desarrollar el estudio detallado a continuación, se comenzó tratando imágenes y datos registrados de observaciones astronómicas anteriores (realizadas por alumnos del curso de Máster de la Universidad Autónoma de Madrid, TOA) con el objetivo de establecer una familiarización con los programas a emplear (Python) y con las técnicas de estudio, ninguna de las dos habiendo sido tratadas anteriormente. Sin embargo, a continuación, se detalla el trabajo de observación final realizado.

A lo largo de la planificación de la observación se tuvo como principal objetivo analizar cuatro nebulosas, cada una de ellas con dos estrellas de calibración asociadas (una azul y otra roja) de cara al desarrollo de la curva de respuesta instrumental que se detalla más adelante en la *sección 2.5*. No obstante, debido a una descalibración del programa digital que contribuyó a un retraso no contemplado con anterioridad durante la planificación, se hizo imposible la medición de dos de las nebulosas que, para entonces, se encontraban ya fuera del campo visual. Asimismo, aunque no tan determinantemente, influyó el clima (nubes), dificultad que se pudo solventar organizando la observación de manera que se midiesen los cuerpos astronómicos más visibles primero antes que los que se encontraban tras las nubes. De esta forma se analizaron principalmente:

- Nebulosa de Orión (NGC 1976): Rigel (azul) y Betelgeuse (roja).
- Nebulosa del Anillo (NGC 6720): Sulafat (azul) y HD-176896 (roja).

Cabe destacar que se observaron cuerpos astronómicos adicionales como Vega, IOTA Aquarii, 88 Aquarii y la Luna a pesar de no ser analizados durante el estudio. Asimismo, se midieron lámparas espectrales de mercurio (Hg) y neón (Ne) de cara a poder determinar la anchura de la rendija empleada, el ángulo de giro de las imágenes y la calibración de píxeles a longitudes de onda, todo ello detallado en las *secciones 2.2 y 2.3*.

2. Desarrollo del código y discusión de resultados

A continuación se procede a detallar los principales pasos llevados a cabo durante la elaboración del código computacional, repasando los puntos más determinantes y los resultados característicos obtenidos.

2.1. Elaboración del código de reducción de datos

A lo largo del proceso de observación de cuerpos astronómicos se recogen una serie de datos en bruto, en los que debe considerarse la presencia de ruido de fondo que posteriormente se suprime con técnicas de reducción de datos. En esencia existen tres tipos de ruido: el ruido de lectura (“*Bias*”), el ruido térmico (“*Dark*”) y el ruido proveniente de la óptica y sensores del aparato instrumental (“*Flat*”).

Cuando a la CCD del telescopio (detector de luz basado en materiales semiconductores) le llegan fotones con la suficiente energía, estos pueden excitar y almacenar electrones en los píxeles de dicho sensor. Una señal de voltaje va contando la cantidad de electrones almacenados en cada pixel y una vez realizado el recuento de cada celda, esta se “borra” y se corren todos los electrones a la celda contigua para continuar con el conteo. En la realidad, sin embargo, pueden quedar algunos electrones rezagados durante el movimiento, provocando en la imagen una estela que no tendría por qué pertenecer a la propia morfología del cuerpo observado. Estos errores se denominan “*Bias*”. Se trata de imágenes que solo continúan ruido de lectura por lo que se toman a tiempo de exposición cero y con el telescopio tapado para leer solo la CCD.

A veces ocurre que debido al cableado y a las corrientes eléctricas que fluyen por debajo de la CCD se producen excitaciones de electrones por efecto térmico lo que supone un exceso de cuentas en los píxeles, efecto que suele verse como un ruido de fondo que aumenta a medida que se aumenta la temperatura y que se prolonga con el tiempo de exposición del telescopio; se trata del “*Dark*”. Se miden con el telescopio tapado y a un tiempo de exposición distinto de cero y lo más parecido posible al de la medida del cuerpo astronómico que hayamos estudiado.

Finalmente se tiene el “*Flat*”, ruido proveniente de las inhomogeneidades de las lentes y de la iluminación despareja creada por polvo o manchas en el tren óptico e íntimamente relacionado con la eficiencia cuántica del sensor. Se ve reflejado como un viñeteo en las esquinas o como manchas en forma de “donut”. Existen varios tipos de “*Flats*”: los de cúpula (se cierra la cúpula y se ilumina una tela lo más homogéneamente posible), los de cielo (se toman imágenes de una zona del cielo “prácticamente” homogénea, teniendo que realizar las medidas al atardecer o amanecer) y los de bombilla (en la oscuridad se apunta el telescopio directamente a una bombilla incandescente; método empleado durante la observación). Los archivos “*Flats*” se miden con un tiempo de exposición distinto de cero y con el telescopio abierto.

Se comienza elaborando un código que permita, a partir de una colección de “*Bias*”, “*Darks*” y “*Flats*”, elaborar unos “*Master Bias*”, “*Master Darks*” y “*Master Flat*” que se aplicarán para la reducción de datos más adelante.

2.1.1. Master Bias

A continuación, se indican cada uno de los pasos a seguir durante la elaboración del “*Master Bias*” (ver *figura 1*). Para ello se midieron 10 archivos “*Bias*” con una temperatura de -10° y una ganancia de 140.

Figura 1. Código del “*Master Bias*”.

```

1 Dirección_Carpeta_Bias = 'BIAS/17_37_36/*.fits' # Dirección de la carpeta "BIAS" (solo los archivos .fits)
2 Lista_Bias = glob.glob(Dirección_Carpeta_Bias) # Genera una lista de todos los archivos .fits de la carpeta "BIAS"

1 # Se genera un array 3D donde se pueda meter cada archivo .fits en forma de capas. Para ello el array debe tener
2 # las dimensiones (z,y,x):
3 # - Primera variable (eje "z"): se trata de cada una de las capas (por ello se indica "len(Lista_Bias")).
4 # - El resto de dimensiones (ejes "y" y "x"): deberían ser siempre las que salgan por defecto al abrir un archivo
5 # Bias cualquiera usando la función hdu.info(). Sale:
6 # NAXIS1 = 4656 (este es nuestro eje "x").
7 # NAXIS2 = 3520 (este es nuestro eje "y").
8
9 A = np.zeros((len(Lista_Bias),3520,4656)) # Array vacío que se llena a continuación.
10
11 for i in np.arange(len(Lista_Bias)):
12     hdu = fits.open(Lista_Bias[i]) # De la "Lista_Bias" se van sacando uno por uno cada archivo Bias ".fits"
13     A[i] = hdu[0].data # y se van metiendo en la variable A, creando así cada capa.

1 # Se realiza el promedio sobre todas las capas para así poder crear el "Master Bias". Se aplica la función
2 # np.nanmean en lugar de np.mean para así evitar arrastrar posibles valores "not a number" en el proceso:
3
4 MASTERBIAS = np.nanmean(A,axis = 0) # Promedio de todos los Bias en el eje 0 (eje de las capas = eje z).
5
6 # Se crea un archivo .fits en nuestro entorno de python con nombre MB (de Master Bias) que contendrá los
7 # datos del MASTERBIAS calculados recientemente. Se guarda en la carpeta de "MASTERS", ya creada:
8
9 MB = fits.PrimaryHDU(MASTERBIAS)
10 MB.writeto('MASTERS/MasterBias.fits')
```

2.1.2. Master Dark

Para la elaboración del “*Master Dark*” se procede de forma análoga al apartado 2.1.1. solo que esta vez teniendo en cuenta la distinción de medidas en función de los tiempos de exposición empleados. Se tomaron 10 “*Darks*” para tiempos de 2, 20, 40 y 60 segundos, todas ellas con una ganancia de 140 y manteniendo la temperatura en torno a $-10,5^{\circ}$. Asimismo, se destaca una peculiaridad y es que para estas medidas se debe eliminar la contribución del “*Master Bias*”, presente siempre en la toma de datos (ver *figura 2*).

Figura 2. Sección final del código “*Master Dark*” para diferentes tiempos de exposición.

```

1 # Se crean los Master Dark "con ruido" para cada tiempo de exposición:
2
3 MASTERTDARK_2_RUIDO = np.nanmean(t_2,axis = 0)
4 MASTERTDARK_20_RUIDO = np.nanmean(t_20,axis = 0)
5 MASTERTDARK_40_RUIDO = np.nanmean(t_40,axis = 0)
6 MASTERTDARK_1_RUIDO = np.nanmean(t_1,axis = 0)
7
8 # Finalmente se obtienen los Master Dark "sin ruido" para cada tiempo de exposición, eliminando para cada uno de
9 # ellos el Master Bias generado anteriormente:
10
11 path_MasterBias = 'MASTERS/MasterBias.fits'
12 MasterBias = fits.open(path_MasterBias)
13
14 MASTERTDARK_2 = MASTERTDARK_2_RUIDO - MasterBias[0].data
15 MASTERTDARK_20 = MASTERTDARK_20_RUIDO - MasterBias[0].data
16 MASTERTDARK_40 = MASTERTDARK_40_RUIDO - MasterBias[0].data
17 MASTERTDARK_1 = MASTERTDARK_1_RUIDO - MasterBias[0].data
```

2.1.3. Master Flat

Se finaliza realizando el mismo proceso descrito anteriormente para una ristra de 10 “Flats” de bombilla para un tiempo de exposición de aproximadamente 1,43 segundos, ganancia de 140 y temperatura de $-9,5^{\circ}$. En este caso existen otras dos peculiaridades a tener en cuenta: en primer lugar, se sustrae tanto el “Master Bias” como el “Master Dark” correspondiente al tiempo de exposición seleccionado. Para este caso en concreto, debido al hecho de que no se presentan “Darks” con tiempos de exposición menores que 2 segundos, se realiza la siguiente operación:

$$\frac{\text{Master Dark (x segundos)}}{x \text{ segundos}} = \frac{\text{Master Dark (y segundos)}}{y \text{ segundos}} = \dots \quad (1)$$

asumiendo $x = 2s$ e $y = 1,43s$. Por otro lado, se debe normalizar la ristra de “Flats” corregidos antes de realizar el “Master” de cara a reescalar los resultados obtenidos y así obtener un mismo valor para los píxeles con mayor luminosidad ^[2] (además de que con este procedimiento se eliminan las unidades de tiempo del “Master Flat”) (ver figura 3).

Figura 3. Fragmentos de las peculiaridades a considerar durante la elaboración del “Master Flat”

```

21 for i in np.arange(len(Lista_Flats_bomb)): # RECORDEMOS QUE "Flats_cielo" TENÍAN texp=1,425785s
22 hdu_bruto_bomb = fits.open(Lista_Flats_bomb[i])
23 corregido_bomb = hdu_bruto_bomb[0].data - MasterBias[0].data - (MasterDark_2s[0].data * 0.7128925)
24 Flats_bomb_corregidos[i] = corregido_bomb # Array de Flats_cielo "sin ruido"

8 media_flats_bomb = np.nanmean(Flats_bomb_corregidos, axis = (1,2)) # Media de cada Flat del Flats_corregidos
9 # (se hace la media en las direcciones "y"
10 # y "x", es decir, en cada capa por separado).

19 Flats_bomb_ready = np.zeros((len(Lista_Flats_bomb),3520,4656))
20
21 for i in np.arange(len(Lista_Flats_bomb)):
22     Flats_bomb_ready[i] = Flats_bomb_corregidos[i] / media_flats_bomb[i] # Array de Flats_bomb corregidos y
23     # normalizados

```

2.2. Análisis de lámparas espectrales de mercurio y neón

Los espectros pertenecientes a lámparas de mercurio y neón permiten, en primer lugar, determinar la posición de las líneas de emisión de cada elemento para así poder establecer la relación de píxeles a longitudes de onda empleando una guía de calibración ^[3].

Figura 4. Espectros de lámparas de Hg y Ne.

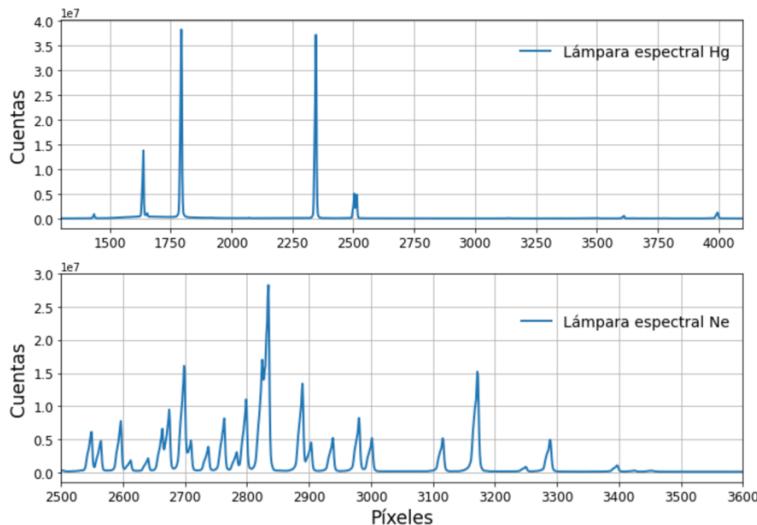
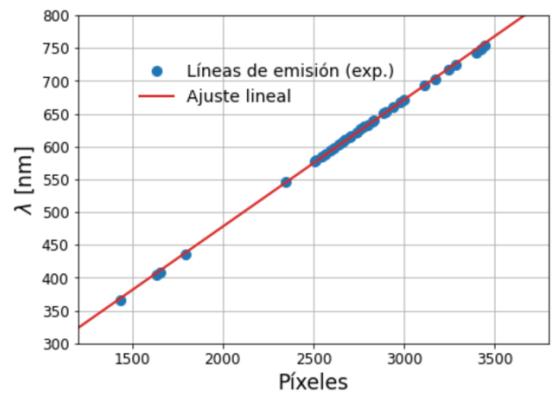


Figura 5. Calibración a longitudes de onda.



En la *figura 5* se introduce un ajuste lineal como $\lambda = np.poly1d(np.polyfit(x_{pix}, \lambda(x_{pix}), 1))$, tal que para cualquier “array” de píxeles dado ($array_{pix}$) se pueda obtener sus longitudes de onda asociadas ($\lambda(array_{pix})$). Por otro lado, a partir de los mapas de color de las lámparas, se pueden determinar tanto el ángulo de giro de las imágenes (pues se introduce un pequeño ángulo en la rendija en función de lo fuerte que se encjen las piezas) como el tamaño de la rendija. A partir de dicho tamaño se pueden recortar las imágenes para que queden lo más precisas posibles).

2.3. Aplicación de correcciones para la reducción de datos

Una vez determinado tanto el ruido de fondo como el ángulo de giro y el tamaño de las imágenes, se procede a reducir los datos de las estrellas y nebulosas. El orden en que se van manipulando los datos es importante de cara a no perder información durante el proceso.

2.3.1. Análisis de la ganancia

Durante la toma de datos se establece una ganancia estándar de 140. Sin embargo, en alguna de las medidas este valor se modifica de cara a la obtención de resultados más favorables (si, por ejemplo, la estrella presenta poca luminosidad se suele manipular el tiempo de exposición y ganancia del programa para obtener un espectro más preciso). Esto implica la realización de un pequeño cálculo de calibración dado por la siguiente relación:

$$G_P \cdot 0.1 = 20 \cdot \log_{10}(G_R) \quad (2)$$

donde G_P se trata de la ganancia del programa (modificable en función del objeto astronómico) y G_R la ganancia real. En base a los valores de G_P empleados para cada objeto se pueden determinar los G_R asociados y así, evaluando el cociente entre $\frac{G_R(G_P)}{G_R(G_P=140)}$, se pueden dividir las imágenes por dicho factor, estableciendo así una relación de ganancia equivalente entre todas ellas (ver *figura 6*). Este proceso se realiza previamente a la reducción del ruido debido al hecho de que los “*Masters*”, a priori, presentan todos ganancia 140 y no deben ser corregidos.

Figura 6. Ejemplo de corrección de la ganancia para la primera ristra de datos de Orión. Procedimiento análogo para el resto de objetos astronómicos.

```

1 # Nebulosa de Orión (Orion_1 y Orion_2 representan la franja superior de la nebulosa a tiempos de exposición
2 # diferentes. Orion_3, en cambio, representa la franja inferior en la que se detecta no solo nebulosa sino
3 # estrella).
4 path_orion1 = 'NEBULOSAS/ORION/Orion_1/23_45_24/*.fits'      # texp_ORION_1=30s (5 imágenes)
5 Lista_orion1 = glob.glob(path_orion1)                            # GANANCIA = 510
6 orion1_array = np.zeros((len(Lista_orion1),3520,4656))
7 for i in np.arange(len(Lista_orion1)):
8     hdu_01 = fits.open(Lista_orion1[i])
9     orion1_array[i] = hdu_01[0].data
10 orion1_ruido = orion1_array / 70.82

```

2.3.2. Reducción, giro y recorte de imágenes

A continuación, se elimina el ruido de las imágenes para la obtención de lo que se conoce como “*imagen de ciencia*”, dada por:

$$Imagen_{Ciencia}(t_{exp.}) = \frac{Imagen_{Ruido}(t_{exp.}) - Master\ Bias - Master\ Dark(t_{exp.})}{Master\ Flat} \quad (3)$$

Es importante mencionar que, al igual que para tiempos fuera del rango de “*Master Darks*” se empleaba la relación (1), de la *figura 7* se observa que, a partir del array de tiempos empleados para los “*Darks*” experimentales y sus correspondientes “*Master Darks*” asociados (*sección 2.1.2.*) se establece una relación de interpolación que permite, a partir de un tiempo dado dentro de este rango, determinar su “*Master Dark*” asociado.

Figura 7. Función de interpolación para la obtención de “*Master Darks*” con tiempos de exposición dentro del rango establecido.

```
1 # Se define la función de interpolación:
2 t_exp = np.array([2, 20, 40, 60])
3 MasterDarks = np.array ([MD_2s, MD_20s, MD_40s, MD_1min])
4 f_interp = scipy.interpolate.interp1d(t_exp, MasterDarks, bounds_error = False, axis = 0)
```

Finalmente, las imágenes se giran el ángulo correspondiente para mantenerlas rectas y se recortan para fijar la región de la rendija que será la que proporcionará la información necesaria en el resto del código (ver *figura 8*).

Figura 8. Reducción final de la primera ristra de datos de Orión.

```
1 # Orión 1 (texp=30s):
2 orion1 = np.zeros((len(Lista_orion1),820,4696))
3 ol = np.zeros((len(Lista_orion1),3520,4656))
4 for i in np.arange(len(Lista_orion1)):
5     ol[i] = (orion1_ruido[i] - MB - f_interp([30])) / MF
6     orion1[i] = ndimage.rotate(ol[i],0.6593)[1325:2145,:]
```

De la *figura 8* se observa, además, que la última ristra de datos presenta dimensiones 4696 x 820 precisamente por el paso de girar y recortar (si se hubiese procedido al contrario las dimensiones serían diferentes y se habría perdido información). Asimismo, cabe destacar que las imágenes de momento solo se recortan a lo largo del eje de las cuentas (eje y), manteniendo la longitud del array de píxeles invariante para no sustraer información relevante.

2.4. Calibración en longitudes de onda de los espectros estelares y sustracción de la contribución del cielo

Una vez se obtienen las ristras de imágenes de cada estrella ya reducidas y listas para ser manipuladas, se procede, en primera instancia, a escoger de entre todas la que presenta el espectro más adecuado para cada caso. Una vez seleccionado, se representa como cuentas frente a longitudes de onda, a partir de la relación mostrada en la *sección 2.2*. Estos resultados (ver *figura 9 (A)*) estarían haciendo referencia a los espectros estelares con la contribución del cielo, presente en la rendija. Cabe destacar que, en particular para la estrella HD-176896, se observan cuentas negativas, cuestión que no encaja con predicciones físicas. Tras un análisis se observó que tal vez el propio programa no se ajustaba del todo bien al análisis de ganancia detallado en la *sección 2.3.1*, pudiendo ser necesaria una relación distinta de (2). Sin embargo, no se encontraron soluciones viables por lo que se continúa el análisis con los datos de igual forma.

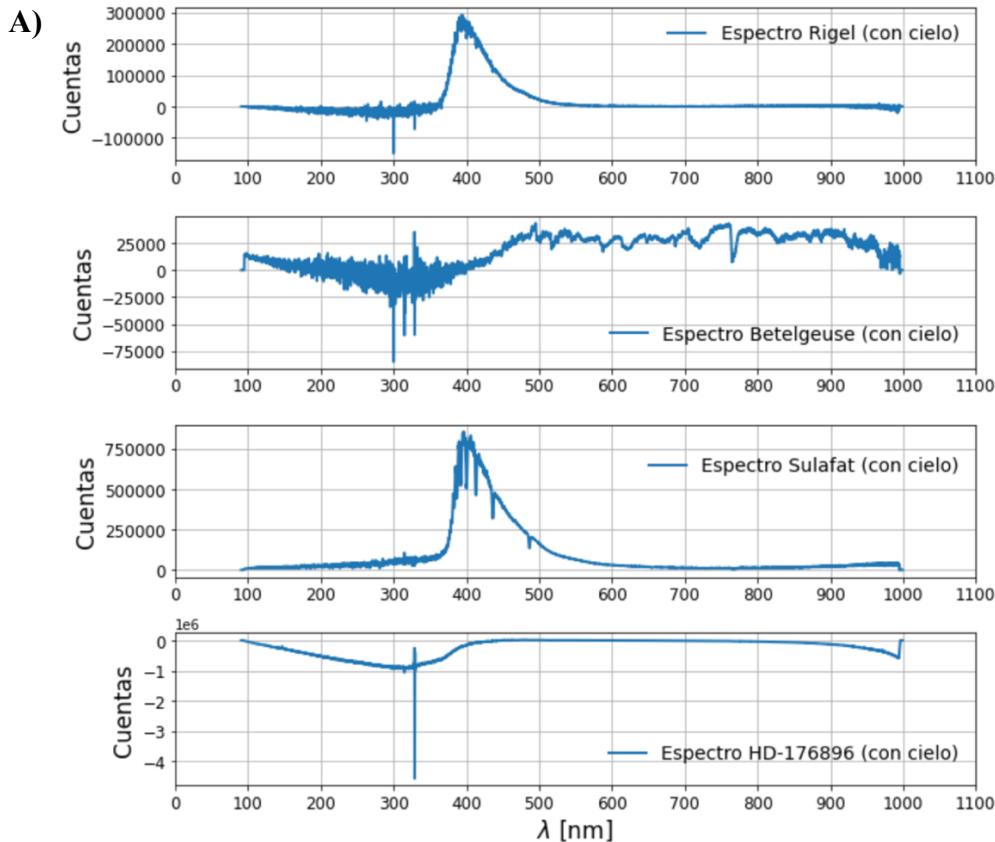
El siguiente objetivo consiste en sustraer la contribución del cielo de las imágenes para obtener espectros donde se representen las estrellas en su totalidad. Para ello, a partir de los mapas de color de cada una de ellas, se comienza recortando la zona donde se localiza la estrella. Por otro lado, se recortan las regiones del cielo y se aplica la siguiente relación:

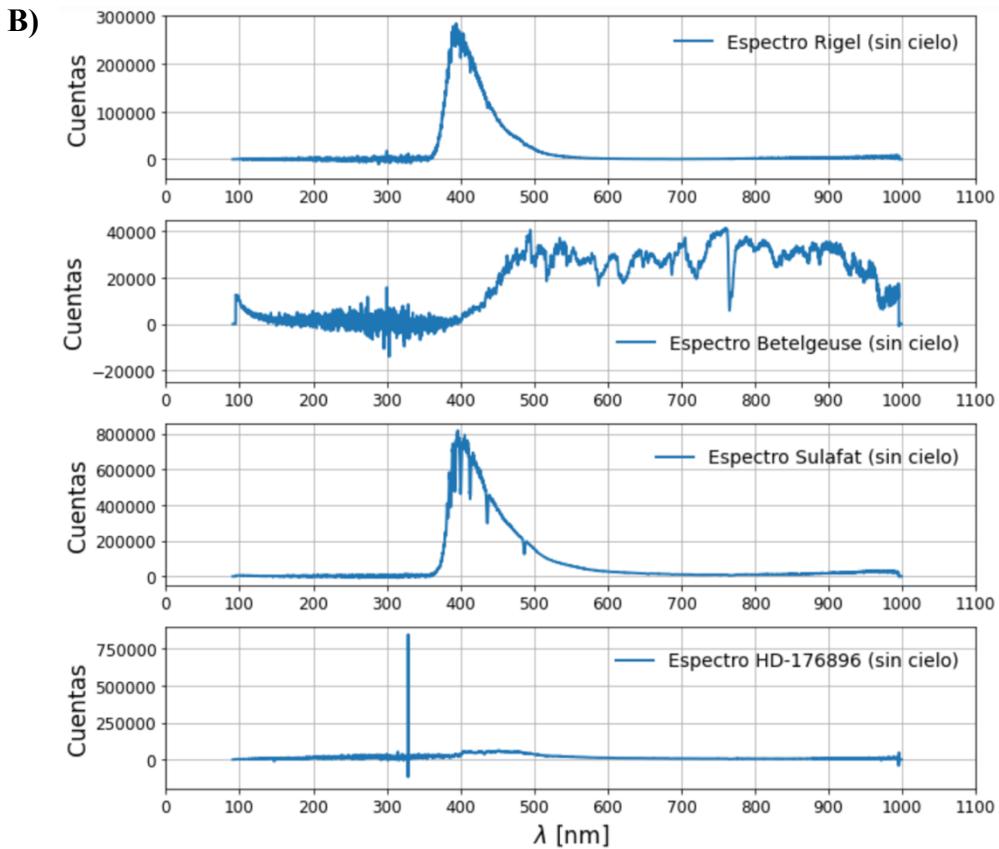
$$Espectro_{final} = Espectro_{Comp.}^* - \mathcal{F} \cdot \left(\sum_{i=1}^{\# secciones\ de\ cielo} Espectro_{Comp.}^{C\ i-\text{ésimo}} \right) \quad (4)$$

donde $Espectro_{Comp.}^*$ hace referencia a la sección de la estrella comprimida (su espectro recortado y comprimido), $Espectro_{Comp.}^{C\ i-\text{ésimo}}$ se trata del espectro de la sección i -ésima del cielo una vez comprimido y \mathcal{F} es un factor multiplicativo que depende de la anchura de cada sección recortada, $\mathcal{F} = \frac{\Delta^*}{\sum_i^{\# secciones\ de\ cielo} \Delta_i^{Cielo}}$ donde Δ hace referencia a las anchuras seleccionadas. Procediendo como se indica, se obtienen los espectros finales de las estrellas (ver *figura 9 (B)*).

Además de la clara diferencia que presentan los espectros tras la sustracción del cielo, se puede comprobar que las estrellas Rigel y Sulafat son azules (B8Iae y B9III) mientras que Betelgeuse es roja (M1-M2Ia-Iab). HD-176896, en cambio, presenta peculiaridades que se analizan en la *sección 2.5*. pues a simple vista no se podría identificar su tipo espectral, a pesar de que teóricamente debería ser una estrella roja (K0III). Cabe destacar la presencia de líneas de absorción, característica de los espectros estelares.

Figura 9. Comparación de los espectros estelares con y sin contribución del cielo.





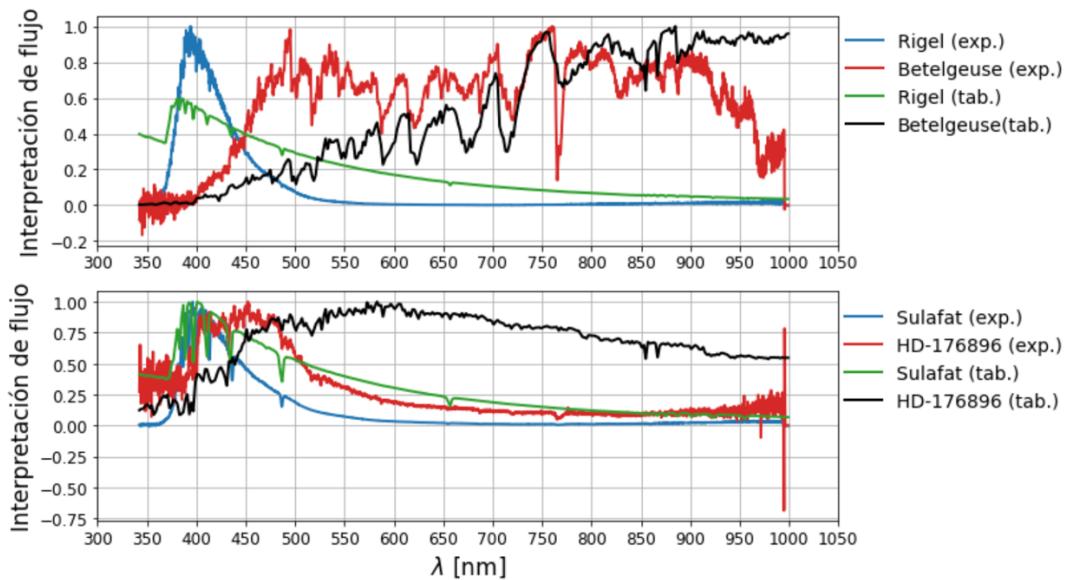
2.5. Calibración en flujo de los espectros estelares y curva de respuesta instrumental

A continuación, conviene elaborar una conversión de cuentas a unidades de flujo, lo que permitirá representar los espectros de los objetos adecuadamente. Para ello se hacen uso de datos de archivo^[4], escogiéndose los espectros asociados a cada estrella en función de su temperatura, radio, gravedad superficial y paralaje^[5, 6]. Una vez determinados (y haciendo un pequeño cálculo requerido por las condiciones de uso) se procede a “ajustar” los espectros de la librería a la resolución de los espectros experimentales de manera que se puedan representar en la misma gráfica. Esto se consigue con la función de interpolación, en la que, a partir de las longitudes de onda experimentales y los datos de flujo y longitudes de onda tabuladas se devuelve el correspondiente flujo de archivo reajustado.

$$\text{Flujo}_{\text{reajustado}}^{\text{tab.}} = \text{np.interp}(\lambda_{\text{exp}}, \lambda_{\text{tab}}, \text{Flujo}_{\text{tab.}}) \quad (5)$$

Seguidamente se normalizan todos los espectros con el objetivo de poder representarlos al unísono y hacer una comparativa más visual. Esto implica que las unidades del eje y ahora son más bien “interpretaciones de flujo”. Posteriormente, se recortan los espectros en el eje x para poder seleccionar la región con mayor información. Para el caso de la estrella HD-176896 primero se recorta y luego se normaliza para evitar la influencia del píxel en $\sim 8,33 \cdot 10^5$.

Figura 10. Representación de los espectros experimentales de las estrellas respecto de los tabulados.



De la *figura 10* se verifica que, efectivamente, Rigel y Sulafat son estrellas azules mientras que Betelgeuse es roja, todas ellas con un espectro bien caracterizado respecto de los valores tabulados. Ahora bien, para el caso de HD-176896 se encuentra una discrepancia respecto del espectro de archivo, verificándose que en realidad se midió una estrella vecina a esta y con regiónpectralazul (se cree que durante el problema de calibración con el programa durante la observación se detectó o bien HD-176913 o HD-177109).

Se determina a continuación lo que se conoce como “*curva de respuesta instrumental*” (CRI) que supone una relación entre los espectros experimentales y tabulados y es característica no solo de las estrellas de calibración empleadas para generarla sino del aparato instrumental empleado. El objetivo principal consiste en elaborar la curva entre Rigel y Betelgeuse y compararla con la de Sulafat y HD-176896 pero, debido a que esta última resultó ser azul, se procede a elaborar curvas para cada estrella (omitiendo HD-176896) para comprobar sus disparidades.

La relación necesaria para la creación de la curva es la representada en la *figura 11*, en la que los espectros se recortan igual que se hacía anteriormente y los experimentales van divididos por su tiempo de exposición de cara a obtener unidades de “Cuentas/s/Flujo” para las curvas. Como estas no son homogéneas (ver *figura 13*), se aplica un filtro gaussiano a cada una de ellas, se normaliza y con él se elabora una función de convolución, necesaria para poder suavizarlas y obtener las curvas de respuesta instrumentales para cada estrella.

Figura 11. Ejemplo del código de elaboración de la curva de respuesta instrumental de Rigel.

```

1 # Curva de respuesta instrumental: RIGEL
2 CRI_r = (espec_rigel[1300:]/1.5) / FLUJO_r[1300:]
```

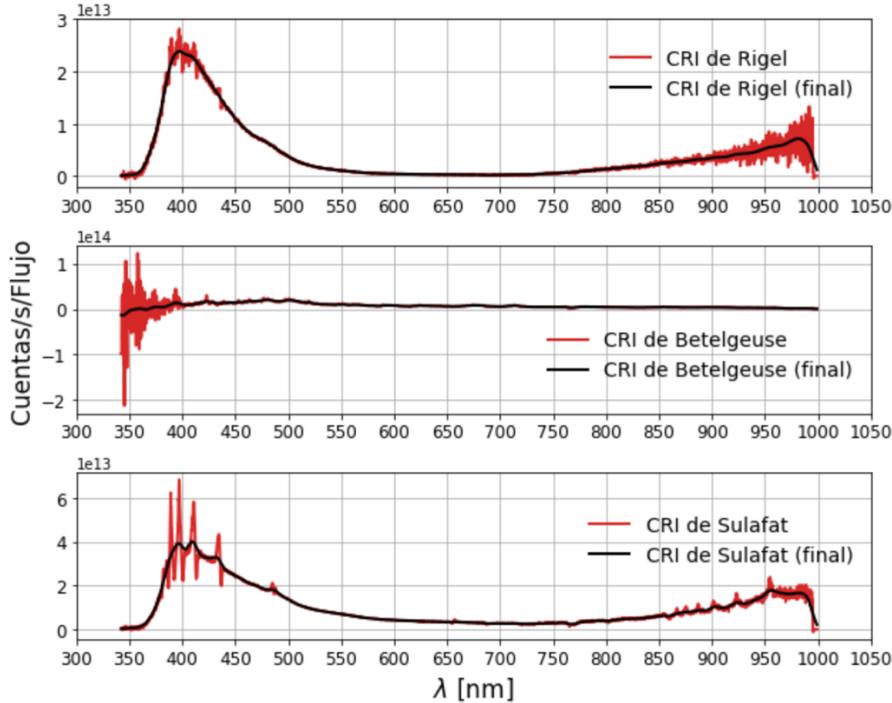
Figura 12. Ejemplo del código para suavizar la curva de respuesta instrumental de Rigel.

```

1 gaus_r = signal.gaussian(len(CRI_r), 20) # el 20 sale de la anchura de los picos (aprox)
2 gaus_norm_r = gaus_r/np.nansum(gaus_r) # 'nansum' pues se requiere un área bajo la curva
3 # de valor 1
4 curva_r = np.convolve(CRI_r, gaus_norm_r, mode='same')

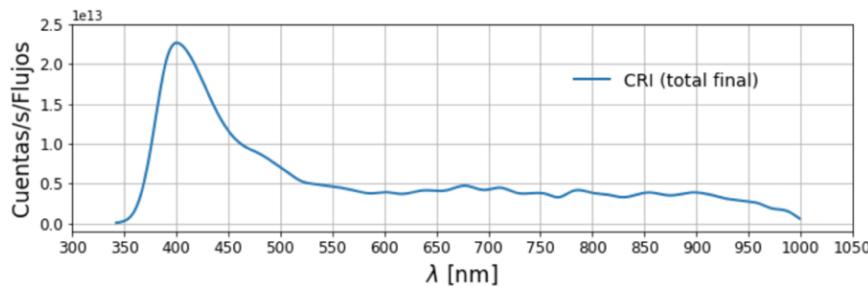
```

Figura 13. Representación de las curvas de respuesta iniciales y tras aplicar sus ajustes gaussianos.



Se verifica la diferencia en la curva de respuesta en función de si la estrella es roja o azul, motivo por el cual suelen escogerse estrellas de calibración pertenecientes a rangos espectrales opuestos a la hora de elaborar la curva. Asimismo, comparando Rigel con Sulafat, se observa que, a pesar de que ambas son azules, la resolución para cada una es ligeramente diferente ($\sim 10\%$ de error). Esto ocurre debido a que Sulafat pasó más tiempo dentro de la rendija en comparación con Rigel, resultando esto en un flujo algo menor para esta última. Por ello, se elabora la curva de respuesta instrumental total asociada a la suma de Rigel y de Betelgeuse, que se emplea en el resto del estudio.

Figura 14. Curva de respuesta instrumental total final.



2.6. Calibración en longitudes de onda de las nebulosas

El siguiente paso consiste en realizar la conversión de píxeles a longitudes de onda para el análisis de las nebulosas. El procedimiento en cierto modo es análogo al que se empleó para el

caso de las estrellas en la sección 2.4. salvo por ciertas peculiaridades implícitas en el hecho de trabajar ahora nebulosas.

2.6.1. Nebulosa de Orión

Partimos de la nebulosa de Orión, característica por presentar no solo una región gaseosa sino una estrella al inicio de la rendija, tal y como se observa en la figura 15. Al representar su zonapectral asociada se obtiene el mapa de color de la figura 16, en la que efectivamente se distingue tanto la intensidad de la estrella como las líneas de emisión de la nebulosa. Ambas imágenes están asociadas (su interpretación se remarca visualmente con indicadores en rojo).

Figura 15. Nebulosa de Orión.

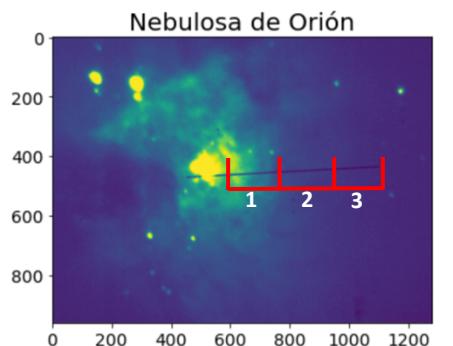
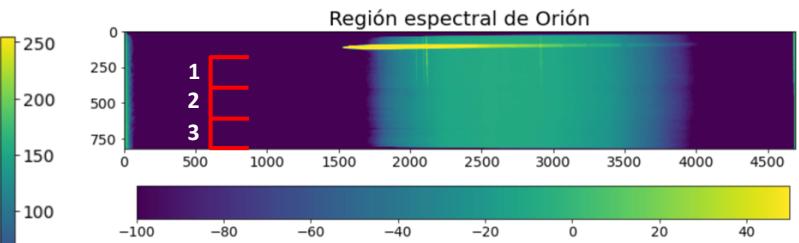


Figura 16. Regiónpectral de estudio (Orión).



Se comienza seleccionando fragmentos equidistantes del mapa, comprimiéndolos y dividiéndolos por el tiempo de exposición del objeto astronómico, de nuevo, para establecer unidades de “Cuentas/s”. En este caso no se sustrae el cielo ya que la rendija únicamente recoge nebulosa (la zona oscura sigue siendo gas denso, no se trata de cielo). Asimismo, se puede observar que se prescinde de la región con la estrella pues el interés actual consiste en determinar las líneas de emisión de la propia nebulosa y la presencia de la estrella podría distorsionar los resultados. Seguidamente se calibra en longitudes de onda, obteniéndose para cada una de las regiones espectros en unidades de “Cuentas/s” frente a longitudes de onda.

2.6.2. Nebulosa del Anillo

Para el caso de la nebulosa del Anillo no se pudo medir su mapa completo como pasaba con Orión, sin embargo, su aspecto se asemejaba a una región de gas circular con un hueco en el centro (ver figura 17) en el que la intensidad disminuía. Su zonapectral, por tanto, se trataba de una región de cielo combinada con líneas de emisión intensas y débiles alternadas tal y como se observa en la figura 18. Análogamente al caso anterior, se seleccionan cuatro secciones: el cielo, una primera región brillante, una zona oscura y una segunda región brillante. Cada una de ellas se comprime y, aplicando en esta ocasión la relación (4), se sustrae la contribución del cielo a las tres regiones restantes (pues en este caso la rendija no solo capta a la nebulosa). Se vuelven a obtener finalmente espectros en unidades de “Cuentas/s” frente a longitudes de onda para cada sección.

Figura 17. Nebulosa del Anillo^[7].

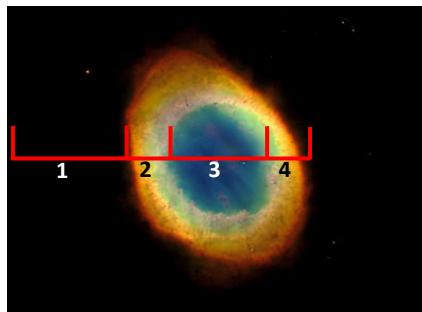
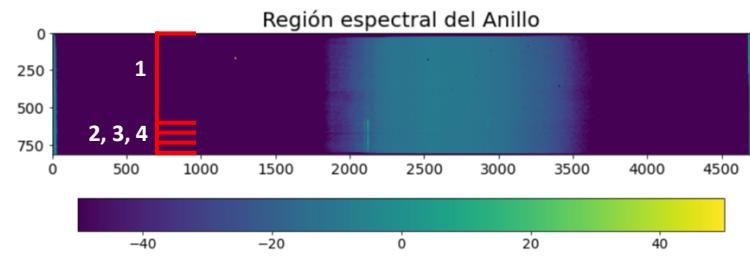


Figura 18. Regiónpectral de estudio (Anillo).

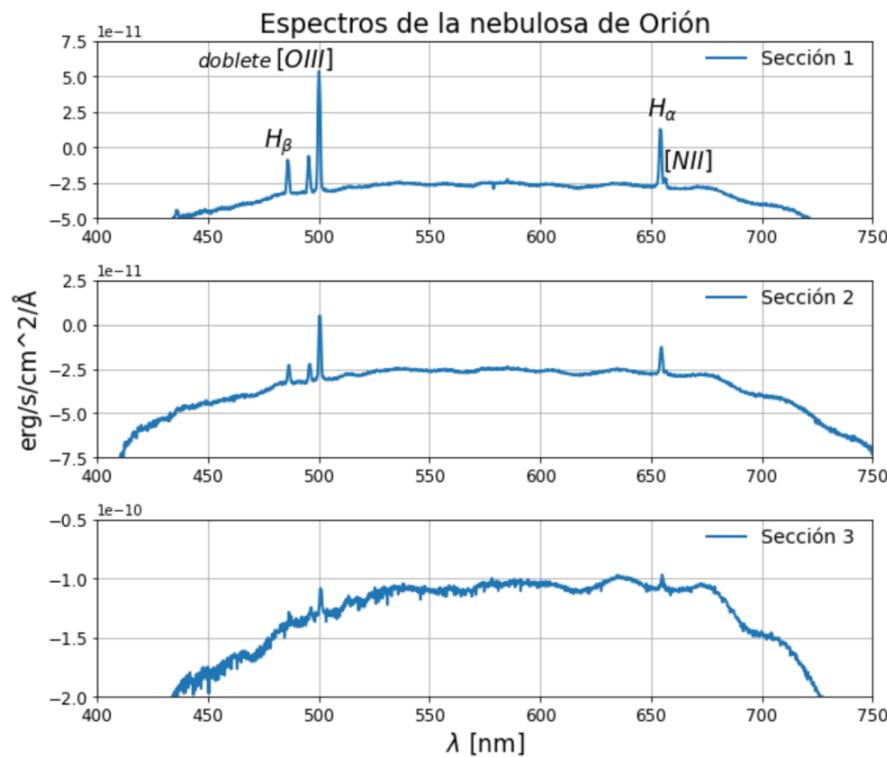


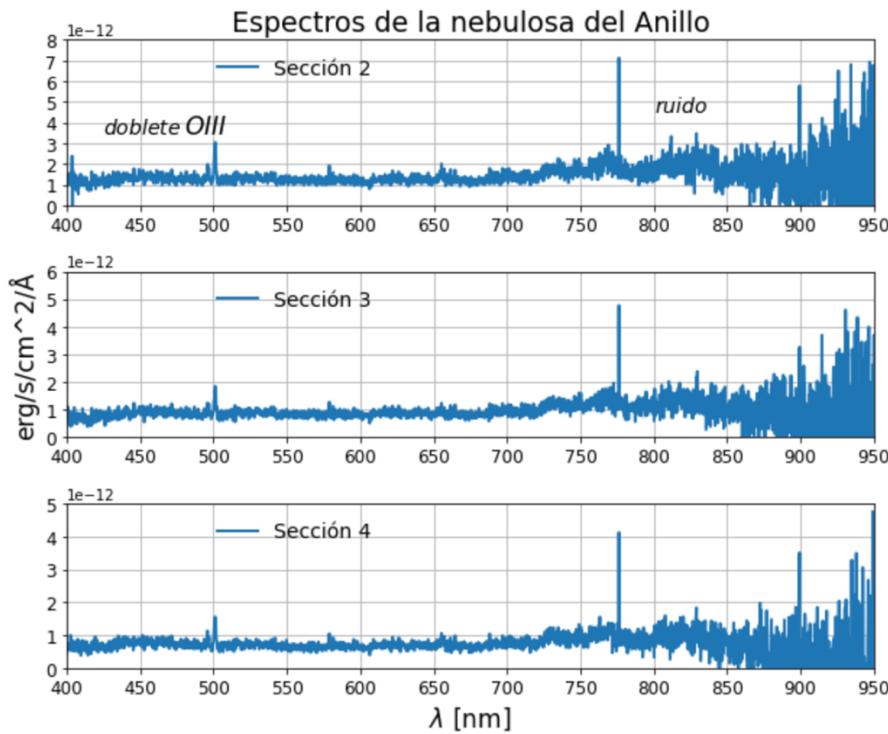
2.7. Generación de los espectros de las nebulosas a partir de la curva de respuesta instrumental

A partir de las regiones espetrales determinadas en la sección 2.6 se aplica la curva de respuesta instrumental (ver figura 14) haciendo uso de la relación detallada en la figura 11, para así determinar sus correspondientes espectros en unidades físicas de “erg/s/cm²/Å” frente a longitudes de onda. Se debe recordar que, al aplicar la curva, se deben emplear las regiones espetrales de las nebulosas recortadas pues según la figura 11 la curva se elaboró a partir de espectros recortados de estrellas de calibración.

De la figura 19 se pueden determinar las principales líneas espetrales de emisión detectadas para cada nebulosa.

Figura 19. Espectros de las regiones seleccionadas para cada nebulosa.





Para la nebulosa de Orión se consiguen distinguir principalmente las líneas de emisión del espectro del hidrógeno, H_α y H_β (asociadas a $\lambda_{tab.}(H_\alpha) = 656,3\text{nm}$ y $\lambda_{tab.}(H_\beta) = 486,1\text{nm}$), el doblete de oxígeno dos veces ionizado $[OIII]$ (con $\lambda_{tab.}^{(1)}([OIII]) = 495,9\text{nm}$ y $\lambda_{tab.}^{(2)}([OIII]) = 500,7\text{nm}$) y nitrógenos una vez ionizados $[NII]$ ($\lambda_{tab.}([NII]) = 658,3\text{nm}$). Se puede observar cómo, a medida que se representa una sección cada vez más alejada de la zona de las líneas (según la figura 16) se detectan picos de emisión cada vez menos intensos y definidos, hasta llegar a un “continuo”. Cabe destacar la diferencia entre líneas permitidas (H_α y H_β) y prohibidas ($[OIII]$ y $[NII]$), donde las primeras ocurren como consecuencia de la recombinaión del átomo y las segundas se dan por el choque de electrones libres contra átomos, ionizándolos y dando las transiciones correspondientes (estas ocurren solo a bajas densidades)^[8, 9].

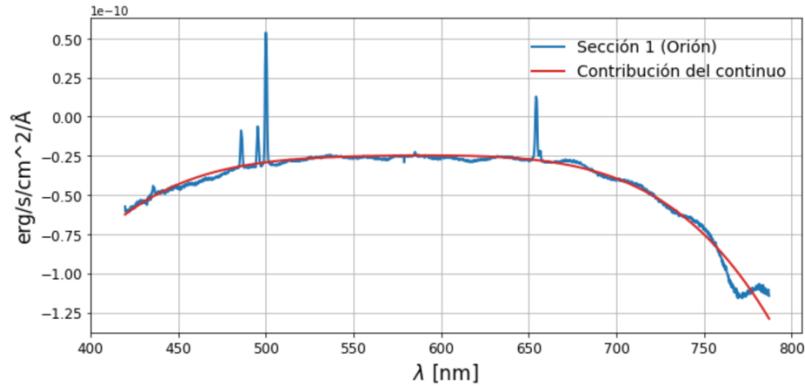
Por otro lado, se observan los espectros de la nebulosa del Anillo. En este caso solo se distingue el doblete de oxígeno dos veces ionizado debido a que el objeto presenta saturación en el espectro por un error de sobreexposición. Es por ello por lo que existe una predominancia del ruido, claramente identificable en las gráficas. No obstante, se puede verificar que la intensidadpectral detectada es mayor para la primera sección brillante, disminuyendo para la zona oscura y manteniéndose aproximadamente inalterable en la última región.

2.8. Eliminación del continuo y representación de los espectros finales de las nebulosas

Finalizando con el estudio se procede a eliminar la contribución continua al espectro, que en ocasiones resta información a la hora de analizar los resultados obtenidos. Se procede a partir

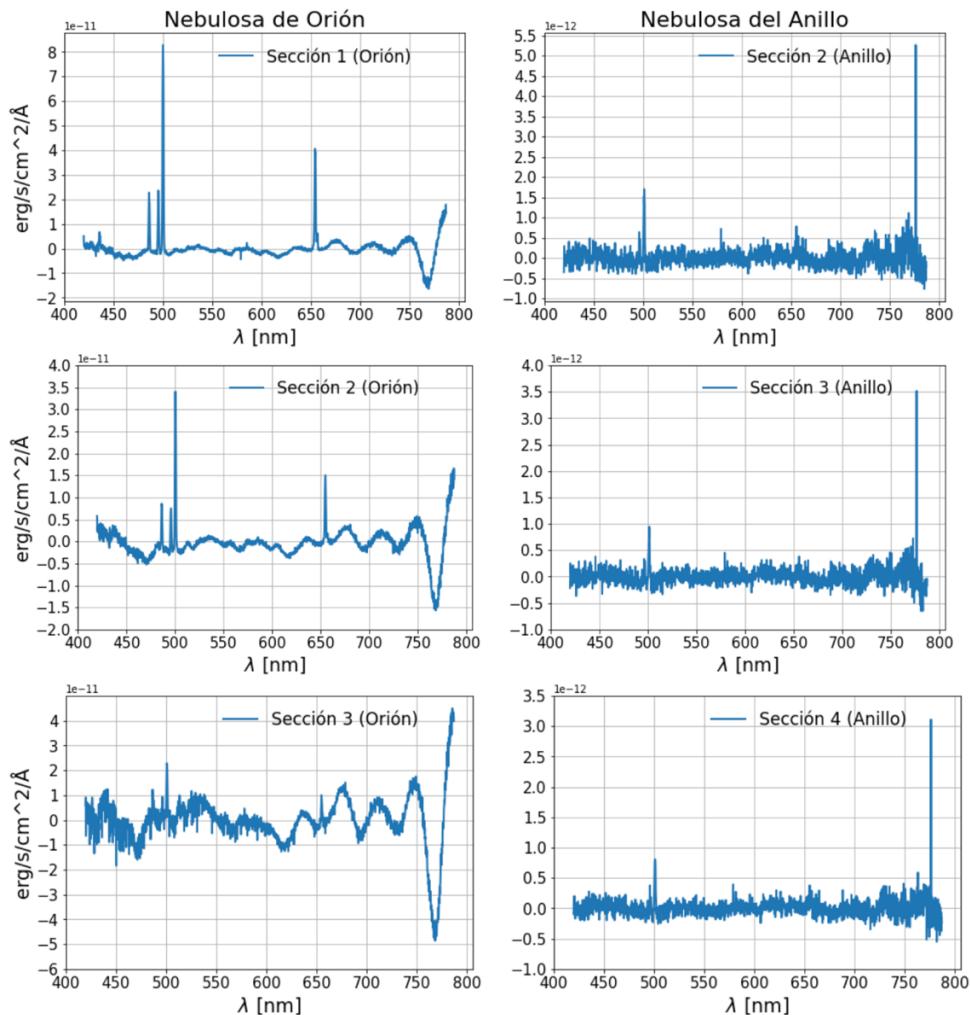
de los espectros de la *figura 19*, generando para cada uno de ellos un ajuste a un polinomio de cuarto orden, procedimiento análogo al llevado a cabo para el ajuste lineal de la *figura 5*.

Figura 20. Contribución del continuo a la primera sección del espectro de Orión (ejemplo).



Bastaría con sustraer dicha contribución al espectro total para obtener los resultados finales. De la *figura 21* se observan dichos resultados para cada sección de la nebulosa, observándose ahora espectros con menos cuentas negativas pero con la misma información esencial que los representados en la *figura 19*.

Figura 21. Espectros finales de las nebulosas.



3. Conclusiones

Durante el estudio se desarrollaron, inicialmente, códigos de reducción de datos con motivo de conseguir una eliminación del ruido de fondo presente en la información recaudada tras la observación. Seguidamente, y a partir de la elaboración de espectros de lámparas de mercurio y neón, se determinó no solo la relación de calibración de píxeles a longitudes de onda sino el ángulo de giro de las imágenes y la anchura precisa de la rendija. Aplicando todas estas contribuciones a los resultados en bruto obtenidos y atribuyendo al análisis una función para la ganancia (que lejos de encontrar otra más adecuada para el aparato instrumental se asumió como viable) se obtuvieron las imágenes de ciencia para las estrellas y nebulosas.

Seguidamente se comenzaron a analizar los espectros estelares, esenciales para la calibración en flujo mediante la creación de la curva de respuesta instrumental. En un principio se procedió calibrando en longitudes de onda los espectros y sustrayendo sus contribuciones del cielo. Posteriormente, se obtuvieron espectros tabulados para las mismas estrellas con el objetivo de comparar la calidad de los datos medidos y observar la importancia de la evaluación de estrellas con diferentes espectros. Asimismo, se pudo verificar que la estrella HD-176896 era en realidad azul y tras un análisis de las curvas de respuesta individuales se obtuvo la correspondiente a la suma de Rigel y Betelgeuse, mostrando esta última un rangopectral mucho más amplio y aplicada al resto del estudio.

Continuando con el análisis se procedió a calibrar en longitudes de onda los espectros de las nebulosas no sin antes elaborar secciones de las mismas y analizarlas como espectros por separado, sustrayendo o no el cielo en función del caso de estudio. A continuación, se aplicó la curva de respuesta instrumental a cada sección, obteniendo así los espectros de las nebulosas en unidades físicas de flujo frente a longitudes de onda y verificando la presencia de las líneas de emisión, características de las nebulosas y menos visuales en el caso del Anillo debido a una sobresaturación en los datos medidos. Finalmente, sustrayendo la contribución del continuo a cada espectro se extraían los resultados finales del estudio de espectroscopía observacional.

A lo largo del proceso se detectaron regiones negativas en los espectros, resultados en contra de las predicciones físicas que indican la necesidad de flujos puramente positivos. Tras una comprobación tanto del código de reducción de datos como del código de análisis se atribuyó la discrepancia a un posible uso inadecuado de la función de ganancia, siendo esta apropiada para valores máximos de 300 cuando el montaje experimental admite hasta valores de 600. No obstante, los resultados parecen entrar dentro de lo teóricamente establecido y se consiguen determinar líneas espectrales características de medios poco densos como son las nebulosas.

4. Referencias

- [1] J. V. Díaz, «Espectroscopía» Universo Blog, [En línea]. Disponible: <https://josevicentediaz.com/astronomia-practica/espectroscopia/>
- [2] Daniel, «Flats» Dastronomía, 21 agosto 2008. [En línea]. Disponible: <http://www.dastronomia.com/505/flats/>
- [3] «Typical Spectra of Oriel Instruments Spectral Calibration Lamps»
- [4] «CASTELLI AND KURUCZ ATLAS» Space Telescope Science Institute (STScI), [En línea]. Disponible: <https://www.stsci.edu/hst/instrumentation/reference-data-for-calibration-and-tools/astronomical-catalogs/castelli-and-kurucz-atlas>
- [5] F. Chereau y G. Chereau, «Stellarium Web» [En línea]. Disponible: <https://stellarium-web.org/>
- [6] «SIMBAD: basic query» Universidad de Estrasburgo/CNRS, [En línea]. Disponible: <https://simbad.unistra.fr/simbad/sim-fbasic>
- [7] «Nebulosa del Anillo» Wikipedia, la enciclopedia libre, 2 oct 2022. [En línea]. Disponible: https://es.wikipedia.org/wiki/Nebulosa_del_Anillo
- [8] Á. R. López Sánchez, «El código de barras de las nebulosas» Universo Rayado, 27 nov 2015. [En línea]. Disponible: <https://universorayado.naukas.com/2015/11/27/el-codigo-de-barras-de-las-nebulosas/>
- [9] C. E. Tapia Ayuga, «Líneas de emisión» De la A a la CETA, [En línea]. Disponible: http://carlostapia.es/astro/lineas_emision.html