

# Reporte Espectroscopia - Reducción de datos espectroscópicos en IRAF

Hollman Daniel Quintero Salazar

Octubre 2022

## Resumen

La astrofísica moderna emplea la espectroscopia de tal forma que esta última permita discernir propiedades tales como la velocidad radial, composición química, movimiento peculiar, entre otras propiedades, de los objetos del espacio exterior. Por tal motivo, su entendimiento y estudio se presenta como un campo de alto impacto dentro de la investigación en astrofísica. El presente reporte es una memoria de trabajo del curso *Spectroscopy in Astrophysics* ofrecido por el Dr. Cesar Augusto Caretta como optativa dentro del pensum académico del posgrado en ciencias (Astrofísica) de la UG. El objetivo general es dejar en evidencia las competencias prácticas adquiridas durante el curso; competencias enfocadas en la reducción y procesamiento de espectros astronómicos con el paquete computacional IRAF.

## 1 ASPECTOS PRELIMINARES

Antes que nada es preciso mencionar que se instaló el paquete computacional **IRAF27** en un ambiente en `conda(python)`. La interfaz de usuario empleada fue `xgterm` y la interfaz gráfica **DS9**.

La información y el análisis aquí presentado tienen como referencia el periodo de observación comprendido entre el 12 y el 16 de agosto del año 2007 en el Observatorio San Pedro Mártir, Baja California (MX). La toma de datos se llevó a cabo por el Dr. Cesar Augusto Caretta utilizando el espectrógrafo Boller & Chivens. La totalidad de los datos (cinco noches de observación) comprenden un espacio aproximado de 362.2 MB (294 archivos en formato `.fit`) siendo estos imágenes *bias*, *darks*, *flats*, lamparas y objetos. Del mismo modo hubo acceso a la bitácora de observación

diligenciada *in situ*, documento que facilitaría la reducción y análisis de la información.

En primera instancia se procedió a organizar los datos clasificándolos según su tipología, es decir, para cada noche de observación, se creó una carpeta que contuviera varias subcarpetas de nombre *bias*, *darks*, *flats*, etc., donde se encontraran los archivos de su mismo tipo y una lista con sus nombres. Es importante hacer la salvedad que los archivos tipo *dark* solo existían para la noche #2.

Posteriormente se procedió a revisar los *headers* de las imágenes usando el paquete *imutil* y la tarea *imheader*. El objetivo de este paso fue revisar si las imágenes contenían información sobre la longitud, latitud y elevación del lugar donde fueron obtenidos los datos (tarea *hselect*). Dado que esta información no existía en el *header* de las imágenes antes de ser procesadas, se utilizó la tarea *hedit* para adicionar los

campos mencionados anteriormente e ingresar los valores correspondientes(lon=31.04417,lat=-115.46361,elev=2800). Este paso era de vital importancia debido a que **IRAF** hace uso de la elevación y posición geográfica del lugar para ejecutar algoritmos de corrección atmosférica y orientación por los movimientos terrestres.

Luego de esto se volvió a utilizar la tarea *hedit* pero esta vez adicionando el paquete *ccdred*. El objetivo de esta operación fue agregar al *header* el tipo de imagen que estaría siendo procesada: *bias*, *darks*, *flats*, etc.

## 2 COSMÉTICA

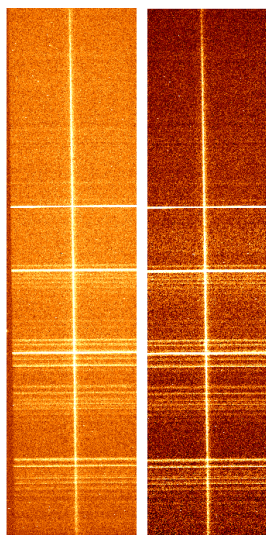


Figura 1: Imagen sin recortar (izquierda) e imagen recortada (derecha)

Debido a que la luz de la rendija empleada en la observación puede tener cierto desfase con el campo que abarca el CCD (incluso después de la colimación), se debe recortar la zona sobrante que no aporta nada de luz al CCD. Nótese de la figura 1 que la imagen de la izquierda sin recortar presenta una zona en la parte izquierda que no contiene información de la luz que pasó por

la rendija, este es el motivo por el cual se debe ajustar la imagen.

Todas las imágenes, desde los *bias*, hasta los objetos debían sufrir esta corrección. No obstante, se deben hacer dos consideraciones importantes. La tarea para realizar este proceso de corte es *ccdproc*; antes de ejecutar esta tarea es necesario ejecutar la tarea *setinstrument* la cual especifica las propiedades técnicas del instrumento empleado y condiciona las características de corte, por otra parte, si bien la tarea *ccdproc* requiere que se ingresen los bordes a cortar dentro de las imágenes, dependiendo el tipo de imagen que será arreglada también se requiere agregar archivos *masterbias*, *masterflat*, etc., con tal de ajustar las propiedades de la imagen resultante. Para el caso concreto, en la figura 1, una imagen objeto, se observa no solo el corte de la imagen, sino también una mejora en la disminución del ruido promedio debido a la extracción de *masterbias*, *masterflat*, etc.

Las imágenes objeto deben ser optimizadas sustrayendo los *bias*, *darks* y *flats*. Con tal de obtener un "master" para cada tipo de imagen se empleó de la interfaz DS9. La idea general consistía en utilizar aquellos archivos que fueran de una calidad aceptable y no presentaran desviaciones significativas que entorpecieran los resultados finales. Se revisaron una por una las imágenes con DS9, se empleó la tarea *imstat* y se revisó la bitácora de observación para desechar aquellas imágenes que fueran defectuosas.

Utilizando el paquete *ccdred* y la tarea *zero-combine* se creó el archivo "Zero4", el *masterbias* de la reducción de los datos (ver figura 2). Justamente, y como se mencionó en el párrafo anterior, el archivo se llama "Zero4" debido a que se corrieron varios intentos con tal de dejar el *masterbias* lo más plano posible eliminando aquellos archivos defectuosos o con algún tipo de gradiente.

Utilizando el paquete *ccdred* y la tarea *dark-combine* se creó el archivo "Dark", el *masterdark* de la reducción de los datos (ver figura 3). Igualmente, en la tarea *ccdproc* se incluyó el archivo "Zero4" con tal de cortar los archivos *dark*. Se consideró necesario incluir el *masterdark* en la reducción de los datos puesto que su valor medio usando la tarea *imstat* fue de 3.5.



Figura 2: *Masterbias*. Archivo "Zero4.fit"

Del mismo modo, utilizando el paquete *ccdred*, la tarea *flatcombine*, y cortando los archivos con *ccdproc* adicionando "Zero4" y "Dark" se obtuvo el *master-Domeflat*. Debido que los archivos *dome flat* (o *flats* en general) son un componente multiplicativo, a diferencia de los *bias* o los *darks* los cuales son aditivos, se empleó el paquete *longslit* y la tarea *response* con el ánimo de normalizar el archivo *master-Domeflat* (ver figuras 4 y 5).

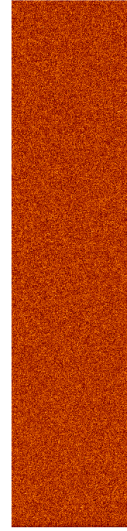


Figura 3: *Masterdark*. Archivo "Dark.fit"

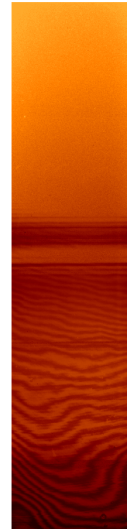


Figura 4: *master-Domeflat*. Archivo "nFlat.fit"

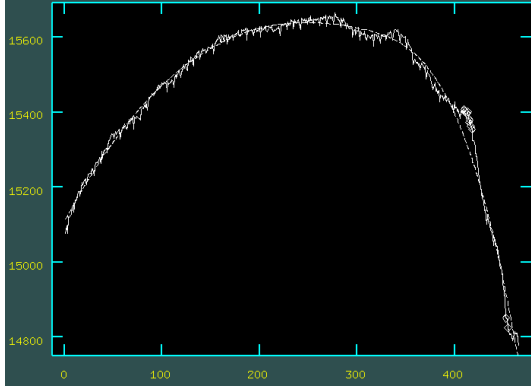


Figura 5: Normalización mediante ajuste polinómico del *master-Domeflat*

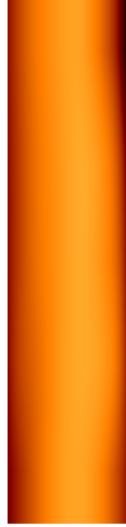


Figura 6: *master-Skyflat*. Archivo "nSky.fit"

Como paso previo antes de obtener los objetos de ciencia, también se obtuvo un *master-Skyflat* para hacer una corrección de iluminación. Se empleó una metodología similar a esa utilizada en la obtención del *master-Domeflat*, sin embargo se usaron las tareas *imarith*, *combine* e *illumination*. El archivo resultante se llamó

"nSky" y se puede observar en la figura 6.

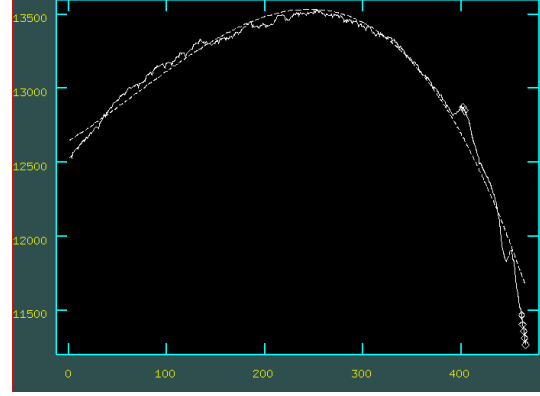


Figura 7: Normalización mediante ajuste polinómico del *master-Skyflat*

Finalmente, utilizando la tarea *ccdproc* y los archivos "Zero4", "Dark", "nFlat" y "nSky", se procedió a cortar las imágenes objeto realizando la debida corrección de ruido. Las imágenes objeto de muestra fueron las siguientes (según el nombre asignado en la bitácora de observación): 1032, 1035, 1037, 1038, 1040, 1041, 1043, 1044, 1046, 1047, 1049, 1050, 1052, 1054, 1055 y 1056<sup>1</sup>.

Un buen indicador que garantiza la calidad de la reducción fue observar la imagen objeto final mediante la herramienta *implot*. Nótese de la figura 8 que, al colapsar el eje espacial, la imagen aparece casi plana, sin un gradiente o curvatura aparente, esto es una clara representación de que el ruido sistemático general fue reducido. También es importante notar de la figura unos picos o sumideros muy abruptos. Estas anomalías corresponden a la interacción de rayos cósmicos con el CCD.

<sup>1</sup>No todas estas imágenes correspondían a objetos de estudio propiamente, algunas eran estrellas de calibración, sin embargo, el ejercicio de reducción se llevó a cabo para todas ellas

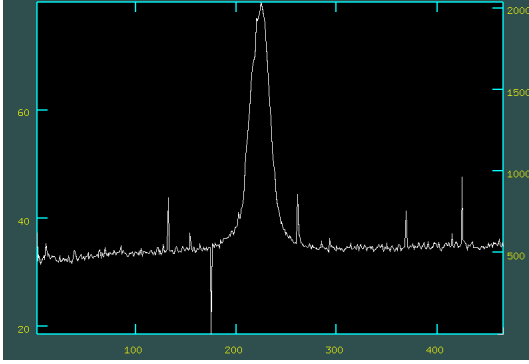


Figura 8: Colapso del eje espacial para el espectro de la imagen 1047 usando la herramienta *implot*.

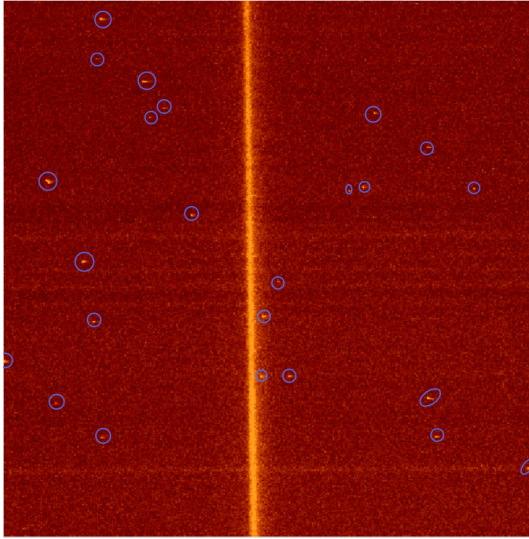


Figura 9: Detalle de la imagen 1047 donde se aprecian las anomalías por rayos cósmicos.

Con ánimo de corregir estas anomalías producidas por los rayos cósmicos (ver figura 9) se utilizó la herramienta *imedit*. La idea subyacente detrás de este procedimiento era suavizar los píxeles defectuosos cercanos al espectro haciendo una especie de promedio con los píxeles adyacentes cambiando dinámicamente el área del *background* y la forma en que se removían

(utilizando promedio por filas o por columnas). En la figura 10 se puede observar la pantalla interactiva que muestra el antes y el después de una remoción de cósmicos. Con este último paso se termina la cosmética de las imágenes y se procede a realizar la extracción del espectro.

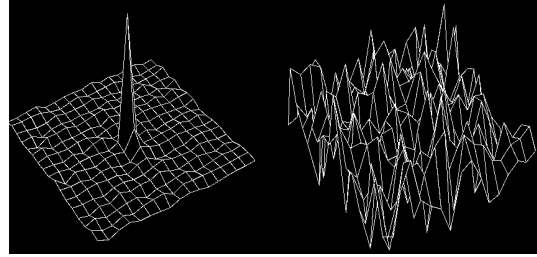


Figura 10: Antes y después de la corrección de un cósmico

### 3 EXTRACCIÓN DE ESPECTROS Y SELECCIÓN DE APERTURAS

Una vez realizada la cosmética de las imágenes se procede a realizar la extracción del espectro con el paquete *apextract* y la tarea *apall*. El procedimiento es básicamente el siguiente: de manera manual (o automática según convenga el caso) se define una apertura. Una apertura es el rango en el eje espacial donde se supone se encuentra el espectro del objeto.

Es fácilmente apreciable (ver figura 11) que el espectro del o los objetos sería el pico más grande y robusto visto desde el marco del eje espacial (la zona en el CCD donde aterriza el espectro). Así pues, la apertura o aperturas se eligen con base en este criterio y se ajustan de manera interactiva delimitando un límite superior, inferior y un nivel basal (aperturas de cielo)(ver figuras 12 y 13). El resultado final es un espectro como el de la figura 14.

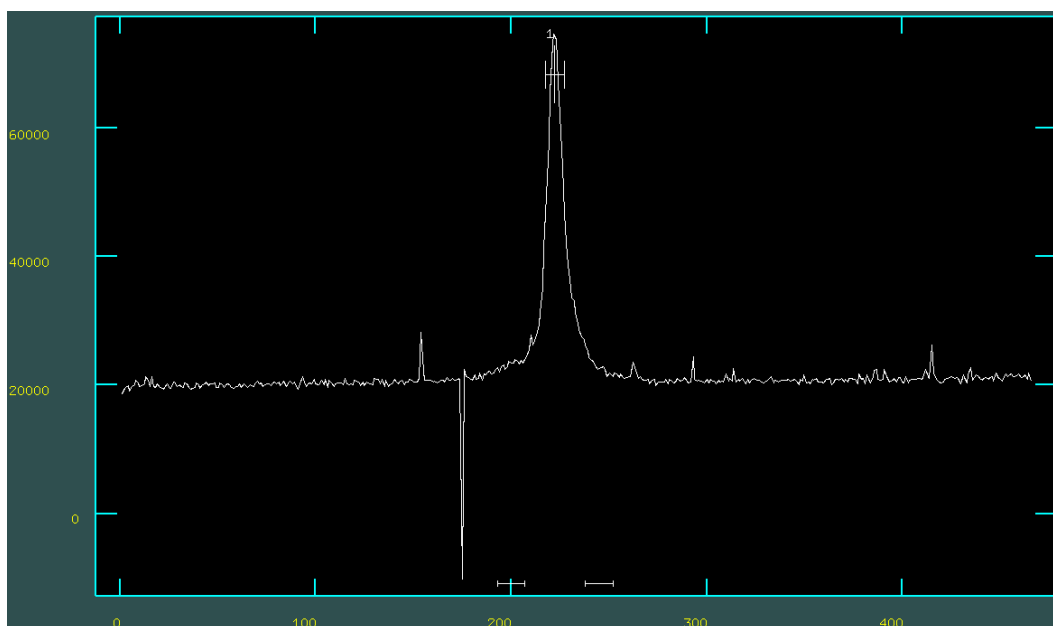


Figura 11: Selección de apertura.

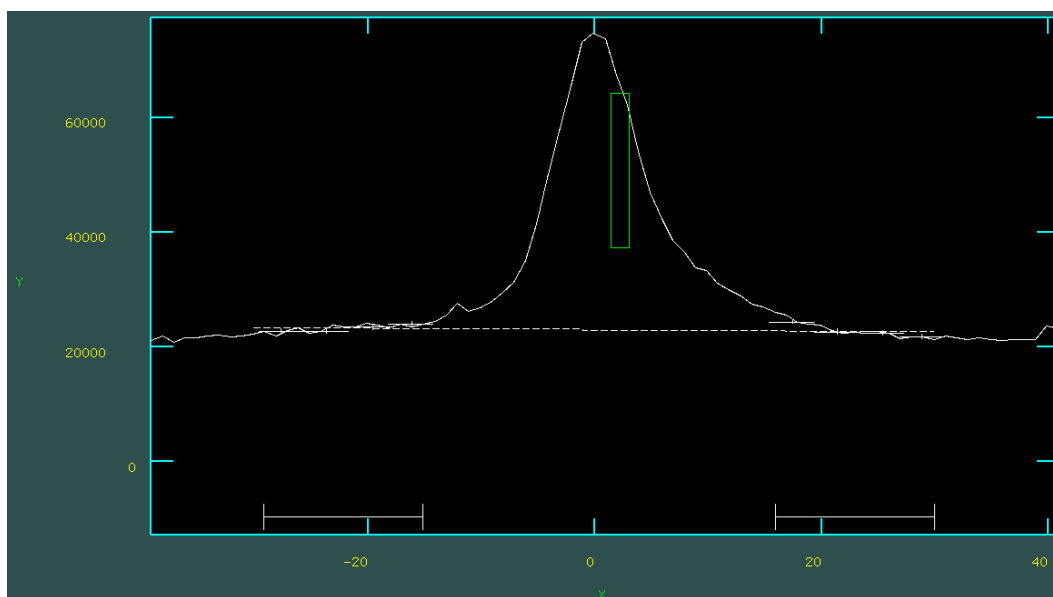


Figura 12: Selección de la apertura de cielo.

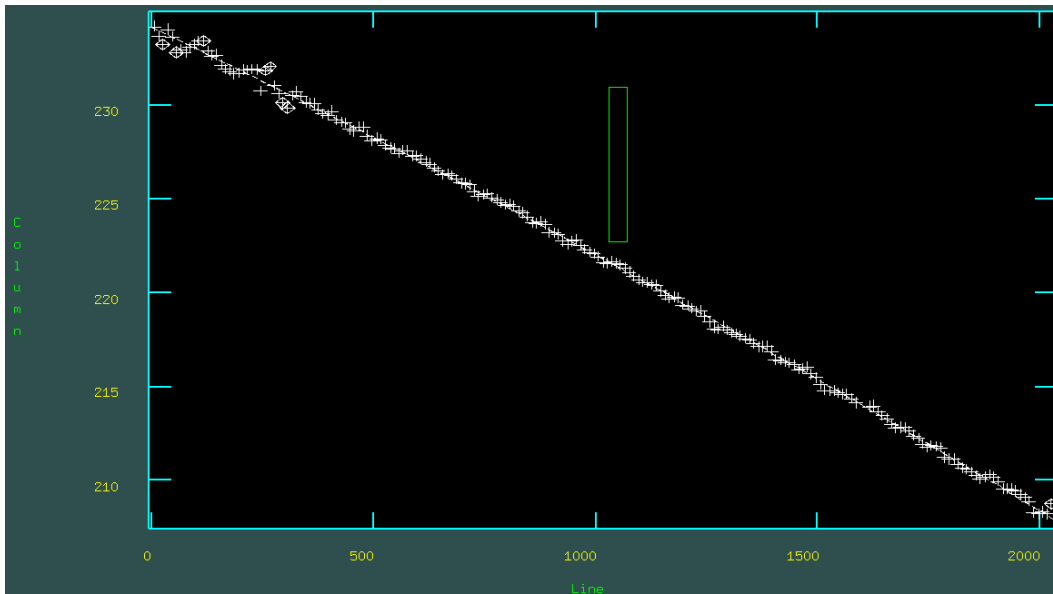


Figura 13: Ajuste del nivel basal.

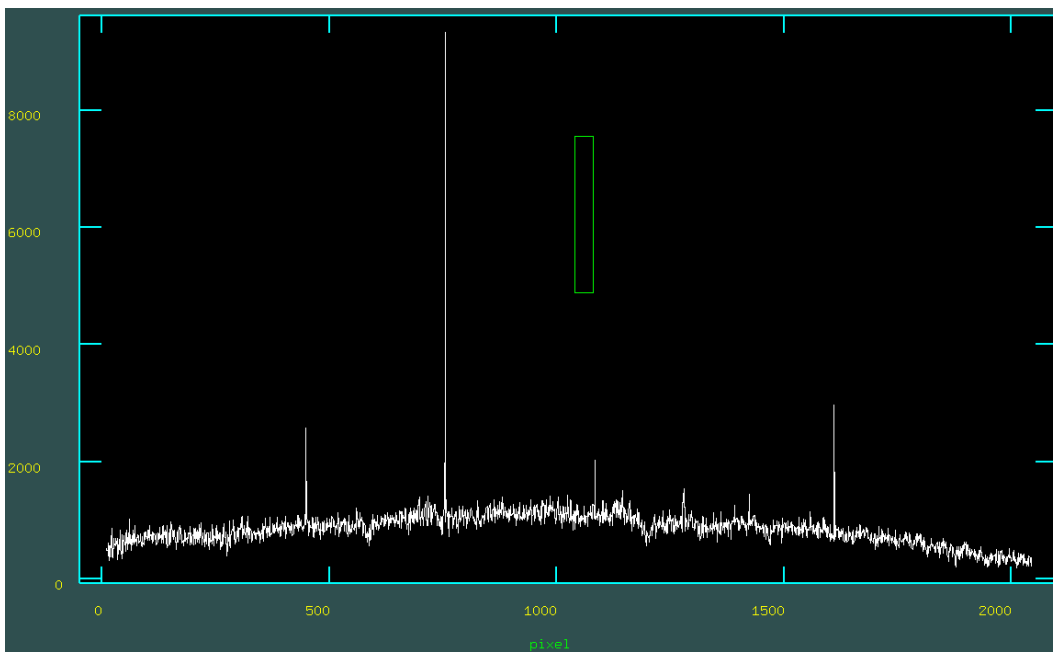


Figura 14: Espectro obtenido de la imagen objeto 1047

En la figura 14 también se observa la presencia de algunos cósmicos que pasaron de la limpieza inicial. Estas anomalías serían corregidas más adelante.

## 4 CALIBRACIÓN DE LÁMPARAS

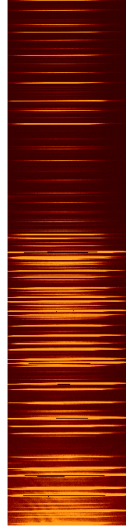


Figura 15: Imagen CCD típica de una lámpara. Se observan claramente las líneas de emisión para calibrar

Una vez finalizado el proceso anterior se deberán calibrar los espectros obtenidos con las lámparas de calibración. La idea general de este paso es obtener el espectro calibrado en longitud de onda respecto a un estándar de referencia.

En primera instancia se realiza la cosmética a las imágenes de las lámparas usando la tarea *ccdproc* (ver figura 15) y luego se extrae el espectro de esa lámpara con *apall* asociándola con el objeto u objetos correspondientes (ver figura 16). Posteriormente, usando la tarea *identify*

(o *reidentify* en caso de una lista y una calibración previa) se establece la calibración de las lámparas de forma manual en relación a una base de datos que contenga líneas de emisión bien conocidas, ej. CuNeAr. Se realiza un ajuste de correlación y la calibración de las lámparas se da por terminada (ver figuras 17 y 18).

Nótese de las figuras 17 y 18 que cuantas más líneas de emisión se identifican mejor es el ajuste de correlación. Para el caso de la imagen ejemplificada el valor de RMS es de 0.04792. Las líneas identificadas fueron las siguientes<sup>2</sup>:

Líneas identificadas			
Línea	Longitud de onda(Å)	Línea	Longitud de onda(Å)
Ar II	4609.57	Ne I	5944.83
Ar II	4764.87	Ne I	6074.34
Ar II	4879.86	Ne I	6096.16
He I	4921.93	Ne I	6266.50
Ar II	4965.08	Ne I	6334.43
He I	5015.68	Ne I	6382.99
Cu I	5105.54	Ne I	6598.95
Cu I	5153.24	Ne I	6717.04
Cu I	5218.2	Ar I	6871.29
Ne I	5400.56	Ne I	6928.47
Ne I	5764.42	Ne I	7032.41
He I	5875.62	Ar I	7147.04

<sup>2</sup>Además de la lista que se presenta también se identificaron otras líneas que estaban saturadas, estas no se incluyeron en la calibración.



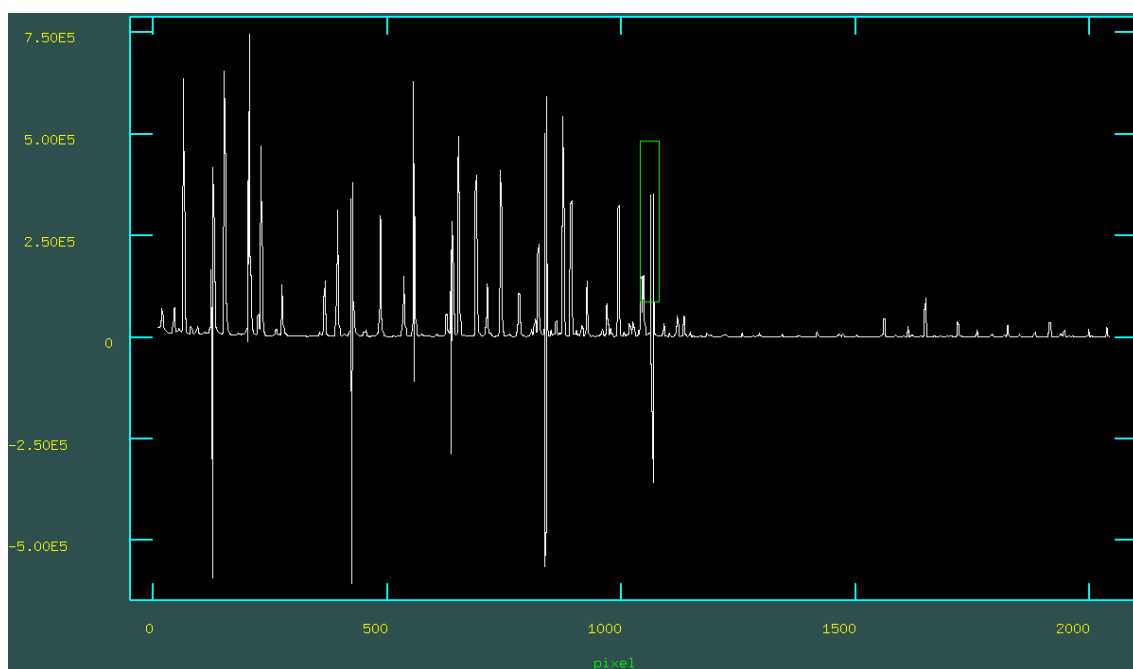


Figura 16: Espectro de una lampara

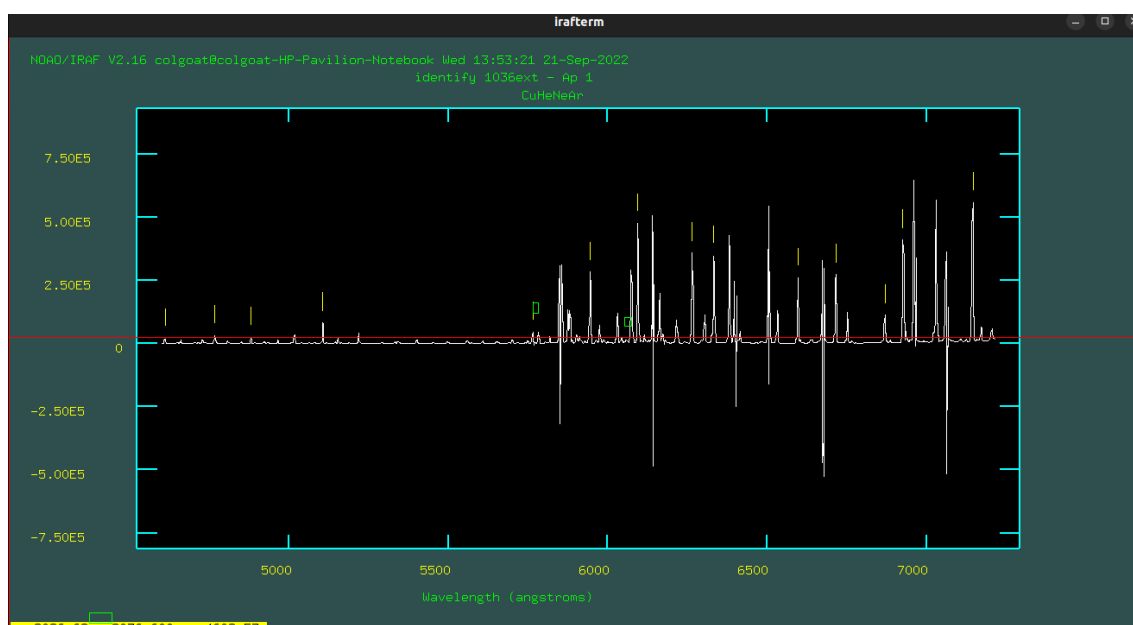


Figura 17: Identificación de líneas dentro del espectro de una lámpara.

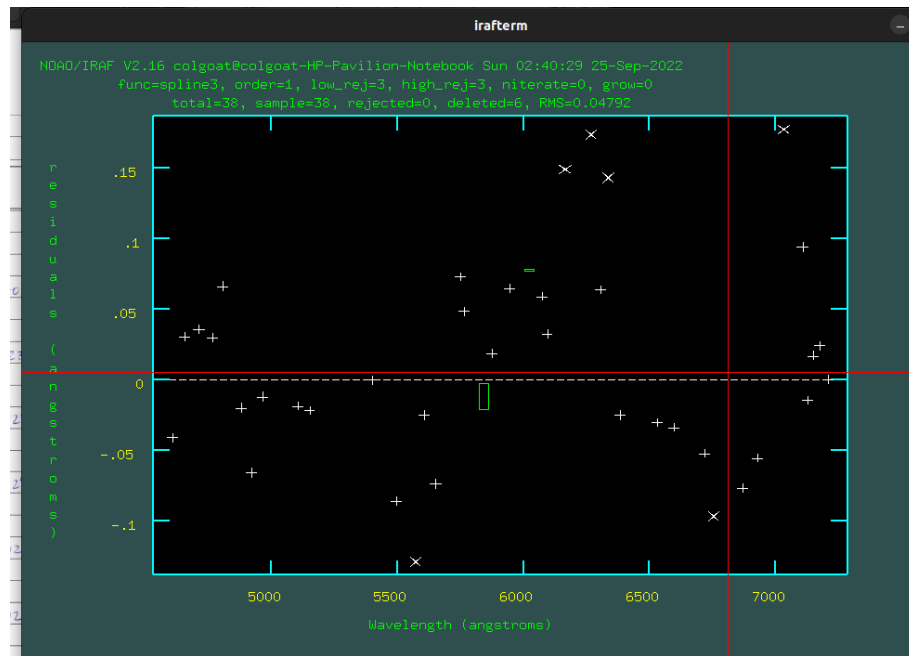


Figura 18: Ajuste de correlación para una lámpara.

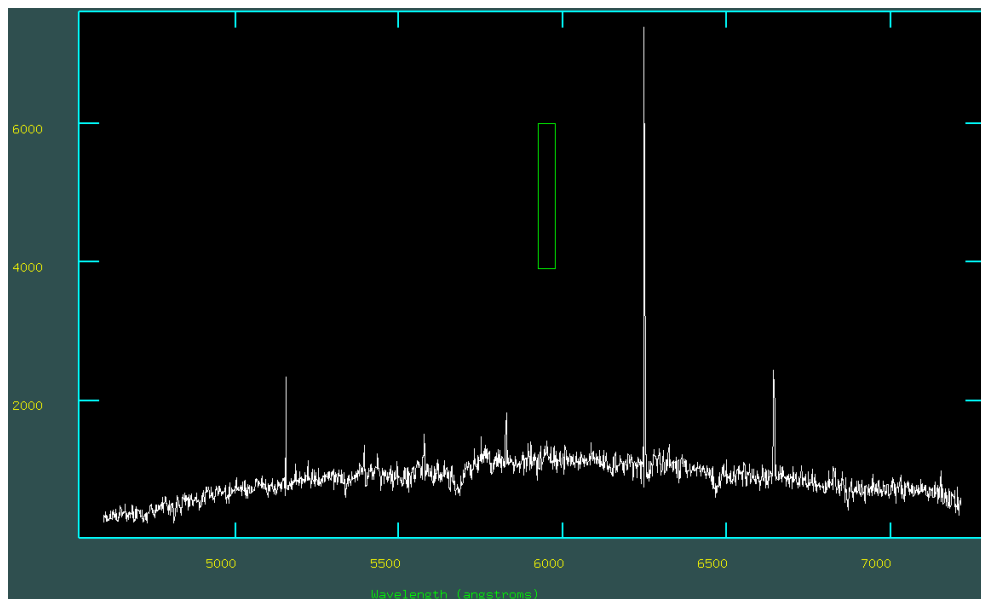


Figura 19: Espectro del objeto 1047 calibrado en longitud de onda

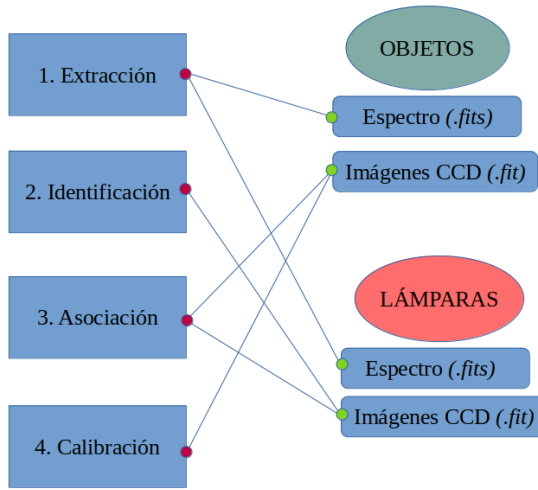


Figura 20: Esquema de identificación de líneas, calibración de lámparas y extracción de espectros

Una vez concluida la tarea anterior se procede a realizar la asociación entre las lámparas previamente calibradas y las imágenes objeto, este paso se realiza con la tarea *refspectra* (si se tienen las listas de objetos y lámparas) o con la tarea *hedit* (si se realiza objeto por objeto).

El objetivo principal de este procedimiento es incluir la información de la calibración realizada a las lámparas (asociadas a cada objeto) a los *headers* de las imágenes objeto. Por último, teniendo asociada la calibración de lámpara a cada objeto en los *headers*, se puede usar la tarea *dispcor* para obtener el espectro de cada objeto calibrado en longitud de onda (en angstroms ( $\text{\AA}$ )). Como se puede ver en la figura 19, aun después de extraer el espectro calibrado de cada objeto en longitudes de onda, con toda la cosmética subyacente, sigue ocurriendo la aparición de cósmicos. Estas impurezas en el espectro serán sustraídas en el paso siguiente.

A modo de resumen de esta sección, se presenta el esquema de la figura 20 el cual engloba todo el proceso de identificación de líneas, calibración de lámparas y extracción de espectros calibrados en longitud de onda.

## 5 COMBINACIÓN DE ESPECTROS MÚLTIPLES

Cuando se toma la imagen de un espectro en el CCD, incluso después de realizar toda la cosmética correspondiente y realizar las calibraciones adecuadas, la señal real del espectro de un objeto con una sola toma es insuficiente para realizar análisis científico (alta probabilidad de errores sistemáticos). Para solventar este dilema lo que se hace es tomar varias muestras del mismo objeto. Es decir, al final de la observación se deberían tener entre 2 y  $5^3$  tomas del mismo objeto con tal de disminuir la razón de señal a ruido.

Tómese como ejemplo las figuras 21 y 22. Estos son espectros debidamente calibrados en longitud de onda del mismo objeto. Los espectros tenían por nombres "1041" y "1043" pertenecientes al objeto "A2469-02". De manera superficial se observa que ambos espectros tienen claras similitudes, lo que indica que de hecho pertenecen al mismo objeto (nótese las líneas de emisión en común en la región de 5000 a 5500  $\text{\AA}$  (OIII, H $\beta$ ) y cerca de los 7000 $\text{\AA}$  (NII, H $\alpha$ )).

No obstante, también se observan dos claras diferencias. 1. Hay picos abruptos en cada espectro que no se corresponden entre sí. Estos picos son anomalías o impurezas producidas por rayos cósmicos. Para remover estas impurezas se activa la tarea *splot* de manera interactiva, se ubica la región que se quiere corregir y se elimina intentando dejar el espectro lo más plano posible con respecto al continuo.

<sup>3</sup>No hay un límite para la toma de datos de un solo objeto, de hecho, se esperaría que cuantas más tomas haya, la disminución de SNR será mayor por que hay más estadística.

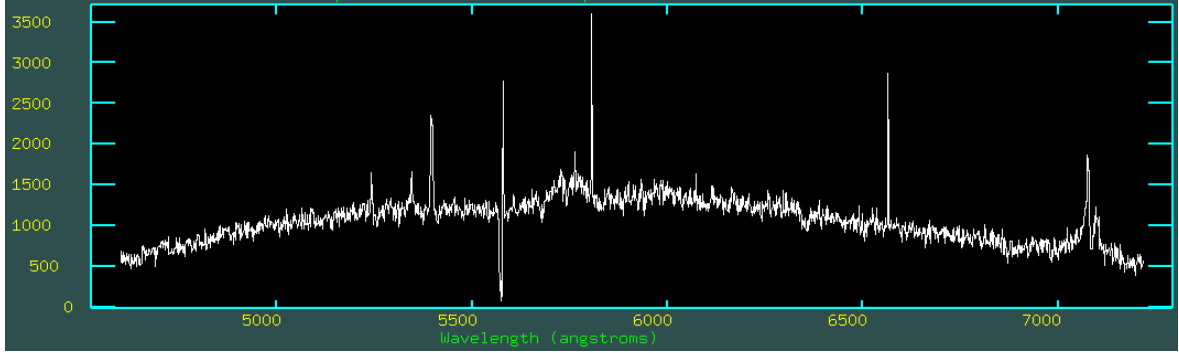


Figura 21: Espectro calibrado en longitud de onda de la imagen 1041.  $\text{RMS}=87.8$ ,  $\text{SNR}=9.49$

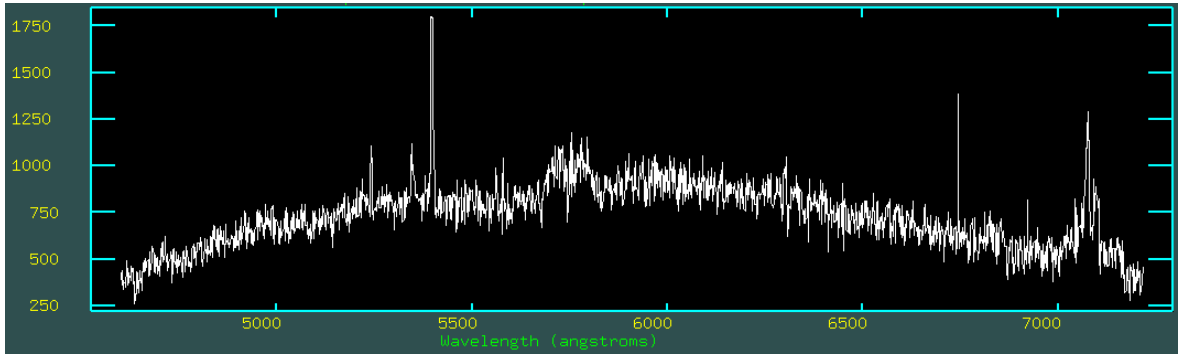


Figura 22: Espectro calibrado en longitud de onda de la imagen 1043.  $\text{RMS}=131.5$ ,  $\text{SNR}=9.24$

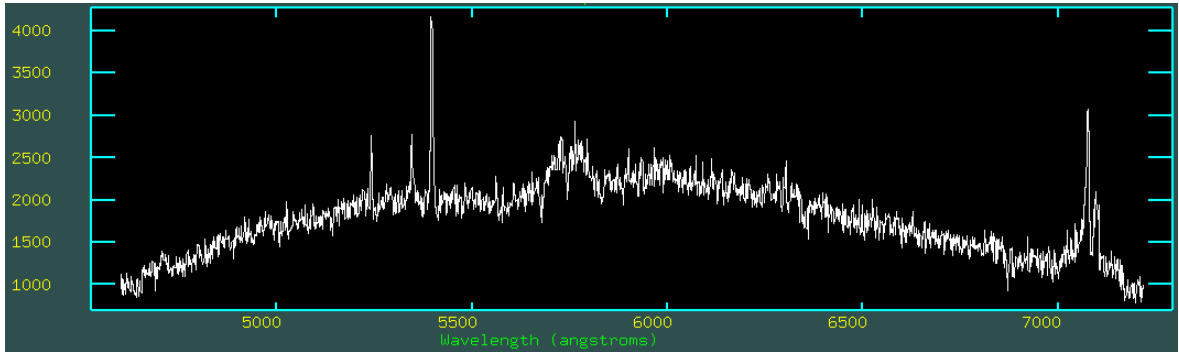


Figura 23: Espectro del objeto A2469-02 con un  $\text{SNR}=10.42$  y sin impurezas por cósmicos

2. La segunda gran diferencia es que, usando la tarea *splot*, se puede conocer la razón de señal a ruido presente en el espectro. Para el caso concreto, la imagen "1041" presentó un valor de SNR de 9.49 y la imagen "1043" un valor de SNR de 9.24. La idea entonces es combinar ambos espectros con tal de obtener el mejor valor de SNR.

Usando la tarea *sarith* (sumando los espectros) se obtuvo un valor de SNR de 10.42 y usando la tarea *scombine* (promediando los espectros) se obtuvo un valor de SNR de 10.39<sup>4</sup>. A pesar que la diferencia entre ambas tareas no es muy significativa, se prefirió usar la tarea *sarith* debido a que solo se contaba con dos espectros para cada objeto aumentando así el valor de SNR.

Nótese de la figura 23, la cual representa

el espectro del objeto "A2469-02" (la suma de los espectros "1041" y "1043"), que ya no hay impurezas por cósmicos y la señal a ruido del espectro aumentó significativamente. Se pueden observar claramente, y de manera independiente, las líneas de emisión y absorción presentes en el espectro.

Así pues, con este último paso, **se tiene el espectro totalmente corregido, calibrado y listo para análisis científico**. Los espectros que se obtuvieron pertenecieron a los objetos "A2469-01"(imágenes "1038" y "1040"), "A2469-02"(imágenes "1041" y "1043"), "A2469-07"(imágenes "1044" y "1046"), "A2469-09"(imágenes "1047" y "1049") y "A0225-07"(imágenes "1052" y "1054"), pertenecientes a la noche 1 (ver figuras 23 a 27).

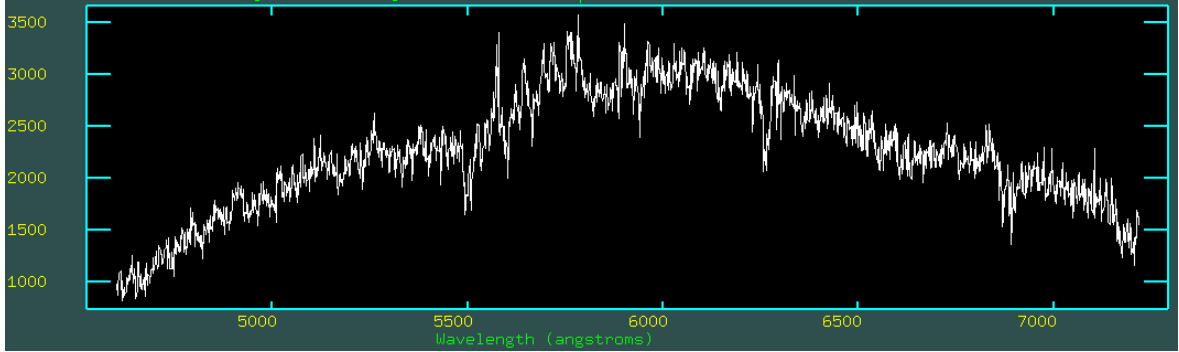


Figura 24: Espectro del objeto A2469-01

<sup>4</sup>Si el espectro tenía más de una apertura se debía indicar cual era para obtener la suma o promedio resultante

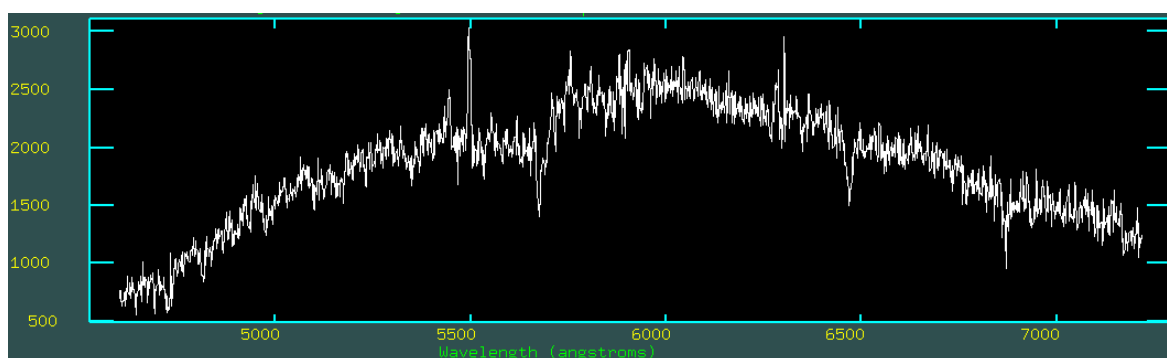


Figura 25: Espectro del objeto A2469-07

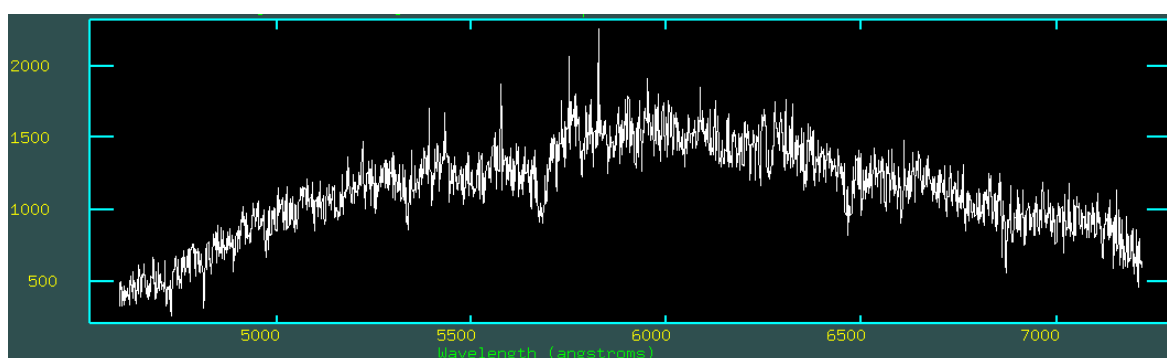


Figura 26: Espectro del objeto A2469-09

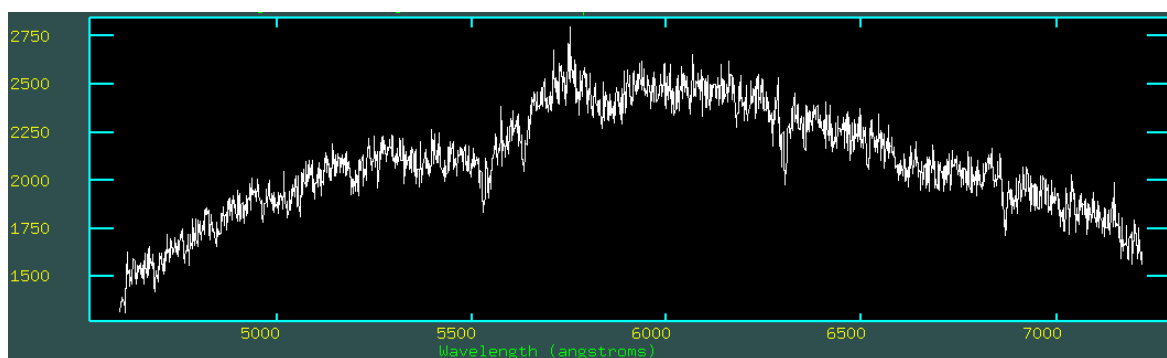


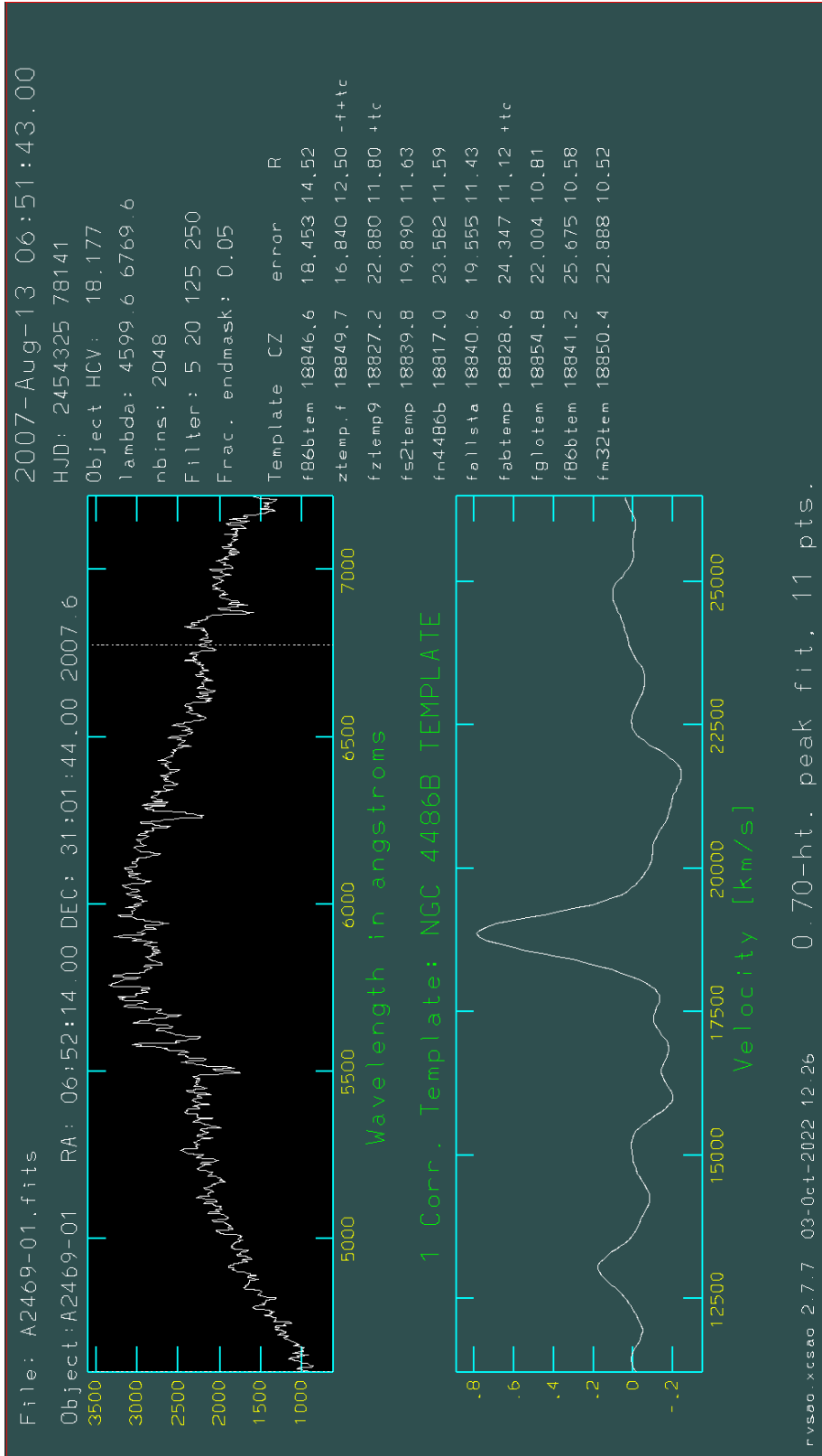
Figura 27: Espectro del objeto A0225-07

## 6 OBTENCIÓN DE VELOCIDADES RADIALES

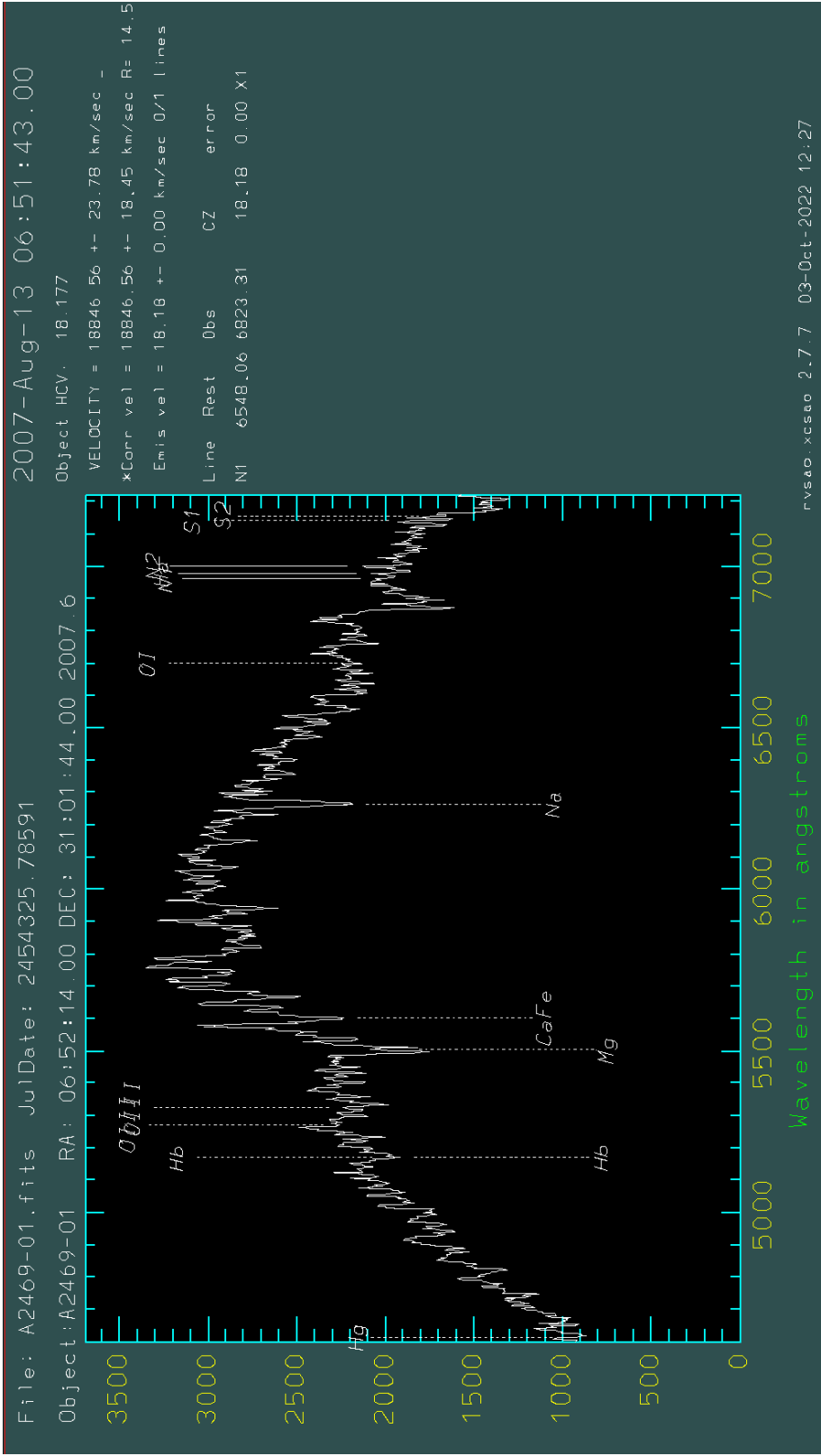
Finalmente, una vez se tienen los objetos debidamente calibrados y listos para análisis científico, se usan las tareas *xcsao* y *emsao* del paquete *rvsao* para obtener las velocidades radiales de los objetos.

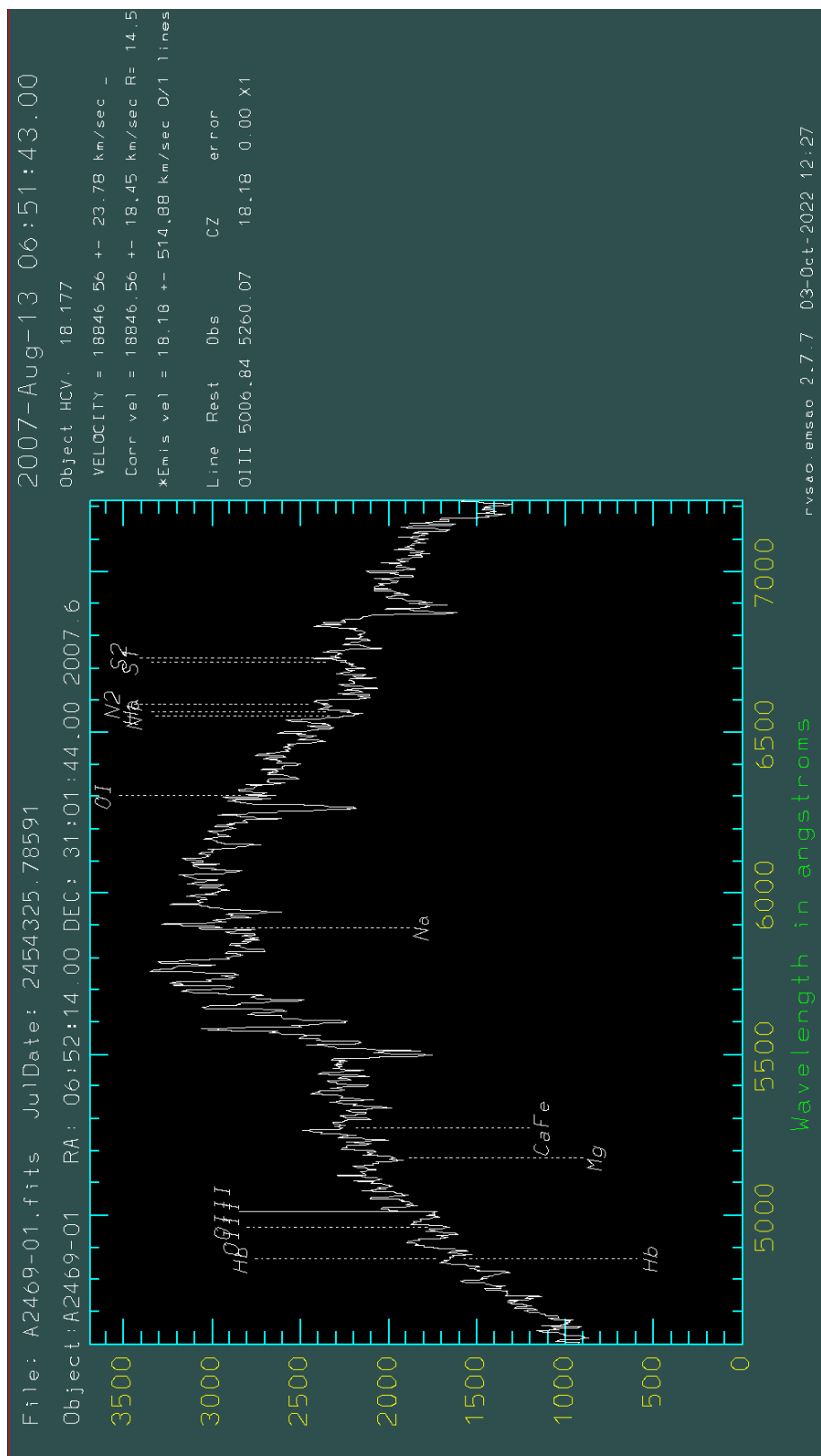
La tarea *xcsao* proporciona una función interactiva para determinar el *redshift* y las dispersiones de velocidad mediante la correlación cruzada del espectro en cuestión con espectros de referencia con velocidades conocidas, por su parte, la tarea *emsao* encuentra líneas de emisión, calcula el *redshift* para cada línea identificada y las combina en una única velocidad radial. Así pues, estas tareas agregan la información anteriormente mencionada al *header* de cada espectro. Luego de ejecutar las tareas fue posible observar línea telúricas, líneas de emisión típicas de galaxias como el doblete de oxígeno,  $H\alpha$ ,  $H\beta$  y líneas de absorción como sodio, hierro o magnesio.

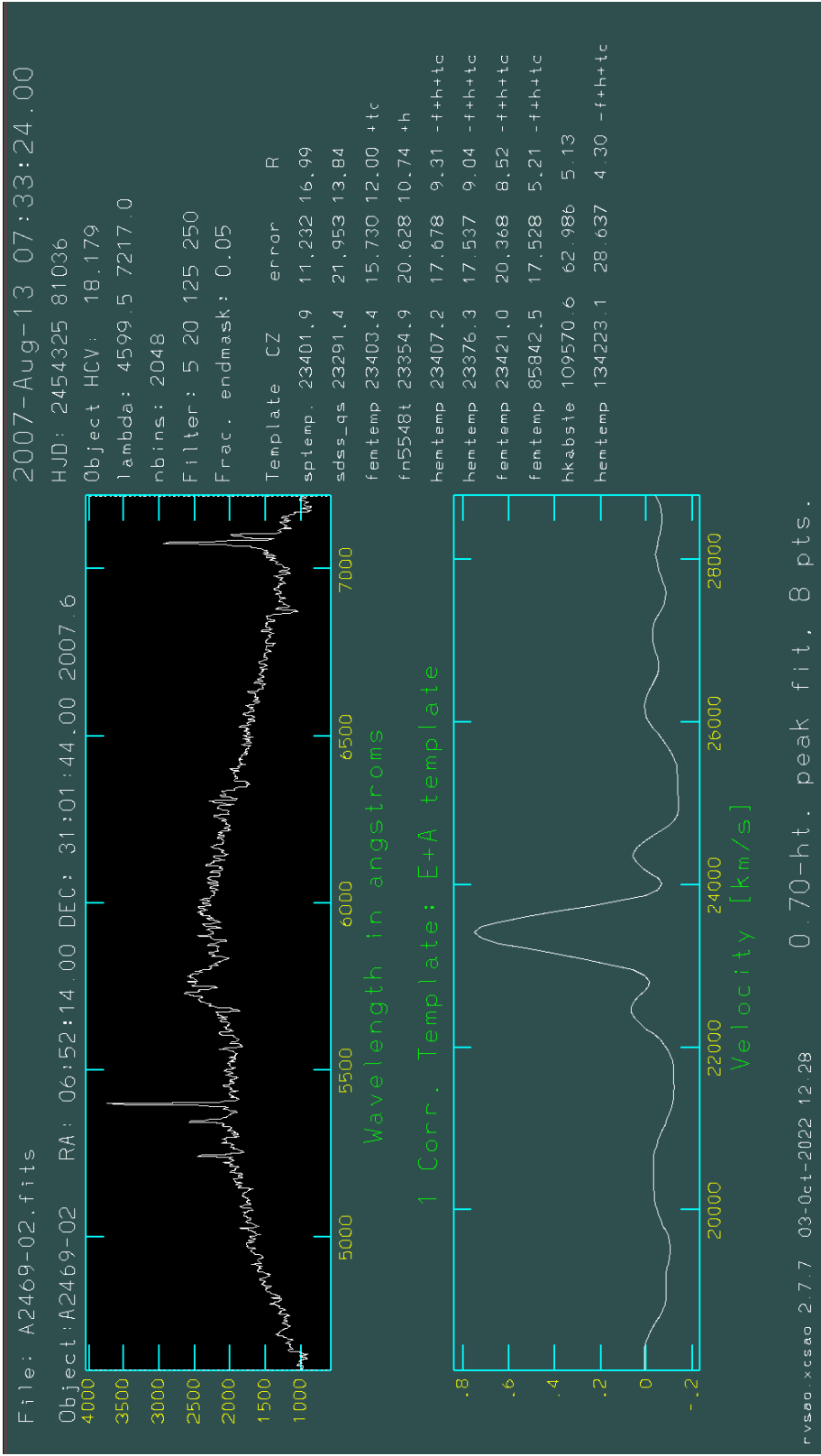
Como evidencia del trabajo realizado se adjuntan los *snapshots* donde se muestran las respectivas velocidades de cada espectro. Del mismo modo, en el envío de este documento estarán adjuntos los archivos *.fit* y *.fits* mencionados durante el texto.

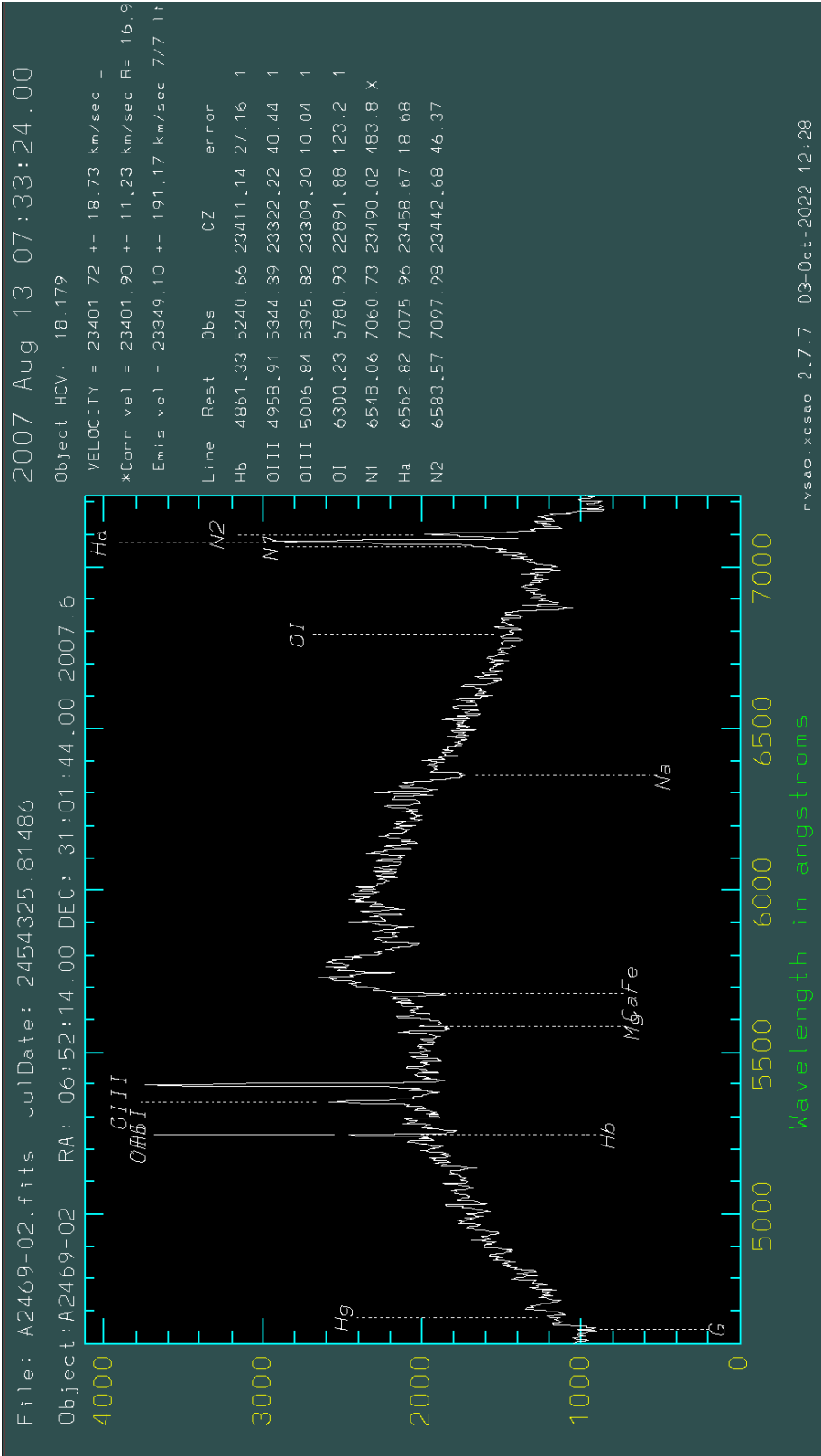












rvsao.xcso 2.7.7    03-Oct-2022 12:28

