# Astrofísica Observacional

# Práctica 4: Espectroscopía

# 1 Introducción

El objeto de esta práctica es la reducción y análisis de imágenes obtenidas con un espectrógrafo. A partir de ellas debemos extraer espectros calibrados en longitud de onda y flujo. Las imágenes a utilizar han sido obtenidas en el telescopio de 50 cm. del Observatorio de Aras de los Olmos. El trabajo lo haremos mediante el uso del paquete de programas IRAF.

# 2 Calibración de las imágenes

Para inicializar IRAF, clicamos sobre el icono correspondiente en las aplicaciones del escritorio virtual Linux Ubuntu. Se abrirá un terminal con el cursor del "command language"

ecl>

En primer lugar tecleamos la instrucción:

set stdimage=imt2048

A continuación nos dirigimos al directorio de trabajo, y abrimos una ventana gráfica para visualizar las imágenes:

!ds9 &

Vemos que las imágenes espectroscópicas tienen un aspecto muy distinto a las imágenes a foco directo. Es importante entender el contenido de cada imagen antes de pasar al procesado posterior.

Como siempre en el uso de las imágenes astronómicas, el primer paso de la reducción es la eliminación de la signatura instrumental, mediante el proceso que llamamos calibración. En las imágenes de esta práctica la calibración consiste en la sustracción de la corriente de polarización ("bias"), de la corriente de oscuridad ("dark") y la corrección de sensibilidad ("flat field"). Todo ello lo haremos con la herramienta "ccdproc". Para invocarla nos trasladamos al directorio donde se encuentra:

noao imred ccdred

En primer lugar comprobamos que el sistema es capaz de reconocer los datos principales de nuestra imágenes, tales como el tipo de imagen correspondiente a cada fichero. Para ello tecleamos:

setinstrument direct
<ctrl>+d
<ctrl>+d

Y a continuación listamos las imágenes, para comprobar que los tipos asignados son correctos:

#### ccdlist

respondiendo "\*" al nombre de la imagen.

Para la corrección de bias, en primer lugar creamos una imagen media de corrección mediante:

#### zerocombine

A continuación restaremos el bias mediante un segundo paso por "ccdproc". Para ello editamos su fichero de parámetros,

#### epar ccdproc

y lo configuramos introduciendo el valor "yes" en "zerocor", y "no" en el resto de las acciones; en el parámetro "zero" introducimos el nombre de la imagen de corrección de bias Zero.fits. Ejecutamos la instrucción:

#### ccdproc

respondiendo "\*" al nombre de la imagen.

Repetimos el proceso para la corrección de oscuridad. Creamos primero el fichero de corrección con

#### darkcombine

y lo configuramos introduciendo el valor "yes" en "darkcor", y "no" en el resto de las acciones; en el parámetro "dark" introducimos el nombre de la imagen de corrección de oscuridad Dark.fits. Ejecutamos de nuevo ccdproc.

A continuación creamos una imagen de corrección de "flat field" mediante "flatcombine". Antes de ejecutarlo hemos de editar su fichero de parámetros:

#### epar flatcombine

e indicar los valores de la ganancia ("gain") y del ruido de lectura ("readnoise"), que para la CCD empleada (Starlight Xpress SXV-H9) son  $0.45 \text{ e}^-/\text{ADU}$  y  $5.0 \text{ e}^-$  respectivamente. También hemos de asegurarnos que el parámetro "process" tenga el valor "no".

En el caso de datos espectroscópicos no cabe esperar que la imagen de "flat field" contenga una distribución más o menos uniforme de la iluminación, como sucede con las imágenes directas que usamos para fotometría. Por una parte, la luz de la lámpara utilizada no se distribuye en todas las longitudes de onda, y por otra la sensibilidad de la CCD también varía con la energía de la radiación recibida. Por tanto, cabe esperar que la iluminación varíe a lo largo de la dirección espectral. Esto lo podemos comprobar analizando con "imexamine" la imagen de corrección, Flat.fits. Si muestreamos a lo largo de una file con la instrucción "l", obtendremos algo parecido a lo que se muestra en la Fig. 1.

Si dividiésemos la imagen de "flat" por su valor medio, como en el caso de las imágenes directas, la corrección de "flat field" deprimiría las líneas centrales a lo largo de la dirección espectral, y aumentaría los extremos, distorsionando de esta forma la imagen a corregir. Por tanto, con imágenes espectroscópicas no se puede proceder de la misma forma que con imágenes directas.

En el caso de las imágenes espectroscópicas, lo que pretendemos es corregir de diferencias de sensibilidad de alta frecuencia en la dirección espectral. Dicho de otra forma, suavizar la variación de la iluminación a lo largo de esa dirección, que como vemos en la Fig. 1, no es una curva suave sino que presenta un grado de "ruido"



Figure 1: Muestreo de la imagen de corrección Flat.fits a lo largo de la dirección espectral.

apreciable. Pretendemos además corregir las diferencias de sensibilidad a lo largo de la dirección espacial.

Para conseguir esto, en lugar de dividir el la imagen de "flat" por su valor medio, la dividimos por una función que ajustamos a lo largo de la dirección espectral. El ajuste de esta función lo hacemos con la herramienta "response", que se encuentra en el directorio noao/twodspec/longslit. Para trasladarnos hasta este directorio desde el noao/imred/ccdred en el que nos encontramos, hacemos:

bye bye twodspec longslit

Ejecutamos la tarea "response". Nos preguntará una serie de cuestiones, que respondemos de la forma siguiente:

Longslit calibration images (): Flat.fits Normalization spectrum images (): Flat.fits : Response function images (): Flat0.fits Fit the normalization spectrum for Flat.fits interactively (): yes

Nos aparecerá una gráfica como las que mostramos en la Fig. 2. En ella vemos como una línea continua la imagen colapsada a lo largo de la dirección espectral, y como línea discontinua el ajuste. Arriba de la gráfica nos aparece la función empleada y el orden del ajuste, junto con otra información.

Si el ajuste no es satisfactorio podemos modificarlo utilizando ajuste distinto o de orden superior. Para ello tecleamos ":", y a continuación "order n" para cambiar el orden del ajuste (ej. :order 3) o "function FUNCIÓN" para funciones de ajuste diferentes (ej. :function spline3). Las posibilidades son spline1 (spline lineal), spline3 (spline cúbico), legendre o chebyshev. El programa que hace este ajuste se denomina "icfit", podemos encontrar más información tecleando



Figure 2: Ajuste de la función de flujo de la lámpara de "flat field" con **response**. Izquierda: primer ajuste con un spline cúbico de orden 3. Derecha: ajuste final con un spline cúbico de orden 15

#### help icfit

Cada vez que cambiemos el orden o la función de ajuste tecleamos "f" para realizar el nuevo ajuste, y comprobamos si es mejor que el anterior, a partir de la inspección visual de la gráfica y de la RMS. Una vez satisfechos con el ajuste salimos del programa tecleando 'q". El ajuste de la derecha en la Fig. 2 se ha obtenido con una función spline3 y orden 15.

El uso de "response" nos ha creado la imagen "Flat0.fits", adecuada para la corrección de "flat field" de las imágenes espectroscópicas. Para hacer la corrección con "ccdproc" volvemos al directorio noao/imred/ccdred, y editamos el fichero de parámetros de "ccdproc". Escribimos "yes" en el parámetro "flatcor", y "no" en las demás acciones. En el parámetro "flat" escribimos el fichero Flat0.fits, generado con "response", en lugar del Flat.fits generado con "flatcombine".

Tras ejecutar "ccdproc" con estos parámetros ya tenemos las imágenes calibradas y listas para su explotación astronómica.

### 3 Extracción de los espectros

Para la estracción de los espectros utilizaremos la herramienta "apall", que se encuentra en el directorio noao/imred/ctioslit. Tecleamos "apall" seguido del nombre de una de las imágenes que contiene el espectro de una estrella

#### apall nombre\_imagen

Nos pregunta una serie de cuestiones, que respondemos de la forma siguiente:

Find apertures for nombre\_imagen? (yes): yes Number of apertures to be found automatically: 1 Resize apertures for nombre\_imagen? (yes): yes Edit apertures for nombre\_imagen? (yes): yes



Figure 3: Extracción del espectro con "apall"

Nos aparece el perfil del espectro en la dirección espacial, con los intervalos de extracción del espectro y del cielo marcados, tal y como vemos en la Fig. 3. Podemos modificar tanto la apertura de extracción del espectro como la selección de la zona de extracción del fondo.

Si el espectro y la zona de extracción nos aparecen muy estrechos, podemos hacer un zoom de la imagen. Para ello situamos el cursor en el límite inferior izquierdo de la región que queremos seleccionar, y pulsamos "w" y luego "e". A continuación movemos el cursor al límite superior derecho, y pulsamos de nuevo "e". Podemos repetir esta operación para un zoom más profundo, hasta que veamos correctamente el perfil estelar y los intervalos de selección, como aparece también en la Fig. 3 en la imagen de la derecha. Si queremos volver a la imagen inicial antes de hacer el zoom, pulsamos "w" y luego "a".

En general, los parámetros de extracción que propone el programa son adecuados, y podemos aceptarlos sin más. Sin embargo, tenemos la posibilidad de modificarlos, haciendo uso de las siguientes opciones:

- Modificar la anchura de la apertura de extracción cambiando sus límites superior e inferior (ej. :upper n1, :lower n2). n1 y n2 representan el número de píxeles desde el centro de la apertura. n2 debe ser un valor negativo.
- Podemos definir los límites de la apertura con el cursor. Para ello desplazamos el cursor y tecleamos "y". La apertura seleccionada será la intersección del eje horizontal del cursor con el perfil de la línea.
- También podemos eliminar la apertura seleccionada para empezar de nuevo. Para borrarla tecleamos "d". Definimos una nueva apertura posicionando el eje vertical del cursor y tecleando "n". La anchura de esta nueva apertura la podemos modificar como se ha expuesto en los puntos anteriores.

Una vez satisfechos con la apertura de extracción espectral nos ocupamos de seleccionar la zona de extracción del cielo. Para ello tecleamos "b". Entramos en un terminal gráfico diferente al anterior, en el que aparece marcado el nivel del fondo como una línea horizontal. Dicha línea debe estar al nivel del fondo que vemos en la imagen a los lados del espectro. Si no es así modificamos las regiones de extracción del fondo. Para ello, primero borramos la selección anterior tecleando "t". Seleccionamos una nueva zona de extracción a la izquierda del espectro con el eje vertical del cursor, tecleando "s" para marcar el inicio del intervalo, y de nuevo "s" para el final. Hacemos lo mismo para seleccionar otra zona a la derecha del espectro. Tecleamos "f" para ver el ajuste



Figure 4: Ajuste a la variación espacial del centro de la imagen de la estrella. Izquierda: primer ajuste que propone el programa. Derecha: ajuste definitivo, de orden 3.

del fondo, y si nos convence, de nuevo "q" para regresar al editor de apertura.

Si todo está en orden, tecleamos "q" de nuevo, y contestamos "yes" a todas las preguntas. Nos aparece una nueva gráfica en la que muestra el modelo de ajuste al espectro (línea discontinua), y su diferencia con el centro de la línea a lo largo de toda la dirección espectral (cruces), ver Fig. 4. Si el ajuste no es satisfactorio podemos modificarlo utilizando ajuste de orden superior (ej. :order 3) o funciones de ajuste diferentes (ej. :function spline3), tal y como hicimos con el ajuste al "flat field" en la sección anterior.

Tecleamos "f" para un nuevo ajuste, y comprobamos si la RMS es mejor que la del anterior. Una vez satisfechos con el ajuste, en primer lugar anotamos las líneas que ocupa el espectro sobre la CCD, y que nos servirán para extraer el espectro de la lámpara para la calibración en longitudes de onda. A continuación salimos del programa tecleando "q" y contestando afirmativamente a las cuestiones. Vemos al final el espectro extraído. Pulsamos de nuevo "q" para volver a la línea de comandos.

Podemos ver de nuevo el espectro con la instrucción

#### splot nombre\_imagen.ms

Que nos muestra el espectro extraído.

# 4 Calibración en longitudes de onda

Para la calibración en longitudes de onda necesitamos tener una imagen del espectro de una lampara de descarga, también llamada arco espectral. Para proceder a la calibración en longitudes de onda, primero representamos el espectro con:

```
identify nombre_imagen_lampara section='line 11 12'
```

Donde l1 y l2 son las líneas que sumaremos para extraer el espectro de la lámpara, y que hemos anotado en el último paso de "apall" antes de extraer el espectro correspondiente. Vemos que nos aparece un espectro de líneas de emisión, como el representado en la Fig. 5. Cada línea la seleccionamos con el eje vertical del



Figure 5: Espectro de la lámpara de calibración en longitudes de onda

cursor, y tecleamos "m". A continuación tecleamos la longitud de onda de esa línea, que encontramos en el atlas presentado en la Fig. 6. Nótese que el espectro a calibrar está invertido con respecto al del mapa (es decir, longitudes de onda decrecientes de izquierda a derecha). Una vez seleccionadas las longitudes de onda, pulsamos "f" para obtener el ajuste.

Nos sale de nuevo una representación gráfica del ajuste, con información acerca del orden del ajuste, función empleada y dispersión. De nuevo este ajuste se hace con "icfit", así que al igual que en el caso anterior podemos variar esos parámetros, y obtener un nuevo ajuste tecleando de nuevo "f".

Si el ajuste nos satisface, salimos del programa tecleando "q" dos veces, y contestando afirmativamente a la pregunta

#### Write feature data to the database (yes)?

La salida del programa es un fichero que se ha creado en el directorio "database" y que se llama idnombre.

Para asociar a nuestro espectro la calibración en longitud de onda tenemos que introducir en su cabecera la palabra clave "REFSPEC1", y asociarla al fichero que contiene dicho ajuste. Esto lo hacemos con:

#### hedit nombre\_espectro.ms REFSPEC1 "nombre\_espectro\_lampara" add+

Y a continuación aplicamos la calibración en longitudes de onda:

#### dispcor nombre\_espectro.ms nombre\_nuevo.ms



Figure 6: Mapa del espectro del Neon

Para ver el espectro calibrado en longitud de onda tecleamos:

splot nombre\_nuevo.ms

Seguimos el procedimiento expuesto en las dos últimas secciones para extraer y calibrar en longitudes de onda todos los espectros de interés.

## 5 Normalización del continuo

Para normalizar el continuo a la unidad utilizamos también la tarea "splot":

#### splot nombre\_nuevo.ms

Luego tecleamos "t", y a continuación "/". Seleccionamos a continuación las regiones del continuo a ajustar, y que son las zonas donde no aparece ninguna línea. Situamos el cursor de forma que la línea vertical esté al principio de la primera de esas zonas, y pulsamos "s". Desplazamos el cursor de forma que la línea vertical esté al final de la zona a seleccionar, y pulsamos de nuevo "s". Repetimos esta operación tantas veces como intervalos del continuo queramos usar para el ajuste.

Para finalizar pulsamos "f", y nos aparece la función ajustada, y los parámetros del ajuste en la parte superior de la imagen. Si el ajuste no nos satisface podemos cambiar la función o el orden, como hemos hecho anteriormente. Si queremos elegir de nuevo las regiones del continuo, pulsamos "t" y procedemos como acabamos de describir.

Una vez obtenido el ajuste satisfactorio, pulsamos "q" para finalizar, y nos aparece el espectro normalizado. Si queremos guardarlo, pulsamos "i", y el programa nos solicita un nombre para dicho espectro normalizado. Escribimos el nombre, y salimos de pulsando "q".

Una vez obtenido el espectro definitivo podemos convertirlo al formato ASCII, para trabajar con el mediante una hoja de cálculo, programa gráfico, etc. Esto lo hacemos con la instrucción:

noao
onedspec
wspectext nombre.ms nombre.txt

## 6 Análisis de los parámetros de la línea

El programa "splot" también nos permite determinar los parámetros fundamentales de la línea, a partir de espectros ya calibrados en longitud de onda y con el continuo normalizado.

### 6.1 Flujo y anchura equivalente.

Llamamos al programa con:

#### splot nombre\_fichero.ms

Situamos cuidadosamente el cursor sobre un punto del continuo, a la izquierda de la línea a analizar, y pulsamos "e". A continuación movemos el cursor a otro punto del continuo, esta vez a la derecha de la línea, y pulsamos "e" de nuevo. El programa calcula la posición del centro de la línea, su anchura equivalente (notemos que para líneas de emisión la anchura equivalente es negativa), el nivel del continuo y el flujo sobre el continuo. Podemos repetir el proceso utilizando diferentes puntos sobre el continuo, para estimar el error de cada uno de estos valores.

### 6.2 Ajuste al perfil de la línea

Podemos ajustar diferentes funciones analíticas al perfil de una línea espectral. Esto también lo podemos hacer con "splot". Una vez representada la línea, situamos el cursor cuidadosamente en el continuo a la izquierda de la línea, y pulsamos "k". A continuación movemos el cursor a un punto del continuo a la derecha de la línea, y pulsamos "g" para obtener un ajuste gaussiano, "l" para un ajuste lorentziano, o "v" para un perfil de Voigt. El ajuste aparece superpuesto al espectro, y también se nos presentan los valores del centro de la línea, la anchura equivalente y la anchura a la semialtura, referidos a la función ajustada.

Una vez hecho el ajuste, podemos restarlo del espectro, para ver los residuos de la línea sobre el perfil medio. Pare ello nos situamos de nuevo en un punto del continuo a la izquierda de la línea, y pulsamos "-". Movemos el cursor a un punto a la derecha, y pulsamos "-" de nuevo.

En el caso de líneas con varias componentes, podemos ajustar simultáneamente varios perfiles a la línea. Para ello, en primer lugar conviene hacer un zoom sobre la región en que se encuentra la línea. Lo hacemos como ya se ha hecho anteriormente con "apall", situamos el cursor en el límite inferior izquierdo de la región que queremos seleccionar, y pulsamos "w" y luego "e". A continuación movemos el cursor al límite superior derecho, y pulsamos de nuevo "e".

A continuación situamos el cursor sobre el continuo, a la izquierda de la línea, y pulsamos "d". Lo situamos después a la derecha, y pulsamos de nuevo "d". Movemos ahora el cursor hasta hacer coincidir la línea vertical con el centro de una de las componentes que queremos ajustar. Una vez situado, pulsamos "g" para un ajuste gaussiano, o "l" o "v" para uno lorentziano o de Voigt, respectivamente. Repetimos la operación para cada una

de las componentes de la línea que queramos ajustar. Cuando estén todas pulsamos "q".

El programa nos plantea una serie de preguntas:

• Fit positions (fixed, single, all, quit)

Nos pregunta si, para el ajuste, mantenemos fijos los centros de las líneas que hemos marcado (fixed), o permitimos al programa que los considere parámetros libres del ajuste (all). La opción "single" los ajusta manteniendo fija la distancia entre ellos. Pulsamos "f", "s" o "a" según la opción que prefiramos, o "q" para terminar.

• Fit Gaussian widths (fixed, single, all, quit).

Lo mismo, con los mismos significados, para las anchuras a la semialtura de las funciones de ajuste.

• Fit background (no, yes, quit)

La opción es ajustar también el nivel del continuo ("y") o dejarlo fijo usando el que hemos introducido manualmente al pulsar "d" sobre el continuo ("n").

• Overplot (total, components, both, none)

Elegimos entre representar el ajuste global ("t"), los ajustes individuales a cada componente ("s"), ambos ("b") o ninguno ("n").

Una vez finalizado el ajuste, en la línea inferior nos aparecen los parámetros de la primera función ajustada. Podemos pulsar "+" o "-" para movernos sobre la lista de componentes y ver los ajustes a cada uno de ellos. Salimos del proceso con "q".