# Astrofísica Observacional

# Práctica 5: Espectroscopía (II)

## 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 2.2 metros del Observatorio de Calar Alto, en el marco del proyecto "Calar Alto Academy". El trabajo lo haremos mediante el uso del paquete de programas IRAF.

## 2 Calibración de las imágenes

Inicializaremos IRAF de la misma forma que en la práctica de fotometría. En primer lugar tecleamos la instrucción:

set stdimage=imt2048

Nuestra primera tarea va a ser inspeccionar visualmente las imágenes, utilizando las herramientas ds9 e "imexam":

!ds9 &
display nombre\_de\_la\_imagen
imexam

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") 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

Una vez allí 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 una primera pasada por "ccdproc". Además, también usaremos "ccdproc" para "recortar" la imagen. En efecto, como hemos visto al examinar las imágenes, estas contienen el orden cero y el uno del espectrógrafo, además de una zona no iluminada entre ellos. Para la extracción de

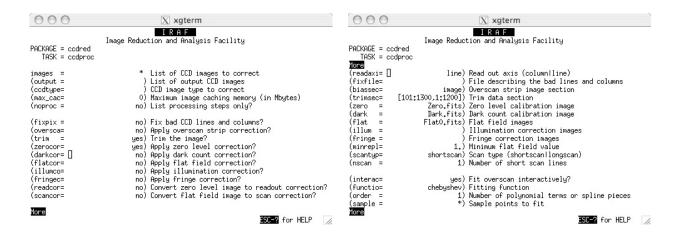


Figure 1: Configuración de los parámetros de ccdproc para la corrección de bias y el recorte ("trimming") de las imágenes.

espectros sólo vamos a utilizar la parte de la imagen ocupada por el primer orden espectral. El trabajar con toda la imagen nos crearía problemas tanto para la corrección del "flat field" como para la extracción de los espectros.

Para realizar estas dos tareas con "ccdproc", editamos su fichero de parámetros,

#### epar ccdproc

y lo configuramos como aparece en la Fig. 1: introducimos el valor "yes" en los parámetros "trim" y "zerocor", y "no" en el resto de las acciones; en el parámetro "trim" introducimos la sección a recortar, con el formato  $[x_1:x_2,y_1:y_2]$ , que en nuestro caso es [101:1300,1:1200]; en el parámetro "zero" introducimos el nombre de la imagen de corrección de bias Zero.fits.

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 son 20 e<sup>-</sup>/ADU y 5.06 e<sup>-</sup> respectivamente. Configuramos los parámetros de flatcombine como aparece en la Fig. 2.

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 tambiín 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 de "flat field". Si muestreamos a lo largo de una columna con la instrucción "c", obtendremos algo parecido a lo que se muestra en la Fig. 3.

Si dividiésemos la imagen de "flat" por su valor medio, como en el caso de las imágenes directas, la corección de "flat field" deprimiria 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.

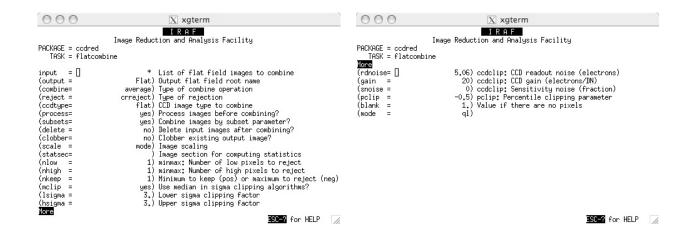


Figure 2: Configuración de los parámetros de flatcombine. Se ha incluido la ganancia y el ruido de lectura de la CCD

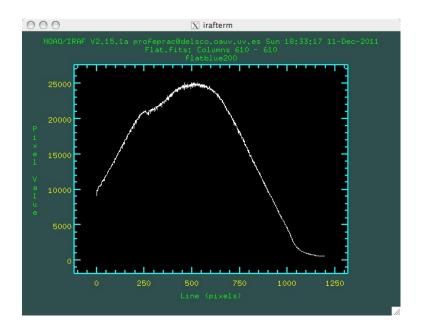


Figure 3: Muestreo de la imagen de corrección Flat.fits a lo largo de la dirección espectral

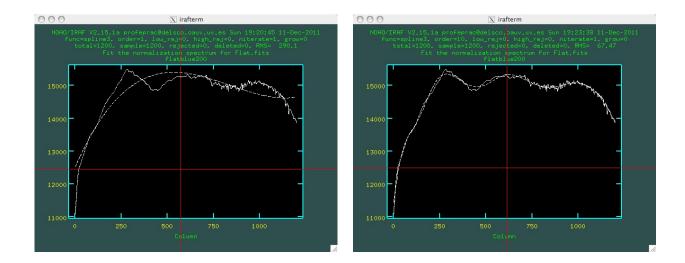


Figure 4: Ajuste de la función de flujo de la lámpara de "flat field" con response. Izquierda: primer ajuste con un spline cúbico de orden 1. Derecha: ajuste final con un spline cúbico de orden 10

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. 3, no es una curva suave sino que presenta un grado de "ruido" 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 haste 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
Dispersion axis (1=along lines, 2=along columns, 3=along z) (1:3) (): 1
```

Nos aparecerá una gráfica como las que mostramos en la Fig. 4. 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

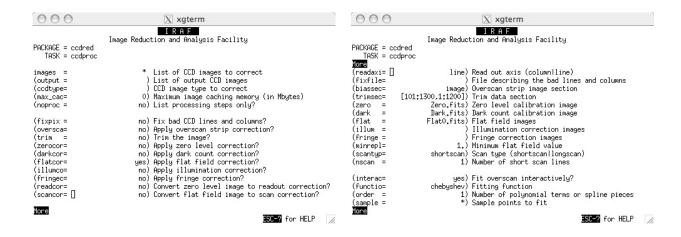


Figure 5: Configuración de los parámetros de ccdproc para la corrección de "flat field".

### 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. 4 se ha obtenido con una función spline3 y orden 10.

El uso de "response" nos ha creado la imagen "Flat0.fits", adecuada para la corrección de "flat field" de la imágenes espectroscópicas. Para hacer la corrección con "ccdproc" volvemos al directorio noao/imred/ccdred, y editamos el fichero de parámetros de "ccdproc", configurándolo como aparece en la Fig. 5. Nótese que 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, por ejemplo:

### apall uniV\_0069

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

```
Find apertures for uniV_0069? (yes): yes
Number of apertures to be found automatically: 1
Resize apertures for uniV_0069? (yes): yes
Edit apertures for uniV_0069? (yes): yes
```

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. 6. Podemos modificar tanto la apertura de extracción del espectro como la selección de la zona de extracción del fondo.

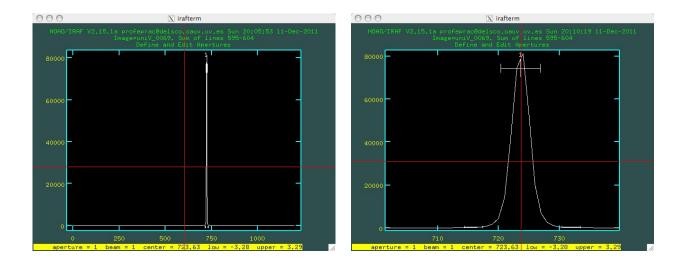


Figure 6: Extracción del espectro con "apall"

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. 6 en la imagen de la derecha.

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 "m". 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 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. 7. 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.

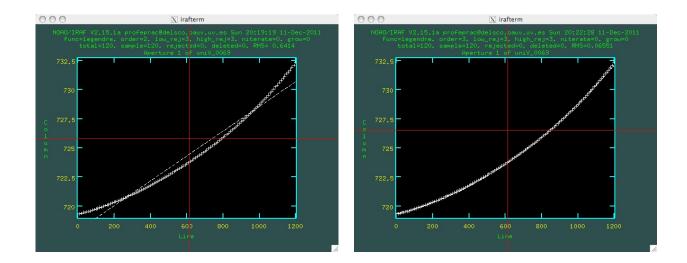


Figure 7: Ajuste a la variación espacial del centro de la imagen de la estrella. Izquierda: primer ajuste que propone el programa. Derecha: ajuste definitivo, de orden 3.

Tecleamos "f" para un nuevo ajuste, y comprobamos si la RMS es mejor que la del anterior. Una vez satisfechos con el ajuste salimos del programa tecleando "q" y contestando afirmativamente a las cuestiones. Vemos al final el espector extraido. Pulsamos de nuevo 'q" para volver a la línea de comandos.

Podemos ver de nuevo el espectro con la instrucción

splot uniV\_0069.ms

Que nos muestra el espectro extraido, tal y como aparece en la Fig. 8.

# 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. En la Fig. 9 presentamos el espectro extraido de una de las imágenes de la lampara utilizada, en el que hemos seíalado varias de sus líneas. La longitud de onda correspondiente a cada una de las líneas aparece en la Tabla 1.

En primer lugar hemos de extraer el espectro del arco a partir de la imagen, con la rutina "apall" de forma similar a como hicimos en la sección anterior. En este caso, como la lámpara ilumina toda la rendija, no hemos de preocuparnos de su centrado ni de la extracción del cielo. Podemos hacer la extracción de forma no interactiva con la instrucción:

apall uniV\_0089.fits recen- trace- back- interac-

Para proceder a la calibración en longitudes de onda, primero representamos el espectro con

identify uniV\_0089.ms

Comparamos las líneas que aparecen en nuestro espectro con las de la Figura 9. Cada línea identificada la seleccionamos con el eje vertical del cursor, y tecleamos "m". Introducimos la longitud de onda correspondiente que aparece en la Tabla 1. Recordemos que podemos ampliar una sección del espectro pulsando "w" y luego situándonos en el límite inferior izquierdo de la zona a ampliar y pulsando "e", y moviendo a continuación el

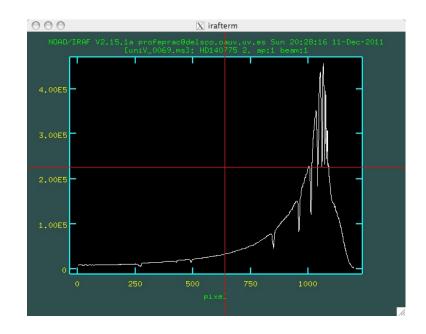


Figure 8: Espectro extraido de la imagen uniV\_0069.fits

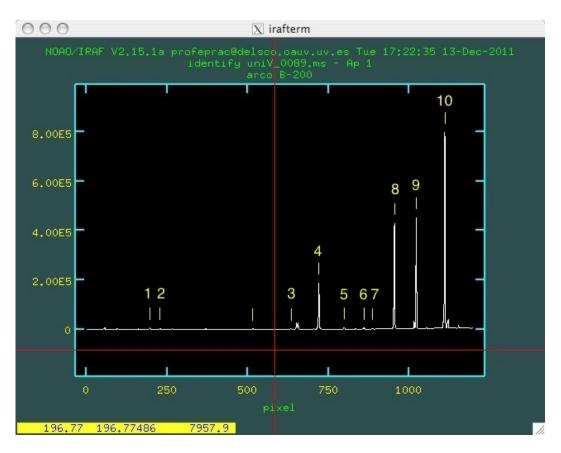


Figure 9: Líneas del arco espectral

Línea	pixel	$\lambda({ m \AA})$
1	196.77	7948.18
2	228.57	7800.30
3	633.73	5875.62
4	720.55	5460.74
5	799.40	5085.82
6	859.92 885.81	4799.91 4678.15
8	954.60	4358.33
9	1022.73	4044.42
10	1111.43	3650.15

Table 1: Líneas del arco espectral

cursor al límite superior derecho, y pulsando de nuevo "e". Podemos deshacer la ampliación y volver al espectro completo con la secuencia "wmwn"

Procedemos de la misma forma para todas las líneas que podamos identificar. Una vez seleccionadas todas, pulsamos "f" para obtener el ajuste.

Obtenemos 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 ajustes anteriores podemos variar esos parámetros, y obtener un nuevo ajuste tecleando de nuevo "f". Si el ajuste no nos satisface, regresamos a la pantalla de selección de líneas pulsando "q" . Podemos eliminar líneas que nos den un residuo alto poniendo el cursor sobre ellas y pulsando "d". También podemos incorporar nuevas líneas.

Cuando lleguemos a un ajuste satisfactorio, salimos pulsando "q" dos veces, y contestando afirmativamente ("yes") 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, en nuestro caso iduni\(V\_0089.ms\), y que ha sido grabado en un directorio llamado "database".

Para asociar a nuestros espectros 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 uniV\_0069.ms REFSPEC1 "uniV\_0089.ms" add+

Y a continuación aplicamos la calibración en longitudes de onda:

dispcor uniV\_0069.ms c0069.ms

Para ver el espectro calibrado en longitud de onda, tal y como aparece en la Fig. 10, tecleamos:

splot c0069.ms

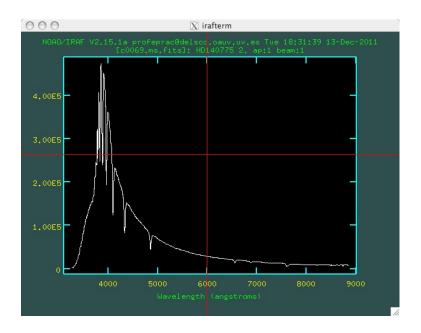


Figure 10: Espectro calibrado en longitudes de onda

Seguimos el procedimiento expuesto en las dos últimas secciones para extraer y calibrar en longitudes de onda todos los espectros de interés. En particular, para la calibración en flujo que describimos en la sección siguiente hemos de extraer los espectros de dos estándares de calibración, Feige 34 (uniV\_0057.fits) y Hz 44 (uniV\_0058.fits). Lo hacemos con:

```
apall uniV_0057
hedit uniV_0057.ms REFSPEC1 "uniV_0089.ms" add+dispcor uniV_0057.ms feige34.ms

apall uniV_0058
hedit uniV_0058.ms REFSPEC1 "uniV_0089.ms" add+dispcor uniV_0058.ms hz44.ms
```

De esta forma hemos llamado feige34.ms y hz44.ms a los espectros de ambas estándares calibrados en longitudes de onda.

# 5 Calibración en flujo

Para la calibración en flujo contamos con los espectros de las estándares Feige 34 y Hz 44, que observamos junto con nuestras estrellas de programa, y que hemos extraído de las correspondientes imágenes y hemos calibrado en longitud de onda. Estos espectros son todavía instrumentales, lo que significa que el flujo en función de la longitud de onda está en número de cuentas medido en el detector, y depende principalmente de la sensibilidad espectral de dicho detector.

La calibración en flujo consiste en utilizar estas estándares para convetir el flujo instrumental en flujo de energía que llega a la atmósfera, en unidades físicas (erg cm $^{-2}$  s $^{-1}$  Å $^{-1}$ ). Para hacer esta conversión necesitamos conocer la distribución en flujo, en unidades físicas, de las dos estándares. Las tablas de distribución de flujo se encuentran en el sistema de IRAF, en el directorio onedstds\$spec50cal. Podemos comprobarlo yendo a ese

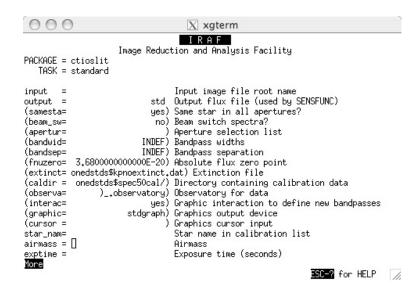


Figure 11: Configuración de los parámetros de la tarea "standard"

directorio y listando los ficheros que contiene. Si queremos hacer esta comprobación, hemos de estar seguros de que conocemos cuál es nuestro directorio de trabajo actual, para ser capaces de volver a él y seguir con nuestro trabajo. Podemos localizar nuestro directorio actual de trabajo con la instrucción:

#### !pwd

Y podemos revisar el listado de tablas de distribución de flujo con:

### cd onedstds\$spec50cal

Encontramos que efectivamente incluye los ficheros feige34.dat y hz44.dat. Podemos editar esos ficheros y ver que contienen la distribución espectral en unidades físicas del flujo.

Para la calibración en flujo necesitaremos además una tabla de la extinción atmosférica en el observatorio. En el sistema de IRAF podemos encontrar esas tablas para dos observatorios concretos, el de Cerro Tololo en Chile y el de Kitt Peak en Estados Unidos. Dichas tablas se encuentran en el directorio onedstds\$, y se llaman ctioextinct.dat y kpnoextinct.dat. Supondremos que la atmósfera de Calar Alto es mas parecida a la de Kitt Peak, y por tanto usaremos la tabla de extinción correspondiente a este último.

Una vez conocida la localización de toda la información necesaria, procedemos al cálculo de la calibración en flujo. Para ello, no nos olvidemos de regresar al directorio en el que se encuentran nuestras imágenes. En primer lugar hemos de construir un fichero que contenga la distribución en flujo de las estándar y la extinción. Eso lo hacemos con la herramienta "standard". En primer lugar configuramos su fichero de parámetros con:

### epar standard

donde indicamos la situación de todos esos datos, configurando los parámetros como aparece en la Fig. 11: A continuación ejecutamos la tarea, dando la respuesta siguiente a las preguntas:

### standard feige34.ms

```
X xgterm
                                   IRAF
                     Image Reduction and Analysis Facility
PACKAGE = ctioslit
   TASK = sensfunc
                            std
standard= [
                                 Input standard star data file (from STANDARD)
sensitiv=
                                 Output root sensitivity function imagename
(apertur=
                                  Aperture selection list
                        yes) Ignore apertures and make one sensitivity functi
logfile) Output log for statistics information
(ignorea=
(logfile=
(extinct= onedstds$kpnoextinct.dat) Extinction file
                    extinct.dat) Output revised extinction file
(newexti=
(observa=
                 )_.observatory) Observatory of data
(functio=
                        spline3) Fitting function
(order =
                             20) Order of fit
(interac=
                            yes) Determine sensitivity function interactively?
(graphs =
                             sr) Graphs per frame
                plus cross box) Data mark types (marks deleted added)
(marks =
                        2 1 3 4) Colors (lines marks deleted added)
(colors =
                                 Graphics cursor input
(cursor =
(device =
                       stdgraph) Graphics output device
                            yes (nolyesINOIYES)
                                                                 ESC-? for HELP
```

Figure 12: Configuración de los parámetros de la tarea "sensfunc"

```
Output flux file (used by SENSFUNC) (): std
Star name in calibration list (): feige34
Edit bandpasses? (): yes
```

Nos aparecerá una gráfica con el espectro y las regiones a usar para el ajuste seíaladas. Podemos editarlas aíadiendo o eliminando regiones, pero en general esto no es necesario, y salimos de la ventana gráfica pulsando "q".

Repetimos el proceso para Hz 44:

#### standard hz44.ms

```
Output flux file (used by SENSFUNC) ( ): std
Star name in calibration list ( ): hz44
Edit bandpasses? ( ): yes
```

El proceso ha creado un fichero llamado "std", que contiene la distribución en flujo, en unidades físicas, para las dos estrellas.

A continuación calculamos la transformación entre las unidades instrumentales y las físicas. Esto lo hacemos con la herramienta "sensfunc". En primer lugar editamos su fichero de parámetros:

### epar sensfunc

Y lo configuramos de forma que aparezca como en la Fig. 12

A continuación ejecutamos la herramienta "sensfunc", y respondemos a las preguntas como sigue:

### sensfunc

Input standard star data file (from STANDARD) (std): std

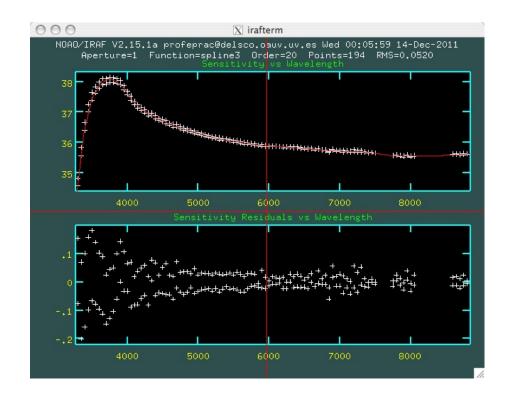


Figure 13: Ajuste del espectro instrumental a la distribución de flujo estándar

Output root sensitivity function imagename (sens): sens Fit aperture 1 interactively? (yes): yes

Se abre una ventana gráfica en cual parte superior vemos el ajuste de nuestro espectro instrumental a la distribución estándar, y en la inferior los residuos del ajuste. Al igual que en casos anteriores podemos variar la función de ajuste y el orden. Una vez satisfechos con el ajuste salimos tecleando "q".

Este proceso ha creado un fichero "sens.fits", que contiene la función de transformación de flujo desde el flujo instrumental al flujo absoluto en unidades físicas. Podemos darle un vistazo con:

## splot sens.fits

Con esto ya hemos calculado la calibración en flujo. Podemos ahora calibrar en flujo cualquiera de los espectros de nuestra muestra. Esto lo hacemos con la herramienta "calibrate":

## calibrate

Input spectra to calibrate (): c0069.ms Output calibrated spectra (): c0069flux.ms

De esta forma obtenemos el espectro final, ya calibrado tanto en longitud de onda como en flujo. Podemos visualizarlo con la instrucción:

splot c0069flux.ms

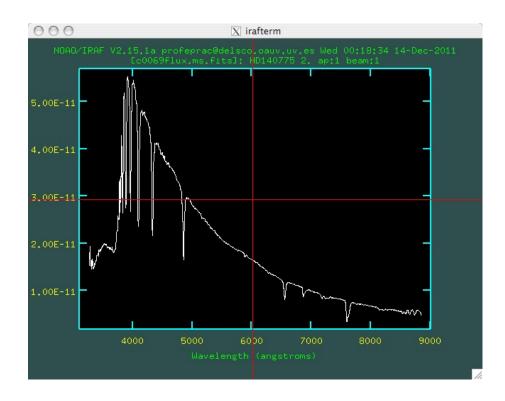


Figure 14: Espectro de HD 140775 calibrado en longitud de onda y en flujo.

que nos representa el espectro calibrado tal y como aparece en la Fig. 14.