ASTRONOMÍA ÓPTICA E INFRARROJA

Actividad Guiada 1: Análisis de datos espectroscópicos

Máster en Astronomía y Astrofísica
Profesora VIU: Juan Gutiérrez Soto
e-mail: juan.gutierrez@campusviu.es

Índice

1. Introducción **1**

2. Actividad Guiada: Análisis de imágenes espectroscópicas **2**

2.1. Inicialización de IRAF 3

2.2. Organización y visualización de las imágenes 3

2.3. Recorte las imágenes y sustracción de bias y flats 5

2.4. Extracción de la apertura de las imágenes 7

2.5. Calibración de longitud de onda 13

2.6. Aplicación de la calibración a los espectros 14

2.7. Normalización o rectificación del contínuo 15

3. Tarea de portafolios **16**

1. Introducción

El objetivo de esta práctica es la reducción y análisis de imágenes obtenidas con un espectrógrafo. A partir de ellas debemos extraer espectros en una dimensión y calibrados en longitud de onda. Trabajaremos con espectros obtenidos en el óptico.

Las imágenes que vamos a utilizar han sido obtenidas por estudiantes de la Universidad de Valencia en el telescopio de 2.2 metros del Observatorio de Calar Alto con el espectrógrafo CAFOS, en el marco del proyecto "Calar Alto Academy". Para más información, os recomendamos que visitéis la web del Observatorio de Calar Alto (`www.caha.es`) y que miréis con detalle la página web de CAFOS (`http://www.caha.es/alises/cafos/cafos.html`). En la Fig. 1 podemos ver las diferentes redes de difracción que CAFOS permite utilizar. Fijaros en las propiedades de cada red de difracción, desde el rango en longitud de onda hasta la dispersión.

CAFOS grisms

Grism	R [Å/mm]	λ_{min}, λ_{max} [1] [nm]	D [nm/px]	m_{lim} (1h) [2]
B-400	388	320, 800	0.976	B=21.5
R-400	398	475, 1100	0.965	R=21.0
B-200	185	320, 700	0.470	B=21.2
G-200	187	400, 850	0.458	V=21.0
R-200	177	630, 1100	0.435	R=20.8
B-100	88	320, 580	0.200	B=20.5
G-100	87	490, 780	0.212	V=20.3
R-100	84	590, 900	0.204	R=20.0

Figura 1: *Tabla con las redes de difracción de CAFOS de menos resolución a más resolución. Fijaros sobre todo en la 3a y 4a columna que dan el rango de longitud de onda observado y la dispersión obtenida.*

La reducción y extracción del espectro la haremos mediante el uso del paquete astronómico *IRAF* instalado en la imagen virtual de Linux que ya hemos usado para la asignatura 06MAA 2011-12.

Las imágenes para el desarrollo de la práctica las podemos encontrar en

el campusviu, en la carpeta de Recursos, Materiales profesores, Actividades guiadas, en el fichero DATOS_AG1_reduccion_espectros.tar.gz .

Podeis descargarons el archivo a un directorio de vuestra elección directamente en la imagen virtual de Linux en el cual realizaremos el trabajo de la práctica.

2. Actividad Guiada: Análisis de imágenes espectroscópicas

Para obtener espectros de 1 dimensión calibrados en longitud de onda a partir de una imagen CCD, vamos a seguir los siguientes pasos:

- Inicialización de IRAF
- Organización y visualización de las imágenes: bias, flats, lámparas de calibración, estrellas objeto
- Recorte las imágenes y sustracción de las imágenes el bias y el flats
- Extracción la apertura de las imágenes para obtener un espectro de 1 dimensión.
- Calibración de longitud de onda a partir de las imágenes de las lámparas de calibración
- Aplicación de la calibración a los espectros de las estrellas objeto
- Normalización o rectificación del contínuo.

En esta práctica no haremos la corrección de la extinción atmosférica ni la calibración de flujo al no tener las imágenes suficientes.

2.1. Inicialización de IRAF

Antes de inicializar *IRAF* conviene que editemos el fichero "login.cl", y ajustemos el parámetro:

```
set stdimage = imt2048
```

y quitando el símbolo #, para poder visualizar bien las imágenes de ese tamaño.

Para inicializar *IRAF*, hacemos doble click en el icono correspondiente a *IRAF* en el escritorio.

A continuación nos dirigimos al directorio de trabajo donde se encuentran los espectros.

2.2. Organización y visualización de las imágenes

Antes de empezar la reducción, es conveniente visualizar los diferentes tipos de imágenes, tanto astronómicas como de calibración. Las examinamos mediante

```
display nombre_de_la_imagen
imexam
```

Vemos en la 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. Es recomendable utilizar el comando `imexam` con las teclas "l" (línea) y "c" (columna) para ver dónde tenemos la información relevante para cada tipo de imágen.

Como en la reducción de imágenes realizada en la asignatura 06MAA 2011-12, vamos a organizar las imágenes en diferentes tipos:

- bias, ficheros que empiezan con bias

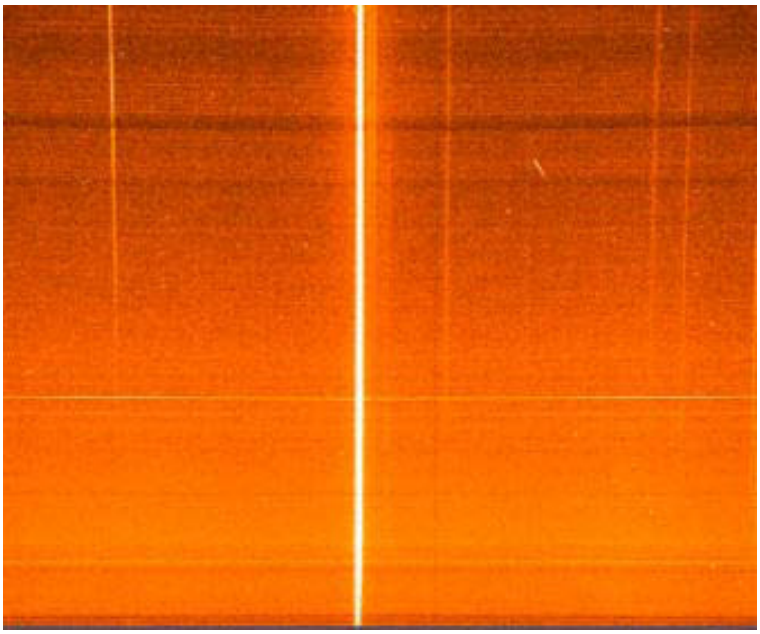

Figura 2: *Imagen que contiene un espectro de una estrella. Fijaros en que el eje y es el eje de dispersión (en el que varía la longitud de onda, el más importante) y en el eje x tenemos el eje del cielo que llamo yo en el que tenemos espectros del cielo alrededor de la estrella.*

- flats, ficheros que empiezan con domeflat
- arcos o espectros de las lámparas de calibración, fichero arco01s.fits
- estrellas objeto, ficheros que empiezan por UVal
- Dos imágenes JPG y GIF, que representan las imágenes del espectro de la lámpara de calibración y que utilizaremos para la calibración en longitud de onda. Son dos porque una muestra las líneas en función de pixeles y otra en longitud de onda.

En este momento creamos las listas necesarias con ls o files y usamos el comando sed de linux para cambiar los ficheros dentro de estas listas. Para más información, mirar el guión de la asignatura 06MAA 2011-12. Por ejemplo:

```
ls bias* > zero.txt
ls domeflat* > flat.txt
```

```
ls UVal_00* > obj.txt
ls arco01s.fits > comp.txt
cat flat.txt obj.txt comp.txt > list.txt
```

Además podemos mirar la cabecera de cada imagen con `imhead imagen l+` para ver qué red de difracción, qué anchura de la rendija estamos utilizando, o qué objeto estamos observando.

2.3. Recorte las imágenes y sustracción de bias y flats

En primer lugar vamos a recortar las imágenes porque sólo nos interesa trabajar con la región que contiene el primer orden espectral. Además en algunos espectrógrafos (no es nuestro caso), el flat no ilumina toda la CCD y por tanto necesitamos recortar solo la región en la que el flat ilumina la CCD. En segundo lugar combinaremos los bias y sustraeremos los bias del resto de imágenes y en tercer lugar combinaremos los flats y sustraeremos los flats de las estrellas objeto y del arco. Necesitaremos conocer la ganancia (2.3e/ADU) y el ruido de lectura (5.9 e) de la CCD utilizada para los comandos zerocombine y flatcombine.

La idea es utilizar el comando ccdproc para estos 3 pasos, pero veo que no funciona el ccdproc en estas imágenes obtenidas con CAFOS. Por tanto os pongo las dos opciones aunque hay que utilizar solo una.

Opción A, como en la asignatura 06MAA 2011-12:

1. Recortamos

   imcopy *.fits[101:1300,1000:2048] *%%t%.fits

   Este comando copia la sección [101:1300,1000:2048] de todas las imágenes a otras con el mismo nombre pero añadiendo "t" antes de ".fits". Cambiamos las listas añadiendo "t" antes del ".fits". Cuidado porque no hay espacios en el fichero resultado entre * y fits.

2. Combinamos bias y sustraemos el bias promedio al resto de imágenes

noao
imred
zerocombine ("@zerot.txt", output="Zero", combine=.ªverage", reject="minmax", ccdtype=, process=no, delete=no, clobber=no, scale="none", statsec= , nlow=1, nhigh=1, nkeep=1, mclip=yes, lsigma=3., hsigma=3., rdnoise="5.9", gain="2.3", snoise="0.", pclip=-0.5, blank=0.)

imarith @listt.txt - Zero.fits result=@listtb.txt

3. Combinamos flats y dividimos por el flat promedio

   flatcombine ("@flattb.txt", output="Flattb", combine="median", reject=.ªvsigclip", ccdtype=, process=no, subsets=no, delete=no, clobber=no, scale="mode", statsec=, nlow=1, nhigh=1, nkeep=1, mclip=yes, lsigma=3., hsigma=3., rdnoise="5.9", gain="2.3", snoise="0.", pclip=-0.5, blank=1.)

   imcopy Flattb.fits Flattb_norm.fits
   normalize Flattb_norm.fits
   imarith @objtb.txt / Flattb_norm.fits result=@objtbf.txt

   Podemos hacer lo mismo con los arcos (comp.txt).

Opción B, con ccdproc, aunque no funciona con estas imágenes pero si con otras imágenes de otros espectrógrafos:

1. Combinamos los bias

   noao
   imred
   zerocombine ("@zero.txt", output="Zero", combine=.ªverage", reject="minmax", ccdtype=, process=no, delete=no, clobber=no, scale="none", statsec= , nlow=1, nhigh=1, nkeep=1, mclip=yes, lsigma=3., hsigma=3., rdnoise="5.9", gain="2.3", snoise="0.", pclip=-0.5, blank=0.)

   Es recomendable conocer qué significa cada parámetro. Siempre poner process=no para que no sobreescriba la imagen. Visualizamos la imagen. No es muy diferente a la que vimos en la asignatura 06MAA 2011-12 al hacer la fotometría.

2. Sustraemos los bias del resto de imágenes y recortamos a la vez:

ccdproc ("@list.txt", output="@listb.txt", ccdtype=, max_cache=0, noproc=no, fixpix=no, overscan=no, trim=yes, zerocor=yes, darkcor=no, flatcor=no, illumcor=no, fringecor=no, readcor=no, scancor=no, readaxis="line", fixfile=, biassec=, trimsec="[101:1300,1000:2048]", zero="Zero", dark=, flat=, illum=, fringe=, interactive=no, function="legendre", order=1, sample="*", naverage=1, niterate=1, low_reject=3., high_reject=3., grow=0.)

Fijaros que recortaríamos de la imagen original [1:1400,1:2048] a la recortada [101:1300,1000:2048], con [x1:x2,y1:y2]. Es recomendable conocer qué significa cada parámetro.

3. Combinamos flats y dividimos por el flat promedio

flatcombine ("@flatb.txt", output="Flatb", combine="median", reject=."avsigclip", ccdtype=, process=no, subsets=no, delete=no, clobber=no, scale="mode", statsec=, nlow=1, nhigh=1, nkeep=1, mclip=yes, lsigma=3., hsigma=3., rdnoise="5.9", gain="2.3", snoise="0.", pclip=-0.5, blank=1.)

ccdproc ("@objb.txt", output="@objbf.txt", ccdtype=, max_cache=0, noproc=no, fixpix=no, overscan=no, trim=no,zerocor=no, darkcor=no, flatcor=yes, illumcor=no, fringecor=no, readcor=no,scancor=no, readaxis="line", fixfile=, biassec=,trimsec=, zero=, dark=, flat="Flattb", illum=, fringe=, interactive=yes, function="legendre", order=1, sample="*", naverage=1, niterate=1, low_reject=3., high_reject=3., grow=0.)

2.4. Extracción de la apertura de las imágenes

Ahora vamos a extraer el flujo de una imagen en 2 dimensiones a otra de 1 dimensión. La extracción de la apertura consiste en 4 pasos que es importante que entendáis. En primer lugar determinamos la apertura. que la definimos como la anchura de la distribución de flujo en el eje x de la image (Fig. 3). Para cada línea de la imagen tendremos una distribución de flujo que sumaremos para obtener el flujo en esa longitud de onda. En segundo lugar determinaremos en ese corte en el eje x la posición del cielo como dos regiones alrededor de la distribución de flujo que tengan cuentas parecidas (ver Fig. 4). Este paso nos permite conocer el espectro del cielo alrededor de la estrella y por tanto, al restar las cuentas de ese cielo podremos eliminar

la contribución de líneas de emisión que no provenga de la estrella, como por ejemplo, de la contaminación lumínica alrededor del observatorio. En tercer lugar, vamos a trazar el pico máximo de la distribución de flujo de la apertura a lo largo del eje de dispersión. Daros cuenta de que a simple vista tenemos que ese pico máximo es totalmente vertical, pero no es cierto y por tanto tenemos que ajustar una función (polinómica o splines) para conseguir siempre el máximo de flujo a lo largo del eje de dispersión. En cuarto lugar, sumaremos el flujo dentro de cada apertura, restando el flujo del cielo, para cada punto del eje de dispersión, e iremos uniéndolo siguiendo la función ajustada a la traza a lo largo del eje de dispersión. Asi obtendremos el espectro en 1 dimensión.

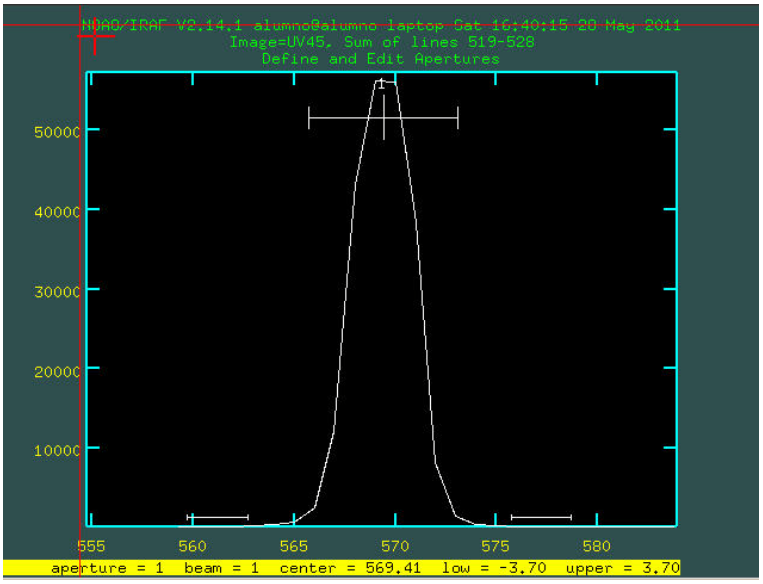

Figura 3: *Corte de la imagen de la Fig. 2 en el eje x, donde se donde está todo el flujo de la estrella a una longitud de onda dada.*

A continuación, realizamos las operaciones de extracción de la apertura. Para acceder a las rutinas de *IRAF* correspondientes tecleamos:

```
noao
twodspec
apextract
```

Para la extracción de los espectros utilizaremos la rutina `apall`:

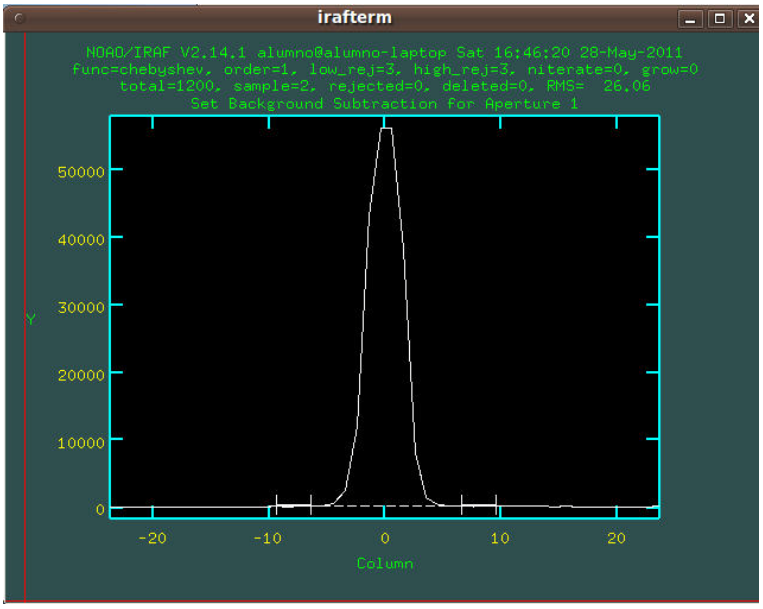

Figura 4: *Figura que muestra las dos regiones a los lados de la apertura en el corte en el eje x de la imagen.*

```
apall imagen
```

Que realmente es:

apall ("UVal_0045tbf", output=, apertures=, format="onedspec", references="", profiles="", interactive=yes, find=yes, recenter=yes, resize=yes, edit=yes, trace=yes, fittrace=yes, extract=yes, extras=no, review=yes, line=INDEF, nsum=10, lower=-10., upper=10., apidtable="", b_function="chebyshev", b_order=2, b_sample="-40:-20,20:40", b_naverage=-3, b_niterate=0, b_low_reject=3., b_high_rejec=3., b_grow=1.0, width=20., radius=15., nfind=1, threshold=0., minsep=5., maxsep=1000., order="increasing", aprecenter="", npeaks=INDEF, shift=yes, llimit=INDEF, ulimit=INDEF, ylevel=0.1, peak=yes, bkg=yes, r_grow=0., avglimits=no, t_nsum=10, t_step=10, t_nlost=3, t_function="spline3", t_order=3, t_sample="*", t_naverage=1, t_niterate=1, t_low_reject=3., t_high_rejec=3., t_grow=0., background="fit", skybox=1, weights="variance", pfit="fit1d", clean=no, saturation=INDEF, readnoise="5.9", gain="2.3", lsigma=4., usigma=5., nsubaps=1)

Es importante conocer los parámetros. Nos pregunta una serie de cues-

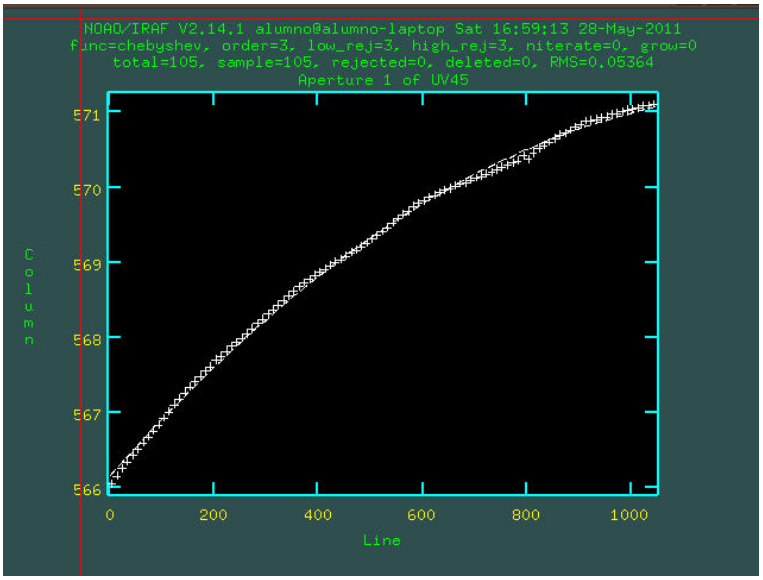

Figura 5: *Traza o camino que sigue el pico máximo a lo largo del eje de dispersión.*

tiones, que contestamos que si:

```
Find apertures for UVal_0045tbf? (yes):
Resize apertures for UVal_0045tbf? (yes):
Edit apertures for UVal_0045tbf? (yes):
```

Nos aparecerá el perfil del espectro en la dirección espacial (eje x), con los intervalos de extracción del espectro y del cielo marcados (Fig. 3). Podemos modificar tanto la apertura de extracción del espectro como la selección de la zona de extracción del fondo, como se indica abajo.

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.

Para modificar la apertura de extracción del espectro tenemos 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. Otra forma es utilizar la tecla "u" (de upper) desplazando el cursor a la posición que queramos para aumentar a la derecha la apertura y la tecla "l" (de lower) para aumentar a la izquierda la apertura.
- 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 apartados anteriores.

Una vez satisfechos con la apertura de extracción espectral nos ocupamos de seleccionar la zona de extracción del cielo. Para ello tecleamos "b" (*background*). Entramos en un terminal gráfico diferente al anterior, en el que aparece marcado el nivel del fondo como una línea horizontal (Fig. 4). 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" o con la tecla "z" seleccionando un segmento. 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" (*fit*)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 (Fig. 5) en la que se muestra el modelo de ajuste al espectro, y su diferencia con el centro de la línea a lo largo de toda la dirección espectral. Si el ajuste no es satisfactorio podemos modificarlo utilizando ajuste de orden superior (ej. `:order 3`) o funciones de

ajuste diferentes (ej. `:function spline3`). Las posibilidades de las funciones son spline1 (spline lineal), spline3 (spline cúbico), legendre o chebyshev. El programa que hace este ajuste se denomina "icfit", podemos encontrar más información tecleando

```
help icfit
```

Tecleamos "f" para un nuevo ajuste, y comprobamos si la RMS es mejor que la del anterior. Las teclas "h" y "j" nos permite ver el ajuste y el residuo del ajuste. Una vez satisfechos con el ajuste salimos del programa tecleando "q" y contestando afirmativamente a las cuestiones. Vemos al final el espectro extraido. Pulsamos de nuevo "q" para volver a la línea de comandos.

Se habrá creado un fichero que se llamará UVal_0045tbf.0001.fits. Podemos ver de nuevo el espectro en la Fig. 6 con la instrucción

```
splot UVal_0045tbf.0001.fits
```

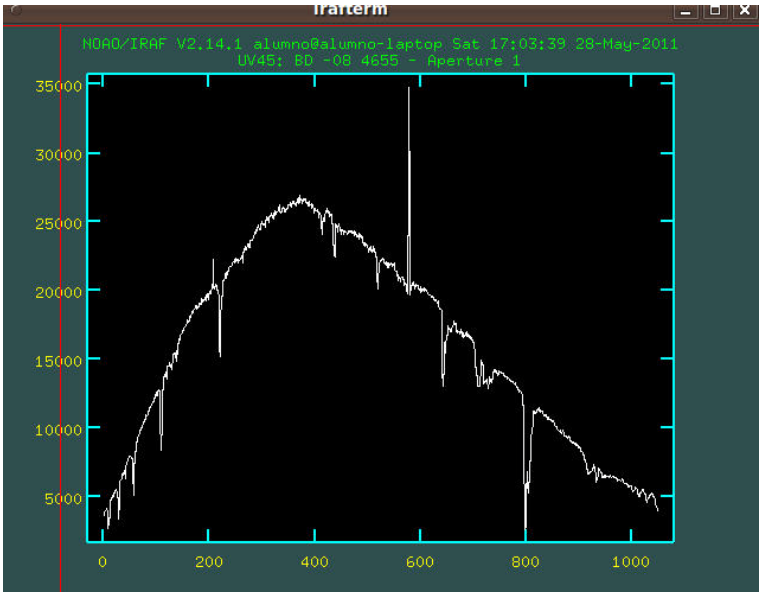

Figura 6: *Espectro 1d sin calibrar en longitud de onda.*

2.5. Calibración de longitud de onda

Para la calibración en longitudes de onda, primero tenemos que extraer la apertura de la imagen del arco y determinar el espectro en 1D con:

```
apall arco01st.fits recen- trace- back- interac-
```

o bien con

apall (“arco01stbf“, output=, apertures=, format=”onedspec“, references=”UVal_0045tbf”, profiles=””, interactive=no, find=no, recenter=no, resize=no, edit=no, trace=no, fittrace=no, extract=yes, extras=no, review=no, line=INDEF, nsum=10, lower=-10., upper=10., apidtable=““, b_function=”chebyshev”, b_order=2, b_sample=“-40:-20,20:40”, b_naverage=-3, b_niterate=0, b_low_reject=3., b_high_rejec=3., b_grow=1.0, width=20., radius=15., nfind=1, threshold=0., minsep=5., maxsep=1000., order=“increasing“, aprecenter=““, npeaks=INDEF, shift=yes, llimit=INDEF, ulimit=INDEF, ylevel=0.1, peak=yes, bkg=yes, r_grow=0., avglimits=no, t_nsum=10, t_step=10, t_nlost=3, t_function=”spline3”, t_order=3, t_sample=“*“, t_naverage=1, t_niterate=1, t_low_reject=3., t_high_rejec=3., t_grow=0., background=”fit”, skybox=1, weights=“variance”, pfit=“fit1d“, clean=no, saturation=INDEF, readnoise=”5.9”, gain=“2.3”, lsigma=4., usigma=5., nsubaps=1)

Ahora vamos a representar ese espectro 1D del arco e identificar las líneas con:

```
identify arco01stbf.0001
```

Dos imágenes de las líneas de calibración para el instrumento CAFOS con el que se obtuvieron los datos están disponibles en la carpeta de datos (cafos.jpg y cafos_lambda.gif), dónde la segunda está en unidades de longitud de onda. Podemos ver tanto en el espectro 1D del arco arco01stbf.0001 (Fig. 7) como en las figuras jpg y gif que contienen las mismas líneas en emisión. Tenemos que identificar el píxel del centro de cada línea de emisión del espectro del arco arco01stbf.0001 con la longitud de onda del centro de cada línea de emisión en las figuras jpg y gif.

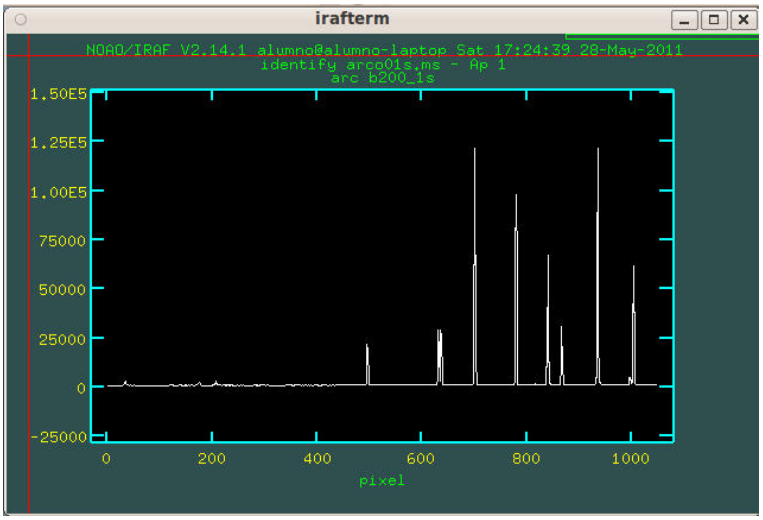

Figura 7: *Espectro 1D del arco.*

Seleccionamos las líneas con el cursor, y tecleamos "m". Introducimos la longitud de onda correspondiente. Acabamos con "f" para 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 crea en el directorio llamado "database" y que se llama *idnombre*, en nuestro caso `idarco01stbf.0001`.

2.6. Aplicación de la calibración a los espectros

Para asociar a nuestros espectros la calibración en longitud de onda tenemos que introducir en su cabecera una referencia al fichero que contiene dicho ajuste. Esto lo hacemos así:

```
hedit UVal_0045tbf.0001 REFSPEC1 arco01stbf.0001 add+
dispcor UVal_0045tbf.0001 out_UVal_0045tbf.0001
```

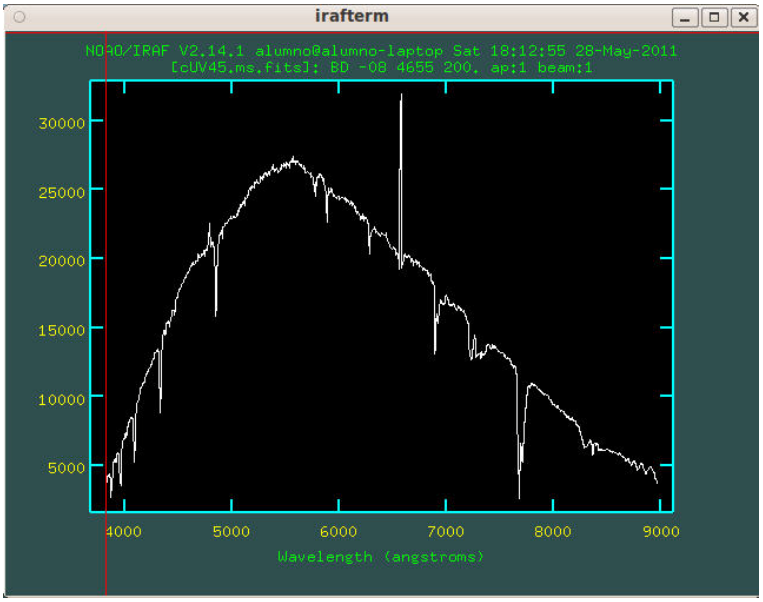

Figura 8: *Espectro final calibrado en longitud de onda.*

Para ver el espectro calibrado en longitud de onda (Fig. 8) tecleamos:

```
splot out_UVal_0045tbf.0001
```

Es recomendable apretar a la tecla "?" para ver todas las posibilidades que nos da este comando. Nos permite normalizar, hallar la anchura equivalente, velocidad radial, zoom, etc. Podéis utilizar el `help splot` en *IRAF*.

2.7. Normalización o rectificación del contínuo

Vamos a ajustar una función al contínuo para que al dividir por esa función, eliminemos el contínuo y nos quedemos con las líneas.

Para ello podemos utilizar:

`splot imagen` y luego apretamos la tecla "t" y luego \. Luego utilizamos la tecla "s" dos veces para elegir las regiones del espectro donde tenemos el

contínuo (donde no hay líneas!) y al que tenemos que ajustar la función. Veremos cómo va quedando la función ajustada al apretar la tecla "f". Para salir del ajuste, apretamos a "q". Si estamos contentos con el ajuste, apretamos a la "q" otra vez. Tendremos el espectro normalizado. Ahora tenemos que apretar a la tecla "i" y darle el nombre que queramos.

O bien podemos utilizar el comando `continuum imagen`, antes escribiendo el paquete `onedspec`. Mirar la ayuda de este comando.

3. Tarea de portafolios

Esta tarea es OPCIONAL. Los ficheros a entregar por parte de los alumnos son los espectros 1D calibrados en longitud de onda finales para que los pueda visualizar con splot. Me envíais los normalizados y sin normalizar, pero siempre calibrados en longitud de onda. Todos estos resultados tendrán que presentarse junto con una memoria en pdf explicando TODOS los pasos realizados junto con los comandos realizados con IRAF.

A partir de los espectros finales podemos clasificar las estrellas espectralmente y elegir en qué clase de luminosidad están, que veremos en la Actividad Guidad 2. Además podemos ver en la Fig. 8 que esta estrella tiene una emisión en Hα.