

Guia de referència per l'anàlisi d'espectres amb IRAF

Universitat de Barcelona

Subirà Vallès, Montserrat

Blanco Cuaresma, Sergi

Peña Pérez, Dídac

Ruiz Dern, Laura

29 de juliol de 2011

Índex

1	Objectius	3
2	Instrumentació	3
3	Preparació de l'entorn IRAF	3
3.1	Instal·lació	3
3.2	Execució	4
3.3	Comandes bàsiques	5
4	Reducció d'imatges	5
4.1	Preparació dels fitxers d'entrada	6
4.2	Reducció de les imatges	9
5	Espectres	10
5.1	Característiques de les imatges	10
5.2	Extracció de l'espectre	11
5.2.1	Mode interactiu	11
5.2.2	Mode automàtic	14
5.3	Calibració	15
5.4	Mesurar línies	16

1 Objectius

El present document és una recopilació de les accions portades a termes amb el programa IRAF per a la reducció d'imatges preses per a la pràctica d'espectres, corresponents a l'assignatura d'Astronomia observacional de la Universitat de Barcelona.

No obstant, el document ha sigut preparat per tal de que també pugui ser utilitzat com una guia de referència general per a la reducció d'imatges amb IRAF. Els espectres analitzats són d'objectes puntuals (estrelles). En cas de disposar d'espectres extensos com nebuloses, es recomana complementar la informació presentada amb altres documents de referència com “*A user's guide to reducing slit spectra with IRAF*” de Phil Massey et al (1992).

2 Instrumentació

Les imatges, reduïdes i analitzades amb IRAF per a la redacció d'aquest document, han estat obtingudes mitjançant una CCD ST-8 amb les següents característiques:

- Xip: KODAK KAF-1603ME de 1530x1020 píxels, cadascun d'ells de $9 \times 9 \mu m$
- Sensibilitat (guany): 2.5 electrons per ADU (*Analogic Digital Unit*, és a dir, cada unitat en la imatge digital ha estat produïda per 2.5 electrons)
- *Read-out noise* (RON): 15 electrons per píxel que equivalen a $15 \text{ electrons} \frac{1 \text{ ADU}}{2.5 \text{ electrons}} = 6 \text{ ADU}$ per píxel.
- Bits per píxel: 16 bits
- Nombre màxim de comptes: $2^{16} = 65536$
- Temperatures de treball: 20-25 graus per sota de la temperatura ambient (màxim -25)

3 Preparació de l'entorn IRAF

IRAF requereix un entorn Unix per a la seva instal·lació. En aquest apartat es descriu la instal·lació en un sistema Ubuntu GNU/Linux.

3.1 Instal·lació

Com usuari administrador en un sistema Ubuntu GNU/Linux, es requereix disposar de la shell 'csh' i crear l'usuari 'iraf':

```
apt-get install csh
mkdir -p /iraf/iraf
useradd -d /iraf/iraf/local -m -s /bin/csh iraf
```

Un cop creat l'usuari, descarregar el fitxer 'iraf.linux.x86_64.gz'¹ (o 'iraf.linux.x86.gz' si el sistema és de 32 bits) i guardar-ho a '/iraf/' per tal de fer la descompressió:

```
cd /iraf/iraf/
cat /iraf/iraf.linux.x86_64.gz | zcat | tar -xpf -
chown -R iraf:iraf /iraf
```

A continuació s'edita el fitxer '/iraf/iraf/unix/hlib/install' per tal d'afegir, al principi de tot:

```
set nonomatch
```

Seguidament, es prepara l'entorn per a la instal·lació:

```
cd /iraf/iraf/unix/hlib
csh
setenv iraf /iraf/iraf/
source $iraf/unix/hlib/irafuser.csh
```

Es recomana primer fer una simulació d'instal·lació per tal de detectar si existeix algun tipus de problema:

¹<http://iraf.noao.edu/>

```
./install -n
```

Si no ha aparegut cap missatge d'error, es deixen tots els paràmetres per defecte, i es pot procedir a la instal·lació real:

```
./install
```

En aquesta ocasió, es deixaran tots els paràmetres per defecte a excepció de:

```
Configure IRAF Networking on this machine? (yes): no
```

```
...
```

```
Create a default tapecap file? (yes): no
```

Un cop finalitzada la instal·lació d'IRAF, es surt de la shell 'csh':

```
% exit
```

Per a la versió 2.15.1a 64 bits, es recomana descarregar unes correccions de bugs que seran utilitzades per a alguna tasca concreta de fotometria:

```
cd /iraf/iraf/bin.linux64/
mv ecl.e ecl64.e
wget ftp://iraf.noao.edu/iraf/v215/support/linux/ecl.e
mv ecl.e ecl32.e
ln -s ecl64.e ecl.e

cd /iraf/iraf/noao/bin.linux64
mv x_photcal.e x_photcal64.e
wget ftp://iraf.noao.edu/iraf/v215/support/linux/x_photcal.e
chmod 755 x_photcal.e
mv x_photcal.e x_photcal32.e
ln -s x_photcal64.e x_photcal.e

chown iraf:iraf /iraf/iraf/bin.linux64/* /iraf/iraf/noao/bin.linux64/*
```

A continuació cal instal·lar 'xgterm', la terminal que utilitza IRAF:

```
mkdir x11iraf-v2.0BETA-bin.linux/
cd x11iraf-v2.0BETA-bin.linux/
wget ftp://iraf.noao.edu/iraf/x11iraf/x11iraf-v2.0BETA-bin.linux.tar.gz
tar -zxvf x11iraf-v2.0BETA-bin.linux.tar.gz
sudo ./install
```

Un cop instal·lat, serà necessari crear el fitxer '/usr/local/bin/iraf.sh' amb el següent contingut:

```
#!/bin/bash
cd $HOME
/usr/local/bin/ds9 &
/usr/local/bin/xgterm -G 1100x350+10-10 -sbr -fn 9x15 -sl 400 -cr red -title IRAF -bg "
    black" -fg "white" -geometry 120x34 -e cl
```

I donar-li permisos d'execució:

```
chmod 755 /usr/local/bin/iraf.sh
```

Finalment, es descarrega el programa DS9 (entorn per a la visualització i anàlisi d'imatges FITS)² per tal de descomprimir-lo i copiar l'executable a un dels directoris del sistema:

```
wget http://hea-www.harvard.edu/saord/download/ds9/linux64/ds9.linux64.6.2.tar.gz
tar -zxvf ds9.linux64.6.2.tar.gz
mv ds9 /usr/local/bin
```

3.2 Execució

Per poder accedir a IRAF amb un usuari normal, la primera vegada s'haurà d'executar 'mkiraf' i seleccionar 'xgterm' com a terminal:

```
cd && mkiraf && iraf.sh
```

D'aquesta forma 'mkiraf' crearà el fitxer 'login.cl' i el directori 'uparm', necessaris per IRAF. Les següents vegades que es vulgui accedir a IRAF només serà necessari executar:

```
iraf.sh
```

²<http://hea-www.harvard.edu/RD/ds9/>

3.3 Comandes bàsiques

Algunes comandes d'utilitat general que poden ser utilitzades en iniciar l'entorn:

logout Sortir

package Llista paquets que poden ser carregats escrivint directament el seu nom (p.ex. `imred`, `ccdred`)

bye Descarrega el paquet actual

help Ajuda de comandes concretes

show | **page** Llista les variables d'entorn

show editor Mostra la variable d'entorn 'editor'

set editor=vim Canvia una variable d'entorn (en aquest cas fa referència a l'editor que s'executarà quan s'utilitzi la comanda 'edit fitxer')

cd imdir Canvia al directori d'imatges FIT de l'usuari (habitualment `/iraf/imdir/usuari/`)

pwd Mostra el directori actual

ls Llista fitxers i directoris

lparam imstat Llista els paràmetres de la comanda 'imstat'.

epar imstat Modifica els paràmetres de la comanda 'imstat' que pot ser executada a continuació. Per sortir de l'edició guardant CTRL+D, sense guardar CTRL+C.

imstat fitxer.fits Mostra estadístiques del fitxer FIT. És important que aquest tingui extensió '.fits' o '.fits' en minúscules.

delete fitxer Esborra un fitxer

cl < calibrate.cl Executa un script anomenat 'calibrate.cl' ubicat al directori actual

less fitxer Visualitza un fitxer de text ('q' per sortir)

! gedit fitxer Executa la comanda del sistema 'less fitxer'

4 Reducció d'imatges

A continuació es descriu el procés de reducció d'imatges brutes per tal de poder extreure els espectres.

IRAF requereix treballar amb imatges FITS, en cas de tenir captures en format ST8 serà necessari fer una conversió, per exemple, fent ús del programa FITSConverter³:

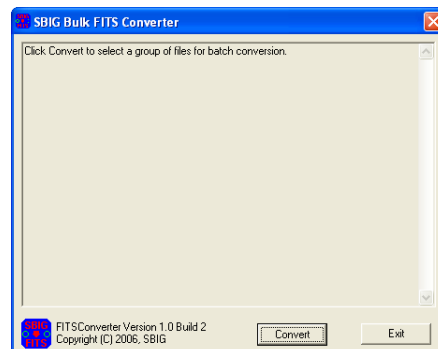


Figura 1: FITSConverter, només disponible per sistemes Microsoft Windows.

³<http://www.sbig.com/sbwht/mls/softpage.htm>

Cal destacar que les imatges FITS han de tenir extensions 'fit' o 'fits' en minúscules ja que sinó és probable que l'IRAF no les pugui obrir correctament. Per renombrar massivament un conjunt de fitxers a GNU/Linux s'empra:

```
$ rename 's/\.FITS$/\.fits/' *
$ rename 's/\.FITS$/\.fits/' *
```

4.1 Preparació dels fitxers d'entrada

1. Abans de començar, és important guardar una còpia de totes les imatges FITS que s'utilitzaran donat que el procés sobre escriurà moltes d'elles.
2. S'inicia el programa gràfic DS9 mitjançant l'execució de 'ds9':

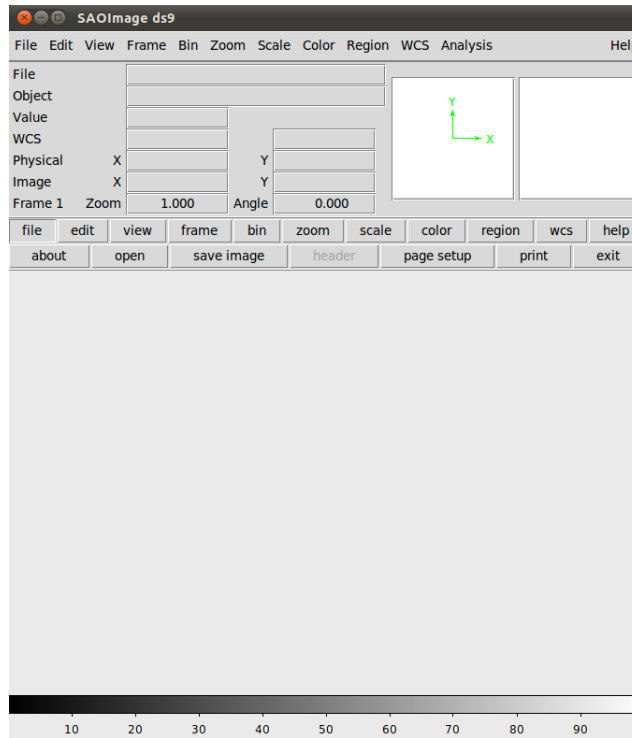


Figura 2: DS9, visualitzador d'imatges FITS

3. S'inicia l'entorn IRAF, situant-se al directori a on estan les imatges (habitualment “/iraf/indir/*usuari*”, referenciat per la variable 'indir'):

```
$ cl
ecl>
ecl> cd indir
```

```

marble@jupyter: ~
NOAO/IRAF PC-IRAF Revision 2.15.1a EXPORT Mon Feb 21 18:54:16 MST 2011
This is the EXPORT version of IRAF V2.15.1a supporting PC systems.

Welcome to IRAF. To list the available commands, type ? or ??. To get
detailed information about a command, type 'help <command>'. To run a
command or load a package, type its name. Type 'bye' to exit a
package, or 'logout' to get out of the CL. Type 'news' to find out
what is new in the version of the system you are using.

Visit http://iraf.net if you have questions or to report problems.

The following commands or packages are currently defined:

      dataio.      images.      lists.      obsolete.      proto.      system.
      dbms.        language.    noao.        plot.          softtools.    utilities.

ecl> cd imdir
ecl>

```

Figura 3: Entorn IRAF

Pel present treball es disposa dels següents fitxers inicials (entre altres):

```

ecl> ls
database                                grup4_alta_obj_HIP28634_90_1.fits
grup1_alta_lamp_1_2.fits                 grup4_alta_obj_HIP28634_90_2.fits
grup1_alta_obj_HD81192_30_1.fits          grup4_alta_obj_HIP28634_90_3.fits
grup1_alta_obj_hip57939_60_1.fits         grup4_alta_obj_HIP35136_60_1.fits
grup1_alta_obj_SAO77800_60_1.fits         grup4_baixa_lamp_10_2.fits
grup1_alta_obj_SAO77800_60_2.fits         grup4_baixa_obj_Arceturus_10_1.fits
grup1_alta_obj_SAO77800_60_3.fits         grup4_baixa_obj_Denebola_10_1.fits
grup1_baixa_lamp_1_2.fits                grup4_baixa_obj_Nekkar_10_1.fits
grup1_dark_30_1.fits                     grup4_dark_10_1.fits
grup1_dark_30_2.fits                     grup4_dark_2_1.fits
grup1_dark_30_combined.fits              grup4_dark_60_1.fits
grup2_alta_lamp_10_1.fits                 grup4_dark_90_1.fits
grup2_alta_obj_SAO58636_30_1.fits         grup5_alta_lamp_10_2.fits
grup2_alta_obj_SAO60896_150_1.fits        grup5_baixa_lamp_10_2.fits
grup2_alta_obj_SAO60896_150_2.fits        grup5_baixa_obj_alphard_10_1.fits
grup3_dark_30_combined.fits              scripts
...

```

Totes les imatges presenten un prefix “grup” per tal d’identificar quin equip de treball les ha obtingut. A continuació, s’especifica si es tracta d’una imatge d’alta o baixa resolució, seguint del text ‘dark’, ‘obj’ o ‘lamp’ en funció de si es un dark, una estrella o una imatge de lampara. Finalment, s’especifica el nom de l’estrella pels casos que aplica i els segons d’exposició.

4. Per visualitzar les imatges al programa DS9, es pot utilitzar la comanda ‘display’:

```
ecl> display grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.fits 1 fill+
```

DS9 disposa de diferents ‘frames’ a on es poden carregar diferents imatges simultàniament i alternar-les entre elles pressionant ‘tabulador’:

```

ecl> display grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.fits 1 fill+
ecl> display grup3_baixa_obj_castor_30_1.fits 2 fill+
ecl> display grup3_baixa_obj_meissa_30_2.fits 3 fill+

```

En cas de que la visualització no sigui satisfactòria, es poden ajustar diferents paràmetres al menú ‘Scale’ de DS9.

5. Per defecte, les funcions d’extracció d’espectres esperen que l’eix de dispersió en posició vertical. En aquest sentit es poden rotar totes les imatges:

```
ecl> imtranspose *.fits *.fits
```

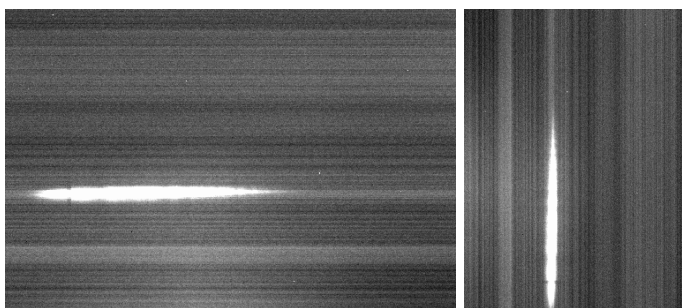


Figura 4: Transposició d'una imatge per a que l'espectre (eix de dispersió) sigui vertical.

Una alternativa més eficient és indicar a la capçalera dels fitxers l'orientació de l'eix de dispersió (1 - horitzontal, 2 - vertical):

```
hedit *.fits DISPAXIS 1 add+
```

6. Per tal de llistar la capçalera d'una de les imatges a reduir s'utilitzarà 'imhead':

```
ecl> imhead grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.fits l+

grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.fits [1530,1020][ushort]:
No bad pixels, min=0., max=65535.
Line storage mode, physdim [1530,1020], length of user area 1580 s.u.
Created Thu 02:00:00 02-Jun-2011, Last modified Thu 20:52:07 02-Jun-2011
Pixel file "grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.fits" [ok]
EXTEND = T / FITS dataset may contain extensions
COMMENT = 'SBIG FITS header format per:'
COMMENT = ' http://www.sbig.com/pdf/FILES/SBFITSEXT_1r0.pdf'
BZERO = 32768 / offset data range to that of unsigned short
BSCALE = 1 / default scaling factor
OBJECT = ' '
TELESCOP = ' '
INSTRUME = 'SBIG ST-8 Dual CCD Camera' / Camera Model
OBSERVER = 'Xavier Franch'
DATE-OBS = '2011-04-05T21:00:32.000' / GMT START OF EXPOSURE
EXPTIME = 30. / EXPOSURE IN SECONDS
CCD-TEMP = 0.19 / CCD TEMP IN DEGREES C
XPIXSZ = 9. / PIXEL WIDTH IN MICRONS
YPIXSZ = 9. / PIXEL HEIGHT IN MICRONS
XBINNING = 1 / HORIZONTAL BINNING FACTOR
YBINNING = 1 / VERTICAL BINNING FACTOR
XORGSUBF = 0 / SUB_FRAME ORIGIN X_POS
YORGSUBF = 0 / SUB_FRAME ORIGIN Y_POS
EGAIN = 2.57 / ELECTRONS PER ADU
FOCALLEN = 4045.9914 / FOCAL LENGTH IN MM
APTDIA = 101.6 / APERTURE DIAMETER IN MM
APTAREA = 125200.007664 / APERTURE AREA IN SQ-MM
CBLACK = 115 / BLACK ADU FOR DISPLAY
CWHITE = 365 / WHITE ADU FOR DISPLAY
PEDESTAL = -100 / ADD TO ADU FOR 0-BASE
DATAMAX = 65535 / SATURATION LEVEL
SBSTDVER = 'SBFITSEXT Version 1.0' / SBIG FITS EXTENSIONS VER
SWACQUIR = 'WinOPS Ver 5.41 Build 6-NT' / DATA ACQ SOFTWARE
SWCREATE = 'WinOPS Ver 5.41 Build 6-NT'
FILTER = 'Red' / OPTICAL FILTER NAME
SNAPSHOT = 1 / NUMBER IMAGES COADDED
DATE = '2011-06-02' / GMT DATE WHEN THIS FILE CREATED
RESMODE = 6 / RESOLUTION MODE
EXPSTATE = '125' / EXPOSURE STATE (HEX)
RESPONSE = 3000. / CCD RESPONSE FACTOR
NOTE = 'Local time: 4/5/2011 at 21:00:32'
TRAKTIME = 0. / TRACKING EXPOSURE
SWMODIFY = 'SBIG Batch SBIG to FITS Converter'
HISTORY Convert from SBIG to FITS Format
```

S'observa que la imatge és de 1530x1020 píxels i que no existeixen les següents seccions:

- (a) TRIMSEC: Píxels útils de la imatge
- (b) BIASSEC: Regió no exposada a la llum (*overscan*)

7. Es procedeix a analitzar la imatge localitzant la coordenada 'y' a on es troba la part central de l'espectre, per després executar 'implot' i seleccionar la línia 'y' (p.ex. teclejant '! 390'):


```
display grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.fits 1 fill+
implot grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.fits
```

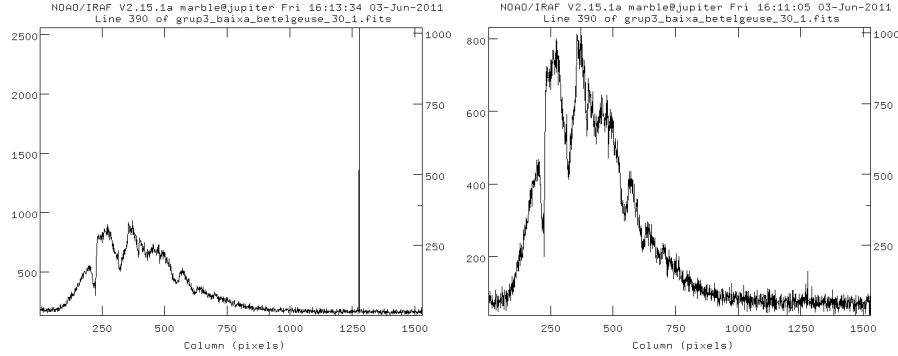


Figura 5: Gràfics centrats a la línia 390 de les imatges de baixa resolució de Betelgeuse original (esquerra) i amb darks aplicats (dreta).

Les comandes que es poden utilitzar directament sobre el gràfic són:

- (a) “:l 300”: visualitza els valors de les columnes per a la línia 300
- (b) “:c 300”: visualitza els valors de les línies per a la columna 300
- (c) “C”: posició del cursor
- (d) “ee”: amplia la regió a on està situat el cursor
- (e) “aa”: torna a mostrar la gràfica a escala
- (f) “q”: sortir

8. Es defineixen els camps de capçalera que s’han detectat que faltaven:

```
hedit *.fits TRIMSEC [1:1530,1:1020] verify - show+ add+
hedit *.fits BIASSEC "[]" verify - show+ add+
```

9. Els darks, flats i imatges originals han de disposar d’un camp IMAGETYP que les identifiqui:

```
hedit *_dark_*.fits IMAGETYP dark verify - show+ add+
hedit grup*_alta_*.fits IMAGETYP object verify - show+ add+
hedit grup*_baixa_*.fits IMAGETYP object verify - show+ add+
hedit grup*_lamp_*.fits IMAGETYP comp verify - show+ add+
```

4.2 Reducció de les imatges

El procés per a la reducció d’una imatge requereix principalment portar a terme les següents operacions:

$$Imatge\ reduida = \frac{(Imatge\ original_{filtre} - Dark_{temps\ imatge})}{(Flat_{filtre} - Dark_{temps\ flat})_{normalitzat}}$$

No obstant, per a l’obtenció d’un espectre serà suficient amb restar els darks i no considerar l’eficiència individual dels píxels (flats):

$$Imatge\ reduida = Imatge\ original_{filtre} - Dark_{temps\ imatge}$$

1. Per tal de que la tasca de reducció ‘ccdproc’ interpreti correctament les capçaleres dels fitxers, es configura per realitzar fotometria amb CCD directe:

```
ecl> imred
imred> ccdred
imred> cd imdir
ccdred> setinstrument direct
```

Es modifica el paràmetre 'pixelty' de manera que les operacions es realitzin utilitzant coma flotant però les imatges resultants continuïn sent representades per nombres reals:

```
(pixelty=          short real) Output and calculation pixel datatypes
```

La resta de paràmetres no es modifiquen (ctrl+d, ctrl+d).

2. Els fitxers dark de la mateixa exposició i pressos a la mateixa nit es combinen mitjançant les següents comandes:

```
darkcombine grup1_dark_30_*.fits output=grup1_dark_30_combined.fits combine=average
reject=minmax ccdtype=dark scale=exposure process=
darkcombine grup3_dark_10_*.fits output=grup3_dark_10_combined.fits combine=average
reject=minmax ccdtype=dark scale=exposure process=
darkcombine grup3_dark_30_*.fits output=grup3_dark_30_combined.fits combine=average
reject=minmax ccdtype=dark scale=exposure process=
darkcombine grup6_dark_1_*.fits output=grup6_dark_1_combined.fits combine=average
reject=minmax ccdtype=dark scale=exposure process=
darkcombine grup6_dark_10_*.fits output=grup6_dark_10_combined.fits combine=average
reject=minmax ccdtype=dark scale=exposure process=
darkcombine grup6_dark_60_*.fits output=grup6_dark_60_combined.fits combine=average
reject=minmax ccdtype=dark scale=exposure process=
```

D'aquesta forma es redueixen possibles efectes de rajos còsmics que hagin caigut sobre la CCD al moment de l'exposició.

3. Finalment, es procedeix a realitzar la reducció de les imatges:

```
# Grup 2
ccdproc grup2*_alta*_10_*.fits ccdtype=object oversca= trim= zerocor= darkcor+
flatcor= dark=grup2_dark_10_1.fits
ccdproc grup2*_alta*_30_*.fits ccdtype=object oversca= trim= zerocor= darkcor+
flatcor= dark=grup2_dark_30_1.fits
ccdproc grup2*_alta*_60_*.fits ccdtype=object oversca= trim= zerocor= darkcor+
flatcor= dark=grup2_dark_60_1.fits
ccdproc grup2*_alta*_120_*.fits ccdtype=object oversca= trim= zerocor= darkcor+
flatcor= dark=grup2_dark_120_1.fits
ccdproc grup2*_alta*_150_*.fits ccdtype=object oversca= trim= zerocor= darkcor+
flatcor= dark=grup2_dark_150_1.fits

ccdproc grup2*_baixa*_10_*.fits ccdtype=object oversca= trim= zerocor= darkcor+
flatcor= dark=grup2_dark_10_1.fits
ccdproc grup2*_baixa*_15_*.fits ccdtype=object oversca= trim= zerocor= darkcor+
flatcor= dark=grup2_dark_15_1.fits
ccdproc grup2*_baixa*_30_*.fits ccdtype=object oversca= trim= zerocor= darkcor+
flatcor= dark=grup2_dark_30_1.fits
ccdproc grup2*_baixa*_45_*.fits ccdtype=object oversca= trim= zerocor= darkcor+
flatcor= dark=grup2_dark_45_1.fits

# Grup 3
ccdproc grup3*_baixa*_10_*.fits ccdtype=object oversca= trim= zerocor= darkcor+
flatcor= dark=grup3_dark_10_combined.fits
ccdproc grup3*_baixa*_30_*.fits ccdtype=object oversca= trim= zerocor= darkcor+
flatcor= dark=grup3_dark_30_combined.fits
```

5 Espectres

En aquesta secció s'exposen els passos necessaris per extreure i calibrar l'espectre d'una estrella a partir de les imatges reduïdes.

5.1 Característiques de les imatges

A continuació s'indiquen algunes de les funcions disponibles per analitzar les imatges i obtenir valors d'interès per a l'extracció final de l'espectre.

1. Amb l'objectiu d'analitzar la traça de l'estrella, es visualitza la imatge corresponent utilitzant 'display' i 'imshow':

```
display grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.fits 1 fill+
imshow grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.fits
```

2. S'indica que la gràfica d'imshow mostri una línia que talli l'espectre (p.ex. 'l 500') i a continuació:

- (a) Es situa el cursor per sota de l'eix X abans del pic de flux (ubicació de l'espectre de l'estrella) i es pressiona 'p'.
- (b) Es desplaça el cursor per situar-ho després del pic i es torna a pressionar 'p'.

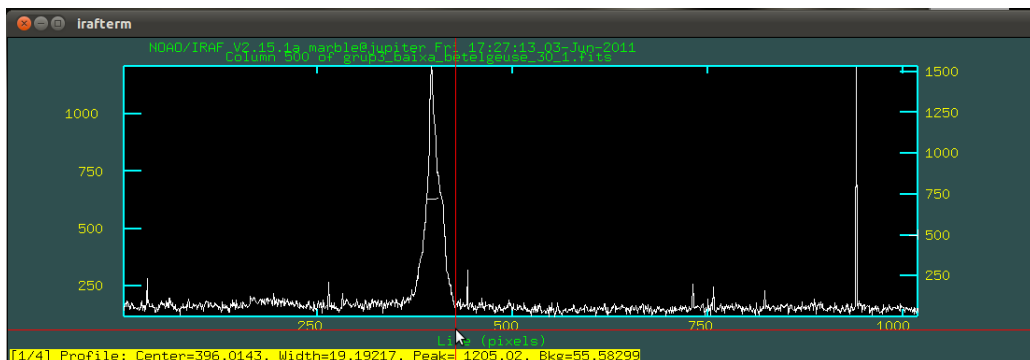


Figura 6: Gràfics centrats a la línia 390 de les imatges de baixa resolució de Betelgeuse original (esquerra) i amb darks aplicats (dreta).

D'aquesta forma s'obté el FWHM (*Full width at half maximum*), es a dir, l'amplada en píxels a alçada meitat. Si en comptes de 'p' s'utilitza 's', llavors es pot extreure el número de píxels entre els dos punts i altres valors estadístics.

3. A continuació es valida el grau de perpendicularitat de l'espectre respecte a l'eix Y. S'escolleixen 3 línies a principi, meitat i final de l'espectre (coordenada Y visualitzada al ds9) i des de l'ímpot:
 - (a) '! 450' Visualitza la línia a meitat de l'espectre (p.ex. 450)
 - (b) ':o' No esborrar la línia anterior
 - (c) '! 150' Visualitza la línia a l'inici de l'espectre (p.ex. 150)
 - (d) ':o' No esborrar la línia anterior
 - (e) '! 750' Visualitza la línia al final de l'espectre (p.ex. 750)

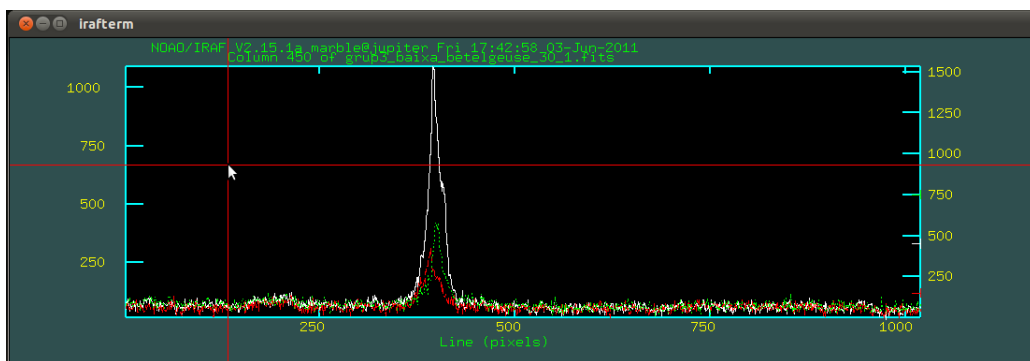


Figura 7: Línia a la meitat de l'espectre (blanc), a l'inici de l'espectre (vermell) i al final (verd).

Situar el cursor sobre cada pic i polsant 'espai' s'imprimeix per pantalla les coordenades, comparant les X s'obté que el desplaçament del pic es de 8 píxels entre l'inici i el final de l'espectre, prou raonable com per no haver de fer cap modificació a la imatge.

5.2 Extracció de l'espectre

5.2.1 Mode interactiu

1. Es carreguen els paquets adjunts:

```
ecl> imred
imred> ctioslit
```

2. La comanda 'apall' serà l'utilitzada per extreure l'espectre amb els següents paràmetres:

```
display grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.fits 1 fill+

apall grup*_*_obj_*.fits line=INDEF nsum=20 width=20 b_sample='-100:-50,50:100'
      b_naver=-100 b_funct=legendre b_order=1 t_nsum=20 t_step=10 t_funct=spline3
      t_order=4 t_niter=1 background=fit weights=none clean=no format=multispec nfind
      =1 find+ recenter- resize- edit+ trace+ fittrac+ extract+ extras+ review-
      interactive+
```

(a) Apertura:

- i. 'line=INDEF': En comptes d'especificar manualment la línia a la que es troba l'espectre, IRAF la cercarà automàticament.
- ii. 'nsum=20': Nombre de línies de dispersió que es sumaran per trobar el centre del paràmetre anterior. Es recomana que el seu valor coincideixi aproximadament amb la FWHM de la traça (extret mitjançant 'implot' tal i com s'especifica a la secció 5.1).
- iii. 'width=20': Tamany del perfil de l'estrella de base a base (igual que l'anterior).
- iv. 'resize=yes': Permet que IRAF identifiqui automàticament els límits de la traça.

(b) Finestra de fons de cel:

- i. 'b_sample='-100:-50,50:100': Ubicació del fons de cel relatiu al centre del perfil de l'estrella. Els valors adients es poden extreure a partir de l'anàlisi presentat a la secció 5.1.
- ii. 'b_funct=legendre', 'b_order=1' i 'b_naver=-100': Funció utilitzada per ajustar les mesures del fons de cel.

(c) Control de la traça:

- i. 't_nsum=20' i 't_step=10': Nombre de línies que seran utilitzades per identificar les variacions de la traça (en cas de que aquesta no sigui perfectament recta). Es recomana un valor similar al paràmetre 'nsum'.
- ii. 't_funct=spline3', 't_order=4' i 't_niter=1': Funció que s'utilitzarà per ajustar la traça.

(d) Extracció del fons de cel:

- i. 'background=fit' i 'weights=none': Restar el fons de cel a la traça.

(e) Format del fitxer de sortida:

- i. 'format=multispec' i 'extras=yes': En un mateix fitxer es guarden diverses imatges.
 - A. Banda 1: Espectre de l'estrella.
 - B. Banda 2: Espectre del cel.

3. Al executar la comanda 'apall' del punt anterior, el sistema realitza dos preguntes a les que s'ha d'indicar 'yes':

```
Find apertures for grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1? (yes): yes
Edit apertures for grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1? (yes): yes
```

A continuació s'obrirà l'editor d'apertura, des d'on també es podrà accedir a l'editor de l'ajustament de cel. Les següents comandes poden ser utilitzades sobre la finestra:

(a) A l'editor d'apertura:

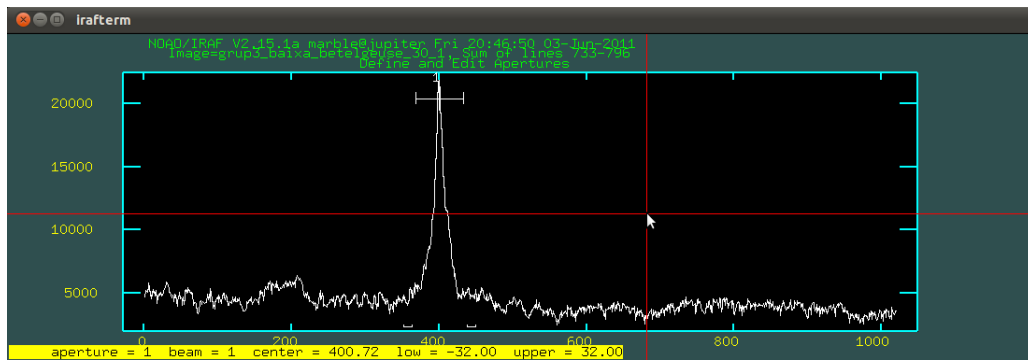


Figura 8: Editor d'apertura

- i. 'y': Canvia l'amplada de l'apertura en funció de la posició del cursor en l'eix de les 'y'.
 - ii. 'b': Obre l'editor de l'ajustament de fons de cel.
 - iii. 'q': Finalitza.
- (b) Al l'editor de l'ajustament de fons de cel:

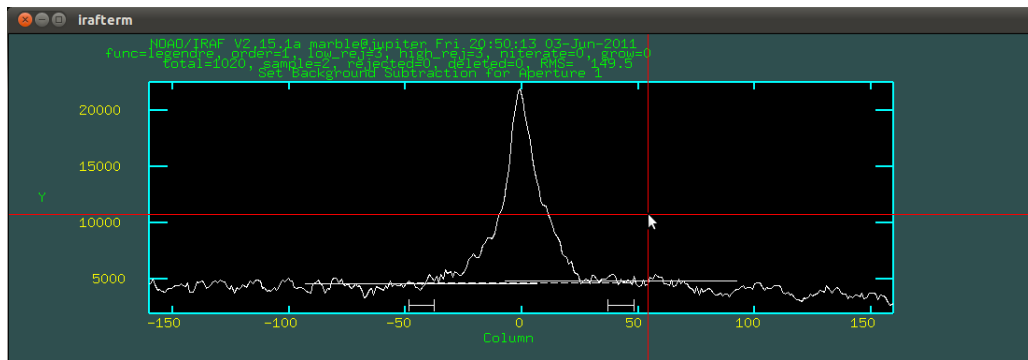


Figura 9: Editor de l'ajustament de fons de cel

- i. 't': Oblida les regions de fons de cel actuals.
 - ii. 's': Dos vegades amb el punter a posicions diferents per tal de marcar noves regions a ser considerades fons de cel.
 - iii. 'f': Ajusta el fons de cel amb les regions actuals.
 - iv. 'q': Torna a l'editor d'apertura.
4. Al finalitzar el punt anterior pressionant 'q' a l'editor d'apertura, el sistema realitza tres preguntes a les que s'ha de respondre 'yes':

```
Trace apertures for grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1? (yes): yes
Fit traced positions for grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1? (yes): yes
Fit curve to aperture 1 of grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1? (yes): yes
```

A continuació visualitza el centre de la traça i la funció ajustada. Aquesta pot ser modificada amb les comandes:

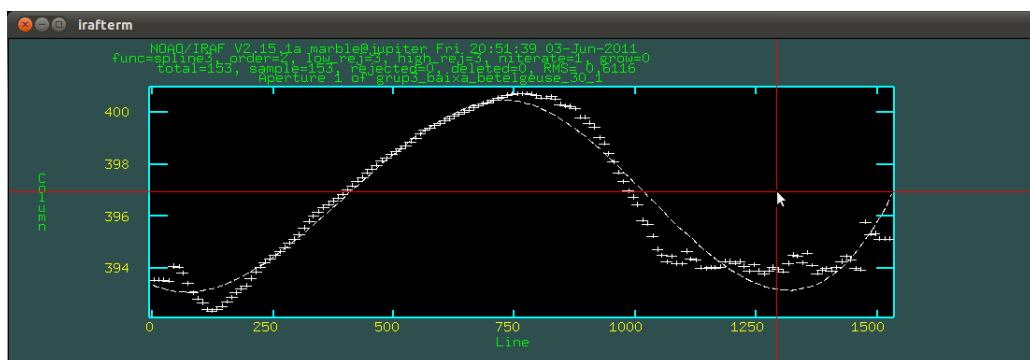


Figura 10: Editor de l'ajustament de la traça

- (a) 'spine3', 'legendre': Canviar la funció.
- (b) 'ordre 2': Canviar l'ordre de la funció.
- (c) 'f': Ajustar la funció.
- (d) 'q': Finalitza.

5. Finalment, el procés realitza quatre preguntes que s'han de respondre afirmativament:

```
Write apertures for grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1 to database? (yes): yes
Extract aperture spectra for grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1? (yes): yes
Review extracted spectra from grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1? (yes): yes
Review extracted spectrum for aperture 1 from grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1? (yes): yes
```

L'espectre obtingut és visualitzar i per sortir només serà necessari pressionar 'q':



Figura 11: Visualitzador de l'espectre

6. La informació del procés d'extracció es guarda al directori 'database' amb el prefix 'ap' i el nom del fitxer original. L'espectre s'ha emmagatzemat al fitxer 'grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.ms.fits'. En cas de voler tornar a visualitzar-ho s'ha d'executar:

```
splot grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.ms.fits band=1
```

Si per altra banda, es vol visualitzar l'espectre del fons de cel extret:

```
splot grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.ms.fits band=2
```

5.2.2 Mode automàtic

En cas de que prèviament s'hagi realitzat un ajustament i extracció interactiva de l'espectre, és possible tornar a extreure'l utilitzant els valors guardats al directori 'database':

```
apall grup*_*_obj_*.fits format=multispec recenter= find= resize= edit= trace+ fittrac=
background=fit extract+ extras+ review= interactive=
```

5.3 Calibració

Per tal d'associar una longitud d'ona a cada píxel s'han de realitzar les següents accions:

1. En primer lloc, s'ha d'extreure l'espectre de la lampara amb les mateixes condicions que la d'un objecte que s'hagi tractat prèviament segons la secció 5.2.1:

```
apall grup3_baixa_lamp_10_1.fits out=grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.ms.lamp.fits
ref=grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.fits recenter= trace= background=
interactive= nfind=1
```

Aquest procés crea el fitxer 'grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.ms.lamp.fits'.

2. S'utilitzarà un llistat de línies que produeix la lampara, IRAF incorpora diversos llistats que poden ser consultats amb:

```
page linelists$README
```

No obstant, pel cas actual es creara un fitxer al directori 'imdir' anomenat 'lampara.dat' amb un llistat de longituds (angstroms) i descripcions:

```
# units Angstroms
4054.0 mercury
4366.0 mercury
4877.0 terbium from Tb3+
5424.0 terbium from Tb3+
5465.0 mercury
5777.0 likely terbium from Tb3+ or mercury
5802.0 mercury or terbium from Tb3+
5840.0 possibly terbium from Tb3+ or europium
5876.0 likely europium in Eu+3:Y2O3
5934.0 likely europium in Eu+3:Y2O3
5997.0 likely europium in Eu+3:Y2O3
6116.0 europium in Eu+3:Y2O3
6257.0 likely terbium from
6311.0 likely europium in Eu+3:Y2O3
6508.0 likely europium in Eu+3:Y2O3
```

3. A l'espectre estret al primer punt, es necessari identificar associar-ho amb com a mínim un parell de línies amb la seva corresponent longitud d'ona:

```
identify grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.ms.lamp.fits coordlist=imdir$lampara.dat
fwidth=64
```

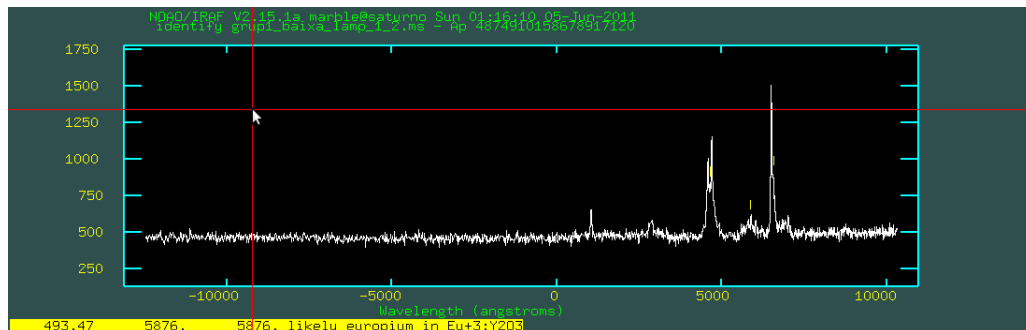


Figura 12: Calibració de la lampara.

- (a) 'm': Marcar una línia i introduir a continuació la longitud d'ona a la que correspon en Angstroms. Per exemple, les més intenses de la lampara utilitzada:

```
977.53 977.52698 ( INDEF ): 6116
821.03 821.02771 ( INDEF ): 5465
```

- (b) 'l': Intentar assignar automàticament la resta de línies segons el llistat de coordenades especificat.
- (c) 'f': Mostrar l'ajustament.
- (d) 'q': Finalitzar i guardar al directori 'database':

Write feature data to the database (yes)?

4. Tots els espectres d'objecte s'han d'associar amb l'espectre de la lampara mitjançant un camp de la capçalera:

```
hedit grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.ms.fits REFSPEC1 "  
grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.ms.lamp.fits" add+ ver- show+
```

5. Finalment, es transforma l'espectre de l'objecte per tal de que l'eix d'abscisses disposi de la longitud d'ona adient:

```
dispcor grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.ms.fits grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.ms.  
fits
```

Per tal de visualitzar el resultat:

```
splot grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.ms.fits band=1
```

6. De forma opcional, és possible normalitzar l'espectre per poder identificar més fàcilment les línies d'emissió i/o absorció:

```
continuum grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.ms.fits output=  
grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.ms.norm.fits function=spline3 order=8
```

Algunes de les funcions disponibles a la finestra del gràfic:

- (a) ':function spline3' i ':order 8': Canviar la funció ajustada (cos negre).
- (b) 'k': Visualitzar espectre normalitzat.
- (c) 'h': Visualitzar espectre sense normalitzar.

Per tal de visualitzar el resultat:

```
splot grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.ms.norm.fits band=1
```

5.4 Mesurar línies

Un cop obtingut l'espectre, pot ser d'interès analitzar les línies d'absorció i d'emissió que apareixen per tal d'identificar la longitud d'ona a la que s'han registrat.

1. Per analitzar un espectre es farà ús de la comanda 'splot':

```
splot grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.ms.fits band=1 nerrsample=100 sigma0=2.94  
invgain=0.40 save_file="splot.log"
```

Els paràmetres anteriors indiquen:

- (a) 'nerrsample=100': Activa el càlcul d'errors.
- (b) 'sigma0=2.94' i 'invgain=0.40': La desviació dels píxels és modelada amb $\sigma^2 = \sigma_0^2 + invgain \times I$ a on I és el valor del píxel. Pel cas actual es recomana que 'sigma0' i 'invgain' siguin calculats a partir de:

- i. $\sigma_0^2 = \frac{readnoise}{\sqrt{width_{aperture}}} = \frac{15}{\sqrt{26}} = 2.94$ a on l'amplada de l'apertura es pot trobar al fitxer 'database/apgrup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1' ($width_{aperture} \simeq 16 - (-10)$):

low	-764.	-10.88208
high	765.	16.75909

- ii. $invgain = \frac{1}{gain} = \frac{1}{2.5} = 0.40$ a on el guany ve determinat per les característiques de la CCD (secció 2).

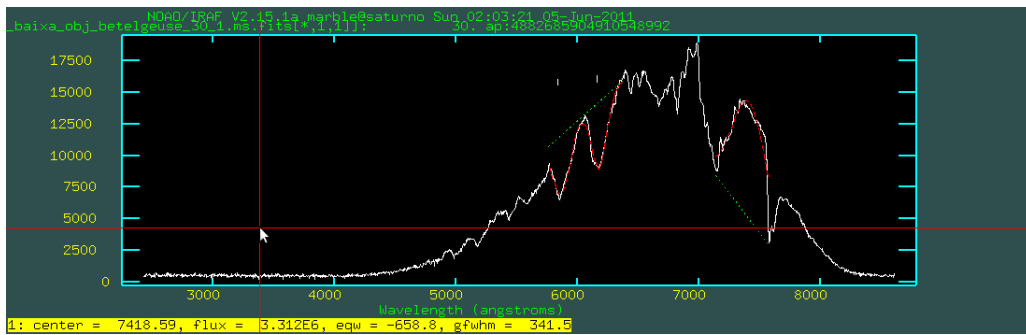


Figura 13: Anàlisi d'espectres amb 'splot'.

A la finestra de la gràfica es poden utilitzar les següents funcions:

- (a) 'a': Polsant 2 cops realitza un zoom entre les dos ubicacions a on estigués el punter.
- (b) 'c': Torna a visualitzar l'espectre anul·lant el zoom.
- (c) 'espai': Imprimeix per pantalla la posició actual del punter.
- (d) 'k': Polsant 2 vegades ajusta una gaussiana simple. El punter ha d'estar per sota si és una línia d'emissió i per sobre si és d'absorció. En cas que es vulguin ajustar regions amb diferents pic és recomana l'ús de 'd'.
- (e) 'd': Polsant 2 vegades es selecciona la regió que es vol ajustar a una de les següents funcions:

Lines ('f'ile, 'g'aussian, 'l'orentzian, 'v'oint, 't'ype, 'q'uit):

Per exemple, en el cas de les gaussianes, s'haurà de pressionar 'g' situant el cursor sobre cadascun dels pics de la gràfica. Un cop finalitzat, es pressiona 'q' i es respon 'a', 'a' i 'y' a les preguntes:

```
Fit positions (fixed, single, all, quit)
Fit Gaussian widths (fixed, single, all, quit)
Fit background (no, yes, quit)
```

Sota del gràfic es mostra informació sobre cada pic senyalat, es pot rotar entre ells amb les tecles '+' i '-'. Cal pressionar 'q' dos vegades per sortir i 'c' per esborrar les línies ajustades.

- (f) 'e': Polsant 2 vegades es selecciona la regió sobre la qual es calcula el punt mig, entre altres paràmetres.
- (g) 'm': Polsant 2 vegades calcula la mitja, RMS i relació senyal soroll (S/N) d'una regió.
- (h) '\$': Intercanvia coordenades físiques (longitud d'ona) i de la imatge (píxels)
- (i) ':log' i ':nolog': Activa/desactiva el log.
- (j) '# text': Afegeix un comentari al log.
- (k) ':label text', ':mabove text' i ':mbelow text': Afegeix text a on esta situat el punter en sentit horitzontal o vertical amb una marca.
- (l) 'q': Finalitza l'anàlisi.

2. Els resultats dels ajustaments realitzat amb 'splot' queden registrats al fitxer "splot.log":

```
Jun 5 2:03 [grup3_baixa_obj_betelgeuse_30_1.ms.fits[* ,1,1]]:
  center    cont    flux    eqw    core    gfwhm    lfwhm
5868.464 11581.12 -793614. 68.53 -4566.84 163.3 0.
(0.12939) ( 5.9505) ( 2948.) ( 0.2343) ( 10.74) ( 0.7415) ( 0.)
6179.632 14239.82 -774879. 54.42 -5270.39 138.1 0.
(0.11816) ( 6.1139) ( 2890.) ( 0.1987) ( 9.852) ( 0.4916) ( 0.)
  center    cont    flux    eqw    core    gfwhm    lfwhm
7418.592 5027.771 3312291. -658.8 9111.94 341.5 0.
(0.17969) ( ) ( 4824.) ( 0.9594) ( 6.614) ( 0.5933) ( 0.)
```