

# Astronomía Extragaláctica – Laboratorio C

## Fotometría diferencial de AGN

1. Estudie el comportamiento del blazar PKS 0537–441 en el filtro  $R$  utilizando su curva de luz diferencial. Para ello, siga los pasos que se indican a continuación:

- a) Descargue de la página de la cátedra el archivo “0537.tar.gz”. Este archivo contiene 33 imágenes del blazar PKS 0537–441 tomadas con el telescopio de 2,15 m Jorge Sahade del CASLEO durante la noche del 16 al 17 de diciembre de 1998. Se usó una cámara CCD con un chip Tektronix  $1024 \times 1024$  + Reductor Focal. La escala final de las imágenes es de  $0.8125 \text{ arcsec px}^{-1}$ . Estas imágenes ya están corregidas y recortadas.
- b) Busque el objeto en la base de datos de objetos extragalácticos de la NASA, NED<sup>1</sup>. En esta base de datos se pueden conocer valores básicos del objeto, lista de publicaciones, etc. Busque allí el valor del corrimiento al rojo y baje una imagen visual del campo centrado en el objeto con tamaño adecuado para poder comparar con las imágenes tomadas en CASLEO. Esto es, un campo de  $\sim 10 \text{ arcmin} \times 10 \text{ arcmin}$ . Note que NED presentará una lista de objetos, el correcto es el primero de esa lista (mire las características que dan en la lista) y eligiendo esa opción, le brindará toda la información requerida.
- c) Para construir la curva de luz diferencial, usaremos tareas de IRAF. En particular, usaremos la tarea `phot`, que está dentro del paquete `digiphot.apphot`. Esta tarea nos permitirá calcular las magnitudes instrumentales tanto del objeto como de las estrellas de campo que se usen para la fotometría diferencial.  
NOTA: para saber la ubicación de cualquier tarea del IRAF, se puede llamar al manual de la tarea con `>help “nombredelatarea”` y en el encabezado de la salida figurará la lista de paquetes que hay que cargar.
- d) Editamos la tarea con `>eparam phot o`, simplemente, `>epar phot`. Lo que aparece en la pantalla es algo como lo que se muestra a continuación.

```
image = ""           The input image(s)
skyfile = ""        The input sky file(s)
(coords = "")       The input coordinate files(s) (default:
                    image.coo.?)
(output = "default") The output photometry file(s) (default:
                    image.mag.?)
(plotfile = "")     The output plots metacode file
```

---

<sup>1</sup><http://ned.ipac.caltech.edu/forms/nearname.html>

```

    (datapars = "")           Data dependent parameters
    (centerpars = "")        Centering parameters
    (fitskypars = "")        Sky fitting parameters
    (photpars = "")          Photometry parameters
    (interactive = no)        Interactive mode ?
    (radplots = no)          Plot the radial profiles in ...
    (icommands = "")         Image cursor: [x y wcs] key [cmd]
    (gcommands = "")         Graphics cursor: [x y wcs] key [cmd]
    (wcsin = )_.wcsin)       The input coordinate system ...
    (wcsout = )_.wcsout)     The output coordinate system ...
    (cache = )_.cache)       Cache the input image pixels ...
    (verify = )_.verify)     Verify critical parameters in ...
    (update = )_.update)     Update critical parameters in ...
    (verbose = )_.verbose)   Print messages in non-interactive mode?
    (graphics = )_.graphics) Graphics device
    (display = )_.display)   Display device
    (mode = "ql")

```

En la variable `image` va el nombre de la imagen a la que se le quiere hacer la fotometría. Dentro de esta tarea, hay que fijar varios parámetros de acuerdo a los criterios que se deseen adoptar para reducir las observaciones. Estos parámetros están dentro de la lista de comandos `datapars`, `centerpars`, `fitskypars` y `photpars`. Para poder verlos y/o editarlos, nos ubicamos en la línea y con “:e” se editan los parámetros.

Detalle de cada lista de parámetros:

1) `datapars`:

```

    (scale = 1.)             Image scale in units per pixel
    (fwhmpsf = 2.5)         FWHM of the PSF in scale units
    (emission = yes)        Features are positive ?
    (sigma = INDEF)         Standard deviation of background ...
    (datamin = INDEF)       Minimum good data value
    (datamax = INDEF)       Maximum good data value
    (noise = "poisson")     Noise model
    (ccdread = "rdnoise")   CCD readout noise image header ...
    (gain = "gain")         CCD gain image header keyword
    (readnoise = 4.4)       CCD readout noise in electrons
    (epadu = 1.83)          Gain in electrons per count
    (exposure = "exptime")  Exposure time image header keyword
    (airmass = "airmass")   Airmass image header keyword
    (filter = "filters")    Filter image header keyword
    (obstime = "hjd")       Time of observation image header ...
    (itime = 1.)            Exposure time
    (xairmass = INDEF)      Airmass
    (ifilter = "INDEF")     Filter
    (otime = "INDEF")       Time of observation
    (mode = "ql")

```

Los parámetros que debemos tener en cuenta para modificar son: `scale`: es la esca-

la con la que se trabajará (si es 1 se trabaja en pixels); noise, ccdread, gain, exposure, airmass, filter, obstime: son los nombres de estas variables en el encabezamiento de la imagen y deben corresponder con los mismos.

NOTA: para ver el encabezamiento de la imagen: >imheader "nombredelaimagen"

- 2) centerpars: se dan los parámetros para el algoritmo de centrado.
- |                           |                                      |
|---------------------------|--------------------------------------|
| (calgorithm = "centroid") | Centering algorithm                  |
| (cbox = 5.)               | Centering box width in scale units   |
| (cthreshold = 0.)         | Centering threshold in sigma ...     |
| (minsnratio = 1.)         | Minimum signal-to-noise ratio ...    |
| (cmaxiter = 10)           | Maximum number of iterations ...     |
| (maxshift = 1.)           | Maximum center shift in scale units  |
| (clean = no)              | Symmetry clean before centering?     |
| (rclean = 1.)             | Cleaning radius in scale units       |
| (rclip = 2.)              | Clipping radius in scale units       |
| (kclean = 3.)             | Rejection limit in sigma             |
| (mkcenter = no)           | Mark the computed center on display? |
| (mode = "ql")             |                                      |

Son importantes aquí, el calgori, tipo de algoritmo; cbox, tamaño de la caja donde busca el centro aplicando el algoritmo elegido en unidades de la escala.

- 3) fitskypars: parámetros para calcular los valores de cielo.
- |                       |                                   |
|-----------------------|-----------------------------------|
| (salgorithm = "mean") | Sky fitting algorithm             |
| (annulus = 18.)       | Inner radius of sky annulus ...   |
| (dannulus = 24.)      | Width of sky annulus in ...       |
| (skyvalue = 0.)       | User sky value                    |
| (smaxiter = 10)       | Maximum number of sky fitting ... |
| (sloclip = 0.)        | Lower clipping factor in percent  |
| (shiclip = 0.)        | Upper clipping factor in percent  |
| (snreject = 50)       | Maximum number of sky fitting ... |
| (sloreject = 3.)      | Lower K-sigma rejection limit ... |
| (shireject = 3.)      | Upper K-sigma rejection limit ,,  |
| (khist = 3.)          | Half width of histogram ...       |
| (binsize = 0.10)      | Binsize of histogram in sky sigma |
| (smooth = no)         | Boxcar smooth the histogram       |
| (rgrow = 0.)          | Region growing radius ...         |
| (mksky = no)          | Mark sky annuli on the display    |
| (mode = "ql")         |                                   |

Los parámetros importantes aquí son salgori, tipo de algoritmo que se aplica para el cálculo del valor de cielo; annulus, es el valor del radio interior del anillo que se toma para calcular el cielo alrededor del objeto; dannulus, el valor del radio de ese anillo.

NOTA: para fijar los valores de annulus y dannulus, se puede desplegar una imagen y utilizando la tarea imexamine, trazar un perfil del objeto (ubicamos el cursor sobre el objeto en el imagen y pulsamos la tecla "r") y usar ese gráfico para elegir el valor de annulus (debería ser un poco más grande que el valor de radio donde termina el objeto). Para dannulus, lo más conveniente es elegirlo tal que el área del anillo de cielo sea lo más similar posible al área del círculo donde se integra el flujo del objeto.

4) photpars:

```
(weighting = "constant")    Photometric weighting scheme ...
(apertures = "2,4,6,8,10,12") List of aperture radii ...
    (zmag = 22.5)           Zero point of magnitude scale
    (mkapert = no)         Draw apertures on the display
    (mode = "q1")
```

Aquí son importantes los valores que elijamos de apertures, que están dados en unidades de la escala elegida y no son otra cosa que los radios de las aberturas donde se realizará la fotometría. Se suele definir más de un valor, para luego elegir la más adecuada. La elección de las aberturas se puede realizar usando el imexamine de la misma manera descrita en el punto anterior.

e) Se fijan los parámetros y se corre la tarea phot. Lo que se busca es tener los archivos ascii que genera esta tarea (los *nombredelaimagen.mag.1*) donde está guardada la información de la fotometría dentro de cada radio de abertura elegido y no solo para el objeto de estudio, sino también para la mayor cantidad de estrellas del campo posible.

Para correr la tarea phot, desplegar la imagen sobre la que se quiere realizar la fotometría, y luego correr la tarea. El cursor irá a la imagen, lo ubicamos sobre el objeto, y con la barra espaciadora nos da los valores; luego ubicamos el cursor sobre la primera estrella y nuevamente con la barra espaciadora tendremos los valores; nos movemos hacia la siguiente estrella y repetimos esta acción hasta la última estrella seleccionada. Luego, con “q” y otra vez “q” salimos de la tarea y grabamos los valores en un archivo ascii.

NOTA: *Es importante que las estrellas en todas las imágenes sean las mismas y guarden la misma numeración.* Para poder lograr esto, conviene correr la tarea phot en forma interactiva con una imagen solamente. Una vez que tenemos el archivo ascii .mag.1 de esa imagen, con la tarea txdump seleccionamos de este archivo los valores de “XCENTER” e “YCENTER”. Haciendo “>txdump xcen,ycen yes > coord.txt” genera un archivo con solo las coordenadas de los objetos (el objeto de ciencia conviene que sea el primero en ser elegido). Este archivo se utiliza luego dentro del phot en la línea coords. Entonces, al correr el phot luego de teclear barra espaciadora sobre el primer objeto de la lista, se tecldea “l” y de esta manera se hace la fotometría del resto de las estrellas de campo elegidas. De esta manera, en todos los frames se podrán elegir las mismas estrellas y en la misma secuencia. También se puede correr el phot en modo no interactivo.

f) Una vez que se tienen todos los archivos ascii con los valores de la fotometría sobre el objeto y la lista de estrellas para cada una de las imágenes, procedemos con la fotometría diferencial. Esto es, vamos a buscar la magnitud del objeto relativa a una estrella del campo. Para ello debemos elegir dos estrellas, una llamada de comparación y otra de control. Estas estrellas no pueden ser estrellas variables y además deben cumplir lo mejor posible con el siguiente criterio: **la estrella de comparación debería ser un poco más brillante que el objeto y la de control con magnitud lo más similar posible a la del objeto.**

Nuevamente, para elegir estas estrellas podemos utilizar la tarea txdump ahora pidiéndole que nos liste, por ejemplo, “ID”, “mag[3]” de alguno de los archivos .mag.1 (el número dentro de los corchetes luego de mag es para elegir la abertura donde queremos el valor de mag; recordemos que elegimos en más de una abertura; este número es la posición en la lista, no el valor de la abertura). Esto nos dará una lista por pantalla de las magnitudes instrumentales para un dado momento ya que elegimos un archivo en particular. Es

conveniente hacer este procedimiento en distintos instantes para poder elegir mejor.

- g) Una vez elegidas ambas estrellas, se pueden construir las curvas. Entonces, si T indica el objeto y S<sub>1</sub> es la estrella de comparación, tendremos que:

$$m_T = Z_0 - 2.5 \log F_T \quad (\text{C.1})$$

$$m_1 = Z_0 - 2.5 \log F_1 \quad (\text{C.2})$$

donde Z<sub>0</sub> es el punto de cero de las magnitudes.

Luego,

$$\Delta m_T = (m_T - m_1) = -2.5 \log \left( \frac{F_T}{F_1} \right) \quad (\text{C.3})$$

Con esto, buscamos construir una curva dependiente del tiempo que, para cada punto  $t_i$  le corresponda un valor de  $(m_T - m_1)_i$ . Luego, tendremos la variación temporal de la fotometría diferencial, esto es, la curva de luz diferencial del objeto.

- h) De igual manera se procede con la segunda estrella, la de control (que llamaremos estrella S<sub>2</sub>), restada con la misma estrella de comparación usada para el objeto. Se obtiene la curva de  $t_i$  vs.  $\Delta m_2 = (m_2 - m_1)_i$ . Toda variación en esta curva será debida a los errores fotométricos, mientras que los efectos atmosféricos (por ejemplo, cambios en el seeing) o problemas instrumentales deberían eliminarse con la fotometría diferencial.
- i) Cálculo de la variabilidad: Para poder saber si la fuente resultó variable, debemos calcular las dispersiones de cada una de estas curvas que hemos construido. O sea,

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta m_i - \langle \Delta m \rangle)^2}{n - 1}}. \quad (\text{C.4})$$

Esta dispersión se calcula para ambas curvas. Luego, tendremos  $\sigma_T$  para la dispersión de la curva de luz diferencial del objeto y  $\sigma_2$  para la dispersión de la curva de luz diferencial de la estrella de control. Con estos valores, podemos calcular el parámetro C, definido como:

$$C = \frac{\sigma_T}{\sigma_2}. \quad (\text{C.5})$$

Luego, si  $C \geq 2.576 \mapsto$  el objeto en cuestión resulta ser variable con un 99 % de nivel de confiabilidad.

2. Con lo explicado en el inciso anterior, construya ambas curvas de luz diferenciales (el tiempo de observación puede ser extraído de los encabezamientos de las imágenes), calcule el parámetro C y responda sobre el estado de variabilidad del blazar.

**NOTA 1:** los valores necesarios para poder realizar todo esto están en los archivos .mag.1 y pueden ser extraídos de allí.

**NOTA 2:** Utilice el programa o la metodología que le resulte más común para realizar los gráficos y los cálculos (graficadores, planillas de cálculo, etc.). Solo explique lo realizado.

**COMENTARIO IMPORTANTE: (fuera de la práctica)**

El parámetro  $C$  aquí definido es un estimador. En la realidad, lo más adecuado es aplicar el mismo parámetro pero pesando la estadística con un factor llamado  $\Gamma$ , que fue introducido por Howell et al. (1988, AJ, 95, 247) y tiene en cuenta las diferencias de magnitudes entre el objeto, la estrella de comparación y la de control. Tengamos en cuenta que no siempre es posible encontrar estrellas en el campo de la imagen que cumplan exactamente con los requisitos planteados más arriba. Y las diferencias entre las magnitudes instrumentales introducen error en las curvas, lo que lleva a que las dispersiones no sean, en todos los casos, las correctas, derivando en un parámetro  $C$  que puede ser erróneo (debido a los errores fotométricos la dispersión de la curva de luz del objeto más débil será mayor).

Usando el factor  $\Gamma$ , el parámetro  $C$  queda definido como:

$$C_{\Gamma} = \frac{\sigma_{\Gamma}}{\Gamma\sigma_2}. \quad (\text{C.6})$$

El factor  $\Gamma$  se construye de la siguiente manera:

$$\Gamma^2 = \frac{N_2}{N_T} \left[ \frac{N_1^2(N_T + P) + N_T^2(N_1 + P)}{N_2^2(N_T + P) + N_T^2(N_2 + P)} \right] \quad (\text{C.7})$$

donde:  $N_x$  es el número de fotones detectados para el objeto  $x$ ,  $P = n_p(N_s + N_r^2)$ ,  $N_s$  número de fotones correspondientes al anillo del cielo,  $N_r$  el ruido de lectura,  $n_p$  número de pixeles dentro de la abertura elegida para la fotometría.

*Si bien este método se aplica en la presente práctica al caso de un blazar, el mismo puede utilizarse para estimar la variabilidad de cualquier fuente astronómica.*