

Introducción a la Astronomía de Rayos-X

Guía 04: Regiones y curvas de luz

Introducción

La mayoría de las fuentes de rayos-X son variables intrínsecamente con escalas temporales que abarcan desde milisegundos hasta años. Parte de esta variabilidad puede ser estrictamente periódica, como en el caso de los pulsares, o periódica o quasi-periódica como en binarias de rayos-X, pero lo más usual es que su espectro de potencias sea más complejo, y que cubra un amplio rango de frecuencias. Algunas fuentes tienen erupciones rápidas, y otras cambian entre diferentes estados de emisión. El estudio de la variabilidad puede brindar datos clave sobre la física de la fuente.

El primer paso en cualquier análisis temporal consiste en la generación de una curva de luz. Para ello es conveniente usar un agrupamiento temporal que sea un múltiplo del intervalo de lectura del detector, que define su resolución temporal. Es importante tener en cuenta las escalas temporales típicas de los instrumentos utilizados como el tiempo de lectura de la cámara, el período orbital del satélite, y el de la Tierra, así como los denominados “tiempos muertos” del detector. A mayor agrupamiento, mejor relación señal/ruido, con el costo de empeorar la resolución. Considerando una curva de luz de N puntos con resolución Δt , la mayor frecuencia a la que puede obtenerse información es la frecuencia de Nyquist, dada por $f_{Ny} = 1/(2\Delta t)$ y la menor frecuencia es $f_{min} = 1/(N\Delta t)$.

Regiones en *ds9*

En *ds9* pueden elegirse regiones de distintas formas, de manera que sean compatibles con *SAS* (por ej: círculos *circle(centro_x, centro_y, radio)*, anillos *annulus(centro_x, centro_y, radio_i, radio_e)*, elipses, cajas, polígonos, etc, que pueden definirse en diversos sistemas de coordenadas, ya sean del detector, físicas o celestes (fk5 para J2000.0, por ejemplo). Las coordenadas del detector representan los píxeles reales de cada cámara (*DETX, DETY*), mientras que las coordenadas físicas (X, Y) representan píxeles virtuales randomizados que coinciden entre todas las cámaras EPIC (*PN, MOS1 y MOS2*) de manera que pueden pensarse como coordenadas en el cielo. Por otra parte, las coordenadas fk5 representan coordenadas celestes y se obtienen transformando las coordenadas físicas de la lista de eventos en posiciones J2000.0 utilizando el centro de apuntamiento y un ángulo de posición que figuran en el *header* del archivo *FITS* de eventos.

Filtrado por regiones

Las regiones definidas en *ds9* pueden ser *inclusivas* o *exclusivas*. Por ejemplo, una región en forma de anillo, con radios menor y mayor, puede ser representada como la diferencia entre una región circular *inclusiva* (dada por el radio mayor) y una región circular *exclusiva* (dada por el radio menor). Regiones con formas más complejas, como polígonos de N vértices, podrán ser utilizadas más adelante para obtener el espectro de emisión extendida, por ejemplo.

Extracción de una curva de luz en *SAS*

A modo de ejemplo, consideremos la extracción de una curva de luz a partir de una lista de eventos de la cámara *PN* filtrada por *GTI* que se encuentra almacenada en el archivo *PNclean.fits*. El mismo procedimiento aplica para las cámaras *MOS*.

1) Inicializar el ambiente *SAS* y las variables *SAS_ODF*, *SAS_CCF* y *SAS_CCFPATH*.

2) En caso de estar interesados en estudiar una fuente con un período muy corto, realizar la corrección por tiempo baricéntrico, mediante la tarea *barycen*:

```
cp PNclean.fits PNclean_nobarycen_cor.fits
barycen table=PNclean.fits:EVENTS
```

3) Extraer una imagen en coordenadas del cielo usando *evselect*:

```
evselect table=PNclean.fits imagebinning=binSize \
  imageset=PNimage.img withinimageset=yes xcolumn=X ycolumn=Y \
  ximagebinsize=80 yimagebinsize=80
```

4) Abrir la imagen **PNimage.img** usando *ds9* y seleccionar una región circular entorno a la fuente de la que se pretende generar la curva de luz. Haciendo doble-click sobre la región circular, y eligiendo coordenadas físicas en el despliegue, obtener las coordenadas del centro y el radio (400 unidades para un radio de 20", por ejemplo).

5) Extraer la curva de luz de la fuente usando la región elegida e incluyendo una selección de eventos de calidad apropiada para la curva de luz y un agrupamiento de, por ejemplo, 5 segundos:

Para PN, tomar eventos buenos, simples y dobles, en el rango de 300 a 10000 eV de energía:

```
"((FLAG==0) && (PATTERN<=4) && (PI in [300:10000]))"
```

Para MOS, tomar eventos simples hasta cuádruples en el rango de 300 a 10000 eV:

```
"((FLAG==0) && (PATTERN<=12) && (PI in [300:10000]))"
```

```
evselect table=PNclean.fits energycolumn=PI \
  expression='(FLAG==0)&& (PATTERN<=4) && (PI in [300:10000]) && \
  ((X,Y) IN circle(27230.484,27526.255,400))' \
  withrateset=yes rateset=PN_src_raw.lc timebinsize=5 \
  maketimecolumn=yes makeratecolumn=yes
```

El parámetro **makeratecolumn=yes** genera una curva de luz en tasa de cuentas (con errores). De lo contrario, la curva de luz se genera simplemente en cuentas (sin errores).

6) Repetir los pasos #4 y #5 para elegir una región de donde extraer la curva de luz del fondo de rayos-X. Suponemos aquí que se eligió una elipse. Es recomendable leer el manual de calibración y análisis de datos de *EPIC (XMM-SOC-CAL-TN-0018)* para obtener recomendaciones actualizadas acerca de cómo elegir estas regiones y sus tamaños.

7) Extraer la curva de luz del fondo, usando las mismas expresiones que para la fuente:

```
evselect table=PNclean.fits energycolumn=PI \
  expression='(FLAG==0) && (PATTERN<=4) && (PI in [300:10000]) && \
  ((X,Y) IN ellipse(24767.172,31155.523,3035.186,1203.6467,30.001172))' \
  withrateset=yes rateset=PN_bkg_raw.lc timebinsize=5 \
  maketimecolumn=yes makeratecolumn=yes
```

Las curvas de luz generadas por *evselect* cumplen con el estándar *OGIP*, por lo que pueden ser procesadas por las tareas de análisis de curvas de luz y variabilidad *XRONOS* y *LHEASOFT*.

8) Sin embargo, estas curvas de luz deben ser primero corregidas por varios efectos que modifican la eficiencia del detector como el viñeteo, los pixeles malos o calientes, variación de la PSF y eficiencia cuántica, así como efectos de la estabilidad del satélite durante la exposición, como tiempos muertos o *GTIs*. La tarea *epiclccorr* de *SAS* realiza todas estas correcciones automáticamente por nosotros. Para ello deben suministrarse tanto la curva de luz de la fuente como la del fondo, así como la lista de eventos original filtrada.

```
epiclccorr srctslst=PN_src_raw.lc eventlist=PNclean.fits \
  outset=PN_lccorr.lc bkgtslist=PN_bkg_raw.lc withbkgset=yes \
  applyabsolute corrections=yes
```

9) La curva de luz resultante puede graficarse con *dsplot*, *fplot* o revisarse con *fv*:

```
> dsplot table=PN_lccorr.lc withx=yes x=TIME withy=yes y=RATE
```

Búsqueda de variabilidad

La primera pregunta que podemos hacernos es si una determinada variación observada es consistente con ruido o si se trata de evidencia de variabilidad intrínseca de la fuente. Para ello, podemos medir el exceso de la varianza, σ_{rms}^2 , dado por:

$$\sigma_{rms}^2 = \frac{1}{N\bar{y}^2} \sum_{k=1}^N \left[(y_k - \bar{y})^2 - \sigma_k^2 \right]$$

donde \bar{y} es el valor medio de y_k , y el error en el exceso de la varianza viene dado por:

$$s_D^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \left(\left[(y_k - \bar{y})^2 - \sigma_k^2 \right] - \sigma_{rms}^2 \bar{y}^2 \right)^2$$

Una alternativa es utilizar el test de Kolmogorov-Smirnov para determinar si el tiempo de arribo de los eventos es consistente con una tasa constante. Ambos métodos permiten determinar si existe variabilidad o no, aunque no proveen información acerca de su naturaleza.

La tarea *lcstats* del paquete *XRONOS* de *HEASOFT*:

La tarea *lcstats* realiza este tipo de búsqueda de variabilidad por nosotros. En la entrada debemos entregar la curva de luz a analizar y a la salida brindará diferentes valores estadísticos relacionados a la curva de luz de entrada:

```
> lcstats PN_lccorr.lc
```

Ayuda/Guía:

<https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/xanadu/xronos/help/lcstats.html>

Espectro de potencias

La forma más usual de caracterizar la variabilidad es calcular la potencia asociada a cada frecuencia. Para ello puede utilizarse la transformada de Fourier que descompone la curva de luz en una suma de sinusoides con frecuencias en el rango f_{min} a f_{Nyq} .

Al contrario de lo que ocurre en otro tipo de análisis de datos, el incremento del tiempo de integración de una curva de luz no disminuye el ruido del espectro de potencias, sino que sólo reduce f_{min} a la vez que distribuye el ruido en un rango mayor de frecuencias. Para reducir el ruido efectivamente, suele dividirse la curva de luz en secciones de manera de obtener el espectro de potencias para cada región y luego promediarlo. De esta manera, el error se reduce por la raíz cuadrada del número de grupos. Esta división permite a su vez, estudiar la posible variación del espectro de potencias con el tiempo, que es muy útil por ejemplo en erupciones.

Las tareas *powspec*, *efsearch* y *efold* del paquete *XRONOS* de *HEASOFT* contienen todas las rutinas necesarias para estudiar señales periódicas.

Ayuda/Guía:

<https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/sas-thread-timing-mk-linux>

El caso del AXP 1E 1841-045 en Kes 73

- 1) A partir de la lista de eventos filtrada **PNclean.fits** de la **ObsID 0013340201**, extraer dos curvas de luz del AXP 1E 1841-045 utilizando una región circular de 400 unidades físicas de radio, con agrupamientos de 5 y 100s. Extraer curvas de luz de fondo a partir de una región externa al SNR Kes 73. Realizar las correcciones y obtener curvas de luz corregidas mediante la tarea *epiclcorr*.
- 2) Utilizar la tarea *ekstest* para realizar una búsqueda de variabilidad mediante el *chisquaretest* para la varianza y determinar las probabilidades de constancia para cada una de las curvas de luz generadas. Analizar y discutir los dos resultados obtenidos.
- 3) A partir de la curva de luz con agrupamiento de 5 segundos obtener el espectro de potencias usando *powspec* y determinar el período del AXP 1E 1841-045. Mejorar la búsqueda de período usando *efsearch* y obtener curvas de luz en fase con la tarea *efold*.
- 4) Generar curvas de luz en los rangos de energía 1–3 keV y 3–8 keV. Repetir las búsquedas de período y obtener nuevas curvas de luz en fase con la tarea *efold*. Discutir los resultados.