Introducción a la Astronomía de Rayos-X
Guía 03: Imágenes y detección de fuentes

Introducción
El objetivo del análisis de imágenes en rayos-X es similar al de otras longitudes de onda: identificación de fuentes hasta cierto límite por sobre el ruido, discriminación entre fuentes puntuales y extendidas, identificación de estructuras y su variación en diferentes bandas de energía, es decir, lo que generalmente se denomina estudio morfológico. Sin embargo, a diferencia de otras longitudes de onda, en Astronomía de Rayos-X, debemos trabajar con dos serias limitaciones: un bajo número de cuentas y grandes cambios de la PSF (función de dispersión de una fuente puntual) en la superficie del detector. Es importante tener presente que el tamaño de la PSF sobre el eje óptico es de 6" en XMM-Newton y 0.5" en Chandra y que este valor va aumentando, es decir, empeorando, al alejarse del eje óptico.

La imagen como proyección de la lista de eventos sobre las coordenadas espaciales:

Despliegue de listas de eventos en ds9:
```
> ds9
```

Utilizando *ds9*, podemos desplegar las listas de eventos filtradas por *GTI* en la Guía anterior (por ej. PNclean.fits). Modificar los parámetros de agrupamiento o *bineo*, escala, color, contraste y suavizado hasta obtener una imagen adecuada. De ser posible, tratar de reconocer en ella emisión extendida y/o fuentes puntuales.

A partir de la expresión de filtro en los parámetros de *bineo*, es posible determinar el rango de energía donde la fuente de interés brilla por sobre el ruido de fondo: usar la columna *PI*. Para guardar una sesión de trabajo y recuperarla nuevamente, se puede usar la opción de *respaldo* o *backup* y *restore,* mientras que para guardar la imagen obtenida en formato postscript (ps), debe utilizarse la *impresión* a archivo (*print*).

(**) Imágenes usando evselect:
A partir de la lista de eventos de cada cámara filtrada por *GTI* en la Guía anterior (PNclean.fits, M1clean.fits, M2clean.fits) y utilizando *evselect*, generar una imagen con un *bineo* tal que cada píxel equivalga a 5", en el rango de energía establecido a partir de la exploración de los rangos de *PI* analizados dinámicamente a partir de *ds9* (como se menciona arriba):

```
> evselect table=entrada xcolumn=X ycolumn=Y \
 imagebinning=binSize ximagebinsize=?? yimagebinsize=?? \
 withimageset=true imageset=salida expression="(PI in [??:??])"
```

Utilizar un marco RGB de *ds9* para cargar las 3 imágenes resultantes superpuestas. Notar que el menú de bineo ya no está disponible porque estamos desplegando imágenes *FITS* y ya no las *listas de eventos*.

Notar las diferencias entre la forma de la cámara *PN* y las cámaras *MOS*. ¿En qué modo fueron usadas? ¿Son paralelas entre sí? Notar cómo la superposición de las diferentes cámaras aporta a la disolución del espacio entre los distintos CCDs y sus píxeles/columnas malas (*gaps*).

La imagen de tres colores en rayos-X como indicador del índice espectral:

Utilizando el *script xmmmosaic.csh*, a partir de las listas de eventos filtradas por *GTI* podemos construir una imagen *FITS* para cada cámara (*PN*, *MOS1* y *MOS2*) en los rangos de energía *soft* (300-1200 eV), *medium* (1200-2500 eV) y *hard* (2500-8000 eV) o en los que considere más adecuados según lo determinado en la primera parte de esta Guía. Para combinar las cámaras adecuadamente, conviene efectuar una corrección por mapas de exposición (similares a los *flats*). Para ello se debe reemplazar ***"attfile"*** por el *Attitude File* de la observacion (que es el archivo que termina en **AttHk.ds*). Si no se desea corregir por mapa de exposición, "attfile" debe reemplazarse por "none".

```
> ./xmmmosaic.csh PNclean.fits M1clean.fits M2clean.fits \
      "attfile" 64 300 1200 soft_
> ./xmmmosaic.csh PNclean.fits M1clean.fits M2clean.fits \
      "attfile" 64 1200 2500 med_
> ./xmmmosaic.csh PNclean.fits M1clean.fits M2clean.fits \
      "attfile" 64 2500 8000 hard_
```

Podemos visualizar el resultado cargando las 3 imágenes resultantes (*_mosaic.fits*) en un marco RGB de *ds9* usando el color rojo para la imagen *soft*, el verde para la *medium* y el azul para la *hard*. Es conveniente ajustar el contraste e identificar las zonas más blandas/duras de la emisión extendida, o el índice espectral de las fuentes puntuales en base a la coloración. Elegir un suavizado adecuado para resaltar la imagen y guardarla en formato *ps* usando la impresión a archivo.

Por otro lado, las tres imágenes pueden combinarse también usando la tarea *emosaic* de *SAS*:

```
> emosaic imagesets="soft_mosaic.fits med_mosaic.fits hard_mosaic.fits" \
 mosaicedset="total.fits" withexposure=no sampling=point
```

Nuevamente, podemos utilizar *ds9* para desplegar la imagen, elegir un suavizado y contraste adecuado y guardar. Tener en cuenta que esta imagen *"total.fits"* ya no tendrá información de la energía de los eventos como en la imagen a 3 colores o bandas.

Detección de fuentes:

El problema de la detección de fuentes se reduce a la utilización de una serie de algoritmos estadísticos diseñados para encontrar una región de la imagen que presente un exceso de cuentas respecto del promedio de cuentas del fondo. Para ello se utilizan tareas como *"eboxdetect"* que se basa en una celda deslizante en forma de caja para calcular esta estadística, o *"wavdetect"* (Chandra) que utiliza pequeñas onditas con tamaños variables para representar la PSF del instrumento. La caracterización del tipo de fuente (ya sea puntual o extendida) se realiza a partir de la comparación del perfil radial de la fuente detectada con la PSF del instrumento en su posición sobre el detector, utilizando, por ejemplo un método de máxima verosimilitud *"emldetect"*. En el caso de XMM-Newton, generalmente se utiliza la cadena de tareas *"edetect_chain"* que realiza todos estos pasos en cadena dando como resultado una lista de fuentes detectadas y sus propiedades.

Paso a paso:
Como primer ejemplo, con la idea de comprender los pasos involucrados en la detección de fuentes, realizaremos la búsqueda de fuentes en la cámara *MOS1*, siguiendo los pasos a continuación:

a) A partir de la lista de eventos filtrada por *GTI* de *MOS1*, usando *evselect*, generamos una imagen en el rango 0.3-10 keV con un *bineo* de 80. Llamarla `m1_image_full.fits` (usando (**)).

b) Obtenemos el mapa de exposición (reemplazar por el ***attfile*** correspondiente):

```
> eexpmap attitudeset="attfile" eventset=M1clean.fits \
 imageset=m1_image_full.fits pimin=300 pimax=10000 \
 expimageset=M1_expmap.ds
```

c) Creamos un mapa de detección que anule las regiones donde el tiempo de exposición sea bajo:

```
> emask expimageset=M1_expmap.ds threshold1=0.25 \
 detmaskset=M1_mask.ds
```

d) Realizamos una detección de caja deslizante, usando un fondo estimado localmente:

```
> eboxdetect usemap=no likemin=8 withdetmask=yes \
 detmasksets=M1_mask.ds imagesets=m1_image_full.fits \
 expimagesets=M1_expmap.ds pimin=300 pimax=10000 \
 boxlistset=M1_eboxlist_local.fits
```

e) Generamos un mapa del fondo, tapando las fuentes detectadas en el paso anterior:

```
> esplinemap bkgimageset=M1_bkg.ds scut=0.005 \
 imageset=m1_image_full.fits nsplinenodes=16 withdetmask=yes \
 detmaskset=M1_mask.ds withexpimage=yes \
 expimageset=M1_expmap.ds boxlistset=M1_eboxlist_local.fits
```

f) Hacemos una segunda detección de fuentes utilizando el mapa de fondo obtenido:

```
> eboxdetect usemap=yes bkgimagesets=M1_bkg.ds likemin=8 \
 withdetmask=yes detmasksets=M1_mask.ds \
 imagesets=m1_image_full.fits expimagesets=M1_expmap.ds \
 pimin=300 pimax=10000 boxlistset=M1_eboxlist_map.fits
```

g) Realizamos un ajuste de máxima verosimilitud a las fuentes detectadas en el último paso para optimizar el centrado de las fuentes y determinamos si se trata de fuentes puntuales o extendidas al ajustar la *PSF* local. En función del filtro y rango de energía usado en la observación, se debe ingresar el factor de conversión de energía *ecf* adecuado:

```
> emldetect imagesets=m1_image_full.fits \
 expimagesets=M1_expmap.ds bkgimagesets=M1_bkg.ds \
 boxlistset=M1_eboxlist_map.fits ecf=2.0 \
 mllistset=M1_emllist.fits mlmin=10 determineerrors=yes
```

h) Creamos mapas de sensibilidad pixel por pixel:

```
> esensmap expimagesets=M1_expmap.ds bkgimagesets=M1_bkg.ds \
 detmasksets=M1_mask.ds mlmin=10 sensimageset=M1_sens_map.fits
```

i) Finalmente, desplegamos la lista de fuentes sobre la imagen MOS1 original usando *ds9*:

```
> srcdisplay boxlistset=M1_emllist.fits \
 imageset=m1_image_full.fits sourceradius=0.01
```

Por supuesto, estas tareas se pueden repetir para *MOS2* y *PN*.

Ayuda/Guía: https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/sas-thread-src-find-stepbystep

Detección de fuentes en forma sintética usando *edetect_chain*:

A partir de la lista de eventos filtrada por *GTI* de cada cámara, usando *evselect*, crear una serie de imágenes con un bineo de 80 en los rangos 300-12000, 300-500, 500-1000, 1000-2000, 2000-4500, 4500-12000 eV, llamándolas 'pn_image_full.fits', 'pn_image_b1.fits', …, 'pn_image_b5.fits', respectivamente (luego repetir para MOS1 y MOS2). Correr la cadena de tareas *edetect_chain* para cada cámara, utilizando los factores de conversión de energía *ecf* adecuados según el filtro usado en la observación (reemplazar por el ***attfile*** correspondiente):

```
> edetect_chain imagesets='"pn_image_b1.fits" "pn_image_b2.fits" \
 "pn_image_b3.fits" "pn_image_b4.fits" "pn_image_b5.fits"' \
 eventsets=PNclean.fits attitudeset="attfile" \
 pimin='300 500 1000 2000 4500' pimax='500 1000 2000 4500 12000' \
 ecf='8.970 6.596 1.953 0.941 0.240' eboxl_list='pn_eboxlist_l.fits' \
 eboxm_list='pn_eboxlist_m.fits' eml_list='pn_emllist.fits' \
 esp_nsplinenodes=16 esen_mlmin=15
```

Una vez ejecutada la cadena de pasos, podemos utilizar la tarea *srcdisplay* para desplegar en *ds9* la imagen completa con la lista de fuentes detectadas superpuesta y guardarla en formato *ps*.

```
> srcdisplay boxlistset=pn_emllist.fits \
 imageset=pn_image_full.fits sourceradius=0.01
```

Ayuda/Guía: https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/sas-thread-src-find

Opcional:

Generar una imagen combinada usando el *script images*:
https://www.cosmos.esa.int/web/xmm-newton/images

Este *script* realiza correcciones por períodos de fondo intenso (*GTI*), remueve pixeles y columnas malas, realiza un suavizado espacial, corrige por mapa de exposición y combina las imágenes de *PN* y *MOS* en diferentes bandas de energía. Su aplicación es directa. Sólo hay que apuntar correctamente el directorio *ODF* y elegir los rangos de energía en los que trabajar. Para más detalles, pueden remitirse al manual o consultar:

https://www.cosmos.esa.int/documents/332006/641121/README.pdf