



## Trabajo Fin de Grado

Análisis de datos observacionales de rayos X

Analysis of observational X-ray data

Autor

Martina Cans Cugat

Directores

Julia Katharina Vogel

Cristina Margalejo Blasco

GRADO DE FÍSICA  
FACULTAD DE CIENCIAS  
2023

# Índice

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Objetivos</b>	<b>4</b>
<b>3. Metodología</b>	<b>6</b>
3.1. Programas utilizados . . . . .	6
3.1.1. NuSTARDAS . . . . .	7
3.1.2. XSPEC . . . . .	10
3.2. Selección de las regiones . . . . .	11
3.3. Parámetros de ajuste . . . . .	13
3.4. Observaciones iniciales . . . . .	16
3.4.1. Cálculo de la luminosidad del magnetar . . . . .	17
3.5. Observaciones más recientes . . . . .	17
<b>4. Análisis de los resultados</b>	<b>18</b>
<b>5. Conclusiones</b>	<b>23</b>
<b>Referencias</b>	<b>24</b>
<b>Anexos</b>	<b>26</b>
<b>A. Nupipeline</b>	<b>26</b>
<b>B. Nuproducts</b>	<b>26</b>

# 1. Introducción

Con un radio de  $\sim 12$  km y una masa del orden de 1,5 masas solares, las estrellas de neutrones son unos de los objetos astronómicos más densos del espacio interestelar, siendo su densidad central entre 5 y 10 veces la densidad de un núcleo en equilibrio formado por neutrones y protones,  $n_0 \approx 0,16 \text{ fm}^{-3}$ [11]. Tienen su origen en el colapso del núcleo de estrellas masivas, cuya masa es unas ocho veces la masa del Sol. Cuando la densidad en el interior de núcleo alcanza  $n_0$ [11] se origina una onda de choque que expulsa el masivo manto estelar hacia el exterior, lo que desencadena una supernova. Esta expulsión conlleva la emisión de neutrinos, produciendo pérdidas de presión que provocan el encogimiento de la estrella y obligando a los electrones y protones a combinarse haciendo la materia rica en neutrones, razón por la cual se las conoce como estrellas de neutrones. Durante el proceso se libera una energía gravitatoria de aproximadamente  $3 \cdot 10^{53}$  erg[11]. Esta enorme cantidad, sumada a la conservación del momento angular y el flujo magnético de la estrella padre, provoca el característico giro a gran velocidad observado en muchas de ellas, además de un enorme campo magnético. Así mismo, la estrella emite energía en forma de calor y de radiación electromagnética en todo el espectro, presentando una gran variedad de comportamientos que permiten clasificarlas en distintos tipos. Todas estas manifestaciones presentan unas características comunes tales como superfluidez, superconductividad con temperaturas críticas cercanas a  $10^{10}$  kelvin y elevados campos magnéticos superiores a  $10^{13}$  Gauss, lo que les otorga una gran potencial científico convirtiéndolas en objetos de enorme interés. A continuación se presenta una breve recopilación de los tipos más representativos observados hasta la fecha basada en [7] y [3].

En primer lugar están los púlsares impulsados por rotación (RPP, del inglés *Rotation-Powered Pulsars*). Presentan una disminución gradual de la tasa de rotación con el tiempo, denominada *spin down*, y una emisión energética amplia, desde las ondas de radio hasta los rayos gamma. Se puede aproximar a un modelo de dipolo magnético rotando alrededor de un eje de giro que induce un campo eléctrico. A partir de las líneas de campo abiertas se emite la radiación más energética desde los polos de la estrella. Una característica de aquellas más jóvenes, que se están enfriando, es la emisión desde la superficie de una radiación de rayos X térmica. Es importante aclarar que no es necesario que el eje de rotación coincida con el eje magnético de la estrella. En este caso, como si de un faro se tratase, la estrella emite energía en forma de pulsos. Por último, cabe destacar algunos púlsares con comportamientos

variables como los *glitches* que sufren cambios en la frecuencia rotacional presentando un aumento denominado *spin-up* repentinamente, o los RRATs (del inglés *Rotating Radio Transients*) en los que, como su nombre indica, los pulsos presentan un comportamiento transitorio.

Otro grupo importante de estrellas de neutrones son los magnetares, caracterizados por un campo magnético muy alto superior a  $10^{15}$  G. Presentan grandes estallidos energéticos seguidos por periodos de reposo de emisión de rayos X. Cuando el campo magnético en el núcleo de la estrella alcanza valores mayores que el de la superficie, este puede verse alterado y las líneas de campo torcerse. La recombinación de las mismas origina las características superllamaradas. Por otro lado, el decaimiento del campo magnético provoca un flujo de calor a través de la corteza que origina la emisión térmica de la estrella. Así mismo, se cree que la emisión no térmica está provocada por la radiación sincrotrón de las partículas aceleradas en las líneas del campo magnético en la magnetosfera. Existen dos subcategorías de magnetares SGRs (del inglés *Soft Gamma-Ray Repeaters*) y AXPs (del inglés *Anomalous X-Ray Pulsars*). El primero se descubrió por la detección de un fuerte estallido de rayos gamma[12]. Por otro lado, el segundo se identificó como una fuente pulsante de rayos X, por lo que se pensó que podía tratarse de un pulsar formado por acreción[20]. Aquí entra otra categoría en la que no se va a profundizar y que se caracteriza por la formación de conjuntos binarios en los que la materia desprendida de una estrella fluye hasta su vecina originándose un disco de acreción y emitiéndose radiación. Finalmente se cree que los SGRs y los AXPs son dos variedades de magnetares ya que ambos presentan *spin-down*, altos campos magnéticos y un espectro de emisión caracterizado por un gran estallido seguido de un decaimiento.

Por último, existen otros dos tipos de estrellas muy similares con campos magnéticos muy bajos y espectros suaves de rayos X con emisión térmica por enfriamiento. Son los CCOs (del inglés *Central Compact Objects*) o “antimagnetares”, llamados así porque sus campos magnéticos son más débiles incluso que los que presentan los púlsares más jóvenes, esto es, del orden de los  $10^{10}$  ó  $10^{11}$  G, y los INSSs (del inglés *Isolated Neutron Stars*). La principal diferencia entre ellos recae en su origen. Los primeros han sido encontrados cercanos a centros de restos de supernovas jóvenes y los segundos están clasificados como estrellas de media edad.

Las estrellas de neutrones aparecen en una gran variedad de manifestaciones (en [7] y [3] se puede encontrar una detallada explicación de sus características), cuya

conexión intenta ser comprendida por los científicos. ¿Afectan las condiciones iniciales o se trata de un mismo objeto en diferentes etapas de su vida? Observando las distintas clasificaciones comentadas, parece que los magnetares destacan por su relación con otros tipos de estrellas de neutrones. Se ha hipotetizado que los INSS sean magnetares cuyo campo ha decaído desde su origen. Por otro lado, en el disco galáctico se han localizado magnetares junto a pulsares jóvenes, y como ambos presentan *spin-down*, también se ha llegado a pensar que los magnetares en reposo son en realidad púlsares con altos campos anómalos. A su vez, se llama *transient* magnetares a púlsares con altos campos que presentan explosiones. Sin embargo, todo esto son suposiciones ya que tan solo son conocidas unas pocas decenas de magnetares y la información que se tiene es escasa. Por este motivo, comprender la física de los magnetares puede arrojar una luz fundamental sobre el entendimiento del conjunto de las estrellas de neutrones.

Desde la primera detección de rayos X provenientes de fuera del sistema solar en los años 60 [10], se ha puesto un gran interés en mejorar su detección. Al ser un tipo de radiación energética necesitan grandes fuentes emisoras como por ejemplo los agujeros negros o las estrellas de neutrones. Por ello, los rayos X van a permitir entender estos cuerpos celestes y sus procesos físicos. Pero para poder estudiarlos, primero debemos entender su naturaleza y de qué manera los rayos X interaccionan con la materia.

Los fotones de rayos X se caracterizan por presentar una energía con valores entre 100 eV y algunos cientos de keV y su longitud de onda presenta valores entre  $10^{-11}$  m y  $10^{-8}$  m. Existe una subdivisión en rayos X blandos o duros, de menor o mayor poder energético respectivamente, estando el límite no estricto en  $10^3$  eV. Por otro lado, debido a su gran energía, los fotones presentan grandes dificultades para reflejarse y son principalmente absorbidos por la materia. Sin embargo, con energías de 10 keV estos son capaces de reflejarse para ángulos  $\sim 0,3^\circ$ . Otra característica de los rayos X es su incapacidad de alcanzar a la superficie terrestre ya por efecto de la atmósfera no llegan más allá de la mesosfera[5].

Los avances científicos y tecnológicos han dado lugar al desarrollo de telescopios capaces de registrar rayos X para el estudio de los cuerpos celestes que los emiten. Conocidos telescopios como *CHANDRA*[21], *INTEGRAL*[23], *RXTE*[19], *Swift*[2] ó *XMM-Newton*[6] han permitido el estudio de magnetares y otros cuerpos emisores de radiación electromagnética energética. Uno de ellos, caracterizado por su alta sensibilidad, es el telescopio de la misión NuSTAR (del inglés *Nuclear Spectroscopic Telescope Array*), de la cual se puede encontrar información detallada en [4]. Fue lanzado en 2012 a una altitud de 600 km y se estimó una vida media en órbita de 10

años, permitiendo así por primera vez el estudio de los rayos X más energéticos, con energías entre los 3 y los 79 keV. A continuación, se da una descripción general del mismo basada en [4], [10] y [5].

El telescopio se caracteriza por presentar dos sistemas ópticos en paralelo, que se encuentran orientados hacia los objetos que se pretende estudiar. Cada uno de estos equipos está formado por 133 espejos cónicos y concéntricos. Cada pieza circular está formada por diferentes segmentos, a su vez divididos en dos partes y cada espejo está compuesto por diversas capas de material. Como hemos comentado antes, la reflectancia de los rayos X es muy característica y depende tanto del ángulo de incidencia como de la energía de la radiación. Por tanto, la finalidad de estos recubrimientos multicapas es obtener una reflectancia significativa, de manera que podamos conducir los rayos X hasta los detectores en el plano focal. Cabe destacar que la reflectancia también depende del material sobre el que se incide, por lo que las distintas capas están forradas con distintos materiales atendiendo a su radio. Las 89 más profundas están recubiertas de un material formado por Pt y C y las 44 más exteriores por W y Si. Los detectores están ubicados en el plano focal a 10,14 m de los sistemas ópticos, ambos conectados por un mástil cuyos movimientos son controlados mediante un sistema de seguimiento por láser. Este sistema permite resolver cualquier desajuste entre las señales de los dos telescopios. La idea es componer las imágenes finales a partir de la información obtenida en ambos. Cabe añadir que el observatorio se alimenta con energía solar, así que permanece siempre orientado al Sol y el conjunto rota sobre el eje Sol-Tierra.

Con esta introducción se pretende haber establecido unas nociones básicas sobre la importancia de los magnetares en la física del cosmos, así como la manera en la que podemos obtener información de los mismos. A continuación vamos a abordar el tema de manera analítica, estudiando las observaciones tomadas de un objeto en particular.

## 2. Objetivos

En este trabajo se va a realizar un estudio de las observaciones tomadas del magnetar SGR J1745-2900. Este fue descubierto en abril de 2013 de manera casual por el observatorio *Swift* cuando detectó una fuerte emisión de rayos X proveniente de Sagitario A\*, el agujero negro súper masivo que se encuentra en el centro de nuestra galaxia. Ante el gran potencial científico que presentaba el cuerpo, *NuSTAR*

también llevó a cabo sus propias observaciones del objeto, comenzando ese mismo día. Posteriores estudios de ese mismo observatorio revelaron la existencia de pulsos que indicaron que se trataba de un magnetar. La estrella atrajo pronto la atención de los científicos debido a la variante alteración de sus magnitudes con el tiempo, tales como su tasa de rotación, flujo y temperatura, llegándose a plantear que estas variaciones podrían tener origen magnetosférico, debido a su proximidad a Sgr A\*.

Todas estas peculiaridades lo convierten en un objeto de estudio de suma importancia. Comenzando por su proximidad a Sgr A\*, en el centro de la galaxia, lo que explica la alta densidad de hidrógeno neutro detectado por ambos observatorios *Swift* y *NuSTAR* ( $N_{\text{H}} \sim 1,4 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-2}$ ). Por otro lado, el objeto se caracteriza por poseer una tasa de giro y una intensidad en sus estallidos variable. Se detectó que el objeto presentaba una luminosidad en el rango de 2-10 keV que oscilaba entre  $10^{32} \text{ erg s}^{-1}$  en reposo y hasta  $\sim 3 \cdot 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$  en los máximos de los estallidos. Estos valores se han encontrado en otros magnetares clasificándolos como *transient* o transitorios, que se caracterizan por estas variaciones de luminosidad. Además, su temperatura en reposo es de  $kT \lesssim 0,3 \text{ keV}$ , comparable a la temperatura en reposo de los *transient* magnetares [14][8]. Esto último, junto con el amplio campo magnético que presenta y la detección de las ondas de radio que emite, supone incluir al objeto en el grupo de los transitorios. Como se ha comentado anteriormente, los límites de dicha clasificación no son claros, lo que hace complejo establecer diferencias reales entre púlsares y magnetares. Otro problema que se añade es la escasa cantidad de magnetares conocidos ya que tan solo unos 30 objetos han sido descubiertos y analizados en nuestra galaxia. Es por esa razón que profundizar en el estudio de este nuevo magnetar puede arrojar luz sobre la física de las estrellas de neutrones y contribuir al conocimiento sobre su formación y comportamiento en la galaxia.

El estudio de una estrella de neutrones puede centrarse principalmente en tres ámbitos, correspondientes a un análisis temporal, un análisis espectral y un estudio de la evolución de su flujo. El estudio que se desarrolla en este trabajo consiste en un análisis espectral del magnetar, para ello se van a utilizar las dos primeras observaciones tomadas por *NuSTAR* de la estrella, que son Obs.ID:30001002006 y Obs.ID: 80002013002, llevadas a cabo el 26 y el 27 de abril de 2013 respectivamente. Las observaciones son descargadas desde el archivo de datos de NuSTAR[16]. La idea es tratar de replicar el análisis presentado en la publicación en la que se presentaba el descubrimiento[14]. Los programas utilizados para la reproducción del estudio son *NuSTAR Data Analysis Software (NuSTARDAS)* y *XSPEC*, los mismos usados en el

análisis realizado en [14] en 2013, y cuyo funcionamiento será detallado más adelante. Reproduciendo de la manera más fidedigna posible el proceso seguido, se pretende destacar la utilidad de estos análisis y extraer conclusiones útiles de los mismos.

Posteriormente, se repetirá el mismo análisis espectral con unas observaciones de magnetar más recientes. De esta manera se pretende, por un lado comprobar la eficacia del método empleado, y por otro lado, estudiar la evolución de la estrella, viendo como varían ciertos parámetros del análisis.

### 3. Metodología

En esta sección se pretende explicar con detalle el método seguido y los programas utilizados para la realización de análisis espectral del magnetar. El desarrollo consiste en la descarga de las observaciones desde el archivo de datos de NuSTAR [16], tras lo que se procesan las mismas mediante el programa *NuSTARDAS*, y este generará los archivos que permitirán realizar el análisis espectral con *XSPEC*. Finalmente se discutirán los parámetros de *input* elegidos, y se expondrán los resultados obtenidos.

Como se ha comentado anteriormente, este análisis trata de replicar el llevado a cabo en [14], sin embargo entre un método y otro se dan una serie de diferencias. Por ello, cabe destacar que en [14] se analizan unas observaciones extra con las que no se cuenta en el presente análisis. Esto se debe a que como el espectro de las observaciones de *NuSTAR* solo abarca una ventana energética entre 3 y 79 keV se han añadido en el artículo al primer tramo energético 5 observaciones llevadas a cabo por el telescopio *Swift* en la banda energética entre 1,7 y 8,0 keV. Esto será tenido en cuenta más adelante, tanto en la discusión de resultados, como en el rango de energías para el ajuste.

#### 3.1. Programas utilizados

Como se ha comentado el *software* empleado para el procesamiento de los datos tomados por el observatorio *NuSTAR* es *NuSTAR Data Analysis Software (NuSTARDAS)*. Con la instalación de este programa se suelen instalar automáticamente otros paquetes necesarios para el estudio de los datos. Entre ellos destaca *DS9*, que ha sido utilizado para la selección de regiones de fuente y fondo, y *XSPEC* para el análisis espectral de los archivos generados. En esta sección se

pretender transmitir en qué consisten cada uno de ellos. Sin entrar en grandes detalles, se va a ver funcionamiento de los mismos, cuales son los datos y los archivos con los que están trabajado los programas y qué se espera obtener de su análisis.

### 3.1.1. NuSTARDAS

El principal programa utilizado es *NuSTARDAS*, se trata de un programa desarrollado conjuntamente por el ASI Space Science Data Center (SSDC, Italy) y el California Institute of Technology (Caltech, USA), cuya finalidad es el procesamiento de los datos tomados por el observatorio *NuSTAR*. La versión utilizada en el artículo de 2013 [14] fue v10.1. Actualmente, para la elaboración de este trabajo, la versión empleada es v2.1.2.

El procesamiento de los datos se realiza en tres etapas distintas, que consisten en calibración, limpieza y, finalmente, extracción de productos científicos, como curvas de luz, espectros o imágenes del cielo. La finalidad de la primera parte es la obtención de archivos de datos calibrados a partir del procesamiento de telemetría en formato FITS. El *software* está diseñado como una colección de módulos, cada uno dedicado a una única función. En la tabla 1 se incluye una lista de los mismos junto con una breve descripción.

Nombre	Función
<i>numetrology</i>	Procesamiento de los datos de metrología
<i>nuattcorr</i>	Corrección del archivo de posición
<i>nuflagbad</i>	Señalización de píxeles erróneos
<i>nuhotpix</i>	Búsqueda de puntos calientes y centelleantes
<i>nucalcpha</i>	Corrección de energía
<i>nucalcpi</i>	Corrección de la ganancia
<i>nuflagevt</i>	Señalización de eventos
<i>nucoord</i>	Conversión de coordenadas Raw en coordenadas del Detector y del Cielo
<i>nucalcpos</i>	Conversión de coordenadas Raw en coordenadas del Detector
<i>nuskypos</i>	Cálculo de las coordenadas SKY del eje óptico

Tabla 1: Funciones la fase 1 ejecutadas con *nupipeline* para la calibración de los datos.

Todas estas tareas se ejecutan de manera automática lanzando el *script nupipeline*. En este, el usuario debe indicar los directorios de entrada y salida y el nombre de la observación a analizar. La orden se ejecuta desde una terminal de Linux y en el anexo

se puede encontrar el comando utilizado.

A continuación, también ejecutando el comando anterior, se lleva a cabo la segunda fase dedicada a la selección de datos mediante la aplicación de ciertos criterios de limpieza basados en parámetros orbitales, de posición e instrumentales de los eventos. Cabe destacar que el *input* de esta fase son los archivos obtenidos en la calibración de la fase anterior. De nuevo, esta fase está compuesta por una serie de tareas que se listan en la tabla 2.

Nombre	Función
<i>nucalcsaa</i>	Cálculo de los pasajes SAA ( <i>South Atlantic Anomaly</i> )
<i>nufilter</i>	Generación de archivos de filtrado
<i>nuscreen</i>	Generación de intervalos de tiempo bueno y filtrado de archivos de eventos
<i>nulivetime</i>	Corrección del tiempo muerto de los archivos de eventos
<i>nuexpomap</i>	Generación de mapas de exposición del cielo
<i>nuskytodet</i>	Cálculo de las coordenadas DET1 y DET2 a partir de las coordenadas SKY
<i>nusplitsc</i>	Divide los archivos de eventos limpiados de NuSTAR Spacecraft Science 06

Tabla 2: Funciones la fase 2 ejecutadas con *nupipeline* para la calibración de los datos.

Como ya se ha comentado el observatorio *NuSTAR* está formado por dos telescopios, por ello cada archivo está formado por dos observaciones correspondientes a los dos módulos, FPMA y FPMB. Hasta ahora, al lanzar la secuencia de comandos se han analizado ambos archivos de datos por defecto. A continuación, el análisis se va a separar para ambos módulos siendo el proceso para uno exactamente igual que para el otro. Finalmente, en el análisis espectral se hará un ajuste conjunto de ambos archivos.

La tercera etapa del proceso está destinada a la generación de los productos, denominados de un alto nivel científico, por el alto potencial de análisis que presentan. Estos archivos consisten en curvas de luz, espectros de energía e imágenes del cielo. De igual manera, el *software* está formado por una serie de módulos con tareas específicas para el tratamiento de los archivos, que se detallan en la tabla 3. Estas herramientas están codificadas en el *script nuproducts*, que recibe como *input* los archivos del directorio de salida de *nupipeline*, y genera un directorio de *output* donde se pueden encontrar los archivos mencionados. Así mismo, uno de los productos de

*input* son dos archivos en formato *.reg* que contienen la región de la fuente y la región del fondo. Se generan de manera manual lanzando el programa *DS9*, que permite visualizar imágenes de los archivos de eventos generados en *nupipeline*. Se seleccionan dos regiones circulares y se guardan en el mismo directorio que los archivos de *input* para *nuproducts*, eligiendo un sistema de coordenadas WCS / fk5. Para lanzar esta orden, se deben indicar los directorios de entrada y salida, el nombre de los archivos de las regiones de fondo y fuente, así como la observación de la que se trata y el telescopio al que corresponden los datos, porque como ya se ha dicho a partir de ahora el análisis se hace de manera separada en ambos módulos. En anexo se incluye el comando utilizado para lanzar *nuproducts*.

Nombre	Función
<i>nubackscale</i>	Aplica la corrección de retroescala a los espectros de energía
<i>nulccorr</i>	Aplica correcciones de tiempo, PSF ( <i>Point Spread Function</i> ) /EXPOSURE y viñeteado a las curvas de luz
<i>numkarf</i>	Genera un archivo ARF ( <i>Ancillary Response Function</i> )
<i>numkrmf</i>	Genera un archivo RMF( <i>Response Matrix File</i> )

Tabla 3: Funciones la fase 3 ejecutadas con *nuproducts* para la generación de productos. Los archivos ARF se corresponden con curvas de área efectiva, que especifican el área del telescopio y la absorción de la ventana, por otro lado, los archivos RMF se corresponden con una matriz que especifica la distribución de probabilidad del canal para un fotón de una energía determinada. Los archivos de respuesta (RSP) se generan combinando ARF y RMF con archivos de fuente y fondo, que contienen información sobre el área efectiva y la función de dispersión puntual.

Para entender y familiarizarse con el software, se ha realizado un primer tratamiento de una observación siguiendo los pasos detallados en [1] para analizarla. Se trata de una observación de calibración del cuásar 3C 273 observado por NuSTAR el 13 de julio de 2013. Además, tanto en [1] como en [17], se puede encontrar información detallada sobre los *scripts* que permiten la ejecución automática de los distintos módulos de análisis de cada una de las fases y sobre el funcionamiento de *DS9*. Por último cabe destacar, que las observaciones para el análisis, además de poderse obtener mediante su descarga desde el archivo web de NuSTAR[16], se pueden adquirir de manera remota. Sin embargo, para la realización de este trabajo, la cantidad y el peso de los archivos no lo han requerido, por ello, se ha optado por su descarga.

### 3.1.2. XSPEC

Para realizar el análisis espectral de los datos se ha utilizado XSPEC. Se trata de un *software* destinado a ajustar datos espectrales de rayos X tomados por distintos observatorios, es decir, es capaz de analizar las observaciones independientemente del detector con el que han sido tomadas. El programa se lanza a través de una serie de comandos en la terminal de Linux, desde el directorio que contiene los productos generados en *nuproducts*. Así mismo, también se puede utilizar un *script*, como se ha hecho en este análisis, que contenga dichos comandos y que se lanza desde el mismo lugar.

Es común que los magnetares se ajusten a funciones de cuerpo negro más una ley de potencia o a dos cuerpos negros[13]. En nuestro caso hemos decidido usar la misma función usada en [14], `TBabs*(bbbody+pegpwrlw)`, para que los resultados sean comparables. Como se puede ver el modelo está constituido por una función de cuerpo negro más una ley de potencia y una función de absorción. La función de cuerpo negro se utiliza para el ajuste ya que en general, el espectro de las estrellas se parece al espectro de cuerpo negro, que se define por la ecuación de Planck 1.

$$B(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} \quad (1)$$

Esto es así porque las estrellas son cuerpos muy calientes, por lo que emiten radiación térmica, y además son opacas, así que la luz dentro de la fuente tiene más probabilidad de interaccionar con la materia de su alrededor que de escapar. De esta manera, se produce un espectro continuo que es el de cuerpo negro. Esto sería el caso ideal, pero las estrellas no son cuerpos negros perfectos, y además hay mucho gas y polvo entre ellas y nosotros. Todo ese material en el medio interestelar absorbe determinadas energías, así que el espectro que al final nos llega es un espectro de cuerpo negro absorbido. Esto se modela con la función de absorción mencionada, *TBabs*, por la que se asume que la absorción producida por el medio interestelar viene dada por las abundancias definidas según el modelo Wilms et al[22], que también es nombrado en el artículo[14]. El parámetro de la densidad de la columna de hidrógeno,  $N_H$  da el valor de la cantidad de materia interviniente entre el objeto y el observador, medida como el número de átomos de hidrógeno por  $\text{cm}^2$ , proyectados a lo largo de la línea de visión. Por esta razón, es el que aporta información sobre la absorción de fotones de rayos X en el rango de energías del ajuste.

En el manual de XSPEC [24] se puede encontrar una sección en la que aparecen

detalladamente las funciones que utiliza el *software* para ajustar las observaciones. La expresión que ajusta el programa para el espectro de cuerpo negro viene dada por la siguiente ecuación 2:

$$A(E) = \frac{K8,0525E^2dE}{(kT)^4 [\exp(E/kT) - 1]} \quad (2)$$

donde  $K$  es una constante de normalización y  $kT$  es la temperatura de cuerpo negro en keV. A partir de ahora, para referirse a la constante de normalización se utilizará *NormBB*. Se trata de un valor adimensional que depende de la luminosidad de la fuente en unidades de  $10^{39}$  erg·s $^{-1}$  ( $L_{39}$ ), y de la distancia a la misma en unidades de 10 kpc ( $D_{10}$ ). Su expresión viene dada por la ecuación 3 y más adelante se podrá ver la importancia que tiene este parámetro en el ajuste de la función.

$$\text{NormBB} = \frac{L_{39}}{D_{10}^2} \quad (3)$$

Finalmente, encontramos la ley de potencia, que establece una relación de proporcionalidad entre las cuentas de los sucesos y la energía, y que viene descrita por la ecuación 4.

$$A(E) = KE^{-\alpha} \quad (4)$$

donde  $\alpha$  se corresponde con el índice fotónico y aporta información sobre el tipo de relación que tienen las medidas con la energía. En esta función también se puede ver una constante de normalización,  $K$ , que se va a denominar *NormPL*. Además, esta función contiene otros dos parámetros de relevancia destacable, *eMin* y *eMax*, que se corresponden al rango de energías en el que se va a ajustar la ley de potencia.

Atendiendo a la forma de la función de cuerpo negro, esta se va a ajustar a los valores más bajos de la energía, alrededor del pico de las cuentas. Así mismo, la ley de potencia se va a ajustar a un rango energético alto. Todo estos parámetros de input serán discutidos más adelante y con mayor profundidad.

### 3.2. Selección de las regiones

Cabe destacar la importancia de seleccionar las regiones de fuente y de fondo de manera correcta, ya que esto va a influir en las curvas de luz generadas y afectará en gran medida al análisis. Como se ha comentado anteriormente esta selección se hace de manera manual desde la aplicación *DS9*. Por un lado, hay que elegir el fondo alejado de otras fuentes de luz ya que podrían alterar los resultados. Para visualizar

esto gráficamente, se puede ver en la figura 1 un ejemplo para la selección del fondo del telescopio FMPA de la observación Obs.ID:30602020010 tomada el día 23 de abril de 2022 a las 19:56:09.

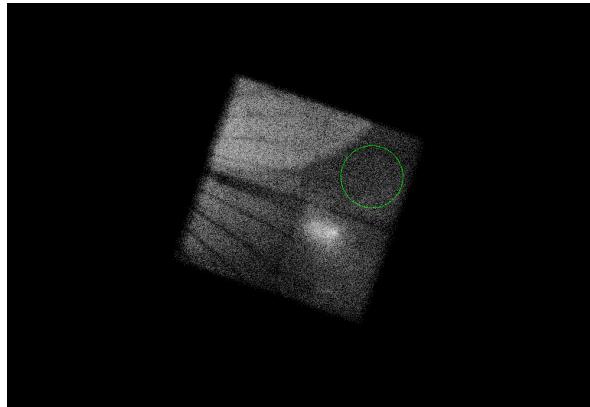


Figura 1: Selección de fondo con FMPA de Obs.ID:30602020010. La circunferencia verde se encuentra seleccionando la región de fondo. Abajo a la derecha se puede ver la fuente emisora correspondiente al magnetar SGR J1745-2900. A la izquierda se ve una fuente de luz contaminante.

En ella se puede ver la fuente de luz correspondiente al magnetar que se desea estudiar abajo a la derecha. Encima, la circunferencia verde corresponde a la selección de la región del fondo. A su izquierda se ve la fuente de la luz contaminante, que debe ser evitada. Es interesante comentar las líneas rectas que se aprecian en esta zona. Son las *spider lines* y se corresponden a los ejes radiales que sostienen la estructura de los espejos concéntricos del observatorio NuSTAR. Se originan por los efectos de difracción debido al ángulo que forma la estrella con el eje axial del telescopio.

Otro aspecto que debe tenerse en cuenta es el diámetro con el que se seleccionan los fondos. En una misma observación, la región de la fuente tiene un diámetro notablemente más pequeño que el fondo, esto no es un inconveniente puesto que *nuproducts* se encarga de normalizar los eventos. Sin embargo, el tamaño seleccionado va a generar distintos espectros y esta diferencia sí que debe ser tenida en cuenta. Para elegir el tamaño de las regiones adecuado se han generado dos espectros de datos para la medida del telescopio A de la Obs.ID:30001002006. El primero con unos diámetros para fuente y fondo de 14'' y 100'' respectivamente, y el segundo con unos diámetros de 35'' y 120''. En la gráfica 2 se ve el espectro de las medidas para las dos selecciones de fondo y fuente, en rojo para los diámetros menores y en negro para los mayores. El número de eventos es notablemente mayor en el caso en el que los diámetros tomados son mayores. Además los valores alcanzados son más parecidos a los observados en [14]. Por esta razón, los valores usados para las regiones de fondo y fuente del resto de

observaciones que se van a estudiar van a ser  $35''$  para la fuente y  $120''$  para el fondo. De esta manera habrá coherencia a la hora de comparar los espectros de distintas observaciones.

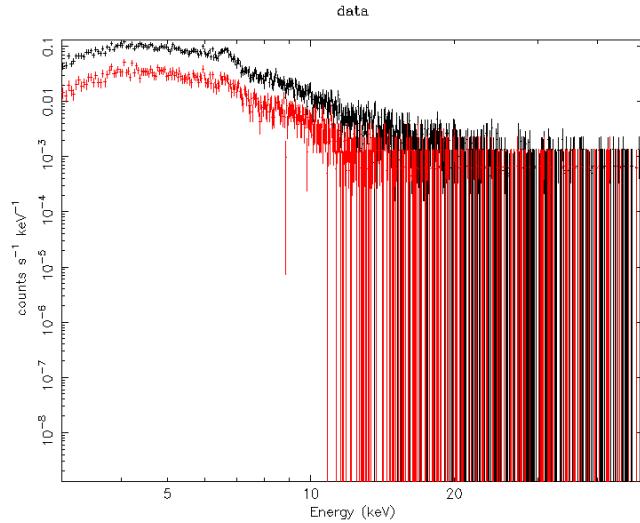


Figura 2: Representación espectral de las Obs.ID:30001002006 medida con FMPA. En rojo los datos seleccionados para  $14''$  fuente y  $100''$  fondo. En negro los datos seleccionados para  $35''$  fuente y  $120''$  fondo.

### 3.3. Parámetros de ajuste

En esta sección se va a discutir la elección que se ha hecho para los parámetros del modelo de ajuste. Durante el análisis desarrollado, se ha manifestado la enorme importancia que ha tenido elegir de forma precisa los parámetros iniciales. Cabe destacar que en [14] no se indican los parámetros iniciales de ajuste, por este motivo aquí se justifica los que se han elegido para la realización del trabajo.

Con la finalidad de obtener los resultados que se presentan en el artículo, se han introducido como parámetros iniciales para la columna de hidrógeno, índice fotónico y temperatura de cuerpo negro unos valores iguales a los resultados presentados en el artículo. En la tabla 4 se muestran los parámetros iniciales introducidos.

A parte de los parámetros comentados anteriormente, el modelo necesita dos valores de normalización y un rango de energías en el que se haga el ajuste de la ley de potencia. El rango de energía ajustado en el artículo es hasta 80 keV. Sin embargo, aquí se ha ajustado hasta 30 keV, ya que se corresponde con el punto máximo en el que es posible resolver una diferencia entre la región de fuente y de fondo, lo que se justifica en la figura 3, donde podemos observar que entorno a 30 keV el fondo de las observaciones

Modelo	Parámetro	Unidad	Valor	Incertidumbre
TBabs	$N_{\mathrm{H}}$	$10^{22} \text{ cm}^{-2}$	14,20	0,68
BlackBody	$kT$ NormBB	keV	0,96 $5 \cdot 10^{-5}$	0,02
Power law	PhoIndex		1,47	0,42
	eMin		7	
	eMax		30	
	NormPL		10	

Tabla 4: Parámetros iniciales de *input*, que se corresponden con los resultados obtenidos en el ajuste en [14], a excepción de NormBB, NormPL, eMin y eMax.

que pretendemos analizar ya no es distinguible de la señal detectada. Esto hace que a altas energías la señal medida se encuentre por debajo de la señal de *background*, lo que provoca que a partir de este punto, el modelo se ajuste al fondo y no a la fuente, dando lugar a resultados erróneos de ajuste. Por esta razón, se establece hasta 30 keV el límite de ajuste para el modelo.

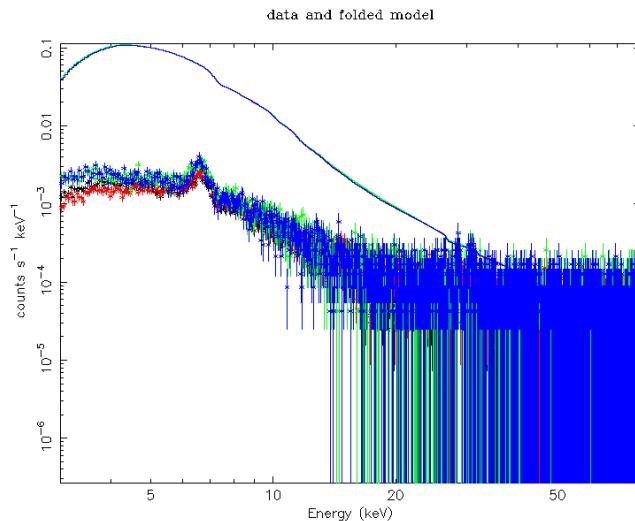


Figura 3: Representación de la señal detectada por el observatorio de las observaciones Obs.ID:30001002006 y Obs.ID:80002013002, junto con la señal de fondo. Se aprecia el punto a partir del cual ambas se hacen indistinguibles.

Otro parámetro que se debe determinar es eMin, que se corresponde a la energía mínima a la que se ajusta la ley de potencia. Para este parámetro se ha escogido un valor de 7 keV. La razón de esta elección se puede justificar comparando el pico en el espectro sin escala logarítmica con el espectro de cuerpo negro, tal y como se muestra en la figura 4. Se puede apreciar la similaridad comentada anteriormente que existe entre ambos modelos. En torno a 7 keV se da un cambio más notable en la

pendiente, por lo que es en este punto en el se establece que comience a ajustarse la ley de potencia, de manera que  $eMin = 7$  keV.

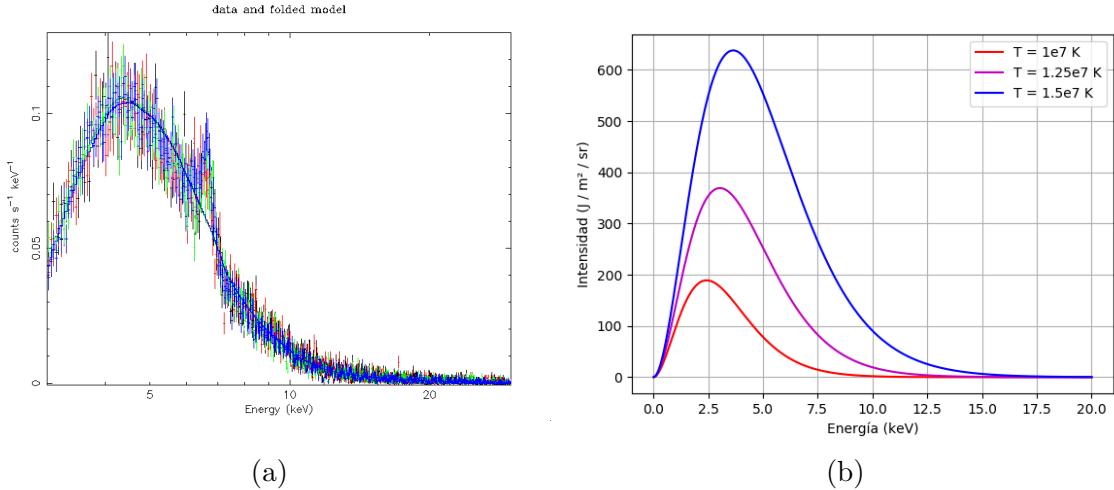


Figura 4: En la subfigura (a) se puede apreciar el espectro generado por *XSPEC* para Obs.ID:30001002006 y Obs.ID:80002013002 sin escala logarítmica. En (b) se representa el espectro de cuerpo negro para varias temperaturas comparables a la del magnetar.

Al hablar de energía mínima para el ajuste, no debe olvidarse el valor mínimo del espectro para el que se ajustará el modelo completo. Es trivial ver que este valor debe ser 3 keV, puesto que como se ha comentado anteriormente *NuSTAR* solo toma medidas en el rango energético a partir de 3 keV y en este ajuste no hay medidas extra para una ventana energética baja como ocurre en el artículo con las observaciones de *Swift*.

Finalmente, otro de los valores de *input* que debe elegirse es el valor de las constantes de normalización tanto de la función de cuerpo negro como de la ley de potencia. Dando un valor inicial de 1 a ambos parámetros, el programa lleva el valor de NormBB a un mínimo en torno a  $(10 \pm 1) \cdot 10^{-5}$  y el valor de NormPL a un mínimo en torno a  $10,0 \pm 0,1$ . Por esta razón se ha decidido escoger unos valores para los parámetros de normalización entorno a dichos ordenes de magnitud. También se ha tenido en cuenta que en un sondeo que hizo el observatorio Chandra[15] en el que podían detectar luminosidades por encima de  $10^{32}$  erg s<sup>-1</sup>, no se detectó ninguna fuente en la posición del magnetar. El hecho de no haber localizado esta fuente significa que su luminosidad en ese momento debía ser  $< 10^{32}$  erg s<sup>-1</sup>, o de otro modo la hubieran detectado. En este caso, a partir de la ecuación (3), y considerando una distancia de 8 kpc del centro galáctico, se obtiene una constante de normalización del orden de  $10^{-7}$ . Por lo tanto, teniendo en cuenta que las observaciones que se están estudiando se corresponden al magnetar en estallido, llegando a emitir 3 órdenes de

magnitud más, se obtiene que  $10^{-4}$  es un valor razonable.

### 3.4. Observaciones iniciales

Con el modelo entendido y los parámetros iniciales justificados se puede realizar el ajuste de las observaciones Obs.ID:30001002006 y Obs.ID:80002013002. A continuación se presentan los resultados obtenidos. En las figuras 5a y 5b se puede ver gráficamente el ajuste y en la tabla 5 los valores de los parámetros ajustados.

Parámetro	Unidad	Fondo propio		Fondo nuevo	
		Valor	Incertidumbre	Valor	Incertidumbre
$N_{\text{H}}$	$10^{22} \text{ cm}^{-2}$	6,18	0,31	6,15	0,31
$kT$	keV	1,03	0,01	1,03	0,01
NormBB		$6,21 \cdot 10^{-4}$	$0,12 \cdot 10^{-4}$	$6,21 \cdot 10^{-4}$	$0,12 \cdot 10^{-4}$
PhoIndex		1,94	0,07	1,95	0,01
NormPL		10,61	0,20	10,68	0,20
$\chi^2_r$ (dof)		19 (2691)		56 (2691)	

Tabla 5: Resultados de las observaciones Obs.ID:30001002006 y Obs.ID:80002013002. A la izquierda bajo el título de *Fondo propio* aparecen los resultados del ajuste que se ha realizado con el fondo de las propias medidas. En la derecha aparecen los resultados que han sido calculados mediante la selección de un nuevo fondo de la observación Obs.ID:30001002003, bajo el título de *Fondo nuevo*.

Debido a la proximidad al centro de la galaxia, la región de estudio abarca una fuerte emisión difusa así como una amplio rango de fuentes no resueltas. Esto indica que el fondo que se ha extraído de las propias observaciones no es el idóneo para hacer el ajuste. En base a este razonamiento, en el artículo [14] se menciona la utilización de otra medida de fondo, correspondiente a una observación de la misma región pero en otro momento, en la cual Sgr A\* no emite señales detectables conocidas como *flares*. Esta es la Obs.ID:30001002003 del 4 de agosto de 2012 a UT 07:56 al del 6 de agosto de 2012 a UT 01:06. Por esta razón se muestran también en la tabla 5 los resultados de un segundo ajuste utilizando dicho fondo. Se han utilizado los mismos parámetros iniciales que en el ajuste anterior. Se puede apreciar que modificando la región de fondo, como se indica en [14], los resultados apenas varían. Posteriormente se analizarán en mayor profundidad estos resultados, comparando la diferencias de este análisis con los resultados del artículo.

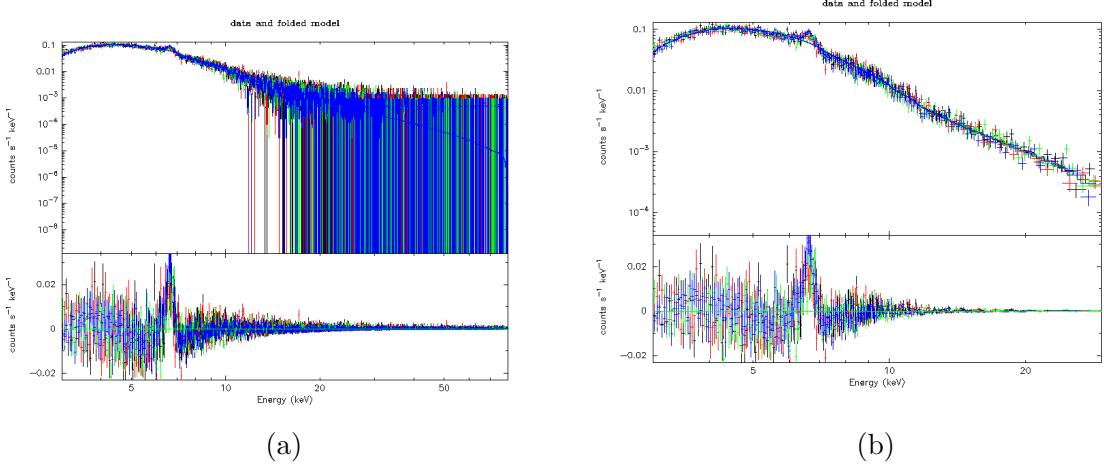


Figura 5: En la subfigura (a) se puede apreciar la gráfica resultante del ajuste de las observaciones Obs.ID:30001002006 y Obs.ID:80002013002 y que da lugar los resultados que se pueden observar en la tabla 5. Por claridad se presenta la subfigura (b), en la que se representan las mismas observaciones, pero en la que se ha ajustado el espectro para tener un mínimo de 30 cuentas por bin.

### 3.4.1. Cálculo de la luminosidad del magnetar

A partir de la constante de normalización del cuerpo negro se puede determinar otra magnitud que puede aportar información al estudio del magnetar, concretamente su luminosidad. Recuperando la ecuación 3, se puede despejar el valor de la luminosidad,  $L \approx (3,97 \pm 0,08) \cdot 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$ , para lo que se ha considerado que la distancia del centro galáctico está a 8 kpc. En [14] el valor que se da para el límite superior de la luminosidad, cuando se produce el estallido en el momento en el que se toman las medidas, es de  $L \sim 3,5 \cdot 10^{35} \text{ erg s}^{-1}$ . De manera que el valor obtenido varía un 13 % respecto al de la publicación, esto puede ser un buen indicador de la bondad de ajuste. Este cálculo es el mismo realizado anteriormente para determinar el correcto orden de magnitud de la constante de normalización de cuerpo negro.

## 3.5. Observaciones más recientes

Con el fin de comprobar la eficacia de método se ha realizado un segundo análisis espectral, esta vez sobre una observación más reciente. Esta es la observación Obs.ID:30602020010 tomada el 23 de abril de 2022, de la cual se ha presentado una imagen previamente en la figura 1. Este segundo estudio, a su vez, va a permitir comprobar la evolución de ciertos parámetros del magnetar tales como la temperatura de cuerpo negro, la columna de hidrógeno y el índice fotónico.

El proceso seguido para la determinación de los parámetros de *input* es el mismo que en el análisis anterior y la función utilizada es la misma. Con el fin de mantener la coherencia entre ambos, se han introducido los mismos parámetros de *input* que en el ajuste anterior, y que se pueden consultar en la tabla 4. Así mismo, los límites de la energía elegidos para el ajuste del modelo también son los mismos. Siguiendo el mismo razonamiento del anterior ajuste, se puede ver en la imagen de la subfigura 6a como a partir de 30 keV los valores de fondo medido superan a los de la señal detectada. Finalmente los resultados del ajuste se presentan a continuación, en la subfigura 6b y en la tabla 6.

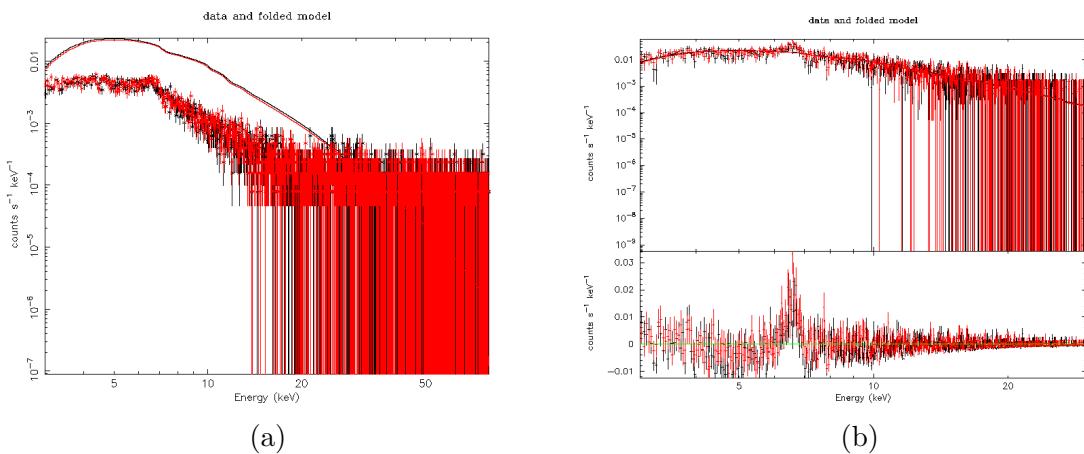


Figura 6: En la subfigura (a) se puede ver la representación de la señal detectada de la observación Obs.ID:30602020010 junto con la señal de fondo, donde se aprecia el punto a partir del cual ambas se hacen indistinguibles. En la subfigura (b) se presenta el ajuste de la observación Obs.ID:30602020010.

Parámetro	Unidad	Valor	Incertidumbre
$N_{\mathrm{H}}$	$10^{22} \text{ cm}^{-2}$	7,24	1,67
$kT$	keV	1,43	0,14
NormBB		$3,82 \cdot 10^{-5}$	$1,90 \cdot 10^{-5}$
PhoIndex		2,04	0,17
NormPL		10,55	0,58
$\chi^2_r$ (dof)		13 (1343)	

Tabla 6: Resultados del ajuste de la observación Obs.ID:30602020010 tras introducir los parámetros de *input* de la tabla 4.

## 4. Análisis de los resultados

En esta sección se van a discutir los resultados presentados en la sección anterior, de manera que se valorará el método seguido, comparándolo con [14]. Además, se

cotejarán los resultados obtenidos en los dos análisis realizados, estudiando la variación que han sufrido los parámetros del magnetar.

Siguiendo el orden en el que han sido presentados los resultados, en primer lugar, vamos a comparar los resultados del primer ajuste con su propio fondo con los analizados con el fondo de otra observación presentados en la tabla 5. En cuanto al valor de la columna de hidrógeno,  $N_{\text{H}}$ , se puede consultar en [15] que su valor típico para el centro de la galaxia es  $6 \cdot 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ . Por esta razón aunque comparado con el resultado del artículo [14] se haya obtenido para  $N_{\text{H}}$  un valor un 56 % menor, el resultado es razonable teniendo en cuenta la ubicación del magnetar en el espacio interestelar. Así mismo, también encontramos una variación notable en el índice fotónico respecto al de la publicación [14], obteniendo un resultado un 32 % mayor. En cuanto al valor de la temperatura de cuerpo negro se ha obtenido un valor más cercano al del artículo [14] aumentando tan solo un 8 %. Otro resultado obtenido cuyo valor también es cercano al publicado en [14], es el de la luminosidad, difiriendo un 13 %. Además la constante de cuerpo negro obtenida se encuentra dentro del orden de magnitud, lo que indica que el ajuste ha dado resultados razonables.

Por otro lado, tanto en [14] como en otro artículo posterior [8], se comenta que el fondo está contaminado por culpa de fuentes sin resolver, lo que puede estar ocasionando la discrepancia en ciertos resultados. Por esta razón se decide hacer un segundo ajuste utilizando otra región de fondo que según [14] parece no presentar ningún tipo de contaminación que afecte al ajuste. En la tabla 5 se pueden consultar los resultados de ambos ajustes, y ver que apenas hay diferencia, ya que los resultados de ambos ajustes varían menos de 1 %.

Cabe destacar que los valores obtenidos para la  $\chi^2$  reducida en ambos casos son grandes. Su alto valor es un indicador de que no se ha producido un buen ajuste de las medidas al modelo en ninguno de los casos, especialmente el segundo ajuste en el cual  $\chi^2_r = 56$ . A raíz de estos resultados se puede pensar que con ningún fondo en esta región se van a producir unos buenos resultados en el ajuste, ya que el error en los ajustes viene causado por la naturaleza del fondo en la localización de la fuente, siendo este no idóneo para resolver los parámetros del magnetar. Es decir, el magnetar SGR J1745-29 se encuentra en el centro de la galaxia, muy próximo al super masivo agujero negro Sagitario A\*, que se trata de una zona de abundante actividad, con una alta concentración de estrellas y otros objetos astronómicos. Esto ocasiona una alta cantidad de gas y polvo que dificultan las observaciones en esta zona, o como ha

ocurrido en nuestro caso contaminando el fondo, y por consiguiente, contaminando el espectro de la fuente de nuestra estrella de neutrones. En la gráfica 7 se representan los espectros de los fondos de las tres observaciones con las que se ha trabajado.

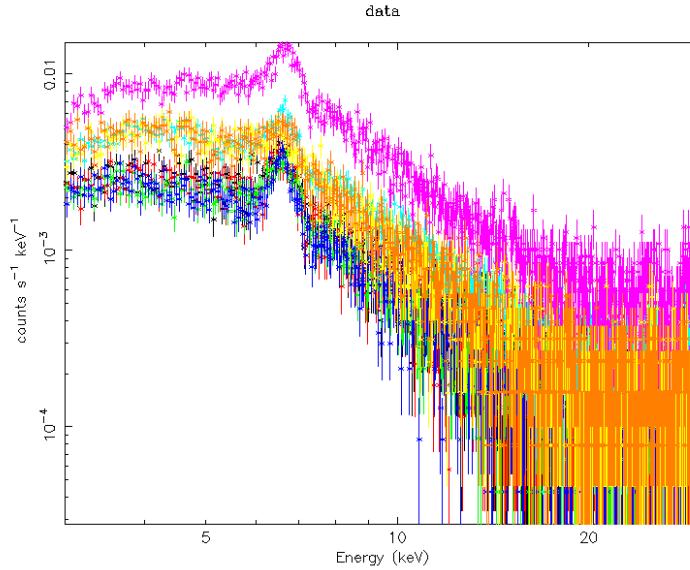


Figura 7: Representación de las señales de fondo. Las señales verde, azul, negra y roja se corresponden a las medidas de fondo de las observaciones Obs.ID:30001002006 y Obs.ID:80002013002. Las medidas azul y rosa se corresponden a las medidas de fondo de la observación Obs.ID:30001002003. Las observaciones naranja y amarilla se corresponden a las medidas de fondo de la observación Obs.ID:30602020010. Cada observación contiene dos señales ya que cada una se corresponde con los dos observatorios FPMA y FPMB.

A diferencia de lo que se esperaría para una medida de un fondo en una región dada, las medidas no son suaves y lineales, sino que presentan fuertes cambios y variaciones, siendo destacable un pico en la cuentas que se sitúa entre 6 y 7 keV para todas las medidas. En [9] se detalla el descubrimiento de un pico de 6,7 keV de emisión K- $\alpha$  del hierro, cuyo tamaño angular de emisión es de 1,8°. Además en [18] se calcula que el magnetar se encuentra a 2,4 arcseg de Sgr A\*, por lo que la línea de emisión del hierro del centro de la galaxia va a estar presente en nuestras observaciones, lo que explica el pico observado. Esto es, sin un lugar a dudas, un indicio de una contaminación importante que va a afectar a los espectros de las fuentes de luz y los ajustes de las mismas. Se puede ver que esto ha ocurrido, tanto en 5a como en 6b, en el enorme pico en los residuos que se da entre 6 y 7 keV. Esto es así porque en este punto los valores del espectro de la fuente se encuentran muy lejos del modelo al que deberían ajustarse debido al exceso de fondo.

Finalmente, se van a discutir los resultados obtenidos en el análisis de una observación más reciente, tomada casi 10 años después. Se trata del mismo ajuste, y como ya se ha comentado anteriormente, los parámetros iniciales introducidos son los mismos con el fin de mantener la coherencia entre análisis. Los resultados de las medidas antiguas y recientes se pueden consultar respectivamente en las tablas 5 y 6, y estos indican que algunos parámetros de la estrella han sufrido variaciones. El mayor aumento en sus magnitudes se da en la temperatura de cuerpo negro, siendo esta un 37% mayor; otras variaciones más bajas se pueden encontrar en el índice fotónico con un 5% y en la densidad de la columna hidrógeno con un 17%. Por otro lado, en este ajuste se da un valor en  $\chi^2_r$  similar al obtenido en el primer ajuste  $\sim 13$ , esto es nuevamente justificable con el enorme pico en los residuos debido la emisión K- $\alpha$  del hierro.

No obstante, encontramos que las incertidumbres son notablemente mayores en este ajuste, una razón por la que los errores pueden ser mayores es que en este caso el ratio señal fondo es mucho menor ya que la señal detectada es mucho menos luminosa (ver subfigura 6a), al contrario de lo que ocurre en análisis previo (figura 3) en el que el fondo es muy similar pero la señal es mayor. Esto provoca que los datos obtenidos en el primer análisis se encuentran a tan solo  $0,64 \sigma$  y  $0,60 \sigma$  de distancia para la columna de hidrógeno y el índice fotónico respectivamente. Teniendo en cuenta esto, se considera un resultado aceptable para  $N_H$ , pues seguimos cerca del valor esperado calculado en [15] y, como se ha comentado anteriormente, este debería mantenerse constante debido a la cercanía del magnetar al centro de la galaxia. Lo mismo ocurre con el índice fotónico, siendo el resultado coherente con el calculado en el análisis previo.

Para estudiar la bondad del ajuste de los parámetros de cuerpo negro vamos a calcular la luminosidad del magnetar en el momento de la medición, aplicando la ecuación 3 y a partir de la constante de cuerpo negro obtenida se tiene que  $L \approx (2,45 \pm 1,22) \cdot 10^{34} \text{ erg s}^{-1}$ , que es un orden de magnitud menor que la luminosidad calculada en el primer análisis. Este resultado es consistente con lo observado en la figura 8 en la que se puede ver que el espectro en la observación nueva es más bajo, lo que indica que su luminosidad ha disminuido y por lo tanto posiblemente no se trata de la medida de un estallido, sino del magnetar en reposo. Por otro lado, si aplicamos la ley de Stefan-Boltzmann, que describe una relación de proporcionalidad entre la luminosidad y la temperatura del cuerpo negro  $L = 4\pi r^2 \sigma T^4$ , obtenemos un valor para la luminosidad de  $L \approx (1,55 \pm 0,61) \cdot 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$ , considerando el radio para el cuerpo

negro  $r_{BB} = 1,7 \pm 0,1$  m, según [14]. Este resultado difiere en dos órdenes de magnitud con el calculado previamente, lo que parece no tener sentido.

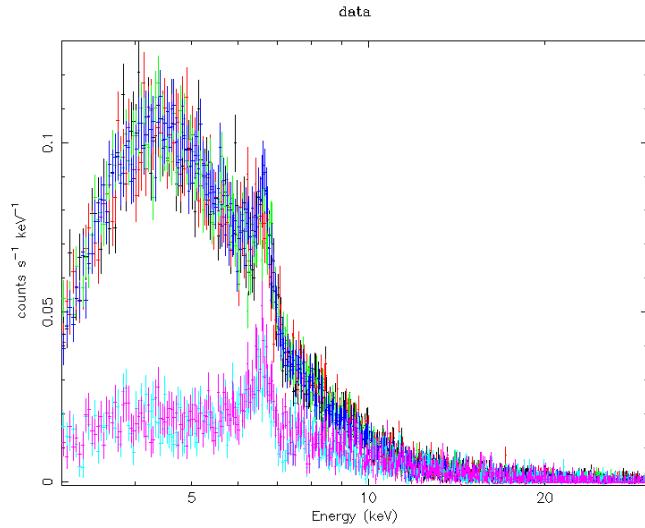


Figura 8: Representación conjunta de las señales medidas para las observaciones Obs.ID:30001002006 y Obs.ID:80002013002 (en azul, verde, rojo y negro) y de la observación Obs.ID:30602020010 (en rosa y azul).

La respuesta a esta aparente inconsistencia se da en los mecanismos físicos a los que obedece la luminosidad un magnetar [13]. Las estrellas emiten radiación térmica, descrita por una función de cuerpo negro, y radiación no térmica, debida a la radiación sincrotrón de partículas cargadas a través de las líneas de campo magnético, descrita por la ley de potencia. En el rango de energía en los que emiten los magnetares, de 1-10 keV, es muy difícil distinguir ambos tipos de emisión [13]. En general, en los momentos de estallido, como en 2013, predomina la emisión no térmica aumentando la luminosidad del magnetar mientras que en los periodos de reposo, esta se reduce notablemente, lo que justifica la disminución en la luminosidad. Esto a su vez no es necesariamente contradictorio con que aumente la temperatura de cuerpo negro que se emite desde la superficie del magnetar siguiendo procesos termodinámicos, tal y como se ha visto reflejado en los resultados obtenidos. Sin embargo, pese a la posibilidad de que este fenómeno ocurra, sería conveniente un estudio más exhaustivo para asegurar que no se trata de un resultado sesgado por los altos valores de fondo y consiguiente bajo ratio señal-fondo.

Por último, podemos calcular  $kT$  mediante la aplicación de la ley de Stefan-Boltzmann y así compararlo con el valor obtenido en el ajuste. Considerando el valor de la luminosidad previamente calculado,  $L \approx (2,45 \pm 1,22) \cdot 10^{34}$  erg s $^{-1}$ ,

y el valor que se da para el radio del objeto en [14], se obtiene  $kT \approx (0,51 \pm 0,06)$  keV. Este resultado es cercano al que se da en la literatura para la temperatura del magnetar en periodo inactivo, según [14] debe ser  $\lesssim 0,3$  keV; y, teniendo en cuenta que la luminosidad en reposo es dos órdenes de magnitud menor, este último resultado para la temperatura de cuerpo negro es coherente. No obstante, hay que tener en cuenta que la ley de Stefan-Boltzman se aplica a cuerpos negros, y como se ha visto previamente la emisión de magnetar, puede requerir modelos más complejos, por ello volvemos a destacar la importancia de realizar un análisis mayor nivel y así disponer de unos resultados de más coherentes.

## 5. Conclusiones

En este trabajo se pretende destacar la importancia del estudio de un tipo de estrellas de neutrones, los magnetares. Para ello, se ha dirigido el interés hacia una estrella en particular, el magnetar SGR J1745-29, reproduciendo su primer análisis espectral tras su descubrimiento de manera casual en 2013.

Sin embargo, a la hora de realizar este análisis se han encontrado una serie de problemas que han provocado que los resultados obtenidos no hayan reproducido fielmente los presentados en [14]. Por un lado, determinamos que estas diferencias en los parámetros del modelo ajustado a los datos obtenidos pueden estar provocadas por la gran cantidad de fondo medida en esta región, ya que como se ha comentado anteriormente se trata de una zona de alta actividad cósmica con mucho ruido que perjudica a las medidas. Citando textualmente el artículo, “*La región de extracción [...] abarca una fuerte emisión difusa y numerosas fuentes no resueltas dentro del complejo Sgr A\**”[14]. En una publicación posterior [8] se describen dos métodos para tratar el fondo y realizar el análisis, para resolver los problemas mencionados. Esto nos hace pensar que en [14] se ha realizado un método de análisis similar, pero que no se menciona. Sin embargo, por su elevada complejidad nos hemos visto limitados a realizar un análisis basado en la selección y el ajuste de un modelo y la elección de unos parámetros iniciales adecuados. Además, no debe olvidarse que en [14] se hace un ajuste conjunto con 5 medidas extras tomadas por el observatorio *swift* que aportan datos para la región de baja energía del espectro, lo que explica la diferencia de resultados en  $N_{\text{H}}$  y en  $kT$  comparando con la publicación.

Finalmente, se ha realizado un ajuste a unos datos más recientes, con la finalidad de comprobar la fiabilidad del método seguido y estudiar la evolución del magnetar.

Nos encontramos con que la luminosidad del magnetar ha disminuido notablemente, lo que se explica mediante la supresión de la emisión no térmica en el periodo de reposo. A su vez, esto podría ser coherente con que la temperatura de cuerpo negro haya aumentado ya que esto es posible por emisión residual desde la corteza del cuerpo y, además, las altas energía del magnetar hacen difícil entender por separado sus dos emisiones térmica y no térmica. No obstante, un análisis más detallado sería deseable. Por último, para  $N_{\text{H}}$  y para el índice fotónico se han obtenido unos resultados coherentes con los cálculos previos teniendo en cuenta sus incertidumbres.

En general, se ha puesto de manifiesto la enorme complejidad que presenta el análisis de las estrellas de neutrones, lo que alimenta el desconocimiento y misterio de estos enigmáticos objetos. Por ello, es realmente importante destinar esfuerzos a comprenderlas, ya que esto supone añadir una pieza al complejo e intrincado puzzle del cosmos.

## Referencias

- [1] K. Forster, B. Grefenstette y K. Madsen. “NuSTAR Data Analysis Quickstart Guide”. En: *NuSTAR Science Operations Center, California Institute of Technology* (2021). URL: <https://www.nustar.caltech.edu/documents/nustar-quickstart-guide>.
- [2] N. Gehrels et al. “The Swift Gamma-Ray Burst Mission”. En: *The Astrophysical Journal* (2004).
- [3] A. K. Harding. “The neutron star zoo”. En: *Frontiers of Physics* (2012).
- [4] F. A. Harrison et al. “The Nuclear Spectroscopic Telescope Array (NuSTAR) High-Energy X-Ray Mission”. En: *The Astrophysical Journal* (2013).
- [5] Anders Clemen Jakobsen. “X-ray optics in new instruments for astro- and astroparticle physics”. En: *Danmarks Tekniske Universitet* (2015).
- [6] F. Jansen et al. “XMM-Newton Observatory”. En: *Astronomy & Astrophysics* (2000).
- [7] V. M. Kaspi. “The Neutron Star Zoo”. En: *Cambridge University Press* (2018).
- [8] V. M. Kaspi et al. “Timing and Flux Evolution of the Galactic Center Magnetar SGR J1745-2900”. En: *The Astrophysical Journal Supplement* (2014).
- [9] K. Koyama et al. “Intense 6.7-keV iron line emission from the Galactic Centre”. En: *Nature* (1989).
- [10] J.M. Lattimer y M. Prakash. “Commissioning and qualification of the Low-Energy X-ray Reflectometer and its utilization in development of X-ray mirror coatings for astronomical instrumentation”. En: *Danmarks Tekniske Universitet* (2021).

- [11] J.M. Lattimer y M. Prakash. “The Physics of Neutron Stars”. En: *Department of Physics and Astronomy State University of New York at Stony Brook Stony Brook, NY 11794-3800, USA* (2004).
- [12] E. P. Mazets et al. “Observations of a flaring X-ray pulsar in Dorado”. En: *Nature* (1979).
- [13] Sandro Mereghetti, José A. Pons y Andrew Melatos. “Magnetars: Properties, Origin and Evolution”. En: *Springer Link* (2015).
- [14] K. Mori et al. “NuSTAR discovery of a 3.76 s transient magnetar near Sagittarius A\*”. En: *The Astrophysical Journal Letters* (2013).
- [15] M. P. Muno et al. “A Catalog of X-ray Point Sources from Two Megaseconds of Chandra Observations of the Galactic Center”. En: *The Astrophysical Journal Supplement* (2009).
- [16] “NuSTAR Archive”. En: (2023). URL: [https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nustar/nustar\\_archive.html](https://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/nustar/nustar_archive.html).
- [17] M. Perri et al. “The NuSTAR Data Analysis Software Guide”. En: *ASI Space Science Data Center and California Institute of Technology* (Julio 2021).
- [18] N. Rea et al. “A strongly magnetized pulsar within grasp of the Milky Way’s supermassive black hole”. En: *The Astrophysical Journal Letters* (2013).
- [19] J.H. Swank. “The Rossi X-ray timing explorer”. En: *Elsevier* (1998).
- [20] G. Vasishth y E. V. Gotthelf. “The Discovery of an Anomalous X-Ray Pulsar in the Supernova Remnant Kes 73”. En: *The Astrophysical Journal* (1997).
- [21] M. C. Weisskopf et al. “An Overview of the Performance and Scientific Results from the Chandra X-Ray Observatory”. En: *Astronomical Society of the Pacific* (2001).
- [22] J. Wilms, A. Allen y R. McCRAY. “On the Absorption of X-Rays in the Interstellar Medium”. En: *The Astrophysical Journal Letters* (2000).
- [23] C. Winkler et al. “The Integral Mission”. En: *Astronomy & Astrophysics* (2003).
- [24] “XSPEC An X-Ray Spectral Fitting Package Users’ Guide for version 12.13”. En: (Noviembre 2022). URL: <https://heasarc.gsfc.nasa.gov/xanadu/xspec/manual/XspecManual.html>.

# Anexos

Cabe destacar de que los siguiente códigos presentados son una modificación del ejemplo extraído de NuSTAR Quickstart guide [1], para más información consultar [17].

## A. Nupipeline

El siguiente código ha sido utilizado para ejecutar las fases 1 y 2 de *nupipeline* con la finalidad de calibrar la Obs.ID:30001002006.

```
nupipeline \
    indir=/disk/nustar/archive/30001002006/ \
    steminputs=nu30001002006 \
    outdir=./out > nupipeline_2006.txt
```

## B. Nuproducts

A continuación se presenta el código utilizado para ejecutar *nuproducts* y generar los productos del observatorio FPMA de la observación Obs.ID:30001002006.

```
nuproducts \
    srcregionfile=./out/srcA_2006.reg \
    bkgregionfile=./out/bgdA_2006.reg \
    indir=./out \
    outdir=./products \
    instrument=FPMA \
    steminputs=nu30001002006 \
    bkgextract=yes > nuproducts_2006.txt
```