



Análisis espectro/temporal de la emisión de rayos X de la binaria XTE J1739-285 observada por *NuSTAR*

E.A. Saavedra¹, F.A. Fogantini^{1,2}, J.A. Combi^{1,2}, F. García³ & G.C. Mancuso^{1,2}

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

² Instituto Argentino de Radioastronomía, CONICET-CIPCPBA-UNLP, Argentina

³ Kapteyn Astronomical Institute, University of Groningen, Países Bajos

Contacto / enzosaave@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen / En este trabajo se presentan los resultados del análisis espectro-temporal de la emisión de rayos X de la binaria de baja masa XTE J1739-285 observada con *NuSTAR*. Las curvas de luz en el rango de energía 3 – 79 keV están dominadas por emisión persistente de $\approx 27 \text{ cs}^{-1}$ y presentan además dos erupciones (*bursts*) de rayos X de tipo I, cuya intensidad máxima alcanza las $\approx 700 \text{ cs}^{-1}$ y cuya emisión por encima del continuo puede detectarse hasta los $\approx 25 \text{ keV}$. Ambos *bursts* presentan en promedio un tiempo de decaimiento de $\approx 50 \text{ s}$. Diagramas intensidad-color entre distintas bandas energéticas muestran que las erupciones poseen una evolución temporal de sentido anti-horario, mostrando histéresis. Los espectros (promedio y de las erupciones) de la fuente fueron modelados usando una combinación, de un modelo de cuerpo negro y continuo térmicamente comptonizado. Los flujos observados durante las erupciones son $\approx 139\%$ veces mayores que aquellos registrados durante los períodos persistentes. La fuente alcanza una luminosidad no absorbida del orden de $L_* \approx 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$ durante estas erupciones, suponiendo una distancia de 4 kpc.

Abstract / This paper presents the results of the study of the X-ray emission of the low-mass X-ray binary XTE J1739-285 detected with *NuSTAR*. The source was observed on February 19, 2020 with an exposure time of $\approx 29 \text{ ks}$. Light curves in the energy range 3 – 79 keV are dominated by persistent emission of $\approx 27 \text{ cs}^{-1}$. They present two type-I X-ray bursts whose maximum intensity reaches $\approx 700 \text{ cs}^{-1}$ and the emission above the continuum can be detected up to $\approx 25 \text{ keV}$. Both bursts have an average decay time of $\approx 50 \text{ s}$. Hardness-intensity diagrams between different energy bands of the bursts present a counter-clockwise evolution, showing hysteresis. The spectra of the bursts and the continuum were modelled using a thermally comptonised continuum and a blackbody component. The observed fluxes during the bursts are $\approx 139\%$ times greater than those measured during the persistent periods. The source reaches an unabsorbed luminosity of the order $L_* \approx 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$ during the bursts, assuming a distance of 4 kpc.

Keywords / accretion, accretion disks — stars: individual (XTE J1739-285) — stars: neutron — X-rays: binaries — X-rays: bursts

1. Introducción

XTE J1739-285 es un sistema binario de rayos X de baja masa (LMXBs, por sus siglas en inglés) transitorio, compuesto por una estrella de neutrones (NS) y una estrella de tipo tardía. La fuente fue descubierta el 19 de octubre de 1999 con el satélite *Rossi X-Ray Timing Explorer* (Markwardt et al., 1999) y está localizada en dirección a la constelación de Ofiuco a una distancia de 4_{-2}^{+4} kpc (Bailer-Jones et al., 2018). Recientemente, se detectaron erupciones de rayos X observadas por *AstroSat* (Chakraborty & Banerjee, 2020) y *NICER* (Bult et al., 2021). Los *burst* de rayos X de tipo I son explosiones termonucleares, que ocurren como producto de la quema inestable de H y/o He en la superficie de las estrellas de neutrones acretantes, en binarias de rayos X de baja masa. Durante estas explosiones, la intensidad de los rayos X observada aumenta bruscamente, entre $\approx 1\text{--}5 \text{ s}$, y luego disminuye en forma aproximadamente exponencial en una escala de tiempo de $10\text{--}100 \text{ s}$ (ver Galloway et al., 2008). La detección de *bursts* de rayos X confirma que el objeto compacto es una NS y no

un agujero negro (ver Bildsten 2000 y Galloway et al. 2008).

2. Observatorio *NuSTAR* y Procesamiento de Datos

El telescopio *NuSTAR* (Nuclear Spectroscopic Telescope Array) es un satélite de rayos X equipado con dos detectores que operan en el rango de energía de 3 a 79 keV. La observación analizada (ID 90601307002) en este trabajo fue realizada el 19 de febrero de 2020 con un tiempo de exposición de $\approx 29 \text{ ks}$. Los datos se redujeron utilizando el software de análisis de *NuSTAR* (*NuSTARDAS-V. 1.9.2*) perteneciente al paquete de tareas *HEASOFT (V.6.27.2)* y archivos de calibración *CALDB (V.1.0.2)*.

Los eventos provenientes de la fuente, se acumularon dentro de una región circular de $90''$ de radio alrededor del centroide de la imagen.

El radio elegido encierra $\approx 90\%$ de la PSF. Los eventos de fondo se tomaron de una región circular li-

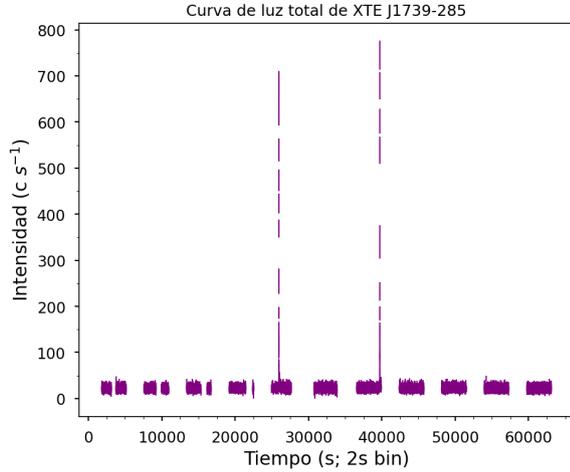


Figura 1: Curva de luz de XTE J1739-285 en el rango de energía 3–79 keV con un agrupamiento temporal de 2 s, tomada con los instrumentos FPMA y FPMB de *NuSTAR* (ID 90601307002). Se identifican dos *bursts* de tipo I.

bre de fuentes con un radio de $90''$ en la esquina del campo de visión. Los eventos de fondo fueron detectados y removidos con una tasa de recuentos máxima de 8 c s^{-1} en el rango de energía de 3–79 keV. En el análisis del comportamiento temporal, se extrajeron curvas de luz en distintos rangos de energías con diferentes agrupamientos temporales. Para un análisis del comportamiento general se extrajo una curva de luz con un agrupamiento de 100 s en el rango de energía de 3–79 keV. Para un análisis particular se redujo el agrupamiento temporal y se dividió en diferentes bandas energéticas (ver Sec. 3.1). Mediante la tarea LCMATH se restó el fondo correspondiente a cada cámara y luego se sumaron las observaciones corregidas para obtener una curva de luz final. Para el modelado de los espectros se utilizó el paquete XSPEC (Arnaud, 1996), versión 12.11.0 .

3. Resultados

3.1. Análisis Temporal

La Fig. 1 muestra la curva de luz de XTE J1739-285 extraída en el rango de energía 3–79 keV y con un agrupamiento de 2 s, la cual presenta una emisión persistente dominante a $\approx 27 \text{ c s}^{-1}$. Se eligió un agrupamiento temporal de 2 s ya que permite apreciar al máximo en detalle los *bursts* respecto a de la emisión persistente. No se encontraron *bursts* de menor escala en agrupamientos temporales menores. De la figura puede observarse la presencia de dos erupciones de tipo I que alcanzan intensidades máximas 30 veces por encima de la emisión persistente.

Extrayendo curvas de luz de las erupciones con distintas cotas superiores de energía se verifica que ambas se detectan por encima del continuo hasta $\approx 25 \text{ keV}$. Con el propósito de obtener intervalos *soft* y *hard*, se construyeron diagramas de intensidad-color para las erupciones, eligiendo un corte de energía en 9 keV.

El color se definió como el cociente entre la tasa de cuentas en el rango 9–25 keV y la tasa de cuentas en

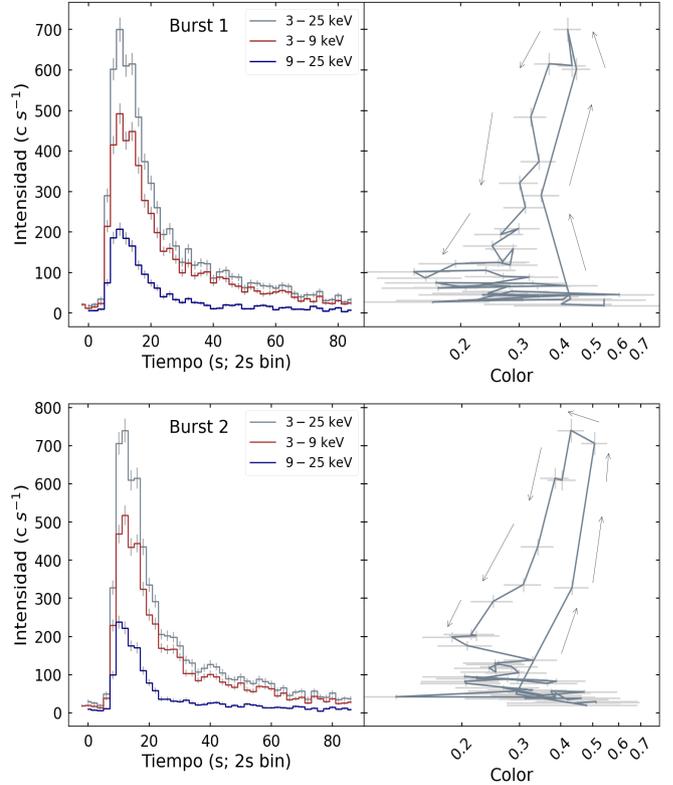


Figura 2: **Panel izquierdo:** Curvas de luz del *burst* 1 (*arriba*) y 2 (*abajo*), en diferentes intervalos energéticos a un agrupamiento temporal de 2 s. Se muestran las bandas *soft*, *hard* y *total*. Se estimaron los tiempos de decaimientos, los cuales no coinciden. **Panel derecho:** Diagrama intensidad-color de los *bursts* 1 (*arriba*) y 2 (*abajo*) con un corte de energía en 9 keV a un agrupamiento temporal de 2 s. Las flechas indican la dirección de evolución en sentido antihorario, desarrollando un ciclo de histéresis.

el rango 3–9 keV. La intensidad se definió como la tasa de cuentas en el rango 3–25 keV. Se eligió el corte en energía en 9 keV puesto que la cantidad de cuentas totales entre ambas bandas es similar, lo cual reduce la propagación de errores al realizar los cocientes. Ambas erupciones presentan una evolución en sentido antihorario, desarrollando un ciclo de histéresis (ver Fig. 2).

Estas dos erupciones fueron modeladas con un crecimiento lineal y un decaimiento exponencial. Ambas erupciones presentan crecimientos en escalas de tiempo promedio de 3.9 s para la banda *soft*, 2.2 s para la banda *hard*, una tasa de decaimiento promedio de 13.7 s para la banda *soft* y 8.9 s para la banda *hard*.

3.2. Análisis espectral

Con el propósito de analizar las propiedades espectrales de la fuente, se extrajeron espectros de cada una de las cámaras de toda la observación, teniendo en cuenta los períodos con erupciones individuales y sin ellas. El espectro de la fuente se redimensionó para tener al menos 30 cuentas por agrupamiento de energía, en la banda de 3–79 keV, con el fin de aplicar la minimización de χ^2 . Ambas cámaras fueron ajustadas en simultáneo inclu-

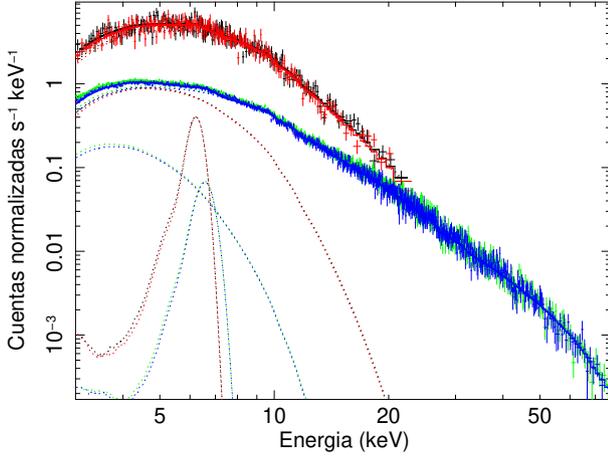


Figura 3: Espectro asociado a la emisión persistente (azul/verde) y a los *bursts* (rojo/negro).

yendo una constante de calibración.

Se propuso y ajustó un modelo fenomenológico que en lenguaje de XSPEC, se escribe como TBABS \times (NTHCOMP+BBODY+GAUSS). TBABS es un modelo de absorción del medio interestelar. Se fijó la densidad columnar de H, n_H , asociada a la absorción correspondiente a XTE J1739–285 en $1.73 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$, estimada por Bult et al. (2021). NTHCOMP describe un continuo térmicamente comptonizado. BBODY está asociado a una componente térmica de tipo cuerpo negro. La incorporación de líneas de emisión mejora significativamente el ajuste espectral respecto a su no inclusión. Para el modelo sin líneas se obtiene un $\chi^2 = 1.1$ (1870 g.d.l.) y mientras que para el caso en el que se incorporan las líneas se obtiene un $\chi^2 = 1.04$ (1866 g.d.l.). Se probaron diversos valores de los anchos (σ) de las líneas de emisión (0.05, 0.1, 0.2, 0.3, 0.4), fijando como resultado final el valor para el mejor ajuste espectral. Finalmente se aprecian líneas de emisión tanto en el espectro persistente como en el de los *bursts*. Dada la baja resolución espectral de *NuSTAR*, no es posible afirmar que la contribución total de las líneas de emisión sean de Fe K α 6.4 keV, ya que posiblemente puede haber una contribución de la línea de 6.7 keV, especialmente en el momento de los *bursts*. En la Tabla 1 y en la Figura 3 se muestran los parámetros de los ajustes obtenidos.

Para obtener el flujo no absorbido se usó un modelo de convolución, CFLUX. Se obtuvo una luminosidad promedio del orden de $10^{36} \text{ erg s}^{-1}$ (3–79 keV), tomando como distancia 4^{+4}_{-2} kpc, dado por la paralaje medida por *Gaia* (Bailer-Jones et al., 2018). Es importante resaltar que la luminosidad total corregida por absorción entre los períodos de erupciones es ≈ 2.4 veces mayor que la de los períodos de emisión persistente (ver Tabla 1).

4. Conclusiones

En este trabajo se presentaron los resultados preliminares espectro-temporales en la banda de rayos X de la

Parámetro	Unidad	Valor _{persistente}	Valor _{burst}
n_H	10^{22} cm^{-2}	1.73^\dagger	1.73^\dagger
Γ		1.81 ± 0.01	2.37 ± 0.01
kT_e	keV	$31.5^{+11.2}_{-5.5}$	$5.83^{+2.2}_{-0.9}$
L_{Compton}	$10^{36} \text{ erg s}^{-1}$	1.35 ± 0.001	2.93 ± 0.05
kT_{bb}	keV	0.83 ± 0.03	1.33 ± 0.1
L_{bb}	$10^{36} \text{ erg s}^{-1}$	0.045 ± 0.02	$0.3^{+0.1}_{-0.09}$
E_{Fe}	keV	$6.57^{+0.1}_{-0.09}$	6.23 ± 0.2
σ	keV	0.3^\dagger	0.2^\dagger
L_{Fe}	$10^{33} \text{ erg s}^{-1}$	3.3 ± 0.1	$17^{+0.3}_{-0.9}$
χ^2		1.04 (1866 g.d.l.)	

Tabla 1: Parámetros de los ajustes espectrales de la emisión persistente y de los *bursts*. † Indica que el parámetro se fijó durante el ajuste.

fuentes XTE J1739–285, utilizando una observación obtenida con el satélite *NuSTAR*. Los resultados muestran que la fuente presenta erupciones de tipo I con crecimientos rápidos de ≈ 4 s y con una tasa de decaimiento de ≈ 13 s. Estos valores son típicos de los *bursts* de tipo I (Galloway et al., 2008).

Los *bursts* detectados por *NuSTAR* se dan horas antes que los analizados por Bult et al. (2021), usando datos de *NICER* en un período de 20 días. En dicho período, se analizaron 32 *bursts* con una recurrencia de $2.0^{+0.4}_{-0.3}$ hr. Los *bursts* analizados en este trabajo tienen una separación temporal de 3.81 hr, siendo ésta consistente a comparación con los 32 *bursts* detectados por *NICER*. Notar que podría haber sucedido uno o varios *bursts* dentro de los *gaps* de *NuSTAR*.

Si suponemos que la NS de XTE J1739–285 tiene una masa de $1.4 M_\odot$, las erupciones alcanzan un pico de ≈ 1.7 % del límite de Eddington. Este es un valor típico para erupciones en las que no hay expansión del radio fotosférico (PRE, por sus siglas en inglés).

Agradecimientos: Agradecemos al réferi por sus comentarios que ayudaron a mejorar este trabajo. JAC, FAF, FG y GCM agradecen el apoyo del PIP 0102 (CONICET) y PICT-2017-2865 (ANPCyT). JAC también agradece a PID2019-105510GB-C32/AEI/10.13039/501100011033 de la Agencia de Investigación del MinClyU, y la Consejería de EICyE de la Junta de Andalucía, de España (Grupo de investigación FQM-322), y a fondos FEDER. FG agradece al programa Athena 184.034.002 (NWO).

Referencias

- Arnaud K.A., 1996, G.H. Jacoby, J. Barnes (Eds.), *Astronomical Data Analysis Software and Systems V*, *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, vol. 101, 17
- Bailer-Jones C.A.L., et al., 2018, *AJ*, 156, 58
- Bildsten L., 2000, *AIP Conference Proceedings*
- Bult P., et al., 2021, *ApJ*, 907, 79
- Chakraborty S., Banerjee S., 2020, *The Astronomer’s Telegram*, 13538, 1
- Galloway D.K., et al., 2008, *ApJS*, 179, 360
- Markwardt C.B., et al., 1999, *IAUC*, 7300, 1