

indica, o bien que la Pequeña Nube de Magallanes no posee un halo con estas características, o bien que, de existir, la contribución de dicho halo a la población estelar sería despreciable a  $\sim 6,5$  kpc. Finalmente, estos resultados indican que la Pequeña Nube tendría un tamaño significativamente mayor de lo que se creía hasta el presente.

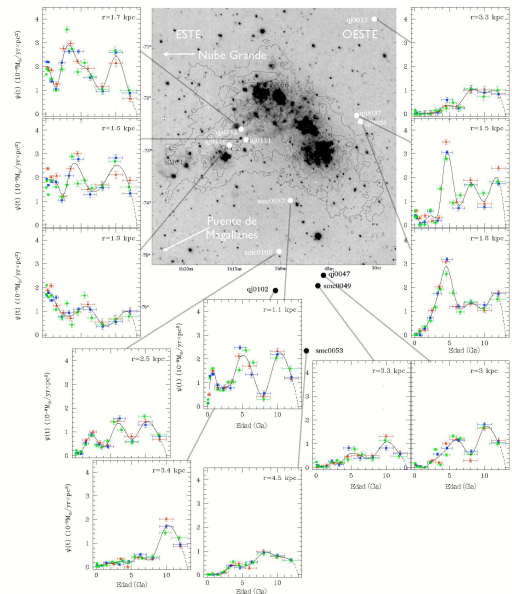


Figura 2 – HFE de los 12 campos estudiados.

## ANÁLISIS ESPECTRAL EN RAYOS X DEL SISTEMA BINARIO DE ALTA MASA 4U 1538–52/QV NOR

José Joaquín Rodes Roca

jjrodes@ua.es

Tesis doctoral dirigida por José Miguel Torrejón Vázquez y Guillermo Bernabéu Pastor

Centro: Universidad de Alicante - Universitat d'Alacant

Fecha de lectura: 26 de junio de 2007

Los sistemas binarios de rayos X, formados por una estrella de neutrones (objeto compacto) y una estrella masiva de tipo temprano (estrella óptica) (HMXBs), constituyen un laboratorio único que nos permite investigar cuestiones fundamentales de Astrofísica como los campos magnéticos en estrellas de neutrones o los vientos estelares de estrellas masivas, entre otros. El análisis del espectro en el rango energético 3–100 keV nos ha permitido estudiar la variabilidad de las líneas ciclotrón, de la línea fluorescente del hierro, del flujo y de la absorción fotoeléctrica. De esta forma, se puede efectuar un test entre lo que predicen los distintos modelos teóricos y lo obtenido a partir de las observaciones, tanto para la estrella visible como para la estrella de neutrones.

El objetivo de esta tesis es el estudio de las características espectrales presentes en el púlsar de rayos X 4U 1538–52/QV Nor, su variación a lo largo de un período orbital y el análisis de las correlaciones entre los parámetros que definen las líneas espectrales y el continuo. Hemos utilizado todas las observaciones públicas disponibles de este sistema de la base de datos del observato-

rio espacial Rossi X-ray Timing Explorer (RX-TE), un total de 45: dos campañas realizadas cubriendo un período orbital (1997 y 2001) y otra tomando una observación mensual entre noviembre de 1996 y diciembre de 1997. También hemos utilizado más de 400 ventanas científicas obtenidas con el satélite INTERNational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory (INTEGRAL) para conseguir un espectro con INTEGRAL Soft Gamma-Ray Imager (ISGRI) en el rango energías 17–100 keV.

Todos los espectros analizados del sistema 4U 1538–52 en esta tesis se han descrito bien con las siguientes componentes: 1) absorción fotoeléctrica a bajas energías; 2) ley de potencias modificada por una exponencial; 3) la línea fluorescente del hierro (centrada a  $\sim 6.4$  keV para este tipo de sistemas); y 4) la línea ciclotrón (centrada a  $\sim 20$  keV, también conocida como característica ciclotrón por dispersión resonante).

El estudio de la variabilidad de la línea ciclotrón fundamental nos ha permitido establecer correlaciones entre la anchura relativa  $\sigma_c/E_c$  y la profundidad óptica de la línea ciclotrón  $\tau_c$  (Figura 1) y

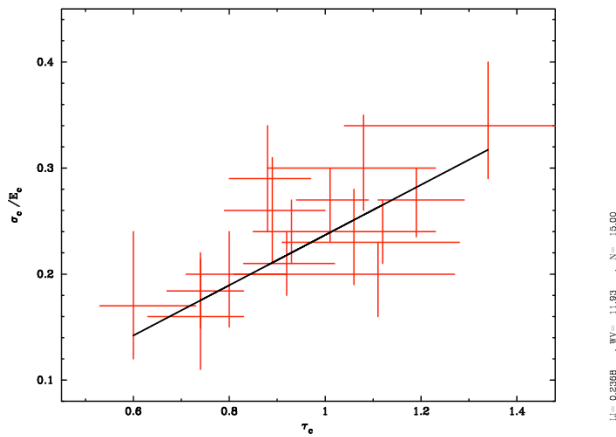


Figura 1 – Variación de la anchura relativa de la CRSF ( $\sigma_c/E_c$ ) con la profundidad óptica a partir de datos de RXTE para la campaña de observación anual del sistema estudiado en esta tesis. La línea continua representa el ajuste de la correlación lineal entre ambos parámetros que es consistente con los resultados obtenidos por Coburn et al. (2002) y por Kreykenbohm et al. (2004).

entre la anchura de la línea ciclotrón  $\sigma_c$  y su energía  $E_c$ . Si la dispersión de los fotones por efecto Compton inverso se crea en todo el volumen de la columna de acrecimiento, los modelos teóricos indican que la profundidad óptica de la línea ciclotrón  $\tau_c$  debe ser mayor cuando la línea de visión sea casi perpendicular a la dirección del campo magnético (Isenberg et al. 1988). Estos modelos predicen una anticorrelación entre  $\tau_c$  y  $\sigma_c/E_c$  en contradicción con los resultados observacionales obtenidos.

Por otra parte, hemos establecido una correlación observacional entre  $\sigma_c$  y  $E_c$ , en completo acuerdo con los modelos teóricos (Mészáros & Nagel 1985), expresada por la ecuación

$$\sigma_c \propto E_c (k T_e)^{1/2} |\cos \theta| . \quad (1)$$

La presencia de esta correlación, sin embargo, sólo puede reconciliarse con la observación del pulso X (que exige la variación de  $\cos \theta$ ) si dicho ángulo es pequeño. Hemos obtenido una cota superior para el valor de  $\theta \leq 18^\circ$  a partir del valor máximo de la energía del plasma ( $k T_e$ ). Esto implica la compatibilidad de la variación de  $\theta$  para la observación de los pulsos de rayos X y la correlación lineal observada.

También presentamos evidencias de la presencia del segundo armónico (Figura 2), basado en espectros de la fuente obtenidos con RXTE e INTEGRAL (esta tesis) y BeppoSAX (Robba et al., 2001). En todos los espectros con suficiente número de cuentas hemos obtenido una mejora de los

ajustes estadísticamente significativa con la inclusión de la segunda línea ciclotrón centrada en  $\sim 50$  keV. De ser así, este sería el quinto sistema que presenta más de un armónico.

El análisis de la línea de emisión fluorescente del hierro a 6.4 keV es una herramienta útil para estudiar la distribución del material circunestelar en los sistemas binarios de rayos X. La correlación entre la anchura equivalente de la línea del hierro y la columna de hidrógeno que observamos se corresponde con la emisión proveniente de un gas neutro absorbente, con abundancias cósmicas, que se distribuye esféricamente alrededor de la fuente de rayos X. También se ha obtenido que una relación inversamente proporcional entre la anchura equivalente de la línea del hierro y el flujo en rayos X de este sistema.

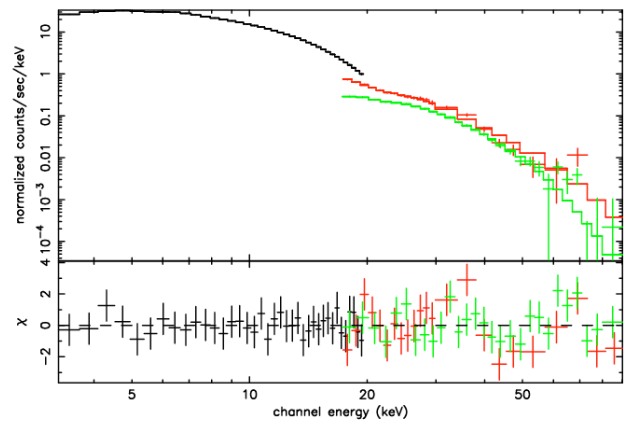


Figura 2 – Espectro de 4U 1538-52 y modelo con una característica ciclotrón. Se representa el espectro con todos los instrumentos utilizados: 3–20 keV con Proportional Counter Array (PCA), 17–100 keV con High Energy X-ray Timing Experiment (HEXTE) y 17–100 keV con ISGRI. Nótese que el comportamiento es idéntico en el rango de altas energías 40–60 keV y obsérvese la desviación de los datos experimentales en ese rango de energías que indica la presencia de la segunda característica ciclotrón.

Finalmente, la variación de la columna de hidrógeno a lo largo de la órbita es debida al movimiento del objeto compacto sobre el viento estelar de la estrella supergigante. Hemos adoptado un modelo sencillo de viento estelar y asumido una órbita circular para el sistema binario. Esta aproximación nos ha permitido describir razonablemente los datos experimentales ajustando una función de tipo sinusoidal, y estimar la pérdida de masa de la estrella supergigante, consistente con el obtenido a partir de observaciones de Ginga (Clark et al., 1994).