

COMUNICACIÓN DE TRABAJO – CONTRIBUTED PAPER

Un modelo evolutivo para V404 Cyg

L. Bartolomeo Koninckx, M.A. De Vito, O.G. Benvenuto

Instituto de Astrofísica de La Plata, IALP, CCT-CONICET-UNLP,
Argentina

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, Paseo del Bosque
S/N, (1900) La Plata, Argentina

Resumen. V404 Cyg es un sistema binario de baja masa con emisión en rayos X (LMXB) en el cual se han dado varios eventos explosivos (1938, 1989 y 2015). Actualmente se conoce un numeroso conjunto de parámetros para este sistema, incluyendo la masa del objeto compacto y de la estrella donante, el período orbital del sistema, el tipo espectral y la clase de luminosidad de la compañera del agujero negro, entre otros. Esto nos da la posibilidad de calcular, a través de modelos teóricos, un sistema progenitor que evolucione hasta describir las características principales observadas para este objeto y que, a su vez, nos permita hacer predicciones acerca del estado evolutivo posterior del sistema binario y sus componentes. En este trabajo hemos usado nuestro código de evolución binaria para obtener los parámetros iniciales (masas iniciales de las componentes, período orbital inicial del sistema y la cantidad de materia acreta) que mejor recreen las características actuales para V404 Cyg, inferidas de las observaciones. Por otra parte, hemos incluido en este trabajo un cálculo de la evolución del parámetro de *spin* del agujero negro, asumiendo que inicialmente no está rotando. En este caso, nuestros resultados no nos llevan a un buen acuerdo con las estimaciones obtenidas a partir de las observaciones. Sin embargo, comentaremos una posibilidad que nos lleve a resolver esta dificultad en un trabajo posterior.

Abstract. V404 Cyg is a Low-Mass X-Ray Binary (LMXB) system known to have undergone outbursts in 1938, 1989, and 2015. During these events it has been possible to obtain a set of reliable measurements of relevant quantities, such as the masses of the compact object (a black hole) and its companion, the orbital period, and the companion's spectral type and luminosity class, among others. This gives us the possibility of constructing theoretical models to account for these observational estimations, which can be used not only to look for the initial characteristics of the system, but also to predict its final fate. In this work, we used our own binary evolution code for computing these models and see which characteristics best fit for representing V404 Cyg's actual state. We also considered the evolution of the black hole spin parameter assuming that the object is initially not rotating. Remarkably, our models could not reach the existing estimation for this quantity. However, we give a possible explanation that may lead to resolve this difficulty in the future.

1. Introducción

El sistema V404 Cyg (GS 2023+338) es un sistema de baja masa con emisión en rayos X (LMXB) formado por una estrella de tipo espectral K3III y un agujero negro (BH) (Casares & Charles 1994), para el cual se han podido medir una serie de parámetros característicos. Los valores de referencia que hemos utilizado en este trabajo se muestran en la Tabla 1.

Por otra parte, este sistema se encuentra bajo un evento de transferencia de masa, donde se estima que la estrella donante tiene una tasa promedio de pérdida de masa de $\langle \dot{M}_d \rangle = 1.1 \times 10^{-9} M_\odot/\text{yr}$. Este valor resulta de utilizar la ecuación 25(a) de Webbink *et al.* (1983) con los parámetros actuales de V404 Cyg. En cuanto a la acreción en el objeto compacto, se cree que se encuentra acotada por una tasa promedio $\langle \dot{M}_{\text{BH}} \rangle = 4.0 \times 10^{-10} M_\odot/\text{yr}$ (Ziółkowski & Zdziarski 2018, de ahora en más ZZ18).

En este trabajo nos propusimos modelar teóricamente las características evolutivas del sistema V404 Cyg para hallar un sistema progenitor del mismo. Para ello utilizamos nuestro código de evolución binaria (Benvenuto & De Vito 2003; De Vito & Benvenuto 2012; Benvenuto *et al.* 2012) con el que exploramos el espacio de parámetros iniciales, tales como las masas de las componentes del sistema, el período orbital y la fracción de masa perdida por la estrella donante que es acretada por el BH. Al mismo tiempo, exploramos numéricamente la evolución temporal de las tasas de pérdida y acreción de masa, razón de cambio del período orbital en el tiempo y parámetro de *spin* del agujero negro de los modelos propuestos para nuestro objeto de estudio, y analizamos posibles comportamientos del sistema, incluyendo su fase evolutiva final.

Tabla 1: Parámetros medidos observacionalmente de V404 Cyg.

Parámetro	Valor	Error	Referencia
M_{BH}	$9 M_\odot$	$^{+0.2}_{-0.6}$	Casares & Charles (1994); Khargharia <i>et al.</i> (2010)
M_d	$0.54 M_\odot$	± 0.05	Casares & Charles (1994); Khargharia <i>et al.</i> (2010)
P_{orb}	6.47 d	± 0.001	Charles <i>et al.</i> (1989)
T_{eff}	4247 K	$^{+116}_{-113}$	Cox <i>et al.</i> (2000); Khargharia <i>et al.</i> (2010)
L_d	$8.7 L_\odot$	$^{+1.7}_{-1.4}$	Khargharia <i>et al.</i> (2010); Ziółkowski & Zdziarski (2018)
R_d	$5.5 R_\odot$	$^{+0.17}_{-0.18}$	Khargharia <i>et al.</i> (2010); Ziółkowski & Zdziarski (2018)

2. Resultados y discusiones

2.1. Modelos

Los modelos fueron calculados asumiendo abundancias solares ($X = 0.676$, $Y = 0.31$ y $Z = 0.014$) con un parámetro de longitud de mezcla $\alpha_{\text{MLT}} = 1.55$. Debido a las evidencias observacionales sobre la tasa de pérdida de masa de la estrella donante y la tasa de acreción en el BH, hemos realizado los modelos asumiendo una transferencia de masa no conservativa. Este evento está caracterizado con dos parámetros libres: la fracción β de masa perdida por la estrella donante que es acretada por el BH, y el momento angular específico de la materia que se pierde

del sistema en unidades del momento angular específico del BH, α (Rappaport *et al.* 1982, 1983). En este trabajo, mantuvimos fijo el valor de $\alpha = 1$. Para cuantificar la proximidad entre las cantidades modeladas y estimadas para el sistema V404 Cyg, definimos la siguiente función:

$$\epsilon^2 = \sum_i \epsilon_i^2, \quad \epsilon_i = \frac{E_i - E_i^{\text{obs}}}{E_i^{\text{obs}}} \quad (1)$$

siendo E_i el valor de la cantidad i modelada y E_i^{obs} la estimada; $i = 1, \dots, 6$ representan, respectivamente, la masa del BH (M_{BH}), la masa de la estrella donante (M_d), el período orbital (P_{orb}), la temperatura efectiva (T_{eff}), la luminosidad (L_d), y el radio (R_d) de la estrella donante.

Los modelos realizados fueron divididos en 3 generaciones. En la primera, se exploraron las masas iniciales de las componentes ($M_d^0 = 1.5, 2.0 M_{\odot}$ para la estrella donante y $M_{\text{BH}}^0 = 8, 9, 10, 11 M_{\odot}$ para el BH) fijando el periodo orbital inicial $P_{\text{orb}}^0 = 1$ d y el parámetro $\beta = 0.9$. El mejor modelo fue aquel calculado con $M_d^0 = 1.5 M_{\odot}$ y $M_{\text{BH}}^0 = 8 M_{\odot}$. Utilizando estas masas, se exploró el período orbital inicial para los valores $P_{\text{orb}}^0 = 0.75, 0.80, 0.90, 1.00$ d, obteniendo el mejor modelo para $P_{\text{orb}}^0 = 0.90$ para la segunda generación. Por último, para la tercera generación, exploramos los valores del parámetro β con 0.9, 0.5, 0.3 y 0.1. Los resultados de estos modelos se encuentran caracterizados en la Figura 1. Obtuvimos valores de ϵ^2 entre 0.007 y 0.025, siendo la mayor cercanía a las estimaciones para el modelo con $\beta = 0.9$.

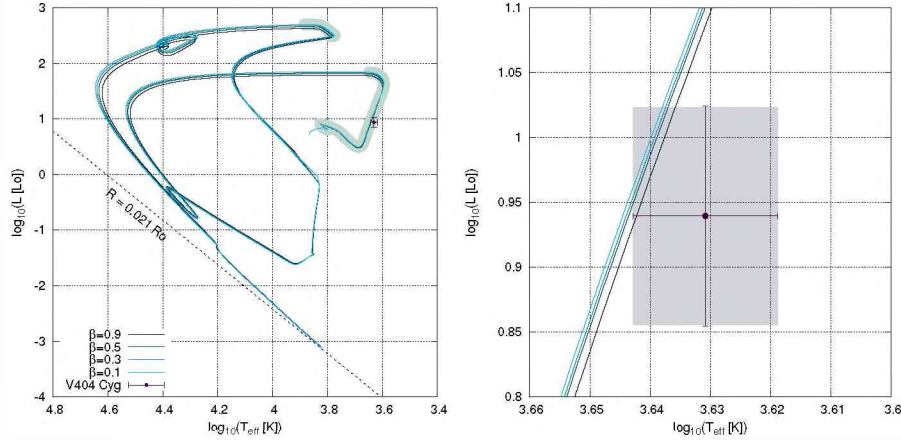


Figura 1: Recorridos evolutivos para la estrella donante de los modelos obtenidos en la tercera generación en un diagrama de Hertzsprung-Russell. En él, hemos sombreado las zonas donde se producen los eventos de transferencia de masa y hemos incluido la posición estimada del sistema V404 Cyg. Se han calculado los recorridos evolutivos desde que la estrella se posiciona en la ZAMS hasta que alcanza una edad de 14 Gyr.

2.2. Transferencia de masa

Los eventos de transferencia de masa de V404 Cyg han sido ampliamente estudiados. Entre ellos, ZZ18 estimaron la tasa de pérdida para el momento actual del sistema en $1.1 \times 10^{-9} M_{\odot}/\text{yr}$, valor en el cual nuestros modelos están en gran acuerdo (Figura 2: izquierda). Además, en ZZ18 se discute una posible cota superior de $4.0 \times 10^{-10} M_{\odot}/\text{yr}$ para la tasa de acreción sobre el BH de V404 Cyg. En sus modelos teóricos obtienen que para que esto suceda, la fracción de masa perdida por la estrella donante que es acretada por el BH debe ser $\beta < 0.33$. En los resultados de las tasas de acreción obtenidas en nuestros modelos, se puede observar que solo los modelos con $\beta < 0.3$ son los que quedan por debajo del límite superior estimado (Figura 2: derecha).

Si bien el mejor ajuste de los parámetros estimados observacionalmente se obtiene con un valor de $\beta = 0.9$, al estudiar la transferencia de masa vemos que se describe mejor el comportamiento estimado en la literatura con un valor de $\beta < 0.3$. Para estos modelos, la cercanía del sistema modelado al observado sigue dentro de los errores observacionales, por lo que los consideramos como los mejores candidatos entre nuestros modelos para describir un sistema progenitor de V404 Cyg.

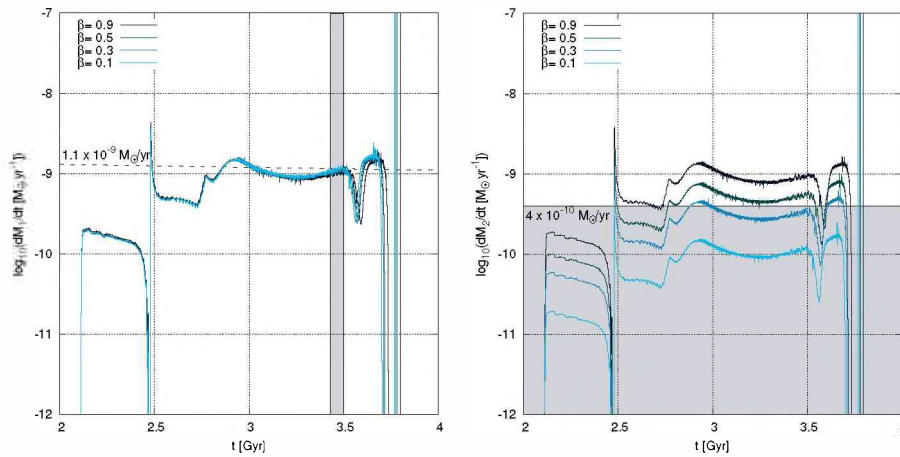


Figura 2: Transferencia de masa para los modelos de la tercera generación. *Izquierda:* Tasa de pérdida de masa de la estrella donante. En línea punteada se encuentra su estimación teórica de $1.1 \times 10^{-9} M_{\odot}/\text{yr}$ para el momento actual, y en sombreado las posibles edades actuales que predicen nuestros modelos. *Derecha:* Tasa de acreción sobre el BH. Sombreada se encuentra la zona por debajo del límite superior de $4.0 \times 10^{-10} M_{\odot}/\text{yr}$. Estimaciones obtenidas de Ziłkowski & Zdziarski (2018).

2.3. Derivada temporal del período orbital y parámetro de *spin* del BH

En los eventos de transferencia de masa no conservativos el período orbital cambia con el tiempo. Nuestros modelos predicen un incremento de esta cantidad $P_{\text{orb}}/\dot{P}_{\text{orb}} = 1.8 \times 10^8 \text{ yr}$, en acuerdo con ZZ18.

Al caer material en el BH, este gana momento angular aumentando su velocidad

de rotación. Calculamos la evolución de su parámetro de *spin* utilizando la ecuación (10) de Podsiadlowski *et. al.* (2003) en la cual se asume que no está rotando inicialmente. Para todos los casos, el valor de este parámetro es $a < 0.35$, por lo que no se alcanza el único valor observacionalmente estimado de $a \sim 0.92$, encontrado por Walton *et. al.* (2017). Este desacuerdo puede estar causado por la suposición de que el BH no está inicialmente rotando, por lo que se explorarán alternativas en un trabajo futuro.

2.4. Predicciones para V404 Cyg

Los modelos obtenidos nos permiten analizar no sólo un sistema progenitor para V404 Cyg, sino que también sus características a lo largo de toda su evolución. Para la estrella donante, podemos analizar su camino evolutivo en la Figura 1. Es destacable que el evento de transferencia de masa comienza cuando la estrella aún se encuentra en la secuencia principal, y se extiende hasta que el objeto abandona la rama de las gigantes (~ 1.6 Gyr). El núcleo no alcanza una temperatura suficiente para que suceda la reacción 3α , por lo que no hay quema del Helio. Luego, cuando la luminosidad de la estrella se encuentra decayendo, experimenta un *flash* termonuclear de hidrógeno en una cáscara. Este evento causa que la estrella vuelva a expandirse, y que pierda masa nuevamente durante un intervalo muy corto de tiempo. Luego de este evento, la estrella ha perdido una gran cantidad de su hidrógeno superficial ($\sim 20\%$ respecto del inicial). Se predice que su etapa final de evolución será como una enana blanca de muy baja masa compuesta mayormente por helio, con algo de hidrógeno en su superficie. La masa de este remanente se estima en $\sim 0.28M_{\odot}$ y un radio de $\sim 0.021R_{\odot}$.

Agradecimientos. Los autores agradecen al comité organizador de las *IV Jornadas de Astrofísica Estelar* por ofrecernos el espacio para publicar nuestro trabajo.

Referencias

- Benvenuto O. G., De Vito M. A., 2003, MNRAS, 342, 50
 Benvenuto O. G., De Vito M. A., Horvath J. E., 2012, ApJ, 753, L33
 Casares J., Charles P. A., 1994, MNRAS, 271, L5
 Charles P., et al., 1989
 Cox A. N., 2000, Allen's astrophysical quantities
 De Vito M. A., Benvenuto O. G., 2012, MNRAS, 421, 2206
 Khargharia J., Froning C. S., Robinson E. L., 2010, ApJ, 716, 1105
 Makino F., 1989, IAU Circ., 4782, 1
 Podsiadlowski P., Rappaport S., Han Z., 2003, MNRAS, 341, 385
 Rappaport S., Joss P. C., Webbink R. F., 1982, ApJ, 254, 616
 Rappaport S., Verbunt F., Joss P. C., 1983, ApJ, 275, 713
 Walton D. J., et al., 2017, ApJ, 839, 110
 Ziółkowski J., Zdziarski A. A., 2018, MNRAS, 480, 1580