



Explorando pérdidas de momento angular y la estabilidad en la transferencia de masa en binarias interactuantes

M. Echeveste^{1,2}, M.L. Novarino^{1,2}, O.G. Benvenuto^{1,2,3} & M.A. De Vito^{1,2}

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

² Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

³ Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Argentina

Contacto / mecheveste@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen / Estudiamos los sistemas binarios interactuantes de baja masa con emisión en rayos X. En esta familia de binarias, una estrella donante de tipo solar transfiere masa a un objeto compacto a través del desborde de su lóbulo de Roche. El frenado magnético es de importancia clave en la pérdida de momento angular en este tipo de binarias, y es por este motivo que hemos decidido hacer un estudio detallado. Para ello, hemos implementado cuatro prescripciones distintas para modelar este fenómeno que, al presentar diversas intensidades, afectan la evolución de las binarias de manera diferente. Finalmente, exploraremos la posibilidad de que los sistemas estudiados lleguen a formar órbitas anchas y órbitas cerradas manteniendo una fase de transferencia de masa estable.

Abstract / We study low-mass X-ray binary systems (LMXB). In this type of binaries, a low-mass star transfers mass to a compact object via Roche Lobe overflow. Magnetic braking is of great importance when studying angular momentum loss from the system. Here, we select four different prescriptions that present different intensities and study their effect on the evolution of the binaries. Finally, we study the possibility of the studied systems forming wide and tight binaries maintaining a stable mass transfer phase.

Keywords / binaries: close — binaries: general — stars: evolution

1. Introducción

Los sistemas binarios de baja masa con emisión en rayos X (SBBMXs) son binarias compuestas por una estrella de baja masa que transfiere materia y momento angular a un objeto compacto (un agujero negro o una estrella de neutrones, EN), a través del desborde de su lóbulo de Roche (RLOF) (ver Verbunt 1993; Tauris & Van Den Heuvel 2010). Existen distintos mecanismos de pérdida de momento angular actuando en la evolución de estas binarias. Usualmente, los más considerados son el frenado magnético (FM), la radiación gravitatoria y la pérdida de masa del sistema. De entre estos mecanismos, el FM es particularmente incierto. La prescripción de FM más utilizada en simulaciones de SBBMXs es la derivada por Verbunt & Zwaan (1981); Rappaport et al. (1983). Se basa en la ley empírica de Skumanich (Skumanich, 1972), que fue construida para describir estrellas de Secuencia Principal como nuestro Sol. Esta ley presenta algunas discrepancias cuando se comparan las simulaciones con los datos observacionales en lo que respecta a la distribución de períodos orbitales (Pfahl et al., 2003; Istrate et al., 2014; Shao & Li, 2015), a la tasa de acreción de masa del objeto compacto (Pfahl et al., 2003; Shao & Li, 2015; Pavlovskii & Ivanova, 2016; Van et al., 2019), y a la cantidad de sistemas ultracompactos que pueden formarse, (problema de *fine-tuning*) (van der Sluys et al., 2005a,b; Istrate et al., 2014; Echeveste et al., 2019).

Van et al. (2019) investigaron modificaciones a la ley de Skumanich y presentaron tres nuevas prescripciones de FM. Encontraron que la llamada prescripción “Intermedia” es la que reproduce el mayor número de SBBMXs observados.

Posteriormente, Romero & Istrate (2019) y Chen et al. (2021) estudiaron la evolución de SBBMXs utilizando algunas de estas nuevas prescripciones. Como menciona explícitamente Chen et al. (2021), existen discrepancias entre sus resultados y los de Romero & Istrate (2019) en el caso de las simulaciones hechas bajo la prescripción “Intermedia”. Resumidamente, Chen et al. (2021) enfrenta problemas de convergencia numérica en las simulaciones debido a las altas tasas de transferencia de masa, por lo que concluye que esta prescripción no es viable como ley universal ya que imposibilita la formación de binarias de órbita ancha. Sin embargo, Romero & Istrate (2019) reproduce binarias de órbita ancha utilizando el mismo código numérico (MESA, Paxton et al. 2013). Esto nos ha motivado a estudiar las nuevas prescripciones de FM, ya que la herramienta computacional con la que contamos es completamente independiente de aquella utilizada por los mencionados autores. Estudiamos entonces dos de las tres prescripciones presentadas en Van et al. (2019) con el fin de analizar sus efectos en la evolución de la estrella donante, en el período orbital y en la tasa de transferencia de masa. Evolucionamos un SBBMX compuesto por una estrella tipo solar y una EN cuyas masas son las mismas que las utilizadas por Romero & Istrate (2019) y Chen et al. (2021).

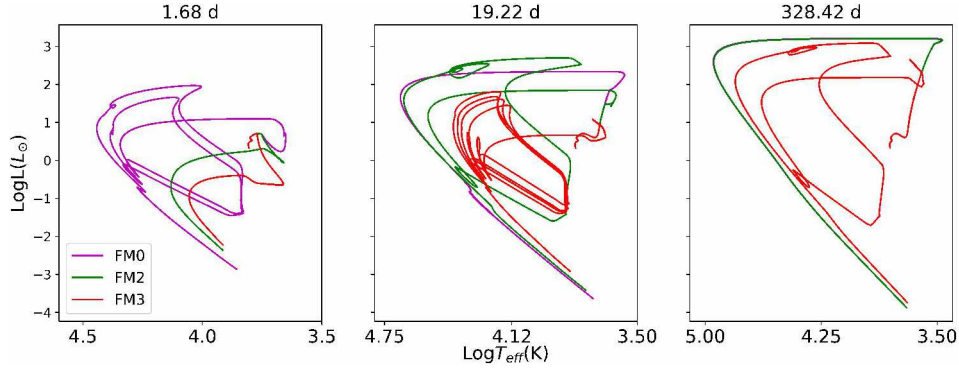


Figura 1: Diagrama Hertzsprung-Russell de la estrella donante en las binarias con $P_{\text{orb},i} = 1.68, 19.22$ y 328.42 d. Cada estilo de línea corresponde a una ley de FM diferente.

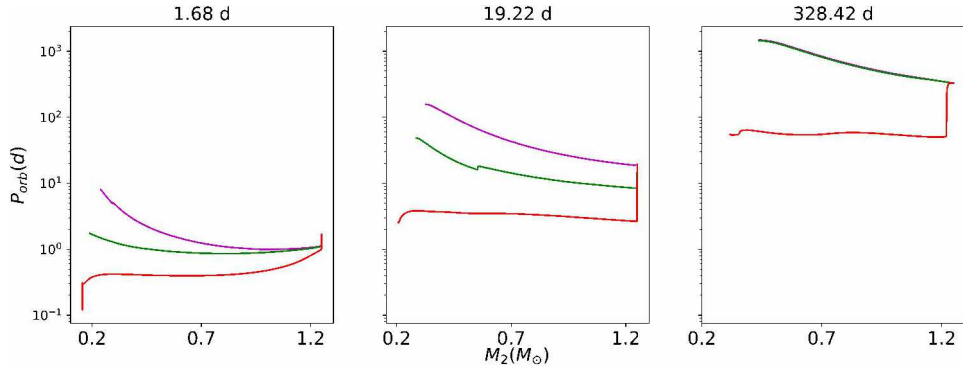


Figura 2: Período orbital como función de la masa de la estrella donante para los mismos sistemas de la Fig 1.

2. Modelo y código binario

Calculamos secuencias evolutivas con el código de evolución binaria presentado en Benvenuto & De Vito (2003). A este código se le ha incorporado el efecto que tiene la energía de ligadura de la EN en la cantidad total de materia que esta puede ganar y el acoplamiento espín-órbita debido a efectos de marea (Novarino et al., 2021)

Estudiamos el caso en que la transferencia de masa es conservativa. Despreciamos el *overshooting*, asumimos un parámetro de *mixing-length* $\alpha_{ml} = 2$ y metalicidad solar para la estrella donante.

Consideramos pérdida de momento angular por radiación gravitatoria, pérdida de masa del sistema por vientos y FM. La pérdida de momento angular por FM fue modelada siguiendo a Van et al. (2019):

$$\frac{dJ_{\text{FM}}}{dt} = \frac{dJ_{\text{FM,Sk}}}{dt} \left(\frac{\omega_2}{\omega_{\odot}} \right)^{\beta} \left(\frac{\tau_{\text{conv}}}{\tau_{\odot,\text{conv}}} \right)^{\xi} \left(\frac{\dot{M}_{2,\text{viento}}}{\dot{M}_{\odot,\text{viento}}} \right)^{\alpha}, \quad (1)$$

donde ω_2 y $\dot{M}_{2,\text{viento}}$ son la velocidad de rotación y la tasa de pérdida de masa por vientos de la estrella donante, respectivamente; y τ_{conv} es el tiempo de circulación convectiva. Los subíndices \odot indican valores para el Sol, y α, β, ξ son parámetros que pueden tomar distintos valores (ver Van et al., 2019). $dJ_{\text{FM,Sk}}$ es la ley de FM derivada por Rappaport et al. (1983).

En este trabajo usamos $\omega_{\odot} = 3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, $\tau_{\odot,\text{conv}} = 2.8 \times 10^6 \text{ s}$ y $\dot{M}_{\odot,\text{viento}} = 2.54 \times 10^{-14} M_{\odot} \text{ año}^{-1}$ (Carroll & Ostlie, 2006).

Según Van et al. (2019), β , ξ y α en la Ec. (1) pueden tomar distintos valores, que resultan en cuatro prescripciones distintas para el FM. Aquí estudiaremos el caso estándar (FM0) en el que $(\beta, \xi, \alpha) = (0, 0, 0)$, el caso “Impulsado por convección” (FM2) en el que $(\beta, \xi, \alpha) = (0, 2, 0)$, y el caso “Intermedio” (FM3) en el que $(\beta, \xi, \alpha) = (0, 2, 1)$.

Para modelar el viento estelar utilizamos la expresión derivada en Reimers (1975).

3. Resultados

Estudiamos la evolución de sistemas binarios compuestos por una estrella donante y una EN cuya masa inicial es $1.25 M_{\odot}$ y $1.3 M_{\odot}$ respectivamente (mismos valores que los utilizados por Romero & Istrate 2019 y Chen et al. 2021). Analizamos tres valores para el período orbital inicial: $P_{\text{orb},i} = 1.68, 19.22$ y 328.42 d y variamos en cada caso la ley de FM utilizada. Como puede verse en la Figura 1, la evolución de las estrellas donantes depende de la ley de FM, ya que mientras mayor es la pérdida de momento angular, antes ocurre el desborde del lóbulo de Roche y más alta es la tasa de transferencia de masa. Mientras el período inicial aumenta, las donantes bajo FM0 y FM2 devienen en binarias muy

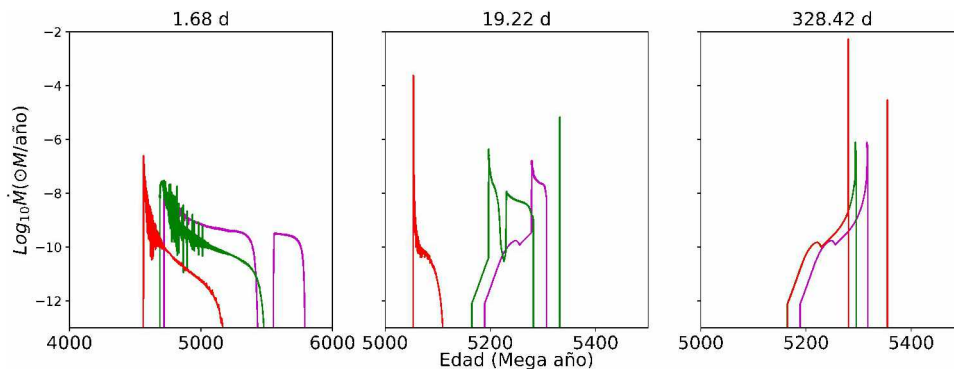


Figura 3: Tasa de transferencia de masa como función de la edad para los mismos sistemas de la Fig 1.

parecidas, mientras que la afectada por FM3 contrasta con ellas.

Como puede verse en la Figura 2, todas las simulaciones bajo la FM3 terminan con período orbital más chico que el inicial, mientras que para el resto de las prescripciones ocurre lo contrario, a excepción de la binaria bajo la FM2 con $P_{\text{orb},i} = 1.68$ que está cerca del período de bifurcación. El sistema con $P_{\text{orb},i} = 328.42$ d que evoluciona bajo la FM3 termina con un período de 55 d, por lo que las tres prescripciones permiten obtener binarias de órbita ancha.

Los altos valores en la tasa de transferencia de masa (Figura 3) en los sistemas con $P_{\text{orb},i} = 19.22$ y 328.42 d bajo la FM3, están en concordancia con los resultados de Van et al. (2019). En el caso del sistema con $P_{\text{orb},i} = 19.22$ d, la tasa de transferencia de masa supera $10^{-4} M_{\odot}/\text{año}$. Este resultado fue hallado también por Chen et al. (2021), que a partir de este valor encuentra los problemas de convergencia numérica. En nuestro caso, las simulaciones son numéricamente estables aún hasta tasas de transferencia de masa cercanas a $10^{-2} M_{\odot}/\text{año}$, por lo que es posible calcular la evolución de los sistemas hasta que llegan a la edad del Universo.

4. Conclusiones

La FM3 es la que más se diferencia de las demás prescripciones, y a su vez, cuando el período inicial crece FM0 y FM2 son similares. Bajo todas las prescripciones se llega a binarias de órbita ancha con la diferencia de que aquellas bajo la FM3 sufren tasas de transferencia de masa altas (en concordancia con lo hallado por Van & Ivanova 2019). A pesar de estos altos valores, es posible

evolucionar los sistemas hasta que emergen del episodio de transferencia de masa y continúan su evolución como binarias separadas, diferenciándose entonces de las simulaciones realizadas por Chen et al. (2021).

Referencias

- Benvenuto O.G., De Vito M.A., 2003, MNRAS, 342, 50
 Carroll B.W., Ostlie D.A., 2006, *An introduction to modern astrophysics and cosmology*, Cambridge University Press
 Chen H.L., et al., 2021, MNRAS, 503, 3540
 Echeveste M., et al., 2019, BAAA, 61, 87
 Istrate A.G., Tauris T.M., Langer N., 2014, A&A, 571, A45
 Novarino M.L., et al., 2021, MNRAS, 508, 3812
 Pavlovskii K., Ivanova N., 2016, MNRAS, 456, 263
 Paxton B., et al., 2013, ApJS, 208, 4
 Pfahl E., Rappaport S., Podsiadlowski P., 2003, ApJ, 597, 1036
 Rappaport S., Verbunt F., Joss P.C., 1983, ApJ, 275, 713
 Reimers D., 1975, *Memoires of the Societe Royale des Sciences de Liege*, 8, 369
 Romero A.D., Istrate A.G., 2019, G.H. Tovmassian, B.T. Gansicke (Eds.), *Compact White Dwarf Binaries*, 13
 Shao Y., Li X.D., 2015, ApJ, 809, 99
 Skumanich A., 1972, ApJ, 171, 565
 Tauris T.M., Van Den Heuvel E.P.J., 2010, *Formation and evolution of compact stellar X-ray sources*, 623
 Van K.X., Ivanova N., 2019, ApJL, 886, L31
 Van K.X., Ivanova N., Heinke C.O., 2019, MNRAS, 483, 5595
 van der Sluys M.V., Verbunt F., Pols O.R., 2005a, A&A, 431, 647
 van der Sluys M.V., Verbunt F., Pols O.R., 2005b, A&A, 440, 973
 Verbunt F., 1993, ARA&A, 31, 93
 Verbunt F., Zwaan C., 1981, A&A, 100, L7