

Efectos de una nueva prescripción de frenado magnético en la evolución de sistemas binarios ultracompactos

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 la formación de sistemas binarios ultracompactos con emisión en rayos X (SBUX) a partir de la evolución binaria. Un punto clave a la hora de considerar la posibilidad de formar SBUXs mediante este canal es la pérdida de momento angular del sistema, en particular debido al frenado magnético (FM). Recientemente, se ha mostrado que la ley de FM más utilizada en los cálculos de evolución binaria lleva a discrepancias con algunas observaciones. Además, las binarias que evolucionan bajo esta ley tienen muy bajas probabilidades de formar SBUXs (problema de *fine-tuning*). Distintos autores han calculado secuencias evolutivas utilizando el código MESA empleando una prescripción de FM distinta de la estándar, y han llegado a resultados dispares entre sí. Teniendo en cuenta que contamos con un código de evolución binaria completamente independiente, calculamos secuencias evolutivas bajo esta nueva ley de FM. Encontramos que la cantidad de SBUXs que pueden ser formados aumenta, pero no es posible reproducir binarias de órbitas abiertas. Por lo tanto, concluimos que bajo esta prescripción de FM pueden formarse mayor cantidad de SBUXs, aunque dicha prescripción no sería una alternativa viable a una ley de FM universal.

Abstract / We study the formation of ultracompact X-ray binaries (UCXBs) through binary evolution. A key point when considering the possibility of forming SBUXs by this channel is the angular momentum loss from the system, particularly by magnetic braking (MB). Recently, it has been shown that the most common MB prescription used in binary calculations leads to discrepancy with some observations. Besides, binaries evolving under this law have very low probability of becoming UCXBs (fine-tuning problem). Different authors have calculated evolutionary sequences using the MESA code, employing a new MB prescription and, remarkably, obtained disparate results. Considering that we have a completely independent binary evolutionary code, we calculate evolutionary paths with this new MB prescription. We found that the number of UCXBs that can be formed increases, but it is not possible to reproduce wide-orbit binaries. We conclude that under this MB more UCXBs can be formed, although this prescription would not be a viable candidate for a universal MB law.

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

1. Introducción

Los sistemas binarios ultracompactos con emisión en rayos X (SBUXs) son binarias con periodo orbital $P_{orb} \leq 1$ h y están compuestos por una estrella de baja masa deficiente en hidrógeno que transfiere materia y momento angular a una estrella compacta (un agujero negro o una estrella de neutrones, EN). Los SBUXs que se encuentran en el campo tienen bajas probabilidades de haber interactuado con otras estrellas y entonces el canal de formación en este caso invoca la presencia de una binaria de baja masa (SBBM) aislada. En los SBBM una de las componentes es una estrella (a la que llamamos donante) que transfiere masa y momento angular a su compañera (un objeto compacto) a través del desborde de su lóbulo de Roche. Cuando la transferencia de masa termina, el sistema puede ser observado como un pulsar binario de milisegundos (PBMS) (Bhattacharya & van den Heuvel, 1991; Tauris & Van Den Heuvel, 2010). Los sistemas que llegan a tener periodos orbitales muy cortos ($P_{orb} \simeq 2-9$ h) y estrellas donantes de masa extremadamente chica ($M_2 \simeq 0.2M_{\odot}$) tienen órbitas suficientemente apretadas

como para que la radiación gravitatoria (RG) achique la órbita y la estrella donante vuelva a llenar su lóbulo de Roche, permitiendo que ocurra otro episodio de transferencia de masa, y se forme un SBUX (Nelemans et al., 2010; Heinke et al., 2013). Cabe mencionar que los SBUXs son los principales candidatos a ser observados como fuentes de ondas gravitatorias por futuros observatorios (como LISA, Amaro-Seoane et al., 2017) por lo que estudiar su formación resulta relevante.

Resumiendo, bajo ciertas condiciones iniciales, SBBMs, PBMSs y SBUXs son distintos estadios de una misma secuencia evolutiva. Un punto clave cuando se considera la posibilidad de formar un SBUX mediante este canal es la pérdida de momento angular del sistema, a través de la masa que se escapa del sistema, el frenado magnético (FM) y la RG. La ley de FM es particularmente incierta. La más utilizada en simulaciones de binarias de baja masa 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 Princi-

pal como nuestro Sol. Sin embargo, como fue señalado por Van et al. (2019), el FM podría ser distinto para otro tipo de estrellas donantes (Mestel, 1968; Mestel & Spruit, 1987; Kawaler, 1988).

Los cálculos evolutivos de SBBMs enfrentan algunos inconvenientes cuando se utiliza la ley de Skumanich. Por un lado, la distribución de períodos orbitales de PBMSs que descienden de SBBMs no es compatible con las observaciones, especialmente para períodos entre 0.1 y 1.0 d (Pfahl et al., 2003; Istrate et al., 2014; Shao & Li, 2015). Además, la tasa de acreción de masa del objeto compacto inferida observacionalmente es un orden de magnitud más alta que la que se deduce de los cálculos donde se utiliza esta ley (Pfahl et al., 2003; Shao & Li, 2015; Pavlovskii & Ivanova, 2016; Van et al., 2019). Por otra parte, se ha mostrado que los SBUXs son muy difíciles de formar bajo esta ley. Solo sistemas con masa de la estrella donante y período orbital inicial en un rango de valores muy acotado pueden evolucionar hacia SBUXs (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 estudiaron sus implicancias en la tasa de acreción de masa de SBBMs. Presentaron tres nuevas prescripciones de FM que incluyen un escaleo de la fuerza del campo magnético con el tiempo de circulación convectiva y la pérdida de masa por vientos. Posteriormente, Romero & Istrate (2019) y Chen et al. (2021) estudiaron la evolución de SBBMs y la formación de PBMSs bajo estas prescripciones, usando el código MODULES FOR EXPERIMENTS IN STELLAR ASTROPHYSICS (MESA version 12115, Paxton et al., 2011). Sus resultados muestran que los caminos evolutivos de estas binarias son fuertemente dependientes de la prescripción de FM considerada. Sin embargo, existen algunas discrepancias entre los resultados de estos autores, como explícitamente mencionan Chen et al. (2021).

En este trabajo usamos una de las prescripciones propuesta por Van et al. (2019) con el fin de estudiar el canal evolutivo que comienza con una SBBM, pasa por PBMS con una enana blanca de muy baja masa y termina como un SBUX.

2. Modelo y código binario

Calculamos secuencias evolutivas con el código de evolución binaria presentado en Benvenuto & De Vito (2003). Hemos incorporado al código el efecto que tiene la energía de ligadura de la EN en la cantidad total de materia que esta puede ganar. Estudiamos el caso conservativo, i.e. la masa total del sistema binario permanece constante. Despreciamos el *overshooting*, asumimos un parámetro de *mixing-length* $\alpha = 2$ y metalicidad solar para la estrella donante. Consideramos que la rotación de la estrella donante está sincronizada con el período orbital, tal como suele asumirse en el estudio de SBBMs (Romero & Istrate, 2019; Deng et al., 2021). Consideramos pérdida de momento angular por RG y FM. La pérdida de momento angular por FM fue modelada siguiendo a Van et al. (2019):

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

donde ω_2 y $\dot{M}_{2,viento}$ 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). $dJ_{FM,Sk}$ es la ley de FM derivada por Rappaport et al. (1983):

$$\frac{dJ_{FM,Sk}}{dt} = -3.8 \times 10^{-30} M_2 R_\odot^4 \left(\frac{R_2}{R_\odot} \right)^{\gamma_{mb}} \omega_2^3 \text{ dyn cm},$$

donde R_2 es el radio de la estrella donante y $\gamma_{mb} = 4$ corresponde a la ley estándar de Skumanich (Verbunt & Zwaan, 1981). En este trabajo usamos $\omega_\odot = 3 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$, $\tau_{\odot,conv} = 2.8 \times 10^6 \text{ s}$ y $\dot{M}_{\odot,viento} = 2.54 \times 10^{-14} M_\odot \text{ año}^{-1}$ (Carroll & Ostlie, 2006).

Según Van et al. (2019), β, ξ y α en la Ec. (2) pueden tomar distintos valores, que resultan en cuatro prescripciones distintas para el FM. Aquí estudiaremos 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). Para el tiempo de circulación convectiva usamos la expresión dada en Hurley et al. (2002).

3. Estudios previos con la prescripción FM3

Chen et al. (2021) analizaron los efectos de la prescripción FM3 en la evolución de sistemas binarios formados por una EN de $1.3 M_\odot$ y una estrella donante de $1.25 M_\odot$. Encontraron que el problema de *fine-tuning* en la formación de SBUXs se mitiga, pero no pudieron reproducir binarias de órbitas abiertas. Esto se debe a que a partir de $P_{orb,i} \gtrsim 25 \text{ d}$ la tasa de transferencia de masa alcanza valores muy altos (hasta $10^{-4} M_\odot \text{ año}^{-1}$) llevando al sistema a una fase de envoltura común, e imposibilitando los cálculos debido a inestabilidades numéricas.

Romero & Istrate (2019) también calcularon la evolución de binarias bajo esta prescripción. Encontraron que el problema de *fine-tuning* en la formación de SBUXs también se mitiga. Además, pudieron calcular secuencias evolutivas con $P_{orb,i}$ de hasta 105 d sin sufrir inestabilidades numéricas por tasas de transferencia de masa demasiado altas. Encontraron que todos los sistemas con $P_{orb,i} \gtrsim 25 \text{ d}$ terminan su evolución con P_{orb} mayor que el inicial, por lo que, a diferencia de lo hallado por Chen et al. (2021), sí pudieron reproducir binarias de órbitas abiertas.

4. Resultados

Motivados por las discrepancias entre los trabajos mencionados anteriormente, reproducimos secuencias evolutivas de binarias formadas por una estrella donante de $1.25 M_\odot$ y una EN de $1.3 M_\odot$ con $P_{orb,i}$ entre 3 y 110 d con nuestro propio código de evolución binaria.

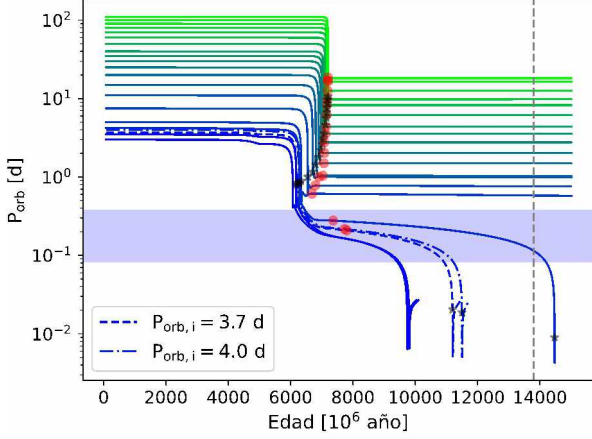


Figura 1: Período orbital en función del tiempo de binarias formadas por una estrella donante de $1.25 M_{\odot}$ y una EN de $1.3 M_{\odot}$ bajo la prescripción FM3 y $P_{orb,i}$ entre 3 y 110 d. La línea vertical indica la edad del Universo. La franja horizontal indica $P_{orb} = 2-9$ h. Las estrellas negras/puntos rojos indican el comienzo/fin de la transferencia de masa. Las curvas de línea punteada corresponden a sistemas que llegan a SBUX en una edad menor a la edad del Universo.

Respecto a la formación de SBUXs, buscamos sistemas que en algún momento de su evolución pasen por el estadio de PBMS, alcanzando $P_{orb} = 2-9$ h sin tener transferencia de masa entre sus componentes; que luego achiquen su órbita gracias a la RG hasta que la estrella donante llene su lóbulo de Roche y vuelva a comenzar la transferencia de masa, alcanzando $P_{orb} \leq 1$ h y formando así un SBUX. Encontramos que la ventana en $P_{orb,i}$ para formar SBUXs es de $\simeq 1$ d, mitigando así el problema de *fine-tuning*. En lo que respecta a la formación de binarias de órbitas abiertas, nuestros resultados difieren de lo hallado por Romero & Istrate (2019), ya que todas nuestras secuencias evolutivas terminan con P_{orb} más chico que el inicial, como se puede ver en la Fig. 1. Por lo tanto, al igual que Chen et al. (2021), no encontramos binarias que evolucionen hacia órbitas abiertas. En nuestro caso, las secuencias evolutivas de sistemas con $P_{orb,i} > 110$ d tienen tasas de transferencia de masa $\gtrsim 10^{-4} M_{\odot} \text{ año}^{-1}$, dando lugar a una fase de envoltura común. La Fig. 2 muestra la evolución de la tasa de transferencia de masa en función del tiempo. Como puede verse, el sistema con $P_{orb,i} = 110$ d alcanza $\dot{M}_2 \lesssim 10^{-4} M_{\odot} \text{ año}^{-1}$.

5. Conclusiones

Adoptando la ley “Intermedia” de FM propuesta por Van et al. (2019) hemos encontrado que el rango de períodos iniciales de SBBMs que pueden evolucionar a SBUXs via un PBMS aumenta en comparación con los modelos donde se utiliza la ley de FM standard. Esto indica que la FM3 podría ayudar a mitigar el problema de *fine-tuning*. Esta contribución constituye un primer paso de un estudio más amplio, en el que incluiremos un estudio paramétrico completo que nos permita estimar

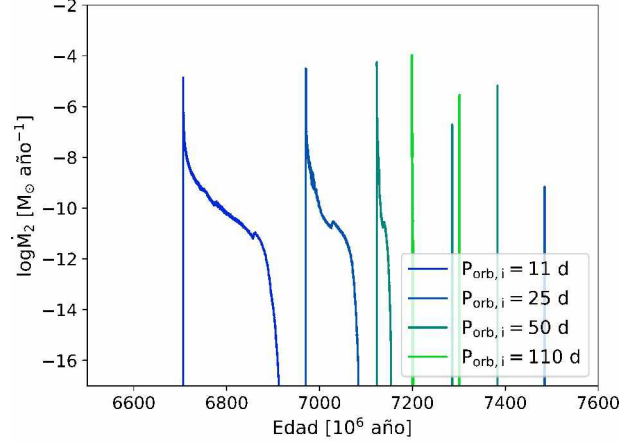


Figura 2: Tasa de transferencia de masa en función del tiempo de sistemas con $P_{orb,i} = 11, 25, 50, 110$ d.

la fracción de SBBM que crean SBUXs. Por otro lado, nuestros resultados muestran que aplicar esta ley imposibilita la formación de binarias de órbitas abiertas, por lo que, en su presente forma, esta ley no resultaría una alternativa viable a ley de FM universal.

Referencias

- Amaro-Seoane P., et al., 2017, arXiv e-prints, arXiv:1702.00786
 Benvenuto O.G., De Vito M.A., 2003, MNRAS, 342, 50
 Bhattacharya D., van den Heuvel E.P.J., 1991, PhR, 203, 1
 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
 Deng Z.L., et al., 2021, ApJ, 909, 174
 Echeveste M., et al., 2019, BAAA, 61, 87
 Heinke C.O., et al., 2013, ApJ, 768, 184
 Hurley J.R., Tout C.A., Pols O.R., 2002, MNRAS, 329, 897
 Istrate A.G., Tauris T.M., Langer N., 2014, A&A, 571, A45
 Kawaler S.D., 1988, ApJ, 333, 236
 Mestel L., 1968, MNRAS, 138, 359
 Mestel L., Spruit H.C., 1987, MNRAS, 226, 57
 Nelemans G., et al., 2010, MNRAS, 401, 1347
 Pavlovskii K., Ivanova N., 2016, MNRAS, 456, 263
 Paxton B., et al., 2011, ApJS, 192, 3
 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., 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., Zwaan C., 1981, A&A, 100, L7