Influencia de los efectos de mareas en la evolución del período orbital de sistemas binarios interactuantes

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

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 / leonelanova88@gmail.com

Resumen / Presentamos un estudio de la evolución del período orbital P_{orb} del sistema binario *redback* PSR J1023+0038, formado por una estrella de neutrones y una estrella de tipo solar. Los modelos de evolución binaria en los que se considera irradiación mutua y sincronización orbital instantánea no proveen una descripción adecuada de dP_{orb}/dt . Por ejemplo, en el caso del sistema *redback* PSR J1723-2837, ese tipo de modelos predice un valor de este parámetro tres órdenes de magnitud menor que el valor observado. Por este motivo, hemos incorporado los efectos de mareas a nuestros modelos. Aplicamos dichos modelos al sistema PSR J1023+0038 y encontramos que para alcanzar el valor de dP_{orb}/dt observado, luego de un episodio de transferencia de masa la rotación de la estrella donante debe estar levemente fuera de sincronía con la revolución orbital, en acuerdo con resultados previos obtenidos para el caso de PSR J1723-2837. Esto muestra la necesidad de considerar los efectos de marea en forma detallada en la evolución estelar binaria.

Abstract / We present a study of the evolution of the orbital period P_{orb} of the redback binary system PSR J1023+0038 formed by a neutron star and a solar-type star. The models of binary evolution that consider irradiation feedback and instantaneous orbital sychronization do not provide an adequate description of dP_{orb}/dt . For example, for the case of the redback PSR J1723-2837, such models predict a value of this parameter three orders of magnitude lower than the observations. Because of this reason, we included tidal effects in our models. We applied them for the case of PSR J1023+0038 and found that in order to reach the observed value of dP_{orb}/dt the stellar rotation should be slightly out of synchronicity with the orbit at the moment in which mass transfer ceases; a result which is in agreement with the case of PSR J1723-2837. This indicates the necessity of considering detailed tidal effects in binary evolution.

Keywords / binaries: close — stars: evolution

1. Introducción

Los sistemas binarios interactuantes (SBI) se caracterizan por experimentar transferencia de masa y momento angular entre sus componentes. Entre los distintos caminos evolutivos que puede tomar esta familia de binarias, encontramos a los redbacks (Roberts, 2013), compuestos por una estrella de neutrones (EN) y una estrella compañera no degenerada de baja masa $(0.1 < M_2/M_{sol} < 0.7, donde M_2$ es la masa de la compañera de la EN) con períodos orbitales entre 0.1 y 1 día. El escenario estándar predice una etapa de transferencia de masa continua cuando la compañera llena su lóbulo de Roche. Sin embargo, si se incorpora al modelo la irradiación mutua, se obtienen eventos de transferencia de masa pulsada, haciendo que el sistema transicione entre estados de acreción (emisores de rayos X) a estado de pulsar (Büning & Ritter, 2004). Este mecanismo ocurre cuando la masa transferida a la EN emite radiación en rayos X que ilumina a la estrella compañera. Si esta última tiene una zona convectiva externa, la superficie se ve parcialmente inhibida de liberar energía proveniente de su interior (Benvenuto et al., 2014). En algunos casos, la estructura de la estrella no logra mantener el desborde de su lóbulo de Roche y la estrella se separa de éste. Posteriormente, la evolución nuclear de la estrella puede ocasionar otro llenado del lóbulo de Roche, y así otro episodio de transferencia de masa. De esta manera, la radiación proveniente de la materia que cae sobre la EN reaparece, dando lugar al proceso cíclico de transferencia de masa.

Además, al tratarse de sistemas con períodos orbitales cortos, las componentes del sistema se encuentran suficientemente cerca como para que la EN genere una fuerza diferencial no despreciable que ocasiona deformaciones de mareas sobre la superficie de la estrella donante. Existen distintos mecanismos disipativos que hacen que la configuración afectada por las mareas se aparte de una equipotencial instantánea. Resulta, entonces, en una falta de alineación de la línea que une las deformaciones ecuatoriales producidas por las mareas con los centros estelares (ver Fig. 1 de Hut 1981). Aparece, entonces, un torque y se produce un intercambio de momento angular entre la rotación de la estrella donante y la órbita, mientras se conserva el momento angular total y disminuye la energía orbital y rotacional. En consecuencia, los parámetros orbitales y rotacionales del sistema cambian continuamente. Finalmente,

el sistema alcanza un estado de equilibrio caracterizado por la coplanaridad, la circularidad y la co-rotación (sincronización) (Hut, 1981).

Anteriormente, Benvenuto et al. (2015) estudiaron la evolución del sistema binario redback PSR J1723-2837 considerando modelos irradiados. Hallaron un posible progenitor para este sistema que reproducía los valores observados de los parámetros característicos, excepto el valor de la derivada temporal del período orbital (dP_{orb}/dt). Por lo tanto, incorporamos a nuestros modelos los efectos de mareas entre dos episodios consecutivos de transferencia de masa para estudiar cómo cambiaban los elemenentos orbitales del sistema. Encontramos que las mareas logran explicar el valor observado de la derivada temporal del período orbital pero se necesita que, inmediatamente después de finalizada la etapa de transferencia de masa, la velocidad de rotación de la estrella compañera sea menor a la velocidad orbital, relajando de esta manera la sincronización instantánea que se suele asumir luego de un evento de transferencia de masa (Echeveste et al., 2020; Novarino et al., 2021).

En este trabajo realizamos un estudio similar al hecho para el caso de PSR J1723-2837, pero para el sistema que contiene al radio pulsar de milisegundo PSR J1023+0038. Este *redback* tiene un período orbital de 0.198 días y está compuesto por una EN de masa 1.71 ± 0.16 M_{sol} (Deller et al., 2012) y una estrella compañera de tipo G con una masa de ~ 0.2 M_{sol}, que se encuentra irradiada por el pulsar y está próxima a llenar su lóbulo de Roche. El cambio en el período orbital observado es de $-7.32(6) \times 10^{-11}$ s s⁻¹. (Archibald et al., 2013). Vamos a explorar los efectos de mareas con el fin de analizar si nuestro modelo también se puede aplicar a este sistema.

2. Tratamiento numérico

El código numérico de evolución binaria utilizado para la búsqueda de progenitores fue desarrollado por Benvenuto & De Vito (2003), Benvenuto et al. (2014). El mismo tiene en cuenta el proceso de irradiación mutua de las componentes del los sistemas. El número de pulsos de transferencia de masa depende del parámetro libre α_{irrad} , que representa la fracción de flujo incidente que efectivamente irradia a la acompañante de la EN.

Para encontrar un posible progenitor para el sistema PSR J1023+0038 nos basamos en la Fig. 3 del trabajo de (Benvenuto et al., 2014), donde se presenta la evolución de sistemas binarios interactuantes en el plano masa de la estrella donante vs. período orbital (M_2 -P_{orb}). De dicha figura identificamos posibles valores iniciales de M_2 y P_{orb} tales que los sistemas binarios con estos parámetros iniciales se acerquen en algún momento de su evolución al valor de la masa de la estrella compañera y el periodo orbital observados para PSR J1023+003. Luego, realizamos una exploración haciendo cálculos evolutivos con valores iniciales cercanos a los indentificados hasta llegar a obtener un posible progenitor. Para el análisis de mareas, seguimos el tratamiento simplificado de mareas en equilibrio asumiendo el modelo de fricción débil. El conjunto de ecuaciones diferenciales que describe la evolución de los parámetros orbitales

del sistema está basado en el modelo de Hut (1981) y generalizado por Repetto & Nelemans (2014). El frenado magnético (Verbunt & Zwaan, 1981; Rappaport et al., 1983) y la radiación gravitatoria (Hurley et al., 2002) están acoplados a estas ecuaciones. Siguiendo el trabajo de Novarino et al. (2021), modelamos al factor de escala para la viscosidad debido a movimientos turbulentos en la zona convectiva, F_{conv} , considerando la expresión lineal propuesta por Zahn (1966). Además, consideramos que la compañera de la EN de este sistema rota como un cuerpo rígido. Resolvemos el sistema de ecuaciones con un algorítmo implícito de diferencias finitas, aplicado al lapso de tiempo comprendido entre dos pulsos consecutivos de transferencia de masa. El tramo entre dos pulsos fue seleccionado de manera tal que se encuentre en concordancia con el período orbital observado. La elección de cualquier otro tramo en el que el sistema no se encuentre transfieriendo masa, nos lleva a resultados completamente similares a los obtenidos en este tramo. Cuando la estrella compañera está trasfiriendo masa, suponemos que el sistema se encuentra sincronizado de manera tal de poder definir los lóbulos de Roche y el punto de Lagrange L_1 .

3. Resultados

Hemos encontrado un posible progenitor para el sistema PSR J1023+0038 que logra reproducir de manera satisfactoria los datos observados para el período orbital, la masas de cada componenete y la temperatura efectiva de la estrella donante. Los parámetros iniciales del progenitor son: $M_{\rm EN} = 1.4 \, M_{\rm sol}, M_2 = 2 \, M_{\rm sol}$ de composición solar con un período orbital inicial de 0.81 días. Usamos un régimen de irradiación mutua con $\alpha_{\rm irrad} = 0.1$.



Figura 1: Evolución de las masas de las componentes del sistema en función del período orbital.

La Figura 1 muestra la evolución de las masas de cada componente en función del período orbital. Las zonas grises indican el rango de los valores estimados para las masas a partir de las observaciones disponibles, y la línea continua negra indica el período orbital observado. Podemos notar que en un determinado momento, el progenitor alcanza simultáneamente valores compatibles con estos parámetros.



Figura 2: Evolución del período orbital para el modelo irradiado con $\alpha_{\rm irrad} = 0.1$. La línea horizontal gris representa el valor de P_{orb} observado. La línea punteada roja indica la zona donde la estrella donante no está transfiriendo masa, seleccionada para el estudio de mareas.

En la Figura 2 vemos la evolución del período orbital para el modelo irradiado, en donde puede apreciarse el efecto de los pulsos de transferencia de masa. Los puntos rojos indican la zona donde la estrella donante no está transfiriendo masa, en ese momento se puede observar al sistema como un pulsar. La línea gris horizontal indica el período orbital observado. Aplicamos el tratamiento de mareas en el pulso que corresponde al período orbital observado. Luego, en la Figura 3 podemos apreciar la derivada temporal del período orbital en función del tiempo. El eje horizontal indica la edad, definida como el tiempo que transcurre desde la finalización de la transferencia de masa. La línea horizontal gris representa el valor observado de la derivada temporal del P_{orb}. Las distintas curvas corresponden a diferentes valores de desincronización en el momento en que la compañera se separa de su lóbulo de Roche. Por lo tanto, el 0% indica que ni bien termina la transferencia de masa, el sistema está sincronizado instantáneamente (la velocidad de rotación de la estrella donante es igual a la velocidad del rotación orbital). En esta condición, observamos que el sistema nunca alcanza el valor estimado a partir de las observaciones para dP_{orb}/dt. Los valores de porcentajes positivos (negativos) refieren a velocidades de rotación de la compañera más grandes (chicos) que la velocidad de rotación orbital. En conclusión, solo se alcanza el valor observado cuando la estrella compañera de la EN, luego de la transferencia de masa, tenga una velocidad de rotación más chica que la del sistema (con una desincroniación mayor al 0.05%).

4. Discusión y conclusiones

Encontramos un posible progenitor para el *redback* PSR J1723-2837 que ajusta de manera satisfactoria los valores observados de las masas de las componentes, el período orbital y la temperatura efectiva de la compañera. Utilizando el código de evolución binaria con sincronización orbital instantánea, en el contexto de mo-



Figura 3: Derivada temporal del P_{orb} vs Edad. Las distintas curvas corresponden a diferentes valores de desincronización del sistema luego de la transferencia de masa. Los valores positivos (negativos) refieren a velocidades de rotación de la compañera más grandes (chicos) que la velocidad de rotación orbital. La línea horizontal representa el valor observado de dP_{orb}/dt .

delos con irradiación mutua, la derivada temporal de P_{orb} obtenida no se ajusta al valor observado. Por lo tanto, aplicamos el tratamiento de mareas de equilibrio entre dos pulsos de transferencia de masa. Encontramos que para alcanzar el valor de dP_{orb}/dt observado es necesario que luego de la transferencia de masa, el sistema no se encuentre sincronizado; la velocidad de rotación de la estrella compañera debe ser más lenta que la velocidad de rotación orbital. Alcanza con que sea un 0.05 % más lenta para obtener un valor de la derivada temporal de P_{orb} compatible con el valor observado. Entonces, el sistema parece comportarse de manera similar al que estudiamos en Novarino et al. (2021).

Estos resultados nos indicarían que las mareas son necesarias para entender la evolución del período orbital de este tipo de sistemas binarios interactuantes.

Referencias

- Archibald A.M., et al., 2013, arXiv e-prints, arXiv:1311.5161
- Benvenuto O.G., De Vito M.A., 2003, MNRAS, 342, 50
- Benvenuto O.G., De Vito M.A., Horvath J.E., 2014, ApJL, 786, L7
- Benvenuto O.G., De Vito M.A., Horvath J.E., 2015, ApJ, 798, 44
- Büning A., Ritter H., 2004, A&A, 423, 281
- Deller A.T., et al., 2012, ApJL, 756, L25
- Echeveste M., et al., 2020, BAAA, 61B, 69
- Hurley J.R., Tout C.A., Pols O.R., 2002, MNRAS, 329, 897
- Hut P., 1981, A&A, 99, 126
- Novarino M.L., et al., 2021, MNRAS, 508, 3812
- Rappaport S., Verbunt F., Joss P.C., 1983, ApJ, 275, 713
- Repetto S., Nelemans G., 2014, MNRAS, 444, 542
- Roberts M.S.E., 2013, J. van Leeuwen (Ed.), Neutron Stars and Pulsars: Challenges and Opportunities after 80 years, vol. 291, 127–132
- Verbunt F., Zwaan C., 1981, A&A, 100, L7
- Zahn J.P., 1966, Ann. Ap., 29, 489