



# Formación de sistemas binarios ultracompactos

M. Echeveste<sup>1</sup>, J. González<sup>1</sup>, O.G. Benvenuto<sup>1,2,3</sup> & M.A. De Vito<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

<sup>2</sup> Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

<sup>3</sup> Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires, Argentina

Contacto / maite.echeveste@gmail.com

**Resumen** / Estudiamos desde un punto de vista teórico los sistemas binarios ultracompactos (UCXBs) en el marco de los sistemas binarios interactuantes. Empleando nuestro código de evolución binaria investigamos la formación de los UCXBs explorando el espacio de parámetros del problema (período orbital y masa inicial de la estrella donante) con el objeto de hallar la región que da lugar a su formación. Tuvimos en cuenta el efecto de evaporación originada por el viento del púlsar y la irradiación mutua, efectos importantes a tener en cuenta en sistemas donde ambas componentes se encuentran muy próximas y que han sido ignorados en otros trabajos.

**Abstract** / We study from a theoretical point of view the ultracompact binary systems (UCXBs) in the framework of interacting binary systems. Using our binary evolution code we investigate the formation of UCXBs by exploring the parameter space of the problem (orbital period and initial mass of the donor star) in order to find the region that gives rise to its formation. We took into account the evaporation effect caused by the pulsar wind and mutual irradiation. These are important effects to be taken into account in systems where both components are very close and that have been ignored in other papers.

**Keywords** / binaries (including multiple): close — stars: evolution

## 1. Introducción

Los sistemas binarios ultracompactos que emiten en rayos X (UCXBs, por sus siglas en inglés) son el resultado de la evolución de sistemas binarios en los que se han dado episodios de transferencia de masa. Son un caso particular de los sistemas binarios de baja masa con emisión en rayos X (LMXB, por sus siglas en inglés), en donde el período orbital alcanza un valor  $P \leq 1$  h, la luminosidad en rayos X,  $L_X \geq 10^{36}$  erg s<sup>-1</sup> y tienen su magnitud absoluta disminuida respecto a los LMXB, ya que la mayor parte del flujo en el óptico proviene de la emisión del disco de acreción y este es menor en los UCXBs (Nelemans & Jonker, 2010).

Se cree que en algunos sistemas binarios que constan de una estrella de neutrones (EN) y otra estrella donante normal en una órbita con período muy corto, la donante alcanza el estado de enana blanca (EB) de helio. Como consecuencia de la pérdida de momento angular por efecto de la radiación gravitatoria, la órbita se vuelve cada vez más cerrada y eventualmente la EB llena su lóbulo de Roche. En este estado el sistema sufre un proceso de transferencia de masa tardío, formando un UCXB. Los UCXBs resultan interesantes por diversos motivos (Lombardi et al., 2006):

- Dominan el brillo en rayos X duros de galaxias elípticas.
- Para entender la estructura y evolución estelar de objetos de baja masa degenerados y casi-degenerados.
- Están relacionados con la formación de púlsares reciclados (púlsares de milisegundos).
- Serían los progenitores de púlsares binarios con com-

pañeras de muy baja masa en cúmulos globulares.

- Son fuentes ideales para el *Laser Interferometer Space Antenna* (LISA).

Vale la pena mencionar que en la base de datos de púlsares ATNF\* es posible encontrar varios sistemas binarios que cuentan con períodos suficientemente cortos como para que evolucionen al estado de UCXB en una escala de tiempo menor que la edad del Universo.

## 2. Marco teórico

Los LMXBs son descritos por el modelo estándar (Podsiadlowski et al., 2002) como sistemas en los que la estrella donante pierde materia debido al desborde de su lóbulo de Roche. Una fracción de esta materia es acretaada por la EN que en este momento actúa como un emisor de rayos X. Büning & Ritter (2004) mostraron que es necesario considerar en los modelos esta irradiación, que al ser recibida por la estrella donante, hace que el proceso de transferencia de masa ocurra en forma de pulsos. De esa manera, modelos más realistas muestran que el sistema binario debería observarse como un LMXB durante el período de transferencia de masa y como un púlsar y un objeto que lo acompaña durante el siguiente período en que la transferencia cesa (Benvenuto et al., 2014). En este trabajo consideramos la irradiación con el objeto de aportar a la comprensión de su efecto sobre los sistemas que estudiamos. Por otra parte, consideramos el efecto de evaporación de la estrella donante debido al viento del púlsar. Este fenómeno produce una tasa extra de

\*<http://www.atnf.csiro.au>

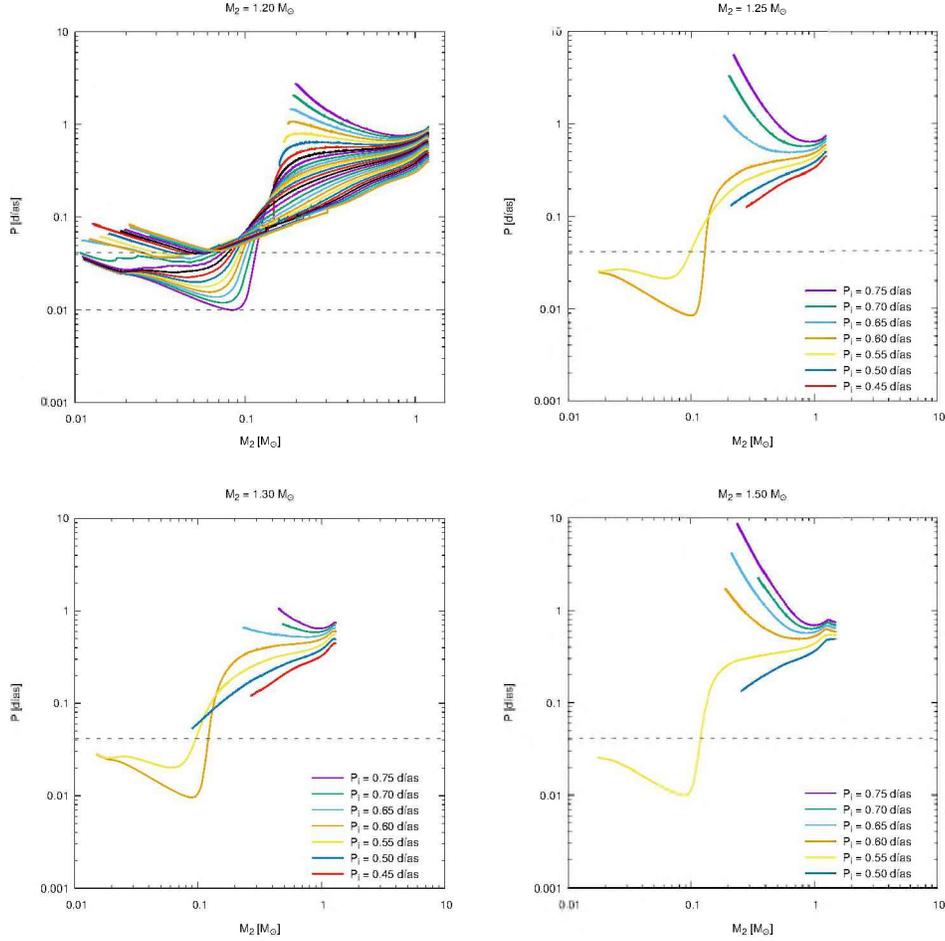


Figura 1: Relación masa de la estrella donante vs Período orbital para diferentes valores de la masa inicial de la estrella donante. Las líneas punteadas corresponden a  $P = 1$  h y a  $P = 14.4$  min.

pérdida de masa del sistema en estadios avanzados en que ambas estrellas se encuentran muy próximas entre sí. Como consecuencia, el período orbital del sistema es mayor y la masa de la estrella donante es más chica (en concordancia con las observaciones) que lo predicho por los modelos que no consideran este efecto.

### 3. Los cálculos

Utilizando nuestro programa de evolución binaria (Benvenuto & De Vito, 2003) calculamos una serie de recorridos evolutivos utilizando distintos valores para la masa inicial de la estrella donante ( $M_{2,i} = 1.20, 1.25, 1.30, 1.40$  y  $1.50 M_\odot$ ) y del período orbital inicial ( $P_i$ ). Para el caso de  $M_{2,i} = 1.20$  realizamos una exploración muy detallada variando  $P_i$  desde 0.42 hasta 0.94 d, con un paso de 0.02 d. Para  $M_{2,i} = 1.40$  y  $1.50 M_\odot$  utilizamos valores de  $P_i$  desde 0.50 hasta 0.75 d, con un paso de 0.05 d y para  $M_{2,i} = 1.25$  y  $1.30 M_\odot$  usamos  $P_i$  desde 0.45 hasta 0.75 d con un paso de 0.05 d. Encontramos que los sistemas que evolucionan a UCXB son:

- $M_{2,i} = 1.20 M_\odot$ ,  $P_i = 0.60, 0.62, 0.64, 0.66, 0.68, 0.70, 0.72, 0.74$ , y  $0.76$  d;

- $M_{2,i} = 1.25 M_\odot$ ,  $P_i = 0.55$ , y  $0.60$  d;
- $M_{2,i} = 1.30 M_\odot$ ,  $P_i = 0.55$ , y  $0.60$  d;
- $M_{2,i} = 1.40 M_\odot$ ,  $P_i = 0.55$  d;
- $M_{2,i} = 1.50 M_\odot$ ,  $P_i = 0.55$  d.

En la Fig. 1 se muestran los caminos evolutivos en el plano *masa de la estrella donante* ( $M_2$ ) vs. *período orbital del sistema* ( $P$ ). Cada gráfico corresponde a un valor distinto para  $M_{2,i}$ , como se indica en la parte superior. Las distintas curvas representan los recorridos correspondientes a diferentes valores de  $P_i$ . En el caso en que  $M_{2,i} = 1.20 M_\odot$ , se puede ver que en los sistemas convergentes la masa de la estrella donante alcanza valores extremadamente pequeños. En los casos de las configuraciones que alcanzan el estado de UCXB,  $M_2$  llega a ser entre  $\simeq 0.075$  y  $0.042 M_\odot$  en el momento en que se alcanza el mínimo valor de  $P$ .

Para los valores de  $M_{2,i} = 1.25, 1.30$  y  $1.50 M_\odot$ , todos los caminos evolutivos con  $P_i = 0.65, 0.70$  y  $0.75$  d divergen. Por otro lado, en los cuatro casos, los sistemas con  $P_i$  de  $0.55$  d terminan en configuraciones ultracompactas, llegando a tener un  $P$  mínimo de  $\simeq 0.01$  d (14.4 min) para el caso de  $M_{2,i} = 1.50 M_\odot$  y un  $P$  mínimo aún menor para  $1.25 M_\odot$  y  $1.30 M_\odot$ . La diferencia más notable entre estas tres Figuras es que para las dos

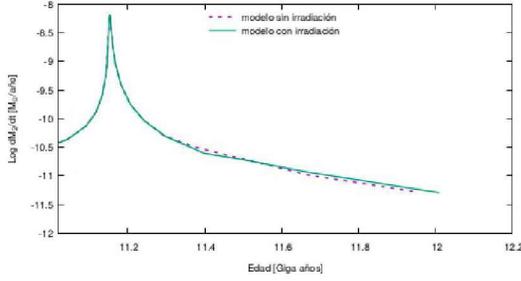


Figura 2: Variación de la tasa de transferencia de masa para los UCXBs con  $M_{2,i} = 1.20 M_{\odot}$  y  $P_i = 0.70$  días para el modelo irradiado y no irradiado.

masas iniciales menores, el valor de  $P = 0.60$  d conlleva a UCXB mientras que para  $M_{2,i} = 1.50 M_{\odot}$  el sistema se vuelve divergente.

Por otro lado, y debido a la complejidad numérica que implica considerar el efecto de irradiación, estudiamos este efecto solo sobre uno de los sistemas que evolucionaron a UCXB, el correspondiente a  $M_{2,i} = 1.20 M_{\odot}$  y  $P_i = 0.70$  d. El efecto fue considerado a partir de que el sistema alcanza  $P = 1$  h, ya que antes de esto la irradiación no cambia cualitativamente su evolución. En la Fig. 2 se grafica el *logaritmo de la tasa de transferencia de masa* en función de la *Edad* del sistema para dos sistemas con los parámetros iniciales mencionados, en que el uno de los dos está afectado por la irradiación y el otro no. Como puede verse, ambas curvas son iguales, por lo que podemos concluir que en este caso el efecto de irradiación no modifica de manera apreciable la transferencia de masa.

Sin embargo, este efecto produce un cambio en la temperatura de la estrella donante en el punto enfrentado a la EN, como puede verse en la Fig. 3. El aumento abrupto en la temperatura que sufre la estrella modelada teniendo en cuenta el efecto de irradiación ocurre en el mismo momento en que se produce el pico en el segundo episodio de transferencia de masa, por lo que evidentemente estos dos hechos están relacionados.

Además, comparamos nuestros resultados con datos observacionales de UCXBs listados en Heinke et al. (2013). Analizando los recorridos evolutivos de algunos de los sistemas con  $M_{2,i} = 1.20 M_{\odot}$  que evolucionan a UCXB en función de  $P$  (en el rango de 10 a 60 min) y del logaritmo de la tasa de transferencia de masa, se puede ver (Fig. 4) que cuando se superponen las curvas calculadas con las observaciones, estas se encuentran cerca de los recorridos computados.

## 4. Conclusiones

Hemos estudiado la formación de los UCXBs empleando el código de evolución binaria (Benvenuto & De Vito, 2003) y considerando además el efecto de evaporación. Realizando una exploración del período orbital inicial,  $P_i$ , y de la masa inicial de la estrella donante,  $M_{2,i}$ , hemos encontrado que nuestros modelos predicen que el rango de períodos iniciales para los que se alcanza la configuración que corresponde a los UCXBs es extremadamente delgado tal como fue hallado por otros autores

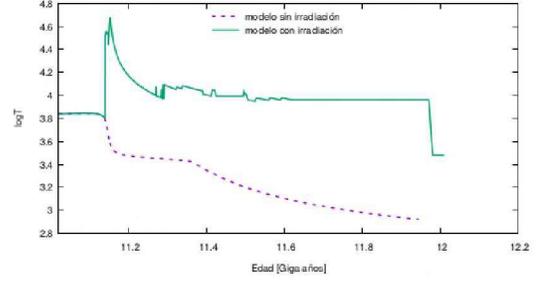


Figura 3: Edad vs Logaritmo de la temperatura efectiva de la estrella donante en el punto enfrentado a la EN para el UCXB con  $M_{2,i} = 1.20 M_{\odot}$  y  $P_i = 0.70$  d en el modelo irradiado y no irradiado.

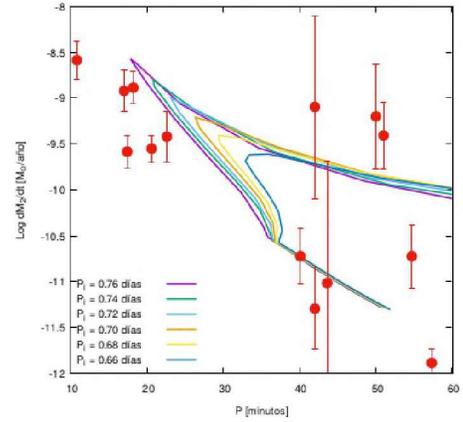


Figura 4: UCXBs con  $M_{2,i} = 1.20 M_{\odot}$  y  $P_i$  entre 0.76 y 0.66 d en el plano  $P$  vs Logaritmo de la transferencia de masa. Las observaciones y sus correspondientes errores están representados mediante puntos rojos y barras de error.

(Istrate et al., 2014). Esto puede ser interpretado como una muestra de que algún proceso importante ha sido omitido en los modelos. Planeamos en un futuro cercano estudiar la posibilidad de que el intervalo de períodos iniciales sea más amplio en el caso de considerar interacciones dinámicas con un tercer objeto que pasa cerca y perturba el sistema. Por otro lado, estudiamos el efecto de irradiación sobre uno de los sistemas que evolucionan a UCXB a partir de que alcanza  $P = 1$  h. No encontramos cambios apreciables en las fases de transferencia de masa aunque sí una gran diferencia en la temperatura de la estrella donante en el punto que está enfrentado a la estrella de neutrones.

## Referencias

- 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  
 Büning A., Ritter H., 2004, A&A, 423, 281  
 Heinke C.O., et al., 2013, ApJ, 768, 184  
 Istrate A.G., Tauris T.M., Langer N., 2014, A&A, 571, A45  
 Lombardi Jr. J.C., et al., 2006, ApJ, 640, 441  
 Nelemans G., Jonker P.G., 2010, NewAR, 54, 87  
 Podsiadlowski P., Rappaport S., Pfahl E.D., 2002, ApJ, 565, 1107