

Impacto de la fotoevaporación en la evolución de discos protoplanetarios en sistemas estelares binarios

A.E. Correa¹, M.P. Ronco^{2,3,4}, M.M. Miller Bertolami^{1,4} & O.M. Guilera^{1,4,3}

¹ Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina

² Instituto de Astrofísica, Pontificia Universidad Católica de Chile, Chile

³ Núcleo Milenio de Formación Planetaria, Chile

⁴ Instituto de Astrofísica de La Plata, CONICET-UNLP, Argentina

Contacto / correaea@fcaglp.unlp.edu.ar

Resumen / En este trabajo presentamos resultados preliminares sobre el impacto que tienen diferentes tasas de fotoevaporación de rayos X en la evolución de discos protoplanetarios en sistemas estelares binarios. Utilizando PlanetaLP-B, un código numérico que modela la estructura vertical, la acreción viscosa y fotoevaporación del disco en estos escenarios, determinamos las características de la evolución radial de estos discos y sus escalas de tiempo de disipación, las cuales dependen de las tasas de fotoevaporación consideradas.

Abstract / In this work we present preliminary results on the impact of different X-ray photoevaporation rates on the evolution of protoplanetary disks in binary systems. Using PlanetaLP-B, a numerical code that computes the vertical structure, viscous accretion and photoevaporation of the disk in these environments, we determine the characteristics of the radial evolution of these disks and their dissipation timescales, which depend on of the photoevaporation rates considered.

Keywords / protoplanetary disks — binaries: close — methods: numerical

1. Introducción

El proceso de formación planetaria es un fenómeno común en estrellas de tipo solar (Drazkowska et al., 2022). Por otro lado, el $\sim 50\%$ de estas estrellas forma parte de sistemas estelares binarios (Raghavan et al., 2010). En la actualidad, más de 215 exoplanetas confirmados forman parte de sistemas estelares binarios (Schwarz et al., 2016) y se espera que este número se incremente significativamente a partir de futuros descubrimientos con TESS y PLATO (Sullivan et al., 2015; Rauer et al., 2016).

Los planetas nacen en los discos protoplanetarios que se forman como sub-producto del proceso de formación estelar (ver detalles en Venturini et al., 2020). Las escalas de tiempo de disipación de estos discos, que en sistemas estelares simples varía de 1 a 10 Ma, con una media en ~ 3 Ma (Fedele et al., 2010; Pfalzner et al., 2014), imponen una cota temporal superior para la formación de planetas gigantes gaseosos. Sin embargo, las edades de discos orbitando a una de las componentes de un sistema estelar binario pueden ser significativamente diferentes debido principalmente a los torques generados por el par binario sobre el disco de gas, capaces de truncarlo y de acelerar su disipación (Papaloizou & Pringle, 1977; Artymowicz & Lubow, 1994; Rosotti & Clarke, 2018). Varios surveys de discos (Cieza et al., 2009; Kraus et al., 2012; Zurlo et al., 2021) efectivamente reportan que la fracción de estos objetos en sistemas binarios cercanos (con separaciones menores a las 40 ua) es menor que alrededor de estrellas simples o binarias separadas.

En este trabajo presentamos resultados preliminares

sobre el estudio del impacto de diferentes tasas de fotoevaporación de rayos X en la evolución temporal de los perfiles radiales de las densidades superficiales y de sus escalas de tiempo de disipación.

2. Evolución del disco de gas

Para computar la evolución de un disco de gas que orbita alrededor de una de las componentes de un sistema estelar binario, utilizamos PlanetaLP-B (Ronco et al., 2021, R21 de ahora en adelante). Este código computa, en primera instancia, la estructura vertical del disco protoplanetario resolviendo las ecuaciones de transporte y estructura, las cuales tienen en cuenta la contribución térmica que genera el sistema binario sobre el mismo (ver la Sec. 2.1 en (R21).) Una vez determinadas las variables termodinámicas en el plano medio del disco, se computa la evolución temporal de la densidad superficial de gas, considerando que evoluciona por acreción viscosa y fotoevaporación. Se resuelve numéricamente una ecuación de difusión, a la cual sumamos la interacción gravitatoria con la compañera estelar (ver eq. 11 en R21). Los discos protoplanetarios en sistemas estelares binarios se encuentran truncados debido al torque producido por la estrella compañera. La distancia a la que ocurre este truncamiento se conoce como radio de truncamiento R_t . Rosotti & Clarke (2018) muestra en su Fig.1 un ajuste a la relación R_t/a dependiendo del cociente de masas $q = \frac{M_2}{M_1}$; que, para valores de $q = 1$ vale aproximadamente $1/3$. El proceso de fotoevaporación producido por la estrella central, actúa como un sumide-

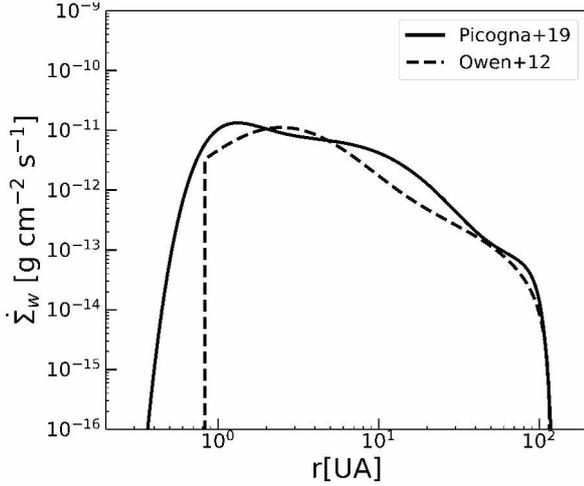


Figura 1: Comparación entre las tasas de fotoevaporación analíticas derivadas por O12 y P19 para una estrella central de $1M_{\odot}$ y $L_X \sim 2.3 \times 10^{30} \text{ erg s}^{-1}$.

ro en la ecuación de difusión. Despreciamos los posibles efectos de fotoevaporación sobre el disco por parte de la estrella compañera. Si bien es posible que este efecto juegue algún rol en sistemas estelares cercanos con estrellas de similar masa, no es posible cuantificarlo actualmente ya que no existen trabajos que lo modelen. Es sin embargo esperable que el impacto, respecto a la fotoevaporación generada por la estrella central, sea secundario para binarias separadas ($\gtrsim 80$ ua) con razón de masas alta (Rosotti & Clarke, 2018).

2.1. Fotoevaporación por rayos X

La fotoevaporación es un mecanismo que, junto con la acreción viscosa, juega un rol fundamental en la disipación de los discos. Trabajos previos mostraron que en estrellas de baja masa ($M_{\star} < 2.5M_{\odot}$) predomina la fotoevaporación por rayos X frente a la fotoevaporación EUV o FUV (Kunitomo et al., 2021). En este trabajo computamos la fotoevaporación por rayos X adoptando prescripciones analíticas derivadas por Owen et al. (2012) y por Picogna et al. (2019) (O12 y P19 respectivamente, de ahora en más) a partir de resultados de simulaciones hidrodinámicas. Estas últimas, obtenidas a partir de un modelado más detallado de la pérdida de masa por fotoevaporación en las regiones externas de los discos (ver P19), reproducen mejor las cavidades observadas en discos de transición y las tasas de acreción de estos objetos.

En la figura 1 mostramos el comportamiento de ambas prescripciones analíticas para la tasa de fotoevaporación utilizadas en nuestro modelo, en función del radio orbital r , para una estrella de $1M_{\odot}$ y luminosidad de rayos X de $\sim 2.3 \times 10^{30} \text{ erg s}^{-1}$ obtenida a partir de Preibisch et al. (2005) (similar a la gráfica 5 de P19). En las regiones más externas del disco de gas, por detrás de las 5 ua, las tasas propuestas por P19 son más eficientes que las propuestas por O12.

Tabla 1: Separaciones del sistema estelar elegidas (a), radios de truncamientos asociados (R_t), y escalas de tiempo de disipación computadas usando O12 ($t_{\text{dis,O}}$) y P19 ($t_{\text{dis,P}}$).

R_t [ua]	a [ua]	$t_{\text{dis,O}}$ [Ma]	$t_{\text{dis,P}}$ [Ma]
140	424.2	3.9	2.8
30	90.0	2.2	2.1
25	75.75	1.88	1.9
20	60.6	1.4	1.6
13	39.4	1.1	1.5
5	15.15	0.4	0.7

3. Resultados

Realizamos nuestras simulaciones considerando un disco de masa $M_d = 0.1M_{\odot}$; masas de las componentes del sistema binario $M_1 = M_2 = 1M_{\odot}$; un valor para el parámetro de la viscosidad $\alpha = 0.001$. En la Tabla 1 se muestran las separaciones estelares consideradas y los radios de truncamiento asociados, teniendo en cuenta que en nuestro caso $q = M_2/M_1 = 1$. Algunas de estas separaciones elegidas generan radios de truncamiento similares a los considerados por Rosotti & Clarke (2018).

En la figura 2 mostramos los perfiles de densidad de gas que se obtuvieron utilizando ambas prescripciones para las tasas de fotoevaporación de RX. En los discos más extendidos (izquierda) observamos la presencia de una brecha, aunque la posición de éstas difiere según las tasas de fotoevaporación utilizadas. Debido a que las tasas de P19 son más eficientes en las regiones externas, estos discos poseen brechas más alejadas de la estrella central y disipan más rápido en comparación a las prescripciones de O12. En discos más compactos, con $R_t = 13$ y 5 ua (centro y derecha), no se forman brechas (en acuerdo con Rosotti & Clarke (2018)), y, como puede apreciarse en la Tabla 1, la tendencia en los tiempos de disipación se invierte. Es decir, los discos computados con O12 disipan más rápido que los computados con P19. Particularmente, en la figura 3 mostramos que este cambio en la tendencia ocurre para discos con $R_t \lesssim 25$ ua.

4. Conclusiones

Comparamos la evolución de discos protoplanetarios en sistemas estelares binarios bajo las prescripciones de fotoevaporación de RX derivadas por O12 y P19, siendo las últimas más representativas de la población observada de discos de transición en sistemas estelares simples. Encontramos que discos con extensiones mayores a ~ 25 ua, disipan más rápido con las tasas de P19, mientras que discos más compactos invierten esta tendencia. Si bien las diferencias encontradas en las escalas de tiempo de disipación para este último caso son pequeñas, podrían favorecer a la formación de planetas gigantes gaseosos.

Cabe mencionar que una limitación de nuestro modelo es que no considera fotoevaporación del disco por parte de la estrella compañera, lo que podría modificar los resultados hallados para sistemas estelares con

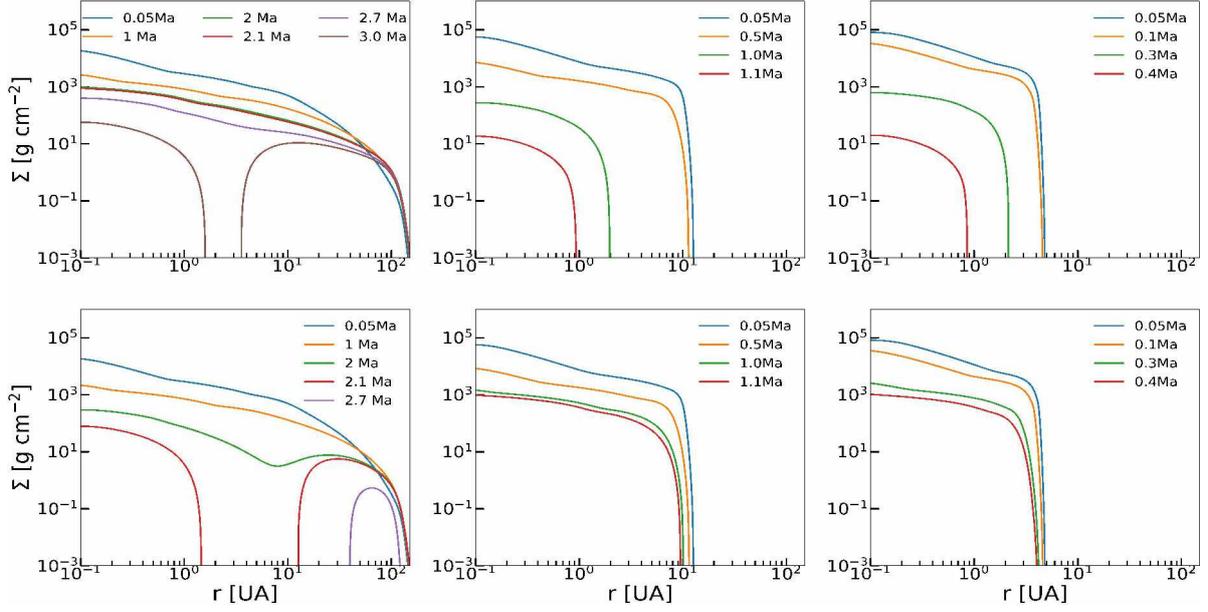


Figura 2: Perfiles de densidad superficial de gas para discos truncados a $R_t \sim 140$ ua (izquierda), $R_t \sim 13$ ua (centro) $R_t \sim 5$ ua (derecha), similar a Rosotti & Clarke (2018). La fila superior muestra resultados considerando las tasas de fotoevaporación de O12 mientras que la inferior, las de P19.

separaciones menores a las 80 ua. Sin embargo, dada la falta de modelos 3D que estudien este fenómeno, no es posible por el momento especular sobre cómo y en qué dirección podrían cambiar nuestros resultados. Por otro lado, otra limitación de nuestro modelo, inherente a su naturaleza axisimétrica, es la de considerar siempre órbitas circulares y coplanares para el disco y el sistema estelar. En la naturaleza, las configuraciones orbitales son en general más complejas, y una órbita excéntrica para la compañera estelar, por ejemplo, podría alterar nuestros resultados.

En futuros trabajos exploraremos estas limitaciones y además haremos un estudio más detallado de nuestros resultados considerando diferentes separaciones y relaciones de masas estelares y parámetros de viscosidad del disco.

Agradecimientos: MPR agradece a FONDECYT Proyecto 3190336. MPR y OMG agradecen soporte de ANID, Iniciativa Científica del Programa Milenio NCN19.171. OMG es parcialmente financiado por el PICT 2018-0934 de ANPCyT, Argentina. OMG y M3B son parcialmente financiados por el PICT 2016-0053 de ANPCyT, Argentina.

Referencias

Artymowicz P., Lubow S.H., 1994, ApJ, 421, 651
 Cieza L.A., et al., 2009, ApJL, 696, L84
 Drazkowska J., et al., 2022, arXiv e-prints, arXiv:2203.09759
 Fedele D., et al., 2010, A&A, 510, A72
 Kraus A.L., et al., 2012, ApJ, 745, 19
 Kunitomo M., et al., 2021, ApJ, 909, 109
 Owen J.E., Clarke C.J., Ercolano B., 2012, MNRAS, 422, 1880
 Papaloizou J., Pringle J.E., 1977, MNRAS, 181, 441

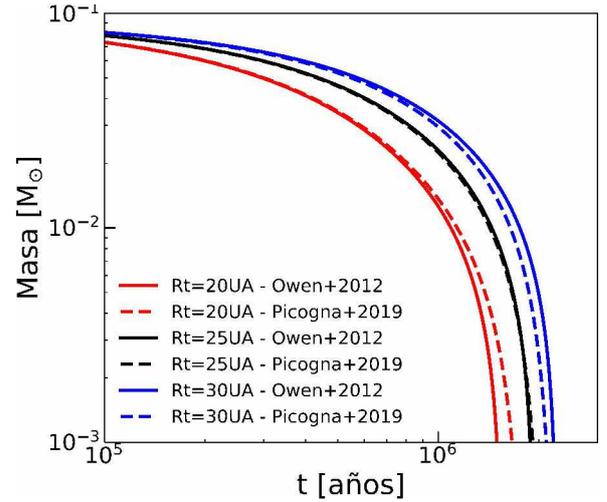


Figura 3: Evolución temporal de la masa de discos de gas con radios de truncamiento de 20, 25 y 30 ua.

Pfalzner S., Steinhausen M., Menten K., 2014, ApJL, 793, L34
 Picogna G., et al., 2019, MNRAS, 487, 691
 Preibisch T., et al., 2005, ApJS, 160, 401
 Raghavan D., et al., 2010, ApJS, 190, 1
 Rauer H., et al., 2016, Astron. Nachr., 337, 961
 Ronco M.P., et al., 2021, ApJ, 916, 113
 Rosotti G.P., Clarke C.J., 2018, MNRAS, 473, 5630
 Schwarz R., et al., 2016, MNRAS, 460, 3598
 Sullivan P.W., et al., 2015, ApJ, 809, 77
 Venturini J., Ronco M.P., Guilera O.M., 2020, SSRv, 216, 86
 Zurlo A., et al., 2021, MNRAS, 501, 2305