



Síntesis poblacional de discos protoplanetarios

J.L. Gomez¹, O.M. Guilera², M.M. Miller Bertolami² & M.P. Ronco²

¹ *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas, UNLP, Argentina*

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

Contacto / josepluis21@gmail.com

Resumen / Presentamos una exploración preliminar del impacto de las condiciones iniciales de nuestro modelo global de formación planetaria en las propiedades observables de los discos protoplanetarios. Para esto se implementaron diferentes módulos numéricos para calcular los parámetros iniciales del modelo, como masas y tamaños de los discos, a partir de distribuciones estadísticas inferidas observacionalmente. En particular, utilizando una síntesis poblacional que compute la evolución de los discos protoplanetarios por acreción viscosa y fotoevaporación de rayos X, exploramos que parámetros y distribuciones iniciales son capaces de reproducir la fracción de estrellas con discos protoplanetarios observadas en poblaciones estelares de diferentes edades.

Abstract / We present a preliminary exploration of the impact of the initial conditions in our global model of planet formation on the observable properties of protoplanetary disks. We implemented different numerical modules to calculate the initial parameters of the model, such as masses and sizes of the disks, from statistical distributions inferred observationally. In particular, using a population synthesis that computes the evolution of protoplanetary disks by viscous accretion and X-ray photoevaporation, we explore which initial parameters and distributions are capable of reproducing the fraction of stars with protoplanetary disks observed in stellar populations of different ages.

Keywords / protoplanetary disks — population synthesis : close — methods: numerical

1. Introducción

La duración de los discos protoplanetarios es una escala de tiempo fundamental para la formación de los planetas gigantes gaseosos, los cuales tienen que alcanzar núcleos masivos de varias veces la masa terrestre para poder acretar el gas del disco antes de su disipación. Durante este intervalo de tiempo la interacción planeta-disco da lugar a la migración planetaria, por lo cual el tiempo de vida de los discos juega también un rol central en el proceso de migración planetaria (ver los resúmenes recientes sobre formación planetaria de Venturini et al., 2020; Drazkowska et al., 2022, y las referencias allí mencionadas). Las escalas de los tiempos de disipación típicas para estos discos protoplanetarios se extienden entre 1 y 10 millones de años (Ma), con un valor medio de ~ 3 Ma (e.g. Mamajek, 2009). Sin embargo, estos tiempos de disipación dependen fuertemente de las tasas de pérdida de masa. Estas tasas de pérdida de masa de los discos son producidas principalmente por la acreción viscosa hacia la estrella central y la fotoevaporación del gas del disco por parte de la estrella y dependerán tanto de las características del disco protoplanetario, de las características de la estrella y del entorno en el que se produce la formación (Coleman & Haworth).

El objetivo de este trabajo es identificar las combinaciones de parámetros libres de nuestro modelo capaces de reproducir las principales características de las muestras observadas de discos protoplanetarios. En particular presentamos los resultados obtenidos de analizar el impacto de los diferentes parámetros que definen los discos y su evolución, en los tiempos de disipación de

los mismos a fin de reproducir el diagrama fracción de discos–edad de los cúmulos jóvenes observados.

2. Modelo numérico

Calculamos la evolución de la componente gaseosa de un disco circumestelar alrededor de una estrella central utilizando el modelo implementado en PLANETALP (e.g. Ronco et al., 2017; Guilera et al., 2017). PLANETALP modela la formación y evolución de un sistema planetario inmerso en un disco protoplanetario que evoluciona en el tiempo. En este trabajo nos centramos en resolver la evolución temporal de la componente gaseosa de los discos alrededor de estrellas de una masa solar. El disco evoluciona en el tiempo por acreción viscosa y fotoevaporación de rayos X debido a la estrella central. El modelo considera un disco axisimétrico, usualmente llamado modelo de disco 1D+1D, en donde una dimensión representa la coordenada radial y la otra dimensión corresponde a la coordenada vertical. El código primero resuelve la estructura vertical del disco resolviendo las ecuaciones de equilibrio hidrostático, la ecuación de transporte y la ecuación de conservación de energía considerando el calentamiento del disco por viscosidad y la radiación de estrella central. Resuelta la estructura vertical, se obtienen las variables termodinámicas y la densidad superficial de gas en el plano medio del disco. Finalmente la densidad superficial de gas evoluciona por acreción viscosa y fotoevaporación.

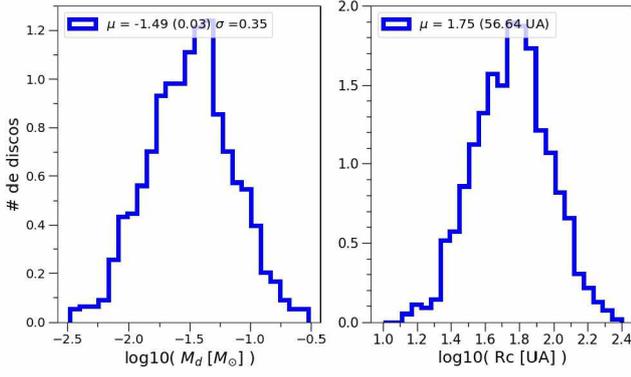


Figura 1: *Panel izquierdo*: histograma de las de masas iniciales consideradas para los discos protoplanetarios utilizando la distribución derivada por Tychoniec L., et al., 2018, The Astrophysical Journal Supplement Series, 238, 19 (T2018), una distribución normal logarítmica de media $\mu = -1.49$ y dispersión $\sigma = 0.35$. *Panel derecho*: distribución de radios característicos obtenidos para los discos protoplanetarios utilizando la relación con la masa dada por Andrews et al. (2010), una distribución normal logarítmica de media $\mu = 1.75$ (56.64 au).

2.1. Densidad superficial inicial

La densidad superficial inicial está elegida en acuerdo con las densidades superficiales inferidas por (Andrews et al., 2010) de las observaciones de discos protoplanetarios.

El perfil radial de la densidad superficial de gas está dado por

$$\Sigma_{gas} = \Sigma_{gas}^0 \left(\frac{r}{r_c} \right)^{-\gamma} e^{-(r/r_c)^{2-\gamma}}, \quad (1)$$

en donde Σ_g^0 es una constante de normalización que depende de la masa inicial del disco, r_c es el radio característico y γ es el gradiente de la densidad superficial.

2.2. Evolución temporal: acreción viscosa y fotoevaporación

La densidad superficial de gas, Σ_g , evoluciona por acreción viscosa y fotoevaporación, siguiendo una ecuación de difusión con un sumidero correspondiente a la fotoevaporación ($\dot{\Sigma}_W$) debida a la estrella central (Pringle, 1981; Guilera et al., 2017, e.g)

$$\frac{\partial \Sigma_g}{\partial t} = \frac{3}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r^{1/2} \frac{\partial}{\partial r} \left(\nu \Sigma_g r^{1/2} \right) \right] + \dot{\Sigma}_W(r), \quad (2)$$

en donde ν es la viscosidad parametrizada con el parámetro adimensional α (Shakura & Sunyaev, 1973). La pérdida de masa por fotoevaporación ocurre debido a que la radiación emitida por la estrella central es capaz de ionizar la superficie del disco, principalmente debido a la radiación ultravioleta lejana (FUV), radiación ultravioleta extrema (EUV) y de rayos X (RX). Sin embargo, Kunitomo et al. (2021) mostraron que en discos alrededor de estrellas con masas $M_* \lesssim 2.5 M_\odot$ domina la fotoevaporación debido a la radiación por RX. Por este motivo, nuestro modelo implementa las prescripciones

para la tasa de pérdida de masa por fotoevaporación de RX derivadas por Owen et al. (2010). La luminosidad en RX sigue la prescripción obtenida por Bae et al. (2013).

2.3. Condiciones iniciales

Las condiciones iniciales que definen un sistema estrella-disco son: la masa de la estrella central, la masa inicial del disco, el radio característico del disco, el parámetro α asociado a la viscosidad y el gradiente de la densidad superficial γ , definido en la Ec. (1).

Para el cómputo de nuestra síntesis poblacional consideramos la masa de la estrella central siempre igual a $1 M_\odot$. El parámetro α asociado a la viscosidad toma valores discretos de $\alpha = 10^{-4}$, 10^{-3} y 10^{-2} . Para el gradiente de densidad superficial consideramos $\gamma = 0.9$, el cual es el valor medio derivado por Andrews et al. (2010).

La masa inicial del disco es considerada como un parámetro libre que sigue una distribución estadística. En la literatura existen varias distribuciones de masa de discos, derivadas de diferentes cúmulos estelares jóvenes, las cuales tienen una diferencia en el valor medio de hasta un orden de magnitud. En este trabajo, utilizamos la distribución aleatoria de masa inferida para las protoestrellas ubicadas en Perseo por Tychoniec et al. (2018, T2018), la cual se muestra en el panel izquierdo de la Figura 1, la cual consideramos representa apropiadamente una población de discos en etapas tempranas (clases 0/I). Para estudiar como la distribución de masas de los discos impacta en la duración de los discos protoplanetarios, realizamos simulaciones adicionales modificando esta distribución incrementando y disminuyendo el valor de la media y la varianza por un factor 2.

Finalmente, a partir del trabajo de Emsenhuber et al. (2021) usamos la relación entre la masa inicial del disco M_d y el radio característico por (la cual está basada en las observaciones de Andrews et al., 2010)

$$\frac{M_d}{2 \times 10^{-3}} = \left(\frac{r_c}{10 \text{ ua}} \right). \quad (3)$$

La distribución de r_c obtenida vía la Eq. (3) se muestra en el panel derecho de la Fig. 1.

3. Resultados

Para cada elección de los valores de los parámetros iniciales y para cada elección de la distribución estadística de las masas iniciales, realizamos una

síntesis poblacional en donde calculamos la evolución de 1000 discos y computamos la fracción de estrellas con discos en función del tiempo.

Nos enfocamos en estudiar la dependencia del tiempo de disipación de los discos con la masa de los discos y la viscosidad de los mismos.

3.1. Dependencia con la viscosidad

En el panel izquierdo de la Fig. 2 analizamos el impacto de diferentes valores de α (10^{-4} , 10^{-3} , y 10^{-2}) en los tiempos de disipación de los discos. Para el caso de

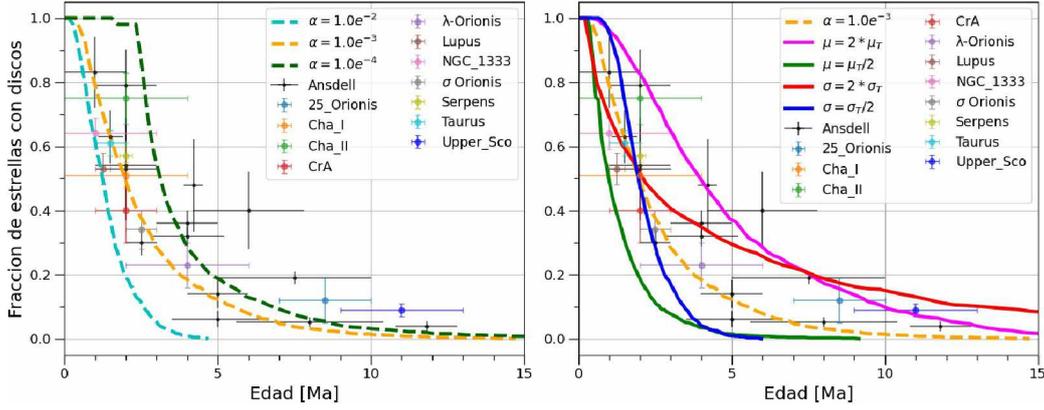


Figura 2: *Panel izquierdo*: fracción de estrellas con discos en función de su edad. Las líneas discontinuas (verde, amarilla y cian) representan los resultados de nuestra síntesis para diferentes valores de α . *Panel derecho*: fracción de estrellas con discos en función de la edad de las mismas considerando diferentes distribuciones de masas iniciales. La línea a trazo amarilla es obtenida de nuestra síntesis poblacional a partir de la distribución de masa de T2018. Las líneas continuas corresponden a las distribuciones de masa para los discos obtenidas modificando la media y la dispersión de la distribución de T2018. En ambos paneles, las cruces de color negro corresponden a las observaciones obtenidas por Ansdell (2017), mientras que los puntos de color corresponden a las observaciones reducidas por (Ribas et al., 2015).

una viscosidad alta ($\alpha = 10^{-2}$) no encontramos estrellas con discos con edades > 5 Ma. Para viscosidades bajas ($\alpha = 10^{-4}$) obtenemos estrellas con discos con edades > 15 Ma. En ambos casos, los resultados de nuestra síntesis no reproducen correctamente las observaciones (líneas cian y verdes a trazos). La fuerte dependencia entre los tiempos de disipación de los discos y la viscosidad se debe a que a mayor viscosidad mayor es la tasa de acreción del gas del disco por la estrella central. Por último, para el valor de viscosidad intermedio ($\alpha = 10^{-3}$) logramos reproducir los datos observacionales hasta ~ 3 Ma. A partir de esta edad nuestra síntesis subestima la fracción de estrellas con discos.

3.2. Dependencia con la masa inicial de los discos

Para estudiar el impacto de la distribución de masa inicial de los discos en la síntesis poblacional consideramos dos variaciones respecto a la distribución de masa de T2018, tanto respecto a la media ($\mu_1 = 2\mu$, $\mu_2 = \mu/2$) como a la varianza ($\sigma_1 = 2\sigma$, $\sigma_2 = \sigma/2$). En el panel derecho de la Fig. 2 mostramos el efecto de estas variaciones en la distribución de masa de T2018. Podemos ver que las observaciones de la fracción de estrellas con discos en función de las edades de los cúmulos son mejor representadas a partir de una distribución con una varianza del doble respecto a la de T2018.

4. Conclusiones

En este trabajo presentamos resultados preliminares de estudiar el impacto de las condiciones iniciales en los tiempos de disipación de los discos protoplanetarios y

comparamos nuestros resultados con las observaciones de la fracción de estrellas con discos en función de las edades de los cúmulos. Encontramos que tanto la viscosidad como la distribución de masa inicial de los discos protoplanetarios son los parámetros que más afectan a la evolución de los discos y por ende a la síntesis poblacional. Dentro del rango de viscosidades y distribuciones de masa obtenidos de la literatura, nuestros modelos son capaces de reproducir las observaciones para viscosidades moderadas ($\alpha = 10^{-3}$) y una distribución de masa con una varianza un factor 2 mayor a la correspondiente a la distribución de masa inferida por T2018.

Referencias

- Andrews S.M., et al., 2010, ApJ, 723, 1241
 Ansdell M.C., 2017, *Protoplanetary disk demographics with ALMA*, Ph.D. thesis, University of Hawaii, Manoa
 Bae J., et al., 2013, ApJ, 774, 57
 Coleman G.A., Haworth T.J., , MNRAS
 Drazkowska J., et al., 2022, arXiv preprint arXiv:2203.09759
 Emsenhuber A., et al., 2021, 656, A70
 Guilera O.M., Miller Bertolami M.M., Ronco M.P., 2017, MNRAS, 471, L16
 Kunitomo M., et al., 2021, ApJ, 909, 109
 Mamajek E.E., 2009, AIP Conference Proceedings, 1158, 3
 Owen J.E., et al., 2010, MNRAS, 401, 1415
 Pringle J.E., 1981, ARA&A, 19, 137
 Ribas Á., Bouy H., Merín B., 2015, A&A, 576, A52
 Ronco M.P., Guilera O.M., de Elía G.C., 2017, MNRAS, 471, 2753
 Shakura N.I., Sunyaev R.A., 1973, A&A, 24, 337
 Tychoniec L., et al., 2018, ApJS, 238, 19
 Venturini J., Ronco M.P., Guilera O.M., 2020, SSRv, 216, 86