

Simplificación numérica del modelo de fragmentación de planetesimales

Irina L. San Sebastián
Octavio M. Guilera
Marcelo M. Miller Bertolami



Contacto: irina@fcaglp.unlp.edu.ar / jirsaixa@gmail.com

Motivación y objetivos

- El modelado de las colisiones y fragmentación de planetesimales es clave para reproducir correctamente la formación y evolución planetaria.
- En el marco de los modelos globales de formación planetaria, el modelado detallado del proceso de fragmentación de planetesimales es extremadamente costoso desde un punto de vista computacional.
- Nuestro objetivo es incorporar al modelo de formación de un planeta gigante una aproximación del modelo detallado de fragmentación de planetesimales (Guilera et al. 2014, San Sebastián et al. 2019), que simplifique el fenómeno numéricamente y, por lo tanto, reduzca significativamente el tiempo de cómputo en nuestras simulaciones.

Modelo de Fragmentación

- Nuestro modelo detallado de fragmentación de planetesimales, basado en el código Boulder (Morbidelli et al., 2009), calcula la evolución colisional de los planetesimales que se encuentran a 8 radios de Hill a cada lado del protoplaneta.

Aproximaciones del modelo detallado de fragmentación

Aproximación local de las colisiones: Calculamos las colisiones entre los planetesimales de un mismo bin de distancia (Gerbig et al. 2019, Ormel & Kobayashi 2012).

Modelado de la variación de las densidades superficiales: Calculamos el modelo detallado para los blancos en la posición del protoplaneta y adoptamos la función de modulación que reproduce las excitaciones gravitatorias del protoplaneta sobre los planetesimales (Guilera et al. 2014),

$$f(R - R_P) = \left(\frac{1}{1 + \left| \frac{(R - R_P)}{var R_H} \right|^{exp}} \right)$$

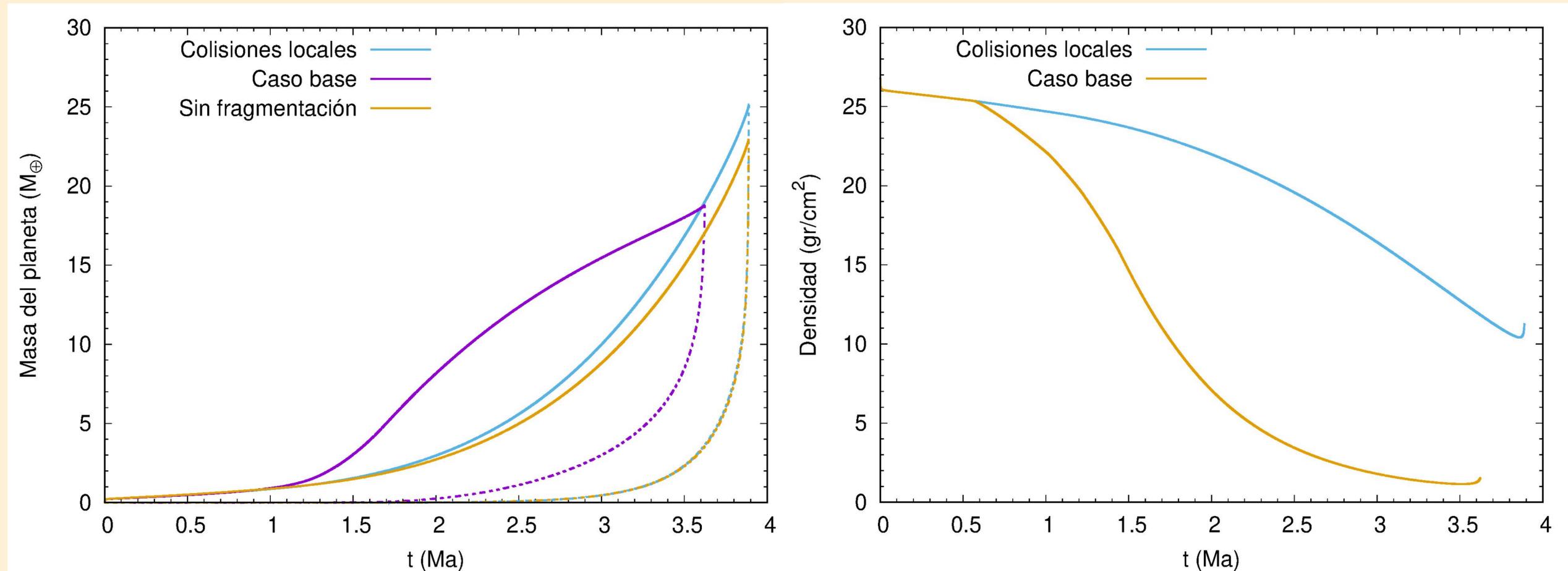
- R es la distancia al protoplaneta
- Rp y Rh la posición y radio de Hill del protoplaneta
- $var = 2.85$ y $exp = 10$

variando los valores de var y exp , para modelar las variaciones en las densidades superficiales de los diferentes tamaños de planetesimales para toda la zona de fragmentación.

Interpolación de la variación de las densidades superficiales: Calculamos la fragmentación detallada en ciertas ubicaciones de la zona de fragmentación y luego interpolando los resultados de la variación de las densidades superficiales de los diferentes tamaños de planetesimales para toda la zona de fragmentación.

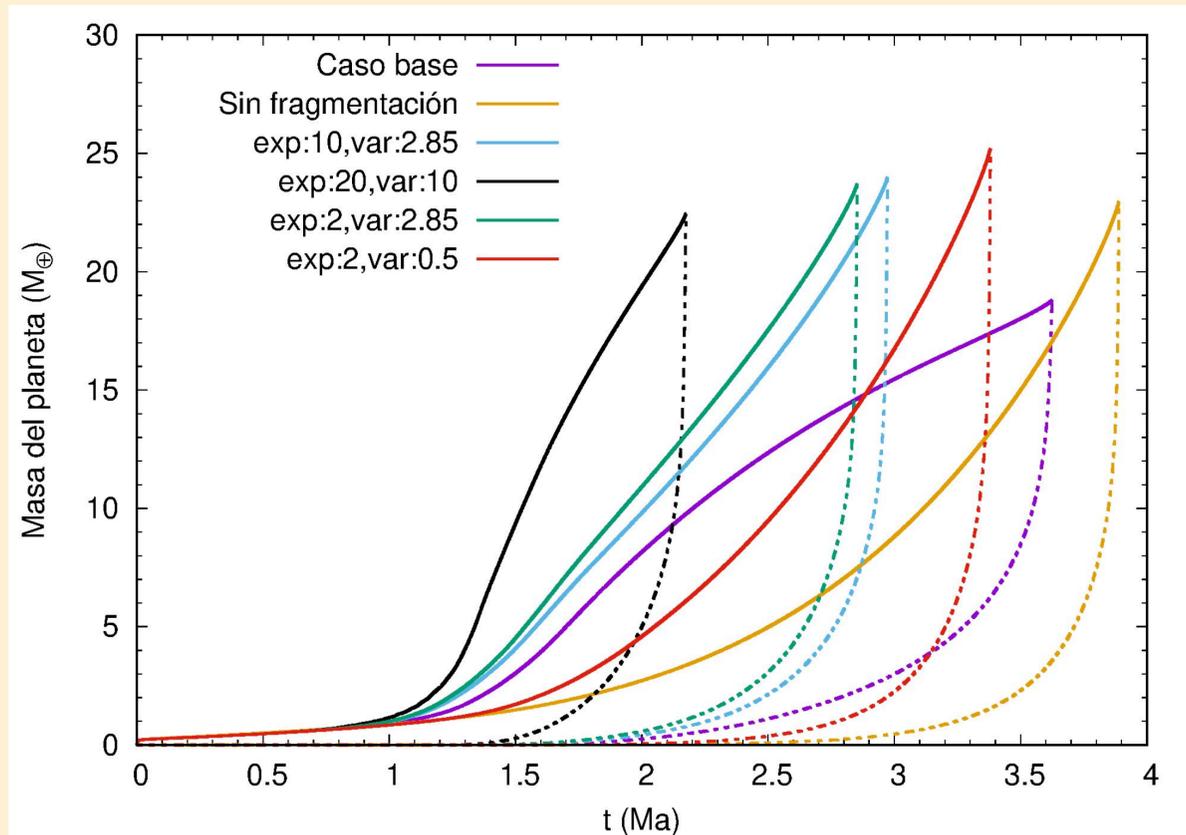
Resultados

Colisiones Locales



- El crecimiento del protoplaneta se comporta como el caso sin fragmentación.
- La densidad superficial de planetesimales de 100km se encuentra por encima del caso base.

Resultados

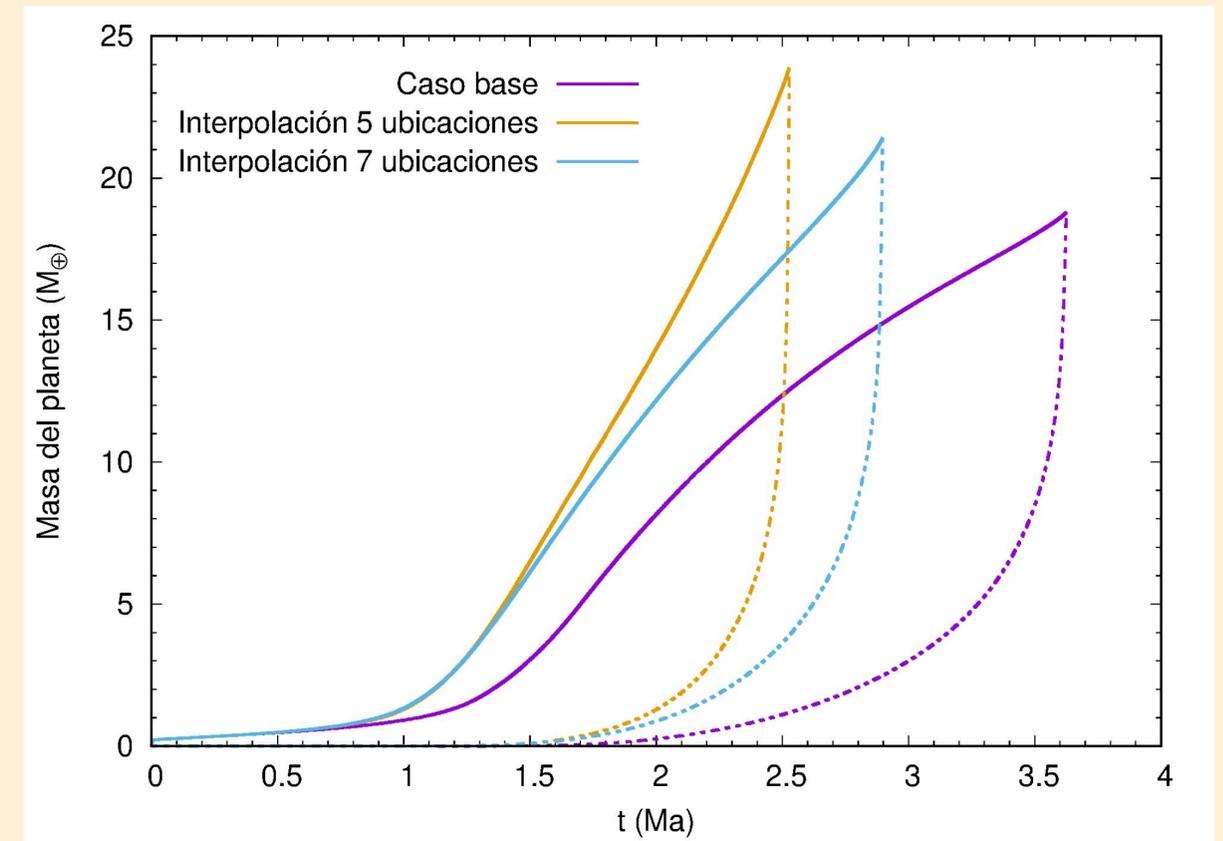


Modelado de la variación de las densidades superficiales:

Para algunas combinaciones de parámetros, el comportamiento del crecimiento del protoplaneta es similar al del caso base pero solo por los primeros Ma.

Interpolación de la variación de las densidades superficiales:

En el caso de la interpolación de 7 ubicaciones de la zona de fragmentación, el crecimiento del protoplaneta se comporta de la misma forma que el caso base, con una diferencia menor al 20% en el tiempo al que llega a la masa de cruce y de ~15% mayor en la masa del núcleo.



Conclusiones y trabajo a futuro

- En todos los casos logramos reducir el tiempo de cómputo de las simulaciones de tres semanas/ un mes al orden de horas.
- Observamos que la mejor aproximación al modelo detallado de fragmentación es la interpolación ya que mantiene el comportamiento del crecimiento del planeta gigante y este alcanza una masa de cruce comparable a la del caso base.
- El objetivo a futuro es realizar un estudio de síntesis poblacional incorporando esta aproximación del modelo de fragmentación de planetesimales en PLANETALP (Ronco et al. 2017), nuestro modelo global de formación planetaria, para estudiar cómo este fenómeno afecta la formación de los sistemas planetarios.

Introducción

Uno de los desafíos de los modelos de formación planetaria es, incorporando los principales fenómenos físicos presentes en dicho proceso, poder explicar las arquitecturas de los diversos sistemas planetarios que hay observados hasta la actualidad. El modelado de las colisiones y fragmentación de planetesimales es clave para reproducir correctamente la formación y evolución planetaria. Sin embargo, en el marco de los modelos globales de formación planetaria, el modelado detallado de estos procesos es extremadamente costoso desde un punto de vista computacional. En este trabajo estudiamos y comparamos diferentes aproximaciones de nuestro modelo detallado de fragmentación de planetesimales (Guilera et al. 2014, San Sebastián et al. 2019), aplicado a la formación de un planeta gigante, que simplifican el fenómeno numéricamente y, por lo tanto, reducen significativamente el tiempo de cómputo en nuestras simulaciones.

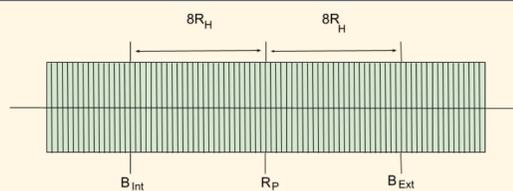
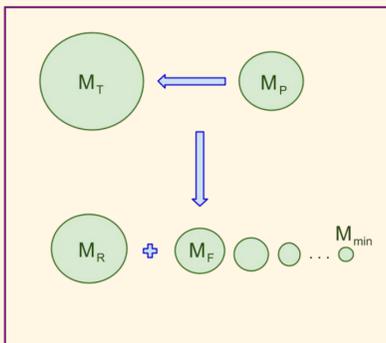


Figura 1: Esquema de la zona de fragmentación para un planeta aislado. R_p es la posición del planeta, B_{int} y B_{ext} son los bordes interno y externo, respectivamente, a 8 Radios de Hill a ambos lados del planeta.

Modelo de fragmentación

Nuestro modelo detallado de fragmentación calcula la evolución colisional de los planetesimales que se encuentran a 8 radios de Hill a cada lado del protoplaneta (Figuras 1 y 2).

Figura 2: Esquema de la colisión entre un planetesimal de masa M_T y uno de masa M_P . La colisión da como resultado un remanente de masa M_R y el resto de la masa se distribuye entre el fragmento más grande de masa M_F y el tamaño mínimo de masa M_{min} .



Comparamos los resultados de diferentes aproximaciones con el caso base que es el que calcula la fragmentación de manera detallada. Inicialmente, en todas las simulaciones, el embrión se encuentra inmerso en una población de planetesimales de 100 km.

Aproximación local de las colisiones: Siguiendo los trabajos de Gerbig et al. (2019) y Ormel & Kobayashi (2012) de formación planetaria que realizan un tratamiento local de las colisiones modificamos el modelo de fragmentación para que solo se calculen las colisiones entre los planetesimales de un mismo bin de distancia.

Modelado de la variación de las densidades superficiales: Las excitaciones gravitatorias del protoplaneta sobre los planetesimales caen sustancialmente a medida que nos alejamos del planeta. Guilera et al. (2014) encuentran una función de modulación que reproduce dichas excitaciones y está dada por

$$f(R - R_P) = \left(\frac{1}{1 + \left| \frac{(R - R_P)}{var \cdot R_H} \right|^{exp}} \right)$$

donde R es la distancia al protoplaneta, R_p y R_h la posición y radio de Hill del protoplaneta, $var = 2.85$ y $exp = 10$. En esta aproximación calculamos el modelo detallado de fragmentación únicamente para los blancos que se encuentran en la posición del protoplaneta y adoptamos la función de modulación, variando los valores de var y exp , para modelar las variaciones en las densidades superficiales de los diferentes tamaños de planetesimales para toda la zona de fragmentación.

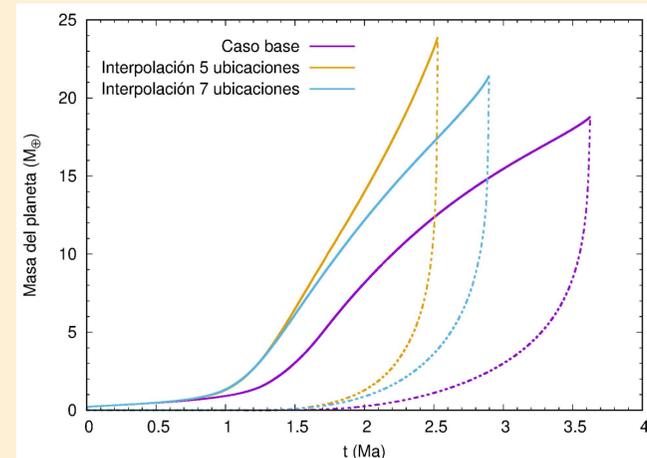


Figura 5: Análoga al panel izquierdo de la Figura 3 para el caso base y los casos en el que interpolamos entre 5 y 7 ubicaciones respectivamente dentro de la zona de fragmentación.

Resultados

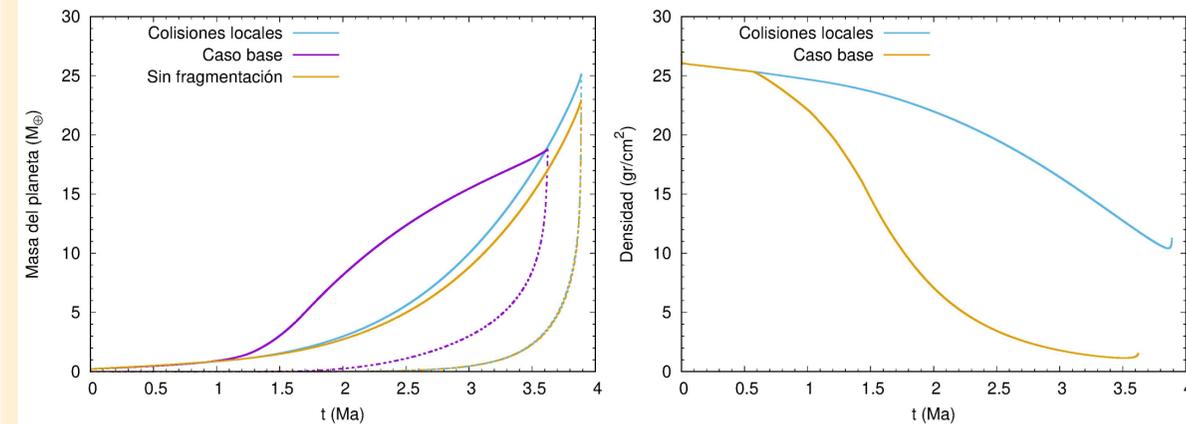


Figura 3: Izquierda: Crecimiento del núcleo (líneas sólidas) y de la envoltura (líneas punteadas) de un protoplaneta ubicado a 5 UA en función del tiempo para el caso base, caso sin fragmentación y para la aproximación local de las colisiones. Derecha: Densidad superficial de planetesimales de 100 km como función del tiempo para el caso base y para la aproximación local de las colisiones.

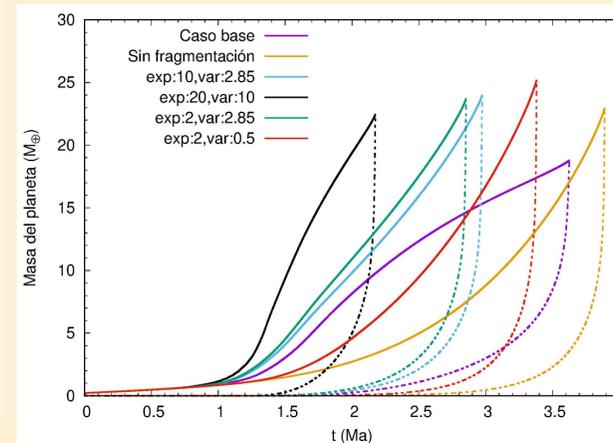


Figura 4: Análogo al panel izquierdo de la Figura 3 para el caso base, el caso sin fragmentación y algunas variaciones de los parámetros de la función de modulación.

Interpolación de la variación de las densidades superficiales: Finalmente, realizamos simulaciones calculando la fragmentación detallada en ciertas ubicaciones de la zona de fragmentación y luego interpolando los resultados de la variación de las densidades superficiales de los diferentes tamaños de planetesimales para toda la zona de fragmentación.

En el panel izquierdo de la Figura 3 vemos que el crecimiento del protoplaneta se comporta como el caso sin fragmentación y en el panel derecho observamos que la densidad superficial de planetesimales de 100km se encuentra por encima del caso base. Para el caso de la función de modulación observamos en la Figura 4 que, para algunas combinaciones de parámetros, el comportamiento del crecimiento del protoplaneta es similar al del caso base pero solo por los primeros Ma. En la Figura 5 vemos que para el caso de la interpolación de 7 ubicaciones de la zona de fragmentación, el crecimiento del protoplaneta se comporta de la misma forma que el caso base, con una diferencia menor al 20% en el tiempo al que llega a la masa de cruce y de ~15% mayor en la masa del núcleo.

Conclusiones y trabajo futuro

En todos los casos logramos reducir el tiempo de cómputo de las simulaciones de tres semanas/ un mes al orden de horas. Observamos que la mejor aproximación al modelo detallado de fragmentación es la interpolación ya que mantiene el comportamiento del crecimiento del planeta gigante y este alcanza una masa de cruce comparable a la del caso base. El objetivo a futuro es realizar un estudio de síntesis poblacional incorporando esta aproximación del modelo de fragmentación de planetesimales en PLANETALP (Ronco et al. 2017), nuestro modelo global de formación planetaria, para estudiar cómo este fenómeno afecta la formación de los sistemas planetarios.

Referencias

Gerbig K., Lenz C. T., Klahr H., 2019, A&A, 629, A116
 Guilera O. M., de Elia G. C., Brunini A., Santamaría P. J., 2014, A&A, 565, A96
 Ormel C. W., Kobayashi H., 2012, ApJ, 747, 115
 Ronco M. P., Guilera O. M., de Elia G. C., 2017, MNRAS, 471, 2753
 San Sebastián I. L., Guilera O. M., Parisi M. G., 2019, A&A, 625, A138

Contacto

E-mail: irina@fcaglp.unlp.edu.ar