



# Formación de planetas gigantes y fragmentación de planetesimales

I.L. San Sebastián<sup>1,4</sup>, O.M. Guilera<sup>1,2</sup>, M.G. Parisi<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> *Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas (UNLP)*, <sup>2</sup> *Instituto de Astrofísica de La Plata, IALP, CCT-CONICET-UNLP, Argentina*, <sup>3</sup> *Instituto Argentino de Radioastronomía (CCT-La Plata, CONICET; CI-CPBA), Argentina*, <sup>4</sup> *Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Argentina*.

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

**Resumen** / Durante el proceso de formación de un planeta gigante las velocidades relativas de los planetesimales aumentan debido a las perturbaciones gravitatorias que genera el planeta en formación sobre los mismos. Este fenómeno produce que las colisiones entre los planetesimales cambien de un régimen de coagulación a bajas velocidades relativas a un régimen de fragmentación a medida que dichas velocidades aumentan. En general, los modelos de formación planetaria, que incluyen el fenómeno de la fragmentación de los planetesimales, consideran la energía específica de impacto a una velocidad y un material fijos. Sin embargo la energía específica de impacto de un blanco es función tanto de las velocidades relativas entre el blanco y el proyectil como así también de la composición de los mismos. En este trabajo estudiamos la formación de un planeta gigante ubicado a 5 UA incorporando a nuestro modelo de fragmentación de planetesimales la dependencia de la energía específica de impacto con el material y la velocidad. Nuestros resultados muestran que dicha dependencia juega un rol importante en la formación de núcleos masivos, y por ende en la formación de planetas gigantes, antes de la disipación de la componente gaseosa del disco protoplanetario.

**Abstract** / During the process of giant planet formation the planetesimal relative velocities are increased by the growing planet due to the gravitational perturbations. This phenomenon produces a change of regimen in the planetesimal collision, from coagulation at low relative velocities to a regimen of fragmentation while the velocities increase. In general, the models of planetary formation that include planetesimal fragmentation consider the specific impact energy for a fixed velocity and composition of the planetesimals. However, the specific impact energy of a target is a function of the relative velocities between the target and projectile as well as the planetesimal composition. We studied the formation of a giant planet at 5 AU incorporating the dependence of the specific impact energy with composition and relative velocity in our fragmentation model. Our results show that this dependence plays a fundamental role in the formation of massive cores, and thus in the formation of giant planets, before the dissipation of the gaseous component of the protoplanetary disk.

**Keywords** / planets and satellites: formation — planets and satellites: gaseous planets — protoplanetary disks

## 1. Introducción

De acuerdo con el modelo estándar de formación de planetas gigantes (mecanismo de acreción del núcleo, Helled et al. 2014), el planeta se forma acretando planetesimales en un núcleo sólido hasta que tiene suficiente masa para empezar a acretar gas del disco protoplanetario. En el momento en que la masa de la envoltura es del orden de la masa del núcleo, el planeta comienza a acretar grandes cantidades de gas en un período muy corto de tiempo. Luego, cuando esta acreción finaliza, el planeta se enfría y se contrae a una masa constante. Existe otro modelo alternativo de formación de gigantes basado en la acreción de pequeñas partículas llamadas “pebbles”. A diferencia de los planetesimales, las pebbles pueden ser acretadas por toda la esfera de Hill del protoplaneta lo cual genera que sus tasas de acreción sean mucho mayores que las de planetesimales (Lambrechts & Johansen, 2012).

Durante el proceso de formación, la fragmentación de planetesimales es un efecto importante que puede favorecer o inhibir la formación de núcleos de planetas gi-

gantes. En una colisión de dos planetesimales, la energía específica por unidad de masa requerida para fragmentar y dispersar el 50 % de la masa del blanco (también conocida como energía de disrupción catastrófica  $Q_D^*$ ) es una función que debe ser definida en los modelos de fragmentación. Esta función depende de muchos factores como la velocidad de impacto, el material y tamaño de los planetesimales, que afectan el resultado de la colisión (Jutzi et al., 2015). En general, en los modelos de formación planetaria que incluyen fragmentación se adopta la prescripción de  $Q_D^*$  de Benz & Asphaug (1999) para basaltos a velocidades de impacto de  $3 \text{ km s}^{-1}$  (Guilera et al., 2014; Chambers, 2014). Sin embargo, a medida que el protoplaneta crece el mismo perturba gravitatoriamente a los planetesimales que lo rodean aumentando sus velocidades relativas y por ende sus energías de colisión.

En este trabajo incorporamos la dependencia de la energía de disrupción catastrófica con el material y la velocidad relativa de los planetesimales en el modelo de fragmentación desarrollado en Guilera et al. (2014). A

## Formación de planetas gigantes y fragmentación de planetesimales

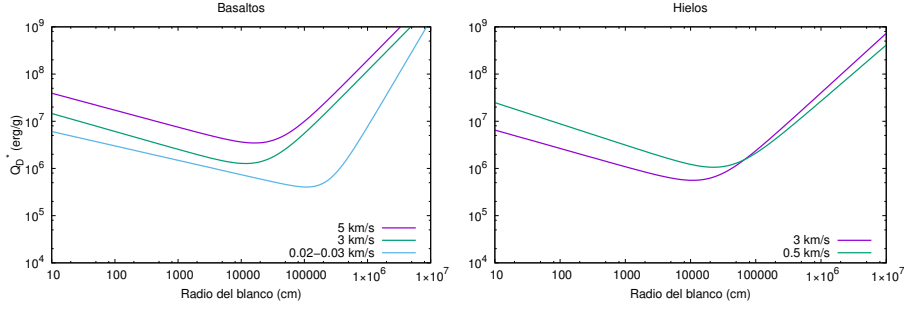


Figura 1: Energía de disrupción catastrófica por unidad de masa para diferentes velocidades de impacto dependiendo del material de los planetesimales.

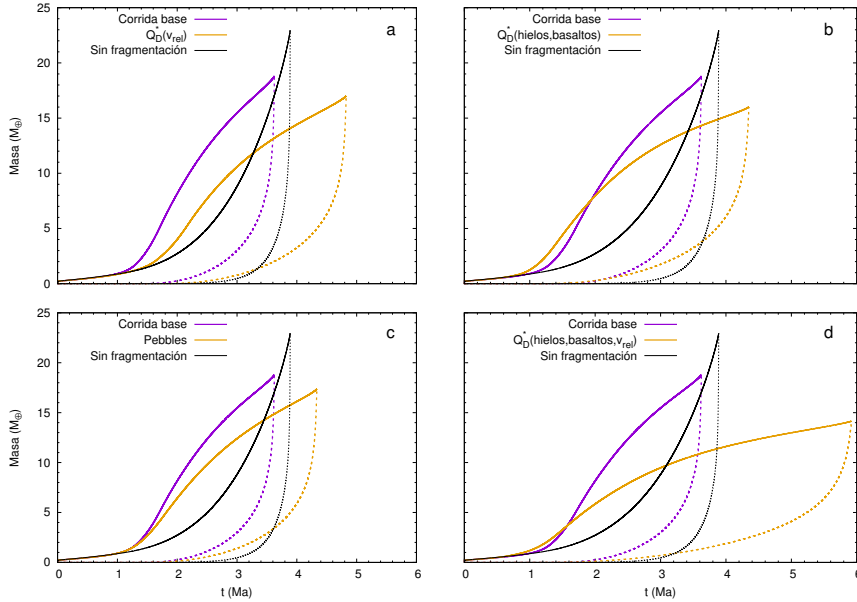


Figura 2: Masa del núcleo (línea sólida) y de la envoltura (línea a trazos) como función del tiempo. a)  $Q_D^*(v_{rel})$  solo tiene en cuenta la dependencia con la velocidad relativa de los planetesimales, b)  $Q_D^*(hielos, basaltos)$  solo tiene en cuenta la dependencia con el material, c) tiene incorporada la acreción de pebbles y d)  $Q_D^*(hielos, basaltos, v_{rel})$  tiene en cuenta ambas dependencias, tanto con la velocidad relativa de los planetesimales como con el material.

su vez, incorporamos las tasas de acreción de pebbles al modelo global de formación planetaria. Estudiamos los efectos de la incorporación de estos fenómenos en la formación de un planeta gigante ubicado a 5 UA.

## 2. Mejoras al modelo de formación de planetas gigantes

Nuestro modelo de formación planetaria, desarrollado en Guilera et al. (2014), describe la formación de planetas gigantes inmersos en un disco protoplanetario que contiene una componente sólida y una gaseosa que evolucionan en el tiempo. Siguiendo el trabajo de Guilera (2016) modificamos las tasas de acreción de sólidos incorporando la tasa de acreción de pebbles además de la tasa de acreción de planetesimales. Para planetesimales utilizamos la tasa de acreción dada por Inaba et al. (2001), mientras que para pebbles usamos las tasas de acreción dadas por Lambrechts et al. (2014).

Además, nuestro modelo de fragmentación está ba-

sado en el “Código Boulder” (Morbidelli et al. 2009 y material suplementario) y describe la evolución colisional de una población de planetesimales. Para más detalle del modelo ver Guilera et al. (2014). En este trabajo incorporamos diferentes regímenes de velocidad y probabilidades de colisión ya que la velocidad relativa utilizada en el Código Boulder es la velocidad de dispersión. Sin embargo, cuando la velocidad relativa tiende a cero, la probabilidad intrínseca de colisión queda indeterminada. Weidenschilling (2011) dio cuenta de este problema e incorporó la velocidad relativa correspondiente al cizallamiento kepleriano. Siguiendo este trabajo, incorporamos los diferentes regímenes de velocidad y probabilidades de colisión para velocidades relativas más bajas y de esta forma obtener tasas de colisión más precisas. Consideramos tres regímenes diferentes siguiendo a Greenberg et al. (1991).

A su vez, en este trabajo, mejoramos el cálculo de la energía de disrupción catastrófica  $Q_D^*$  (por unidad de masa) que es la energía necesaria para fragmen-

tar y dispersar la mitad del blanco en un impacto. En la Fig. 1 vemos los diferentes ajustes de  $Q_D^*$ , a la izquierda, para basaltos a velocidades de impacto de  $0.02 \text{ km s}^{-1}$  –  $0.03 \text{ km s}^{-1}$  (Benz, 2000),  $3 \text{ km s}^{-1}$  y  $5 \text{ km s}^{-1}$  (Benz & Asphaug, 1999), a la derecha, para hielos a velocidad de impacto de  $0.5 \text{ km s}^{-1}$  y  $3 \text{ km s}^{-1}$  (Benz & Asphaug, 1999). Como se ve en la Fig. 1,  $Q_D^*$  varía con el material y la velocidad de impacto. En nuestro modelo, dada una velocidad relativa, realizamos una interpolación lineal (hielos) o cúbica (basaltos) entre los diferentes ajustes de  $Q_D^*$  para obtener  $Q_D^*$  dependiendo de la velocidad relativa de los planetesimales para cada material. Fuera del rango nos quedaremos con los valores extremos (Venturini et al., 2015). A su vez, de acuerdo a Lodders (2003), en el Sistema Solar primitivo, detrás de la línea del hielo, la mitad del material debería estar condensado. Como trabajaremos detrás de la línea del hielo podemos asumir que los planetesimales no están hechos solo de basaltos (Lodders, 2003). Por lo tanto, para incorporar la dependencia de  $Q_D^*$  con el material hacemos una combinación lineal con los valores de  $Q_D^*$  para cada material a una velocidad de impacto dada dependiendo el porcentaje de hielo y basalto que definamos para los planetesimales.

### 3. Resultados

En este trabajo calculamos la formación de un planeta gigante a 5 UA. Nuestras simulaciones empiezan al comienzo del régimen de crecimiento oligárquico con un embrión del tamaño de la Luna. Inicialmente el embrión se encuentra inmerso en una población homogénea de planetesimales de 100 km de radio.

Compararemos los efectos de incluir la dependencia de la velocidad relativa y la mezcla de materiales en la energía de disrupción catastrófica respecto a la simulación más representativa del trabajo de Guilera et al. (2014) a la que llamaremos “corrida base”. En esta simulación se consideró el fenómeno de la fragmentación de planetesimales adoptando  $Q_D^*$  para basaltos a  $3 \text{ km s}^{-1}$ . También analizaremos los resultados de la inclusión de las tasas de acreción de pebbles en nuestro modelo global de formación planetaria. Para este caso, es importante remarcar que las tasas de acreción de planetesimales utilizadas en Guilera et al. (2014) sobrestiman los valores correspondientes a las tasas de acreción de pebbles para los fragmentos pequeños producto de las colisiones de los planetesimales. Si una parte significativa de la masa distribuida en los fragmentos (producto de las colisiones) es depositada en los fragmentos más pequeños, las tasas de acreción de estos pueden jugar un rol importante. Es por esto que es fundamental modelar de manera correcta las tasas de acreción de estos pequeños fragmentos.

En la Fig. 2 podemos ver que la dependencia de  $Q_D^*$  con la velocidad relativa y la mezcla de materiales tiende a hacer más ineficiente el proceso de formación de un planeta gigante, a pesar de que en todos los modelos el planeta alcanza las  $10 M_{\oplus}$  en unos pocos millones de años. Esto se debe a que, como se ve en la Fig. 1,  $Q_D^*$  es menor para velocidades relativas más bajas y para planetesimales que no están compuestos solo por basaltos.

Este fenómeno produce que el proceso de fragmentación de planetesimales comience a una edad más temprana y a núcleos menos masivos en comparación con el caso en que se adopte el  $Q_D^*$  para basaltos a  $3 \text{ km s}^{-1}$ . La tasa de acreción de planetesimales pequeños en la corrida base está sobrestimada en comparación a la tasa de acreción de pebbles, por lo cual cuando incorporamos un correcto tratamiento de las partículas más pequeñas, el planeta alcanza la masa de cruce a un tiempo ligeramente posterior. Es evidente que en todos los casos, al incorporar los diferentes efectos la formación del planeta gigante se ralentiza.

No hemos presentado los resultados de la incorporación de los regímenes de velocidad ya que en este problema físico en particular no muestran diferencias con la corrida base ya que las velocidades relativas de los planetesimales aumentan rápidamente debido a las perturbaciones del protoplaneta en crecimiento.

### 4. Discusión y conclusiones

Observamos que las dependencias incluídas en la energía de disrupción catastrófica y la inclusión de la acreción de pebbles tienden a ralentizar la formación del planeta gigante. A medida que los planetas se vuelven cada vez más masivos, las velocidades relativas de los planetesimales aumentan generando colisiones catastróficas y limitando la formación de núcleos masivos. Es importante remarcar que si bien la formación del planeta se ralentiza, igualmente se forman núcleos de  $5 M_{\oplus}$  –  $10 M_{\oplus}$  en unos pocos millones de años. Recientemente, Venturini et al. (2016) mostraron que tales núcleos tendrían una envoltura significativa como para disolver los planetesimales acretados. Además, encontraron que si se tiene en cuenta la contaminación de estos planetesimales sobre la envoltura gaseosa, las tasas de acreción de gas crecen significativamente favoreciendo la rápida formación de planetas gigantes con núcleos poco masivos.

*Agradecimientos:* Este trabajo está financiado parcialmente por los PIPs 0699 y 0436 (CONICET) y por el PID G144 (UNLP).

### Referencias

- Benz W., Asphaug E., 1999, *Icarus*, 142, 5
- Benz W., 2000, *Space Sci. Rev.*, 92, 279
- Chambers J. E., 2014, *Icarus*, 233, 83
- Greenberg R., et al., 1991, *Icarus*, 94, 98
- Guilera O. M., et al., 2014, *A&A*, 565, A96
- Guilera O. M., 2016, *BAAA*, 58, 316
- Helled R., et al., 2014, *Protostars and Planets VI*, pp 643–665
- Inaba S., et al., 2001, *Icarus*, 149, 235
- Jutzi M., et al., 2015, *ArXiv e-prints*
- Lambrechts M., Johansen A., 2012, *A&A*, 544, A32
- Lambrechts M., Johansen A., Morbidelli A., 2014, *A&A*, 572, A35
- Lodders K., 2003, *ApJ*, 591, 1220
- Morbidelli A., et al., 2009, *Icarus*, 204, 558
- Venturini J., et al., 2015, *A&A*, 576, A114
- Venturini J., Alibert Y., Benz W., 2016, *A&A*, 596, A90
- Weidenschilling S. J., 2011, *Icarus*, 214, 671