

Composición Química de Planetas Tipo Terrestres: Potencial habitabilidad

M. P. Ronco^{1,2}, A. Thiabaud^{3,4}, U. Marboeuf^{3,4}, Y. Alibert^{3,4,5}, G. C. de Elía^{1,2}, O. M. Guilera^{1,2}

(1) Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas - UNLP

(2) Instituto de Astrofísica La Plata (IALP) - CONICET - UNLP

(3) Physics Institute and Center for Space and Hability, University of Bern, Bern, Switzerland

(4) Observatoire de Besançon, France

e-mail: María Paula Ronco: mpronco@cag1p.unlp.edu.ar



Abstract

En general, los modelos de formación planetaria se enfocan principalmente en el estudio de los procesos de acreción y evolución dinámica de los planetas sin tener en cuenta la composición química de los mismos. A partir del código comercial HSC Chemistry, calculamos la secuencia de condensación y composición química para un disco protoplanetario de baja masa alrededor de una estrella tipo solar. Incorporamos esta secuencia de elementos químicos y moléculas volátiles en nuestro modelo semianalítico de formación planetaria que calcula el proceso de formación de un sistema planetario durante su etapa gaseosa. Los resultados de este modelo, son utilizados como condiciones iniciales para desarrollar simulaciones de N cuerpos que computan la formación pos oligárquica de planetas tipo terrestres. Estas simulaciones nos permiten estudiar la historia colisional de cada planeta resultante y de determinar así su composición química una vez finalizado el proceso de formación. Los resultados de nuestras simulaciones indican que la composición química de los planetas de mayor interés astrobiológico, que son aquellos que permanecen en la zona de habitabilidad, presenta características similares a la composición química de la Tierra.

Introducción

El modelo de formación planetaria de Alibert et. al. 2005 calcula la estructura y evolución de un disco protoplanetario determinando para cada distancia a la estrella central la estructura vertical del disco. Este modelo permite determinar los perfiles de temperatura, presión y densidad superficial para diferentes distancias a la estrella central a partir de definir la masa del disco protoplanetario (en nuestro caso $M_d = 0.03M_\odot$) y el exponente que define la pendiente de su perfil de densidad superficial (en nuestro caso $\gamma = 1.5$). Una vez obtenidos dichos perfiles, el software comercial HSC Chemistry computa las secuencias de condensación de los distintos elementos químicos bajo condiciones de equilibrio. Los datos obtenidos incluyen información sobre las abundancias de los elementos más importantes y sobre la formación de moléculas volátiles (hielos). Estas distribuciones de elementos químicos y moléculas volátiles son incorporadas en nuestro modelo semianalítico de formación planetaria (Brunini & Benvenuto 2008; Guilera et al. 2010) que calcula el proceso de formación de un sistema planetario durante su etapa gaseosa considerando la formación *in situ* de los embriones planetarios. Los resultados de este modelo, que involucran la distribución de embriones y planetesimales al momento de la disipación del gas, son utilizados finalmente como condiciones iniciales para desarrollar simulaciones de N-cuerpos que computan la formación pos oligárquica de planetas tipo terrestres. Dado que con los resultados de dichas simulaciones podemos estudiar la historia colisional de cada uno de los planetas resultantes, es posible determinar cuál es la composición química final de cada uno, en particular de aquellos que permanecen en la zona de habitabilidad (ZH) que es, para nosotros, la zona de mayor interés.

Condiciones Iniciales

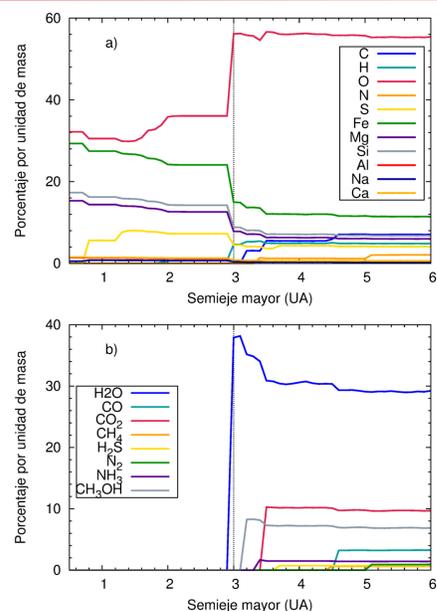


Figura 1. a) Abundancias de elementos químicos que resultan del proceso de condensación del disco protoplanetario y que serán condiciones iniciales en las simulaciones de N-cuerpos dado que el modelo semianalítico considera la formación *in situ* de los embriones. b) Distribuciones iniciales de las moléculas volátiles más relevantes. La línea punteada representa la posición de la Línea de Hielo que para este disco se ubica en 3 UA.

A partir de las condiciones iniciales (ver figs. 1 y 2) generamos 4 simulaciones de N-cuerpos distribuyendo al azar los elementos orbitales de la distribución de embriones y planetesimales. Utilizamos el código MERCURY (Chambers, 1999) y dejamos evolucionar los sistemas por 200 Ma utilizando un paso de integración de 6 días para computar la zona interna de la órbita con suficiente precisión.

Referencias

- Alibert, Y., Mordasini, C., Benz, W., & Winisdoerffer, C. 2005, A&A, 434, 343
- Brunini, A., & Benvenuto, O. G. 2008, ICARUS, 194, 800
- Chambers, J. E. 1999, MNRAS 304, 793

Condiciones Iniciales

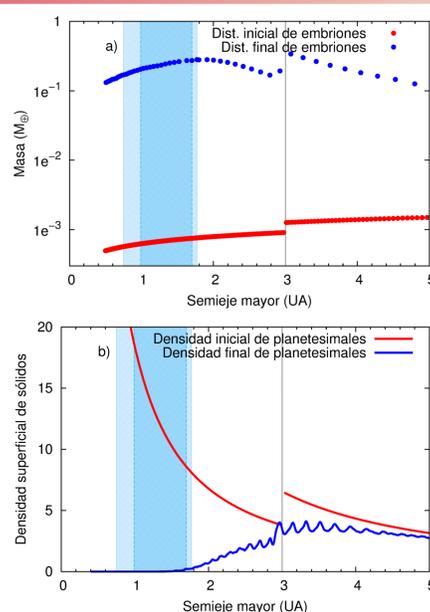


Figura 2. a) Los puntos rojos representan la distribución inicial de embriones y los azules, la final, obtenida luego de 3 Ma de evolución con el modelo semianalítico. b) En rojo se muestra el perfil de densidad superficial inicial de planetesimales y en azul el final. La zona sombreada con celeste claro representa la ZH optimista, entre 0.75 UA y 1.77 UA, y la sombreada con celeste oscuro, la ZH conservadora, entre 0.99 UA y 1.7 UA (Kopparapu et. al. 2013).

Resultados

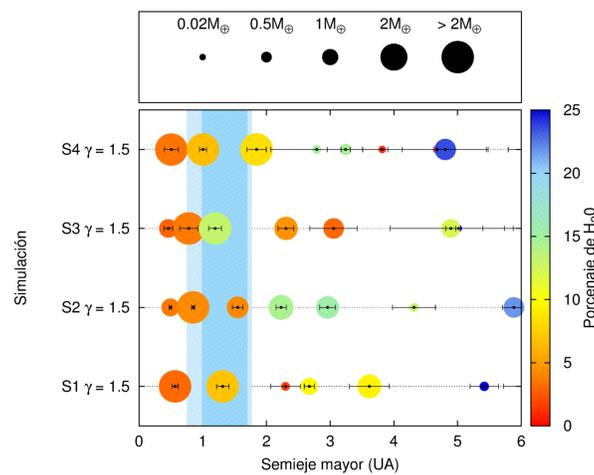


Figura 3. Configuración final de las cuatro simulaciones de N-cuerpos. La escala de color representa el contenido de agua en los planetas resultantes. Las líneas negras sobre los planetas representan su movimiento radial sobre la órbita. Como se puede apreciar, todas las simulaciones presentan planetas en la ZH y sus contenidos de agua varían entre 4.29% y 13.19% por masa.

	Mercurio	Venus	Tierra	Marte	Simulaciones
Fe	64.47	31.17	32.04	27.24	21.34 - 24.70
O	14.44	30.9	31.67	33.75	35.23 - 41.93
Mg	6.5	14.54	14.8	14.16	11.17 - 12.93
Al	1.08	1.48	1.43	1.21	1.03 - 1.19
Si	7.05	15.82	14.59	16.83	12.61 - 14.59
Ca	1.18	1.61	1.6	1.33	0.56 - 0.65
C	0.0005	0.05	0.004	0.29	0.55 - 1.03
Na	0.02	0.14	0.25	0.57	1.14 - 1.31

Tabla 1. Abundancias planetarias en % por masa de Mercurio y Venus (Morgan & Anders 1980), la Tierra (Kargel & Lewis 1993), Marte (Lodders & Fegley 1997) y el rango de valores hallados para los planetas en la ZH de nuestras simulaciones.

Todas las simulaciones presentan planetas en la ZH con masas que varían entre $1.52M_\oplus$ y $4M_\oplus$. Poseen entre 6.37% y 16.41% de material volátil respecto a su masa total siendo la molécula de agua la más abundante, con valores entre 4.29% y 13.19% (ver fig. 3).

Resultados

En términos generales, las abundancias finales de elementos químicos obtenidas en nuestras simulaciones son similares a las derivadas por Kargel & Lewis 1993 para la Tierra. Sin embargo, los planetas que resultan en la ZH de nuestras simulaciones muestran un marcado déficit en la cantidad final de hierro así como también un exceso en la cantidad de oxígeno y carbono.

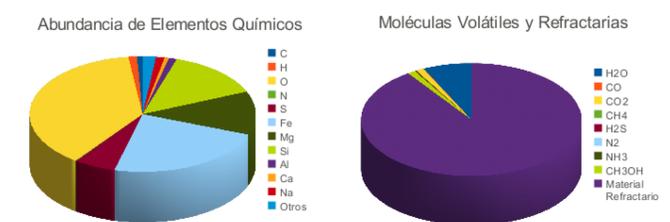


Figura 4. Promedio de las abundancias químicas y moléculas volátiles finales en los planetas de la ZH.

Es interesante analizar tanto las similitudes como las diferencias obtenidas en las abundancias finales de elementos químicos entre los planetas que resultan de nuestras simulaciones en la ZH y la Tierra. Por un lado, las equivalencias obtenidas podrían sugerir similitudes en la distribución de elementos químicos en el disco protoplanetario primitivo. Por otra parte, las diferencias podrían ser atribuidas fundamentalmente a discrepancias asociadas con el entorno dinámico en el cual se forman los planetas. En efecto, a diferencia de lo que sucede con los planetas terrestres de nuestro Sistema Solar, los planetas en nuestras simulaciones son formados en ausencia de gigantes gaseosos. Estas diferencias naturalmente conducen a distintas historias dinámicas para los planetas terrestres formados en ambos sistemas, por lo que es evidente obtener discrepancias en las abundancias finales de elementos químicos. Por otra parte, las abundancias de los planetas formados en nuestras simulaciones son aquellas obtenidas asumiendo que las colisiones son perfectamente inelásticas. Un tratamiento más realista de las colisiones podría brindarnos un cálculo más preciso de las abundancias finales.

Las abundancias de elementos químicos de los planetas que resultan en la ZH son también similares a las abundancias típicas encontradas por Thiabaud et al. 2014 para planetas rocosos en general. Sin embargo, un análisis comparativo entre ambos trabajos debería ser realizado con cuidado dado que las abundancias computadas para los planetas de nuestras simulaciones son obtenidas luego de la disipación del gas en el sistema, mientras que Thiabaud et al. 2014 analizan los procesos de formación de los planetas de tipo terrestre hasta que se produce la disipación de la componente gaseosa.

Conclusiones

Luego de 200 Ma de evolución y partiendo de condiciones iniciales obtenidas con un modelo semianalítico formamos sistemas planetarios que presentan planetas terrestres en la ZH. Las masas y abundancias químicas de dichos planetas son similares a las de nuestra Tierra aunque existen diferencias asociadas al entorno dinámico en el cual se forman. En general, las características de los planetas de la ZH, sobre todo las masas y la cantidad de agua, indicarían que son planetas potencialmente habitables.

- Lodders, K., & Fegley, B. 1997, Icarus, 126, 373
- Morgan, J. W., & Anders, E. 1980, PNAC, 77, 6973
- Thiabaud, A., Marboeuf, U., Alibert, Y., et al. 2014, A&A, 562, A27