

Júpiter se formó con más alquitrán que hielo

Dr. Luciano Ariel Darriba

**Grupo de Ciencias Planetarias, FCAGLP
Instituto de Astrofísica La Plata, CONICET-CCT La Plata,
Argentina**

20 de Noviembre de 2014

Introducción

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 611:587–597, 2004 August 10

© 2004. The American Astronomical Society. All rights reserved. Printed in U.S.A.

JUPITER FORMED WITH MORE TAR THAN ICE

KATHARINA LODDERS

Planetary Chemistry Laboratory, Department of Earth and Planetary Sciences and McDonnell Center for the Space Sciences,
Washington University, Campus Box 1169, St. Louis, MO 63130-4899; lodders@levee.wustl.edu

Received 2004 January 30; accepted 2004 April 13

La *Galileo Probe Mass Spectrometer* midió, en la atmósfera de Júpiter ($P \sim 20$ bars), el contenido de ciertos compuestos.

- Gases nobles (Ne, Ar, Kr, Xe)
- Hidrógeno
- Carbono (CH_4)
- Nitrógeno (NH_3)
- Oxígeno (H_2O)
- Azufre (H_2S)
- Otros compuestos menores
- Abundancia normalizada a H_2
- Rico en C, N, S, Ar, Kr y Xe (según abundancia Solar)
- Defecto de He, Ne y O

Introducción

Se reexaminaron la información de abundancias por dos razones

- 1 La abundancia relativa al H_2 supone que la abundancia de H_2 en la envoltura de Júpiter es la Solar.
- 2 Se volvió a chequear la abundancia solar, con cambios en C, N, O y los gases nobles, en dos escalas de abundancia: Una para la fotosfera Solar y otra para el Sistema Solar.

Abundancias relativas al H₂ (H₂ = 1)

Gas	Júpiter (M/H ₂)	Elem.	S.S. (M/H ₂)	Júpiter/S.S.
H ₂	≡ 1.0	H ₂	≡ 1.0	≡ 1.0
He	0.1574 ± 0.0036	He	0.1928	0.816 ± 0.019
Ne	(2.48 ± 0.3) × 10 ⁻⁵	Ne	1.77 × 10 ⁻⁴	0.14 ± 0.02
Ar	(1.82 ± 0.36) × 10 ⁻⁵	Ar	8.43 × 10 ⁻⁶	2.16 ± 0.43
Kr	(9.3 ± 0.7) × 10 ⁻⁹	Kr	4.54 × 10 ⁻⁹	2.05 ± 0.37
Xe	(8.9 ± 1.7) × 10 ⁻¹⁰	Xe	4.44 × 10 ⁻¹⁰	2.00 ± 0.38
CH ₄	(2.1 ± 0.4) × 10 ⁻³	C	5.82 × 10 ⁻⁴	3.6 ± 0.7
NH ₃	(7.1 ± 3.2) × 10 ⁻⁴	N	1.60 × 10 ⁻⁴	4.4 ± 2.0
PH ₃	(1.3 ± 0.5) × 10 ⁻⁶	P	6.89 × 10 ⁻⁷	1.9 ± 0.7
H ₂ O	6.0 ^{+3.9} _{-2.8} × 10 ⁻⁴	O	1.16 × 10 ⁻³	0.52 ^{+0.34} _{-0.24}
H ₂ S	(7.7 ± 0.5) × 10 ⁻⁵	S	3.66 × 10 ⁻⁵	2.10 ± 0.14

Abundancias relativas al H₂ (H₂ = 1)

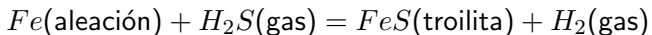
Gas	Júpiter (M/H ₂)	Elem.	S.S. (M/H ₂)	Júpiter/S.S.
H ₂	≡ 1.0	H ₂	≡ 1.0	≡ 1.0
He	0.1574 ± 0.0036	He	0.1928	0.816 ± 0.019
Ne	(2.48 ± 0.3) × 10 ⁻⁵	Ne	1.77 × 10 ⁻⁴	0.14 ± 0.02
Ar	(1.82 ± 0.36) × 10 ⁻⁵	Ar	8.43 × 10 ⁻⁶	2.16 ± 0.43
Kr	(9.3 ± 0.7) × 10 ⁻⁹	Kr	4.54 × 10 ⁻⁹	2.05 ± 0.37
Xe	(8.9 ± 1.7) × 10 ⁻¹⁰	Xe	4.44 × 10 ⁻¹⁰	2.00 ± 0.38
CH ₄	(2.1 ± 0.4) × 10 ⁻³	C	5.82 × 10 ⁻⁴	3.6 ± 0.7
NH ₃	(7.1 ± 3.2) × 10 ⁻⁴	N	1.60 × 10 ⁻⁴	4.4 ± 2.0
PH ₃	(1.3 ± 0.5) × 10 ⁻⁶	P	6.89 × 10 ⁻⁷	1.9 ± 0.7
H ₂ O	6.0 ^{+3.9} _{-2.8} × 10 ⁻⁴	O	1.16 × 10 ⁻³	0.52 ^{+0.34} _{-0.24}
H ₂ S	(7.7 ± 0.5) × 10 ⁻⁵	S	3.66 × 10 ⁻⁵	2.10 ± 0.14

Por qué elegir el S para normalizar?

- El S es el elemento refractario más abundante en la atmósfera de Júpiter.
- A diferencia de los volátiles (C, N, O, gases nobles), el S se comporta como un elemento formador de rocas como el Mg, Si, Ca, Al, Na, Fe y P.
- Química del S en Júpiter \neq Nebulosa Solar. En Júpiter es menos refractario porque está en forma de H_2S (Idem para el P, que se encuentra en PH_3).

Por qué elegir el S para normalizar?

- En la nebulosa Solar, el gas H_2S reacciona con el Fe formando troilita a 704K, descrito como



- A 664K, la mitad del S se condensa en FeS
- A 450K, el 99.99% del S es removido del gas.
- La presencia de troilita en meteoritos primitivos sugiere que los planetesimales que formaron los planetas también contuvieron troilita.
- Júpiter podría haber acreutado el S en forma de troilita.

Por qué elegir el S para normalizar?

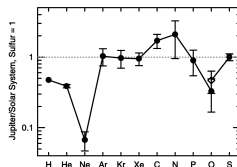
- El Fe, que se condensa a altas temperaturas, se encuentra enterrado en una nube metálica de hierro, y no hay metal de Fe presente en regiones superficiales (frías) que reaccione con el H_2S para formar FeS .
- Luego, el H_2S permanece en la atmósfera.
- El primer condensado con S en formarse en la atmósfera es el Sulfuro de Sodio Na_2S , el cual quita una pequeña fracción de S.

$$Na = 13\% \rightarrow S = 6.5\% \quad (1)$$

- La concentración de $\text{H}_2\text{S}/\text{H}_2$ para $P \leq 16\text{bar}$ fue determinada con una incerteza de $\sim 6.5\%$, que se explica con lo anterior.
- Debido a las incertezas, y al pequeño efecto producido por el Na_2S , no es corregida la abundancia de S y se usa como normalizador.

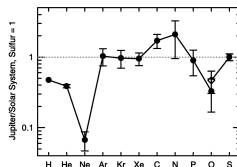
Abundancias relativas al S (S= 100)

Elem.	Júpiter	S.S.	Condritas CI	Júpiter/S.S.	Júpiter/CI
H ₂	2.60×10^6	5.46×10^6	1236	0.476	2104
He	$(2.05 \pm 0.05) \times 10^5$	5.27×10^6	1.36×10^{-4}	0.389 ± 0.010	$(1.51 \pm 0.04) \times 10^9$
Ne	32 ± 4	483	5.29×10^{-7}	0.066 ± 0.008	$(6.1 \pm 0.8) \times 10^7$
Ar	23.6 ± 4.7	23.0	2.16×10^{-6}	1.03 ± 0.20	$(1.1 \pm 0.2) \times 10^7$
Kr	0.0121 ± 0.0022	0.0124	3.69×10^{-8}	0.98 ± 0.18	$(3.3 \pm 0.6) \times 10^5$
Xe	0.00116 ± 0.00022	0.00121	7.86×10^{-8}	0.96 ± 0.18	$(1.5 \pm 0.3) \times 10^4$
C	2727 ± 520	1591	174	1.71 ± 0.33	16 ± 3
N	922 ± 416	438	12.4	2.10 ± 0.95	74 ± 4
P	1.69 ± 0.65	1.88	1.88	0.90 ± 0.35	0.90 ± 0.35
O _{gas}	779^{+506}_{-364}	2454	984	$0.33^{+0.21}_{-0.15}$	$0.81^{+0.51}_{-0.37}$
O _{roca}	$\equiv 722$	722	722	$\equiv 1.0$	$\equiv 1.0$
O _{total}	1501^{+506}_{-364}	3176	1706	$0.47^{0.16}_{-0.12}$	$0.82^{+0.30}_{-0.21}$
S	$\equiv 100$	$\equiv 100$	$\equiv 100$	$\equiv 1.0$	$\equiv 1.0$



Abundancias relativas al S (S= 100)

Elem.	Júpiter	S.S.	Condritas CI	Júpiter/S.S.	Júpiter/CI
H ₂	2.60×10^6	5.46×10^6	1236	0.476	2104
He	$(2.05 \pm 0.05) \times 10^5$	5.27×10^6	1.36×10^{-4}	0.389 ± 0.010	$(1.51 \pm 0.04) \times 10^9$
Ne	32 ± 4	483	5.29×10^{-7}	0.066 ± 0.008	$(6.1 \pm 0.8) \times 10^7$
Ar	23.6 ± 4.7	23.0	2.16×10^{-6}	1.03 ± 0.20	$(1.1 \pm 0.2) \times 10^7$
Kr	0.0121 ± 0.0022	0.0124	3.69×10^{-8}	0.98 ± 0.18	$(3.3 \pm 0.6) \times 10^5$
Xe	0.00116 ± 0.00022	0.00121	7.86×10^{-8}	0.96 ± 0.18	$(1.5 \pm 0.3) \times 10^4$
C	2727 ± 520	1591	174	1.71 ± 0.33	16 ± 3
N	922 ± 416	438	12.4	2.10 ± 0.95	74 ± 4
P	1.69 ± 0.65	1.88	1.88	0.90 ± 0.35	0.90 ± 0.35
O _{gas}	779^{+506}_{-364}	2454	984	$0.33^{+0.21}_{-0.15}$	$0.81^{+0.51}_{-0.37}$
O _{roca}	$\equiv 722$	722	722	$\equiv 1.0$	$\equiv 1.0$
O _{total}	1501^{+506}_{-364}	3176	1706	$0.47^{0.16}_{-0.12}$	$0.82^{+0.30}_{-0.21}$
S	$\equiv 100$	$\equiv 100$	$\equiv 100$	$\equiv 1.0$	$\equiv 1.0$



Abundancia de Oxígeno

Los datos de *Galileo* solo miden el O en forma de H_2O . Pero el O también aparece en otros elementos

$$O_{\text{total}} = O_{\text{rocas}} + O_{\text{gas}} \quad (2)$$

- $O_{\text{rocas}} = SiO_2, MgO, CaO, Al_2O_3$ y TiO_2 .

La cantidad de O en óxidos se calcula a partir de las abundancias elementales

$$O_{\text{rocas}} = 2A_{Si} + A_{Mg} + A_{Ca} + 1.5A_{Al} + 2A_{Ti} \dots \quad (3)$$

- Condritas CI, el Sol y el S.S. tienen la misma abundancia de elementos rocosos. Luego de condensarse, la cantidad de O en elementos rocosos debe ser la misma.

Abundancia de Oxígeno

La abundancia en las CI es la mitad que en el S.S.

	% de O en elementos rocosos
S.S.	~ 23%
Condritas CI	~ 42%

Distintas técnicas indican que el agua es el gas predominante de O en la atmósfera de Júpiter ($\text{H}_2\text{O}/\text{CO} \approx 3 \times 10^5$). Luego, O_{gas} en Júpiter es básicamente la abundancia de O en agua. Para O_{rocas} se toman las razones Solares de elementos con respecto al azufre.

Abundancia de Oxígeno

- Se espera abundancia Solar de O en Júpiter.
- La relación de O Júpiter/S.S. normalizada a S es 0.47.
- La abundancia de O en agua en Júpiter relativo al O en el S.S. es 0.25. Luego, la mitad del O en Júpiter se encuentra en rocas y la otra mitad en agua.

Origen

Cualquier modelo de formación de Júpiter debe tener en cuenta lo siguiente:

- 1 Abundancias solares de Ar, Kr, Xe, P y S;
- 2 Empobrecimiento relativo de H, He, Ne y O;
- 3 Enriquecimiento relativo de C y (posiblemente) N.

Origen

La formación de Júpiter ocurrió en tres etapas:

- 1 La formación de un núcleo sólido ($\sim 10M_{\oplus}$) por acreción de planetesimales con baja cantidad de gas.
- 2 Continúa acretando planetesimales y gas, construyendo la atmósfera primordial. (Los planetesimales se evaporan en la proto-atmósfera, posiblemente liberando el S al gas, permaneciendo en la atmósfera como H_2S).
- 3 Cuando $M_{\text{núcleo}} \approx M_{\text{atm}}$ se produce una acreción acelerada del gas nebular de la zona de alimentación (*run away gaseoso*). (En esta etapa acreta la mayor parte de su masa, la cual es más de 80% H y He).

Roca, Hielo y Carbono

- La formación de un protonúcleo y crecimiento *runaway* requiere que la densidad superficial Σ del disco en la región de formación del gigante sea suficientemente alta como para acumular un protonúcleo masivo.
- Un aumento en la densidad de mása de sólidos a 5.2UA en la nebulosa Solar es posible debido a que, esencialmente, todos los modelos de nebulosa suponen condensación de agua (la línea de hielo) cerca de la órbita de Júpiter.

Roca, Hielo y Carbono

- Stevenson & Lunine (1988) y Cyr et al. (1998) propusieron que la cantidad de sólidos cerca de la región de formación de Júpiter pudo haber aumentado por redistribución difusiva del agua (gas) desde el interior de la nebulosa, y la condensación del hielo. En sus modelos, el agua atrapada a distancias $\geq 5.2\text{UA}$ podrían aumentar la densidad de masa requerida para que el núcleo crezca.
- Sin embargo, el empobrecimiento de oxígeno en Júpiter se contrapone a la idea de abundancia de agua en la zona de formación de Júpiter.

Si había gran cantidad de agua pero Júpiter muestra abundancias subsolares de O , ¿dónde se fue el agua?

Roca, Hielo y Carbono

Por otro lado, hay un gran enriquecimiento de C en la atmósfera de Júpiter y en los otros planetas exteriores, aumentando con la distancia. Las relaciones CH_4/H_2 son:

- Júpiter: $(2.1 \pm 0.4) \times 10^{-3}$
- Saturno: $(4.5 \pm 2.4) \times 10^{-3}$
- Urano: $(1.6 \pm 0.7) \times 10^{-2}$
- Neptuno: $(2.2 \pm 0.6) \times 10^{-2}$

La relación C/H_2 en Júpiter es mayor que la relación S/H_2 , y la relación C/S es mayor que la Solar. Es decir, que el carbono está más enriquecido que los elementos formadores de rocas, y para eso es necesaria una fuente carbonosa.

Roca, Hielo y Carbono

¿Qué tal si la materia carbonosa, y no el hielo, incrementó la densidad de masa para el crecimiento rápido del núcleo?

Esto no contradice el hielo observado en los satélites Galileanos. Stevenson & Lunine (1988) notaron que estos satélites se formaron más tarde que el proto-Júpiter, y los modelos de acreción predicen que la línea de hielo se mueve durante el enfriamiento del disco. Durante la formación del proto-Júpiter la línea de hielo estaba lejos, Júpiter no podría haber acretado agua. Durante el enfriamiento del disco, la línea se mueve hacia adentro, posibilitando a los Galileanos la acreción de agua.

Roca, Hielo y Carbono

El material carbonoso se pudo originar a partir de una nube de material no evaporado, o de materia carbonosa formada en la nebulosa solar bajo condiciones de no equilibrio.

- Se requieren temperaturas $> 350 - 400K$ para evaporar dos tipos de materiales orgánicos análogos a éstos.
- El grafito se forma a $\sim 530K$.
- El polvo carbonoso puede aparecer como producto de una condensación de la nebulosa de gas a $T < 530K$.
- A 5.2UA la temperatura debe estar por encima de la temperatura de condensación del agua ($T \approx 160K$), para prevenir que Júpiter pueda acretar hielo.

Luego, los límites globales de temperatura en la región de formación de Júpiter serán $160K \leq T \leq 350K$ a $\sim 5.2UA$ al momento que se formó el proto-Júpiter.

Roca, Hielo y Carbono

- Existe evidencia observacional de la presencia de material carbonoso en la nebulosa solar, a pesar de que no es estable bajo condiciones de equilibrio termodinámico.
- En la condritas carbonosas CI, la materia carbonosa coexiste con materiales oxidados, y dichos meteoritos contienen $\sim 10\%$ de la abundancia de C del S.S., y $\sim 54\%$ de la abundancia de O del S.S. ($\sim 23\%$ asociado a rocas y $\sim 31\%$ ligado a magnetita y silicatos hidratados).
- Los productos de alteraciones acuosas en las condritas CI indican que el agua estaba presente en su cuerpo padre, pero ahora se perdió. Sin embargo, los compuestos carbonosos se encuentran presentes en las condritas CI (y en otros tipos también), lo que es evidencia directa de que la materia carbonosa es más refractaria que el hielo.

Roca, Hielo y Carbono

Más evidencias de la presencia de material carbonoso en el exterior de la nebulosa solar provienen de observaciones de

- Compuestos materiales en los cometas
- Partículas de polvo interplanetarias, que se suponen relacionadas a cometas
- La presencia de materia orgánica “alquitranada” se infiere de las superficies de asteroides C y D, en algunos de los satélites de los planetas exteriores, en los anillos de Urano y en los objetos del cinturón de Kuiper.
- El incremento relativo de C/H con la distancia heliocéntrica está en concordancia con la hipótesis de abundante materia carbonosa en el sistema solar exterior.

Roca, Hielo y Carbono

- Los materiales “alquitranados” tienen más probabilidades de “pegotear” que el agua y podría proveer de un mejor pegamento que el hielo para producir la acumulación rápida de sólidos en el proto-Júpiter.
- Si la materia carbonosa, y no el hielo, es la responsable del crecimiento acelerado de Júpiter, la posición radial de la línea de hielo cerca de 5.2UA debería ser reemplazada por una *línea de alquitrán*, durante el período de máximo crecimiento de Júpiter.
- Consecuentemente, la línea de hielo es ubicada más lejos en la nebulosa. El escenario de una línea de hielo reubicada es apoyada considerando que Neptuno debe contener un gran enriquecimiento de agua (~ 440 veces la solar) para explicar la abundancia de CO.

Incorporación de gases nobles

- El gas nebular que es capturado debe contener H_2 , He, Ne, Ar, Kr y Xe en proporciones solares, siempre y cuando los gases nobles no hayan sido removidos a algún sólido por adsorción, captura o formación de clatratos.
- Si tomamos las abundancias observadas de H y He como referencia, hay sobreabundancia de Ar, Kr y Xe
- Si tomamos las abundancias observadas de Ar, Kr y Xe, hay defecto de H, He y Ne.
- Para explicar la sobreabundancia de gases nobles pesados relativas al hidrógeno, se podría incluir una fuente extra en la forma de planetesimales.
- Veremos por qué los escenarios de entrega de volátiles a Júpiter por planetesimales no es favorable, y que el aparente exceso puede reflejar una separación de H y He de la envoltura molecular de Júpiter hacia la envoltura metálica de H-He.

Incorporación de gases nobles

- La captura de gas por sí sola no puede explicar las abundancias observadas de gases nobles pesados, C y N relativas al H, porque estos no estarían fraccionados y presentarían abundancias solares.
- Para explicar las altas razones de Ar/H, Kr/H, Xe/H, C/H y N/H en Júpiter, se proponen planetesimales helados que contienen a los gases.
- Hay dos modelos que proponen que los volátiles fueron o bien atrapados en el hielo o secuestrados en forma de clatratos hidratados.
- Se sabe de varias formas de carbono (carbón activado, negros de carbón grafitizado) que adsorben eficientemente los gases nobles pesados.
- Por lo tanto, materia carbonosa (en lugar de hielo o clatratos hidratados) podrían transportar los gases nobles en los planetesimales.

Modelos que involucran captura y clatración de volátiles

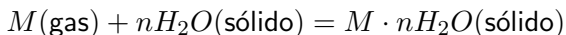
- Owen et al. (1999) propone que los gases nobles son tomados de la nebulosa solar por planetesimales helados amorfos, que luego acreta Júpiter.
- Para atrapar gases nobles en proporciones solares se necesita $\sim 30K$ (inconsistente con las T a 5.2UA).
- Júpiter se debería haber formado a 30UA y luego migrado.

Modelos que involucran captura y clatración de volátiles

- Gautier et al. (2001) propone captura de volátiles en clatratos hidratados en la zona de alimentación de Júpiter.
- Clatratos de la forma $X \cdot n\text{H}_2\text{O}$, con $X=\text{CO}$, N_2 , H_2S u otros gases, y $n = 6$ es el número de moléculas de agua.
- El problema es que se necesita mucho hielo. Ej: si el carbono (CO o CH_4) es llevado a Júpiter por clatratos, se requieren 6 moléculas de H_2O por cada átomo de C. (cuando que en realidad, $\text{H}_2\text{O}/\text{CH}_4 \sim 0.3$).

Fraccionamiento de los gases nobles durante la formación de clatratos hidratados

La presión de equilibrio del vapor determinada por Barrer & Edge (1967) para la reacción de “clatración”



es ajustada a

$$\ln P_M = -\Delta S_C/R + \Delta H_C/RT,$$

Gas M	$-\Delta S_C/R$	$+\Delta H_C/R$ (K)	ΔH_C (kJ mol ⁻¹)	Rango de T (K)	P_M requerida (bars)	P_M disponible (bars)
Ar	10.03 ± 0.04	-1497 ± 5	-12.446	90 – 273	1.96	7.06 × 10 ⁻¹²
Kr	9.996 ± 0.04	-1999 ± 8	-16.620	164 – 273	0.082	3.80 × 10 ⁻¹⁵
Xe	11.08 ± 0.04	-2917 ± 9	-24.252	211 – 273	7.84 × 10 ⁻⁴	3.72 × 10 ⁻¹⁶

Fraccionamiento de los gases nobles durante la formación de clatratos hidratados

- Xe es el que menor entalpía presenta, por lo que es el más estable.
- La presión parcial para estabilizar los clatratos a 160K es mucho mayor que la disponible. Los clatratos de gases nobles son inestables.
- Los clatratos se forman a 42K (Ar), 46K (Kr) y 63K (Xe). La temperatura de condensación del agua ($\sim 160 - 180\text{K}$) es mucho mayor que la requerida para formar clatratos.
- Podrían haberse formado en regiones más alejadas (más frías) y migrar, pero deberían llegar a Júpiter bien preservados, y no evaporarse cuando ingresan en regiones de mayor temperatura.
- A las temperaturas consideradas en este trabajo ($\sim 350\text{K}$), la preservación de los clatratos hidratados mientras se acercan a Júpiter es muy improbable.

Fraccionamiento de los gases nobles durante la formación de clatratos hidratados

- Retención (sin fraccionamiento) de los tres gases nobles (Ar, Kr y Xe) de un gas con composición solar a presiones y temperaturas nebulares supuestas para la región de formación de Júpiter, es improbable que ocurra por formación de clatratos.
- Todavía no se ha demostrado experimentalmente que no hay fraccionamiento entre Ar, Kr y Xe durante la exposición de este gas a hielo amorfo (captura) o hielo cristalino (formación de clatratos) a presiones totales bajas.

Fraccionamiento de los gases nobles durante la adsorción sobre carbono

- La adsorción de gases nobles sobre el carbono provee otro mecanismo de captura de gases nobles en planetesimales.
- Tiene especial interés por el enriquecimiento de C en Júpiter.
- Además de presión y temperatura, la adsorción depende del área del adsorbente.

Fraccionamiento de los gases nobles durante la adsorción sobre carbono

- La adsorción a presiones parciales bajas siguen la ley de Henry, y los datos de cantidad adsorbida (N_M) se ajustan a la ecuación

$$N_M = P_M k_H = P_M k_H^0 e^{E_{\text{ads}}/RT}.$$

Gas	$\ln k_H^0$ (ccmSTP atm ⁻¹) cm ⁻²	$\ln k_H^0$ (mol bar ⁻¹ gC ⁻¹)	E_{ads}/R (K)	E_{ads} (J mol ⁻¹)
Ne	-19.88 ± 0.14	+3.94 ± 0.14	539 ± 13	4480 ± 111
Ar	-19.02 ± 0.02	+4.78 ± 0.02	1176 ± 3	9777 ± 27
Kr	-19.05 ± 0.05	+4.77 ± 0.05	1490 ± 16	12388 ± 136
Xe	-18.77 ± 0.19	+5.05 ± 0.19	1844 ± 60	15331 ± 500

Gas	Rango de T (K)	P_M requerida (bars)	P_M disponible (bars)
Ne	60 – 378	8.42×10^{-6}	1.48×10^{-10}
Ar	140 – 393	3.91×10^{-9}	7.06×10^{-12}
Kr	245 – 393	2.84×10^{-13}	3.80×10^{-15}
Xe	279 – 393	2.23×10^{-15}	3.72×10^{-16}

Fraccionamiento de los gases nobles durante la adsorción sobre carbono

- Las energías de adsorción muestran que la adsorción del Xe es preferida por sobre los gases nobles y que el fraccionamiento ocurrirá.
- Se supone un área específica de 100 m^2 por gramo de carbono, que es valor característico de los negros de carbón grafitizado.
- Si los gases nobles fueron llevados a Júpiter por un transportador de carbono, la relación gas noble/carbono puede ser considerada como un referente de la cantidad sorbida N_M .

Fraccionamiento de los gases nobles durante la adsorción sobre carbono

- Este es un escenario óptimo, se utiliza la máxima cantidad de carbono disponible para adsorción.
- Con respecto a las presiones parciales, el Xe es el más próximo a la P_M requerida, pero aún así la presión parcial requerida es 6 veces la disponible.
- Para Kr, Ar y Ne, las presiones parciales son 75, 550 y 57000 veces más grande, respectivamente que las presiones disponibles
- La adsorción de gases nobles sobre carbono conduce a las abundancias fraccionadas de Ar, Kr y Xe, con el mayor efecto sobre Xe.

Fraccionamiento de los gases nobles durante la adsorción sobre carbono

En conclusión, la entrega a Júpiter de los gases nobles incorporados (capturado, clatratado o adsorbido) en cualquier clase de sustrato es desfavorable por sí sólo debido a que el Ar, Kr y Xe estarían fraccionados con respecto a los valores solares.

Captura de gas de la nebulosa solar y segregación subsecuente de H y He en la capa metálica de Júpiter

- Si los planetesimales helados se formaron en una región distante, Júpiter tendrá estos gases más los que acrete de la nebulosa solar en su zona de alimentación, incorporando también H_2 y He.
- Si H_2 y He indican la fracción de gas solar capturada, la mitad del Ar, Kr y Xe observado es debido a captura y la otra mitad debido a planetesimales.
- Considerando que la abundancia de los gases nobles incorporados debido a los planetesimales deberían estar fraccionados con respecto a la solar, por qué la suma de ambas fuentes dan abundancia solar para el Ar, Kr y Xe sin fraccionamiento?

Captura de gas de la nebulosa solar y segregación subsecuente de H y He en la capa metálica de Júpiter

- Una explicación podría ser que estos gases son acretados por Júpiter del gas nebuloso, produciendo abundancias no fraccionadas similares a la del S.S., como se observa.
- Esto también debería dar abundancias solares de H_2 , He y Ne, pero estos están empobrecidos en la envoltura de Júpiter.
- Una fracción importante de Júpiter es una capa metálica de H y He.
- Supongamos que inicialmente no existe tal capa y que la composición de Júpiter es más o menos homogénea. Cuando comienza a enfriarse, se comienza a formar la capa H+He.
- Si esta capa contiene H, He y, en menor medida, Ne, las abundancias normalizadas con H deberían aumentar, como es observado.

Captura de gas de la nebulosa solar y segregación subsecuente de H y He en la capa metálica de Júpiter

- La composición de la envoltura de Júpiter (X, Y, Z) se obtiene de la tabla de abundancias normalizadas con S, y de suponer que los elementos pesados se encuentran en abundancias elemento/S condríticas.

Frac.	Protosolar	Proto-Júpiter	Env. Júp.	Capa Júpiter
X	0.711	0.712	0.739	0.689
Y	0.274	0.274	0.233	0.309
Z	0.015	0.014	0.028	0.002

- El valor de He en la envoltura (0.233) es ligeramente menor que el medido por *Galileo*, dado que se utilizó la relación $M(He)/(M(He) + M(H))$ y no se tiene en cuenta la contribución de elementos pesados en el denominador.
- Columna 2: Para modelar el proto-Júpiter, las abundancias protosolares son modificadas para que las razones C/S, N/S y O/S coincidan con la envoltura de Júpiter. Esto se hizo colocando la línea de alquitrán a 5.2UA y desplazando más lejos la línea de hielo.
- Columna 3: Envoltura de Júpiter, conociendo las contribuciones de elementos pesados a ésta y al proto-Júpiter.
- Columna 4: Para calcular la composición de la capa metálica se utiliza la relación de equilibrio de masas para X (idem para Y y Z):

$$X_{\text{proto-Júpiter}} = F_{\text{env}} X_{\text{env}} + F_{\text{met}} X_{\text{met}},$$

Captura de gas de la nebulosa solar y segregación subsecuente de H y He en la capa metálica de Júpiter

- F_{env} y F_{met} son las fracciones totales de masa de la envoltura y de la capa metálica de Júpiter, definidas como $F_{\text{env}} + F_{\text{met}} = 1$.
- La capa metálica consiste en (masa) 69% de H, 31% de He y solo 0.2% de elementos pesados (Ne).
- La constancia de las razones gases nobles pesados/S en el S.S y en la envoltura, indican que no hay fraccionamiento entre los elementos pesados.
- Si la capa metálica contiene elementos más pesados que el Ne, deben estar en proporciones solares, como se ve en la envoltura.
- La ecuación de balance de masas entre la envoltura y la capa metálica es $F_{\text{env}} = 45.8\%$ y $F_{\text{met}} = 54.2\%$.

Conclusiones

- Cuando las abundancias en Júpiter se normalizan con el azufre (el elemento más refractario observado en la atmósfera de Júpiter), se observan las siguientes abundancias:
 - ✓ Ar, Kr, Xe y P son solares
 - ✓ C y N están enriquecidos
 - ✓ H, He, Ne y O son subsolares.
- Las abundancias solares de Ar, Kr y Xe son explicadas por captura gravitatoria directa de la nebulosa en la zona de alimentación de Júpiter, aunque esto ya no se cumpliría si también incorpora gases nobles mediante captura o adsorción.
- El empobrecimiento de O (poca agua) se contradice con el modelo de acreción que sitúa una línea de hielo en la región de formación de Júpiter. El enriquecimiento en C permitió proponer como solución una *línea de alquitrán* en lugar de la línea de hielo, y moviendo esta última a regiones más externas.