EL AGUA EN EL UNIVERSO

Asunción Fuente

Observatorio Astronómico Nacional Instituto Geográfico Nacional - Ministerio de Fomento

Abstract

Despite of being interesting by itself, the study of water in the Universe is important to understand the origin of water in the Earth. Thus far, our knowledge of the physics and chemistry of water outside the Solar System has been hampered by the scarce observational data. The Herschel Space Observatory has provided the opportunity of observing water vapor in all astronomical environments. In this paper we summarize the most important results.

Introducción

El agua en estado líquido es necesaria para la existencia de vida en la Tierra tal y como la conocemos. El agua es el líquido que sirve para el intercambio de alimentos y desechos entre el ser vivo y el exterior. El agua tiene además otras propiedades interesantes para los seres vivos como la capilaridad y la dilatación anómala. Gracias a la capilaridad, el agua puede subir a través de las raíces y los tallos de las plantas hasta las hojas en contra de la fuerza de la gravedad. La densidad del agua en estado sólido (hielo) es inferior a la densidad del agua en estado líquido, lo que permite al hielo flotar en el agua permitiendo que la vida continúe en las capas inferiores y evitando que los océanos se congelen. Su papel es también importante en el origen de la vida en la Tierra, pues en el océano se produjeron las reacciones químicas que dieron lugar a la compleja química orgánica que sustenta la vida.

En el Universo hay grandes cantidades de agua. El hidrógeno es el elemento más abundante en el Universo y unas veces en forma atómica (H) y otras en forma molecular (H_2) es responsable de prácticamente la totalidad de la masa visible del Universo. Ésta está dominada por las estrellas. En nuestra galaxia, la masa de las estrellas supone el $\sim 85\,\%$ de

la masa total. El resto, $\sim 15\%$, se concentra en nubes de gas y granos de polvo que llenan el espacio entre las estrellas, es lo que se llama el medio interestelar. Los átomos pesados (aquéllos con masa superior al H, principalmente las de carbono, oxígeno y nitrógeno, C, O, y N respectivamente) se forman en el interior de las estrellas. Al final de la vida de las estrellas, éstas explotan como supernovas en el caso de estrellas masivas o expulsan las capas externas de su envoltura formando nebulosas planetarias en el caso de estrellas de masa similar al Sol, de esta manera los átomos pesados se liberan al espacio incorporándose al medio interestelar. En el medio interestelar el gas y el polvo no se distribuyen uniformemente, sino que se acumulan formando nubes. En las partes más densas de las nubes interestelares, donde la radiación UV (ultravioleta) de las estrellas no puede llegar, se forman las móleculas. Actualmente se han identificado más de 160 moléculas diferentes en el medio interestelar (véase una lista actualizada en el apartado de **Tablas complementarias** de este Anuario), y el número de moléculas detectadas crece cada año debido a la mayor sensibilidad y resolución angular de los radiotelescopios.

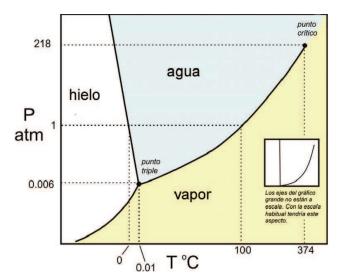


Figura 1: Diagrama de fases del agua en función de la presión y la temperatura (adaptado de *Water in the Universe*, Arnold Hanslmeier, Springer, 2010).

Después del hidrógeno molecular (H_2) , el agua (H_2O) junto con el monóxido de carbono (CO) son la moléculas más abundantes. De hecho, por cada $10\,000$ moléculas de hidrógeno, hay una molécula de agua. En astronomía, esto se suele expresar diciendo que la abundancia del agua

relativa al hidrógeno molecular¹ es 10⁻⁴. El agua se encuentra en todos los entornos en el medio interestelar: regiones de formación estelar, núcleos activos de galaxias, sistemas planetarios y estrellas en las últimas fases de su vida. Se puede decir que el agua es ubicua en nuestro Universo. Sin embargo, resulta muy difícil encontrarla en estado líquido, que es el estado más habitual en la Tierra y el que tiene más interés desde el punto de vista biológico.

En el medio interestelar, el agua se encuentra generalmente en estado sólido (hielo) o gaseoso (vapor de agua). Esto se debe a las peculiares condiciones de presión y temperatura existentes. A la presión en la superficie terrestre (P = 1 atmósfera), el agua puede estar en estado sólido, líquido o gaseoso dependiendo de la temperatura (ver Figura 1). Para temperaturas menores que 0 grados centígrados (= 273 grados Kelvin) el agua se encuentra en estado sólido. Entre 0 y 100 grados centígrados (entre 273 y 373 grados Kelvin), el agua se encuentra en estado líquido. A temperaturas más altas, el agua se evapora. En el medio interestelar la presión es mucho menor que en la Tierra porque tanto la temperatura como la densidad típicas lo son: 10 K (= -263 grados C) y 10^4 núcleos de hidrógeno por centímetro cúbico respectivamente. Para estas presiones $(\sim 10^{-17} \text{ atmósferas})$ el agua sólo puede estar en estado sólido y gaseoso, y la temperatura de evaporación (estrictamente hablando es de sublimación pues se pasa directamente del estado sólido al gaseoso) es 100 grados Kelvin (= -173 grados C) (ver presiones menores que 0,006 atm en la Figura 1). En nuestra Galaxia, esta temperatura sólo se alcanza en las regiones más cercanas a las estrellas y en las zonas del medio interestelar donde se producen choques.

¿Podemos detectar agua en el espacio?

Dentro de nuestro Sistema Solar, se han enviado sondas a distintos planetas y satélites para conocer la composición de su atmósfera y su superficie. Se conoce la existencia de agua en Marte y en algunos satélites de Saturno y Júpiter. En Marte, hay dos grandes casquetes polares de hielo de agua y de dióxido de carbono. Europa, el satélite de Júpiter, está revestido de una capa de agua helada. La sonda Cassini descubrió grandes bloques de agua helada en Titán, luna de Saturno. La sonda Cassini también descubrió volcanes de hielo o géiseres que lanzan vapor de agua y otros gases al espacio en Encelado, luna de Saturno (ver Figura 2). El planeta enano Ceres y el asteroide Palas, que orbitan en el entorno de Marte y Júpiter, también podrían contener agua. El agua es también un componente del hielo que recubre el núcleo de los cometas. Cuando el cometa transita por la cercanía del Sol, este hielo es evaporado formando la cabellera. Sin

embargo, a excepción de nuestro planeta, sobre la superficie de ningún otro cuerpo celeste del Sistema Solar se encuentra el agua en estado líquido. Los astrónomos creen que bajo la gruesa capa de hielo de los satélites Encelado y Europa existen océanos. Por esta razón, está proyectada una misión de exploración no tripulada a Europa cuya función consistiría en introducirse a través del escudo de hielo, cuyo grosor se calcula en 50 kilómetros, hasta toparse con la capa de agua líquida.

404



Figura 2: Representación artística de los volcanes de Encelado detectados por la sonda Cassini en el año 2009 (cortesía de NASA)

Dada la gran distancia que separa al Sol del resto de las estrellas de nuestra galaxia, la detección de agua líquida fuera del Sistema Solar no es posible. Por fortuna, podemos emplear la espectroscopía para detectar el vapor de agua incluso en las galaxias más lejanas. Los astrónomos utilizamos la espectroscopía para conocer la composición química y determinar las condiciones físicas del gas en las nubes interestelares. Dependiendo de su estructura molecular, cada compuesto químico emite radiación a unas frecuencias determinadas dando lugar a líneas espectrales, es decir tiene un espectro característico. Dicho espectro nos permite identificar una molécula de la misma manera que las huellas digitales permiten identificar a los seres humanos. La intensidad de las líneas y los cocientes entre las intensidades de unas y otras, dependen de las condiciones de presión y temperatura del gas. Por tanto, a partir del espectro de un gas se pueden identificar las moléculas que lo componen y determinar sus condiciones físicas.

El vapor de agua interestelar fue detectado por primera vez hace más de 40 años en la nube molecular de Orión a través de la emisión máser de la

¹O sea, el cociente entre el número de moléculas de H₂O y de H₂ es 10⁻⁴.

línea a 22 GHz ² (Cheung et al. 1969). Este tipo de emisión se produce en zonas extremadamente densas y calientes, que son la excepción en el medio interestelar. Por esta razón, el conocimiento sobre la distribución espacial del vapor de agua que se puede tener a partir de la emisión de esta línea es muy limitado. La puesta en marcha del radiotelescopio de 30m de diámetro de IRAM en Pico de Veleta permitió la detección de la emisión máser de las líneas de agua a 183 GHz y 325 GHz. La emisión máser de estas líneas procede de regiones más extensas, lo que permitió realizar por primera vez un mapa de la emisión del vapor de agua en Orión y otras regiones de formación estelar (Cernicharo et al. 1990, 1994; González-Alfonso et al. 1995). Líneas infrarrojas de agua procedentes de regiones muy calientes en la cercanía de las estrellas (a distancias menores que 10 UA) han sido observadas desde Tierra con el Very Large Telescope (VLT) y desde el espacio con el Spitzer Space Telescope. Sin embargo, la mayor parte del vapor de agua en el medio interestelar se encuentra en regiones más frías v menos densas que no emiten en estas líneas.

Para estudiar la distribución espacial del vapor de agua en el medio interestelar, necesitamos observar las transiciones de agua de más baja energía que se hallan en la región del infrarrojo lejano del espectro electromagnético. Desgraciadamente, debido a la gran cantidad de vapor de agua que hay en la atmósfera terrestre, toda la radiación proveniente del espacio a estas frecuencias es absorbida al atravesar la atmósfera, por lo que para observar estas líneas necesitamos telescopios espaciales. En los últimos años, varias misiones espaciales han sido lanzadas teniendo entre sus objetivos la observación del vapor de agua: Submillimeter Wave Astronomy Satellite (SWAS, Melnick et al. 2000); ODIN (e.g., Hjalmarson et al. 2003), y Infrared Space Observatory (ISO) (van Dishoeck 2004). Pero ha sido el Herschel Space Observatory, por su mayor cobertura en frecuencia, su mayor sensibilidad y su mayor resolución angular, el que ha permitido el estudio del vapor de agua en todos los entornos astrofísicos. En la Tabla 1 se listan las líneas más intensas del vapor de agua en las regiones milimétrica y del infrarrojo lejano del espectro, así como el telescopio con el que se pueden (o se han podido) observar.

El Observatorio Espacial Herschel

El observatorio espacial Herschel es el cuarto programa "cornerstone" de la Agencia Espacial Europea (ESA). Fue lanzado desde la Guayana francesa el 14 de mayo del 2009. El satélite lleva a bordo una antena Cassegrain con 3,5 metros de diámetro que es la más grande que se ha lanzado al espacio hasta ahora. La instrumentación que la acompaña permite hacer fotometría y espectrocopía en el rango de 55-671 µm

406 Asunción Fuente

Table 1: Líneas de H₂O observadas

Línea ¹		Freq.(GHz)	λ(μm)	$E_u(K)^2$	Telescopio
H ₂ O	6 \5	22.235	1.35 cm	626	desde Tierra
1120	$6_{1,6} \rightarrow 5_{2,3}$	183.310	1.63 mm	199	desde Tierra
	$3_{1,3} \rightarrow 2_{2,0}$				
	$5_{1,5} \rightarrow 4_{2,1}$	325.153	0.92 mm	458	
	$1_{1,0} \rightarrow 1_{0,1}$	556.936	538.3 μm	61	SWAS, ODIN, Herschel
	$2_{1,2} \rightarrow 1_{0,1}$	1669.905	179.5 μm	114.4	ISO, Herschel
	$1_{1,1} \to 0_{0,0}$	1113.343	$269.3 \mu \text{m}$	53.4	Herschel
	$2_{0,2} \rightarrow 1_{1,1}$	987.927	$303.5 \mu \text{m}$	100.8	Herschel
	$2_{1,1} \rightarrow 2_{0,2}$	752.033	398.6 μ m	136.9	Herschel
	$3_{1,2} \rightarrow 3_{0,3}$	1097.365	$273.2 \mu \text{m}$	249.4	Herschel
	$3_{1,2} \rightarrow 2_{2,1}$	1153.127	$260.0 \mu \text{m}$	249.4	Herschel
	$2_{2,1} \rightarrow 2_{1,2}$	1661.008	$180.5 \mu m$	194.1	ISO, Herschel
	$2_{1,2} \rightarrow 1_{0,1}$	1669.905	179.5 μm	114.4	ISO, Herschel
	$3_{0,3} \rightarrow 2_{1,2}$	1716.770	174.6 μm	196.8	ISO, Herschel
	$3_{1,3} \rightarrow 2_{0,2}$	2164.132	$138.5 \mu \text{m}$	204.7	ISO, Herschel
	$3_{3,0} \rightarrow 3_{2,1}$	2196.346	136.5 μm	410.7	ISO, Herschel
	$4_{0,4} \rightarrow 3_{1,3}$	2391.573	$125.4 \mu m$	319.5	ISO, Herschel
	$4_{1,4} \rightarrow 3_{0,3}$	2640.474	$113.5 \mu m$	323.5	ISO, Herschel
	$2_{2,1} \rightarrow 1_{1,0}$	2773.977	$108.1 \mu \text{m}$	194.1	ISO, Herschel
	$3_{2,2} \rightarrow 2_{1,1}$	3331.458	90.0 μ m	296.8	ISO, Herschel
	$7_{0,7} \rightarrow 6_{1,6}$	4166.852	71.9 μm	843.5	ISO, Herschel

¹ Sólo se listan las transiciones que dan lugar a las líneas más intensas.

²El gigahercio es un múltiplo de la unidad de frecuencia, el hercio. 1 GHz = 10⁹ Hz

² Energía del nivel superior de la transición expresada en grados K. Para que la emisión del vapor de agua en una transición sea intensa, el gas debe tener una temperatura mayor que $E_u/2$.

(Pilbratt et al. 2010; de Graauw et al. 2010). Varias líneas de agua caen en este rango de longitudes de onda permitiendo un estudio detallado de la distribución espacial y las condiciones físicas del vapor de agua en el medio interestelar. Para una completa información sobre el Observatorio Espacial Herschel, ver el artículo "El Observatorio Espacial Herschel" publicado por Pere Planesas y Javier Graciá Carpio en el Anuario del Observatorio Astronómico Nacional del año 2007. A continuación se detallan algunos de sus principales aportaciones en los dos años que han transcurrido desde su lanzamiento.



Figura 3: Representación artística del Telescopio Espacial Herschel (cortesía de la Agencia Espacial Europea, ESA).

El agua en las nubes donde se forman las estrellas

Las estrellas se forman en los núcleos fríos (T~10 K) y densos (más de 10000 moléculas de hidrógeno por centímetro cúbico) de las nubes interestelares. A estos núcleos se les denomina condensaciones pre-estelares. En estas zonas prácticamente toda el agua se encuentra formando mantos de hielo en la superficie de los granos de polvo. El agua congelada en los granos de polvo, puede transformarse en vapor de agua si el grano se calienta hasta alcanzar una temperatura mayor que 100 K (temperatura de sublimación del agua a las presiones existentes en el medio interestelar). Cuando los granos están a una temperatura inferior, existen otros mecanismos que pueden devolver parte de las moléculas de agua a la fase gaseosa manteniendo cierta cantidad de vapor de agua en la nube. Estos mecanismos son: fotodesorción (la molécula de agua absorbe

408 Asunción Fuente

un fotón ultravioleta y la energía adquirida le sirve para pasar a la fase gaseosa), *sputtering* (parte de la energía cinética disipada en un choque se utiliza para liberar las moléculas de agua y devolverlas al gas) y desorción por rayos cósmicos y rayos X.

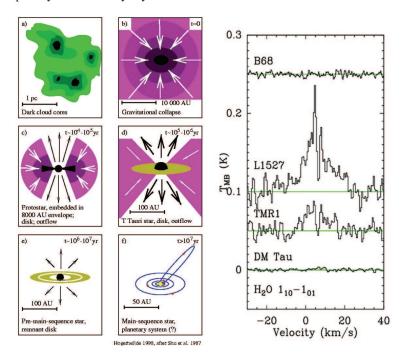


Figura 4: A la izquierda se muestra un esquema de la formación de una estrella de masa similar al Sol. Los paneles a) y b) corresponden a la fase de condensación pre-estelar. Los paneles c) y d) corresponden a la fase de proto-estrella, en la que mientras la estrella adquiere la totalidad de su masa, se producen fuertes eyecciones bipolares. Los paneles e) y f) corresponden a una estrella adulta rodeada de un disco protoplanetario. A la derecha mostramos observaciones de la línea H_2O $1_{1,0} \rightarrow 0_{0,1}$ en una condensación pre-estelar (B68), dos protoestrellas (L1527 y TMR1) y un disco protoplanetario (DM Tau). Es evidente la gran variación que se produce en la emisión del vapor de agua durante la formación y vida de una estrella (van Dishoeck et al., 2011).

Observaciones recientes con el telescopio espacial Herschel demuestran que la abundacia de vapor agua en el interior de los núcleos densos y fríos de las nubes interestelares es menor que 1,3 10⁻⁹ pudiendo aumentar

hasta $\sim 10^{-8}$ en la parte externa de la nube debido a la fotodesorción. Esta abundancia es mucho menor que la abundancia esperada para el agua, 10^{-4} , lo que indica que prácticamente la totalidad del agua se halla atrapada en los hielos. En la Figura 4 se muestra el espectro a la frecuencia de la transición H_2O $1_{1,0} \rightarrow 0_{0,1}$ obtenido con Herschel en la condensación preestelar B68. Como vemos, el agua no ha sido detectada en este núcleo frío.

Cuando comienza el colapso, en el interior de la nube se forma un objeto proto-estelar (embrión de estrella) que calienta el gas y el polvo hasta una temperatura mayor que 100 K. Esta región caliente es muy pequeña (típicamente unos pocos centenares de unidades astrónomicas) y se denomina *hot core* o *hot corino* (dependiendo de la masa de la estrella). En estos núcleos calientes la temperatura de los granos excede la temperatura de evaporación del agua y prácticamente la totalidad del agua regresa a la fase gaseosa. Paralelamente, en estas primeras fases de la formación de las estrellas se producen fuertes vientos y eyecciones bipolares que crean choques en la nube materna de la misma manera que un buque crea una frente de choque cuando avanza por el océano. En estas regiones de choque, todo el agua es liberada a la fase gaseosa debido al *sputtering* y la temperatura del gas asciende a miles de grados Kelvin.

En la Figura 4 se muestran los espectros de la transición $H_2O 1_{1,0} \rightarrow 0_{0,1}$ observados con Herschel en las proto-estrellas L1527 y TMR1. La emisión de la línea de vapor de agua es muy intensa en estas proto-estrellas. Es también de destacar, que las líneas son muy anchas en velocidad, con anchuras mayores que 20 km s⁻¹ (unos 70.000 km/h), lo que sugiere que la mayor parte de la emisión proviene de las regiones de choque producidas cuando los vientos y las eyecciones bipolares golpean a la nube. La cantidad de masa de la nube afectada por los choques es mucho mayor que la cantidad de masa que forma el *hot corino* y la temperatura del gas es también mayor. Por tanto, es la emisión del vapor de agua producido en los choques la que domina el espectro.

Esta interpretación es confirmada por los mapas de agua que se han realizado en este tipo de protoestrellas. En la Figura 5 se muestra un mapa de la emisión de agua a 179 μ m en la estrella joven L1157mm. La mayor parte de la emisión no proviene de las cercanías de la estrella, sino de los choques entre las eyecciones bipolares y la nube materna. La abundancia de vapor de agua en las zonas de choque es tan alta, $\sim 10^{-4}$, que podemos decir que prácticamente todo el oxígeno se encuentra en forma de agua.

En los espectros de agua de L1527 y TMR1 mostrados en la Figura 4, se puede observar una pequeña (auto-)absorción en el centro de la línea. Esta absorción nos permite saber que la abundancia máxima del agua en el gas de la nube materna que no está afectada por los choques ni por el *hot corino* es de $\sim 10^{-8}$, similar a la que había antes de formarse la estrella.

410 Asunción Fuente

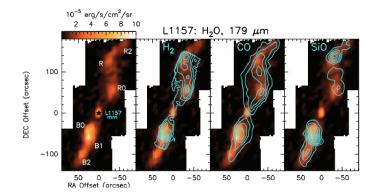


Figura 5: En el panel de la izquierda se muestra el mapa de la emisión de la línea de vapor de agua a 179 µm realizado con Herschel en la proto-estrella L1157-mm. Nótese que la mayor parte de la emisión de agua procede de las zonas de choque entre las eyecciones bipolares y la nube materna. En el resto de los paneles se compara la emisión de agua con otros trazadores de choque encontrándose una buena correspondencia (Nisini et al. 2010).

El agua en discos proto-planetarios

Durante a formación de las estrellas, las eyecciones bipolares, los vientos y la radiación ultravioleta producida por la joven estrella dispersan el gas y el polvo de la nube. Cuando la estrella llega a la edad adulta, lo único que resta de la nube materna es un pequeño disco circunestelar. En este disco circunestelar se formarán los futuros planetas, por lo que también recibe el nombre de disco proto-planetario. La detección de agua en discos protoplanetarios ha sido y sigue siendo un objetivo prioritario de Herschel, debido a las implicaciones que un descubrimiento de este tipo tiene para comprender el origen del agua en la Tierra. Bergin et al. (2010) publicó una detección tentativa de la línea de H_2O $1_{1,0} \rightarrow 0_{0,1}$ en el disco proto-planetario de DM Tau (ver Figura 4). La intensidad de esta línea es un factor 20-230 más débil de lo que predicen los modelos. La explicación más aceptada para esta falta de vapor de agua es que un 95 %-99 % del agua se encuentra en forma de hielo en los granos de polvo que se acumulan en el plano medio del disco. El telescopio espacial Spitzer había detectado con anterioridad vapor de agua en las partes más internas (distancias a la estrella menores que 10 UA) de algunos discos proto-planetarios con una abundancia similar a la esperada. Uniendo la información procedente de ambos telescopios llegamos a la conclusión de que la abundancia y estado del agua cambian con la distancia a la estrella en los discos protoplanetarios. Mientras que en las regiones cercanas a la estrella el agua está

en estado gaseoso, en las regiones más alejadas (\sim 100 UA), el agua parece estar esencialmente en forma de hielo que se sitúa en el plano medio del disco. El límite que separa una región de otra es lo que se llama *snowline*.

411

El agua en las envolturas de las estrellas viejas

Durante la edad adulta, las estrellas obtienen energía mediante la fusión del hidrógeno. La fusión del hidrógeno consiste en formar un átomo de helio a partir de cuatro átomos de hidrógeno. El Sol, con una edad de 4500 millones de años, se encuentra en esta fase de su vida. Pero dentro de 4000 o 5000 millones de años, el Sol habrá gastado todo el hidrógeno de su interior y entrará en la fase de gigante roja. Durante esta fase su tamaño aumentará en más de cien veces, llegando a engullir a Mercurio, Venus, incluso quizás a la Tierra, y la temperatura de su superficie descenderá hasta unos 2000 K, lo que permitirá que se formen moléculas en su atmósfera (entre otras, el agua). Siguiendo con su evolución, en una etapa posterior, el Sol expulsará sus capas externas perdiendo una fracción significativa de su masa. Estas capas formarán primero una envoltura fría alrededor de lo que queda de estrella. Esta envoltura se expandirá hasta ser expulsada y los átomos pesados se incorporarán al medio interestelar. La última etapa se conoce con el nombre de nebulosa planetaria. Herschel nos ha permitido estudiar la abundancia de vapor de agua en las envolturas frías (unos 1000 K) y masivas de las gigantes rojas y en las envolturas más extensas y tenues de las nebulosa planetarias, planteando nuevos problemas al estudio de la química en estos objetos.

Las moléculas que se forman en la envoltura de las estrellas evolucionadas y su abundancia dependen de la razón C/O, que a su vez depende de la masa de la estrella y de su estado evolutivo. En general, podemos decir que las estrellas carbonadas (C/O mayor que 1 en su envoltura) tienen menor masa que las estrellas oxigenadas (C/O menor que 1 en su envoltura). En las estrellas oxigenadas, las moléculas que se espera que sean más abundantes son CO y H₂O, con una abundancia de vapor de agua respecto al hidrógeno molecular entre 10^{-7} y 10^{-6} , similar a otras regiones del medio interestelar. Sin embargo, en las estrellas carbonadas, las moléculas más abundante deberían ser CO y C₂H₂ con una abundancia muy pequeña de vapor de agua. Los resultados obtenidos con SWAS y Herschel contradicen estos modelos. La primera sorpresa fue la detección de vapor de agua en la estrella carbonada IRC+10216 realizada con el telescopio espacial SWAS (Melnick et al. 2001). Diversas explicaciones se propusieron para explicar esta inesperada detección de vapor de agua. Una posible explicación era que el agua procedía de las regiones de choque que se producen en la envoltura entre los vientos más recientes y el gas expulsado anteriormente. Otra, más exótica, era que el agua procedía de la evaporación de cometas u objetos rodeados de hielo que orbitarían alrededor de la estrella. La re412 Asunción Fuente

ciente detección con Herschel de vapor de agua en 8 estrellas carbonadas (Neufeld et al. 2011), y la similitud entre los perfiles de las líneas de CO y $\rm H_2O$ contradicen esta última interpretación. La formación de agua en la envoltura de estas estrellas debe ser el resultado de choques en su envoltura, o de fotones ultravioletas interestelares que iluminan la envoltura de la estrella desde el exterior.

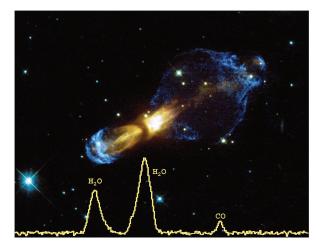
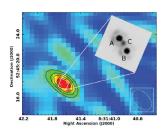


Figura 6: Ejemplo de espectro de vapor de agua y monóxido de carbono obtenido con el Observatorio Espacial Herschel (amarillo claro) en la nebulosa planetaria OH231.8+4.2, superpuesto a una imagen óptica de la nebulosa obtenida con el Telescopio Espacial Hubble (cortesía de V. Bujarrabal, investigador principal del programa clave de Herschel HIFISTARS).

El agua en otras galaxias

El vapor de agua no sólo es un ingrediente fundamental del medio interestelar en nuestra Galaxia sino también en las galaxias externas. Herschel ha permitido la observación de vapor de agua en la galaxia ultraluminosa Markarian 231 (González-Alfonso et al. 2010) y la galaxia con brotes de formación estelar M 82 (Weiß et al. 2010). El origen de la emisión es diferente en estas dos galaxias. En Markarian 231, la emisión procede del núcleo de la galaxia. Los rayos X producidos por el agujero negro que hospeda en su interior y los fuertes choques son los responsables de que gran cantidad de moléculas de agua se hallen formando vapor de agua en este núcleo activo. En M 82 la emisión de vapor de agua parece estar asociada a una componente más difusa que rodea el núcleo de la galaxia formando un halo.



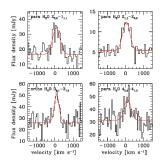


Figura 7: A la derecha se muestran los espectros de las líneas de agua observadas en APM 08279+5255 utilizando el interferómetro de IRAM del Plateau de Bure (Francia). El mapa en color corresponde a la emisión integrada de la línea de $2_{1,1} \rightarrow 2_{0,2}$ de H_2O . En grises aparece la imagen de la galaxia en infrarrojo (Van der Werf et al., 2011).

Probablemente el descubrimiento más impactante en cuanto a la detección de agua en galaxias externas ha sido la reciente detección de vapor de agua en el quásar APM 08279+5255 realizado con el interferómetro de IRAM situado en el Plateau de Bure (Francia) (Lis et al., 2011; Van der Werf et al. 2011). La galaxia APM 08279+5255 está situada a un corrimiento hacia el rojo de z=3,91, lo que implica que la emisión que observamos proviene del Universo temprano, cuando la edad del Universo era aproximadamente un décimo de la edad actual (la edad actual es de unos 13 700 millones de años). El análisis de las líneas de agua detectadas muestra que su emisión proviene del núcleo de la galaxia donde grandes cantidades de agua son producidas por los choques y los rayos X procedentes del agujero negro en su interior. Esta lejana galaxia parece más similar a Markarian 231 que a M 82. El estudio del agua en este caso, y su comparación con las galaxias más cercanas Markarian 231 y M 82, nos permite tener una idea de cómo eran las galaxias en el joven Universo.

¿Qué hemos aprendido con Herschel sobre el origen del agua en la Tierra?

Toda el agua que hay en nuestro planeta se formó en la más tierna infancia de la Tierra, hace unos 2500 millones de años. En la actualidad el agua puede cambiar de fase como cuando se evapora de los océanos, o de sitio con los cambios climáticos, pero la cantidad total permanece prácticamente constante. De hecho ha sido constante desde que apareció la vida en la Tierra y el agua que bebemos ahora la compartimos con todos los seres vivos que han habitado y habitarán la Tierra.

414 Asunción Fuente

Hay diversas teorías sobre cómo se formaron los océanos, aunque ninguna de ellas da una explicación totalmente satisfactoria. En los discos proto-planetarios hay agua en estado sólido y gaseoso. El agua de los océanos podría provenir de la mezcla de rocas y gases a partir de la cual se formó la Tierra. Pero las teorías de formación de planetas predicen que la mayor parte de ese agua escaparía al espacio en los primeros millones de años de vida del planeta cuando la Tierra era menos masiva de lo que es hoy en día. La temperatura del planeta en ese momento era tan alta que todo el agua estaba en estado gaseoso y dado que la Tierra era muy poco masiva, su gravedad no era suficiente para retener las moléculas de vapor de agua en su atmósfera, que escaparían al espacio. Unos 20 o 30 millones de años después de su formación, la Tierra sufrió el impacto de un gran meteorito que le desgajó un trozo, la Luna. Algunos investigadores piensan que en ese impacto pudo formarse, además de la Luna, gran parte del agua. Otra de la teorías más aceptadas propone que el agua podría provenir del impacto de cometas recubiertos de hielo en la joven Tierra. Los choques entre cometas y planetas eran bastante frecuentes en las épocas más tempranas del Sistema Solar.

Una manera de averiguar el origen del agua de la Tierra es midiendo la cantidad relativa de agua deuterada respecto al agua normal (HDO/H₂O) en los cometas y compararla con la razón que se mide en los océanos. Todo el hidrógeno y deuterio (D) del Universo fue formado en el Big Bang y la razón es D/H=0,00001. Sin embargo, la razón HDO/H₂O cambia dependiendo del las condiciones físicas del lugar en el que se forman ambas moléculas. Si el agua de la Tierra procede de un meteorito o cometa, la razón HDO/H₂O en los cometas debería ser la misma que la de los océanos (0,015 % = 0,00015).

Hasta ahora, la razón HDO/ H_2O en los cometas en que se había medido era dos veces mayor que la de los océanos lo que contradecía la teoría del origen cometario del agua. Recientemente, se ha medido la razón HDO/ H_2O en el cometa Hartley 2 utilizando el observatorio espacial Herschel. La razón HDO/ H_2O es casi idéntica a la de los océanos. La diferencia entre este cometa y los cometas estudiados anteriormente es que el cometa de corto periodo Hartley 2 se originó en el cinturón de Kuiper situado más allá de Neptuno, en los confines del Sistema Solar, mientras los otros cometas estudiados, aunque se piensa que se formaron en la región de los planetas gigantes, debieron ser eyectados por estos en las primeras etapas de la formación del sistema solar hasta la nube de Oort, de donde provienen ahora. Este descubrimiento abre de nuevo la posibilidad del origen cometario del agua en la Tierra. El agua podría proceder en parte de choques de cometas formados en el cinturón de Kuiper con la Tierra.



Figura 8: Imagen del cometa 103P/Hartley 2 tomada en 2010 por la sonda EPOXI (cortesía de NASA/JPL-Caltech/UMD)

Conclusiones

El agua, un compuesto esencial para la vida en la Tierra, es una de las moléculas más abundantes del Universo. Debido a las condiciones de presión y temperatura del medio interestelar, el agua se encuentra generalmente en estado sólido o gaseoso fuera de la Tierra. El lanzamiento del Observatorio Espacial Herschel nos ha permitido conocer con detalle la distribución del vapor de agua en el Universo. Ahora sabemos que en las nubes moleculares de nuestra Galaxia el agua se encuentra esencialmente en estado sólido, siendo uno de los principales componentes de los mantos helados que rodean los granos de polvo. El vapor de agua sólo es abundante en las regiones cerca de las estrellas, donde debido a las altas temperaturas y a los choques que producen las eyecciones bipolares, los hielos se destruyen y las moléculas de agua se transfieren al estado gaseoso. En las últimas etapas de la vida de las estrellas, el agua se forma en cantidades apreciables en las envolturas de las gigantes rojas. Cuando las gigantes rojas llegan al estado de nebulosa planetaria, el gas de las envolturas va siendo expulsado poco a poco al medio interestelar donde las moléculas de agua son destruídas por la radiación ultravioleta liberando los átomos de O e H, que posteriormente servirán para formar nuevos compuestos (entre ellos, agua) en las nubes moleculares.

El agua es también una molécula muy abundante en otras galaxias. En algunas de ellas, debido a los rayos X que producen sus agujeros negros, a los choques entre nubes, o a la intensa formación estelar que hay en sus núcleos (órdenes de magnitud mayor que en el núcleo de nuestra galaxia), la abundancia del vapor de agua es tan grande que puede ser detectado con nuestros telescopios.

Respecto al origen el agua en nuestro planeta, éste sigue siendo aún un tema muy controvertido. La observación del agua en nuestro Sistema Solar 416 Asunción Fuente

y en otros lugares del Universo, en concreto en los discos proto-planetarios, es imprescindible para desvelar nuestro propio origen.

Referencias

- A. Hanslmeier, Water in the Universe, ed. Springer.
- E. A. Bergin, M. R. Hogerheijde, C. Brinch et al. Astronomy & Astrophysics, 521, L33 (2010).
- P. Caselli, E. Keto, L. Pagani et al. Astronomy & Astrophysics, 521, L29 (2010).
- A. C. Cheung, D. M. Rank, & C. H. Townes. Nature, 221, 626 (1969).
- J. Cernicharo, C. Thum, H. Hein et al. Astronomy & Astrophysics, 231, L15 (1990).
- J. Cernicharo, E. González-Alfonso, J. Alcolea, R. Bachiller & D. John. Astrophysical Journal, 432, L59 (1994).
- T. de Graauw, F. P. Helmich, T. G. Phillips et al. Astronomy & Astrophysics, 518, L6 (2010).
- E. González-Alfonso, J. Cernicharo, R. Bachiller & A. Fuente. Astronomy & Astrophysics, 293, L9 (1995).
- E. González-Alfonso, J. Fischer, K. Isaak et al. Astronomy & Asrophysics, 518, L43 (2010).
- Å. Hjalmarson, U. Frisk, M. Olberg et al. Astronomy & Astrophysics, 402, L39 (2003).
- D. C. Lis, D. A. Neufeld, T. G. Phillips, M. Gerin & R. Neri. Astrophysical Journal, 738, L6 (2011).
- G. J. Melnick, J. R. Stauffer, M. L. N. Ashby et al. Astrophysical Journal, 539, L77 (2000).
- G. J. Melnick, D. A. Neufeld, K. E. S. Ford, D. J. Hollenbach & M. L. N. Ashby. Nature, 412, 160 (2001).
- D. A. Neufeld, E. González-Alfonso, G. Melnick et al. Astrophysical Journal, 727, L29 (2011).
- B. Nisini, M. Benedettini, C. Codella et al. Astronomy & Astrophysics, 518, L120 (2010).
- G. L. Pilbratt, J. R. Riedinger, T. Passvogel et al. Astronomy & Astrophysics, 518 L1 (2010).
- P. P. van der Werf, A. Berciano Alba, M. Spaans et al. arXiv:1106.4825 (2011).
- E. F. van Dishoeck. Anual Review Astronomy & Astrophysics, 42, 119 (2004).
- E. F. van Dishoeck, L. E. Kristensen, A. O. Benz et al. PASP, 123, 138 (2011).
- A. Weiß, M. A. Requena-Torres, R. Güsten, S. García-Burillo et al. Astronomy & Astrophysics, 521, L1 (2010).
- NASA, http://www.nasa.gov/home/index.html.
- ESA, http://www.esa.int/esaCP/Spain.html.
- Herschel Science Center, http://herschel.esac.esa.int/latest_ news.shtml.