

La tecnología de vacío en la simulación espacial*

Jesús Manuel Sobrado y José Ángel Martín-Gago

La Tierra está rodeada, esencialmente, de vacío. Por tanto, una de las formas de profundizar en el conocimiento del espacio es mediante la utilización de equipos de vacío. No sólo se trata de comprender el funcionamiento de los cuerpos celestes o de los procesos que ocurren en el espacio sino también en la superficie de muchos de los planetas, incluyendo las capas altas de la atmósfera terrestre. Un sistema de vacío puede ser un entorno adecuado donde recrear diferentes ambientes espaciales controlando algunos de los parámetros físicos del sistema (como presión total, composición de los gases, radiación, temperatura...). La simulación espacial utilizando equipos de vacío es una poderosa herramienta para preparar misiones espaciales, interpretar datos de las mismas o simplemente para investigar cómo se comporta la materia en esas condiciones.

1. Introducción

Con el lanzamiento del primer satélite Sputnik [1] comienza una nueva era tecnológica que ha permitido a la humanidad explorar el universo físicamente [2]. Este año se ha cumplido el 40 aniversario de la llegada del hombre a la Luna. Del fruto de este empeño y de otros de la misma naturaleza, como fue el primer *Martizaje* por la sonda Viking, o la puesta en marcha del proyecto internacional común para la construcción de la estación espacial internacional, la sociedad ha obtenido un elevado beneficio tecnológico. Podemos afirmar que la frase pronunciada por Neil Armstrong cuando pisó Luna se ha hecho realidad: “Este es un pequeño paso para el hombre, pero un gran paso para la humanidad”.

La ventana abierta hacia el espacio nos acerca al conocimiento que tenemos sobre nosotros mismos. No olvidemos que formamos parte del sistema solar en el planeta Tierra y que estamos, por tanto, rodeados de vacío, en medio de fuerzas gravitatorias y electromagnéticas, que convierten nuestro planeta en una maravillosa perla azul en un vasto territorio negro. (En 1990, en la misión “Voyager”, Carl Sagan, insistió antes de que la sonda abandonase el sistema solar, que tomase fotografías de la tierra vista desde el exterior. Las imágenes tardaban 5 horas y media en ser recibidas en la Tierra) [3]. Fruto de esta necesidad de conocimiento surge el planteamiento de buscar nuevas formas de conocer el espacio que nos rodea. El espacio está esencialmente vacío. Parece por tanto evidente, que los avanzados sistemas de vacío actuales puedan ayudarnos a comprender mejor los procesos y mecanismos que ocurren fuera de la atmósfera terrestre. No sólo en el espacio interestelar, sino también sobre la superficie de muchos de los planetas y objetos celestes en los que su presión atmosférica sea menor que la terrestre. Así, un sistema de vacío puede ser un entorno adecuado donde recrear diferentes ambientes espaciales, controlando algunos

de los parámetros físicos del sistema para poder aprender sin necesidad de desplazarnos materialmente.

Las misiones espaciales presentan un número elevado de inconvenientes. Una de las principales críticas que han recibido siempre es su elevado coste. Por ejemplo, una misión “económica” a Marte, como pudo ser la Mars Express, tuvo un costo aproximado de unos 1000 millones de euros. Otro inconveniente es el largo tiempo necesario para realizarlas, ya que desde que una misión se concibe en los despachos hasta que se concluye pasa más de una década. Parece por tanto necesario asegurar todos los parámetros y, para ello, probar y calibrar lo mejor posible y en las mismas condiciones de operación, la instrumentación de la misión. Este es el marco en el que hay que entender la simulación en sistemas de vacío. Como una plataforma que nos permita reproducir condiciones planetarias e interestelares. Esta simulación tiene, por tanto, un doble objetivo. Por una parte preparar las misiones espaciales y, por otra, ayudar a entender los resultados obtenidos por las mismas.

La simulación de un problema complejo permite acotar y separar de forma controlada las variables relevantes de un sistema aislado. Es una manera de resolver pequeños problemas obteniendo valiosa información sobre el funcionamiento de sistemas en condiciones muy específicas. De este modo se van creando parámetros o esquemas de comportamiento que son fácilmente reproducibles, si se respetan todas las variables iniciales. Es importante conocer las limitaciones de la simulación. Al realizar la simulación en la Tierra, son dos normalmente los factores limitantes, las dimensiones de la cámara de vacío y la gravedad [4]. Este último es el menos relevante, ya que en la simulación de atmósferas o superficies planetarias, la gravedad es un factor existente que no determina las condiciones climatológicas de la atmósfera. Sin embargo las dimensiones si son importantes, ya que limitan los diferentes gradientes de presión y temperatura,

* Los cuatro primeros artículos de "Temas de Física" del presente número pertenecen al grupo de artículos sobre la Física del Vacío en España. Por razones de espacio no pudieron incluirse en el número anterior de la Revista Española de Física (Nota de la Redacción).

así como los niveles de radiación en función de la altura a la superficie. El volumen interno de una cámara así como la superficie interna limitan la transferencia de energía (calor), y por tanto la homogeneidad del sistema.

En este trabajo vamos a describir como recrear distintos ambientes espaciales y planetarios mediante el uso de entornos de vacío. Daño del ADN por la radiación espacial, estabilidad de fases cristalinas de minerales en la superficie de Marte, comportamiento de sensores frente al polvo marciano o supervivencia de esporas en un viaje espacial o superficie planetaria, son algunos ejemplos de una interminable lista de temas interdisciplinar que se pueden estudiar en equipos de simulación. Veremos cuáles son los parámetros importantes para reproducir una atmósfera planetaria en un laboratorio, o para poder estudiar los hielos que se forman en el medio interestelar denso. Estas ideas se han materializado en la creación de una serie de máquinas de vacío que describiremos y que están operativas dentro de la unidad de simulación de ambientes planetarios y microscopía del Centro de Astrobiología [5].

2. La simulación espacial y de atmósferas planetarias

Planetas con atmósferas singulares, residuos de explosión de estrellas, espacio profundo o la entrada de meteoritos en una atmósfera planetaria, son algunos de los objetos y procesos que ocurren en el espacio. Un entorno espacial se puede caracterizar en función de muchos parámetros, que cruzados dan como resultado la recreación de un sistema concreto. Las principales variables que definen un sistema de simulación en un entorno espacial son la presión total, la composición de gases, la temperatura local o en la superficie de objetos planetarios, la temperatura ambiental, y la radiación recibida.

Estas variables son muy generales. Para poder implementar una instrumentación adecuada que responda a un determinado problema, es necesario conocer su rango de variación [6]. A partir de este dato se desarrolla la tecnología necesaria para poder controlar y monitorizar estas variables en un entorno de vacío. Vamos a hacer un repaso de los rangos de cada una de ellas y del tipo de instrumentación que deberíamos utilizar en cada caso.

La presión atmosférica

Puesto que vamos a utilizar para la simulación sistemas de vacío, la presión total debe de ser menor que la presión atmosférica. Esta es la primera limitación, que excluye automáticamente el estudio de planetas como Venus, cuya presión en la superficie es unas 90 veces mayor que la de la Tierra [7]. Estos planetas, así como el interior de océanos y mares de hielo que puedan existir en objetos planetarios como Europa (luna de Júpiter), deben de estudiarse mediante cámaras de alta presión, que incorporan una tecnología completamente distinta.

Es muy difícil dar valores precisos para la presión total en diferentes entornos planetarios o interestelares, y de hecho se encuentra frecuentemente bibliografía contradictoria. No

obstante intentaremos dar algunas estimaciones y sobre todo, los rangos aproximados de estos parámetros para algunos entornos espaciales.

El espacio interplanetario

En el espacio interplanetario, por ejemplo, la presión viene determinada por el viento solar y por moléculas provenientes de las atmósferas de los distintos cuerpos celestes que lo pueblan, como cometas, o planetas. En física del espacio se suele utilizar la presión dinámica, que se define como: $P = 1.6726 \cdot 10^{-6} \cdot n \cdot v^2$. Donde la presión viene en nPa, n es la densidad en partículas por cm^3 y v es la velocidad en $\text{km} \cdot \text{s}^{-1}$. Esta fórmula, aplicada para el viento solar en las inmediaciones de la Tierra, que tiene un número de partículas aproximado de 4 por cm^3 , permite estimar la presión del viento solar como del orden de 10^{-11} mbar. (La unidad de presión en vacío es el Pascal, $1 \text{ mbar} = 100 \text{ Pa} [\text{N}]/[\text{m}^2]$. Históricamente se empleaba el Torr, como homenaje a Evangelista Torricelli. $1 \text{ mbar} = 0,75 \text{ Torr} [\text{mm Hg}]$. Nosotros en este trabajo utilizaremos el mbar, que aunque no es la unidad en el sistema internacional, es la utilizada mayoritariamente por la comunidad científico-tecnológica en equipos de alto y ultra alto vacío). El viento solar lo forman protones, partículas alfa, iones pesados y electrones, que fluyen desde la superficie del Sol con velocidades de hasta 800 Km/s. Como el viento solar es un plasma, este lleva consigo parte del campo magnético solar, por lo que las partículas de viento solar que son atrapadas en el campo magnético terrestre provocan entre otras cosas las auroras boreales y australes cuando chocan con la atmósfera terrestre cerca de los polos. Sabemos que el borde del sistema solar lo forma la burbuja del viento solar en el medio interestelar. En el punto en el que el viento solar no ejerce presión para desplazar el medio interestelar, se considera que es el borde más exterior del sistema solar [8].

Si nos acercamos a algún cuerpo celeste, es la emisión de gases del mismo la que limita la presión total. Así, por ejemplo, cerca de la estación espacial internacional la presión viene determinada por los propios gases de la estación y otras partículas atrapadas por el campo gravitatorio de la misma, siendo esta del orden de $10^{-4} - 10^{-5}$ mbar.

Fuera del espacio interplanetario, en *el espacio interestelar*, donde las temperaturas son muy bajas y la densidad molecular prácticamente inexistente, el concepto de presión deja de tener sentido. Sin embargo, encontramos zonas del espacio interestelar, las llamadas nubes de polvo, en las que se detecta acumulación de material. Así, en el llamado medio interestelar difuso, (aquel cuya densidad es menor que 10^3 partículas $\cdot \text{cm}^{-3}$), el principal componente gaseoso es el hidrógeno atómico. A causa de la gran cantidad de fotones y rayos cósmicos la temperatura típica del polvo en el medio interestelar difuso es de 100 K y sus principales componentes, según se deduce de las observaciones por absorción en el infrarrojo, son el hidrógeno, silicatos amorfos y carbono amorfo hidrogenado. Su presión, puede ser estimada entonces como del orden de $10^{-15} - 10^{-20}$ mbar. Por otra parte está el denominado medio denso (nubes moleculares con densidades ente

$10^3 - 10^6$ partículas \cdot cm $^{-3}$), cuyo principal componente gaseoso es el hidrógeno molecular. Aunque la densidad molecular en este caso es mucho mayor, la temperatura es muy baja en su interior, hasta unos 10 K, debido al apantallamiento de la radiación UV en las capas externas de la nube. Las partículas de polvo, como las presentes en el medio difuso, se cubren de mantos de hielo con espesores del orden de 0.01 micras. Por tanto la presión total puede ser del orden de $10^{-12} - 10^{-18}$ mbar.

Se ha dicho en algunas ocasiones que las presiones del medio interestelar no son alcanzables en un laboratorio. Esto no es del todo cierto. En realidad no son medibles. En algunas líneas criogénicas de He líquido, se estima que la presión residual puede ser de 10^{-30} mbar, y es debida exclusivamente a la desorción por rayos cósmicos de los gases de las paredes del recipiente. El problema reside en que no existe actualmente tecnología para medir el vacío por debajo de $10^{-14} - 10^{-15}$ mbar. En el CERN, con manómetros modificados del tipo Bayard-Alpert se han podido medir presiones de hasta $2 \cdot 10^{-14}$ mbar [9].

En el caso de la mayor parte de *los planetas* la presión sí es una magnitud alcanzable y con sentido físico. Así la presión media en la superficie de Marte es de unos 7 mbar, o en Tritón de 10^{-2} mbar. Las atmósferas planetarias de la mayoría de los cuerpos del sistema solar son conocidas por observaciones de IR. Sin embargo, no hay que olvidar que la presión total en un planeta depende de la altura. Por ejemplo, en la tierra a 86.000 m de altura la presión es de 10^{-2} mbar. (100.000 veces menor que la atmosférica). Por tanto debemos tener en cuenta esta dependencia cuando queramos simular la presión en la atmósfera marciana o la superficie marciana.

La figura 1 representa una gráfica en la que se resumen los distintos rangos del vacío junto con las bombas necesarias para alcanzarlos. En la figura vemos que las presiones interplanetarias y del medio interestelar son sólo reproducibles en sistemas trabajando en las llamadas de vacío extremo (XHV-del inglés, *extreme high vacuum*). Sin embargo, experimentos que se realicen en la estación espacial internacional, pueden simularse utilizando una bomba turbo molecular.

No sólo es necesario elegir el tipo de bombas adecuado para llegar a una u otra presión. También es necesario contar con distintos tipos de sensores, desde el Pirani y el piezo-resistivo, para vacío bajo, capacitivo para vacíos medios y terminando en sensores tipo Penning o Bayard-Alpert para alto vacío y ultra alto vacío y vacío extremo.

La composición atmosférica

El siguiente parámetro relevante para controlar en una cámara de simulación es la composición de los gases de la atmósfera. De nuevo la primera división es entre composición de gases en medio interestelar denso y superficies planetarias. La principal fuente de información para la composición atmosférica son espectros de infrarrojo tomados por telescopios orbitales o por satélites. Por ejemplo en el caso de Marte la atmósfera es muy compleja. Se han detectado composiciones medias de 95% CO $_2$, 2,7% N $_2$, 1,6% Ar y 0,6% H $_2$ O. En el caso de otros planetas como Europa, luna Galileana de Júpiter, la presión está formada en más de un 95% de O $_2$ y en el caso del interior de una cámara de vacío a 10^{-11} mbar en el laboratorio, casi el 100% es hidrógeno.

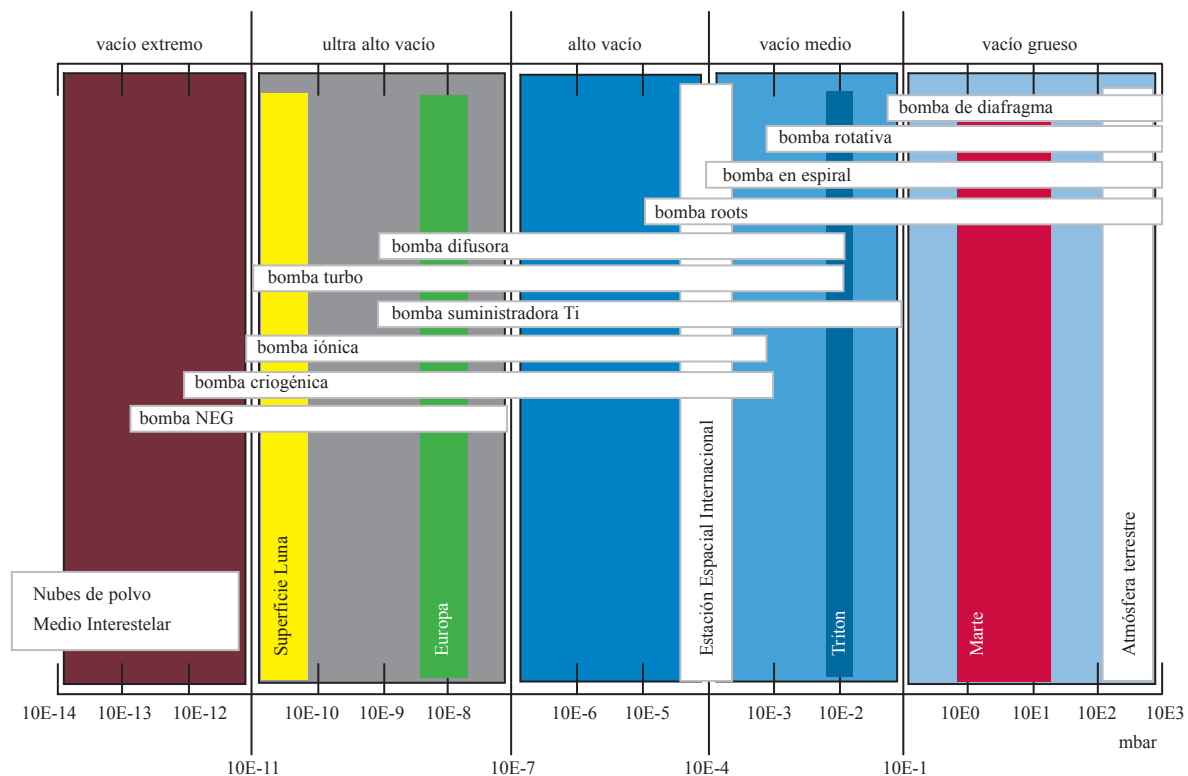


Fig.1. Esquema representativo de los distintos tipos de vacío, junto con el tipo de bomba utilizada para alcanzarlo en cada caso y los rangos de presión de algunos entornos espaciales.

La composición atmosférica según el medio interestelar denso es esencialmente hidrógeno tanto en forma molecular como gaseosa. En estos medios existen también una densidad no despreciable de otras moléculas, de composición orgánica y mineral, que se recombinan entre ellas dando lugar a lo que se conoce como Astroquímica. Por ejemplo, en el interior de la nube situada tras la nebulosa de Orión, el gas adquiere la densidad suficiente y la baja temperatura necesaria para que los átomos se enlacen y formen moléculas, en las que predomina el hidrógeno molecular y hay trazas de monóxido de carbono, cianógeno y amoníaco [10], entre otras moléculas.

El control de la composición de gases en el sistema de simulación se realiza mediante la inclusión de detectores de masa cuadrupolares. Estos detectores ionizan el gas separando cada molécula según su relación carga/masa. Sabiendo la masa molecular podemos, identificarla en muchos casos y cuantificar su número. Este instrumento, mediante bombeo diferencial, puede operarse desde presión atmosférica. Sin embargo, a presiones inferiores de 10^{-5} mbar puede utilizarse con mayor resolución.

Para estar seguros de la composición de la atmósfera es preciso primero hacer el mejor vacío posible, y luego introducir la composición de gases deseada. Es por tanto importante controlar la composición de la presión residual en el sistema de simulación. En un sistema de alto-vacío con cierres KF, y bombeado con una bomba turbomolecular la presión residual parcial de cada uno de los gases está determinada por la velocidad efectiva de bombeo de la bomba turbomolecular (es distinta para cada composición gaseosa), y por la tasa de fugas en cierres de juntas de vitón (KF y LF), situándose en 10^{-8} mbar. Por tanto, planetas como Europa no pueden simularse utilizando este tipo de cierres. En un sistema con cierres de UHV (ultra alto vacío), la presión mínima está determinada por la permeabilidad del hidrogeno en cámaras de vacío de acero inoxidable 316L o aluminio, que está en el orden de 10^{-13} mbar.

Para introducir atmósferas complejas, como por ejemplo la de Marte, en el interior de las cámaras de vacío o sistema de simulación, se han desarrollado mezcladores (y evaporadores para el caso del agua) en los que se controla la presión parcial de cada uno de ellos mediante un espectrómetro de masas cuadrupolar antes de introducirlos en el sistema. Estos mezcladores pueden incorporar caudalímetros para experimentos en los que se requiera un control más preciso sobre alguno de los componentes atmosféricos. La mezcla de los gases en los sistemas de simulación se realiza mediante válvulas de fugas o sistemas de capilar controlados por válvulas de aguja. Las válvulas de fuga permiten una entrada de gas controlada hasta $2 \cdot 10^{-10}$ mbar litro/s, mediante el ajuste cónico de dos piezas metálicas una de cobre (metal blando) y la otra de acero (metal duro), de este modo la pieza de cobre se garantiza la estanqueidad ya que recupera su forma original después de cada cierre. En cuanto a los capilares permiten, o bien introducir o extraer gas desde el punto exacto donde comienza el capilar, esto permite además generar flujos en el interior de la cámara de simulación.

La temperatura

El concepto de temperatura es de difícil aplicación, ya que es un concepto termodinámico que se aplica a sistemas

en equilibrio. En el espacio, el campo de temperaturas es quizá más amplio que el de las presiones. En planetas cercanos al Sol, puede superar varios cientos de grados y en los hielos de los cometas llega a pocos Kelvin.

La temperatura en la superficie de los objetos planetarios es fácilmente controlable con un criostato refrigerado con He líquido, en el que se pueden realizar ciclos de temperatura simulando por ejemplo, variaciones estacionales o diarias. Para ello, una vez enfriado el material que queremos estudiar en condiciones espaciales, un pequeño filamento nos permite aumentar la temperatura y ajustarla mediante un controlador PID a los valores deseados. Como ya hemos indicado, la temperatura en nubes densas de gas del medio interestelar viene determinada por la interacción de la materia con la radiación UV y rayos cósmicos. Esta temperatura es del orden de 10K en el interior de la nube. Sin embargo en planetas con atmósfera muy ligera o prácticamente inexistente puede oscilar entre la noche y el día entre 400K y 100K, como puede ser el caso de la Luna, o entre 300K y 135K en los polos de Marte. La temperatura sobre un cristalito de hielo, por ejemplo de dióxido de carbono, que se pueda crear en el espacio interestelar, puede simularse depositando el gas sobre una ventana transparente de un criostato, que a través de un dedo frío, permite enfriar a 4K.

Para las medidas de bajas temperaturas se emplean diodos de germanio y silicio, y para el resto de temperaturas hay un espectro amplísimo, que va desde distintos tipos de termopares, pasando por hilos de platino y acabando en Pirómetros ópticos.

Controlar la temperatura ambiental es un proceso más difícil de controlar de manera estable, aunque es relativamente sencillo monitorizarla. La temperatura como manifestación de la energía se transfiere mediante conducción, convección y radiación. En entornos interplanetarios como en ultra alto vacío y vacío extremo sólo se transfiere mediante radiación, y en atmósferas planetarias normalmente mediante convección y radiación. Solamente se le añade la conducción en la superficie de los planetas. En una cámara de simulación juega un papel muy importante las dimensiones, ya que estas condicionan el volumen interno y la superficie de radiación, con lo que se convierte en el factor determinante a la hora de poder cambiar la temperatura ambiental de la atmósfera en función de la temperatura del contenedor, en este caso las paredes de la cámara de vacío.

En los sistemas de simulación es realmente complejo establecer una temperatura homogénea para un volumen relativamente pequeño (50l), como en una cámara destinada a la verificación de sensores, por lo que se suele emplear es un intercambiador de calor interno refrigerado por nitrógeno líquido, acompañando una resistencia externa que recubre todas las paredes de la cámara y utilizando un gas con una alta movilidad como es el helio. De este modo se consigue una cierta homogeneidad de la temperatura ambiental en detrimento de la composición gaseosa original de la atmósfera planetaria.

Los sistemas desarrollados para medir la temperatura ambiental están basados en conjuntos de sensores repartidos por todo el volumen de la cámara, y a la vez aislados térmicamente, para poder crear un mapa tridimensional

de temperaturas en el interior de la cámara de vacío. Así, por ejemplo, la figura 2 representa una simulación mediante ordenador mostrando un diagrama de temperaturas de la cámara MARTE, cuando se resuelve la ecuación del calor en dos dimensiones mediante elementos finitos. Este estudio previo es necesario para poder entender cómo se comporta la temperatura ambiental antes de realizar una prueba experimental. En el caso de la figura 2 todas las paredes externas así como los anillos interiores se encuentran a temperatura ambiental de 300 K, la parte inferior del porta muestras a 77 K (refrigerado por nitrógeno líquido), y la superior a 150 K (controlado térmicamente mediante un controlador PID, Proporcional Integral Diferencial), en un ambiente a 7 mbar en atmósfera de Marte. La figura 2 muestra el gradiente de temperatura ambiental en función de la distancia, en un plano medio de la cámara, que cuenta con simetría cilíndrica en el eje central vertical.

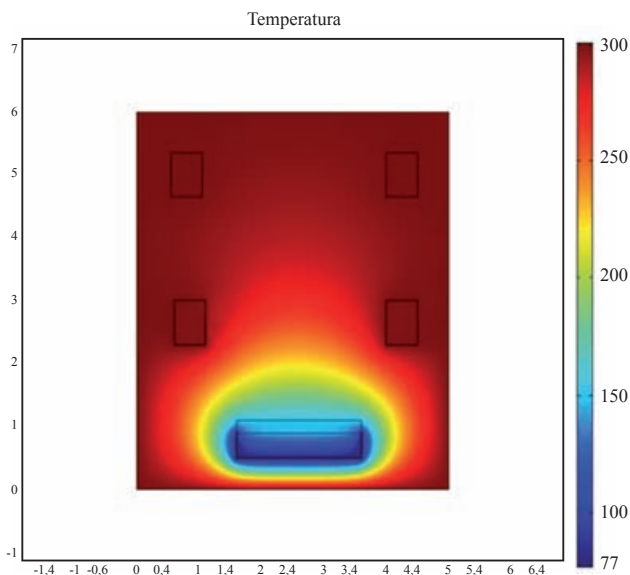


Fig. 2. Representación de la temperatura, en el interior de la cámara MARTE, en el plano central de la misma. (La cámara MARTE presenta simetría cilíndrica en el eje central vertical).

Las fuentes de irradiación

Para concluir esta revisión de parámetros relevantes para la simulación de entornos espaciales, nos falta añadir la radiación. En el sistema solar la mayor parte de la radiación recibida en la superficie de los planetas es UV (ultravioleta), que es generada en el laboratorio normalmente mediante una fuente de xenón. En el caso de vacío interplanetario, tenemos además electrones, iones y rayos X, que son generados en el laboratorio por fuentes de radiación específicas. Aunque las fuentes más comunes de electrones e iones tienen energías muy inferiores a las producidas por el viento solar pueden ayudar a hacerse una idea del tipo de alteraciones químicas que ocasionan.

Como hemos dicho cruzando todas estas variables generamos un entorno espacial. Entorno sobre el que podemos realizar multitud de estudios científicos y tecnológicos,

apoyados en instrumentación específica como es el caso de interferómetros de Fourier en el infrarrojo FTIR y espectroscopia Raman, que nos permitan seguir en tiempo real los cambios químico-físicos que se producen.

3. La unidad de simulación de ambientes planetarios del CAB

Un ejemplo de aplicación de las ideas expuestas anteriormente lo podemos encontrar en la Unidad de Simulación de Ambientes Planetarios y Microscopia, del Centro de Astrobiología (centro mixto INTA-CSIC). El principal objetivo de la unidad es el de prestar apoyo técnico y tecnológico a los científicos usuarios del CAB y cualquier otro investigador interesado en la realización de experimentos relacionados con el vacío y la simulación espacial.



Fig. 3. Fotografía de la Unidad de Simulación de Ambientes Planetarios y Microscopia en el centro de Astrobiología (INTA-CSIC).

La unidad cuenta actualmente con diversas máquinas de vacío dedicadas a la simulación de diferentes sistemas espaciales. Cada una de ellas está concebida para estudiar distintas facetas de diferentes entornos. En este sentido, las más importantes y representativas son: **PASC** (Planetary Atmospheres Simulation Chamber), **ISAC** (Interstellar Astrochemistry Chamber), **MARTE** (Mars Simulation Chamber) y **TUNEL** (Túnel de viento en vacío). Pasaremos a describir las más representativas tecnológicamente en la simulación de ambientes planetarios e interplanetarios [11].

ISAC (InterstellarAstrochemistry Chamber)

La primera aplicación de simulación espacial la encontramos en la *simulación de ambientes interestelares y circunestelares*. Uno de los objetivos científicos principales es el estudio de la naturaleza (las propiedades físico-químicas), el origen y la evolución de las partículas de polvo, de composición carbonácea/orgánica y/o mineral, en su periplo desde las atmósferas estelares, pasando por el medio interestelar hasta la nebulosa solar, para dar lugar a la formación de cometas, asteroides y planetas. Además se estudian las implicaciones astrobiológicas de dicha materia. Para tal fin es necesario entender la relación entre la materia observada

en el espacio (radioastronomía y astronomía en el infrarrojo), la materia orgánica producida por procesos primarios (procesamiento fotónico e iónico de hielos) y simulaciones experimentales del procesamiento de hielos (*annealing* térmico e irradiación). ISAC ha sido diseñada para tal efecto.

Describiremos la tecnología y las aplicaciones de ISAC [12], que cuenta con el diseño y la tecnología adecuados para trabajar en presiones por debajo de 10^{-10} mbar. Combinando bombas de absorción sin evaporación (NEG), y sublimadoras de Ti podemos alcanzar presiones de $2 \cdot 10^{-11}$ mbar. Esta máquina incorpora un criostato que permite bajar la temperatura hasta 7K. A esta temperatura, una mezcla de gases que se introduce en el sistema, como los que se han detectado en las nubes de polvo interestelar, forman una capa de hielo en el criostato. El hielo de composición análoga a los mantos de hielo interestelares se puede irradiar con una fuente de ultravioleta de vacío y espectro parecido a la radiación presente en el medio difuso interestelar. Al mismo tiempo, tanto la composición química del hielo como su alteración debida a la irradiación pueden estudiarse in situ mediante espectroscopia infrarroja (FTIR) en transmisión y Raman. Las moléculas que desorben del hielo durante el calentamiento (desorción térmica) o la irradiación ultravioleta (fotodesorción) son detectadas por QMS.

El avance en nuevas bombas de absorción no evaporables, bombas NEG (Non Evaporable Getter), combinado con una optimización del volumen y una correcta disposición de las bombas de vacío así como una desgasificación de la misma en un horno de vacío en el proceso de fabricación, hace posible pasar de UHV a XHV, permitiendo, alcanzar presiones en torno a 10^{-11} mbar, en tan sólo 48 horas desde su puesta en marcha. Otro punto muy destacable y tecnológicamente viable pero complejo, es el de la preparación de mezclas de gases con una resolución en ppm (partes por

millón), gracias al innovador diseño de una línea de gases que funciona con electroválvulas en condiciones de flujo laminar, mezcladores en vacío, monitorizados por un espectrómetro de masas o cuadrupolo en RF (radio frecuencia), que permiten una vez obtenida la composición deseada del gas, depositarlo por medio de una válvula de aguja en la cámara principal para formar el hielo de interés astrofísico. De este modo, es posible controlar el número de monocapas que se desea depositar.

PASC (Planetary Atmosphere Simulation Chamber)

La máquina de simulación PASC, [13,14], es un entorno de simulación para las condiciones de objetos planetarios con atmósferas. La característica principal de esta máquina es la versatilidad, de manera que el investigador puede definir cada uno de los parámetros para simular el entorno



Fig.4. Fotografía de la cámara de simulación ISAC (Interstellar Astrochemistry Chamber) en el centro de Astrobiología (INTA-CSIC).

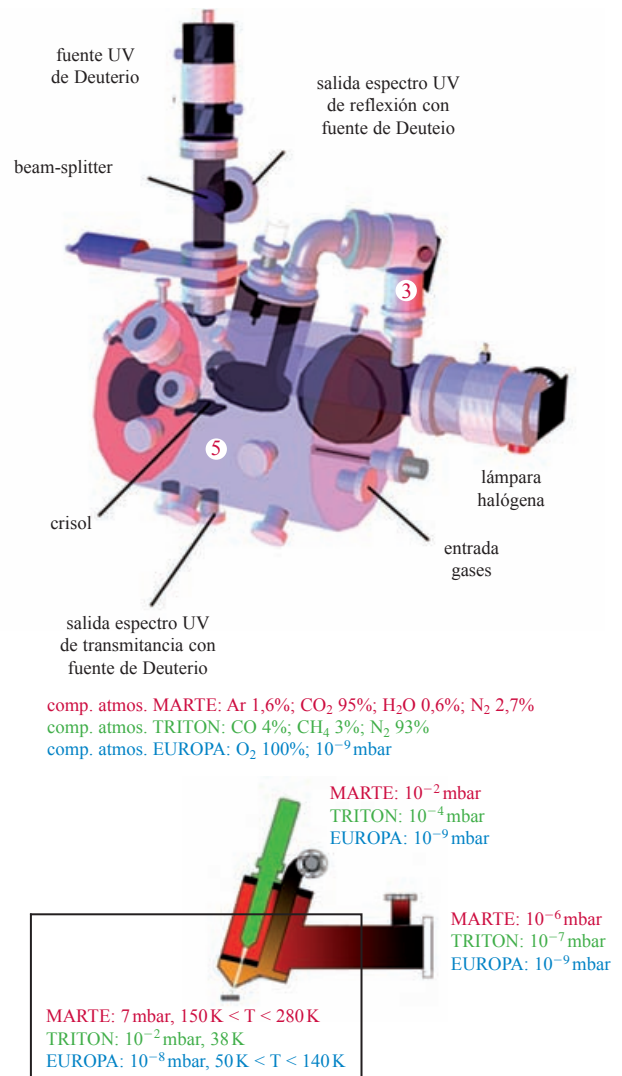


Fig.5. La imagen superior muestra un esquema de la instrumentación incluida en la cámara atmosférica de la máquina PASC. La imagen inferior muestra las condiciones ambientales de distintos objetos planetarios, así como las presiones necesarias, que mediante bombeo diferencial se consiguen para poder encender las fuentes de radiación.

que desee. Esta máquina reproduce la presión atmosférica, composición gaseosa, temperatura e irradiación de la mayor parte de los planetas sólidos del sistema solar o en un entorno ficticio. La presión puede regularse entre 5 y $5 \cdot 10^{-9}$ mbar y la temperatura desde 4 a 325 K. El porta muestras está concebido para permitir introducir diferentes tipos de muestras y de diferentes tamaños, que vayan desde regolitos marcianos o terrestres, esporas, hielos o materiales utilizados en aeronáutica. La irradiación (UV) se realiza mediante una lámpara de deuterio. Uno de los principales retos tecnológicos de este diseño es que permite el encendido de fuentes de irradiación de electrones e iones a presiones de 10^{-2} mbar. Para ello se ha diseñado una cámara interior en la que se realizan dos etapas de bombeo diferencial, como se indica en la figura 5. Así, se puede enviar electrones sobre la muestra en estudio, por ejemplo, mientras que en la presión total es 10^{-2} mbar.

Las aplicaciones científicas de la misma tienen mucho que ver con el comportamiento de muestras de origen biológico y geológico, en condiciones similares a las de Marte, Tritón o Europa, algunos ejemplos pueden ser el comportamiento de absorción y desorción de CO_2 en muestras minerales bajo ciclos de temperatura y radiación estacionales, desorción de vapor de agua en jarositas, estabilidad de fases minerales en Marte, estudio de resistencia radiativa UV de biosensores, son algunos de los proyectos de investigación recientes realizados en esta máquina.

4. MARTE

Veinte años ha tardado la NASA en volver a mostrar interés por Marte, este es el periodo de tiempo que hay entre las sondas Viking y el Mars Pathfinder (MPf). Durante este tiempo los científicos han estudiado las 57.000 imágenes de la Viking, que han permitido conocer la geología del planeta rojo con bastante exactitud. Sin lugar a dudas no hay planeta del sistema solar con mejores condiciones para albergar vida, extinta o actual, que Marte. Se parece a la Tierra en muchos aspectos; El proceso de su formación, la historia climática de sus primeros tiempos, sus reservas de agua y fenómenos geológicos como los volcanes [15,16]. Las misiones desde

la MPf tienen un carácter de exploración física y ambiental del entorno, para lo cual la exploración no sólo se realiza con satélites y sondas como la Viking, sino también con *rovers* (pequeños vehículos todoterreno) que son capaces de recorrer la superficie marciana, cada vez con mayor autonomía. En las futuras misiones a Marte, no sólo por la NASA sino también por la ESA, se desea caracterizar la climatología, así como la búsqueda de vida primigenia, en la que mediante una tecnología basada en biosensores, se puedan analizar muestras in situ y de enviar los resultados a la Tierra en tiempo real.

La cámara de simulación de MARTE, está especialmente diseñada para estudiar condiciones marcianas e introducir muestras electrónicas reales. Para ello, se puede modificar la temperatura en el portamuestras en un rango entre 80 K y 450 K, y además es capaz de modificar la temperatura ambiental entre 200 K y 400 K y de generar “tormentas de polvo” en su interior. El principal objetivo de esta cámara es la de probar nuevos dispositivos electromecánicos “sensores”, por lo que su ámbito de aplicación se destina principalmente a la *calibración de sensores e instrumentación ambiental* que serán enviados al espacio en futuras misiones espaciales. El principal reto, está en poder combinar rangos de temperatura en el porta muestras distintos a los de la atmósfera, y cruzar esto con cambios bruscos de presión, mientras se mantiene la composición gaseosa de Marte. El portamuestras de MARTE, está diseñado para poder soportar dispositivos electromecánicos de grandes dimensiones usando la misma geometría de las mesas ópticas, y pudiendo ser enfriado y calentado desde el interior. En cuanto a la atmósfera el interior, de MARTE cuenta con unos anillos refrigeradores de nitrógeno líquido que en función de la presión y la composición de la atmósfera permite enfriar la misma no sólo por radiación sino también por conducción y convección.

Además la cámara, está diseñada y construida para poder generar tormentas de polvo en su interior mediante un ingenioso sistema de deposición, que mediante la combinación de un tamiz vibratorio, la gravedad y la diferencia de presiones es capaz de producir una niebla de polvo de partículas de hierro, similar a las de Marte. Sobre todo este conjunto de posibilidades también hay unos pasamuros, en los que se pueden adaptar fuentes de luz halógenas y de xenón, siguiendo el esquema del movimiento del Sol en el hemisferio norte de Marte, de este modo simulamos la incidencia de la luz solar en función de la dependencia angular. Todo este complejo sistema se ha desarrollado para testear los sensores de la estación meteorológica REMS (Rover Environmental Monitoring Station), de la misión MSL (Mars Science Laboratory) de la NASA, así como otros proyectos para la ESA, como ExoMars. El proyecto REMS, lo compone una estación meteorológica formada por sensores de radiación ultravioleta, sensor de presión, sensor de temperatura del suelo, sensor de temperatura ambiental, y sensor de viento. En cuanto al vacío, la cámara MARTE puede trabajar en dinámico o en estático, en dinámico cuando las condiciones de temperatura tanto del porta muestras como del interior modifican las condiciones de presión, y en estático cuando lo que interesa es cambiar el volumen sin modificar las condiciones de temperatura, como ocurre cuando se desea verificar la resolución del sensor de presión (calibración y tiempo de respuesta) en incrementos de presión a partir de 0.05 mbar.



Fig.6. Fotografía de la cámara de simulación MARTE en el centro de Astrobiología (INTA-CSIC).

5. Conclusión

El avance en la tecnología del vacío, dado por la consecución de presiones cada vez menores, es debido no sólo a las mejoras de las bombas, sino también al avance en materiales contenedores de vacío, “cámaras”, con presiones de vapor y permeabilidades cada vez más bajas. Este desarrollo unido a sistemas de medida más precisos y fiables en rangos extremos, ha permitido que sea posible estudiar la materia condicionada por fenómenos atmosféricos, que ocurren en objetos planetarios con un gran interés científico, y que están situados a cientos de miles de kilómetros de la Tierra, y de dar credibilidad a los resultados en los sistemas experimentales.

La experiencia ha demostrado que la simulación no es sólo un recurso de innovación tecnológica, sino también una herramienta útil, que permite validar la responsabilidad de las misiones espaciales, que debido al alto coste de las mismas condicionan su propia viabilidad. Del fruto de la simulación de algo tan complejo y tan vasto como es un sistema climático, en el que una mínima variación de un parámetro condiciona el comportamiento global del sistema, estamos obteniendo un gran provecho tecnológico, que nos permitirá en un futuro cada vez más cercano verificar nuestros propios resultados, y realizarnos preguntas sobre fenómenos que ni siquiera podemos conocer.

6. Agradecimientos

Queremos agradecer a las empresas Tecnovac SL y Maques SL el gran esfuerzo técnico y tecnológico, así como su colaboración desinteresada, realizado durante la construcción de algunos de los sistemas de simulación que se describen en este artículo. También agradecemos a José Flores del ICMM-CSIC, por su tiempo, experiencia y dedicación en la construcción de cámaras y componentes de vacío, a Andrés Buendía de la UAM por sus consejos en criogenia y principalmente, a nuestros compañeros Eva Mateo Martí, Pablo Merino, Guillermo Muñoz Caro, Antonio Jimenez, Elena López, y Celia Rogero por su dedicación y responsabilidad en la explotación de las máquinas de la unidad de simulación de ambientes planetarios y microscopia de CAB.

7. Referencias bibliográficas

- [1] Física y Sociedad. nº18, Especial sobre Astronáutica: 50 años después del Sputnik
- [2] GILES SPARROW. *Astronáutica, La historia desde el Sputnik al transbordador y más allá*, Editorial Akal. ISBN: 9788446029472.
- [3] CARL SAGAN. *Un punto azul pálido: Una visión del futuro humano en el espacio*. Editorial Planeta. 2006. ISBN: 9788408059073.
- [4] LORI C. WALTERS. *To Create Space on Earth: The Space Environment Simulation Laboratory and Project Apollo*. NASA/CR-2003-208933.
- [5] <http://www.cab.inta.es>
- [6] JOHN F. O'HANLON. *A user's guide to vacuum technology*. Editorial Wiley, Third Edition. ISBN: 9780471270522.
- [7] ROMAN SMOLUCHOWSKI. *El sistema solar. Biblioteca Científica American*. ISBN: 9788475930138.
- [8] La NASA dispone de datos sobre el viento solar en tiempo real a través del satélite ACE, lanzado en 1997. La variación del viento solar en tiempo real puede encontrarse en la página web del satélite.
- [9] KARL JOUSTEN. *Pressure Measurement with ionization Gauges*. Physikalisch-Technische Bundesanstalt. Berlin.
- [10] NICK SCOVILLE Y JUDITH S. YOUNG, *Nubes moleculares, formación de estrellas y estructura galáctica. La vida de las estrellas*, TEMAS 7 de Investigación y Ciencia. ISBN: 9778411355668-0007.
- [11] <http://www.electronvoltio.com>
- [12] G.M. MUÑOZ-CARO, J.A. MARTÍN-GAGO, C. ROGERO, J.M. SOBRADO, C. ATIENZA, S. PUERTAS. *The Interstellar Astrochemistry Chamber (ISAC)*. WSPC – September 9, 2008
- [13] E. MATEO-MARTÍ, O. PRIETO-BALLESTEROS, J.M. SOBRADO, J. GÓMEZ-ELVIRA AND J.A. MARTÍN-GAGO. *A chamber for studying planetary environments and its applications to astrobiology*. Meas. Sci. Technol. 17 (2006) 2274–2280.
- [14] MARTIN REES. *Universo, La guía visual definitiva*. Editorial Pearson de Alhambra. ISBN: 8420551414.
- [15] PHILIP R. CHRISTENSEN, *Estratigrafía y relieve de Marte. Planetas*. TEMAS 53 de, Investigación y Ciencia, Tercer trimestre del 2008. ISBN: 9778411355668-00053
- [16] TIM BEARDSLEY, *Paseo Planetario, Marte. Sistemas Solares*. TEMAS 15 de Investigación y Ciencia, Primer trimestre de 1999. ISBN: 9778411355668-00015.

Jesús Manuel Sobrado

Centro de Astrobiología. CSIC-INTA
Unidad de Simulación de Ambientes Planetarios y Microscopia
(sobradovj@inta.es)

José Ángel Martín-Gago

Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid. CSIC,
(gago@icmm.csic.es)

NORMAS DE PUBLICACIÓN

Los artículos deberán estar redactados con lenguaje poco técnico y con el mínimo uso de matemáticas de manera que puedan ser leídos fácilmente por los que no son especialistas en la materia. No deben exceder de 3.000 palabras, pero se ruega a los autores que intenten ser más breves lo que aumentará la probabilidad de la aceptación de sus artículos. Normalmente actuarán como árbitros de publicación los miembros del Consejo Editorial, pero se solicitará la opinión de otros expertos cuando sea conveniente.

Los autores deben incluir, al enviar sus contribuciones:

- Título del artículo, nombre del o de los autores e Institución donde se ha realizado el trabajo con su dirección actual y la traducción inglesa del título.
- Un resumen de menos de 10 líneas en castellano o inglés.
- Texto a doble espacio, preferentemente en papel tipo A-4. En la última página se incluirá la lista de referencias en orden alfabético de los autores.
- Figuras, con lista de sus pies, y tablas. En el texto se indicará la situación más convenientemente de cada una de ellas.

1. Los trabajos deben enviarse en cualquiera de esos formatos, word o TeX, pdf, txt. En el caso de los artículos entregados en latex, se agradecerá la entrega del fichero de texto (sin código), además de los ficheros habituales. Aunque esto no es en completamente imprescindible.
2. Las ilustraciones (figuras, fotos, etc.) “importadas”, es decir, no creadas mediante el procesador de textos, además de incluirse adecuadamente en el texto, deberán enviarse en archivos aparte (jpg o similares). Su resolución debe ser al menos de 200 ppp, a fin de que la calidad de su reproducción en la revista sea adecuada.