

SOBRE LA EXPLORACIÓN DEL SISTEMA SOLAR

MANUEL BAUTISTA ARANDA
Dr. Ingeniero Aeronáutico

INTRODUCCIÓN

Uno de los grandes espectáculos que nos ofrece la naturaleza es la contemplación del cielo en una noche despejada, sin Luna, en pleno campo y lejos de cualquier ciudad que deslumbre con sus luces o ensucie la atmósfera con su polución.

El interés del ser humano por los cuerpos celestes se remonta a la más lejana antigüedad. Al observar atentamente las estrellas, pronto se dieron cuenta de que había cinco de ellas que no eran igual que las demás, que se movían, que su posición en el espacio iba cambiando. Esas cinco estrellas son justamente los cinco planetas más próximos: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. Pero, durante muchos siglos, la única fuente de información sobre ellos procedía de sus propios ojos, lo que, evidentemente, era bastante poco. A pesar de ello, es admirable el conocimiento que llegaron a adquirir sobre los movimientos de estos planetas, y que les permitió predecir sus posiciones futuras con aceptable precisión. En este aspecto son de destacar los estudios que nos han llegado de Hiparco (siglo II a. C.) y Tolomeo (siglo II d. C.).

El año 1609 es una fecha clave en la Astronomía. Fue entonces cuando el astrónomo italiano Galileo Galilei utilizó por primera vez el recién inventado telescopio para observar el cielo. Y lo que vio le llenó de admiración. De entrada, había muchas más estrellas de las que se veían a simple vista. Y, al concentrarse en la observación de los cuerpos celestes más cercanos, fue descubriendo, entre otras cosas, que la Luna tenía montañas y cráteres, que el Sol tenía manchas, que Júpiter tenía cuatro satélites y que Venus presentaba fases como la Luna¹. A partir de esta fecha, la Astronomía avanza rápidamente. El telescopio se convierte en una herramienta imprescindible para el estudio del Universo en general, pero muy especialmente

para el estudio del Sistema Solar. Poco a poco se construyen instrumentos cada vez más perfeccionados, y, a medida que van apareciendo nuevas técnicas, tales como la fotografía, el análisis espectral y últimamente los ordenadores, se van incorporando a los telescopios, con lo que se consiguen aumentos sustanciales en sus posibilidades. Pero el estudio del universo con telescopios terrestres tiene dos limitaciones insuperables: las grandes distancias de los cuerpos que se quieren observar y la existencia de la atmósfera, que ni siquiera dentro de la banda visible del espectro es perfectamente transparente. De hecho, la calidad de las imágenes obtenidas con los grandes telescopios terrestres viene limitada por la turbulencia de la atmósfera, el vapor de agua, el polvo en suspensión y otros factores.

Por fortuna, el panorama cambió radicalmente a partir del año 1957 con la llegada de la tecnología espacial, que abre a la Astronomía unas posibilidades insospechadas. El 2 de enero de 1959 se lanza el vehículo soviético *Lunik 1*, que consigue por primera vez escapar de la gravedad terrestre y pasar cerca de la Luna. Y ocho meses más tarde, el *Lunik 2* hace impacto en nuestro satélite. La exploración de los planetas se inicia el 14 de diciembre de 1962. Ese día el vehículo espacial estadounidense *Mari-ner 2*, después de 109 días de viaje, pasó cerca del planeta Venus, captando y enviando a la Tierra información del más alto interés científico. Desde esa fecha ha habido más de 100 lanzamientos con éxito para explorar los distintos cuerpos del Sistema Solar. Con mayor o menor profundidad se ha explorado el Sol, todos los planetas (excepto Plutón), la Luna y más de 50 satélites (incluyendo en esta cifra todos los importantes), cuatro asteroides, algunos cometas y el espacio interplanetario. Aunque los éxitos conseguidos han sido realmente espectaculares y han supuesto un enorme avance en el conocimiento del Sistema

¹ El descubrimiento de que el Sol tenía manchas le costó algunos disgustos a Galileo, pues, según las ideas reinantes en aquella época, el Sol era un símbolo de la luz, de la pureza, de la perfección. Y el hecho de que se dijera que tenía manchas era casi una herejía.

El descubrimiento de las fases de Venus representó un fuerte argumento contra la teoría de Tolomeo, que situaba a la Tierra como centro del Universo, y de apoyo a la de Copérnico, en la que afirmaba que todo giraba alrededor del Sol.

Solar, hay que pensar que estamos empezando a explotar las inmensas posibilidades que ofrece la tecnología espacial, que las exploraciones efectuadas hasta la fecha son sólo el principio y que lo descubierto es mucho menos de lo que falta por descubrir.

CONSIDERACIONES GENERALES

La exploración de los distintos cuerpos del Sistema Solar con vehículos espaciales presenta una serie de problemas específicos, que vamos a analizar, aunque sea de forma superficial. Para concretar un poco más, en las consideraciones siguientes nos vamos a referir fundamentalmente a la exploración de los planetas, aunque gran parte de lo que se diga se puede aplicar también a la exploración del Sol, de los cometas, de los asteroides y del espacio interplanetario.

Distancia y duración del viaje

El primer problema que se presenta es la gran distancia a que se encuentran los planetas y la larga duración de los viajes hasta ellos. Habida cuenta de que tanto la Tierra como los planetas giran alrededor del Sol en distintas órbitas y con diferentes velocidades, la distancia a la Tierra de cualquiera de ellos está cambiando continuamente, y está variando entre un mínimo, que se produce cuando ambos planetas están alineados con el Sol y al mismo lado de éste, y un máximo, cuando están también alineados, pero uno a cada lado del Sol. Las distancias mínimas y máximas de los distintos planetas a la Tierra, expresadas en millones de kilómetros, son:

Planeta	Distancia mínima	Distancia máxima
Venus	40	260
Marte	56	400
Mercurio	82	217
Júpiter	591	965
Saturno	1.208	1.650
Urano	2.609	3.166
Neptuno	4.343	4.717
Plutón	4.294	7.634

En cualquier caso, se trata de distancias muy grandes. Varían entre los 40 millones de kilómetros, que es la distancia mínima de Venus, y los 7.634 millones de kilómetros, que es la distancia máxima de Plutón.

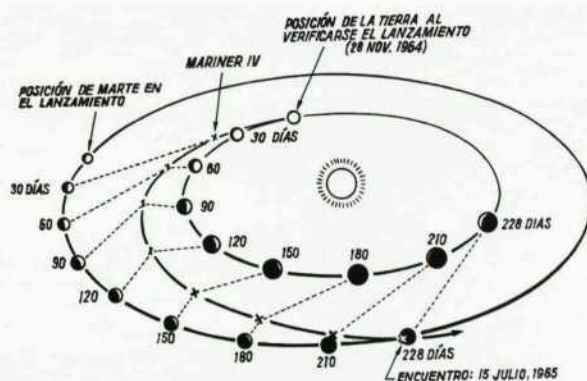


Fig. 1.— Trayectoria seguida por el «Mariner 4», el primer vehículo espacial que pasó cerca de Marte y envió imágenes de su superficie.

Pero el camino que sigue un vehículo espacial para llegar a un planeta no es, en ningún caso, el vuelo directo siguiendo el camino más corto, es decir, la línea recta. La trayectoria que normalmente se sigue es la que requiere la mínima energía, la que permite el uso del cohete lanzador menos potente (y menos caro), o bien, para un cohete lanzador dado, la que permite la mayor masa posible del vehículo espacial. En la figura 1 se muestra el camino seguido por el *Mariner 4* en su histórico vuelo a Marte (fue el primer vehículo que pasó junto a Marte y fotografió su superficie). Como inciso diremos que la primera fotografía de Marte se recibió en la Estación de Robledo de Chavela, en la provincia de Madrid². Como norma general, la trayectoria de mínima energía es un arco de elipse tangente a la órbita de la Tierra y a la del planeta que se quiere visitar.

Una consecuencia que se deriva de lo anterior es que los lanzamientos hacia los planetas no pueden realizarse en cualquier momento. Hay que esperar a que las posiciones relativas del correspondiente planeta y de la Tierra sean las adecuadas. Son las llamadas «ventanas de lanzamiento». Si el lanzamiento se hace fuera de la «ventana», la energía necesaria crece rápidamente y puede llegar a ser prohibitiva. En el caso de los planetas más cercanos, Venus y Marte, las ventanas de lanzamiento se presentan de una forma aproximada cada 19 y cada 26 meses, respectivamente.

En los lanzamientos hacia los planetas lejanos, como veremos más adelante, cada vez se recurre más a la ayuda gravitatoria prestada por algún planeta intermedio, lo que permite aumentar la carga útil y reducir la duración del viaje. El ejemplo más llamativo es el del *Voyager 2*, que llegó junto a Neptuno en 1989, tras 12 años de viaje, gracias a la ayuda gravitatoria prestada sucesivamente por Júpiter, Saturno y Urano. Sin ella, en vuelo directo a Neptuno, hubiera tardado 30 años.

² A título anecdótico diremos que cuando se lanzó el *Mariner 4*, en noviembre de 1964, la construcción de la Estación de Robledo de Chavela estaba en su fase inicial, se estaban poniendo los cimientos de los edificios y de la antena principal. Y, sin embargo, la NASA contaba con que la estación estuviese terminada y en servicio para poder recibir las imágenes que transmitiese este vehículo espacial, cuando el 15 de julio de 1965 pasase junto a Marte. Aquello fue una verdadera carrera contrarreloj. Por un lado, el *Mariner 4*, avanzando inexorablemente unos dos millones de kilómetros diarios, y por otro, más de 200 personas trabajando a marchas forzadas para que la estación estuviese lista. Al final se consiguió y se recibió en ella la primera fotografía de cerca que el hombre obtenía de otro planeta.

Comunicaciones

No es necesario resaltar la importancia de las comunicaciones. Si se pierden por cualquier motivo, la misión hay que darla por terminada. El vehículo espacial podrá obtener información muy importante, pero si no podemos recibirla en Tierra de nada vale. Una de las medidas habituales es duplicar los equipos transmisores y receptores de a bordo.

Un aspecto importante es la distancia máxima a la que pueden mantenerse estas comunicaciones y la velocidad de transmisión a tierra de la información captada. En ello influyen varios factores, pero, por lo que se refiere al vehículo espacial, vamos a considerar sólo dos: la potencia del transmisor y la ganancia de la antena. Evidentemente, cuanto mayor sea esta potencia, mayor será el alcance; pero mayor potencia significa equipos más pesados y mayor consumo de energía eléctrica (cuya producción requiere a su vez mayor peso). Y el peso es algo que hay que mantener al mínimo en cualquier vehículo espacial. Resultado de todo ello es que en la práctica las potencias de los transmisores de a bordo son increíblemente pequeñas. El ejemplo más espectacular es el del *Pioneer 10* (figura 2). Se lanzó en 1972 y fue el primer vehículo que pasó junto a Júpiter (1973), el primero que cruzó la órbita de Neptuno (1983) y el que más lejos ha estado de la Tierra hasta el 17 de febrero de 1998 (en esta fecha fue sobrepasado por el *Voyager 1*, lanzado cinco años más tarde, pero que se aleja con mayor velocidad). Con un transmisor de tan sólo ¡8 vatios! de potencia se han recibido sus señales desde distancias superiores a los 10.000 millones de kilómetros³. Actualmente, en los vehículos destinados a la exploración de los planetas se suelen instalar a bordo transmisores un poco más potentes, de 20 a 30 vatios, que permiten una mayor velocidad en la transmisión de la información que obtienen. Pero, en cualquier caso, sigue siendo una potencia muy pequeña, menor que la de una bombilla corriente en nuestros domicilios.

Un elemento fundamental para conseguir estos resultados es la antena que lleve el vehículo espacial. Su misión es concentrar la energía radiada por el transmisor en un pincel lo más estrecho posible (algo parecido a lo que hacen los faros de un automóvil) y que este pincel esté orientado hacia la Tierra. La ganancia de una antena (que se mide en decibelios) refleja su eficacia para conseguir esta concentración de energía. Desgraciadamente, antenas de gran ganancia exigen grandes dimensiones, que de nuevo están limitadas por el peso y también por el volumen disponible dentro de la caperuza del cohete lanzador. Para dar algunas cifras, el citado *Pioneer 10* iba equipado con una antena parabólica de 2,75 m de diámetro (que tenía una ganancia de 33 decibelios a 2.292 Mhz), con la que se conseguía aumentar en unas 2.000 veces la potencia radiada por el transmisor de a bordo en la dirección del pincel. Unos años más tarde, el vehículo espacial *Voyager 2*, lan-

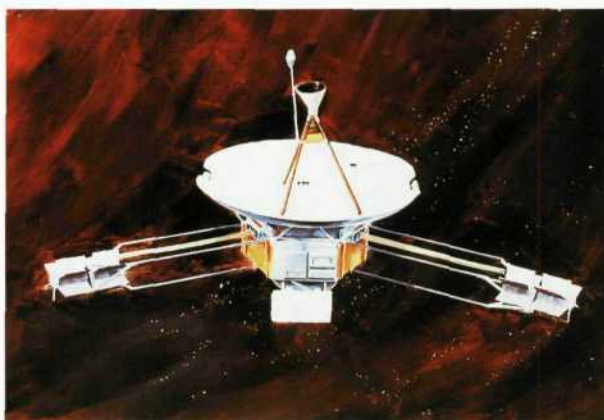


Fig. 2.- Vista general del *Pioneer 10*, en la que destaca su gran antena parabólica de 2,75 m de diámetro. El *Pioneer 10* ha sido el primer vehículo en cruzar el Cinturón de Asteroides, el primero en pasar cerca de Júpiter (1973) y el primero en atravesar la órbita de Neptuno (1983), penetrando en el espacio interestelar.

zado en 1977 y que exploró sucesivamente Júpiter (1979), Saturno (1981), Urano (1986) y Neptuno (1989), llevaba una antena mayor (3,66 m de diámetro), utilizaba una frecuencia más alta (8.418 Mhz) y conseguía así una ganancia de 48 db, equivalente a un aumento de la potencia radiada en la dirección del haz de 6.300 veces. Últimamente, con el *Galileo*, lanzado en 1989 también en dirección a Júpiter, se intentó el uso de una antena plegable de 4,8 m de diámetro; pero el experimento no ha funcionado bien, porque la antena ha tenido problemas mecánicos y sólo se ha desplegado parcialmente.

A pesar de la ayuda que proporciona la antena de a bordo, la intensidad de la señal que llega a la Tierra es extremadamente débil. Para su recepción se emplean antenas enormes con la mayor ganancia posible. En las figuras 3



Fig. 3.- Vista aérea de la gigantesca antena de 70 m de diámetro de la Estación de Robledo de Chavela (Madrid), que permite recibir señales extremadamente débiles desde los confines del Sistema Solar.

³ Para hacerse una idea de lo grande que es esta distancia, pensemos que una señal transmitida desde la Luna tarda poco más de un segundo en llegar a la Tierra, mientras que las señales del *Pioneer 10* tardan unas 10 horas en recibirse.



Fig. 4.— Otra vista de la misma antena. Sus grandes dimensiones pueden apreciarse al compararla con las dos personas y el automóvil que hay junto a su base.

y 4 se muestran dos vistas de la gran antena parabólica de la Estación de Robledo de Chavela. Tiene un diámetro de 70 m, una ganancia de 74,2 db (en la frecuencia anterior de 8.418 Mhz), que equivale a una ganancia en potencia de 26 millones de veces. Su parte móvil pesa unas 2.700 toneladas. La Estación de Robledo de Chavela (que tiene además tres antenas de 30 m y una de 26 m) ha sido, y sigue siendo, un elemento clave en la exploración del Sistema Solar. Esta estación, junto con otras dos análogas, una en Canberra (Australia) y otra en Goldstone (Estados Unidos), constituyen la Red del Espacio Lejano de la NASA, que se ha utilizado en apoyo de todos los lanzamientos americanos y europeos para la exploración del Sistema Solar, incluyendo la Luna y la llegada del hombre a ésta.

Con todo, la potencia de la señal captada por estas grandes antenas sigue siendo muy débil y cualquier interferencia, cualquier ruido de fondo, puede hacer que se pierda. Para tratar de evitarlo, lo primero que se hace con ella es amplificarla. El primer paso en este sentido, que es el más crítico, se hace con un amplificador criogénico tipo «máser», que aumenta la potencia de la señal entre 100.000 y 700.000 veces, incorporando muy poco ruido. Para que funcione correctamente, el máser tiene que

estar a muy baja temperatura, a unos 3 K (270 °C bajo cero), lo que obliga a utilizar helio líquido en su refrigeración.

En la Red del Espacio Lejano se vienen incorporando sistemáticamente todos los avances técnicos que permitan mejorar las comunicaciones con los vehículos espaciales. En este sentido es muy curioso ver lo ocurrido con el *Pioneer 10* antes citado. Cuando se lanzó en 1972 se estimaba que unos seis años más tarde, cuando estuviese a unos 2.000 millones de kilómetros (entre las órbitas de Saturno y Urano), sus señales llegarían tan débiles que las comunicaciones se perderían. Pero los hechos no ocurrieron así. A medida que se alejaba, sus señales se iban debilitando de acuerdo con lo previsto. Pero, paralelamente, las innovaciones técnicas que se iban introduciendo en las estaciones de la Red iban permitiendo mejorar sus posibilidades de recepción de señales débiles y haciendo posible que la distancia máxima a la que se podían mantener las comunicaciones con el *Pioneer 10* fuera aumentando de año en año prolongándose durante veinticinco años y alcanzando una distancia superior a los 10.000 millones de kilómetros.

Navegación

El objetivo de la navegación espacial es análogo al de la navegación marítima o aérea. Se trata de saber en cada momento dónde está el móvil, con qué velocidad se mueve y si la trayectoria que sigue es la más adecuada para llegar a su destino. Las diferencias surgen en la forma de medir y calcular estas magnitudes, y en la precisión que se exige.

Para darnos una idea de la precisión que se ha llegado a alcanzar en la navegación espacial, vamos a citar un caso muy llamativo. Se trata del *Voyager 2* que, tras doce años de viaje y de haber recorrido más de 7.000 millones de kilómetros, pasó a 4.898 km de la capa superior de nubes de Neptuno, con un error de tan sólo 4,8 km en altura y 33,8 km en desviación lateral respecto a lo previsto por los controladores del vehículo. Esto sería equivalente a lanzar un misil intercontinental y que llegase a un objetivo situado a 7.000 km de distancia con error inferior a 4 centímetros.

Los actuales sistemas de lanzamiento pueden situar a los vehículos espaciales en las trayectorias deseadas con una dispersión relativamente pequeña, pero que resulta totalmente insuficiente para que puedan llegar a su destino con precisiones del tipo indicado en el ejemplo anterior. Para conseguirlo, para que la trayectoria real coincida lo más posible con la previamente calculada, hay que introducir algunas pequeñas correcciones a lo largo del vuelo. Pero estas correcciones no pueden ser grandes, porque la cantidad de combustible que lleva a bordo el vehículo es forzosamente muy limitada. El proceso que se sigue, expuesto de forma muy esquemática, consiste en medir desde las estaciones de la Red del Espacio Lejano la trayectoria que realmente va siguiendo el vehículo espacial, compararla con la que debería seguir, detectar los posi-

bles errores, calcular la corrección necesaria y enviarle las órdenes oportunas para que, con el motor de a bordo, produzca el adecuado incremento de velocidad (en magnitud y dirección) que corrija la desviación detectada.

La trayectoria que siguen los vehículos espaciales se calculan básicamente a partir de dos tipos de medidas: la velocidad con que se alejan o se acercan a la estación terrena (es decir, la componente radial de su velocidad) y la distancia a que se encuentran de ella.

La velocidad radial del vehículo se mide con ayuda del llamado «efecto Doppler». Según él, la frecuencia de las ondas radioeléctricas recibidas es igual a la de las transmitidas, si la distancia entre el transmisor y el receptor se mantiene constante. En cambio, si el transmisor se aleja del receptor, la frecuencia de la señal recibida es menor que la transmitida, y la diferencia entre ambas (el llamado desplazamiento Doppler de la frecuencia) es proporcional a la velocidad de alejamiento. Y si el transmisor se acerca, la frecuencia recibida es mayor, y la diferencia también es proporcional a la velocidad de acercamiento. Para conseguir una alta precisión en las medidas de velocidad es fundamental que las señales transmitidas tengan una frecuencia muy estable. Como instalar a bordo de un vehículo espacial un transmisor de frecuencia extremadamente estable y que mantenga esta estabilidad durante años y años es muy difícil, se recurre al procedimiento llamado «doble Doppler» o «Doppler de doble camino». En él se transmite desde la estación una señal de frecuencia muy estable, que recibe el vehículo espacial y retransmite a tierra, en donde se compara la frecuencia recibida con la transmitida y se mide su diferencia. Para conseguir frecuencias con la máxima estabilidad posible, en la Red del Espacio Lejano se han utilizado siempre patrones atómicos, primero de rubidio, después de cesio y de ahí se ha pasado a los máseres de hidrógeno, con los que se consiguen estabilidades de frecuencia de 10^{-14} durante varias horas. Para que nos hagamos una idea de lo que esto significa, diremos que, si esta estabilidad pudiera mantenerse indefinidamente, un reloj accionado por un máser de hidrógeno tardaría más de un millón de años en adelantar o atrasar un solo segundo. Como ejemplo de la precisión que puede conseguirse en la medida de la velocidad radial de los vehículos espaciales, citaremos de nuevo al *Voyager 2*. Cuando pasó junto a Neptuno, su velocidad, que era de alrededor de 100.000 km/h, se medía con error inferior a 0,01 km/h.

En cuanto a la distancia, su medida se basa en la medida del tiempo de tránsito de las ondas radioeléctricas entre el vehículo espacial y la estación terrena. Teóricamente es una técnica muy sencilla, que se aplica rutinariamente en los equipos de radar. Las complicaciones surgen cuando hay que operar con señales extremadamente débiles y, además, se necesita una gran precisión. El procedimiento que se sigue, explicado de forma muy esquemática, es el de transmitir desde tierra una señal con una modulación especial (que es una secuencia de códigos de período muy largo), que es recibida por el vehículo y retransmitida a tierra, en donde se efectúa una correlación de la señal reci-

bida con la enviada, que permite conocer el tiempo que ha tardado esta señal en ir y volver. Las precisiones que se consiguen en distancias de muchos millones de kilómetros son de centenares de metros, que pueden mejorarse en ciertos casos hasta decenas de metros. Como decía un alto responsable del proyecto *Voyager*, la gran exactitud que se consigue en las medidas de velocidad y distancia nos permiten manejar los vehículos espaciales con la precisión de un joyero, aunque se encuentren a muchos millones de kilómetros de distancia.

Aunque las mediciones de velocidad y de distancia son la base de la navegación interplanetaria, también se utilizan otros procedimientos que en ciertos casos pueden aportar una ayuda interesante. Uno de ellos es el empleo de imágenes tomadas con las cámaras del propio vehículo espacial, que sitúan el objetivo hacia el que se dirige sobre un fondo de estrellas cuyas posiciones son bien conocidas. Como ejemplo de aplicación de este método de navegación, podemos citar el paso del vehículo espacial *Galileo*, camino de su destino principal, Júpiter, junto al asteroide Gaspra, el 29 de octubre de 1991. Era la primera vez en la historia que se iba a fotografiar de cerca un asteroide. Sus efemérides no se conocían con precisión, porque en el pasado no había ofrecido ningún interés especial como para que los astrónomos se concentrasen en su estudio. Resultado de ello es que los datos sobre su posición en el espacio adolecían de un margen de error excesivo, que no permitían asegurar que el *Galileo* pasase a la distancia adecuada y pudiese orientar correctamente su cámara fotográfica y demás equipos de medida durante los breves instantes en que iba a estar cerca del Gaspra. Con objeto de conocer con más precisión la posición relativa de ambos cuerpos, se llevaron a cabo cuatro sesiones fotográficas, que tuvieron lugar 53, 31, 16 y 8 días, respectivamente, antes del encuentro. Ello permitió corregir ligeramente la trayectoria del *Galileo* y que cumplierse correctamente su cometido. En la figura 5 se muestra una de las imágenes tomadas.



Fig. 5.— Fotografía del asteroide Gaspra, tomada en 1991 por el vehículo espacial *Galileo* en su camino hacia Júpiter. Es la primera vez que se pasó cerca de un asteroide y se pudieron tomar imágenes del mismo.

Otro procedimiento que también se emplea a veces como ayuda en la navegación es la observación simultánea por dos estaciones de la Red de las señales del vehículo espacial y de alguna radiofuente angularmente próxima a él. Utilizando la interferometría de muy larga base, es posible alcanzar precisiones de centésimas de segundo de arco.

Antes de terminar con este tema quisiera destacar un hecho importante. Debido al tiempo de tránsito de las señales, que es de muchos minutos y hasta de varias horas en los planetas más lejanos, todas las maniobras del vehículo espacial en la fase terminal del vuelo deben ser realizadas de forma automática, de acuerdo con las órdenes previamente enviadas desde la Tierra y almacenadas en el ordenador de a bordo. A pesar de ser la fase más crítica del vuelo, el control en directo desde la Tierra es irrealizable. Desde que surge un posible problema, se tiene noticia de él en la Tierra, se envían las instrucciones adecuadas y éstas se reciben a bordo, el tiempo transcurrido es inaceptablemente largo. Una situación análoga se ha presentado recientemente con el pequeño vehículo *Sojourner* (figura 6) moviéndose en la superficie de Marte. Y todavía se presentará de forma más aguda en el futuro, cuando se envíen vehículos que se desplacen a mayores distancias y a más velocidad.

EXPLORACIÓN DE JÚPITER

Las consideraciones anteriores son aplicables en principio a todos los vehículos espaciales que vayan a explorar cualquier cuerpo del Sistema Solar. Con el fin de poder concretar un poco más sobre cómo se realiza esta exploración y los resultados que se obtienen, nos vamos a centrar en un caso de gran actualidad: la exploración de Júpiter y de sus grandes satélites, especialmente de Ío y Europa.

Júpiter es el mayor planeta del Sistema Solar. Su volumen es tal, que con él se podrían formar 1.300 planetas como la Tierra. A pesar de su tamaño, gira muy rápidamente alrededor de su eje, dando una vuelta completa en tan sólo 9 horas y 55 minutos. En cambio, el año es largo, tarda 11,86 años terrestres en completar su giro alrededor del Sol. Su distancia mínima a la Tierra es de 591 millones de kilómetros. Hasta la fecha ha sido explorado por cinco vehículos espaciales, todos lanzados por la NASA. Ha habido un sexto, el *Ulysses*, que pasó cerca de Júpiter, pero fue para aprovechar su atracción gravitatoria como ayuda para poder alcanzar su destino, que era la exploración de las regiones polares del Sol.

El primer visitante

El primer vehículo espacial que se acercó a Júpiter fue el ya citado *Pioneer 10* (figura 2). Inició su camino el 3 de marzo de 1972 desde Cabo Cañaveral y, tras un viaje de casi dos años (641 días), pasó a 130.000 km de la capa superior de nubes del planeta. El *Pioneer 10* es un vehículo



Fig. 6.— El pequeño vehículo *Sojourner* examinando una roca en la superficie de Marte.

muy notable: relativamente sencillo, robusto y barato, con una masa total de 260 kg, de los que 30 corresponden a los instrumentos científicos. Su misión era llevar a cabo una exploración preliminar y preparar el camino a otros vehículos posteriores mucho más complejos. Partió de la Tierra con una velocidad inicial de 51.700 km/h, la más alta conseguida hasta esa fecha. En tan sólo once horas cruzó la órbita de la Luna. Podíamos decir que hasta llegar a la órbita de Marte navegaba por espacios conocidos, pues habían sido cruzados por los *Mariner 4, 6, 7 y 9*, americanos, y los *Mars 2 y 3*, rusos. Pero más allá estaba lo desconocido, incluyendo el temido Cinturón de Asteroides.

Las ideas que se tenían sobre el Cinturón de Asteroides eran bastante imprecisas. En aquellas fechas había catalogados unos 2.000 asteroides, con dimensiones que variaban desde el mayor de ellos, Ceres, de 970 km de diámetro, hasta algunos que apenas sobrepasaban el kilómetro. Pero se suponía que el Cinturón debía contener cientos de miles de asteroides más pequeños e inmensas cantidades de partículas diminutas, que, animadas a gran velocidad, podían suponer un grave peligro para los vehículos espaciales que intentaran atravesarlo. El *Pioneer 10* llevaba dos instrumentos para poder estimar la cantidad de partículas existentes, su masa, su velocidad y, en suma, su peligrosidad. Y no se descartaba la posibilidad de que el propio vehículo fuera destruido, o dejado fuera de servicio, por el impacto de uno de estos asteroides. El *Pioneer 10* tardó unos 200 días en cruzar los 240 millones de kilómetros de anchura del Cinturón y, con enorme satisfacción para todos, demostró que su peligrosidad era muy inferior a la temida. Recibió algunos pequeños impactos, que no afectaron a su buen funcionamiento. Este resultado fue muy importante, pues en caso contrario, la exploración de los planetas situados más allá del Cinturón habría sido muy difícil y se hubiera retrasado bastantes años. Otros cinco vehículos lo han cruzado después y han confirmado los resultados del *Pioneer 10*.

Durante su paso junto a Júpiter obtuvo valiosa información, en especial sobre los intensos anillos de radiación que hay cerca del planeta. Aunque pasó a una distancia relativamente grande (a 130.000 km), el *Pioneer 10* acu-



Fig. 7.- Imagen de Júpiter tomada por el *Voyager 1* desde una distancia de 33 millones de kilómetros. En ella se aprecian perfectamente las bandas claras y oscuras paralelas al ecuador y la gran Mancha Roja.

muló una radiación total unas 100 veces superior a la dosis que se considera mortal para el 50% de las personas. Después de Júpiter, el *Pioneer 10* continuó su camino por el espacio; pero, como resultado del intenso campo gravitatorio del planeta, su velocidad experimentó un fuerte incremento (más de 40.000 km/h), lo que le ha permitido escapar del Sistema Solar y alejarse indefinidamente. Es el primer vehículo espacial que lo ha conseguido.

La NASA, ante el riesgo de que algo fallase en este vehículo espacial y no pudiese cumplir su misión, había construido otro vehículo gemelo, el *Pioneer 11*, que lanzó un año más tarde, el 6 de abril de 1973. Pero, habida cuenta del éxito de su antecesor, se modificó ligeramente su trayectoria, para que, además de pasar más cerca de Júpiter (a 43.000 km), se aprovechara su atracción para con-



Fig. 8.- Imagen tomada también por el *Voyager 1* cuando estaba a 20 millones de kilómetros. Puede verse el satélite Ío pasando por delante de la Mancha Roja y a la derecha el satélite Europa. Ambos tienen un tamaño parecido al de la Luna.

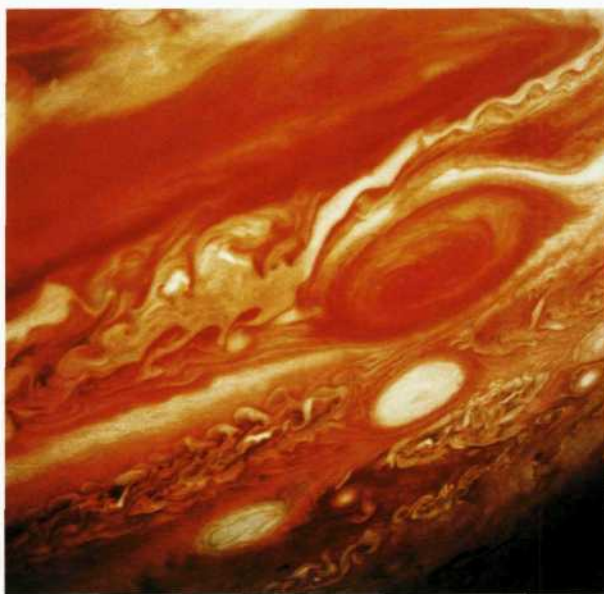


Fig. 9.- La Mancha Roja vista con más detalle, desde una distancia de 5 millones de kilómetros. Sorprende la fuerte turbulencia en las capas altas de la atmósfera de Júpiter.

seguir una velocidad de salida adecuada, en magnitud y dirección, que le llevase hasta Saturno, cosa que ocurrió el 1 de septiembre de 1979, tras casi cinco años más de viaje. Fue el primer vehículo que pasó junto a este planeta.

Las misiones *Voyager 1* y *Voyager 2*

Después de los dos lanzamientos anteriores de tipo exploratorio, la NASA preparó otros dos vehículos gemelos, los *Voyager 1* y *Voyager 2*, bastante más complejos y transportando cada uno 105 kg de instrumental científico. Se lanzaron con pocos días de diferencia en 1977 y llegaron junto a Júpiter el 5 de marzo y el 9 de julio de 1979, respectivamente. El instrumento que obtuvo los resultados más espectaculares fue sin duda el sistema doble de cámaras fotográficas, montadas en una plataforma común, que podía orientarse a voluntad desde la Tierra. Una de las cámaras permitía obtener imágenes de gran resolución (distancia focal 1.500 mm), mientras que la otra, con menor resolución, podía cubrir un campo 57 veces mayor. En total transmitieron más de 33.000 imágenes del planeta y de sus principales satélites. Las figuras 7, 8 y 9 fueron tomadas por este vehículo mientras se acercaba a Júpiter, desde unas distancias de 33, 20 y 5 millones de km, respectivamente.

Muchos fueron los descubrimientos que se hicieron con los *Voyager*, pero quizás los más inesperados fueron los relacionados con sus cuatro grandes satélites: Ío, Europa, Ganimedes y Calixto. Su existencia se conocía desde hace casi 400 años, desde que Galileo los descubrió en 1610, pero se sabía poco de ellos, pues con los telescopios terrestres apenas se pueden apreciar detalles. La figura 10 muestra una vista general de Ío. La gran sorpresa fue ver que en este satélite, que tiene un tamaño parecido al de la



Fig. 10.— Vista general de Ío tomada en 1979 por el *Voyager 1*. Causó una gran sorpresa descubrir que este satélite tuviera varios volcanes en plena actividad.



Fig. 11.— En esta imagen se ve uno de los volcanes de Ío, que está ampliado en el recuadro inferior derecho.

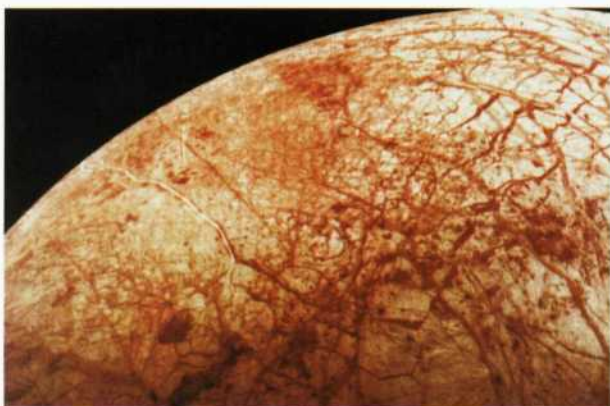


Fig. 12.— Vista parcial de Europa tomada también en 1979, mostrando una superficie muy lisa y cubierta de hielo profundamente cuarteado.



Fig. 13.— Ganimedes, el mayor satélite del Sistema Solar, mayor incluso que el planeta Mercurio.

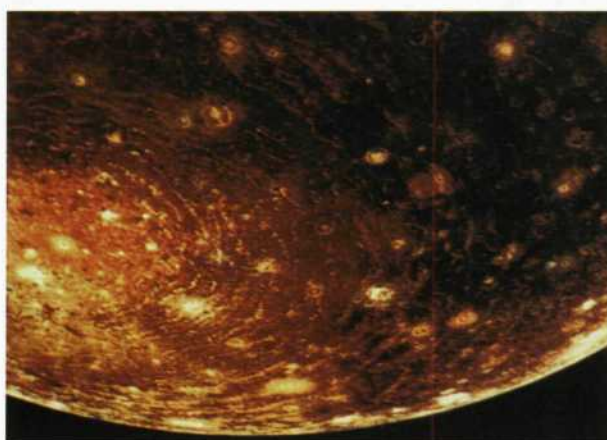


Fig. 14.— Vista parcial de Calisto, el más alejado de los cuatro grandes satélites de Júpiter. Su superficie densamente cubierta de cráteres de impacto es reflejo de su gran antigüedad.

Luna, había hasta 8 volcanes en actividad, con penachos que llegaban a los 300 km de altura. En la figura 11 se ve uno de ellos. La figura 12 cubre una parte de Europa. Su extraña textura superficial hizo pensar a los científicos que este satélite podría tener una cubierta de hielo, flotando posiblemente sobre un océano líquido. La figura 13 muestra a Ganimedes, el mayor satélite de Júpiter y de todo el Sistema Solar, mayor incluso que el planeta Mercurio. En Calisto (figura 14) toda la superficie está densamente cubierta de cráteres. Entre los satélites que ya se conocían y los que han descubierto los *Voyager*, Júpiter está rodeado por un cortejo de 16 satélites, con dimensiones que varían entre los 5.262 km de Ganimedes hasta los 16 km de Leda. Y no se descarta que pueda haber más, pero pequeños.

Respecto al propio planeta, los *Voyager* confirmaron que básicamente es una inmensa esfera de hidrógeno y helio, con fuerte achatamiento polar. Su forma es la que corresponde a un equilibrio hidrostático. Su atmósfera, de unos 1.000 km de espesor, está constituida por un 89% de hidrógeno, un 11% de helio y escasamente un 1% de otros componentes (amoníaco, metano, etano, acetileno, cris-

tales de agua, etc.). Por debajo de la atmósfera, el hidrógeno está en estado líquido, formando un inmenso océano que cubre todo el planeta. Se supone que a unos 25.000 km de profundidad, debido a la gran presión (unos 3 millones de atmósferas) y alta temperatura (unos 11.000 °C) allí existentes, el hidrógeno adquiere propiedades metálicas.

Júpiter es un planeta que pierde por radiación bastante más calor del que recibe del Sol, entre 2 y 3 veces más. Este hecho tiene una influencia decisiva en el comportamiento de su atmósfera, que es muy distinta de la terrestre. Tiene bandas paralelas al ecuador, alternativamente claras y oscuras, que rodean todo el planeta. Son regiones de gases ascendentes y descendentes, respectivamente. Se han detectado fuertes descargas eléctricas en las capas superiores de nubes. Y también auroras en las regiones polares. Especial mención merece la famosa «Gran Mancha Roja», que se viene observando telescópicamente desde hace más de trescientos años. Su tamaño es bastante superior al de la Tierra. Parece que es una gigantesca tormenta, un inmenso torbellino, que da un giro completo cada 6 días.

Este planeta tiene un campo magnético muy intenso, unas 4.000 veces más intenso que el de la Tierra. Y se extiende profundamente en el espacio, dando lugar a una magnetosfera cuyo volumen es un millón de veces superior al de la terrestre. Júpiter está rodeado de cinturones de radiación, cuya intensidad es de 5.000 a 10.000 veces mayor que la de los cinturones de radiación de Van Allen en la Tierra. Entre el planeta y su satélite Ío hay un tubo de flujo magnético por donde circula una corriente eléctrica de unos 5 millones de amperios.

Otra sorpresa fue el descubrimiento de un anillo de unos 5.800 km de anchura en torno a Júpiter. Es un anillo con poca densidad de materia y con estructura radial no uniforme.

La misión *Galileo*

Todos estos resultados despertaron un enorme interés de los científicos por Júpiter y sobre todo por sus satélites. Y la NASA preparó el *Galileo* (figura 15), el vehículo más complejo hasta ese momento destinado a la exploración planetaria, con dos objetivos prioritarios: estudiar la atmósfera de Júpiter, incluyendo su composición química, y profundizar en el estudio de los satélites. El plan inicial era lanzar al *Galileo* en vuelo directo a Júpiter, utilizando para ello el Transbordador Espacial, para ponerlo primero en órbita terrestre, y un cohete *Centaur* para darle el impulso adicional que lo llevase hasta ese planeta. Pero el plan tuvo que ser abandonado como consecuencia del desastre del *Challenger* en 1986 y la decisión de que, por motivos de seguridad, no se podría utilizar el *Centaur* en los futuros vuelos del transbordador. Y la NASA se encontró con que no disponía de ningún lanzador con potencia suficiente para el vuelo directo Tierra-Júpiter. Ante esta difícil situación y con la perspectiva de tener que cancelar un proyecto en el que llevaba trabajando bastantes

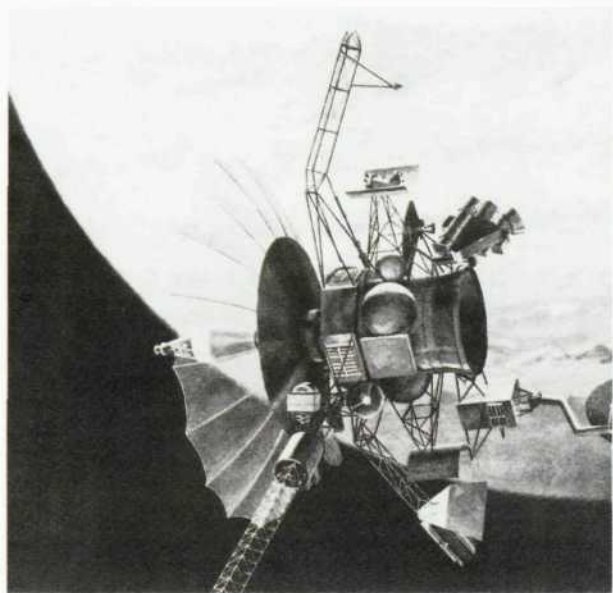


Fig. 15.— Vista general simulada de la nave *Galileo*. La gran antena de 4,8 m de diámetro, que iba plegada durante el lanzamiento, no pudo desplegarse completamente por problemas mecánicos.

años y en el que había invertido cuantiosos recursos, tuvo que aceptar una solución un tanto extraña, pero que le permitiría llegar a Júpiter con los lanzadores disponibles: el Transbordador Espacial y un cohete tipo IUS (bastante menos potente que el prohibido *Centaur*), aunque al precio de tener que elegir una trayectoria muy larga (seis años de viaje), muy compleja y con muchos problemas de navegación (figura 16).

El lanzamiento tuvo lugar el 18 de octubre de 1989 en dirección a Venus, a cuyas proximidades llegó en febrero de 1990. Aprovechando la ayuda gravitatoria de este planeta consiguió aumentar su velocidad en 7.900 km/h y situarse en una trayectoria que le llevó a dar una vuelta completa alrededor del Sol y pasar cerca de la Tierra

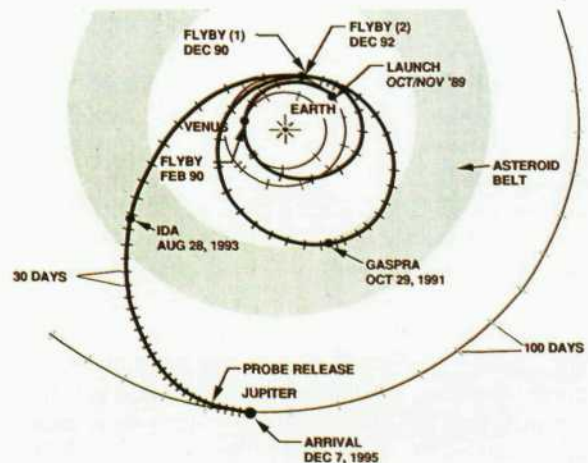


Fig. 16.— Representación simplificada de la larga y compleja trayectoria que ha tenido que seguir el *Galileo*, porque la NASA no disponía de ningún sistema de lanzamiento con energía suficiente para el vuelo directo Tierra-Júpiter.

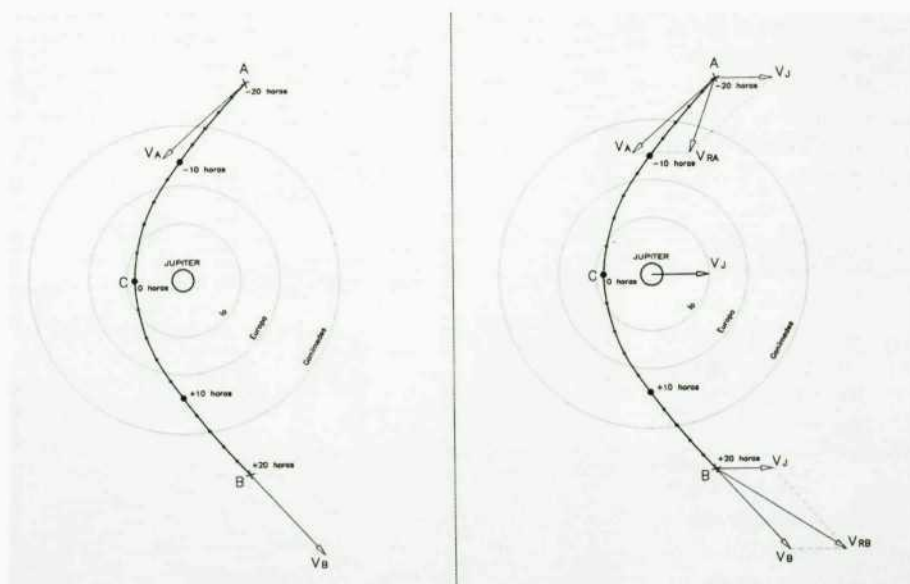


Fig. 17.— Paso del *Voyager 1* junto a Júpiter y cambios producidos en la magnitud y dirección de su velocidad debidos a la atracción de este planeta. En la figura de la izquierda, vistos por un observador en Júpiter, y en la derecha, vistos por un observador en el Sol.

(a 960 km) en diciembre de 1990. También aquí aprovechó la gravedad terrestre, incrementó su velocidad en 18.700 km/h y quedó situado en una nueva órbita que, después de dar otra vuelta alrededor del Sol, le llevó por segunda vez a pasar junto a la Tierra (a 303 km) en diciembre de 1992. En este segundo paso logró un nuevo incremento de velocidad de 13.300 km, con el que finalmente pudo iniciar su viaje hacia Júpiter, a cuyas proximidades llegó en diciembre de 1995. Fue un viaje realmente complejo y delicado. Cualquier error en la navegación hubiera podido hacer fracasar la misión, pues la cantidad de combustible que llevaba a bordo sólo permitía ligeros ajustes en la trayectoria.

Dada la utilización cada vez más frecuente que se viene haciendo del campo gravitatorio de un planeta como ayuda para facilitar la llegada de un vehículo espacial a su destino, creo que merece la pena hacer un inciso y analizar con algún detalle este proceso. Vamos a tomar como ejemplo el paso del *Voyager 1* cerca de Júpiter (figura 17). La curva de la izquierda (una rama de hipérbola) muestra la trayectoria que vería un observador situado en el planeta. Las velocidades V_A y V_B son las que tenía el vehículo 20 horas antes de su máxima aproximación (punto A) y 20 horas después (punto B). Ambas son iguales en magnitud (unos 100.000 km/h) y únicamente ha cambiado su dirección. Pero visto desde el Sol, las cosas son distintas. Júpiter y todo su entorno se mueven alrededor del Sol con una velocidad V_J de 46.800 km/h. Al sumar vectorialmente esta velocidad con las que había en los puntos A y B, obtenemos las velocidades resultantes, V_{RA} y V_{RB} , que son las que tenía el *Voyager 1* respecto al Sol 20 horas antes del encuentro y 20 horas después. Y al compararlas entre sí vemos que no sólo ha cambiado la dirección de la velocidad, sino también su magnitud. Concretamente en este caso se aumentó nada menos que en 57.000 km/h.

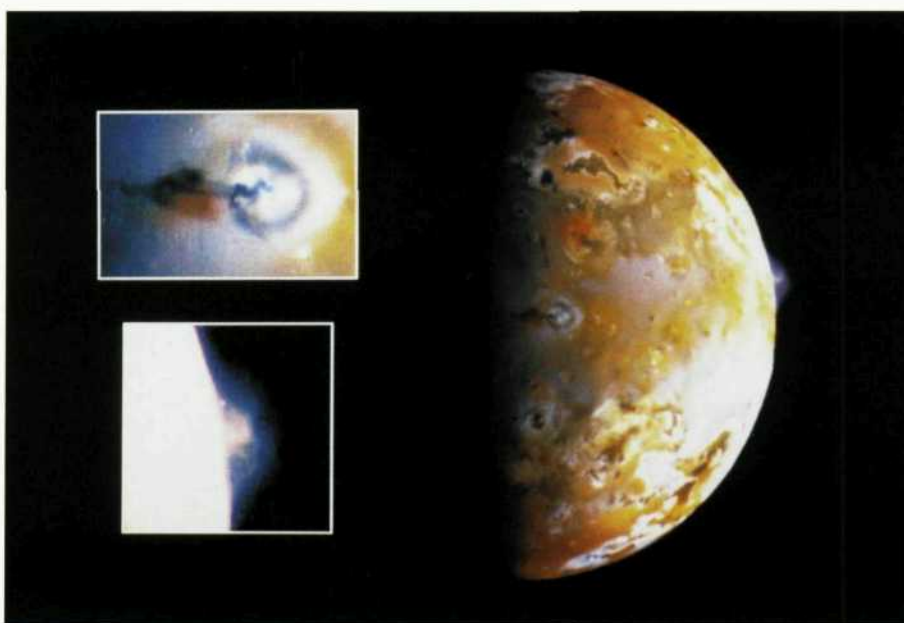
De una forma general, el cambio de velocidad que experimenta un vehículo espacial al pasar cerca de un pla-

netta depende básicamente de cuatro factores: la masa del planeta, la distancia mínima de paso, la velocidad de llegada del vehículo y la situación del punto de máxima aproximación. Según que el vehículo, visto desde el Sol, pase por detrás del planeta, o por delante, o por arriba, o por debajo, o por cualquier otra dirección, el cambio en la magnitud y dirección de la velocidad será muy distinto.

Pero volvamos de nuevo al *Galileo*. Durante su camino hacia Júpiter realizó algo muy importante. El 29 de octubre de 1991 pudo fotografiar un asteroide, el 951 Gaspra (figura 5), con unas dimensiones de $19 \times 12 \times 11$ km. Era la primera vez que se conseguía ver de cerca un asteroide. Dos años más tarde, el 28 de agosto de 1993, volvió a pasar cerca de un segundo asteroide, el 243 Ida, de unos 58 km, y también obtuvo imágenes de él. El paso del *Galileo* cerca de estos dos asteroides no fue una afortunada casualidad. Fue el resultado de un largo y meticuloso estudio sobre qué asteroides podrían ser observados durante su largo y complicado viaje a Júpiter, con un consumo adicional de combustible pequeño. El número inicial de posibles asteroides a explorar ascendía a más de 1.000, que se fue rápidamente reduciendo al calcular en qué medida tendría que modificarse la trayectoria del *Galileo* para poder pasar junto a cada uno de ellos.

El plan de vuelo previsto para el *Galileo*, si exceptuamos el fallo en la apertura de la antena principal, se está cumpliendo muy satisfactoriamente. El 7 de diciembre de 1995 se puso en órbita en torno a Júpiter, convirtiéndose en el primer satélite artificial de este planeta. Pero antes había desprendido una sonda, que penetró directamente en la atmósfera de Júpiter, para obtener datos sobre su estructura y su composición química. La sonda, de 339 kg y llena de instrumentos de medida, llegó a las capas altas de la atmósfera con una velocidad de 170.000 km/h. Allí sufrió un violento frenado aerodinámico, con deceleraciones de hasta 230 g, que redujo su velocidad a 160 km/h. A partir de aquí el descenso fue lento con ayuda de un para-

Fig. 18.— Imagen de Ío tomada por el *Galileo*, diecisiete años después de la mostrada en la figura 10. En los recuadros de la derecha se ha ampliado la parte correspondiente a los dos volcanes que aparecen en la imagen.



caídas. Estuvo enviando información durante 61 minutos, mientras descendía unos 650 km. Cuando se interrumpieron las comunicaciones, la presión atmosférica era 20 veces la terrestre al nivel del mar.

La órbita del *Galileo* en torno a Júpiter se había elegido de tal forma que en cada vuelta, con mínimas correcciones de trayectoria, pudiese sobrevolar alguno de sus cuatro grandes satélites. No podemos entrar aquí en detalles, pero esto ha sido realmente una maravilla de navegación espacial. El programa inicial se ha completado a plena satisfacción. Ha pasado una vez cerca de Ío, tres de Europa, cuatro de Ganimedes y tres de Calixto. En vista del éxito y del buen estado de los equipos de a bordo, la NASA decidió extender la misión del *Galileo* hasta finales de 1999, dedicándolo de manera especial a la observación de Europa, que ha sido sobrevolado ocho veces más. También ha pasado cuatro veces cerca de Calixto y dos veces junto a Ío. La observación de Ío, a pesar de lo interesante que es este satélite, se ha dejado para el final, porque, dada su proximidad al planeta, el *Galileo* tendría que estar mucho tiempo dentro de los intensos campos de radiación, lo que podría dañar algunos equipos de a bordo.

Las figuras 18 y 19 corresponden de nuevo a Ío, pero son imágenes tomadas diecisiete años después de las que enviaron los *Voyager*. En la primera se ven dos volcanes en plena actividad. La segunda son dos tomas del mismo terreno, que muestran los cambios que han tenido lugar entre ambas. De todos los planetas y satélites del Sistema Solar, Ío es el que tiene la máxima actividad volcánica, cosa realmente sorprendente si se compara, por ejemplo, con la Luna que tiene un tamaño parecido. La causa de ello se atribuye a lo siguiente: Ío gira alrededor de Júpiter en una órbita casi circular, a 422.000 km del centro, con un período de 1,77 días y presentando siempre la misma cara al planeta. Pero esta órbita sufre algunas perturbaciones de-

bido a la atracción de Ganimedes y especialmente a la de Europa, que, además de acercarse más a Ío, tiene un período que es exactamente el doble (3,54 días), lo que hace

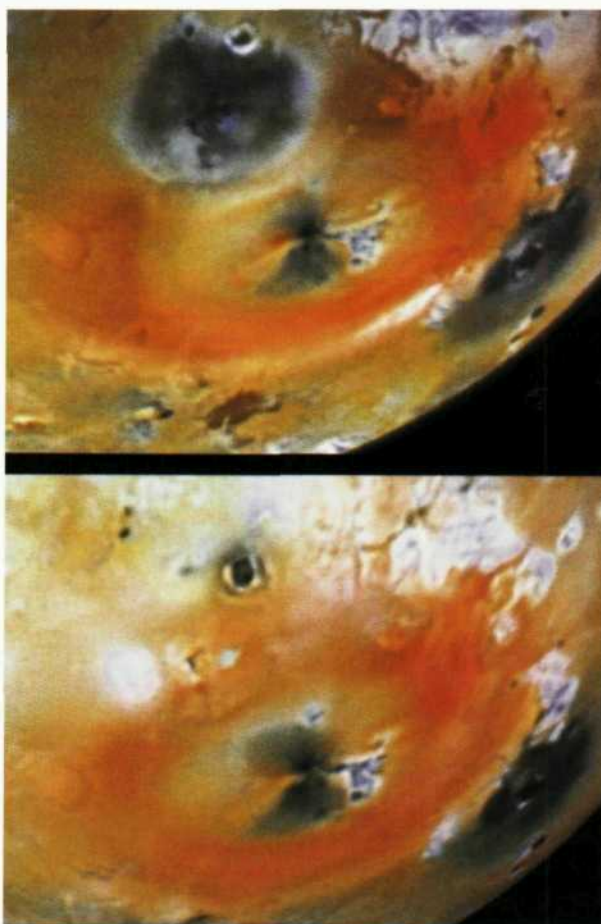


Fig. 19.— Dos tomas de la misma zona de Ío, en la que se aprecian los cambios habidos durante el tiempo transcurrido entre ambas.



Fig. 20.— Una zona de Europa de extensión parecida a la de Extremadura, fotografiada por el *Galileo*. Destaca lo muy fracturada que está la cubierta de hielo y la casi total ausencia de cráteres.

que cada dos vueltas de Ío ambos cuerpos queden a la mínima distancia entre sí. Y, aunque la atracción de Europa es relativamente pequeña, su efecto se va acumulando vuelta tras vuelta, y produce una cierta deformación en la órbita de Ío, que pasa a ser ligeramente elíptica. La consecuencia es que deja de presentar exactamente la misma cara a Júpiter y que las deformaciones que experimenta debidas a su fuerte atracción no son estáticas, sino que hay mareas. Estas deformaciones, que se estiman en unos 100 m en la superficie, hacen que por rozamiento interno se disipen en forma de calor grandes cantidades de energía, que elevan la temperatura del interior de Ío por encima de los 1.500 °C, según se ha podido medir en la lava expulsada por los volcanes.

Las dos fotos siguientes corresponden a Europa. La primera (figura 20) cubre una superficie de 240 por 225 km. Entre las muchas líneas de fractura que pueden verse, destacan dos bandas oscuras que cruzan la imagen en sentido diagonal. Se supone que estas dos bandas son el resultado de grietas en la superficie helada del satélite, que se han ido abriendo al desplazarse las placas de



Fig. 21.— Esta imagen cubre una superficie de 18 x 13 km. En ella pueden apreciarse accidentes de tan sólo 25 m de tamaño.

hielo y ha aflorado material más oscuro desde el interior. Puede verse también la casi total ausencia de cráteres de impacto, lo que indica que la superficie es bastante joven. La foto de la figura 21 es bastante más detallada. Cubre una superficie de 18 por 13 km (como la de una gran ciudad) y en ella pueden distinguirse accidentes del terreno de tan sólo 25 m de tamaño. En la parte izquierda hay una zona sensiblemente circular y muy lisa de unos 3 km de diámetro. Se cree que fue producida por una erupción de material fluido, que cubrió el terreno y formó como una especie laguna, que muy pronto se volvió a congelar. Por el contrario, a su derecha aparece una zona muy rugosa, irregular y como cubierta de bloques de hielo.

Al estudiar éstas y otras muchas imágenes, los expertos han llegado a la conclusión de que la capa de hielo que cubre Europa debe de estar como flotando en un océano líquido, o al menos en una capa de lodo o fango acuoso semilíquido. Y la pregunta que surge inmediatamente es: Si la temperatura en la superficie es de unos 160 °C bajo cero, ¿de dónde sale el calor necesario para mantener el agua en estado líquido? La fuente de calor está probablemente en el mismo efecto marea que hemos visto en el caso de Ío, aunque aquí es menos intenso por estar Europa más lejos de Júpiter (a 661.000 km). Se estima que las deformaciones superficiales son en este satélite de unos 40 m.

Si en el interior de Europa hay calor, agua líquida y seguramente material orgánico procedente de cometas y meteoritos, quiere decir que habría los ingredientes básicos para una posible existencia de vida. El hecho de que en nuestro planeta se hayan descubierto seres vivos en las profundidades del océano cerca de zonas volcánicas calientes, donde nunca llega la luz del Sol ni hay oxígeno libre, demuestra que la vida es posible en condiciones tal vez parecidas a las que pudiera haber bajo las capas de hielo de Europa.

La información disponible no permite de momento llegar más lejos, pero es suficiente para hacer que Europa sea uno de los cuerpos celestes más interesantes del Sistema Solar y más dignos de ser explorados en profundidad con nuevos lanzamientos. Para el año 2003 o el 2005, la NASA está considerando el lanzamiento del *Europa Orbiter*, con la misión principal de estudiar las características de ese posible océano interno, combinando una serie de técnicas distintas. Una de ellas sería un equipo de radar, para que sus ondas penetrasen en el hielo y dieran información sobre su espesor. Y probablemente se incluya en esta misión, o en otra distinta, un módulo que se pose en la superficie del satélite y trate de perforar la capa de hielo para estudiar lo que hay debajo de él.

BIBLIOGRAFÍA

- BAUTISTA, M., «La gran aventura del *Pioneer 10*», *Revista de Aeronáutica y Astronáutica*, diciembre 1990.

- BAUTISTA, M., «Recientes progresos en la exploración del Sistema Solar», *Ingeniería Aeronáutica y Astronáutica*, n.º 146, junio de 1975.
- BAUTISTA, M., «Sobre la navegación de vehículos espaciales destinados a la exploración de los planetas», *Revista del Instituto de Navegación*, n.º 1, otoño 1997.
- *Europa, a Continuing Story of Discovery*, <http://www.jpl.nasa.gov/galileo/europa>.
- «The Evolution of Technology in the Deep Space Network», *NASA-JPL Publication 95-20*, diciembre 1995.
- «La exploración del sistema solar», *Gran Atlas del Espacio*, Ebrisa, Barcelona, 1988.
- FIMMEL, R. O.; VAN ALLEN, J., y BURGESS, E., «Pioneer. First to Jupiter, Saturn, and beyond», *NASA SP-446*, 1980.
- JOHNSON, T. V., y SODERBLOM, L. A., *Ío, Investigación y Ciencia*, febrero 1984.
- JOHNSON, T. V., «La misión Galileo», *Investigación y Ciencia*, enero 1996.
- «Mission to Jupiter and Its Satellites», *Science*, junio 1979.
- MORRISON, D. y SAMZ, J., «Voyage to Jupiter», *NASA SP-439*, 1980.