

La navegación espacial

MANUEL BAUTISTA ARANDA
General Ingeniero Aeronáutico (R)



Fig. 1.- Vista aérea de la Estación ESA de Villafranca del Castillo.

La navegación espacial es seguramente el ejemplo más emblemático de aplicación de las matemáticas en el campo de la Astronáutica. El determinar la posición de un vehículo en el espacio, la trayectoria que sigue y las eventuales correcciones que haga falta introducir en ella, requieren normalmente cálculos bastante complejos.

Desde el primer momento, la Astronáutica hizo amplio uso de la Mecánica Celeste, desarrollada pacientemente por los astrónomos desde los tiempos de Kepler y Newton. Las leyes que rigen el movimiento de los vehículos espaciales (tanto si se trata de satélites terrestres, como de sondas interplanetarias) son las mismas que gobiernan el movimiento de las estrellas, de los planetas, de los cometas y de cualquier otro

cuerpo celeste. La famosa ley de la gravitación universal de Newton, la que dice que los cuerpos se atraen en razón directa a sus masas e inversa al cuadrado de sus distancias, se aplica a cualquier cuerpo que se mueva en el espacio, sea grande o pequeño y sea natural o fabricado por el hombre.

Sin embargo, la navegación espacial presenta notables diferencias. En el caso de los astrónomos, al observar los cuerpos celestes tratan de calcular, con la mayor precisión posible, su trayectoria y sus movimientos. Pero en ningún momento figura en sus planes el modificar la trayectoria de estos cuerpos.

En cambio, en el caso de los vehículos espaciales, el introducir modificaciones en sus trayectorias suele ser una maniobra frecuente. La primera razón viene a



estar relacionada con el propio lanzamiento. Durante la preparación de esta fase, se calcula con toda precisión la órbita en que se desea situar al nuevo satélite, o la trayectoria que debe seguir, en el caso de sondas destinadas a la exploración de los planetas u otros cuerpos del Sistema Solar. Pero los sistemas actuales de lanzamiento, a pesar de los avances conseguidos en este campo, tienen una dispersión excesiva y, con demasiada frecuencia, las órbitas o trayectorias reales no coinciden exactamente con las previstas. Hay entonces que determinar cuál es la órbita real y qué diferencias presenta con respecto a la que teóricamente debía seguir. Y a partir de ello, se calculan las maniobras necesarias para corregir estos errores y se transmiten al vehículo espacial las órdenes oportunas, para

que, en el instante prefijado, las ejecute con los sistemas de guiado y propulsión de a bordo.

Hay también otra diferencia entre la Astronomía y la Astronáutica, que afecta a los datos que se miden en cada caso y al tratamiento matemático necesario para calcular a partir de ellos las órbitas correspondientes. El instrumento básico de los astrónomos ha sido siempre el telescopio. Con él se mide la dirección (ascensión recta y declinación) en que se ven los objetos observados. Y a partir de estos datos de dirección se calculan las órbitas. Pero en la navegación espacial lo fundamental son las ondas radioeléctricas y los correspondientes equipos transmisores y receptores de tierra y de a bordo. Y las magnitudes que se miden con ellos no son direcciones, sino distancias y velocidades radiales, según veremos más adelante.

Al examinar la navegación de los vehículos espaciales, conviene distinguir entre los satélites, cuya distancia a la superficie terrestre se mide en centenares o millares de kilómetros, y las sondas destinadas a la exploración del Sistema Solar, cuyas distancias son normalmente de cientos de millones de kilómetros. Veamos cada uno de ellos.

CASO DE LOS SATÉLITES TERRESTRES

Las maniobras para la puesta en órbita de un satélite en torno a la Tierra son algo teóricamente muy simple. Sólo hay que elevarlo a una altura suficiente e imprimirle la velocidad necesaria para que quede en órbita. Sin embargo, la enorme cantidad de energía que requieren estas maniobras, hace que la fase del lanzamiento resulte especialmente delicada. De hecho, un 90 %, aproximadamente, de la masa total al despegue de un cohete lanzador corresponde al combustible necesario. La trayectoria a seguir, desde que se inicia el despegue hasta que el satélite queda en órbita, se calcula cuidadosamente para que necesite la mínima energía, amén de otras consideraciones, tales como que en ningún momento se excedan los valores admisibles de aceleración, presión dinámica, etc. Consecuencia de todo ello, es que la fase del lanzamiento se realiza siempre, incluso en los vuelos tripulados, de una forma totalmente automática, siguiendo las instrucciones cuidadosamente programadas en los ordenadores de a bordo.

Terminada la fase del lanzamiento, se procede a calcular la órbita inicial del satélite. Y este cálculo se actualiza periódicamente, para ir detectando, midiendo y eventualmente corrigiendo, las desviaciones que pueda experimentar dicha órbita, como consecuencia de las fuerzas perturbadoras que actúan sobre el satélite. Entre estas fuerzas cabe citar las debidas al achatamiento polar de la Tierra, a las anomalías locales del campo gravitatorio terrestre, a la atracción de la Luna y del Sol, a la presión de la radiación solar, al frenado producido en las altas capas de la atmósfera, a las corrientes inducidas por campo magnético terrestre, etc.

Los métodos que se utilizan habitualmente para determinar la órbita de los satélites se basan, como indicamos antes, en la medición de distancias y de velocidades radiales, aunque en casos especiales se recurre también a la navegación inercial, a la navegación astronómica y al empleo de los satélites GPS.

La distancia de un satélite a una estación terrena de seguimiento se obtiene a partir del tiempo de tránsito de las señales, que se propagan a la velocidad constante de 300.000 km/s. Desde tierra se envía al satélite una señal, adecuadamente modulada, que se recibe a bordo, se amplifica y se retransmite a tierra, en donde se mide el tiempo que ha tardado en este recorrido. La precisión conseguida depende de varios factores, pero puede ser del orden del metro. Si el satélite lleva instalados retroreflectores láser, es posible medir distancias con muy pocos centímetros de error.

La medida de la componente radial de la velocidad, es decir la velocidad con que el satélite se acerca, o se aleja, de la estación terrena, se calcula con ayuda del llamado efecto Doppler. Este efecto consiste en que si un transmisor emite una señal radio de frecuencia fija, la señal que recibe un receptor tiene esa misma frecuencia, siempre que la distancia entre ambos se mantenga constante; pero la frecuencia recibida será mayor que la transmitida, si el transmisor se acerca al receptor, y será menor, si se aleja. Y esta diferencia entre la frecuencia transmitida y la recibida es proporcional a la velocidad de alejamiento, o de acercamiento, lo que permite determinar esta última midiendo la diferencia citada. La precisión conseguida con este procedimiento es muy grande. Se pueden medir velocidades de decenas de miles de kilómetros por hora con error inferior a unos pocos metros por hora.

Los datos de distancia y velocidad radial obtenidos en las estaciones terrenas, entre las que está por ejemplo la de Villafranca del Castillo (Fig. 1), se transmiten al correspondiente centro de control de la red de estaciones, en donde, a partir de ellos, se procede a calcular los parámetros que definen la órbita del satélite. Cálculos que, si hubiera que hacerlos manualmente, como en el pasado los tenían que hacer los astrónomos, resultarían extremadamente laboriosos y len-

tos; pero que con el uso de potentes ordenadores, los resultados se obtienen con toda rapidez.

Consideración especial merecen los vuelos espaciales tripulados. Alguien pudiera pensar que, al haber un piloto a bordo, la nave podría maniobrar libremente en el espacio, en forma parecida a como lo puede hacer un avión en la atmósfera. Pero el que así piense está en un grave error. En primer lugar, el combustible disponible a bordo es siempre muy limitado y esto hace que las maniobras a realizar se limiten a las estrictamente necesarias. En segundo lugar, hay fases del vuelo en que las maniobras son tan críticas y comple-

jas, como en el caso del lanzamiento antes citado, que el piloto difícilmente podría ejecutarlas. Y por último, las maniobras necesarias para conseguir un determinado fin no suelen ser nada intuitivas, deben ser las que indiquen los cálculos. Para comprender mejor este punto, voy a poner un ejemplo imaginario.

Supongamos que hay dos satélites situados en la misma órbita, pero distanciados entre sí unos 20 km, por ejemplo. Y que el que va detrás, que está tripulado, quiere acercarse al primero. La maniobra intuitiva normal sería la de meter motor para aumentar un poco su velocidad e irse acercando al otro satélite. Pero si hiciera esto, se llevaría una gran sorpresa, pues vería que el satélite, en vez de acercarse, mo-

dificaba su órbita, aumentaba su altura y se iba quedando más rezagado. Si en las ecuaciones que regulan el movimiento de su satélite hubiera introducido el empuje adicional proporcionado por el motor, hubiera visto que el resultado obtenido era justamente el que cabría esperar.

De lo anterior pudiera parecer que la función del piloto en una nave tripulada es mínima. Y esto tampoco es cierto. Hay maniobras en que su intervención es fundamental. Pongamos dos ejemplos concretos. Uno es el conjunto de maniobras, muy precisas y muy delicadas, que tenían que realizar los transbordadores espaciales americanos para acoplarse suavemente a la estación rusa MIR, y que tendrán que repetir cada vez que visiten la Estación Espacial Internacional. El otro ejemplo es la captura y reparación de grandes satélites en órbita, como ha sido el caso del telescopio es-



Fig. 2.- Telescopio de 1,2 m de apertura utilizado para detectar objetos pequeños en órbitas altas.

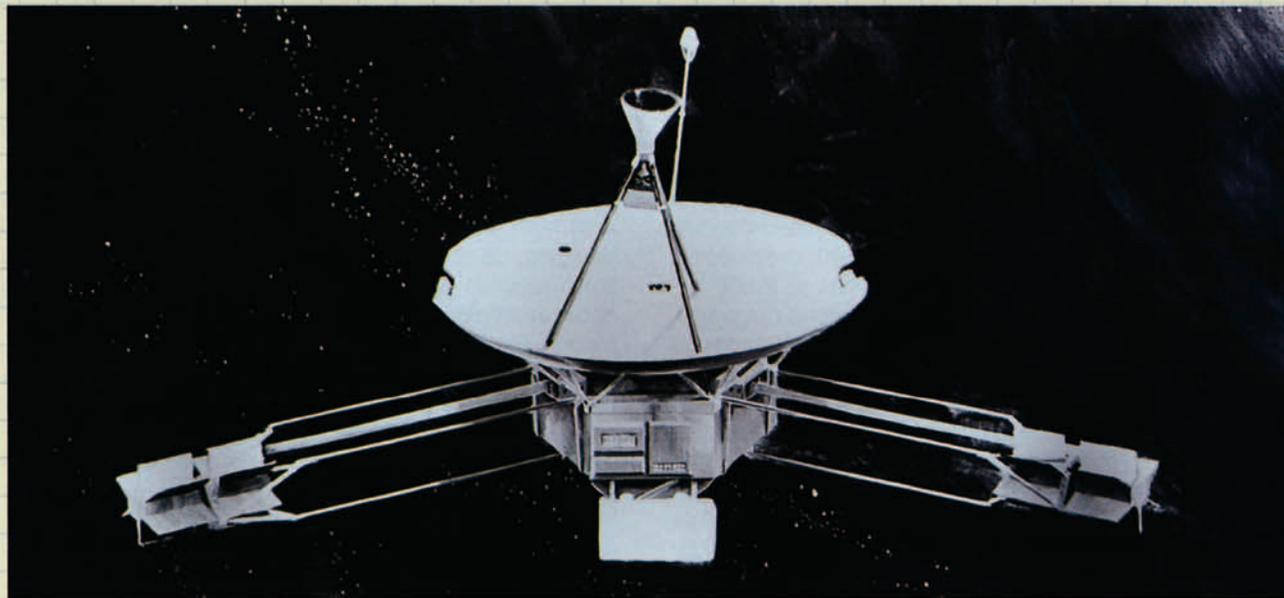


Fig. 3.- Vista general del Pioneer 10, que lleva 28 años de viaje y se encuentra actualmente a 11.000.000.000 km de la Tierra.

pacial Hubble. Son satélites extremadamente delicados y que cualquier maniobra un poco brusca, cualquier pequeño roce, bastaría para dejarlos fuera de servicio.

Un caso especial está constituido por los satélites que pudiéramos llamar no cooperativos. Me refiero a lo que vulgarmente se llama chatarra espacial, incluyendo en ella a los satélites que en su día tuvieron una determinada misión, pero que han dejado de funcionar y ya no se puede comunicar con ellos. En este momento hay catalogados más de 6.000 objetos con tamaño superior a 10 cm. Y el conocer las órbitas de todos ellos es muy importante, por el peligro que representan para los satélites que están en servicio. Ya en varias ocasiones los transbordadores espaciales han tenido que realizar maniobras evasivas, ante la predicción de que alguno de estos objetos iba a pasar peligrosamente cerca de ellos. Pero, al no ser cooperativos, al no disponer de un transpondedor a bordo, no se pueden aplicar los procedimientos de medida antes citados, hay que recurrir a otros distintos. Y estos son, la detección con radares especiales y el empleo de telescopios, que fotografían la posición de los satélites sobre el fondo de estrellas.

Las dimensiones mínimas de los objetos que son capaces de detectar estos sensores, dependen fundamentalmente de

la altura de sus órbitas, aunque influyen otros factores, tales como su forma, el material de que estén hechos, su iluminación etc. Los radares son más eficaces para órbitas bajas, pueden detectar objetos de unos 10 cm hasta alturas de unos 2.000 km. A partir de unos 5.000 km, los sistemas ópticos son más adecuados. No obstante, para la órbita geoestacionaria (36.000 km de altura) es difícil detectar objetos de tamaño inferior a 1 m. En la figura 2 se muestra un telescopio de 1,2 m de abertura utilizado por los Estados Unidos para este fin.

NAVEGACION INTERPLANETARIA

En el caso de los satélites la fuerza dominante que actúa sobre ellos es el campo gravitatorio terrestre. En el caso de los vehículos espaciales destinados a la exploración de los distintos cuerpos del Sistema Solar (planetas, satélites, asteroides, cometas o el propio Sol) la situación es más compleja. La gravedad terrestre predomina en los momentos iniciales. Pero, a medida que el vehículo espacial se va alejando, hay que ir teniendo en cuenta el campo gravitatorio del Sol, que acaba siendo el dominante durante la mayor parte del viaje. Hasta que el vehículo se aproxima a su destino y empieza a tener un efecto cada vez mayor la atracción del planeta al que se acerca.



Fig. 4.- Gigantesca antena parabólica de 70 m de diámetro de la Estación NASA de Robledo de Chavela.

Todo ello complica sin duda los cálculos necesarios para la correcta navegación.

Los grandes éxitos que se han obtenido en la exploración del Sistema Solar se han debido en gran parte a los avances en el campo de la navegación, que han permitido que los vehículos espaciales llegasen a sus correspondientes destinos con una precisión extraordinaria. A título de ejemplo, vamos a citar el caso concreto del Voyager 2. El 25 de agosto de 1989, después de 12 años de viaje y de haber recorrido más de 7.000 millones de kilómetros, pasó sobre el polo norte del planeta Neptuno, a una altura de 4.898 km sobre la capa superior de nubes y con una desviación de tan sólo 4,8 km en altura y 33,8 km en horizontal, con respecto al punto ideal previsto por los controladores del vehículo. Y el hecho es todavía más notable, si se tiene en cuenta que el Voyager 2 había pasado antes cerca de Júpiter, Saturno y Urano, habiendo experimentado en cada uno de estos pasos violentos cambios en la magnitud y dirección de su velocidad, debido a la fuerte atracción de estos planetas.

Los sistemas de lanzamiento disponibles no permiten, ni remotamente, situar al vehículo espacial en una trayectoria que le lleve a su destino con semejante precisión. Hay que instalar a bordo algún sistema de propulsión para que, de acuerdo con las órdenes transmitidas desde tierra, se puedan ir corrigiendo los pequeños errores que se vayan detectando a lo largo del viaje.

Los datos a partir de los cuales se calculan las trayectorias de estos vehículos interplanetarios son básicamente los que hemos citado anteriormente, es decir, las medidas de distancia y de la componente radial de la velocidad. Pero la situación se complica bastante, por el hecho de que hay que mantener el contacto radioeléctrico con vehículos que están a distancias de muchos millones de kilómetros. La intensidad de las señales que se reciben se va debilitando con gran rapidez, a medida que se alejan de la Tierra. Se van debilitando con el cuadrado de la distancia. Para que nos hagamos una idea de lo que esto significa, las señales recibidas desde un vehículo espacial que se encuentre a 100 millones de kilómetros de la Tierra son 40.000.000.000 de veces más débiles que las que se recibirían si este mismo vehículo estuviera en órbita terrestre a 500 kilómetros de altura.

Como solución inmediata podría pensarse en utilizar a bordo transmisores más potentes. Pero aumentar la potencia del transmisor lleva consigo aumentar su peso y su consumo de energía eléctrica, lo que a su vez se traduce también en más peso para producirla. Y el peso es algo que hay que mantener al mínimo en cualquier vehículo espacial. Resultado de todo ello es que las potencias utilizadas en los transmisores de a bordo son muy pequeñas, increíblemente pequeñas.

El ejemplo más espectacular es el del Pioneer 10 (Fig. 3), el primer vehículo que pasó junto a Júpiter (1973), el primero que cruzó la órbita de Neptuno (1983) y que se acabará escapando del Sistema Solar. Con un transmisor de tan sólo ¡¡ 8 vatios !! de potencia

todavía (febrero 2000) se siguen recibiendo sus señales, desde una distancia de 11.000 millones de kilómetros. Señales que, propagándose a la velocidad de la luz, tardan 10 horas y 15 minutos en llegar a la Tierra.

Semejantes comunicaciones son posibles gracias al empleo de antenas directivas a bordo. Pero sobre todo, por la utilización en las estaciones terrenas de enormes antenas parabólicas, de receptores de muy bajo nivel de ruido, de códigos especiales para tratamiento de la señal recibida y de otras medidas destinadas a que las débiles señales recibidas no se pierdan en el ruido de fondo. Una de estas antenas se muestra en la figura 4. Es la gran antena parabólica de 70 m de diámetro de la Estación de Robledo.

El tiempo de tránsito de las señales a tierra es un factor a tener en cuenta en todo el proceso de la navegación interplanetaria. Desde un planeta cercano como Marte las señales tardan en llegar entre 3 y 22 minutos, según la posición relativa de este planeta con respecto a la Tierra. Pero es que este tiempo de tránsito se eleva a 43 minutos, como término medio, en el caso de Júpiter. Y a 1 hora y 19 minutos, en el caso de Saturno. Lo que tiene fuertes implicaciones en la programación de la fase final del viaje. Si el objetivo es, por ejemplo, que el vehículo espacial se ponga en órbita alrededor de un planeta, las maniobras finales, que son especialmente críticas, no se pueden controlar en directo desde tierra. Porque, caso de que surgiese en esta fase algún problema imprevisto, hasta que se tuviera noticia de él en tierra, se transmitirían las medidas correctoras necesarias y éstas se recibiesen a bordo, el tiempo total transcurrido sería inaceptablemente largo. Ello obliga a asumir un cierto riesgo y que las maniobras finales se realicen de forma totalmente automática, de acuerdo con las instrucciones previamente enviadas y almacenadas en los ordenadores de a bordo.

Aunque las mediciones de velocidad y de distancia son la base de la navegación interplanetaria, también se recurre a otros procedimientos, que en ciertos casos pueden aportar una ayuda interesante. Uno de ellos es el empleo de las 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, podemos citar el caso del vehículo espacial Galileo, que, camino de Júpiter, su destino principal, pasó 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. Pero sus efemérides no se conocían con precisión, porque en el pasado este asteroide no había ofrecido suficiente interés como para que los astrónomos se concentrasen en su estudio. El resultado de ello es que los datos disponibles sobre su posición en el espacio adolecían de un margen de error excesivo y no permitían asegurar que el Galileo fuese a pasar a la distancia adecuada, ni que pudiese orientar correctamente su cámara fotográfica 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 4 sesiones fotográficas, que tuvieron lugar 53, 31, 16 y 8 días, respectivamente, antes del encuentro. La información así obtenida permitió corregir ligeramente la trayectoria del Galileo y que pudiese cumplir correctamente su cometido.

Una posibilidad que cada vez se emplea con más frecuencia en la navegación interplanetaria, con resultados a veces espectaculares, es la llamada ayuda gravitatoria. Consiste en esencia en aprovechar la perturbación que el campo gravitatorio de un cuerpo celeste (normalmente un planeta grande) ejerce sobre la trayectoria de un vehículo espacial que pase por sus

sultado de este experimento fue tan satisfactorio, que desde entonces ha pasado a ser una "herramienta" frecuente en los vuelos interplanetarios. Su aplicación más conocida tuvo lugar con el ya citado Voyager 2, que exploró sucesivamente Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno, aprovechando el impulso gravitatorio que recibía al pasar junto a cada uno de estos planetas, como ayuda para llegar al siguiente. Y, además, consiguió con ello llegar a Neptuno en tan sólo 12 años, en lugar de los 30 años que hubiera sido la duración normal en un lanzamiento directo a este planeta.

Cuando el planeta auxiliar queda en el camino que tiene que seguir el vehículo espacial para llegar a su destino, o, por lo menos, si la desviación a efectuar para

pasar junto a él es relativamente pequeña, intuitivamente se entiende que este procedimiento pueda ser eficaz. Pero es que hay casos en que la desviación es enorme. Casos que serían inaceptables, si los cálculos matemáticos no nos mostrasen claramente que eran ventajosos.

El ejemplo más llamativo es, sin duda, el del vehículo ESA-NASA Ulysses, lanzado en 1990 y destinado a estudiar las regiones polares del Sol. Hasta ese momento, todos los vehículos espaciales que habían observado al Sol lo habían hecho desde órbitas cercanas al plano de la Eclíptica, con lo que sus observaciones se concentraban básicamente en las zonas próximas al Ecuador solar y

suministraban poca información de lo que ocurría en las zonas polares. Pero el lanzamiento directo del Ulysses para que sobrevolase las regiones polares del Sol requería tal cantidad de energía, que no había ningún lanzador con potencia suficiente para conseguirlo. En vista de ello, se eligió una trayectoria, que a primera vista era totalmente disparatada, pero que los cálculos mostraban sin lugar a dudas que requería mucha menos energía. Y de acuerdo con la trayectoria elegida, en vez de lanzar el Ulysses hacia el Sol, que está a unos 150 millones de kilómetros de distancia, se lanzó hacia Júpiter, que está en sentido contrario y a unos 775 millones de kilómetros de la Tierra. Pero la atracción gravitatoria de Júpiter tuvo el efecto calculado y el Ulysses está cumpliendo perfectamente su misión.

Y para terminar, creo que a lo largo de estas líneas ha quedado muy claro que sin las matemáticas, sin los complejos cálculos necesarios para el estudio de las trayectorias mas adecuadas en cada lanzamiento, la navegación espacial sería totalmente imposible. ■

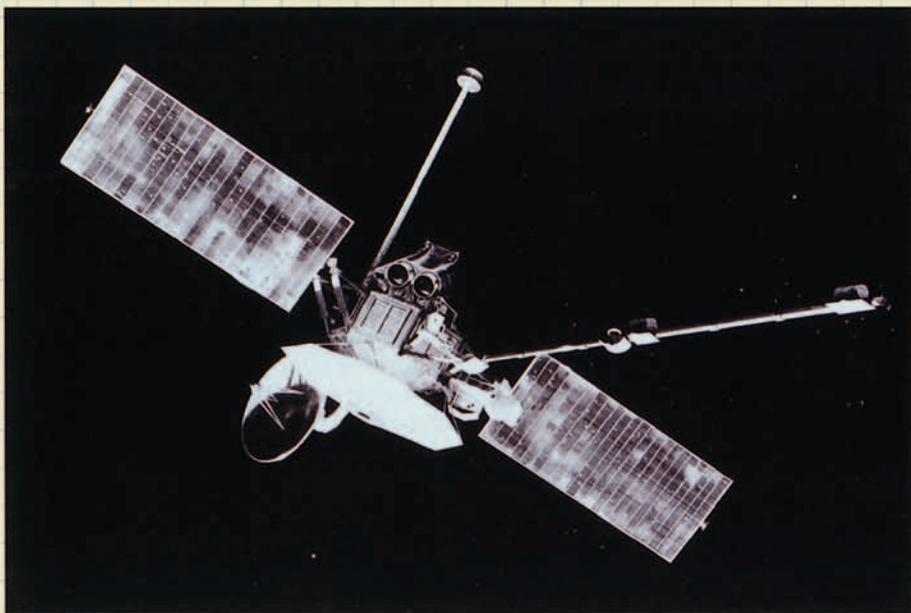


Fig. 5.- Aspecto del Mariner 10, el único vehículo que ha explorado el planeta Mercurio.

proximidades, como ayuda para que éste pueda llegar a su destino. Teóricamente se sabía desde hacía mucho tiempo que esta ayuda gravitatoria era posible y útil. De hecho, los astrónomos habían observado en repetidas ocasiones cómo los cometas que pasaban cerca de Júpiter eran desviados y en qué medida este paso modificaba su órbita inicial. Pero su aplicación en los viajes interplanetarios presentaba una grave dificultad. Y es que la navegación del vehículo debía ser extremadamente precisa para poder sacar provecho de ella. Si el paso, al llegar a la mínima distancia del planeta auxiliar, no se hacía por el punto teóricamente calculado, con un margen de tolerancias bastante pequeñas, el resultado no sería el deseado, e incluso podía llegar a ser negativo.

La primera vez que se hizo uso de esta posibilidad fue en 1973 con el Mariner 10 (Fig. 5), cuya misión era explorar el planeta Mercurio. Pero el lanzador utilizado, un Atlas-Centaur, no tenía potencia suficiente para ello. Y se recurrió al artificio de que pasase antes junto a Venus y se aprovechara su ayuda gravitatoria. El re-