

CINEMATICA Y DINAMICA DEL SISTEMA SOLAR

Oscar Diez Higuera

INTRODUCCION

Normalmente nuestra imagen del Sistema Solar es la de un conjunto de objetos siguiendo órbitas fijas, casi invariables y deterministas, unos alrededor de otros.

Sin embargo no es así, pues el Sistema Solar resulta dinámico y en continuo cambio. Aquí el determinismo a corto plazo deja paso, con el transcurrir del tiempo, al caos que tanto interés está despertando en la Física actual.

Las órbitas de los astros cambian continuamente de forma y orientación, y estos cambios adquieren importancia como causa de fenómenos que en apariencia no estarían relacionados. Ocurre así por ejemplo con las glaciaciones terrestres, que parecen estar moduladas por los cambios en la excentricidad de la órbita, entre otras causas también de origen astronómico.

Estos cambios son lentos en el tiempo, sin embargo otros astros menores, debido a las influencias que sobre ellos ejercen los mayores, pueden variar sus trayectorias de forma impredecible, en relativamente poco tiempo. Ocurre así con algunos cometas, asteroides, e incluso con el propio Plutón, en este sentido la estabilidad del Sistema solar no está asegurada, y puede que en un futuro algo lejano incluso las órbitas de planetas grandes varíen sin predicción posible.

De este tema hablaré en lo que sigue, dando previamente unas ideas sobre la caracterización de las órbitas y los elementos que permiten su descripción y orientación en el espacio.

FUNDAMENTOS

Nuestro actual conocimiento de la dinámica del Sistema solar se fundamenta sobre la base establecida por científicos como Galileo y Newton. Partiendo de ellos la Física clásica fue mejorando la descripción del mundo hasta que algunas pequeñas discordancias experimentales obligaron a introducir cambios que desembocarían en la Nueva Física, Cuántica y Relativista. Pero para nuestro propósito basta con conocer algunas de las leyes y definiciones de la Física Clásica, tales como los siguientes:

LEY DE LA GRAVITACION de Newton Las masas se atraen con una fuerza directamente proporcional al producto de dichas masas, e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que las separa. Esta fuerza actúa en la dirección de la recta que las une.

LEY DE ACCION DE LAS FUERZAS: Cuando una fuerza actúa sobre un objeto de masa constante, le produce una aceleración (es decir, un cambio en su velocidad, variando el valor de esta, su dirección o ambas a la vez) siendo esa aceleración directamente proporcional a la fuerza e inversamente a la masa del objeto.

LEY DE ACCION Y REACCION Cuando un objeto actúa ejerciendo una fuerza sobre otro (acción), este último actúa ejercien-

do otra fuerza sobre el primero (reacción), de igual valor y dirección, pero de sentido contrario.

ENERGIA MECANICA de un objeto: es la suma de la energía cinética, debida al movimiento, mas la energía potencial, debida a la posición en un campo de fuerzas.

CONSERVACION DE LA ENERGIA mecánica En el campo gravitatorio y en ausencia de fuerzas extrañas, la energía mecánica permanece invariable, se conserva. Si consideramos otros tipos de fuerzas como las de fricción con el medio, o la presión de las radiaciones, puede que la energía mecánica se incremente o disminuya, pero el efecto es muy pequeño en los grandes objetos del Sistema solar.

E F E C T O S RELATIVISTAS: Pueden aparecer en presencia de fuertes campos gravitatorios, dando lugar a discrepancias entre lo observado y las predicciones de la Física Clásica. Como ejemplo tenemos el comportamiento de la órbita de Mercurio, tan cercano al Sol, no explicable fácilmente por métodos clásicos pero si mediante consideraciones relativistas.

TIPOS DE ORBITAS

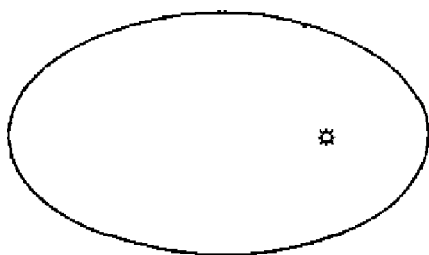
Aunque el caso general es mas complicado, nosotros vamos a comenzar estudiando el comportamiento de un pequeño objeto abandonado a la acción gravitatoria de otro mucho mayor, siendo la masa del primero despreciable frente a la del segun-

do. Este es el caso de un planeta o cometa atraídos por el Sol, o el de un cometa atraído por uno de los grandes planetas.

Consideramos el cuerpo mayor en el centro (ASTRO CENTRAL), creando un campo gravitatorio en el que se moverá el cuerpo menor (ASTRO ORBITAL). Este poseerá energía cinética debido a su velocidad, y energía potencial a causa de su posición en el campo de gravedad.

Pero mientras que la primera es siempre positiva, la segunda es siempre negativa, cuando se conviene en que se anule en el infinito. Sumando ambos obtenemos la energía mecánica, y según sea esta podemos tener diferentes tipos de órbitas:

ELIPTICAS (Fi 1):



ellipse
 $0 < e < 1$

Energía mecánica negativa, pues domina la energía potencial, al ser la velocidad y por tanto la energía cinética insuficientes para vencer la gravedad. Por ello el objeto menor está capturado por el mayor y nunca escapa de su entorno, describiendo una órbita cerrada con forma de elipse.

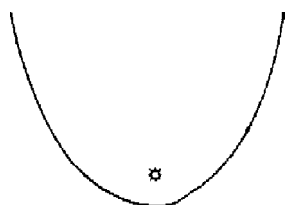


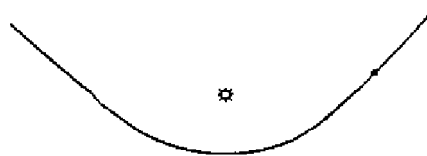
Fig. 2

parabola
 $e = 1$

PARABOLICAS (Fi 2):

Energía mecánica nula al tener el mismo valor absoluto la energía cinética y la potencial. En este caso la velocidad y energía cinética son justamente las precisas para vencer la atracción, por lo que el objeto menor está en el límite de escape, describiendo una órbita abierta que se cerraría en el infinito: la parábola.

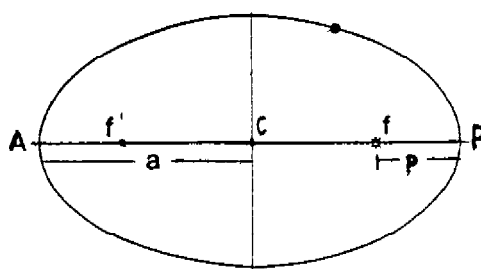
HIPERBOLICAS (Fi 3):



hyperbola
 $e > 1$

Energía mecánica positiva por dominar la cinética a la potencial, al ser la velocidad mayor que la necesaria para vencer la atracción gravitatoria. El cuerpo menor puede escapar y describe una órbita abierta denominada hipérbola.

LA ELIPSE (Fi 4)



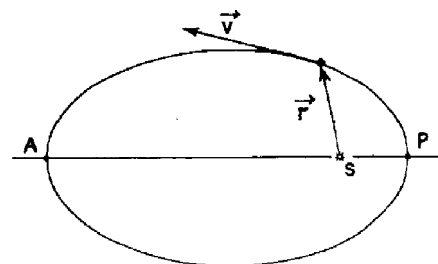
es la órbita que aparece con mas frecuencia en nuestro tratamiento del Sistema solar, por lo que vemos seguidamente algunas de sus características geométricas.

Posee dos ejes de simetría que se cortan en el centro: uno es el EJE MAYOR y el otro el EJE MENOR.

La mitad de la longitud del primero se denomina LONGITUD DEL SEMIEJE MAYOR (a). Sobre el eje mayor y simétricos con respecto al centro se hallan dos puntos especiales, denominados FOCOS (f y f'). Las propiedades mecánicas de los focos hacen que el astro central se encuentra precisamente en uno de ellos (f), y no en el centro.

POSICION SOBRE LA ORBITA

A continuación vemos algunos conceptos básicos relativos a la posición del cuerpo menor sobre su órbita (Fi 5):



El VECTOR DE POSICION (r) une el astro central con el orbital y proporciona la distancia entre ambos y su posición relativa en cualquier instante. El PERIASTRO (P) es el punto de la órbita mas cercano al astro central. El APOASTRO (A) al contrario que el anterior, es el punto mas alejado. En el caso de órbitas abiertas se localizaría en el infinito.

En el caso de órbita cerrada elíptica, el movimiento se hace periódico, al ocupar el astro central la misma posición sobre su órbita repetidas veces. El intervalo de tiempo que transcurre entre dos pasos sucesivos por el mismo punto se denomina PERIODO (T). Cuando se necesita tomar una referencia temporal para describir el movimiento del astro se toma el mo-

mento del paso del mismo por el Periastro (P), tanto si la órbita es abierta como cerrada.

FORMA Y TAMAÑO DE LAS ORBITAS

La forma de la órbita, como hemos visto, responde a tres tipos de curva elipse, parábola e hipérbola, pero dentro de cada tipo podemos tener diferentes grados de «aplastamiento», el cual viene cuantificado por el concepto matemático de excentricidad (e). Según sean sus valores tendremos:

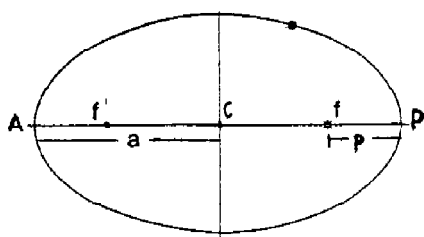
$e = 0$ ORBITA CIRCULAR o elipse de aplastamiento nulo

$0 < e < 1$ ORBITA ELIPTICA de

$e = 1$ ORBITA PARABOLICA (Fió 2).

$e > 1$ ORBITA HIPERBOLICA de «apertura» creciente (Fió 3).

El tamaño de la órbita puede cuantificarse dando el valor de la distancia entre el Periastro y el cuerpo central. DISTANCIA PERIASTRAL (p). En el caso de



órbitas elípticas se suele dar el valor del SEMIEJE MAYOR (a)

(Fi 4).

Cuanto mas grandes sean estos valores, mayor será el tamaño de la órbita.

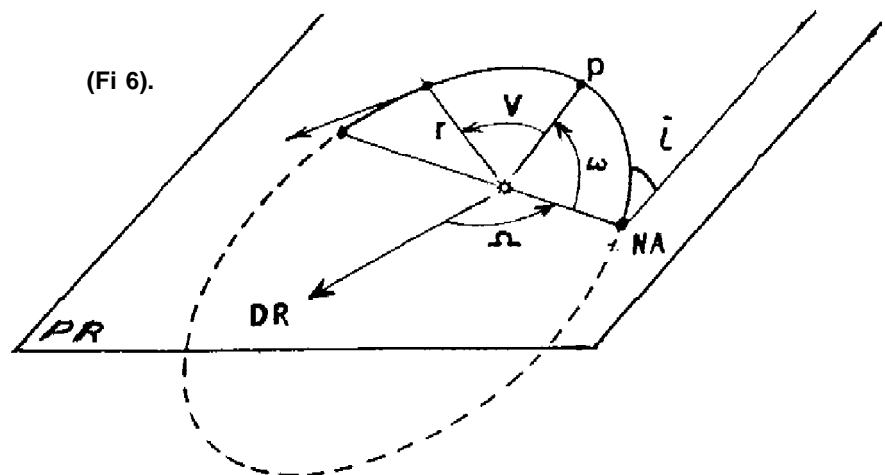
ORIENTACION DE LAS ORBITAS EN EL ESPACIO

Para orientar algo en el espacio es preciso tomar una referencia. Es muy frecuente tomar un sistema de coordenadas con tres ejes X, Y, Z, pero en Astronomía, donde son mas importantes los ángulos que las distancias, es mas práctico utilizar un PLANO DE REFERENCIA (PR), una DIRECCION DE REFERENCIA (DR) contenida en el plano, y un CONVENIO DE SIGNO para los giros (I).

En el Sistema solar el plano de referencia es el de la órbita terrestre denominado PLANO DE LA ECLIPTICA, la dirección de referencia es la del PUNTO VERNAL o equinoccio de primavera, y el convenio de signo para el giro es el del TORNILLO, tan frecuentemente utilizado en otras ramas de la Física.

La órbita queda orientada mediante tres parámetros que son:

INCLINACION ORBITAL (i) (Fi 6).



Viene dada por el ángulo de inclinación del plano de la órbita sobre el plano de referencia, se representa por «i».

LONGITUD DEL NODO ASCENDENTE (omega muy) (Fi 6). Es el ángulo comprendido entre la dirección de referencia y la dirección del NODO ASCENDENTE (NA). Este es el punto de intersección de la órbita con el plano de referencia, en el que el astro orbital pasa de la región inferior a la superior.

ARGUMENTO DEL PERIASTRO (omega mi) (Fi 6)- Es el ángulo entre la dirección del nodo ascendente, antes definido, y la dirección del Periastro, que como sabemos es el punto de máxima aproximación al astro central

POSICION DEL ASTRO SOBRE SU ORBITA

Una vez conocida la forma. el tamaño y la posición de la órbita, si queremos especificar donde se encuentra el astro que se mueve sobre la misma, debemos considerar un parámetro mas:

ANOMALIA VERDADERA (V) (Fi 6). Es el ángulo comprendido entre la dirección del periastro y el vector de posición del astro del que ya se habló anteriormente.

VARIACION ORBITAL

Hasta aquí hemos tratado el caso mas simple en el que solo interactúan dos astros, uno de ellos mucho menor que el otro. Además los consideramos como simples puntos materiales dotados únicamente de las propiedades asociadas a su contenido de masa, como gravedad e inercia. Esto lógicamente no es mas que un modelo, muy útil porque permite una aproximación sencilla a la realidad, y sirve como punto de partida para poder abordar en pasos sucesivos la auténtica complejidad del sistema.

Realmente el Sistema solar está formado por multitud de objetos, de tamaños muy diversos y todos actuando entre si. Además cuando los cuerpos están próximos comienza a adquirir importancia la distribución de sus masas, debiéndose considerar la forma y constitución interna de cada objeto si se quiere estudiar correctamente el movimiento. Por si esto fuera poco, además actúan otras fuerzas distintas de la gravitatoria, que llega a ser importantes para los cuerpos menores: presión de radiación, campos eléctricos y magnéticos, colisiones, etc. Todos estos fenómenos hacen que la trayectoria real de los astros pueda llegar a ser muy compleja como veremos a continuación.

En el caso de órbitas elípticas, la influencia de los demás astros hace que la órbita que sigue un cuerpo varíe lentamente sus parámetros de orientación y forma. Por ello con el tiempo va cambiando la inclinación orbital, la posición del nodo ascendente y la posición del periastro. También la excentricidad sufre cambios casi cíclicos,

aumentando para luego disminuir y alcanzar de nuevo los valores iniciales en cada ciclo.

Dicho esto podemos comprender que los parámetros orbitales dados para un determinado cuerpo son solo correctos en un momento dado llamado EPOCA, que es preciso indicar también cuando se proporcionan los parámetros. Para tiempos anteriores o posteriores puede recurrirse a la corrección de los parámetros en función del tiempo transcurrido desde la época de los datos.

El tamaño orbital, dado por la longitud del semieje mayor de la elipse (a) es muy estable, ya que está relacionado con la energía total orbital del cuerpo, y esa energía tiende a conservarse mientras no haya fuertes influencias exteriores. El periodo (T) también es muy estable al estar relacionado con el semieje. Estas características orbitales permanecen constantes para los grandes cuerpos durante períodos de tiempo muy grandes.

Como ejemplo podemos poner el caso de la Luna orbitando a la Tierra. El influjo solar hace que la dirección del periastro (perigeo) vaya cambiando a razón de un giro completo cada 8,85 años. La dirección del nodo ascendente también gira, dando una vuelta cada 18,6 años. Las variaciones de inclinación y excentricidad orbital son mas lentas.

LA ESTABILIDAD DEL SISTEMA SOLAR

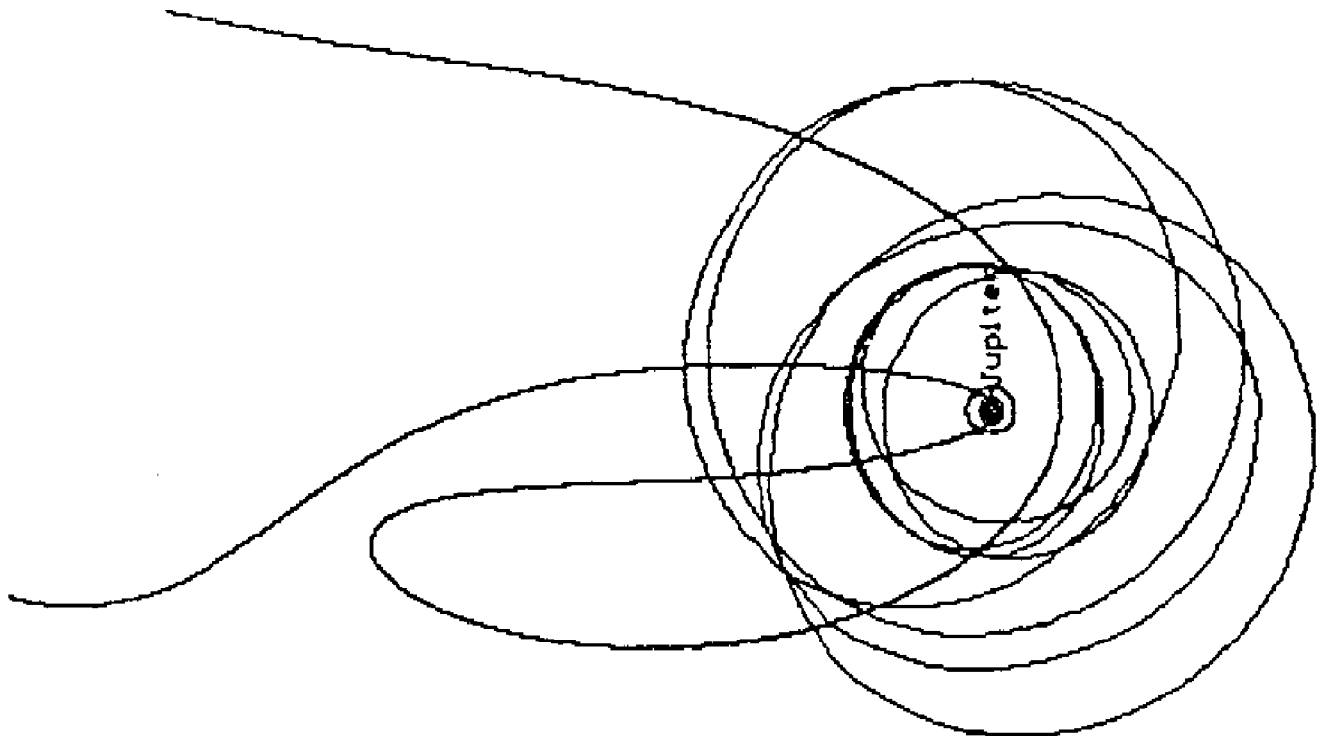
La cuestión que se nos plantea ahora es determinar si en un futuro las órbitas de los objetos principales del Sistema solar seguirán variando ligeramente, aunque manteniéndose dentro de unos límites, en cuyo caso diríamos que el sistema

es estable. O por el contrario, dichos cambios se harán caóticos, desfigurando las órbitas y haciendo que, a la larga todo el sistema quede ir reconocible. En este último caso los asteroides comenzarían a dispersarse por el sistema, colisionando a la larga con los planetas, los cuales también adquirirían órbitas impredecibles, acercándose algunos al Sol, y alejándose otros. Diríamos que el sistema se comporta caóticamente.

Este problema ya preocupó a científicos de otros tiempos como Laplace, el cual llegó a demostrar, utilizando un método aproximado, que el movimiento del Sistema solar era casi periódico, y que los parámetros orbitales de los planetas únicamente oscilaban alrededor de unos valores determinados. Pero estudios posteriores con métodos diferentes mostraron que realmente la estabilidad a largo plazo no estaba demostrada.

Los resultados de investigaciones actuales arrojan alguna luz sobre el problema. Por ejemplo, se están realizando simulaciones con potentes ordenadores para seguir el comportamiento de las órbitas de los planetas durante decenas de millones de años en el futuro. De esta forma se ha determinado que el comportamiento de Plutón se hará caótico al cabo de unos 20 millones de años. También se ha visto que los planetas mas interiores con el tiempo alcanzan dicho comportamiento, mientras que las órbitas de los grandes planetas exteriores son mas estables.

Cuando el comportamiento deviene caótico, pequeños cambios en un momento dado son capaces de provocar, al transcurrir el tiempo, grandes variaciones que hacen imposible la predicción de la tra-



yectoria a largo plazo. Como ejemplo en la Fig. 7 tenemos el encuentro de un cometa con el planeta Júpiter, simulado con ordenador, y en ella vemos la extraña trayectoria que sigue el primero a causa de la interacción.

Por otra parte, si la órbita impredecible, su influencia sobre los demás también lo es, surgiendo la posibilidad de que todo el sistema acabe siguiendo un comportamiento desconocido para nosotros,

en un futuro que aún se presenta muy lejano. Por ahora podemos estar tranquilos, salvo alguna colisión terrestre con algún pequeño asteroide “caotizado”

El arte de dirigir, consiste en saber cuando hay que abandonar la batuta para no molestar a la orquesta.
Von Karajan.

La pintura es poesía muda, la poesía, pintura ciega.
Leonardo da Vinci.

Todo lo que una persona puede imaginar, otras personas podrán hacerlo realidad.
Julio Verne.

Cásate con un arqueólogo, cuanto mas vieja te hagas, mas encantadora te encontrará.
Agatha Christie.

Los años arrugan la piel, renunciar al entusiasmo, arruga el alma.
Albert Schewertzer.

Hay gente tan sumamente pobre que sólo tiene dinero.
Anónimo.