

Equilibrio y caos en el sistema solar

Néstor Rotstein *

La existencia de un sistema planetario sólo es posible en condiciones generales de equilibrio. Sin embargo, muchos de los procesos que se desarrollan en el sistema solar están asociados a características que involucran rupturas espontáneas de simetría, caos y tendencias a nuevos equilibrios.

1. Introducción

Las sociedades tecnológicas nos enfrentan, entre otras cosas, a un conjunto permanentemente renovado de palabras novedosas, que debemos incorporar a una velocidad mucho mayor que la que nuestra formación y conocimiento muchas veces nos permite. Así, por ejemplo, expresiones tales como *átomo*, *angioplastia*, *transistor*, *dióxido de carbono* o *energía* se han transformado en términos de uso cotidiano y hasta coloquial.

La popularización de los términos que son específicos de una determinada disciplina ha llevado muchas veces a confundir los conceptos. Por ejemplo, no nos cabe duda alguna de que es la Tierra la que orbita alrededor del Sol, pero seguimos sosteniendo que el Sol sale por el Este, pasa al mediodía por el Norte y se oculta por el Oeste. Parece claro que nuestro aprendizaje escolar entra en franca contradicción con nuestra percepción cotidiana.

En general, fuera de la disciplina y el contexto en que son enunciados, muchos vocablos pierden su significado preciso y, como consecuencia, pueden usarse con diferentes acepciones. Tal es el caso de los términos **equilibrio** y **caos**.

En nuestro lenguaje cotidiano establecemos una íntima significación entre *equilibrio*, *orden* y *estabilidad*, en tanto que por el contrario es común asociar el *caos* al *desorden* y a la *falta de información*. Por ejemplo, ya nos hemos acostumbrado a escuchar que, a pesar del caos en que se hallaban, se ha logrado el equilibrio en las cuentas públicas y, con este, la tan ansiada estabilidad.

Sin embargo, el sentido que en la Física se da a estos términos no es tan amplio. Y de hecho, cuando hablamos de equilibrio y caos en el sistema solar (o en cualquier otro sistema) hacemos referencia a situaciones concretas que no son pasibles de interpretaciones alternativas. En lo que sigue, en lugar de intentar una definición precisa y completa de los conceptos de equilibrio y caos habremos de introducirnos en su significado específico poniendo de manifiesto algunas de sus características salientes y distintivas y su observación en el sistema solar.

2. Equilibrio, simetría y estabilidad

En general, nuestra percepción del orden y del equilibrio depende de las escalas temporales involucradas. Por ejemplo, imaginemos un vaso que contiene agua caliente.

* Licenciado en Ciencias Físicas (UBA). Doctor en Ciencias Físicas (UBA). Docente e investigador.

En principio, parece un sistema en equilibrio, pero este equilibrio aparente no es estable porque la temperatura del agua casi con seguridad no coincide con la temperatura ambiente y habrá un intercambio de calor entre el agua y el medio ambiente (hasta que alcancen la misma temperatura) que habrá de requerir un tiempo que en este caso es medible a escala humana. Este tiempo es precisamente el que le lleva a los sistemas formados por el agua y la habitación alcanzar el equilibrio (térmico).

Supongamos ahora que deseamos enfriar "rápidamente" el agua que contiene el vaso. Para eso agregamos algo de agua fría e "inmediatamente" obtenemos agua tibia. Es decir, para nuestra escala temporal característica el proceso fue "instantáneo" y no parecen haber disequilibrios. Sin embargo, cuando se mezclaron los sistemas a diferente temperatura la situación estuvo completamente apartada del equilibrio y, de hecho, le llevó algún tiempo (que se mide en décimas de segundo) alcanzar un nuevo equilibrio.

En el extremo opuesto de escalas temporales de equilibrio podemos mencionar nuestra percepción de la inmutabilidad de los cielos. Después de todo nos es posible reconocer constelaciones porque las estrellas "están siempre ahí". Sin embargo, las estrellas son sistemas que evolucionan: no sólo se desplazan unas respecto a otras sino que además ellas mismas generan procesos que las lleva irremediablemente a algún tipo de colapso. Las escalas cósmicas involucradas en estos procesos exceden largamente la escala humana de tiempo, y es por eso que, en general, no podemos distinguir su tendencia a nuevas formas de equilibrio.

Un rasgo esencial de los *sistemas en equilibrio* es que *existe un conjunto de parámetros medibles que caracterizan el estado del sistema*. Por esto es que podemos, en principio, clasificar los equilibrios en estables e inestables. En la figura 1 esquematizamos la situación general apelando a un ejemplo sencillo, como es el de una bolita dentro y sobre una superficie curvada.

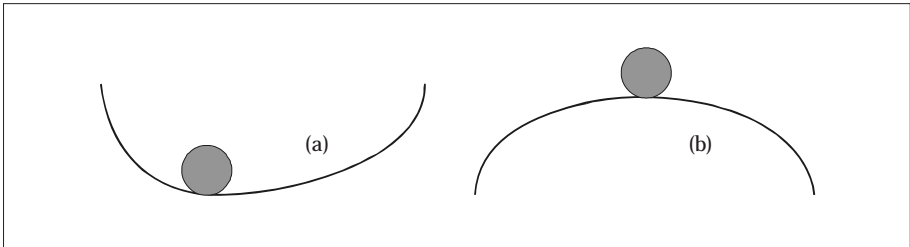


Figura 1: una bolita en equilibrio estable (a) e inestable (b). Obsérvese que la superficie no tiene por qué ser simétrica

Imaginemos que la bolita está quieta y que el sistema sufre una leve perturbación; la manera en que la bolita evoluciona luego de ser ligeramente apartada del equilibrio es bien diferente en ambos casos: en la situación (a), en tanto existan fuerzas disipativas, la bolita regresa al punto de equilibrio en el que se hallaba luego de algunas oscilaciones, mientras que en el caso (b) la bolita se aleja indefinidamente de su estado original. La condición del equilibrio depende, entonces, de que frente a un leve apartamiento de la

posición de equilibrio el sistema retorne (o no) a la configuración inicial. La situación planteada en la figura 1.a representa un equilibrio estable, en tanto que la de la figura 1.b representa un equilibrio inestable.

Parece evidente, entonces, que sin importar su naturaleza (física, biológica, química, etc) todo sistema que interactúa con su entorno debe acceder a un estado de equilibrio estable con ese entorno para poder prosperar. En el caso específico de un sistema biológico, esta aseveración no es más que una forma modificada del postulado de selección natural darwiniano.

Ahora bien, si la Naturaleza hubiera sido excesivamente restrictiva y sólo hubieran sido permitidos una forma de equilibrio estable o equilibrios inestables el universo seguramente no se vería como se ve. La posibilidad de acceder a diferentes estados estables es lo que llamamos *adaptabilidad*¹, y en el caso de sistemas biológicos se halla íntimamente ligada a la diversidad. De alguna manera, es como si los factores naturales fueran introduciendo deformaciones en la superficie cóncava en la que reposa la bolita de la figura 1a, de manera tal que el sistema debe optar por uno de dos estados accesibles, como se muestra en la figura 2. Esta necesidad de elegir puede llevar a la extinción de algunos individuos de una población o bien a la aparición de nuevas formas a través del proceso de *especiación* inducido por las nuevas formas de equilibrio.

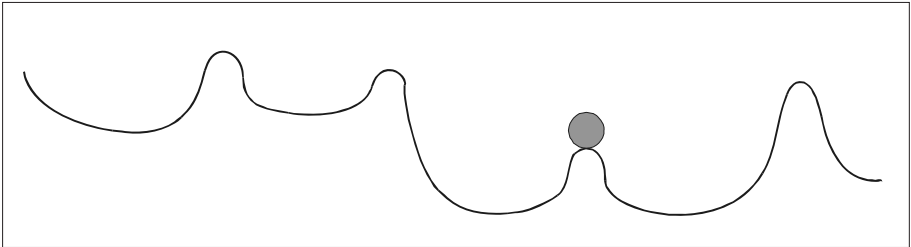


Figura 2: el estado de equilibrio estable de la bolita ha sido deformado, y ahora debe "optar" por un nuevo estado.

Cuando los "valles" poseen un punto o un eje que lo divide en dos partes semejantes (es decir, las partes derecha e izquierda de la superficie en la que se halla la bolita son iguales) se dice que son simétricos. Las deformaciones introducidas en la estructura de la superficie rompen esta simetría, y a estos procesos se los llama *ruptura espontánea de simetría*.

Por ejemplo, muchas moléculas poseen *simetría especular*, esto es, se trata de los mismos átomos pero con una configuración espacial diferente, a saber, la que resulta de poner a la molécula frente a un espejo. A las moléculas que poseen esta propiedad de coexistir con sus imágenes se las denomina *isómeros ópticos*. Si bien los isómeros

1. En general, a este tipo de equilibrio se lo denomina *metaestable*, y se trata de un estado desde el cual un sistema puede evolucionar hacia otras formas de equilibrio estable.

poseen estructuras similares, sus propiedades son bien diferentes; de hecho, de acuerdo a sus propiedades ópticas se los clasifica en levógiros (L) y dextrógiros (D).

Aminoácidos y azúcares pueden existir en cualquiera de sus dos versiones simétricas, pero los aminoácidos que constituyen la base de todo ser viviente en el planeta Tierra son decididamente L, en tanto que los azúcares del ADN y del ARN son D.

Avertisov y colaboradores (1991) discutieron las implicaciones que tiene la ruptura de la simetría especular sobre la autorreplicabilidad. De hecho, la enorme precisión que se requiere para configurar un código genético y su lectura sólo sería viable en un medio donde sólo existiera una única versión de los dos isómeros posibles.

En principio, la ruptura de la simetría se halla ligada a la existencia de valores críticos en los parámetros que determinan el equilibrio. Bajo ciertas condiciones la coexistencia de los dos isómeros está permitida, pero cuando las condiciones medioambientales son tales que tornan insostenible o inviable la simetría, esta se rompe. En términos de nuestros esquemas de las figuras 1 ó 2, este proceso natural se halla asociado a la aparición de un "pico" en medio de un "valle" y la consiguiente "selección" de estado por parte de la bolita.

Sintetizando lo discutido hasta aquí, podríamos afirmar tres condiciones al menos esenciales para los estados de equilibrio de los sistemas:

- todo cambio en las condiciones de equilibrio trae aparejado un conjunto de reacomodamientos que hacen tender al sistema a un nuevo equilibrio.
- las configuraciones de los sistemas dinámicos y multiinteractivos son en general el resultado de una sucesión de equilibrios estables.
- la magnitud de los cambios producidos en la configuración de un sistema depende de la intensidad de la perturbación y de las condiciones del equilibrio previo.

3. *Caos*

Imaginemos un sistema dinámico cuyo estado se describe en términos de una o más variables y su evolución temporal se halla *determinada* por una ecuación conocida (a tales sistemas se los llama *determinísticos*, precisamente porque puede determinarse unívocamente su estado en cada instante). Se dice que el sistema es **caótico** cuando dos condiciones iniciales muy próximas determinan estados futuros que divergen exponencialmente.

Obsérvese que aun cuando la evolución del sistema depende críticamente de las condiciones iniciales, su estado sigue siendo perfectamente calculable en el dominio del tiempo o en el espacio. Las variables involucradas no son aleatorias, de manera tal que la impredecibilidad de un sistema caótico no reside en la presencia de factores azarosos ni en la falta de un modelo matemático, sino más bien en la imposibilidad de predecir comportamientos futuros del sistema en término de datos actuales. Haciendo una burda analogía, esta característica es similar a la imposibilidad de calcular las segundas diez cifras decimales del número π basados en el conocimiento de las primeras diez.

A modo de ejemplo, pensemos en un sistema retroalimentado, como el que muestra la figura 3, que utiliza su salida en un determinado instante para controlar la entrada en el siguiente

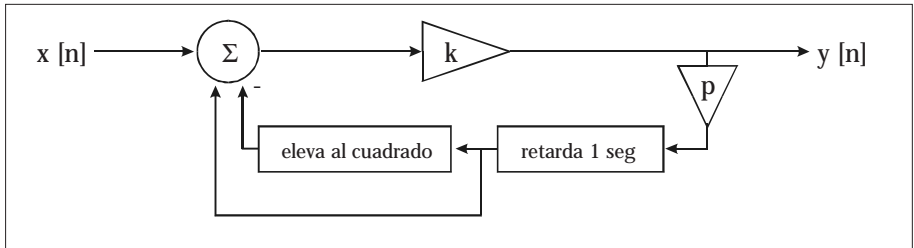


Figura 3: sistema retroalimentado en el que los parámetros k y p son ajustables externamente

El símbolo Σ representa un sumador, en tanto que los bloques triangulares multiplican la señal por el factor que indican. Estos multiplicadores se ajustan externamente, de manera tal que son dos parámetros externos que fijan las condiciones iniciales. El signo negativo en la entrada al sumador indica que la señal que proviene de la segunda rama se resta de la señal de entrada $x[n]$, donde n es la variable temporal (que en este caso toma valores discretos). La ecuación del sistema está luego dada por la expresión

$$y[n] = k x[n] + kp y[n-1] \{ 1 - y[n-1] \} \quad (1)$$

Supongamos que el sistema es causal, es decir, tiene respuesta nula para entrada nula, y que en el instante $n=0$ a la entrada se aplica un impulso, esto es, $x[n] = \delta[n]$. De esta manera resulta $y[0] = k$. La forma en que el sistema vaya a responder depende de los parámetros k y p . Las figuras 4a y 4b muestran las soluciones que resultan de tomar $p \approx 13,166$ $k=0,7$ y $p \approx 12,333$ $k=0,3$, respectivamente. Obsérvese que en tanto la evolución de la respuesta es impredecible en el primer caso, la figura 4b muestra un período de 11 unidades de tiempo.

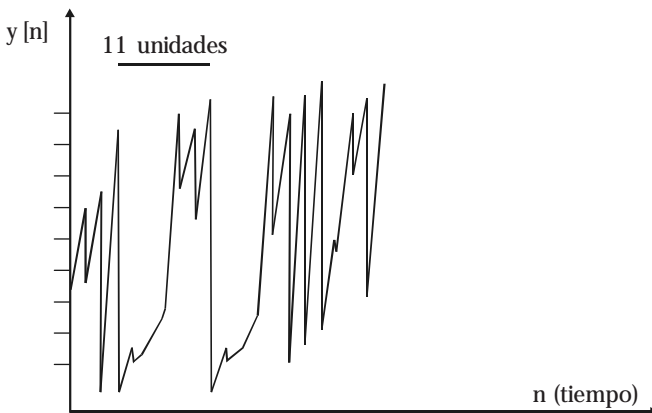


Figura 4a: respuesta caótica del sistema para $p \approx 13,166$ $k=0,7$

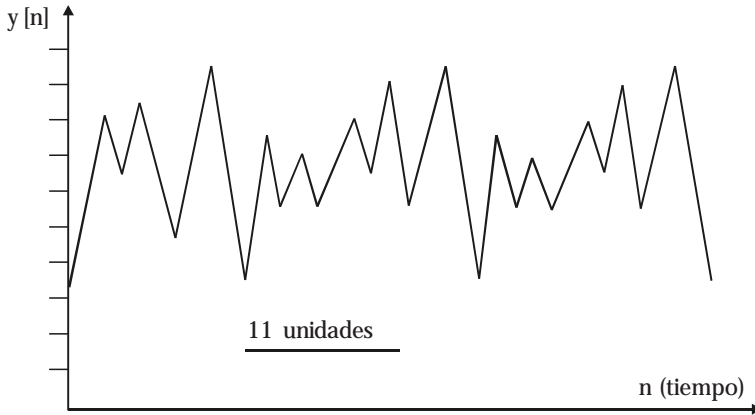


Figura 4b: respuesta periódica del sistema para $p \approx 12,333$ $k=0,3$

Que la respuesta del sistema sea caótica o periódica depende de las condiciones iniciales y/o de contorno. En el caso del ejemplo, estas condiciones están dadas por los valores de los parámetros k y p que, como se dijo, se fijan externamente. Por ejemplo, para $k=p=1$ la salida es igual a la entrada si ingresa un tren de impulsos.

Obsérvese que, con todo, en algunas soluciones pareciera existir un cierto "orden predictivo". Por ejemplo, si en la figura 4a sólo tomamos los dos intervalos de 11 unidades de extensión asociados a los valles en forma de señaladores, pareciera que el sistema posee un comportamiento perfectamente predecible. De hecho, la mera observación del gráfico 4a no ofrece garantía alguna de que no exista algún período asociado a los valores de los parámetros k y p , y sólo un detallado y riguroso análisis permite demostrar que, en efecto, una solución es periódica o caótica.

Por otro lado, imaginemos que no podemos fijar con precisión absoluta los valores de los parámetros externos del sistema ¿Qué tipo de respuesta obtendríamos? En principio, y de acuerdo a lo que acabamos de discutir, aun cuando pareciera existir una respuesta periódica no existiría garantía alguna de que así fuera, fundamentalmente porque sabemos que cometemos errores en la determinación de los parámetros.

Si el sistema fuera lineal no habría ningún tipo de problemas. Por ejemplo, si se deja caer un objeto en el vacío sabemos que el tiempo que tarda en llegar al piso (o tiempo de caída) vale $t = (2h/g)^{1/2}$, donde h es la altura desde la que se suelta el objeto y g el valor de la aceleración gravitatoria del lugar. Tanto h como g habrán de estar determinadas con errores propios del proceso de medición, de suerte tal que lo más que cabe es computar el valor del tiempo de caída con un cierto margen de error. Pero aun así el tiempo de caída no será caótico, pues dos valores próximos cualesquiera de h y g producen dos valores igualmente próximos de los valores finales del tiempo que se calcula.

Este tipo de análisis es particularmente interesante en el caso de mediciones astronómicas, que por lo general se realizan de manera indirecta y, por lo tanto, resulta imposible hacerlo con total exactitud. Veamos algunos ejemplos.

3.1. El ciclo solar

La actividad solar se halla íntimamente ligada a las manchas solares, y estas son el producto de la interacción entre los movimientos convectivos debajo de la superficie del Sol, los campos magnéticos y la turbulencia asociada a estos procesos. Se trata de procesos no lineales, del tipo discutido en el ejemplo de la respuesta del sistema de la figura 3.

La figura 5 esquematiza crudamente el proceso de generación de manchas y arcos sobre la superficie solar (entre la fotosfera y la corona).

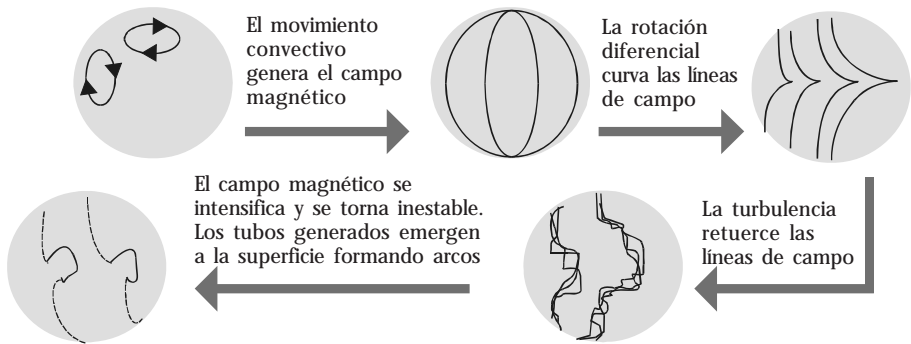


Figura 5: esquema de la generación de arcos y manchas solares

En la región convectiva (la zona inmediatamente por debajo de la fotosfera) el campo magnético solar es generado por lentos pero persistentes movimientos de tipo circulatorio, similares a los del aire en una habitación calentada por una estufa. La turbulencia típica de estos movimientos en las condiciones reinantes provoca el enroscamiento de las líneas de campo magnético, y se forman tubos dentro de los cuales el plasma de la región interactúa y queda atrapado.

Sin embargo, estas estructuras magnéticas son inestables y buscan un nuevo equilibrio. Si enroscamos una banda elástica, más temprano que tarde se deformará de tal manera de formar un arco, una suerte de joroba que le permite equilibrarse con las fuerzas aplicadas. Una inestabilidad del mismo tipo lleva a los tubos magnéticos a formar arcos, que emergen a la superficie y pueden ser observados.

Las *manchas solares* son las bases de los arcos, y representan los lugares donde los *tubos magnéticos* generados por turbulencia emergen ("cortan") por la fotosfera. Estos procesos, que en sí mismos son de una complejidad majestuosa, no son eventos azarosos sino que por el contrario están regidos por la dinámica del interior del Sol, y se hallan asociados al *ciclo solar*, períodos de aproximadamente 11 años que llevan de un máximo a un mínimo de actividad. En el máximo de actividad, mayor es el número de manchas observables.

Como ya se ha dicho, estos procesos son no-lineales y cabría esperar algún tipo de caos. De hecho, se han registrado ciclos de entre 8 y 17 años de duración. La figura 6

muestra el número de manchas solares en los últimos 200 años, período en el cual fueron ya estudiadas y analizadas sistemáticamente.

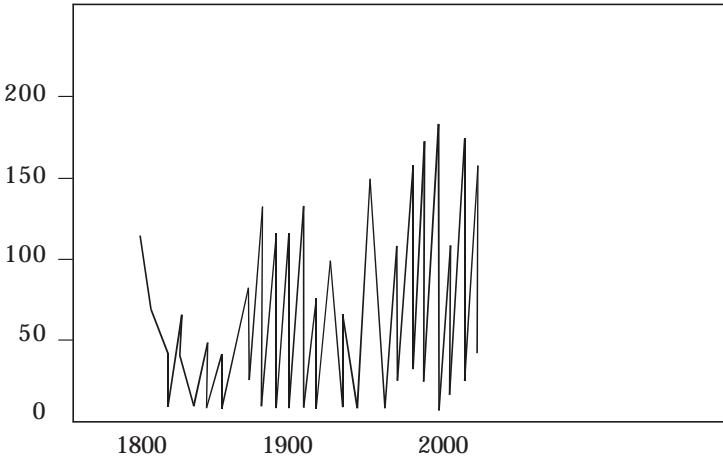


Figura 6: número de manchas solares (eje vertical) observadas en los últimos 200 años (eje horizontal). Téngase en cuenta que las modernas técnicas tornan más confiables las últimas mediciones.

Se comprenderá ahora que la elección de intervalos de 11 unidades de tiempo en la figura 4 no es caprichosa, sino que se ha elegido para permitir una mejor visualización de la caoticidad asociada al ciclo solar, particularmente durante el siglo XIX.

3.2. La órbita de Plutón y los asteroides

En términos de la longitud del semieje mayor de su órbita, Plutón es el más distante de los planetas del sistema solar. Sin embargo, no necesariamente es el más alejado, o al menos no siempre. Es tal la excentricidad de su órbita que por períodos (el último fue entre 1979 y 1998) se halla más cerca del Sol que Neptuno.

Este hecho no significa que las órbitas de estos dos planetas se intersecten, porque la órbita de Plutón está además muy inclinada respecto del plano de la órbita de Neptuno (cerca de 16°), y si se tiene en cuenta que el período orbital de Plutón (de 247,7 años terrestres) es 1,5 veces el de Neptuno, se concluye que lo más cerca que pueden estar es alrededor de 2.500 millones de kilómetros, una distancia por demás considerable a la hora de pensar en algún tipo de colisión.

El hecho de que la razón entre los períodos orbitales sea 1,5 obedece a la dinámica del sistema y corresponde a un estado estacionario. Cualquier perturbación externa que tendiera a modificar las órbitas encontraría al sistema en equilibrio estable y, por ende, los planetas no se separarían indefinidamente de las mismas.

Sin embargo, hay al menos un par de aspectos que debieran ser cuidadosamente analizados: en primer lugar, las órbitas planetarias, que resultan de la interacción Sol-

planeta, no son elipses perfectas sino que son perturbadas precisamente por la presencia de los otros planetas; en segundo lugar, los parámetros orbitales de los planetas se miden de manera indirecta y es imposible determinarlos con total exactitud.

De hecho, Sussman y Wisdom (1988) sugirieron que el grado de excentricidad observado en la órbita plutoniana podría deberse al movimiento caótico de este planeta. Utilizando valores ligeramente diferentes de las condiciones iniciales, estos científicos concluyeron que es imposible conocer la órbita de Plutón más allá de los próximos 20 millones de años, tiempo gigantesco a escala humana pero muy pequeño si se lo compara con los 5.000 millones de años del sistema solar.

No sólo los planetas poseen órbitas caóticas. El análisis de la evolución de cualquier cuerpo celeste se fundamenta en el conocimiento de su estado presente, pero por lo discutido hasta aquí queda claro que resulta imposible conocer de manera acabada y con absoluta precisión el estado de estos objetos. Analicemos el caso del grupo de asteroides que atraviesan la órbita terrestre (la familia *Apollo*), conformado por alrededor de una centena de objetos relativamente pequeños, en general derivados del *cinturón principal de asteroides*, algunos de ellos con diámetros del orden de los 20 km.

Los destinos posibles de estos asteroides, una vez que interactúan con el planeta, son dos: o son expulsados del sistema solar o colisionan. Resulta casi imposible precisar los movimientos conjuntos de todos los objetos involucrados en el sistema, pero una colisión (en el sentido amplio de la palabra) entre un asteroide de este grupo y el planeta Tierra ocurre en tiempos del orden de los 100 millones de años, y en principio es tan probable un choque como una interacción cercana sin contacto.

Ahora bien, el último registro que se tiene del impacto de al menos un asteroide de unos 10 km de diámetro data de unos 65 millones de años, época en la que se produjo el último gran proceso de extinción en masa, conocido como *crisis del Cretácico*. Esta crisis presumiblemente haya sido provocada por el impacto del asteroide, y de hecho las pruebas que se han recopilado apuntan en ese sentido.

Si el problema fuera lineal o fuera posible el conocimiento preciso de las posiciones de todos los asteroides del grupo, una computadora podría alertar a la especie humana del próximo impacto, presumiblemente en no menos de unos 35 millones de años. Infortunadamente, ni una cosa ni la otra ocurre. La buena noticia es que no existen razones para esperar una catástrofe inmediata, y por lo demás está bastante mejor preparada hoy en día la especie humana para afrontar una tal colisión que lo que lo estaban los grandes saurios a fines del Cretácico.

4. La tendencia al equilibrio

A esta altura de la discusión es probable que hayamos perdido definitivamente las esperanzas de conocer con precisión parámetro alguno de ningún objeto celeste, más allá, quizás, de las escalas típicas de medición en nuestro planeta. Pero que no sepamos medir no implica que el universo sea caótico, dicho esto en sentido coloquial.

De alguna manera, si los objetos celestes *evolucionan* de una manera regular es porque pasan por una serie de equilibrios que tienden a devolver la estabilidad al sistema. Cuando esta tendencia al equilibrio es imposible el colapso es inevitable (típicamente, una supernova).

En general, al final de sus vidas todas las estrellas habrán de sufrir algún tipo de colapso, sencillamente porque ya no tienen manera de sustentar el equilibrio en contra de la contracción gravitatoria. Y el tipo de final que le espera a una estrella depende de la masa que acumuló en su formación.

La masa de una estrella no es una cantidad que permanezca constante e inmutable. De hecho, la evolución de todos los objetos estelares se halla íntimamente ligada a la manera y la velocidad con que pierden su material.

En términos absolutamente generales, y en el caso del Sol en particular, existen en las estrellas dos mecanismos centrales de pérdida de masa:

- a) la transformación de materia en energía;
- b) la expansión permanente de su atmósfera externa, y su posterior eyección, en un proceso que se conoce como *viento solar*.

La energía que el Sol es capaz de producir cada segundo, esto es, su *luminosidad* L_{\odot} , proviene básicamente de la conversión de 4 átomos de hidrógeno en 1 de helio más energía a través de lo que se denomina ciclo protón-protón (ciclo p-p), y su valor es

$$L_{\odot} = 3,9 \cdot 10^{33} \text{ erg / seg}$$

Supongamos, teniendo en cuenta la proporción relativa de los elementos más abundantes en el universo y que la nuestra es una estrella de segunda generación, que el Sol se formó con 75% de hidrógeno y 25% de helio. Dado que la masa del Sol es de aproximadamente $2 \cdot 10^{33}$ g, la masa original de hidrógeno, M_{H_0} , resulta

$$M_{\text{H}_0} \approx 0,75 \times 2 \cdot 10^{33} \text{ g} = 1,5 \cdot 10^{33} \text{ g} \quad (2)$$

La conversión $4\text{H} \rightarrow 1\text{He}$ resulta con un decremento de masa que se transforma en energía de acuerdo a la relación

$$4 m_p \rightarrow 3,97 m_p + E \quad (3)$$

donde m_p es la masa del protón y E representa la energía liberada. Luego, resulta

$$E = 0,03 m_p c^2 \quad (4)$$

De acuerdo a la estimación de la masa disponible de la expresión (2) y teniendo en cuenta que se requieren 4 protones para el ciclo p-p, resulta que el Sol, con la cantidad de H disponible, puede liberar una energía total

$$E = \frac{1}{4} 0,03 \times 9 \cdot 10^{20} \times 1,5 \cdot 10^{33} \text{ erg} \approx 10^{52} \text{ erg} \quad (5)$$

de manera tal que, si libera $3,9 \cdot 10^{33}$ erg por cada segundo, su vida útil sería de alrededor de $10^{52} / 3,9 \cdot 10^{33}$ seg = $2,6 \cdot 10^{18}$ seg. Dado que 1 año = $3,16 \cdot 10^7$ seg, el Sol podría brillar cerca de $7 \cdot 10^{10}$ años. Sin embargo, cuando el Sol consume alrededor del 13% de su hidrógeno disponible dilatará en una *gigante roja*, de manera tal que su tiempo de evolución es de $0,13 \times 7 \cdot 10^{10} \approx 9 \cdot 10^9$ a.

Asumiendo que la luminosidad es constante, que siempre convirtió hidrógeno a la misma tasa, y que la edad del Sol es del orden de la edad de la Tierra, el Sol se halla a la mitad de su vida en *secuencia principal* (esto es, antes de su primera dilatación). Luego, consumió aproximadamente 6,5 % de su M_{Ho} .

Esto significa que la masa del Sol era mayor cuando se formó el sistema, y de hecho es posible calcular, entre las expresiones (2) y (5), cuál es la tasa de pérdida de masa del Sol por el ciclo p-p. Si convenimos en llamar \dot{M}_{pp} a esta tasa, resulta

$$\dot{M}_{pp} \approx 5,7 \cdot 10^{11} \text{ kg/seg} \quad (6)$$

Por otro lado, la tasa de pérdida de masa por efectos de la eyección de su atmósfera externa (la corona solar), a la que habremos de denotar \dot{M}_v , es del orden de $5 \cdot 10^9$ kg/seg, de manera tal que la pérdida de masa por segundo será la suma

$$\dot{M}_{\odot} = \dot{M}_{pp} + \dot{M}_v \approx 5,75 \cdot 10^{11} \text{ kg/seg}$$

Ahora bien, el período de un planeta está determinado, de acuerdo a la tercera ley de Kepler, por la expresión

$$P^2 = \frac{4\pi^2}{G} \frac{a^3}{(M_{\odot} + M_p)} \quad (7)$$

donde P es el período, G la constante universal de gravitación, M_{\odot} la masa del Sol y M_p la masa del planeta en cuestión. En el caso de la Tierra, en lugar de M_p escribiremos M_{\oplus} y su valor es de aproximadamente $6 \cdot 10^{24}$ kg.

En rigor, el valor de M_{\odot} es actualmente de cerca de $2 \cdot 10^{30}$ kg. Si aceptamos que siempre perdió masa al mismo ritmo, debemos escribir

$$M_a = M_o - \dot{M}_{\odot} t \quad (8)$$

Claramente, si la masa del Sol ha variado, el cociente a^3 / P^2 debe haberlo hecho. En principio, la órbita terrestre tiene una excentricidad casi nula y se halla contenida en el plano en el que orbitan prácticamente todos los planetas. Luego, podemos asumir a primer orden que la órbita terrestre no se ha modificado, de manera tal que lo que sí sufre variaciones en el tiempo es el período de revolución, lo que comúnmente llamamos año.

Con $a = \text{cte}$, la expresión (7) puede escribirse como

$$P = \frac{\beta}{(M_a + M_{\oplus})^{1/2}} \quad (9)$$

donde $\beta = (4\pi^2 a^3 / G)$ es un factor constante. Si en lugar de Ma escribimos su expresión dada por la ecuación (8), podemos estudiar las variaciones de dP/dt escribiendo

$$dP = \frac{d}{dMa} \left(\frac{\beta}{(M_a + M_{\oplus})^{1/2}} \right) \frac{dMa}{dt} dt \quad (10)$$

de donde resulta inmediatamente por simple integración

$$P(t) = P_0 + \frac{\beta}{2} \frac{\dot{M}_{\oplus}}{(M_a + M_{\oplus})^{3/2}} t \quad (11)$$

Con $\dot{M}_{\oplus} = \dot{M}_{pp} + \dot{M}_v \approx 5,75 \cdot 10^{11} \text{ kg/seg}$, y con los valores actuales de P_0 (1 año) y β , obtenemos que el período orbital de la Tierra sería aproximadamente 8 días menor en el comienzo del sistema solar; los dinosaurios, poco antes de extinguirse, habrían vivido "años" que serían del orden de unas 2,5 horas más cortos.

5. Conclusiones

Hace 2.500 años, Aristóteles sentó las bases de una cosmología que habría de trascender las épocas y perdurar hasta el siglo XVI como la imagen real del universo. Su sistema geocéntrico postulaba la existencia de dos mundos, uno armonioso y eterno, el cosmos, y otro en el que la corrupción era posible, el mundo sublunar, el caos.

Hoy en día, y a la luz de las nuevas teorías y descubrimientos, parece poco realista pensar en el universo en general y en el sistema solar en particular como un conjunto de objetos celestes en equilibrio permanente e inmutable. Existe en el universo una tendencia natural, dirigida por la dinámica de la evolución, a reacomodarse a las nuevas condiciones de equilibrio. La única especie conocida hasta ahora por nosotros capaz de modificar esos equilibrios es precisamente la especie humana.

Su inherente curiosidad ha llevado al hombre a abrir nuevas puertas. Pero sería bueno detenerse a pensar que cada nuevo desafío conlleva, junto a la excitación de lo nuevo, un cúmulo de responsabilidades.

El futuro de la especie humana depende, en parte, de la manera en que maneje esas responsabilidades.

6. Referencias

- Avertisov, V.A; Goldanskii, V.I; Kna'min, V.V; 1991: Physics Today, 44, N07.
- Sussman, G; Wisdom, J; 1988: Science, 241, 433-437