

Caos y mecánica celeste

Rafael Andrés Alemañ Berenguer

<http://raalbe.jimbo.com>

La ciencia funda gran parte de su atractivo intelectual en el esclarecimiento de lo desconocido, y lo desconocido, por su propia naturaleza, es esencialmente imprevisible. Esto es especialmente cierto en un ámbito como el de la teoría del caos –o más correctamente, teoría de los sistemas no lineales–, uno de cuyos resultados capitales establece la imposibilidad de predecir el curso exacto de numerosos procesos físicos, pese a que éstos se hallen gobernados por leyes matemáticas inequívocas. Ese es el motivo de que debamos aproximarnos con notable circunspección y una buena dosis de cautela a las tentativas de anticipar los futuros logros científicos, con excepción de los inmediatamente venideros. No debemos olvidar jamás que en la ciencia, como en una buena novela, el mayor interés reside en los acontecimientos que nadie pudo prever.

Las raíces del caos

El nacimiento de la teoría del caos, por su parte, constituye un magnífico ejemplo de cómo lo imprevisto, e incluso lo supuestamente insignificante, puede erigirse con el paso del tiempo en semilla de una visión singularmente nueva del mundo físico. Sus orígenes deben rastrearse hasta la misma revolución intelectual del siglo XVII, cuando Galileo y Newton sentaron las bases del moderno método científico, liberando el pensamiento del estrecho corsé del escolasticismo medieval. Para ello mantuvieron que era imperativo deducir las leyes que rigen los fenómenos naturales sirviéndose de la observación experimental y de la formalización matemática. Mediante la primera se manipulaban las condiciones ambientales en las que tenían lugar los procesos físicos con el fin de aislar aquellos factores auténticamente relevantes y determinar el tipo de influencia ejercida. A su vez, el lenguaje matemático aportaba a la formulación de estas leyes la universalidad y la inflexible precisión que lo caracterizan.



Fue justamente tal inflexibilidad la responsable del nacimiento de una doctrina que quedó tácitamente inscrita en el pensamiento de los científicos, si bien jamás ha sido una necesidad lógica del mismo. Quien mejor y más nítidamente expuso tal doctrina fue el físico y matemático francés del siglo XVIII Pierre Simon de Laplace, cuando afirmó que un genio dotado de suficiente poder de cálculo podría conocer las posiciones y velocidades de todas las partículas del universo en cualquier instante del tiempo. Nada escaparía, pues, al conocimiento de este ser, para quien pasado, presente y futuro aparecerían como algo inexorablemente inferido de las ecuaciones matemáticas en que se plasmaban las leyes de la física. El apabullante éxito práctico de la gravitación newtoniana y sus leyes del movimiento, hizo esta suposición poco menos que irresistible para las mentes de los científicos decimonónicos. Precisamente la astronomía suministró el campo idóneo para someter a prueba la capacidad predictiva de la nueva física, gracias a la cual pronto se obtuvieron triunfos deslumbrantes en el pronóstico de eclipses, movimientos planetarios, trayectorias de cometas y un largo etcétera de acontecimientos siderales. A partir de entonces nadie se atrevió a poner en duda lo acertado de la opinión de Laplace: el mecanicismo se había asentado victorioso en el pensamiento general, y así se mantendría durante más de un siglo.

Es cierto que apenas nadie objetaba seriamente de la suma perfección alcanzada por la física tras la obra de Newton y sus seguidores, pero también lo es que pronto se hicieron evidentes algunas perplejidades en el mismo corazón de las teorías triunfadoras. Una de ellas era la dificultad de determinar la conducta dinámica de tres cuerpos de masa comparable afectados únicamente por sus mutuas interacciones gravitatorias. El caso más simple de dos cuerpos, uno de ellos con masa muy superior al otro, era sobradamente conocido: el movimiento de la Tierra en torno al Sol –despreciando el influjo del resto de los planetas– cumplía dichos requisitos. Tampoco había graves problemas prácticos cuando en un trío seguía dándose una gran desproporción en la masa de alguno de sus miembros frente al resto. Ahora bien, si en un grupo de tres o más objetos todos ellos poseían masas semejantes, el asunto distaba mucho de ser trivial. Tanto es así que las mejores mentes matemáticas de los siglos XVIII y XIX se estrellaron contra este monumental desafío, el llamado “problema de los n cuerpos”.

Adoptando una actitud bastante frecuente en la física y en otras ciencias, se supuso que con paciencia y un trabajo diligente todo problema llegaría a ser sol-

ventado, y el mecanicismo prosiguió su marcha triunfal en el seno de la física. La doctrina de Laplace provenía de la conjunción de dos premisas cuya independencia raramente fue discernida por aquellos que las asumieron con tanto entusiasmo. Por un lado se tenía la idea del determinismo, según la cual no existe fenómeno natural que no se halle sujeto a una ley física matemáticamente expresable. Por otro estaba el principio del análisis, que afirmaba la posibilidad de estudiar un efecto complejo dividiéndolo en un conjunto de efectos simples, la combinación de los cuales permitía reproducir sin distorsiones el resultado original. La posibilidad del análisis se basaba en realidad en la existencia de procesos lineales, esto es, procesos en los que una variación determinada en las causas produce una variación estrictamente proporcional en los efectos. Estos dos presupuestos se remontan, por lo menos, a los días de Galileo, quien los aplicó implícitamente en el curso de sus investigaciones. Y como ocurrió después con la leyes de Newton, su rotundo éxito veló temporalmente cualquier objeción que hubiese cabido formular sobre ellos. Muchos años más tarde la física cuántica se encargaría de desmentir el primero, en tanto que la mecánica del caos derrocaría la confianza en el segundo.

La senda del definitivo declive quedó expedita a finales del siglo XIX, cuando el matemático, físico y filósofo francés Henri Poincaré descubrió que al aumentar la precisión en las predicciones a largo plazo del problema de tres cuerpos, algunos de sus resultados arrojaban la posibilidad de trayectorias atrozmente irregulares y caóticas. Peor todavía; apoyándose en un teorema elucidado por el matemático Bruns en 1887, Poincaré probó la imposibilidad de conocer por anticipado cuáles de esas trayectorias, estables o inestables, se darían en la realidad, excepto realizando un número infinito de operaciones algebraicas. Ahí residía la auténtica solución del problema de los n cuerpos, en el reconocimiento puro y simple de que tal solución era inasequible. La interacción gravitacional de n cuerpos de masa equiparable resulta ser un problema no lineal, y por ello carece de solución matemática exacta, no importa cuánta habilidad de cálculo invirtamos en su búsqueda.

La irrupción en escena poco después de la relatividad y la teoría cuántica desplazó las investigaciones de Poincaré del centro de la atención general, y las relegó al cajón donde se almacenan las curiosidades interesantes en espera de tiempos mejores. El momento propicio llegó en 1963, cuando Edward Lorenz quedó estupefacto al comprobar que variando mínimamente las condiciones iniciales de una simulación meteorológica en su computadora, la evolución

del clima variaba drástica e impredeciblemente de un caso al otro. Su comentario según el cual “una mariposa batiendo las alas en Pekín podía causar un tornado en Tejas”, no tardó en hacer fortuna como emblema de la nueva ciencia del caos. Su arrolladora popularidad planteó de inmediato la pregunta de por qué no se había evidenciado mucho antes la presencia de tales comportamientos caóticos en la naturaleza. Y la respuesta consiste en que los procesos reales a los que habitualmente se aplican nuestros conocimientos físicos, pertenecen a la escala terrestre o astronómica, ámbitos en los cuales los efectos no lineales son de hecho despreciables o se ha de esperar periodos de tiempo muy dilatados para percibir su influencia. ¿Significa esto que la astronomía de los próximos años permanecerá indiferente al influjo de la mecánica del caos? A continuación comprobaremos de sobra que no es así.

Estrellas, planetas y cuerpos menores

La estabilidad del sistema solar sigue siendo una cuestión abierta que verosímilmente encontrará su respuesta durante las próximas décadas. La configuración más simple del problema de los 3 cuerpos es el modelo de Sitnikov, compuesto por un planeta ligero P que se mueve bajo la influencia de dos estrellas iguales, A y B , las cuales giran una alrededor de la otra describiendo elipses. Bajo tales condiciones el planeta P experimentaría sucesivos periodos de rotación distintos sin pauta regular alguna. Una imprecisión de cien metros en la ubicación del centro de la Tierra en el día de hoy, convierte en completamente imposible inferir su situación dentro de cien años. Por ahora, no parece posible prever el movimiento conjunto del sistema solar más allá de cien millones de años, ni tampoco resulta factible retrocedir parámetros orbitales como la excentricidad de la Tierra, tan importante para el estudio de los paleoclimas terrestres. La presencia de resonancias seculares (proporcionalidad entre periodos orbitales que intensifican las interacciones) en los movimientos de precesión de las órbitas planetarias de los planetas, permitirá aportar nuevas explicaciones a variados fenómenos astronómicos, como las lagunas de Kirkwood o el transporte de cometas, sin recurrir a causas externas a la gravitación. Hiperión –un satélite de Saturno– presenta un movimiento claramente errático en su eje de rotación, y también existen signos de caos en las bandas de asteroides, en los anillos de Júpiter o en Plutón. Por otro lado, si el tiempo que hemos de esperar

para que se manifiesten efectos caóticos graves en el sistema solar es igual o superior a la vida estimada de nuestra estrella, la naturaleza estable o inestable de las órbitas nos será del todo indiferente para cualquier propósito práctico.

Es importante señalar que la no linealidad de una órbita no implica necesariamente la inestabilidad y la descomposición del movimiento. Puede darse la situación cuasi-periódica, en la que un objeto describe una trayectoria que nunca pasa dos veces por el mismo punto pero tampoco sobrepasa jamás ciertos márgenes. Esto indica que la no linealidad podría ser compatible con cierto género de estabilidad, en el sentido de que las trayectorias mantengan su forma o pasen a otra muy semejante pese a su sensibilidad infinita a las condiciones iniciales. Probablemente la Tierra se encontrará dentro de cien años en una posición muy similar a la actual, pero incluso es difícil concretar qué significa aquí el término “probablemente”. El teorema KAM (por las iniciales de sus autores, Kolmogorov, Arnold y Moser) viene a sostener algo de esa índole, estableciendo las condiciones bajo las cuales se dará esa casi-estabilidad. Resulta, de acuerdo con este teorema, que determinadas resonancias entre los planetas sólo serán desestabilizadoras si sus respectivos periodos orbitales se encuentran en relación de números enteros. Ahora bien, en el mundo real es altamente improbable que se dé una relación tan exigente como la requerida, pues siempre será más probable que aparezcan decimales en lugar de números exactamente enteros. El teorema KAM se alza de esta manera como uno de los escasísimos ejemplos en los que la invariancia de un cierto fenómeno natural (en este caso, las órbitas) se garantiza, no por la conservación de alguna magnitud física (energía, impulso, etc.), sino por un puro requisito formal, como es el carácter aritmético de ciertas relaciones numéricas. No es descabellado pensar que en el futuro asistiremos a más descubrimientos de este cariz.

En años recientes se ha constatado que las órbitas hoy observables de los planetas en el sistema solar, no han sido siempre tan estables como ahora parecen. Existen indicios muy poderosos que señalan en la dirección de una posibilidad que hasta la fecha se había desdeñado por completo, y es la migración planetaria hasta sus ubicaciones actuales desde las posiciones en que estos cuerpos celestes se engendraron. La peculiar órbita de Plutón, la orientación singularísima del eje de Urano, y la relación entre los periodos orbitales de Neptuno y Plutón, abonan la hipótesis de cambios paulatinos en la ordenación de sus respectivas trayectorias. Estas variaciones justificarían también la marcada proximidad a sus respectivas estrellas

de los planetas gigantes hallados en los últimos tiempos fuera de nuestro sistema solar. Tales gigantes gaseosos habrían nacido en posiciones más alejadas de su estrella progenitora para acercarse con posterioridad a causa de diversas interacciones con otros compañeros o con el disco protoplanetario.

La estructura interna de las estrellas –todos lo sabemos– se halla sometida a un dinamismo mucho más rápido y violento que el de las órbitas planetarias. Las manchas solares (cuyo ciclo de once años ha sido objeto de polémica durante décadas), las oleadas de protuberancias solares, las fulguraciones repentinas y las alteraciones rítmicas en la distribución espacial y temporal del campo magnético solar, son algunos de los fenómenos estelares que, tras intrigar largo tiempo a los expertos, podrían ser explicados con ayuda de la mecánica caótica de fluidos. En efecto, como un fluido cabe considerar el inmenso cúmulo de átomos, núcleos y partículas que configuran el interior de las estrellas, y un fluido –esto es lo importante– en régimen caótico. La convección térmica en el seno de los fluidos tiende a tornarse caótica para calentamientos muy intensos, y nadie duda que así ocurre en el interior del Sol. El desorden deriva entonces de la aparición de varias estructuras en el fluido, unas estructuras que surgen, desaparecen, se desplazan o simplemente fluctúan de modo aparentemente aleatorio. En estos casos tan extremos se está lejos aún de comprender los fundamentos físicos de la turbulencia. Es por ello muy posible que tales investigaciones puedan ser convenientemente utilizadas para dilucidar la existencia o inexistencia de objetos astrofísicos exóticos, como las estrellas de bosones y otros retoños de la unión entre las ciencias del espacio y la física de partículas.

La disposición de los meteoroides en los enjambres meteoríticos invita a pensar en la presencia de agrupaciones a pequeña y gran escala, cada una de ellas semejante a las que incluye y a aquellas en las que se subsume. Esta disposición se denomina geoméricamente fractal, según el francés Benoît Mandelbrot la definió en 1975. Como todo fractal, esta estructura es autosimilar o “sibisemejante”, es decir, ofrece el mismo aspecto en todas las escalas de longitud. Naturalmente, esta propiedad no se cumple idealmente más que en los objetos abstractos; cualquier conjunto de cuerpos reales posee cotas inferiores y superiores de tamaño más allá de las cuales la autosimilaridad se pierde. Dentro de tales limitaciones, sin embargo, el modelo teórico se adapta de modo bastante satisfactorio a las observaciones. Tanto es así que la herramienta fractal se ha ensayado en muchos otros ámbitos astrofísicos con análoga eficacia, como en la

distribución temporal de las lluvias cometarias, en la estructura de los cúmulos globulares, cinturones de asteroides, discos de acreción y nebulosas planetarias, o en las variaciones de luz de algunos cuásares (el 3C-345, por ejemplo).

||| Cosmos y caos

La estructura fractal no parece ser una propiedad privativa de las nubes de asteroides y cometas, sino que surge como un principio modelador primordial a gran escala en el universo. Así parece atestiguarlo la disposición global de las nubes interestelares, las galaxias y los cúmulos de galaxias. Nuestra Vía Láctea, por ejemplo, se halla formada por unos cien mil millones de soles, mezclados con nubes de gas y polvo que constituyen el medio interestelar. Estas aglomeraciones gaseosas y polvorientas se presentan en un amplio abanico de densidades que crecen conforme el tamaño de la nube disminuye. Cuando el cúmulo es tenue encontramos tan solo átomos de hidrógeno, H, los cuales se combinan en moléculas, H₂, al aumentar la densidad. Las nubes más importantes contienen también átomos más pesados, provenientes del núcleo de las estrellas, que se enlazan entre sí para formar moléculas más complejas, entre las que sobresale el monóxido de carbono, CO. La relevancia astronómica de esta molécula radica en su facultad de emitir una radiación electromagnética característica en longitudes de onda milimétricas. Gracias a estas emisiones nos es dado conocer las características de tales nubes siderales, pues el H₂ no radia a las temperaturas reinantes en esos lugares (unos 10 K \approx -263 °C).

La información transmitida de este modo por el CO –cuya intensidad emisora depende de la cantidad de gas en la dirección de la visual– ha permitido relacionar la masa de las nubes con su dispersión interna de velocidades (una magnitud que nos indica hasta qué punto la velocidad promedio de las moléculas representa bien las velocidades individuales de cada una de ellas) y con su tamaño. De ello se colige que la masa M de una de estas nubes es proporcional a r^D , donde r es su tamaño típico y D un exponente decimal, aproximadamente 1,7. En un medio perfectamente homogéneo el valor de este exponente igualaría a la dimensionalidad del espacio subyacente, y en nuestro espacio tridimensional sería D = 3. La circunstancia de que D posea un valor de hecho inferior indica la presencia de una estructura fractal, lo que explica asimismo la organización acusadamente jerárquica de estas nubes. Las más grandes están compuestas por otras más pequeñas, las cuales contienen

a su vez unidades menores, y así sucesivamente hasta una cantidad de entre cinco y diez niveles. La autosimilaridad de estas composiciones, como se ha mencionado antes, pierde su validez al traspasar ciertos límites de tamaño. Las nubes más grandes abarcan cerca de 300 años-luz y su masa es un millón de veces la de nuestro Sol; no se pueden formar nubes mayores porque las fuerzas de marea de la propia galaxia que las acoge, las despedazaría. En el extremo inferior, las nubes menores cuentan con una decena de unidades astronómicas (1 u.a. ~150 millones de km), y su masa es aproximadamente igual a la de Júpiter. Así, la relación entre los tamaños de la nube mayor y la menor es de un millón, y la relación de masas de unos mil millones.

La conformación de estas estructuras, sus condiciones termodinámicas y su participación en la formación de estrellas son aspectos todavía pendientes de esclarecimiento por futuras investigaciones. No obstante, la existencia de leyes de escala (leyes que no dependen del tamaño de los sistemas a los que se aplican) sugiere que la gravitación podría explicar en solitario esta clase de fenómenos. La formación del fractal se explicaría presuntamente por inestabilidades gravitatorias seguidas de fragmentaciones. Dado que estos procesos no tienen una escala preferente, pueden proseguir en cascada con independencia del tamaño de la nube, a condición de que el gas se mantenga a temperatura constante (régimen isoterma) radiando energía. Dada la gran complejidad del problema, todavía se carece de una descripción termodinámica satisfactoria para este conjunto fractal de fragmentos en equilibrio casi isoterma, de número variable y sometidos únicamente a su autogravitación.

Las galaxias, representadas como un conjunto de puntos autogravitantes, tampoco escapan a las consideraciones precedentes. Su disposición típica es la de una estructura jerárquica formada por grupos, cúmulos y supercúmulos. Si la Vía Láctea posee un diámetro aproximado de 100.000 años-luz, y las mayores aglomeraciones de materia conocidas llegan a los mil millones de años-luz, las galaxias componen una estructura fractal de exponente característico próximo a 1,7. Pese a todo, el universo se torna homogéneo a gran escala –como demostró el sondeo del satélite COBE– puesto que la autogravedad de las estructuras no es predominante frente a la expansión global del universo. Esto significa que a gran escala D adquiere el valor 3, circunstancia sugerida ya por los catálogos observacionales de galaxias. Sin embargo, la incertidumbre de estas observaciones es muy acusada, pues dependen del modelo cosmológico escogido, el cual se rige a su vez por magnitudes (curvatu-

ra, densidad, constante de Hubble, etc.) todavía mal conocidas. La escala de transición a un universo homogéneo es actualmente objeto de vivo debate, y su dilucidación final cabe confiar que surja con la indagación de la totalidad de las galaxias visibles en los próximos años.

Los primeros instantes

No es posible olvidar que una buena proporción de las características cosmológicas depende de las condiciones iniciales que imperaron en los momentos más tempranos de nuestro universo. El enlace entre la termodinámica y el modelo estándar de la física de partículas, por ejemplo, es una unión que todavía queda por efectuar y de la cual pueden surgir vástagos de propiedades insospechadas. La definición de la entropía gravitacional constituye por sí misma una cuestión notablemente intrincada, que sin duda no puede considerarse ya saldada por las discusiones desarrolladas en la última década del siglo xx. No sabemos hasta qué punto el universo puede considerarse un sistema aislado, desdeñando el influjo de su propia gravedad sobre sí mismo, o en qué sentido hemos de considerar termodinámicamente esta autoacción gravitatoria para juzgarlo como verdaderamente aislado. Aquí es donde habremos de decidir entre una termodinámica cosmológica del equilibrio o del desequilibrio, enfrentándonos con ello a una auténtica cascada de controvertidas cuestiones.

La no linealidad de las interacciones cuánticas entre partículas elementales, asimismo, se elevará probablemente como uno de los campos de investigación más fructíferos de la primera mitad del siglo XXI, cuyas repercusiones en la astrofísica de primera línea no podemos menospreciar. Sabemos ya con suficiente certeza que la combinación lineal con la que representamos la superposición típica de estados cuánticos, apenas es un primer paso en la exploración de este desconcertante mundo. Las formulaciones no lineales de tales teorías se habrán de investigar en toda su profundidad, y desvelarán sin duda conductas aún insospechadas en las partículas cuánticas. La polémica sobre la masa en los neutrinos es seguro que se resolverá en cuanto los montajes experimentales pertinentes se hallen dispuestos para llevar a cabo los ensayos definitivos. Como se ha comprobado, la existencia de neutrinos masivos está relacionada con la facultad de estas partículas para evolucionar desde una superposición de estados a un único estado cuántico, en un proceso de decaimiento de muy breve duración. De todos es sabido también que las

interacciones no lineales desempeñan un papel decisivo en tales fenómenos, denominados de “decoherencia”, en el curso de los cuales las partículas pasan de encontrarse en una combinación de estados a adoptar uno de ellos como estado propio. Es muy posible, así pues, que las futuras teorías cuánticas no lineales revelen procesos de decoherencia que aporten nueva luz a las propiedades de partículas hoy utilizadas como herramientas de exploración del cielo profundo. Incluso cabría esperar de ellas –¿por qué no?– algún auxilio en la resolución del enigma de la materia oscura del universo.

Se abriga la esperanza de que las teorías cuánticas no lineales del siglo XXI, cuya aspiración más cara es la de unificarse con la relatividad general einsteniana, despejen en alguna medida el misterio de los “agujeros negros”, condensaciones infinitamente densas de masa y energía (singularidades) rodeadas de un oscuro halo de tinieblas a causa de una gravitación periférica tan intensa que ni la luz puede escapar de ella. Puesto que los modelos de creación de los agujeros negros provienen todos de la relatividad general pura, no es descabellado pensar que la incorporación a los mismos de procesos cuánticos no lineales podría ejercer los mismos efectos balsámicos sobre las singularidades que la originaria teoría cuántica procuró al modelo atómico de Rutherford, sanándolo de su intrínseca inestabilidad. Tal vez en esas nuevas condiciones las singularidades no se produzcan como nosotros suponíamos, y las masas de los grandes soles fenecidos no se precipiten irremediabilmente en un abismo gravitatorio sin fin. Quizás exista un mecanis-

mo cuántico no lineal que prevenga la aparición de una singularidad puntual de densidad infinita en el centro de un agujero negro, del mismo modo que otra regla cuántica impide el derrumbamiento de los electrones sobre los núcleos atómicos. Y quién sabe las implicaciones de estos futuros hallazgos sobre los propios modelos del Big Bang, cuyas especulaciones se detienen en el tiempo cero debido a la singularidad inicial de la que, supuestamente, brotó todo.

La reciente entrada en el escenario teórico de la constante cosmológica de Einstein, merced a los resultados de las últimas observaciones realizadas sobre la densidad de la materia en el universo y su ritmo de expansión, introduce nuevas y muy revulsivas consecuencias sobre la no linealidad de sus interacciones. El modelo inflacionario y su concepción del periodo de expansión acelerada como una transición de fase de segundo orden, se beneficiará sin duda de venideros avances en la termodinámica de los sistemas no lineales. Todo ello acompañado, sin duda, por la necesaria progresión en nuestro conocimiento de las técnicas precisas para desentrañar ecuaciones acopladas en derivadas parciales de segundo orden, e incluso superiores. Ya se planifican programas con este fin en la siguiente generación de potentes computadores de procesamiento en paralelo. Y bien, perdidos como estamos en mitad de este océano de incógnitas no podemos más que aferrarnos a una única certeza: los físicos del caos, astrofísicos y cosmólogos del siglo XXI tienen ante sí un horizonte de descubrimientos tan prometedores como apasionantes.