Thémata. Revista de Filosofía. Número 43, 2010

INCERTIDUMBRE, PREDICTIBILIDAD E INDETERMINACIÓN EN LA CIENCIA FÍSICA

Rafael Andrés Alemañ Berenguer. Universidad Miguel Hernández de Elche

Resumen: A lo largo del siglo XX, y en especial a partir del desarrollo de la física cuántica y de la dinámica no lineal, los conceptos de incertidumbre, impredictibilidad e indeterminación han sido fuente de gran confusión, pese a sus distintos significados y aplicaciones. Un somero análisis de las teorías que los emplean permite distinguirlos con suficiente claridad.

Summary: In the XXth century, and specially after the quantum physics and nonlinear dynamics development, the concepts of uncertainty, unpredictability and indetermination, became a source of great confusion, despite their different meanings and applications. A brief analysis of the theories where these concepts are used, allow us to put their differences clearly enough forwards.

1. Introducción

Cincuenta años después de la publicación de sus Principia, la mecánica de Newton había derrotado a cualquier otra descripción física del mundo que aspirase a competir con ella, dando paso así a la ciencia moderna. El éxito de sus predicciones teóricas, especialmente el cálculo astronómico de las posiciones de los planetas, fue tan resonante y el número de sus aplicaciones prácticas tan avasallador, que con el paso del tiempo expertos y profanos la aclamaron unánimemente como el ejemplo emblemático de una ciencia perfecta [Bernard-Cohen, 1983]. Se conocían sistemas, desde luego, en los cuales las leyes de Newton eran difícilmente aplicables a causa del gran número de sus componentes –piénsese en mecánica estadística de los gases– pero nadie albergó jamás la menor duda de que las dificultades se originaba tan solo en la inmensa potencia de cálculo necesaria para vérselas con tan abrumador número de entidades [Gibbs, 1960].

Así pues, se admitió sin reservas que el universo entero era una suerte de inmenso mecanismo de relojería que funcionaba de acuerdo con las leyes de Newton. Esta suposición, filosófica más que científica, se denominó "mecanicismo" y dominó gran parte del siglo XVIII y XIX. Epítome de tal actitud ante la naturaleza fue el conocido comentario del científico francés Laplace en su obra Ensayo filosófico sobre las probabilidades, escrito en 1776, quien declaraba [Laplace, 1985, p 25]: "… hemos de considerar el estado actual del universo como efecto de su estado anterior y como la causa del que ha de seguirle. Una inteligencia que en un momento determinado conociera todas las fuerzas que animan a la naturaleza, así como la situación respectiva de los seres que la componen, si además fuera lo suficientemente amplia como para someter a análisis tales datos, podría abarcar en una sola fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del universo y los del átomo más ligero; nada le resultaría incierto y tanto el futuro como el pasado estarían presentes ante sus ojos".

La afirmación de Laplace expresa con impoluta claridad una convicción que acabaría adquiriendo rango filosófico bajo la denominación de "mecanicismo", doctrina de la cual esta cita sigue siendo una de las más representativas. En las palabras del sabio francés se manifiestan los dos ingredientes primordiales de la doctrina: el determinismo ("El estado presente de la naturaleza es evidentemente una consecuencia de lo que era en el momento anterior...") y la predictibilidad ("...podría decir [...] las propiedades generales de todos estos entes en cualquier tiempo del pasado o del futuro"). A juicio de Laplace, y de acuerdo con la visión newtoniana del universo, las leyes naturales implican un determinismo estricto y una completa capacidad de predecir los acontecimientos, aunque las imperfecciones de las medidas exigieran introducir a veces el uso de probabilidades, como en la física estadística [Salet, 1975]. Ahora sabemos que los efectos cuánticos hacen inviable un ideario como éste, por lo que el viejo mecanicismo debe considerarse superado por los hechos [Mandl y Shaw, 1984].

Ahora bien, podríamos preguntarnos si una postura mecanicista de nuevo cuño distanciada de las antiguas esperanzas de Laplace sería capaz de sobrevivir en la actualidad. El interrogante sería en nuestros días: ¿bastarían las ecuaciones de la física junto con los datos de la distribución de la energía en un tiempo dado, para determinar el comportamiento de una cierta porción de materia no inferior a un tamaño mínimo (evitando así las contribuciones cuánticas)? O dicho de otra forma: ¿autorizan las leyes de la naturaleza, tal como las conocemos hasta ahora, una concepción mecanicista del mundo no cuántico? Hasta fechas recientes la contestación más extendida entre los físicos hubiese sido favorable; hoy sabemos que la respuesta es categóricamente negativa.

2. Análisis y linealidad

La razón de tan contundente rechazo deriva de una limitación metodológica antes inadvertida, concerniente a un procedimiento tan habitual en la investigación científica como es el análisis. Se suponía en general que el resultado de un sistema complejo podía averiguarse dividiéndolo en partes más reducidas (subsistemas), y calculando el comportamiento aislado de cada una de ellas. Sumando a continuación los efectos separados de cada una de esas partes, se esperaba encontrar el comportamiento del sistema en su conjunto. Este carácter se resumió en una frase con aire proverbial que sentencia: "El todo es igual a la suma de sus partes". Aquellos sistemas que resultan analizables de este modo, se califican matemáticamente de lineales. Tales sistemas presentan la afortunada característica de que, dadas varias soluciones de las ecuaciones que los describen, la combinación lineal de ellas es también solución de dichas ecuaciones. Esta propiedad facilita en gran medida cálculos que de otro modo sería ofuscadoramente prolijos, pero a la vez resulta físicamente estéril ya que no es posible obtener ningún comportamiento cualitativamente nuevo.

Una vez que se conocen las soluciones básicas de las ecuaciones que gobiernan un sistema lineal, todas las demás posibles soluciones se obtienen mediante combinaciones lineales de aquéllas. Las leyes de la física suelen expresarse por medio de unas fórmulas matemáticas que reciben el nombre de ecuaciones diferenciales, y entre éstas las que pueden resolverse con exactitud se dice que son integrables. Pues bien, las ecuaciones referidas a sistemas lineales poseen la propiedad de ser siempre integrables, determinando a la vez un comportamiento regular y ordenado en los sistemas que rigen. En esta clase de sistemas, que son los más simples, se realizan con mayor o menor aproximación los deseos de Laplace.

La sencillez con que esta técnica permitía resolver los problemas a los que se aplicaba, hizo a los investigadores propensos a olvidar que la estructura profunda de la naturaleza no tiene porqué ser susceptible de un tratamiento semejante. En los sistemas llamados no lineales, de hecho, esa regla no se cumple. En tales sistemas, por decirlo de alguna manera, "el todo es distinto de la suma de sus partes". La combinación lineal de varias soluciones no es a su vez solución de las ecuaciones del sistema, lo que abre la puerta a una tremenda complejidad matemática junto a una no menos enorme riqueza de posibilidades en su comportamiento. La mayoría de los sistemas no lineales no resultan integrables, y nuestra capacidad de pronosticar el curso de su comportamiento futuro con relativa fiabilidad se ve por ello sumamente recortada. Cuando las ecuaciones diferenciales son no lineales no es posible, por lo general, obtener soluciones exactas y el comportamiento de los sistemas que describen se hace errático e impredecible. En este ámbito el mecanicismo laplaciano encuentra definitivamente vedado el camino.

Cabe preguntarse entonces si los problemas que exhiben rasgos no lineales son muy frecuentes en la naturaleza, o si por el contrario se trata de incómodas rarezas que más vale arrinconar en el baúl de lo indeseable. Nuevamente la respuesta desagradará a los mecanicistas puros, pues resulta ser que los sistemas no lineales son abrumadoramente mayoritarios en el mundo físico. El hecho de que esta circunstancia no haya sido plenamente reconocida hasta la segunda mitad del siglo XX, se debe, entre otras razones, a que las principales aplicaciones de la mecánica se dieron durante el siglo XIX en la astronomía del sistema solar, donde los efectos que se alejan de la linealidad son muy reducidos y muy amplia la escala de tiempos en que se apreciarían. Por otra parte, la considerable dificultad matemática de las ecuaciones diferenciales no lineales retardó el estudio de sus propiedades, impidiendo que se descubriesen los efectos que ahora hemos podido desvelar gracias al auxilio de los modernos computadores.

Las principales consecuencias de un comportamiento no lineal son dos: o bien el sistema que lo experimenta se encamina hacia el caos (lo que se ha popularizado como "caos determinista" por los motivos que luego se explicará), o bien accede a un estado donde el sistema presenta una organización distinta a la inicial, a menudo con un mayor grado de orden ("auto-organización"). Cualquiera que sea el resultado, la posibilidad de una conducta tan sorprendente era inimaginable siquiera para los físicos de principios de siglo, habituados a la suposición de que los comportamientos complicados sólo provienen de los sistemas complejos. La aparición en escena de la dinámica de sistemas no lineales ha desmentido tal ilusión, y puede ser juzgada por ello como una de las grandes revoluciones científicas del siglo XX [Haken, 1984; Arnold, 1987].

3. No linealidad y caos

Uno de los primeros en comprender que la mecánica clásica encerraba en sí misma la semilla de lo impredecible, fue el gran físico y filósofo francés Henri Poincaré, quien escribió [Poincaré, 1944, p. 58]: "...Pero, aun cuando se diera el caso de que las leyes de la naturaleza no tuviesen ningún secreto para nosotros, solamente podemos conocer la situación inicial de manera aproximada. Si esto nos permitiera predecir la situación que sigue en el tiempo con la misma aproximación, es todo lo que necesitaríamos, y podríamos decir que el fenómeno ha sido predicho, que está regido por leyes. Pero esto no es siempre así; puede ocurrir que pequeñas diferencias en las condiciones iniciales produzcan condiciones muy diferentes en los fenómenos finales. Si un pequeño error en las condiciones iniciales produce un enorme error en las condiciones finales, la predicción se vuelve imposible y tenemos aparece el fenómeno fortuito". El arrollador surgimiento poco después de la Relatividad y la teoría Cuántica, desvió el interés de los físicos hacia otros derroteros y hubieron de transcurrir sesenta años hasta la confirmación de tales conjeturas. En 1963 Edward Lorenz, meteorólogo del Instituto Tecnológico de Massachusetts, descubrió que con una variación ínfima en los datos iniciales de su modelo de la atmósfera, el computador proporcionaba resultados completamente distintos en sus cálculos finales [Lorenz, 1963]. El descubrimiento de Lorenz permaneció casi ignorado al publicarse en una revista circunscrita a los especialistas en física del aire, hasta su redescubrimiento en los trabajos de Ruelle y Takens ocho años después [Ruelle y Takens, 1971].

El punto crucial a destacar en estos hallazgos es que la evolución del clima, gobernada por ecuaciones no lineales, se mostraba capaz de un comportamiento caótico aun cuando sus leyes eran plenamente deterministas [Gleick, 1987]; de ahí el nombre de "caos determinista". Siempre había sido una creencia general que el caos se daba en sistemas regidos por leyes no deterministas, a las cuales se atribuía la aparición de tal efecto. Nada de eso –afirmó Lorenz– la atmósfera se puede representar como un fluido clásico, es decir, un sistema con multitud de partículas todas ellas sometidas al estricto determinismo de la mecánica newtoniana. Y sin embargo una diminuta modificación de los datos iniciales conduce, como auguraba Poincaré, a un resultado en absoluto similar al original. Esto significa, ni más ni menos, que de no especificar los datos iniciales con infinita precisión jamás podremos estar seguros de la predicción realizada en un sistema no lineales. Por si ello fuese poco, las conclusiones de Ruelle y Takens probaban que el fenómeno del caos era susceptible de aparecer en sistemas mucho más sencillos que la atmósfera. Ya ni siquiera nos es dado resguardarnos de esta amenaza limitándonos a estudiar sistemas simples; el caos acecha implacable en cada recodo de la naturaleza.

Nos preguntaremos después de todo qué es el caos y cuáles son sus propiedades, aspectos estos de la máxima importancia epistemológica. Los sucesos naturales muestran con frecuencia una conducta turbulenta, con oscilaciones irregulares de sus propiedades físicas que no se repiten jamás, pese a encontrarse bajo rigurosas condiciones deterministas. Este fenómeno, que ocasiona la imposibilidad de realizar cualquier predicción fiable de su comportamiento, se denomina caos o movimiento caótico. Su carácter determinista se refiere al hecho de que, aun en ausencia de toda fluctuación interior o exterior, los sistemas de esta clase desarrollan una conducta caótica [Rasband, 1990].

Pero acaso el rasgo más distintivo del caos, y lo que le ha ganado la antipatía de los mecanicistas, sea su irritante tendencia a impedir toda predicción de su comportamiento futuro. Responsable de ello es la sensibilidad infinita a las condiciones iniciales que presentan los sistemas no lineales en general. Salvo que en las ecuaciones correspondientes incluyamos datos iniciales con un número infinito de cifras decimales, lo que resulta de todo punto imposible, nuestras predicciones se alejarán significativamente del valor real al cabo de un tiempo más o menos breve. Cierto es que en todos sus resultados los científicos agregan una estimación del error probable cometido en los cálculos. Empero, la gran diferencia entre los sistemas caóticos y los que no lo son, es que en los primeros el error puede minimizarse y se mantiene siempre acotado dentro de límites razonables. En cambio en los segundos el error crece a un ritmo vertiginoso, circunstancia que pronto difumina todo el valor predictivo de nuestros cálculos.

Podría pensarse que esto no es más que un problema técnico: aumentemos la capacidad de cálculo de nuestros computadores y recuperaremos con ello la facultad de realizar pronósticos con la precisión que se desee. Desafortunadamente la escapatoria no es tan simple, pues el problema afecta al concepto mismo de predicción. Imaginemos que se desea calcular la posición de una partícula cuyo movimiento es caótico, para lo que nos servimos de las ecuaciones perfectamente deterministas que lo regulan. A fin de calcular su posición en el primer segundo efectuamos –por ejemplo– una operación matemática que nos suministra un resultado con su margen de error, es decir, un intervalo de valores dentro del cual suponemos incluido el dato que se persigue.

Aunque nos conformemos con permanecer dentro de dicho margen sin disminuir el error cometido, no tardaríamos en sufrir un singular inconveniente. Para predecir la posición de la partícula a los dos segundos necesitaríamos realizar, digamos, once operaciones matemáticas; a los tres segundos precisaríamos cincuenta operaciones; a los cuatro doscientas veinte, y así sucesivamente. Cuando el tiempo para el que intentamos un pronóstico tiende a infinito, la cantidad de operaciones matemáticas a realizar se hace también infinita, lo que priva de todo sentido a la propia idea de predicción sin que perfeccionamiento técnico alguno pueda evitarlo [Hanson, 1977].

4. Predicción, incertidumbre e indeterminación

Este extremo nos brinda una interesante ocasión de establecer las diferencias entre el mecanicismo laplaciano, la física del caos y la teoría cuántica, cuyas suposiciones teóricas tan a menudo se confunden. En la concepción mecanicista de Laplace la exactitud de la física newtoniana se llevaba a sus últimas consecuencias. Todo objeto físico era considerado idealmente como un corpúsculo puntual y siempre existía una función, f_P, que a cada uno de ellos le asignaba tres coordenadas de posición en el sistema de referencia escogido.

Si las coordenadas dependen del tiempo decimos que el cuerpo se mueve, por lo cual la función de posición nos suministrará sus coordenadas en cada instante, presumiblemente con un margen de error siempre acotado. Esto es lo que no sucede en los sistemas caóticos, donde la función de posición, que denotaremos como f_Π, aumenta su error a un ritmo indomable. O en otras palabras, el intervalo en cuyo interior se halla el valor buscado, crece sin control. De este modo en multitud de situaciones es inevitable que al cabo de algún tiempo el intervalo posible de posiciones devenga igual o mayor que todo el rango de posiciones permitidas por el tipo de sistema considerado.

Así ocurriría, digamos en el caso de una bola de billar librada a un movimiento sin fricciones sobre una mesa de ese mismo juego. Suponiendo que las colisiones con el borde de la mesa resulten perfectamente elásticas, al poco tiempo de comenzado su movimiento la imposibilidad de expresar las condiciones iniciales con infinita precisión provocan que la trayectoria no sea una línea infinitamente estrecha sino una haz de trayectorias suficientemente estrecho al comienzo como para que la diferencia parezca desdeñable. Sin embargo, con cada colisión el haz de las trayectorias se va ensanchando hasta que el intervalo de error de las posiciones ocupa toda la superficie de la mesa de billar. Desde ese momento en adelante, carece de sentido hablar de capacidad predictiva con respecto a la posición de la bola de billar sobre la mesa.

A diferencia de los dos casos previamente considerados, una de las cualidades distintivas de la física cuántica es justamente que el concepto mismo de función de posición no existe en esa teoría, puesto que los entes con los que trata no son corpúsculo puntiformes [Sen, 1968]. Ese es el motivo por el cual resulta equívoco el nombre de "mecánica cuántica". La teoría cuántica no es una "mecánica" en el sentido estricto atribuible a ese término [Reichenbach, 1938, 1944], dado que no existe en ella la idea de posición[1] ni mucho menos la de trayectoria (salvo aproximaciones idealizadas).

La física cuántica –no lo olvidemos– se muestra continua y completamente determinista en los procesos **U**, aquellos en los que un sistema cuántico no sufre una medida ni una interacción equivalente con otro sistema, sino que evoluciona libremente gobernado por la ecuación de Schroedinger. Por el contrario, las discontinuidades y los cambios aleatorios se introducen en los procesos **R**. en los cuales una medida o una interacción externa colapsan la superposición de posibilidades contenida en la función de onda en un solo valor [Penrose, 1991, 2006]. Por ello esta teoría se puede calificar de "determinista" en tanto existen unas leyes especificadas sin ambigüedad que relacionan unos estados físicos con otros. Pero no es plenamente "causal" en el sentido de que estados iniciales idénticos de un sistema cuántico, incluso con datos infinitamente precisos conforme al ideal laplaciano, pueden desembocar de modo aleatorio en diferentes estados finales [Bunge, 1959].

Este azar no tiene nada que ver con la sensibilidad a los datos iniciales y no guarda relación por tanto con el caos. En los sistemas caóticos dos estados cuyos datos iniciales se especificasen con infinita precisión, sí darían lugar a los mismos resultados finales. Estos dos aspectos son diferentes a su vez del concepto de "incertidumbre" tan indebidamente asociado al dominio de la microfísica. Un gas ideal, por ejemplo, es un sistema clásico en el que las posiciones y velocidades de todos sus componentes se hallan perfectamente definidas por la teoría. Suponiendo que conociésemos los datos iniciales con una exactitud infinita, tendríamos un caso de los soñados por Laplace [Brillouin 1969]. Sin embargo, la dificultad técnica de calcular todas las posiciones y velocidades de los componentes del gas, aunque posible en teoría, hace la tarea inviable en la práctica. Es entonces cuando el recurso a las probabilidades introduce la

---

1 El llamado "operador de posición" cuántico, en realidad no hace más que etiquetar puntos del espacio de configuraciones sin indicar en cuál de ellos se encuentra el cuantón. Y tampoco puede decirse que existen verdaderas autofunciones de posición, puesto que las que se emplean como tales (las denominadas "deltas de Dirac") no son verdaderas funciones, sino una magnitud matemática más elaborada.

incertidumbre en nuestro conocimiento de las propiedades exactas de una molécula cualquiera. La teoría cuántica y la del caos entrañan distintas restricciones teóricas, mientras que la incertidumbre de, digamos, la mecánica estadística clásica supone una restricción de tipo computacional.

El caos es ubicuo en el mundo real y, en un sentido matemático muy preciso, está justificado decir que el número de sistemas caóticos es infinitamente mayor que el de los que no lo son. El comportamiento meteorológico de la atmósfera, el desplazamiento de un péndulo amortiguado sometido a una fuerza oscilante, el movimiento acoplado de tres o más planetas de tamaño comparable, el ritmo de goteo de un grifo semiabierto de un modo particular, las oscilaciones eléctricas de circuitos retroalimentados, las turbulencias líquidas en ciertas condiciones, la dinámica "presa-depredador" en los ecosistemas biológicos, el cambio concertado en las poblaciones animales y vegetales de un territorio, los procesos de autorregulación y autoduplicación de los genes en las células, las arritmias cardiacas, las irregularidades eléctricas cerebrales, las transmisiones de señales en las células nerviosas de los calamares, las variaciones en la actividad locomotora de las quisquillas, e incluso las fluctuaciones en los ciclos económicos, son ejemplos estudiados hasta hora en los que el influjo del caos determinista se deja sentir.

Los sistemas cuánticos tampoco escapan a los efectos caóticos en determinadas circunstancias. Sometidos a perturbaciones que rebasan un cierto umbral –como un campo magnético de una intensidad particular– la distribución de los niveles energéticos de algunos sistemas atómicos o el tiempo de retención de los electrones en su choque con moléculas pequeñas, presentan un comportamiento caótico [Mehlberg, 1980; Gutzwiller, 1990]. En todos ellos el caos no debe ser confundido con el "ruido" experimental, nombre dado a las fluctuaciones al azar inevitables en todo sistema natural. A diferencia de lo que sucede con este ruido, las oscilaciones en las propiedades físicas de los sistemas caóticos se mantienen confinadas dentro de unos intervalos muy concretos, y el margen de error en los valores esperados de las medidas crece de modo muy típico [Briggs y Peat, 1994].

5. Localidad y separabilidad

El meteorólogo E. Lorenz, pionero en la teoría del caos, acuñó una metáfora que alcanzó muy pronto la celebridad. Refiriéndose a la inestabilidad frente a mínimas variaciones en los datos iniciales, Lorenz afirmó humorísticamente que "el batir de las alas de una mariposa en Hong-Kong puede ser la causa de un ciclón en California". Esta modificación drástica en las consecuencias de un proceso por cambios ínfimos en sus condiciones de partida, se conoció desde entonces como "efecto mariposa". Junto con la no localidad cuántica, este rasgo de la naturaleza ha infundido ánimos a la fracción más imprudente de los escritores de divulgación para embarcarse en una suerte de misticismo holista, según el cual toda porción del universo está conectado con el resto de forma que no existen sistemas independientes. De ello extraen una serie de conclusiones metafísicas, éticas y emocionales pretendidamente avaladas por la física de vanguardia. Esta controversia nos ofrece de nuevo la posibilidad de comparar los tres sectores de la física discutidos antes, y comprobar si es cierto lo que estos nuevos místicos declaran.

Con ese fin habremos de recordar que los sistemas físicos se componen de dos elementos primordiales: las leyes que regulan sus cambios y las condiciones de contorno (datos del sistema en un instante inicial o comportamiento del mismo en un caso conocido) que permiten aplicar dichas leyes en una situación concreta. Esquemáticamente, {Sistema físico} = {Leyes de evolución} ⊕ {Condiciones de contorno}.

La idea admitida sin reservas en la física clásica –caótica o no– desde Newton, era la de que en el comportamiento de un sistema dado, la influencia de las partes más alejadas del resto del universo resulta despreciable. Siempre es posible, al menos en teoría, dividir el universo en parcelas aisladas que no interactúen entre sí de forma significativa. Este principio, que llamaremos "localidad", se funda en que las leyes naturales no contienen efectos independientes de la distancia; es decir, es una prescripción que sólo afecta a las leyes de evolución del sistema.

Aunque el mecanicismo al estilo de Laplace no conociese más que influencias físicas (gravedad y electromagnetismo) que se debilitan con la distancia, sabía muy bien que únicamente se anulan en el infinito, razón por la cual para determinar con perfecta exactitud las condiciones de contorno sería necesario conocer el efecto que ejerce la totalidad del universo sobre nuestro sistema. Por ello los antiguos mecanicistas precisaron añadir un postulado adicional que garantizase que una mínima variación en las condiciones de contorno no modificaría drásticamente el resultado final previsto. Ese nuevo principio es el de "insensibilidad" a las condiciones de contorno, y por tanto no concierne en absoluto a las leyes de evolución. La combinación de estos dos principios, localidad e insensibilidad, dará lugar en la física clásica a los sistemas que llamaremos "separables".

Y he aquí la clave de nuestra discusión. La aparición de la física cuántica desmintió el primer postulado y la del caos el segundo. Las correlaciones cuánticas no locales introdujeron en las leyes de evolución efectos independientes de la distancia [Albert, 1992; Hughes, 1989], en tanto que el caos traía consigo la tan temida sensibilidad a las condiciones de contorno [Baker y Gollub, 1995; Nicolis, 1995]. Sea como fuere, resulta de capital importancia advertir que ambas prescripciones son lógicamente independientes entre sí, como demuestra el hecho de que hay grandes parcelas de la física que funcionan con envidiable corrección sin cuantones ni caos (la mecánica clásica, por ejemplo), otra que es cuántica sin caos (aunque se estudia ya el caos cuántico) y una física del caos sin cuantización. La teoría cuántica es no local y por ello no consiente sistemas separables en el sentido antes discutido [Bohm, 1957], pero la del caos sí respeta el postulado de localidad aunque refute la separabilidad a causa del "efecto mariposa". El caos surge por las características no lineales de algunos sistemas físicos (lo que indirectamente se relaciona con la clase de leyes que lo regulan), responsable de la sensibilidad de éstos; pero sus leyes de evolución siguen siendo tan locales como todas las de la física no cuántica.

El aroma de mística que ciertos autores han querido conferir a estos descubrimientos no parece ahora justificado. En la teoría del caos las leyes fundamentales se someten al principio de la localidad tanto como sus predecesoras no cuánticas, por lo que podríamos considerar que los componentes del universo están tan conectados entre sí como en la época de Newton. Cierto es que el efecto mariposa asegura que el batir de las alas de este animal trastoca el comportamiento de un sistema más complejo por un cambio imperceptible en los datos iniciales. Pero en general tiende a olvidarse que dicho efecto se aplica también al propio movimiento de la mariposa. Para confirmar que ha sido el batir de sus alas el responsable del huracán final, deberíamos hallarnos en disposición de seguir la evolución del sistema con entera precisión, que es justamente lo que el caos nos prohíbe. En el mejor de los casos podríamos afirmar que estados iniciales de un sistema infinitesimalmente distintos pueden ocasionar estados finales por completo diferentes.

Razones semejantes invitan a pensar que la física cuántica tampoco abona una visión mística de la realidad [Jackiw, 1977]. Las correlaciones no locales demostradas por Aspect se daban en sistemas tan sencillos como una pareja de cuantones [Aspect 1982]; cuando los sistemas son más complicados las correlaciones se transforman de modo mal conocido, sin que sepamos todavía los nuevos efectos que podrían emerger en esos niveles de complejidad. Ello nos conduce al problema cuántico de la medida, o "problema del colapso de la función de onda", cuya sustancia se origina en la dificultad de justificar de modo convincente la transición desde el mundo cuántico al clásico. Carecemos por ahora de una explicación cabal sobre la transición desde las desquiciantes propiedades cuánticas al familiar comportamiento de los objetos clásicos. Es muy posible que la no linealidad tenga mucho que decir al respecto. Pero eso es algo que sólo el tiempo y el progreso científico podrá aclararnos.

6. Conclusiones

No parece posible que un sistema resulte predecible si no es determinista, pero, al contrario, la dinámica no lineal demuestra que la alternativa opuesta es más que una mera posibilidad. Tanto los procesos caóticos como los autoordenados son plenamente deterministas desde el momento en que se hallan gobernados por leyes que vinculan sus estados en el futuro con los de su pasado. No ocurre esto, por ejemplo, en la emisión de energía por un átomo excitado, en la desintegración de un núcleo atómico, o en la obtención de un autovalor al medir una magnitud cuántica. Nada hay en esos casos que establezca una conexión legal unívoca entre los estados anteriores y posteriores del sistema. Por esa razón es correcto afirmar que la teoría cuántica es parcialmente indeterminista.

Pero la situación en los regímenes no lineales difiere notablemente de la anterior. En ellos sí consta la presencia de leyes bien especificadas que regulan su conducta, pese a que la estructura de esas mismas leyes impone severas restricciones a nuestra facultad de avanzar pronósticos con su auxilio[1]. Tras un breve periodo, la inevitable imprecisión en los datos iniciales crece hasta engullir toda capacidad predictiva sobre la evolución del sistema. Sencillamente ocurre que, aun manteniéndose el lazo causal entre el pasado y el futuro, se pierde toda conexión calculable entre ellos. Esta suerte de consideraciones ha atraído nuevas y más cuidadosas miradas sobre las teorías de computabilidad y complejidad algorítmica. La computabilidad de un problema formalizado con precisión hace referencia a la posibilidad de resolverlo mediante un conjunto finito de instrucciones, aun cuando los números envueltos en él contuviesen un número infinito de cifras (piénsese por ejemplo en π). Un número se dice computa-

1 Cabe demostrar que en una ecuación de ondas (fórmula que relaciona las derivadas segundas espaciales y temporales de una función) en la que se inserten datos iniciales no derivables dos veces, es posible obtener resultados no computables, esto es, valores no calculables en un número finito de pasos [Pour-El y Richards, 1989].

ble, por consiguiente, si existe un algoritmo –un conjunto finito de reglas de cálculo no ambiguas– que lo determine, incluso aunque presente una cantidad ilimitada de dígitos.

Por su parte, la complejidad concierne a la clasificación del problema de acuerdo con la cantidad de operaciones elementales necesarias para su resolución. Casi es innecesario señalar que la complejidad de los problemas dinámicos no lineales sepulta la menor expectativa de efectuar predicción alguna. Este carácter impredecible −reiterémoslo− no depende de nuestra técnica de cálculo, ni cabe esperar reducirlo refinándolas sin límite, sino que se encuentra enraizado en la misma naturaleza de las operaciones a realizar. Todo esto probablemente hubiese divertido a Sócrates, cuya humildad en el reconocimiento de su ignorancia es rebasada con creces por la modestia con que deberían revestirse los científicos ante el hecho palmario de que, cuanto más descubrimos sobre el mundo, menos parecemos conocerlo.

Referencias

Albert, Daniel, Quantum mechanics and experience, Harvard, Harvard University Press, 1992.

Arnold, Vladimir, Teoría de catástrofes, Madrid, Alianza, 1987.

Aspect, Alain, Dalibard, Jean, Roger, Gérad, Experimental Test of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers Physical Review Letters 49, 1982, pp. 1804-1807.

Baker, Gerard, Gollub, Joshua, Chaotic Dynamics, Cambridge, Cambridge University Press, 1995

Bernard-Cohen, Ian, La revolución newtoniana y la transformación de las ideas científicas, Madrid, Alianza, 1983

Bohm, D., Causality and chance in modern physics, Londres, Rout. & Kegan, 1957

Brillouin Louis, La información y la incertidumbre en la ciencia, Méjico, Ed. Universidad Nacional Autónoma de Mejico, 1969

Briggs, John, Peat, Frederic, El espejo turbulento, Salvat, 1994

Bunge, M., Causality, Harvard, Harvard University Press, 1959

Gibbs, Josiah, Elementary principles statistical mechanics, New York, Dover, 1960

Gleick, James, Chaos. Makimg a new science, New York, Penguin Books, 1987

Gutzwiller, Michael, Chaos in classical and quantum mechanics, Berlin, Springer-Verlag, 1990

Haken, Herman, Synergetics. An introduction, Berlin, Springer-Verlag, 1984

Hanson, Hugh, Patrones de descubrimiento, observación y explicación, Madrid

Alianza, 1977
Hughes, Robert, The structure and interpretation of quantum mechanics, Harvard, Harvard University Press, 1989
Jackiw, Robert, Quantum meaning of classical field theory Review of modern physics 3 (49), 1977, pp. 681-706.
Laplace, Pierre Simon, Ensayo filosófico sobre las probabilidades, Madrid, Alianza, 1985
Lorenz, Edward, Deterministic nonperiodic flow Journal of Atmospheric Science 20, 1963, pp 130 y 448.
Mandl, Frederic, Shaw, Gerald, Quantum field theory, New York, Wiley, 1984
Mehlberg, Herbert, Time, causality and quantum theory, Dordrecht, Reidel, 1980
Nicolis, Girardi, Introduction to nonlinear science, Cambridge, Cambridge University Press, 1995
Penrose, Roger, La nueva mente del emperador, Barcelona, Mondadori, 1991
Penrose, Roger, El camino la realidad, Barcelona, Debate, 2006
Poincaré, Henri, Ciencia y Método, Buenos Aires, Espasa-Calpe Argentina, 1944.
Pour-El, Marian, Richards, Ian, Perspectives in Mathematical Logic, Volume 1, Berlin, Springer-Verlag, 1989.
Rasband, Stewart, Chaotic dynamics in non-linear systems, New York, Wiley, 1990
Reichenbach, Hans, Experience and prediction, Chicago, Chicago University Press, 1938
Reichenbach, Hans, Philosophic foundations of quantum mechanics, Berkeley, California University Press, 1944
Ruelle, David, Takens, Francis, On the nature of tubulence Communications on Mathematical Physics 20, 1971, pp. 167-192.
Salet, Georges, Azar y certeza, Sevilla, Ed. Alhambra, 1975
Sen, Daniel, Fields and/or particles, New York, Academic Press, 1968

Rafael Andrés Alemañ Berenguer
Dpto. CC. de Materiales, Óptica y Tecnología Electrónica
Edif. Torrevaillo (Despacho de A. Fimia)
Avda. Universidad, s/n., 03202-Elche (Alicante)
raalbe.autor@gmail.com