



RASC

Real Academia
Sevillana de Ciencias

Complejidad y conocimiento científico

discurso pronunciado por el

Ilmo. Sr. D.

Manuel Zamora Carranza

en el acto de recepción como académico numerario

el día 22 de mayo de 1991

y

contestación del académico numerario

Ilmo. Sr. D.

Rafael Márquez Delgado

COMPLEJIDAD Y CONOCIMIENTO CIENTIFICO

*Discurso pronunciado por el
Ilmo. Sr. D. MANUEL ZAMORA CARRANZA,
en el acto de su recepción como Académico Numerario
celebrado el 22 de Mayo de 1991*

PRESENTACION

Excmo. Sr. Presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias, Ilmas. Autoridades, Dignas Representaciones de las Reales Academias de Medicina, Buenas Letras y Veterinaria de Sevilla, Excmos. e Ilmos. Sres. Académicos, Señoras y Señores.

Sean mis primeras palabras de gratitud por la honrosa designación que los miembros de esta docta Academia han hecho recaer en mi persona. No es la vida del científico dada a los actos públicos y solemnes, más bien tiende a ser retraída y sencilla. Por ello, el ocupar esta tribuna implica más un ejercicio de profesionalidad, que una muestra de satisfacción. En mi caso, ténganlo a buen seguro, este acto reverdece mis mejores ilusiones e inquietudes científicas, por cuanto me va a permitir incorporarme a la densa labor que tiene por delante esta Academia, y hacerlo junto a las personas del prestigio científico y de la calidad humana que la forman. Muchas gracias.

La vitalidad que viene poniendo de manifiesto esta Academia de Ciencias, junto con su continuada apuesta por las cuestiones más palpitantes de la actividad científica, obligan a sus nuevos miembros a elegir los temas de sus discursos de ingreso entre los que presentan mayor actualidad en sus respectivos campos. Por otra parte, el rigor obligado de la disertación exige que dichos temas hayan adquirido un nivel de desarrollo suficientemente amplio para poder armonizar los problemas y sus soluciones de forma conveniente, transmitiendo con ello el mensaje de esperanza y de dignidad que está impreso en toda aventura científica. Por último, el carácter solemne del acto impide usar en la presentación las técnicas visuales (esquemas, diagramas, fórmulas matemáticas y químicas, etc.) tan queridas por todos los oradores científicos. Todo lo expuesto nos permite comprobar que los temas más frecuentes de estas tomas de posesión versan sobre la filosofía, la historia y la crítica del hecho y del pensamiento científico. No va a ser ésta una excepción, voy a hablar de «complejidad y conocimiento científico», pues el concepto de complejidad está emergiendo con

inusitada fuerza en el mundo de las ciencias, tanto naturales como sociales. Para ello, estructuraré esta conferencia en tres partes bien definidas. En la primera trataré de establecer, lo más rigurosamente posible, el origen y el contenido de la complejidad, cuestión que no resulta trivial, a la vista de lo disperso que se encuentra el material necesario para ello y la disparidad de puntos de vista con que se presenta. En la segunda, trataré de situar el concepto de complejidad dentro del marco del conocimiento científico, para ello haré una breve enumeración histórica, tratando someramente las obras de algunos autores importantes; y también realizaré algunas reflexiones acerca de la complejidad del pensamiento humano. Por último, discutiré dos importantes teorías físicas, la mecánica y la termodinámica clásicas, desde la perspectiva obtenida en las partes precedentes. Se trata de realizar un análisis, obligadamente conciso, del proceso científico mediante el cual se ha aumentado apreciablemente la complejidad de nuestro conocimiento de la materia, tanto a nivel de estructura como de comportamiento.

1. EL CONCEPTO DE COMPLEJIDAD

1.1. El origen de la complejidad

No falta quien considera a Paul Valéry como un brillante precursor del concepto de complejidad, pues ya en 1924 escribió en sus Cuadernos «el conocimiento produce como resultado que nada resulte sencillo, que nada sea natural, sino que nuestra impronta consiste en la absorción y el encubrimiento de lo complejo. Es por esta razón, por la que lo complejo llega a hacerse simple mediante la educación». Con independencia de la idea de anticipación que se le asigna, la frase es sugerente y aleccionadora.

La palabra complejidad, en la acepción que tratamos de darle ahora, apareció por primera vez en la literatura científica, en un famoso trabajo del Dr. Warren Weaver titulado «Ciencia y Complejidad», publicado en 1947. La fecha no es ociosa, muy al contrario, sitúa la escena científica en un punto especialmente importante de la historia reciente de la humanidad: El fin de la Segunda Guerra Mundial y el comienzo de la llamada «guerra fría». Tanto en una como en otra, las necesidades de producción de bienes y de nuevos armamentos —bien debido al esfuerzo de guerra, bien a la política hegemónica y disuasoria de las grandes potencias— intensificaron, de una parte, las inversiones para investigación y, de otra, generaron una importantísima interrelación entre científicos de los más diversos campos: matemáticos, físicos, químicos, biólogos, médicos, ingenieros, economistas, psicólogos, sociólogos, etc. La experiencia fue tan enriquecedora y fructífera que obliga a concluir a John D. Bernal en su *Historia Social de la Ciencia*: «También han sido muy importantes los efectos de unas ciencias sobre otras. Esto se ha producido en gran parte por la importación a un campo del saber de ideas derivadas de otro, a veces directamente y a veces por analogía. El probado valor de la observación analógica de las teorías científicas

ficas acentúa todavía más la unidad y las relaciones de las distintas ciencias y elimina la esterilidad que acompaña a la especialización.» Veamos ahora dos ejemplos.

Como primer ejemplo de este tipo de relaciones interdisciplinarias, podemos considerar la evolución de la sociología. Las estructuras teóricas de esta ciencia antes de la guerra eran excesivamente académicas y elevadamente formales, sin que cupiese en ellas aplicaciones concretas de interés. Con el impulso recibido en la guerra y después de ella, por simbiosis con otras ciencias experimentales, se desarrollaron las técnicas de investigación y de análisis estadístico. Así, la sociología ha llegado a sustituir las definiciones verbales y las argumentaciones genéricas por la medición y el cálculo. El resultado ha sido la diversidad de empleos que ahora posee y la gran importancia que han adquirido algunos de ellos, por ejemplo, la planificación urbana, la publicidad, la investigación de mercados, los sondeos de opinión, la sociología industrial, etc.

El segundo ejemplo nos acercará, aún más, al corazón de nuestro problema. En la época de la guerra se iniciaron los estudios sistemáticos sobre la propagación de ondas electromagnéticas, las líneas de transmisión, los elementos electro-mecánicos de control y las máquinas computadoras, los cuales se continuaron ampliando en la postguerra. Como consecuencia de ello se desarrollaron, entre otros, dos cuerpos de doctrina que habrían de tener una gran influencia en el futuro de la complejidad. Me refiero a la teoría de la Información y de la Comunicación de Shannon y Weaver y a la Cibernética de Robert Wiener. Aunque ambas teorías se refieren a aspectos puramente técnicos de la estructura y de la transmisión en circuitos eléctricos, su influencia sobre otras muchas disciplinas ha estimulado la introducción de nuevas y fructíferas ideas en muchas de ellas. Es preciso reconocer que la Cibernética se planteó, ya desde un principio, como una materia interdisciplinaria, tanto por lo intrincado del tema como por las connotaciones que presentaba con otras áreas del saber. Por ejemplo, en las famosas reuniones de la Fundación Macy intervinieron, entre otros, el cardiólogo Arturo Rosenblueth, el matemático John von Neumann, el psicólogo Kurt Lewin, el neurofisiólogo Warren McCulloch y el antropólogo Gregory Bateson. Fue una época apasionante como narra en su libro *Cibernética* el propio Dr. Wiener. El desarrollo de las nuevas técnicas de comunicación exigió el establecimiento de una teoría estadística de la información. Debido a ello, se enlazó con la mecánica estadística, primero, y con la termodinámica, a continuación. El discutido y, al parecer inagotable, concepto de entropía, tanto en la versión de Clausius como en la de Boltzmann, comenzó a situarse en el centro de las nuevas ideas, como una medida negativa de la información y de la comunicación, que es capaz de emitir o recibir el ser humano. Por ello, bien merece que le dediquemos, más tarde, una especial atención.

La reiterada confluencia de las diversas ramas de la ciencia había de tener profundas repercusiones, no sólo en cada una de ellas individualmente, sino también en la concepción científica del mundo y en las formas cognoscitivas que poseemos para alcanzarla. En efecto, comenzó a gestarse una revisión crítica, de carácter general, acerca de determinados preceptos clásicos, tales como la simplificación, el orden, la reversibilidad, el determinismo y la concepción geométrica del mundo. Los agentes

revisionistas más destacados fueron aquellos científicos cuyas ramas del saber no pueden permitirse ni simplificaciones de sus objetos, ni parametrizaciones sencillas de sus situaciones, ni reversibilidades temporales o espaciales a voluntad del observador. Junto a ellos, se alinearon los estudiosos de la mecánica cuántica con Werner Heisenberg a la cabeza y, recientemente, los investigadores que trabajamos en situaciones termodinámicas alejadas del equilibrio, llevando al frente a Ilya Prigogine. Este movimiento, aún invertebrado, se agrupó bajo la idea de la complejidad de la estructura y de los procesos del pensamiento y del mundo, tanto natural como artificial.

El paso del tiempo sólo ha venido a hacer más profunda la conciencia de la complejidad de la naturaleza. Nuevos problemas han venido a corroborar tal necesidad. Incluso las ciencias más clásicas se enfrentan con situaciones tan alejadas de sus experiencias tradicionales, que requieren un nuevo enfoque conceptual de las mismas. Los nuevos planteamientos resultan tan ambiciosos, que tratan de aproximarse a lo que se ha considerado siempre como el antípoda de la ciencia en las actividades creativas del hombre, es decir, el arte. La complejidad queda, pues, establecida como una actitud, como una llamada a la renovación científica y al rearme conceptual. Hasta el momento, carece de método, de instrumentos propios de examen e, incluso, de metas específicas. A lo largo de este trabajo iré perfilando la visión personal que he alcanzado de la complejidad; será, por tanto, el punto de vista de un científico prendado del rigor de la teoría y de la contundencia de la experimentación y que está convencido que la complejidad nació, en realidad, con el concepto de entropía.

1.2. La entropía

La teoría del movimiento de los cuerpos fué establecida por Sir Isaac Newton en su famosa obra Principios Matemáticos de la Filosofía Natural, publicada en 1687. La nueva teoría se convirtió pronto en el arquetipo de doctrina empírica y racional de la naturaleza, y fue utilizada sistemáticamente como ejemplo por los filósofos críticos y empíricos frente a los dogmáticos. Su ambicioso desarrollo posterior, sigue justificando el lugar preeminente que ocupa dentro de la ciencia y el carácter referencial que ha llegado a alcanzar.

En 1824 un joven ingeniero militar francés, Sadi Carnot, publicó un pequeño opúsculo titulado «Reflexiones sobre la Potencia Motriz del Fuego y sobre las Máquinas para Desarrollar su Potencia» en el que establecía las bases de lo que llegaría a ser el segundo principio que, junto a la conservación de la energía, conformarían la termodinámica. Una nueva rama del conocimiento —entre la física y la ingeniería— que tenía por objeto inicial el estudio de las máquinas térmicas. Casi dos siglos después, no deja de sorprender la lucidez con que el joven Carnot se planteó el problema. «El estudio de las máquinas —escribió— es del mayor interés, su importancia es inmensa, su empleo aumenta cada día. Parecen destinadas a producir una gran revolución en el mundo civilizado.» Así predijo Carnot lo que ha llegado a conocerse como «la revolución industrial».

A partir del trabajo de Carnot dos destacados científicos uno alemán, Rodolphe Clausius, y otro inglés, William Thomson, más conocido por Lord Kelvin, dieron una formulación al segundo principio de la termodinámica de manera completamente independiente. Preciso es reconocer que el tratamiento dado por Clausius fue matemáticamente más completo, lo que le permitió introducir una nueva magnitud: La entropía. Por el contrario, Lord Kelvin, más preocupado por los resultados experimentales obtenidos por entonces en el estudio de los gases, estableció la escala absoluta de temperatura.

Desde su nacimiento, la entropía posee un cierto componente abstracto y cosmológico que la distingue de las restantes magnitudes de la física. Por ejemplo, uno de los trabajos de Clausius se tituló «La entropía del universo tiende hacia un máximo». A partir de este criterio evolutivo, la tendencia de la entropía hacia un máximo, se propagó una penosa idea, afortunadamente ya superada: La muerte térmica del universo. Las interpretaciones dadas al concepto de entropía fueron muy variadas y sorprendentes, y repercutieron fuertemente en la vida cultura de la época. Así, por vez primera, el principio de aumento de la entropía proporcionó una dirección de evolución para nuestro mundo; la llamada «flecha del tiempo» quedaba ligada a la relajación de un cuerpo aislado. Las diferencias establecidas entre calor y trabajo permitían interpretar la entropía como una medida de la disipación o de la degradación de la energía o, lo que es igual, como una cota del mal empleo de nuestras posibilidades. Por último, la entropía permitía parametrizar nuestra capacidad de diferenciación de las diversas partes de un cuerpo o de cuerpos entre sí, lo que vino a llamarse el orden de los objetos bajo estudio. De esta forma, la entropía se presentaba como un ente físico de características muy peculiares y, en consecuencia, pronto se iniciaron los esfuerzos para incluirla en la línea de pensamiento de la mecánica.

Fué el propio Clausius uno de los primeros en tratar de englobar la termodinámica dentro del marco clásico de la mecánica, para lo cual inició el estudio de la teoría cinética de los gases junto a James C. Maxwell y Ludwig Boltzmann. Las interpretaciones alcanzadas con el estudio de los gases llegaron a ser muy enriquecedoras, pues introdujeron en física conceptos tales como «aleatoriedad», «probabilidad», «azar», «laguna de conocimiento» y «subjetividad» que, íntimamente ligados a la entropía, han llegado a conformar el concepto actual de complejidad.

Para Maxwell, la aleatoriedad del movimiento de las moléculas de un gas implicaba una laguna de conocimiento, y ello era debido a nuestra incapacidad material de conocer completamente sus parámetros. Resultaba, de esta forma, que la aleatoriedad no era una propiedad intrínseca de la naturaleza, como ahora entendemos, sino una subjetividad del observador. Como ejemplo, Maxwell describió su famoso «diablillo» que, conociendo las características dinámicas de cada molécula, era capaz de describir y de predecir el comportamiento del gas en forma determinista. Desgraciadamente el ser humano no posee los agudos sentidos del diablillo de Maxwell, por lo que sólo aprecia los comportamientos medios de sus moléculas. Con todo, Maxwell alcanzó la visión actual del segundo principio de la termodinámica en el sentido de

que no es un principio absoluto, sino dinámico, es decir, estadístico. Esto quedaría más tarde demostrado por la existencia de las fluctuaciones en los sistemas en equilibrio termodinámico.

Boltzmann, como Maxwell, aceptó que la aleatoriedad de los acontecimientos moleculares son una consecuencia directa de nuestra incapacidad de alcanzar el conocimiento pleno, es decir, la indeterminación deriva de la incompetencia del observador, y no es una propiedad intrínseca de la naturaleza. Como discuten Kuhn y Denbigh parece que Boltzmann comenzó a vislumbrar que la aleatoriedad y la probabilidad –que él introdujo en la física mediante su famosa fórmula que la relaciona con la entropía– son propiedades intrínsecas de la materia, a partir del planteamiento de la famosa paradoja de Loschmidt.

1.3. Complejidad y complicación

La mayor parte de los diccionarios consideran la complejidad como un sinónimo de la complicación, es decir, la calidad de estar compuesto por múltiples elementos. No obstante, algunos aclaran que «complejo da idea de mayor trabazón entre los elementos componentes». Esta distinción es crucial para comprender el contenido de la complejidad. En lo que sigue estudiaremos algunas características de estos dos conceptos.

Hemos visto que el contenido lingüístico de complicado corresponde a la superposición de los elementos constitutivos, siempre que entre ellos exista una trabazón escasa o nula. De esta idea deben destacarse dos aspectos: El primero se refiere a la propia existencia de los elementos constitutivos y el segundo se refiere a la acción mutua entre ellos.

Aceptar «a priori» la existencia de los elementos constitutivos obliga a considerar que, con ellos, debe poder hacerse no sólo la formación del todo, sino también el proceso inverso, es decir, su despiece. Esto nos lleva a que las partes deben ser reconocibles tanto cuando forman el todo, como cuando se encuentran aisladas. Este carácter de parte reconocible exige que la diferencia entre las propiedades del elemento aislado y agregado sean mínimas, lo cual asegura que, al menos, hay una determinación experimental que garantiza su reconocimiento. Este tipo de complicación corresponde al aspecto estructural del todo. A él corresponde, por ejemplo, la confección de un rompecabezas, en el que la concatenación de las partes no implica condicionantes mecánicos mutuos, sino simplemente la inteligibilidad de la imagen global.

Las trabazones entre los elementos de un todo pueden ser de muy diversos tipos. El más sencillo es el que se puede definir como «acción-reacción» en el que una influencia generada por un elemento sobre otro, es respondida por otra influencia igual y contraria, aplicada al primer elemento. De esta forma, cada parte está formada por el propio elemento, más las influencias generadas sobre él por los restantes. Así pues, siempre que la acción mutua entre elementos pertenece al tipo acción-reacción, podemos asegurar que el todo puede descomponerse en elementos y acciones indivi-

duales asignados a los mismos. Un ejemplo típico de la física lo constituye el sólido rígido, en el cual las fuerzas internas cumplen el principio de acción y reacción enunciado por Newton. Los restantes tipos de interacciones —siempre que sean débiles, tal y como estamos suponiendo— podemos considerarlas, sin gran error, descompuestas en una acción y una reacción consecuente.

Blaise Pascal escribió «la multitud que no se reduce a la unidad es confusión». Pues bien, la complejidad es, de hecho, el estudio de la confusión en el sentido dado por Pascal, es decir, el análisis de los sistemas que no aceptan una descomposición inmediata en elementos simples. Como en el caso de la complicación, la complejidad puede ser estructural o funcional. La primera corresponde a la configuración del objeto de estudio, bien porque no pueda descomponerse en partes, o bien porque dichas partes resulten irreconocibles cuando se presentan aisladas. Es el caso de una palabra fuera de su contexto, que mientras en el diccionario posee muchas y muy variadas acepciones, en una frase bien construida sólo cabe una de ellas, que puede no ser ni la primera que aparece en el diccionario, ni siquiera la más frecuente.

La complejidad funcional posee un doble aspecto que es preciso destacar: La primera es interna al propio objeto de interés, mientras que la segunda corresponde a la acción externa del objeto de estudio con el mundo que le rodea.

Como ya hemos visto, las acciones entre los elementos de un todo pueden ser fuertes y no pertenecer al tipo de acción-reacción, o, lo que es lo mismo, no pueden ser descompuestas y asignadas a cada una de las partes. Por consiguiente, la interacción debe tener entidad propia y constituye, de hecho, una nueva parte del todo, situada en un plano distinto al que pertenecen los elementos materiales. Esto sucede, por ejemplo, con la energía del enlace covalente en química, la cual es una propiedad del enlace mismo y no puede descomponerse entre los átomos que lo forman.

Las acciones entre el objeto de estudio y el mundo exterior tienen una particular relevancia porque incluyen las relaciones entre éste y el observador. Como el observador configura, también, un ente complejo, las relaciones entre objeto y observador deben presentar muchas y muy diversas facetas. Estas facetas dependerán de las condiciones de la observación y merecerán nuestra atención especial próximamente. Baste decir por ahora, que la visión que un observador tiene de un objeto depende del interés que pone y de su propia capacidad o, como escribe George J. Klir, «la complejidad de un objeto está en el ojo del observador».

Se ha escrito «la complicación es a la complejidad, lo que la energía es a la entropía» y de nuevo aparece la entropía en nuestro tratamiento. Pues bien, la sentencia expuesta distingue ciertos aspectos importantes de la complejidad. En primer lugar, es una propiedad intrínseca de los objetos, al igual que la complicación, pero a diferencia de ésta no acepta una ampliación por simple adición. La complejidad, por lo tanto, es una característica del objeto y de su función, que se crea dentro de él y se mantiene, debido a la imposibilidad natural del observador de penetrar en el cuerpo y realizar, dentro de él, una partición de su estructura o de su acción, de la que resulten porciones independientes u ortogonales. Sólo el diablillo de Maxwell podría hacer una cosa así, pero su existencia es puramente utópica.

1.4. Complejidad y simplificación

Las grandes teorías clásicas de la ciencia de la naturaleza han sido formuladas siempre mediante la simplificación o idealización de los objetos naturales. Es el caso, por ejemplo, de la mecánica cuando introduce el concepto de punto material. La simplificación, por lo tanto, se ha venido considerando como un punto de partida indispensable para el estudio de la materia.

La simplificación se sitúa, pues, en el mundo del conocimiento como un antagonista de la complejidad, o mejor, como el grado más bajo de la misma. Para estudiar su diferencia conviene que tratemos el mecanismo más frecuente de simplificación, que es la definición de sistema. Toda teoría científica se inicia definiendo el sistema que ha de ser el objeto de su estudio. Esto es así, debido a la imposibilidad que tenemos de aprehender toda la naturaleza en su conjunto. En efecto, delimitado un objeto, somos incapaces de conocer, estudiar e interpretar conjuntamente todas y cada una de sus propiedades. Nos vemos, pues, obligados a destacar algunas de ellas e ignorar el resto. Dicha selección define el sistema, que contiene únicamente un determinado número de elementos y de efectos. De esta manera, la elección del sistema conlleva la eliminación de partes constitutivas o funcionales del objeto elegido, porque carecen de interés para esa ciencia en particular. Este es el principio de la simplificación o idealización del objeto, con el que se trata de parametrizarlo y hacerlo tratable mediante un escaso número de variables. Conviene añadir que como el número de propiedades de cualquier objeto natural es muy elevado, la cantidad de posibles sistemas definibles a partir de un mismo objeto es también muy grande. Queda así definido un sistema como una de las imágenes parametrizables de un cuerpo material. Como escribe acertadamente Ross Ashby en su artículo «Algunas peculiaridades de los sistemas complejos»:

«Nuestro primer impulso es contemplar un péndulo y decir «éste es mi sistema». Este método, no obstante, tiene una desventaja fundamental. Todo objeto material contiene poco menos de infinitas variables y, por tanto, de posibles sistemas. El péndulo real no posee sólo longitud y posición, tiene también masa, temperatura, conductividad eléctrica, estructura cristalina, impurezas químicas, algo de radiactividad, velocidad, poder reflectante, tensiones mecánicas, una película superficial de agua condensada, contaminación bacteriana, forma, densidad, y así más y más. Cualquier sugerencia para estudiar «todas» las características carece de realidad y, en verdad, nunca se hace. Resulta necesario que elijamos y estudiemos los hechos que son importantes por algún interés especial que tengamos... El sistema ahora significa, no una cosa, sino una lista de variables».

Así pues, tanto a nivel estructural como a nivel de función, un sistema se forma siempre mediante la simplificación de un objeto real. En consecuencia, el sistema tendrá siempre un grado de complejidad menor que el objeto a partir del cual se formó. Pero debemos elegir la simplificación convenientemente. Los objetos materiales nos presentan diversos aspectos según nos acerquemos a ellos. Esto significa que los objetos materiales resultan ser multidimensionales, es decir presentan una gran

diversidad de formas y funciones. Pues bien, una simplificación adecuada exige que la reducción de la dimensionalidad del objeto se haga disyuntiva, es decir, ortogonal. Sin este último requisito, la contracción de su espacio de propiedades resultará ser una mutilación indeseable, mejor que una simplificación creadora.

1.5. Las estructuras de la complejidad

De todo lo expuesto hasta ahora, resulta evidente que el concepto de complejidad pertenece a su propia dimensión compleja y, por tanto, su estructuración implicará una apreciable dificultad. Esto ha motivado que solo existan tímidos intentos de clasificación y estructuración del concepto, de los cuales veremos a continuación algunos de ellos.

Warren Weaver, el introductor de la palabra en el léxico científico, estableció una división de la misma que posee cierto interés. Dividió el mundo en tres partes, a saber, la simplicidad ordenada, la complejidad ordenada y, por último, la complejidad desordenada.

La simplicidad ordenada se da en aquellos cuerpos en los que existen unos pocos parámetros (dos o tres) muy importantes para su estudio, mientras que los restantes carecen de interés o como tales se toman. En este caso, se crea un sistema bien definido que puede ser estudiado analíticamente dentro del más estricto determinismo. El caso corresponde al péndulo estudiado, cuando se destacan tres parámetros importantes: La masa, la longitud y el tiempo.

La complejidad ordenada corresponde a aquellos sistemas en los que existen una gran cantidad de variables, todas ellas con la misma jerarquía descriptiva. En este caso, la solución encontrada, tanto en las ciencias naturales como en las sociales, consiste en aplicar los métodos estadísticos, y alcanzar así valores promedios para el conjunto. Estos métodos requieren también que el número de variables a manejar sea muy elevado, e implican el establecimiento de la probabilidad individual de cada suceso. Resulta así, una descripción no analítica y básicamente aleatoria. Estas técnicas se usan tanto en la mecánica estadística como en los sondeos de opinión y en la medicina preventiva.

La complejidad desordenada se da en los objetos que poseen un número intermedio de variables, todas ellas con capacidades descriptivas similares. En este caso, los métodos analíticos son, en general, inaplicables y los métodos estadísticos resultan poco fiables, pues no disponen de suficientes datos para llevar a cabo su análisis probabilístico. A este tipo de complejidad pertenecen un buen número de problemas de la física, a pesar de lo cual carecen todavía de un método general de análisis.

Otro intento de establecer una estructura teórica de la complejidad se debe a G. Klir. Su teoría parte de una jerarquía de tipos epistemológicos de sistemas, mediante la cual trata de clasificarlos en categorías, según las variables que los describen. Estas variables pueden ser siempre divididas en dos tipos, las variables básicas o internas al sistema, y las variables de soporte o externas al mismo. La categoría más baja o nivel cero corresponde al «sistema fuente», constituido sólo por la serie de

variables de soporte o condicionantes externos. Este nivel representa la definición de un sistema concreto. Los sistemas de mayor jerarquía son los que, comprendiendo al nivel inferior, contienen alguna información adicional que los caracteriza. Por ejemplo, el nivel uno se conoce como «sistemas de datos» y corresponde al sistema fuente más el conjunto de valores de las variables básicas que expresan los estados reales del sistema. El nivel dos o «sistema generativo» responde a la imposición de una o varias ligaduras, a través de las variables de soporte, con lo cual se generan relaciones entre las variables básicas.

A partir de la clasificación anterior, Klir establece los dos principios generales de la complejidad de los sistemas:

Primer principio general. La complejidad de un sistema cualquiera es proporcional a la cantidad de información requerida para describirlo. El término «información» se usa aquí sólo en sentido sintáctico. Por tanto, cuanto mayor sea el nivel epistemológico de un sistema, tanto mayor será su complejidad.

Segundo principio general. La complejidad de los sistemas será proporcional a la cantidad de información necesaria para resolver toda incertidumbre asociada con él. Aquí la información se considera como una medida de la incertidumbre y puede tomar la forma dada por Shannon en su teoría de la información. Se utiliza para distinguir la complejidad de los sistemas dentro del mismo nivel epistemológico.

Una última mirada sobre las diferentes perspectivas con que se ha tratado de estudiar la complejidad, nos lleva al análisis que hace Jorge Wagensberg de las relaciones entre el objeto y su entorno. Para llevarlo a cabo es preciso definir varias magnitudes, lo que haremos muy sucintamente:

La complejidad del sistema, que puede definirse como la cantidad de información contenida en el mismo. Esta información dependerá de la variedad estructural y funcional del sistema.

La incertidumbre del entorno, que no es más que la propia complejidad del entorno, definida de manera similar a la del sistema.

La capacidad de anticipación del sistema, que expresa la cantidad de información que, saliendo del sistema, no es recogida por el entorno, por no ser sensible a ella. Debe considerarse como el error de transmisión entre el sistema y su medio exterior.

La sensibilidad del entorno, que expresa el error inverso al anterior, es decir, la insensibilidad del objeto para codificar toda la información que recibe del entorno.

Definidos los parámetros anteriores, Wagensberg formula su identidad fundamental, a partir de la teoría de la información, donde los flujos de información en ambas direcciones deben tener el mismo valor. Su formulación es la siguiente: La complejidad del sistema menos su capacidad de anticipación con respecto a su entorno, es igual a la incertidumbre del entorno menos su sensibilidad con respecto al sistema.

A partir de este principio podemos hacer el siguiente análisis de los sistemas. Cuando un sistema se somete a ligeras solicitudes externas, trata de adaptarse a las nuevas circunstancias de una manera continua. Si aumentamos las solicitudes, llega un momento en el cual la adaptación es imposible y se produce una transformación

brusca. Es la transición a un nuevo estado o autoorganización. Desde el punto de vista de la identidad de Wagensberg, podemos decir que el aumento de la incertidumbre del entorno puede ser compensado por los errores de la transmisión, es decir, por la capacidad de anticipación del sistema o por la propia sensibilidad del entorno. Para grandes aumentos de la incertidumbre, es preciso modificar la complejidad del sistema como único medio de mantener la identidad. Como ejemplo puede considerarse la cesión de calor a un sólido, ante él, el sólido se adapta aumentando su temperatura, hasta que, llegado a la temperatura de fusión, se autoorganiza como un líquido, fundiéndose.

2. EL PENSAMIENTO CIENTIFICO

2.1. El período clásico

En el estudio del conocimiento del ser humano existe, como en otras muchas ramas de la ciencia, un punto de inflexión, a partir del cual la doctrina consigue su propia identidad y su contenido alcanza la demarcación que corresponde a la visión moderna de la misma. En el caso del pensamiento científico esto sucedió entre los siglos XVII y XVIII con la aparición del empirismo moderno, que nació en Inglaterra de manos de John Locke (1632-1704), George Berkeley (1685-1753) y, sobre todo, de David Hume (1711-1766). La filosofía desarrollada antes de esas fechas se conoce comúnmente como dogmática, pues fue, por esencia, incapaz de atacar el problema del conocimiento. En efecto, todas las tendencias existentes tenían en común la aceptación de dos verdades indiscutidas: La primera aceptaba la posibilidad de conocer las cosas mediante el conocimiento puro. La segunda creía en el conocimiento real de las cosas mediante la experiencia. El análisis de estas dos proposiciones, tomadas como verdades «a priori» por el antiguo régimen, propició la aparición de la teoría del conocimiento como una rama de la filosofía moderna.

Preguntas tales como las siguientes: ¿Cómo podemos justificar nuestras teorías? o ¿Cómo podemos valorar las afirmaciones de largo alcance de teorías rivales? o, por fin, ¿En qué consiste una justificación?, establecieron con sus repuestas lo que hoy llamamos la teoría del conocimiento científico. El camino no ha sido fácil, aún hoy día se siguen discutiendo determinados aspectos de la misma, pero nosotros nos detendremos, en breves destellos, en lo que consideramos como aportaciones más destacadas.

En su obra «Tratado acerca de la Naturaleza Humana», David Hume reconoce la existencia de hechos concatenados en nuestra experiencia, de forma que estas regularidades pueden llevarnos a verdades de dos tipos: Las «relaciones de ideas» que corresponden a verdades implícitas en el propio lenguaje y que llamó «verdades lógicas». Y los «juicios de hecho» que relacionan acontecimientos entre los cuales se da una relación causal o, como él la llamó, una «conexión necesaria». Las primeras relaciones fueron aceptadas como verdades ligadas al propio significado de las pala-

bras, por ejemplo, la proposición «todo cisne es un ave» es cierta por cuanto el diccionario define al cisne como «ave palmípeda, etc...». Respecto a las segundas, Hume consideró demostrado que, siendo posible el conocimiento empírico de las cosas y de los hechos, la conexión necesaria entre la causa y el efecto no podía justificarse a partir de la experiencia. Queda así establecido el llamado problema de la inducción, que se enuncia así: Es imposible inferir inductivamente de un caso particular –por muy observable que sea– una regularidad general o una ley universal. Por aclarar las ideas veamos un ejemplo clásico, la sentencia «todos los cisnes son blancos», no queda confirmada porque encontremos un cisne blanco.

El paso siguiente, en este escueto repaso de la teoría del conocimiento, corresponde a Emmanuel Kant, buen conocedor de las teorías científicas de su época. En sus primeros escritos, Kant trató de interceder en las frecuentes disputas científicas entre los seguidores de Newton y los de Leibniz. A partir de 1770 –despierto, según confesión propia, del «sueño dogmático» gracias a la lectura de Hume– inició su periodo crítico, del cual su obra básica es «la Crítica de la Razón Pura», publicada en 1781. En ella trata de resolver la tremenda contradicción surgida del choque entre la espléndida realidad de la ciencia, en particular de la mecánica, y el excepticismo de Hume. ¿Cómo es posible –se cuestiona– alcanzar ese nivel científico, si no somos capaces de justificar la verdad de sus leyes? La respuesta de Kant a esta pregunta consiste en considerar que los juicios de hecho –que él llama sintéticos– pueden ser «a priori», es decir, universales, necesarios y sin ninguna excepción posible. Es más, culmina Kant, todas las leyes de la ciencia son juicios sintéticos «a priori». Con ello, Kant consiguió dos fines, el primero fue incorporar las verdades matemáticas al mundo de las verdades lógicas o relaciones entre ideas, y el segundo, asegurarse que las leyes de la ciencia, si bien no son comprobables mediante experiencias positivas, si resultan sensibles a las negativas. Así, la sentencia del ejemplo anterior, «todos los cisnes son blancos», pierde su vigencia al encontrar un cisne negro.

El siglo XIX se caracteriza por la falta de grandes filósofos interesados en el estudio del conocimiento científico, lo que obligó a los propios científicos a tratar de justificar los nuevos descubrimientos y a hacer razonables las intuiciones que ellos sugieren. El más importante de ellos fue un matemático francés llamado Augusto Comte. Comte fue el creador del positivismo; una ambiciosa doctrina, impregnada de maquinismo, que pretendió ser la regeneradora de la sociedad occidental. Para ello, pregonaba que la alternativa al antiguo régimen habría de ser una sociedad industrial, fundada y organizada según principios científicos. A tal interpretación de la historia llegó a partir de su famosa ley de los tres estados, según la cual todo conocimiento humano pasa por tres etapas: La teológica, la metafísica y, por último, la positiva. Para Comte la civilización de su tiempo había alcanzado la tercera etapa, es decir, el nivel científico-industrial propio del positivismo. En cuanto al conocimiento científico, Comte fue de un fenomenalismo radical, para él no existía la sustancia, sólo aquello que se presenta y manifiesta por medio de la experiencia.

2.2. El siglo veinte

En 1898 Lord Kelvin presentaba ante la Real Sociedad inglesa su visión acerca de la situación de la física en aquel momento. En el frondoso lenguaje de la época, Lord Kelvin señaló que dos grandes nubarrones se cernían sobre la estructura teórica de la termodinámica, a la que tanto había contribuido él mismo. La primera nube se refería a la distribución espectral de la radiación térmica del cuerpo negro, que resistía imperturbable todos los intentos de justificación teórica. La segunda correspondía al conjunto de propiedades, cada vez más incoherentes, que se le venían asignando al éter; el último de los «fluidos» que aún permanecía en la estructura de la física teórica. El brillante diagnóstico de Lord Kelvin se vio categóricamente confirmado poco después, ya en el siglo XX, por la aparición de dos cuerpos de doctrina que desencadenaron la llamada «crisis de la ciencia clásica» y que se conocen como la mecánica relativista y la mecánica cuántica, respectivamente.

En 1900 Max Planck, un físico alemán, llegó a justificar las curvas espectrales del cuerpo negro mediante una sorprendente hipótesis: Los cuerpos no pueden emitir cantidades arbitrarias de energía radiante, sino únicamente paquetes de ondas, llamados «cuantos», cuya energía se mantiene proporcional a la frecuencia de la radiación. Así nació la mecánica cuántica, cuya aparición conmovió intensamente el mundo de la ciencia.

En 1905 un joven físico alemán, Albert Einstein, realizó tres publicaciones diferentes en el campo de la física: La explicación del movimiento browniano, la justificación del efecto fotoeléctrico y, por último, la teoría de la relatividad especial. Con el primer trabajo confirmó la estructura corpuscular de la materia; con el segundo, por el que le concedieron el premio Nobel en 1921, corroboró la hipótesis cuántica de Planck y con el último estableció una nueva concepción del universo. La teoría de la relatividad mostró lo innecesario del concepto de éter, siempre que se abandonara la idea del tiempo absoluto. Los antecesores inmediatos de esta teoría fueron el experimento crucial llevado a cabo por Albert Michelson y Edward Morley entre los años 1881 y 1887, y la interpretación dada a éste por el holandés Hendrik Lorentz. Como señalaba Einstein en su artículo «la velocidad de la luz medida por observadores situados en diversos sistemas de referencia inerciales tiene siempre el mismo valor, con independencia de que tales observadores se muevan unos respecto a otros». Poco después, y sobre la base de consideraciones matemáticas, el francés Henri Poincaré hizo una sugerencia similar. La teoría de la relatividad estaba llamada a jugar un papel esencial en la moderna concepción del mundo.

Pero no sólo fue la física la única que sufrió grandes cambios en la frontera del siglo, otras muchas ramas del saber sufrieron importantes avances, condicionados por hechos de singular importancia. Así, en 1897, Ivan Petrovich Pavlov publicó su famosa «Conferencia acerca de la Actividad de las Principales Glándulas Digestivas» y en 1900 Sigmund Freud publicó «La interpretación de los sueños». Igualmente, en 1897, David Hilbert elabora la noción de cuerpo y, más tarde, el método axiomático para el establecimiento de diversas geometrías, y en el borde del siglo surgieron la

lógica formal, que se desarrolló desde los trabajos de George Boole hasta los famosos «*Principia Mathematica*» de Alfred Whitehead y Bertrand Russell, y la teoría de los conjuntos de George Cantor. En 1893, Alfred Werner estableció la teoría de la coordinación de los compuestos complejos en química. Henri Becquerel descubrió la radiactividad en las sales de uranio y en 1898 el matrimonio formado por Marie y Pierre Curie consiguieron aislar primero el polonio y después el radio, a los tres se les concedió conjuntamente el premio Nobel en 1903. Por otra parte, en 1897, Eduard Buchner demostró que los principios contenidos en las células de la levadura eran capaces, por sí mismos, de hacer fermentar a los azúcares, abriendo así el camino de la bioquímica y, a partir de 1913, Thomas Hunt Morgan publicó sus investigaciones sobre los genes, lo que permitió conocer los mecanismos íntimos de la herencia y de las mutaciones.

Todo lo expuesto lo ha sido con la intención de demostrar la importancia que tiene, en el campo de la ciencia, la entrada en el siglo XX. Este tremendo caudal de nuevos conocimientos y su posterior evolución, hubieron de repercutir decisivamente en la filosofía de la ciencia y en la concepción del pensamiento científico. El resultado de todo ello, como hemos visto, ha sido una generalización de los métodos de la ciencia, que ha llevado, no sólo al concepto de complejidad, sino a la idea de hacer una ciencia de la propia ciencia. Pero pasemos a describir la evolución del pensamiento científico en nuestro siglo, usando la misma técnica de destellos puntuales que venimos siguiendo.

A partir de 1930, y como reacción al idealismo alemán, surgieron dos movimientos empiristas, uno en Viena y otro en Berlín independientemente. Con el paso del tiempo el predominio recayó sobre el primero, llamado «el Círculo de Viena», cuyo empirismo lógico llegó a tener cultivadores en todos los países con tradición científica. El círculo de Viena se formó alrededor del profesor Moritz Schlick y contó con prestigiosos colaboradores como Friedrich Weismann, Kurt Gödel, Otto Reurath y Rudolf Carnap, además de Hans Reichenbach y Richard von Mises que procedían del círculo de Berlín, así como otros importantes representantes del pragmatismo americano, como Ernest Nagel.

El empirismo lógico es una prolongación de la tradición empirista de Hume y de Kant, sobre la que influyeron también los escritos de Ludwig Wittgenstein y de Bertrand Russell. Pero la mayor influencia les llegó desde el mundo científico, de figuras tales como Planck y Einstein. Como doctrina excluyeron completamente la metafísica y adoptaron un empirismo radical, que sólo permitía la lógica formal como instrumento de análisis. En palabras de Reichenbach: «Todo lo que sabemos sobre el mundo es obtenido por la experiencia y las manipulaciones de datos empíricos son puramente tautológicas, analíticas». Para los empiristas lógicos carecía de significado toda afirmación acerca de la realidad, ya que no existe la posibilidad de verificación preliminar. La única justificación posible en el caso de una estructura teórica —que debe ser siempre axiomática y no intuitiva— es «a posteriori» y merced a la experimentación. Así justificaron, por ejemplo, el abandono del determinismo y de los conceptos absolutos de espacio y de tiempo.

Dos nuevos aspectos consagraron definitivamente los empiristas lógicos: El primero es un nuevo tipo de proposición, el argumento de probabilidad que comprende dos tipos, aquel que se refiere al acuerdo entre una hipótesis científica y una determinada evidencia, llamada probabilidad lógica, y aquel que corresponde a la frecuencia de aparición de un acontecimiento dentro de una secuencia de ellos, o probabilidad frecuencista. El segundo se refiere al propio lenguaje de la descripción científica, centrando la demarcación entre enunciados científicos y no científicos en el criterio de verificación. Para ellos, el ámbito de la ciencia y del significado coinciden.

Coetáneo de los empiristas lógicos es Karl Popper, el cual modifica el criterio de verificación en el sentido de emplear la falsación, es decir los enunciados o hechos que afirman la falsedad de un enunciado. Para Popper las teorías científicas son contingentes y sólo contienen afirmaciones acerca de sus falsadores y nada dicen de aquellos otros enunciados que resultan permitidos.

A partir de este momento, la teoría del conocimiento científico se embarca en una corriente situada entre el historicismo y el relativismo. Thomas Kuhn mantiene que el conocimiento científico no es acumulativo, sino que cada época establece su propio marco teórico mediante una revolución en la que se establecen sus propios paradigmas, es decir, teorías, metodologías, etc. Para Kuhn la ciencia no tiene fin en sí misma, y carece de sentido hablar de progreso. En esta misma línea, se encuentra Imre Lakatos, que define sus programas de investigación como cadenas de teorías con los mismos principios, que forman el núcleo común, y unos enunciados específicos de cada una, que conforman el cinturón protector. La reforma de las teorías requiere la eliminación de enunciados del núcleo común por medio de justificaciones negativas. Por último, Paul Feyerabend en su «Tratado contra el Método» alcanza el mayor grado de relativismo, hasta el punto que se le conoce como el anarquismo epistemológico. Para él, no cabe ningún mecanismo de justificación, ya que ningún punto de vista es superior a otro, y no existen valores que permitan establecer la comparación entre teorías. Su famosa expresión «todo vale» contiene su pensamiento.

En la actualidad está surgiendo una nueva visión estructuralista de las teorías científicas creadas por el americano J. C. Sneed y otros. El estructuralismo científico considera que las teorías son estructuras abstractas que, en sí mismas, no son verdaderas ni falsas, en consecuencia no son ni demostrables ni falsables, en el sentido de Popper. Esta visión del conocimiento científico está ahora creándose y no parece apropiado juzgar aún su extensión.

2.3. Determinismo y causalidad

El desarrollo histórico del pensamiento científico, desde el empirismo de Hume hasta el anarquismo epistemológico de Feyerabend, nos ha proporcionado un preciado bagaje de conocimientos, el cual se centra en nuestra capacidad para justificar las teorías sobre la naturaleza. En todos los casos, el objeto de estudio ha sido la comprobación de la verdad de los enunciados científicos, sin que se haya mostrado es-

pecial interés acerca de la conexión entre los enunciados que dan origen a una teoría y los resultados que ésta llega a alcanzar. En este sentido, debemos entender como teoría científica al conjunto de proposiciones lógicas y matemáticas que desarrollan unos enunciados científicos básicos, los cuales tratan de relacionar y de explicar un determinado orden de fenómenos naturales. En lo que sigue, trataremos de establecer una interrelación, lo más clara posible, entre los enunciados que generan una teoría y los resultados que ésta es capaz de conseguir. Nos basaremos, para ello, en las reglas para bien razonar que, en 1637, estableció René Descartes en su «Discurso del Método»:

«La primera no aceptar nunca como verdadera ninguna cosa que no conociese con evidencia que lo era....

La segunda, dividir cada una de las dificultades que examinase, en tantas partes como fuera posible y como requiriese su mejor solución.

La tercera, conducir por orden los pensamientos, comenzando por los objetos más sencillos, para ir ascendiendo, poco a poco, como por grados, hasta el conocimiento de los más complejos....

La cuarta, y última, hacer en todo enumeraciones tan completas y revisiones tan generales, que se adquiriese la seguridad de no omitir nada».

Las respetables normas de Descartes conservan todavía una envidiable lozanía, y, según ellas, debemos estudiar primero lo más simple para llegar a conocer lo más complejo. Iniciemos, pues, nuestra revisión estudiando los primeros pasos de la ciencia, para llegar a entender mejor sus estudios más elaborados.

Resulta fácil comprobar que los principales enunciados científicos, los que motivaron los grandes cuerpos de doctrina de las ciencias de la naturaleza, fueron siempre enunciados causales. Es decir, relaciones jerárquicas entre diversos conceptos o hechos, que establecen entre ellos una calidad o categoría, y que llegan a constituir verdaderas relaciones doctrinales. Las que, para Hume, constituían las conexiones necesarias. En ellas, la causa es el motivo u origen de que se produzca el efecto, y éste es la consecuencia del acontecimiento llamado causa. Con estos antecedentes, puede establecerse una primera relación causal del siguiente modo: «Una causa produce siempre un efecto», de donde se infiere una consecuencia excepcionalmente importante: «Ningún efecto es anterior a su causa». Con ello, se establece una jerarquía de anticipación entre causa y efecto.

Un enunciado causal sencillo es siempre, dado el carácter complejo de nuestro mundo, una consecuencia de un proceso de simplificación del mundo real, el cual puede ser, como lo ha sido en algunos casos, especialmente creativo y brillante. Pero este tipo de enunciado resulta siempre riguroso y categórico. Riguroso porque carece de alternativa a la causa, al efecto y a su interrelación, y categórico porque, al ser único, es de cumplimiento obligado en todos los casos. Este conjunto de circunstancias conduce, sin duda, a una concepción del mundo condicionada por la necesidad de satisfacción y de predicción que establece el enunciado causal que la origina. Este tipo de necesidad, rigurosa y categórica, se conoce habitualmente como determinismo, el cual aparece como una consecuencia directa de la existencia de una ley causal úni-

ca. Como ejemplo de excepcional importancia de este tipo de comportamientos, podemos tomar la mecánica clásica que, a partir de la ley del movimiento de Newton, llevó a escribir, en 1812, a Pierre Simon, Marqués de Laplace, la frase máxima del determinismo mecanicista:

«Una inteligencia que conociese todas las fuerzas que actúan en la naturaleza en un instante dado, así como las posiciones instantáneas de todas las cosas del universo, estaría capacitada para englobar, en una sólo fórmula, los movimientos de los grandes cuerpos, tanto como los átomos más ligeros del mundo, siempre que su intelecto fuese lo suficientemente poderoso como para someter a un análisis todos los datos; para ella no habría nada incierto, el futuro y el pasado estarían expuestos ante sus ojos».

De lo dicho se sigue que un enunciado causal único conduce inevitablemente al determinismo, pues aplicada una causa queda determinado su efecto. Por consiguiente, parece claro que una primera simplificación conduce a leyes causales únicas y éstas nos llevan al determinismo. Ahora bien, la inversión de este mecanismo resulta completamente gratuita, el determinismo es un efecto y, como tal, no puede tomarse como origen de la causalidad y, ni siquiera, confundirse con ella. Caben, como veremos, otras formas de enunciados causales que pueden conducir a visiones del mundo muy alejadas del determinismo. Lo cierto es que nuestro mundo natural ha resultado ser no determinista, aunque pueda parecerlo en una primera visión superficial, pero a ningún observador actual se escapa que las estructuras reales de la naturaleza poseen una variedad y una incertidumbre en verdad muy alejadas del rigor determinista. Una visión apropiada de esta nueva concepción del mundo, mucho más elaborada y más finamente discernida, podemos encontrarla en la siguiente frase de Ilya Prigogine:

«El hecho de que nos encontremos en un mundo abierto, en el que el pasado es presente y acumulativo, en el que el presente existe pero no el futuro, es una de las respuestas a la pregunta acerca del significado del conocimiento y del valor ético de la ciencia. El “conocimiento” ya no es simplemente el conocimiento del pasado, es el descubrimiento. Y ¿Qué es el futuro?. El futuro no existe todavía, el futuro está en construcción, una construcción que continua realizandose en todas las actividades existentes. El propio espacio-tiempo es un resultado de esta construcción. (...). Por ello, el mundo en que vivimos, el mundo conveniente, contiene una ruptura en la simetría temporal y está gobernado por leyes que poseen, en sí mismas, una ruptura de la simetría del tiempo».

2.4. Complejidad y casualidad

Hemos discutido en el capítulo anterior la complejidad del mundo y, en particular, la complejidad de nuestra mente. ¿Cómo, entonces, es posible describir un mundo complejo mediante leyes simples?, ¿Cómo podemos aceptar, en nuestra propia complejidad, enunciados simples y solitarios? La respuesta es muy sencilla, en general arropamos esos enunciados empíricos con todo tipo de razonamientos lógicos

y matemáticos, estudiando todas las posibilidades de aplicación y buscando nuevas formas de ver los problemas, formas más sencillas, formativas y enriquecedoras del razonamiento. En resumen, lo que hacemos es complicar nuestra ley original, pero no por ello aumentamos nuestro conocimiento de la realidad. El mejor ejemplo es la mecánica clásica en la que los tratamientos de D'Alembert, Lagrange, Hamilton y Jacobi han permitido con ejemplar grandiosidad acercarnos al movimiento de los cuerpos con nuevas visiones más claras y aleccionadoras, pero al final seguimos hablando del punto material y de sus ligaduras idealizadas. La realidad debe ser conocida y estudiada y, para ello, debemos incorporar cada vez mayor cantidad de información en nuestras leyes.

En 1843, Jaime Balme escribió en su obra «el Criterio»: «Un entendimiento claro, capaz y exacto, abarca el objeto entero; le mira por todos los lados, en todas sus relaciones con lo que le rodea». Siguiendo esta idea, debemos tratar de mejorar nuestras leyes causales, con el fin de aumentar nuestra capacidad de descripción de la naturaleza, tratando de captarla con todos sus atributos. Ahora bien, tanto el mundo que nos rodea como nuestro propio pensamiento deben aceptarse como complejos; por consiguiente, resulta inevitable que también lo sean los enunciados causales que manejamos. Pero, ¿Qué debemos entender por enunciados causales complejos? Por enunciados causales complejos debemos aceptar aquellas combinaciones de enunciados causales simples, que satisfacen las condiciones de ser simultáneos y mutuamente excluyentes. Esto es, que son de aplicación en un instante dado a un mismo hecho u objeto, de tal forma que la satisfacción de uno de ellos, implica la exclusión del otro. En la lógica, la combinación de proposiciones que cumplen las mismas condiciones impuestas a nuestros enunciados causales, conforman una proposición disyuntiva exclusiva, la cual cumple ciertas propiedades: La primera se refiere a la unicidad de uno de sus elementos, mientras que la segunda se centra en las alternativas del elemento no único, que deben cubrir la totalidad de las posibilidades existentes. Nuestras leyes causales deben satisfacer también estas condiciones.

Las alternativas que nos proporcionan los enunciados causales que venimos estudiando, requieren la existencia de relaciones entre ellos, que nos permitan decidir cual debe elegirse en cada caso o cual es el verdadero. Tales relaciones, que llamaremos relaciones internas, nos permiten establecer una jerarquía entre los diversos enunciados posibles. Cuando una de tales relaciones internas sea una comprobación experimental, llega a establecer la oportunidad de uno de los enunciados. Estas relaciones internas deben entenderse como enunciados sobre enunciados, por lo que su verdad no puede verificarse directamente. Por ello, este tipo de relaciones, propias del pensamiento complejo, permite una serie de libertades al hecho o al objeto bajo estudio, que son una fuente de incertidumbre en su proceso descriptivo. Veamos un ejemplo: La pareja de enunciados «La vida es el cultivo del espíritu» y «La vida es el culto al cuerpo» son simultáneos y excluyentes, y la relación interna que se establezca entre ellos, es decir, la jerarquía con que se tomen, separa a la figura de D. Quijote de la de su escudero Sancho.

De todo lo dicho, se infiere que la complejidad del pensamiento pasa por un entramado formado por proposiciones causales simultáneas, ordenadas mediante un conjunto de relaciones internas. Las relaciones internas forman esa jerarquía de valores de la que tanto hablan las estructuras morales y a la que tan proclives somos los educadores, ya que permiten distinguir, entre otras cosas, lo esencial de lo accesorio.

2.5. El conocimiento complejo

Hemos estudiado que la formación del conocimiento complejo se hace mediante la conexión, por medio de relaciones internas, de enunciados básicos o leyes causales simultáneos y excluyentes. Estos enunciados básicos, convenientemente guarnecidos por verdades lógicas y matemáticas, conforman un cuerpo de doctrina o teoría. Pasemos ahora a estudiar, en el caso más simple de dos enunciados, la forma en que dichos enunciados pueden presentarse.

Se han establecido como propiedades de nuestros enunciados, la unicidad de uno de sus elementos y la integridad del otro. Junto a esto, es preciso realizar algunas consideraciones acerca de la reversibilidad de todo enunciado causal. Como es patente, toda causa es anterior a su efecto, lo cual implica una asimetría temporal en todo enunciado causal. En efecto, conocida en un instante la causa, el efecto puede predecirse y, posteriormente, confirmarse de forma experimental. Por el contrario, conocido un efecto en un momento dado, la causa sólo puede ser presumida y, en modo alguno, puede ser confirmada experimentalmente. Esta ruptura de la simetría temporal de toda ley causal tiene una singular importancia en el pensamiento complejo y, naturalmente, en los enunciados simultáneos y excluyentes que estudiamos. En ellos, pueden darse dos casos, que el elemento único y compartido sea la causa o bien que lo sea el efecto, detengámonos en ellos:

Cuando se comparte la causa y ésta es conocida, su relación con los efectos posibles es de predicción y, como se ha dicho, cabe una posterior confirmación experimental. Por el contrario, si se conoce el efecto, sea cual fuere, la causa queda perfectamente determinada, por ser única. Así pues, la inversión de este tipo de enunciado no introduce ninguna incertidumbre añadida acerca del conocimiento adquirido del sistema. A este tipo de enunciados le llamaremos de causa común.

En el caso de que lo compartido sea el efecto el problema es diferente, pues diversas causas provocan un mismo efecto. Si, en cierto instante, las causas son conocidas, este tipo de enunciado implica una predicción determinista del efecto común, lo que hace superflua la comprobación experimental. Por el contrario, si se conoce el efecto, la asimetría temporal del enunciado genera una fuerte incertidumbre acerca de la causa que lo provocó, lo cual implica la existencia de relaciones internas en el problema concreto bajo estudio. En este tipo de enunciados es preciso disponer, además, de cláusulas de equivalencia o de igualdad de las causas. A esta clase de enunciados, más subjetivos y complejos que los anteriores, le llamaremos de efecto común.

Cuando los enunciados simultáneos y excluyentes son más de dos, el problema se complica drásticamente, ya sean enunciados de causa común o de efecto común o se presenten ambos mezclados. La inteligencia humana posee una capacidad considerable para entender relaciones duales, pero se muestra muy limitada para superar la incertidumbre que genera la existencia de tres o más sujetos. El lenguaje ordinario es un buen ejemplo de ello, somos capaces de enumerar con precisión los sentimientos y las pasiones que aparecen entre dos personas y, sin embargo, la incorporación de una tercera provoca tal complejidad, que la literatura está llena de ejemplos de estudios diversos respecto a sus interrelaciones, el aforismo popular «dos son compañía, tres multitud» parece establecido para darnos la razón. Es por ello, por lo que en las ciencias naturales resultan recalcitrantes los problemas con tres o más sujetos. En estos casos los comportamientos resultan siempre complejos, y así debe ser también el cuerpo de doctrina que los trate.

El conjunto de enunciados o leyes causales simultáneas forman un circuito de líneas de razonamiento en paralelo, que están unidas entre sí por relaciones internas. El resultado de todo ello, es el entramado característico del pensamiento complejo, en el que no hay unidad reticular. Dicho entramado aumenta considerablemente las alternativas y la incertidumbre, por requerir un número elevado de relaciones internas de enlace. El pensamiento científico clásico se caracteriza por un número pequeño de leyes causales, lo que le confiere, en general, escasa incertidumbre.

En otro orden de cosas, la complejidad aumenta mucho cuando el pensamiento se dedica a analizar otras formas creativas de la actividad humana, siendo las más complejas de todas aquellas que expresan las inquietudes más profundas del ser humano, es decir, la religión y el arte. Este último, es una de las actividades humanas más complejas y, en consecuencia, carece de método y tiene por norma la subjetividad y la incertidumbre. Como ejemplo de complejidad extrema veamos la visión de la poesía que nos da el poeta León Felipe:

«Deshaced ese verso.
Quitadle los caireles de la rima,
el metro, la cadencia,
y hasta la idea misma.
Aventad las palabras,
y si después queda algo todavía,
eso
será la poesía».

3. FÍSICA Y COMPLEJIDAD

3.1. La Física clásica

Hablar de física, como hablar de otras ramas de la ciencia, exige, cada vez más, un esfuerzo previo de precisión lingüística, que delimite el contenido de los térmi-

nos que se emplean en el discurso. Esto es consecuencia directa del apogeo que ha alcanzado esta ciencia, que le ha llevado a estudiar aspectos extraordinariamente diversos de la naturaleza. Así, la física estudia desde el núcleo atómico hasta el cosmos en su conjunto, desde el reposo hasta la más elevada rapidez de un móvil, desde el cuerpo más sencillo hasta el más complicado, desde el orden en un sistema hasta el caos o falta total de información. De todo ello, el físico debe extraer nuevos conocimientos y expresarlos además en el lenguaje intuitivo de la sociedad a la que pertenece. En la actualidad, los nuevos conocimientos que deben introducirse en el lenguaje común son tantos, y proceden de situaciones tan diversas, que el resultado de todo ello es una pequeña Babel en la que las mismas palabras llegan a tener significados muy diversos. Por ejemplo, palabras simples para las lenguas literarias como cercanía, simultaneidad, periodicidad o experimentalidad pueden llegar a representar conceptos muy diversos entre sí e incluso muy alejados de la experiencia cotidiana del hombre. Hasta las famosas «intuiciones primarias» de Kant —el espacio y el tiempo— pueden llegar a hacerse irreconocibles como conceptos básicos del conocimiento humano. Resulta, pues, inapelable el requisito previo de establecer los niveles de interpretación que deben ser concedidos a los términos que se emplean.

Por física clásica se entiende habitualmente los conocimientos adquiridos por el hombre en ese campo antes del año 1900. Realmente la definición de la física clásica es bastante más complicada que la fijación de una fecha. Por tal debe entenderse el estudio del mundo a nuestra escala, lo que podremos llamar el mundo artesanal, ya que es aquel del que dispone el artesano en su trabajo. Pero hay algo más, que se encuentra encerrado en la concepción del mundo por parte del hombre. La física clásica estudia el mundo artesanal como algo ajeno completamente al que lo observa o lo describe. Con ello, se crea una considerable distancia entre el objeto de estudio y el estudioso, que no se siente nunca incluido ni dependiente de aquel. Además distintos observadores llegan todos a idénticos resultados sobre el mismo cuerpo, sin más que realizar una simple transformación geométrica, ligada a sus respectivas posiciones y velocidades. Por último, la física clásica considera que la medida es un acto plenamente idealizado, por el que jamás se perturba al sistema bajo estudio, ni se limita la precisión de los resultados de las medidas. Los errores experimentales corresponden a imperfecciones circunstanciales de los aparatos, y no a su incapacidad funcional para alcanzar tanta precisión como el observador desee y, mucho menos, a una perturbación de las propiedades del cuerpo.

De todas las materias clásicas vamos a detenernos, con la debida brevedad, en dos de sus grandes ramas: La mecánica clásica, establecida por Newton, y la termodinámica clásica, nacida a partir de la descripción realizada por Carnot de las máquinas térmicas. La elección de estas ramas está motivada por las concepciones que proporcionan de la estructura de la materia, las cuales están separadas por una importante diferencia de complejidad. Además, recientemente se han iniciado extensiones de sus teorías, que contemplan comportamientos temporales de la materia de un nivel de complejidad impredecible hace, tan sólo, unos decenios. Esta última extensión se viene llamando la nueva física.

Con el fin de ordenar los razonamientos, iniciemos nuestro estudio tratando de responder a las preguntas siguientes: Siendo la mecánica y la termodinámica ramas clásicas de la física, y partiendo ambas de una serie de tres principios causales bien establecidos. ¿Cómo es posible que una de ellas, la mecánica, conduzca al determinismo; mientras que la otra, la termodinámica, nos lleve al concepto de entropía, es decir, a la medida de la degradación, del desorden y de la aleatoriedad?. ¿Qué tipo de imagen acerca de la estructura de la materia nos proporcionan ambas teorías?. ¿Qué tipos de comportamientos dinámicos contemplan ambos sistemas teóricos?. En realidad, lo que se pretende es analizar las causas profundas y las consecuencias de que mientras un sistema mecánico queda determinado por sus ligaduras externas, un sistema termodinámico posee libertad suficiente para reorganizarse internamente. Se trata, pues, de desarrollar razonadamente el origen de lo que convendremos en llamar la complejidad estructural y funcional de la materia, en el sentido clásico, que está contenida en ambos cuerpos de doctrina.

3.2. Las relaciones causales de la mecánica

El establecimiento de las leyes de la mecánica por Sir Isaac Newton fue, sin duda alguna, uno de los momentos culminantes de la historia de las ciencias naturales. Su sencillez, su elegancia y su capacidad extraordinaria de previsión y desarrollo han sido, con toda seguridad, las fuentes del claro prestigio del que la física ha gozado durante siglos. A fuer de consecuentes, hemos de aceptar que el nivel de abstracción y de generalidad alcanzado por la mecánica debe aceptarse como una meta y un reto a alcanzar por las restantes disciplinas científicas.

Las leyes de la mecánica que estableció Newton fueron tres. La primera es el principio de inercia que define el estado de movimiento de un cuerpo. La segunda y la tercera son leyes causales que relacionan una misma causa, la fuerza, con dos efectos posibles: La modificación del estado de movimiento del cuerpo o la deformación del mismo, si no se mueve. Resulta así, que las dos últimas leyes de la mecánica conforman un conjunto de leyes causales simultáneas y excluyentes con la causa común. Por consiguiente, forman un conjunto de leyes reversibles por cuanto al invertirlas, tanto desde un efecto como desde el otro, se llega a la misma causa. El sistema carece de libertad para decidir qué camino debe tomar, su comportamiento le viene impuesto desde fuera. Con este comportamiento, la mecánica es capaz de predecir el estado de movimiento de un cuerpo en un instante dado, sin más que conocer las condiciones iniciales y aplicar convenientemente sus leyes. Con ello, y tomando de nuevo como iniciales las posiciones y las velocidades calculadas en la primera etapa, se puede llegar a conocer el estado de movimiento del cuerpo en otro instante posterior. De esta manera puede calcularse la trayectoria espacial del cuerpo, la cual es una representación gráfica del propio cuerpo y de sus condiciones dinámicas, con las que llega a confundirse. Como consecuencia de esto, el determinismo de la mecánica deriva de una idealización de la noción de estado inicial. Para sistemas dinámicos complejos, cualquier lige-

ra imprecisión en la medida de las condiciones iniciales puede provocar una fuerte incertidumbre de sus trayectorias. Es por ello, por lo que en los sistemas dinámicos complejos no pueden hacerse predicciones a largo plazo, y lo que lleva a tener que considerar el conjunto de trayectorias compatibles con la precisión de las condiciones iniciales.

Un segundo aspecto de gran importancia en las leyes establecidas por Newton, incluye al tiempo como variable especial. En efecto, como ya hemos considerado, en una ley causal el efecto jamás puede ser anterior a la causa. Pues bien, Newton estableció en sus leyes que tanto la causa como el efecto se producen simultáneamente, de forma que no se da retraso entre la una y el otro. Esto tiene una excepcional importancia en la mecánica clásica por dos razones: La primera porque hace reversibles todas las ecuaciones de la misma y la segunda porque le niega cualquier estructura interna a los cuerpos que estudia. En realidad, éste es el gran proceso simplificador de la mecánica clásica que, no sólo trata un único aspecto de los sistemas naturales, el movimiento, sino que además les niega que tengan otras características.

El carácter simultáneo que Newton asigna a la causa y a su efecto provoca la eliminación del concepto de tiempo en la mecánica. En esta ciencia sólo tiene interés el intervalo de tiempo y su sentido completo carece de significado. Sólo los movimientos periódicos permiten establecer una unidad de intervalo temporal, de ahí los relojes mecánicos; pero representan la negación del concepto general de tiempo con su devenir inevitable, puesto que todo movimiento periódico se reinicia al cabo de su periodo. La simetría del tiempo hace que todas las ecuaciones de la mecánica sean reversibles, ya que deben ser satisfechas tanto para intervalos temporales positivos como negativos. El mundo real para la mecánica es como una proyección cinematográfica, sus protagonistas lo mismo andan y comen que, invirtiéndola, caminan hacia atrás o se sacan la sopa de la boca. La mecánica se convierte en una geometría en la que el tiempo juega un papel similar al de cualquier otra coordenada espacial. A pesar de ello la mecánica sigue representando el espíritu de la física, su componente primero, particularmente en el aprendizaje de la misma.

La simultaneidad newtoniana de la causa y del efecto obliga a considerar que los objetos que estudia la mecánica carecen de estructura interna. En efecto, es un hecho cotidiano que el retraso temporal existente entre la causa y su efecto sea una medida de la complejidad del proceso que se produce. La frase popular «las cosas de palacio van despacio» es una buena muestra de ello. Pues bien, al negarle ese retraso, Newton dió el paso al límite de complejidad estructural cero, es decir, que sus elementos dinámicos carecen de estructura interna y sólo quedan caracterizados por una constante, la masa. Así nace el concepto de punto material con el que Newton se incorpora definitivamente a la corriente atomista iniciada por Empédocles. El punto material se configura como el elemento inalterable que constituye la materia, al cual se le han ido asignando propiedades atemporales como la masa, la carga eléctrica, el espín o la extrañeza. Esta visión de la materia, fortalecida por la confirmación de la hipótesis de su estructura corpuscular por parte de Rutherford, ha llevado a la

búsqueda denodada de esa partícula elemental, constituyente único e inmutable de la materia. En lo que va de siglo, no obstante, se ha creído encontrar cinco veces esa piedra angular en diferentes elementos estructurales, primero fueron el átomo y las moléculas, más tarde el núcleo, a continuación las partículas elementales o hadrones, después los quarks de los que se vislumbran seis variaciones y, por último, los llamados pre-quarks, tanto en la versión de los preones de J. C. Pati y A. Salam, como en la de los rishones de H. Harari.

Los sistemas mecánicos se tornan cada vez más complicados, del problema de los dos cuerpos se pasa al de los tres cuerpos que presenta grandes dificultades para su resolución y, de ahí, al problema de los N cuerpos. Del concepto de fuerza como causa fundamental y eje del cálculo se pasa a la energía expresada mediante la función de Hamilton o hamiltoniano del sistema, el cual incluye tanto la energía cinética como la potencial del mismo. Con el uso de las transformaciones canónicas pertinentes, las ecuaciones del movimiento de Hamilton llegan a hacerse integrables en muchos casos y, durante gran parte del siglo XIX, se trabajó denodadamente en los llamados sistemas integrables. Con el cambio de siglo, Henri Poincaré demostró que la mayor parte de los problemas interesantes de la mecánica clásica —comenzando por el problema de los tres cuerpos— no eran integrables. Esto dio lugar, en el presente siglo, al estudio de nuevos sistemas conocidos como ergódicos.

3.3. La termodinámica y sus leyes

La termodinámica es estructuralmente una ciencia más compleja que la mecánica. Como punto inicial no cuenta con intuiciones primarias como el espacio y el tiempo. Su primer cometido consiste justamente en definir el concepto de temperatura o potencial de equilibrio térmico, al cual dedica el principio cero. Esta ley corresponde a la definición de estado de equilibrio y a su transitividad, concepto esencial en la termodinámica clásica y que, sin duda, está fuertemente enraizado en la mentalidad científica actual. La inducción central de la termodinámica se encuentra en las famosas experiencias de James P. Joule, llevadas a cabo a partir de 1840. En ellas, Joule utilizó, entre otros elementos, un recipiente lleno de agua dentro del cual gira una rueda de paletas movida por la caída de un peso, y comparó el trabajo mecánico desarrollado con el aumento de la temperatura del líquido. A partir de estas experiencias, Joule determinó el famoso equivalente mecánico del calor y demostró la equivalencia entre los efectos del trabajo y del calor. Esta confirmación experimental de las ideas esbozadas anteriormente por Rumford, Mayer y otros, permitió que el día 27 de Julio de 1847, Hermann von Helmholtz presentase en la Sociedad de Física de Berlín su memoria titulada «Sobre la conservación de la fuerza», en la que se establecía el nuevo concepto de energía. Su idea es que toda la naturaleza está inundada por una cantidad enorme e invariable de energía, que se presenta bajo diversos aspectos. Desde nuestro punto de vista, los resultados de los trabajos de Joule y de Helmholtz pueden establecerse como dos leyes causales simultáneas, excluyentes

y de efecto común, a saber: «El calor modifica la energía interna de los cuerpos» y «el trabajo modifica la energía interna de los cuerpos». Queda por estudiar la relación de identidad entre ambas causas, lo que ha de constituir el segundo principio de la termodinámica.

Los acontecimientos históricos se desarrollaron sin atenerse a la jerarquía lógica de los hechos. La aparición, a partir de 1690, de las máquinas térmicas diseñadas por Denis Papin, Thomas Newcomen, Joseph Black y, por fin, James Watt, dieron origen a la, ya citada, memoria de Carnot veintitres años antes de la propuesta del primer principio por Helmholtz. Naturalmente el trabajo de Carnot quedó olvidado hasta que se vio su importancia epistemológica; en 1851 Clausius y Kelvin lo hicieron resurgir como una necesidad lógica de la nueva disciplina, la termodinámica. No obstante, este principio de identidad se muestra como todo lo contrario, el trabajo y el calor no son idénticos, y de ahí deriva una libertad del sistema físico: Su capacidad de tramutar el calor en trabajo y viceversa. La función que rige este proceso la llamó Clausius entropía, del griego «entropé» que significa conversión, vuelta, transformación o cambio. Con la termodinámica se nos muestra un ejemplo característico de leyes causales de efecto común, que es capaz de permitir libertades internas al sistema bajo estudio.

La termodinámica, tal y como está establecida, no idealiza los sistemas, pero si sus procesos, pues parece inevitable la idealización en el establecimiento de teorías clásicas. Fue el propio Carnot el que, siguiendo las enseñanzas de su padre Lázaro Carnot, que fue un experto profesor de máquinas mecánicas, estableció un proceso idealizado, el proceso reversible, que hace máximo el rendimiento de las máquinas térmicas. El resto del desarrollo de la termodinámica es tan apasionante como sus comienzos. Incapaz de introducir con su verdadero rango la tercera interacción posible entre el sistema y su medio exterior, es decir la interacción másica, se ve obligada por manos de Willard Gibbs a introducir el potencial químico de forma estrictamente matemática. Esta pobreza de planteamiento ha generado no pocos problemas en el estudio del comportamiento interno de la materia. Con su definición de potencial químico, Gibbs justificó teóricamente la reacción química, los cambios de fase y los procesos de mezclas entre sustancias, pero aún quedan muchos y diversos problemas por resolver, ya que los modelos realizados del mismo —el modelo de Lewis y Randall de los sistemas expansivos, el modelo de Debye y Hückel para los iones en disolución, etc.— no han demostrado la utilidad y la generalidad que de ellos cabía esperar.

Como se ha puesto de manifiesto, la termodinámica, lejos de ignorar la estructura interna de la materia, la acepta como centro de su cuerpo doctrinal, y llega a cuantificar algunos de sus aspectos. Para ello, le asigna a la materia nuevas e importantes propiedades, tales como la entropía y el potencial químico. El avance en el conocimiento de la estructura de la materia es manifiesto y se corresponde con una visión más amplia y con un conocimiento más detallado de la complejidad estructural de la misma. Resulta así, que el desarrollo histórico del proceso científico se corresponde con un aumento de la capacidad de la mente humana para adentrarse en los aspectos menos intuitivos de la naturaleza y, por ende, más complejos.

Con el siglo XX, la termodinámica tomó nuevos derroteros. A partir de 1931, fecha en que Lars Onsager establece sus famosas relaciones fenomenológicas, diversas escuelas nacieron para el estudio de los sistemas termodinámicos fuera del equilibrio, la escuela de Bruselas, la del Prof. Meixner y la del Dr. Truesdell, entre otras. Posiblemente la que ha obtenido mayor predicamento ha sido la escuela de Bruselas dirigida por el Prof. Prigogine, que estableció una teoría lineal de los procesos irreversibles en las proximidades del equilibrio. En ella, la visión física del problema del desequilibrio es idéntica a la teoría clásica, es decir, la entropía del sistema aislado tiende a un máximo, el cual corresponde al equilibrio donde las leyes son universales y el desorden máximo. Como veremos, los sistemas muy alejados del equilibrio dejan de presentar esta estructura, son capaces de autoorganizarse mediante leyes claramente específicas, de amplificar sus fluctuaciones y de presentar comportamientos muy diferentes a los previstos por las teorías descritas.

3.4. El sistema dinámico

Hasta aquí, hemos ensamblado dos de las grandes teorías de la física clásica, dentro de una interpretación del desarrollo científico ligado al concepto de complejidad. Ampliemos, para finalizar, dicha interpretación, incluyendo en ella los aspectos funcionales de la materia, a pesar de que dicho estudio ha de ser necesariamente descriptivo, debido a la carencia de plenitud teórica y, por tanto, de perspectiva conceptual. Para ello, debemos incluir en nuestro análisis, siempre clásico, el aspecto evolutivo de la materia, es decir, lo que se viene denominando en física el sistema dinámico. Para centrar ideas, diremos que un sistema dinámico es aquel que evoluciona a lo largo del tiempo. Este sistema puede ser de cualquier tipo, físico, químico, electrónico, biológico, económico, social, etc. Sus leyes de evolución se formulan sin referencia directa a los elementos materiales que conforman el sistema. El cuerpo de doctrina que estudia este tipo de sistema, se encuentra actualmente en vías de estructuración.

Una clasificación habitual de los sistemas dinámicos se hace en función de una característica interna de los mismos, lo que genera dos problemáticas bien diferenciadas. Dicha característica se refiere a la consideración de la estructura interna del sistema, de forma que puede o no considerarse su existencia, en el sentido discutido previamente. En el caso de no tener estructura interna, su ausencia hace que el sistema carezca de inercias temporales y de disipaciones o frotamientos internos, los ejemplos corresponden a la mecánica clásica, a la astronomía y a los plasmas en los aceleradores. Estos sistemas poseen siempre un hamiltoniano independiente del tiempo y son, por tanto, conservativos. El segundo tipo de sistemas contempla aquellos cuya estructura interna le impone retrasos debidos a los frotamientos internos que les son propios. Carecen de hamiltoniano independiente del tiempo y por todas estas características se les conoce como disipativos. Los ejemplos son muchos, así la turbulencia y la convección en los fluidos, las reacciones químicas autocatalíticas, los eco-

sistemas, etc. Describamos muy someramente, tal y como venimos haciendo, los hechos más destacados de los avances experimentados por las dos clases establecidas de sistemas dinámicos, de esa forma conectaremos la nueva física con las teorías clásicas ya tratadas.

A partir de las ideas de Poincaré, Birkhoff, von Neumann y otros, se venía aceptando que los sistemas dinámicos de interés en la mecánica no eran integrables sino que cumplían la hipótesis ergódica, establecida ya por Gibbs y Boltzmann en la mecánica estadística, y que en su forma matemática puede establecerse de la siguiente manera: «El punto representativo del sistema en el espacio de las fases —es decir el espacio de las posiciones y de las cantidades de movimiento— deberá pasar, tarde o temprano, tan cerca como queramos de un punto compatible con las condiciones del sistema». Pues bien, fue A. N. Kolgomorov, en 1954, el primero en dudar de esta opinión general. Sus ideas fueron continuadas independientemente por V.I. Arnold y por J. Moser que lograron probar el famoso teorema K.A.M. (Kolgomorov-Arnold-Moser), el cual puede enunciarse así: «La introducción de una perturbación en el hamiltoniano de un sistema dinámico de N cuerpos, divide el espacio de las fases en dos regiones de volúmenes distintos y diferentes de cero. El mayor contiene el comportamiento normal, mientras que al más pequeño le corresponden trayectorias furiosamente erráticas, y se conoce como la región de inestabilidad». Los sistemas dinámicos conservativos pueden ser, debido a ello, de tres tipos: Periódicos o integrables, ergódicos y mezclados. Este último tipo se llama así porque, con el paso del tiempo, se produce la intersección o mezcla de las diversas zonas del espacio de las fases. A partir de este enunciado se plantearon los problemas habituales de caracterización de los sistemas, es decir, dado un sistema dinámico conservativo cuyo hamiltoniano se conoce ¿Cómo saber si es ergódico o mezclado? A raíz de esta pregunta, en 1962, surgió la gran sorpresa cuando Sinai, miembro también de la escuela rusa, demostró que «un sistema de N esferas duras encerradas en una caja de paredes elásticas es un sistema mezclado». Lo más sorprendente de todo ello es que este resultado se cumple hasta que N se hace igual a dos. Como puso de manifiesto Balescu: «Esto destruye la vieja creencia de que la ergodicidad es una propiedad exclusiva de los sistema muy grandes. El hecho de que dos bolas de billar sobre una mesa resulte ser, no sólo un sistema ergódico, sino mezclado (...) es de suma importancia para demostrar la extraordinaria complejidad del movimiento de los sistemas sencillos». Cabe, pues, la existencia de trayectorias erráticas incluso en los sistemas mecánicos simples. La amplitud de miras y la potencialidad del cálculo permiten, así, incorporar a la mecánica clásica nuevos y sorprendentes comportamientos de la materia.

Un sistema termodinámico fuera del equilibrio se consigue mediante la aplicación de solicitudes externas adecuadas, es decir, las llamadas fuerzas generalizadas. Tal sistema, para solicitudes elevadas, llega a presentar comportamientos dependientes del tiempo y, por consiguiente, se convierte en un sistema dinámico disipativo, gobernado por ecuaciones no lineales. El carácter disipativo del sistema trata de obligarle a buscar un estado estable en el que permanecer o, en el moderno lenguaje matemático, un atractor o lugar geométrico del espacio de las fases donde concurren

todas las trayectorias estables. Por otro lado, el carácter de no linealidad hace que el sistema pueda encontrarse en situaciones de clara inestabilidad. La región del espacio de las fases que limita las zonas de estabilidad y no estabilidad corresponde a los estados de estabilidad marginal del sistema.

Los sistemas dinámicos disipativos tienen algunas características muy especiales. Por ejemplo, carecen de hamiltoniano independiente del tiempo, por lo que su energía no se conserva. Pueden disponer, en algunos casos, de una función de Liapunov, que, como la entropía en el equilibrio, nos permita disponer de una medida de la irreversibilidad del sistema debido a sus frotamientos internos. Por razón de esta irreversibilidad inherente, las ecuaciones dinámicas no son reversibles en el tiempo y, por último, el volumen ocupado por el sistema en el espacio de las fases no se conserva.

Cuando las solicitudes aplicadas sobre el sistema dinámico aumentan, éste puede llegar a tener un comportamiento caótico, es decir, el espectro de potencia de su comportamiento temporal presenta una banda continua, además de los posibles picos característicos. Este régimen caótico sigue siendo determinista pero presenta un comportamiento anómalo, pues no es predecible en el sentido de que cualquier imprecisión en las condiciones iniciales —por pequeñas que sean— se amplifican geométricamente en el transcurso del tiempo. Ante esta situación una posible pregunta es la siguiente: ¿Qué tipo de atractor es preciso adjudicarle a un espectro de Fourier que presenta una banda continua? La respuesta existente en la teoría de Landau de la turbulencia era muy general. Según ella, el paso del régimen laminar al turbulento en un fluido que circula con cierta velocidad media, se lleva a cabo mediante modulaciones sucesivas de su velocidad, según aumenta el número de Reynolds. De esta forma, la velocidad local se ve modulada por sucesivas frecuencias inconmensurables que generan la turbulencia. Recientemente, en 1971, Ruelle y Takens han llegado a la conclusión siguiente: «Tres grados de libertad son suficientes para provocar el régimen caótico», lo que significa que el atractor que le corresponde a este tipo de comportamiento sea un «atractor extraño», debido a sus propiedades poco comunes y, en particular, a su sensibilidad a las condiciones iniciales. Esta propuesta no es la única válida para explicar lo que se denomina la ruta al caos de un sistema dinámico disipativo. La cascada subarmónica y las intermitencias han sido propuestas recientemente, pero su contenido se escapa de nuestra intención descriptiva.

Se confirma ahora nuestro análisis acerca del origen de la complejidad. Tanto en la mecánica, con el problema de los dos cuerpos rígidos, como en la termodinámica, con el caos determinista, se comprueba que el descubrimiento de nuevos aspectos del mundo real, alejados del determinismo y de la tendencia tradicional al equilibrio, está vinculado a una visión más amplia de los problemas y de sus posibilidades, a la que no son ajenos los avances experimentados en la capacidad experimental y en la potencialidad del cálculo. Remedando a Klir, podemos decir que poseemos ahora un ojo más penetrante y un campo de observación más amplio. En este sentido, conviene incorporar algunas opiniones muy recientes de J. Ford acerca de las diferencias

existentes entre determinismo y predecibilidad. Según ellas, uno y otra se distinguen tanto por las relaciones de información entre la entrada del cálculo y la salida del mismo, como por las relaciones existentes entre tiempo de cálculo y tiempo propio del sistema. De esta manera concluye «el tiempo de máquina requerido para calcular numéricamente una trayectoria analítica es proporcional al logaritmo del tiempo propio del sistema. Por otra parte, el tiempo de máquina necesario para calcular numéricamente una trayectoria caótica es proporcional al tiempo propio del sistema. Por tanto, una trayectoria analítica es determinista y esencialmente predecible, porque podemos anunciar el estado futuro del sistema mucho antes de que ocurra. Por el contrario, una trayectoria caótica podrá ser determinista pero no predecible, porque no podemos anunciar el futuro apreciablemente antes de que ocurra». Este es un problema esencial, por ejemplo, en las predicciones climatológicas por parte de los meteorólogos.

De todo lo dicho, hemos de concluir que la complejidad del mundo físico, tanto desde el punto de vista estructural como evolutivo, ha aumentado considerablemente al desarrollarse la ciencia. La causa de este apreciable aumento de complejidad no puede buscarse en la naturaleza, cuya estructura se mantiene y cuya actividad discurre de forma ajena a toda posible observación. El origen de dicha complejidad se encuentra en nuestra propia mente, que ha sido lo suficientemente flexible como para adaptar sus estructuras cognoscitivas a la realidad impasible que nos rodea. De esta flexibilidad mental es imprescindible destacar la capacidad de abstracción, continuamente desarrollada, pues los problemas que se atacan resultan cada vez más alejados de nuestras intuiciones primarias. Así, se viene consiguiendo satisfacer la meta que Herzen le asignaba a la ciencia: «Eleva lo tangible a la categoría de pensamiento». Resulta, pues, que la complejidad de la naturaleza se configura como un constante reto a su observador, que debe acercarse a ella con una visión cada vez más aguda, para extraerle nuevos componentes de su propia sabiduría.

4. CONCLUSION

A lo largo de esta conferencia he pretendido aclarar algunos puntos técnicamente importantes de las ciencias positivas y vincularlos con toda una nueva línea de pensamiento, donde el objeto de estudio es la propia estructura de la ciencia. Pero, sobre todo, he intentado demostrar que la ciencia no es una estructura cerrada, rígida y sólo justificable por la utilidad material de sus resultados, como creen algunos. La ciencia es una necesidad intrínseca del hombre con la que pretende conocer el mundo que le rodea, como parte de sí mismo; es un acto continuo de confianza en la naturaleza, de la que se extrae, mediante la reflexión, la mayor parte de nuestra sabiduría. Por ello, podemos concluir como lo hacía D. Miguel de Unamuno su obra «Como se hace una novela»: «¿Terminado? ¡Qué pronto escribí ésto! (...). Hace ya años, en mi primera mocedad, oía hablar a mis amigos wagnerianos de melodía infinita. No se que es ésto, pero debe ser como la vida y su novela, que nunca terminan.

Como la historia». Para añadir «Como la ciencia». Y llegado a este punto, finalizo mi exposición agradeciéndoles su presencia y la atención que han tenido la bondad de dispensarme.

5. BIBLIOGRAFIA

- ARNOLD, V.I.: Russian Math. Surv. 18: 9, 1963.
ASHBY, R.: Cibernetic Medicine, 9: 1, 1973.
BALESCU, R.: Equilibrium and Nonequilibrium Statistical Mechanics, John Wiley, 1975
BERGE, P., POMEAU, Y., VIDAL, CH.: L'ordre dans le Chaos, Hermann, 1984.
BERGE, P.: editor, Le Chaos, Théorie et Expériences, Eyrolles, 1988.
BERNAL, J.D.: Historia Social de la Ciencia, Península, 1973.
CARNOT, S.: Réflexions sur la Puissance Motrice du Feu et sur les Machines propres a Développer cette Puissance, Bachelier, 1824. (Existe una reproducción de la Librería Blanchard).
CLAUSIUS, R.: Ann. Phys., 125: 353, 1865.
CHAMBADAL: Evolution et Applications du Concept d'Entropie, Dunod, 1963.
DAVIES, P.: editor, The New Physics, Cambridge Univ. Press, 1989.
DENBIGH, K.G. y DENBIGH, J.S.: Entropy in relation to Incomplete Knowledge, Cambridge University Press, 1985.
DESCARTES, R.: Discurso del Método, Mediterráneo, 1986.
FELIPE, L.: Antología Rota, Losada, 1968.
FEYERABEND, P.: Tratado contra el Método, Tecnos, 1981.
Gran Enciclopedia Larousse, Planeta, 1971.
GEYMONAT, L.: Historia del Pensamiento Filosófico y Científico, Ariel, 1984.
HAGENBERG, L.: Introducción a la Filosofía de la Ciencia, Herder, 1979.
KANT, E.: La Crítica de la Razón Pura, Losada, 1967.
KLIR, G.J.: The Many Faces of Complexity, en the Science and Praxis of Complexity, U.N.U.P., 1985.
KUHN, T.J.: La Estructura de las Revoluciones Científicas, Fondo de Cultura Económica, 19.
NEWTON, I.: Principios Matemáticos de la Filosofía Natural, Tecnos, 1987.
POPPER, K.R.: Realismo y el Objetivo de la Ciencia, Tecnos, 1985.
PRIGOGINE, I.: Physique, Temps et Devenir, Masson, 1980.
PRIGOGINE, I. y STENGERS, I.: Order out of Chaos; Man's New Dialogue with Nature, Batam Books, 1984.
PRIGOGINE, I.: New Perspective on Complexity, en The Science and Praxis of Complexity, U.N.U.P. 1985.
RUELLE, D. y TAKENS, F.: Comm. in Math. Phys., 20: 167, 1971.
SHANNON, C.E. y WEAVER, W.: The Mathematical Theory of Communication, Urbana, 1949.
SINAI, I.A.: Russian Math. Surv., 25: 137, 1970.
VALERY, P.: Cahiers, vol. 1, Pleiade, 1973.
WAGENSBERG, J.: Ideas acerca de la Complejidad del Mundo, Tusquets, 1985.
WIENER, R.: Cibernética, Guadiana, 1960.
WEAVER, W.: American Scientist, 36: 536, 1947.

DISCURSO PRONUNCIADO POR EL ILMO. SR. D. RAFAEL MARQUEZ DELGADO

*Académico Numerario,
en contestación al leído por el
Ilmo. Sr. D. MANUEL ZAMORA CARRANZA,
en el acto de su recepción como Académico Numerario
celebrado el día 22 de Mayo de 1991*

Excmo. Sr. Presidente de la Real Academia Sevillana de Ciencias, Dignísimas Autoridades, Excmos. e Ilmos. Señores Académicos, Señoras y Señores.

Una de las actividades más importantes y solemnes de las Académias es, sin duda, la recepción de un nuevo académico, y yo me siento muy honrado con que la Real Academia Sevillana de Ciencias me haya designado para contestar al Discurso de Ingreso en la misma de D. Manuel Zamora Carranza, compañero hoy no sólo en esta Real Academia sino también en el departamento universitario, y amigo desde hace muchos años.

Mi primer recuerdo de D. Manuel Zamora se remonta al año 1960 cuando, recién licenciado, acompañó a Madrid a nuestro común amigo y maestro, D. Manuel Pérez Rodríguez, para prestarle ánimos y apoyo en las oposiciones a la cátedra de Termología de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Sevilla, que tan brillantemente obtuvo. D. Manuel Pérez me habló entonces de Manolo Zamora como chico talentoso, muy interesado por la física, que venía frecuentando su laboratorio desde años antes de terminar su licenciatura. Me habló también de sus cualidades humanas que quedaban, por supuesto, bien de manifiesto en el hecho mismo de acompañar a su profesor y maestro en aquellas oposiciones. Gestos de esta clase nos llaman hoy la atención, pues es cada día más difícil, incluso en la Universidad, encontrar personas capaces de sacrificar su tiempo, sus intereses y su tranquilidad en beneficio de los demás.

Realizó D. Manuel Zamora su tesis doctoral en la que por entonces constituía prácticamente la única línea de investigación en física en la Universidad de Sevilla: La determinación de estructuras cristalinas mediante difracción de rayos X. Su trabajo consistió en la determinación de la estructura cristalina del sulfocianuro de cadmio ditiourea, pasado con la máxima calificación en la Universidad de Sevilla en el año 1963. El trabajo fue dirigido por D. Manuel Pérez y D^a Mercedes Cubero

—muertos ambos, pocos años después, en el mejor momento de su producción científica y cuando más necesitaba de ellos la recientemente creada Sección de Físicas de esta Universidad—.

En las mismas oposiciones en las que D. Manuel Pérez obtuvo la cátedra de Termología de Sevilla, D. Vicente Gandía Gomar obtenía una cátedra para desempeñar la Física para Médicos en la Facultad de Medicina de Cádiz, integrada entonces en la Universidad de Sevilla; cátedra que, cuando se resolvió la oposición, había desaparecido administrativamente. D. Manuel Pérez consiguió que dicha cátedra se incorporase a la Facultad de Ciencias de Sevilla, y facilitó en todo lo que pudo la instalación del nuevo catedrático en la misma, cediéndole no solamente espacios y gran parte de los pocos recursos con los que contaba, sino animando incluso a varios de sus mejores discípulos a que colaborasen con el Prof. Gandía. D. Manuel Zamora fue uno de éstos y dirigió desde entonces su interés hacia la termodinámica.

D. Manuel Zamora fue profesor adjunto en la Universidad de Sevilla desde el año 1964 hasta el 67, profesor agregado en la Central de Barcelona hasta el 69, y catedrático de la Universidad de Sevilla desde esa fecha. Aquí fue director del Departamento de Termología hasta 1985, Vicedecano y Decano después de la Facultad de Física desde el 79 al 81 y desde el 82 al 84, respectivamente, y director del Colegio Mayor Hernando Colón desde el 84 al 86. Ha sido Vicepresidente del Grupo Especializado de Termodinámica de la Real Sociedad Española de Física, investigador principal de varios proyectos de la Comisión Asesora de Investigación Científica y Técnica y de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología, responsable de un grupo de investigación de la Junta de Andalucía, director de una decena de tesis doctorales, e iniciador de varias líneas de investigación, que prosiguen sus discípulos y han fructificado hoy en grupos autónomos de investigación de reconocido prestigio.

Me van Vds. a permitir que haga ahora un breve paréntesis para dedicar unas palabras de reconocimiento al esfuerzo —generalmente, poco o mal valorado— que aquellos primeros profesores que se fueron incorporando a las recién creadas Secciones de Física de nuestras universidades, tuvieron que hacer para ir implantando estudios y líneas de investigación, a veces incluso de áreas de conocimiento muy alejadas de la propia, en una época de grandes carencias, difícil de imaginar, diría que afortunadamente, por los licenciados que hoy en día se incorporan a nuestros departamentos universitarios.

Es un hecho reconocido que la investigación en la Universidad española está alcanzando un grado de desarrollo que va tendiendo a aproximarse al de otros países de nuestro entorno socio-cultural y nuestro nivel económico. Desde el momento en que el Estado ha hecho una inversión más importante en la investigación, ésta ha comenzado a dar sus frutos, porque en la universidad había personas preparadas para la misma. Y estas personas que están contribuyendo al desarrollo de nuestra investigación, las podemos clasificar en tres grupos: Las que en aquellos años de múltiples carencias universitarias pudieron salir fuera de nuestro país para formarse y volvieron después, las que se marcharon y no volvieron, y las que permanecieron en él.

Un análisis del papel que en nuestra universidad actual corresponde a cada uno de estos grupos cae fuera de contexto en este acto, pero sería interesante que se realizase algún día. Lo que yo quiero en esta ocasión, porque es la situación que corresponde al Prof. Zamora y a otros muchos profesores de la universidad española, es llamar la atención acerca del papel importante que desempeñaron los que se quedaron en nuestro país, los que en aquellos años no pudieron salir más que esporádicamente y en estancias relativamente cortas. Estos, y lo que digo vale para los profesores —la mayoría de ellos todavía en activo— que se fueron incorporando a la universidad española en los años cincuenta y sesenta, encontraron, como les decía, una universidad con múltiples carencias, especialmente en el campo de las ciencias experimentales, y más concretamente en el de la física, cuyos estudios, salvo en Madrid, y algo en Zaragoza y Barcelona, carecían prácticamente de tradición en nuestro país. Y esas personas, muy vocacionadas, a base principalmente de esfuerzo y también de ingenio, sacando el máximo partido del escaso material de que disponían, realizaron sus tesis doctorales e iniciaron investigaciones en las que las circunstancias jugaban, la mayoría de las veces, un papel más importante que sus propias aficiones o vocación. Cosa que, por otra parte, les había ocurrido, asimismo, en la elección de carrera; puesto que, en muchos casos, habían tenido que limitar esta elección a alguno de los muy pocos estudios que se ofertaban en el propio distrito universitario, y el nuestro, que entonces comprendía además de las provincias de Huelva y Sevilla, las de Badajoz, Cádiz y Córdoba, no ofrecía hasta mediados los años sesenta, otros estudios superiores, científicos o técnicos, que la licenciatura en Química. Razón por la que el Prof. Zamora y el que les habla, así como otros muchos profesores de Física de la universidad española, son licenciados en Química.

Pues bien, esos licenciados que deseaban seguir una carrera universitaria y se quedaron en nuestro país encontraron una universidad con grandes carencias, no sólo de recursos materiales sino también de profesorado. Profesorado al que han de suplir encargándose en ocasiones de enseñanzas que ellos mismos no han cursado, y dándose a veces el caso de un profesor en formación que tenía a su cargo dos o tres asignaturas diferentes. Por otra parte, éstos jóvenes profesores habían sido educados por sus maestros en la importancia de las clases prácticas de laboratorio, y a ellas dedicaron muchas horas de sus largas jornadas laborales de las que, a veces, podían dedicar a la investigación apenas las horas que restaban a su descanso.

Mientras, aquellos otros que consiguieron salir fuera de nuestras fronteras a realizar sus tesis doctorales y completar su formación, pudieron, sin otras ocupaciones, dedicar su tiempo a la investigación en laboratorios bien dotados, bajo la dirección de los más prestigiosos científicos, utilizando equipos y métodos modernos, y obteniendo, por tanto, un rendimiento muy superior, consiguiendo una buena formación y un excelente curriculum investigador. Todo esto, por supuesto, no puede ir en demérito de ellos, sino que, por el contrario, hay que destacar el esfuerzo y sacrificios que, en la mayoría de los casos, pusieron en el empeño. Lo que yo quiero señalar aquí solamente es que todo ello les coloca en una situación diferente a los anteriores. Por otra parte, hay que reconocer que estos científicos que volvieron, al irse

incorporando a nuestras universidades y centros de investigación, y continuar en ellos sus trabajos con ese estilo y metodología que aprendieron fuera, han desempeñado y siguen desempeñando un papel muy importante, tal vez fundamental, en el desarrollo de la investigación en nuestro país.

También es justo reconocer el papel importante que están desempeñando aquellos que salieron y no volvieron. Muchos de ellos han triunfado, ocupan puestos científicos relevantes, demostrando que con medios suficientes y en un clima científico adecuado, un ciudadano español puede realizar investigación científica de calidad como cualquier otro ciudadano de cualquier otro país de nuestro entorno socio-cultural, cosa que, si bien hoy nos parece evidente, se ha venido discutiendo desde antiguo hasta hace muy pocos años. Por otra parte, ellos sirven de estímulo a nuestros estudiantes, a los que, además, suelen dar una excelente acogida en sus laboratorios, contribuyendo a su formación doctoral o postdoctoral.

Hoy que el Ministerio de Educación y Ciencia ha emprendido la tarea de evaluar la investigación universitaria, no sé si ha tenido verdaderamente en cuenta las circunstancias reales en las que se realizaba la investigación científica en España en aquellos años, ni ese hándicap que todavía hoy sigue gravitando sobre parte del profesorado universitario de entonces, sobre el que recayó la enorme tarea de mantener, con unos medios prácticamente inexistentes, nuestra institución universitaria. Cosa que, en general, trató de hacer con toda la dignidad que le fue posible.

Y cierro el paréntesis.

El interés investigador del Prof. Zamora, aparte de aquellos primeros años de su doctorado en los que se ocupó de estudios estructurales de compuestos cristalinos mediante difracción de rayos X, se dirigió pronto hacia la termodinámica. En su etapa de profesor agregado en la Universidad Central de Barcelona aprendió, junto al Prof. Vidal Llenas, a hacer uso de la técnica calorimétrica de Calvet, que después, ya en la Universidad de Sevilla, aplicó al estudio de problemas particulares en el campo de la termodinámica de los procesos irreversibles. Su interés se extiende pronto al estudio de estructuras disipativas, estabildades de sistemas termodinámicos y otros problemas relacionados, que caen dentro del campo apasionante y de gran actualidad de esa física nueva, que se ha dado en llamar no-lineal, turbulenta o caótica, cuyo objeto es el estudio de fenómenos complejos, en apariencia caóticos, pertenecientes a los campos más diversos, y que hasta hace poco parecían escapar a la descripción científica, habiéndose conseguido hoy una unificación conceptual inesperada.

Para la descripción de todo esto, se ha hecho necesario la introducción de nuevas nociones y la matización de otras existentes: orden, desorden, caos, complejidad, estructura, función, organización, adaptación, disipación, catástrofe, proceso, etc. De todas ellas es, posiblemente, la complejidad la que más se está resistiendo a una definición satisfactoria dentro del marco de la ciencia moderna, y a reflexionar sobre la misma en relación con el conocimiento científico, nos ha invitado esta tarde el Prof. Zamora en su Discurso de Ingreso en esta Real Academia Sevillana de Ciencias.

En él, como acaban Vds. de comprobar, el Prof. Zamora no ha tratado de hacer una exposición exhaustiva de las ideas que circulan actualmente en ciencia acerca

de la complejidad, sino que ha realizado un trabajo original, muy selectivo y meditado, bien estructurado y magistralmente desarrollado, buscando, por encima de todo, el rigor; el rigor académico, como corresponde a este acto.

Es obligado para mí el hacer unos comentarios acerca del tema elegido por el nuevo académico, y me dan ganas de, parodiando la célebre frase juanramoniana, decir algo así como: No lo toquemos ya más, que así está bien. Y ésta es, por supuesto, la verdad. Pero como algunos lo tomarían como una muestra de comodidad, o de pereza, por mi parte, voy a hacer unos muy breves comentarios que, aunque expuestos bajo una misma línea argumental, no pretenden ser más que unas notas en letra pequeña al pie de algunas de las páginas del texto de su discurso.

Hasta hace relativamente pocos años, las leyes de la naturaleza eran prácticamente las leyes de la física, y todas las demás ciencias buscaban en ella la explicación de los fenómenos observados. Siguiendo el procedimiento analítico tradicional de la física: Descomposición en componentes elementales y mono-causalidad, la ciencia, en sus diferentes disciplinas, tanto naturales como sociales, trataba de explicar los fenómenos observables reduciéndolos a un conjunto de unidades elementales, que según la naturaleza del sistema eran: átomos, moléculas, enzimas, células, sensaciones elementales, reflejos individuales, individuos, etc. Reuniendo de nuevo estos elementos, se pensaba, deberían reproducirse teórica y experimentalmente las propiedades del conjunto. Hoy se sabe que éste esquema de unidades aislables actuando por una causalidad en sentido único se muestra insuficiente. Para comprender estos conjuntos (o sistemas), es necesario conocer no solamente sus elementos constituyentes sino también sus relaciones, y cuando se estudia su evolución se encuentra que ésta no es, como en mecánica newtoniana, una simple sucesión de hechos instantáneos, sino una suma de procesos dinámicos que implican duraciones finitas.

Se explica ahora cómo en determinadas condiciones el estado totalmente desordenado no es el más estable —como pensaba la termodinámica clásica—, sino que cada vez que las solicitudes impuestas al sistema pasan un cierto umbral crítico y las ecuaciones cinéticas lo permiten, el sistema evoluciona hacia estructuras macroscópicas ordenadas, más y más complejas, estableciéndose un orden dinámico y funcional, que recuerda al de la materia viva y que deja de ser privativo de ésta. El tema, como les decía anteriormente, no puede ser más apasionante. Y esos problemas y conceptos, aunque surgidos de la física, han ido apareciendo en los últimos años, de forma independiente, en todas las disciplinas científicas sea cual sea su objeto de estudio, mundo inanimado, organismos vivos, fenómenos sociales, etc., conduciendo a un cambio profundo tanto en nuestras concepciones científicas como en nuestra actitud frente a la naturaleza.

Como indica el Prof. Zamora, se trata de un nuevo enfoque conceptual que se aparta, como les decía, del procedimiento analítico tradicional de la física y que, trascendiendo del mero campo de la ciencia, ha quedado incorporado, en un contexto más amplio, a la filosofía natural. Las realidades básicas son hoy, más que las sustancias estéticas independientes, los sucesos dinámicos unidos en procesos, dice Whitehead, quien destaca el lugar primario que en el pensamiento filosófico actual ha alcanzado

la noción de proceso. Por otra parte, como señala J. L. Spradley, es posiblemente ese mismo espíritu que influyó en todo lo anterior el que encontramos en ciertas manifestaciones actuales, como el interés por el medio ambiente y la ecología, la medicina holística, los sistemas burocráticos altamente complejos, los gobiernos, organismos y empresas multinacionales, los modelos macroeconómicos, etc. en las que se pone el énfasis más en las relaciones comunales que en el individualismo, y más en la cooperación que en la competición, buscando la integración y el orden orgánico más que la fragmentación y la uniformidad.

Dentro del propio campo de la física, el carácter holístico de la realidad física se pone de manifiesto no sólo en esos complejos sistemas macroscópicos a los que hemos aludido, sino incluso en ejemplos tales como la verificación experimental de las sorprendentes predicciones de la teoría cuántica acerca de la no separabilidad de sistemas individuales que hubiesen estado anteriormente en interacción mutua.

Hay quien quiere ver en todo ésto la aparición, al lado del mundo cuantitativo —objeto de estudio tradicional de la física—, de un mundo cualitativo en el que el crecimiento y el devenir puedan encontrar explicación, y que ya fue anunciado por Richard Feynmann cuando dice: «Quizás la inteligencia humana llegará mañana, en una nueva etapa de su evolución, a concebir un método que permita comprender el contenido cualitativo de las ecuaciones. Hoy no podemos. No se sabe si las ecuaciones del flujo de un fluido dan cuenta de fenómenos como la estructura de los torbellinos observados entre dos cilindros en rotación, o si las ranas, los compositores o la moral, están comprendidos en la ecuación de Schrodinger. No se puede decir si falta algo a esa fórmula —Dios, por ejemplo—. Y es ésto lo que nos permite expresar opiniones diferentes en un sentido o en otro».

Termina el Prof. Zamora su Discurso de Ingreso en esta Real Academia Sevillana de Ciencias, recordando unas palabras que Don Miguel de Unamuno aplica a «la vida y su novela, que nunca terminan. Como la historia», y añade el Prof. Zamora: «Y como la ciencia». Porque la ciencia, y de ello estamos convencidos la mayoría de los científicos actuales, no terminará jamás. En la segunda mitad del siglo pasado, como el padre de Max Planck comentase con su amigo el Prof. Jolly que su hijo quería estudiar física y pidiese su consejo, éste trató de convencer al joven Planck de que la física era una ciencia prácticamente cerrada en la que no merecía la pena intentar avanzar más, puesto que todo lo que había que descubrir en ese campo había sido ya descubierto. Afortunadamente, pensamos hoy, el joven Planck no se dejó convencer por las razones del Prof. Jolly, e inició, como es sabido, una de las revoluciones más importantes que se conocen en el campo de la física, y que ha trascendido a todas las demás ciencias e incluso a la filosofía.

Hace muy pocos días, recordaba el Prof. M. Cardona cómo hace relativamente pocos años parecía que en el campo de los materiales estaba prácticamente todo investigado, y que se trataba sólo de realizar algún perfeccionamiento de tipo tecnológico. Hoy estamos comprobando cómo, y a pesar del enorme número de científicos que en el mundo se ocupan del estudio de los materiales, los problemas planteados se acumulan sobre sus mesas de trabajo. Y esto mismo podríamos decir de cualquier

otro campo de la ciencia natural. Y ello es así, como indica el Prof. Zamora, no porque la complejidad de la naturaleza haya cambiado en estos últimos años sino, como también señala citando a Klir, porque nuestro ojo es cada vez más penetrante y el campo de observación más amplio.

Pero, aparte de todo ésto, pensamos muchos, la ciencia tiene que ser necesariamente abierta, en constante renovación, ya que nuestros conocimientos no serán jamás ni definitivos, ni absolutamente ciertos. Como se ha dicho muchas veces, la ciencia se ocupa de la verdad, no de los dogmas. Pero los científicos sabemos que esta verdad que buscamos es una verdad limitada, incapaz de conseguir posiblemente la comprensión definitiva de las cosas. Y ello tiene que ser así, porque la ciencia en general, pero más concretamente la física, contiene en sí misma una descripción, incluso cuantificada, de sus propias limitaciones.

En esta línea de pensamiento, creo que el Prof. Zamora, aparte del tema concreto de su disertación, ha querido resaltar sobre todo, la creatividad conceptual de la actividad científica, de la que se extrae, como él mismo dice, mediante la reflexión, la mayor parte de nuestra sabiduría.