

REAL ACADEMIA DE DOCTORES

# INFORMACION Y CAOS

---

## DISCURSO

PRONUNCIADO POR EL

**Ilmo. Sr. D. Juan José Scala Estalella**

EN EL ACTO SOLEMNE DE SU RECEPCION COMO ACADEMICO DE NUMERO  
DE LA REAL ACADEMIA DE DOCTORES

## CONTESTACION

DEL

**Ilmo. Sr. D. Luis-Alberto Petit Herrera**

MADRID

1991



*Excmo. Sr. Presidente  
Excmos. Sres. Académicos  
Sres. Doctores  
Señoras y Señores*

*Al subir a este estrado para pronunciar mi discurso de ingreso en la Real Academia de Doctores invade mi ánimo un doble sentimiento: timidez e ilusión. No se me oculta que son dos sentimientos típicos de la infancia, pero que brotan en mí con la sinceridad y espontaneidad, que caracterizan las manifestaciones del niño.*

*No voy a caer, pues, en la tentación de decir que se me confiere un honor que no merezco. No hay mayor arrogancia que la de convertirnos en jueces de nosotros mismos. Antes al contrario, acepto el superior juicio de quienes me propusieron y me aceptaron. Si a los primeros arrastraron excesivamente los sutiles lazos de la amistad, y los segundos fueron demasiado débiles ante la generosa indulgencia que les inspiraba su bondad, a mí no me queda más que ofrecer a todos mi gratitud.*

*Mi temor nace de que mi discurso, ante tan cualificada audiencia, pueda ser una imagen demasiado pobre de las prestigiosas personalidades que integran la Academia, y la profundidad de los trabajos que en su seno se desarrollan. Al mismo tiempo, mi ilusión se inspira en la fortuna que supone poder trabajar en estrecha colaboración con quienes constituyen un seguro camino hacia todos los campos del saber. La multidisciplinaridad de la Real Academia de Doctores es su más peculiar característica y no puede menos que ilusionar a quien la estrechez de conocimientos contrasta con la amplitud de una insaciada e insaciable curiosidad científica. ¡Qué mejor suerte que la de ser acogido por tantos maestros de quienes aprender!*

*Pero si ahí quedaran mis sentimientos estaría al borde de caer en un defecto, también típico de la infancia: el egoísmo. El niño prefiere recibir a dar, le gusta más poseer que compartir. En distintas ocasiones, como miembro correspondiente de la Academia he tenido el privilegio de poner mi trabajo al servicio de actividades organizadas bajo su patrocinio. En este momento, y con más estrecho compromiso, renuevo este propósito de entrega generosa, esperando que el quehacer de cada día me haga más merecedor del lugar que ahora se me llama a ocupar.*

*De manera especial me obliga a ello el recuerdo de la ilustre personalidad que me precedió en la posesión de la medalla n.º 4 de la Sección Ingeniería e Informática*

*de la Academia: el insigne Ingeniero Industrial y Aeronáutico D. Rafael Calvo Rodés. Al evocar su memoria, no puedo menos que añorar con nostalgia mis primeros pasos en la actividad docente, cuando, como joven profesor ayudante en la Cátedra de Metalurgia de la Escuela Especial de Ingenieros Industriales, leía con avidez sus obras y, en particular, la titulada «Aleaciones Hierro-Carbono», que a tantos estudiantes iniciaron en lo que luego se ha designado, con más amplio espectro, como ciencia de los materiales. Su discurso de ingreso en esta Academia, cuyo trigésimo aniversario se cumplirá el próximo 30 de noviembre, titulado «La tipificación racional y la tipificación universal de los aceros», constituyó una lección magistral sobre la necesidad de normalizar las características de estos materiales sobre bases científicas y técnicas. El tiempo ha demostrado la visión de futuro de Calvo Rodés, al plantear esa necesidad, actualmente por todos reconocida.*

*Para un universitario el birrete de doctor constituye la coronación de su carrera académica. Y en este momento no puedo menos que recordar las horas dedicadas a la dirección de tesis doctorales, ayudando y estimulando a jóvenes universitarios a alcanzar esta corona del saber, compartiendo con ellos los momentos ingratos y gratificantes de la actividad investigadora, haciéndoles descubrir cuanto de apasionante tiene el esfuerzo por ampliar las fronteras del conocimiento, principal patrimonio de la Humanidad. Algunos de ellos, hoy catedráticos de universidad, me acompañan entrañablemente en este acto y estoy seguro de que comparten conmigo estos recuerdos. Quizá sea éste, señores académicos, el único mérito que me reconozco para estar aquí.*

*Desahogado ya con esta pública manifestación de mis sentimientos, me dispongo a dar lectura a mi discurso de ingreso, que es una mera reflexión en torno a dos conceptos científicos de gran actualidad, que a veces se nos ofrecen como un binomio indisoluble y no pocas como una antinomia irreconciliable: son la información y el caos.*

## INFORMACION Y CAOS

### En busca del orden

Para Aristóteles el orden es una de las formas o clases de la medida. Esta medida no es una mera disposición de las cosas entre sí o de las partes en el todo, sino que comporta determinada manera de interactuar. San Agustín eleva el concepto de orden a uno de los atributos que hace que lo creado por Dios sea bueno. Dios ha creado el mundo en forma, medida y orden. El orden es, pues, una perfección que subordina lo inferior a lo superior, lo creado al Creador. La naturaleza, según Maimónides, carece de capacidad para autoorganizarse y, por consiguiente, el orden que en ella se observa es consecuencia de la acción de una inteligencia superior. Para Santo Tomás, el orden consiste en la disposición de una pluralidad de cosas u objetos de acuerdo con la anterioridad y posterioridad en virtud de un principio.

La obsesión por descubrir este orden necesario en el mundo condujo a no pocos errores científicos como los recogidos en el primer libro de Kepler, cuya idea aparece ya contenida en el mismo título de la obra: *Prodomus dissertationum cosmographicarum continens mysterium cosmographicum de admirabili proportione coelestium orbium* (Introducción a las disertaciones cosmográficas referentes al misterio cosmográfico sobre la admirable proporción de las órbitas celestes). Declara en él que ha estudiado detenidamente el número, las distancias y los movimientos de los cuerpos celestes. De este estudio concluye que como los planetas eran sólo cinco (los conocidos en su época) y como cinco eran también los sólidos platónicos (es decir, los poliedros regulares) debía haber una razón divina que estableciera la relación entre ambos hechos. Por ello, la Tierra es la esfera; circunscribiendo a esta esfera un dodecaedro, la órbita de Marte estará en otra esfera en la que aquél esté inscrito. A su vez, sobre la esfera de Marte circunscribiremos un tetraedro y la esfera que incluye a éste contendrá la órbita de Júpiter. A éste seguirá un cubo, y por la esfera que lo incluye viajará Saturno, etc.

Sin embargo, Tycho Brahe ya apunta en otro sentido cuando le decía: *No construyáis una Cosmografía fundada en abstractas especulaciones; basadla en los sólidos cimientados de la observación y desde allí ascended gradualmente para averiguar las causas*. Esta línea de pensamiento culminaría con Galileo al introducir el método experimental. Pero las observaciones de Tycho Brahe, recogidas en las Tablas Rudolfinas, aparecidas en 1627, fueron la base experimental de las tres leyes que rigen el movimiento de los planetas. El título del libro en que se anuncia la tercera de estas leyes, *Harmonices mundi*, vuelve a aludir a la idea de un mundo en que impera el orden, la armonía.

Newton introduce un nuevo método en el estudio de la mecánica: el cálculo. A partir del hecho de que los planetas describen elipses alrededor del Sol, situado en uno de los focos, infiere que la fuerza atractiva debe decrecer con el cuadrado de la distancia. Ningún método experimental hubiera permitido llegar a esta conclusión que Halley y Hooke habían entrevisto por la misma época. Esta metodología llevó a Newton a enfrentarse con ciertos problemas de cálculo como, por ejemplo, demostrar que, a efectos gravitatorios, la masa de una esfera puede considerarse concentrada en su centro y reducir así la atracción entre dos esferas a la de dos masas puntuales entre las que el concepto de distancia está bien definido.

Casi simultáneamente las aportaciones de Leibniz aseguran y dan un nuevo impulso al cálculo matemático. Este mejora las notaciones y abre la puerta a la lógica simbólica actual. En el fondo está convencido de que desarrollando un lenguaje simbólico generalizado y construyendo un álgebra de proposiciones, se puede reducir a un proceso de cálculo la determinación de la verdad de cualquier proposición. Distinguía dos clases de verdades: las de razón (*adaequatio intellectus cum se*) y las de hecho (*adaequatio intellectus cum re*); las primeras son necesarias y sus opuestas son imposibles, las segundas son contingentes y sus opuestas son posibles. En las primeras se incluyen los axiomas, hipótesis, demostraciones, teoremas y corolarios que encadenan el proceso de pensamiento, tirando de lo que Leibniz llamaba el hilo de Ariadna, capaz de guiar a la razón, cual otro Teseo, a través del laberinto. La idea de orden informaba los conceptos de espacio y de tiempo, que consideraba relativos, a diferencia de Newton. Para Leibniz el espacio es un orden de coexistencia y el tiempo es un orden de sucesiones.

En 1788 publica Joseph Louis Lagrange su *Mécanique Analytique*, en la que aplica el cálculo de variaciones a las coordenadas generalizadas para ofrecer una nueva visión de la dinámica: el formalismo lagrangiano, totalmente analítico. Esta modelización de la mecánica culmina cuando Laplace extiende la teoría de la gravitación de Newton al conjunto del sistema solar, lo que constituía un complejo problema. Según las observaciones realizadas desde el tiempo de Tycho Brahe, es decir, durante dos siglos, la órbita de Júpiter se estaba reduciendo continuamente, mientras que la de Saturno se ampliaba. El hecho había sorprendido a Newton quien, al no poder explicar matemáticamente fenómenos tan complejos, supuso una periódica intervención divina para arreglar las cosas y evitar la catástrofe. Laplace desarrolló las soluciones en serie hasta las terceras potencias de las excentricidades y de las inclinaciones, antes despreciadas, concluyendo en la invariancia del movimiento medio planetario. Era el paso más importante en la física astronómica desde Newton.

## Laplace y el determinismo

Laplace resume los resultados obtenidos por medio de cálculos matemáticos y la aplicación de la ley de la gravitación de Newton en su gran obra titulada *Traité de Mécanique Céleste*. El alcance de sus conclusiones queda reflejado en sus propias palabras:

*Presentamos en la primera parte de este trabajo los principios generales del equilibrio y del movimiento de los cuerpos. La aplicación de estos principios a los movimientos de los cuerpos celestes nos ha conducido, por razonamientos geométricos, sin hipótesis alguna, a la ley de atracción universal. La acción de la gravedad y el movimiento de los proyectiles son casos particulares de esta ley. Consideramos después un sistema de cuerpos sometidos a esta universal ley de la Naturaleza y obtenemos, por un análisis singular, las expresiones generales de sus movimientos, de sus figuras y de las oscilaciones en los fluidos que los cubren. De estas expresiones deducimos todos los fenómenos conocidos de la subida y bajada de las mareas, las variaciones de los grados y de la fuerza de la gravedad en la superficie de la Tierra, la precesión de los equinoccios, el movimiento de vibración de la Luna y rotación de los anillos de Saturno. Hemos señalado también la causa de que estos anillos permanezcan constantemente en el plano del Ecuador de Saturno. Además, hemos deducido de la misma teoría de la gravitación las ecuaciones principales de los movimientos de los planetas, en particular de los de Júpiter y Saturno, cuyas grandes perturbaciones tienen un periodo de cerca de novecientos años.*

Podemos resumir lo anterior diciendo que la cosa funcionaba, y funcionaba muy bien. El Universo, como realización de un magnífico orden, respondía perfectamente a las leyes de la física. Laplace se entusiasma con sus propias conclusiones y añade:

*Las irregularidades de los dos planetas —se refiere a Júpiter y Saturno— parecían antiguamente inexplicables por la ley de la gravitación universal. Ahora constituyen una de sus demostraciones más llamativas. Tal ha sido el destino de este descubrimiento brillante, que cada dificultad que ha surgido ha resultado para él un nuevo motivo de confirmación, circunstancia que es la característica más cierta del verdadero sistema de la Naturaleza.*

Pero Laplace no lo explica todo, al menos todo lo que hoy sabemos. Por ejemplo, la Tierra no es un cuerpo rígido; los movimientos de los fluidos que

afectan al manto y a la corteza, así como las variaciones del nivel global de los mares, debidas a la congelación o fusión del hielo polar alteran el momento de inercia del planeta y afectan a su velocidad de rotación. El sistema no es, además, conservativo, pues los fenómenos de marea frenan los movimientos de los cuerpos celestes y, en el caso de la Tierra, suponen un incremento gradual de casi 2 milisegundos por siglo. Las medidas se han hecho mucho más precisas y el láser ha permitido conocer que la Luna se aleja de la Tierra 4 cm por año.

Sin embargo, Laplace no se plantea estas reservas y afirma que el sistema está diseñado *para una duración eterna, mediante los mismos principios que prevalecen tan admirablemente en la Tierra misma para la conservación de los individuos y para la perpetuidad de las especies*. Llegado a ese punto, para pasar de la física a la filosofía no faltaba más que un paso y Laplace lo dio contribuyendo al desarrollo del determinismo, según el cual todos y cada uno de los sucesos del universo están sometidos a las leyes naturales. Así lo expone en su *Ensayo filosófico*. Volvamos a escucharle:

*Así pues, deberíamos considerar el estado presente del Universo como el efecto de su estado anterior y como la causa del que le va a seguir. Supuesta por un instante una inteligencia que pudiera captar todas las fuerzas que animan la Naturaleza y la situación respectiva de los seres que la componen, una inteligencia suficientemente amplia para someter esos datos a análisis, abarcaría en una única fórmula los movimientos de los cuerpos más grandes del Universo y los del átomo más ligero. Para ello, nada sería incierto, y el futuro, tanto como el pasado, estarían presentes a sus ojos. La mente humana ofrece, en la perfección que ha sido capaz de dar a la astronomía, una remota idea de esa inteligencia. Su descubrimiento de la mecánica y geometría, unidos a los de la gravitación universal, le han capacitado para comprender en las mismas expresiones analíticas los estados del pasado y futuro del sistema del mundo. Aplicando el mismo método a algunos otros campos de su conocimiento ha logrado comprender fenómenos reservados a leyes generales y prever aquellos fenómenos que circunstancias dadas han de producir. Todos estos esfuerzos en la búsqueda de la verdad tienden a apuntar continuamente a la amplia inteligencia que hemos mencionado, de la cual la mente humana se verá siempre infinitamente alejada. Esta tendencia peculiar a la raza humana, es la que le hace superior a los animales, y su progreso en este respecto distingue a las naciones y a las épocas, y constituye su verdadera gloria.*



Laplace establece que el estado actual del Universo determina tanto el futuro como el pasado. Quien poseyere la información suficiente para describir dicho estado en un momento del tiempo, posee la historia completa. Esta proyección hacia adelante y hacia atrás radica en que el tiempo interviene en la ley fundamental de la dinámica dimensionalmente elevado al cuadrado. En efecto, así ocurre al expresar la aceleración como derivada segunda del espacio respecto al tiempo. Dicha cantidad cinemática, efecto de las fuerzas motrices, resulta invariante ante un cambio de signo del tiempo y por eso sus conclusiones se extienden en ambos sentidos de la recta real, sobre la que esta variable se represente.

A continuación apela Laplace a una inteligencia capaz de almacenar los datos, que describan todas las acciones dinámicas actuantes en un instante determinado; tratándose de un sistema universal, habían de ser en todo caso fuerzas interiores. Ciertamente, con los conocimientos de la época, bastaba una información referente a las posiciones de las partículas, sus velocidades y sus masas, pues de ello sólo dependían las correspondientes interacciones. Finalmente era necesaria una descripción cinemática de los cuerpos. En resumen, de cada partícula, supuesta esférica, habrá que conocer seis datos: las tres coordenadas de su posición y las tres componentes de la cantidad de movimiento. Si no se considerasen esféricas, habría que duplicar esta información, pues habría que conocer su orientación inicial, para lo que servirían los tres ángulos de Euler, y su rotación, dada por sus componentes cartesianas, o bien, sobre el propio triedro de Euler, es decir la nutación, la precesión y la rotación propia. El duplicar la información, no obstante, no altera el orden de magnitud de ésta.

### **Necesidad de información**

Laplace recaba, además de esa inteligencia, la capacidad de someter esos datos a análisis, es decir, su elaboración. Esta segunda parte es aún más exigente que la primera, pues el tratamiento analítico se mostró incapaz de ir más allá de dos partículas. El problema de los tres cuerpos, es decir, el estudio del movimiento de tres partículas, que se atraen según la ley de gravitación de Newton, hizo correr mucha tinta desde la época de Laplace. Más de 800 trabajos científicos de los matemáticos más notables se ocuparon de él. Las ecuaciones matemáticas, que describían el movimiento, se planteaban con facilidad, pero se resistían a una solución analítica, y la solución numérica con cálculo manual era prácticamente irrealizable. Lagrange encontró algunas soluciones particulares, la triangular y la lineal, y así quedó hasta fines del siglo

pasado, cuando Poincaré desvaneció todas las esperanzas, al demostrar que se trataba de un problema no integrable por ser insuficientes las cantidades conservadas.

La amplia inteligencia, que Laplace invoca, será siempre infinitamente superior a la mente humana. Sólo nos queda la duda de que si Laplace hubiera vislumbrado los albores del cálculo automático, hubiese acaso apeado la exigencia de esa infinitud. En efecto, el número de partículas elementales de nuestro Universo se estima en  $10^{80}$ .

No vale la pena inquietarnos por los escurridizos neutrinos que, al ser tomados en consideración, suponen algunos que pueden hallarse presentes en una proporción 100 veces superior. Dos unidades en el exponente no alteran demasiado nuestras reflexiones. Tampoco las altera el hecho de que hay que conocer 6 datos de cada partícula. Unos cálculos tan simples como espectaculares nos dicen que nadie puede pensar en almacenar esta información ni con los soportes de más elevada densidad. Pero, ¿a qué pensar en el Universo? Limitémonos a 1 litro de gas en condiciones normales. El número de sus moléculas es

$$\frac{6,0225 \times 10^{23}}{22,4}$$

El número de datos sería

$$\frac{6,0225 \times 10^{23} \times 6}{22,4}$$

y el de cifras significativas

$$\frac{6,0225 \times 10^{23} \times 6 \times 3}{22,4} = 4,8 \times 10^{23}$$

Si los registramos en diskettes de 3 1/2" y capacidad de 1,4 megabites, suponen aproximadamente  $3,43 \times 10^{17}$  diskettes. Tapizando de diskettes el medio millón de kilómetros cuadrados de España, y superponiendo capas sucesivas, superaríamos los 16 metros. ¡Y todo para describir el estado de 1 litro de gas! La infinitud de inteligencia que Laplace necesita es, al menos, razonable.

Pero las leyes de la mecánica se aplicaban principalmente en la astronomía donde el número de puntos materiales, asociados a los cuerpos celestes,

era mucho menor y los sistemas prácticamente conservativos. Las predicciones de los eclipses, por ejemplo, resultaban muy exactas, desarrollando métodos aproximados para tratar los problemas de interés práctico. La gran masa del Sol, comparada con cualquiera de los demás cuerpos de su sistema, permitía calcular el movimiento de cualquier planeta con exactitud suficiente, admitiendo que la acción de todos los demás ejercía sólo un pequeño efecto perturbador sobre su órbita.

Así estaban las cosas hasta que, alrededor de 1950, Eckert y sus colaboradores, utilizando uno de los primeros computadores electrónicos, realizaron el cálculo numérico, no ya de los tres cuerpos, sino de los seis cuerpos. Calcularon la posición de cinco planetas —Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno y Plutón— desde 1653 hasta el año 2000 con intervalos de cuarenta días. El cálculo se basó en unas 25.000 observaciones, la mayor parte de ellas entre 1730 y 1940, y las trayectorias planetarias se obtuvieron con catorce cifras decimales, es decir, en exceso respecto a las garantizadas por las medidas observadas. En total se efectuaron doce millones de operaciones. El programa comprobaba cuidadosamente cada una de ellas, pues un error arrastrado hubiera invalidado todo el trabajo. La publicación de los resultados contenía un millón y medio de cifras, y ocupaba un volumen de 325 páginas grandes. Desde entonces se han hecho cálculos mucho más importantes, pero este trabajo de hace cuarenta años es antológico en la historia del cálculo automático.

### **Principio de incertidumbre de Heisenberg**

El concepto determinista del Universo hizo crisis en 1927, cuando el físico alemán Werner Heisenberg estableció que la posición y la velocidad de un objeto no pueden ser medidas ambas exactamente en el mismo momento, incluso en teoría. La coexistencia de los meros conceptos de posición exacta y velocidad exacta carecen de significado en la naturaleza. El principio de incertidumbre de Heisenberg no se pone de manifiesto en la experiencia ordinaria, pues su alcance escapa a la observación. Sólo se hace significativo cuando se trabaja con las masas muy pequeñas de los átomos o de las partículas elementales. El producto de las incertidumbres de su posición y de la cantidad de movimiento de una de esas partículas es igual o superior a  $h/2\pi = 1,0545 \times 10^{-34}$  J.s.

### **La mecánica clásica**

Por ello la mecánica teórica clásica se seguía desarrollando por la vía analítica de Lagrange, no como una oposición a la geometría, sino por la utiliza-

ción de unos métodos deductivos capaces de levantar todo el edificio, a partir de unos pocos principios fundamentales. Basada en una axiomática muy reducida, sus métodos son estrictamente lógico-deductivos, propios de la matemática, aunque sea la materia de una parte de la física. Esto era posible, porque el edificio de la mecánica clásica, en sus partes esenciales, se consideraba cerrado. De no ser así, el método deductivo analítico hubiera tenido que convivir con el inductivo sintético, propio de la física experimental, que, a partir de hechos aislados, busca edificar una teoría. No quiere esto decir que en la mecánica, llamada clásica, teórica o básica, no quedaran preguntas abiertas, sino que el cuerpo de doctrina, en su conjunto, se consideraba firme.

De hecho, los métodos de la mecánica se aplicaron a sistemas con pocos grados de libertad, como el sólido rígido. Los sistemas constituídos por muchas partículas, aún admitiendo que obedecían a las mismas leyes, resultaban inmanejables por las razones antes apuntadas. Hamilton concibió la idea de representar el estado de un sistema de  $n$  grados de libertad por un conjunto de  $2n$  coordenadas, constituídas por los parámetros que definen el estado del sistema y sus cantidades de movimiento. Llevando estas coordenadas y velocidades generalizadas a un hiperespacio de  $2n$  dimensiones, se obtiene un punto, cuya evolución por dicho espacio, llamado espacio de las fases, representa la evolución del sistema. Dado el carácter determinista de las ecuaciones, un sólo punto, es decir, el estado en un momento determinado, define toda la trayectoria, que informa sobre el pasado y el futuro del sistema. Una trayectoria no puede cortarse a sí misma, pues a partir del punto común se tendrían dos posibles evoluciones, si bien pueden ser cerradas en los casos en que el sistema posee una evolución cíclica. Un mismo sistema puede seguir una infinidad de trayectorias, según sean sus condiciones iniciales o de contorno. Dichas trayectorias tampoco se cortan entre sí y aquéllas que son próximas, siempre permanecen próximas. Su imagen es análoga a las líneas de corriente de un fluido que se mueve en régimen laminar.

## **Le mecánica estadística**

Para estudiar sistemas con un gran número de partículas, como una masa de gas, no es necesario conocer las coordenadas generalizadas de cada una de ellas. Las propiedades macroscópicas que caracterizan el sistema, como la presión, el volumen o la temperatura, se pueden valorar aplicando métodos estadísticos a la cantidad ingente de datos que definen cada uno de los posibles microestados. En general, un macroestado corresponde a un gran número de posibles microestados distintos, pero de hecho indistinguibles entre sí por la

observación y medidas realizadas en el sistema. Esta visión de los sistemas con gran número de grados de libertad es la base de la Mecánica estadística.

Boltzmann introduce el concepto de aleatoriedad con una doble perspectiva. La equiprobabilidad de los microestados supone que el sistema pase de uno de ellos a otro de forma totalmente arbitraria. Todos los pasos entre estados microscópicos son igualmente posibles. No obstante, un mismo macroestado puede ser descrito por un número de distintos microestados, lo cual determina en el conjunto de microestados una clasificación tal, que las clases no contienen el mismo número de ellos. Por consiguiente los macroestados no son equiprobables, siendo los más cercanos al equilibrio aquéllos que corresponden a clases más numerosas de microestados.

Sin embargo, no hay ninguna razón para que un sistema que se encuentra en equilibrio permanezca indefinidamente en él. La ley de la aleatoriedad de las transiciones sigue funcionando y por ello se apartará del mismo, cayendo en otros macroestados. Estos serán tanto menos probables cuanto corresponden a una clase menos numerosa de microestados. Son éstas las imprevisibles y necesarias fluctuaciones, cuya probabilidad es menor, cuanto más se apartan del equilibrio. Si tenemos una botella de 1 litro comunicada con un frasco de  $250 \text{ cm}^3$  y llenamos el conjunto con aire, podemos esperar que en un momento determinado todo el nitrógeno esté sólo en la botella y todo el oxígeno en el frasco. No obstante, es una paciente espera que, en términos de probabilidad, podemos evaluar en  $10^{260}$  años, mientras que la vida del Universo, desde el momento de la gran explosión, se estima en  $10^{16}$  años.

La mecánica estadística permite una interpretación microscópica del potencial termodinámico, magnitud fundamental de la termodinámica del equilibrio. De esta manera la probabilidad de alcanzar tal o cual estado microscópico viene a sustituir la imposibilidad de prever la evolución del sistema, que se sigue suponiendo determinista, aunque admitiendo nuestra ignorancia sobre la información suficiente para aplicarle las leyes de la mecánica clásica.

Cabe preguntarse si tiene significado describir en términos de probabilidad la evolución de un sistema, supuesto determinista. Creemos que sí. Los jugadores de dados no se plantearán esta cuestión si tienen la seguridad de que nadie es capaz de tener la información suficiente para conocer el estado final, en que quedarán después de la caída. La mecánica estadística introduce el concepto de entropía como medida del desorden. Nótese bien que este desorden está relacionado, a través de un logaritmo y la constante de Boltzmann  $K_B = 1,3805 \times 10^{-23} \text{ J.K}^{-1}$ , con el número de microestados, que describen un macroestado conocido. Si se nos permite la expresión, la entropía es una medida de nuestra ignorancia para pasar del macroconocimiento al microconoci-

miento. Si el macroestado de un sistema pudiera ser descrito por un solo microestado, éste sería conocido y la entropía valdría cero.

La mecánica estadística, con el segundo principio, ha introducido la flecha del tiempo, que estaba ausente en la mecánica clásica. El crecimiento de la entropía en los procesos irreversibles, que son todos los reales, apunta siempre hacia el futuro. Este desorden creciente del Universo, como sistema aislado, conduce en este modelo a la muerte térmica, estado de máximo desorden, perfectamente estable y del que ninguna energía puede extraerse, por la imposibilidad de encontrar un foco caliente y otro frío. En ese océano térmico, perfectamente nivelado, no quedan más que esas olas que hemos llamado las fluctuaciones. Pero si así fue al principio, una de esas fluctuaciones pudo conducir a la mutación necesaria e imprevisible, que reunió a los átomos en la forma feliz para producir el primer código genético. Si así fuera, y sobre ello no nos pronunciamos, la flecha del tiempo no quedaría determinada por la mecánica estadística, sino que habría que suponerla. En un cierto momento se dejó de cumplir, gracias a Dios, el segundo principio de la termodinámica.

### **Hacia el concepto del caos**

Después de estas referencias a las mecánicas cuántica y estadística, retornamos a la mecánica analítica, desarrollada con los formalismos lagrangiano y hamiltoniano a partir del principio diferencial de D'Alembert y del principio integral de Hamilton. Su vocación principal eran los sistemas conservativos, es decir, aquellos que conservan la energía, lo que se cumplía bastante exactamente en astronomía, pero también tenían cabida, con ciertos retoques, los sistemas disipativos, que transforman en calor parte de su energía, debido al rozamiento, constituyendo, en sentido estricto, un problema termodinámico.

Ya hemos hecho referencia al hecho de que Poincaré demostró que el problema de los tres cuerpos no era integrable. Quiere ésto decir que no puede reducirse a cuadraturas, es decir, a integrales. Independientemente de los planteamientos cuánticos o estadísticos, la visión determinista de la mecánica sufría un notable impacto. Los formalismos lagrangiano y hamiltoniano permitían plantear cualquier problema dinámico en la misma forma canónica. Es cierto que en algunos casos las ecuaciones no podían ser resueltas analíticamente. Pero ésto era un problema estrictamente matemático: la existencia de las trayectorias para cualquier sistema en el espacio de las fases quedaba garantizada. Fue el alemán Bruns quien primeramente demostró que había problemas en los que no era posible encontrar un número suficiente de constantes del movimiento expresables como funciones analíticas de las coordenadas ge-

neralizadas. De ahí infiere Poincaré que existen sistemas dinámicos de comportamiento cualitativo distinto y que sus trayectorias en el espacio de las fases no sirven para explicar su evolución futura. Estas trayectorias podrán tener un sentido matemático, pero no físico, ya que la determinación de un punto en el espacio de las fases se hará siempre con una incertidumbre que, en algunos casos, impide determinar la trayectoria que seguirá el sistema.

La pregunta a la que hay que responder es respecto a la posibilidad de acotar los errores en la evolución futura del sistema para un tiempo tan lejano como se quiera. Incluso cuando esta acotación no es posible, interesa conocer la ley de crecimiento de estos errores. Existen casos de gran sensibilidad a las condiciones iniciales, de manera que dos puntos próximos en el espacio de fases pueden separarse mucho en el futuro, como dos vehículos que viajan próximos por una autopista podrán desviarse por distintos ramales y alejarse indefinidamente. Las condiciones iniciales del movimiento de un sistema prácticamente no determinan un punto en el espacio de fases, sino una región del mismo, tanto más pequeña cuanto más exactas han sido las medidas. Su evolución no genera, pues, una línea, sino un tubo. Y aquí se ofrecen tres posibilidades: el tubo se va cerrando y nos conduce inexorablemente a una región, línea o punto, que define la evolución en la que el sistema caerá al cabo de un tiempo suficientemente lejano. Este dominio acotado del espacio de fases constituye un atractor. Si el sistema parte de cualquier punto situado en otro dominio, llamado cuenca del atractor, se sabe que acabará irremediamente en él, como se sabe el río o lago en que acabarán las gotas de lluvia según el lugar en que han caído. Una segunda posibilidad es que el tubo en el espacio de fases no se vaya cerrando, pero que su dimensión futura permanezca acotada. Esto supone que si se parte de dos puntos próximos en el espacio de fases y se acota la separación entre ellos, dicha separación permanece también acotada en cualquier instante futuro. Finalmente puede ocurrir que el tubo se vaya abocinando, abriéndose cada vez más, con lo que dos trayectorias distintas del espacio de fases pueden alejarse infinitamente en el futuro. Esto genera, en un tiempo suficientemente largo, un régimen turbulento en la evolución de los puntos figurativos.

El caos es, pues, consecuencia de la gran sensibilidad que presentan ciertos sistemas mecánicos descritos por sistemas de ecuaciones diferenciales no lineales, a los errores con que se dan las condiciones iniciales y de la exactitud con que los cálculos se efectúan. En consecuencia, las leyes de la física clásica, aun tomando en consideración los modelos relativista y cuántico, resultan insuficientes para explicar el complejo comportamiento de la naturaleza y podemos tener la seguridad de que, por mucho que mejoren nuestros medios de medida y cálculo, una cortina opaca, más o menos lejana, ocultará el

futuro a nuestros ojos. El caos ha acabado con la concepción filosófica mecanicista de un universo que obedece fielmente las leyes de una armonía preestablecida. Como dice el norteamericano Lorenz, el vuelo de una mariposa puede alterar la evolución. Sólo cabe preguntarse: ¿acaso no estará también determinado el vuelo de esa mariposa? Dejemos a los filósofos la tarea de buscar respuestas a esa pregunta. Para los físicos basta saber que, si lo está, ellos nunca podrán averiguarlo.

### **Importancia de la información**

Este desarrollo modifica profundamente los modelos ofrecidos por la mecánica clásica. El concepto de información queda así enriquecido, pues ya no sólo comporta unos medios aproximados de observación, cuyos errores son la única barrera que separa nuestras predicciones de las que pudiera hacer la inteligencia omnisciente, que invocaba Laplace, sino que ahora forma parte esencial de los sistemas estudiados y nuestro análisis exigirá una permanente alimentación de esa información, como una máquina real exige una aportación permanente de energía para que no se detenga. Los modelos que pretenden representar el Universo, por complejos que sean, no pueden describir en todos los casos, con una aproximación satisfactoria, situaciones futuras suficientemente alejadas. Es cierto que las ecuaciones describen el comportamiento de sistemas no lineales y que muchas de ellas admiten tratamientos análogos. Pero, al no ser integrables, sólo el computador permitirá analizar dichas analogías de comportamiento. Para un matemático, análisis y cálculo eran conceptos bien distintos. El segundo comportaba la parte menos noble y, como su nombre indica, más pétrea y pesada de la matemática. Con el caos, el computador puede reclamar su puesto como método analítico indispensable.

Un sistema hamiltoniano es regular o no caótico cuando se pueden encontrar tantas constantes del movimiento (cantidad de movimiento, momento cinético, energía, etc.) cuantos grados de libertad posea el sistema. Pero ésta no es la norma, sino la excepción. Incluso los sistemas integrables ofrecen aproximaciones caóticas, pues los errores introducidos al medir las condiciones iniciales pueden crecer con el tiempo. Consecuentemente el caos no es un mero problema matemático, sino que se presenta como una ley de la Naturaleza. Por elevada que sea la precisión con que se tomen los datos y su tratamiento, se demuestra que el número de operaciones a realizar, para conocer el futuro con una aproximación requerida, crece más deprisa que la distancia temporal a esa previsión. Por tanto, para obviar el caos habría que partir de una información infinita y realizar los cálculos con una exactitud tam-



bién infinita. Cabe preguntarse por qué los efectos del caos no se detectaron antes. En algunos casos, porque la previsión se extendía a corto plazo y se cumplía, albergándose la esperanza de que, con más información y más potentes medios de elaboración, podría ampliarse este plazo indefinidamente. En otros casos, como en la astronomía y, concretamente, en el sistema solar, los efectos caóticos se pondrán de manifiesto en un futuro lejano. Hoy, sin embargo, nadie podría garantizar, como lo hacía Laplace, que las trayectorias de los planetas sean verdaderamente periódicas y que, en un momento determinado, una de ellas no aumente su diámetro, para acabar alejándose indefinidamente del Sol. Los computadores, con su actual potencia de cálculo, han permitido simular para futuros lejanos y han puesto de manifiesto la realidad del caos. La regularidad, como superposición de movimientos periódicos, se traduce en espectros discretos de frecuencias. Pero las funciones de onda no son analíticas, en general, por lo que se expresan por espectros continuos de frecuencias y éstos conducen a situaciones caóticas.

Este nuevo enfoque de la mecánica exige tener presente el concepto de información desarrollado por Shannon, como una magnitud medible. Según esta teoría, la información recibida, cuando se conoce que un suceso ha tenido lugar, es igual al logaritmo cambiado de signo de la probabilidad de realización del suceso. Así la noticia de que a uno le ha tocado el primer premio de la lotería de Navidad comporta una información algo superior a 16. En efecto, su probabilidad es equivalente a acertar la serie de 16 lanzamientos de una moneda. Hemos utilizado logaritmos en base 2, con lo cual se tiene medida la información en unidades binarias. La teoría ergódica de la información toma precisamente su nombre de la mecánica ( $\epsilon\rho\gamma\omicron\nu$  = trabajo) y en su origen se encuentra la hipótesis de la teoría cinética de los gases. El teorema ergódico, formulado por Birkhoff, transforma la hipótesis ergódica de Maxwell y Boltzmann sobre la teoría cinética de los gases en un principio riguroso, por el uso de la teoría de la medida de Lebesgue. El método se ha utilizado en una serie de investigaciones, que se extienden desde los años 30 hasta hoy y en ellas, además de Birkhoff, hay que citar a Neumann, Hopf, Kolgomorov, Sinai, Arnold y Ohrenstein. Todas ellas se han desarrollado en el seno de la matemática en diversas direcciones: análisis funcional y teoría de grupos, cálculo de probabilidades y, más exactamente, procesos markovianos, teoría de la información, etcétera.

Los métodos ergódicos han permitido plantear ciertos problemas de manera distinta y dar nuevas prolongaciones a estas ramas de la matemática. En teoría de la información un sistema ergódico no es más que una cadena de caracteres, que se suceden en términos de probabilidad, existiendo un grado de interdependencia entre ellos, pero sin que esta interdependencia pueda ex-

tenderse más allá de un cierto número de caracteres. Este número está acotado, es decir, la influencia que comporta la presencia de un carácter sigue una ley exponencial.

Si en un mensaje redactado en español aparece la letra Q se tendrá la casi seguridad de que sigue la letra U. A continuación, con una probabilidad que se puede calcular a partir de las palabras del diccionario y su frecuencia en nuestro idioma, se esperará la presencia de una E o una I. Si los hechos confirman el primer supuesto, se puede estimar como bastante probable que siga un blanco, y así sucesivamente. Estamos ante un proceso de Markov en que los hechos se suceden en términos de probabilidad. Sin embargo, habrá que estimar como absolutamente aleatoria la presencia de una letra 100 lugares más adelante, y su probabilidad habrá que calcularla tomando simplemente como base su frecuencia en la lengua española. La información que aportaba la secuencia de 3 ó 4 caracteres ha perdido ya todo valor como elemento de predicción. Hay que tener en cuenta que las probabilidades estimadas mediante las frecuencias estadísticas y las que se definen matemáticamente se parecen entre sí como las figuras reales de la naturaleza y las figuras ideales, que la geometría estudia. Los conceptos de información y entropía aparecen, pues, fuertemente relacionados: un sistema aportaría tanta más información cuanto menos probable sea su configuración, es decir, cuanto más elevada sea su entropía, y ambas están relacionadas con el logaritmo de la probabilidad.

### **La entropía de Kolmogorov**

Volvamos a la mecánica clásica. En un planteamiento determinista para la evolución de un sistema, su estado futuro era conocido con certeza, la probabilidad es 1 y la entropía nula. Sólo al considerar macrosistemas con muchos grados de libertad la entropía es mayor. Pero este desorden no pasa de ser un planteamiento aproximado, de gran utilidad práctica, pero sin ningún significado en la propia esencia de las cosas. La teoría del caos se fundamenta en un concepto bien distinto. Son ahora los sistemas con pocos grados de libertad, que se pueden describir con un número reducido de ecuaciones y cuyo estado inicial queda definido por pocas coordenadas generalizadas, los que presentan una evolución irreversible. Se pasa así de una evolución dinámica a una evolución probabilística, según un modelo de cadenas de Markov. La simetría temporal de la mecánica clásica se pierde, como ocurre en la termodinámica; se requiere una definición microscópica de la entropía.

Este fue el trabajo de Kolmogorov, que se basó en la teoría de la información para redefinir el concepto de entropía. Se llama entropía de Kolmogorov

al promedio, calculado sobre todas las trayectorias posibles, de la pérdida de información sobre el estado del sistema por unidad de tiempo. La idea de Kolmogorov consiste en discretizar el tiempo y el espacio de fases, asociando a cada trayectoria una secuencia de celdillas, por las que pasa. A continuación se puede calcular, según la teoría de Shannon, la información que supone conocer el paso de la trayectoria por una serie finita de tales celdillas y, por consiguiente, la información adicional necesaria para predecir la celdilla siguiente, por la que pasará la trayectoria. De esta manera se mide la pérdida de información que ha habido en el transcurso del tiempo. El límite que se obtiene al tender a infinito el número de celdillas, mientras que tienden a cero los diámetros de las mismas, así como los intervalos temporales, define la entropía de Kolmogorov. Esta es cero para una evolución determinista e infinita para una evolución totalmente aleatoria; adquiere cualquier valor para un sistema caótico, dando así una medida del grado de caoticidad.

Si la entropía de Kolmogorov es nula, la cantidad de información que suponen las condiciones iniciales se conserva con el paso del tiempo; si no es así, dicha información se pierde al cabo de un cierto tiempo, tanto más breve cuanto más imprecisa es la información inicial y mayor la entropía de Kolmogorov. A partir de ese momento, el futuro es absolutamente desconocido y sólo la estadística permite orientar las predicciones.

Se llama semilla al punto de partida de una trayectoria en el espacio de las fases. El flujo turbulento viene caracterizado por la rápida divergencia de las trayectorias. La distancia entre dos puntos representativos del mismo sistema puede crecer exponencialmente en función del tiempo. El coeficiente que afecta al tiempo en el exponente se llama número o exponente de Lyapunov. El caos en flujo turbulento viene caracterizado por esa rápida e impredecible separación de elementos vecinos, es decir, por la separación de dos órbitas, cuyas semillas estuvieran inicialmente muy cercanas.

El tiempo de previsión es inversamente proporcional a la entropía de Kolmogorov, pero depende, además del logaritmo de la inversa, de la precisión inicial. Hay, pues, una doble dependencia, siendo la segunda especialmente importante, pues si queremos que el alcance de la previsión crezca en proporción aritmética, la previsión de las condiciones iniciales debe crecer en progresión geométrica. Pero como la toma de datos y su elaboración también exigen un tiempo, se llega a un planteamiento en que la previsión se nos va de las manos, a pesar de la precisión de los instrumentos de medida, la abundancia de éstas y su elaboración con los más avanzados equipos de cálculo.

Incluso cuando un sistema obedece a las ecuaciones de Lagrange y Hamilton de la mecánica analítica, y además estas ecuaciones son reducibles a

cuadraturas, lo que es mucho pedir, pueden presentarse también las características de los movimientos desordenados, es decir, la irreversibilidad, la imprevisibilidad y la ergodicidad. Basta que los errores de medida con que se han valorado las condiciones iniciales crezcan linealmente con el tiempo. En este caso se dice que existe *caos determinista* y las imprecisiones no crecen exponencialmente, como ocurre con el verdadero caos, sino linealmente.

## Atractores y estructura fractal

Los sistemas que conservan la energía se llaman conservativos, pero los sistemas reales son siempre más o menos disipativos: parte de la energía degenera en forma de calor, contribuyendo al aumento de entropía. Los sistemas disipativos pueden olvidar las perturbaciones que han sufrido; por ello caen en ciertos dominios de su espacio de fases, llamados atractores, a los que ya hemos aludido. Entre ellos merecen especial mención los llamados "atractores extraños", según la terminología introducida por Ruelle y Takens en 1971. Los atractores extraños son típicos de los sistemas discretos, y sólo ocurren en los continuos cuando el orden es superior a 2; presentan un número de dimensiones no entero y el comportamiento del punto representativo en el espacio de fases constituye un "caos dinámico".

Muchos atractores extraños tienen estructura fractal. Las fractales fueron descritas por Benoit Mandelbrot en su libro *Fractals: Form, Chance and Dimension* y constituyen figuras que, al contemplar una parte de ellas, se conservan semejantes a sí mismas. La longitud de su contorno es una potencia de la escala. El exponente de esta potencia es la dimensión de Hausdorff, quien en 1913 analizó esta invariancia de escala.

Las representaciones discretas del movimiento de una partícula en espacios multidimensionales se llaman representaciones de Poincaré. Un atractor extraño presenta secciones transversales que son conjuntos de Cantor de dimensión no entera. El teorema de Poincaré-Bendixon establece que un sistema de ecuaciones diferenciales no puede tener solución caótica más que si existen, por lo menos, tres ecuaciones y tres variables. Con una o dos variables hay siempre un punto fijo o un ciclo límite. Cuando el número es mayor, un dominio del espacio de fases puede atraer todas las trayectorias de una cuenca, consiguiéndose un conjunto estable, aunque el movimiento puede ser inestable y caótico dentro de él. Se conjugan así la estabilidad con la inestabilidad, pues los movimientos próximos tienden a estos atractores extraños, en tanto que se mantiene la estocasticidad en su interior. Estos sorprendentes resultados, que el computador ha puesto de manifiesto, nos han hecho ver

que un sistema de tres ecuaciones diferenciales, puede entenderse peor que un conjunto de  $10^{23}$  partículas.

## Conclusión

Y para terminar, señores académicos, volvamos a enfrentar los dos conceptos entre los que hemos tendido el hilo conductor de este discurso: ¿la información ha creado el caos, o acaso el caos amenaza acabar con la información? La respuesta a la primera parte de la pregunta es rotundamente negativa. El caos está en la misma esencia de las cosas y es, quizá, la ley de nuestro Universo. El computador lo ha hecho visible como el telescopio y el microscopio hicieron visibles lejanas galaxias y células diminutas. En cuanto a la segunda parte de la pregunta, podemos decir que el caos no acabará con la información, como la evaporación no ha acabado con las aguas. Sólo nos ha hecho ver que es volátil y que habremos de alimentarla continuamente, si pretendemos satisfacer nuestra sed de conocer.

En el pasado los sabios quisieron descubrir en la Naturaleza una imagen de la perfección divina, presidida por leyes eternas e inquebrantables. Pretendieron encontrar en ella armonía y estabilidad, proporción y simetría, regularidad y periodicidad. Quizá olvidaron que el Creador permitió la convivencia de la virtud y el vicio, de la verdad y el error, de la sabiduría y la ignorancia... No era, pues, sorprendente que en el seno de esa Naturaleza coexistiesen el Cosmos y el Caos.

Las leyes del movimiento planetario de Kepler, o las del péndulo y las de la caída de los graves de Galileo, son simples aproximaciones, que se descubrieron al aceptar que en los fenómenos había un orden. Newton, apoyándose en el cálculo, obtuvo nuevas conclusiones sobre la gravitación, dando un primer paso hacia la unificación de las interacciones. Desde entonces, los descubrimientos físicos no han dejado de sorprendernos y, como dice Schrödinger, somos incapaces de decir lo que se tenía que haber descubierto para no quedar sorprendidos. El Universo, como la esfinge, nos plantea continuos enigmas. Pero nadie nos ha dicho cómo debería estar hecho para no plantearlos.

Recordemos las palabras de Milton en el *Paraíso perdido*: *Accuse not Nature; she has done her part; do thou but thine* (No acuses a la Naturaleza, ella ha cumplido con su papel; cumple tú con el tuyo). El nuestro es buscar ávidamente más y más información. En la Historia del Universo hay escritas muchas páginas, y muchas quedan por escribir. Pero nadie podrá encontrar el final de esa apasionante Historia.



CONTESTACION  
DEL  
**Ilmo. Sr. D. Luis-Alberto Petit Herrera**





Excmos. Sres.  
Muy Ilustres Sres. Académicos  
Sras. y Sres.:

Tras dejar constancia de mi gratitud a la Junta Directiva de la Real Academia de Doctores por su gentileza al invitarme a presentar al Académico de Número electo Dr. D. Juan José Scala Estalella, quiero significar cuánto me abruma esta intervención mía, por cuanto que estamos ante una persona eminente por muchos motivos, tal y como Vds. van a apreciar sin duda.

Siendo estudiantes y residiendo ambos en el Colegio Mayor Jiménez de Cisneros, se inició entre nosotros una relación y una amistad que me permitieron apreciar que se trataba de un hombre bueno, más activo en su espíritu que en su cuerpo, brillante y oportuno, cuya fina sensibilidad unida a su carácter afable, propiciaba una generosidad de que hacía gala en todo momento, amparada —sin duda— en su discreta, pero profunda fe religiosa. Nuestra conexión actual confirma que vive en él un espíritu festivo, que retoza en una maliciosa sonrisa para encarnarse después en una frase irónica, llena de gracia.

Pero no ha de pensarse que este comentario es una estimación subjetiva, fruto de esa hermosa parcialidad que es la amistad reverente y el cálido afecto que me unen al beneficiario que, desde hace 40 años, me honra con su cordialidad y su delicadeza, quizás porque aplica lo que indica el Eclesiastés: «Ne derelinquas amicum anticuum» (no abandones a un viejo amigo). (IX, 14.)

Entiendo que la presentación del Dr. Scala se hace por sí sola. Quiero decir que la hace él mismo pronunciando su discurso que es el elemento esencial de esta ceremonia pública y solemne. Además la objetividad de mi juicio quedará verificada a través de una simple y parcial enumeración del brillante historial del nuevo Académico.

Tras obtener en 1946 el título de Bachiller, con calificación de Sobresaliente y Premio Extraordinario en el examen de Estado celebrado en su Sevilla natal, mereció el de Ingeniero Industrial, también con la calificación de Sobresaliente y número uno de la promoción n.º 97 de la Escuela Especial de Ingenieros Industriales de Madrid.

En 1976 adquirió el título de Licenciado en Informática, tras obtener con el n.º 1 el de Diplomado en Organización y Métodos por la Escuela Nacional de la Administración Pública donde me cupo el honor de explicar una de las disciplinas. Durante aquellas clases que me permitieron compartir con él de nuevo múltiples vivencias, se mostraba siempre persona de naturales fidelidades, sociable y comunicativo, locuaz y atento, lo que me hacía musitar en mi

interior lo que André Maurois, según relata en sus *Memorias*, dijo a un amigo cuando él iba a ingresar en la Académie Française: “¡Amigo mío! Cómo os agradezco que siendo vos quien sois, seáis al mismo tiempo mi amigo.”

En 1968 defendió la tesis que le otorgó el Doctorado en Ingeniería Industrial, que logró con la calificación también de Sobresaliente y Premio Extraordinario, siendo notable el hecho de que, aunque tuvo la posibilidad de acceder al grado de Doctor a través de la Comisión Ministerial que juzgaba el historial profesional e investigador de cada Ingeniero, el Profesor Scala optó por la vía académica, presentando y defendiendo su Tesis Doctoral sobre *Condiciones de convergencia de la integral de potencia en dominios infinitos y en variedades de medida nula*.

Dentro de sus actividades profesionales he de recordar la época en que, siendo alumno de la Escuela de Ingenieros, trabajaba ya como tal en el sector privado, lo que compartía con sus primeras actividades docentes en la misma Escuela. Con posterioridad ganó la oposición de Ingeniero Industrial al Servicio de Hacienda, desarrollando su labor especialmente en el Centro de Proceso de Datos de dicho Ministerio, donde puso en funcionamiento uno de los primeros computadores electrónicos que llegaron a España. Pasó en 1971 a la titularidad de la Subdirección General encargada de la Jefatura del Servicio Central de Informática de la Presidencia del Gobierno, habiendo colaborado después en la Dirección General de Organización, Procedimientos e Informática de dicha Presidencia del Gobierno, puestos de los que obtuvo la excedencia para dedicarse a su gran vocación docente, tras haber mostrado siempre su talante respetuoso y abierto a todos los horizontes. El recuerdo y el afecto de sus anteriores actividades no lastraron sus alas en el vuelo universal de su vocación, sino que lo hicieron viento favorable para sus conjeturas.

En conexión con sus trabajos, ha sido Asesor de la Facultad de Informática de la Universidad Politécnica de Madrid durante los cinco primeros años de su existencia y ha colaborado entre otros en la OCDE y en el Instituto Nacional de Racionalización del Trabajo. Forma parte del Consejo de Dirección de la Fundación CITEMA, dentro de la cual preside el Jurado que otorga el Premio a una Tesis Doctoral referente a Informática. También ha sido Consultor del Gobierno Portugués en temas de su especialidad y, además de participar en la Delegación Española de múltiples Congresos y Seminarios Internacionales, ha sido Presidente del Consejo Ejecutivo de la Oficina Intergubernamental para la Informática, que es el organismo vinculado con este tema en la estructura de la UNESCO.

Su participación como ponente ha sido numerosa desde Portugal hasta Chile pasando, en España, por el Patronato Juan de la Cierva, la Escuela de Or-

ganización Industrial o Fundesco, que yo recuerde. Y en cuantas ocasiones le escuché habló con elocuencia, pero sin barroquismo ni ese atropello de imágenes que suelen contener las palabras de los andaluces, poniendo de manifiesto su ingente labor creativa y de promoción.

Mientras todo ésto abunda en que estamos ante un profesional destacado por méritos propios, que hace innecesario el empleo de adjetivos encomiásticos, conviene señalar que el beneficiario ha dejado constancia siempre, en sus trabajos y en sus intervenciones, de su carácter abierto a la comprensión y fácil a la disculpa, trascendiendo en cuantas reuniones participó su respeto a la libertad de cada uno, partiendo de que la libertad de uno termina donde empieza la del otro, así como su carácter humanista y humano en el doble sentido de abarcar la humana cultura y poner énfasis en el respeto y en el conocimiento de las personas.

En el orden asociativo, el Doctor Scala ha sido Vicepresidente de la Asociación de Licenciados en Informática, Miembro de la Junta Directiva de la Asociación Española de Informática y Automática, formando parte en la actualidad del Patronato de la Fundación Universidad-Empresa y siendo Miembro Colaborador del Club de Roma y Fundador de la Asociación de Amigos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid creada a fines de 1989.

Su magisterio comenzó cuando, aún de alumno, completaba para sus compañeros las explicaciones de algunos profesores.

En el año 1960, nuestro nuevo Miembro ganó por oposición la Cátedra de Mecánica Fundamental de la Escuela en la que había cursado sus estudios.

Como Catedrático, es maestro en puntualidad, en exactitud, en seriedad, en claridad de exposición, en entrega y en generosidad de asistencia.

Habiéndole escuchado muy distintas conferencias, estoy seguro que sus clases, siempre preparadas, originales, matizadas con una experiencia personal siempre inédita, son al mismo tiempo modelo de elegancia. Con su sonrisa y sus modos de acogida permanente, con la amenidad de sus comentarios, el nuevo Miembro es un ejemplo vivo de lo que debe ser un maestro ya que su erudición y su experiencia no le alejan nunca de la realidad cotidiana y minúscula, en él nunca vulgar.

El nuevo Académico ha sido además Profesor de Investigación Operativa durante 10 años en la actual Facultad de Ciencias Empresariales de la Universidad P. Comillas e impartió clases también en la Escuela Nacional de Administración Pública y en la Escuela Nacional de Administración Local, habiendo

dictado Curso de Doctorado sobre "Física Estadística" en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial y sobre "Teoría de Autómatas" en la Facultad de Informática de Madrid.

Su vocación docente le condujo a detentar la Jefatura de Departamento en la Escuela de Formación del Profesorado de Grado Medio, y la Dirección del Instituto de Ciencias de la Educación de la Universidad Politécnica de Madrid entre 1974 y 1984. Su larga experiencia en el trabajo de Organismos Internacionales ha hecho que la Dirección de la Escuela le haya encomendado la coordinación de las acciones, cada vez más numerosas, de intercambio de alumnos y profesores entre las Universidades de la Comunidad Económica Europea en el marco de los distintos programas comunitarios. Desde 1986 es Director del Departamento de Física Aplicada a la Ingeniería Industrial de la Universidad Politécnica de Madrid.

Importante es también su tarea investigadora de la que da una prueba la dirección de ocho tesis doctorales en relación con la investigación en aspectos de la educación así como de la mecánica y de otros aspectos de la Física y cuyos titulares son hoy, a su vez, en su mayoría Catedráticos de Universidad, ocupándose actualmente de la Dirección de dos nuevas tesis.

Su rigurosa preparación le ha permitido publicar catorce obras que aparecen en el Índice de Autores de la Biblioteca Nacional en torno al cálculo tensorial, al cálculo vectorial, a la informática, a la mecánica analítica y a la mecánica fundamental, estando pendientes de registrar otras cuatro. Y ello además de muy numerosos artículos editados en Revistas italianas, portuguesas y españolas.

Quieren los usos académicos que la presentación de un nuevo Académico englobe una contestación a su discurso.

Dada la enorme personalidad de nuestro nuevo compañero y el profundo conocimiento de que ha hecho gala sobre la materia que ha escogido, optaré por limitarme a formular sucintamente seis puntos de reflexión que me ha sugerido su sapiente discurso, que ha consistido, como reza etimológicamente en la definición de dicho sustantivo, en un periplo, en una ambulación alrededor del tema información y caos.

En primer lugar, es fácil apreciar un paralelismo entre su apasionante exposición, en lo que conlleva de desarrollo histórico de la física, y el eterno interrogante que las personas nos planteamos sobre quién somos: algo que resulta inseparable del dónde estamos. Por ello que el cambio que estamos teniendo de nuestra visión del Universo ha de implicar un cambio en la visión de nosotros mismos. El anhelo por alcanzar esta visión ha sido sin duda el

gran acicate que ha llevado a una rápida expansión de la física, cuyos estudios han ido consiguiendo a lo largo del tiempo que sus ideas avanzaran hacia lo desconocido, haciendo de la física un caminar científico sin parangón desde la mecánica de Newton hasta las teorías modernas de la información y del caos.

En segundo lugar, merece especial ponderación el que, si bien la experimentación y la formulación matemática son los dos métodos que se han empleado en la física a lo largo de su historia, la aportación de las matemáticas ha consistido más en su carácter simbólico que en el cuantitativo. Los simbolismos artificiales y su interrelación a través de modelos son, en efecto, los que hacen posible profundizar y ampliar los experimentos. Por otra parte un resultado numérico no garantiza nunca la confirmación de una hipótesis que depende en último término de una interpretación coherente con un comportamiento racional de las personas. Y éste requiere que las nuevas teorías se construyan a partir de otras antiguas que quedan a su vez corregidas por las nuevas. Esa complementariedad entre experiencia y matemáticas aparece desde Newton, es decir, después de que el canónigo polaco Nicolás Copérnico introdujera en 1543 una gran revolución con el modelo heliocéntrico y de que Galileo descubriera las leyes de caída de los graves.

En tercer lugar, singular atención sugiere la figura de Isaac Newton cuyos méritos van desde las leyes de la gravitación hasta los fundamentos del cálculo infinitesimal. En particular, Newton introdujo grandes avances en el cálculo, aunque no disponía de ordenadores. Por ejemplo, se cuenta que Halley, estando preocupado por la forma de la órbita que describía un cuerpo que fuera atraído por otro con una fuerza inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que separara a ambos, planteó esta pregunta a Newton. Este contestó sin dudar que la órbita sería elíptica. Quiriendo Halley conocer cómo había recibido tan rápida respuesta Newton contestó: «Ya lo he calculado antes». Hoy, con la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica, se obtienen los resultados de la mecánica newtoniana cuando se aplican a cuerpos de gran masa respecto a la de las partículas elementales o pequeña velocidad comparadas con la de la luz.

El hilo del discurso del recipiendario me ha hecho recordar, en cuarto lugar, la interrelación existente entre la evolución de la física y la de las matemáticas. Las ecuaciones diferenciales que modelaron las fórmulas del movimiento de Newton han implicado una expresión del esquema determinista de la causalidad. Y han sido necesarias nuevas generaciones de científicos para que el esquema causal se correspondiera con la distribución estadística, de la misma forma que la teoría de conjuntos y el análisis de la simetría han sido ne-

cesarios para la física de las partículas elementales. La actual versión del Universo ha sido posible gracias a todo ésto, como lo ha sido, por otra parte, gracias a la mecánica cuántica con su dualidad onda-corpúsculo, al concepto de antimateria y al de espacio de fases; gracias —desde los años 60— al concepto de supergravedad y de supersimetría que propicia unificar las cuatro fuerzas fundamentales y —desde los 80— gracias a la teoría de las cuerdas y de las supercuerdas. Un proceso inacabado ya que hoy prosigue aún el descubrimiento de partículas más elementales. Los Premios Nobel de Física en 1990: Jerome Friedman, Henry Kendall y Richard Taylor son quienes detectaron los quarks —cuyo nombre procede de la novela de James Joyce *Fumegan's wake*— y de los que existen seis tipos como partículas elementales que configuran los protones y los neutrones. Los quarks junto a los gluones que los unen y a los electrones forman toda la materia del Universo. Este desarrollo de los conceptos relativos al espacio no excluye el de los relativos al tiempo, desde su concepto cíclico en la Grecia clásica al de su progresión lineal basada en la tradición judeo-cristiana, para llegar al ortocronos en el big-bang y con Hawking a su antisimetría como consecuencia de las flechas del tiempo.

En quinto lugar, una especial reflexión insinúa la relevancia que ha dado el Académico electo a la termodinámica que, en vez de concebir los procesos en términos de movimiento de partículas o de ondas a través del espacio, considera los sistemas a medida que se transforman en el tiempo, es decir como un proceso markoviano, con lo que volvemos al paralelismo entre desarrollo de la física y de las matemáticas. Es decir, que la termodinámica se puede calificar como descriptiva de la comunicación, ya que todo sistema pasa de un estado a otro por la transmisión de la información, que es lo que se obtiene de una experiencia. Por ello, que la termodinámica sea la teoría más amplia de la física ya que describe el proceso fundamental de la información y de la entropía. El universo en que vivimos no es pues un universo mecánico como dedujo Newton, ni un universo de luz como pensaba Einstein, sino un universo de comunicación.

Una última cavilación merece el considerar la no linealidad y la dependencia de las condiciones iniciales, que son las características del caos, que han hecho que éste venga a añadirse a la relatividad y a la mecánica cuántica para configurar los tres grandes avances en la física del siglo XX. Con el caos se soslaya la ignorancia que se tenía en torno a los desórdenes de la atmósfera y del mar alborotado, a las fluctuaciones de las poblaciones animales y vegetales, a las oscilaciones del corazón y del cerebro. El efecto mariposa de Lorenz, según el cual se puede obtener un comportamiento de resultados impredecibles a base de tres ecuaciones diferenciales deterministas no lineales, el atrac-

tor de Ruelle y la subsiguiente geometría de los fractales, con su encaje p.ej. en las ramificaciones de los bronquios, son aspectos ya muy divulgados del caos basados en principios homólogos a los usados para el estudio del humo de un cigarrillo, que se remonta suavemente desde el cenicero, se acelera hasta que sobrepasa una velocidad crítica y se divide en torbellinos desordenados, removiéndose así la teoría de Laplace sobre la predictibilidad determinista. El traer el tema del caos al seno de la Real Academia de Doctores me parece de especial interés. En efecto, la singularidad esencial de esta Corporación estriba en su estructuración en las diez distintas Secciones relacionadas con las Letras, las Ciencias, la Técnica y las Artes y en su interdisciplinaridad. Pues bien, esta característica tiene precisamente la teoría del caos por cuanto que afecta no solo a la física, sino que también encuentra su aplicación en la biología, en la demografía, en la sociología, en la economía, etc. En este último aspecto, p. ej., las hipótesis del caos tienen la ventaja de su flexibilidad, no implicando ni la homogeneidad ni la continuidad que son las condiciones del espacio euclídeo, pero que no se corresponden con las cualidades en ciertos modelos econométricos.

El periplo del Dr. Scala a través de la física nos lleva, en resumen, a concluir sobre la gran capacidad de los científicos para trascender lo que simplemente ven. Han construido modelos y han inventado lenguajes simbólicos para interrogar a la naturaleza. Todo ello ha conllevado una alta dosis de creatividad, igual que se ha requerido ésta para valorar sus conclusiones. De esto se induce que han tenido que saber que saben: algo que está por encima de la materia.

Es decir, que las personas construyendo modelos, concibiendo teorías, diseñando experimentos y trascendiendo lo que es puramente convencional, tenemos capacidad para conocer y dominar la naturaleza. Pero nada más. Desconocemos la esencia de los hechos, porque el conocimiento completo está fuera de nuestro alcance. Solo sabemos que la ciencia, aún despojada de toda trascendencia, pone de manifiesto que el Universo es un todo unitario y que está bien hecho, por lo que nuestra actitud no puede ser más que la de la apertura a la realidad. Aquello que decía San Agustín: «Abierto estoy para Ti, quienquiera que seas, porque me llamas»;

Como concluye nuestro recipiendario: «Nadie podrá encontrar el final de la apasionante historia del Universo».

Desde esta perspectiva científica y humanista bien probada en su discurso de ingreso, y cargado de méritos profesionales y docentes, viene a colaborar en nuestras tareas el nuevo Académico. La medalla que le va a ser impuesta así como el Diploma que le va a ser entregado —con lo que se le dará pose-

sión de su plaza— constituyen las credenciales que le van a permitir ejercer en el seno de nuestra Corporación el derecho de servir a la ciencia, a la técnica y a la Sociedad.

Dr. D. Juan José Scala Estalella: los Miembros de esta Real Academia, siendo conscientes de que como dice Voltaire en su *Edipo* "L'amitié d'un grand homme est un bienfait de Dieu" (la amistad de un gran hombre es un don de Dios), nos honramos desde ahora con su amistad como la Real Academia se honra con su presencia, ya que con su ingreso se incrementa, si cabe, el prestigio, la dignidad y la seriedad de esta Institución en la que un grupo de doctores, catedráticos e investigadores en distintas disciplinas tiene la misma ambición: el bien común.

En nombre de la Real Academia de Doctores y en el mío propio os doy la bienvenida a su seno.