



El caos cotidiano

Las matemáticas de lo impredecible, desde el mercado
de valores hasta las listas de éxitos o el tiempo

BLUME

Brian Clegg

El caos cotidiano



Título original *Everyday Chaos*

Edición Nigel Browning, Kate Shanahan,
Clare Saunders y Richard Webb

Diseño Koen Slothouber y Sandra Zellmer

Traducción Alfonso Rodríguez Arias

Doctor Ingeniero Industrial

Coordinación de la edición en lengua española
Cristina Rodríguez Fischer

Primera edición en lengua española 2021

Primera edición en formato electrónico 2021

© 2021 Naturart, S.A. Editado por BLUME

Carrer de les Alberes, 52, 2º, Vallvidrera

08017 Barcelona

Tel. +34 93 205 40 00 e-mail: info@blume.net

© 2020 UniPress Books Ltd., Londres

I.S.B.N.: 978-84-18725-79-1

Todos los derechos reservados. Queda prohibida la
reproducción total o parcial de esta obra, sea por medios
mecánicos o electrónicos, sin la debida autorización
por escrito del editor.

WWW.BLUME.NET

El caos cotidiano

Las matemáticas de lo impredecible, desde el mercado
de valores hasta las listas de éxitos o el tiempo

BLUME

Brian Clegg

Contenido

6	Introducción		
	Mecanismo de relojería y caos		
14	Newton, Laplace y el sorprendente universo determinístico		
22	La aleatoriedad es predecible		
26	El poder de la probabilidad		
32	El diario del pavo		
36	El movimiento del péndulo		
42	No es computable		
	Movimientos intrincados de Newton y retroalimentación sin control		
50	El tema de la gravedad		
58	Con dos cuerpos, bien; con tres, mal		
64	Galaxias giratorias		
70	Billar versus pinball		
76	La seguridad del vapor		
	Problemas del tiempo y mariposas caóticas		
84	Con la vista en el futuro		
91	Lluvia o sol		
99	El gran panorama		
107	La transformación de la meteorología		
	Atractores extraños y distancias inconmensurables		
116	Islas y atracciones		
121	El extraño mundo del espacio físico		
127	Autosimilitud		
133	Concepto de fractal		
143	El universo fractal		
	Quiebras del mercado de valores y superéxitos		
150	Mal uso de la probabilidad		
156	El juego de los mercados		
160	Retroalimentación y las formas de Sierpiński		
163	De expertos a éxitos de venta		
165	Macrodatos		
173	La salida del caos		
	Dominio del caos		
184	Tiempos turbulentos		
189	Peligro del cielo		
197	Secretos caóticos		
202	Caos en el tráfico		
205	Pánicos de la población		
209	Caos cuántico		
	Complejidad y emergencia		
214	Sistemas complejos		
224	Emergencia		
232	Superorganismos		
238	Adaptación		
241	Vida emergente		
244	Inteligencia artificial		
247	Bienvenidos al caos y la complejidad		
252	Índice		
256	Créditos de las imágenes		

Quiebras del mercado de valores y superéxitos

150	Mal uso de la probabilidad
156	El juego de los mercados
160	Retroalimentación y las formas de Sierpiński
163	De expertos a éxitos de venta
165	Macrodatos
173	La salida del caos

Dominio del caos

184	Tiempos turbulentos
189	Peligro del cielo
197	Secretos caóticos
202	Caos en el tráfico
205	Pánicos de la población
209	Caos cuántico

Complejidad y emergencia

214	Sistemas complejos
224	Emergencia
232	Superorganismos
238	Adaptación
241	Vida emergente
244	Inteligencia artificial
247	Bienvenidos al caos y la complejidad

252	Índice
256	Créditos de las imágenes

Introducción

Los científicos y los matemáticos tienden a tomar términos del lenguaje común y darles significados muy específicos. Por ejemplo, en la práctica cotidiana se suelen utilizar casi como sinónimos «potencia» y «energía». Sin embargo, en la física, el término potencia define específicamente la cantidad de energía transmitida en la unidad de tiempo. De un modo semejante, las palabras «caos» y «complejidad», que serán fundamentales en lo que se expone en el presente libro, tienen un carácter ampliamente descriptivo en su uso general, pero, en matemáticas, tienen significados que implican características particulares.

Coloquialmente, cuando hablamos del caos, pensamos en algo revuelto, desordenado, azaroso. La palabra tiene su origen en la latina *chaos*, que a su vez deriva de la griega que describía lo primero que existió, el estado amorfo, informe e impreciso en que se encontraba la materia antes de la ordenación del universo. La palabra griega significaba también abertura o abismo y, en cualquier caso, denotaba una carencia de estructura. El caos sembraba confusión y era una fuerza destructiva. No definía nada bueno, por lo que fue el término elegido para describir las matemáticas del comportamiento de un número sorprendentemente grande de cosas en nuestro entorno. Aplicado en un principio al crecimiento de la población animal y al tiempo climático, el caos en su sentido matemático es típico de un sistema, un conjunto de cosas que interactúan, en el que una pequeña diferencia en el modo en que se originan puede conducir a enormes implicaciones en cómo se desarrollan finalmente.

Si el caos implica impredecibilidad, el desorden que surge de puntos de partida aparentemente ordenados, el concepto matemático de complejidad es una especie de *alter ego* (aunque los sistemas caóticos pueden ser complejos). En un sistema complejo, la interacción de componentes aparentemente simples lleva a resultados que de otro modo no habrían sido posibles. La complejidad es llevar al extremo la expresión del todo es más que la suma de sus partes.

→
Desenmarañando el caos
Ilustración del grabador
del siglo xvi Hendrick
Goltzius para Mesmerfyseis,
el poema de Ovidio del
siglo i.





En el lenguaje común, «complejidad» hace referencia a algo que consta de muchas partes o que tiene una forma intrincada. Sin embargo, la complejidad matemática puede surgir de un sistema relativamente pequeño, aunque también lo puede hacer de un mecanismo intrincado. En resumen, un sistema no necesita ser «complejo» para serlo matemáticamente.

Una característica de un sistema complejo es la emergencia. Es aquí donde se hace válido el concepto de más que la suma de las partes». La emergencia sugiere que del sistema complejo «emergen» espontáneamente nuevas propiedades sin que haya una fuerza rectora responsable de la conformación de esas nuevas propiedades. El lector, por ejemplo, es un sistema complejo. Si analizamos todos los átomos individuales que forman su cuerpo en su totalidad, constatamos que no están vivos. Sin embargo, él sí lo está. Si subimos al siguiente nivel, podríamos determinar que las células de su cuerpo están vivas, pero no son capaces de pensar, o sentir, o realizar las acciones que hace el cuerpo. Estas propiedades o características son emergentes de la complejidad que es la persona del lector.

Quizá lo más notable del caos y la complejidad es su presencia en toda la naturaleza que nos envuelve. Están en todos los seres vivos, en el tiempo, en la mayor parte de las cosas del mundo real con las que interactuamos. También están presentes en muchas creaciones y sistemas humanos, desde el mercado de valores a una librería. En la escuela no nos enseñan nada sobre el caos y la complejidad. Tampoco están presentes en una gran cantidad de los trabajos realizados por científicos, que, a menudo, se concentran en los pequeños detalles, con resultados que no son aplicables holísticamente.

Gran parte de la ciencia puede describirse como reduccionista; descompone algo complicado en sus componentes para estudiar cómo funcionan, y los vuelve a unir para intentar entender cómo es el conjunto. Por ejemplo, una reacción química en el mundo real puede ser caótica. Cualquiera que haya añadido ácido sulfúrico concentrado al agua sabe que el resultado depende en gran manera de cómo se inicia el proceso. Sin embargo, cuando estudiamos química, descomponemos los compuestos en sus átomos componentes y solo analizamos el modo en que interactúan.

Las dos teorías hermanas del caos y la complejidad nos proporcionan la posibilidad de alcanzar una mejor comprensión del mundo real, bastante mejor que el universo de juguete en el

que se desenvuelven la mayor parte de las ciencias. El mundo real es mucho más complejo, caótico, y, francamente, más interesante de lo que sugieren las ciencias que aprendimos en la escuela. Estamos a punto de sumergirnos en él y descubrir la realidad.

Bienvenidos al caos cotidiano.

Qué será, será

En los últimos 2000 a 2500 años, hemos desarrollado un número creciente de perspectivas científicas, apoyadas a menudo por las matemáticas. En algunos casos, este enfoque ha resultado notablemente efectivo. Sin embargo, con demasiada frecuencia, el mundo real ha frustrado los intentos de la ciencia para predecir lo que deparará el futuro.

Debimos esperar hasta la segunda mitad del siglo xx para darnos cuenta de lo que sucedía. La interacción de los componentes de un sistema, desde un aparentemente sencillo péndulo a los sistemas enormemente detallados de los pronósticos del tiempo, causaban resultados inesperados. Al mismo tiempo, grupos de entidades sencillas son capaces de ejecutar obras notables; piense, por ejemplo, en la habilidad de algunas especies de hormigas, que, como entes individuales serían incapaces de ningún acto útil, pero que, mediante un trabajo conjunto, pueden utilizar sus cuerpos para construir puentes, cosear hojas y transportar cargas considerables.

Para ver el modo en que llegamos a comprender el caos y la complejidad, debemos dar un paso atrás en el tiempo hasta el momento en que parecía que el futuro estaba totalmente al alcance de nuestras mentes matemáticas. Gracias a los trabajos de Isaac Newton, sus sucesores estaban convencidos de que muy pronto sería posible enfrentarse al universo y vencer.

que se desenvuelven la mayor parte de las ciencias. El mundo real es mucho más complejo, caótico, y, francamente, más interesante de lo que sugieren las ciencias que aprendimos en la escuela. Estamos a punto de sumergirnos en él y descubrir la realidad.

Bienvenidos al caos cotidiano.

Qué será, será

En los últimos 2000 a 2500 años, hemos desarrollado un número creciente de perspectivas científicas, apoyadas a menudo por las matemáticas. En algunos casos, este enfoque ha resultado notablemente efectivo. Sin embargo, con demasiada frecuencia, el mundo real ha frustrado los intentos de la ciencia para predecir lo que deparará el futuro.

Debimos esperar hasta la segunda mitad del siglo xx para darnos cuenta de lo que sucedía. La interacción de los componentes de un sistema, desde un aparentemente sencillo péndulo a los sistemas enormemente detallados de los pronósticos del tiempo, causaban resultados inesperados. Al mismo tiempo, grupos de entidades sencillas son capaces de ejecutar obras notables; piense, por ejemplo, en la habilidad de algunas especies de hormigas, que, como entes individuales serían incapaces de ningún acto útil, pero que, mediante un trabajo conjunto, pueden utilizar sus cuerpos para construir puentes, coser hojas y transportar cargas considerables.

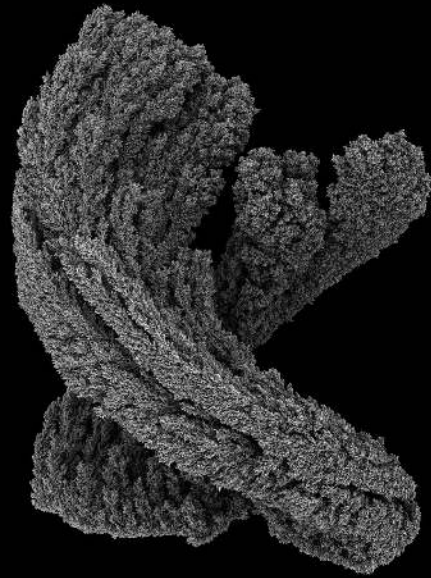
Para ver el modo en que llegamos a comprender el caos y la complejidad, debemos dar un paso atrás en el tiempo hasta el momento en que parecía que el futuro estaba totalmente al alcance de nuestras mentes matemáticas. Gracias a los trabajos de Isaac Newton, sus sucesores estaban convencidos de que muy pronto sería posible enfrentarse al universo y vencer.

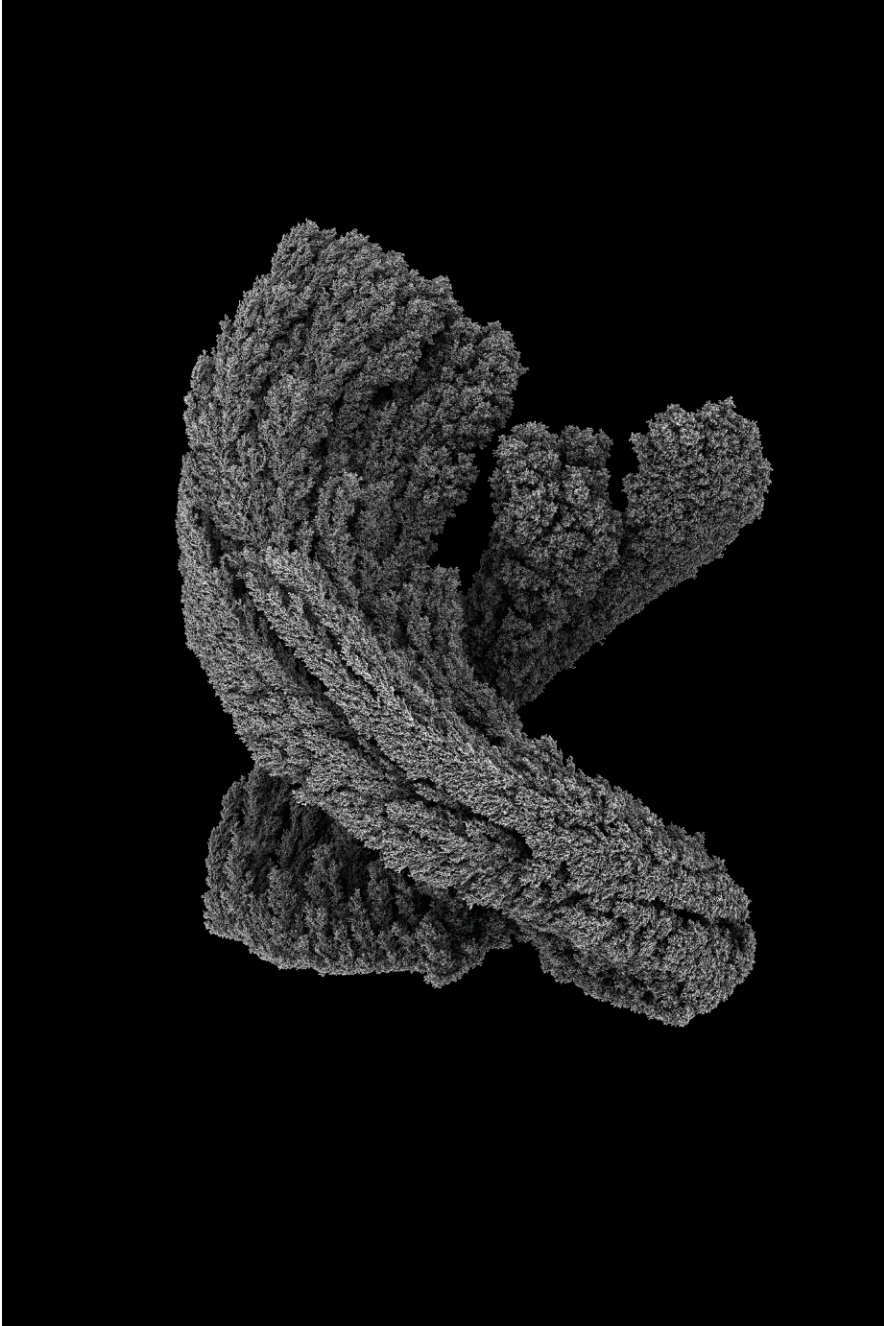




Migración de estorninos
De la interacción de las aves en vuelo emergen complejas formas cambiantes.

1
Mecanismo de relojería y caos





Newton, Laplace y el sorprendente universo determinístico

«Un intelecto que conociera en un momento determinado todas las fuerzas que animan la naturaleza y la posición relativa de los entes que la componen, si fuera lo suficientemente vasto para analizar los datos, podría reflejar en una única fórmula el movimiento de los grandes cuerpos del universo y de los más ínfimos átomos; para ese intelecto nada sería incierto y tanto el futuro como el pasado se presentarían ante sus ojos».

Pierre-Simon, marqués de Laplace, 1749-1827

La fluidez del tiempo

En nuestros días, en los que la tecnología forma parte de nuestra vida normal y cotidiana, es muy fácil olvidar el papel tecnológico transformador desempeñado por el reloj mecánico. Antes de que existieran los relojes, el tiempo era siempre algo aproximado, con puntos de referencia muy imprecisos. Todo el mundo podía hacer referencia al tránsito aparente del Sol en el cielo o al movimiento del firmamento por la noche (si no estaba nublado). Los más acomodados podían disponer de un reloj solar, o de una clepsidra que medía el tiempo mediante el flujo regulado de un líquido que goteaba por un pequeño orificio en su parte inferior, o medirlo por la combustión de una vela calibrada. Sin embargo, no existía un concepto definido de exactitud. Esto lo revelan algunas expresiones que han perdurado como «las arenas del tiempo» que hacen referencia a los relojes de arena, o el modo de expresarse en función de la posición del Sol en el cielo cuando se usan términos como amanecer, mediodía y anochecer.

Hoy en día, nuestras vidas están tan ligadas a la tecnología que la precisión del tiempo puede ser una carga, pero cuando se inventaron los relojes mecánicos fueron considerados una revelación maravillosa. No solo era posible saber exactamente la hora para poder hacer una cita a una hora determinada sin tener que esperar una hora o dos, sino también para poder cumplir los preceptos de las distintas religiones que estaban relacionados con tiempos determinados, y para la ciencia. Disponer de un medio para observar el progreso del tiempo fue fundamental para empezar a comprender cómo funcionaban algunos aspectos del universo. No es casual que los grandes avances en la física del movimiento llegaran a Europa al mismo tiempo que crecía el empleo de los relojes bastante precisos.

Parece ser que los primeros relojes mecánicos se crearon en Europa en el siglo XIV. Es difícil determinar cuál fue el primero, pero uno de los ejemplares más antiguos fue el de la abadía de San Albano en Inglaterra, construido por Richard de Wallingford en la década de 1320. Este no sobrevivió a la reforma, pero otro de los primeros relojes ingleses, en la catedral de Salisbury, de hacia 1386, funciona todavía hoy. Como muchos relojes de la época, no tenía dial, y el objeto del mecanismo era hacer sonar una campana a determinadas horas del día para convocar a los servicios religiosos programados.

En los primeros relojes, el mecanismo del escape, que mide la unidad de tiempo, no era lo bastante preciso desde el punto de vista actual. Las mediciones relativamente precisas del tiempo no se lograron hasta 1656, cuando el científico holandés Christiaan Huygens inventó un reloj con el batido regulado por un péndulo. Contemporáneo de sir Isaac Newton, Huygens se cuenta entre los que dieron un sentido más matemático a la física.

Pocas décadas antes, cuando Galileo Galilei necesitó introducir el tiempo en sus estudios de los objetos en movimiento, se vio obligado a recurrir a mediciones imprecisas como, por ejemplo, su propio pulso. Sin embargo, con Newton, las matemáticas desempeñaron un papel fundamental en su explicación del universo, por lo que necesitó

Hoy en día, nuestras vidas están tan ligadas a la tecnología que la precisión del tiempo puede ser una carga, pero cuando se inventaron los relojes mecánicos fueron considerados una revelación maravillosa. No solo era posible saber exactamente la hora para poder hacer una cita a una hora determinada sin tener que esperar una hora o dos, sino también para poder cumplir los preceptos de las distintas religiones que estaban relacionados con tiempos determinados, y para la ciencia. Disponer de un medio para observar el progreso del tiempo fue fundamental para empezar a comprender cómo funcionaban algunos aspectos del universo. No es casual que los grandes avances en la física del movimiento llegaran a Europa al mismo tiempo que crecía el empleo de los relojes bastante precisos.

Parece ser que los primeros relojes mecánicos se crearon en Europa en el siglo XIV. Es difícil determinar cuál fue el primero, pero uno de los ejemplares más antiguos fue el de la abadía de San Albano en Inglaterra, construido por Richard de Wallingford en la década de 1320. Este no sobrevivió a la reforma, pero otro de los primeros relojes ingleses, en la catedral de Salisbury, de hacia 1386, funciona todavía hoy. Como muchos relojes de la época, no tenía dial, y el objeto del mecanismo era hacer sonar una campana a determinadas horas del día para convocar a los servicios religiosos programados.

En los primeros relojes, el mecanismo del escape, que mide la unidad de tiempo, no era lo bastante preciso desde el punto de vista actual. Las mediciones relativamente precisas del tiempo no se lograron hasta 1656, cuando el científico holandés Christiaan Huygens inventó un reloj con el batido regulado por un péndulo. Contemporáneo de *sir* Isaac Newton, Huygens se cuenta entre los que dieron un sentido más matemático a la física.

Pocas décadas antes, cuando Galileo Galilei necesitó introducir el tiempo en sus estudios de los objetos en movimiento, se vio obligado a recurrir a mediciones imprecisas como, por ejemplo, su propio pulso. Sin embargo, con Newton, las matemáticas desempeñaron un papel fundamental en su explicación del universo, por lo que necesitó

el tipo de precisión que proporcionaban los relojes de Huygens y sus sucesores. Los mecanismos de relojería no solo ponían a disposición el modo con el que medir el tiempo de los movimientos, sino que creaban un modelo mental en el que basar la comprensión del universo en sí.

El legado de Newton

Desde que los antiguos griegos estudiaron por primera vez el cielo nocturno, el universo fue considerado una estructura mecánica, con esferas de cristal que soportaban los astros y las estrellas, como si fueran los engranajes de una máquina. Sabemos que los griegos construyeron un modelo mecánico con engranajes (es probable que más de uno) que reflejaba algunos de los movimientos de los cuerpos celestes con el notable mecanismo Antikythera, una calculadora astronómica de h. 100 a. C., que se encontró en un pecio frente a las costas griegas en 1901.

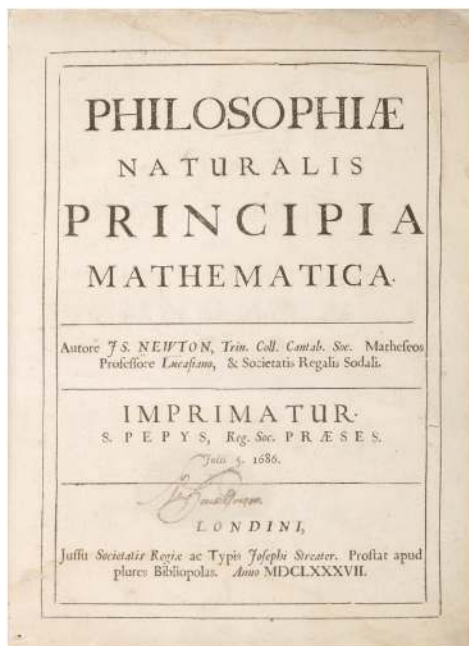
Muchos relojes astronómicos espectaculares, de los que un ejemplo extraordinario es el Orloj de Praga, en la República Checa, que data de 1410, presentaban, mediante un mecanismo de relojería, numerosos aspectos del universo, en tanto que los pequeños, los planetarios mecánicos, reproducían modelos heliocéntricos de su universo (lo que hoy denominamos el sistema solar), que mostraban

→
Reloj astronómico de Praga (Orloj), detalle
Dial que muestra los recorridos del Sol y de la Luna, las fases de la Luna, y más.

→
Reloj astronómico de Praga (Orloj)
Es probable que la visión mecanicista del universo de Laplace influyera en la precisión de los relojes astronómicos como este magnífico ejemplar de 1410 en la pared sur del Ayuntamiento de la Ciudad Vieja de Praga.







Los Principios de Newton

Portada de la primera edición de *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, la obra maestra de Isaac Newton, publicada en 1687 (el libro debería haberse publicado en 1686, pero los fondos no eran suficientes).

las posiciones y las órbitas de los planetas y satélites, accionados usualmente por un mecanismo de relojería.

Se trataba de modelos eficientes. Sin embargo, gracias a los trabajos de Isaac Newton, surgió un nuevo modelo para los filósofos naturales (nombre con el que se conocía a los científicos): un modelo matemático. Newton no fue el primero en describir la física del movimiento. Por ejemplo, Galileo ya había iniciado el estudio de cómo se aceleraba una bola por la acción de la gravedad cuando se deslizaba por un plano inclinado. Sin embargo, Newton convirtió una ciencia que había sido básicamente descriptiva en una en la que las matemáticas se podían utilizar para determinar el futuro.

En su obra maestra, *Philosophiæ naturalis principia mathematica* (*Principios matemáticos de la filosofía natural*), Newton utilizó herramientas matemáticas para definir cómo la fuerza de atracción de la gravedad entre dos cuerpos, como la Tierra y la Luna, era la causa de que se movieran en órbitas definidas, o que los objetos, como la famosa manzana, cayeran hacia la Tierra. También formuló sus tres leyes del movimiento, que explicaban cómo se mueven los cuerpos y el modo en que las fuerzas los hacen acelerarse o interactuar entre ellos.

Para alcanzar este logro, Newton desarrolló un nuevo tipo de herramientas matemáticas que denominó método de las fluxiones (que hoy conocemos como cálculo, el nombre que le dio su competidor, el polímata alemán Gottfried Leibniz). Con estas nuevas herramientas, sus sucesores fueron capaces de estudiar todo el universo, y el que lo hizo de forma brillante fue su seguidor europeo más entusiasta, el filósofo natural Pierre-Simon Laplace.

Esta hipótesis no es necesaria

En sus trabajos sobre la gravedad, Newton se centró en los movimientos de los cuerpos en el sistema solar. Laplace tuvo una visión más amplia. Nacido en 1749 en el seno de una familia aristocrática, mostró un gran talento para las matemáticas desde su más temprana edad, que dio sus frutos cuando abordó muchos de los problemas de aplicación de aquellas al universo y de su empleo en casos prácticos de la física y la ingeniería. Sin embargo, desde nuestro punto de vista, la aportación más importante de Laplace fue el concepto de determinismo.

Con él, se lleva a su máximo extremo la descripción matemática de la realidad. Laplace imaginó un universo como un mecanismo



Los *Principios* de Newton

Portada de la primera edición de *Philosophiæ naturalis principia mathematica*, la obra maestra de Isaac Newton, publicada en 1687 (el libro debería haberse publicado en 1686, pero los fondos no eran suficientes).

las posiciones y las órbitas de los planetas y satélites, accionados usualmente por un mecanismo de relojería.

Se trataba de modelos «físicos». Sin embargo, gracias a los trabajos de Isaac Newton, surgió un nuevo modelo para los filósofos naturales (nombre con el que se conocía a los científicos): un modelo matemático. Newton no fue el primero en describir la física del movimiento. Por ejemplo, Galileo ya había iniciado el estudio de cómo se aceleraba una bola por la acción de la gravedad cuando se deslizaba por un plano inclinado. Sin embargo, Newton convirtió una ciencia que había sido básicamente descriptiva en una en la que las matemáticas se podían utilizar para determinar el futuro.

En su obra maestra, *Philosophiæ naturalis principia mathematica* (*Principios matemáticos de la filosofía natural*), Newton utilizó herramientas matemáticas para definir cómo la fuerza de atracción de la gravedad entre dos cuerpos, como la Tierra y la Luna, era la causa de que se movieran en órbitas definidas, o que los objetos, como la famosa manzana, cayeran hacia la Tierra. También formuló sus tres leyes del movimiento, que explicaban cómo se mueven los cuerpos y el modo en que las fuerzas los hacen acelerarse o interactuar entre ellos.

Para alcanzar este logro, Newton desarrolló un nuevo tipo de herramientas matemáticas que denominó «método de las fluxiones» que hoy conocemos como cálculo, el nombre que le dio su competidor, el polímata alemán Gottfried Leibniz. Con estas nuevas herramientas, sus sucesores fueron capaces de estudiar todo el universo, y el que lo hizo de forma brillante fue su seguidor europeo más entusiasta, el filósofo natural Pierre-Simon Laplace.

Esta hipótesis no es necesaria

En sus trabajos sobre la gravedad, Newton se centró en los movimientos de los cuerpos en el sistema solar. Laplace tuvo una visión más amplia. Nacido en 1749 en el seno de una familia aristocrática, mostró un gran talento para las matemáticas desde su más temprana edad, que dio sus frutos cuando abordó muchos de los problemas de aplicación de aquellas al universo y de su empleo en casos prácticos de la física y la ingeniería. Sin embargo, desde nuestro punto de vista, la aportación más importante de Laplace fue el concepto de determinismo.

Con él, se lleva a su máximo extremo la descripción matemática de la realidad. Laplace imaginó un universo como un mecanismo

de relojería en el que todo lo que ocurre viene determinado exactamente por lo ocurrido en el momento anterior, siguiendo la mecánica de las leyes de Newton. Para ilustrar las implicaciones de esta visión del universo, Laplace imaginó su edemónios. Su descripción en 1814 de esta creación, que describió como un intelecto, se cita al inicio de este capítulo.

Según la concepción de Laplace, si alguien pudiera conocer todos los detalles del estado del universo en un momento determinado, sería capaz, gracias a las certezas matemáticas de Newton y las matemáticas de Laplace, de predecir exactamente los que sucederán en los momentos sucesivos. Todo estaría predeterminado para la eternidad.

Siempre, como seres humanos que somos, hemos querido conocer el futuro. Las civilizaciones antiguas tenían sus uráculos y augures, medios místicos y mágicos para asomarse al futuro. La astrología, hasta finales de la Edad Media, formaba parte del acervo científico, partiendo de la base de que el movimiento de los planetas influía en lo que ocurría en la Tierra; a menudo recurrían a ella reyes y plebeyos por igual. A partir de las observaciones de Galileo, Newton fue capaz de soslayar el misticismo y hacer predicciones de matemáticas superiores a las de los oráculos y los astrólogos. Funcionaban. Una y otra vez predecían lo que iba a suceder.

Las matemáticas de Newton no solo describían cómo se movían los objetos en nuestro entorno, sino que vinculaba los movimientos conocidos de los objetos en la Tierra con aquellos aparentemente más grandes y totalmente separados de los cuerpos celestes. Mostraban que, por ejemplo, se podía predecir el recorrido de la Luna alrededor de la Tierra a partir de los simples factores de las masas y la distancia entre ambos cuerpos. Algunos llegaron más lejos. Edmond Halley, amigo y seguidor de Newton (quien consiguió que se publicaran sus *Principios*), utilizó sus matemáticas para hacer un cálculo preciso sobre la fecha de vuelta del cometa que hoy se conoce con su nombre. No vivió lo suficiente para contemplar su triunfante reaparición, pero la predicción de Halley fue correcta. El cometa regresó puntualmente.

Laplace fue aun más allá. Era de la opinión de que partiendo de un conocimiento perfecto de cómo eran las cosas en un momento determinado, era posible aplicar el modelo matemático del universo al futuro y ver lo que iba a ocurrir en cualquier otro momento, paso a paso. Era una visión global de un reloj universal que se movía sobre pistas inmovilables. Sin embargo, para muchos parecía inverosímil. ¿Cómo podría la realidad estar tan alejada de ese ideal matemático?

→
Zodiaco astrológico.
Ilustración española del
siglo XIV de los signos del
zodiaco que muestra cuándo
el Sol entra en cada signo.



La aleatoriedad es predecible

«Si así fuera, preferiría haber sido zapatero remendón, o incluso empleado en un casino, antes que físico».

Albert Einstein, 1879-1955

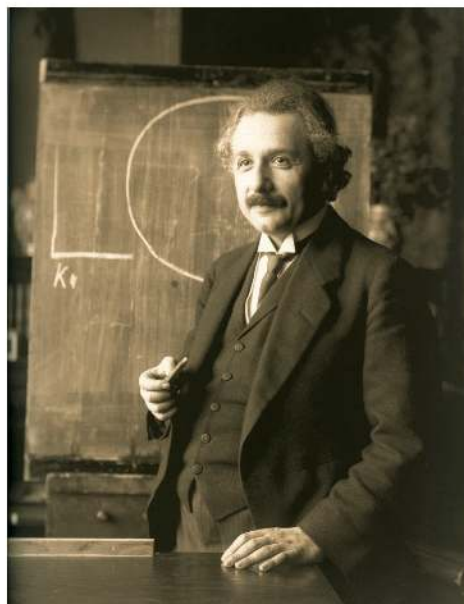
La aleatoriedad en la realidad

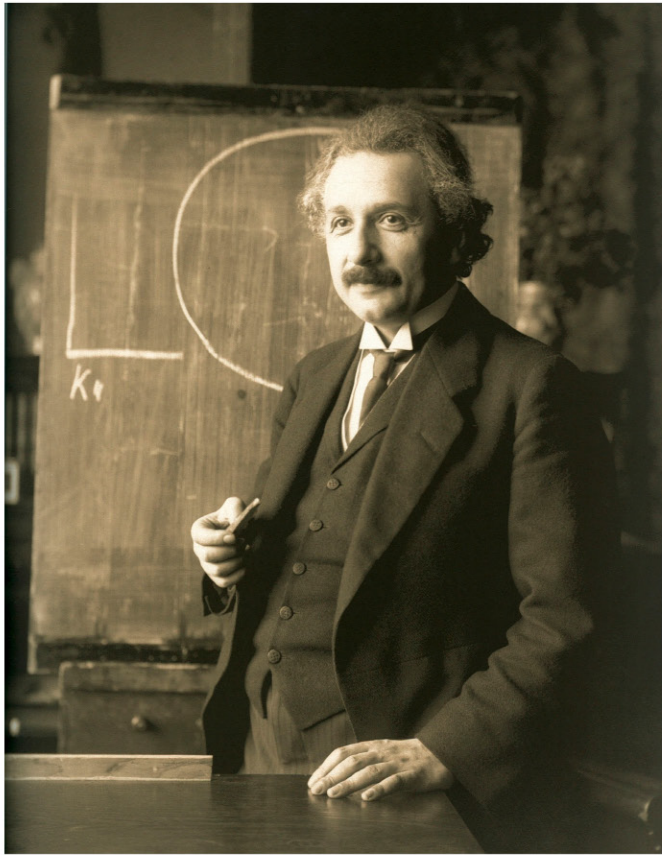
Para que el concepto de Laplace funcione, todo lo que sucede en todo momento debe seguir a algo o precederlo, con una clara relación de causa-efecto. Era un universo que hoy calificaríamos como determinístico, lo que significa que cualquier cosa que ocurre ahora viene determinada, clara e inequívocamente, por todo lo ocurrido en el momento anterior. Sin embargo, había un gran problema que bloqueaba la visión del universo de Laplace: la aleatoriedad.

La idea de que hay cosas que pueden suceder al azar sin razón previa alguna es natural entre los seres humanos. Comprendemos el mundo que nos rodea a través de patrones, y nos resulta difícil aceptar que pueda suceder algo sin principio que lo guíe, sin un por qué. Esta dependencia de los patrones es excelente cuando nos lleva a darnos cuenta de la presencia de un depredador o si nos hallamos en una situación peligrosa, pero significa también que vemos fantasmas donde no los hay, o asumimos, por ejemplo, que un desastre debe atribuirse a la acción directa de una deidad, al destino o a la intervención malévola de un poder mágico.

En realidad, desde la más remota antigüedad, estaba claro que, de todos los puntos de vista, algunos sucesos se debían al azar, como el resultado de lanzar una moneda al aire o de tirar los dados,

—
Albert Einstein
A pesar de ser uno de los fundadores de la física cuántica, Einstein (fotografiado aquí en 1921) se mostraba reacio a aceptar la aleatoriedad inherente a la teoría.





Fotones
Aunque durante mucho tiempo se afirmó que la luz era una onda, la teoría cuántica demostró que la luz se comportaba también como un flujo de partículas denominadas fotones.

lo que llevó a que estos sucesos fueran objeto de los juegos de azar. Sin embargo, nuestra escasa disposición a aceptar la aleatoriedad presente en el mundo real explica también nuestra tendencia a dejarnos engañar por los procesos basados en dicha aleatoriedad, tanto si es en los casinos o en la esperanza de que tras una especial «racha de suerte» podamos esperar un cambio de fortuna.

A medida que las matemáticas se iban haciendo más potentes, se pudo constatar que, aunque la aleatoriedad era impredecible por definición en términos de un solo suceso, se comportaba predeciblemente a largo plazo. Por ejemplo, no podemos saber qué número saldrá al tirar un dado bien equilibrado (no trucado). Puede ser del 1 al 6. Sin embargo, lo que sí sabemos es que después de un número suficiente de tiradas, todas las caras aparecerán aproximadamente el mismo número de veces. No podemos predecir el resultado de una tirada, pero sí podemos predecir un comportamiento a largo plazo, y cuantas más veces se repite un suceso, tanto mayor es la precisión de la predicción.

La confusión cuántica

La importancia de la aleatoriedad para la ciencia se puso de manifiesto en la primera parte del siglo xx con el desarrollo de la teoría cuántica. Esta trata la física de lo muy pequeño, como los átomos, los electrones y los fotones de luz, y muestra que gran parte del comportamiento de estas partículas depende del todo de la probabilidad. El resultado de cada uno de los sucesos es total e inherentemente impredecible, pero, con el tiempo, el patrón de los resultados es predecible por completo.

Esta aleatoriedad hizo que Albert Einstein, uno de los fundadores de la teoría cuántica, llegara a dudar de ella; pasó décadas buscando los fallos de la teoría y no los llegó a descubrir. Veamos un ejemplo sencillo: la reflexión de la luz en el cristal de una ventana. Cuando la luz incide en ella, la mayor parte pasa a su través, pero una parte se refleja. Esto sucede siempre, pero resulta más evidente cuando una cara de la ventana está mucho más iluminada que la otra, como ocurre, por ejemplo, cuando por la noche se está en el interior de una habitación iluminada. Al mirar a la ventana, lo que se ve claramente es el reflejo de la habitación en la que se está, no lo que se halla en el exterior.

Aunque lo que se ve es la habitación que es tá a la espalda, no es porque su luz no pase a través de la ventana, ya que gran parte de ella sí lo hace. Lo que se ve es la pequeña parte de esta que se refleja. (Esto ocurre siempre, no solo durante la noche, pero

durante el día la imagen se desvanece por la intensidad de la luz que entra del exterior). La probabilidad entra en acción cuando consideramos los fotones individuales constitutivos de la luz que sale de la habitación. Cuando un fotón alcanza el cristal, hay una probabilidad de aproximadamente el 95 % de que lo atraviese, y un 5 % de que sea reflejado. Sin embargo, nunca se puede predecir lo que hará un fotón individual.

Einstein consideró que debían haber variables ocultas, es decir, información disponible para el fotón, pero no para nosotros, que le permite «saber» lo que tenía que hacer al llegar al cristal. Esta es la razón por la que hizo una serie de observaciones poniendo en duda la teoría cuántica, como su comentario sobre ser un zapatero remendón citado en la página 22, extraído de una carta a su colega, el físico Max Born. Sin embargo, en la actualidad, hay pruebas indudables de que no es así. El fotón tiene una probabilidad de reflejarse y otra de atravesar el cristal, pero hasta que no llega el momento no hay nada que decida lo que ocurrirá. Esta es la verdadera aleatoriedad.