

Los límites del conocimiento

Miguel Ángel Sanchis-Lozano¹, Elena Pinilla-Cienfuegos²

¹ IFIC, Centro mixto CSIC-Universitat de València, Real Sociedad Española de Física

² Valencia Nanophotonics Technology Center, Universidad Politécnica de Valencia

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7989>

Reflexionaba **Aristóteles**, hace más de dos milenios, que el hombre por naturaleza desea saber. Lo lleva "escrito" en sus genes, por eso es *Homo Sapiens*. Ya el habitante del Paleolítico practicaba rituales mágicos, realizaba extraordinarias pinturas con fines propiciatorios (caza, fecundidad...) y poseía una vaga noción de su propia trascendencia más allá de la muerte. La interpretación "mágica" de los fenómenos naturales fue el antecedente remoto de la ciencia y la tecnología actuales. Ahora bien, hubo que esperar muchos milenios hasta que la civilización griega (cuna de la civilización occidental) dio el paso fundamental, del *Mito al Logos* [Sam 1999]: de la explicación imaginativa de los fenómenos naturales basada en deidades antropomórficas (los temblores de tierra se deberían a un iracundo Poseidón) a una interpretación más racional apoyada en la observación y un pensamiento considerablemente libre y crítico (según el filósofo milesio Anaximandro, los terremotos eran consecuencia de tensiones originadas en cavidades del interior de la Tierra). No por casualidad, filosofía

y democracia (con las limitaciones de la época; por ejemplo, el voto estaba negado a las mujeres) nacieron y se desarrollaron conjuntamente en la antigua Grecia.

Cierto es que los griegos no pusieron en práctica el método experimental como se entiende modernamente, con pocas pero notables excepciones como **Estratón**, un verdadero experimentador, o **Arquímedes**, el ingeniero de la antigüedad por antonomasia¹. El trabajo manual, necesario en cualquier experimentación o trabajo técnico, era considerado más propio de esclavos que de sabios especulando sobre cuestiones fundamentales [Sanchis 2001]. Es más, lo que actualmente se conoce como transferencia del conocimiento básico a la industria, fue un hecho anecdótico incluso durante la época helenística, limitada a pocas aplicaciones navales y militares, o simplemente lúdicas.

Un profundo deseo de rigor intelectual, sin embargo, quedó plasmado en *Los Elementos* de **Euclides**, un compendio monumental del trabajo acumulativo de generaciones de matemáticos que condujeron a un método deductivo (basado en un conjunto de definiciones, axiomas, teoremas y demostraciones) aplicado a la geometría euclídea, que ha continuado prácticamente inalterado hasta el presente.

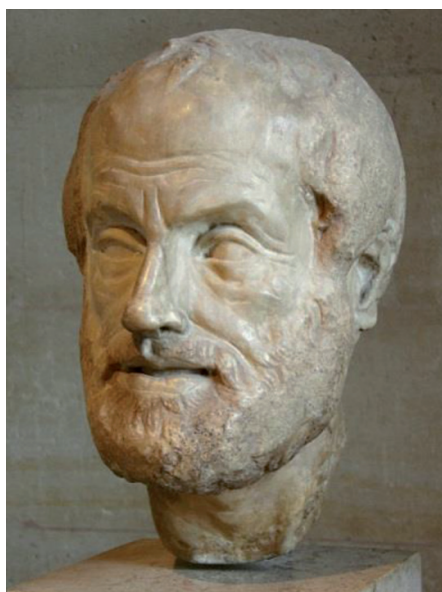
Otra de las características de algunas escuelas griegas (aunque no todas) de filosofía era su *optimismo* (común a la sociedad y cultura helénicas de entonces) a la hora de proponer explicaciones racionales para multitud de fenómenos de la Naturaleza. Esa confianza nos puede parecer hoy en día un tanto desmesurada, dada la falta de medios técnicos para la observación y el análisis de los fenómenos físicos. No obstante, una de las claves del éxito de la filosofía natural helena fue la decidida aplicación del reduccionismo para explicar la complejidad del mundo en base a unos pocos principios. Así, el filósofo presocrático, **Tales de Mileto**, consi-

deraba que toda la materia era en esencia agua; **Anaxímenes** aire, y finalmente **Empédocles** propuso los célebres cuatro elementos interaccionando mediante "*fuerzas de amor/odio*". La física y la química modernas son herederas en gran medida de ese espíritu unificador.

Tras el nacimiento del *método científico* (**Galileo**, siglos XVI-XVII) y el consiguiente desarrollo de la mecánica (**Newton**, siglos XVII-XVIII) y del electromagnetismo (**Maxwell**, siglo XIX), se llegó también al engañoso convencimiento de que quedaba poco por añadir al conocimiento de las leyes fundamentales de la física, y que el determinismo clásico gobernaba completamente la evolución de la Naturaleza, como un inmenso mecanismo de relojería. Sólo quedaba por desarrollar las aplicaciones en las diferentes ramas de la ingeniería y tecnología. Nada más lejos de la realidad...

A principios del siglo XX, la *Mecánica Cuántica* y la *Teoría de la Relatividad* de **Einstein** vinieron a "derribar", no sin una tenaz resistencia, el paradigma de la Física Clásica², desplazando para siempre conceptos tan aparentemente indiscutibles como un espacio absoluto euclídeo y un tiempo universal. El "*reconfortante*" *determinismo clásico* del mundo físico se vio reemplazado por la incertidumbre cuántica, en un marco positivista donde los papeles de observador y fenómeno observado llegan a difuminarse, poniendo en cuestión la existencia de una realidad independiente.

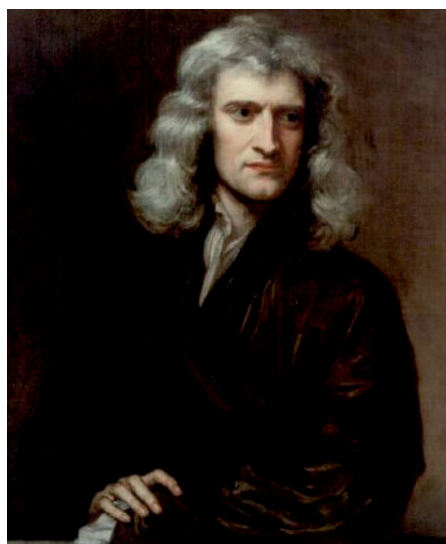
Una situación hasta cierto punto semejante se produjo en las Ciencias Exactas. Tras la introducción, en el siglo XIX, del *rigor* en el análisis por matemáticos de la talla de **Gauss**, **Cauchy**, **Bolzano** y **Weierstrass**, se llegó a considerar, al principio del siglo XX, que cualquier proble-



Aristóteles: su influencia dogmática, negativa para el desarrollo de la física, se extendió durante dos milenios

¹ Lucio Russo, profesor de física en la Universidad "Tor Vergata" de Roma, en su libro *La rivoluzione dimenticata: il pensiero scientifico greco e la scienza moderna*, plantea que la ciencia moderna realmente surgió por primera vez en la época helenística. Russo da cuenta de la invención de sifones, émbolos de vacío, diferentes tipos de válvulas y bombas hidráulicas, la clepsidra (reloj de agua), así como piezas mecánicas como tornillos de precisión, engranajes demultiplicadores, o *árboles de levas*.

² Para ser precisos, la ciencia avanza ampliando el conocimiento anterior. Incluso las grandes revoluciones científicas, como es el caso de la Física Cuántica o la Relatividad de Einstein, no "arrojan por la borda" todo el saber previo, sino que delimitan primero su marco de validez, ampliándolo después. Así, un ingeniero utilizará habitualmente y con total seguridad la mecánica newtoniana y el electromagnetismo clásico en sus proyectos, salvo que intervengan elementos con velocidades próximas a la luz (por ejemplo, en un acelerador de electrones utilizado en hospitales para tratamiento de tumores) o cuando los fenómenos cuánticos sean importantes (nuevas tecnologías).



Newton: su Mecánica se extendió indiscutida hasta la Teoría de la Relatividad de Einstein

ma matemático bien formulado tendría solución; que los sistemas formales como la *Geometría* o la *Teoría de Números* se apoyaban sólidamente en una base de axiomas inmovibles y de definiciones precisas, que conducían a su vez a los teoremas mediante una serie de argumentos lógicos. De esta forma se concluía que en Matemáticas cabe demostrar la verdad o la falsedad de cualquier enunciado matemático bien planteado.

El gran matemático alemán **David Hilbert** capitaneaba ese optimismo, sintetizado en su célebre frase pronunciada durante un congreso en 1930:

Wir müssen wissen, wir werden wissen ("Debemos saber, vamos a saber").

Irónicamente, el día anterior, el lógico-matemático austriaco **Kurt Gödel** había presentado su teorema de incompletitud, originando una conmoción en la lógica y las matemáticas.

Lo que Hilbert pretendía (como otros muchos, desde **Leibniz** en el siglo XVII hasta los lógicos británicos **Russell** y **Whitehead** en el siglo XX) era crear un sistema matemático formal, completo y consistente, de modo que se pudiera encontrar un algoritmo que determinara la verdad o falsedad de cualquier proposición en el sistema formal. A dicha cuestión se le denominó *Entscheidungsproblem* (el problema de la decisión).

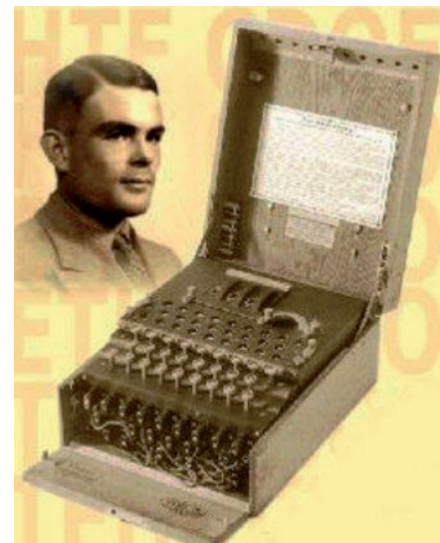
Sin embargo, enunciado en forma breve, el *teorema de incompletitud* de Gödel afirma que cualquier teoría que contenga la aritmética convenientemente axiomatizada, y sea consistente, es incompleta, lo cual implica la existencia de enunciados indecibles. Por indecible se entiende que no se puede saber su verdad o falsedad, siguiendo el sistema lógico formal

de partida³. Éste es el caso de la hipótesis del continuo relativa al "tamaño" de los conjuntos infinitos⁴, formulada por **Georg Cantor** en el siglo XIX y considerada por Hilbert en 1900 como uno de los 23 problemas del siglo, "resuelto" finalmente por Gödel en 1940 (no puede ni demostrarse, ni refutarse).

El genial lógico-matemático británico **Alan Turing**, generalmente conocido por descifrar el complejísimo código de la máquina *Enigma* utilizada por los nazis durante la Segunda Guerra Mundial, reformuló en 1936 las ideas de Gödel en términos más cercanos al mundo físico. Para ello concibió teóricamente la denominada *Máquina de Turing*, lo que actualmente podríamos considerar como un moderno ordenador idealizado, de memoria y batería infinitas. Los ordenadores resuelven problemas mediante algoritmos⁵; la indecibilidad de una proposición determinada se traduce en un tiempo infinito para que una máquina de Turing pueda dar un resultado (*never halting machine*).

Desde el final del siglo pasado, los físicos teóricos han intentado englobar las ideas de Turing en modelos idealizados de los fenómenos físicos. En un artículo reciente [Cubitt 2015] se estudia un modelo teórico de una red bidimensional finita de átomos. Pese a disponer de una descripción microscópica completa de la red (basada en la Mecánica Cuántica) resulta imposible predecir si, al aumentar el tamaño del sistema (incluso añadiendo un solo átomo más), éste será aislante o conductor. Según los autores, se trata de una realización

física de la cuestión de la indecibilidad de Turing. Además, pone en tela de juicio una confianza ilimitada en el reduccionismo aplicado a sistemas complejos al partir, en el caso de la red bidimensional, de toda la información posible sobre un sistema y sin embargo no poder predecir su comportamiento macroscópico⁶.



Alan Turing y la máquina Enigma

Aparte del indudable interés teórico, este caso concreto señala la profunda relación entre el desarrollo de la investigación pura y las aplicaciones y avances tecnológicos, y en particular, los relacionados con nuevos materiales. Un ejemplo fascinante se puede encontrar en el grafeno [Novoselov 2004], cuando sus descubridores (**Geim** y **Novoselov**, galardonados con el Premio Nobel de Física en 2010) desafiaron el *Teorema de Mermin-Wagner* que planteaba teóricamente la imposibilidad de obtener un material bidimensional termodinámicamente estable. Nada más lejos de la realidad: el grafeno es una lámina de átomos de carbono organizados en una red hexagonal unidos fuertemente por enlaces covalentes. Esta sencilla descripción encierra, no obstante, extraordinarias propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas que ya están revolucionando la industria electrónica [Geim 2007].

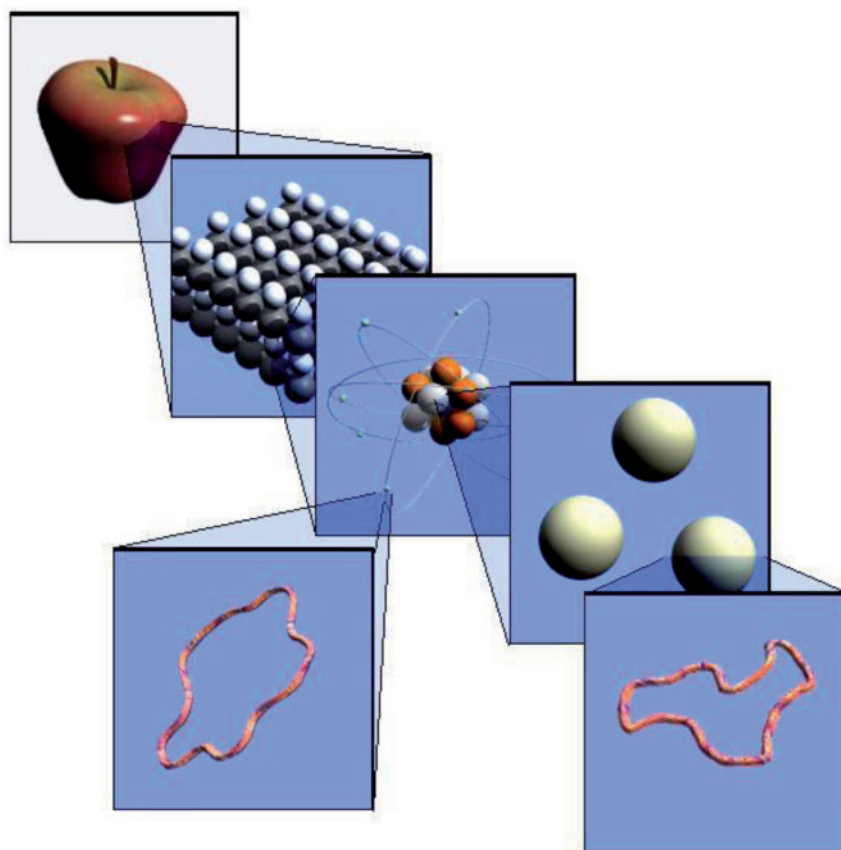
Volviendo a la existencia de proposi-

³ Un antecedente histórico puede hallarse en el quinto postulado de Euclides (que afirma que por un punto exterior a una recta pasa una recta paralela y sólo una). Durante siglos se discutió si tal enunciado podía deducirse a partir de los cuatro primeros axiomas de la geometría euclídea y ser, por tanto, un teorema. Finalmente, Bolyai y Lobachewski (1826) por un lado, y Riemann más tarde, aclararon que la adopción del quinto postulado, o su negación, no conducen a contradicción alguna, sino que generan nuevas posibles geometrías. Es de señalar que la geometría hiperbólica de Riemann fue posteriormente adoptada por Einstein en su Teoría General de la Gravitación para describir el espacio-tiempo del universo.

⁴ Su enunciado afirma que no existen conjuntos infinitos cuyo tamaño (cardinal) esté comprendido entre el conjunto de los números naturales y el conjunto de los números reales.

⁵ Un algoritmo puede definirse como un conjunto de instrucciones bien definidas y ordenadas que permite realizar una actividad (por ejemplo un cálculo) mediante un número finito de pasos sucesivos. Etimológicamente procede del nombre del matemático y astrónomo persa Al-Khowarizmi (780-850).

⁶ La emergencia hace referencia a aquellas propiedades colectivas de un sistema y considera que "el todo, es más que la suma de las partes". Por ejemplo, carece de sentido hablar de estado sólido, líquido o gaseoso para una única molécula de agua aislada. En el caso citado en el texto, la emergencia de la propiedad "aislante o conductor" sería impredecible al aumentar el tamaño del sistema, lo cual supone un cuestionamiento más profundo de un reduccionismo extremo que en el caso del agua mencionada.



Teoría de cuerdas: sus vibraciones y oscilaciones lo explicarían "todo"

ciones indecidibles en matemáticas, las formulaciones análogas en sistemas físicos alertan acerca de una visión ingenua en la descripción del mundo físico. Así pues, hay que ser prudentes a la hora de buscar de una **Teoría del Todo** (*Theory of Everything*), en la cual las leyes de la Naturaleza quedan unificadas (es decir, derivan de un mismo principio) y sus parámetros fundamentales (como, por ejemplo, la carga y masa eléctrica del electrón o la constante de Planck) determinados unívocamente dentro de la propia teoría.

Desde la década de los ochenta del pasado siglo, la *Teoría de Cuerdas* [Green 1999] se ha mostrado como firme candidata para convertirse en la *Teoría del Todo*, al integrar la gravedad y el resto de interacciones (electrodébil y fuerte) dentro de un formalismo cuántico común, el sueño inalcanzado de Einstein con su campo unificado. Sin embargo, el "precio a pagar" es elevado pues, por ejemplo, las dimensiones del espacio pasan a ser diez en vez de las tres habituales, precisando de un complejo, y en principio arbitrario, método de "compactificación" de las dimensiones adicionales (del orden de la longitud de Planck y por tanto inobservables).

Tras constatar que la Teoría de Cuerdas era consistente y que podía explicar la expansión acelerada del universo, el

optimismo se adueñó de la comunidad científica especialista en la creencia, una vez más, de que en pocos años se habría hallado la ansiada Teoría del Todo. Y sin embargo, lo que se encontró, en vez de una única Teoría del Todo, fueron ¡10⁵⁰⁰ posibles soluciones!, cada una con leyes físicas (y constantes fundamentales) diferentes: todo un "paisaje" (*landscape*) de soluciones.

La hipótesis del *landscape* ampara la posibilidad de que existan tantos universos como soluciones proporciona la Teoría de Cuerdas. Ahora bien, tal interpretación conlleva el cuestionamiento del método científico al implicar, por ejemplo, que prácticamente cualesquiera valores de las constantes fundamentales de la Naturaleza son posibles. La razón de los valores que determinan *nuestro universo* sería puramente "accidental"; los partidarios del principio antrópico consideran que estarían así justificados por la aparición de la vida inteligente [Hawking 2010]. En consecuencia, no cabría preguntar, por ejemplo, por qué la masa del electrón es la que es. En otra variante del Multiverso, la masa del electrón podría tomar cualquier otro valor. Y lo mismo aplicado a todas las leyes y parámetros. Se habría alcanzado, por tanto, el límite del conocimiento en la ciencia fundamental (no así de las aplica-

ciones tecnológicas por supuesto).

Ahora bien, pese a su elegancia formal y extraordinario potencial unificador, actualmente no hay garantía científica de que la Teoría de Cuerdas sea realmente correcta [Smolin 2016]. En el futuro quizá se encuentre una teoría alternativa, que no precise del principio antrópico para explicar el aparente "contubernio" de las leyes y parámetros físicos que hacen que nuestro universo sea tan proclive a albergar vida inteligente.

Aún queda una opción más "descoazonadora" si, al igual que ocurre con el sueño imposible de hallar una teoría formal completa en matemáticas, la existencia de la Teoría del Todo fuera una cuestión fuera de nuestro alcance o, incluso, indecidible.

PARA SABER MÁS

- [Sam 1999] S. Sambrusky, *El mundo físico de los griegos*. Alianza Editorial 1999
- [Sanchis 2001] M.A. Sanchis-Lozano, *Filosofía griega y ciencia moderna*. ACDE 2001.
- [Cubitt 2015] T. Cubitt, D. Perez-Garcia and M. Wolf, *Undecidability of the Spectral Gap*. *Nature*, 528 (2015) 207-211.
- [Novoselov 2004] K.S. Novoselov et al., *Electric field effect in atomically thin carbon*. *Science* (2004) 306(5696):666-9.
- [Geim 2007] A. Geim and K.S. Novoselov, *The rise of Graphene*. *Nature Materials* 6 (2007) 183.
- [Green 1999] Brian R. Green, *El universo elegante*. Editorial Crítica 1999.
- [Hawking 2010] S. Hawking y L. Mlodinow, *El Gran Diseño*. Editorial Crítica 2010.
- [Smolin 2016] Lee Smolin, *Las dudas de la física en el siglo XXI: ¿Es la teoría de cuerdas un callejón sin salida?* Editorial Crítica 2016.