

## Una visita guiada al infinito

La cuestión del infinito comenzó su andadura en nuestra mente tan pronto como los primeros seres humanos racionales alzaron la vista hacia el cielo con ojos inquisitivos. La posterior historia de la humanidad trajo consigo otros tipos de infinito: infinitamente pequeño, infinitamente complejo, infinitamente veloz, infinitamente preciso... Pero, al fin y al cabo, el verdadero problema es lo que simboliza lo infinito, lo que representa en nuestra concepción de la naturaleza y de la mente humana. ¿Cómo lo definimos? ¿Cuáles son las consecuencias para nuestra vida cotidiana?

De estas dos preguntas, probablemente sea la primera la que tiene una respuesta más sencilla: no hay forma de definir el infinito en términos concisos. De hecho, el infinito no se define por lo que es, sino por lo que no es. El infinito solo se puede aprehender metafóricamente y, en ese sentido, constituye una de las raras concesiones que la ciencia hace a la poesía. Es el lugar donde la mente del científico puede vagar libremente y donde (casi) todo es posible. Es el lugar en el que el artista y el científico pueden viajar codo con codo sin ver su avance obstaculizado por los estrictos límites de la realidad.

Como es habitual, la libertad no está exenta de riesgos, y este caso no es una excepción. Si bien el infinito está siempre, por definición, fuera de nuestro alcance, la ciencia nos ha enseñado que lo que suponemos que sucede en él puede tener profundas consecuencias para lo que esperamos observar a nuestro alrededor. Por ese motivo, los científicos utilizan el infinito como una herramienta básica para restringir las teorías a la realidad. Hay que añadir, dicho sea de paso, que también lo utilizan para relegar al olvido objetos y conceptos que no resultan relevantes (o convenientes) para la discusión de los fenómenos objeto de estudio, lo cual convierte al infinito en un concepto sumamente práctico y difuso, siempre y cuando no devuelva el golpe en las mismas narices del científico. La física moderna —en particular la teoría cuántica de campos— emplea esta técnica con más frecuencia de lo que aconsejaría la prudencia, pero en la actualidad esta teoría en verdad funcional, cuya comprensión es aún incompleta, no nos deja ninguna otra opción.

Hasta el siglo XX, nuestro universo era ilimitado tanto en el espacio como en el tiempo, y el infinito impregnaba nuestro conocimiento de la naturaleza sin reservas. El infinito era un concepto que resultaba útil y práctico para realizar cálculos y para ignorar partes de nuestro mundo, pero nada más. La mayor parte de esto ha cambiado en los últimos cien años, pues hemos descubierto que, en muchos sentidos, lo que considerábamos infinito lo era únicamente debido a una ilusión derivada de nuestro limitado conocimiento de la naturaleza. Una de las más profundas consecuencias de la física moderna es que ha demostrado que, en algunos aspectos, nuestro universo es limitado.

Este proceso de limitación comenzó a finales del siglo XIX y siguió varias direcciones al mismo tiempo. En 1881, las extrañas propiedades de la luz llevaron a Michelson y Morley a medir con suma precisión la velocidad de la luz. No era la primera vez que se acometía semejante empresa, dado que el propio Galileo ya había intentado sin éxito medirla. Posteriormente, Descartes postuló que era infinita. En las postrimerías del siglo XVII, Ole Rømer, basándose en las peculiares anomalías de la secuencia de eclipses de Ío, uno de los satélites de Júpiter, demostró que esas anomalías eran debidas a la naturaleza finita de la velocidad de la luz. Y finalmente, partiendo de ese resultado, Christian Huygens calculó por vez primera esa velocidad inconcebiblemente elevada. Pero lo que despertaba el interés de Michelson y Morley no era la velocidad de la luz per se, sino que querían conocer su relación con la velocidad del observador. El resultado de su experimento abrió una primera grieta en el muro, hasta entonces considerado impenetrable, de la física clásica, y marcó el comienzo de una visión limitada de la naturaleza.

Su resultado experimental, complementado en 1905 por la aportación de Albert Einstein, demostró que no existe lo infinitamente veloz. A este respecto, la naturaleza se ve limitada a velocidades menores que la velocidad de la luz en el vacío y, por consiguiente, no todo el mundo puede comunicarse en nuestro universo. A lo sumo, solo aquellos capaces de intercambiar una señal luminosa podrán intercambiar información. Al ser una velocidad límite, la velocidad de la luz en el vacío es, por tanto, la misma para todos, un hecho capaz de desconcertar a cualquiera que se enfrente a él por vez primera, pues contraviene la tan apreciada ley de composición de velocidades que ha acompañado a la humanidad desde tiempos de Galileo. En el proceso, distorsionó asimismo los conceptos de espacio y tiempo hasta el punto de que nuestra anterior visión del universo se tornó por completo irreconocible.

Y no fue esa la única dirección en la que nos topamos con una barrera infranqueable. Dentro de la termodinámica clásica, el concepto de escala de temperatura absoluta surgió del estudio de los gases y, en particular, de los gases enrarecidos. El cero absoluto, que equivale a  $-273,15$  oC, se hizo un hueco en la física a través de una escala de temperatura que únicamente tenía un límite inferior. Sin embargo, en los primeros años del siglo XX, Walther Nernst demostró que ese límite mínimo no podía alcanzarse: es imposible alcanzar el cero absoluto por medio de un número finito de operaciones, un hecho que hoy en día se conoce como la tercera ley de la termodinámica. Lo que demostrara Nernst fue más tarde completado por la mecánica cuántica con el concepto de energía del punto cero. Pero lo que resulta importante es el hecho de que el cero absoluto únicamente se puede alcanzar por medio de un número infinito de pasos. La frontera existe, pero el camino que conduce a ella no tiene fin.

El proceso de limitación continúa hasta hoy ampliando el reino del infinito hacia nuevas áreas. En cierto modo, era de esperar: a medida que vamos comprendiendo mejor la naturaleza en todos sus aspectos,

comenzamos a descubrir el fundamento (es decir, las fronteras) que le permite funcionar de forma armónica hasta en sus más intrincados detalles.

A estas alturas, también sabemos que no existe lo infinitamente preciso. Tradicionalmente, se esperaba que fuéramos siempre capaces de especificar con la máxima precisión tanto dónde nos encontramos como hacia dónde nos dirigimos. La mecánica cuántica nos confirma cada día que eso ya no es cierto a una escala subatómica. Así pues, la naturaleza es, en ese sentido, intrínsecamente imprecisa, un hecho que, en realidad, le permite explorar posibilidades de una forma mucho más eficiente. Lo que se ha tornado preciso a esta escala ya no son posiciones y velocidades, sino la probabilidad de que un sistema se encuentre en un determinado estado. La evolución de esa probabilidad se puede predecir de una forma totalmente precisa y predecible por medio de la ecuación de Schrödinger. Por consiguiente, lo infinitamente preciso adquiere un significado y un alcance completamente distintos.

El tiempo, la eterna morada del infinito, se ha vuelto asimismo limitado, en cierto modo, en los últimos cien años. Nos hemos percatado de que el universo actual tuvo un comienzo y, por tanto, su vida no se extiende indefinidamente en el pasado. Aún no sabemos hasta dónde se extenderá su vida en el futuro, pero existe una probabilidad distinta de cero de que no se extienda hacia un futuro infinito.

Asimismo, la precisión con la que somos capaces de medir el tiempo se ha vuelto limitada. La mecánica cuántica ha demostrado –paralelamente a lo ocurrido con la posición y la velocidad– que la energía y el tiempo están conectados de tal modo que solo uno de ellos se puede medir de forma precisa a escala atómica y subatómica.

En la actualidad, nos enfrentamos a lo infinitamente complejo en ciencias biológicas, matemáticas, economía y, básicamente, en todas las ramas de la física y la química. Las estadísticas nos proporcionan una forma de vencer parte de las dificultades, pero, en el mejor de los casos, nos ofrecen una perspectiva global de los problemas. Los ordenadores pueden ayudar a paliar hasta cierto punto nuestras limitaciones, pero aún a una escala insuficiente para la mayoría de los problemas. Así pues, en esta frontera en particular podemos decir que el infinito está aún más bien fuera de nuestro alcance y que seguirá estándolo en un futuro próximo.

Hace cien años, la «catástrofe ultravioleta» provocada por la descripción de la radiación del cuerpo negro señaló la necesidad de un cambio fundamental en la forma en que percibíamos la interacción de la radiación con la materia. El infinito que predijera la ley de Rayleigh–Jeans, que describe a la manera clásica el espectro de la radiación del cuerpo negro, impulsó a Max Planck en 1900 a introducir el concepto de cuantos de energía. Desde entonces, el infinito ha sido el sello distintivo de todas las revoluciones científicas. Por

medio de él hemos podido seguir la evolución de nuestro conocimiento de la naturaleza, a lo largo de los últimos cien años, a escala tanto microscópica como macroscópica.

La necesidad de armonizar la mecánica cuántica y la relatividad especial llevó a Paul Dirac a proponer en 1928 el concepto de materia y antimateria. Desde la confirmación experimental, en 1932, de este carácter dual de la naturaleza por parte de Carl D. Anderson, los físicos obtienen del vacío todo tipo de partículas y antipartículas. El vacío se convirtió en el concepto más concurrido entre los conocidos por la humanidad, un hecho que constituye sin lugar a dudas la más ridícula de las venganzas de la naturaleza: hacer del lugar supuestamente más vacío un depósito ilimitado de elementos fundamentales. Es tal la magnitud de la situación, que la física de los últimos cincuenta años se puede describir de forma precisa como el estudio fundamental de las propiedades del vacío.

Uno de los aspectos más sorprendentes de la física moderna es el sentido de unidad que impregna desde lo infinitamente grande hasta lo infinitamente pequeño. No solo hemos ampliado las fronteras de nuestro universo en ambas direcciones hasta llegar muy lejos, sino que además hemos caído en la cuenta de que están irremediablemente entrelazadas. Las escalas de tiempo también se han vuelto claramente interdependientes, ya que procesos que ocurren en intervalos de tiempo sumamente breves condicionan de múltiples formas el destino del universo en la escala de tiempo cósmica infinitamente grande. Dicho de otro modo, la manera en que interactúan las partículas elementales determina el modo en que evoluciona el universo en la escala de tiempo cósmica. Y recíprocamente, dado que a estas alturas sabemos que la velocidad de la luz en el vacío es finita e insuperable, lo que vemos en los confines del infinito espacial nos proporciona información acerca de procesos que tuvieron lugar cerca del comienzo del tiempo.

Hoy en día, la visión del total entrelazamiento de lo infinitamente pequeño y lo infinitamente grande es una de las piedras angulares de la ciencia moderna, hasta el extremo de que la Organización Europea para la Investigación Nuclear (CERN) y la Agencia Espacial Europea (ESA) decidieron ponerlo en conocimiento del público general a través de la iniciativa Origins 2013 – a European Researchers' Night event, que se celebró en septiembre de 2013 en Bolonia, París y Ginebra.

Sin embargo, puede que la manifestación más espectacular de esta unidad de escalas sea la medición del espectro de radiación de fondo de microondas (CMB) iniciada en 1990 por el satélite de la NASA COBE, seguido, con una precisión mucho más elevada, por el satélite Planck de la ESA entre 2009 y 2012. Esta radiación térmica es una huella indeleble dejada por la evolución de nuestro universo cuando se tornó transparente a la luz, como lo es hoy día. En la actualidad, la increíble exactitud con la que la curva hallada por Max Planck en 1900 describe el espectro de radiación de CMB es una de las

más sorprendentes demostraciones de la existencia de un Big Bang primigenio y del modelo cosmológico estándar. Observar –con una precisión asombrosa– en la enorme escala del universo la misma curva que anunciara la existencia de cuantos en el mundo subatómico constituye un hito importantísimo en la revolucionaria visión que inauguraran la física moderna y la moderna cosmología.

Sabemos desde hace tiempo que solo cuatro interacciones – gravitatoria, electromagnética, de fuerzas fuertes y débiles– son responsables de todos los procesos que operan en el universo. Fue la presencia del infinito a escalas energéticas del orden de 1 TeV ( $10^{12}$  electronvoltios) en el modelo original de Fermi para la descripción de la fuerza débil lo que condujo al descubrimiento de teorías de gauge y, en última instancia, a la introducción del campo de Higgs. Estos dos conceptos se fusionaron en el actual modelo estándar de interacciones electrodébiles y fuertes. El infinito fue tal vez el heraldo de la unificación de todas las fuerzas fundamentales.

Aceleradores tales como el Gran Colisionador de Hadrones (LHC) del CERN nos acercan aún más al comienzo del tiempo mediante el estudio de los procesos que tuvieron lugar en la diminuta escala de una minúscula fracción del tamaño del protón. Los resultados de los experimentos realizados en el LHC, y sobre todo el descubrimiento de la partícula de Higgs, han arrojado luz sobre la estructura del reino microscópico de la naturaleza. Esta nueva partícula es la clave para comprender el origen de la masa y, por consiguiente, la clave para entender las condiciones que imperaban cerca del nacimiento de nuestro universo, así como su destino en el futuro infinito. El tiempo dirá cuán trascendental puede llegar a ser este descubrimiento y qué nos aguarda más allá.

Fue también el infinito a distintas escalas energéticas lo que llevó a los científicos a plantearse la existencia de una simetría fundamental en la naturaleza que relacionaba los fermiones (partículas con espín semientero) y los bosones (partículas con espín entero). Queda por ver si esa supersimetría (o, en su forma abreviada, SUSY) está presente en la naturaleza, pero el problema que dio lugar a esta propuesta sigue ahí. El infinito alumbra lo desconocido, seamos o no capaces de encontrar el camino hacia él.

El programa del LHC está inmerso en la búsqueda de SUSY. En general, busca cualquier rastro de objetos que pudieran existir más allá de lo conocido hasta la fecha y que describe el modelo estándar. Esos nuevos objetos deben necesariamente existir, puesto que su ausencia lleva aparejada la consecuencia inmediata de que sería preciso ajustar los parámetros fundamentales de nuestro universo con un grado de precisión imposible de 1 parte en  $10^{30}$ . Esos números están íntimamente relacionados, a efectos prácticos, con el infinito y, por tanto, apuntan a la ausencia de una pieza fundamental en el puzle de nuestro universo.

Para hacer nuestra posición todavía más frágil, hemos descubierto en

los confines del universo que la masa aún nos tenía reservada otra sorpresa. Sabíamos desde hacía algún tiempo que la masa se hallaba oculta bajo la forma de la denominada «materia oscura», pero hace casi quince años descubrimos que una cantidad aún mayor se encuentra escondida en forma de «energía oscura». La masa invisible parece ser la materia de la que está hecho en gran medida nuestro universo. Así pues, el destino del universo en un futuro lejano descansa aún más en los límites de nuestra capacidad de observación, es decir, en los confines del infinito, que es preciso continuar ampliando para ir más lejos, ya sea en lo infinitamente pequeño o en lo infinitamente grande, con el fin de desvelar qué otras sorpresas nos tiene preparadas la evolución.

El siglo xxi comienza con un panorama muy similar a aquel al que la humanidad se enfrentó hace cien años. Acumulamos datos acerca de cosas que no tenemos ni la menor idea de lo que significan, de cómo se relacionan unas con otras y de qué manera conectan con lo que actualmente sabemos y entendemos. Parafraseando las célebres palabras de lord Kelvin, vemos acercarse unas nubes en el horizonte, pero todavía no tenemos ni la más remota idea de qué tipo de tempestad auguran. Hace cien años, las nubes de lord Kelvin anunciaron la teoría cuántica y la relatividad de Einstein, las cuales cambiaron de forma irreversible el modo en que percibimos el universo. Aún no está claro lo que anunciarán las nubes actuales, pero tienen la capacidad de revolucionar una vez más nuestra visión de la naturaleza.

Llegados a este punto, resulta finalmente posible pasar a discutir la segunda pregunta que planteamos al comienzo de este texto, a saber, la importancia del infinito para nuestra vida cotidiana. ¿Por qué deberíamos preocuparnos del infinito si no es posible alcanzarlo en ningún caso? ¿Por qué deberíamos preocuparnos tanto por un objetivo tan esquivo?

Si el lector dedica un instante a reflexionar sobre estas dos preguntas, la respuesta se hará evidente: el infinito es, de hecho, la única y exclusiva motivación del descubrimiento. Por definición, el infinito siempre se encuentra más allá de lo que conocemos y, por ese motivo, es la dirección del infinito la que tenemos que tomar en nuestra búsqueda de lo desconocido. Es el infinito el que impulsa a la humanidad a perfeccionar constantemente sus esquemas de pensamiento y sus métodos de observación, ampliando las fronteras del conocimiento para llegar cada vez más lejos. De hecho, cada vez que avanzamos posiciones en busca del infinito, adquirimos un mejor conocimiento de los procesos fundamentales de la naturaleza.

En el camino hacia el infinito, la humanidad deja huellas permanentes. Tanto un sencillo utensilio de piedra prehistórico como un traje espacial son balizas que señalan los lugares por los que hemos pasado. Algunas de esas huellas son sumamente modestas, otras, muy importantes, pero todas resultan necesarias. En esa senda, algunos de los pasos resultaron fáciles a la primera, otros hubieron de ensayarse experimentalmente una y otra vez hasta que



quedó claro cuál era la forma segura de avanzar. Todas esas huellas están ahí para mostrarnos de dónde venimos, las dificultades que afrontamos y cómo debemos continuar.

Las fotografías de Edgar Martins dan testimonio de los hitos que hemos dejado en el camino hacia el infinito. Esas señales, colocadas ahí, eternamente inmóviles, pertenecientes a la humanidad, pero que esta ha dejado atrás a medida que avanza hacia nuevos desafíos, representan nuestra lucha constante por comprender la naturaleza. Esas señales, siempre en el presente y, al mismo tiempo, siempre en el pasado –pues cada fotografía representa, por su propia naturaleza, una realidad que ya es pasado–, perfilan el camino de descubrimiento: son las huellas de la ciencia.

Cada uno de los objetos retratados, construido para explorar los límites de nuestro conocimiento, contiene en sí mismo la suma total de lo que la humanidad había aprendido hasta el momento en que se creó. En un simple guante se condensa el conocimiento de la estructura íntima de la materia, de las cuatro interacciones básicas que operan en la naturaleza y de la estructura local del universo. Sin embargo, ese simple guante o ese traje espacial o, en suma, cualquiera de los objetos que aparecen retratados en estas fotografías, trasciende todo esto. Por diseño o por casualidad, la finalidad principal de esos objetos es guiarnos hacia lo desconocido. Los humanos que los llevan dan pasos firmes y seguros para avanzar unos cuantos centímetros más en el camino del conocimiento y continuar adelante en nuestra búsqueda del infinito.

Esa búsqueda continúa sin descanso día a día. Pronto el Gran Colisionador de Hadrones del CERN creará las mayores densidades de energía jamás producidas por el hombre con la esperanza de desvelar nuevos secretos de la estructura microscópica de la naturaleza, los cuales nos acercarán un poco más al comienzo del tiempo. Las misiones espaciales de la ESA y la NASA continuarán el programa de las naves COBE y Planck, a la caza de minúsculas anisotropías en la radiación de fondo de microondas, persiguiendo los misterios del nacimiento del universo. Sin duda adquiriremos nuevos conocimientos por las vías de investigación más inesperadas. Juntos, todos esos esfuerzos se unirán para crear una visión distinta del lugar del que venimos y de aquel al que nos encaminamos. Se descubrirán nuevas fronteras y aparecerán nuevos infinitos. Se crearán y abandonarán nuevos hitos, nuevos hitos que necesariamente simbolizarán una visión totalmente distinta del infinito, pero hacia los que tendremos que volver la vista en nuestra búsqueda de nuevos caminos de descubrimiento.

**João Seixas** es profesor en el Instituto Superior Técnico (Lisboa, Portugal) y miembro del proyecto de colaboración CMS (Solenoides Compactos de Muones) del Gran Colisionador de Hadrones del CERN (Ginebra, Suiza), donde lidera el grupo portugués en los estudios sobre quarkonios e interacciones de iones pesados de alta energía.