

Identidad cuántica

Desde hace tiempo se intenta rasgar el velo de misterio que envuelve a la mecánica cuántica. Debe esa rara apariencia que la caracteriza a un fenómeno singular: las diversas partículas de un mismo tipo resultan indistinguibles entre sí

Peter Pesic

La mecánica cuántica constituye el quicio sobre el que descansa la física moderna, el hilo conductor por el laberinto de átomos y núcleos, la clave de la estabilidad de la materia. Permanece, sin embargo, rodeada de misterio. Sus hipótesis básicas no han dejado de parecernos desconcertantes. En ella, todo es, a la vez, onda y partícula. Incertidumbre y probabilidad la rigen. Cien años después, expertos y profanos siguen perplejos. Albert Einstein, para quien la teoría cuántica caía en lo “fantasmal”, trató de obviarla. Paul Dirac pensaba que “ni siquiera con palabras podemos explicarla bien”; por eso había que apoyarse en su estructura matemática abstracta. Pero tras haber dominado el lenguaje formal de la mecánica cuántica, agregaba Freeman Dyson, no cabe más remedio que “reconocer que no hay nada que entender”. Richard Feynman, un maestro en encontrar maneras sencillas de explicar ideas complejas, confesaba tras resumir las reglas básicas de la teoría: “Me gustaría preguntar: ¿Cómo funciona? ¿Qué maquinaria subyace bajo la ley? Nadie la ha visto. Nadie explicar más que lo que hemos explicado. Nadie nos ofrecerá una representación más profunda. No contamos con idea alguna acerca de un mecanismo más fundamental del que se deduzcan estos resultados.”

Estamos, pues, atrapados en las dificultades de la teoría cuántica. Lo que no ha impedido que superase con brillantez todas las pruebas experimentales. Sin embargo, tal vez exista alguna manera de abordarla que proyecte su misterio en una perspectiva más clara. Desde hace veinte años vengo ocupándome del papel de la iden-

tividad y la individualidad en la historia y los fundamentos de la mecánica cuántica. En mi opinión, su núcleo reside en una concepción radical, que defendía que las partículas elementales carecen de individualidad. Sus identidades se entremezclan y, con ello, engendran el extraño mundo de los fenómenos cuánticos.

Desde hace mucho, la identidad cuántica ha sido una propiedad admitida de la teoría, decisiva para entender el enlace químico y la estructura de los elementos. Con todo, venía a ser un escolio de otras hipótesis, más abstractas. Quiero darle la vuelta a la cuestión. Pondré la identidad cuántica en el centro del misterio. En círculos restringidos he ofrecido argumentos matemáticos para justificarlo; aquí presentaré algunas reflexiones generales, que apoyan mi tesis: para desentrañar el misterio de la mecánica cuántica, se requiere considerarlo una consecuencia de la identidad cuántica.

Cortados por un mismo patrón

En la búsqueda de una nueva intelección de la teoría cuántica, conviene empezar por el problema de la individualidad. De larga tradición en filosofía y en física, aparece ya en las primeras especulaciones griegas en torno a los átomos. Para Aristóteles, la individualidad constituía una propiedad fundamental de las personas, los objetos o los átomos. No obstante, atribuía una importancia mayor a la pertenencia común a una especie o género.

Los filósofos posteriores volvieron a plantearse la naturaleza de la individualidad. En el siglo XVII, Gottfried Wilhelm Leibniz exponía que dos hojas no podían nunca ser exactamente la misma, aun cuando procedieran del mismo árbol. Desde su óptica, la unicidad de cada hoja reflejaba su peculiar historia y posición en el universo, no la individualidad intrínseca de una hoja. Un Dios racional, aducía Leibniz, no permitiría individuos idénticos; pues, ¿cómo podría Él situar una *aquí* y otra *allí* si no pudiese identificarlas?

Leibniz estaba convencido de que la unicidad individual contradecía la existencia de átomos anónimos.

El autor

PETER PESIC, profesor del Colegio Universitario St. John's de Santa Fe, se doctoró en física en la Universidad de Stanford. Las ideas que hilvana en este artículo hallan un amplio desarrollo en su último libro, *Seeing Double: Shared Identities in Physics, Philosophy, and Literature*.
© American Scientist Magazine.



1. ESTE SANTUARIO SINTOISTA, de dos mil años de antigüedad, cercano a Ise, en Japón, se conserva como el primer día porque los edificios de madera de ciprés se reconstruyen por completo cada 20 años. El santuario de Ise evoca una cuestión filosófica debatida desde la época de Platón: cuando un objeto experimenta de manera constante grandes renovaciones, ¿hasta qué punto pierde su

identidad original? Estas inquietudes filosóficas acerca de la identidad empezaron a adquirir una dimensión científica, práctica, en el siglo XIX, cuando se sentaron los fundamentos de la futura teoría cuántica. Como explica el autor, el papel de la identidad y de la "identificidad" de las partículas subatómicas ilumina los extraños efectos de la mecánica cuántica.

Por la misma época, Isaac Newton abogaba por la realidad de los átomos, que consideraba distinguibles. Para Newton, la diferencia entre las individualidades de dos partículas es tan patente, que resulta imposible confundirlas. Sin embargo, la aplicación de la mecánica newtoniana a la materia sacaba a la luz un aspecto de la realidad radicalmente nuevo: las fuerzas ejercidas entre objetos. El propio Newton razonaba que la gravedad actuaba a distancia, a grandes distancias; no directamente, sino a través de "la mediación de algo *que no es material*". Unos dos siglos más tarde, con un talante similar, Michael Faraday describía la electricidad y el magnetismo mediante líneas de fuerza o campos, expresiones que acuñó. En la mente de Faraday, la materia había perdido su carácter central. La realidad genuina se hallaba en las líneas de fuerza.

Faraday generalizó su concepción a los campos invisibles que constituyen la luz visible, entendida como ondas ligadas a las líneas de fuerza. Le impresionaba profundamente que esas vibraciones no estuviesen fijadas en el espacio: los campos estacionarios rodeaban las cargas estáticas o los imanes, pero cuando estas fuentes se aceleraban, sus campos adquirían libertad y se manifestaban como ondas de luz que se propagaban por un espacio sin límites. No mucho antes, el famoso experimento de difracción de Thomas Young había mostrado que la luz consistía en ondas. En el

aparato de Young, la luz generaba patrones de interferencia porque, siendo procesos y no objetos materiales las ondas, resultaban intercambiables y podían coincidir en el espacio y el tiempo.

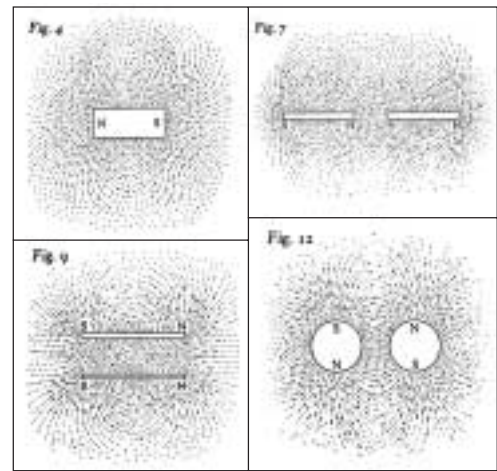
Quedó claro para Faraday que, estacionarios o en movimiento, los átomos daban lugar a campos indistinguibles entre sí. Tal idea socavaba la individualidad de los propios átomos, ya que la visión radical de Faraday entrañaba otra consecuencia, que no se extrajo entonces. A saber, si la carga y la materia sólo existen en cuanto recurso literario para referirse a la densidad de unas líneas de campo, en sí indistinguibles, las partículas materiales tampoco serán realmente distinguibles. La visión de Faraday de un mundo de campos cuestionaba la clase de individualidad que correspondía a las partículas impenetrables.

Con el trabajo de Faraday comenzó el diálogo entre campos y partículas que nos es tan familiar. Pero varios decenios antes, en paralelo con la configuración de la teoría atómica, se produjo otro avance crucial: los átomos perdieron su individualidad. John Dalton sostuvo en 1800 que los átomos de hidrógeno debían mostrarse iguales en sus propiedades observadas. De lo contrario, el hidrógeno no sería un elemento exclusivo, sino una multitud de distintos "hidrógenos".

James Clerk Maxwell, más joven que Faraday, propuso también la identidad absoluta de todas las molé-



2. MICHAEL FARADAY es conocido por sus logros experimentales, muchos de los cuales tuvieron lugar en su laboratorio de la Royal Institution (*izquierda*). Con limaduras de hierro puso de manifiesto las líneas de fuerza que manaban de distintos imanes (*derecha*); resaltaba así la impor-



tancia de los campos y recortaba la de las partículas materiales que los originan. La comprensión de que los campos se interpenetran y pierden todo sentido de individualidad facilitó que se percibiese que lo mismo ocurría con las partículas.

culas, “se encuentren en la Tierra, en el Sol o en las estrellas fijas”. Se apoyaba, para ello, en los patrones espectrales; aparecían los mismos en la Tierra y en la luz de estrellas remotas. A su vez, los espectros estelares revelaban que los átomos conservaban las mismas propiedades desde hacía muchísimo tiempo, desde el momento en que emitieron la luz captada aquí. Maxwell concluyó que cada molécula estaba cortada por un mismo patrón, con una uniformidad que les confería “carácter de artículo manufacturado”.

Los experimentos posteriores mostraron más pruebas del corte por el mismo patrón. Empezaron con el descubrimiento de los “rayos catódicos”, descargas eléctricas luminosas en tubos de cristal en los que se había hecho el vacío (predecesores de los monitores de televisión y de vídeo). En 1897, J. J. Thomson logró, por medio de campos eléctricos y magnéticos cruzados, curvar las trayectorias de los rayos catódicos. Encontró que la razón de su carga a su masa tenía un solo valor, universal; lo que no entrañaba dificultad de comprensión alguna si consistían en corrientes de partículas de la misma carga y masa. (Ahora las llamamos electrones.) Dos años más tarde descubrió valores idénticos para las partículas producidas cuando la luz incide sobre una placa metálica (el efecto fotoeléctrico). Thomson denominó “corpúsculos” a ambos tipos de partículas; subrayaba así su carácter particulado.

Desesperación de Planck

Los experimentos de Thomson con electrones corroboraban la existencia de unidades indivisibles de la materia, pero no abordaban de manera directa su individualidad. Esta cuestión afloraría, por aquellas fechas, en otra área de la física, la termodinámica. En principio, la mecánica newtoniana sigue la trayectoria de cada partícula por separado. Para vérselas con la cifra ingente de átomos que componen los objetos ordi-

narios, Ludwig Boltzmann y otros físicos del siglo XIX desarrollaron la mecánica estadística. Con todo, Boltzmann pensaba que, entre los principios de la física, el fundamental era la continuidad y la distinguibilidad de la trayectoria de cada partícula. Sin embargo, la esencial igualdad de los átomos entraba en conflicto con el determinismo individual de la mecánica newtoniana.

La crisis estalló en el año 1900. Fue a raíz del trabajo de Max Planck, aunque éste alteró la noción de individualidad más de lo que contribuiría a articular su importancia. Se proponía conciliar los principios reversibles de la física newtoniana con las leyes irreversibles de la termodinámica. Para ello, imaginó un horno con una pequeña abertura por donde escapase la luz. Se había demostrado ya que, si el horno era perfectamente negro, absorbería y emitiría todas las frecuencias de luz, con independencia del material de que estuviera hecho. El color de la luz emitida —la *radiación del cuerpo negro*— dependía sólo de la temperatura del horno. Planck quería conocer los mecanismos físicos fundamentales que determinaban el espectro de esta luz.

Sus colegas berlineses midieron con mayor precisión, también en esos mismos días, el espectro de la radiación del cuerpo negro (incluidas las componentes infrarroja y ultravioleta, cuya medición no se había acometido hasta entonces). Con esa gavilla de observaciones esperaba Planck someter a prueba su teoría. Andando el tiempo, Planck llamaría a lo que sucedió “un acto de desesperación”. Para que la tesis concordase con los datos experimentales, había que admitir que, en el horno, sólo se intercambiaban cuantías discretas de energía; a esos paquetes les puso el nombre de *quanta*, o cuantos.

Se quedó intranquilo; la hipótesis, carecía, a su parecer, de sentido. Para esclarecer el asunto, ideó una nueva expresión de sus resultados que resaltaba la importancia central del átomo. Aunque la teoría atómica había ganado una amplia aceptación a finales del siglo XIX, Wilhelm Ostwald y Ernst Mach, científicos

eminentes, seguían viendo en los átomos meros constructos teóricos, sin realidad física.

El propio Planck compartía en un comienzo ese mismo escepticismo. Pero acabó siendo atomista a raíz de sus reflexiones sobre la probabilidad. No podía haber estadística, razonó, sin objetos discretos que contar; es lo que sucede con las probabilidades de las apuestas: se apoyan en los estados discretos proporcionados por las caras de los dados tirados. La comprensión de la física, prosiguió, descansa sobre la probabilidad relativa de los estados, que, por tanto, deben ser discretos o atómicos.

Planck generalizó el enfoque para incluir la luz misma, amén de gases o conjuntos de átomos. Estaba seguro de que la luz, aunque inmaterial, obedecía las leyes de la termodinámica. Parecían leyes tan universales, que no podían admitir excepción alguna. Por consiguiente, debía haber alguna entidad básica que permitiera contar las distintas probabilidades de los estados de la luz; deberían existir “átomos” de luz, y un átomo de luz no podía ser sino un estado discreto de energía luminosa, o cuanto. Pero el razonamiento llevaba a un punto crítico: al contar las distintas maneras en que los cuantos de luz podrían repartirse la energía, Planck los tenía que tratar como absolutamente indistinguibles entre sí; en caso, contrario los resultados teóricos discrepaban de los experimentales.

Planck no apostilló el curioso método de cómputo empleado, quizá más preocupado por la necesidad de discretizar, por esa decisión “desesperada” de atribuir al salto cuántico, h , un número finito distinto de cero. Todavía en 1909, seguía presentando su extraña forma de cómputo sin parecer percatarse de tal rareza, como si se tratara de una peculiaridad de su enfoque teórico, y no una particularidad de la propia luz. La integridad de Planck impidió que negase lo que había afirmado ni siquiera mientras batallaba por superar su paradoja.

La singular manera en que Planck contaba los cuantos de luz sólo fue el inicio. La pérdida radical de la individualidad terminó por convertirse en una característica esencial de la estructura de la teoría cuántica. En 1952, reflexionando acerca de las partículas cuánticas, Erwin Schrödinger subrayaba que “no se debe ni *imaginar* siquiera que cualquiera de ellas esté *marcada* por un ‘punto rojo’, de suerte que más tarde podamos reconocerla como *la misma* partícula”. En contra de lo admitido por Newton y Einstein, no se puede tomar *un* neutrón, marcarlo y seguir su curso subsiguiente. En esta asombrosa combinación de perfecta igualdad y completa indistinguibilidad reside el auténtico núcleo de la identidad cuántica. Ninguna lengua

4. MAX PLANCK (derecha) enunció una teoría del espectro de la radiación del cuerpo negro mediante una aproximación antes aplicada a los grandes conjuntos de partículas de gas. Había que contar el número de estados distintos de la energía luminosa, o cuantos. Sólo dio con el resultado correcto cuando tomó a los cuantos de la luz por idénticos. Si hubieran sido distinguibles, la respuesta habría sido diferente, de la misma manera que el número de resultados posibles al lanzar dos monedas difiere según las monedas sean idénticas (*izquierda*) o distinguibles (*centro*).



3. LOS EXPERIMENTOS DE J. J. THOMSON revelaron, a finales del siglo XIX, que los rayos catódicos eran corrientes de partículas dotadas de carga (electrones) que siempre muestran una misma razón entre la carga eléctrica y la masa. Este resultado daría más tarde a entender que las partículas subatómicas son completamente indistinguibles unas de otras.

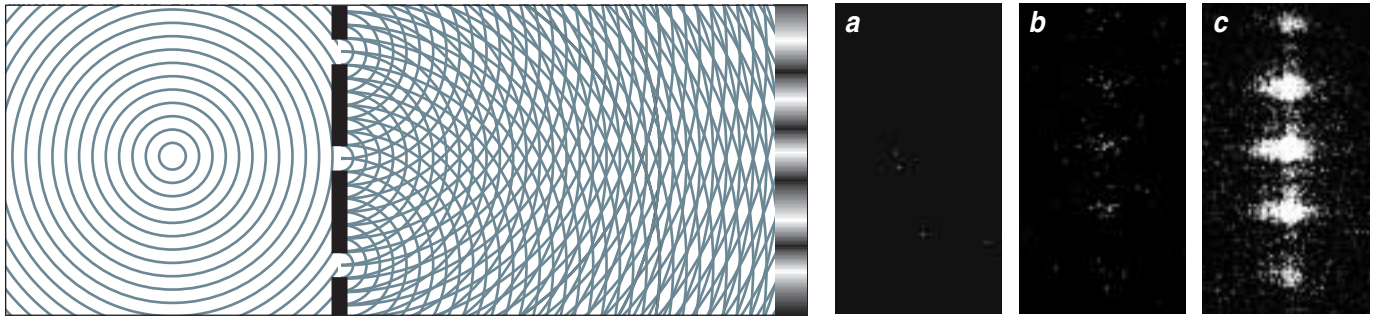
tiene una palabra adecuada para esta condición. Referirse a ella como “falta de individualidad” implica, erróneamente, que las partículas cuánticas deberían haber tenido individualidades pero carecen de ellas. He acuñado una palabra para expresar, de forma positiva, esa naturaleza peculiar suya: *identidad*. Quiere decir que los miembros de una especie sólo tienen identidad en cuanto miembros de tal especie, sin ningún tipo de rasgos que distinga a un individuo de otro. La identidad incluye la total indistinguibilidad y la completa igualdad de las propiedades observables, con independencia de cuándo o dónde se midan.

Tan extraña es esta condición, que algunos filósofos prefieren tratar las partículas cuánticas como si poseyeran todavía individualidad, aunque oculta a la vista. Desde un punto de vista lógico, tal encubrimiento es posible, pero parece innecesariamente complicado. Para mí, si la individualidad se oculta del todo, se pierde.

Más allá de la individualidad

Mostraremos un ejemplo que ilustra la naturaleza de la identidad, basado en unos experimentos de Johann Summhammer y Hermann Rauch, de la Universidad Técnica de Viena, Anton Zeilinger, del





5. LA INTERFERENCIA ENTRE ONDAS constituye un fenómeno sencillo y comprensible. En este ejemplo (*izquierda*), las ondas luminosas, que emanan de una única fuente y atraviesan las tres rendijas de la barrera intermedia, interfieren entre sí y producen una serie de bandas luminosas y oscuras cuando se proyectan sobre una pantalla. La luz está formada por fotones individuales que se interfieren —incluso cuando la intensidad de la luz es tan baja,

que sólo pasa un fotón a la vez por el aparato—. La interferencia no se percibe si se la observa cuando sólo han llegado a la pantalla unos cuantos fotones (*a*). Ahora bien, si se espera hasta que haya impactado en ella un mayor número, unos 150, se irá descubriendo una estructura (*b*). Con un número aún mayor, unos 15.000, se ven con claridad los efectos de la interferencia: las tres rendijas crean cinco concentraciones de luz (*c*).

Instituto de Tecnología de Massachusetts, y otros. Dentro de un recipiente en el que se ha hecho el vacío, se desdobra un chorro de neutrones (provenientes de un reactor nuclear). Ambas ramas se desvían hacia unos cristales de silicio, que las juntarán de nuevo. Separados varios centímetros los cristales, podemos distinguir muy bien las dos trayectorias (los haces de neutrones no son mayores que un sello de correos). Ahora bien, no nos será concedido poder, en virtud de la trayectoria que tomen, distinguir entre neutrones idénticos. El patrón característico que forman los neutrones cuando los haces se recombinan resulta de la interferencia ondulatoria entre los neutrones; dicha interferencia, a su vez, refleja la imposibilidad de determinar las individualidades de los neutrones, pese a que llegan enteros e indivisos al detector situado en el extremo opuesto. Esta singular mezcla de fenómenos suele denominarse “dualidad onda-partícula”.

No sigamos la vía de imaginar un neutrón como onda y partícula a la vez. Optemos por considerar ambos aspectos un reflejo de la identidad de los neutrones. Para someter a prueba esta suposición modifiquemos un poco el experimento. Cada neutrón tiene una cierta propiedad intrínseca, el espín. Es posible utilizar una fuente que genere neutrones polarizados, es decir, tales que sus espines se hallen todos alineados; que apunten hacia arriba, por ejemplo. Una tal fuente producirá el mismo resultado que antes, debido a que los neutrones siguen siendo indistinguibles. Pero si se introduce un imán especial que invierta el espín en una de las rutas, los neutrones de las dos trayectorias se volverán distinguibles y la figura de interferencia desaparecerá. Los efectos característicos de la interferencia cuántica también se dan en sistemas mayores: átomos, micromoléculas y macromoléculas (fullerenos). En este tipo de experimentos, la fuente puede ser tan débil que en cualquier instante de tiempo sólo haya una partícula en el aparato. Por tanto, la cuestión no reside en la indistinguibilidad de dos neutrones, sino en la identidad continua de cualquier neutrón *consigo mismo* en el curso del tiempo y a través del

espacio. En conclusión, un solo neutrón mantiene su identidad.

Esta idea no carece de sutileza. Podemos referirnos a un neutrón que se halla en la habitación A, en cuanto diferente de otro que se encuentra en la habitación B. Ahora bien, mirado con profundidad, no estamos distinguiendo realmente entre los neutrones, sino sólo entre las *habitaciones* donde están. Si escapasen de su confinamiento, no se podría ya distinguir uno de otro.

Esto se aplica de manera inmediata a las imágenes que Hans Dehmelm de la Universidad de Washington, obtuvo en 1980, de un átomo. Aparecía ingeniosamente suspendido en una trampa y aislado de otros. En las imágenes se ve, es cierto, un átomo solitario. Sus parpadeos constituyen una manifestación directa de los saltos cuánticos que suceden cuando el átomo absorbe luz, queda excitado y radia ese exceso de energía. Un tal átomo puede seguir atrapado durante meses. A quienes lo guardaron así, se les hizo tan cercano, que hasta le pusieron nombre (“Astrid”). Sin embargo, permanecerá silvestre y sin individualidad, por mucho tiempo que se dedique a domesticarlo. En cuanto se liberara a “Astrid”, no habría manera de atraparlo de nuevo. El nombre es humano, el átomo no tiene nombre.

El éxito de Dehmelm se cimentó sobre su anterior investigación, en la que atrapó un solo electrón. Estuvo confinado 10 meses, pero finalmente se perdió; se convirtió en un electrón sin rostro entre la muchedumbre. Ese anonimato no se evita haciendo aún menor la trampa. Cuanto más pequeña sea la caja, mayores serán las fuerzas necesarias para confinarlo, y más irregularmente y más deprisa se moverá, como si no quisiera hallarse aislado. Esta manera antropomorfa de hablar no es correcta, pero da una idea viva e intuitiva del principio de incertidumbre de Heisenberg: cuanto más se acote una partícula en el espacio, más incierto devendrá su momento. La caja está construida por electrones idénticos al electrón prisionero; a medida que empequeñezca, cada vez habrá más razón para afirmar que el prisionero ha cambiado su puesto con uno de los guardianes.

El problema de Einstein

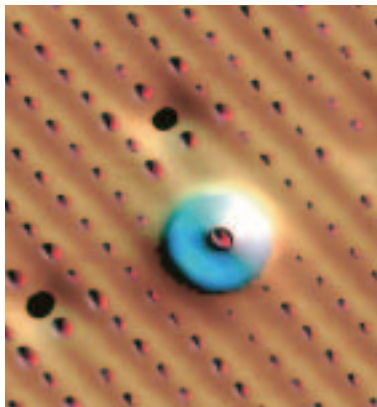
En esa posibilidad de intercambio reside la causa de que no podamos considerar un átomo o un neutrón como algo separado de sus hermanos. Sucede lo mismo que con los gemelos, que confunden al profesor cambiándose de pupitre. La metáfora, empero, no es exacta; los gemelos no son tan idénticos como los átomos.

La confusión de la identidad conduce a unos efectos cuánticos especiales. Nos referimos a las fantasmales correlaciones que Einstein encontraba tan paradójicas, como si fueran diabluras de gemelos. Insistía en que la física debe dar “una completa descripción de los sistemas individuales”, de manera que se pueda “seguir el curso de los átomos individuales y predecir sus acciones”. Pero esta capacidad requeriría la identificación de cada partícula con un individuo único, lo que es imposible.

Las objeciones de Einstein arrancaban de su concepción de las leyes de la física. Para él, como antes para Newton, determinaban de manera cabal el devenir de cada partícula individual. Pero la identidad obliga a ir más allá de la descripción newtoniana de las partículas identificables, cada una con una posición y una velocidad observables y regidas por una ecuación matemática. Esa exigencia le llevó a Max Born a una formulación, profundamente novedosa en su expresión matemática, de la teoría cuántica. Sucedió en 1928.

A fin de ocultar la individualidad, Born atribuyó al mundo dos niveles: un nivel exterior de números positivos, que representaban la probabilidad de observar un neutrón en un lugar del espacio-tiempo, y un nivel interior, no accesible a la observación, que guiaba las probabilidades observables. En el nivel interior estaban las *amplitudes*, números complejos (entes relacionados con la raíz cuadrada de los números negativos); no se las puede observar debido a que los dispositivos de medición registran sólo números reales. Born estipuló que esas amplitudes siguen ecuaciones estrictas (la de Schrödinger o la de Dirac), que determinan su despliegue en el tiempo, sin incertidumbre.

Ahora bien, las probabilidades que se observan son el cuadrado de una magnitud real ligada a las amplitudes. Estas probabilidades no evolucionan de manera determinada. Así, la probabilidad de que se observe un neutrón en un instante y en un lugar no determina, en absoluto, la probabilidad de que se lo pueda observar en otro tiempo y lugar, ya que ello significaría identificar la partícula. Por consiguiente, no hay una ecuación maestra que prediga con certeza las apariciones del neutrón. Y ello, pese a que existe una ecuación que predice la probabilidad de que se pueda observar el neutrón aquí o allá.



6. IMAGEN DE UN SOLO ATOMO de xenón, tomada con un microscopio de barrido de efecto túnel. Induce a error al sugerir que un determinado átomo puede tener características que le conviertan en especial. Este es idéntico en todo a los demás átomos de xenón.

Certezas cuánticas

Las matemáticas proporcionan sólo una representación de la realidad física, pero permiten profundizar en su naturaleza y disipan malos entendidos. Por ejemplo, la teoría cuántica no versa, en última instancia, sobre la incertidumbre y el indeterminismo. En el nivel interno, es tan cierta y determinada como las teorías de Newton y de Maxwell. La aparente incertidumbre sólo emerge cuando intentamos observar, desde el exterior, lo internamente determinado. Pero estamos formados por un número inmenso de electrones y quarks (los constituyentes de los protones y los neutrones), cuyo estado puede ser de una inmensa complejidad. “Somos”, en el sentido correspondiente a nuestra aparente individualidad global, esos estados complejos, que caracterizan nuestras aproximaciones a la realidad.

Cuando queremos examinar un átomo en concreto, lo hacemos con instrumentos que son, en comparación, enormes. Ello es coherente con nuestro tamaño y nuestra roma sensibilidad. Además, observamos sólo sucesos probabilísticos. Pero nuestra mente puede adentrarse en el reino de certezas a través de las ecuaciones de la teoría.

Esta doble visión del mundo es turbadora. Según juzgaba Einstein, la mecánica cuántica había abandonado el proyecto central de la física: la comprensión cabal de los datos observables mediante una teoría matemática. No aceptaba el punto de vista de Born: que lo observable no es seguro y lo seguro no es observable. Ciertamente, Einstein reconocía la potencia y la validez de la teoría cuántica, pero no la consideraba completa. Su concepción del entender urgía trascender esos aparentes límites del conocimiento. Pensaba que cada neutrón tenía su propia individualidad, acerca de la que nosotros andamos confundidos, pero que Dios conoce perfectamente bien. Ningún observador, sin embargo, puede distinguir un neutrón de otro.

Bibliografía complementaria

INDIVIDUALITY: AN ESSAY ON THE FOUNDATIONS OF METAPHYSICS. J. J. E. Gracia. State University of New York Press; Albany, 1988.

THE PRINCIPLE OF IDENTICALITY AND THE FOUNDATIONS OF QUANTUM THEORY. I: THE GIBBS PARADOX. II: THE ROLE OF IDENTICALITY IN THE FORMATION OF QUANTUM THEORY. P. D. Petic, en *American Journal of Physics*, vol. 59, págs. 971-979; 1991.

IDENTITY AND THE FOUNDATIONS OF QUANTUM THEORY. P. D. Petic, en *Foundations of Physics Letters*, vol. 13, págs. 55-67; 2000.