



¿Cómo es un átomo?





GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL
México, la Ciudad de la Esperanza

Gobierno del Distrito Federal

Lic. Alejandro Encinas Rodríguez
Jefe de Gobierno

Lic. Francisco Garduño Yáñez
Secretario de Transportes y Vialidad

Dra. Florencia Serranía Soto
Directora General del Sistema
de Transporte Colectivo

Lic. José Alfonso Suárez del Real y Aguilera
Subdirector General Jurídico y de Seguridad
Institucional del Sistema de Transporte Colectivo



Universidad Nacional Autónoma de México

Juan Ramón de la Fuente
Rector

Enrique del Val Blanco
Secretario General

Daniel Barrera Pérez
Secretario Administrativo

René Drucker Colín
Coordinador de la
Investigación Científica

Julia Tagüeña Parga
Directora General de
Divulgación de la Ciencia

Patricia Gómez Cano
Jefe del Departamento de Difusión de la
Coordinación de la Investigación Científica



¿Cómo es un átomo?

Luis de la Peña





Dirección General de Divulgación de la Ciencia

Coordinación editorial
Rosanela Álvarez y Juan Tonda

Diseño de la colección
Elizabeth Cruz

Corrección técnica
Martín Bonfil y Javier Crúz

Formación
Elizabeth Cruz y Kenia Salgado

Asistente editorial
Leticia Monroy

Ilustraciones
Aline Guevara

Primera edición, 2005

D.R. © Dirección General de Divulgación de la Ciencia
Universidad Nacional Autónoma de México
Edificio Universum, tercer piso, Circuito Cultural,
Ciudad Universitaria, Coyoacán 04510, México, D.F.

ISBN 970-32-2075-4



Agradecemos el apoyo otorgado por ISA Corporativo

Impreso y hecho en México

Este libro no puede ser reproducido, total ni parcialmente, por ningún medio electrónico o de otro tipo, sin autorización escrita de los editores.



¿Cómo es un átomo?

La idea del átomo

La materia está hecha de átomos. La piel, nuestro cabello y el pelo de los animales, el agua, el aire..., nosotros y todo lo que nos rodea estamos hechos de átomos. O moléculas formadas por átomos, las que a veces se unen entre sí sólidamente como en el acero, y a veces de manera suave como en el aire.

Pero, ¿qué son los átomos, de qué y cómo están hechos? Desde cuándo sabemos estas cosas es una larga e interesante historia que nos proponemos contar aquí.

El filósofo griego Demócrito desarrolló la idea de su maestro Leucipo de que la materia está constituida por átomos, e incluso los bautizó con esta palabra, que significa “indivisible” o “incortable”. Demócrito vivió en el siglo V antes de nuestra era, por lo que la idea de los átomos tiene ya casi 2 500 años. Para Demócrito los átomos eran sólidos, duros, indestructibles, y sus diferentes for-



mas y tamaños determinaban las propiedades de la materia en bulto. Pero no sólo de la materia, pues Demócrito creía que también cualidades como la bondad o la belleza estaban fabricadas con átomos; y hasta el alma humana la veía hecha de átomos. Cosa de cien años más tarde, otro filósofo griego, Epicuro, llegó a proponer que aun los dioses estaban hechos de átomos, por lo que debían cumplir con las leyes de la naturaleza.

Todas éstas eran meras ideas sin mayor apoyo que el que da la imaginación, y a menudo fueron rechazadas por otros filósofos. Platón, por ejemplo, consideraba que lo permanente e indestructible son las ideas y las formas (es decir, conceptos abstractos), no los átomos, a los que veía (junto con el resto del mundo material) como producto de nuestras creencias. Por su lado, Aristóteles también se opuso a la noción de los átomos, aunque sus razones fueron otras. Según los atomistas griegos, lo que no era átomos era vacío, y Aristóteles creía que el vacío no puede darse en la naturaleza. Puesto que las enseñanzas de Aristóteles se mantuvieron vivas hasta entrado el siglo xvii, particularmente en los ambientes dominados por los teólogos cristianos romanos, las nociones atómicas de Demócrito encontraron fuerte oposición, al ser consideradas materialistas y ateas.

La idea de los átomos pasó siglos más dormida que despierta. Fue el químico inglés John Dalton quien la despertó alrededor del año 1803, dando argumentos *científicos* para sustentar la teoría atómica, que así dejó de ser *filosófica* para convertirse en una teoría *científica*. Se

necesitaron dos mil años para hacer posible este paso esencial.

Dalton propuso (acertadamente) que los átomos de los diferentes *elementos* químicos (como el hidrógeno, el oxígeno, el carbono, el hierro, el oro, etc.) son diferentes y que las *sustancias* o *compuestos* químicos están formados por moléculas, o sea agregados muy estables de átomos. Las moléculas, que son la unidad mínima de un compuesto químico, pueden ser muy sencillas, como la del agua, cada una formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno (H_2O), la del monóxido de carbono (CO), la del dióxido de carbono (CO_2), etc. Pero pueden poseer incluso miles de átomos, como las que constituyen los genes, que son enormes cadenas atómicas. Dalton suponía que las diferencias entre los diversos átomos son de tamaño y masa (el término masa se refiere a la cantidad de materia). Esta suposición fue correcta, pero incompleta, como veremos más adelante. Los átomos son tan pequeños que apenas ahora alcanzamos a visualizarlos con las técnicas microscópicas más modernas. Para tener una idea de las dimensiones de un átomo, pensemos que requeriríamos cosa de cien millones de átomos, más o menos equivalente al número de habitantes en México, puestos uno al lado del otro, para alcanzar un centímetro de longitud.

El argumento científico de Dalton va más allá de los límites de este trabajo, pero damos una conclusión de su teoría, que desempeñó un papel central en el desarrollo posterior de la química. Hay casos en que dos ele-

mentos (como el carbono y el oxígeno en el CO y el CO₂) se combinan de diferentes formas para dar diferentes moléculas. En este ejemplo, por cada átomo de carbono puede haber uno o dos de oxígeno. Éste es un caso simple de la ley de las proporciones múltiples, que dice que cuando dos elementos se combinan en formas diferentes para dar lugar a moléculas diferentes, manteniendo fija la cantidad de uno de ellos (aquí un solo átomo de carbono en cada caso), el otro entra en proporciones que se pueden expresar en términos de números enteros pequeños (aquí como 2/1 o 1/2, como prefiramos). Otro ejemplo es el de la molécula de agua, que se puede presentar como agua simple (H₂O) o como agua oxigenada (H₂O₂), tan importante para nuestras rubias morenas, pero también como combustible para las naves espaciales. Esto suele suceder con los compuestos de la química orgánica, esto es la química del carbono. Recordemos de paso que las moléculas formadas sólo por átomos de oxígeno pueden tomar la forma de oxígeno (O₂) o de ozono (O₃).

Con el descubrimiento de Dalton se pudo calcular el número de moléculas que contiene un pedazo de materia. Un litro de gas en las condiciones ambientales (de presión y temperatura) usuales, contiene varios miles de trillones de moléculas. La teoría de Dalton fue aceptada por muchos científicos como punto de partida para sus investigaciones. En particular, la física avanzó en el estudio del comportamiento de los gases, especialmente con los cambios de temperatura.

Pero, como en los viejos tiempos, tanto entre los físicos como entre los químicos se dieron dos corrientes: los atomistas, que eran entonces los modernos y progresistas; y los antiatomistas, que eran los conservadores. Ambas escuelas tenían sólidos argumentos, y durante todo el siglo XIX se dio la batalla entre atomistas y antiatomistas. La razón de fondo era que aunque la noción atómica resultaba muy útil para determinados propósitos, no existía ninguna prueba directa de la existencia de los átomos. Pese a todos sus éxitos, se hacía urgente mostrar de manera directa la realidad de los átomos y, por fin, se encontró la manera de hacerlo. Fue Einstein, que tenía entonces tan sólo 26 años de edad, a quien se le ocurrió la manera de lograrlo. Supongamos que un líquido (como el agua) contiene un pequeñísimo granito en suspensión. Debido a que este cuerpecillo recibe constantemente los golpes de una multitud de moléculas de agua que se mueven en todas direcciones, debe de estar saltando de un lugar a otro de manera enteramente desordenada, en un movimiento inagotable que será más violento conforme se caliente el líquido. Aunque Einstein no lo sabía en aquel momento, este movimiento había sido observado por el botánico inglés Robert Brown en 1827, por lo que se le llama movimiento browniano. Brown notó el movimiento permanente y desordenado de los granitos de polen suspendidos en agua, pero ni él ni nadie pudo explicar las razones de este fenómeno, hasta su redescubrimiento (esta vez por vía puramente teórica)

por Einstein, 78 años después, en 1905. Einstein demostró que ciertas características del movimiento browniano dependen del tamaño de las moléculas del líquido. Esto le permitió proponer un método para determinar el tamaño de las moléculas del agua, directamente de la observación del movimiento browniano. El estudio experimental lo llevó adelante el físico francés Jean Perrin, quien para 1910 anunció que había podido medir el tamaño de las moléculas del agua siguiendo el método propuesto por Einstein. ¡Por fin se había logrado mostrar experimentalmente la existencia real de las moléculas!

Observar el movimiento browniano es como ver el movimiento de las moléculas, que producen con su golpeo la agitación del granito en suspensión. Es difícil tener una prueba más clara del movimiento de agitación de las moléculas del agua. Afortunadamente hay una manera muy simple de ver este fenómeno, sin necesidad de recurrir a un microscopio. En una habitación tranquila, sin corrientes de aire, en ocasiones podemos ver las motitas de polvo suspendidas en el aire e iluminadas por la luz que entra por una ventana. Si seguimos una de ellas con atención no tardaremos en notar que se mueve erráticamente y sin cesar, brincando con energía quién sabe hacia dónde.

Es muy interesante notar, pues, que fue hasta iniciado el siglo xx, hace poco menos de cien años, que se supo ya en firme que la materia está formada por átomos.

¿Y de qué están hechos los átomos?

Había llegado el momento de las grandes preguntas: ¿qué son los átomos?, ¿de qué, cómo están hechos? Los físicos se pusieron de nuevo a trabajar para construir la teoría atómica.

Este término merece atención. A ningún ciudadano de a pie se le ocurre que debido a que se había verificado la existencia de los átomos se daba la necesidad de crear su teoría. Pero por su curiosidad e interés en saber cómo es y cómo se comporta la naturaleza, el problema se convierte en una necesidad intelectual para un físico. Son ese tipo de necesidades, análogas a las de un artista, que le dan al hombre su dimensión intelectual, que surgen de su capacidad de raciocinio, de asombro y deleite profundo al contemplar y tratar de comprender la naturaleza o la sociedad.

Para 1910, cuando se demostró la existencia de los átomos, se sabía muy poco de ellos. A finales del siglo XIX se habían descubierto los electrones y se había demostrado que forman parte de los átomos, ya que los átomos los pueden soltar (por ejemplo, al calentarse). Como los electrones tienen carga eléctrica negativa y los átomos son eléctricamente neutros, éstos deberían contener también carga positiva. Durante algunos años se pensó en la posibilidad de que esta carga estuviera distribuida en todo el volumen ocupado por el átomo, como si fuera una masa con carga positiva y adentro de ella estuvieran inmersos los electrones, en número sufi-

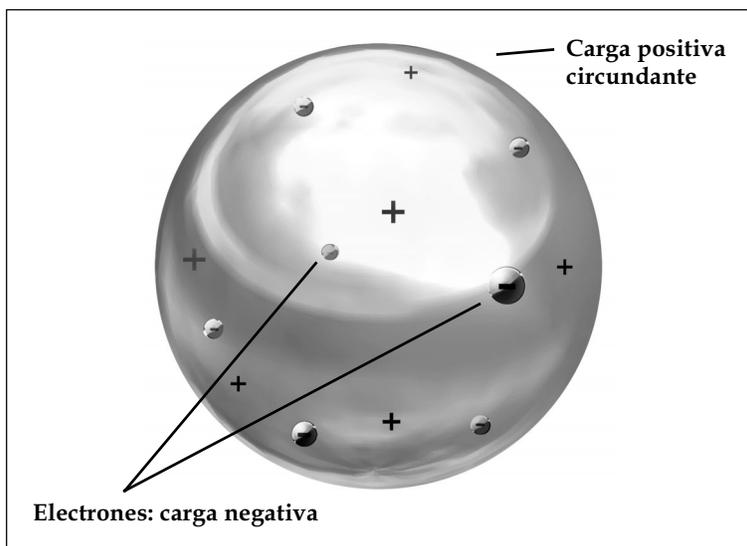


Figura 1. Modelo atómico del panqué de pasas.

ciente para neutralizar la carga positiva. A esto se le llamó, con buen humor, modelo del pan de pasas (el pan es la carga positiva; las pasas, los electrones).

Pero los experimentos mostraron que este modelo no es correcto, pues de ellos resultó que la carga positiva aparecía concentrada en la zona central del átomo, ocupando un volumen pequeñísimo, algo así como un puntito muy cargado eléctricamente. Además, los electrones son muy ligeros. En el caso del hidrógeno, cuyos átomos son los más simples y ligeros, el electrón único que posee cada átomo tiene una masa que equivale a muy poco más que $1/2000$ de la masa del átomo. Esto significa que esa pequeña esferita en el centro del átomo que contiene toda la carga positiva, contiene también casi

toda la masa del átomo. A esta estructura central muy cargada y pesada se le llamó núcleo atómico, y buena parte de la física que hubo que hacer a partir de ahí fue la física nuclear.

Así pues, se aceptó que el átomo está constituido por un núcleo muy pequeño, masivo y con carga positiva, y los ligeros electrones girando en torno de él. Este modelo recuerda un sistema solar en miniatura, con el Sol sustituido por el núcleo y los planetas por los electrones. Como el sistema planetario, el átomo es una estructura casi vacía: un pequeño núcleo en su centro y algunos otros puntitos aún más pequeños, los electrones, girando a su alrededor. Esto dista mucho de la imagen que en su momento se construyeron Demócrito y aun Dalton.

Pero ahora podemos ver lo acertado de otra conclusión de Dalton: que cada elemento químico tiene su átomo característico. En efecto, los átomos de cada elemento químico poseen diferente número de electrones y, naturalmente, núcleos diferentes, pues poseen diferentes cargas eléctricas. El hidrógeno, el elemento más ligero, posee un electrón, mientras que el uranio, el elemento natural más pesado, posee 92 electrones. Hay, pues, únicamente 92 elementos diferentes en la naturaleza (otros dos elementos más pesados que el uranio, el neptunio y el plutonio, se encuentran también en estado natural, pero sólo en cantidades pequeñísimas). Es la combinación de estos 92 elementos en una enorme diversidad de moléculas lo que produce la ri-

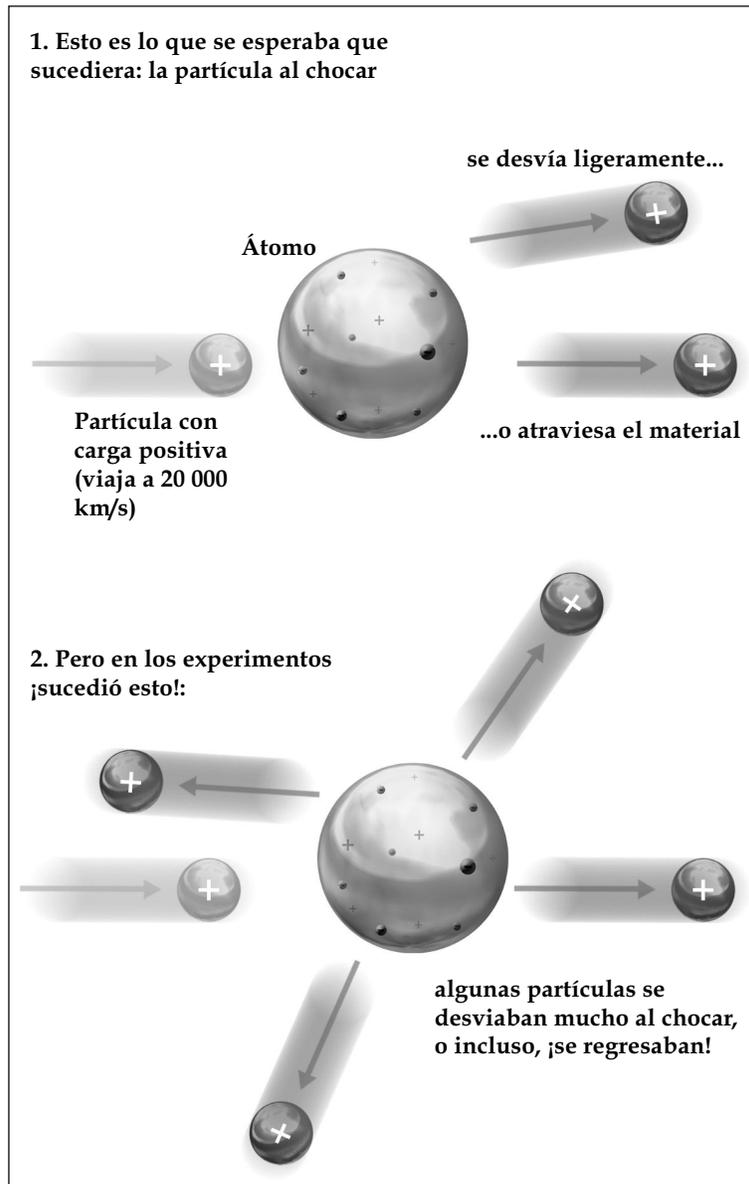
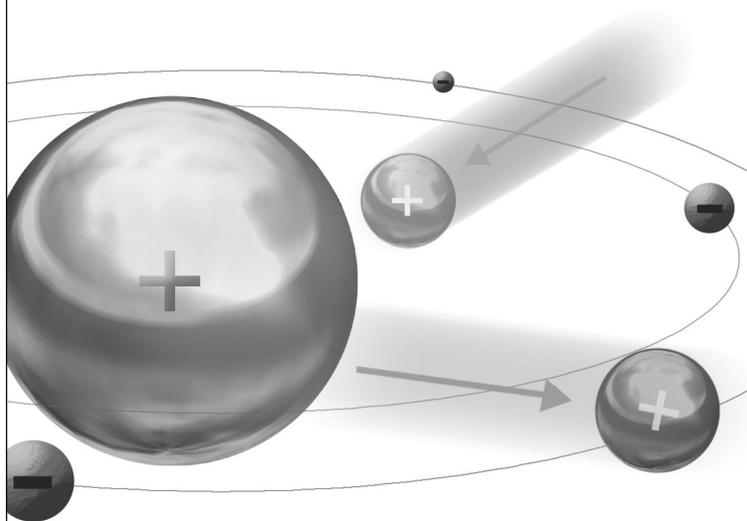


Figura 2

3. Algo estaba mal con el modelo del panqué de pasas. No era posible que el átomo hiciera regresar así a una partícula que viaja con tal velocidad, pues era como disparar una bala a una hoja de papel, ¡y que rebotara!... Sí, el modelo era incorrecto.

4. Los físicos dedujeron que lo único que podía hacer regresar a las partículas positivas era que chocaran contra un núcleo que contuviera toda la carga positiva del átomo, pues cargas iguales se repelen.



En este nuevo modelo atómico, los electrones — con carga negativa — circulan en órbitas alrededor del núcleo positivo. Es como un sistema solar en miniatura.

quísima variedad de sustancias que se dan de manera natural o se producen industrialmente (como los plásticos o los textiles modernos). Por sus funciones, algunos de estos elementos resultan fundamentales, como el carbono para la vida, el oxígeno para respirar, o éste y el hidrógeno para formar el agua. Otros son mucho menos abundantes y participan poco en las sustancias de la naturaleza, como los gases nobles, que son casi inertes y forman un muy limitado número de compuestos. Los hay que se han convertido en esenciales para nuestra cultura, como el hierro de los aceros o el cobre de los conductores eléctricos. Hoy en día, la moderna industria electrónica ha transformado el silicio, que antes usábamos casi sólo para la fabricación de vidrios y lo hemos pisado desde siempre en la arena de las playas, en un elemento central, pues se le utiliza para la producción de los transistores y de los circuitos integrados (los chips), que constituyen los elementos activos de los dispositivos electrónicos modernos, como las computadoras.

Con el átomo, cada día se sabía más pero se entendía menos. La física de la época, en particular la mecánica que tantos éxitos había tenido, era incapaz de dar solución a los problemas que presentaban los átomos. Se obtenían resultados equivocados, y no podía explicar varios fenómenos observados con ellos. Hacía falta, pues, una nueva física y, afortunadamente, se contaba con un indicio que provenía de un campo totalmente ajeno a los átomos.

El gran físico alemán Max Planck estudió el comportamiento de la luz presa en una cavidad llamada en este caso *cuerpo negro*, pues un cuerpo totalmente negro absorbe toda la luz que recibe y la cavidad, por estar cerrada, tampoco deja escapar la luz. En 1900 Planck descubrió que para entender las propiedades del cuerpo negro se debe suponer que los intercambios de energía entre sus paredes y la luz se hacen por paquetes de tamaño fijo. Más o menos como cuando intercambiamos azúcar por dinero: compramos paquetes de 1 o 2 kilogramos, pero no nos venden 158 gramos de azúcar, digamos. O se intercambia un número entero de paquetes, o nada. Esta observación suponía un fenómeno físico enteramente nuevo e inesperado: los cambios en la energía en ciertos casos ocurren de manera discreta; es decir, son cambios bruscos, no de poco en poco. Planck calculó el tamaño de estos paquetes, a los que llamó *cuantos* de energía, usando el término latino *quantum*, que significa precisamente “cuanto”. Los caracteriza una nueva constante que define su tamaño. Como los paquetes de energía son muy pequeños, la nueva constante también resultó muy pequeña, pero determinante, porque establece una especie de frontera entre la física clásica y la nueva física cuántica. Por ejemplo, no resulta importante para medir la energía con que dos boxeadores se rompen la cara. Pero sí resulta fundamental para expresar la cantidad de luz (que es energía pura) que un átomo puede emitir, por ejemplo. Esta constante recibe el nombre de *constante de Planck* y aparece en todos

los problemas de la física cuántica. El descubrimiento de Planck fue enriquecido y generalizado por Einstein en 1905, mostrando que hay otros importantes sistemas físicos para los cuales resulta indispensable.

¿Cuál es el interés de todo esto para nosotros, que estamos hablando de los átomos y no de la luz? Pues resulta que el físico danés Niels Bohr, después de darle vueltas al problema durante varios años, llegó en 1913 a la conclusión de que también la energía de los electrones de los átomos está cuantizada. Un electrón atómico no puede tener cualquier energía, sino sólo ciertas energías discretas: una, o la otra, u otra más, etc., pero sólo alguna de las energías posibles. Algo así como los coches en un estacionamiento: se pueden estacionar en un cajón, o en otro, pero está prohibido estacionarse en posiciones intermedias. Sin embargo, mientras que los coches pueden violar la norma, los electrones no, pues las leyes físicas son absolutamente inviolables.

La teoría de Bohr resultó un verdadero éxito —se hicieron nuevas predicciones y se explicaron muchas cosas—, aunque también se aclaró que sólo era aplicable al átomo de hidrógeno, al más sencillo de los átomos. Poco podía hacerse con ella para estudiar los demás átomos. ¡Apenas algo más del 1% de los átomos de la naturaleza quedaba explicado! Pero al menos se sabía algo nuevo y muy importante: los átomos son objetos cuánticos. La nueva teoría tendría que ser cuántica.

Fue hasta los años de 1925 a 1927 cuando, finalmente, quedó construida, al menos en su parte fundamental.

Con la nueva mecánica hemos aprendido que los átomos no son del todo como un microscópico sistema planetario. Sí, en cuanto que su estructura básica se conserva como la hemos imaginado párrafos arriba. Pero no en cuanto que los átomos no obedecen las leyes (*clásicas*) que se aplican a los planetas. Son microscópicos sistemas planetarios, pero regidos por leyes cuánticas, que difieren de manera sustancial de las leyes de la mecánica clásica.

Por ejemplo, una característica esencial del movimiento de los electrones (o de cualquier corpúsculo cuántico) es que van siempre acompañados de un fenómeno ondulatorio. Este fenómeno, típicamente cuántico, fue predicho por el físico francés Louis de Broglie y recibe el nombre de *dualidad onda-corpúsculo*. En la física clásica (anterior a la cuántica) corpúsculo y onda se refieren a dos formas de comportamiento enteramente diferentes e independientes. Una onda es una onda y se comporta como onda, mientras que una partícula se comporta siempre y únicamente como partícula. Característica central de una partícula es que durante su movimiento mantiene su estructura, la que ocupa un volumen del espacio pequeño y fijo. Por lo contrario, una onda no tiene una forma o un volumen definidos, sino que conforme se propaga (viaja), estas propiedades pueden ir cambiando. Además, una onda viaja con una velocidad fija, que le es característica. Así, sabemos que la velocidad del sonido en el aire es de 320 metros cada segundo, mientras que la luz viaja en el

vacío con la estratosférica velocidad de 300 millones de metros cada segundo. Por el contrario, una partícula se puede mover con cualquier velocidad (siempre y cuando sea menor que la velocidad de la luz). Además, las ondas producen fenómenos ondulatorios exclusivos. Uno típico es la interferencia, que consiste en que una onda puede *cancelar* otra. En cambio, una partícula nunca puede cancelar otra; lo más que puede hacer es desplazarla, pero ambas siguen existiendo. A pesar de estas profundas diferencias, los electrones no dejan nunca de ser partículas, pero presentan también propiedades ondulatorias que varían según su estado de movimiento.

La dualidad onda-corpúsculo no es la única propiedad que distingue los objetos cuánticos de los clásicos. La física cuántica difiere en muchos aspectos fundamentales de la física que se había logrado construir estudiando el mundo que corresponde a nuestra escala, en centímetros, metros o kilómetros. Cuando pasamos a las dimensiones de lo atómico, es decir, a millonésimas de milímetro o aun menos, las leyes y los principios que deben aplicarse son otros, exclusivos del reino cuántico.

Además de sus aplicaciones científicas, como en la astrofísica (la física del universo) o la química, una cantidad importante de los productos característicos de nuestra época son de origen cuántico. Por ejemplo, son cuánticos el láser, incluyendo el pequeño láser de estado sólido que utilizan los CDs y DVDs, los apuntadores,



Figura 3. En el modelo atómico cuántico, los elementos que lo componen ya no son sólo partículas. Electrones, protones y neutrones poseen una cualidad sorprendente: a veces se comportan igual que las ondas y, otras, como partículas.

los lectores de barras de los supermercados, etc.; los transistores y toda la electrónica de las computadoras y los teléfonos celulares; las pantallas planas de TV y los monitores de las computadoras; buena parte del instrumental médico moderno, como el que produce imágenes del interior del organismo usando resonancia nuclear magnética. Tiene que ver asimismo con los llamados nanomateriales. Éstos son materiales cuyas estructuras fundamentales, que sirven como tabiques para construir los productos finales, tienen dimensiones de nanómetros, es decir, de milésimas de la millonésima parte de un metro. En estas dimensiones caben algunas decenas de átomos, en arreglos muy ordenados. Por ejemplo, en tubos microscópicos (nanotubos, de carbono en la mayoría de los casos) con su circunferencia constituida por unos pocos átomos, aunque su longitud puede ser variable dentro de amplios límites. Se ha encontrado que los materiales contruidos con estos nanotubos son transparentes, pero conductores de la electricidad (pues son de carbono puro), extremadamente ligeros (por estar hechos de tubos huecos) y, sin embargo, capaces de resistir esfuerzos casi cien veces mayores que los que soporta un buen acero (debido a su fuerte y regular estructura molecular). Son materiales llamados a cambiar para bien de nuestro futuro, si les damos el uso civilizado que todo el mundo desearía que se diera a los productos de la ciencia.

Pero seguramente la física cuántica nos deparará aún más sorpresas. Al presente, por ejemplo, se está estu-

diando intensamente la posibilidad de producir computadoras cuánticas frente a las cuales las modernas sembrarán juguetes infantiles. Y quién sabe cuántas cosas más...

Quien esté interesado en ver algo de lo que aquí se ha dicho (y un poco más) de manera interactiva, seguramente encontrará estimulante una visita al Museo de las Ciencias *Universum* en Ciudad Universitaria (UNAM), que recientemente ha inaugurado una sala cuántica llamada *Expo Q*.



Luis de la Peña

Luis de la Peña hizo su doctorado en física en la Universidad Estatal de Moscú. Es investigador emérito del Instituto de Física y profesor en la Facultad de Ciencias, ambos de la UNAM. Su línea de investigación se centra en los fundamentos de la mecánica cuántica. Es Investigador Nacional Emérito y ha recibido, entre otros, los premios Universidad Nacional en Ciencias Exactas y Nacional en Ciencias Exactas y Naturales. Ha publicado diez libros y cerca de 200 artículos sobre asuntos científicos.

