

THE EVOLUTION OF SEX DETERMINATION

Por Leo Beukeboom y Nicolas Perrin. Oxford University Press, Oxford, 2014.

Determinación del sexo

La sexualidad, un enigma evolutivo

El sexo ocupa un lugar central en la concepción humana del mundo vivo. De hecho, la distinción entre macho y hembra se encuentra profundamente enraizada en nuestro cerebro. La biología del sexo y la conceptualización social del sexo (género) acompañan nuestra vida diaria. Masculinidad y feminidad son elementos simbólicos fundamentales de todas las culturas humanas. Según la doctrina taoísta, todos los fenómenos del universo parten de la interacción entre el principio femenino (yin) y el masculino (yang). Existen razones biológicas para esa fascinación cultural por el sexo: se requiere para la reproducción humana. Sin embargo, frente al prominente papel de la mujer en esa tarea, sobre quien recae la carga del embarazo y la lactancia, la contribución exacta del varón en el proceso reproductor ha sido objeto de largos debates e interpretaciones contradictorias.

¿Qué entender por sexo? Existen al menos dos definiciones biológicas. La primera considera el sexo como intercambio genético entre individuos. La segunda lo explica por la presencia de meiosis. Aunque ambas definiciones se solapan en buena parte de su recorrido, no dejan de presentar importantes diferencias: la transmisión vírica no es sexo, la autofecundación es una forma de sexo y hay tipos diversos de partenogénesis. Meiosis y mitosis portan numerosas semejanzas. Una y otra implican división celular y recombinación genética. Pero uno y otro proceso divergen también en varios aspectos importantes: la recombinación mitótica se produce entre cromátidas hermanas, no hay intercambio de material genético y termina con dos células diploides genéticamente idénticas.

En cambio, la recombinación meiótica se da entre cromosomas homólogos, hay intercambio y se producen cuatro células haploides genéticamente únicas. El sexo meiótico es un proceso complejo en dos etapas, iniciado por singamia, es decir, la fusión de dos células haploides para formar un cigoto diploide, y terminando con la reducción a la haploidía a través de la meiosis.

Encontramos sexo meiótico en la mayoría de los linajes de eucariotas. Ampliamente difundido, es conspicuo entre grandes formas multicelulares; no así en las unicelulares, donde puede ser facultativo y expresarse solo en condiciones específicas y crípticas. El sexo meiótico se asocia a menudo con la reproducción. A veces de una forma inseparable. Los humanos nos reproducimos solo sexualmente, e igualmente todos los demás mamíferos.

La reproducción sexual se cuenta entre las notas integrantes de la definición de vida. Llamamos vivo a lo que, en potencia, está capacitado para reproducirse. Requiere, por lo común, el desarrollo de una meiosis y la fusión de dos gametos de sexos diferentes. Importa distinguir entre determinación sexual y diferenciación sexual. Por la primera se entiende la etapa del desarrollo en que el destino del individuo conduce a la condición de macho o de hembra. La diferenciación abarca las etapas del desarrollo durante las cuales se van formando los fenotipos masculinos y femeninos de acuerdo con la decisión inicial de la determinación. En muchos casos, la determinación del sexo es genética: machos y hembras portan alelos o genes diferentes que especifican su morfología sexual. En los animales, ello suele ir acompañado de diferencias

cromosómicas. En otros casos, el sexo puede venir determinado por el medio (la temperatura, por ejemplo) o por variables sociales (el tamaño de un organismo en relación a otros miembros de su población). El ámbito de la determinación del sexo se ciñe a veces a la acción del desencadenante inicial (activación de *Sry* en los terios), mientras que el desarrollo consiguiente de las gónadas en ovarios o testes (o de los meristemas florales en carpelos y estambres) se refiere a la diferenciación sexual primaria.

No obstante, el sexo no es intrínsecamente un proceso reproductor. La mayoría de los linajes a lo largo de la filogenia eucariota han mantenido una forma de reproducción asexual (que se da durante la fase haploide, durante la fase diploide o en ambas). En muchos grupos los dos procesos se hallan disociados: los dinoflagelados, por ejemplo, se reproducen solo asexualmente, a través de mitosis haploides. Durante el ciclo sexual se fusionan dos células haploides para formar un cigoto, pero se deja un núcleo haploide tras la meiosis (los tres restantes se descartan). Como mucho, puede generalizarse que la mayoría de los eucariotas presentan alguna forma de sexo. Más allá de ello, casi todos los atributos que asignamos al sexo suelen ser específicos del linaje. La sexualidad meiótica constituye uno de los rasgos unificadores de la radiación y diversidad eucariota. Los mismos genes que controlan la meiosis se han encontrado en los principales linajes, incluidas formas menos conocidas de hongos inferiores, clorofíceas, rodofíceas, fenofíceas, diatomeas y muchos más. El sexo se ha perdido en algunos linajes, muy pocos. Los que tienen solo reproducción asexual (o autofecundación obligada) muestran unas tasas de extinción muy altas: tienden a ocupar las puntas de las ramas filogenéticas, son recientes y presumiblemente de vida corta.

Descifrar la estructura y función de los tipos de apareamiento ha ensanchado las perspectivas sobre el origen de la sexualidad masculina y femenina. Sorprendentemente, los mecanismos de determinación del sexo no se han conservado en el curso de la evolución, sino que han ido adquiriendo una amplísima diversidad y mutado con celeridad. ¿Qué mueve la dinámica de ese proceso fundamental que conduce siempre a un mismo resultado: dos tipos sexuales, el macho y la hembra?

Los mecanismos que determinan el sexo han interesado a los biólogos desde

siempre, por su universalidad e importancia crítica en todas las formas de vida. En 1983, James Bull publicó una excelente síntesis de la cuestión en *Evolution of sex determining mechanisms*. Hasta la fecha no había aparecido ninguna actualización. Este libro sale al paso de esa deficiencia, sin alejarse de la idea central, a saber: los sistemas de determinación del sexo, que se dirían singulares e independientes, forman en realidad un continuo de fondo. Tampoco existe fundamento para la dicotomía clásica entre determinación genética y determinación ambiental. El sexo constituye un fenómeno umbral, lábil, influido por la herencia y por el medio.

Con Pitágoras (570-495 a.C.) se esbozó la concepción «espermista», tesis que sostiene que el padre aporta los caracteres esenciales de la progenie, en tanto que la participación de la madre se limita al sustrato material. En 1676, Antoni van Leeuwenhoek (1632-1723) utilizó lentes que había tallado, de 270 aumentos, para investigar lo que, «sin sentimiento de pecado, permanece como resto después del coito conyugal», y establecía que aquella misteriosa sustancia, el semen, estaba habitada por una muchedumbre de animales anguilliformes. Pensó que esos «animáculos espermáticos» desempeñaban un papel crucial al suministrar su sustancia al embrión, en tanto que el óvulo proporcionaría nutrición. En 1694, Nicolaas Hartsoeker (1656-1725), ayudante de Leeuwenhoek y codescubridor de los espermatozoides, ilustró su visión espermista con un dibujo de un humano preformado en el interior de una célula espermática, el homúnculo.

En el siglo XVIII, el preste italiano Lazzaro Spallanzani (1729-1799) demostró experimentalmente, en anfibios, que el espermatozoide del macho era necesario para la fecundación de los óvulos de la hembra. En 1827, el embriólogo Karl Ernst von Baer (1792-1876), descubridor del óvulo de los mamíferos, acuñó el término espermatozoo. Puso en 1841 orden en la maraña conceptual todavía reinante otro embriólogo, Albert von Kölliker (1817-1905), quien, tras examinar bajo el microscopio procesos de fecundación en diversos animales marinos, llegó a la conclusión de que los espermatozoos no eran animales preformados, sino productos de las células de los testes, que necesitaban del contacto con el óvulo para una reproducción exitosa. La fusión entre óvulo y espermatozoo fue observada finalmente en 1876 por el zoólogo Oskar Hertwig.

Una historia pareja ha recorrido en diferentes culturas y épocas la vía de determinación del sexo. Parménides, en el siglo VI a.C., propuso que el sexo dependía del lado de la matriz donde se instalara el embrión; para Anaxágoras, del V a.C., el sexo dependía de los testes del progenitor. Aristóteles, en el siglo IV a.C. criticó ambas teorías, aportando pruebas de que, en los animales, los embriones de ambos sexos pueden instalarse en el mismo lado del útero y que los varones con un solo teste podían tener hijos de ambos sexos. Siguiendo las ideas de Empédocles sobre los cuatro elementos, Aristóteles propuso que los machos se caracterizaban por una abundancia de fuego, por cuyo motivo eran cálidos y secos, mientras que las hembras, con abundancia de agua, eran frías y húmedas. Por consiguiente, el sexo de un engendrado viene determinado por el calor del progenitor masculino durante la relación sexual. En el siglo XVIII, el anatomista Michel Procope-Couteau (1684-1753) retomó las ideas de Parménides y Anaxágoras, y sugirió que el mejor camino para controlar el sexo del niño sería eliminar el teste o el ovario conectado con el sexo no deseado.

Las teorías ambientalistas o epigenéticas sobre la determinación del sexo han predominado hasta no hace mucho. A finales del siglo XIX se creía que el alimento constituía el factor determinante; el sexo vendría determinado por la nutrición de la madre durante los tres primeros meses de embarazo: una dieta pobre producía machos; una dieta rica, hembras. Las opiniones epigenéticas fueron abandonándose tras el descubrimiento de los cromosomas sexuales. Henking observó en 1891 que un elemento de la meiosis de macho de *Pyrrhocoris apterus* (con un sistema XX-X0) se transmitía solo a la mitad del espermatozoide. Aludió a ese elemento como «X», es decir, desconocido. En 1902, McClung postuló que era este un cromosoma, el responsable del sexo. Lo llamó cromosoma X. La implicación del cromosoma X en la determinación del sexo recibió apoyo ulterior de la obra de Bridges, quien analizó individuos de *Drosophila* con constitución aberrante de cromosomas sexuales.

Por las mismas fechas iniciales del siglo XX, los biólogos se percataron de que la constitución cromosómica humana difería entre varones y hembras. De los 23 pares de cromosomas, uno es heteromórfico en los varones (con un pequeño cromosoma Y formando par con su poderoso

homólogo X), mientras que en la mujer el par era homomórfico (XX). Conforme avanzaba la centuria, se fue descubriendo que, en los humanos, las diferencias sexuales esconden diferencias génicas: el cromosoma Y contiene genes, incluido el gen *Sry*, que se requieren para la determinación y diferenciación de la masculinidad. El sexo de un niño depende de si el espermatozoide paterno que fecundó el óvulo materno contribuyó con un cromosoma X o con un cromosoma Y.

Las perspectivas evolutivas sobre el sexo están cuestionando ideas intuitivas que se suponían asentadas. Citemos solo tres. En primer lugar, aunque asociado con la reproducción en muchos linajes multicelulares, el sexo no es fundamentalmente un proceso reproductor, toda vez que los costes resultan mucho mayores que los beneficios. Tampoco implica intercambio sexual: la fecundación externa, tras la eclosión de los gametos, es común en muchos organismos. No se requiere macho y hembra para crear progenie; pensemos en muchos insectos. Por fin, en la larga historia del sexo, machos y hembras tardaron en llegar; en vez de dos sexos diferenciados, numerosos organismos presentan tipos de apareamiento morfológicamente similares, que en los hongos se cuentan por docenas o cientos.

Pudiera parecer que con su origen temprano en los eucariotas y su distribución casi universal, el sexo debería aportar grandes y obvias ventajas evolutivas. Pero resultan más llamativos los costes que los beneficios. Costes que son de tipos muy dispares. En primer lugar, los costes fisiológicos, intrínsecos de la meiosis. En los unicelulares, se gasta más energía en alcanzar la meiosis que la mitosis. Durante el tiempo necesario para conjugarse y reorganizar los núcleos, una célula de levadura podría experimentar ocho mitosis, produciendo 256 células hijas (esto es, 2⁸). Ello puede parecer un coste muy oneroso, que queda aliviado cuando expresan sexo aprovechando que las condiciones ambientales son menos favorables para el desarrollo. El hecho de que el sexo (como la transformación en bacterias) se exprese a menudo bajo condiciones de estrés (por ejemplo, bajo escasez de nitrógeno en *Chlamydomonas*), no implica necesariamente que constituya una adaptación a esas condiciones, sino que explota entonces unas circunstancias de coste mínimo. Como resultado de esas asociaciones, los cigotos se especializan a menudo en es-

tados de reposo, lo mismo en eucariotas unicelulares que pluricelulares.

Aumentan los costes cuando el sexo implica un intercambio genético entre diferentes individuos (reproducción cruzada, frente a autofecundación o clonación). En primer lugar, el cruzamiento puede inducir una importante carga de recombinación, por disgregación de combinaciones beneficiosas de genes adquiridas durante la selección. En segundo lugar, el propio proceso de apareamiento es costoso. La constitución de los órganos de la reproducción del macho y la hembra, así como los caracteres secundarios, imponen una carga pesada en inversión energética. Dar con un compañero sexual puede a veces ser arduo, en particular si la densidad de población es baja. El apareamiento difunde, además, las enfermedades de transmi-

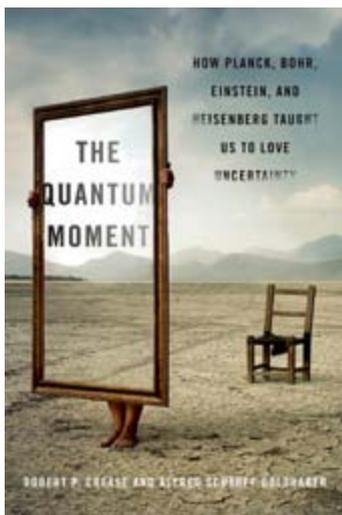
sión sexual e induce riesgos de depredación, sobre todo si comporta un despliegue o una exhibición llamativa.

Los genomas han de cumplir una diversidad de funciones durante el ciclo biológico de un organismo. Por ello codifican una diversidad de programas que deben ser silenciados o expresados según la situación. Ello se aplica también a los sexos y tipos de apareamiento. Los genomas son fundamentalmente bipotentes, dotados de capacidad para promover un sexo u otro de acuerdo con determinadas claves específicas. Ese enunciado es enteramente cierto en sistemas con determinación ambiental del sexo: un embrión de tortuga se desarrollará en macho o hembra según la temperatura de incubación. Y es casi cierto de sistemas con determinación sexual genotípica: un

XY humano o de *Drosophila* porta pares de todos los genes requeridos para desarrollarse en una hembra; los individuos XX pueden desarrollar también fenotipos masculinos (si bien no serán fértiles porque les faltarán los genes ligados al cromosoma Y requeridos para la formación adecuada de testes).

Los mecanismos de la determinación del sexo abarcan no solo el desencadenante inicial que dirige un programa de desarrollo del organismo hacia un sino masculina o femenino, sino que aseguran también la presencia de genes que organizan la diferenciación sexual primaria. La diferenciación sexual es un proceso complejo, que requiere redes reguladoras génicas, con bucles de realimentación y antagonismos dinámicos.

—Luis Alonso



THE QUANTUM MOMENT. HOW PLANCK, BOHR, EINSTEIN, AND HEISENBERG TAUGHT US TO LOVE UNCERTAINTY

Por Robert P. Crease y Alfred Scharff Goldhaber. W. W. Norton & Company, Nueva York, 2014.

Sociología de la ciencia

Impacto cultural de la física clásica y cuántica

El descubrimiento de lo cuántico (la idea según la cual la energía cursa en paquetes finitos y no en cantidades infinitamente divisibles) despertó un elenco rico de metáforas en la imaginación popular. El término *cuántico* se ha introducido en la poesía, cine, pintura, ficción, filosofía, psicología y neurociencia. Expresiones tales como *saltos cuánticos*, *multiversos*, *universos paralelos*, *principio de indeterminación* y *gato de Schrödinger* han pasado al lenguaje coloquial. Han arraigado como memes culturales. ¿Son grandes o pequeños los saltos cuánticos? ¿Cuán incierto es el principio de incertidumbre? ¿Es esotérico el lenguaje cuántico o solo otra forma de nuestra manera de pensar?

El título del libro de cabecera responde al nombre de la asignatura cuya docencia, para un alumnado heterogéneo de ciencias y letras, se reparten ambos autores Alfred Scharff Goldhaber, físico, y Robert P. Crease, filósofo. El curso estudia el impacto cultural de lo cuántico. El cuanto fue introducido en 1900 para explicar ciertos resultados desconcertantes, obtenidos en un rincón remoto de la física dedicado a la absorción y emisión de luz. A ello siguieron dos revoluciones cuánticas. La primera sucedió entre 1900 y 1925; los científicos discutieron y desarrollaron la teoría sin atraer apenas la atención del gran público. De la segunda revolución, entre 1925 y 1927, emergió la mecánica cuántica, cuyas curiosas implicaciones

pasaron a ser tema de debate común. Incluso hoy, ochenta años después, mantiene su interés sorprendente, visionario y contrario a la intuición.

Los alumnos de la asignatura mencionada manejan libros y artículos de historia, filosofía y sociología, obras de teatro (recordemos *Copenhagen*, de Michael Frayn), novelas y películas. En clase se explica el desarrollo de los conceptos fundamentales de la teoría cuántica. Conocidos en lo posible los fundamentos físicos, corresponde a los estudiantes descubrir el uso y abuso del lenguaje y las imágenes cuánticas. Goldhaber enseña las bases de una teoría, hoy plenamente desarrollada, sobre la materia y la energía. Crease ayuda a explorar las implicaciones filosóficas de los conceptos de espacio, tiempo, causalidad y objetividad. Prestaremos atención a la exposición del físico.

Pero no es ninguna novedad la repercusión de la física y sus avances en la cultura y en la vida de la humanidad. Ni sus dificultades. Erwin Schrödinger puso en 1935 la imagen del ahora célebre gato como recurso lúdico para mostrar la incapacidad de sus colegas a la hora de pensar desde una perspectiva mecanocuántica. Para entender el fenómeno y el marco en que apareció la cuántica necesitamos remontarnos a Isaac Newton (1642-1727), cuyo impacto en la filosofía y la cultura en general nadie cuestionará.

Newton vio la luz el año en que se desencadenó la primera guerra civil inglesa. Habría tres entre 1642 y 1651. Lo único que se tenía claro por entonces era que el

firmamento y la Tierra eran mundos distintos, con comportamientos diferentes. La bóveda celeste era eterna, los objetos terrestres cambiaban y morían, transformándose en otras cosas. Cambiaban porque había fuerzas ocultas. Newton daría un vuelco radical a esa doctrina. De niño se entretenía construyendo ingenios mecánicos: molinos de viento, relojes de agua y cometas o leyendo los libros que le prestaba el boticario local. En el Trinity College de Cambridge estudió filosofía, matemática y física. La Gran Peste que asoló Inglaterra en 1665 le obligó a retirarse a la casa de campo materna, en Lincolnshire. Dedicó el tiempo al estudio ininterrumpido y puso las bases de muchos de sus descubrimientos fundamentales en física, astronomía, óptica y matemática. Se adentró en la alquimia y le interesó la piedra filosofal. Uno de sus grandes hallazgos fue el cálculo, del que se sirvió para construir sus tres leyes del movimiento. Su obra magna, *Philosophiae naturalis principia mathematica*, publicada en 1687, donde exponía las leyes del movimiento y la atracción gravitatoria universal, cambió la concepción del mundo.

El newtonianismo conformó el universo material y mental, industrial y científico. Los propios teóricos de la política comenzaron a buscar leyes que gobernarán el mundo de los hombres a la manera en que Newton había descubierto las leyes que gobernaban el mundo físico. Uno de los ayudantes de Newton, John Desaguliers, escribió un poema titulado «El sistema newtoniano del mundo, el mejor modelo de gobierno».

La simplicidad, elegancia e inteligibilidad del mundo newtoniano destacaban en su coherencia y belleza. Tierra y cielos pertenecían a un mismo universo, cuyo espacio, tiempo y leyes eran idénticas en cualquier escala. Se trataba de un mundo predecible, como caracterizó, decenios después, Pierre-Simon Laplace. Transcurridos apenas tres años de la muerte de este, John Herschel escribió en 1830 a William Whewell sobre la urgente necesidad de divulgar la ciencia, de escribir compendios de lo que se sabe en cada campo de la ciencia para ofrecer una visión coherente de lo que se sabe y de lo que falta por conocer. Que la ciencia empapara la vida intelectual. Quien dio los primeros pasos en esa dirección fue una autodidacta, Mary Fairfax Somerville. Su libro *On the connexion of physical sciences*, publicado en 1834, en la misma

editorial donde vieron la luz los textos de Walter Scott, Lord Byron y Jane Austen, no contiene ecuaciones, solo algunos diagramas y escasa matemática. Pero se trata de una pieza maestra de la explicación descriptiva y de la analogía. En el mundo newtoniano los fenómenos podían producirse en cualquier escala. A propósito de la descripción de la gravitación universal, Somerville declara que se trata de una fuerza que actúa «lo mismo en la caída de una gota de agua que en las cataratas del Niágara, lo mismo en el peso del aire que en las fases de la Luna».

Antes, en 1809, se había dado un paso importante en la generalización de los conceptos científicos. Ese año, Johann Wolfgang von Goethe publicaba una novela, *Die Wahlverwandtschaften* («Afinidades electivas»), donde colocaba la ciencia en el centro de las preocupaciones humanas y, a los humanos, en el centro de la ciencia. Goethe subrayaba la primacía de la percepción humana en la comprensión de la naturaleza como una entidad holista. El título de la obra procede del químico sueco Torbern Bergman, un precursor de la tabla periódica. Igual que los elementos, los personajes de la novela de Goethe introducían nuevas relaciones cuando se agregaba un reactivo.

La obra de Newton impulsó a los filósofos una nueva tarea. Muchos se percataron de que la física dependía de un espacio y tiempo infinitamente extensos y divisibles y una causalidad universal; ni unos ni otra eran autoevidentes (como las matemáticas), ni objetos hallados por experiencia. Immanuel Kant mostró que esas ideas constituían condiciones de posibilidad de la experiencia, sin las cuales no era posible la consciencia humana; organizan los datos procedentes de los sentidos y confieren orden y coherencia a nuestra experiencia.

Los modelos mecánicos podían ya expresarse matemáticamente; la fuerza de la atracción gravitatoria entre dos cuerpos, por ejemplo, viene expresada por una constante multiplicada por el producto de las masas de los cuerpos dividido por el cuadrado de la distancia entre ellos. Además, el mundo newtoniano podía prescindir de referencias finalistas; el movimiento de un carro se explicaba solo en términos de fuerzas y masas, cualquiera que fuera la intención de su conductor. Cada masa tiene una posición específica en un tiempo específico. Si se mueve, su tasa de cambio de posición con respecto al tiempo se denomina velocidad. Si la

velocidad cambia, su tasa de cambio con respecto al tiempo se denomina aceleración. Las masas se aceleran en virtud de la acción de fuerzas. Las fuerzas surgen de la interacción entre cuerpos, por contacto y o por atracción o repulsión. Los *Principia* establecieron tres leyes del movimiento que se suponen válidas en todas las escalas y regiones del universo.

Más tarde, Charles Coulomb y otros estudiaron la atracción y repulsión eléctricas, a imitación de la ley universal de la gravitación. Descubrieron que la fuerza ejercida entre dos cargas eléctricas, o entre dos polos magnéticos, era proporcional al producto de las cargas e inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre ellas. Pero mientras que todas las masas son positivas, las cargas eléctricas o los polos pueden ser positivos o negativos; ello significa que las masas gravitatorias siempre se atraen entre sí, mientras que cargas y polos pueden atraerse o repelerse mutuamente. El concepto de campo (magnitud que tiene un valor específico para cada localización del espacio y tiempo) extendía el poder de la mecánica newtoniana. James Clerk Maxwell se percató de que los campos eléctricos cambiantes inducían campos magnéticos circulantes, estableciéndose un vínculo entre electricidad y magnetismo. Cuando armó el esqueleto conceptual del electromagnetismo obtuvo un resultado sorprendente: la luz correspondía a ondas de campos electromagnéticos.

La introducción de los cuantos sacudió los fundamentos del mundo newtoniano. El universo cuántico, contrario a toda intuición, carecía de simplicidad y elegancia. Por varias razones: primera, la diferencia a través de la escala, pues había que aplicar al micromundo leyes distintas de las que gobernaban el macromundo. Otra razón residía en la inhomogeneidad; ciertas cosas tienen un tipo de presencia en el mundo que difiere de la que muestran otras. Un tercer rasgo, la discontinuidad; los valores de las propiedades del espacio y el tiempo no flúan entre sí con la suavidad de lo que acontecía en la física newtoniana. Un cuarto aspecto, la incertidumbre; determinadas propiedades del universo newtoniano, tales como la posición y el movimiento, no podían establecerse a la vez y ni siquiera cabía afirmar que fueran reales. Un quinto, la impredecibilidad; y un sexto, la imposibilidad de prescindir del sujeto en ciertos tipos de medición.

Fue Max Planck (1858-1947) quien introdujo la noción de cuanto en la ciencia. Siendo alumno en la Universidad de Múnich, uno de sus profesores le aconsejó que abandonara la física «porque era una disciplina en la que ya estaba todo dicho y solo quedaba rellenar algunos agujeros». No le importó rellenar los huecos y limpiar el polvo de los rincones. Trasladado a Berlín, se centró en la termodinámica, campo de la física interesado en las relaciones entre calor, luz y energía. De nuevo sus profesores le aconsejaron que abandonara porque no había nada nuevo que descubrir. Tampoco esta vez siguió el aviso. A Planck no le atraían tanto las novedades cuanto consolidar fundamentos. Pero sería quien sacudiese esos cimientos.

Los materiales que mejor absorbían la luz incidente fueron llamados cuerpos negros por Gustav Kirchhoff. El gobierno alemán, instado por la industria eléctrica, pidió que se investigara la radiación de cuerpo negro. En 1892 Planck sucedió a Kirchhoff en la cátedra de Berlín e hizo suyo el problema. Un triple motivo le impulsaba: en cuanto servidor público trabajaría en un tema de interés nacional, la cuestión guardaba relación con trabajos que ya venía realizando y, por fin, el hecho de que el resplandor de las bombillas dependiera solo de la temperatura del material y no de su composición química sugería que la solución sería fundamental; de una manera similar a la naturaleza fundamental de la fuerza gravitatoria, señalada por su dependencia de la masa del cuerpo, no por su química.

Descubrió que los cuerpos absorbían y emitían luz selectivamente, como múltiplos enteros de cierta cantidad de energía, que él denominó $h\nu$, donde h es una constante que ahora lleva su nombre y ν es la frecuencia de la radiación. Si E es la energía y n un entero, la fórmula de la radiación de Planck será $E = nh\nu$. Muy pocos repararon en la idea de Planck. Solo cinco años después, el joven Albert Einstein, al redactar un ensayo sobre el efecto fotoeléctrico, explicaba la fórmula de Planck con una sugerencia radical: la propia energía luminosa procede en múltiplos de h . Los cuantos de energía de luz recibirían más tarde el nombre de fotones. Los cuantos no eran un ardid matemático, como había creído Planck, sino una entidad física. Tampoco la idea de Einstein tuvo mucho eco.

Todos los esfuerzos por encajar la teoría de Planck en la física clásica fracasaron. Los cuantos aparecían por doquier

en el mundo subatómico. En 1911, la crema de la física europea se reunió en una conferencia en Bruselas sobre la cuestión. Bajo el patrocinio de la industria Solvay, el encuentro fue presidido por Walther Nernst, quien primero consideró grotesca la idea del cuanto para admitirla luego como indispensable. La aceptación fue *in crescendo*. En 1913 Niels Bohr se interesó al comprobar en su tesis doctoral que la física clásica no podía explicar las propiedades electromagnéticas de los metales. La teoría clásica predecía que los electrones en órbita radiarían energía y terminarían por colapsar en el núcleo. Pero si suponemos, expuso Bohr, que las órbitas del electrón pueden poseer solo momento angular en múltiplos de una nueva unidad natural, $h/2\pi$, entonces los electrones no tienen un número infinito de órbitas posibles alrededor del núcleo.

De todas las propiedades del mundo cuántico, una de las más espinosas es sin duda la identidad de las partículas, es decir, las formas que pueden adoptar. Hay dos clases posibles: bosones y fermiones. Los bosones siguen la estadística de Bose-Einstein; los fermiones, la de Fermi-Dirac. Esas dos posibilidades fueron descubiertas a mediados de los años veinte. Satyendra Nath Bose y Albert Einstein hallaron las propiedades de los bosones. El principio de exclusión de Wolfgang Pauli articulaba el comportamiento de los fermiones: dos fermiones idénticos (partículas con espín semientero, como los electrones) no pueden ocupar el mismo estado cuántico. Principio estructural fundamental, gobierna todas las formas de materia, de los átomos a las interacciones químicas, pasando por cristales y metales.

En la segunda revolución cuántica, de 1925-27, los físicos se esforzaron en imaginarse juntas ondas y partículas. Todo dependía del enfoque. Muchos extraños al campo sacaron la conclusión de que podían tenerse aproximaciones contradictorias de una misma realidad. En 1925 Heisenberg acometió la descripción del mundo cuántico en términos de la matemática de sus propiedades observadas, en una mecánica de matrices. E introdujo el principio de indeterminación. En 1926, Erwin Schrödinger optó por enmarcarla en una mecánica de ondas; describía el cuanto como un tipo particular de onda que evolucionaba continua y predictiblemente en el tiempo de acuerdo con ecuaciones diferenciales.

—Luis Alonso

ESPECIAL

DESCUBRE LA NUEVA REVISTA DIGITAL

Nuestros mejores artículos
sobre temas de actualidad

