

PLANCK Y LA REVOLUCIÓN CUÁNTICA

**JOSÉ BERNABÉU ALBEROLA, desde Valencia, (Universidad de Valencia)
octubre, 2000**

MAX Karl Ernst Ludwig PLANCK nació el 23 de abril de 1858 en Kiel y falleció el 3 de octubre de 1947 en Göttingen. Este físico alemán, que da nombre en la actualidad a la prestigiosa red de Institutos de investigación en Física, siguió sus estudios universitarios en Berlín y Munich, donde obtuvo su doctorado en 1880. Inició su carrera de profesor en la Universidad de Kiel y se trasladó a Berlín en 1889, siendo nombrado catedrático de física teórica en 1892, posición que mantuvo hasta su jubilación en 1928.

Aunque las investigaciones iniciales de Planck fueron en termodinámica, en 1900 publicó un trabajo "Zur Theorie der Gesetzes der Energieverteilung im Normal-Spektrum" ("Sobre la teoría de la Ley de Distribución de Energía en el Espectro Continuo"), que representó el nacimiento de la teoría cuántica.

A finales del siglo XIX, un problema importante de la física consistía en explicar la radiación emitida por un cuerpo caliente. Se sabía que la intensidad de dicha radiación aumenta con la longitud de onda hasta un valor máximo y, a continuación, disminuye al aumentar la longitud de onda. También se conocía que el origen de esa radiación radica en las vibraciones de los átomos del cuerpo caliente. Para un emisor perfecto (el llamado "cuerpo negro", que emite y absorbe a todas las longitudes de onda), la termodinámica debería ser capaz de proporcionar una expresión teórica para esa radiación de cuerpo negro. Wilhelm Wien había descrito en 1896, mediante una ley empírica, el comportamiento presentado a longitudes de onda cortas. Lord Rayleigh y James Jeans dedujeron una ley capaz de explicar los resultados de longitudes de onda largas, pero predecía que el cuerpo debería tener una emisión masiva de energía a longitudes de onda cortas: un sinsentido conocido como "catástrofe ultravioleta".

Inicialmente, el problema de Planck era muy técnico: la búsqueda de una ecuación que describiera correctamente la emisión de radiación para todas las longitudes de onda. Cuando la encontró, contenía automáticamente los límites de Rayleigh-Jeans a longitudes de onda largas y de Wien a longitudes de onda cortas. ¡Pero sería una gran injusticia para Planck dar la impresión que su descubrimiento fue exclusivamente el resultado de interpolar datos experimentales! Incluso si Planck hubiese parado en ese punto, sería recordado eternamente como el descubridor de la ley de radiación. La grandeza científica de Planck se manifiesta en que continuó queriendo interpretar su ecuación. Siguiendo sus ideas de muchos años, planteó cómo correlacionar la entropía de un oscilador con su energía, mediante argumentos termodinámicos y estadísticos. En esa comparación, la fórmula de Planck necesitaba incorporar un ingrediente

contrario a la física clásica: la energía emitida o absorbida por un oscilador sólo puede tomar valores múltiplos de una energía elemental, cuanto energético conectado a la frecuencia de la radiación mediante

$$E = h f$$

¡Y así es como nació la teoría cuántica! La Naturaleza es selectiva en las cantidades energéticas que un cuerpo puede absorber y emitir, permitiendo tan solo valores múltiplos de h . La introducción de la constante h , el "cuanto elemental de acción" (en palabras de Planck), que conecta el cuanto elemental de energía con la frecuencia de la vibración, fue una idea revolucionaria, una rotura radical con la física clásica .

A partir del trabajo de Planck, se produjo un movimiento irresistible que llevó a aplicar el concepto de "saltos" energéticos a los fenómenos microscópicos de los átomos y de la radiación. En 1905, Albert Einstein demandó consistencia al proponer que, si la energía de los osciladores atómicos al emitir o absorber radiación tomaba valores discretos, la propia radiación debía consistir de cuantos energéticos: los fotones. Con su existencia, Einstein fue capaz de explicar el efecto fotoeléctrico. En 1913, Niels Bohr incorporó estas ideas en su teoría del átomo de hidrógeno. En 1923, Arthur Compton explicó la dispersión de rayos X. Todos estos éxitos iniciales de las ideas cuánticas sembraron el camino para el florecimiento de la nueva teoría cuántica, formulada por de Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Dirac, Pauli, ..., a partir de 1924.

La mecánica cuántica se ha revelado como la herramienta más poderosa para entender y predecir toda clase de fenómenos físicos y está en la base de los desarrollos tecnológicos de mayor éxito en la segunda mitad del siglo XX. Al ser aplicada a átomos y moléculas, la mecánica cuántica es la base y el futuro de la química moderna, pues permite dar una fundamentación rigurosa al enlace químico. En los sólidos, los electrones son atraídos por los iones que forman la red cristalina; al ser tratada esta interacción cuánticamente, los niveles de energía del material forman series de valores muy apretados llamadas "bandas energéticas". La teoría de bandas permite explicar el comportamiento de conductores, aislantes y semiconductores, de tanto uso en la tecnología electrónica de los tiempos actuales. El transistor es un dispositivo que permite una gran amplificación de la corriente eléctrica en pequeñas dimensiones. Las técnicas modernas de manipulación de materiales permiten la elaboración de heteroestructuras, cuyo comportamiento depende de fenómenos cuánticos. Los láseres de semiconductores microscópicos y los pozos cuánticos son manifestaciones de esta nueva tecnología, cuyos límites son aún desconocidos. Los microscopios de efecto túnel permiten, al eliminar las dificultades de difracción, resolver distancias de tamaño atómico. Bajo condiciones en que los aspectos cuánticos también se manifiestan macroscópicamente, como a bajas temperaturas, la condensación atómica o de pares de Cooper electrónicos conduce a fenómenos tan espectaculares como la superfluidez o la superconductividad, respectivamente. La conexión entre la física y la tecnología en el área de materiales es tan estrecha que una distinción real entre los dos campos ha desaparecido. Parece apropiado identificar el siglo XX como el "siglo cuántico". En física fundamental, se han explorado distancias hasta una cienmillonésima parte de las distancias atómicas, sin que se hayan detectado desviaciones de la mecánica cuántica.

Paradójicamente, a pesar del dominio con que hemos aprendido a utilizar la física y tecnología cuántica, la interpretación del núcleo básico de la teoría sigue sujeta a múltiples debates. Más allá del carácter probabilista, indeterminista, de la mecánica cuántica, cuyos límites de predictibilidad están ejemplificados en las "relaciones de incertidumbre" de Heisenberg, más allá de la evolución acausal asociada con el problema de la medida, las últimas décadas han singularizado el aspecto de no-separabilidad de los sistemas cuánticos como el más alejado de los presupuestos de la

física clásica. Para sistemas de dos o más partículas correlacionadas, la física cuántica predice que el todo es bastante más que la suma de las partes y es imposible asignar una descripción objetiva separada a cada una de las partículas, un "elemento de realidad" en terminología de Einstein. Einstein enfatizó este resultado con el fin de negarle la categoría de "completitud" a la teoría cuántica. La publicación en 1964 de las "desigualdades de Bell" trasladó este debate interpretativo y filosófico al campo de la física, al demostrar el carácter observable y medible de esas correlaciones cuánticas más allá de los límites exigidos por una descripción realista separable de tipo clásico. Todos los experimentos realizados en los últimos treinta años para proceder a un test de las desigualdades de Bell han confirmado, sin asomo de duda, las predicciones de la mecánica cuántica.

Pero el último capítulo está aún por escribir. El uso de los estados cuánticos entrelazados no-separables para tecnologías de información y comunicaciones, ahora en sus balbuceos, puede abrir desarrollos en criptografía y computación cuánticas ni siquiera vislumbrados hace unos pocos años.

Todo ello empezó hace 100 años con la hipótesis de los cuantos de Planck en el año 1900. En 1918, Max Planck recibió el Premio Nobel de Física. La constante h del "cuanto de acción elemental", la constante de Planck, aparece grabada sobre la lápida de su tumba en Göttingen: $h = 6'62 \times 10^{-27}$ erg. s.

Valencia, Enero de 2000

José Bernabéu Alberola
Catedrático de Física Teórica en la Universidad de Valencia.