

**CENTENARIO DE LA TEORÍA CUÁNTICA  
14 DE DICIEMBRE DE 1900: ¿DESCUBRIMIENTO DEL AZAR?**

Alicia G. de Mesa

*Departamento de Física, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá  
Colombia (\*)*

Cuando Max Planck pronunció su conferencia ante la Sociedad Alemana de Física es posible que ninguno de los presentes, ni siquiera él mismo, pudiera intuir que estaba naciendo una nueva era científica y tecnológica.

Planck centró su interés en la Radiación del Cuerpo Negro atraído por ciertos rasgos universales presentes en el fenómeno de emisión de radiación de un cuerpo a temperatura  $T$ . Todo cuerpo en equilibrio térmico a temperatura  $T$  emite calor radiante. Un Cuerpo Negro es, por definición, el mejor absorbedor y también el mejor emisor de energía radiante a una temperatura dada.

Cuando un cuerpo se calienta empieza a cambiar de color; primero aparece oscuro (esto significa que la mayor parte de la energía emitida es invisible, como el infrarrojo); luego aparece un tinte rojizo, luego amarillo, después azul, luego violeta, finalmente blanco. Si continuamos elevando la temperatura empezará a predominar radiación ultravioleta, también invisible. Pero nuestros ojos continuarán percibiendo solo el espectro visible, cuya superposición produce el color blanco. El color predominante (correspondiente a la longitud de onda  $\lambda_{\max}$  para la cual se produce la máxima radiación) no depende notoriamente del material. En el caso límite de un cuerpo negro solo depende de la temperatura, de acuerdo con la ley  $\lambda_{\max}T = \text{constante}$ . Esto significa que al aumentar la temperatura disminuye la longitud de onda dominante y el color de la radiación emitida se desplaza del rojo hacia el violeta.

En 1859 Gustav Kirchhoff, en sus investigaciones sobre la radiación solar, estableció, sobre la base de argumentos puramente termodinámicos, una relación universal entre la densidad de la energía radiante con frecuencia  $\nu$  contenida en una cavidad a temperatura  $T$  y la intensidad (o energía por unidad de tiempo y por unidad de área) emitida por esa cavidad. Lo trascendental es que esta energía solo depende de la temperatura de la cavidad y de la frecuencia de la radiación emitida. Se trataba, pues, de una '**función universal**' independiente del material de las paredes de la cavidad. Previamente Kirchhoff había demostrado que esta radiación de cavidad era "de la misma cantidad e intensidad" que la radiación de un cuerpo perfectamente negro a igual temperatura (esto es, un cuerpo que absorbe toda la radiación que incide sobre él). La búsqueda de esta función universal  $f$  se convirtió así en un programa de investigación que

---

(\*) Conferencia pronunciada en el Departamento de Física de la Universidad Nacional (Bogotá) el 14 de diciembre del año 2000.

comprometió los esfuerzos de muchos físicos teóricos y experimentales de la época y que habría de culminar con la fórmula de radiación de Planck.<sup>[1]</sup>

El impacto de esta función universal  $f$  sobre el edificio conceptual de la física sería devastador. Einstein en un discurso pronunciado en 1913 resumió así la crisis desatada pero aún no completamente resuelta: "Sería conmovedor si pudiéramos colocar sobre una balanza la sustancia cerebral que fue sacrificada por los físicos teóricos en el altar de esta función universal  $f$ . ¡Y no se vislumbra un punto final a este cruel sacrificio! Más aún: también la mecánica clásica cayó víctima de ella y no se puede anticipar si las ecuaciones de la electrodinámica de Maxwell sobrevivirán a la crisis que ha ocasionado la función  $f$ ." <sup>[2]</sup>

En 1895 Otto Lummer y Wilhelm Wien, sobre la base del teorema de la cavidad de Kirchhoff, utilizaron por primera vez una cavidad isotérmica con una pequeña abertura como fuente de radiación para analizar el espectro de la radiación térmica de un 'cuerpo negro'.

La confirmación experimental de la existencia de ondas electromagnéticas, lograda por Heinrich Hertz en 1888, había dado piso firme a la hipótesis de que también la luz visible y el calor radiante (o radiación térmica emitida por un cuerpo caliente) son ondas electromagnéticas regidas por las ecuaciones de Maxwell. Sobre esta base Planck inició en 1895 una investigación sistemática sobre los procesos de emisión de ondas electromagnéticas por osciladores Hertzianos abstractos que emiten radiación de frecuencia  $\nu$  y longitud de onda  $\lambda = c/\nu$ , donde  $c$  es la velocidad de la luz.

En 1896 Wien encontró una fórmula exitosa para describir la intensidad de la radiación en cierto rango de longitudes de onda y temperaturas. Pero Otto Lummer y Ernst Pringsheim detectaron a comienzos de 1900 claras desviaciones de los datos experimentales con respecto a esta ley para valores altos de  $\lambda T$ .

El 7 de octubre de 1900, durante una visita en casa de Planck, Heinrich Rubens se refirió a sus recientes mediciones de intensidad de la radiación. Para longitudes de onda largas (infrarrojo) los datos concordaban con una fórmula publicada unos meses antes por Lord Rayleigh. Pero esta era evidentemente incorrecta en la región de onda corta, donde la de Wien parecía adecuada. Durante esa misma noche Planck construyó una interpolación entre estas dos fórmulas y la comunicó inmediatamente a Rubens en una tarjeta postal. Un par de días más tarde éste le informó sobre la excelente concordancia de la nueva fórmula con los resultados experimentales en un amplio rango de longitudes de onda. Planck tuvo apenas tiempo de elaborar un "Comentario" para ser leído en la sesión de la Sociedad Alemana de Física del 19 de octubre, después del informe de Rubens y Kurlbaum.

Habiendo superado con éxito la prueba experimental, Planck tenía ante sí la tarea de fundamentar teóricamente lo que hasta entonces era apenas "una fórmula de interpolación felizmente adivinada". "Después de unas pocas semanas del más

extenuante trabajo de mi vida, la oscuridad se desvaneció y un paisaje inesperado empezó a aparecer", dijo en su discurso de aceptación del premio Nobel el 2 de junio de 1920.

El 14 de diciembre de 1900, considerado como fecha de nacimiento de la teoría cuántica, Planck presentó una deducción de su ecuación ante la Sociedad Alemana de Física. En ella usaba como modelo de cuerpo negro una cavidad resonante donde se establece un equilibrio entre el material de las paredes a temperatura  $T$  y la radiación electromagnética. El sistema estudiado se reducía así a un conjunto de osciladores (o 'resonadores') en interacción con un campo electromagnético regido por las ecuaciones de Maxwell. Debido al carácter 'universal' de esta radiación, Planck no se sintió obligado a identificar estos osciladores con átomos, cuya existencia aún era problemática, ni con los electrones recientemente descubiertos (1887).

Usando un cálculo combinatorio, análogo al empleado por Boltzmann para calcular la entropía,<sup>(\*)</sup> Planck divide el continuo de energías posibles de los osciladores en elementos de tamaño finito. Pero, a diferencia de Boltzmann, encuentra que ese tamaño no puede ser arbitrario si quiere llegar a la fórmula correcta. Este tamaño debe ser fijo y proporcional a la frecuencia del resonador. Planck es consciente de que esta suposición rompe con el esquema de la física clásica (donde los osciladores pueden tener energías con valores en un rango continuo) pero se ve forzado a introducirla como "punto esencial" en su derivación:

*"Ahora debemos considerar la distribución de la energía  $E$  entre los  $N$  resonadores de frecuencia  $\nu$ . Si se toma  $E$  como una magnitud infinitamente divisible, entonces es posible distribuirla de infinitas maneras. Pero nosotros suponemos - y **este es el punto esencial de todo el cálculo**- que  $E$  está compuesta de un número determinado de partes finitas iguales y nos servimos para ello de la constante natural  $h = 6.55 \times 10^{-27}$  erg seg. Esta constante, multiplicada por la frecuencia  $\nu$  de los resonadores, da el elemento de energía  $\mathcal{E}$  en ergios ( $\mathcal{E} = h\nu$ ) y dividiendo  $E$  por  $\mathcal{E}$  obtenemos el número  $P$  de elementos de energía que se han de distribuir entre los  $N$  resonadores."*  
(Berliner Berichte -Dic.14, 1900).

A partir de este cálculo de la entropía de los osciladores, Planck llegó, mediante argumentos termodinámicos, a su famosa fórmula para la densidad de la energía radiada por un cuerpo negro:

---

(\*) Vale la pena anotar que Planck fue el primero en aplicar la fórmula probabilística de Boltzmann para calcular la entropía del conjunto de osciladores, pero sin aceptar que de esta manera la segunda ley de la termodinámica (la tendencia de la entropía de un sistema aislado a aumentar hasta alcanzar un máximo en el equilibrio) perdía su carácter absoluto para convertirse en una ley probabilística.

$$u(\nu) = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1} \quad (1)$$

La deducción teórica no estuvo exenta de crítica pero su defensa incuestionable residía en la excelente concordancia con los resultados experimentales. Gracias al trabajo riguroso y persistente de físicos experimentales como Lummer y Pringsheim o Rubens y Kurlbaum, la fórmula de Planck se mantuvo incólume a pesar de que el carácter discreto de la energía de los osciladores no cabía dentro de los marcos de la física clásica.

El programa de búsqueda de la 'función universal' de Kirchhoff había concluido. Pero la constante  $h$  se convirtió en el germen potente de un desarrollo teórico, experimental y tecnológico que trataremos de ilustrar con algunos ejemplos.

La historia subsiguiente está marcada por varios hitos:

-En primer lugar, en 1905, contra toda la evidencia experimental acumulada sobre el carácter ondulatorio y continuo de la luz, Einstein se ve forzado a construir un modelo corpuscular, discontinuo, para poder explicar rasgos del efecto fotoeléctrico inexplicables sobre la base de la teoría ondulatoria clásica. Según este modelo, las partículas o cuantos de luz, (que más tarde se llamarían fotones), tienen energías iguales a la frecuencia de la luz multiplicada por la constante de Planck ( $\varepsilon=h\nu$ ), ¡exactamente como los resonadores de Planck! Aunque el modelo solo encontraría confirmación experimental independiente 11 años más tarde, se puede afirmar que con él nació la llamada dualidad onda-corpúsculo de la luz.

No deja de ser irónico que Planck se negara a aceptar el carácter corpuscular de la radiación electromagnética. Aún en 1913, en asocio de sabios eminentes como Nernst, Warburg y Rubens, al recomendar a Einstein para una posición académica, después de referirse a sus extraordinarias contribuciones en diversos campos de la física, señala que "puede haber errado el blanco algunas veces, por ejemplo, en sus especulaciones sobre los cuantos de luz". Por su parte, Einstein criticó la contradicción que había en la deducción de Planck entre el uso de las ecuaciones de Maxwell y la introducción de conceptos incompatibles con ellas. Pero, en vez de tomar esto como un argumento para desechar una ecuación tan bien establecida experimentalmente, vio aquí una razón más para revisar la electrodinámica clásica. Planck, por el contrario, no consideraba necesaria esta revisión y en adelante realizó numerosos e infructuosos esfuerzos por reconciliar su fórmula con la electrodinámica de Maxwell.

- Otro paso notable en el desarrollo de la teoría fue avanzado por Bohr en 1913 con base en el trabajo experimental de Rutherford, que 2 años antes había revelado en lo esencial la estructura atómica. A pesar de que Bohr utilizó un conjunto de hipótesis contradictorias, que incluían cálculos clásicos y saltos cuánticos entre niveles de energía discretos, su modelo lograba explicar la estabilidad de los átomos y daba cuenta de las rayas espectrales emitidas por éstos. En 1916, en plena guerra mundial, Millikan comprobó la ecuación de

Einstein para el efecto fotoeléctrico y unos años más tarde las asombrosas evidencias experimentales de interferencia de electrones en cristales confirmaron la llamada dualidad onda-corpúsculo de las partículas ordinarias, postulada por Louis De Broglie en 1924.

-Este proceso de desarrollo tiene su primer punto culminante en 1925 con la creación de dos teorías aparentemente diferentes: La mecánica cuántica matricial de Heisenberg, que parecía acentuar los rasgos de discretez o discontinuidad en los eventos cuánticos, y la mecánica ondulatoria de Schrödinger que suscitó el entusiasmo de Planck, Einstein y otros defensores de la continuidad y el determinismo. Los niveles discretos de energía aparecían ahora como un conjunto de valores propios de una ecuación de onda y la continuidad parecía reflejar la estructura real de la materia. (Schrödinger propuso abandonar la noción de partícula en favor de una distribución continua de masa que estaría representada por el módulo al cuadrado de su función de onda). Pero pronto el mismo Schrödinger demostró la equivalencia de ambas formulaciones.

La ecuación de Schrödinger establece una evolución determinista de la función de onda que describe un sistema físico, por ejemplo, un átomo. Pero esa función de onda, de acuerdo con la interpretación probabilista debida a Max Born y hoy universalmente aceptada, es apenas una amplitud de probabilidad para la ocurrencia de ciertos eventos individuales, tales como la localización del átomo en una región del espacio, o el instante del paso del átomo de un nivel de energía a otro más bajo mediante la emisión de un fotón. Aunque la información contenida en la función de onda es la máxima posible, estos eventos individuales son por principio impredecibles y solo tiene sentido preguntar por la probabilidad de su ocurrencia. De este modo se instauró el azar en los eventos o mediciones individuales y el determinismo se redujo a una regularidad estadística, visible solo en una colección muy grande de eventos individuales.

Un ejemplo típico es un experimento de interferencia de partículas (fotones o átomos) que pueden llegar a una placa detectora por caminos diferentes. El punto de llegada de cada partícula es completamente impredecible, pero un gran número de partículas que llegan sucesivamente van dibujando un patrón de rayas (máximos y mínimos de intensidad) que es perfectamente predecible. Aunque la onda que describe las partículas está regida por una ecuación determinista, los rasgos típicamente ondulatorios, como frecuencia, longitud de onda, polarización y fase, solo se manifiestan a través de numerosos eventos o mediciones individuales. Esta síntesis cuántica entre lo discreto y lo continuo, entre el azar y la necesidad, está en la base de lo que usualmente se denomina 'complementariedad' o 'dualidad onda-corpúsculo'.

### **ACTUALIDAD DE LOS RESONADORES DE PLANCK**

Los resonadores de Planck no se han quedado archivados como un simple dato histórico. Recientemente, dos investigadores de la Universidad de Harvard, S. Peil y G. Gabrielse<sup>[3]</sup>, lograron analizar los movimientos cuantizados de un

electrón en una trampa de Penning, un dispositivo que, mediante la combinación de un fuerte campo magnético homogéneo y un campo electrostático de cuadrupolo, logra aislar y retener un electrón durante muchos meses. Los estados posibles del electrón confinado tienen energías cuantizadas de forma idéntica a las de un oscilador armónico:

$$E_n = h\nu_c (n + 1/2) \quad (2)$$

(donde  $\nu_c$  es la llamada frecuencia de ciclotrón).

Gracias al altísimo vacío dentro de la trampa (presión menor que  $10^{-16}$  mbar), la única interacción del electrón es su acoplamiento al campo electromagnético. Esto hace posible la emisión espontánea de energía en cuantos o porciones de  $h\nu_c$  al pasar de un estado a otro. Para estudiar los estados excitados los experimentalistas encerraron el electrón dentro de una cavidad resonante cilíndrica con un altísimo factor de calidad y tal que las frecuencias de resonancia (es decir, de los modos normales) de la cavidad están muy alejadas de la frecuencia de ciclotrón  $\nu_c$ . Esto hace disminuir considerablemente la tasa de emisión espontánea de modo que el electrón permanece un tiempo mucho mayor en un estado excitado. Por ejemplo, el primer estado excitado, que tendría una duración de 90 ms en un campo magnético de 5,3 Tesla sin resonador, tiene una vida media de 13 s en el interior del resonador. El estado base debería ser absolutamente estable. Para evitar que el electrón absorba cuantos de la radiación de cuerpo negro proveniente de las paredes de la cavidad se disminuyó su temperatura con ayuda de un criostato especial a 80mK. De acuerdo con la fórmula de Planck, la probabilidad de que las paredes del resonador emitan un cuanto con la frecuencia del ciclotrón es casi cero ( $<10^{-38}$ ). Experimentalmente, cuando el electrón se encuentra en el estado base, no se ha observado durante muchas horas ningún salto hacia niveles superiores. Teóricamente (si todas las condiciones se mantienen estables) podría permanecer en este estado  $10^{32}$  años!

Este experimento muestra que es posible manipular la vida media de los estados excitados (alargándola o acortándola), lo cual abre otras perspectivas de interés teórico y experimental. Por otra parte, muestra de manera irrefutable que los estados cuánticos son asignables a partículas individuales y no solamente a colectivos o ensambles preparados en idénticas condiciones.

### **¿ES DEBIDO EL AZAR CUANTICO A INFORMACION INCOMPLETA?**

La interpretación de la función de onda de Schrödinger como amplitud de probabilidad dotó a la teoría de un lazo prácticamente unívoco con los resultados experimentales, pero el debate sobre el sentido real del formalismo y las preguntas sobre el tipo de realidad expresada en las ecuaciones continúa hasta hoy.

El proceso de la mecánica cuántica durante todo el siglo XX ha acentuado y multiplicado los rasgos extraños y en apariencia absurdos que irritaban a sus creadores. La existencia de un **azar absoluto**, irreductible, que rige **eventos individuales** como la emisión de un fotón por un átomo excitado, o la desintegración de un neutrón, o la emisión de una partícula por un núcleo radioactivo, es una de las implicaciones inevitables de la mecánica cuántica. Hoy sabemos que la imposibilidad de predecir la ocurrencia de ciertos eventos individuales es una imposibilidad intrínseca, no debida a limitaciones de la teoría o de los instrumentos de observación o a una especificación incompleta del estado del sistema, como ocurre en el azar clásico o relativo.

El azar objetivo que rige los eventos individuales implica la ruptura de ideales clásicos de determinismo, continuidad espacio-temporal y causalidad. Por esta razón, Einstein y Planck, entre otros, lo consideraron una renuncia innecesaria a la racionalidad. "No se trata de negar la causalidad en la emisión; pero los procesos que determinan causalmente la emisión deben ser de tal naturaleza oculta que sus leyes, **por ahora**, no pueden ser expresadas sino estadísticamente", afirmaba Planck en 1911. En un artículo acerca de la interacción entre radiación y materia, publicado en 1917 en la revista *Zeitschrift für Physik* <sup>[4]</sup>, Einstein expresó un punto de vista similar: "Si la molécula sufre una pérdida de energía de magnitud  $h\nu$  sin influencia externa, emitiendo esta energía en forma de radiación (emisión espontánea), este proceso es de naturaleza direccional. No hay emisión de ondas esféricas. La molécula sufre en el proceso elemental espontáneo un retroceso de magnitud  $h\nu/c$  en una dirección que, **en el estado actual de la teoría**, está determinado solo por el azar". Einstein ve como "debilidad" de la teoría "el hecho de dejar al '**azar**' el instante y la dirección de los procesos elementales". (Los subrayados son míos)

Como ellos, muchos físicos pensaron que el carácter probabilístico de la teoría y el recurso al azar eran producto de nuestra ignorancia acerca de las "verdaderas causas" que determinan los eventos. Pero la posibilidad de 'completar' la descripción cuántica mediante causas o "parámetros ocultos", como los denominó más tarde von Neumann, fue sometida a una refutación al parecer definitiva por el teorema de J. S. Bell, enunciado en la década del sesenta y confirmado reiteradamente con una precisión cada vez mayor.

Sin embargo, el evento cuántico aleatorio, aunque impredecible por principio, no es completamente arbitrario. Los eventos individuales están subordinados a las leyes de conservación de energía, momentum, momento angular, carga eléctrica, etc., leyes que expresan ciertas simetrías fundamentales de la naturaleza.

## AZAR Y COHERENCIA CUÁNTICA

Otro de los rasgos de la teoría cuántica que más asombro suscita, porque parece desafiar no solo la causalidad sino incluso la relatividad especial, es la existencia de correlaciones cuánticas en subsistemas entrelazados ('entangled' o 'verschränkt'). Schrödinger, uno de los creadores de la teoría cuántica y autor de la paradoja del gato que lleva su nombre, consideró estas correlaciones como el

"rasgo esencial" de la física cuántica. En esencia se trata de una forma de coherencia entre partes espacialmente separadas, no explicable con modelos clásicos. De aquí surgen paradojas como la planteada por Einstein, Rosen y Podolsky (EPR) en 1935: Si dos subsistemas están cuánticamente correlacionados, una medición realizada sobre uno de ellos afecta **instantáneamente** al otro, sin importar cuán distante se encuentre<sup>[5]</sup>. Einstein denominó este efecto "acción fantasmagórica a distancia".

Sin embargo, la existencia de correlaciones cuánticas entre subsistemas alejados en el espacio no viola la relatividad especial porque no constituye un transporte de información o energía. Un modelo simple ideado por A. Zeilinger<sup>[6]</sup> permite visualizar estas correlaciones: Imaginemos un par de dados A y B preparados en tal forma que, cuando los lanzamos simultáneamente, ambos dados marcan el mismo número. Si los separamos espacialmente y lanzamos solamente el dado A nos dará un resultado al azar, por ejemplo la cara 3 (cada cara saldrá con una probabilidad de 1/6). Si posteriormente (sin que haya transcurrido tiempo suficiente para que la información viaje con la velocidad de la luz hasta el sitio de B) lanzamos el dado B, éste caerá con certeza por la cara 3. Pero no hay manera de saber de antemano por cuál cara va a caer. El azar absoluto evita la contradicción con la relatividad. Un lanzamiento determina instantáneamente el resultado en un lugar distante. Pero no podemos saber qué resultado se obtuvo con A hasta cuando no lancemos B o nos llegue la información con velocidad finita. Registrando lanzamientos sucesivos obtendríamos dos secuencias absolutamente aleatorias pero estrechamente correlacionadas (de hecho idénticas en este caso, pero podrían haber sido correlacionadas de otra manera). Si en vez de dados de seis caras pensamos en fotones, con direcciones de polarización en vez de caras, podemos anticipar lo que ocurrirá cuando se producen pares de fotones correlacionados de tal manera que sus polarizaciones sean aleatorias pero estrictamente correlacionadas. Cualquier medición realizada sobre un fotón determina inmediatamente el resultado de la otra. De hecho en 1998 fue realizado un experimento que mostró correlaciones EPR entre un fotón en Ginebra y otro enviado a través de fibra óptica a una localidad situada a más de diez kilómetros de distancia<sup>[7]</sup>.

En 1997 estas correlaciones permitieron obtener en el laboratorio por primera vez un fenómeno insólito: la teleportación. Un grupo experimental en Innsbruck (Austria) bajo la dirección de Anton Zeilinger logró teletransportar fotones, sin que estos tuvieran que viajar a través del aire o de una fibra óptica<sup>[8]</sup>. En esencia lo que se hizo fue utilizar pares de fotones A y B distantes pero correlacionados para transferir a uno de ellos (B) el estado cuántico de un tercer fotón X que se correlaciona con A mediante una medición conjunta. Así pues, dirán Uds., lo que se transfirió no fue un fotón sino un estado cuántico de un fotón a otro. Pero el estado cuántico, en este caso la polarización, es lo único que caracteriza a un fotón; por tanto podría decirse que lo que ocurrió fue una transferencia de identidad de X a B. (Algunos se preguntan : ¿Será posible alguna vez transferir nuestra identidad a un conjunto de átomos y moléculas situados fuera del sistema solar? Pero las posibilidades de aplicación en los futuros computadores

cuánticos parecen más realistas). Lo importante en este experimento es que abre la posibilidad de teletransportar una partícula sin necesidad del transporte físico de la misma. Naturalmente un observador cercano a B no puede saber qué estado se obtuvo en la medición conjunta de X y A a menos que se le transfiera la información por caminos ordinarios con velocidad menor o igual a  $c$ . (Para el esquema experimental véase el artículo de Zeilinger[6].

La teoría cuántica nos enfrenta a una paradoja que podría formularse así: El azar absoluto en el nivel de los procesos individuales hace posible la coherencia cuántica, una forma de orden inconcebible desde el punto de vista clásico determinista. (Coherencia proviene del latín *coherere* que significa 'estar ligado en todas sus partes', 'formar un todo compacto').

El mecanicismo clásico ve el mundo como ensamblaje o reunión externa de partes en estados perfectamente definidos, regidas por leyes deterministas. En este universo Laplaciano o Nietzscheano, donde se asume la predeterminación absoluta de cada minúsculo evento y de la totalidad del destino del universo, incluidos los seres humanos, la coherencia entre partes de un sistema carece sencillamente de sentido y el tiempo carece de realidad, es apenas un espejismo de nuestra conciencia.

El azar objetivo, no simple fruto de nuestro conocimiento imperfecto, nos garantiza que el futuro no está totalmente contenido en el pasado y por ello da sentido real al tiempo, a la evolución, al desarrollo en un universo abierto. El azar, como hemos visto en el caso de las correlaciones a distancia, restaura la posibilidad de la coherencia sin violar los principios de la relatividad que establecen un límite a la velocidad con la cual pueden viajar la energía y la información. Esto, que podría llamarse un rasgo holista, constituye, a mi ver, la belleza implícita en el cuadro abstracto de la naturaleza que nos ofrece la mecánica cuántica. Una belleza ciertamente más difícil de captar que la del realismo clásico.

El reto optimista de Galileo: "Medir todo lo que es medible. Y lo que no es medible, hacerlo medible" tropezó con un límite fundamental determinado por la constante de Planck. No todo es medible, por ejemplo, la posición y velocidad de una partícula en un instante dado. Es la misma teoría la que decide lo que es y no es medible. Las relaciones de indeterminación de Heisenberg ponen un límite absoluto, determinado por el valor finito de la constante de Planck  $h$ , a la posibilidad de asignar simultáneamente algunas propiedades a los objetos cuánticos. Esto conduce a la imposibilidad de formar imágenes claras de la realidad que se expresa a través de los experimentos y la teoría. Pero esto no es un argumento contra la teoría cuántica. La realidad es racional pero, ¿por qué exigir que sea visualizable? Como lo expresó Graham Collins en la revista *Scientific American* (Dic.2000) : "La mecánica cuántica gobierna el mundo. Casi siempre los rasgos extraños de la mecánica cuántica están ocultos tras una fachada de física clásica. Nosotros cometemos el error de tomar la fachada por la sustancia de la realidad y de allí proviene nuestra comprensión de sentido común

acerca de cómo funcionan las cosas: Los objetos tienen localizaciones, movimientos e identidades y su comportamiento está rígidamente descrito por leyes deterministas. El núcleo mismo de la mecánica cuántica desafía nuestra intuición cotidiana. Las localizaciones y velocidades de las partículas son fundamentalmente equívocas y están regidas por probabilidades. Aún la idea de objetos que poseen identidades diferentes es radicalmente modificada por las partículas cuánticas. "

### **COHERENCIA CUÁNTICA EN SISTEMAS MACROSCÓPICOS**

Esta imposibilidad fundamental de distinguir dos partículas idénticas, como dos electrones o dos átomos de la misma naturaleza, conduce a correlaciones entre partículas idénticas, que se manifiestan como fuerzas de puro origen cuántico, de repulsión entre fermiones (partículas de espín semi-entero como los electrones y los átomos de Helio 3) y de atracción entre partículas de espín entero o cero como los fotones y los átomos de Helio cuatro. Estas extrañas correlaciones dan lugar a efectos cuánticos macroscópicos a bajas temperaturas, como la superfluidez o la superconductividad o los condensados gaseosos de Bose-Einstein. Esto significa que las características cuánticas no son exclusivas, como se pensó durante algún tiempo, de los sistemas de escala microscópica. Un superfluido puede ser observado a simple vista. Un condensado gaseoso de Bose-Einstein puede ser más grande que una de las células de nuestro organismo y, sin embargo, es un objeto capaz de mostrar características ondulatorias como la interferencia de haces atómicos y otros fenómenos de la más pura estirpe cuántica.

Tratemos de ver, al menos cualitativamente, qué es un condensado de Bose-Einstein. En 1924 el físico hindú Nath Bose encontró una nueva deducción de la fórmula de la radiación de Planck. Gracias al rechazo del artículo por parte de una prestigiosa revista científica, Bose se dirigió a Einstein, quien acogió el trabajo con gran entusiasmo, lo tradujo al alemán para su publicación en la *Zeitschrift für Physik* y lo acompañó con una nota donde señalaba la importancia de esta deducción para el estudio de los gases ideales cuánticos. Con base en este trabajo Einstein aplicó a un gas genérico de partículas en equilibrio térmico una forma nueva de estadística para partículas idénticas e indistinguibles, que luego recibió el nombre de Bose-Einstein. Más tarde, en 1925, Einstein predijo, sobre esta base, que cuando la temperatura de un gas fuese suficientemente baja, una fracción macroscópica de los átomos pasaría a ocupar el estado de más baja energía y los paquetes de onda individuales se fundirían en un solo paquete macroscópico que podría ser observado a simple vista. Sin embargo, tal vez por la imposibilidad práctica de alcanzar en esa época temperaturas cercanas al cero absoluto, la hipótesis fue recibida como una curiosidad sin mucha relevancia física. En el plano teórico, esta hipótesis permitió explicar en las décadas siguientes las propiedades superfluidas del Helio líquido a temperaturas por debajo de los 2.2 K. Pero solo durante la década del setenta avanzó la tecnología de refrigeración hasta el punto de obtener temperaturas del orden de una millonésima de grado Kelvin y los experimentalistas empezaron en varios

laboratorios del mundo a plantearse de manera concreta la posibilidad de crear un condensado gaseoso.

Pero, cómo evitar que el gas se convierta en un sólido a tan bajas temperaturas? Era necesario lograr una forma extrema de gas superfrío y sobresaturado. Para entonces otra predicción de Einstein se había convertido en una herramienta poderosa: el láser. Con un trabajo de diseño experimental asombroso y en una interacción permanente entre físicos teóricos y experimentales se obtuvo el enfriamiento de átomos alcalinos como sodio, rubidio y cesio, encerrados en trampas ópticas. En 1985 el grupo de S. Chu en Stanford logró el enfriamiento de un haz de átomos neutrales en una campo tridimensional constituido por seis láseres de igual frecuencia dispuestos en tres pares ortogonales, cada par apuntando en direcciones opuestas hacia el centro de la trampa óptica. El principio de funcionamiento es simple: Si la frecuencia de la luz multiplicada por la constante de Planck es igual a la distancia entre dos niveles vecinos de los átomos, habrá resonancia y por tanto fuerte absorción. Cuando un átomo absorbe un fotón experimenta un retroceso en la dirección del fotón y poco tiempo después reemite la luz con igual probabilidad en todas las direcciones. Pero un átomo en movimiento "ve" una frecuencia diferente de cada láser debido al corrimiento Doppler. Esto permite aplicar un truco muy ingenioso para frenar los átomos: Se elige la frecuencia de los láseres un poco por debajo de la requerida para la resonancia. De este modo, cada átomo podrá absorber resonantemente solo aquella luz que, por venir a su encuentro, le aparecerá con la frecuencia correcta. Como la emisión subsiguiente no tiene ninguna dirección privilegiada, el efecto neto será frenar todos los átomos del gas, sin importar la dirección de su movimiento. Con la adición de un campo magnético inhomogéneo se logró posteriormente atrapar y almacenar la nube de átomos casi inmóviles durante varios minutos y obtener un enfriamiento adicional por un procedimiento similar a la evaporación. La temperatura del gas descendió al orden de  $10^{-7}$  K, que corresponde a una velocidad media de algunos mm/s y es cienmil veces menor que la velocidad media del gas a temperatura ambiente. En 1997 fue concedido el premio Nobel a los experimentalistas y teóricos S. Chu, Cohen-Tannoudji y W. Phillips por sus trabajos sobre enfriamiento y almacenamiento de átomos con luz láser. Entretanto, se ha logrado obtener un condensado de átomos de hidrógeno polarizado (D. Kleppner, 1998), se han desarrollado nuevos esquemas que permiten frenar haces, desviarlos, enfocarlos y colimarlos y obtener patrones de interferencia entre haces coherentes (Kleppner 1997), exactamente como en el caso de la luz<sup>[9]</sup>. Lo que parecía pura especulación en los años veinte hoy es una realidad: La interferencia de ondas asociadas a objetos macroscópicos. (Algunos sugieren la posibilidad de hacer interferir dos virus coherentes).

Un condensado atómico es similar a un láser, solo que en vez de fotones consta de átomos y el proceso de amplificación se realiza cuando un condensado B-E atraviesa una fuente de átomos que son inducidos con ayuda de un láser a sumarse al haz de una manera coherente, es decir, en idéntico estado cuántico (MIT y Tokio, 1999). Sobre el nombre de 'láser atómico' han surgido algunas

bromas debido a que la inicial  $I$  proviene de luz. Pero la alternativa propuesta no parece suscitar mucho entusiasmo: CSAASSA (COHERENT STATE ATOM AMPLIFICATION BY STIMULATED SCATTERING OF ATOMS).

En noviembre de 1999 un grupo del Instituto Rowland (Cambridge, Mass.), superó su récord anterior (17m/s) al lograr una disminución de la velocidad de la luz a través de un condensado de Bose-Einstein hasta 1m/s. Esto ha abierto nuevas posibilidades experimentales, por ejemplo, la simulación de huecos negros, con la luz orbitando alrededor de los vórtices que aparecen en los superfluidos.

No he mencionado otras perspectivas deslumbrantes como la criptografía cuántica, los computadores cuánticos, etc. Sin embargo, espero haber podido sugerir algunas pruebas convincentes de que el Azar objetivo, la evolución determinista de la probabilidad cuántica, las relaciones de indeterminación, las correlaciones EPR, la indistinguibilidad de partículas, nos revelan y nos inducen a construir un mundo más coherente que el de la física clásica. Todos estos rasgos extraños para nuestra intuición clásica hacen de la física cuántica una teoría "absurda y maravillosa", según la expresión de A.J. Leggett.

¿Qué pensarían Planck y Einstein si pudieran ver el rumbo que tomó su creación, la teoría cuántica, donde lo que parecía absurdo se realiza en el laboratorio y se convierte en fuente de aplicaciones técnicas?

Una advertencia final: La Física cuántica no invalida ni hace superflua la física clásica. Newton adquiere un sentido nuevo y, así reinterpretado, sigue vigente en un dominio restringido. La causalidad, el determinismo y la continuidad, tal como se aplican en el laboratorio para interpretar los datos o en la vida cotidiana para tomar decisiones, son restaurados a partir de cierta frontera de la mecánica cuántica. Los objetos macroscópicos a temperaturas ordinarias generalmente están en una **mezcla incoherente** de estados cuánticos altamente inestables, por lo cual las incertidumbres y correlaciones cuánticas no son directamente evidentes. Las leyes deterministas clásicas pueden interpretarse como relaciones entre promedios estadísticos sobre ciertos conjuntos de estados cuánticos. Por esta razón no está excluida la posibilidad de fluctuaciones, aunque estas pueden ser altamente improbables.

Quizás una analogía puede ayudarnos a comprender esta relación entre los dos niveles de descripción: El agua, merced a la pequeñez y enorme cantidad de sus moléculas constituyentes, parece a simple vista un fluido perfectamente continuo. La dinámica de fluidos, haciendo uso de un modelo continuo, puede hacer predicciones en excelente concordancia con la experiencia. De igual manera, un proceso macroscópico puede verse como continuo y sometido a una dinámica determinista si prescindimos en la descripción de los innumerables procesos elementales y aleatorios que lo constituyen.

¿Cuándo y cómo empiezan a borrarse los rasgos típicamente cuánticos de un sistema para dar paso a un régimen clásico? Este es un problema abierto. La

difusa frontera donde el comportamiento cuántico deviene clásico continúa siendo objeto de intensa investigación experimental y teórica.

### Referencias

- [1] T. S. Jun, La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912, Alianza Ed. Madrid, 1987, p 23.
- [2] Citado por D. Giulini y N. Straumann en Phys. B1 **56**, (2000) p. 9.
- [3] S. Peil y G. Gabrielse, Phys. Rev. Lett. **83**, 1287 (1999).
- [4] Reproducido en: Sources of Quantum Mechanics, B. L. van der Waerden (ed.), Dover, New York, p. 63 y sigs.
- [5] A. Einstein, B. Podolsky y N. Rosen, Phys. Rev. **47**, 777 (1935).
- [6] A. Zeilinger, Sc. Am. abril 2000.
- [7] W. Tittel, J. Brendel, H. Zbinden y N. Gisin, Phys. Rev. Lett. **81**, 3563 (1998).
- [8] D. Bouwmester, J. W. Pan, K. Mattle, M. Eibl, H. Weinfurter y A. Zeilinger, Natur, **390**, 575 (1997)
- [9] W. Ketterle, Phys. To. **52** 30-35 (Dic.1999).