

# La hipótesis cuántica



# de la luz

En 2005 se celebra el centenario de los trabajos de Albert Einstein, publicados en *Annalen der Physik*, que llevaron a reconocer nuevas propiedades de la luz, la materia, el espacio y el tiempo. En ellos, conocidos en la literatura como los artículos sobre el efecto fotoeléctrico, el movimiento browniano y la relatividad, abordó problemas de frontera para la época, asociados a preguntas sobre la luz ¿ondas o corpúsculos? y ¿existe el éter luminífero?, y sobre la materia ¿existen los átomos? Para las dos primeras, las respuestas de consenso eran ondas y que el éter si existe con base en la teoría electromagnética de Maxwell. Para la tercera, había premios Nobel de física y de química que respondían “la hipótesis atómica no es necesaria para entender el comportamiento de la materia”. Einstein, en el trabajo sobre movimiento browniano, proporciona los métodos para validar o rechazar la hipótesis atómica; los experimentos favorecieron la validación y permitieron contar el número de átomos y determinar sus tamaños. En el artículo sobre la relatividad, responde a la segunda pregunta “la introducción de un éter luminífero es superflua”. Mientras que en el texto sobre el efecto fotoeléctrico, la primera pregunta se transforma y sugiere la respuesta ondas y partículas; pero durante

veinte años los problemas que reconoció y sus sucesivos argumentos no fueron aceptadas por algunos de sus más destacados contemporáneos, como Planck, Bohr y Millikan. La validación de la hipótesis cuántica de la luz en el nivel experimental se produjo con los trabajos de Compton y de Bothe y Geiger sobre la dispersión de rayos X por electrones. La aceptación final de la propuesta de Einstein coincide cronológicamente con la formulación de la mecánica cuántica en 1925.

En el año 2000 se celebró el centenario del *quantum*, con motivo del trabajo de Max Planck para describir la ley de radiación de cuerpo negro —objeto que absorbe toda la luz que incide sobre él— con base en mediciones experimentales. También logró deducirla a partir de argumentos de electrodinámica, termodinámica y mecánica estadística, donde introdujo la hipótesis de que los intercambios de energía entre la materia —modelada a través de osciladores— y la radiación se realizan por medio de “elementos de energía”, denominados  $hf$ , proporcionales a la frecuencia de la radiación. Al comparar los resultados de la ley deducida y las mediciones experimentales del espectro de frecuencias de la radiación a determinada temperatura, Planck obtuvo los valores de la constante de

Boltzmann y la constante de acción. A partir de éstas, también obtiene el número de Avogadro, utilizando la constante de los gases ideales; y la carga del electrón, usando el valor medido por Faraday para la cantidad de electricidad asociada a los iones de un mol —número de gramos de un compuesto, igual a su peso molecular— en la separación electrolítica.

En su artículo de marzo de 1905, Einstein contrasta la naturaleza discreta de la materia, según la teoría cinética, y la naturaleza continua de la luz, según la teoría electromagnética de Maxwell. La energía de una porción de materia se escribe como la suma de las energías de sus átomos componentes. La de la radiación electromagnética es una función espacial continua. En particular, la energía de la luz emitida por una fuente puntual se distribuye continuamente en un volumen ininterrumpidamente creciente.

Reconoce que la teoría ondulatoria de la luz tiene una base experimental, y que es válida en los fenómenos de propagación, reflexión, refracción y difracción. Pero advierte que tal teoría, basada en funciones espaciales continuas, puede conducir a contradicciones al aplicarse en fenómenos de emisión y transformación de la luz. En relación con las observaciones sobre radiación de

cuerpo negro, fluorescencia, producción de rayos catódicos por luz ultravioleta y otros procesos de emisión y absorción de la luz, se tiene un mejor entendimiento con base en el supuesto de que la energía de la luz se distribuye de manera discontinua en el espacio. Según su hipótesis “la energía de un rayo de luz que parte de una fuente puntual no se distribuye continuamente en el espacio ininterrumpidamente creciente, sino consta de un número finito de cuantos que se localizan en diversos puntos del espacio, que se mueven sin dividirse y que pueden ser producidos y absorbidos solamente como unidades completas”.

En la primera sección del artículo considera el límite de bajas frecuencias de la ley de radiación de cuerpo negro, obtenido previamente por Rayleigh y Jeans, con base en la energía promedio de los osciladores materiales en equilibrio termodinámico con la radiación y el principio de equipartición. Planck reemplazó este principio por su hipótesis de elementos de energía para evitar la catástrofe ultravioleta —límite en que se favorece la presencia de radiación de alta frecuencia y el crecimiento ilimitado de la energía total—, y encontró la ley de radiación de cuerpo negro que concuerda con las mediciones experimentales. En la segunda sección, Einstein señala que la determinación de las constantes fundamentales en el trabajo de Planck depende sólo del límite de altas temperaturas y bajas frecuencias de su fórmula completa. Mientras la teoría ondulatoria de la radiación y la teoría cinética, que conducen al principio de equipartición, son aplicables en dicho límite, Einstein reconoce sus fallas en otro, como lo había descrito

correctamente Wien. En las siguientes cuatro secciones, usa los métodos de la termodinámica y la mecánica estadística, aplicados a la radiación y la materia, para identificar la energía del cuanto de luz. Mientras que en las tres últimas explica la relación de frecuencias de la luz fluorescente y la luz que la induce; describe la energía cinética de los fotoelectrones en términos de la energía del cuanto y la función de trabajo; y expone la relación entre la energía del cuanto y la energía de ionización.

Es importante destacar la diferencia entre el elemento de energía de Planck y el cuanto de luz de Einstein. El primero fue introducido específicamente en conexión con el intercambio de energía entre la materia y la radiación en equilibrio termodinámico a determinada temperatura. Einstein identifica al cuanto de luz como la energía de cada partícula asociada a la radiación electromagnética. Planck y sus contemporáneos no podían aceptar esta idea que equivalía asociarle propiedades corpusculares a la luz. Consideraban que la teoría electromagnética de la luz, desarrollada en el siglo XIX, había respondido definitivamente la pregunta ¿ondas o corpúsculos? sobre la naturaleza de la luz, a favor de las primeras. Es interesante señalar que en los trabajos de Einstein, entre 1905 y 1909, al aplicar el método de fluctuaciones, que desarrolló en conexión con su estudio del movimiento browniano, al problema de radiación de cuerpo negro, en los límites de Rayleigh-Jeans y de Wien coexisten los comportamientos ondulatorio y corpuscular de la radiación electromagnética, dominando uno y otro en los límites respectivos.

En su trabajo de 1913 sobre el átomo de hidrógeno, Bohr reconoció

las limitaciones de la mecánica de Newton y la teoría electromagnética de Maxwell para entender el espectro de radiaciones característico de ese elemento. Para remediarlas, introdujo el postulado de órbitas estacionarias, con el fin de asegurar que el electrón no radia mientras se mueve en una de ellas, y el postulado de la radiación asociada a saltos cuánticos del electrón entre dos de tales órbitas con una frecuencia que sigue de aplicar la hipótesis de Planck, pero también la hipótesis cuántica de Einstein. En todo caso, Bohr se definió por la primera y rechazó la segunda.

Por su parte, a partir de 1911, Millikan inició una serie de mediciones sistemáticas sobre el efecto fotoeléctrico, con el expreso propósito de mostrar que la ecuación de Einstein para tal efecto no era válida. Después de varios años, sus mediciones mostraron que la energía de los fotoelectrones varía linealmente con la frecuencia de la luz, y la pendiente es la constante de acción de Planck. Entonces aceptó que la ecuación de Einstein describe correctamente el fenómeno, pero subrayó que la hipótesis cuántica de la luz no puede ser aceptada. Durante la siguiente década, este tipo de posiciones se extendieron, a pesar de que Einstein recibió el Premio Nobel en 1921 por su trabajo sobre el efecto fotoeléctrico.

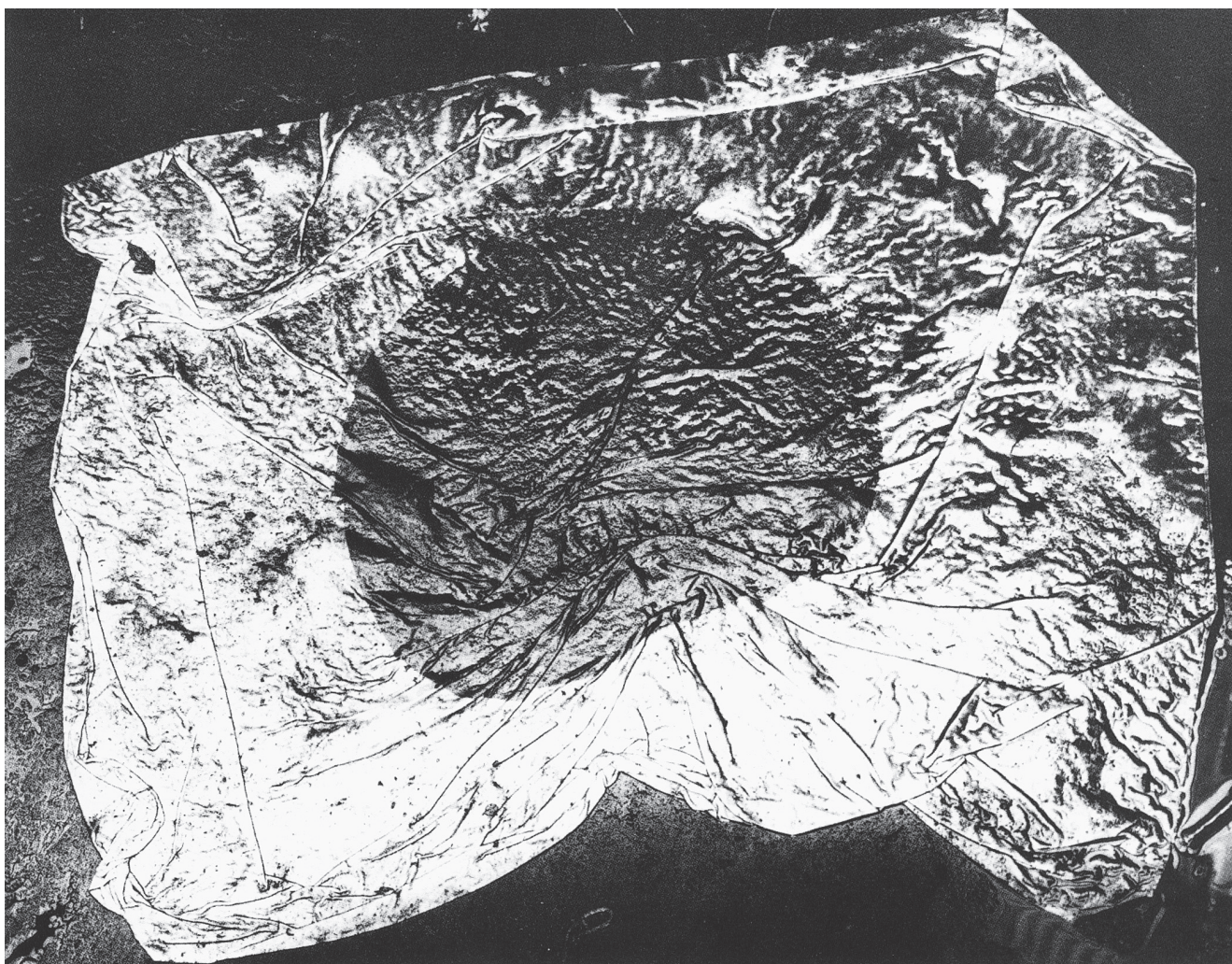
En 1917 Einstein dedicó un artículo titulado “Teoría cuántica de la radiación” para deducir la ley de Planck de radiación de cuerpo negro, considerando el equilibrio termodinámico entre átomos o moléculas, con dos niveles discretos de energía, y el campo de radiación. Introdujo los conceptos de emisión espontánea, emisión estimulada y absorción

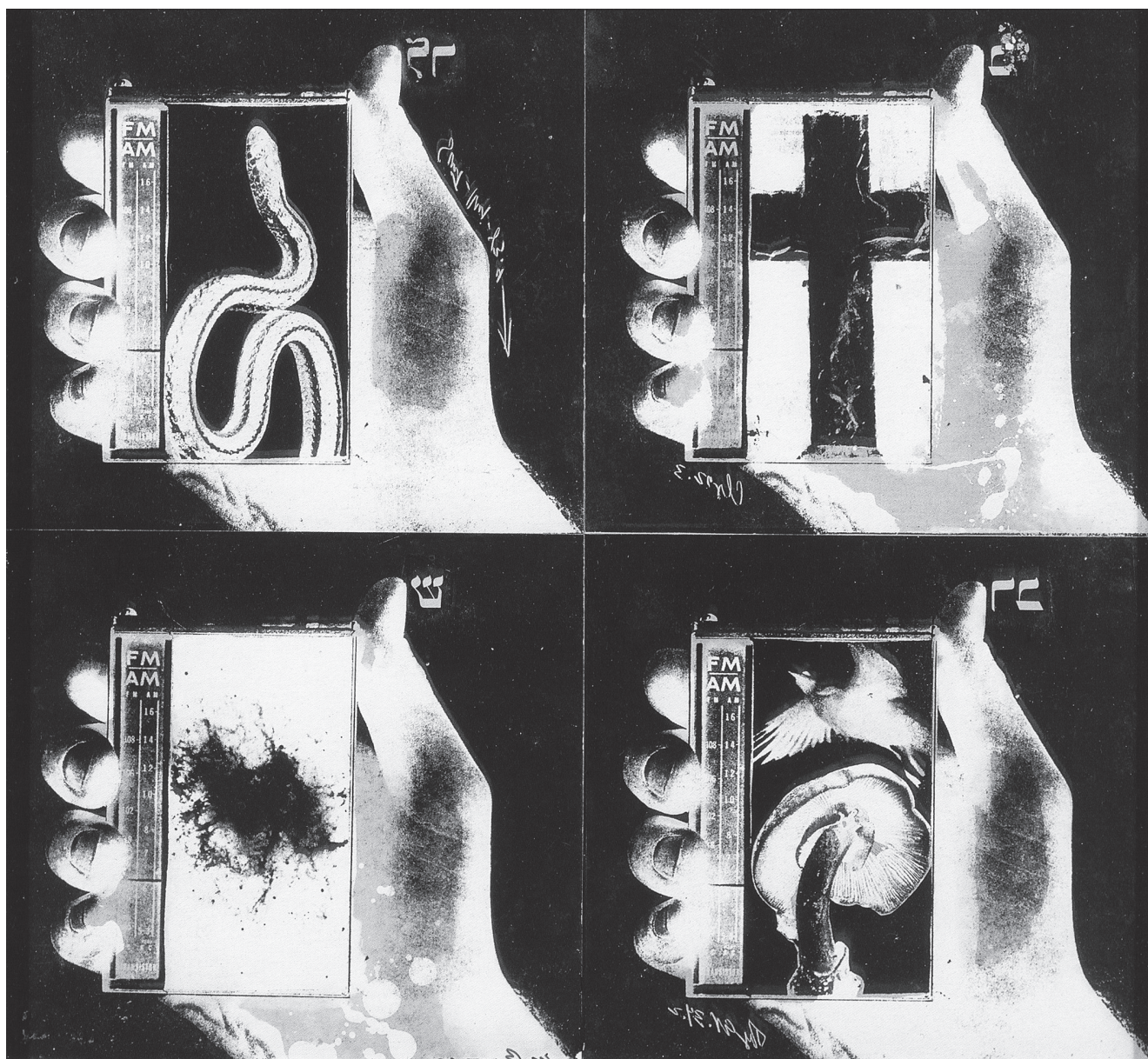
estimulada en átomos, como procesos resultantes de sus interacciones con el campo de radiación. También reconoció que el cuanto de luz posee una cantidad de movimiento.

El artículo consta de siete secciones. En la primera, "Hipótesis fundamental de la teoría cuántica. Distribución canónica de estados", adopta la distribución exponencial de Boltzmann para describir la ocupación de los niveles de energía de un sistema de átomos. En la segunda, "Hipótesis sobre el intercambio radiativo de energía", define los diversos procesos de emisión y absorción. En la terce-

ra, "Derivación de la ley de radiación de Planck", establece la condición de equilibrio entre los átomos de dos niveles y el campo de radiación. La cuarta, "Un método para calcular el movimiento de las moléculas en el campo de radiación", está encaminada a asegurar que ese movimiento sea compatible con la distribución de Maxwell o de Boltzmann para las moléculas a la misma temperatura que la radiación. En la quinta calcula el promedio de la cantidad de movimiento transferida del campo de radiación a las moléculas, y en la sexta el valor medio cuadrático de la mis-

ma. La última contiene sus conclusiones: la absorción o emisión de un cuanto de luz con energía  $hf$  —donde  $h$  es la constante de acción de Planck y  $f$  la frecuencia— por una molécula es acompañada por una transferencia de cantidad de movimiento  $hf/c$  —donde  $c$  es la velocidad de la luz en el vacío—, en la dirección de la luz absorbida y en la dirección opuesta de la luz emitida, respectivamente; la emisión espontánea también es direccional, y no existe radiación saliente como onda esférica —reforzando en este punto la hipótesis cuántica formulada en 1905—; la di-





rección de retroceso de la molécula en los procesos estimulados queda determinada por la radiación, pero en la emisión espontánea es un proceso al azar.

Einstein señala que su modelo de moléculas con dos niveles desempeña el papel del modelo de osciladores de Planck, y que la hipótesis cuántica de la luz conduce de manera natural tanto al postulado de radiación de

Bohr como a la ley de radiación de Planck. Subraya que la transferencia de cantidad de movimiento a las moléculas asociada a la absorción y emisión de radiación es indispensable para entender la coexistencia de la distribución de Boltzmann para la materia y la distribución de Planck para la radiación, cuando ambas se encuentran a la misma temperatura. La conexión con la teoría ondulatoria

sigue siendo elusiva, y el carácter azaroso de la direccionalidad de la radiación emitida espontáneamente constituye un nuevo problema.

Varios artículos publicados entre 1923 y 1924 resultaron relevantes para responder la pregunta ¿ondas o partículas? acerca de la luz. Se trata de los trabajos de Compton, de Bohr, Kramers y Slater, y de Bose, mencionados en orden cronológico de pu-

blicación. El último está conectado con la hipótesis cuántica, mientras que los otros dos se escribieron independientemente de dicha hipótesis y como alternativa a ella, respectivamente.

Bose envió su trabajo al *Philosophical Magazine* a fines de 1923. A mediados del siguiente año, recibió la respuesta de no aceptación por parte del editor y decidió enviárselo a Einstein, pensando que él si lo entendería, y pidiéndole que, si le parecía correcto, buscara a alguien para traducirlo al alemán y enviarlo al *Zeitschrift für Physik*. Efectivamente, Einstein apreció lo novedoso del trabajo, lo tradujo y lo envió con el título “La ley de Planck y la hipótesis del cuanto de luz”, incluyendo un comentario al final: “En mi opinión la deducción de Bose de la ley de Planck constituye un avance importante. El método usado también conduce a la teoría cuántica del gas ideal como lo reportaré en otro lugar”.

Bose tomó como punto de partida la hipótesis cuántica de la luz, suponiendo que la radiación está formada por cuantos de luz con energía ( $\epsilon = hf$ ) y cantidad de movimiento ( $p = \epsilon/c = hf/c$ ). Introdujo un nuevo método para contar el número de estados microscópicos dividiendo el espacio fase de un cuanto de luz en celdas de tamaño  $h^3$ , siendo  $h$  el

cuanto de acción —cantidad de movimiento por desplazamiento— de Planck.

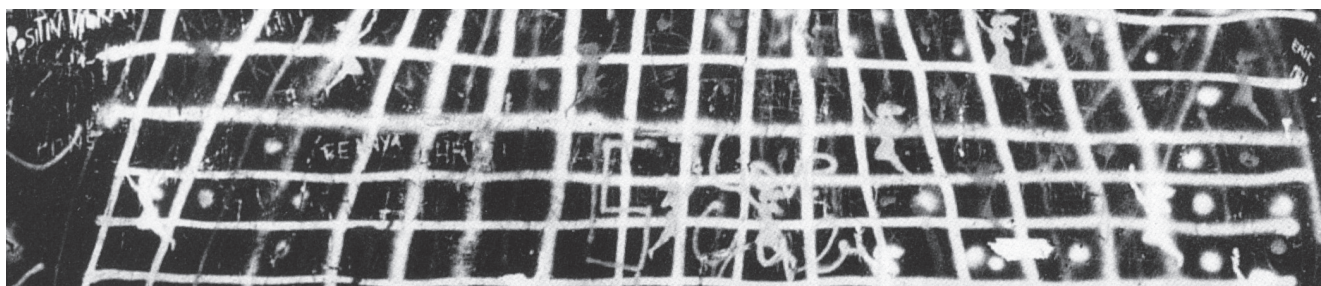
Aunque Bose afirma que siguió los métodos de Boltzmann de la mecánica estadística, donde se cuenta el número de partículas, él cuenta el número de celdas. En todo caso, al maximizar la entropía de la distribución de cuantos de luz en el espacio fase, a una temperatura  $T$ , obtuvo la ley de distribución de Planck. Bose le mostró a Einstein su determinación del factor que aparece en la aproximación Rayleigh-Jeans y en la distribución de Planck a partir de las propiedades de cantidad de movimiento del cuanto de luz y sin necesidad de invocar la electrodinámica. Para Einstein, esta deducción de la ley de Planck es importante porque permite reconocer que la radiación está formada por partículas relativistas de masa cero. En la deducción de Bose también está implícito que el número de partículas no se conserva.

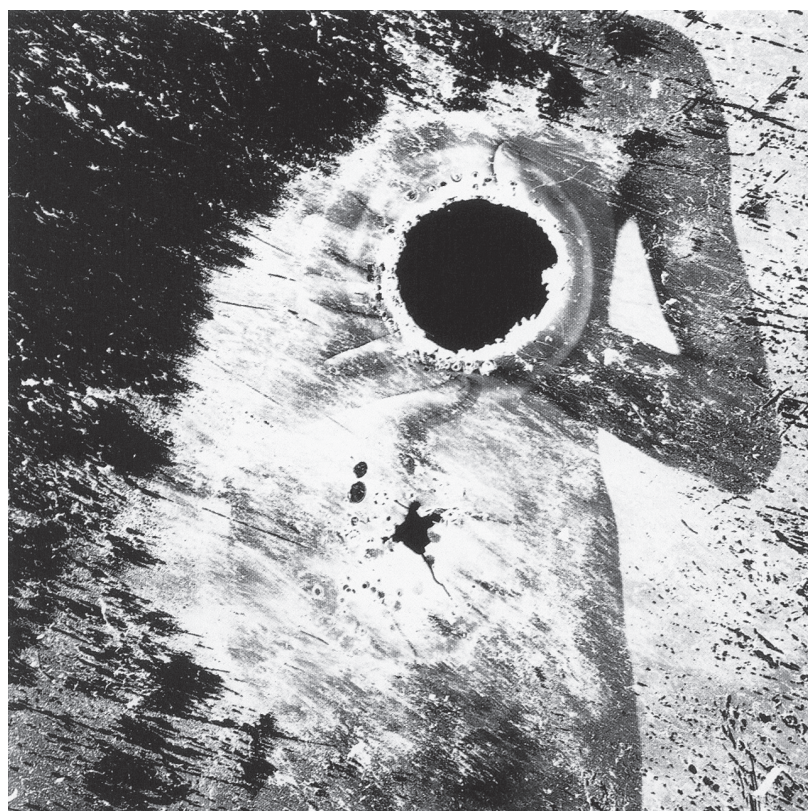
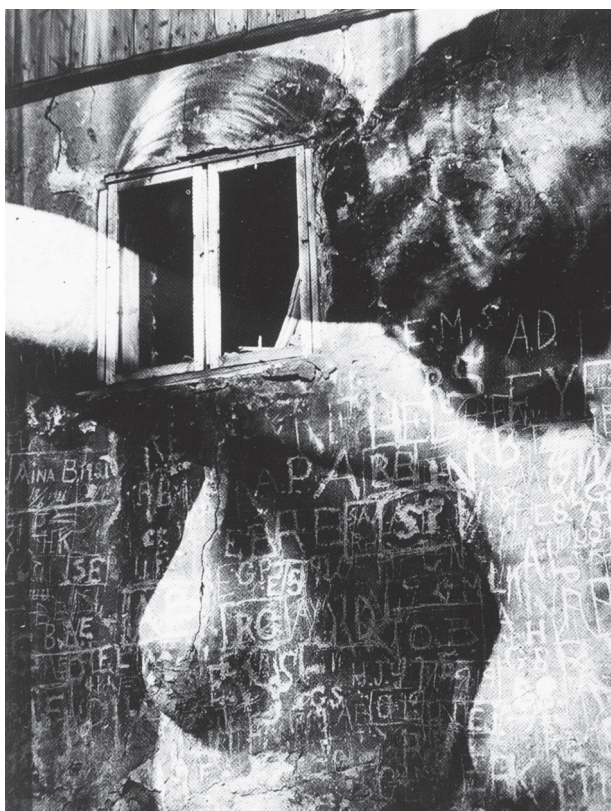
Aunque los artículos de Einstein de 1906 a 1909 sugieren la coexistencia de los comportamientos ondulatorio y corpuscular en la luz, el trabajo de Bose lo convenció de la necesidad de admitir que el cuanto de luz corresponde a partículas de luz. El nombre de fotón para tales partículas se debe al fisicoquímico estadounidense Gilbert Newton Lewis

en un trabajo de 1926 que tituló “La conservación de fotones”, aunque su concepto de átomo de luz no corresponde al cuanto de luz de Einstein.

El dilema sobre la naturaleza ondulatoria o corpuscular de la luz, se manifestó de manera práctica y específica en conexión con los rayos X desde su descubrimiento por Roentgen en 1895 hasta la década de los años veinte del siglo pasado. La naturaleza ondulatoria de los rayos X fue descubierta y aplicada en cristalografía por Von Laue y los Bragg desde 1912. Maurice de Broglie extendió las mediciones del efecto fotoeléctrico a la región de rayos X, confirmando la validez de la ecuación de Einstein hacia fines de la primera guerra mundial.

El trabajo de A. Compton describe la colisión entre un rayo X individual con energía ( $\epsilon = hf$ ) y cantidad de movimiento ( $p = hf/c$ ) con un electrón inicialmente en reposo, como si fuera un choque entre bolas de billar, y determina la energía del rayo X dispersado y del electrón golpeado en función del ángulo de salida de uno de ellos. Esta descripción coincide con las mediciones realizadas por el mismo autor. Mientras este efecto Compton hace uso de propiedades corpusculares de los rayos X, es interesante notar que en el mismo período publicó un artículo





lo en el cual el fenómeno estudiado es típicamente una manifestación de comportamiento ondulatorio. Aunque las propiedades de los rayos X que supone Compton coinciden con las del cuanto de luz, él no hace referencia al trabajo de Einstein.

Por su parte, el trabajo de Bohr, Kramers y Slater fue escrito como una alternativa a la hipótesis cuántica de la luz. Para evitarla, así como sus consecuencias, Bohr estuvo dispuesto a suponer que en los procesos individuales no eran válidas la conservación de energía y de cantidad de movimiento, aceptando la última sólo en forma estadística. Las cuidadosas mediciones sobre el efecto Compton de las energías correlacionadas del rayo X y el electrón dispersados por Bothe y Geiger, y por

Compton y Simon, iniciadas en 1924 y publicadas en 1925, corroboraron que la conservación ocurre a nivel individual y no estadístico. Bohr aceptó que la alternativa propuesta no funcionó.

Finalmente, después de veinte años se reconoció que la luz es descrita adecuadamente por la teoría electromagnética de Maxwell en su comportamiento ondulatorio y por la hipótesis cuántica de la luz de Einstein en su comportamiento corpuscular al interactuar dinámicamente con la materia.

#### **Formulación de la mecánica cuántica**

Los desarrollos de la mecánica cuántica durante el período de 1900 hasta 1925, conocidos como la mecánica

cuántica antigua, comprenden la formulación de la ley de radiación de cuerpo negro por Planck, la hipótesis cuántica de la luz de Einstein y el trabajo de Bohr sobre los átomos, todos con sus múltiples extensiones y aplicaciones. La cuantización de la acción, de la energía y la cantidad de movimiento de la radiación, así como la cuantización de los niveles de energía de los átomos señalan el abandono de las ideas de la mecánica y electrodinámica clásicas. En 1925 se presenta la formulación matricial de la mecánica cuántica por Heisenberg y un año después, la formulación ondulatoria por Schrödinger.

El reconocimiento final de que la luz exhibe tanto un comportamiento ondulatorio como uno corpuscular es contemporáneo con la propuesta

de Louis de Broglie, en 1923, de que la materia además de su comportamiento corpuscular, tradicionalmente aceptado, debe tener también uno ondulatorio. Esta hipótesis fue encontrada por de Broglie al tratar de entender el espectro discreto de energía asociado a los átomos. Algunos ejemplos de sistemas clásicos con espectros discretos están en instrumentos musicales y en cavidades de resonancia electromagnética, en las cuales se reconoce la presencia de ondas acústicas y ondas de radiación estacionarias, respectivamente. La selección de órbitas circulares estacionarias por Bohr en el átomo de hidrógeno es explicada por de Broglie como la condición para que en la órbita de determinada longitud algunas ondas interfieran constructivamente, y también sean estacionarias. La longitud de onda de las ondas propuestas por de Broglie es inversamente proporcional a la cantidad de movimiento de la partícula material, el electrón en el presente ejemplo. Schrödinger adoptó esta propuesta y reconoció que la cuantización debe poder escribirse en términos de una ecuación de onda y los niveles de energía discretos de un sistema material corresponden a las soluciones de un problema de valores propios. Para 1926, identificó las ecuaciones que llevan su nombre, en sus versiones dependientes e independientes del tiempo, aplicándolas sucesivamente para encontrar las descripciones ondulatorias del átomo de hidrógeno, el oscilador armónico, etcétera. En 1927, se tuvieron evidencias experimentales de difracción de electrones, por un cristal de níquel realizado por Davisson y Germer y por láminas delgadas de diferentes materiales por G.

P. Thomson. Esto confirmó la hipótesis ondulatoria de Louis de Broglie incluyendo el valor cuantitativo de la longitud de onda. La aceptación de que el electrón posee propiedades corpusculares y ondulatorias fue mucho más rápida que la del cuanto de luz. Einstein se mostró muy receptivo con las ideas y trabajos de L. de Broglie y de Schrödinger.

Heisenberg llegó a la versión matricial de la mecánica cuántica en su intento de sistematizar la información sobre las intensidades y frecuencias de las radiaciones emitidas o absorbidas por los átomos, reconociendo que éstas son las cantidades medibles espectroscópicamente. En 1925 trata de establecer las bases para una mecánica cuántica teórica sustentada exclusivamente en relaciones entre cantidades que sean observables en principio. Reconoce que en el caso de átomos, las cantidades medidas espectroscópicamente pertenecen a esta categoría, en contraste con otras como la posición y la velocidad del electrón que no pueden observarse en los átomos. Para las últimas propone desarrollos de Fourier en el tiempo con frecuencias determinadas por la condición de Bohr-Einstein y coeficientes que llama amplitudes de transición, cuyos cuadrados en valor absoluto identifica como cantidades observables por ser proporcionales a las probabilidades de transición entre dos estados estacionarios, los cuales corresponden al coeficiente de emisión espontánea de Einstein. Entre las aplicaciones, establece la conexión con la teoría de dispersión de Kramers y analiza la radiación de un oscilador anarmónico y de un rotador. En el proceso encuentra que el producto de amplitudes de transi-

ción asociadas a diferentes cantidades es no conmutativo.

Heisenberg pidió a Born que leyera su manuscrito y decidiera si merecía ser publicado. Born lo encontró interesante y reconoció que el producto de amplitudes corresponde al producto de matrices, entendiéndolo bajo qué condiciones es conmutativo o no. Envió el manuscrito de Heisenberg para su publicación y comenzó a trabajar con Jordan en la interpretación y extensión de sus resultados con base en las propiedades de matrices. El trabajo de Born y Jordan incluye la identificación de la multiplicación encontrada por Heisenberg como una multiplicación de matrices, la demostración de conservación de energía y de la condición de frecuencia de Bohr, así como la incorporación de las leyes del campo electromagnético en el nuevo formalismo. Mientras los dos primeros trabajos con uno y dos autores sobre la formulación matricial de la mecánica cuántica se limitaron a sistemas de una dimensión, el artículo de los tres autores, M. Born, W. Heisenberg y P. Jordan, cubre sistemas de varias dimensiones, incluye una parte sobre mecánica matricial y otra sobre cuantización del campo electromagnético y cálculo de fluctuaciones del mismo.

Durante el verano y el otoño de 1925 Heisenberg estuvo en Copenhague y en Cambridge difundiendo los avances de los desarrollos de la mecánica matricial. Y en enero de 1926, Pauli envió el artículo "Sobre el espectro del átomo de hidrógeno desde el punto de vista de la nueva mecánica" al *Zeitschrift für Physik*, y Dirac envió "Mecánica cuántica y una investigación preliminar sobre el átomo de hidrógeno" a *Proceedings of the Royal Society*.



En el mismo año Schrödinger demostró la equivalencia entre las formulaciones matricial y ondulatoria de la mecánica cuántica. Poco tiempo después, Dirac presentó su versión de esta equivalencia con un tratamiento más abstracto y general, reconociendo adicionalmente la conexión con la mecánica clásica. Las ecuaciones de la mecánica cuántica se obtienen a partir de las ecuaciones de la mecánica clásica hamiltoniana, reemplazando las cantidades físicas por operadores o matrices, y convirtiendo paréntesis de Poisson en conmutadores.

La poca familiaridad de los físicos con matrices, en contraste con su conocimiento sobre ondas, determinó sus preferencias sobre las dos versiones de la mecánica cuántica. Heisenberg investigó el átomo de helio con la versión ondulatoria y Born hizo lo mismo al investigar el problema de dispersión. Mientras que Pauli desarrolló la descripción matricial del momento angular intrínseco o el espín del electrón.

A finales de 1924, inmediatamente después de recibir el trabajo de Bose, Einstein aplicó el método de contar el número de estados microscópicos y su distribución en las celdas del espacio fase para el caso del gas atómico cuántico. Las diferencias con respecto al caso estudiado por Bose es que los átomos tienen masa y su número se conserva. La publicación del trabajo se efectuó en dos partes. En la primera, introduce lo que se llama la distribución de Bose-Einstein, que difiere de la de Planck en la presencia del término correspondiente al potencial químico. Analiza las desviaciones perturbativas a altas temperaturas de la distribución del gas ideal clásico y verifica la con-



sistencia de la distribución cuántica y la tercera ley de la termodinámica, formulada por Nernst diez años antes, de que la entropía tiende a anularse cuando la temperatura tiende al cero absoluto. En la segunda parte, que apareció publicada a principios de 1925, reconoce la posibilidad de que a una temperatura suficientemente baja ocurra una transición de fase en la que los átomos del gas ocupan de manera creciente el estado de energía más baja. Este fenómeno se conoce con el nombre de condensación de Bose-Einstein.

Ehrenfest y otros colegas señalaron que en los trabajos de Bose y

Einstein, los cuantos y los átomos no son tratados como estadísticamente independientes. Einstein aceptó el señalamiento, subrayando que las diferencias en las formas de contar como Boltzmann y como Bose “expresan indirectamente cierta hipótesis sobre una influencia mutua de las partículas que por el momento es de una naturaleza muy misteriosa”.

En 1925 Pauli formuló el llamado principio de exclusión. Bohr, al estudiar los átomos, reconoció que los electrones ocupan los estados estacionarios con energías crecientes de manera sucesiva, resultando la llamada estructura de capas, en vez

de ocupar todos el estado más bajo de energía. El principio de exclusión trata de justificar ese comportamiento establecido experimentalmente al afirmar que “en el átomo cada estado cuántico electrónico puede ser ocupado por un solo electrón”. Entonces, el estado más bajo de un átomo no puede ser aquel en que todos los electrones ocupan el de más baja energía, sino que los electrones ocupan los estados con energías sucesivamente crecientes debido a la limitación del principio de exclusión.

Para 1926, Fermi publicó un artículo que difiere del trabajo de Einstein porque se aplica en átomos que deben de satisfacer el principio de exclusión con respecto a los estados cuánticos de energía disponibles para ellos. Mientras el número de ocupación de un estado cuántico puede ser mayor que uno para el gas clásico, o el estudiado por Einstein, en el presente caso ese número sólo puede ser cero o uno. La forma de contar que introduce Fermi es diferente de la de Boltzmann y la de Bose; aunque mantiene la idea de celdas en el espacio fase introducida por el último.

En la segunda mitad del mismo año, Dirac aborda el mismo problema del gas cuántico en sus dos versiones, la de Einstein y la de Fermi, pero sin citar la referencia al último. Reconoce que las partículas idénticas en la descripción cuántica son indistinguibles y que las funciones de onda para sistemas de ellas poseen simetría de intercambio, estableciendo que bajo el intercambio de dos de las partículas la función de onda no cambia en el caso estudiado por Einstein, y se dice que es simétrica, y cambia de signo en el caso de partículas sujetas al principio de



exclusión de Pauli, para las cuales la función se dice que es antisimétrica. Las simetrías respectivas se traducen en que los bosones —partícula de espín entero que se comportan de acuerdo a la estadística de Bose-Einstein— tienden a ocupar el mismo estado cuántico, explicando la influencia mutua y misteriosa mencionada por Einstein para responder a Ehrenfest; y en que los fermiones —partícula de espín semi-entero que se comportan de acuerdo a la estadística de Fermi-Dirac— no pueden ocupar el mismo estado cuántico como lo establece el principio de exclusión, que es una consecuencia

de la condición de antisimetría de la función de onda.

Dirac inició el desarrollo de la electrodinámica cuántica en 1927. Introdujo operadores de creación y aniquilación de fotones que satisfacen reglas de anticonmutación para describir los procesos de emisión y absorción de radiación por sistemas de partículas cargadas, desarrollando el método de segunda cuantización. También encontró las fórmulas para calcular los coeficientes de emisión espontánea, emisión estimulada y absorción introducidos por Einstein diez años antes.

Born identificó la función de onda como una amplitud de proba-

bilidad, cuyo cuadrado en valor absoluto representa una densidad de probabilidad. Heisenberg formuló el principio de incertidumbre, reconociendo que el concepto clásico de órbita deja de tener sentido en el nivel cuántico. Bohr formuló el principio de complementariedad, que permite reconocer las condiciones en que ciertos conceptos y otros alternos son aplicables o no. La interpretación de la mecánica cuántica sobre estas bases transformó el debate inicial sobre ondas o partículas, en uno sobre si era o no una descripción completa de la realidad física.

#### Discusión

A partir del trabajo de Einstein de 1917, desde 1955 se logró la invención de amplificadores de microondas —luz y rayos X— por emisión estimulada de radiación, conocidos con los acrónimos de MASER, LASER y

X-RASER. Sus aplicaciones son múltiples y bien conocidas, destacando el desarrollo de la óptica y las espectroscopías no lineales.

Del trabajo de 1925 sobre la condensación de Bose-Einstein puede mencionarse que los fenómenos de superconductividad, descubierto por Kammerling Onnes en 1911, y de superfluidez son estudiados como manifestaciones de tal condensación. Experimentos encaminados a producir el cambio de fase de gas atómico a condensado de Bose-Einstein se iniciaron desde la década de los años ochentas del pasado siglo por Klepner usando técnicas de criogenia convencional con hidrógeno atómico. En 1995, las técnicas de atrapamiento y enfriamiento de átomos usando luz láser culminaron con la condensación de Bose-Einstein de un gas de rubidio atómico, logrando temperaturas extremadamente bajas. Otros experimentos con di-

ferentes átomos alcalinos también mostraron su condensación de Bose-Einstein en ese año y los siguientes. Poco después también Klepner la logró en hidrógeno.

El núcleo atómico fue descubierto por Rutherford en 1911, y el neutrón por Chadwick en 1932, identificándolo como una partícula componente del núcleo. Los procesos de decaimiento y las reacciones nucleares permitieron reconocer nuevas interacciones de los componentes del núcleo. A partir de los años treinta esos sistemas y procesos se han estudiado usando los métodos de la mecánica cuántica.

En el estudio de los rayos cósmicos, y también en aceleradores de partículas, se han producido e identificado cientos de nuevas formas de materia que se conocen con el nombre genérico de partículas elementales. También su estudio ha estado guiado por la mecánica cuántica. ☼



Eugenio Ley Koo  
Instituto de Física,  
Universidad Nacional Autónoma de México.

#### IMÁGENES

Pp. 38 y 44: Brigit Kahle. *Sin título*, 1984 y *Sin título*, 1983. P. 41: Kikuji Kawada. *Bandera nacional japonesa*, 1963. P. 42: Wallace Berman. *Sin título*, 1970. P. 43: Michael Schmidt. *El muro de Berlín*, 1986.

P. 44: Henz Hajek-Halke. *Casa de navegantes*, 1928. P. 46: Man Ray. *Regreso a la razón*, 1923. P. 47: Wolfgang Pietrzok. *Compresión*, 1989. P. 48: Astrid Klein. *Materia nocturna I*, 1985.