

EINSTEIN Y LA TEORIA CUANTICA

Por: *Guillermo Castillo Torres* *

*Departamento de Física
Universidad Nacional de Colombia*

Aunque menos popular que su papel en la teoría de la Relatividad, también es importante la intervención de Einstein en la Teoría cuántica. Pero hay un aspecto paradójico en ella: por un lado fue uno de sus pioneros porque formuló varias hipótesis que tuvieron decisiva importancia en el desarrollo de la teoría, pero por otro discrepó frecuentemente de la interpretación aceptada como oficial, si bien se ha exagerado mucho sobre la magnitud de estas discrepancias.

Su primera contribución importante pertenece al problema de la naturaleza de la luz. A fines del siglo XIX la teoría ondulatoria de la luz había alcanzado grandísima perfección después que Maxwell había predicho que la luz era un tipo de ondas electromagnéticas y que Hertz había producido en su laboratorio ondas de esta clase, las hertzianas, de mayor longitud de onda que las luminosas pero de igual velocidad de propagación y susceptibles de ser reflejadas, refractadas, polarizadas, sufrir interferencia, etc., en forma análoga a lo que ocurre con la luz. El mismo Hertz cuando anunció los resultados de sus experimentos, dijo que en conclusión podría afirmarse que la óptica era un capítulo cerrado. Sin embargo, dentro de este mismo informe mencionó un hecho, para él inexplicable: en su generador de ondas electromagnéticas observó que la chispa saltaba más fácilmente cuando una de las esferas era iluminada con luz ultravioleta. Este era el efecto foto-eléctrico, que iba a reabrir el capítulo de la óptica y darle a esta nuevos e insospechados desarrollos.

El efecto foto-eléctrico tal como se fue descubriendo en los años sucesivos, requiere la incidencia de las ya entonces llamadas ondas electromagnéticas, cuyo espectro va desde las ondas que produjo Hertz hasta las que poco después se descubrieron y se llamaron los rayos γ de las sustancias radiactivas, pasando por la luz visible y los rayos X. La onda incidente, si es de longitud de onda adecuada, desprende electrones de una superficie metálica. Pero había algunas cosas no muy claras, descubiertas experimentalmente por Lenard (1): para cada metal había una frecuencia umbral, es decir por debajo de ella no había efecto foto-eléctrico; la energía cinética de los electrones más veloces dependía de la frecuencia de la onda incidente y no de la intensidad; esta última

propiedad influía sobre el número de electrones emitidos.

Estos hechos surgieron a Einstein una hipótesis (2): la energía incidente no está distribuida continuamente como lo prevé la teoría ondulatoria sino más bien está concentrada en paquetes de energía o *cuantos de luz* como los llamó Einstein, o *fotones* como se les bautizó más adelante. Para ello, Einstein se guió por los resultados de la hipótesis de Planck sobre la distribución espectral de la energía en el cuerpo negro, donde se había supuesto que las frecuencias de los osciladores que producen la onda era un múltiplo entero del célebre *cuanto* de Planck $h\nu$, donde h es la constante de Planck y ν es la frecuencia de la radiación emitida. El cuanto de luz tiene también la energía $h\nu$ y desaparece en el proceso de la expulsión del electrón. Como es un proceso de un fotón por cada electrón, se podrá escribir una ecuación que indique la conservación de la energía.

$$h\nu = h\nu_0 + 1/2 m v^2$$

La energía del fotón $h\nu$ se convierte en el trabajo de extracción de $h\nu_0$ y en la energía de los electrones más veloces. ν_0 es la frecuencia umbral. Los electrones menos veloces requieren más energía para ser extraídos y la ecuación contiene más términos.

Einstein mostró que su ecuación no contradice las mediciones de Lenard (1) cuyos resultados ya habíamos mencionado y fue comprobada exactamente por Millikan en 1916 (3) incluyendo el valor numérico de h .

Esta hipótesis tuvo después importantes consecuencias: por ejemplo Bohr en su átomo de Hidrógeno supuso que en la transición atómica que da lugar a las líneas espectrales el electrón pasa de un nivel de energía E_m a otro nivel de energía E_n y emite un cuanto de luz

$$E_m - E_n = h\nu$$

donde ν es de nuevo la frecuencia de la radiación emitida.

Sin embargo, este regreso a la teoría corpuscular fue recibida por muchos con bastante escepticismo. Desde entonces y durante muchos años más se habló de la dualidad onda-partícula que muestra la luz en su naturaleza y sobre cuya solución, que se alcanzó varios años después no tenemos tiempo de extendernos aquí.

* Trabajo leído en la sesión solemne conmemorativa del Centenario de Einstein.

Después del modelo atómico de Bohr la teoría cuántica pasó por un período de desorientación en que se echaba de menos una serie de principios coherentes que sirvieran de guía y que permitieran calcular no sólo las frecuencias sino también las intensidades de las líneas espectrales. Aquí intervino de nuevo Einstein con el concepto de probabilidad de transición (4), introducido a propósito de su tratamiento fenomenológico de la emisión espontánea y la emisión estimulada. Este concepto reemplazó la noción clásica de intensidad de la radiación.

En muchos centros universitarios de Europa se empezó a trabajar sobre estas ideas. En 1925 nace la Mecánica Cuántica (matricial) de Heisenberg, Born y Jordan y poco después la Mecánica Ondulatoria de Schrödinger que no trabaja con matrices sino con funciones de onda. Al poco tiempo Schrödinger demostró la equivalencia de los dos métodos con lo cual quedó a disposición de los físicos una teoría abstracta fuertemente matemática, que hoy se llama Mecánica Cuántica y que ha tenido éxitos indudables en los terrenos de la Física Atómica, de la Física Molecular, de la Física Nuclear y de la Física del Estado Sólido. Una característica notable de los nuevos métodos es que reemplaza el determinismo de la Física Clásica por las ideas de probabilidad de encontrar la partícula, de probabilidad de transición, probabilidad de algún valor definido, etc.

Y aquí viene uno de los hechos paradójicos, de los cuales está llena la intervención de Einstein en la teoría cuántica. Max Born, el responsable de la interpretación del cuadrado de la función de onda $|\psi|^2$ (2) como densidad de probabilidad de encontrar la partícula, declaró en su discurso de aceptación del Premio Nobel en 1954, que la idea que le sirvió de guía vino de Einstein cuando este interpretó el cuadrado de la amplitud óptica como densidad de probabilidad de presencia de fotones. Sin embargo, en la larga polémica epistolar que mantuvo con el mismo Born entre 1916 y 1955 (5), Einstein manifiesta sus reservas sobre la interpretación probabilística de Heisenberg, Born y Jordan y asevera varias veces que Dios no juega a los dados. Parece sin embargo exagerada la afirmación de que Einstein rechazó totalmente la interpretación probabilística y de que aspiraba a una interpretación determinista como la de la Mecánica Clásica.

Tanto en su artículo con Rosen y Podolski (6) como en las cartas a Born de los últimos años, lo que se dice es que la Mecánica Cuántica no describe sistemas individuales, sino más bien "ensembles" similarmente prepa-

rados. Einstein fue muy explícito en hacer notar que sus discrepancias con los miembros de la llamada escuela de Copenhague (Bohr, Heisenberg, Born, etc.), versaban sobre puntos de interpretación y no ponían nunca en tela de juicio la formulación matemática. Tampoco rechazó, como a veces se dice, el principio de incertidumbre. Tuvo sí una interpretación diferente (5), (6): reconoció que la partícula libre tiene en realidad una posición determinada y un momentum determinado, si bien no se pueden verificar ambos al mismo tiempo, en el mismo caso individual, a través de una medición; la interpretación corriente entre los físicos es que la partícula no tiene en realidad ni una posición, ni un impulso determinado; la localización definida que resulta en una medición es producida solamente por la inevitable (esencial) intervención de la medida. (Tomado casi textualmente de una de sus cartas a Born).

¿Hasta dónde favoreció Einstein una interpretación determinista? Es cierto que él sostuvo repetidas veces (7) que la formulación conocida de la Mecánica Cuántica es incompleta en el sentido de que no puede describir completamente sistemas individuales y que será reemplazado más tarde por una descripción completa (no se dice si determinista).

De ahí resulta otro interrogante. Apoya Einstein la concepción de las variables ocultas, es decir creía él en la existencia de nuevas variables cuyas leyes no conocemos en detalle y el promedio de cuyos valores es lo que medimos en definitiva?

En realidad el punto de vista de Einstein es compatible con las variables ocultas si bien no las exigió expresamente. Cabe mencionar, sin embargo, que cuando Born hizo una interpretación completa de la Mecánica Cuántica a base de variables ocultas (8) esta solución le mereció a Einstein el calificativo de "barata". Se ha sugerido (9) que probablemente Einstein creía por aquella época (1952) que la "descripción más general" de que había hablado varias veces la iría a suministrar su teoría del campo unificado, que a la sazón ocupaba su atención, pero que en la postre no dio el resultado esperado.

El caso de Einstein con la teoría cuántica ilustra muy bien uno de los rasgos de su carácter: a pesar de haber sido uno de los pioneros de esa teoría, de haber originado con sus ideas muchos desarrollos importantes, nunca perdió su costumbre de analizar cuidadosamente las bases de toda teoría sin aceptar incondicionalmente los enunciados generalmente admitidos, sino por el contrario, sometiéndolos a un agudo escrutinio. Esa es la actitud que se espera de los verdaderos científicos.

BIBLIOGRAFIA

- (1) R. Lenard, *Ann Physik* 8, 169 (1902).
- (2) A. Einstein, *Ann Physik* 17, 132 (1905).
- (3) R. Millikan, *Phys. Rev.* 7, 355 (1916).
- (4) A. Einstein, *Phys. Zeits* 18, 121 (1917).
- (5) Existe una compilación de esa correspondencia en Alemán: "Albert Einstein - Max Born Briefwechsel" (Rowohlt, Hamburg) y una versión inglesa: M. Born - Einstein Letters (Walter & Co. New York, 1971).
- (6) A. Einstein, B. Podolski y N. Rosen, *Phys. Rev.* 47, 777 (1935).
- (7) Albert Einstein, *Philosopher Scientist*. Ed. por P.A. Schilpp. Reimpreso por Harper y Row. A. Einstein. *Física y Realidad*, J. Franklin Inst. 221, (1936).
- (8) D. Bohm. *Phys. Rev.* 85, 166 (1952).
- (9) L.E. Ballentine. *Am. J. of Physics.* 40, 1.763 (1972).