



Einstein y el efecto Compton

Alejandro CASSINI

Leonardo LEVINAS

Hernán PRINGE

INTRODUCCIÓN

La hipótesis del cuanto de luz, formulada por Einstein en 1905, encontró fuertes resistencias en la comunidad de los físicos a pesar de su gran poder explicativo. La mayoría de los físicos la rechazó en los años posteriores a 1905 y todavía a comienzos de la década de 1920, cuando ya se había adquirido nueva evidencia a favor de la hipótesis, seguía sin suscitar consenso. La capacidad explicativa del cuanto de luz era reconocida de manera casi unánime, pero su existencia se consideraba dudosa. Parecía faltar una evidencia experimental decisiva que confirmara la hipótesis. Cuando, en 1923, Arthur Compton y, de manera independiente, Peter Debye descubrieron el llamado “efecto Compton” la mayoría de los físicos, aunque con importantes excepciones, admitió que la hipótesis de Einstein debía considerarse confirmada.

¿Cuál fue la reacción del propio Einstein ante ese descubrimiento? Contra lo que podría pensarse, resultó moderada y cautelosa. Publicó un único escrito específicamente dedicado al efecto Compton, un artículo que apareció en el periódico *Berliner Tageblatt* el día 20 de abril de 1924 (cf. Einstein, 1924). Ese artículo, hasta donde sabemos, no ha sido reimpresso ni editado, y de él sólo existe una traducción inglesa incompleta, incluida como apéndice a la edición de los trabajos científicos de Compton (cf. Einstein, 1973 [1924]).¹ En el apéndice de este artículo ofrecemos el texto alemán original y una traducción española del trabajo de Einstein, que, aunque no es técnico ni presenta resultados teóricos nuevos, tiene indudable valor histórico como testimonio de su posición frente a la naciente teoría cuántica de la luz.

En esta introducción, que tiene como objetivo principal describir el contexto histórico del trabajo de Einstein, presentaremos, en primer lugar, una síntesis del desarrollo de la obra de Einstein sobre el cuanto de luz entre los años 1905, cuando lo

¹ La traducción, debida a Lucille B. Pinto, no incluye el primer párrafo del artículo original.

postuló por primera vez como un simple paquete de energía, hasta el año 1916, cuando terminó de concebirlo como dotado de propiedades típicamente corpusculares, como el momento lineal. Luego, describiremos brevemente los resultados experimentales que Compton obtuvo en 1923, así como su interpretación del alcance de esos resultados. Finalmente, comentaremos la reacción de Einstein ante el experimento de Compton, teniendo en cuenta su correspondencia sobre ese tema, así como sus manifestaciones anteriores a 1924 sobre la realidad de los cuantos de luz. No nos ocuparemos, sin embargo, de sus trabajos posteriores a abril de 1924, ni tampoco haremos referencia a los desarrollos de la física teórica o experimental después de esa fecha. Nuestro objetivo se limita a presentar el pensamiento de Einstein sobre la naturaleza de los cuantos de luz hasta el momento de la redacción del artículo del *Berliner Tageblatt*. Concluiremos haciendo algunas reflexiones sobre la posición de Einstein acerca de la teoría cuántica de la luz, las que, según creemos, permiten explicar su posición ante el descubrimiento del efecto Compton.

I LA HIPÓTESIS DEL CUANTO DE LUZ DE 1905 A 1916

El 17 de marzo de 1905 Einstein completó su histórico artículo sobre el cuanto de luz, el único al que calificó de “revolucionario” en una carta a Conrad Habocht del 25 de mayo de 1905 (cf. Einstein, 1997 [1905]), como tantas veces se ha señalado (cf. Cassidy, 2005; Stuewer, 2006; Veguillas, 2009 [1990], cap. 2). El objetivo de ese trabajo era proporcionar una explicación de los fenómenos de interacción entre la materia y la radiación para los cuales la electrodinámica de Maxwell no ofrecía una descripción satisfactoria. Esos fenómenos tenían en común la ocurrencia de procesos de absorción y emisión de la luz por la materia. Einstein se proponía dar cuenta de toda una clase de fenómenos, de los cuáles el conocido efecto fotoeléctrico es sólo una especie. Su punto de partida consistió en señalar que la teoría ondulatoria de Maxwell resultaba completamente satisfactoria para explicar la propagación de la radiación libre en el espacio vacío, así como los fenómenos de interferencia y difracción de las ondas electromagnéticas. Sin embargo, la electrodinámica clásica no conseguía explicar una amplia clase de fenómenos observados, y experimentalmente bien conocidos, en los cuales las ondas continuas de radiación debían interaccionar con los átomos discretos que componían la materia, en particular, con las partículas elementales como los electrones (las únicas conocidas en ese momento).

Al comienzo de su artículo de 1905, introdujo su hipótesis fundamental, la naturaleza cuántica de la radiación, en términos tan claros y precisos que merecen citarse *in extenso* una vez más:

De hecho, ahora me parece que las observaciones de la “radiación de cuerpo negro”, fotoluminiscencia, producción de rayos catódicos por luz ultravioleta y otros grupos de fenómenos concernientes a la emisión y transformación de la luz pueden aparecer más comprensibles bajo el supuesto de que la energía de la luz está distribuida discontinuamente en el espacio. De acuerdo con el supuesto que contemplamos aquí, en la propagación de un rayo de luz que sale de un punto, la energía no está distribuida continuamente en un espacio que se vuelve más y más grande, sino que ésta consiste en un número finito de cuantos de energía localizados en puntos del espacio, los cuales se mueven sin dividirse, y sólo pueden ser absorbidos o generados como un todo (Einstein, 1905, p. 133).

Inmediatamente después, Einstein procedió a establecer que los cuantos de luz estaban dotados de una energía proporcional al producto de la frecuencia de la luz por la constante de Planck,² esto es, $E = hn$. En 1905, no atribuyó masa ni momento lineal a los cuantos de luz, presumiblemente porque no necesitaba apelar a esas cantidades físicas para explicar los fenómenos de interacción entre la materia y la radiación. Le bastaba para ello recurrir a la energía de los cuantos luminosos. Por esa razón, es posible interpretar que Einstein no concibió originalmente a los cuantos de luz como corpúsculos materiales o partículas. Como lo expresó Abraham Pais, en 1905, “el cuanto de luz no era todavía una partícula sino sólo un paquete de energía E relacionado con la frecuencia de la luz n por $E = hn$ ” (Pais, 1988, p. 245). Si eso es así, la concepción de la luz de Einstein todavía no resulta abiertamente incompatible con la electrodinámica de Maxwell. Puede advertirse, no obstante, que la dualidad onda-partícula se encuentra en germen en la fórmula de la energía, cuya interpretación nos obliga a atribuir una magnitud típicamente ondulatoria, la frecuencia, a cada cuanto de luz individual. En principio, la frecuencia es la de un rayo luminoso emitido por una fuente. Podemos imaginar, sin embargo, que la intensidad de la luz se disminuye hasta alcanzar el nivel cuántico, esto es, hasta que los cuantos de luz se emiten uno por uno.

Mediante la hipótesis del cuanto de luz, Einstein fue capaz de explicar de manera unificada todos los fenómenos de interacción entre materia y radiación que mencionó al comienzo del pasaje antes citado. Para ello, supuso que los cuantos de luz podían ser absorbidos y emitidos por los electrones de los átomos sólo como unidades completas. La relación entre electrones y cuantos luminosos era en 1905 estrictamente uno a uno en todo proceso de interacción recíproca: cada electrón podía absorber o emitir un único cuanto de luz y, a su vez, cada cuanto podía ser absorbido o emitido por un único

² En 1905, Einstein no escribe la constante de Planck como h , sino como la combinación de otras constantes Rb/N (donde R es la constante universal de los gases, N es el número de Avogadro y b es igual a h/k ; aquí la constante de Boltzmann k , por su parte, es igual a R/N). El símbolo h comenzó a utilizarlo recién en 1909.

electrón. Por otra parte, también supuso que los cuantos de luz no interactuaban entre sí cuando se propagaban como radiación libre. Mediante la hipótesis del cuanto de luz, junto con esas hipótesis auxiliares, Einstein consiguió ofrecer una explicación sorprendentemente simple y precisa del efecto fotoeléctrico (cf. Cassini & Levinas, 2008). El defecto de esos supuestos, sin embargo, era la imposibilidad de dar cuenta de los fenómenos de interferencia y difracción, que se explican naturalmente en el marco de la concepción ondulatoria de Maxwell. Así, desde el comienzo, la hipótesis del cuanto de luz, incluso enriquecida con hipótesis auxiliares, no constituía una teoría completa de los fenómenos luminosos, como rápidamente los críticos se encargaron de señalar.

En el título mismo de su artículo de 1905 Einstein afirmó que se limitaba a proponer “un punto de vista heurístico” acerca de la naturaleza de la luz. Esa expresión puede entenderse, en un sentido amplio, simplemente como sinónima de “hipótesis”. Pero también puede interpretarse, de una manera más restringida y, según creemos, más acorde con la intención original de Einstein, de una manera ficcionalista. De acuerdo con esa interpretación, Einstein no afirmó la existencia de los cuantos de luz, sino que los introdujo como una ficción explicativa útil. Por consiguiente, no sostuvo que la luz tuviera una naturaleza corpuscular ni granular, sino meramente que “se comporta como si” estuviera formada por cuantos de energía. Un pasaje característico de ese modo de expresarse es el siguiente:

La radiación monocromática de baja densidad (dentro del rango de validez de la fórmula de la radiación de Wien) se comporta termodinámicamente como si consistiera en cuantos de energía mutuamente independientes de magnitud Rbn / N (Einstein, 1905, p. 143).

Como hemos de comprobar enseguida, Einstein mantuvo ese modo de hablar condicional y no categórico toda vez que se manifestó públicamente acerca de la realidad de los cuantos de luz.

El carácter verdaderamente revolucionario de la hipótesis de Einstein de 1905 es que atribuye a la radiación libre una estructura granular. No se trata simplemente de que la luz interactúe con la materia como si estuviera compuesta por partículas, sino que se propaga por el espacio vacío como si fuera un gas de partículas luminosas, y no como una onda continua. Este es el punto que suscitó las mayores resistencias por parte de la comunidad de los físicos, la cual reaccionó con bastante escepticismo a la propuesta de Einstein, aunque éste advirtiera que se trataba sólo de una hipótesis heurística.

En un breve artículo de 1906 sobre la producción y absorción de la luz por la materia, Einstein atribuyó a Planck la introducción en la física del cuanto de luz. Según

Einstein, la teoría de la radiación de Planck usa implícitamente la hipótesis del cuanto de luz, a la cual caracteriza como “el punto de vista de que la luz de frecuencia n sólo puede ser absorbida y emitida en cuantos de energía h ” (Einstein, 1906, p. 199). Dado que Planck empleó la misma hipótesis para caracterizar a sus resonadores elementales, él es, dice Einstein, quien “en su teoría de la radiación introdujo en la física un nuevo elemento hipotético: la hipótesis de los cuantos de luz” (Einstein, 1906, p. 203). La manera en que Planck caracterizó al cuanto de radiación no implicaba necesariamente que la radiación libre estuviera compuesta por cuantos, sino que todavía era compatible con la idea de que la hipótesis del cuanto de luz se aplicaba exclusivamente a los procesos de intercambio de energía entre la materia y la radiación, como la absorción o emisión de la luz.

La mayoría de los físicos alemanes interpretó la hipótesis del cuanto de luz de esa manera. Planck mismo, por ejemplo, le escribió a Einstein en 1907 expresando un punto de vista que se puede tomar como representativo de una gran parte de la comunidad de los físicos.

Busco el significado de los cuantos elementales de acción no en el vacío sino en los puntos de absorción y emisión, y creo que los procesos en el vacío están *correctamente* descritos por las ecuaciones de Maxwell. Al menos, todavía no veo ninguna razón convincente para apartarse de ese supuesto que, por el momento, me parece el más simple y uno que de manera característica expresa el contraste entre el éter y la materia (Carta de Planck a Einstein, 6 de julio de 1907; Einstein, 199? [1907], p.).

Sin embargo, desde 1909, Einstein dejó en claro que esa interpretación no era satisfactoria y que su concepción cuántica de la luz implicaba atribuir un carácter granular a la radiación libre. En el primero de sus dos artículos sobre la radiación publicados ese año afirmó:

hemos visto que la ley de radiación de Planck se puede entender bajo el supuesto de que la energía oscilatoria de frecuencia ν sólo puede ocurrir en cuantos de magnitud $h\nu$. Según eso, no es suficiente suponer que la radiación solo puede ser emitida o absorbida en cuantos de esta magnitud, es decir, que se trata de una propiedad exclusiva de la material que absorbe o emite [radiación]; las consideraciones [que hicimos antes] muestran que las fluctuaciones en la distribución especial de la radiación y en la presión de radiación también ocurren como si la radiación consistiera en cuantos de la magnitud señalada (Einstein, 1909a, p. 191).

Puede advertirse, en el final de ese pasaje, la misma construcción gramatical de tipo condicional que aparecía en 1905. Einstein no afirma de manera categórica que la radiación está constituida por cuantos discretos, sino que los fenómenos ocurren *como si* estuviera constituida de esa manera. También debe observarse que el éter luminífero ya no aparece en la discusión de los cuantos de luz, puesto que la hipótesis de los cuantos permite prescindir de él en tanto medio material que opera como soporte de la radiación electromagnética.

En el segundo artículo de 1909 sobre la radiación, Einstein volvió a revisar los fenómenos de absorción y emisión de la luz que no resultaban explicables para la electrodinámica de Maxwell. Cuando consideró la producción de rayos catódicos (electrones) por los rayos X que inciden en una superficie de metal, Einstein señaló que

con otras palabras, el proceso elemental de radiación parece desarrollarse de manera tal que no distribuye y dispersa la energía del electrón primario mediante una onda esférica que se propaga en todas direcciones, como lo exige la teoría ondulatoria. Más bien, parece que al menos una gran parte de esa energía está disponible en alguna otra ubicación (...). El evento elemental de emisión de radiación parece estar dirigido (Einstein, 1909b, p. 821).

Esa es la primera indicación de que los cuantos de luz pueden tener dirección y, por consiguiente, estar dotados de momento lineal. Einstein reforzó esa conclusión a partir de su análisis del fenómeno de la presión que la radiación ejerce sobre la superficie de un espejo. Todavía no formuló, sin embargo, la ecuación del momento de un cuanto de luz.

La mayoría de los físicos en 1909 era todavía escéptica acerca de la realidad de los cuantos de luz. No obstante, la necesidad de cuantificar la radiación para explicar ciertos fenómenos ópticos y termodinámicos era ampliamente aceptada. Planck, en un breve comentario al trabajo de Einstein, expresó claramente las reservas que tenía sobre la hipótesis del cuanto de luz. Según Planck, la hipótesis de Einstein implica concebir a la radiación que se propaga en el espacio vacío como constituida por “átomos de acción” pero, si ello es así, se hace necesario “renunciar a las ecuaciones de Maxwell” (Planck, 1909, *apud* Einstein, 1909c, p. 825). La comunidad de los físicos, e incluso el propio Einstein, no estaba dispuesta a sacrificar ecuaciones tan exitosas. Planck sugirió, entonces, que el análisis en términos de cuantos de acción se limite a los procesos de interacción entre materia y radiación, procesos que se desarrollan en intervalo temporal muy breve y en regiones casi puntualmente localizadas. Para los procesos de propagación de la radiación en intervalos temporales largos y en regiones

extensas del espacio, ésta puede seguir concibiéndose como una onda continua tratable mediante la teoría de Maxwell. Esta era la posición que Planck había tomado desde el comienzo, la cual parecía, ciertamente, una solución de compromiso que dejaba sin explicar cómo una onda continua puede interactuar con la materia como si estuviera compuesta de cuantos de energía discretos.

Por otra parte, resultaba evidente que si la radiación libre está compuesta por cuantos, los fenómenos de interferencia y difracción no podían explicarse. Einstein respondió brevemente hacia el final de su segundo artículo de 1909 que no consideraba en principio que esos fenómenos fueran inexplicables en un contexto cuántico. Sugirió que los cuantos de luz podrían concebirse como singularidades del campo electromagnético. De acuerdo con esa hipótesis la explicación sería la siguiente:

en todo caso, me parece que por el momento la interpretación más natural es que la aparición de los campos electromagnéticos de luz está ligada a puntos singulares del mismo modo que la aparición de campos electrostáticos según la teoría de los electrones. No está excluido que, en una teoría tal, toda la energía del campo electromagnético pueda considerarse localizada en esas singularidades, precisamente como en la vieja teoría de la acción a distancia. Pienso cada uno de tales puntos singulares como rodeado de un campo de fuerza que posee esencialmente el carácter de una onda plana y cuya amplitud disminuye con la distancia a los puntos singulares. Si existen muchas de tales singularidades, en distancias que son pequeñas comparadas con las dimensiones del campo de fuerza de un punto singular, entonces, los campos de fuerza se superpondrán y su totalidad producirá un campo de fuerza ondulatorio que quizá se diferenciará muy poco de un campo ondulatorio en el sentido de la actual teoría electromagnética de la luz (Einstein, 1909b, p. 824-5).

Ese esbozo de explicación era sólo de carácter programático y debía desarrollarse mucho para poder considerarse una explicación acabada de los fenómenos aparentemente ondulatorios en términos cuánticos. No obstante, como reconocía el propio Einstein, esa nueva explicación implicaba abandonar uno de los supuestos originales de 1905, aquél según el cual los cuantos de luz no interactúan entre sí cuando la radiación se propaga en el espacio vacío. En las palabras de Einstein, “no debe suponerse que las radiaciones consisten en cuantos que no interactúan; esto haría imposible explicar el fenómeno de la interferencia” (Einstein, 1909c, p. 826).

En esa etapa del desarrollo de su pensamiento, Einstein reconocía abiertamente que había dificultades para conciliar la teoría de Maxwell con la hipótesis del cuanto de

luz, pero no consideraba que esas dificultades fueran insuperables, ni mucho menos, que implicaban abandonar las ecuaciones de Maxwell. Comenzaba su artículo con palabras de tono profético.

Es incluso innegable que hay un extenso grupo de hechos concernientes a la radiación que muestran que la luz posee ciertas propiedades fundamentales que pueden concebirse más fácilmente desde el punto de vista de la teoría newtoniana de la emisión de la luz que desde el punto de vista de la teoría ondulatoria. Por eso es mi opinión que la próxima fase del desarrollo de la física teórica nos traerá una teoría de la luz que pueda considerarse como una especie de fusión de las teorías ondulatoria y de la emisión de la luz (Einstein, 1909b, p. 817).

Y lo finalizaba diciendo que

yo sólo quería señalar brevemente (...) que ambas propiedades estructurales (la estructura ondulatoria y la estructura cuántica), que la radiación debe poseer según la fórmula de Planck, no han de considerarse como mutuamente incompatibles. (Einstein, 1909b, p. 825).

Como la historia posterior habría de mostrar, el optimismo de Einstein era un poco excesivo. La dualidad onda-partícula de la luz, y de toda la materia, resultó muy difícil de conciliar en una única teoría. En cierto modo, el problema no se resolvió en absoluto sino que, a partir de 1926, se incorporó a la nueva mecánica cuántica como un hecho fundamental e inexplicado, y constituye desde entonces uno más de los misterios de esa teoría que aguarda una comprensión adecuada.

En 1910, Einstein volvió a considerar el problema de la localización de la energía en la radiación electromagnética. Se preguntó si los cuantos de luz podían explicarse completamente mediante las propiedades de la materia que absorbe o emite radiación, o bien si “se debería asignar a la radiación electromagnética misma, además de la estructura ondulatoria, un segundo tipo de estructura, tal que la energía de la radiación misma ya esté dividida en cuantos definidos.” (Einstein, 1910, p. 526). Como era de esperar, respondió que debía adoptarse la segunda opción. Es interesante comprobar que Einstein admite aquí una doble estructura para la radiación, donde la estructura granular no anula la estructura ondulatoria. Eso podría tomarse como una buena formulación de la dualidad onda-partícula que Einstein ya parece considerar como un hecho.

En 1912, Einstein estudió el fenómeno de la equivalencia fotoquímica, que consiste en la desintegración de una molécula cuando sobre ella incide radiación de cierta frecuencia. Concluyó que “una molécula de gas que se desintegra bajo radiación de

absorción de una frecuencia *no* absorbe (en promedio) una energía radiante *hno* en el proceso de su desintegración” (Einstein, 1912a, p. 837-8). En otro artículo de ese mismo año, extrajo la conclusión de que la cantidad de energía absorbida no dependía de la frecuencia propia de la molécula de gas, sino sólo de la frecuencia de la radiación incidente (Einstein, 1912b, p. 884). Esos hechos eran fácilmente explicables suponiendo que la molécula de gas absorbe un cuanto de radiación. Einstein, sin embargo, fue muy prudente y no propuso de manera categórica ese tipo de explicación cuántica. En un artículo de 1913, ofreció una prueba puramente termodinámica de la ley de la equivalencia fotoquímica, esto es, una prueba puramente fenomenológica que no se aventuraba a proponer un mecanismo subyacente que explicara dicha ley. Al final del trabajo, señaló que el resultado obtenido podía deducirse de la hipótesis del cuanto de luz, pero que, “por razones conocidas”, era necesario “proceder con mucha prudencia e incluso con desconfianza cuando se emplea esa hipótesis” (Einstein, 1913, p. 282). Las características del cuanto de luz, evidentemente, todavía le parecían lejos de hallarse completamente establecidas por la experiencia, más aún en ausencia de una teoría que determinara sus propiedades.

Einstein había sugerido claramente, desde 1909, que los cuantos de luz estaban dotados de direccionalidad, pero recién en 1916, por fin, les atribuyó de manera explícita un momento lineal $p = hn/c$. No fue el primero en escribir esa ecuación, dado que Johannes Stark ya lo había hecho siete años antes. Stark fue uno de los primeros físicos que apoyó la hipótesis según la cual la radiación libre está compuesta de cuantos de energía discretos. Inmediatamente después de participar en la discusión entre Einstein y Planck, realizada en el congreso de física de Salzburgo en septiembre de 1909, publicó un artículo notable en el que extraía varias conclusiones importantes de la hipótesis cuántica. Stark comparó las explicaciones ondulatoria y corpuscular del fenómeno de producción de rayos catódicos por medio de rayos X, así como también el proceso inverso. Concluyó que, de acuerdo con la teoría ondulatoria, en los procesos de absorción y emisión de energía por parte de los electrones el momento total electromagnético debía ser igual a cero, mientras que el momento mecánico debía permanecer constante. En cambio, según la hipótesis del cuanto de luz, el momento electromagnético de un electrón acelerado es diferente de cero y “su valor absoluto está dado por hn/c , donde h es el cuanto de acción de Planck y n la frecuencia” (Stark, 1909, p. 903). Stark señaló, además, que, en los procesos de absorción y emisión, el momento total siempre se conserva, pero el momento mecánico se transforma en momento electromagnético y a la inversa, algo que según la teoría ondulatoria resulta imposible (Stark, 1909, p. 903). En el trabajo de Stark, encontramos claramente presentadas la expresión del momento del cuanto de luz y la conservación del momento en todos los procesos de absorción y emisión de luz; allí ofreció una ecuación para el momento lineal que

el propio Einstein no formuló antes de 1916, e incluso entonces no la escribió con tanta precisión, como veremos enseguida.³

En efecto, en su artículo de 1916, Einstein analizó nuevamente el proceso de interacción entre la radiación y la materia considerando el caso de un gas compuesto por moléculas que se encuentra en equilibrio térmico con la radiación. Supuso, naturalmente, que la interacción entre el gas y la radiación se producía mediante la absorción y emisión de cuantos de energía $h\nu$ por parte de las moléculas del gas. La conclusión de su análisis fue que cuando un cuanto de radiación es absorbido por una molécula, éste no sólo le transfiere la totalidad de su energía sino también un momento igual a $h\nu/c$. Por otra parte, cuando la molécula emite espontáneamente un cuanto de energía $h\nu$, ésta le transfiere al cuanto un momento $h\nu/c$. La radiación emitida tiene, por consiguiente, una dirección determinada. No se trata, entonces, de una onda electromagnética que se propaga por todo el espacio, sino de una energía localizada como una partícula que se mueve en una dirección determinada. Hacia el final del trabajo, Einstein resumió esas conclusiones del siguiente modo:

si un paquete de radiación actúa sobre una molécula para absorber o emitir una cantidad de energía $h\nu$ en forma de radiación por medio de un proceso elemental (radiación inducida), entonces, siempre se transfiere a la molécula un impulso $h\nu/c$, precisamente en la dirección de propagación del paquete cuando absorbe energía y en la dirección opuesta cuando emite energía (...). Si la molécula experimenta una pérdida de energía de la magnitud $h\nu$ sin estimulación externa, en la cual emite esa energía en forma de radiación (emisión espontánea), entonces, también ese proceso es direccional. No hay emisión de radiación en ondas esféricas. La molécula experimenta un retroceso de magnitud $h\nu/c$ durante ese proceso elemental de emisión de radiación, pero la dirección de ese retroceso en el estado actual de la teoría solo está determinada por el “azar” (Einstein, 1916, p. 61).

Los cuantos de radiación eran concebidos ahora con propiedades mucho más semejantes a las partículas materiales, ya que están dotados de momento lineal, una propiedad característica de los corpúsculos clásicos. La luz podía concebirse, entonces, como una lluvia de proyectiles de energía que se propagan por el espacio vacío con una dirección determinada. Además, la interacción entre las moléculas (o sus componentes) y los cuantos luminosos resultaba, en algunos aspectos, semejante a la colisión entre partículas materiales, ya que implicaba la transferencia de momento entre

³ Con todo, en 1909, Stark meramente postuló que los cuantos de luz tenían momento lineal, mientras que, en 1916, Einstein ofreció razones para probar que el cuanto de luz debía estar dotado de momento.

las entidades que interactúan. La diferencia esencial con un choque entre corpúsculos era que los cuantos de energía no son dispersados por la materia (no “rebotan”), sino que son emitidos o absorbidos, es decir, completamente creados o aniquilados, como Einstein ya había indicado en su explicación del efecto fotoeléctrico. Debe señalarse que la teoría ondulatoria también le adjudica a la onda electromagnética un momento lineal (por unidad de volumen) denominado “vector de Poynting”, que resulta proporcional al producto vectorial de los campos eléctrico y magnético y, por lo tanto, a sus respectivas amplitudes. La orientación de ese vector corresponde a la dirección de propagación de la onda en el punto.

La frecuencia es la propiedad esencial de los cuantos de luz, como resulta evidente a partir de las fórmulas para el momento y la energía, dado que allí es la única variable en el vacío. Dos cuantos dotados de la misma frecuencia resultan, entonces, estrictamente indiscernibles, ya que necesariamente deben poseer la misma energía y el mismo valor absoluto del momento. Por otra parte, de la relatividad especial se sigue que todos los cuantos deben tener masa en reposo nula por el hecho de moverse a la velocidad de la luz, de modo que tampoco podrían diferenciarse por sus masas. Como no pueden desacelerarse debido a la constancia de la velocidad de la luz, los cuantos de luz deben ser absorbidos y emitidos por la materia de manera instantánea. Se trata, sin duda, de entidades muy diferentes de las partículas luminosas masivas características de las tradicionales teorías corpusculares de la luz.

Resulta significativo que Einstein se refiriera, en ese artículo de 1916, a la “teoría cuántica de la radiación” y no meramente a la “hipótesis del cuanto de luz” como había hecho en 1905. Es evidente que se había completado hasta lo que era posible el cuadro de las propiedades del cuanto de luz y que, con la atribución de momento, la hipótesis cuántica había adquirido al menos las características mínimas exigibles a una teoría corpuscular de la radiación. Por cierto, dicha teoría distaba de ser completa, ya que ahora parecía más difícil que nunca explicar los fenómenos de interferencia y difracción de la luz apelando a la interacción entre los cuantos de energía concebidos como partículas. Einstein evaluó las dificultades de esa teoría con las siguientes palabras:

La debilidad de la teoría consiste en que, por una parte, no nos conduce más cerca a una conexión con la teoría ondulatoria, y que, por otra parte, deja al “azar” el tiempo y la dirección de los procesos elementales; no obstante, confío totalmente en la seguridad del camino emprendido (Einstein, 1916, p. 61).

El pasaje expresa claramente la insatisfacción de Einstein con los aspectos indeterministas que ya había comenzado a tomar la teoría cuántica de la radiación. En ese caso, la teoría no puede predecir cuándo una partícula (un electrón) emitirá un cuanto

de energía ni tampoco en qué dirección lo hará. Einstein pensaba que ambos fenómenos debían estar perfectamente determinados por los estados precedentes de la partícula (y/o de su entorno), pero su teoría no era capaz de decir nada al respecto. Desde el punto de vista de Einstein, ese hecho no probaba la existencia de una suerte de azar objetivo en la naturaleza, sino que mostraba simplemente que la teoría del cuanto de luz era incompleta. Aquí se encuentra en germen la posición que, hasta el final de su vida, Einstein adoptará respecto de la mecánica cuántica. Cabe decir que la actitud de Einstein frente a la física cuántica no está exenta de ambigüedades y vacilaciones (cf. Pais, 1982, p. 440-69; Stachel, 2002, p. 367-402).

2 EL EFECTO COMPTON

En diciembre de 1922, Arthur Holly Compton encontró la explicación teórica de los resultados de una larga secuencia de experimentos con rayos X, en los cuales la radiación incidente era dispersada por un blanco de grafito. En sus experimentos, había determinado que la radiación dispersada tenía una frecuencia menor y, consiguientemente, una longitud de onda mayor que la radiación incidente. Este resultado no podía explicarse satisfactoriamente mediante la electrodinámica clásica, donde se suponía la naturaleza ondulatoria de la radiación. Thomson había elaborado una teoría de la dispersión de la radiación por la materia, la cual predecía que la onda dispersada debía tener la misma frecuencia y longitud que la onda incidente.⁴ Esa predicción, evidentemente, era incompatible con los resultados de Compton, por lo que éste, luego de muchos intentos, propuso una explicación diferente, que implicaba abandonar el marco de la electrodinámica clásica.

En términos cualitativos, la explicación es la siguiente. Ante todo, se supone que la radiación incidente está formada por cuantos de energía discretos que se mueven en una dirección determinada. Cuando los cuantos incidentes interactúan con los átomos de grafito del blanco, cada cuanto individual resulta dispersado por un único electrón de un átomo de grafito. El electrón dispersa al cuanto de luz en una dirección que forma un ángulo determinado respecto de la trayectoria del cuanto incidente. Como efecto de la interacción, el electrón, que puede considerarse en reposo ya que su velocidad resulta despreciable comparada con la de la luz, experimenta un retroceso en una dirección bien definida a causa de la energía y el momento que recibe del cuanto de luz. El retroceso es proporcional al cambio en la energía y el momento del cuanto

⁴ Stuewer (1975) contiene un análisis histórico detallado de todas las investigaciones de Compton, al cual remitimos para todos los aspectos del proceso de descubrimiento que aquí apenas esquematizamos. Stuewer (2000) es una buena síntesis de ese proceso.

incidente, que cede una parte de su energía y momento al electrón. Puesto que la energía y el momento deben conservarse en la interacción, el cuanto dispersado tendrá una energía igual a la del cuanto incidente menos la energía cinética del retroceso del electrón. Si el cuanto de luz cede parte de su energía al electrón que lo dispersa, y dado que su velocidad permanece constante, las fórmulas para el momento y la energía implican que su frecuencia debe disminuir y su longitud de onda debe aumentar.

Desde el punto de vista cuantitativo, Compton consiguió establecer las ecuaciones para la frecuencia y la longitud de onda de los cuantos dispersados. Lo hizo suponiendo que cada cuanto de luz estaba dotado de una energía $E = h\nu$ y un momento lineal $p = h\nu/c$, tal como lo postulaba la teoría del cuanto de luz de Einstein. También supuso que la energía y el momento se conservaban en la interacción de la radiación con la materia. A partir de esas hipótesis dedujo que la radiación dispersada debía tener una longitud de onda $\lambda\theta = \lambda_0 + (2h/mc) (\text{sen}^2 \frac{1}{2} \theta)$ (donde θ es el ángulo de dispersión) y una frecuencia $\nu_\theta = \nu_0 / 1 + 2\alpha \text{sen}^2 \frac{1}{2} \theta$ (donde $\alpha = h\nu_0 / mc^2$) (cf. Compton, 1923, p. 486-7). Compton logró, entonces, determinar cuáles eran exactamente los cambios en la frecuencia y la longitud de onda de la radiación dispersada (lo cual se sigue inmediatamente de las dos fórmulas que dedujo).

Las dos ecuaciones de Compton resultaron confirmadas, dentro del margen del error experimental, por las mediciones del espectro de los rayos X dispersados, que Compton había realizado desde varios años antes.⁵

En el experimento de Compton, las magnitudes observables, esto es medibles en el laboratorio, eran la frecuencia y longitud de onda de los rayos X dispersados y el ángulo de dispersión de la radiación. La frecuencia, la longitud de onda y la energía de los rayos incidentes, por su parte, se suponen conocidos y se toman como datos. El resto de la explicación es de carácter teórico y tiene que ser formulado de manera hipotética. En particular, en el experimento, no se observa ningún efecto que pueda ser atribuido a cuantos de luz individuales, ni tampoco ninguna propiedad característicamente corpuscular de la radiación. Al contrario, las mediciones basadas en la espectroscopía hacen uso de una propiedad característicamente ondulatoria de la luz, como es la interferencia. En sentido estricto, Compton observa el cambio en el patrón de interferencia de la radiación dispersada. De allí, empleando exclusivamente la electrodinámica clásica, es posible inferir el cambio en la frecuencia y la longitud de onda de dicha radiación. La teoría cuántica de la luz sólo entra en juego cuando se trata de explicar el hecho de que la frecuencia de los rayos dispersados ha disminuido. Allí es donde Compton apela a las fórmulas de Einstein para la energía y el momento del cuanto

⁵ Compton también predijo que el incremento de la longitud de onda de la radiación dispersada debía ser el mismo cualquiera sea la longitud de onda de la radiación incidente. La evidencia de Compton no era concluyente respecto de esta predicción (cf. Stuewer, 1975, p. 226-9, para mayores detalles).

de luz. Finalmente, las leyes de conservación de la energía y del momento lineal están presupuestas en toda la explicación y nunca se cuestionan ni se ponen en juego en el experimento. Se las trata, simplemente, como conocimiento antecedente presupuesto. Por su parte, la predicción acerca del retroceso de los electrones que interactúan con los cuantos de luz no fue confirmada hasta junio de 1924, mediante otro experimento realizado con una cámara de niebla (cf. Compton y Simon, 1925).

Compton envió el artículo en que comunicaba su descubrimiento a la *Physical Review* el 13 de diciembre de 1922. El trabajo apareció publicado en mayo de 1923 (cf. Compton, 1923). Mientras tanto, Peter Debye, trabajando en Zurich de manera completamente independiente de Compton, llegó a los mismos resultados, pero tuvo la suerte de que fueran publicados antes que los de Compton. El artículo de Debye, enviado en marzo de 1923, se publicó en *Physikalische Zeitschrift* el 15 de abril de 1923 (Debye, 1923). La prioridad le corresponde, evidentemente, a Compton. Comparando ambos artículos se advierte que los dos físicos emplearon los mismos presupuestos y ofrecieron la misma explicación de los resultados experimentales. Significativamente, Compton no citaba a Einstein ni mencionaba siquiera su teoría del cuanto de luz, mientras que Debye hacía al menos una referencia explícita a la noción de “radiación aguja” de Einstein. Por otra parte, Debye se apoyaba en los resultados experimentales de Compton, de quien citaba un extenso trabajo (cf. Compton, 1922) en el que se informaba acerca del cambio de frecuencia y longitud de onda de los rayos X secundarios (dispersados) sin la correspondiente explicación teórica mediante la hipótesis del cuanto de luz.

En 1953, hacia el final de su vida, en respuesta a una carta de Gordon Hull, Compton declaró que no conocía los trabajos de Einstein y que había deducido por sí mismo la fórmula para el momento del cuanto de luz a partir de la electrodinámica de Maxwell. La carta de Compton es lo suficientemente interesante como para citarla *in extenso*:

(...) cuando escribí mis artículos sobre la dispersión de los rayos X (...), la idea de “rayos-aguja”, que poseen energía hn y momento hn/c , era una que en ese tiempo estaba muy difundida entre los físicos y era usualmente asociada con el nombre de Einstein. Probablemente había escuchado acerca de ella primeramente de Richardson, con quien estudié en 1913 y con quien había discutido esos problemas en 1920. Para él el concepto era de especial importancia en conexión con el efecto fotoeléctrico. En 1922 yo estaba familiarizado sólo con un resumen del artículo de Einstein de 1917, y llegué independientemente al valor del impulso impartido por un cuanto de radiación como hn/c . Mi cálculo también estaba basado en la teoría de Maxwell (Carta de Compton a Hull del 17 de mayo de 1953; Compton, 1973 [1953], p. 757).

Shankland, el editor de los trabajos científicos de Compton, afirma que la correspondencia y los cuadernos de notas de Compton de esa época confirman esa afirmación. Consiguientemente, concluye, es la electrodinámica clásica más que la hipótesis del cuanto de luz la que proveyó los conceptos mediante los cuales Compton explicó sus resultados experimentales sobre la dispersión de los rayos X (cf. Shankland, 1973, p. 756, 758). Así, aparentemente, la teoría de Einstein sólo habría tenido una influencia indirecta en la obra de Compton, lo cual explica, además, el hecho de que éste no lo citara.⁶

Compton finalizaba su artículo de 1923 con las siguientes palabras:

la presente teoría depende esencialmente del supuesto de que cada electrón que es efectivo en la dispersión dispersa un cuanto completo. Implica también la hipótesis de que los cuantos de radiación son recibidos desde direcciones definidas y son dispersados en direcciones definidas. El apoyo experimental de la teoría indica muy convincentemente que un cuanto de radiación lleva consigo un momento dirigido así como una energía (Compton, 1923, p. 501).

La conclusión de Compton es sobria, pero categórica e inequívoca. No cabe duda de que su experimento puede interpretarse como una confirmación contundente de la hipótesis del cuanto de luz de Einstein, en particular, de la teoría de 1916 que atribuía momento lineal a los cuantos.

En su artículo de 1923, Compton no hace ninguna consideración general acerca de la existencia real de los cuantos de luz ni acerca de la naturaleza corpuscular de la radiación. Sus escritos posteriores, sin embargo, muestran claramente que consideraba que la radiación debía concebirse como constituida por partículas. Así, por ejemplo, en otro trabajo publicado en 1924, pero escrito ese mismo año, redactado en colaboración con Hubbard, concluía afirmando que

tanto desde el punto de vista de la evidencia experimental como de la consistencia interna de la teoría somos, por consiguiente, forzados a la conclusión de que cada cuanto de los rayos X dispersados es emitido en una dirección definida. Parecería que no hay sino un corto paso hacia la conclusión de que toda radiación ocurre como cuantos definidamente dirigidos más bien que como ondas esféricas (Compton & Hubbard, 1924, p. 449).

⁶ Con todo, el supuesto desconocimiento de la obra de Einstein en una fecha tan tardía como 1923 es tan significativo como la omisión de Einstein respecto del experimento de Michelson y Morley en 1905. Es muy posible que Compton no hubiera leído los artículos de Einstein de 1905 y 1916-1917, pero es muy improbable que no supiera que las fórmulas para la energía y el momento del cuanto de luz provenían de esos trabajos de Einstein.

En marzo de 1924, en el resumen de otro de sus artículos importantes, Compton escribió como título “Teoría cuántica corpuscular de la dispersión de los rayos X” (Compton, 1924a, p. 168). A partir de allí, siempre se refirió a los cuantos de luz como “partículas”, “corpúsculos” o “proyectiles”, o incluso “balas” (cf. Compton, 1925). Además, toda vez que explicó su descubrimiento, ya sea en artículos profesionales o de divulgación, lo hizo en términos mecánicos, como si la interacción entre el cuanto de luz y el electrón fuera una especie de choque entre partículas. Por ejemplo, en un artículo de carácter general publicado en junio de ese año, utilizó la analogía con las bolas de billar, la más tradicional de la mecánica clásica de partículas.

Encontramos que la longitud de onda y la intensidad de los rayos dispersados son lo que deberían ser si un cuanto de radiación rebotara contra un electrón, igual que una bola de billar rebota contra otra. (Compton, 1924b, p. 70).

La explicación que Compton ofrece de sus propios resultados experimentales no es cuántica, en sentido estricto, sino eminentemente clásica. Considera a la interacción entre los cuantos de luz incidentes y los electrones en reposo de la materia como un caso de dispersión de partículas materiales en el que se produce una suerte de colisión elástica en la que los cuantos transfieren una parte de su momento y su energía a los electrones. Desde el punto de vista de la teoría de Einstein, en cambio, no se trata de un choque ni de una dispersión de partículas, sino de un proceso de absorción y emisión de cuantos. Los cuantos de luz incidentes son absorbidos por los electrones, produciéndose su completa aniquilación y la transferencia de todo su momento y su energía a dichos electrones. A su vez, los electrones excitados emiten nuevos cuantos luminosos de menor frecuencia en otra dirección. Los cuantos emitidos son diferentes de los cuantos absorbidos y perfectamente discernibles respecto de ellos, ya que, como consecuencia de la disminución de su frecuencia, poseen menor energía y momento. En suma, desde el punto de vista cuántico, el efecto Compton no es un choque elástico entre partículas materiales, sino un auténtico proceso de aniquilación y creación (instantáneas) de cuantos carentes de masa.

Las explicaciones del efecto Compton que eran posibles en 1923 evidentemente no eran de carácter cuántico en el sentido actual del término.⁷ Tanto para Compton como para Einstein los cuantos de luz individuales tenían trayectorias bien definidas en el espacio (y en el espacio-tiempo), de modo que era perfectamente significativo

⁷ Después de publicados los resultados de Compton se propusieron muchas explicaciones alternativas que trataban de conciliarlo con la electrodinámica clásica, esto es, con la idea de que el campo electromagnético no está cuantizado (cf. Stuewer, 1975, p. 288-305). Casi todas esas explicaciones semiclásicas fueron pronto abandonadas. La más duradera fue la de Schrödinger (1927), que todavía tiene partidarios.

afirmar que un cuanto de luz determinado era absorbido o emitido por un electrón determinado y sólo por él. Después de establecido el principio de indeterminación de Heisenberg de 1927 ya no es posible sostener que las partículas elementales poseen trayectorias continuas y bien determinadas y, por consiguiente, tampoco se puede dar un sentido preciso a la idea de que un cuanto de luz determinado es emitido por un electrón en una región del espacio-tiempo y absorbido por otro electrón localizado en una región diferente. Desde ese punto de vista, todos los diagramas explicativos del efecto Compton, que aparecen en los libros de texto de física, no pueden interpretarse literalmente como descripciones de procesos físicos que ocurren realmente, sino que deben tomarse como meros auxiliares instrumentales o como simples recursos pedagógicos.⁸ Compton, en cambio, concebía a las representaciones visuales que presentaba al comienzo de su artículo (cf. Compton, 1923, p. 486) de manera eminentemente realista y descriptiva. Einstein, por su parte, habría estado de acuerdo con esa interpretación descriptivista de las representaciones, aunque su concepción del mecanismo que produce el efecto era muy diferente de la del propio Compton.

Finalmente, señalemos que Compton concibió la naturaleza dual de la luz como una “paradoja” que debía resolverse de alguna manera conciliando sus aspectos corpuscular y ondulatorio (a la manera del propio Planck). Un artículo de carácter histórico, publicado en 1929, terminaba con las siguientes palabras:

partiendo de la histórica sugerencia de Planck de que la radiación es emitida en unidades discretas proporcionales a la frecuencia, hemos visto, entonces, cómo Einstein fue llevado a sugerir cuantos corpusculares de radiación o fotones para dar cuenta del efecto fotoeléctrico, y cómo experimentos recientes con rayos X, especialmente aquellos con cuantos individuales de radiación X, han parecido establecer esa hipótesis corpuscular. Sin embargo, hemos sabido desde hace mucho que la luz tiene las características de las ondas. Por siglos se ha supuesto que esas dos concepciones son contradictorias. No obstante, incitados por los obstinados experimentos, al parecer hemos hallado una salida. Continuamos pensando en la luz como propagándose como ondas electromagnéticas, pero la energía de la luz está concentrada en partículas asociadas con las ondas, y dondequiera que la luz hace algo lo hace como partículas (Compton, 1929, p. 89).

Todo eso, más que una solución al problema de la dualidad onda-partícula de la luz, suena como un enunciado del problema mismo. La idea de que las partículas están,

⁸ Esa afirmación también vale, pensamos, para todas las representaciones visuales de los procesos cuánticos, tales como los diagramas de Feynman.

de alguna manera, “asociadas” con las ondas (o los campos) se ha repetido una y otra vez desde entonces, pero no por ello podemos decir que se ha vuelto más comprensible. En efecto, ¿qué clase de relación física es la asociación entre una partícula y un campo? Parece, más bien, un término que cubre nuestra ignorancia al respecto.

3 LA REACCIÓN DE EINSTEIN ANTE EL EFECTO COMPTON EN EL ARTÍCULO DE 1924

Las reacciones de Einstein al descubrimiento del efecto Compton se encuentran en su artículo periodístico del 20 de abril de 1924 y en una carta a Besso del 24 de mayo de 1924. Resulta sorprendente que, dada la importancia atribuida por la comunidad científica a los resultados experimentales de Compton, que los consideró de manera mayoritaria como una confirmación de la teoría del cuanto de luz de Einstein, éste se refiriera tan pocas veces en su obra a ese descubrimiento. No menos sorprendente es que el único trabajo escrito por Einstein sobre el efecto Compton sea un artículo de divulgación publicado en un periódico general. Evidentemente, sintió la necesidad de hacer llegar la noticia a un número amplio de lectores no especializados, pero nunca escribió un comentario destinado a la comunidad de los físicos.

El *Berliner Tageblatt*, fundado en 1872, era en ese momento un periódico independiente de gran prestigio y amplia circulación en Alemania (En 1933, perdió su independencia, ya que fue intervenido por el gobierno nazi, que lo cerró definitivamente en 1939.) Einstein ya había publicado allí diversos artículos sobre cuestiones educativas, científicas y epistemológicas de interés general.⁹ De hecho, el artículo de 1924, que se propone básicamente informar sobre el experimento de Compton, comienza con un extenso párrafo sobre la función social de la ciencia, más precisamente, sobre la responsabilidad del científico como educador de la humanidad. El subtítulo del propio artículo, puesto en forma de interrogación, (“¿Es la ciencia un fin en sí mismo?”) sugiere que ese pasaje, que no tiene una relación directa con el efecto Compton, no es accidental, sino que responde a genuinas preocupaciones de Einstein acerca de la finalidad de las prácticas científicas en el contexto de la sociedad. (La traducción inglesa de ese artículo, evidentemente, no lo consideró relevante y optó por eliminarlo, como ya indicamos en la nota 1.)

En función de ese objetivo general, Einstein asume la tarea de divulgar un descubrimiento científico reciente que considera de gran importancia para la física.

⁹ Por ejemplo, Einstein (1919; 2005 [1919]) es particularmente importante para conocer su posición sobre el método científico y sobre varias cuestiones, todavía actuales, de la filosofía de la ciencia, tales como la estructura de las teorías o la elección entre teorías rivales.

Respecto del contenido propiamente físico del artículo de Einstein, no es necesario comentarlo con detalle, ya que es breve, claro y conciso. Nos limitaremos a dos observaciones acerca de las dos conclusiones principales del trabajo.¹⁰

Einstein, luego de hacer una breve reseña histórica sobre las concepciones corpuscular y ondulatoria de la luz, explica los éxitos y limitaciones de la electrodinámica de Maxwell, naturalmente interpretada en un marco ondulatorio. Fenómenos como la radiación del cuerpo negro y el efecto fotoeléctrico, llevaron a Planck y a Einstein mismo a proponer la hipótesis de que la radiación estaba compuesta por cuantos de energía discretos, iniciando de esa manera la teoría cuántica de la luz. Ahora el experimento de Compton confirma esa teoría cuántica, teoría que a simple vista es incompatible con la teoría de Maxwell. Sin embargo, sigue habiendo fenómenos que se explican mejor de manera ondulatoria, como la interferencia y la difracción de la luz, por lo cual la electrodinámica clásica sigue siendo indispensable. Esa dualidad de teorías, que expresa la dualidad onda-partícula de la radiación, es la primera conclusión que extrae Einstein. La formula con las siguientes palabras:

ahora tenemos, por lo tanto, dos teorías de la luz, ambas indispensables, y – tal como hoy debe admitirse a pesar de veinte años de tremendos esfuerzos de los físicos teóricos – sin conexión lógica [entre sí] (Einstein, 2013 [1924], p. 217).

La conciliación entre esas dos teorías, que Einstein había predicho ya en 1909, debió esperar hasta la formulación de la electrodinámica cuántica, que sólo se terminó hacia 1950, pero que resultó una teoría que Einstein nunca pudo aceptar. De hecho, el efecto Compton fue uno de los caminos que condujeron a la formulación de la electrodinámica cuántica, (cf. Brown, 2002).

Einstein se pregunta luego hasta qué punto el efecto Compton nos obliga a concebir a los cuantos de luz como partículas o corpúsculos, análogos a las partículas elementales que componen los átomos (en ese momento sólo se conocían los protones y electrones). Ya hemos señalado que Compton no parecía tener dudas al respecto y que, en sus artículos, habló abiertamente de la naturaleza corpuscular de la radiación. La posición de Einstein, en cambio, es mucho más prudente y circunspecta. Es posible concebir que la radiación tiene características corpusculares sólo en tanto posee un momento lineal, característico de los proyectiles. Su segunda conclusión, expresada en la oración que cierra el artículo, es la siguiente:

¹⁰ Esas dos conclusiones ya habían sido advertidas por Pais (1982, p. 414), aunque la traducción que hace de los pasajes correspondientes difiere un poco de la nuestra.

el resultado positivo del experimento de Compton prueba que, no sólo respecto de la transferencia de energía, sino también respecto de los efectos de la colisión, la radiación se comporta como si consistiera en proyectiles discretos de energía (Einstein, 2013 [1924], p. 219).

Einstein vuelve a emplear el mismo lenguaje ficcionalista que había utilizado en su artículo original de 1905. No afirma que la radiación está formada por partículas, sino sólo que “se comporta como si” lo estuviera. Ese hecho sugiere la hipótesis de que Einstein nunca abandonó el “punto de vista heurístico” acerca de la realidad de los cuantos de luz. No queremos sugerir que haya adherido al ficcionalismo de Hans Vaihinger (1927 [1911]), muy popular en Alemania en la década de 1920 y que Einstein, sin duda, conocía (cf. Hentschel, 1990 p. 168-77, 276-92). Para Vaihinger, las ficciones son empíricamente falsas o directamente autocontradictorias, una idea que Einstein no podía encontrar aceptable. La posición ficcionalista de Einstein respecto de la teoría cuántica de la radiación consiste, simplemente, en no afirmar la existencia de los cuantos de luz.

Un mes después de la publicación de su artículo periodístico, Einstein se refirió al efecto Compton en una carta a su incondicional amigo Michele Besso:

En el plano científico estoy sumergido casi sin interrupción en el problema de los cuantos y creo verdaderamente estar sobre la buena pista (...). Mis nuevos esfuerzos tratan de conciliar los cuantos y el campo de Maxwell. De los resultados experimentales de estos últimos años que tengan importancia no hay mucho que decir, excepto las experiencias de Stern y Gerlach, así como la experiencia de Compton (dispersión de los rayos Roentgen con cambio de frecuencia); las primeras demuestran la existencia única de los estados cuánticos, y la última la realidad del impulso de los cuantos de luz (Carta de Einstein a Besso, 24 de mayo de 1924; Speziali, 1979, p. 119-20).

La interpretación del efecto Compton es aquí la misma que la del artículo periodístico de abril. El resultado experimental prueba que los cuantos de luz tienen momento lineal. Eso es todo lo que Einstein parece dispuesto a suscribir, a diferencia del propio Compton. Por otra parte, la referencia a la conciliación entre la teoría de Maxwell y la del cuanto de luz muestra claramente que Einstein se encontraba insatisfecho con la dualidad de teorías de la luz y que consideraba todavía incompleta a su propia teoría del cuanto, la cual no proporcionaba una explicación completa de todos los fenómenos relativos a la radiación.

Las únicas manifestaciones explícitas acerca de la realidad de los cuantos de luz aparecen en dos cartas de Einstein a Besso, no destinadas a publicación y editadas póstumamente (cf. Speziali, 1979). La primera, del año 1916, es de la época en que Einstein escribió el artículo donde aparece por primera vez la fórmula del momento de los cuantos de luz. Allí, luego de comunicarle ese resultado a su amigo, expresó que

lo que hay de esencial es que las consideraciones *estadísticas* que conducen a la fórmula de Planck se han *sistematizado*, y que se puede concebir la cosa de una manera general por el hecho de que, para la constitución particular de las moléculas consideradas, se ha partido únicamente de la idea más general de los cuantos. Esto conduce al resultado (que todavía no se encuentra en el trabajo que te he enviado) de que, cuando existe intercambio de energía elemental entre la radiación y la materia, se transfiere el impulso $h\nu/c$ a la molécula. Se deduce que todo el proceso elemental de esta naturaleza es un proceso *enteramente orientado*. Así queda establecida la existencia de los cuantos de luz. (Carta de Einstein a Besso, 6 de septiembre de 1916; Speziali, 1979, p. 50).

En la segunda carta, del año 1918, Einstein le comunica su insatisfacción con el estado de la teoría cuántica de la radiación, en la cual continúa trabajando para completarla, pero que todavía no ha obtenido la aceptación de la mayoría de los miembros de la comunidad de los físicos.

He reflexionado durante un número incalculable de horas sobre la cuestión de los cuantos naturalmente, sin hacer verdaderos progresos. Pero no dudo de la realidad de los cuantos en la radiación, aunque sea siempre el único que tiene esa convicción. Y pasará también mucho tiempo hasta que se haya logrado establecer una teoría matemática (Carta de Einstein a Besso, 29 de julio de 1918; Speziali, 1979, p. 77).

A la luz de la investigación histórica reciente, la afirmación de Einstein de que él es el único que creía en la realidad de los cuantos de luz es exagerada. Sabemos que ya en esa fecha la hipótesis del cuanto de luz tenía el apoyo de varios físicos importantes, como Stark, aunque ciertamente todavía no había alcanzado un consenso mayoritario y contaba con la oposición de Lorentz, de Planck, de Millikan, de Bohr y de muchos otros físicos consagrados (cf. Brush, 2007, p. 232). La carta a Besso es el único lugar que conocemos en el que Einstein afirma que no tiene dudas acerca de la existencia real de los cuantos. No obstante, resulta significativo que nunca se expresara públicamente de esa manera. En todos sus trabajos publicados o intervenciones en congresos

Einstein se muestra mucho más prudente, insistiendo siempre en el carácter provisorio de la teoría cuántica y refiriéndose de manera hipotética y condicional a la composición cuántica de la radiación.

CONCLUSIONES

Es bien conocido el hecho de que Einstein no adjudicaba demasiada importancia a los resultados experimentales en tanto evidencia confirmatoria para las teorías. Valoraba mucho más, en cambio, las virtudes epistémicas de las teorías, en particular, la simplicidad, la fertilidad explicativa y la capacidad unificadora. Esa actitud se encuentra bien reflejada en su moderada reacción ante las observaciones de Eddington de 1919, que los medios de prensa, y también muchos físicos, consideraron una confirmación sensacional de la teoría de la relatividad general (cf. Pais, 1982, p. 303-6; Isaacson, 2007, p. 255-62). Su respuesta al conocer los experimentos de Compton fue en algunos aspectos similar. No consideró que aportaran una prueba indudable de la existencia de los cuantos de luz, esto es, de que la radiación libre estuviera realmente compuesta de cuantos discretos de energía. Al menos públicamente, Einstein nunca afirmó de manera categórica la existencia del cuanto de luz. Se expresó siempre de manera condicional apelando al “como si”. Sus afirmaciones sobre la composición cuántica de la luz son, por lo tanto, compatibles con una concepción ficcionalista, o al menos anti-realista, de la hipótesis del cuanto de luz. Ello no implica, por supuesto, que Einstein tuviera una interpretación anti-realista de las teorías científicas en general. Al contrario, su orientación es predominantemente realista, aunque la naturaleza y el alcance de su realismo ha sido muy discutido (cf. Fine, 1996 [1986]; Howard, 1993). Sin embargo, respecto de la teoría cuántica de la luz, siempre tuvo serias reservas. No podía considerarla como una descripción adecuada del campo electromagnético y, por ello, siempre mantuvo que era una representación útil, pero provisorio de los fenómenos y, en el fondo, una teoría incorrecta que no proporcionaba una aproximación adecuada a la naturaleza de la realidad física. Sus reticencias acerca de la realidad del cuanto de luz pueden entenderse, entonces, como un aspecto más de su posición general ante la física cuántica a la que nunca consideró una teoría completa, es decir, una descripción completa de la realidad.

Desde el punto de vista epistemológico, la posición de Einstein resultaba más prudente que la de Compton, ya que no consideraba que el efecto en cuestión proporcionara una prueba definitiva de la existencia del cuanto de luz. Como ya señalamos, en los experimentos de Compton no se produce la observación de cuantos luminosos. Los resultados experimentales de Compton podrían describirse completamente en

términos ondulatorios expresando los cambios observados en la dirección, frecuencia y longitud de onda de los rayos X incidentes. Ocurre, sin embargo, que tales cambios resultaban anómalos para la teoría ondulatoria, es decir, que no podían ser explicados en el contexto de esa teoría. La hipótesis del cuanto de luz, dotado al igual que el electrón de momento y energía, no es una consecuencia del experimento de Compton, sino un postulado que se emplea para explicar los resultados anómalos. Pero, como cualquier otra hipótesis teórica, no está determinada por ningún experimento. En principio, siempre es posible que los mismos resultados experimentales sean explicados por otras teorías que no postulan la existencia del cuanto de luz.☞

AGRADECIMIENTOS. Los autores agradecen a los referees de *Scientiae Studia* por sus observaciones y comentarios a la primera versión de este trabajo.

Alejandro CASSINI

Profesor de Filosofía de la Ciencia,
Universidad de Buenos Aires.
Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones
Científicas y Técnicas, Argentina
alepafrac@yahoo.com.ar

Leonardo LEVINAS

Profesor de Historia de la Ciencia,
Universidad de Buenos Aires.
Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones
Científicas y Técnicas, Argentina
leo@levinas.com.ar

Hernán PRINGE

Profesor del Instituto de Humanidades,
Universidad Diego Portales, Santiago, Chile.
Instituto de Filosofía, Universidad de Buenos Aires.
Investigador del Consejo Nacional de Investigaciones
Científicas y Técnicas, Argentina.
hpringe@gmail.com

Einstein and Compton's effect

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BROWN, L. M. The Compton effect as one path to QED. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 33, p. 211-49, 2002.
- BRUSH, S. G. How ideas became knowledge: the light-quantum hypothesis 1905-1935. *Historical Studies in the Physical and Biological Sciences*, 37, p. 205-46, 2007.
- CASSIDY, D. C. Einstein and the quantum hypothesis. *Annalen der Physik*, 14, Supplement, p. 15-22, 2005.
- CASSINI, A. & LEVINAS, M. L. La explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico. *Revista Latinoamericana de Filosofía*, 34, p. 5-38, 2008.
- COMPTON, A. H. Secondary radiation produced by x-rays and some of their applications to physical problems. *Bulletin of the National Research Council*, 4, p. 1-56, 1922.
- . A quantum Theory of the scattering of x-rays by light elements. *Physical Review*, 21, p. 483-502, 1923.
- . A general quantum theory of the wave-length of scattered x-rays. *Physical Review*, 24, p. 168-76, 1924a.
- . The scattering of x-rays. *Journal of the Franklin Institute*, 198, p. 57-72, 1924b.
- . Light waves or light bullets? *Scientific American*, 133, p. 246-47, 1925.
- . The corpuscular properties of light. *Physical Review*, 1, p. 74-89, 1929.
- . Letter to Hull, 17th May 1953. In: SHANKLAND, R. S. (Ed.). *Scientific papers of Arthur Holly Compton: x-ray and other studies*. Chicago/London: The University of Chicago Press, 1973 [1953]. P. 757.
- COMPTON, A. H. & HUBBARD, J. C. The recoil of the electron from scattered x-rays. *Physical Review*, 23, p. 439-49, 1924.
- COMPTON, A. H. & SIMON, A. W. Directed quanta from scattered x-rays. *Physical Review*, 26, p. 289-99, 1925.
- DEBYE, P. Zerstreung von Röntgenstrahlen und Quantentheorie". *Physikalische Zeitschrift*, 24, p. 161-6, 1923.
- EINSTEIN, A. Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt. *Annalen der Physik*, 17, p. 132-48, 1905.
- . Zur Theorie der Lichterzeugung und Lichtabsorption. *Annalen der Physik*, 20, p. 199-206, 1906.
- . Zum gegenwärtigen Stand des Strahlungsproblems. *Physikalische Zeitschrift*, 10, p. 185-93, 1909a.
- . Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung. *Physikalische Zeitschrift*, 10, p. 817-25, 1909b.
- . "Diskussion", *Physikalische Zeitschrift*, 10, p. 825-826, 1909c.
- . Sur la théorie des quantités lumineuses et la question de la localisation de l'énergie électromagnétique. *Archives des sciences physiques et naturelles*, 29, p. 525-8, 1910.
- . Thermodynamische Begründung des photochemischen Äquivalentgesetzes. *Annalen der Physik*, 37, p. 832-8, 1912a.
- . Nachtrag zu meiner Arbeit: Thermodynamische Begründung des photochemischen Äquivalentgesetzes. *Annalen der Physik*, 38, p. 881-4, 1912b.
- . Déduction thermodynamique de la loi de l'équivalence photochimique. *Journal de physique*, 3, p. 277-82, 1913.
- . Zur Quantentheorie der Strahlung. *Mitteilungen der Physikalische Gesellschaft Zürich* 16, p. 47-62, 1916. (Reimpreso en *Physikalische Zeitschrift* 18: 121-128, 1917).
- . Induktion und Deduktion in der Physik. *Berliner Tageblatt*. 25 de diciembre, I. Beiblatt, 1919.
- . Das Komptonsche Experiment. *Berliner Tageblatt*. 20 de abril, I. Beiblatt, 1924.

- EINSTEIN, A. Compton's experiment. Is science an end in itself? Tradução L. B. Pinto. In: SHANKLAND, R. S. (Ed.). *Scientific papers of Arthur Holly Compton: x-ray and other studies*. Chicago/London: The University of Chicago Press, 1973 [1924]. p. 759-61.
- _____. Indução e dedução na física. Tradução W. A. Bezerra. *Scientiae Studia*, 3, 4, p. 663-4, 2005 [1919].
- _____. Das Komptonsche Experiment. Ist die Wissenschaft um ihrer selbst willen da? El experimento de Compton ¿Es la ciencia un fin en sí mismo? *Scientiae Studia*, 11, 1, p. 211-9, 2013 [1924].
- FINE, A. *The shaky game: Einstein, realism, and the quantum theory*. 2. ed. Chicago: The University of Chicago Press, 1996 [1986].
- HENTSCHELL, K. *Interpretationen und Fehlinterpretationen der speziellen und der allgemeinen Relativitätstheorie durch Zeitgenossen Albert Einsteins*. Basel/Boston/Berlin: Birkhäuser Verlag, 1990.
- HOWARD, D. Was Einstein really a realist? *Perspectives on Science*, 1, p. 204-51, 1993.
- ISAACSON, W. *Einstein: his life and universe*. New York: Simon & Schuster, 2007.
- PAIS, A. "Subtle Is The Lord...". *The science and the life of Albert Einstein*. Oxford: Clarendon Press, 1982.
- _____. *Inward bound: of matter and forces in the physical world*. New York: Oxford University Press, 1988.
- SCHRÖDINGER, E. Über den Comptoneffekt. *Annalen der Physik*, 27, p. 257-64, 1927.
- SHANKLAND, R. S. (Ed.). *Scientific papers of Arthur Holly Compton: x-ray and other studies*. Chicago/London: The University of Chicago Press, 1973.
- SPEZIALI, P. (Ed.). *Correspondence Einstein avec Michele Besso (1903-1955)*. Paris: Hermann, 1979.
- STACHEL, J. *Einstein from B to Z*. Boston: Birkhäuser, 2002.
- STACHEL, J., et al. (Ed.). *The collected papers of Albert Einstein*. Princeton: Princeton University Press. 1987-2009. 12v.
- STARK, J. Zur experimentellen Entscheidung zwischen Ätherwellen und Lichtquantenhypothese. I. Röntgenstrahlung. *Physikalische Zeitschrift*, 10, p. 902-13, 1909.
- STUEWER, R. H. *The Compton effect: turning point in physics*. New York: Science Publications, 1975.
- _____. The Compton effect: transition to quantum mechanics. *Annalen der Physik*, 9, p. 975-89, 2000.
- _____. Einstein's revolutionary light-quantum hypothesis. *Acta Physica Polonica B*, 37, p. 543-58, 2006.
- VAIHINGER, H. *Die Philosophie des Als Ob*, Reuther & Reichard. Leipzig: Felix Meiner, 1927 [1911].
- VEGUILLAS, L. N. *Einstein profeta y hereje*. 2. Ed. Madrid: Tusquets, 2009 [1990].

