



Einstein y la evidencia experimental a favor de la hipótesis del cuanto de luz

Alejandro CASSINI

Leonardo LEVINAS

Hernán PRINGE



RESUMEN

En la primera parte de este artículo, respondemos a los comentarios críticos de Michel Paty sobre nuestro trabajo “Einstein y el efecto Compton”. Si bien nuestra intención no fue evaluar la respuesta de Einstein a la evidencia experimental de la hipótesis cuántica de la luz más allá del año 1923, en la segunda parte del artículo evaluamos dos importantes experimentos completados en 1924: los realizados por Bothe y Geiger en Alemania y los de Compton y Simon en los Estados Unidos. Discutimos por qué ambos experimentos proporcionaron pruebas adicionales que respaldaron los puntos de vista de Einstein sobre la teoría cuántica de la radiación. Sin embargo, afirmamos que aun después de conocer estos resultados, Einstein nunca expresó un juicio categórico sobre la realidad de los cuantos de luz tal como el que formuló De Broglie a principios de 1923, con el que comparamos el punto de vista de Einstein.

PALABRAS-CLAVE • Efecto Compton. Cuanto de luz. Einstein. De Broglie. Paty.

INTRODUCCIÓN

En su detallado comentario a nuestro artículo “Einstein y el efecto Compton” (cf. Cassini, Levinas & Pringe, 2013), Michel Paty (2013) ha formulado varias críticas y objeciones a nuestro tratamiento del desarrollo histórico del concepto de cuanto de luz en la obra de Einstein.¹ El artículo de Paty no se limita a un mero comentario crítico, sino que aporta, además, diversos elementos de juicio acerca del pensamiento de Einstein sobre este tema, en particular, aquellos que proceden de los años 1924 y 1925, que nosotros no tuvimos en cuenta en nuestro trabajo. Agradecemos sinceramente estos aportes y, como señalaremos enseguida, creemos que efectivamente proporcionan valiosa información complementaria a la de nuestro artículo y que deberían ser tenidos en cuenta para una evaluación global de las ideas de Einstein sobre la teoría cuántica de la radiación, aunque ese no era el objetivo de nuestro trabajo.

¹ De aquí en adelante nos referiremos a nuestro artículo como CLP y al de Paty como MP.

En este artículo quisiéramos responder a algunas de las principales críticas de Paty, para luego mencionar otros elementos de juicio que consideramos relevantes para una apreciación ponderada del problema de la realidad de los cuantos de luz en el momento en que Einstein escribió el artículo sobre el efecto Compton (cf. Einstein, 1924a; 2013 [1924.]), cuya edición y traducción presentamos en nuestro trabajo, y en el curso del año siguiente, cuando se descubrieron nuevas evidencias experimentales.

Las críticas que formula Michel Paty pueden reducirse a tres principales.

(a) El surgimiento y desarrollo de la teoría de los cuantos de luz está estrechamente relacionado con el problema de las propiedades atómicas de la materia, del cual no puede ser separado. Einstein elaboró sus ideas no solamente teniendo en cuenta el problema de la interacción entre la materia y la radiación, sino también mediante una analogía entre la composición atómica de la materia, por ejemplo, de un gas, y la de la radiación. En CLP no se tiene en cuenta este contexto más amplio y, como consecuencia de este recorte temático, se presenta solamente una versión parcial e incompleta de la evolución del pensamiento de Einstein sobre el cuanto de luz. El resultado es un relato inadecuado y distorsionado de ese proceso histórico, al cual se le ha amputado una parte importante de la información (MP, p. 221, 226).

(b) El relato histórico que se presenta en CLP se interrumpe de manera arbitraria e injustificada en abril de 1924, cuando Einstein publicó su único trabajo sobre el efecto Compton. Sin embargo, es necesario tomar en cuenta los trabajos publicados por Einstein luego de esa fecha, principalmente entre 1924 y 1925, para poder evaluar correctamente su posición sobre la existencia de los cuantos de luz. El experimento de Bothe y Geiger (cf. 1924; 1925a; 1925b) proporcionó una evidencia adicional acerca de la existencia de cuantos de luz dotados de momento lineal, evidencia tanto o más importante que la ofrecida por el experimento de Compton de 1923. También los trabajos de Einstein y Bose publicados entre 1924 y 1925 deben considerarse como un apoyo teórico adicional a la teoría del cuanto de luz y a la hipótesis de la dualidad onda-partícula de la radiación, y, más en general, de toda la materia (cf. MP, p. 221, 226, 235-9).

(c) El artículo CLP emplea en varias ocasiones algunas expresiones que son anacrónicas desde el punto de vista histórico, ya que hace uso de conceptos de la física cuántica que todavía no estaban disponibles en 1924, entre otros, los de “completitud” de la teoría cuántica de la radiación y los de “creación” y “aniquilación” de los cuantos de luz. También utiliza conceptos filosóficos actuales, como los de “ficcionalismo” y “anti-realismo”, que, además de ser anacrónicos, sobreinterpretan el pensamiento de Einstein y, como consecuencia de ello, ofrecen una formulación distorsionada de sus ideas. Por último, en el artículo se describen de manera incorrecta los trabajos de Einstein anteriores a 1909, donde éste no emplea los términos “absorción” y “emisión” de “cuantos de luz” (cf. MP, p. 227-9).

Nuestra respuesta a Michel Paty tiene dos partes bien diferenciadas. En la primera, replicaremos de manera concisa a las críticas de Paty, concentrándonos con más detalle en la tercera. En la segunda parte, intentaremos aportar algunos otros elementos de juicio que Paty no menciona pero que consideramos relevantes para el tema, comparando, muy brevemente, las posiciones de Einstein y De Broglie sobre la realidad de los cuantos de luz y sus respectivas reacciones ante el descubrimiento del efecto Compton. También revisaremos brevemente las nuevas evidencias a favor de la teoría del cuanto de luz que se descubrieron a comienzos de 1925, así como la reacción de Einstein frente a esos resultados experimentales, no sólo los experimentos de Bothe y Geiger (1924; 1925a; 1925b), sino también los de Compton y Simon (1925a; 1925b; 1925c), que se conocieron durante el año 1925, de manera más o menos simultánea.

I LA HIPÓTESIS DEL CUANTO DE LUZ DE EINSTEIN

Comencemos por responder a la primera crítica de Michel Paty. En nuestra opinión el problema fundamental que Einstein quería resolver en 1905, cuando propuso la hipótesis del cuanto de luz, era el de la interacción entre la radiación electromagnética y la materia. Según el punto de vista de Einstein, había varios fenómenos que no podían explicarse de manera satisfactoria mediante la teoría ondulatoria de Maxwell, como el efecto fotoeléctrico, la fotoluminiscencia y otros sobre los cuales se conocían regularidades empíricas que estaban experimentalmente bien establecidas. La hipótesis del cuanto de luz estaba teóricamente justificada en ese momento sólo en cuanto permitía explicar esos fenómenos mejor que la teoría ondulatoria. Para ello, Einstein le atribuyó a los cuantos de radiación las propiedades físicas indispensables para la explicación de cada fenómeno. Ese fue el hilo conductor principal de nuestra presentación en CLP.

El aspecto más revolucionario de la hipótesis de Einstein consiste en que atribuyó un carácter granular a la radiación electromagnética libre, cuando ésta se propaga en el espacio vacío de materia, y no sólo cuando interacciona con los electrones de los átomos (como pensaban Planck, von Laue y la mayoría de los físicos alemanes inmediatamente después de 1905). Es indudable que Einstein, ya desde antes de 1905, basó la mayor parte de sus reflexiones acerca del carácter discreto de la radiación electromagnética en una analogía entre el comportamiento termodinámico de los átomos de un gas ideal y el de la radiación libre. En el artículo de 1905, Einstein partió de un análisis de la entropía de la radiación del cuerpo negro y calculó su expresión en el dominio de aplicación de la ley de Wien (esto es, en la radiación de alta frecuencia). A partir de la expresión correspondiente dedujo la probabilidad W de que la totalidad de la radiación se encontrara en un determinado subvolumen v del volumen V de una

cavidad determinada. Luego, mostró que esta expresión tenía la misma forma que la de la probabilidad w de que todas las moléculas de un gas ideal, si son estadísticamente independientes entre sí, se encuentren en un subvolumen v del volumen total V . De allí concluyó, por analogía, que los cuantos de la radiación eran independientes como las moléculas del gas, o, según su propia expresión, que la radiación “se comportaba como si estuviera constituida por cuantos de energía independientes entre sí” (Einstein, 1905, p. 143).² Este hecho es bien conocido y ha sido analizado con detalle en varios trabajos especializados (cf. Dorling, 1971; Pais, 1982, cap. 19; Stachel, 2000; Norton, 2006). Por esa razón, no insistimos sobre él en nuestro trabajo, aunque probablemente deberíamos haberlo señalado. Ese razonamiento analógico, sin duda, fue decisivo para Einstein a la hora de postular el carácter discreto de la distribución de la energía de la luz y de toda la radiación electromagnética. Michel Paty (cf. MP, p. 226) está en lo cierto al señalar que ese es el contexto más amplio del conjunto de los fenómenos cuánticos que debe tenerse en cuenta para comprender de manera cabal lo que podríamos llamar, usando una expresión tradicional de la filosofía de la ciencia, el contexto de descubrimiento de la teoría del cuanto de luz.

Consideremos ahora la segunda crítica. El objetivo principal de nuestro trabajo en CLP fue presentar el artículo de Einstein sobre el efecto Compton publicado el 20 de abril de 1924. Por esa razón, nuestro relato del desarrollo histórico de las ideas de Einstein sobre el cuanto de luz se detiene en ese momento y no toma en cuenta sus trabajos posteriores. No creemos que esta haya sido una decisión arbitraria ni injustificada, considerando los objetivos limitados de nuestro artículo. No intentamos trazar un panorama completo del pensamiento de Einstein sobre la teoría cuántica de la radiación, tema sumamente amplio que excede los límites de un artículo. El propio Michel Paty ha dedicado un libro completo a la cuestión (cf. Paty, en prensa). Tampoco afirmamos ni sugerimos allí que las ideas expresadas por Einstein en ese artículo representen su última palabra o su posición definitiva sobre la realidad de los cuantos de luz. Es obvio, como señala Paty (MP, p. 225), que el pensamiento de Einstein no se detuvo en ese punto y que, en buena medida, podríamos agregar, siguió en movimiento hasta el final de su vida. No nos parece, sin embargo, que hayamos distorsionado severamente el pensamiento de Einstein por el solo hecho de finalizar nuestro relato en abril de 1924, dado que nuestro objetivo era considerar la reacción de Einstein frente al descubrimiento del efecto Compton.

En nuestro relato intentamos llamar la atención sobre el hecho de que Einstein a comienzos de 1924 todavía no había renunciado al modo condicional de referirse a los

² *Monochromatische Strahlung (...) verhält sich in wärmetheoretischer Beziehung so, wie wenn aus voneinander unabhängigen Energiequanten (...) bestünde.*

cuantos de luz y, en tal sentido, puede decirse que todavía no había abandonado el punto de vista heurístico con el cual introdujo el cuanto de energía en 1905. Otros físicos, incluso antes de esa fecha, tuvieron menos reservas y afirmaron abiertamente que la evidencia proporcionada por el experimento de Compton era suficiente para aceptar la realidad de los cuantos de luz.³

Los trabajos de Bose (1924a; 1924b) y Einstein (1924a; 2013 [1924]; 1924b; 1925a; 1925b) sobre la estadística de los cuantos de luz (más tarde extendida a todas las partículas de *spin* entero, que serían llamadas *bosones*) sin duda dieron apoyo teórico a la hipótesis de la constitución cuántica de la radiación, como señala Paty (MP, p. 237-8). No obstante, estos desarrollos teóricos, de hecho, no proporcionan una nueva evidencia empírica y, por consiguiente, sólo pueden considerarse como un apoyo indirecto para la hipótesis del cuanto de luz. En nuestro trabajo, de manera deliberada, sólo tuvimos en cuenta la evidencia experimental proporcionada por el descubrimiento del efecto Compton y la reacción de Einstein ante éste.⁴

Respondamos ahora a la tercera crítica, en la cual nos detendremos con mayor detalle. Paty afirma que en CLP proponemos varias formulaciones pedagógicas de las ideas de Einstein, formulaciones que tienen un carácter retrospectivo, ya que apelan a conceptos de la teoría cuántica que sólo estuvieron disponibles después de 1927 o incluso en la década de 1930. El resultado de ese uso es una distorsión del proceso histórico que se relata en nuestro artículo (cf. MP, p. 227). No creemos que sea así, en la mayoría de los casos al menos, tal como lo señalamos a continuación.

Ante todo, Paty objeta el uso de la expresión “cuantos de luz” para referirse a la cuantificación de la energía de la radiación que Einstein realizó en 1905 y en los trabajos que le siguieron inmediatamente. Señala que es literalmente inadecuada porque en ellos Einstein empleó otras expresiones como “cuantos de energía de radiación” o “cuantos de energía de luz”, y afirma que usó la expresión “cuantos de luz” no antes de 1909 (MP, p. 228). Sin embargo, Paty se equivoca en este punto. En el artículo original de 1905, Einstein se refirió en dos ocasiones a los cuantos, en un mismo párrafo, primero como “cuantos de energía” (*Energiequanten*) e inmediatamente después como “cuantos de luz” (*Lichtquanten*) (cf. Einstein, 1905, p. 144-5). La primera expresión se usa en dicho artículo en 18 ocasiones, mientras que la segunda se emplea en 6 ocasiones. Por su parte, la expresión “cuanto de energía de luz” (*Lichtenergiequant*) sólo aparece 3 veces.⁵ En su artículo de 1906, el segundo publicado sobre el cuanto de luz,

3 Sobre este punto volveremos al comienzo de la sección siguiente, donde comparamos la posición de Einstein con la de De Broglie.

4 En la sección 2 de este artículo también consideraremos la evidencia empírica proporcionada por otros experimentos inmediatamente posteriores al de Compton.

5 La cuenta está realizada sobre la base de las apariciones en singular y plural de cada término.

Einstein afirmó explícitamente, refiriéndose a Planck, que éste había hecho un uso implícito de la “hipótesis de los cuantos de luz” (Einstein, 1906, p. 199),⁶ y luego tituló el párrafo inmediatamente siguiente “la teoría de la radiación de Planck y los cuantos de luz”⁷ (Einstein, 1906, p. 200). Hacia el final del trabajo, la expresión se usa tanto en singular (*Lichtquant*) como en plural (*Lichtquanten*) (cf. Einstein, 1906, p. 205). En cambio, la expresión más repetida en el artículo de 1905, “cuantos de energía” (*Energiequanten*), no se emplea nunca en este trabajo. Así pues, resulta claro que el término “cuantos de luz” ya se introdujo en el primer artículo publicado por Einstein sobre la cuantificación de la energía radiante en marzo de 1905 y su empleo quedó establecido a partir de su segundo artículo sobre el tema, publicado exactamente un año después, en marzo de 1906.

En nuestro artículo, señalamos de manera clara y enfática que el cuanto de energía postulado en 1905, y sólo de manera heurística, no fue concebido por Einstein como un corpúsculo material (CLP, p. 187). Por consiguiente, creemos que está bastante claro que Einstein no adoptó en 1905 un modelo corpuscular de la luz y que su hipótesis del cuanto de energía no podía considerarse como un retorno a una teoría de la emisión de carácter newtoniano. Señalamos también que Einstein no atribuyó a los cuantos momento lineal y sugerimos que la razón de ello es que esa propiedad no era necesaria para explicar el efecto fotoeléctrico y otros fenómenos que se propuso explicar en el artículo de 1905. También indicamos que sólo en su artículo de 1909 Einstein afirmó por primera vez que los cuantos de luz parecían estar dotados de momento lineal, pero que no formuló allí la ecuación del momento de un cuanto (cf. CLP, p. 190). Más adelante, llamamos la atención sobre el hecho de que la fórmula para el momento de los cuantos de luz, $p = hn/c$, que Einstein publicó recién en 1916, ya había sido formulada por Stark en 1909, luego de que éste asistiera a la conferencia de Einstein en el congreso de Salzburgo de ese mismo año (cf. CLP, p. 193). Paty nos objeta el hecho de no distinguir la posición de Stark, que habría adherido a una teoría de la emisión, de la de Einstein, que, por supuesto, no lo hizo (cf. MP, p. 227). Pero en ningún momento sugerimos que las ideas de Einstein y de Stark sobre el cuanto de luz fueran idénticas; simplemente, afirmamos que Stark fue el primero en escribir esa fórmula, lo cual es un hecho, y en advertir las implicaciones que la cuantificación del momento tenía en el modo corpuscular de concebir a la radiación. Es evidente que Einstein no podía adherir a una teoría emisionista de la luz porque cualquier teoría de este tipo era incompatible con su propia teoría de la relatividad (cf. Cassini & Levinas, 2007). No obstante, no dejó de señalar, como indicamos en CLP, que “la luz posee ciertas propiedades

⁶ *Die Plancksche Theorie implizite von der eben erwähnten Lichtquantenhypothese Gebrauch macht.*

⁷ *Die Plancksche Theorie der Strahlung und die Lichtquanten.*

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” (Einstein, 1909b, p. 817). Por otra parte, podemos agregar ahora, no había en ese momento una evidencia empírica clara contra las teorías de la emisión, como la de Ritz (1908), que todavía podía considerarse como una electrodinámica de los cuerpos en movimiento que proporcionaba una alternativa viable a la relatividad especial. La primera evidencia contra las teorías de la emisión la descubrió De Sitter (1913a; 1913b; 1913c) a partir de observaciones astronómicas, pero sólo en la década de 1960 se realizó una evaluación completa de dicha evidencia (cf. Martínez, 2004).

En nuestro artículo, afirmamos que en la interacción entre la radiación y la materia los cuantos de luz no son dispersados, como si se tratara de un choque elástico entre partículas, sino que son enteramente absorbidos o emitidos por los electrones (cf. CLP, p. 195). Al explicitar esa idea, dijimos allí que los cuantos eran “completamente creados o aniquilados, como Einstein ya había indicado en su explicación del efecto fotoeléctrico”. Paty señala, con razón, que estos términos son anacrónicos, ya que sólo se introdujeron en los comienzos de la teoría cuántica de campos, hacia 1930 (cf. Dirac, 1930a; 1930b).⁸ No obstante, no pretendimos atribuir al propio Einstein los conceptos de creación y aniquilación, sino solamente llamar la atención acerca de la manera en que los procesos de absorción y emisión de cuantos de luz debían entenderse. La frase tiene ambigüedad, porque puede interpretarse como si afirmara que Einstein los llamó de esa manera. Habría sido mejor señalar que se trataba de una comparación y no de una atribución de uso literal, debido al significado técnico que estos términos habrían de adquirir más tarde. No obstante, es cierto que Einstein ya se refería en 1905 a los procesos de absorción de luz indicando que cada cuanto transfiere toda su energía a un único electrón (cf. Einstein, 1905, p. 145) y, como consecuencia de ello, deja de existir. En un sentido estricto, creemos, este es un proceso de aniquilación, aunque Einstein no lo caracterizara en esos términos. En ese mismo pasaje, Einstein admite la posibilidad de que un electrón absorba solamente una parte de la energía del cuanto de luz. La explicación subsiguiente del efecto fotoeléctrico supone, sin embargo, que la interacción entre electrones y cuantos es de uno a uno, y que cada electrón absorbe toda la energía del cuanto de luz (cf. Cassini & Levinas, 2008).

Paty señala que la terminología de Einstein acerca de la interacción de la radiación y la materia cambió en diferentes ocasiones. Según Paty, Einstein, al igual que sus contemporáneos, hablaba de “producción y transformación de la luz” (en 1905), de

⁸ En ese momento, el término “positrón” todavía no estaba en uso, por lo que Dirac llama “protón” al electrón con carga positiva, confundiéndolo con los protones masivos presentes en el núcleo atómico. Hasta fines de la década de 1930 no se abandonó la idea de que había electrones en el núcleo atómico, la cual causaba todo tipo de problemas en la física de partículas, como ocurrió en el caso del neutrino (cf. Cassini, 2012).

“producción y absorción” (en 1906), y de “absorción y emisión” (en 1916-1917) (cf. MP, p. 228). Sin embargo, queremos señalar que, ya en el artículo de 1905, Einstein también había utilizado otros términos para referirse a la interacción de los cuantos de luz con la materia. Los términos “producción” (*Erzeugung*) y “transformación” (*Verwandlung*) que aparecen en el título del artículo no se aplican a los cuantos individuales, sino a la luz misma. La producción es la emisión de luz por parte de una fuente luminosa, mientras que la transformación es la conversión de la luz monocromática en luz de otra frecuencia diferente (cf. Einstein, 1905, p. 144). Para referirse a los cuantos, en cambio, Einstein empleó el término “absorción” (*Absorption*), mientras que usó el término “generación” (*Entstehung*) para el proceso inverso al primero. Einstein afirma, entonces, que

cada cuanto de energía productor de frecuencia ν_1 es absorbido y (...) por sí mismo da lugar a la generación de un cuanto de luz de frecuencia ν_2 ; posiblemente la absorción del cuanto de luz productor también podría estar acompañada por la generación simultánea de cuantos de luz de frecuencias ν_3, ν_4 , etc., tanto como por la de energía de algún otro tipo (por ejemplo, calor) (Einstein, 1905, p. 144).⁹

Por su parte, en el artículo de 1906, Einstein se refirió al proceso de “producción de la luz y absorción de la luz” (*Lichterzeugung un Lichtabsorption*) en el título del trabajo, pero caracterizó a la interacción de los cuantos de luz en términos de “emisión y absorción”, diciendo que “la luz de frecuencia ν sólo puede ser absorbida (*absorbiert*) o emitida (*emittiert*) en cuantos de energía $h\nu$ ” (Einstein, 1906, p. 199). Así pues, si bien la terminología de Einstein acerca de los cuantos de luz no estuvo completamente establecida de manera uniforme hasta 1916, resulta evidente a partir de los pasajes citados que los términos “cuantos de luz”, “hipótesis de los cuantos de luz”, y “emisión” y “absorción” de cuantos de luz ya habían sido introducidos, todos ellos, en una fecha tan temprana como marzo de 1906. Es cierto, no obstante, que Einstein nunca empleó los términos “creación” o “aniquilación” para referirse a los procesos de interacción entre cuantos de luz y electrones.

En la conclusión de nuestro trabajo señalamos el hecho, para nosotros significativo, de que Einstein empleara en 1924 las mismas expresiones condicionales que había usado en 1905 y 1909 para referirse a la composición cuántica de la luz. De acuerdo con ello, Einstein no se expresa diciendo que la luz se compone de cuantos de energía discretos, ni mucho menos de corpúsculos, sino sólo que “se comporta como si” estuviera constituida por tales cuantos. Ese modo condicional de expresarse es caracterís-

⁹Adviértase que, si bien Einstein no emplea el término emisión, la palabra alemana *Entstehung* tiene este sentido (e incluso el de “creación”).

tico de la filosofía ficcionalista de Hans Vaihinger, que estaba en pleno apogeo en la Alemania de la década de 1920. Nos preguntamos, entonces, si ese modo de expresión podría tomarse como un indicio de una actitud “ficcionalista o al menos anti-realista” de Einstein respecto de la existencia del cuanto de luz (cf. CLP, p. 206). Paty considera que esos conceptos “tomados de una literatura reciente” proporcionan un “sobreinterpretación” de las ideas de Einstein que no parece “necesaria o incluso oportuna” (MP, p. 229). No obstante, no lo consideramos de esa manera. En primer lugar, el concepto de ficcionalismo no es anacrónico, sino contemporáneo de Einstein, que sin dudas lo conoció, ya que mantuvo correspondencia con Vaihinger durante los años 1920. En nuestro trabajo señalamos claramente que no sugeríamos que Einstein adhiriera al ficcionalismo de Vaihinger (cf. CLP, p. 206) ni tampoco que empleara el término correspondiente, sino solamente que su modo de expresarse era “compatible” con una concepción ficcionalista, ya que no se expresaba de una manera francamente realista sobre la existencia de los cuantos de luz (cf. CLP, p. 206). Creemos que esta afirmación describe correctamente la actitud de Einstein, al menos hasta la publicación de su artículo sobre el efecto Compton en abril de 1924. El término “anti-realista”, por su parte, no se lo atribuimos al propio Einstein, sino que lo empleamos en el contexto de una evaluación epistemológica de su posición frente a la hipótesis del cuanto de luz, en el marco de una discusión de la posición de filósofos de la ciencia contemporáneos, como Arthur Fine y Don Howard, que analizaron el “realismo” de Einstein. Ese tipo de análisis epistemológico no nos parece un anacronismo y, por el contrario, nos resulta pertinente desde un punto de vista filosófico, que en ningún momento confundimos con el relato histórico de los hechos.

En diversos lugares de nuestro trabajo nos referimos a la insatisfacción de Einstein en relación con el carácter “incompleto” de la teoría del cuanto de luz. Paty objeta que se trata de otra expresión anacrónica, ya que Einstein no hablará acerca de la incompletitud de la teoría cuántica antes de 1927, cuando esa teoría pudo formularse de manera suficientemente satisfactoria como para poder reclamar el título de teoría (cf. MP, p. 229). Esto es indudablemente cierto, si el término “incompletitud” se entiende en el sentido técnico que adquirió, tanto en los escritos de Einstein como de otros físicos, a partir de esa fecha. De acuerdo con quienes sostienen que la teoría cuántica es completa, la función de onda o vector de estado asociado a un sistema físico expresa toda la información que es posible obtener acerca de ese sistema (posible por principio y no por limitaciones prácticas). Incluso, el término no se aplicó originalmente a la teoría cuántica de la luz, que todavía no existía como tal, es decir, no se había terminado de formular, sino a la teoría cuántica de las partículas materiales, más precisamente, a la correspondiente al átomo de hidrógeno, para el cual se había resuelto la ecuación Schrödinger. Pero no es ese el sentido con el que en nuestro trabajo pre-

tendimos emplear los términos “completa” o “incompleta” en relación con la teoría del cuanto de luz. Quisimos señalar, simplemente, el hecho de que esta teoría, todavía provisoria y en proceso de construcción, era incapaz de explicar ciertos fenómenos bien conocidos, como la interferencia y la difracción, que se podían explicar mucho mejor desde el punto de vista de la teoría ondulatoria de Maxwell y Lorentz. Posiblemente, en vista de las confusiones que podrían crearse, habría sido mejor hacerlo explícito o incluso emplear otro término. Dicho esto, creemos que el punto queda completamente aclarado y que no hay aquí anacronismo alguno. No obstante, en las conclusiones de nuestro trabajo cuando indicamos que “sus reticencias [de Einstein] 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.” (CLP, p. 206), no nos referimos al estado de la teoría del cuanto de luz en 1924, sino en perspectiva, haciendo referencia a la posición que tomó Einstein, sobre todo a partir de 1927, al considerar que la mecánica cuántica no era una teoría completa.

2 LA EVIDENCIA EXPERIMENTAL DESPUÉS DEL EFECTO COMPTON

En un artículo escrito en octubre de 1923, Louis De Broglie hacía una evaluación bastante diferente de la de Einstein acerca de la existencia del cuanto de luz. Vale la pena citar *in extenso* un pasaje inicial.

La evidencia experimental acumulada en años recientes parece ser bastante concluyente a favor de la realidad efectiva de los cuantos de luz. El efecto fotoeléctrico, que es el principal mecanismo de intercambio de energía entre la radiación y la materia, parece con creciente probabilidad estar gobernado siempre por la ley de Einstein del efecto fotoeléctrico. Los experimentos sobre las acciones fotográficas, los resultados recientes de A. H. Compton sobre el cambio en la longitud de onda de los rayos X dispersados, serían muy difíciles de explicar sin usar la noción de cuanto de luz. Desde el lado teórico la teoría de Bohr, que está apoyada por tantas pruebas experimentales, está fundada en el postulado de que los átomos sólo pueden emitir o absorber energía radiante de frecuencia ν en cantidades iguales a $h\nu$, y la teoría de Einstein de las fluctuaciones de energía en la radiación negra nos conduce necesariamente a las mismas ideas.

En este artículo, asumiré la existencia real de los cuantos de luz, y trataré de ver cómo sería posible reconciliar con ella la fuerte evidencia experimental sobre la cual estaba basada la teoría ondulatoria (De Broglie, 1924, p. 446).

La diferencia en el tono de estas afirmaciones categóricas contrasta con la prudencia de las expresiones de Einstein, escritas seis meses después. Para De Broglie, la evidencia experimental conocida luego de los resultados de Compton era claramente suficiente como para declarar la realidad de los cuantos de luz. De Broglie finalizaba su artículo con las siguientes palabras:

Muchas de estas ideas pueden ser criticadas y quizá reformadas, pero parece que ahora no debería quedar ninguna duda acerca de la realidad de los cuantos de luz. Además, si nuestras opiniones son recibidas, puesto que están fundadas en la relatividad del tiempo, toda la enorme evidencia experimental sobre el “cuanto”, se volverá a favor de las concepciones de Einstein (De Broglie, 1924, p. 457).

Para De Broglie, entonces, la evidencia experimental a favor de la existencia de los cuantos de luz era tan grande que podría resistir cualquier cambio de teoría acerca del comportamiento y las propiedades de los cuantos. Nos parece evidente que Einstein no tenía en esa época una actitud tan abiertamente realista acerca de la existencia de los cuantos de luz como la que expresa De Broglie, que ya había empleado la hipótesis de los cuantos de luz en 1922, antes del descubrimiento de Compton (cf. De Broglie, 1922). Parece evidente que tomó esa hipótesis de los propios escritos de Einstein, como luego declaró explícitamente en muchas ocasiones. Según sus palabras, se propuso “extender a toda las partículas la coexistencia de ondas y partículas descubierta por Einstein en el caso de la luz” (De Broglie, 1973, p. 35; cf. 1953; 1956; 1966).

Michel Paty señala, con razón, que después de la publicación de los resultados de Compton se obtuvieron nuevas evidencias acerca de la realidad de los cuantos. Afirma que los experimentos de Bothe y Geiger tuvieron para Einstein un valor confirmatorio mayor que los de Compton respecto de la teoría del cuanto de luz (cf. MP, p. 235-7). Invoca al respecto una muy breve conferencia pronunciada por Einstein en Río de Janeiro el 7 de mayo de 1925, en la cual Einstein se refirió explícitamente a la realidad de los cuantos de luz.¹⁰ En CLP, no mencionamos este resultado experimental, que se publicó recién el 12 de junio de 1925 (cf. Bothe & Geiger, 1925a; 1925b). El experimento se proponía contrastar la teoría de Bohr, Kramers y Slater publicada en 1924. De una manera muy sintética, la situación era la siguiente. Los resultados de Compton no probaban que en la dispersión de los rayos X por la materia el momento y la energía se conservaran estrictamente en todos los procesos individuales de interacción entre un

¹⁰ Einstein pronunció su conferencia en francés, la cual fue publicada en 1926 en una traducción portuguesa (Einstein, 1926). Una nueva traducción portuguesa fue publicada por Tolmasquim y Moreira (1996), pero recién en 2002 se editó el texto del manuscrito original en alemán (cf. Tolmasquim & Moreira, 2002). Cuando escribimos el artículo CLP no teníamos conocimiento de ese trabajo de Einstein, cuya referencia agradecemos a Michel Paty.

cuanto de luz y un electrón. El experimento de Compton era todavía compatible con la hipótesis de una conservación estadística del momento y la energía en un gran número de interacciones. Bohr, Kramers y Slater (1924) construyeron una teoría que hacía uso de esa hipótesis para explicar el efecto Compton sin emplear la hipótesis del cuanto de luz. En esa teoría, conocida como BKS, la radiación es continua, como en la teoría electromagnética clásica, pero se comporta como si estuviera constituida por partículas cuando interacciona con los electrones de los átomos. Para explicar ese comportamiento, la teoría BKS postuló que el momento y la energía sólo se conservan estadísticamente, pero no necesariamente en cada proceso individual de emisión o absorción de radiación por parte de cada átomo. En el caso del efecto Compton, la teoría BKS afirmaba que

en contraste con esa imagen [la de Compton], la dispersión de la radiación por los electrones es considerada, desde nuestro punto de vista, como un fenómeno continuo al cual cada uno de los electrones iluminados contribuye mediante la emisión de ondículas secundarias coherentes. De ese modo, la radiación virtual incidente da lugar a una reacción de cada electrón, similar a la que sería de esperar en la teoría clásica de un electrón moviéndose con una velocidad coincidente con la de la antes mencionada fuente imaginaria y realizando oscilaciones forzadas bajo la influencia del campo de radiación (Bohr; Kramers & Slater, 1924, p. 799).

En la teoría BKS el cambio en la frecuencia de la radiación dispersada se explica como una suerte de efecto Doppler ya que los osciladores virtuales asociados a cada electrón dispersan la radiación como si estuvieran en movimiento en la misma dirección que la radiación incidente. Sin embargo, esta teoría no proporciona una predicción cuantitativa acerca del cambio de la frecuencia de la radiación dispersada, ni tampoco acerca de la energía, el momento y la dirección de los electrones en retroceso. Compton (cf. 1928, p. 171) señala esa diferencia entre las dos teorías y la considera como una virtud teórica favorable a la teoría del cuanto de luz, con independencia de que la teoría BKS pudiera acomodarse a los resultados experimentales.

La teoría BKS suscitó la oposición de muchos físicos alemanes, entre ellos, del propio Einstein.¹¹ El experimento de Bothe y Geiger se propuso contrastar la teoría BKS a partir de una predicción crucial respecto de las leyes de conservación. Si la con-

¹¹ Einstein expresó sus críticas en una conversación con Pauli y en una carta a Ehrenfest del 31 de mayo de 1924. Entre quienes apoyaron la teoría BKS estuvo Schrödinger, que expresó su acuerdo en una carta a Bohr del 24 de mayo de 1924. Sobre las diferentes reacciones, positivas y negativas, a la teoría BKS véase Stuewer (1975, p. 294-9, 336-7, notas).

servación del momento y de la energía se cumplieran en todo proceso individual de dispersión de los rayos X por parte de un electrón, entonces, debería haber una correlación claramente medible entre la radiación dispersada y los electrones expulsados de los átomos. Un electrón en retroceso y un cuanto de luz dispersado tendrían que emitirse simultáneamente en cada proceso individual de dispersión del tipo de Compton, aunque en direcciones diferentes, de acuerdo con la fórmula de Debye. Según la teoría BKS, en cambio, no es necesario que se expulse un electrón en retroceso en cada proceso individual de dispersión de la radiación incidente por un electrón. Ese fenómeno sólo ocurrirá ocasionalmente. Así pues, la teoría del cuanto de luz y la teoría BKS hacen predicciones diferentes respecto de los resultados de la dispersión de radiación. Según la teoría del cuanto de luz, debe haber una correlación estricta entre la emisión de un electrón en retroceso y la de un cuanto de luz, que se manifiesta en la producción de un fotoelectrón. Para la teoría BKS, por el contrario, no debería haber correlación sistemática alguna entre electrones en retroceso y fotoelectrones producidos por la radiación dispersada, salvo coincidencias ocasionales y, por consiguiente, poco frecuentes.

Bothe y Geiger consiguieron medir esas correlaciones, empleando dos contadores de partículas (llamados “contadores de agujas”, que eran precursores de los contadores Geiger) colocados en posiciones opuestas. Uno de los contadores detectaba los electrones en retroceso y el otro detectaba los fotoelectrones producidos por la radiación dispersada que penetraban en el contador. Este último proceso se registraba con menor frecuencia que el primero debido a las dificultades experimentales y a la baja eficiencia del instrumento detector. Bothe y Geiger calcularon que por cada electrón en retroceso detectado por el primer contador debía detectarse un fotoelectrón en el segundo contador. El contador de coincidencias que emplearon era capaz de detectar las partículas hasta una precisión de una diezmilésima de segundo, un valor notable para la época. El resultado del experimento mostró una coincidencia en el segundo contador por cada 11 electrones detectados en el primero, en claro acuerdo con la predicción derivada del efecto Compton. Bothe y Geiger detectaron 66 coincidencias en un período de observación de 5 horas. En la teoría BKS las coincidencias, puramente accidentales, debían producirse con una frecuencia menor en varios órdenes de magnitud respecto de la observada. Bothe y Geiger calcularon que la probabilidad de observar el número de coincidencias registrado era, según la teoría BKS, de 1 en 400.000.

Este resultado se consideró, a la vez, como una refutación de la teoría BKS y como una confirmación de la teoría del cuanto de luz de Einstein. Bothe y Geiger publicaron un informe preliminar de su proyecto de experimento el 5 de agosto de 1924 (cf. Bothe & Geiger, 1924). El 18 de abril de 1925 enviaron un informe breve de sus resultados, que se publicó el 15 de mayo de ese año (cf. Bothe & Geiger, 1925a). Una semana des-

pués, el 25 de abril, enviaron un artículo extenso con sus resultados definitivos, que fue publicado el 12 de junio de 1925 (cf. Bothe & Geiger, 1925b). Bothe y Geiger concluían su artículo definitivo diciendo que los resultados que habían obtenido:

(...) no concuerdan con la interpretación de Bohr del efecto Compton (...). Es por tanto recomendable retener por el momento la imagen original de Compton y Debye (...). Probablemente, se debería admitir, por consiguiente, que el concepto de cuanto de luz posee un alto grado de realidad, como se supone en esa teoría (Bothe & Geiger, 1925b, p. 662-3).

Einstein, que entonces residía en Berlín, estuvo enterado desde el comienzo de los primeros resultados del experimento de Bothe y Geiger, que se hizo en esa misma ciudad. En enero de 1925 se conocieron los resultados preliminares, que Bothe y Geiger decidieron no publicar hasta haberlos verificado con más cuidado. En una carta a Bohr del 15 de enero de 1925, Max Born le comunicó la noticia en estos términos:

Recientemente estuve en Berlín; allí todos hablaban del resultado del experimento de Geiger-Bothe, que aparentemente ha resultado *a favor* de los cuantos de luz. Einstein estaba triunfante (Born a Bohr, 15-01-1925, *apud* Stolzenburg, 1984, p. 303).¹²

Así pues, Einstein ya conocía de primera mano el resultado del experimento antes de emprender su viaje a Sudamérica, aunque los artículos de Bothe y Geiger todavía no se habían publicado.

La reacción que Einstein expresa en su conferencia del 7 de mayo de 1925 no resulta, sin embargo, tan clara y decisiva como Paty parece pensar. Einstein comienza contraponiendo la teoría ondulatoria de la luz, en su formulación electromagnética, con la “teoría cuántica de la luz”, a la que caracteriza como “semejante a la antigua teoría newtoniana de la emisión” (Einstein, 2002 [1925c], p. 237). Luego, prosigue señalando que, a pesar de todos los esfuerzos realizados por los físicos, todavía no se logró obtener “una síntesis lógica” entre las teorías ondulatoria y cuántica de la luz. Señala, entonces, que, por esa razón, “la cuestión de la realidad de los cuantos de luz corpusculares es muy discutida” (Einstein, 2002 [1925c], p. 237).¹³ Esta observación presu-

¹² La carta completa se encuentra en Stolzenburg (1984, p. 302-4). Mehra y Rechenberg (1982, p. 611) la citan parcialmente y dan una traducción un poco diferente de la nuestra. En esa carta Born continuaba explicando que no estaba convencido de la validez del resultado.

¹³ *Deshalb is die Frage nach der Realität korpuskel-artiger Lichtquanten eine viel umstrittene.*

pone, indudablemente, que la cuestión de la existencia de tales cuantos no estaba resuelta en la comunidad de los físicos hacia comienzos de 1925. Después de resumir la teoría BKS y el experimento de Bothe y Geiger, Einstein indica que los resultados obtenidos hasta el momento parecen mostrar la existencia de la correlación buscada. De allí concluye, en la última oración, que si esto fuera confirmado, “se tiene un nuevo argumento importante para la realidad de los cuantos de luz” (Einstein, 2002 [1925c], p. 238).¹⁴

Como en el caso del efecto Compton, la reacción de Einstein es muy mesurada y cautelosa. No afirma que el resultado del experimento de Bothe y Geiger sea suficiente para declarar sin reservas la existencia de los cuantos de luz. Sólo dice que ese experimento proporciona un argumento más a favor de la realidad de los cuantos. Es indudable que ese experimento, a diferencia del de Compton de 1923, puede interpretarse como una evidencia confirmatoria para la hipótesis de que la conservación del momento y la energía se cumplen en los procesos individuales de interacción. Se trata, indudablemente, de evidencia novedosa que apoya la teoría cuántica de la luz y apunta claramente a reforzar la hipótesis de la composición “corpúscular” de la radiación. No obstante, en su conferencia de 1925, Einstein no parece considerar que el experimento de Bothe y Geiger ofrezca una evidencia decisiva para afirmar la realidad de los cuantos de luz, aunque no cabe duda de que piensa que proporciona una evidencia adicional a la del experimento de Compton.

Casi simultáneamente con el experimento de Bothe y Geiger se realizó otro experimento independiente de éste, que Michel Paty no menciona en su comentario a nuestro trabajo, pero que puede considerarse tanto o más importante para la refutación de la teoría BKS. En los Estados Unidos, Compton y Simon realizaron un experimento – al que consideraron crucial – que aportó una nueva evidencia confirmatoria para la teoría del cuanto de luz de Einstein, a la vez que disconfirmó la teoría BKS. Compton había predicho en su artículo de 1923 que cuando un electrón resultaba dispersado por un cuanto de luz, debía experimentar un retroceso en una dirección determinada como consecuencia de la transferencia de momento lineal por parte del cuanto incidente (cf. Compton, 1923, p. 485). Por su parte, Debye (1923) había deducido la fórmula exacta que relacionaba el ángulo de deflexión (ϕ) del cuanto de luz incidente y el ángulo de retroceso (θ) del electrón eyectado: $\tan \frac{1}{2} \phi = -1 / [(1 + h/mc\lambda) \tan \theta]$. Este era un resultado teórico original de Debye, que no se encontraba en el artículo de Compton y que no había sido contrastado experimentalmente. El experimento de Compton de 1923, en efecto, no le permitía medir la dirección de los cuantos individuales dispersados ni la dirección de los electrones eyectados.

¹⁴ *Wenn sich dies bestätigt, so liegt ein neues wichtiges Argument für die Realität der Lichtquanten vor.*

La predicción de Debye resultó clave para diseñar un experimento crucial entre la teoría BKS y la teoría cuántica de la luz. De acuerdo con la teoría del cuanto de luz, debía existir una correlación estricta entre los ángulos ϕ y θ , dada por la fórmula de Debye. En cambio, según la teoría BKS, puesto que los rayos X dispersados son ondas esféricas, que pueden producir efectos en cualquier dirección, no debería haber ninguna correlación entre esos dos ángulos, salvo meras coincidencias accidentales. Compton y Simon compararon estas predicciones en los siguientes términos.

Así, un cuanto particular dispersado puede producir un efecto sólo en la dirección determinada en el momento en que es dispersado y predecible a partir de la dirección en la que el electrón en retroceso procede. Sin embargo, si los rayos X dispersados consisten en ondas esféricas, pueden producir efectos en cualquier dirección y, consecuentemente, no debería haber ninguna correlación entre la dirección en la cual proceden los electrones en retroceso y las direcciones en las cuales se observan los efectos de los rayos X dispersados (Compton & Simon, 1925c, p. 290).

El experimento requería, entonces, observar simultáneamente las huellas de los electrones en retroceso y de los “efectos” de los rayos X dispersados, esto es, de los fotoelectrones producidos por ellos. Compton y Simon diseñaron un experimento que empleaba una cámara de burbujas en la cual se podían observar las huellas de los electrones en retroceso, midiendo de esta manera el ángulo de retroceso respecto de la dirección de la radiación incidente. Además, las huellas de los rayos X dispersados resultaban indirectamente observables, mediante los fotoelectrones que producían, permitiendo de este modo medir la correlación de los dos ángulos en procesos individuales de interacción electrón-cuanto de luz. Los primeros resultados positivos de este experimento se obtuvieron en noviembre de 1924, y fueron presentados en una reunión de la *American Physical Society* realizada el día 28 de ese mes. Un informe preliminar de dichos resultados se publicó en enero de 1925, y uno más extendido, firmado el 15 de noviembre de 1924, se publicó en marzo de 1925; mientras que las conclusiones definitivas recién aparecieron en un artículo, firmado el 23 de junio de 1925, que se publicó en septiembre de 1925 (cf. Compton & Simon, 1925a; 1925b; 1925c).

Es interesante detenerse en los detalles del experimento de Compton y Simon; ellos tomaron tres series de fotografías estereoscópicas en la cámara de niebla, de 302, 338 y 511 placas, respectivamente. Esas fotografías mostraban, en promedio, las huellas de dos o tres electrones en retroceso, por lo que la mayoría debió ser descartada ya que en ellas no podían separarse los electrones en retroceso genuinos, esto es, causados por los cuantos dispersados, de los rayos beta parásitos producidos por la radia-

ción del entorno o por rayos X perdidos. Las seleccionadas fueron aquellas de las series segunda y tercera en las que se encontraba la huella de un solo electrón en retroceso. El procedimiento, entonces, consistió en medir el ángulo θ que formaba la huella del electrón en retroceso con la huella de la radiación incidente. Luego, mediante la fórmula de Debye se calculó el ángulo ϕ que debería formar la huella del fotoelectrón producido por el cuanto de luz dispersado. Compton y Simon encontraron 38 fotografías en las cuales podían observarse las huellas de un solo electrón en retroceso y un solo fotoelectrón. Encontraron que en 18 de ellas el ángulo ϕ estaba dentro de un margen menor que 20° respecto del cálculo realizado mediante la fórmula de Debye. Los datos no mostraban una alta correlación entre los ángulos de dispersión, pero el valor obtenido era cuatro veces mayor que el valor esperado sobre la base de la teoría BKS. Compton y Simon también calcularon que la probabilidad de que las correlaciones observadas fueran accidentales era tan baja como $1/250$. El resultado parecía, entonces, claramente favorable para la teoría del cuanto de luz y adverso para la teoría BKS.

En el comienzo de su artículo definitivo de 1925, Compton y Simon afirmaban que su experimento tenía un carácter crucial (*crucial test*) entre dos maneras de considerar la naturaleza de la radiación dispersada en el efecto Compton: como ondas esféricas, según la teoría BKS, o como cuantos de luz, según la teoría cuántica (cf. Compton & Simon, 1925c, p. 290). En las conclusiones, por su parte, señalaban sin ambigüedad los resultados del experimento crucial diciendo que

Estos resultados no parecen reconciliables con el punto de vista de la producción estadística de electrones en retroceso y fotoelectrones propuesta por Bohr, Kramers y Slater. Por otra parte, apoyan directamente el punto de vista de *que la energía y el momento se conservan durante la interacción entre la radiación y los electrones individuales* (Compton & Simon, 1925c, p. 299, subrayado por los autores).

En esa misma conclusión también formulaban un juicio prudente, pero mucho más categórico que el de Einstein, acerca de la realidad de los cuantos de luz.

Resulta, entonces, altamente probable que toda la radiación electromagnética esté constituida por cuantos discretos que se mueven en direcciones definidas (Compton & Simon, 1925c, p. 299).

En una nota a pie de página de ese mismo artículo, Compton y Simon citaron los dos primeros artículos de Bothe y Geiger (1924; 1925a) y señalaron que era una “prueba bastante similar” a la de ellos. Sin embargo, en esa misma nota señalaron que,

aunque este experimento [el de Bothe y Geiger] proporciona una evidencia menos definida que el presente [el de Compton y Simon] respecto de la naturaleza dirigida de los rayos X dispersados, es igualmente incompatible con la consideración estadística de Bohr, Kramers y Slater acerca de la producción de fotoelectrones y electrones en retroceso (Compton & Simon, 1925c, p. 291, nota 10).

Desde el punto de vista epistemológico es importante preguntarse por qué Compton y Simon consideraron que la evidencia que aportaba su experimento tenía mayor valor confirmatorio que la del experimento de Bothe y Geiger. Ellos no lo dijeron, pero la razón parece bastante clara. El experimento de Bothe y Geiger confirma la producción simultánea de electrones en retroceso y fotoelectrones producidos por los rayos X dispersados, pero no permite concluir nada acerca de la correlación de los ángulos de dispersión predicha por la fórmula de Debye. El experimento de Compton y Simon, en cambio, confirma esa fórmula y, además, también confirma la hipótesis de la producción simultánea de electrones en retroceso y fotoelectrones, que se manifiesta en las fotografías en el origen común de las dos huellas en un punto de la trayectoria de la radiación incidente, esto es, en un mismo vértice de los ángulos de dispersión.

La teoría BKS resultó, entonces, disconfirmada por dos experimentos independientes entre sí, cuyos resultados, por esa razón, se reforzaron mutuamente. Ambos experimentos, además, confirmaron la teoría del cuanto de luz, pero lo hicieron de manera global, esto es, confirmaron todo un conjunto de hipótesis que incluían la existencia de cuantos de luz de energía $E = h\nu$ y momento $p = h\nu/c$, junto con las hipótesis de la conservación del momento y la energía en todos los procesos individuales de interacción entre electrones y cuantos de luz.

Dado que Einstein inició su viaje a Sudamérica el 5 de marzo de 1925, es poco probable, aunque no imposible, que haya podido tener noticias sobre el experimento de Compton y Simon antes de salir de Alemania. En su conferencia de Río de Janeiro, al menos, no se encuentra ninguna mención de ese experimento, aunque sí se alude al efecto Compton, pero se refiere, evidentemente, a los resultados publicados en 1923.

En los años subsiguientes, el propio Compton afirmó que la evidencia proporcionada por el descubrimiento de los electrones eyectados confería una mayor confirmación a la hipótesis del cuanto de luz que la ofrecida por el efecto fotoeléctrico, porque se trataba de una predicción novedosa. La explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico, en cambio, se limitaba, según Compton, a la acomodación de fenómenos conocidos, en particular, las regularidades empíricas previamente descubiertas por Lenard (cf. Compton, 1928; 1929). Así, en el segundo de esos artículos afirmó que

hemos visto que la hipótesis de Einstein de unidades corpusculares de energía radiante proporciona una explicación satisfactoria del efecto fotoeléctrico. Como Jeans ha señalado notablemente, Einstein inventó la hipótesis del fotón para explicar ese solo efecto, y no es sorprendente que debiera explicarlo bien. Para tener un gran peso la hipótesis debería también encontrarse aplicable a algunos fenómenos de un carácter ampliamente diferente. Tales fenómenos han sido recientemente encontrados, asociados con la dispersión de rayos X, el cambio en longitud de onda de los rayos dispersados, y el retroceso de los electrones asociados con ellos (Compton, 1929, p. 79).

No es cierto que Einstein haya inventado la hipótesis del cuanto de luz sólo para explicar el efecto fotoeléctrico, pero incluso en caso de que lo fuera, tampoco es evidente que, en general, la verificación de predicciones novedosas proporcione mayor apoyo confirmatorio a una hipótesis que la acomodación de fenómenos ya conocidos. Se trata de una cuestión que divide a los filósofos de la ciencia, tanto como a los propios científicos y que se encuentra lejos de estar resuelta, como se puede ver, por ejemplo, en Lipton (2005), que defiende la tesis predictivista, y en las réplicas que suscitó ese artículo entre científicos e historiadores de la ciencia (cf. Lipton *et al.*, 2005). En cualquier caso, aunque se adoptara la tesis predictivista, ésta no permitiría discriminar entre la evidencia que los experimentos de Bothe y Geiger y de Compton y Simon proporcionaron a favor de la teoría del cuanto de luz. En los dos casos, se confirmó una predicción nueva. En el experimento de Bothe y Geiger, se confirmó la producción simultánea de los electrones en retroceso y los fotoelectrones producidos por los cuantos de luz dispersados; en el experimento de Compton y Simon, se confirmó la correlación entre los ángulos de las trayectorias de los electrones en retroceso y los correspondientes fotoelectrones.

Por otra parte, ambos experimentos son independientes entre sí, en el sentido de que los resultados de uno de ellos no afectan el posible resultado del otro. También lo son en el sentido más específico de que los respectivos diseños experimentales son diferentes y emplean tanto instrumentos como teorías presupuestas diferentes. Finalmente, los dos experimentos se realizaron de manera casi simultánea. Así, pues, debería considerarse que ambos experimentos aportaron una evidencia independiente e igualmente importante para la confirmación de la teoría cuántica de la luz.

CONCLUSIÓN

Resulta evidente, a partir de los hechos que hemos reseñado, que después de que Einstein publicó su artículo sobre el efecto Compton en abril de 1924, se encontró nueva evidencia experimental confirmatoria para la teoría del cuanto de luz. Es natural, por tanto, que Einstein reaccionara de una manera distinta frente a la acumulación de resultados experimentales favorables a su teoría. No obstante, incluso cuando se considera esta evidencia, su reacción es mucho más prudente y mesurada que la de otros físicos que afirmaron sin reservas la realidad de los cuantos de luz. Por otra parte, es un hecho bien conocido que ninguno de los dos experimentos que mencionamos convenció a todos los físicos de la época acerca de la realidad de los cuantos de luz. Bohr, por ejemplo, aceptó la refutación de la teoría BKS, pero no la evidencia de que los cuantos de luz eran reales. Schrödinger, por su parte, publicó en 1926, después de conocidos ambos resultados experimentales, una explicación alternativa del efecto Compton en la cual la radiación no estaba cuantificada (cf. Schrödinger, 1927). Finalmente, la aceptación de la teoría cuántica de la luz fue gradual y se produjo después de que se descubrieron otros fenómenos que sólo podían explicarse de manera satisfactoria mediante la hipótesis cuántica. Uno de ellos fue la *Bremsstrahlung* o radiación de frenado, una suerte de efecto fotoeléctrico inverso. El otro fue la creación y aniquilación de pares electrón-positrón (esto es, los procesos: $2\gamma \rightarrow e^- + e^+$ y $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$). El análisis de estos fenómenos está más allá de los límites de nuestro trabajo, ya que nos llevaría a la física de partículas y la teoría cuántica de campos de la década de 1930. Pero no cabe duda de que ofrecieron una evidencia importante para la aceptación de la realidad del fotón, como ya se llamaba desde 1926 al cuanto de luz. Así, por ejemplo, Resnick y Halliday (1985, cap. 5) los consideran, junto con el efecto fotoeléctrico y el efecto Compton, como la evidencia fundamental que apoya la existencia de los fotones. El extenso proceso histórico de acumulación de evidencia experimental a favor de la hipótesis del cuanto de luz todavía no ha sido estudiado de manera completa. Brush (2007) aporta valiosa información, pero sólo llega hasta el año 1935. En este trabajo sólo hemos considerado algunos de los experimentos inmediatamente posteriores al de Compton de 1923 que confirmaron la hipótesis del cuanto de luz de Einstein. Para algunos físicos la evidencia que aportaron los experimentos de Bothe y Geiger y de Compton y Simon fue decisiva para la aceptación de la hipótesis cuántica. No obstante, todavía en 1925 Einstein mantenía sus reservas. La comunidad de los físicos, por su parte, aún no había alcanzado un consenso firme sobre la necesidad de una teoría cuántica de la radiación.☉

Alejandro CASSINI

Instituto de Filosofía,
Universidad de Buenos Aires.
Consejo Nacional de Investigaciones
Científicas y Técnicas, Argentina.
alepafrac@yahoo.com.ar

Leonardo LEVINAS

Instituto de Historia,
Universidad de Buenos Aires.
Consejo Nacional de Investigaciones
Científicas y Técnicas, Argentina.
leo@levinas.com.ar

Hernán PRINGE

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

Einstein and experimental evidence in favour of the hypothesis of light quanta

ABSTRACT

In the first part of this paper we reply to Michel Paty's critical remarks on our paper "Einstein and the Compton effect". We state that we did not evaluate Einstein's response to the experimental evidence about the light quantum hypothesis beyond 1923. Nevertheless, in the second part we analyze two important experiments completed in 1924: those performed by Bothe and Geiger in Germany and by Compton and Simon in the United States. We point out that both experiments provided additional evidence that supported Einstein's views about the quantum theory of radiation. Nonetheless, we contend that even after becoming aware of these results, Einstein never expressed a categorical judgment about the reality of light quanta, such as the one stated by De Broglie as early as 1923, with which we compared Einstein's position.

KEYWORDS • Compton effect. Light quanta. Einstein. De Broglie. Paty.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOHR, N.; KRAMERS, H. A. & SLATER, J. C. The quantum theory of radiation. *Philosophical Magazine*, 47, p. 785-802, 1924.
- BOSE, S. N. Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothese. *Zeitschrift für Physik*, 26, p. 178-81, 1924a.
- _____. Wärmegleichgewicht im Strahlungsfeld bei Anwesenheit von Materie. *Zeitschrift für Physik*, 27, p. 384-93, 1924b.
- BOTHE, W. & GEIGER, H. Ein Weg zur experimentellen Nachprüfung der Theorie von Bohr, Kramers und Slater. *Zeitschrift für Physik*, 25, p. 44, 1924.
- _____. Experimentelles zur Theorie von Bohr, Kramers und Slater. *Naturwissenschaften*, 13, p. 440-1, 1925a.
- _____. Über das Wesen des Comptoneffekts: ein experimenteller Beitrag zur Theorie der Strahlung. *Zeitschrift für Physik*, 32, p. 639-63, 1925b.
- 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.
- CASSINI, A. La invención del neutrino: un análisis epistemológico. *Scientiae Studia*, 10, 1, p. 11-39, 2012.
- CASSINI, A. & LEVINAS, M. L. La hipótesis del cuanto de luz y la relatividad especial. ¿Por qué Einstein no las relacionó en 1905? *Scientiae Studia*, 5, 4, p. 425-52, 2007.
- _____. & _____. La explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico. *Revista Latinoamericana de Filosofía*, 34, p. 5-38, 2008.
- CASSINI, A.; LEVINAS, M. L. & PRINGE, H. Einstein y el efecto Compton. *Scientiae Studia*, 11, 1, p. 185-209, 2013. (CLP)
- COMPTON, A. H. A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements. *Physical Review*, 21, p. 483-502, 1923.
- _____. Some experimental difficulties with the electromagnetic theory of radiation. *Journal of the Franklin Institute*, 205, p. 155-78, 1928.
- _____. The corpuscular properties of light. *Physical Review Supplement*, 1, p. 74-89, 1929.
- COMPTON, A. H. & SIMON, A. W. Measurements of the beta-rays excited by hard X-rays. *Physical Review*, 25, p. 107, 1925a.
- _____. Measurements of b-rays associated with scattered X-rays. *Physical Review*, 25, p. 306-13, 1925b.
- _____. Directed quanta of scattered X-rays. *Physical Review*, 26, p. 289-99, 1925c.
- DE BROGLIE, L. Rayonnement noire et quanta de lumière. *Journal de Physique et le Radium*, 3, p. 422-8, 1922.
- _____. A tentative theory of light and quanta. *Philosophical Magazine*, 47, p. 446-58, 1924.
- _____. Vue d'ensemble sur mes travaux scientifiques. In: GEORGE, A. (Ed.). *Louis de Broglie, physicien et penseur*. Paris: Albin-Michel, 1953. p. 39-63.
- _____. Le dualisme des ondes et des corpuscles dans l'oeuvre de Albert Einstein. In: _____. *Nouvelles perspectives en microphysique*. Paris: Albin Michel, 1956. p. 91-120.
- _____. Les idées qui me guident dans mes recherches. In: _____. *Certitudes et incertitudes de la science*. Paris: Albin Michel, 1966. p. 149-67.
- _____. Mon itinéraire scientifique. In: GEORGE, A. et al. (Ed.). *Louis de Broglie: sa conception du monde physique*. Paris: Gauthier-Villars, 1973. p. 33-8.
- DEBYE, P. Zerstreung von Röntgenstrahlen und Quantentheorie. *Physikalische Zeitschrift*, 24, p. 161-6, 1923.
- DE SITTER, W. Ein astronomischer Beweis für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit. *Physikalische Zeitschrift*, 14, p. 429, 1913a.
- _____. A proof of the constancy of the velocity of light. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*, 15, p. 1297-8, 1913b.

- DE SITTER, W. On the constancy of the velocity of light. *Proceedings of the Royal Netherlands Academy of Arts and Sciences*, 16, p. 395-6, 1913c.
- DIRAC, P. A. M. A theory of electrons and protons. *Proceedings of the Royal Society of London A*, 126, p. 360-5, 1930a.
- _____. On the annihilation of electrons and protons. *Mathematical Proceedings of the Cambridge Philosophical Society*, 26, p. 361-75, 1930b.
- DORLING, J. Einstein's introduction of photons: argument by analogy or deduction from the phenomena? *British Journal for the Philosophy of Science*, 22, p. 1-8, 1971.
- 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.
- _____. Zur Quantentheorie der Strahlung. *Mitteilungen der Physikalische Gesellschaft Zürich*, 16, p. 47-62, 1916. (Reimpreso en *Physikalische Zeitschrift*, 18, p. 121-8, 1917).
- _____. Das Komptonsche Experiment. *Berliner Tageblatt*, I. Beiblatt. 20 abr. 1924a.
- _____. Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften, Physikalisch-mathematische Klasse*, p. 261-7, 1924b.
- _____. Quantentheorie des einatomigen idealen Gases. Zweite Abhandlung. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften, Physikalisch-mathematische Klasse*, p. 3-14, 1925a.
- _____. Quantentheorie des idealen Gases. *Sitzungsberichte der Preussischen Akademie der Wissenschaften, Physikalisch-mathematische Klasse*, p. 18-25, 1925b.
- _____. Observações sobre a situação atual da teoria da luz. *Revista da Academia Brasileira de Ciências*, 1, p. 1-3, 1926.
- _____. Bemerkungen zu der gegenwärtiger Lage der Theorie des Lichtes. In: TOLMASQUIM, A. T. & MOREIRA, I. C. Einstein in Brazil: the communication to the Brazilian Academy of Sciences on the constitution of light. In: KRAGH, H.; VANPAEMEL, G & MARAGE, P. (Ed.). *History of modern physics*. Turnhout: Brepols, 2002 [1925c]. p. 237-8.
- _____. El experimento de Compton. Traducción H. Pringe. *Scientiae Studia*, 11, 1, p. 211-219, 2013 [1924].
- GEORGE, A. (Ed.). *Louis de Broglie, physicien et penseur*. Paris: Albin-Michel, 1953.
- GEORGE, A. et al. (Ed.). *Louis de Broglie: sa conception du monde physique*. Paris: Gauthier-Villars, 1973.
- HOWARD, D. & STACHEL, J. (Ed.). *Einstein: the formative years, 1879-1909*. Boston: Birkhäuser, 2000.
- KRAGH, H.; VANPAEMEL, G & MARAGE, P. (Ed.). *History of modern physics*. Turnhout: Brepols, 2002. (Proceedings of the xxth International Congress of History of Science).
- LIPTON, P. Testing hypotheses: prediction and prejudice. *Science*, 307, p. 219-21, 2005.
- LIPTON, P et al. Accomodation or prediction? *Science*, 308, p. 1409-12, 2005.
- LOCHAK, G. (Ed.). *Louis De Broglie: un itinéraire scientifique*. Paris: La Découverte, 1987.
- MARTÍNEZ, A. Ritz, Einstein, and the emission hypothesis. *Physics in Perspective*, 6, p. 4-28, 2004.
- MEHRA, J. & RECHENBERG, H. *The historical development of quantum theory*. New York: Springer, 1982. v. 1: The quantum theory of Planck, Einstein, Bohr and Sommerfeld: its foundation and the rise of its difficulties.
- NORTON, J. Atoms, entropy and quanta: Einstein's miraculous argument of 1905. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 37, p. 71-100, 2006.
- PAIS, A. "Subtle is the Lord...". *The science and the life of Albert Einstein*. Oxford: Clarendon Press, 1982.
- PATY, M. Considerações sobre o caminho original de Einstein rumo a uma teoria quântica da radiação (a propósito do artigo "Einstein y el efecto Compton"). *Scientiae Studia*, 11, 1, p. 221-42, 2013. (MP)

- PATY, M. *Einstein, les quanta et le réel*. En prensa.
- RESNICK, R. & HALLIDAY, D. *Basic concepts in relativity and early quantum theory*. New York: Wiley, 1985.
- RITZ, W. Recherches critiques sur l'électrodynamique générale. *Annales de Chimie et de Physique*, 13, p. 145-275, 1908.
- SCHRÖDINGER, E. Über den Comptoneffekt. *Annalen der Physik*, 27, p. 257-64, 1927.
- STACHEL, J. Einstein's light-quantum hypothesis, or why didn't Einstein propose a quantum gas a decade-and-a-half earlier. In: HOWARD, D. & STACHEL, J. (Ed.). *Einstein: the formative years, 1879-1909*. Boston: Birkhäuser, 2000. p. 231-51.
- STARK, J. Zur experimentellen Entscheidung zwischen Ätherwellen und Lichtquantenhypothese. I. Röntgenstrahlung. *Physikalische Zeitschrift*, 10, p. 902-13, 1909.
- STOLZENBURG, K. (Ed.). *Collected works of Niels Bohr*. Amsterdam: North-Holland, 1984. v. 5: The emergence of quantum mechanics (mainly 1924-1926).
- STUEWER, R. H. *The Compton effect: turning point in physics*. New York: Science Publications, 1975.
- TOLMASQUIM, A. T. & MOREIRA, I. C. Um manuscrito de Einstein no Brasil. *Ciência Hoje*, 21, p. 22-9, 1996.
- _____. & _____. Einstein in Brazil: the communication to the Brazilian Academy of Sciences on the constitution of light. In: KRAGH, H.; VANPAEMEL, G. & MARAGE, P. (Ed.). *History of modern physics*. Turnhout: Brepols, 2002. p. 229-42.

