

## LA EXPLICACIÓN DE EINSTEIN DEL EFECTO FOTOELÉCTRICO: UN ANÁLISIS HISTÓRICO-EPISTEMOLÓGICO

**Alejandro Cassini**

*Universidad de Buenos Aires,  
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas*

**Marcelo Leonardo Levinas**

*Universidad de Buenos Aires,  
Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas  
Instituto de Astronomía y Física del Espacio (IAFE)*

**RESUMEN:** Mostramos que la explicación de Einstein del efecto fotoeléctrico es una explicación causal que posee claras ventajas epistemológicas sobre otras explicaciones rivales. Señalamos la fertilidad heurística de esta hipótesis y los problemas que suscitó la aceptación de la realidad de los cuantos de luz. Concluimos que la realidad de los cuantos de luz ha resultado históricamente afectada por el problema general de la realidad de las entidades cuánticas y no ha podido resolverse independientemente de él. Por ello el componente causal de la explicación de Einstein no ha logrado mantenerse en el contexto de una teoría cuántica referida al movimiento de partículas. No obstante, el valor heurístico original de la hipótesis del cuanto de luz de Einstein ha mantenido su vigencia.

**PALABRAS CLAVE:** cuantos de luz, explicación causal, heurística, realismo, consenso científico.

**ABSTRACT:** We show that Einstein's explanation of photoelectric effect is a causal explanation that has clear epistemological advantages with respect to other rival explanations. We point out the heuristic fertility of this hypothesis and the problems brought about by the acceptance of the reality of light-quanta. We conclude that the reality of light-quanta has been historically affected by the general problem of the reality of quantum entities and that the former cannot be solved independently of the latter. For that reason, the causal component of Einstein's explanation cannot be retained in the context of quantum theory of particle motion. In any case, the original heuristic value of Einstein's hypothesis of light-quanta is not affected by the aforementioned considerations.

KEYWORDS: light-quanta, causal explanation, heuristics, realism, scientific consensus.

### 1. Introducción

El 9 de noviembre de 1922 se le concedió a Einstein el Premio Nobel de Física correspondiente al año 1921. La carta del secretario de la Academia Sueca, C. Aurivillius, escrita al día siguiente, le comunicaba, de una manera un tanto peculiar, que la decisión se había tomado “en consideración a su trabajo sobre la física teórica, y en particular por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico, pero sin tomar en cuenta el valor que pueda ser acordado en el futuro a sus teorías de la relatividad y de la gravitación, después de que éstas sean confirmadas en el futuro”.<sup>1</sup> Usualmente, este premio no se concede a los creadores de hipótesis puramente teóricas que no hayan sido bien confirmadas por medio de experimentos. A. Pais ha señalado que resulta paradójico que la conservadora Academia haya premiado a Einstein por “la contribución más revolucionaria que jamás haya hecho a la física” (Pais, 1982, p. 511). Sin embargo, la ecuación de Einstein para el efecto fotoeléctrico (en adelante abreviado como *EF*) podía considerarse experimentalmente bien confirmada para esa época, mucho mejor confirmada que, por ejemplo, la teoría de la relatividad general. El aspecto revolucionario de la contribución de Einstein no se encontraba en la deducción de esa ecuación sino en la explicación teórica de la producción del *EF*, más precisamente, en la hipótesis de que la luz, y posiblemente toda la radiación electromagnética, se componía de cuantos discretos. Esta hipótesis, que interviene de manera esencial en la explicación de Einstein del *EF*, a comienzos de la década de 1920 era resistida por la mayoría de los físicos –no

1. Citada en Pais (1982), p. 503. Sobre los detalles de la concesión del premio, concretado luego de varias propuestas previas, véase todo el capítulo 30 de esta gran obra de Pais. Véase también Bárány, Skog y Stenkula (2005), que es un trabajo preparado por el Museo Nobel en ocasión del centenario de los artículos de Einstein de 1905.

tanto por su capacidad explicativa como por sus consecuencias ontológicas– y no disponía, como veremos, de evidencia decisiva a su favor. Fue precisamente en razón del notable poder explicativo de esta hipótesis que por fin la Academia Sueca encontró la oportunidad para concederle el premio Nobel cuando ya Einstein era una celebridad por sus dos teorías de la relatividad.

El artículo en el que Einstein introdujo su teoría cuántica de la luz, “Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz” (Einstein, 1905a), no se proponía solamente explicar el *EF* sino todo un conjunto de fenómenos de interacción entre la radiación y la materia para los cuales la electrodinámica clásica de Maxwell y Lorentz no tenía una explicación satisfactoria. Sin embargo, la explicación del *EF* que Einstein ofrece en ese artículo pronto adquirió un carácter paradigmático.<sup>2</sup> Hay varias razones que permiten comprender ese hecho. En primer lugar, Einstein formulaba una ecuación sumamente simple, ecuación que, sin embargo, permitía deducir varias predicciones novedosas, todas ellas susceptibles de contrastación experimental. En segundo lugar, sus hipótesis acerca de la naturaleza cuántica de la luz permitían explicar *todas* las regularidades empíricas conocidas hasta el momento sobre el *EF*. Esta explicación, además, resolvía todas las anomalías que se presentaban cuando se intentaba explicar el *EF* desde el punto de vista de la electrodinámica clásica, sin introducir ninguna anomalía nueva. A su vez, Einstein postulaba un mecanismo causal microscópico que podía aplicarse no sólo a la explicación del *EF* sino, muy particularmente, a la de otros fenómenos de emisión y absorción de la luz por parte de la materia. De ese modo, ofrecía una explicación *unificada* de varios fenómenos diferentes que, en principio, parecían requerir explicaciones de distinta naturaleza.

La explicación de Einstein, además de todos estos beneficios, también parecía tener algunos costos elevados. Ante todo, era incompatible con la electrodinámica clásica, una teoría que en ese momento estaba muy bien confirmada por numerosos fenómenos

2. Véanse Cassidy (2005) y Stuewer (2006) para dos valoraciones recientes del revolucionario artículo de Einstein, escritas en ocasión del centenario.

ópticos y daba una explicación muy satisfactoria, en el marco de una concepción ondulatoria, de la propagación de la luz. En segundo lugar, tenía dificultades para explicar los fenómenos de interferencia, difracción y polarización de la luz, que tenían una explicación natural y simple en el marco de la electrodinámica clásica. Finalmente, introducía en la física el problema de la dualidad onda-partícula para la luz, básicamente atribuyéndole al cuanto de luz propiedades características tanto de los corpúsculos newtonianos como de las ondas electromagnéticas.

Nuestro objetivo en este trabajo es hacer una evaluación epistemológica de la explicación de Einstein del EF. Consideraremos, de manera sumaria, tanto el contexto histórico como los presupuestos de esta explicación. Partiremos del conocimiento experimental que se tenía de este efecto antes de 1905 y mostraremos por qué resultaba anómalo para la electrodinámica clásica (sección 2). Luego, analizaremos de qué manera Einstein consiguió ofrecer una explicación causal de todas las regularidades empíricas conocidas sobre el EF que, a la vez, resolvía todas las anomalías existentes (sección 3). Después, estudiaremos la naturaleza de los cuantos de luz de Einstein y la consiguiente dualidad onda-partícula que se origina a causa de las peculiares propiedades que Einstein atribuyó a dichos cuantos (sección 4). Finalmente, describiremos las explicaciones del EF alternativas a la de Einstein que se propusieron después de 1905 (sección 5). En las conclusiones, compararemos la explicación de Einstein con las explicaciones alternativas y señalaremos las virtudes epistemológicas de su teoría del cuanto de luz.

## 2. Las anomalías del efecto fotoeléctrico

Desde fines del siglo XIX el problema de explicar cómo se producen las interacciones entre la materia y la radiación constituía un ámbito de investigación de frontera que presentaba severas anomalías para la electrodinámica clásica, elaborada por Maxwell y Lorentz. Basta recordar los problemas referidos a la radiación del cuerpo negro, que motivó la introducción del cuanto de acción  $h$  (Planck, 1900). Al comienzo de su artículo, Einstein señala explícitamente que los fenómenos asociados con la radiación del cuerpo negro plantean una dificultad para la teoría de Maxwell (Einstein,

1905a, p. 133). La teoría que Planck propuso para resolver este problema tampoco le parecía satisfactoria a Einstein, pero este es un tema demasiado específico como para tratarlo en este trabajo.<sup>3</sup>

Entre los fenómenos que Einstein señaló como problemáticos para la electrodinámica clásica, sólo consideraremos el EF. Este efecto se interpretaba en 1905, al igual que en nuestros días, como la emisión de electrones por parte de las sustancias sobre las que incide luz de determinadas frecuencias. Sin embargo, el descubrimiento de dicho efecto fue anterior al del electrón, por parte de J. J. Thomson en 1897, por lo que originalmente no se lo pudo interpretar de esa manera.

H. Hertz había descubierto accidentalmente el EF en 1887 cuando, en el transcurso de sus conocidos experimentos con ondas de radio, advirtió que la luz ultravioleta provocaba una descarga, una chispa, en el cátodo de sus instrumentos. Un año después, W. Hallwachs mostró que los cuerpos metálicos descargados adquirían carga eléctrica positiva cuando se los iluminaba con luz ultravioleta. En 1899 Thomson sostuvo que el EF producido por luz ultravioleta consistía en la emisión de electrones. Consiguió medir el valor del cociente  $m/e$  (masa/carga eléctrica) de las partículas emitidas en el EF y encontró que era igual al de los rayos catódicos que había medido dos años antes cuando había descubierto el electrón. La coincidencia de estos valores, junto con el resultado de Hallwachs, lo llevó a la conclusión de que las partículas emitidas en el EF debían identificarse con los electrones. Esta conclusión no era forzosa, porque podía tratarse de otra partícula, hasta entonces desconocida, que coincidiera con los valores de la relación  $m/e$  del electrón, pero se diferenciara de éste en otras propiedades. Hubiera sido, sin duda, una coincidencia improbable, pero no imposible. No obstante, la comunidad de los físicos aceptó la conclusión de Thomson e impuso la denominación de *fotoelectrones* a las partículas emitidas en el EF, ya fueran producidas por luz ultravioleta o de cualquier otra frecuencia.

En 1902 P. Lenard finalizó un estudio experimental sistemático del EF y se encontró con el hecho sorprendente de que la energía

---

3. Véanse al respecto las obras de Kuhn (1978), Pais (1982) y Navarro Veguillas (1990).

de los fotoelectrones no parecía mostrar dependencia alguna respecto de la intensidad de la luz incidente, en particular, no aumentaba cuando la intensidad de esta luz se incrementaba hasta mil veces (Lenard, 1902).

Antes de 1905 se habían establecido experimentalmente cuatro regularidades empíricas sobre el *EF*, de las cuales tres no tenían explicación teórica satisfactoria en el marco de una concepción ondulatoria de la luz.

La primera era que existía un *umbral* en la *frecuencia* de la luz que provocaba el *EF*. Para cada sustancia parecía haber una *frecuencia crítica* por debajo de la cual no se observaba la emisión de fotoelectrones, cualquiera fuese la intensidad de la luz incidente. Sin embargo, según la teoría electromagnética, la densidad de energía (por unidad de volumen) de una onda luminosa era proporcional a su *intensidad* (más precisamente, a la suma de los módulos al cuadrado de las amplitudes de los campos eléctrico y magnético correspondientes). Si la frecuencia de la luz incidente era muy baja, podía necesitarse luz de mucha intensidad o un tiempo de irradiación muy largo pero, en cualquier caso, en algún momento los electrones debían adquirir la energía suficiente como para escapar de los átomos. En suma, dado un tiempo suficientemente prolongado de irradiación, el *EF* tenía que producirse con luz de toda frecuencia e intensidad.

La segunda era que la energía de los fotoelectrones aumentaba con la *frecuencia* de la luz incidente.<sup>4</sup> Esto nuevamente resultaba incompatible con la electrodinámica de Maxwell, donde la densidad de energía de una onda luminosa no tiene relación alguna con su frecuencia.

La tercera era que el número de fotoelectrones resultaba proporcional a la *intensidad* de la luz incidente. Este es el único hecho

---

4. Lenard sólo había determinado esta relación sin especificar la manera en que frecuencia y energía estaban vinculadas (Lenard, 1902). Experimentalmente no se había establecido que la relación fuera lineal y la cuestión recién quedó saldada con los experimentos de Millikan más de una década después (Millikan, 1916a y 1916b). Hasta entonces se plantearon diferentes relaciones entre la frecuencia de la luz y la energía de los fotoelectrones (lineales como la de Einstein, cuadráticas, logarítmicas y otras).

experimental que podría tener una explicación ondulatoria. Dado que una onda más intensa posee mayor energía, era razonable esperar que las ondas de mayor intensidad excitasen un número mayor de electrones.

La cuarta era que no había ningún *tiempo de retardo* en la emisión de fotoelectrones, cualquiera fuera la intensidad de la luz incidente. Sin embargo, para la teoría electromagnética debía existir un tiempo de retardo *inversamente* proporcional a la intensidad de la onda incidente. En particular, si la intensidad de la iluminación fuera muy baja, los electrones absorberían energía muy lentamente, por lo que la emisión de fotoelectrones podría demorar tiempos muy largos, incluso del orden de horas o aun de días. Las mediciones mostraban, no obstante, que, cuando la luz alcanzaba la frecuencia crítica, cualquiera fuera su intensidad, no había retardo temporal alguno, hasta un orden de precisión de  $10^{-3}$  segundos, en la producción del *EF*.

### 3. La explicación causal de Einstein

Einstein propuso en 1905 una teoría de la luz que resolvía simultáneamente todas las anomalías conocidas del *EF*. Consistía en suponer que la energía de la luz no estaba distribuida de manera continua, como en una onda luminosa, sino de manera discreta en cuantos localizados puntualmente. Conjeturó que cada cuanto de luz poseía una energía  $E = h\nu$  (donde  $\nu$  es la frecuencia de la luz), de acuerdo con la fórmula de Planck para la energía de la radiación del cuerpo negro (Planck, 1900). También postuló que en las interacciones entre la luz y la materia, la energía se intercambiaba en cantidades discretas consistentes en la absorción o emisión de un cuanto luminoso por los átomos de materia. La formulación de las hipótesis fundamentales de Einstein se encuentra contenida en el siguiente pasaje:

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 aparecen más comprensibles bajo el supuesto de que la energía de la luz está distribuida discontinuamen-

te 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, 1905a, p. 133).

La teoría del cuanto de luz de Einstein no sólo contiene la hipótesis de la composición granular de la luz, sino también hipótesis específicas acerca de la *interacción* entre los cuantos de luz mismos y entre éstos y los electrones. En particular, Einstein supuso que los cuantos de luz no interactúan entre sí cuando la luz se propaga en el vacío, o al menos, se hallan tan separados uno de otro que toda interacción entre ellos resulta despreciable. Además, asumió que cada electrón absorbe un único cuanto de luz y que este cuanto le transfiere la totalidad de su energía cinética.<sup>5</sup>

En la explicación del *EF* Einstein procede de la siguiente manera. Supongamos que sobre una sustancia metálica incide un número finito de cuantos de luz cuya energía es  $h\nu$ . Dichos cuantos penetran a través de la superficie, donde interactúan con los electrones. La interacción consiste, como ya se indicó, en que cada cuanto es absorbido por un único electrón al que le transfiere toda su energía, la que se transforma en energía cinética de los electrones. Los electrones así excitados se mueven a través de la sustancia y emergen de la superficie con una determinada energía cinética, para lo cual deben efectuar cierto trabajo, por lo que perderán energía. Si  $h\nu$  es la energía del cuanto absorbido y  $P$  es el trabajo de extracción característico del metal, necesario para escapar de la

5. Actualmente sabemos que cuando la intensidad de la luz es muy alta, por ejemplo, en la luz láser, un electrón puede absorber dos fotones de energía  $h\nu$ , lo cual equivale a un fotón de energía  $2h\nu$ . En este caso, el *EF* se produce como si la luz incidente tuviera el doble de la frecuencia que realmente tiene. Se conocen asimismo procesos atómicos de absorción o emisión estimulada de tres o más fotones. Incluso es posible que los fotones absorbidos tengan diferentes frecuencias. Además, un mismo fotón puede interactuar con varios electrones de un mismo átomo (véase Cohen-Tannoudji *et alia*, 1998, pp. 98 y ss.).

superficie de la sustancia, la energía cinética máxima del fotoelectrón emergente será:

$$E_{M\acute{a}x} = \frac{1}{2}mv^2 = h\nu - P \quad [1]$$

donde  $m$  y  $v$  son la masa y la velocidad del fotoelectrón, respectivamente. Esta es la célebre fórmula del *EF* de Einstein. Dicha ecuación presupone que el cuanto de luz transfiere *la totalidad* de su energía a un solo electrón. Obviamente, esta energía máxima se alcanza cuando los fotoelectrones se encuentran directamente sobre la superficie del cuerpo y son expulsados perpendicularmente a ella. Einstein considera que la hipótesis más probable es la de máxima transferencia, pero no excluye la posibilidad de que el electrón absorba sólo una parte de la energía del cuanto de luz; en este caso la energía del fotoelectrón sería menor a la indicada por [1].

De la ecuación [1] se sigue que un fotoelectrón se emite solamente si el cuanto de luz incidente tiene una energía:

$$h\nu > P \quad [2]$$

También se deduce de [1] que para cada sustancia el umbral de la frecuencia del cuanto de luz incidente es:

$$\nu_0 = P/h \quad [3]$$

Mediante su teoría del cuanto de luz Einstein interpretó y explicó los resultados experimentales que eran anómalos para la electrodinámica de Maxwell de la siguiente manera:

La existencia de un umbral en la frecuencia de la luz incidente la explicó suponiendo que cada electrón absorbe *un solo* cuanto de luz. Dado que la energía de dicho cuanto es proporcional a su frecuencia, si éste no tiene una determinada frecuencia mínima, dada por la ecuación [3], no tendrá la energía suficiente como para arrancar al electrón de su átomo. La energía mínima necesaria para desprender un fotoelectrón, a su vez, dependerá de cada sustancia, según cuál sea la energía con que están ligados sus electrones.

La misma hipótesis le permitió explicar simultáneamente el hecho de que la energía de los fotoelectrones era proporcional a la frecuencia de la luz incidente, ya que ésta resultaba simplemente

proporcional a la energía de los cuantos de luz, determinada por la fórmula de Planck  $E = hv$ . Los resultados experimentales de Lenard habían sido puramente cualitativos y mostraban solamente que la energía de los fotoelectrones aumentaba cuando aumentaba la frecuencia de la luz incidente. La fórmula [1] de Einstein, en cambio, predice exactamente cuál es la energía que tendrán los fotoelectrones para cualquier frecuencia  $\nu \geq \nu_0$  de la luz incidente.

Es importante señalar que estas explicaciones requieren del uso de la hipótesis auxiliar según la cual el umbral de frecuencia depende exclusivamente de la composición del cuerpo irradiado y no de una interacción diferencial en la que un mismo tipo de luz (determinado por su frecuencia) se comportaría de manera diferente de acuerdo con la naturaleza del cuerpo (por ejemplo cediendo diferentes proporciones de su energía, según el caso).

Si se supone, como hizo Einstein, que la luz está compuesta por un número finito de cuantos, la intensidad de la luz resulta proporcional al número de cuantos que llegan a una determinada superficie por unidad de tiempo. De esta manera, Einstein pudo explicar fácilmente el hecho de que el número de fotoelectrones aumenta cuando se incrementa la intensidad de la luz incidente. Ello ocurre porque sobre la superficie de la sustancia iluminada llegan más cuantos de luz, los cuales, consiguientemente, excitan un mayor número de electrones.

La energía de los cuantos de luz sólo depende de la frecuencia, por lo que el aumento de la intensidad de la luz no modifica la energía de cada cuanto luminoso. Consiguientemente, Einstein pudo dar cuenta del hecho de que la energía de los fotoelectrones no cambia cuando aumenta o disminuye la intensidad de la luz incidente. Si cambia la intensidad de la luz, lo que cambia es simplemente el número de cuantos que llegan a la superficie iluminada. Por cierto, la energía total que transporta el rayo luminoso, que puede concebirse como la suma de todas las energías de los cuantos componentes, es proporcional a la intensidad, pero la energía de cada cuanto individual es independiente de ella.

Finalmente, Einstein explicó la ausencia de retardo temporal en la emisión de fotoelectrones suponiendo que la absorción y emisión de los cuantos de luz por la materia se realiza de manera instantánea, o, al menos, que se trata de procesos que duran un tiempo característico de la escala atómica. Esta idea es coherente con el

supuesto inicial de que la energía de los cuantos de luz está localizada de manera puntual, como ocurre en el caso de las partículas materiales, y no distribuida en regiones grandes del espacio, como el frente de una onda electromagnética.

La explicación de Einstein del EF es claramente una explicación causal. Su forma corresponde de manera bastante precisa a la del llamado *modelo mecánico-causal* de W. Salmon.<sup>6</sup> Esta clase de explicación consiste, en una de sus formas típicas, en ofrecer una *historia causal* del hecho que se quiere explicar, historia que expone los mecanismos por medio de los cuales se produce. Así, por ejemplo, la ocurrencia de un evento de tipo *B* se explica mediante una cadena causal que comienza en otro evento de tipo *A* y termina en *B*. Usualmente, se distinguen entre *A* y *B* otros eventos, cada uno de los cuales está causalmente conectado con el que lo sucede inmediatamente en la cadena. Los eventos que se estipulan como comienzo de la cadena causal, así como los diferentes eventos intermediarios, dependen del contexto y de diversos factores pragmáticos, tales como los intereses de la comunidad científica o los presupuestos del público al que se dirige la explicación. En los casos paradigmáticos, un científico profesional dirige la explicación a un grupo, más o menos indeterminado, pero a veces muy reducido, de miembros de su disciplina de especialización o de una comunidad más amplia de especialistas dentro de una misma ciencia.

En la explicación del EF la cadena causal en cuestión comienza con la emisión de cuantos de luz por una fuente más o menos puntual, pero no es necesario especificar, entre otras cosas, cómo se produce la luz (por ejemplo, mediante una corriente eléctrica que calienta una resistencia) ya que ese hecho se considera irrelevante para la explicación. En principio, una cadena causal puede remontarse indefinidamente hacia el pasado, por lo que el evento que se elija como comienzo es una cuestión convencional. De la misma manera, sólo se mencionan los eventos intermediarios de la cadena que se consideran relevantes para la explicación. En el caso del EF, si la fuente de luz es una lámpara, no se mencionará el hecho de

---

6. Véase Salmon (1984) y (1998) para una descripción detallada de este modelo de explicación.

que los cuantos de luz atraviesen el vidrio de la lámpara, pese a que allí se produce algún tipo de interacción entre los átomos del vidrio y los cuantos. Sin embargo, esos eventos se consideran irrelevantes porque no modifican la frecuencia de la luz incidente, que es la variable más importante en la explicación de este fenómeno, y, además, porque tienen un efecto despreciable sobre otras variables relevantes, como la intensidad de la luz. Por supuesto, los eventos relevantes sólo pueden distinguirse de los irrelevantes sobre la base de un amplio conjunto de teorías presupuestas. La atribución de causas a un evento determinado, como señalara Hanson (1958), es una actividad altamente cargada de teoría y, por esa razón, resulta siempre falible y sujeta a eventuales revisiones. La historia causal que explica la ocurrencia de un evento dado es, entonces, una construcción realizada por el científico sobre la base de todo su conocimiento previo y de sus intereses específicos, así como del contexto pragmático en que se produce la explicación.

Típicamente, las explicaciones mecánico-causales apelan a entidades y procesos microscópicos como causas de los eventos macroscópicos que se quieren explicar. A menudo, pero no siempre, postulan todo un nivel de estructuras inobservables subyacentes a los fenómenos. Estas estructuras físicas son las que relacionan los fenómenos que constituyen el comienzo y el final de la cadena causal. Así, en la producción del EF sólo son observables las propiedades de la luz incidente (frecuencia, intensidad) y las de la corriente eléctrica emitida por el material iluminado (intensidad, energía). Ni los cuantos de luz incidentes ni los fotoelectrones emergentes son observables; ambos pertenecen a la estructura causal explicativa, de carácter microscópico. La existencia de electrones en el interior de los átomos y la explicación de las corrientes eléctricas como flujo de electrones libres eran hipótesis aceptadas ya en 1905. La existencia de cuantos de luz, en cambio, era una hipótesis novedosa y revolucionaria porque contradecía a la explicación entonces aceptada sobre la naturaleza de la luz.

El pasaje donde Einstein aplica su teoría del cuanto de luz para explicar la producción del EF contiene de manera explícita la narración de una historia causal:

Los cuantos de luz inciden en la capa superficial de los cuerpos y su energía cinética se convierte, al menos en parte, en energía cinética de

los electrones. La representación más simple del proceso es que un cuanto de luz cede la totalidad de su energía a un único electrón. [...] Un electrón del interior del cuerpo dotado de energía cinética habrá perdido una parte de su energía cinética cuando haya alcanzado la superficie. Además, se supondrá que cada electrón tiene que efectuar un trabajo  $P$  (característico de cada cuerpo) cuando abandona el cuerpo. Los electrones excitados que se encuentren inmediatamente sobre la superficie del cuerpo lo abandonarán con la máxima velocidad en dirección perpendicular. La energía cinética de tales electrones es  $R\beta v/N - P$ .<sup>7</sup> (Einstein, 1905a, pp. 145-146).

Es importante advertir que esta explicación no es una explicación de eventos singulares sino de *regularidades generales*. En verdad, las explicaciones de este tipo proporcionadas por la física teórica son, casi siempre, explicaciones de hechos generales, esto es, de regularidades de la naturaleza.<sup>8</sup> De hecho, Einstein explica mediante su teoría, como ya hemos señalado, cuatro regularidades previamente conocidas del EF.

No se trata, sin embargo, de una explicación restringida a estas regularidades. El mecanismo subyacente que Einstein postuló para explicar el EF podía aplicarse, y de hecho, se aplicó, a otras clases de fenómenos de interacción entre materia y radiación. Podemos describir el mecanismo básico de estos fenómenos de interacción de la siguiente manera (la cual representa una extensión y generalización de las hipótesis de 1905, que el propio Einstein desarrolló parcialmente en trabajos posteriores):<sup>9</sup>

7. Adviértase que Einstein no utiliza la constante de Planck  $h$ , sino una formulación equivalente expresada mediante otras constantes:  $R\beta v/N$ , donde  $R$  es la constante universal de los gases,  $N$  es “el número de moléculas reales en un equivalente gramo” (el número de Avogadro) y  $\beta = h/k$  (donde  $k$  es la constante de Boltzman).

8. Salmon señala al respecto que “parece completamente razonable mantener que cualquier explicación adecuada de un hecho particular debe ser, en principio, generalizable a una explicación de un tipo apropiado de regularidad.” (Salmon, 1984, p. 276).

9. Aquí se toman en cuenta Einstein (1916), donde se atribuye impulso a los cuantos de luz, así como Bose (1924) y Einstein (1924), donde se presenta la estadística que gobierna a los cuantos de luz, llamada de Bose-Einstein, la cual implica que el número de cuantos no se conserva.

1. Las fuentes luminosas emiten un número finito de cuantos de luz dotados de energía e impulso ( $E = hv$ ,  $p = hv/c$ ).
2. Los cuantos de luz se mueven sin interactuar entre sí siguiendo trayectorias definidas.
3. Cuando un cuanto de luz colisiona con un electrón es completamente absorbido por éste y le transfiere todo su impulso y energía.
4. Los electrones excitados pueden ser arrancados del material, o bien pueden emitir nuevos cuantos de luz.
5. En todo proceso de absorción o emisión de cuantos de luz se conservan la energía y el impulso totales, pero no el número de cuantos.

Estos procesos constituyen el mecanismo subyacente de muchas clases de interacciones entre la radiación y la materia. Permiten, por ejemplo, explicar la reflexión de la luz en el espejo como una interacción entre la luz incidente y el espejo, una interacción donde los cuantos de luz son absorbidos por los electrones de la placa del espejo y son emitidos nuevos cuantos correspondientes a la misma frecuencia. De esta manera se produce una auténtica unificación explicativa, la que en el marco del modelo mecánico-causal consiste en explicar el mayor número de fenómenos diferentes postulando el menor número de mecanismos causales subyacentes.<sup>10</sup> La hipótesis del cuanto de luz de Einstein consigue, efectivamente, unificar una amplia variedad de fenómenos de interacción entre luz y materia. No logra, sin embargo, como veremos enseguida, proporcionar una explicación unificada de *todos* los fenómenos ópticos.

10. Salmon (1984), p. 276, considera que la unificación se alcanza postulando un número reducido de mecanismos causales fundamentales gobernados por unas pocas leyes extremadamente comprensivas. Esta clase de unificación es diferente de la que defiende Kitcher (1989) basada en la aplicación de un número reducido de patrones explicativos generales. Estos dos modelos de explicación, como sostuvo el propio Salmon (1998, p. 73), son, en principio, compatibles. Podría argumentarse incluso que, en muchos casos, la aplicación de un mismo patrón general para la explicación de diferentes hechos es posible porque existe un único mecanismo causal subyacente a todos ellos.

La explicación causal del *EF* es posible porque la teoría del cuanto de luz es todavía una teoría de carácter clásico, esto es, no cuántico. Los cuantos de luz de Einstein, todavía retienen algunas propiedades características de los corpúsculos materiales de la mecánica clásica: poseen localización espacio-temporal bien definida y tienen trayectorias perfectamente determinadas. Por esa razón pueden interactuar causalmente con partículas de otra especie, tales como los electrones. Tal interacción involucra, como todas las interacciones clásicas, una transferencia de energía entre partículas. Aunque Einstein no lo afirmó en 1905, no hay razón para suponer que pensaba que la energía podía no conservarse. De hecho la conservación de la energía se hallaba presupuesta en la interpretación del *EF*, relacionando la energía de los cuantos de luz incidentes con la energía necesaria para liberar un electrón del átomo y la energía de los fotoelectrones emitidos. Es precisamente el “parámetro” libre *P*, que depende de cada material, el que formalmente permite “restablecer” el balance de energía en cada caso.

#### 4. La naturaleza dual del cuanto de luz

Desde fines del siglo XVII, cuando se formularon las concepciones corpuscular y ondulatoria de la luz, no existió una teoría unificada de los fenómenos luminosos. Siempre se tuvo conciencia de que determinados fenómenos se explicaban mejor desde el punto de vista ondulatorio, mientras que otros se explicaban mejor desde el punto de vista corpuscular. Podemos agrupar las principales virtudes y defectos explicativos de las teorías corpuscular y ondulatoria de la luz de la siguiente manera.

La teoría corpuscular de la luz permite explicar de manera sumamente clara y satisfactoria los siguientes fenómenos: la propagación rectilínea de los rayos luminosos, la formación de sombras, la reflexión y la absorción y emisión de la luz por la materia. Debe agregarse entre sus virtudes que no requiere de la existencia del éter para explicar la propagación. Algunos de los fenómenos que no puede explicar satisfactoriamente son: la interferencia, la difracción y la polarización de la luz. Entre las anomalías de esta teoría debe mencionarse que no consigue explicar por qué los

rayos luminosos no interfieren entre sí cuando se cruzan y por qué el “tamaño” de las fuentes luminosas no disminuye con el tiempo, ya que al emitir corpúsculos deberían perder materia.

La teoría ondulatoria, por su parte, explica de manera satisfactoria los fenómenos de interferencia, difracción y polarización. Además, soluciona aceptablemente las dos principales anomalías de la teoría corpuscular: los rayos de luz no interfieren porque las ondas, a diferencia de los corpúsculos, pueden superponerse; las fuentes luminosas no disminuyen su tamaño porque no emiten materia alguna. Entre los fenómenos que esta teoría no puede explicar claramente se encuentran algunos que constituyen los mayores éxitos explicativos de la teoría corpuscular. La propagación rectilínea y la reflexión de los rayos luminosos sólo se pueden explicar mediante la noción de frente de onda. La formación de sombras bien definidas resulta problemática ya que las ondas luminosas deberían transmitirse en todas direcciones rodeando los obstáculos. La interacción entre las ondas luminosas y la materia tampoco tiene explicación precisa, por lo que los fenómenos de absorción y emisión de la luz no resultan del todo comprensibles. Finalmente, la teoría ondulatoria necesitaba postular la existencia de un éter luminífero dotado de propiedades mecánicas muy especiales (extrema rigidez y, a la vez, completa penetrabilidad y falta de resistencia al movimiento de los cuerpos) para explicar la propagación de las ondas luminosas en el espacio aparentemente vacío de materia.

Es interesante señalar que, en rigor de verdad, ninguna de las dos teorías clásicas de la luz proporcionaba una explicación completamente satisfactoria de los fenómenos de absorción y emisión de la luz por la materia. La teoría corpuscular, por ejemplo, no explicaba qué ocurría con los corpúsculos luminosos cuando la materia los absorbía. Por su parte, la teoría ondulatoria no especificaba cómo el éter luminífero continuo podía interactuar con una materia compuesta por átomos. En consecuencia, ambas teorías debían recurrir a hipótesis auxiliares muchas veces poco plausibles. La situación, en este aspecto, no era esencialmente diferente en 1905, pese a los éxitos teóricos y experimentales obtenidos por la teoría ondulatoria de la luz a lo largo del siglo XIX. Cuando Einstein formuló su hipótesis acerca del cuanto de luz en 1905, claramente, la teoría ondulatoria era dominante y había desplazado

hacia tiempo a la teoría de la emisión de Newton; no obstante, se tenía clara conciencia de algunas de sus dificultades, lo que podía hacer sospechar que no era una teoría completa.

Ahora bien, durante casi dos décadas la hipótesis del cuanto de luz fue rechazada de manera casi unánime por la comunidad de los físicos.<sup>11</sup> Algunos la consideraron como un retorno a una concepción corpuscular que creían superada. Muchos insistieron en la imposibilidad de explicar los fenómenos de interferencia, difracción y polarización de la luz, que tan naturalmente se explicaban en el contexto de la teoría ondulatoria. Einstein concedió este punto; en el Congreso Solvay de 1911 afirmó:

Insisto en el carácter provisional de este concepto (*quanta* de luz) que no parece reconciliable con las consecuencias experimentales verificadas de la teoría ondulatoria.<sup>12</sup>

Después de 1905 era claro que había dos concepciones diferentes de la luz, cada una de las cuales era exitosa para explicar diferentes tipos de fenómenos ópticos y que, desde un comienzo, la posición de Einstein frente a esta dualidad de teorías rivales parece haber sido ambivalente. En primer lugar, reconoció que la teoría ondulatoria, expresada en la electrodinámica de Maxwell y Lorentz, era *incompleta*, esto es, incapaz de explicar toda una clase de fenómenos ópticos: los de absorción y emisión de luz por la materia. En segundo lugar, sostuvo que la electrodinámica clásica *no sería reemplazada* como explicación del dominio de fenómenos en los que resultaba exitosa. En su artículo de 1905 escribió:

La teoría ondulatoria de la luz, que opera con funciones espaciales continuas, se ha mostrado soberbia para describir fenómenos puramente ópticos y probablemente nunca será reemplazada por otra teoría. (Einstein, 1905a, p. 132).

En tercer lugar, admitió que su teoría del cuanto de luz también era *incompleta*, ya que dejaba sin explicar todo el dominio de

11. Sobre este tema véanse las obras de Pais (1982), Sánchez Ron (2001) y Stuewer (1975), que contienen abundantes testimonios.

12. Citado por Pais (1982), p. 383.

fenómenos ópticos que la teoría ondulatoria explicaba de manera más satisfactoria. En cuarto lugar, sostuvo que la teoría del cuanto de luz era *provisoria* y debía ser reemplazada, y pensó que en el futuro debía buscarse una *teoría unificada* de la luz que fuera, por así decirlo, una síntesis de las teorías corpuscular y ondulatoria. En 1909 lo expresó de esta manera:

Es innegable que hay un amplio grupo de hechos concernientes a la radiación que muestran que la luz posee ciertas propiedades fundamentales que pueden comprenderse mucho mejor desde el punto de vista de la teoría de la emisión de Newton que desde el punto de vista de la teoría ondulatoria. Es mi opinión, por consiguiente, que el próximo estadio en el desarrollo de la física teórica nos traerá una teoría de la luz que pueda comprenderse como una especie de fusión de la teoría ondulatoria con la de la emisión. (Einstein, 1909, p. 817)

En quinto y último lugar, si bien no formuló ni siquiera el esbozo de esta teoría unificada de la luz, conjeturó que debía ser una *teoría de campos*, en la cual el concepto de partícula no podía tener lugar, y, por tanto, tampoco el de cuanto de luz (entendido como una entidad independiente del campo, tal como las partículas clásicas).<sup>13</sup>

Así pues, tanto la electrodinámica clásica como la teoría del

13. En un artículo tardío, Einstein resume con claridad su concepción del campo unificado: “La combinación de la idea de un campo continuo con la de puntos materiales discontinuos en el espacio parece inconsistente. Una teoría de campos consistente requiere la continuidad de todos los elementos de la teoría, no sólo en el tiempo sino también en el espacio, y en todos los puntos del espacio. Así, la partícula material no tiene lugar como concepto fundamental en una teoría de campos. Por tanto, incluso aparte del hecho de que la gravitación no está incluida, la electrodinámica de Maxwell no puede considerarse una teoría completa. [...] Dado que la teoría general de la relatividad implica la representación de la realidad física mediante un campo *continuo*, el concepto de partículas o puntos materiales no puede desempeñar un papel fundamental, ni tampoco el concepto de movimiento. La partícula sólo puede aparecer como una región limitada en el espacio en la cual la intensidad del campo o la densidad de energía son particularmente altas.” (Einstein, 1950, pp. 345 y 348, respectivamente).

cuanto de luz eran, según Einstein, incompletas. Sin embargo, la primera era definitiva y sería integrada como parte de una teoría completa de la luz, mientras que la segunda era provisoria y sería reemplazada sin que, aparentemente, se conservara nada de ella. La razón de esta diferencia de actitud de Einstein respecto de las dos teorías de la luz se explica por la primacía ontológica que concedió al campo sobre las partículas. La teoría de Maxwell, en tanto teoría de campos puros, proporcionaba para Einstein el modelo sobre el que debían construirse todas las teorías de la física.<sup>14</sup> En particular, en una teoría unificada y completa de la luz no podían retenerse los cuantos de luz como entidades autosubsistentes. Las manifestaciones aparentemente corpusculares de la luz debían explicarse como producidas por regiones del campo electromagnético en las cuales la concentración de energía era particularmente alta. Einstein siempre expresó una profunda insatisfacción con el dualismo ontológico de campo y materia, o de ondas y partículas, legado por la física del siglo XIX, y, a la vez, tuvo una marcada preferencia por la noción de campo como entidad fundamental. La unificación de la física, según este punto de vista, debía conseguirse reduciendo las partículas a los campos y no a la inversa.

Notemos que el cuanto de luz, ya desde 1905, resultaba una entidad híbrida, dotada a la vez de características corpusculares y ondulatorias. Como las partículas materiales, poseía una localización puntual en el espacio y el tiempo, además de trayectorias bien determinadas. Como a las ondas, se le asociaba una frecuencia, y por consiguiente una longitud de onda, dos propiedades característicamente ondulatorias que no tiene sentido asignar a los corpúsculos materiales. En rigor de verdad, deberíamos considerar al cuanto de luz sólo como un “bloque” de energía bien determinada, más que como una partícula newtoniana, lo cual era potencialmente compatible con una teoría de campo.

En un esquema corpuscular de tipo newtoniano, la energía de cada corpúsculo luminoso debería depender de su masa y de su velocidad. Por ello, en principio, era posible que existieran corpúsculos de luz dotados de diferentes masas moviéndose con diferen-

14. Esta valoración de Maxwell es especialmente clara en Einstein (1931).

tes velocidades. En este cuadro, cuando la luz se propaga, se concibe que las partículas luminosas se mueven libremente en un espacio casi vacío, sin colisionar con los corpúsculos de materia. Esta propagación no requiere de la existencia de un éter luminífero. Los corpúsculos de luz interactúan con los medios densos mediante fuerzas a distancia, a modo de la gravitación, de tal manera que aumentan su velocidad cuando ingresan a un medio de mayor densidad, por ejemplo, al pasar del aire al agua. No hay nada en este modelo de la naturaleza de la luz que permita, en principio, relacionar las propiedades de los corpúsculos luminosos con propiedades ondulatorias tales como la frecuencia o la amplitud de onda.

En la concepción ondulatoria clásica, en cambio, la energía de la luz depende funcionalmente de la amplitud de la onda luminosa mientras que el color depende de su frecuencia. En el esquema conceptual ondulatorio, por su parte, no hay lugar para conceder a la luz propiedades características de los corpúsculos tales como localización espacial y temporal, masa o impenetrabilidad. Las ondas se extienden sobre volúmenes de espacio cada vez mayores a medida que se propagan en el tiempo, pueden superponerse y ocupar el mismo volumen, y, finalmente, no tienen masa y, por tanto, carecen de un impulso asociado a ésta.

Cuando Einstein introduce la noción de cuantos de luz y caracteriza a la energía de éstos en función de su frecuencia, realiza una atípica combinación de propiedades corpusculares y ondulatorias. Los cuantos de luz tienen una localización espacio-temporal precisa, y por tanto, trayectorias espaciales, como las partículas materiales newtonianas. Presumiblemente deberían tener también masa e impulso. Sin embargo, Einstein no les atribuyó impulso en el artículo de 1905, cosa que recién hizo en 1916.<sup>15</sup> Por otra parte, la relatividad especial, habría de poner, de hecho, restricciones ineludibles a la velocidad y a una eventual masa de los cuantos de luz. Desde el punto de vista relativista todos los cuantos deberían moverse en el vacío con una velocidad invariante  $c$  y tener una masa

15. Einstein (1916). Véase Pais (1982), Cap. 21; y Navarro Veguillas (1990), Cap. II, para una historia detallada del proceso de desarrollo de la noción de cuanto de luz y de sus propiedades.

inercial en reposo nula; es evidente, entonces, que los cuantos de luz no podían ser corpúsculos newtonianos. Por todas estas razones, la teoría del cuanto de luz de Einstein no podía considerarse como un retorno a las teorías clásicas de la emisión.

La frecuencia es, en el trabajo de 1905, la propiedad esencial de los cuantos de luz porque de ella dependen tanto la energía como el color asociado. Este es un aspecto heterodoxo desde el punto de vista ondulatorio ya que en la teoría ondulatoria sólo el color de la luz, pero no su energía, depende de la frecuencia de la onda luminosa. ¿Por qué las energías cinéticas de los cuantos de luz de diferentes colores no dependían de diferencias en sus velocidades cuando en un modelo corpuscular de la luz eso era lo que cabría esperar? Creemos que en este punto Einstein conservó un compromiso fuertemente maxwelliano. Aceptó de la teoría ondulatoria la idea de que todos los colores, esto es la luz de diferentes frecuencias, se mueven en el vacío con la misma velocidad. Por esa razón, las diferentes energías cinéticas de los cuantos de luz sólo podían depender de las diferencias en sus respectivas frecuencias. La unicidad de la velocidad de la luz en el vacío ya se insinuaba en (1905a) como una suerte de propiedad absoluta que Einstein en (1905b), apenas tres meses después, elevaría a la condición de postulado.

Con todo, los cuantos de luz, a pesar de su carácter dual, no eran todavía entidades plenamente cuánticas, tal como las entendemos actualmente. De las propiedades que hoy consideramos características de las entidades cuánticas, los cuantos de luz sólo poseían dos. La primera es la energía cuantificada, en el sentido de que la luz está compuesta de unidades mínimas asociadas a los efectos producidos sobre los fotoelectrones y que dependen de la frecuencia, pero *no* cuantificada en el sentido de que sólo existen ciertos valores de energías permitidos (como sucede, desde que Bohr los postuló en 1913, en el átomo de hidrógeno para los electrones ligados). En principio, un cuanto de luz, y dentro de cierto rango, puede estar dotado de cualquier frecuencia y, por consiguiente, de cualquier energía, ambas magnitudes continuas. La segunda característica es una suerte de dualidad onda-partícula, que implicaría entender a la luz como constituida por cuantos con localización espacio-temporal bien determinada o como ondas electromagnéticas, lo cual presupone concebir a la luz como un

“objeto” espacialmente extendido. Los cuantos de luz de Einstein, por otra parte, no están sometidos al principio de indeterminación de Heisenberg, formulado recién en (1927), por lo que poseerían un impulso y una posición bien determinados que podrían ser simultáneamente conocidos. Como consecuencia de ello, los cuantos de luz tienen, en principio, trayectorias bien definidas en el espacio.

En resumen, los cuantos de luz de Einstein, si bien obviamente no son ondas clásicas, tampoco presentan todas las propiedades típicas de las partículas. Poseen algunas propiedades características de las partículas materiales y algunas otras propiedades características de las ondas. Tienen, por así decir, un *status* “mixto” entre ondas y partículas, que, comprensiblemente resultaba difícil de entender para los físicos de la época, e incluso para el propio Einstein. La dualidad onda-partícula hacía aquí su primera aparición, todavía de una manera implícita y no bien reconocida.<sup>16</sup> Por último, los cuantos de luz tampoco son entidades plenamente cuánticas, como los fotones. Tienen también un carácter semiclásico o intermedio entre las partículas newtonianas y las “partículas” de la física cuántica.

##### 5. Explicaciones alternativas del efecto fotoeléctrico

La ecuación de Einstein para el *EF* hacía predicciones empíricas nuevas y bien definidas. A. Pais las describe de esta manera:

Esta ecuación [ $E = hv - P$ ] hizo predicciones nuevas y muy fuertes. Primera, que  $E$  debía variar linealmente con  $v$ . Segunda, que la pendiente del gráfico ( $E, v$ ) es una constante universal, independiente de la naturaleza del material irradiado. Tercera, que el valor de la pendiente debía ser la constante de Planck determinada a partir de la ley de radiación. Nada de eso se sabía entonces. (Pais, 1982, p. 381).

Sin embargo, durante una década después de 1905, ninguna de estas predicciones resultó claramente confirmada. Antes de 1915

16. Sobre el origen y desarrollo de la dualidad onda-partícula véase el detallado estudio de Wheaton (1983), que contiene abundantes referencias.

los resultados experimentales sólo habían confirmado, después de muchas dudas, el carácter lineal de la relación entre la energía y la frecuencia de los fotoelectrones. Entre 1915 y 1916, los experimentos de R. Millikan confirmaron con toda precisión la relación energía-frecuencia establecida en la ecuación de Einstein del *EF*, pese a que la intención declarada de Millikan era refutar dicha ecuación.<sup>17</sup> Este resultado le permitió a Millikan, además, medir de manera precisa la constante de Planck.

No obstante, después de publicados los resultados de Millikan, la comunidad de los físicos siguió rechazando mayoritariamente la hipótesis del cuanto de luz. Una de las razones de ese rechazo era, indudablemente, el carácter heterodoxo de la noción misma de cuanto de luz. La naturaleza revolucionaria de la concepción cuántica de la luz de Einstein consiste, sobre todo, en que supone que, para explicar los efectos de interacción luz-materia, la *radiación libre* se describe mejor, no como una onda continua, sino como un agregado de cuantos discretos. Esto significa que la hipótesis cuántica no debía aplicarse solamente a la interacción de la luz con la materia, sino también a la propagación de la luz en el vacío. Einstein, recordemos, propuso esta hipótesis con un carácter meramente heurístico. Planck y la mayoría de los físicos en ese momento, fueron más conservadores y prefirieron mantener la teoría de Maxwell para la radiación libre, trasladando el problema del carácter cuántico de la luz exclusivamente a los procesos de interacción con la materia.<sup>18</sup> Einstein podría haber seguido este camino, que luego se reveló intransitable ya que dejó sin explicar cómo la onda luminosa incidente podía “transformarse” para actuar como corpúsculos discretos cuando la luz interactuaba con cuerpos materiales.

17. Millikan (1915), (1916a) y (1916b). De hecho, hacia el final de su artículo (1916b), Millikan presentaba, como veremos enseguida, el esbozo de una teoría del *EF* alternativa a la de Einstein.

18. En una carta a Einstein del 6 de julio de 1907 Planck escribió lo siguiente: “No busco el significado del quantum de acción en el vacío, sino más bien en los lugares en que ocurra absorción y emisión, y supongo que lo que sucede en el vacío está descrito rigurosamente por las ecuaciones de Maxwell.” (citado por Pais, 1982, p. 384).

Otra razón que explica la resistencia de los físicos a aceptar la existencia del cuanto de luz es el hecho de que después de 1905 se formularon varias interpretaciones del *EF* que se proponían explicarlo sin emplear esa hipótesis. Lorentz, Thomson y Sommerfeld idearon distintas teorías del *EF* basadas en diferentes modelos de la estructura del átomo, sobre la cual se conocía muy poco en ese momento.<sup>19</sup> El supuesto común a todas estas teorías era que resultaba preferible explicar el *EF* mediante hipótesis acerca de la estructura atómica que no implicaran modificación alguna de la electrodinámica de Maxwell y Lorentz. Todas ellas postularon un mecanismo por el cual una onda luminosa incidente, que tuviera una frecuencia superior a la frecuencia crítica, pudiera excitar a los electrones, a menudo concebidos como parte del núcleo atómico, y arrancarlos de los átomos. Para ello contaban con cierta libertad para elaborar hipótesis acerca de la estructura de la materia, cuyo conocimiento era aún incipiente. Sin embargo, todas estas teorías, elaboradas entre 1910 y 1913, resultaron incompatibles con el modelo atómico de Bohr (1913), por lo que fueron rápidamente abandonadas después de 1913.

La única teoría del *EF* alternativa a la de Einstein que permaneció en pie después de 1913 fue la de O. W. Richardson, publicada en varios trabajos a partir 1912.<sup>20</sup> La razón de ello es, simplemente, que la teoría de Richardson era de carácter puramente macroscópico y no empleaba ninguna hipótesis acerca de la estructura de los átomos. Su enfoque era de tipo termodinámico y se proponía tratar explícitamente el problema de la interacción entre los átomos y la luz, o “radiación etérea”, como él la llamaba (Richardson, 1912a, p. 617). Richardson empleó la ley de distribución de Wien para la radiación, a la que también había apelado Einstein en (1905a), así como la hipótesis auxiliar de que el número de electrones emitidos en el *EF* era proporcional a la intensidad de la luz incidente. Sobre la base de estos supuestos, consiguió deducir la ecuación del *EF* de Einstein sin emplear la hipótesis del cuanto de

19. Para detalles y bibliografía véase Stuewer (1970). Sobre el contexto de estas teorías véase Wheaton (1983). Sobre el estado de los conocimientos acerca de la estructura atómica véase Pais (1988).

20. Richardson (1912a) y (1912b) son los más importantes.

luz. Sostuvo, además, que ninguna de sus hipótesis auxiliares implicaba que la luz estuviera compuesta por cuantos discretos. Según su punto de vista, la ley de Planck, también presupuesta en su deducción de la ecuación de Einstein, era independiente de la hipótesis del cuanto de luz. Además, según Richardson, nadie había probado que esta última hipótesis fuera necesaria para explicar la proporcionalidad entre el número de electrones emitidos en el *EF* y la intensidad de la luz incidente. Richardson concluyó que la confirmación experimental de la ecuación de Einstein “no implicaría la aceptación de la teoría unitaria [o sea, de cuantos] de la luz”.<sup>21</sup> Él mismo, en colaboración con K. T. Compton, llevó a cabo los experimentos más precisos hasta ese momento sobre el *EF* y logró confirmar el carácter lineal de la relación entre la energía cinética de los fotoelectrones y la frecuencia de la luz incidente.<sup>22</sup>

Entre 1912 y 1915 R. Millikan realizó una serie de experimentos de alta precisión con el fin de contrastar las tres predicciones, ya citadas, que se deducían de la ecuación de Einstein para el *EF*. El resultado, publicado en 1916, fue la confirmación de todas las predicciones conjuntamente. Sus datos, que mostraban la energía de los fotoelectrones como función de la frecuencia de la luz incidente, caían todos sobre una línea recta cuya pendiente era  $h/e$ , tal como se deducía de la ecuación de Einstein (Millikan, 1916b). Desde ese momento la comunidad de los físicos aceptó que dicha ecuación estaba confirmada más allá de toda duda razonable. Sin embargo, eso no llevó a la aceptación de la explicación de Einstein del *EF*. El propio Millikan rechazó la hipótesis del cuanto de luz y terminó su trabajo proponiendo una explicación alternativa (Millikan, 1916b, p. 385). De acuerdo con ella, debían existir “osciladores” de todas las frecuencias en los metales que experimentaban el *EF*. Dichos osciladores estaban en todo momento cargando energía hasta el valor  $h\nu$ , por lo que algunos de ellos se encontrarían en sintonía con la frecuencia  $\nu_0$  de la onda electromagnética incidente. Esos osciladores absorberían la energía hasta alcanzar el valor crítico  $h\nu_0$ , y, en ese momento, el electrón sería expulsado del átomo por una suerte de explosión. Como se advierte, se trata de una teoría

21. Richardson (1912b), p. 574.

22. Richardson y Compton (1912).

no einsteiniana del *EF*; una teoría clásica, en tanto presupone una concepción ondulatoria de la luz, a la que se agrega un conjunto de hipótesis nuevas acerca de la estructura microscópica de la materia. Este hecho hace que la teoría de Millikan se diferencie de la de Richardson, que es puramente macroscópica, y se asemeje al tipo de las de Sommerfeld y Thomson que también proponían hipótesis sobre el comportamiento de las partículas subatómicas.

Sólo después de los experimentos de Millikan se dispuso de una confirmación satisfactoria de la ecuación de Einstein. Sin embargo, no se obtenía de esta manera una evidencia crucial a favor de la hipótesis del cuanto de luz. En realidad, los resultados de Millikan confirmaron la teoría de Einstein, pero no constituyeron un experimento crucial respecto de la teoría rival de Richardson, o de su propia teoría (o, más bien, esbozo de teoría), que también quedaron confirmadas. En ese momento parecía razonable, entonces, suspender el juicio acerca de la confirmación de la hipótesis del cuanto de luz hasta que se realizaran otro tipo de experimentos que proporcionaran nuevas evidencias.

La teoría de Einstein, aunque hacía una conjetura sumamente audaz sobre la estructura microscópica de la luz, no incluía, al igual que la de Richardson, ninguna hipótesis específica acerca de la estructura de la materia. Sin embargo, suponía algunas concepciones generales acerca de la naturaleza del átomo. Einstein asumió que la materia era de carácter discreto y estaba constituida por átomos, cuya estructura interna dejó casi sin determinar. La única idea acerca de la composición de los átomos que Einstein presupuso es que estos contenían electrones ligados de manera más o menos débil. Estos supuestos los comparte también la teoría de Richardson. Einstein también supuso, de manera tácita, que los electrones eran la única clase de partículas que interactuaban con los cuantos de luz para producir el *EF*. Ninguna de estas hipótesis podía considerarse establecida hacia 1905, pero en el curso de las siguientes décadas resultaron bien confirmadas y se incorporaron a teorías generales acerca de las partículas subatómicas y sus interacciones. A la postre, la falta de hipótesis específicas acerca de la estructura del átomo resultó favorable para la teoría de la luz de Einstein, ya que la hizo compatible con el modelo atómico de Bohr de 1913 y con los descubrimientos posteriores acerca del núcleo atómico.

La hipótesis del cuanto de luz de Einstein, sin embargo, conti-

nuó siendo resistida por la mayoría de los físicos. Ya no se podía dudar de la corrección de la ecuación de Einstein, pero se buscaban explicaciones alternativas de corte clásico, esto es, que no modificaran la electrodinámica de Maxwell y Lorentz. El cambio decisivo en la actitud de la mayoría de los físicos se produjo después de los experimentos de A. H. Compton, finalizados en 1923. Compton encontró que los rayos X dispersados por materiales como el grafito y la parafina emergían con una frecuencia menor (y consiguientemente una longitud de onda mayor) que las de los rayos incidentes. Este fenómeno resultaba incompatible con la teoría clásica de la dispersión desarrollada por J. J. Thomson en el marco de la teoría ondulatoria de la radiación, de la cual se deducía que la frecuencia de los rayos dispersados debía ser la misma que la de los rayos incidentes.

Ante esta situación, Compton propuso adoptar una explicación cuántica de los fenómenos de dispersión que había observado. Supuso, entonces, que la luz estaba constituida por cuantos dotados de una energía  $E = hv$  y un momento  $p = hv/c$  (como había sostenido Einstein en 1905 y 1916, respectivamente). Además, supuso que en la interacción entre la luz y la materia se satisfacían las leyes de conservación del momento y de la energía. A partir de estas premisas, dedujo las fórmulas para calcular la frecuencia y la longitud de onda de la luz dispersada. Dichas fórmulas daban resultados casi idénticos a los de la electrodinámica clásica cuando la luz incidente era de baja o media frecuencia, pero predecían valores diferentes para los rayos X duros (muy energéticos) y para los rayos  $\gamma$ . Estas nuevas predicciones concordaban muy bien con los resultados experimentales de Compton. De manera independiente y casi simultánea, P. Debye (1923) obtuvo los mismos resultados y los explicó de la misma manera mediante la hipótesis del cuanto de luz.<sup>23</sup>

23. Según Stuewer (1975 y 2006), Compton se anticipó a Debye en enviar su trabajo a publicación (10 de diciembre de 1922 y 15 de marzo de 1923, respectivamente), pero el artículo de Debye fue publicado antes que el de Compton (15 de abril de 1923 y mayo de 1923, respectivamente). Curiosamente, Compton no citaba a Einstein en su artículo, mientras que Debye lo reconocía como su punto de partida.

Según el propio Einstein, el efecto Compton demostraba el carácter orientado de la radiación electromagnética,<sup>24</sup> por lo cual ya no podía dudarse de que se desplazaba por el espacio vacío con un impulso  $p = hv/c$ . Esto convenció a la mayoría de los físicos de que debía adoptarse una teoría cuántica de luz fundada en las hipótesis introducidas por Einstein casi veinte años antes. Millikan, sin embargo, no abandonó todas sus reticencias. En su discurso de recepción del Premio Nobel, el 23 de mayo de 1924, después de pasar revista a los numerosos experimentos, los propios y los que le sucedieron, que confirmaron la ecuación de Einstein para el *EF*, afirmó:

En vista de todos estos métodos y experimentos la validez general de la ecuación de Einstein es, según pienso, universalmente aceptada, y en esa medida la realidad de los cuantos de luz de Einstein puede considerarse experimentalmente establecida. Pero la concepción de los cuantos de luz localizados [corpúsculos], a partir de la cual Einstein obtuvo su ecuación, debe considerarse todavía lejos de estar establecida. (Millikan, 1924, p. 63; subrayado por el autor).

El mismo discurso muestra que el descubrimiento del efecto Compton evidentemente lo impresionó, aunque tampoco logró convencerlo totalmente de la realidad de los cuantos de luz. El efecto Compton parecía proporcionar una confirmación de la hipótesis del cuanto de luz completamente independiente del *EF*. Millikan lo reconoció con estas palabras:

Puede decirse, entonces, sin hesitación que no es meramente la ecuación de Einstein la que está teniendo un éxito extraordinario en este momento, sino también la concepción de Einstein (Millikan, 1924, p. 65).

---

24. "El resultado positivo del experimento de Compton demuestra que la radiación se comporta como si estuviese constituida por proyectiles de energía discreta, y no sólo a efectos de impacto." (Einstein, 1924, trad. esp. de Sánchez Ron, 2001, p. 391). En una carta a M. Besso del 24 de mayo de 1924, Einstein le decía explícitamente que la significación de los resultados de Compton consiste en que demuestran "la realidad del impulso de los cuantos de luz" (Einstein, 1979, trad. esp. p. 218.)

Sin embargo, Millikan concluía con la siguiente expresión de reservas respecto de la existencia del cuanto de luz:

Pero hasta que esta [la hipótesis del cuanto de luz] pueda dar cuenta de los hechos de interferencia y otros efectos que hasta ahora han parecido irreconciliables con ella, debemos rehusarle nuestro completo asentimiento. (Millikan 1924, p. 65).

Como ya señalamos antes, el propio Einstein había reconocido siempre que su teoría del cuanto de luz no era capaz de explicar los fenómenos de interferencia luminosa. En realidad, el problema al que Millikan alude, nunca pudo resolverse mediante la hipótesis de que los cuantos de luz están localizados en todo momento.<sup>25</sup>

## 6. Conclusiones

La hipótesis del cuanto de luz, aunque resistida, tenía evidentes éxitos explicativos que debían evaluarse comparativamente con otras teorías rivales, de las cuales sólo la de Richardson resultaba viable después de 1913. Desde el punto de vista epistemológico, la teoría de Einstein tenía dos claras ventajas sobre la de Richardson. En primer lugar, era una explicación más profunda porque apelaba a procesos causales que ocurrían en el nivel microscópico. En segundo lugar, era una explicación más general y tenía mayor poder unificador dado que no sólo explicaba el *EF*, sino otros fenómenos luminosos. Ofrecía una explicación unificada, apelando a un mismo tipo de proceso causal subyacente a diversos procesos de interacción entre la luz y la materia, procesos que, hasta ese momento, se consideraban susceptibles de explicaciones de diferente naturaleza. Por esta razón, la hipótesis del cuanto de luz podía considerarse confirmada no sólo por los datos experimentales acerca del *EF*, como los de Lenard, sino también

---

25. Así, la electrodinámica cuántica supone que los fotones, cuando producen efectos de interferencia, se hallan *deslocalizados*, es decir, no ocupan una posición puntual, sino que se extienden en el espacio como si fueran ondas. De hecho, pueden concebirse como ondas planas que ocupan la totalidad del espacio.

por todos los hechos conocidos que conseguía explicar, como la fotoluminiscencia, la radiación del cuerpo negro e incluso el efecto Compton, descubierto más adelante.

A pesar de las virtudes explicativas de la teoría de Einstein, hubo algunos físicos que siguieron dudando de la existencia del cuanto de luz y propusieron explicaciones de tipo ondulatorio tanto del EF como del efecto Compton.<sup>26</sup> Estas explicaciones alternativas, que persisten hasta la actualidad, no son empíricamente equivalentes a la teoría del cuanto de luz. La vigencia de la teoría de Einstein debemos atribuirle al hecho de que siempre ha resultado mejor confirmada que cualquiera de las teorías rivales en las que el campo electromagnético no está cuantificado.<sup>27</sup> Además, otro elemento que, indudablemente, ha contribuido a que esta teoría resulte preferida, es su mayor elegancia, simplicidad y transparencia. Desde un punto de vista popperiano la teoría de Einstein es una hipótesis audaz y sumamente falsable que resistió todos los intentos de refutación (como los de Millikan), y, sin embargo, no se aceptó como bien corroborada. Una explicación de esta actitud se puede atribuir al hecho de que nunca se obtuvo un completo consenso a favor de una interpretación realista de la existencia del cuanto de luz, debido, a su vez, a la relación reticente de la propia física cuántica respecto de la realidad de sus observables.

Cuando Einstein recibió el premio Nobel, como señalamos al comienzo, su ecuación del EF estaba bien corroborada, y sin embargo, su explicación teórica de este fenómeno aún no era acep-

26. Ya hemos citado las principales explicaciones alternativas del EF. Las explicaciones no cuánticas del efecto Compton comenzaron tempranamente con el trabajo de Schrödinger (1927). Mayores detalles sobre este tema pueden encontrarse en Greenstein y Zajonc (1998), pp. 21-35 y 213-214.

27. Véase Clauser (1974) para una comparación entre las predicciones de las teorías clásicas y semiclásicas del EF y la teoría cuántica del campo electromagnético. La conclusión de Clauser es que los resultados experimentales “contradicen las predicciones de cualquier teoría clásica o semiclásica de la radiación, en las cuales la probabilidad de fotoemisión es proporcional a la intensidad clásica del campo. [...] Nuestro experimento, por tanto, resucita al efecto fotoeléctrico como un fenómeno que requiere la cuantización del campo electromagnético”. (Clauser, 1974, p. 854).

tada. No obstante, el hecho de que le hubiesen otorgado el premio invocando “su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico”, indica que la fertilidad heurística de su hipótesis era entonces innegable. En cambio, las predicciones de la relatividad especial y general, por la que Einstein es hoy más reconocido por el público y por los propios físicos, no poseían la fuerza del EF en cuanto a la claridad intuitiva y a la simplicidad de sus consecuencias, además de no tener aún suficiente confirmación experimental.

A pesar de su actitud realista respecto de las teorías físicas, Einstein propuso su hipótesis del cuanto de luz como un mero instrumento explicativo; un modelo causal tan poderosamente predictivo que no necesitaba comprometerse con la realidad de las nuevas entidades que postulaba. En este sentido, el *carácter heurístico* de esta hipótesis permanece vigente hasta hoy y ha dado muestras de una enorme fertilidad explicativa. Sin embargo, el *componente causal* de la explicación de Einstein no puede mantenerse en el contexto de una teoría cuántica referida al movimiento de partículas. La realidad de los cuantos de luz resulta afectada por el problema general de la realidad de las entidades cuánticas y no puede resolverse independientemente de él. Pocas veces el empleo del término *heurístico* en el título del artículo de Einstein de 1905, resultó tan adecuado desde un punto de vista tanto epistemológico como histórico.

## BIBLIOGRAFÍA

- BÁRÁNY, A.; SKOG, F. y STENKULA, A. (2005), *Albert Einstein «for his discovery of...»*, Stockholm, Nobel Museum.
- BOHR, N. (1913), “On the Constitution of Atoms and Molecules [Part I]”, *Philosophical Magazine*, **26**: 1-25.
- BOSE, S. N. (1924), “Planck Gesetz und Lichtquantenhypothese”, *Zeitschrift für Physik*, **26**: 178-181.
- CASSIDY, D. C. (2005), “Einstein and the Quantum Hypothesis”, *Annalen der Physik (Leipzig)* **14**, Supplement, 15-22.
- CLAUSER, J. F. (1974), “Experimental Distinction Between the Quantum and Classical Field Theoretic Predictions for the Photo-Electric Effect”, *Physical Review D*, **9**: 853-860.
- COHEN-TANNOUJDI, C.; DUPONT-ROC, J. y GRINBERG, G. (1998), *Atom-*

- Photon Interactions: Basic Processes and Applications*, New York, J. Wiley & Sons.
- COMPTON, A. H. (1923), "A Quantum Theory of the Scattering of X Rays by Light Elements", *Physical Review*, **21**: 483-502.
- DEBYE, P. (1923), "Zerstreuung von Röntgenstrahlen und Quantentheorie", *Physikalische Zeitschrift*, **24**: 161-166.
- EINSTEIN, A. (1905a), Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt, *Annalen der Physik*, **17**: 132-148.
- EINSTEIN, A. (1905b), Zur Elektrodynamik bewegter Körper, *Annalen der Physik*, **17**: 891-921.
- EINSTEIN, A. (1909), Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung", *Physikalische Zeitschrift*, **10**: 817-825.
- EINSTEIN, A. (1916), "Zur Quantentheorie der Strahlung", *Mitteilungen der Physikalische Gesellschaft Zürich*, **16**: 47-62. (Reimpreso en: *Physikalische Zeitschrift* (1917), **18**: 121-128.)
- EINSTEIN, A. (1924), "Komptonsche Experiment", *Berliner Tageblatt*, 20 de Abril, I. Beiblatt.
- EINSTEIN, A. (1924), "Quantentheorie des einatomigen idealen Gases", *Preussische Akademie der Wissenschaften. Physisch-mathematische Klasse Sitzungsberichte*, pp. 261-267.
- EINSTEIN, A. (1931), "Maxwell Einfluss auf die Entwicklung der Auffassung des physikalisch-realen", en: Einstein (1934) pp. 159-162.
- EINSTEIN, A. (1934), *Mein Weltbild*, Amsterdam, Querido Verlag. (Reimpreso en Zurich, Europa Verlag, 1980.)
- EINSTEIN, A. (1950), "On the Generalized Theory of Gravitation", *Scientific American*, **182**: 13-17. (Reimpreso en: Einstein, A., *Ideas and Opinions*. New York, Crown, 1954, pp. 341-356.)
- EINSTEIN, A. y BESSO, M. (1979), *Correspondence (1903-1955)*, Paris, Hermann. (Traducción española: *Correspondencia con Michele Besso (1903-1955)*, Barcelona, Tusquets, 1994.)
- GREENSTEIN, G. y ZAJONC, A. (1997), *The Quantum Challenge: Modern Research on the Foundations of Quantum Mechanics*, Sudbury, Mass., Jones and Bartlett Publishers.
- HEISENBERG, W. (1927), "Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik", *Zeitschrift für Physik*, **43**: 172-198.

- KITCHER, P. (1989), "Explanatory Unification and the Causal Structure of the World", en: Kitcher, P. y Salmon, W. (eds.), *Scientific Explanation*, Minnesota, University of Minnesota Press, pp. 410-505.
- LENARD, P. (1902), "Über die lichtelektrische Wirkung", *Annalen der Physik*, **8**: 149-198.
- MILLIKAN, R. A. (1915), "New Tests of Einstein's Photo-Electric Equation", *Physical Review*, **6**: 55.
- MILLIKAN, R. A. (1916a), "Einstein's Photoelectric Equation and Contact Electromotive Force", *Physical Review*, **7**: 18-32.
- MILLIKAN, R. A. (1916b), "A Direct Photoelectric Determination of Planck's 'h'", *Physical Review*, **7**: 355-388.
- MILLIKAN, R. A. (1924), "The Electron and the Light-Quant from the Experimental Point of View", en: *Nobel Lectures: Physics 1922-1941*, Amsterdam, Elsevier, 1965, pp. 54-66.
- NAVARRO VEGUILLAS, L. (1990), *Einstein, profeta y hereje*, Barcelona, Tusquets.
- PAIS, A. (1982), 'Subtle Is The Lord...' *The Science and The Life of Albert Einstein*, Oxford, Clarendon Press, 2005.
- PAIS, A. (1988), *Inward Bound: Of Matter and Forces in the Physical World*, New York, Oxford University Press.
- PLANCK, M. (1900), "Zur Theorie des Gesetzes der Energieverteilung in Normalspektrum", *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft*, **2**: 237-243.
- RICHARDSON, O. W. (1912a), "Some Applications of the Electron Theory of Matter", *Philosophical Magazine*, **23**: 594-627.
- RICHARDSON, O. W. (1912b), "The Theory of Photoelectric Action", *Philosophical Magazine*, **24**: 570-574.
- RICHARDSON, O. W. y COMPTON, K. T. (1912), "The Photoelectric Effect", *Philosophical Magazine*, **24**: 575-594.
- SALMON, W. (1984), *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World*, Princeton, Princeton University Press.
- SALMON, W. (1998), *Causality and Explanation*, New York, Oxford University Press.
- SÁNCHEZ RON, J. (2001), *Historia de la física cuántica. 1. El período fundacional (1860-1926)*, Barcelona, Crítica.
- SCHRÖDINGER, E. (1927), "Über den Comptoneffekt", *Annalen der Physik*, **82**: 257-264.
- STUEWER, R. H. (1970), "Non-Einsteinian Interpretations of the

Photoelectric Effect”, *Minnesota Studies in the Philosophy of Science*, Vol. V, Minneapolis, University of Minnesota Press, pp. 246-263.

STUEWER, R. H. (1975), *The Compton Effect: Turning Point in Physics*, New York, Science History Publications.

STUEWER, R. H. (2006), “Einstein’s Revolutionary Light-Quantum Hypothesis”, *Acta Physica Polonica B*, **37**: 543-558.

WHEATON, B. R. (1983), *The Tiger and the Shark: Empirical Roots of Wave-Particle Dualism*, Cambridge, Cambridge University Press.

*Recibido el 18-03-07; aceptado el 18-09-07.*