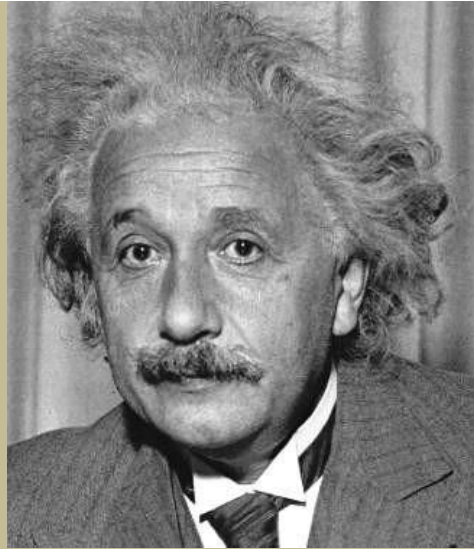


EL FOTÓN CUMPLE CIEN AÑOS:

Gestación difícil y recepción hostil

por Luis Navarro Veguillas*



La conmemoración de este centenario representa una ocasión impagable para precisar ciertos malentendidos históricos sobre el tema y revisar algunos conceptos de la física que lo envuelve. El episodio nos servirá, además, como ejemplo ilustrativo de que la creación científica no siempre se ajusta a las pautas prescritas por el loado «método científico».

En un trabajo de riguroso corte historiográfico, es imprescindible acompañar datos y afirmaciones con las referencias correspondientes. Pero nuestras intenciones aquí son meramente divulgativas, por lo que no queremos abrumar al lector medio con un mar de citas. El interesado encontrará justificación y referencias para casi todas nuestras aseveraciones en el sexto tomo de las obras completas de Einstein,¹ así como en nuestras propias investigaciones.²

Nuestra historia comienza en 1905 con las primeras nociones cuánticas de Albert Einstein (1879-1955), acerca de la emisión y absorción de luz. Sigue con la narración de la evolución de su pensamiento al respecto y de las polémicas que suscitó, prestando atención especial al nacimiento del fotón, en 1917. Tras poner de manifiesto la hostilidad inicial hacia el nuevo concepto, acabaremos justificando las razones por las que las voces de los que clamaban contra tan revolucionarias concepciones no cesaron hasta la consolidación de la moderna teoría cuántica.

* Profesor Emérito, Universitat de Barcelona, luis.navarro@ub.edu

¹ La serie *The Collected Papers of Albert Einstein* (CPAE) comenzó a publicarse en 1987 [1]. Contendrá más de 15.000 documentos, científicos y personales, agrupados en unos 30 volúmenes, cada uno con su correspondiente traducción inglesa. Hasta ahora han aparecido los 13 primeros.

² Véase Navarro (2009) [2]

Un malentendido histórico y conceptual a propósito del efecto fotoeléctrico (1905)

Es frecuente asociar el nacimiento del fotón, con la explicación del efecto fotoeléctrico por Einstein en 1905. Pero hay mucho que precisar aquí. No sólo por razones historiográficas, sino también conceptuales. Tal efecto fue detectado por H. R. Hertz, en 1887, como un fenómeno secundario en los experimentos con los que pretendía confirmar la teoría de J. C. Maxwell sobre el campo electromagnético. Ironías de la historia: tratando de asentar una teoría de naturaleza continua, como es la descripción maxwelliana, Hertz proporcionó una base experimental para sugerir el posible comportamiento discreto de la radiación electromagnética.

En 1905 Einstein pone de manifiesto la analogía formal que existe entre un gas ideal monoatómico –que, en el equilibrio, se ajusta a la distribución de velocidades de Maxwell– y la radiación del cuerpo negro, regida por la entonces ya obsoleta ley fenomenológica de Wien.³ Un genuino análisis de tal analogía le llevo a concluir que la radiación de frecuencia ν –dentro del rango de validez de la ley de Wien– «se comporta termodinámicamente como si estuviera constituida por cuantos de energía, mutuamente independientes, de valor $h\nu$ », donde h es la constante de Planck. Sobre la base de tal conclusión Einstein daba cuenta de tres fenómenos que, por entonces, se resistían a una explicación teórica satisfactoria: la regla de Stokes –la frecuencia de la emisión por luminiscencia resulta inferior a la frecuencia de la luz incidente–, el efecto fotoeléctrico y la ionización de gases por luz ultravioleta.

La anterior conclusión fue entendida –en realidad, malentendida– por muchos, y aún hoy lo es, como la introducción de la naturaleza corpuscular de la radiación, siendo los cuantos las partículas que más tarde se llamarían «fotones». Ni lo uno ni lo otro. Si, en efecto, Einstein así hubiera pensado, no sólo lo habría destacado como se merecía, sino que el creador de la teoría de la relatividad tenía que haber asignado al cuanto un impulso de valor $h\nu/c$. El efecto fotoeléctrico se reduciría entonces a un simple choque inelástico cuanto-electrón. En ese caso, Einstein tendría que haber considerado también el choque elástico de ambos, con lo que habría previsto la existencia del efecto Compton, casi veinte años antes de su descubrimiento. Hay que insistir: la explicación teórica del efecto fotoeléctrico por Einstein en 1905 implica,

³ Es sencillo comprobar que si Einstein hubiera partido de la ley de Planck para la radiación del cuerpo negro, la que mejor se ajustaba por entonces a los experimentos, no habría llegado a la analogía citada. Él partió de la de Wien. Pero es que, como demostraría Ehrenfest en 1911, ambas leyes implican la misma cuantización de la energía, si bien, a cada valor posible de ésta, una y otra le asignan peso estadístico diferente. Para más detalles, véase NAVARRO y PÉREZ (2004) [3].

como mucho, la cuantización de la energía de la radiación, pero nada respecto a su posible constitución corpuscular. Esto vino después.

Rechazo generalizado

La tónica del impacto causado por su hipótesis cuántica de 1905 se puede detectar con claridad al leer un párrafo del discurso que Planck pronunció —¡en 1913!— ante la Academia Prusiana de Ciencias para presentar al candidato a nuevo académico:

«En suma, puede afirmarse que entre los problemas importantes, tan abundantes en la física moderna, difícilmente exista uno ante el que Einstein no adoptara una posición de forma notable. Que, a veces, errara el blanco en sus especulaciones, como por ejemplo en su hipótesis acerca del cuanto de luz, no puede esgrimirse realmente demasiado en su contra. Porque sin correr un riesgo de vez en cuando es imposible, incluso en la ciencia natural de mayor exactitud, introducir verdaderas innovaciones».

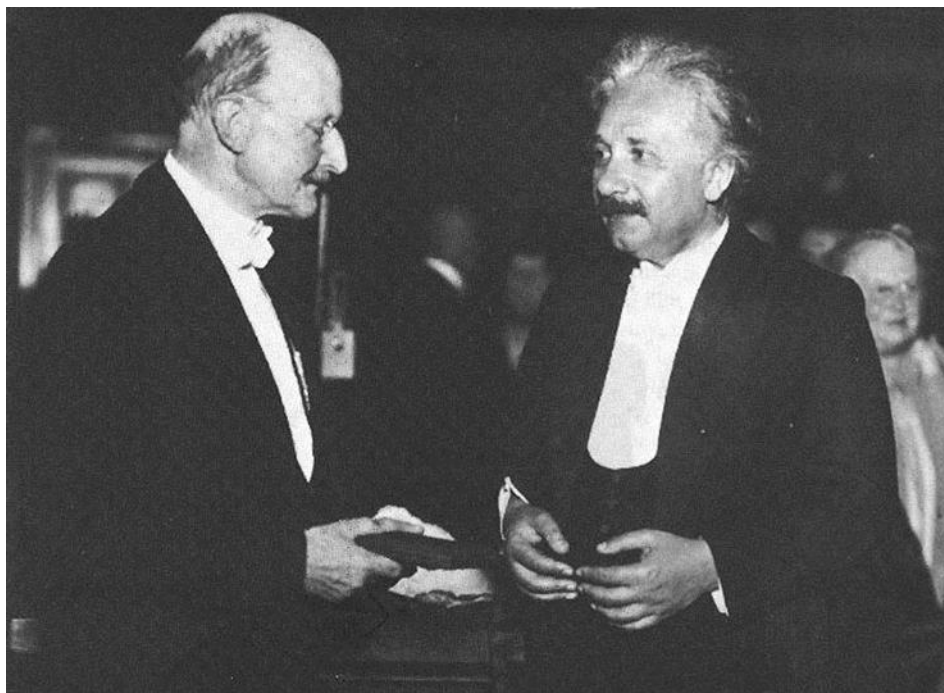


Fig. 1. Planck, en 1913, calificó de “error” la hipótesis de Einstein sobre los cuantos, de 1905.

Cabría pensar que la prevención generalizada ante una noción tan nueva y problemática como los cuantos estaba justificada en tanto no se obtuvieran resultados experimentales que se ajustaran fielmente a las previsiones einsteinianas. Nada más lejos de la realidad. Millikan publicó, en 1916, un artículo exponiendo los resultados de una serie de experimentos que confirmaban la plena validez de la ley de Einstein para el efecto fotoeléctrico. Pero ni siquiera el propio Millikan pensaba que ello implicaba la confirmación experimental de la hipótesis de los cuantos, pues su artículo concluye así: «La ecuación fotoeléctrica de Einstein, con independencia de lo que se pueda

afirmar sobre su origen, parece resistir con firmeza todas las comprobaciones a las que ha sido sometida». Y remata su opinión en un segundo artículo del mismo año –destinado ahora a determinar el valor de la constante de Planck por medio del efecto fotoeléctrico– afirmando: «A pesar del éxito aparentemente completo de la ecuación de Einstein, la teoría física de la que estaba destinada a ser la expresión simbólica se ha encontrado tan insostenible que el mismo Einstein, creo, ya no la sostiene».

Este rechazo de las primeras ideas cuánticas de Einstein se prolongó a lo largo de veinte años. Aunque se le habría de otorgar el premio Nobel de Física de 1921 por «...su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico», la mención evitaba sutilmente cualquier referencia a la hipótesis cuántica que le había servido de soporte teórico, dada la inseguridad que aún por entonces había sobre su validez.

Son varias las razones que confluyeron en el prolongado rechazo de los cuantos de Einstein pues se trata de una osada hipótesis que parece sugerir, cuando menos, la necesidad de una revisión profunda del formalismo de Maxwell para el campo continuo de radiación. Y todo esto ¿a cambio de qué? De casi nada, pues las referencias a hechos experimentales en el artículo de 1905 no podían valorarse adecuadamente en aquellos tiempos por la carencia de resultados rigurosos sobre los fenómenos allí analizados. Por ejemplo, la linealidad entre la energía del electrón liberado y la frecuencia de la radiación incidente, en el efecto fotoeléctrico, hubo de esperar aún una década antes de ser detectada de forma fiable por los experimentos.

Pero Einstein está cada vez más convencido de la necesidad de admitir algún tipo de comportamiento discreto para la radiación. Un tema éste –el de la necesidad– que también abordaron Ehrenfest (1911) y Poincaré (1912), independientemente.⁴ Las pretensiones de Einstein son claras: en lugar de introducir los cuantos como hipótesis de partida, al tratarse de un concepto tan extravagante él se inclina por deducir su existencia como un resultado ineludible a partir del comportamiento de la radiación electromagnética.

Un jugoso *Gedankenexperiment*

La doble tarea –la necesidad de los cuantos y su compatibilidad con el electromagnetismo de Maxwell– aparece para Einstein como ineludible, aunque sumamente ardua. No sólo por la dificultad intrínseca de la investigación, sino porque

⁴ Ehrenfest, en 1911, y Poincaré, en 1912, también abordaron, independientemente, el tema de la necesidad de la cuantización de la energía de la radiación. Véase Navarro y Pérez (2004) [3].

para la mayor parte de los líderes de la física del momento el comportamiento discreto de la energía –propio de un agregado de partículas materiales– y el comportamiento continuo de dicha magnitud –característico de las ondas electromagnéticas– representaban aspectos irreconciliables por ser mutuamente excluyentes.

Es un buen momento para detenerse en 1909 y reparar en la comunicación que Einstein presenta en la reunión anual de la Sociedad Alemana de Científicos Naturales y Médicos, en Salzburgo; una ponencia que Pauli no dudaría más tarde en calificar como «uno de los hitos en el desarrollo de la física teórica». Einstein introduce aquí un fructífero *Gedankenexperiment* –al que volverá en diversas ocasiones–, que le permite aunar intuición y dominio de los métodos estadísticos. Imagina un espejo se puede mover libremente en la dirección perpendicular a su propio plano, reflejando totalmente la radiación comprendida en el intervalo de frecuencias $(\nu, \nu + d\nu)$ y siendo transparente para el resto. El espejo se encuentra en el interior de una cavidad que contiene un gas ideal monoatómico y radiación electromagnética; todo ello en equilibrio térmico, a una cierta temperatura absoluta T .

Al igual que existen fluctuaciones en los choques irregulares de las moléculas de gas con el espejo, el equilibrio exige la existencia de fluctuaciones en la presión de la radiación. Un análisis más intuitivo que riguroso –basado en el electromagnetismo y la mecánica estadística– le permite obtener sendas expresiones para las fluctuaciones de la energía de la radiación $\overline{\varepsilon^2}$ y del momento lineal del espejo $\overline{\Delta^2}$:

$$\begin{aligned} \overline{\varepsilon^2} &= \left(h\nu\rho + \frac{c^3}{8\pi\nu^2} \rho^2 \right) V d\nu \\ \frac{\overline{\Delta^2}}{\tau} &= \frac{1}{c} \left(h\nu\rho + \frac{c^3}{8\pi\nu^2} \rho^2 \right) S d\nu \end{aligned} \quad , \quad (1)$$

donde h es la constante de Planck, $\rho(\nu, T)$ la densidad de energía de la radiación –representada por la ley de Planck–, c la velocidad de la luz en el vacío, V el volumen de la cavidad, S la superficie del espejo y τ el intervalo de tiempo considerado.

Einstein destaca que, en ambas expresiones, el primer sumando “recuerda” el carácter cuántico de la radiación mientras que el segundo se puede obtener como

consecuencia de un proceso de interferencias –que no concreta– basado en la interpretación usual de la radiación electromagnética. Tan fina consideración le permite vislumbrar la posible necesidad de tener que incorporar, en la misma teoría, cierto dualismo para la mejor comprensión del comportamiento de la radiación, dada la naturaleza cuántica (discreta) del primer sumando y el carácter ondulatorio (continuo) del segundo. Lo que le sirve para justificar el sorprendente comienzo de su intervención en Salzburgo: «Es mi opinión, entonces, que la próxima fase del desarrollo de la física teórica nos aportará una teoría de la luz que pueda ser interpretada como una fusión de las teorías ondulatorias y de emisión [es decir, corpuscular]». Einstein comienza a pensar que tal vez los aspectos corpusculares y ondulatorios no sean tan absolutamente incompatibles como hasta entonces se creía.

Entre 1909 y 1916 Einstein puso de manifiesto una característica esencial para llegar hasta la naturaleza de la radiación: con dos procesos elementales —absorción y emisión (espontánea)— tan sólo se puede vincular la ley de Wien con el comportamiento de la radiación; lo que era un grave defecto para ser mantenido en 1916, pues ya aquella había resultado unánimemente descartada ante la plena confirmación experimental de la ley de Planck. Einstein se encargará de demostrar que su introducción de un tercer proceso, la emisión estimulada, permite reconducir satisfactoriamente la situación.

El nacimiento del fotón

Centrémonos ahora en el famosísimo artículo de 1917, que certifica la realidad de los cuantos, o equivalentemente, el nacimiento del fotón.⁵ En el artículo podemos distinguir dos puntos bien diferenciados: la deducción de la ley de radiación de Planck y el carácter direccional de los procesos elementales introducidos para tal fin.

En la introducción Einstein recuerda que, aunque la teoría desarrollada por Planck dieciséis años antes condujo a una fórmula para la radiación, brillantemente confirmada, su deducción resultó «inauditamente atrevida» y se basaba en «teorías incompatibles», como lo eran su hipótesis cuántica y el electromagnetismo de Maxwell, lo que producía gran insatisfacción en el propio Planck y en los teóricos que se ocupaban del tema. Y es en la misma introducción donde Einstein anticipa que va a exponer una reflexión propia que resulta «atractiva por su sencillez y generalidad».

⁵ Lo esencial del contenido de este artículo, había sido publicado un año en una de revista de Zúrich con escasa divulgación –véase [4]–, por lo que en la “partida de nacimiento” del fotón reza, impropriamente, el año 1917.

La reflexión einsteiniana tiene doble aspecto: consiste en la sustitución de los vetustos resonadores planckianos por moléculas susceptibles de experimentar transiciones bohrianas y el establecimiento de tres procesos elementales (emisión espontánea, absorción y emisión inducida), como responsables últimos de la interacción entre la materia y la radiación. Es el momento “elegido” por Einstein para, enarbolando con decisión la navaja de Ockham, liberar a la incipiente teoría cuántica de resonadores, espejos y demás intermediarios. Pasa a considerar un gas material en equilibrio térmico con la radiación. Cada molécula del gas puede presentarse en un conjunto discreto de estados $Z_1, Z_2, \dots, Z_n, \dots$, con energías respectivas $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n, \dots$

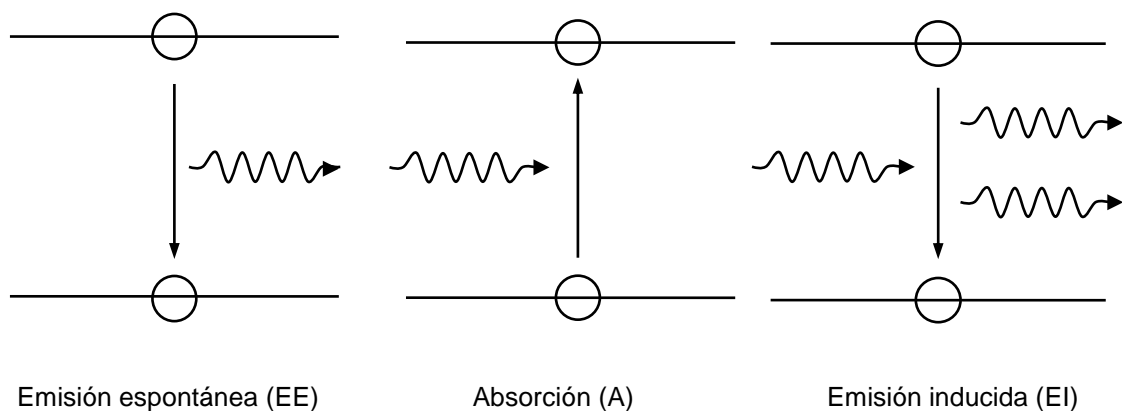


Fig. 2. En 1917 Einstein mostró que partiendo de los dos procesos elementales, (EE) y (A), se llegaba ineludiblemente a la obsoleta ley de Wien. Introdujo un tercer proceso, (EI), y con el trío como hipótesis de partida obtuvo la ya plenamente confirmada ley de Planck... y bastante más.

Las moléculas del gas pueden efectuar transiciones hacia estados de energía mayor, absorbiendo de la radiación la correspondiente diferencia de energía, y hacia estados de energía menor, emitiendo ahora la diferencia en forma de energía radiante. Como no se conocen las leyes exactas que gobiernan estos procesos elementales, Einstein introduce las «probabilidades de transición» para cada uno de ellos en el intervalo de tiempo dt :

- Para procesos tipo (EE): $dW = A_m^n dt$
- Para procesos tipo (A): $dW = B_n^m \rho dt$
- Para procesos tipo (EI): $dW = B_m^n \rho dt$

Los coeficientes A y B –luego conocidos como «coeficientes de Einstein»– son característicos del par de estados involucrados en la transición y los procesos inducidos por la radiación son proporcionales a la densidad de energía de ésta ρ .

Con tal bagaje, tras imponer la condición de equilibrio al sistema materia-radiación, no sólo deduce Einstein la ley de radiación de Planck, sino que llega a la conclusión de que en todos aquellos procesos elementales la cantidad de energía intercambiada entre materia y radiación de frecuencia ν venía dada por el mismo valor: $h\nu$.

La segunda mitad de su artículo de 1917 —la más importante para nuestra conmemoración— está dedicada a someter a un test personalísimo la coherencia de las hipótesis empleadas y de los resultados obtenidos, dado la escasa justificación —y lo extraño— del nuevo tratamiento. Su test se basa No se limita a deducir allí la ley de Planck, sino que dedica la mitad del artículo al análisis crítico de las conclusiones obtenidas; una rigurosa forma de proceder, a la vista de lo extraño que resultaban alguna de aquellas. La segunda parte del artículo contiene cálculos y consideraciones que dotan de coherencia a sus resultados precedentes. Es como un test de las propiedades de los cuantos y se basa en argumentos sobre fluctuaciones; lo que no puede sorprender a quien sea consciente del alto papel que Einstein asignaba a la mecánica estadística en general y a las fluctuaciones en particular.

De hecho se plantea rediscutir su *Gedankenexperiment*, al que nos hemos referido en el apartado anterior y anticipa que va a emplear métodos ya utilizados en su primer análisis, en 1909. Resultaría prolijo describir aquí el tratamiento sui generis que Einstein da a la situación de equilibrio entre el gas y la radiación.⁶ Pero uno de los resultados obtenidos como consecuencia de su análisis habría de resultar crucial para el devenir de la física. Así anticipa Einstein a su amigo y confidente Michele Besso el alcance de sus conclusiones:⁷

«Lo que hay de esencial es que las consideraciones *estadísticas* que conducen a la fórmula de Planck se han *sistematizado* y que [...] se ha partido únicamente de la idea más general de los cuantos. Esto conduce al resultado (que todavía no se encuentra en el trabajo que te he enviado) de que, cuando existe intercambio de energía elemental entre radiación y materia, se transfiere el impulso $h\nu/c$ a la molécula. Se deduce que todo proceso elemental de esta naturaleza es un proceso *enteramente orientado*. Así, queda establecida la existencia de los cuantos de luz».

Si el intercambio de energía entre materia y radiación en todos los procesos elementales de emisión y absorción siempre va acompañado de una transferencia de impulso, es lícito modificar la terminología y afirmar que en aquellos procesos

⁶ Para una versión simplificada de este tratamiento, véase, por ejemplo, Navarro (2009) [2], 134-157.

⁷ Carta de A. Einstein a M. Besso, 6 de septiembre, 1916. Traducción española en EINSTEIN (1994), [5] 131-132. Énfasis en el original. En la traducción se data erróneamente la carta en diciembre.

elementales se intercambian cuantos y no meros cuantos de energía, como hasta entonces. Así los cuantos de radiación monocromática de frecuencia ν , pasan a ser auténticas partículas, que se mueven a la velocidad de la luz, tienen masa nula —de acuerdo a las prescripciones relativistas—, energía $h\nu$ e impulso $h\nu/c$. Lo de llamarlos «fotones» vendría diez años después.⁸



Fig. 3. La emisión inducida, introducida por Einstein en 1917, sería el fundamento del láser. Aquí se muestra uno de rubí, adquirido en 1962 por la Universidad de Barcelona, muy parecido al primer láser de rubí, construido por T. H. Maiman en 1960. (Fotografía de S. Vallmitjana).

Un complicado proceso de aceptación: la propuesta BKS

Puede parecer obvio el convencimiento por parte de Einstein de la realidad de los fotones a partir de 1917. Tal vez sorprenda entonces la lectura de un párrafo dirigido a Besso, a mediados de 1918:⁹

«He reflexionado durante un número incalculable de horas sobre la cuestión de los cuantos, naturalmente sin hacer verdaderos progresos. Pero ya no dudo en absoluto de la *realidad* de los cuantos de radiación, si bien aún soy casi el único con este convencimiento. Así quedarán las cosas en tanto que no se establezca ninguna teoría matemática. A pesar de todo, cuento con decidirme a presentar mis argumentos con claridad».

¿Qué razones había para que los físicos del momento no compartieran las convicciones de Einstein? ¿Por qué continuaba éste interesado en el problema de los fotones— si consideraba que había probado su existencia y establecido su comportamiento? ¿Qué quiere decir Einstein al afirmar que no ha conseguido «verdaderos progresos».

⁸ Fue en 1926 cuando el estadounidense G. N. Lewis propuso el término «fotón» —que nosotros emplearemos de ahora en adelante—, para referirse al cuanto de radiación. Esta terminología se impuso con rapidez, hasta el punto de que el quinto congreso Solvay (octubre, 1927), se convocó ya bajo el título «Electrones y fotones».

⁹ Carta de A. Einstein a M. Besso, 29 de julio, 1918. Traducción española en EINSTEIN (1994), [5] 165-167. Énfasis en el original.

No cabe duda de que una razón fundamental para la no aceptación del fotón era la admitida y pregonada incompatibilidad entre la teoría electromagnética (ondulatoria) y la nueva teoría cuántica (corpúscular). Además, para una gran mayoría de físicos las fluctuaciones estadísticas —centrales para la justificación einsteiniana— representaban poco más que un tema académico de escasa relevancia. Así, para muchos, podía resultar inconcebible pensar en un posible desmantelamiento de la teoría del campo electromagnético —entonces plenamente contrastada y admitida—, sobre la base de unos razonamientos apoyados sustancialmente en las fluctuaciones estadísticas.

Una forma usual de sobrellevar la situación consistía en mantener a toda costa la imagen maxwelliana del campo libre y, en la medida de lo posible, investigar con ahínco en nuevos modelos para la interacción materia-radiación, con la esperanza de poder llegar a eliminar cualquier residuo cuántico por innecesario; pero todo ello resultó en vano.

Es frecuente ver escrito que el fotón se instaló definitivamente en la física tras el descubrimiento y la explicación teórica del «efecto Compton» —dispersión de rayos X por electrones atómicos escasamente ligados—, en 1923. Dicha explicación parecía confirmar simultáneamente dos teorías por entonces aún en entredicho: la realidad de los fotones de Einstein y la relatividad especial, que se empleaba en la descripción del choque elástico fotón-electrón libre. No cabía pensar en que aquellas dos teorías pudieran ser falsas, pero que compensaban sus desatinos de forma que lograban proporcionar una explicación acertada de los precisos datos experimentales que se tenían sobre tal efecto. Así, la realidad del fotón de Einstein parecía confirmada.

Pero la historia siguió otros derroteros. Para comprobarlo basta detenerse en un renombrado artículo firmado en 1924 por Bohr, junto a sus jóvenes colegas Kramers y Slater.¹⁰ Tal vez constituya el ejemplo más conocido e influyente de la filosofía imperante al respecto. En dicho trabajo, conocido por las siglas BKS, se rechaza sin ambigüedad el fotón de Einstein; es decir, las hipótesis cuánticas introducidas por éste en 1916-1917 sobre la naturaleza y comportamiento de la radiación en su interacción con la materia.

No es la ocasión de analizar el contenido de la propuesta BKS. Tan sólo in somero comentario al respecto. Por supuesto, Los autores asumen que las

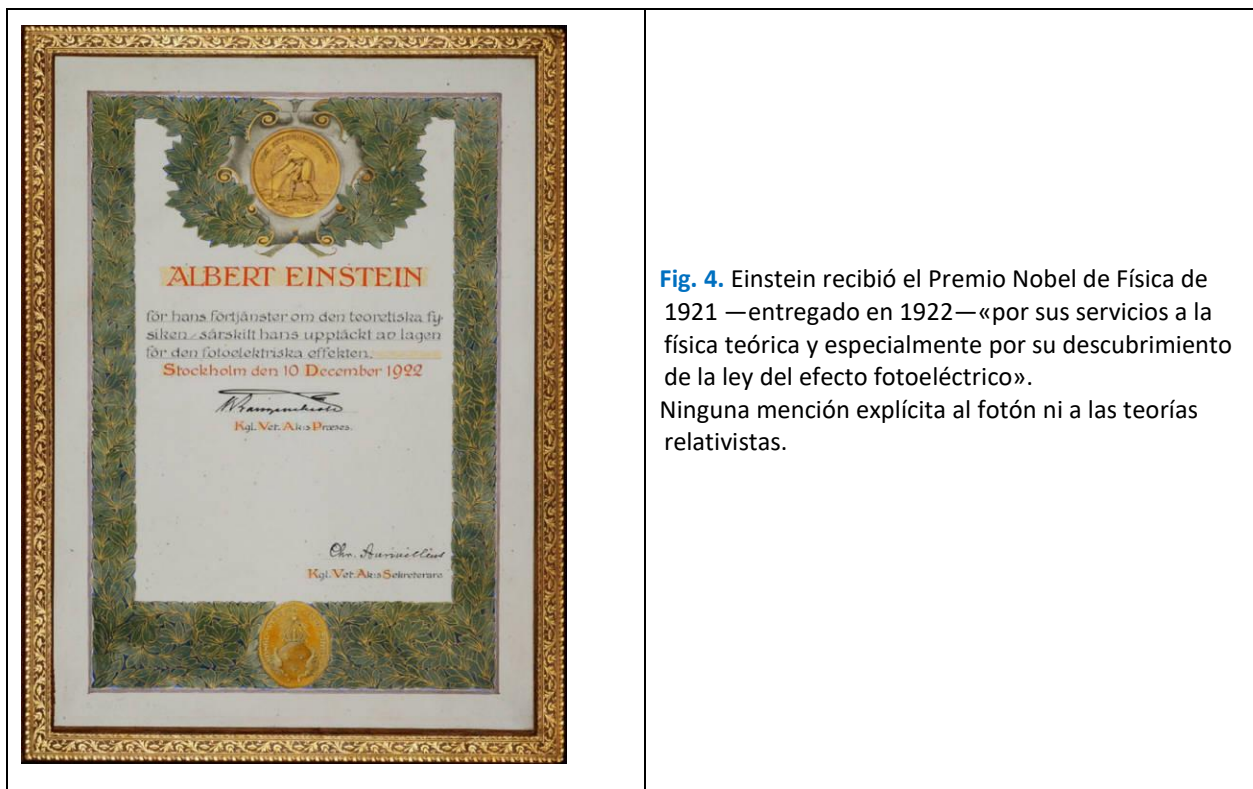
¹⁰ BOHR; KRAMERS; SLATER (1924), [6].

discontinuidades cuánticas resultan ya imprescindibles para poder explicar teóricamente las propiedades observadas en la interacción materia-radiación. Pero ello no implica la validez de las ideas de Einstein al respecto; es decir, no conducen inexorablemente al fotón como realidad física ni, por tanto, a la naturaleza corpuscular de la radiación. Por el contrario, lo que se pretende en el artículo BKS es mostrar una forma de hacer compatibles los saltos cuánticos con la descripción maxwelliana (continua) del campo electromagnético.

Así, la interacción materia-radiación se describe en términos de interferencias entre campos electromagnéticos, ya sean éstos reales o virtuales. El que dichas interferencias den lugar a fenómenos de absorción o emisión de radiación sólo se puede describir en términos probabilísticos análogos —según los autores— a los empleados por Einstein en su famoso artículo de 1916-1917. Además de reconocer que la causalidad estricta clásica resulta incompatible con su modelo, los autores consideran implicaciones del mismo y llegan a una conclusión extraordinariamente llamativa, cuando menos: en un proceso individual de emisión o absorción de radiación, descrito sobre la base de aquellos campos virtuales, los principios de conservación de la energía y del momento dejan de ser universalmente válidos. Tan sólo gozan de validez estadística. O lo que es equivalente, se cumplen para valores medios correspondientes a un muy elevado número de procesos.

Las llamativas consecuencias de los extraños supuestos de BKS sirvieron de estímulo para que ciertos físicos trataran de someter a una prueba experimental directa alguna de aquellas conclusiones. Los resultados aparecieron ya en 1925 y fueron ciertamente contundentes. Bothe y Geiger sometieron a prueba experimental una de las implicaciones de la propuesta BKS: la violación del principio de causalidad. Comprobaron que el botón secundario que se origina en el efecto Compton se crea en el instante mismo del impacto fotón-electrón, como exige la causalidad clásica, sin que existiera un intervalo de tiempo, detectable con las técnicas experimentales del momento, entre el impacto y la aparición de aquel fotón, como exigía la teoría BKS, al requerir ésta la interacción entre distintos campos de radiación. Por otra parte, Compton y su Simon diseñaron un experimento diferente en una cámara de niebla que confirmaba la conservación de la energía en los procesos individuales.¹¹

¹¹ Para más detalles sobre la propuesta BKS y sobre los experimentos Bothe-Geiger y Compton-Simon, véase, por ejemplo, PAIS (1984) [7], 418-424.



Epílogo

Así, la alternativa BKS quedaba fuera de combate tan sólo un año después de nacer. Los experimentos no dejaban lugar a dudas. Pero ello no significó, ni mucho menos, que Bohr y otros cesaran en la búsqueda de argumentos para cerrar la puerta de entrada en la física al fotón einsteiniano, al tiempo que trataban de retener algunos aspectos de la propuesta derrotada. Bohr no descartaba tener que acudir en un futuro próximo a supuestos más audaces. Ello es tan cierto y está hoy tan documentado como la innegable influencia que la filosofía del artículo BKS tuvo en la gestación de la mecánica matricial.

Por curioso que pueda resultar, la insatisfacción de Einstein no decrecía al no ser capaz de reconciliar estos dos aspectos del comportamiento de la radiación —el cuántico recogido en su teoría de 1916-1917 y el continuo de la descripción del campo electromagnético—, a pesar de sus múltiples intentos por lograrlo.

Pero, en nuestra opinión, había un motivo adicional para la preocupación de Einstein —más tarde para su desencanto— ante el giro que comenzaban a tener algunos aspectos de sus propias investigaciones y de otras posteriores, como la misma propuesta BKS. El papel que él había asignado a la probabilidad en su trabajo de 1916-1917, estaba evolucionando según una dirección que le preocupaba enormemente. Parecía empezar a revelarse como una propiedad básica de la

descripción física y no como mera herramienta de cálculo, que es lo que ocurre en mecánica estadística.

Si la falta de información sobre el «cuándo» y el «cómo», por ejemplo, de la emisión espontánea de radiación por un átomo, se tomaba como un defecto de la teoría, lo procedente sería esperar para solucionar la cuestión hasta que apareciese una nueva teoría más completa. Pero si realmente se había establecido la teoría más afinada posible sobre el comportamiento de la radiación, el papel que en ella desempeña la probabilidad lleva a la negación del determinismo absoluto y del principio de causalidad clásico. El dilema era fuerte y Einstein se inclinó desde un principio por la primera opción: su teoría cuántica, así como la posterior mecánica cuántica, eran teorías provisionalmente válidas, pero no definitivas, por incompletas.

Tras la publicación en 1924 de BKS los temores de Einstein se acrecentaron. Lo expresaba, por ejemplo, mediante una metáfora, en misiva dirigida ahora a la esposa de Born:¹²

«La opinión de Bohr sobre la radiación es de gran interés. Pero no desearía verme forzado a renunciar a la causalidad estricta sin defenderla con mayor intensidad que lo he hecho hasta ahora. Me resulta completamente intolerable la idea de que un electrón expuesto a radiación pueda escoger *según su propio libre albedrío*, no sólo el momento para saltar, sino también la dirección. Si este fuera el caso, preferiría haber sido zapatero remendón, o incluso empleado de un casino, antes que físico».

El desacuerdo que Einstein expresa aquí, en relación con la esencia de las ideas de Bohr, en el fondo se habría de mantener de por vida. Subsistiría incluso después de la formulación de la mecánica cuántica (la matricial por Heisenberg en 1925 y la ondulatoria por Schrödinger en 1926) y de la electrodinámica cuántica (por Dirac en 1927); las dos disciplinas que proporcionan la solución vigente a los problemas que venimos exponiendo. La discrepancia entre ambos acerca de la interpretación del formalismo cuántico nunca desapareció. Hay quien piensa que esta confrontación, aunque centrada en el nacimiento del fotón y la contrapropuesta BKS, debe ser considerada como el auténtico punto de partida de lo que se conoce como «debate Bohr-Einstein». Pero eso es harina de otro costal...

¹² Carta de A. Einstein a H. Born, 29 de abril de 1924, en BORN (1971), [8] 82. El énfasis aparece en el original.

Referencias

- [1] A. EINSTEIN, The collected papers of Albert Einstein (abreviadamente CPAE). (Princeton University Press, Princeton, desde 1987). La versión digitalizada de la serie, de acceso libre, se encuentra en <http://einsteinpapers.press.princeton.edu>.
- [2] L. NAVARRO, Einstein, profeta y hereje (Tusquets, Barcelona 2009), 2ª edición.
- [3] L. NAVARRO y E. PÉREZ, «Paul Ehrenfest on the necessity of quanta (1911): Discontinuity, quantization, corpuscularity, and adiabatic invariance», *Archive for History of Exact Sciences*, **58** (2004), 97-141.
- [4] A. EINSTEIN, «Zur Quantentheorie der Strahlung». *Physikalische Gesellschaft Zürich. Mitteilungen*, **16** (1916), 47-62. Reeditado en *Physikalische Zeitschrift*, **18** (1917), 121-128. Véase, traducción inglesa incluida, en CPAE, vol. 6, doc. 38.
- [5] A. EINSTEIN, Correspondencia con Michele Besso, 1903-1955. (Tusquets, Barcelona 1994).
- [6] N. BOHR; H. A. KRAMERS; J. C. SLATER, «The quantum theory of radiation». *Philosophical Magazine*, **47** (1924), 785-802. Reimpreso en B. L. VAN DER WAERDEN (ed.), *Sources of quantum mechanics*. (Dover, New York 1968), 159-176.
- [7] A. PAIS, 'El Señor es sutil...' La ciencia y la vida de Albert Einstein. (Barcelona, Ariel 1984).
- [8] M. BORN (ed.), *The Born-Einstein letters*. (London, Macmillan 1971). Traducción de la hija de Born, Irene Newton-John (madre de Olivia Newton-John, actriz que protagonizó la película *Grease*). Versión original alemana, 1969.