

Einstein 1905: De los «cuantos de energía» a los «cuantos de luz»

Augusto Beléndez Vázquez

Física para tod@s (28/11/2015)

<https://blogs.ua.es/fisicateleco/2015/11/einstein-1905/>

“La energía de un haz de luz que se propaga desde una fuente puntual no se distribuye de forma continua en un espacio creciente [la teoría ondulatoria de la luz], sino que consiste en un número finito de cuantos de energía localizados en los puntos del espacio, que se mueven sin dividirse y que sólo se pueden producir y absorber como unidades completas”.

Con estas palabras Albert Einstein (1879-1955) presentaba sus ideas “heurísticas” en su artículo **“Sobre un punto de vista heurístico relativo a la producción y transformación de la luz”** (“Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt”) publicado el 9 de junio de 1905, su Annus Mirabilis, año que el propio Einstein calificó como “muy revolucionario”. Einstein introdujo el concepto de “cuanto de luz”, un paquete indivisible, aunque no fue hasta 1926 cuando el término “fotón” sustituyera al “cuanto de luz” de Einstein para siempre. El término “fotón” fue utilizado por Gilbert Lewis (1875-1946) en un artículo publicado en Nature el 18 de diciembre de 1926, aunque ya había sido usado con anterioridad por los físicos Leonard T. Troland (1889-1932) en 1916 y John Joly (1857-1933) en 1921, pero en ninguno de los tres casos como sinónimo del “cuanto de luz” de Einstein.

Einstein es mundialmente famoso por sus teoría de la relatividad, la especial y la general. Sin embargo, tal vez no es tan conocido que Einstein también realizó varias contribuciones seminales a la ciencia de la luz. No sólo introdujo en 1905 el concepto de “cuanto de luz” y lo aplicó para estudiar teóricamente “la emisión y transformación de la luz”, como se ha mencionado antes, sino que también postuló la emisión estimulada en 1916, hace un siglo, que a la postre se convirtió en la base de funcionamiento del láser. Además de estas dos contribuciones, Einstein también fue uno de los pioneros que exploraron la dualidad onda-partícula de la luz en un artículo publicado en 1909. No cabe la menor duda: **Einstein nos dejó un gran legado para la ciencia de luz.**

De todos los grandes logros científicos realizados por Einstein –declarado por la revista Time como el “personaje del siglo XX”, el genio entre los genios-, he elegido como tema de esta contribución uno, no por ser más importante que los demás sino por tres razones fundamentales. La primera, porque introduce la idea de “cuanto de luz” (más tarde rebautizado con el nombre de “fotón”) de manera convincente. La segunda, porque fue Einstein quien aplicó las ideas de Planck, antes que ninguno de sus colegas, para explicarlo teóricamente en 1905. Y la tercera, porque la resolución de las Naciones Unidas en la que 2015 fue declarado como el Año Internacional de la Luz se refiere a este importante hito en la historia de la ciencia de la luz. El lector habrá adivinado que me estamos refiriendo al efecto fotoeléctrico.



Albert Einstein en 1905. Créditos: Wikipedia.

El efecto fotoeléctrico fue descubierto por Heinrich Hertz (1857-1894) mientras estaba llevando a cabo sus investigación sobre la generación de ondas electromagnéticas. Observó que muchos metales emiten electrones cuando incide luz sobre la superficie del metal. Estos electrones se conocen como “fotoelectrones”. No penséis que este efecto es algo que sólo se puede encontrar en los laboratorios de investigación. Como Doris Kimbrough nos recuerda:

“El efecto fotoeléctrico se utiliza en muchos dispositivos modernos, como en las puertas automáticas de los supermercados, los detectores de movimiento o las gafas de visión nocturna, y además sus aplicaciones se extienden desde las calculadoras solares y nuestra amiga la televisión”.

En 1902 el físico Phillip Lenard (1862-1947) demostró que si la longitud de onda de la radiación incidente sobre la superficie del metal es suficientemente corta, entonces se produce la emisión electrones (la luz ultravioleta facilita el proceso). Con los primeros trabajos quedaron establecidas de forma empírica las leyes fundamentales del efecto fotoeléctrico:

1. El número de electrones emitidos es proporcional a la intensidad de la radiación incidente.
2. Para cada metal existe una frecuencia umbral de la radiación incidente f_0 (su “color”) por debajo de la cual no se emiten no se emiten electrones.
3. La energía cinética máxima de los electrones emitidos es proporcional a $(f - f_0)$ e independiente de la intensidad de la radiación incidente.
4. La emisión de electrones es prácticamente instantánea, es decir, aparece y desaparece con la radiación electromagnética sin retraso medible.

Las leyes 2) y 3) son irreconciliables con la teoría electromagnética de la luz de Maxwell (otro de los hitos que conmemorados en este Año Internacional de la Luz) y la 4) nunca se ha observado. Si la luz incidente sobre el metal es suficientemente débil, según la teoría de Maxwell, debería existir un tiempo de retraso mensurable entre el instante en que la luz empieza a incidir sobre la superficie y la expulsión del fotoelectrón. Sin embargo, este retraso nunca se ha detectado.

Max Planck (1858-1947) fue el primero que en 1900 fue capaz de dar correctamente una interpretación teórica sobre la radiación electromagnética emitida por un cuerpo negro en equilibrio térmico a una determinada temperatura. Haciendo uso de argumentos termodinámicos y una hipótesis *ad hoc* encontró una fórmula que se ajustaba bastante bien a los datos experimentales. Tras seis años trabajando en este tema, y en un “acto de desesperación” (como Planck definió a su hipótesis *ad hoc*), consideró que la energía total de los resonadores del cuerpo negro se compone de pequeños “elementos” indivisibles, cada uno de magnitud E , y asumió que la energía E de cada uno de estos “elementos” era proporcional a la frecuencia f con la que los resonadores vibran, $E = hf$, siendo h la constante de proporcionalidad (conocida como constante de Planck). Acababa de nacer la primera discontinuidad cuántica. Sin embargo, Planck fue bastante cauto en el uso de su concepto cuántico porque era de naturaleza conservadora. Para él, después de la radiación, la energía electromagnética se propagaba en el espacio en forma de ondas electromagnéticas.

El 17 de marzo de 1905, tres días después de su vigésimo sexto cumpleaños, un joven Einstein envió un artículo desde de la ciudad de Berna a *Annalen der Physik*, la revista líder de la física alemana, titulado “Sobre un punto de vista heurístico relativo a la producción y transformación de la luz”. En este trabajo, Einstein presenta un “punto de vista heurístico” sobre que los cuantos de energía de Planck son reales y pueden encontrarse en algunos experimentos como constituyentes de la luz y otro tipo de radiaciones. Era el nacimiento de la segunda discontinuidad cuántica y de los “cuantos de luz”.

Einstein realizó algunos de sus más grandes logros científicos entre 1902 y 1909, cuando ese gigante desconocido ocupaba un puesto humilde como “funcionario técnico” en la Oficina Federal de Patentes de Berna. Este trabajo como oficial de patentes le dejaba el suficiente tiempo libre para desarrollar, uno tras otro, trabajos científicos extraordinarios. De hecho, el propio Einstein calificó a estos años en Berna no sólo como los más felices, sino también como el período más fructífero en su vida. Einstein había sido uno de los primeros en sentirse atraídos por la teoría cuántica de Planck, probablemente unos de los pocos que por aquel entonces había vislumbrado su aplicabilidad a otros fenómenos físicos. De hecho, hacia 1905 las ideas de Planck eran bastante ignoradas. Señalemos, por ejemplo, que en 1911, en la primera Conferencia Solvay Einstein mismo declaró:

“Insisto en el carácter provisional de este concepto [cuanto de luz]”

o que no se aplicaron a la descripción del átomo hasta que Niels Bohr lo hiciera en 1913 y de ello no cabe duda que fue responsable el trabajo de Einstein de 1905 sobre los “cuantos de luz”.



Primera conferencia Solvay (1911). Créditos: Wikipedia.

En su artículo de 1905, Einstein utilizó su “hipótesis del cuanto de luz” para explicar el efecto fotoeléctrico, que analiza en una breve sección del artículo que titula “Sobre la generación de rayos catódicos por iluminación de cuerpos sólidos”. Para explicar el efecto fotoeléctrico Einstein considera que luz consiste de cuantos de energía, cada uno de magnitud hf , y que los cuantos penetran en la capa superficial del metal. Un cuanto de luz transfiere su energía a un único electrón y parte de esta energía se transforma en energía cinética del electrón y la otra parte, W , se utiliza para arrancarlo de metal (W es la energía que el electrón pierde al salir el metal). W es función de cada material y se conoce como “función trabajo”. Teniendo esto en cuenta, la energía cinética máxima de un electrón eyectado viene dada por la ecuación $hf - W$. Cien años después de que Thomas Young demostrara tan brillantemente la naturaleza ondulatoria de la luz mediante su célebre experimento de la doble rendija, Einstein tenía la osadía de presentar ante la comunidad científica lo que parecía una vuelta a las ideas una vez propuestas por Newton sobre que la luz se compone de un chorro de partículas. La respuesta inmediata de la comunidad científica a su nuevo concepto de “cuantos de luz” no parecía ser muy acogedora:

“¿Partículas de luz? ¡Es una idea terrible!”.

El propio Planck fue uno de los que más criticaron esta idea de “cuantos de luz”, y Robert Millikan (1868-1953) tachó a la idea de Einstein de imprudente.

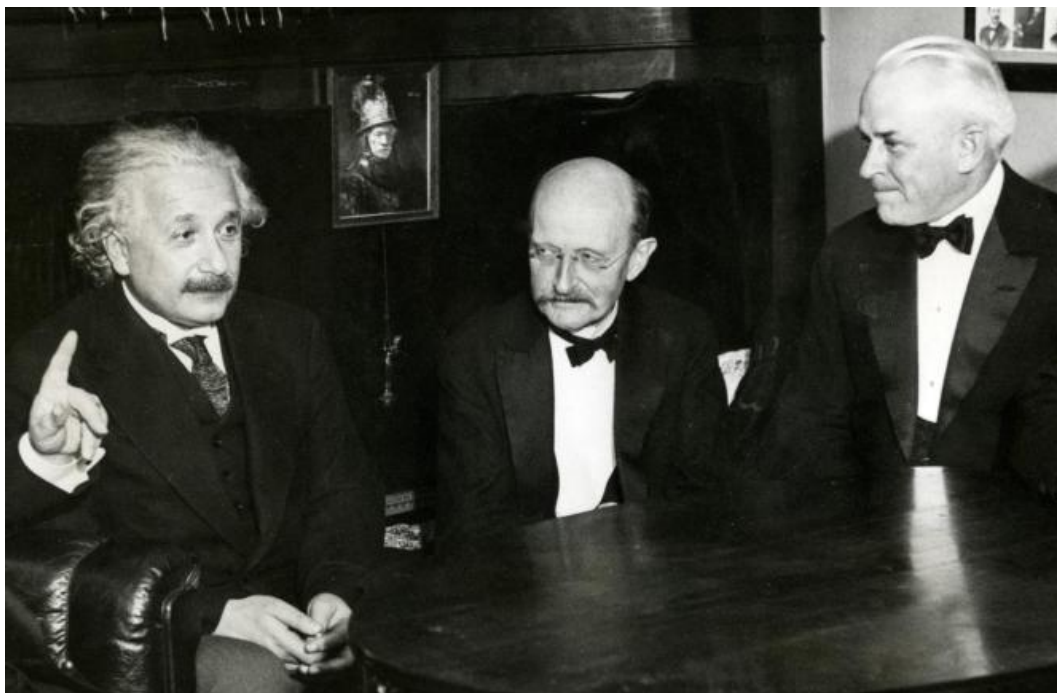
Finalmente, en 1916 y después de diez años de experimentos, fue el propio Millikan quién no sólo validaría la ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico sino que también

determinaría “fotoeléctricamente” la constante de Planck h y además con gran precisión. El artículo de Millikan de 1916 finaliza con una conclusión que no deja lugar a dudas:

“La ecuación de Einstein del efecto fotoeléctrico ha sido sometida a muchas pruebas experimentales y en todos los casos predice con exactitud los resultados observados”.

Sin embargo, inicialmente los que pretendía Millikan con sus experimentos era demostrar que las ideas de Einstein sobre los “cuantos de luz” eran erróneas. En un artículo publicado en 1949 en la revista *Reviews of Modern Physics* para celebrar el septuagésimo cumpleaños de Einstein, Millikan escribió:

“Pasé diez años de mi vida sometiendo a la ecuación de Einstein de 1905 [la del efecto fotoeléctrico] a diferentes pruebas, y contrariamente a todas mis expectativas me vi obligado en 1915 a proclamar su indudable verificación experimental, a pesar de lo irrazonable que era, pues parecía violar todo lo que sabíamos acerca de la interferencia de la luz”.



De izquierda a derecha: Einstein, Planck y Millikan en 1931. Créditos: Wikipedia.

Pero al final la historia sobre el efecto fotoeléctrico tuvo un final feliz, tanto para Einstein como para Millikan. Ambos fueron galardonados con el **Premio Nobel de Física**, Albert Einstein en 1921 “por sus servicios a la física teórica, y en especial por su descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico”, y Robert Millikan en 1923 “por su trabajo sobre la carga elemental de electricidad y sobre el efecto fotoeléctrico”. A esto hay que añadir que en 1905 Phillip Lenard también recibió el Premio Nobel de Física “por su trabajo sobre los rayos catódicos” y parte de “su trabajo” incluía sus investigaciones sobre el efecto fotoeléctrico. Sin duda, **nadie hubiera pensado jamás que algo como el efecto fotoeléctrico habría proporcionado tantos Premios Nobel.**

BIBLIOGRAFÍA

A. Einstein, "On a Heuristic Point of View about the Creation and Conversion of Light," *Annalen der Physik* 17, 132–148 (1905).

A. Einstein, "On the Present Status of the Radiation Problem," *Physikalische Zeitschrift* 10, 185–193 (1909).

A. Einstein, "Emission and Absorption of Radiation in Quantum Theory," *Verhandlungen der Deutschen Physikalischen Gesellschaft* 18, 318–323 (1916).

A. B. Arons y M. B. Peppard, "Einstein's Proposal of the Photon Concept – a Translation of the *Annalen der Physik* Paper of 1905," *American Journal of Physics* 33, 367–374 (1965).

B. R. Masters, "Albert Einstein and the Nature of Light," *Optics and Photonics News* 23 (7), 42-47 (2012).

D. R. Kimbrough, "Einstein's Miraculous Year," *ChemMatters*, December, 4–6 (2005).

R. Millikan, "A Direct Photoelectric Determination of Planck's h ," *Physical Review* 7, 355–388 (1916).

R. Millikan, "Albert Einstein on His Seventieth Birthday," *Reviews of Modern Physics* 21, 343–345 (1949).

J. A. Azcárraga, *En torno a Einstein, su ciencia y su tiempo* (Publicaciones de la Universidad de Valencia, 2007).

H. Cooper, *Great Physicists: The Life and Times of Leading Physicists from Galileo to Hawking* (Oxford University Press, Oxford, 2001).

A. Galindo y P. Pascual, *Mecánica Cuántica* (Eudema Universidad, Madrid, 1989).

J. M. Sánchez Ron, *Historia de la Física Cuántica I. El período fundacional (1860–1926)* (Crítica, Barcelona, 2001).

C. Olalla, *Planck: La fuerza del deber* (Nivola Libros y Ediciones, Madrid, 2006).

F. R. Villatoro, "La historia del término fotón", *Naukas-La Ciencia de la Mula Francis*.
<<http://francis.naukas.com/2014/01/05/nota-dominical-la-historia-temprana-del-termino-foton/>>

Versión en español de la entrada publicada el 24 de noviembre de 2015 en el blog del Año Internacional de la Luz – IYL2015:

Einstein 1905: From "Energy quanta" to "Light quanta"

<http://hdl.handle.net/10045/51908>



Augusto Beléndez Vázquez (2015)

