

Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 35, n. 2, 2404 (2013)
www.sbfisica.org.br

La introducción del concepto de fotón en bachillerato

(*The introduction of the photon concept in upper secondary school*)

Francisco Savall Alemany¹, Josep Lluís Domènech Blanco¹, Joaquín Martínez Torregrosa^{1,2}

¹*Departamento de Didáctica General y Didáctica Específica, Didáctica de las Ciencias Experimentales, Facultad de Educación, Universidad de Alicante, España*

²*Instituto Universitario de Física Aplicada a la Ciencia y Tecnología, Universidad de Alicante, España*
Recibido em 23/3/2012; Aceito em 27/1/2013; Publicado em 24/4/2013

La investigación didáctica ha puesto de manifiesto la importancia de la historia de la ciencia en el diseño y desarrollo de unidades didácticas, tanto por su valor para favorecer el aprendizaje como por su contribución a las actitudes de los estudiantes y a la imagen que se forman de la ciencia. La aparición de la hipótesis cuántica a principios del siglo XX introdujo a la física en una crisis profunda. La necesidad de recurrir al carácter discreto de la distribución de la energía violaba todo lo que establecían el electromagnetismo y la mecánica. Hemos probado que la enseñanza habitual está lejos de dar cuenta de los problemas que se tuvieron que superar hasta la aceptación del concepto de fotón por parte de la comunidad científica, lo cual dificulta el aprendizaje. Para hacerlo hemos realizado una investigación histórica con intencionalidad didáctica a la luz de la cual hemos analizado los libros de física de 2º de bachillerato de uso más extendido.

Palabras-clave: física cuántica, fotón, enseñanza problematizada, historia de la ciencia, libros de texto.

Research has shown how important is the history of science for designing and developing didactic units, for its value to promote learning and for its contribution to the students attitudes and the image of science that they learn. Physics faced a strong crisis at the beginning of the 20th century when the quantum hypothesis was introduced. The discrete distribution of energy was against the well established theories of electromagnetism and dynamics. We have proved that traditional teaching is far away from considering the problems that the photon concept had to overcome until it was accepted by the scientific community, and this makes learning more difficult. To do so, we have done a historical research with didactic intention in order to analyse the most used physics textbooks in the Spanish upper secondary school last course.

Keywords: quantum physics, photon, problem-based teaching and learning, history of science, textbooks.

1.. Introducción y planteamiento del problema

Numerosos autores han defendido la utilización de la historia de la ciencia para mejorar la enseñanza. Las justificaciones para dicha utilización son variadas y se reflejan en el uso que se da al conocimiento histórico en el aula. Así, podemos citar diferentes objetivos que se encuentran conectados entre sí:

- Humanizar y aproximar la ciencia. La introducción en la enseñanza de aspectos relacionados con la historia de la ciencia permite dar una imagen más ajustada del trabajo científico poniendo de manifiesto que la construcción de la ciencia es un proceso tentativo en el que compiten hipótesis y argumentos enfrentados, válidos para explicar los mismos resultados experimentales, y que el establecimiento de consensos tiene carácter

provisional, dando lugar a conocimientos que se encuentran en continua revisión y reformulación. Además del carácter histórico y social, la producción científica tiene un fuerte carácter contextual: los avances científicos han llevado a importantes cambios sociales, culturales y políticos a lo largo de la historia. La enseñanza habitual ha infrutilizado el valor de los episodios históricos reduciéndolos a aspectos anecdóticos que complementan la instrucción y que contribuyen a promover una imagen incorrecta de la ciencia en los estudiantes, menoscabando su valor como instrumento para vehicular y reforzar la adquisición de conocimientos tanto conceptuales como procedimentales y actitudinales [1-2]. Sin embargo, diversas propuestas han mostrado que se puede mejorar el aprendizaje y la actitud de los alumnos usando casos históricos para ilustrar la cone-

¹E-mail: paco.savall@ua.es.

xión de los nuevos conocimientos con la sociedad, lo que se conseguiría incorporando las relaciones Ciencia-Técnica-Sociedad que contextualizan la producción científica y su influencia e impacto en la sociedad [3-5], o mediante la dramatización de “casos históricos” en las que se muestran las ideas que predominaban en la comunidad científica y la sociedad, las hipótesis que se pusieron en juego, los resultados experimentales, los conflictos e intereses, etc. [6-9].

- **Problematizar la enseñanza.** El hecho de contemplar las diferentes hipótesis científicas que históricamente pugnaron por dar respuesta a un problema, participar de la controversia que llevó a su aceptación o rechazo, interpretar los datos experimentales a la luz de cada propuesta, etc. lleva a reflexionar no sólo sobre el contenido que se aprende sino también sobre aspectos epistemológicos relacionados con cuestiones como “¿Cómo sabemos...?” o “¿Qué evidencias tenemos...?” [10]. Hacer partícipes a los estudiantes de los métodos de creación de conocimiento científico es, junto con la adquisición de conocimientos, uno de los pilares de la alfabetización científica. En este sentido, la historia de la ciencia juega un papel fundamental como fuente para el diseño de unidades didácticas, lo que requiere que se identifiquen los problemas que están en el origen de los conocimientos que queremos que aprendan nuestros alumnos, las grandes ideas que permitieron avanzar en su resolución y los obstáculos asociados. Dicho conocimiento histórico, conjuntamente con el conocimiento didáctico, se utiliza para organizar la enseñanza en torno a problemas fundamentales de interés [11-12].
- **Transmitir una imagen correcta del trabajo científico y de la ciencia.** Como hemos indicado con anterioridad, la alfabetización científica de los estudiantes ha de comprender tanto la adquisición de conocimientos científicos como la adquisición de una imagen correcta de la ciencia [13-15]. En este sentido, la historia de la ciencia contribuye tanto a la adquisición de conocimientos como a la formación de una imagen de la ciencia que permite superar las visiones deformadas que transmite la enseñanza habitual [5, 16-17].

A pesar de las aportaciones de la investigación didáctica la enseñanza convencional no suele integrar, cómo han puesto de manifiesto diversas investigaciones en casos concretos [12, 18-19], estas potenciales aportaciones sustanciales de la historia limitándose, en general, a transmitir contenidos en su estado final, de forma lineal y aproblemática (y, por tanto, ahistórica), sin tener en cuenta los problemas que dieron lugar a ellos, las dificultades para aceptarlos, su impacto social, etc.

Nos encontramos, así, que la mayor parte del tiempo los alumnos se van formando una imagen sobre la naturaleza de la ciencia y el trabajo científico por omisión y no por reflexión explícita, y que las únicas ocasiones en que reciben información relacionada con la forma en que se producen y cambian los conocimientos en la ciencia es cuando se trabajan determinadas secuencias temporales estereotipadas.

De hecho, los profesores de ciencias sabemos que existen “episodios” en que la práctica totalidad de los textos incorporan, al menos, una secuencia temporal de la evolución de las ideas sobre un concepto, modelo o teoría. Uno de los ejemplos más ilustrativos es la teoría heliocéntrica, que generalmente se introduce a partir de la secuencia histórica que lleva del geocentrismo al heliocentrismo. Otros ejemplos los podemos encontrar en la teoría atómico-molecular o en la teoría de la evolución.

Nuestro interés se centra en uno de estos “episodios temporales”: el de la introducción de la física cuántica, o – en nuestro caso particular – la introducción de un concepto central de la teoría cuántica: el fotón. Consideramos que este episodio es especialmente adecuado en tanto que:

- A finales del siglo XIX la comunidad científica consideraba que en la física quedaban solo unos pocos aspectos por resolver.
- La comunidad científica avanzó de forma tentativa y con gran cautela en el establecimiento de los fotones:
- La hipótesis de Planck en 1900 cuestionó solamente el intercambio continuo de energía entre los osciladores cargados responsables de la emisión de radiación y la propia radiación.
- En la explicación del efecto fotoeléctrico en 1905 Einstein consideró el cuanto como un paquete de energía sin carácter corpuscular, hipótesis que recibió un fuerte rechazo.
- En su explicación en 1913 de la emisión y absorción de radiación por parte del átomo de hidrógeno Bohr considera que la radiación es un fenómeno ondulatorio.
- Nuevas evidencias experimentales fueron cruciales: El efecto Compton confirma el carácter corpuscular de los cuantos.
- La aceptación de los fotones como modelo de radiación y la coexistencia de un modelo ondulatorio supone un problema que cuestiona abiertamente el carácter lineal de crecimiento de la ciencia.

Todo ello llevará a nuestros alumnos a reflexionar sobre la naturaleza problemática del conocimiento

científico; el papel de hipótesis que permiten explicar resultados experimentales y, a su vez, ser contrastadas empíricamente; la búsqueda de explicaciones universales y de “mejora continua” como finalidad de la ciencia [20]; la resistencia (lógica) de la comunidad científica a abandonar teorías o, más aún, a admitir un cambio ontológico (sobre la misma naturaleza del mundo) y la importancia de los datos y predicciones empíricas cuando la comunidad científica valora las nuevas ideas (en contra de una concepción “retórica” del conocimiento científico).

Deseamos resaltar, además, que el objetivo no es meramente que los alumnos aprendan sobre la naturaleza de la ciencia: por nuestra propia experiencia sabemos que la incorporación de estos aspectos genera un ambiente problematizado que refleja la expectación de la empresa científica, un clima emocional que favorece la implicación de las personas y un aprendizaje con sentido.

Concretamente, nuestra investigación pretende responder al siguiente problema: ¿En qué medida los libros de texto de física de bachillerato aprovechan la introducción del fotón para transmitir una imagen sobre la naturaleza de la ciencia y el conocimiento científico cercana a las concepciones actuales? Para responder a esta pregunta, haremos, en primer lugar, una revisión del proceso de aceptación del fotón desde la primera hipótesis sobre la cuantización de la energía hasta la concesión del Nobel a Compton, cuya aportación fue definitiva para la aceptación del nuevo concepto. A partir de esta revisión, justificaremos los aspectos que deberían estar presentes en una introducción del fotón que reflejara adecuadamente la naturaleza de la ciencia y el conocimiento científico en el nivel escolar. Por último, mostraremos los resultados obtenidos al analizar una muestra (que representa la mayor parte del mercado editorial español) de libros de texto de física de 2º curso de bachillerato [21-27]. Dichos libros aparecen referenciados en un anexo al final del artículo.

Debemos indicar, sin embargo, que este trabajo no pretende ser fiel al desarrollo histórico, sino a la evolución histórica de las ideas con la intención de adaptarla para favorecer el aprendizaje de la física.

2.. ¿Cómo llegó la comunidad científica a aceptar que los fotones existen?

2.1. A finales del siglo XIX la comunidad científica consideraba que en física quedaban solo unos pocos aspectos por resolver

A finales del siglo XIX buena parte de la comunidad científica llegó a reconocer públicamente que la física estaba cerca de estar acabada. Impactados por los éxitos científicos que se habían sucedido durante los últi-

mos decenios, algunos científicos llegaron a pensar que se habían completado todos los conocimientos sobre el mundo físico que se podían establecer. En este sentido llegaron a manifestarse diversos investigadores de renombre: cuando el joven Planck tenía que elegir estudios, dudaba entre la música, la filología antigua y la física. El físico de Munich Philipp von Jolly le recomendó que no escogiese física puesto que era una disciplina en la que quedaban pocos aspectos por completar [28]. Incluso una personalidad como Lord Kelvin escribía en 1901 en un artículo titulado “Nineteenth century clouds over the dynamical theory of heat and light” (Nubes del siglo XIX en la teoría dinámica de la luz y el calor) que existían dos grandes escollos por superar en la teoría de la dinámica [28-29]. También a principios de siglo Albert Michelson escribía: “los hechos y leyes más importantes de la física ya han sido descubiertos y la posibilidad de que sean suplantados como consecuencia de nuevos descubrimientos es muy remota” [29].

A pesar de dichas manifestaciones, esa sensación era más una postura poco fundamentada que una realidad tangible en tanto que no cesó el empeño por dar respuesta a los aspectos que, supuestamente, quedaban por resolver. Entre ellos, son diversos los fenómenos relacionados con la forma en que los materiales emiten y absorben radiación que a finales del siglo XIX no encontraban explicación en el marco clásico formado por la mecánica y la electrodinámica: los espectros de emisión y absorción o el efecto fotoeléctrico son algunos ejemplos [28, 30]. De acuerdo con la teoría de Maxwell la emisión de cualquier tipo de radiación se debía al movimiento oscilatorio de cargas eléctricas que emiten energía continuamente en forma de ondas electromagnéticas de frecuencia coincidente a la de oscilación. Esta idea está en la base de los primeros intentos de explicar los procesos de emisión de radiación [31]. Pero fue precisamente al intentar explicar como interacciona la radiación con la materia cuando la física clásica se enfrentó a graves contradicciones, y entró en crisis profunda [32].

2.2. La hipótesis de Planck en 1900 cuestionó solamente el intercambio continuo de energía entre los osciladores cargados responsables de la emisión de radiación y la propia radiación

La radiación que emite cualquier objeto sólido o líquido debido exclusivamente a su temperatura, es decir, eliminando cualquier contribución que pudiera ser reflejada o dispersada por el objeto², es independiente de la composición del objeto y tiene un espectro característico para cada temperatura, con una intensidad variable con la frecuencia. Buscar una explicación para

² Este objeto ideal que absorbe toda la radiación que le llega y que emite un espectro que es función de su temperatura recibió el nombre de cuerpo negro.

dicha uniformidad y encontrar la función matemática que proporciona la distribución de energía para cada frecuencia del espectro fue un objetivo que ocupó a los físicos desde que Kirchhoff publicó sus primeros trabajos en 1860 [33].

Fue Planck quien, tras exhaustivos intentos fallidos, a finales del año 1900 consiguió dar con una expresión que se ajustaba a los resultados experimentales. Para ello supuso que las paredes del cuerpo negro estaban formadas por resonadores e introdujo la hipótesis que la energía de los resonadores que vibran a una determinada frecuencia se intercambia en cantidades finitas llamadas cuantos, ε , con el campo que vibra a esa misma frecuencia, siendo dicha cantidad de energía proporcional a la frecuencia, $\varepsilon = h \cdot \nu$ [33].

No existe un consenso sobre el valor y la extensión de la hipótesis de Planck y de sus efectos en la comunidad científica. De acuerdo con Kuhn [33], la deducción de la ley de radiación es completamente clásica, no exige que la energía de cada resonador se limite a un conjunto discreto de valores, solamente restringe a elementos $\varepsilon = h \cdot \nu$ la energía del conjunto de resonadores que vibran a la misma frecuencia ν . La energía de cada resonador aislado sigue variando de forma continua. Además, apunta Kuhn, los resonadores eran entidades imaginarias, sin posibilidad de investigación experimental. Su introducción era un artificio matemático para llegar a la expresión que caracteriza la distribución de energía de la radiación en equilibrio con el cuerpo negro. Sin embargo, y como el mismo Kuhn reconoce, dicha interpretación no está libre de polémica [34]. Diversos investigadores discrepan de la interpretación de Kuhn [35-36] y no consideran que la aportación de Planck fuese completamente clásica, si bien reconocen que no se debe atribuir un excesivo valor como ruptura a la interpretación de una única experiencia.

Durante la primera década del siglo XX se acumularon gran cantidad de pruebas experimentales que confirmaron la validez de la ley de radiación de Planck y, al mismo tiempo, se buscó una interpretación física para los elementos discretos $\varepsilon = h \cdot \nu$. Sin embargo, los intentos por demostrar dicha ley sin recurrir a ellos y los intentos que trataron de reducir dichos elementos a principios clásicos, producidos por la prudencia y el rechazo hacia la idea de un intercambio discontinuo de la energía, resultaron infructuosos.

La dificultad para aceptar la discontinuidad de la energía por parte de la comunidad científica, incluido el mismo Planck, no era fortuita: los físicos estaban convencidos que los procesos naturales son de naturaleza continua, como Newton había dicho: *natura non saltus facit*. Esta era, además, una necesidad para mantener la relación causa-efecto o para seguir utilizando el cálculo diferencial e integral. Incluso el mismo Planck seguía rechazando la idea de cuantificar la energía de cada oscilador individual en la que se ha llamado la “segunda teoría” de Planck, publicada en 1912. Sin embargo,

en esa misma década la comunidad científica fue convenciendo de la necesidad de una física discontinua: Einstein había sido el primero en proponer en 1905 la cuantización de la energía de un oscilador y, a partir de 1905, habían ido sumándose a la idea de la cuantización científicos como Eherenfest, Laue, Jeans, Lorentz y otros, aunque no aceptaban las concepciones radicales de Einstein, como veremos a continuación [33].

2.3. En la explicación del efecto fotoeléctrico en 1905 Einstein consideró el cuanto como un paquete de energía sin carácter corpuscular

En uno de sus artículos de 1905 Einstein propuso que diversos fenómenos relacionados con la emisión y absorción de luz se podían entender más fácilmente si se admitía un modelo discontinuo de la radiación. Siguiendo esta idea, propuso una explicación del efecto fotoeléctrico que ampliaba el concepto de cuanto introducido por Planck. Así, Einstein proponía como hipótesis que “en la propagación de un rayo de luz emitido desde una fuente puntual la energía no está distribuida de forma continua sobre volúmenes de espacio cada vez mayores, sino que consiste en un número finito de cuantos de energía localizados en puntos del espacio que se mueven sin dividirse, y solo pueden ser absorbidos o generados como unidades completas” [37-38].

Aunque Einstein no atribuía en 1905 un carácter corpuscular a los cuantos luminosos con el tiempo empezó a defender esa posibilidad. Sin embargo, no fue hasta 1916 cuando habló por primera vez del momento lineal de los cuantos y les aplica las ecuaciones relativistas energía-momento características de las partículas [39-41].

Aunque la hipótesis anterior recuerda a un flujo de partículas hay que destacar que Einstein en ningún momento hablaba de un modelo de partículas para la radiación, sino que entendía el cuanto como un trozo de energía para el cual no tenía una imagen clara [39]. No es hasta 1916 cuando empezó a defender la posibilidad de atribuir a los cuantos luminosos un carácter corpuscular, les atribuye momento lineal y les aplica por primera vez las ecuaciones relativistas energía-momento características de las partículas [39-41].

La aportación de Einstein de 1905 no se ha de entender como una teoría elaborada, puesto que no disponía de ninguna formulación coherente, sino solo de un intento de explicar hechos hasta el momento inexplicables [28, 42]. Prueba de ello es el hecho de que calificase su trabajo como “un punto de vista heurístico” [38-39, 42] y que remarcase en su carácter provisional: “insisto en el carácter provisional de este concepto (el cuánto de radiación), que no parece reconciliable con las consecuencias experimentales verificadas de la teoría ondulatoria” fueron sus palabras en el congreso Solvay de 1911 [39]. Einstein reconocía que la teoría ondulatoria

de la luz “se había mostrado insuperable” para explicar la difracción, la interferencia, la reflexión y la refracción y que “jamás se vería reemplazada por otra teoría”, pero consideraba que dicha teoría tenía enormes dificultades para explicar la emisión y absorción de la luz por su carácter instantáneo [28, 42]. Este pensamiento le llevó a buscar, durante 10 años, algún tipo de comportamiento discreto para la radiación que fuese compatible con el carácter continuo que le atribuía el electromagnetismo. No consideraba que la imagen discreta y la continua fuesen mutuamente excluyentes, y así lo manifestó en 1909 en Salzburgo delante de toda la comunidad científica [38].

A pesar de todos los esfuerzos, Einstein reconocía su frustración por no llegar a resultados positivos. En 1909, en una carta dirigida a Lorentz, le remitió un artículo que calificó de “insignificante resultado de años de reflexión” y añadió que “No he sido capaz de abrirme paso hacia una verdadera comprensión del asunto” [28]. Incluso al final de su vida, recordando aquella época en su autobiografía, reconocía haber “fracasado rotundamente” [28] y ni siquiera haber dado con la respuesta satisfactoria 50 años después, “los 50 años enteros de consciente cavilación no me han acercado a la respuesta a la pregunta: ¿Qué son los cuantos de luz?”, escribió a Besso en 1951 [43].

Hay que destacar, pese a no ofrecer un modelo concreto para la radiación, que la aportación de Einstein no se redujo a una generalización del concepto de cuanto introducido por Planck. La introducción del cuanto de energía para explicar el espectro del cuerpo negro suponía, como hemos indicado anteriormente, un recurso matemático que explicaba los resultados experimentales pero no modificaba el modelo de radiación aceptado hasta el momento. La propuesta de Einstein, en cambio, suponía una modificación profunda en la forma de concebir la radiación, atribuyéndole otra naturaleza que daba cuenta de hechos experimentales inexplicados por el modelo ondulatorio [28, 38].

2.4. Rechazo de la cuantización de la radiación por parte de la comunidad científica

A pesar de la capacidad explicativa del cuanto de luz puesta de manifiesto por Einstein en el artículo de 1905, la comunidad científica recibió esta hipótesis con incredulidad y escepticismo. Esto fue debido a diversos motivos:

- Contradecía, como hemos indicado, el carácter ondulatorio de la radiación, la parte más conocida de la teoría electromagnética de Maxwell, que contaba con más de 40 años de resultados experimentales positivos [38, 43-44].
- La introducción de la discontinuidad en la distribución de la energía suponía un cuestionamiento

del uso del cálculo diferencial e integral: mientras los cuantos surgen de golpe las ondas electromagnéticas clásicas representan un fenómeno continuo [45].

- El apoyo experimental era escaso. A pesar de que en el artículo de 1905 Einstein utilizó los cuantos para explicar tanto el efecto fotoeléctrico como la ionización de los gases por luz ultravioleta y el fenómeno de la fluorescencia no se disponía en ese momento de evidencia empírica que confirmara la validez de su hipótesis. Einstein hacía referencia, en el artículo de 1905, a las consecuencias experimentales de su propuesta, pero él no presentó los datos correspondientes. Los resultados experimentales de Lenard para el efecto fotoeléctrico a que hacía referencia Einstein sólo mostraban que la energía del electrón emitido es constante para luz de una frecuencia fija, pero no una dependencia lineal de la energía de los electrones emitidos con la frecuencia de la radiación incidente, como predecía su ecuación [46].
- La inconsistencia de las nuevas ecuaciones. La expresión $E = h \cdot \nu$ no es coherente con ningún modelo clásico, ni el ondulatorio ni el corpuscular, puesto que el cuanto representa un paquete de energía para el cual es imposible definir una frecuencia [31, 47].

El rechazo a la hipótesis de Einstein todavía era manifiesto en 1913. Así, al proponer a Einstein para la Academia Prusiana de Ciencias, Planck, Nerst, Rubens y Warburg indican (Ref. [48] citado en Ref. [49]):

Los firmantes miembros de la Academia tienen el honor de proponer al Dr. Albert Einstein, profesor ordinario de física teórica del Instituto Politécnico Federal de Zurich, para su elección como miembro regular de la Academia. [...] En suma, puede afirmarse que, entre los problemas importantes que tanto abundan en la física moderna, es difícil encontrar alguno del cual Einstein no adopte una posición notoria. El hecho de que alguna no dé en el blanco en sus especulaciones, como por ejemplo, la hipótesis sobre los cuantos de luz, no ha de ser esgrimido en su contra. Dado que sin asumir de vez en cuando un riesgo resulta imposible, hasta en la ciencia natural más exacta, introducir verdaderas innovaciones.

La falta de consideración al cuanto de Einstein se constata también en el modelo atómico que en 1913 propuso Bohr. Al explicar el espectro del hidrógeno Bohr hace uso de la teoría electromagnética de Maxwell cuando afirmaba que el electrón gana o pierde energía cuando pasa de un estado estacionario a otro emitiendo

o absorbiendo radiación homogénea de carácter ondulatorio [28, 50-51], evitando de esta forma recurrir al cuanto de radiación.

Aunque la cuantización de la energía de los osciladores atómicos (manteniendo el carácter ondulatorio del campo de radiación) ya había recibido cierto apoyo entre la comunidad científica [33, 51], acarrea, no obstante, problemas relacionados con el principio de conservación de la energía. La emisión súbita de una determinada cantidad de energía supone una transición atómica instantánea, hecho contradictorio con la emisión de un tren de onda que implica necesariamente un intervalo finito de tiempo. Los esfuerzos por preservar la teoría ondulatoria llevaron a algunos físicos, como C.G. Darwin, Kramers o el mismo Bohr, a negar la validez universal de la conservación de la energía, reduciéndola a un principio de carácter estadístico y proponiendo la existencia a nivel atómico de un mecanismo para almacenar energía hasta que se había absorbido un cuanto [28, 52].

Los primeros resultados experimentales sólidos sobre el efecto fotoeléctrico aparecieron en 1915 cuando Millikan, después de 10 años de un trabajo riguroso y metódico encaminado a reafirmar la naturaleza ondulatoria de la luz, demostró la validez de la ecuación propuesta por Einstein ($E = h\nu - W$ en notación moderna) [30]. Pero, a pesar de la adecuación de los resultados experimentales a la ley einsteiniana del efecto fotoeléctrico, Millikan afirmaba: “La ecuación fotoeléctrica de Einstein [...] parece predecir exactamente en todos los casos los resultados observados [...] Pero la teoría semicorpuscular mediante la cual Einstein llegó a su ecuación parece hoy completamente insostenible” [53].

Esta posición continuaba siendo mayoritaria en 1919, año en que Einstein afirmaba: “Ya no dudo más de la realidad de los cuantos de radiación, aunque todavía estoy completamente solo en esta convicción” [43]. Incluso en 1921 se otorgó a Einstein el premio Nobel “por los servicios a la física teórica y especialmente por el descubrimiento de la ley del efecto fotoeléctrico”, pero nada se dice del cuanto de luz [45].

2.5. El efecto Compton confirma el carácter corpuscular de los cuantos

La prueba definitiva a favor del carácter corpuscular de los cuantos la proporcionó Compton y su equipo en 1923 al dar cuenta del fenómeno que posteriormente recibiría su nombre. Su trabajo se insertaba en una línea de investigación (junto con Laue, Bragg y otros) y pretendía mostrar que los rayos X eran un tipo de radiación electromagnética, tratando de demostrar que tenían el mismo comportamiento que la luz visible (refracción, reflexión especular, polarización, difracción por cristales...).

Cuando se estudió la reflexión difusa o dispersión producida tras incidir los rayos X en una superficie no

cristalina, se vio que su comportamiento se separaba claramente del de la luz visible. De acuerdo con la teoría clásica, la dispersión de radiación tiene lugar cuando la onda incidente produce oscilaciones forzadas en los electrones del medio, que irradian la energía que reciben en forma de onda electromagnética de la misma frecuencia que la radiación incidente. Esto es lo que ocurre para las longitudes de onda de la luz visible. Pero cuando la longitud de onda de la radiación incidente disminuye al rango de los rayos X, en la radiación dispersada se detectan dos frecuencias, una frecuencia primaria idéntica a la de la radiación incidente y una frecuencia secundaria menor que la incidente. Más aun, cuando se hace disminuir la longitud de onda del haz incidente, la intensidad de la componente primaria de la radiación dispersada disminuye y la intensidad de la componente secundaria aumenta, hasta el punto de que cuando se utilizan rayos X duros como haz incidente, la componente primaria desaparece totalmente. El mecanismo clásico de radiación no puede, ni siquiera, dar cuenta de la presencia de una segunda radiación de longitud de onda mayor.

Compton sugirió que se podía dar cuenta del cambio en la longitud de onda de los rayos dispersados si se consideraba la luz como un haz de corpúsculos (cuantos) sin masa pero con momento lineal $\frac{h\nu}{c}$, como ya había propuesto Stark en 1909 [36, 45] y había sido usado por Einstein en 1917 para explicar los mecanismos de emisión y absorción de radiación [43]. Bajo esta hipótesis, cuando se produce la interacción de la radiación con un electrón del medio no ocurre la oscilación forzada que describe la física clásica sino una colisión elástica en la que se deben satisfacer los principios de conservación de la energía y el momento lineal. Uno de los cuantos incidentes, de energía $h\nu_o$, es absorbido por uno de los electrones del medio, que emite un segundo cuanto de menor energía, $h\nu$, y por tanto menor frecuencia y mayor longitud de onda. Como consecuencia de la colisión el electrón sale dispersado con una energía $h(\nu_o - \nu)$, Fig. 1. Además, la dirección de dispersión no puede ser cualquiera, sino aquella que satisfaga el principio de conservación del momento lineal [54].

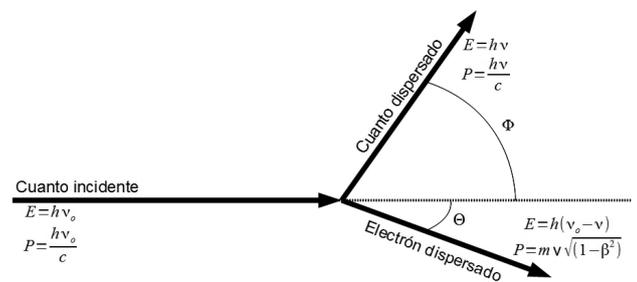


Figura 1 - De acuerdo con la interpretación de Compton, la interacción entre el electrón y el cuanto incidente da lugar a un nuevo cuanto de menor energía y produce la dispersión del electrón. Las direcciones de dispersión deben satisfacer el principio de conservación del momento lineal.

La confirmación de dichas predicciones fue de especial relevancia ya que permitió corroborar experimentalmente que la energía y el momento se conservan en el proceso de dispersión [54]. La interpretación de Compton ponía de manifiesto que se podían absorber cantidades de energía $h\nu$ por parte de electrones libres. Por tanto, la cuantización es una característica de la radiación y no sólo de los osciladores atómicos. Se tiene, además, que en los procesos de absorción y emisión de radiación se debe cumplir el principio de conservación del momento lineal. Ello pone de manifiesto que la radiación transporta momento lineal y que la emisión de radiación tiene lugar en una dirección fija, contrariamente a lo que predice la teoría ondulatoria, de acuerdo con la cual el electrón debería emitir una onda esférica al realizar oscilaciones forzadas.

La explicación del efecto Compton supuso la rápida aceptación de la idea del fotón como partícula a pesar de algunas reticencias [43] entre las cuales destaca la protagonizada por Bohr, Kramers y Slater y que quedó plasmada en su artículo “La teoría cuántica de la radiación” de 1924 (conocido como artículo BKS) en que continuaban rechazando los fotones y considerando el carácter estadístico de los principios de conservación. Finalmente, nuevos resultados experimentales demostraron un desacuerdo profundo con las previsiones de Bohr, Kramers y Slater [52]. En 1926, Lewis llamaría fotones a los cuantos de luz.

2.6. La aceptación del fotón tiene carácter problemático

Ahora bien, la aceptación generalizada, a partir de 1924, del concepto de fotón por parte de la comunidad científica reabría el debate sobre la naturaleza de la luz. Cuando, a partir de las aportaciones de Maxwell, parecía claro el carácter ondulatorio de la luz, la aceptación de los fotones volvía a poner encima de la mesa el debate. Además, ahora, había evidencia empírica a favor de los dos modelos, lo cual constituía un problema serio. En palabras de Einstein “ahora hay al menos dos teorías de la luz, las dos imprescindibles y –como hay que admitir a pesar de los 20 años de enormes esfuerzos por parte de los físicos teóricos- sin conexión lógica alguna” [43].

Constatamos que desde la propuesta, por parte de Einstein, de los cuantos hubieron de pasar 18 años antes de su aceptación por la comunidad científica. Durante ese tiempo se tuvo que sortear una gran diversidad de obstáculos y, al mismo tiempo, el concepto fue evolucionando y precisando su significado.

Consideramos que no sólo es fundamental conocer la dificultades conceptuales a las que se pueden enfrentar los alumnos durante el aprendizaje del concepto de fotón. El dramatismo y la emoción que se extraen de este proceso de invención/rechazo/aceptación deben ser integrados en la enseñanza, permitiendo que los estu-

diantes sean partícipes de los procesos de creación y aceptación de conocimientos propios de la ciencia. Ello contribuirá tanto a la clarificación de la naturaleza del fotón (y a su aprendizaje) como a transmitir una imagen dinámica y no ingenua de la naturaleza de la ciencia.

3. Análisis de los libros de texto

Hemos elaborado una red de análisis para contrastar en qué medida los libros de texto incorporan los aspectos característicos del proceso histórico que llevó a la aceptación del fotón. En particular, consideramos que tener en cuenta el carácter controvertido de este período histórico supone:

- Hacer a los estudiantes conscientes del hecho que una parte de la comunidad científica consideraba que la física estaba prácticamente acabada y que solo quedaban unos pocos aspectos problemáticos por resolver, entre los cuáles se encontraba el establecimiento de un mecanismo que permitiese explicar cómo la materia absorbe o emite radiación.
- Dar cuenta de la rotura que supone la hipótesis de Planck con la física anterior y de la prudencia con que fue propuesta la hipótesis del cuanto de energía, en tanto que el carácter continuo de la energía de los osciladores y de la radiación ni siquiera estaba, en principio, en entredicho.
- Poner de relieve que en la explicación del efecto fotoeléctrico Einstein amplía el carácter discreto de la energía a la radiación, en contra de lo que establecía el electromagnetismo. Mostrar, además, la prudencia de Einstein al realizar la propuesta, que lo lleva a considerar los cuantos no como partículas sino como paquetes de energía y a calificar su propuesta de heurística.
- Ilustrar el fuerte rechazo que recibió la hipótesis de cuantización de Einstein en tanto que contradecía todo lo que el electromagnetismo establecía para la propagación de la radiación en el espacio, conocimientos que estaban respaldados por más de 40 años de resultados experimentales satisfactorios. Un ejemplo claro de ello es el hecho que Bohr hiciese uso del modelo ondulatorio de radiación para explicar la emisión y absorción de luz por el átomo de hidrógeno.
- Dar cuenta de que la explicación del efecto Compton supuso la confirmación experimental del carácter corpuscular del cuanto al evidenciar que los cuantos son portadores de momento lineal y que la radiación intercambia energía en cantidades $h\nu$ tanto con partículas libres como ligadas.

- Profundizar en el carácter problemático que supone la aceptación del concepto de fotón, en tanto que lleva a la necesidad de recurrir a dos modelos mutuamente excluyentes para explicar el comportamiento experimental de la radiación.

Siguiendo estos criterios hemos analizado los capítulos de física cuántica de 7 libros de física de 2º de bachillerato. Estos libros corresponden a la edición más actual de los textos de las principales editoriales españolas y son los textos de uso más frecuente entre el profesorado. La relación de libros se encuentra en el anexo.

Todos los libros han sido analizados de forma independiente por dos de los investigadores que han determinado si en la unidad se daba cuenta de cada uno de los aspectos antes comentados. Después de dicho análisis se hizo una puesta en común con la finalidad de aumentar la coherencia. El grado de coincidencia fue elevado (superior al 85%) y la mayor parte de las discrepancias fueron debidas al escaso énfasis con que se tratan algunos de los aspectos analizados en los libros de texto, a la ambigüedad del lenguaje empleado o a la existencia de contradicciones entre diversas partes del texto. En aquellos casos en que no ha habido coincidencia de criterio se ha pedido la opinión del tercer investigador. Hecho esto, si persistía la discrepancia se ha tomado la opción más desfavorable para nuestra investigación.

4.. Resultados

4.1. ¿Se da cuenta de que la comunidad científica consideraba que en la física quedaban solo unos pocos aspectos por resolver?

La totalidad de los libros de texto, al iniciar la unidad, coinciden en el hecho que la física clásica falla cuando intenta dar cuenta de los procesos de emisión y absorción de radiación, citando como principales ejemplos la radiación térmica emitida por un cuerpo, los espectros de los gases y el efecto fotoeléctrico. Sin embargo, sólo cinco de ellos indican explícitamente que existía en la comunidad científica el sentimiento de que la física estaba casi acabada. Tres de ellos [23, 26, 27] lo hacen sin hacer referencia a hechos o palabras concretas, mientras que los otros dos [22, 24] comentan la posición de Kelvin al respecto:

[...] a partir de 1880 estuvo inactivo [Lord Kelvin] porque anunció que ya todos los descubrimientos de la física se habían hecho, y que solamente quedaban por ajustar algunos de ellos [22, p. 289].

A finales del siglo XIX se pensaba que la física era una ciencia completamente desarrollada. Kelvin, sin ir más lejos, asegura:

“la física se ha terminado. A las siguientes generaciones de físicos solo les queda mejorar los dispositivos experimentales y poner decimales en los resultados.[...] Solo quedan dos nubecillas en el cielo: el experimento de Michelson-Morley y la radiación del cuerpo negro [24, p. 262].

4.2. ¿Se muestra que la hipótesis de Planck cuestiona solamente el intercambio continuo de energía entre los osciladores cargados y la radiación?

Los libros de texto aprovechan el espectro del cuerpo negro para introducir la cuantización de la energía. Todos los textos excepto el de Editex [22] analizan la distribución espectral de la energía e introducen la ley de Stephan-Boltzman y la ley de Wien. Seguidamente comentan que los intentos realizados con las teorías físicas conocidas hasta el momento no consiguieron obtener una explicación de los resultados experimentales, aunque no analizan en qué aspectos falla el electromagnetismo y la mecánica clásica a la hora de establecer un mecanismo de emisión de radiación, con lo cual no se aprecia la situación de crisis a que se enfrentaba la física clásica ni las insuficiencias del cuerpo teórico que hasta el momento se consideraba casi acabado. Esto impide, a su vez, apreciar la discrepancia entre el mecanismo clásico de emisión de radiación y el nuevo mecanismo cuántico al que dio origen la propuesta de Planck. Por contra, se limitan a indicar qué aspectos del espectro no podían ser explicados. Especialmente significativo es el hecho de que sólo 4 textos [22-25] atribuyen la emisión de radiación a la vibración de partículas cargadas que forman parte del objeto.

Indicada la necesidad de superar las leyes de la física conocidas hasta el momento, podemos considerar comprensible el hecho de que no se estudie el mecanismo clásico de emisión de radiación del cuerpo negro si se tiene en cuenta que la física que se requiere excede ampliamente los conocimientos de los estudiantes. Sin embargo, consideramos que sí se puede comentar el carácter continuo de la energía que implica el proceso clásico de emisión de radiación y compararlo con el carácter discontinuo que se deriva de las ideas de cuantización que tienen su origen en la hipótesis de Planck, dando cuenta así de la fractura que implicaba. En este sentido, sólo 4 libros de texto [22-25] indican explícitamente que la hipótesis de Planck supone un intercambio discontinuo de energía entre la radiación y la materia mientras que las teorías clásicas suponían que este intercambio era continuo.

Llegados a este punto, únicamente dos libros indican, de diferente forma, que hubiese dificultades para aceptar la hipótesis de Planck. En el libro de Ecir [25] se hace referencia al poco alcance que tuvo la aportación de Planck y a la prudencia con que fue propuesta:

La ecuación de Planck se refiere al caso particular de la energía de los átomos de una cavidad cuando éstos interactúan con la luz. Planck consideraba la ecuación como una “premisa puramente formal” sólo para justificar los valores experimentales (p. 111).

Mientras que el libro de Editex [22] resalta la oposición que recibió la idea por parte de la comunidad científica:

La idea de Planck encontró en el mundo científico y filosófico de la época la más violenta oposición, ya que implicaba la emisión de luz (radiación electromagnética) en forma de paquetes o cuantos de energía $h \cdot \nu$ (p. 299).

Respecto a la cautela con que la aportación de Planck fue realizada, ninguno de los libros de texto indica que se trataba de una hipótesis cuyo desarrollo posterior daría origen a una visión discontinua de la energía. Únicamente dos de los textos analizados [24-25] dan una visión moderada de lo que supone la hipótesis de Planck, según la cual, aún cuando el intercambio de energía entre la radiación y la materia era discontinuo, la radiación continuaba considerándose continua. Los otros textos afirman que la hipótesis de Planck supone la cuantización de la energía del oscilador y a continuación plantean situaciones en las cuales se da a entender que la cuantización se refiere, también, a la radiación. Así, en el libro de Santillana [21, p. 308-309] se indica:

[Planck] Supuso que en la materia existen pequeños osciladores (átomos o moléculas) que vibran con determinadas frecuencias, absorbiendo y emitiendo energía en forma de ondas electromagnéticas.

para, posteriormente, afirmar, siendo así que clásicamente la energía de la radiación no depende de su frecuencia, que:

Así, los rayos X (λ pequeña y ν grande) pueden provocar cáncer porque son muy energéticos, mientras que las ondas de radio y televisión (radiación de λ grande y ν pequeña) no causan esos efectos porque son muy poco energéticas.

En la misma página se propone un ejercicio en donde se llega a hablar de fotones:

Por término medio, la longitud de onda de la luz visible es de 550 nm. Determina la energía transportada por cada fotón.

Esta presentación origina una evidente confusión respecto del alcance de la hipótesis de Planck, además de dar una falsa imagen del proceso de crisis en que se vio inmersa la física.

4.3. ¿Se evidencia que en la explicación del efecto fotoeléctrico se utiliza el concepto de cuanto como un paquete de energía, sin ningún carácter corpuscular?

El siguiente aspecto que se trata es el efecto fotoeléctrico. Todos los libros, con profundidad desigual, describen el fenómeno, comentan el montaje experimental que permite su estudio y apuntan los resultados experimentales que se obtienen, indicando las diferencias respecto a las predicciones clásicas. Inmediatamente después introducen la hipótesis de cuantización de la radiación de Einstein de una forma muy desigual. Solamente dos textos [22, 25] manifiestan en un primer momento que Einstein no atribuía un carácter corpuscular a los cuantos. Los otros cinco libros hablan desde un principio de fotones. En tres de ellos [23, 24, 27] se atribuye un carácter corpuscular a estos fotones:

Einstein propuso en 1905 una explicación del efecto fotoeléctrico, según la cual la luz está formada por partículas llamadas fotones [...] [24, p. 268].

[...] Einstein volvió a introducir la naturaleza corpuscular en la propagación de la luz y su interacción con la materia [23, p. 356].

[...] en 1905 Einstein interpretó los términos de la anterior fórmula empírica [$E_{c,máx} = h\nu - h\nu_0$] de la siguiente forma: la luz incidente es considerada como un conjunto de partículas, denominadas fotones [...] [27, p. 337].

En los otros dos [21, 26] si bien inicialmente no se indica que el fotón sea una partícula, tampoco se da una imagen clara de lo que se esconde tras dicho concepto y posteriormente aparecen expresiones en las cuales la imagen corpuscular es manifiesta. Así, en el libro de Santillana [21] encontramos, al introducir la hipótesis de de Broglie:

Esto venía a completar el puzzle originado cuando Einstein señaló en 1905 que la luz podía considerarse compuesta por partículas que ahora llamamos fotones (p. 319).

y en el libro de Anaya [26] se lee, al introducir el efecto Compton:

Einstein insistió desde 1905 en la naturaleza corpuscular de la luz, en la existencia de partículas luminosas, aunque sin masa, que ahora llamamos fotones (p. 366).

A la luz de la nueva hipótesis, todos los textos comentan el proceso individual de interacción fotón-electrón que permite explicar la emisión de electrones y

dan cuenta de los resultados experimentales. La explicación de dicho proceso individual les permite, además, deducir la ley del efecto fotoeléctrico aplicando el principio de conservación de la energía.

4.4. ¿Se da cuenta del rechazo que recibió la hipótesis cuántica de Einstein?

Respecto a la aceptación de la hipótesis del cuanto de radiación, fuertemente contradictoria con lo que se sabía respecto a la naturaleza ondulatoria de la radiación, seis de los libros de texto dan por aceptada la hipótesis del cuanto de radiación una vez demostrada su capacidad para explicar el efecto fotoeléctrico. Sólo el libro de Edix [22] muestra el rechazo de la comunidad científica a la idea del cuanto de radiación (aunque atribuye dicha idea a Planck) argumentando:

La idea de Planck encontró en el mundo científico y filosófico de la época la más violenta oposición, ya que implicaba la emisión de luz (radiación electromagnética) en forma de paquetes o cuantos de energía $h \cdot \nu$. Esto chocaba con la idea de continuidad de los fenómenos físicos y, sobre todo, por que esta nueva idea corpuscular de la luz y de la radiación electromagnética irrumpía en la física en un momento en el que la teoría ondulatoria de la radiación electromagnética se consideraba lo suficientemente probada (p. 299).

El texto de Ecir [25] aunque señala que inicialmente hubo oposición por parte de la comunidad científica a la hipótesis del cuanto luminoso, no indica que las reticencias persistieron tras la confirmación experimental de la ecuación en 1915. Otros tres libros [23, 26, 27] apuntan solamente que los resultados experimentales disponibles en 1905 eran insuficientes pero no hacen referencia al rechazo hacia la idea del cuanto luminoso y atribuyen la aceptación de la propuesta a la concordancia de las previsiones de Einstein con los resultados de Millikan. Respecto a los otros dos textos [21, 24] dan por válida la hipótesis del cuanto de radiación tras interpretar el efecto fotoeléctrico sin poner de manifiesto, y sin hacer ningún comentario al respecto, que hubieron de pasar casi veinte años antes de que fuese aceptada.

4.4.1. ¿En la explicación de la emisión y absorción de radiación mediante el modelo de Bohr se indica que éste consideraba la radiación como un fenómeno ondulatorio?

Los seis textos que trabajan este punto (llama especialmente nuestra atención, puesto que se trata del primer modelo atómico que introduce la cuantización de la energía, el hecho de que el libro de Mc Graw Hill

[24] no trate el modelo de Bohr ni los espectros atómicos en la unidad de física cuántica) comienzan con la introducción de los espectros discontinuos de los gases, indicando en mayor o menor medida cómo se obtienen experimentalmente. Seguidamente hablan de la clasificación de las líneas espectrales en series (excepto el libro de Edix [22]) y, sin dar una interpretación clásica de la formación de los espectros, introducen los postulados de Bohr de forma desigual:

Tres de ellos [22, 23, 26] hablan de fotones cuando se refieren al tipo de radiación emitida durante las transiciones electrónicas. Así, en el libro de Edix [22] encontramos:

Quando el electrón pasa de una órbita a otra absorbe o emite energía en forma de un fotón, en una cantidad igual a $\Delta E = h \cdot \nu$ (p. 302).

El texto de Ecir [25] habla de radiación homogénea, aunque no aclara en el postulado si se trata de ondas o fotones. Sin embargo, en la introducción del apartado sí que apunta que “El concepto de fotón [...] contribuyó a explicar el problema no resuelto por la física clásica de los espectros atómicos” (p. 124).

En Sm [27] no indica los postulados, sólo explica cómo se concibe el átomo y utiliza los fotones para referirse a la radiación emitida.

Posteriormente se da cuenta de la formación de los espectros de líneas por el átomo de hidrógeno atendiendo al modelo de átomo descrito por Bohr y usando el concepto de fotón. Ningún texto se hace eco de un aspecto histórico que muestra de forma clara la escasa consideración de la comunidad científica al cuanto luminoso: el hecho que Bohr introdujese la cuantización en el átomo sin aceptar la cuantización de la radiación. Se llega incluso a afirmar todo lo contrario:

[...] no es de extrañar que el joven Niels Bohr echara mano de la teoría de los cuantos de Planck y Einstein, que venía demostrando su eficacia frente a las teorías clásicas” [23, p. 358].

4.5. ¿Se indica que el efecto Compton supone la confirmación del carácter corpuscular de los cuantos, es decir, de los fotones?

Ya nos hemos referido al papel decisivo que con relación a la aceptación del carácter corpuscular del cuanto jugó el efecto Compton. Pues bien, coherentemente con el carácter aporético de la introducción que venimos constatando, encontramos que sólo dos de los textos analizados [25, 26] abordan el estudio de dicho efecto.

En uno de los textos indicados anteriormente se enfatiza la aportación de Compton para la aceptación del carácter corpuscular de la radiación:

Las propiedades corpusculares del fotón precisaban de una prueba experimental que evidenciara la cantidad de movimiento asociada al mismo. Esta prueba fue aportada en 1923 por el físico norteamericano Arthur Holly Compton (1892-1962) [25, p. 121].

y posteriormente se describe el experimento, se indica cuál es el resultado que cabía esperar a la luz de la teoría electromagnética y se interpreta la disminución de la longitud de onda de la radiación dispersada por parte de los electrones libres como una consecuencia de los principios de conservación de la energía y del momento lineal, a pesar de indicar que:

“El fotón, al chocar con el electrón, intercambia con éste cantidad de movimiento y energía: y en consecuencia *decrece la energía del fotón* [...]” [25, p. 123, la cursiva es nuestra].

interpretación que es contradictoria con el fundamento de la cuantización, que sólo permite que los fotones sean absorbidos en su totalidad, la absorción parcial de la energía de un fotón supone la aceptación del carácter continuo de la energía.

En el otro texto, aún cuando se indica que los experimentos de Compton supusieron “una gran confirmación” [26, p. 352] de las ideas de Einstein, no se había planteado previamente ningún interrogante respecto del comportamiento corpuscular de los fotones, no se indica cuál es el resultado clásico esperado ni se da una interpretación del mecanismo cuántico, sólo se indica que se deben cumplir los principios de conservación de la energía y el momento lineal. Queda así meramente como un hecho experimental más que se puede explicar usando el concepto de fotón, perdiéndose el valor de aportación crucial que tuvo en el avance de la teoría cuántica.

4.6. ¿Se pone de relieve el carácter problemático que supone la existencia de dos modelos para la radiación?

Llegados a este punto, todos los libros dan por suficientemente probado el carácter corpuscular de la radiación y continúan con el proceso histórico introduciendo la hipótesis de de Broglie sin mencionar los problemas que quedaban por superar.

Así, presentan el carácter dual de la luz y los nuevos desarrollos cuánticos que tienen su origen en la hipótesis de de Broglie como la consecuencia lógica de la existencia de dos modelos para la radiación, aunque la forma de hacerlo es muy diferente. Encontramos casos [22, 24, 27] en que no se hace ninguna mención al hecho que la existencia de dos imágenes para la radiación sea una situación problemática, puesto que ni siquiera se indica o recuerda que hay resultados experimentales que sólo se

pueden explicar atendiendo exclusivamente al modelo corpuscular o al ondulatorio.

Otros [21, 23, 25, 26] mencionan que existen resultados experimentales contradictorios pero resuelven el problema haciendo una simbiosis “evidente” de los dos modelos:

La luz tiene una doble naturaleza: ondulatoria y corpuscular. Según el tipo de fenómeno, se manifiesta de una u otra forma, y no es necesario tener en cuenta ambas en la explicación del fenómeno [26, p. 358].

En ningún momento se analiza el hecho que ambos modelos son excluyentes y que recurrir a la dualidad no es una solución sino un problema.

Ningún texto considera siquiera que la expresión $E = h\nu$ sea problemática y no realizan comentario alguno al respecto. Es más, En los libros de Anaya [26] y Ecir [25] consideran que la expresión $E = h\nu$ es un argumento en defensa de la naturaleza dual de la radiación, como si fuese común en física aceptar modelos contradictorios sobre los fenómenos. En Anaya [26, p. 358] se lee:

La hipótesis de Planck, con la interpretación revolucionaria de Einstein de los cuantos de radiación como la energía transportada por partículas luminosas, nos permite obtener la relación entre las dos naturalezas de la luz:

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} = p \cdot c \rightarrow \lambda = \frac{h}{p}$$

En este sentido, los ejercicios propuestos con anterioridad inducen a confusión al pedir que se calculen magnitudes corpusculares a partir de las ondulatorias, o viceversa, sin hacer una reflexión sobre qué significado tiene el cálculo realizado a la luz del modelo de radiación. Así, en Ecir [25, p. 112] encontramos la siguiente actividad:

Los átomos de una muestra de sodio en estado de vapor pueden absorber y emitir *fotones de longitud de onda 590 nm*. Determina la energía de cada fotón, expresándola en J y en eV

y en el libro de Sm [27, p. 335]:

Un cuerpo está radiando energía. Conforme a la hipótesis de Planck:

- Determina la energía de un “cuanto” cuya longitud de onda es $\lambda = 25 \text{ nm}$.
- Calcula la *frecuencia correspondiente a dicho cuanto* de energía.

En ambos casos la cursiva es nuestra.

Una vez se ha introducido y se ha dado por aceptada la dualidad, tanto para la luz como para las partículas materiales, sí que se comenta la necesidad de buscar una nueva imagen para las partículas que supere

la visión clásica y que dé cuenta de los nuevos avances. Sin embargo, y como hemos indicado anteriormente, no se indica que la existencia de dos modelos para la luz sea un problema, aparentemente sólo es problemática la dualidad para las partículas materiales.

5.. Conclusiones y perspectivas

Los resultados obtenidos al analizar la presentación que los libros de texto hacen del concepto de fotón nos permiten afirmar que, resumidamente, en la enseñanza tradicional se introduce la discontinuidad de la energía de la radiación a la hora de dar cuenta del efecto fotoeléctrico, a dichos cuantos se les llama fotones y hemos de ver en ellos corpúsculos.

Con relación a la opción más extendida que consiste en no proponer, como punto de partida, el estudio pormenorizado del espectro del cuerpo negro, fenómeno que llevó a Planck a introducir por primera vez la cuantización de la energía, podemos aceptar que se trata de un aspecto lo suficientemente complejo, y prescindible para los estudiantes de bachillerato, como para no tratarlo en detalle o incluso no introducirlo. Es así que estaría justificado introducir el cuanto de luz a la hora de interpretar el efecto fotoeléctrico.

Sin embargo, creemos profundamente desacertado hablar, desde un primer momento, de que estos cuantos puedan ser tratados como corpúsculos, con muy escasas referencias a las objeciones planteadas por los físicos del momento. Por debajo del escaso o nulo énfasis que la enseñanza habitual hace de las dificultades que la comunidad científica hubo de vencer para pasar de los cuantos de Planck a los fotones en su significado actual está la asunción de que los estudiantes aceptarán fácilmente la idea según la cual la luz, y la radiación en general, está formada por corpúsculos. Si ello es así, si realmente los estudiantes ofrecen pocas reticencias a la aceptación del fotón, nos encontramos frente a un indicador del, posiblemente, escaso aprendizaje conseguido por ellos respecto del carácter ondulatorio de la luz. Hemos de coincidir en que es difícilmente aceptable, al menos inicialmente, que la luz se comporte en algunas ocasiones como una onda, y, en otras, como si estuviese formada por partículas.

Constatamos que se da, al mismo tiempo, una imagen errónea de la actividad científica de acuerdo con la cual los avances se corresponden con “descubrimientos” de “realidades” que permanecían ocultas hasta que el trabajo experimental las ha puesto de relieve, obviando que el conocimiento científico es construido, fruto de la controversia y del consenso, y que se encuentra siempre en continua revisión. De hecho, a físicos de la talla de Planck, Millikan o Bohr, por mencionar unos pocos, les costó muchos años, y enormes esfuerzos, aceptar el comportamiento cuántico de la luz. Es más, el mismo Einstein, que no veía en un primer momento corpúsculos en los cuantos, cuando se convenció de la existencia

de los fotones (en su significado moderno) se negó a aceptar un comportamiento dual para la luz. Si esto ha ocurrido con científicos de primera línea no podemos suponer que nuestros alumnos de 17/18 años aceptarán fácilmente dicho carácter dual. La coherencia es una de las principales características de las teorías científicas, y una enseñanza de calidad exige que los alumnos tomen conciencia de dicho criterio epistemológico. ¿Dónde está la coherencia si resulta que para explicar los fenómenos luminosos hemos de recurrir, alternativamente, a modelos tan opuestos como el corpuscular y el ondulatorio?

El estudio de la historia de la ciencia (vista como un conjunto de problemas cuya superación ha supuesto avances) y de su epistemología ha de aportar a los docentes y a los alumnos conocimientos sobre los cambios conceptuales que se producen al construir los modelos y teorías que se trata de enseñar. Dichos cambios no afectan solamente al significado de los conceptos sino que también implican cambios metodológicos y epistemológicos relacionados con la forma de analizar la realidad e interpretarla. La falta de consideración de dichas “discontinuidades” llevan a los estudiantes a usar sólo los conceptos que consideran más intuitivos, impidiendo que se adquiera el perfil epistemológico que se pretende.

Pensamos que una adecuada comprensión de la naturaleza de la luz pasa por estudiar en profundidad la teoría ondulatoria de la luz dando cuenta, muy en particular, de los fenómenos de interferencia y difracción (fenómenos típicamente ondulatorios). Posteriormente, los estudiantes han de notar que la teoría electromagnética de Maxwell confirma dicho carácter ondulatorio (la luz sería un campo electromagnético variable que se propaga por el espacio). La incapacidad del modelo ondulatorio para dar cuenta del efecto fotoeléctrico debe llevar a la introducción de la hipótesis del fotón remarcando los problemas epistemológicos que ello conlleva, así como las resistencias de la comunidad científica a aceptar la dualidad propuesta. En concreto, los estudiantes han de percibir que la aceptación de los fotones plantea un nuevo problema a los físicos, en tanto que lleva a la coexistencia de dos modelos para la radiación, ambos necesarios pero contradictorios.

Consideramos, además, que el hecho de dar cuenta de las dificultades históricas que rodearon a la aceptación del concepto de fotón tendrá un efecto positivo no sólo sobre los aspectos conceptuales del proceso de enseñanza-aprendizaje sino también sobre las actitudes de los alumnos hacia la instrucción en tanto que muestra una de las etapas más controvertidas (y más apasionantes) de la historia de la ciencia.

El diseño de un programa de actividades que contemple las dificultades históricas que tuvo que superar el concepto de fotón y la puesta a prueba en grupos de alumnos de la educación secundaria superior es ahora nuestro objetivo, del cual esperamos dar cuenta en futuros trabajos.

6.. Anexo

Relación de libros de física de 2º de bachillerato analizados (Editorial y año de publicación)

- M.C. Vidal, *Física* (Santillana, Madrid, 2009).
- J. Barrio, D.M. Andrés y J.L. Antón, *Física* (Editex, Madrid, 2009).
- J.B. Barrio, *Física* (Oxford y Estella, Navarra, 2009).
- F.J. Ruiz y F. Tarín, *Física 2* (Mc Graw Hill y Arevaca, Madrid, 2009).
- S. Lorente, F. Sendra, E. Enciso, J. Quílez y J. Romero, *Éter. Física* (Ecir, Paterna, Valencia, 2009).
- S. Zubiaurre, J.M. Arsuaga, J. Moreno y F. Gálvez, *Física* (Anaya, Madrid, 2009).
- J. Puente, N. Romo, M. Pérez y J.D. Alonso, *Física 2* (Sm, Madrid, 2009).

Referencias

- [1] J. Solbes y M.J. Traver, *Enseñanza de las Ciencias* **14**, 103 (1996).
- [2] H.A. Wang and D.D. Marsh, *Science & Education* **11**, 169 (2002).
- [3] G.S. Aikenhead, *Science Education* **6**, 453 (1985).
- [4] D. Gil-Pérez *et al.*, *Enseñanza de las Ciencias* **17**, 503 (1999).
- [5] J. Solbes y M. Traver, *Enseñanza de las Ciencias* **19**, 151 (2001).
- [6] A. Stinner, *Science Education* **79**, 555 (1995).
- [7] J.L. Heilbron, *Science & Education* **11**, 321 (2002).
- [8] H. Lin, J. Hung and S. Hung, *International Journal of Science Education* **24**, 453 (2002).
- [9] C. Lin, J. Cheng and W. Chang, *International Journal of Science Education* **32**, 2521 (2010).
- [10] M. Monk and J. Osborne, *Science Education* **81**, 405 (1997).
- [11] R. Verdú y J. Martínez-Torregrosa. *La Estructura Problematizada de los Temas y Cursos de Física y Química como Instrumento de Mejora de su Enseñanza y Aprendizaje* (Universitat de València, València, 2005).
- [12] L. Osuna, J. Martínez Torregrosa, J. Carrascosa y R. Verdú. *Enseñanza de las Ciencias* **25**, 277(2007).
- [13] National Research Council. *National Science Education Standards (DC National Academy Press, Washington, 1996)*. <http://www.nsta.org/publications/nses.aspx>.
- [14] W. Harlen, *Principles and Big Ideas of Science Education* (Association for Science Education) www.ase.org.uk (2010).
- [15] D. Gil *et al.*, ¿Cómo promover el interés por la cultura científica? (Oficina Regional de Educación de la UNESCO para América Latina y el Caribe) <http://www.oei.es/decada/libro.php> (2005).
- [16] D. Gil, *Enseñanza de las Ciencias* **11**, 197 (1993).
- [17] F.J. Rutherford, *Science & Education* **10**, 569 (2001).
- [18] C. Furió y G. Guisasola, *Enseñanza de las Ciencias* **15**, 259 (1997).
- [19] J.L. Doménech, D. Gil-Pérez, A. Gras, J. Guisasola, J. Martínez-Torregrosa, y J. Salinas, *Revista de Enseñanza de la Física* **14**, 45 (2001).
- [20] A.F. Chalmers, *Science and Its Fabrication* (University of Minnesota Press, Minneapolis, 1990).
- [21] M. C. Vidal. *Física* (Santillana, Torrelaguna – Madrid, 2009).
- [22] J. Barrio, D. M. Andrés y J. L. Antón. *Física* (Editex, Pozuelo de Alarcón – Madrid, 2009).
- [23] J. B. Barrio. *Física* (Oxford, Estella – Navarra, 2009).
- [24] F. J. Ruiz y F. Tarín. *Física 2* (Mc Graw Hill, Arevaca – Madrid, 2009).
- [25] S. Lorente, F. Sendra, E. Enciso, J. Quílez y J. Romero. *Éter. Física*. (Ecir, Paterna – Valencia, 2009).
- [26] S. Zubiaurre, J. M. Arsuaga, J. Moreno y F. Gálvez. *Física* (Anaya, Madrid, 2009).
- [27] J. Puente, N. Romo, M. Pérez y J. D. Alonso. *Física 2* (Sm, Pinto – Madrid, 2009).
- [28] J.M. Sánchez Ron, *Historia de la Física Cuántica. I. El Período Fundacional (1860-1926)* (Crítica, Barcelona, 2001).
- [29] P.J.E. Peebles, *Nineteenth and Twentieth Century Clouds Over the Twenty-first Century Virtual Observatory*. Contribution to the conference, Toward an International Virtual Observatory, Garching, <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0209403> (2002).
- [30] A. Arons, *Teaching Introductory Physics* (Wiley, New York, 1997).
- [31] G. Holton y S.G. Brush, *Introducción a los Conceptos y Teorías de las Ciencias Físicas* (Editorial Reverté S.A., Barcelona, 1987).
- [32] J. Gribbin, *El Gato de Schrödinger: La Fascinante Historia de la Mecánica Cuántica*. (Salvat Editores, Barcelona, 1985).
- [33] T.S. Kuhn, *La Teoría del Cuerpo Negro y la Discontinuidad Cuántica, 1894-1912* (Alianza Editorial, Madrid, 1980).
- [34] T.S. Kuhn, *Historical Studies in the Physical Sciences* **14**, 231 (1984).
- [35] M.J. Klein, A. Shimony y T. Pinch, *Isis* **70**, 429 (1979).
- [36] P. Galison, *British Journal for the Philosophy of Science* **32**, 71 (1981).
- [37] A. Einstein, en: *Einstein 1905: Un Año Milagroso*, editado por J. Stachel (Crítica, Barcelona, 2001), p. 156.
- [38] L. Navarro, *Investigación y Ciencia* **338**, 38 (2004).
- [39] J. Stachel, *Einstein 1905: Un Año Milagroso* (Crítica, Barcelona, 2001).

- [40] D. Kleppner, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **27**, 87 (2004).
- [41] A. Einstein, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **27**, 93 (2005).
- [42] M. Kumar, *QUÁNTUM. Einstein, Bohr y el Gran Debate Sobre la Naturaleza de la Realidad* (Kirós, Barcelona, 2011).
- [43] A. Pais, *El Señor es sutil... La Ciencia y la Vida de Albert Einstein* (Ariel, Barcelona, 1984).
- [44] A. Beléndez, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **30**, 2601 (2008).
- [45] L. Navarro, *Investigación y Ciencia* **396**, 96 (2009).
- [46] D. Lindley, *Incertidumbre* (Ariel, Barcelona, 2008).
- [47] N. Bohr, *Física Atómica y Conocimiento Humano* (Aguilar, Madrid, 1964).
- [48] A. Beck, *The Collected Papers of Albert Einstein* (v. 5). *The Swiss Years: Writings, 1902-1914* (Princeton University Press, Princeton, 1995).
- [49] L. Navarro, en: *1905 El Jove Einstein en Català*, editado por E. Sallent, A. Roca y A. Molina (Biblioteca de Catalunya, Barcelona, 2005) .
- [50] N. Bohr, *The Structure of the Atom*. Nobel Lecture, http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1922/bohr-lecture.html. (1922)
- [51] L.O.Q. Peduzzi y A.C. Basso, *Revista Brasileira de Ensino de Física* **27**, 545 (2005).
- [52] M. Jammer, *The Conceptual Development of Quantum Mechanics* (Mc Graw Hill, New York, 1966).
- [53] R.A. Millikan, *The Electron and the Light-Quant From the Experimental Point of View*. Nobel Lecture, http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1923/millikan-lecture.pdf (1924).
- [54] A.H. Compton, *X-rays As a Branch of Optics*. Nobel Lecture, http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1927/compton-lecture.pdf (1927).