

## LA INTRODUCCIÓ DEL CONCEPTE DE FOTÓ EN EL BATXILLERAT<sup>1</sup>

FRANCISCO SAVALL ALEMANY;<sup>1</sup> JOSEP LLUÍS DOMÈNECH;<sup>2</sup> JOAQUÍN MARTÍNEZ TORREGROSA<sup>3</sup>

<sup>1</sup> IES NÚM. 1 DE XÀBIA.

<sup>2</sup> IES ANTONI LLIDÓ DE XÀBIA.

<sup>3</sup> UNIVERSITAT D'ALACANT.

Paraules clau: *ensenyament problematitzat, física quàntica, fotó*

### The introduction of the photon concept in higher secondary school

Summary: *Analysing the history of the introduction of the photon concept and its treatment in physics textbooks we conclude that the photon concept is taught in the higher secondary school without taking into account the historical problems that it had to overcome, which makes students learning difficult.*

Key words: *problem-based teaching and learning, quantum physics, photon, textbooks*

### Introducció i plantejament del problema

Si es fa una revisió a la investigació en didàctica de la ciència es constata que el fracàs de l'ensenyament científic afecta tots els camps de la ciència, tant a nivell d'ensenyament secundari com universitari. Per superar aquest fracàs s'ha apuntat la conveniència de plantejar l'ensenyament com un procés de resolució de situacions problemàtiques d'interès (Rocard *et al.*, 2007; NSES, 1996). Nosaltres concretem aquesta proposta en allò que anomenem *model d'ensenyament per investigació dirigida* (Gil, 1993), la principal característica del qual és l'estructura problematitzada de la seqüència d'activitats.

---

1. Aquest article hauria d'haver estat publicat a les Actes de la, VI Jornada sobre la Història de la Ciència i l'Ensenyament, corresponents a la Jornada celebrada els dies 20 i 21 de novembre de 2009.

Per dissenyar l'estructura problematitzada d'un tema l'equip de professors ha de tindre un coneixement profund de la matèria a tractar, i això requereix prendre consciència, entre d'altres aspectes, dels problemes que estan en l'origen dels conceptes a estudiar, com han evolucionat fins a l'estat actual i quines van ser les dificultats que van haver de superar (Osuna *et al.*, 2007). Adquirir dita informació requereix un estudi històric i epistemològic realitzat amb *intencionalitat didàctica* i amb coneixement pràctic sobre els alumnes i l'aula, amb la finalitat que siga útil per ensenyar i aprendre (Duit *et al.*, 2005; Furió *et al.*, 2006; Verdú, 2004).

Nosaltres intentarem mostrar que això està lluny de ser així en el cas de la física quàntica. Començarem, per tant, amb una anàlisi històrica de la problemàtica que va portar a la introducció del concepte de fotó i de les dificultats que es van haver de superar fins a la seua acceptació. A la llum d'aquesta revisió històrica realitzarem una posterior anàlisi de la forma en què s'introdueix el concepte de fotó en l'ensenyament habitual. Per fer-ho utilitzarem els llibres de text de les principals editorials en tant que constitueixen el material curricular d'ús més extens entre els docents.

## **Problemes històrics lligats a l'acceptació del concepte de fotó**

### *Hipòtesi de quantització de l'energia*

El concepte de *quàntum* apareix per primera vegada en 1900 de la mà de Planck en donar una interpretació de l'espectre d'emissió del cos negre. L'impacte inicial de la hipòtesi de Planck, consistent a considerar discontinua l'energia dels oscil·ladors que formaven la paret del cos negre tot mantenint el caràcter continu de l'energia de la radiació, va ser bastant limitada. La dificultat per acceptar la discontinuïtat en l'energia provenia del convenciment que els processos naturals són de naturalesa contínua, condició necessària per mantindre la relació causa-efecte o per seguir emprant el càlcul diferencial i integral (Holton, 1987: 644).

### *Hipòtesi del quàntum de llum*

Einstein va donar en 1905 una explicació de l'efecte fotoelèctric proposant que el quàntum produït per l'emissor no es distribuïx per tot el front d'ona sinó que la llum consisteix en un flux de quanta localitzats en punts de l'espai, que es mouen sense dividir-se i que poden ser absorbits sols en unitats completes (Stachel, 2001: 156). Cal dir, però, que la proposta inicial d'Einstein no introduïa un model de partícules per a la radiació. Einstein parlava en 1905 de quàntums d'energia, entenent aquest com un tros d'energia (Pais, 1984: 362, 405, 410; Navarro, 2009).

### *Dificultats per acceptar la hipòtesi del quàntum de radiació*

Tot i la capacitat explicativa del quàntum de llum posada de manifest per Einstein en l'article de 1905, la comunitat de físics va rebre aquesta hipòtesi amb incredulitat i escepticisme. Açò va ser degut a diversos motius:

- Contradeïa tot allò que se sabia de la propagació dels camps electromagnètics en el buit, la part més coneguda de la teoria electromagnètica de Maxwell, que comptava amb més de 40 anys de resultats experimentals positius (Pais, 1984: 387-389; Navarro, 2004).
- El qüestionament de la continuïtat suposava la impossibilitat d'usar el càlcul diferencial i integral en què es basa la física.

- El suport experimental era molt escàs (Pais, 1984: 389).
- La inconsistència de les noves equacions: no es pot donar significat físic a les magnituds de l'expressió  $E = h \cdot \nu$  en tant que el quantum representa un paquet d'energia per al qual és impossible definir una freqüència (Holton, 1987: 654; Bohr, 1964: 42).

El rebuig a la hipòtesi d'Einstein queda patent en 1913 quan, en proposar Einstein per a l'Acadèmia Prusiana de Ciències, Planck, Nerst, Rubens i Warburg indiquen que la seua hipòtesi del quàntum de llum és una especulació que no encertà en el blanc.

La manca de suport al quàntum de radiació es palesa en l'èxit del model atòmic que en 1913 va proposar Bohr. Per explicar l'espectre de l'hidrogen Bohr defèn que l'electró guanya o perd energia quan passa d'un estat estacionari a un altre emetent o absorbint radiació homogènia «que té les mateixes propietats que aquella que seria emesa d'acord amb la teoria clàssica per una partícula elèctrica que realitza una vibració harmònica» (Bohr, 1922). Aquests esforços per preservar la teoria electromagnètica van portar alguns científics a negar la validesa universal del principi de conservació de l'energia i reduir-lo sols a un principi de caràcter estadístic tot postulant l'existència dins dels àtoms d'un mecanisme per emmagatzemar energia fins que s'havia rebut un quàntum (Sánchez Ron, 2001: 397).

### *Dels quanta de llum als fotons*

Tot i que Einstein no atribuïa en 1905 un caràcter corpuscular als quanta lluminosos no va tardar molt de temps en defensar eixa possibilitat. Així, en 1909 va proposar, no sense manifestar grans dubtes, que els camps electromagnètics estaven associats a «quanta singulars» (Sánchez Ron, 2001: 180). Tot i això, no és fins al 1916 que parla per primera vegada del moment lineal dels quanta (Pais, 1984: 411).

Els primers fets experimentals sòlids apareixen en 1915 quan Millikan va comprovar experimentalment la validesa de l'equació d'Einstein. No obstant això, Millikan indicava que la concepció corpuscular de la radiació a partir de la qual Einstein obté l'equació encara estava lluny de considerar-se vàlida (Millikan, 1924). Aquesta posició era, a més, generalitzada, i així ho demostra el fet que el premi Nobel de 1921 se li atorgue a Einstein «pels serveis a la física teòrica i especialment pel descobriment de la llei de l'efecte fotoelèctric», no per la idea del quàntum de llum (Navarro, 2009).

La prova definitiva a favor del caràcter corpuscular dels quanta la va proporcionar Compton en donar una explicació satisfactòria del fenomen que posteriorment rebria el seu nom. Analitzant els raigs X dispersats per electrons lliures va arribar a la conclusió que la disminució de la freqüència de la radiació dispersada no podia ser explicada per l'electromagnetisme clàssic. La interpretació de Compton va posar de manifest experimentalment que la radiació és portadora de moment lineal i que en la interacció entre un quàntum de radiació i un electró es compleixen les lleis de conservació relativistes de l'energia i el moment (Sánchez Ron, 2001: 338). Va demostrar, a més, que l'energia  $h \cdot \nu$  era absorbida també per partícules lliures i no sols pels electrons atòmics, la qual cosa convertia la quantització de l'energia en una característica de la radiació.

Ara bé, tot i l'acceptació generalitzada del fotó lluminós per part de la comunitat científica, el problema referent a la naturalesa de la llum estava lluny d'estar tancat. Einstein escrivia que «ara hi ha almenys dues teories de la llum, les dues imprescindibles i —com cal admetre tot i els 20 anys d'enormes esforços per part dels físics teòrics— sense connexió lògica alguna» (Pais, 1984: 416).

### Procediments i resultats

A la llum del procés històric, hem elaborat una xarxa d'anàlisi (Fig. 1) per contrastar en quina mesura en l'ensenyament es tenen en compte les dificultats que va haver de superar la teoria quàntica fins a arribar a l'acceptació del concepte de fotó.

1. En introduir la hipòtesi de Planck s'indica que la distribució d'energia de la radiació és contínua.
2. En l'explicació de l'efecte fotoelèctric s'utilitza el concepte de quàntum, no el de fotó.
3. Es dóna compte del rebuig que va rebre la hipòtesi quàntica d'Einstein.
4. S'assenyala el caràcter contradictori de l'expressió  $E = h \cdot \nu$ .
5. En l'explicació de l'emissió i absorció de radiació mitjançant el model de Bohr es considera que la llum és de naturalesa ondulatoria.
6. S'indica que l'efecte Compton suposa la confirmació del caràcter corpuscular dels quanta, és a dir, dels fotons.
7. Es posa en relleu el caràcter problemàtic que suposa l'existència de dos models per a la radiació.

FIGURA 1. Xarxa d'anàlisi per a llibres de text sobre l'acceptació del concepte de fotó.

Seguint aquests criteris analitzem les unitats de física quàntica i estructura atòmica de catorze llibres de física de segon de batxillerat. Els resultats obtinguts es mostren en la taula següent (Fig. 2):

Ítem	En donen compte	No en donen compte
1	2	12
2	1	13
3	3	11
4	0	14
5	2	12
6	3	11
7	0	14

FIGURA 2. Resultats obtinguts en analitzar la manera com els textos introdueixen el concepte de fotó.

### Conclusions i perspectives

Podem concloure que en l'ensenyament habitual de la física quàntica el concepte de fotó s'introdueix sense tindre en compte les dificultats històriques que va haver de superar. Considerem absurd que uns coneixements contraintuïtius com el fet que la radiació està formada per partícules, que va costar vint-i-cinc anys d'acceptar per part de la comunitat científica, puguin ser adquirits amb comprensió pels estudiants si se'ls dóna un tractament aproblemàtic. El disseny d'un programa-guia o seqüència d'activitats que contemple les dificultats històriques que va haver de superar el concepte de fotó i la posada a prova amb grups d'alumnes de l'educació secundària superior és ara el nostre objectiu, del qual esperem donar compte en futurs treballs.

## Referències bibliogràfiques

- BOHR, N. (1922), *The structure of the atom. Nobel lecture*, [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1922/bohr-lecture.html](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1922/bohr-lecture.html) (darrer accés: 15.09.09).
- BOHR, N. (1964), *Física atòmica y conocimiento humano*, Madrid, Difusión Científica, Aguilar.
- DUIT, R.; GROPENIEBER, H.; HATTMANN, U. (2005), «Towards science education research that is relevant for improving practice: The model of educational reconstruction». A: FICHER, H. E. (ed.), *Developing Standards in Research on Science Education*, Leiden, Taylor & Francis, 1-9.
- FURIÓ, C.; AZCONA, R.; GUIASOLA, J. (2006), «Enseñanza de los conceptos de "cantidad de sustancia" y de mol basada en un modelo de aprendizaje como investigación orientada», *Enseñanza de las ciencias*, **24**, (1), 43-58.
- GIL-PÉREZ, D. (1993), «Contribución de la Historia y Filosofía de las ciencias al desarrollo de un modelo de enseñanza/aprendizaje como investigación», *Enseñanza de las Ciencias*, **11**, (2), 197-212.
- HOLTON, G. (1987), *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*, Mollet del Vallès (Barcelona), Editorial Reverté.
- MILLIKAN, R. A. (1924), *The electron and the light-quant from the experimental point of view*, [http://nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/1923/millikan-lecture.pdf](http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1923/millikan-lecture.pdf) (darrer accés:15.09.09).
- NSES (National Science Education Standards, (1996), <http://www.nsta.org/publications/nses.aspx> (darrer accés:15.09.09).
- NAVARRO VEGUILLAS L. (2004), «Einstein y los comienzos de la física cuántica: de la osadía al desencanto», *Investigación y Ciencia*, **338**, 38-48.
- NAVARRO VEGUILLAS, L. (2009), «Einstein», *Investigación y Ciencia*, **396**, 96.
- OSUNA GARCÍA, L. et al. (2007), «Planificando la enseñanza problematizada: el ejemplo de la óptica geométrica en educación secundaria», *Enseñanza de las Ciencias*, **25**, (2), 277-294.
- PAIS, A. (1984), «El Señor es sutil...» *La ciencia y la vida de Albert Einstein*, Barcelona, Ariel.
- ROCARD, M. et al. (2007), *Science education now: A renewed pedagogy for the future of Europe. European Commission*, <http://ec.europa.eu/research/science-society> (darrer accés:15.09.09).
- SÁNCHEZ RON, J. M. (2001), *Historia de la física cuántica. I. El período fundacional (1860-1926)*, Barcelona, Crítica.
- STACHEL, J. (2001), *Einstein 1905: Un año milagroso*, Barcelona, Crítica.
- VERDÚ CARBONELL, R. (2004), *La estructura problematizada de los temas y cursos de física y química como instrumento de mejora de su enseñanza y aprendizaje*, Memoria presentada para optar al Grado de Doctora en Ciencias Físicas por Rafaela Verdú Carbonell; dirigida por Joaquín Martínez Torregrosa, València, Universitat de València.