

## EXPERIMENTS CRUCIALS AL LABORATORI

### ENRIC PÉREZ CANALS

DEPARTAMENT DE FÍSICA DE LA MATÈRIA CONDENSADA. UNIVERSITAT DE BARCELONA.

Paraules clau: *quasi-història, història de la física quàntica, Einstein, efecte fotoelèctric, fotó*

### Crucial Experiments in the Lab

Summary: *Some reflections gathered along more than two years of experience giving the course «Historical experiments in quantum physics» –last semester of Physics degree– are developed: 1) The recreation of some debates in the history of science can be extremely useful in order to foster scientific reasoning among students, 2) Historiographical methods can be adapted to the teaching of current physics to avoid dogmatism in the classroom, 3) Some notes on how this ideas can be applied to a lesson on the concept of 'photon' are given.*

Key words: *quasi-history, history of quantum physics, Einstein, photoelectric effect, photon*

### Introducció

Ara ja fa més de dos cursos que, a la Facultat de Física, en Joan Manel Hernández i jo mateix impartim semestralment vuit sessions sota el títol «Experiments històrics de la física quàntica». Formen part del Laboratori de física moderna, assignatura obligatòria de l'últim semestre de la menció de Física fonamental. Malgrat estar incloses en una assignatura eminentment experimental, en aquestes sessions combinem classes al laboratori i a l'aula i, a més, introduïm elements d'història de la física. En aquesta comunicació exposaré algunes reflexions que són fruit d'aquesta experiència, centrant-me en les possibilitats que presenta la història de la ciència en la transmissió de continguts científics.

### Experiments històrics de la física quàntica

Cada sessió està dedicada a un experiment que té un paper destacat en les reconstruccions històriques del procés previ i immediatament posterior al sorgiment de

la mecànica quàntica. Es proposa als estudiants fer-los per parelles, i comentar-ne els resultats a la classe amb tot el grup. Són:

1. Mesura de la relació càrrega-massa dels raigs catòdics
2. Mesura de la càrrega de l'electró
3. Radiació de cos negre
4. Efecte fotoelèctric
5. Dispersió de partícules alfa
6. Espectres atòmics
7. Mesura de la dispersió d'electrons per mercuri gasós
8. Difracció d'electrons

La primera cosa en què parem atenció és en la diferència notable que hi ha entre els muntatges experimentals dels laboratoris docents i els originals. També mirem de contextualitzar històricament la mesura i el fenomen observat tot situant els debats en el marc on van adquirir, si és el cas, la rellevància que avui els atribuïm. Un dels propòsits del curs és discutir fins a quin punt es poden considerar experiments crucials per a dirimir qüestions teòriques fonamentals, sense renunciar al debat més general de si hi ha algun experiment que sigui crucial *per se* (Lakatos, 1974). Val a dir que la intenció prioritària del curs no és transmetre un coneixement acurat dels episodis històrics pertinents, sinó utilitzar-los per a qüestionar i aprofundir alhora en els conceptes teòrics involucrats, però sense caure en deformacions.

### **Història de la ciència a l'aula: una proposta**

Malgrat que aquest no és el lloc per fer un repàs exhaustiu dels avantatges i inconvenients d'introduir la història de la ciència en els currículums de ciències, no és sobrer comentar de passada els més destacats.<sup>1</sup> Des d'un punt de vista científic, el coneixement de la història acostuma a veure's com un estrany, ja que al cap i a la fi no aporta res a l'enteniment de la forma vigent de les teories. Això és bastant cert, i poc tinc a dir contra un ensenyament que prescindeixi completament –si és que es pot– dels processos històrics. Ara bé, malauradament, la història gairebé sempre fa acte de presència, però reduïda al paper d'anecdota que permet fer les classes més entretingudes i florides. Per què?

La història de la ciència, feta amb rigor i honestat, mostra una evolució del pensament científic que dista molt del desenvolupament acumulatiu i unidireccional, mite criticat repetidament, però repetidament enaltit amb la història com a coartada. Quan se subjugua la història a una certa idea preconcebuda i predominant de ciència, no l'hauríem d'anomenar història, sinó, amb Whitaker, *quasi-història*, ja que aleshores es converteix en una reconstrucció racional descontextualitzada que encareix les teories contemporànies (Whitaker, 1979). En contrast, la història pot ajudar a evidenciar suposicions i plantejaments que moltes vegades resten amagats darrere presentacions acrítiques que se sustenten en interpretacions titllades d'evidència empírica. Una història que tracta amb cura el rerefons on van emergir debats i teories del passat convida a pensar en la dinàmica del coneixement científic, en el mètode científic i, en definitiva, en què és la ciència. Entre d'altres virtuts, aques-

---

1. Per al cas de la física podeu veure, per exemple, Brush (1969) i Holton (1989).

ta possibilitat defuig la miopia de l'especialització, però no amb faules o xafarderies, sinó elevant el grau d'abstracció de les lliçons.

Però aquí m'interessa destacar especialment una de les possibilitats que brinda la història: reviure, replantejar antigues controvèrsies, qüestions que avui es consideren superades o solucionades, i incitar els alumnes a analitzar-les, però atenint-se, en la mesura que es pugui, a les circumstàncies en què es van produir. Certament és un exercici difícil, però en aquest cas el mèrit no està tant en l'assoliment, difícil de quantificar, sinó en el mateix intent. L'intent involucra un canvi d'actitud interessant, atès l'estat de la docència.

Crec que, en termes generals, hi ha una diferència, que frega la contraposició, entre l'ensenyament de ciències i allò en què consisteix, en principi, la pràctica científica. L'esperit científic, cosí germà de l'esperit crític, hauria de viure en la pregunta contínua, beure de l'escepticisme, advertir de la provisionalitat. Tota hipòtesi, tota dada, cal prendre-la amb circumspècció i només en la mesura que ha estat prèviament argumentada i garantida. Una mesura que mai no és sense condicions.

Tot el contrari d'allò que passa, normalment, a l'aula. El procés d'adquisició de coneixement acostuma a ser acrític i consistent en una assumpció gradual de les teories i els mètodes per a aplicar-les que no deixa de ser, a la fi, un procés memorístic. I el fet de fer exercicis o experiments no mitiga aquesta carència: al laboratori, els estudiants estan cridats a adoptar una actitud que podríem qualificar sense embuts d'anticientífica; van proveïts d'un guió que indica, pràcticament sense marge de maniobra, els passos a seguir. Si no obtenen els resultats pautats, cal que justifiquin on s'han equivocat o on han fallat els aparells.

Penso que la història pot servir d'antídot per a aquesta xacra. Com? Plantejant controvèrsies i debats dels quals els estudiants majoritàriament en coneixen el desenllaç, però –i això és simptomàtic– no el fil argumental. En la meua experiència aquest plantejament s'ha mostrat com una bona forma de fer-los prendre consciència de fins a quin punt el coneixement que han adquirit és pragmàtic. Es mou la Terra? Hi ha àtoms? Qüestions amb respostes tingudes per evidents, però d'argumentació no tan senzilla. En el primer cas podem acudir als debats entre copernicans i aristotèlics; en el segon, als primers passos de la teoria cinètica.

Així com en l'estudi de la història hi ha certa tendència a ressaltar els punts foscos, les mancances de les teories descartades i arrossegades pel torrent de la història i el desenvolupament tècnic, en les classes de ciències, per contra, es tendeix a presentar les teories vigents com a acabades, rodones i sense fissures. No s'acostumen a explicar les paradoxes o contradiccions que encara les sobreviuen, sovint arraconades i oblidades, però mai completament. Entre historiadors de la ciència és habitual intentar evitar el *whigisme*: cal posar esment en no mirar les teories avui no acceptades amb el filtre dels nostres coneixements actuals. Hem d'apropar-nos a les contribucions passades amb ulls nets, neutres. O almenys procurar-ho. Cal, doncs, fer ciència *de debò* quan mirem enrere: valorar els resultats, amb els experiments que els avalen o refuten, els fonaments conceptuals del moment, els interessos de l'època, etc. Els historiadors prenem aquesta precaució. Però, i els científics? Per què no hauríem d'aplicar aquest mètode –que podríem anomenar historiogràfic– a l'ensenyament de la ciència, de les teories actuals? No ens les hauríem de prendre com un destí tancat i barrat, sinó com el que són, un producte d'una època, amb els experiments que les acrediten i –també n'hi ha!– els que les qüestionen o que no hi encaixen. Per què no podem aplicar els miraments que tenim per examinar el passat a l'hora d'examinar el present? És així com penso que la història, o el mètode historiogràfic, pot venir a combatre el dogmatisme imperant en el món acadèmic.

### Un exemple: els fotons

Dedicaré el que queda de nota a donar uns apunts per a una possible estratègia de com emprendre un tema de física amb la història com a eina d'anàlisi en el sentit que acabo de proposar, basant-me en una de les sessions de l'assignatura que dona títol i sentit a aquesta ponència. No pretenc que aquest esquema d'exposició serveixi de patró per a qualsevol tema, ja que la casuística de cada episodi demana enfocaments i tractaments diferents.

La quarta sessió està dedicada a l'efecte fotoelèctric, i el protagonista de la història és el fotó. Comencem per l'experiment. Al laboratori es demana als estudiants verificar fins a quin punt se satisfà la llei d'Einstein de l'efecte fotoelèctric (Eisberg & Resnick, 1993: 47-55):

$$E = h\nu - w.$$

Quan s'il·lumina un metall (una cel·la fotoelèctrica) la teoria diu que es poden arrencar electrons si la freqüència de la llum incident està per sobre de cert llindar. En termes d'electrons,  $E$  seria l'energia cinètica dels corpuscles arrencats,  $\nu$  la freqüència de la llum incident, i  $w$  la funció treball del material, que és el preu energètic d'extreure'ls del sòlid. La novetat de la proposta d'Einstein de 1905 va ser que l'energia de la llum només es pogués transmetre als electrons en quàntums de magnitud  $h\nu$ , i no de manera contínua (Einstein, 1905). Segons això, és el fet que un electró només pugui absorbir un únic quàntum el que provoca que una llum de freqüència inferior al llindar, per més intensa que sigui, no provoqui l'efecte.

La quasi-història presenta el fotó d'Einstein com la solució revolucionària a un trencaclosques que posteriorment el físic americà Robert Millikan va verificar de manera espectacular el 1916. D'aquesta manera tot concorda amb l'ideal de mètode científic: un fenomen esperant explicació, un geni proposant una hipòtesi agosarada i un experimental meticulós que la confirma amb tots els ets i uts.

Com ens pot ajudar la història en aquest cas? No és difícil veure que, certament, el fenomen era conegut des de finals del segle XIX, i que ben aviat es va detectar la rellevància de la freqüència de la llum en detriment de la intensitat (Wheaton, 1983). Ara bé, el nombrós grup de radiacions novinyudes arran del desenvolupament de l'electricitat no va convertir l'efecte fotoelèctric en quelcom particularment problemàtic, ja que eren moltes les rareses que aleshores s'anaven acumulant als laboratoris. D'això en podem veure mostres també en l'article original d'Einstein: la motivació i els raonaments del cèlebre físic no estan centrats, ni molt menys, en aquest efecte, sinó que tenen una intenció molt més teòrica, més fonamental. I això malgrat que es conegui aquesta contribució com *l'article de l'efecte fotoelèctric*. A partir de raonaments estadístics i termodinàmics, Einstein proposa entendre els processos d'emissió i absorció de la llum de freqüència elevada com si aquesta no es transmetés de manera contínua, sinó per paquets de mida  $h\nu$ . No pretén acabar amb un cop genial amb la visió ondulatoria de la llum, i així ho indica en el mateix títol de l'article: «Sobre un punt de vista heurístic relatiu als processos d'emissió i adsorció de la llum». Es tracta, doncs, d'una investigació exploratòria (heurística), que no pretén liquidar la qüestió. A més, dibuixa amb molta cura els límits de la validesa de la seva hipòtesi: una analogia formal entre gasos i radiació que adquireix sentit només en processos d'emissió i adsorció, i això únicament en un cert rang de freqüències.

La confirmació de Millikan també amaga sorpreses (Millikan, 1916). El físic americà es preocupa de deslligar la verificació experimental de la llei d'Einstein de la hipòtesi estrafolària que la susten-

ta, i es mostra completament contrari a restaurar una imatge corpuscular de la llum. De fet, la rebuda de la hipòtesi dels quanta d'energia d'Einstein va ser entre freda i adversa (Navarro, 2009). I això fins i tot després de les contribucions de Millikan.

De manera que la construcció utòpica del mètode científic s'ensorra quan obrim la porta de l'aula a la història. Ni la hipòtesi d'Einstein era realista, sinó heurística, ni la confirmació experimental apuntava al fotó, sinó únicament a la llei. Aquest no és un cas aïllat en l'esdevenir històric del coneixement científic, fins al punt que l'excepció no és la violació del mètode sinó a l'inrevés. La història mostra que el mètode és una entelèquia poc propera al dia a dia dels científics, però amb molt d'èxit com a esquema narratiu.

Una qüestió interessant per plantejar a l'aula és si calia abraçar la hipòtesi heurística d'Einstein, o si era més sensat fer el que van fer la majoria dels seus col·legues: considerar-la una patinada. Es van equivocar? Els arguments d'Einstein, malgrat ser interessants i profètics en termes actuals, tenien prou pes com per a desestimar l'electromagnetisme maxwellià? Llegint l'article d'Einstein, veiem que ni ell mateix no ho pretenia. Però el que interessa aquí és que estem obligats a llegir l'article, valorar-ne els arguments i, en definitiva, pensar sobre aquest tema. No quedar-nos amb clixés o relats estereotipats.

No puc estendre'm en les múltiples ramificacions que pot prendre aquesta història apassionant: la diferència entre la hipòtesi d'Einstein i la de Planck, sovint confoses (Pérez, 2007), la identificació de la natura dual de la llum per part d'Einstein ja el 1909 (Navarro, 2009), o el significat de *fotó* per a qui li va donar nom, Gilbert N. Lewis, el 1926 (Lewis, 1926).

I, amb tot això, què és un *fotó*? N'és Einstein el pare? Va néixer el 1905? Potser deu ser per desinterès, o per una mala praxi docent, o per altres i diversos motius, però el cert és que la idea que els estudiants tenen del *fotó* es desvia força d'allò que es correspon amb la idea que es desprèn de la teoria que en ret compte, la teoria quàntica de camps. Poca cosa té a veure amb la idea original d'Einstein, i poca cosa amb la idea tradicional de partícula (Hobson, 2010). Ara bé, l'anàlisi dels requisits de la hipòtesi original de 1905 és una ajuda excepcional per a discutir tot això a la classe. Aquestes i altres qüestions que encara avui estan vives (Lamb, 1995) poden convertir una sessió sobre l'efecte fotoelèctric en un debat on es considerin els pros i els contres de les diferents interpretacions, quins fenòmens s'expliquen satisfactòriament i quins resten foscos, suavitzant així una forma d'escometre la docència que presenta els resultats de la física contemporània d'una manera més enlluernadora que brillant.

## Referències bibliogràfiques

- BRUSH, S. G. (1969), «The role of history in the teaching of physics», *The physics teacher*, 7, 271-280.
- EINSTEIN, A. (1905), «Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt», *Annalen der Physik*, 14, 132-148. Traducció al català a: SALLEN, E., ROCA, A., MOLINA, A. (2005), *El jove Einstein en català*, Barcelona, IEC.
- EISBERG, R., RESNICK, R. (1993), *Física cuántica. Átomos, molècules, sòlids, núcleos y partículas*, México, Limusa.
- HOBSON, A. (2010), «There are no particles, there are only fields», *American Journal of Physics*, 81, 211-223.
- HOLTON, G. J. (1989), *Introducción a los conceptos y teorías de las ciencias físicas*, Barcelona, Reverté. [Edició ampliada i revisada per S. G. Brush]
- LAKATOS, I. (1974), «The role of crucial experiments in science», *Studies in History and Philosophy of Science*, 4, 319-320.
- LAMB Jr., W. E. (1995), «Anti-photon», *Applied Physics B*, 60, 77-84.
- LEWIS, G. N. (1926), «The conservation of photons», *Nature*, 118, 274.
- MILLIKAN, R. (1916), «A direct photoelectric determination of Planck's "h"», *Physical Review*, 7, 355-388.
- NAVARRO, L. (2009), *Einstein, profeta y hereje*, Barcelona, Tusquets.
- PÉREZ, E. (2007), «Einstein i la calor específica dels sòlids: arguments per a una teoria quàntica», *Revista de Física*, 4, 34-48.
- WHEATON, B. R. (1983), *The tiger and the shark. Empirical roots of wave-particle dualism*, Cambridge, Cambridge University Press.
- WHITAKER, M. A. B. (1979), «History and quasi-history in physics education. I», *Physics Education*, 14, 108-112.