

Recursos de física

núm 13

PRIMAVERA 2014

Societat Catalana de Física

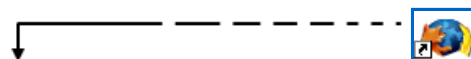
[Inici](#)[Com podeu col·laborar?](#)[Subscripció](#)[Sumari](#)

L'EFECTE FOTOELÈCTRIC I LA DETERMINACIÓ DE LA CONSTANT DE PLANCK

Adolf Cortel

L'article descriu, detalla i analitza experiments que estudien l'efecte fotoelèctric, quantitativament i qualitativament, utilitzant diferents fonts de radiació (LED, làsers, llum blanca amb filtres, làmpades d'UV) que incideixen en cèl·lules fotoelèctriques, en pilots de neó o en una làmina de zinc sobre un electroscopi.

Guia per al professorat



Introducció

Sovint, l'efecte fotoelèctric és la porta d'entrada al que normalment s'anomena *física moderna* en els cursos de batxillerat. La seva importància és que demostra que no tan sols estan quantitzades la matèria (àtoms) i la càrrega elèctrica (càrrega de l'electró), sinó que també ho està l'energia de la radiació (fotons). Quan la radiació interacciona amb la matèria ho fa com si estigués formada per unitats, cadascuna amb una energia proporcional a la seva freqüència. Cada unitat interacciona individualment amb els àtoms i no se'n sumen els efectes (l'energia): si un fotó no té prou energia per produir un fenomen (com ara el trencament d'un enllaç químic), no ho aconseguiran molts fotons que incideixin l'un rere l'altre.

Les demostracions i experiments sobre l'efecte fotoelèctric permeten estudiar com:

a) Hi ha una freqüència llimdar a partir de la qual la radiació és capaç d'expulsar electrons d'un metall. Si la freqüència és superior al llimdar s'arrenquen electrons i s'origina un corrent elèctric amb una intensitat proporcional a la intensitat de la radiació. Per sota de la freqüència llimdar, el corrent elèctric és nul, independentment de la intensitat de la radiació.

b) Els electrons que s'arrenquen tenen una energia cinètica que es pot mesurar frenant-los amb un camp elèctric que anul·li el corrent. Es pot fer fàcilment amb un generador de tensió variable V que s'augmenta poc a poc fins que, en un valor V_a (potencial d'aturada), s'anul·la el corrent. Llavors es verifica que:

$$E_{c \max} = e V_a \quad (1)$$

D'acord amb el principi de conservació de l'energia, l'energia cinètica d'un electró que s'hagi arrencat ha de ser igual a l'energia del fotó menys l'energia necessària per arrencar l'electró de la superfície del metall. Si es tractés d'un gas, aquesta energia seria el potencial d'ionització; en un metall s'anomena *potencial d'extracció o funció de treball*, W .

$$E_c = E_{\text{foto}} - W \quad (2)$$

L'expressió (2) mostra que la representació gràfica de l'energia cinètica dels electrons en funció de l'energia dels fotons ha de ser una recta. Si s'irradia un metall amb diferents freqüències conegudes i es mesura en cada cas l'energia cinètica dels electrons extrets es verifica experimentalment que la representació gràfica $E_c(f)$ és una recta de pendent a per a valors de f superiors a un llimdar f_0 :

$$E_c = a f + b \quad ; \quad f > f_0 \quad (3)$$

c) D'acord amb les expressions anteriors, l'energia dels fotó és proporcional a la freqüència i es pot

determinar la constant de proporcionalitat (constant de Planck), h , que és simplement el pendent de la recta en la representació $E_c(f)$, així com el potencial d'extracció, que correspon a l'energia $h f_0$, on f_0 és la freqüència llindar.

Si el que es representa és el potencial d'aturada en funció de la freqüència, el pendent de la recta és $\frac{h}{e}$.

$$V_a = \frac{h}{e} f + c \quad (4)$$

Experiments amb cèl·lules fotoelèctriques

a) Muntatges comercials

Els muntatges comercials per realitzar experiències sobre l'efecte fotoelèctric i la determinació de la constant de Planck tenen algunes variacions, especialment pel que fa a la font de llum [1-5]. Sovint utilitzen com a font de radiació una làmpada de mercuri que emet línies en les regions UV i visible. Cada freqüència se selecciona amb una xarxa de difracció o amb filtres. En els equips Phywe s'empra una bombeta d'incandescència i un joc de filtres d'interferència cadascun dels quals només deixa passar una banda molt estreta de freqüències. En tots els muntatges hi ha un circuit per regular i mesurar la diferència de potencial necessària per aturar els electrons emesos. Com que, en general, la intensitat de la llum transmesa pel filtre és relativament baixa, el corrent elèctric és petit i s'ha de fer servir alguna mena d'electròmetre per determinar quan és nul.

Pel que fa a les cèl·lules fotoelèctriques, la superfície sensible està recoberta d'un metall alcalí (o d'una barreja d'aquests metalls). Com que, en general, els elements químics que tenen un potencial d'ionització baix (metalls alcalins i alcalinoterris) també són els que tenen un treball d'extracció baix, permeten l'expulsió de fotoelectrons en tot el marge de freqüències de la llum visible. Com es discutirà més endavant, en els muntatges de tipus "casolà" es poden fer servir zinc i magnesi, que, al contrari dels metalls alcalins, no s'han de protegir del contacte amb l'aire, encara que s'oxiden lentament i s'ha de netejar la superfície abans de fer l'experiment.

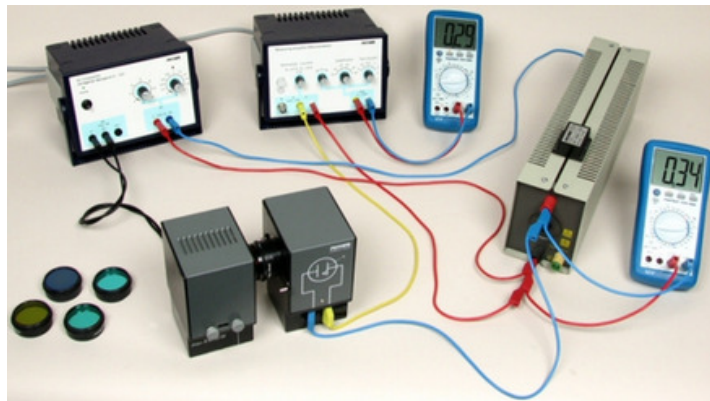


Fig. 1: Equip comercial per estudiar l'efecte fotoelèctric. L'equip Phywe.

b) Amb LEDs

S'han descrit diferents simplificacions del muntatge anterior, la més interessant de les quals consisteix a fer servir LED com a fonts de radiació [6]. Com que la intensitat de la llum és relativament gran es pot fer servir un voltímetre digital (i no un electròmetre) per detectar el punt de corrent nul, mesurant la tensió en una resistència per on circula el corrent. El problema d'aquest mètode és que hi ha molts fabricants de LED i n'hi ha pocs que tinguin una banda d'emissió prou estreta per poder-los emprar en l'experiment. De fet, s'haurien de buscar els que recomanen els autors de l'article, ja que tots els que es poden trobar en les botigues d'electrònica que tenim a l'abast tenen una banda d'emissió ampla, tal com es pot comprovar amb un espectroscopi. Si es fan servir LED, la incertesa en la freqüència utilitzada és tan gran que només permet fer una estimació de l'ordre de magnitud de la constant de Planck. En qualsevol cas, l'experiment pot resultar útil per comprovar que l'energia dels fotons emesos és aproximadament proporcional a la freqüència de la radiació. És fàcil comprovar com les freqüències baixes, com ara les dels LED, que emeten en l'infraroig (que es fan servir en els comandaments a distància), no són capaces d'arrencar fotons. Una petita modificació, fent servir un generador de senyal per alimentar els LED i un oscil·loscopi per mesurar el temps de resposta de la cèl·lula fotoelèctrica als polsos de llum, permet verificar que els electrons s'alliberen molt ràpidament i que els fotons no

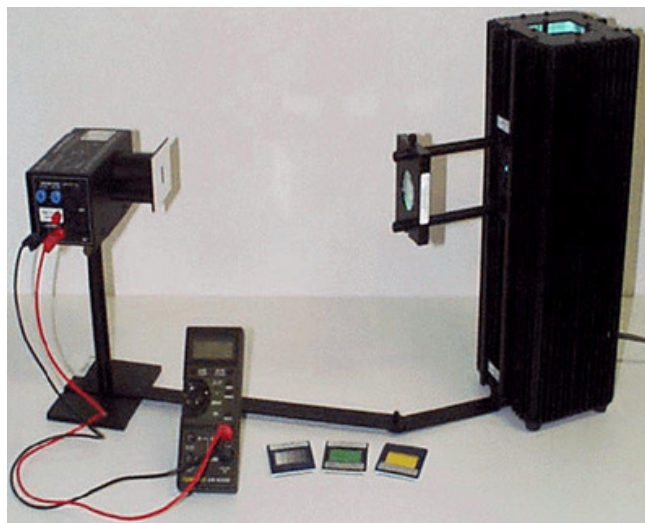


Fig. 2: Equip comercial per estudiar l'efecte fotoelèctric. L'equip Pasco.

sumen la seva energia per arrencar electrons.

c) Amb punters làser

Amb la dràstica reducció de preus dels punters làser verds i violeta en els darrers 5 anys, hi ha la possibilitat d'utilitzar-los com a fonts de llum monocromàtica. Com a mínim hi ha tres punters relativament assequibles. Els vermells donen una longitud d'ona d'uns 660 nm (amb una incertesa de 10 nm), els verds tenen una longitud d'ona de 532 nm (amb 1-2 nm d'incertesa) i els violetes, que es fan servir en els Blu-ray tenen una longitud d'ona de 405 nm (amb una incertesa d'uns 5 nm). També es poden aconseguir punters de llum blava (435 nm) i d'infraroig (780 nm i altres longituds d'ona). Aquests punters permeten realitzar l'experiment i aconseguir una aproximació molt bona dels punts experimentals $E_c(f)$ (taula 1) a una recta que permet determinar la constant de Planck amb un error relativament baix, tal com es mostra a la figura 3.

làser	λ (nm)	f (Hz)	Potencial aturada (V)	E_c màx. Elect. (J)
IR	780	$3,85 \cdot 10^{14}$	No es va detectar	
vermell	660	$4,55 \cdot 10^{14}$	0,215	$3,44 \cdot 10^{-20}$
verd	532	$5,64 \cdot 10^{14}$	0,697	$1,12 \cdot 10^{-19}$
blau	435	$6,90 \cdot 10^{14}$	1,178	$1,88 \cdot 10^{-19}$
violeta	405	$7,41 \cdot 10^{14}$	1,33	$2,13 \cdot 10^{-19}$

Taula 1: Potencial d'aturada en funció de la freqüència en un experiment d'efecte fotoelèctric emprant punters làser i un fototub 1P39

Tots els mètodes que s'acaben de descriure necessiten una cèl·lula fotoelèctrica comercial com a detector. Les que es poden aconseguir a un cost raonable són de fabricació antiga i cal fer-ho en llocs d'electrònica *vintage*. S'ha recomanat el tub 1P39, que es troba a uns preus entre 40-50 € a eBay; també es poden fer servir tubs equivalents, a preus similars. Estigueu alerta: si trobeu tubs descrits com a cèl·lules fotoelèctriques us heu d'assegurar que siguin "al buit"; moltes de les cèl·lules fotoelèctriques que trobareu procedeixen de projectors de cinema antics i no us serviran, ja que contenen un gas a baixa pressió que frena els electrons emesos.

Quan disposeu del tub és relativament fàcil trobar un sòcol per muntar-lo en una caixa. Un altre detall que cal remarcar és la conveniència de posar una màscara (una tira estreta de cartolina negra) enganxada al vidre del tub per bloquejar la llum que arribaria a l'ànode (el fil central del tub). Possiblement això es deu al fet que una petita quantitat del metall alcalí que hi ha en el càtode sensible s'ha evaporat i s'ha dipositat en l'ànode, que també serà fotosensible. Finalment, el resultat en la mesura de la constant de Planck també millora si la cèl·lula s'il·lumina uniformement; per aconseguir-ho n'hi ha prou a posar una peça de vidre esmerilat (o un tros de paper vegetal) que intercepti la llum a prop de la cèl·lula fotoelèctrica.

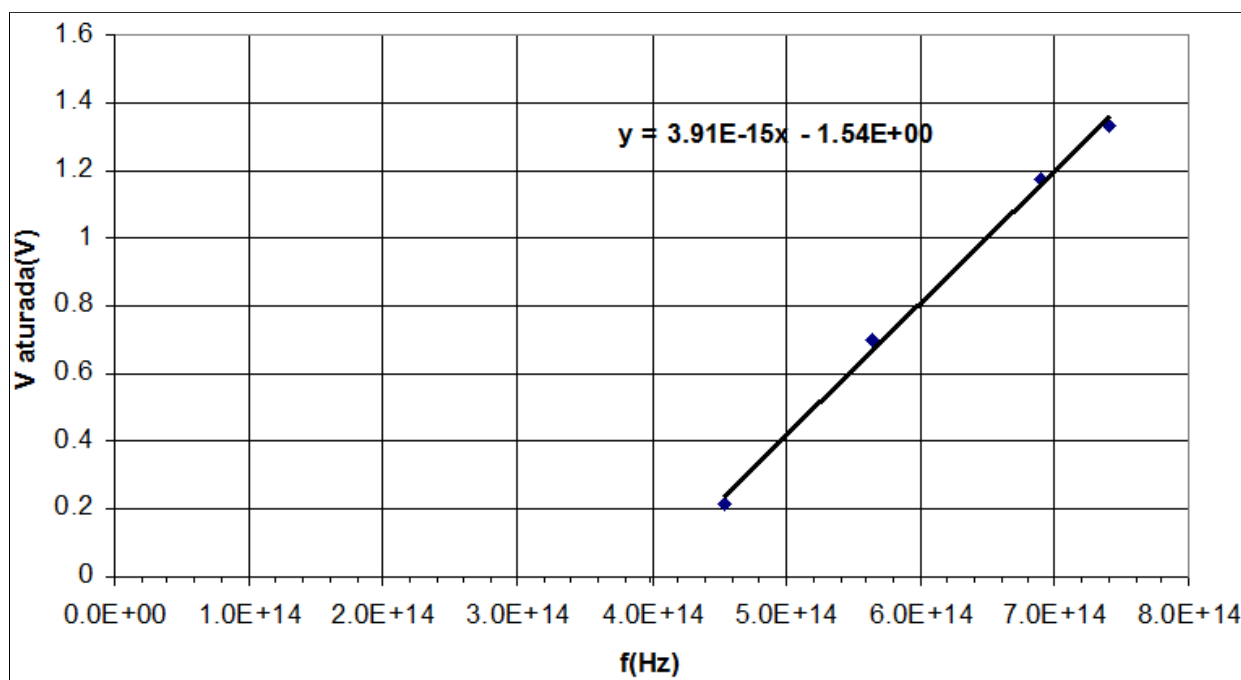


Fig. 3: Efecte fotoelèctric amb punters làser i fototub 1P39. El pendent de la recta és h/e . Si suposem que es coneix la càrrega de l'electró ($1,60 \cdot 10^{-19} \text{ C}$), el valor de la constant de Planck és $6,26 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ (un 5% inferior que el valor real). El punt de tall amb l'eix d'abscisses és la freqüència llindar, que es pot trobar gràficament o a partir de l'equació de la recta. En aquest experiment és $3,94 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$. La longitud d'ona corresponent és 761 nm (es justifica que el làser de 780 nm no pugui arrencar electrons). La funció de treball que es dedueix de l'experiment és $2,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ ($1,6 \text{ eV}$).

El circuit per mesurar la tensió necessària per aturar els electrons és molt senzill [6], tal com es veu a la figura 4.

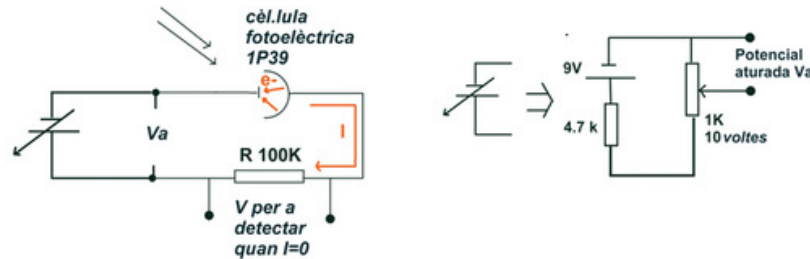


Fig. 4: Circuit per ajustar el potencial d'aturada i mesura del corrent nul.

Es fan servir dos voltímetres, un dels quals mesura la tensió a la resistència de $100 \text{ k}\Omega$ de manera que, d'acord amb la llei d'Ohm, el quocient $\frac{V}{R}$ és la intensitat que hi circula. Si es fa servir l'escala de 200 mV del voltímetre, la sensibilitat en la mesura del corrent és de 10 nA . Pel que fa a l'ajust del potencial d'aturada, s'empra un circuit divisor de tensió amb una pila de 9V , una resistència fixa de $4,7 \text{ k}\Omega$ i un potenciòmetre de $1 \text{ k}\Omega$ (que ha de ser necessàriament de tipus multivolta). La tensió es mesura amb un segon voltímetre i s'ajusta fins que l'altre voltímetre detecti un corrent nul. La mesura s'ha de repetir per cada punter que s'utilitzi. Cal fer-ho amb cura, per definir clarament el seu valor i no sobrepassar la tensió mínima necessària per aturar els electrons. L'experiment i el muntatge es descriuen en un vídeo [7] que s'ha penjat a la xarxa.

L'efecte fotoelèctric sense cèl·lules fotoelèctriques

Si no es disposa de cap cèl·lula fotoelèctrica hi ha diferents alternatives per a observar el fenomen, però no es podran fer mesures.

a) Amb un pilot de neó

Es pot fer servir un pilot de neó (dels que hi ha en els alguns interruptors o tornavisos) com a element fotosensible [8]. Aquests pilots són molt econòmics i es poden trobar a les botigues de components electrònics. A dins hi ha dos petits elèctrodes cilíndrics separats aproximadament 1 mm . El metall dels elèctrodes és capaç d'emetre electrons quan s'il·lumina amb llum visible o UV, fent que el gas de l'interior es torni una mica conductor; possiblement el fabricant prepara els elèctrodes amb un recobriment metàl·lic que facilita la descàrrega en el gas.

En el muntatge es necessita una font d'alimentació capaç de subministrar uns 70 V , regulable d'una forma fina. Afortunadament, no cal que la tensió sigui contínua; l'experiment també funciona amb una tensió alterna i així resulta més fàcil generar aquesta tensió, que és relativament elevada. Es pot fer servir un Variac (un autotransformador ajustable) o un generador de senyal connectat a un petit transformador $6:220 \text{ V}$. Si es fa servir el generador cal connectar la sortida sinusoidal al terminal de baixa tensió del transformador. Regulant la tensió de sortida del generador (i si és necessari, la freqüència) es pot aconseguir una tensió prou alta a l'altra sortida del transformador que es pot ajustar acuradament.

Es connecten en sèrie el pilot de neó, una resistència de $4,7 \text{ k}\Omega$ i un LED d'alta lluminositat, que només té la funció d'indicar el pas del corrent. Convé que el LED estigui una mica allunyat del pilot de neó, com es mostra a les figures 5 i 6. S'augmenta poc a poc la tensió i quan és prou elevada (al voltant d'uns 65 V) s'observa que hi ha una descàrrega dins del neó, hi circula corrent i s'encén el LED (el color vermell de la descàrrega en el neó es veu poc; en canvi, amb al mateix corrent, el LED fa molta més llum). A continuació, s'ha de regular la tensió amb cura per aconseguir que quan el neó estigui ben il·luminat (es pot fer servir un lot) hi circuli corrent, però a les fosques no.

Amb aquest muntatge també es pot demostrar que la llum blava pot produir efecte fotoelèctric, mentre que la llum vermella, de freqüència més baixa, no. Es pot fer amb un lot i filtres de colors blau i vermell, però s'ha de tenir cura a assegurar que el filtre vermell no deixa passar gens de llum blava ni verda (es pot verificar amb un espectroscopi). L'ajust de la tensió ha de ser molt fi, d'algunes dècimes de volt, ja que la diferència d'energia dels fotons corresponents a llum vermella i blava és petita. La figura 5 mostra els materials i la figura 6 els resultats.

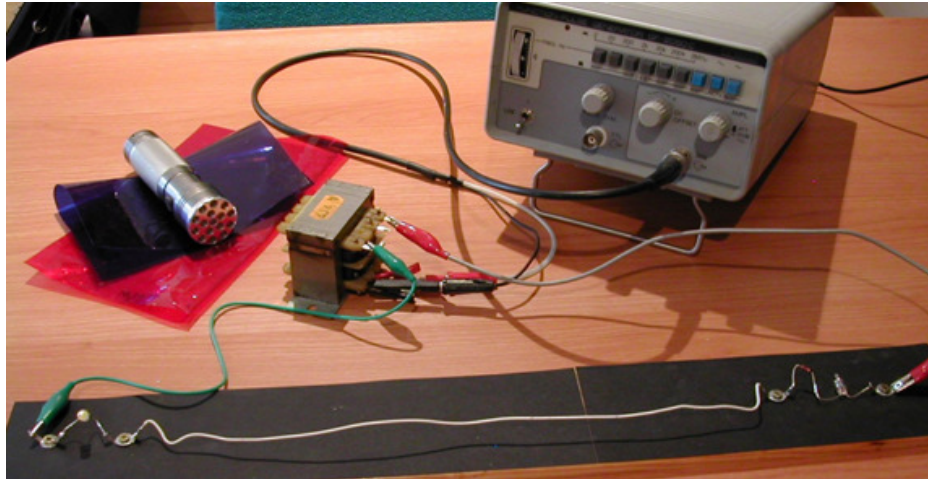


Fig. 5: Muntatge per a observar l'efecte fotoelèctric on el fotodetector és un pilot de neó.

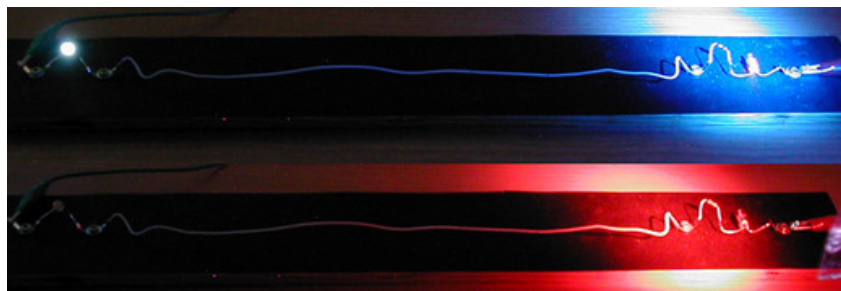


Fig. 6: La llum blava que il·lumina el pilot de neó produeix efecte fotoelèctric i la llum vermella no.

b) Amb un electroscopi

El mètode més senzill per observar l'efecte fotoelèctric o, si més no, el que requereix menys materials, consisteix a fer servir un electroscopi, a sobre del qual s'ha posat una làmina de zinc. L'electroscopi es carrega negativament i quan s'il·lumina amb llum visible manté la càrrega; en canvi, quan s'il·lumina amb radiació UV es descarrega ràpidament [9]. Si es carrega positivament, no es descarrega en cap cas. L'electroscopi pot ser relativament senzill i de fabricació casolana, amb la condició que tingui una capacitat elèctrica petita i, per tant, emmagatzemi una petita quantitat de càrrega.

La làmina ha d'estar molt neta i s'ha de passar paper d'esmeril ben fi per la superfície abans de cada sessió on es faci l'experiment. Si no es fa així, la capa fina i invisible d'òxid de zinc suprimeix l'efecte fotoelèctric (si es fa servir magnesi, que també va bé, l'oxidació encara és més ràpida).

Per carregar la làmina negativament, el més còmode és fer servir un encenedor piezoelèctric de cuina, al qual se li ha d'haver tret la caputxa; en molts models, quan es prem el gallet de l'encenedor dona càrrega d'un signe i quan s'allibera en dona de signe contrari.

Finalment, cal tenir en compte que la radiació UV ha de tenir prou energia per poder arrencar els electrons del zinc. Les làmpades UV de "llum negra" no serveixen, ja que la radiació, amb una longitud d'ona de 365 nm, no té prou energia. S'han de fer servir làmpades germicides de mercuri, amb el tub de sílice fosca, que emeten radiació a 254 nm (a més de les altres línies espectrals del mercuri). Aquesta radiació és perillosa per a la vista i la pell, per tant, s'han de prendre les precaucions necessàries, posant la làmpada en algun suport que bloquegi la radiació en totes les direccions excepte cap a l'electroscopi. A causa d'aquests efectes, és convenient fer servir una làmpada de baixa potència (6-9W); emprar un tub germicida o una làmpada de vapor de mercuri de més potència suposa un perill afegit innecessari.

Activitats per a l'alumnat

a) Normalment les fonts de llum i radiació UV es caracteritzen per la seva longitud d'ona. Els alumnes han de calcular les freqüències corresponents

b) En el sistema internacional l'energia es mesura en joules, però pel que fa a radiació i les partícules és molt freqüent emprar els eV (electró-volt, $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Els alumnes haurien de calcular l'energia dels fotons corresponents a les diferents fonts en joules i eV.

c) A partir de la taula de resultats f i V_a d'un experiment, com ara els de la taula 1, han de fer la representació gràfica $E_c(f)$ i determinar: la constant de Planck, la freqüència lliardar, la longitud d'ona lliardar i la funció de treball.

d) Considerant que una làmpada germicida de 254 nm és capaç de produir efecte fotoelèctric en el zinc mentre que una làmpada de llum negra de 365 nm no, han de fer una estimació de la funció de treball del zinc.

Referències

- [1] <http://demoweb.physics.ucla.edu/node/118>
 [2] <https://wiki.brown.edu/confluence/display/PhysicsLabs/Experiment+390>
 [3] <http://www.dartmouth.edu/~physics/labs/descriptions/photoelectric.effect.html>
 [4] <http://ocw.mit.edu/courses/physics/8-13-14-experimental-physics-i-ii-junior-lab-fall-2007-spring-2008/labs/jlexp005.pdf>
 [5] http://www.phywe.com/index.php/fuseaction/download/lrn_file/versuchsanleitungen/P2510402/e/P2510402.pdf
 [6] Garver W.P. The photoelectric effect using LEDs as light sources. *The Physics Teacher*, **44**, pp.272-275 (2006). DOI: <http://dx.doi.org/10.1119/1.2195395>
 [7] <http://www.youtube.com/watch?v=Eyp38Uh38sE>
 [8] Cortel, A. . Simple photoelectric effect. *The Physics Teacher*, **44**(5)(2006), 310-311. DOI: <http://dx.doi.org/10.1119/1.2195405>
 [9] <http://www.youtube.com/watch?v=Co0tyAKvLts>



Sumari

3/8

[Inici](#)

[Com podeu col·laborar?](#)

[Subscripció](#)

ISSN: 1988-7930 **DL:** B-31773-2012 **Adreça a la xarxa:** www.RRFisica.cat **Adreça electrònica:**

redaccio@rrfisica.cat difusio@rrfisica.cat

Comitè de redacció : Josep Ametlla, Octavi Casellas, Xavier Jaén, Gemma Montanyà, Octavi Plana, Jaume Pont.

Treballem conjuntament : Societat Catalana de Física, Associació de Professores i Professors de Física i Química de Catalunya, XTEC, Universitat Politècnica de Catalunya, Universitat de Barcelona



Aquesta obra està subjecta a una [Llicència de Creative Commons](#)



Programació web: Xavier Jaén i Daniel Zaragoza.

Correcció lingüística: Serveis Lingüístics de la Universitat Politècnica de Catalunya.

Recursos de Física col·labora amb [la baldufa](#) i també amb [ciències](#) Revista del Professorat de Ciències de Primària i Secundària (Edita: CRECIM-UAB)